

「異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト／
高機能センサネットシステムと低環境負荷型プロセスの開発」
事後評価報告書

平成24年3月

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会

平成24年3月

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
理事長 古川 一夫 殿

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会 委員長 西村 吉雄

NEDO技術委員・技術委員会等規程第33条の規定に基づき、別添のとおり
評価結果について報告します。

目 次

はじめに	1
分科会委員名簿	2
審議経過	3
評価概要	4
研究評価委員会におけるコメント	7
研究評価委員会委員名簿	8
第1章 評価	
1. プロジェクト全体に関する評価結果	1-1
1. 1 総論	
1. 2 各論	
2. 評点結果	1-17
第2章 評価対象プロジェクト	
1. 事業原簿	2-1
2. 分科会における説明資料	2-2
参考資料1 評価の実施方法	参考資料 1-1
参考資料2 評価に係る被評価者意見	参考資料 2-1

はじめに

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構においては、被評価プロジェクトごとに当該技術の外部専門家、有識者等によって構成される研究評価分科会を研究評価委員会によって設置し、同分科会にて被評価対象プロジェクトの研究評価を行い、評価報告書案を策定の上、研究評価委員会において確定している。

本書は、「異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト／高機能センサネットシステムと低環境負荷型プロセスの開発」の事後評価報告書であり、第28回研究評価委員会において設置された「異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト／高機能センサネットシステムと低環境負荷型プロセスの開発」（事後評価）研究評価分科会において評価報告書案を策定し、第31回研究評価委員会（平成24年3月28日）に諮り、確定されたものである。

平成24年3月
独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会

「異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト／
高機能センサネットシステムと低環境負荷型プロセスの開発」

事後評価分科会委員名簿

(平成23年11月現在)

	氏名	所属、役職
分科会長	おおわだ くにき 大和田 邦樹	帝京大学 理工学部 情報科学科 教授
分科会長 代理	はっとり ただし 服部 正	兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 特任教授
委員	いしだ まこと 石田 誠	豊橋技術科学大学 工学部 電気・電子情報工学系 教授 副学長 (研究担当)
	さわだ れんし 澤田 廉士	九州大学大学院 工学研究院 機械工学部門 教授
	しょうじ しゅういち 庄子 習一	早稲田大学 理工学術院 基幹理工学部 電子光システム学科 教授
	むろ ひでお 室 英夫	千葉工業大学 工学部 電気電子情報工学科 教授

敬称略、五十音順

審議経過

● 第1回 分科会（平成23年11月28日）

公開セッション

1. 開会、分科会の設置、資料の確認
2. 分科会の公開について
3. 評価の実施方法と評価報告書の構成について
4. プロジェクトの概要説明
5. プロジェクトの詳細説明

非公開セッション

6. 現地調査
7. 全体を通しての質疑

公開セッション

8. まとめ・講評
9. 今後の予定
10. 閉会

● 現地調査（平成23年11月28日）

産業技術総合研究所 つくば東地区（茨城県つくば市）

● 第31回研究評価委員会（平成24年3月28日）

評価概要

1. 総論

1) 総合評価

BEANS（異分野融合型次世代デバイス）プロジェクトの進展を加速するという意味で非常に有効な短期プロジェクトであり、近い将来その相乗的な効果による成果が期待できる。特に BEANS で先行的に行っていたテーマをいくつか取り上げて短期間で成果を示した点は評価できる。

また、MNOIC（マイクロナノオープンイノベーションセンター）運営による8インチラインの有効活用により、ファブレスメーカーの製品開発支援、少量生産の製造設備として今後、日本のMEMS開発の拠点になることを期待する。

しかし、デバイス開発からセンサネットワークのシステム開発まで幅広い成果が得られた反面、センサネットワークの検証に選ばれている2つのテーマは効果の判断が難しく、個々のテーマについて選定に工夫が必要であった。また、8インチMEMSプロセスライン設置に重点を置き、クリーンルームの面積を増やすなどに予算をつけた方が良かった。

2) 今後に対する提言

本プロジェクトで実施したクリーンルーム空調制御システム、植物工場センサネットワークシステム、低消費電力LSI、新センサデバイス原理、低環境負荷型プロセス技術など、研究開発の着実な継続実施と実用化、事業化が進むようにNEDOとして今後の活動を強力にフォローアップして欲しい。

また、8インチMEMSプロセスラインの有効利用について、MNOIC運営による産学連携共同研究用インフラ設備として活用し、研究用設備貸与や少量試作サービス事業を展開する実用化スケジュールが計画されており、今後、日本の誇れるマイクロナノ・オープンイノベーションセンターとして、さらなる拡充が望まれる。

本プロジェクトは短期間で終了しているが、今後、明らかになった問題点を抽出しそれを解決することが重要である。また、本プロジェクトはセンサネットワークによる省エネのシステムや低環境負荷のプロセス開発などグリーン・テクノロジーの基礎となる技術が多く、これらを日本中に水平展開できるように応用技術開発も継続的に進めて欲しい。

2. 各論

1) 事業の位置付け・必要性について

センサ・MEMS 分野の世界市場の動向を見ると、日本は世界トップクラスのシェアを占めているが、欧米各国と激しい競争を行っており、高機能センサネットワークシステム開発および MEMS デバイスの製作技術の低環境負荷化はいずれも日本の国際競争力維持のために重要なポイントである。本プロジェクトを実施することにより、その成果をいち早く創出することで国際競争力の向上を図ることができることから産官学一体とした推進は不可欠で、NEDO のプロジェクトとして妥当である。

一方、1年間という限られた期間内に 8 インチ MEMS プロセスラインを構築した点は評価できるが、テーマの中にはその有効性についてまだ検証が十分ではないものもあり、今後の課題として BEANS プロジェクト等で引き続き検討することが望まれる。

2) 研究開発マネジメントについて

補正予算による 1 年間のプロジェクトであることを踏まえ、効率的できめ細かいマネジメントが実施され、BEANS プロジェクトとの連携も良く機能していた。

さらに、研究開発実施者はそれぞれの要素技術を実施する上で十分な技術力と事業化能力を有する企業であり、これらの企業は成果の受け取り手でもあることから、ユーザとしての意見は十分に反映される体制であった。また、成果の実用化につなげる戦略として、各参加企業での実用化、つくばイノベーションアリーナへの展開、最先端設備の効率的活用が明確になっていた。

一方、国として広範な研究者が利用できる 8 インチ MEMS ラインを構築した点は評価できるが、導入された設備はイオン注入装置が無いなど十分なものではなく、今後欧米と対抗していく上では迅速な設備増強が望まれる。

3) 研究開発成果について

1年間という限られた期間内に 8 インチ MEMS プロセスラインの構築、センサデバイス開発、センサネットワークのシステム開発を行い、ほぼすべての項目において当初設定した目標を達成したことは評価できる。

また、高機能センサモジュール小型化の達成レベルは高く、ポリマーMEMS プロセス、深堀エッチングガス、低温接合、3次元設計・検査情報共有化フレームワーク等、本プロジェクトで開発された技術は低環境負荷型プロセスの実現にキーとなるプロセス技術であり、MEMS 生産システムの低環境負荷化への多大な貢献が期待できる。

今後、開発成果についてさらにデータを蓄積して、よりわかりやすい形にすることで普及を加速すべきである。

4) 実用化の見通しについて

8 インチ MEMS プロセスラインについては、MNOIC 運営による産学連携共同研究用設備として活用し、研究用設備貸与や少量試作サービス事業を展開する実用化スケジュールが明確になっている。また、センサデバイスやセンサネットワークの開発については最終的には、各メーカーが製品化するということが基礎技術確立により実用化への道筋ができたと考える。特にクリーンルーム管理は時機を得たものであり、今後、店舗・工場への展開を期待したい。

但し、8 インチ MEMS プロセスラインについては欧米に対抗するレベルに達するにはまだ多くの課題がある。また、センサデバイスやセンサネットワークについても実用化の鍵である低価格化と信頼性確保の課題が残されており、引き続き課題をブレイクダウンしてプロジェクトを継続していくことが望まれる。

研究評価委員会におけるコメント

第31回研究評価委員会（平成24年3月28日開催）に諮り、本評価報告書は確定された。研究評価委員会からのコメントは特になし。

研究評価委員会

委員名簿（敬称略、五十音順）

職 位	氏 名	所属、役職
委員長	西村 吉雄	学校法人早稲田大学大学院 政治学研究科 (科学技術ジャーナリスト養成プログラム) 客員教授
委員長 代理	吉原 一紘	オミクロンナノテクノロジージャパン株式会社 最高顧問
委員	安宅 龍明	一般社団法人ナノテクノロジービジネス推進協議会 企画運営推進会議 副議長
	五十嵐 哲	学校法人工学院大学 工学部 応用化学科 教授
	伊東 弘一	学校法人早稲田大学 理工学術院 総合研究所 客員教授（専任）
	稲葉 陽二	学校法人日本大学 法学部 教授
	尾形 仁士	三菱電機エンジニアリング株式会社 相談役
	小林 直人	学校法人早稲田大学 研究戦略センター 教授
	佐久間一郎	国立大学法人東京大学 大学院工学系研究科 精密機械工学専攻 教授
	佐藤 了平	国立大学法人大阪大学 大学院工学研究科 マテリアル 生産科学専攻（システムデザイン領域担当） 教授
	菅野 純夫	国立大学法人東京大学 大学院新領域創成科学研究科 メディカルゲノム専攻 教授
	架谷 昌信	学校法人愛知工業大学 特任教授
	宮島 篤	国立大学法人東京大学 分子細胞生物学研究所 教授

第1章 評価

この章では、分科会の総意である評価結果を枠内に掲載している。なお、枠の下の「○」「●」「・」が付された箇条書きは、評価委員のコメントを原文のまま、参考として掲載したものである。

1. プロジェクト全体に関する評価結果

1. 1 総論

1) 総合評価

BEANS（異分野融合型次世代デバイス）プロジェクトの進展を加速するという意味で非常に有効な短期プロジェクトであり、近い将来その相乗的な効果による成果が期待できる。特に BEANS で先行的に行っていたテーマをいくつか取り上げて短期間で成果を示した点は評価できる。

また、MNOIC（マイクロナノオープンイノベーションセンター）運営による8インチラインの有効活用により、ファブレスメーカーの製品開発支援、少量生産の製造設備として今後、日本のMEMS開発の拠点になることを期待する。

しかし、デバイス開発からセンサネットワークのシステム開発まで幅広い成果が得られた反面、センサネットワークの検証に選ばれている2つのテーマは効果の判断が難しく、個々のテーマについて選定に工夫が必要であった。また、8インチMEMSプロセスライン設置に重点を置き、クリーンルームの面積を増やすなどに予算をつけた方が良かった。

〈肯定的意見〉

- 短期間の間、震災などありながら、8インチMEMSラインの中心的設備を整え、稼働させる状況に持ってこられていることは大変評価できる。これが企業等の試作に貢献でき、日本のMEMS開発の拠点になれることを期待する。
- 国の援助がないと成立しないプロジェクトであり、諸外国を見るにむしろ遅すぎたといえる。
- BEANS プロジェクトの進展を加速するという意味で非常に有効な短期プロジェクトであり、近い将来その相乗的な効果による成果が期待できる。特に BEANS で先行的に行っていたテーマをいくつか取り上げて短期間で成果を示した点が特徴的である。その中で企業がそれぞれの得意技術を活用して実用化に結びつく研究を加速したことも評価できる。震災など予測できない環境の変化があった点も考慮すると、プロジェクト全体として想定されたものに対して十分な成果が上がったと判断できる。
- 地球温暖化対策のための温室効果ガス削減や原子力発電からのエネルギー政策の見直しが緊急に求められている現時点において、センサネットワークによる環境制御や環境にやさしいプロセス開発は日本の発展に不可欠な事業と考える。
- 高機能センサネットワークシステムでは、本プロジェクトで開発された技術により、製造プロセスの省資源化、高効率化の実現が期待でき、今後実

用化を推進することにより、センサネットワーク市場の拡大につながることを期待できる。また、検証用クリーンルームの CO₂ 削減見込みや高機能センサモジュールの小型化は世界最高レベルである。低環境負荷型製造プロセスでは、ポリマーMEMS プロセス、深堀エッチングガス、低温接合、3次元設計・検査情報共有化フレームワーク等、本プロジェクトで開発された技術は低環境負荷型プロセスの実現にキーとなるプロセス技術であり、MEMS 生産システムの低環境負荷化への多大な貢献が期待でき、成果の意義は深い。

- また、担当参加企業が継続して研究開発し数年後の実用化を目指しており、成果の実用化イメージ・出口イメージは明確である。8 インチラインの有効利用については、MNOIC 運営による産学連携共同研究用インフラ設備として活用し、研究用設備貸与や少量試作サービス事業を展開する実用化スケジュールが明確になっている。
- さらに、端末寸法小型化、無線化などセンサネットワークの課題解決により、MEMS センサネットワークの普及、市場拡大が期待され、技術的・経済的・社会的波及効果は大きい。低環境負荷型プロセス技術の実用化、普及が進めば MEMS 製造プロセスの CO₂ 排出量削減が見込まれ、経済的・社会的波及効果が期待される。MNOIC 運営による 8 インチラインの有効活用により、ファブレスメーカーの製品開発支援、少量生産の製造設備として産業界への多大な波及効果が期待できる。
- 我が国の今後の基盤技術として、本プロジェクトは革新的 MEMS の基幹となる量産想定 8 インチパイロット設置が不可欠であったが、今回、高機能センサネットワークシステムと低環境負荷型プロセスの開発の中で短期間に設置でき、評価できる。またセンサネットワークのセンサ開発・低環境負荷型プロセスの開発においてもロードマップに沿ったものであり、事業目的として妥当と判断する。

〈問題点・改善すべき点〉

- 1年間と極めて短い期間で MEMS の製造ライン立ち上げからプロセス開発、デバイス開発からセンサネットワークのシステム開発まで幅広い成果が得られた反面、もう少し集中した方がより有効な結果が得られる感じもする。
- 短期間の大型装置の設置、整備であり、設備を設置するクリーンルームの建物が、2カ所に分かれていることは、使用者の立場から使い勝手の点で問題である。今後通路をもうけるなど一体化をする必要がある。
- MEMS と LSI の融合も視野に入れたプロジェクトであれば良かったと思

う。そういう意味では、補正予算でなく本予算で対応するプロジェクトである。

- 即効的プロジェクトという総合的な観点からのテーマ設定は妥当であり成果の上がる体制は整っているが、個々のテーマについてはやや選定に工夫が必要であったように感じられる。特にセンサネットワークの検証に選ばれている2つのテーマは効果の判断が難しく、その選定等にもう少し考慮が必要であったと考えられる。
- 短期間での事業のそれぞれのテーマがやや多すぎ、BEANSプロジェクトとの関係が少々あいまいという印象を受けた。8インチパイロット設置に重点を置き、例えばクリーンルームの面積を増やすなどに予算をつけたほうがよかったのではと思う。

〈その他の意見〉

- ・ 短期間にそれぞれ目標を達成したことは評価に値する。
- ・ 震災の影響などもあり1年間という短期間で上がる成果も限定的であることから、評価の時期を遅くした方が良かったと考える。

2) 今後に対する提言

本プロジェクトで実施したクリーンルーム空調制御システム、植物工場センサネットワークシステム、低消費電力 LSI、新センサデバイス原理、低環境負荷型プロセス技術など、研究開発の着実な継続実施と実用化、事業化が進むように NEDO として今後の活動を強力にフォローアップして欲しい。

また、8 インチ MEMS プロセスラインの有効利用については、MNOIC 運営による産学連携共同研究用インフラ設備として活用し、研究用設備貸与や少量試作サービス事業を展開する実用化スケジュールが計画されており、今後、日本の誇れるマイクロナノ・オープンイノベーションセンターとして、さらなる拡充が望まれる。

本プロジェクトは短期間で終了しているが、今後、明らかになった問題点を抽出しそれを解決することが重要である。また、本プロジェクトはセンサネットワークによる省エネのシステムや低環境負荷のプロセス開発などグリーン・テクノロジーの基礎となる技術が多く、これらを日本中に水平展開できるように応用技術開発も継続的に進めて欲しい。

〈今後に対する提言〉

- 本プロジェクトで実施したクリーンルーム空調制御システム、植物工場センサネットワークシステム、低消費電力 LSI、新センサデバイス原理、低環境負荷型プロセス技術などは担当した参加企業が継続して研究開発し、数年後の実用化を目指すことになっており、研究開発の着実な継続実施と実用化、事業化が進むよう NEDO としても今後の活動を強力にフォローアップしていただきたい。このためには、実用化、事業化をより推進するための組織的・体制的な工夫がもっと必要と考える。
- また、8 インチラインの有効利用については、MNOIC 運営による産学連携共同研究用インフラ設備として活用し、研究用設備貸与や少量試作サービス事業を展開する実用化スケジュールが計画されているが、関係者の努力により円滑な推進を期待する。
- 本プロジェクトは短期間で終了しているが、成果が上がるには（成果が検証されるには）時間が掛かると考えられる。今後、本プロジェクトにおいて明らかになった問題点を抽出しそれを解決することが重要で、日本の技術的優位性の確保を意識した後継プロジェクトが待望される。また、8 インチ MEMS ラインの維持には今後相当な費用を要することが予想され、その自立的運用に関して戦略と工夫が必要と思われる。
- 日本の MEMS 試作、開発拠点になる環境を整える必要がある。特に建物が独立しておらず、外部から日本の拠点となる姿が見えない。また、スタ

ップの充実も必要である。この事業以外でも長期プランのもとに上記拠点に向かった整備が必要と思われる。

- 日本の誇れるマイクロナノ・オープンイノベーションセンターとして、さらなる拡充をお願いしたい。
- 現在のクリーンルームでは面積があまりに小さく、今後の展開が難しい。早急の対応が必要と考える。
- 本事業ではセンサネットワークによる省エネのシステムや低環境負荷のプロセス開発などグリーン・テクノロジーの基礎となる技術が多く、これらを日本中に水平展開できるように応用技術開発も継続的に進めてもらいたい。
- MEMS と LSI の融合を促進するプロジェクトの追加。全国規模での人材育成の施設としての機能強化を望む。

1. 2 各論

1) 事業の位置付け・必要性について

センサ・MEMS 分野の世界市場の動向を見ると、日本は世界トップクラスのシェアを占めているが、欧米各国と激しい競争を行っており、高機能センサネットワークシステム開発および MEMS デバイスの製作技術の低環境負荷化はいずれも日本の国際競争力維持のために重要なポイントである。本プロジェクトを実施することにより、その成果をいち早く創出することで国際競争力の向上を図ることができることから産官学一体とした推進は不可欠で、NEDO のプロジェクトとして妥当である。

一方、1年間という限られた期間内に 8 インチ MEMS プロセスラインを構築した点は評価できるが、テーマの中にはその有効性についてまだ検証が十分ではないものもあり、今後の課題として BEANS プロジェクト等で引き続き検討することが望まれる。

〈肯定的意見〉

- 日本の置かれた現状から、本プロジェクトの内容及び産官学の共同研究体制の観点から NEDO 事業として妥当である。
- 本事業の柱の一つである 8 インチ MEMS ライン構築は低価格の量産型 MEMS センサ開発に不可欠であり、ロボット・新機械イノベーションプログラムに大いに寄与するものと思う。
- 世界的技術動向から位置づけ、必要性は妥当である。
- 総合評価でも述べたように補正予算ではなく、本予算で国家戦略に基づいて計画的に行うプロジェクトである。もちろん公共性が高く NEDO の関与が必要である。
- ロボット・機械分野の日本の優位性を確保するために重要なプロジェクトであり、産官学一体とした推進が不可欠で NEDO のプロジェクトとして相応しいと考える。高機能センサネットワークシステム開発および MEMS デバイスの製作技術の低環境負荷化はいずれも日本の国際競争力維持のために重要なポイントであり、タイムリーな研究テーマである。
- 本プロジェクトの目的は、高機能センサネットワークシステム・センサモジュールの事業化と、低環境負荷型製造プロセスの確立に向けた開発・実証研究を行うことである。この目的は、経済産業省ロボット・新機械イノベーションプログラムの達成目標である、バイオ技術や IT 技術などの異分野技術を活用した従来の機械の概念を超えた新しい機械の創造、2015 年頃に革新的 MEMS の本格普及を目指すことによる、安全・安心な社会の構築への貢献に寄与する。

- また、補正予算への対応としては、「明日の安心と成長のための緊急経済対策」として、「環境・エネルギー技術への挑戦」が求められたが、「高機能センサネットワークシステムと低環境負荷型プロセスの開発」として緊急に実施し、その目的に合致している。
- さらに、本プロジェクトは、民間活動のみでは達成できず、公共性が高いことから、NEDO 事業として取り組む妥当性がある。
- センサ・MEMS 分野の世界市場の動向を見ると、日本は世界トップクラスのシェアを占めているが、欧米各国と激しい競争を行っている。本プロジェクトを実施することにより、その成果をいち早く創出することで国際競争力の向上を図ることができる。本プロジェクトの事業の目的は妥当である。

〈問題点・改善すべき点〉

- もっと時間をかけて整備することが必要か。補正予算でも建物を含めた日本の拠点としての環境が必要。
- 例えば振動発電デバイスなど、補正予算での研究期間では短期間過ぎるものがある。研究担当企業にやや無理して参加させたという印象を持った。
- G デバイス開発について 4 つの開発項目が並行して進められてきたが、8 インチ MEMS クリーンルーム構築・高機能センサモジュール技術の開発目的が明確であるのに対して、クリーンルームおよび植物工場 2 つのセンサネットワーク開発は達成度の指標が明確とは言えず、その効果、特に費用対効果の検証が難しい。その有効性を示すためには、センシングの項目・ポイント数と制御可能な要素のバランスを考える必要がある。低環境負荷プロセスについてはそれぞれ一定の成果が上がっているが、低環境負荷の客観的・定量的指標を確立することが重要で、今後の課題として BEANS プロジェクト等で引き続き検討することが望まれる。
- 本来の MEMS の展開、すなわちマイクロ構造（可動構造を含む）と LSI の融合が実行できる施設に改善すべき。
- 1 年間という限られた期間内に 8 インチ MEMS ラインを構築した点は評価できるが、その有効性についてはまだ検証が十分ではなく、今後さらなる設備の追加や技術の標準化が必要と思われる。

〈その他の意見〉

- ・ 今回見学した 8 インチ MEMS ラインのクリーンルームはかなり手狭な印象を受けた。今後の発展を考えるともっと広いクリーンルームを作るべきではなかったかと思う。

- 補正予算による短期プロジェクトであり、成果の評価は今後の展開を考慮しつつ行うことになり、現時点での事後評価はあまり意義を感じない。今後同様なプロジェクトについては事後評価の時期について考慮が必要と思われる。

2) 研究開発マネジメントについて

補正予算による 1 年間のプロジェクトであることを踏まえ、効率的できめ細かいマネジメントが実施され、BEANS プロジェクトとの連携も良く機能していた。

さらに、研究開発実施者はそれぞれの要素技術を実施する上で十分な技術力と事業化能力を有する企業であり、これらの企業は成果の受け取り手でもあることから、ユーザとしての意見は十分に反映される体制であった。また、成果の実用化につなげる戦略として、各参加企業での実用化、つくばイノベーションアリーナへの展開、最先端設備の効率的活用が明確になっていた。

一方、国として広範な研究者が利用できる 8 インチ MEMS ラインを構築した点は評価できるが、導入された設備はイオン注入装置が無いなど十分なものではなく、今後欧米と対抗していく上では迅速な設備増強が望まれる。

〈肯定的意見〉

- プロジェクト管理もよく、普及活動、成果展開とも満足できる。
- 各テーマに対し、参加企業の実用化計画の明確化はよい。
- 短期間の間によく立ち上げることが出来たと思う。評価できる。
- これだけ多くの開発アイテムを数回の推進委員会や拠点毎研究会議でフォローしながら、1 年間という限られた期間内にすべての目標を達成した点は協賛に値するものと思う。
- 高機能センサネットシステム開発：この研究開発目標は、MEMS 技術戦略マップ 2010 の中の応用事例として取り上げられ、その目標値は従来達成されていない。また、CO₂削減比とセンサ寸法の目標値が定量的に設定されている。さらに、これらの定量値は目標達成度を測定・判断するための適切な指標である。
- 低環境負荷型製造プロセス：この研究開発目標は、MEMS 技術戦略マップ 2010 のロードマップ数値をクリアすることを狙いとして設定された戦略的目標である。その数値は従来未達成である。また、温暖化ガス排出量の削減可能値、接合温度の目標値が定量的に設定されている。一方、大口径 MEMS 用試作ラインと設計・計測・ファブ環境情報については、目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されている。
- 研究開発のスケジュール、予算はほぼ妥当である。また、目標達成に必要な要素技術を網羅し、要素技術間の関係、順序は適切である。さらに、新センサ原理検討項目の中で、これまで BEANS プロジェクトで開発してきたセンサ技術を取り上げ、実用化の観点から絞り込んだうえで活用を図っている。

- 研究開発の実施体制として、推進体制は **BEANS** の体制の中で取り組み、研究体制は **G デバイスセンター**と **G デバイスセンター関西**に分かれて進めており適切である。研究開発実施者はそれぞれの要素技術を実施する上で十分な技術力と事業化能力を有する企業である。これら企業は成果の受け取り手でもあり、ユーザとしての意見は十分に反映される体制である。全体を統括するプロジェクトリーダーとして前田研究グループ長が選任され、十分に活躍できる環境が整備されている。
- 成果の実用化につなげる戦略として、各参加企業での実用化、つくばイノベーションアリーナへの展開、最先端設備の効率的活用が明確になっている。また、知財マネジメントの方針も明確である。
- 補正予算による1年間の緊急実施事業であることを踏まえ、効率的できめ細かいマネジメントを実施した。東日本大震災に対しても適切に対応し予定通り事業を完了した。
- 短期間に施設のみならず、試作できる体制を作り上げられたのは、プロジェクトリーダーや担当者の努力の賜物である。
- 補正予算による短期プロジェクトであり、震災など予想外のことが起こったことを考えると十分機能したマネジメント体制であった。**BEANS** プロジェクトとの連携も良く機能したように思われる。

〈問題点・改善すべき点〉

- 短期間で実現したことを考慮すると、特に指摘することはないが、補正予算ということで短期間に遂行しないという制限があるのかもしれないが、もともと短期間でやるべき代物ではない。日本の今後を左右する重要なプロジェクトであると言っても過言ではない。補正予算ということもあり、予算の制約上致し方ないことかもしれないが、複数のクリーンルームを出入りするのに一度外に出ないといけないなど、根本的な問題（不都合）がある。
- 短期間のプロジェクトであり、震災の影響もあり普及活動が限られた面も理解できるが、**G デバイスプロジェクト・8 インチライン**等についてコンセプト・有効性のアピールに目的を絞った独自のシンポジウムを行うなどもう少し工夫が必要であったと思われる。
- 国として広範な研究者が利用できる**8 インチ MEMS** ラインを構築した点は評価できるが、導入された設備はイオン注入装置が無いなど十分なものではなく、今後欧米と対抗していく上では迅速な設備増強が望まれる。
- 補正予算頼みではなく、産総研のマスタープランの基に計画される長期的な展望が望まれる。

3) 研究開発成果について

1年間という限られた期間内に8インチMEMSプロセスラインの構築、センサデバイス開発、センサネットワークのシステム開発を行い、ほぼすべての項目において当初設定した目標を達成したことは評価できる。

また、高機能センサモジュール小型化の達成レベルは高く、ポリマーMEMSプロセス、深堀エッチングガス、低温接合、3次元設計・検査情報共有化フレームワーク等、本プロジェクトで開発された技術は低環境負荷型プロセスの実現にキーとなるプロセス技術であり、MEMS生産システムの低環境負荷化への多大な貢献が期待できる。

今後、開発成果についてさらにデータを蓄積して、よりわかりやすい形にすることで普及を加速すべきである。

〈肯定的意見〉

- 8インチMEMSラインの立ち上げを中心とする整備の1年間の成果としては十分なものである。
- BEANSプロジェクトの推進を加速する位置づけとして本プロジェクトが位置付けられていることが良く理解できた。Gデバイスについては、8インチMEMSラインの立ち上げ、高機能センサモジュールの開発など、震災の影響を考えると短期間の中で十分成果が上がっている。また、低環境プロセスに関しても設定されたテーマごとに一定の成果が上がっており、今後の展開に期待がもてる。
- 高機能センサネットワークシステム開発：センサネットワークシステム開発で検証用クリーンルームのCO₂削減（90年度比60%削減）見込み、大口径MEMSプロセスライン構築、植物工場で20%の省エネ効果、高機能センサモジュール試作で30x30x10mmの小型化達成、などほぼ完全に目標を達成している。
- 低環境負荷型製造プロセス：ポリマーMEMS基本プロセス確立、深堀エッチングにおける温暖化ガス排出量90%削減の指針確保、250℃以下の低温接合課題抽出、3次元設計・検査情報共有化フレームワーク指針確保、などほぼ完全に目標を達成している。
- 高機能センサネットワークシステム：本プロジェクトで開発された技術により、製造プロセスの省資源化、高効率化の実現が期待でき、今後実用化を推進することにより、センサネットワーク市場の拡大につながることを期待できる。また、検証用クリーンルームのCO₂削減見込みや高機能センサモジュールの小型化は世界最高レベルである。
- 低環境負荷型製造プロセス：ポリマーMEMSプロセス、深堀エッチング

ガス、低温接合、3次元設計・検査情報共有化フレームワーク等、本プロジェクトで開発された技術は低環境負荷型プロセスの実現にキーとなるプロセス技術であり、MEMS 生産システムの低環境負荷化への多大な貢献が期待できる。

- いずれの項目も、投入された予算に見合った成果が得られており、成果の意義は深い。
- 5 件の特許出願、3 件の出願手続き中があり、知的財産権等の取扱は計画に沿って適切に行われている。
- 15 件の研究発表・講演がおこなわれ、発表は適切である。また、展示会での成果概要展示、8 インチ MEMS プロセスライン見学会、国際会議創設など、一般に向けた広い情報発信を行っている。
- 1 年間という限られた期間内に 8 インチ MEMS ラインの構築、8 項目のセンサデバイス開発、センサネットワークのシステム開発を行い、すべての項目において当初設定した目標を達成したことは評価される。特にパーティクルセンサについてはゼロからスタートして開発できたことは称賛に値する。
- 短期間でそれぞれ目標達成しており、評価できる。量・質とも満足できる。成果の普及もよく行われている。
- このプロジェクトは目的であるファブリケーション施設を短期間で立ち上げた点では目的を果たしている。

〈問題点・改善すべき点〉

- センサデバイス開発やセンサネットワークの開発の成果についてはさらにデータを蓄積して、よりわかりやすい形にすることで普及を加速すべきと思われる。
- 本プロジェクトは施設の立ち上げのほか、クリーンルームなどにパーティクルセンサなどを配置し低消費電力化する、いわゆるセンサネットによるグリーン化（エコ化）並びにプラスチック成型による MEMS 製造の課題があるが、このプラスチック成型についての成果が良く見えていない。
- G デバイス・低環境負荷プロセスいずれも BEANS プロジェクトでの先行研究を関連した研究テーマが設定されているが、その目的達成のために最適なテーマであるかその選択にやや疑問を感じる。基礎・基盤研究としての位置づけであるならば、短期間に成果が上がることを意識せず BEANS 以外の新たなテーマを増やす可能性があったのではないかと感じる。
- 野菜工場などの開発成果は、期間が短いので、今後継続して行う必要がある。

- 短期間ということもあるが、特許出願がやや少ない。

〈その他の意見〉

- ・ 8 インチ MEMS ラインについては場所貸しだけでなく、ファンダリーサービスまで拡張した方が有効活用できると思う。

4) 実用化の見通しについて

8 インチ MEMS プロセスラインについては、MNOIC 運営による産学連携共同研究用設備として活用し、研究用設備貸与や少量試作サービス事業を展開する実用化スケジュールが明確になっている。また、センサデバイスやセンサネットワークの開発については最終的には、各メーカーが製品化するということが基礎技術確立により実用化への道筋ができたと考える。特にクリーンルーム管理は時機を得たものであり、今後、店舗・工場への展開を期待したい。

但し、8 インチ MEMS プロセスラインについては欧米に対抗するレベルに達するにはまだ多くの課題がある。また、センサデバイスやセンサネットワークについても実用化の鍵である低価格化と信頼性確保の課題が残されており、引き続き課題をブレークダウンしてプロジェクトを継続していくことが望まれる。

〈肯定的意見〉

- 企業で整えるには高価な装置が設置されていて、試作ラインとして成果が期待できる。
- このプロジェクトは目的であるファブリケーション施設を短期間で立ち上げた点では目的を果たしている。本来のこのプロジェクトの成果は、現時点では判断できない。今後の新しいデバイスの発掘、産学官の連携の促進、人材育成の活性化にかかっている。
- 研究開発企業の事業化の見通しを明確にした活動はよい。今後のフォローをお願いしたい。
- 特にクリーンルーム管理は時機を得たものである。店舗・工場への展開を期待したい。
- G デバイスにおいて高機能センサモジュール技術開発は、戦略的観点から意欲的であり波及効果も期待できる。低環境負荷プロセスの個々のテーマも波及効果が大きいものが概ね選定されている。各企業で行っているデバイスの開発は、具体的に実用化を意識したもので、本プロジェクトで実施した内容については比較的短期間で効果が上がることが期待される。
- 8 インチ MEMS ラインについては MNOIC が設立されて実用化への第一歩を踏み出せたと思う。センサデバイス開発やセンサネットワークの開発については最終的には各メーカーが製品化するということが基礎技術確立により実用化への道筋ができたと思う。
- 成果の実用化可能性：クリーンルーム空調制御システム、植物工場センサネットワークシステム、低消費電力 LSI、新センサデバイス原理、低環境負荷型プロセス技術などは担当した参加企業が継続して研究開発し、数年

後の実用化を目指しており、成果の実用化イメージ・出口イメージは明確である。

- 成果の実用化可能性：8インチラインの有効利用については、MNOIC 運営による産学連携共同研究用インフラ設備として活用し、研究用設備貸与や少量試作サービス事業を展開する実用化スケジュールが明確になっている。
- 波及効果：端末寸法小型化、無線化などセンサネットワークの課題解決により、MEMS センサネットワークの普及、市場拡大が期待され、技術的・経済的・社会的波及効果は大きい。
- 波及効果：低環境負荷型プロセス技術の実用化、普及が進めば MEMS 製造プロセスの CO₂ 排出量削減が見込まれ、経済的・社会的波及効果が期待される。
- 波及効果：MNOIC 運営による 8インチラインの有効活用により、ファブレスメーカーの製品開発支援、少量生産の製造設備として産業界への多大な波及効果が期待できる。

〈問題点・改善すべき点〉

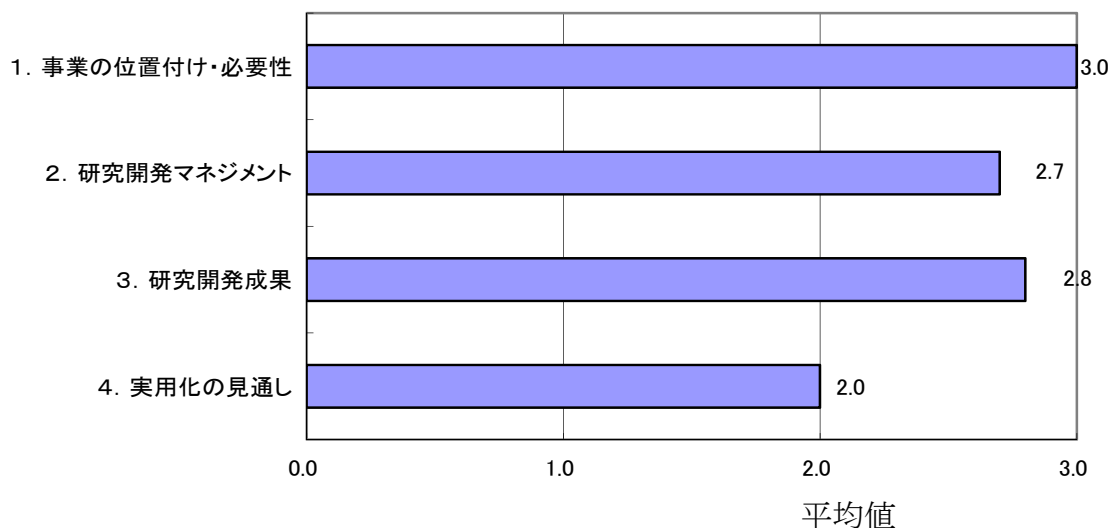
- プロジェクトの評価を一度して終わりではなく、評価はあくまでも今後改善してより良いものを実現することに主眼をおいて、実際に今後使用するユーザの建設的な意見を取り入れ前向きに改善していく方策も組み入れるべきである。
- 装置などの設備が、2カ所に分離されているので、今後一体化を行い利用しやすい工夫が必要。また、回路が作製できる設備の設置、スタッフの充実が望まれる。
- 8インチ MEMS プロセスラインは生産効率の面から魅力的であるが、多品種少量生産が多い実際の MEMS 応用分野ではトータルな意味での効率・コストの面から優位性を判断するのは難しい。CMOS との融合など実用化に向けて今後解決すべき課題が多いと感じる。
- 8インチ MEMS ラインについては欧米に対抗するレベルに達するにはまだ多くの課題があり、またセンサデバイスやセンサネットワークについても実用化の鍵である低価格化と信頼性確保が残されており、引き続き課題をブレークダウンしてプロジェクトを継続していくことが望まれる。
- 実用化にはさらなる研究が必要と思われるテーマ、例えば振動発電デバイスなど今後の進め方を議論してほしい。他のプロジェクトでも多々行われている。それらとの関係は？

〈その他の意見〉

- ・ マイクロナノ・オープンイノベーションセンターとして、まだ管理・技術とも心配である。現在はそれぞれの技術に対しての対応は研究者で行っているが、試作などのサービスでは研究者でない技術者が必要と思う。今後どのようにヒト・モノ・金をどうしていくか?

3. 評点結果

3. 1 プロジェクト全体



評価項目	平均値	素点 (注)					
		A	A	A	A	A	A
1. 事業の位置付け・必要性について	3.0	A	A	A	A	A	A
2. 研究開発マネジメントについて	2.7	A	A	A	A	B	B
3. 研究開発成果について	2.8	A	A	A	B	A	A
4. 実用化の見通しについて	2.0	B	A	B	B	C	B

(注) A=3, B=2, C=1, D=0 として事務局が数値に換算し、平均値を算出。

〈判定基準〉

1. 事業の位置付け・必要性について	3. 研究開発成果について
・非常に重要 →A	・非常によい →A
・重要 →B	・よい →B
・概ね妥当 →C	・概ね妥当 →C
・妥当性がない、又は失われた →D	・妥当とはいえない →D
2. 研究開発マネジメントについて	4. 実用化の見通しについて
・非常によい →A	・明確 →A
・よい →B	・妥当 →B
・概ね適切 →C	・概ね妥当であるが、課題あり →C
・適切とはいえない →D	・見通しが不明 →D

第2章 評価対象プロジェクト

1. 事業原簿

次ページより、当該事業の事業原簿を示す。

「異分野融合型次世代デバイス製造技術
開発プロジェクト／高機能センサネットシステムと低環
境負荷型プロセスの開発」

事業原簿【公開】

担当部	独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 技術開発推進部
-----	------------------------------------

目次

概要

プロジェクト用語集

I. 事業の位置付け・必要性について	I-1
1. NEDO の関与の必要性・制度への適合性.....	I-1
1.1 NEDO が関与することの意義.....	I-1
1.2 実施の効果.....	I-2
2. 事業の背景・目的・位置づけ	I-2
II. 研究開発マネジメントについて	II-1
1. 事業の目標	II-1
2. 事業の計画内容	II-2
2.1 研究開発の内容.....	II-2
2.2 研究開発の実施体制	II-8
2.3 研究の運営管理.....	II-9
2.4 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性.....	II-13
3. 情勢変化への対応.....	II-14
III. 研究開発成果について	III-1
1. 事業全体の成果	III-1
2. 研究開発項目毎の成果.....	III-3
2.1 高機能センサネットシステム開発	III-3
2.2 低環境負荷型プロセス技術開発.....	III-5
3. 成果の意義	III-7
4. 成果に関する特許及び論文・学会発表に関して	III-9
4.1 特許	III-9
4.2 研究発表・講演.....	III-9

5. 成果の普及広報	III-9
IV. 実用化の見通しについて	IV-1
1. 事業全体の実用化の見通し	IV-1
2. 研究課題毎の実用化の見通し	IV-3
2.1 半導体クリーンルームセンサネットシステム	IV-3
2.2 8 インチラインの構築	IV-4
2.3 植物工場応用センサネットシステム	IV-5
2.4 高機能センサモジュール	IV-7
2.5 低消費電力 LSI	IV-8
2.6 新センサデバイス原理	IV-9
2.7 低環境負荷ポリマー・センサ融合プロセス	IV-13
2.8 スマートプロトタイピング (8 インチラインのプロセスプラットフォーム構築)	IV-14
2.9 低環境負荷型深堀エッチング	IV-16
2.10 低環境負荷型集積化プロセス基盤	IV-17
2.11 スマートファブシステム	IV-17
V. 各研究開発成果の詳細内容	V-1
V.1 高機能センサネットシステム開発	V-1
V.1.1 半導体クリーンルームセンサネットシステム開発	V-1
V.1.2 8 インチ MEMS プロセスラインの構築	V-56
V.1.3 植物工場センサネットシステムの開発	V-75
V.1.4 高機能センサモジュール技術開発	V-105
V.1.4.1 センサモジュール	V-105
V.1.4.2 低消費電力 LSI	V-145
V.1.4.3 新センサデバイス原理	V-157
(i) ナノ構造ガスセンサ	V-157
(ii) 低消費電力センサ・無線モジュールへの検討	V-179
(iii) パーティクルセンサの MEMS 化	V-195

(iv)汚染ガスセンサ.....	V-217
(v)振動発電を中心とした小型高効率発電デバイス.....	V-232
(vi)センサ用パワーマネジメントデバイス.....	V-250
(vii)位置推定センシング原理.....	V-287
(viii)高感度温度センシング用機能薄膜.....	V-306
V.2 低環境負荷型プロセス技術開発.....	V-318
V.2.1 低環境負荷ポリマー・センサ融合プロセス技術開発.....	V-318
V.2.2 スマートプロトタイピング技術開発.....	V-341
V.2.2.1 シリコンベースセンサ TEG の試作.....	V-341
・加速度センサ・ジャイロセンサ・シリコン振動子 TEG の設計・試作..	V-341
・薄膜メンブレン TEG の設計・試作.....	V-374
・圧電薄膜ジャイロ TEG の設計・試作.....	V-395
V.2.2.2 異分野融合型次世代デバイス製造技術を適用したデバイス作製... V-415	V-415
・中性粒子ビームエッチングプロセスを適用したセンサ TEG の作製.....	V-415
・ μ プローブ TEG の設計・試作.....	V-443
V.2.2.3 欠陥・ばらつき評価におけるモデリング・計測技術開発.....	V-467
V.2.3 低環境負荷型深堀りエッチング技術開発.....	V-504
V.2.4 低環境負荷型集積化プロセス基盤技術開発.....	V-577
V.2.5 スマートファブシステム技術開発.....	V-597

(添付資料)

A-1：イノベーションプログラム基本計画

A-2：プロジェクト基本計画

A-3：技術戦略マップ(分野別ロードマップ)

A-4：事前評価関連資料(パブリックコメント募集の結果)

A-5：特許論文リスト

概要

		最終更新日	平成 23 年 11 月 15 日
プログラム(又は施策)名	ロボット・新機械イノベーションプログラム		
プロジェクト名	異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト/高機能センサネットシステムと低環境負荷型プロセスの開発	プロジェクト番号	P09008
担当推進部/担当者	技術開発推進部 奥谷 英司 (平成 23 年 11 月現在) 技術開発推進部 渡辺 秀明 (平成 22 年 3 月~平成 23 年 3 月)		
0. 事業の概要	<p>2015 年以降 2025 年に向けて革新的イノベーションを起こし、更なる市場の拡大を図るには、従来電子・機械製造技術と完全に異分野とされてきた技術とを融合させる等により、これまでの製造技術の概念・常識を打ち破った技術を創出することが肝要である。このため、「異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト」では、MEMS 製造技術とナノ・バイオ等異分野技術の融合による以下①~④の研究開発項目により新たな共通基盤製造技術を開発する。①バイオ・有機材料融合プロセス技術、②3次元ナノ構造形成プロセス技術、③マイクロ・ナノ構造大面積・連続製造プロセス技術、また、開発成果の産業界への普及促進に向けた環境整備のため、④異分野融合型次世代デバイス製造技術知識データベースの整備を行う。</p> <p>今回の事後評価対象テーマ「高機能センサネットシステムと低環境負荷型プロセスの開発」は、「異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト」の研究開発項目⑤として、平成 21 年度補正予算で約 1 年間実施されたものであり、本テーマでは、「異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト」で開発したプロセス技術等を活用しつつ、高機能センサネットシステム・センサモジュールの事業化と、低環境負荷型製造プロセスの確立に向けた開発・実証研究を行う。</p>		
I. 事業の位置付け・必要性について	<p>工場等の製造現場において、原材料や使用資源のきめ細かい状況モニタリングと制御を行う微細・極小、高機能なセンサの実用化により、製造プロセスの省資源化、高効率化の実現が期待されている。小型で低コスト、かつ信頼性の高いワイヤレスセンサとすることで、設置にあたっての大きかりな工事を必要とせず、既存施設にも低コストでの導入が可能となる。合わせて、センサの製造において低環境負荷型の製造プロセス技術の開発を行うことで、生産システムの低炭素化にも貢献が可能となる。</p> <p>本テーマは、上記背景に加え、全世界的課題として環境エネルギー問題への対応が国や産業毎に強く要請されている中、平成 21 年度補正予算(第 2 号)「明日の安心と成長のための緊急経済対策」を実施するために措置された「環境・エネルギー技術への挑戦」に位置付けられた事業であり、NEDO はこれに早期に対応すべく「異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト」に追加して緊急に実施した。</p>		
II. 研究開発マネジメントについて			
事業の目標	<p>①高機能センサネットシステム開発 検証用のクリーンルームにおいて、従来比(1990 年比)CO2 削減 60%のセンサネット制御システムを開発する。また、一辺 30mm、厚み 10mm 以内に複数の MEMS センサと処理回路、無線回路、エネルギーデバイスとの融合を想定したセンサモジュールプラットフォームを作製する。</p> <p>②低環境負荷型プロセス技術開発 現状の SF6 ガスに対し、複数の代替候補ガスを調査・検討し、温暖化ガス排出量を 90%以上削減可能とする最適代替ガスの選定指針を得る。また高機能デバイス薄膜の集積化に関し、250℃以下で大気圧付近から真空中で封止できる接合方式を決定する。さらに生体適合性ポリマーを用いた MEMS 製造プロセスにおいて、シミュレーションを用いて機械特</p>		

	<p>性などの機能数値を具体的に示す。</p> <p>大口径 MEMS 用試作ラインにて、センサ用途等 TEG の設計および試作を複数種類行い、歩留まり、生産性、効率性のデータとデバイスの動作を妨げる製造装置、製造プロセス、デバイス構造起因の欠陥・ばらつき等の課題を抽出する。研究開発項目②「3次元ナノ構造形成プロセス技術開発」の成果である中性粒子ビームエッチングをセンサ TEG に適用し、デバイス性能への効果を検証する。</p> <p>設計・計測・ファブ環境情報において共有化する情報を類型化し、データ共有化のためのデータフォーマット、それに付随する基本ソフトウェアの開発を行い、MEMS-TEG を用いてデータ交換および設計手法の検証を行う。また、クリーンルームおよび製造・検査装置に関わる消費エネルギー、二酸化炭素排出量など環境情報の収集管理の方法を決定する。</p>					
事業の計画内容	主な実施事項	H20fy	H21fy	H22fy	H23fy	H24f
	⑤高機能センサネットワークシステムと低環境負荷型プロセスの開発	<p>(異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト 研究開発項目①～④)</p>				
開発予算 契約種類： (委託(○))	会計・勘定	H20fy	H21fy	H22fy		総額
	補正予算(一般)	3,310(百万円)				
開発体制	経産省担当原課	製造産業局産業機械課、産業技術環境局研究開発課				
	プロジェクトリーダー	<p>「異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト」 技術研究組合 BEANS 研究所 所長 遊佐 厚</p> <p>⑤高機能センサネットワークシステムと低環境負荷型プロセスの開発 チームリーダー 独立行政法人 産業技術総合研究所 前田 龍太郎 (「異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト」サブプロジェクトリーダー)</p>				
	委託先 (平成 22 年度時点)	<p>技術研究組合 BEANS 研究所 【オリンパス、オムロン、デンソー、三菱電機、大日本印刷、パナソニック電工、日立製作所、日立ハイテクノロジーズ、日立プラントテクノロジー、東芝、富士電システムズ、セイコーインスツル、アルバック、みずほ情報総研、堀場製作所、産業技術総合研究所、立命館大学、マイクロマシンセンター】</p>				
Ⅲ. 研究開発成果 について	<p>本事業は、大きく二つのカテゴリーとして、「高機能センサネットワークシステム」と「低環境負荷型プロセス開発」に分けられる。前者は、高機能センサネットワークシステムの実験場としての 8 インチ MEMS 一貫プロセスライン(クラス 1000 クリーンルームとプロセス装置群)の構築と、そこでの空調オンデマンド制御に連動したセンサネットワークシステムの設置による CO2 削減目標の検証を実施し、後者は、MEMS 製造プロセスとして特徴的な Si 深堀エッチングと接合におけるプロセスの低環境不負荷化、前述の 8 インチ MEMS 一貫プロセスラインでの MEMS 基本プロセスレシピとして 7 種類の MEMS デバイスのテストエレメントグループ(TEG)の開発を行い、いずれも目標を達成した。</p>					
	投稿論文	「査読付き」9 件				
	特 許	「出願済」5 件(3 件手続き中)(内外国出願 0 件)				
	その他の外部発表 (プレス発表等)	「学会発表」6 件、「セミナー講演会・展示会」3 件				
Ⅳ. 実用化の見通し について	<p>それぞれの研究開発課題を担当した研究員の所属する企業において、例えば半導体クリーンルーム用センサネットワークシステム事業や、植物工場への事業、各種低環境負荷型プロセスの自社事業などにおいて、それぞれ展開されつつある。</p> <p>また、世界的にも例を見ない低環境負荷化を実現できる高機能センサネットワークシステムを完備した MEMS 一貫プロセス開発・試作施設は、我国有数の 8 インチという MEMS とし</p>					

	<p>ては大口径ウェハを扱える先端的な装置群を完備した研究開発拠点となりうる。これらについては、我が国の研究拠点 TIA-NMEMS への展開を想定し、MEMS 協議会にマイクロナノイノベーションセンター (MNOIC) を研究・開発から量産試作まで踏まえた研究開発の実行部隊として組織し、平成 23 年 7 月に設置された。本事業により設備が構築された AIST 集積マイクロシステム研究センターと共同で MNOIC は研究開発試作機能の構築と継続的運営を図るべく取り組みを進めている。</p>	
<p>V. 基本計画に関する事項</p>	<p>作成時期</p>	<p>平成 21 年 3 月 作成</p>
	<p>変更履歴</p>	<p>平成 21 年 3 月 改訂 (NEDO へ移管されることに伴う根拠法等の変更) 平成 21 年 12 月 改訂 (研究開発項目⑤「高機能センサネットシステムと低環境負荷型プロセスの開発」を追加) 平成 22 年 3 月 改訂 (研究開発項目②(3)宇宙適用 3 次元ナノ構造形成技術」の研究開発の目標を産業化の進展を踏まえ変更)</p>

プロジェクト用語集

【AHU】	AHU (エアハンドリングユニット) とは、外部熱源設備から供給される冷水・温水・蒸気等を用いて、空気の温度・湿度を調節して部屋へ供給する、比較的大きな一体型の空気調和機である。
【Analog-to-Digital Convertor (ADC)】	入力されたアナログ信号に比例した数値をデジタル出力する回路。
【BOSCH プロセス】	エッチングとデポを交互に繰り返して行うエッチング方法で、高アスペクト比のエッチングが可能。これと対比して連続的にエッチングを行う方法を非 BOSCH プロセスと呼ぶ。
【CMP】	化学機械研磨 (Chemical Mechanical Polishing)。研磨剤自体が有する表面化学作用または研磨液に含まれる化学成分的作用によって、高速かつ平滑な研磨面を得る技術
【CAE】	Computer Aided Engineering の略。コンピュータ技術を活用して製品の設計、製造や工程設計の事前検討の支援を行うこと、またはそれを行うツール。
【DRIE】	Deep Reactive Ion Etching. シリコンの深堀をするドライエッチング法. 高アスペクトでシリコンを加工することが可能.
【FFU】	FFU (ファンフィルターユニット) とは、ファン付きの高性能フィルタユニットのことです。FFU はクリーンルームやクリーンブース、精密製造装置の天井に設置し清浄空気を吹き出してクリーンな環境を作る装置。
【FCU】	ファンコイルユニットとは、一般的に、熱交換器 (コイル) ・ファンモータユニット・エアフィルタで構成されたものをいう。必要量の外気は AHU にて調和処理を行い室内に供給し、ファンコイルユニットは主に室内側の温度調整用として用いられる。また、室内側の温調は空調機 (AHU) が行い、ペリメータゾーンの負荷処理を行なうためにファンコイルユニットが使用される場合もある。
【GWP】	大気温暖化係数: Global Warming Potential、二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素などの各種の温室効果ガス毎に定められる、温室効果の程度を示す値。
【ICP】	誘導結合型プラズマ: Inductive Coupled Plasma、コイルアンテナに高周波を印加してプラズマを発生させる方式で、高密度のプラズマが生成される。
【IPCC】	気候変動に関する政府間パネル (英語: Intergovernmental Panel on Climate Change、略称: IPCC)。国際的な専門家で作る、地球温暖化についての科学的な研究の収集、整理のための政府間機構
【MEMS 等価回路】	等価回路は、L (コイル) ・C (コンデンサ) ・R (抵抗) ・電圧源・電流源などの素子により表現される。これにより、MEMS における電気と機械の複雑な相互作用およびその特性を明確に把握することができる。MEMS においては一般的に系全体のエネルギーをラグランジアンにより表現し、ラグランジュ方程式を解くことで等価回路を導出する。現在は、等価回路ジェネレータを用いることで簡便に MEMS を等価回路化することもできる。
【MEMS 化】	ここでの MEMS 化は、MEMS (Micro Electro Mechanical System) を一部または全体に用いて小型化することを指す。
【OES】	発光分光計測: Optical Emission Spectrometry、プラズマの発光をモニタリングする手法。
【PZT】	ジルコン酸チタン酸鉛 (Pb (Zr, Ti) O ₃) の略称。代表的な強誘電体材料で超音波センサや人感センサに広く応用されている。
【P-E ループ】	強誘電体において電界を印加したときの分極の変化を示す曲線。
【platen power】	プラテンはウエハステージのことで、プラテンパワーとは、ウエハステージに印加する高周波のパワーを意味する。
【QCM】	Quartz Crystal Microbalance. 表面に物質が付着することによって変化する共振周波数の値から付着した物質の質量を計測するセンサ。
【SEM】	操作型電子顕微鏡: Scanning Electron Microscopy. 電子線を計測対象に照射し、対象物から放出される二次電子像を計測することで像を構築し、表示する顕微鏡。

【SIMS】	二次イオン質量分析法：Secondary Ion-microprobe Mass Spectrometry。個体の表面にイオンを照射し、そのイオンと固体表面の分子・原子レベルでの衝突によって発生する二次イオンを検出することにより表面の組成、化学構造、深さ方向の分布等を計測する表面計測法。
【TEM】	Transmission Electron Microscope（透過電子顕微鏡）の略称。ナノメートル以下の物質構造が観測できる。
【TEG】	Test Element Group の略。設計上や製造上の問題を見つけ出すための評価用パターンや構造をもった素子。
【TFT】	Thin Film Transistor、液晶ディスプレイの一種で、アクティブマトリクス方式の、薄膜状に加工されたトランジスタを用いるタイプのものである。
【VB-FET】	Vibrating-Body Field Effect Transistor の略。2007年にD. Groggらによって提案されたデバイスで、その構造は、駆動するMEMSの側壁部分に形成されたチャネルと固定されたゲートから成る構造であり、MEMSとトランジスタの集積デバイスとなっている。VB-FETは、ゲートと駆動チャネルの相互作用によりトランジスタ機能を発現し、入力信号を低インピーダンスに変換することができ、また、信号を増幅することができる。
【Wald-Minimax 法】	逐次サンプリングの手法の一つ。評価線図が直線になり、かつ、ポアソン分布の信頼区間から求めた評価線図と比べて、評価結果に違いがなく、計測時間が短縮されることからJISの規格で使用されている。
【アナログフロントエンド (AFE)回路】	本報告では、センサからの微小なアナログ信号を増幅し、デジタル信号に変換することでマイコンで扱えるようにする回路を指す
【圧電性】	外部からの応力により電界が生じること。電界を印加することにより歪が生じることを逆圧電効果と呼ぶ。
【アニール処理】	熱処理のこと。本研究で用いたアニール処理は金属-半導体接触面を合金化することによりショットキー接触からオーミック接触に変化させる効果を持つ。
【アパーチャ】	中性粒子ビームを生成する為の主要部品。プラズマで生成したイオンを電気的に中性化すること及びイオンに対しバイアスによる運動エネルギーの付加がその主な役割。材質はカーボン。
【アーチファクト】	実際の物体ではない二次的に発生した画像のノイズ
【アクティビティ図】	動作 (action) に着目し、その実行順序や条件、制御などの依存関係を示した図
【圧縮乾燥空気】	圧縮空気を乾燥させたもの 圧縮させると結露があるため乾燥が必要となる用途がある
【アッシャー】	レジストを気相中でオゾンやプラズマにより灰化 (Ashing) することにより除去する装置
【育苗装置】	種を発芽をさせる装置。人工光にて発芽させる。苗が1cm~2cmに成長した段階で、栽培室に移して栽培する。
【インダクタンス】	電磁誘導の大きさを表す定数
【ウエハ・ツー・ウエハ接合】	ウエハ同士の接合。W2W接合とも略される。
【埋め込み酸化膜】	Buried Oxide (BOX)。シリコン、酸化膜、シリコンを積層した基板の酸化膜
【塩基置換容量】	塩基置換容量 (CEC) とは、土壌のもつ負の電荷 (陰イオン) の総量のことをいい、土が陽イオンの塩基肥料成分 (窒素、石灰、苦土 (マグネシウム)、加里 (カリウム)) を保持する能力 (保肥力) を表す。CECの大きい土壌は肥料成分を多く保持することができ、生育後半まで養分を保つことができる。
【塩基飽和度】	塩基飽和度とは、塩基置換容量 (CEC) に対して、塩基 (石灰、苦土 (マグネシウム)、加里 (カリウム)) が占めている割合を%で示したものである。土の保肥力に対してどのくらいの塩基があるのかを示す。塩基飽和度が100%以上の場合は、肥料分があふれている状態である。
【Au-Au 常温接合】	異種材料を接合する技術の一種で常温で接合できる。接合する材料の最表面にAu薄膜を形成したものをAu-Au接合と云う。
【エアシャワー】	作業員または衣服に付着している粒子状物質を強制的に吹き飛ばし除去するための装置。25m/s程度の流速で空気を吹き出す。
【エッチング】	化学反応を利用して金属膜等を削ること。液体を利用するものをウエットエッチング、気体を利用するものをドライエッチングという。

【エレクトレット】	誘電体内部に強制的に電荷を保持させたもののことであり、一度閉じ込められた電荷は半永久的に保たれる、という特徴を持つ。
【NLD プラズマ】	磁気中性線放電：Magnetic Neutral Loop Discharge、磁場がゼロとなるポイントが真空中に形成されるのが特徴。磁場ゼロのループ付近に濃いプラズマが形成される。
【FDTS 膜】	SAM 膜の一つ。perfluorodecyltrichlorosilane、 $\text{CF}_3(\text{CF}_2)_7\text{CH}_2\text{CH}_2\text{SiCl}_3$ 。
【X 線 CT 装置】	線管と検出器の間で測定物を回転させながら X 線を透過し、全方向から透視画像データをコンピューターで断層像に再構成して表示する装置
【SOI ウェハ】	Silicon On Insulator の略。Si 基板と表面 Si 層の間に SiO_2 を挿入した構造のウェハ。
【温室効果ガス】	Greenhouse Gas (GHG)。大気圏にあって、地表から放射された赤外線の一部を吸収することにより温室効果をもたらす気体の総称。二酸化炭素、メタンなど
【温室効果】	大気圏を有する惑星の表面から発せられる放射（電磁波により伝達されるエネルギー）が、大気圏外に届く前にその一部が大気中の物質に吸収されることで、そのエネルギーが大気圏より内側に滞留し結果として大気圏内部の気温が上昇する現象
【換気回数】	クリーンルームの洗浄度を維持するためにクリーンルーム内の空気の入替えを行っており、その回数。対象となる空間に 1 時間あたりに供給される清浄エアの量を部屋の容積で割ったもので、1 時間あたりに何回、部屋の空気が入れ替わったのかを表す。
【灌液チューブ】	灌液チューブは、植物の 1 株 1 株単位で養液を供給できるチューブである。チューブの先端の小さな穴から点滴灌液を行なうことができる。
【緩衝層】	薄膜形成において基板と成膜する材料との結晶定数が異なる場合に、基板の上に形成し成膜材料との結晶の整合性をとる層のこと。
【開放電圧】	フォトダイオードにおいて、電流を流していない状態での電極間の電位差。
【カーボンフットプリント】	Carbon Foot Print (GFP) 製品やサービスのライフサイクルの各過程で排出された「温室効果ガスの量」を合算した結果、得られた全体の量を CO_2 量に換算して表示すること
【管電圧】	電子線を高電圧で加速し、陽極に衝突させて X 線を発生させる X 線源装置で、電子線に加える加速電圧。管電圧を高くすると X 線の透過性が高くなる
【管電流】	電子線を高電圧で加速し、陽極に衝突させて X 線を発生させる X 線源装置で、電子線による電流。管電流を高くすると X 線量が高くなる
【外調機】	外調機とは、外気負荷を処理する為の空調機。空調利用時の換気の際、外気を導入するが、そのままだと夏は暑く、冬は冷たい空気を取り込むため、空調システムに大きな負荷となる。そこで、主の空調機が取り入れる前に、外気をある程度の状態まで冷暖房や加湿などの処理を行うの設備。
【ガウスフィルタ】	注目画素に近いほど、平均値を計算するときの重みを大きくし、遠くなるほど重みを小さくなるようにガウス分布の関数 ガウス分布 を用いた処理
【機能性ナノ粒子】	ナノサイズの粒状物質の表面に修飾を行い機能を付加した粒状物質。
【強誘電体】	外部から電界を印加しなくても自発分極が存在し、電界によってその向きが変えられる材料。
【キャパシタンス】	電気容量の大きさを表す定数
【Q 値】	Quality Factor の略 共振の鋭さをあらわす値
【キャリアウエハ】	チップ仮配置のための輸送用の補強ウエハ。
【共振周波数】	固有振動数と同様
【クラス 10、100、1000】	クリーンルームの洗浄度を表す基準であり、1CF（キュービックフィート=1 辺が 1 フィートの立方体の体積を表す表記で約 28.3 リットルに相当）中のパーティクル数の上限値。つまり、クラス 100 のクリーンルームとは、28.3 リットルに含まれるパーティクルの数が 100 個以下ということの意味する。
【空気線図】	乾球/湿球温度/露点温度、絶対/相対湿度、エンタルピーなどを記入し、その中から 2 つの値を求めることにより、湿り空気の状態が分かるようにした線図。

【クラス・中間クラス】	空気清浄度の等級。通常クラス1~9であらわされる。1.1から8.9まで最小区切りを0.1とした中間クラスを使用することも可能。対象となる粒径に対する空気1m ³ あたりの粒子数の上限がクラスによって決まっている。
【クリーン度の傾向管理】	クリーンルーム内の場所に応じた局所的なクリーン度がどのような時間変化をしているかをモニタリングし、制御すること。
【空気取り込み機構】	市販のパーティクルセンサにおいて、ポンプを用いて、環境の空気を取り込むのが一般的であるが、ヒータで空気の対流を起こす熱式の取り込み機構も存在する。
【櫛歯】	ミラーを振らせるために必要な静電引力を発生させる部位。可動櫛歯と固定櫛歯が交互に噛みあうようにミラーの両端に配置される。
【顕熱/潜熱】	冷凍空調において物質を冷却または加熱する場合、温度が変わる熱と変わらない熱。温度が上昇下降する時に変化する熱が「顕熱」。顕熱に対して蒸発、融解、凝縮、凝固など、状態が変化するだけで温度の変わらない熱が「潜熱」。
【原単位】	二酸化炭素排出量の算定に用いる排出係数
【現像】	形成したい形状に露光させたレジストから必要な部分以外を除去すること
【コロナ荷電】	気体中における針・平板などの電極配置で印加電圧を大きくすると、ギャップに不平等電界が発生し、高電界部の電界が局部的に破壊電界に達した時に電離が起きる現象のことをコロナ放電という。この際、電極からは印可電圧が正電圧なら正イオン、負電圧なら負イオンが周囲に向かって発散するため、誘電体膜に直接電荷を打ち込むことが可能となる
【コンプライアンス】	ばね定数の逆数
【高環境負荷プロセスガス】	半導体加工で用いられるCF ₄ 、C ₂ F ₆ 、C ₃ F ₈ 、C ₄ F ₈ 、CHF ₃ 、SF ₆ 、NF ₃ 等
【固有振動数】	物体に強制変位を与えて開放した場合、物体は一定の振動数で振動する。固有振動数は複数あり、それぞれ振動モードに対応する
【コータデベロッパ】	ウェハにレジストを均一に塗布(コート)する装置と塗布されたレジストを現像(デベロッパ)する装置
【細霧冷却】	コータとデベロッパが一体化しているものが多い 細霧冷却方法とは、夏季の暑い日に温室の温度を下げるための方式である。水を噴霧するノズルとファンから構成される。
【サンプリングレート】	ADCに於いて、アナログ信号を測定しデジタル信号に変換する間隔であり、測定の速さを表す。
【散乱・散乱光】	光が粒子等に当たり、その周囲の様々な方向に光が広がること。周囲に広がった光を散乱光という。また、周囲への光の広がり方は、光の波長に対する粒子のサイズで決まり、光の波長に対して、粒子の粒径が十分小さい場合レイリー散乱、同程度の場合ミー散乱、十分大きい場合は幾何光学に従う。
【SAM膜】	自己組織化単分子膜 (Self-Assembled Monolayer)。物質表面に自発的に化学吸着した単分子層膜。
【再構成フィルタ】	画像再構成の際に、対象物の周りのボケを低減するために行う画像フィルタ処理
【植物工場】	植物工場とは、環境及び生育のモニタリングを基礎として、高度な環境制御を行うことにより、野菜等の植物の周年・計画生産が可能な栽培施設である。植物工場には、完全人工光型と太陽光利用型がある。完全人工光型は、閉鎖環境で太陽光を用いずに栽培する設備である。太陽光利用型は、温室等において、太陽光の利用を基本とし、人工光による補光や夏季の高温抑制技術等を用いて栽培する設備である。
【硝酸態窒素】	土壌中の無機窒素は、アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素の3つの形で存在する。ただし、植物は硝酸態窒素だけしか、根から吸収して利用できない。通常、畑などにまかれた有機肥料の中の窒素成分は、当初アンモニア態窒素の状態である。アンモニア態窒素は、土壌中の硝酸菌(土壌微生物)の作用で、亜硝酸態窒素を経て硝酸態窒素に変換される。このため、硝酸態窒素になるまで時間が掛かる。一方、化学肥料(窒素)の場合には、最初から植物に吸収されやすい硝酸態窒素で利用される。
【焦電性】	強誘電体材料において温度上昇により自発分極が減少し、結晶表面に減少した分の電荷が発生すること。この特性を利用し、人体が発する熱を検知し人の存在を検知できる。人感センサとも呼ばれ広く普及している。

【真空紫外線】	120~160 nmの波長を持ち、大気圧下ではすぐに吸収されてしまうが、数 Pa 程度の低圧下において、軟 X 線よりも吸収率が大きい。
【4 面体要素】	連続体である物体形状を有限なサイズの 4 面体で分割した際の部分領域
【振動モード】	振動系の自由度によって決まる物体特定の振動形
【集中質点系モデル】	質量が 1 点に集中していると仮定している理想化したモデル。物体の変形などを無視している。
【人感センサ】	人感センサ（じんかんセンサ）とは、人間の所在を検知するためのセンサである。赤外線、超音波、可視光などが用いられる。
【蒸散】	植物内の水分が水蒸気として植物の外に排出される現象。気孔蒸散と表皮蒸散（クチクラ蒸散）があり、主に気孔の開閉によって排出量が調節される。
【JIS 規格 B 9920, Z 8122】	B 9920：クリーンルームの空気清浄度の評価方法が規定されている。 Z8122：クリーンルーム関連の用語が定義されている。
【蒸着】	金属や酸化膜などを蒸発させて、素材の表面に膜を形成する方法。
【ジャイロ】	物体の角度や角速度を検出するためのセンサ
【スパッタ成膜法】	薄膜形成技術のひとつ。真空チャンバー内に薄膜としてつけたい金属をターゲットとして設置し、高電圧をかけてイオン化させた希ガス元素（アルゴン等）や窒素を衝突させる。するとターゲット表面の原子がはじき飛ばされ、基板に到達して成膜することができる。また、真空チャンバー内にガスを導入し、これをはじき飛ばされた金属と反応させることによって化合物を成膜する手法を反応性スパッタ法と呼び、本研究における W03 成膜はこの方法に属する。
【垂直エレクトレット】	例えば、MEMS 技術により作製された櫛歯型構造の側壁へ蒸着した材料に、荷電をしてエレクトレットにしたもの。
【スキヤロッピング】	スキヤロップともいう。BOSCH プロセスで生じる、エッチング側壁のうねりのこと。
【スティッキング】	微細な構造体が基板や他の構造体に付着してしまう現象。
【選択的表面修飾】	ある基板（固体表面）に対し、異種材料の分子またはナノ粒子が、基板表面の材料および状態に応じ、選択的に配置・結合する現象または性質。たとえば無機材料基板上の希望の位置にタンパク質などの生体分子を配列する技術により従来にないデバイスの実現が可能となる。
【静電容量型】	動作原理に静電容量の変化を応用したもの
【精製窒素】	精製装置により窒素ガスの純度を高めたもの
【ソフトウェアアーキテクチャ】	ソフトウェアの内部構造、それらの外部特性、またそれらの相互関係、等
【多重反射】	一つの光線が構造物で複数回反射すること。ここでは、フォトダイオード表面にあるマイクロ構造で複数回反射することを意味する。
【耐摩耗プローブ】	摩耗特性に優れたプローブの総称。摩耗や損傷しにくい材質及び構造などを有するプローブを指している。
【ダイヤモンド構造】	MEMS 技術によって、センサ部の下部の Si 基板をエッチングすることで、薄膜化した構造。このような構造にすることで、熱容量が小さくなり、加熱が必要な半導体ガスセンサにおいては、ヒーターの消費電力を小さくすることができる。
【ダウンフロー】	FFU によって送り込まれた空気の流れ。FFU は天井に設置されており、床に向かって浮遊粒子を落としている。したがって、天井から床に向かって流れが生じるため、ダウンフローと呼ばれる。目的とする清浄度によるが、ダウンフローの流速は 0.3m/s 程度である。
【逐次比較型】	ADC の変換方式の一つ。他方式と比較して間欠的な測定に向くが、サンプリングレートを高くし難い。
【逐次サンプリング法】	空気清浄度の簡易な評価方法。一定量の空気を逐次サンプリングし、サンプリング空気中の微小粒子の累積個数を逐次サンプリング評価線図と比較して、清浄度クラスへの適合、不適合、サンプリング続行の判定をし、適合または不適合が判定された時点でサンプリングを終了する評価方法。

【中性粒子ビーム】	プラズマ中に含まれるイオンを加速し中性化アパーチャを通すことで得られる。通常のプラズマ（連続放電プラズマ）を用いても得られるが、パルスプラズマに含まれる負イオンを用いることで99%以上の高い中性化率が得られる。電荷を持たない粒子で加工するため、電界によってビーム粒子の軌道が影響されず、微細加工が可能である。ラジカルとは異なり、方向性と運動エネルギーを持っているために垂直加工が可能である。さらにプラズマとは異なり紫外線放射がほとんどないため、物質中に欠陥を生成しない。
【超低損傷エッチング】	一般的なプラズマエッチングでは異方性加工が可能であるが、電荷を持った粒子により加工を行うため、チャージアップによって加工対象に絶縁破壊などの損傷を与えることがある。また、プラズマ加工ではプラズマから照射される紫外線が物質に侵入し、化学結合を切断する（欠陥を生成する）。中性粒子ビームによって、これらの損傷をほとんど与えることなく加工が可能である。
【チップ・ツー・ウエハ 接合】	ウエハ上へのチップの接合。C2W 接合とも略される。
【徒長率】	徒長とは、植物の茎が不要に長く伸びた状態のこと。
【等方性エッチング・異 方性エッチング】	対象物のすべての方向に一樣な速度でエッチングが進むものを等方性エッチング、エッチング速度が方向によって異なるものを異方性エッチングという。
【透過画像】	X線を物体に照射し、物体を透過したX線の減衰係数の分布を、空間的に多数配置された検出器を用いて取得したもの。おおよそX線の減衰係数は物質の密度と相関があり、レントゲン写真のような2次元X線透過像のようなもの
【ドライコイル】	クリーンルーム内には、さまざまな生産機器が各所に配置され、発熱するタイプのものがある。そうした環境の中で緻密な温度管理を行うための設備。
【土壌灌水】	土壌灌水方法とは、土壌に水を注ぐ方法である。注水する水の量を制御することにより、トマトなどの果実の糖度を上げることが可能となる。
【ドメイン】	強誘電体材料において分極方向が一方向に揃っている領域。分域とも云う。
【軟X線荷電】	気体に波長が0.1~10 nmの軟X線を照射すると気体が電離し、生じたイオンや電子をバイアス電圧で分離して荷電を行うものである。
【ナノトライボロジー】	原子レベルの極微小なスケール領域におけるトライボロジー。摩擦や摩耗を扱う学問分野を総称してトライボロジーと呼ぶ。接触面積数10nm~数nmの極微小なトライボロジーにおいては、超潤滑現象を始めとするこのスケール特有の現象が観測され、その評価技術の確立及び挙動モデルの構築が求められている。
【Ni電鍍】	電気による化学反応によって電着する技術で、金属溶液の電気分解によりマスター盤に所望の厚さの金属を析出させ電着させた後、この電着層を母型から剥離し、金型または製品・部品として用いられることを指す。なかでもNi電鍍が主流で、レコードの原盤作成等のスタンパーとして用いられる。近年では光ディスクや半導体等でも用いられる古くて新しい技術である。
【熱源】	空調設備に必要な冷水や温水を製造する設備。冷熱源設備としては、蒸気圧縮冷凍機、吸収式冷凍機、吸着式冷凍機、ターボ冷凍機などがあり、温熱源設備としては、ボイラーなどがある。
【熱拡散・ドープ・ドー プ層】	シリコン表面に熱をかけ、リンやボロンなどの不純物を拡散させること。また、シリコン表面に不純物が拡散されている領域をドープ層という。
【熱酸化】	酸素を加えながら、シリコンウエハに熱を加えてシリコンの表面を酸化すること。
【ネットリスト】	電子回路における端子間の接続情報
【パーティクル】	クリーンルームやクリーンブース、ベンチ内の目に見えない微小なゴミ・チリ・ホコリ。
【半導体ガスセンサ】	WO ₃ , Sb ₂ O ₃ , ZnOなどの金属酸化物半導体の表面でのガスの吸着・反応による電気抵抗の変化を利用して、ガスを検知するセンサ。検知膜の材料、補助触媒等の添加、動作温度等を最適化することにより、様々なガス種の検知に対応することができ、小型・高感度・低消費電力・低コスト・長寿命等の特徴を持つ。
【配向性】	薄膜において基板面上方へ成長する結晶軸の分布度合い。完全配向では結晶の軸が揃っている。

【発塵量】	クリーンルーム内の装置や作業から生じるパーティクルの量。人が出入りすることでクリーンルーム内の発塵量は変化する。変化する発塵量に応じてFFUを制御し、クリーンルームの消費電力を抑えるということがコンセプト。
【ハードスプリング効果】	構造で規定される機械的なばね定数よりも実効的にばね定数が高くなること
【バブラー】	乾燥したガスを水の中を通過させることで、ガスを加湿する装置。バブラーを通過した後のガスはバブラーの温度における飽和水蒸気量の水分を含んだガスとなり、バブラーの温度を制御することで、ガスの湿度を制御することができる。
【バルクシリコン】	通常のシリコンデバイスに用いる単結晶シリコンウェハをSOIウェハと区別してバルクシリコン（あるいはバルクシリコンウェハ）と呼ぶ。
【パーティクル・浮遊粒子】	個体または液体の粒状小物体と定義される。インダストリアルクリーンルームにおいて、ワークから生じる金属粒子、人から生じる皮脂等が主な測定対象パーティクルとなる。クリーン度の分類は、0.1~5 μmの範囲における粒径以上の累積個数濃度によって行われる。
【パーティクルセンサ・パーティクルカウンタ】	パーティクルの数・粒径をはかるための計測器。市販のものは空気中のパーティクルに光をあて、その散乱光からパーティクルの数・粒径を算出する光散乱式が採用されている。
【非鉛系強誘電体】	代表的な強誘電体材料であるPZTは主成分として鉛(Pb)を含んでいるが、鉛を含まない強誘電体材料のこと。非鉛系強誘電体材料としてはバナチウム酸バリウム(BaTiO3)やニオブ酸カリウム-ナトリウム((K, Na)NbO3)がある。近年鉛を含む家電製品等の廃棄処理に対して環境問題が懸念され、非鉛系強誘電体材料の開発が関心を集めている。
【拡がり抵抗顕微鏡・SSRM】	Scanning Spread Resistance Microscope。試料にバイアス電圧を印加し、導電性探針を通して流れる電流を計測することで、試料の抵抗分布を計測する方法。
【ビーム（トーションビーム）】	ミラーの両端に対称に配置され、ミラーの回転軸となる。
【PFCガス】	Perfluorocarbonガス。半導体工場においてエッチング剤や洗浄剤として使用されているガスで、高い温暖化係数を持つ。CF4、C2F6、C3F8、C4F8、CHF3、SF6、NF3。
【フリークーリング】	フリークーリングとは、外気温度の低い冬期に冷却塔単独で空調や生産装置の冷却に使われる冷水を製造するシステムのこと。冷凍機を用いずに冷水を作ることができるため大きな省エネルギー効果が期待できる。
【冬季暖房】	冬季暖房方法とは、冬季の外気温が低くなったときに、温室を暖房する方法である。暖房装置としては、温風ボイラー、ヒートポンプなどがある。
【フェムト秒レーザー】	レーザーの種類で、パルス幅がフェムト秒オーダー、波長800nmのレーザー。透明材料の内部加工ができる。
【フォトリソグラフィ】	感光性物質を塗布した物質の表面に特定のパターンを持った光を当てることで、光が当たった部分と当たっていない部分のパターンを表面に形成する技術。
【不純物ドーピング】	半導体の電気特性を変化させるために不純物を添加すること
【浮遊容量】	半導体間の相互作用により発生する意図しない容量成分
【雰囲気流体】	物体周辺の気体（雰囲気）を流体としての扱う場合の、流体
【プローブリソグラフィ】	nmサイズの微小プローブ先端直下で試料表面の電気化学反応を誘起し、固体基板表面に微細パターンを描画する技術の総称。 陽極酸化反応による金属・半導体表面への酸化膜パターン形成のほか、有機分子膜へのパターン描画等の実例もある。 次世代ローコスト&微細リソグラフィ技術として期待されている。
【プローバ】	ウェハ上の電極へ電気探針を当てる装置
【プラズマ表面活性化接合】	固体表面をAr, O2などのプラズマにて活性化した接合。低温で異種材料の接合が可能となる。
【ペルチェ素子】	2種類の金属の接合部へ電流を流すと、金属間で熱が移動する現象を利用した素子。一方の面で発熱、他方の面で吸熱が生じるため温度制御素子として広く使われている。
【補光照明】	補光照明方法とは、冬季の日射量が少ない場合に、人工光にて日射量を補う方式である。人工光としては、ナトリウムランプやLEDが利用される。

【ホットエンボス】	型を用いて樹脂材料などを加熱及び加圧して成型する技術。
【ボッシュプロセス】	シリコンの深堀エッチング技術。エッチングと側壁の保護を交互に行いながら高アスペクト比のエッチングを行うことができる異方性エッチング法。
【ポリウムメッシュ】	物体の内部構造をポリゴンで表したもの
【ポリマー(PMMA など)】	2つ以上のモノマーが重合反応してできる化合物で、多数のモノマーが数多く連なって形成された高分子をいう（透過性の高いポリマー材料であるアクリル樹脂 (poly methyl methacrylate)）。ポリマー材料は、①大変位（ヤング率が小さい。シリコンの約 1/50）、②非脆性（壊れにくい）、3D 微細加工の容易性などの特徴を持つ。
【ポリゴン】	一般的には、多角形を表す。ここでは特に、3次元形状を4面体の組み合わせによって表すときの各4面体要素。
【マスフローコントローラー】	流体の質量流量を計測し流量制御を行う機器。流体の流量計測には主に“体積流量”と“質量流量”が用いられているが、質量流量は、流体の質量（重さ）を計測する事により、環境温度や使用圧力等の変化による補正を行う必要がなく、半導体プロセスをはじめ、高精度な流量計測・制御を要求されるプロセスにおける流量制御機器として幅広く使用されている。
【マルチプローブアレイ】	マルチプローブがアレイ状に配列されている状態。 プローブの先端に複数の機能部を有するマルチプローブがアレイ上に並んでいるものである。高スループットが期待できるため、プローブリソグラフィなどへの応用が盛んに研究されている。
【Marching Cubes 法】	コンピュータグラフィックスのアルゴリズムのひとつ。スカラーデータで埋まった等方向3次元ボクセルデータを、ポリゴンデータに変換するアルゴリズム
【マスク】	マスクの有無により加工の選択比の違いを利用した加工に用いる
【ミー散乱】	光の波長に対し、光が当たる対象となる粒子のサイズが同程度の場合の散乱現象。本研究では、ミー散乱が支配的な散乱現象となる。
【迷光】	機器内での屈折や反射等で予期せず発生した光線のこと。
【メディアンフィルタ】	局所領域における濃度値を小さい順に並べ、真ん中にくる濃度値を領域中央の画素の出力濃度とする処理
【ヤング率】	弾性範囲で単位ひずみあたり、どれだけ応力が必要かの値を決める定数
【有効bit数(Effective Number Of Bits: ENOB)】	ADCに於いて、雑音・入力周波数を考慮した有効分解能であり、測定の正確さを表す。
【ユースケース図】	システムには、どのようなアクタ（利用者）が存在するのか、それぞれのアクタはこういった操作（ユースケース）をするのかを記述した図
【ユーティリティ】	クリーンルーム内で共通で利用される設備。圧縮空気、バキュームライン、空調、等
【養液土耕】	培地に土やロックウールを利用し、水に肥料を溶かした養液を用いて栽培すること。
【ライフサイクルアセスメント】	Life Cycle Assessment (LCA)。製品やサービスに対する資源の採取から製造、使用、廃棄、輸送などすべての段階（ライフサイクル）を通して、投入資源あるいは排出による環境負荷を定量的、客観的に評価（アセスメント）する手法である。
【リン酸吸収係数】	土壌にはリン酸を吸着して無効化する性質があり、その強さを表わすのがリン酸吸収係数である。リン酸吸収係数が大きい程、リン酸を吸着し無効化する性質が大きくなり、リン酸が作物に利用されにくい。
【流量センサ】	ここでは、MEMS カセンサを用いた流量センサを想定。流路の上流と下流の圧力差をカセンサで計測し、圧力差から流速を算出。流路の断面積をかけることで流量が求められる。
【リバースエンジニアリング】	一般的には、出来上がったものの観察や動作解析により製造方法や動作原理、設計情報を調べること。ここでは特に、出来上がったものの形状をCAD形式のデジタルデータにすること
【冷却塔】	冷却塔とは、水などの熱媒体を大気と直接または間接的に接触させて冷却する熱交換器の一種で特に屋外に設置する設備。
【冷却水ポンプ】	冷却水ポンプは、冷凍機（ターボ冷凍機・冷温水発生機）で冷房時に発生する熱を冷ます為の冷却水を冷却塔に循環させるポンプ。

【冷水ポンプ】	冷水ポンプは、冷凍機で製造した冷水を外調機などの空調設備に送るポンプ。
【冷水・冷却水一定流量制御】	冷凍空調負荷に関係なく一定流量でポンプを運転する制御方式。
【冷水・冷却水変流量制御】	冷凍空調負荷に応じて流量を減らすことにより搬送動力の削減を図る制御方式。流量を削減する方法としては、インバータなどによりポンプやファンの回転数を下げる方法や絞りやダンパによって流路の抵抗を大きくする方法がある。
【レシピ】	装置の制御情報
【レジスト剥離液】	レジストを剥離するための溶液
【六フッ化硫黄】	常温大気圧において化学的に安定度の高い無毒、無臭、無色、不燃性の気体。100年間の地球温暖化係数は、二酸化炭素の 23,900 倍と大きく大気中の寿命が長いため、京都議定書で削減対象の温室効果ガスの 1 つに指定された。

I. 事業の位置付け・必要性について

1. NEDO の関与の必要性・制度への適合性

1.1 NEDO が関与することの意義

MEMS 技術は、自動車、各種製造機器、情報機器、通信機器、セキュリティ、バイオ、医療環境などの広範囲な分野において、わが国の産業競争力強化に貢献している。現在 MEMS は高集積化・複合化による高機能化・低コスト化を推進し、その役割を拡大させようとしている。(図 I-1.1-1)

一方で、経済がグローバル化し、コスト・質という面で多くの国が我が国と競争可能になっている現在、我が国優位な競争力を今後も維持していくためには、イノベーションを促進することが非常に重要であり、電子部品・デバイスの小型化・高性能化に大きく寄与している MEMS 技術は、その有力な手段である。そうしたことから、社会にイノベーションを起こし、将来の社会に革新的インパクトを与え、新たなライフスタイルを創造する未来デバイスの開発が不可欠である。そして、この未来デバイス実現のキーとなるのが、従来の延長線上ではない、不連続な進歩（ジャンプアップ）が期待される創造的な研究開発であり、わが国のお家芸である微細加工技術と近年進展著しいナノテク、バイオとの融合であるプロセスインテグレーションや、従来の半導体製造技術の応用ではなく高速、低コストで連続形成可能な新たな製造技術である。このため、将来の第 3 世代 MEMS である革新的次世代デバイス（BEANS : Bio Electromechanical Autonomous Nano Systems）の創出に向けた新たな基盤的プロセス技術群を開発し、プロセス技術群のプラットフォーム化を確立することを通じて、わが国産業の国際競争力の強化を目指すとともに、新たな産業化を促進するための環境整備を行う必要がある。「異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト」（以後、BEANS）は、20 年後の社会の国家的課題である「環境・エネルギー」、「医療・福祉」、「安全・安心」分野で新しいライフスタイルを創る革新的デバイスを創製するために必要となる、トップダウンである微細加工プロセスとボトムアップであるナノ・バイオプロセスとを融合させたマイクロ・ナノ統合製造技術の確立を狙いとする世界でも類を見ない壮大で挑戦的な試みであり、NEDO が関与する意義が高いと考える。

今回の事後評価の対象テーマである、BEANS の研究開発項目⑤「高機能センサネットシステムと低環境負荷型プロセスの開発」（以後、G デバイス）は、全世界的課題として環境エネルギー問題への対応が国や産業毎に強く要請されている中、平成 21 年度補正予算（第 2 号）「明日の安心と成長のための緊急経済対策」を実施するために措置された「環境・エネルギー技術への挑戦」に位置付けられた事業であり、NEDO はこれに早期に対応すべく BEANS に追加して緊急に実施したものである。研究開発期間は平成 22 年 3 月から平成 23 年 3 月の約 1 年間、予算額は 33.1 億円であった。

進化するMEMSデバイス 第3世代MEMS:BEANS



図 I-1.1-1 第3世代MEMS: BEANSの位置付け

(Bio Electromechanical Autonomous Nano Systems :

異分野融合型次世代デバイス及びその製造技術) 出典 (財) マイクロマシンセンター

1.2 実施の効果

BEANSの成果を活用した革新的次世代デバイスとして超小型高感度センサがあげられるが、この超小型高感度センサは、我が国の産業が今後発展すると期待される分野である医療・バイオ、環境などに不可欠であり、幅広く活用・搭載されることで製品に競争力を与えるものであり、経済再生への貢献は大きい。BEANSで開発する新規製造技術は、MEMSの機能を飛躍的に向上させ、グルコースモニタや膵島細胞移植などの成人病治療に貢献し、全自律分散電源や超高感度センサによるセンサネットワークの実現が可能となり、安全・安心・快適な生活をもたらす新たな産業の創出が期待される。

今回の事後評価の対象テーマである、Gデバイスでは、BEANSで開発したプロセス技術等を活用しつつ、高機能センサネットワークシステム・センサモジュールの実用化と、低環境負荷型製造プロセスの確立に向けた開発・実証研究を行うことにより、BEANSの早期の実用化が期待できる。

2. 事業の背景・目的・位置づけ

図I-2-1のMEMS産業・技術ロードマップで示すように、MEMSは自動車、各種製造機器、情報機器、通信機を中心に広範囲な分野において現在の小型・高性能単機能

デバイスが既存部品を置き換えた第1世代から、2010年を目指し高集積化・複合化による多機能デバイスの創出を狙う第2世代 MEMS の研究開発へと移行している。そして2015年以降2025年に向けて、革新的イノベーションを起こし、更なる市場の拡大を図るには第3世代 MEMS の実現が望まれる。

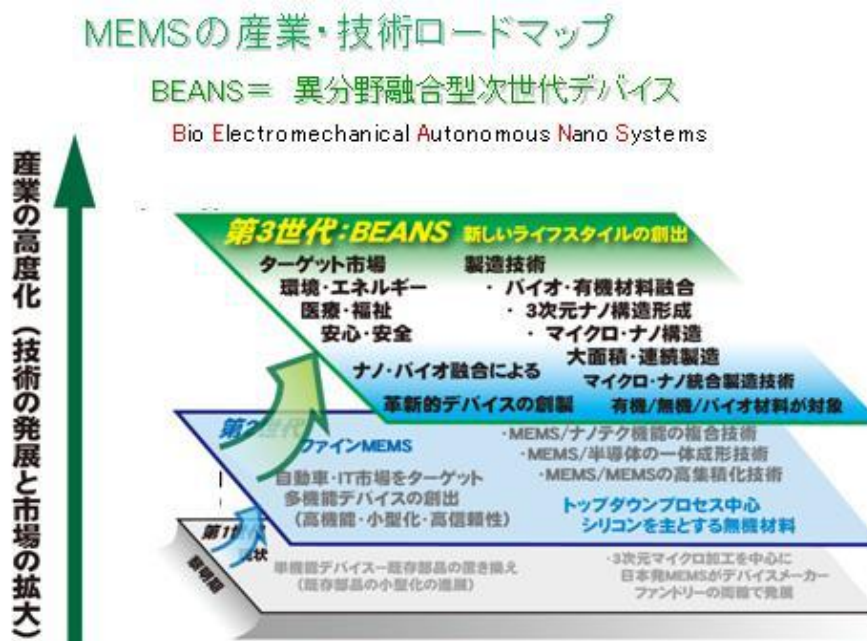


図 I-2-1 MEMS 産業・技術ロードマップ
(財) マイクロマシンセンターの資料を基に NEDO 編集

また、図 I-2-2 に MEMS 技術のロードマップを示す。ここでは、今後、ユビキタスセンサネットワークデバイスなどに貢献する革新的 MEMS の開発が求められており、BEANS の使命である、新しくライフスタイルを創出する革新的デバイスを創製するために MEMS の異分野技術を融合したプロセス技術群を開発することと合致している。

MEMS分野の導入シナリオ

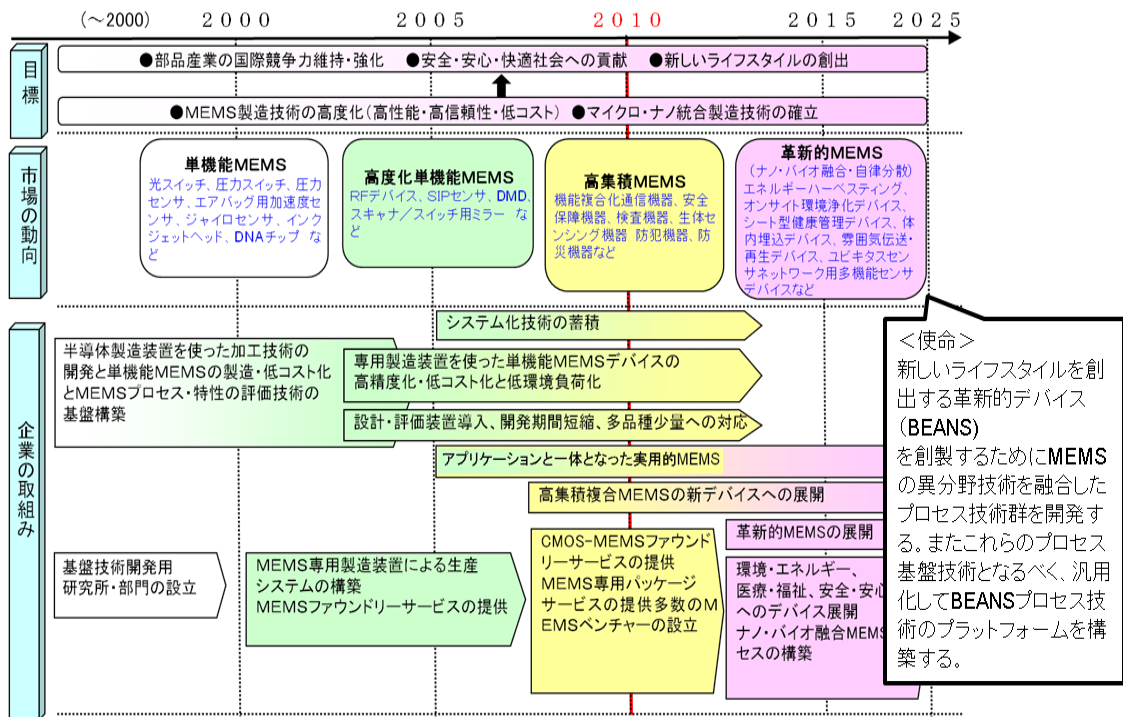
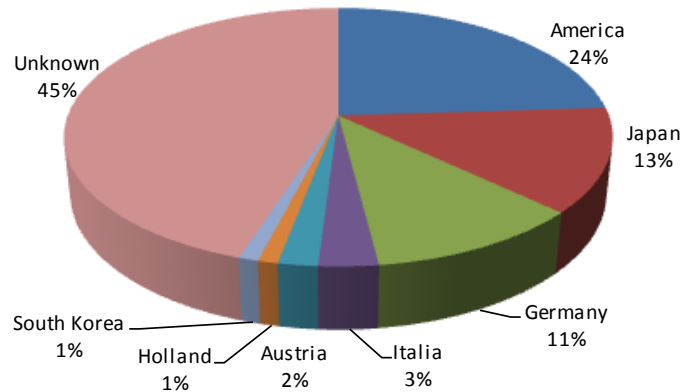


図 I-2-2 MEMS 技術ロードマップ

また、国のプログラムにおける位置付けについては、経済産業省「ロボット・新機械イノベーションプログラム」に BEANS が位置付けられており、プログラムの達成目標である「我が国製造業の高度化に必要な不可欠な基盤技術である機械分野においては、バイオ技術や IT 技術などの異分野技術を活用した従来の機械の概念を超えた新しい機械の創造及びその計測技術の確立を図ることを目標とする。例えば、2015 年頃に革新的 MEMS の本格普及を目指すことにより、安全・安心な社会の構築に貢献する。」に対して、BEANS では、①異分野融合による革新的 MEMS の実現、②途中段階でも実用化が可能な研究成果については、スピンアウトし実用化を促進、③健康・医療への応用、という面において上位のプログラムの目標達成に貢献できる。

海外動向については、図 I-2-3 に示すように、日本は、センサ・MEMS では、世界トップクラスのシェアを占めつつも、欧米各国と激しい競争が行われている。また、今後のセンサ・MEMS 市場の成長については、大きく伸びることが予想され、G デバイスを実施することによって、BEANS で開発したプロセス技術等を活用し、成果をいち早く創出することで国際競争力強化に資することが出来ると考えられる。

世界シェアTop20のメーカーの占める世界シェアを国別に整理
(2010)



Databeans の資料をもとにNEDOが作成

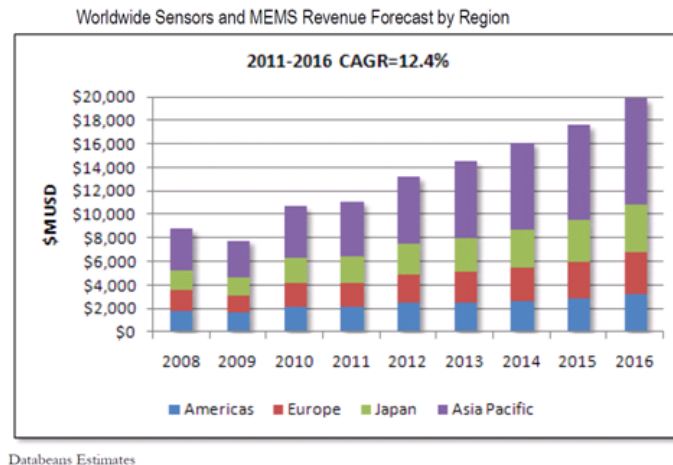


図 I-2-3 センサ・MEMS のシェアと市場成長予測、出展：Databeans, Inc.

その様な中、全世界的課題として環境エネルギー問題への対応が国や産業毎に強く求められ、BEANS の研究開発項目⑤として G デバイスを平成 21 年度補正予算で約 1 年間実施した。

事業の背景として、工場等の製造現場において、原材料や使用資源のきめ細かい状況モニタリングと制御を行う微細・極小、高機能なセンサの実用化により、製造プロセスの省資源化、高効率化の実現が期待されている。小型で低コスト、かつ信頼性の高いワイヤレスセンサとすることで、設置にあたっての大がかりな工事を必要とせず、既存施設にも低コストでの導入が可能となる。合わせて、センサの製造において低環境負荷型の製造プロセス技術の開発を行うことで、生産システムの低炭素化にも貢献が可能となる。

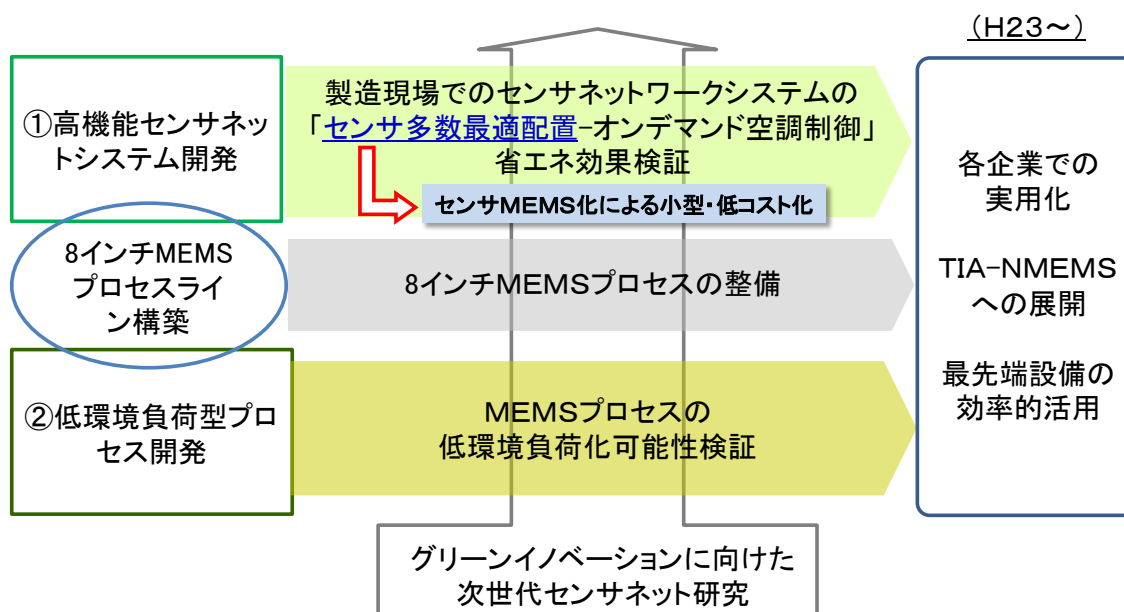
そこで、G デバイスは BEANS で開発したプロセス技術等を活用し、高機能センサネットワークシステム・センサモジュールの実用化と、低環境負荷型製造プロセスの確立に向け

た開発・実証研究を目的として実施した。具体的には、センサネットにより全ての機器類の消費電力等を「見える化」して、将来の省エネ社会に役立てようとするものであり、特に、消費電力が大きいと考えられる MEMS 関連のクリーンルームにセンサネットを張り巡らし、省エネを図るという近未来のエネルギー問題に先鞭を付けるものである。

II. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

「異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト」(以後、BEANS)のうち、今回の事後評価の対象である研究開発項目⑤「高機能センサネットワークシステムと低環境負荷型プロセスの開発」(以後、Gデバイス)は、MEMS技術戦略マップ2010のロードマップを踏まえつつ目標を設定して実施した。図II-1-1に示すように、高機能センサネットワークシステム開発として製造現場に多数のセンサを配置したセンサネットワークシステムを構築し、空調制御することで省エネ化の有効性や、多数配置可能なMEMSセンサ端末課題の把握を行うことと、MEMSプロセス自体の低環境負荷化を目標とした。そのための製造環境(大口径MEMSプロセスラインなど)の整備や、大口径MEMSプロセスの開発等を行った。大口径MEMSプロセスラインの整備は、我国の研究開発拠点(つくばイノベーションアリーナ(TIA-NMEMS))への展開も可能である。



図II-1-1 Gデバイス グリーンイノベーションにおける目標・実施内容の位置づけ

① 高機能センサネットワークシステム開発

検証用のクリーンルームにおいて、従来比(1990年比)CO₂削減60%のセンサネットワーク制御システムを開発する。また、一辺30mm、厚み10mm以内に複数のMEMSセンサと処理回路、無線回路、エネルギーデバイスとの融合を想定したセンサモジュールプラットフォームを作製する。

これらの取り組みや目標に関してはMEMS技術戦略マップ2010の応用事例としてその重要性が取り上げられ、既存の半導体クリーンルームで未達成のCO₂削減量であり、複数のセンサ機能を搭載したモジュールを目標サイズで達成した例はない。

② 低環境負荷型プロセス技術開発

シリコン貫通深掘り加工において、温室効果ガス排出量削減に向けて、温暖化係数の高いSF₆ガスに対し、複数の代替候補ガスを調査・検討し、温暖化ガス排出量を90%以上削減可能とする最適代替ガスの選定指針を得る。また高機能デバイス薄膜の集積化に関し、250℃以下で大気圧付近から真空中で封止できる接合方式を決定する。さらに生体適合性ポリマーの機械特性などの数値を求める。

深掘りエッチングにおけるSF₆の代替ガスや低温接合によるフレキシブル集積化は従来から課題視されていたものの未達成領域であり、ポリマーのMEMS化を含めMEMS技術戦略マップ2010のロードマップ数値をクリアすることを狙いとする。

大口径MEMS用試作ラインにて、センサ用途等TEGの設計および試作を複数種類行い、歩留まり、生産性につながるデバイスの動作を妨げる製造装置、製造プロセス、デバイス構造起因の欠陥・ばらつき等の課題を抽出する。異分野融合型次世代デバイス製造技術プロジェクトの研究開発項目「3次元ナノ構造形成プロセス技術開発」の成果である中性粒子ビームエッチングをセンサTEGに適用し、デバイス性能への効果を検証する。

設計・計測・ファブ環境情報において共有化する情報を類型化し、データ共有化のためのデータフォーマット、それに付随する基本ソフトウェアの開発を行い、MEMS-TEGを用いてデータ交換および設計手法の検証を行う。また、クリーンルームおよび製造・検査装置に関わる消費エネルギー、CO₂排出量など環境情報の収集管理の方法を決定する。

2. 事業の計画内容

2.1 研究開発の内容

基本計画に示す研究開発の内容は、以下のとおりである。

(1) 高機能センサネットワークシステム開発

大口径MEMS用クリーンルームにおける各製造・評価装置や空調、純水製造等の周辺装置の消費エネルギー、温度、圧力、風量、異物粒子、ガスなどをセンシングすることにより、省資源、高効率に最も適した集積化センサチップ及びセンサネットワークシステムを検証し、省エネルギー、低炭素化などに関する効果を分析するための、センサネットワークシステムを試作する。

また、低環境負荷型及び異分野融合型次世代デバイス製造技術で開発したプロセス技術を活用した高機能集積化センサチップの開発に向け、ワイヤレス通信、エネルギーのワイヤレス自立、小型・薄型化と、エネルギー、温度、圧力、風量、異物粒子、ガスなどの高感度センシング機能、新たなセンシング原理を開発し、これらの数値を収集する。

この内容を受けて取り組んだテーマは以下の通りである。

1) 8 インチ MEMS クリーンルームセンサネットワークシステム開発

産総研つくば東事業所に新設した 8 インチ MEMS 用クリーンルームをセンサネットワークの実験場として、各製造・評価装置や空調装置、純水等の周辺装置の消費エネルギー、温度、圧力、風量、異物粒子、ガスなどを現状のネットワークシステムと現状のセンサ群の多数配置によるきめの細かいセンシングネットワークシステムを試作・検証した。

その結果、エネルギー消費量 60%削減を含め、フィードバック制御を想定した省資源、高効率生産に最も適したセンサネットワークシステムのあるべき姿を示した。

2) 8 インチ MEMS プロセスライン及びクリーンルームの構築

異分野融合型次世代デバイス製造プロセスの実証及び集積化 MEMS センサデバイスの試作を可能にする 8 インチシリコンウェハベース MEMS ラインを産総研つくば東事業所内に構築した。また、これをセンサネットワークシステムの実験場として活用した。

装置には、MEMS/LSI の前工程から後工程、評価までカバーする一貫ラインとして、ウェハの洗浄、リソグラフィ、拡散、酸化、成膜、エッチングから、接合・封止、デバイスチップ切断、実装用配線、さらに、デバイス表面及び内部の形状評価までを実施する装置を導入した。

3) 植物工場センサネットワークシステムの開発

東京農業大学内に植物工場を新設し、そこをセンサネットワークシステムの実験場として、野菜の育成状況を温度、湿度や照度と植物工場の稼働に必要な消費エネルギーを現状のネットワークシステムとセンサ群を多数配置し、きめ細かなセンシングネットワークを試作・検証することにより、省資源、高効率生産に最も適したセンサネットワークシステムを検証した。

4) 高機能センサモジュール技術開発

自立型ワイヤレス MEMS センサ端末に関し、モジュール試作及び想定モジュールのプラットフォームを検討した。センサ（温度、湿度、圧力、加速度など）の追加、差し替え可能なプラットフォームモジュールに関する課題を明確化した。

さらに、自立型ワイヤレス MEMS センサに必要なセンサ処理 LSI の低消費電力化の検討と試作を行った。

また、新たなセンサデバイス原理の可能性を検討する目的で以下を実施した。

- (i) 異分野融合型次世代デバイス製造技術開発の実証 ナノ構造ガスセンサ
- (ii) 異分野融合型次世代デバイス製造技術開発の実証 低消費電力センサ・無線モジュールへの検討

- (iii) パーティクルセンサの MEMS 化
- (iv) 汚染ガスセンサ
- (v) 振動発電を中心とした小型高効率発電デバイス
- (vi) センサ用パワーマネジメントデバイス
- (vii) 位置推定センシング原理
- (viii) 高感度温度センシング用機能薄膜

(2) 低環境負荷型プロセス技術開発

シリコン貫通深掘り加工において、温室効果ガス排出量削減に向けて、温暖化係数の高いSF₆ から代替ガスへの切り替えと、エッチレート高速化によるガスの消費量低減およびエネルギー消費効率の向上など環境負荷の小さい高効率なエッチングプロセスの開発をする。

また、ウェハ・ツー・ウェハとチップ・ツー・ウェハ技術を組み合わせて、ウェハサイズ、チップサイズ、チップ厚さに関わらず、様々な異種デバイスをウェハレベルで一括集積化する技術も開発する。さらに、従来のシリコンに比べ高い機械特性を有するポリマー材料を使ったMEMSを開発するとともに、従来のシリコンMEMSと異種材料MEMSとの多層集積化技術を開発し、環境負荷低減プロセスを提示する。

さらに本プロジェクト成果のデバイス機能検証のためのTEG(Test Element Group)ウェハを設計開発及び試作すると共に、大口径TEGのデバイス・プロセス設計及び試作を行う。

3次元構造かつ可動部から構成される高機能センサ製造に不可欠となる設計—検査間の情報共有化フレームワークを構築し、そのフレームワーク上でマスク、3次元構造、及び機械的・電気的特性に関する設計情報を製造・検査に利用するだけでなく、非破壊検査装置の計測データを設計にフィードバックし、歩留まり・品質、スループットの向上を図るとともに、製造設備の電力使用量や温室効果・有害ガスの排出量などのデータを活用し、デバイス設計時から環境負荷を考慮した情報共有化技術を開発する。

これらを受けて以下の取り組みを実施した。

超小型・低コスト集積化 MEMS 開発に向けた低環境負荷型製造プロセス技術に関して以下の開発課題に取り組んだ。

1) 低環境負荷ポリマー・センサ融合プロセス技術開発

従来のシリコンを中心とする無機ドライ材料に加え、有機材料の持つ特異な機能を活かす融合プロセスに関して、特にアクチュエータ MEMS の性能予測が可能なシミュレーション技術及びナノインプリントによる製造プロセスの開発を行った。

2) スマートプロトタイピング技術開発

新設した 8 インチ MEMS プロセスライン活用のためにプロセス条件の確立、レシピの整備等、プロセスプラットフォームの構築が重要となる。特に、異分野融合型次世代デバイス製造プロセスの実証及び集積化 MEMS センサデバイスの試作が可能となるよう、以下の開発課題に取り組んだ。

①シリコンベースセンサ TEG の試作

8 インチ MEMS プロセスラインの各装置の要素プロセスの検討及びセンサ TEG の試作を行った。

②異分野融合型次世代デバイス製造技術を適用したデバイスの作製

(i) 中性粒子ビームエッチング技術をセンサ TEG の製造プロセスに適用し 8 インチ化によるウェハ内の特性ばらつきを検討した。

(ii) 新構造マルチプローブ作製及びナノトライボロジーの評価の研究成果を実証するため、マルチプローブの特性ばらつきの抑制、先端部サブミクロンサイズの試作、マルチプローブ評価装置導入による形状・特性のばらつきを評価した。

③欠陥・ばらつき評価におけるモデリング・計測技術の開発

8 インチ MEMS プロセスライン等で作製するセンサ TEG を設計し、製造、評価を経て得られた情報を収集・整理した。デバイス特性の欠陥やばらつき、更には電気的特性への影響要因について、等価回路モデルを活用してモデリング化し、デバイス特性のばらつき要因等を特定する評価手法を開発した。

3) 低環境負荷型深堀エッチング技術開発

シリコン深堀エッチングにおける低環境負荷化への取り組みとして、基本計画に基づき、SF6 排出量 90%削減に向けた代替ガスの選定指針の検討、リアルタイムモニタリングによるエッチングの高効率化、フィードバック制御手法を用いたエッチング最適化に関し検討した。

4) 低環境負荷型集積化プロセス基盤技術開発

MEMS 集積化に不可欠なチップ、ウェハ接合技術の低環境負荷化として、250°C以下の低温接合を基本として、一括集積化のための 1/10 強度の仮接合技術についての表面粗さ、表面改質の検討、による本接合における機能膜の活用などについて検討した。

5) スマートファブシステム技術開発

①MEMS 固有の 3 次元構造の設計・計測情報の共有化技術

形状計測データ等を設計ツールで利用するためのデータ変換技術の課題抽出、プロセスレシピ・動作特性などを登録・参照できる MEMS 統合設計データベースシステムの基盤を構築、設計・計測データ、MEMS 統合設計データベース、MEMSONE 等の設計ツール等と連携して活用するための情報共有化フレームワークの要求仕様

を作成した。

②スマートファブ環境情報共有化技術

最先端 8 インチ MEMS プロセスラインでの MEMS 製造装置の電力使用量、およびガス使用量などの環境情報を収集する仕組み、収集された環境データを基に環境負荷を算出する手法の確立、環境負荷データ共有化データベース基盤の構築、MEMS 製造プロセスに用いられる主要な 30 種の原材料、作製されたセンサ TEG の環境負荷算出に必要なデータを収集した。

(1)、(2) を通じた全体の開発計画を以下に示す。

事業項目	H22年度				
	H21年度 4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
(1) 高機能センサーシステム開発					
1) MEMSクリーンルームセンサーシステム開発		センサーネットワーク・制御システム構築検討	センサーネットワーク・制御システム試作・効果検証		センサーネットワーク・制御システム試作・効果検証
2) 8インチMEMSプロセスライン構築		設備仕様検討	設備導入・設置		次世代オンデマンドシステムの検討
3) 植物工場センサーネットワークシステム開発		センサーネットワーク構築検討	設置		センサーネットワーク効果検証
4) 高機能センサーモジュール開発		仕様検討		試作	評価
・自立型複数センサーモジュール開発				試作	評価
・低消費電力LSI開発					
・新センサーデバイス原理検討					
BEANS適応センサーデバイス					
他センサーデバイス					
			ナノガス、低電力デバイス原理検討		
			デバイス原理検討(パーチクル、汚染ガス、小型発電、パワーマネージメント、位置推定、温度センサー用機能薄膜)		
(2) 低環境負荷型プロセス開発					
1) 低環境負荷ポリマー・センサー融合プロセス技術開発			原理、特性検討		試作
2) スマートプロトタイプセンシング技術開発					
・シリコンベースセンサーTEG試作		設計検討	事前試作		8インチライン条件出し試作・評価
・BEANS適用デバイス試作		設計検討	予備試作等検討		8インチライン条件出し試作・評価
・欠陥・ばらつきモデリング、計測技術開発		構想検討			評価検討
3) 低環境負荷型浸堀エッチング技術開発			代替ガス調査選定		
					プラズマモニタリングエッチング効率化
4) 低環境負荷型集積化プロセス基盤技術開発			接合強度制御、気密封止検討		
			機能膜を劣化させない低温接合検討		
5) スマートファブシステム技術開発					
・3次元構造の設計・計測情報の共有化		構想検討			データ収集、情報共有化検討
・環境情報共有化		構想検討			データ収集、情報共有化検討

2.2 研究開発の実施体制

研究開発項目⑤「高機能センサネットシステムと低環境負荷型プロセスの開発」（以後、G デバイス）は、「異分野融合型次世代デバイス研究開発プロジェクト」（以後、BEANS）の下に H21 末-22 年度に追加実施されたものであり BEANS 推進体制（図 II-2.2-1）のなかで取り組んだ。

拠点として、本部（秋葉原）、研究拠点 G デバイスセンター（産総研つくば東事業所内）と G デバイスセンター関西（立命館大学びわこ草津キャンパス内）の 3 か所を設け実施した。

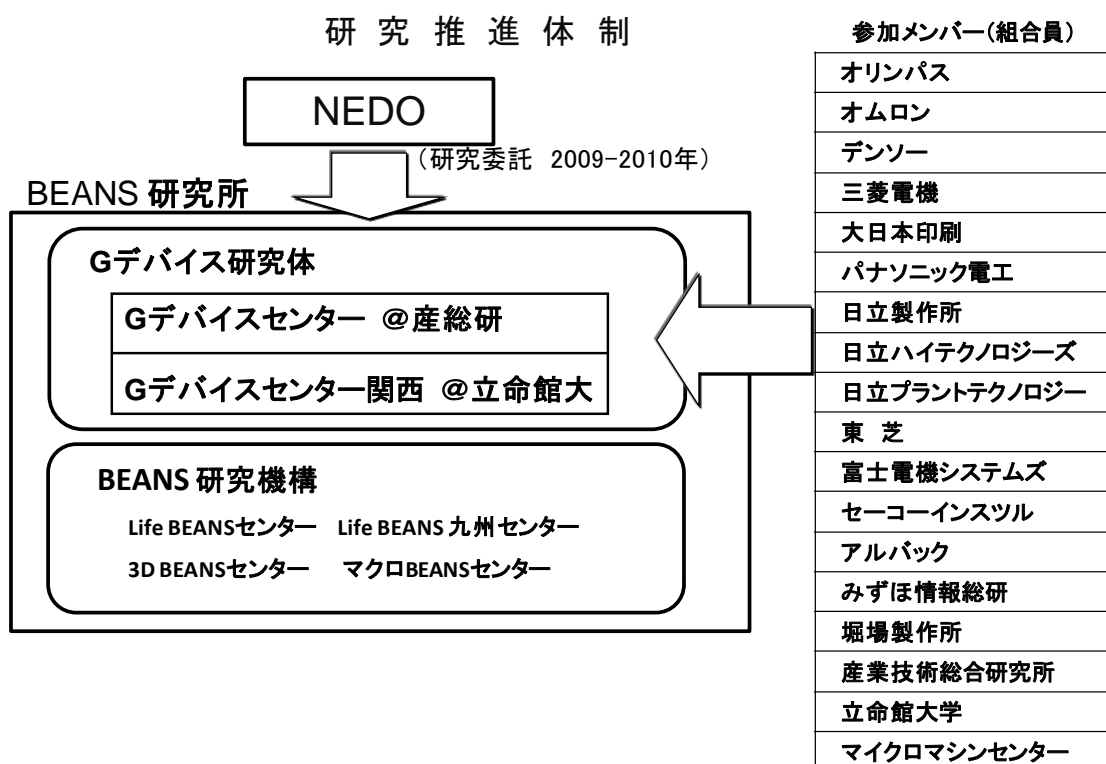


図 II-2.2-1 BEANS 推進体制

BEANS の NEDO 参画の上位運営会議であるプロジェクト推進連絡会へ研究体長以下関係者が参画し進捗報告等を行うとともに、BEANS プロジェクト本体全体の意思決定を受けて G デバイスの取り組み内容の追加、修正等を行った。

特に、G デバイスにおける研究実施体制として G デバイス研究体（図 II-2.2-2）は以下の通りである。

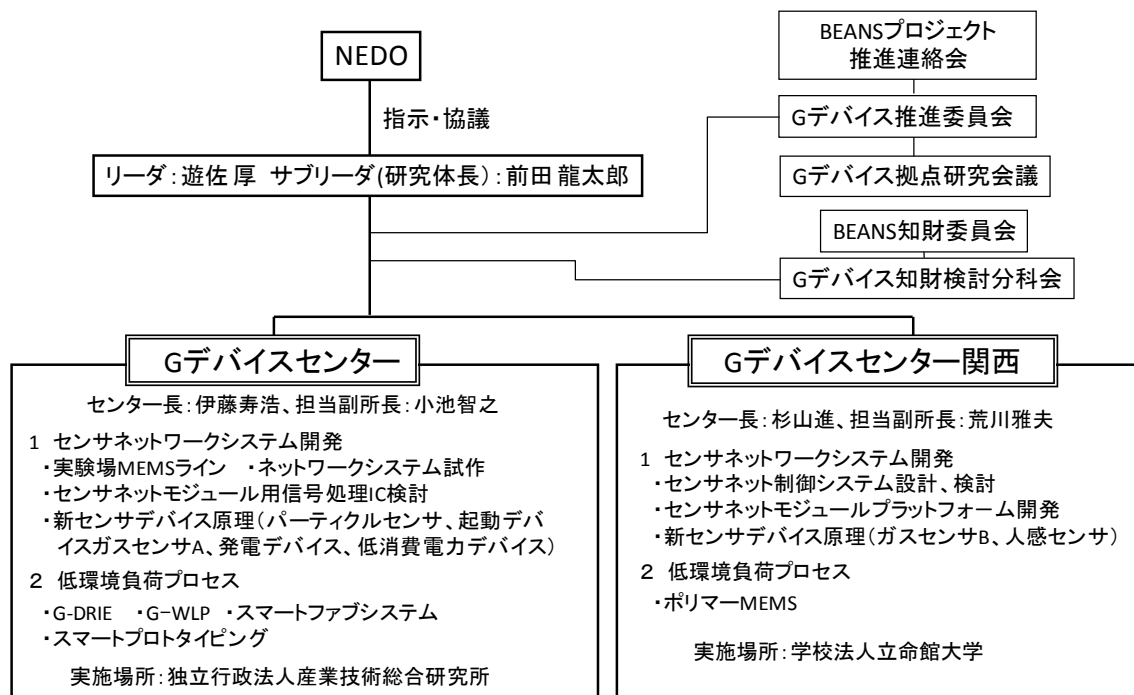


図 II-2.2-2 G デバイス研究体 : BEANS 研究組合の G デバイス担当部隊

また、研究体長をサポートし効果的な開発推進および開発進捗を管理するために、開発に参加する企業や大学研究者と研究員との緊密な連携を取りながら効果的に成果が得られるよう、BEANS プロジェクト推進連絡会の下に設置した G デバイス推進委員会を四半期に一度実施した。委員会の委員は、組合員企業と大学の有識者から 21 名で構成した。

さらに、本研究開発課題に新規参画した企業メンバーを主に想定し、本プロジェクトの知財規程の周知徹底を図るために、本プロジェクト知財委員会の下に G デバイス知財検討分科会を設置して実施した。分科会メンバーは組合員企業の知財部門等から 18 名で構成した。

2.3 研究の運営管理

G デバイスを効果的に運営・推進する目的で、BEANS における G デバイス担当の前田龍太郎プロジェクトサブリーダー(独立行政法人産業技術総合研究所集積マイクロシステム研究センターセンター長;以下、研究体長)とともに、開発計画の詳細の検討や、開発進捗を管理した。そして、研究開発に取り組む研究員全体の相互連携による効果的な開発成果が得られるよう、前述のとおり BEANS におけるプロジェクト推進連絡会の下に G デバイス推進委員会を設置し、四半期に 1 度開催した。また拠点として、G デバイスセンター(産総研つくば東事業所内、センター長:伊藤寿浩集積マイクロシステム研究センター副センター長)と G デバイスセンター関西(立命館大学びわこ草津キャン

ンパス内、センター長：杉山進立命館大学教授)で研究開発を行い、研究体長の下、それぞれの拠点での研究会議を毎月初めに開催し、研究テーマ毎の進捗のフォローや実用化に向けた検討等を実施した。知財権に関しては、BEANS 知財委員会の下に G デバイス知財検討分科会を設置し、知財規程の周知徹底を図った。

また、成果普及活動として、マイクロマシン MEMS 展での展示や国際ワークショップへの展示参加、年度末に本研究開発の成果報告の場として G デバイス研究体主催の国際ワークショップを開催し、ウェブサイト等を通じた広報、普及活動を実施した。

全期間を通じての、運営管理の実績を図 II-2.3-1 に示す。

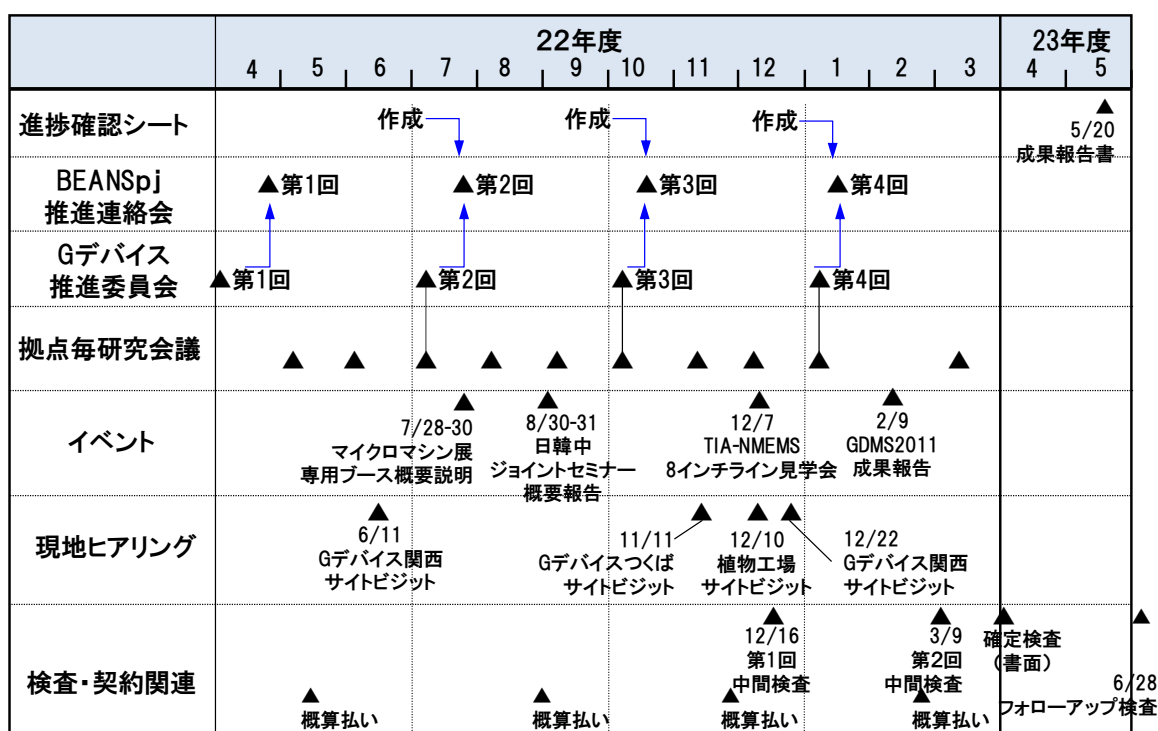


図 II-2.3-1 G デバイス マネジメント関連スケジュール

(1) G デバイス推進委員会の開催

G デバイスの確実な成果達成に向け、研究開発進捗と予算執行状況、設備導入状況などの報告を行い議論、課題の共有化・方向付けのために、研究体長を委員長として、四半期に一度開催した。開催実績を表 II-2.3-1 に示す。毎回、委員のほぼ全員とオブザーバーとしての METI 研究開発課の出席が得られ、活発な意見交換を行われた。委員会開催風景を図 II-2.3-2 に示す。

表 II-2.3-1 G デバイス推進委員会 開催実績

	開催日時	開催場所	参加者数
第 1 回	4 月 8 日 (木) 16:00~17:30	MMC テクノサロン	25 名

第2回	7月 6日 (火) 15:00~16:50	東京都産業労働局秋葉原庁舎 第一会議室	24名
第3回	10月 7日 (水) 15:45~17:30	スター貸会議室(秋葉原)	25名
第4回	1月 7日 (木) 15:30~17:30	産総研つくば東 第一会議室	25名

MMC：財団法人マイクロマシンセンター



図Ⅱ-2.3-2 G デバイス推進委員会の開催状況

最後の第4回のGデバイス推進委員会では、メンバー企業向けに前年11月末に完成した8インチMEMSプロセスラインの見学会を実施した。

(2) G デバイス研究会議の実施

研究拠点として、Gデバイスセンター(産総研つくば東事業所内)とGデバイスセンター関西(立命館大学びわこ草津キャンパス内)を設け、Gデバイスの研究会議を実施した。研究会議は、短期集中で目的の成果を得るための取り組みについて、毎月初めに、研究体長と各センター長の出席により、研究開発の進捗状況、優先順位の判断、アドバイス等をタイムリーに行う狙いで開催した。

そのなかで、Gデバイスセンター、Gデバイスセンター関西に共通的な開発課題については、Skypeを活用したTV会議形式を導入し、効率的な拠点間の連携を図った。さらに四半期毎にはGデバイス推進委員会の前段として、両拠点の合同研究会議を実施して、研究員間の研究課題の取り組みに関する技術交流を図った。

表Ⅱ-2.3-2に、Gデバイスセンターの研究会議の開催実績一覧を示した。また、研究会議開催風景を図Ⅱ-2.3-3に示す。

表Ⅱ-2.3-2 G デバイスセンター研究会議 (産総研つくば東) 開催実績

	開催日時	開催場所	参加者数
第1回	5月12日 (水) 9:45~17:00	Gデバイスセンター	総勢25名

第2回	6月8日(火) 9:45~17:00	産総研つくば東第三輪講室	総勢 25名
第3回 合同研究会議	7月6日(火) 9:30~15:00	東京都産業労働局秋葉原庁舎 第一会議室	45名
第4回	8月4日(水) 9:45~17:00	産総研つくば東第三輪講室	総勢 23名
第5回	9月1日(水) 9:45~17:00	産総研つくば東第三輪講室	総勢 25名
第6回 合同研究会議	10月7日(水) 9:30~15:00	スター貸会議室(秋葉原)	43名
第7回	11月8日(月) 9:45~17:00	産総研つくば東第三輪講室	総勢 25名
第8回	12月9日(木) 9:45~17:00	産総研つくば東第三輪講室	総勢 25名
第9回 合同研究会議	1月7日(金) 9:30~15:00	産総研つくば東第一会議室	44名



図II-2.3-3 Gデバイスセンター研究会議 実施状況

また、表II-2.3-3にGデバイスセンター関西の研究会議の開催実績一覧を示した。6月度、12月度は、NEDO サイトビジットと同時開催とした。また、研究会議開催風景を図II-2.3-4に示す。

表II-2.3-3 Gデバイスセンター関西研究会議(立命館大びわこ草津キャンパス)開催実績

	開催日時	開催場所	参加者数
第1回	5月7日(金) 9:30~12:00	立命館大 オープンリサーチルーム	8名
第2回 NEDO サイトビジット	6月11日(金) 14:00~16:00	立命館大 アドセミナリオ館会議室	16名
第3回 合同研究会議	7月6日(火) 9:30~15:00	東京都産業労働局秋葉原庁舎 第一会議室	45名
第4回	8月2日(月) 9:30~11:30	立命館大 オープンリサーチルーム	9名
第5回	9月2日(木) 9:30~11:30	立命館大 オープンリサーチルーム	9名
第6回 合同研究会議	10月7日(水) 9:30~15:00	スター貸会議室(秋葉原)	43名
第7回	11月8日(月)	立命館大	9名

	9:30～12:00	オープンリサーチルーム	
第8回 NEDO サイトビジット	12月22日(水) 10:00～11:45	立命館大 オープンリサーチルーム	9名
第9回 合同研究会議	1月7日(金) 9:30～15:00	産総研つくば東第一会議室	44名



図 II-2.3-4 G デバイスセンター関西研究会議 実施状況

(3) G デバイス知財検討分科会の開催

知財検討分科会は BEANS の知財委員会の下に設置され、G デバイスとして新たに参画した企業メンバーがいるため、BEANS 知財規定について内容の周知、意見交換を行い、コンセンサスを得ることを目的として開催した。

表 II-2.3-4 G デバイス知財検討分科会

	開催日時	開催場所	参加者数
第1回	9月8日(火) 13:30～16:30	MMCテクノサロン	20名

(4) 普及広報活動

約一年間という短期間の研究開発のため、前半は特にその取り組み概要を広く周知することを目的に 2010 マイクロマシン・MEMS 展などに参加して普及活動を行った。また、後半は 8 インチ MEMS プロセスラインの完成を機に関係者から見学会を実施、また 2 月に国際ワークショップを開催しその研究成果を広く公開した。

2.4 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性

G デバイスの成果を踏まえて、参加企業での実用に対する取り組み及び、つくばイノベーションアリーナ (TIA-NMEMS) への展開について、G デバイスの研究会議及び G デバイス推進委員会において研究体長及びセンター長を中心に実施内容の検討を行った。

さらに、TIA-NMEMS の本格的な研究開発試作拠点形成に向け 8 インチ MEMS ラインに配置した国内有数な装置などの見学会を開催し、我が国関連産業にいち早く周知されるような取り組みを実施した。

3. 情勢変化への対応

G デバイスは、平成 21 年度補正予算（第 2 号）により措置され、緊急に実施した事業であり、更に 1 年間の短期間であったため、その成果を効率的に出すべく、前述の通り推進委員会や研究会を通じてきめ細かいマネジメントを行い対応した。

また、プロジェクト期間中に発生した東日本大震災の影響で産業技術総合研究所つくば東事業所の被災と G デバイスセンターの機能停止が一時停止したが、Web による掲示板等で被害・復旧状況等を関係者と情報共有するなど、遅滞なく研究開発の成果取り纏め、予定通り事業を完了した。

III. 研究開発成果について

1. 事業全体の成果

本事業では、MEMS技術戦略マップ2010のロードマップによる2025年以降の技術等を見越し、研究開発の目的に即した革新的製造プロセス技術を抽出し、その技術を確立することを目指した。

本事業は、大きく二つのカテゴリーとして、「高機能センサネットシステム」と「低環境負荷型プロセス開発」に分けられる。前者は、高機能センサネットシステムの実験場としての8インチMEMS一貫プロセスライン(クラス1000クリーンルームとプロセス装置群)の構築と、そこでの空調オンデマンド制御に連動したセンサネットシステムの設置によるCO2削減目標の検証を実施した。後者は、MEMS製造プロセスとして特徴的なSi深堀エッチングと接合におけるプロセスの低環境不負荷化、前述の8インチMEMS一貫プロセスラインでのMEMS基本プロセスレシピとして7種類のMEMSデバイスのテストエレメントグループ(TEG)の開発を行った。目標及び成果について、表Ⅲ-1-1に示すとおり、いずれも目標を達成することができた。

これらは、世界的にも例を見ない低環境負荷化を実現できる高機能センサネットシステムを完備したMEMS一貫プロセス開発・試作施設の構築であり、その開発・試作能力は、8インチというMEMSとしては大口径ウェハを扱える先端的な装置群を完備したもので我国有数なものである。研究開発拠点としてのTIA-NMEMSへの展開を想定、研究・開発から量産試作まで踏まえた施設として今後の我国MEMS関連産業発展へ大きく資するものとする。

表Ⅲ-1-1 Gデバイス：目標と成果

研究課題	目 標	成 果
<p>高機能 センサネット システム開発</p>	<p>①製造現場として MEMS クリーンルームにセンサネットシステム・空調制御で CO2 削減 60%(’90 年比)。 ②上記検証用クリーンルームと大口径 MEMS プロセスラインを構築。 ③製造現場としてセンサネット適用の植物工場を構築し省エネ効果 20%。 ④高機能 MEMS センサモジュール試作(自立型、複数センサ、30×30×10 mm)及び新センサデバイス原理を検討。</p>	<p>達成</p> <p>①8 インチ MEMS 一貫プロセスラインの空調、ライン装置等のエネルギー見える化システムを設置。多数配置センサによるオンデマンド空調制御で 90 年度施設比 60%の CO2 削減見込みを確保。 ②8 インチ MEMS 一貫プロセスラインの構築完。 ③植物工場に多数配置センサネットを設置し、葉物野菜、トマトなどの育成で、20%省エネ効果を検証、収率は 10% 向上。 ④複数センサ搭載自立センサモジュール試作、小型化達成。合計 8 種の新センサデバイス原理の可能性を把握。</p>
<p>低環境負荷型 プロセス開発</p>	<p>①ポリマ MEMS 基本プロセス確立とミラーデバイス基礎データ把握。 ②深堀エッチング：代替ガス及びエッチング効率の最適化で温暖化ガス排出量 90%削減の指針を確保。 ③集積化接合：部分的接合強度制御と 250℃以下の気密低温接合課題抽出。 ④大口径 MEMS プロセスライン TEG 試作を実施。3 次元計測情報を設計ツールと連携するフレームワーク要求仕様作成プロセス環境負荷情報データベース基盤構築とデータ収集、欠陥ばらつきモデリング技術を確保。</p>	<p>達成</p> <p>①低環境負荷型プロセスとしてポリマミラーデバイスの可能性についての基本プロセス、基礎データ等、方向性を確保。 ②深堀エッチング：目標をクリアし、低環境負荷型プロセスへの指針を確保。 ③集積化接合：目標をクリアし、低環境負荷型プロセスへの指針を確保。 ④8 インチ MEMS 一貫プロセスラインでの 7 種類の TEG を試作、プロセス条件を確保、一年間の短期の取り組みで、すぐ使える試作ラインを構築。同ラインでのプロセスを想定した、デバイス特性ばらつき、3 次元設計・検査情報共有化等のフレームワーク指針を確保、設計検査の面でも基盤を構築。</p>

2. 研究開発項目毎の成果

2.1 高機能センサネットシステム開発

高機能センサネットシステム開発の研究課題は、「半導体クリーンルームセンサネットシステム開発」、その実験場としての「8インチ MEMS プロセスラインの構築」、「植物工場センサネットシステム開発」、「高機能センサモジュール技術開発」である。研究課題毎の目標と成果内容、及び達成度（達成：○、未達：×）を、表Ⅲ-2.1-1に示した。

表Ⅲ-2.1-1 高機能センサネットシステム開発 目標と成果内容、達成度

研究課題	目標	成果内容	達成度
半導体クリーンルームセンサネットシステム開発	クリーンルームでのCO2排出量削減を検討できる制御管理システムを開発。 検証用クリーンルームでCO2削減(90年度比60%削減)を実証。	<ul style="list-style-type: none"> ・パーティクル量等の441点を計測評価できるエネルギーマネジメント統合管理システムを開発し産総研に設置。 ・塵埃負荷及び熱負荷時のパーティクル量、パーティクル拡散量、温度上昇等のデータから1990年度比、CO2 60%削減検証を実施。 	○
8インチラインの構築	MEMS/LSIの前工程から後工程、評価までカバーする一貫ライン、デバイス表面及び内部の形状等の評価装置の導入。	MEMS/LSI前工程プロセスラインとして、ウェハ洗浄、0.35 μ mロセリソグラフィ、ウェハ熱酸化・拡散、CVD・スパッタ成膜、ウェット及びドライエッチングライン(TKB812F)と、後工程プロセス・評価ラインとして、ウェハ接合・封止、ダイシング、実装配線、デバイス表面・内部性状・電気的特性評価ライン(TKB812B)を導入し、8インチMEMSプロセスの試作検証に適用。	○
植物工場センサネットシステムの開発	センサネットを適用した省エネ評価用植物工場を構築し、センサネットの効果及びMEMSデバイスの実用化を検討。	東京農大にセンサネット植物工場の開発環境を構築。リーフレタス、ミニトマトを栽培、細霧冷却、補光照明、冬季暖房、土壌灌水の4提案方式に関して、それぞれエネルギー20%の削減を達成。補光照明、冬季暖房、土壌灌水の3提案方式に関して、植物の収穫量10%改善を確認。MEMSデバイスの実用化可能性を検討。	○
高機能センサモジュール技術開発			
高機能センサモジュール	<ul style="list-style-type: none"> ・無線センサモジュール(30mm×30mm×10mm)試作開発。 ・アプリケーション分野の明確化と新たなセンサネットの活用検討。 	<ul style="list-style-type: none"> ・センサ機能に温度、湿度、圧力、加速度を搭載し、電池、信号処理回路、無線送信回路、アンテナを実装。植物工場など用途に応じセンサ機能を差替え可能な30mm×30mm×10mm以内のプラットフォームモジュールを試作。 ・半導体クリーンルーム応用に特定し、事業化課題と進め方を明確化。 	○

低消費電力 LSI	センサモジュールの長寿命/バッテリー交換レス化を目標に、低消費電力アナログ回路要素技術開発を行う。複数センサ信号を増幅・デジタル化するアナログフロントエンド LSI を試作、課題を抽出。	アナログフロントエンド回路を低電力化するために、低電圧(1.2V)、短時間動作回路要素技術を開発。平均消費電力 4 μ 時程度 (従来比 60%以上削減) で動作可能あり、目標であるセンサモジュールの長寿命化の要素技術開発に成功。	○
新センサデバイス原理検討			
ナノ構造ガスセンサ	<ul style="list-style-type: none"> ・センサ小型化及び性能検証: トレンチに SnO₂ 粒子をポーラス状に埋め込み、センサ部の面積を 1/2 以下の省スペース化とセンシング感度維持を両立。 ・粒子配列プロセスの大面積化: プロセスの大面積化に伴う課題抽出。 	<ul style="list-style-type: none"> ・センサ部の面積を 1/2 以下の省スペース化とセンシング感度維持を両立するために、トレンチ埋め込み型ガスセンサを評価、平坦基板と比較し高濃度ガス中での感度が向上。 ・粒子配列プロセスの大面積化の課題抽出として、4inch Si 基板上へのディップコートを検討し、メニスカス先端部への微粒子供給を阻害しないような容器設計が必要こと、ウエハ表面を清浄に保つ必要があることを見出した。 	○
低消費電力センサ・無線モジュールへの検討	高効率な容量型センサや高効率高周波デバイス、そしてさらなる小型化・低消費電力化に向け、デバイスの試作を通じて課題検証。	超低損傷ドライエッチング技術を低消費電力センサ・無線モジュールに適用した場合の課題検証を実施。シミュレーションでは、専用設計ツールを構築し計算結果からゲート長・幅などのデバイス構造の課題を抽出。8 インチファンドリ試作ではインプラ工程や CMP 工程などのプロセス課題を抽出。	○
パーティクルセンサの MEMS 化	小型化、低コスト化が困難なパーティクルセンサの MEMS 化を検討。	<ul style="list-style-type: none"> ・検出方法として、光学的・電気的方法を複数検討、小型化のために新光学系を提案、パーティクル (線香の煙) を検出。 ・センサの流路断面積 5\times5 mm²、ダウンフロー流速を 0.3 m/s、対象粒径 0.5 μm とし、10 個のセンサで 1 秒間サンプリングを行うとして、JIS 規格のクリーン度を見積ることができた。 	○
汚染ガスセンサ	汚染ガス (NH ₃ , H ₂ S 等) を ppb レベルで計測するための酸化物半導体のセンサ開発。	低消費電力化された高感度 MEMS ガスセンサを開発。耐熱温度 500 $^{\circ}$ C 以上で、NH ₃ に対する検出限界を 2ppb、消費電力を 31mW に低減、H ₂ S に対する検出限界を 0.02ppb、消費電力を 48mW に低減を達成。	○

振動発電を中心とした小型高効率発電デバイス	垂直エレクトレットの新しい高速荷電方法の開発を目指すとともに、小型化に有利な櫛歯型エレクトレット発電器の原理を検証。	真空紫外線による電離を用いた荷電法を開発し、コロナ荷電、軟 X 線荷電よりも極めて高速に荷電できることを明らかにし、当初目標を達成した。また、原理検証として、櫛歯状の垂直エレクトレットへの真空紫外線荷電の検証と 1uW オーダーの発電が可能であることを示した。	○
センサ用パワーマネジメントデバイス	センサネットワーク端末の電力削減のため起動スイッチの原理検証と通信方式の検証。	ゾルゲル PZT と流路形状デバイスにより発電型の低消費電力起動スイッチの可能性を得た。起動スイッチ向け無線として起動スイッチを用いた場合の通信シーケンスチャート、データフォーマット、通信タイミングチャートを策定。消費電力推定の基礎データを取得。	○
位置推定センシング原理	作業者の位置推定の原理開発。	ワイヤレス給電型慣性センサと RFID を組合せた無線方式センサモジュールで作業者位置をリアルタイム計測し、RFID タグ検出時の位置補正、サーバには作業者位置表示・タグ位置設定・履歴表示・シミュレーション機能を具備した作業者位置追跡システムを開発。	○
高感度温度センシング用機能薄膜	環境に優しい非鉛系強誘電体材料におけるセンサとしてのデバイス原理開発。	非鉛系強誘電体材料 BaTiO ₃ 薄膜をスパッタ法で形成し、焦電係数は 10~20pC/N、圧電定数は 10pC/(cm ²) を達成し、センサとして十分な性能を得た。	○

2.2 低環境負荷型プロセス技術開発

低環境負荷型プロセス技術開発の研究課題は、「低環境負荷ポリマー・センサ融合プロセス技術開発」、BEANS への展開も考慮した 8 インチ MEMS プロセスラインでのプロセス技術構築としての「スマートプロトタイプング技術開発」、特に MEMS 集積化に不可欠なプロセスの低環境負荷化に取り組んだ「低環境負荷型深堀エッチング技術」、「低環境負荷型集積化プロセス基盤技術」、「スマートファブ技術開発」からなる。研究課題毎の目標と成果内容、及び達成度を、表 III-2.2-1 に示した。

表 III-2.2-1 低環境負荷型プロセス技術開発 目標と成果内容、達成度

研究課題	目標	成果内容	達成度
低環境負荷ポリマー・センサ融合プロセス技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・ポリマーデバイス向け電鍍成型金型基本プロセス確立。 ・アクチュエータ MEMS を 2 回製作、駆動電圧、ミラー部反射率、ミラー部表面粗さの特性を評価、生体適合性への課題抽出。 	PMMA ポリマー材料による静電型ミラーデバイス（アクチュエータ MEMS）を電鍍成型金型によるプロセスにて開発。試作（2 回）及び特性評価した結果、生体適合性に問題ないことを確認。	○

スマートプロトタイプング技術開発			
シリコンベースセンサ TEG の試作	シリコンベースセンサ TEG の試作に向けて、各プロセス（成膜・リソグラフィ・エッチング・洗浄）装置の要素技術を開発。8インチラインを用いて試作し、ラインの特性と製造環境を評価、MEMS デバイス製造基盤を構築。	8インチウエハによる酸化膜、SiN、i線露光、Si 異方性エッチング、Si-DRIE、メタルドライエッチング、犠牲層ドライエッチング条件出し、応力解析、断面形状、寸法、ウエハ面内均一性を評価。5種センサ TEG 試作とそのセンサ特性評価により、8インチ試作に適用できるプロセスプラットフォームを構築、8インチプロセス装置、計測装置のレシピを蓄積。	○
中性粒子ビームエッチングのデバイス性能向上実証	中性粒子ビームエッチングの大口径(8インチ)化によるウエハ内の特性ばらつきをセンサ TEG の試作により評価。	8インチウエハ面内に作製したカンチレバーに中性粒子ビームエッチングを行ない、カンチレバーの共振周波数と Q 値の初期特性を計測し、ウエハの表面状態が回復すること、100nm エッチング行ったところで特性のサチュレーションが確認でき、中性粒子ビームエッチング装置開発に重要な指針となるデータを取得。	○
μ プローブ TEG の設計・試作	先端部の有効径・幅がサブミクロンであるマルチプローブアレイを8インチウエハで試作し、ウエハ内、及びロット間の形状・特性のバラツキを、マルチプローブ評価装置を用いて評価。さらに、8インチラインの検査デバイスとして適用できるかの可能性を検討。	マルチプローブ評価装置を用いた評価手法として、局所陽極酸化(LAO)法による描画、光てこを用いた直接高さ測定、プローブ先端接触電流値のリアルタイム計測の3つの手法を提案し、電流値リアルタイム計測法が最も直接的かつ容易にデバイスの特性ばらつき計測や不良スクリーニングできることを見出した。上記計測法で8インチラインで試作したデバイスの、ロット間、ウエハ内形状ばらつきを評価、顕著な形状ばらつきはなかったが、ロット間電極配線形成プロセスの品質差を把握、本デバイスを用いた手法が、8インチライン検査デバイスとして適用し得る可能性を示した。	○
欠陥・ばらつき評価におけるモデリング・計測技術開発	ばらつき評価に有効なセンサ TEG を設計・試作、最終パッケージ（真空中）やテスト（外力印加）段階と同様の擬似環境下でウエハ内の電氣的・機械的特性計測技術及び解析結果を基に構造依存のばらつき特性近似モデリング技術を開発。	8インチウエハに作製した複数デバイスについて、真空中・大気中で電氣的・機械的計測を行い、それぞれの MEMS 等価回路モデルパラメータを算出。算出した等価回路モデルパラメータのばらつきより構造寸法のばらつき評価を行い、等価回路モデルパラメータのばらつきから構造寸法のばらつきが正しく評価できることを確認。	○

<p>低環境負荷型深掘りエッチング技術開発</p>	<p>低環境負荷代替ガスの探索を3種類以上のガスについて行い、エッチング効率化/最適化と組合せ、SF6ガスに対し温暖化ガス排出量を90%以上削減可能とする最適代替ガスの選定指針の取得。</p>	<p>F2, BF3, SiF4 など5種類の候補ガスについて、10Hz周期の高速リアルタイム・プラズマ発光モニタリングにより得られた高効率エッチングレシピとプロセスシミュレーションによるフィードバック制御の組合せにより、温暖化ガス排出量をSF6比で90%削減できる低環境負荷代替ガス選定指針を得た。</p>	<p>○</p>
<p>低環境負荷型集積化プロセス基盤技術開発</p>	<p>(1) ウェハ/チップ仮接合強度を、正規接合強度の1/10以下に安定制御する集積化プロセスを開発。 (2) 可動部固着防止用機能膜が特性劣化しない250℃以下の低温接合技術実現に向け、接合面に付着した機能膜の影響を把握、機能膜部分的除去方法確立の課題を抽出。</p>	<p>合面の表面粗さと面積の制御、環状くり抜きパターンの選定により、正規の接合強度の1/10以下に安定して制御できることが判った。 機能膜として、SAM膜(自己組織化単分子膜、FDTS膜)はUV光、プラズマ照射で除去可能であり、除去後の250℃表面活性化接合で十分な気密封止が得られること、パターニング方法としては、N2、あるいはArプラズマ照射が適していることが判った。</p>	<p>○</p>
<p>スマートファブシステム技術開発</p>	<p>(1) 3次元設計・計測情報を、MEMS統合設計データベース、MemsONE等の設計ツール等と連携して活用するための情報共有化フレームワークの要求仕様を作成。 (2) 環境負荷データを情報共有化するためのデータベースの構築し、センサTEGの製造時における環境負荷を算出するのに必要なデータを収集・登録。</p>	<p>(1) X線CT装置により3次元構造を計測、得られた構造から設計時の形状や力学特性を比較。機械・電気特性の計測データと設計形状を、集中質点系モデルを介在させて比較する手法を検討。併せて、情報共有データベースシステムの設計・プロトタイプ開発を行い情報共有化フレームワークの要求仕様を纏めた。 (2) 30種類のMEMSデバイス用原材料と8インチライン(TKB812)で試作されたセンサTEG構造体の製造工程でのCO2排出に寄与する項目をデータ収集し、それらを積算して排出量を算定。算定の結果により、装置・工程・項目に対する排出量の削減への指針を得た。</p>	<p>○</p>

3. 成果の意義

H21年度末からほぼH22年度末まで一年間余りで短期に取り組み全体として当初の目標を満足したその成果については、H23年2月に開催したInternational Workshop on Green Devices and Micro Systems 2011(GDMS2011)においていち早く一般に公開し、多くの参加者を得て高い評価を得た。今回の取り組みは、グリーンイノベーション推進の強力な手段としてきめの細かいセンサネットワークによるエネルギーマネジメントが重要であることを半導体MEMS製造ライン、他で先駆的、実

証的に示せたことが大きな成果という。加えて省エネルギーに向けて、クリーン空調だけではなく、製造装置そのものの強力な管理ツールとしても示せたことも重要な意義がある。さらに、製造プロセスそのものの低環境負荷化に向けた取り組み指針を得られたことも意義があり、将来の国プロへの先導的な役割を果たすことができた。

特に製造現場における省エネ化は我が国にとって重要な課題といえる。しかしながら最先端の MEMS や半導体などの分野において、製造装置やクリーンルームの消費電力の内訳を「見える化」した例は、これまでほとんど見当たらなかった。例えば、最近の検討結果から、クリーンルーム内の製造装置のうち、特定の装置が著しいエネルギー消費量を示すことが判ってきた。それらの多くが、振動の抑制のための空気圧制御システムという、いずれも、加工の精度や安定性を維持するためのものである。こうした製造装置は、これまで、24 時間の稼動を前提とした運用がなされてきた。今回の成果を活用し、エネルギー消費量等の「見える化」を実現することで、運転の運用を変えることにより、待機電力を大きく削減でき、その結果として製造装置全体の消費電力を、従来に比べてピーク時で 3 割以上削減できる可能性があるかと推測している。

さらに、クリーンルームにおける消費電力は、そのほとんどが、空気をクリーンルーム内で必要な条件に変えるために使われている。クリーンルーム内の温度の制御と、微粒子を除去するための空気の循環に使われる空調機、温水や冷水を空調機などに供給するための装置が電力を消費する。

この空調機の消費電力は、送風に使われている分が大きく、季節の要因で大きく変わることはない。一方 この温水や冷水を供給するための装置の消費電力は、季節の要因で大きく変わる。外気の湿度や温度が高い夏になると、クリーンルームに必要な空気の湿度や温度と、外気の湿度や温度との差が、他の季節より大きくなり、除湿や冷却に必要な冷水が増えてしまう。この結果、夏場には、温水や冷水を供給するための装置の消費電力が大きくなり、クリーンルーム全体の消費電力の 6 割以上を占めるまでになる。

クリーンルームの電力消費量を、大幅に減らすことは簡単ではないが、製造装置の消費電力と同じように、クリーンルームにおいても、減らす余地が大きいと考えている。今回の研究成果を活用し、クリーンルームのある区画が無人だった場合、微粒子の浮遊量が少なくなるために、無人の時間は、送風を最小限に抑えることで消費エネルギーが削減できることが期待できる。

開発した高機能センサネットシステムでクリーンルームという巨大システムの消費電力を客観的に「見える化」し、システム全体の運用を最適化し、さらに社会全体のエネルギー消費を、大きく低減できることをこのプロジェクトは示すことができた意義は大きい。

本プロジェクト終了時の 2011 年 3 月 11 日に、東日本を大震災が襲った。発電施設、とりわけ原子力発電所にもたらしたダメージは大きく、それ以前と後の境界条件が大きく変わってしまった。省エネ化、グリーン化は近未来の問題ではなく、今年の夏の待ったなしの課題となった。そういった意味でも、先験的な取り組みとその成果を示すことができた。

世界的にも例を見ない低環境負荷化を実現できる高機能センサネットシステムを完備した MEMS 一貫プロセス開発・試作施設が構築され、その開発・試作能力は、8 インチという MEMS としては大口径ウェハを扱える先端的な装置群を完備したもので我国有数なものとなった。TIA-NMEMS への展開のなかで、研究・開発から量産試作まで踏まえた施設として今後の我国 MEMS 関連産業発展へ大きく資するものであり、その意義は大きい。

4. 成果に関する特許及び論文・学会発表に関して

4.1 特許

技術研究組合 BEANS 研究所の知財規定に基づき、BEANS 知財審査会を経て、BEANS 特許として取組みを行ったものとして、手続き中を含め 8 件の特許を計上した。現在 5 件が出願済みであり、出願済特許詳細を A-5 に示す。

4.2 研究発表・講演

本研究に基づいて、15 件の研究発表、講演を行った。一覧を A-5 に示す。

5. 成果の普及広報

約一年間という短期間の研究開発のため、前半は特にその取り組み概要を広く周知することを目的に普及活動を行った。また、後半は 8 インチ MEMS プロセスラインの完成を機に関係者から見学会を実施、また 2 月に国際ワークショップを開催しその研究成果を広く公開した。

1) マイクロマシン・MEMS 展への取り組み概要展示

国内イベントの中で、MEMS 関連企業、研究者が最もたくさん集まる本展示会が 7 月 28 日～30 日、東京ビッグサイトで開催され、そこでプロジェクトの取り組みを説明した。本展示はマイクロマシンセンター展示ブースの隣に 4 スパンのブースを確保し、「異分野融合型次世代デバイス製造技術開発事業」本体展示（12 スパン）と通路を挟んだ場所に位置し、本体の成果展示との連携がわかるような配置とした。

展示ブースでは、研究開発のコンセプトや個別テーマのパネル展示と、半導体ク

クリーンルームのパーティクルセンサを多数配置した場合の塵埃量に対応したオンデマンド空調によるエネルギー削減のデモおよび、植物工場での温度、湿度、照度などの多数配置によるモニタリングのイメージデモの二つを展示した。多数の来場者が訪れ、実際の研究者が個別テーマやデモについて直接説明することにより、来場者の十分な理解が得られるように工夫し、活発な議論が行われた。G デバイスセンター展示ブース状況を図Ⅲ-5-1 に示す。



図Ⅲ-5-1 2010 マイクロマシン・MEMS 展（東京ビッグサイト）
での概要展示

2) The 1st Japan-Korea-China Joint Seminar on MEMS/NEMS for Green and Life Innovation への展示

グリーンイノベーション、ライフイノベーションに貢献するマイクロナノ技術をテーマとする日韓中セミナーが、平成 22 年 8 月 30 日～31 日、札幌コンベンションセンターで開催された。日韓中の関係する先端研究者に取り組みをアピールするため、ポスターセッションにて展示を行った。集った研究者は総勢 60 名弱で、G デバイスの取り組み概要のほか、半導体クリーンルームのパーティクルセンサを多数配置した場合の塵埃量に対応したオンデマンド空調によるエネルギー削減のイメージについて報告した。

3) 8 インチ MEMS プロセスライン見学会

12 月 7 日に開催されたつくばイノベーションアリーナ NMEMS の関係者が集うワーキンググループ(TIA-NMEMS WG)で、ほぼ完成した 8 インチ MEMS プロセスラインの見学会を実施した。参加メンバーは、MEMS 試作関連の取り組みを検討しているメンバーなどであり、大口径ウェハのプロセスが可能で、特徴のある装置群が並ぶラインとして好評だった。

前述のごとく、G デバイス推進委員会の委員に対しても、1 月 7 日の第 4 回委員会で見学を行い、関係者に周知ができた（図Ⅲ-5-2）。



図Ⅲ-5-2 8インチ MEMS プロセスライン見学会

4) International Workshop on Green Devices and Micro Systems (GDMS2011)開催

3月の事業終了前に、成果について内外に報告するため、本国際会議を平成23年3月9日(水)にAISTつくば中央共用講堂で開催した。

事前登録130名に対し、当日関東地方は朝から大雪模様となり、出席者が少なくなることが予想されたものの、当日の出足は順調で、最終的に参加者数146名となった。グリーンイノベーションを主題にした本テーマへの関心度の高さと、最先端8インチMEMSプロセスラインへの期待の大きさを示した結果であると思われる。

当日のプログラムは、METI 研究開発課 矢野研究開発調整官と NEDO 機械システム部久木田部長がプロジェクトの位置付けと成果についての期待を込めた挨拶のあと、環境利用エネルギーハーベスティングや RFMEMS の研究で著名な Prof. Stepan Lucyszyn、商業店舗などのエネルギーマネジメントに関する研究で著名な東大藤本教授の招待講演が行われた(図Ⅲ-5-3)。



図Ⅲ-5-3 GDMS2011 会場風景

そのあと、二つの研究拠点 G デバイスセンター長が両拠点での取組みや成果の概要について報告、昼食時より、ポスターセッションでのテーマごとの報告、及び代表的テーマのオーラルセッションが行われた。どのセッションでも、最後まで多くの参加者が熱心に聴講及び意見交換が行われた。

最先端 8 インチ MEMS ライン見学は、3 回に分けて実施したが、すべて、定員一杯で事前登録の段階で締め切るほどであった。

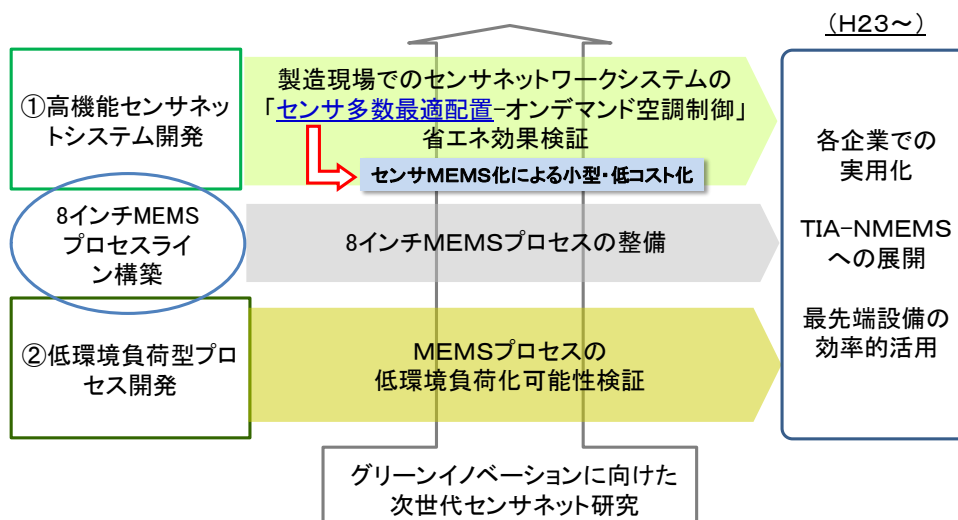
以下に、GDMS2011 プログラムを示す。

10:20	Opening session , Moderator R. Maeda T. Yano (METI), S. Kukita (NEDO)
10:30	Invited talks , Moderator R. Maeda “Ambient Electromagnetic Energy Scavenging for Sensor Networks”, Prof. Stepan Lucyszyn, Imperial College of London “Energy management in retailing business”, Prof. J. Fujimoto (Tokyo University)
11:30	Project overview : Moderator T. Koike T. Toshihiro Itoh and S. Sugiyama
12:10-14:30	Working Lunch Poster view of project details and topics from Inter university network Green 8 inch MEMS prototype station “TKB812” tour (A) Special Tutorial (13:30-14:20) “Challenges and Progress in MEMS Energy Harvesters”, Prof. C. Lee (National University of Singapore)
14:30	Oral session : Moderator T. Sakamizu “Green operation on demand (GOOD) for clean room”, K Ando “Development of Wireless Smart Multisensor Devices for a Green World”, A. Ranjith “MEMS Particle sensor for GOOD, H. Sven “Micro coil fabrication for ubiquitous power monitoring” Y. Zhang “Ultra Low Power Consumption IC for Green device”, T Fujimori “Environment Friendly MEMS process, D. D z ung
16:00-	Poster View and Green 8 inch MEMS prototype station “TKB812” tour (B) Reception : Opening remark: S. Ichimura(AIST), Closing remark: K. Aoyagi (MMC)

IV. 実用化の見通しについて

1. 事業全体の実用化の見通し

本事業で取り組んだ研究課題の狙いとその実用化の方向性は、図IV-1-1 に示す通りである。また、成果に基づく実用化の見通しを表IV-1-1 に示す。



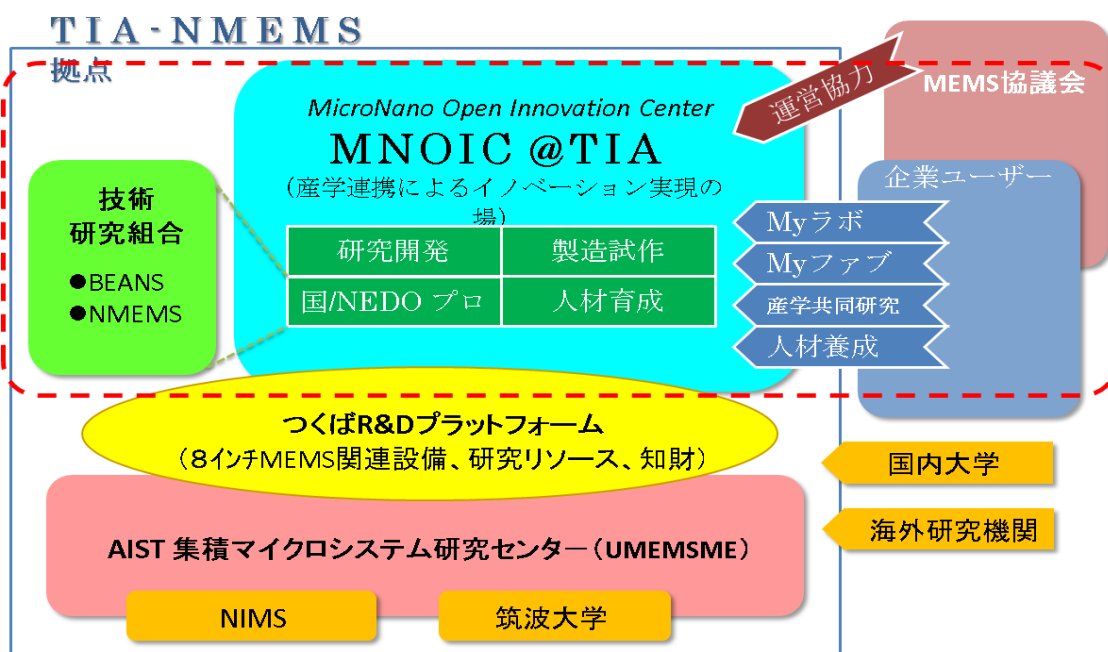
図IV-1-1 (再掲) G デバイスの実用化の方向性

表IV-1-1 G デバイス：実用化の見込み

研究課題	成果	実用化の見込み
高機能 センサネッ トシステム 開発	<p>①8 インチ MEMS 一貫プロセスラインの空調、ライン装置等のエネルギー見える化システムを設置。多数配置センサによるオンデマンド空調制御で、90 年度施設比 60%の CO2 削減見込みを確保。</p> <p>②8 インチ MEMS 一貫プロセスラインの構築完了。</p> <p>③植物工場に多数配置センサネットワークを設置し、葉物野菜、トマトなどの育成で、20%省エネ効果を検証、収率は 10%向上。</p> <p>④複数センサ搭載自立センサモジュール試作、小型化達成。合計 8 種の新センサデバイス原理の可能性を把握。</p>	<p>①多数配置センサによるオンデマンド空調制御システムの事業化を、半導体クリーンルームで積極的に展開する(オムロン)。</p> <p>②8 インチラインは TIA-NMEMS の基幹設備として、活用する。活用主体は、MMC に新設された MNOIC となる見込み。</p> <p>③植物工場のセンサネットワークシステムは、検証した 4 方式を実際の民間植物工場の実態に合わせて適用する等、実用化を進める(日立)。</p> <p>④自立センサモジュールや低消費電力 LSI 技術、新センサデバイス原理検討から、継続して各社で数年後の実用化を目指す。(オムロン、日立、パナソニック電工、SII、堀場、富士電機)</p>

<p>低環境負荷型プロセス開発</p>	<p>①深堀エッチング：目標をクリアし、低環境負荷型プロセスへの指針を確保。 ②集積化接合：目標をクリアし、低環境負荷型プロセスへの指針を確保。 ③8インチMEMS一貫プロセスラインでの7種類のTEGを試作、プロセス条件を確保、一年間の短期の取り組みで、すぐ使える試作ラインを構築。同ラインでのプロセスを想定した、デバイス特性ばらつき、3次元設計・検査情報共有化等のフレームワーク指針を確保、設計検査でも基盤を構築。 ④低環境負荷型プロセスとしてポリマーミラーデバイスの可能性についての基本プロセス、基礎データ等、方向性を確保。</p>	<p>①深堀エッチング：高集積センサやプロセス装置への実用化に取り組む（デンソー、アルバック）。 ②集積化接合技術：高集積センサ等へ4年後の実用化を目指す（三菱電機）。 ③TIA-NMEMSの8インチMEMS一貫ラインでのTEGレシピやプロセス条件として活用。活用主体はMMCに新設されたMNOICとなる見込み。3次元キャラクター化サービスの提供サービスを本年度実用化見込み（みずほ情報総研）。 ④ポリマーMEMS技術は、低環境負荷プロセスとして検討を継続。さらにVOC濃度センサとして病院施設等や、医療応用匂いセンサの実用化を目指す（オリンパス）。</p>
---------------------	---	--

また、世界的にも例を見ない低環境負荷化を実現できる高機能センサネットシステムを完備したMEMS一貫プロセス開発・試作施設は、我国有数の8インチというMEMSとしては大口径ウェハを扱える先端的な装置群を完備した研究開発拠点となりうる。これらについては、我が国の研究拠点TIA-NMEMSへの展開を想定し、MEMS協議会にマイクロナノイノベーションセンター（MNOIC）を研究・開発から量産試作まで踏まえた研究開発の実行部隊として組織し、平成23年7月に設置された。本事業により設備が構築されたAIST集積マイクロシステム研究センターと共同でMNOICは図IV-1-2に示すような研究開発試作機能の構築と継続的運営を図るべく取り組みを進めている。



図IV-1-2 TIA-NMEMS の概念図

2. 研究課題毎の実用化の見通し

2.1 半導体クリーンルームセンサネットワークシステム

センサネットワークシステム(Clean On Demand 空調自動制御システム)の成果に基づいた実用化の見通しは、現状下記の通り事業展開を継続中である。

(1) オムロン内部での取り組み状況

■BEANS 研究所 G デバイスでの研究成果の社内共有

社内の関係者と G デバイス研究成果の社内共有を行った。

■オムロン野洲工場での取り組み成果の社内共有

オムロン野洲工場でも類似の検討を行っており、野洲工場での成果の社内共有を行った。

■確認/共有事項

- ・人によりパーティクルが発生するため、その人をセンシングして、空調機の制御を行うことは、空調機のエネルギー削減に大きく貢献できることを確認した。
- ・G デバイス/オムロン野洲での各種データは、非常に有用であり、制御システムを構築する際に活用できるだけでなく、顧客提案を行う際にも説得力を持ってアピールする材料として活用できることを確認した。
- ・1Step として、これまでに付き合いのある顧客に絞り込んで提案を行い、社外での実績を積み上げて、横展開する方針で進めることとした。

(2) 外への取り組み

・オムロンとしての取り組み実績と、今後の商品化を平成23年7月9日に日本経済新聞に発表。

・客先提案状況

A 社：現場にて1次調査完了。

現場の空調機がインバータタイプでなかったため、空調機の ON/OFF で実地検証。クリーンルームが負圧状態となる恐れが出たため、一次検証を保留した。現在は、提案内容を再検討中。

B 社：現場にて1次調査完了。

ベイ方式ではなく、ミニエンパイロメントタイプのクリーンルームであったため、提案内容を再検討中。

(3) 全体を通して

G デバイスの成果は非常に有用であり、クリーンルームのエネルギー削減に繋がることを、オムロンとしても認識しており、事業化へと繋げるべく、社外への提案を行っている。しかし、客先のクリーンルームの構成(例：空調機がインバータタイプで

はないなどによっては、実地検証を進めることが困難である場合も見えてきた。

まず、社外での実績を作ることを最優先の取り組みとして、今後は、更に客先を絞り込み、取り組みを継続して進める。

また、客先提案に際しては、クリーンルームに応じた提案を行うこととする。

- ・ハイクラスクリーンルーム

電気料金も大きいため、一定規模以上の客先投資金額が見込めるため、数メートル間隔でセンサを設置するシステム構成。

- ・ミドルクラスクリーンルーム

安価なシステム構成とするため、最低限度必要な人感センサとパーティクルセンサでシステム構成。

2.2 8インチラインの構築

我国有数の8インチというMEMSとしては大口径ウェハを扱える先端的な装置群全般が独立行政法人産業技術総合研究所(AIST)に設置され、TIA-NMEMSつくばR&Dプラットフォームの基幹設備として位置付けられた。AIST集積マイクロシステム研究センターと共同で研究開発試作機能の構築と継続的運営を図るMNOICを発足させ、産学連携共同研究開発インフラとしての利用の募集を開始した。

事業化までのシナリオとしてMEMS開発支援サービス業務を試行し、独立組織としての自主運営を目指す。波及効果として、ファブレスMEMSメーカーの新規参入により、国内MEMS産業の活性化に資するものである。

The image shows two screenshots of the MNOIC website. The left screenshot displays the main navigation menu with categories like 'ご利用案内' (User Guide), 'ご利用案内' (User Guide), 'お問い合わせ' (Contact Us), and 'お問い合わせ' (Contact Us). The right screenshot shows a detailed page for 'MNOICの8インチMEMSラインの利用設備詳細の一覧表です(2011.8.3時点)' (List of equipment details for MNOIC's 8-inch MEMS line as of 2011.8.3). This page includes a table with columns for '設備名' (Equipment Name), '実用化' (Commercialization), and '設備仕様' (Equipment Specifications).

設備名	実用化	設備仕様
ウェハ洗浄装置	○	ウェハ寸法: 152mm x 152mm x 0.5mm, 乾燥: ウェットウェット洗浄装置による乾燥処理(ウェット洗浄・スピン乾燥), 前処理用洗剤供給(ソルト・付着・洗浄プロセス: 乾燥) 過熱水素水, 希釈水による洗浄と超純水リンス洗浄
ウェハスピン洗浄装置	○	ウェハ寸法: 152mm x 152mm x 0.5mm, 乾燥: ウェットウェット洗浄装置による乾燥処理(ウェット洗浄・スピン乾燥), 洗浄プロセス: スピン乾燥(過熱水素水, 希釈水)による洗浄と超純水リンス洗浄
有機溶剤洗浄装置	○	ウェハ寸法: 152mm x 152mm x 0.5mm, 乾燥: ウェットウェット洗浄装置による乾燥処理(ウェット洗浄・スピン乾燥), 洗浄プロセス: スピン乾燥(過熱水素水, 希釈水)による洗浄と超純水リンス洗浄
洗浄プロセス	○	ウェハ寸法: 152mm x 152mm x 0.5mm, 乾燥: ウェットウェット洗浄装置による乾燥処理(ウェット洗浄・スピン乾燥), 洗浄プロセス: スピン乾燥(過熱水素水, 希釈水)による洗浄と超純水リンス洗浄

MNOIC ホームページ解説

2.3 植物工場応用センサネットシステム

本研究で提案した植物工場に適したセンサネットシステムの実用化・事業化の見込みに関して述べる。

植物工場の将来市場に関しては、矢野経済研究所から「植物工場に関する調査結果(2009)」が報告されている。本報告書によれば、植物工場で生産される野菜は、2008年度が28億円であるが、2013年度には100億円、2018年度には200億円、2020年度には288億円に拡大すると推定されている。植物工場は成長分野であるといえる。

本研究では、センサネットに適した植物工場の制御システムとして、細霧冷却、補光照明、冬季暖房、土壌水分の4つの方式を提案した。これらの方式は、栽培エリアを分割して、それらのエリアを個別制御する方式である。栽培エリアの方向(東西南北)や、栽培エリアの中央や周辺で栽培環境が異なることが確認できた。各栽培エリアの環境測定にセンサネットを適用し、栽培エリア毎に分散制御することにより、省エネおよび作物の収穫量が改善できる可能性を示した。

一方、植物工場用センサネットシステムの投資回収は、省エネによる電力コスト削減だけでは短期間での回収が厳しく、生産する作物の収穫量改善や、高品質な作物を生産するための設備としても適用することが重要であることを示した。

これらに基づいて、日立としては以下の内容で今後実用化に向けて検討を続ける。

制御系まで含めた設備投資は、新規の植物工場でなければ、導入は厳しいので、既存の植物工場に関しては、環境計測用のセンサネットの導入を進める。

既存の植物工場では、温度監視などのセンサは1点だけの設備が多いので、多点計測が可能な環境計測用のセンサネットの導入を進める。センサネットで計測した計測データは、クラウドで一括管理する方法も提案し、スマートフォン等の端末で植物工場の環境を監視できるようにする。導入先は、既存の植物工場だけでなく、大学等の研究用の植物工場も含めて広く提案していく。

新規の植物工場に関しては、本研究で評価した4つの方式を提案していく。実用化に際しては、今回提案した4つの方式を、全て提案するのではなく、植物工場の立地条件や、栽培する作物により、効果の高いものから提案していく。北海道や東北のような寒い地方では、冬季暖房システム有効であり、日本海側の日射量の少ない地域では補光照明システムが有効である。また、九州などの暑い地方では、細霧冷却システムが有効である。高付加価値のトマトの栽培であれば、土壌水分制御システムを導入して、トマトの高糖度化に適用するのが良い。これらは、植物工場の設置環境などに応じて提案していく。

また、農業用途のセンサネットシステムを普及させるためには、露地栽培にも適用させることが必要と考える。外気温が大きく変動する最近の気象状況において、環境モニタリング可能なセンサネットシステムが、露地栽培においても、作物の品質向上につ

ながると考えられる。

2.4 高機能センサモジュール

高機能センサモジュールはクリーンルームや植物工場に限らず、生産現場、オフィス、そして店舗等の省エネルギー化、安全・安心に関わる異常検知・危険予知、生産性向上、収量向上等の様々な場面で適用可能である。

本研究開発で作製したモジュールは、クリーンルームの最適環境制御に特化して作成したものであり、省エネに向けたセンシング項目、センシング頻度の抽出に用いるものであり、無線方式・電池容量・非接触給電等が選択でき、複数種類のセンサの差し替えが可能なことを特長としたのである。

従来の市販センサ、コンポーネントでも同様の機能を実現することは可能ではあるが、市販品であることからモジュール単価のコストが数千円～数万円と高価であることが課題である。また、センサ自体が市販品であるためセンサ寸法が大きくなり、きめ細やかな計測制御の普及に大きな課題を有している。

本研究開発成果である高機能センサモジュールは、上記従来の課題を克服したものであり、複数のセンサ（最大 31 種）を搭載することができ、様々な想定現場で自由に構成できる小型、ローコストなセンサモジュールプラットフォームであることが特長である。

(1) オムロン内部での取り組み状況

■BEANS 研究所 G デバイスでの研究成果の社内共有

社内の関係者と G デバイス研究成果の社内共有を行った。

■確認/共有事項

クリーンルーム実証実験の共有化

人によりパーティクルが発生するため、その人をセンシングして、空調機の制御を行うことは、空調機のエネルギー削減に大きく貢献できることを確認した。

一方、パーティクルは常時モニタが必要であること、従来のパーティクルセンサでは光源が必要あるいは、吸引するポンプが必要であるなど消費電力が大きく電池寿命の観点で課題があることを共有。

上記課題について以下の点を共有

- ① パーティクル代替としてフローセンサで相関比較実験を実施。クリーンルームによってはパーティクルセンサの代替策としてフローセンサで代用できることを確認した。
- ② フローセンサの消費電力低減として、ピエゾ式フローセンサの活用を提案。
- ③ 上記、課題に対応したセンサモジュールとしてイベント起動型、電池サイズ大&非接触給電のタイプも準備。

(2) ビジネスモデルとオムロンとしての進め方

センサモジュール関連のビジネスは以下の2つの方法が考えられる

① モデル1

G デバイスで開発したセンサモジュール、受信機をそのまま販売する。

(ただし、この場合はコネクタの接触信頼性等改良が必要である。)

顧客自らセンサネットワークを構築する必要がある。

② モデル2

アプリケーション毎にセンサネットワークシステムを構築し、システムで供給。

顧客は、工場、オフィス、店舗、空調メーカー等になる。

システム納入のため売上げは大きくなる。

オムロンとしては②で事業展開を進めていく。

実際のセンサモジュールは社内の独自のモノで進めていくが、必要に応じて上記 G デバイスで培った要素技術、IP を導入していく。

(3) 今後

電源コンセント式、電池式ではメンテが必要、大型になる等でコスト、サイズの広く普及するには課題が大きい。今後は、自己発電デバイスとの併用で電池レス、メンテナンスフリー化が重要である。

2.5 低消費電力 LSI

本研究で開発したアナログフロントエンド回路は、センサを用いる際に、必須となる回路ブロックである。よって、本開発技術はセンサネットワークへの適用はもちろん、センサ応用システム全般に適用可能な基盤技術である。また、本開発で要素試作により実証した回路は、アナログフロントエンド回路に於いて実用上重視される指標である、サンプリング速度・測定精度に対する低電力性能に関し、世界最高水準の性能を有する。よって、本開発技術を基に、用途に応じた実用的な回路を構成することで、強い競争力を有するセンサ応用システムを実現可能であると言える。

本技術の実用化に向け、今後、周辺回路を含めた、アナログフロントエンド回路の改良を行う。改良したアナログフロントエンド回路を IP 化し、センサ用周辺回路のプラットフォームの構築を行い、センサネットワークへの適用を検討する。また、併せて、構築したプラットフォームを用い、日立グループの社会システム製品群や産業機器製品群におけるセンサ適用製品への適用による、早期の実用化を検討する。

2.6 新センサデバイス原理

(1) ナノ構造ガスセンサ

本研究において開発を進めてきたガスセンサの実用化・事業化の見込みについて、以下の通りである。

ガスセンサのアプリケーションとして今回 CR ドラフトガスを対象にしてきた。高濃度のガス感度が向上している為、溶媒濃度が爆発限界中でも感度が飽和しない可能性がある、この為、濃度検出及び爆発検知にも適用できる可能性がある。また、前述したように堆積材料の拡張性が高い為、幅広い用途に適用できる可能性がある。建築用材から放出される揮発性有機物質であるトルエン等の溶媒検出にも適用の可能性はあると考えられる。

(2) 低消費電力センサ・無線モジュール

本研究において開発を進めてきた VB-FET の実用化・事業化の見込みについて、以下の通りである。

本デバイスは、MEMS とトランジスタの集積による特徴的な特性を活かし、SAW や FBAR などの高周波デバイスにかわるチューナブルバンドパスフィルタの実現や加速度センサやジャイロセンサなどにも応用し周辺部品点数削減・低消費電力化などが期待できる。特にチューナブルバンドパスフィルタは、マルチバンド化した携帯電話市場においてニーズが高く、数百億円規模の市場であるため、事業化するメリットは非常に大きいと考えられる。また、加速度センサやジャイロセンサなどにおいてもセンサネットワークの省電力化ニーズが高いことから同様に期待できる。

(3) パーティクルセンサ

提案するパーティクルセンサの目指すところは、市販のパーティクルセンサの置き換えではなく、市販のパーティクルセンサとの併用により、クリーンルームのような大空間のクリーン度の傾向管理を実現することである。感度の高い大型のパーティクルセンサにより、大域的なクリーン度を評価し、提案するパーティクルセンサを用いて、局所的なクリーン度変化の傾向を計測する。このような用途において、提案する小型のパーティクルセンサは期待が高い。

提案するパーティクルセンサを実用化するためには、主に 2 つの技術的課題がある。第一に、レンズを用いずにパーティクルを感度よく検出すること、第二に、ポンプを用いずに効率よくパーティクルを検出領域に流入させることである。レンズを用いないことでセンサの小型化が実現できる。また、ポンプを用いないことでセンサの小型化に加え消費電力低減も実現できる。従って、小型で低消費電力なパーティクルセンサの実用化のためには上記 2 つの技術的課題を解決する必要がある。

前者の課題に対しては、マイクロ構造を有するフォトダイオードを用いたパーティクルセンサを提案し、原理検証まで終えている。しかしながら、クリーンルームなどクリーン度の高い環境における使用を想定すると、検出感度のさらなる向上が必要である。対応策としては、光源波長の最適化、フォトダイオードの高感度化により向上が見込め、PIN ダイオードやアバランシェフォトダイオードなどに今回提案したマイクロ構造を組み合わせることで実現できる。次に、後者の課題に関しては、すでにシミュレーションを行い、検討を始めている。現在はセンサの接地面と流路の距離に応じて、空気の取り込み量が増えることを確認している。流路の位置や形状を改善させることにより、さらに多くの空気を効率よく取り入れる構造を構築することも可能だと考えられる。従って、現在までの検討で提案するパーティクルセンサを実用化するための主たる技術的課題の解決方法を提案し、さらに基礎原理の確認に成功している。今後は上記課題のさらなる改善を行うと共に、SII（セイコーインスツル）内で行われているセンサネットに適用することを想定し、消費電力・製造コストなども検討し、実用化・事業化を目指す。

(4) 汚染ガスセンサ

本研究ではクリーンルームの消費電力削減のため、ドラフトの排気量制御に用いることのできる高感度・低消費電力のガスセンサの開発を行った。

実用化に向けての課題としては、まずセンサ応答の安定性・再現性の向上、製作ばらつき改善等があげられる。これらの課題の解決には WO_3 の成膜条件のばらつきを抑え、膜の耐環境性の向上が必要であり、スパッタによる制御性の高い WO_3 成膜の導入やアニール条件の最適化等の検討が必要と思われる。またガス選択性向上も大きな課題であり、課題解決のためには、触媒添加・動作温度の最適化等を検討しなければならない。

これらの課題が解決できれば実用的な小型・高感度・低消費電力・低コストのガスセンサが実現でき、高機能センサネットワークへの適用が容易となり、アプリケーションとしては、本研究の当初の目的としたクリーンルームの消費電力削減のためのドラフトの排気量制御だけでなく、都市環境の広域大気汚染モニタリングや工場・オフィス等の室内の換気制御等、センサネットワークに適合した今までにないガス計測応用技術へ展開できると考えられ、掘場製作所として継続して検討を続ける。

例えば、大気汚染モニタリング事業についてその市場性を見積もると、現在、従来の大気汚染分析装置は各都道府県に数十台ずつ設置されているが、それだけでは大気汚染の実態を十分に把握することはできず、各都道府県に数千箇所の測定ポイントが求められている。しかし現状の高価な大気汚染分析装置ではコスト的に実現が不可能である。そこで安価で高信頼性のセンサが実現できれば、大きな事業展開

が見込める。たとえば、センサユニット単価を 5 万円、センサユニット 100 個ごとに 500 万円のデータ集積ユニットが必要だとすると、各都道府県に 2000 個ずつセンサユニットを配置するとすれば、約 100 億円規模の市場であると見積もられる。また国内だけでなく、海外へも事業展開すればさらに大きな市場となる。

(5) 振動発電を中心とした小型高効率発電デバイス

真空紫外線を用いた高速荷電を用いることにより、実用的な荷電時間で櫛歯状の垂直エレクトレットへ形成することが可能になった。垂直エレクトレットを持つ MEMS 発電器が実現できたことにより、組立が不要となり、低コスト化、小型化が容易になった。

垂直エレクトレットを用いた MEMS 発電器は、低コスト化が可能であり、産業技術としての適用可能性が拡大した。今後は、低共振周波数化、エレクトレット材料の改良などにより、発電器の発電性能を上げ、実用化へ向けて取り組んでいく。

(6) センサ用パワーマネジメントデバイス

本プロジェクトでは、センサ端末の電池寿命を最大限延ばすために、必要時のみ動作する起動スイッチ(イベントドリブン型スイッチ)の開発を実施した。センサ端末の対象は、クリーンルーム内活用のためパーティクルセンサを起動させることを目的とした起動スイッチの開発を実施。起動源としては、フロー変化によりパーティクル量の変化に着目し、フロー変化検出タイプの起動スイッチを実施した。

本研究開発では低消費電力なスイッチを実現するために、圧電体(ゾルゲル PZT)付きカンチレバーを利用した省電力なスイッチの開発を行うとともに感度向上のためカンチレバーの上下面に圧力差を発生させる構造のフローセンサを提案し、フロー変化による起動スイッチの有効性を示唆した。

本起動スイッチは、センサ端末の電池寿命向上、電池交換なしなどのメンテナンス性に対して有効であり、センサーネット普及のためには画期的技術であることが示せた。しかし、起動スイッチとセンシング対象のユニット化、システム化検証により有効性を提案することが必須であり本プロジェクトで得た技術検証をさらに発展させ、事業化に進めるためセイコーインスツルとして継続的に研究開発を実施し実用化に近づける所存である。

(7) 高感度温度センシング用機能薄膜

本研究開発項目の機能性薄膜を用いた最終目標として集積化センサネットワークモジュールをあげることができる。本モジュールにおいては非鉛系強誘電体薄膜を用い、高感度温度センサ(焦電センサ)、および同じ薄膜を活用して作製する無線ネットの駆動電源として活用できる自立発電デバイスが搭載されている。従来

の焦電センサや振動発電デバイスの薄膜材料としては鉛系材料が用いられてきたが、有害な鉛を含まず優れた焦電特性および圧電特性を有する非鉛系強誘電体薄膜の開発が強く望まれている。

本プロジェクトで開発した非鉛系薄膜は Si 基板上の鉛系薄膜と同等の焦電性を示すことができた。今後、社内において開発した技術をベースに薄膜形成技術を進化・発展させ、PZT と同等性能を有する非鉛系圧電／焦電薄膜の開発を推進する。

また本プロジェクトにおいて取り組んだ強誘電体薄膜剥離転写技術においては、高品位な薄膜を、Si や安価なガラス、ポリマー基板上に膜品質の大きな劣化なく形成できる可能性を得た。これにより各種基板上への強誘電体膜の形成が可能となり、従来技術では実現不可能であった IC 一体型強誘電体薄膜が作成でき、センサ等の高感度化が期待できる。また、本技術によればガラスやポリマー基板上に薄膜形成できることから、ガラスやポリマー基板の持つ特性を活かした従来にない新規な MEMS デバイス開発が期待できる。

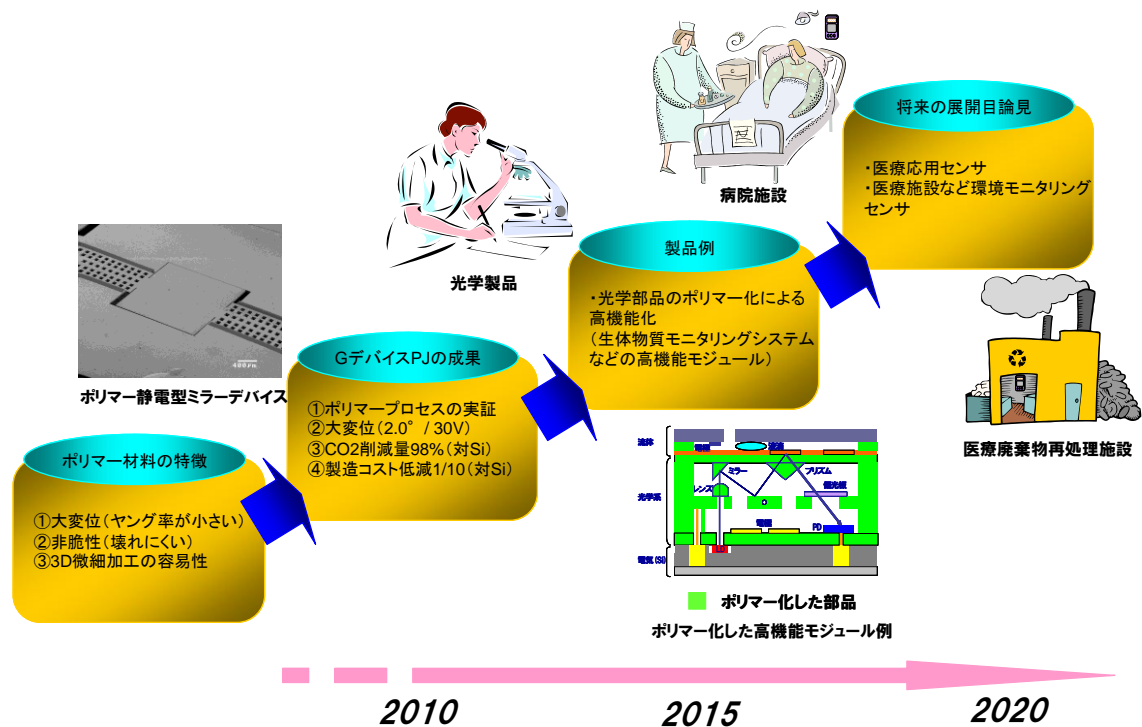
パナソニック 電工においては既に、非鉛系材料を用いたバルク焦電体からなる人感センサを開発し、センサユニットおよびセンサ搭載照明器具を販売している。一方 MEMS 技術を応用した圧力センサ、加速度センサも販売しており、MEMS デバイス製造に関しては豊富な実績を有している。今後、本プロジェクトで開発した技術をベースに、低環境負荷である非鉛強誘電体薄膜を応用し、省エネ化が可能でかつ快適空間創出につながる照明・空調制御を主としたセンサネットワークモジュールの開発を進めると同時に市場性を判断して、数年後をメドに実用化・事業化についての見通しを立てる。

2.7 低環境負荷ポリマー・センサ融合プロセス

生体適合性のあるポリマー材料は、①大変位（ヤング率が小さい）、②非脆性（壊れにくい）、③3D 微細加工の容易性などの大きな特徴がある。本PJにおいてPMMAを用いた静電型ミラーデバイスを開発することで、目論みの性能を得てポリマーの特徴を証明した。

オリンパスとしては、これらの特徴を活かし光学部品や医療向けセンサへの適用（下図）を考える。光学部品としては、大変位という特徴を活かした微小光学部品や医療応用としては、生体適合性の観点から生体情報モニタリング用センサなどの微細構造部品のポリマー化である。

また将来の目論見として、コスト低減というポリマー化の最大のメリットを活かし、環境モニタリングセンサなどの開発へ繋げる。例えば4インチウエハ1枚あたりの製造コストで比較すると、従来のシリコンベース静電型ミラーデバイスの約1/10になると試算している。



2.8 スマートプロトタイピング(8 インチラインのプロセスプラットフォーム構築)

研究試作の段階から 8 インチプロセスラインを用いて、新製造・検査装置による高品位プロセスの構築、新材料・新構造に対応したプロセスレシピの蓄積、プロセスマージンを制御した設計技術の高度化、及び高い製造歩留り・生産性を実現する新たな評価・解析技術のシーズの探索と実用化が不可欠である。

今後も低コスト化と量産化が求められる静電容量型のジャイロおよび加速度センサ、圧電型ジャイロ、Si 発振子等のセンサ TEG の試作を、8 インチラインのプロセス技術群のプラットフォーム化の手段に用いた。これらの試作に先立って、あるいは相前後して、8 インチラインに導入したプロセス装置の性能・特性を把握し、要素プロセス開発および面内均一性（欠陥・ばらつき）評価を行い、プロセスレシピ、各プロセスの歩留まり、材料、検査・計測・装置制御に関わる情報、知見・ノウハウの収集・整理を行うこととした。これらの収集・整理と試作プロセスでのそれを網羅的に蓄積することで、8 インチラインの特性・環境を踏まえたプロセスプラットフォーム確立に向けた第一歩を踏み出し、BEANS・3 次元集積化デバイスの開発・試作ユーザへの訴求力が高まることが期待される。

具体的な取り組みと成果については以下に述べる。

1) 加速度・ジャイロ・シリコン振動子、Si 薄膜メンブレン、圧電ジャイロ TEG の設計・試作

<取り組み内容>

- ・シリコンベースセンサ TEG の試作に向けて、各プロセス（成膜・リソグラフィ・エッチング・洗浄）装置の要素技術を開発する。
- ・8 インチラインを用いて試作を行い、ラインの特性ならびに製造環境を評価し、MEMS デバイス製造の基盤構築を図る。

<成果>

- ・8 インチウエハによる酸化膜、SiN、i 線露光、Si 異方性エッチング、Si-DRIE、メタルドライエッチング、犠牲層ドライエッチングの条件出し、応力解析、断面形状、寸法評価、ウエハ面内均一性を評価し、さらに5種類のセンサ TEG の試作とそのセンサの特性評価により、8 インチ試作に適用できるプロセスプラットフォームの構築を完了した。同時に8インチプロセス装置、計測装置のレシピの蓄積を行った。

<実用化の見通し>

MNOIC；ファンドリー事業（H23 年度）

パナ電；赤外線センサ、フローセンサ商品化予定（H26 年度）

DNP；ジャイロ商品化予定（H26 年度）

2) 中性粒子ビームエッチングのデバイス性能向上実証

<取り組み内容>

中性粒子ビームエッチングの大口径(8 インチ)化によるウエハ内の特性ばらつきをセンサ TEG の試作により評価する。

<成果>

8 インチウエハ面内に作製したカンチレバーに中性粒子ビームエッチングを行ない、カンチレバーの共振周波数と Q 値の初期特性を計測し、ウエハの表面状態が回復すること、100nm エッチング行ったところで特性のサチュレーションが確認でき、中性粒子ビームエッチング装置開発に重要な指針となるデータを取得できた。

3) μ プローブ TEG の設計・試作

<取り組み内容>

先端部の有効径・幅がサブミクロンであるマルチプローブアレイを 8 インチウエハで試作し、ウエハ内、及びロット間の形状・特性のバラツキを、マルチプローブ評価装置を用いて評価する。さらに、8 インチラインの検査デバイスとして適用できるかの可能性を検討する。

<成果>

マルチプローブ評価装置を用いたマルチプローブデバイスの評価手法として、局所陽極酸化(LAO)法による描画、光てこを用いた直接高さ測定、プローブ先端接触電流値のリアルタイム計測の 3 つの手法を提案し、電流値のリアルタイム計測法が最も直接的かつ容易にデバイスの特性ばらつき計測や不良スクリーニングをできることを見出した。電流値のリアルタイム計測法を用いて、8 インチラインで試作したデバイスの、ロット間、ウエハ内での形状ばらつきを評価した結果、顕著な形状ばらつきは見られなかったものの、ロット間の電極配線形成プロセスの品質に差があることが示唆された。このことから、本デバイスを用いた手法が、最先 8 インチラインの検査デバイスとして適用し得る可能性を示した。

<実用化の見通し>

東芝； 16nm 世代以降の半導体・MEMS 向けローコスト描画技術として、実用化・事業化を目指す。

(東芝プレスリリース、

http://www.toshiba.co.jp/about/press/2011_01/pr_j2502.htm)

4) 欠陥・ばらつき評価におけるモデリング・計測技術開発

今回開発したばらつき評価手法で等価回路モデルパラメータのばらつきから構造寸法のばらつきが正しく評価できることを確認できた。本成果より設計者がウエハ内のばらつきを解析するためのツールである「ウエハ内特性ばらつき可視化・分析ソフトウェア」として 2015 年までに実用化できる見込みである。まずは MNOIC のライ

ンに対応したシステムを提供する。実用化に向けて静電容量系以外の MEMS への対応、多種デバイスによる検証、測定の高精度化、高速化を進めていく。具体的には実用化のために、以下のステップを踏むこと考える。

- ① 静電容量系以外の MEMS への対応と多種デバイスによるさらなる検証
- ② 実用化に向けたツールの整備
- ③ 汎用の電気特性評価システムに組み込み「ウエハ内特性ばらつき可視化・分析ソフトウェア」を TIA-NMEMS/MNOIC にて提供
- ④ 「ウエハ内特性ばらつき可視化・分析ソフトウェア」の販売

更なる検証のためには、等価回路モデルにおける直流電圧依存性を考慮し、複数の直流電圧の出力特性からパラメータを抽出することで、等価回路モデルの精度を向上する必要がある。また実用的な手法を確立するためには、より多くのセンサに対して検証を行い評価手法の信頼性、汎用性を高めることが求められる。その後、評価を行うツールの整備を進める。評価に必要なツールには、MEMS の電気、機械特性のウエハ内分布を自動的に計測するツール、電気・機械特性から等価回路パラメータを抽出するツール、等価回路パラメータからばらつきを評価するツールなどがある。最後に整備したツールを汎用の電気特性評価システムに組み込み、「ウエハ内特性ばらつき可視化・分析ソフトウェア」として 2015 年度頃にユーザに提供を開始する見通しである。最初のツール提供の場としては、出来るだけ多くの設計者に還元でき、評価のために必要な測定装置を備えた公開研究施設である TIA-NMEMS/MNOIC が有力候補として考えられる。2018 年度頃には、年間数千万規模のソフトウェア販売事業を想定している。

2.9 低環境負荷型深堀エッチング

実用化に向けた今後の取り組みとして、

- ① MEMS 深堀エッチング装置、半導体エッチング装置への適用推進（アルバック）
 - ② 車載用高集積センサ、ECU 用 LSI への適用推進（デンソー）
 - ③ エッチング解析ソフトへのプラグイン化（みずほ情報総研）
- がある。

一方、実用化の課題として、以下をクリアにする必要がある。

（課題）

- ① BF3 ガスの低コスト化
SF6 と BF3 の単位重量あたりの単価を比較すると、現時点では BF3 が約 8 倍高価であることから、ガス使用量で試算すると 1 プロセスあたり 4 倍ほどプロセスコストがかかる。このコスト差をいかに縮めるかが今後の課題となる。
- ② エッチング性能への付加価値性
エッチング代替ガスを使ったプロセスをエッチング装置に組み込み、ユーザに

対してうれしさをアピールするには、エッチング性能で既存のプロセスに対してプラスになる何らかの付加価値が必要である。

③ 想定デバイスの技術成立性

車載用高集積センサ、ECU 用 LSI への適用を検討するうえで、エッチング工程を含むトータルプロセスおよび、デバイス性能の成立性が満足できるかが今後の課題である。

また、将来的には本プロジェクトで開発したプラズマモニタリングとエッチング形状予測結果からパラメータへフィードバックを行うことをエッチング装置に組み込むことも視野に入れる。

以上の実用化の課題に関して継続的に検討に取り組み、4、5年後の実用化を目指す。

2.10 低環境負荷型集積化プロセス基盤

本研究開発項目の最終目標である低温接合技術を適用する MEMS デバイスとして静電容量型加速度センサを挙げることができる。従来は、別チップとして製造した信号処理回路 ASIC と MEMS を、ワイヤー・ボンディングで接続して 1 パッケージ化している。本接合技術により、ASIC と MEMS とを 1 チップに集積化することで、ワイヤー・ボンディングによる接続に比べて寄生容量を低減できるため高性能化と小型化が実現できる。さらに、低温接合技術により、高温で機能劣化するスティクション防止膜の性能を損なうことなく実装が可能となる。

三菱電機は、1999 年に製品化した静電容量型 MEMS 加速度センサを初めとして、高い信頼性が要求される各種分野に継続して製品を提供している。総合電機メーカーとして幅広く製品展開をしており、各種システムと MEMS デバイスとを融合させた製品を事業化する能力を有している。例えば、加速度センサとジャイロを集積化した慣性センサは、国内外での法制化が進む自動車の走行安定性を制御する横滑り防止システムに不可欠なセンサであり、高性能で高い信頼性が求められ、本研究開発成果を適用するにふさわしい製品のひとつと考えている。

今回のプロジェクトで得られた要素技術をもとに、4 年程度を目処に実用化の見通しを立てる。事業化については、その時点での市場動向や事業性を勘案して判断する。

2.11 スマートファブシステム

本技術開発項目の成果の実用化の対象として次のものが挙げられ、それぞれみずほ情報総研としての実用化の見込みについて述べる。

① 3 次元構造計測による設計へのフィードバック

X 線 CT 装置計測から形状・力学特性の比較という一連の手続きにより、デバイス・プロセス設計改善への指針を提示し得る。これにより MEMS 設計の効率化を

図ることができ、開発時のエネルギー・資源の削減、開発期間の短縮・製品の早期市場投入につながる。

X線CTによるMEMSの計測はこれまで行われていなかったため、計測の特性が企業の必要としている開発現場のニーズを満たすものであれば、計測・分析サービスという形で実用化の可能性は高いと想定される。2011年度中に実用化を予定しており、3年後の売り上げを9000万円と見込んでいる。

② MEMS製造時の二酸化炭素排出量の分析

MEMSのデバイス構造体の製造工程についての二酸化炭素排出量の分析により、装置・工程・項目に対する排出量の削減への指針を得る。これらにより、製造工程の環境負荷低減を図ることができ、また、MEMSの低環境負荷設計を行うことも可能になる。様々なMEMSの二酸化炭素排出量分析を通じて得られた知見は、ソフトウェアツールとして提供することで幅広く有効に活用されるものとなる。

環境負荷低減は我が国全体を挙げて取り組むべき課題であり、カーボンフットプリント等の国家の法制度・標準化施策や企業の社会的責任としての取り組みの進展とともに、二酸化炭素排出量の分析へのニーズが高まってくるものと想定される。ソフトウェアツールとしての提供は2013年を予定している。また、MNOIC@TIAでの装置やレシピへの環境ラベリングのための分析を予定している。

二酸化炭素排出量の分析手法が出荷される全MEMSに適用され25%の削減効果があると想定すると、9万t-CO₂e/年間(2019年)の排出量の削減が見込まれる。

③ デバイス設計・プロセス設計のための情報共有基盤

設計情報や材料物性、計測情報や環境負荷情報を格納できるデータベースシステムと、これらのデータを協調して活用するためのフレームワークを実用に供する形で実現することにより、設計の効率化を図ることが可能になる。設計の効率化という観点から、設計ツールとの連携や統合化をはかることで、より有効に活用されるものとなる。

設計における3次元構造などの計測情報の活用や、二酸化炭素排出量などの環境負荷情報の活用の進展とともにデータベースへのニーズが高まってくると想定される。特に、環境負荷情報は、環境負荷を分析する上での標準化と歩調を合わせた公共性の高いデータとなり得る。MNOIC@TIAの装置に対応したデータベースシステムの提供を2013年に、設計ツールとの連携機能の提供を2015年に予定している。

データベースシステムの利用によるデータの収集や設計の効率化により、設計時間を6000時間(1サイト、20デバイス開発)削減可能であると見込んでいる。

各研究開発成果の詳細内容

- ・ 1 高機能センサネットシステム開発
- ・ 1. 1 半導体クリーンルームセンサネットシステム開発

(1) 研究目的

全世界的課題として環境エネルギー問題への対応が各国毎、各産業毎に強く求められている。特に、省資源や高効率、低環境負荷化として温室効果ガス排出量削減に向けた取り組みが重要となる。特に、クリーンルームでは非常に大きなエネルギーが使用されており、CO2 排出量削減に向けた取り組みが望まれる。

表V.1.1-1に実際の半導体工場での消費電力量の一例を示す。

2000 平米(クリーン度 10 個/cf)クリーンルームが 3 箇所ある半導体工場の年間消費電力量である。非常に大きな電力が消費されていることが分かる。金額換算すると、施設設備では、4.2 億円。生産設備では、1.8 億円の電力が毎年消費されている。電力量単価を 12 円/kWh とする。

施設設備：35048000(kWh) × 12(円/kWh) = 420,576,000(円)

生産設備：14947000(kWh) × 12(円/kWh) = 179,364,000(円)

表V.1.1-1 (某)半導体工場での年間電力量(千 kWh)

施設設備	千kWh/年	生産設備	千kWh/年
空調設備用冷凍機	11316	ドライエッチング装置	3162
空調機	9158	枚様式生膜装置	2894
パッケージ空調機	173	イオン注入装置	1953
生産排気設備	2246	縦型炉	1858
生産冷却水設備	1296	露光装置	1797
N2製設備	3710	スパッタ装置	1140
超純水設備	1123	レジスト除去装置	527
排水処理設備	864	試験装置	1616
圧縮空気設備	1384	小計	14947
照明設備	1253		
特別高圧変圧器損失	1683		
高圧用変圧器損失	842		
小計	35048		

表V.1.1-2に国内のクリーンルーム数を示す。

2007年10月時点で国内には8000以上のクリーンルームが存在することが分かる。

表V.1.1-2 国内クリーンルーム数

	合計数量	平成3年以降	平成元年～2年	昭和59年～63年	昭和58年以前
クリーンルーム 全体	8,372 (100.0%)	1,611 (19.2%)	1,648 (19.7%)	3,121 (37.3%)	1,992 (23.8%)
クラス100以下	1,710 (100.0%)	357 (20.9%)	314 (18.4%)	734 (42.9%)	305 (17.8%)
クラス1000以上	6,662 (100.0%)	1,254 (18.8%)	1,334 (20.0%)	2,387 (35.8%)	1,687 (25.3%)

■特定機械設備統計調査
<http://www.meti.go.jp/statistics/tyo/kikaise/tokei.html>
 最終更新日:2007.10.1
<http://www.meti.go.jp/statistics/tyo/kikaise/xls/hm24940j.xls>

仮に、クラス100以下のクリーンルームの年間電力量を5000万円、クラス1000以上のクリーンルームの年間電力量を500万円と仮定すると、国内のクリーンルームでは、年間1200億円弱の電力量が毎年消費されていることとなり、非常に大きなエネルギーが使われている。クリーンルームでのエネルギー削減は非常に大きな意義があることが分かる。表V.1.1-3に国内クリーンルームでの年間電力料金を示す。

表V.1.1-3 国内クリーンルームでの年間電力料金

	合計_電力料金@年	数量	電力料金@年
クラス100以下	855億円	1,710	5000万円
クラス1000以上	333.1億円	6,662	500万円
クリーンルーム全体	1188.1億円	8,372	---

高機能センサネットワークシステムを実現するに際し、下記3項目の検討を行った。

- ・エネルギー(CO2)見える化システムの検討
- ・CO2_60%削減の検討
- ・エネルギー最適_空調自動制御システムの検討

図V.1.2-1に高機能センサネットワークシステムで目指している最終の姿を記載する。

最終的には、クリーンルームで消費されている様々なエネルギーおよびエネルギーに影響を与える項目の「見える化」を行い、エネルギーのムダを抽出し、あるムダは運用改善で、あるムダは自動制御を行って、エネルギーの削減を行うことを目指している。そのための手段として、MEMSセンサによる多点計測とオンデマンド制御をキーワードに各種検討を行った。

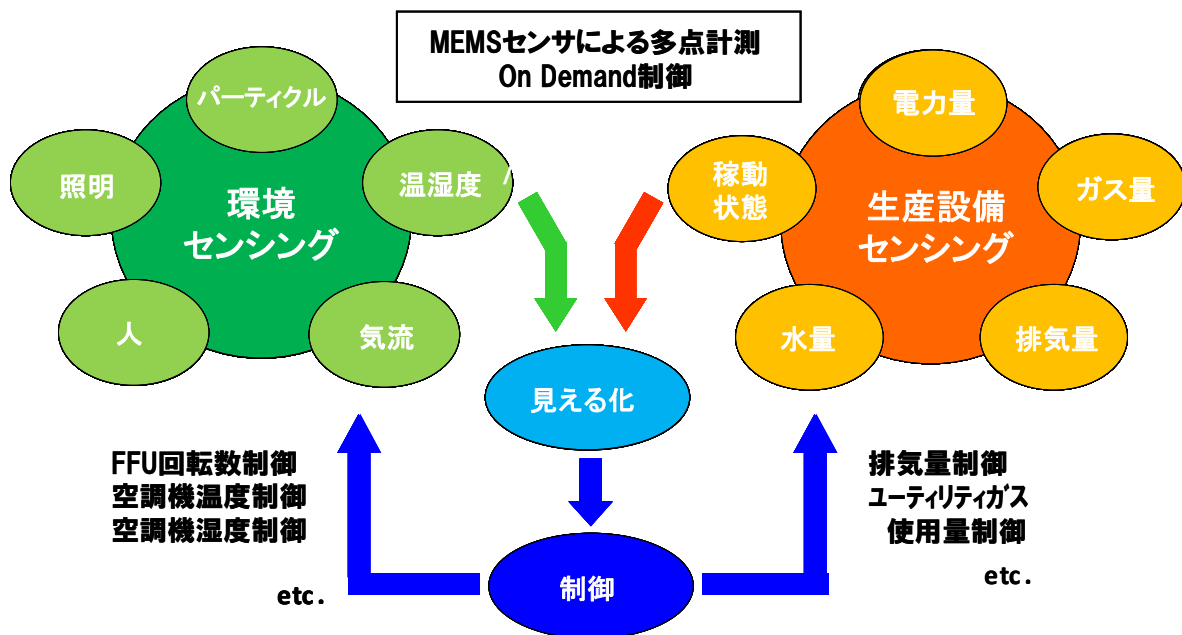


図 V.1.2-1 高機能センサネットワークシステムでの最終の姿

(2) エネルギー(CO2)見える化システムについて

(2) -1 エネルギー(CO2)見える化システムの検討

エネルギー(CO2)排出量削減に向けた取り組みを継続して推進して行くためには、使用されるエネルギーの消費量や消費傾向を把握することは重要である。クリーンルームで消費されているエネルギーおよび、そのエネルギーに影響を与える項目の見える化の検討を行った。

エネルギー見える化の項目

下記項目の見える化を行う。

- ・ 電力消費量：エネルギーの基本単位であり、生産設備、空調設備、付帯設備の全てにおいて、見える化を行う。
- ・ ガス消費量：プロセスガスやユーティリティガスも多量に使用されており、見える化を行う。
- ・ 純水消費量：純水も多量に使用されており、見える化を行う。
- ・ 温湿度：空調エネルギーに大きく影響を与える項目であり、見える化を行う。
- ・ パーティクル量：パーティクル量の有無に係わらず、空調設備が稼働しており、空調設備エネルギーに影響を与える項目であり、見える化を行う。次ステップとしては、パーティクル量に応じた空調設備の自動制御に繋げる。自動制御のイメージとしては、パー

ティクル量が少ない時は、FFU(FanFilterUnit)などの空調設備の稼働状態を低く抑えて、省エネを図る。

- ・ 人在室情報：人の有無に係わらず、空調設備が稼働しており、空調設備エネルギーに影響を与える項目であり、見える化を行う。次ステップとしては、人の在室状況に応じた空調設備の自動制御に空調設備の自動制御に繋げる。自動制御のイメージとしては、人が居ない時、もしくは少ない時は、FFU(FanFilterUnit)などの空調設備の稼働状態を低く抑えて、省エネを図る。
- ・ 設備排気量：設備からの排気量の見える化を行う。現状、設備の稼働状態に係わらず、設備排気は行われている。排気を行うということは、排気を行った分だけ、外気を新たに温湿度調整して取り込む必要がある。次ステップとしては、設備稼働状態に応じた排気設備の自動制御に繋げる。自動制御のイメージとしては、プロセス以外の時は、排気量を制限し、外気取り組み量も併せて制限することにより、空調設備の省エネを図る。
- ・ 設備稼働情報：設備稼働状態を把握することは重要であり、見える化を行う。例えば、設備の稼働情報から、設備電力量のムダを抽出したり、設備の稼働情報から、生産設備が稼働していない時は、その生産設備周辺の空調設備の稼働状態を低く抑えて、省エネを図ることなども想定できる。

■ ユーザフレンドリーな情報端末の導入検討

組織的に継続して省エネに取り組むためには、構成メンバーの前向きな取り組み参加が重要である。その際、エネルギーに関する各種情報が、誰でも、何処でも、簡単に情報共有できることは重要である。一般的に、研究所では研究員、開発現場では開発員、製造現場では製造スタッフにとって、省エネ活動は主目的な取り組み業務ではない。何らかの研究や商品開発や納期通りに製品を作り上げることが最優先業務であり、省エネ活動は付随的な業務に成りがちである。特に、エネルギーに関する各種情報へのアクセスが面倒であれば、益々、構成メンバーは、継続的な省エネ活動を後回しにすることとなる。それを防ぎ、構成メンバーの前向きな取り組みの動機付けを行うためにも、「誰でも、何処でも、簡単に」、クリーンルームでのエネルギー情報を共有できることは重要である。上記理由により、ユーザフレンドリーな情報端末の導入を行った。

■ エネルギー分析支援ツールの導入検討

エネルギー削減の専任担当者もしくは準専任担当者が、エネルギーの詳細データを分析するには、任意のデータを任意の期間、任意の組み合わせで、データ加工／再表示できることは重要である。例えば、設備 A と設備 B を比較する場

合、電力量のみならず、周辺の温湿度やパーティクル量や稼動状態などの情報を任意に選択でき、再表示できれば、エネルギーのムダを抽出することに役立たせることは可能となる。

上記理由により、エネルギー分析を行う支援ツールの導入を行った。

■運用イメージ

実際に、ユーザフレンドリーな情報端末とエネルギー分析支援ツールを導入して、工場などの現場で運用するイメージは下記の通りである。

エネルギー削減専任責任者が「エネルギー見える化システム」で収集したデータを「エネルギー分析支援ツール」でムダを抽出し、削減の指針や方向性を示し、構成メンバは、いつでも、どこでも、誰でも、簡単に情報を共有できるユーザフレンドリーな情報端末を利用して、省エネ活動を継続して取り組み、エネルギー削減に繋げる。

(2) -2 エネルギー(CO2)見える化システムの評価

■エネルギー見える化

3D棟、3B棟、2G棟クリーンルームにおいて、エネルギーの見える化を行った。見える化を行った項目の詳細を表V.2.2.-1、表V.2.2.-2、表V.2.2.-3に記載する。3D棟クリーンルームでは、157点。3B棟クリーンルームでは、179点。2G棟クリーンルームでは、105点。合計：441点の項目の見える化を実現した。計測間隔は、10分。

表V.2.2-1 3D棟クリーンルーム エネルギー見える化システム項目

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ウェハ洗浄装置(1)(kWh)	ウェハ洗浄装置(2)(kWh)	薬液発生機(kWh)	ウェハ検査装置(kWh)	ウェットエッチング装置(kWh)	有機ドラフト(kWh)	アッシャー(kWh)	IPAバーバー乾燥機(kWh)	CL2除害(kWh)	PFC除害(kWh)	その他(N-24B-21)(kWh)	その他(N-26A-28)(kWh)	その他(N-24B-22)(kWh)	その他(N-26A-29)(kWh)	HF酸性層エッチャー(kWh)
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
高品質膜作成装置(シリクロシラン)(kWh)	高品質膜作成装置(モラン)(kWh)	低温成膜装置(kWh)	金属機能性材料膜形成装置(kWh)	金属機能性材料膜エッチング装置(kWh)	金属機能性材料膜エッチング装置(SF6ガス)(kWh)	酸化炉(kWh)	大面積シリコン深堀加工装置(kWh)	マスク露出装置(kWh)	マスク露光機(kWh)	段差測定装置(kWh)	コーターデロパ(kWh)	ステップ(kWh)	シリコン深堀加工装置(kWh)	酸化炉・窒化物エッチング装置(kWh)
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
拡散炉(kWh)	超純水製造装置(kWh)	ガス監視UPS(kWh)	酸・アルカリ排気ガス処理装置(kWh)	有機排気ガス処理装置(kWh)	熱回収チラーユニット(RHU-1)(kWh)	冷水1次ポンプ(PH-1-1)(kWh)	温水1次ポンプ(PH-1-1)(kWh)	冷水2次ポンプ(PH-2-1)(kWh)	温水2次ポンプ(PH-2-1)(kWh)	空冷パッケージ(PAC-1)(kWh)	空冷パッケージ(PAC-2)(kWh)	空冷パッケージ(PAC-3)(kWh)	空冷ヒートポンプパッケージ(PAC-4)(kWh)	熱一般排気ファン(kWh)
46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
加湿器(WM-2)(kWh)	加湿器(WM-3)(kWh)	外調機(AHU-1)(kWh)	コンセントA(3D-8-04)(kWh)	コンセントB(3D-9-03)(kWh)	その他(N-23A-10)(kWh)	その他(N-23A-11)(kWh)	その他(G-23A-06-1)(kWh)	その他(N-26A-29)(kWh)	その他(N-23A-36)(kWh)	その他(N-24B-30)(kWh)	その他(N-26A-37)(kWh)	その他(N-24B-23)(kWh)	その他(N-24B-30)(kWh)	その他(N-24B-28)(kWh)
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
その他(N-26A-35)(kWh)	その他(N-24B-24)(kWh)	その他(N-26A-31)(kWh)	その他(N-24B-25)(kWh)	その他(N-26A-32)(kWh)	その他(N-26B-26)(kWh)	その他(N-26A-33)(kWh)	その他(N-24B-27)(kWh)	その他(N-26A-34)(kWh)	その他(N-23A-13)(kWh)	その他(N-23A-14)(kWh)	G23-06(kWh)	その他(N-24B-12)(kWh)	その他(N-24B-20)(kWh)	その他(N-26A-27)(kWh)
76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
その他(N-24B-19)(kWh)	その他(N-26A-26)(kWh)	パーティクル量0.3μm(Wet室)出入口(個)/cf[0.3μm]	パーティクル量0.5μm(Wet室)出入口(個)/cf[0.5μm]	パーティクル量1.0μm(Wet室)出入口(個)/cf[1.0μm]	パーティクル量0.3μm(エアリターン/wet室)出入口(個)/cf[0.3μm]	パーティクル量0.5μm(エアリターン/wet室)出入口(個)/cf[0.5μm]	パーティクル量1.0μm(エアリターン/wet室)出入口(個)/cf[1.0μm]	パーティクル量0.3μm(エアリターン/wet室)出入口(個)/cf[0.3μm]	パーティクル量0.5μm(エアリターン/wet室)出入口(個)/cf[0.5μm]	パーティクル量1.0μm(エアリターン/wet室)出入口(個)/cf[1.0μm]	パーティクル量0.3μm(エアリターン/wet室)出入口(個)/cf[0.3μm]	パーティクル量0.5μm(エアリターン/wet室)出入口(個)/cf[0.5μm]	パーティクル量1.0μm(エアリターン/wet室)出入口(個)/cf[1.0μm]	パーティクル量0.3μm(エアリターン/wet室)出入口(個)/cf[0.3μm]
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105
パーティクル量0.5μm(エアリターン/wet室)出入口(個)/cf[0.5μm]	パーティクル量1.0μm(エアリターン/wet室)出入口(個)/cf[1.0μm]	パーティクル量0.3μm(エアリターン/wet室)出入口(個)/cf[0.3μm]	パーティクル量0.5μm(エアリターン/wet室)出入口(個)/cf[0.5μm]	パーティクル量1.0μm(エアリターン/wet室)出入口(個)/cf[1.0μm]	パーティクル量0.3μm(エアリターン/wet室)出入口(個)/cf[0.3μm]	パーティクル量0.5μm(エアリターン/wet室)出入口(個)/cf[0.5μm]	パーティクル量1.0μm(エアリターン/wet室)出入口(個)/cf[1.0μm]	パーティクル量0.3μm(エアリターン/wet室)出入口(個)/cf[0.3μm]	パーティクル量0.5μm(エアリターン/wet室)出入口(個)/cf[0.5μm]	パーティクル量1.0μm(エアリターン/wet室)出入口(個)/cf[1.0μm]	薬液発生機(N2ガス)(L)	アッシャー(N2ガス)(L)	低温成膜装置(N2ガス)(L)	金属機能性材料膜形成装置(N2ガス)(L)
106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
高品質膜作成装置(N2ガス)(L)	コーターデロパ(N2ガス)(L)	金属機能性材料膜エッチング装置(N2ガス)(L)	大面積シリコン深堀装置(SF6ガス1系統)(L)	大面積シリコン深堀装置(SF6ガス2系統)(L)	大面積シリコン深堀装置(C4F8ガス1系統)(L)	大面積シリコン深堀装置(C4F8ガス2系統)(L)	シリコン深堀加工装置(SF6ガス)(L)	シリコン深堀加工装置(C4F8ガス)(L)	酸化炉・窒化物エッチング装置(SF6ガス)(L)	高品質膜作成装置(シリクロシラン)(L)	高品質膜作成装置(モラン)(L)	超純水製造装置(上)(L)	ウェットエッチング装置(カナックス)純水(L)	コーターデロパ(純水)(L)
121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135
ウェハ洗浄装置(1)純水入力(L)	ウェハ洗浄装置(2)純水出力(L)	熱一般排気量(m3)	酸・アルカリ排気量(m3)	有機排気(排気量)(m3)	ウェハ洗浄装置(1)排気量(m3)	ウェハ洗浄装置(2)排気量(m3)	有機ドラフト(排気量)(m3)	シリコン深堀加工装置(排気量)(m3)	酸化炉・窒化物エッチング装置(排気量)(m3)	コーターデロパ(排気量)(m3)	ステップ(排気量)(m3)	拡散炉(排気量)(m3)	酸化炉(排気量)(m3)	ウェハ洗浄装置(2)薬品(L/min)
136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150
ウェットエッチング装置(カナックス)薬品	メイン室温度(Wet室) (°C)	メイン室温度(Wet室) (°C)	Wet室温度(°C)	リソ室温度(°C)	メイン室温度(リソ室) (%)	メイン室温度(Wet室) (%)	Wet室温度(%)	リソ室温度(%)	差圧メイン室-Wet室(Pa)	差圧リソ室-Wet室(Pa)	差圧リソ室-メイン室(Pa)	差圧測定リソ室(Pa)	差圧測定メイン室(Pa)	差圧測定Wet室(Pa)
151	152	153	154	155	156	157								
人感センサ(Wet室) ([0-1])	人感センサ(リソ室) ([0-1])	人感センサ(メイン室A) ([0-1])	人感センサ(メイン室B) ([0-1])	シリコン深堀装置(タウラン) ([0-1])	高品質膜作成装置(タウラン) ([0-1])	拡散炉(タウラン) ([0-1])								

電力量
パーティクル量
ガス量/排気量/市水純水量

温度/湿度
室圧
人感
設備稼働

表V.2.2-2 3B棟クリーンルーム エネルギー見える化システム項目

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
電気特性検査装置 電力量 (kWh)	内部構造観察装置 (本体) 電力量 (kWh)	内部構造観察装置 (PC) 電力量 (kWh)	マルチプローブ 電力量 (kWh)	薄膜内部応力評価装置 電力量	分析構造解析装置 電力量	高精度寸法測定装置 電力量 (kWh)	赤外線顕微鏡 電力量 (kWh)	電極形成装置 電力量 (kWh)	熱処理炉 電力量 (kWh)	ウェハtoウェハ 接合装置 (プロセス) 電力量 (kWh)	ウェハtoウェハ 接合装置 (接合) 電力量 (kWh)	チップtoチップ 接合装置 (接合) 電力量 (kWh)	FFU1 (FFU-1 8台) 合計 電力量 (kWh)	FFU2 (FFU-2, 10台) 合計 電力量 (kWh)
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
FFU3 (FFU-3 1台) 合計 電力量 (kWh)	FCU3 (FCU-2 1台) 合計 電力量 (kWh)	FCU2 (FCU-12 3台) 合計 電力量 (kWh)	FCU1 (FCU-8 2台) 合計 電力量 (kWh)	FFU-1-01 CR1 FFU電力量 (kWh)	FFU-1-02 CR1 FFU電力量 (kWh)	FFU-1-03 CR1 FFU電力量 (kWh)	FFU-1-04 CR1 FFU電力量 (kWh)	FFU-1-05 CR1 FFU電力量 (kWh)	FFU-1-06 CR1 FFU電力量 (kWh)	FFU-1-07 CR1 FFU電力量 (kWh)	FFU-1-08 CR1 FFU電力量 (kWh)	FFU-2-01 CR2 FFU電力量 (kWh)	FFU-2-02 CR2 FFU電力量 (kWh)	FFU-2-03 CR2 FFU電力量 (kWh)
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
FFU-2-04 CR2 FFU電力量 (kWh)	FFU-2-05 CR2 FFU電力量 (kWh)	FFU-2-06 CR2 FFU電力量 (kWh)	FFU-2-07 CR2 FFU電力量 (kWh)	FFU-2-08 CR2 FFU電力量 (kWh)	FFU-2-09 CR2 FFU電力量 (kWh)	FFU-2-10 CR2 FFU電力量 (kWh)	FFU-3 更衣室 FFU電力量 (kWh)	FCU-2 更衣室 FCU電力量 (kWh)	FCU-12-1 CR2 FCU電力量 (kWh)	FCU-12-2 CR2 FCU電力量 (kWh)	FCU-12-3 CR2 FCU電力量 (kWh)	FCU-8-1 CR1 FCU電力量 (kWh)	FCU-8-2 CR1 FCU電力量 (kWh)	空調盤-1 電力量 (kWh)
46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
空調盤-2 電力量 (kWh)	照明電灯盤 電力量 (kWh)	31BP-1114-1 主幹 電力量 (kWh)	31BP-1116-1-1 主幹 電力量 (kWh)	31BP-1116-1-2 主幹 電力量 (kWh)	31BP-1117-1 主幹 電力量 (kWh)	31BP-1118-1 主幹 電力量 (kWh)	RH-1 空冷ヒートポンプ 電力量 (kWh)	R-1 空冷ヒートポンプ 電力量 (kWh)	PCH-1 冷温水ポンプ 電力量 (kWh)	PC-1 冷水ポンプ 電力量 (kWh)	VP-1 真空ポンプ 電力量 (kWh)	COM-1 空気圧縮機 電力量 (kWh)	AD-1 エアライナー 電力量 (kWh)	MVD装置 (トランポン) 電力量 (kWh)
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
MVD装置 (トランス) 電力量 (kWh)	MVD装置 (PC) 電力量 (kWh)	UV照射装置 電力量 (kWh)	接合欠陥観察装置 電力量1 (kWh)	接合欠陥観察装置 電力量2 (kWh)	FE-1 排気ファン 電力量 (kWh)	FE-2 排気ファン 電力量 (kWh)	OAC-1 加湿器 電力量 (kWh)	OAC-1 外気処理空調機 電力量 (kWh)	OAC-1 外気処理空調機 電力量 (kWh)	電気特性検査装置 (0.3 μm) (個/cf)	電気特性検査装置 (0.5 μm) (個/cf)	電気特性検査装置 (1.0 μm) (個/cf)	内部構造観察装置 (0.3 μm) (個/cf)	内部構造観察装置 (0.5 μm) (個/cf)
76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
内部構造観察装置 (1.0 μm) (個/cf)	高精度寸法測定装置 (0.3 μm) (個/cf)	高精度寸法測定装置 (0.5 μm) (個/cf)	高精度寸法測定装置 (1.0 μm) (個/cf)	電極形成装置 (0.3 μm) (個/cf)	電極形成装置 (0.5 μm) (個/cf)	電極形成装置 (1.0 μm) (個/cf)	熱処理炉 (0.3 μm) (個/cf)	熱処理炉 (0.5 μm) (個/cf)	熱処理炉 (1.0 μm) (個/cf)	ウェハtoウェハ 接合装置 (0.3 μm) (個/cf)	ウェハtoウェハ 接合装置 (0.5 μm) (個/cf)	ウェハtoウェハ 接合装置 (1.0 μm) (個/cf)	チップtoチップ 接合装置 (0.3 μm) (個/cf)	チップtoチップ 接合装置 (0.5 μm) (個/cf)
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105
チップtoチップ 接合装置 (1.0 μm) (個/cf)	MVD装置 (0.3 μm) (個/cf)	MVD装置 (0.5 μm) (個/cf)	MVD装置 (1.0 μm) (個/cf)	UV照射装置 (0.3 μm) (個/cf)	UV照射装置 (0.5 μm) (個/cf)	UV照射装置 (1.0 μm) (個/cf)	接合欠陥観察装置 (0.3 μm) (個/cf)	接合欠陥観察装置 (0.5 μm) (個/cf)	接合欠陥観察装置 (1.0 μm) (個/cf)	THE1-2-T CR1 室内温度 (°C)	TE-1-01-T CR1 室内温度 (°C)	TE-1-02-T CR1 室内温度 (°C)	電気特性検査装置 温度 (°C)	マルチプローブ 温度 (°C)
106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
高精度寸法測定装置 温度 (°C)	TE-1-03-T CR2 室内温度 (°C)	TE-1-04-T CR2 室内温度 (°C)	TE-1-05-T CR2 室内温度 (°C)	電極形成装置 温度 (°C)	熱処理炉 温度 (°C)	ウェハtoウェハ 接合装置 温度 (°C)	THE1-1-T 外気温度 (°C)	THE1-1-06-T 更衣室 室内温度 (°C)	TE-OAC 給気温度 (°C)	TE-CS 冷水温度 (°C)	チップtoチップ 接合装置 温度 (°C)	接合欠陥観察装置 温度 (°C)	MVD装置 温度 (°C)	UV照射装置 温度 (°C)
121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135
THE1-3-T CR2 温度 (°C)	TE-CR 冷水温度 (°C)	OAC内部温度 (°C)	TE-HCS 冷温水温度 (°C)	TE-HCR 冷温水温度 (°C)	THE1-1-H 外気湿度 (%)	THE1-2-H CR1 湿度 (%)	THE1-3-H CR2 湿度 (%)	電気特性検査装置 湿度 (%RH)	マルチプローブ 湿度 (%RH)	高精度寸法測定装置 湿度 (%RH)	電極形成装置 湿度 (%RH)	熱処理炉 湿度 (%RH)	ウェハtoウェハ 接合装置 湿度 (%RH)	UV照射装置 湿度 (%RH)
136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150
接合欠陥観察装置 露点温度 (%RH)	チップtoチップ 接合装置 露点温度 (%RH)	MVD装置 露点温度 (%RH)	DE-OAC 給気露点 (°CDP)	電極形成装置 露点温度 (°CDP)	チップtoチップ 接合装置 露点温度 (°CDP)	電気特性検査装置 露点温度 (°CDP)	UV照射装置 露点温度 (°CDP)	マルチプローブ 露点温度 (°CDP)	熱処理炉 露点温度 (°CDP)	高精度寸法測定装置 露点温度 (°CDP)	ウェハtoウェハ 接合装置 露点温度 (°CDP)	MVD装置 露点温度 (°CDP)	接合欠陥観察装置 露点温度 (°CDP)	GD-2 CR1 露点温度 (%)
151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165
GD-3 CR2 酸素濃度 (%)	GD-1 CR1 酸素濃度 (%)	DPE-1-1 CR1 室内差圧 (Pa)	DPE-1-2 CR2 室内差圧 (Pa)	DPED-1 給気静圧 (Pa)	DPED-2 排気静圧 (Pa)	人感センサ1	人感センサ2	人感センサ3	人感センサ4	FM-C 冷水流量 (L/min)	FM-HC 冷温水流量 (L/min)	VAV-1S VAV 風量出力値 (m3/h)	VAV-2S VAV 風量出力値 (m3/h)	PE-HCS 冷温水圧力 (Mpa)
166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	
PE-CS 冷水圧力 (Mpa)	MV-C-01 FCU冷水弁 01 開度出力値 (%)	MV-C-02 FCU冷水弁 02 開度出力値 (%)	MV-C-03 FCU冷水弁 03 開度出力値 (%)	MV-C-04 FCU冷水弁 04 開度出力値 (%)	MV-C-05 FCU冷水弁 05 開度出力値 (%)	MV-C-06 FCU冷水弁 06 開度出力値 (%)	OAC-1 ファン INV 出力値 (Hz)	OAC-1 ヒーター 出力値 (%)	OAC-1 加湿器 出力値 (%)	MV-CB FCU 冷水ハイパス弁 開度出力値 (%)	MV-HCB OAC 冷温水ハイパス弁 開度出力値 (%)	MV-HC OAC 冷温水弁 開度出力値 (%)	FE-1 ファン INV 出力値 (Hz)	

電力量
パーティクル量
ガス量/排気量/市水純水量

温度/湿度
室圧
人感
設備稼働

表V.2.2-3 2G棟クリーンルーム エネルギー見える化システム項目

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
密閉型大気圧プラズマ方式評価装置 1/3単相 (kWh)	密閉型大気圧プラズマ方式評価装置 2/3三相 (kWh)	密閉型大気圧プラズマ方式評価装置 3/3三相 (kWh)	4インチ熱処理炉 (kWh)	マグネトロンスパッタ装置 1/2単相 (kWh)	マグネトロンスパッタ装置 2/2三相 (kWh)	RIE 電力量 (kWh)	SEM (CHILLER) 1/2 (kWh)	SEM (MAIN) 2/2 (kWh)	抵抗金属電極スパッタ装置 (kWh)	ICP STS #1 電力量 (kWh)	ICP STS #2 電力量 (kWh)	自動酸化炉 (kWh)	CVD (kWh)	AHU-2 1Fドライ加工室空調機 (kWh)
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
コンプレッサ (kWh)	塗料製造装置 (kWh)	PFC除外装置 (kWh)	1LM-B 実験電力単相 (その他) (kWh)	1LM-C 実験電力単相主幹 (kWh)	1LM-C 実験電力三相 (その他) (kWh)	1LM-D 実験電力単相主幹 (kWh)	1LM-D 実験電力三相 (その他) (kWh)	1LM-E 実験電力単相 (その他) (kWh)	1LM-E 実験電力三相 (その他) (kWh)	1LM-F 実験電力単相主幹 (kWh)	1LM-F 実験電力三相 (その他) (kWh)	1LM-G 実験電力単相 (その他) (kWh)	1LM-G 実験電力三相主幹 (kWh)	1LM-H 実験電力三相 (その他) (kWh)
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
1LM-H 実験電力単相主幹 (kWh)	AHU-1 1Fナ加工室空調機 (kWh)	電子線描画 1/4単相 (kWh)	電子線描画 2/4単相 (kWh)	電子線描画 3/4単相 (kWh)	電子線描画 4/4三相 (kWh)	ステップ露光装置 (kWh)	ヘーク炉 (kWh)	現像ドラフト (kWh)	ホットプレート HP-2S (kWh)	両面マスクライター (kWh)	ホットプレート TH-900 (kWh)	1LM-J 実験電力単相 (その他) (kWh)	1LM-J 実験電力三相 (その他) (kWh)	1LM-K 実験電力単相 (その他) (kWh)
46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
1LM-K 実験電力三相主幹 (kWh)	精密塗布装置 (kWh)	純水製造システム 1/2単相 (kWh)	純水製造システム 2/2三相 (kWh)	ドラフト 1/2 鏡単相 (kWh)	ドラフト 1/2 有機単相 (kWh)	ドラフト 2/2 共通三相 (kWh)	AHU-3 1F化学実験室空調機 (kWh)	1LM-A 実験電力単相 (その他) (kWh)	1LM-A 実験電力三相 (その他) (kWh)	1L-1 一般照明コンセント 1F (kWh)	RM-1 一般空調一括 (kWh)	R-1-1 空冷式チラーユニット (kWh)	R-1-2 空冷式チラーユニット (kWh)	OHU-1 1F系統外調機 (kWh)
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
AS-1 エアークリーン (kWh)	B-1 ボイラー (kWh)	PH-1 温水ポンプ (kWh)	1M-1 特殊空調 (その他) (kWh)	1LM-I 実験電力単相主幹 (kWh)	1LM-I 実験電力三相主幹 (kWh)	パーティクル量 #1 0.3 μm (個/cf [0.3 μm])	パーティクル量 #1 0.5 μm (個/cf [0.5 μm])	パーティクル量 #1 1.0 μm (個/cf [1.0 μm])	パーティクル量 #2 0.3 μm (個/cf [0.3 μm])	パーティクル量 #2 0.5 μm (個/cf [0.5 μm])	パーティクル量 #2 1.0 μm (個/cf [1.0 μm])	パーティクル量 #3 0.3 μm (個/cf [0.3 μm])	パーティクル量 #3 0.5 μm (個/cf [0.5 μm])	パーティクル量 #3 1.0 μm (個/cf [1.0 μm])
76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
パーティクル量 0.3 μm (個/cf [0.3 μm])	パーティクル量 0.5 μm (個/cf [0.5 μm])	パーティクル量 1.0 μm (個/cf [1.0 μm])	パーティクル量 0.3 μm (個/cf [0.3 μm])	パーティクル量 0.5 μm (個/cf [0.5 μm])	パーティクル量 1.0 μm (個/cf [1.0 μm])	OHU-1 給気露点温度指示調節計 (°C)	AHU-2 室内温度指示調節計 (°C)	AHU-1 室内温度指示調節計 (°C)	AHU-3 室内温度指示調節計 (°C)	AHU-2 室内湿度指示調節計 (%RH)	AHU-1 室内湿度指示調節計 (%RH)	AHU-3 室内湿度指示調節計 (%RH)	差圧ドライ加工室 (Pa)	OHU-1 給気静圧指示調節計 (Pa)
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105
AHU-2 室間差圧指示調節計 (Pa)	差圧ドライ加工室-化学実験室 (Pa)	AHU-1 室間差圧指示調節計 (Pa)	AHU-3 室間差圧指示調節計 (Pa)	純水 純水製造装置 (m3)	市水 #1 抵抗金属電極スパッタ装置 (m3)	市水 #2 マグネトロンスパッタ装置 (m3)	市水 露点ドラフト (m3)	市水 #4 ICP STS共通 (m3)	市水 #5 密閉型大気圧プラズマ方式評価装置 (m3)	市水 #6 RIE (m3)	ICP STS #1 SF6使用量 (L)	ICP STS #1 C4F8使用量 (L)	ICP STS #2 SF6使用量 (L)	ICP STS #2 C4F8使用量 (L)

電力量
パーティクル量
ガス量/排気量/市水純水量

温度/湿度
室圧
人感
設備稼働

■ユーザフレンドリーな情報端末

非常に操作性の良い情報端末(iPad)を導入した。クリーンルームおよび事務所に無線のアクセスポイントを設置し、クリーンルーム内/外だけでなく、事務所においても、「いつでも、何処でも、誰でも、簡単」にクリーンルームのエネルギーおよびエネルギーに影響を与える項目の情報共有が可能となった。

図V.2.2-1、図V.2.2-2、図V.2.2-3、図V.2.2-4に画面の一例を示す。

TOP画面では、各々のクリーンルーム毎のCO2排出量を確認できる。

電力量だけでなく、SF6などのプロセスガス使用量や純水使用量などもCO2に換算して、表示している。

また、一人当たり/フロア面積辺り/装置辺りのCO2排出量を先月比で表示しており、経営上位層などが全体のエネルギー使用量を大きく把握し易い画面構成となっている。図V.2.2-1に画面一例を示す。



図V.2.2-1 情報端末の画面一例 その1

TOP 画面において、クリーンルーム箇所を指でタッチすると、クリーンルームの部屋ごとの CO2 排出状況が確認できる画面に移る。TOP 画面が経営上位層向けであるのに対して、この画面は、クリーンルーム管理者向けに、クリーンルームとしてのエネルギー使用量が把握できる画面構成としている。

図 V.2.2-2 に画面一例を示す。

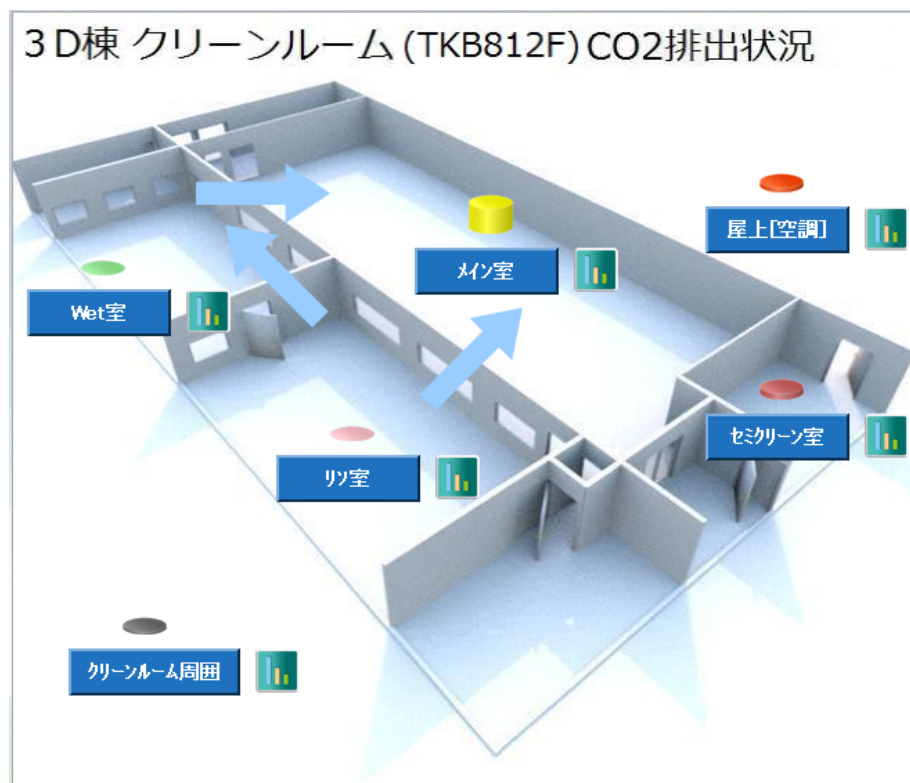


図 V.2.2-2 情報端末の画面一例 その2

次に、クリーンルームの部屋を指でタッチすると、その部屋に設置されている設備が確認できる画面に移る。任意の設備をタッチ操作すると、その設備の画像とともに、リアルタイムのエネルギー使用量が確認できる。また、部屋での共通事項である温室度やパーティクル量や人の在室状況などは共通事項として、グルーピングしている。また、設備ごとに、どのような項目を測定しているかが一目で分かるように、測定項目に対応したアイコンを表示し、設定値を超えると、そのアイコンが緑から赤表示となるようにしている。

図 V.2.2-3 に画面一例を示す。

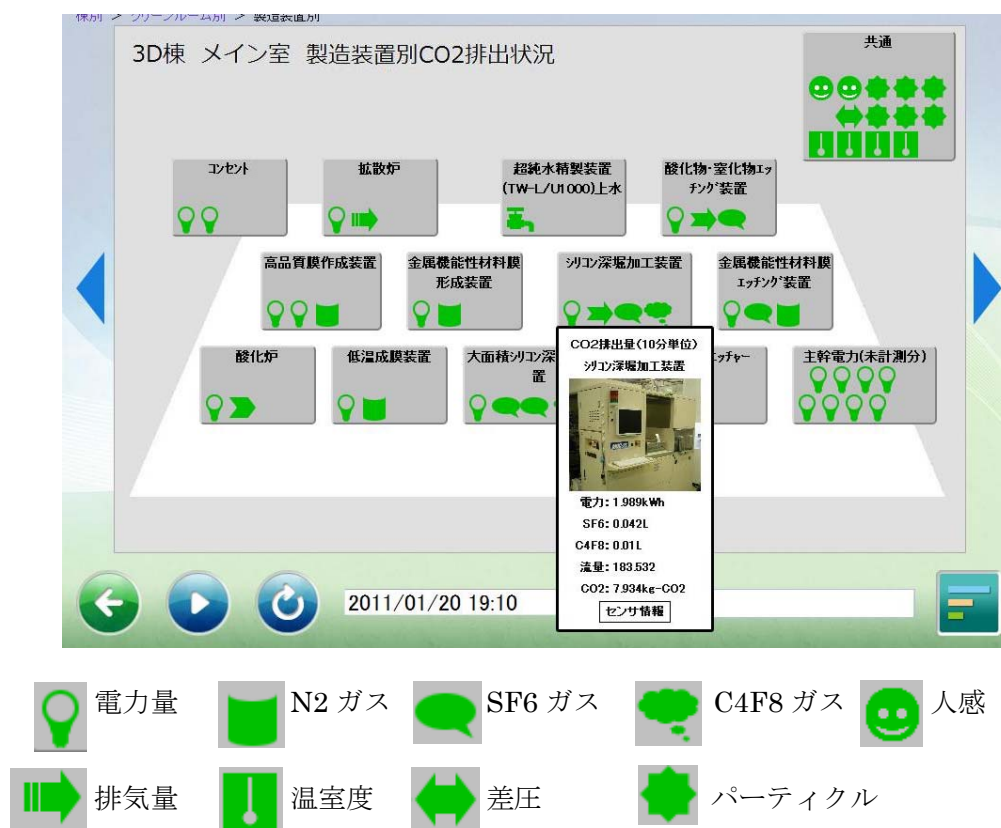
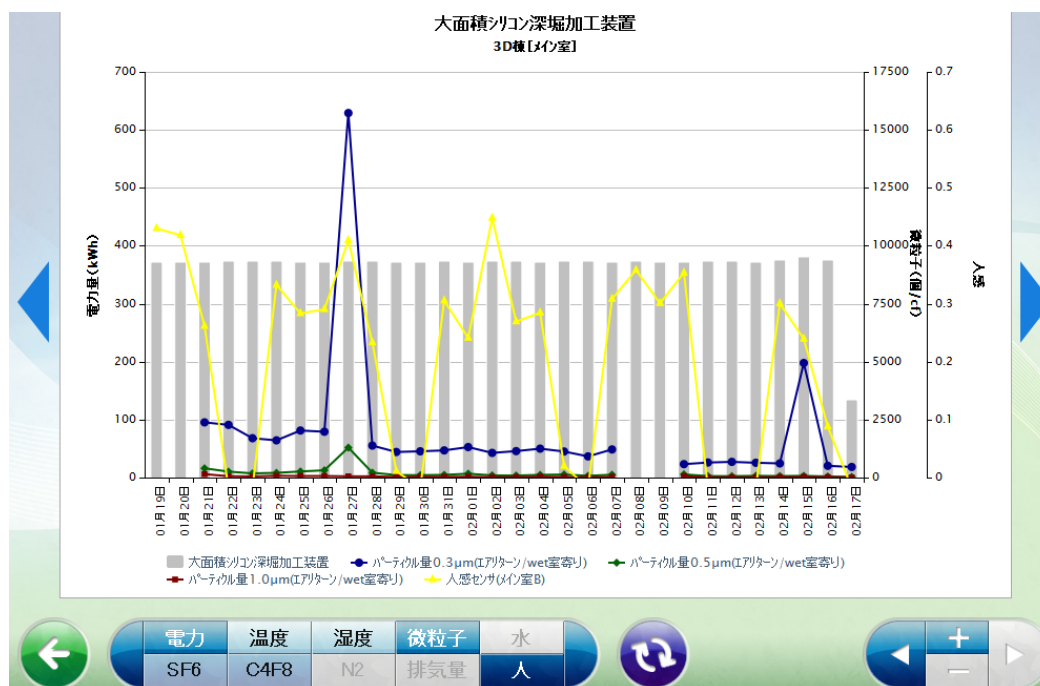


図 V.2.2-3 情報端末の画面一例 その3

次に、設備を指でタッチすると、その設備でのエネルギー経緯が確認できる。設備ごとに測定項目が異なるため、任意の項目を選択できる構成としている。例えば、ある設備の電力量とSF6ガスを選択することも可能であるし、電力量と設備稼働状態を選択することも可能であるし、設備周辺のパーティクル量と人情報を表示することも可能である。この画面は、各設備担当者向けに、設備でのエネルギー使用量および関連情報が把握できる画面構成としている。

図V.2.2-4に画面一例を示す。



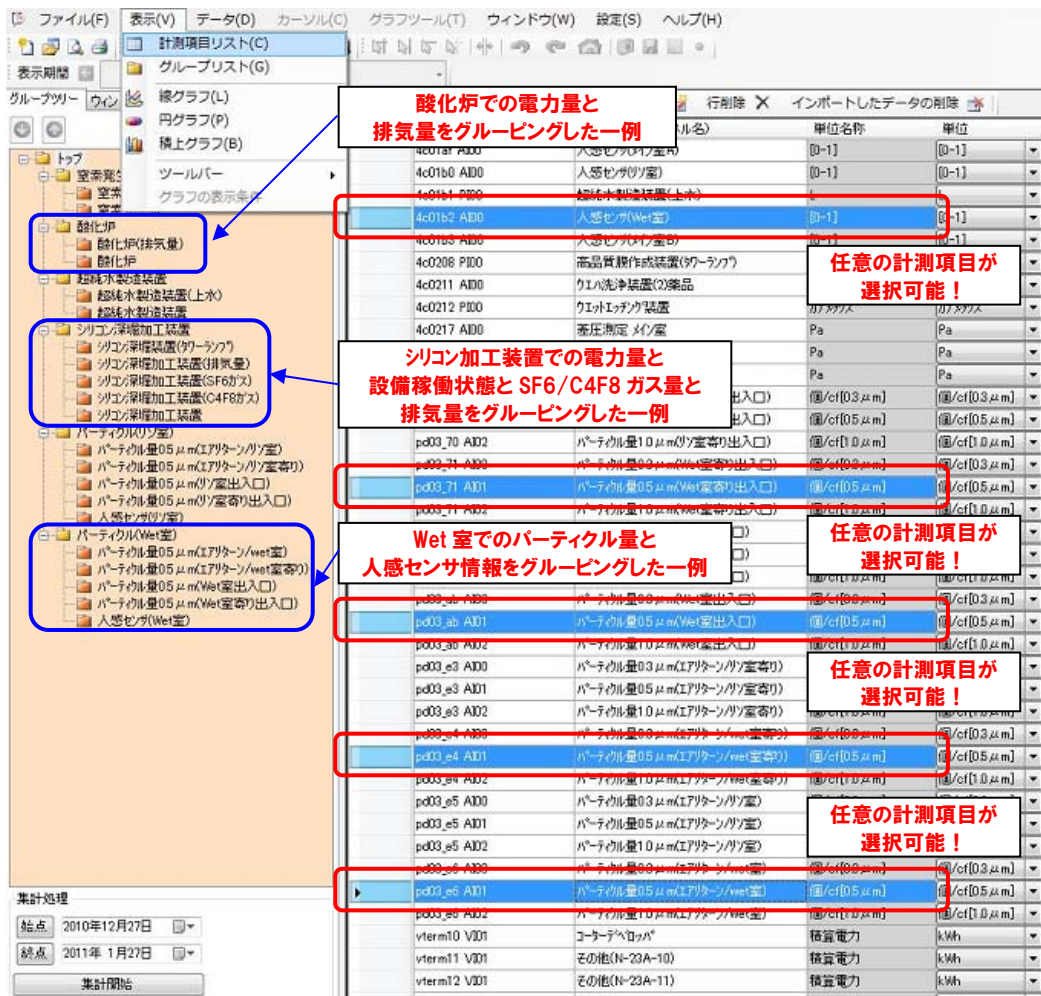
図V.2.2-4 情報端末の画面一例 その4

■エネルギー分析支援ツール

クリーンルームでのエネルギーおよびエネルギーに影響を与える詳細データの分析を支援するツールを導入した。

基本的な操作は、任意のデータを分析支援ツールに取り込み、その後、計測項目の中から任意の項目を選択し、グルーピングする。そして、グルーピングごとに、グラフ表示を行うことが可能である。

図V.2.2-5、図V.2.2-6に画面一例を示す。



図V.2.2-5 分析支援ツールの画面一例 その1

■エネルギー見える化により抽出されたムダの一例

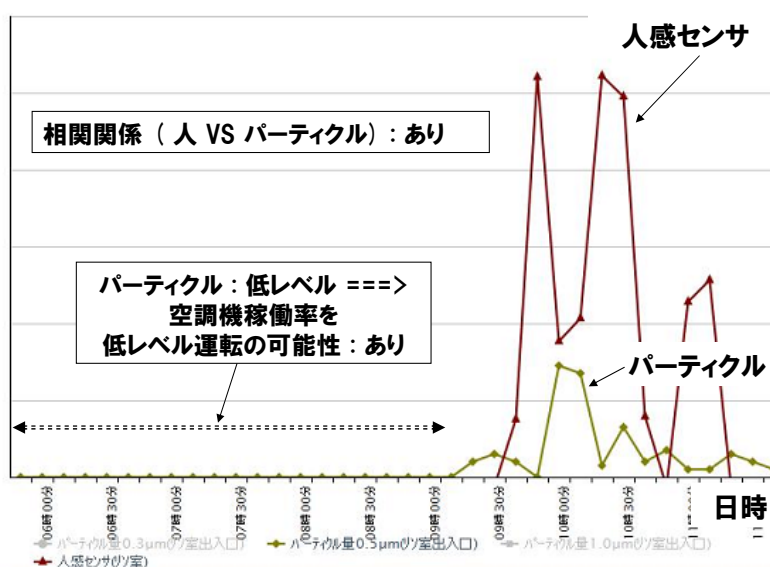
エネルギー見える化により抽出されたムダの一例を記載する。

図V.2.2-7、図V.2.2-8、図V.2.2-9、図V.2.2-10、図V.2.2-11 にエネルギーのムダの一例を示す。

図V.2.2-7は、人感センサとパーティクルセンサの情報である。

横軸は日時。縦軸はパーティクルの個数。

パーティクル量と人に相関関係があることが分かる。現状では、人感センサの反応が無く、パーティクルも発生していない期間であっても、空調設備はフル稼働している。例えば、その期間(作業者も居なく、パーティクルも未発生)においては、空調設備の運転を省エネ運転できる可能性があることが分かる。



図V.2.2-7 空調エネルギーのムダの一例

図V.2.2-8は、温度と湿度の情報である。横軸は日時。

湿度が大きく変化していることが分かる。この湿度が大きく変化していた期間は、加湿器が異常な運転をしていた。誰でも、何処でも、簡単に情報を共有できる情報端末により、加湿器の異常を早めに検知することができた。

エネルギーのムダだけでなく、設備異常の早期発見にも貢献できた一例である。

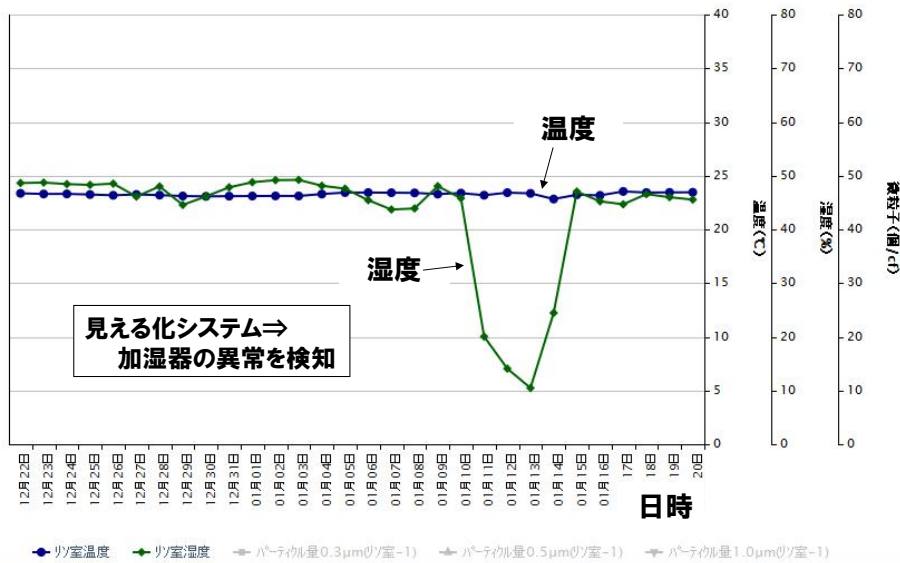


図 V.2.2-8 加湿器異常運転検知の一例

図 V.2.2-9 は、成膜装置の電力量と N2 ガス使用量の情報である。横軸は日時。長期休暇の期間、設備電力が 0 であり、装置の電源が OFF となっていることが分かる。しかし、N2 ガスの流量に大きな変化は無い。装置汚染の都合上、N2 ガスを 0 とすることは不可能かもしれないが、流量を制限することは可能であると思われる。ここにも、エネルギー削減の可能性があることが分かる。

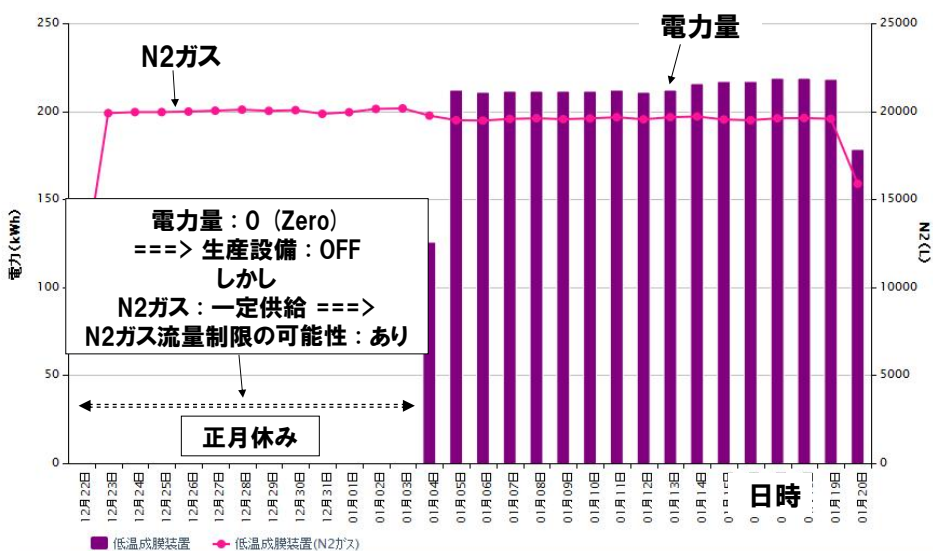


図 V.2.2-9 N2 ガスのムダの一例

図V.2.2-10は、拡散炉の電力量と設備排気量の情報である。横軸は日時。長期休暇の期間、設備電力が0であり、装置の電源がOFFとなっていることが分かる。しかし、排気の流量に大きな変化は無い。排気量を少なくすると、新たに温湿度調整して取り込む外気量を減らすことができるため、ここにも、エネルギー削減の可能性があることが分かる。

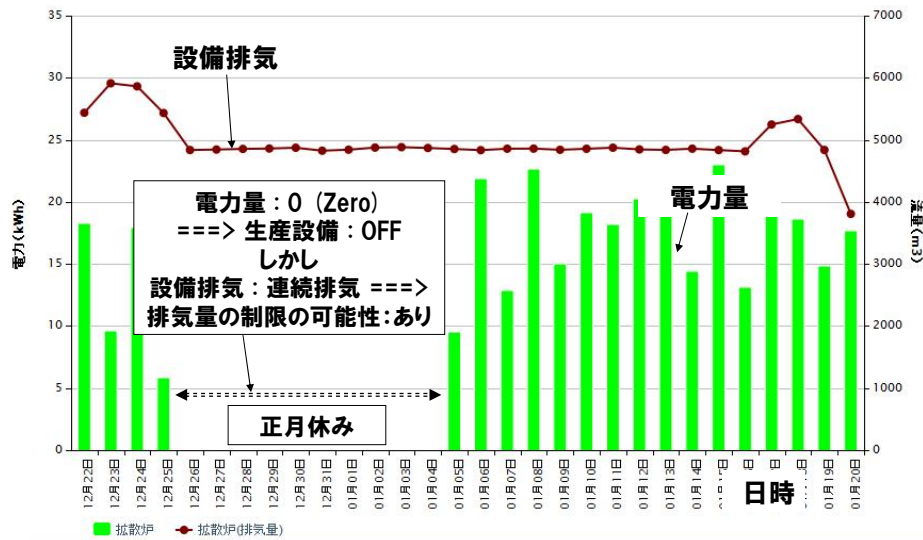


図 V.2.2-10 排気量のムダの一例

図V.2.2-11は、シリコン深堀加工装置の電力量とプロセスガス使用量である。プロセスガスの流量が低い時、つまりプロセスが行われていない時でも、プロセスが行われている時と同じ程度の電力量が使用されている。プロセスを行っていない時は、設備電源をOFFするなどの電力量削減の余地があることが分かる。

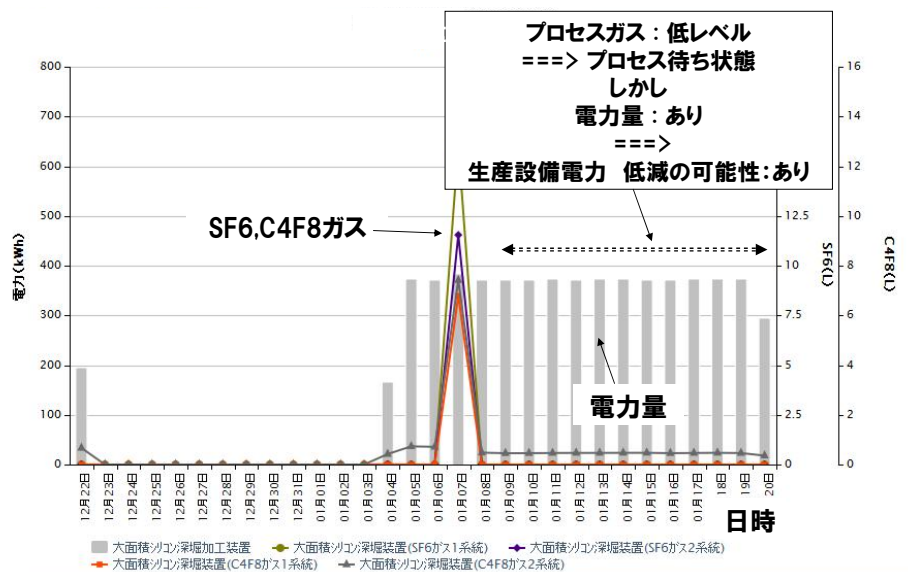


図 V.2.2-11 電力量のムダの一例

(2) -3 エネルギー(CO2)見える化システムのまとめ

産業総合技術研究所つくば東事業所の3箇所のクリーンルームにおいて、エネルギー見える化システムを開発した。

3D棟クリーンルームでは、157点。3B棟クリーンルームでは、179点。
2G棟クリーンルームでは、105点。合計：441点の項目の見える化を実現した。
計測間隔は、10分。

クリーンルームのエネルギーおよびエネルギーに影響を与える事項に関する情報を、いつでも、何処でも、誰でも、簡単に共有できるユーザフレンドリーな情報端末を採用したシステムを開発した。

継続的なエネルギー削減活動の取り組みを支援するためのデータ分析ツールを開発した。

今後は、導入したシステムを活用して、継続的なエネルギー削減活動を展開し、エネルギーの削減に取り組む。

(3) CO2_60%削減について

(3) -1 従来技術と課題

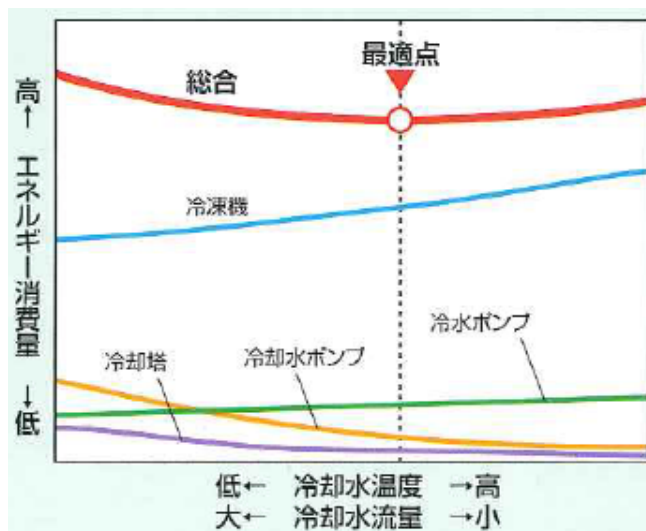
従来、クリーンルームの空調設備におけるエネルギー削減対策としては、熱源系に対する空調自動制御が多く実施されている。

実施内容は、熱源システム全体の省エネ制御により冷凍機、冷却塔、ポンプを高効率運転させるとともに季節に応じた運転モード自動切換えによるフリークーリングの長期運転により大きな電力量の削減が実現されている。

1990年度比でCO2_50%の削減が実現されている。

・冷凍機、冷却塔、ポンプの高効率運転システムの特徴

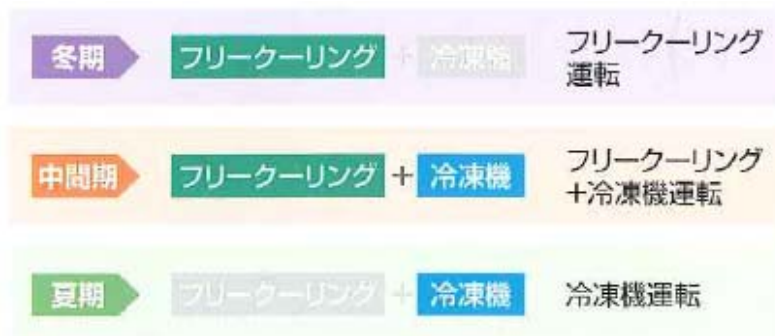
熱源系全体の消費エネルギーが最も低くなるポイント(最適点)に基づいて冷水・冷却水の温度・流量等を自動で変更し、熱源系全体の消費エネルギーを削減する。図V.3.1-1に最適化のイメージを示す。



図V.3.1-1 最適化のイメージ

・長期間運転フリークーリングの特徴

外気・負荷条件に応じて運転モードの自動切り替えを行い、中間期における冷凍機とフリークーリングの併用運転を行う。



図V.3.1-2 長期間運転フリークーリング運転のイメージ

クリーンルームにおける空調制御システムとしては、いかに熱源を効率的に運転させるかの制御であった。クリーンルーム内の空調環境、特に、パーティクル量に関しては、定期的な測定は行われているが、連続測定されることは稀であり、空調制御に使用されることは行われていない。理由としては、下記が考えられる。

技術的に管理対象への制御の考え方が違う。

従来技術は、温度を測定して、温度を制御する。

例：室内温度を測定して、空調機の給気温度を制御する。しかし、パーティクルを測定しても、パーティクルを直接制御することはできない。パーティクルを制御するには、空調機の風量を制御して、間接的に、パーティクル量を制御するしかない。

パーティクル量と風量間の相関関係が分からない。

パーティクルの発生具合は、現場や時間帯で異なる。作業者の有/無や多い/少ないで異なってくる。単純に、このくらいの風量にすれば、必ず、このくらいのパーティクル量になると言い難い。

サブコン業者は、JIS 規定に従うことで済ませている。

JIS から、クリーン度と風量(換気回数)が規定されており、サブコン業者は、①②のような面倒なことはしたくない。面倒なことをしなくとも設備と、その工事で商売が成立しているので、エネルギーに無駄があると分かっているにもかかわらず、固定の設計値で運用している。

投資対効果が分からない。

パーティクルに応じた風量制御を行う場合、②の理由から、削減効果が現場ごとに異なる。客先に提案する際、客先の運用実態の詳細を把握しないと、削減効果の目処が付かない。

パーティクルセンサが高額

温湿度センサは、各社より様々なセンサが市販されているが、パーティクルセンサは、生産しているメーカーも限定されていて、価格も高い。温度：1～5 万円。パーティクル：30～100 万円。

上記のような理由から、空調環境、特に、パーティクル量に応じた空調制御は行われていない。そこで、BEANS 研究所の取り組みとして、空調環境に応じた空調自動制御を行うことにより、従来技術では達成できていなかった更なるエネルギー削減(CO2 削減)を目指すこととした。

(3) -2 CO2_60%削減の検討

1990年度比、CO2_60%削減を実現するために、実際の半導体工場を想定し、年間の電力量を机上にて算出した。2010年度まで1990年度比で熱源系の制御などにより50%の削減が実現されている。更に10%を上積みし60%を実現するためには、空調機(FFU)の電力量を64%削減すれば、1990年度比でCO2_60%削減を実現できることが分かった。

また、想定した半導体工場の場合、空調機(FFU)の電力量が64%削減できた場合、年間電力量の削減金額は、1380万円。電力量単価を12円/kWhとする。

$$(1800-650)\text{MWh/年} \times 1000\text{k} \times 12(\text{円/kWh}) = 13,800,000(\text{円})$$

非常に大きな削減が見込めることが分かった。

表V.3.2-1 半導体工場での年間電力量(机上計算)

半導体工場(一例)	1990年	2010年	BEANS
冷凍機	6850	3050	3050
冷却水ポンプ	995	590	590
冷却塔	380	260	260
冷水ポンプ	550	300	300
フリークリング	0	200	200
空調機(FFU)	3700	1800	650
小計	12475	6200	5050
比率	100%	50%	40%

年間削減見込み金額: **1380万円**

(1800-650) MWh/年 × 1000k × 12円 (kWh単価)

空調機(FFU) 電力を64%削減する必要がある。

$$\frac{1800-650}{1800} = 63.8\% \approx 64\%$$

6000平米の半導体工場の場合 単位MWh/年

机上計算の算出条件

1990年度システム:

冷水製造温度系統: 1系統, 冷水・冷却水一定流量, フリークリング無し

冷凍機: 標準ターボ冷凍機 COP4.6(冷水温度 7-12)

冷水制御: 空調機 二方弁による変流量制御

冷水主管 主管ヘッダ差圧バイパス制御

冷凍機 定流量

装置冷却水: 7℃冷水を用いて熱交換器で装置冷却水(15~25)を製造

FFU: 10W/m³/min 24時間 365日運転, 換気回数 300回/h(天井高 4m)

2010年度システム:

冷水製造温度系統: 3系統, 冷水・冷却水変流量制御, フリークリング有り

冷凍機: 高効率ターボ冷凍機 COP6.0(冷水温度 7-12)

冷水制御: 1990年度と同様

装置冷却水: 夏期、中間期 7℃の冷水を用い熱交換器で装置冷却水

(15℃~25℃)を製造。冬期 外気を利用し装置冷却水を製造。

FFU: 2.9W/m³/min 24時間 365日運転, 換気回数 300回/h(天井高 4m)

冷却負荷 外気風量 0.5m³/min/m², 顕熱 0.55kW/m²

図V.3.2-1にFFU(Fan Filter Unit)電力量を削減する制御イメージを記載する。従来は、クリーンルーム内の代表的な箇所のみ温湿度が測定され、そのデータが、空調制御に使用されている。また、パーティクルは、連続測定されておらず、定期的な測定のみであり、空調制御には反映されていない。例：1週間に1回、パーティクルを測定するだけ。

今回は、多点でパーティクルと温室度を測定し、その情報を空調制御に使用し、エネルギー削減を行う空調自動制御を目指している。

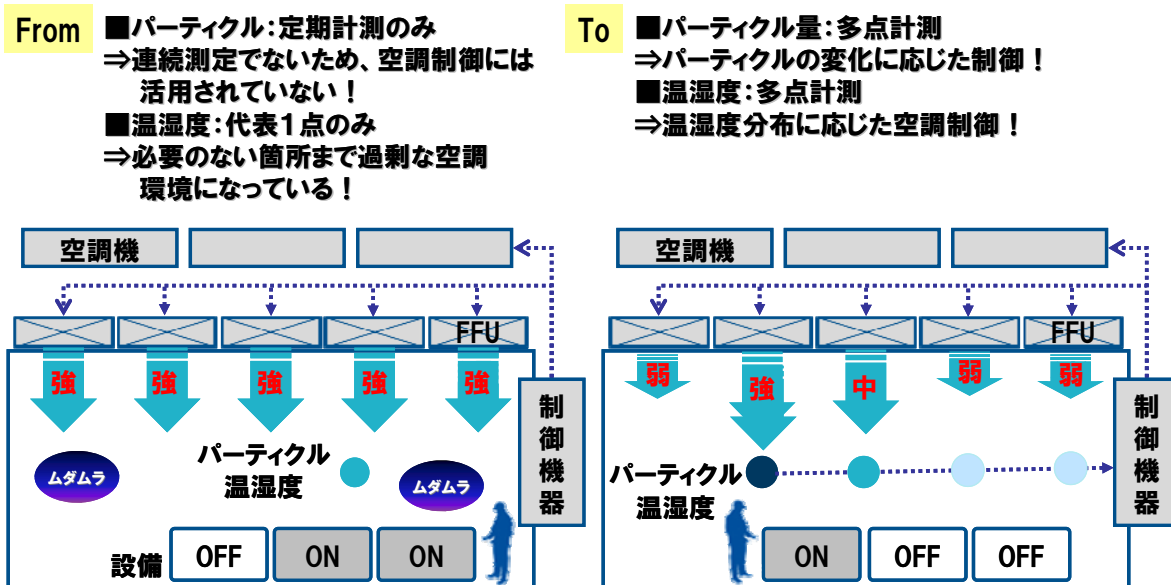
今回、導入を検討している空調自動制御のイメージ画像を図V.3.2-2に記載する。デモ機によるイメージ画像である。

図V.3.2-2では、クリーンルームエリア①では、パーティクルが発生している。クリーンルームエリア②③では、パーティクルは発生していない。今回の自動制御では、パーティクルの発生しているエリア①の空調設備①のみをフル稼働させて、パーティクルの発生していないエリア②③の空調設備②③は、省エネ運転とする空調自動制御を目指している。

その際、下記事項が懸念される。

- ・空調制御を行うことにより、パーティクル量は許容範囲以内となるか？
- ・空調制御を行うことにより、室内の温度上昇は許容範囲以内となるか？

上記懸念事項を確認するため、事前の検証を行った。



図V.3.2-1 FFU(Fan Filter Unit)電力量削減制御イメージ

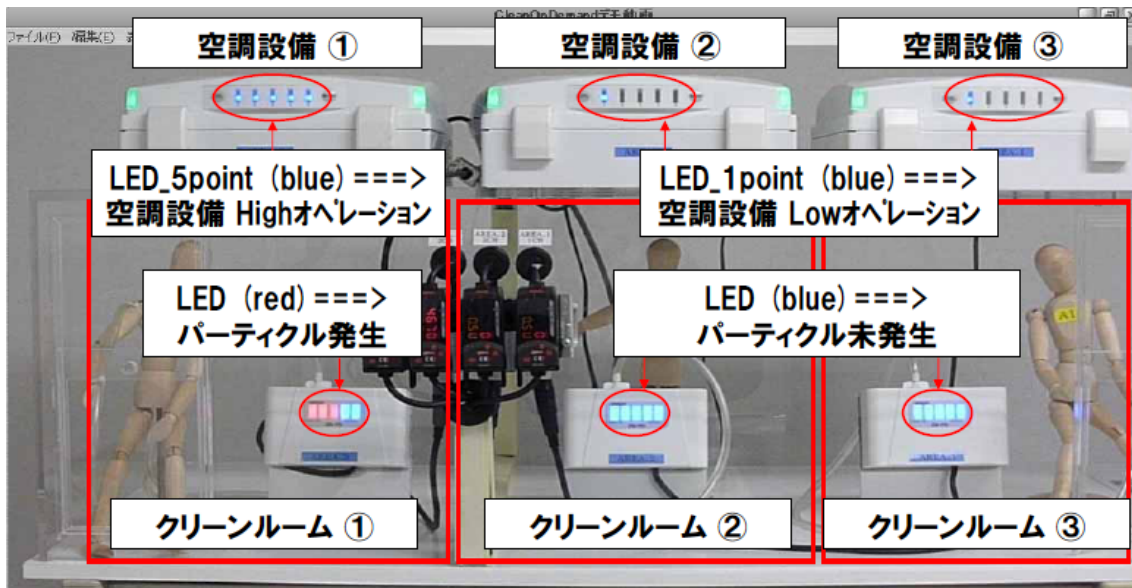


図 V.3.2-2 導入を検討している空調自動制御のイメージ画像

空調制御を行うことによるパーティクル量と温度上昇の事前検証を行った。6m²のクリーンルームに、各種センサを設置した。設置したセンサは下記の通り。

- ・ パーティクルセンサ：16 個
- ・ 温度センサ：16 個
- ・ 湿度センサ：16 個

上記以外にも、空調設備電力を計測する電力センサや、天井に人を検知するための人感センサや、空調設備の冷水温度や流量を計測するセンサを設置し、空調設備の状態をモニターしながら評価を行った。また、意図的にパーティクル量を増加させるために外気を取り込むダクトを設けるとともに、室内の擬似的熱負荷として電気ヒータを設置した。また、本クリーンルームの空調設備 (FFU：23 台) は、個別にインバータ制御可能な設備である。

図 V.3.2-3 に実験場所の画像を示す。

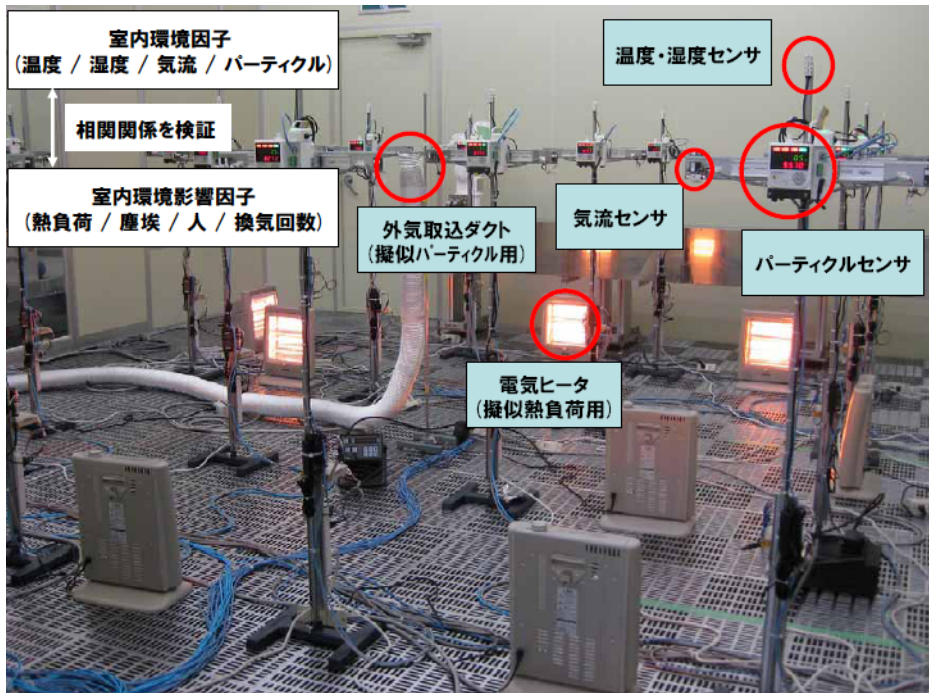
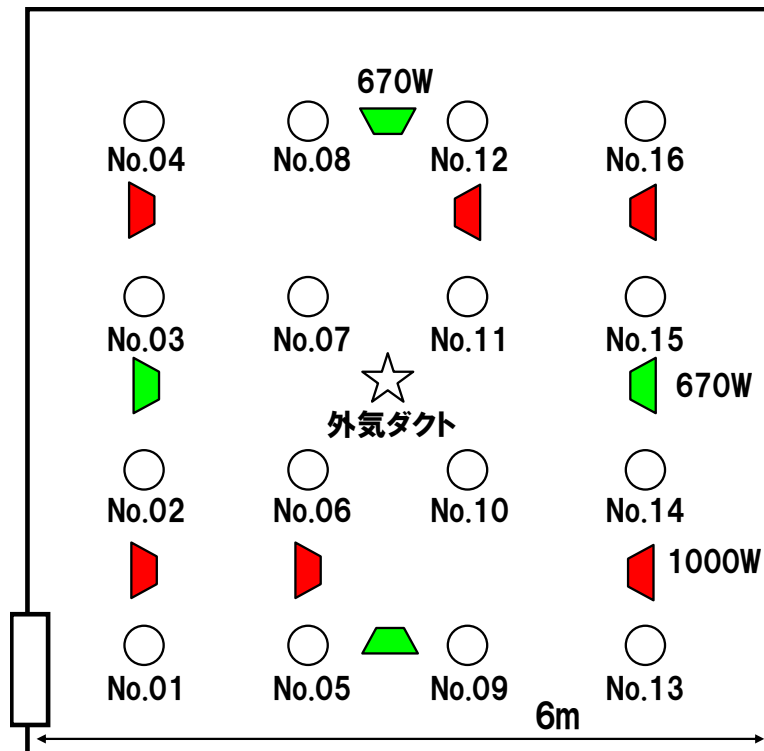


図 V.3.2-3 実験場所風景

図 V.3.2-4 に実験場所の鳥瞰図を示す。



- センサ設置箇所
- △ 熱負荷用電気ヒータ設置箇所
- ☆ 外気取り込みダクト位置

図 V.3.2-4 実験場所 Top View

3) -3 CO2_60%削減の評価(電力量について)

FFU(Fan Filter Unit)の回転数を変化させた時の電力量を測定した。

表V.3.3-1と図V.3.3-1にFFU回転数と電力量の実測値を示す。

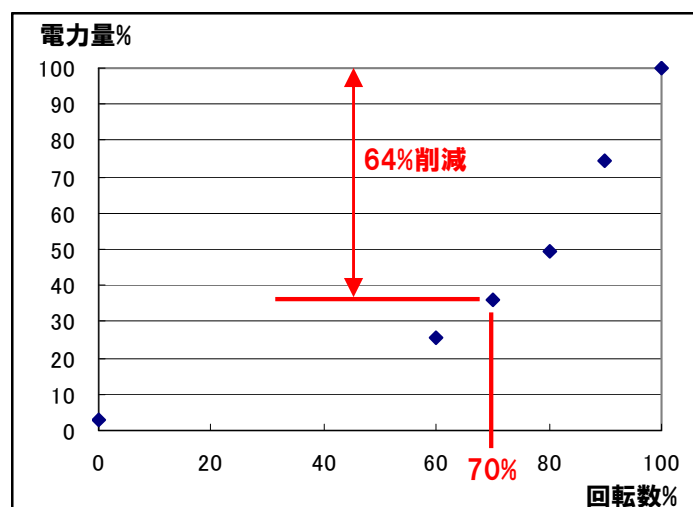
また、回転数100%とした時の電力量を100とした時の比率も記載している。

図V.3.3-1よりFFU回転数を100%から70%まで低減すれば、電力量としては、64%の削減が実現できることが分かる。

次頁以降では、FFU回転数を70%以下とした時のパーティクル量と温度上昇の検証を行い、問題がないことを確認する。

表V.3.3-1 FFU回転数と電力量(実測値)

回転数%	電力量W	電力量%
0	4	3
60	33	26
70	46	36
80	63	49
90	95	74
100	128	100



図V.3.3-1 FFU回転数と電力量(実測値)

3) -4 CO2_60%削減の評価(パーティクル量について)

FFU(Fan Filter Unit)の回転数を低下させた時のパーティクル量を測定した。測定方法は、FFU回転数とFFU稼働台数を変化させ、その時のパーティクル量を測定した。表V.3.4-1にFFU回転数とFFU稼働台数に対するクリーン度を示す。つまり、FFUを15台、100%運転した場合は、クリーン度100個/cfに相当するクリーンルームを擬似的に再現したこととなる。参考として、表V.3.4-2にJISで規定されているクリーン度と換気回数および気流速度の関係を示す。

表V.3.4-1 FFU(回転数、稼働台数)と換気回数(≒クリーン度)の関係

FFU稼働台数	FFU回転数	換気回数(時間当り)	クリーン度個/cf
23台	100% (0.5m/s)	237回	10相当
15台		154回	100相当
8台		82回	1,000相当
4台		42回	10,000相当

計算の算出条件

FFU100%運転時の風速：0.5m/s

FFUサイズ：1.2×0.6m

クリーンルームサイズ6×6×3.5m

計算一例(FFU15台/100%)

$$0.5(\text{m/s}) \times 1.2(\text{m}) \times 0.6(\text{m}) \times 3600(\text{hour}) \times 15(\text{台}) = 19440\text{m}^3/\text{hour}$$

$$6(\text{m}) \times 6(\text{m}) \times 3.5(\text{m}) = 126\text{m}^3$$

$$\text{換気回数} = () / () = 19440 / 126 = 154(\text{回}/\text{hour})$$

表V.3.4-2 JIS-B-9919 クリーン度と換気回数、気流速度

クリーン度個/cf	換気回数(時間当り)	気流速度(m/s)
10	-	0.3-0.5
100	-	0.2-0.5
1,000	30-90	-
10,000	20-40	-

JIS-B-9919

表V.3.4-3にFFU15台を回転数100%運転とした時と60%運転に回転数を低下させた時のパーティクル(粒径0.5μm)量の実測値を示す。

FFU15台、回転数100%はクラス100個/cf相当のクリーンルームを擬似的に再現しており、そのクリーンルームにおいて、FFU回転数を低下させた時の

パーティクル量の変化を擬似的に再現したデータとなる。

歩行 No.01-16 の平均値では、FFU 回転数を 100% から 60% に低下させても、基準値 100 個を大きく下回った 18 個であり、回転数の低減によるパーティクルの増加は少ないことが分かる。しかし、作業 No.01 および作業 No.7 の最大値のデータでは、基準値の 100 個を超えている。しかし、FFU100% 運転の場合でも基準値の 100 を超えている。つまり、100% 運転においても、特定箇所にピークとして発生するパーティクルに関しては、基準値を超えることがあるということを意味している。

図 V.3.4-1、図 V.3.4-2 に波形データを示す。波形データから、FFU 回転数を 100% から 60% に低減させた場合のパーティクルの最大値と平均値の検討を行う。

表 V.3.4-3

クラス 100 相当クリーンルームにて FFU 回転数を低下させた時のパーティクル

0.5 μm	FFU: 15台					
	歩行No.01-16		作業No.01		作業No.07	
	最大	平均	最大	平均	最大	平均
100%運転 (クラス100相当)	48	4	211	22	105	18
60%運転	136	18	642	82	461	127

単位: 個/cf

パーティクル: 16 箇所のデータ

最大: 16 箇所のデータの最大値(個)

平均: 16 箇所のデータの平均値(個)

歩行 No.01-16: No.1~16 のセンサの間を 5 分間歩行した場合のデータ

作業 No.01: No.1 のセンサの前で大きく手回し動作(5 分間)をした場合のデータ

作業 No.07: No.7 のセンサの前で大きく手回し動作(5 分間)をした場合のデータ

図 V.3.4-1 に FFU 回転数を 100% 運転とした場合のパーティクル量の波形データを示す。100% 運転においても、ピークとして発生している値は基準値の 100 を超えている。しかし、ベースとして常に発生しているパーティクルは 50 個を下回っている。つまり、ピークとして発生しているパーティクルやピークに引き連られて上昇しているパーティクルは、作業者の作業内容などにより異なるため、参考とはするべきではあるが、FFU 回転数低下での必須管理項目とはすべきではないことを意味している。常にベースとして発生しているパーティクル量を必須の管理項目とするべきである。

乱暴な言い方をすれば、汚れた防塵服を着て作業をすれば、FFU が 100% 運転をしていても、基準値を超えるので、別の管理方法で管理するべきであり、FFU 回転数により制御できる事項ではない、ということである。ピークとして発生する

パーティクルの管理方法としては、例えば、定期的なウェアのクリーニングの実施やエアシャワーの適切な浴び方の徹底や、設備の物理的な局所化(ミニエンバイロメント化)が考えられる。

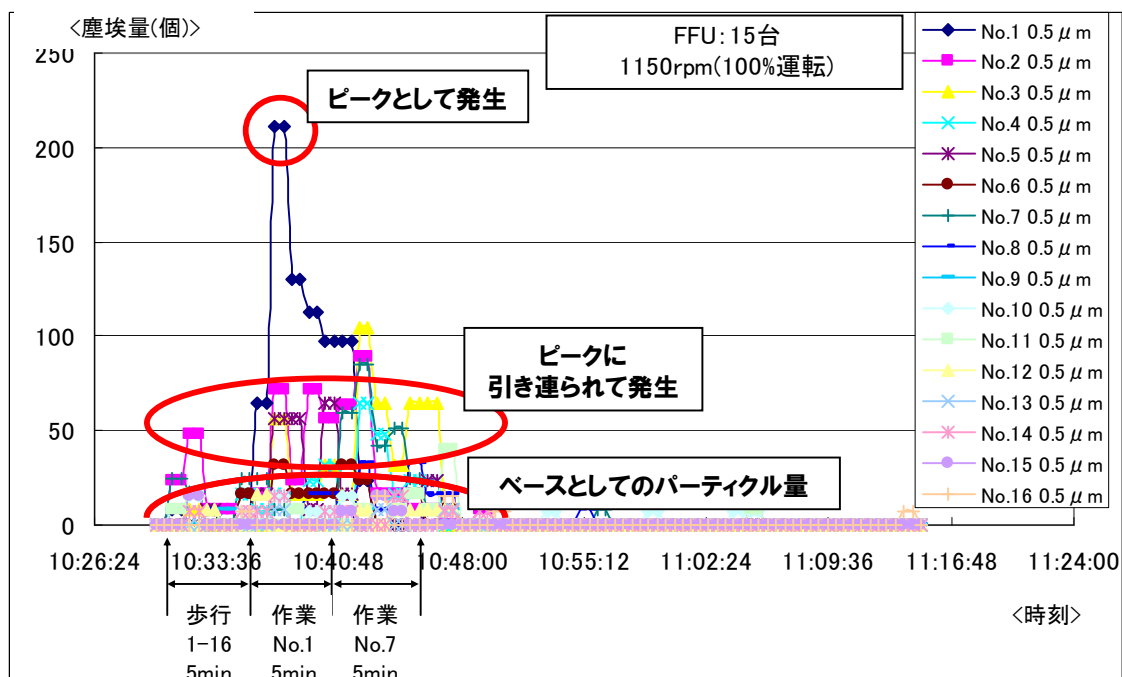


図 V.3.4-1

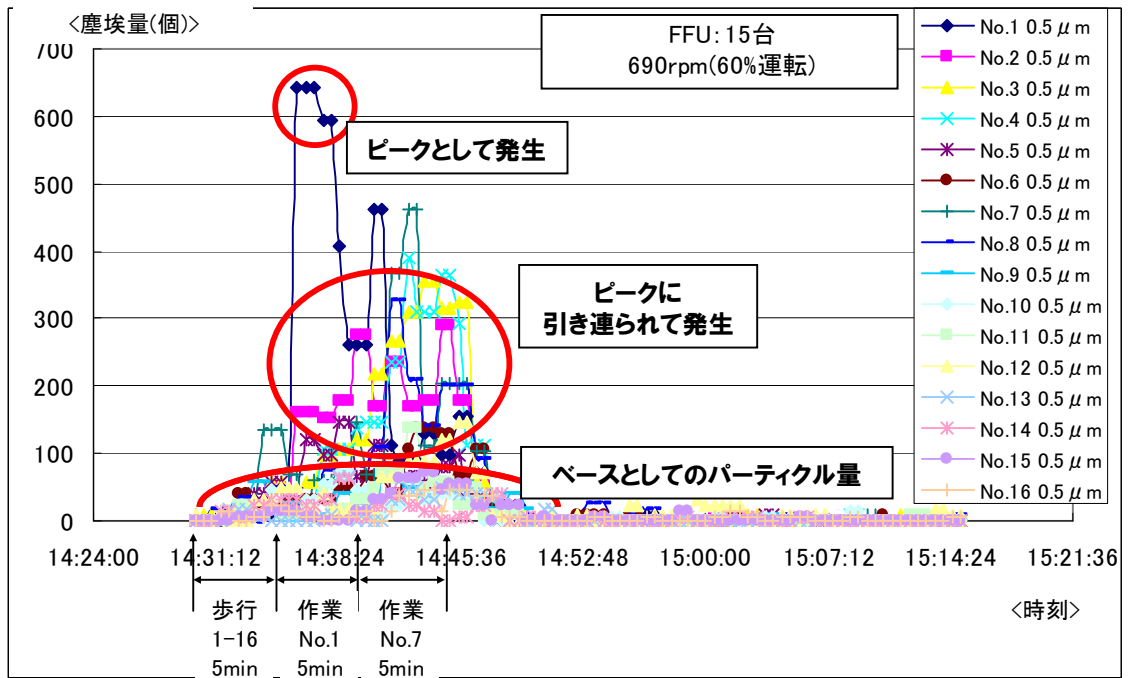
クラス 100 相当クリーンルームでの FFU 回転数 100%時のパーティクル量

図 V.3.4-2 にクラス 100 相当クリーンルームでの FFU 回転数を 60%に低下させた時のパーティクル量を記載する。

ベースとして常に発生しているパーティクル量は、基準値の 100 以下であり、FFU の回転数を低下させても、パーティクル量が基準値以内であることが分かる。

しかし、必須の管理項目とはしないが、ピークとして発生したパーティクルが、周辺に対して、どの程度の影響を与えるのかについては、検討が必要である。

次頁以降で検討する。



図V.3.4-2

クラス 100 相当クリーンルームでの FFU 回転数を 60% に
低下させた時のパーティクル量

3) -5 CO2_60%削減の評価(パーティクルの拡散について)

ある箇所が発生したパーティクルの周辺への影響を検討する。

評価方法は、クリーンルームの中央に設けた外気取り込みダクトより強制的にクリーンルーム内に外気を取り込む。そして、クリーンルーム内に設置した 16 箇所パーティクル量を測定し、測定されたパーティクル量の最大値を 100 とし、データを規格化した。

表 V.3.5-1 にクラス 100 相当の場合と、FFU 回転数を 60%に低下させた場合のパーティクル量の規格化値を示す。表 V.3.5-2 に平均値を抜粋した値を示す。

表 V.3.5-2 から分かるように、パーティクル発生地点から 1.5m 離れば、その影響は、FFU 回転数が 100%の場合で 25%、FFU 回転数が 60%運転の場合で 27%であり、両者に大きな差異はないことが分かるとともに、その影響も 25%前後であり大きくはない。しかし、パーティクル発生地点から 1.0m 地点では、60-70%の影響を受けることが予想されるため、注意が必要であることが分かった。

表 V.3.5-1 パーティクル拡散度合い(実測値)

0.5 μm	FFU:15台															
	中心4点(1m地点)				周辺8点(1.5m地点)								外周4点(2m地点)			
	No.06	No.07	No.10	No.11	No.02	No.03	No.05	No.08	No.09	No.12	No.14	No.15	No.01	No.04	No.13	No.16
100%運転 (クラス100相当)	32	100	44	68	21	40	15	56	13	40	5	8	12	50	8	17
	61				25								22			
60%運転	72	100	37	66	36	25	26	60	22	31	4	10	15	46	5	19
	69				27								21			

単位:%

中心 4 点 : 外気取り込みダクトから 1.0m 地点。

測定箇所 No.06,07,10,11 のデータとその 4 点の平均値。

周辺 8 点 : 外気取り込みダクトから 1.5m 地点。

測定箇所 No.02,03,05,08,09,12,14,15 のデータとその 8 点の平均値。

外周 4 点 : 外気取り込みダクトから 2.0m 地点。

測定箇所 No.01,04,13,16 のデータとその 4 点の平均値。

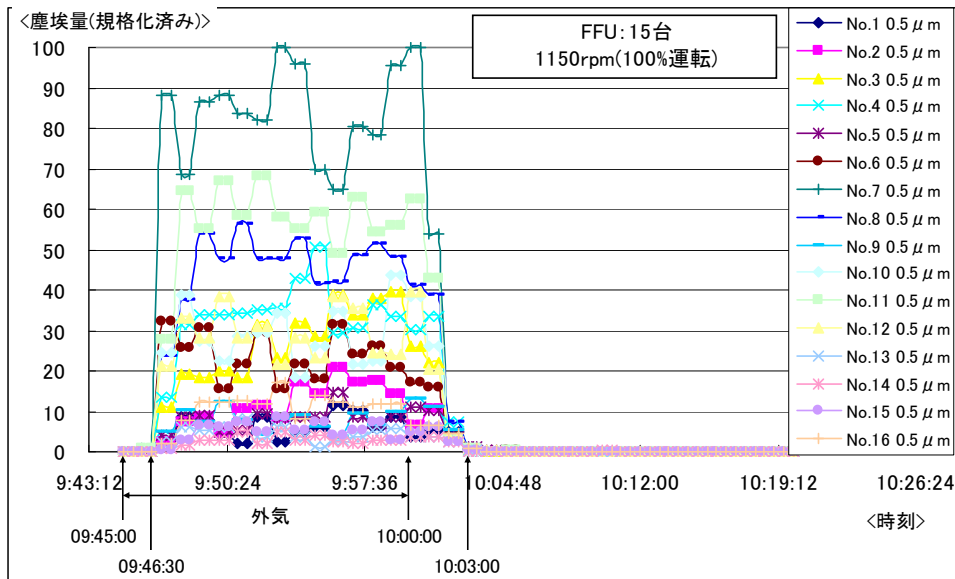
表 V.3.5-2 パーティクル拡散度合い(実測値の平均値)

0.5 μm	FFU:15台		
	1m地点	1.5m地点	2m地点
100%運転(クラス100相当)	61	25	22
60%運転	69	27	21

単位:%

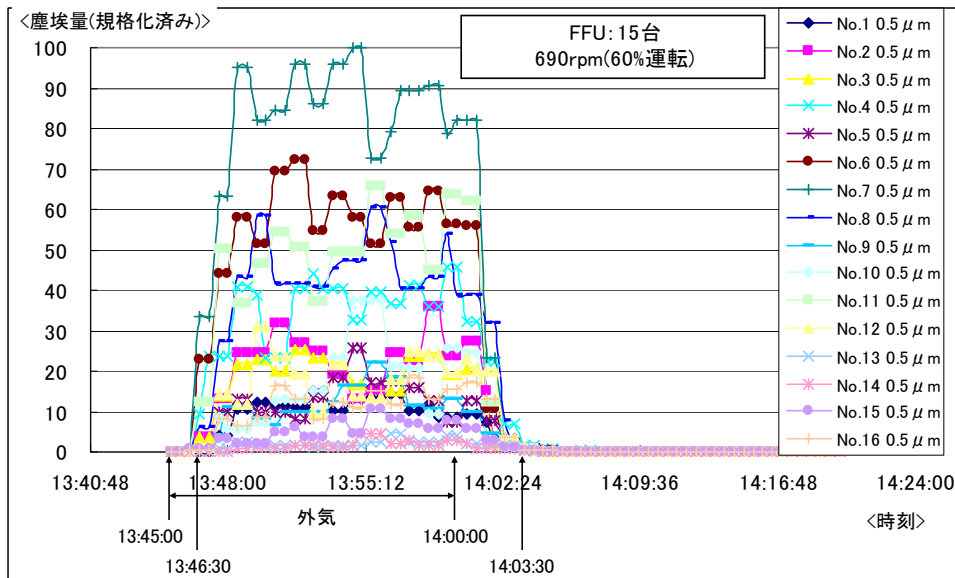
表の見方 : 防塵服が汚れていたなど何らかの理由でパーティクルが 1300 個/cf 発生した場合、その地点から 1.5m 離れた地点では、FFU が 60%の運転の場合、351 個/cf (1300 × 27%) が観測される可能性がある、ということ。

図V.3.5-1、図V.3.5-2にパーティクル拡散度合いの波形データを示す。
 外気の取り込み開始から1.5分後に大きくパーティクル量が上昇している。
 言い方を変えれば、1.5分後には周辺に影響を与えることを意味している。
 また、外気取り込み停止後、3~3.5分後には、パーティクル量は減少している。
 言い方を変えれば、FFU回転数を60%に低下させていても、3.5分後には
 パーティクルは低い値に収束することを意味している。



図V.3.5-1

クラス 100 相当クリーンルームでの FFU 回転数 100%時のパーティクル拡散度合い



図V.3.5-2

クラス 100 相当クリーンルームでの FFU 回転数を 60%に
 低下させた時のパーティクル拡散度合い

3) -6 CO2_60%削減の評価(温度上昇について)

FFU回転数を低下させた時のクリーンルーム内の温度上昇を検討する。

評価方法は、クリーンルームで想定される熱負荷を擬似的に電気ヒータで与え、クリーンルーム内に設置した16箇所温度を測定した。また、今回は、擬似的に与えた熱負荷(顕熱)をクリーンルーム施設のドライコイルで顕熱処理をせずに、そのままの温度上昇を測定した。測定結果の評価基準は、下記の通りとした。電気ヒータで与えた熱負荷は250W/m²とした。一般的なクリーンルームで想定される値の最大値を用いた。

温度上昇の許容値

温度上昇が6.5℃以内

評価基準の考え方と算出方法

- ・空調設備で処理する必要がある熱量=9000W
 $250\text{W}/\text{m}^2$ (今回の実験で与えた熱負荷) \times 6m(クリーンルーム横) \times 6m(クリーンルーム縦)
- ・一般的なクリーンルームでの空調設備による熱負荷(9000W)処理
 $9000\text{W} / (6.5 \times 0.33) = 4195\text{m}^3/\text{hour}$
温度差6.5℃、風量4195m³/hourの空気で9000Wの熱負荷が処理可能。
- ・温度差6.5℃について
一般的なクリーンルーム空調設備では、給気と還気の温度差が6.5℃確保できるように空調設備は設計されている。
- ・風量4195m³/hourについて
FFU回転数を60%とした場合、FFU風速は0.2m/s。
FFUサイズは1.2m \times 0.6m。
 $0.2(\text{m}/\text{s}) \times 1.2(\text{m}) \times 0.6(\text{m}) \times 3600(\text{hour}) \times 15(\text{台}) = 7776\text{m}^3/\text{hour}$

上記より、FFU回転数を低減させても十分な風量が確保されており、温度上昇が6.5℃以内であれば、一般的なクリーンルームでの空調設備で熱負荷を処理できる。

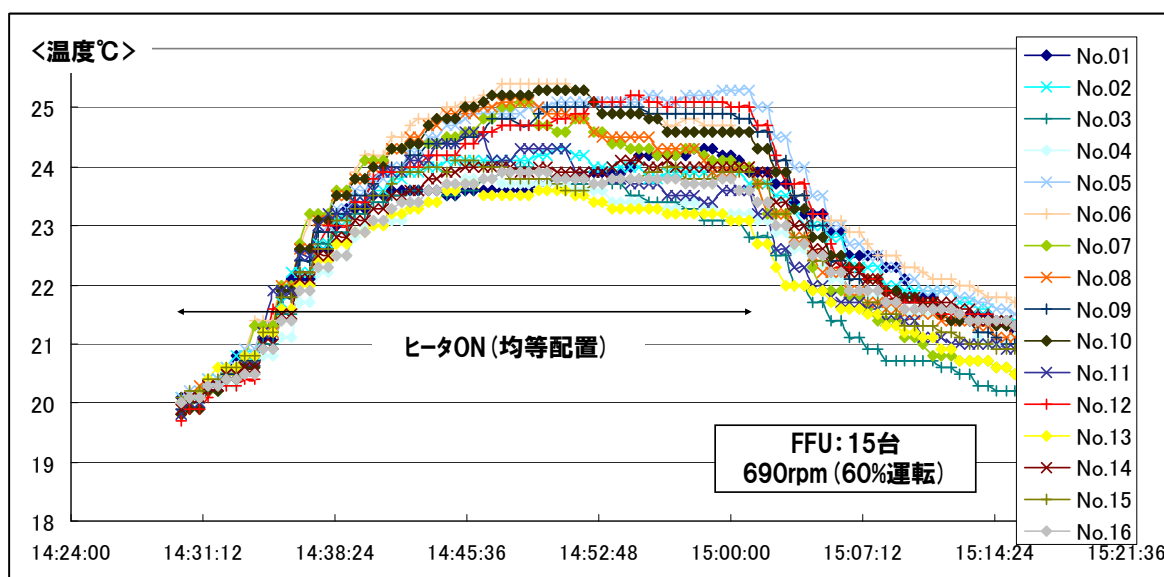
表V.3.6-1、図V.3.6-1 にクラス 100 相当のクリーンルームにおいて、FFU 回転数を 60%に低減させた場合の温度上昇を示す。

最も温度上昇が大きかった箇所でも 5.3℃であり、許容範囲以内であることが分かる。平均値としては、4.1℃の温度上昇であった。

表V.3.6-1

クラス 100 相当クリーンルームでの FFU 回転数を 60%に低下させた時の室内温度上昇

ヒータ均等配置	No.01	No.02	No.03	No.04	No.05	No.06	No.07	No.08	No.09	No.10	No.11	No.12	No.13	No.14	No.15	No.16	平均
開始時 (00:00)	20.1	20.1	20.0	19.9	20.1	20.0	19.8	19.9	19.9	19.8	19.8	19.7	20.0	19.9	20.1	20.0	19.94
終了時 (00:30)	24.2	23.9	23.1	23.2	25.3	24.7	24.1	23.9	24.9	24.6	23.6	25.0	23.1	24.0	23.9	23.8	24.08
Δ	4.1	3.8	3.1	3.3	5.2	4.7	4.3	4	5	4.8	3.8	5.3	3.1	4.1	3.8	3.8	4.14



図V.3.6-1

クラス 100 相当クリーンルームでの FFU 回転数を 60%に低下させた時の室内温度上昇

3) -7 C02_60%削減のまとめ

1990 年度比として C02_60%を削減するためには、FFU 電力量を 64%削減すれば実現できることが分かった。

FFU 回転数を 70%以下に低減すれば、FFU 電力量を 64%削減することができることが分かった。

クラス 100 相当のクリーンルームにおいて、FFU 回転数を 70%以下に低減させた場合のパーティクル量と室内温度上昇を検証した結果、許容範囲以内に収まることが分かった。

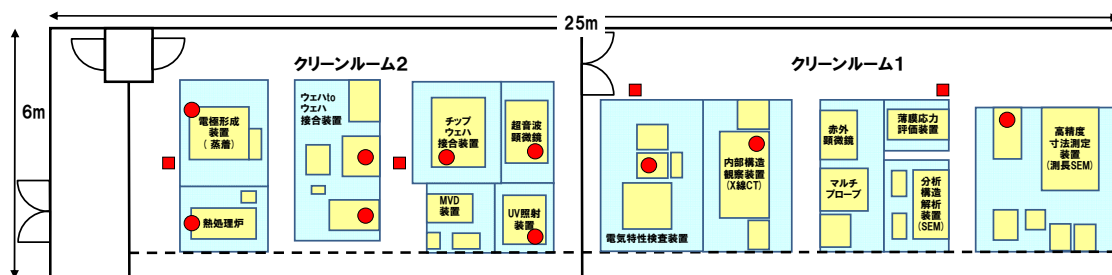
*今回の実験では、FFU 回転数を 60%にまで低減させても問題がないことを確認。

同様に、クラス 10 相当およびクラス 1000 相当のクリーンルームにおいても、FFU 回転数を 60%に低下させた時の検証を行っているが、同様の結果を得ることができた。

今回は、検証用クリーンルームにて事前検証という位置付けで検証を行った。この結果を受けて、実際に半導体プロセスが行われている産業総合技術研究所つくば東 3B 棟のクリーンルームに空調制御システムを導入して、次頁以降で削減効果を確認する。

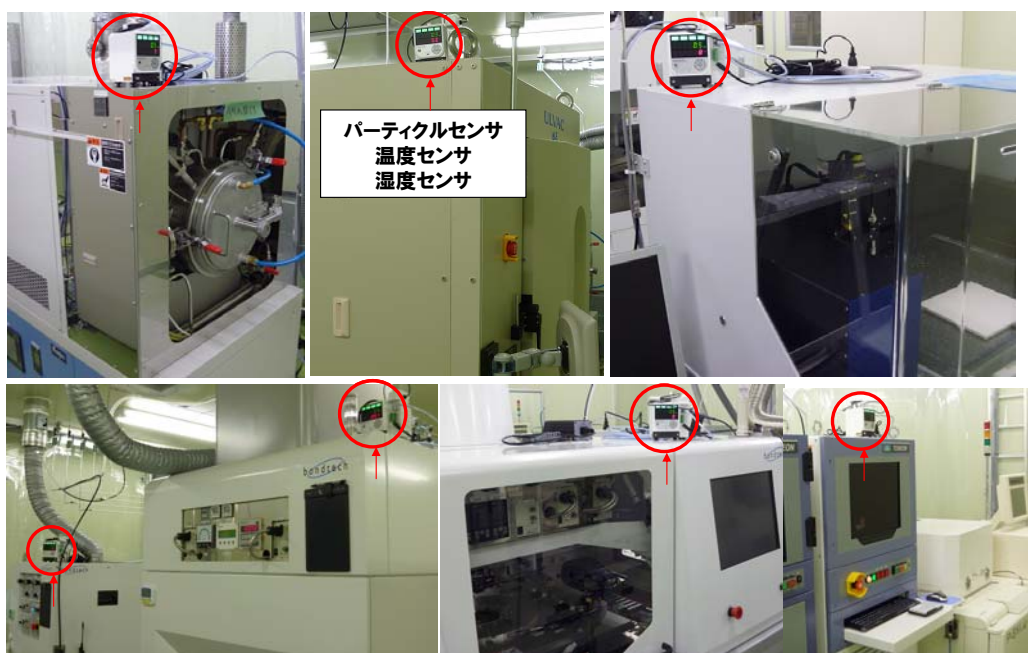
- 4) エネルギー最適_空調(FFU)自動制御システム(Clean On Demand)について
 4) -1 エネルギー最適_空調(FFU)自動制御システム(Clean On Demand)の検討
 つくば東 3B 棟クリーンルームに空調自動制御システムを導入した。

図V.4.1-1にクリーンルームとセンサの配置図を示す。図V.4.1-2にセンサの設置箇所画像を示す。クリーンルーム2には、後工程の生産設備が設置されているため、全ての設備にパーティクルセンサ/温度センサ/湿度センサを配置した。クリーンルーム1に導入されている設備は検査設備であるため、設置箇所を絞って配置した。



● パーティクルセンサ/温度センサ/湿度センサ ■ 人感センサ

図V.4.1-1 3B棟クリーンルームとセンサ配置図(Top View)

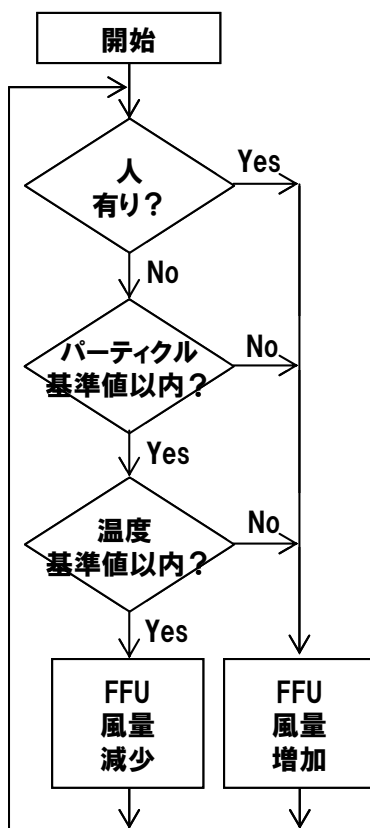


図V.4.1-2 センサ設置箇所画像

図V.4.1-3に制御フローチャートを示す。

人感センサと多点パーティクルおよび温度情報をもとに、FFU(Fan Filter Unit)の回転数を制御する制御フローとしている。

パーティクルと温度が設定した値を満足しているか否かを判定し、その基準を満足している間は、FFUの回転数を徐々に下げて行くこととしている。しかし、人感センサがアクティブとなった時は、入室作業が行われていると判断して、パーティクルと温度が規定値以内であっても、FFU回転数を増加させることとした。



図V.4.1-3に制御フローチャート

制御盤の導入に際しては、実際のクリーンルームでは、現場ごとに判定基準や設置するセンサの数量などは異なることが想定されるため、多様な現場に臨機応変に対応ができる構成とした。

導入した制御盤の特徴は、下記の通り。

複数の論理ブロックを持ち、その論理ブロックで判定するためのセンサを任意に選択できるとともに、判定基準およびFFU回転数も任意に選択が可能な構成。具体的には、論理ブロックごとに情報源とするセンサを登録するとともに判定基準などを設定し、その論理ブロックで制御対象とするFFUを割り付けることで実現している。

図V.4.1-4に制御盤外観画像と操作パネル画面の一例を示す。

図V.4.1-4では、パーティクル/温度センサ1と2および人感センサ2の情報をもとに、FFUの回転数を制御する論理ブロックの一例を示している。



図V.4.1-4 制御盤外観画像と操作パネル画面の一例

4) -2 エネルギー最適_空調(FFU)自動制御システム(Clean On Demand)の評価
 FFU(Fan Filter Unit)空調自動制御システムを導入した。

パーティクル量の変化を検討する。システムを導入したクリーンルームのパーティクルの基準値(設計値)は 1000 個/cf である。

図V.4.2-1に通常制御時の波形データを示す。図V.4.2-2にFFU空調自動制御時の波形データを示す。

通常制御時において、突発的に大きな値が測定されている。事前検証で検証を行った通り、通常制御においても、作業者の作業内容によっては基準値を超えることが分かる。しかし、通常制御時では、作業者が居ない深夜から明け方については、パーティクルがほぼ0であるのに対し、FFU空調自動制御時は、100前後の値が観測されており、パーティクル量が上昇していることが分かる。しかし、基準値1000以内であり、問題のないレベルであることも分かる。

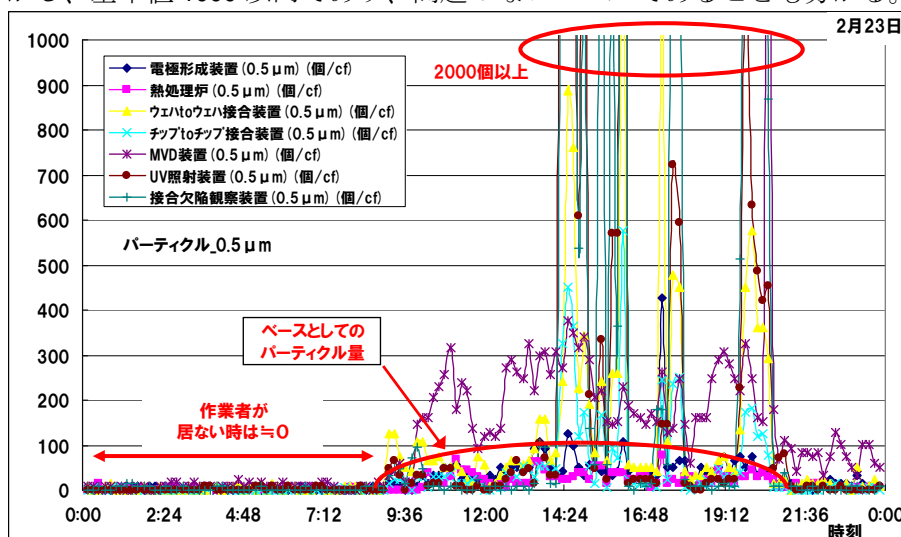


図 V.4.2-1 通常制御時のパーティクル量

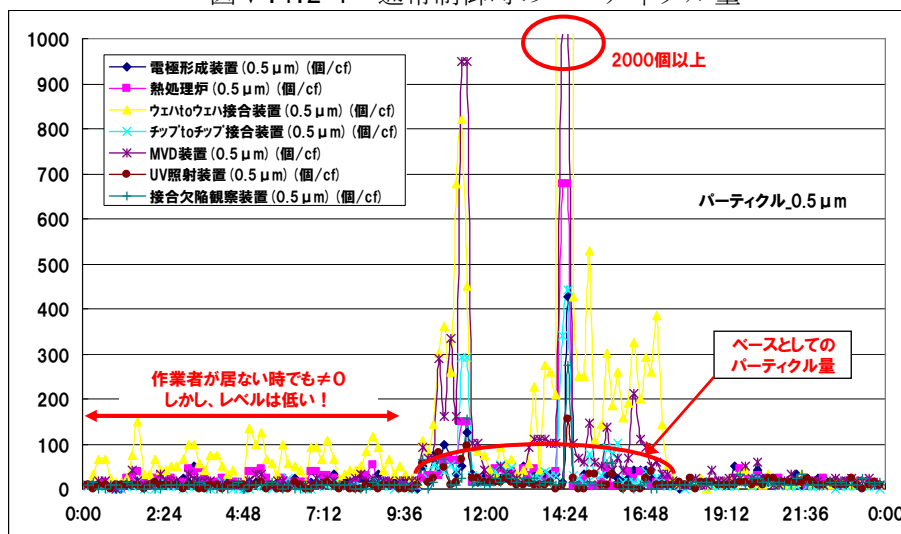
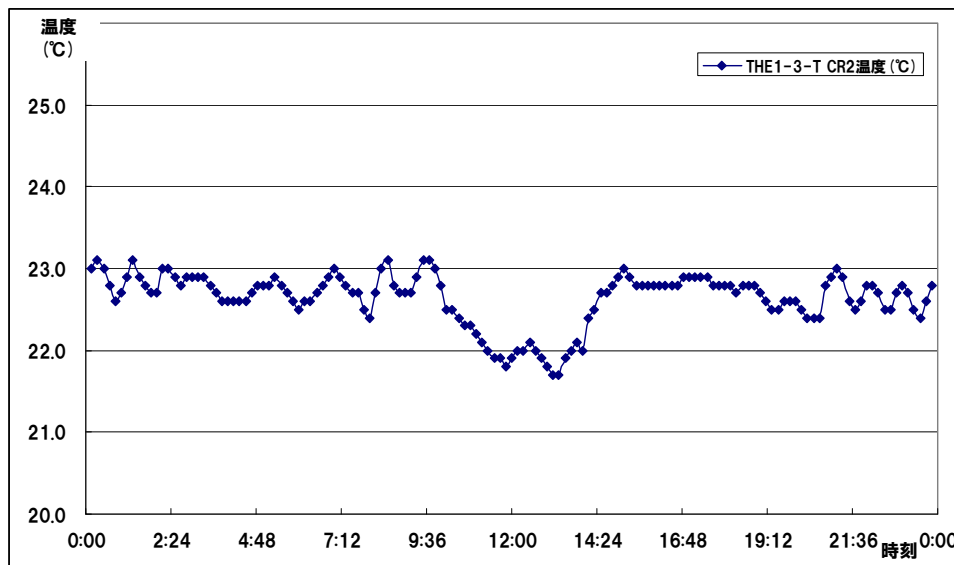


図 V.4.2-2 FFU空調自動制御時のパーティクル量

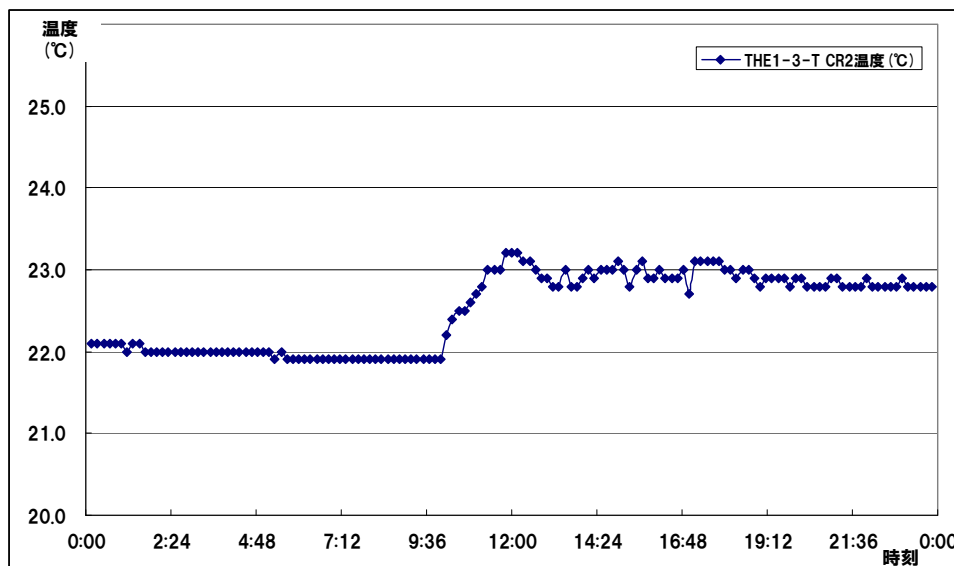
温度変化を検討する。システムを導入したクリーンルーム温度の基準値(設計値)は22~24℃である。

図V.4.2-3に通常制御時の波形データを示す。図V.4.2-4にFFU空調自動制御時の波形データを示す。

通常制御時において、若干、基準値を下回っているが、概ね、通常制御時およびFFU空調自動制御時ともに基準値の範囲に収まっている。



図V.4.2-3 通常制御時のクリーンルーム内の温度



図V.4.2-4 FFU空調自動制御時のクリーンルーム内の温度

電力量の変化を検討する。

算出方法は、数日間の電力量データより、平日の平均電力と休日の平均電力を算出し、1週間および年間の電力量を計算した。

表V.4.2-1に通常制御時とFFU空調自動制御時の電力量を示す。

表V.4.2-2に削減量を示す。

FFU空調自動制御を行うことにより、電力量として56%の削減を達成していることが分かった。

今回は、実際に製造プロセスを行っているクリーンルームへの初めての適用であったため、パーティクル量をあまり悪化させられなかった。事前検証で目標としていた64%の削減までには至らなかったが、先に記載したパーティクル量の波形データから更にFFU回転数を低下させても、パーティクルの基準値を満足できると思われる。実際のクリーンルームにおいても、FFU回転数の更なる低下により、FFU電力量の64%削減は十分に可能であることが分かる。

表V.4.2-1 FFU電力量(通常制御とFFU自動制御)

通常制御	クリーンルーム_2 FFU:10台	FFU自動制御	クリーンルーム_2 FFU:10台
2/21(月)	22.9	3/7(月)	9.4
2/22(火)	23.1	3/8(火)	11.3
2/23(水)	23.1	平日平均@1日	10.4
平均@1日	23.0	3/5(土)	9.7
1週間	161.2	3/6(日)	9.2
52週間(1年)	8384	休日平均@1日	9.4
		1週間	70.7
		52週間(1年)	3674

単位:kWh

単位:kWh

表V.4.2-2 FFU電力量の削減量

	クリーンルーム_2 FFU:10台
通常制御	8384
FFU自動制御	3674
削減量	4710
削減率	56%

単位:kWh

FFU(Fan Filter Unit)空調自動制御システムを導入し、パーティクル量の変化、室内温度の変化および電力量の削減量を検討した。しかし、現状、パーティクルセンサは非常に高額(30~100万円)であり、クリーンルームの規模によっては、多数のパーティクルセンサを設置したのでは、投資対効果が合わないことが想定される。そこで、人感センサのみでFFU空調自動制御システムを運用した場合の検討を行う。

図V.4.2-5に人感センサ情報のみでFFU空調自動制御を行った場合のパーティクルの波形データを示す。パーティクルは、モニターのみであり、制御には使用していない。

制御にパーティクル情報を使用していないため、深夜0時ごろにパーティクル量が上昇していることが分かる。また、ベースレベルとしてのパーティクル量も全体的に上昇していることが分かる。しかし、基準値1000以内である。

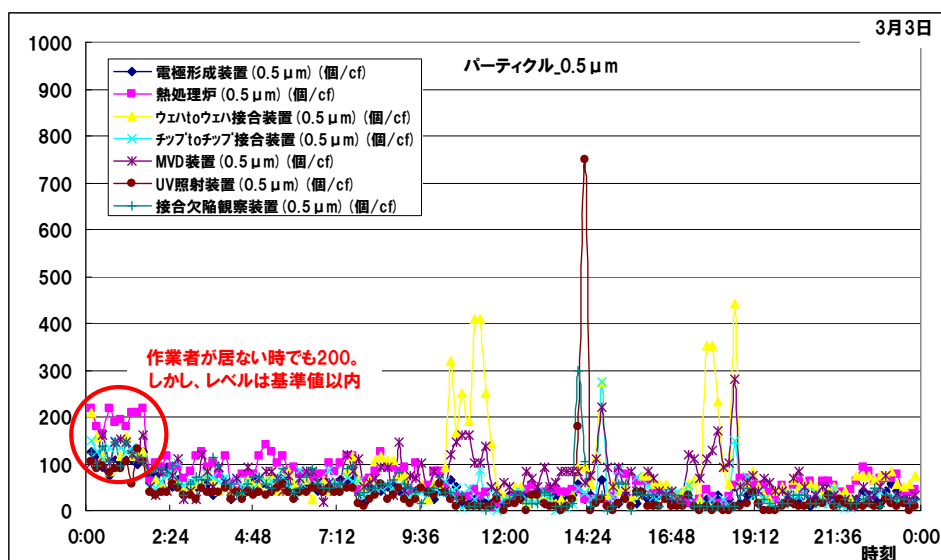


図 .4.2-5 FFU空調自動制御時のパーティクル量

表 .4.2-3 にパーティクルセンサ、温度センサ、人感センサを使用してFFU空調制御を行った場合と人感センサのみでFFU空調制御を行った場合のFFU電力量の値を示す。人感センサのみでの制御の場合は、若干、FFU電力量は大きいですが、通常制御時より大きく削減されていることが分かる。

表 .4.2-3 FFU電力量(@1日)の比較

自動制御	クリーンルーム_2 FFU:10台
パーティクル+温度+人	10.4
人	11.1

単位:kWh

通常制御時は23kWh

空調 FFU(Fan Filter Unit)自動制御システム時の電力量波形を示す。

図 V.4.2-6 に通常制御時と FFU 空調自動制御時の電力波形データを示す。

通常制御時は、電力量が一定であるのに対し、FFU 空調自動制御時は、電力量が大きく変動していることが分かる。昼間は、パーティクル量に応じて、FFU が制御されているためである。また、夜間においては低いレベルで電力量が推移していることが分かる。夜間は作業者の入室がなく、常にパーティクルが低いレベルであるため、FFU 回転数が低いレベルで運転されているためである。

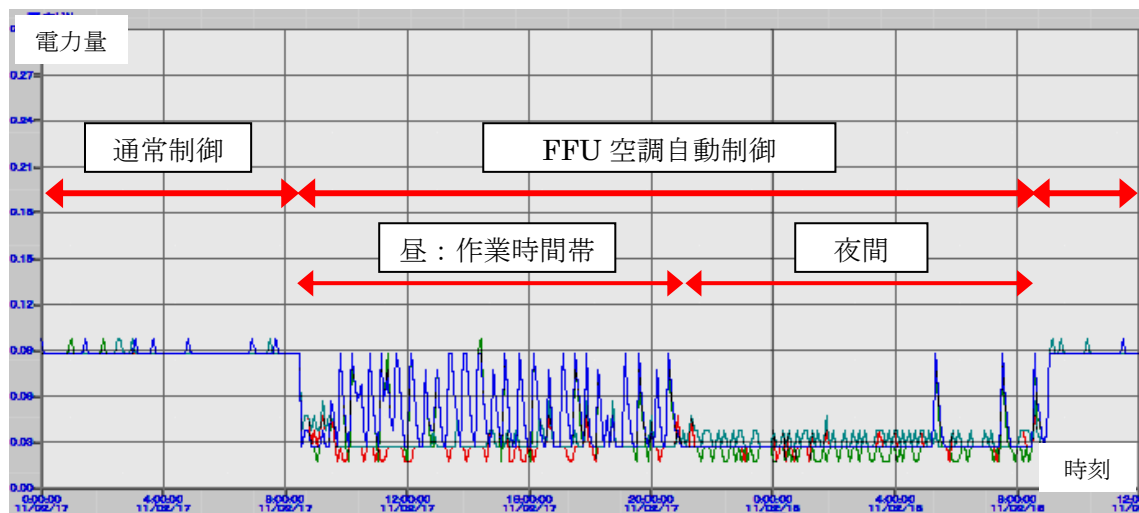


図 V.4.2-6 FFU 電力波形(通常制御と FFU 自動制御)

図 V.4.2-7 にパーティクルセンサ+温度センサ+人感センサと人感センサのみで FFU を自動制御した場合の電力波形データを示す。人感センサのみの場合は、パーティクル量が少なくても、人が作業している場合には、FFU 回転数が高い値に設定されるため、電力量についても、ある値が継続していることが分かる。

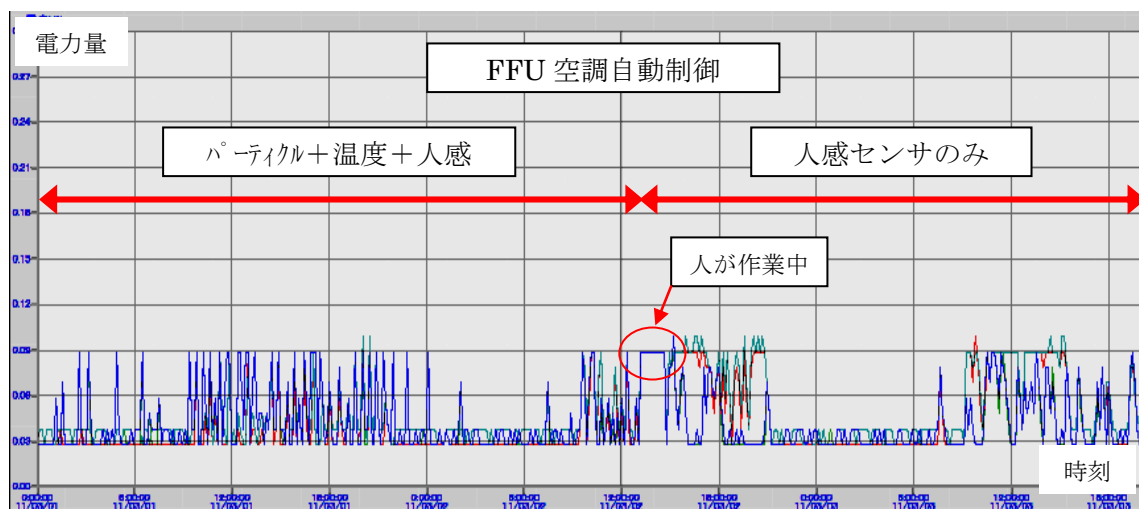


図 V.4.2-7 FFU 電力波形(パーティクル+温度+人感と人感のみ)

空調(FFU)自動制御システムにより、品質を維持しつつ、電力量を削減できることが分かった。投資対効果を検討する。

実際のクリーンルームでは、運用形態に応じて異なると思われるが、FFU 電力量の削減量は、事前検証で確認できた 64%と仮定する。

表 V.4.2-4 に FFU 台数とそれに相当するクリーン度クラスと削減見込み電力量を示す。

表 V.4.2-4 FFU 台数、相当するクリーン度クラス、削減見込み電力量

FFU台数	換気回数	クラス 個/cf	電力量 kWh@1台	合計電力量 kWh@1日	削減電力量 kWh@1日	削減電力金額 円@1年	削減電力金額 円@5年
100	11.3	10000	1.6	160	102.4	¥448,512	¥2,242,560
150	16.9		1.6	240	153.6	¥672,768	¥3,363,840
200	22.5		1.6	320	204.8	¥897,024	¥4,485,120
300	33.8	1000	1.6	480	307.2	¥1,345,536	¥6,727,680
500	56.3		2.3	1150	736	¥3,223,680	¥16,118,400
1000	112.5	100	2.3	2300	1472	¥6,447,360	¥32,236,800
1300	146.3		2.3	2990	1913.6	¥8,381,568	¥41,907,840
1500	168.8		2.3	3450	2208	¥9,671,040	¥48,355,200
2000	225	10	2.3	4600	2944	¥12,894,720	¥64,473,600
2500	281.3		2.3	5750	3680	¥16,118,400	¥80,592,000

計算条件

- ・クリーンルームサイズ：40×50×4m
- ・FFU 風量：900m³/hour(回転数 100 運転時)
- ・FFU 電力量：2.3kWh/day

3B 棟クリーンルームでの FFU 電力量実測値(回転数 100%運転時)。

但し、クラス 10000、1000 については、FFU による換気ではなく、AHU による換気が一般的に採用されることが多く、電力量の改善が見込めるため、FFU 電力換算として、0.7 倍の 1.6 kWh/day。

- ・電力料金単価：12 円/ kWh。
- ・計算の一例(FFU：500 台の場合)

クリーンルーム体積：40m×50m×4m=8000m³

FFU 風量：900m³/hour×500 台=450000m³/hour

換気回数：450000/8000=56.3 回/hour⇒クラス 1000 相当の換気回数

削減電力量/day：2.3 kWh/day×500 台×0.64=736kWh/day

削減電力金額/year：736 kWh/day×365day×12 円=3,223,680 円

クラス 100 相当 (FFU : 1000 台) クリーンルームの場合の投資対効果を考慮した機器、システム費用を想定した。投資金額は、表 V.4.2-4 の結果より 3200 万円と仮定した。工事費用は、機器合計金額の同額と仮定した。よって、工事費用などに含まれる宿泊旅費や、工事管理費は工事には含めずに、小計の合計金額に一定の倍率を掛けて、最終のトータル費用とした。

クラス 100 相当のクリーンルームの場合、既に FFU が何らかの制御システム下に置かれていることが想定されるため、既存システムとの連携を考慮した制御ソフトウェアとする必要があり、1200 万円を見込んだ。但し、この 1200 万円には、試運転調整費用も込みの価格である。表 V.4.2-5 にクラス 100 クリーンルームにおいて、投資対効果を考慮した場合に許容される機器/システム費用を示す。

表 V.4.2-5 クラス 100 クリーンルームでの機器/システム費用

項目	数量	単価	小計
制御ソフトウェア	1	¥12,000,000	¥12,000,000
制御盤	1	¥3,000,000	¥3,000,000
パーティクルセンサ	6	¥350,000	¥2,100,000
温湿度センサ	6	¥50,000	¥300,000
工事 (H/W関連)	1	¥5,400,000	¥5,400,000
		合計	¥22,800,000
		合計*1.4	¥31,920,000

クラス 1000 相当 (FFU : 300 台) クリーンルームの場合の投資対効果を考慮した機器、システム費用を想定した。投資金額は、表 V.4.2-4 の結果より 670 万円と仮定した。パーティクルおよび温湿度センサともに、もう少し設置数を増やしたいが、投資対効果に見合なくなるため、2 個とした。言い方を変えると、適切な箇所に設置する必要があるということを示唆している。また、FFU が 300 台相当存在するシステムの制御盤として、150 万円は非常に厳しい金額と想定される。その場合は、FFU で換気を行っているアプリケーションは切り捨て、AHU で換気を行っているアプリケーションに限定するなどの対応が必要である。AHU でのアプリケーションであれば、制御対象が FFU のように 300 台ではなく、数台に減少されるため、制御盤も安価な構成が可能であると思われる。表 V.4.2-6 にクラス 1000 クリーンルームにおいて、投資対効果を考慮した場合に許容される機器/システム費用を示す。

表 V.4.2-6 クラス 1000 クリーンルームでの機器/システム費用

項目	数量	単価	小計
制御盤	1	¥1,500,000	¥1,500,000
パーティクルセンサ	2	¥350,000	¥700,000
温湿度センサ	2	¥50,000	¥100,000
工事 (H/W関連)	1	¥2,300,000	¥2,300,000
		合計	¥4,600,000
		合計*1.4	¥6,440,000

クラス 10000 相当 (FFU : 100 台) クリーンルームの場合の投資対効果を考慮した機器、システム費用を想定した。投資金額は、表 V.4.2-4 の結果より 330 万円と仮定した。投資金額が少ないため、パーティクルセンサを設置する場合と、パーティクルセンサの代替として人感センサを設置する場合を検討した。

表 V.4.2-7 にはパーティクルセンサを設置した場合、表 V.4.2-8 には人感センサを設置した場合のクラス 10000 クリーンルームにおける投資対効果を考慮した場合に許容される機器/システム費用を示す。

表 V.4.2-7 クラス 10000 クリーンルームでの機器/システム費用 その 1

項目	数量	単価	小計
制御盤	1	¥1,000,000	¥1,000,000
パーティクルセンサ	1	¥350,000	¥350,000
温湿度センサ	0	¥50,000	¥0
工事 (H/W関連)	1	¥1,350,000	¥1,350,000
		合計	¥2,700,000
		合計*1.2	¥3,240,000

表 V.4.2-8 クラス 10000 クリーンルームでの機器/システム費用 その 2

項目	数量	単価	小計
制御盤	1	¥1,000,000	¥1,000,000
人感センサ	6	¥50,000	¥300,000
温湿度センサ	0	¥50,000	¥0
工事 (H/W関連)	1	¥1,300,000	¥1,300,000
		合計	¥2,600,000
		合計*1.2	¥3,120,000

空調 (FFU) 自動制御システムの投資対効果を検討した。

基本的な考え方として、費用の積上げではなく、投資対効果を考慮した場合には、これぐらいの費用で収める必要がある、という考え方で費用を算出している。

今回は、現状のセンサ市場価格をベースに投資対効果を検討した。そのため、多点計測によりキメ細かく測定することが困難ケースでは、人感センサで代替するなどの回避策を採用した。

特に、現状では、パーティクルセンサが非常に高額であり、パーティクルセンサの MEMS 化による低価格化が急がれる。また、今回の工事では、有線によるセンサを想定しているが、将来的に、各種センサが MEMS 化され、電源もバッテリー化されれば、工事費用も大きく低減することが想定され、その場合には、更に、キメ細かく多点計測が可能になる。

各種センサ (温度、湿度、パーティクル) の MEMS 化による小型⇒安価および無線化による工事費用の低減が急がれる。

4) -4 エネルギー最適_空調(FFU)自動制御システム(Clean On Demand)のまとめ

半導体プロセスが行われている産業総合技術研究所つくば東 3B 棟のクリーンルームに空調制御システムを導入して、削減効果を確認した。

FFU 空調制御システムにより、FFU 電力量の 56%削減を達成した。
また、その際のパーティクル量および温湿度も許容範囲以内であることを確認した。

クラス 100、1000、10000 のクリーンルームにおける投資対効果を検討し、回収年月 5 年の場合の機器およびシステム費用の概算を算出した。

今後は、実際のクリーンルームを所有しているユーザにヒアリングを行い、課題などを明確にする必要がある。

5) エネルギー最適_空調温湿度自動制御システム(T/H On Demand)について

5) -1 エネルギー最適_空調温湿度自動制御システム(T/H On Demand)の検討

従来の空調制御システムでは、室内の温湿度設定値(Set Point)は固定値となっている。クリーン度の低いクリーンルームでは、夏場と冬場に設定値を手動で変更して運用されていることもあるが、設定許容範囲を有効に活用することは行われていない。そこで、今回、設定温度および設定湿度の許容範囲を有効活用しながら、設定値を自動変更するシステムを検討した。

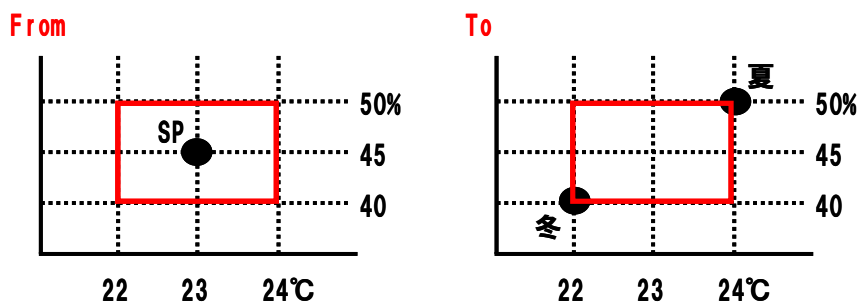
図V.5.1-1に温湿度設定値(Set Point)イメージを示す。

従来は、外気温湿度に関わらず、制御システムの設定値(Set Point)は一定である。エネルギー最適_温湿度空調自動制御システムでは、外気の温度および湿度と室内の温度と湿度から、空調設備のエネルギーが最小となる制御システムの設定値(Set Point)を自動でリアルタイムに変更しながら、空調制御を行う制御システムである。

平たく言えば、設定値を夏であれば、温度、湿度ともに高い値に設定し、冬は温度、湿度ともに低い値に設定することにより空調のエネルギー削減を目指している。

夏場と冬場に設定値を手動で変更するのに対して、中間期も含めて、リアルタイムに自動で制御するため、よりキメ細かい制御が可能となる。

もちろん、許容範囲を有効活用するのであって、最終的なクリーンルームの温湿度は、許容範囲以内となることを制御の前提としている。



図V.5.1-1 温湿度設定値(Set Point)イメージ

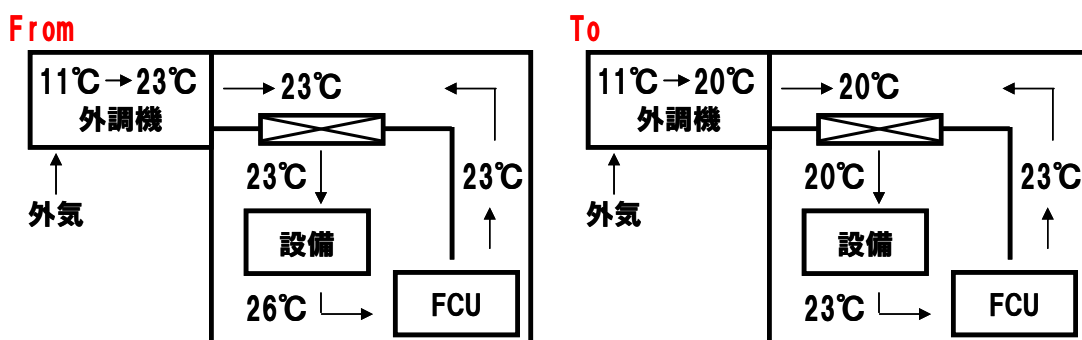
また、クリーンルームでは、湿度管理を厳密に行う必要から、一旦、空気を過冷却し、再熱・再加湿されている。エネルギー最適_温湿度空調自動制御システムでは、この過冷却による再熱・再加湿のムダ削減にも対応した制御システムとした。

図V.5.1-2に設定温度イメージを示す。室内の設定温度は23℃とする。

従来は、外調機にて外気を一旦、11℃まで過冷却し、除湿した後、23℃まで再熱している。再熱された空気は、クリーンルーム内に送られ、設備などの熱負荷により、例えば、26℃まで上昇する。室内の熱負荷で上昇した26℃の空気を室内の顕熱処理用のFCU(Fan Coil Unit)やDC(Dry Coil)で、熱処理して、所定の23℃に温度調整して、クリーンルーム内に戻している。

エネルギー最適_温湿度空調自動制御システムでは、除湿のため11℃まで過冷却するのは同じであるが、その後の、再熱を23℃までとせず、室内熱負荷の温度上昇を考慮して、20℃までの再熱とする。そして、室内の熱負荷により所定の23℃まで上昇させることにより、外調機での再熱ムダとFCUでの熱処理ムダの両方を削減することを目指している。

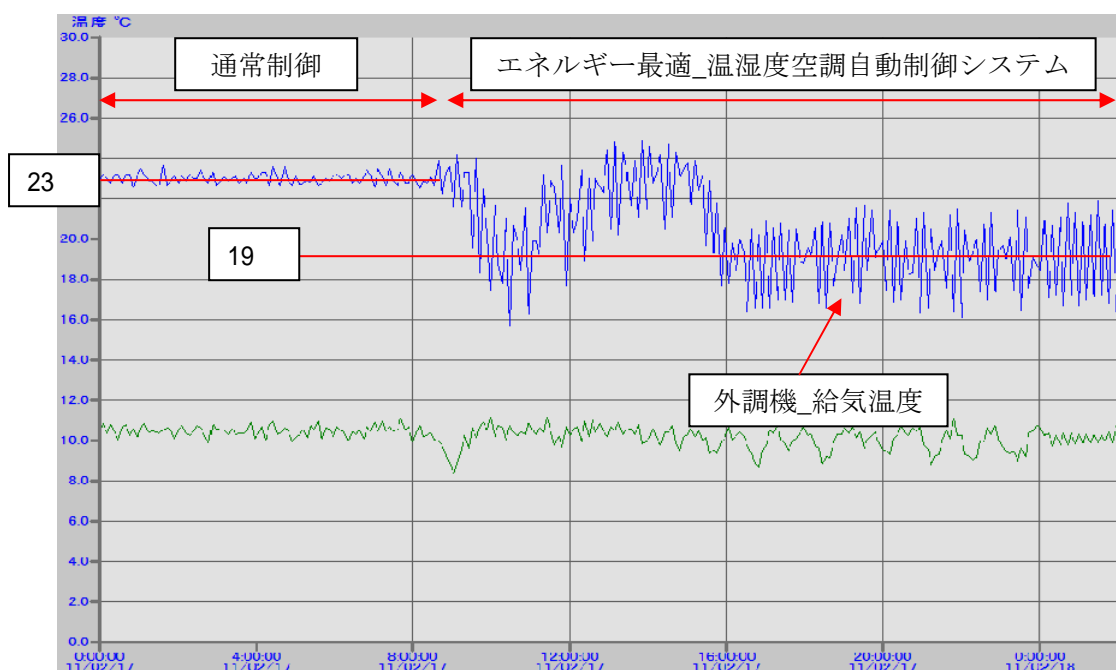
しかし、設備の熱負荷は刻々と変化するため、その変化に対応が可能な制御システムが要求される。



図V.5.1-2 設定温度イメージ

5) -2 エネルギー最適_空調温湿度自動制御システム(T/H On Demand)の評価
エネルギー最適_温湿度空調自動制御システムを導入した。

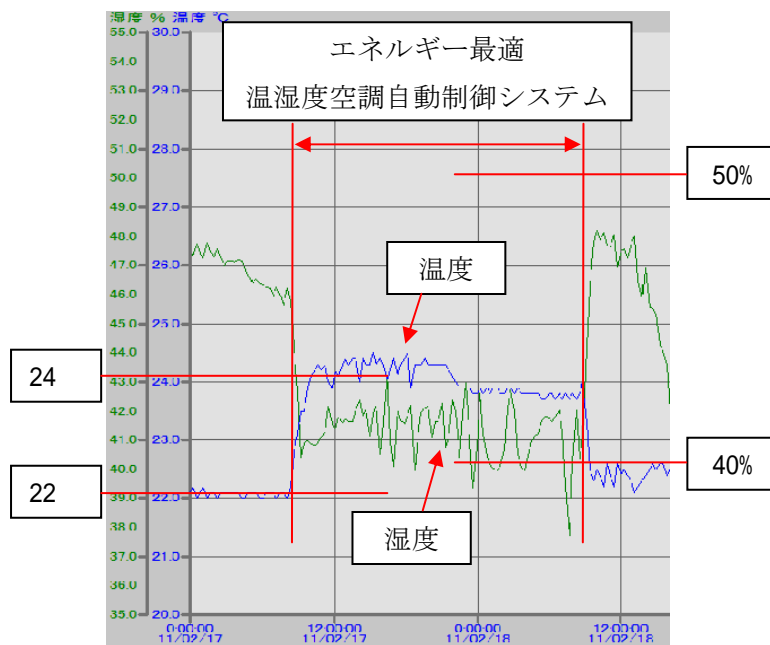
図V.5.2-1に外調機の給気温度変化を示す。図V.5.2-2に室内の温湿度を示す。
通常制御では、給気温度は、ほぼ23°C一定である。しかし、エネルギー最適_
温湿度空調自動制御システムでは、給気温度は、19°C前後で大きく変動している。
つまり、11°Cまで過冷却された空気は、23°Cまで再熱されず、19°C前後までの
再熱処理となり、再熱のムダが削減されていることが分かる。また、室内の熱
負荷に応じて、給気温度が大きく変動していることも分かる。



図V.5.2-1 外調機_給気温度

室内の許容温度範囲は、22～24℃である。エネルギー最適_空調温湿度自動制御システム時では、上限を若干超えている。今回、検証時間の都合上、微調整をする時間がなく、FCUの制御が上手く連動していないと思われる。しかし、この程度の超過は調整できる範囲であると思われる。

また、湿度についての許容範囲は、40～50%である。通常制御時よりも低い値で推移しており、余計な加湿を行っていないことが分かる。



図V.5.2-2 室内の温度と湿度

エネルギー最適_空調温湿度自動制御システムによる電力量の削減を検討する。
しかし、検証期間が短く、その期間での外気の温湿度を考慮した比較までには
至っていない。

特に、検証期間が冬場であり、外気の湿度によって削減量は左右されるため、
参考値として記載する。

また、排気量の制限による検証も行っており、単純な評価はできない。

表V.5.2-1 に通常制御時の電力量を示す。表V.5.2-2 にエネルギー最適_温湿度空調自動制御システム時の電力量を示す。設備排気は 100%設定。表V.5.2-3 に設備排気を 50%に絞った時の電力量を示す。通常制御時の設備排気は 100%設定。
電力使用量の多い熱源系に関して、14~17%の削減が確認できた。

表V.5.2-1 通常制御時の電力量

	合計電力量 kWh	外気温度 Max値	外気温度 Min値	外気湿度 Max値	外気湿度 Min値	FCU3 (1台)	FCU2 (3台)	FCU1 (2台)	加湿器	外調機	RH-1 チラー @OAC	R-1 チラー @FCU	備考
2/21(月)	291	9.6	4.6	63.7	41.2	0.8	8.2	5.2	169.7	11.7	73.1	22.2	OAC:通常モード/FCU:通常モード 排気:終日100%
2/22(火)	310	9.4	2.9	68.7	46.4	0.8	8.3	5.1	168.4	11.9	93.6	22.0	OAC:通常モード/FCU:通常モード 排気:終日100%
2/23(水)	290	10.8	4.4	67.7	48.9	0.7	8.3	5.2	152.4	11.8	81.1	30.9	OAC:通常モード/FCU:通常モード 排気:終日100%
平均値	297												

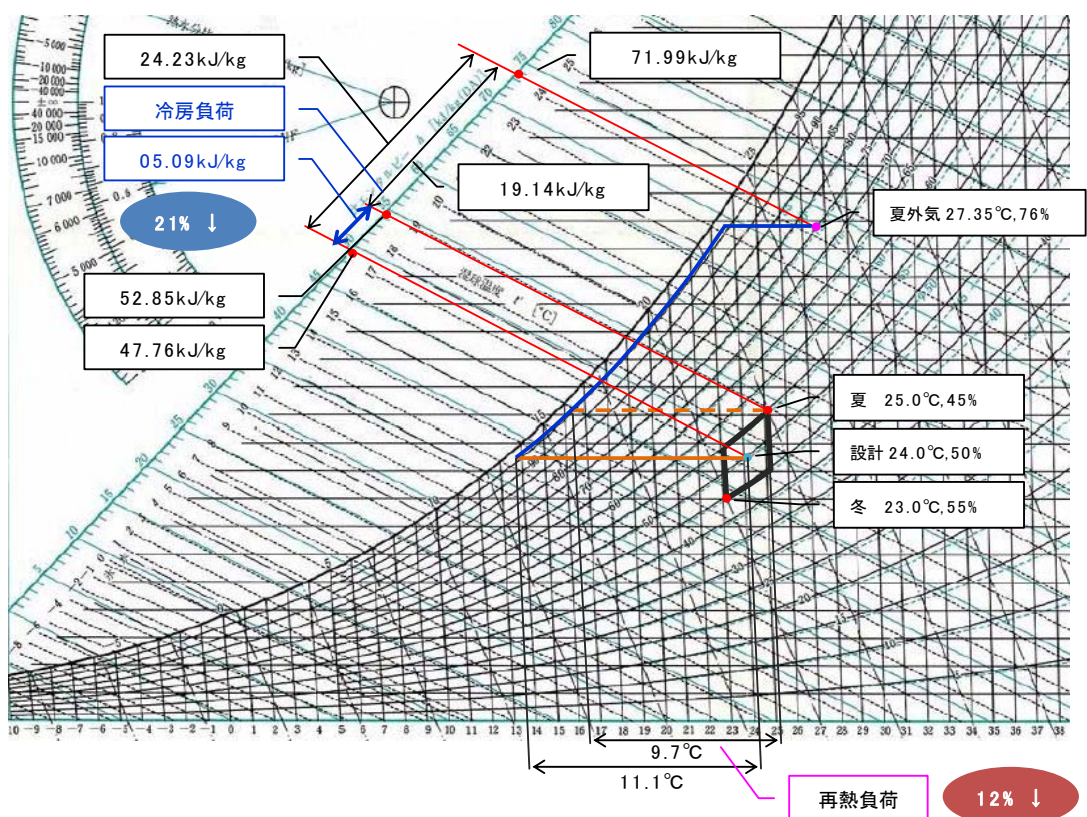
表V.5.2-2 エネルギー最適_温湿度空調自動制御システム時の電力量

	合計電力量 kWh	外気温度 Max値	外気温度 Min値	外気湿度 Max値	外気湿度 Min値	FCU3 (1台)	FCU2 (3台)	FCU1 (2台)	加湿器	外調機	RH-1 チラー @OAC	R-1 チラー @FCU	備考
2/28(月)	254	8.9	3.7	87.3	60.3	0.7	8.4	5.0	121.4	11.7	88.9	18.2	OAC:自動制御/FCU:自動制御 排気:終日100%
3/1(火)	239	8.7	4.8	88.7	65.6	0.7	8.3	5.1	112.9	11.7	82.1	18.0	OAC:自動制御/FCU:自動制御 排気:終日100%
3/7(月)	264	8.5	3.3	83.9	55.8	0.7	8.4	5.1	125.2	11.7	95.9	16.5	OAC:自動制御/FCU12系:自動制御 /FCU8系:通常モード 排気:終日100%
3/8(火)	261	10.0	4.4	80.6	36.6	0.8	8.3	5.1	133.3	11.6	84.4	17.9	OAC:自動制御/FCU12系:自動制御 /FCU8系:通常モード 排気:終日100%
平均値	255												
削減量	43												
削減率	14%												

表V.5.2-3 エネルギー最適_温湿度空調自動制御システム時の電力量(設備排気 50%)

	合計電力量 kWh	外気温度 Max値	外気温度 Min値	外気湿度 Max値	外気湿度 Min値	FCU3 (1台)	FCU2 (3台)	FCU1 (2台)	加湿器	外調機	RH-1 チラー @OAC	R-1 チラー @FCU	備考
2/26(土)	284	9.6	5.6	50.1	24.8	0.8	8.4	5.1	176.4	10.4	64.8	18.1	OAC:自動制御/FCU:自動制御 排気:0-6のみ50%
2/27(日)	177	15.0	5.7	71.8	46.5	0.8	8.4	5.2	101.4	7.9	35.0	18.1	OAC:自動制御/FCU:自動制御 排気:終日50%
3/3(木)	310	6.6	2.7	44.7	19.3	0.8	8.4	5.2	196.7	10.4	70.1	17.9	OAC:自動制御/FCU:自動制御 排気:0-7のみ50%
3/5(土)	272	10.1	1.4	61.5	23.6	0.8	8.4	5.1	168.4	10.4	62.9	16.4	OAC:自動制御/FCU12系:自動制御 /FCU8系:通常モード 排気:0-6のみ50%
3/6(日)	193	13.2	3.0	65.5	21.8	0.7	8.5	5.1	115.5	7.8	37.9	17.7	OAC:自動制御/FCU12系:自動制御 /FCU8系:通常モード 排気:終日50%
平均値	247												
削減量	50												
削減率	17%												

今回は、検証期間が冬季ということもあり、夏季の削減量は測定できていない。
 そこで、夏季における削減見込みを机上で算出する。
 冷房負荷として21%、再熱負荷として12%の削減が期待されることが分かった。
 熱源系の電力量は非常に大きいため、金額ベースとしても大きな削減が見込める。
 図V.5.2-3に夏季の空調温湿度の遷移を空気線図で示す。



図V.5.2-3 夏季の削減見込み(空気線図)

5) -3 エネルギー最適_空調温湿度自動制御システム(T/H On Demand)のまとめ

半導体プロセスが行われている産業総合技術研究所つくば東 3B 棟のクリーンルームにエネルギー最適_空調温湿度自動制御システムを導入した。

温度および湿度の設定許容範囲を有効に活用しつつ、再熱のムダを削減した空調自動制御システムを開発した。

参考値ではあるが、冬季データとして、熱原系の電力量で 15%の削減が確認できた。

熱原系では非常に大きな電力が使用されており、大きな削減が見込める。

今後は、夏季および中間期での電力の削減量を検証しつつ、実際のクリーンルームを所有しているユーザにヒアリングを行い、課題などを明確にする必要がある。

6) 高機能センサネットワークシステム開発の全体まとめ

エネルギー見える化システムについて

エネルギーマネジメント統合管理システム(3D棟、3B棟、2G棟クリーンルーム)を開発した。見える化項目として、エネルギーおよびエネルギーに影響を与える項目全ての見える化を実現した。

電力量(生産設備、空調設備、付帯設備)、ガス使用量(N₂、SF₆、C₄F₈)、純水使用量、温湿度(多点)、設備排気量、パーティクル量(多点)、人在室情報、設備稼働情報。合計：441点(3D棟 157点、3B棟 179点、2G棟 105点)の見える化を実現した。

いつでも、どこでも、だれでも、簡単にクリーンルームのエネルギーに関する情報が共有できるユーザフレンドリーな情報端末(iPad)を採用したシステムを開発するとともに、効率的にエネルギーのムダを抽出できるデータ分析支援ツールを開発した。

CO₂_60%削減について

検証用クリーンルームにて、パーティクル、温湿度に関する基本データを取得し、その知見を空調自動制御(On Demand制御)システム開発に反映させた。

クラス 10、100、1000 クリーンルームを擬似的に再現し、塵埃負荷および熱負荷を与えた時のパーティクル量、パーティクル拡散量、温度上昇などの基本データを取得し、1990年度比、CO₂_60%削減の検証を実施した。

エネルギー最適_空調(FFU)自動制御システム(Clean On Demand)

温湿度を満足しつつ、パーティクル量に応じたFFU(Fan Filter Unit)自動制御システムを開発した。

つくば3B棟クリーンルームにてFFU電力量56%削減を実現した。

エネルギー最適_空調温湿度自動制御システム(T/H On Demand)

温湿度設定許容範囲を有効活用しつつ、再熱処理のムダを削減した空調温湿度自動制御システムを開発した。

つくば3B棟クリーンルームにてエネルギー消費量の大きい熱源系電力の15%削減を実現した。

次世代オンデマンド型ユビキタスセンサネットワークについて

クリーンルームでの各種エネルギーの見える化システムおよびパーティクル量に応じた空調自動制御システムを開発した。しかし、クリーンルームではモノ作りが行われており、そのモノ作りの力こそが、日本の国際競争力の源泉ともなっている。しかし、未だ、モノ作りと連携した空調自動制御システムは、実現していない。次世代オンデマンド型ユビキタスセンサネットワークの目指すべき姿としては、モノ作り情報(いつ、どの設備で、何を作るという生産管理情報)と環境情報(室内温湿度、パーティクルなど)と空調設備情報(熱源、空調機など)から、エネルギーが最適となる空調自動制御システムが目指すべき姿である。

図 V.6-1 に次世代オンデマンド型ユビキタスセンサネットワーク活用イメージを示す。

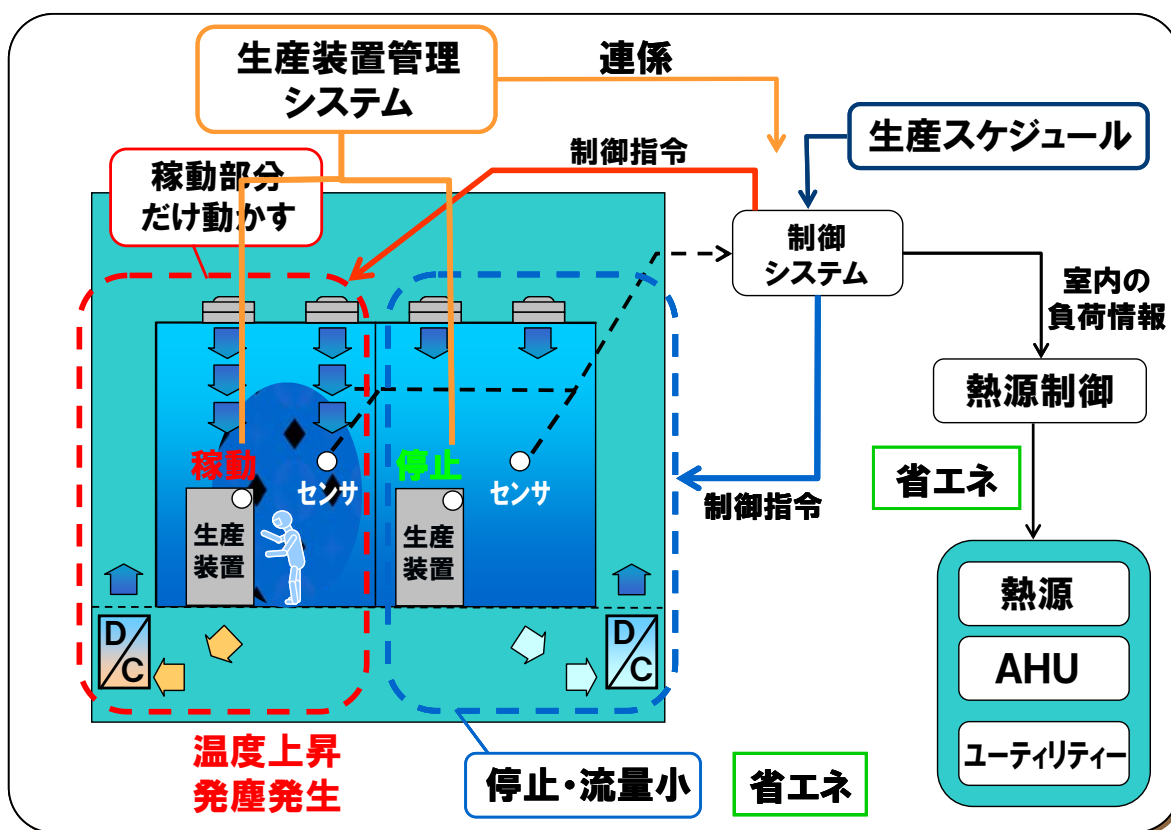


図 V.6-1 次世代オンデマンド型ユビキタスセンサネットワーク活用イメージ

以上

1. 2 8インチ MEMS プロセスラインの構築

(1) 研究の目的

「異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト」で得られた研究開発成果である3次元ナノ構造形成プロセス技術においては、試作プロセスから大口径での(8インチ)性能ばらつき等を実証できる段階にある。また、研究開発項目⑤の「高機能センサネットシステムの開発」の一環として実施されるクリーンルームの環境負荷低減を目指したエネルギー管理用センサネットシステムの検証と、同じく研究開発項目⑤の「低環境負荷型プロセス技術開発」において実施される高生産性・低環境負荷型 MEMS デバイス製造のためのプロセスプラットフォーム構築に向けたジャイロ、加速度、MEMS 振動子などのセンサ TEG (Test Element Group) の試作が必要である。また、これまで日本が必ずしも得意とはして来なかった、MEMS プロトタイピングから量産想定パイロット生産の開発支援に対応し、“Commercialization Gap” 克服の一助となること、さらに、つくばナノテク拠点の TIA-NMEMS W/G と一般財団法人マイクロマシンセンターが目指す、将来のマイクロナノオープンイノベーションセンター (MNOIC) 構想の中核拠点を立ち上げることも重要課題である。

以上の課題に対応するため、独立行政法人産業技術総合研究所(産総研)つくば東事業所の集積マイクロシステム研究センター内に、MEMS 製造ラインとして、クラス 1000 以下のクリーンルームと最先端 8 インチラインを設置した。これらの MEMS ラインは、異分野融合型次世代デバイス製造技術の実証や現在の MEMS 製造の動向をふまえた最先端ラインとしての 8 インチシリコンウェハベース MEMS ラインとした。ラインの構成としては、MEMS/LSI の前工程から後工程、評価までカバーする一貫ラインであり、ウェハの洗浄、リソグラフィ、拡散、酸化、成膜、エッチングから、接合・封止、デバイスチップ切断、実装用配線、さらに、デバイス表面及び内部の形状評価までを実施する装置を導入した。

(2) 最先端 8 インチラインのコンセプト及び特長

MEMS デバイスの製造現場を持たないファブレス企業が MEMS 応用製品を商業化しようとする場合、MEMS ファンドリーとの連携が非常に重要である。国内の場合、MEMS の新規のアプリケーション・アイデアや基礎研究と製品化・量産化の“Commercialization Gap”を橋渡しする仕組みが脆弱といわれているが、海外では、コンセプトモデル開発から量産までをカバーする量産試作ファンドリーもあり、スタートアップ育成、産業拡大のキープレイヤーとなっている。このような仕組みを国内で展開することが可能か、米国のみで可能なビジネスモデルなのか、今後の詳細な検討が課題となっている。

以下、最先端 8 インチラインの特長を列挙する。

i) 最先端レベルの 8 インチウェハ対応 (クラス 1000 以下)

図 V.1.2.2-1 に最先端 8 インチラインの設置場所を示す。本ラインを産総研つくば東事業所に設置することで、産総研 12 インチ半導体ラインとの合体によりシナジー効果を発揮

することを目的としている。

ii) 環境負荷測定センサネットワークシステムによる監視ライン

エネルギー見える化システムによる環境負荷の監視と個別空調システムによるライン環境のスマート制御の併用により低環境負荷生産の実現を目指している。

iii) MEMS プロトタイプから、量産想定パイロット生産まで対応

図V.1.2.2-2に8インチラインの想定開発ステージを示す。本ラインは、MEMS デバイス開発におけるプロトタイプ段階から量産試作プロセス開発段階への適用を主な対象としており、MEMS デバイス開発の初期段階から、将来の量産化に円滑に移行できるようなプロセスを採用するとともに、国内ファンドリー企業との連携が容易な半量産仕様の装置群を選定した。

iv) MEMS/LSI の前工程から後工程、評価までカバーする一貫ライン

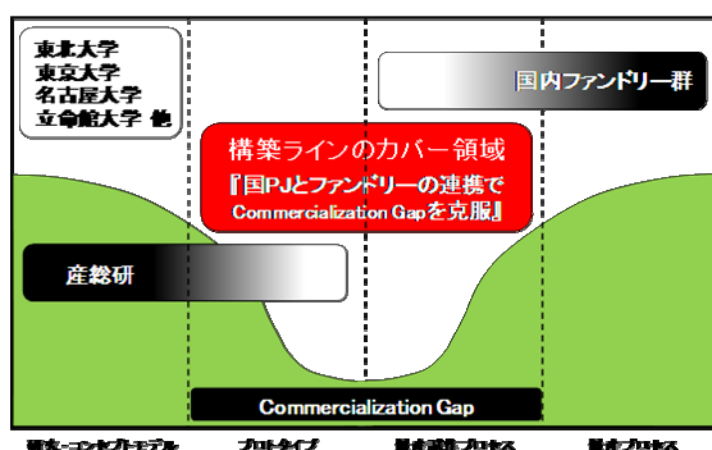
ウェハの洗浄、リソグラフィ、拡散、酸化、成膜、エッチング、接合・封止、デバイスチップ切断、実装用配線、デバイス表面及び内部の形状評価が可能な一貫製造ラインを構築した。

v) 3次元マイクロ加工からサブハーフミクロン加工まで対応。

異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト成果プロセスの検証デバイス試作と高生産性・低環境負荷型 MEMS デバイス製造のためのプロセスプラットフォーム構築に向けたジャイロ、加速度、MEMS 振動子などのセンサ TEG (Test Element Group) の試作に使用するため、実績あるセンサ等の MEMS から、最先端レベルデバイスまで対応可能な装置群を選択した。



図V.1.2.2-1 設置場所



図V.1.2.2-2 8インチラインの想定開発ステージ

(3) 最先端 8 インチライン(TKB812)と導入設備

表V.1.2.3-1に最先端 8 インチラインに導入した設備の一覧表を示す。

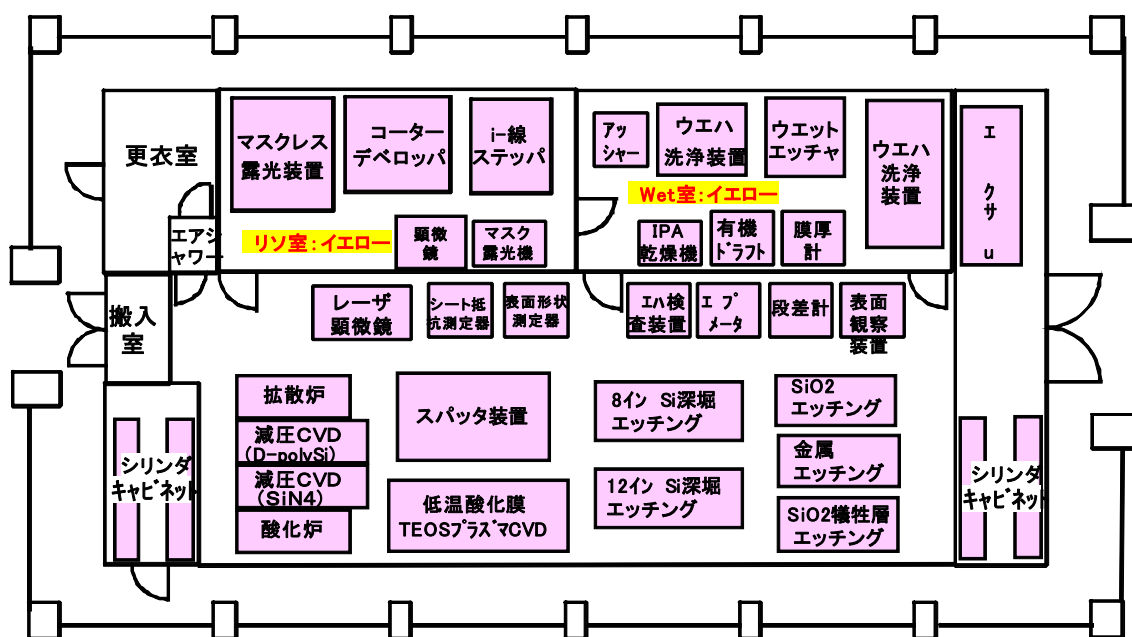
前工程クリーンルームは産総研建設設備で、その中に前工程ライン(以下、TKB812F ラインと称する)として、ウェハ洗浄・乾燥、リソグラフィ、成膜、エッチングプロセス装置とプロセス中のウェハの評価装置を設置した。

後工程・評価用クリーンルームは本研究開発プロジェクトで建設したスマート空調クリーンルームで、その中に後工程・評価ライン (以下、TKB812B ラインと称する)として、接合・実装装置と評価装置を設置した。

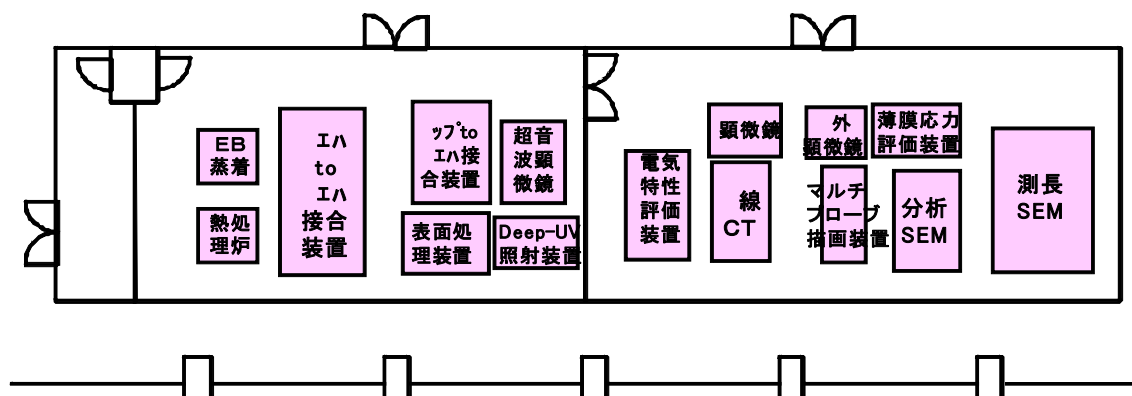
表V.1.2.3-1 最先端 8 インチライン導入設備一覧表

工程	プロセス/評価装置	設置場所
洗浄・乾燥	ディップ型/スピン型ウェハ洗浄装置(RCA洗浄)	前工程 クリーン ルーム TKB812F
	有機ドラフト、IPAベーパー乾燥装置、超純水精製装置	
リソグラフィ	マスクレス露光装置、i-線ステッパ、マスク露光機	
	コーターディベロッパ、アッシャー	
成膜	酸化炉、ボロン拡散炉、低温酸化膜TEOSプラズマCVD	
	シリコン窒化膜減圧CVD	
	リンドープポリシリコン膜減圧CVD	
	金属・圧電材料・絶縁膜スパッタ装置	
エッチング	シリコン深堀、酸化膜・窒化膜ドライエッチング(フッ素系ガス)	
	金属ドライエッチング装置(塩素系ガス)	
	シリコン異方性ウェットエッチング装置	
	酸化膜犠牲層エッチング装置	
評価	ウェハ検査装置、触針式段差測定機、反射分光膜厚計、光学顕微鏡	
接合・実装	チップtoウェハ接合装置、ウェハtoウェハ接合装置	後工程・評価 クリーン ルーム TKB812B
	レーザ・ステルスダイサー、ブレードダイサー(別棟に設置)	
	電子ビーム加熱真空蒸着、熱処理炉	
評価	測長電子顕微鏡、分析電子顕微鏡(元素分析、結晶解析)	
	ウェハスタブローバ、X線CT評価装置、薄膜応力評価装置	
	ウェハ表面観察装置、光学顕微鏡	

図V.1.2.3-1に前工程ライン (TKB812F) のレイアウト、図V.1.2.3-2に後工程・評価ライン (TKB812B) のレイアウトを示す。前工程クリーンルームは約 350m² の広さがあり、清浄度クラスは 1000 である。リソグラフィとウェットプロセス装置はそれぞれ仕切られたイエロー照明室に配置した。成膜、エッチング、プロセス中評価装置はメイン室に配置した。後工程・評価クリーンルームは約 150m² の広さで、清浄度クラスは前工程と同様に 1000 とした。接合・実装装置と評価装置を仕切られた 2 部屋にそれぞれ配置した。

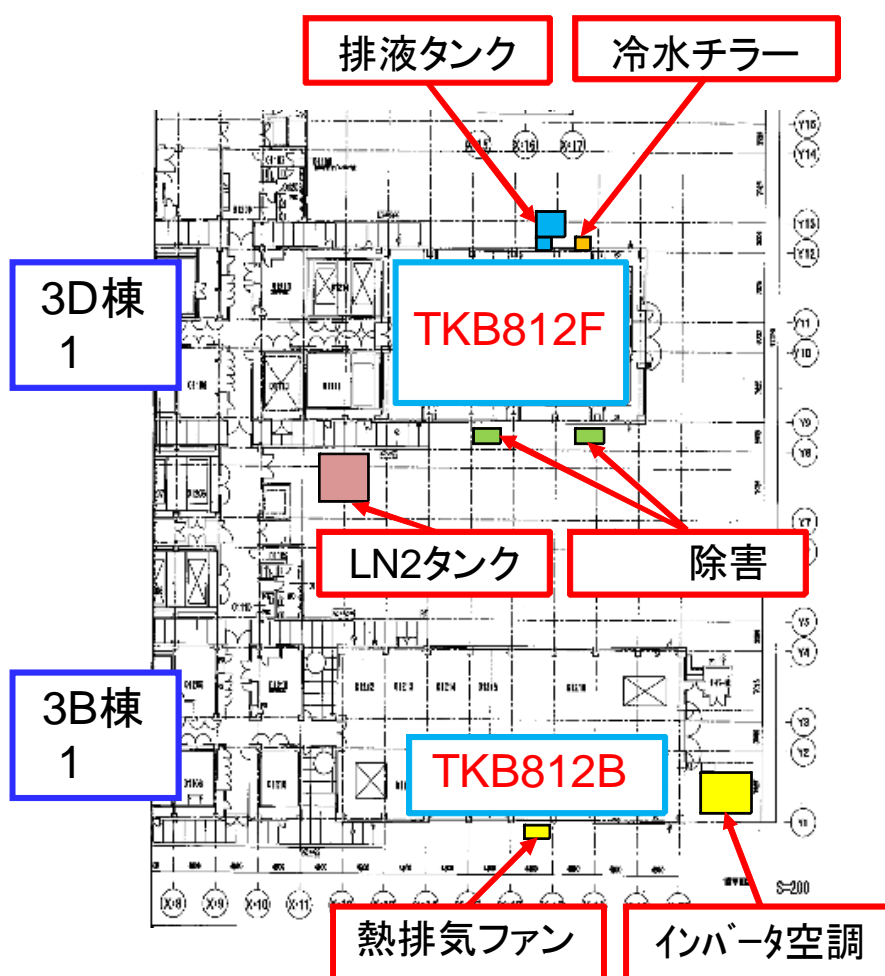


図V.1.2.3-1 前工程ライン (TKB812F) レイアウト



図V.1.2.3-2 後工程・評価ライン (TKB812B) レイアウト

図V.1.2.3-3に前工程、後工程・評価ラインにユーティリティを供給する屋外設備のレイアウトを示す。産総研つくば東事業所 3D 棟 1 階に前工程ライン(TKB812F)を設置し、その屋外ユーティリティ設備として、排液タンクと冷水チラーおよび緊急除害装置を設置した。後工程・評価ライン(TKB812B)は、同事業所 3B 棟 1 階に設置し、同じく屋外ユーティリティ設備として、熱排気ファンとインバータ空調装置を設置した。さらに両ラインに超高純度窒素ガスを供給する LN2(液体窒素)タンクを設置した。



図V.1.2.3-3 屋外ユーティリティ設備レイアウト

以下に、最先端 8 インチラインの代表的な装置を列記する。

図 V.1.2.3-4~9 に前工程ライン (TKB812F) 設置装置の外観と主な仕様・性能を示す。

ウェハ洗浄・乾燥装置として、超純水精製装置、スピン型ウェット洗浄装置、IPA ベーパー乾燥装置を設置し、産総研の 12 インチ対応ディップ型ウェット洗浄装置及びスピン乾燥装置と組み合わせて、半導体工程で必須の RCA 洗浄が可能になるよう配置した。

リソグラフィ装置としては、i-線ステッパ、マスク露光機、12 インチ対応アッシャーを設置し、産総研の 12 インチ対応マスクレス露光機とコーターディベロッパと相互の利用が可能になるように配置した。

拡散・酸化・成膜装置としては、酸化炉、ボロン拡散炉、12 インチ対応 TEOS プラズマ CVD 装置、シリコン窒化膜・リンドーパポリシリコン膜減圧 CVD 装置、金属・圧電材料・絶縁膜スパッタ装置を設置した。

エッチング装置としては、シリコン深堀エッチング装置、酸化膜・窒化膜エッチング装置、金属エッチング装置、シリコン異方性ウェットエッチング装置、酸化膜犠牲層エッチング装置を設置した。なお、シリコン深堀エッチングについては、産総研の大口径 (12 インチ) 対応装置も隣接・配置した。

さらに、プロセス中のウェハ評価装置として、ウェハ検査装置、触針式段差測定機、反射分光膜厚計、12 インチ対応光学顕微鏡を設置した。

<p>装置名：超純水精製装置</p>	<p>主な仕様・性能</p>
	<p>低グレード市水を原水とする超純水製造 抵抗率・水温・パーティクルの管理が可能。 抵抗率：18M cm 以上 水温：25 ± 2 パーティクル (0.1 μ m 以上) : 10 個/ml 以下 精製水量：1m³/h</p>
<p>装置名： スピン型ウェット洗浄装置</p>	<p>主な仕様・性能</p>
	<p>ウェハのスピン型ウェット洗浄 (スピン乾燥機能付き) 8 インチウェハ枚葉処理方式 エッチング液調合・供給・廃液回収機能付属 洗浄プロセス： APM (アンモニア過酸化水素水洗浄) HPM (塩酸過酸化水素水洗浄) DHF (希釈フッ酸洗浄) QDR (超純水リンス洗浄)</p>
<p>装置名：IPA ベーパー乾燥装置</p>	<p>主な仕様・性能</p>
	<p>ウェハを IPA ベーパー雰囲気にして水分を除去・乾燥させる。 8 インチウェハの 5 枚バッチ処理 スピン型ウェット洗浄装置及び Si 異方性ウェットエッチング装置と共通のウェハカセットを使用。</p>

図 V.1.2.3-4 最先端 8 インチライン装置(1)




装置名：i線ステッパ	主な仕様・性能
	<p>i線による 1/5 縮小投影ステップアンドリピート露光</p> <p>最小解像線幅：0.35 μm</p> <p>使用レチクル：6 インチ角</p> <p>標準レジスト厚さ：1 μm</p>
装置名：マスク露光機	主な仕様・性能
	<p>ラージギャップ・高段差露光、裏面アライメント対応マスクアライナ</p> <p>6、8 インチウェハ対応</p> <p>マスク寸法：7、9 インチ角</p> <p>露光モード：</p> <p>バキューム/ハードコンタクト露光</p> <p>プロキシミティ露光</p> <p>アライメント精度：±0.5 μm 以内</p> <p>標準レジスト厚さ：1 μm、10 μm</p>
装置名：アッシャー	主な仕様・性能
	<p>ウェハの酸素プラズマアッシング</p> <p>8 及び 12 ウェハ対応、2 バッチ処理</p>

図 V.1.2.3-5 最先端 8 インチライン装置(2)

装置名：酸化炉	主な仕様・性能
	<p>ウェット/ドライ熱酸化膜形成 水蒸気発生用燃焼器内蔵 8 インチウェハ 25 枚バッチ縦型チューブ 最高温度：1150 カセット・ツー・カセットウェハ搬送方式</p>
装置名：ボロン拡散炉	主な仕様・性能
	<p>ドライ方式ボロンドーピング 固体拡散ソース使用 8 インチウェハ 25 枚バッチ縦型チューブ カセット・ツー・カセットウェハ搬送方式</p>
装置名：TEOS プラズマ CVD 装置	主な仕様・性能
	<p>プラズマ CVD 低温酸化膜形成装置 TEOS 液体ソース内蔵 8、12 インチ対応バッチ処理装置 成膜温度：200</p>

図 V.1.2.3-6 最先端 8 インチライン装置(3)

装置名：シリコン窒化膜減圧 CVD 装置	主な仕様・性能
	減圧 CVD によるシリコン窒化膜形成 8 インチウェハ 25 枚バッチ縦型チューブ カセット・ツー・カセットウェハ搬送方式 内部応力制御成膜可能
装置名：P ドープ polySi 膜減圧 CVD 装置	主な仕様・性能
	減圧 CVD によるポリシリコン膜形成 8 インチウェハ 25 枚バッチ縦型チューブ カセット・ツー・カセットウェハ搬送方式
装置名：金属・圧電材料・絶縁膜スパッタ装置	主な仕様・性能
	3 チャンバ構成マグネトロンスパッタ装置 ターゲットへの DC/RF 電圧選択印加 8 インチウェハ対応 各種金属、圧電材料(ALN)、絶縁膜の成膜

図 V.1.2.3-6 最先端 8 インチライン装置(4)

装置名：Si 深堀エッチング装置	主な仕様・性能
	<p>フッ素系ガス ICP ドライエッチング 8 インチ Si および SOI ウェハの ボッシュプロセスによる深堀り溝加工 プラズマ発光分光検出器付属 ウェハエッジ保護機能付属 カセット・ツー・カセット搬送方式</p>
装置名：酸化膜・窒化膜エッチング装置	主な仕様・性能
	<p>フッ素系ガス ICP ドライエッチング 8 インチ Si ウェハ、Si 酸化膜・Si 窒化膜の 非ボッシュプロセスによる加工 エッチング終点判定機能付属 カセット・ツー・カセット搬送方式</p>
装置名：金属エッチング装置	主な仕様・性能
	<p>塩素系ガス ICP ドライエッチング 8 インチ対応、金属、polySi、圧電膜加工 ウェハの腐食防止アッシングチャンバ付属 エッチング終点判定機能付属 カセット・ツー・カセット搬送方式</p>

図 V.1.2.3-7 最先端 8 インチライン装置(5)




装置名：Si 異方性ウェットエッチング装置	主な仕様・性能
	<p>TMAH 恒温薬品槽へのディッピングによるシリコン異方性エッチング</p> <p>8 インチウェハの 5 枚バッチ全自動搬送</p> <p>ウェハ処理槽内揺動による均一エッチング</p> <p>QDR 超純水リンス洗浄槽</p> <p>エッチング液濃度調整供給・廃液回収機能</p>
装置名：酸化膜犠牲層エッチング装置	主な仕様・性能
	<p>フッ酸ベーパーによる酸化膜犠牲層のドライエッチング</p> <p>可動 MEMS 構造のドライリリース用</p> <p>終点判定機能付属</p>
装置名：大口径 Si 深堀エッチング装置	主な仕様・性能
	<p>フッ素系ガス ICP ドライエッチング</p> <p>12 インチ Si および SOI ウェハのボッシュプロセスによる深堀り溝加工</p> <p>プラズマ発光分光検出器付属</p> <p>カセット・ツー・カセット搬送方式</p>

図 V.1.2.3-8 最先端 8 インチライン装置(6)

装置名：ウェハ検査装置	主な仕様・性能・特長
	<p>8インチウェハ面内の塵埃数カウント ステージ移動によるマッピング機能 粒子径分布ヒストグラム表示 検出粒子径：0.079－5.0 μm カセット・ツー・カセット搬送方式</p>
装置名：触針式段差測定機	主な仕様・性能
	<p>触針式表面プロファイル測定 先端角 20 度の鋭角スタイラス付属 プロファイル及びストレスマッピング機能 測定レンジ：5－300 μm 再現性：最小レンジで 1nm</p>
装置名：反射分光膜厚計	主な仕様・性能
	<p>反射分光方式非接触膜厚計 分光曲線フィッティングによる 屈折率及び膜厚測定 8 及び 12 インチウェハ対応 測定エリアは 8 インチ径以内 測定膜厚：10nm－40 μm 繰り返し精度：0.1%</p>

図 V.1.2.3-9 最先端 8 インチライン装置(7)

図V.1.2.3-10～13に後工程・評価ライン（TKB812B）設置装置の外観と主な仕様・性能を示す。

接合・封止装置として、チップ to12インチウェハ接合装置及びウェハ to ウェハ接合装置、表面処理装置、その他の関連装置を設置した。デバイスチップ切断装置としては、レーザ・ステルスダイサー及び12インチ対応ブレードダイサーを別棟に設置した。

実装用配線装置としては、電子ビーム加熱真空蒸着装置及び熱処理炉を設置した。また、デバイス表面の形状評価装置として、測長電子顕微鏡、分析電子顕微鏡、ウェハ表面観察装置、ウェハテスタプローバを設置した。さらに、デバイス内部の形状評価装置として、12インチ対応 X 線 CT 評価装置、薄膜応力評価装置を設置した。

装置名：チップ to ウェハ接合装置	主な仕様・性能
	<p>8 及び 12 インチウェハ/チップ接合 チップ寸法：1-20mm角 接合温度：60-450 アライメント精度：±0.5 μm 以内</p>
装置名：ウェハ to ウェハ接合装置	主な仕様・性能
	<p>6 及び 8 インチウェハ同士の接合 6-12 インチウェハのプラズマ表面処理モジュール付属 接合チャンバ内でのウェハアライメント 陽極接合、プラズマ低温接合可能 接合温度：60-250 アライメント精度：±0.5 μm 以内</p>
装置名：レーザ・ステルスダイサー	主な仕様・性能
	<p>3-8 インチウェハのドライ切断 低ダメージ・レーザステルスダイシング カセット・ツー・カセット搬送方式 ステージ分解能：0.1 μm 送り速度：1-1000mm/s</p>



図V.1.2.3-10 最先端 8 インチライン装置(8)

装置名：ブレードダイサー	主な仕様・性能
	<p>最大 12 インチウェハのダイシングソー ダイヤモンドブレードによる切断 ステージ分解能：0.1 μm 送り速度：0.1–600mm/s</p>
装置名：電子ビーム加熱真空蒸着装置	主な仕様・性能・特長
	<p>電子ビーム及び抵抗加熱方式真空蒸着 8、12 インチウェハバッチ処理 加熱源/ウェハ間距離が両加熱方式でほぼ等しいチャンバ内配置 成膜速度例：30–60nm/分</p>
装置名：熱処理炉	主な仕様・性能
	<p>真空及び N2 ガスフロー熱処理 8 インチウェハ 10 枚バッチ 真空排気チューブ方式 最大加熱温度：600 オーミック電極シタリング処理</p>

図 V.1.2.3-11 最先端 8 インチライン装置(9)

装置名：測長電子顕微鏡	主な仕様・性能
	<p>走査型測長電子顕微鏡 4、6、8 インチウェハ対応ステージ 測長範囲：0.1–2.0 μm 解像分解能：3nm 観察倍率：1000–300000 倍</p>
装置名：分析電子顕微鏡	主な仕様・性能・特長
	<p>ウェハ走査型電子顕微鏡 元素分析、結晶解析ユニット付属 試料ホルダ：チップ、4, 6, 8, 12"ウェハ 観察倍率：30–300000 倍</p>
装置名：ウェハ表面観察装置	主な仕様・性能
	<p>4、6、8 インチ対応光学顕微鏡 ステージ移動によるウェハ欠陥検査 最小検出欠陥(異物)寸法：2 μm 測定エリア：最大 8 インチ</p>

図 V.1.2.3-12 最先端 8 インチライン装置(10)

装置名：ウェハテスタプローバ	主な仕様・性能
	<p>8インチウェハレベル電气的特性評価 セミオートウェハ搬送 プローブカードによる大気中プローブ 容量計測・周波数解析機能 音響加振機能付属</p>
装置名：X線CT評価装置	主な仕様・性能
	<p>X線CTスキャン顕微鏡観察 チップ、8及び12インチウェハ対応 8インチエリアのウェハ観察 分解能：1μm程度 取込み画像ファイルのCADフォーマット 変換ソフト付属。</p>
装置名：薄膜応力評価装置	主な仕様・性能・特長
	<p>ウェハ反り量の非接触自動マッピング計測 内部応力値を換算評価 加熱中のin-situ計測による応力変化の温度 履歴評価機能 最高加熱温度：600</p>

図V.1.2.3-13 最先端8インチライン装置(11)

(4) まとめ

MEMS/LSI の前工程から後工程、評価までカバーする一貫ラインとして、ウェハの洗浄、リソグラフィ、拡散、酸化、成膜、エッチングから、接合・封止、デバイスチップ切断、実装用配線、さらに、デバイス表面及び内部の形状評価までを実施する装置を導入し、各研究テーマの実証に供することで、研究開発目標を 100%達成した。

本研究成果で得られた装置と各研究テーマ実行のために立ち上げた加工プロセスを基にして、将来の TIA-NMEMS 拠点としてのオープンイノベーションセンター(MNOIC) の標準 MEMS デバイス製造メニューにブラッシュアップし、新デバイスプロトタイピングから量産化に至る早期実用化開発に役立つ最先端 MEMS ラインを目指す。

1. 3 植物工場センサネットワークシステムの開発

(1) 研究目的

1) 植物工場の概要

植物工場は、施設内の環境及び植物の生育をモニタリングして、高度な環境制御を行うことにより、野菜等の植物の周年・計画生産が可能な栽培施設である。植物工場は、完全人工光型と太陽光利用型の2種類のタイプに分けることができる。完全人工光型植物工場は、閉鎖環境で太陽光を用いずに人工光を利用して栽培する設備である。太陽光利用型植物工場は、温室等において、太陽光の利用を基本とし、人工光による補光や夏季の高温抑制技術等を用いて栽培する設備である。

植物工場には、以下に示す利点と将来性がある。

() 運営

季節・天候に左右されない。地域や土地を選ばない。マーケットインの農業生産が可能。異業種からの参入が可能。

() 生産性

単位面積当りの生産性が高い。環境と生育のモニタリングと生育予測に基づいた計画的・安定的な生産が可能。

() 品質向上・需要創出

養水分制御による食味の向上。アクや苦味が少ない作物の生産。医薬品、機能性食品（サプリメント）向け等新しい作物（新需要）の栽培が期待できる。

() 安全性

農薬が少ない。虫・異物の混入が少ない。雑菌が少なく日持ちする。エグミのない、洗わずに食べることが可能な野菜の提供。生産履歴（トレーサビリティ）が正確である。

() 作業環境

労働の平準化、作業環境の快適化、軽労化。若い人の農業産業への参画を促す。

2) 研究背景と目的

上記のような将来性のある植物工場であるが、植物工場の制御方法には、以下の課題があった。

- ・植物工場内にセンサが1個であり、植物工場内のきめ細かな環境計測ができていない。
- ・植物工場で使用する消費エネルギーの分析ができていない。
- ・植物工場用のセンサが高価である。

そこで、植物工場にセンサネットワークシステム（以下、センサネットワークと略す）を導入し、きめ細かな計測制御を実現することにより、生産計測設備の省資源化、高効率化および作物の収穫量改善を評価検証する。本研究の目的は、以下の通りである。

(i) 植物工場において作物の生育を促進するための生産計測設備の省資源化、高効率化に最も適したセンサネットワークの検討

(ii) 省エネルギー、生産性の高い作物栽培などの効果を分析するセンサネットの適用による省資源化、高効率化の効果の検証

(iii) 植物工場に適した MEMS デバイスに求められる機能の検証

本研究における省エネの数値目標は、エネルギーの 20%削減と、植物の収穫量の 10%改善とする。収穫量の 10%改善は、エネルギーの 10%削減と同等の効果とする。

(2) 植物工場センサネットの検討

1) 植物工場センサネットの提案

植物工場の制御設備の中で、センサネットによる省エネや収量改善に効果がある方法を検討した。検討内容を表 V.1.3.2.1-1 に示す。

表 V.1.3.2.1-1 植物工場へのセンサネット適用検討一覧表

NO	分類		提案システム構成	センサの種類
1	きめ細かな環境制御	空調	温風ボイラー+ヒートポンプ	温度センサ
2		照明	太陽光+LED 補光照明	日射センサ
3	夏季の高温対策	細霧冷却	ノズル+ファン	温湿度センサ、風量/風向センサ
4	養液栽培適性品種の育成	高糖度トマト	灌液チューブ+電磁弁+流量計	土壌水分センサ、電磁弁
5		夏季のいちご	クラウン冷却システム、一株単位での温度制御	温度センサ
6		土壌センシング	土壌の管理	PH、電気伝導度 (EC)、リン酸吸収係数、塩基置換容量 (CEC)、塩基飽和度
7		水養液センシング	水養液の管理	硝酸態窒素、アンモニア態窒素
8	雑菌・病気対策 (リスク対策)	菌数管理	パーティクルカウンタ+ファン	パーティクルカウンタ
9	人件費削減	作業者監視		位置検知

今回の実験では、この中で、特に省エネの効果が高いと想定される下記の 4 つの方法を実証し、評価することとした。これらの方法の共通点は、栽培エリアを分割し、分割したエリア毎に独立制御できるようにし、各栽培エリアにセンサを配置し、そのセンサ情報を利用して、効率的な省エネ制御、栽培制御を評価するものである。センサ、および計測部分をセンサネットで実現するものである。

(i) 細霧冷却システム（上記表の No3）

夏の暑い時期に植物工場の中は、高温になり冷却が必要になる。冷却方法としては、細霧冷却方法が有効である。細霧冷却は、細霧の気化熱により温室内の温度を下げる方式である。湿度が 100%に近くなると、細霧が気化しなくなるため、この状態で噴霧を続けても効果が少ない。従来は、晴れの日を想定して、噴霧する水量をタイマで制御していた。このため、雨や曇りの日には、過剰な噴霧を行っていた。

そこで、湿度をモニタリングして噴霧出力のオンオフ制御を行なう方式を提案した。湿度をモニタすることにより、湿度が高い時の噴霧量を抑制できる。複数の温度センサ、湿度センサと噴霧装置を栽培エリア毎に設置し、そのエリアの温度と湿度に応じて、細霧冷却装置の噴霧量を制御することとする。なお細霧冷却装置は、ファンと一体型の噴霧器とする。

(ii) 補光照明システム（上記表の No2）

植物を計画的に安定出荷するためには、日照時間確保が必要である。植物を効率よく栽培するためには、2500 時間/年の日射時間が望まれる。日照不足を補完するには補光照明が有効である。複数の日射センサと補光照明を栽培エリア毎に設置し、その日射量に応じて、補光照明を制御する。補光照明としては、オンオフの切り替えが容易な LED 照明を評価する。

(iii) 冬季暖房システム（上記表の No1）

冬季の低温は、植物の成長を著しく妨げる。植物を計画的に安定出荷するためには、冬季の暖房による作物の生育を促す必要がある。複数の温度センサと暖房装置を栽培エリア毎に設置し、各エリアの温度に応じて、暖房装置を制御する。暖房装置としては、エリア毎の設置が容易なヒートポンプと、外部温度が低い時に暖房効率の良いガスボイラーを併用する。

(iv) 土壌灌水システムの省エネルギー評価実験（上記表の No4）

ミニトマトの栽培には、土壌灌水の管理が重要である。従来は、晴れの日を想定して、灌水量をタイマで制御していた。このため、雨や曇りの日には、過剰な灌水を行っていた。本実験では、トマトの栽培を行なう培地（ロックウール等）の水分をモニタし、トマトの栽培に使用する水量を削減できる制御方式とする。複数の土壌水分センサと灌水装置を栽培エリア毎に設置し、その土壌の水分量に応じて、灌水量を制御する。

2) 評価用植物工場の構成

本研究における実証実験の環境は、下記の方針で構築した。

(i) MEMS によるセンサネット構築を前提とし、その効果を検証するために既存のディスプレイのセンサを活用した植物工場の省エネ評価環境を構築する。

(ii) 本実験では、太陽光併用型植物工場を評価する。

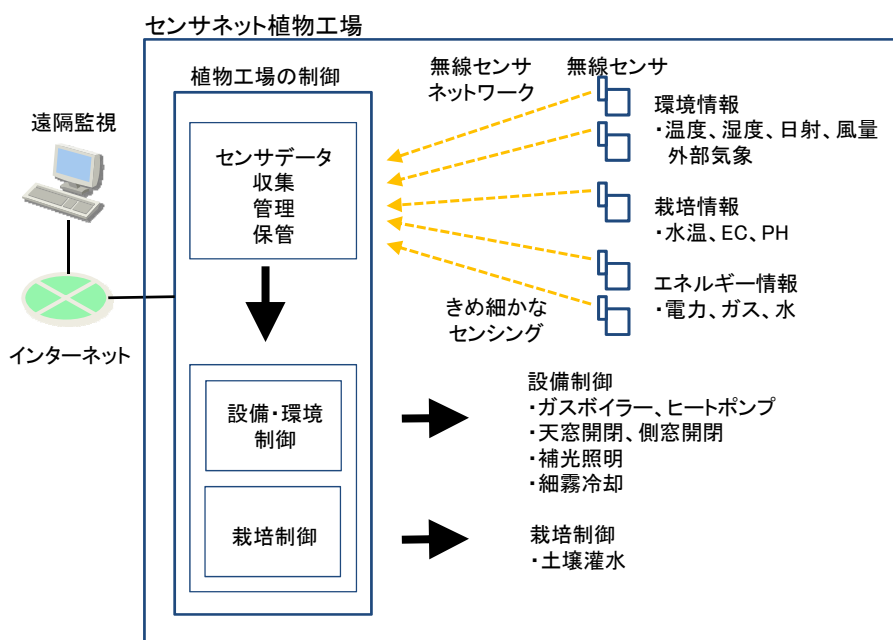
(iii) 評価方法は、一般的な植物工場の設備と、センサネットを活用した省エネ設備の二

つの設備を同じ場所に構築し、同じ環境で同じ作物を栽培し、省エネの効果と植物の秀品率を評価する。

図V.1.3.2.2-1にセンサネット植物工場概念図を示す。植物工場の制御部は、センサデータの収集、管理、保管、設備・環境の制御および栽培制御を行なう。各種センサは、無線または有線のネットワークで接続され、植物工場の制御部は、これらのデータを元に設備や環境を制御する。なお、収集したデータは、インターネット経由で遠隔監視することが可能である。

図V.1.3.2.2-2に評価用植物工場の構成図を示す。従来の設備を利用した一般的な植物工場（A棟）と、センサネットを活用した省エネ植物工場（B棟）を同じ場所に構築し、省エネおよび収穫量を比較できるようにした。本研究で提案する方式は、B棟の設備に採用する。C棟は準備室である。A棟、B棟の大きさは同じで、9m×6m（54m²）である。植物工場方向は、図の上側が北、下側が南、A棟が東、B棟が西になる。

図V.1.3.2.2-3に構築した評価用植物工場の概観を示す。本実験は、東京農業大学の世田谷キャンパスのエコテックゾーンで行なわれた。



図V.1.3.2.2-1 センサネット植物工場概念図

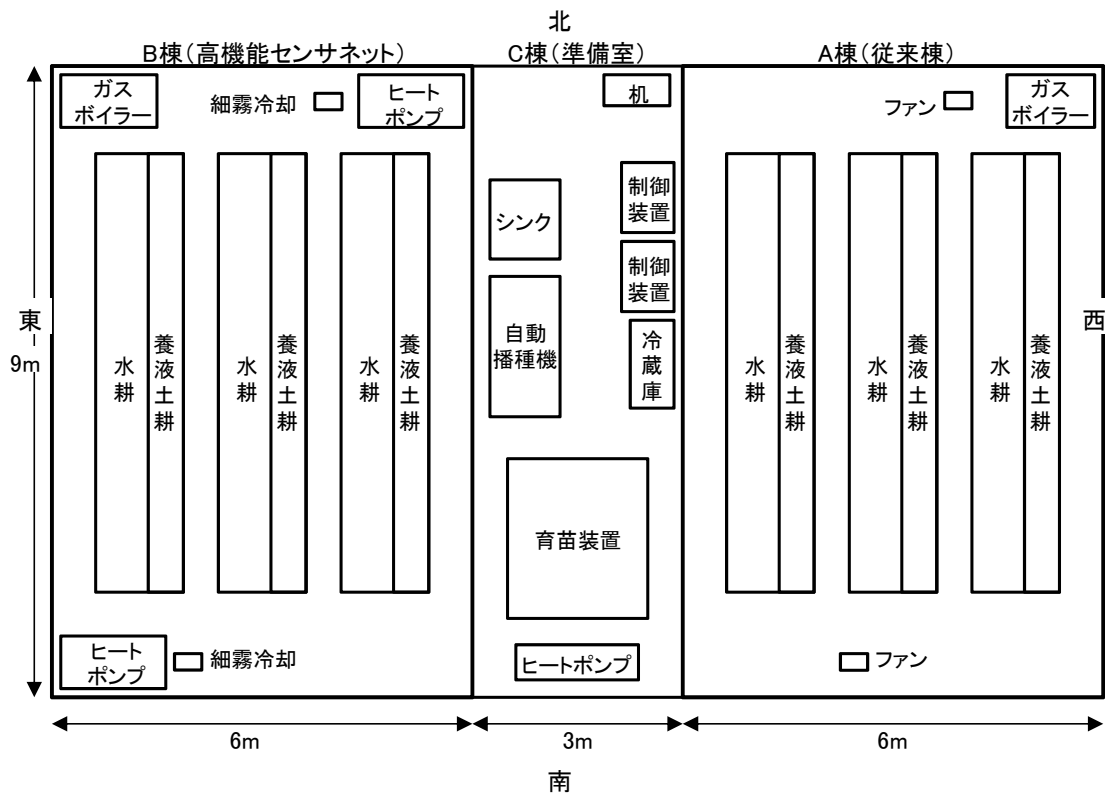


図 V.1.3.2.2-2 評価用植物工場の構成図



図 V.1.3.2.2-3 評価用植物工場の概観

表 V.1.3.2.2-1 に A 棟と B 棟の設備の比較を示す。A 棟の設備は、従来型の植物工場の設備である。B 棟は、センサネット評価用の設備であり、本提案の細霧冷却、補光照明、冬季暖房、土壌灌水システムの実験ができる。表 V.1.3.2.2-2 に植物工場用センサネットで利用したセンサの一覧を示す。環境計測用として、温度、湿度、風量、日射、土壌水分を計測できるようにした。また、エネルギーは、水量、ガス量、電力量を計測できるようにし

た。以下、各実験設備の詳細仕様を説明する。

表V.1.3.2.2-1 A棟とB棟の比較

実験内容		A棟(従来棟)	B棟(センサネット適用多点計測)
細霧冷却	設備	ノズル	ファン+ノズル(2ブロック分割制御)
	制御方式	温度とタイマによるオンオフ制御	温度、湿度を監視してオンオフ制御
	省エネ評価	水の使用量	同左
	収穫量評価	-	-
補光照明	設備	ナトリウムランプ	LED(4ブロック分割制御)
	制御方式	日射量によるオンオフ制御	日射量によるオンオフ制御
	省エネ評価	補光照明の電力量	同左
	収穫量評価	秀品率	同左
冬季暖房	設備	ガスボイラー	ガスボイラー+ヒートポンプ(2ブロック分割制御)
	制御方式	温度によるオンオフ制御	温度によるオンオフ制御
	省エネ評価	エネルギー使用量をCO ₂ 換算値にて評価	同左
	収穫量評価	秀品率	同左
土壌灌水	設備	灌水システム	灌水システム(3ブロック分割制御)
	制御方式	タイマによるオンオフ制御	土壌水分によるオンオフ制御
	省エネ効果	水の使用量	同左
	収穫量評価	秀品率	同左

表V.1.3.2.2-2 植物工場用センサー一覧

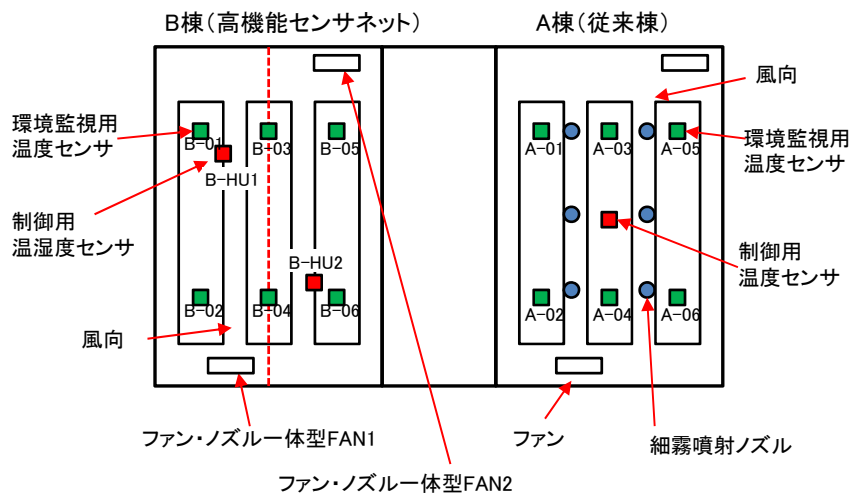
項目		センサの種類	センサ電源、 センサインタフェース
環境計測	温湿度	温湿度センサ ・SHT11(センシリオン) 温度センサ(サーミスタ)	電源、インタフェース共にセンサノードに内蔵
	風量	風量センサ:風量 0~1m/秒 ・D6F-W01A1(オムロン)	電源 12V 出力 DC 1~5V
	日射	日射センサ:日射量 0~1.750W/m ² ・PYR 全天日射計(Apogee)	電源 無し 出力 0~250mV
	土壌水分	土壌水分センサ:土壌水分、温度、EC ・5TE(デカゴン)	電源 5V 出力 専用シリアル(DIO)

エネルギー計測	電力量	積算電力量計 ・TWPS (タケモトデンキ)	電源 AC100V/AC200V 出力 RS485
	水量	流量計 ・EDS20Q-8452 (愛知時計電気)	電源 無し 出力 パルス(1L/パルス)
	ガス量	ガスセンサ ・NDS-NS (金門製作所)	電源 無し 出力 パルス(100L/パルス)

1 細霧冷却システム

図V.1.3.2.2.1-1に、細霧冷却の実験設備の構成図を示す。A棟の細霧冷却設備は、ファンとノズルタイプ噴霧器から構成される。制御用の温度センサは1ヶ所とし、噴霧のオンオフ制御はタイマ制御とする。

B棟の細霧冷却装置は、ファンと一体型の噴霧器にて構成される。細霧冷却装置を2台 (FAN1、FAN2) 設置し、それぞれの装置に温湿度センサ (B-HU1、B-HU2) を設置する。噴霧器出力は、湿度センサの出力により制御される。



図V.1.3.2.2.1-1 細霧冷却の実験設備の構成図

以下、実験の概要を説明する。

() 制御方法

A棟は、細霧冷却が稼動する温度を設定し、温度がそのしきい値以上になると細霧を噴霧する制御方法とする。噴霧時間はタイマ制御とする。

B棟は、細霧冷却が稼動する温度と湿度を設定し、温度がそのしきい値以上でかつ湿度が設定範囲内の場合に細霧を噴霧する制御方法とする。

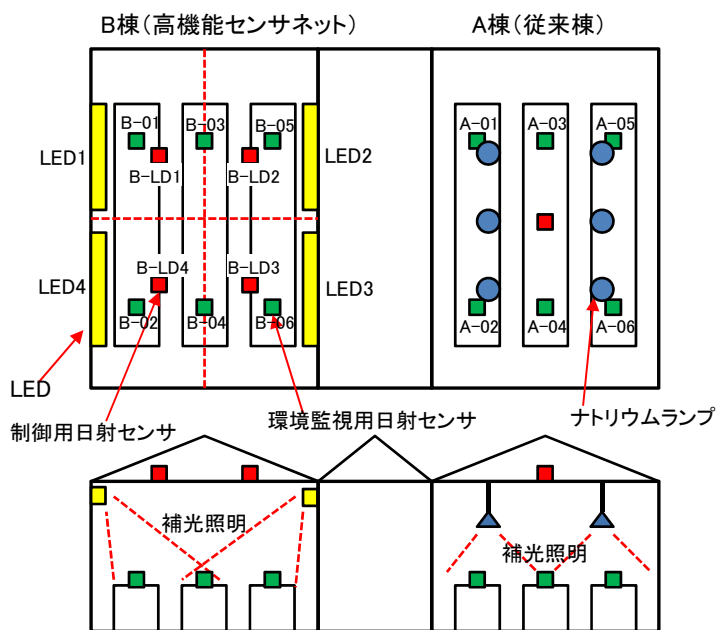
() 給水量の測定

細霧冷却装置のポンプ部に給水された水量をパルス発信装置付き水量計にて計測する。水量計は、A棟、B棟別に設置され、それぞれパルス入力インタフェース付きの無線センサノードに接続され、計測データは無線で収集される。

2 補光照明システム

図V.1.3.2.2.2-1に補光照明の実験設備の構成図を示す。A棟の補光照明は、高圧ナトリウムランプである。日射センサは1個設置し、このセンサで補光照明のオンオフを制御する。

B棟の補光照明は、LED照明である。LEDの照射エリアを4分割し、それぞれのLED(LED1~LED4)を独立にオンオフ制御できるようにした。オンオフ制御のための日射センサは、それぞれのLEDに対応して4個(B-LD1~BLD4)用意した。各照射エリアで、日射量が異なれば、独立に制御することにより、無駄な補光照明を抑えることが可能となる。



図V.1.3.2.2.2-1 補光照明の実験設備の構成図

以下、実験の概要を説明する。

() 制御方法

補光照明動作時間は、A棟B棟共通で、7時~19時(12時間/日)とする。この時間内で、

日射量が所定のしきい値以下の場合に、補光照明が点灯するようにする。補光照明の点灯するのは、朝方、夕方および天気の良い日である。A棟は、1個の日射センサで補光を制御する。B棟は、栽培エリアを4分割（東西南北）し、各エリアを4個の補光照明で、独立制御するようにする。

() 電力量の測定方法

A棟は全体で1系統、B棟は4エリア分割で4系統の電力を電力量計にて集計する。電力量計と無線センサノードは、RS485 インタフェースで接続される。

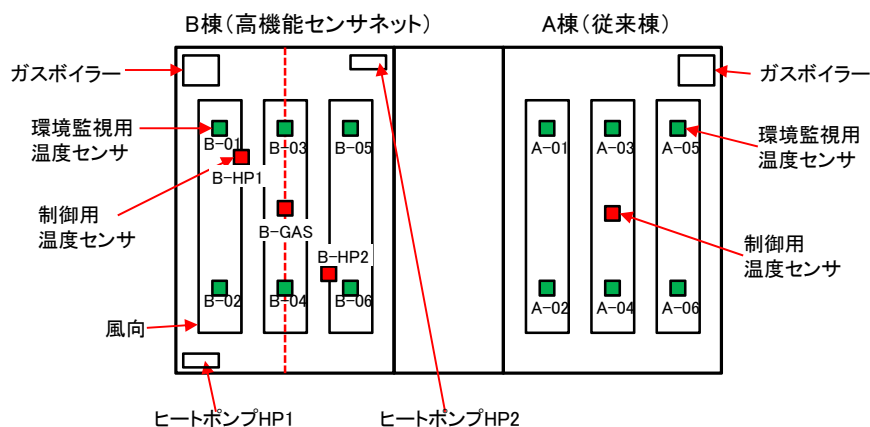
() 収穫量の評価方法

A棟、B棟共に、リーフレタスを栽培し、その秀品率で比較する。

3 冬季暖房システム

図V.1.3.2.2.3-1に冬季暖房の実験設備の構成図を示す。A棟は、ガスボイラーとする。制御用温度センサは1ヶ所とする。

B棟は、ガスボイラー1台とヒートポンプ2台（HP1、HP2）のハイブリッド構成とする。温度センサは、3ヶ所（B-GAS、B-HP1、B-HP2）に用意し、それぞれの暖房装置を独立に制御できるようにする。



図V.1.3.2.2.3-1 冬季暖房の実験設備の構成図

以下、実験の概要を説明する。

() 制御方法

設定温度は、A棟、B棟共通である。暖房稼働温度は、13℃以下で、暖房停止温度を14

以上とする。また、B棟では、ヒートポンプとガスボイラーの切り替え温度を外気温で制御することにした。外気温が0℃以上の時は、ヒートポンプが稼動し、外気温0℃以下の時ガスボイラーが稼動する。

() エネルギー使用量の測定方法

A棟、B棟のガス使用量は、パルス発信装置付きガスメータにて計測する。ガスメータは、A棟、B棟別に設置され、それぞれパルス入力インタフェース付きの無線センサノードに接続され、計測データは無線で収集される。B棟のヒートポンプの電力量は、2台の電力を電力量計にて集計する。電力量計と無線センサノードは、RS485インタフェースで接続され、計測データは無線で収集される。

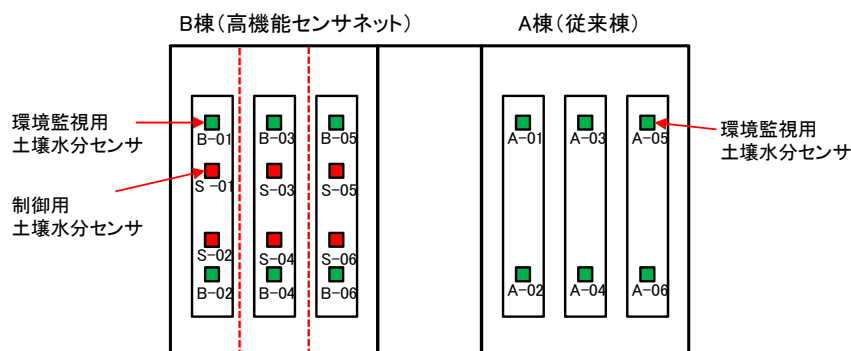
() 収穫量の評価方法

A棟、B棟共に、リーフレタスを栽培し、その秀品率で比較する。

4 土壌灌水システム

図V.1.3.2.2.4-1に土壌灌水の実験設備の構成を示す。A棟は、土壌水分センサを利用せず、培地に与える水量をタイマで管理する方法とする。

B棟は、培地に与える水量を土壌水分センサでモニタ（S-01～S-06）し、その土壌水分に応じて、灌水量を制御するものとする。土壌水分センサ、灌水用のバルブは栽培エリアの6ヶ所に設置し、それぞれが独立に制御できるようにした。



図V.1.3.2.2.4-1 土壌灌水の実験設備の構成図

以下、実験設備の概要を示す。

() 制御方法

灌水の時間周期の設定は下記の通りとする。A棟は、1日4回（0時、6時、12時、18時に1分間の灌水をタイマ制御にて行なう。B棟は、土壌湿度を計測し、その計測値がしきい値以下の場合のみ1分間灌水するようにした。

（ ） 給水量の測定

土壌に給水された水量をパルス発信装置付き水量計にて計測する。水量計は、A棟、B棟別に設置され、それぞれパルス入力インタフェース付きの無線センサノードに接続され、計測データは無線で収集される。

（ ） 収穫量の評価方法

A棟、B棟共にミニトマトを栽培し、トマトの糖度を評価する。

(3) 植物工場センサネット実験結果およびその評価

1) 細霧冷却の実験結果

細霧冷却は夏に行なう実験であるが、日程の都合上12月に行なった。本実験環境は、大きな温室（東京農大の既設設備）の中に植物工場の設備を設置したので、昼間の植物工場の外の温度（大きな温室の中の温度）は、40℃近くになり、細霧冷却の実験が可能となった。

細霧冷却の実験パラメータを、表V.1.3.3.1-1に示す。

表V.1.3.3.1-1 細霧冷却の実験パラメータ

制御項目	A棟	B棟
細霧冷却の稼働しきい値	25℃以上で稼働	同左
細霧冷却稼働中のオンオフ制御	稼働時間はタイマ管理で、15秒稼働、30秒停止を繰り返す。温度が稼働しきい値を下回ると停止。	稼働期間は湿度センサで管理、湿度が80%以上で停止、70%以下で稼働を繰り返す。温度が稼働しきい値を下回ると停止。

細霧冷却実験における実験結果を以下に示す。

(i) 温度制御

B棟（センサネット棟）には、2台の細霧冷却装置（ファン+ノズルタイプ）を設置し、同時に動作させた。細霧冷却稼働中の温室内の温度と湿度の分布を図V.1.3.3.1-1、図1.3.3.1.3に示す。噴霧を行なうと、湿度が上昇し、その気化熱で温度が下がるが、直に温度が上昇し、再度噴霧を行なうという制御が繰り返し発生している。この期間の温度分布は、栽培室の中で23℃～33℃になっている。また、湿度は、管理幅70～80%に対して、60%～90%の間で分布している。

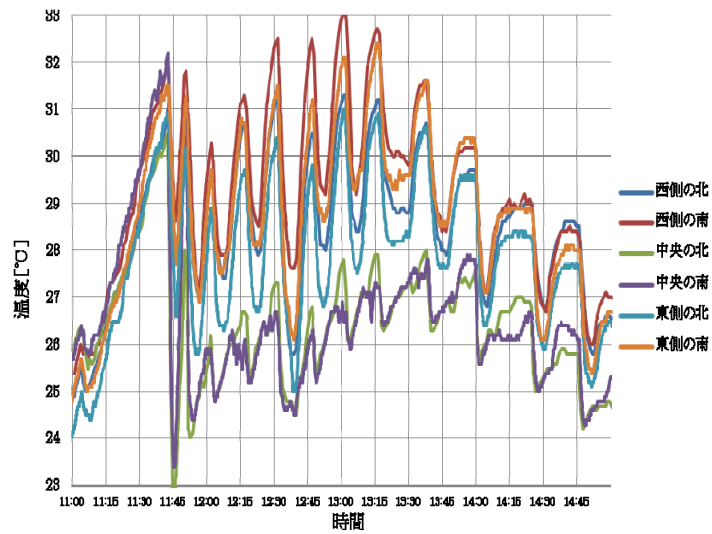


図 V.1.3.3.1-1 B 棟の温度分布

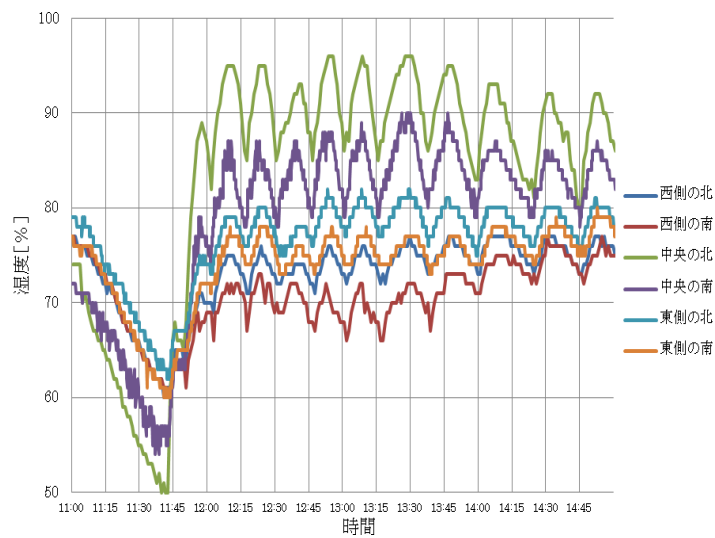


図 V.1.3.3.1.3 B 棟の湿度分布

表 V.1.3.3.1-3 に、計測した温度データの平均値を示す。細霧を噴出している時間帯では、温室の中心部分の温度が、周辺に比べて低くなっていた。これは、細霧冷却設備 1、2 の両方の細霧噴射の冷却効果によるものと考えられる。今回の実験環境では、2 台の細霧冷却設備の設置位置が近かったためだと思われる。よって、各細霧冷却設備の間にセンサーを設置し、この部分の温度をモニタすることにより、噴霧量の調整が可能となる。

実際の植物工場に本提案の細霧冷却装置を適用する場合には、各細霧冷却設備間の距離が最適になるよう、温室内を適当なエリアに区分けし、その区分けしたエリアに細霧冷却装置を一台ずつ設置し、それらの装置が自律分散的に動作する制御方式が適すると考えられる。

表V.1.3.3.1.3 B棟の細霧冷却時の温度の平均値

設置位置	西側	中央	東側
北側	28.5	26.4	27.8
南側	29.2	26.5	28.7

(ii) 水の使用量

表V.1.3.3.1-3にA棟とB棟の水の使用量の比較を示す。A棟の水の使用量は、約60リットル/日、B棟の使用量は、15リットル/日であった。B棟の水の使用量は、A棟の約25%であった。本結果から、提案した湿度センサによる制御方式は、水の使用量の削減に効果があることが分かった。

表V.1.3.3.1-3 A棟とB棟の水の使用量の比較

項目	A棟	B棟	備考
細霧冷却用水量(リットル)	60	15	1日の使用量

(iii) 結露

細霧冷却では、結露による液だれの防止が重要である。結露が発生すると水滴が植物の葉に落ち、この水滴がレンズの役割をして、葉焼けを起こす可能性がある。葉焼けすると作物の品質が下がる。

A棟のタイマによる細霧の噴射量を制御する方式では、温室内の湿度によらず、細霧を噴霧するため、温室内の湿度が100%を超えても細霧の噴射を停止することができなかった。このため、A棟の栽培室が結露し、水滴が溜まる現象も発生した。湿度で制御するB棟の場合には、結露は発生しなかった。

2) 補光照明の評価

補光照明の実験パラメータを表V.1.3.3.2-1に示す。栽培する植物は、リーフレタスで、栽培期間は12月7日～1月5日であった。

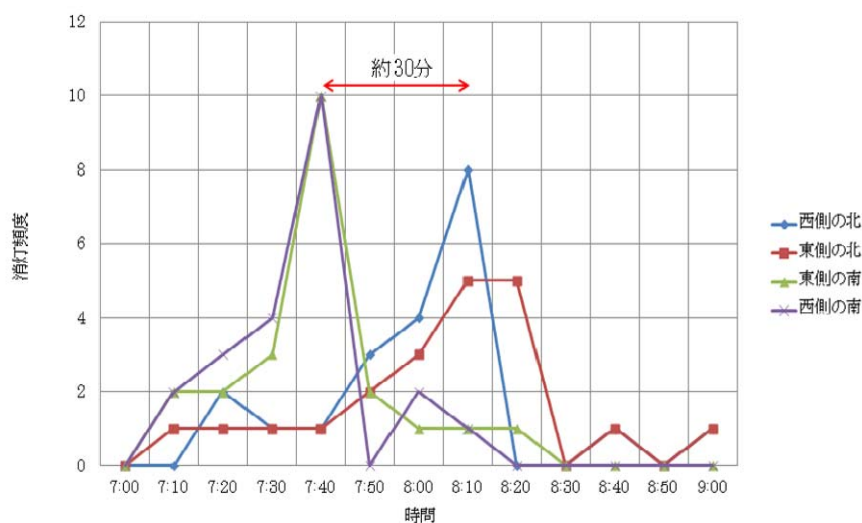
表V.1.3.3.2-1 補光照明の実験パラメータ

制御項目	A棟	B棟
補光照明の稼働しきい値	0.006kW/m ² 以下で稼働	同左
補光照明稼働時間	7時～19時(日射時間は12時間/日)	同左

(i) 日射量の分布評価

補光照明の照射時間を1ヶ月評価した。補光は、夕方と朝方に行なった。夕方の点灯時間に関して、大きな差は見られなかった。朝方の消灯時間に関しては、図V.1.3.3.2-1に示すように、南側と北側で約30分の時間差が見られた。栽培エリアの西側と東側では、消灯時間に大きな差は見られなかった。この結果、本実証実験の環境では、栽培エリアの北

側と南側に各1個の日射センサを設置し、南側と北側のLEDを独立に制御することにより、省エネを実現できることが分かった。



図V.1.3.3.2-1 朝方の消灯時間の差のグラフ

(ii) 電力使用量の評価

A棟のナトリウムランプとB棟のLEDの消費電力を比較する。その比較結果を表V.1.3.3.2-1に示す。B棟の消費電力は、A棟の約30%である。これにより、LEDによる省エネ効果を確認できた。

表V.1.3.3.2-1 LEDとナトリウムランプの電力量の比較

項目	A棟	B棟
電力使用量	9.3 kWh/日	2.5 kWh/日

表V.1.3.3.2-2に、4つのLEDの電力使用量の比較を示す。南側と北側で約10%の消費電力の差がある。

表2.3.2-2 4つのLEDの電力使用量の比較

項目	電力使用量
LED1 (北側の西)	0.67kWh/日
LED2 (北側の東)	0.67kWh/日
LED3 (南側の東)	0.60kWh/日
LED4 (南側の西)	0.58kWh/日

(iii) 収量の評価

補光照明の実験では、暖房機能をなるべく使わないようにしたため、夜間の温度が低く、生育が遅れた。このため、収穫量の評価は、作物の大きさではなく、大きさのばらつきで評価することとした。

秀品率は、A棟、B棟それぞれのリーフレタスの1本当りの平均重量を基準として、平均重量の50%以下を不良品として秀品率を算出した。この結果を表V.1.3.3.2-3に示す。B棟の秀品率は、A棟よりも約10%改善されている。図V.1.3.3.2-2にリーフレタスの栽培状況を示す。

表V.1.3.3.2-3 A棟とB棟の秀品率の比較表

項目	A棟	B棟
栽培本数	144	144
総重量の平均値（根含む）	5.2g	8.8g
葉重量の平均値（葉のみ）	2.9g	5.8g
秀品本数	126	143
秀品率	88%	99%

(注)秀品率の定義：作物の葉重量の平均の50%以下を不良品とする。



図V.1.3.3.2-2 リーフレタスの栽培状況

() 補光照明の照度分布の評価

A棟の秀品率が下がった原因として下記が考えられる。

ナトリウムランプは、栽培エリア内での光量のばらつきが大きい可能性がある、ランプの下は明るい、ランプから離れると暗くなる。ナトリウムランプのシェード（直径約45cmのかさ）が昼間の太陽光の影になる。ナトリウムランプは、点灯してから光量が安定するのに5分程度必要で、この期間の補光照明の効果が少ない可能性がある。

図V.1.3.3.2-2、図V.1.3.3.2-3にA棟の補光照明の照度分布図と、植物の重量の分布図を示す。図V.1.3.3.2-4、図V.1.3.3.2-5に、B棟の補光照明の照度分布図と、植物の重量の分布図を示す。

A棟では、中央の栽培エリアでは、補光照明の照度は低くなっているが、この部分の植物の成長は悪くない。秀品率の低下は、ナトリウムランプのシェードが、太陽光を遮った影響である可能性が高い。

B棟では、中央の栽培エリアのLEDの照度が低いため、これが原因で中央エリアの成長

がやや遅くなった可能性がある。照度分布を一定になるように調整すれば、さらに成長のばらつきを抑えられる可能性がある。

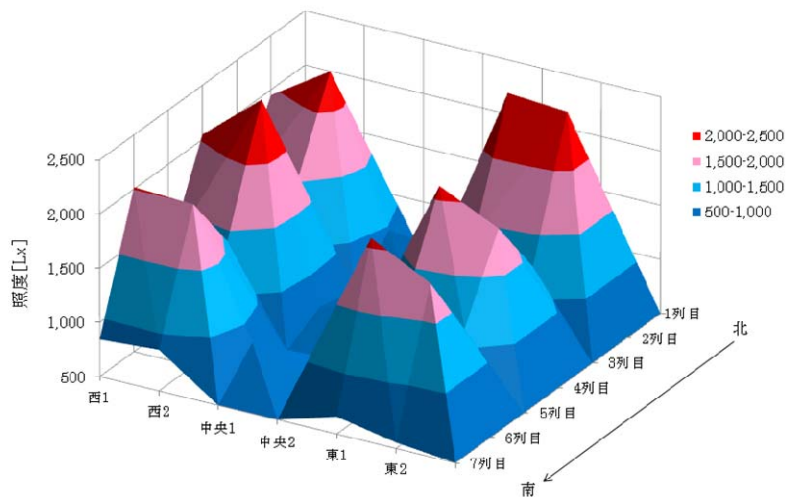


図 V.1.3.3.2-2 A 棟の補光照明の照度分布図

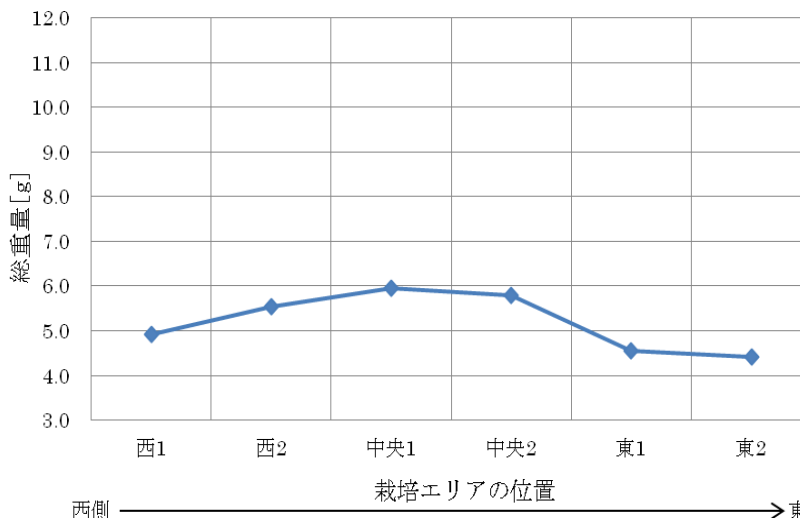
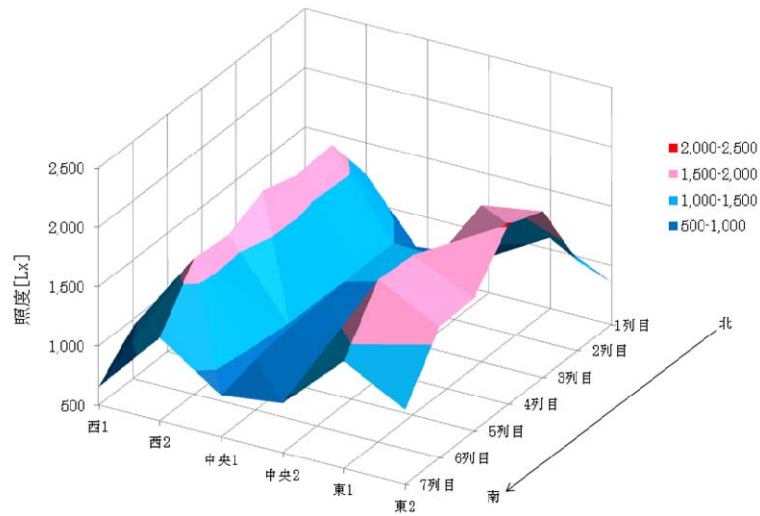
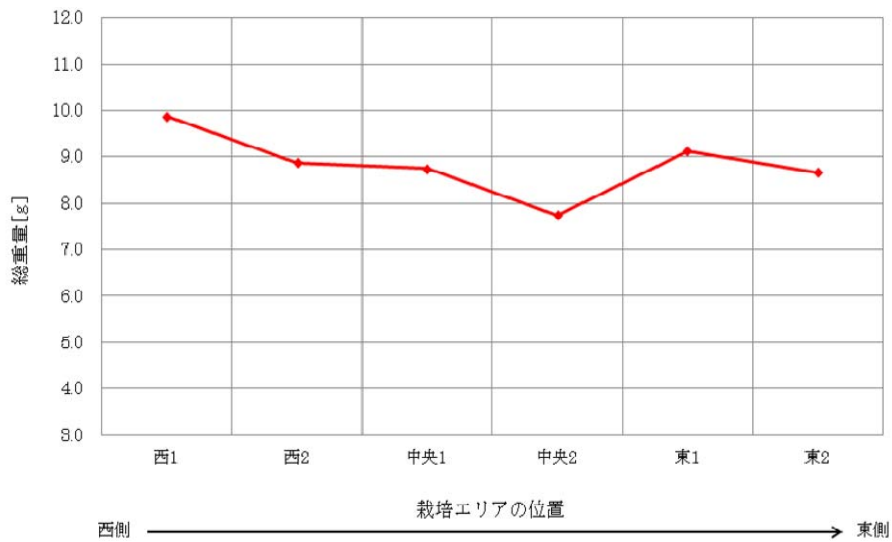


図 V.1.3.3.2-3 A 棟の植物の重量の分布図 (栽培エリアの西から東の分布)



図V.1.3.3.2-4 B棟の補光照明の照度分布図



図V.1.3.3.2-5 B棟の植物の重量の分布図（栽培エリアの西から東の分布）

3) 冬季暖房の評価

冬季暖房の実験パラメータを表V.1.3.3.3-1 に示す。栽培する植物はリーフレタスで、栽培期間は1月11日～2月15日である。

表V.1.3.3.3-1 冬季暖房の実験パラメータ

制御項目	A棟	B棟
冬季暖房稼働しきい値	13℃以下で稼働、14℃以上で停止	同左
ガスボイラーとヒートポンプの切り替え方法	ガスボイラーのみ	外気温が0℃以上の場合ヒートポンプを稼働、0℃以下の場合ガスボイラーを稼働

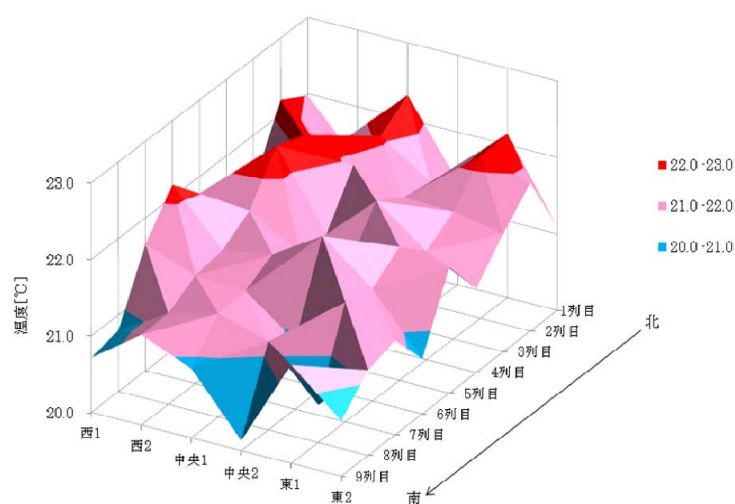
実験結果を以下に示す。

B棟の栽培エリアの温度分布を調査した。図V.1.3.3.3-1、図V.1.3.3.3-2、図V.1.3.3.3-3に、ヒートポンプ1台で暖房した場合、ヒートポンプ2台で暖房した場合、ガスボイラーで暖房した場合の温度分布を示す。

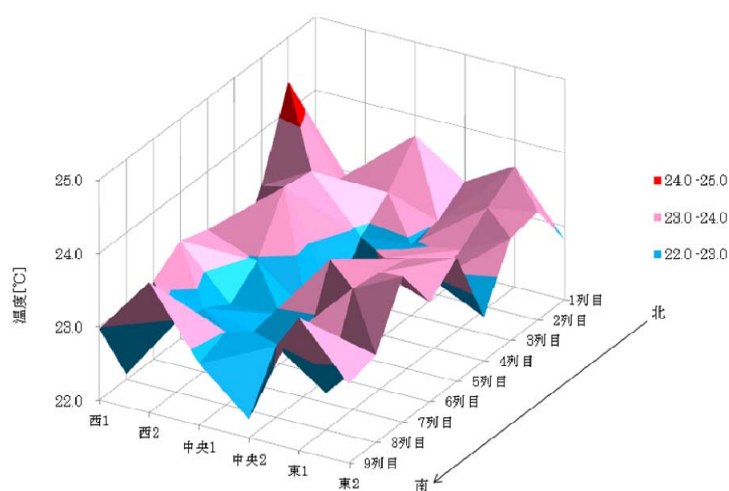
ヒートポンプ1台の実験は、栽培室の南西に設置されているヒートポンプ1を利用した。この場合は、ヒートポンプからの温風が吹き出す方向（栽培室の北側）は、暖められるが、ヒートポンプの横（栽培室の南側）が暖まりにくいという傾向が見られる。

ヒートポンプ2台で暖房した場合は、栽培室全体が均一に暖められる傾向が見られる。

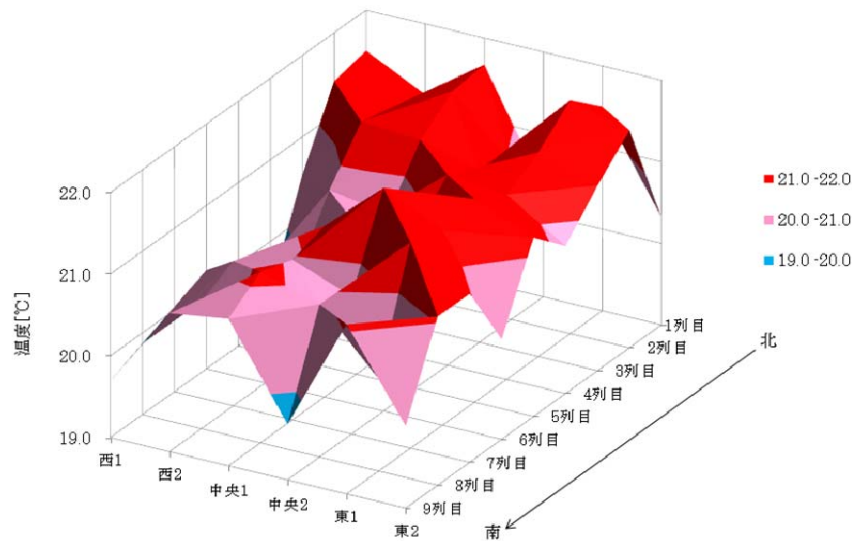
ガスボイラーで暖房した場合は、栽培室の南西および西側が暖まりにくいという傾向が見られる。これは、ガスボイラーの設置位置が、栽培室の西北であり、温風の吹き出し方向が東南東のためだと思われる。



図V.1.3.3.3-1 ヒートポンプ1台で暖房した場合のB棟の温度分布



図V.1.3.3.3-2 ヒートポンプ2台で暖房した場合のB棟の温度分布

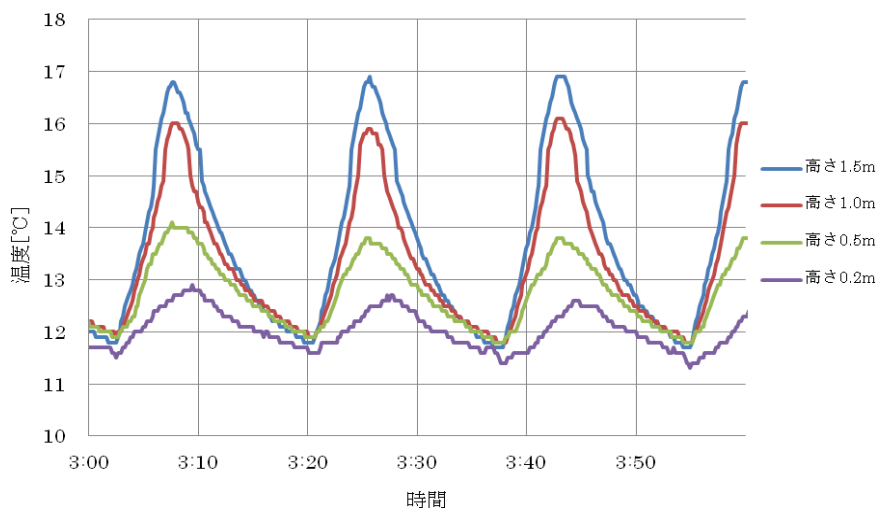


図V.1.3.3.3-3 ガスボイラーで暖房した場合のB棟の温度分布

図V.1.3.3.3-4に栽培室の高さ方向の温度分布を示す。このグラフは冬季暖房が稼働中の温度分布であり、暖房機が間欠動作していることを示す図である。地上から1.5m、1m、50cm、20cmの4ヶ所で測定したものである。高い位置ほど、暖房による温度上昇が高い。

よって、省エネを行なうためには、制御用の温度センサを高い位置に設置すればよい。高い位置では、温度上昇が早いので、暖房を稼働してから停止するまでの制御時間が短くなる。

また、温度センサの高さを変えることにより、作物に一番近いところの温度計測が可能となる。50cmの高さが水耕栽培の高さであり、この高さでリーフレタスが栽培される。また、1.5m、1mの位置は、トマトの実ができる場所である。ここに温度センサを設置することにより、植物の環境計測を正確に行なえる。



図V.1.3.3.3-4 B棟の高さ方向の温度分布

() エネルギー使用量

A 棟と B 棟のガス使用量とヒートポンプの電力量と、そのエネルギー量に対応する CO₂ 排出量を表 V.1.3.3.3-1 を示す。このデータは、2 月 23 日～3 月 3 日のものである。B 棟の CO₂ 排出量は、A 棟の約 60%となる。

表 V.1.3.3.3-1 A 棟と B 棟の CO₂ 排出量の比較表

項目		A 棟	B 棟
エネルギー使用量	ガス	2.49m ³	0.33m ³
	ヒートポンプ	0	9.11kWh
CO ₂ 換算値	ガス	5.7kg	0.66kg
	ヒートポンプ	0	3.09kg
	合計	5.7kg	3.75kg (A 棟の 66%)

() 収穫量の評価

A 棟と B 棟の収穫結果を表 V.1.3.3.3-2 に示す。栽培エリア全体の比較では、B 棟の秀品率が A 棟に比べて、約 10%高くなっている。

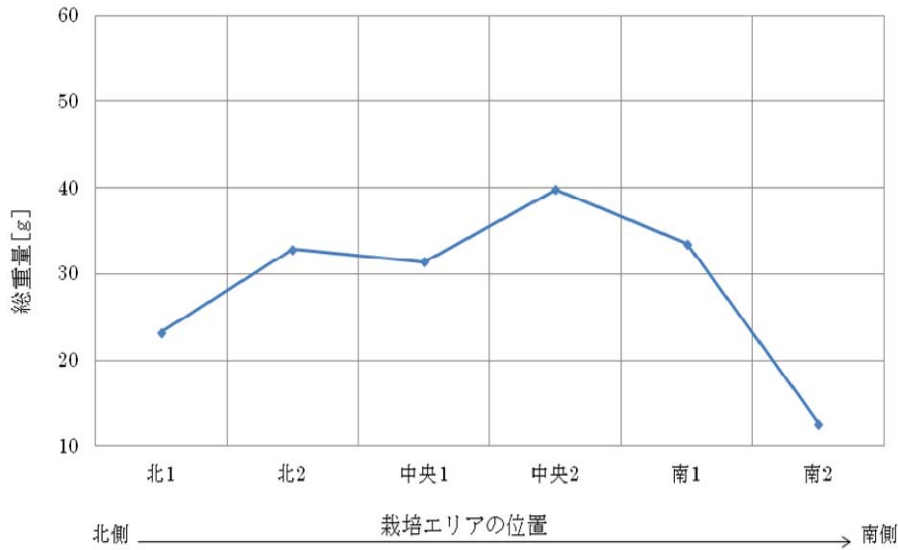
表 V.1.3.3.3-2 A 棟と B 棟の秀品率の比較表

項目	A 棟	B 棟
栽培本数	144	144
総重量の平均値 (根含む)	28.9g	44.9g
葉重量の平均値 (葉のみ)	24.3g	38.6g
秀品本数	109	122
秀品率	76%	85%

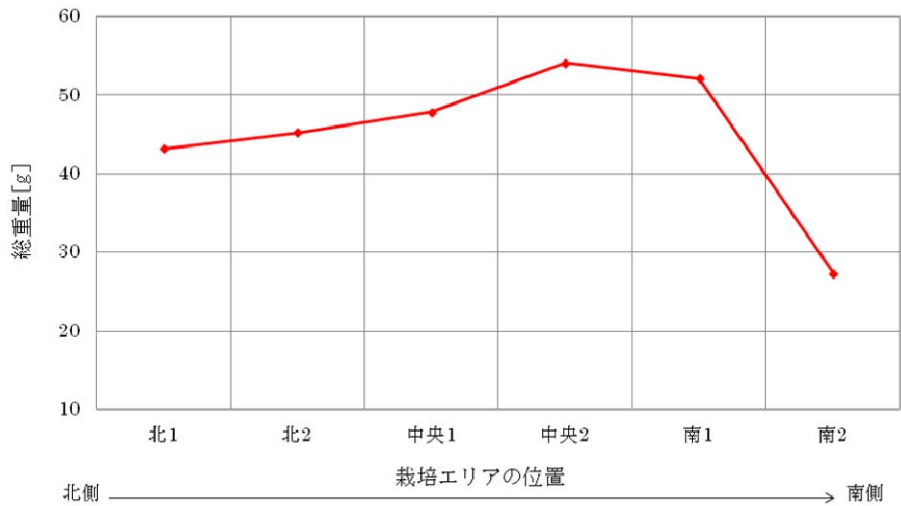
(注)秀品率の定義：作物の葉重量の平均の 50%以下を不良品とする。

() 収穫量の評価

図 V.1.3.3.3-5 に A 棟の植物の重量の分布図(栽培エリアの北から南の分布)を示す。図 V.1.3.3.3-6 に B 棟の植物の重量の分布図(栽培エリアの北から南の分布)を示す。栽培室の南北方法の分布を見ると、両棟共に南側の成長が悪い。



図V.1.3.3.3-5 A棟の植物の重量の分布図（栽培エリアの北から南の分布）



図V.1.3.3.3-6 B棟の植物の重量の分布図（栽培エリアの北から南の分布）

A棟は、ガスボイラーのみの暖房であるが、南側が暖まりにくいためであると予想される。B棟も同じ傾向があるが、B棟はヒートポンプとガスボイラーが外気温に応じて切り替えられて動作する。それぞれが切り替わって動作したため、暖まりにくい栽培エリアが移動し、植物の均一性がA棟よりも向上したと思われる。

表V.1.3.3.3-3にB棟の暖房機の動作比率を以下に示す。ヒートポンプは2台あるが、南西側に設置したヒートポンプ1の動作比率が高かった。外気温に近いところにヒートポンプ1の温度センサが設置されているため、この温度センサが先に低温になり、ヒートポンプ1が稼動する。この温風により、ヒートポンプ2の温度センサ周辺が暖められ、その温度センサの値が、稼動しきい値を下回らず、ヒートポンプ2が稼動しなくなることが多かった。2台のヒートポンプを設置してあるが、1台だけ動作する時間が長かったので、省エ

ネに貢献する運用方法といえる。

一方、収穫量優先で制御する場合には、ヒートポンプ 2 台を同時に稼働させ、温室内の温度の均一化せるようにした方が良いと思われる。

表V.1.3.3.3-3 ヒートポンプとガスボイラーの動作比率

項目	動作比率
ヒートポンプ 1 が動作	72%
ヒートポンプ 2 が動作	0%
ヒートポンプが 2 台動作	16%
ガスボイラーが動作	12%

4) 土壌灌水の評価

土壌灌水の実験パラメータを表V.1.3.3.4-1に示す。栽培する植物は、ミニトマトで、栽培期間は1月20日からである。

表V.1.3.3.4-1 実験パラメータ

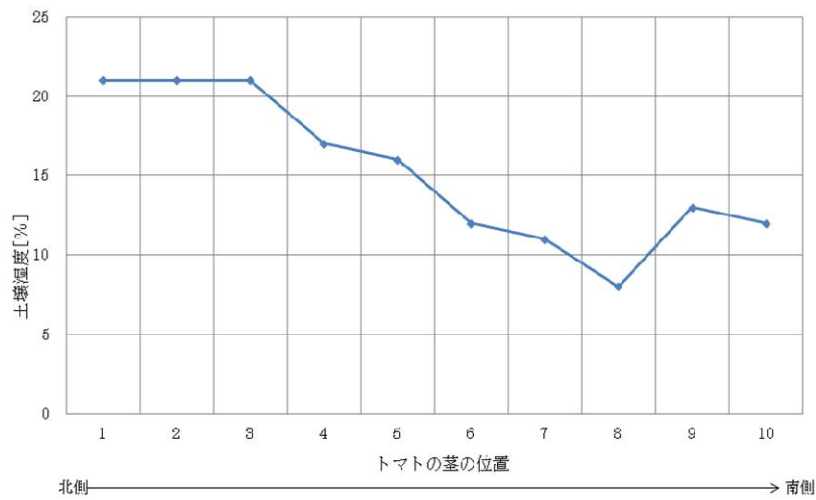
制御項目	A 棟	B 棟
土壌灌水制御	1日4回灌水(0時、6時、12時、18時)、灌水時間はタイマ制御とし、1回に1分間灌水する。	10分周期で計測し、土壌水分がしきい値(25%)を下回ったら1分間灌水する。

() 土壌水分の評価

土壌灌水実験は、次の通り行なった。まず、A棟、B棟共に、苗を定植させて、その後に、一旦土壌水分が、100%近くになるまで、ロックウール培地に給水させて、苗の根の活着を促進させた。その後、2月5日から土壌灌水制御を開始した。

図V.1.3.3.4-1に栽培エリアの土壌水分の分布を示す。測定点は、トマトの茎の近くと、2本のトマトの茎の間を交互に測定した。本データの取得時は、北側の方の水分量が高く、南側が低いという結果が得られた。

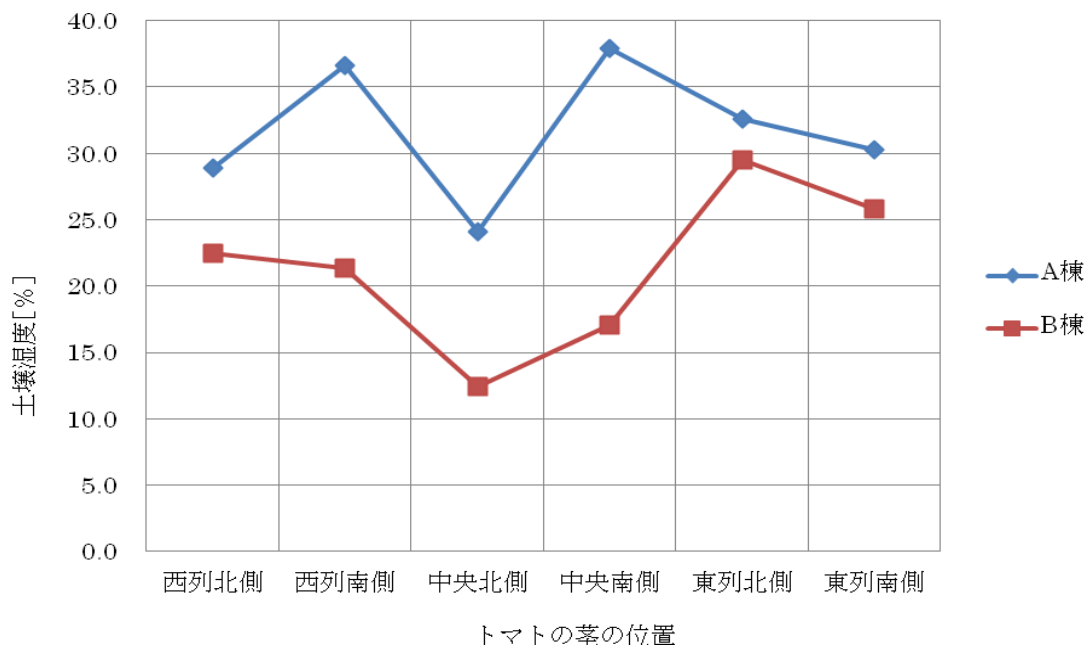
また、計測ポイント毎に、センサの表示値が異なっていた。本実験で採用したロックウール培地は、保水力が高く、土のように密度が一定ではない。灌水は、スポイトのような細い管から行なっている。ロックウール培地の保水力が高いため、その水滴が落ちる場所と、そこから離れた場所で、水分量が異なると思われる。土壌水分の測定には、センサの設置位置が重要となる。きめ細かな計測を行なうことで、不要な場所への灌水を抑制し、灌水量を削減できる可能性が高い。将来は、トマト1本毎にセンサを設置し、土壌水分を測定するのが良いと思われる。一株単位の計測の場合には、センサノードも含めて1cm～2cm角程度の小型化も必要である。



図V.1.3.3.4-1 栽培エリアの南北方向の土壌水分の分布

() 水量の評価

図V.1.3.3.4-2にA棟とB棟のトマトを栽培した期間の土壌水分の平均値を示す。A棟の土壌水分は、25~40%の範囲で分布し、B棟は、17~30%の範囲で分布している。



図V.1.3.3.4-2 A棟とB棟の土壌湿度分布

表V.1.3.3.4-1に、土壌灌水に利用された水の量の比較を示す。B棟の使用量は、A棟の約15%程度である。

表V.1.3.3.4-1 土壌灌水の水の使用量

項目	A 棟	B 棟	備考
灌水用水量 (リットル)	336	51	約1ヶ月の使用量

() 秀品率

A 棟と B 棟の着花数、徒長率を表V.1.3.3.4-2 に示す。A 棟のミニトマトは、茎の成長が早く、徒長現象が見られる。トマトの生育としては、あまり良くない状況である。灌水量を絞った B 棟は、全体的にコンパクトに育っていて、優秀である。

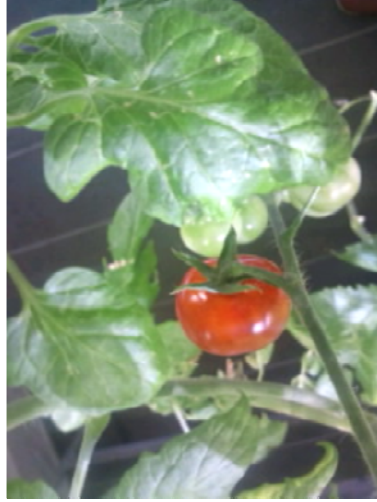
表V.1.3.3.4-2 トマトの着花率の比較

項目	A 棟	B 棟
苗本数	32 本	32 本
平均着花数 (1 段目)	10.6 個	12.9 個
徒長率	130cm	114cm

秀品率は、A 棟、B 棟からそれぞれトマトのサンプルを 5 個取り、糖度を測定した。トマトの糖度の測定結果を表V.1.3.3.4-3 に示す。B 棟のトマトは、A 棟に比べて、22%糖度が良くなった。栽培したトマトの写真を図V.1.3.3.4-4 に示す。

表V.1.3.3.4-3 トマトの糖度の測定結果

サンプル	A 棟	B 棟
1	5.9	7.4
2	6.7	7.8
3	6.9	8.7
4	6.6	8
5	6.6	7.6
糖度の平均値	6.5	7.9



図V.1.3.3.4-4 栽培したトマトの写真

5) 植物工場に適した制御方式のまとめ

今回の評価環境は小さな設備であったが、その環境内でも温度や日射量の分布があることが分かった。今回実験した4つの制御方式に関して、以下にまとめる。

細霧冷却実験では、栽培室の湿度を計測することにより、節水しながら温度を調節できることを示した。栽培エリア毎に湿度を計測して噴霧量を制御するようにしたが、細霧冷却装置間の設置位置が近いと、二つの装置の影響を受ける栽培エリアでは、過剰な噴霧がかかり、その部分の温度が設定以上に下がることが分かった。この部分をセンサネットで計測することにより、省エネ制御が可能になる。また、設備の配置を改善することも可能になる。

補光照明実験では、栽培エリア毎に日射量を測定し、そのエリアに必要な照射時間を計測することにより、それぞれの栽培エリアで照射時間を変えられることが分かった。本実証実験では、施設の南側は、北側に比べて照射時間を約10%削減できることが分かった。

冬季暖房実験では、ガスボイラーとヒートポンプを併用し、外気温が一定の温度以下の場合のみ、ガスボイラーを利用することにより、CO₂の排出量を削減した。

複数のヒートポンプを制御する場合、省エネを優先する制御と秀品率を優先する場合で制御方法を変える必要がある。省エネを優先する場合には、制御用の温度センサをヒートポンプと一対一で設置し、一方のヒートポンプが動作により室温が上昇し、他方のヒートポンプが動作を抑制する方が良い。秀品率を優先にする場合には、同時に複数のヒートポンプを動作させ、温室内の温度の均一性を保つ方が良い。

土壌灌水実験では、土壌水分を計測することで、灌水量を削減できることが分かった。保水性の高いロックウール培地では、計測位置により土壌水分量が異なる。また、太陽光が長く当たる南側部分と北側部分で土壌水分量が異なる傾向を示すことが分かった。南側と北側の栽培エリアに土壌水分センサを設置することにより、土壌水分量を最適制御できる

可能性がある。

6) MEMS 化の検討

本研究では、温度センサ、湿度センサ、日射センサ、土壌水分センサを有効利用した。日射センサは、照度センサで代用できる。植物工場では、温度センサ、湿度センサ、照度センサを、1個のセンサノードに実装し、これらのセンサをまとめて MEMS 化できれば、センサノードの低コスト化が図れる。電源としては、太陽光発電が適している。ボタン電池サイズの 2 次電池も開発されているので、太陽光発電とボタン型 2 次電池の組合せで小型のセンサノードを実現できる。

土壌水分センサは、まだ高価であり、MEMS 化による低コスト化が期待される。図 1.3.3.6-1 に将来の土壌水分センサノードの構成案を示す。水を供給する細いチューブの先端に、土壌水分センサと灌水を制御するバルブ開閉用アクチュエータを取り付けるのが理想的である。このセンサ付きアクチュエータを植物の根の近くに設置する。現状は、一つの栽培エリアにセンサ数個程度の設置となるが、本センサが数百円で実現できれば、植物一株単位での計測制御が可能になるとと思われる。

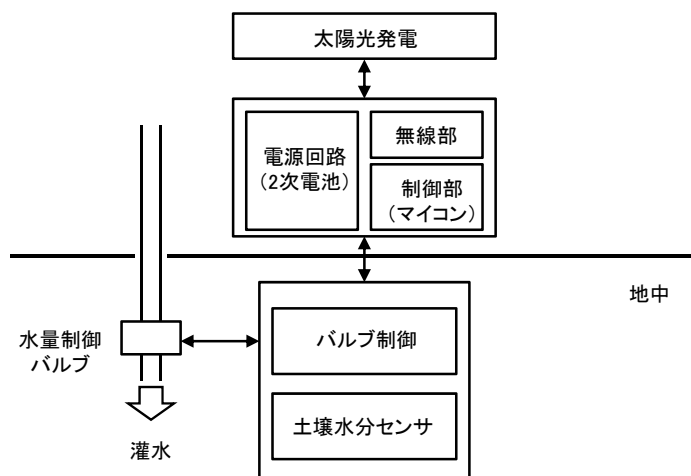
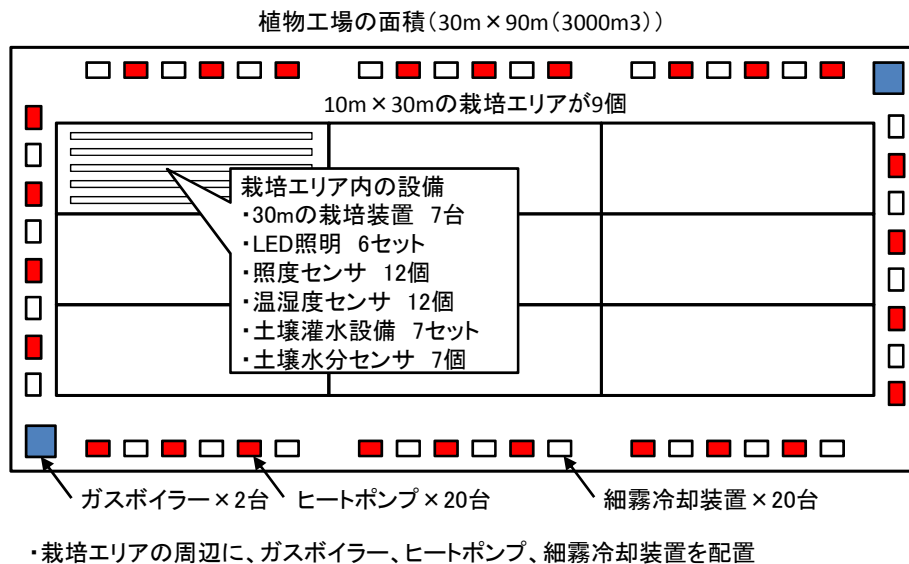


図 V.1.3.3.6-1 土壌水分センサノードの構成案

(i) 実用化の検討 システム構成

本研究で提案したシステムを制御するセンサネット植物工場の機器の配置例を図 1.3.3.6.1-1 に示す。植物工場の大きさとしては、 3000m^2 の広さを想定する。栽培エリアは、 $10\text{m} \times 30\text{m}$ のエリアが 9 個である。栽培エリアの周辺に、ガスボイラー、ヒートポンプ、細霧冷房装置を配置し、各栽培エリアには、30m の栽培装置、LED 照明、土壌灌水設備、照度センサ、温湿度センサ、土壌水分センサを配置する。



図V.1.3.3.6.1-1 センサネット植物工場の実用化時の実装イメージ

(ii) 実用化の検討 コスト試算

本提案システムによる省エネの効果を試算する。エネルギー使用料金の削減額を表

.1.3.3.6.2-1 に示す。上下水道料金 829 円/m³ (農大と同じレベル)、電気料金 12 円/kWh、ガス料金 79 円/m³ として試算している。冬季暖房では、ガス料金は減少するが、ヒートポンプの電気代が増えるので、その差額を削減金額としている。

実用化時の植物工場の面積は、3000m² として試算する。本評価環境の面積は、54m² なので、実用化時には、その 55 倍の面積になる。エネルギーコスト削減額についても同じ比率で試算する。表 V.1.3.3.6.2-2 に実用化時のエネルギー削減効果を示す。年間で、約 130 万円の削減効果がある。

表V.1.3.3.6.2-1 本評価環境（54m²）におけるエネルギーの削減効果

実験内容	エネルギー	1日の削減量	利用期間	1年間の削減量	1年間の削減金額
細霧冷却	水	45リットル/日	6ヶ月 (5月～10月) 利用率 66%	5.4m ³ /年	¥4,477
補光照明	電気	6.7KWh/日	3ヶ月 (12月～2月) 利用率 100%	603kWh/年	¥7,236
冬季暖房	ガス +電気	ガス削減量 2.16m ³ /日 電気使用量 9.1KW/日	5ヶ月 (11月～3月) 利用率 100%	ガス削減量 324m ³ /年 電気使用量 1365KW/年	¥9,300
土壌灌水	水	10リットル/日	通年	3.65m ³ /年	¥3,026
合計					¥24,038

表V.1.3.3.6.2-2 実用化時（3000m²）におけるエネルギーの削減効果

実験内容	エネルギー	1年間の削減量	1年間の削減金額
細霧冷却	水	330m ³ /年	¥246,213
補光照明	電気	33165kWh/年	¥397,980
冬季暖房	ガス+電気	ガス削減量 17820m ³ /年 電気使用量 75075KW/年	¥511,500
土壌灌水	水	200m ³ /年	¥166,422
合計			¥1,322,115

センサネット植物工場を実現するために必要な費用を表V.1.3.3.6.2-3に示す。A棟（従来棟）の設備費を基準として、提案システムの設備費を算出した。設備の構成は、この結果、その二つの設備の差額は、約1200万円となった。これをエネルギー削減コストで回収する場合には、回収期間が約10年となる。

表 V.1.3.3.6.2-3 本提案システム実用化時の設備費の試算

NO	機能		A 棟 (従来)			B 棟 (提案方式)			差額 (K¥) (B 棟-A 棟)	備考
			単価 (K¥)	台数	金額 (K¥)	単価 (K¥)	台数	金額 (K¥)		
1	全体制御	複合制御	1,400	1	1,400	1,400	1	1,400	0	
		センサネット制御				500	1	500	500	
2	細霧冷却	制御部分	400	20	8,000	550	20	11,000	3,000	注 1
		センサノード				10	108	1,080	1,080	
3	補光照明	制御部分	400	55	22,000	450	54	24,300	2,300	注 2
		センサノード				10	108	1,080	1,080	
4	冬季暖房	ガスヒータ	8,500	2	17,000	8,500	2	17,000	0	
		ヒートポンプ		0	0	100	20	2,000	2,000	注 3
		センサノード				10	0	0	0	注 4
5	土壌灌水	制御部分	0	0	0	1,000	1	1,000	1,000	
		センサノード				15	63	945	945	
	合計			48,400			60,795	11,905		

注 1) 1 台の細霧冷却装置がカバーできる範囲を 5m x 30m として試算

注 2) LED の単価は 2 年後の単価で試算

注 3) ヒートポンプは、家庭用機器レベルの単価で試算

注 4) 冬季暖房のセンサノードは、細霧冷却のセンサノードと共通化する

センサネット植物工場では、秀品率も改善できる。表 V.1.3.3.6.2-4 に秀品率の改善を 10%程度とした場合の売上金額を試算する。作物は、リーフレタスを前提とすると、600 万円の売上増加が見込まれる。この売上の 50%程度を投資の回収に組み込めると想定すると、エネルギーの削減コストと秀品率による売上の増加分の合計は、年間 400 万円程度となる。回収期間を 2~3 年に短縮できる可能性がある。

表 V.1.3.3.6.2-4 本提案システムによる売上金額の試算

項目	A 棟 (従来棟)	B 棟 (提案方式)
リーフレタスの出荷単価	100 円	100 円
年間の出荷株数	60 万株	66 万株
年間の出荷金額	6000 万円	6600 万円
売上増分		600 万円

(4) まとめ

本研究の内容を以下にまとめる。

1) センサネットに適した制御方式の提案

植物工場の制御システムとして、細霧冷却、補光照明、冬季暖房、土壌水分の4つの方式を提案した。これらの方式は、栽培エリアを分割して、それらのエリアを個別制御する方式である。栽培エリア毎の環境計測や、各栽培エリアの境界の環境測定にセンサネットを適用することにより、省エネを実現できる可能性を示した。

2) 省エネ効果と収量改善のまとめ

本研究で行なった4つの制御システムの実験結果を表V.1.3.4-1に示す。目標の省エネ20%削減、秀品率10%改善に対して、目標を達成できたと考える。

細霧冷却実験は、日程の関係で、植物の栽培が行なえなかった。補光照明、冬季暖房、土壌灌水実験に関しては、ほぼ目標を達成できた。

表V.1.3.4-1 実験結果まとめ

NO	実験項目	省エネ	秀品率
1	細霧冷却	水の使用量を75%削減	-
2	補光照明	電力量を約70%削減	リーフレタスの秀品率を約10%改善
3	冬季暖房	CO ₂ 排出量を約30%~40%削減	リーフレタス秀品率を約10%改善
4	土壌灌水	水の使用量を約80%削減	トマトの糖度を約20%改善

3) MEMS 化の検討

植物工場用センサノードは、温度センサ、湿度センサ、照度センサを実装したものが適することを示した。土壌水分センサに関しては、土壌水分測定センサとバルブ制御を一体化した方式を提案した。これらのセンサのMEMS化による低コスト化が期待される。

4) 実用化の見通し

本提案の省エネ方式を植物工場に適用する場合のコストを試算した。本提案システムの導入コストは、本方式による省エネ効果の金額の約10年分相当であり、10年間で投資を回収できる見込みである。秀品率の改善効果を含めると、回収期間を2~3年に短縮できる可能性も示した。

5) 今後の課題

本研究では、省エネを主目的に植物工場のセンサネットを評価した。本提案のセンサネットを植物工場に導入すれば、新たなセンサも本プラットフォームに接続可能となる。高級な果物の栽培(夏季のイチゴ)、植物単体のモニタ(蒸散、CO₂等)、土壌・水養液の管理、虫の検知(虫センサ)、病気の検知、作業監視、盗難防止等へのセンサネットの適用は、今後の課題である。

1. 4 高機能センサモジュール技術開発

1. 4. 1 センサモジュール

(1) 研究の目的

クリーンルームの省エネ化のためには、各種環境量の計測と、その結果を用いたきめ細かな設備・機器の制御が求められる。本研究は、この目的達成のため、配線不要でどこにでも設置でき、内蔵電池で長時間駆動が可能な超小型高機能センサモジュールを開発するものである。併せて、センサモジュールの低消費電力化にとって重要な無線センサ端末受信機の試作も行ったので報告する。

(2) センサモジュール詳細仕様の検討

1) 概要

今後の普及に向けた要素技術の確立に向け、特に外形寸法と消費電流の削減に注力した。その後、センサに常時通電するイベント対応型モジュールの必要性が想起され、同方式の試作を追加した。クリーンルームでのデータ測定から、同方式の有効性が確認された。

2) 外形寸法

内部部品寸法積み上げ方式の取り組みでは限界を突破できないと考え、まずは $30\text{mm} \times 30\text{mm} \times 10\text{mm}$ 以内との意欲的目標を定めた。この寸法を絶対条件として以後の詳細検討に進んだ。

この結果後述の如く、今後の実用化に向かうための、超小型無線センサモジュールの究極の姿を提起できたものとする。



図 V.1.4.1.1 定周期型モジュール

3) 内蔵電池

エネルギー密度の高いリチウムイオン電池の採用を前提とし、外形寸法の制約から、CR2032 (直径 20mm、厚さ 3.2mm、3V 220mAh) を選定して、一次試作を開始した。その後の検討で、この電池では内部抵抗が高すぎ (当初 10 Ω 、時間が経過すると 50 Ω にも達する) モジュールの瞬間的な消費電流に耐えるのが困難と判明。3.7V 75mAh ではあるが、内部抵抗の 1 桁低い PD2032 に変更した。

*モジュールの瞬間最大電流は、約 25mA。電池電圧 3V、DCDC コンバータ効率 80%だと、回路電圧が 3.3V のため、電池電流は 34mA になる。

この状態では、内部抵抗が初期値の 10 Ω でも、電池電圧は 2.65V に落ち、さらに電池

電流が増え、電圧が下る・・・結果として電池電流は 40mA 以上になる。

初期段階でこの状態であり、内部抵抗が増えると、電池電圧が半減し、70mA 程度流れることが観測された。CR2032 は 10mA 流すと、電池容量 220mAh が半分以下に落ち、それ以上の電流だとさらに急峻に容量が減少するはずである。

(10mA 以上は製品規格外であり、メーカーからのデータなし)

PD2032 は、内部抵抗が一桁低く、電池の端子電圧低下も、同じ電流に対しては一桁低い。瞬間最大電流 150mA までが仕様範囲になっている。

表 V.1.4.1.1 電池の主な仕様



図 V.1.4.1.2 PD2032
(CR2032 も同一形状)

項目	CR2032	PD2032
公称電圧	3.0V	3.7V
標準放電電流	0.2mA	15mA
瞬間放電電流	10mA	150mA
容量	220mAh	75mAh
初期内部抵抗	10	1

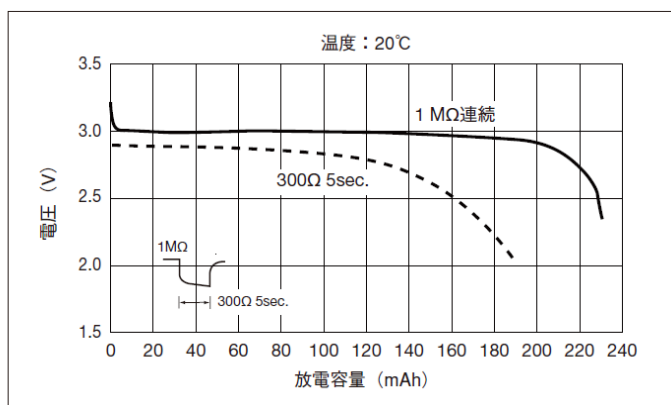


図 V.1.4.1.3 CR2032 のパルス放電特性 (初期値 10mA で約 10)

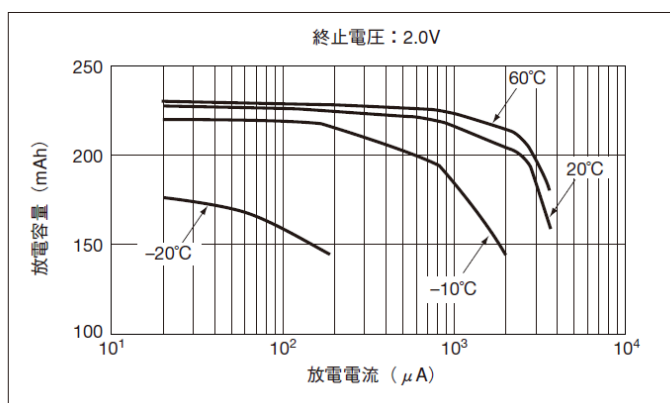


図 V.1.4.1.4 CR2032 の放電電流と放電容量

実際の寿命測定では、CR2032 を使用すると PD2032 の半分以下しか持たなかった。

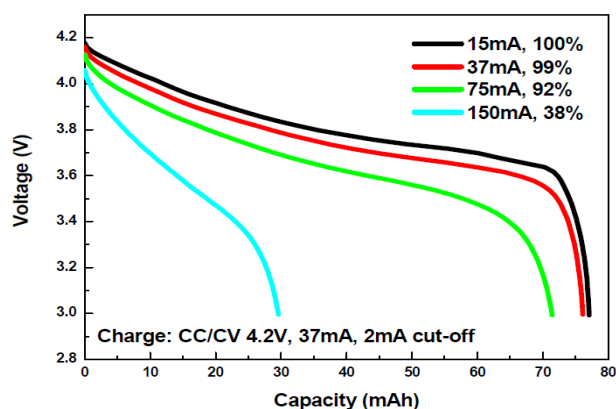


図 V.1.4.1.5 PD2032 の放電特性

4) 搭載センサ数と品種

複数のセンサの中から、都度必要なものを選択搭載できるモジュールとし、搭載センサ数については3個と定めた。センサは小さな基板に搭載し、コネクタでモジュールの基板に接続した。コネクタの選択には頭を悩ませたが、0.4mm ピッチで 0.8mm と超薄型の京セラエルコ型 24-5802 020 002 829+を選定した。

表 V.1.4.1.2 コネクタ概略仕様

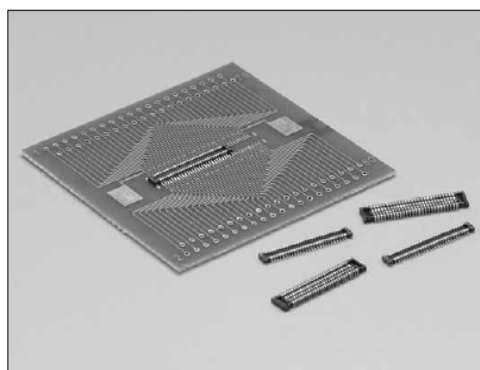


図 3.1.4.1.6 5802 シリーズコネクタ

シリーズ (Series)	5802
基板間高さ (Stacking Height)	0.8mm
極間隔 (Pitch)	0.4mm
極数 (No. of Positions)	10~60
定格電流 (Rated Current)	AC/DC 0.3A
定格電圧 (Rated Voltage)	AC/DC 50V
耐電圧 (D.W.Voltage)	AC 250Vrms/min.
コンタクト材質 (Contact Material)	銅合金 Copper alloy
インシュレータ材質 (Insulator Material)	耐熱樹脂 Heat resistance plastic
使用温度範囲 (Operating Temperature)	-40~85°C

搭載するセンサとしては、小型かつ低消費電力の要求から BEANS 研究所で開発中のものを含め MEMS ないし半導体型の、SENSIRION の温湿度センサ、オムロンのフローセンサ、東芝の照度センサ、日立製作所の絶対圧センサ、アルガンの紫外線照度センサを選定した。



図 V.1.4.1.7 主基板とセンサ子基板裏面

表 V.1.4.1 センサ主要仕様

対象	温度	湿度	風量	照度	絶対圧	紫外線	
メーカー	SENSIRION		オムロン	東芝	日立	AlGaN	
型式	SHT21		D6F-V03A1	TPS856	HT01	UVA	UVB (CIE)
方式	BandGap	容量変化	温度差検出	Si7フォトIC	容量変化	AlGaN	
電源電圧	2.1~3.6V		3.15~3.45V	1.8~5.5V	2.6~3.6V	3V	3V
消費電流	0.27~0.33mA		<15mA	<20uA	<1.5mA	0.5mA以下	0.5mA以下
推奨測定範囲	24~43°C	20~80%	0~3m/s	1~10,000Lx	50~150kPa	0~3.73mW/cm ²	0~0.11mW/cm ²
出力信号	デジタル	デジタル	0.5~2V	57uA/100Lx	電圧	電圧	
外形寸法(mm)	3×3×1.1		24×14×8	1.6×1.6×0.55	4.7 × 3.7 × 1.3	7×7×3	7×7×3

Datasheet SHT21

Humidity and Temperature Sensor

- Fully calibrated
- Digital output, I²C interface
- Low power consumption
- Excellent long term stability
- DFN type package – reflow solderable

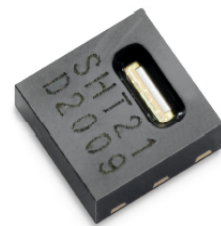


図 V.1.4.1.8 センシリオン製 温湿度センサ

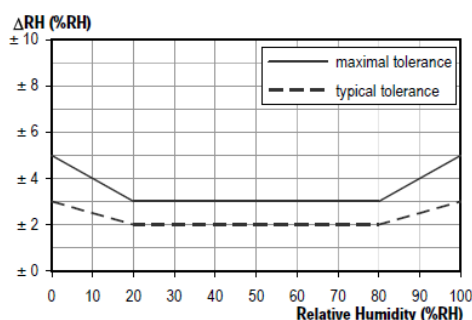


Figure 2 Typical and maximal tolerance at 25°C for relative humidity. For extensive information see Users Guide, Sect. 1.2.

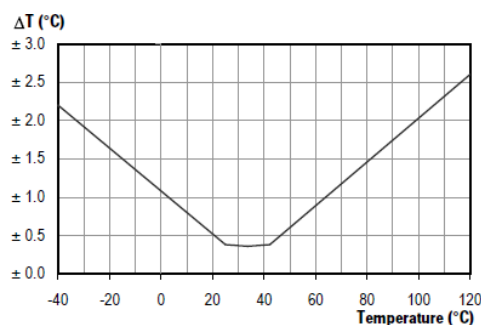


Figure 3 Maximal tolerance for temperature sensor in °C.

Electrical Specification

Parameter	Conditions	min	typ	max	Units
Supply Voltage, VDD		2.1	3.0	3.6	V
Supply Current, IDD ⁶	sleep mode	-	0.15	0.4	μA
	measuring	270	300	330	μA
Power Dissipation ⁶	sleep mode	-	0.5	1.2	μW
	measuring	0.8	0.9	1.0	mW
	average 8bit	-	1.5	-	μW
Heater	VDD = 3.0 V	5.5mW, ΔT = + 0.5-1.5°C			
Communication	digital 2-wire interface, true I ² C protocol				

Packaging Information

Sensor Type	Packaging	Quantity	Order Number
SHT21	Tape & Reel	400	1-100707-01
	Tape & Reel	1500	1-100645-01
	Tape & Reel	5000	1-100694-01

図 V.1.4.1.9 温湿度センサの特性

MEMS Flow-Sensor D6F-V03A1

The unique dust separating structure, developed by OMRON is a compact and highly efficient FLOW-SENSOR.

- A dust-resistant design has been taken into consideration, by the original dust segregation structure, of OMRON.
- +/-10% Full-Scale repeatable accuracy achieves consistent air velocity measurement.
- Applications include clogged-filter detection and air velocity.



Sensor specification

Type	D6F-V03A1
Flow Range	0 - 3 m/s @ 25°C, 1 atmosphere
Case Material	Thermoplastic resin
Gas	Air
Ambient Temperature	-10 to +60°C (with no condensation)
Using Humidity	Max. 85% RH (with no condensation)
Storage Temperature	-40 to +80°C (with no condensation)
Preservation Humidity	Max. 85% RH (with no condensation)
Power Supply Voltage	3.15 to 3.45 VDC
Output Signal	Analog output 0.5 to 2 VDC (non-linear output) Load resistance min. 10kΩ
Current Consumption	Max. 15mA (No-load, V _{CC} = 3.3 VDC, 25°C)
Insulation Resistance	20Mohm min. (500VDC, between lead terminal and the case)
Dielectric Withstanding Voltage	Leakage current is 1mA max. (at 500 VAC, 50/60Hz for one minute). 500VAC, 50/60Hz judged at 1mA max. (between the lead terminals and the case)

図 V.1.4.1.10 オムロン製 フローセンサ仕様

TPS856

- 携帯電話
- ノート PC、PDA
- ビデオカメラ、デジタルスチルカメラ
- そのほか光量調整用

TPS856 は、フォトダイオードと電流増幅回路を 1 チップに集積化した超小型の照度センサ用表面実装型フォト IC です。

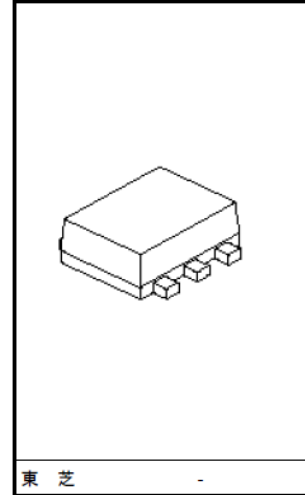
フォトトランジスタに比べて高感度で、感度バラツキが小さいという優れた特長を持っています。

視感度に近い分光感度を持っているので、明るさに比例したリニア出力が得られます。

また、超小型の表面実装型パッケージの採用により、携帯電話の表示部バックライトの点灯制御や家電機器のパワーセーブ制御などに用いることで、機器の省エネに貢献できます。

さらにスタンバイ機能を有しているため、必要時のみ動作させる事ができます。これにより低消費電力動作が可能です。

- 超小型・軽量の表面実装型パッケージ : 1.6 × 1.6 mm (厚さ 0.55 mm)
- 照度に対する優れた出力リニアリティ
- 光感度が高く、低バラツキ
 - : $I_L = 57 \mu A$ (標準) @ 蛍光灯 100 lx 照射
 - : 光電流バラツキ幅 1.67 倍 (ランク指定時)
 - : 光電流の温度変動が少ない
- 視感度補正機能を内蔵し、光源別の光感度差を低減
 - : I_L (@白熱灯) / I_L (@蛍光灯) = 1.0 倍 (標準)



東 芝

質量: 0.003 g (標準)

図 V.1.4.1.11 東芝製照度センサ

表 V.1.4.1.4 日立製絶対圧センサ仕様

1. 最大定格

No.	項目	条件	min.	typ.	max.	単位	備考
1	電源電圧		-0.3		7.0	V	
2	消費電力			2.0	30	mW	
3	保存温度		-40	25	125	°C	

2. 推奨動作条件

No.	項目	条件	min.	typ.	max.	単位	備考
1	動作電源電圧	3.3V動作	2.6	3.3	3.6	V	
2	動作電源電圧	5.0V動作	4.5	5.0	5.5	V	
3	保存温度		-20	25	85	°C	

3. 電気的特性表(3.3V動作時)

No.	項目	条件	min.	typ.	max.	単位	備考
1	全体	消費電流		0.6	1.5	mA	
2		スリープ電流		0.0	1.0	μA	
3	圧力センサ	出力応答時間		1	10	ms	出力に接続するコンデンサ値0.1 μF 時
4		ゼロ点電圧	増幅率・ゼロ点は内蔵レジスタで調整				
5		スパン幅	増幅率・ゼロ点は内蔵レジスタで調整				
6		出力電圧ばらつき		-1.5		1.5	mV
7	温度センサ	出カインピーダンス		5	10	15	k Ω
8		ゼロ点電圧	増幅率・ゼロ点は内蔵レジスタで調整				
9		スパン幅	増幅率・ゼロ点は内蔵レジスタで調整				
10	温度センサ	温度係数		12.5			mV/°C
11		出カインピーダンス		5	10	15	k Ω
12	SLEEP端子	フルアップ入力抵抗		50	100	150	k Ω
13		入力Vth		1.6			V

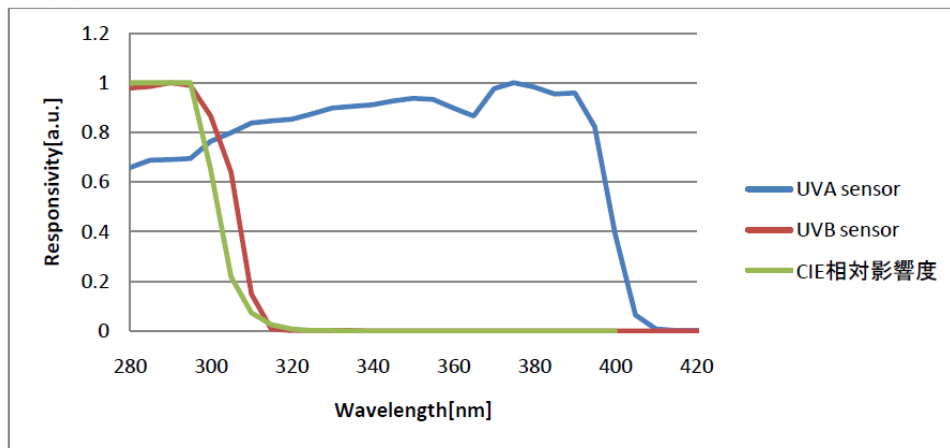


図 V.1.4.1.12 ALGAN 製 UV センサ分光感度特性

5) CPU

試作品の利用形態に鑑み、スリープ時の消費電流が少なく、アナログ・デジタル両信号入力に対応し、豊富な命令セットを備えた T I 社の MSP430FG46191ZQW を選定した。動作時クロック周波数は 12MHz とした。回路電圧は、消費電力の観点からは低いほど良いのは論を待たないが、今回はフローセンサの電源電圧仕様に合わせ、3.3V とした。当初設計を CR2032 を想定して進めていたため、昇圧が必要となり、スイッチング式の DCDC コンバータを使用した。変換効率、出力電流 100 μ A で 40%、20mA で 80%程度であり、出力電流 0 時のスタンバイ電流は 55 μ A であった。

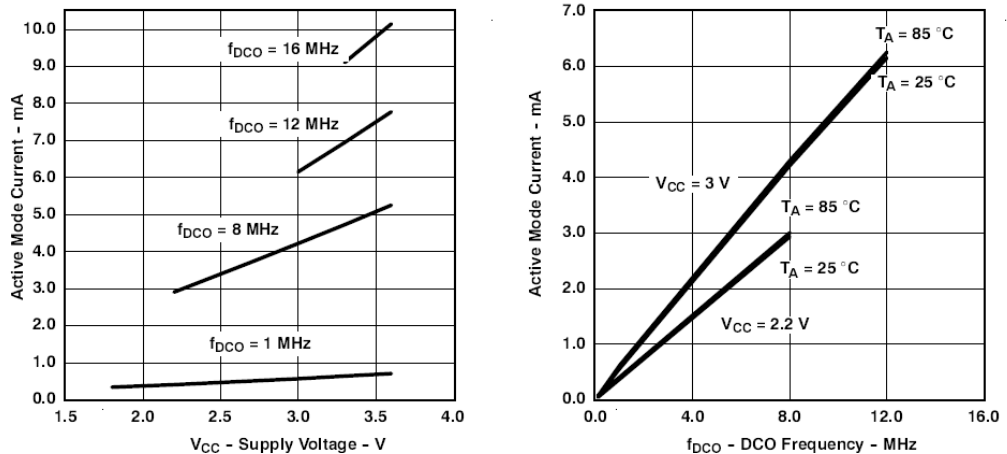


図 V.1.4.1.13 CPUの電源電圧、クロック周波数とアクティブモード消費電流

表 V.1.4.1.5 CPU のローパワーモード消費電流

low-power mode supply current into V_{CC} excluding external current (see Notes 1 and 2)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	T _A	V _{CC}	MIN	TYP	MAX	UNIT
I _{LPM0, 1MHz} Low-power mode 0 (LPM0) current, see Note 3	f _{MCLK} = 0 MHz, f _{SMCLK} = f _{DCO} = 1 MHz, f _{ACLK} = 32768 Hz, BCSCSTL1 = CALBC1_1MHZ, DCOCTL = CALDCO_1MHZ, CPUOFF = 1, SCG0 = 0, SCG1 = 0, OSCOFF = 0	-40°C to 85°C	2.2 V	68	83	μA	
		105°C		83	98		
		-40°C to 85°C	3 V	87	105		
		105°C		100	125		
I _{LPM0, 100kHz} Low-power mode 0 (LPM0) current, see Note 3	f _{MCLK} = 0 MHz, f _{SMCLK} = f _{DCO(0, 0)} = 100 kHz, f _{ACLK} = 0 Hz, RSELX = 0, DCOx = 0, CPUOFF = 1, SCG0 = 0, SCG1 = 0, OSCOFF = 1	-40°C to 85°C	2.2 V	37	49	μA	
		105°C		50	62		
		-40°C to 85°C	3 V	40	55		
		105°C		57	73		
I _{LPM2} Low-power mode 2 (LPM2) current, see Note 4	f _{MCLK} = f _{SMCLK} = 0 MHz, f _{DCO} = 1 MHz, f _{ACLK} = 32768 Hz, BCSCSTL1 = CALBC1_1MHZ, DCOCTL = CALDCO_1MHZ, CPUOFF = 1, SCG0 = 0, SCG1 = 1, OSCOFF = 0	-40°C to 85°C	2.2 V	23	33	μA	
		105°C		35	46		
		-40°C to 85°C	3 V	25	36		
		105°C		40	55		

6) 無線モジュール

当初は、広く使われている ZigBee 方式で検討を進めたが、消費電力低減のため、特定小電力方式に切り替え、パイソフトラブ社の RFS24D1D-5-A を採用した。0dB (1mW) の出力で、目標の通信距離 10 m を確保した*。ただ、外形寸法の制約から、アンテナ周辺に十分な空間を確保できず、カタログ記載の通信距離最大 50m には及ばなかったが、開発目標の 10m は達成した。**

* ZigBee の、送信時 45mA 受信時 35mA に対し今回使用の特小はそれぞれ 18mA と 16mA であり、ほぼ半分。送信出力は 5mW 対 1mW。

** 直線見通し距離で、カタログ値 50m 以下、実測値 10.2m だった。

● 特 徴

- 使用 RF デバイス NORDIC 社製 nRF24LE1
 - ・CPU 内蔵 (8051 互換)
 - ・プログラム FlashROM 16K+1Kbyte
 - ・データメモリ RAM 1Kbyte
- ユーザーインターフェイス
 - シリアル接続 (UART, 最大 500Kbps)
 - GPIO 入出力, I2C, PWM 出力
 - 12bit-ADC 入力, SPI (スレーブ)
- 小型軽量で組込に最適
- 従来にない低価格
- アンテナ一体型により組込設計が簡単
- 動作電圧 1.9V~3.6V
- 超低消費電力 DeepSleep 時: 0.5uA 以下
- 無線伝送速度 250kbps~2Mbps



外観写真 (シールドカバー付き)

図 V.1.4.1.14 無線モジュールの特長と写真

表 V.1.4.1.6 無線モジュール仕様

機能	項目	主な仕様
一般仕様	使用デバイス	NORDIC 社製 nRF24LE1-F16Q32(内蔵 CPU-8051 Compatible)
	周波数帯	2,400MHz~2,525MHz (1MHz Step、但し伝送速度 2Mbps の場合は 2MHz 以上の Step)
	チャンネル数	124ch(1MHz Step 時)
	空中線電力	最大 0dBm±4dBm 以内
	発振子	水晶発振 16MHz 内蔵(PLL 周波数シンセサイザ方式) 水晶発振 32.768KHz 内蔵(超低消費電流動作)
	伝送速度	250Kbps、1Mbps、2Mbps
	伝送フォーマット	NRZ(同期通信)
	通信形態	1:1、1:N
	電源電圧	+1.9V~+3.6V (標準+3.0V)
	消費電流	-18dBm 送信時:11mA 以下、受信時(250Kbps)17mA 以下 スリープモード時:0.5μA 以下、待機モード時:0.05mA
	外形寸法	17mm×15mm×2.95mm
	基板	板厚:0.6mm、材質:FR4
	重量	2g 以下
	使用温度	-20℃~+75℃
保存温度	-40℃~+80℃	
RF 送信部	送信電力	最大 0dBm±4dBm 以内、-6dBm Step 最小-18dBm 変更可能
	周波数偏差	50ppm 以下
	スプリアス	2.5uW 以下
	占有周波数帯域幅	1MHz 以下(1Mbps データ伝送速度時)
	変調方式	GFSK
RF 受信部	基準受信感度	-82dBm 以下(2Mbps、Bit 誤率 0.1%) -94dBm 以下(250Kbps、Bit 誤率 0.1%)
	周波数偏差	50ppm
	受信スプリアス	2.6uW 以下
アンテナ	内蔵	パターンアンテナ
	形式	1/4λ 逆 F 型
	指向性	無指向性
ユーザ外部 IF	シリアル通信 UART	UART-IF(MAX:38400bps)
	同軸コネクタ	技術適合証明取得用 RF 同軸コネクタ内蔵(50Ω) 村田製作所:MM8130-2600
	インターフェイス端子	26pinコネクタ 京セラエルコ:24 5805 026 000 829+

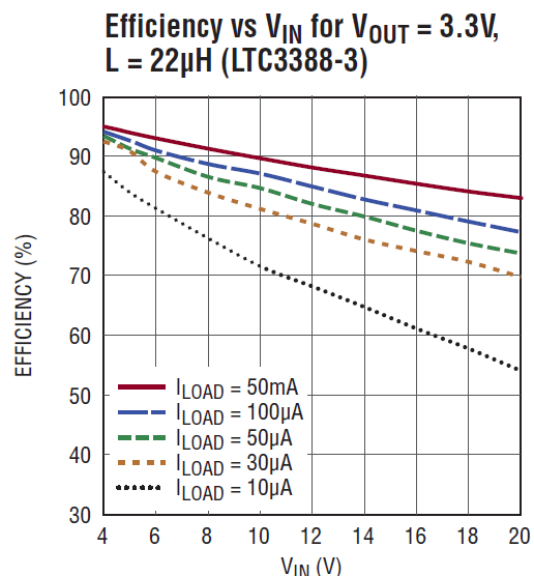
7) 電池寿命対策

電池寿命の増大に向けては、大容量電池の採用、回路電圧の低減、消費電流の小さな部品の選択、DCDC コンバータなどによる電力ロスの低減、さらには、各部品への通電時間の極小化などの手法を駆使することになる。今回の試作では、外形寸法の制約から電池形状が定まり、搭載できる電源部コンデンサ容量から、前述のとおり内部抵抗の低い PD2032 を選んだ。一次試作においては、試作請負企業の当時の技術力の限界もあり、結果的に電池寿命は 170 時間程度に留まった。

8) 2次試作への取り組み

一次試作品の限界を解析し、さらなる低消費電力化に向け下記改良を加えて2次試作を実施した。

- ・定電圧回路の改良： 電池電圧が3.7Vになったこともあり、定電圧ICをLinear Technology社の型LTC3388EDD-3#PBFに変更した。本モジュールで特に問題となる回路スリープ時(数十 μA)の定電圧回路効率が80%以上と2倍化し、スタンバイ電流も55 μA から一桁以上下げた。



図V.1.4.1.15 定電圧ICの効率

- ・CPUほかの電力低減：CPU動作時のクロックを8MHzに下げて、電流を下げた。フローセンサについては、ごく短時間の突入電流を除くと、消費電流は仕様値より大幅に低く、100ms平均の実測で3.5mAに留まっていた。ヒータを内蔵しているにもかかわらず、MEMSゆえにその時定数が短いおかげとのことである。この結果、10分間に1回通信の定周期計測モードにおいて、通信のリトライ率を平均20%見込んでも、次ページの表に示すように大幅な低電流化を実現した。

表V.1.4.1.7 定周期型センサモジュールの消費電流

回路	状態	通信周期 600秒(10分)毎 単位 時間&周期三秒		当初想定		一次試作		二次試作		将来像	
		電流	時間	電流	時間	電流	時間	電流	時間	電流	時間
CPU	稼働	7.000	2	7.000	3	4.000	3	2.000	2	2.000	2
	スリープ	0.100	598	0.100	597	0.050	597	0.010	598	0.010	598
無線モジュール	受信	18.000	1	18.000	0.9	18.000	0.5	8.000	0.1	8.000	0.1
	送信	16.000	1	16.000	0.1	16.000	0.5	6.000	0.1	6.000	0.1
	待機	4.800	0	4.800	0	4.800	0				
	スリープ	0.001	598	0.002	599	0.002	599	0.002	599.8	0.002	599.8
定電圧電源	稼働	0.000	0	0.055	5	0.055	3	0.005	3	0.005	3
定電圧電源	スリープ	0.000	0	0.055	595	0.005	597	0.005	597	0.005	597
温湿度センサ	稼働	28.000	1	0.330	0.1	0.400	0.1	0.330	0.1	0.330	0.1
絶対圧センサ	稼働	1.500	1	1.500	0.1	1.500	0.1	0.500	0.1	0.500	0.1
フローセンサ	稼働	15.000	1	15.000	0.1	3.500	0.1	2.000	0.1	2.000	0.1
定電圧回路稼働時効率率(%)			1.00		80%		90%		90%		90%
定電圧回路スリープ時効率率(%)			1.00		40%		80%		100%		100%
合計電池電流(10分間平均mA)			0.253		0.42		0.108		0.0259		0.0259
電池種類と容量 (mAh)		CR2032	220	PD2032	75	PD2032	75	CR2032	220	CR2032	220
電池寿命(時間)			870		176.6		693.1		8505.1		8505.1
説明		CR2032で直接駆動		回路電圧安定化		チューニングの徹底		新無線モジュール & 新センサの貢献			
		・当初想定電池寿命 = 870時間		×定電圧回路追加 ×回路電圧上昇 ×CR2032→PD2032		○定電圧効率向上 ○CPUスリープ制御 ○無線部スリープ制御		○回路電圧低下 ○CPUの見直し ○CR2032再登場			

9) 通信方式の改良

一時試作においては、通信に不安定さが残り、しばしばエラーを出していた。このため、通信部のソフトを見直し、特にサーバ側無線モジュールとサーバ間のデータ授受部は1から作り直した。通信エラー発生時のリトライ回数は最大4回（従来は最大2回）に増やし、通信の安定化に成功した。全ての子機に対して4回リトライをかけるという最悪の場合を想定すると、同時にN個のセンサモジュールをモニタするには、通信周期をN秒間以上にする必要がある。

10) 操作性の向上： センサ対応

一次試作においては、所定寸法のケース内に部品を詰め込み、基本機能を確認することに注力したが、操作性に関しては、不十分さが残っていた。センサモジュールに搭載するセンサの種別、各センサ出力の生データを、所望の値に変換するスケーリングなどは、全てプログラムで処理されており、たとえばセンサのオフセット変更は、ソースプログラムを書き換え、再コンパイルする状況に留まっていた。同品種センサの個体差を補正する手段はなかった。2次試作において、これらを大幅に改善した。2次試作における、機能強化点を以下に列記する。

- ・搭載可能センサ種別： 最大7品種から、31品種に拡大した。
新規センサの追加については、従来プログラムで対応していたが、**config** ファイル内にセンサ名称を列記する形式に改め、センサの名称変更や、新規センサ名の登録を簡便化した。
- ・新センサの追加： 何らかのデジタルインタフェースを持つセンサに関しては、品種ごとにインタフェースプログラムを作成することが不可欠である。
デジタルインタフェースを持つセンサには、一次試作においては温湿度センサと絶対圧力センサがあったが、2次試作では新たに3軸加速度センサを追加した。アナログ電圧出力型のセンサについては、前記のように **config** ファイルに新名称を登録（具体的には、「予備 n」を新センサ名称に書き換える）するだけで、追加可能となった。
- ・センサ信号のスケーリング： センサ出力は、モジュール内で平均化処理を施した後に、所定周期で上位 PC に送出される。上位 PC 側では、オフセット調整（基準点における誤差補正）ならびにスケーリング処理を施して、所望する単位の数値に換算して表示する。従来はこれらを全てプログラム処理していた。同一品種のセンサを複数個用いた場合の個体差補正機能はなかった。以下に、2次試作で新たに追加した、設定用画面を示す。

センサ識別No.	センサ名称	基準値	単位	オフセット	係数	最小スケール	最大スケール
0	温度	0	℃	0	0.000776	0	30
1	絶対圧力	0	hPa	810	1	800	1100
2	フロー	0	m/s	630	0.00146	0	5
3	UVA	0		0	1	0	3000
4	照度	0	lx	8172	-0.0938	0	3000
5	UVB	0		0	1	0	30
6	加速度X	0	G	8400	0.000119	-3	3
7	なし	0		0	1	0	30
8	湿度	0	%	0	0.00096	0	100
9	差圧	0		0	1	0	30
10	新フローX	0		0	1	0	30
11	パーティクル	0		0	1	0	30
12	予備1	0		0	1	0	30
13	予備2	0		0	1	0	30
14	加速度Y	0	G	8400	0.000119	-3	3
15	加速度Z	0	G	8400	0.000119	-3	3
16	予備3	0		0	1	0	30
17	予備4	0		0	1	0	30
18	予備5	0		0	1	0	30

図V.1.4.1.16 センサ初期設定画面

センサ初期設定画面における各項目の意味は以下のとおりである。

- センサ番号は合計 31 種のセンサの識別番号。
No.7 は「なし」の指定席であり、他のセンサを設定できない。多出力センサの場合、各出力についてスケールが必要のため、出力毎に 1 番号を割り付ける。
- 基準値は、そのセンサの出力値を校正する値。同じセンサでも、使用者によって校正する基準値は同一とは限らぬため、任意に設定できるようにした。
- 単位は、センサ値を表示するときの単位。表示の小数点以下桁数が多くなりすぎないように、適当に選ぶ。
- オフセットは、本システムの場合、センサを基準値の環境においたときの、そのセンサ出力の生データ。
- 係数は、センサ出力信号と、測定値の関係を示す傾き。

-スケール変換の計算式は、
 センサ信号を ST、
 センサ基本設定オフセットを Offo、
 センサモジュールオフセット補正（後述）を Offc
 センサ基本設定係数を Ko
 センサモジュール係数補正（後述）を Kc
 基準値を S とすると

$$(ST - (Offo + Offc)) \times (Ko + Kc) + S$$
 となる。

-最小スケールと最大スケールは、センサ信号の推移をグラフ表示する場合の、
 Y 軸の最小値と最大値。

・個別センサの設定：センサ登録との機差補正のために、下記画面を設けた。

モジュールNo.	設置場所	センサ1	センサ1 オフセット補正	センサ1 係数補正	センサ1 閾値補正	センサ2	センサ2 オフセット補正	センサ2 係数補正	センサ2 閾値補正	センサ3	オフ
1		なし	0	0	0	照度	0	0	0	なし	
2		なし	0	0	0	なし	0	0	0	なし	
3		なし	0	0	0	なし	0	0	0	なし	
4		なし	0	0	0	なし	0	0	0	なし	
5		なし	0	0	0	なし	0	0	0	なし	
6		なし	0	0	0	なし	0	0	0	なし	
7		なし	0	0	0	なし	0	0	0	なし	
8		なし	0	0	0	なし	0	0	0	なし	
9		なし	0	0	0	なし	0	0	0	なし	
10		なし	0	0	0	なし	0	0	0	なし	
11		なし	0	0	0	なし	0	0	0	なし	
12		なし	0	0	0	なし	0	0	0	なし	
13		なし	0	0	0	なし	0	0	0	なし	
14		なし	0	0	0	なし	0	0	0	なし	
15		なし	0	0	0	なし	0	0	0	なし	
16		なし	0	0	0	なし	0	0	0	なし	
17		なし	0	0	0	なし	0	0	0	なし	
18		なし	0	0	0	なし	0	0	0	なし	
19		なし	0	0	0	なし	0	0	0	なし	
20		なし	0	0	0	なし	0	0	0	なし	
21		なし	0	0	0	なし	0	0	0	なし	
22		なし	0	0	0	なし	0	0	0	なし	
23		なし	0	0	0	なし	0	0	0	なし	
24		なし	0	0	0	なし	0	0	0	なし	
25		なし	0	0	0	なし	0	0	0	なし	

図 V.1.4.1.17 モジュールへのセンサ登録と機差補正画面

-モジュール No.は、センサモジュール毎に設定された ID 番号。

-設置場所は、各モジュールの設置場所などを記入するメモ覧。

-センサ1～3は、各センサモジュールに搭載するセンサの名称。センサ4は、
温湿度センサ搭載時に使用する、湿度センサの登録覧。

-センサn オフセット補正は、当該モジュールのセンサn に登録されたセンサの、
初期設定オフセットに対する補正量。センサ初期設定画面で設定した
オフセットと、本画面で設定したオフセット補正の和が、個別センサのオ
フセットとなる。

-センサn 係数補正は、当該モジュールのセンサn に登録されたセンサの、初
期設定係数に対する補正量。センサ初期設定画面で設定した係数と、本画
面で設定した係数補正の和が、個別センサの係数となる。

(-センサn 閾値補正は、イベント対応型でのみ使用する。)

・測定値数値表示

測定中には、1行1モジュールで順次測定データが記入されてゆく。

なお、測定データをファイルに保存したものを読み出して表示する、履歴の数
値表示画面も同じような形式になっている。

ポーリング履歴データ												測定日	201
サンプル 回数	モジュ ールNo.	設置場所	時刻	センサ1	データ	センサ2	データ	センサ3	データ	センサ4	データ		
1	1	1	124415	温度	22.59°C	照度	670.48lx	なし		湿度	18.01%		
2	1	1	124420	温度	22.51°C	照度	670.48lx	なし		湿度	17.95%		
3	1	1	124425	温度	22.49°C	照度	670.39lx	なし		湿度	18.04%		
4	1	1	124430	温度	22.49°C	照度	670.39lx	なし		湿度	18.06%		
5	1	1	124436	温度	22.46°C	照度	670.29lx	なし		湿度	18.16%		
6	1	1	124441	温度	22.45°C	照度	670.39lx	なし		湿度	18.16%		
7	1	1	124446	温度	22.44°C	照度	670.29lx	なし		湿度	18.16%		
8	1	1	124451	温度	22.42°C	照度	670.48lx	なし		湿度	18.16%		
9	1	1	124457	温度	22.42°C	照度	670.39lx	なし		湿度	18.27%		
10	1	1	124502	温度	22.4°C	照度	670.39lx	なし		湿度	18.19%		
11	1	1	124507	温度	22.39°C	照度	670.39lx	なし		湿度	18.22%		
12	1	1	124512	温度	22.39°C	照度	670.29lx	なし		湿度	18.27%		
13	1	1	124517	温度	22.37°C	照度	670.39lx	なし		湿度	18.26%		
14	1	1	124523	温度	22.36°C	照度	670.39lx	なし		湿度	18.31%		
15	1	1	124528	温度	22.34°C	照度	670.39lx	なし		湿度	18.45%		
16	1	1	124533	温度	22.33°C	照度	670.39lx	なし		湿度	18.23%		
17	1	1	124538	温度	22.33°C	照度	670.39lx	なし		湿度	18.21%		
18	1	1	124543	温度	22.31°C	照度	670.29lx	なし		湿度	18.21%		
19	1	1	124549	温度	22.31°C	照度	670.48lx	なし		湿度	18.26%		
20	1	1	124554	温度	22.31°C	照度	670.48lx	なし		湿度	18.27%		
21	1	1	124559	温度	22.31°C	照度	670.39lx	なし		湿度	18.27%		
22	1	1	124604	温度	22.3°C	照度	670.29lx	なし		湿度	18.21%		
23	1	1	124610	温度	22.27°C	照度	670.39lx	なし		湿度	18.24%		
24	1	1	124615	温度	22.26°C	照度	670.39lx	なし		湿度	18.26%		

図 V.1.4.1.18 測定履歴数値表示画面

・測定値のグラフ表示

モジュール毎の複数センサの測定値を、グラフ形式で表示する。

Y 軸目盛はセンサ初期設定で、X 軸は本画面右上で設定する。

グラフが画面右端に到達すると、スクローリングが始まる。グラフの一部を選んで、拡大表示する機能を追加した。



図 V.1.4.1.19 測定値グラフ表示画面

1 1) イベント対応型の試作

環境条件計測の定周期型のほかに、ワークの移動、ドアの開閉、人の移動などを捕らえて、所望の対応（例えばダウンフロー量の変更、照明の ON/OFF など）をするには、変化を捉えて遅滞なくサーバに伝えるイベント対応型のセンサモジュールが必要と考えられる。このため、3 軸加速度センサ、フローセンサを搭載可能で、常時センサに通電し、所定の値を超えるとサーバ画面に表示する、イベント方式のモジュールを試作した。センサに常時通電のため、大きな電池を搭載し、実用性を考えて非接触充電機能を付加した。サーバへの通報はイベント発生後 5 秒以内に完了する。通報までの間に複数回のイベントが発生すると、閾値超え量が最大のセンサ出力を表示させるようにした。本モジュール用に 3 軸加速度センサ (ST マイクロ社の LIS3DH) を搭載し、別途 3 軸フローセンサ、差圧センサ、パーティクルセンサ接続の準備も施した。

常時通電のため、1,400mAh の大容量リチウムイオン電池と、非接触充電器を組み込んだ。



図V.1.4.1.20 イベント対応型モジュール

1 2) クリーンルームでの計測

高機能センサモジュールを、一般的な環境計測以外に応用展開する試みとして、立命館大学びわこ草津キャンパス内のクリーンルームで、パーティクルカウンタ、絶対圧力計、フローセンサを用いた測定を実施した。(モジュールの適用可否判断のため、モジュールより高速・高精度の機器を使用。)

この結果、フローセンサで人の移動を検知できることが確認できた。ただし、検知すべきフロー変動が急速なため定周期計測のモジュールではいくら計測周期を短縮しても(せいぜい数秒が限界)追従不能であり、イベント対応型のモジュールの必要性が確認された。絶対圧力計からは、有意な測定結果は得られなかった。

フローセンサとの距離を色々替え、速歩、ゆっくり移動、あるいは椅子より立ち上がるなどの動作をし、センサ波形を観測した。センサからの距離40cm程度が、早足で歩いても検出できる限界。また、波形の中は、狭いものでは0.2秒程度であった。

表V.1.4.1.8 フローセンサによる人の移動検出結果

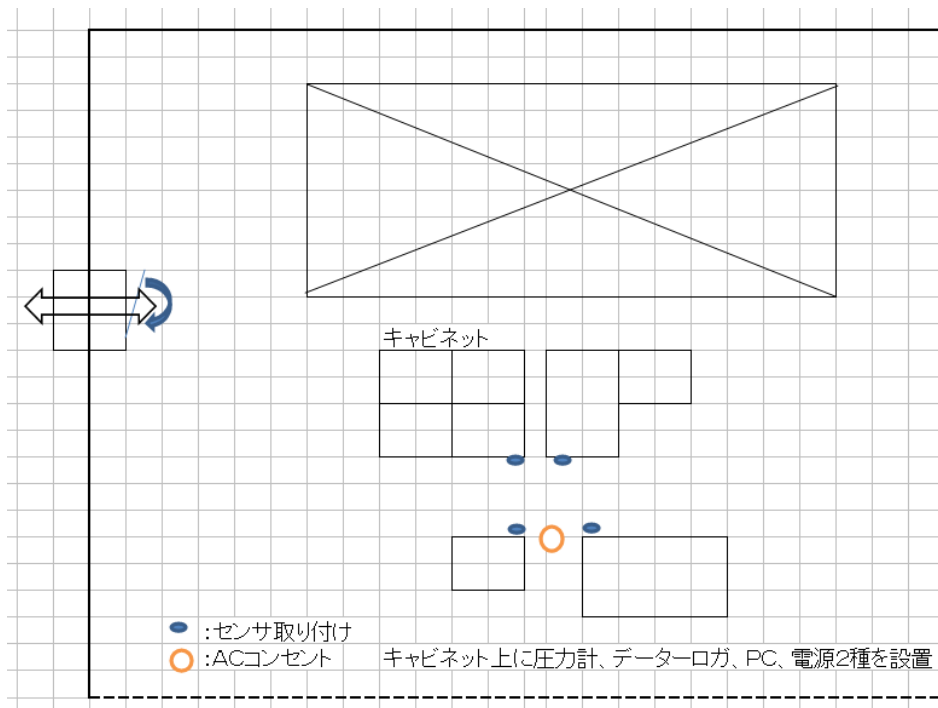
センサとの距離	速歩	ゆっくり歩行	椅子から立上る	しゃがんで立上る
20cm程度	○/3510	○/8180	×	○
40cm程度	○/4670	×/5860	×/3510	×/4670
60cm程度	×	×	×	×

/の後ろは、約1分後のパーティクルセンサ出力変化量(定常値=1160)

速歩: 約 2m/s ゆっくり: 約 1m/s

クリーンルーム内のセンサ配置を下図に、実験場風景と、センサ出力波形例を次ペ

ージ以降に示す。今回実験したクリーンルームはメッシュのない平面床であり、各ブローセンサは、床上80cmに垂直センサ、床上78cmに水平センサを一組として、下図のように4箇所に取り付けた。通路間隔は120cmであった。



図V.1.4.1.21 クリーンルーム内配置図



図V.1.4.1.22 クリーンルーム内測定現場

静止状態では、下図のようにフローセンサ出力はほとんど出ていない。紫色のグラフは、絶対圧測定器の出力であり、常時変動しているものの、その値には人の移動やクリーンルームドアの開閉による変化が認められなかった。

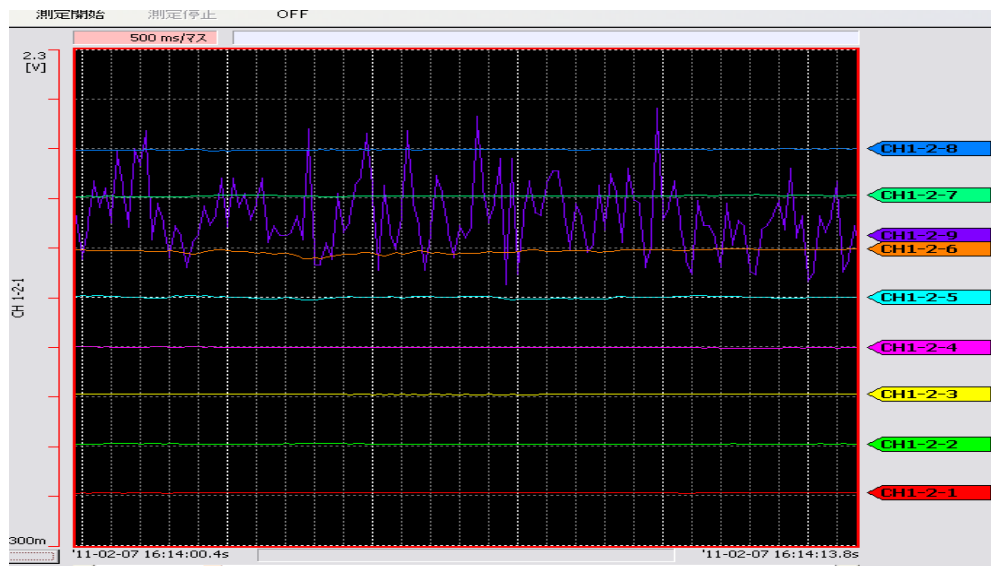


図 V.1.4.1.23 静止状態、CH-2-9（紫色）のみ圧力、それ以外はフローセンサ出力

人が移動すると、次ページグラフのように、フローセンサ出力に明らかな変化が現れた。ただし、変化が観察できるのは、センサから約 40cm 以内における移動に限られている。

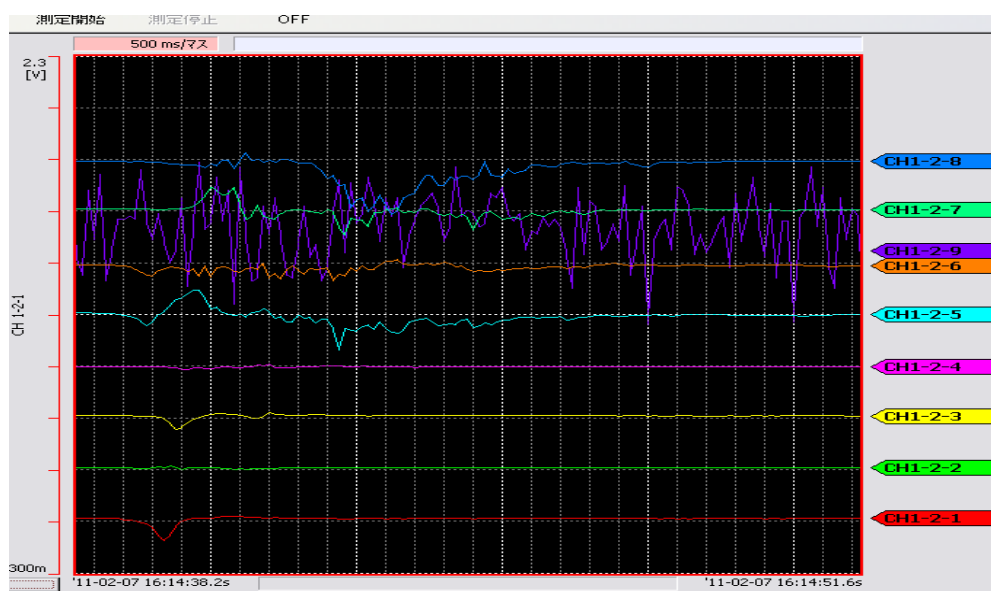


図 V.1.4.1.24 ゆっくり歩行、CH-2-9 のみ圧力、それ以外はフローセンサ出力

1 3) イベント対応型の仕様検討

前述のとおり、イベント対応型センサモジュールで検出すべきイベントは、フローセンサでもパルス幅 0.2 秒以下、加速度センサによるワークの移動や衝撃の検出だと数十 ms 以下の高速応答が求められる。このためイベント検出用のセンサは常時通電する必要があるほか、その信号を受け取る CPU も、割り込み信号発生機能のないセンサがある以上、常時通電する必要がある。しかしながら、イベント信号の用途を考えると、現状例えばパーティクルセンサによるダウンフロー制御では、パーティクルセンサ自体の応答速度が 30 秒から 1 分かかっており、瞬時の制御応答が求められるわけではない。

この点に鑑み、イベント対応センサモジュールはセンサ部の高速応答を維持しながら、上位 PC との通信については、5 秒以内の応答で確実な (=衝突の発生しない) 通信方式を採用した。具体的には、通信周期を同時にモニタすべきセンサモジュールの数に応じて、1 ないし 5 秒に設定可能とした。

イベント検出のための閾値は、当初センサ出力の生データ値としたが、設定を容易にするため、スケール変換後の単位を用いた値に改めた。

センサモジュール自体は、定周期型とは搭載するセンサが異なるものの、回路は当然同一とした。加えて、センサモジュール内のファームウェアも両方式で同一とし、上位 PC からの指示でいずれにも切り替え可能とした。

PC 用の特定小電力無線モジュール (dongle) も両方式同じものである。ついであるが、センサモジュールの ID 番号は、一次試作ではプログラムで設定していたが、2 次試作では、上位 PC から書き込む方式に改めた。この結果、各モジュールに同じファームウェアを書き込めばよくなり、作業性が大幅に改善された。

上位 PC 側では、定周期型センサモジュールとイベント対応型センサモジュールを同時に監視すべき場合が想定される。このため、両方式が同時に稼働できるように、システム設計を行った。

1 4) イベント対応型の画面

イベント対応型システムの、センサ初期設定画面を以下に示す。イベント検出ための閾値設定覧が加わっている。この閾値と、モジュールセンサ補正設定画面に入力される個別センサの閾値補正值の合計でもって、イベント発生を判定させている。

The screenshot shows a window titled 'センサ初期設定' (Sensor Initial Setting). It contains a table with the following columns: 'センサ識別No.' (Sensor ID No.), 'センサ名称' (Sensor Name), '閾値' (Threshold), '基準値' (Reference Value), '単位' (Unit), 'オフセット' (Offset), '係数' (Coefficient), '最小スケール' (Minimum Scale), and '最大スケール' (Maximum Scale). The table lists 19 sensors, with the first row (ID 0, '予備0') highlighted in blue.

センサ識別No.	センサ名称	閾値	基準値	単位	オフセット	係数	最小スケール	最大スケール
0	予備0	0	0		0	1	0	30
1	絶対圧力	0	0		0	1	0	30
2	フロー	0	0		0	1	0	30
3	UVA	0	0		0	1	0	30
4	照度	0	0		0	1	0	30
5	UVB	0	0		0	1	0	30
6	加速度X	0	0		0	1	0	30
7	なし	0	0		0	1	0	30
8	湿度	0	0		0	1	0	30
9	差圧	0	0		0	1	0	30
10	新フロー	0	0		0	1	0	30
11	パーティクル	0	0		0	1	0	30
12	予備1	0	0		0	1	0	30
13	予備2	0	0		0	1	0	30
14	加速度Y	0	0		0	1	0	30
15	加速度Z	0	0		0	1	0	30
16	予備3	0	0		0	1	0	30
17	予備4	0	0		0	1	0	30
18	予備5	0	0		0	1	0	30

図 V.1.4.1.25 イベント対応方式のセンサ初期設定場面

検出結果の表示については、定周期方式と同様である。ただし、イベント発生がない場合は、当然ながら表示データがなく、対応する数値表示の行が出てこない。イベント発生時には、閾値を超えた値、通信周期内に複数のイベントが発生した場合には、閾値を一番大きく超えた値が表示される。

グラフ表示の場合、定周期方式のような折れ線グラフにはならず、イベント発生時のみの棒グラフ状表示となる。

(3) センサモジュール試作品の評価

1) 定周期計測型高性能センサモジュール

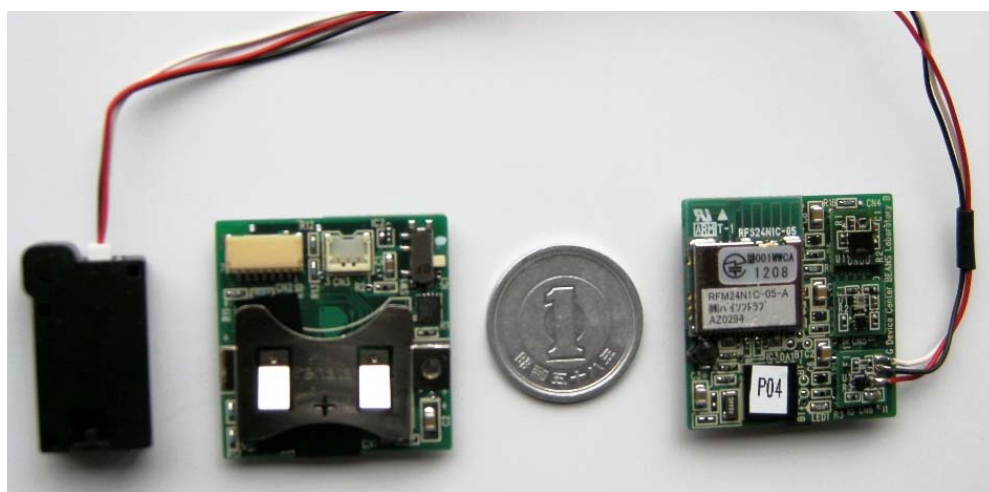


図 V.1.4.1.26 フロー、照度、温湿度センサを搭載した主基板の表裏

目標サイズのケースに、所定の機能を組み込み、測定周期 10 分間の場合で平均消費電流約 110 μ A 以下を達成した。

表 V.1.4.1.9 仕様項目ごとの結果

目標仕様	結果
①通信距離 半径10m	①半径 10m
②最大モジュール数 定周期計測時 100台 イベント対応時 50台 デモ時 10台 *定周期とイベントは、別周波数を使用	②同左 イベント対応版は、25台 毎に別周波数を使用。
③定周期計測モジュール 1、2、5、10、15、20、30、60分 デモ時 5秒,10秒,30秒 スリープなし イベント対応モジュール 5秒(固定)	③定周期モード 5~3600秒 30秒以下スリープなし。 イベントは同左
④搭載可能センサ 定周期計測 温湿度、照度、絶対圧、フロー、UV照度 イベント対応 加速度、絶対圧、差圧、新フロー、パーティクル	④同左 新規電圧出力センサも 接続可
⑤搭載電池 定周期計測 PD2032または同等品 75mAh 平均消費電流 約 110 μ A イベント対応 500mAh以上 非接触充電装置を組み込む	⑤定周期PD2032 75mAh 平均電流 約110 μ A イベント 1,400mAh 非接触充電装置組み込み
⑥使用温度、湿度範囲 15~35 $^{\circ}$ C、30~80%Rh	⑥同左
⑦外形寸法 定周期計測モジュール 30 \times 30 \times 10mm以内	⑦定周期 同左

次ページの表にこれまでの主な発表されているセンサモジュールを記す。約 30 種のセンサの中から 3 種を選んで搭載できる構成であるものはほかには類はなく、3 種多種センサを搭載可能にしたモジュールで 30mm x10t のサイズは市場初であると考える。

表V.1.4.1.10 各種無線方式センサモジュール

Developer		T社	H社	C社	M社	S社	UoC	UCLA
Target	Illumination Air conditioner Security			Distributor Retailer	Elevator, etc.		Wearable	Wearable
Stage	Prototype	Product	Product	Product	Product	Product	Prototype	Prototype
Photo								
Battery	CR2032	CR123A	AAA*2	Li-ion	CR17450	CR1632		
Wireless	License free	ZigBee	Proprietary	Bluetooth	ZigBee	Wi-Fi		
Sensors	Temperature Humidity Illumination	Temperature Humidity	Temperature Humidity Illumination	Acceleration Gyro	Temperature Humidity Illumination Pressure Acceleration	2axis Acceleration	Temperature Humidity Illumination Pressure Acceleration etc.	
Size	25*25*20	69*69*34	219*97*24	45*45*18.5	102*24.5*64	12*12*4.5	70*55*18	
Bat. Life	1 Y	1 Y	6 M	10 H	10 Y		4.5 H	

2) イベント対応型センサモジュール

同時最大 50 個のイベント対応型センサモジュールをモニタできるシステムが完成した。(26~50 個の場合は、PC 側無線モジュールを 2 個使用。) イベント検出遅れはモジュール 5 個までなら最大 1 秒間、25 個以上で最大 5 秒間となった。

3) 実用化に向けた共通課題：センサインタフェースの標準化

複数メーカーからこの種モジュールが発売され、広く普及するためには、搭載センサとモジュール主基板とのインタフェースの標準化が不可欠である。標準化が実現した暁には、用途に応じて、搭載センサ数、センサ種類、使用目的、測定頻度、使用環境、などの異なる様々な新モジュールの設計が容易になり、搭載するセンサ子基板の量産効果によるコストダウンも大いに期待できる。

標準化企画にあたって、考慮すべき点を列記する。

- ・コネクタ：今回は究極の小型化、薄型化追求のため、前記のコネクタを採用したが、着脱のしやすさ、接続の確実な維持に不安が残ることも否めない。特に、加速度センサなど振動や衝撃に曝される用途やフローセンサのように接続線を引き出す場合には、接触不良が懸念される。逆ざし防止機能がなく、センサ子基板がごく小さく方向を見誤り易いことも、取り扱いを困難にした。広範な普及のためには、より確実に接続できる方式への変更が望まれる。
- ・デジタルインタフェースの標準化：今回は、3 種類のデジタルインタフェースを持つセンサを搭載した。電圧出力式のセンサと異なり、デジタルインタフェースを持つセンサは、使用される信号の種類、伝送方式、データフォーマットがまちまちである。このため、アナログ電圧方式と異なり、試作完了後に新たなセンサを追加使用することが不可能となる。消費電力の低さ、ノイズ対策の容易化、複合・高機能センサの可能性など、デジタルインタフェースセンサへの期待は大きい。たとえ、検出対象は異なっても、主な信号端子機能、伝送方式、測定データやパラメータ設定データ型式の標準化が望まれる。そうすれば、試作完了後の新センサ追加使用が可能になり、同時に新規モジュールの設計も容易になるのは確実である。

4) 実用化に向けた共通課題：回路電圧と電池

今回は、フローセンサの仕様から、回路電圧を 3.3V とした。しかしながらその他の使用部品は、全て 3V 以下で動作可能である。電源電圧低下は直接消費電力減少に寄与するため、使用部品の動向に合わせ、回路電圧の一層の低下が望まれる。また、今回は電源回路に 22 μ F しか接続できず、内部抵抗の低い(残念ながら体積あたりの容量

も低い) 電池を採用せざるを得なかった。

モジュールの外形寸法がもう少し大きければ、数十 mF の大容量コンデンサを電源回路に付加して、内部抵抗の高い電池を使用することが出来る。(モジュール内の隙間を埋める変形した大容量コンデンサ、あるいは、モジュール内の空間に合わせた形状の電池が生産されれば、これにこしたことはない。) 将来的には、エネルギーハーベスト技術を活用した電池レス方式こそが、無線式センサモジュールの進むべき道であろう。

5) 実用化に向けた共通課題：センサ

今回採用したセンサの中には、電源電圧 3.3V、瞬間最大電流 15mA のものから、2 V 程度で動作し、消費電流も 1 μ A 程度のものまで様々である。今後のためには低電圧、低消費電流はもとより、電源投入後の応答時間の短いもの(スリープ機能を持ち、即立ち上がるものでも良い)、あるいは何らかの条件を設定することで、CPU に割り込み信号を送出できるものが望まれる。

近い将来に期待される低消費電力 LSI、新センサ原理各テーマで培った新センサ類、あるいは低消費電力の無線モジュールが出現すれば、応じて消費電流が下がることは論を待たない。

センサのスケーリングに関しては、2 次試作で個体差補正までの機能を組み込んだ。今後は、初期設定、個体差補正設定の自動化が望まれる。

6) 実用化に向けた共通課題：制御システムとの連携

今回開発したのは、各種センサ信号を収集するシステムである。その有効活用のためには、これら収集システムで得た情報を、制御系システムに引き渡す必要がある。制御側のシステムが決まれば、連携の具体化自体は容易であろう。

7) 実用化に向けた課題： 定周期型

実用化はすぐに可能と考える。実用化に向けて主な検証項目としては以下を予想する。

-) センサ、無線等をコネクタ接続方式で考えているが、実際のアプリケーションを想定すると振動等の環境の影響が懸念される。本センサモジュールで評価を進め。実用には一般的な振動・衝撃信頼性基準を十分クリアすることが前提であり、コネクタ強度の改善、あるいは固定式とすることが必要である。
-) また、メンテナンスの手間は実用に際して非常に重要である。電池の交換のしやすさ、電池を外さなくて充電可能な方式にする等の工夫が必要と考える。

8) 実用化に向けた課題： イベント対応型

今回は、センサのみならず、センサ信号捕獲のために CPU にも常時通電した。 ST マイクロ社の加速度センサチップは、センサ自体に閾値を書き込み、CPU に割り込み

信号を送る機能を持っている。イベント対応型モジュールに搭載するセンサが全て割り込み信号発生機能を持てば、CPU は通信時以外にスリープすることが可能になり、消費電力を低減することが出来る。

イベント検出にあたっては、閾値を超えたことのみを判定しているが、実用上は、閾値を下回った場合、変化量がある値を超えた場合など、様々な判定仕様が考えられる。具体的な用途に照らして、機能拡大することが望まれる。

(4) 低消費電力無線センサ端末用受信機の検討

1) 概要

本受信機は、無線センサネットワークに必要な同時多元接続と、無線センサ端末の送信時の低消費電力化を可能とする、新たに考案した受信技術の実現可能性を検証するために試作したものである。低消費電力化とは、送信電量の低減による端末の送信時間の短縮と、受信機の高感度化による端末の放射電力の低減である。本報告書では上記を実現する回路構成と動作試験を行った結果について報告する。

2) 背景と目的

無線センサ端末では、送信動作が（本受信機を用いたシステムは単方向通信を前提としている）、最も消費電力が大きい動作の1つであり、この低消費電力化は端末のメンテナンスフリー化のためには必須となる。

センサネットワークでは、端末を大量分散配置するために同時多元接続を必要としており、端末の低消費電力化のためには信号処理量の少ない FDMA(frequency division multiple access)がその手法として望ましい。これまでの受信機では、1つの受信チャンネル（周波数）を選択し、そのチャンネルの電文の復調を波高弁別法により行っている。この手法では1つのチャンネルに1つの回路を必要とすることになり、多数のチャンネルを必要とする場合には、回路規模が膨大になる。また、波高弁別法では閾値を基準として復調を行っており、閾値をフィードバック制御により調整することで感度を向上させているが、更に感度を増加させることができれば少ない放射電力で通信が行えることになり、端末の低消費電力化になる。本試作では、端末の送信時の低消費電力化と高感度同時多元接続を可能にする下記手法の実現可能性を検証する。

3) 受信方法

通常、無線通信の電文にはシンボルのタイミングや、電文内のフレーム位置を同期するための数 10bit の情報を必要とするが、本手法ではこれを 2bit の固定文とし、電文の同期、検出を行う。多元接続方法には FDMA を採用する。これらを可能にする検出方法として、所定の帯域の電波を FFT(fast fourier transform)した周波数スペクトルの時系列データを用い、上記 2bit の固定文が存在する場合に該当する条件を複数検証

する方法を用いる。

実際には、310~320MHz の受信した電波をヘテロダインで 10MHz の中間周波数にして FFT 処理し、そのデータを時系列でメモリに保存する。その時系列データから電文である可能性の高い電文開始 Frame(1 回の FFT 処理で出力された結果群)、チャンネルを下記方法により検出し、その開始 Frame から設定した電文長分の電文データを抽出する。

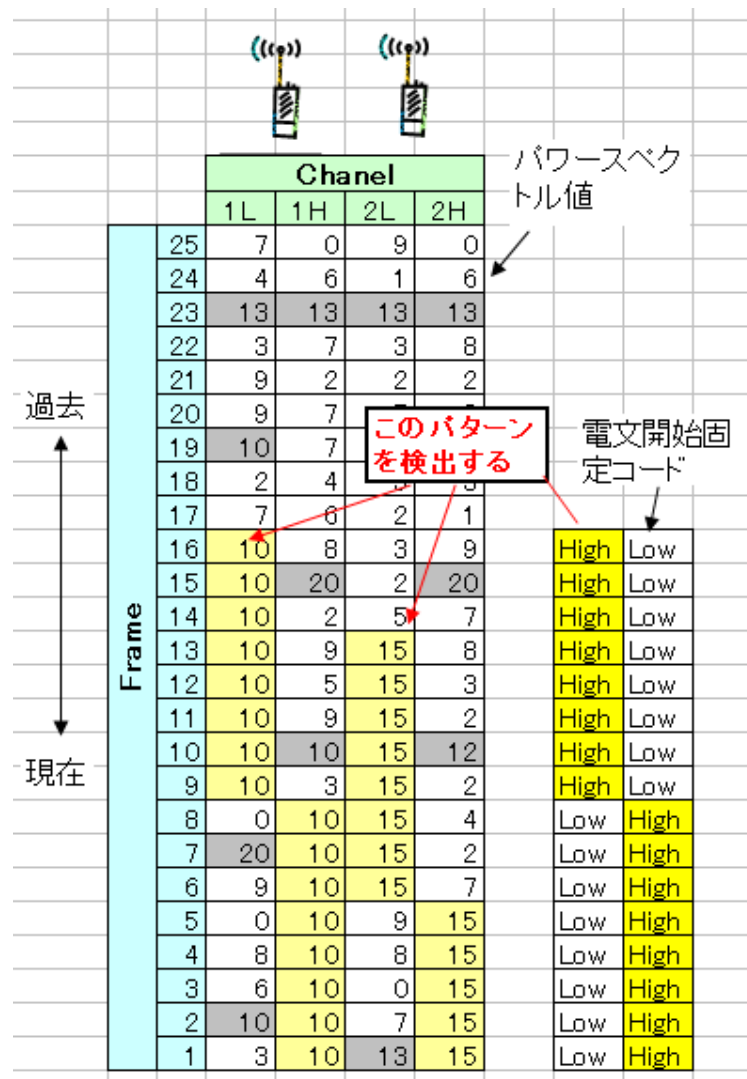
(i) 電文検出方法

・前提条件

1. 電文には開始固定コード(01)がある。
2. 各端末における送信周波数 (チャンネル) は既知である。
3. 各チャンネルには FSK(Frequency-shift keying)された信号の Low, High がある。
4. 電文は連続送信されることはない。

・検出方法

1. 受信電波を FFT し、その周波数スペクトル値を時系列で保存する。(下図参照)
2. 下図ではチャンネル 1L、Frame16 が電文開始コードの開始位置となる。例えばこの位置の周波数スペクトル値 (以下、「値」) は、このチャンネルのこれより過去の Frame の 1L の値及び 1H の値よりも高い可能性が高い。同時に、電文開始コードの他の位置 (つまり Frame9 から Frame15 の 1L、及び Frame1 から Frame8 の 1H) の値も、Frame16 より過去の Frame の 1L の値及び 1H の値よりも高い可能性が高い。これら電文開始コードの計 16 位置の値それぞれを、Frame17 から Frame32 の 1L と 1H の計 32 位置の値それぞれと比較する。この条件数は計 512 である。
3. 更に、同上電文開始コードの開始位置 (Frame16 の 1L) の値は、同じ Frame の同じチャンネルの相対する FSK 周波数 (Frame16 の 1H) の値よりも高い可能性が高い。同時に、電文開始コードの他の位置 (つまり Frame9 から Frame15 の 1L、及び Frame1 から Frame8 の 1H) の値も、相対する FSK 周波数 (つまり Frame9 から Frame15 の 1H、及び Frame1 から Frame8 の 1L) の値よりも高い可能性が高い。これら電文開始コードの計 16 位置の値それぞれを、相対する FSK 周波数の値それぞれと比較する。この条件数は計 16 である。
4. このようにして、このチャンネル、この時刻に電文があるのであれば満たすであろう両条件 (上記の前提条件に基づく) をある確率以上満たす場合、その位置を電文開始位置とする。
5. 1 回の FFT 処理ごとにこれを全チャンネルについて行う。



図③-3.28 FFT した周波数スペクトルの時系列データと検出方法

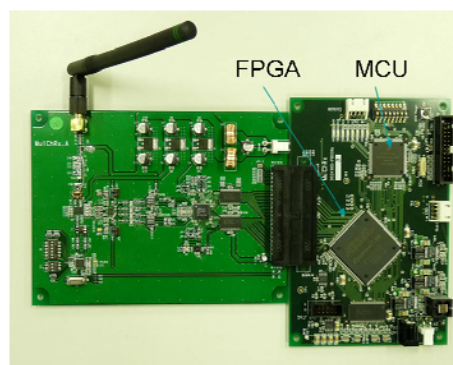
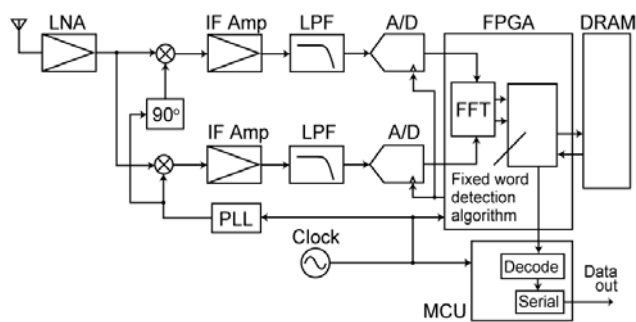
(ii) 電文復調方法

1. 電文は電文開始コードを含め 1bit あたり 8Frame で、電文データは電文開始コードに続く。2-1 電文検出方法の、検出方法 1 項の時系列データより、電文開始位置から始まる電文開始コードも含めた 8Frame 毎に 1bit の電文データを下記 2 項に従って復調する。
2. 1bit 内の各 Frame について、それぞれ相対する FSK 周波数の値を比較し、L/H 判定する。当該チャンネルの周波数が低い側の値のほうが大きければ L とし、そうでなければ H とする。各 Frame の計 8 判定のうち、L 判定のほうが多ければ 0 とし、H 判定のほうが多ければ 1 とする。同数の場合は、この bit を含

む電文自体を誤りとする。

3. 2項及び後の受信電文検査で誤りと判定された場合、検出された電文開始位置の 2Frame 過去、1Frame 過去、1Frame 未来、2Frame 未来を、順に電文開始位置として同様に復調と受信電文検査を行う。受信電文検査で誤りが無ければその時点で、それを受信電文とする。全て誤りと判定された場合、この電文は誤りとして排除する。
4. 2項で、0 に復調された L 判定の周波数が低い側の値、及び 1 に復調された H 判定の周波数が高い側の値を、電文全体に渡り平均した値を受信信号強度とする。

(iii) 回路図と基板写真



アナログ・フロントエンド デジタル回路

図③-3.27 (a)回路図、(b)基板

(iv) 動作試験と結果

・試験方法

信号発生機 (ROHDE&SCHWARZ 製 SMU-200A) を用いて、固定文 01 をもつ電文を発生させ、受信機により受信可能かどうかを確認した。

同軸ケーブルで信号発生機と受信機を接続した場合

信号源周波数 (MHz)	信号源強度 (dBm)	受信成否	信号源強度 (dBm)	受信成否
310.3692	-35		-105	
315.1692	-35		-105	
319.7662	-35		-105	

・-105dBm 以下では受信できない場合が多かった。

信号発生器と受信機にアンテナ (Linx Technologies Inc 製 ANT-315-CW-HWR-SMA)を接続し、発信機と受信機を 1.5m 程度離して無線で受信した場合

信号源周波数 (MHz)	信号源強度 (dBm)	受信成否
310.5635	-30	
	-36	×

・受信機部分でのノイズレベルの測定は行っていない

(複数チャンネル同時に信号を同時に出す装置がないため) アナログ回路を介さず、直接デジタル信号をパソコンより入力し、4チャンネル同時に電文を入力した結果、4チャンネルで同時に受信が可能であることを確認した。

(v) まとめ

無線センサネットワークに必要な同時多元接続と、無線センサ端末の送信時の低消費電力化を可能とする新たに考案した受信方法を試験する受信機を試作し、その実現可能性があることを実証した。今後はアナログフロントエンド、デジタル部分を分けて詳細な性能試験を進める。

5) 事業化に向けた課題と今後の進め方

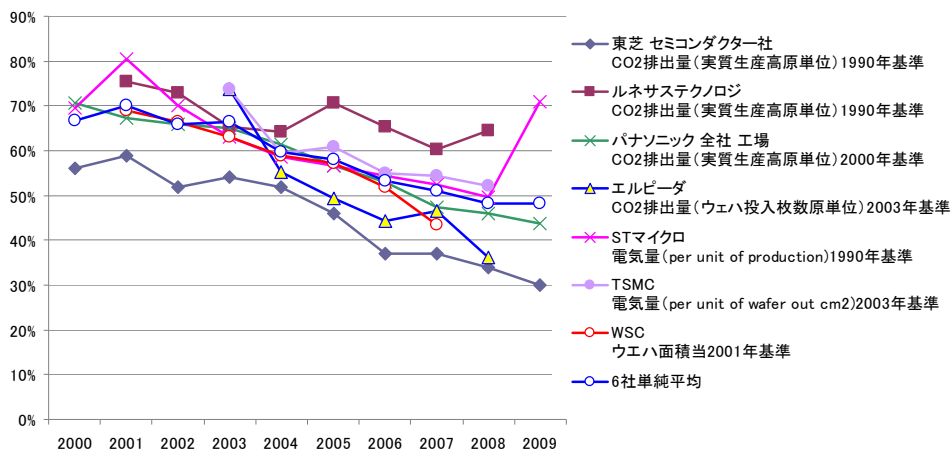
(i) クリーンルームでの市場規模、センサネットワークのアプリケーション調査

センサネットワークの事業化に向けた課題抽出に向けて、クリーンルーム、植物工場等のセンサネットワークの活用が想定されている、市場、および省エネに対する課題を明確にする必要がある。以下に高機能センサモジュールを用いたセンサネットワークが適用される想定価値のある市場調査の結果について記す。

a)消費エネルギーの推移と内訳

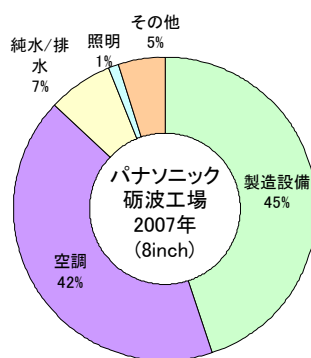
地球温暖化防止のため社会全体に省エネルギーが求められる中、クリーン・ル

ームはエネルギー多消費型の施設でありエネルギー削減が進められている。各メーカーから発表された消費エネルギーの推移を図V.1.4.1.293.1.4.1.29 に示す。基準年は企業ごとに異なるため、1990年比の値に補正している。各社排出量を低減させており、2009年では1990年比平均でおよそ5割の省エネルギー化が進められている。



図V.1.4.1.29 各メーカー発表の消費エネルギー推移 (基準年の違いを規格化)

エネルギーの内訳の例としてパナソニックの砺波工場で消費されたエネルギーの割合を図V.1.4.1.30に示した。製造設備と空調や排水などの動力設備の割合はおよそ1:1である。動力設備の中でも空調(冷凍機を含む)が最も大きく、全体に対しても42%と多い。



図V.1.4.1.30 パナソニック 砺波工場 (2007年度) 消費エネルギー割合 (出典) パナソニック 砺波工場発表資料 より

b) クリーン・ルームの省エネルギー対策

クリーン・ルームの省エネルギー対策は大きく分けて以下に分類することができる。

- 空調方式
- 熱源
- 装置

空調方式

空調方式を変更するには建屋全体の変更が必要になるため、クリーン・ルームの新設時に、新しい方式が導入される。1990 年ごろには大型のファンを使ってクリーン・ルーム全体を一括して空調を行う方式であったが、1995 年ごろから FFU を用いたユニット方式に移行し、2004 年ごろからは、必要と思われる必要最小限の部分だけに局在化してクリーン度を上げ、他の部分は循環風量を削減化する局所空調方式が用いられるようになった。必要な製造環境に応じて局所的に空気か循環し、効率的に清浄な環境を維持している。

現在では必要なクリーン度とクリーン・ルームの規模（面積）によって各種の空調方式化から適したものを選択して用いている。

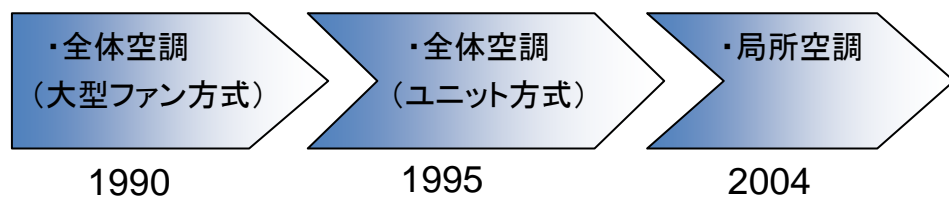


図 V.1.4.1.31 空調方式の変遷

空調が使用するエネルギーの占める割合は約 4 割（図 V.1.4.1.30）と大きく、その削減効果が大きいため空調方式を変更することで低エネルギー化が進められている。JEITA の試算では全体空調から局所空調へ方式を変更することで空調のエネルギー使用量はもとの全体空調の 40%（図 V.1.4.1.32）と大幅な省エネルギー化が推進されている。

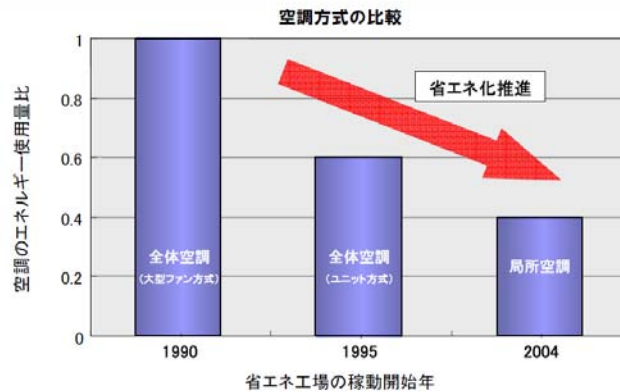


図 V.1.4.1.32 空調方式の改善による消費エネルギー低減
(出典) JEITA 発表資料より

冷熱源

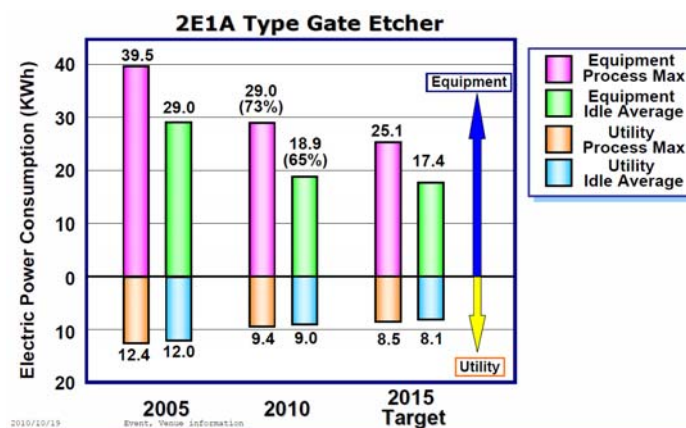
クリーン・ルーム内の装置を冷却し、室内の温度・湿度を一定に保つため、様々な冷熱源がクリーン・ルーム内に存在する。例えば、導入する外気の空調、クリーン・ルーム内で循環させる空気の手調、冷却水の生成、供給する純水の温度調節などがある。これらの冷熱源に関して廃熱の再利用、ヒートポンプやインバータなどの高効率機器の導入などにより省エネルギー化を実現することができる。

装置

装置ごとに新機種で省エネ性能の向上が進められている。装置の省エネ化を行うためにはプロセス処理時のエネルギー低減を図るとともにアイドル時のエネルギー低減を図ることが重要である。多くの装置は温度や真空度を一定に保つためにアイドル時にも処理時に近いエネルギーを消費している装置が多く、これを如何に減らすか課題である。

また、真空ポンプやチラーなどの装置のユーティリティ側でもモーターのインバータ化などによる省エネルギー化が進められている。

図 V.1.4.1.33に装置の消費エネルギーの削減例として日立ハイテクノロジーズのドライエッチャーの消費エネルギーの変遷を示す。2005年時点に比べ2010年ではプロセス処理時73%、アイドル時では65%、およびユーティリティ側では処理時で76%、アイドル時で75%の消費電力となっている。



図V.1.4.1.33 ドライエッチャーの消費エネルギーの変遷（日立ハイテクノロジーズデータ）

（出典）SEMI 2010年 省エネ座談会 発表資料より

以上の省エネルギー技術をまとめる。

- 空調方式では新たな空調方式の導入により 40%の省エネルギー化が推進されている。
- 熱源に関しては、廃熱の再利用、ヒートポンプやインバータなど高効率機器の導入が主な対策である。
- 装置では、新機種で省エネルギー性能が向上されており、旧モデル比で 50 から 70%の削減を行っている。

c) 技術動向

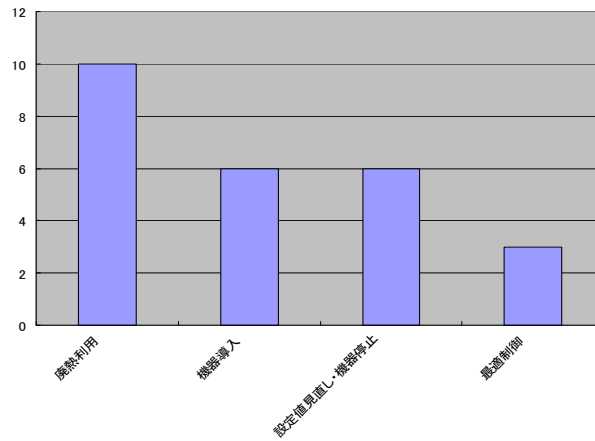
平成 20 年度に公表された各社の対策を図 V.1.4.1.34 に示す。設備の空調、水まわりが対策の中心となっている。対策は冷水・純水の水処理関係と空調が中心である。生産装置に関するものは少ない。



廃熱利用
機器導入
設定値見直し・機器停止
最適制御

図 V.1.4.1.34 対策技術マップ

対策技術の事例件数を図V.1.4.1.35に示す。「廃熱利用」の件数が最も多く、「機器導入」「機器見直し・機器停止」が続く。また、「最適制御」の件数は少ない。

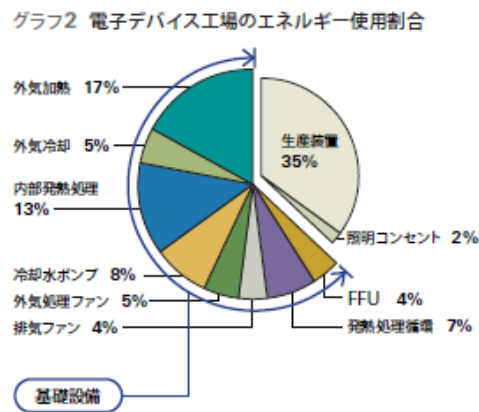


図V.1.4.1-35 対策技術

省エネルギーの対策はおもに水処理と空調の設備に対して行われており、対策技術は「廃熱利用」最もが多く、「機器導入」「機器見直し・機器停止」が続く「機器制御」は比較的少ない。

d) クリーン・ルームの排気量削減による省電力効果

図V.1.4.1.36に工場のエネルギー使用割合を示す。外気導入に伴い必要となる消費エネルギーの割合は、排気ファンで直接消費される4%と、外気導入に伴い必要となる間接的な「外気加熱」「外気冷却」「外気処理ファン」の割合17+5+5=27%の合計31%となる。排気に伴い必要となるエネルギーは、クリーン・ルームで消費される全エネルギーの31%と大きい。ガスセンサを導入することなどにより、排気量をコントロールし、排気量を削減できれば、省エネルギー効果は大きい。



図V.1.4.1.36 工場（エプソン）のエネルギー使用割合（出典）エプソン発表資料より

2) 事業シナリオと課題

- 本プロジェクトではクリーンルームの省エネルギーに向けて、クリーンルーム内の温度、湿度、風量等の環境をきめ細やかにセンシングをし、最適環境制御を行うことで省エネルギー化を実現することを目的としている。そして、
 - 1 項の検討で記載のとおり、きめ細やかなセンシング、および最適制御を行うことによって省エネルギー化がはかれることが確認できた。しかしながら、実際のビジネスにあてはめて考えると 10cm□サイズ、そして 10 万円/個以上するパーティクルセンサを細かく多数設置することはスペース、および投資の観点で現実性がない。本プロジェクトで作成したセンサモジュールは 30mm × t10mm の小型サイズでありスペースの観点では実用レベルにあると考える。また、価格についてはセンサによるが、従来センサコンポーネントに比べて、原価で一桁以上の価格に抑えることができると考えている。これは、次のことが大きく寄与していると考えている。

市販のディスクリット部品で構成していること、
約 30 種類のセンサ、無線、そしてバッテリーを差し替えできセンサ項目によらずに汎用化ができていないこと。
同一センサモジュールでも上述のとおり一定周期でのセンシング、常時センシング方式等にも対応した共通センサモジュールであり、想定される利用状況にほとんど対応できるプラットフォーム化を進めたことが 3.1.4.1.3 項記載の課題はあるが、標準品での構成、汎用性が高いために実用化に向けての障壁は低いと考えている。

- 本高機能センサモジュールはクリーンルームをはじめ、電力削減効果の大きい投資対効果の成立するアプリケーションでは早期に実用化が進むと考える。
が、以下の観点でさらなる改善が望まれる。
 - ① 電池レス化：電池には寿命があるため寿命が存在する。電池交換の工数、バッテリー切れによるセンシング動作不良等の課題がある。
このために、メンテナンスフリーであることは実用化加速に非常に重要なポイントである。
振動、照明、太陽光等の環境で発電するデバイス、あるいは環境電源からの無線給電等の技術が必要となる。

②低消費電力化

電池レス化に大きく影響するのが低消費電力化である。

センサの消費電力ばかりでなく、待機電力、処理回路の消費電力、そして、無線での消費電力トータルでの改善が重要である。

上記改善に向けては以下のような候補技術が望まれる。

- ・ センサ ・ ・ 静電容量方式等消費電力の少ないセンサ
- ・ 無線 ・ ・ センシング処理アルゴリズムによる無線送信頻度を必要最小限に行う。あるいは、センサでの送信内容を極力抑え短文での通信を行う。また、無線出力が小さくても確実にセンシング情報を拾える受信技術。
- ・ LSI ・ ・ センサネットに特化した省電力 LSI
- ・ 待機電力 ・ ・ 何らかのセンシング情報でセンサモジュールが動作するイベント起動型スイッチ

低コスト化

センサネットワークを広く普及させるためには、上記メンテナンスフリーに加えて安価であることが不可欠である。本高機能センサモジュールではディスクリート部品の組合せで共通化しており、比較的安価な構成となっている。さらなる低コスト化を進めるためには、ディスクリートではなくウェハレベルでの集積化が重要となる。8インチ、あるいは12インチ単位でのセンサモジュールの集積化をはかり、チップレベルでセンサノードとして機能することができると格段に安価なセンサノードが形成できる。将来のセンサノードのイメージを以下の図に示す。複数のセンサ、信号処理、無線、そして発電および蓄電機能を内蔵した高機能小型安価なセンサノードを目指していくことが重要である。

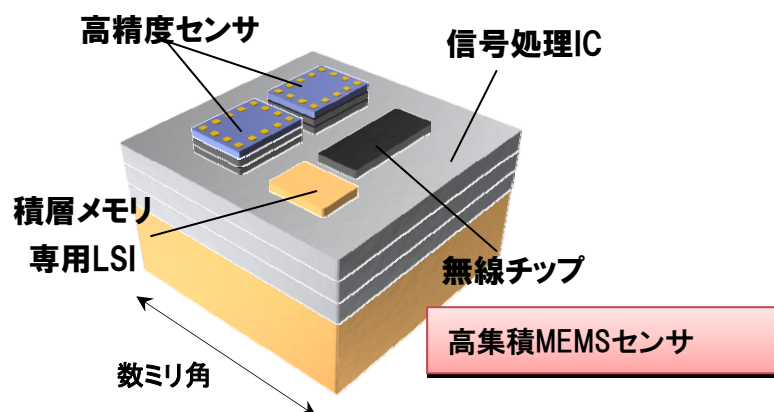


図 V.1.4.1.28 小型チップレベル高機能センサモジュールイメージ

- ・今後の事業展開について

センサネットワークの普及には、3.1.4.1.5.2 項記載のメンテナンスフリーで安価なセンサノードが不可欠である。一方、事業として考えると安価なセンサノードだけの事業は剥離多売となり携帯電話の部品に代表されるように高収益化には不向きである。センサネットワークのシステムとしての事業、そしてセンサノードは使い捨てができるようなモデルが良いと考える。

1.4.2 低消費電力 LSI

(1) 研究の目的

センサネットの実用化には、無線センサネットモジュールの消費電力低減が重要である。本研究では、無線センサモジュールを構成する要素のうち、アナログフロントエンド (AFE) 回路について、低電力化を検討した。

一般的な無線センサモジュールのブロック図を図V.1.4.2.1-1 に示す。センサからのアナログ出力を、AFE 回路で増幅し、デジタル信号に変換する。デジタル信号化されたセンサ出力をマイコンで処理し、無線信号 (RF) 回路で送信する構成である。これらの回路は、電池で駆動する必要があり、低電力動作が強く要求されるため、無線センサモジュールの間欠動作や無線送信頻度の削減等により平均消費電力を抑制することが広く行われている。

図V.1.4.2.1-2 に無線センサモジュールの一例として、センサ測定を 1 分に 1 回行い、10 分に 1 回の無線データ送信を行う場合の消費電力の内訳を示す。無線データ送信が約 4 割、マイコンの消費電力が約 4 割、センサ測定に関しては約 2 割を消費している。さらに詳細に見ると、センサ測定のうちの 4 分の 3、すなわち、無線センサモジュール全体の 15% は AFE 回路が消費している。

マイコンや RF 回路は、半導体加工技術の進歩による CMOS 回路微細化の恩恵により、低消費電力化が進んでいる。しかしながら、AFE 回路についてはマイコンや RF 回路と比較して、低消費電力化があまり進んでいなかった。これは、微細化により大きくなるトランジスタ等の素子特性バラつきに、アナログ回路はデジタル回路と比較して強く影響を受けることから CMOS 回路の微細化による恩恵を享受し難いこと、また、チップ面積 (チップ面積はコストに比例する) や測定精度は、消費電力と一般的にトレードオフの関係にあること等に起因すると考える。

本節では、無線センサモジュールの更なる低消費電力化を実現するために、チップ面積や測定精度を極力維持しつつ AFE 回路を低消費電力化する要素技術開発を行った結果を報告する。

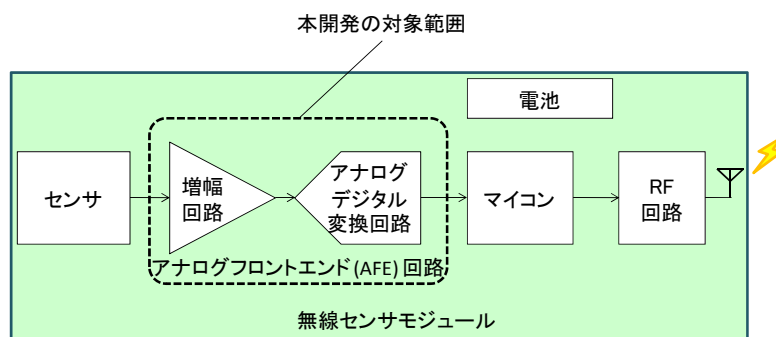


図 V.1.4.2.1-1 無線センサモジュールと本開発の対象範囲

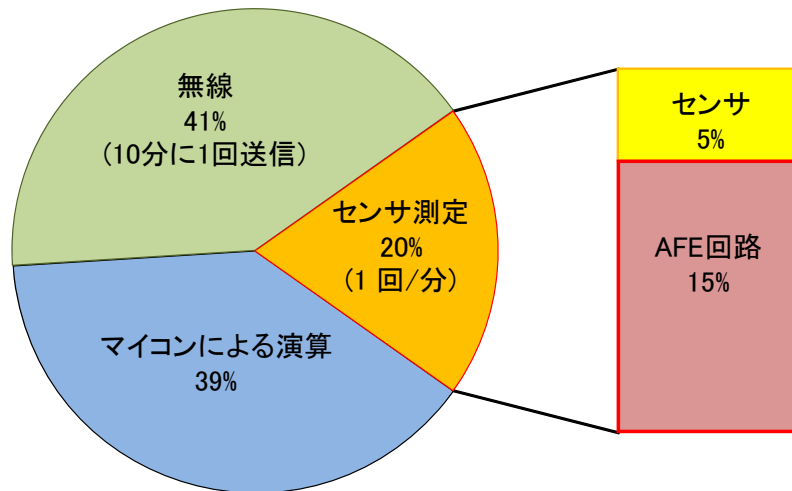


図 V.1.4.2.1-2 無線センサモジュール消費電力内訳の一例

(2) 低電力 AFE 回路の検討

1) 低電力化の方針と開発目標

AFE 回路の低電力化を実現するために、AFE 回路の動作を詳細に分析し、消費電力を削減する方針を検討した。

図 V.1.4.2.2-1 に AFE 回路の動作による消費電力の模式図を示す。横軸は時間、縦軸は消費電力であり、この図の面積が、消費電力量の大きさを表す。無線センサモジュールでは間欠動作が行われるため、待機、1 回の測定、待機、1 回の測定…を繰り返し行う。この際、待機時は極めて小さな電力しか消費しない。一方、測定時の詳細を見ると、まず増幅回路およびその他周辺回路を起動し、回路安定化まで比較的長時間を要し、この間は mW オーダーの電力を消費する。その後、アナログ信号をデジタル信号に変換する Analog-to-Digital Convertor (ADC) を、比較的短時間起動（この時間は ADC の変換速度に依存する）し、この変換に数 10 mW の大きな電力を消費している。

以上を鑑み、AFE 回路の低消費電力化へ有効と考えられる、

- (i) ADC の低消費電力化による、ピーク電力の削減 (図 V.1.4.2.2-2)
- (ii) ADC の測定時間高速化による電力消費時間の削減 (図 V.1.4.2.2-3)

の 2 つを実現可能な ADC 回路の検討を行った。

まず、ADC の低消費電力化による、ピーク電力の削減に関して述べる。図 V.1.4.2.2-2 に示すように、ADC の消費電力削減により AFE 回路全体の低電力化を実現できることは自明である。しかしながら、ADC の消費電力は、変換速度、変換精度やチップ面積とトレードオフの関係にある。変換速度や変換精度を犠牲に、消費電力は下げた場合、その汎用性は失われ、本研究のターゲットである複数種類のセンサを搭載する無線モジュールにおいて適用は難しくなる。また、チップ面積の増大は、実装面積が増えて無線センサモジュール

の小型化の阻害要因になることは勿論、チップ面積に比例して生産コストも増大してしまうことから実用的な回路にならない。そこで、本研究では、変換速度・変換精度・チップ面積を極力落とさずに消費電力を下げる回路方式について検討を行った。

次に、ADC の測定時間高速化による電力消費時間の削減について述べる。AFE 回路の消費電力は、AFE 回路を構成する各回路の消費電力と、起動時間の長さによって決まる。よって、図 V.1.4.2.2-3 に示すように、各回路の動作時間を短縮することは、AFE 回路の消費電力削減に大きなインパクトを与える。そのためには、ADC の測定に係る時間を短縮することが有効である。

以上の検討より、本研究において開発する ADC の性能目標を、表 V.1.4.2.2-1 のように定めた。

開発する ADC の測定分解能は 14 bit とし、有効 bit 数 (Effective Number Of Bits: ENOB、雑音・入力周波数を考慮した有効分解能) は 11 bit (フルスケールの約 0.05%)以上を目標とする。これは、現在の無線センサモジュールを用いたセンサネットワークシステムにおいて要求される分解能と、同等かそれより高い目標であり、実現できれば幅広い分野における無線センサモジュールで応用可能な分解能である。

また、サンプリングレートは、1 M samples/second (Msps) と、従来の無線センサモジュールで主に用いられている ADC より 10~100 倍以上の高速な仕様とした。これにより、ADC の測定に係る時間短縮による低消費電力化を狙った。

消費電力の目標は、10 mW 以下とした。本数値は、現状の無線モジュールおよびセンサ用アナログ回路の消費電力 (数 10 mW 程度) から 50%以上の削減を目指すものとして設定した。14bit 分解能、1Msps の高精度・高速動作において 10 mW 以下を実現できれば世界最高レベルの低消費電力 ADC となる。

また、無線センサモジュールの間欠動作を考慮した消費電力目標として、1 秒に 1 回の測定を行った際の平均消費電力 10 μ W 以下を設定した。これは、無線センサモジュールにおいて、将来適用が期待されている環境発電技術の動向を鑑み、100 μ W 程度の環境発電モジュールを適用した無線モジュールにおいても、本開発技術を応用可能になる目標値として設定した値である。

表 V.1.4.2.2-1 ADC の目標仕様

項目	目標値
測定分解能	14 bits
有効 bit 数 (ENOB)	11 bits 以上
サンプリングレート	1 M samples / second (Msps)
消費電力 (測定時)	10 mW 以下
消費電力(平均)	10 μ W 以下 (1 sample/sec)
回路面積	2.25 (1.5 × 1.5) mm ²

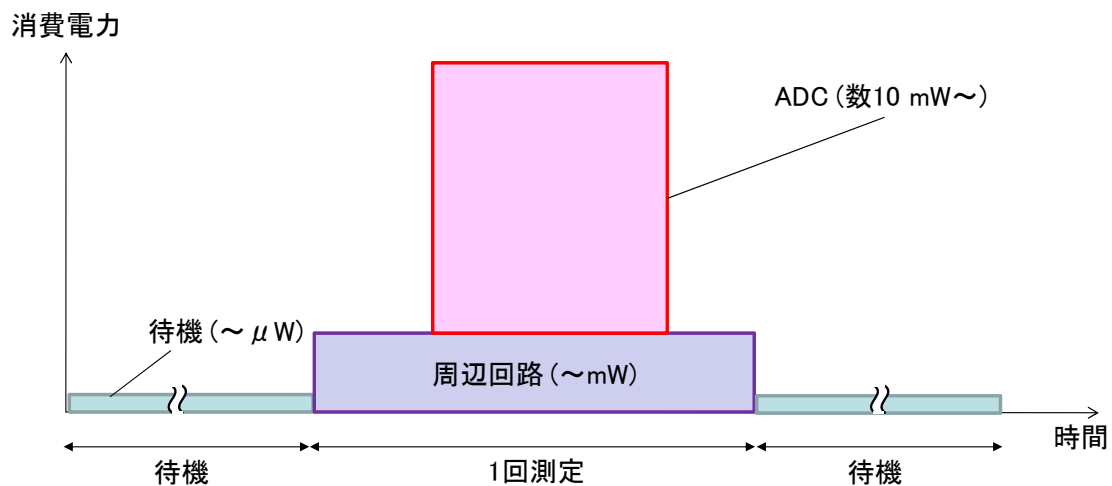


図 V.1.4.2.2-1 1回測定におけるアナログフロントエンド回路の消費電力模式図

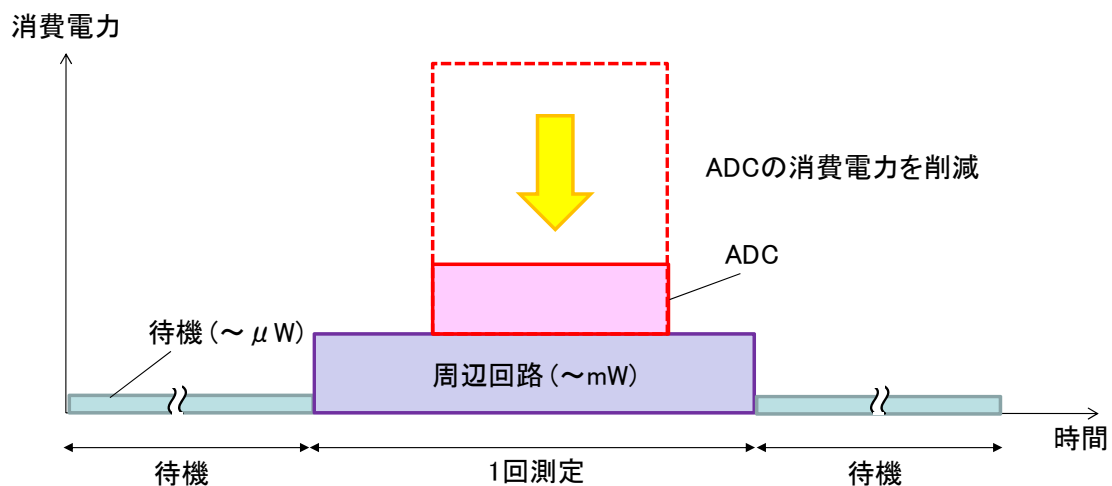


図 V.1.4.2.2-2 低電力化方針 1 : ADC 消費電力の削減

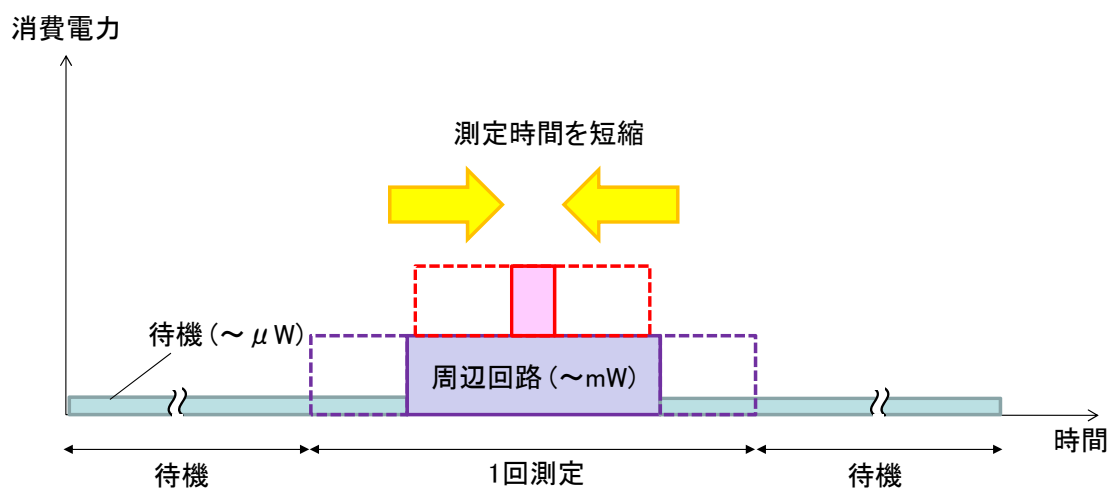


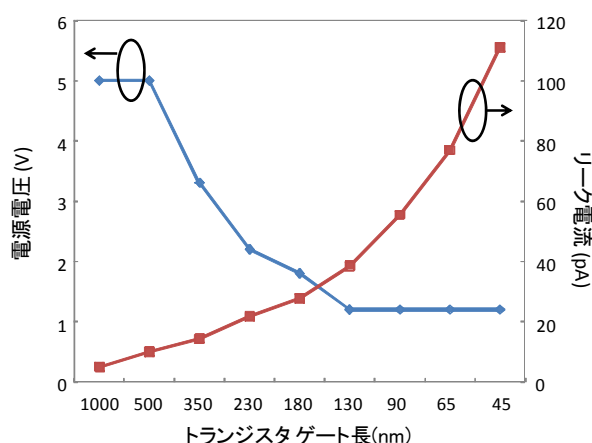
図 V.1.4.2.2-3 低電力化方針 2 : ADC と増幅回路の高速化

ただし、これらの目標値を達成したとしても、高コスト技術となつては、センサネットワークでの適用は難しい。そこで、LSIのコストを決定する主要因である回路面積について、本検討では1.5 mm×1.5 mm以内を目標とした。既存の同程度の性能を有するADCと比較しても小面積であり、パッケージング等を考慮したうえでも、本研究でターゲットとしている小型の無線センサモジュール(30 mm×30 mm)に適用可能な面積である。

2) ADCの低電圧化のためのCMOSプロセス検討

一般にADCの消費電力は、低消費電力品でも数10 mWと比較的大きい。本研究では、ADCの変換動作に係る消費電力を10 mW以下に削減することを目標に、ADCの電源電圧を低くすることを検討した。CMOS回路を低消費電力化するには、微細なトランジスタを用いて構成し、電源電圧を低くすることは有効である。ただし、アナログ回路の設計難易度は高くなる。また、微細なトランジスタを用いた場合、トランジスタがオフ状態で流れる電流(リーク電流)が消費電力を増大させることも考慮する必要がある。

図V.1.4.2.2-3に、トランジスタのサイズ(ゲート長)と、電源電圧およびリーク電流の関係例(ITRS:国際半導体技術ロードマップを基に作成)を示す。横軸にトランジスタのゲート長、縦軸に電源電圧およびリーク電流をプロットしている。電源電圧は、半導体加工技術の進化に伴い、5Vから1.2Vまで低下しているが、130 nm世代以降はトランジスタの閾値バラツキの影響により、電源電圧は下げ止まっている。一方で、リーク電流はトランジスタの微細化に伴い増大を続けている。そこで、本検討では、最も低い1.2Vの電源電圧で、かつ、その中で最もリーク電流の低くなるゲート長130 nm世代のトランジスタを用いて、ADCを設計した。



図V.1.4.2.2-3 トランジスタゲート長と電源電圧・リーク電流の関係
ITRS(国際半導体技術ロードマップ)の記述を基に作成

3) デジタル補正機能によるSAR型ADCの低電力化設計

本検討では、アナログ-デジタル変換方式として、デジタル補正技術を適用した逐次比較

(Successive Approximation Register: SAR) 型の低電力 ADC (参考文献[1])をセンサネットワーク用設計した。

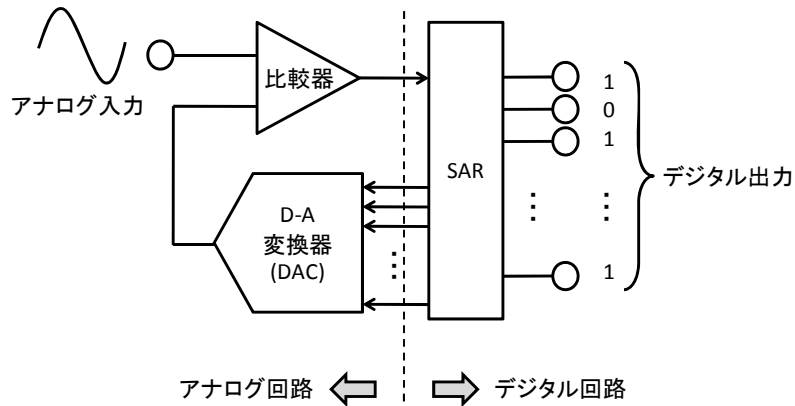


図 V.1.4.2.2-4 一般的な SAR 型 ADC の概略ブロック図

図 V.1.4.2.2-4 に一般的な SAR 型の回路の概略図を示す。SAR 型は主に、デジタル回路である SAR と、デジタル-アナログ変換器 (DAC)、比較器からなる。SAR が設定する DAC の出力電圧を変えながら、アナログ入力信号と DAC 出力電圧の最も近くなるデジタル値の探索を行う。

SAR はデジタル回路であり、微細 CMOS によっても容易に設計可能であり、低電圧駆動による低消費電力化を実現し易い。しかしながら、アナログ-デジタル変換の精度を決定する DAC を低電圧化した場合、その出力電圧に関して同程度の SN 比を維持するためには、回路定数を大きくする必要がある。

図 V.1.4.2.2-5 に DAC および比較器部の回路図を示す。一般的に、SAR 型で用いられている DAC では容量を用いて電圧を生成する。この電圧を生成するための総容量値 C_s は、DAC の出力電圧精度に対する、容量値の加工バラつき、および、熱雑音、の影響を鑑みて決定する必要がある。

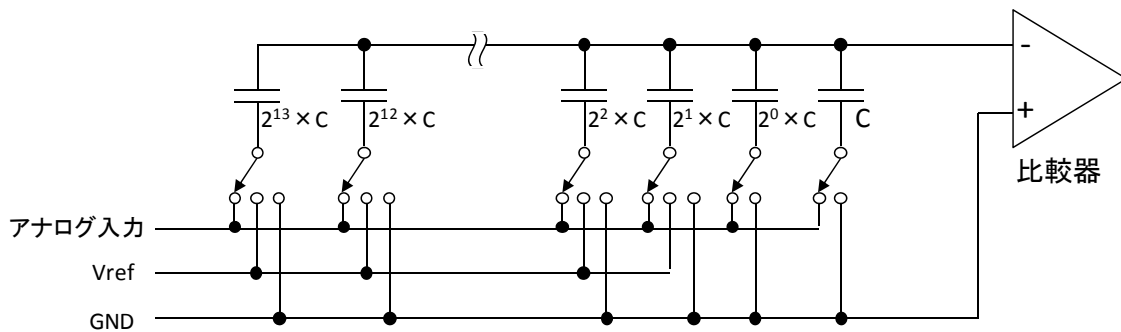


図 V.1.4.2.2-5 SAR 型 ADC で用いる DAC の回路図

ここで、絶雑音と、本検討で用いる DAC の最小電圧を比較すると、電源電圧 V_{dd} は 1.2 V、14 bit の差動入力の ADC の場合、ボルツマン定数を k 、温度 T を室温程度、とし、

$$\sqrt{\frac{2kT}{C_s}} < \frac{2 \times V_{dd}}{2^{14} \times 2\sqrt{3}} \quad C_s > 6.2 \text{ (pF)} \quad (\text{式 : 1.4.2-1})$$

となる。

次に、容量の加工バラつきを考える。容量の加工バラつきは、LSIの製造プロセスに依存する数値であり、一概には言えないが、例えば参考文献[2]で用いられている実測から得られた値を適用した場合、容量値のバラつきとDACの精度を比較すると、

$$\frac{\Delta C_s}{C_s} (3\sigma) = \frac{6 \times 10^{-4}}{\sqrt{C_s}} < \frac{1}{2^{14}} \quad C_s > 97 \text{ (pF)} \quad (\text{式 : 1.4.2-2})$$

となる。式 1.4.2-1 および式 1.4.2-2 を比較すると、容量の加工バラつきが、容量値を決定するうえで支配的な要因となっていることがわかる。

上記より、非常に大きな容量値が 14 bit の SAR 型 ADC を設計するうえで必要になることがわかる。しかしながら、大きな容量値が必要であることは、その充電に必要な電力も大きくなるため、消費電力の増大を意味する。また、チップ面積も大きくなり、小型センサモジュール実現の障害となるうえ、コスト増大することも意味する。

そこで、本検討では、デジタル回路とソフトウェアにより容量の加工バラつきを計算により補正する方式(参考文献[1])を適用した。実現できれば、熱雑音のみを考慮した容量値(式 1.4.2-1)を選定できるため、消費電力およびチップ面積の大幅低減を図れる。

図 V.1.4.2.2-6 に検討したデジタル補正機能付きの SAR 型 ADC のブロック図を示す。入力部に、同一のアナログ入力信号に対して、オフセット電圧± を印加した変換結果のデジタルコード D_i^* を出力する機能を追加した。入力信号を V_{in} 、変換結果の各 bit に対する重み係数を W_i とすると、入力と出力信号の関係は、

$$\begin{aligned} V_{in} + \Delta &= \sum_{i=0}^{N-1} W_i \cdot D_i^+ + W_{OFS} \\ V_{in} - \Delta &= \sum_{i=0}^{N-1} W_i \cdot D_i^- + W_{OFS} \end{aligned} \quad (\text{式 : 1.4.2-3})$$

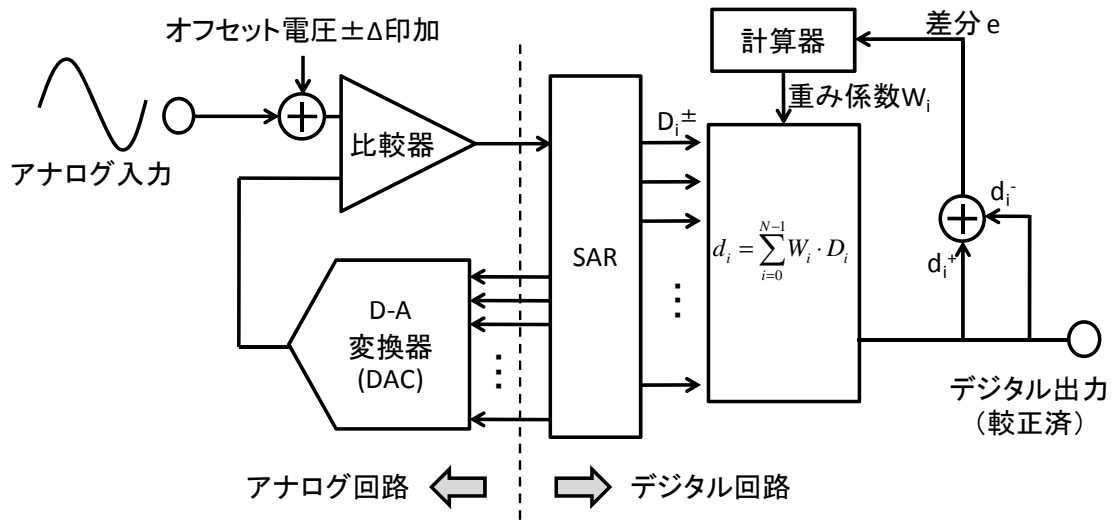
と表すことができる。ここで、もし DAC が理想的であれば、右辺の第一項は等しくなるはずであり、2 式の差は定数となるはずである。しかしながら、実際には加工バラつきに起因する誤差が存在する。そこで、式 1.4.2-3 の 2 式の差（オフセットは省略）を e と置き、

$$e = \sum_{i=0}^{N-1} W_i \cdot D_i^+ - \sum_{i=0}^{N-1} W_i \cdot D_i^- \quad (\text{式 : 1.4.2-4})$$

この e がゼロになるような W_i の値を探索し、アナログ-デジタル変換に用いるようにすれば、DAC の誤差を補正した出力が得られることになる。 W_i の探索については PC やマイコン上で計算することで容易に実現することが可能である。

上記のデジタル補正機能付きの SAR 型 ADC を用いることで、DAC 容量を 90% 以上減らすことが可能であり、その結果、消費電力およびチップ面積の点でセンサネット向けとし

て優れた性能を有する ADC を実現可能な設計見通しを得た。



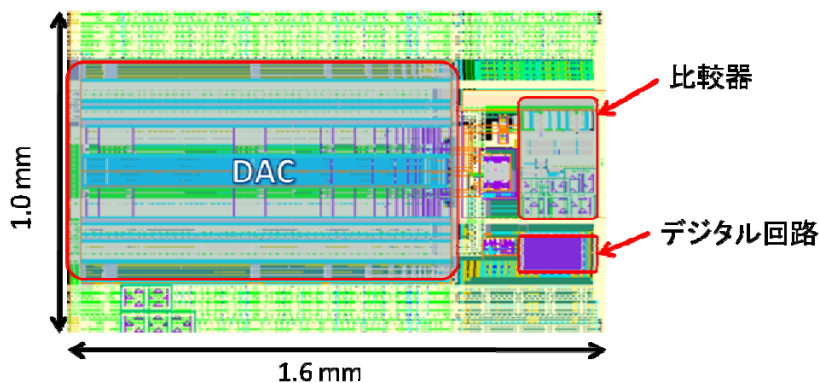
図V.1.4.2.2-6 デジタル補正機能付き SAR 型 ADC のブロック図

4) 設計結果

(1) で述べた目標仕様を踏まえ、(2) (3) で述べた低電力 ADC の検討結果に基づき設計した低電力 ADC のレイアウト設計結果を図V.1.4.2.2-7に示す。

本 ADC の動作電圧は 1.2 V で、測定分解能は 14 bit である。レイアウト設計結果を踏まえたシミュレーションの結果、サンプリングレート 1 Msps における消費電力は 3.0 mW 程度である。このように、高速・高精度な ADC を、デジタル補正機能により、実効面積で $1.6 \times 1.0 \text{ mm}$ と非常に小面積で実現することができた。

センサネット用の AFE 回路に用いるものとして、十分な性能を有する ADC を設計できたと考える。



図V.1.4.2.2-7 デジタル補正機能付き SAR 型 ADC のブロック図

(3) 低電力 AFE LSI の試作検証

検討したデジタル補正 SAR ADC によるセンサネット用 AFE LSI を試作し、低電力化効果

の検証を行った。試作した LSI のブロック図を図 V.1.4.2.3-1 に示す。無線モジュールに搭載し、センサを接続した状態を検証できるように、前項で設計した ADC に加えて、下記の周辺回路を設計、集積化した。

- ・動作クロックを生成する回路
- ・必要な電圧（基準電圧、電源電圧）を生成する電圧生成回路
- ・マイコンと接続するためのデジタルインターフェース回路等を構成するロジック回路
- ・センサからの入力信号のゼロスパン調整回路（Programmable Gain Amp (PGA)と 8 bit の DAC で構成）

また、センサは 4 つまで同時に接続できるようにし、マルチプレクサ（MUX）で信号を選択している。

図 V.1.4.2.3-2 に試作した LSI チップの光学顕微鏡写真（表面状態の観察のため、表面の保護用ポリイミド膜を除去して撮影）と、評価のためにパッケージングした状態の写真を示す。なお、チップ写真中、白枠で囲んでいない部分については、未使用領域か、もしくは動作テスト用の回路領域である。一般的な LSI ファウンダリの 0.13 μm プロセスルールで試作した。

LSI の評価は、専用の評価用回路基板を用いた評価系（図 V.1.4.2.3-3）を構築して行った。図 V.1.4.2.3-3(a)は LSI 特性の詳細評価用基板である。基板上に、高精度評価に必須となる、入力アナログ信号のノイズ・歪みを除去するフィルタ、静特性評価用の高分解能電圧生成回路等を搭載しており、ロジックアナライザ等の測定器と組み合わせることで、14 bit 分解能の ADC 特性を評価可能な高精度評価用基板である。また、実際の無線センサモジュールに近い回路構成で消費電力等を評価するための小型評価用基板（図 V.1.4.2.3-3(b)）も作製した。

以下、評価結果について述べる。

図 V.1.4.2.3-4 にデジタル補正 SAR ADC の出力スペクトル測定例を示す。 V_{pp} 2.16 V（フルスケールに対して 90%の V_{pp} ）、周波数 1 kHz のサイン波を入力信号に用い、デジタル変換出力値をロジックアナライザで取り込み、PC 上でデジタル補正を行った。デジタル補正の前後で FFT 解析したスペクトルから Signal to Noise plus. Distortion Ratio (SNDR)を見積り、ENOB を求めた結果、デジタル補正前は ENOB 10.1 bit (SNDR 62.4 dB) 程度であった。それに対し、デジタル補正後は、ENOB 11.7 bit (SNDR 72 dB)であり、測定精度が 1.6 bit（約 3 倍）改善している（デジタル補正後のスペクトルには、測定系起因と見られる AM 変調性ノイズがスペクトル中に現れており、このノイズが改善されることを仮定した。このノイズが改善しない場合は、ENOB 11.4 bit (SNDR 70.1 dB)となる）。その他、測定条件を変えて検証を行い、ほぼ同等の特性を得られることを確認できた。

表 V.1.4.2.3-1 に SAR ADC の評価結果のまとめを示す。実測から、測定時の消費電力は 2.5 mW 程度であった。これは、目標値 10 mW に対して大幅に削減できている。その他の項目も、概ね設計通りの値が得られ、目標性能通り、もしくは目標を上回る結果が得られた。

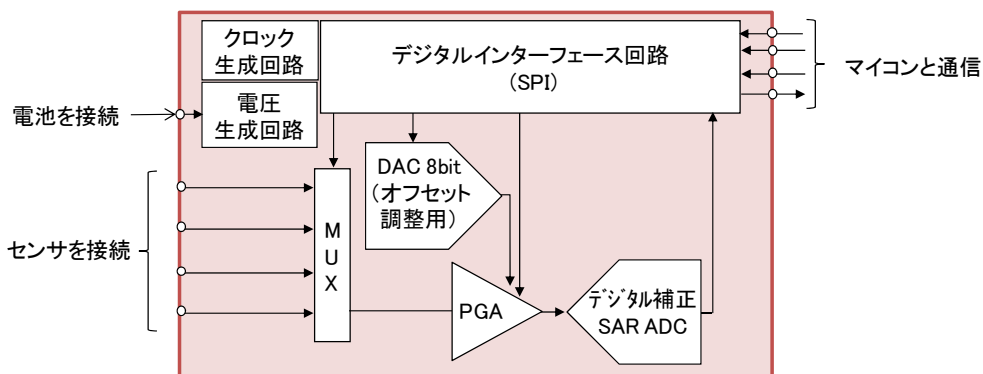


図 V.1.4.2.3-1 ADC 低電力効果検証用 AFE LSI のブロック図

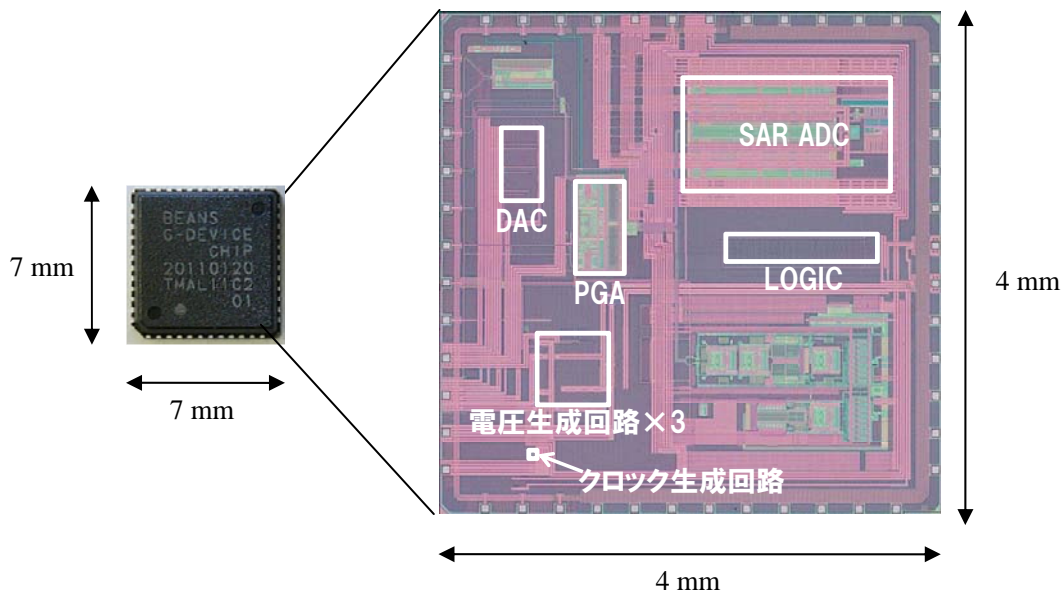
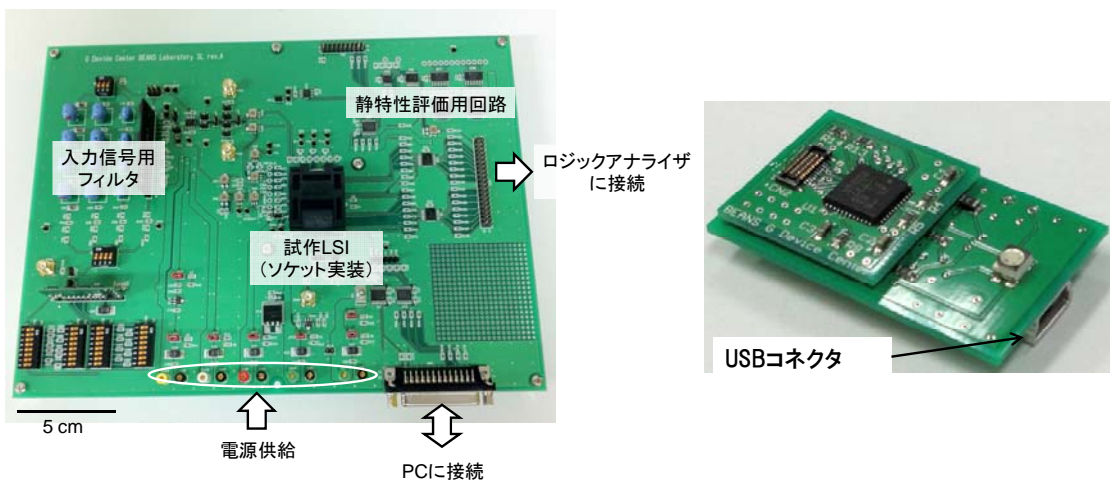


図 V.1.4.2.3-2 試作した AFE LSI 左：パッケージング後の写真、右：チップの光学顕微鏡



(a) ADC 特性精密評価用基板
(270 × 200 mm)

(b) センサモジュール動作
模擬評価用小型基板 (22 × 36 mm)

図 V.1.4.2.3-3 本検討で構築した AFE LSI の評価系

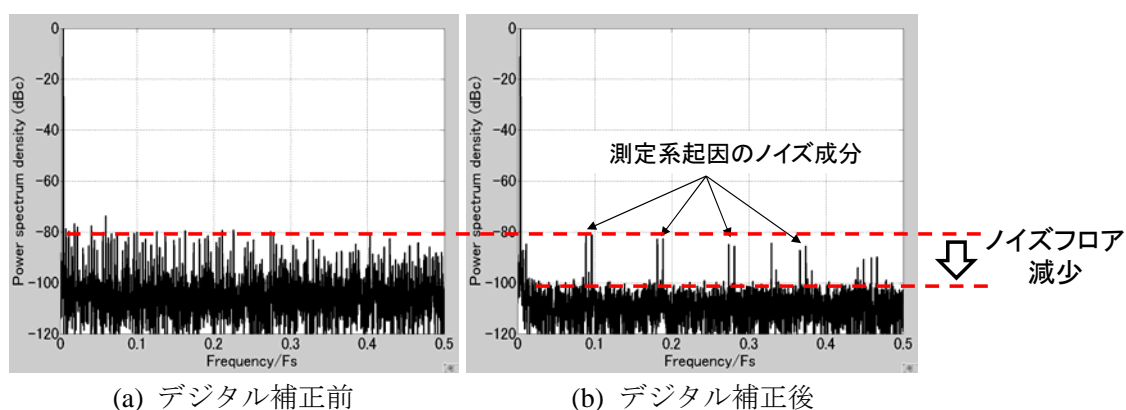


図 V.1.4.2.3-4 デジタル補正前後における SAR ADC の測定スペクトルの比較

表 V.1.4.2.3-1 デジタル補正 SAR ADC の評価結果

項目	目標値もしくは設計値	性能値 (実測)
動作電圧	1.2 V	1.2 V
サンプリングレート	1 Msps	1 Msps
分解能	14 bits	14 bits
有効 bit 数(ENOB)	11 bit 以上	11.7 bits
消費電力 (測定時)	10 mW 以下	2.5 mW
回路面積	2.5 mm ² 以下	1.6 mm ²

これらの検証結果より、無線センサモジュールに十分な精度 11.7 bit と測定速度 1Msps の測定性能を有しつつ、3.0 mW という非常に低消費電力な ADC を 1.6 mm² の小面積で実現できたと考える。

最後に、平均消費電力を見積もるために行った、AFE LSI の各ブロックの消費電力の測定結果を表 V.1.4.2.3-2 に示す。なお、PGA については、LSI の構成上、単独での正確な値の実測は不可能であるため、回路シミュレーション結果から見積もった値を記載している。表 V.1.4.2.3-2 を基に、各回路の起動後の安定待ち時間は 0.5~2 msec 程度、変換動作時間を表 V.1.4.2.3-1 に記載のサンプリングレート 1Msps から約 1 μsec と仮定すると、表 V.1.4.2.3-2 から 1 秒間に 1 回の測定を行う間欠動作時の平均消費電力は、概ね 5~10 μW 程度になると見積もることができ、目標の 10 μW 以下を達成すると考える。

なお、平均消費電力は、周辺回路の起動・安定待ちに費やす時間に強く依存していることから、起動時間短縮化による削減の余地を残しており、今後の検討課題であると考え。

表 V.1.4.2.3-2 AFE LSI を構成する ADC 以外の各回路ブロックの消費電力

	動作時の消費電力 (mW)
ロジック回路	0.0
電圧生成回路	1.2
クロック生成回路	0.2
DAC	1.3 (最大出力時)
PGA	2.5 (シミュレーション値)
合計	5.2

(4) まとめ

センサモジュールのアナログフロントエンド (AFE) 回路を低電力化するために、低電圧 (1.2V)、高速サンプリング動作の ADC 回路技術を開発した。動作時消費電力 2.5 mW、サンプリングレート 1 M sample/sec、有効 bit 数 11.7bit のデジタル補正機能を有する逐次比較方式の ADC を、回路面積 1.6 mm² (一般的な同等性能の ADC と比較して 90%以上の削減) の小面積で開発し、試作により動作を実証した。開発した ADC を適用することで AFE 回路の、1 秒間に 1 回の測定を行った場合の平均消費電力を 10 μW 以下 (従来比 60%以上の削減) にできる見込みであり、センサモジュールの長寿命化に向けたアナログフロントエンド回路の要素技術開発に成功したと考える。

(5) 参考文献

- [1] W. Liu, P. Huang, and Y. Chiu, "A 12b 22.5/45 MS/s 3.0 mW 0.059 mm² CMOS SAR ADC Achieving Over 90dB SFDR," ISSCC Dig. Tech. Papers, pp. 380-381, Feb. 2009.
- [2] 遠藤 洋輝, 宮原 正也, 松澤 昭, "マルチビット型パイプライン型 ADC の検討", 電子情報通信学会 シリコンアナログ RF 研究会(RF), 京都, vol. RF2006-1, p. 3, May 2006.

1. 4. 3 新センサデバイス原理

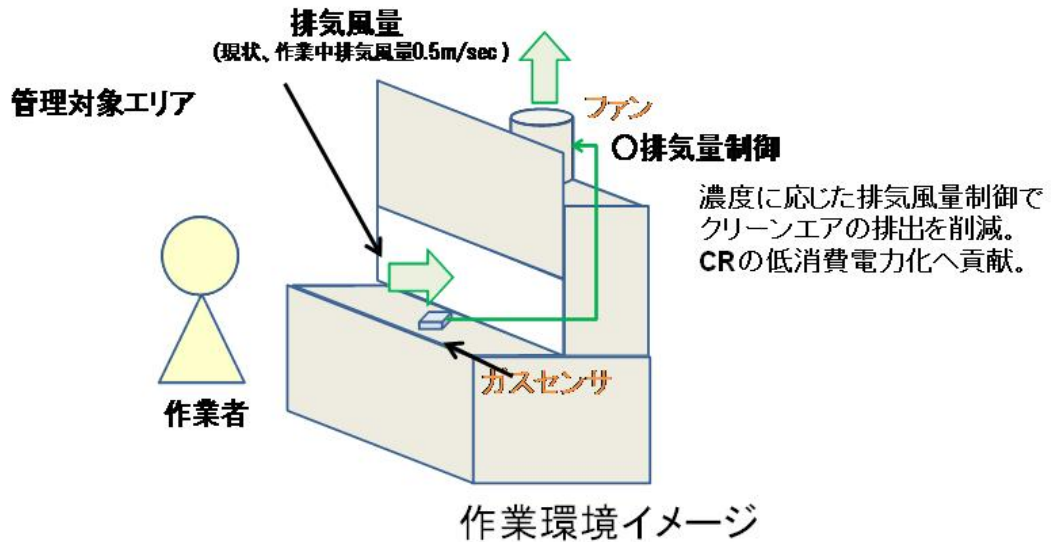
(i) ナノ構造ガスセンサ

()-1 研究の目的

粒状の物質に最密充填構造を取らせると高表面積、高密度等の優位性を示すことから、微粒子の自己整列構造を利用したデバイス^{1),2)}及びプロセスが盛んに研究されている、微粒子の自己組織化現象を利用したプロセスと移流集積法があげられる。移流集積法は懸濁液と呼ばれる固体粒子が分散した溶液に基板を浸漬させる。このような懸濁液に分散させる材料を変えることで、配列材料を変えることが可能であり、さまざまな材料への展開が期待できる。また、基板を懸濁液に浸漬させるプロセスであるので、比較的簡易な装置構成、基板の一括処理が可能で低コストプロセスが期待される。これらの微粒子を3D構造に配列することができれば、膜厚の制御性向上やフラットな基板と比べて表面積の増大、微細流路デバイスへの応用といった可能性が期待される。この為、研究開発項目「3次元ナノ構造形成プロセス技術の開発」(2)異種機能集積3次元ナノ構造形成技術(2)-1 3次元構造への選択的機能性ナノ構造修飾技術において、H21年度は移流集積法を利用し3D構造体(トレンチ形状)を形成した基板に粒子配列を試み、トレンチの側壁のみにポリスチレン粒子を配列する事が可能であることを示した。また、酸化亜鉛(ZnO)粒子のトレンチ構造への埋め込みを行うことに成功はしたものの、その性能を十分に確認するには至らなかった。また、H22年度Gデバイスではクリーンルーム(CR)の低消費電力化を行い低環境負荷・グリーン化を目指している。低環境負荷CRへのガスセンサの貢献方法として、CR内で運用されるドラフトチャンバー及びその周辺的气体モニタリングがあげられる。ドラフトチャンバーは薬品を使用した場合にその薬品が作業員へ被曝することを防ぐため、局所排気装置が取り付けられており常に排気がなされている。作業員の安全を考慮しその排気風量には基準が設けられ、0.5m/secの風量を確保することで、作業員が薬品に被曝することを防いでいる。しかしながら、CR内は温度、湿度をコントロールした精密空調及び、パーティクル管理がされたクリーンエアである。エネルギーを消費し作製したエアを常に排気し続けることは、エネルギーを無駄に排出していることに他ならない。このため、作業中のガス濃度を検出し、ガス濃度に応じて排気風量を調節し、クリーンエアの排出量を削減することで低環境負荷CRへ貢献することができる。(図V.1.4.3(i).1.1)このような背景から本年度は

- ・CRの有機ドラフトの測定対象ガスへ対応するためのターゲットガス絞り込み

- ・トレンチヘガスセンサを作製し、センササイズの低減を、検出感度維持
- ・大面積プロセスの課題抽出



図V.1.4.3 (i) .1.1 ドラフトの環境制御イメージ

(i) -2.1 実験方法

(i) -2.1.1 ターゲットガス選定

CR に設置された有機ドラフトでのガスセンシングを行う為、労働安全衛生法第六十五条の二第二項の規定作業環境評価基準や PRTR 制度を参考にし、CR や MEMS プロセスで使用頻度が高いと考えられる有機溶媒を選定した。(表V.1.4.3

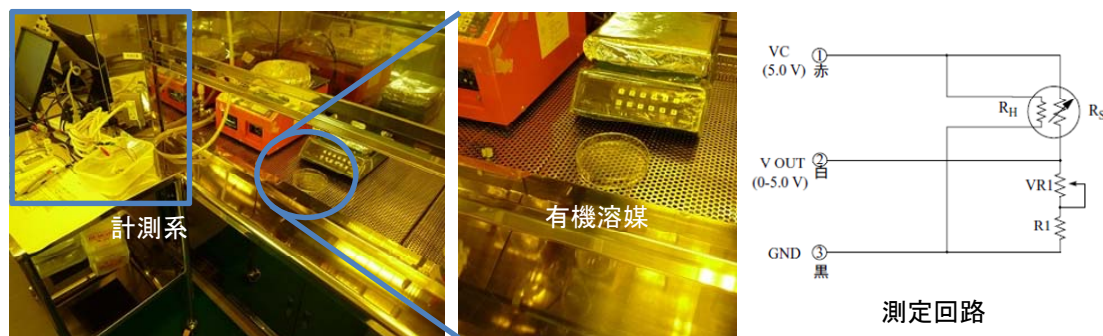
(i) .2.1)これらの有機溶媒に対して、ガスセンサ材料として検討している SnO_2 がセンサ応答をするかを、実際に有機溶媒ガスにガスセンサをさらし確認する。これにより、有機溶媒の管理が必要かつセンサ応答が確認できた有機溶媒をターゲットガスとして選定する。

表V.1.4.3 (i) .2.1 対象有機溶媒

有機溶媒	管理濃度[ppm]	法令
アセトン	500	労働安全衛生法
イソプロピルアルコール	200	労働安全衛生法
キシレン	50	労働安全衛生法
クロロホルム	3	労働安全衛生法
N-Nジメチルホルムアミド	10	労働安全衛生法
トルエン	20	労働安全衛生法
メタノール	200	労働安全衛生法
シクロヘキサン	-	PRTR
ノルマルヘキサン	-	PRTR
メチルプロキトールアセテート(PGMEA)	-	

(i) -2.1.2 実験方法

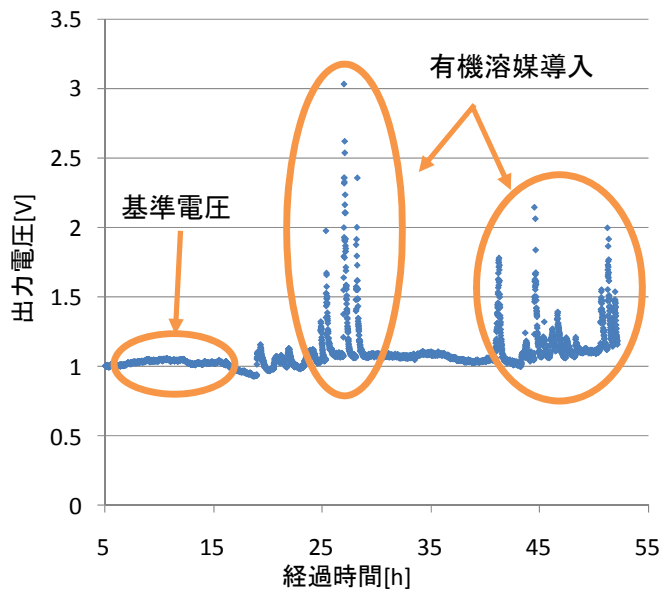
ターゲットガス選定の為、ドラフトで有機溶媒を開放し設置した SnO₂ ガスセンサで応答を確認した。実験の外観写真と、ガスセンサ測定回路を図V.1.4.3 (i) .2.2 に示す。測定回路には、印加電 5 [V]としガス導入の無い大気中の基準出力を計測し V_aとした。その後、表 1 に挙げた有機溶媒を開放して、その都度 V_gを計測し SnO₂ で出力変化が発生するか確認した。



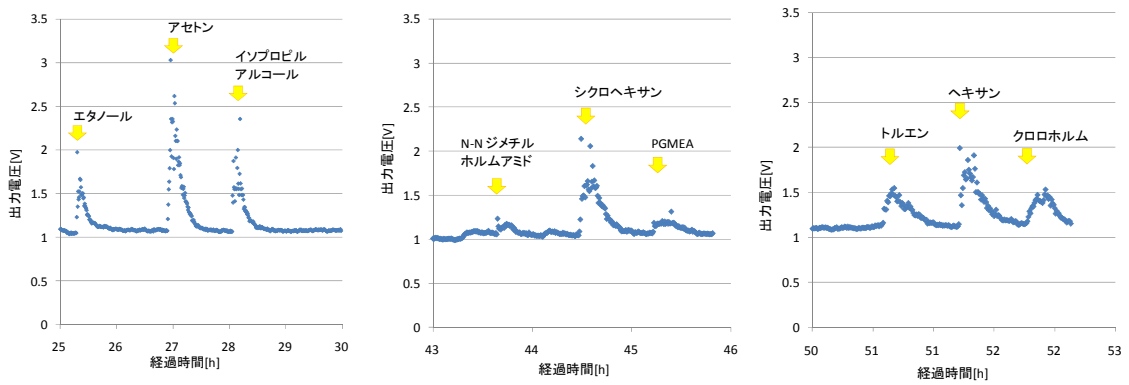
図V.1.4.3 (i) .2.2 実験外観写真及び測定回路

(i) -2.2 実験結果

SnO₂ ガスセンサでの各有機溶媒応答を計測した結果を図V.1.4.3 (i) .2.3 に示す。基準電圧 V_a は測定の結果 1.017[V]であることが確認された。各有機溶媒を導入した場合の応答結果を図V.1.4.3 (i) .2.4 に示す。SnO₂ ガスセンサが選定した各有機溶媒中で出力変化を、



図V.1.4.3 (i) .2.3 有機溶媒導入による SnO₂ ガスセンサの応答



図V.1.4.3 (i) .2.4 各有機溶媒導入時の SnO₂ ガスセンサの応答

有機溶媒	応答結果	出力電圧[V]	Vg/Va
エタノール	○	1.973	1.939
アセトン	○	3.032	2.980
イソプロピルアルコール	○	2.355	2.315
N,N-ジメチルホルムアミド	△	1.237	1.216
シクロヘキサン	○	2.143	2.106
PGMEA	△	1.209	1.188
トルエン	○	1.536	1.509
ヘキサン	○	1.995	1.961
クロロホルム	○	1.474	1.448

基準電圧 1.017 [V]
1.5V以上の応答あり ○
1.5V以下の応答あり △
応答なし

図 V.1.4.3 (i) .2.5 有機溶媒雰囲気中の SnO₂ ガスセンサ出力

していることが確認された。また、各有機溶媒の応答結果をまとめると図 V.1.4.3 (i) .2.5 のようになる。今回選定した有機溶媒で SnO₂ ガスセンサが応答することを確認した。また、エタノール、アセトン、イソプロピルアルコール、シクロヘキサン、トルエン、ヘキサン、クロロホルムでは比較的高い応答結果となり検出し易く、N,N-ジメチルホルムアミド、PGMEA、では応答が低く検出しにくい有機溶媒であることが確認できた。

(i) -3.1 ガスセンサ作製

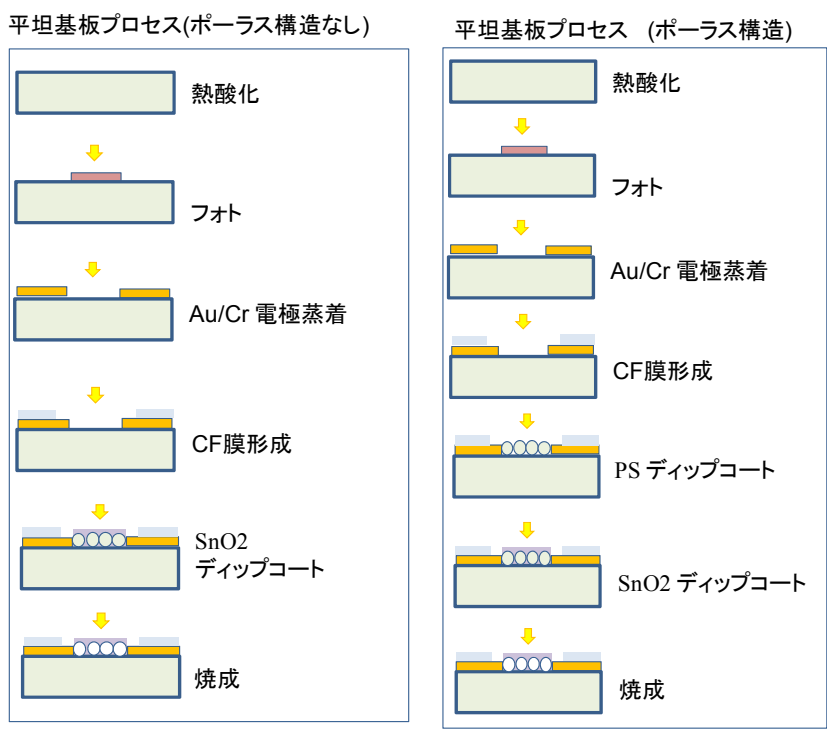
酸化錫に代表される酸化物半導体はターゲットガスと固体の表面反応を利用する為、高温での動作が必要であるが、低コストでのセンサ作製が可能である幅広く利用されている。^{3), 4), 5), 6)} 今回ターゲットガスの選定を行った中で扱い易い有機溶媒としてエタノールの評価を行った。エタノールは 3.3%~19%の濃度が大気中に混在すると爆発し、高濃度有機溶媒中のガスセンサ感度の向上は重要である。今回ポーラス化及びトレンチ埋め込みにより、センサ感度の向上効果を確認した。また一方で、懸濁液を利用した移流集積法で作製する事で、より低コストのプロセスが期待される。この事から、センササイズの低減、表面積の向上によるセン

サ性能の向上をトレンチに埋め込みポーラス化することにより確認する事を H22 年度の目的とし、またその際、ガスセンササイズの低減及びガス感度の維持を目標とする。

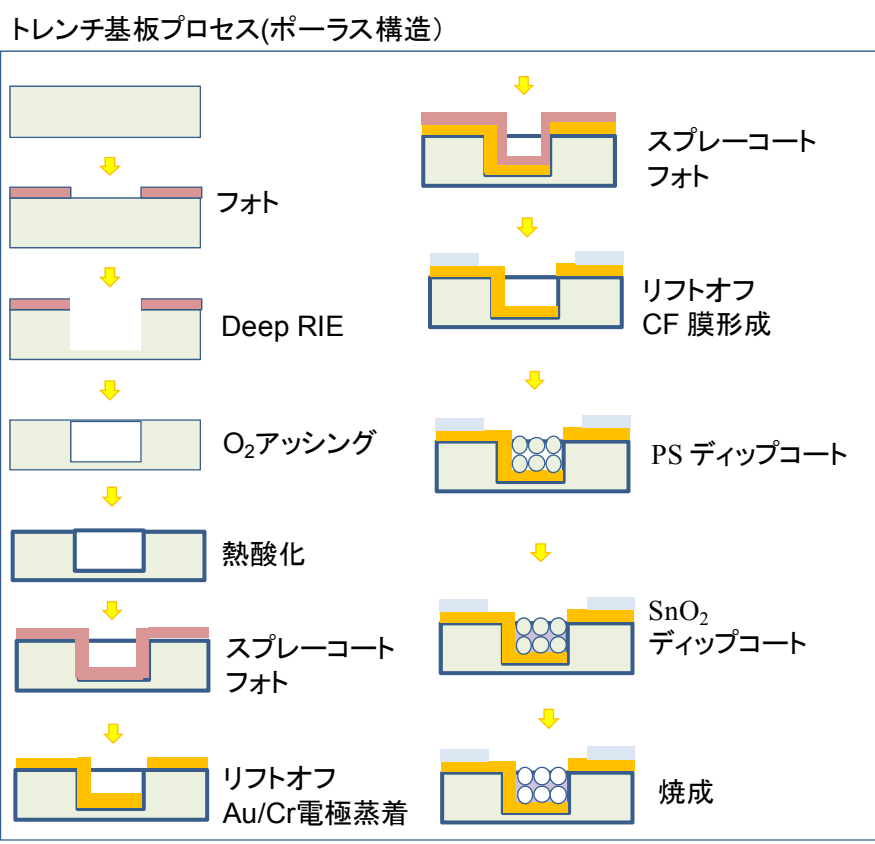
(i) -3.2 実験方法

ガスセンサ作製のプロセスフローを図 V.1.4.3 (i) .3.1、図 V.1.4.3 (i) .3.2 に示す。MEMS プロセスとの整合性を考え基板には Si(001)基板を使用した。トレンチの作製は Deep-RIE で行い、エッチング後にレジストとポリマーの除去を O₂ プラズマアッシングで行った。その後、センサを絶縁するための熱酸化膜形成を行い、基板表面及びトレンチ内に電極形成を行った。その後、ディップコーティングでパターニングを行う為の撥水膜(フルオロカーボン膜)を形成した。以上の処理を行った基板に、ポリスチレン粒子をディップコートによって充填し、その後ガスセンサである SnO₂ 粒子の充填を行った。最後にポリスチレン粒子を燃焼させ空孔の作製、及び SnO₂ 粒子の焼成を行った。

また、リファレンス用として平坦基板上に SnO₂ ガスセンサを形成した。絶縁用熱酸化膜形成し、Au 電極をリフトオフ後、パターニング用の撥水膜を形成し、SnO₂ 粒子のディップコートを行った。平坦基板に作製したガスセンサは SnO₂ 粒子単体をガスセンサとしたサンプルとポリスチレン粒子を利用してポーラス構造を作製したガスセンサを作製した。その後焼成を行い選定した有機溶媒に対するガスセンサ評価を行った。図 V.1.4.3 (i) .3.3 に示すようにガスセンサ評価装置をガス導入部、加熱部、制御部で構成し評価を行った。有機溶媒はエタノールを使用し各濃度でのセンサ抵抗値を R_g とし、大気中のセンサ抵抗値 R_a との比を感度とした。

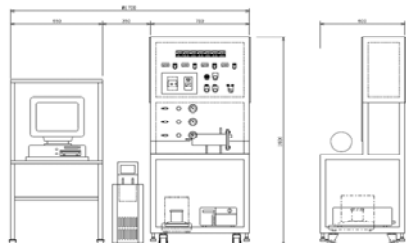


3.1.4.3 (i) .3.1 平坦基板 SnO₂ ガスセンサプロセスフロー



3.1.4.3 (i) .3.2 トレンチ基板 SnO₂ ガスセンサプロセスフロー

○装置外観



○システム構成

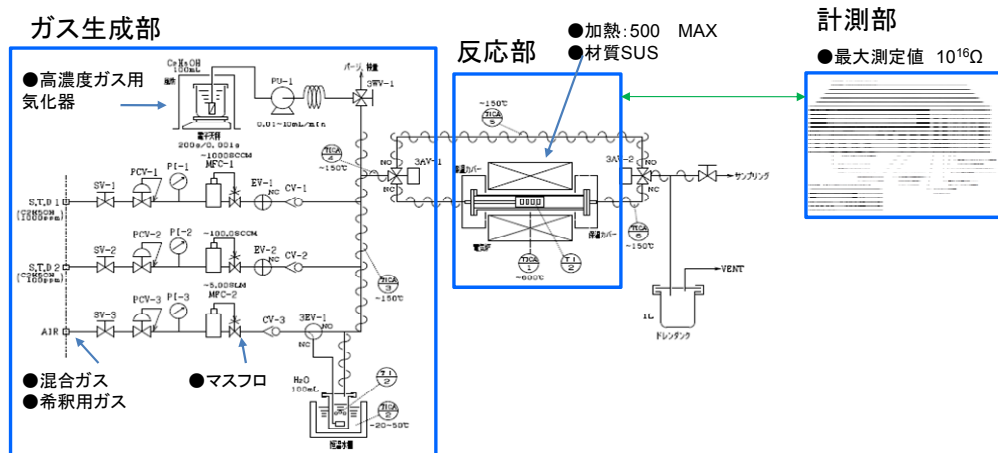
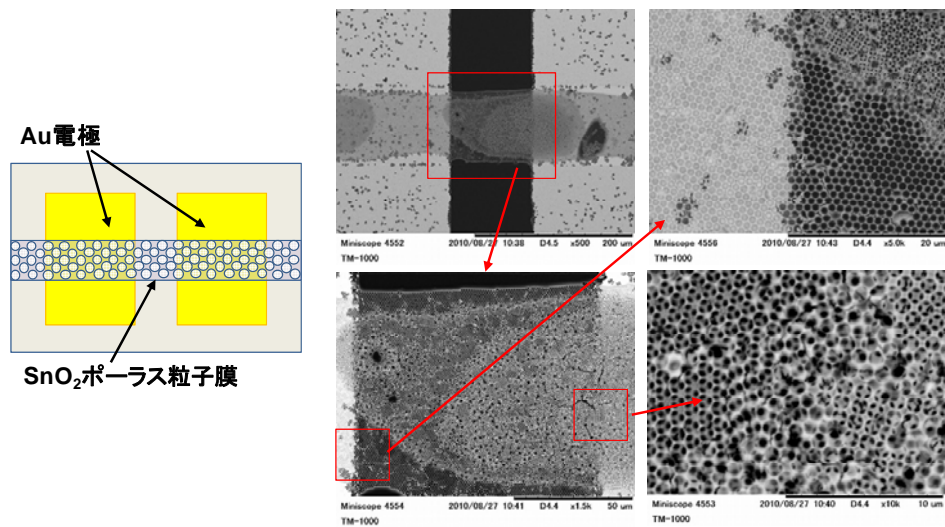


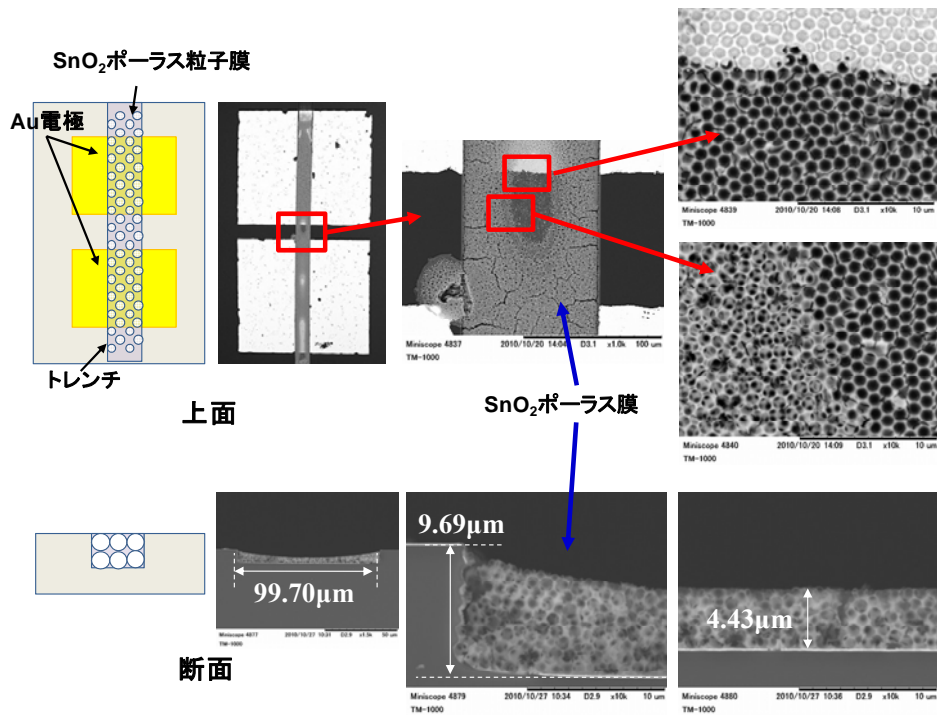
図 V.1.4.3 (i) .3.3 ガスセンサ評価装置

(i) -3.3 実験結果

トレンチ埋め込みを行った SnO₂ ガスセンサの SEM 画像を 3.1.4.3 (i) .3.4 に示す。基板上面から観察した SEM 画像から、トレンチ内部に SnO₂ 粒子のポーラス構造が確認できるが、センサとして動作する電極間で一様な膜厚が形成されているわけではなく、濡れ性の欠陥と思われる部分は薄く下地電極が確認できていることから 1 層である。欠陥のない部分では厚く堆積し 9 層程度であることが確認された。また、作製したガスセンサにはクラックが多数導入されてしまっていることも確認できる。しかし、センサ部が分断されているわけではなく、センサ動作は確認できると判断し、ガスセンサとしての評価を行った。



図V.1.4.3 (i) .3.4 トレンチ基板ポーラス SnO₂ ガスセンサの SEM 画像



図V.1.4.3 (i) .3.5 トレンチ基板ポーラス SnO₂ ガスセンサの SEM 画像

(i) -3.4 ガスセンサ評価

図V.1.4.3 (i) .3.6、図V.1.4.3 (i) .3.7、図V.1.4.3 (i) .3.8に平坦基板上及びトレンチ基板に作製した SnO₂ ガスセンサの応答特性を示す。両者ともに、エタノール濃度の上昇に伴いセンサの抵抗値が減少しており、ガスセンサとして動作している事が確認できる。また、ポーラス構造に作製しガスセンサは SnO₂ 粒子膜よりも高い抵抗値を示している。

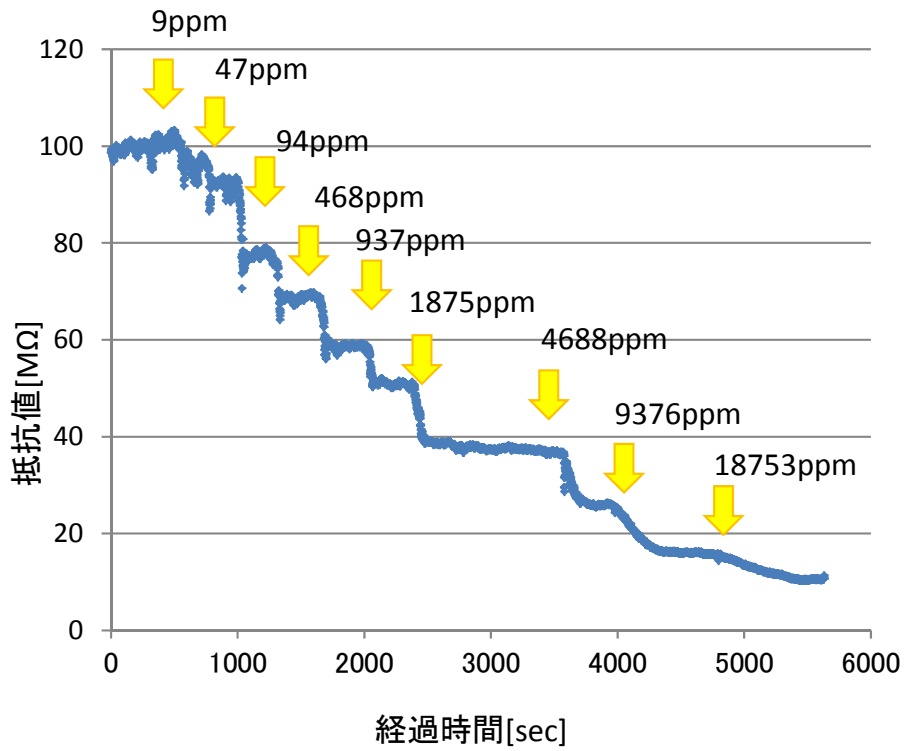


図 V.1.4.3 (i) .3.6 平坦基板 SnO₂ ガスセンサの応答特性

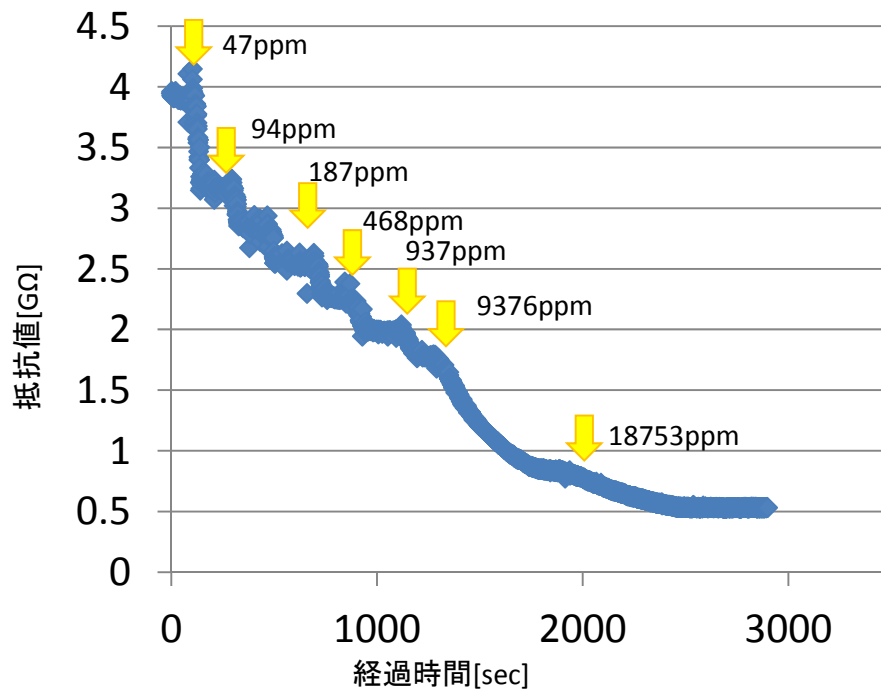
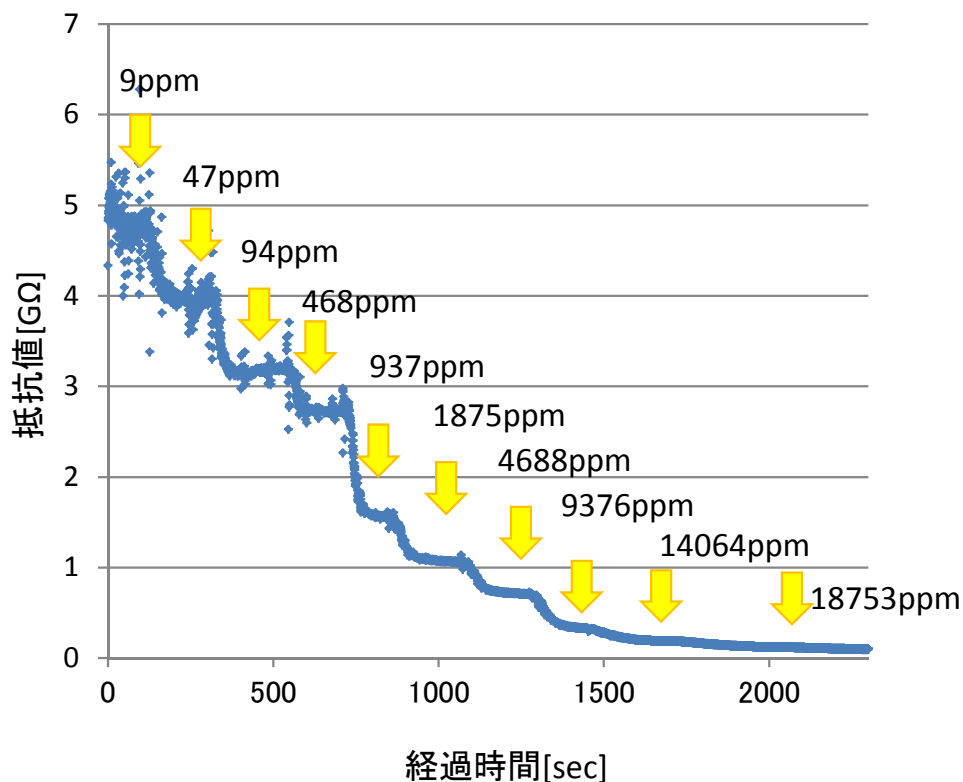


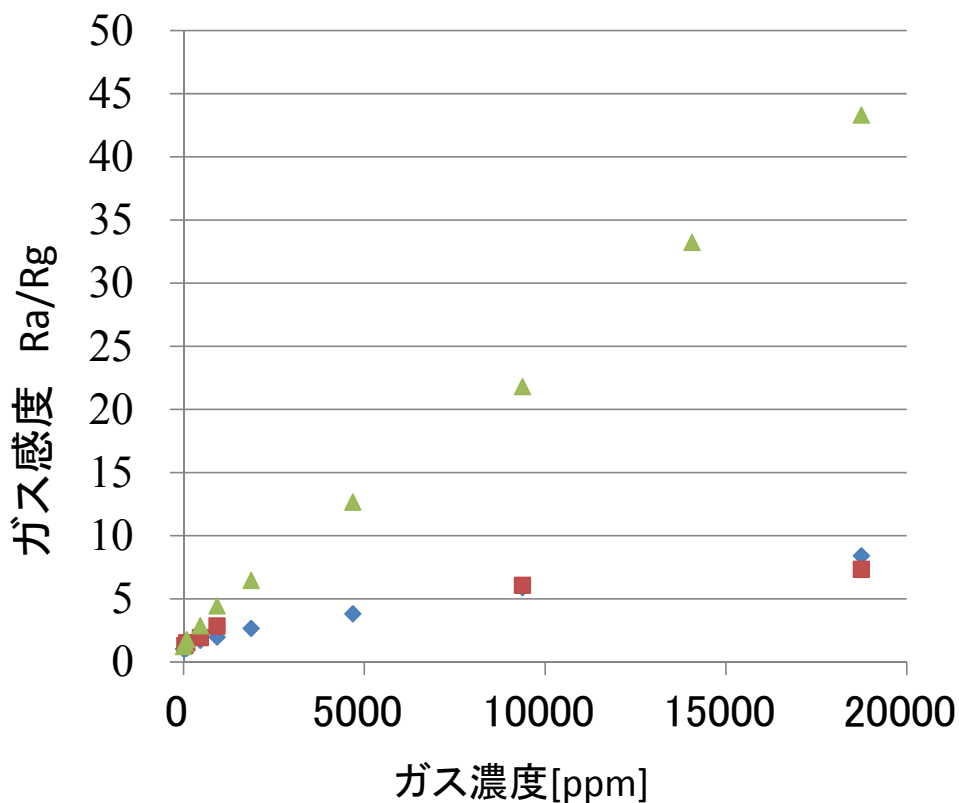
図 V.1.4.3 (i) .3.7 平坦基板ポーラス SnO₂ ガスセンサの応答特性



図V.1.4.3 (i) .3.8 トレンチ基板ポーラス SnO₂ ガスセンサの応答特性

平坦基板、トレンチ基板に作製したガスセンサのエタノール濃度に対する感度特性を図V.1.4.3 (i) .3.9 に示す。平坦基板上に作製した SnO₂ ガスセンサと比較して、トレンチ基板に作製したガスセンサの 1000ppm から向上している事が確認された。また、平坦基板上でポーラス状に形成したガスセンサの感度は、SnO₂ 粒子単体のセンサと感度が変わらなかった。単層程度では高濃度での感度が向上せず、ある程度積層することでガスセンサの性能が向上する結果となった。

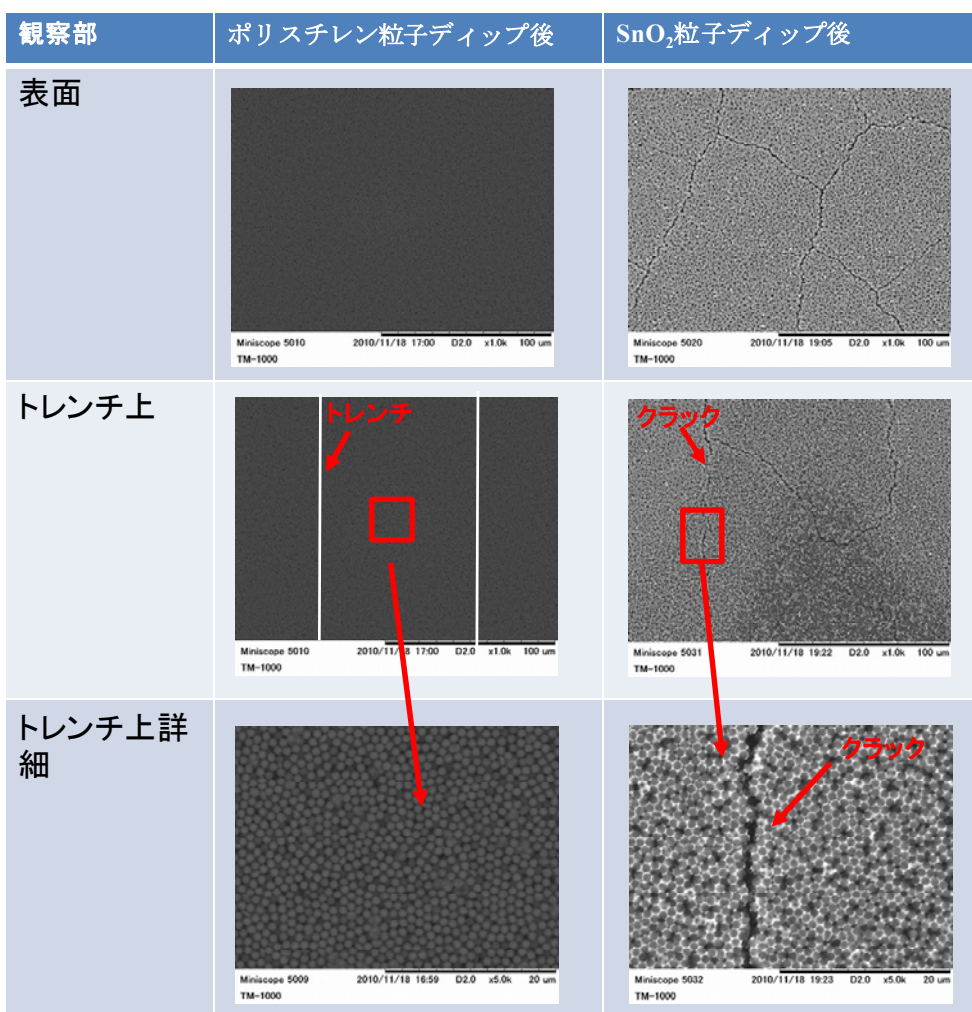
今回作製したガスセンサには、3.1.4.3 (i) .3.5 に示すようにクラックが多数発生している。抵抗値変化に関与しないと予想されるクラックを抑制すれば、さらなる感度向上が期待できる。この為、クラックの抑制を行う事とした。



図V.1.4.3 (i) .3.9 各ガスセンサの感度、ガス濃度特性

(i) -.3.5 ガスセンサのクラック抑制

ガスセンサに発生するクラックがどの工程に入っているかをSEM観察から確認を行った結果が図V.1.4.3 (i) .3.10である。ポリスチレン粒子ディップ工程ではクラックが確認されていないが、SnO₂粒子ディップ工程でクラックが発生している事が確認された。SnO₂のディップ時、すでに堆積したポリスチレン粒子中にSnO₂懸濁液が濡れ広がりポリスチレン粒子の隙間にSnO₂粒子が入り込み、焼成工程を経てポーラス構造が形成される。SnO₂懸濁液乾燥時の溶媒により粒子に表面張力が発生しクラックが発生しているものと推定される。懸濁液の分散溶媒としてよく使用されている有機溶媒の表面張力を図V.1.4.3 (i) .3.11に示す。今回使用した溶媒は純水であり表面張力は大きく0.072.5Nmである。今回は懸濁液の入手が容易なエタノールで表面張力を0.022.5Nmに低減しディップコートを行った。

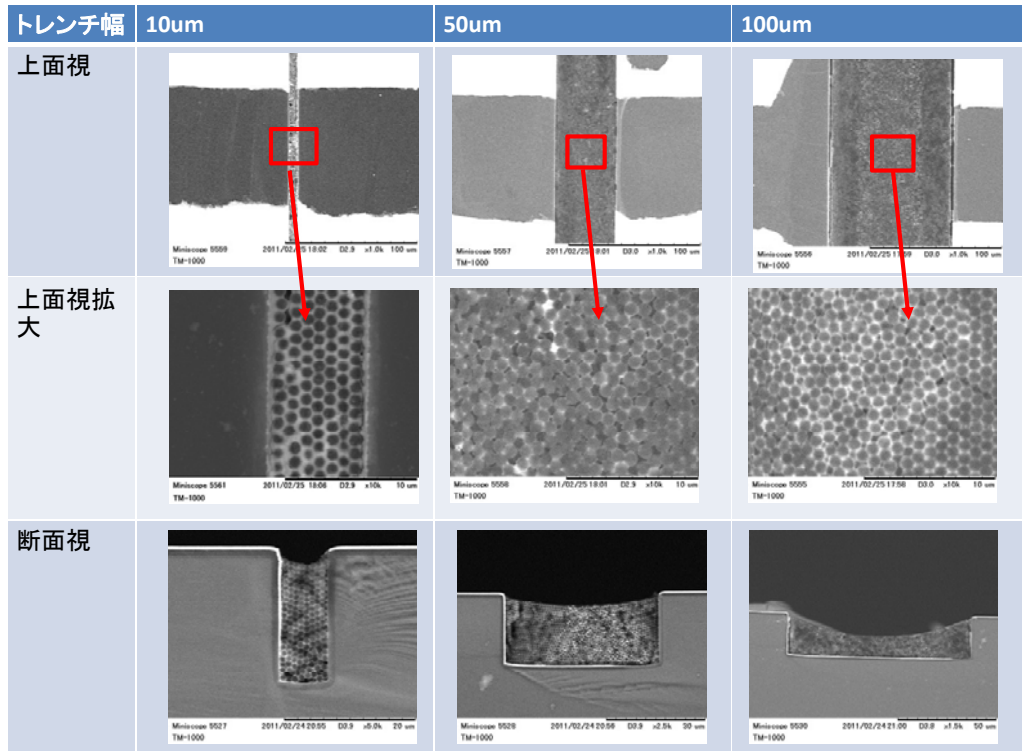


図V.1.4.3 (i) .3.10 純水溶媒 SnO₂懸濁液でディップコート後のSEM画像

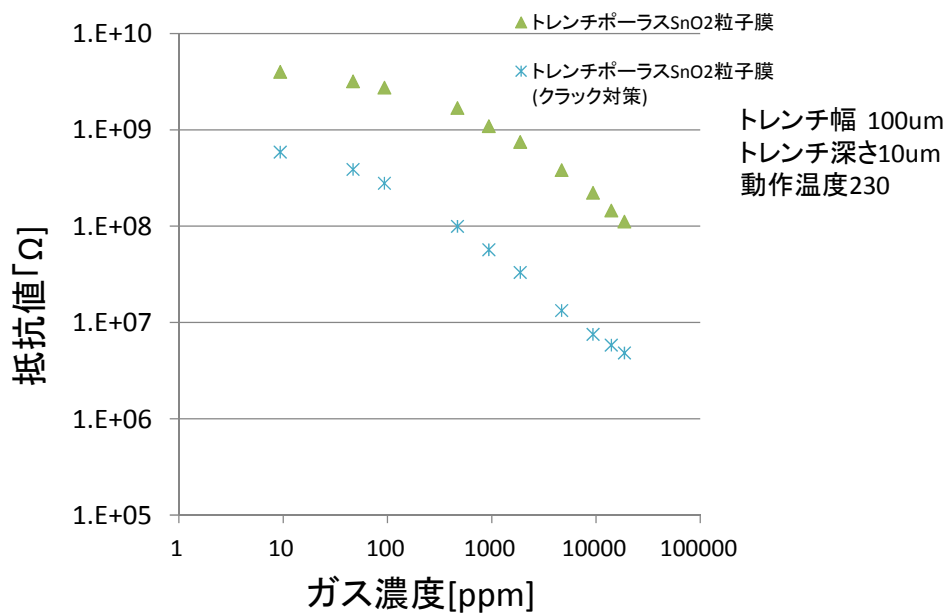
溶媒	表面張力[mN/m]
水	72.8
アセトン	23.3
エタノール	22.6
メチルエチルケトン	24.6
n-ヘキサン	18.4

図V.1.4.3 (i) .3.11 代表的な懸濁液溶媒別表面張力

エタノール溶媒 SnO₂ 懸濁液でディップコートした結果が図V.1.4.3 (i) .3.12 である。観察結果からクラック発生が抑制されている事が確認できる。溶媒の表面張力低減がクラックの抑制に効果的である事が確認された。



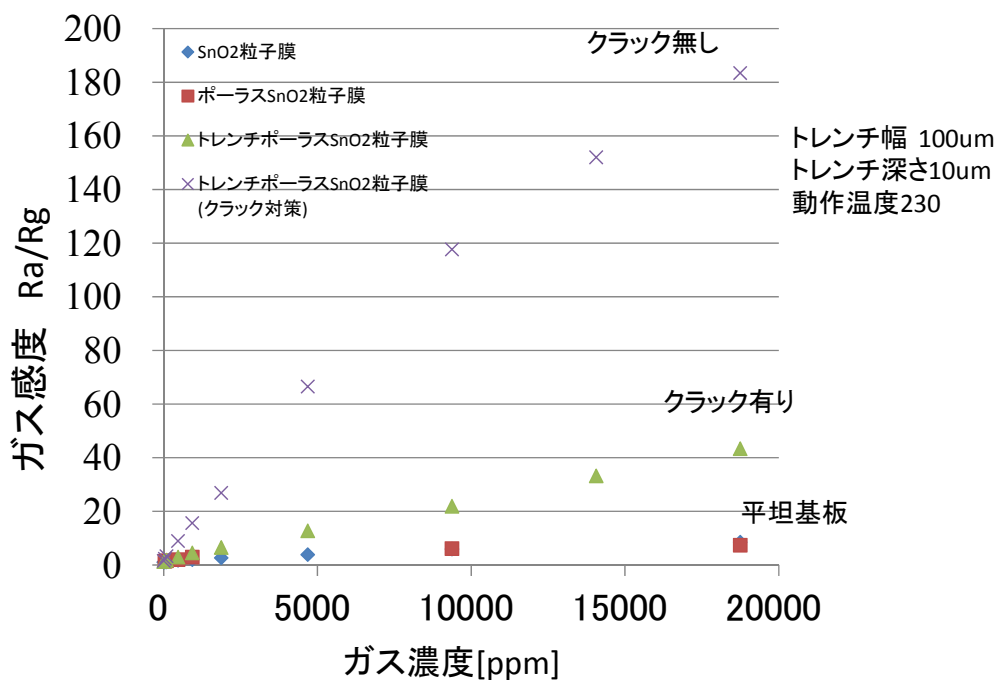
図V.1.4.3 (i) .3.12 エタノール溶媒 SnO₂ 懸濁液でのディップコート結果



図V.1.4.3 (i) .3.1.4 クラック導入有無によるガスセンサの抵抗値

クラックを抑制したガスセンサの抵抗値特性を図V.1.4.3 (i) .3.1.4 に示す。クラックの抑制により、大気中での抵抗値 Ra が 5G から 900M へ約 4.1G 低減する結果となった。

また、エタノール濃度に対するセンサ感度特性を図V.1.4.3 (i) .3.14 に示す。クラック導入を低減する事により、エタノール濃度が 18753ppm の時で感度が約 4 倍向上する結果が得られ、センサ形状がセンサ感度に大きく影響する因子であることが確認された。



図V.1.4.3 (i) .3.14 クラック抑制ガスセンサ感度特性

ガスセンサのトレンチ埋め込みにより、高濃度なエタノール雰囲気中でのガス感度向上が確認されたが、トレンチ構造がどのような場合にセンサ感度の向上が見込めるか確認をするため、トレンチの幅、深さ、長さをパラメタとしたガスセンサを作製し評価を行った。図V.1.4.3 (i) .3.15 に大気中のセンサ抵抗値 Ra のセンサ数特性を示す。各トレンチ幅のサンプルでほぼ線形な抵抗値の推移が確認された。また、Ra のトレンチ幅、トレンチ深さの特性を図に示す。トレンチの幅に対しては線形な傾向が得られず、幅 10 μm トレンチで抵抗値が下がるような形となっている。また、トレンチ深さに対しても線形な傾向が得られず、トレンチ深さ 25 μm のサンプルで高抵抗を示す結果となった。長さ方向が線形に推移しているのに対して、幅、深さに対しては線形な傾向が見られないため、トレンチ内

に形成した電極形状やセンサであるポーラス SnO₂ 構造の形状、SnO₂ 粒子と電極間の接触に違いある可能性があり、正常に作製されているかの形状確認が必要である。

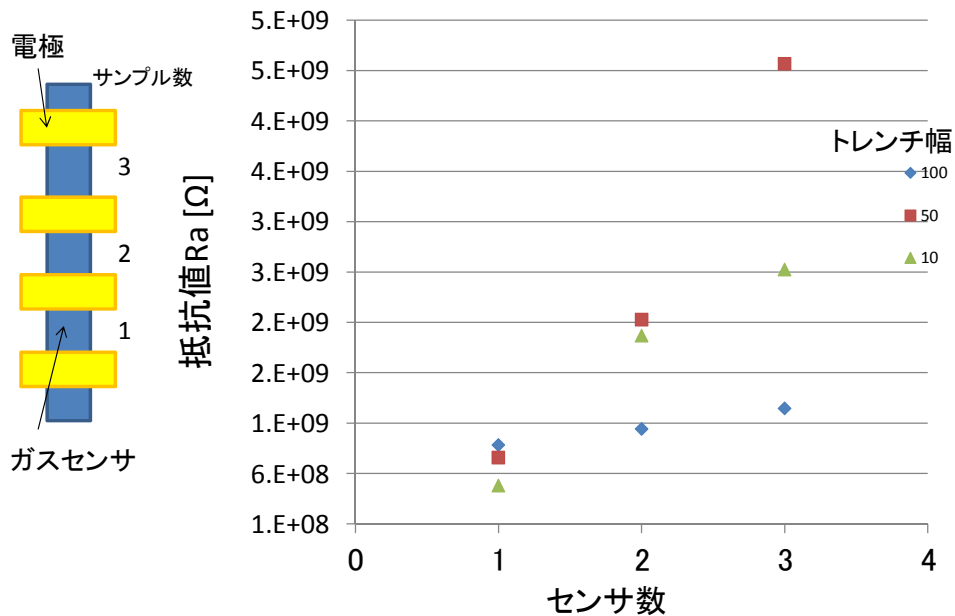


図 V.1.4.3 (i) .3.15 トレンチガスセンサの抵抗値、センサ数特性

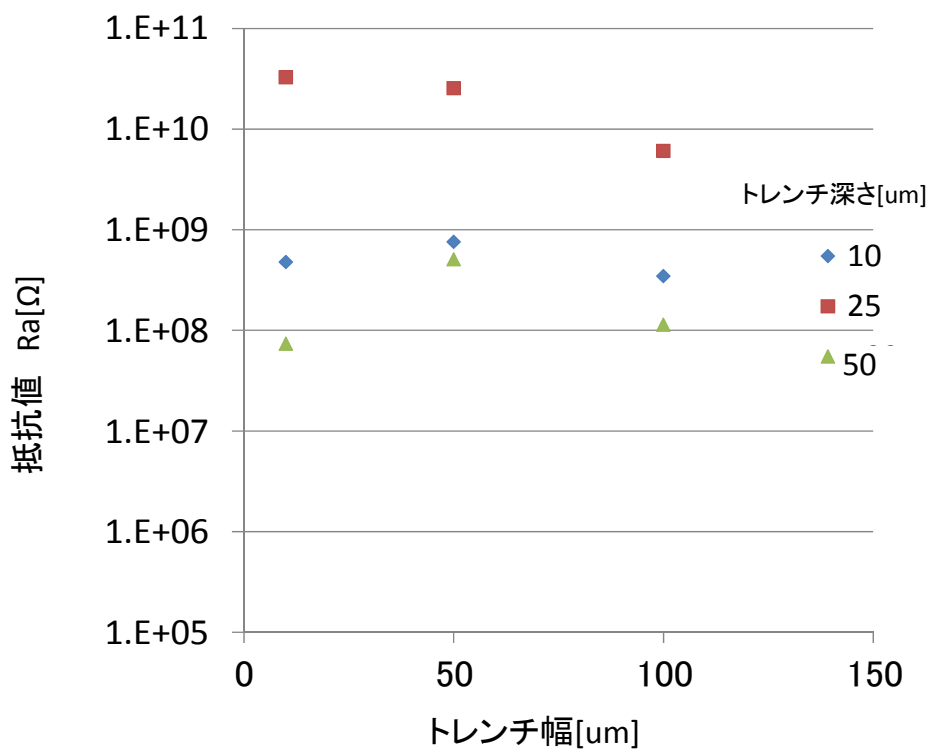
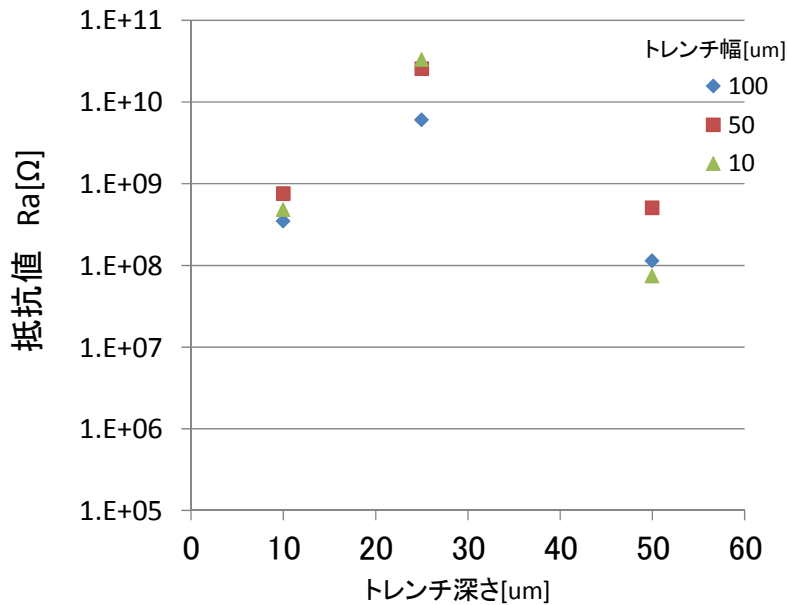
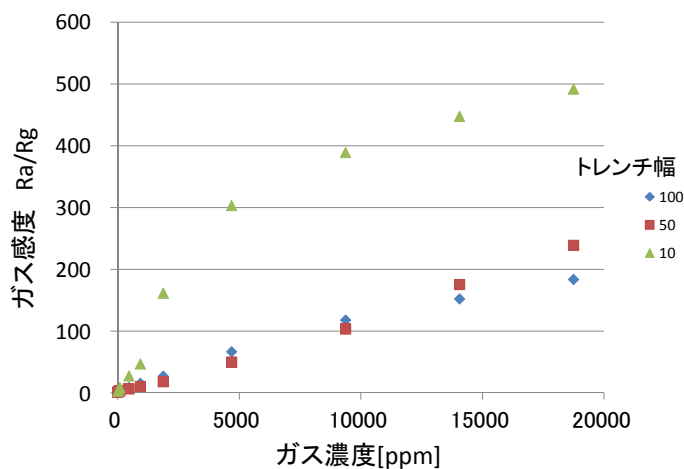


図 V.1.4.3 (i) .3.16 トレンチガスセンサの抵抗値、トレんチ幅特性



図V.1.4.3 (i) .3.17 トレンチガスセンサの抵抗値、トレンチ深さ特性

また、センサとしては動作するため、感度評価を実施した結果が図V.1.4.3(i).3.18である。深さ条件 10 μm において幅 10 μm の感度が高く、濃度に対する傾向が線形でなく飽和しているような特性となっている。一方で、50 μm、100 μm の感度は同程度であるが、線形性は保たれている。図に示したトレンチ幅 10 μm サンプルの大気中での抵抗値も考慮すると、センサ形状に違いがあることが推測される。また、この結果からセンササイズを 1/2 にし、平坦基板に作製したサンプルと比較して感度が向上する事が確認された。



図V.1.4.3 (i) .3.18 トレンチガスセンサの感度、トレンチ幅特性

(i) -4.1 大面積化の検討

本項では粒子配列技術の大面積化について検討したので報告する。現状では図に示すように、チップレベルでの粒子配列を行っている。引上げ装置部、懸濁液容器、基板固定アームから構成されており、インクジェット法やディスペンス法と比較して大面積基板への一括処理が可能であり生産性の向上が期待される。将来的にディップコーターによるガスセンサの大量産を考慮した場合、大面積 Si 基板への粒子配列技術は必要不可欠である。今回は、懸濁液容器の大容量化を行い、4inch Si 基板上に粒子配列を行った。

また、微粒子配列は基板と懸濁液界面に生じるメニスカスを利用して行われる。メニスカスの先端部では図に示すように、メニスカス先端部への溶媒の流れが起こり基板への微粒子の供給が発生する。この微粒子の供給は雰囲気温度湿度で制御され、懸濁液に分散している微粒子の濃度により粒子の供給量が決定する。この時基板を液面から引き上げる事でメニスカスの先端部を移動させ、基板上に堆積する粒子数を制御する。また、メニスカスが図のような親水性の場合粒子が堆積するが疎水性を示す場合には堆積しない。また、従来のチップ基板から 4inch 基板へ拡大するため、引上げ速度、微粒子濃度、表面処理、基板サイズを条件とし実験を行った。

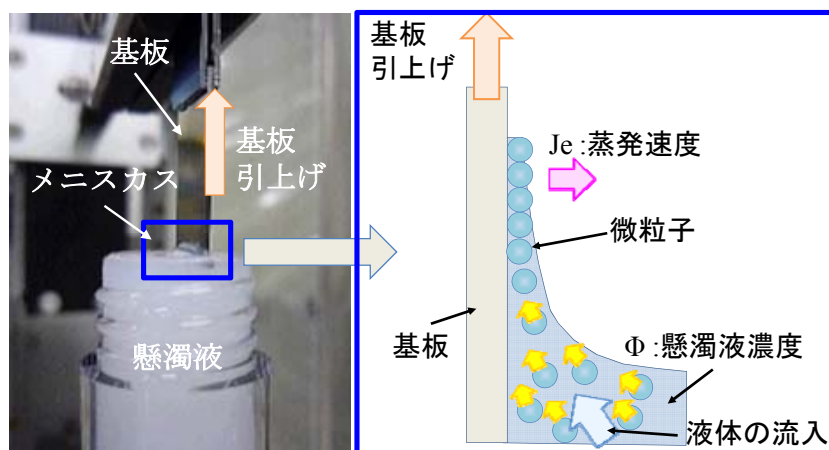


図 V.1.4.3 (i) -4.1 ディップコート概要

(i) -4.2 実験方法

4inch Si ウェハ用の装置構成及び実験の概要を図に示す。固定アームに 4inch ウェハを設置しポリスチレン懸濁液に浸漬させる。浸漬後にアーム部が低速で上方に可動し、ディップコートを行う。図に示すように懸濁液の容器は 4inch 用に変更

を行いつ懸濁液を大量に消費しないように、容器の内寸を長さ 120mm×高さ 100mm×幅 5mm、槽内容量 60ml として作製した。また、実験条件を表に示す。今回 4inch 基板での懸濁液としては、粒子材料ポリスチレン、粒子径 $1\mu\text{m}$ 、懸濁液溶媒を純水とし、回転子にて攪拌を行った。雰囲気温度、湿度を 23°C 、35%RH 一定として、基板引上げ速度を $0.24\mu\text{m}\sim 2\mu\text{m}$ 、懸濁液濃度を 1vol%、10vol% の条件でウエハの引上げを行った。基板サイズはウエハをへき開もしくはダイシングし、実験を行った。

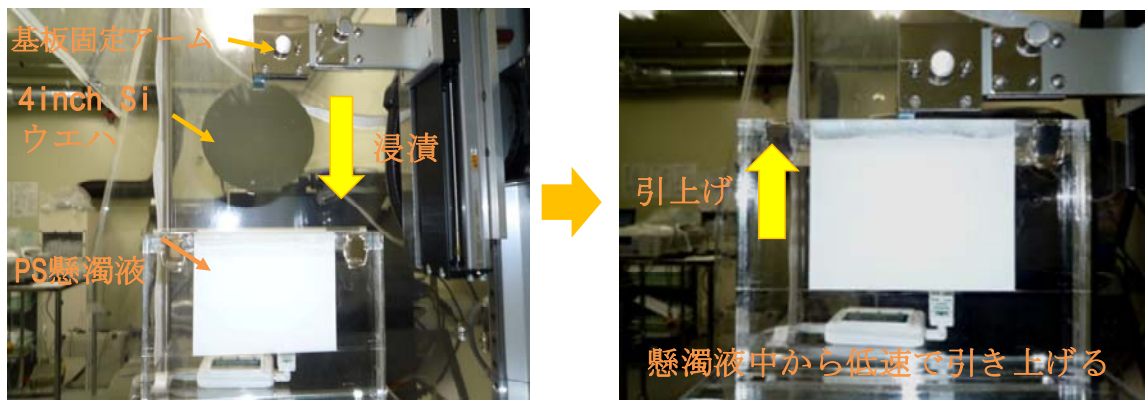


図 V.1.4.3 (i) .4.2 ウエハ用ディップコーター構成

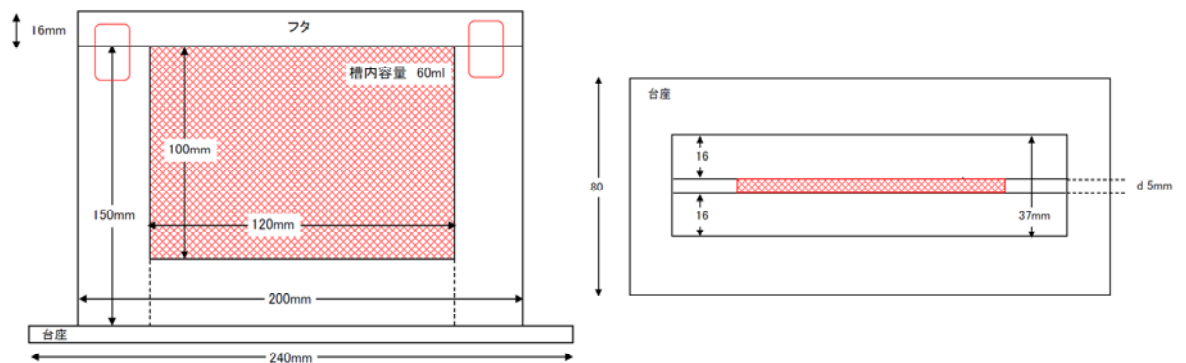


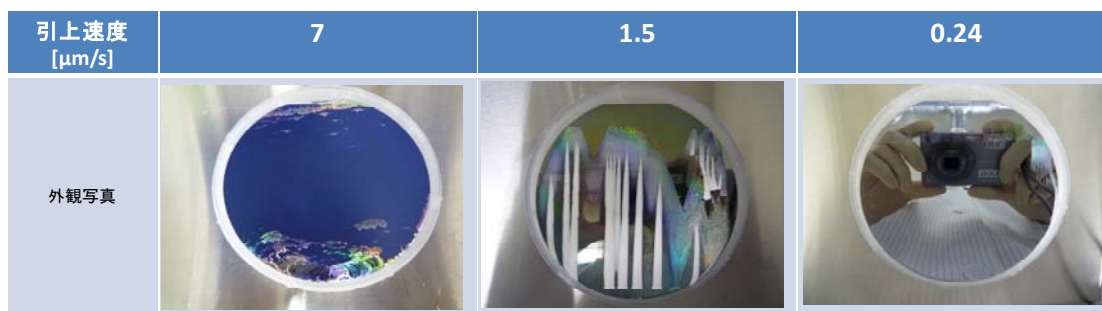
図 V.1.4.3 (i) .4.3 ウエハ用懸濁液容器の構成

表V.1.4.3 (i) .4.1 実験条件

項目	小項目	材料、条件
引上げ速度		0.24~10 μ m/sec
懸濁液	粒子材料	ポリスチレン
	粒子径	1 μ m
	溶媒	純水
	濃度	1、10 vol.%
基板材料	基板材料	Si (100)
	ウエハ	Φ 100mm ウエハ、1/2分割 ϕ 100ウエハ
	チップ	20mm \times 10mm
雰囲気条件	温度	23
	湿度	35%RH
表面処理	O ₂ プラズマ	1min
	BHF \rightarrow SPM	各10min

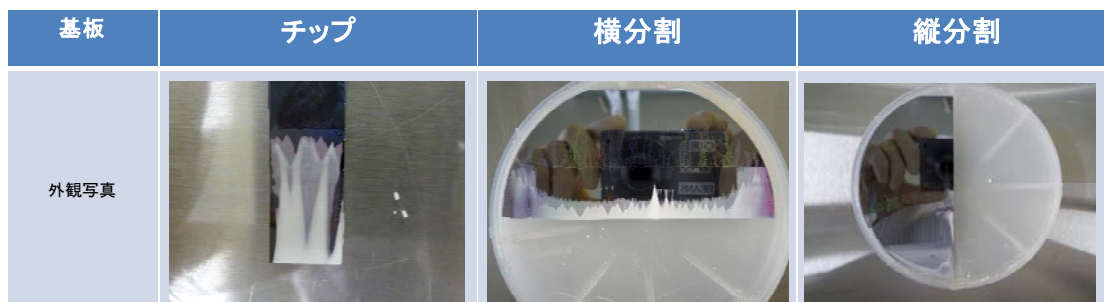
(i) -4.3 実験結果

引上げ速度を 0.24~7 μ m/s に変化させ微粒子をディップコートした場合の外観写真を図に示す。引上げ速度が低速の 0.24 μ m/s であっても粒子が配列しない結果となり、1.5 μ m/s の条件では線状に粒子が堆積している事が確認された。



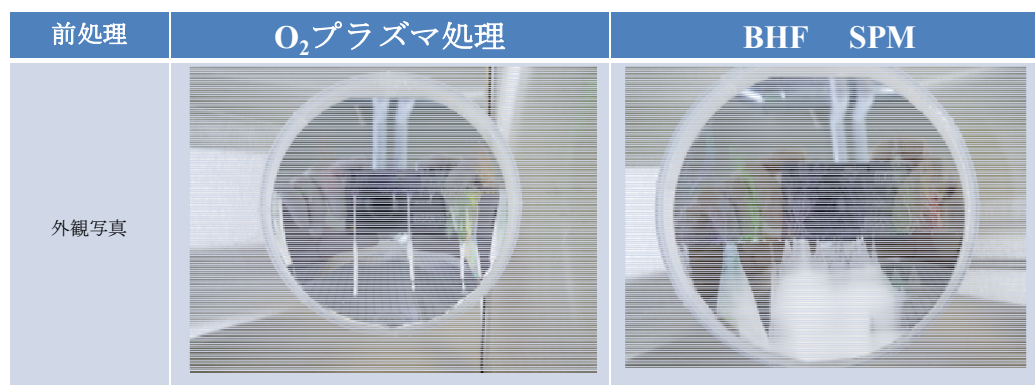
図V.1.4.3 (i) .4.4 堆積粒子の引上げ速度依存性

この結果から想定される原因として、ウエハの大口径化に伴い基板が懸濁液の流れを阻害している事が予想され、最終的にメニスカス先端部への微粒子の供給が阻害されている、もしくは供給されているが親水性化処理が不十分で微粒子が基板に堆積できない、が挙げられる。この為、チップ基板、分割ウエハでディップコートを行った。またウエハの分割は縦横の 2 条件行い、基板の縦方向か横方向の長さのどちらが影響しているかの確認を行った。結果が図である。



図V.1.4.3 (i) .4.5 堆積粒子の基板サイズ依存性

20×10mm に分割したチップウエハに関してはポリスチレン微粒子が堆積しており、このサイズの基板ならば粒子が配列する事が確認された。また、縦分割したウエハでは微粒子の配列は発生せず、横分割したウエハは横方向に様に粒子が配列している。基板の縦の長さが影響している結果となり、懸濁液内に浸漬している基板が攪拌を阻害している事が確認された。また、今回懸濁液容量を削減するため容器の幅を 5mm としており、また粒子径 1 μm のポリスチレン微粒子は沈降が発生する事から、十分な懸濁液の攪拌ができなかったものと推察される。基板と懸濁液容器間にある程度の幅を持たせる事で改善する可能性もあり今後検討が必要である。また、O₂ プラズマ処理では有機物の残差が除去しきれていない可能性がある為、表面処理を従来の O₂ プラズマ処理から BHF、SPM 洗浄に変えてディップコートした結果が図である。表面処理を変えた事で微粒子の堆積が発生し改善される傾向が確認された。



図V.1.4.3 (i) .4.6 堆積粒子の表面処理依存性

以上の結果から、大面積プロセスにおける課題点は、

- ・メニスカス先端部への微粒子供給を阻害しないような容器設計が必要
- ・ウエハ表面を清浄に保つ必要がある

- 1) Y. Lu, Y. Yin, Y. Xia: A Self-Assembly Approach to the fabrication of Patterned, Two-Dimensional Arrays of Microlenses of Organic Polymers, *Adv. Mater.*, 13, 1, (2001) 34.
- 2) S. H. Im, O. O. Park: Three-dimensional self-assembly by icecrystallization, *Appl. Phys. Lett.*, 80, 22, (2002) 4133.
- 3) Yuta Matsushima*, Yukie Nemoto¹, Tsutomu Yamazaki, Kazuyuki Maeda, Takeyuki Suzuki “Fabrication of SnO₂ particle-layer on the glass substrate using electrospray pyrolysis method and the gas sensitivity for H₂”, *Sensors and Actuators B vol*, 96 pp. 133-148, 2003..
- 4) A.R. Phani, S. Manorama, V.J. Rao, “Effect of additives on the response of sensors utilizing semiconducting oxide on carbon monoxide sensitivity”, *Appl. Phys. Lett.* Vol.66, 3489–3491, 1995.
- 5) C. Baratto, G. Sberveglieri, A. Onischuk, B. Caruso, S. di Stasio “Low temperature selective NO₂ sensors by nanostructured fibres of ZnO”, *Sensors and Actuators B vol*, 100 pp. 261–265, 2004.
- 6) Jian-Ping Ge, Jin Wang, Hao-Xu Zhang, Xun Wang, Qing Peng, Ya-Dong Li “High ethanol sensitive SnO₂ microspheres”, *Sensors and Actuators B vol*, 113 pp. 937–943, 2006.

(ii) 低消費電力センサ・無線モジュールへの検討

(ii) -1 背景と目的

超低損傷ドライッチング技術は、試料にダメージを与えない超低損傷加工と原子レベルの平滑加工が特徴の加工技術であり、MEMS に適用することで機械的特性であるエネルギーロスの低減、信頼性向上、流体抵抗の低減などの効果が期待されている。これまで、東北大学の寒川らは超低損傷エッチング技術を用いて、トランジスタの電気的特性を向上させるなど様々な実験を通してその効果を検証してきた。一方、機械的特性については、平成 21 年度の研究開発項目③「3次元ナノ構造形成プロセス技術の開発」(1) -1 超低損傷エッチングによる高密度3次元ナノ構造形成技術の成果として、超低損傷ドライッチング技術が、従来のエッチング技術に対してMEMSの機械的特性を向上・改善することができる有効な技術であることが確認されている。一方、MEMSは電気と機械が相互作用することで機能を発現するものであり、電気的特性のみならず機械的特性も重要な項目である。そのため、超低損傷ドライッチング技術をMEMSに適応することで、デバイス特性の向上や新たな原理による新デバイスの創出などが期待できる。そこで本研究では、超低損傷ドライッチング技術による有効性を活かすことができるデバイスとしてトランジスタとMEMSの集積化デバイスであるVibrating-Body Field Effect Transistor (VB-FET)に着目し、センサ・無線モジュールへの応用のための基礎検討をシミュレーションおよび試作を通じて実施し、これらの課題抽出を行ったので報告する。

(ii) -2 MEMS とトランジスタの集積構造デバイス

超低損傷ドライッチング技術でシリコンをエッチングした場合、従来方式のエッチング技術と異なり、超低損傷の効果によってエッチング時のシリコン界面における界面準位の数大幅に低減することができ、その数はベアシリコンと遜色ないレベルであるとされる。よって、本技術によりMEMSを作製した場合、エッチング界面にMOSトランジスタを形成することが可能となる。そこで我々は、MEMSデバイスの側壁にMOSトランジスタを形成する構造であるVibrating-Body Field Effect Transistor (VB-FET)に注目した。

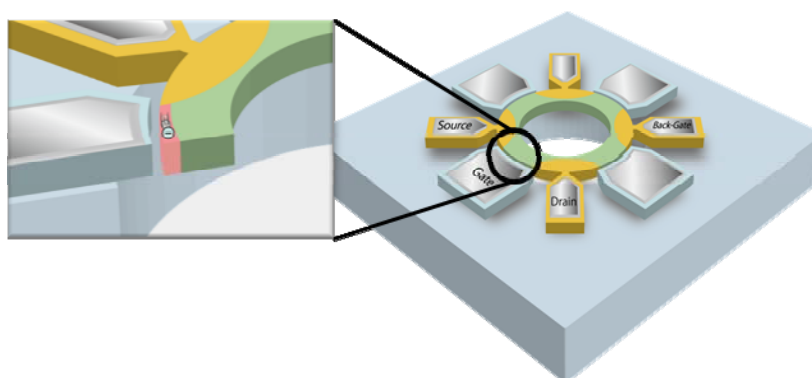


図 V.1.4.3 (ii) -2-1. VB-FET の概要図

VB-FET は、2007 年に D.Grogg らによって提案されたデバイスである⁽¹⁾。その構造は、駆動する MEMS の側壁部分に形成されたチャンネルと固定されたゲートから成る構造であり、MEMS とトランジスタの集積デバイスである (図 V.1.4.3 (ii) -2-1)。VB-FET は、ゲートと駆動するチャンネルの相互作用によりトランジスタ機能を発現し、入力信号を低インピーダンスに変換することができ、信号を増幅することができる。さらに、我々は駆動するゲート構造を有する Coupled VB-FET を考案し、異なる 2 つの共振周波数で信号を増幅することを可能とした。これにより SAW や FBAR などの高周波デバイスにかわるチューナブルバンドパスフィルタの実現や集積化構造による部品点数削減・低消費電力化などが可能となる。また、MEMS は、リング・ディスク構造、平行平板構造などさまざまな MEMS に適応が可能であり真の集積化 MEMS として期待できる。提案されている VB-FET は、駆動するチャンネルと固定されたゲートを平行平板型アクチュエータとしてモデリングしているが⁽²⁾、我々は、チャンネル・ゲートともに駆動する連成モデルである Coupled VB-FET をゲートとトランジスタのチャンネル間に働く電気機械相互作用をモデリングする手法でシミュレーションを実施し、課題抽出を行った。また、8 インチファンドリによるデバイスの試作を通じてプロセス課題検証を実施した。

(ii) -3 シミュレーションによる検討

(ii) -3.1 MEMS 等価回路設計手法

我々は、ラグランジュの運動方程式を用いて Coupled VB-FET をモデル化した。ラグランジュ運動方程式を用いることで電気系と機械系のエネルギーの伝達を表すことができる。そのため、電気系デバイスである MOS-FET と機械デバイス系デバイスである MEMS の集積デバイスの Coupled VB-FET をモデル化するためには、本手法を用いることは非常に有効である。本方式はこれまでも静電型 MEMS などの設計に利用されておりその有効性は示されている⁽³⁾。ここで、モデル化する Coupled VB-FET の模式図を図 V.1.4.3 (ii) -3-1 に示す。通常、Coupled VB-FET は $V_D < V_{GS} - V_T$ で駆動させる。そのため、本研究のモデルでは線形領域のみを考慮した。また、ゲート・チャンネル間の絶縁体を真空または空気とした。本モデルでは、ゲート・チャンネル間のキャパシタンス C は、駆動するゲートとチャンネルそれぞれの変位 y_g と y_c の関数となる。また、ソース・チャンネル間の表面電位には勾配があるため、キャパシタンス C を n 分割し、微小区間のキャパシタンス $C_n(y_g, y_c)$ で表した。この手法は、従来の MOS-FET をモデル化する時に用いられる一般的な手法であり、我々はそれを VB-FET に適応した。ここで、チャンネル抵抗 R_n 、チャンネル内交流電位 e_n 、チャンネル内直流電位 V_n 、ゲート電流 i_G 、ドレイン電流 i_D 、ゲート・ソース間容量 $C_{GS}(y_g, y_c)$ 、ゲート・ドレイン容量 $C_{GD}(y_g, y_c)$ 、ゲートとソース・ドレインがオーバーラップしている幅をそれぞれ $L_{GS} \cdot L_{GD}$ とする。微小区間のキャパシタンス $C_n(y_g, y_c)$ とチャンネル抵抗 R_n は、式 (1)、(2) の通り表すことが出来る。式 (1)、(2) における各パラメータは、真空の誘電率 ϵ_0 、チャンネル幅 W 、チャンネル長 L 、ギャップ d_0 、直流バイアスによるゲート側変

位 d_g 、チャネル側変位 d_c 、電気移動度 μ 、閾値電圧 V_T とする。

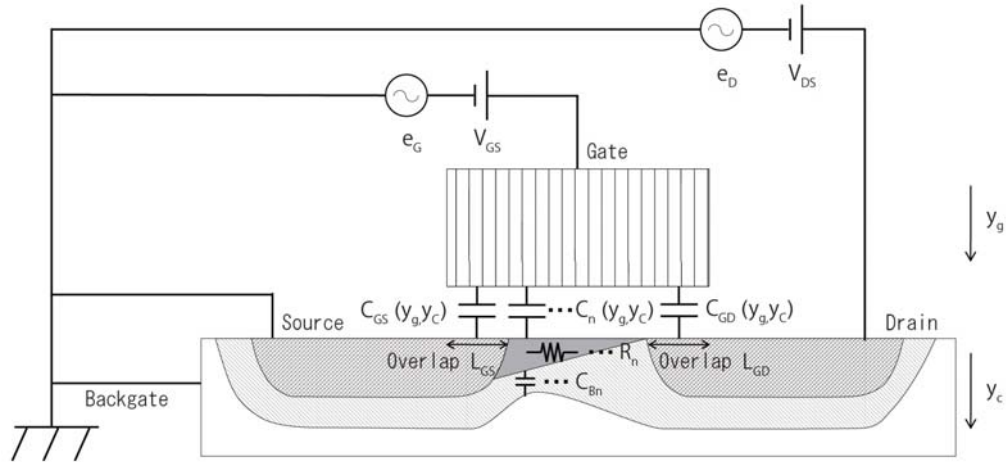


図 V.1.4.3 (ii) - 3-1. Coupled VB-FET の概要図

$$C_n(y_g, y_c) = \frac{\epsilon_0 L W}{n(d_0 - d_g - d_c - y_g - y_c)} \quad (1)$$

$$R_n = \frac{L(d_0 - d_g - d_c - y_g - y_c)}{nW\mu\epsilon_0(V_{GS} + e_G - V_T - V_n)} \quad (2)$$

次に、我々は、ゲート・チャネル間に働く電気機械相互作用をモデリングするために図 V.1.4.3 (ii) - 3-1 のようにモデル化した Coupled VB-FET を図 V.1.4.3 (ii) - 3-2 の等価回路で表した。そして、Coupled VB-FET の電気系と機械系のエネルギーの相互作用を表すエネルギー関数のラグランジアン L と散逸関数式 F を導出した。ここで、ゲートの質量 m_g 、ゲートのバネ定数 k_{sg} 、チャネルの質量 m_c 、チャネルのバネ定数 k_{sc} とする。

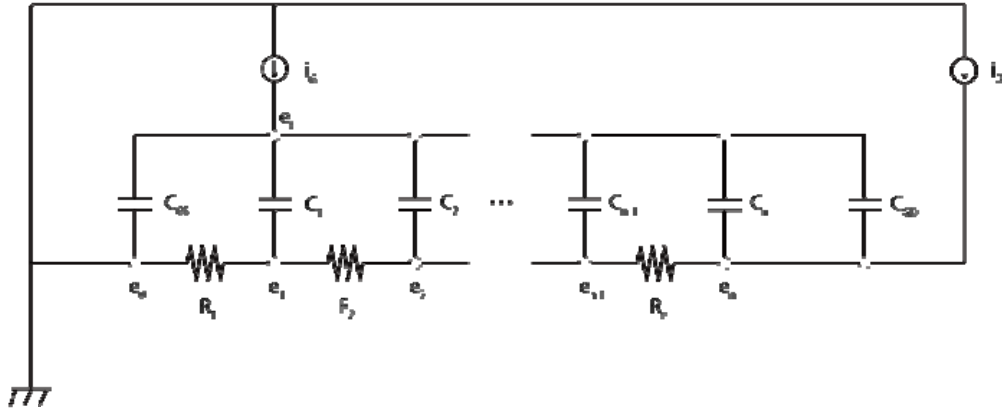


図 V.1.4.3 (ii) -3-2. Coupled VB-FET の等価回路図

まず、ラグランジアン \$L\$ は、ゲート・チャネルが駆動する運動エネルギー、ゲート・チャネル間の静電力によるエネルギー、チャネル・ゲートのバネによるエネルギーから式 (3) の通り表される。次に、散逸関数 \$F\$ は、機械抵抗と電気抵抗のそれぞれの項から表され、式 (4) となる。

$$\begin{aligned}
 L = & \frac{1}{2} m_g v_g^2 + \frac{1}{2} m_c v_c^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n C_k(y_g, y_c)(V_{GS} + e_G - V_T - V_k - e_k)^2 \\
 & + \frac{1}{2} C_{GS}(y_g, y_c)(V_{GS} + e_G - V_T)^2 + \frac{1}{2} C_{GD}(y_g, y_c)(V_{GS} + e_G - V_T - V_{DS} - e_D)^2 \\
 & - \frac{1}{2} k_{sg}(d_g + y_g)^2 - \frac{1}{2} k_{sc}(d_c + y_c)^2
 \end{aligned} \quad (3)$$

$$F = \frac{1}{2} r_g v_g^2 + \frac{1}{2} r_c v_c^2 + \sum_{k=1}^n \frac{1}{2R_2} (V_k + e_k - V_{k-1} - e_{k-1})^2 \quad (4)$$

そして、ラグランジュ方程式 (5)、(6)、(7)、(8)、(9) をテイラー展開によって線形化することで線形行列を求め、解析を行った。

$$f_y = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial v} \right) - \frac{\partial L}{\partial y} + \frac{\partial F}{\partial v} \quad (5)$$

$$f_c = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial v_c} \right) - \frac{\partial L}{\partial y_c} + \frac{\partial F}{\partial v_c} \quad (6)$$

$$i_k = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial e_k} \right) - \frac{\partial L}{\partial \phi_k} + \frac{\partial F}{\partial e_k} \quad (7)$$

$$i_G = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial e_G} \right) - \frac{\partial L}{\partial \phi_G} + \frac{\partial F}{\partial e_G} \quad (8)$$

$$i_D = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial e_D} \right) - \frac{\partial L}{\partial \phi_D} + \frac{\partial F}{\partial e_D} \quad (9)$$

このように求めた線形行列を掃出し法によって整理することで式 (10) を導出した。このように計算することで、Coupled VB-FET のアドミタンス行列を導出でき、相互コンダクタンス (gm) や出力抵抗 (1/gr) などの特性を計算することができる。また、このように求められたアドミタンス行列からハイブリット行列を導出できるので、|H21| から遮断周波数などの特性を解析することも可能である。

$$\begin{pmatrix} f_G \\ f_C \\ I_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ I_{n-1} \\ I_D \\ I_G \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & a_{1n+3} \\ 0 & 1 & a_{23} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & a_{2n+3} \\ 0 & 0 & 1 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & a_{3n+3} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & a_{n+1n+2} & a_{n+1n+3} \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & g_d & g_m \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & g_r & g_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_g \\ v_c \\ e_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ e_{n-1} \\ e_D \\ e_G \end{pmatrix} \quad (10)$$

(ii) -3.2 シミュレーションによる検討

(ii) -3.2-1 シミュレーションによる静特性評価

まず我々は、式 (5)、(6)、(7)、(8)、(9) のテイラー展開の 0 次項より ID-VDS 特性とチャネル内電位を求めた。ここでの計算では、 $n=14$ 、 $L=2\mu\text{m}$ 、 $W=20\mu\text{m}$ 、 $d_0=0.1\mu\text{m}$ 、 $\mu=0.05\text{m}^2/\text{Vs}$ とした。まず、ID-VDS 特性の計算結果を図 (ii) -3-2 に示す。

ここでは V_{GS} を 20V、30V、40V、50V と変化させ、教科書等に掲載されている一般的な式と我々が導出した式のそれぞれで計算し比較した。その結果、 I_D - V_{DS} 特性において本手法で求めた値と従来手法で求めた値は完全に一致し、本手法により正確に特性が導出できることを確認した。次にチャンネル内電位の計算結果を図 V.1.4.3 (ii) -3-3 に示す。ここでは、 V_{GS} を 30V、 V_{DS} を 1V、5V、10V、15V、20V、25V と変化させ計算した。チャンネル内電位は、チャンネルの位置によって変化し、 V_{DS} の値がピンチオフ電位に近い値となり、ドレイン側に近づいた位置になるとその値は急激に変化した。一方で、 V_{DS} の値がピンチオフ電位に比べて十分小さい場合は線形近似ができることも確認でき、その特徴を正確に導出できた。このように、 V_{DS} の値によってチャンネル内電位の表し方は変化するが、本手法のようにゲート・チャンネル間のキャパシタンスを分割して扱うことで、ピンチオフ前のすべての V_{DS} に対応することができる。そして、ゲート・チャンネル間のエネルギー相互作用をより正確に表し、VB-FET の特性を導出することができる。

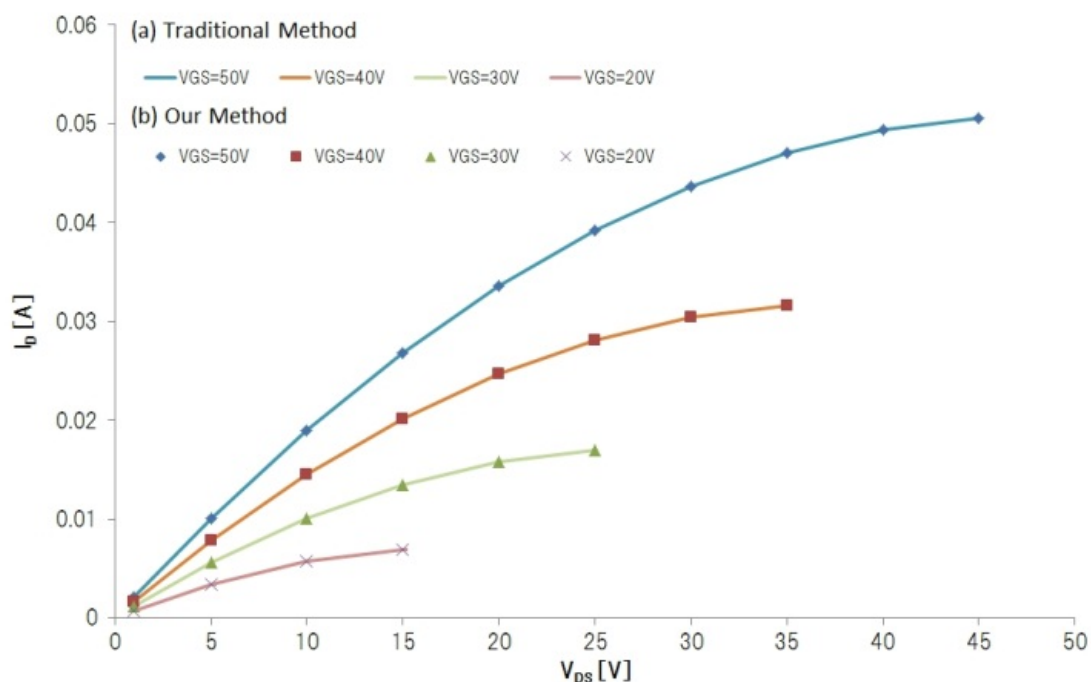
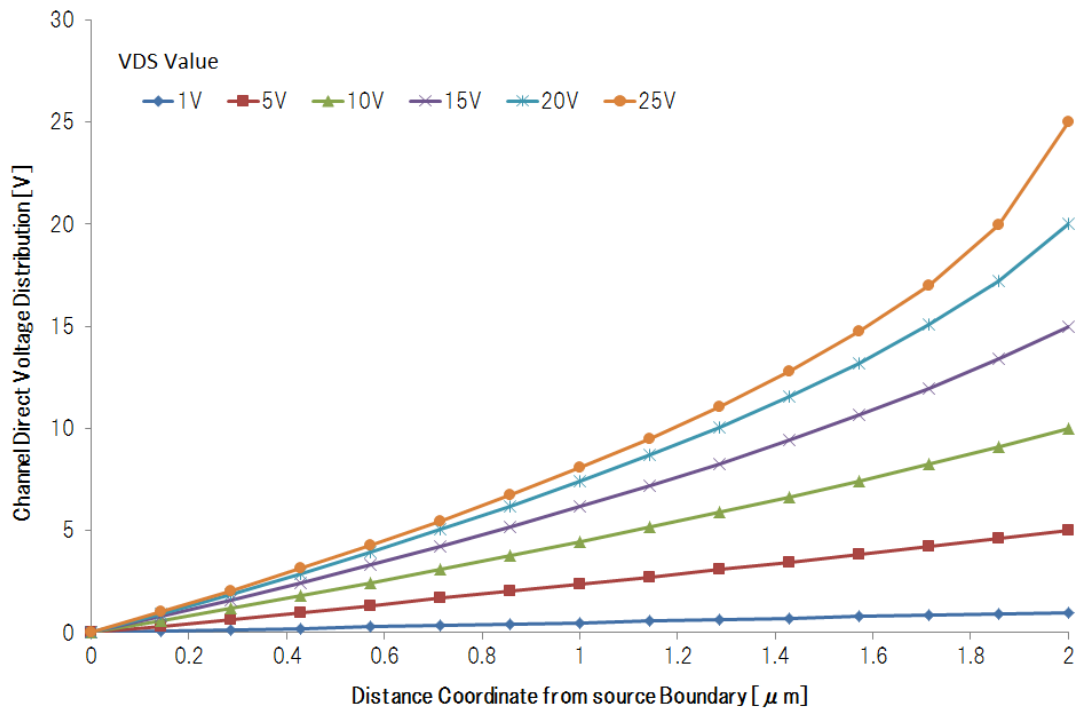


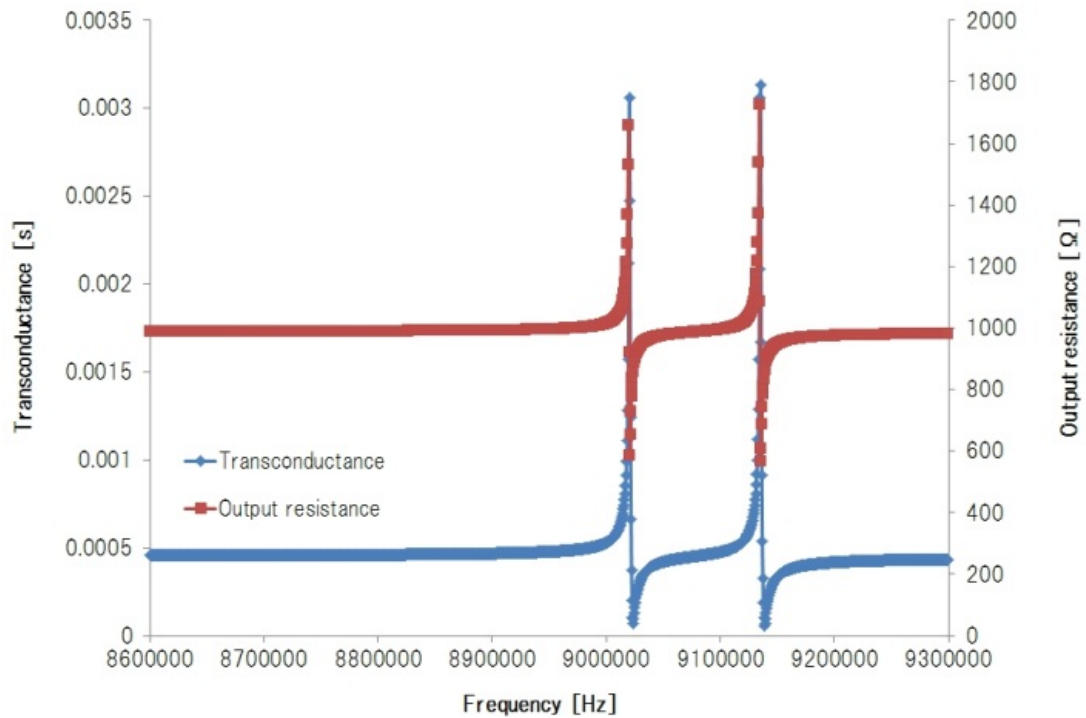
図 V.1.4.3 (ii) -3-2. Coupled VB-FET の静特性計算結果



図V.1.4.3 (ii) -3-3. Coupled VB-FET のチャンネル内電位計算結果

(ii) -3.2-2 シミュレーションによる Coupled VB-FET 特性評価

次にゲート電圧 30V、ドレイン電圧 10V、ゲートとチャンネルの Q 値をそれぞれ $Q_c = Q_g = 10000$ 、 $m_c = m_g = 7.31 \times 10^{10} \text{kg}$ 、 $k_{sc} = 2.3 \times 10^5 \text{Pa}$ 、 $k_{sg} = 2.41 \times 10^5 \text{Pa}$ として Coupled VB-FET の特性解析を行った。ここでは、特性として相互コンダクタンス、出力抵抗、相互コンダクタンスの VDS 依存性、 $|H_{21}|$ による遮断周波数について解析を行った。まず、相互コンダクタンスと出力抵抗の計算結果を図V.1.4.3 (ii) -3-4 に示す。その結果、ゲート・チャンネルそれぞれの共振周波数で g_m および $1/g_r$ がピークを有することを確認した。 g_m は、ピーク値がベース値と比較して約 6 倍に増加した。一方、 $1/g_r$ のボトム値は、ベース値と比較して約半分の値となった。



図V.1.4.3 (ii) -3-4. Coupled VB-FET の相互コンダクタンスと出力抵抗

次に g_m の V_{GS} 依存性について検討した。 V_{GS} を 20V、40V、60V に変化させた場合の計算結果を図V.1.4.3 (ii) -3-5 示す。ここでは、分かりやすくするためゲート側のばね定数を

$k_{sg} = 2.41 \times 10^{20} \text{Pa}$ と大きくすることで固定し、共振ピークをひとつとした。その他のパラメータは、先の検討と同じ値を用いた。その結果、 V_{GS} の値に対応し、共振周波数が変化する様子が確認できた。

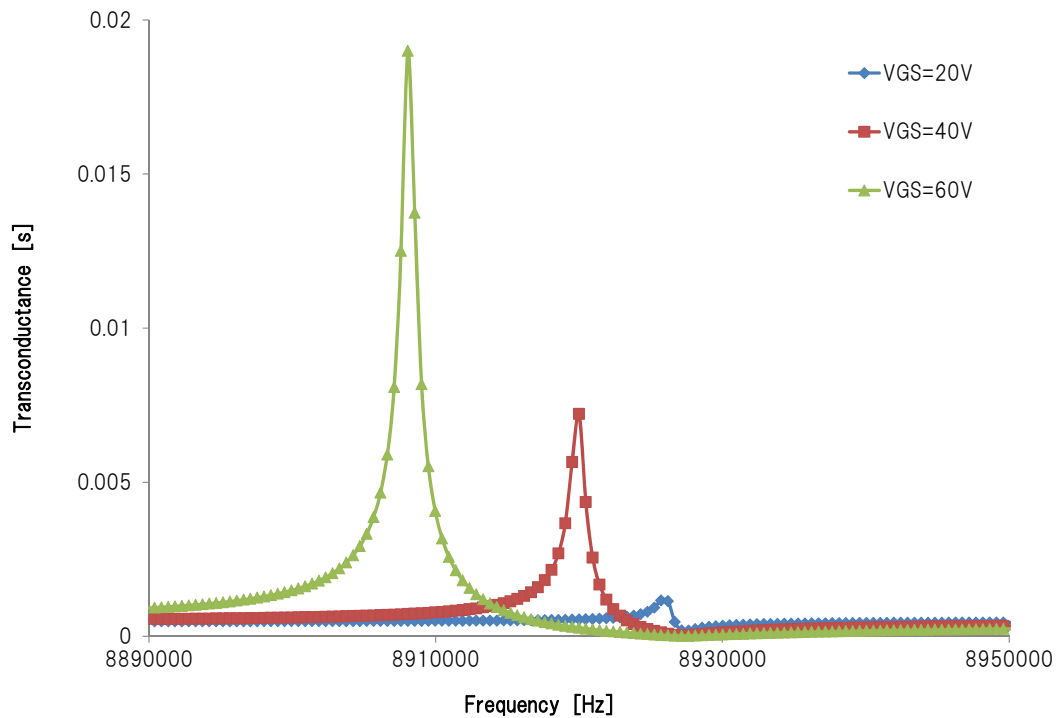


図 V.1.4.3 (ii) -3-5.相互コンダクタンスの VGS 依存性

次に、 g_m の VDS 依存性について検討した。 g_m は、ベース値・ピーク値それぞれを計算し、ベース値については従来の計算式でも導出した。形状パラメータは、先の検討と同じ、 $V_{GS} = 30V$ とし、VDS を 1V から 25V まで変化させた。その結果、従来の計算式で求めたベース値は VDS に比例し増加した (図 V.1.4.3 (ii) -3-6)。一方、我々の計算式で求めたベース値は、VDS が 15V あたりまで従来式と同じ値となり比例増加するが、それ以降は徐々に従来式の結果から外れ、その値よりも増加した。これは、チャンネルの表面電位が線形近似できる VDS の領域から外れた為である。また、ピーク値は、VDS が 0V から増加し VDS が 18V でピークとなり、それ以降は減少した。これは、従来のトランジスタ同様に VDS の増加とともに g_m が増加するが、次第に MEMS の駆動電圧となる $V_{GS} - V_{DS}$ の値が小さくなり増幅が小さくなるためである。この結果は、Coupled VB-FET の特性がトランジスタ特性が支配的になる領域と MEMS 特性が支配的な領域を有することを示している。これにより、Coupled VB-FET の特性を最適条件で駆動することができる。

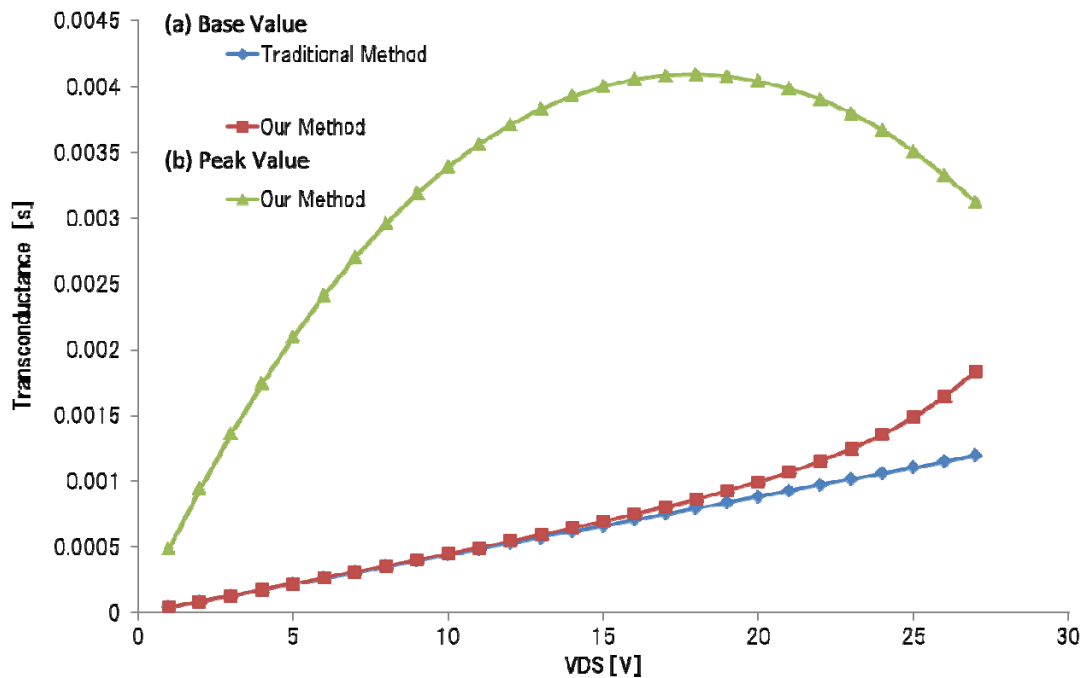


図 V.1.4.3 (ii) -3-6.相互コンダクタンスの VDS 依存性

最後に、ゲートとソース・ドレインがそれぞれ覆いかぶさっている幅であるオーバーラップ量とハイブリット行列から求められる $|H_{21}|$ との関係性を評価した。オーバーラップ量 $L_{GS} \cdot L_{GD}$ を $0 \mu\text{m}$ 、 $1 \mu\text{m}$ 、 $10 \mu\text{m}$ と変化させて計算した結果を図 (ii) -3-7 に示す。その結果、オーバーラップ量の増加によって遮断周波数 ($|H_{21}|=1$ での周波数) が低下した。また、 $10 \mu\text{m}$ においてはピーク部分が大きく減少し増幅効果が損なわれている。一方、オーバーラップ量の増加は、MEMS の駆動力を増加する方向に進むため、その影響により g_m が増加し、最終的に $|H_{21}|$ の値も増加した。この結果は、 g_m の VDS 依存性の結果同様に Coupled VB-FET の特性を最適駆動することができることを示している。このように、Coupled VB-FET はトランジスタと MEMS の特性を最大限に活かした設計が可能であり、センサまたはフィルタなどのデバイスに求められる特性に合わせた最適設計を実現することができる。

(ii) -3.2-3 シミュレーションによる課題抽出と展望

これまで述べた検討結果から、共振周波数においてピークを有する特徴を活かし、Coupled VB-FET でフィルタ機能を実現することができる。また、MEMS の形状を設計することで2つの共振ピークを組み合わせ、任意のバンドパスフィルタを構成することが可能である。そして、共振周波数については、MEMS の直流バイアスを変化させることで可変となる。そのため、これらすべての機能を組み合わせ、チューナブルバンドパスフィルタ

を構成することができる。その他にも、加速度センサやジャイロセンサなどの静電型 MEMS センサに本集積化構造を適応した場合、MEMS の共振により信号が増幅されることから、周辺備品として一般的に必要とされるプリアンプが不要になり、部品点数削減や小型・低消費電力化が期待できる。一方課題として、図 V.1.4.3 (ii) -3-6・7 のそれぞれの結果から、トランジスタと MEMS を独立して設計することは不適切であり、本モデルの通り相互作用を考慮してデバイスを設計する必要性が分かった。また、本デバイスの構造においてポイントとなるゲートとチャネル間のギャップにおいては、真空では通常の SiO₂ と比較して誘電率が 1/4 程度となるため、出来る限り狭ギャップであることが望まれる。しかしながらギャップは、作製プロセスによる影響も大きく発生するので、プロセスと特性のバランスを考慮して設計する必要がある。

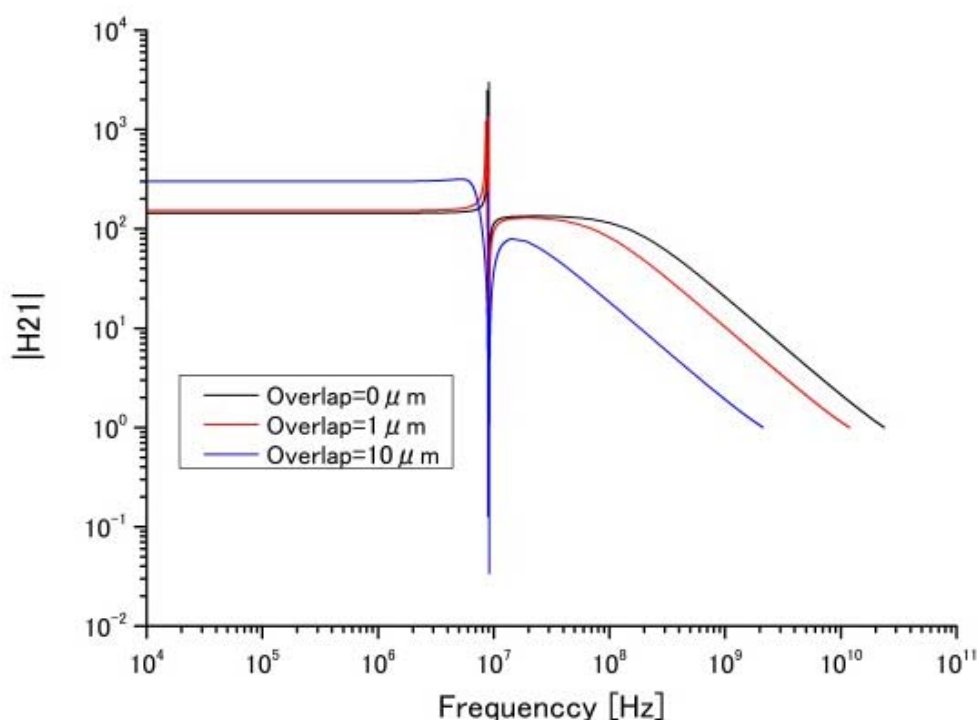


図 V.1.4.3 (ii) -3-7. H21 のオーバーラップ量依存性

(ii) -3 試作による検討

(ii) -3.1 デバイスの作製手法

我々はリング型振動子のリング側壁に N チャネル MOSFET を作製することで VB-FET を作製した。VB-FET を作製する上で最も重要となる点は、ゲート・チャネル間のギャップをいかに作製するかである。それは、絶縁層が従来の SiO₂ から Air もしくは真空になることで誘電率が大きく異なるためであり、VB-FET のトランジスタ特性を向上させるため

にはできる限りギャップを狭くすることが求められるからである。一般的にこのような狭ギャップは EB リソグラフィを用いることで数十 nm まで作製が可能であるが、VB-FET のように高アスペクト性も求められるとその技術難易度が非常に高い。よって我々は、ゲートとチャンネル・ソース・ドレインをそれぞれ別に作製し、その過程で SiO₂ により犠牲層を形成し、その後フッ酸で除去することで狭ギャップを実現した。我々が用いた作製方法の詳細は次の通りである (図 V.1.4.3 (ii) -3-1)。まず、(a)Si 基板に酸化炉にて 2 μm の SiO₂、さらにその上に CVD で 2 μm の Poly-Si を形成することで疑似 SOI を作製した。デバイス層を Poly-Si で作製することで、本モデルと同様にバックゲートを無視できるものとした。その後デバイス層全面にボロン(B)をイオンインプラし P 型にした。(b)ソースとドレインにはリン(P)とヒ素 (As) を、バックゲートにはボロン(B)と BF₂ をイオンインプラすることでそれぞれ N 型と P+型にした。(c)次にソースとドレインをフォトリソグラフィにて形成する。(d)その後、基板全体を 0.2 μm 酸化することで、ゲート・チャンネル間のギャップを形成する。(e)次にゲートを作製するための Poly-Si を全体に積層する。(f)そして、CMP により表面を研磨し、デバイス表面を平坦にする。(g)ゲートをフォトリソグラフィにて形成する。(h)最後にフッ酸により BOX 層を除去し、リリースする。最後に全体を酸化する。このように作製したデバイスの写真および全体像を図 V.1.4.3 (ii) -3-2・3・4・5 に示す。

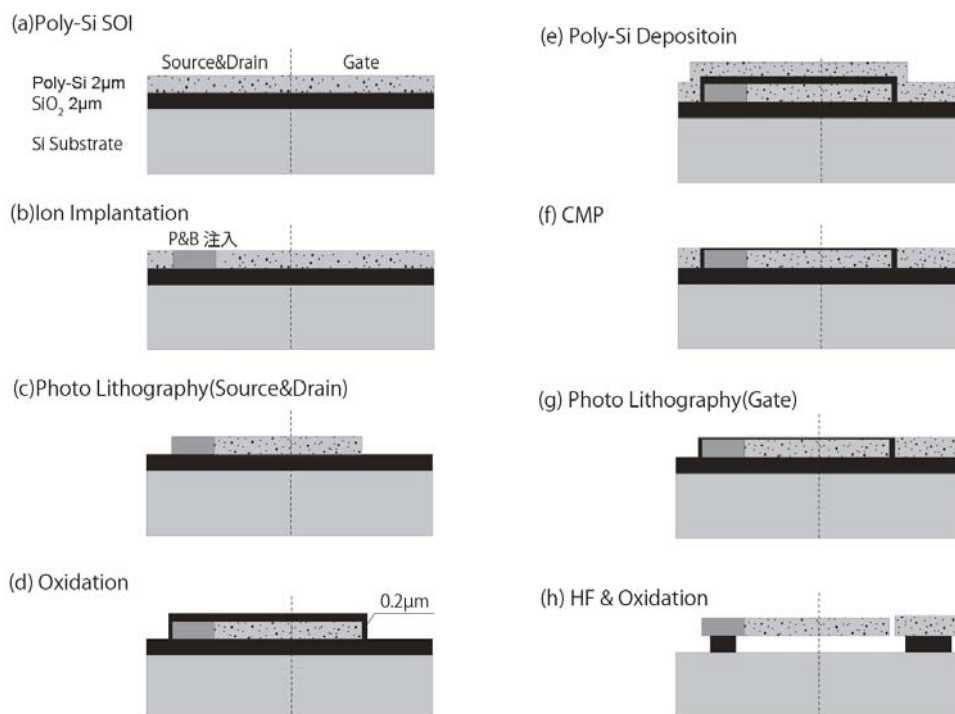
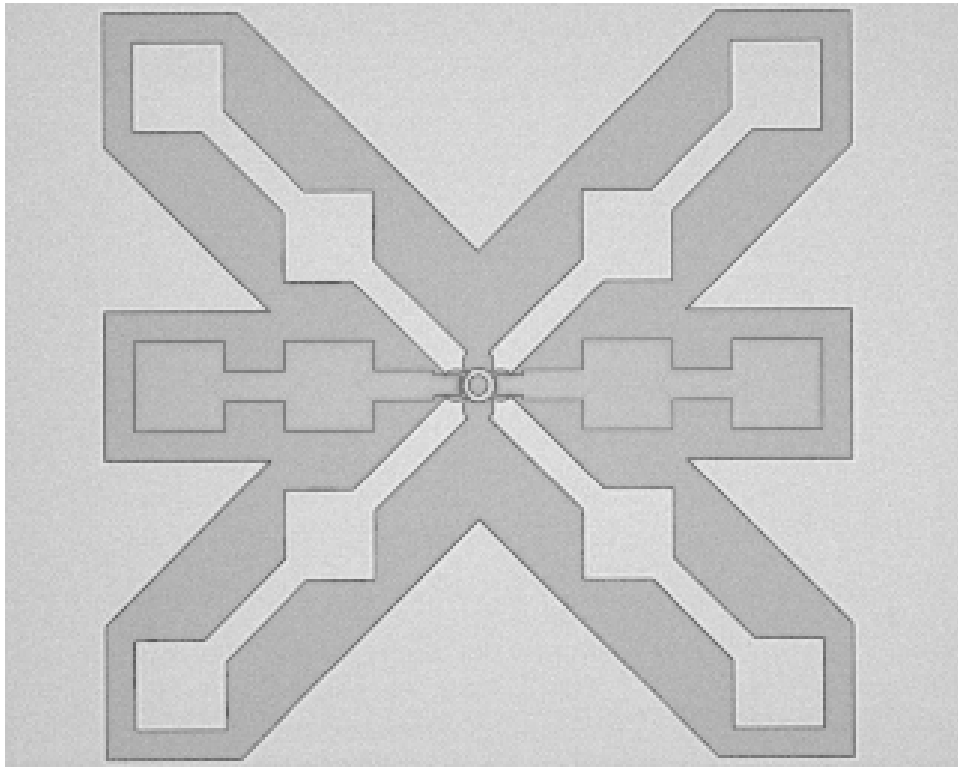
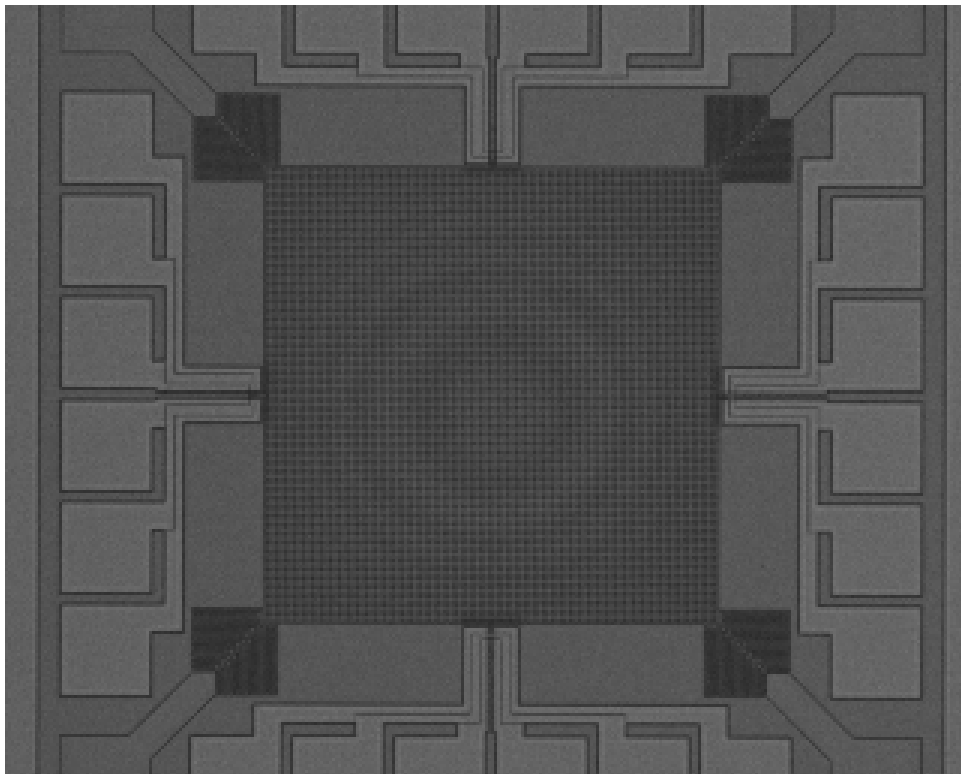


図 V.1.4.3 (ii) -3-1.8 インチウエハによる基礎構造デバイス作製プロセスフロー



図V.1.4.3 (ii) -3-2.作製した基礎構造デバイスの写真



図V.1.4.3 (ii) -3-3.作製したデバイスの写真①

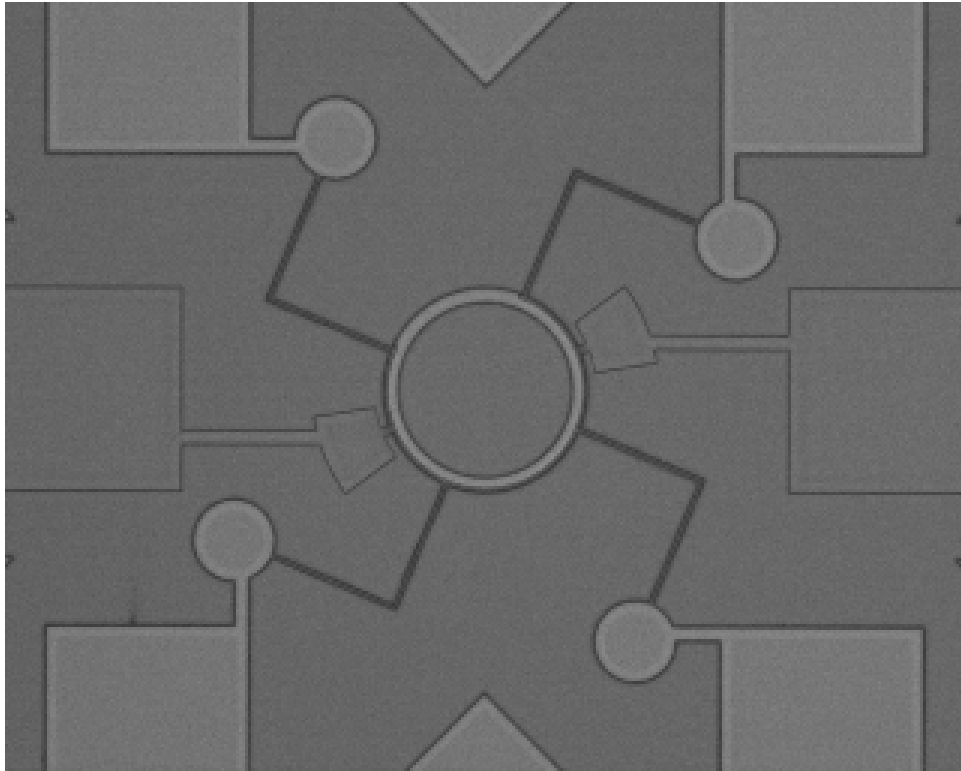


図 V.1.4.3 (ii) -3-4.作製したデバイスの写真②

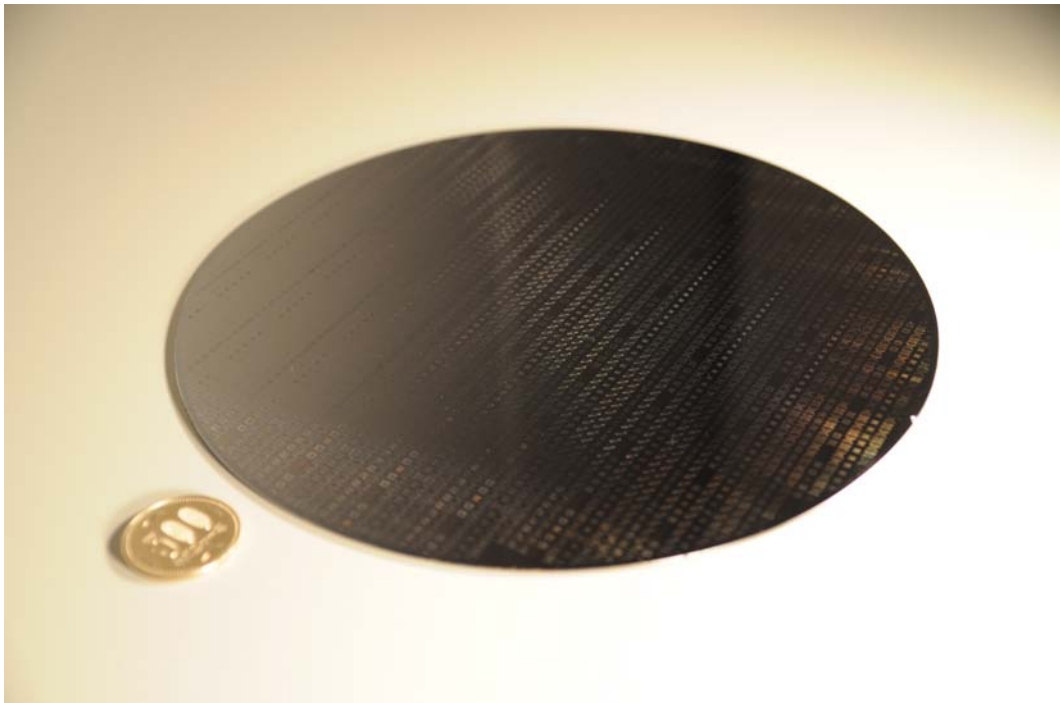


図 V.1.4.3 (ii) -3-5.作製した基礎構造デバイスの 8 インチ全体像

(ii) -3.2 試作による課題抽出と展望

我々は、本デバイスをチップや 2 インチサイズなどの研究レベルでは無く、作製プロセスを工夫することにより一般的なファンドリメーカーでかつ 8 インチサイズで作製することに成功した。これにより、本デバイスが一過性のプロセスではなく、量産に耐えうるプロセスで作製できることを確認した。また、歩留りを低下させるプロセス課題も抽出できた。具体的には、工程 (f) における CMP 工程の影響により裏面、BOX 層、表面の SiO₂ の膜厚が異なり、ウエハの反りが発生し、その影響でゲート部分に割れが発生することが判明した。対策として、裏面を CMP で追加研磨することで反り量を最適化することとゲートデザインにおいて応力集中しやすい角形状から曲線形状に変更することが考えられる。

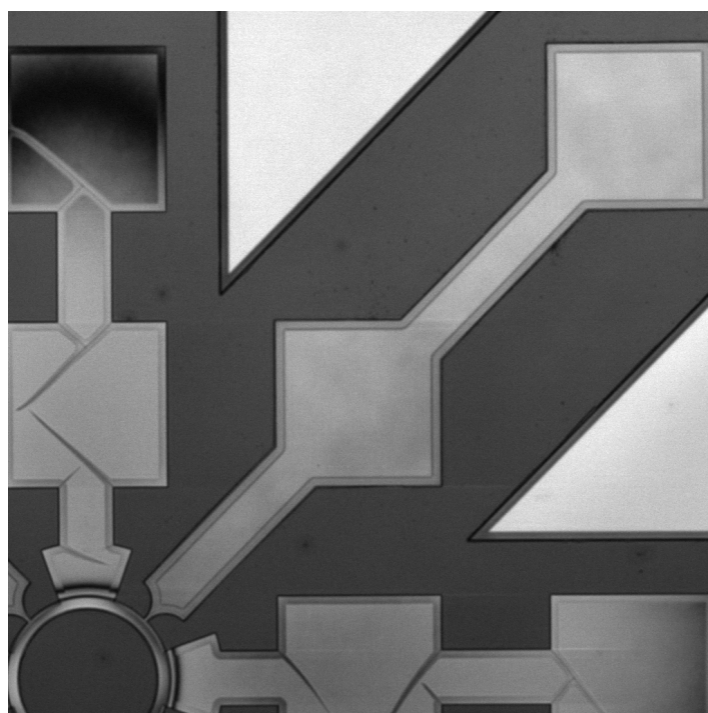


図 V.1.4.3 (ii) -3-6 作製した基礎構造デバイスの亀裂写真

(ii) -4 まとめ

本研究では、超低損傷ドライエッチング技術の効果を最大限に発揮できるデバイス構造として Coupled VB-FET に注目し、シミュレーションと試作を通じ検討を行った。シミュレーションでは、チューナブルバンドパスフィルタや加速度センサなどの実現の可能性を示した。一方で集積化構造であるために、本研究において考察した相互作用を考慮したモデリングおよび設計でなければ適切な設計ができないことも判明した。また、試作では 8 インチファンドリでの作製を通じ、量産への可能性を示した。一方で CMP での反りによるゲート部の割れが判明し、具体的な課題を抽出できた。今後は、本デバイスの特徴を発揮できる高周波チューナブルバンドパスフィルタの作製とその評価を進める。

(ii) -5 参考文献

- (1) D. Grogg and A. M. Ionescu, TRANSDUCERS & EUROSENSORS 2007, (2007), 1709-1712
- (2) D. Grogg and A. M. Ionescu, ESSDERC2009, (2009), 14-18
- (3) G.Hashiguchi, JSME annual meeting, (2007), pp.707-708

(iii) パーティクルセンサのMEMS化

(iii) -1.1 研究の目的

クリーンルームの壁や装置壁面、人の衣服など様々な場所に配置し、クリーンルームの局所的なクリーン度を計測することをめざし、現状で、小型化、低コスト化が困難なパーティクルカウンタに関し、MEMS化を検討する。具体的には、小型化の課題であるパーティクルの検出方法を複数比較・検討し、その結果に基づき試作および検出原理の確認を行うことを目的とする。また、小型化に伴い、少量サンプルからのクリーン度を統計的に見積もる方法を検討する。

クリーンルームでは、ファンフィルタユニット (FFUs) によりダウフローを発生させることで、空気中に浮遊するパーティクルを排除し、クリーン度を維持している。現状では、FFUs の出力は、発塵量の多少にかかわらず一定出力で駆動されており、発塵量が少ないときには、クリーンルーム内のクリーン度が必要以上の値になっている場合がある。近年、クリーン度が必要以上の値になっている領域において、FFUs の出力を抑えるといったような、必要な時、必要な場所で、必要な分だけ FFUs を駆動するといった制御を行うことでクリーンルームの消費電力を抑えようという考えが提案されている。このような FFUs の制御のためには、クリーンルーム内の局所的なクリーン度を把握することが必要となり、クリーンルームの壁や装置壁面、人の衣服など様々な場所に配置可能な小型のパーティクルカウンタが求められる (図 1.4.3 () .1.1-1)。現在市販されているパーティクルセンサは、計測対象となる領域の空気を取り込み、取り込んだ空気に光をあて、空気中に含まれる浮遊粒子による散乱光を計測することで、単位体積当たりのパーティクル数を算出し、クリーン度に変換している (図 1.4.3 () .1.1-2)。市販のパーティクルセンサの構成として、ポンプなどの空気取り込み機構、パーティクルに光を当てるためのレーザ、浮遊粒子による散乱光を計測するためのフォトダイオード、レーザ光や散乱光を集光することで、計測信号を増大させるためのレンズ系、浮遊粒子を含む空気が流れる流路からなる。機能の面から考えると、パーティクルの取り込みおよびパーティクルの検出に分けられる。パーティクルの取り込みにおいては、ポンプなどの空気取り込み機構を用いることで、一定量の空気を取り込むことが可能となり、再現性を向上させている。パーティクルの検出においては、レンズ系により、レーザ光や散乱光を集光し、計測信号を増大させることで感度が向上している。しかし、取り込み機構やレンズ系はパーティクルセンサ全体としてのサイズが大きくなる要因となっており、クリーンルームの様々な場所に配置するという用途には向かない。そこで本項目では、パーティクルセンサの MEMS 化を検討する。ただし前述したとおり、市販のパーティクルセンサは感度や再現性を確保するためサイズが大きくなっており、小型化により感度や再現性が低下することが予想される。したがって、小型のパーティクルセンサの使い方として、市販のパーティクルセンサと併用してクリーンルーム内のクリーン度の傾向管理を行うことを想定して小型化の検討を行った。パーティクルの取り込みについては、ポンプの代わりにクリーンルームのダウフローやエアシャ

ワーなどの環境の流れを用いることを想定し、パーティクルの検出については、光学的・電氣的な方法について比較を行った。その結果に基づき、光学的な検出方法によりパーティクル検出部を構成し、実際にパーティクルの検出を行った。また、小型化に伴いパーティクルセンサにおけるサンプリング体積は小さくなるため、少量サンプルからクリーン度を見積もる統計的な手法について検討をおこなった。

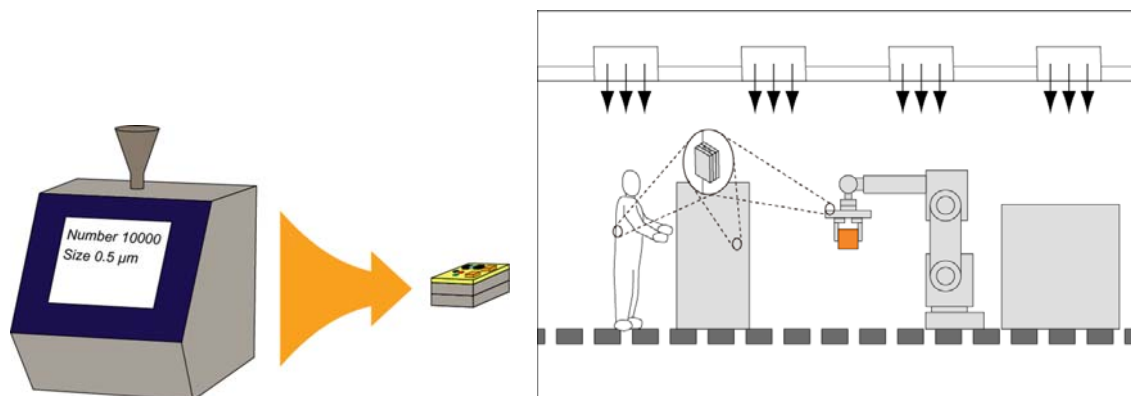


図 .1.4.3 () .1.1-1 小型パーティクルセンサの配置概念図

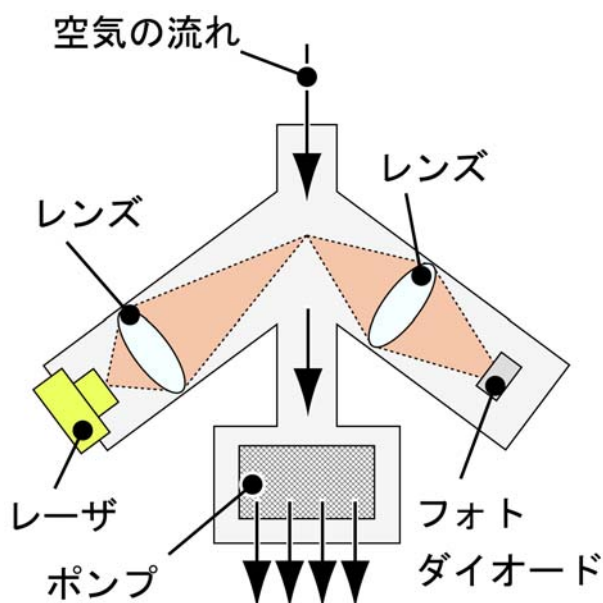


図 .1.4.3 () .1.1-2 一般的なパーティクルセンサの構成

(iii) -1.2 パーティクルセンサの構成

一般的なパーティクルセンサは、パーティクルの取り込み部、パーティクルの検出部を持ち、それぞれにおいて小型化の課題がある。パーティクルの取り込み部については、一般的にはポンプを用いて一定の流量を取り込むことで再現性を高めているが、ポンプのサイズが大きく、小型化の課題となっている。そこで、ポンプなどの取り込み機構を用いる代わりに、クリーンルームのダウンフロー(0.3 m/s)、エアシャワー(25 m/s)などによる空気の流れ、ウエハ搬送アーム(1.2 m/s)や人の歩行(1.1 m/s)によるセンサの移動などによる空間との相対運動による流れなど、周囲の環境によって生じる流れを利用して取り込むこととし、パーティクルセンサとして、取り込み機構を持たない構成とした。この場合、パーティクル検出部に導入される流量は環境の流れに依存し不安定なため、検出部には流量センサを設置可能な構成とする(特許[1])。環境の流れが利用できない場合においては、ポンプを外付けすることで、パーティクルセンサとして機能させることも可能である。パーティクル検出部については、パーティクル検出のための光学系が小型化の課題となっている。本報告では次節において、光学的・電気的な検出方法を複数検討する。提案するパーティクルセンサの概念図を図 1.4.3 () .1.2-1 に示す。パーティクルセンサの流路内に取り込まれた空気の流量と空気中に含まれるパーティクルがそれぞれ計測され、単位体積あたりのパーティクル数を求めることができる。

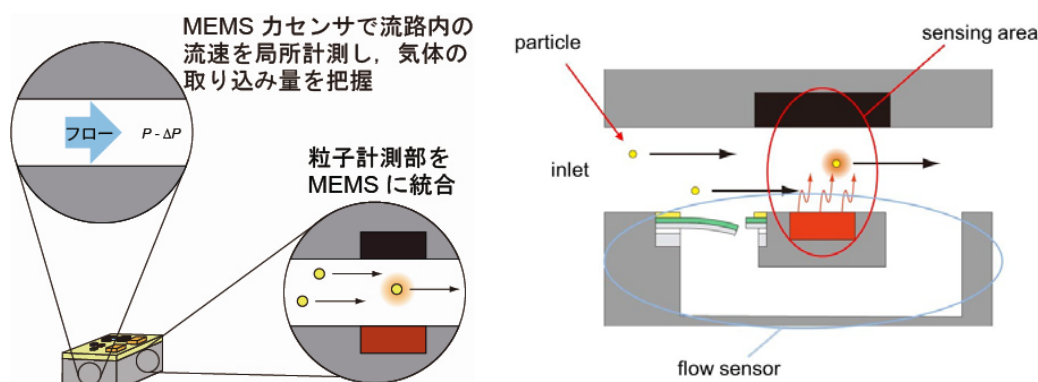


図 1.4.3 () .1.2-1 流量計測機能をもつパーティクルセンサ

(iii) -1.3 パーティクル検出方法の検討

検出方法として、電気特性計測型、質量計測型、光学量計測型の3方式について検討し、有効性を比較する。JIS規格において、クリーン度計測の対象となる粒径は $0.1\sim 5\ \mu\text{m}$ とされているため、直径 $0.5\ \mu\text{m}$ のパーティクルについて検討した。また、クリーンルームの傾向管理を行うにあたり、JIS規格におけるクラス6~8程度を対象クリーン度とした。

電気特性計測型

電気特性計測型の検出原理として、流路の壁面に対向電極を形成し、パーティクルが電極間を通過することによる静電容量の変化を計測する方法について検討した。流路の断面積を $0.5 \times 0.5\ \text{mm}^2$ とし、図 .1.4.3 () .1.3-1 のように流路の壁面に電極を形成した場合に、直径 $0.5\ \mu\text{m}$ のパーティクル1個が電極間を通過した際のパーティクルの誘電率に応じた静電容量の変化率を示したグラフを図V.1.4.3 (iii) .1.3-2 に示す。電極の幅を $0.5\ \mu\text{m}$ とした場合、電極間の静電容量は $0.5\ \mu\text{F}$ となる。この時、通過したパーティクルがシリコンだとすると、シリコンの誘電率は $2.4\ \text{F/m}$ なので、 $0.5\ \text{pF}$ 以下の静電容量の変化を計測する必要がある。流路の断面積を変えず、電極間距離を小さく、電極厚みを大きくするよう形状にすることで、信号変化率を増加することができるが、電極間距離を $1/10$ 、電極厚みを 10 倍にしても信号変化率は 100 倍にしかならない。また、センサまでの配線部分も大きく影響するため、センサモジュール内でこの容量変化を計測するのは困難である。

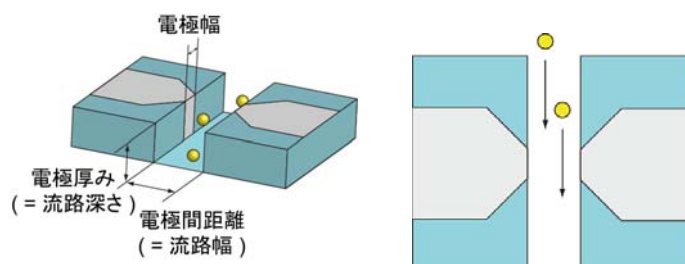


図 .1.4.3 () .1.3-1 静電容量計測によるパーティクルの検出

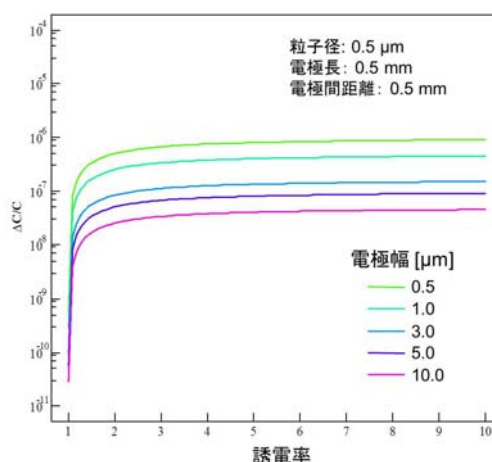


図 .1.4.3 () .1.3-2 パーティクル検出部の比較

質量計測型

質量計測型の検出原理として、Quartz Crystal Microbalance(QCM)について検討を行った。QCMは、表面に物質が付着することによって変化する共振周波数の値から、付着した物質の質量がわかるというものである。QCMにおいて、

$$\Delta f = \frac{2 \cdot f^2}{S \cdot \sqrt{\rho \cdot \mu}} \Delta m \quad (\text{Sauerbrey の式})$$

から、共振周波数変化を計測することで表面に付着した物質の質量を求めることができる。ここで、 f はセンサの周波数、 Δf は周波数の変化量、 S はセンサ面積、 ρ は水晶の比重($2.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)、 μ は水晶のせん断応力($2.9 \times 10^{10} \text{ g/cm} \cdot \text{s}^2$)、 Δm は吸着したパーティクルの質量を表す。センサ周波数 9 MHz、センサ領域が直径 5 mm の円形のセンサにおいて、直径 0.5 μm のシリコンパーティクル 1 個がセンサ表面に付着したとき、11 Hz の周波数変化がある。たとえば、クラス 7 のクリーンルームの場合、粒子が均一に分散しているとすると、センサには平均的に 8.3 個/s のパーティクルが吸着することになる。したがって、91 Hz/s 程度の信号変化を計測することが求められるが、現状この感度をセンサモジュールとして組み込むのは困難である。また、QCM センサの特徴として、センサにパーティクルが吸着するにつれ、感度が落ちるといった特徴がある(図 .1.4.3 () .1.3-3)。8.3 個/s のペースで粒子が吸着すると 18 時間程度で感度が 1/10 になってしまい、実際に使用する際には、頻繁にメンテナンスをする必要がある。そのため、クリーンルーム内に複数個配置して使用するという用途には向かない。

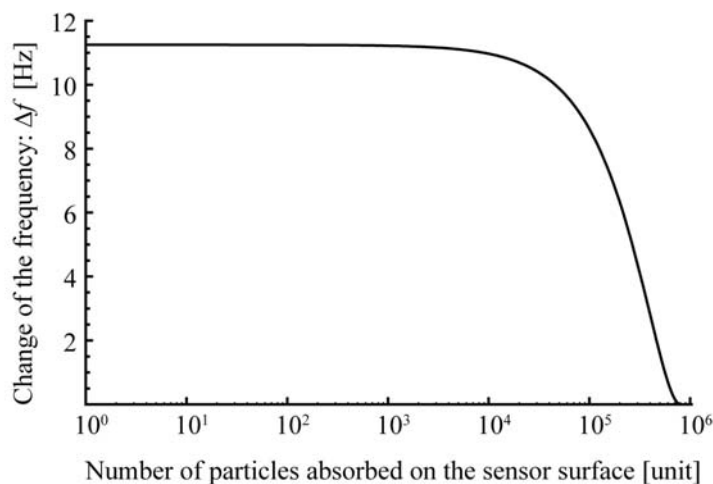


図 .1.4.3 () .1.3-3 QCM センサに吸着した粒子数と単一粒子あたりの周波数の変化量

光学量計測型

光学量計測型の検出原理として、市販のパーティクルセンサで利用されている光の散乱

光を計測する方法について検討した。すでに述べたとおり、市販のパーティクルセンサの原理は、計測対象となる領域に集光したレーザ光を照射し、計測対象に含まれる粒子において散乱された光を集光してフォトダイオードで検出するものである。ここで、微弱な散乱光を計測可能とするため、集光レンズが組み立てられており、小型化の障壁となっている。

ここで、散乱光の空間分布に関して考察する。パーティクルセンサの光源として 660 nm の波長を持つレーザを用いたとき、0.1~5 μm の大きさのパーティクルに対する散乱光はミー散乱が支配的になる。そこで、0.5~1 μm のパーティクルにおけるミー散乱のシミュレーションを行った。詳細な条件と結果を図 .1.4.3 () .1.3-4 に示す。市販のパーティクルセンサにおいて、フォトダイオードは 0~30° の位置に配置されている構成が多く、ミー散乱光を検出するには非常に効率が悪い構成となっていることが分かった。さらに、シミュレーションの結果をみると、レーザ光の進行方向と同一方向 ($\theta=90^\circ$ 付近) や逆方向 ($\theta=-90^\circ$ 付近) へのミー散乱強度が大きいことが分かった。例えば大きさ 1 μm のパーティクルにおける $\theta=90^\circ$ のミー散乱強度は、 $\theta=0^\circ$ のミー散乱強度と比較し、約 100 倍の強度であった。これは、光源とフォトダイオードの位置関係を改善するだけで 100 倍の感度を得られることを示しており、集光レンズが不要になる可能性、つまり小型化の可能性はある。

以上の検討により、パーティクルの検出方式として、すでにパーティクルを検出できている光学的な手法を小型化する構成を検討する。

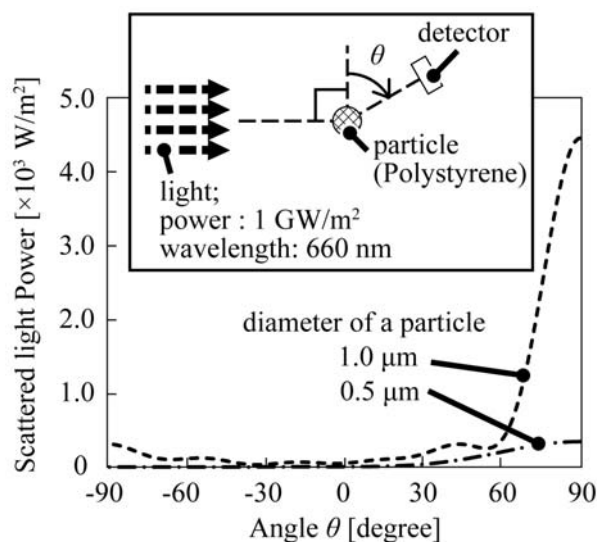


図 .1.4.3 () .1.3-4 ミー散乱シミュレーションの結果

(iii) -1.4 パーティクル検出部の構成の検討

(iii) -1.3 において、パーティクルセンサを小型化する際に、光学的手法が適していることが分かった。すでに述べたとおり、光学的手法が一般的に使用されている従来のパーティクルセンサは、レーザ、フォトダイオード、集光レンズ、ポンプ、流路から構成されており、検出部においては、集光レンズを含む光学系が小型化のボトルネックとなっている。そこで本項では、光学的な検出方法に関して、光源とフォトダイオードの位置関係を工夫することで、レンズ系を持たない構成でのパーティクルの計測可能性の検討を行った。

(iii) -1.4.1 平面型パーティクルセンサ

検出部を小型化する構成として、まず、光源となる LED と受光部となるフォトダイオードを同一面内に構成することを検討した。レンズ系の構成要素を一か所にまとめることで検出部全体の小型化をはかった。図 V.1.4.3 (iii) .1.4-1 に提案する手法でパーティクルを計測する原理を示す。検出部は、フォトダイオードの中心にピンホールがあいており、その穴を通して LED の光が照射される構造となっている。LED から計測対象領域に光を照射し、対象領域内で散乱した光をフォトダイオードで受光し、フォトダイオードの出力から粒子密度を見積もる。検出部の製作プロセスを図 V.1.4.3 (iii) .1.4-2 に示す。まず、p 型にドーブしたシリコンウエハの一部を、電極をとるために DRIE にてエッチングした。次に、LED の光を通すためのピンホール、LED を配置するための穴を、シリコンウエハを DRIE にてエッチングすることで構成した。さらに、表面に金を蒸着することで電極を形成し、フォトダイオードに対して裏から直接 LED の光が入らないように反射防止膜として裏面にアルミを蒸着した。最後に、LED をはんだ付けした銅基板にかぶせるように、フォトダイオードを配置した。

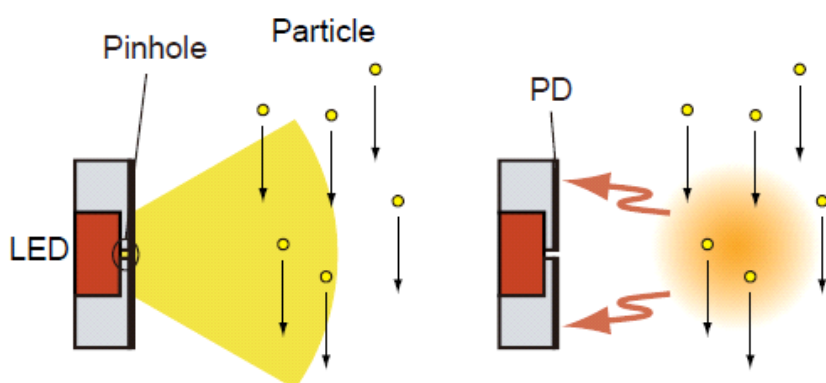


図 .1.4.3 () .1.4-1 平面型パーティクルセンサのパーティクル検出原理

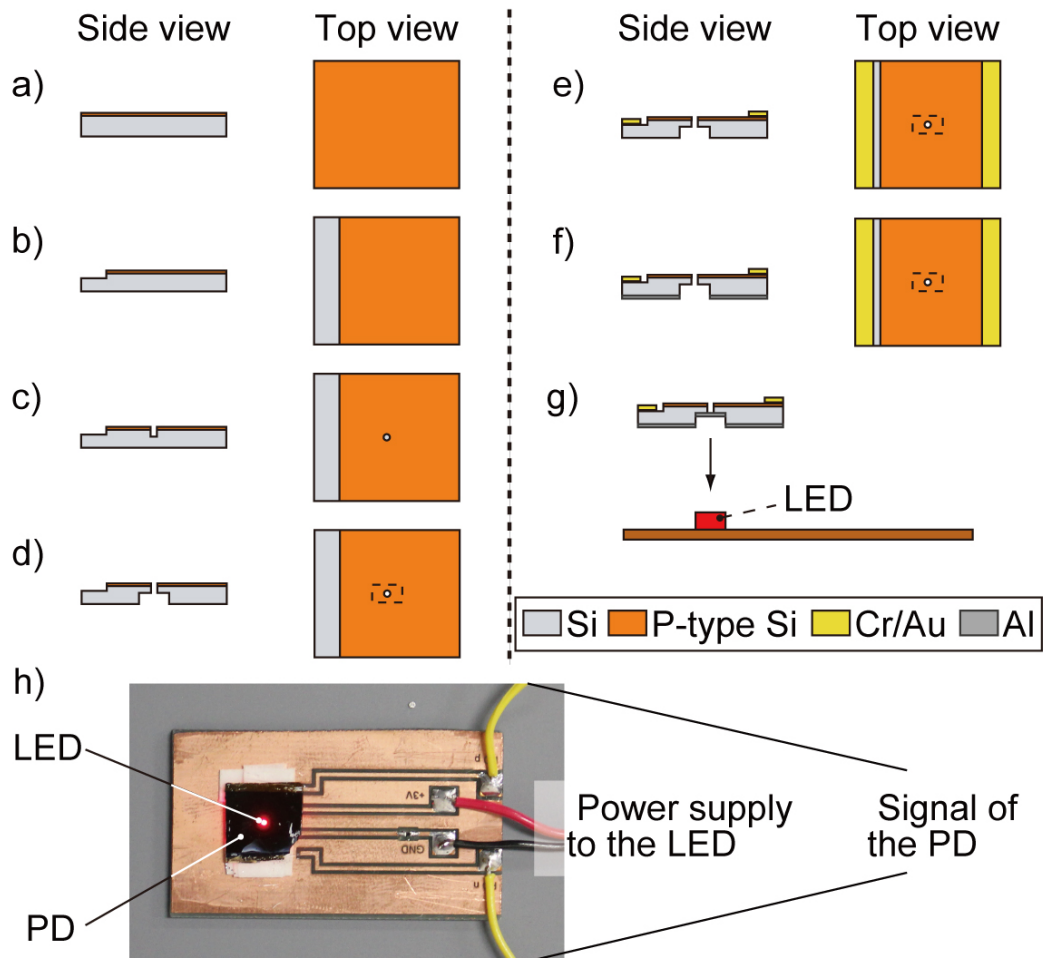


図 V.1.4.3 () V.1.4-2 平面型パーティクルセンサの製作プロセス

シリカビーズを用いたパーティクル検出原理確認

試作した検出部を用いて粒子密度の変化が計測できるかどうかを確認するために、ガラス基板上にシリカビーズを分散させ、分散させる密度を変化させたときの検出部の出力を計測した。シリカビーズを分散させたガラス基板は、ガラス基板上にシリカビーズを含む水を一定量たらし、水を乾燥させることで製作した。このとき、シリカビーズを含む水のシリカビーズの濃度を変化させることで、ガラス表面上のシリカビーズの粒子密度を変化させた。粒子密度は、粒子がない場合から、 10×10^4 個/mm² まで、 10^4 個/mm² ごとに变化させ計測を行った。図 V.1.4.3 (iii) V.1.4-3 のように、試作した検出部の前面にシリカビーズを分散させたガラス基板を配置し、LED の光を照射したときのフォトダイオードの開放電圧を計測した。計測結果を図 V.1.4.3 (iii) V.1.4-4 に示す。グラフを見ると、粒子密度の増加に伴い、開放電圧が増加していることがわかり、試作した検出部で粒子密度の変化を検出することができることを示した。ただし、計測した粒子密度は、クリーンルームの粒子密度に比べ、大きな値となっているため、検出部の感度向上が必要となる。

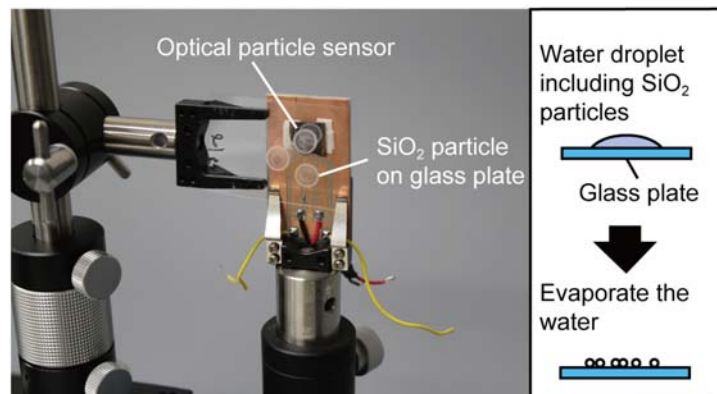


図 .1.4.3 () .1.4-3 粒子密度計測セットアップとシリカビーズ分散基板の製作方法

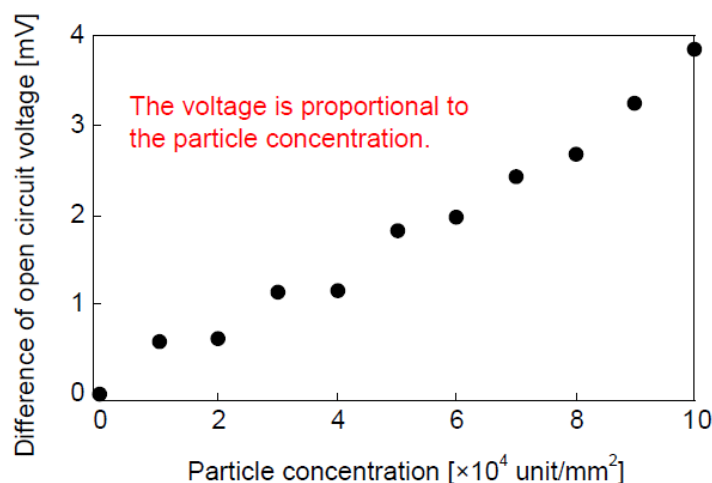


図 .1.4.3 () .1.4-4 粒子密度に応じたフォトダイオードの出力

(iii) -1.4.2 計測可能領域拡大大型パーティクルセンサ (学会発表[1]、特許[2])

次に、レーザー光をミラーにより多数回反射させ、粒子の散乱が起こる領域を拡大した構成のパーティクルセンサについて検討した。このとき、散乱光強度の空間分布特性に基づき、散乱光を効率よく検出する構成とした。提案するパーティクルセンサの構成 (図 .1.4.3 () .1.4-5) は、2つのミラーとレーザー及びフォトダイオードから構成される。ここで特にレーザー光とフォトダイオードの位置関係をミー散乱シミュレーションの結果に基づき設計した。具体的には、図 .1.4.3 () .1.4-6 に示すように、レーザー光とフォトダイオードが平行になるように配置されている。レーザー光の光路にパーティクルが存在した場合、パーティクルからのミー散乱光はレーザー光進行方向 ($\theta = 90^\circ$) に強く散乱される。このとき、レーザー光とフォトダイオードの距離が近ければ、 $\theta = 90^\circ$ に近い散乱光も検出でき、従来のパーティクルセンサと比較し、ミー散乱光を効率的に検出可能である。さらに、レーザー光を

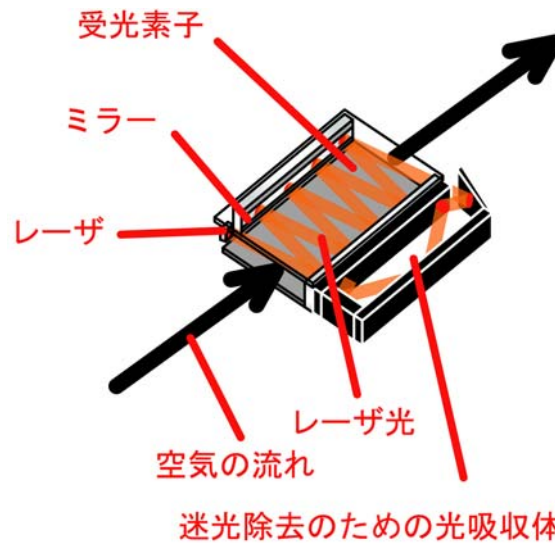


図 .1.4.3 () .1.4-5 提案するパーティクルセンサの概念図

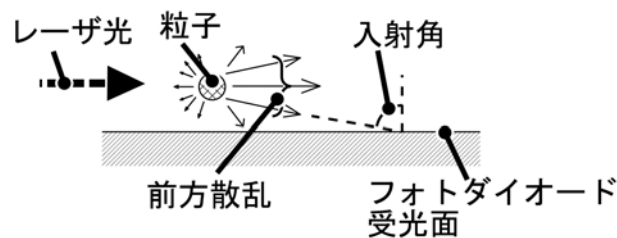


図 .1.4.3 () .1.4-6 図 .1.4.3 () .1.4-5 に示した構成における前方散乱とフォトダイオードに入射する入射光の関係

ミラーにより反射させ、光路長を長くすることで計測可能領域を拡大し、パーティクルからの散乱光を増加させることができる。以上のように図 .1.4.3 () .1.4-5 に示した構造を用いることで集光レンズを用いることなく、従来のパーティクルセンサと比較して効率良く散乱光を検出できることが期待できる。

線香の煙を用いたパーティクル検出原理確認

図 .1.4.3 () .1.4-5 に示したパーティクルセンサの原理検証を行うことを目的とし、簡易的な光学系を組むことでパーティクル検出実験を行った。図 .1.4.3 () .1.4-7 に実験セットアップを示す。実験セットアップは光学系として、レーザ、ミラー、フォトダイオードから構成されている。図 .1.4.3 () .1.4-5 で示したパーティクルセンサと同様に、レーザ光を 2 枚のミラーで反射させている。それらのミラーの間にフォトダイオードを配置した。今回、フォトダイオードは市販のフォトダイオード (Kyosemi、KPD3065C) を使用した。ミラー間で反射を繰り返しているレーザ光に向かって線香の煙を噴射させ、線香の煙で散乱されたレーザ光をフォトダイオードで検出する。このとき、フォトダイオード

ドから得られる信号強度を増幅させるために pre-amplifier および Lock-in Amplifier を使用した (図 .1.4.3 () .1.4-7)。一般に、Lock-in Amplifier を使用することで S/N 比を大幅に向上させることができる。

図 .1.4.3 () .1.4-8 に実験結果を示す。Lock-in Amplifier からの信号と、Pre-Amplifier から直接得られる信号を併せて載せてある。Pre-Amplifier から得られた信号は、線香の煙噴出時にも反応していないが、Lock-in Amplifier を通して得られた信号は顕著に反応が得られていることが分かる。

以上より、図 .1.4.3 () .1.4-5 に示したパーティクルセンサの構成でパーティクルを検出できる可能性が示された。改善すべき課題として、フォトダイオードの感度を向上させる必要がある。特に、今回提案している構成に対して感度良く信号を検出できるようなフォトダイオードを開発する必要がある。その1つとして、マイクロ構造を有するフォトダイオードを提案する (詳細は (iii) -1.6 に示す)。他にも、迷光の低減など改善の余地は多く、さらなる検討が必要となる。

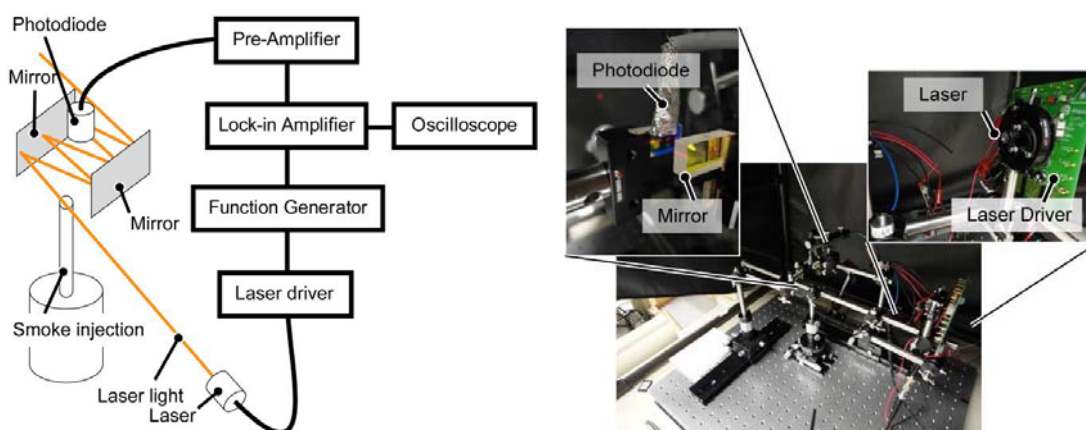


図 .1.4.3 () .1.4-7 実験セットアップ

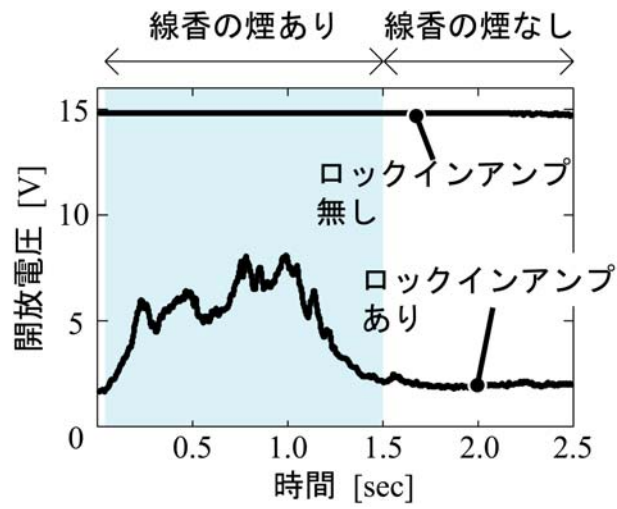


図 .1.4.3 () .1.4-8 市販のフォトダイオードを用いた線香の煙検出実験

(iii) -1.5 マイクロ構造をもつフォトダイオード (学会発表[2、3]、特許[3])

(iii) -1.4.2 で示した構成のパーティクルセンサにおいて、フォトダイオードに対して大きな入射角で照射する散乱光を検出することが必要となるが、平坦な表面形状を有するフォトダイオードでは表面の反射により大きな入射角での感度が悪い。反射を防ぐために微細構造を受光面に形成する研究は古くから提案されている (参考文献[1])。また、近年では、ナノ構造を表面に形成し、反射率を抑える研究が数多く提案されている (参考文献[2、3]) が、これらナノ構造形成プロセスは、スループットが悪く、高価である。そこで、安価で小型のパーティクルセンサを実現するために、フォトリソグラフィで形成できるマイクロオーダの構造を表面に作りこむことにより反射を抑える方法を提案する (図 .1.4.3 () .1.5-1)。マイクロ構造に大きな入射角を持った光が入射したときの伝搬光の挙動の模式図を図 .1.4.3 () .1.5-2 に示す。図 .1.4.3 () .1.5-2(a)、(b)はそれぞれテーパ構造、逆テーパ構造の例である。逆テーパ構造を有する場合、テーパ構造に比べ、効率良く多重反射を利用できることが分かる。図 .1.4.3 () .1.5-2(b)に示すような逆テーパを有するマイクロ構造を試作し、多重反射の効果を利用することで入射角の大きな光を効率的に検出できるフォトダイオードの実現を目指した。

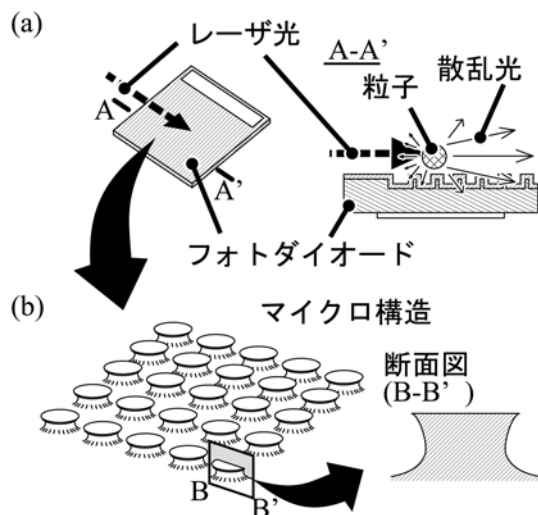


図 .1.4.3 () .1.5-1 (a)パーティクルセンサ用光学系システムの概念図
(b)マイクロ構造の概念図

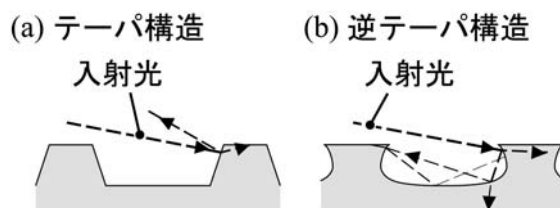


図 .1.4.3 () .1.5-2 (a)テーパ構造と(b)逆テーパ構造のマイクロ構造を持つ表面上の入射光の伝搬の様子

フォトダイオードの試作

マイクロ構造を持つフォトダイオードの試作プロセスのプロセスフローを図 .1.4.3 () .1.5-3 に示す。本報告では、厚み $250\mu\text{m}$ の p 型 Si ウエハに熱酸化により SiO_2 膜を形成した。次に、Si をエッチングする際のマスクとして使用するために、この SiO_2 膜をパターンした。その後、逆テーパのマイクロ構造を製作するため、DRIE を用いて Si をエッチングした。形成されたマイクロ構造の表面を熱拡散によりドーピングした。ドーピング条件は参考文献[4]を参照した。次に、テクスチャ構造が存在する表面の一部に Al 電極を形成し、アニール処理を行った。最後に、裏面に Al 電極を形成した。図 .1.4.3 () .1.5-4 に逆テーパ構造を形成するための DRIE の詳細なエッチング条件を示した。まず、Si ウエハをボッシュプロセスによりエッチングする。その後、 SF_6 のみを用いて等方性エッチングを行う。このようなプロセスを行うことで図 .1.4.3 () .1.5-5 に示すような逆テーパ構造を形成することができた。このマイクロ構造はピッチ $40\mu\text{m}$ で規則的に並んでおり、側面の中央付近にくぼみを持った円柱構造をしている。上部とくぼみ部分の直径は、それぞれ $20\mu\text{m}$ と $15\mu\text{m}$ であった。また、高さは $10\mu\text{m}$ であった。なお、等方性エッチングのみで Si のエッチングをおこなうと、図 .1.4.3 () .1.5-4(cf) のような形状が形成される。したがって、逆テーパ構造を得るためには等方性エッチングの前に、ボッシュプロセスによる異方性エッチングプロセスが必要となる。

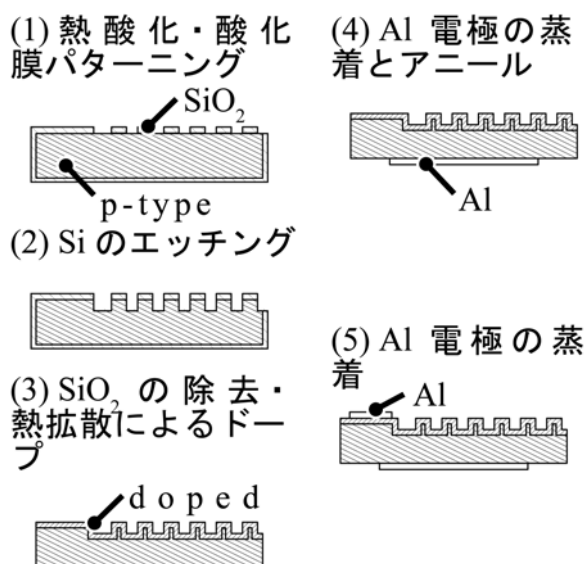


図 .1.4.3 () .1.5-3 プロセスフロー

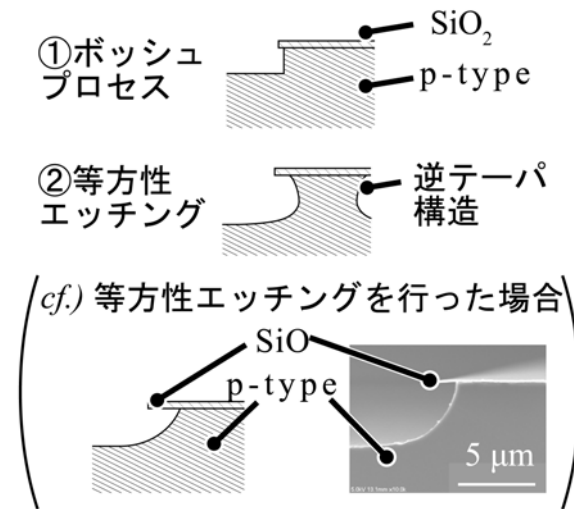


図 .1.4.3 () .1.5-4 逆テーパ構造のエッチング条件

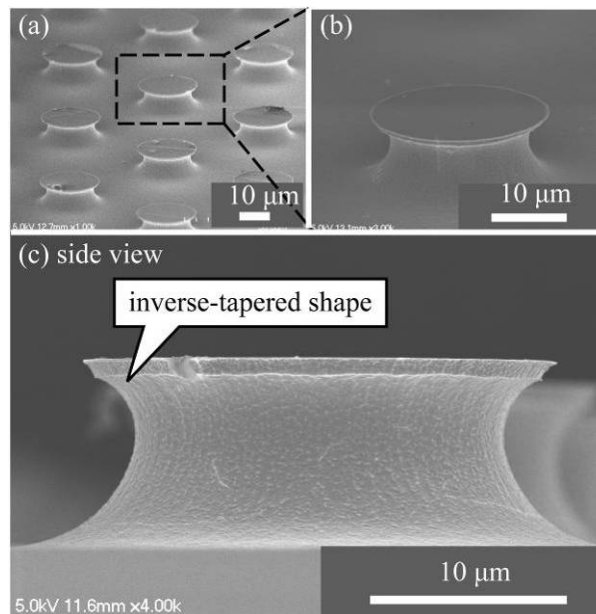


図 .1.4.3 () .1.5-5 試作した逆テーパ構造を持つフォトダイオードのSEM写真

表面のドープ状態の分析

試作したマイクロ構造の表面、特に逆テーパ部の表面がドープされていることを確認するため、拡がり抵抗顕微鏡(SSRM)を用いて表面の観察を行った。図 .1.4.3 () .1.5-6(a)に観察領域を示す。観察領域は、それぞれ、(i)逆テーパ部および(ii)平面部である。観察試料製作手順を以下に示す。まず、電極としてマイクロ構造表面にPtを蒸着する。その後、基板全体をエポキシ樹脂でコーティングする。最後に機械研磨により観測断面を形成する。製作した断面にプローブをあてることにより、プローブとPt電極との間の抵抗値を計測し、

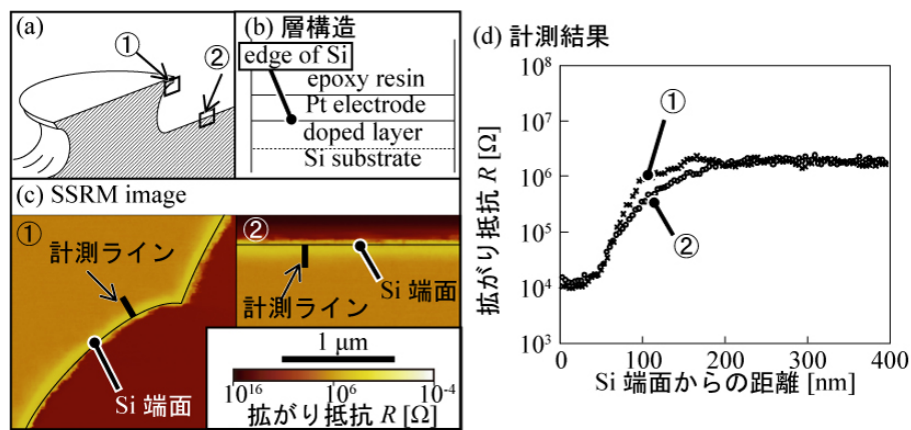


図 .1.4.3 () .1.5-6 SSRMによる観察結果 (a)マイクロ構造の断面図と観察箇所 (b)観察断面の層構造の模式図 (c)SSRM像 R :抵抗 (d)Si端面からの距離と拡がり抵抗の関係

拡がり抵抗を算出する。観察領域の膜構造は図 .1.4.3 () .1.5-6(b)のようになる。図 .1.4.3 () .1.5-6(c)にSSRMの観測像を示す。図中の黒線はSi層のエッジを示している。図 .1.4.3 () .1.5-6(d)はSi層のエッジからの距離と拡がり抵抗の関係を示している。(i)と(ii)の結果は共に140nm程度の領域で低抵抗層が形成されている。すなわち140nmのドーブ層が形成されている。この結果は、参考文献[4]で示されているSIMSデータと一致している。これらの結果からマイクロ構造を有するフォトダイオードの表面全体にドーブ層が形成されていることが分かる。

マイクロ構造を持つフォトダイオードの特性評価

試作したフォトダイオードの特性を評価するために受光面にマイクロ構造を有するフォトダイオードと受光面が平坦なフォトダイオードの光に対する応答の角度依存性を比較した。実験セットアップを図 .1.4.3 () .1.5-7(a)に示す。レーザを固定し、フォトダイオードの角度 α を 0° から 85° まで回転させることで測定した。マイクロ構造を有するフォトダイオードを測定する場合、マイクロ構造の配置が入射光に対して、図 .1.4.3 () .1.5-7(a)のような配置になるように設置した。レーザは波長 660nm、出力パワー0.2mW のものを使用した。図 .1.4.3 () .1.5-7(b)に実験結果を示す。この結果は角度 α が 0° における出力で規格化している。角度 α が 65° から 85° へ増加している範囲に着目すると、平坦な受光面を有するフォトダイオードの出力は減少し、マイクロ構造を有するフォトダイオードの出力は角度 α の増加に従い増加していることが分かる。また、角度 α が 85° のとき、平坦な受光面を持つフォトダイオードの規格化した値は 0.84 であり、マイクロ構造を有するフォトダイオードの規格化した値は 1.68 であった。このとき、角度 α が 0° のときのフォトダイオードの出力値は、平坦な受光面を持つフォトダイオードが 62.8mV であり、マイクロ構造を

有するフォトダイオードが 25.1mV であった。すなわち、マイクロ構造を有するフォトダイオードの出力が低い値になっているが、これはマイクロ構造を形成するプロセスで結晶欠陥などが生じたためと

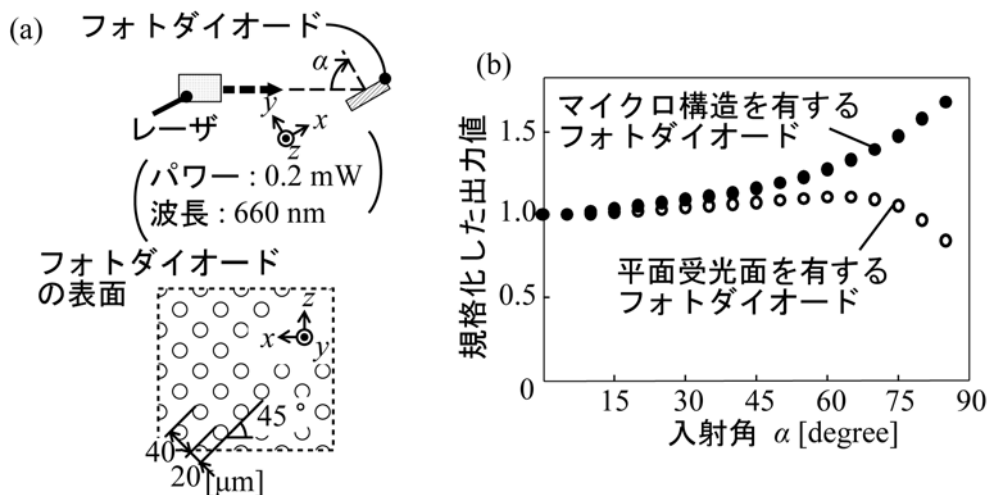


図 1.4.3 () .1.5-7 (a)実験セットアップ。(b)試作したフォトダイオードの角度依存性

考えられる。この問題は参考文献[5]に示されるように、マイクロ構造形成後にウェットエッチングにより結晶欠陥を除去することで解決できると考えられる。

線香の煙に対する応答

マイクロ構造を有するフォトダイオードを用いて簡易的な実験系を組んで、原理検証を行った。実験セットアップを図 1.4.3 () .1.5-8(a)に示す。実験セットアップはマイクロ構造を有するフォトダイオードとレーザーで構成されている。レーザー光をフォトダイオードと平行に照射し、そのレーザー光に線香の煙を噴射する。線香の煙で散乱された光をフォトダイオードで検出する。実験結果を図 1.4.3 () .1.5-8(b)に示す。線香の煙が検出できていることが確認できた。

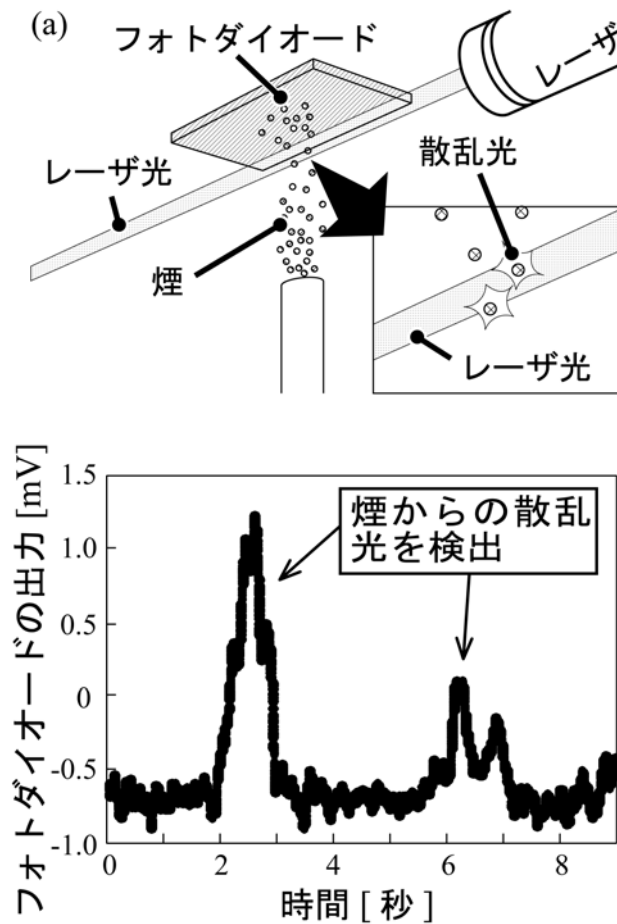


図 1.4.3 () 1.5-8 (a)実験セットアップ (b)試作したフォトダイオードの反応

結論

図 1.4.3 () 1.4-5 で提案したパーティクルセンサに適したフォトダイオードとして、フォトダイオードの受光面に逆テーパ構造を持つマイクロ構造を形成することで、入射角が大きくなるに従って出力が大きくなるフォトダイオードを実現した。このフォトダイオード実現のために、逆テーパ構造を持つマイクロ構造の試作プロセスを開発し、SSRMにより逆テーパ構造に高ドープ層が形成されていることを確認した。また、マイクロ構造を有するフォトダイオードを用いて線香の煙を検出した。(学会発表[3]、特許[3])

(iii) -1.6 少量サンプルからのクリーン度の見積もり

パーティクルセンサを小型化した場合、従来のパーティクルセンサと比較し、サンプリング体積が小さくなることが問題となる。そこで、本項では少量サンプルからのクリーン度の見積もり、特に、センサをクリーンルームの様々な個所に配置した場合を想定し、複数のセンサ出力からクリーン度を見積もる方法について検討する。ここでは、JIS規格においてクリーン度が高く、計測する粒子数が少ない場合に用いられる、逐次サンプリング法をもとに検討する（参考文献[6]）。

JIS規格において、クラス N (N は1~9の整数) の室内での直径 d [μm]のパーティクルの上限濃度 $C(N)$ [$\text{個}/\text{m}^3$]が以下の式であらわされる。

$$C(N) = 10^N \times (0.1/d)^{2.08}$$

Wald-Minimax 法においてクラス N のクリーン度の場合、サンプル体積を V [m^3/s]、サンプリング時間 t [s]とすると、

$$E(N) = V \times t \times C(N)$$

として、上限参照値 $C_H(N)$ および下限参照値 $C_L(N)$ が

$$C_H(N) = 3.96 + 1.03 \times E(N)$$

$$C_L(N) = -3.96 + 1.03 \times E(N)$$

とあらわされ、サンプリング開始からの直径 d [μm]のパーティクルの累計粒子数 N_t が

$N_t > C_H(N)$ のとき、室内のクラスは N より大きい。

$N_t < C_L(N)$ のとき、室内のクラスは N 以下。

とクリーン度が判定される。したがって、室内のクラスが N になるとき、下記の関係式を満たす。

$$C_H(N-1) < N_t < C_L(N) \quad \dots$$

ただし、 $N=1$ のときは、 $N_t < C(N)$ となる。

v [m/s]のダウンフローがある JIS 規格におけるクリーン度がクラス N の室内の床 A_t [m^2]の領域に、流路の断面積（空気の流入面積） A_s [m^2]のパーティクルセンサを n [個]配置したとき、計測された N_t とクラス N との関係を考察する。ただし、センサはまわりの流れに影響を与えないとする。この時、式①を N の関係式に変形すると

$$\log_{10}((N_t + 3.96) / (1.03 \times n v A_s t \times (0.1/d)^{2.08})) < N < \log_{10}((N_t - 3.96) / (1.03 \times n v A_s t \times (0.1/d)^{2.08})) + 1$$

となり、この関係式より、クリーン度 N の範囲が決定される。

ここで、センサの流路断面積を $5 \times 5 \text{ mm}^2$ 、ダウンフローの流速を $0.3 \text{ m}/\text{s}$ 、対象粒径を $0.5 \mu\text{m}$ とし、10 個のセンサで 1 秒間にサンプリングを行うとして、上記の式にしたがってクリーン度を決定した結果を図 1.4.3 () 1.6-1、2 に示す。たとえば、クラス 7 の場合、センサ 1 個につき、平均的に 2.6 個/s の粒子が計測される。図を見ると、10 個のセンサを利用した場合、26 個/s の粒子が計測されることになるため、ほぼクリーン度を判定することが可能となる。

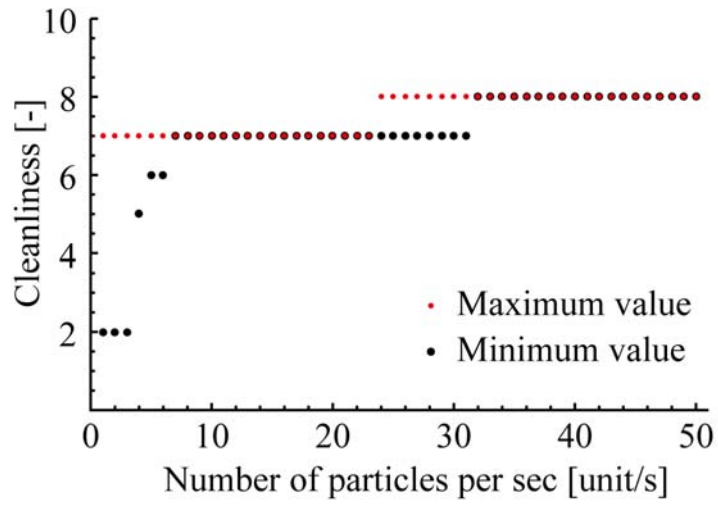


図 .1.4.3 () .1.6-1 計測された粒子数とクリーン度

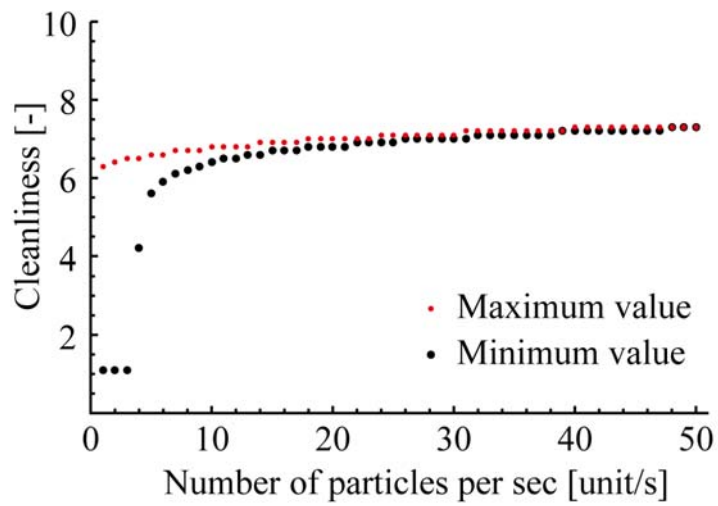


図 .1.4.3 () .1.6-2 計測された粒子数とクリーン度 (中間クラスを用いた場合)

(iii) -1.7 まとめ

パーティクルセンサの MEMS 化の検討を行った。市販のパーティクルセンサの小型化の課題として、パーティクル取り込み部としてのポンプが大きいという点、パーティクル検出部のレンズ系が大きいという点を抽出した。ポンプが大きいという課題に対しては、ポンプの代わりにクリーンルームのダウンフロー、搬送用アームの移動など、環境によって生じる流れを利用してサンプルを取り込む方法を提案した。パーティクル検出部に関しては、光学的・電氣的な検出手法を複数検討し、光学的な検出方法で、レンズ系を用いない検出部の構成を提案し、試作評価を行った。光源となる LED とフォトダイオードを一つの平面で構成した「平面型パーティクルセンサ」においては、ガラス表面に分散させたパーティクル密度に応じた出力が得られ、提案した構成で粒子密度が計測できることを示した。ミラーの反射を用いて粒子の散乱が起こる領域を拡大した構成の「計測可能領域拡大型パーティクルセンサ」においては、線香の煙を検出することができた。「計測可能領域拡大型パーティクルセンサ」においては、ミー散乱のシミュレーションをもとに光源とフォトダイオードの位置関係を設計した。さらに、設計した光源とフォトダイオードの位置関係において効率的に散乱光を計測するためのフォトダイオードとして、逆テーパのマイクロ構造を表面にもつフォトダイオードの試作評価を行った。このフォトダイオードは、フォトダイオード表面に対して大きな角度で入射する光に対して感度が高くなっていることを確認した。最後に、パーティクルセンサの小型化によりサンプリングが可能な体積が小さくなることに伴い、複数のセンサから計測された粒子数とクリーン度の関係性を統計的な方法により求めた。

パーティクルセンサを MEMS 化するにあたり、今後検討すべき課題として以下があげられる。空気の取り込みに関して、流路のサイズ・サンプルの流入流出口の形状を改善することでサンプルを効率よく取り込むことが求められる。パーティクル検出部に関しては、感度向上に関して、光源・フォトダイオード・構成にそれぞれ分けて考えると、光源については、本報告では安全上の理由からレーザ強度の弱いものかつ可視光のレーザを利用して検出方法の原理確認を行った。実際にパーティクルセンサとして構成する際に、光が外部へ漏れない構成にし、レーザ光の強度を上げることで感度を向上させることが可能となる。また、レーザの波長として Si フォトダイオードは可視光よりも長波長において感度が高い。したがって、使用するレーザの波長を長くすることが高感度化につながる。マイクロ構造をもつフォトダイオードに関しては、プロセスおよびマイクロ構造のサイズや配置を最適化することで感度の向上をみこめる。また、PIN フォトダイオード、アバランシェフォトダイオード、など一般に研究開発が進んでいる高感度フォトダイオードに対し、本報告で検討したマイクロ構造を組みこむことで、従来のフォトダイオードの高感度化をはかることが可能である。構成に関しては、ミラーを用いた構成において、ミラーとレーザの入射角度を調整し、ミラーでの反射回数を増やすことが高感度化につながる。

参考文献

- [1] A. W. Blakers, et al., “20% efficiency silicon solar cells,” *Appl. Phys. Lett.* 48, 215 (1986)
- [2] H. Toyota, et al., “Fabrication of Microcone Array for Antireflection Structured Surface Using Metal Dotted Pattern”, *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 40, pp.L747-L749, 2001.
- [3] S. Chattopadhyay, “Anti-reflecting and photonic nanostructures”, *Materials Science and Engineering R*, 69, pp.1-35, 2010
- [4] M. Gel *et al.*, “Force sensing submicrometer thick cantilevers with ultra-thin piezoresistors by rapid thermal diffusion,” *Journal of micromechanics and microengineering*, Vol. 14, pp. 423–428, 2004.
- [5] T. Machida *et al.*, “Efficiency improvement in polycrystalline silicon solar cell with grooved surface,” *Conf. Record. 22nd IEEE Photovol. Sqec. Conf. (Las Vegas)*, pp. 1033-1034, 1991.
- [6] JIS B 9920 クリーンルームの空気清浄度の評価方法

(iv) 汚染ガスセンサ

(iv) - 1 研究の目的

現在、クリーンルームではドラフトチャンバー等の排気は一定の風量以上で常時行うことが法令で規定されている。しかしこの排気に伴う電力消費は大きく、排気ファンの運転のための電力だけでなく、排気したクリーンエアーの製造にかかった電力も捨ててしまっていることになる。規制の対象となる汚染ガスの濃度を基準濃度以下に保つために、排気を常時行う必要性は必ずしもなく、図V.1.4.3 (iv) .1-1 に示すようにガスセンサを用いて汚染ガス濃度をモニターしながら、排気量を制御することで電力消費の無駄を省くことが可能となる。

図V.1.4.3 (iv) .1-2 はあるクリーンルームの消費電力の割合の一例を示したもので、排気ファンの運転のための電力が 4%、外気加熱・冷却、外気処理ファン運転等のクリーンエアー製造に関わる電力が 27%となっている。そしてクリーンエアー製造に関わるエネルギーのうち、ドラフト排気等のスクラブ処理が必要な排気に該当するものはあるクリーンルームでは 21%程度となっている。つまりドラフト排気に伴う消費電力のクリーンルーム全体に対する割合は $(4+27) \times 0.21=6.5\%$ となる。仮にガスセンサによる排気量制御によって、排気量を 1/4 にできたとすれば、クリーンルーム全体に対して 5%近くの大きな電力削減が見込めることになる。現在、法令上はドラフト排気量の制御は認められていないが、今後の研究によって、ガスセンサによる排気量制御の有効性と安全性を十分に示すことができれば、法令の改正も検討されると思われる。

以上のような検討から、本研究ではクリーンルームの消費電力削減のため、ドラフトの排気量制御に用いることのできる高感度・低消費電力のガスセンサを開発することを目的としている。クリーンルーム内における測定対象の汚染ガスは様々あるが、まずは酸・アルカリ系のガスとして、 NH_3 と H_2S を主なターゲットとした。 NH_3 や H_2S はクリーンルーム内に ppb レベルで存在すると、製造物や製造装置を汚染し、品質・歩留まり低下の原因となる。そこで本研究では ppb レベルの NH_3 や H_2S を検知可能な実用的なガスセンサの開発を目標とした。

ガスセンサの検知原理としては様々なものがあるが、本研究では金属酸化物半導体の一種である酸化タングステン (WO_3) をガス検知膜とする半導体ガスセンサを用いることとした。半導体ガスセンサは金属酸化物半導体の表面でのガスの吸着・反応による電気抵抗の変化を利用して、ガスを検知するものであり、検知膜の材料、補助触媒等の添加、動作温度等を最適化することにより、様々なガス種の検知に対応することができ、小型・高感度・低消費電力・低コスト・長寿命等の特徴を持ち、本研究の目的に最も適したガスセンサと言える。

半導体ガスセンサの歴史は長く、今まで多くの研究がなされてきており、 NH_3 や H_2S を検知する半導体ガスセンサの構成も多く提案されている [1]-[6]。しかし NH_3 においては

いずれも ppm レベルの検知性能であり、ppb レベルの検知性能を持つ半導体ガスセンサは実現されていない。一方、 H_2S においては NH_3 に比べ、感度の高いものが実現できており、ppb レベルの半導体ガスセンサも提案されている。しかし応答速度・選択性・安定性・再現性・消費電力等、実用化に向けて必要な性能を満たす半導体ガスセンサははまだ実現されていない。

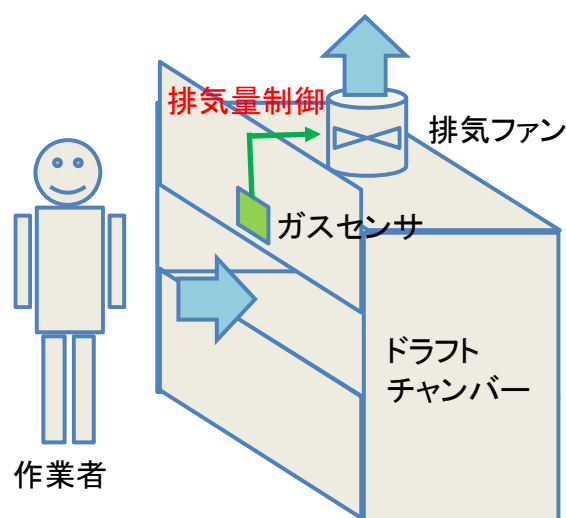


図 V.1.4.3 (iv) .1-1 ガスセンサによるドラフト排気制御の概念図

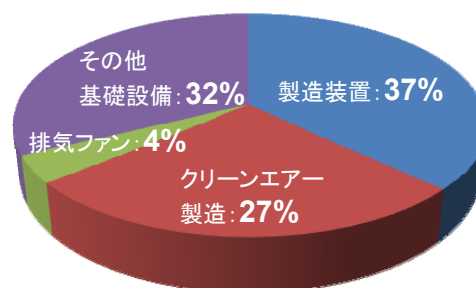


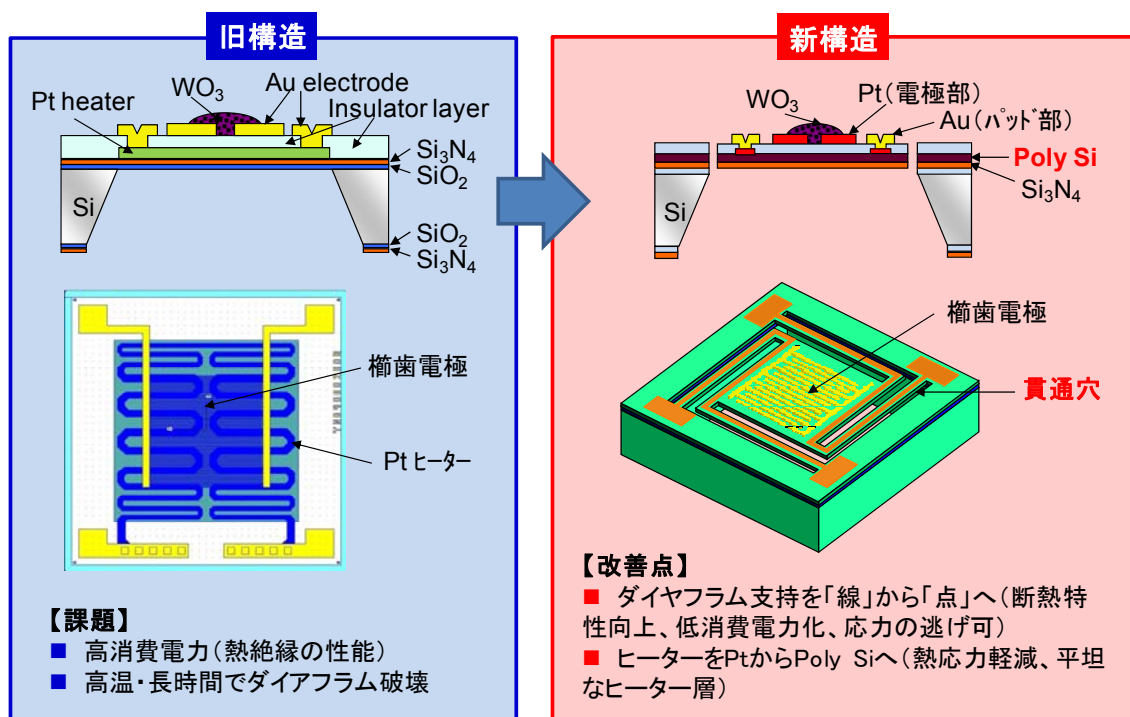
図 V.1.4.3 (iv) .1-2 クリーンルーム全体の消費電力の割合の一例

(iv) - 2 省電力 MEMS センサチップの設計と試作

半導体ガスセンサはガス感応膜を数百度に加熱する必要があり、そのためにセンサチップに加熱用のヒーターを備える必要があり、消費電力が比較的大きくなる。この消費電力を抑えるためにはセンサチップの構造を最適化し、熱分離をうまく図り、ガス感応膜のみを効率よく加熱することが必要となる。

このような設計方針のもと、今回我々が設計した新構造のダイヤフラム構造と従来のダイヤフラム構造のセンサチップの比較を図 V.1.4.3 (iv) .2-1 に示す。従来の構造ではダイヤフラムを基板外枠の四辺で支持していたものを新構造ではダイヤフラムに切り込みを入れ、梁持ち構造によって点でダイヤフラムを支持することによって、基板外枠への熱の逃げを抑制し、断熱特性が大幅に向上することが期待される。またこの構造ではダイヤフラム部が変形によって応力を逃がすことが容易になっているので、熱応力による破壊が起こりにくく、耐熱性も大幅に向上することが期待される。さらに新構造ではヒーター部を従来のジグザグ形の Pt ヒーターから平坦な Poly-Si へ変更した。このようにすることで、熱応力が低減し耐熱性がさらに向上することと、ヒーター層が平坦になり、のちに高感度化のために検討するナノギャップ櫛歯電極をその上に形成する際に加工が容易となる利点が

ある。



図V.1.4.3 (iv) .2-1 MEMS センサチップの特性改善の設計方針

設計したセンサチップの省電力化の効果をあらかじめ見積もるため、MEMS シミュレーターを用いてシミュレーションを行った。シミュレーションの対象とした旧構造と新構造のセンサチップの寸法を図V.1.4.3 (iv) .2-2 に、その結果を図V.1.4.3 (iv) .2-3 に示す。旧構造のセンサチップは全体の大きさが 2mm 角で、ダイアフラム部が 1.3mm 角であり、新構造のセンサチップは 2mm 角のものと 1mm 角のものを設計した。ダイアフラム部の厚みは Poly-Si ヒーターと TEOS-SiO₂ 層を合わせて 2.5 μm である。図V.1.4.3 (iv) .2-3 を見ると明らかなように旧構造に比べ新構造のセンサチップは同じ温度を達成するのに必要な消費電力を大幅に低減できることが示されている。たとえば 200℃のセンサ温度を達成するのに、旧構造のセンサチップでは 312mW 必要なのに対して、新構造の 2mm 角のセンサチップで 42mW、1mm 角のセンサチップでは 18mW で済む。熱分離をうまく行い、サイズを小さくすることで大幅な消費電力低減が見込めることが示された。

そこで実際に設計したセンサチップの試作を行った。試作したセンサチップのプロセスフローおよび完成したセンサチップの実物の外観写真を図V.1.4.3 (iv) .2-4 および図V.1.4.3 (iv) .2-5 に示す。そして試作したセンサチップの Poly-Si ヒーターの抵抗値の温度係数を測定し、ヒーターの抵抗値からセンサ温度を計算して、センサ温度と消費電力との関係を測定した。その結果を図V.1.4.3 (iv) .2-6 に示す。この実験結果と図V.1.4.3 (iv) .2-3 を比較するとよく一致しており、試作した新構造のセンサチップは旧構造のセン

サチップに比べ、大幅な消費電力の低減が実現できていることを確認できた。また旧構造のセンサチップは耐熱温度が 350°C程度であったが、新構造のセンサチップは 500°Cを超えてもダイヤフラムが破壊されないことが確認でき、耐熱性も大幅に向上していることを確認できた。

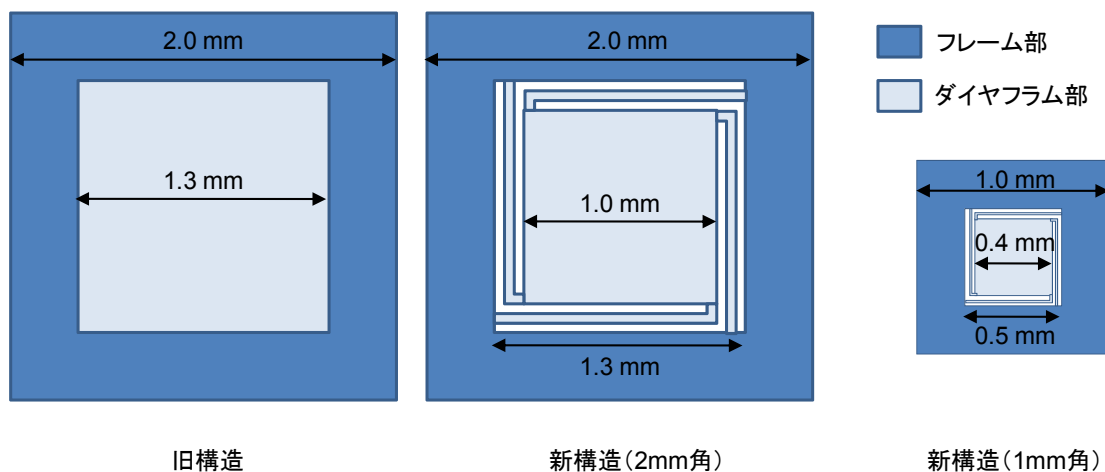


図 V.1.4.3 (iv) .2-2 旧構造と新構造センサチップの寸法

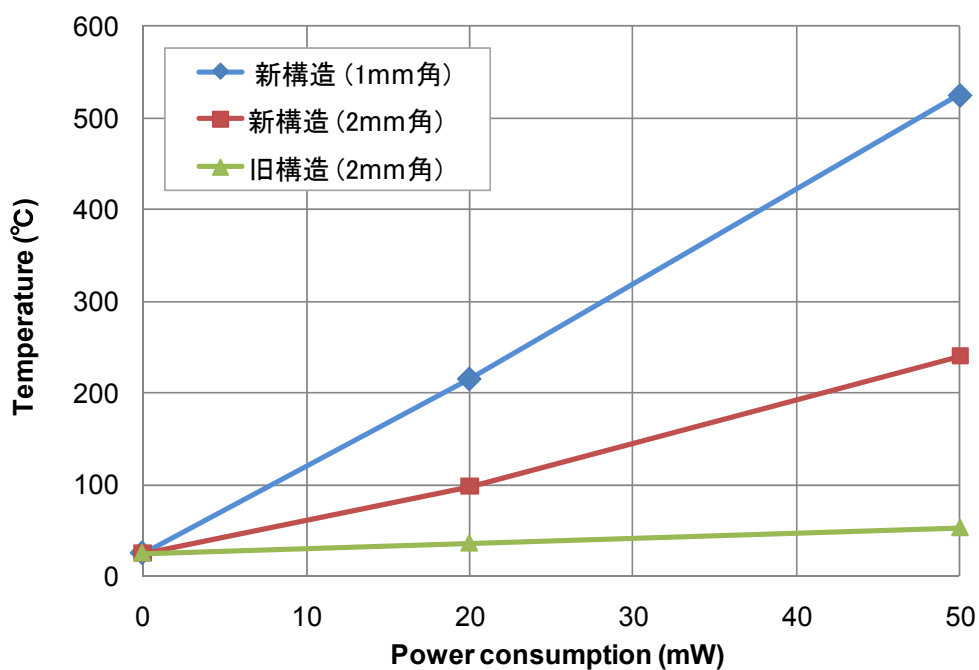
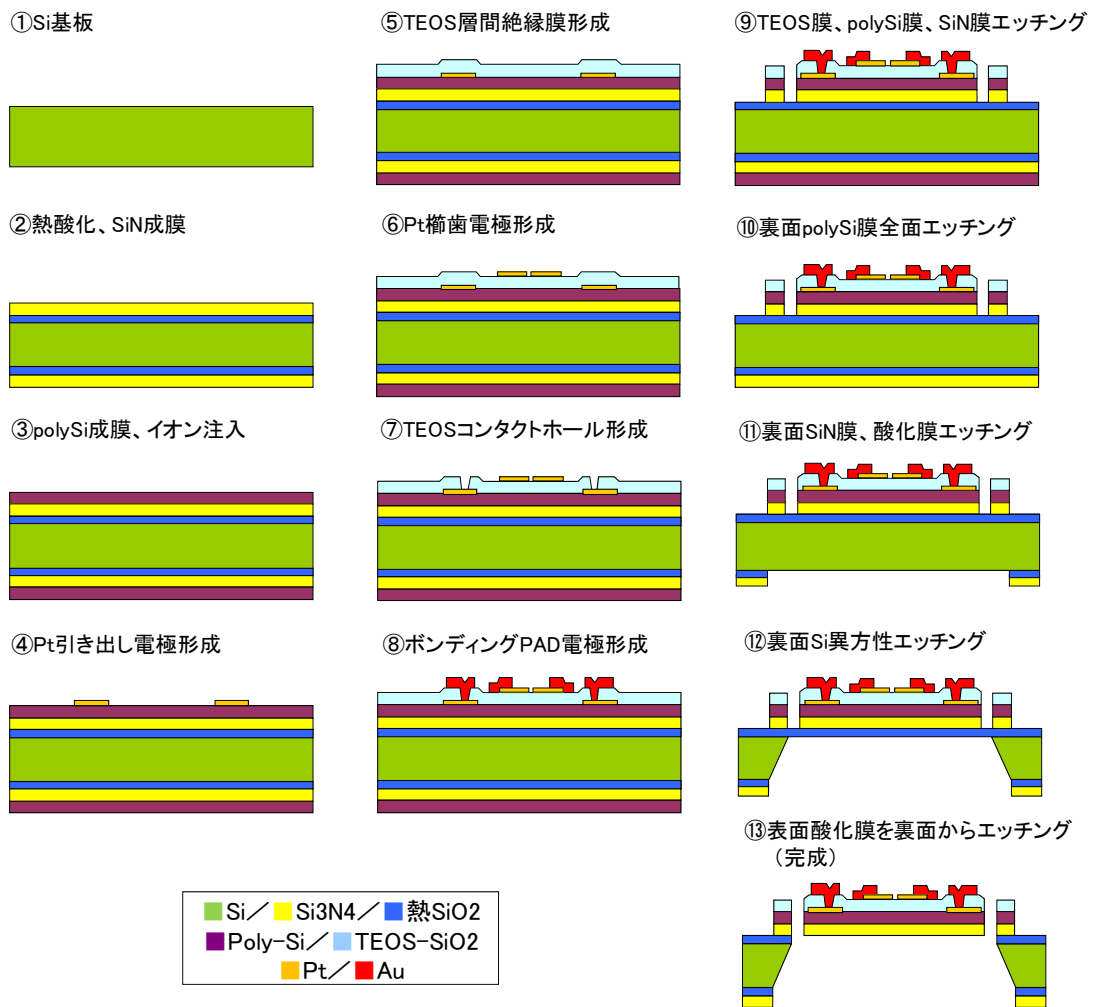
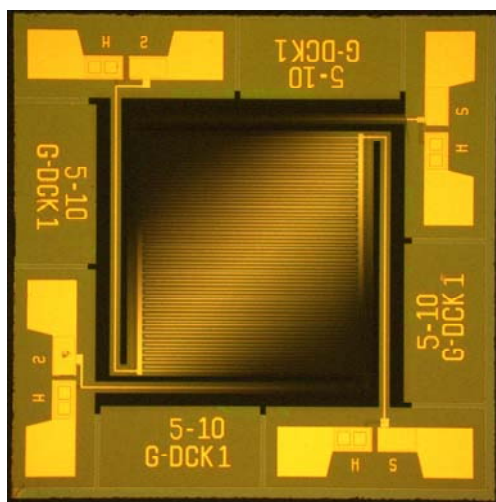


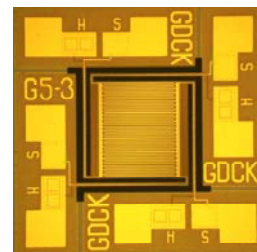
図 V.1.4.3 (iv) .2-3 旧構造と新構造センサチップの消費電力とセンサ温度の関係のシミュレーション結果



図V.1.4.3 (iv) .2-4 新構造センサチップのプロセスフロー



2mm 角



1mm 角

図V.1.4.3 (iv) .2-5 新構造センサチップの外観写真

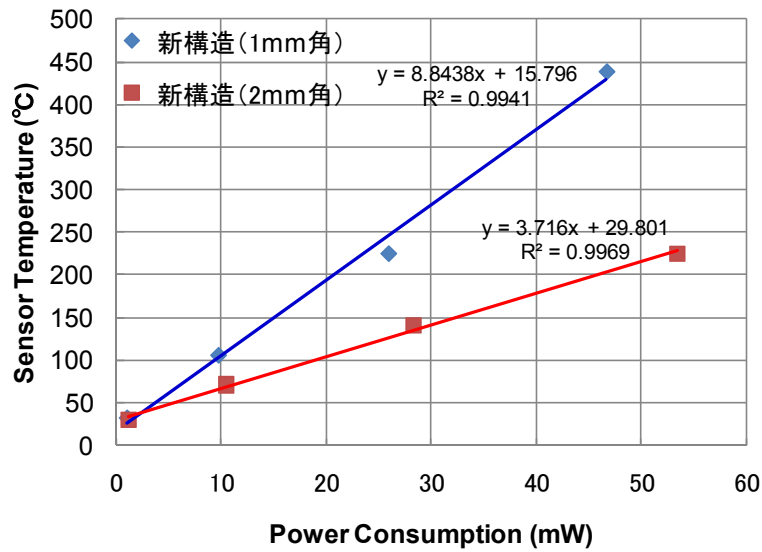


図 V.1.4.3 (iv) .2-6 試作した新構造センサチップの消費電力とセンサ温度の関係

(iv) - 3 WO₃を用いた MEMS ガスセンサの汚染ガス感度評価

本研究では、酸化タングステン (WO₃) をガス検知材料とする半導体ガスセンサの開発を行う。WO₃ はその結晶構造、粒度、膜厚等によって感度が大きく変化することが知られている。我々は六方晶を含むキューボイド状の WO₃ 結晶において、NO₂ に対して大きな感度を有することを以前に見出した。本研究においてもこの WO₃ を用いてガスセンサを構成する。図 V.1.4.3 (iv) .3-1 に高感度 WO₃ 結晶の調製およびセンサチップ上への成膜の手順をまとめる。

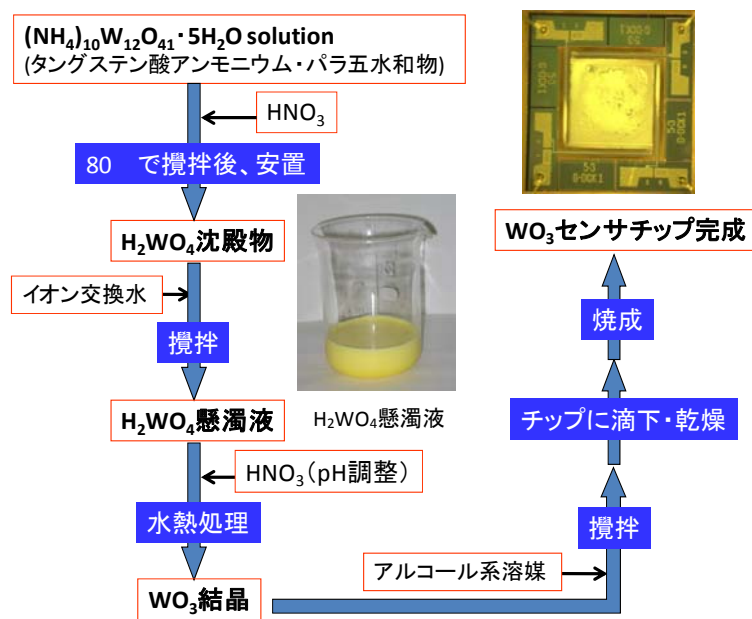


図 V.1.4.3 (iv) .3-1 高感度 WO₃ 結晶の調製・成膜フロー

以上のような方法でセンサチップ上へ WO_3 を成膜して完成したガスセンサの NH_3 および H_2S に対する感度を旧構造、新構造の各センサチップにおいて測定した。その実験系の模式図を図 V.1.4.3 (iv) .3-2 に示す。本実験系は N_2 で希釈された約 5ppm の NH_3 または H_2S のガスボンベ、および N_2 100%、 O_2 100% のガスボンベからのガスをマスフローコントローラー (MFC) で各流量を制御し混合することで、空気 (N_2 80%、 O_2 20%) で希釈された任意の濃度の NH_3 または H_2S のガスを作りだせるようになっている。そしてそのガスをバブラーを通した空気ガスボンベのガスと混合することで、実環境と同じ水分を含んだガスをセンサに供給することができるようになっている。なおこのバブラーは恒温水槽内に置かれており、温調することが可能で、任意の湿度のガスをつくりだすことができる。またセンサおよび MFC は恒温槽の中に置き、温度影響がないようにした。センサに流れるガスの流量は MFC により 50 ml/min に設定し、一定の流量のガスをセンサに供給している。

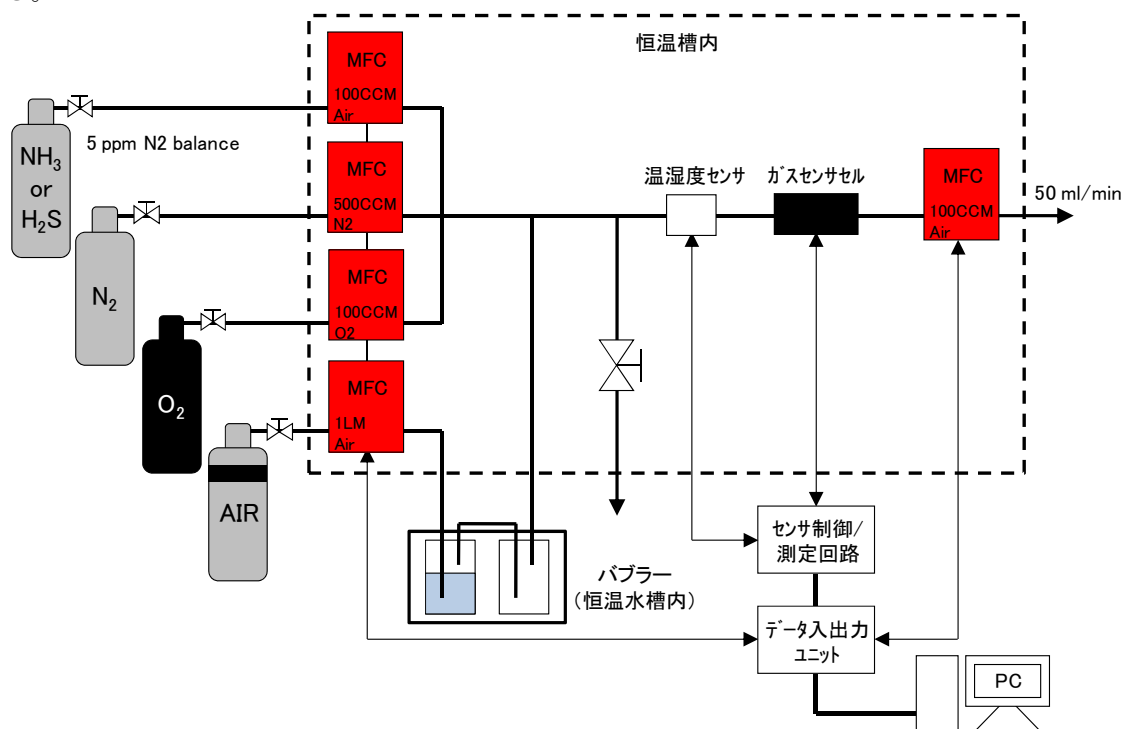


図 V.1.4.3 (iv) .3-2 ガスセンサ感度評価実験系

以上のような実験系を用いて、今回試作した新構造センサチップ (2mm 角、1mm 角) に WO_3 を成膜したガスセンサの NH_3 および H_2S に対する感度を評価した。すべての実験において、ガスセンサの周囲温度は 25°C 、ガスの相対湿度は 30% になるよう調節して測定を行った。ガス感度はセンサ温度によって大きく依存するため、センサチップ内にあるヒーターへの印加電圧を変化させながら感度測定を行い、最大感度が得られるセンサ温度を見出すようにした。そして測定結果から各センサチップにおける NH_3 および H_2S の最大感度、検出限界、消費電力、センサ温度等を算出し、比較した。

ここで、空気（ゼロガス）中のセンサ抵抗値を R_{AIR} とし、ある濃度の対象ガス（スパンガス）中のセンサ抵抗値を R_{GAS} とすると、その濃度におけるセンサの感度 S は以下の式で定義される。

$$S = \frac{R_{AIR}}{R_{GAS}} - 1$$

NH_3 や H_2S などの還元性ガスにおいては S は 0 より大きい値となり、値が大きいほど感度が高いことを意味する。なお、実際の測定結果において、 R_{AIR} および R_{GAS} の値が安定していない場合は、 R_{AIR} の値はゼロガスからスパンガスに切り替える直前の値とその時の傾きからスパンガスからゼロガスへ戻す直前の値を推定し、 R_{GAS} の値はスパンガスからゼロガスへ戻す直前の値を用いて、感度 S を算出した。

また検出限界 (LOD: Limit of Detection) とは対象ガスの検出可能な最小の濃度であり、空気中のセンサ抵抗値 R_{AIR} の測定における標準偏差が σ で、ある濃度 C_g における感度が S であるセンサの検出限界は以下の式で定義される (ガス濃度 C_g と感度 S は比例関係にあるものと仮定する)。

$$LOD = \frac{3\sigma}{R_{AIR}} \frac{C_g}{S}$$

そして、センサの消費電力はヒーター電圧と電流をモニターし、その積として算出し、その消費電力の値から、図 V.1.4.3 (iv) .2-6 の消費電力とセンサ温度の関係の測定結果を用いて、センサ温度を換算した。

1mm 角、2mm 角の新構造センサチップにおける NH_3 および H_2S に対する感度の温度依存性の測定結果、および最大感度時のセンサ応答の様子を図 V.1.4.3 (iv) .3-3~図 V.1.4.3 (iv) .3-10 に示す。そして測定結果から得られた各センサチップの最大感度、最大感度時のセンサ温度、検出限界、消費電力等のデータを表 V.1.4.3 (iv) .3-1 および表 V.1.4.3 (iv) .3-2 にまとめる。

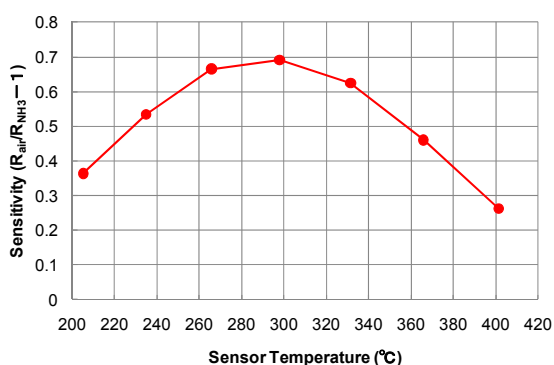


図 V.1.4.3 (iv) .3-3 2mm 角センサチップにおける NH_3 400ppb に対する感度の温度依存性

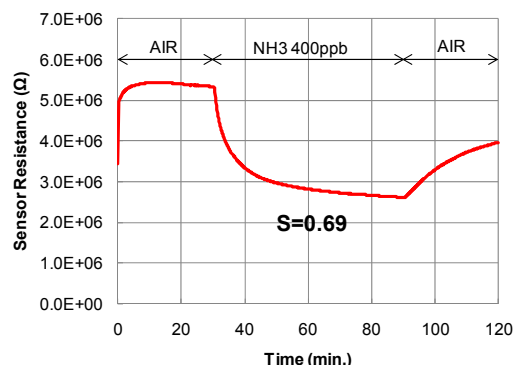


図 V.1.4.3 (iv) .3-4 2mm 角センサチップにおける NH_3 400ppb に対する応答 (センサ温度 298°C)

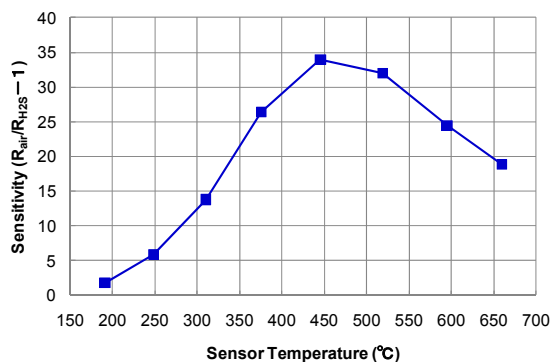


図 V.1.4.3 (iv) .3-5 2mm 角センサチップにおける H₂S 260ppb に対する感度の温度依存性

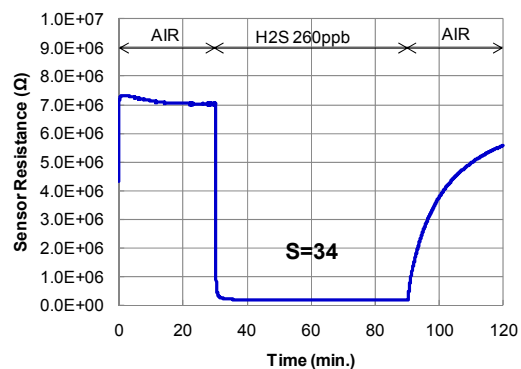


図 V.1.4.3 (iv) .3-6 2mm 角センサチップにおける H₂S 260ppb に対する応答 (センサ温度 445°C)

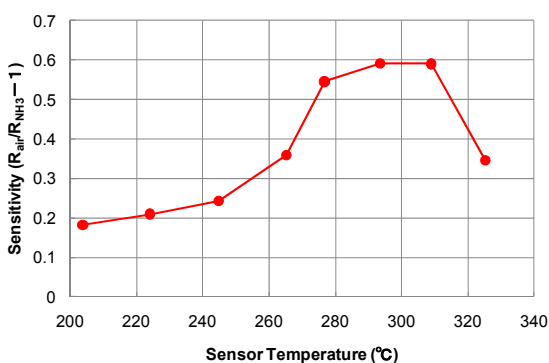


図 V.1.4.3 (iv) .3-7 1mm 角センサチップにおける NH₃ 500ppb に対する感度の温度依存性

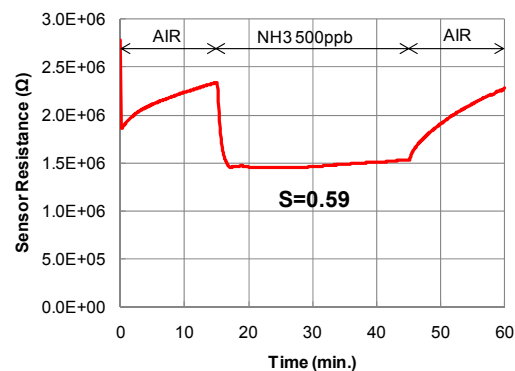


図 V.1.4.3 (iv) .3-8 1mm 角センサチップにおける NH₃ 500ppb に対する応答 (センサ温度 293°C)

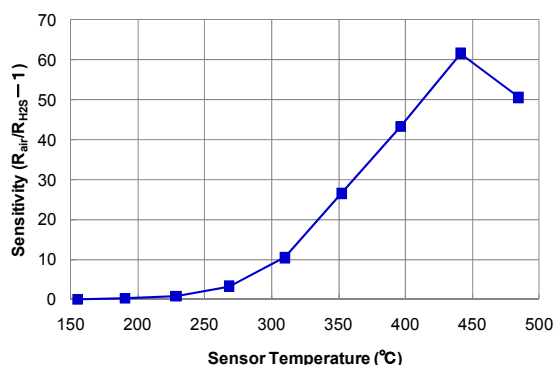


図 V.1.4.3 (iv) .3-9 1mm 角センサチップにおける H₂S 500ppb に対する感度の温度依存性

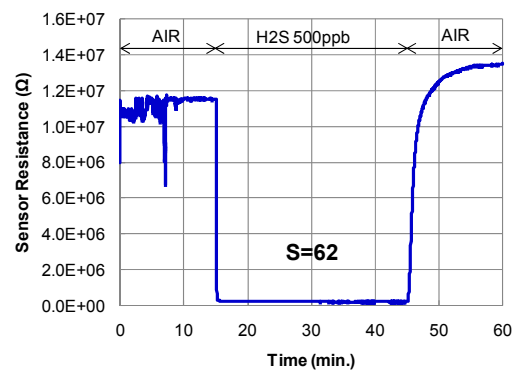


図 V.1.4.3 (iv) .3-10 1mm 角センサチップにおける H₂S 500ppb に対する応答 (センサ温度 441°C)

表 V.1.4.3 (iv) .3-1 NH₃ に対する最大感度時のセンサ特性の比較

	2mm 角	1mm 角
感度／ガス濃度	0.69／400ppb	0.59／500ppb
検出限界(ppb)	1.7	2.5
消費電力(mW)	61	31
センサ温度()	298	293

表 V.1.4.3 (iv) .3-2 H₂S に対する最大感度時のセンサ特性の比較

	2mm 角	1mm 角
感度／ガス濃度	34／260ppb	62／500ppb
検出限界(ppb)	0.023	0.024
消費電力(mW)	91	48
センサ温度()	445	441

以上の実験結果を整理し、考察・検討した内容を以下にまとめる。

感度については、まず我々の試作したセンサは NH₃ に対する感度に比べ、H₂S に対する感度が二桁程度も高く、H₂S に対して非常に高感度であるということがわかった。検出限界として、最高で NH₃ で 1.7ppb、H₂S で 0.023ppb とそれぞれ ppb レベルの感度を持つことが確認できた。2mm 角と 1mm 角の感度を比較するとやや 2mm 角の方が大きい傾向があるがセンサ間のばらつきの範囲内であり、ほぼ同等であると言える。理想的なモデルで考えると、単位体積当たりのガス吸着表面積が変化しないならば、感度はガス感応膜の面積には依存しないはずなので、妥当な結果だと言える。

最大感度が得られる消費電力については、まず図 V.1.4.3 (iv) .2-3 のシミュレーション結果から、旧構造センサチップの消費電力は NH₃ 測定時 (295℃) で 482mW、H₂S 測定時 (445℃) で 749mW となる。この値と比較すると、新構造センサチップの 2mm 角で約 1/8、新構造の 2mm 角から 1mm 角でさらに約 1/2 の消費電力の低減がなされており、旧構造のセンサチップに比べ、新構造のセンサチップは大幅な消費電力の低減が実現できている。2mm 角と 1mm 角では感度には大きな差がないので、より消費電力の低い 1mm 角のセンサチップが有利であると言える。

(iv) - 4 スパッタ成膜による WO₃ 薄膜センサの評価

前章までに評価したガスセンサの WO₃ 膜は化学的に合成した WO₃ 結晶を含む懸濁液をマイクロディスペンサーでセンサチップ上へ滴下・焼成する方法で成膜している。この手法では膜厚等の正確な制御が難しく、センサ特性の大きなばらつきに繋がり、実用上問題となる。そこでスパッタ成膜によってセンサチップ上へ WO₃ 膜を形成することで、膜厚を精度よく制御することができ、特性にばらつきの少ないガスセンサを作製することができ

と考え、スパッタ成膜による WO₃ 薄膜センサを実際に試作し、ガス検知特性の評価を行った。

スパッタによる WO₃ 成膜条件を表 V.1.4.3 (iv) .4-1 にまとめる。ターゲットをタングステン（純度 99.5%）とし、Ar 50%、O₂ 50%の雰囲気中で反応性スパッタリングを行い、センサチップ上に WO₃ 膜を形成した。センサチップは試作の都合上、旧構造のものを用いた。

表 V.1.4.3 (iv) .4-1 スパッタによる WO₃ 成膜の成膜条件

スパッタ装置	雰囲気	真空度	RF パワー	基板温度	成膜時間
ULVAC 製 SH-100 (RF スパッタ)	Ar=50% O ₂ =50%	6 × 10 ⁻¹ Pa	500 W	70	120 分

試作したスパッタ WO₃ 薄膜センサの NH₃ および H₂S に対する感度を評価した。測定は図 V.1.4.3 (iv) .3-2 で示した系を用いて、センサセルの周囲温度は 25°C、ガスの相対湿度は 30%になるよう調節して測定を行った。NH₃ に対する感度は非常に小さく評価できなかった。一方、H₂S に対してはある程度の感度を持つことがわかった。H₂S に対する感度の温度依存性の測定結果、および最大感度時のセンサ応答の様子を図 V.1.4.3 (iv) .4-1 および図 V.1.4.3 (iv) .4-2 に示す。測定結果より、最大感度はセンサ温度が 240°C の時に得られ、H₂S 500ppb に対して S=3.7 となっており、検出限界としては 0.4ppb と見積もられる。従来の WO₃ 膜でのセンサと比較すると、表 V.1.4.3 (iv) .3-2 で示したように、2mm 角のセンサチップにおいて、最大感度はセンサ温度 445 で、H₂S 260ppb に対して S=34、検出限界が 0.023 であったので、感度としてはスパッタ WO₃ 膜の方が 1 桁以上小さい。しかし最大感度が得られるセンサ温度が従来の WO₃ 膜に比べ、大幅に低いので、消費電力の低減にはスパッタ WO₃ 膜の利用が効果的であると言える。今後、スパッタ条件、膜厚、電極構成等を最適化することでさらなる感度向上が図れれば、スパッタによる WO₃ 成膜は、実用上、非常に有用なセンサ作製手法となりえることがわかった。

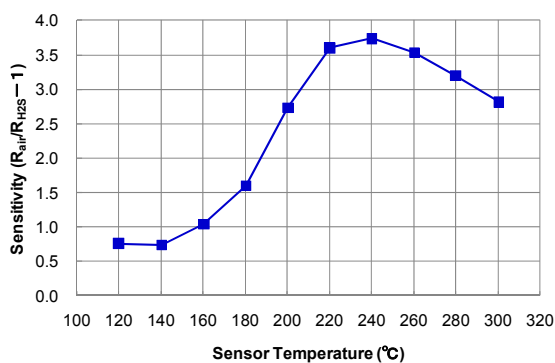


図 V.1.4.3 (iv) .4-1 H₂S 500ppb に対する感度の温度依存性

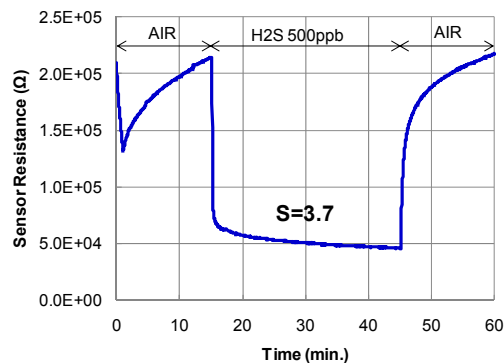
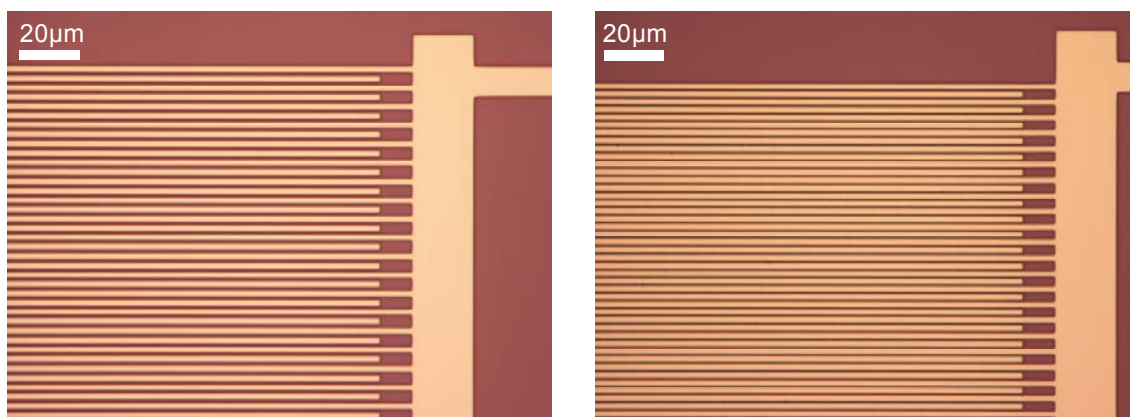


図 V.1.4.3 (iv) .4-2 H₂S 500ppb に対する応答 (センサ温度 240°C)

(iv) - 5 ナノギャップ櫛歯電極による高感度化の検証

半導体ガスセンサにおいて、検知膜の抵抗値測定のために設けられたセンサチップ上の電極の両極間の距離が小さいほど感度が上がることが知られている[7]。特に電極間距離が数十 nm～数百 nm である時に高感度化の効果が大きい。前章までに述べてきた今回我々が開発したガスセンサはすでに ppb レベルの感度を持つ高感度なセンサを実現できているが、スパッタ成膜を用いた WO_3 センサにおいては特に NH_3 に対してはまだまだ感度向上が必要である。そこでこのナノギャップ効果を用いて、更なる高感度化を図れるかどうかを検証した。

ナノギャップ効果による高感度化を検証するため、櫛歯電極の電極間距離が従来のセンサチップでは $5\ \mu\text{m}$ であったが、 $1\ \mu\text{m}$ および $0.5\ \mu\text{m}$ まで小さくしたセンサチップを試作した。櫛歯電極の材質は Pt とし、Si 基板上に酸化膜を挟んで Pt を成膜した後、電子線露光装置によってマスクを形成し、ドライエッチングによって、線幅/線間 = $2\ \mu\text{m}/1\ \mu\text{m}$ および $2\ \mu\text{m}/0.5\ \mu\text{m}$ の櫛歯電極を形成した。このセンサチップはヒーター構造を持たないため、電気炉等で外部から加熱して評価する必要がある。試作したセンサチップの櫛歯電極部の顕微鏡写真を図 V.1.4.3 (iv) .5-1 に示す。



ギャップサイズ $1.0\ \mu\text{m}$

ギャップサイズ $0.5\ \mu\text{m}$

図 V.1.4.3 (iv) .5-1 ナノギャップ櫛歯電極加工後の顕微鏡写真

試作したナノギャップ櫛歯電極センサチップ、および従来のギャップサイズ $5\ \mu\text{m}$ のセンサチップにそれぞれ従来の手法 (図 V.1.4.3 (iv) .3-1) で WO_3 膜を成膜し、出来上がったセンサの NH_3 に対する感度を評価した。測定は図 V.1.4.3 (iv) .3-2 で示した系を用いて、センサセルの代わりに電気炉の中にセンサを入れ、炉の温度を 240°C に設定し、ガスの相対湿度は 30% になるよう調節して測定を行った。 NH_3 500ppb に対する応答の様子を図 V.1.4.3 (iv) .5-2、その結果から得られたギャップサイズと感度の関係を図 V.1.4.3 (iv) .5-3 に示す。これらの結果から明らかなように、櫛歯電極のギャップサイズが小さくなるほど NH_3 に対する感度が向上することが確認でき、ナノギャップ効果を実証できた。ギャップ

サイズを $5\mu\text{m}$ から $0.5\mu\text{m}$ にすると感度が約 6 倍になり、ナノギャップ櫛歯電極を採用することで、更なる感度向上が見込めることがわかった。

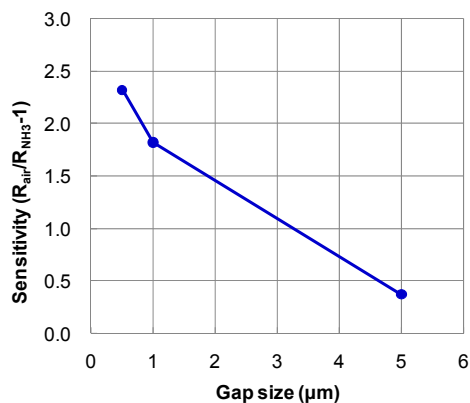
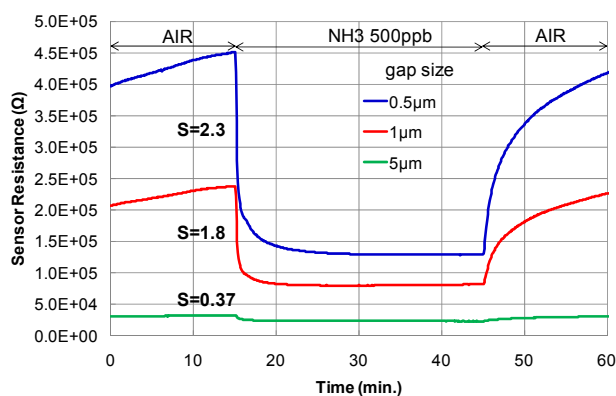


図 V.1.4.3 (iv) .5-2 ナノギャップ櫛歯電極センサの NH_3 500ppb に対する応答 (センサ温度 240°C)

図 V.1.4.3 (iv) .5-3 ギャップサイズと感度の関係

(iv) - 6 結論

本研究ではクリーンルームの消費電力削減のため、ドラフトの排気量制御に用いることのできる高感度・低消費電力のガスセンサの開発を行った。ターゲットガスは酸・アルカリ系のガスとして、 NH_3 と H_2S とし、ppb レベルの検知性能を有する実用的なガスセンサの開発を目標とした。本研究により以下の成果が得られた。

MEMS センサチップの省電力化設計により、クリーンルーム内汚染ガス (NH_3 , H_2S) を ppb レベルで検知可能な従来のセンサチップ構造に比べ、大幅に耐熱性が向上し、低消費電力化された MEMS ガスセンサを開発した。耐熱温度 500°C 以上で、 NH_3 に対する検出限界は 2ppb、消費電力は 482mW から 31mW に低減、 H_2S に対する検出限界は 0.02ppb、消費電力は 749mW から 48mW に低減を達成した。更なる低消費電力化にはセンサの間欠動作および初期応答からの感度推定等を行うことで実現可能となる。

スパッタ成膜による WO_3 薄膜センサを評価した結果、 NH_3 に対しては感度は認められなかったが、 H_2S に対しては従来の WO_3 膜のセンサに比べ、一桁程度低いながら、ppb レベルの検出限界を有することを確認した。そしてセンサ温度が従来の WO_3 膜のセンサに比べ、大幅に低い温度で動作が可能で、更なる消費電力の低減に効果的である。今後、スパッタ条件・膜厚・電極構成等の最適化で更なる高感度化を実現できれば、スパッタ成膜による WO_3 膜の形成により、高安定性・高再現性・ばらつき小・生産効率向上が期待でき、実用上非常に有用なセンサ作製手法となりえる。

ナノギャップ櫛歯電極を採用することで更なる高感度化が見込めることを実証した。ギャップサイズ $5\mu\text{m}$ から $0.5\mu\text{m}$ にすることで、感度が約 6 倍向上した。今後、ギャッ

プサイズをさらに小さくすることでどこまで感度向上が見込めるか検討し、最適なギャップサイズを見出し、スパッタ WO₃ 薄膜センサと組み合わせることで、更なる高感度・低消費電力でかつ生産効率が高く、実用性の高いガスセンサを実現することができる。

以上のように、本研究では、MEMS 技術により高感度化・低消費電力化を図った NH₃、H₂S に対する世界最高水準の検出感度を有する半導体ガスセンサを実現した。本成果を他種の半導体ガスセンサに適用すれば、様々なガスに対して高感度・低消費電力のガスセンサの実現が可能となる。また本成果により、半導体ガスセンサのセンサネットワークへの適用が容易となり、高機能センサネットワークにガス計測の要素が加わり、付加価値が向上し、新たな市場の創造につながる。

実用化に向けての課題としては、センサ応答の安定性・再現性・選択性の向上、製作ばらつきの改善があげられる。これらの課題の解決には WO₃ の成膜条件のばらつきを抑え、膜の耐環境性の向上が必要であり、スパッタによる WO₃ 成膜条件、膜厚、アニール条件、電極構造の最適化等の検討が鍵を握っていると思われる。これらの課題が解決されれば実用的な小型・高感度・低消費電力・低コストのガスセンサが実現でき、ドラフト排気の制御や都市環境の広域大気汚染モニタリング等、センサネットワークに適合した今までにないガス計測応用技術へ展開できる。

1. 論文・学会発表・特許

- [1]【学会発表】Dzung Viet Dao, Takeshi Hashishin, Jun Tamaki, Ling-Han Li, Kyoji Shibuya, Susumu Sugiyama: “Development of a Miniaturized NO₂ Gas Sensor Based on Nanoparticles WO₃ Thin Film on Interdigitated Electrodes”, IEEE Sensors 2010 (November 1-4, 2010, Waikoloa, Hawaii USA) B1L-C3.
- [2]【学会発表】Dzung Viet Dao, Kyoji Shibuya, Tung Thanh Bui and Susumu Sugiyama: “Micromachined NH₃ Gas Sensor with ppb-level Sensitivity Based on WO₃ Nanoparticles Thinfilm”, Eurosensors 2011 (September 4-7, 2011, Athens, Greece) submitted.
- [3]【特許】半導体ガスセンサ（高感度化を容易に実現できる半導体ガスセンサの構造に関するもの）出願準備中

2. 参考文献

- [1] Xusheng Wang, Norio Miura and Noboru Yamazoe: “Study of WO₃-based sensing materials for NH₃ and NO detection”, Sensors and Actuators B **66** (2000) 74–76.
- [2] Vibha Srivastava and Kiran Jain: “Highly sensitive NH₃ sensor using Pt catalyzed

- nonaqueous sol–gel route”, *Sensors and Actuators B* **145** (2010) 847–853.
- [4] Jun Tamaki, Kengo Shimano, Yoshihiro Yamada, Yoshifumi Yamamoto, Norio Miura and Noboru Yamazoe: “Dilute hydrogen sulfide sensing properties of CuO–SnO₂ thin film prepared by low-pressure evaporation method”, *Sensors and Actuators B* **49** (1998) 121–125.
- [5] Chandra Sekhar Rout, Manu Hegde and C.N.R. Rao: “H₂S sensors based on tungsten oxide nanostructures”, *Sensors and Actuators B* **128** (2008) 488–493.
- [6] Vivek Kumar, Shashwati Sen, K.P. Muthe, N.K. Gaur, S.K. Gupta and J.V. Yakhmi: “Copper doped SnO₂ nanowires as highly sensitive H₂S gas sensor”, *Sensors and Actuators B* **138** (2009) 587–590.
- [7] Jun Tamaki, Akira Miyaji, Jiro Makinodan, Shunsuke Ogura and Satoshi Konishi: “Effect of micro-gap electrode on detection of dilute NO₂ using WO₃ thin film microsensors”, *Sensors and Actuators B* **108** (2005) 202–206.

(v) 振動発電を中心とした小型高効率発電デバイス

(v) .1 研究の目的

軟 X 線を用いたエレクトレットの新しい荷電方法の高速化を目指すとともに,従来デバイスよりも MEMS プロセスとの整合性が高く,小型化に有利な楕歯型エレクトレット発電器の原理検証を行う.また,体温を用いた新しい環境低負荷の熱電発電器の基礎検討を実施し方針を明確化する.

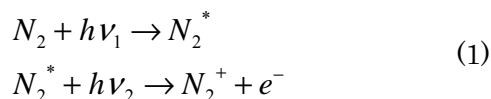
(v) .2 各研究内容の検討

(v) .2.1 新しい荷電法を用いた楕歯型 MEMS 発電器の検討

Suzuki et al [1],Miki et al [2] は,パリレン樹脂をばねとして用いた一体型の振動型エレクトレット MEMS 発電器を試作し,38Hz, 1G の振動条件において, 発電出力 3.8 μ W を実現している.しかし,この一体型発電器では,シリコン基板およびガラス基板上に別々にエレクトレット膜・電極を形成し,エレクトレット膜を荷電した後,最後にエレクトレット膜と電極が対向するようアセンブリする必要がある(図 V.1.4.3 (v) .2.).現在, エレクトレットを用いない静電誘導発電器としては,楕歯型電極を用いたものが試作されている[3]. エレクトレットへの荷電方法は, コロナ荷電法が一般的であるが, この方法で楕歯型の側壁に成膜したエレクトレットへの荷電を行った場合, 開口部に電荷が集中し, 静電反発力により内部までコロナイオンが侵入することができず, 十分な荷電量を得られない(図 V.1.4.3 (v) .2.1-2).

別の荷電方法に, Hagiwara ら[4]が開発した軟 X 線照射による荷電方法がある. 気体に波長が 0.1~10 nm の軟 X 線を照射すると気体が電離し, 生じたイオンや電子をバイアス電圧で分離して荷電を行うものである. 楕歯型デバイスに対してこの方法で荷電すると, 狭ギャップの中で気体が電離するため側壁エレクトレットへの荷電が可能である(図 V.1.4.3 (v) .2.1-3). しかし, 電荷が飽和するまでに 30 分以上もの長い時間を要する. これは軟 X 線の吸収率が非常に小さいことに起因している. 窒素の場合, 吸収率は 0.02%である.

一方で, 軟 X 線よりも吸収率が大きい波長が 120~160 nm の真空紫外線(Vacuum UltraViolet, VUV)を用いることで, 非パターン膜に対し, より短時間での荷電が可能であるという予備的な結果が得られている(図 V.1.4.3 (v) .2.1-4). VUV は大気圧下ではすぐに吸収されてしまうが, 数 Pa 程度の低圧下において直進性が得られる. この方法では式(1)に示した 2 光子吸収反応によって電離が起こる.



気体を電離した後, バイアス電圧により正イオンまたは電子のみをエレクトレット膜へ帯電させる. VUV の吸収率は図 V.1.4.3 (v) .2.1-5 に示すように 1 Pa で 4%と軟 X 線に比

べ 100 倍以上大きくなっており，短時間での荷電が期待できる。

そこで本研究では，VUV 照射荷電法を確立し，櫛歯型デバイスに適用することを目的とする。

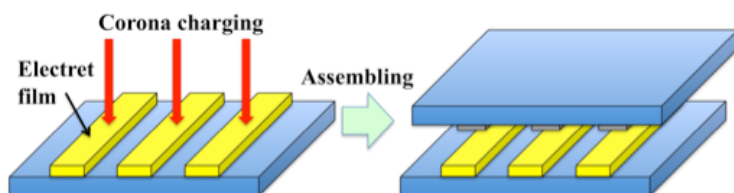


図 V.1.4.3 (v) .2. 一体型 MEMS 発電器におけるアセンブリ

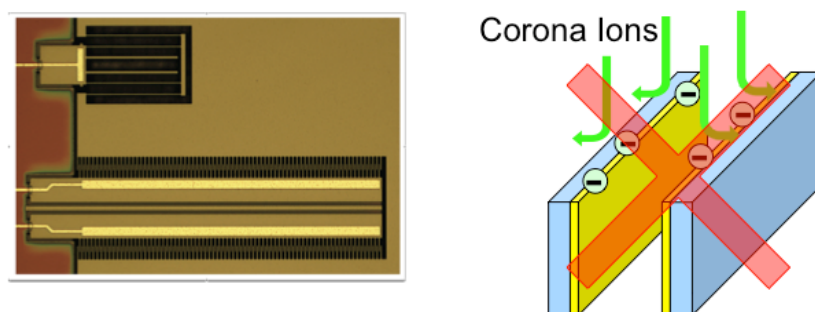


図 V.1.4.3 (v) .2.1-2 コロナ荷電では櫛歯電極の開口部に電荷が溜まり，側壁部への荷電が困難[3]

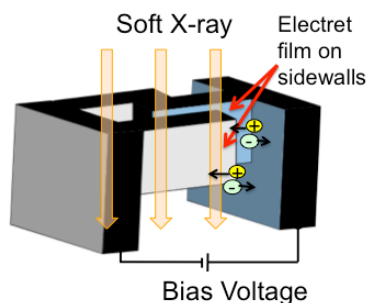


図 V.1.4.3 (v) .2.1-3 軟 X 線による垂直エレクトレットの荷電

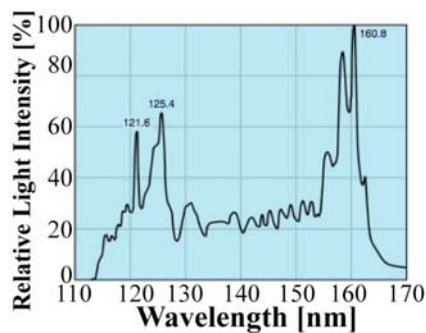
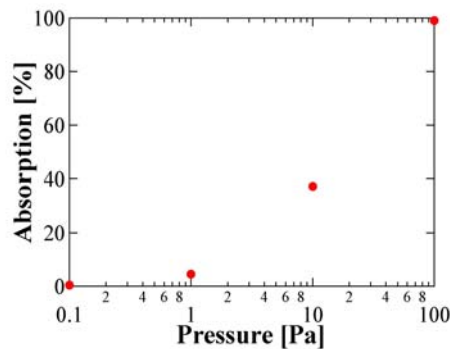


図 V.1.4.3 (v) .2.1-4 真空紫外線（波長 120~160 nm）における吸収率 []



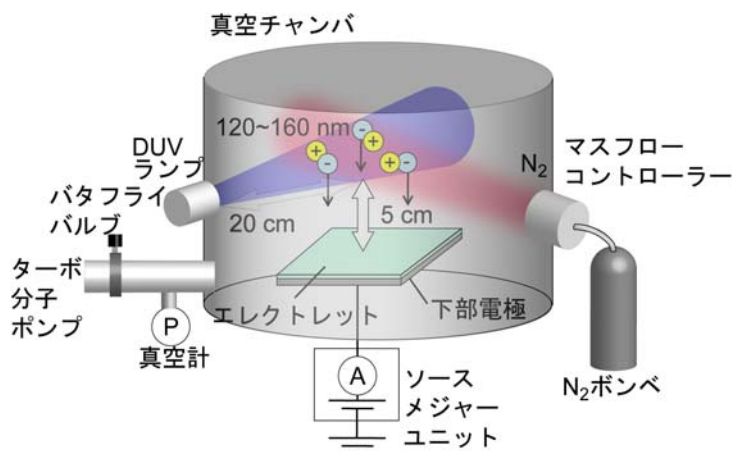
図V.1.4.3 (v) .2.1-5 真空 UV 荷電法における圧力に対する吸収率

(v) .2.2 VUV 照射荷電法の検討

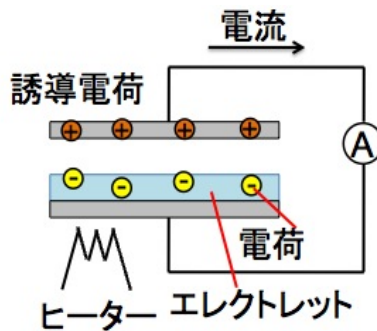
図 .1.4.3 () .2.2-1 に製作した VUV 荷電装置の概念図を示す. 紫外線源として DUV ランプ L1835 (浜松ホトニクス製) を使用し, 紫外線が直接サンプルにあたらないように配置した. エレクトレット下部電極へかけるバイアス電圧源および電流計としてソースメジャーユニット Model 2410 (ケースレーインスツルメンツ製) を使用した. 窒素ガスはボンベから導入し, マスフローコントローラ SCE-E40 (堀場エステック製) を用いて流量の制御を行い, バタフライバルブと電離真空計 GI-M2 (アルバック製) を用いてチャンバ内の圧力を制御した.

荷電はまず 5×10^{-3} Pa まで真空引きを行い, 窒素を導入, 圧力調整の後に紫外線照射, バイアス電圧を所定の時間印加した. また, エレクトレット膜は高い表面電荷密度をもつ CYTOP (旭硝子製) を採用し, 低抵抗の Si 基板上にスピコートで成膜した. 荷電後の表面電位は表面電位計 Model 279 (モンローエレクトロニクス) で測定した.

エレクトレット膜の電荷保持特性を他の荷電方法と比較するために TSD (Thermally Stimulated Discharge) 測定を行った. これは図V.1.4.3 (v) .2.2-2 に示すようにあらかじめ荷電したエレクトレット膜を室温から徐々に加熱し, その漏れ電流を測定する手法であり, 電流値がピークとなる温度から電荷保持特性を評価することができる.



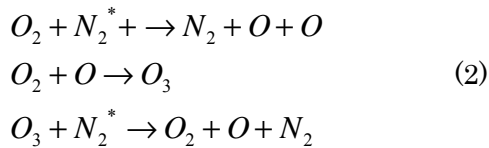
図V.1.4.3 (v) .2.2-1 真空紫外線荷電装置の概念図



図V.1.4.3 (v) .2.2-2 電荷保持特性を測定する TSD の概念図

(v) .3.1 VUV 照射荷電条件の検討および荷電評価

図に気体の種類に対する荷電結果を示す. 使用した気体はドライエア, 窒素(99.9%), 高純度窒素(99.9995%)の 3 種類である. 窒素の純度をあげることによって荷電量が大きく上昇している. これは, 酸素が存在すると式(2)に示した反応が起こり, 窒素の電離が阻害されるためであると考えられる. 以降の実験で 99.9995%の窒素を使用した.



次に, 荷電条件を最適化するためエレクトレットを成膜していない Si 基板を用いてイオン電流の測定を行った. 図V.1.4.3 (v) .3.1-2 に窒素流量を変化させたときのイオン電流を示す. イオン電流は窒素流量に依存しないことがわかる. そのため, 流量は 5 sccm とした. 図V.1.4.3 (v) .3.1-3 に圧力を変化させた場合のイオン電流の変化を示す. 高バイアス電圧印加時の破線部分は電極とチャンバの間で放電が起きてしまい, 測定不可能であった領域である. イオン電流は最大で 1.5 Pa のときに 70 μ A であった. コロナ荷電では 2 μ A, 軟 X 線では 0.1 μ A であり, 非常に大きなイオン電流が得られた. また, この結果より 5 Pa 付近でイオン電流が最大になることがわかる. 得られる表面電位はバイアス電圧と同程度であるため, できるだけ大きなバイアス電圧がかけられることが望ましいが, チャンバの構造や大きさを最適化することで +1.0 kV のバイアス電圧でも放電を起こさないようにすることができるといえる.

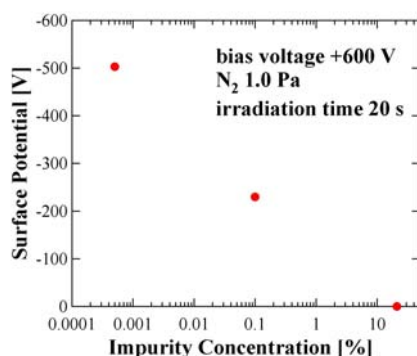
イオン電流の基礎的な知見が得られ荷電条件がある程度把握できたため, CYTOP を成膜した Si 基板を用いて表面電位を評価した. 図V.1.4.3 (v) .3.1-4 に圧力を変化させた場合の表面電位を示す. 0.1~0.5 Pa が最適であることがわかった. これは 5 Pa 程度で最大となるイオン電流の傾向と一致していない. その原因は荷電粒子の平均自由行程にあると考えられる. 0.1 Pa での平均自由行程は 6 cm であるのに対し, 1 Pa では 0.6 cm である. 一方, イオン発生エリアとエレクトレット基板との距離は 5 cm であるから 1 Pa では荷電粒

子がエレクトレット膜へ到達する前に再結合する割合が大きくなっていると考えられる。

図V.1.4.3 (v) .3.1-5 に荷電時間と表面電位の関係を示す。わずか 2 秒間で表面電位は飽和しており、コロナ荷電 (2 分)、軟 X 線荷電 (30 分) に比べ 100 分の 1 以下の非常に短い時間で荷電できることがわかった。図V.1.4.3 (v) .3.1-6 に荷電後の表面電位の経時変化を示す。荷電条件によらず 3500 時間以上経過してもまったく減衰していない。

図V.1.4.3 (v) .3.1-7 に TSD 測定の結果を示す。測定サンプルは Si 基板上に成膜した CYTOP 15 μm である。電流がピークとなる温度は 141 $^{\circ}\text{C}$ となった。一方でコロナ荷電法ではピーク温度は 150 $^{\circ}\text{C}$ であるため、VUV で荷電したもののほうが 9 $^{\circ}\text{C}$ ほど低くなっている。この理由は、以下のように考えられる。一般にポリマーエレクトレットでは、荷電中にガラス転移温度以上に加熱することで安定な電荷保持特性が得られる。コロナ荷電では CYTOP を加熱し荷電しているが、現在の VUV 荷電装置では加熱するための機構が備わっていないため室温で荷電している。そのために電荷保持特性が低くなっている可能性がある。

次に、櫛歯型デバイスへ適応するため狭ギャップ構造への荷電を検討した。具体的には、図V.1.4.3 (v) .3.1-8 のようにエレクトレット下部電極にバイアス電圧を印加し、70 μm のギャップをカプトンテープによって保持し、電気的に浮いている対向電極を配置した。荷電後に表面電位計にて開口部からどのくらいの深さまで荷電できているかを評価した。図V.1.4.3 (v) .3.1-8 は荷電時間を変化させた場合の結果である。荷電時間が 10 秒の場合には不十分であるが、時間をのばすに従い深くまで荷電されていることがわかる。3 分間の荷電によりギャップ幅である 70 μm の 100 倍の深さまで荷電できているので十分と判断した。また、+1 kV のバイアス電圧に対し表面電位は -400 V と十分な値が得られていない。これは対向電極を浮かせているためである。図V.1.4.3 (v) .3.1-9 は圧力を変化させた場合の測定結果である。圧力の上昇に伴い、イオン電流が大きくなるため表面電位は上昇している。一方、電子の平均自由行程が短くなるため荷電できる深さは浅くなってしまっている。



図V.1.4.3 (v) .3. 真空 UV 法における、気体の種類に対する荷電結果

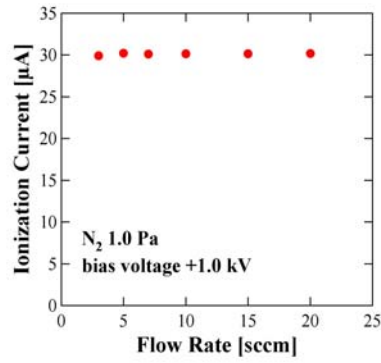


図 V.1.4.3 (v) .3.1-2 窒素流量を変化させた時のイオン電流 (Si 基板)

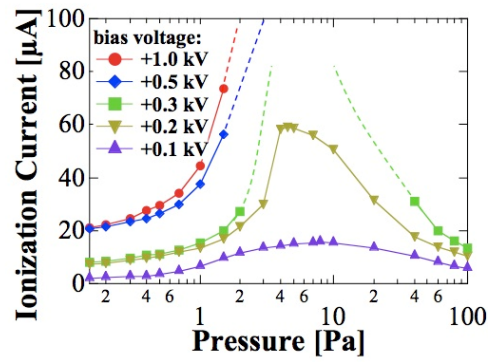


図 V.1.4.3 (v) .3.1-3 圧力を変化させた時のイオン電流 (Si 基板)

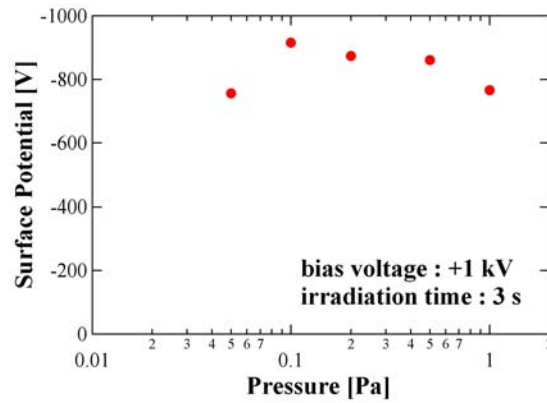


図 V.1.4.3 (v) .3.1-4 圧力を変化させた時のイオン電流 (CYTOP 膜 / Si)

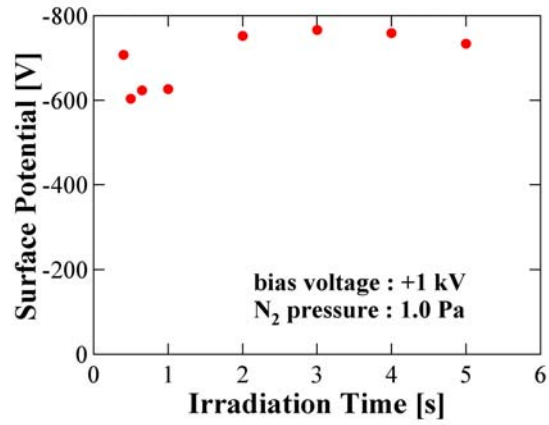


図 V.1.4.3 (v) .3.1-5 荷電時間を変化させた時のイオン電流 (CYTOP 膜 / Si)

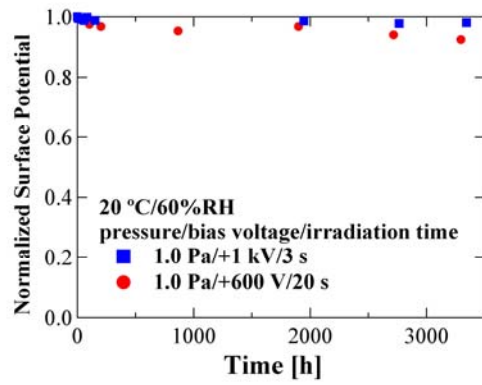


図 V.1.4.3 (v) .3.1-6 荷電後の表面電位の経時変化 (CYTOP 膜 / Si)

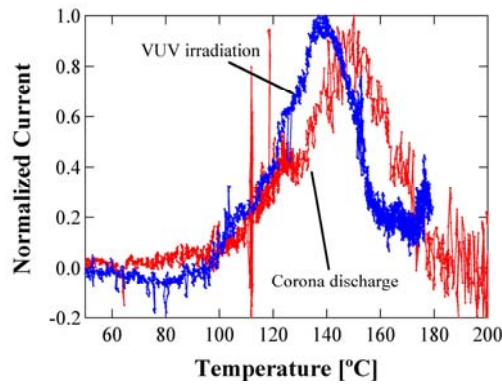


図 V.1.4.3 (v) .3.1-7 TSD による電荷保持特性 (CYTOP 膜 / Si)

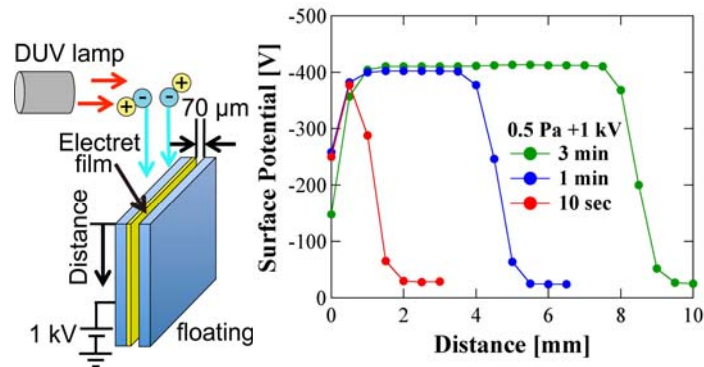


図 V.1.4.3 (v) .3.1-8 狭ギャップ構造への荷電の概念図と荷電時間変化による表V面電位

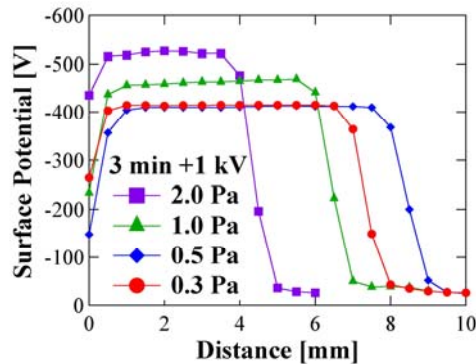


図 V.1.4.3 (v) .3.1-9 狭ギャップ構造への荷電における圧力変化に対する表面電位

次のステップとして、垂直エレクトレットとしての特性を評価するため、DRIEでSi基板上に7 μmのギャップで深さ90 μmの溝を製作し、そこにparyleneを1 μmの厚さで成膜したものに荷電を行った。モノロー製の表面電位計は分解能が1 mmであるため今回のサンプルは測定不能である。そこで走査プローブ顕微鏡SPM-9600（島津製作所製）の表面電位測定モード（KFMモード）で計測を行った。カンチレバーは分解能が数十nmであるEFM-10（Nano World製）を使用した。具体的には、エレクトレット膜をVUVにより荷電し、溝の部分で2つに割り、図V.1.4.3 (v) .3.0に示すようにその側壁を走査プローブ顕微鏡によって測定した。測定部位の開口部からの距離は取得した写真の画像解析から求めている。荷電条件は、100 V, 1 Pa, 3分で、背圧が 5×10^{-3} Paある。各エレクトレット膜の測定した表面電位を図V.1.4.3 (v) .3.1に示す。

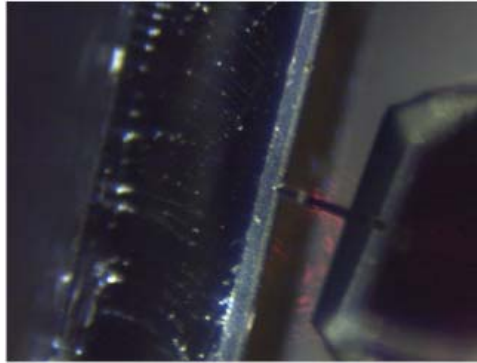


図 V.1.4.3 (v) .3.0 走査プローブ顕微鏡による側壁の表面電位の測定

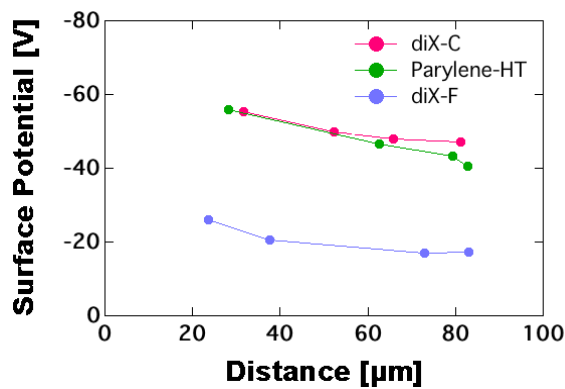


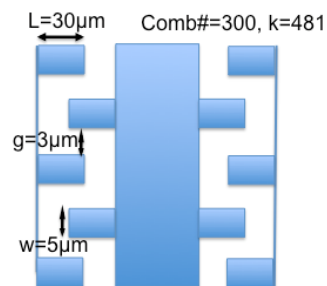
図 V.1.4.3 (v) .3.1 狭ギャップ ($7\mu\text{m}$) における表面電位と電位分布

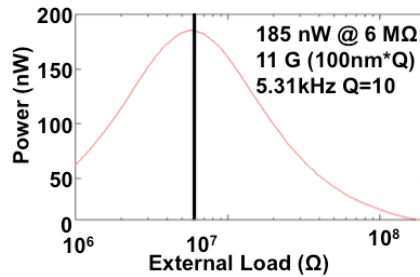
(v) .3.2 垂直エレクトレット用いた楕歯型 MEMS 発電器の設計と試作

初期プロトタイプ的设计として,表V.1.4.3 (v) .3.2-1 にプロトタイプ的设计パラメータを示す. 本パラメータの表面電位, デバイスサイズ, および寄生容量は Honzumi ら[5]が製作した加速度デバイスの結果に基づく. また,本设计パラメータによる発電シミュレーションを図V.1.4.3 (v) .3.2-1 に示す. 出力は 181nW となり, 原理確認デバイスとして十分な発電量と考え, 本设计で試作・評価を行った.

表V.1.4.3 (v) .3.2-1 プロトタイプ的设计パラメータ

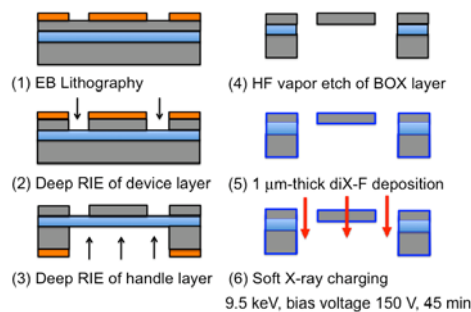
Surface Potential	52 V
Gap (Comb)	3 μm
Number (Comb)	300
Size	4mm x 3mm
Cp	50 pF
Mass	0.43 mg
Spring Constant	481
Resonant F	5.31 kHz
Output	181 nW@11G





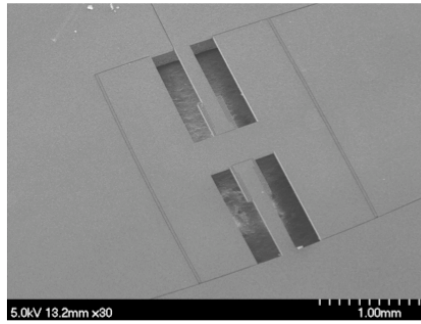
図V.1.4.3 (v) .3.2-1 プロトタイプデバイスの発電シミュレーション

図V.1.4.3 (v) .3.2-2 に楯歯型エレクトレット MEMS 発電器のプロセスチャートを示す。まず、厚膜の EB レジスト (OEBR-CAP2) を用いて、4 インチ SOI ウエハに EB 描画装置 (ADVANTEST, F52) によりパターニングをする (図V.1.4.3 (v) .3.2-2a) 。ばねと楯歯を形成するため、50 μm 厚の活性層を DRIE によりエッチングする (図V.1.4.3 (v) .3.2-2b) 。さらに、エレクトレット材料となるパリレンを蒸着する際に可動部がスティクションしないよう、裏面を DRIE でエッチングする (図V.1.4.3 (v) .3.2-2c,d) 。気相 HF による犠牲層エッチングでリリースを行い (図V.1.4.3 (v) .3.2-2e) ,その後 1.5- μm 厚の diX-F 膜を CVD を用いて、楯歯側壁に蒸着する (図V.1.4.3 (v) .3.2-2f) 。この製作したチップを PC 基板に固定し、軟 X 線 (X-ray : 9.5 keV, Bias Voltage : 150 V for 45 minutes) を用い diX-F 膜に荷電をし、垂直エレクトレット膜を形成する。

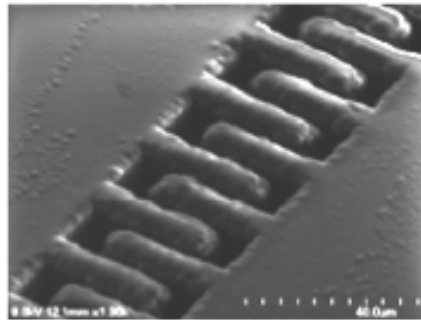


図V.1.4.3 (v) .3.2-2 垂直エレクトレットを持つ楯歯型 MEMS 発電器のプロセスチャート

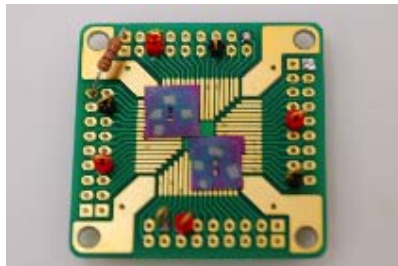
図V.1.4.3 (v) .3.2-3 に製作したデバイスの SEM 像を示す。本デバイスは、共振周波数に関わる中央部のマスを 6 μm 幅のシリコンばねで支持した構造である。さらに、エレクトレット用の diX-F 膜を蒸着後の、楯歯部分の拡大像を図V.1.4.3 (v) .3.2-4 に示す。この時の楯歯間のギャップは 1.5 μm である。また、治具基板にチップを固定した写真を図V.1.4.3 (v) .3.2-5 に示す。



図V.1.4.3 (v) .3.2-3 製作したデバイスのSEM像

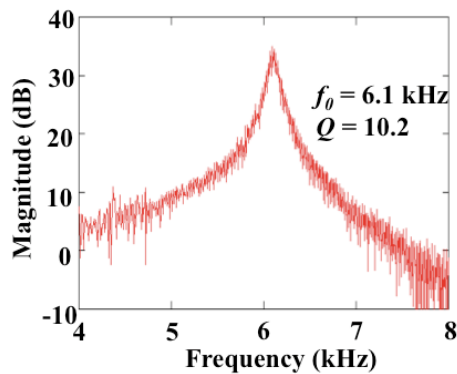


図V.1.4.3 (v) .3.2-4 エレクトレット用の diX-F 膜を蒸着後の、櫛歯部分の拡大像



図V.1.4.3 (v) .3.2-5 治具基板にチップを固定した写真

振動解析装置 (Polytec, MSA-500)を用いて、製作したデバイスの共振周波数を測定した。図V.1.4.3 (v) .3.2-6に示すように、6.1 kHzの共振周波数が測定された。また、Q値は10.2である。ちなみに、設計周波数は5.31 kHzである。



図V.1.4.3 (v) .3.2-6 製作したデバイスの周波数特性

製作したデバイスを電磁加振器 (ET-126B-1, Labworks) に固定して,面内振動を外部から加えた.また,レーザー変位計 (LC-2430, Keyence) を用いて,その時の変位を測定した.100 Hz以下のノイズを,FFTおよび逆FFTで取り除いた測定データを図V.1.4.3(v).3.2-7に示す.得られた出力電圧は 0.4 V_{pp},電力は 2 nW である.測定時の条件は,外部振動 500Hz,15G で,外付け抵抗は 10MΩ であった.

また,図V.1.4.3(v).3.2-8に出力電圧と外部振動の関係を示す.出力電圧は外部振動に対し線形性に近い特性を持ち,この結果から表面電位が約 95V と見積もられた.

一方,図V.1.4.3(v).3.2-1で示した本デバイスのシミュレーション結果と比較すると非常に小さい.これは,①共振周波数からかなり離れた周波数で振動させている.②櫛歯側壁の開口部から底面まで一様に荷電された条件でシミュレーションしている.そこで,試作したデバイスを共振 (6.1 kHz) で振動させた時の発電シミュレーション結果を図V.1.4.3(v).3.2-9に示す.外力10 G ,最適抵抗値 34 MΩ で約0.17 μW の発電が見積もられた.

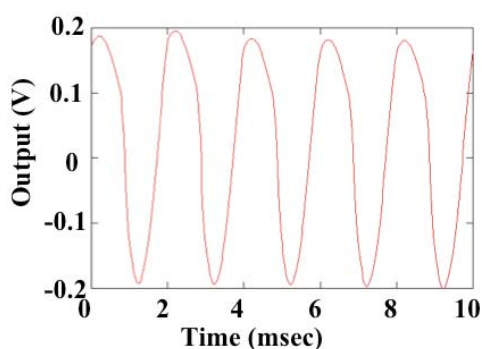


図 V.1.4.3 (v) .3.2-7 製作したデバイスの発電測定結果

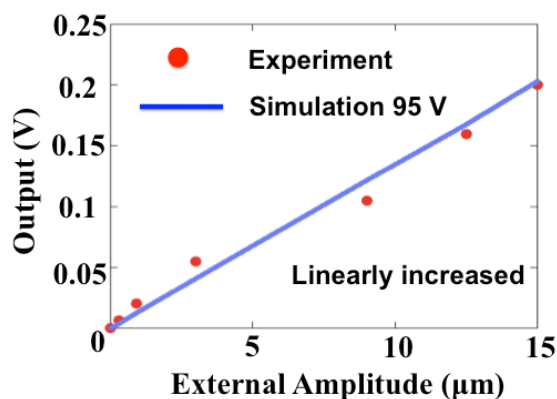


図 V.1.4.3 (v) .3.2-8 出力電圧と外部振動の関係

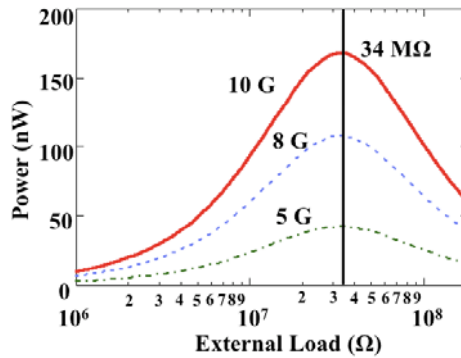


図 V.1.4.3 (v) .3.2-9 製作したデバイスを共振で振動させた時の発電量 (SIM)

次のステップとして、垂直エレクトレットの製作に真空UV荷電法を用いた評価を報告する。また、今回はエレクトレット用の膜にパリレンHTを用いた。パリレンHTは、図 .1.4.3 (v) .3.2-10のようにパリレンCの両側のメチル基の水素をフッ素置換した材料で、非常に高い電荷密度が測定されている [6]。

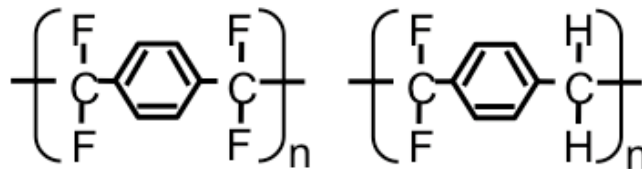
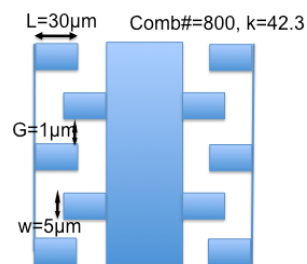


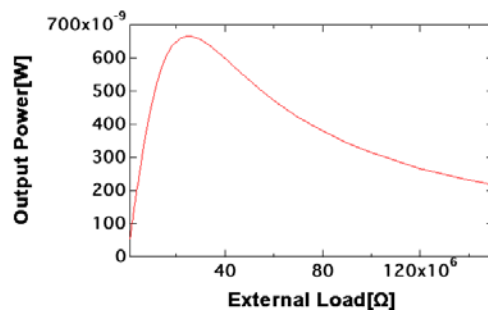
図 V.1.4.3 (v) .3.2-10 パリレンHT (左図 V.1.4.3 (v)) およびdIX-F (右図 V.1.4.3 (v)) の構造

μW レベルの出力を目指す改良型のデザインとして、表 V.1.4.3 (v) .3.2-2 にデザインパラメータを示す。本パラメータの表面電位、デバイスサイズ、および寄生容量はプロトタイプデバイスの結果に基づく。また、本デザインパラメータによる発電シミュレーションを図 V.1.4.3 (v) .3.2-1 に示す。出力は $0.67\mu\text{W}$ となり、改良型デバイスとして十分な発電量と考え、本デザインで試作・評価を行った。

表 V.1.4.3 (v) .3.2-2 改良型のデザインパラメータ

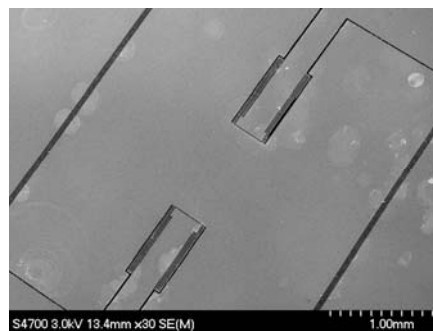
Surface Potential	95 V
Gap (Comb)	1 μm
Number (Comb)	800
Size	7mm x 6mm
Cp	2.6 pF
Mass	3.76 mg
Spring Constant	42.3
Resonant F	534 Hz
Output	$0.67 \mu\text{W}@1.5\text{G}$



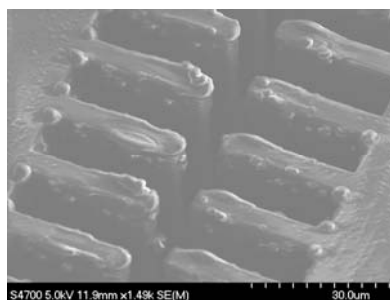


図V.1.4.3 (v) .3.2-11 改良型デバイスの発電シミュレーション

図V.1.4.3 (v) .3.2-12 に製作したデバイスのSEM像を示す.本デバイスは,共振周波数に関わる中央部のマスを $5\mu\text{m}$ 幅のシリコンばねで支持した構造である.さらに,共振周波数を下げるため,マスのサイズを大きくした.また,エレクトレット用のパリレン HT 膜を蒸着後の,櫛歯部分の拡大像を図V.1.4.3(v) .3.2-13 に示す.この時の櫛歯間のギャップは $1\mu\text{m}$ である.



図V.1.4.3 (v) .3.2-12 製作したデバイスのSEM像



図V.1.4.3 (v) .3.2-13 製作したデバイスの櫛歯部分の拡大像

製作したチップをPC基板に固定し,真空UV (Bias Voltage : 150 V for 3 minutes, 1 Pa) を用いパリレン HT 膜に荷電をし,垂直エレクトレット膜を形成する.

荷電後のデバイスを電磁加振器 (ET-126B-1, Labworks) に固定して,面内振動を外部から加えた.また,レーザー変位計 (LC-2430, Keyence) を用いて,その時の変位を測定した.100 Hz以下のノイズを,FFTおよび逆FFTで取り除いた測定データを図V.1.4.3(v) .3.2

–14 に示す. 得られた出力電圧は $0.1 \text{ V}_{\text{pp}}$, 電力は 1 nW である. 測定時の条件は, 外部振動 1.73kHz , 2G で, 外付け抵抗は $10\text{M}\Omega$ であった.

また, 図 V.1.4.3 (v) .3.2–15 に出力電圧と外部振動の関係を示す. 出力電圧は外部振動に対し線形性に近い特性を持ち, この結果から表面電位が約 62V と見積もられた.

一方, 本デバイスのシミュレーション結果と比較すると非常に小さい. これは, プロトタイプデバイスと比較して, 寄生容量が非常に大きくなった (2.6 pF – 19.8 pF) からだと示唆される. この改良型デバイスは, 共振周波数を下げるためデバイスサイズを大きくしたが, それにより寄生容量が増加してしまったため, 最適なデバイスサイズの検討が必要であると考えられる.

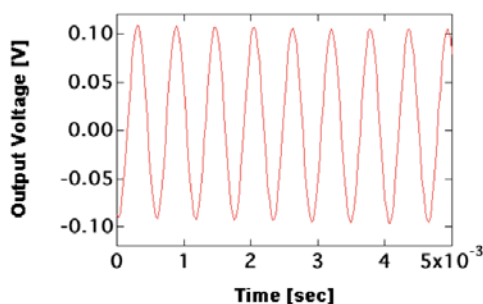


図 V.1.4.3 (v) .3.2–14 真空 UV 荷電による垂直エレクトレット発電器の測定結果

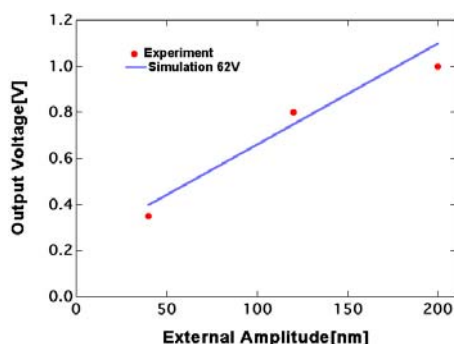


図 V.1.4.3 (v) .3.2–15 出力電圧と外部振動の関係

(v) .2.4 エレクトレットを用いた非定常熱発電デバイス

発電原理の概要図を図 V.1.4.3 (v) .2.3–1 に示す. 表面に荷電された CYTOP と誘電体を図のように電極で挟む. 誘電体の誘電率が温度によって変化することで, 両電極に誘起される電荷量に変化し電流が流れ発電を行う. 図 V.1.4.3 (v) .2.3–2 に構築した発電モデルを示す. s , s_e , ϵ_1 , ϵ_2 , $C(t)$, C_e , E , E_e , σ_1 , σ_e , σ_2 , R , I , V はそれぞれ, 誘電体, エレクトレットの静電容量, 電場, 下極板, エレクトレット表面, 上極板の表面電荷密度, 抵抗, 電流, 極板間電圧であり, 面積は A である.

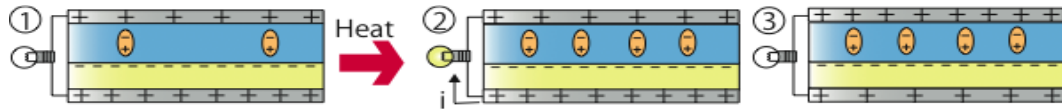


図 1.1.2.3-1 発電原理

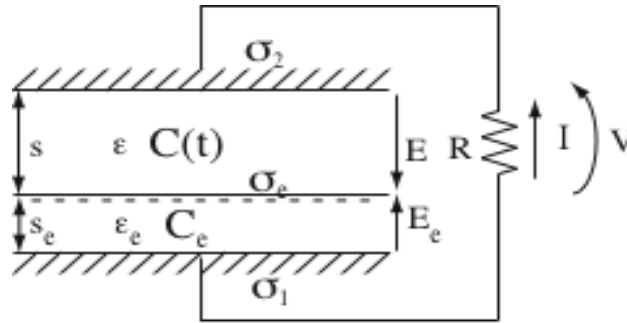


図 1.1.2.3-2 発電モデル

まずキルヒホッフの法則から以下の式が導出される.

$$V = s_e E_e - sE, \quad I = -A \frac{d\sigma_1}{dt} = A \frac{d\sigma_2}{dt} \quad (1)$$

次にガウスの法則から以下の式が導出される.

$$\sigma_1 = \epsilon_0 \epsilon_e E_e, \quad \sigma_2 = \epsilon_0 \epsilon E, \quad \sigma_e = -\epsilon_0 \epsilon_e E_e - \epsilon_0 \epsilon E \quad (2)$$

(1), (2)から次の微分方程式が得られる.

$$\frac{d\sigma_1}{dt} = -\frac{1}{R} \left(\left(\frac{1}{C_e} + \frac{1}{C(t)} \right) \sigma_1 + \frac{1}{C(t)} \sigma_e \right) \quad (3)$$

また出力は以下のようなになる.

$$W = RI^2 = R \left(A \frac{d\sigma_1}{dt} \right)^2 \quad (4)$$

(3)の微分方程式は $C(t)$ にも依るが、基本的に解析的に解くことは出来ないので、数値解析を行い、実験の際に必要なパラメータについて分析する.

(v) .3.4 数値解析によるパラメータの検討

誘電体の静電容量 $C(t)$ は、温度により変化するが、ここでは、簡単のため時間の関数として以下のように仮定する. ここで、 T は誘電率が変化するのに必要な時間である.

$$C(t) = C_0 \left\{ 1 + (\alpha - 1) \frac{t}{T} \right\}$$

まず、面積を4インチウエハ相当の $8.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 、誘電率の変化が2倍($\alpha = 2$)、 C_e 、 σ_e はCYTOPと仮定し、それぞれ、 -2.0 mC/m^2 、 9.9 nF とした. 誘電率の変化時間を60sとした場合に、誘電体の初期静電容量を決めるための指標である ϵ/d を変化させたときの出力を図V.1.4.3 (v) .3.4-1に示す.

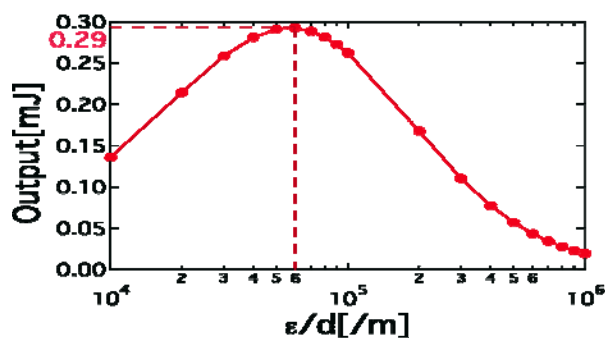


図 1.1.3.4-1 誘電体の静電容量による出力の変化

最適な誘電体の初期静電容量が存在し、その時出力が合計で 0.29 mJ, 平均で 5 μ W である。以上より、センサ用電源として十分な出力が期待出来ることが分かる。

次に誘電率の変化率 α , 変化時間 T , CYTOP の厚さ d , 表面電荷密度 σ_e を変えた時の出力の変化を図 V.1.4.3 (v) .2.3-2 に示す。

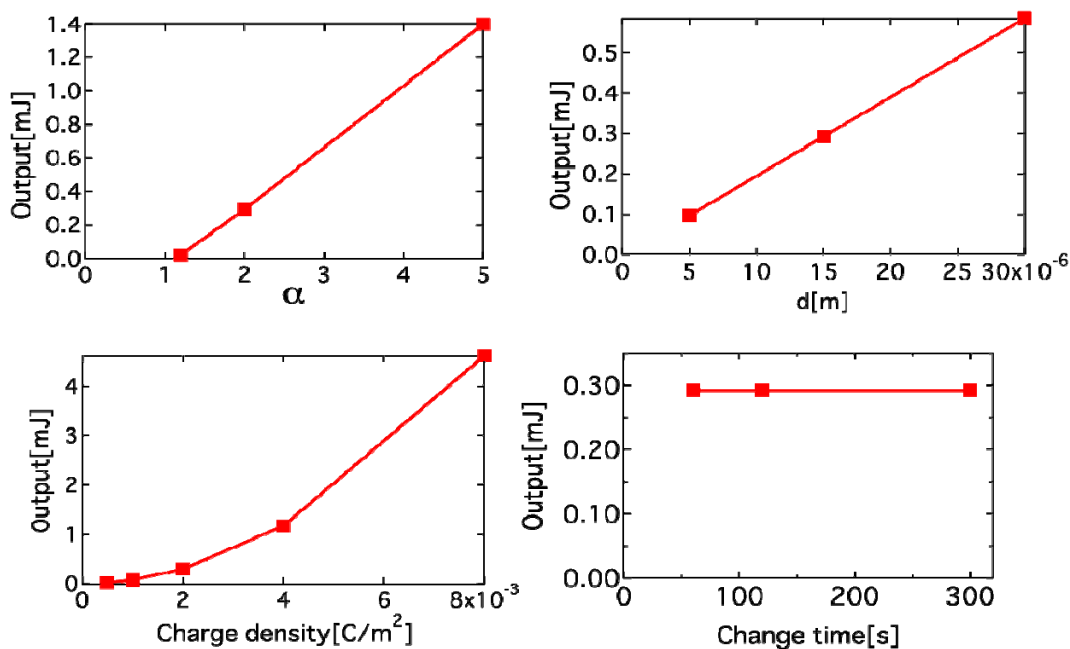


図 1.1.2.3-2 各パラメータによる出力

これより、出力は誘電率の変化率、エレクトレットの厚さ、(表面電荷密度)² に比例することが分かる。また、変化時間は出力の総量には依存しない。

(v) .4 まとめ

1. 垂直エレクトレットを用いた櫛歯型 MEMS 発電器

- ・発電原理検証を確認し、2nW の出力を得た。また、VUV 荷電法を用いた垂直エレクトレットでの発電を確認した。
- ・狭ギャップにおける表面電位の測定により、表面から 80 μ m 程度まで一定した表面電位

を得られた。

2. VUV 照射荷電法による荷電の高速化

- ・新しい荷電法，真空 UV 荷電法を確立した。
- ・従来の荷電法（コロナ荷電法，軟 X 線荷電法）と比較して，非常に短時間で高い表面電位およびイオン電流を得た。

3. エレクトレットを用いた非定常熱発電デバイス

- ・発電原理を確認し，キルヒホッフの法則，ガウスの法則を用いて発電モデルを構築した。
- ・数値解析を行い以下の事を得た。
 - ・ CYTOP の静電容量に対して，最適な誘電体の初期誘電率が存在する。
 - ・ 出力は変化率，CYTOP の厚さ，(表面電荷密度)² に比例する。

(v) .5 参考文献

- [1] Y. Suzuki, D. Miki, M. Edamoto, and M. Honzumi, A MEMS Electret Generator With Electrostatic Levitation For Vibration-Driven Energy Harvesting Applications *J. Micromech. Microeng.*, **20**, 104002, 8pp, 2010.
- [2] D. Miki, M. Honzumi, Y. Suzuki, and N. Kasagi, "Large-Amplitude MEMS Electret Generator with Nonlinear Spring," 23rd IEEE Int. Conf. Micro Electro Mechanical Systems (MEMS2010), Hong Kong, China, January 24-28, 2010, pp.176-179.
- [3] D. Hoffmann, B. Folkmer, and Y. Manoli, "Fabrication, characterization and modelling of electrostatic micro-generators," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 19, 094001pp, (2009).
- [4] K. Hagiwara, M. Goto, Y. Iguchi, Y. Yasuno, H. Kodama, K. Kidokoro, and T. Tajima, "Soft X-ray Charging Method for a Silicon Electret Condenser Microphone", *Applied Physics Express* **3** (2010)
- [5] M. Honzumi, A. Ueno, K. Hagiwara, Y. Suzuki, T. Tajima, and N. Kasagi, "Soft-X-ray-charged vertical electrets and its application to electrostatic transducers," *23rd IEEE Int. Conf. Micro Electro Mechanical Systems (MEMS2010)*, Hong Kong, 635-638, 2010.
- [6] H.-W. Lo, and Y.-C. Tai, "Parylene-based electret power generators," *J. Micromech. Microeng.*, **18**, 104006, 8pp, 2008.

(vi) センサ用パワーマネジメントデバイス

(vi) .1 研究の目的

(1) 背景

無線センサネットワークは端末の仕様や端末に接続するセンサを最適化することにより、設置する場所や収集するデータなどを柔軟に変更することができ、様々な用途に用いることができる。それにより、例えば、被災地や火山の火口など、人間が立ち入ることが困難な場所の情報を収集することができる。多数存在する無線センサデバイスが互いに連携することによりユーザにサービスが提供されるためには、無線通信デバイスは必要なときにセンシングデータをやりとりできる状態でネットワークに接続していることが求められる。しかしながら現在の技術では無線センサデバイスの待機時およびセンシング時の消費電力が大きいため、電池持続時間、センシング頻度もしくは連続センシング時間が制限されてしまうという問題がある。

一般に無線通信部の消費電力は、送受信時だけでなく待機時でもセンサデバイスに比較して大きい。さらにセンサデバイスは高機能化および複合化されて消費電力が増加する傾向にある。したがってこの電池接続時間の制限は、無線センサネットワークの普及を妨げている。

このような問題に対して、センサデバイスでは、端末に搭載されているセンサのセンシング頻度を最小にすることが必要である。その解決策としては一定時間間隔でセンシングや通信を行うタイマー駆動や特定のイベントが発生したときにだけセンシングや通信を行うイベント駆動という考え方がある。しかし、タイマー駆動では、タイマーの時間以外の状態を知ることはできず、場合によっては端末が動作していないために必要な情報をセンシングできないという可能性がある。そこで、必要なときに必要なだけセンサを動かすイベント駆動型の端末の開発が望まれる。一方、無線部では、ハードウェアの改良^[1]^[2]や無線通信制御技術の改良^[3]によって無線通信部の消費電力を削減する研究が進められている。また、センサデータ通信用の無線通信部とは別にウェイクアップ専用の無線通信部を設けることで受信電力を削減する研究も行われている。^[4]^[5]

(2) 目的

無線センサデバイスは、常時または定期的にセンシングデータを送信するような利用シーンと、常時待機してあるイベントの発生によりセンシングを開始し、センサによる測定データを無線通信によってサーバ側に送信するというような利用シーンが考えられる。本研究では、イベントによりセンシングを開始する利用シーンを想定した起動スイッチを付加したセンサ部と無線部の最適化による待機電力レスシステムを提案する。今回は、起動スイッチを付加したシステムの実現性を確認するため、低消費電力化を志向した起動スイッチおよび起動スイッチ向け無線の検討を行い、起動モジュールと無線部の要求仕様を把握することを目的に実施した。

(vi) .2 起動スイッチの低消費電力化検討

(vi) -2.1 目的

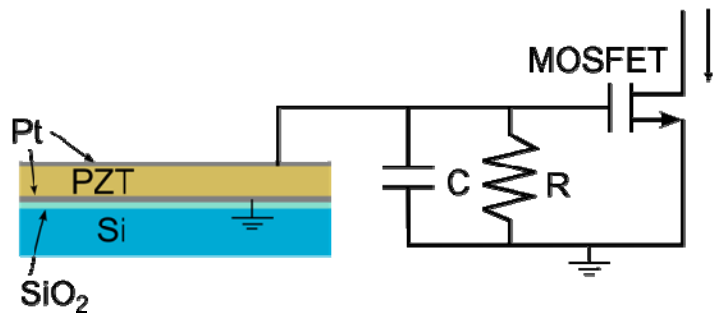
本研究開発では、端末の低消費電力化のために端末のイベント駆動型化を目指した。端末をイベント駆動化するためには、端末をイベントの発生に応じて必要なときに動作させるためのスイッチが必要となる。そこで、本研究開発では、起動スイッチに着目し研究開発を行った。

(vi) -2.2 起動スイッチの構成検討

起動スイッチはその機能から省電力であることが求められ、その理想は待機電力レス、消費電力レスのスイッチである。待機電力レスを実現するスイッチとしては、接点型のセンサもしくは発電型のセンサが考えられる^[6]。

また、起動スイッチで重要である重要なのはイベントの設定である。本研究開発では、センサ端末の設置場所をクリーンルームと想定しているため、クリーンルームにおいて最も必要とされる情報を選択することが望ましい。クリーンルームは半導体や MEMS などを開発および生産する環境であり、クリーン度、すなわちパーティクルの体積密度が非常に重要である。つまり、クリーンルームではパーティクルの数の変化を起動情報として採用することが望ましい。しかしながら、パーティクルセンサを接点型、発電型のセンサにすることは難しい。そこで、まずはパーティクルセンサを起動するための起動スイッチの開発を行った。

クリーンルームのパーティクルは主に空気中を漂い、空気の流れに寄って運ばれるものと、床に堆積したものが、人や物の移動に伴い巻きあげられるものが存在する。どちらにも共通するものは空気の流れがパーティクルを運ぶことである。そこで、本研究開発では、空気の流れの変化に対して ON・OFF するフローセンサ型のスイッチを提案する。しかしながら、それでは空気の流れの無いところではスイッチが ON しないが、例えばスイッチを搬送ロボットのようなものに取り付けることにより、その動作に連動しスイッチの ON・OFF を行うことができると考える。起動スイッチの構成は、接点型特有のチャタリングや耐久性を考慮し、発電型のフローセンサと MOSFET を組み合わせてスイッチとした。発電には圧電体を利用し、圧電体の撓みによって、電圧を発生し MOSFET を ON することにより、スイッチが ON となる (図 V.1.4.3 (vi) -2.2-1)。



図V.1.4.3 (vi) -2.2-1 提案するスイッチの構

(vi) -2.3 フローセンサの動作原理

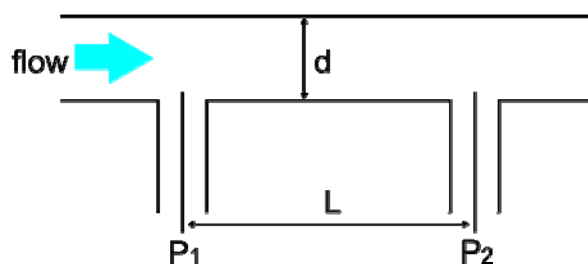
圧電体を用いたフローセンサとして、カンチレバー上に圧電体を形成し、流体の圧力によってカンチレバーと積層された圧電体が撓み電圧を出力するようなセンサを考える。

流体中に流体の流れに垂直に平板をおいた場合、場合に平板に働く力 D は以下のように表される。

$$D = C_D \frac{\rho v^2}{2} A \quad (1)$$

ここで、 C_D は抗力係数、 A は平板の面積、 ρ は流体の密度、 v は流体の流速である。流体が、気体の場合は密度が小さく、流速や平板の面積が大きくないと大きな力を得ることができない。

そこで、図V.1.4.3 (vi) -2.3-1 に示すような流路を考える。流路に流体が流れると、管路損失に寄って流路の上流 (P_1) と下流 (P_2) には圧力差が生じる。



図V.1.4.3 (vi) -2.3-1 流路概念

その圧力差 ΔP は、Darcy - Weisbach の式により以下のように表される。

$$\Delta P = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho}{2} v^2 \quad (2)$$

ここで、 λ 、 l 、 d はそれぞれ管路摩擦係数、測定部の長さ (P_1 と P_2 間の距離)、流路直径である。流路内の流れが層流の場合、管路摩擦係数 λ はレイノルズ数 Re を用いて次のよ

うに表される。

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (3)$$

したがって、カンチレバーの上面と下面の圧力差 P は動粘度 μ を用い以下のようになる。

$$\Delta P = \frac{32 \cdot \mu \cdot l \cdot v}{d^3} \quad (4)$$

単純に流体を平板に当てた場合に比べ、測定部の長さ l や流路直径 d を変更することにより、大きな圧力を取り出せることが分かる。また、式(1)では、圧力が流体速度の 2 乗に比例しているが、式(4)では、圧力が流体の速度にたいして線形に変化するため、センサとしても利用しやすい。

次に、カンチレバーが圧力を受けて撓んだ時に、圧電体の上面と下面に発生する電圧について考える。圧電体はできるだけ大きな電圧を発生させるため、電気機械結合定数の大きさを考慮し PZT を採用した。先端に錘が付いているカンチレバーへ加速度を与えた場合の単位加速度辺りに PZT に発生する電荷 S_q は以下のように表される。^[7]

$$S_q = \frac{d_{31} \cdot E_p \cdot z_p \cdot m \cdot \frac{1}{2} \cdot (L_m + l) \cdot l}{\sum_i E_i \left(\frac{1}{12} \cdot h_i^3 + h_i \cdot Z_i^2 \right)} \quad (5)$$

ここで、 d_{31} 、 E_p はそれぞれ PZT の圧電歪定数とヤング率であり、 z_p は PZT 層の中心と積層されたカンチレバーの中立線との距離であり、 m は錘の質量である。また、 L_m と l はそれぞれ慣性質量の長さと同軸レバーの長さである。また、 E_i と h_i はカンチレバー上に積層された各層のヤング率と厚さ、 Z_i はカンチレバー上に積層された各層の中心と同軸レバーの中立線との距離である。したがって、単位加速度が加わったときの PZT に発生する電圧は、

$$V = \frac{d_{31} \cdot E_p \cdot z_p \cdot m \cdot \frac{1}{2} \cdot (L_m + l) \cdot l}{\sum_i E_i \left(\frac{1}{12} \cdot h_i^3 + h_i \cdot Z_i^2 \right)} \cdot \frac{1}{C_p + C_{others}} \quad (6)$$

となる。ここで、 C_p は PZT の静電容量、 C_{others} は測定系などの寄生容量である。また、 C_p は、次の式で表される。

$$C_p = \epsilon \epsilon_0 \frac{S}{h_p} \quad (7)$$

ここで、 ϵ と ϵ_0 はそれぞれ真空の誘電率と PZT の比誘電率、 S は上部電極の Pt/Ti の面積、

h_p は PZT の厚さである。本研究開発で作製するカンチレバーは加速度による力ではなく、圧力を検出するため、以下のように変形する。

$$V = \frac{d_{31} \cdot E_p \cdot z_p \cdot \frac{1}{2} \cdot (L_m + D) \cdot h_p \cdot \Delta P}{\sum_i E_i \left(\frac{1}{12} \cdot h_i^3 + h_i \cdot z_i^2 \right)} \cdot \frac{1}{\epsilon \epsilon_0} \quad (8)$$

ここで、 P はカンチレバーの上面と下面の圧力差である。また、簡単のために寄生容量 C_{others} は無視する。式 (8) は先端荷重の場合の計算であり、圧力により発生する力は面荷重であるため、厳密には単にカンチレバーにかかる荷重を圧力に荷重に置き換えることはできないが、大まかな設計指針を得るためには十分である。

以上より、本研究開発で提案するセンサの出力は、

$$V = \frac{d_{31} \cdot E_p \cdot z_p \cdot (L_m + D) \cdot l^2}{\sum_i E_i \left(\frac{1}{12} \cdot h_i^3 + h_i \cdot z_i^2 \right)} \cdot \frac{h_p}{\epsilon \epsilon_0} \cdot \frac{16 \cdot \mu \cdot v}{d^2} \quad (9)$$

となる。

(vi) -2.4 圧電フローセンサの構造

本研究開発で開発するフローセンサの断面概念図を図 V.1.4.3 (vi) -2.4-1 に示す。フローセンサはセンサ部とメイン流路とバイパス流路から構成される。センサ部は SOI ウエハから MEMS 技術を用いて、カンチレバーと圧力を伝えるための孔が形成され、カンチレバー上には絶縁のための SiO₂、下部電極の Pt/Ti、PZT 上部電極の Pt/Ti が積層されている。メイン流路とバイパス流路は PDMS (Polydimethylsiloxane) で形成されている。

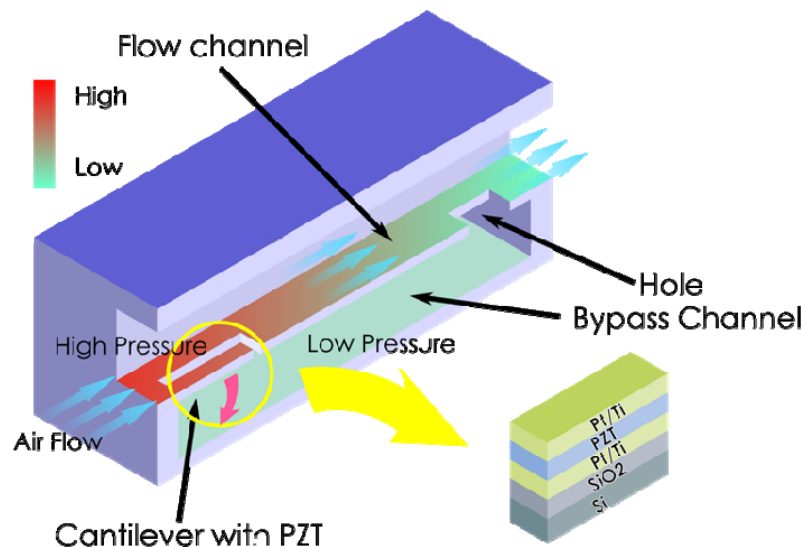
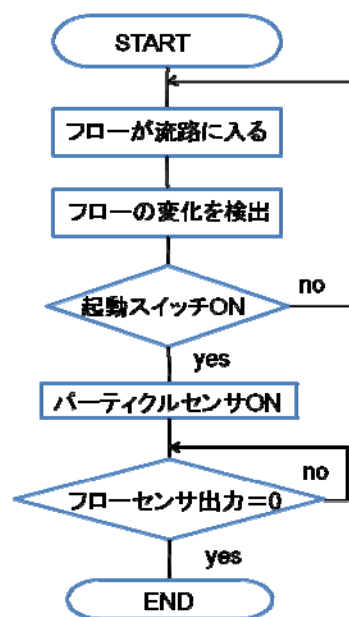


図 V.1.4.3 (vi) -2.4-1

図の左側から入った空気は流路で壁との摩擦により圧力を失う、そして孔を通してカンチレバーの下側は圧力が低くなる。その結果、カンチレバーの上面と下面に圧力差が生じ。カンチレバーが撓む。この時、カンチレバーと SOI 基板との隙間が大きいと空気がバイパス流路に流れ圧力差が生じなくなるため、隙間の大きさが重要となる。

このセンサのスイッチとしての動作は以下のようなフローチャートで表される。



図V.1.4.3 (vi) -2.4-2 フローチャート

(vi) -2.5 フローセンサの作製

(vi) -2.6.1 PZT 積層基板の形成

ここでは、SOI ウェハに PZT を成膜する方法を述べる。サブ μm から $1\mu\text{m}$ 程度の膜厚を有する PZT の成膜方法としては、スパッタ法、CVD 法、ゾルゲル法がよく使用されている。スパッタ法や CVD 法で、PZT のような多元系酸化物薄膜を成膜する場合、その膜組成のコントロールが難しいことが知られている。そのため、本研究開発では、ゾルゲル法を用いて PZT の成膜を行った。しかし、ゾルゲル法には段差被覆性に乏しいという欠点があるため、PZT を成膜してからカンチレバーの加工を行うことが必要である。

ゾルゲル法は、まず有機溶媒に溶かした金属の無機化合物を部分的に加水分解・重縮合反応を進行させたゾルゲル液を基板上に塗布する。塗布された液は、加水分解・重縮合反応によりゲル膜として固化する。それを加熱し結晶化する。

本研究開発では、まず活性層 $2\mu\text{m}$ 、BOX $1\mu\text{m}$ 、支持層 $400\mu\text{m}$ の N 型 SOI 基板を熱酸化により、酸化膜の形成を行った。この酸化膜は、PZT 形成時に Pt/Ti と Si が反応したり、Pb や Zr が Si に拡散するのを防ぐためのものである。したがって、この酸化膜は PZT の形成上必要不可欠なものである。他方で、この酸化膜は寄生容量となってしまうため、 $1\mu\text{m}$ 程度あることが望ましい。熱酸化膜を形成したあと、スパッタ法により Pt/Ti を成膜する。

この Pt/Ti は下部電極として、機能すると共に PZT の結晶化にも大きく寄与する。続いて、形成した Pt/Ti 上にゾルゲル液をスピコートし、120°Cのホットプレートで2分、250°Cのホットプレートで5分加熱して、熱分解・重縮合を行いゲル膜を形成、その後、650°Cまで急速に加熱し、ゲル膜を結晶化という工程により PZT 膜を形成する。これら一連の工程で得られる膜厚は 0.12~0.13 μm であり、この工程を所望の厚さまで繰り返す。今回は 1 μm の PZT 膜を得るために、8 回工程を繰り返した。PZT の成膜後、スパッタ法により上部電極となる Pt/Ti を形成する。この上部電極の Pt の厚みを変えることにより、PZT の引張応力をキャンセルし、カンチレバーを平坦に作製することが可能となる。最後に、裏面の熱酸化膜を除去して膜の形成は終了となる。

(vi) -2.5.2 PZT 付きカンチレバー及び孔の形成

ここでは (vi) -2.5.1 のプロセスにより作製した積層基板からカンチレバーと孔を形成するプロセスについて述べる。図 V.1.4.3 (vi) -2.5.2-1 に作製プロセスフローを示す。

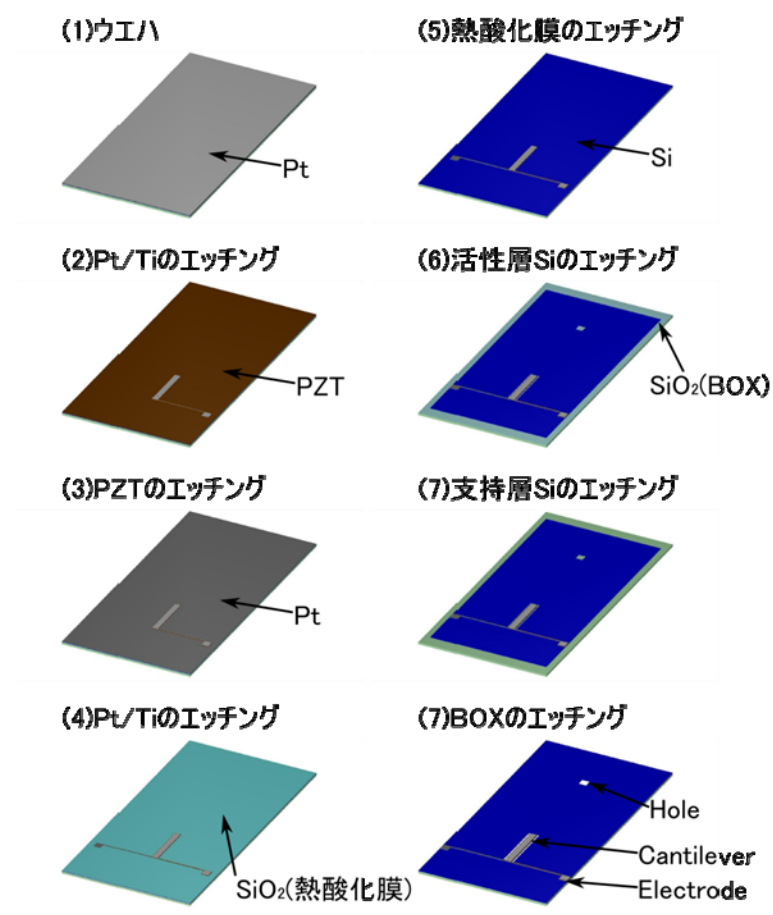


図 V.1.4.3 (vi) -2.5.2-1 プロセスフロー

まず、上部電極の Pt/Ti を Ar イオンでミリングし、上部電極のパターニングを行った。エッチング後にウエハ表面の電気抵抗を測定し、絶縁されていれば誘電体である PZT が露出していると判断できるため、エッチング終了となる。次に、PZT を混酸 (BHF/60% HNO_3 /35% $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}=10/47/50/300$) を用いてウエットエッチングした。PZT のエッチング後には白い残渣が残ったが、アセトンに浸漬することにより除去することができた。続いて、上部電極と同様に下部電極の Pt/Ti を Ar イオンでミリングし、下部電極のパターニングを行った。その後、熱酸化膜を CHF_3 を用いて、ドライエッチングした。最後にボッシュプロセスにより活性層の Si をエッチングし、BOX を CHF_3 でドライエッチングすることでカンチレバーと孔の形状が出来上がる。ここまでで活性層側の加工が完了し、続いて支持層側を加工する。支持層の Si をボッシュプロセスで BOX までエッチングするとカンチレバーはリリースされ、孔は貫通する。最後に、カンチレバー裏面の BOX を CHF_3 で除去することにより、センサ部の加工は完了である。

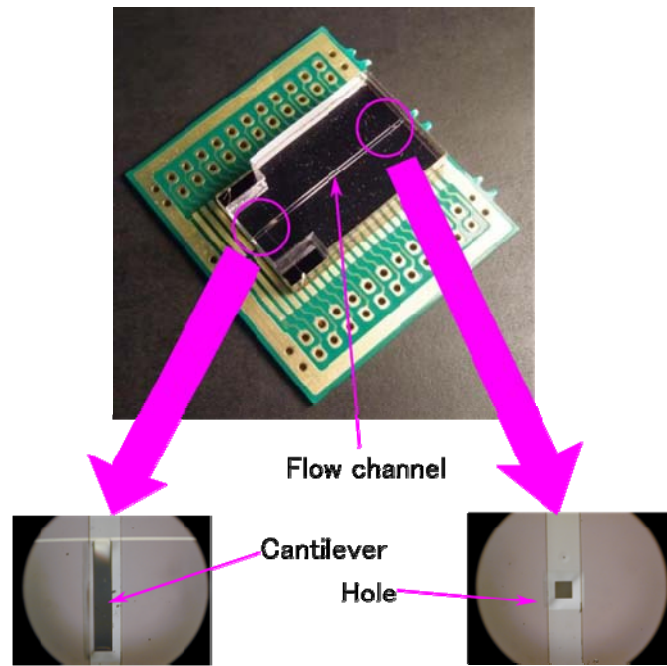
(vi) -2.5.3 PDMS による流路形成

まず、厚膜ネガ型レジスト SU-8 (化薬マイクロケム(株)) を用いて型を作製した。Si ウエハ上に SU-8 をスピコートし、ホットプレートでベーク後、露光を行った。その後、オーブンで PEB (Post Exposure Bake) を行った後、現像して型の作製は完了である。そこに PDMS を流して、 100°C のオーブンで、1 時間ベークして流路を形成した。

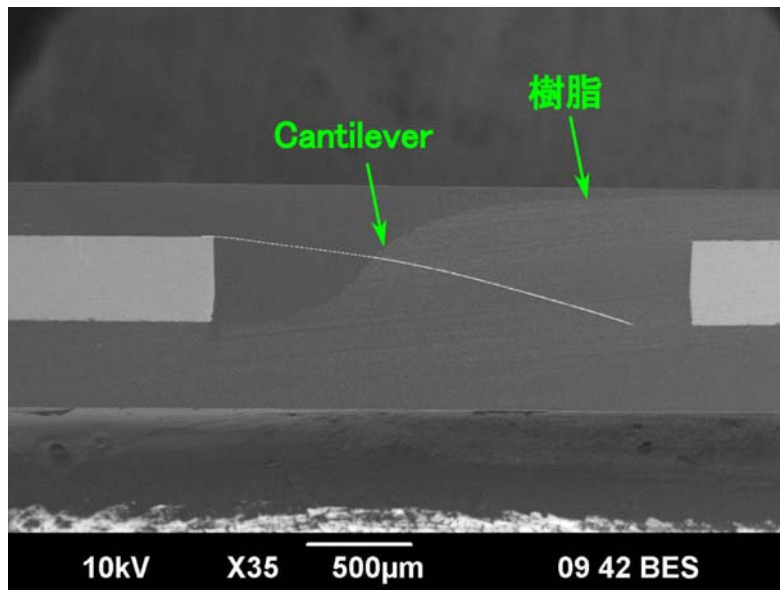
(vi) -2.6 フローセンサの特性評価

作製した流路は長さが、2.5 mm で幅が 0.5 mm、高さが 0.3mm である。また、カンチレバーの大きさは、長さが 3mm、幅が 0.3 mm である。

図 V.1.4.3 (vi) -2.6-1 に作製したセンサの外観写真を示す。カンチレバーが下向きにたわんでいることが分かる。これは、Pt の膜厚が厚く、Pt の圧縮応力が PZT の引張応力よりも大きくなったことが原因だと考えられる。図 V.1.4.3 (vi) -2.6-2 に作製したセンサの断面 SEM 像を示す。これはセンサを樹脂に埋め込んで機械研磨し、さらにブロードな Ar ビームにより研磨断面をミリングする事により得られた断面を SEM にて観察したものである。カンチレバーの根本付近と先端付近で、樹脂のコントラストが異なっているのは、根元付近のみ Ar ビームでミリングしてあるためである。広範囲を Ar ビームでミリングするには非常に長い時間が必要となるため、根本付近だけ Ar ビームミリングを行った。次に図 V.1.4.3 (vi) -2.6-3 にカンチレバーの断面 SEM 像を示す。



図V.1.4.3 (vi) -2.6-1 センサ外



図V.1.4.3 (vi) -2.6-2 センサ断面

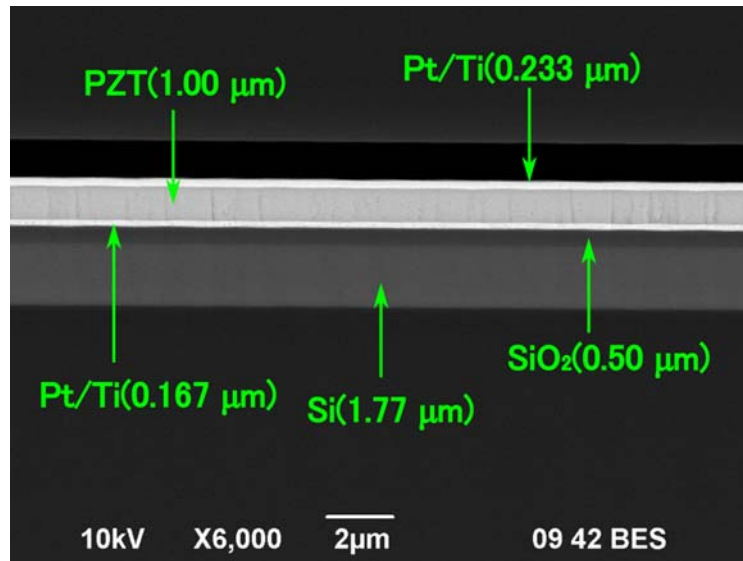


図 V.1.4.3 (vi) -2.6-3 カンチレバー断面

図中に示された数字は SEM の測長機能を用いて測定した各層の膜厚である。また、上部電極の Pt/Ti の上の黒い部分は樹脂が上部電極から剥がれてできた隙間である。

DC ファンモータの後ろにシャッターを設置して、シャッターの開閉に応じた出力の変化を測定した。図 V.1.4.3 (vi) -2.6-4 に測定系概要を示す。

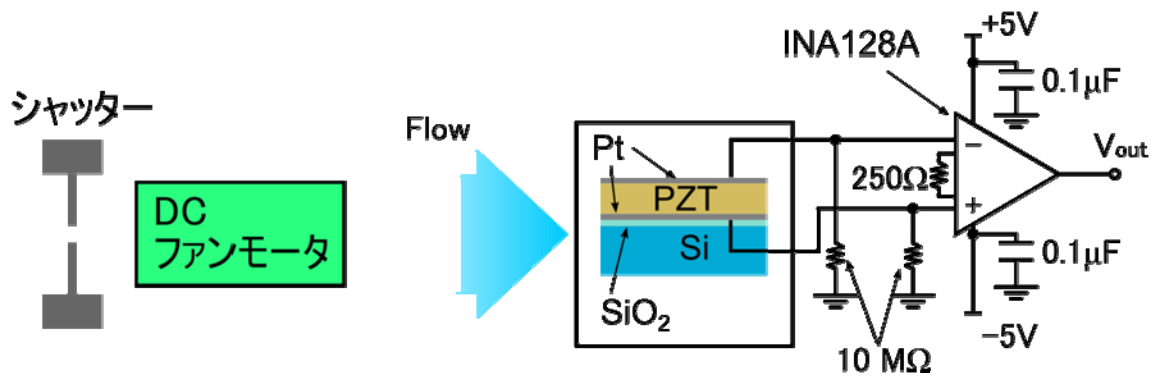
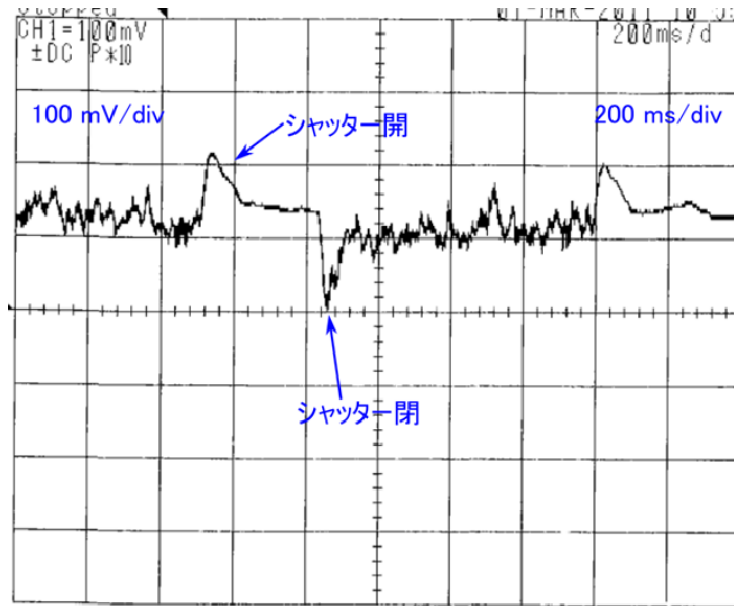


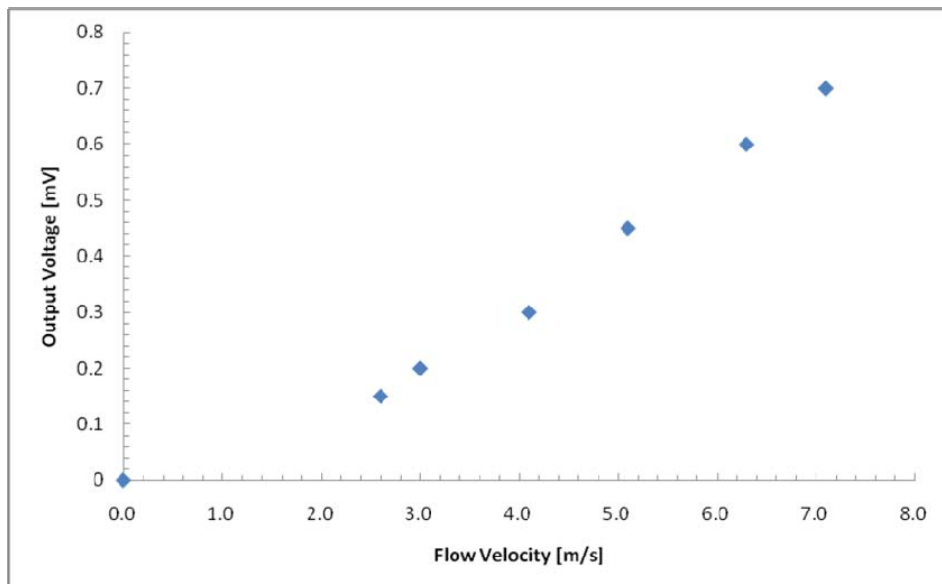
図 V.1.4.3 (vi) -2.6-4 測定系概要

PZT の出力はオペアンプ (INA128A) で 200 倍に増幅し、オシロスコープにて出力波形を観察した。センサ直前の流速が 7.1 m/s の時のオシロスコープの波形を図 V.1.4.3 (vi) -2.6-5 に示す。シャッターの開閉に伴う出力はシャッターを閉めた時のほうが大きく 0.7 mV であった。測定したセンサはカンチレバーの長さが 3 mm、幅は 0.3 mm である。



図V.1.4.3 (vi) -2.6-5 オシロスコープ出力 (7)

シャッターを開けたときと閉めたときで出力の正負が逆転しており、妥当な結果が得られている。次に様々な流速でシャッターを開閉したときの出力を図V.1.4.3 (vi) -2.6-6に示す。縦軸は出力電圧、横軸は流速である。流速が大きくなるにつれて出力が増加することが確認できた。しかし、式(8)から予想される出力は流速が7.1 m/sの時、0.15 Vであり、得られた結果は200分の1程度になった。



図V.1.4.3 (vi) -2.6-6 各流速に対する

考えられる原因は以下のとおりである。

- (1) 空気が流路に入る際に損失が大きく流路内の流速が遅くなっている。
- (2) カンチレバーが下向きに大きく撓んでいる。
- (3) 配線の寄生容量が大きいと。

したがって、センサの外形および、流路入り口の形状の変更と上部電極の膜厚を PZT の応力に応じて最適化することにより、感度の改善が可能である。また、配線の寄生容量を減らすために配線のデザインの変更をすることで、PZT に発生する電荷が同じでも、出力電圧を大きくすることができる。

(vi) -2.8 まとめ

本研究開発では、起動スイッチとして、PZT を用いたフローセンサの開発を行った。ゾルゲル法により PZT を成膜し、流路構造を用いることで圧力差を増加させセンサ感度の向上を試みた。その結果、7.1 m/s のとき 0.7 mV の出力を得ることができた。また、流速にたいして、ほぼ線形な出力電圧の変化を確認した。出力が小さく、MOSFET を動作させるには至らなかったが、圧電型フローセンサによる端末のイベント駆動化の可能性を示すことができたといえる。

(vi) .3 起動スイッチ向け無線検討

(1) 要求仕様の策定

本研究では、本システムのクリーンルーム内搬送ロボットへの適用を想定し、以下のような利用シーンを考える。

1. クリーンルーム内にある搬送ロボットにウェハが搭載される。
2. 搬送ロボットには、**新型**パーティクルセンサと**起動スイッチ**が装備されている。
*新型パーティクルセンサは、起動スイッチにより始動する。
起動スイッチは、搬送ロボットが移動することによって発生する空気のフローを検出することでONになる。
(起動スイッチは、クリーンルーム内の大気流によってはONにならない。)*
3. 搬送ロボットが成膜装置まで移動する。
4. **起動スイッチ**は、搬送ロボットが移動したことを検出し、**新型**パーティクルセンサを**起動**し、測定データを無線通信により送信する。
5. クリーンルーム管理システムは、**新型**パーティクルセンサの測定値を判断して、異常がなければ、搬送ロボットに搭載されているウェハを成膜装置に移動される。
6. 搬送ロボットは次の装置に移動する。
7. 搬送ロボットは1つのクリーンルーム内に複数台稼働している。
8. 電池を搭載した無線センサデバイスの使用を前提とする。

次に、クリーンルームで現在使用されている天井走行型搬送用ロボット^{[8] [9]}の移動速度は 3m/s(200m/min)程度、床走行型搬送ロボット^{[10] [11]}は 0.5m/s～1m/s(2km/h～3.6km/h)である。この移動速度において安定して動作することが求められる。

上記利用シーンを実現するために、無線部には以下の要件が求められる。

移動する搬送ロボットに設置されることから、小型で軽量であることが求められる。また設置性操作性の面からアンテナなどの突起物はないこと、電池駆動であることが求められる。

搬送ロボットは設備機器であるため、一般的な設備償却期間である 5 年以上の電池寿命が求められる。さらに、搬送ロボットは一般的な工業製品と同様日本国内専用ではなく世界中で共通に使用できることが望ましい。

搬送ロボットは連続して動作するのではなく、装置に供給されているウェハを使用したときに新たにウェハを供給するために動作するというような間欠的な動作モードが想定される。したがって、搬送ロボットが移動した時、つまりパーティクルセンサが起動した時に高速で測定データを送信することだけでなく、長時間の待機状態でも低消費電力であることが求められる。

通信として必要な距離は、全センサデータを確実に送信するために 5 秒間の通信時間を確保すると、最大速度 3m/s のときに、 $15\text{m}=3\text{m/s} \times 5\text{s}$ となる。

クリーンルーム内に搬送ロボットは複数台あることが考えられるので、装着されている搬送ロボットを識別できる必要がある。また、センサモジュールには複数のセンサが搭載されているので、どのセンサのデータであるかを識別する必要がある。さらに各センサのデータが取得された時刻を個別に記録する必要がある。また、複数の搬送ロボットが稼働しているため、複数の起動スイッチから送られてくるデータを全て取得する必要がある、取得した複数のデータがそれぞれどの起動モジュールからのデータなのかを識別する必要がある。

データの暗号化の必要性については用途に応じて今後検討する必要がある。

以上の要件から、無線部に対する要求仕様を以下のように策定した。

無線部要求仕様	
電池寿命	5年以上
寸法・重量	小型軽量
稼働地域	日本以外を含む
通信距離	15m以上
データ	測定値
	測定時刻情報
	その他情報(ベンダID・センサ種別など)
通信機能	複数センサデータの同時取得
アンテナ	内蔵

表V.1.4.3 (vi) .3-1 無線部要求仕様

以下、次のようなステップで上記要求仕様に関する分析を行い、現在の技術レベルとの差異を把握した。

1. 要求仕様を満足するために必要な起動スイッチ向け無線の基本仕様について検討する。
2. 従来技術を採用している機器を使用した実験により、無線通信モデル作成に必要なデータを求める。
3. その実験結果を用いて無線通信モデルを作成し、今回検討した基本仕様による要求仕様の実現性について検討する。

(2) 無線部基本仕様の検討

以下、要求仕様を満足するデータ構造と、そのデータを通信するための通信シーケンスについて検討した。さらに、検討した通信を行う時の消費電力を低減するために備えるべきハードウェア構成と、そのハードウェアの制御シーケンスについて検討した。最後に、無線に関する仕様について検討した。

(2.1)通信データ構造に関する検討

通信データはデータに関する要求仕様を満足するために、アプリケーション層と制御層の2層とし、以下の構造とする。これにより1台の起動モジュールが、ソフトウェア的には、最大9個のセンサデータを処理することが可能になる。

アプリケーション層		
データ種類	サイズ(Byte)	備考
計測データ	Measurement Data	4 計測データ
計測時刻	Time Stamp	4 計測時刻(yyyy.mm.dd.tt.mm.ssss)
計測条件	Measurement Characteristic	2 計測条件(精度、雑音除去などの処理)
センサー情報	Device Characteristic	2 センサ情報(ベンダーID、種類、仕様など)
アプリケーション層 小計		12 1パケットにつきセンサー9個まで
制御層		
データ種類	サイズ(Byte)	備考
データフォーマット	data format	1 以下に続くデータのフォーマット・バージョンなど
分割フラグ	division frag	1 送信されるデータが複数パケットになるかなど
制御層 小計		2 1パケットにつき1セット

表 V.1.4.3 (vi) .3-2 通信データ構造

このとき、パケットのデータ構造は以下ようになる。

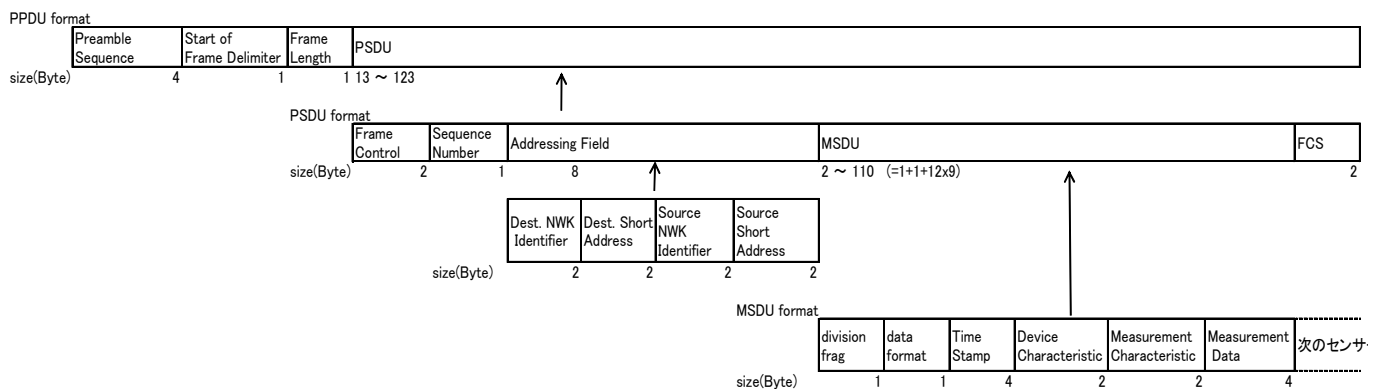


図 V.1.4.3 (vi) .3-1 パケットデータフォーマット

パケットサイズは以下の式で表現される。

$$P = Cd + (Sd * Ns)$$

P: パケットサイズ (バイト)

Cd: 制御層パケットサイズ = 2 バイト

Sd: センサあたりのアプリケーション層パケットサイズ = 12 バイト

Ns: センサ数 (最大 9 個)

パケットサイズ P は、センサが 9 個の時に最大で、129 バイトになる。

(2.2)通信シーケンスに関する検討

前記通信データ構造を用いて通信を行うが、通信の多くを占めることが想定される

センサデータを送信する場合のメッセージシーケンスを以下に示す。

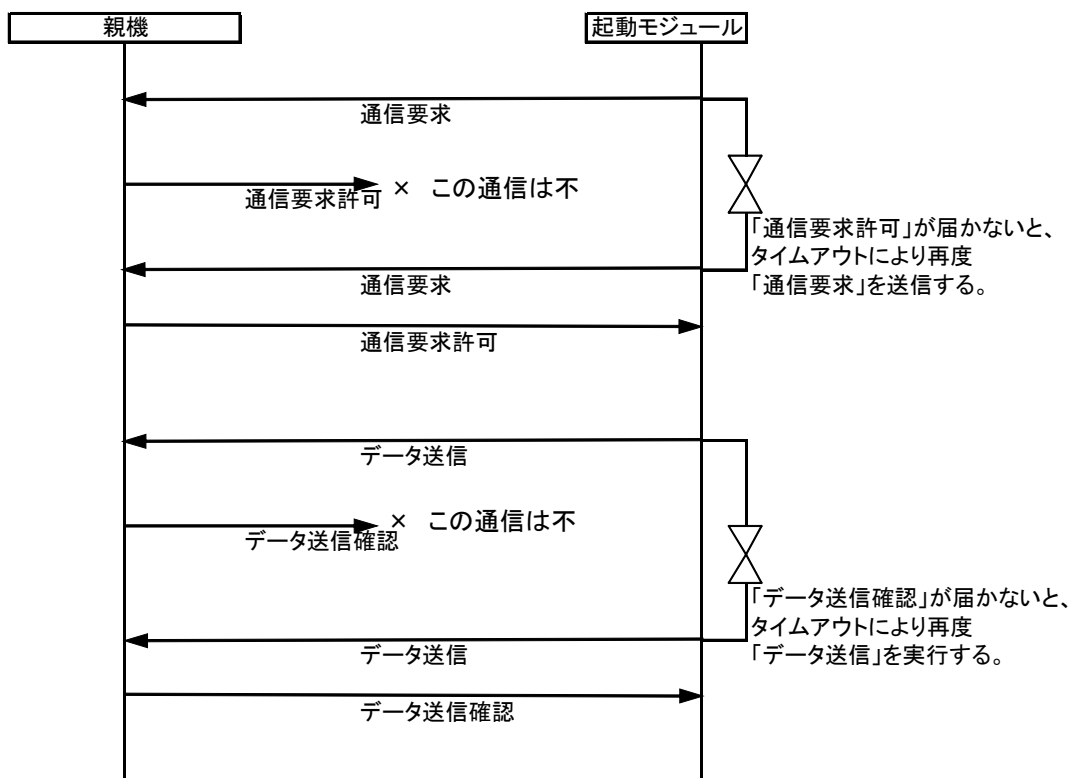


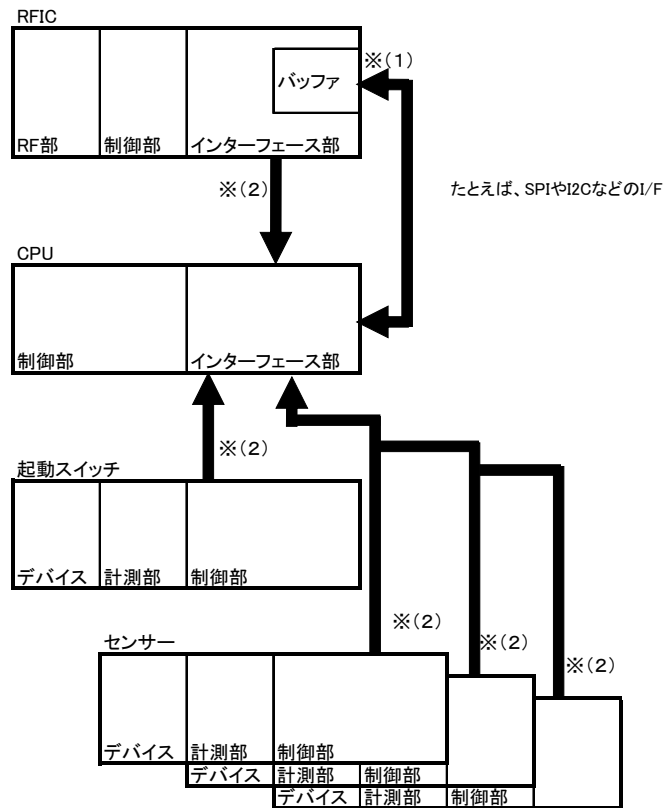
図 V.1.4.3 (vi) .3-2 センサデータ送信時メッセージシーケンスチャート

クリーンルーム内に複数の軌道モジュールが存在するため、同時にデータ送信を買い始する可能性がある。したがってデータ送信前に親機に対する通信を確保する必要があるため、親機に対して「通信要求」を送信する。

アプリケーション層での「データ送信確認」によって、データが送信されたことを確認して通信を終了する。本検討では消費電力低減を優先して、MAC 層での確認(ACK)は行わないものとする。

(2.3)ハードウェア構成に関する検討

ハードウェアは、低消費電力化を実現するため以下の構成とする。



- (1) 無線ICは通信データ用バッファを備える
- (2) CPUは、無線IC、起動スイッチおよびセンサーからの割込インターフェースを備える

図V.1.4.3 (vi) .3-3 ハードウェア構成図

一般に CPU をはじめとする能動部品に比較して無線 IC の消費電力は極めて大きい。したがって、無線通信時のみに無線 IC の電源を ON し、その他の場合は必要に応じて細かなタイミングで無線 IC と CPU を独立して ON/OFF できるように、無線 IC および CPU には通信用バッファを備える。また、CPU は無線 IC、起動スイッチ、センサーなどからの割込インターフェースを備える。

(2.3)通信制御タイミングに関する検討

通信の制御は、消費電力削減を目的に、前記ハードウェア構成以下のタイミングで行う。これは、ここでは通信時の消費電力を低減するために、無線 IC と CPU を必要最小限な時間に限定して動作させる。そのような制御を行うために必要なハードウェア構成を前節で検討している。

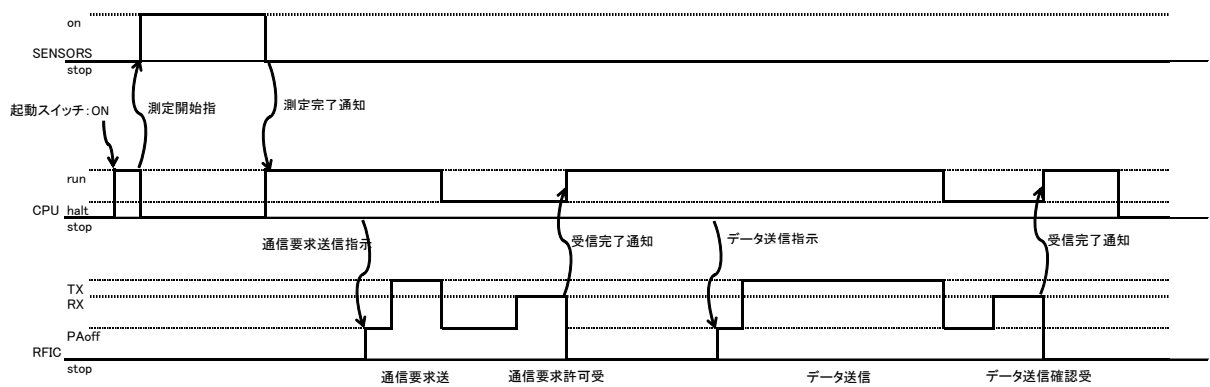


図 V.1.4.3 (vi) .3-4 通信制御タイミングチャート

タイミングチャートの横軸は、経過時間を示している。縦方向に下から、RFIC、CPU、センサ(SENSOR)の状態を、縦方向高さで示している。RFICでは、1番下の状態が停止(STOP)状態、2番目がパワーアンプのみ OFF(PAoff)状態、その上が受信(RX)状態で、1番上が送信(TX)状態を示している。CPUは下から、停止(STOP)状態、2番目が HALT(halt)状態、1番上が動作(RUN)状態を示している。センサでは、下が停止(STOP)状態、上が動作(ON)状態を示している。

(2.4)無線通信性能に関する検討

本検討では適正なコストで実現できる技術を採用することを前提とする。具体的には RF CMOS 技術での実現を想定する。

まず通信速度について検討する。今回検討するシステムにおいては、センサはパーティクルセンサや温湿度センサであり、データサイズは1データにつき数バイト程度であり、間欠的にセンシングするものである。したがって、高速もしくは大容量通信は要求されないので、通信データレートは 250kbps とする。

次に受信感度および送信出力について検討する。要求される通信距離は 15m 程度であるので、受信感度は IEEE802.15.4 で規定している -85dBm、送信電力は 0dBm とする。そしてアンテナは特に利得を必要としない。自由空間の伝達損失は Friis の伝達公式によると、送信出力 0dBm、送受信アンテナの利得を 0dB とすると距離 100m において -80.2dBm となるためである。

反対に、送信電力 0dBm より絞っても、ベースバンド処理のデジタル回路部での消費電力の方が大きく、無線 IC の電力削減への寄与は小さいと考えられる。したがって送信出力は 0dBm より小さくしない。受信感度 -85dBm および送信電力 0dBm は現在の

RF CMOS 技術では安価で安定して製造可能な仕様である。

次にアンテナについて検討する。アンテナは操作性の面から、小型もしくは内蔵型が望ましい。また指向性については搬送ロボットが移動することを考慮すると、無指向性であることが望ましい。

この要求仕様とここまでの仕様検討結果から、通信速度などの性能に関する要求は高くない、つまり従来技術レベルであることがわかる。一方電池寿命などの消費電力に関する要求は従来技術よりかなり高いことがわかる。したがって、消費電力に着目して検討を実施した。

(3) 無線部基本仕様基礎データの取得

(3.1) 実験環境

本実験では、現在市販されている IEEE802.15.4^[12] 準拠の RFIC である Texas Instruments 社(以下 TI 社)の CC2520^[13] および Atmel 社(以下 AT 社)の AT86RF231^[14] を、通信プロトコルとしては ZigBee^[15] を採用した。ハードウェアとしては、それぞれの RFIC の評価キットを用い、ネットワークの検索、接続、切断、再接続、データ送信の各動作をさせ、各通信の状態における送受信タイミングとその時の RFIC の消費電流を測定することで性能を確認した。実験装置の構成図および実験装置の写真をそれぞれ以下に示す。

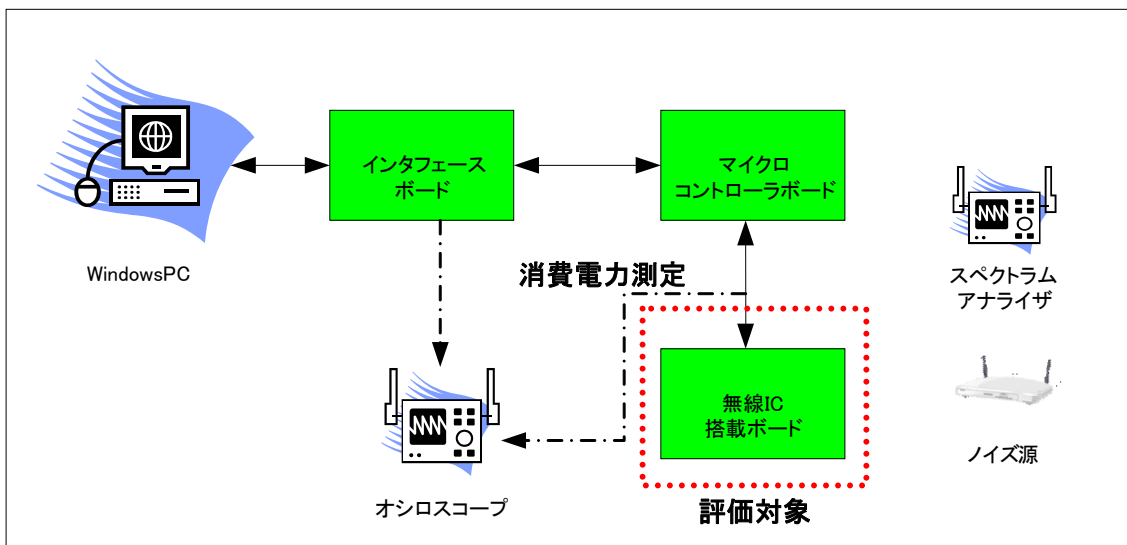
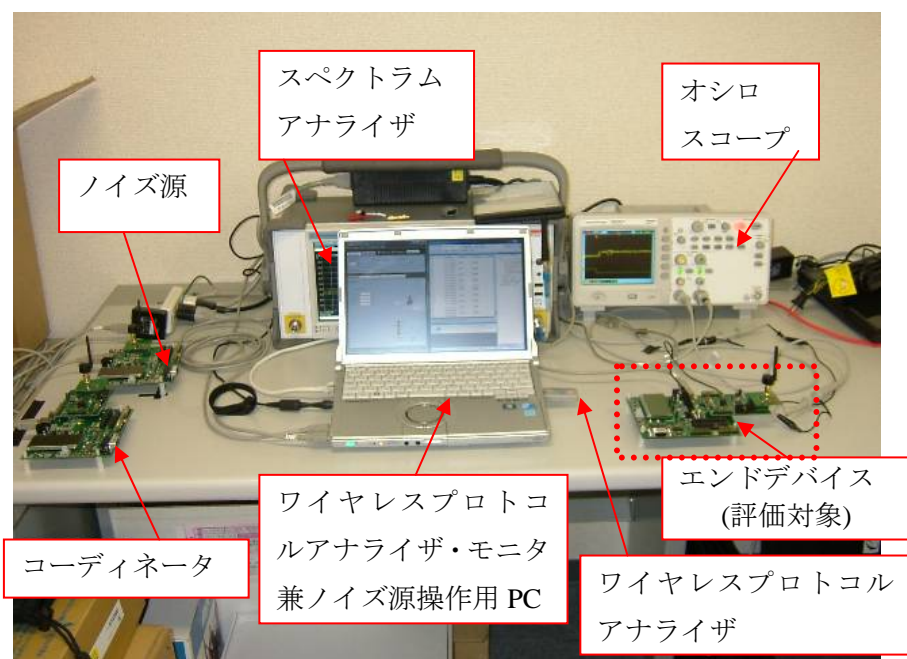


図 V.1.4.3 (vi) .3-5 評価実験装置構成図



図V.1.4.3 (vi) .3-5.1 評価実験装置

データ送信の評価シーケンスを通信状態の代表例として以下に示す。単独（1 パケット）送信および複数パケット送信の 2 シーケンスが記述されている。

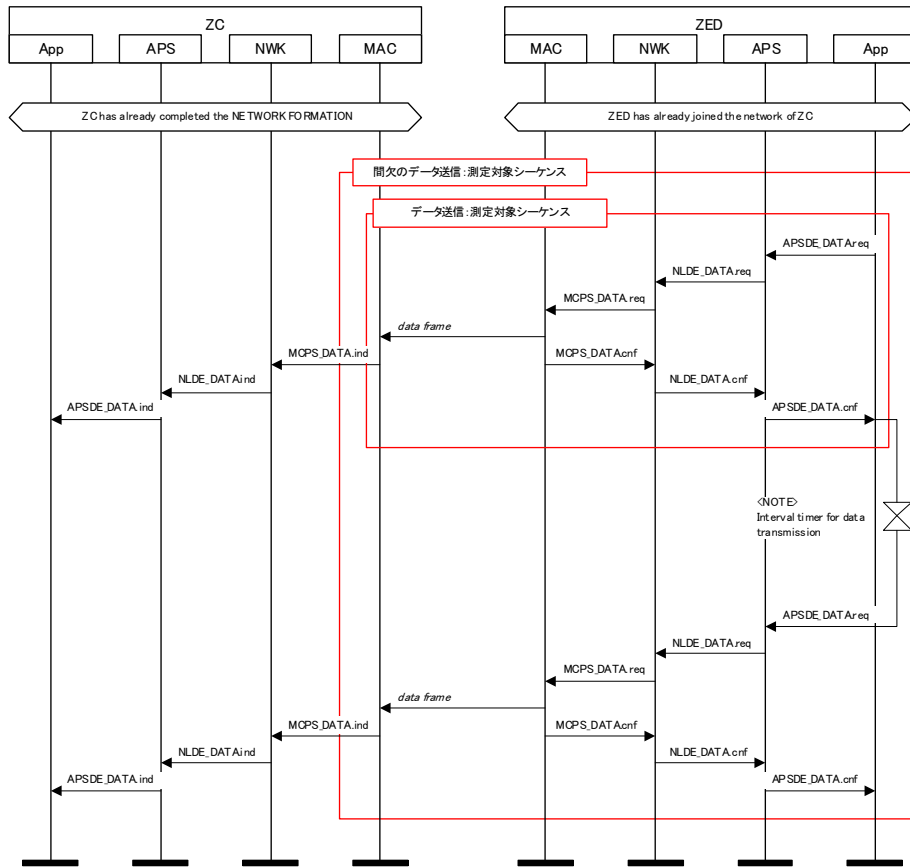
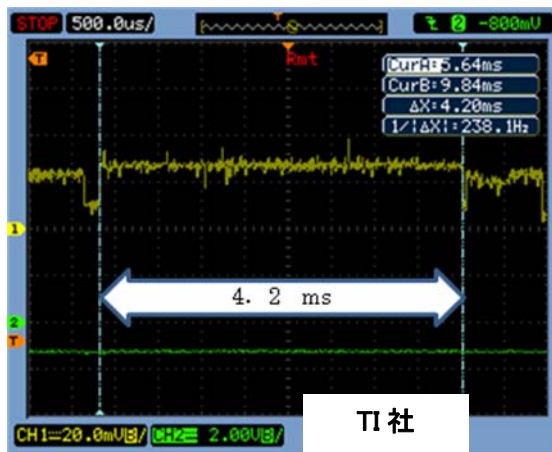


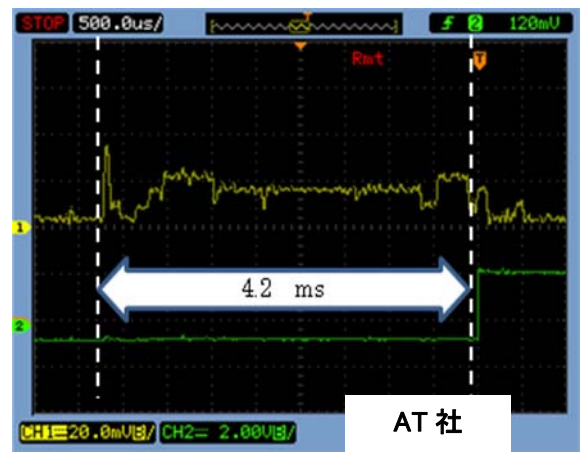
図 V.1.4.3 (vi) .3-6 評価したメッセージシーケンスチャート例

(3.1)実験結果

実験により測定した一例として、MSDU114 バイト (PPDU133 バイト) 送信時の TI 社と AT 社の RFIC の消費電流波形を以下に示す。



TI 社



AT 社

図 V.1.4.3 (vi) .3-7 データ送信時の消費電流波形

PPDU133 バイトの理論上の送信時間は、4.256ms であり、2 社の RFIC の実測値とほぼ一致することが確認できた。理論上の送信時間は以下の式で求められる。

$$4.256\text{ms} = 1/(250\text{kbps}) \times (133 \text{ バイト} \times (8 \text{ ビット}/1 \text{ バイト}))$$

このようにして数値シミュレーションに必要な値を評価実験により求めた。実験結果を以下の表に示す。なお、これらのデータは ZigBee 方式による実験により求めたものだが、得られた通信時間や消費電流は、通信速度、送信出力や変調方式が同等であれば、ZigBee 方式以外の無線通信方式でも十分に参考にできると考えられる。

	TI:CC2520		Atmel:AT86RF231		TI:CC2520		Atmel:AT86RF231	
	電流 (mA)	時間 (mS)	電流 (mA)	時間 (mS)	電流 (mA)	時間 (mS)	電流 (mA)	時間 (mS)
送信 (MSDU:114バイト)	27.2	4.2	12.8	4.2	22.4	2.4	16.0	0.56
受信 (MSDU:8バイト)	24.0	—	17.6	—	18.4	—	17.0	—
CSMA/CA	23.2	1.9	16.0	0.14	18.4	0.4	16.0	0.14
RX<->TX	9.6	0.2	8.0	0.2	6.0	0.2	8.0	0.04
通信条件:								
通信速度	250 kbps		250 kbps		1 Mbps		2 Mbps	
送信出力	0dBm		0dBm		0dBm		0dBm	
プロトコル	ZigBee		ZigBee		TI original		Atmel original	
変調方式	DSSS		DSSS		DSSS		DSSS	

表 V.1.4.3 (vi) .3-3 実験の測定結果一覧表

上記表 V.1.4.3 (vi) .3-3 の中で、MSDU8 バイトの受信時間の測定を行っていない。この値については、他の測定値から理論値に近い数値が出ることが予測されたので、実験を省略した。以下にこの理論値を示す。

$$0.864\text{ms} = 1/(250\text{kbps}) \times (8 \text{ バイト} + 19 \text{ バイト}) \times (8 \text{ ビット}/1 \text{ バイト})$$

以上の結果から求めた、モデルによる評価実験に必要なデータを以下に示す。

RFIC:		
	電流 (mA)	時間 (mS)
送信 (MSDU:114バイト)	12.8	4.2
受信 (MSDU:8バイト)	17.6	0.9
CSMA/CA	16.0	0.9
PAoff	8.0	0.2
OFF	0.0	
設定の条件:	通信速度	250 kbps
	送信出力	0dBm
	電源電圧	3V
CPU:		
	電流 (mA)	
Active	2.760	
Halt	0.0021	
Stop	0.0001	
設定の条件:	CPU	TI: MSP430F5438A
	クロック	12 MHz
	電源電圧	3V

図 V.1.4.3 (vi) .3-8 モデル化に必要なデータ

以下、上記図 V.1.4.3 (vi) .3-8 のデータを用いたモデルを使ったシミュレーション実験を行った。

(4) 無線通信モデルを用いた評価実験

(4.1) 実験環境

図 V.1.4.3 (vi) .3-8 に示すデータを使い MATLAB/Simulink 上に無線通信モデルを開発した。本モデルは、通信速度やエラーレートなどの通信性能をシミュレーションするだけでなく、その消費電力も同時にシミュレーションすることを特長とするものである。最上位層を図 V.1.4.3 (vi) .3-9 に示す。

図 V.1.4.3 (vi) .3-9 の、(a)①、②、③が起動モジュール、(a)④が起動モジュールと通信する中継機である。(b)が(a)の消費電力をモニタする。この(a)と(b)が今回の研究のために新規に開発した機能である。以下、(c)は伝送路でありパケットエラーレートなどの設定などが行える。(d)は通信状態をモニタする。(e)は各種パラメータを設定する機能を持つ。

通信に関する基本的な設定値は、外部のエクセルファイルから読み込むことで、無線通信モデルとは分離した形で設定値を記述することができる。この設定値としては、RFIC および CPU の各動作状態の消費電流や動作時間などがある。

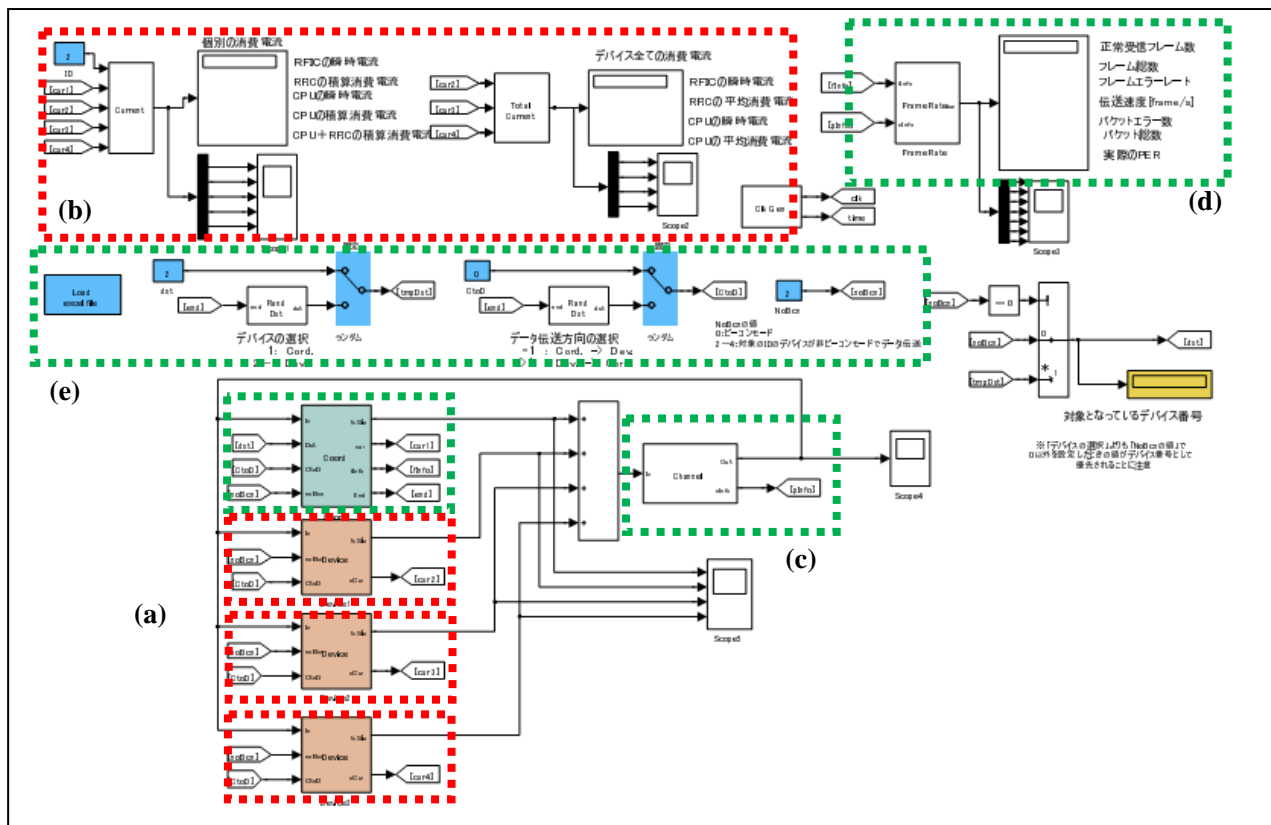


図 V.1.4.3 (vi) .3- 9 無線通信モデル

今回のシミュレーションでは、3種類の技術を使った場合の無線通信に要した消費電力を算出した。3種類の技術を以下に示す。

従来技術 1

1秒ごとにセンシングを行いセンサデータを送信し、制御装置側で必要なセンサデータを判断する。したがって1日に86400回センサデータを送信する。

従来技術 2

1秒ごとに制御装置からのセンサデータ取得命令を受信し、取得命令を受信した(起動条件が成立した)場合にセンシングを行い、センサデータを制御装置側に送信する。したがって1日に86400回センサデータ取得命令を受信する。

起動スイッチ

起動スイッチがセンサ起動条件を検出した場合にセンシングを行い、制御装置側にセンサデータを送信する。

またシミュレーションでは電池寿命も算出している。ボタン電池 CR2032 およびアルカリ単三乾電池の仕様を以下に示す。

電池		電圧	標準容量	放電容量
ボタン電池	CR2032	3V	220	154
単三乾電池	アルカリ	1.5V	2000	1600

表 V.1.4.3 (vi) .3-4 電池の仕様

表 V.1.4.3 (vi) .3-4 にある標準容量とは、適正な環境下小電流で使い続けたときに利用できる容量であり、電池メーカーが公表しているものである。放電容量とは、今回のシミュレーションのように 10mA を超えるような大電流で使い続けたときに利用できる容量であり、電池を利用した過去の知見から著者が判断した値で、電池メーカーからは公表されているものではない。今回の電池寿命のシミュレーションには表上段のボタン電池 CR2032 の放電容量を採用した。

(4.2)実験結果

以下に、実験結果を示す。最初に、1 時間に 1 回つまり一日 24 回起動条件が成立し、センサデータを送信する場合の待機電流による変化の結果を示す。

	受信回数	送信回数	待機電流(mA)				
			0.001	0.002	0.003	0.004	0.005
従来技術1	86400	86400	8812.8	8899.2	8977.0	9063.4	9149.8
従来技術2	86400	24	2089.3	2175.7	2262.1	2348.5	2434.9
起動スイッチ	0	24	88.8	175.2	261.6	348.0	434.4

「待機電流」: センサ、無線IC、CPUは待機状態で、起動スイッチのみがOFF状態で動作している状態の消費電流を意味する。

「従来技術1」: 1秒に1回受信を行い、1秒に1回データを送信する。

「従来技術2」: 1秒に1回受信を行い、1日に24回データを送信する。

「起動スイッチ」: 1日に24回起動スイッチにより起動してセンシングを行いデータを送信する。

表 V.1.4.3 (vi) .3-5 待機電流と電力消費量の比較

表 V.1.4.3 (vi) .3-5 では、起動スイッチを採用した場合と、従来技術を採用した場合の一日あたりの消費電力の差異を求めた。

「従来技術1」は、起動スイッチを持たず、1秒に1回管理装置側からのデータ送信要求を受信しデータを送信した場合の一日あたりの消費電力量、単位は mA 秒である。

「従来技術 2」は、起動スイッチを持たず、1秒に1回管理装置側からのデータ送信要求を受信し一日に24回データを送信した場合の一日あたりの消費電力量、単位はmA秒である。「起動スイッチ」は、起動スイッチを持ち、起動スイッチが起動条件を一日に24回検出し計測したデータを送信した場合の一日あたりの消費電力量、単位はmA秒である。また、「待機電流」は、センサ、無線IC、CPUは待機状態で、起動スイッチのみがOFF状態で動作している状態の消費電流を意味し、0.001mAから0.005mAきざみに0.005mAまで変化させた。

グラフを以下に示す。

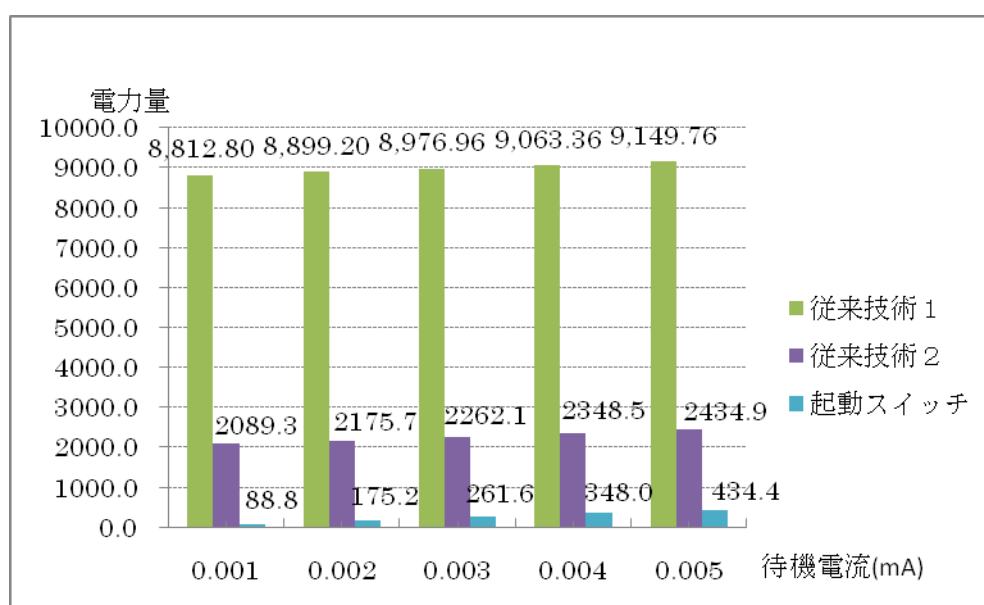


図 V.1.4.3 (vi) .3- 10 待機電流と電力消費量の比較

起動スイッチを使った場合は従来技術 1 を使った場合より、消費電力量が 40 倍前後低いことがわかる。また従来技術 2 と比較しても 10 倍前後消費電力を低減することがわかる。

次に、1 時間に 1 回つまり一日 24 回起動条件が成立し、センサデータを送信する場合のデータ送信回数による変化の結果を示す。

	待機電流 (mA)	受信回数 (回/日)	送信回数(回/日)					
			0	1	24	240	1440	86400
従来技術1	0.003	86400	8977.0	8977.0	8977.0	8977.0	8977.0	8977.0
従来技術2	0.003	86400	2260.2	2260.3	2262.1	2278.9	2372.2	8977.0
起動スイッチ	0.003	0	259.2	259.3	261.6	283.4	404.5	8977.0

表 V.1.4.3 (vi) .3-6 送信回数と消費電力量の比較

表 V.1.4.3 (vi) .3-6 では、起動スイッチを採用した場合と、従来技術を採用した場合の一日あたりの消費電力の差異を求めた。

「従来技術 1」は、起動スイッチを持たず、1 秒に 1 回管理装置側からのデータ送信要求を受信しデータを送信した場合の一日あたりの消費電力量、単位は mA 秒である。

「従来技術 2」は、起動スイッチを持たず、1 秒に 1 回管理装置側からのデータ送信要求を受信し、一日に 0 回から 86400 回(1 秒ごと)データを送信した場合の一日あたりの消費電力量、単位は mA 秒である。「起動スイッチ」は、起動スイッチを持ち、起動スイッチが起動条件を一日に 0 回から 86400 回(1 秒ごと)データを送信した場合の一日あたりの消費電力量、単位は mA 秒である。また、「待機電流」は、センサ、無線 IC、CPU は待機状態で、起動スイッチのみが OFF 状態で動作している状態の消費電流を意味し、0.003mA の時の値を求めた。

グラフを以下に示す。

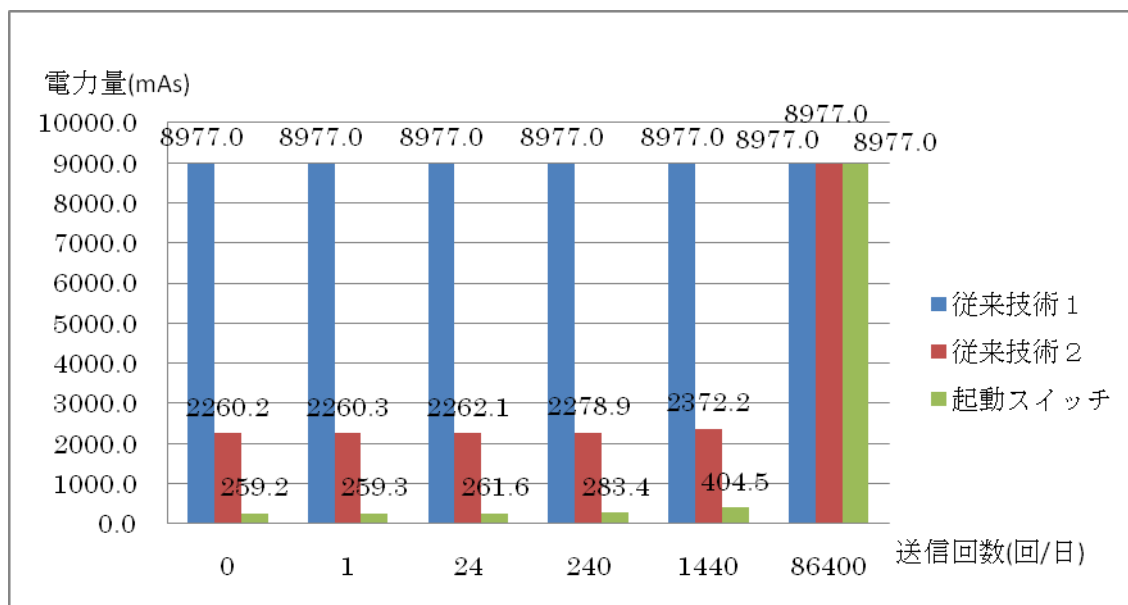


図 V.1.4.3 (vi) .3-11 送信回数と電力量の比較

センサデータの送信回数は、一日数 100 回であれば、起動スイッチの場合の消費電力量は大きな増加傾向は見せないことがわかった。

表 V.1.4.3 (vi) .3-5 と表 V.1.4.3 (vi) .3-6 から以下のことがわかる。待機電流 0.003mA で送信回数が 24 回/日の場合の消費電力量は 261.6mAs であり、同じく待機電流 0.003mA で送信回数が 1440 回/日の場合の消費電力量は 404.5mAs である。一方、待機電流が 0.005mA で送信回数が 24 回/日の場合の消費電力量は 434.4mAs である。これから、送信回数を 24 回から 1440 回（これは一分に 1 回に相当する）に 60 倍するより、待機電流を 0.003mA から 0.002mA 増加させた方が 1 日あたりの消費電力量の増加量が大きいということがわかる。

次にこのように求めた消費電力量を電池寿命として表現する。電池は表 V.1.4.3 (vi) .3- 4 で示すボタン電池 CR2032 と放電容量を使って算出している。待機電流が 0.003mA の場合の電池寿命を示す。

送信回数/日	0	1	24	240	1440	86400
消費電力量(mAs)	259.2	259.3	261.6	283.4	404.5	8977.0
電池寿命(年)	5.860	5.858	5.806	5.359	3.755	0.169

表 V.1.4.3 (vi) .3-7 消費電力量と電池寿命

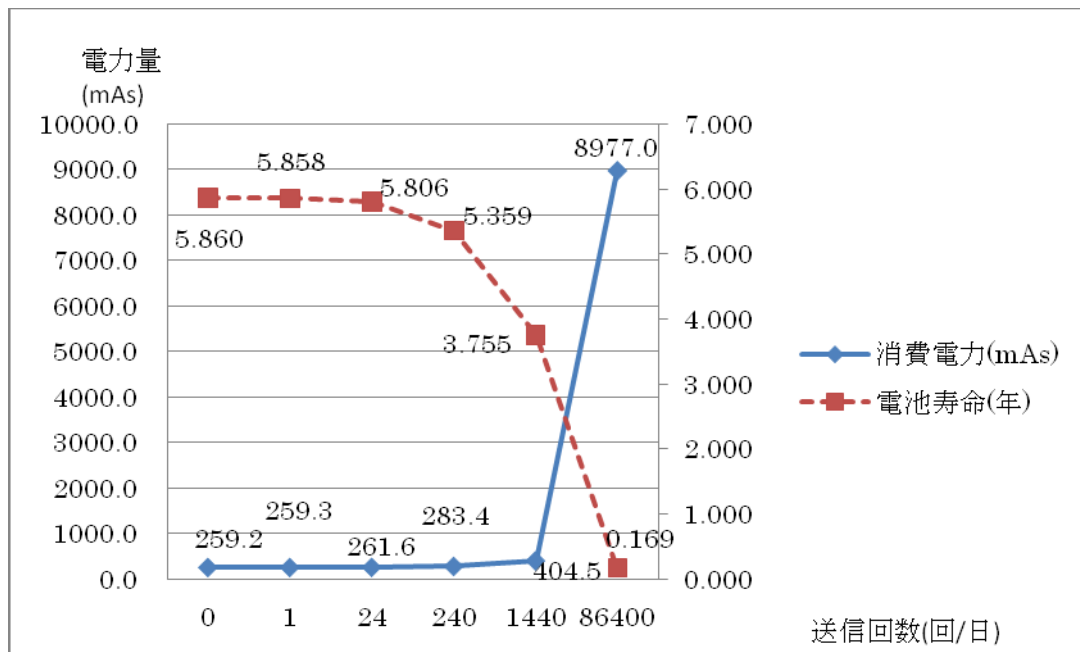


図 V.1.4.3 (vi) .3-12 消費電力量と電池寿命

以上のデータから、待機電流 0.003mA の場合では一日数 100 回のデータ送信で電池寿命約 5 年となっている。一日 1440 回のデータ送信でも 4 年弱の電池寿命であることがわかる。

次に、待機電流と送信回数を変化させた場合の消費電力量を求めたので以下に示す。

待機電流(mA)	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005
0回	86.4	172.8	259.2	345.6	432.0
1回	86.5	172.9	259.3	345.7	432.1
24回	88.8	175.2	261.6	348.0	348.0
240回	110.6	197.0	283.4	369.8	456.2
1440回	231.8	318.2	404.5	490.9	577.3
86400回	8812.8	8899.2	8977.0	9063.4	9149.8

表 V.1.4.3 (vi) .3-8 送信回数および待機電力と消費電力量

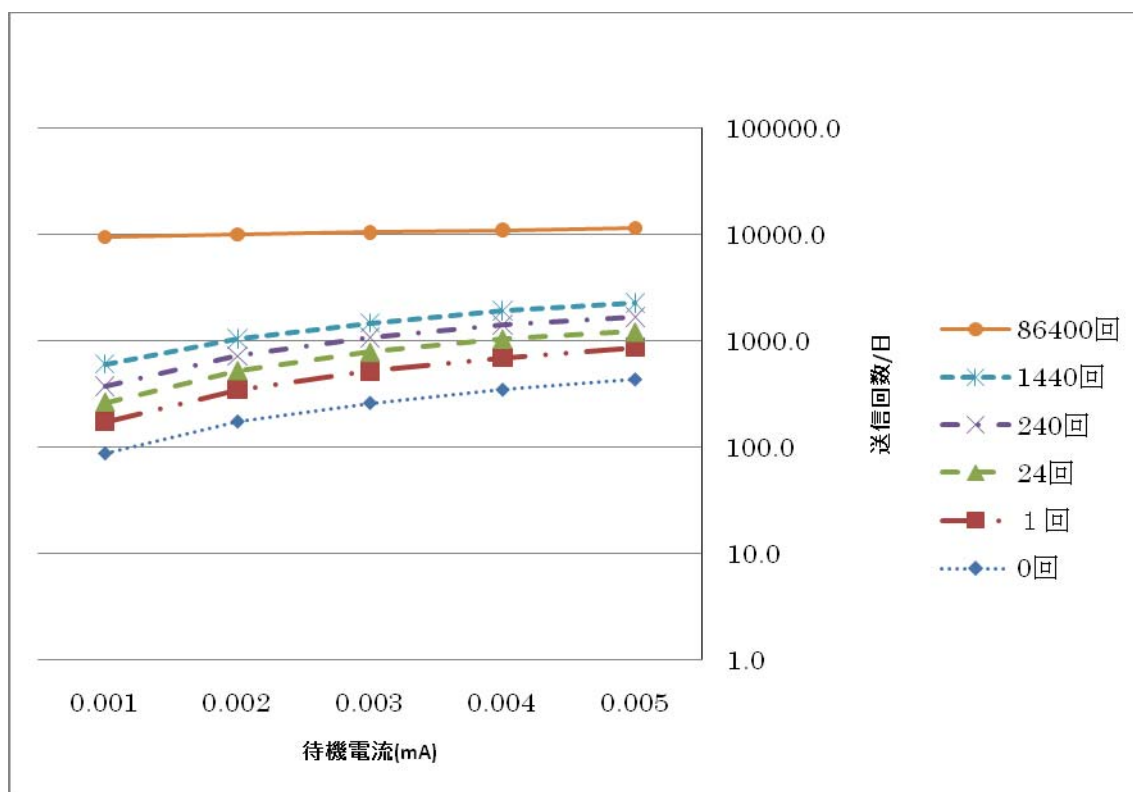


図 V.1.4.3 (vi) .3- 13 送信回数および待機電力と消費電力量

以上のデータから、待機電流よりデータ送信回数の方が電池寿命に大きく影響することがわかる。また、一日数 100 回のデータ送信数であれば、待機電流が 0.005mA の場合でも電池寿命が 2 年以上であることがわかる。

次に、無線 IC の動作電流と送信回数を変化させた場合の消費電力量を求めたので、以下に示す。

無線 IC 動作電流とは図 V.1.4.3 (vi) .3- 5 に示した、送信 (12.8mA)、受信 (17.6mA)、CSMA/CA (16.0mA)、PAoff (8.0mA) の電流値を基本値として、それぞれを、0.5 倍、1.5 倍、2.0 倍した値を用いてシミュレーションを行った結果を示している。

	無線動作電流	×0.5	×1.0	×1.5	×2.0
送信回数	0回	259.2	259.2	259.2	259.2
	1回	259.3	259.3	259.3	259.4
	24回	260.6	261.6	262.6	263.6
	240回	273.4	283.4	293.4	303.4
	1440回	344.6	404.5	464.5	524.4
	86400回	5384.4	8977.0	12579.8	16174.1

表 V.1.4.3 (vi) .3-9 無線 IC 動作電流および送信回数と消費電力量の関係

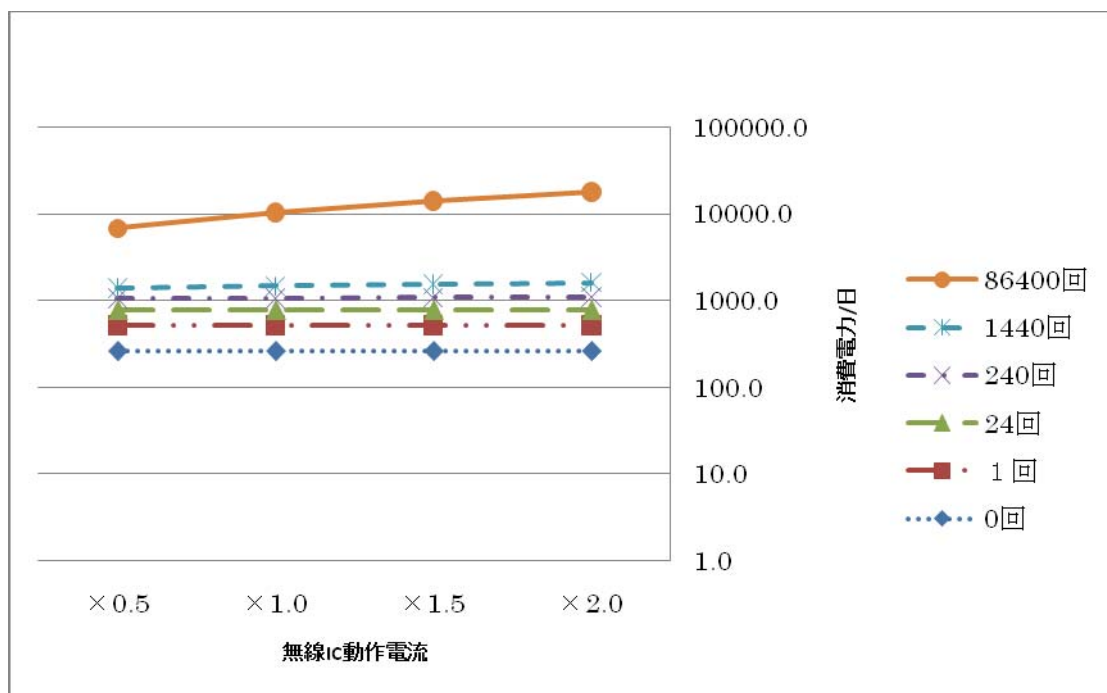


図 V.1.4.3 (vi) .3-14 無線 IC 動作電流および送信回数と消費電力量の

以上のデータから、無線 IC の動作電流を 2 倍（送信電流：25.6mA、受信電流：35.2mA 等）にしても消費電流への影響は、データ送信回数が 240 回の場合で 7%程度短縮されることがわかる。

(5) 無線部検討の結論

常時待機していてイベントの発生によりセンシングを開始する起動スイッチを用いたシステムにおいて、以下の結論を得た。

無線通信方式の詳細な検討を行うことで、以下の条件において、ボタン電池 CR2032 を電源として、電池寿命 5 年程度を達成できる可能性が高い。

条件：

- ・送信するセンサデータは 100 バイト程度で、送信回数は一日に 200 回程度まで
- ・通信距離は 20m 程度まで
- ・待機時の消費電流は 3 μ A 程度、送受信動作時は 20mA 程度まで
- ・起動スイッチは回路部を含み低消費電力 1 μ A 未満で安定して動作する

この時、待機時の消費電流の方が動作時の消費電流より電池寿命に与える影響が大きい。

(vi) .4 起動モジュールと無線部の要求仕様

無線部を含む起動モジュールの要求仕様は、(vi) .3 起動スイッチ向け無線検討 (1)要求仕様の策定で検討した内容から、以下のようになる。

起動モジュール要求仕様	
電池寿命	5年以上
寸法・重量	小型軽量
稼働地域	日本以外を含む
無線部要求仕様	
電池寿命	5年以上
寸法・重量	小型軽量
稼働地域	日本以外を含む
通信距離	15m以上
データ	測定値
	測定時刻情報
	その他情報(ベンダID・センサ種別など)
通信機能	複数センサデータの同時取得
アンテナ	内蔵

表 V.1.4.3 (vi) .4-1 起動モジュールと無線部の要求仕様

(1)機能確認用試作機の仕様

起動モジュールの機能確認用試作機を制作して動作確認を行った。試作機の構成図および全景を以下に示す。本試作では、起動スイッチとして、圧電型圧力センサ、熱発電センサおよびフローセンサを動作させる。センサとしては、温湿度セ

ンサと仮想のフローセンサを接続した。温湿度センサは動作させて温湿度を測定した。仮想のフローセンサは、動作電流 1mA で動作時間を 500ms として動作するように設定して動作させた。無線方式として ZigBee を採用した。

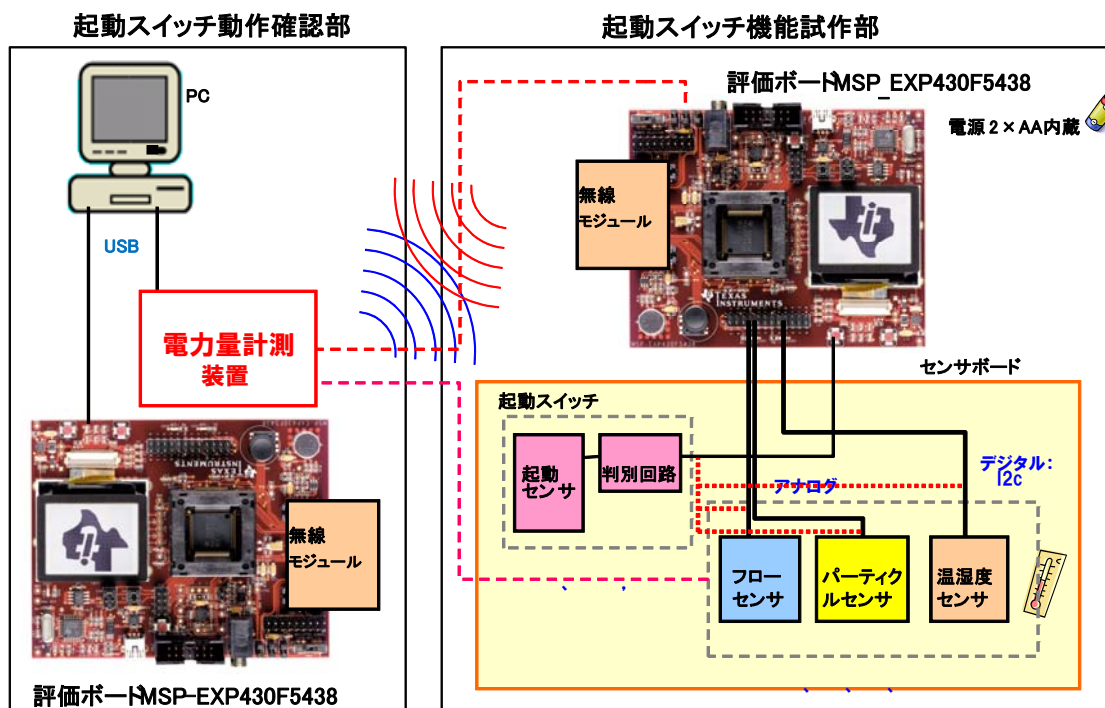


図 V.1.4.3 (vi) .4-1 機能確認試作機構成図

図 V.1.4.3 (vi) .4-1 の右側が機能確認試作機であり、左側は機能確認試作機の消費電力を測定するための計測部である。



図 V.1.4.3 (vi) .4-2 機能確認試作機全景

(2)実験結果

次に、確認実験の結果を示す。

まずフローセンサと温湿度センサを動作させた場合の消費電流の変化を以下に示す。

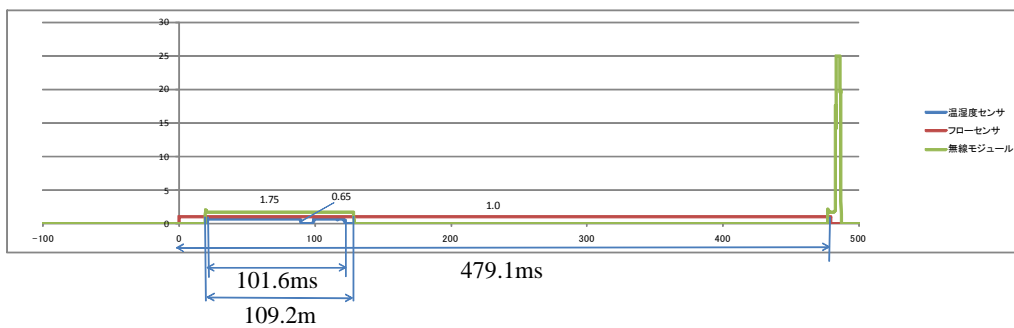


図 V.1.4.3 (vi) .4-3 機能確認試作機動作結果 (全体)

グラフの縦軸は消費電流(単位 mA)、横軸は経過時間(単位 ms)である。温湿度センサとフローセンサの消費電力は以下のように確認できた。

温湿度センサ

$$216.6(\mu\text{W}) = 0.65(\text{mA}) \times 101.6(\text{ms}) \times 3.28(\text{V})$$

フローセンサ

$$1571.4(\mu\text{W}) = 1(\text{mA}) \times 479.1(\text{ms}) \times 3.28(\text{V})$$

無線部(1)

$$626.8(\mu\text{W}) = 1.75(\text{mA}) \times 109.2(\text{ms}) \times 3.28(\text{V})$$

無線部については、以下に図 V.1.4.3 (vi) .4-3 の経過時間 500ms 直前の 25ms を拡大した図を以下に示す。この図では、消費電流の最大値が 25mA になっているが、これは低電流まで精度を確保できるように計測範囲を設定したので、大電流側では測定値が飽和しているためである。以下の電力算出には無線部基礎データより、28mA を用いた。

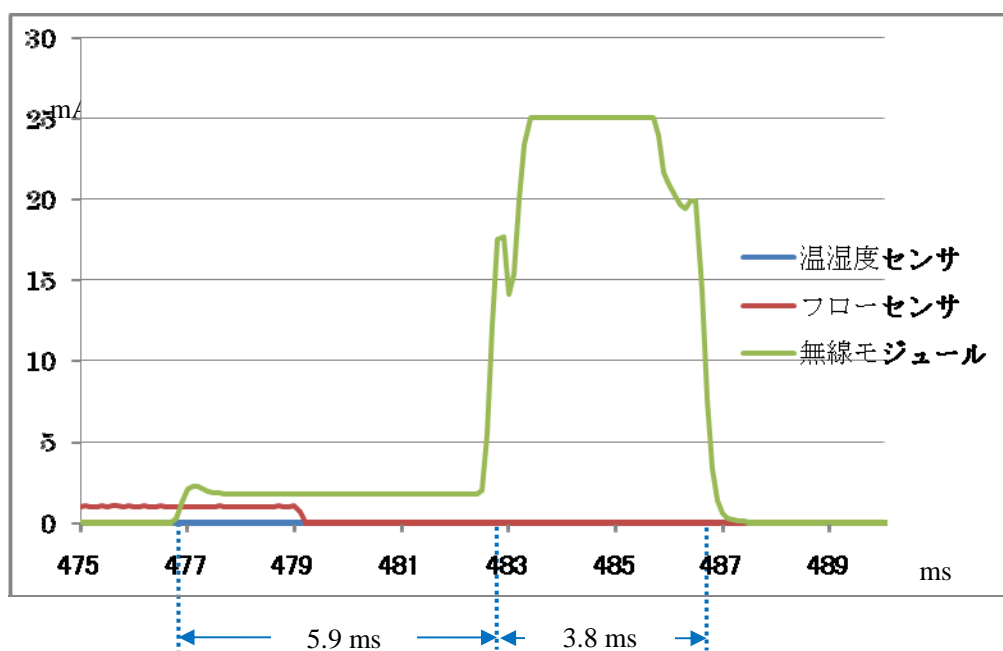


図 V.1.4.3 (vi) .4-4 機能確認試作機測定結果 (無線部)

この部分の無線部の消費電力は以下のようになる。

無線部(2)

$$382.9(\mu\text{W}) = (28.0(\text{mA}) \times 3.8(\text{ms}) + 1.75(\text{mA}) \times 5.9(\text{ms})) \times 3.28(\text{V})$$

無線部総計

$$1009.7(\mu\text{W}) = \text{無線部(1)} + \text{無線部(2)}$$

無線部(1)および無線部(2)の前半にある消費電流 1.75mA で 5.9ms の部分は、従来技術である ZigBee を使用していることで発生する動作であり、今回検討した通信制御を行うことで削減できる電力であるとかんがえられる。

以上の実験結果から、無線部の動作時間および消費電流は、前節の無線部検討結果が妥当であることが確認できた。

(vi) .5 まとめ

本研究開発では、起動スイッチ、起動スイッチ向け無線、起動モジュールと無線部の要求仕様の検討を行った。起動スイッチとして、PZT を用いたフローセンサの開発を行い、流速にたいしてほぼ線形な出力電圧の変化を確認し、圧電型フローセンサによる端末のイベント駆動化の可能性を示すことができた。また、起動スイッチを用いたシステムにおいて、無線通信方式の詳細な検討を行うことで、以下の条件下では、ボタン電池 CR2032 を電源として、電池寿命 5 年程度を達成でき、この時、待機時の消費電流の方が動作時の消費電流より電池寿命に与える影響が大きいことが分かった。

条件：

- ・送信するセンサデータは 100 バイト程度で、送信回数は一日に 200 回程度まで
- ・通信距離は 20m 程度まで
- ・待機時の消費電流は 3 μA 程度、送受信動作時は 20mA 程度まで
- ・起動スイッチは回路部を含み低消費電力 1 μA 未満で安定して動作する

(vi) .6 参考文献

- [1]. A. P. Chandrakasan, S. Sheng and R. W. Brodersen: "Low-power CMOS digital design", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol.27, pp. 473-484 (1992).
- [2]. 吉川嘉茂, 堀池良雄, 林錠二, 滝池敏夫, 中井誠治, 丹藤克彦: "超小型特定小電力無線モジュールとその応用", Matsushita Technical Journal, Vol.52 No.5 (2006).
- [3]. J. Polastre, J. Hill and D. Culler: "Versatile low power media access for wireless sensor networks", Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (sensys), pp.95-107 (2004).
- [4]. L. Gu and J. A. Stankovic: "Radio-triggered wake-up capability for sensor networks", Proceedings of Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, pp.27-36 (2004).
- [5]. 石田繁巳, 鈴木誠, 森戸貴, 森川博之: "低受信待機電力無線通信のための多段ウェイクアップ機構", 電子情報通信学会技術研究報告, IN2007-218 (2008).
- [6]. T. Kobayashi, H. Okada, T. Masuda, and T. Itoh, "A Digital Output Piezoelectric Accelerometer Using Patterned Pb(Zr,Ti)O₃ Thin Films Electrically Connected in Series", in Tech. Digest of MEMS 2009 Conference, Sorrento, Jan. 25-29, 2009, pp. 801-804.
- [7]. Q.Zou, W. Tan, E. S. Kim, G. E. Loeb, "Single- and Triaxis Piezoelectric-Bimorph Accelerometers", J. Microelectromech. Syst. Vol. 17, pp45-57,2008 .
- [8]. 株式会社明電舎: "天井走行台車", . (オンライン)
<http://agv.meidensha.co.jp/agv/ceiling.html>.
- [9]. 株式会社ダイフク: "クリーンウェイ", . (オンライン)
http://www.daifuku.co.jp/business/efa/efa_products_index.html.
- [10]. 愛知機械テクノシステム株式会社: "低床タイプ", . (オンライン)
<http://aiki-tcs.co.jp/products/standard.html>.
- [11]. 株式会社日立プラントテクノロジー: "AGV 自律走行型無人搬送車", . (オンライン)
http://www.hitachi-pt.co.jp/agv_intelligentcarry/ic_specification.html.
- [12]. <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2006.pdf>. (オンライン)
- [13]. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc2520.pdf>. (オンライン)
- [14]. http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc8111.pdf. (オンライン)
- [15]. <http://www.zigbee.org/Specifications/ZigBee/download.aspx>. (オンライン)

(vii) 位置推定センシング原理

(vii) .1 研究の目的

クリーンルーム内の作業には、その作業環境維持のため照明、空調などのエネルギーを必要とする（ただし、空調は製造設備向けの要素が強い）。一方で作業者は、埃発生の主要な原因でもあり、作業者周辺ではダウンフローを強める（換言すれば、作業者不在の場所では、ダウンフローを弱める）ことで全体としてもエネルギー消費量の削減が期待できるなど、作業者の位置を把握する価値は大きい。このため、慣性センサと RFID を組み合わせた無線方式のセンサモジュールを作業者の靴に装着して、リアルタイムにその位置を追跡するシステムを試作した。



図V.1.4.3 (vii) .1 左 モジュールと基板裏面、右 基板表面



図V.1.4.3 (vii) .2 左 サーバ、右 モジュール装着状態

(vii) .2 詳細仕様の検討

(vii) .2.1 概要

作業者の位置追跡手段としては、超音波、赤外線、カメラ、無線などの諸方式があるが、総合的に判断して、MEMS 加速度センサ、角速度センサを用いて位置を推定し、累積誤差を RFID タグで校正する方法を選定した。

表 V.1.4.3 (vii) .1 各種位置追跡法

方式	特 徴
超音波	・システムコストが高く、構造も複雑。
赤外線	・有線ネットワークが必要で、検出距離も短い。
画像	・システムが複雑、リアルタイム信号処理負荷大。高価。
UWB	・マルチパスが悪影響、既存システムと干渉。
慣性センサ+RFID	・コンパクトでコストも妥当。

出典：What is RTPTS? By Dr. Ranjith Amarasinghe (筆者一部補足)
高性能センサモジュールの開発成果を活用する観点から、同テーマで使用した CPU、無線モジュールとほぼ同一部材を使用することとした。

(vii) .2.2 搭載センサ

小型、低消費電力のセンサとして、ST マイクロ社の 3 軸加速度センサ型 LIS3DH、同社の 3 軸角速度センサ型 L3G4200D を採用した。RFID リーダには、超小型のアートテクノロジー社型 ASI4400 を選定した。

表 V.1.4.3 (vii) .2 MEMS センサの主な仕様 (メーカー： S Tマイクロ)

項 目	3 軸加速度センサ	3 軸角速度センサ
型 式	LIS3DH	L3G4200D
測定範囲	± 2/4/8/16 G 切換	250/500/2000 Deg / s 切換
感度	1/2/4/12 mG / Digit	8.75/17.5/70 mDeg/ s/ Digit
温度特性	0.01% /	0.03 Deg/s /
オフセット	± 40mG	± 15 Deg/s
雑音レベル	220 μ G / SQRT(Hz)	—
電源電圧	1.71~3.8 V	2.4~3.6 V
消費電流	11 μ A	6.1 mA
使用温度範囲	-40~85	-40~85
外形寸法	3*3*1 mm	4*4*1.1 mm

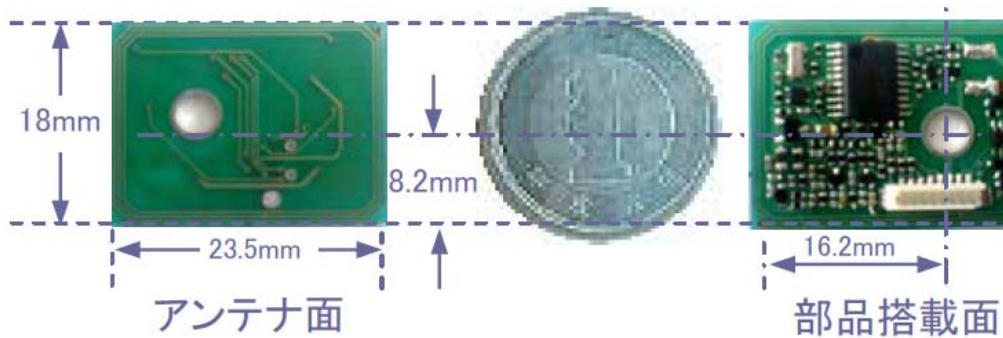


図 V.1.4.3 (vii) .3 超小型 RFID リーダ

表 V.1.4.3 (vii) .3 超小型 RFID リーダの主な仕様

No	項目	仕様
1	中心周波数	13.56MHz
2	伝送速度	ISO15693 送信(本体→タグ)26.48Kbps 受信(本体←タグ)26.69Kbps
		mobileCard 送信(本体→タグ)211.8Kbps 受信(本体←タグ)211.8Kbps
3	通信方式	ISO15693 準拠、MobileCard対応
4	適合チップ	ISO15693 I-CODE SLI I-CODE SLI-S Tag-IT Plus 読書き
		mobileCard IDm 読み取り
5	アンチコリジョン	未対応
6	マルチリーダ接続	IICバスにより最大32モジュールを接続(マスター・スレーブ接続)
7	動作温度	-10℃ ~ 50℃
8	保存温度	-30℃ ~ 60℃
9	保存・動作湿度	25%RH ~ 85%RH(結露無きこと)
10	本体基板	18mm × 23.5mm × 2.5mm (コネクタ含まず)
		18mm × 23.5mm × 4.0mm (コネクタ含む)
11	基板重量	約2g以下
12	制御部寸法	18mm × 23.5mm アンテナ基板裏面に配置
13	供給電源	DC3.3V ±5%
14	読取距離 ※ 参考:I-CODE SLI	カードサイズ 最大 5cm
		20 × 30mmサイズ 最大 4cm
		20φコインサイズ 最大 3cm
		5φ 小型サイズ 最大 1cm
		FeliCa IDm 最大 3cm
※参考値 リーダライトアンテナ、ICタグの設置環境(金属の有無、ノイズ)等で変動します		
15	アンテナ出力	80mW以下 固定 微弱無線通信局
16	消費電流 1台当り	動作時最大
		80mA
	動作時最小	10mA以下
	待機時	250 μA

(vii) .2.3 CPU

高機能センサモジュールテーマで使用したのと同じ TI 社 CPU のシリーズ品 MSP430F2418TPM を採用した。概要を以下に示す。接続確認やピン部での信号チェックなど、扱い易さの観点から、QFP を使用した。

MSP430F241x, MSP430F261x
MIXED SIGNAL MICROCONTROLLER

SLAS541G - JUNE 2007 - REVISED MARCH 2011

- Low Supply Voltage Range, 1.8 V to 3.6 V
- Ultra-Low Power Consumption:
 - Active Mode: 365 μ A at 1 MHz, 2.2 V
 - Standby Mode (VLO): 0.5 μ A
 - Off Mode (RAM Retention): 0.1 μ A
- Wake-Up From Standby Mode in Less Than 1 μ s
- 16-Bit RISC Architecture, 62.5-ns Instruction Cycle Time
- Three-Channel Internal DMA
- 12-Bit Analog-to-Digital (A/D) Converter With Internal Reference, Sample-and-Hold, and Autoscan Feature
- Dual 12-Bit Digital-to-Analog (D/A) Converters With Synchronization
- 16-Bit Timer_A With Three Capture/Compare Registers
- 16-Bit Timer_B With Seven Capture/Compare-With-Shadow Registers
- On-Chip Comparator
- Four Universal Serial Communication Interfaces (USCIs)
 - USCI_A0 and USCI_A1
 - Enhanced UART Supporting Auto-Baudrate Detection
 - IrDA Encoder and Decoder
 - Synchronous SPI
 - USCI_B0 and USCI_B1
 - I²C™
 - Synchronous SPI
- Supply Voltage Supervisor/Monitor With Programmable Level Detection
- Brownout Detector
- Bootstrap Loader
- Serial Onboard Programming, No External Programming Voltage Needed
Programmable Code Protection by Security Fuse
- Family Members† Include:
 - MSP430F2416
92KB+256B Flash Memory, 4KB RAM
 - MSP430F2417
92KB+256B Flash Memory, 8KB RAM
 - MSP430F2418
116KB+256B Flash Memory, 8KB RAM
 - MSP430F2419
120KB+256B Flash Memory, 4KB RAM
 - MSP430F2616
92KB+256B Flash Memory, 4KB RAM
 - MSP430F2617
92KB+256B Flash Memory, 8KB RAM
 - MSP430F2618
116KB+256B Flash Memory, 8KB RAM
 - MSP430F2619
120KB+256B Flash Memory, 4KB RAM
- Available in 80-Pin Quad Flat Pack (QFP), 64-Pin QFP, and 113-Pin Ball Grid Array (BGA) (See Available Options)
- For Complete Module Descriptions, See the *MSP430x2xx Family User's Guide*, Literature Number SLAU144

(vii) .2.4 電池と充電器

センサと CPU に常時通電するため、200mAh のリチウムイオン電池を使用した。送信周期 30/100ms の場合にそれぞれ 6/8 時間以上使用できた。

また、運用上の利便性を考え、非接触充電モジュール (セイコーエプソン製 型 S4E16402/16403) を追加した。充電所要時間は、4 時間以内であった。

表 V.1.4.3 (vii) .4 電池の仕様

項目	PD2450
公称電圧	3.7V
標準放電電流	100mA
瞬間放電電流	400mA
容量	200mAh
初期内部抵抗	0.5

■ 特徴

- ◆ 空芯平面コイルによる伝送距離 2.8mm、出力 0.5W の無接点電力伝送を実現
- ◆ 空芯平面コイルの採用により薄型ユニットを実現
- ◆ ID 認証機能による識別化が可能
- ◆ 金属検知、異常温度検知により安全性を確保
- ◆ サイズ：送電側=45*33*6.2(t)mm
受電側=22*22*2.3(t)mm



図 V.1.4.3 (vii) .4 非接触充電モジュールの特長と外観

(vii) .2.5 無線モジュール

高性能センサモジュールに使用したものと同一、パイソフトラブ社の特定小電力製品を採用した。(通信頻度の高さに鑑み、型 RFS24D1D-5-B を使用。)

カタログ通信距離の 50m に対し、当初のセンサモジュール構造では、2m 程度しか距離が伸びなかった。高性能センサモジュールでは 10m 強の通信が出来ることから、モジュールケース内の無線アンテナ位置変更などを試み、静止状態では 7m 強までの通信が可能であることを確認した。

しかしながら、モジュールを回転させると、データ欠損が発生した。1 m の距離でも 1 秒以上の欠損が頻繁に発生し、未だに解決できていない。サーバ側では欠損データを埋める対処をしているが、1 秒以上の欠損は追跡精度を大きく損なうものである。以下に、7.1m の距離で静止状態、ならびに 1 m で回転させた場合のデータ欠損例を示す。Y 軸が 2 以上の場合 1 を減じた値が連続欠損数であり、最大 65 回連続欠損 = 6.5 秒間の欠損が記録されている。

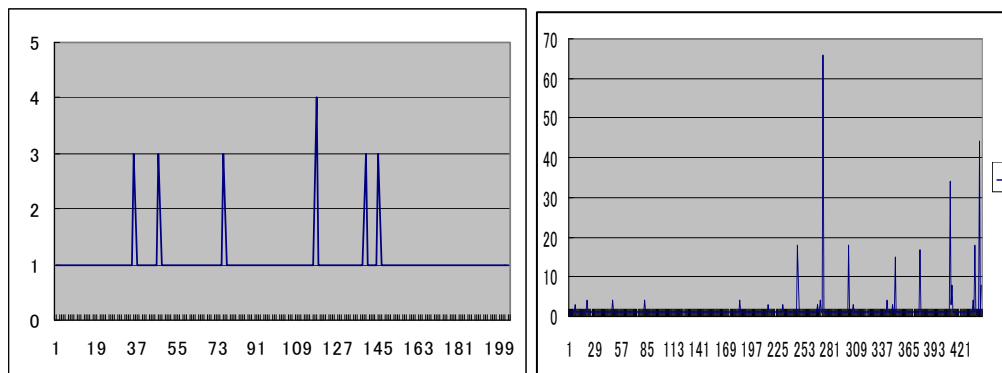


図 V.1.4.3 (vii) .5 モジュール無線出力(a)7.1m での静止時、(b)1m での回転時

データ欠損の理由としては、電池寿命の観点から出力 0 dB (1 mW) と微弱な電波を用いたこと、ゲインの低い基板パターン上のアンテナを使用したこと、2.4GHz の電波は直進性が強く、障害物の影響を大きく受けること、モジュールが金属メッシュ床直近に置かれるため、電波が飛びにくいことなどが挙げられる。バイナリデータを送受することもあり、一旦同期が外れると再同期に時間がかかる。今後は無線方式の再選定、1 秒以上のデータ欠損があることを前提としたシステム構成の見直し、あるいはアルゴリズムの開発が必要である。

なお、無線でなく有線通信を用いた場合にも、時折データが欠損することが観察された。その原因は、Windows OS の処理や別アプリケーションの動作（例えば、タスクマネージャ）であり、本追跡システム稼動にあたっては、別のアプリケーションはすべて終了させる必要がある。

(vii) .2.6 センサ信号前処理

センサ信号の状況より、センサ信号の前処理には、それなりの工夫をした。具体的には、スパイクノイズカットのため急峻な変化波形の除去、最大値リミッタ（実際には、使用不要と判明）、平準化のための移動平均などを組み込んだ。下図において、Z 軸加速度が -1,000 近辺にあるのは重力加速度のため、X 軸加速度が -160 辺りにあるのは、モジュール取り付け角度の傾きによる重力加速度の X 軸方向分力のためである。

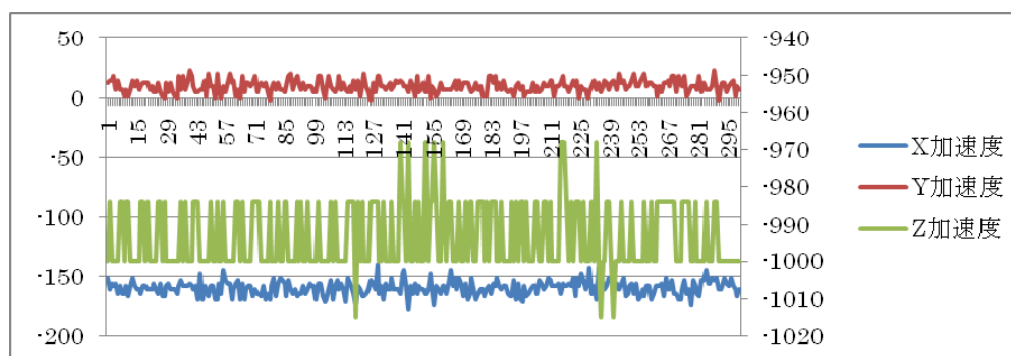


図 V.1.4.3 (vii) .6 静止時の加速度センサ信号 左軸 X、Y 右軸 Z 30ms 周期
(単位は mG)

センサ信号のサンプリング周期は当初 10ms としていたが、短パルスノイズ除去機能追加にあわせ、最終的に 5ms に改めた。サーバへの通信周期は、モジュール 1 個の場合で 30ms または 100ms、複数モジュールの場合は、100ms である。サーバへの通信周期にあわせ、X と Y 軸加速度センサ、ならびに角速度センサ出力には任意回数の移動平均、ないし積分処理する機能を組み込んだが、フィールドテスト時には、通信周期に合わせた移動平均＝積分処理と等価のみ用いた。

Z軸の加速度センサ出力は、当初X、Y加速度と同じ扱いとしたが、着地検知を確実にするため、ピークホールドに改めた。

サーバへの通信データ欠損対策として、2回までの欠損時にはその後のデータで補充することとした。

上記センサ信号のほかに、RFID タグ検出信号と電池電圧もサーバに送った。

(vii) .2.7 追跡アルゴリズム 1：積分法

当初追跡に用いた演算式は、オーソドックスなものである。センサ信号に対してゼロ点補正のためのオフセット調整、ゼロ点近傍ノイズカットのためのリミッタ（正負別の値を設定可）、センサの正負特性バラツキ対策として、積分係数を+側と-側独立して設定可能とするなどの処理を組み込んだ。

モジュールの向きは、ジャイロの角速度出力を積分して求めた。

加速度を積分して速度と X、Y 軸方向位置移動情報を算出し、体の向き情報を加味してクリーンルームの X、Y 軸方向の移動量に換算の上積算した。

以下に、その詳細を記す。

表V.1.4.3 (vii) .5 使用した記号

	位置	速度	加速度	生加速度	生角速度	加速度変
センサー座標	X _n	V _{xn}	A _{xn}	mA _{xn}		A _{xn}
	Y _n	V _{yn}	A _{yn}	mA _{yn}		A _{yn}
	Z _n	V _{zn}	A _{zn}	mA _{zn}		A _{zn}
ワークスペース	wX _n	wV _{xn}	wA _{xn}			
	wY _n	wV _{yn}	wA _{yn}			
	wZ _n	wV _{zn}	wA _{zn}			
角速度センサ	K _{xn}	C _{xn}			mC _{xn}	
	K _{yn}	C _{yn}			mC _{yn}	
	K _{zn}	C _{zn}			mC _{zn}	

		乗数係数	オフセット係数
実加速度変換係数	X	P _x	Q _x
	Y	P _y	Q _y
	Z	P _z	Q _z
実角速度変換係数	X	E _x	F _x
	Y	E _y	F _y
	Z	E _z	F _z

時間間隔	Δt	サンプル時間
------	------------	--------

n 0～のシリアル番号、通信上は1～
wX wY wZ wV wAの wはワークスペースの記号
x y z は軸を示す記号

(1) 基本計算式

X 軸速度と位置は

$$V_{xn} = A_{xn} dt + V_{xn-1}$$

$$X_n = V_{xn} dt + X_{n-1}$$

Y 軸速度と位置は

$$V_{yn} = A_{yn} dt + V_{yn-1}$$

$$Y_n = V_{yn} dt + Y_{n-1}$$

Z 軸の角度 (ヨー角)

$$K_{zn} = C_{zdt} + K_{zn-1}$$

ただし、n は 0 からの連番

初期位置はセンサー座標では 0、初速度は 0 (ゼロ) である。

$$A_{x0} = A_{y0} = 0$$

$$V_{x0} = V_{y0} = 0$$

$$X_0 = Y_0 = 0$$

$$K_{z0} = 0$$

加速度を XY 座標に毎に変換

$$\begin{bmatrix} A_{xn} \\ A_{yn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(K_{n-1}) & -\sin(K_{n-1}) \\ \sin(K_{n-1}) & \cos(K_{n-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{xn-1} \\ A_{yn-1} \end{bmatrix}$$

センサーモジュールデータを今のセンサーの向きの実加速度に変換

$$_A_{xn} = P_x (mA_{xn} + Q_x)$$

$$_A_{yn} = P_y (mA_{yn} + Q_y)$$

センサー座標の加速度に変換

$$A_{xn} = _A_{xn} \cos(K_{n-1}) - _A_{yn} \sin(K_{n-1})$$

$$A_{yn} = _A_{xn} \sin(K_{n-1}) + _A_{yn} \cos(K_{n-1})$$

X 軸速度と位置は

$$V_{xn} = A_{xn} t + V_{xn-1}$$

$$X_n = V_{xn} t + X_{n-1}$$

Y 軸速度と位置は

$$V_{yn} = A_{yn} t + V_{yn-1}$$

$$Y_n = V_{yn} t + Y_{n-1}$$

t は一定時間で内部定数を参照する。(100ms または 30ms)

Z 軸の角度（ヨー角）

$$Czn = Ez \cdot mCzn + Fz$$

$$Kzn = Czn \cdot t + Kzn-1$$

足が着地するごとに速度をリセットし、累積誤差を解消した。足の着地は、当初 Z 軸加速度、その後 X 方向の加速度や Z 軸方向の位置情報を加味して判定を試みたが、最終的には通信周期毎にピークホールドされた Z 軸加速度のみから判定することとした。当初着地時 Z 軸の加速度が X 軸に比べて低めに見えたのは、Z 軸加速度変化が X 軸より急峻でパルス巾が狭く、100ms 間の平均化によって小さくなっていたからである。Z 軸加速度は位置検出に用いていないこともあり、平均化処理をピーク値保存処理に改めた。この結果、着地補足失敗率が激減した。加速度の波形例を以下に示す。

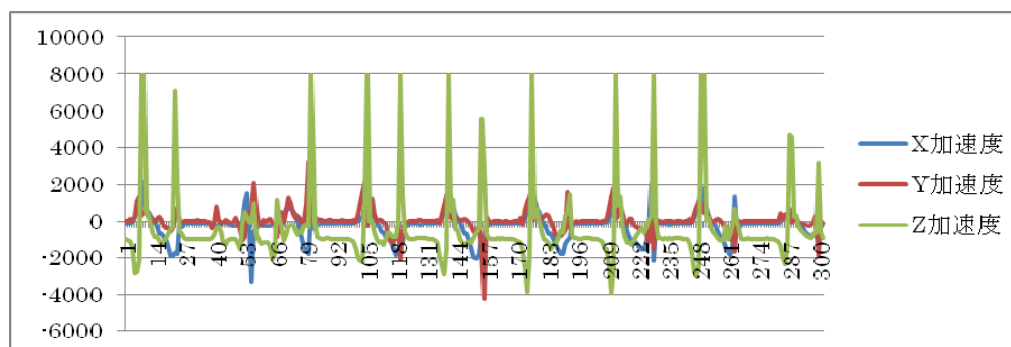


図 V.1.4.3 (vii) .7 歩行時の加速度 周期 30ms (単位 m)

追跡に当たってのモジュールの初期位置、ならびに角度は、クリーンルーム入り口部にキータグを設置し、それを指定された角度で踏むことで教示する。体の向きとモジュールの向きには一定のズレがあるため、そのオフセット角度を設定できるようにになっている。室内にはほかにも複数のタグを置き、それぞれの近辺にモジュールが来ると、各タグの位置に校正する。

後述するが、本方式による追跡結果は当初の期待にまったく及ばなかった。このため、新規な方法（以後、歩数計法と記す）を新たに組み込んだ。

(vii) .2.8 追跡アルゴリズム 2 : 歩数計法

積分法では、加速度を積分して求めた速度を再度積分して、移動量を算出する。実際の加速度波形を見ると、残念なことに、同じように歩いているつもりでも加速度の値は大きく変動している。また、軌跡が実際の歩行のメリハリの利いたモジュール移動にもかかわらず、ほとんど追従できていなかった。

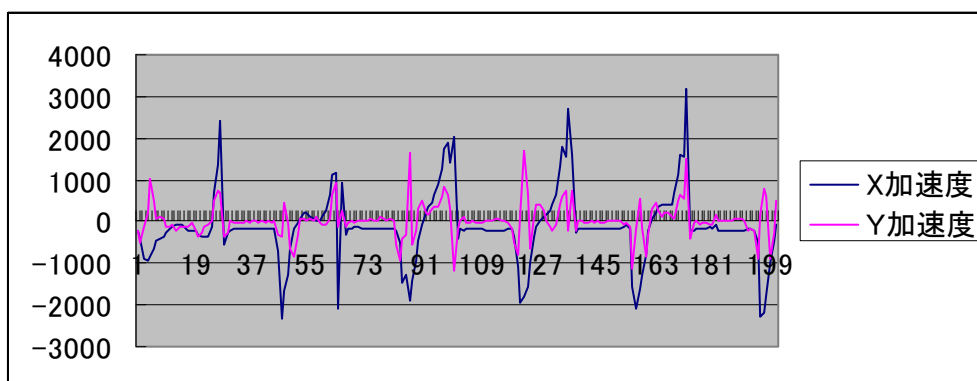


図 V.1.4.3 (vii) .8 歩行時の X、Y 加速度 30ms 周期 (単位 mG)

新アルゴリズム開発に際し、無線通信ではデータ欠落が不可避のため、有線方式のみを対象とした。アルゴリズム検討に集中するため、子機数も 1 台のみとした。

新たに組み込んだ歩数計法は、以下のようなものである。

センサ信号に対する処理、モジュールの角度算出、ならびにモジュールの X、Y 軸方向の速度算出法は、積分法と同じである。

積分法では、算出した速度信号を再度積分して移動量を求めていたのに対し、歩数計法では算出した速度のピーク値に、着地間隔時間と係数を掛けたもので移動量を算出している。前進/後退の判別は、正負それぞれの加速度ピーク値の絶対値の大きいほうを採用することで対応した。

着地時には、Z 方向に大きな加速度が観察されるが、その時間幅は比較的短い。着地前後には、X、Y 方向にも大きな減速加速度が観察される。Z 加速度検知による速度情報のリセット期間が短く、着地時の大きな X、Y 減速加速度を積分した瞬間速度情報によって進行方向を誤って判断することが散見されたため、着地信号を指定期間延長する手段を追加した。

また、着地時刻間隔と速度を乗算する方法では、たとえば椅子に座ってモジュールのついた靴を長時間浮かせていると、次回着地時に大きな移動距離が積算されてしまう。この予防策として、通常の歩行ではありえない時間連続して着地が検知されない場合は、刻々と積分されている速度情報をクリアする手段を付加した。

(vii) .2.9 サーバ機能

サーバ側には、以下の画面を設けた。

- ・タグ配置登録： クリーンルームの広さ、基準点となるキータグの位置とオフセット角度、ならびにその他のタグの位置を登録。(最大 254 個まで登録可能)

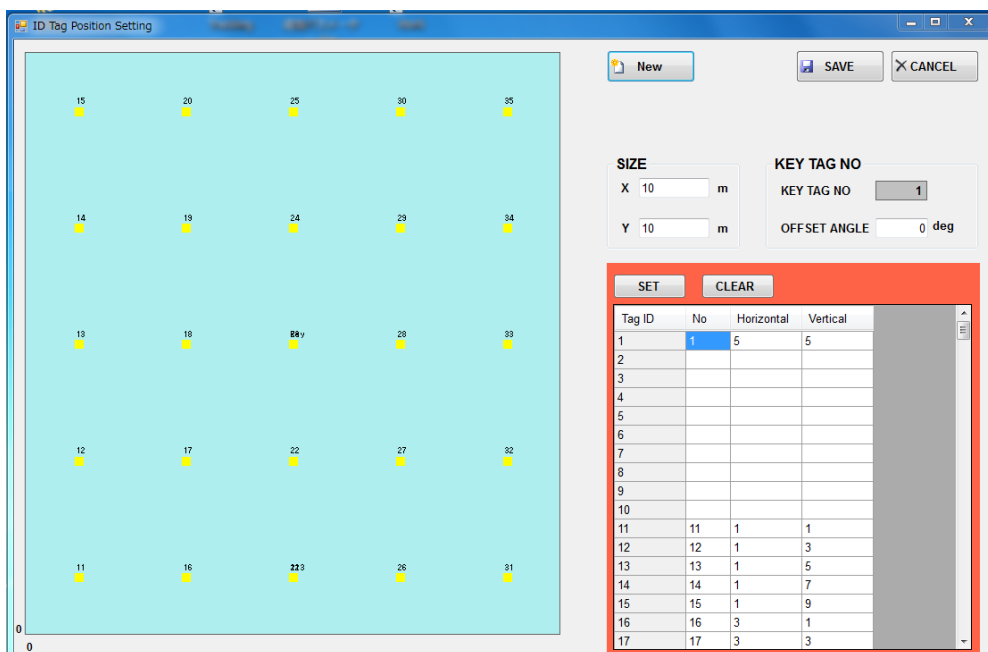


図 V.1.4.3 (vii) .9 RFID タグ配置設定登録画面

- ・設定： システム稼動上の諸条件を設定する。

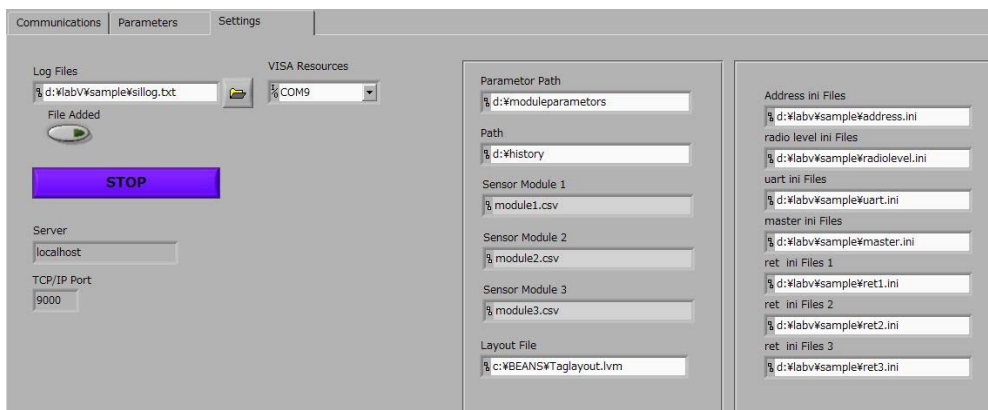


図 V.1.4.3 (vii) .10 動作条件設定画面

- ・パラメータ設定： 位置推定のための各モジュールのパラメータを設定する。

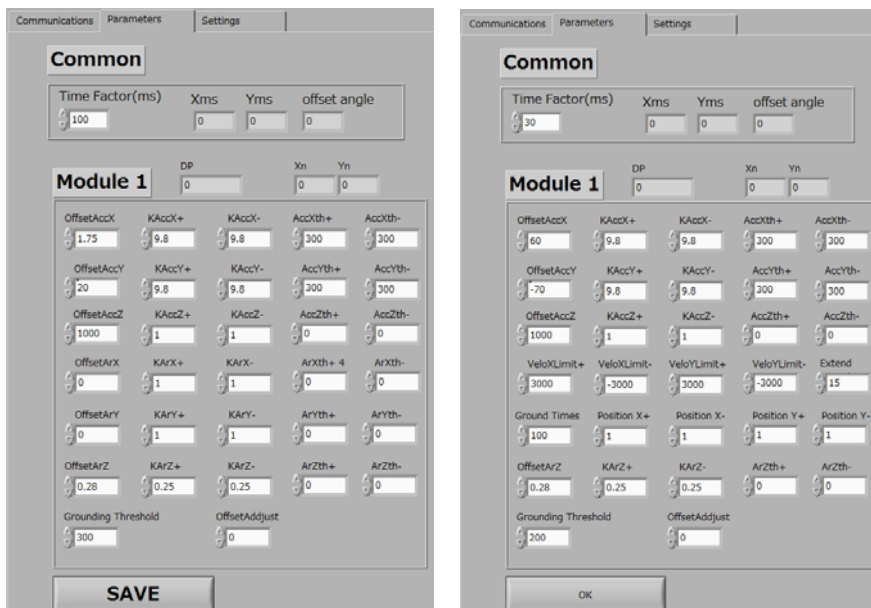


図 V.1.4.3 (vii) .11 パラメータ設定画面 左 積分法 右 歩数計法

共通パラメータ： 通信周期、3 軸加速度および Z 軸周り角速度に対するオフセット／正負積分係数／正負微小ノイズリミッタ、着地検知レベル

歩数計法専用： X/Y 方向最高速度リミッタ、X/Y 正負移動距離係数、着地信号延長タイマ、非着地継続時速度リセットタイマ

- ・センサモニタ： 各モジュール内蔵センサの出力、検知した RFID タグ、電池残量をリアルタイム表示する。



図 V.1.4.3 (vii) .12 センサ、電池残量のモニタ画面

- 位置表示： 追跡中のモジュールの所在地を画面上に表示する。

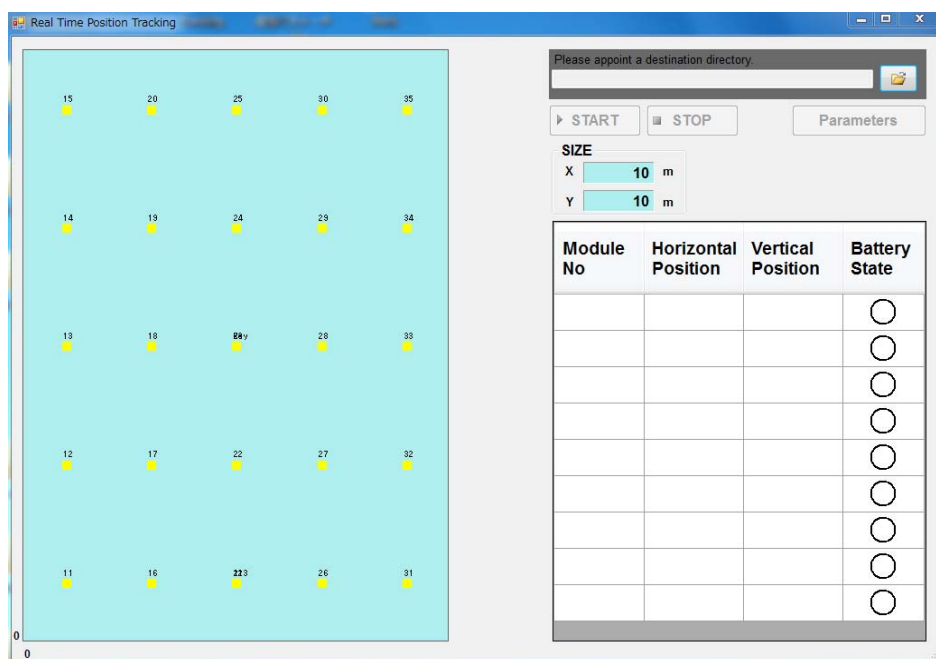


図 V.1.4.3 (vii) .13 追跡位置表記画面

- 履歴表示： 1 個のモジュールのログデータを読み出し、移動軌跡を描画する。一括描画、進行描画、ならびに RFID による校正状況が描画される。画面右側には、加速度と角速度のグラフが表示される。

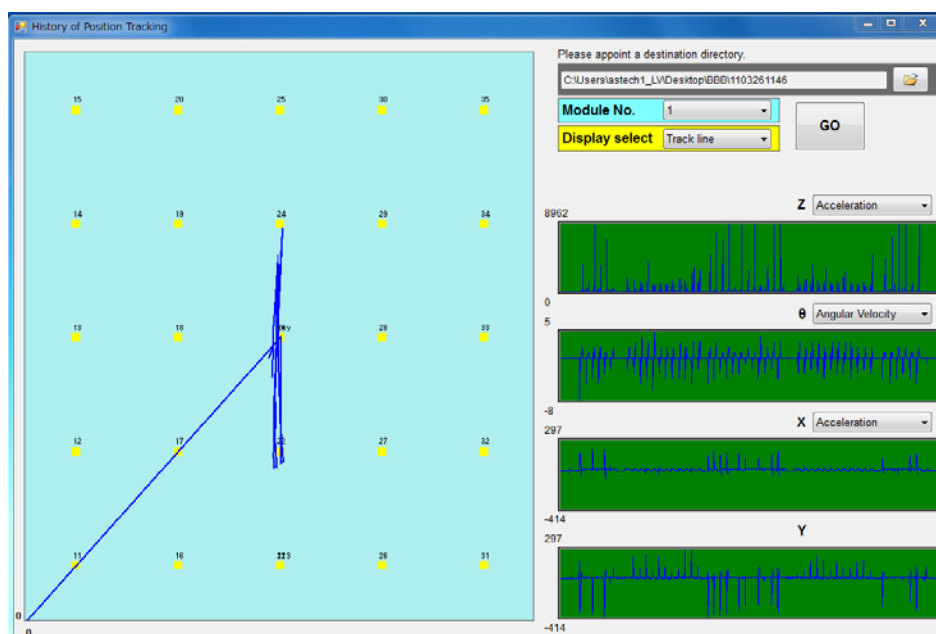


図 V.1.4.3 (vii) .14 移動軌跡一括表示例 (歩数計法、カニ歩き)

(vii) .3 試作品の評価

(vii) .3.1 有線による追跡結果

モジュールからの無線信号にデータ欠損が多発するため、モジュールとサーバを有線で接続して、位置追跡性能を確認した結果を下表に示す。

モジュールは、右足の靴のかかと部に取り付けた。

積分法、歩数計法それぞれについて、所定のパターンで1分間強歩行し、出発点に戻った時点における位置誤差を測定した。(X/Y 方向誤差。単位m。)

RFID タグ検知による校正機能は別途確認済のため、タグは測定開始時の位置ならびに角度校正にのみ使用した。

個別パラメータは、歩行ごとにパラメータを調整した場合、共通パラメータは代表的なパラメータを全歩行パターンに適用した場合の結果を示す。

共通パラメータとしては、個別パラメータ中太字のものを採用した。

表 V.1.4.3 (vii) .6 所定パターン1分後の位置推定結果 (X/Y (単位:m))

パターン	積分法		歩数計法	
	個別 P	共通 P	個別 P	共通 P
静止①	0.59/0.08	0.59/0.08	0.00/0.00	0.00/0.00
足踏み②	0.17/0.30	13.59/19.85	0.13/0.08	3.64/2.89
カニ歩き③	0.65/0.09	18.45/6.36	0.23/0.36	1.03/1.76
前後進④	0.82/0.83	18.56/18.06	0.37/0.53	2.07/2.49
前進 CCW⑤	0.20/0.39	1.84/18.44	0.84/0.69	1.24/1.01
円周 CCW⑥	0.62/0.33	11.19/22.43	0.17/0.34	0.27/0.75
円周 CW⑦	.085/0.17	OF/OF	0.01/0.48	0.01/0.48

P:パラメータ OF:オーバフロー (>37.77m)

靴を履いて静止

その場で足踏み

6 mの直線上を、中央から出発して左右に往復を繰り返す。

6 mの直線上を、中央から出発して、Uターンすることなく前後に往復を繰り返す。

6 mの直線上を、中央から出発して、端に来る毎に左回りにUターンして、往復を繰り返す。

直径2 mの円周上を、反時計回りに5回転する。

直径2 mの円周上を、時計回りに5回転する。

最終時点の位置誤差は上表のとおりであるが、軌跡形状も歩数計法のほうが階段に優れていた。

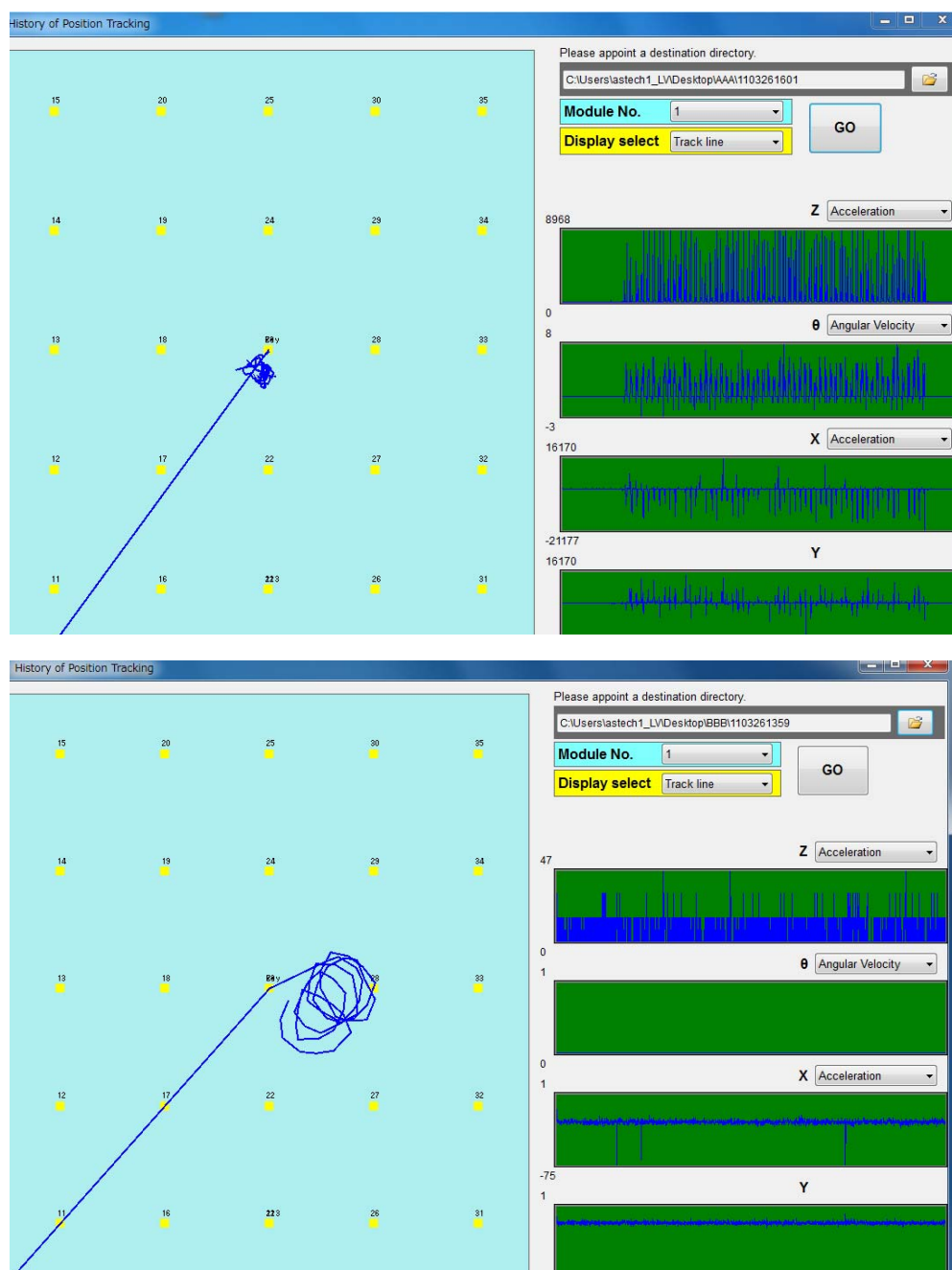


図 V.1.4.3 (vii) .15 円周上歩行時の軌跡 (上：積分法 下：歩数計法)

積分法は、補正パラメータで幾ら調整しても位置検出が出来たとはとても言い難い。位置精度を話題に出来るレベルではなく、実際の歩行経路とは似ても似つかぬ追跡結果であった。全般的に動きにメリハリがなく、停止中もノイズで位置がふらつき、逆に移動しても殆ど追従できなかった。

センサ信号を観察すると、定常的な歩行においても信号のレベル変動が大きく、積分による平準化効果に期待したが、全くの期待はずれに終わった。

(vii) .3.2 実用化に向けた課題： システム構築手段

開発当初は LabVIEW 単独でシステム構築を目指したが、操作性 (GUI) を考えた場合、LabVIEW で満足するためには非常な労力を必要とする点や、画像表示に於いて複数アイテムの表示が高速に行えない事が判り、データ受信部と計算部分を除き Windows アプリ (C#) で開発した。ただ、動作パラメータのテーブルからの読み込みが困難などの LabVIEW の特殊性を考えると、多数のモジュールを同時追跡する用途では、全て C で組んだほうが結果的に簡単であったといえる。(本見解は、LabVIEW 発売元の NI 社の理解を得ていない。設計担当者の LabVIEW に対する未熟さが原因の可能性は否定できない。)

作業位置表示機能、タグ位置設定機能、履歴表示機能、シミュレーション機能が正常に機能している事を確認した。ただし、履歴ファイルを用いたパラメータ変更効果確認作業については、操作性に課題を残している。

今回は Windows PC を用いたが、無線通信のデータ欠損の原因になることが判明した。この種システムでは、リアルタイム OS の採用が望ましいといえよう。

(vii) .3.3 実用化に向けた課題： 無線通信

今まで述べたように、今回選定した無線モジュールでは、満足の行く通信結果が得られなかった。より大出力を用いる (消費電力は増える)、ゲインの高いアンテナを用いる、アンテナを床面からはなす、あるいは回り込みの大きい周波数の電波を用いる (寸法が大きくなる) などの改善策が考えられるが、程度の差こそあれ、データ欠損は残るであろう。

同時追跡可能なモジュール数についても、無線通信プロトコルにより通信タイミングが定期的に割り振られるため、センサモジュールのデータをエンタリーできる期間に制限が有ることが判明し、通信周期 100ms では最大 9 台であった。更に、センサモジュール 2 個でのテストに於いて、連続したチャンネルに配置した場合、データの欠落が発生する事が判明し、最終的に安定的に通信できるモジュール数は同時 3 台となった。この解決には、サーバ側無線モジュールとサーバ本体の間に大容量の通信バッファを設置し、バッファとサーバ間の通信を現在の RS232C から、高速のイーサネット等にすることが必要である。

今回は、センサデータを高頻度にサーバに取り込み、サーバ側で位置推定計算をさせる構成としたが、モジュール側で位置計算まで実施し、サーバからモジュールに動作パラメータを送り込む方式のほうが、データ欠損には強い。この場合、アルゴリズム構築・調整が困難になるため、今回のシステムなどでアル

ゴリズムを開発、チューニングののちに、子機に書き込むことが求められる。

(vii) .3.4 実用化に向けた課題： アルゴリズム

追跡結果が芳しくない要因を、以下に掲げる。

①知見の欠如

ランジス博士による事前研究や調査から得られた知見・ノウハウを活用できず、既存文献から出発してオーソドックスな数式を立てて臨んだが、実際にセンサから収集されるデータは、波形やレベル変動の非常に大きなものであった。定常的に歩いても、センサ信号は全く定常的ではなかった。このため、得られた追跡結果は、当初の予備的なセンサ信号誤差計算から予想したもの（2%強、換言すれば1分間ごとに2m程度の累積誤差）には、とても及ばなかった。加速度データには、歩行本来の足首の一步ごとの加速減速に起因するもののほかに、歩行時の足の角度変化に起因する重力加速度の分力が重畳する。足首の角度を用いた補正演算である程度解決するとも考えられるが、実際の歩行時データのバラツキ具合からは悲観的にならざるを得ない。

②新方式の検討不足

局面打開のため別方式を試みたが、積分方式よりは優れるものの、軌跡を含む追跡精度を語るレベルには至らなかった。着地検知信号を延長する手段は付加したが、着地時点のX、Y軸加速度信号をカバーしきれなかった。

③方向検知に関する課題

今回のシステムでは、追跡当初にキータグを踏む際モジュールの角度をシステムに教えるが、それ以降の角度情報はジャイロによる計測データにのみ頼っている。現実には、使用した角速度センサの精度（1回転ごとに最大7度以上の誤差が累積する）から、方向情報はすぐにずれ始める。追跡にあたっては、加速度センサ信号から算出されるモジュールのX、Y方向の移動量を、角速度センサで求めたモジュールの向きによってクリーンルームのX、Y方向に都度換算する。このとき、モジュールの向きが狂っていると、追跡結果が全く別方向を向いてしまうことになる。（例えば、逆方向に移動したと誤判断することになる。）今回は、累積的な角度誤差以前の問題として、最初からたったの2回転目でも追跡結果があらぬ方向に動いてしまった。（方向転換速度により、得られる角度変化が大幅に左右されてしまったため。）

この問題は、角速度センサデータのデータ収集精度を上げることによりある程度は改善できようが、今回のテーマで用いたセンサ信号だけからは、根本的解決は見込めない。

ももとは、RFID タグ信号で位置誤差を校正する際に、校正時の誤差量を加速度要因と角速度要因に分解し、角度誤差をも校正することを目指していたが、誤差量が大きすぎて対処できなかった。

(vii) .3.5 実用化に向けた課題

①コンパスの併用

角度の累積誤差を解消するには、コンパスの併用が効果的である。室内では、場所によって地磁気の方向に乱れが生じるが、現在採用しているRFIDタグでの位置校正時に、タグごとの地磁気偏差データを加味すれば方向校正が簡単に可能となる。MEMS地磁気コンパスは、すでに販売されている。(例 ヤマハ YAS525B)

「タグによる位置補正データから、多元連立方程式を解いて方位を修正する」のが絶対不可能とも言えないが、コンパス採用の方が、はるかに容易である。

③追跡アルゴリズム

歩数計法で着地検知信号を延長する手段は付加したが、着地時点のX、Y軸加速度信号をカバーしきれなかった。両加速度信号を所定時間遅延させた後に速度に積分し、延長された着地信号でその速度をクリアできれば、より正確な速度が求まるものと思われる。この着地検知部分の工夫は、積分法にも効果をもたらすはずである。

どのようなアルゴリズムを用いるにせよ、様々な場面を同じ演算パラメータでカバーするには無理がある。追跡成績(タグを踏んだときの校正量)から、演算パラメータをダイナミックに更新するシステムとする必要がある。このための手段としては、カルマンフィルタ、ニューラルネット、ファジィ推論、シーン判定によるモード切替など色々ありうる。

(vii) .4 まとめ

本件開発で作業員の位置検出性能は思うように実現できなかったが、歩行の基礎データは多数収集して履歴データとして保存した。更にセンサのノイズ評価、ドリフト評価も今後の開発に役立つものである。

タグ検出時の位置補正機能も作業員の位置検出システムには有効である。

また、作業員位置表示機能、タグ位置設定機能、履歴表示機能、シミュレーション機能も作業員位置追跡システムには不可欠な機能である。

今回の成果に歩行解析アルゴリズムを強化すれば、目的の位置追跡システムが構築出来るものとする。

(vii) .5 参考文献

花若他「歩行計測システムとその応用」横河技報 Vol151.No.3 PP24-27(2007)

②センサ誤差の予備検討

加速度センサ： LIS3DH (S Tマイクロ)

主な仕様： フルスケール $\pm 8G$ (3軸共)
感度 4mG/Digit
同上温度係数 $\pm 0.01\%/$
オフセット $\pm 40mG$
オフセット温度係数 $\pm 0.5mg/$

誤差の検討 何らかの手段で 0g、+/-8g の3点で初期校正されたとする。

加速度誤差 子機温度範囲は、充電直後の温度上昇を 20°Cとして、10~50°C。
(温度変化 40°C)

温度による誤差 感度 $\pm 0.4\%$ + オフセット $\pm 20mG$

平均加速度を 1G と仮定すると、合計 約 $\pm 2.4\%$

ゼロ点ズレの速度データへの積算を、毎歩ごとにリセットして
も、100m 移動ごとに進行方向に 2.4m 程度の誤差が累積する。

角速度センサ： L3G4200D (S Tマイクロ)

主な仕様： フルスケール $\pm 500^\circ /s$
感度 17.5m $^\circ /s/Digit$
同上温度係数 $\pm 2\%$ (-40~85°C)
オフセット $\pm 15^\circ /s$
オフセット温度係数 $\pm 0.0035^\circ / /s$ (-40~85°C)

誤差の検討 何らかの手段で 0 $^\circ /s$ 、 $\pm 500^\circ /s$ の3点で初期校正済とする。

角速度誤差 子機温度範囲は、充電直後の温度上昇を 20°Cとして、10~50°C。
温度による感度誤差は-40~85°Cの 1/3 の影響とみなして $\pm 0.7\%$
ゼロ点誤差 $\pm 0.14^\circ /s$ 平均角速度を 10 $^\circ /s$ とすると $\pm 1.4\%$
合計 約 $\pm 2.1\%$

1回転ごとに、7.5 $^\circ$ の誤差が累積する。この影響は、加速度センサよりはるかに大きい。(100m 歩いて、横方向に 13m の誤差。) あるいは、ゼロ点誤差だけで 1分間に $\pm 8.4^\circ$ にもなりうる。

両センサとも、データシートに感度のばらつき、非直線性、軸間干渉などの記載がないが、これらを考慮すると、誤差はより大きいものと思われる。

(viii) 高感度温度センシング用機能薄膜

() -1.1 研究の目的

クリーンルーム内の省エネ化において、人の存在や位置情報を正確に検出し、空調、照明等の機器を最適運転するために必要な集積化自立センサネットワークが必要である。本ネットワークを実現するため、人の存在情報を正確に得るために必要な高感度温度センサおよびこのセンサから得られた情報を外部電源にたよることなく処理し伝送することが可能な自立電源として働く振動発電デバイスを一体化したモジュールが必要である。本研究においてはこのモジュールを実現するためのベースとなる高精度の人体検知が可能な焦電センサや自立電源としての振動発電デバイスを目指し、デバイスのキーとなる非鉛系強誘電体薄膜を作製し、前述のデバイスの実現可能性を探る。

具体的には、高感度温度センサおよび本センサに電力を自立供給可能な電源としての振動発電デバイスの実現に向けた、シリコン及びポリマー基板上へのスパッタ法による非鉛系薄膜形成技術を開発する。

本テーマにおいては、前述したような温度センサおよび発電デバイスを実現するために必要な下記の項目について開発をおこなった。

- ・ 非鉛系強誘電体薄膜の開発
- ・ IC 一体化のための焦電薄膜の Si 基板への転写技術の開発
- ・ 発電デバイス向け圧電膜のガラスおよびポリマー基材への転写形成技術の開発

非鉛系薄膜としての仮目標値は以下である。

焦電係数 ; $2\text{pC}/(\text{cm}^2\text{K})$

圧電係数 $10\text{pC}/\text{N}$

() -1.2 実験方法

我々は、センサネットワークモジュールのキー素子としての温度センサのための焦電薄膜および振動発電デバイスに応用するための強誘電体薄膜をスパッタ法を用いて開発した。

本開発においては、強誘電体材料として広く知られているチタン-ジルコン酸鉛系薄膜 (PZT)¹⁾⁻³⁾、および非鉛系材料として BaTiO₃ 薄膜 (BTO) の形成条件を検討した。

() -1.2-1 PZT 薄膜形成

優れた焦電および圧電特性を示すとされているチタン-ジルコン酸鉛の代表組成である Pb(Zr_{0.53},Ti_{0.47})TiO₃ 薄膜を RF マグネトロンスパッタ法により形成した。スパッタ条件は (表 V.1.4.3 (viii) -1.2-1-1) に示す。基板は PZT の成長によく利用される単結晶 MgO(100) 基板および Si 基板を用いた。基板温度は約 600°C である。MgO 基板においては Pt を成膜したのち、緩衝層である SrRuO₃ (以降 SRO と記す) を成膜しその上に PZT 膜を成膜した。Si 基板においては密着性を上げるため最初に Ti を成膜した後、Pt、SRO および PZT 膜を成膜した。得られた膜は、以下に述べる分析評価手法を駆使し結晶性、電気特性の

評価をおこなった。

表 V.1.4.3 (viii) -1.2-1-1. スパッタ条件

ターゲット組成	0.8Pb(Zr0.53, Ti0.47)O ₃ +0.2PbO ₃ BaTiO ₃
RFパワー	150-200W
Ar/O ₂	19/1
基板温度	600°C

X線ディフракトメーターにより結晶構造の同定、配向性を調べた。また一部の膜についてはより詳細な結晶構造を調べるために X 線による極図形も調べた。電子顕微鏡による表面モフォロジー、断面観察および透過電子顕微鏡により詳細な断面構造観察をおこなった。薄膜の組成は電子顕微鏡に取り付けたエネルギー分散型組成分析機器(EDX)で調べるとともに、ICP 発光分光分析により高精度な分析をおこなった。薄膜の膜厚方法の組成分布を調べるために SIMS 分析をおこなった。

() -1.2-2 BTO 薄膜形成

BTO 薄膜においても PZT 薄膜と同様のスパッタ法により成膜した。成膜条件は PZT 薄膜とほぼ同じである。基板は単結晶 MgO(100)を用いた。得られた膜は PZT 膜と同様に X 線ディフракトメーターによる結晶構造解析等をおこなった。焦電係数は新規に導入した焦電評価システムを用いておこなった。

() -1.2-3 圧電膜の Si、ガラスおよびポリマー基材への転写形成技術

PZT をはじめとする強誘電体薄膜は MgO や SrTiO₃ 単結晶基板にはエピタキシャル成長するが^{1), 2)}、Si 基板には多結晶膜しか成長できず^{1), 3)}、多結晶 PZT 膜においては圧電特性や焦電特性がエピタキシャル膜より低いことが知られている。また、PZT 薄膜の形成には約 600°C の高い基板温度が必要であり、また成長基板との格子整合性が必要であるためガラスやポリマーの上に優れた圧電/焦電特性を示す PZT 膜を成膜することはできない。これらの課題を解決し、より汎用性があり安価な Si、ガラス、ポリマー等の基材上に優れた圧電/焦電特性を示す PZT 膜を形成できれば、強誘電体薄膜の応用範囲を格段に広げることが可能となる。

本研究においては、この点に視点をおいて基本技術としてのレーザ照射による PZT 膜の単結晶基板からの剥離・転写を試みた。

() -1.3 実験結果および考察

() -1.3-1 PZT 薄膜

RFマグネトロンスパッタ法によりPZT薄膜をMgO単結晶基板およびSi基板上に形成した。膜厚は1~3 μm である。得られた膜はas-grownでc軸配向を示すとともに、自発分極を示し、分極のためのポーリング処理は不要であった。図V.1.4.3 (viii) -1.3-1-1にMgO基板およびSi基板の上に形成した薄膜のX線回折図形を示す。両方の膜はともにc軸配向を示している。しかし回折強度に注目すると、照射X線強度40kV、40mAにおいてMgO基板上のPZT膜の(001)ピークでは約30万カウントであったが、Si基板上では最大約5万カウントしか示さなかった。一般的に(100)Si基板上においては格子ミスマッチングに起因しPt膜は(111)配向を示すことがよく知られている。本研究においては格子ミスマッチングを低減するため緩衝層としてSrRuO₃ (SRO)を用いると同時に基板温度、RFパワー等のスパッタパラメータの検討をおこない成膜最適条件を見出した。その結果、Pt膜の上に(100)配向のSRO膜を形成でき、その上にPZT薄膜を形成した。しかしながら、図V.1.4.3 (viii) -1.3-1-1から明らかなようにX線回折ピーク強度においては、Si基板上に形成したPZT膜はMgO基板上のPZT膜より1ケタ以上小さい。またより詳細に分析するため膜面内の結晶方位分布を4軸X線回折法で測定した。MgO基板上PZT膜ではa面が揃いほぼ単結晶状であった。一方、Si上のPZT膜では面内では結晶方位は揃っていない多結晶であることが判明した。

表V.1.4.3 (viii) -1.3-1-1にエネルギー分散型組成分析装置(EDX)で分析したPZT薄膜の構成元素

の組成を示す。得られた膜の組成はターゲット材料の組成の10%以内になっていることがわかった。構成元素の膜厚方向分布をSIMSにより調べた。その結果膜の各構成元素はほぼ均一であることがわかった。

表V.1.4.3 (viii) -1.3-1-1 EDX測定装置により得られたPZT薄膜の組成比

	EDX (換算前)	EDX (換算後)	ICP発光分光
Pb	27.92	50.28	57.1
Zr	13.47	24.52	20.6
Ti	13.54	24.65	22.3
O	45.06	-----	分析不可能

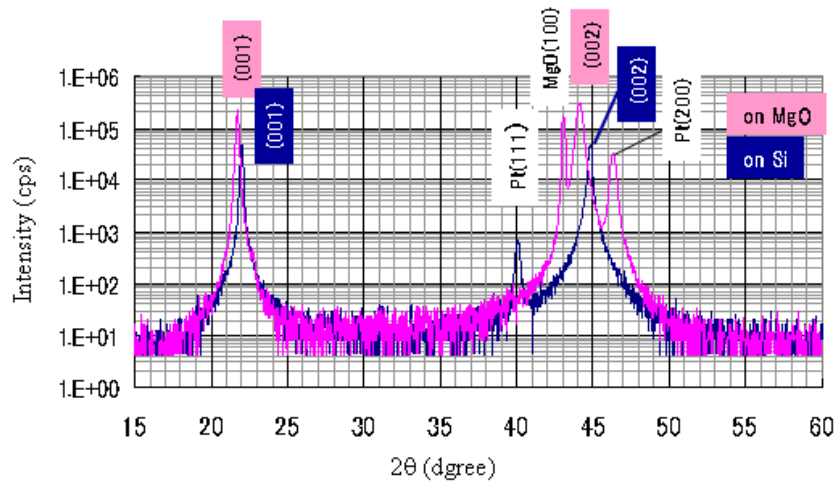


図 V.1.4.3 (viii) -1.3-1-1 MgO 基板及び Si 基板の上に成膜した PZT 薄膜の X 線回折パターン

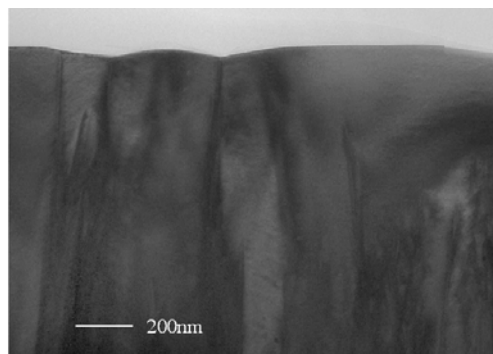


写真 .1.4.3 (viii) -1.3-1-1 MgO 基板の上に形成 PMNzT 薄膜の透過電子顕微鏡写真

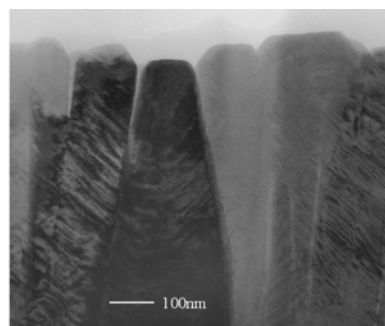


写真 .1.4.3 (viii) -1.3-1-2 Si 基板の上に形成した PMNzT 薄膜の透過電子顕微鏡写真

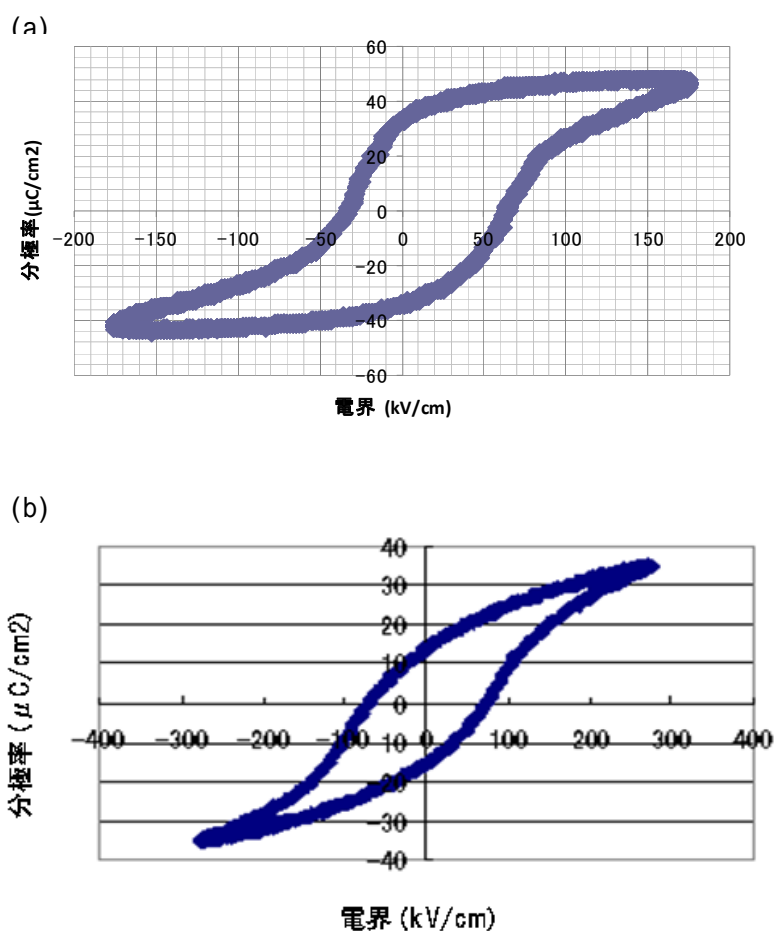


図 V.1.4.3 (viii) -1.3-1-2 PZT 薄膜の P-E 曲線 (a):MgO 基板上の PZT 薄膜、(b) : Si 基板上の PZT 薄膜

写真 .1.4.3 (viii) -1.3-1-1 および 2 に各基板上に形成した PZT 膜の断面 TEM 写真を示す。MgO 基板上では単結晶に近い膜が得られている (写真 (viii) -1.3-1-1)。一方、Si 基板上の PZT 膜は分域 (ドメイン) が不ぞろいであることがわかる (斜め 45° にコントラストがついている部分)。

図 V.1.4.3 (viii) -1.3-1-2 に測定した分極 電界特性 (P-E ループ) を示す。両者とも自発分極を示し、強誘電体であることを示している。誘電率は MgO 基板上では約 150、Si 基板上では 700~1000 であり、MgO 基板上の PZT 膜の方が誘電率を低いことがわかる。本研究において、緩衝層として SRO 膜を用いて Si 基板上に c 軸配向をする PZT 薄膜を得ることができたが、PZT 膜の結晶性をより詳細に分析した結果、Si 基板上の PZT 膜は c 軸優先配向を示すが、膜面内においては a 軸の方向が揃っていない、また一部では c 軸配向ドメインが存在していることが判明した。

() -1.3-2 非鉛系強誘電体薄膜

我々は、非鉛系材料としてバルクで強誘電体特性を示す BaTiO₃(BTO)材料をスパッタ法で作製した。これまで Ba と Sr 組成を傾斜的変化させた (Ba,Sr)TiO₃ 薄膜において非常に大きい焦電係数が観察できた焦電係数の温度依存性が大きいと報告されている。⁴⁾ 本開発においては、Sr を添加しない BaTiO₃ 薄膜の焦電係数を調べ、BTO 薄膜での可能性を探ることを目的にした。スパッタ条件は PZT 薄膜とほぼ同じである。(表 V.1.4.3 (viii) -1.2-1-1) 使用した基板は(100)単結晶 MgO である。薄膜構成としては次の 2 種類を検討した。①下部電極 Pt(膜厚約 70nm)を形成した後 BTO 膜を形成した。Pt 膜の上に緩衝層として SRO 膜(膜厚約 80nm)を形成したその上に BTO 膜を形成したものである。図 V.1.4.3 (viii) -1.3-2-2 に得られた BTO 薄膜の X 線回折パターンを示す。SRO 緩衝層の上に成膜した BTO 膜の方が、c 軸配向度が若干良いことがわかる。写真 .1.4.3 () -1.3-2-1 に MgO 基板上 Pt 上に成長した BTO 薄膜の高分解能透過電子顕微鏡写真をしめす。図から明らかのように、非常にきれいにエピタキシャル成長していることがわかる。この膜について PE ヒステリシスカーブを測定した。図 V.1.4.3 (viii) -1.3-2-2 に結果を示す。BTO 膜は強誘電性を示し、自発分極 10 μ C/cm²、抗電界 20kV/cm であった。

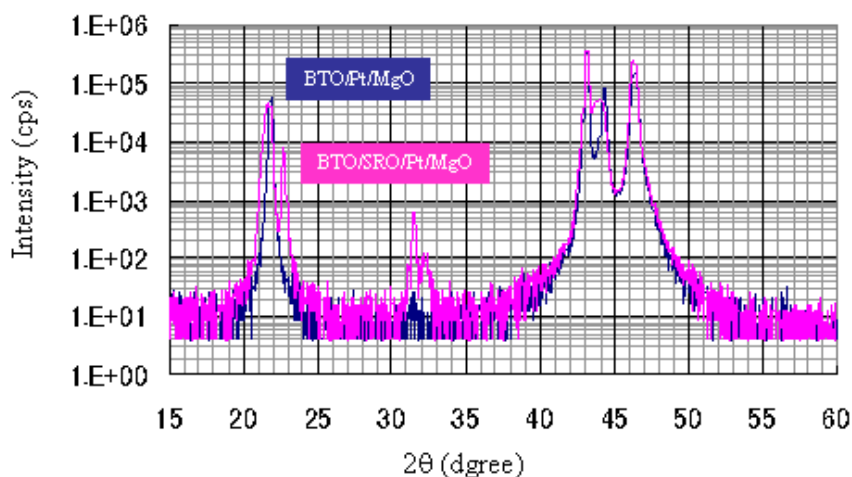


図 V.1.4.3 (viii) -1.3-2-1 BTO/Pt および BTO/SRO/Pt 薄膜の X 線回折図形

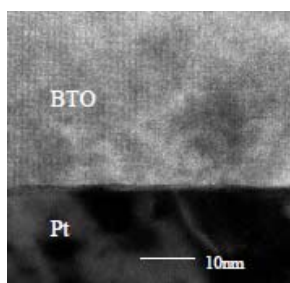


写真 .1.4.3 () -1.3-2-1 BTO 薄膜の高分解能断面 TEM 写真

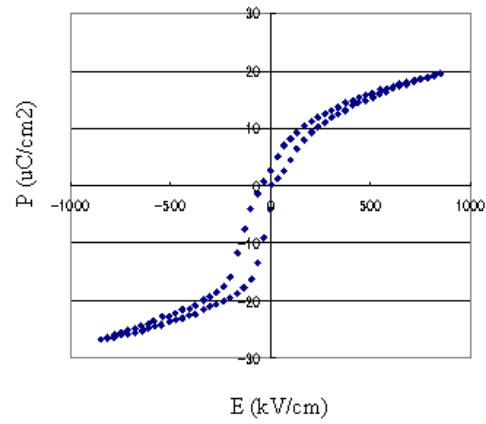


図 V.1.4.3 (viii) -1.3-2-2 BTO 薄膜の PE カーブ



図 V.1.4.3 (viii) -1.3-2-2 焦電係数評価装置の全体写真

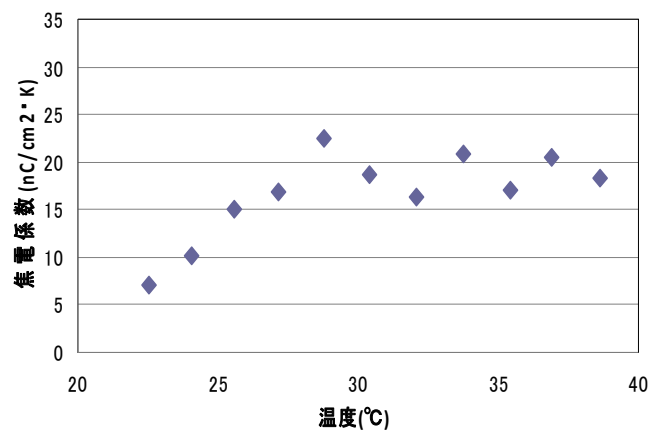


図 V.1.4.3 (viii) -1.3-2-3 BTO 薄膜の焦電係数の温度依存性

それぞれの膜について温度センサの温度検知の指標である焦電特性およびアクチュエーター性能に関与する指標である圧電特性を調べた。

焦電特性は今回新たに導入した焦電評価装置を用いて評価した。装置はペルチェ素子を用いた温度制御ステージ、ピコアンペアメータから構成している。写真 .1.4.3 () -1.3-2-2 に焦電評価装置を示す。被測定サンプルはステージに設置され、温度制御範囲は $-10\sim 80$ 、また昇降温レートは $1\sim 20^{\circ}\text{C}/\text{分}$ である。Pt 膜上に直接形成した BTO 薄膜の測定結果を図 V.1.4.3 (viii) -1.3-3-2-3 に示す。得られた焦電係数は多少のバラツキがあるが約 $10\sim 20\text{ pC}/(\text{cm}^2\text{K})$ であった。この値はこれまで報告されている Si 基板上に形成した PZT 薄膜 $20\text{pC}/(\text{cm}^2\text{K})$ の焦電係数とほぼ同等であり、この BaTiO₃ 系薄膜が PZT 材料に置き換える非鉛系材料としての可能性があることが判明した。緩衝層 SRO を設けた BTO 薄膜も同様に焦電係数を測定したところ、前述の緩衝層なし BTO 膜の結果より若干小さい値を示した。また圧電係数は $10\text{pC}/\text{N}$ であった。

() -1.3-3 強誘電体薄膜の剥離転写

本研究において、前述のように単結晶 MgO 基板上にスパッタ法を用い優れた焦電または圧電特性を示す PZT 薄膜および BTO 薄膜を得た。しかしながら、これらの強誘電体薄膜を幅広く各種 MEMS デバイスに応用展開する際には、Si、ガラス、ポリマー等の幅広く使われている基板材料の上に形成すること強誘電体 MEMS デバイスの応用範囲を広げる観点から必要である。これまで、エキシマレーザを用い PZT 薄膜の剥離転写が報告されている。⁵⁾ この報告では転写膜の面積が小さい。本研究においてはレーザ技術を駆使し、MgO 単結晶基板上に成長した高品位な強誘電体薄膜を Si、ガラス、ポリマーに大面積領域に剥離転写形成することを試みた。基本的概念は図 V.1.4.3 (viii) -1.3-3-1 に示す。MgO 単結晶基板上に成長した PZT 膜において、MgO 基板側からレーザ光を照射し PZT 等を MgO 基板から剥離するとともに、PZT 膜の上面に貼り付けた第 2 の基板へ転写する。レーザ光源としては、フェムト秒レーザを用いた。PZT 膜が基板から剥離する原理は以下の様に考えられる。MgO 基板の裏面 (PZT 膜が成膜されていない面) からレーザ照射しレーザ光を Pt/MgO 界面に集光すると、Pt 膜付近においてマイクロエクスプロージョンがおり Pt を MgO 基板から剥離すると同時に Pt 上の PZT 膜も剥離される。ここで PZT 膜は膜の上部に接着固定された基板 (Si、ガラス、ポリマー) へ転写される。用いたレーザは波長 800nm 、パルス幅 100fs のフェムト秒レーザである。写真 .1.4.3 () -1.3-3-1(a)、(b) に転写後の PZT 薄膜の写真を示す。(a) は導電性接着剤で PZT 薄膜とガラス基板を接合したサンプルの結果である。(b) は PZT 薄膜およびガラス基板のそれぞれの接着面に Au を成膜した後、両方を超高真空下で圧力を印加しながら常温接合したものの結果である。写真 .1.4.3 () -1.3-3-1(a) における左側の基板は PZT 膜を剥離した後の MgO 基板である。この基板がくすんで見えるのは、Pt が若干残っているためであると考えられる。右側の基板はガラス (表面に Pt 電極形成済み) に転写形成された PZT 膜である。転写形成された PZT 膜にはワレやボイド等は目視では

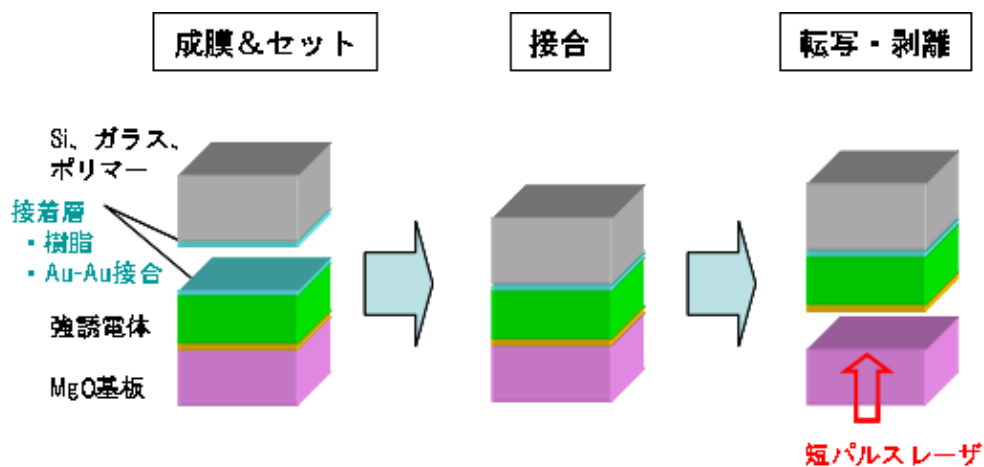
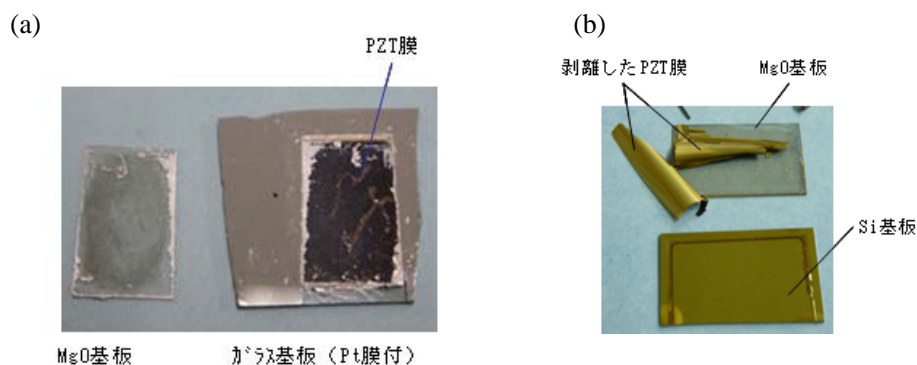


図 V.1.4.3 (viii) -1.3-3-1 レーザ剥離転写プロセスの概念図



写真図 V.1.4.3 (viii) -1.3-3-1 レーザ転写剥離後の PZT 薄膜写真 (a) : ガラス基板への転写 (銀ペースト接着), (b) : ガラス基板への転写(Au-Au 常温接合)

観察できず、かつほとんど均一に転写形成されていることがわかる。

図 V.1.4.3 (viii) -1.3-3-2 に転写前後の X 線回折パターンを示す。転写前後において薄膜の配向性に変化はなくどちらも c 軸配向を示している。高角度側 ($2\theta \sim 96.5$ 度付近) の (004) 回折ピークから格子定数を導出すると、転写前後で c 軸は 4.112\AA から 4.127\AA と約 3%伸びている。これは MgO 基板の上の PZT 膜 (レーザー照射前の膜) においては、PZT 膜の面内の格子定数 a が MgO の格子定数より小さいため、PZT 膜が MgO 基板から応力を受けて引っ張られている。一方、転写後の PZT 膜においては、レーザー照射により PZT 膜が MgO 基板から剥離するため基板から受けている応力が開放される。その結果、PZT 膜が受けていた引っ張り応力がなくなり面内方向に縮むと同時に c 軸方向に伸びた結果であると解釈できる。

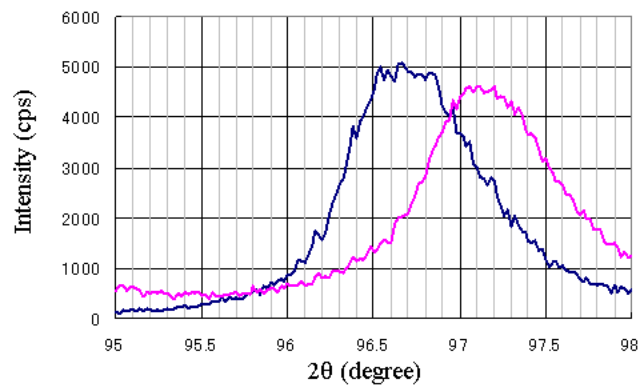
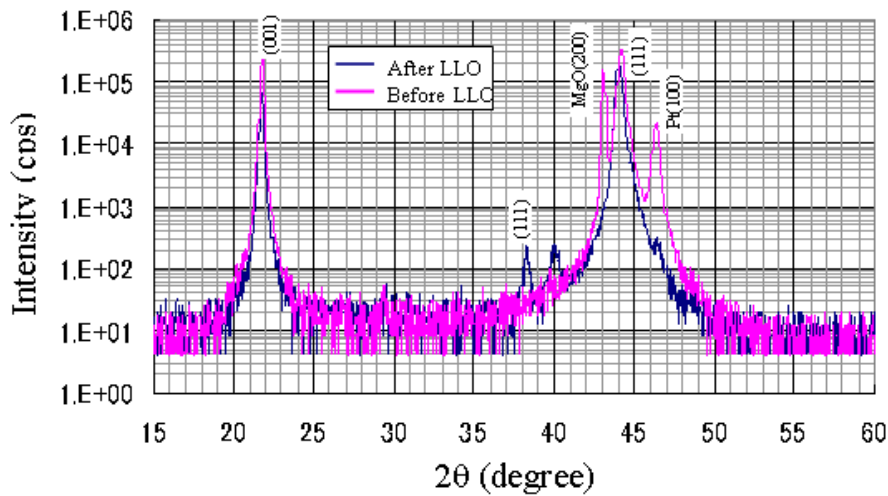


図 V.1.4.3 (viii) -1.3-3-2 レーザ剥離転写前後の X線回折図形 (a): 測定範囲 15° 2θ 60° (b):95° 2θ 98

写真 .1.4.3 () -1.3-3-1(b)に Au-Au 接合したサンプルのレーザ剥離・転写後の PZT 薄膜の写真を示す。カール状の膜は剥離した PZT 薄膜である。これは以下の様に解釈できる。PZT 膜と転写先のガラス基板との接合強度が弱かったため PZT 膜が MgO 基板から剥離されると同時に完全にフリーな状態となった。写真で明らかなように、カール状の PZT 膜表面が金色を示している。これは接合前の PZT 膜の上面に形成した接合用の Au 薄膜の表面の色である。カール形状と PZT 膜の表裏面の関係は以下の様に推測できる。MgO 基板上に成長した PZT 膜は前述した様に PZT 膜と MgO 基板の面内格子定数の差に起因して引っ張り応力を受けているが、レーザ照射により PZT 膜が MgO 基板から剥離すると同時に基板から受けていた応力が開放され、PZT 膜が MgO 基板側を内側にしたカール状に変形したと考えられる。

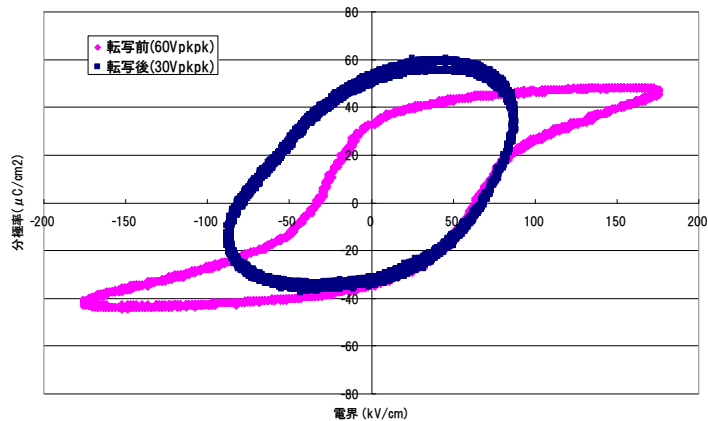


図 V.1.4.3 (viii) -1.3-3-3 レーザ剥離転写前後の PZT 薄膜の P-E ループ

このカール形状の PZT 膜は前述の格子定数の変化と整合していることがわかる。

なお、ポリマー基板への剥離転写実験も実施した結果、Si やガラス基板と同様にポリマー基板上にも PZT 薄膜を形成できることがわかった。より詳細な結晶構造解析のためにはレーザ剥離転写前後の薄膜の逆格子マッピング測定等をおこなう必要がある。

レーザ剥離転写前後の PZT 薄膜の P-E ヒステリシス測定を行った。図 V.1.4.3 (viii) -1.3-3-3 にその結果を示す。転写後の膜のヒステリシスカーブは転写前の膜のような角型を示していないが、自発分極および抗電界は共に増大している。これは転写後の膜においては MgO 基板から受ける応力が解放されたためであると推測される。今後、X 線回折等の精密構造解析等を行い、結晶格子の状態を正確に把握して総合的な判断をする必要がある。

() -1.4 まとめ

本研究においては、クリーンルーム内の省エネ化を目指し、人の存在や位置情報を正確に検出し、空調、照明等の機器を最適運転するために必要な集積化自立センサネットワークの実現を目指し、基本構成デバイスである温度センサおよびそれを駆動するための振動発電デバイスのキー技術となる非鉛系焦電/圧電薄膜の開発し、可能性を検討した。その結果、非鉛系強誘電体材料として BaTiO₃ 薄膜をスパッタ法で形成した。得られた薄膜の焦電係数は 10~20pC/N、圧電定数は 10pC/(cm²)であった。これらの値は当初の仮目標値を達成している。レーザ剥離転写技術を開発し、高品位強誘電体薄膜をより汎用性の高い Si、ガラス、ポリマー基板へ形成できることがわかった。この技術は強誘電体薄膜のアプリケーションを拡げることにつながると期待できる。以上の開発した強誘電体薄膜は、集積化自立センサネットワークの実現のためのキーマテリアルとなりうる可能性を見出した。

参考文献

- 1) I. Kanno, H. Kotera, and K. Wasa, *Sensors and Actuators A* **107**, 68 (2003).
- 2) N. Yamauchi, T. Shirai, T. Yoshihara, Y. Hayasaki, T. Ueda, T. Matsushima, K. Wasa, I. Kanno, and H. Kotera, *Appl. Phys. Lett.* **94**, 172903-1 (2009).
- 3) T. Matsushima, S. Xiong, H. Kawada, H. Yamanaka and P. Muralt, *IEEE TRANSSACTIONS ON ULTRASONICS, FERROELECTRICS, AND FREQUENCY CONTROL* **54**, 2439 (2007).
- 4) F. Jin, G. W. Auner, R. Naik, N. W. Schunbring, J. Mantese and A. L. Micheli, *Appl. Phys. Lett.* **73**, 2838 (1998).
- 5) L. Tsakalakos and T. Sands, *Appl. Phys. Lett.* **76**, 227 (2000).

- ． 2 低環境負荷型プロセス技術開発
- ． 2. 1 低環境負荷ポリマー・センサ融合プロセス技術開発

(1) 研究の目的

低環境負荷・生体適合性ポリマーを用いたデバイスとして、例えば人体の内外に設置し、生体情報、環境情報などを高精度にセンシングする高機能モジュールなどが求められている。ポリマー材料は、電子デバイスにおいて近年シリコンに替わる材料として、生体適合性やリサイクルのし易さの観点から、人に優しい、低環境負荷材料として注目されている。また、機械特性を示すヤング率はSiの約1/50程度(例としてSi: 130~188GPa、PMMA: 3.4GPa)と非常に軟らかく、例えばMEMS材料としてシリコンを遥かにしのぐ優れた特性が期待される。

本研究開発項目では、低環境負荷ポリマーとセンサを融合させたプロセス技術開発として、アクチュエータMEMSデバイスの試作を行い、シミュレーション技術を用いて、その製造プロセスとシリコンMEMSより優位に立つと言われている特性の検証を行う。

(2) ポリマー化プロセスの検討

将来のMEMSデバイスのポリマー化に向け、アクチュエータMEMSについて、性能予測が可能なシミュレーション技術及びナノインプリントによる製造プロセスを開発する。

(2) -1 ポリマーMEMSの設計・シミュレーション技術開発

ポリマー化に向けてはシミュレーションによる性能予測が重要となる。しかしながら、シリコンと比較して機械特性などのデータの蓄積は道半ばである。今回の技術開発では、シミュレーションソフトMemsONEやCODE Vを有効活用し、ポリマーMEMSとしての光学特性などを予測し、実デバイスの要素試作データとの比較検証を行う。取得したデータは将来のデータベース化をにらみシミュレーションソフトの機械特性データに逐次反映する。

● ポリマー材料検討

本プロジェクトではポリマーの柔軟性を活かして、ポリマー静電型マイクロミラーデバイスの開発を行う。将来的にマイクロレンズやマイクロプリズムなど他のポリマーMEMS光学デバイスへの展開を鑑みて、本プロジェクトで製作するポリマー静電型マイクロミラーデバイスの材料として、透過性の高いポリマー材料であるアクリル樹脂 (poly(methyl methacrylate); PMMA), ポリカーボネート (polycarbonate; PC), およびポリ乳酸 (polylactic acid; PLA) を候補に挙げて材料特性を比較検討し、本プロジェクトで実際に使用する材料を決定した。

各ポリマーの材料特性を表V.2.1.2-1に示す。同じポリマーでもグレードや充填剤(ガラス繊維など)の違いによって材料特性値も大きく異なり、表V.2.1.2-1に掲げた特性値は一般グレードにおける数値である⁽³⁻⁵⁾。

表V.2.1.2-1 ポリマーMEMS材料の熱特性、力学特性、光学特性

	PMMA	PC	PLA
融点 (°C)	160	267	170
ビカット軟化温度 (°C)	80~100	150~155	59
ガラス転移温度 (°C)	72~105	145~150	57~60

密度 (g/cm ³)	3.2.19	1.20	1.25
線熱膨張係数 ($\times 10^{-5} \text{K}^{-1}$)	6~8	7~8	9
成形温度 (°C)	165~290	280~300	150~200
成形圧力 (MPa)	70~140	100~180	
引張り強さ (MPa)	50~75	50~65	57
引張り伸び (GPa)	2~10	100~130	4
曲げ弾性率 (%)	3.0	2.4	4.3
曲げ強さ (MPa)	90~120	98	102
ヤング率 (GPa)	3.2	2.5	4~6
屈折率 (波長 589nm)	1.49~1.54	1.59	1.4
光線透過率 (厚さ 3mm) (%)	92~93	87~90	88

PMMA および PC は非晶性のポリマーであり^(3,4)，軟化温度（≒熱変形温度）とガラス転移温度が同程度と見做してよい。PLA の熱変形は PMMA より低い温度で起こるが，PLA は白濁した結晶性のもと透明の非晶性のものであり，57~60°C のガラス転移温度を示すのは非晶性の PLA である⁽⁵⁾。融点やガラス転移温度の高い PC は成形温度も高く設定する必要があるが，比較的低温でも熱変形が生じる PLA は成形温度も低めに設定する。

これらのポリマー材料の機械特性についてはほとんどの項目で互いによく似た特性値をもっており，ヤング率の大きさはそれぞれシリコンの約 30 分の 1~約 70 分の 1 と非常に小さい。したがって，同じ大きさの応力に対して得られる変位はこれらのポリマー材料がシリコンよりも桁違いに大きくなる。また，引張り伸びにおいて PC の数値が格段に大きいことが特筆される。

表 V.2.1.2-1 に掲げた材料特性を比較検討した結果，とくに成形加工条件を重視して，PC よりも成形温度が低い PMMA を本プロジェクトで実際に使用する材料として選択した。PLA は汎用プラスチックである PMMA やエンジニアリングプラスチックとして扱われている PC と比べて成形加工条件に関する情報が少ないだけでなく，加水分解が進行しやすく PMMA よりも耐久性が劣るため，本プロジェクトでの使用は見送った。但し，この PLA の加水分解性（生分解性・生体吸収性）はポリマー MEMS デバイスの応用範囲を広げる特性として，今後の研究において積極的に展開できるものである。

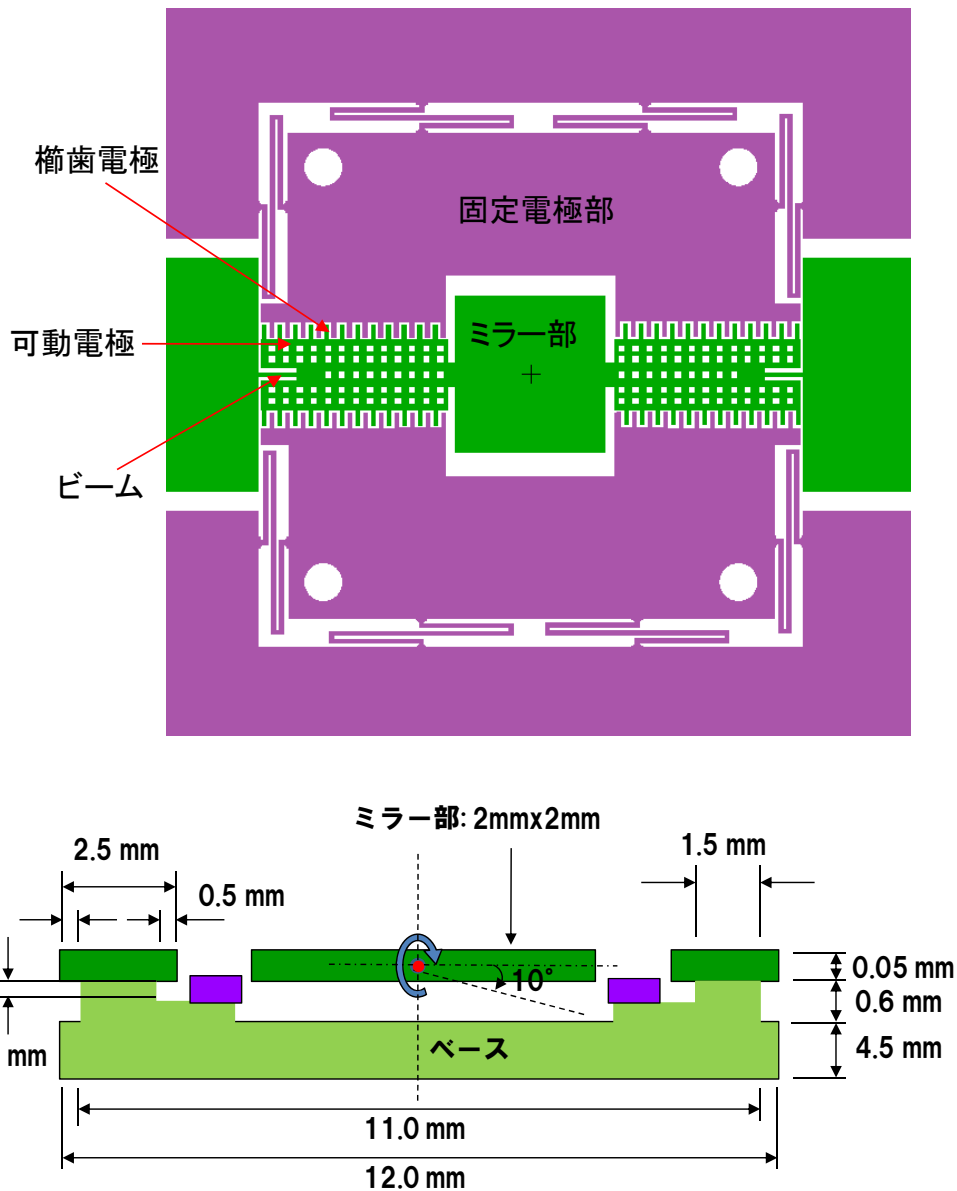
● 静電型ミラーデバイスの設計検討

ポリマー材料を PMMA に決定したので，PMMA の材料データを用いた MemsONE によるシミュレーションをもとに製作するミラーデバイスの設計を行った。ミラーデバイスの性能目標は，駆動電圧：30V 以下，ミラー部反射率：90%以上，ミラー部表面粗さ：100nm 以下，の 3 点である。また，ポリマー材料の特徴を活かし，ミラーの最大振れ角度を 10 度程度に設定した。

当初は従来からよく用いられているミラー片に櫛歯がある構造を採用し，比較的大きなミラーサイズ（4mm 角程度）で 15 度程度の振れ角度を加えても過度の局所応力が加わらず，ミラーの平面性がほぼ保持され，且つ，ミラー最小共振モードがミラー回転方向になるようにミラー部の設計を進めていたが，この構造では 30V の駆動電圧では 3 度程度のミラー回転角しか得られず，ミラーを大きく振れさせるには，非常に大きな駆動電圧が必要になることがわかった。

そこで，独自アイデアによるミラー部構造の設計を新たに行い，本プロジェクトで製作するミラーデバイスに採用した。静電駆動ミラーデバイスの構造を図 2.1.2-1 に示す。デバイス構造はミラ

一部、駆動用の垂直静電アクチュエータ部、およびトーションビームから構成される。可動電極部（可動櫛歯）と固定電極部（固定櫛歯）からなる垂直静電アクチュエータはミラー部の両側に対称に配置し、固定櫛歯を押し下げて、可動櫛歯と固定櫛歯の間に段差がつくように設計した。この段差によって、電圧を印加することで可動電極部と固定電極部の間に静電引力が発生し、ミラー部がトーションバーを軸に回転運動することで反射光の向きを変えることができる。また、アクチュエータ部とミラー部の間にはスリットがあるため、大きなミラー振れ角度が実現できるほか、駆動時におけるミラー部のたわみ変形も防ぐことができ、振れ角度が大きい場合でもミラーの平面性がほぼ保持される。ミラー平面性の詳細は別項で報告する。



図V.2.1.2-1 静電型ミラーデバイスの構造：上図はトップビュー図，下図は断面図

ミラーデバイスの全体寸法は、これまでオリンパス（株）が開発したシリコン製ミラーとの性能比較や評価を行えるように、オリンパス（株）のシリコン製ミラーデバイス寸法と等しい12mm × 12mmとした。ミラー部の面積は2mm × 2mmに決定した。

これまでの製作プロセスの経験上、最小のL/S（ラインアンドスペース）5 μ m/5 μ mであり、ミラーデバイスの櫛歯の幅と櫛歯間のギャップを5 μ m/5 μ mにした。また、製作プロセスの確立を考慮

し、アスペクト比を 10，デバイスの厚みを 50 μm に設定した。さらに，目標①を達成するためのビーム寸法を以下の数値解析により決定した。

可動電極部と固定電極部の間に電圧 V を印加すると(1)式で表される静電引力が発生する。

$$F_{\text{静電}} = n \times \epsilon_r \epsilon_0 \frac{l_{\text{ovl}}}{g} V^2 \quad (1)$$

但し， n は可動電極の櫛歯数， ϵ_0 は真空の誘電率， ϵ_r は空気の比誘電率， l_{ovl} は固定櫛歯と可動櫛歯のオーバーラップ長， g は櫛歯間ギャップ長であり，下記の値を使用した。

$n = 233$ (アクチュエータの寸法と櫛歯幅・ギャップの寸法から計算)；

$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ (F/m)； $\epsilon_r = 1$ ； $l_{\text{ovl}} = 140$ (μm)； $g = 5$ or 7 (μm)

得られた静電力および表 V.2.1.2-2 に示す機械特性パラメータを用いて構造解析を行った。構造解析モデルを図 V.2.1.2-2 に示す。駆動電圧，ビーム寸法振れ角度，共振周波数の相関関係を表 V.2.1.2-3 にまとめた。数値解析で得られた駆動電圧と振れ角度の対応は図 V.2.1.2-3 に示す。

表 V.2.1.2-2 ポリマー材料 (PMMA) とシリコンの機械的特性

	ヤング率 (GPa)	ポアソン比	密度 (g/cm^3)
PMMA	3.0	0.35	1.2
Si (3.2.10)	169	0.065	2.33

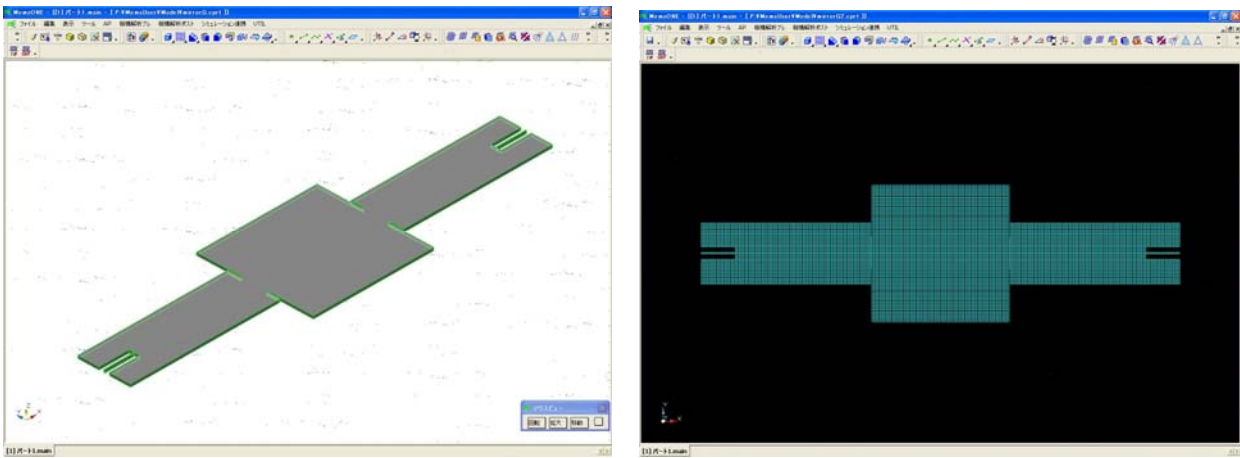


図 V.2.1.2-2 ミラーデバイスの解析モデルとソリッドメッシュ

表 V.2.1.2-3 構造解析結果

	ビーム寸法(μm) (長さ \times 幅 \times 厚み)	櫛歯幅/ギャップ (μm)	駆動電圧 (V)	振れ角度 (deg)	共振周波数 (Hz)
PMMA	500 \times 15 \times 50	5/5	27	5	244
		5/5	38	10	244
		7/7	38	5	244
Si	500 \times 15 \times 50	5/5	203	5	1266

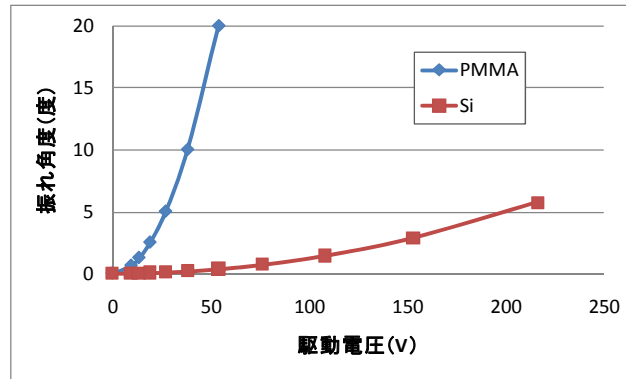


図 V.2.1.2-3 解析結果：駆動電圧と振れ角度の対応

垂直静電アクチュエータでは可動電極の櫛歯と固定電極の櫛歯の垂直変位が一致すると、垂直方向にそれ以上動かなくなり、その時のミラー部の振れ角度が最大角度となる。デバイスの厚み（櫛歯の厚み）は $50\mu\text{m}$ なので、今回のミラーの最大振れ角度は 5 度である。表 V.2.1.2-3 に示すように、同じ寸法のシリコンミラーにおいて同じ振れ角度を実現しようとする、その駆動電圧は PMMA ミラーの駆動電圧より 7.5 倍大きくなる。しかし、共振周波数についてはシリコンミラーの方が PMMA ミラーよりも 5 倍大きい。

- ミラー部平坦度解析

ポリマーは柔軟性に富むため、PMMA 製の静電駆動ミラーとして従来からよく用いられているミラー片に櫛歯がある構造を採用すると、比較的大きなたわみ変形が観察される。しかし、本プロジェクトにおけるデバイス構造（図 V.2.1.2-4）ではアクチュエータ部とミラー部の間にあるスリットの効果によって、駆動時におけるミラー部のたわみを防ぐことができ、最大振れ角度（5 度）においてもたわみによるミラー中央部の凹み d はわずか $0.3.2.12\mu\text{m}$ である。ミラー幅 $W = 2\text{mm}$ より曲率半径 R を計算すると、 $R = 4.45\text{m}$ ときわめて平坦性が高いことがわかる。（従来の構造における曲率半径はたかだか数十 cm である。）

さらに振れ角が 5 度のミラー平面を 4 次までの多項式展開で表現し、光学解析ソフトウェア CODE V を用いてミラー特性を解析した。ミラーの反射光路を図 V.2.1.2-4 に示す。反射光はレンズのように焦点を結ぶわけではないので、少しでも歪みがあると点像関数は図 V.2.1.2-5(b) のようにブロードに分布する。また、横収差プロット（図 V.2.1.2-6）は典型的なデフォーカス状態を示しているが、図 V.2.1.2-6 の X 方向（回転軸に沿う方向）・Y 方向（回転軸からミラー端に向かう方向）ともにほぼ直線であり、OPD（光路差）収差（図 V.2.1.2-7）もミラー中央部できわめて小さく、図 V.2.1.2-8 に示したディストーショングリッドのようにほとんど歪みのない反射像が得られる。歪みが非常に小さいため図 V.2.1.2-8 ではわかりにくいですが、反射像の動径方向ディストーションの比率は +Y 方向のミラー端で 1.0029（わずかに拡大）、-Y 方向のミラー端で 0.9968（わずかに縮小）である。

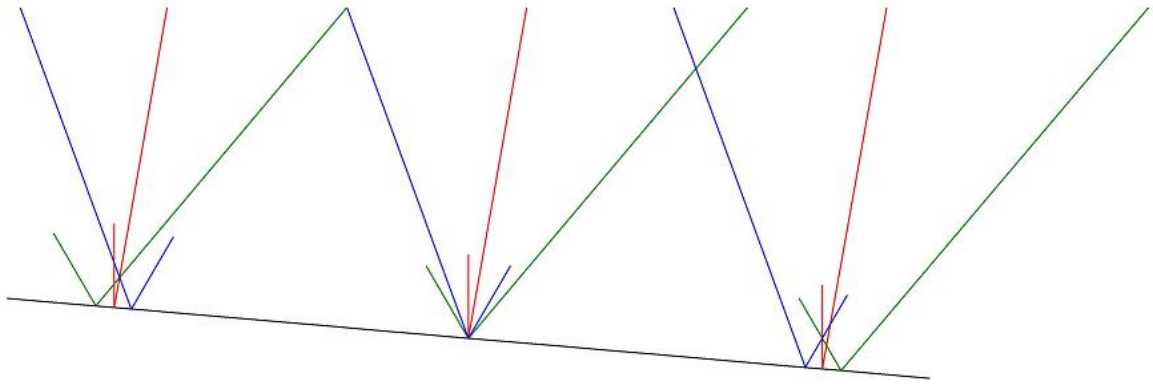
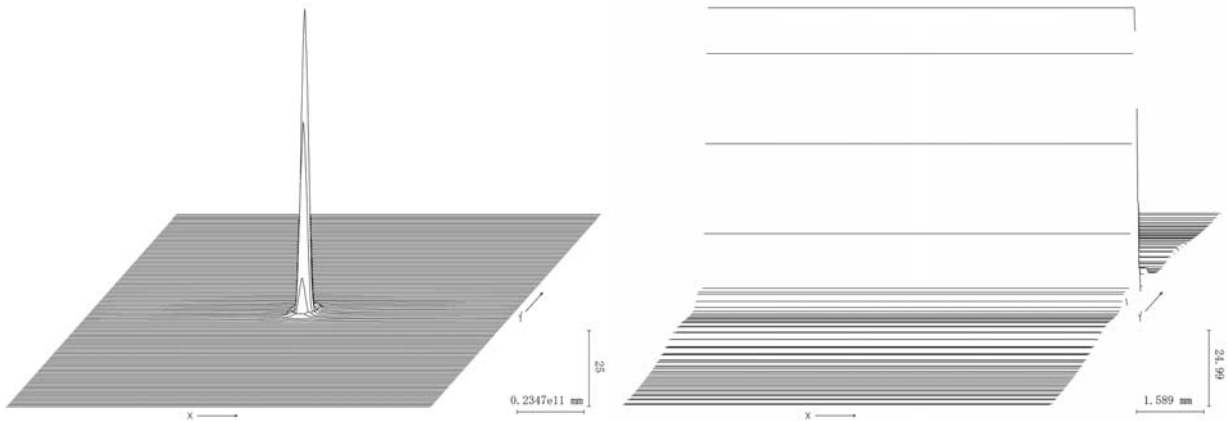


図 V.2.1.2-4 ミラー振れ角 5 度での反射光路 (赤 : 入射画角 0 度、青 : +30 度、緑 : -30 度)
短い線が入射光、長い線が反射光



(a)

(b)

図 V.2.1.2-5 入射画角 0 度の白色光*における点像関数プロット

((a) ミラー振れ角 0 度 ; (b) ミラー振れ角 5 度)

*ウェイトは 643nm:0.07; 591nm:0.36; 542nm:0.42; 500nm:0.13; 466nm; 0.02

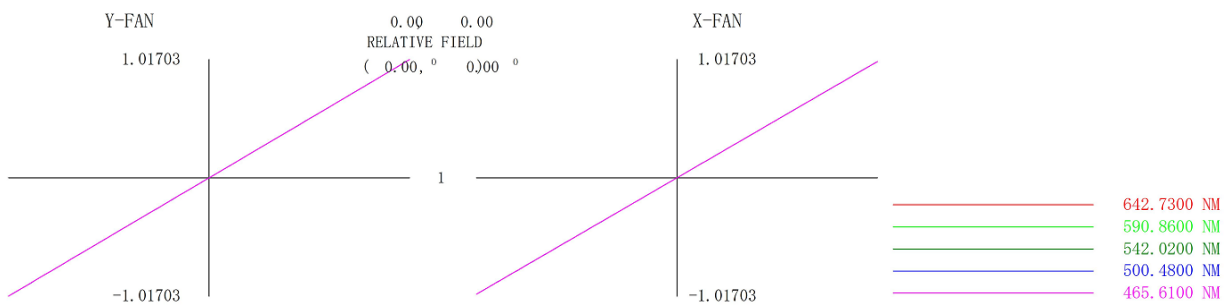


図 V.2.1.2-6 ミラー振れ角 5 度での白色光横収差プロット (入射画角 0 度)

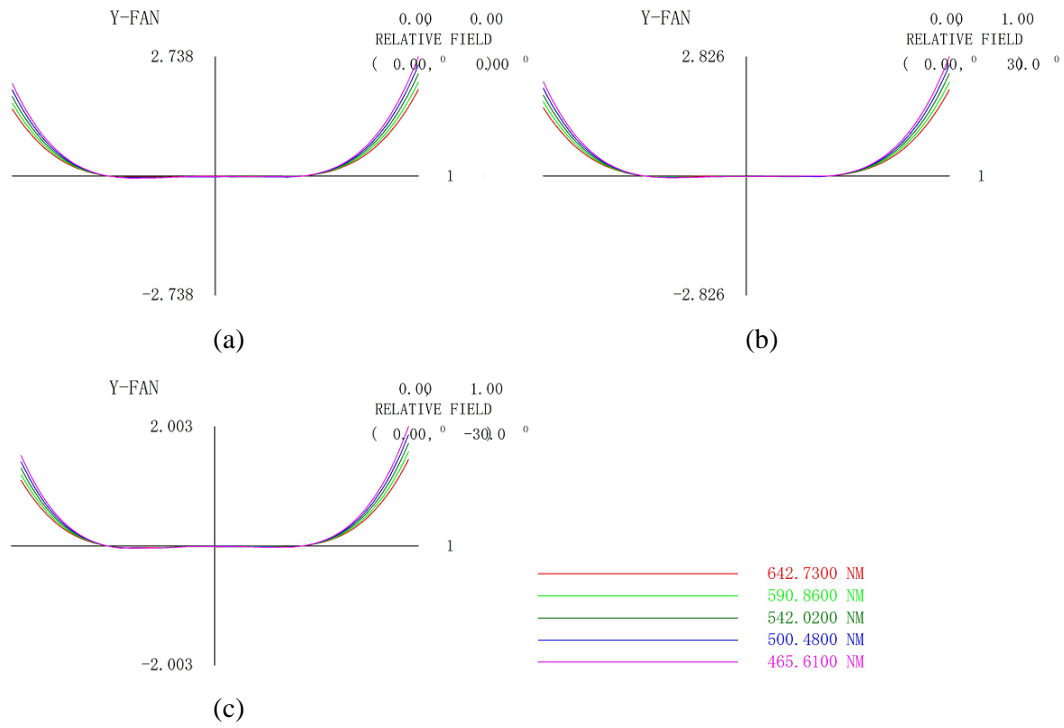


図 V.2.1.2-7 ミラー振れ角 5 度での Y 方向白色光 OPD 収差プロット ()
 ((a) 入射画角 0 度 ; (b) 入射画角+30 度 ; (c) 入射画角-30 度)

Anamorphic Ratio (Y/X) = 1.01533

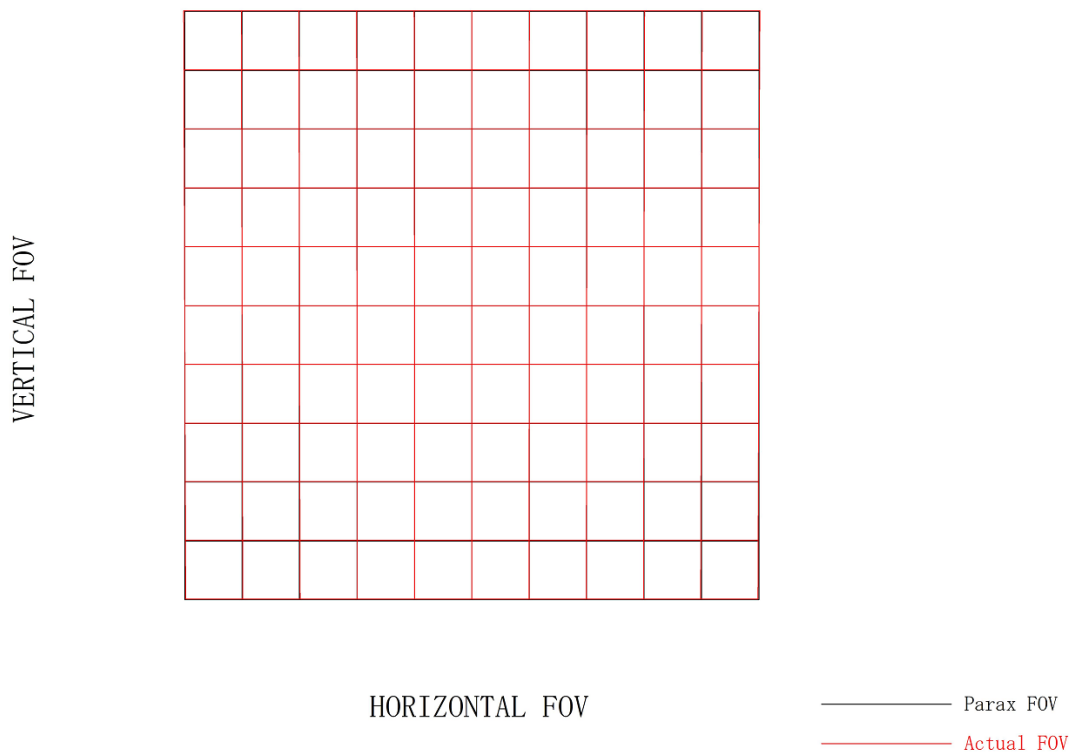


図 V.2.1.2-8 ミラー振れ角 5 度での反射像ディストーショングリッド

(2) -2 ポリマー化プロセスの要素検討 (試作ラインの整備)

ポリマー化の製造プロセスでは、シリコン型を用いてアクチュエータなど構造体を加工する。シリコン型は温室効果ガスであるSF₆やC₄F₈によるエッチング技術により形成するため環境負荷も大きく、型としての寿命も短い。今回の開発では、電鍍成型金型による製造プロセスを確立し、より高精度な構造体の加工と温室効果ガスの削減を目論む。金属型はスタンパーとして100ショット以上可能であり、製造プロセスとしての温室効果ガスの使用量は3.2.100となる。

本プロジェクトで開発したポリマーMEMS 製作プロセスを図 2.1.2-9 に示す⁽¹⁾。ホットエンボス用の金型を製作し、デバイス構造とベース構造をホットエンボスにより成形した(第1工程)。金型製作については次項で説明する。成形サンプルとベースは表面活性化法によって接合し(第2工程)、接合後のサンプル上面にあるホットエンボス後に残る残膜を研磨加工によって除去した(第3工程)。研磨加工を用いることにより、多数のデバイスを同時に加工することが可能となる。研磨加工後のデバイス表面にAuをスパッタリングすることによってコーティングした(第4工程)。垂直静電アクチュエータの機能をもたせるため、可動櫛歯と固定櫛歯の間に段差がつくように固定櫛歯を押し下げた。なお、コーティング時の短絡を防止するため、デバイス側面にはアンダーカットを設けている。次節より各工程の詳細および実験結果を示す。

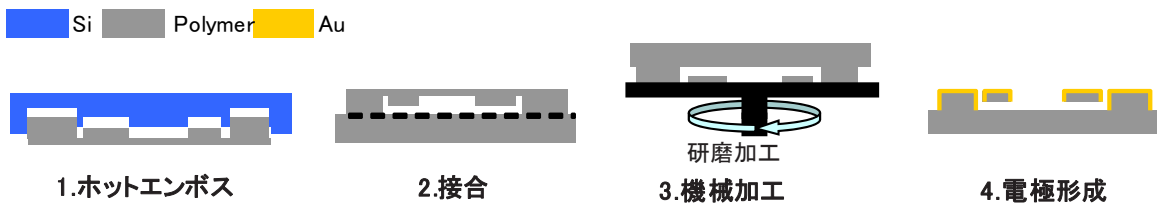


図 V.2.1.2-9 ポリマーMEMS 製作プロセス

また、これまでは20×20mm サイズの試作ラインであったが、本プロジェクトにおいて、成型装置、接合装置及び研磨装置を新設し、4インチ試作ラインを構築した。整備したラインを図 2.1.2-10 に示す。

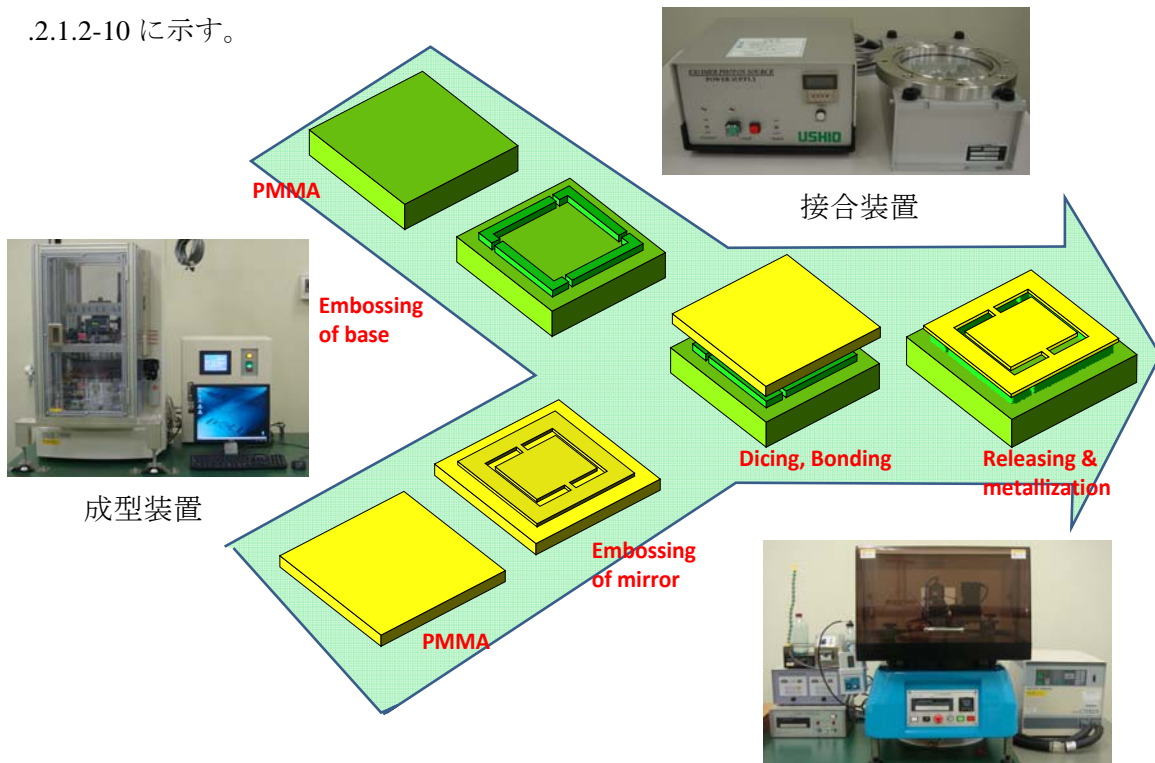


図 V.2.1.2-3.2.1 4インチ試作ライン 研磨装置

● ポリマー成型用型製作プロセスおよび製作結果

ポリマーの成型用型として、ミラーはシリコン及び Ni 電鍍で製作し、ベースはモールド用型材として良く知られている NAK55 を採用した。シリコン型は、シリコンとガラスを接合したタイプ、MEMS デバイスで良く使われる SOI (Silicon On Insulator) タイプとベアシリコンタイプの 3 種類を検討した。それぞれ製作したシリコン型を図 V.2.1.2-12~17 に、ベース用金型を図 V.2.1.2-18 に示す。

シリコン型は、当初ミラーの厚みを $100\mu\text{m}$ としていたためエッチング深さも $100\mu\text{m}$ としていた。しかしながら、目標とする駆動電圧を達成するため櫛歯部の L/S を $5/5\mu\text{m}$ としたため、アスペクトとしても 20 程度と大きく、離型時において櫛歯部の型が破損に至るという問題があった。特に接合タイプや SOI タイプは強度的にも弱いことから、ミラーの厚みを再設計し型のエッチング深さも $50\mu\text{m}$ と浅くし、試作には最も強度の高いベアシリコンタイプを採用した。また、型の深さ方向の傾斜角度や側壁形状も離型のし易さを大きく左右するため、櫛歯部は順テーバーで側壁のいわゆるスキヤロップの大きさが最小となるエッチング条件を採用した。

一方、シリコン型は耐久性に乏しく都度製作する必要があるため、多くの温室効果ガスを使う。そこで我々は、耐久性があり半永久的に使用可能な低環境負荷である電鍍金型の検討を行った。材質としては電鍍では一般的な Ni を採用した。図 V.2.1.2-19 に Ni 電鍍の製作フローを示す。Ni 電鍍プロセスは、狭ピッチで深さのある櫛歯部を考慮し、シード層形成は Ni 無電解めっき工法とした。また、実際の製作においては櫛歯部の L/S に水準を設けた。図 V.2.1.2-20~23 に製作した Ni 電鍍金型の SEM 像とレーザー顕微鏡によるパターン高さの評価結果を水準別に示す。評価結果より、パターンとしては $20\mu\text{m}$ L/S までは問題なく形成できていることがわかる。しかしながら、 $10/10\mu\text{m}$ L/S までのパターン形成は難しいため、本静電型ミラーデバイスの目標構造である $5/5\mu\text{m}$ L/S への Ni 電鍍金型の適用は見送ることとした。製作にあたっては数社検討を行ったが、安定的に製作できるレベルは $50/50\mu\text{m}$ L/S である。

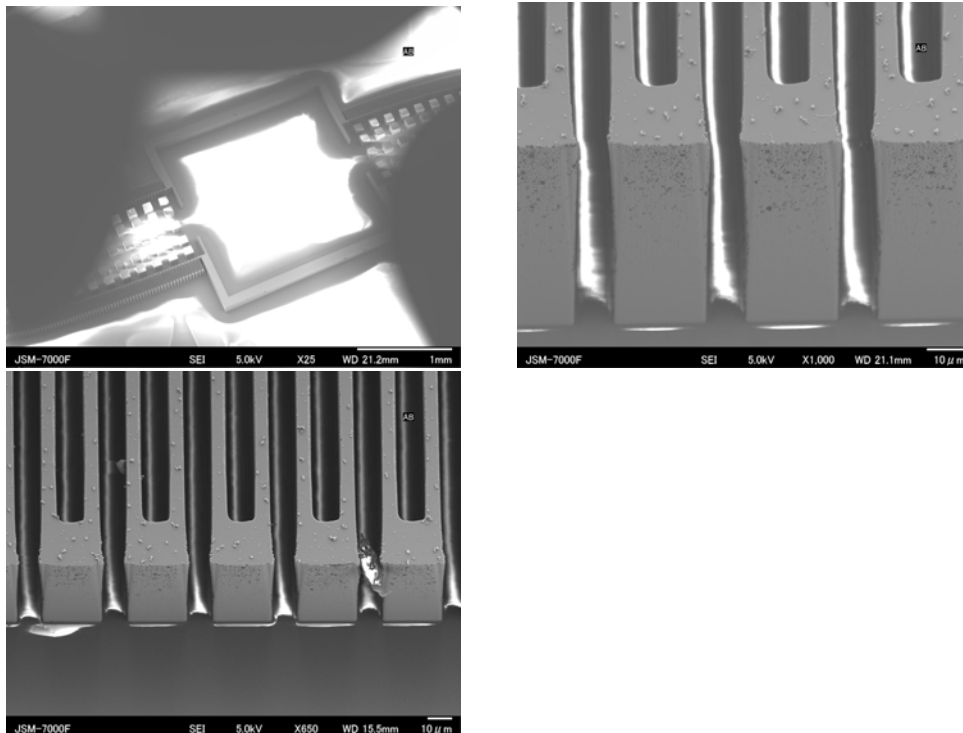


図 V.2.1.2-12 シリコン/ガラス接合タイプ (L/S $8\mu\text{m}$)

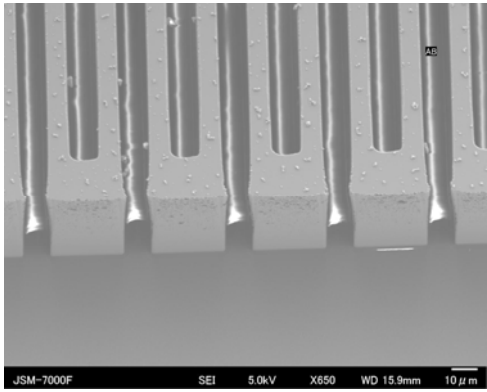
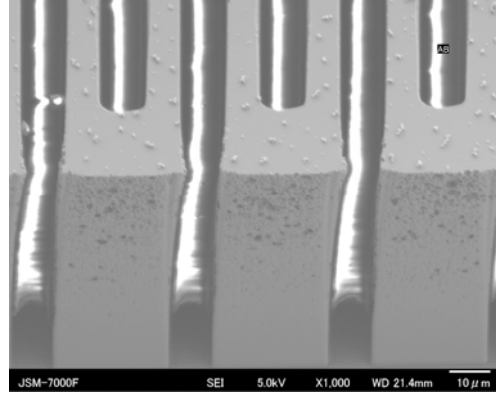
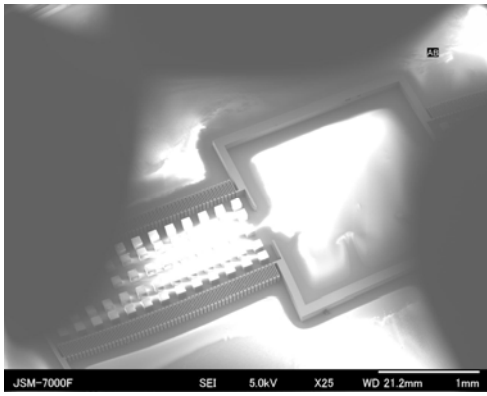


図 V.2.1.2-13 シリコン/ガラス接合タイプ (L/S 10 μ m)

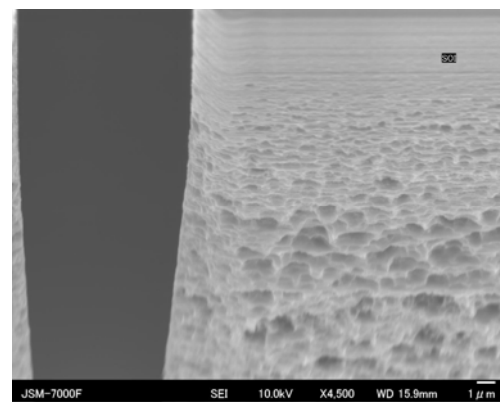
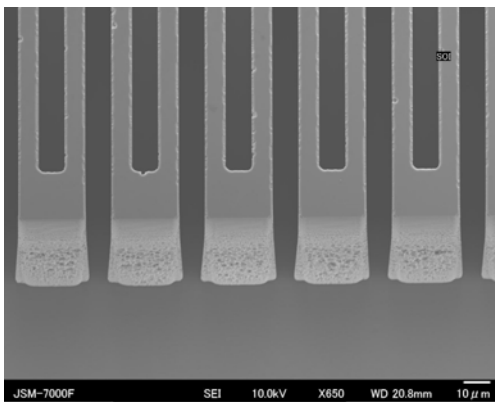
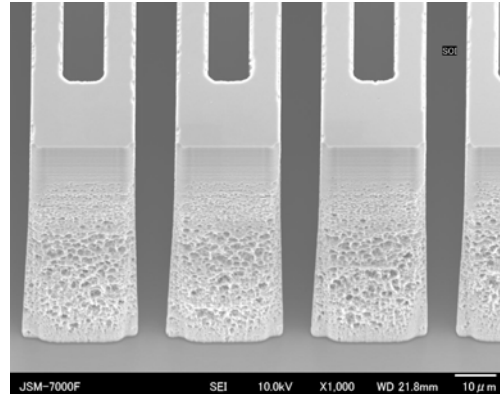
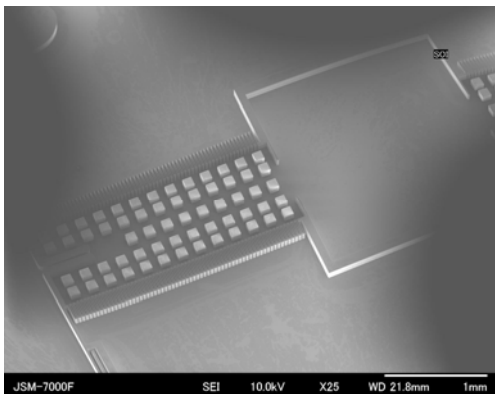


図 V.2.1.2-14 SOI タイプ (L/S 8 μ m)

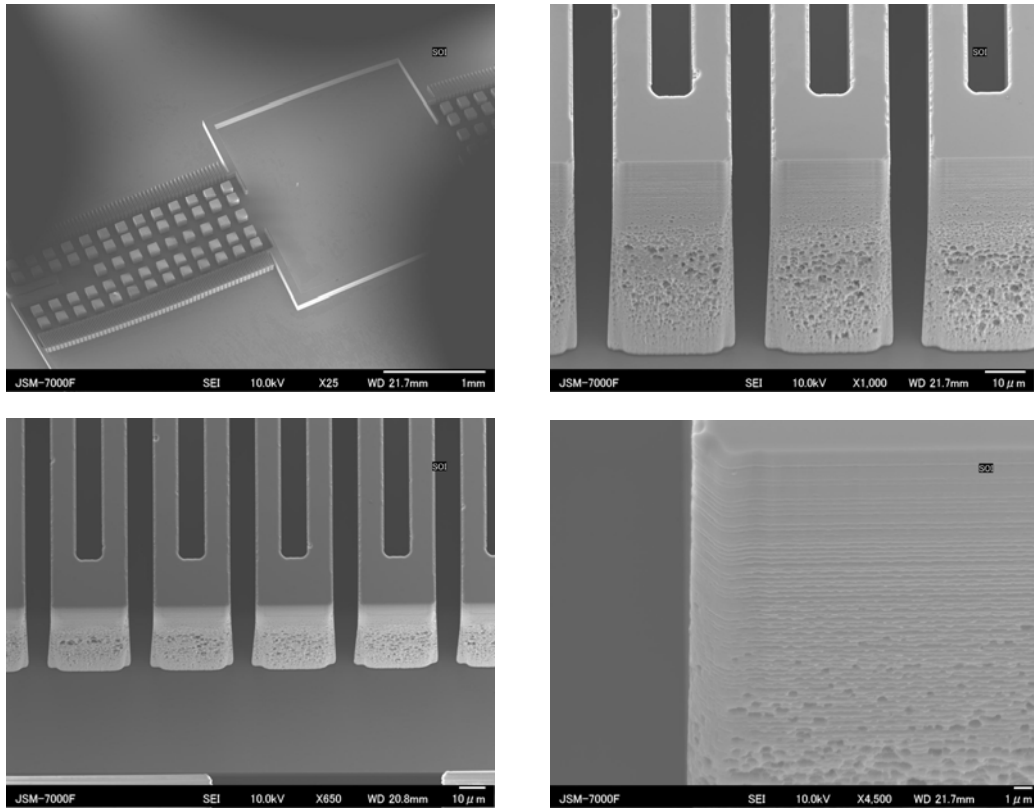


図 V.2.1.2-15 SOI タイプ (L/S 10 μ m)

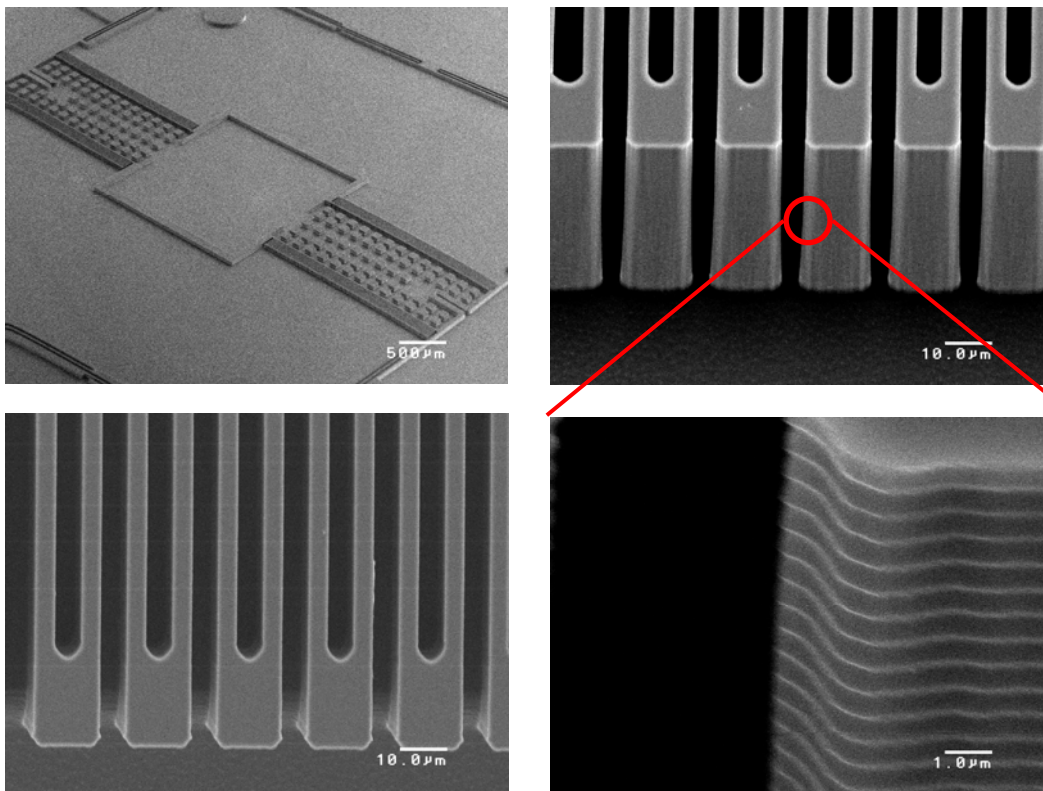
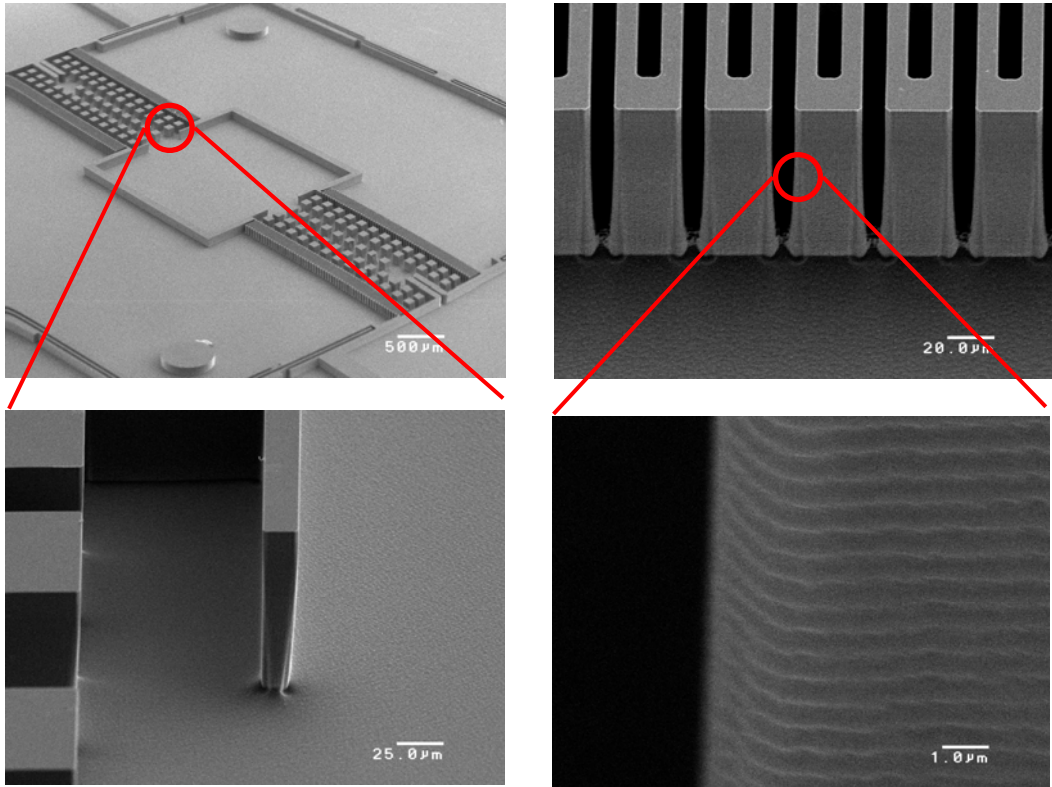


図 V.2.1.2-16 ベアシリコンタイプ (L/S 5 μ m)



図V.2.1.2-17 ベアシリコンタイプ (L/S 10 μ m)



図V.2.1.2-18 ベース基板成型用金型

Ni 電鍍成型金型製作フロー

シリコン原版製作

②シリコン表面親水性処理 (アッシング)

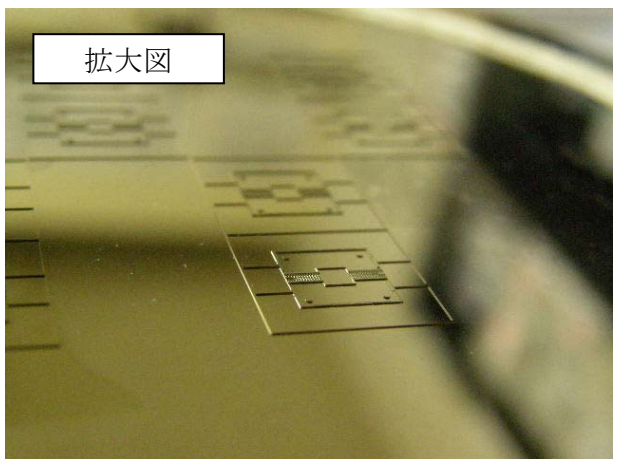
③シード層形成 (Ni 無電解めっき)

Ni 電鍍造 (0.3mmt)

⑤シリコン溶解 (22%TMAH)



シリコン溶解前のウエハ



シリコン溶解後のウエハ

図 V.2.1.2-19 Ni 電鍍成型金型製作フロー

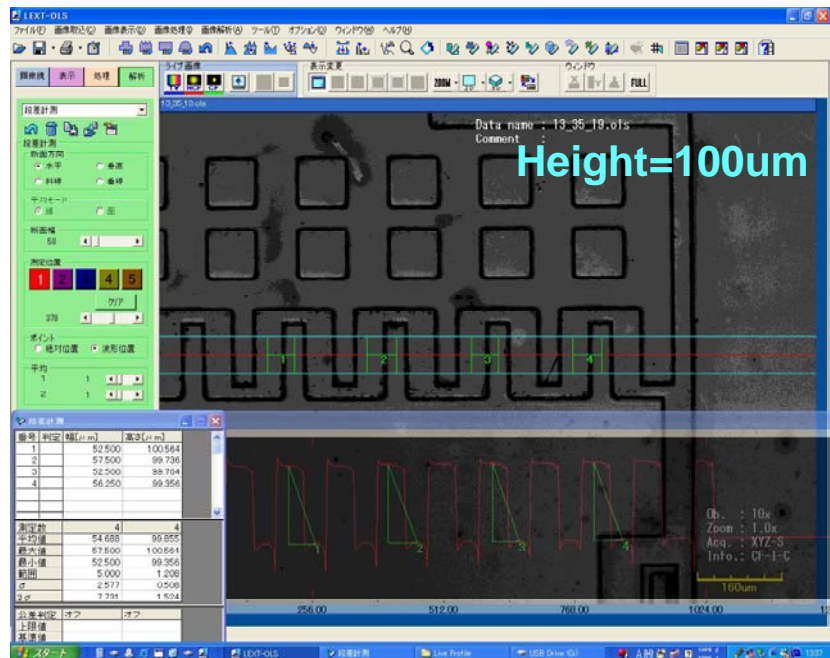
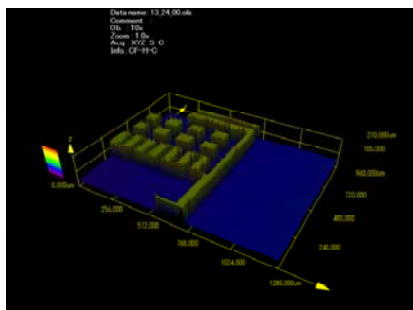
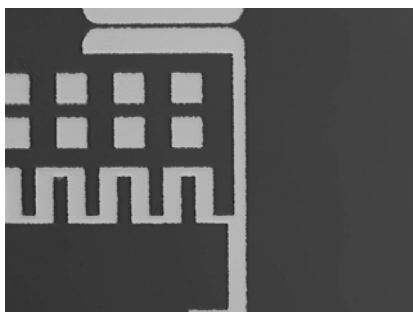
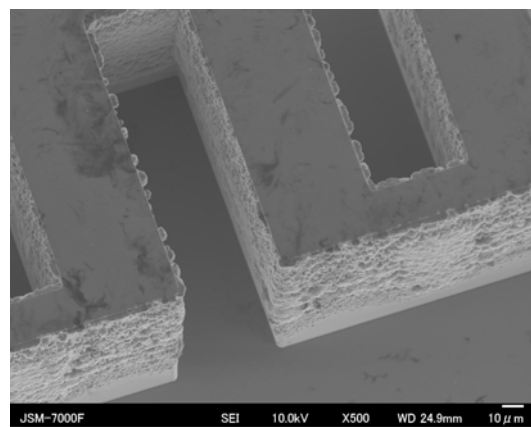
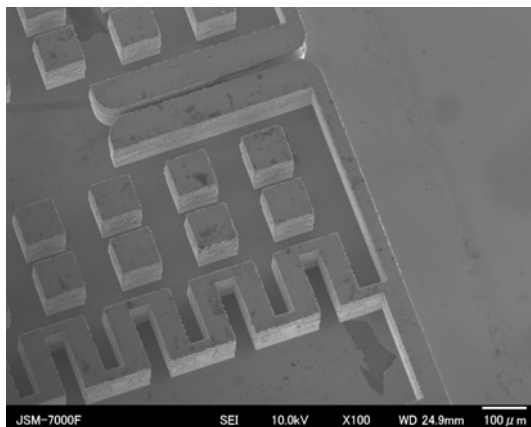
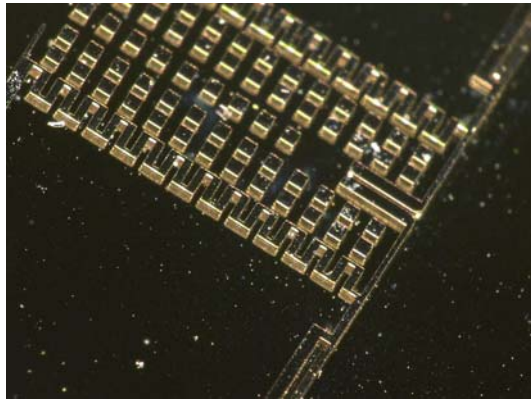


図 V.2.1.2-20 Ni 電鍍 50/50μm L/S パターン評価結果

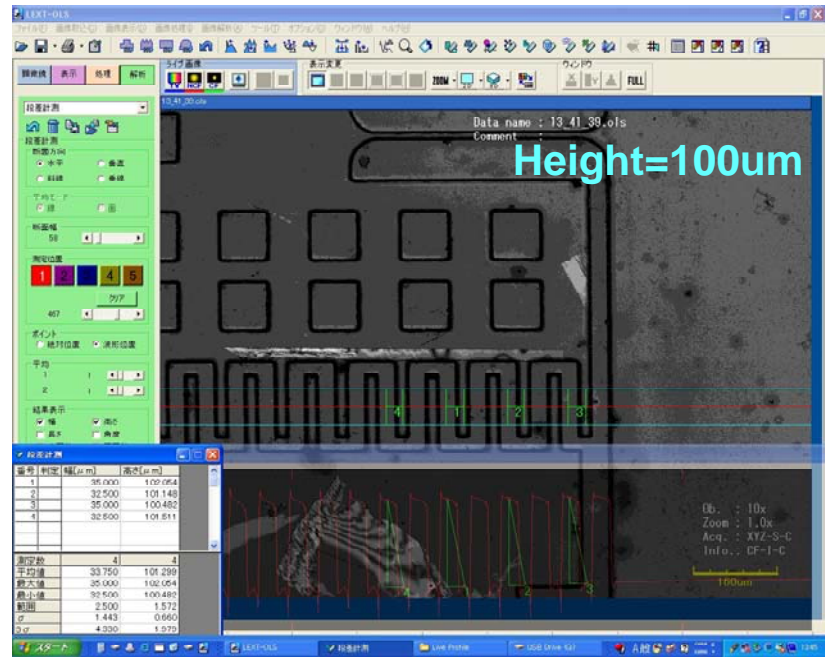
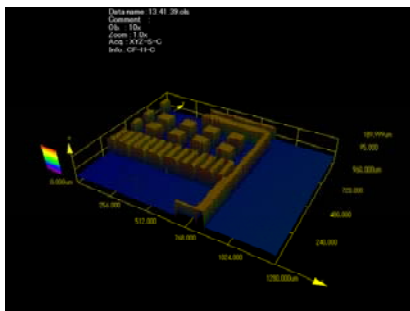
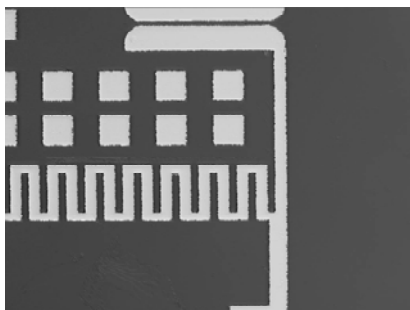
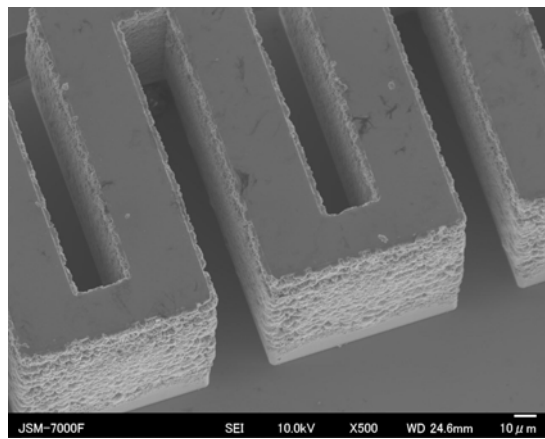
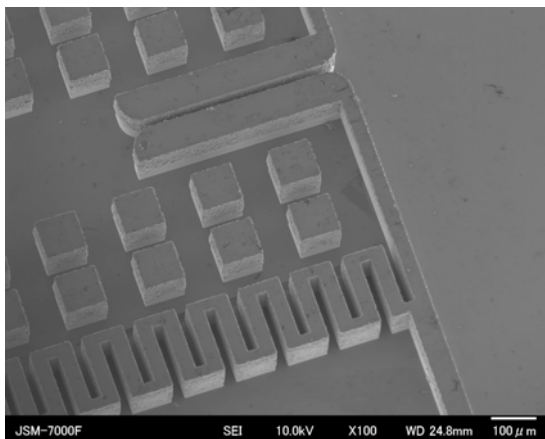
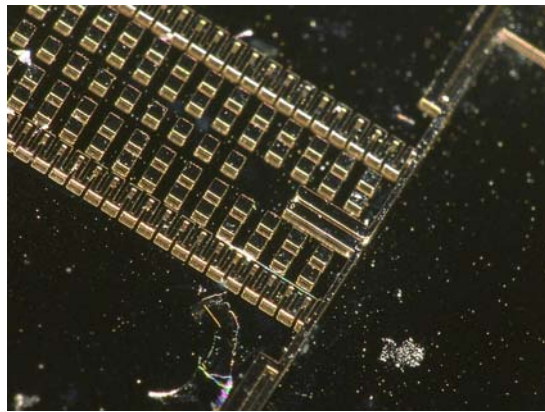


図 V.2.1.2-21 Ni 電鍍 30/30μm L/S パターン評価結果

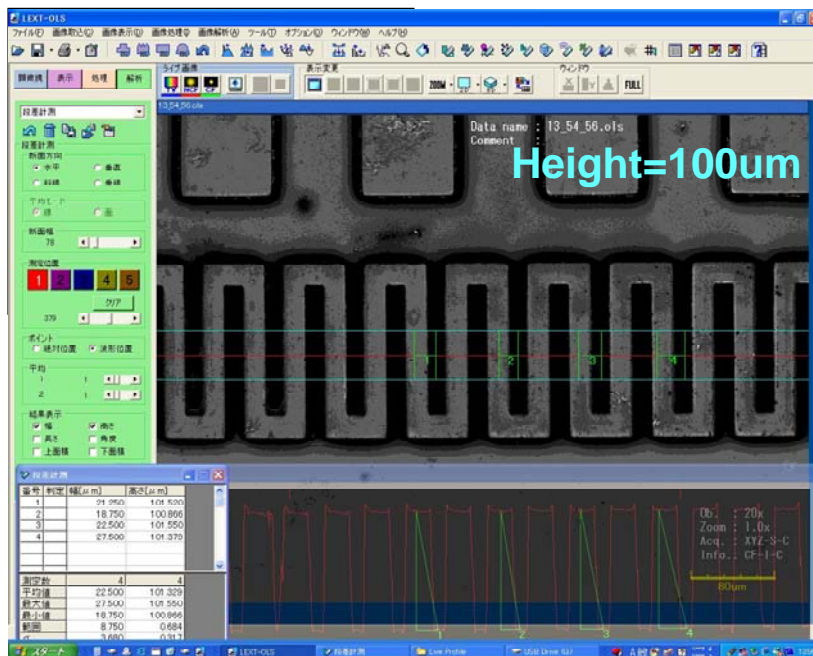
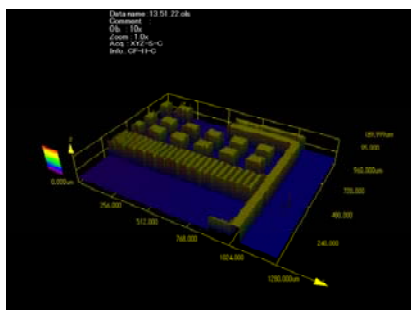
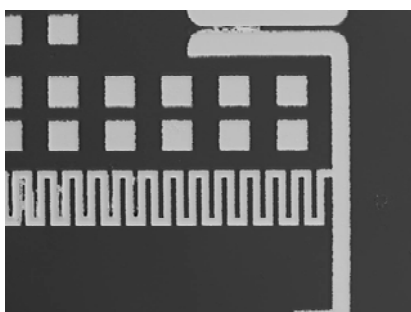
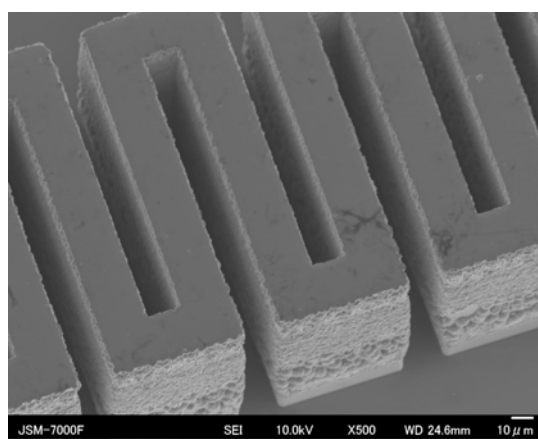
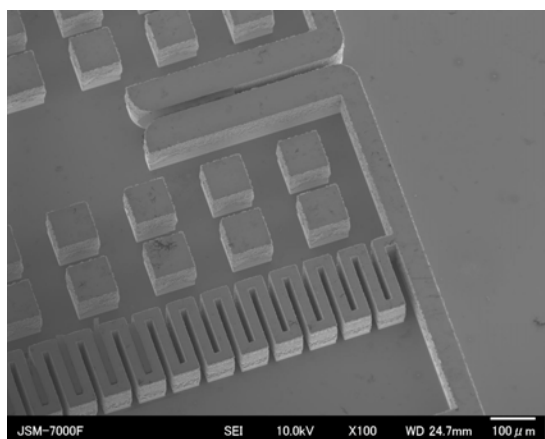
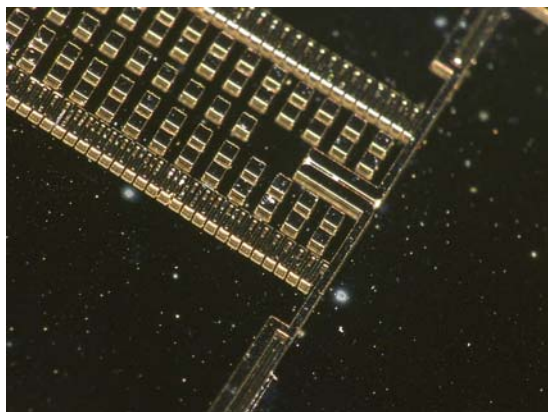


図 V.2.1.2-22 Ni 電鍍 20/20μm L/S パターン評価結果

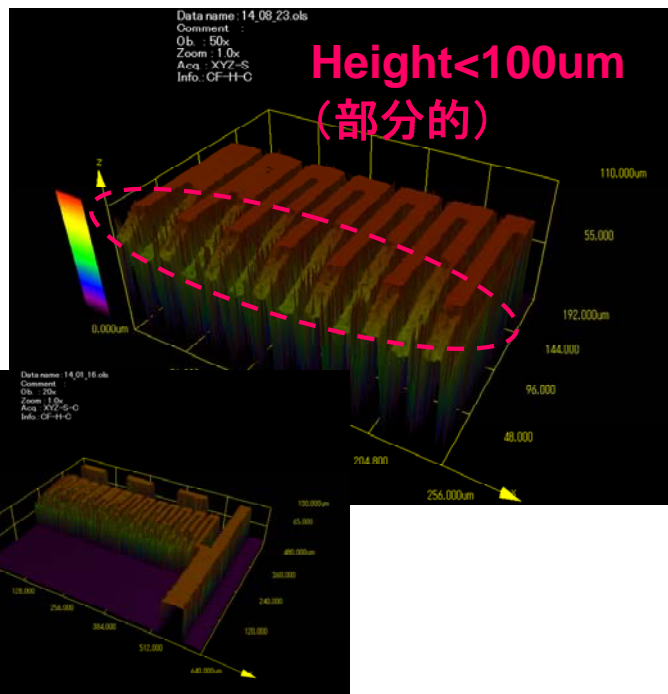
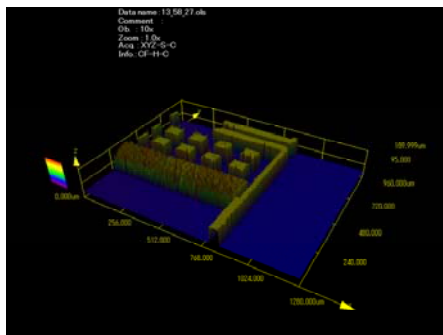
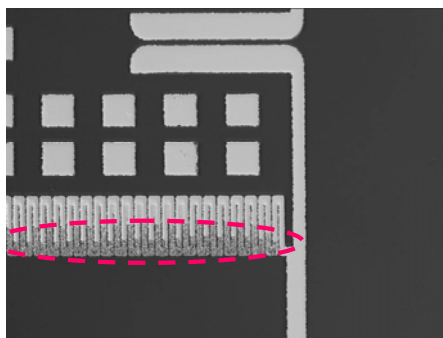
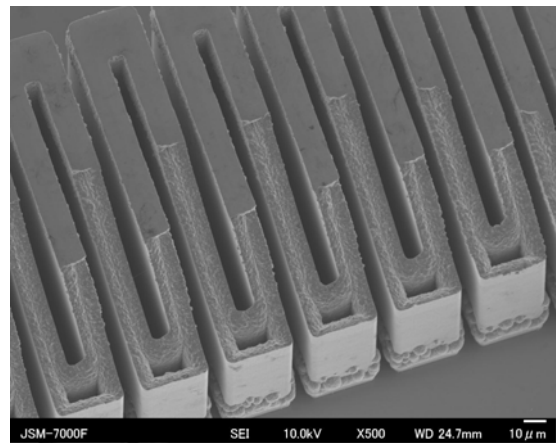
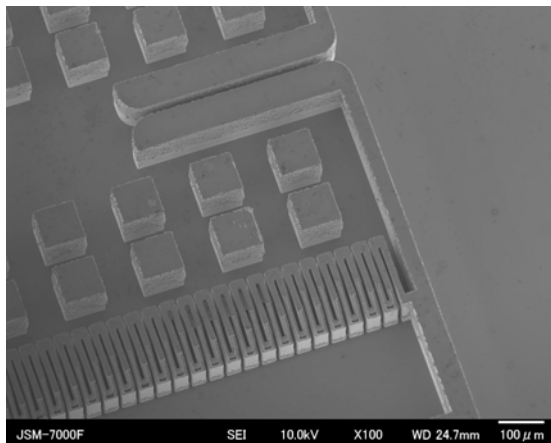
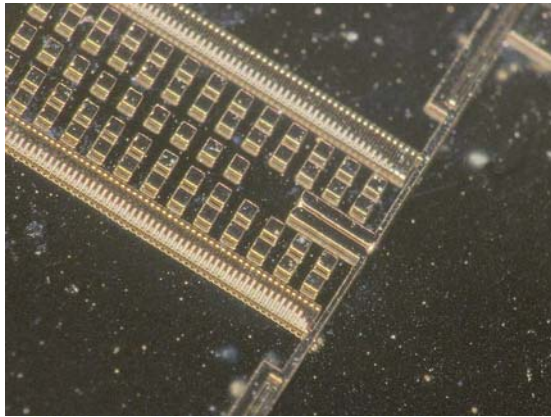


図 V.2.1.2-23 Ni 電鍍 10/10μm L/S パターン評価結果

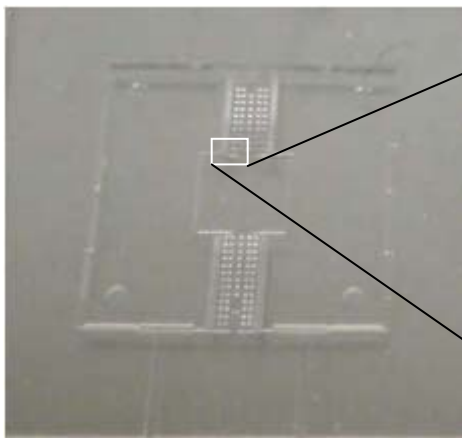
- ホットエンボス実験結果

ホットエンボスは、材料試験機（島津製作所：AG-10kNIS）と本プロジェクトで導入した4インチウエハ用真空プレスチャンバーから構成され、0.001～1000mm/minの範囲で移動速度を制御可能である。このチャンバーには加熱・冷却用の流路を設けた金属プレートを上下に配置した。加工するPMMAには、クラレックス S（日東樹脂工業製）を使用した。

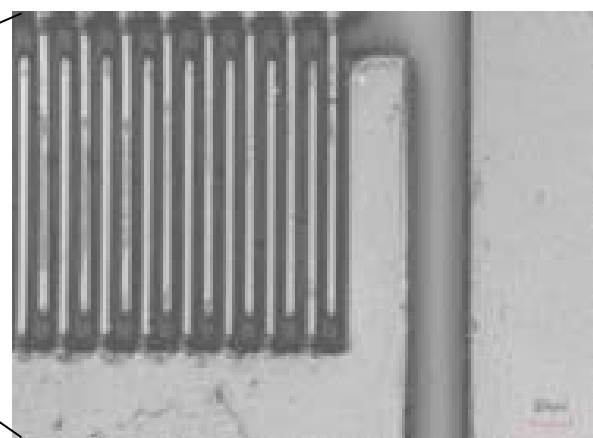
成形条件および手順は以下の通りである。

- 1.樹脂および金型を180℃に加熱
- 2.180℃に到達後、0.1mm/minの速度で加圧していき、2000Nで15分間保持（金型サイズ：15mmx15mm）
- 3.圧力を2000Nに保持したまま冷却開始
- 4.樹脂のガラス転移温度105℃に到達後、加圧を終了
- 5.80℃まで冷却した後、0.01mm/minの速度で離型

成形結果を図V.2.1.2-24、25に示す。



図V.2.1.2-24 ミラーデバイス全体



図V.2.1.2-25 櫛歯部拡大

- 表面活性化による接合結果

接合は、真空紫外線（波長：172nm）を用いた表面活性化による常温接合を行った⁽²⁾。本手法を用いることにより、従来の熔融接着や接着剤の使用で問題となるデバイスの変形および微細パターンの埋没を回避でき、低温での接合が可能となる。

ホットエンボスサンプルとPMMAベースに真空紫外線を10分間照射し、その後サンプルを重ね合わせて70℃に加熱した状態で、4.4MPaで10分間加圧した。

接合後のサンプルを図V.2.1.2-26に示す。変形することなく接合できていることが確認できた。

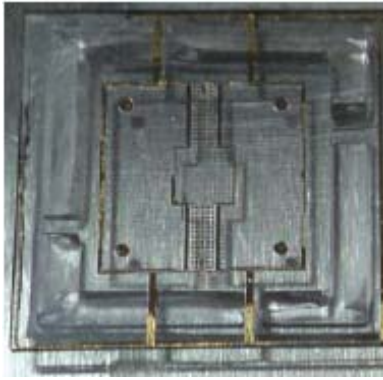


図 V.2.1.2-26 接合後のサンプル

● 研磨加工による残膜除去結果

可動構造を得るため、図 V.2.1.2-9 (ポリマーMEMS 製作プロセス概略図) のようにデバイス層上部にホットエンボス後に残る残膜を除去する必要がある。本研究では、残膜を研磨加工により除去した。

研磨加工は、研磨剤に BAIKALOX(粒度 $3.0\mu\text{m}$, $0.05\mu\text{m}$)を使用し、 1.3kg の荷重をかけながら実施した。粒度 $3.0\mu\text{m}$ で粗加工を行った後、粒度 $0.05\mu\text{m}$ にて仕上げ加工を行った。加工時間は全工程で 40 分程度であった。研磨加工後、デバイス表面に電極用薄膜としてスパッタにて Au をコーティングした。

図 V.2.1.2-27 に示したように、製作したデバイスは残膜が完全に除去されていることが確認できた。また、数 μm 以下程度のバリが発生していたものの、デバイスの破損およびスクラッチ痕などは観察されず、良好な表面状態にて残膜を除去できていることが確認できた。レーザー顕微鏡にて表面粗さを測定した結果、測定値は 30nm (R_a)であった。

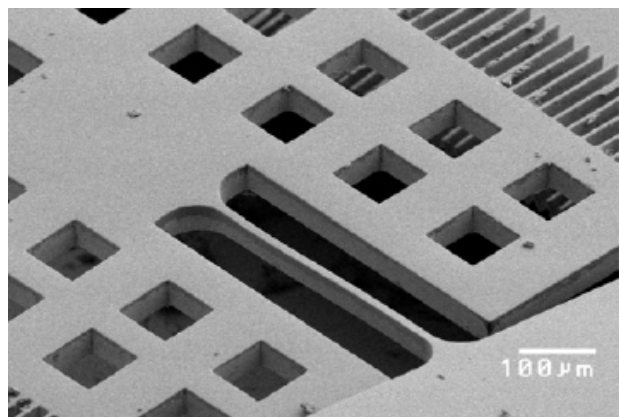
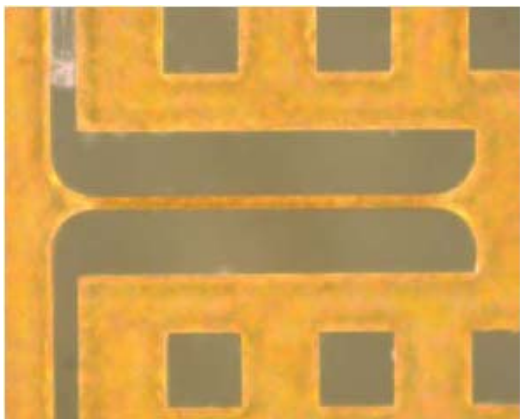


図 V.2.1.2-27 リリースした PMMA ミラーデバイス

(3) 静電ミラーデバイスの要素試作及び性能評価

ポリマーMEMS は、同一形状、同一印加電圧でシリコンに比べてセンサ感度 10 倍以上、アクチュエータ変位 10 倍以上 (根拠: ヤング率が Si に比べ約 $1/50$ 程度)、構造物の可視光域における光透過率が 80%以上 (根拠: PMMA の光学特性から) とシリコンをしのぐ特性が期待される。今回は、アクチュエータ MEMS デバイス(ミラーデバイス)を 2 回に渡り製作し、シミュレーションによ

る性能予測と以下の目標性能数値の比較検証を実施した。合わせて、生体適合性への課題を抽出した。

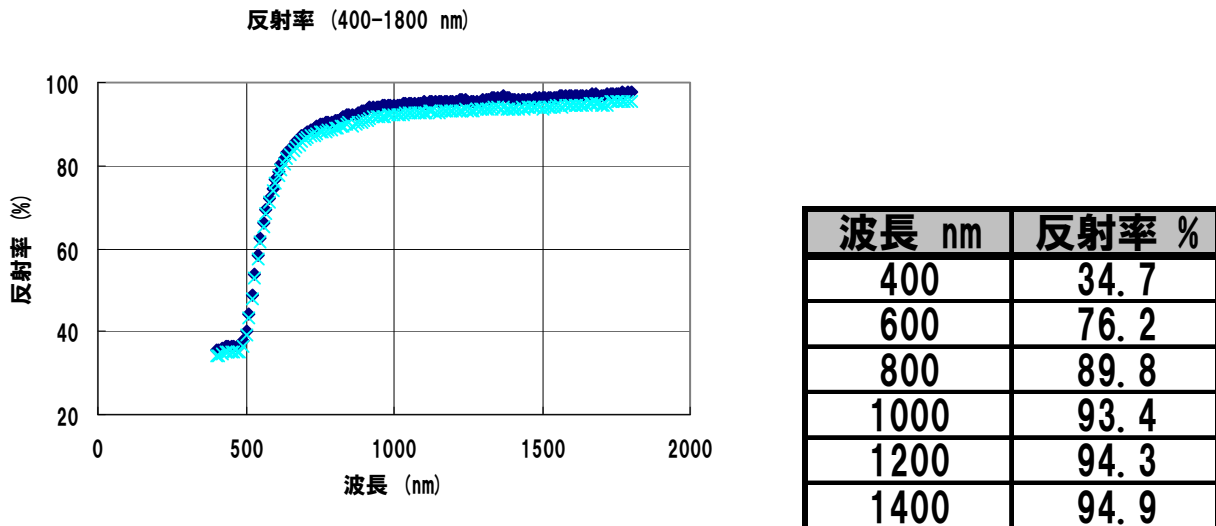
- a.ミラー素子アクチュエータ駆動電圧：30V 以下（参考：シリコン製アクチュエータ 100V）
- b.ミラー素子ミラー部反射率：90%以上（参考：シリコン製ミラー 95%）
- c.ミラー素子ミラー部表面粗さ Ra：100nm 以下（参考：シリコン製ミラー 5nm）

● 駆動電圧評価

ミラーの振れ角を5度とした場合、約28Vで駆動することが確認された。計算結果とは概ね合致しており、同構造のシリコンミラーの約1/3程度となっている。設計時に設定した触れ角10度とした場合の駆動電圧は約38Vとなっており、アクチュエータ部などさらなる構造最適化が必要である。

● ミラー部反射率評価

静電ミラーデバイス全面に、反射膜としてAu200nmの成膜を実施し、ミラー部の反射率測定を行った。各波長における反射率を図V.2.1.3-1に示す。スキャナなどでよく使われる波長1000nm以上で90%以上の反射率となっていることがわかる。



図V.2.1.3-1 ミラー部の反射率測定結果

● ミラー部表面粗さ評価

表面粗さはミラーデバイスのS/N感度に大きく影響する。表面粗さが大きい場合、レーザー光などの乱反射が大きくなり、戻り光の減衰や隣接ミラーへのクロストークなどの要因となる。シリコンミラーデバイスでは、ウエハの初期表面状態を維持しており数nmレベルである。ポリマーミラーデバイスのプロセスでは、残膜を研磨することで構造体をリリースするが、レーザー顕微鏡による評価ではRa=30nmと予想以上の良好な結果であった。

● 生体適合性への課題抽出

ポリマーMEMSセンサやデバイスをバイオ・医療分野へ応用するにあたっては、ポリマー材料そのものの物理的・化学的性質だけでなく、血液適合性や細胞・組織適合性など生体側の反応性を精査する必要がある⁽⁶⁻¹²⁾。医療機器・用具においては、表V.2.1.3-1に示すように生体適合性の評価項目ごとに国際規格（ISO 10993シリーズ）があり、また、米国薬局方（United States Pharmacopeia）でも材料の生体適合性がクラス分けされている。

表V.2.1.3-1 ISO10993 シリーズ

ISO10993-1	リスクマネジメントプロセスにおける評価及び試験
ISO10993-2	動物の保護の要求事項
ISO10993-3	遺伝子毒性，発がん性及び生殖毒性の試験
ISO10993-4	血液との相互作用の試験の選択
ISO10993-5	インビトロ細胞毒性試験
ISO10993-6	埋込後の局所的影響の試験
ISO10993-7	酸化エチレン滅菌処理残留物
ISO10993-9	潜在的な分解生成物の同定及び定量化の枠組み
ISO10993-10	炎症及び皮膚感作性の試験
ISO10993-3.2.1	組織毒性の試験
ISO10993-12	試料調製及び標準物質
ISO10993-13	高分子医療機器からの劣化生成物の同定及び定量化
ISO10993-14	セラミックスからの分解生成物の同定及び定量化
ISO10993-15	金属及び合金からの分解生成物の同定及び定量化
ISO10993-16	分解生成物及び浸出物の毒性動態の試験計画
ISO10993-17	溶出物質の許容限度値の設定
ISO10993-18	材料の化学キャラクタリゼーション

PMMA は医療用として血液浄化器，吸着剤，眼内レンズ，コンタクトレンズ，人口歯・義歯などに幅広く使用されており，これらに使われる PMMA の材料グレードは，発がん性，血液との相互作用，インビトロ細胞毒性，埋め込み後の局所的影響，酸化エチレン滅菌処理，炎症・皮膚感作性などそれぞれ該当する国際規格をクリアしている。また，多くの学術論文において PMMA の各種生体適合性が実証・報告されており，エンボス加工ができるポリマー材料の中では最も生体適合性の優れた材料の 1 つである。

PC も生体適合性に優れた材料であり，とりわけ血液適合性に優れ，中糸空型人工透析器の材料として広く使用されている。また，高密度ポリエチレンは人工弁・人工関節（ソケット部），低密度ポリエチレンやポリプロピレンは人工肺・血漿分離器に用いられるなど，ポリマー材料それぞれの生体適合性の高い項目について適材適所で使用されており，さらに生体内でもつくられている成分（乳酸）のポリマーである PLA も，縫合・接着材料などの加水分解性を利用した医療材料に使われている。これらの流れから，生体適合性ポリマー材料を用いて製作した MEMS デバイスは，体内取り付けや皮膚埋め込み，内服使用などの適所における医療・バイオ分野での応用が考えられ，今後の技術展開が大いに期待される。

実際にポリマー MEMS デバイスをこれらの分野で使用するときには成形後の耐久性評価が課題となる。信頼性試験のほか，成形前後の特性値変化の様子で生体適合性に関する耐久性もある程度予測できると思われる。本プロジェクトにおける成形プロセスでは，表 V.2.1.3-2 に示したように成形前後の特性値変化が小さいことが明らかになっている。

表 V.2.1.3-2 成形温度 180°C, 成形圧力 20MPa における成形プロセス前後の PMMA 特性値

		成形プロセス前	成形プロセス後
物理特性	密度 (g/cm ³)	1.20	1.20
	吸水率 (%)	0.66	0.78
機械特性	ヤング率 (GPa)	2.90	2.93
	ポアソン比	0.36	0.37
熱特性	熱伝導度 (W/mK) 厚さ方向	0.21	0.21
	熱伝導度 (W/mK) 面内方向	0.21	0.21
	比熱 (J/kg·K)	1.40	1.43
	線膨張係数 (× 10 ⁻⁵ K ⁻¹)	8.8	3.2.1.6
光学特性	屈折率	1.489	1.491
	全光透過率 (%)	93	90

(4) まとめ

PMMA による静電型ミラーデバイスは、概ね目標特性をクリアした。また、生体適合性ポリマー材料を用いて製作した MEMS デバイスは、体内取り付けや皮膚埋め込み、内服使用などの適所における医療・バイオ分野での応用は十分考えられることが確認された。

一方、Ni 電鍍成型金型を用いたホットエンボスによるポリマープロセスは、CO₂ 排出の削減においても有効である。表 V.2.1.4-1 にシリコンプロセスと比較して 4 インチウエハ 1 枚あたりの CO₂ 排出量の試算結果を示す。Ni 電鍍金型によるポリマーデバイスでは、シリコンデバイスに対して約 98% 以上の CO₂ 削減となる。これは、SF₆ や C₄F₈ など温室効果ガスの大幅な使用量削減による。特に Ni 電鍍金型の場合は、最初にシリコン原版の製作は必要となるが、型としては半永久的に使えるため、シリコン型によるポリマーデバイスより CO₂ の排出量はさらに小さくなる。

表 V.2.1.4-1 4 インチウエハ 1 枚あたりの CO₂ 排出量 (対象：静電型マイクロミラーデバイス)

単位：CO₂-kg

	プロセス	温室効果ガス	合計	対 Si 削減率 (全体)
シリコン	142.3	7,098.1	7,240.4	
ポリマー (シリコン型)	121.0	354.9	475.9	93.4%
ポリマー (Ni 電鍍金型)	121.0	3.5	124.5	98.3%

※温室効果ガスついて現状は、排ガス処理装置にて対処

※ポリマー (シリコン型) の温室効果ガス排出量は、20 ショット以上使用可能として算出

※ポリマー (Ni 電鍍金型) の温室効果ガス排出量は、シリコン型に対し 100 ショット以上使用可能として算出

※温室効果ガス排出量を除いた場合の CO₂ 削減率は約 15%

(5) 参考文献

- (1) Satoshi Amaya, Dzung Viet DAO, Susumu Sugiyama, "Development of an Efficient and Low Cost Fabrication Process for Polymer MEMS Devices Using Hot Embossing and Polishing Processes", Proceedings of the 27th Sensor Symposium, (IEEJ), 14-15 October 2010, Matsue, Japan, pp. 251-254.
- (2) T. Suzuki, F. Kitagawa, H. Shinohara, J. Mizuno, K. Otsuka and S. Shoji, "Polymer Microchip for Electrophoresis-Mass Spectrometry Fabricated by Hot Embossing and Low Temperature Direct Bonding", Tech. Digest Transducers'07, pp. 1617-1620.
- (3) 「プラスチック成形加工データブック第2版」(社)日本塑性加工学会編 (日刊工業新聞社、2002).
- (4) 松谷守康:「プラスチック技術マニュアル 原料・設計・加工」(理工学社、1989).
- (5) 辻秀人:「ポリ乳酸 植物由来プラスチックの基礎と応用」(米田出版、2008).
- (6) 堀内孝、村林俊:「医用材料光学」(コロナ社、2006).
- (7) 片岡一則、岡野光夫、由井伸彦、桜井靖久:「生体適合性ポリマー」(共立出版、1988).
- (8) 石原一彦:「ポリマーバイオマテリアル 先端医療のための分子設計」(コロナ社、2009).
- (9) 「生体適合材料」筏義人編 (日本規格協会、1993).
- (10) 「バイオマテリアル 材料と生体の相互作用」田中順三、角田方衛、立石哲也編 (内田老鶴圃、2008).
- (3.2.1) 「医療材料・医療機器 その安全性と生体適合性への取り組み」土屋利江編 (シーエムシー出版、2009).
- (12) 「医療用高分子材料の展開」中林宣男監修 (シーエムシー出版、2003).

． 2. 2 スマートプロトタイプング技術開発

8インチ MEMS プロセスラインにおいて、センサを中心とした多機能デバイスの創出や異分野融合型次世代デバイス製造技術開発の研究開発項目②「3次元ナノ構造形成プロセス技術開発」の成果を用いた新規デバイスの製造検討を実施するに当たり、開発・製造コスト上昇の要因となる製造歩留り、性能ばらつき、ファブでの生産性と効率を向上させることが重要な課題となる。生産性・経済性を向上させる手段として大口径ウエハへの移行として新設した8インチ MEMS プロセスラインにおいて各種想定デバイスのテストエレメントグループ (TEG) 試作を実施することにより上記の基盤技術を構築した。

想定デバイスとして、自動車分野を中心に MEMS デバイス (圧力、加速度、ジャイロ) の採用が本格的に始まり、現在では情報通信分野の民生機器である、携帯電話、デジタルカメラ、モバイル PC、ゲーム機器向けに (加速度、ジャイロ、Si マイク、Si 発振子) が採用され、既存用途の市場拡大および新規市場開拓のキーデバイスとなっていることを踏まえて5種類選定し、試作した。

また、異分野融合型次世代デバイス製造技術開発の研究開発項目②「3次元ナノ構造形成プロセス技術開発」の成果を踏まえて2種類の検討を実施した。

これらの試作に先立って、あるいは相前後して、8インチラインに導入したプロセス装置の性能・特性を把握し、要素プロセス開発および面内均一性 (欠陥・ばらつき) 評価を行い、プロセスレシピ、各プロセスの歩留まり、材料、検査・計測・装置制御に関わる情報、知見・ノウハウの収集・整理を行った。

． 2. 2. 1 シリコンベースセンサ TEG の試作

(i) 加速度センサ・ジャイロセンサ・シリコン振動子 TEG の設計・試作

(i) -1.1 設計の原理

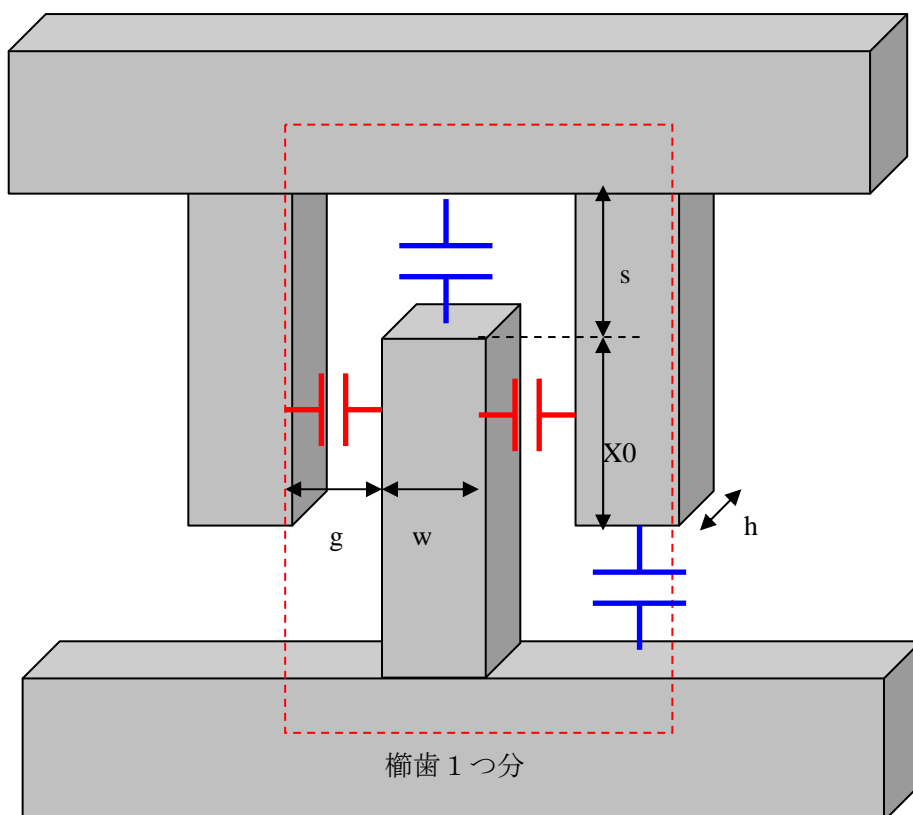
加速度センサ、ジャイロセンサを設計する指針として設定したのは、共振周波数 f_0 の値である。今回作製する MEMS デバイスの設計では、数 kHz オーダーの共振周波数で設計を行った。これは、どのような測定機器を用いても計測が可能な範囲であること、デバイスの駆動が容易な範囲であることが理由である。

共振周波数の設計において必要なパラメータは、質量 m とバネ定数 k である。この2つさえ決まれば、下記の式より計算できる。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

理論上、バネ定数を大きくすればするほど、質量を小さくすればするほど共振周波数は大きくなり、結果としてセンサデバイスの感度は良くなる傾向にある。ただし、実際に作製して動くものを作るには、駆動力や空気の粘性などの影響を大きく受けるため、一概には言えない。また、駆動力を大きくする為にアクチュエータを多く作りこむと、質量が増加し、結果として共振周波数が大きくなっていく。駆動力、質量、バネ定数をど

のようなバランスで設計するかは、各パラメータのトレードオフによって決まる為、最適な値はその目的によって異なる。



図V.2.2.1(i) -1.1-1 歯歯アクチュエータの設計モデル

今回の設計では、1チップの大きさの制限を設け、そこから駆動力と質量を概算し、バネ定数、共振周波数を決定した。歯歯アクチュエータの駆動力は、図V.2.2.1(i) -1.1-1 のようなモデルを考え、計算した。 g は歯歯間のギャップ、 h はSOIの活性層の厚さ、 X_0 は歯歯の重なり長さ、 w は歯歯の幅、 s は歯歯のストローク、 ϵ_0 は真空の誘電率、 n は歯歯数、 x は微小変位となっている。全体の静電容量は、歯歯の可動側の静電容量と、対向側の静電容量を足し合わせ、下記のような式となる。

$$C = 2n\epsilon_0 \left(\frac{w}{s-x} + \frac{X_0+x}{g} \right) h$$

静電容量は変位の関数として表すことができるので、駆動力も同様に変位によって表すことができる。変位と力の関係を求めることができれば、それはバネ定数が求まることを表している。この図V.2.2.1(i) -1.1-1 の場合、力の式は下記のようなになる。 F は駆動力、 V は電圧、 C は静電容量、 x は微小変位である。

$$F = \frac{1}{2} \frac{dC}{dx} V^2$$

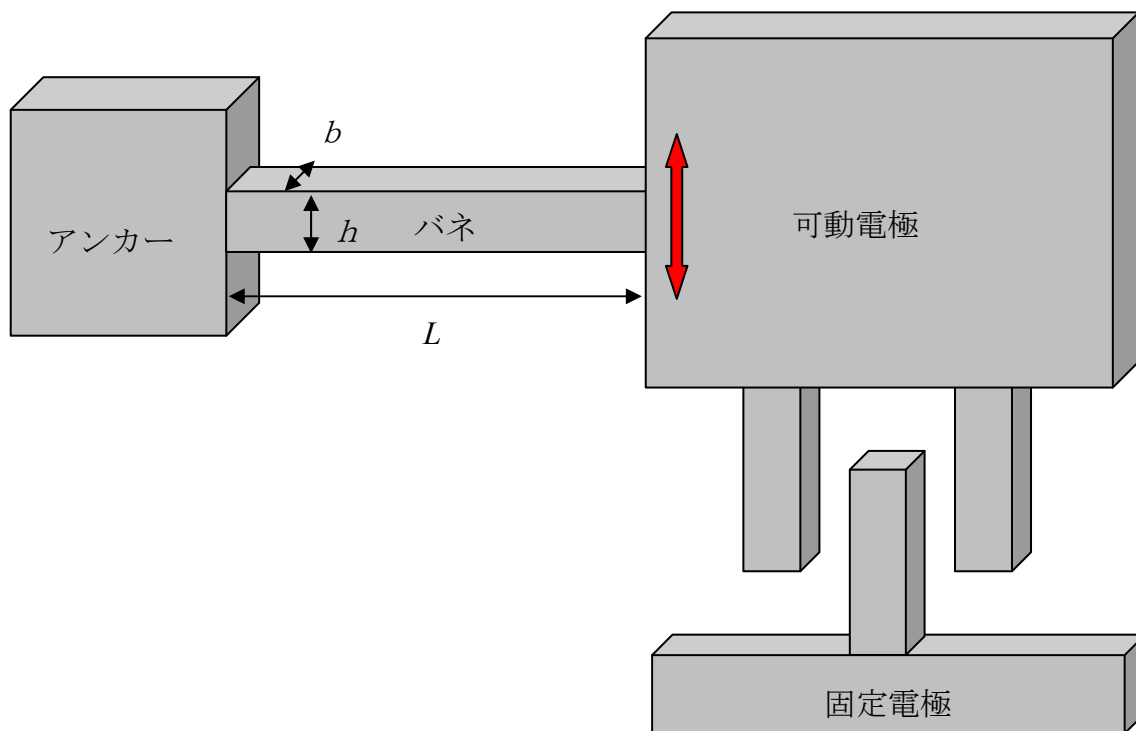
また、材料力学の梁のたわみの式より、構造の寸法からバネ定数を求めることも出来る。カンチレバーのようなデバイスであれば片持ち梁、今回作製するような両端に質量がある

デバイスだと両端支持梁のモデルを用いる。梁の断面形状より、断面二次モーメントを計算し、バネ定数を算出する。

今回の場合、横方向からの力を受けて駆動するので、モデルは図V.2.2.1(i) -1.1-2のようになる。下記は、断面二次モーメント I と両端支持の場合のバネ定数 k の算出式である。

$$I = \frac{bh^3}{12}$$
$$k = \frac{12EI}{L^3}$$

ここで、 b は SOI の活性層の厚さ、 h はバネの幅、 E はヤング率、 L はバネの長さである。この式から分かるとおり、横方向から力を受けるデバイスの場合、バネ定数はバネの幅の 3 乗に比例するため、フォトリソ工程や Si エッチング工程の寸法ばらつきの影響を大きく受ける。そのため、加工装置の面内ばらつきやウエハ間ばらつきを把握し、それを軽減することは非常に重要である。



図V.2.2.1(i) -1.1-2 バネの設計モデル

(i) -1.2 加速度センサ TEG の検討

今回試作する加速度センサ TEG は、図 V.2.2.1(i) -1.2-1 のよう構造となっている。この加速度センサは楕歯型アクチュエータを用いた静電容量型加速度センサとして設計されており、固定電極間に可動電極を有する構造となっている。可動電極は、4つの板バネで支持されている。可動電極はメッシュ構造になっており、活性層側から BOX 層をエッチングすることで、構造体がリリースできるようになっている。固定電極、可動電極には、それぞれアルミ電極パッドを設けており、このパッドにプローバーの針を当てて電氣的測定を行う。アルミパッドは、プローバーの針とデバイスの接触抵抗を軽減する役割がある。

1チップの大きさは、 $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ となっており、その中に加速度センサが2つ設けられている。電極パッドの数は合計6つで、加速度センサ1つに対して3つの電極を有する。

この「1チップ $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ の大きさで、電極が6つ」という設計に基づいて、ジャイロセンサ TEG、シリコン振動子 TEG も設計されている。

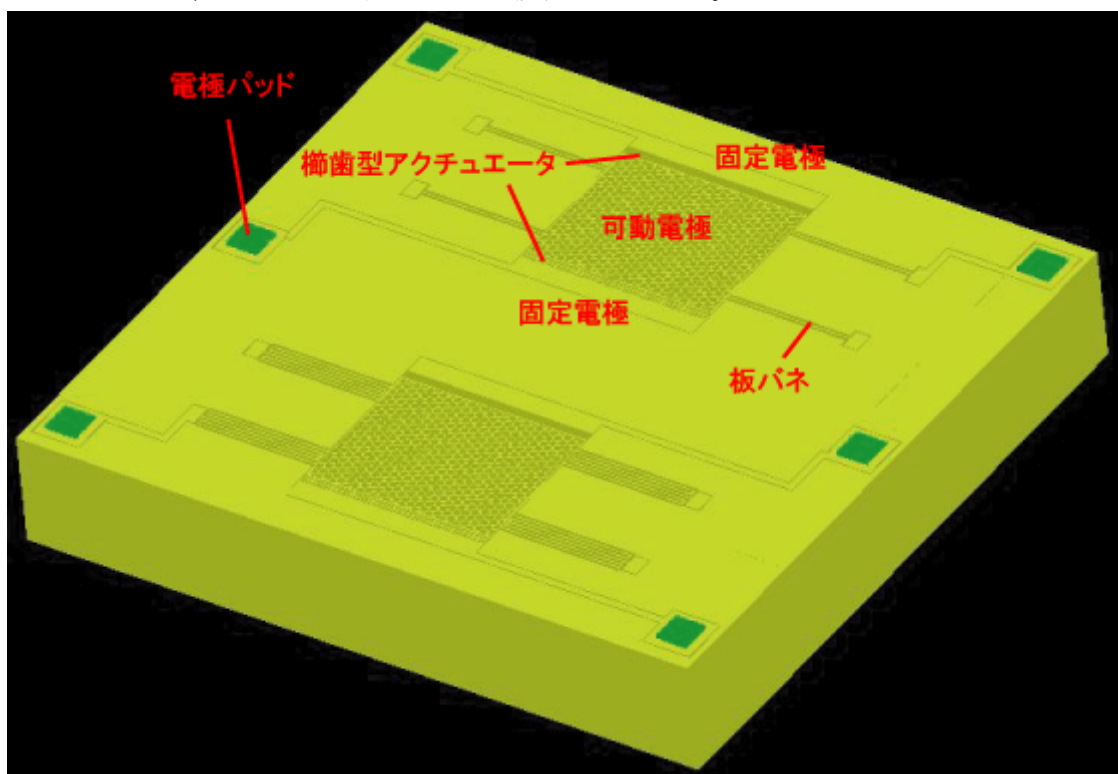


図 V.2.2.1(i) -1.2-1 加速度センサ TEG

具体的な設計値を、表 V.2.2.1(i) -1.2-1 に示す。バネ構造が異なる2種類の TEG を設計・試作している。今回の試作では、共振周波数が数 kHz オーダーのものを狙って設計している。今回設計したデバイスは、 8.0kHz と 5.5kHz の2種類である。この値とした理由は、前項に記述した数 kHz での設計指針を立てたためである。また、他のメーカーの加速度センサにならない、今回試作する TEG についても、楕歯アクチュエータを用いた静電駆動

型とした。

2種類の構造の違いとしては、バネ構造を板バネと折り返しバネにしたことで、バネ定数と質量が異なり、共振周波数が変化した。静電容量は同じ設計にした。

表 V.2.2.1(i) -1.2-1 加速度センサ TEG の設計値

	櫛歯 Gap [μm]	櫛歯数	マス構造	バネ構造	バネ定数 [N/m]	質量 [kg]	静電容量 [F]	共振周波数 [kHz]
A	2	50	メッシュ	板バネ	25.6	1.02×10^{-8}	1.26×10^{-13}	8.0
B	2	50	メッシュ	折り返し バネ	14.9	1.23×10^{-8}	1.26×10^{-13}	5.5

(i) -1.3 ジャイロセンサ TEG の検討

今回作製するジャイロセンサ TEG は、図 V.2.2.1(i)-1.3-1 のような構造となっている。設計はリングジャイロを想定している。構造は加速度センサと似ているが、可動電極がリング形状となっており、さらにセンシング電極が追加されている。リングを駆動させるための電極は、リングの両端に固定電極が 2 箇所あり、ここに交流電圧を印加する。リングには直流電圧を印加し、電気機械結合係数を大きくする。リングを支持するバネは折り返し構造になっており、リングの 4 箇所を支持している。この支持している点は、リングが定常状態で駆動しているときに変位がゼロの点を狙って設計した。リング振動中に回転する力が生じたとき、バネと垂直な方向に振動方向がズレ、センシング電極とバネとのギャップが変化する。このときの静電容量の変化が回転力に比例した値となるので、それを読み取りジャイロセンサとする。

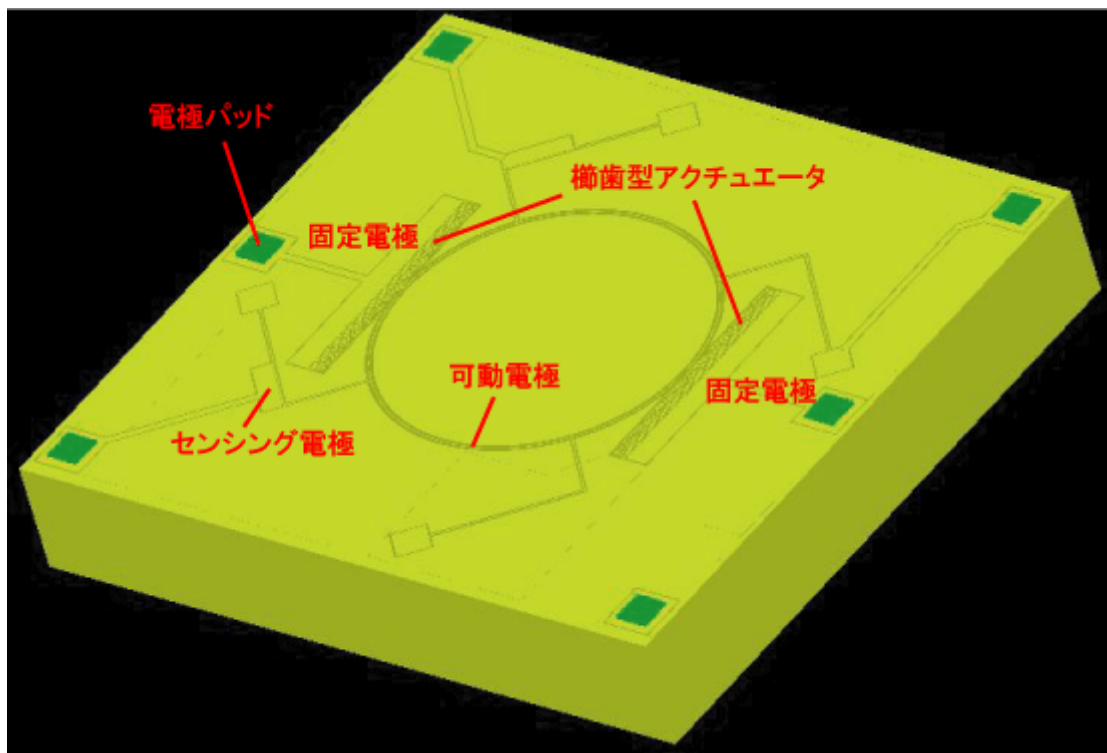


図 V.2.2.1(i) -1.3-1 ジャイロセンサ TEG

具体的な設計値は、表 V.2.2.1(i) -1.3-1 のようになっている。固定電極と可動電極の構造は櫛歯アクチュエータとなっており、そのギャップは $2\mu\text{m}$ とし、その数は 62 とした。電極間の静電容量は、 $7.6 \times 10^{-13}\text{F}$ とした。可動電極のリング半径は $500\mu\text{m}$ で、その質量は $2.43 \times 10^{-9}\text{kg}$ 、バネ定数は 2.1N/m とした。このバネ定数は、あくまでリング部分のみのバネ定数なので、支持バネの値は含まれていない。リングのみが駆動したと仮定した場合の共振周波数は 4.6kHz という設計値にした。この設計値についても、加速度センサと同様

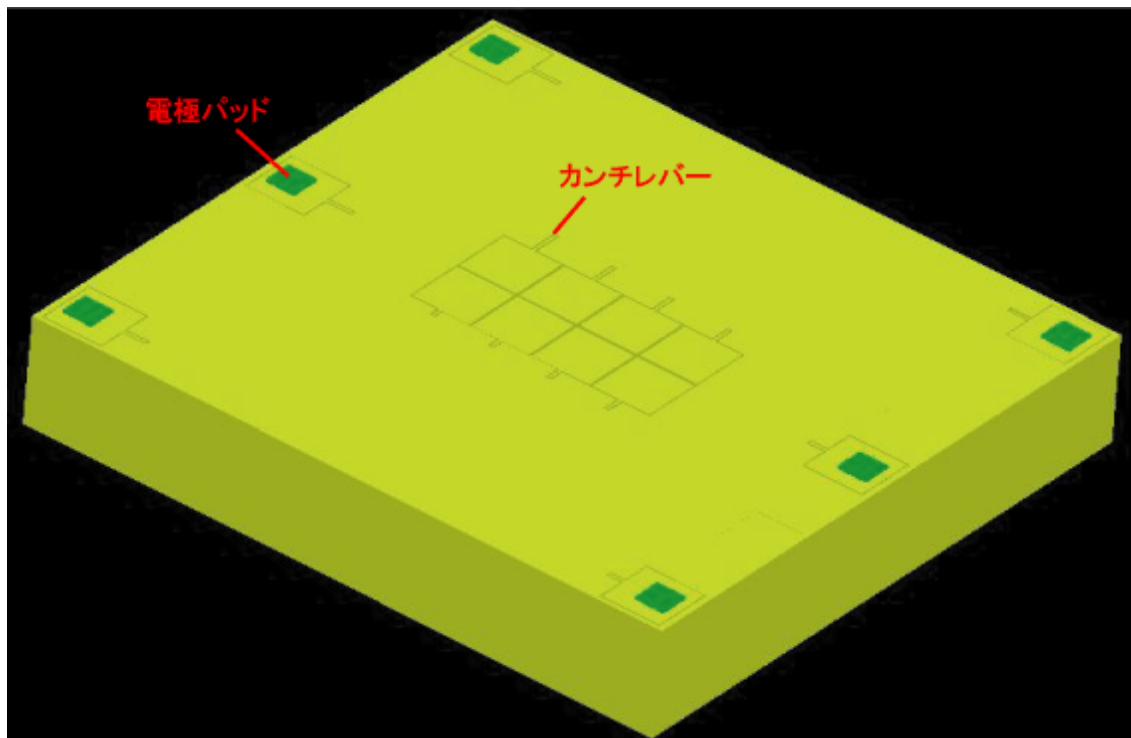
に、一般的なジャイロセンサの動作周波数を参考にした。

表V.2.2.1(i) -1.3-1 ジャイロセンサ TEG の設計値

櫛歯 Gap [μm]	櫛歯数	マス構造	バネ構造	バネ定数 [N/m]	質量 [kg]	静電容量 [F]	共振周波数 [kHz]
2	62	リング	折り返しバネ	2.1	2.43×10^{-9}	7.6×10^{-13}	4.6

(i) -1.4 シリコン振動子 TEG の検討

シリコン振動子の概観図は、図V.2.2.1(i) -1.4-1 のようになっている。長さの異なる 8 つのカンチレバーが並んだ構造となっている。



図V.2.2.1(i) -1.4-1 シリコン振動子 TEG

8つのカンチレバーの設計値で、共通の設計値を表V.2.2.1(i) -1.4-1 にまとめた。このカンチレバーの長さを $30\mu\text{m}$ から $100\mu\text{m}$ まで、 $10\mu\text{m}$ ずつ変更したものを設計した。そのときのカンチレバー長さと共振周波数の関係が図V.2.2.1(i) -1.4-2 のようになる。共振周波数が約 3.4MHz から 38.3MHz までの範囲となっている。この値を設定した理由としては、一般的な水晶振動子の周波数範囲 ($1\sim 20\text{MHz}$) を参考にした。

表V.2.2.1(i) -1.4-1 シリコン振動子 TEG の設計値

カンチレバー厚さ [μm]	カンチレバー幅 [μm]	密度 [kg/m^3]	ヤング率 [GPa]	振動モード定数
25	8	2330	169	1.876

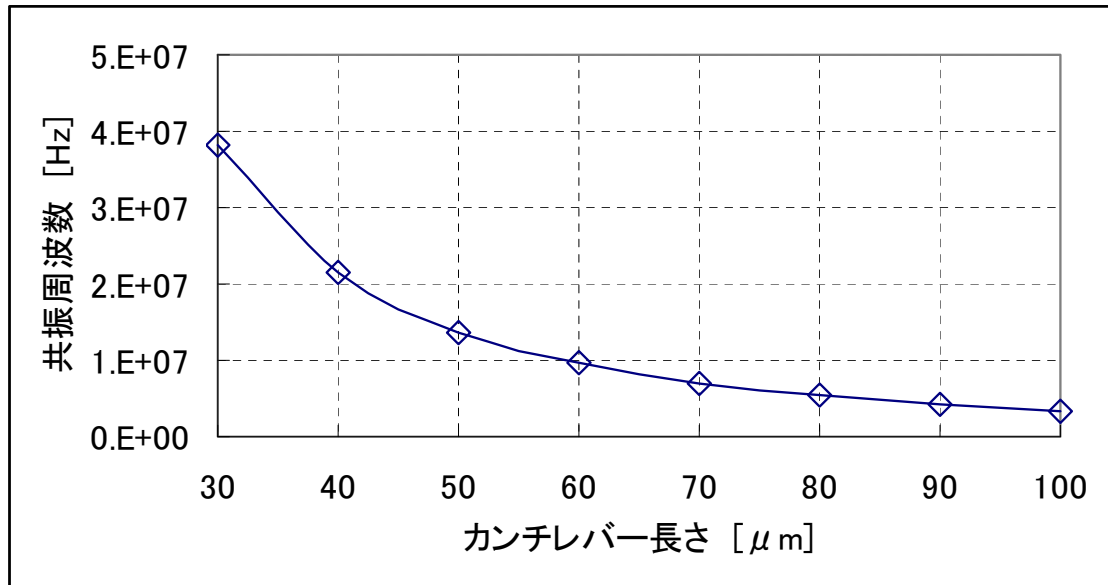




図 V.2.2.1(i) -1.4-2 カンチレバー長さ と共振周波数の関係

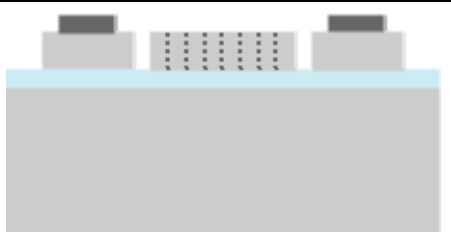
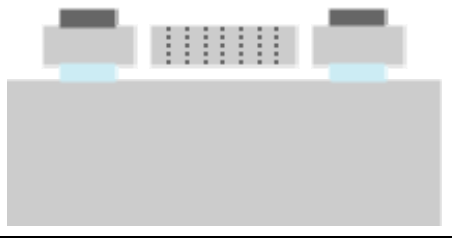
(i) -1.5 センサ TEG のプロセスフロー

今回試作するセンサ TEG は、静電容量型加速度センサ、静電容量型ジャイロセンサ、シリコン振動子の 3 種類とする。本項では、その作製プロセスフローについて説明する。なお、3 種類の TEG の作製プロセスは同じであるため、同ウエハに 3 種類の TEG を一括して作製している。使用するウエハは低抵抗 (0.02 cm 以下) の SOI ウエハとし、活性層 25 μm、BOX 層 1 μm、基盤層 725 μm とした。下記の表 V.2.2.1(i) -1.5-1 は、加速度センサ TEG のプロセスフローである。

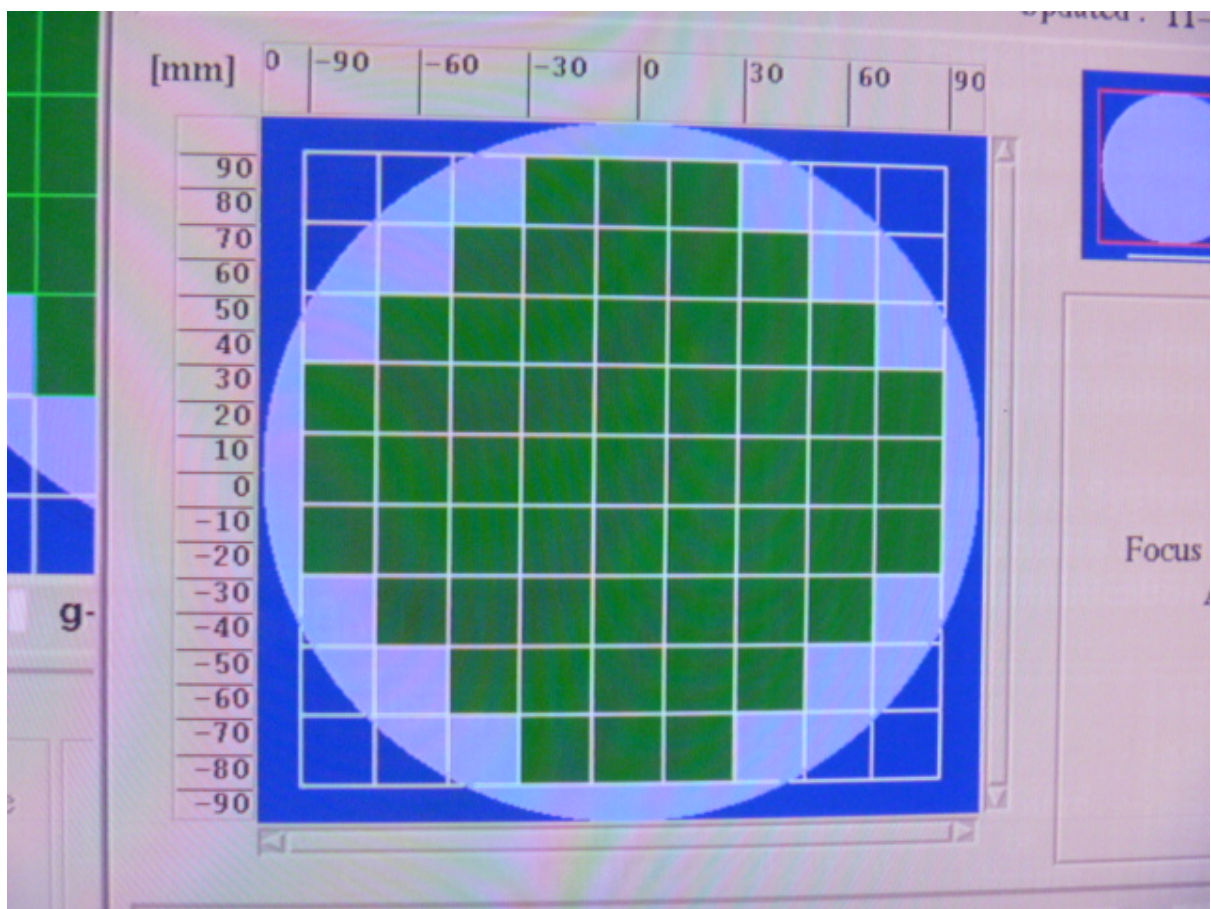
表 V.2.2.1(i) -1.5-1 センサ TEG のプロセスフロー

工程	内容	使用装置	条件等	図
1	レジストパターンニング	<ul style="list-style-type: none"> コーターデベロッパ [ACD-12802C-3H] (ジャパנקリエイト製) ステッパー [NSR-2205i11D] (ニコン製) 	Layer1	
2	Si エッチング (アライメント加工)	<ul style="list-style-type: none"> Deep-RIE [MUC-21 ASE-Pegasus] (住友精密工業製) 	150nm	
3	レジスト除去	<ul style="list-style-type: none"> アッシャー [PC-1100] (samco 製) ウエハ洗浄装置 		
4	アルミ成膜	<ul style="list-style-type: none"> スパッタ [SME-200E] (ULVAC 製) 	2 μm	

5	レジストパターンニング	<ul style="list-style-type: none"> ・コーターデベロッパー [ACD-12802C-3H] (ジャパングリエイト製) ・ステッパー [NSR-2205i11D] (ニコン製) 	Layer2	
6	アルミエッチング	<ul style="list-style-type: none"> ・無機ドラフト 	2 μ m	
7	レジスト除去	<ul style="list-style-type: none"> ・アッシャー [PC-1100] (samco 製) 		
8	アルミ熱処理	<ul style="list-style-type: none"> ・ボロン拡散炉 [VF-3000] (光洋サーモシステム製) 	400 30min	
9	レジストパターンニング	<ul style="list-style-type: none"> ・コーターデベロッパー [ACD-12802C-3H] (ジャパングリエイト製) ・ステッパー [NSR-2205i11D] (ニコン製) 	Layer3	
10	Si エッチング	<ul style="list-style-type: none"> ・Deep-RIE [MUC-21 ASE-Pegasus] (住友精密工業製) 	25 μ m	

11	レジスト除去	・アッシャー [PC-1100] (samco 製)		
12	BOX層エッチング	・犠牲層エッチャー (memsstar 製)	4 μm	

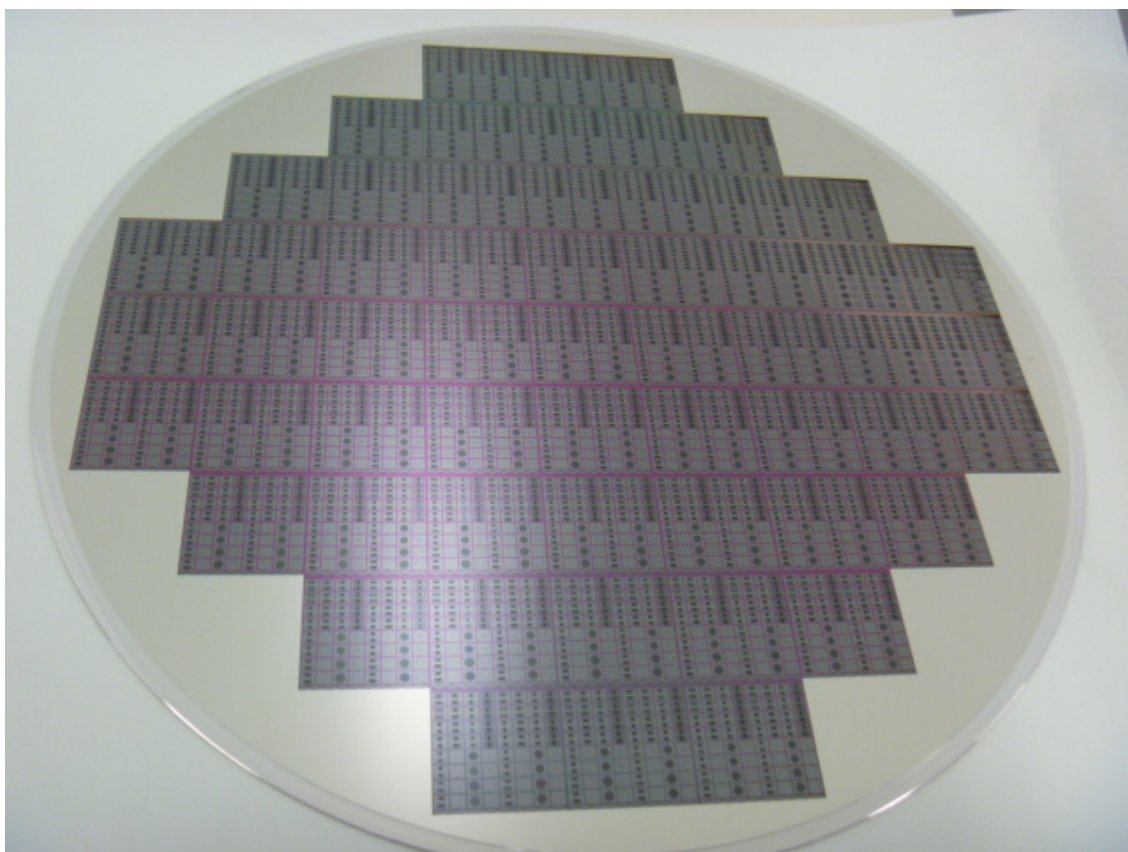
ステッパーによるショットマップを、図V.2.2.1(i) -1.5-1に示す。1ショットが20mm × 20mmのパターンを、200mm ウエハ上にパターンニングしている。ウエハ全体を9 × 9に区切り、190mmの円よりはみ出るショットは除外した(エッジカット5mm設定)。



図V.2.2.1(i) -1.5-1 ステッパーのショットマップ

(i) -2.1 処理条件の評価

まず、試作したウエハ全体の写真を、図V.2.2.1(i) -2.1-1に示す。1ショットが20mm×20mmのパターンを、面内に57ショット分作製した。1ショットの中には、加速度センサ TEG、ジャイロセンサ TEG、シリコン振動子 TEG が含まれている。



図V.2.2.1(i) -2.1-1 センサ TEG ウエハ全体写真 (BOX 層剥離前)

加工に用いた装置のレシピを、下記に示す。表V.2.2.1(i) -2.1-1、(i) -2.1-2は、ジャパントリエイト製のコーターデベロッパー[ACD-12802C-3H]のレジスト塗布レシピおよび現像レシピである。このレシピは、工程 1、5、9 の処理に用いた。処理時間は、レジスト塗布の場合、1枚あたり約5minほどで、現像処理の場合、1枚あたり約8minである。

表V.2.2.1(i) -2.1-1 コーターデベロッパー[ACD-12802C-3H]のレジスト塗布レシピ

COT-8inchi 1.0micron IP3650 5CP
SUB Recipe 1

Program STEP	回転 RPM	回転 時間sec	アーム 1 レジスト				アーム 2 リンス			バック リンス	表面 リンス	蓋	終了 モード
			モード	速度	液	流量 ml	モード	速度	液				
1	0	0.0	2	4	0	0.0	0	0	OFF	OFF	OFF	無	続行
2	0	0.0	0	0	1	0.0	0	0	OFF	OFF	OFF	無	続行
3	0	0.0	1	4	0	4.5	0	0	OFF	OFF	OFF	無	続行
4	800	3.0	0	0	0	0.0	0	0	OFF	OFF	OFF	無	続行
5	3000	5.0	0	0	0	0.0	0	0	OFF	OFF	OFF	無	続行
6	3000	8.0	0	0	0	0.0	0	0	OFF	ON	OFF	無	続行
7	0	3.0	0	0	0	0.0	0	0	OFF	OFF	OFF	無	終了
8	0	0.0	0	0	0	0.0	0	0	OFF	OFF	OFF	無	終了
9	0	0.0	0	0	0	0.0	0	0	OFF	OFF	OFF	無	終了
10	0	0.0	0	0	0	0.0	0	0	OFF	OFF	OFF	無	終了
11	0	0.0	0	0	0	0.0	0	0	OFF	OFF	OFF	無	終了
12	0	0.0	0	0	0	0.0	0	0	OFF	OFF	OFF	無	終了
13	0	0.0	0	0	0	0.0	0	0	OFF	OFF	OFF	無	終了
14	0	3.0	0	0	0	0.0	0	0	OFF	OFF	OFF	無	終了
15	0	0.0	0	0	0	0.0	0	0	OFF	OFF	OFF	無	終了

塗布の量
加速時間
加速時間
持続時間

メイン レジセット名 1					
ローダー	処理1	処理2	処理3	処理4	処理5
BINCHI CST	レジスト	HP2	CP		
	sec	レシビ	sec	°C	sec
	72	1	120	110	60

アンローダー
8 INCHI CST

表V.2.2.1(i) -2.1-2 コーターデベロッパー[ACD-12802C-3H]のレジスト現像レシピ

DEV-8inchi-1micron-ip3650 5cp/NMD3
SUB Recipe 19

Program STEP	回転 RPM	回転 時間sec	アーム 1 現像液				アーム 2 リンス			バック リンス	カップ	終了 モード
			モード	速度	液		モード	速度	液			
1	500	4.0	0	0	0	2	4	OFF	OFF		下降	続行
2	500	20.0	0	0	0	7	0	ON	OFF		下降	続行
3	800	3.0	0	0	0	1	4	OFF	OFF		下降	続行
4	800	5.0	0	0	0	0	0	OFF	OFF		下降	続行
5	0	2.0	0	0	0	0	0	OFF	OFF		下降	続行
6	20	1.0	2	4	0	0	0	OFF	OFF		下降	続行
7	20	3.0	0	0	0	0	0	OFF	OFF		上昇	続行
8	20	8.0	7	0	1	0	0	OFF	OFF		上昇	続行
9	0	1.0	1	4	0	0	0	OFF	OFF		上昇	続行
10	0	48.0	0	0	0	0	0	OFF	OFF		上昇	続行
11	0	0.0	0	0	0	2	4	OFF	OFF		上昇	続行
12	600	0.0	0	0	0	0	0	OFF	OFF		上昇	続行
13	600	0.0	0	0	0	7	0	ON	OFF		上昇	続行
14	600	0.0	0	0	0	1	4	OFF	ON		上昇	続行
15	1800	0.0	0	0	0	0	0	OFF	OFF		下降	続行
16	1800	3.0	0	0	0	0	0	OFF	OFF		下降	続行
17	0	0.0	0	0	0	0	0	OFF	OFF		下降	終了
18	0	0.0	0	0	0	0	0	OFF	OFF		下降	終了
19	0	0.0	0	0	0	0	0	OFF	OFF		下降	終了
20	0	0.0	0	0	0	0	0	OFF	OFF		下降	終了

メイン レジセット名 9						
ローダー	処理1	処理2	処理3	処理4	処理5	
BINCHI CST	HP2	CP	現像	HP1	CP	
	sec	°C	sec	レシビ	sec	°C
	90	110	60	195	19	60
					80	60

アンローダー
8 INCHI CST

表V.2.2.1(i) -2.1-3 は、工程 2 及び 10 で用いた、住友精密工業製の Deep-RIE[MUC-21 ASE-Pegasus]の処理レシピの内容である。工程 2 はエッチング量 150nm、工程 10 はエッチング量が 25 μ m である。このレシピについては詳細に条件出しを行ったので、後に記述する。

表V.2.2.1(i) -2.1-3 Deep-RIE[MUC-21 ASE-Pegasus]の処理レシピ

工程 2

レシピ名: PPS-Align

	SF6 [sccm]	C4F8 [sccm]	RF [W]	LF [W]	Press. [Pa]	Time [sec]
エッチング1	400	0	1500	90	3	1.2
エッチング2	400	0	1500	20	3	0.4
パッシベーション	0	400	1500	0	6	1

Total	5 cycles
	13 sec

工程 10

レシピ名: PPS-L2-25um-2

	SF6 [sccm]	C4F8 [sccm]	RF [W]	LF [W]	Press. [Pa]	Time [sec]
エッチング1	400	0	1500	90	3	1.2
エッチング2	400	0	1500	20	3	0.4
パッシベーション	0	400	1500	0	6	1

Total	290 cycles
	754 sec

表V.2.2.1(i) -2.1-4 は、samco 製のアッシャー[PC-1100]を用いたときのアッシングレシピである。この処理は、工程 3、7、11 で用いた。一度に処理できる枚数は、最大で 4 枚である。このアッシャーは RIE モードと PE モードを切り替えることができ、それぞれでレートが異なる。表V.2.2.1(i) -2.1-4 の処理は RIE モードのときで、アッシングレートは 143nm/min である。PE モードの場合だと、同じ条件で 45.4nm/min のアッシングレートであった。PE モードは、イオンアタックを防ぐ処理になっており、静電ダメージが軽減されるが、その分レートも低くなる。

表V.2.2.1(i) -2.1-4 アッシャー[PC-1100]の処理レシピ

レシピ1

O2 [sccm]	Press [Pa]	Power [W]	time [min]
50	6	500	15

表V.2.2.1(i) -2.1-5 は、ULVAC 製のスパッタ装置[SME-200E]でのアルミ製膜レシピである。アルミ膜厚は2 μ m で、1枚あたりの処理時間は約50minである。

表V.2.2.1(i) -2.1-5 アルミ製膜レシピ

レシピ名:P4Al-1k50m-2um-2

STEP	time [sec]	Ar [sccm]	シャッター	Power [W]
1	15	0	Close	0
2	10	70	Close	0
3	10	70	Close	1000
4	10	50	Close	1000
5	10	50	Open	1000
6	3000	50	Open	1000
7	10	0	Close	0

スパッタ時間

アルミの熱処理は、光洋サーモシステム製の拡散炉[VF-3000]にて実施し、処理レシピは表V.2.2.1(i) -2.1-6のとおりである。この処理レシピは、工程8にて使用した。今回使用した拡散炉は、一度に100枚のウエハを処理することができる。1回あたりの処理時間は、約80minほどであった。

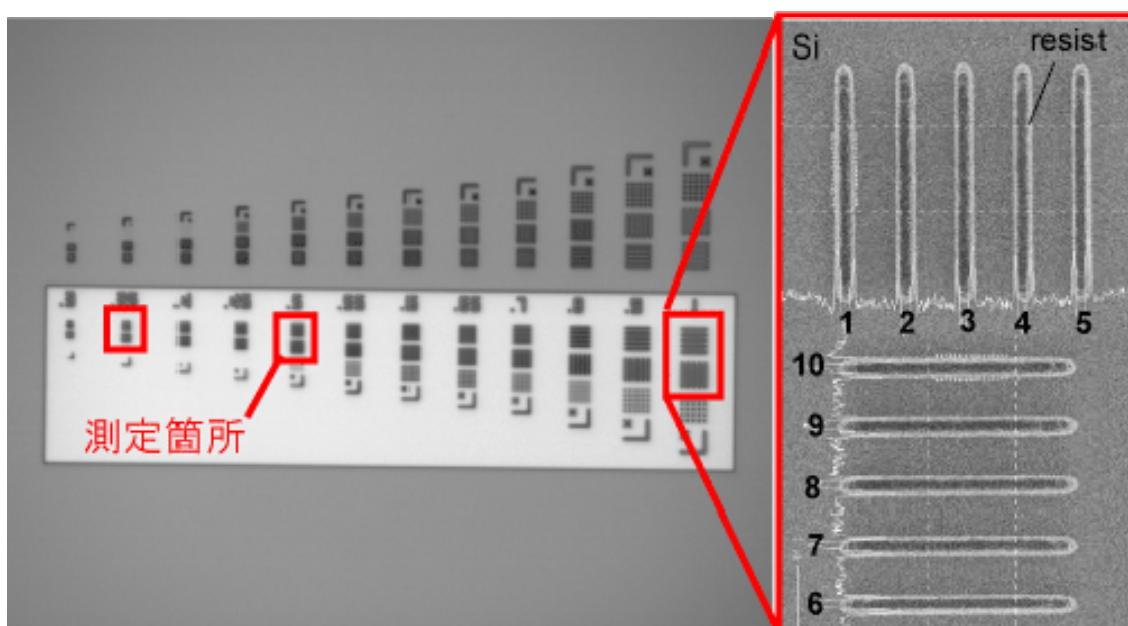
表V.2.2.1(i) -2.1-6 アルミ熱処理レシピ

工程	step	time	動作
1	STANDBY		
2	ALOG	9m40s	カセット→ポート
3	BLOAD	9m	ポート→炉
4	BRCV	10m	N2=3LSM、400°C
5	WAIT	30m	N2=3LSM、400°C
6	BULD	9m	炉→ポート
7	ALDCG	9m40s	ポート→カセット
8	END		

(i) -2.1.1 露光条件評価

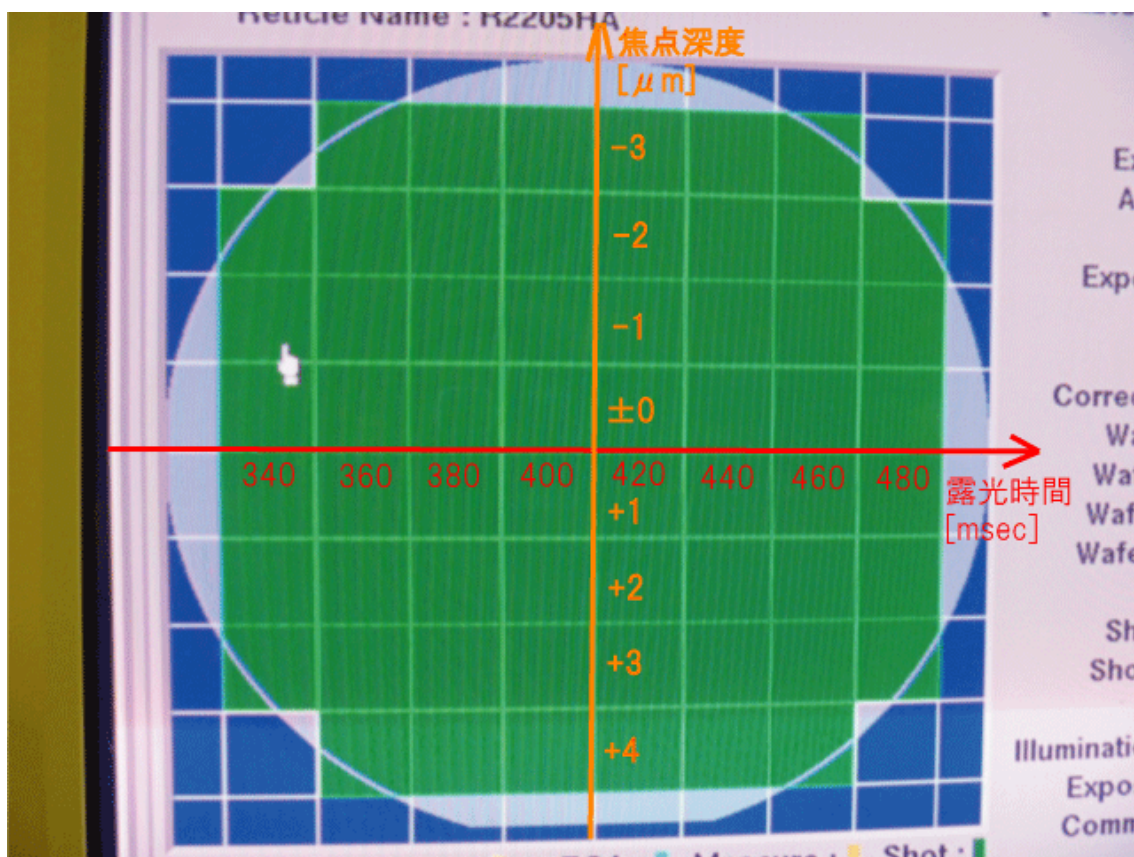
今回試作する各センサ TEG は、ステッパーにて露光を行う。その為、ステッパーの露光条件を最適化する必要がある。今回使用するレジストは、THMR iP3650HP（東京応化製）とした。膜厚は $1\mu\text{m}$ とし、そのときの露光条件を求めた。

図V.2.2.1(i) -2.1.1-1のようなパターンを、ウエハ全面にステッパーを用いてパターンニングした。これは、ドットパターンと Line and Space が、 $0.3\mu\text{m}$ から $1\mu\text{m}$ まで描かれたパターンで、写真の数値が、その寸法を示している。今回使用したステッパーは $0.35\mu\text{m}$ の分解能を有する装置であるため、評価寸法は $0.35\mu\text{m}$ 、 $0.5\mu\text{m}$ 、 $1\mu\text{m}$ の3条件にて評価を行った。



図V.2.2.1(i) -2.1.1-1 露光条件評価用パターン

ステッパーの設定で、ウエハ面内で露光時間を振って露光し、設計寸法に最も近い露光時間を求め、最適値とした。露光時間は、 400msec を基準に、 20msec 刻みで振った。具体的なショットマップは、図V.2.2.1(i) -2.1.1-2のようにした。



図V.2.2.1(i) -2.1.1-2 露光条件評価用ショットマップ

露光条件を振ってみた結果を、図V.2.2.1(i) -2.1.1-3に示す。横軸が露光時間で、縦軸がパターン線幅である。パターン線幅は、 $0.35\ \mu\text{m}$ 、 $0.5\ \mu\text{m}$ 、 $1.0\ \mu\text{m}$ の線幅に対し、実際にパターニングされた寸法を測長SEMにて測定した値を示している。測定値は $n=10$ として、その平均値と分散値を求めた。この結果、実寸法に最も近い露光時間を最適条件とし、試作の条件とする。今回の結果から、その最適条件は 460msec とした。このときの分散値は、 $5\sim 15\text{nm}$ 程度であった。

ステップ露光時間とパターン線幅 (Step=20msec)

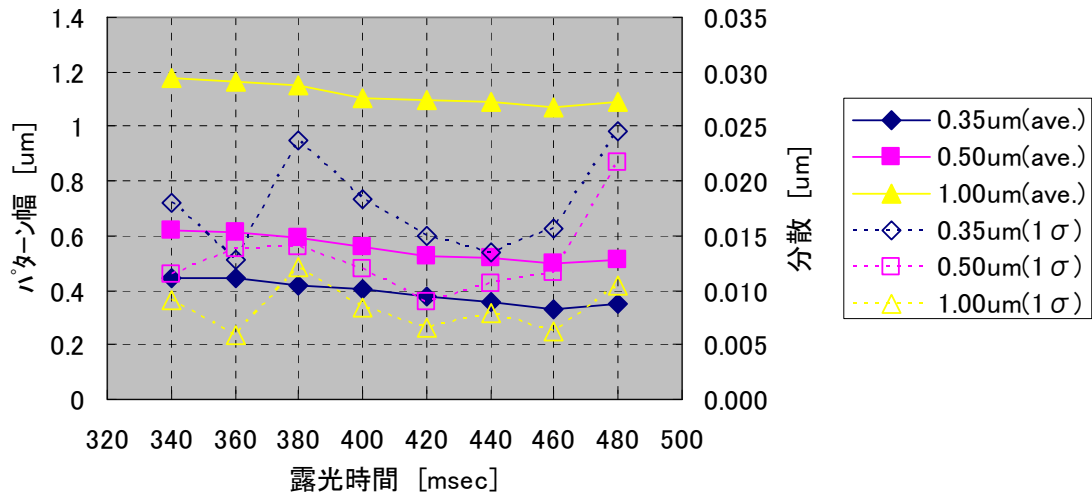


図 V.2.2.1(i) -2.1.1-3 露光時間とパターン線幅

(i) -2.1.2 Deep-RIE 加工条件評価

センサ TEG の試作に関して、最重要装置である Deep-RIE の条件出しを事前に実施した。狙いとする条件は、活性層 $25\ \mu\text{m}$ の SOI ウエハのエッチングでの形状重視のエッチングとし、テーパ角度、スキヤロップ、ノッチングなどができるだけ少ない条件を見出す。テーパ角度、スキヤロップ、ノッチングの定義については図 V.2.2.1(i) -2.1.2-1 に示す。テーパ角度はエッチング溝の Top と Bottom より算出し、算出式は下記のようにした。

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{2D}{X-Y}\right) \times \frac{180}{\pi}$$

ノッチングは溝底面部分のスキヤロップからのえぐれ寸法とした。

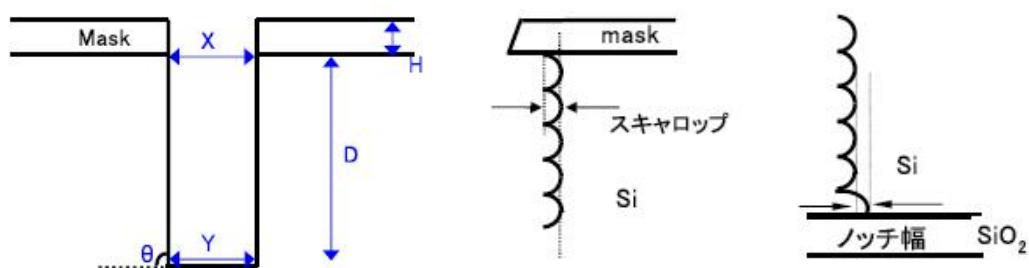


図 V.2.2.1(i) -2.1.2-1 テーパ角度、スキヤロップ、ノッチの定義

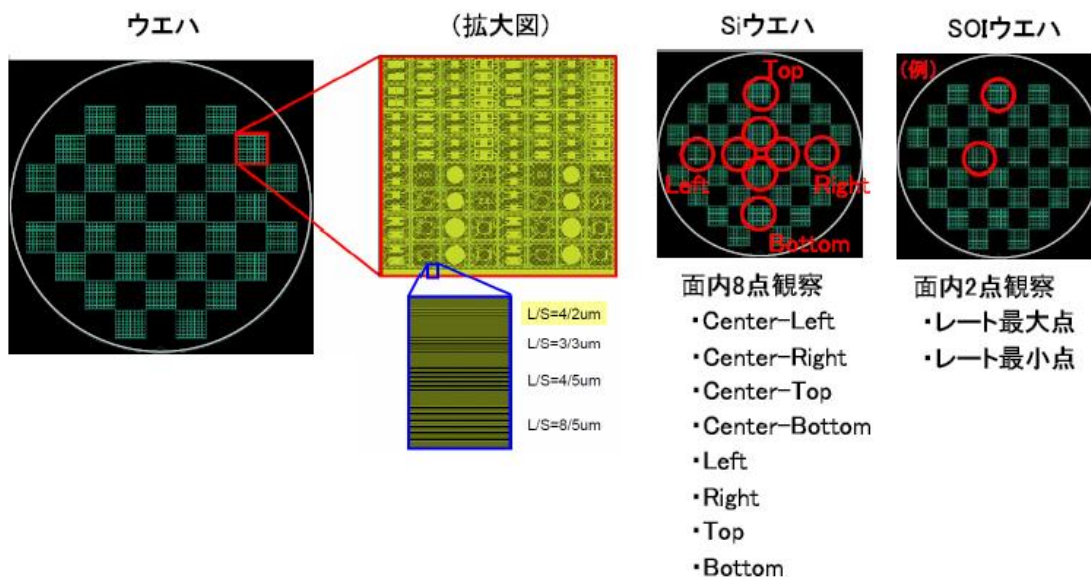


図 V.2.2.1(i) -2.1.2-2 ウエハ面内測定箇所

用意したサンプルは、8 インチの Si ウエハと SOI ウエハの 2 種類。どちらもレジスト 1 μm を塗布し、パターニングしたサンプルとした。パターンは、センサの実パターンと Line and Space が混合したものとなっている。この Line and Space の寸法は、作製するセンサ TEG の静電アクチュエータ部分と同じ寸法としている。

	Center-Left	Center-Right	Center-Top	Center-Bottom
断面SEM 全体 ($\times 3k$)				
断面SEM 上部 ($\times 25k$)				
断面SEM 下部 ($\times 25k$)				
エッチング深さ	24.1 μm	24.3 μm	24.0 μm	24.5 μm

	Left	Right	Top	Bottom
断面SEM 全体 ($\times 3k$)				
断面SEM 上部 ($\times 25k$)				
断面SEM 下部 ($\times 25k$)				
エッチング深さ	24.3 μm	24.3 μm	24.3 μm	24.7 μm

図 V.2.2.1(i) -2.1.2-3 エッチングレート測定結果 (L/S 部分)

条件出しのウエハ面内測定箇所を図 V.2.2.1(i) -2.1.2-2 に示す。まずは Si ウエハにてウエハ面内のエッチングレートの分布を測定し、エッチングレートが最も高いところと低いところを割り出した。面内の測定箇所は 8 箇所 (Center-Left, Center-Right, Center-Top, Center-Bottom, Left, Right, Top, Bottom) とし、断面形状観察は、Line and Space の

Line=4 μ m、Space=2 μ m の部分と、実パターンの最大開口箇所 (30 μ m 開口) とした。エッチングレート算出のために行った処理時間は 10min とした。

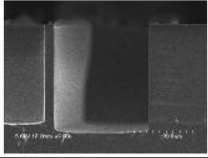
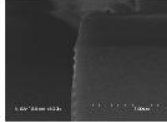
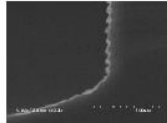
実パターン(Center-Top)	
断面SEM 全体 ($\times 3k$)	
断面SEM 上部 ($\times 50k$)	
断面SEM 下部 ($\times 50k$)	
エッチング深さ	29.3 μ m

図 V.2.2.1(i) -2.1.2-4 エッチングレート測定結果 (30um 開口部分)

Si ウエハを用いたエッチングレート測定結果を図 V.2.2.1(i) -2.1.2-3 と図 V.2.2.1(i) -2.1.2-4 に示す。Line and Space のエッチングレートは $2.43 \mu\text{m}/\text{min} \pm 1.4\%$ となり、エッチングレートが一番低いところに合わせるよう 25 μ m のエッチングに必要な時間 (Just time) を算出した。このとき、実パターン (30 μ m 開口部分) のエッチングレートは 2.93 $\mu\text{m}/\text{min}$ であり、Line and Space の 2 μ m 開口部分とは約 20% の差が生じた。これより、実パターンエッチングにおいては、2 μ m のエッチングを狙った条件においては、最低でも Just time+20% のエッチングが必要であると分かる。

算出した Just time (10min47sec) を基準とし、SOI ウエハを Just time、Just time+15%、Just time+30%、Just time+50% のエッチングを行った。面内の観察箇所は、エッチングレート最大点と最小点の 2 箇所とした。断面形状観察は、エッチングレート算出のときと同様、Line and Space の Line=4 μ m、Space=2 μ m の部分と、実パターンの最大開口箇所 (30 μ m 開口) とした。

SOI ウエハをエッチングした結果を、図 V.2.2.1(i) -2.1.2-5 から図 V.2.2.1(i) -2.1.2-8 に示す。スキヤロップの大きさについては、Just time から Just time+50% にかけて変化は無い。これは同じレシピを用いているため、当然の結果といえる。このときの Line and Space 部分のノッチングの大きさは、Just time から Just time+50% とオーバーエッチングを実施したにもかかわらず、30~80nm 程度となり増加傾向は見られない。実パターン (30 μ m 開口部分) については、ノッチング量はゼロであった。これは、開口が大きいほど側壁の保護膜が生成されやすいためと推測される。そのため、テーパ角度もオーバーエッチング時間に寄らず、Line and Space 部分では 89.8 度、実パターン部分においては 90.0 度と一定であった。

この条件出しの結果より、最先端 8 インチライン試作における Deep-RIE の処理条件は Just time+30% (13min22sec) とする。

	Bottom	Center-Top	実パターン(Center-Top)
断面SEM 全体(×3k)			
断面SEM 上部(×25k) (×50k)			
断面SEM 下部(×25k) (×50k)			
Top幅	2.17 μm	2.17 μm	29.77 μm
Bottom幅	2.03 μm	1.98 μm	29.77 μm
テーパ角度	89.8°	89.8°	90.0°
スキヤロップ	28nm	28nm	32nm
ノッチング	79nm	75nm	0nm

図 V.2.2.1(i) -2.1.2-5 Just time 処理時の SOI 断面 SEM 写真

	Bottom	Center-Top	実パターン(Center-Top)
断面SEM 全体(×3k)			
断面SEM 上部(×25k) (×50k)			
断面SEM 下部(×25k) (×50k)			
Top幅	2.18 μm	2.21 μm	29.77 μm
Bottom幅	2.03 μm	2.01 μm	29.77 μm
テーパ角度	89.8°	89.8°	90.0°
スキヤロップ	28nm	28nm	32nm
ノッチング	44nm	52nm	0nm

図 V.2.2.1(i) -2.1.2-6 Just +15%処理時の SOI 断面 SEM 写真

	Bottom	Center-Top	実パターン(Center-Top)
断面SEM 全体(×3k)			
断面SEM 上部(×25k) (×50k)			
断面SEM 下部(×25k) (×50k)			
Top幅	2.20 μm	2.20 μm	29.87 μm
Bottom幅	2.01 μm	1.99 μm	29.87 μm
テーパ角度	89.8°	89.8°	90.0°
スキヤロップ	28nm	28nm	32nm
ノッチング	67nm	52nm	0nm

図V.2.2.1(i) -2.1.2-7 Just +30%処理時の SOI 断面 SEM 写真

	Bottom	Center-Top	実パターン(Center-Top)
断面SEM 全体(×3k)			
断面SEM 上部(×25k) (×50k)			
断面SEM 下部(×25k) (×50k)			
Top幅	2.22 μm	2.22 μm	29.96 μm
Bottom幅	2.08 μm	2.00 μm	29.96 μm
テーパ角度	89.8°	89.8°	90.0°
スキヤロップ	28nm	28nm	32nm
ノッチング	32nm	40nm	0nm

図V.2.2.1(i) -2.1.2-8 Just +50%処理時の SOI 断面 SEM 写真

(i) -2.2 加速度センサ TEG の評価

加速度センサ TEG を試作した結果を、図 V.2.2.1(i) -2.2-1 に示す。これは光学顕微鏡で撮影した写真で、設計通りの形状になっていることがわかる。次に、静電容量、共振周波数、 Q 値を測定した。共振周波数と Q 値測定時の出力波形を図 V.2.2.1(i) -2.2-2 に示す。デバイスにインパルス波形を入力し、そのときの出力電圧を取得したものである。矩形波にオーバーシュートが見られるが、これは可動電極が振動したときの慣性力により生じる応答で、この波形が減衰していく様子から共振周波数と Q 値を算出している。

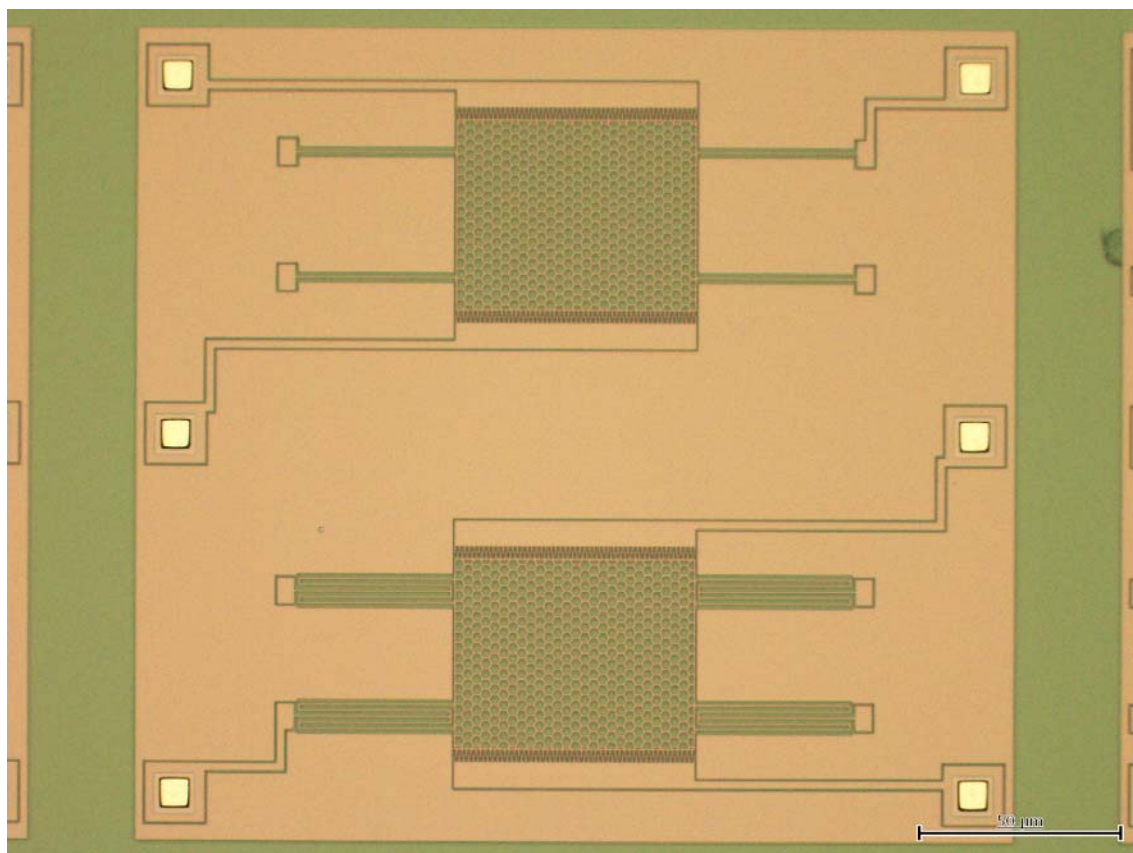


図 V.2.2.1(i) -2.2-1 加速度センサ TEG の光学顕微鏡写真 (BOX 層剥離前)

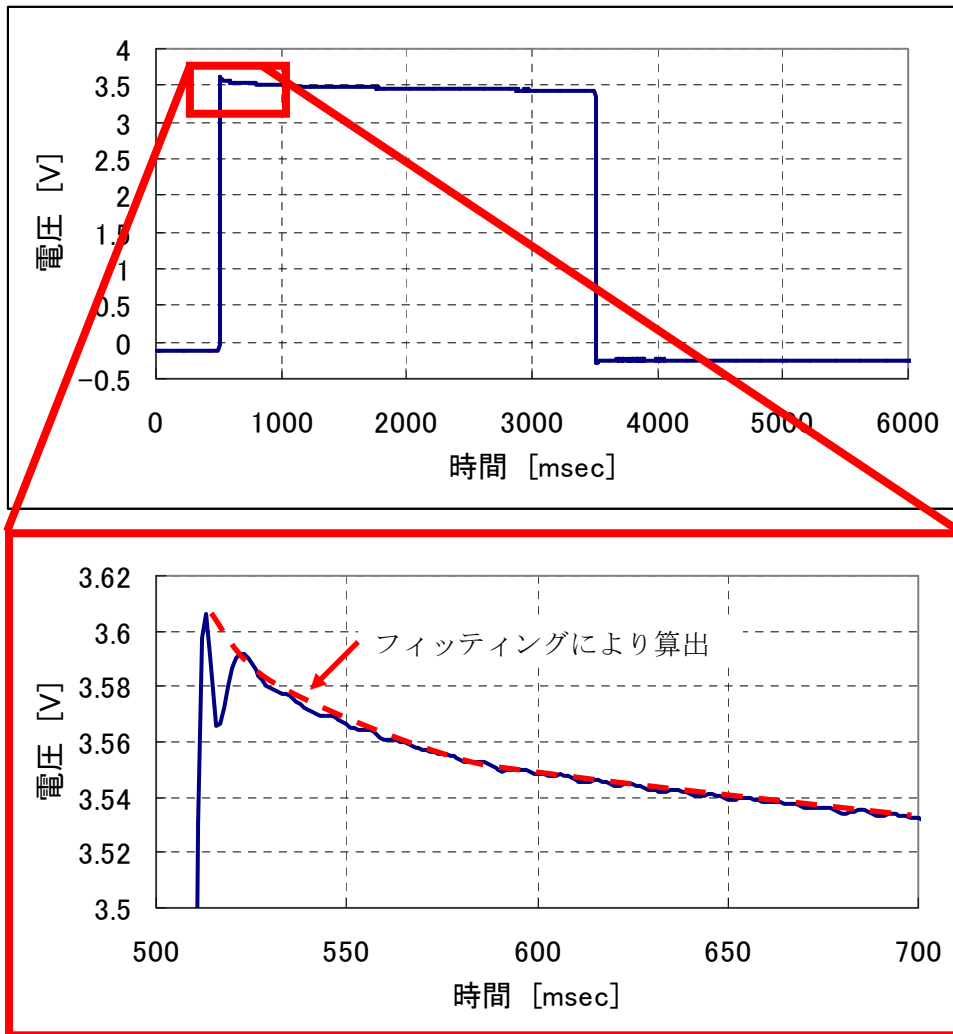


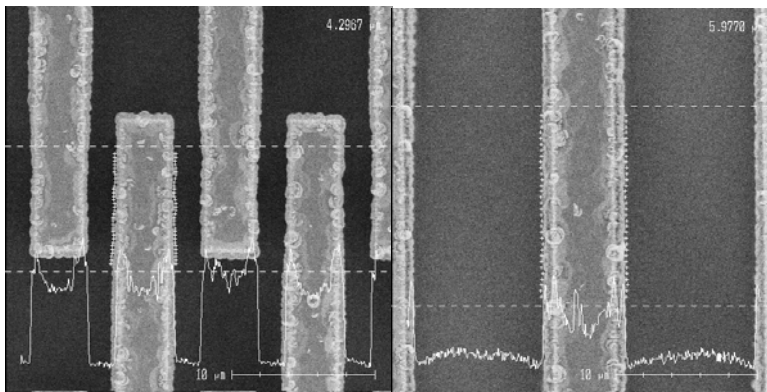
図 V.2.2.1(i) -2.2-2 共振周波数と Q 値測定時の出力波形

デバイスの性能に大きく影響する寸法を、設計値と測長 SEM の測定結果を比較したものが表 V.2.2.1(i) -2.2-1 であり、そのときに撮影した SEM 画像を図 V.2.2.1(i) -2.2-3 に示す。静電容量については、設計値より小さめの値が計測されたが、共振周波数にその傾向は見られなかったため、この測定結果が確からしいかどうかの議論の余地があると考えられる。Q 値についても、今回は大気中での測定であるため、今回設計した周波数だと数十という値に落ち着くと予想していたため、157 という値については疑問が残る。

寸法を比較した箇所は、櫛歯アクチュエータの寸法、ギャップ、バネの幅である。測定結果が設計値より大きな寸法となっているが、これは加工面が荒れているためである。荒れの原因としては、レジスト/シリコンの選択比が悪く、レジストパターンがもたなかったことが挙げられる。あとはアルミ熱処理時に、表面に残っていた残渣成分が荒れの原因として考えられる。

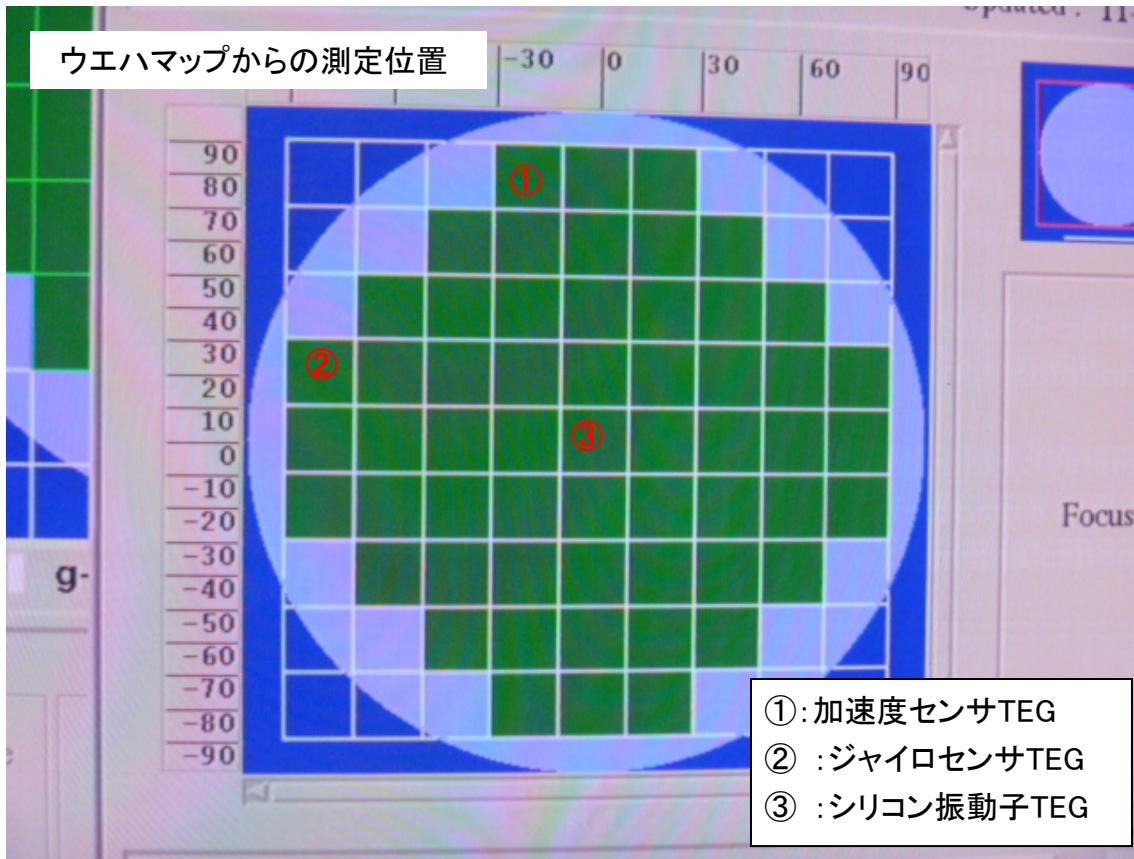
表V.2.2.1(i) -2.2-1 設計値と測長 SEM の測定結果 (加速度センサ TEG)

	静電容量 [fF]	共振周波数 [kHz]	Q 値	櫛歯 (Line) [μm]	櫛歯 (Space) [μm]	バネ [μm]
設計値 A	126	8.0	-	4.00	2.00	5.00
測定値 A	86	6.8	157	4.30	1.69	5.98
設計値 B	126	5.5	-	4.00	2.00	5.00
測定値 B	108	6.4	51	4.30	1.69	5.98



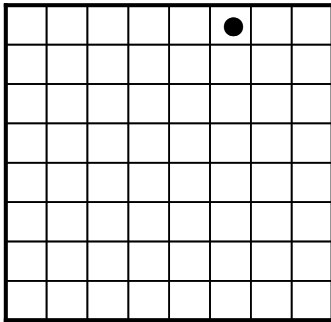
図V.2.2.1(i) -2.2-3 櫛歯アクチュエータ (左) とバネ (右) の SEM 写真

試作したウエハにおける測定箇所を図V.2.2.1(i) -2.2-4 に示す。このウエハ内には 3 種類のセンサ TEG が作製できている。1 ショットは 8×8 チップからなり、1 ショット内の測定箇所については、図V.2.2.1(i) -2.2-5 に示す。①は加速度センサ TEG、②はジャイロセンサ TEG、③はシリコン振動子の配置を示している。

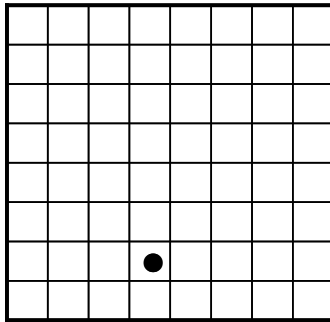


図V.2.2.1(i) -2.2-4 測定箇所 (ウエハ内)

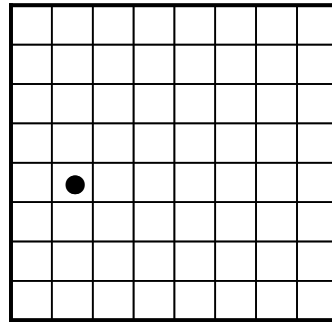
① 加速度センサ



② ジャイロセンサ



③ シリコン振動子



図V.2.2.1(i) -2.2-5 測定箇所 (1ショット内)

(i) -2.3 ジャイロセンサ TEG の評価

8 インチラインで試作したジャイロセンサ TEG の光学顕微鏡写真を、図 V.2.2.1(i) -2.3-1 に示す。外観は設計図どおりにできていることが確認できた。

設計値と寸法測定の結果を、表 V.2.2.1(i) -2.3-1 に示す。測定箇所は、楕歯アクチュエータの寸法、ギャップ、バネの幅、リングの幅とした。寸法は設計値に近いものができるものの、共振周波数の値が設計よりかなり大きな値が測定された。これは、Q 値が低すぎて正しく測定できなかつたためである。Q 値の下限は 0.5 で、これ以上 Q 値の小さいデバイスは計測が非常に困難であることがわかった。設計時に Q 値を算出することは難しいが、今回の設計を参考にすることで、より良いデバイスの設計する指標になると思われる。図 V.2.2.1(i) -2.3-2 に測長時の SEM 画像を示すが、表面や断面が荒れていることが確認できる。

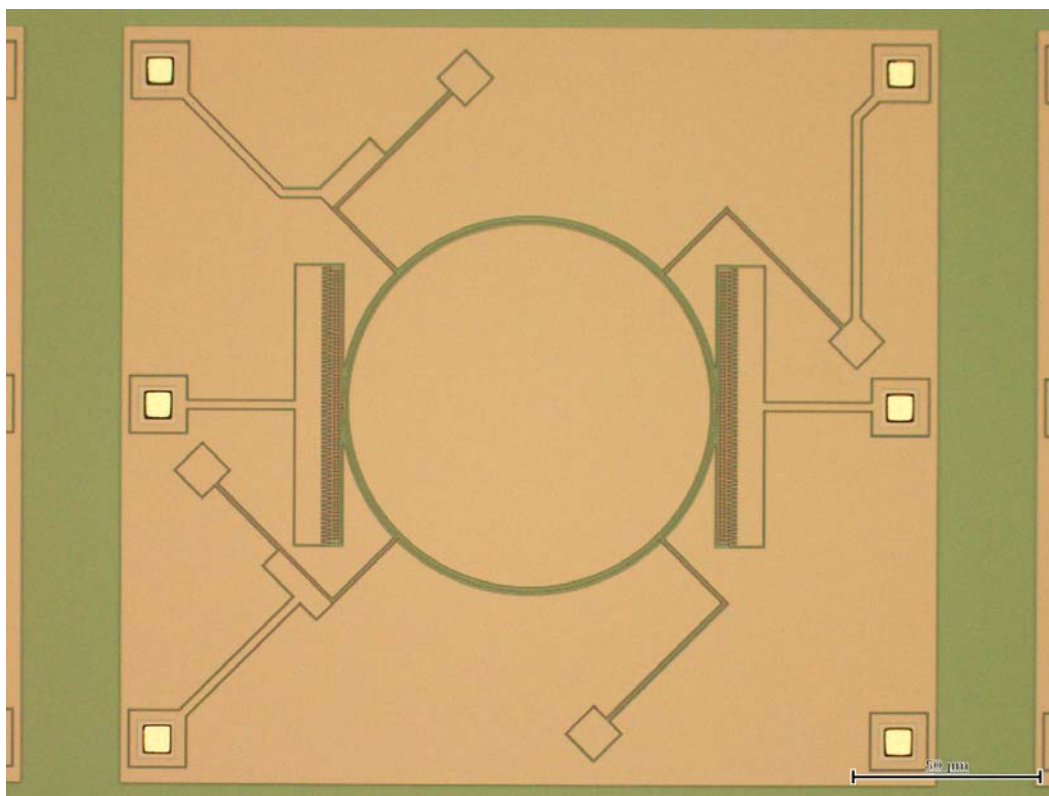
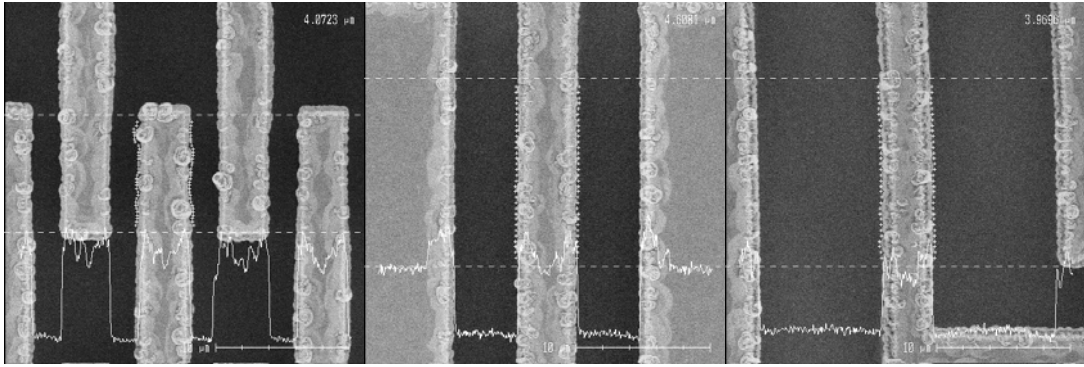


図 V.2.2.1(i) -2.3-1 ジャイロセンサ TEG の光学顕微鏡写真 (BOX 層剥離前)

表 V.2.2.1(i) -2.3-1 設計値と測長 SEM の測定結果 (ジャイロセンサ TEG)

	静電容量 [fF]	共振周波数 [kHz]	Q 値	楕歯 (Line) [μm]	楕歯 (Space) [μm]	バネ [μm]	リング [μm]
設計値	77	4.6	-	4	2	4	3
測定値	51	15.5	0.5	4.07	1.86	4.60	3.97



図V.2.2.1(i) -2.3-2 櫛歯アクチュエータ (左)、バネ (中央)、リング (右) の SEM 写真

(i) -2.4 シリコン振動子 TEG の評価

試作したシリコン振動子 TEG の光学顕微鏡写真を、図 V.2.2.1(i) -2.4-1 に示す。チップ中央に長さが異なる 8 種類の振動子が作製できていることが確認できた。測長 SEM では、カンチレバーの幅 1箇所と長さ 8箇所を測定し、その結果を表 V.2.2.1(i) -2.4-1 にまとめた。カンチレバー 8 種類の、長さが短いもの (30 μm) から順に A,B とナンバリングした。測定結果は、カンチレバーの幅は設計値より少し大きい結果となっているが、長さはほぼ設計どおりの寸法となっていた。測定時の SEM 写真を図 V.2.2.1(i) -2.4-2 に示す。加速度センサ TEG、ジャイロセンサ TEG に比べると表面の荒れが少ないように見える。

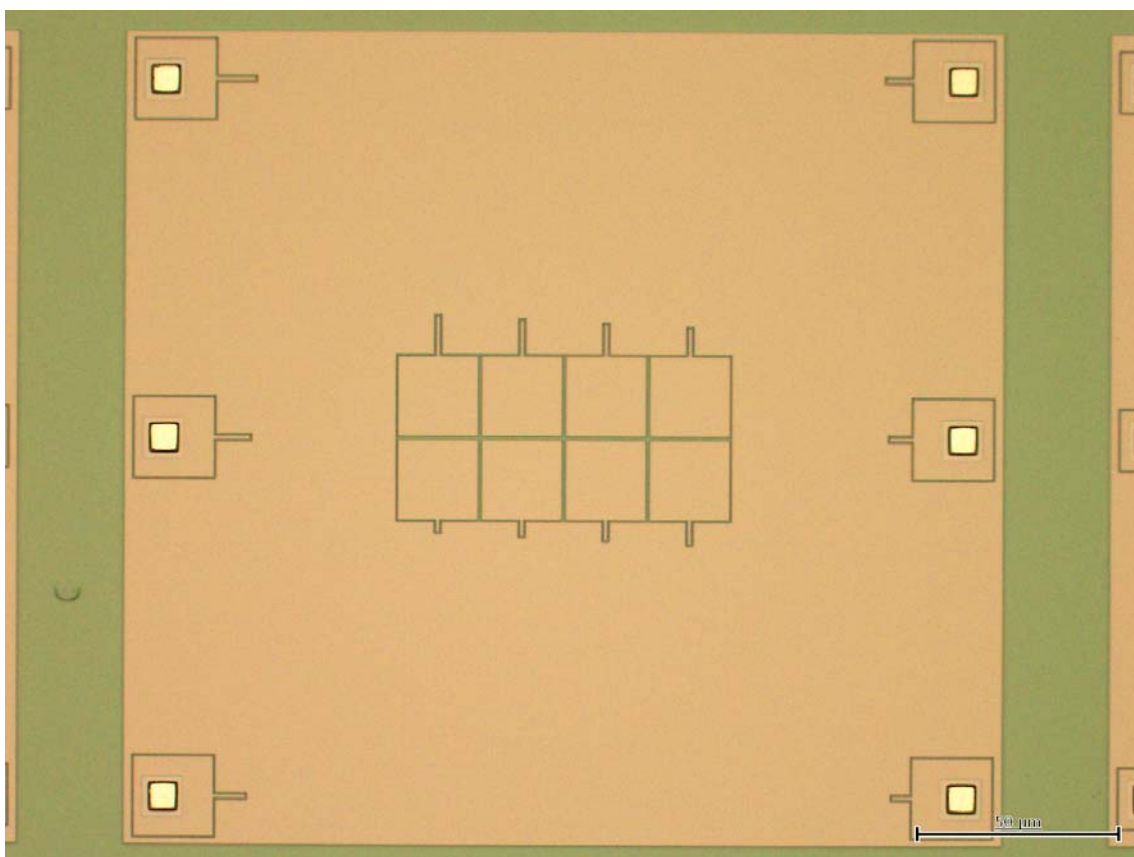
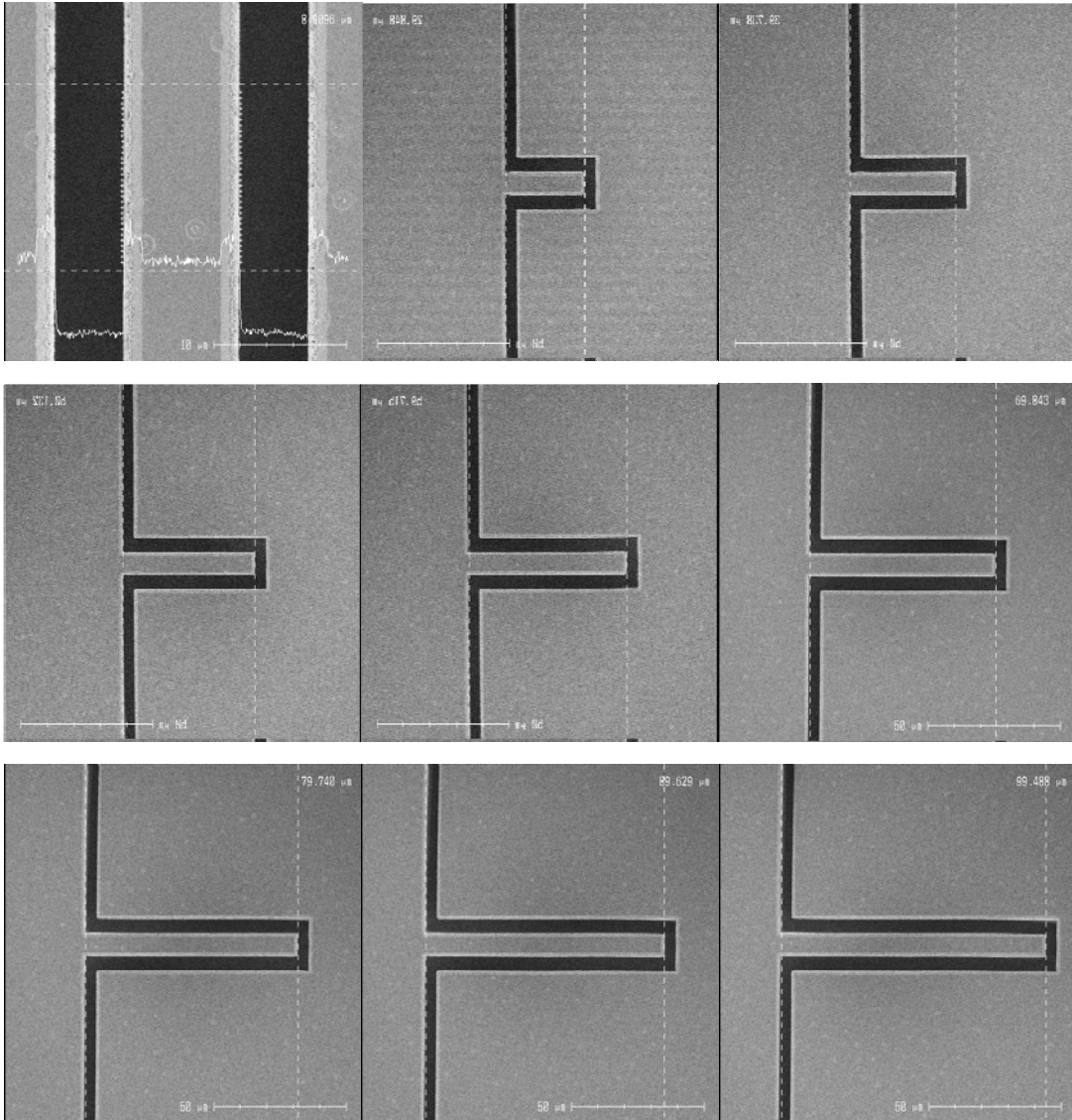


図 V.2.2.1(i) -2.4-1 シリコン振動子 TEG の光学顕微鏡写真 (BOX 層剥離前)

表 V.2.2.1(i) -2.4-1 設計値と測長 SEM の測定結果 (シリコン振動子 TEG)

	幅 [μm]	A [μm]	B [μm]	C [μm]	D [μm]	E [μm]	F [μm]	G [μm]	H [μm]
設計値	8	30	40	50	60	70	80	90	100
測定値	8.91	29.85	39.74	50.13	59.72	69.84	79.74	89.63	99.49



図V.2.2.1(i) -2.4-2 バネの幅 (左上) と各カンチレバーの SEM 写真

設計値と測定値から共振周波数のグラフを描いたものが図V.2.2.1(i) -2.4-3になる。設計値と測定値がよく一致しており、設計どおりのシリコン振動子が作製できたといえる。

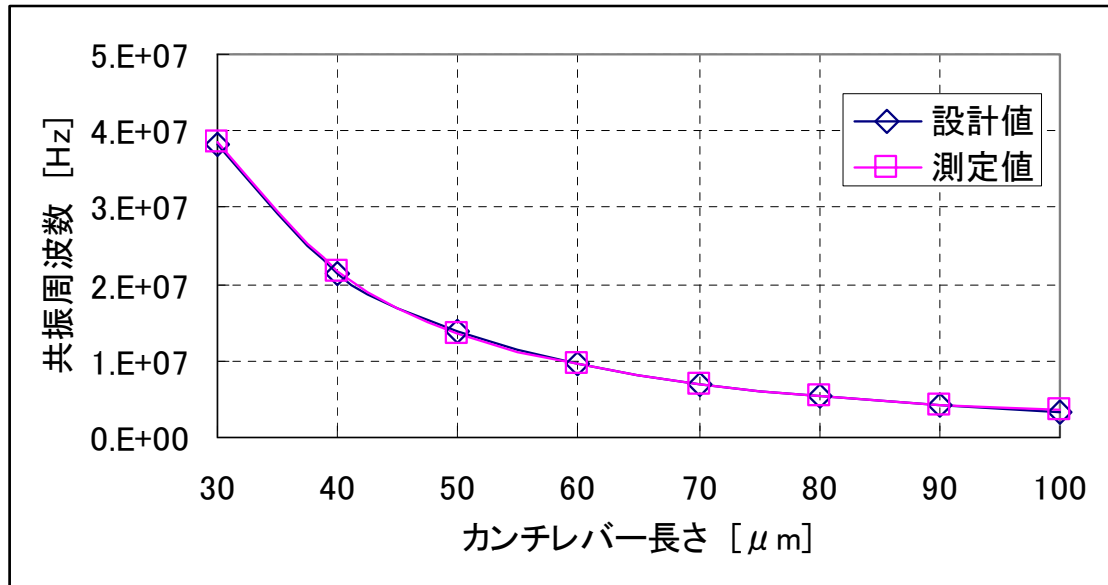


図 V.2.2.1(i) -2.4-3 カンチレバー長さ と共振周波数の関係 (設計値と測定値の比較)

(i) -3 まとめ

8 インチラインで試作するためのセンサ TEG (加速度センサ、ジャイロセンサ、シリコン振動子) を設計した。設計指標は、一般的な加速度センサ、ジャイロセンサ、シリコン振動子を参考にして決定した。

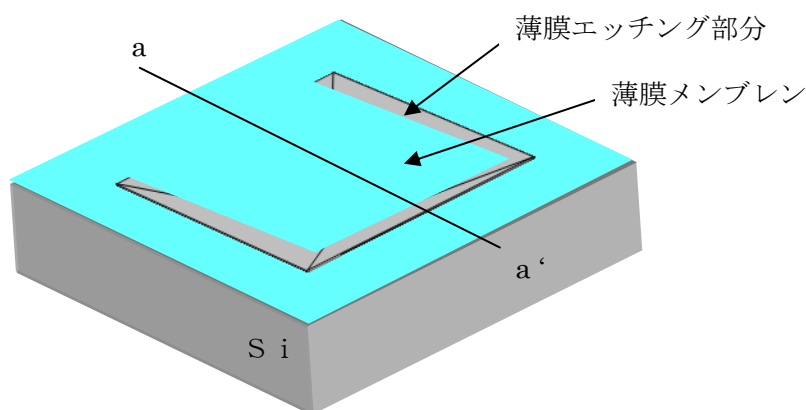
8 インチラインを用いて、センサ TEG を作製した。加速度センサは、動作確認はできたものの、その測定値については議論の余地がある。今回作製したデバイスだと、測定時のフィッティングの再現性を評価する必要がある。測定原理上、 Q 値が高いデバイスほど測定の高確度が高くなるので、共振周波数をもう少し上げる設計にするか、真空中での測定を実施する必要があると考えられる。また、デバイスの歩留まりや完成度は高いとはいえないので、プロセスの改善を実施していく必要もある。ジャイロセンサは、動作確認時において、 Q 値が低すぎたために正しく測定できていない。これは設計段階で Q 値を見積もることができないため、測定器のレンジを外れた設計になってしまった為である。ただし、外観から判断すると、加速度センサと同等の出来栄であると予想できる。シリコン振動子は、上記 2 つのセンサと比較すると外観も良く、測定結果も設計値に近い値であった。

今回の試作では 3 種類のセンサ TEG を試作し各装置で様々なレシピを作成したが、今後はそのレシピを元により良い条件を見出していく必要がある。

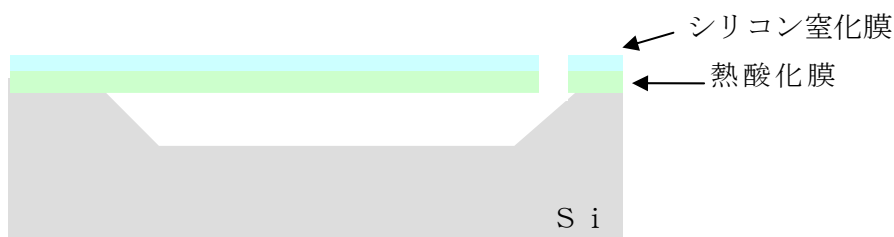
(ii) 薄膜メンブレンTEGの設計・試作

()-1 薄膜メンブレンTEG設計試作の概要

今回設計・試作する薄膜メンブレンTEGは、図V.2.2.1-1-1、図V.2.2.1-1-2 に示すように、シリコン基板上に形成した、薄膜メンブレンの片持ちの構造体TEGであり、構造としてはシリコン基板上に熱酸化膜、シリコン窒化膜の薄膜が成膜してあり、その薄膜をエッチング除去した部分からシリコンの異方性エッチングを行い、シリコンのキャビティ構造を形成したものである。



図V.2.2.1-1-1 薄膜メンブレンTEG概念斜視図

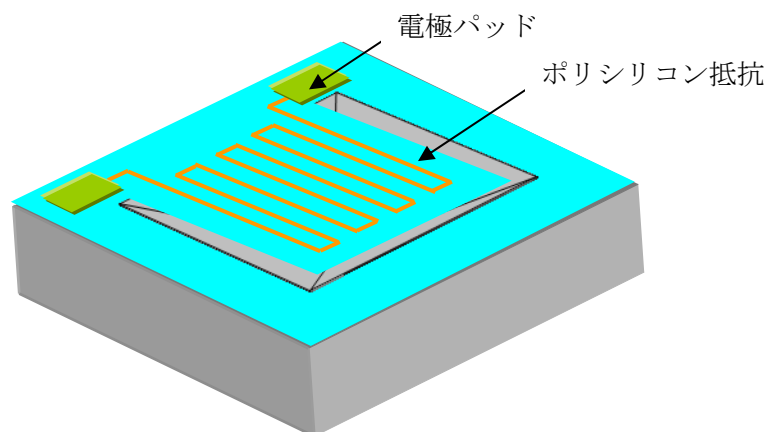


図V.2.2.1-1-2 薄膜メンブレンTEG a-a'断面概略図

この薄膜メンブレンTEGの応用展開としては、圧力センサ、フローセンサ、温度センサ等に展開可能であり、センサとして機能させる例として、図V.2.2.1-1-3にあるように、薄膜メンブレン上にポリシリコンで形成した抵抗配線を形成し、薄膜メンブレンの変位を、抵抗変化の電気信号として検出する方法がある。

そうしたセンサとして機能する上で、薄膜メンブレンTEGの出来栄がセンサ特性に大

大きく影響を及ぼす。その為、今回のTEG設計・試作は、重要となるシリコン基板上への薄膜メンブレン構造の形成を主として取り組むものである。



図V.2.2.1-1-3 センサとしての検出方法例

今回の設計・試作の取り組みのポイントとして、片持ちの薄膜メンブレンTEGの反りをコントロールする為の、二層薄膜の応力制御である。今回用いる薄膜は、半導体製造で一般的に用いられる熱酸化膜と、保護膜として用いられるシリコン窒化膜を用いる。その為、熱酸化膜の圧縮応力と、シリコン窒化膜の引っ張り応力の、二層の膜の応力コントロールを行い、薄膜メンブレンTEGの反りをいかに制御するかが、試作の重要なポイントである。その手段としてシリコン窒化膜の低応力化や、薄膜メンブレンTEGの膜構成の最適化について取り組んだ結果について報告するものである。又、TEG試作で用いたラインの特性評価も実施したので合わせて報告する。今回の報告の項目を下記に示す。

- ・ ()-2 薄膜メンブレンTEGのマスク設計
- ・ ()-3 プロセスフロー
- ・ ()-4 ラインの特性評価結果
- ・ ()-5 シリコン窒化膜の低応力化検討結果
- ・ ()-6 薄膜メンブレンTEGの最適化検討
- ・ ()-7 まとめ

()-2 薄膜メンブレンTEGのマスク設計

薄膜メンブレンTEG上に形成したポリシリコンの検出抵抗の目標値を 24K、12K、4K に設定した。また、ポリシリコン配線のデザインルールを以下の通り設定した。

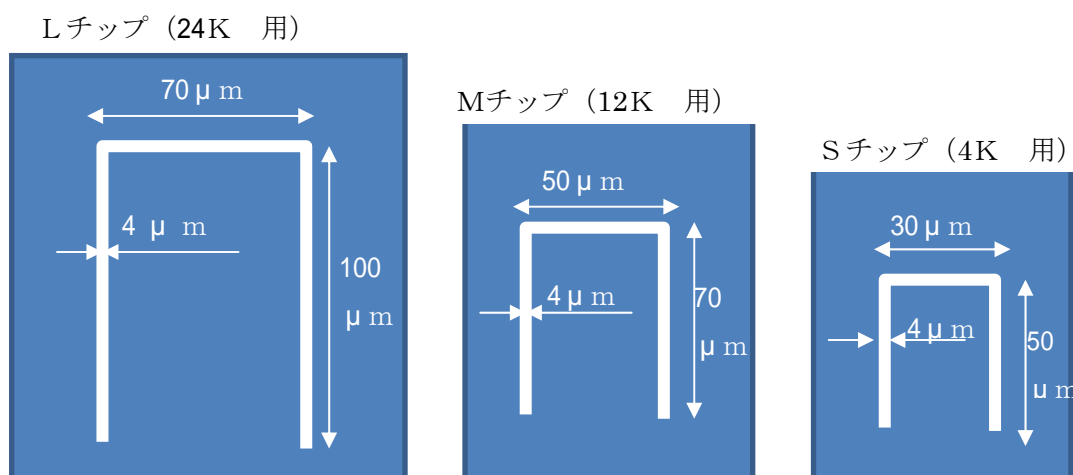
- ポリシリコンのシート抵抗：30 /

- ポリシリコンの配線幅：2 μm
- ポリシリコンの配線間隔：2 μm

図V.2.2.1-1-3に示すポリシリコン配線の配置を仮定すると、目標の抵抗値を実現する為に以下の薄膜メンブレンTEG面積が必要である。

- 24K 用のLチップ：70 μm ×100 μm
- 12K 用のMチップ：50 μm ×70 μm
- 4K 用のSチップ：30 μm ×50 μm

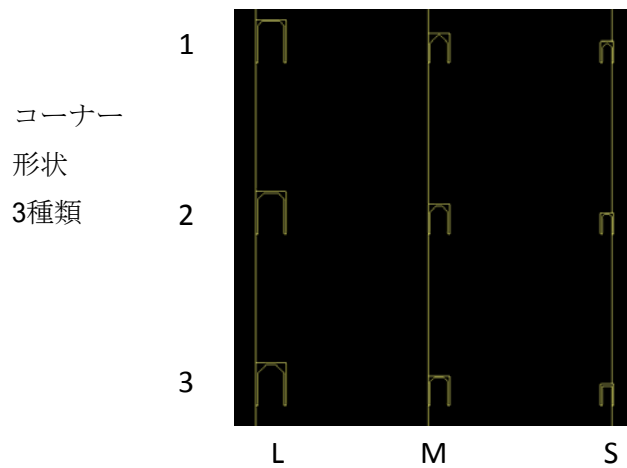
エッチングのスリット幅は、全てのチップ4 μm 、薄膜メンブレンTEGの端からポリシリコンまでの間隔は、2 μm として、図V.2.2.1-2-1に示す3種類のチップを設計した。



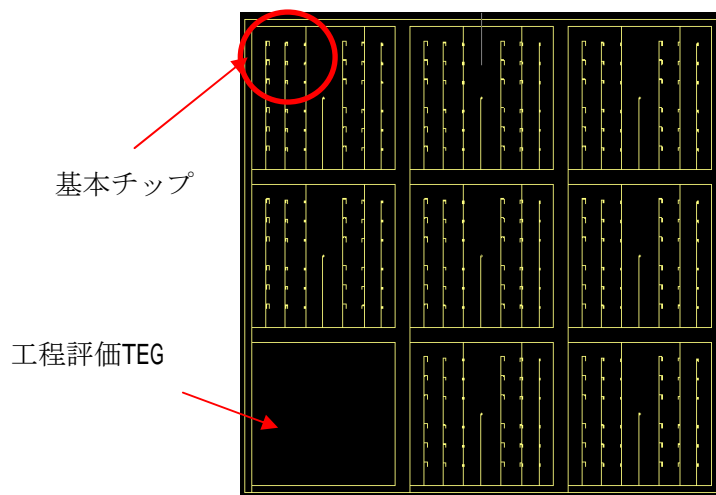
図V.2.2.1-2-1 チップの基本設計

作製するチップは、図V.2.2.1-2-2にある、L、M、Sの基本設計3種類のチップに3種類のコーナー部の形状を変えた、9種類のチップをレイアウトした。

1ショットのレチクルデータは、図V.2.2.1-2-3にあるような配置にして、その一部分に、膜厚評価、エッチング終点判定等の工程評価用のTEGを配置している。



図V.2.2.1-2-2 作製チップ内容



図V.2.2.1-2-3 レチクルデータ

()-3 プロセスフロー

今回試作する薄膜メンブレンTEGの作製プロセスフローについて説明する。表 .2.2.1-3-1は、薄膜メンブレンTEGのプロセスフローである。

工程1でウェハの表面洗浄を枚葉式のウェハ洗浄装置でSC1洗浄を行い、工程2で酸化炉を用いて、熱酸化膜を成膜する。その時の条件は、パイロ酸化で、温度1100℃、時間50分で、5000程度の熱酸化膜を形成する。工程3では、その膜の上にLPCVD-SiN装

置によってシリコン窒化膜を形成する。条件は、温度 780℃、時間 30 分であり、1000 程度の成膜を行う。工程 4 では、エッチングを行う部分を除去する為のレジストパターニングを行う。使用したレジストは住友化学㈱製のスミレジスト PFI-38A9 8cp で、レジスト厚は、後工程の SiO₂/SiN エッチング工程で、厚膜をエッチングする場合を考慮し、1.4 μm とした。露光はステッパーを用いて、225mj/cm² の露光量である。工程 5 では、ドライエッチング装置にて、熱酸化膜とシリコン窒化膜のエッチングを行い、シリコン基板へのダメージを抑える為に 5%程度のオーバーエッチとした。工程 6 では、アッシング装置を用いてレジスト除去を行い、工程 7 では、硫酸過水での SPM ウェット洗浄を実施し、その後、自然酸化膜除去の為に、希 HF での DiP エッチを 60sec 実施する。工程 8 で、TMAH を用いたシリコンのウェットエッチングを行う。条件は TMAH 濃度 25%、温度 85 時間 60min で実施する。工程 9 のエッチング後の乾燥として、スティクションを防止する為に IPA ベーパー乾燥装置を用いる。

表 V.2.2.1-3-1 薄膜メンブレン TEG のプロセスフロー

工程	内容	使用装置	条件等	断面図
1	受け入れ 洗浄	・ 枚葉ウェハ洗浄装置 (ETS 製)	SC1	
2	パイロ酸化	・ 酸化炉 (光洋サーモ製)	温度： 1100 時間： 50min 膜厚： 5000	
3	LPCVD -SiN 成膜	・ LP-CVD (光洋サーモ製)	温度： 780 時間： 30min 膜厚： 1000	

4	レジストパターニング	<ul style="list-style-type: none"> • コーターデベロッパ (ジャパンクリエイト製) • ステッパー (ニコン製) 	レジスト： 住友化学 PFI-38A9 8cp 厚み： 1.4 μm 露光 225mj/cm2	
5	SiO ₂ /SiN エッチング	<ul style="list-style-type: none"> • 酸化膜エッチャー (パナソニック F 製) 	O E： 5%	
6	レジスト除去	<ul style="list-style-type: none"> • アッシャー (sumco 製) 	R F： 500w 圧力： 10Pa 時間： 20min	
7	SPM洗浄 & D i P エッチ	<ul style="list-style-type: none"> • バッチ式ウェハ洗浄 (セミコンクリエイト製) 	時間： 15min 温度： 120 ° D i P 1 : 100 60sec	
8	シリコンウェットエッチング	<ul style="list-style-type: none"> • ウェットエッチング装置 (カナメックス製) 	温度： 85 °C 時間： 60min 濃度 25wet%	

9	乾燥	<ul style="list-style-type: none"> IPAベーパー乾燥装置 (ETS製) 	温度： 85℃	
---	----	--	------------	--

()-4 ラインの特性評価

今回の設計試作で使用する設備のライン特性評価を実施した。

ラインに用いる主な装置は、ウェットエッチング装置、酸化炉、高品質成膜装置 (LPCVD-SiN)、IPAベーパー乾燥装置の 4 装置であり、全ての装置で仕様を満足する結果を得られた。下記に各装置の評価結果を示す。

()-4.1 ウェットエッチング装置のライン特性評価

まずは、(株)カナメックス社製のシリコンのウェットエッチング装置における、シリコンのウェットエッチング深さ精度の評価を行った。実施した条件は次の条件である。

<エッチング条件>

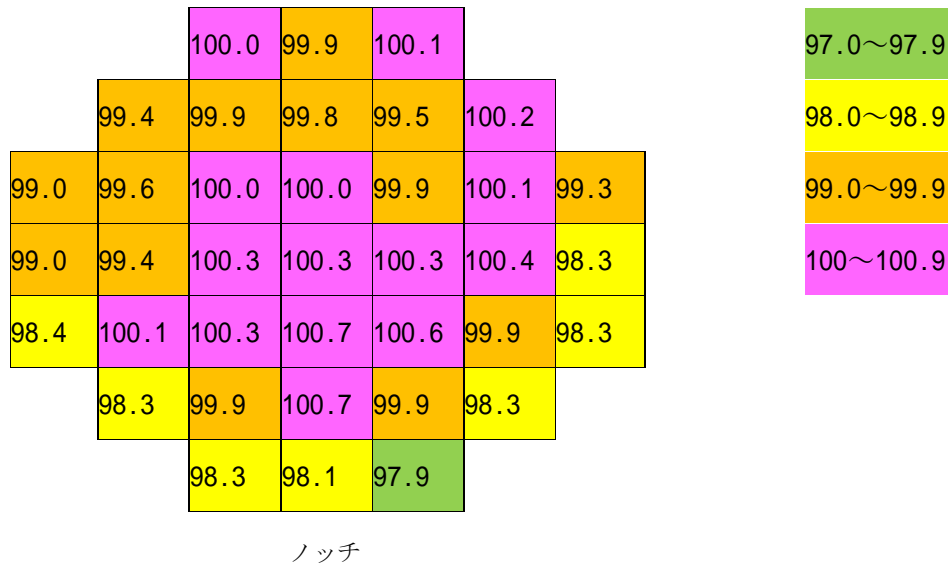
- ・使用薬液：TMAH 濃度 25wet%
- ・エッチング液温：85
- ・エッチング時間：3hour 20min
- ・ウェハ：8インチ N [100] 10~50 ・cm²

評価は KLA Tencor 製 P-16 の段差測定装置を用いて、工程評価 TEG 部のエッチング深さを評価した。評価した結果を表 V.2.2.1-4.1-1 に示す。エッチング深さ精度は ±1.4% であり、検収条件である ±3% をクリアしている。エッチングレートは 0.5 μm/min 程度である。

エッチング深さバラツキのウェハ面内分布としては、図 V.2.2.1-4.1-2 で示しており、下側のウェハ外周付近 (エッチング時の上側) が、やや浅くなっていることが判った。

表V.2.2.1-4.1-1 エッチング深さ評価結果

	評価結果
エッチング深さ平均	99.6 μ m
	0.8 μ m
MAX	100.7 μ m
MIN	97.9 μ m
R	2.8 μ m
加工精度	±1.4%



図V.2.2.1-4.1-2 エッチング深さバラツキのウェハ面内分布

マスク材であるシリコン窒化膜の膜減り量は、図V.2.2.1-4.1-2 に示すように、シリコンを 100 μ m エッチングする場合、膜減り量が 78 Å 程度で、膜減りレートが 0.4 / min 程度と小さく、シリコンエッチング加工上問題の無いレベルであった。

表V.2.2.1-4.1-2 シリコン窒化膜の膜減り量の評価結果

エッチング前膜厚	エッチング後膜厚	膜減り量	膜減りレート
5254	5176	78	0.4 /min

()-4.2 酸化炉のライン特性評価

シリコン基板に熱酸化膜を形成する、(株)光洋サーモ社製酸化炉について、膜厚均一性及び、膜応力評価を行った。実施した条件は下記の条件である。

- ・ 酸化方式：パイロ酸化
- ・ 温度：1100
- ・ 時間：50min
- ・ ウェハ配置：図 V.2.2.1-4.2-1 の 25 枚間隔配置。

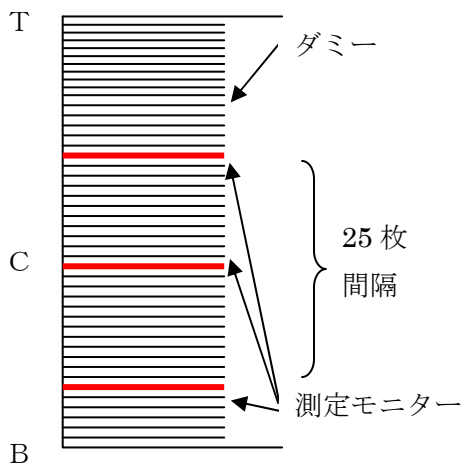


図 V.2.2.1-4.2-1 酸化炉でのウェハ配置

膜厚均一性を、大塚電子(株)社製 FE-3000 を用いて評価し、評価結果を、表() .4.2-1 に示す。それぞれのウェハに対し、面内 9 点の膜厚を測定した。ウェハ面内の膜厚均一性は $\pm 0.4\sim 0.7\%$ 程度、バッチ内の膜厚均一性は $\pm 1.7\%$ 程度で、検収条件である $\pm 3\%$ をクリアしている。

熱酸化膜の応力評価を、ヤマト化学(株)社製 F L X -2320 の薄膜応力評価装置を用い評価し、評価結果を図() .4.2-2 示す。応力は 337MP a であり圧縮応力であった。

表 V.2.2.1-4.2-1 膜厚評価結果

	TOP	CNT	BTM	バッチ内
A v e	4955	4964	4972	4964
	13	18	22	19
精度	$\pm 0.4\%$	$\pm 0.6\%$	$\pm 0.7\%$	$\pm 1.7\%$

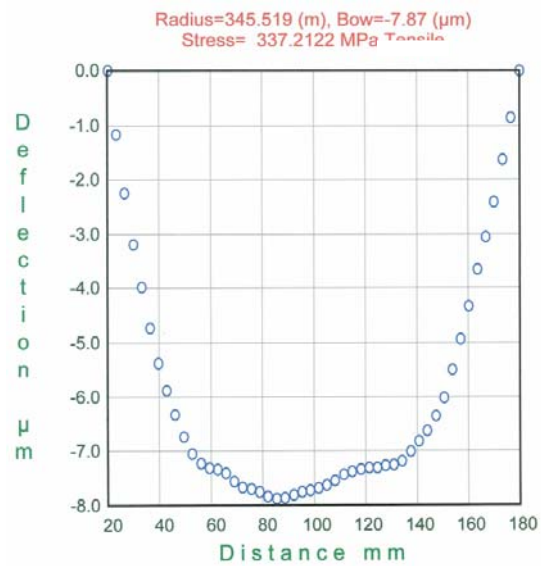


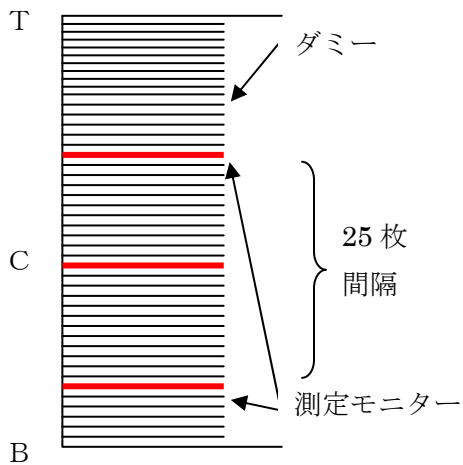
図 V.2.2.1-4.2-2 熱酸化膜の応力評価

()-4.3 高品質成膜装置 (LPCVD-SiN) のライン特性評価

シリコン基板にシリコン窒化膜を形成する、(株)光洋サーモ社製高品質成膜装置 (LPCVD-SiN) について、膜厚均一性及び、膜応力評価を行った。

実施した条件は下記の条件である。

- 温度 : 780
- 時間 : 30min
- ウェハ配置 : 図 V.2.2.1-4.3-1 の 25 枚間隔配置。



図V.2.2.1-4.3-1 LPCVD-SiNでのウェハ配置

評価は、大塚電子(株)製 FE-3000 膜厚測定装置を用いて評価し、評価結果を、表 .2.2.1-4.3-1 に示す。それぞれのウェハに対し、面内 9 点の膜厚を測定した。ウェハ面内の膜厚均一性は $\pm 1.8\sim 2.3\%$ 程度、バッチ内の膜厚均一性は $\pm 1.4\%$ 程度で、検収条件である $\pm 3\%$ をクリアしている。

シリコン窒化膜の応力評価を、ヤマト化学(株)製 F L X -2320 の薄膜応力評価装置を用い評価し、評価結果を図V.2.2.1-4.3-2 に示す。応力は -871MPa であり引っ張り応力であった。

表V.2.2.1-4.3-1 膜厚評価結果

	TOP	CNT	BTM	バッチ内
Ave	1048	1046	1064	1048
	17	13	22	20
精度	$\pm 2.2\%$	$\pm 1.8\%$	$\pm 2.3\%$	$\pm 1.4\%$

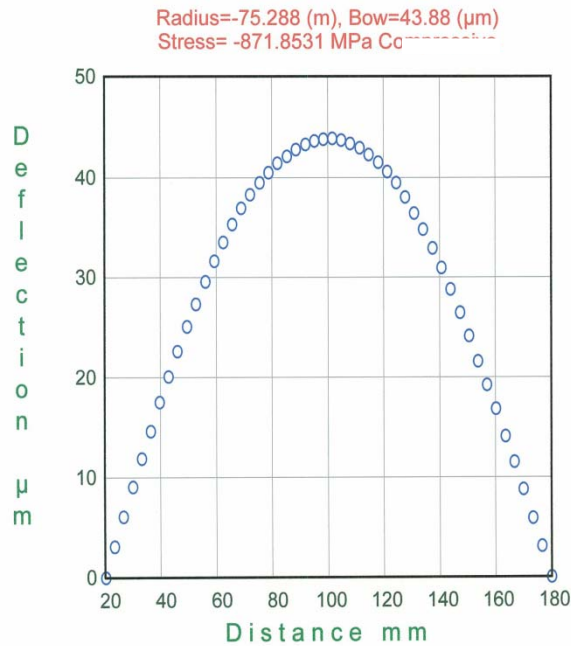
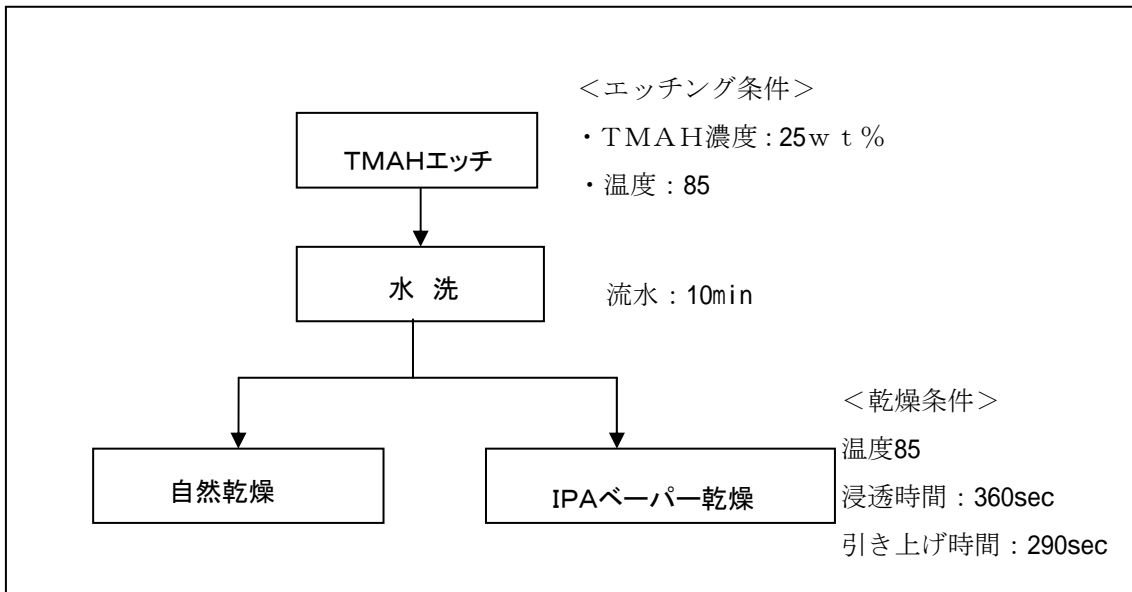


図 V.2.2.1-4.3-2 シリコン窒化膜の応力評価結果

()-4.4 IPAベーパー乾燥装置のライン特性評価

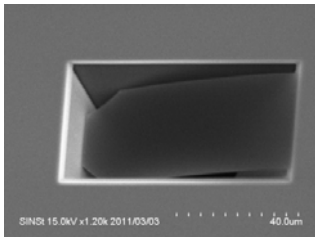
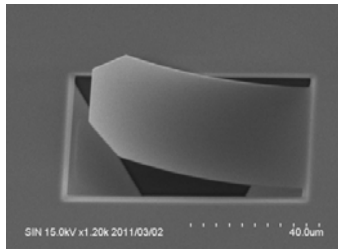
ウェットエッチング後の乾燥に用いる(株)ETS社製IPAベーパー乾燥装置に関し、乾燥性能の評価を行った。評価方法として、TMAHによるシリコンのウェットエッチング後の乾燥工程について、スティクションの発生度合いを確認する為に、自然乾燥とIPAベーパー乾燥でのスティクション発生状態の比較評価を行った。評価水準として、図 .2.2.1-4.4-1 に示す通り、TMAH液を用いてシリコンウェットエッチングを行い、水洗を行った後、自然乾燥する水準と、水洗後すぐにIPAベーパーで乾燥する水準である。チップは、今回設計したLチップを用いて比較評価を行う。膜構成は、シリコン窒化膜 1000、熱酸化膜 3000 とした。IPAベーパー乾燥装置の条件としては、温度 85°C、浸透時間 360sec、引き上げ時間 290sec とした。



図V.2.2.1-4.4-1 IPAベーパー乾燥の評価方法

スティクション評価は、ブルカー・エイエックスエス製のGTX-3 3次元表面評価装置を用いた。ウェハ面内 15 点を評価した結果を表V.2.2.1-4.4-1 に示す。自然乾燥では、15 点中 14 点の薄膜メンブレンTEGがシリコンのエッチング側面にスティクションしているが、IPAベーパー乾燥では、15 点全ての薄膜メンブレンTEGがスティクションせずに乾燥できている。

表V.2.2.1-4.4-1 IPAベーパー乾燥スティクション評価結果

	自然乾燥	IPAベーパー乾燥
スティクション発生数	14/15	0/15
発生率	93%	0%
SEM観察写真		

()-5 シリコン窒化膜の低応力化検討結果

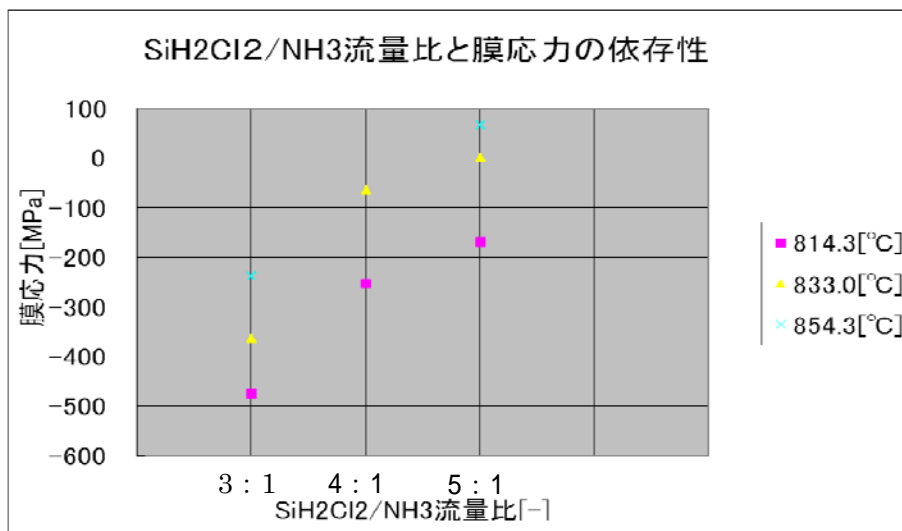
今回の設計・試作の取り組みにおいて、熱酸化膜の圧縮膜応力と、シリコン窒化膜の引っ張り膜応力の、二層膜の応力コントロールを行い、薄膜メンブレンTEGの反りをいかに制御するかが、試作の重要なポイントである。その手段としてシリコン窒化膜の低応力化について取り組んだ。

成膜時に SiH_2Cl_2 と NH_3 ガスを供給し減圧CVDで成膜する。低応力のシリコン窒化膜を成膜するには、ガス比を、 SiH_2Cl_2 の割合を増やす。これによりシリコンリッチで低応力のシリコン窒化膜が成膜可能である。その為に、 SiH_2Cl_2 と NH_3 ガス比、及び、成膜温度を条件設定し、膜応力との依存性を把握する実験を行った。

実験水準としては、下記に示す。

- ・ガス比 ($\text{SiH}_2\text{Cl}_2 : \text{NH}_3$) = 3水準 3 : 1、4 : 1、5 : 1
 - ・成膜温度 = 3水準 815°C、830°C、850°C
- 上記3水準×3水準=計9水準

成膜後の応力評価は、ライン評価と同じくヤマト化学(株)製FLX-2320の薄膜応力評価装置を用いて行った。その結果について図V.2.2.1-5-1に示す。 SiH_2Cl_2 の割合を増やすことにより、膜応力が低減していることが確認出来た。又、成膜温度を高く設定すると、膜応力の低減効果が確認出来た。



図V.2.2.1-5-1 低応力の実験結果

()-6 薄膜メンブレンTEGの最適化検討

()-6.1 シリコン窒化膜低応力化検討試作結果

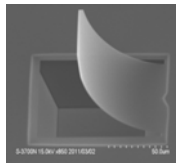
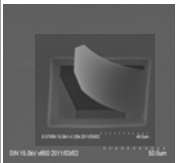
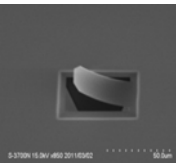
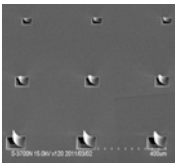
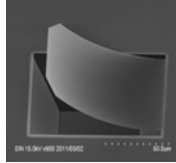
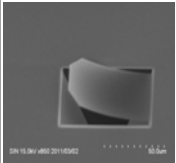
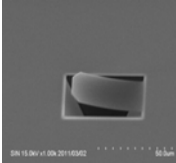
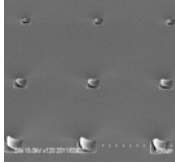
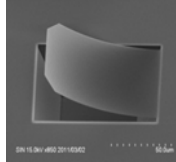
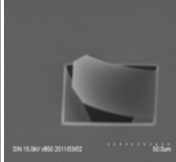
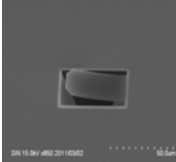
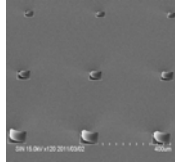
()-5 でシリコン窒化膜の低応力化検討で得られた結果を基に、下記成膜水準で試作した。試作の水準を、表V.2.2.1-6-1-1に示す。

表V.2.2.1-6-1-1 試作水準内容

	水準1	水準2	水準3
酸化膜厚(Å)	4800	4800	4800
SiN膜厚(Å)	500	500	500
SiN膜応力(MPa)	-871	-100	60

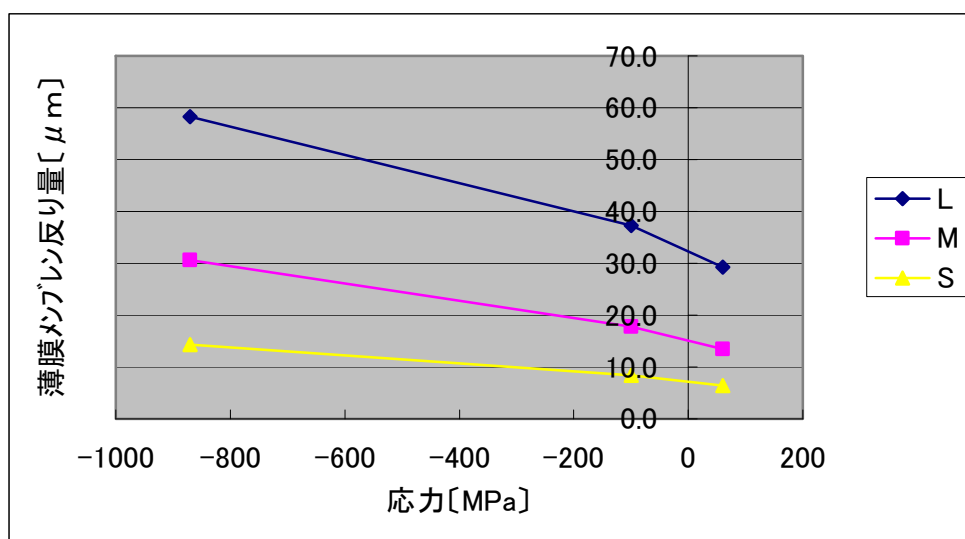
試作後薄膜メンブレンTEGの形状評価を、日立ハイテク(株)製の電子顕微鏡を用いて実施した。その結果を表V.2.2.1-6-1-2に示す。薄膜メンブレンTEGの反り量については、ブルカー・エイエックスエス製のGTX-3 3次元表面評価装置を用いて評価した。その結果を表V.2.2.1-6-1-3、図V.2.2.1-6-1-1示す。水準1の標準条件に比べ、水準2から水準3と低応力になるにつれて、反りが低減しており、シリコン窒化膜応力と薄膜メンブレンTEGの反り量との依存性が確認出来た。水準1と水準3を比べると、Sチップでは14μm程度の反りが、6.5μmに低減されている。Lチップでは、60μm程度の反りが、半分程度の30μm程度に低減されているが、反り量はやや大きい。

表()-6-1-2 SEMによる薄膜メンブレンTEG形状観察結果

	Lチップ	Mチップ	Sチップ	全体
水準1 SiN-850MPa :500				
水準 SiN:-100MPa SiN:500				
60MPa SiN:500 SiO2 : 4800				

表V.2.2.1-6.1-3 薄膜メンブレンTEGの反り評価結果

		水準1	水準2	水準3
酸化膜厚(Å)		4800	4800	4800
SiN膜厚(Å)		500	500	500
SiN膜応力(MPa)		-871	-100	60
L	AVE(μm)	58.3	37.3	29.2
	(μm)	0.6	0.8	0.5
M	AVE(μm)	30.6	17.8	13.4
	(μm)	0.5	0.7	0.3
S	AVE(μm)	14.4	8.3	6.5
	(μm)	0.7	0.4	0.1



図V.2.2.1-6-1-1 シリコン窒化膜応力と、薄膜メンブレンTEG反りの依存性

()-6.2 薄膜メンブレンTEG膜構成の最適化検討試作結果

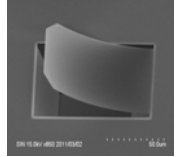
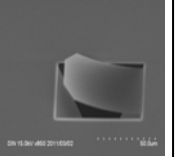
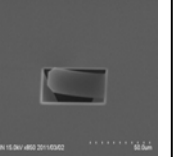
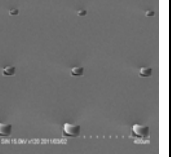
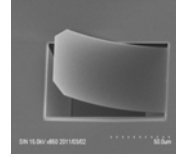
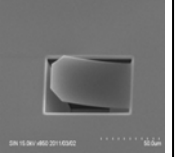
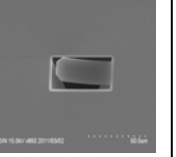
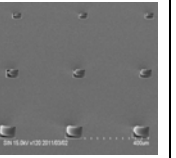
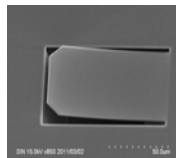
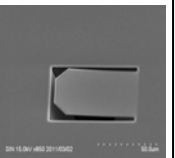
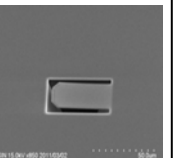
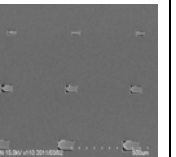
そこで、更なる薄膜メンブレンTEGの反り低減を狙い、薄膜メンブレンTEGの膜構成の検討試作を行った。反り発生の要因はシリコン窒化膜の引っ張り応力の残留が考えられる。その残留応力の影響度合いを少なくする為、熱酸化膜の厚みを厚くした。熱酸化膜の厚みと、薄膜メンブレンTEGの反りとの依存性を把握する為、表V.2.2.1-6.2-1 に示す水準の試作を実施した。

表V.2.2.1-6.2-1 実験水準内容

	水準3	水準4	水準5
酸化膜厚 (Å)	4800	5800	12000
SiN 膜厚 (Å)	500	500	500
SiN 膜応力 (MPa)	60	60	60

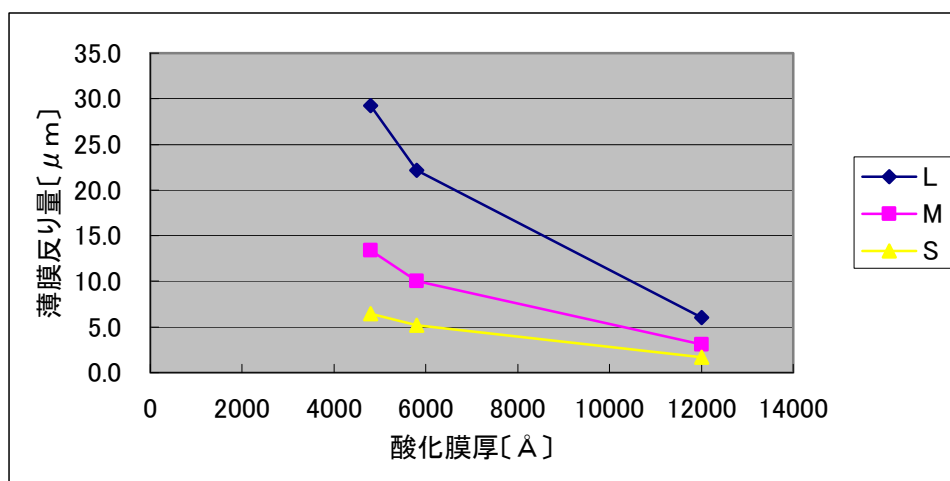
薄膜メンブレンTEGの形状評価結果を表V.2.2.1-6.2-2 に、薄膜メンブレンTEGの反り量の結果を表V.2.2.1-6.2-3、図V.2.2.1-6.2-1 に示す。水準3の標準条件と比べ、水準4、5の熱酸化膜が厚くなるにつれて、薄膜メンブレンTEGの反りが低減しており、依存性が確認出来た。水準3と水準5を比べると、Sチップでは6.5μm程度の反りが、1.7μmに低減されている。Lチップは、30μm程度の反りが、1/5程度の6μmに大きく低減されていることが確認できた。

表V.2.2.1-6.2-2 SEMによる薄膜メンブレンTEG形状観察結果

	Lチップ	Mチップ	Sチップ	全体
水準3 60MPa SiN:500				
水準4 60MPa SiN:500 SiO2 : 5800				
水準5 60MPa SiN:500 SiO2 : 12000				

表V.2.2.1-6.2-3 薄膜メンブレンTEGの反り評価結果

		水準3	水準4	水準5
酸化膜厚 (Å)		4800	5800	12000
SiN 膜厚 (Å)		500	500	500
SiN 膜応力 (MPa)		60	60	60
L	AVE (μm)	29.2	22.2	6.0
	(μm)	0.5	0.3	0.2
M	AVE (μm)	13.4	10.0	3.1
	(μm)	0.3	0.5	0.3
S	AVE (μm)	6.5	5.2	1.7
	(μm)	0.1	0.2	0.2



図V.2.2.1-6.2-1 熱酸化膜厚と、薄膜メンブレンTEG反りの依存性

(a)-()-6.3 試作ウェハのキャビティー加工形状評価結果

ここで、試作した 5 つの水準に関して、シリコンウェットエッチング加工形状の評価を行った。表V.2.2.1-6.3-1 に、TMAHでウェットエッチングされたキャビティーのエッチング深さをブルカー・エイエックスエス製のGT X-3 3次元表面評価装置を用いて評価した結果を示す。各ウェハの平均値が 28.5~29.7 μmの範囲内で、ほぼ 1 μmであり、ウェハ間の再現性が得られた。加工バラツキは、 が最大で 0.6 μmであり、問題ないレベルであった。

表V.2.2.1-6.3-1 エッチング深さ評価結果

		水準1	水準2	水準3	水準4	水準5
酸化膜厚(Å)		4800	4800	4800	5800	12000
SiN膜厚(Å)		500	500	500	500	500
SiN膜応力(MPa)		-871	-100	60	60	60
深さ	AVE(μm)	28.5	29.7	28.8	28.7	29.5
	(μm)	0.0	0.6	0.3	0.1	0.2

表V.2.2.1-6.3-2は、TMAHでウェットエッチングされたシリコン部分のTOP面のX、Yの開口寸法をブルカー・エイエックスエス製のGTX-3 3次元表面評価装置を用いて評価した結果である。

水準3、5について、ほぼ設計値の形状は得られているが、水準1、2、4では平均で2~3μm、MAXで10μm程度広がっている部位があり、原因究明が今後の課題である。

表V.2.2.1-6.3-2 XY形状評価結果

		水準1	水準2	水準3	水準4	水準5	
酸化膜厚(Å)		4800	4800	4800	5800	12000	
SiN膜厚(Å)		500	500	500	500	500	
SiN膜応力(MPa)		-871	-100	60	60	60	
L	X	AVE(μm)	74.5	75.5	72.5	75.6	73.0
		(μm)	2.9	3.0	0.3	2.7	0.5
	Y	AVE(μm)	103.8	105.0	102.9	105.0	102.6
		(μm)	2.3	2.3	0.3	2.2	0.4
M	X	AVE(μm)	54.5	55.4	52.6	55.2	52.6
		(μm)	3.2	2.7	1.1	2.6	0.4
	Y	AVE(μm)	73.9	74.9	72.6	75.2	72.4
		(μm)	2.3	2.7	0.4	2.8	0.4
S	X	AVE(μm)	34.0	35.5	32.8	35.6	32.9
		(μm)	2.4	2.8	0.2	2.7	0.5
	Y	AVE(μm)	54.1	54.7	52.6	54.7	52.4
		(μm)	2.7	2.3	0.2	1.9	0.3

表V.2.2.1-6.3-3は、水準5において、ウェハ間の加工バラツキを評価した結果である。ウェハ1とウェハ2を比較して、薄膜メンブレンTEGの反り、エッチングされたシリコン部分のTOP面のX、Yの開口寸法、エッチング深さとも、再現性良く加工されていることが確認出来た。

表V.2.2.1-6.3-3 ウェハ間のバラツキ評価結果

			水準5		
			ウェハ1	ウェハ2	
酸化膜厚(Å)			12000	12000	
SiN膜厚(Å)			500	500	
SiN膜応力(MPa)			60	60	
薄膜 メンブレン 反り量 〔μm〕	L	AVE(μm)	6.0	6.2	
		(μm)	0.2	0.1	
	M	AVE(μm)	3.1	3.1	
		(μm)	0.3	0.2	
	S	AVE(μm)	1.7	1.7	
		(μm)	0.2	0.2	
エッチング 深さ〔μm〕		AVE(μm)	29.5	29.2	
		(μm)	0.2	0.1	
XY形状 〔μm〕	L	X	AVE(μm)	73.0	72.4
			(μm)	0.5	0.3
		Y	AVE(μm)	102.6	102.6
			(μm)	0.4	0.2
	M	X	AVE(μm)	52.6	52.5
			(μm)	0.4	0.3
		Y	AVE(μm)	72.4	72.6
			(μm)	0.4	0.3
	S	X	AVE(μm)	32.9	32.5
			(μm)	0.5	0.5
		Y	AVE(μm)	52.4	52.7
			(μm)	0.3	0.3

()-7 まとめ

今回、薄膜メンブレンTEG設計・試作を行うことにより、圧力センサ、フローセンサ、温度センサ等のセンサ造出に不可欠であるシリコン窒化膜・熱酸化膜の形成条件のデータ蓄積が行えた。シリコン窒化膜の低応力化や、薄膜メンブレンTEGの膜構成の最適化により、薄膜メンブレンTEGの反りを十分に低減でき、安定した加工形状が得られることを確認した。

また、8 インチラインでのウェットエッチング装置・酸化炉・高品質成膜装置(LPCVD-SiN)・IPAベーパー乾燥装置のラインの特性を評価し、試作ウェハの面内バラツキ評価、ウェハ間のバラツキ評価を通じて、製造環境を評価した。これらにより、薄膜メンブレンTEGに用いるMEMSデバイス製造ラインの構築が図れた。

(iii) 圧電薄膜ジャイロ TEG の設計・試作

() -1.1 センサ構造

近年ジャイロセンサは、カメラ一体型 VTR やデジタルスチルカメラの手ぶれ防止用途、家庭用ゲーム機器のコントローラやスマートフォン等の携帯電話に採用が拡大している。

本センサは、MEMS 技術を用いて振動子をビームで保持する構造体上に圧電薄膜を成膜し、その上に駆動電極と検出電極を配置した構造である。駆動電極に交流電圧を印加することにより振動子（錘）を駆動し、角速度印加によるコリオリ力を検出電極に発生する電荷で検出する。この原理により 2 軸または 3 軸の角速度を検出だけでなく、3 軸の動的加速度の検出も可能である。また、圧電薄膜型モーションセンサの構造は、加速度センサの構造と全く同じなので圧電薄膜を成膜する前にピエゾ抵抗素子を形成しておけば、静的加速度の検出も可能である。

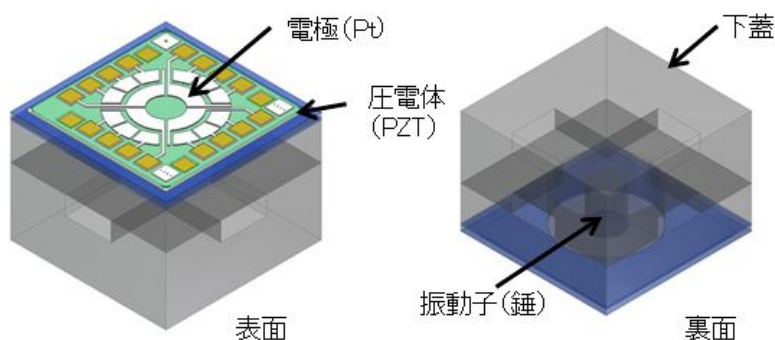


図 V.2.2.1-1.1 センサ概略図

() -1.2 検出原理と駆動方法

本センサは 1 個のセンサで駆動方法を変えることで、3 軸加速度&2 軸角速度検出（5 軸モーションセンサ）と 3 軸加速度&3 軸角速度検出（6 軸モーションセンサ）の 2 種類のセンサにすることができる。ここでは、3 軸加速度と 3 軸角速度の検出原理とそのときの駆動方法について説明する。

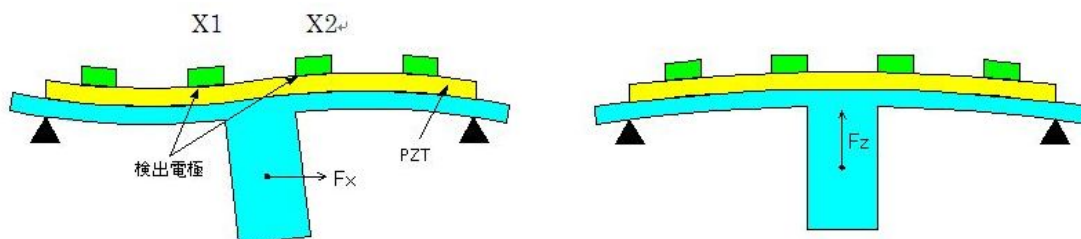
() -1.2.1 3 軸加速度の検出原理

圧電薄膜型モーションセンサの断面模式図を図 V.2.2.1-1.2.1-1 に示す。MEMS 技術で形成された Si ダイアフラムの上に PbTiO_3 と PbZrO_3 の固溶体である $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ 薄膜（以下 PZT 薄膜）を成膜し、その上に駆動電極と検出電極を配置した構造である。

PZT 薄膜の上には駆動電極、検出電極、駆動状態をモニターするためのフィードバック電極が形成されている。駆動電極と検出電極の配置は FEM 解析によって決定する。とくに検出電極の位置は重要であり、応力が集中する領域に配置する必要がある。

振動子に加速度が作用すると振動子に力 ($F=ma$) が加わり、振動板が変形する。X 軸方位の加速度が作用すると、振動板は図 V.2.2.1-1.2.1-1 の左図のように変形し、また、Z

軸方向の加速度が作用すると図V.2.2.1-1.2.1-1の右図のように変形する。この変形により、4つの検出電極(X1, X2, Y1, Y2)には表V.2.2.1-1.2.1-1に示す電荷が発生する。したがって、X軸方向の力 F_x はX軸上に配置された2つの検出電極(X1, X2)に発生する電荷の差で検出され、Y軸方向の力 F_y はY軸上に配置された2つの検出電極(Y1, Y2)に発生する電荷の差で検出され、また、Z軸方向の力 F_z は4つの検出電極(X1, X2, Y1, Y2)の和で検出される。



図V.2.2.1-1.2.1-1 断面模式図によるダイアフラムの変形

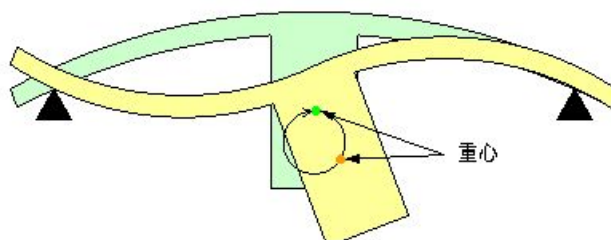
表V.2.2.1-1.2.1-1 各検出電極での電荷発生状況

	X1	X2	Y1	Y2
F_x	-	+	0	0
F_y	0	0	-	+
F_z	+	+	+	+

() -1.2.2 3軸角速度の検出原理

質量も持った物体がある速度をもって運動しているとき、その物体に角速度が作用すると、コリオリ力が発生する。角速度の検出にはこのコリオリの法則を利用する。

2軸角速度を検出する場合は振動子をZ軸方向に単振動させればよいが、3軸角速度を検出する場合は振動子を図V.2.2.1-1.2.2-1に示すようにX-Z平面で回転運動させる。この運動において、振動子はX軸方向の運動成分 V_x とZ軸方向の速度成分 V_z を持つことになる。



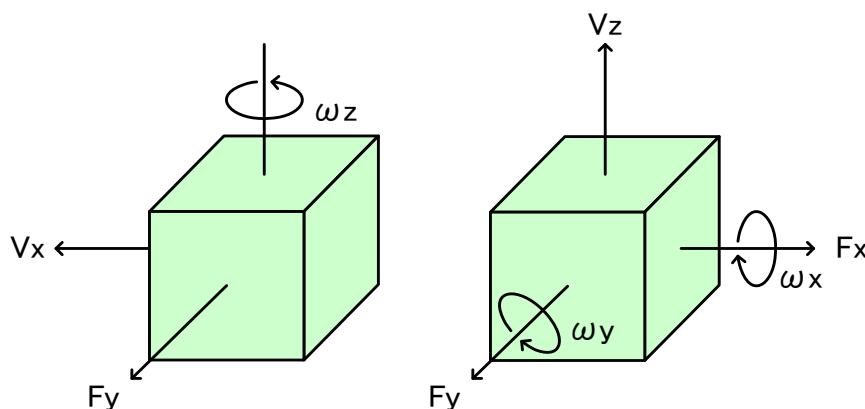
図V.2.2.1-1.2.2-1 振動子のX-Z平面での回転運動

図V.2.2.1-1.2.2-2に示す通り、振動子がZ軸方向の速度成分Vzを持って運動しているとき、X軸周りの角速度 ω_x が作用するとY軸方向のコリオリ力Fyが発生し、Y軸方向の角速度 ω_y が作用するとX軸方向のコリオリ力Fxが発生する。また、振動子がX軸方向の速度成分Vxを持って運動しているとき、Z軸周りの角速度 ω_z が作用するとY軸方向のコリオリ力Fyが発生する。

この関係を次式(1)に示す。

$$\begin{aligned} F_y &= 2mV_z \times \omega_x \\ F_x &= 2mV_z \times \omega_y \cdots \cdots (1) \\ F_y &= 2mV_x \times \omega_z \end{aligned}$$

この式は、振動子をX-Z平面で回転運動させることによって2軸方向の速度成分(Vx, Vz)を与え、2軸方向のコリオリ力(Fx, Fy)を検出することで、3軸の角速度成分(ω_x , ω_y , ω_z)を検出することができることを示している。振動子にコリオリ力Fxが作用すると振動板は図V.2.2.1-1.2.1-1の左図のように変形し、X軸方向のコリオリ力Fxは、加速度がX軸方向に作用したときと同じように検出される。Y軸方向のコリオリ力Fyも同様に検出される。



図V.2.2.1-1.2.2-2 コリオリ力の検出原理

() -1.2.3 振動子の駆動方法

ダイアフラム周辺部に配置された4つの駆動電極に位相の異なる交流信号を印加することで、図V.2.2.1-1.2.2-1のように振動子をX-Z平面で回転運動させることができる。具体的には、駆動電極(X1)と(X2)の駆動信号の位相差を180°、駆動電極(X1, X2)と(Y1, Y2)の位相差を90°に設定する。

() -1.3 信号処理方法

2軸角速度検出は、振動子をZ軸方向に単振動させX軸方向のコリオリ力からY軸周りの角速度 ω_y 、Y軸方向のコリオリ力からX軸周りの角速度 ω_x を検出する。3軸角速度検出は、振動子をX-Z平面で回転運動させることによってX軸方向とZ軸方向の速度成分を与え、X軸方向のコリオリ力 F_x からY軸周りの角速度 ω_y 、Y軸方向のコリオリ力 F_y からX軸周りの角速度 ω_x とZ軸周りの角速度 ω_z を検出する。2軸方向の力 (F_x , F_y) によって圧電薄膜に発生する電荷を、力に比例した電圧 (E_x , E_y) に変換する。

X軸上を通過する瞬間(速度成分 V_z)において、X軸方向とY軸方向のコリオリ力 (F_x , F_y) を測定する。つまり、駆動信号 (D_x 又は D_z) で電圧 (E_x , E_y) を同期検波すれば、角速度 ω_x と角速度 ω_y を検出することができる。さらに、Z軸上を通過する瞬間(速度成分 V_x)において、Y軸方向のコリオリ力 F_y を測定する。つまり、駆動信号 (D_x , D_z) で電圧 (E_y) を同期検波すれば、角速度 ω_z を検出することができる。また、3軸加速度成分を検出する場合、3軸方向の力 (F_x , F_y , F_z) によって圧電薄膜に発生する電荷を電圧 (E_x , E_y , E_z) に変換し、ローパスフィルタに通すことで、3軸加速度成分 (A_x , A_y , A_z) を得ることができる。

() -2 8インチ TEG 設計

本センサの基板はSOI ウェハを用い、表面に下部電極(Pt)、PZT 薄膜、上部電極 (Pt) を積層し、裏面は Deep RIE により錘を形成する。

() -2.1 ジャイロセンサチップ

ジャイロセンサチップの概略図を図V.2.2.1-2.1-1の通りである。チップサイズ1.6mm角、検出・駆動電極サイズ160 μ m角、錘は外径970 μ m内径360,420,490 μ mの3種類ある。チップには外径の種類や8インチウェハのチップ座標が分かるよう図V.2.2.1-2.1-2の示すように①~③のマークを設けた。

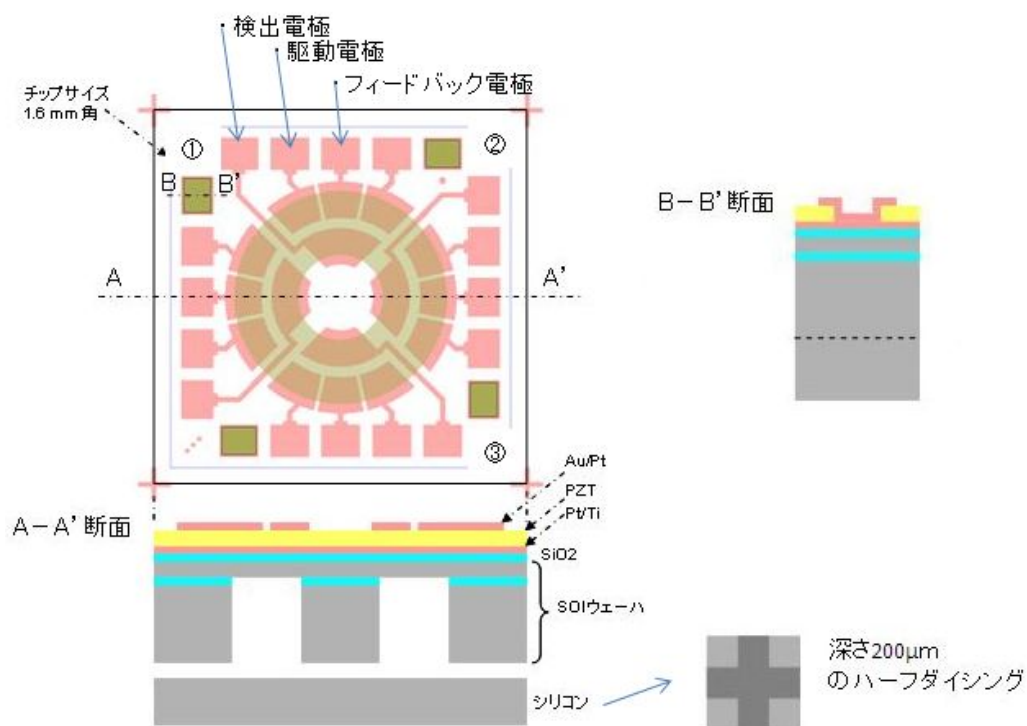


図 V.2.2.1-2.1-1 センサ概略図



図 V.2.2.1-2.1-2 チップマーク

() -2.2 カンチレバー

8インチ面内 PZT 薄膜の圧電定数 d_{31} を測定できるように TEG 内に圧電マイクロカンチレバーを挿入した。図 V.2.2.1-2.2-1 にカンチレバー構造を示す。カンチレバーのサイズは、長さ 1mm 幅 300 μ m である。

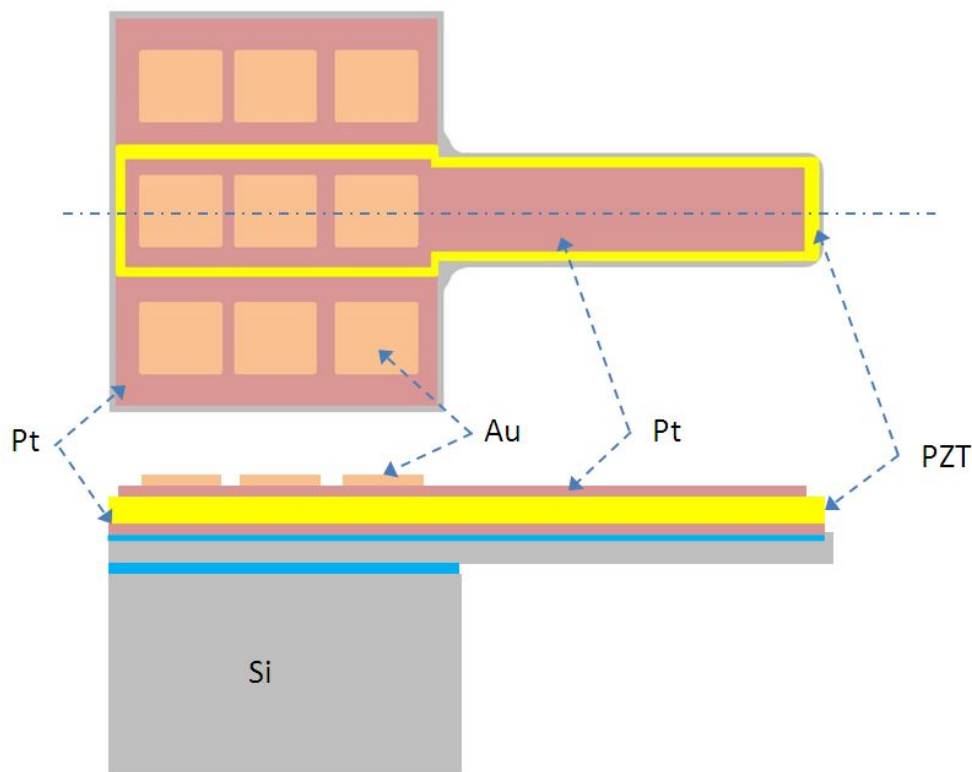


図 V.2.2.1-2.2-1 カンチレバー

(iii) -2.3 TEG 配置

8インチウェハ面内の TEG 配置図を図 V.2.2.1-2.3-1 に示す。カンチレバーは 6 個を 1 チップとして 8インチ面内に 19 箇所配置、その他薬液浸透用として貫通孔を約 10mm ピッチに配置した。

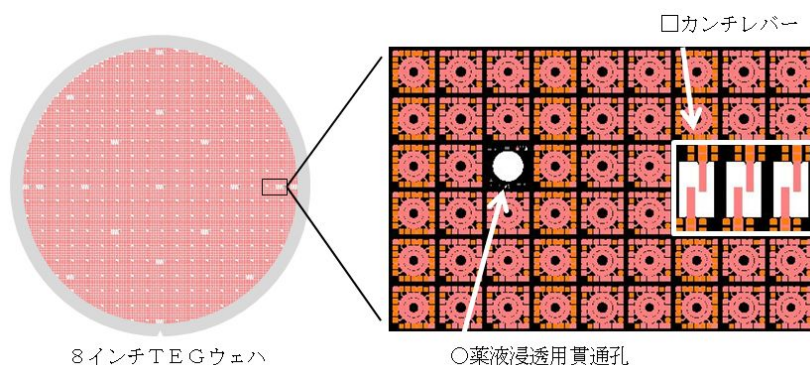


図 V.2.2.1-2.3-1 TEG 配置

(iii) -2.4 共振周波数の FEM 解析

共振周波数の FEM 解析結果を図 V.2.2.1-2.4-1 に示す。周波数は基本的に 20kHz~32kHz が望ましくこれらは、チップのサイズや振動子（錘）の厚みが周波数の大きさを左右する。解析結果では、PZT 膜厚 1μm で周波数 26~28kHz、離調度は 2%弱である。

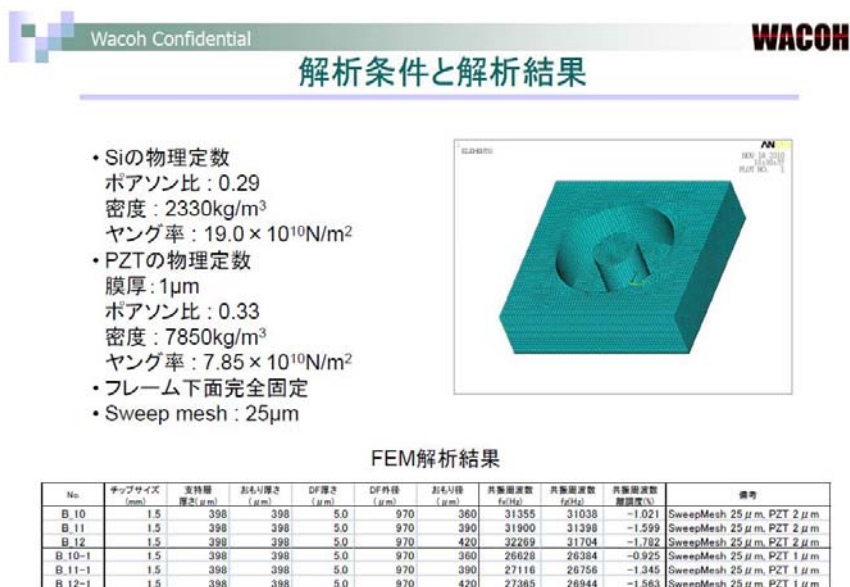


図 V.2.2.1-2.4-1 共振周波数シミュレーション結果

(iii) -2.5 指標

8 インチ TEG ウェハの試作目標および指標は表 V.2.2.1-2.5-1 の通りである。

表 V.2.2.1-2.5-1 指標

種類	項目	単位	目標値
強誘電特性	飽和分極量 Pm	μ C/cm2	30
カンチレバー変位	圧電定数 d31	pm/V	-100
センサ特性	最大検出角速度	deg/sec	300
	検出感度	mV/deg/sec	0.7
8 インチ TEG ウェハ	面内分布	%	± 5

() -3 プロセス設計

圧電薄膜ジャイロセンサー 8 インチ TEG ウェハの基板仕様を表 V.2.2.1-3-1 に、試作工程を表 V.2.2.1-3-2,3,4 に示す。8 インチウェハ用 PZT 成膜装置は、来期導入予定の為今期は外部委託 (MO-CVD 法とスパッタリング法) とした。

表 V.2.2.1-3-1 基板仕様

	項目	MO-CVD法	スパッタリング法
SOI 基板	直径	200mm	→
	ノッチ	Vノッチ	→
	面仕上げ	片面ポリッシュ	→
	結晶面方位	{100}	→
	ノッチ方位	<011>	→
	厚さ 活性層	5um	→
	厚さ BOX層	2um	→
	厚さ 支持層	400um	→
成膜 加工	表面SiO ₂	120nm ±10nm	→
	Ti (密着層)	20nm ±10nm 成膜温度 RT	20nm ±10% ---
	Pt (上部・下部電極)	100nm ±10nm 成膜温度 RT	100nm ±10% ---
	PZT (圧電体)	800-1000nm	2000nm ±10%
		成膜温度 525℃	---

表 V.2.2.1-3-2 試作工程 1

No	1	2	3	4	5
工程	絶縁膜成膜	下部電極成膜	圧電体成膜	上部電極成膜	上部電極エッチング
仕様	TOx: 100nm	Pt: 100nm TEMP: RT &200℃	PZT: 1-2um	Pt: 100nm TEMP: RT	Resist: PFI 1.5um CL2/60.O2/40 2Pa,1000W/500W OE 50%
場所 装置	3D 拡散炉 or 酸化炉	3D スパッタリング	<外注> MO-CVD スパッタリング	3D スパッタリング	3D メタルエッチング
構造					

表 V.2.2.1-3-3 試作工程 2

No	6	7	8	9	10
工程	圧電体ウェットエッチング	下部電極エッチング	パッド成膜	パッドエッチング	シリコン深堀 (サポート基板剥離用穴加工)
仕様	Resist: PFI 1.5um BHF調合液	Resist: PFI 1.5um 上部電極同様	Au: 400nm TEMP: RT	Auエッチャント液	Resist: PFI 1.5um Recipe: High rate
場所 装置	2G ドラフト	3D メタルエッチング	3D スパッタリング	2G ドラフト	3D シリコン深堀り加工
構造					

表 V.2.2.1-3-4 試作工程 3

No	11	12	13	14
工程	シリコンポリッシュ	シリコン深堀 (錘加工)	ハーフダイシング (下蓋加工)	下蓋接合
仕様	絶縁膜剥離 Si 2um研磨 電極側サポート基板 貼り付け	Resist: CA1000 10um Recipe: High rate 電極側サポート基板		
場所 装置	外注	3D シリコン深堀り加工	2A ブレードダイシング	3B 低環境負荷ウエハ接合
構造				

() -4 PZT 成膜

強誘電体 (PZT) 薄膜の主な形成方法には、溶液塗布 (ゾルゲル法)、有機金属化学気相成長法 (MO-CVD :Metal-Organic Chemical Vapor Deposition)、スパッタリング法がある。いずれも強誘電体不揮発性メモリ FeRAM 開発のための膨大な研究成果によるところが大きい。しかし FeRAM で必要とする PZT 厚みは 100nm 前後と MEMS で必要とする 2~10um に遠くおよばない。一方バルクセラミックスは性能が安定化しており研磨加工して製造する手法も考えられるが機械加工による研磨は数十 um が限界である。現在主流となる成膜法はなくファブダリーや装置メーカーは MEMS 用途の為にゾルゲル・MO-CVD・スパッタリング法による PZT 厚膜化を個々に開発している。

() -4.1 外観

今回 PZT 薄膜は MO-CVD 法とスパッタリング法の 2 種類の方法で装置メーカーへ成膜委託した。図 V.2.2.1-4.1-1 は、成膜後の顕微鏡および断面 SEM 観察結果である。

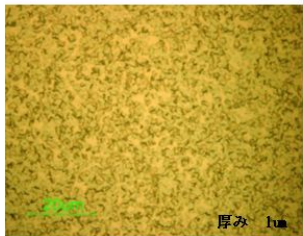
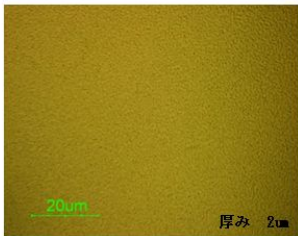
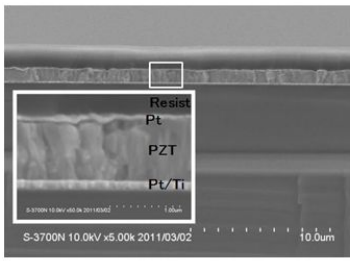
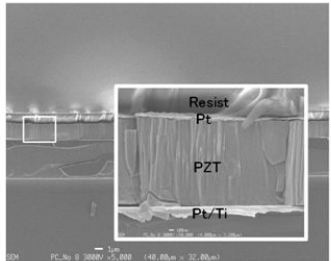
	MO-CVD法	スパッタリング法
顕微鏡		
SEM		

図 V.2.2.1-4.1-1 外観結果 (顕微鏡・SEM)

() -4.2 X線回折測定 (XRD)

MO-CVD 法およびスパッタリング法にて成膜した 8 インチ PZT 基板の面内 9 点の X 線回折測定を実施した。結果は図・表 V.2.2.1-4.2-1 の通りである。

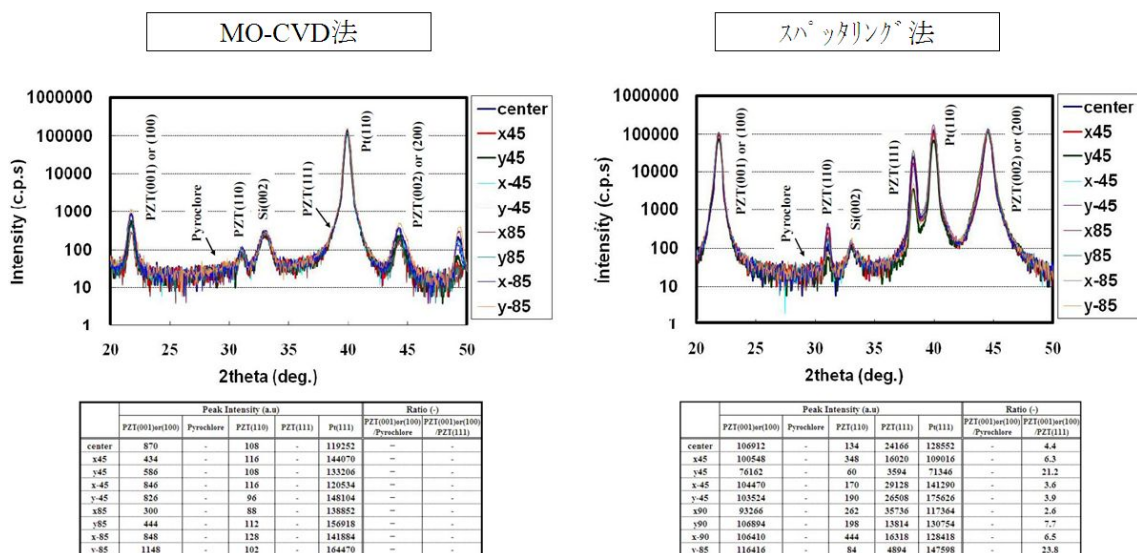


図 V.2.2.1-4.2-1 X線回折測定結果

ピーク強度		MO-CVD法	スパッタリング法
PZT(100)	平均	700	91270
	面内分布 ±%	41%	53%
PZT(111)	平均	---	18909
	面内分布 ±%	---	85%
PZT膜厚	平均 nm	980	2000
	面内分布 ±%	±2%	---

表 V.2.2.1-4.2-1 X線回折測定の 8 インチ面内バラツキ

配向性を比較すると MO-CVD 法では PZT(111)にピークはなく、また PZT(001)or(100)のピーク強度が弱いランダム配向であるのに対しスパッタリング法は PZT(111)より PZT(001)or (100)のピーク強度が強い Z 方向優先配向である。ピーク強度の面内バラツキは PZT(100)において MO-CVD は 41%、スパッタリング法は 53%で MO-CVD の方が小さいが膜厚分布±2%とは桁が異なる。圧電薄膜ジャイロ用としては Z 方向優先配向基板が望ましい。

() -5 8インチライン特性

圧電薄膜ジャイロセンサ TEG の試作において、表 V.2.2.1-5-1 の加工仕様を満たす条件評価および装置・環境特性評価を実施した。

表 V.2.2.1-5-1 加工装置と要求仕様

装置メーカー	型式	加工項目	要求仕様
ULVAC	SME-200E	電極成膜	Pt 100~120nm ±10%
Panasonic	E658-I	電極エッチング加工	選択比(Pt/Re) >0.1
住友精密工業	Pegasus-N	シリコン深堀加工	選択比(Si/Re) >45

() -5.1 電極成膜

ULVAC 製スパッタ装置 SME-200E にて Pt 成膜の膜厚測定および XRD 測定を実施した。

() -5.1.1 膜厚

ベアシリ基板上 3 点に油性ペンで印をつけ表 V.2.2.1-5.1.1-1 の条件 (成膜温度=Heater Temp ; 25(RT),50,100,150,200) で成膜処理、マーク部をアセトンで剥離、膜厚を段差計 (KLA-tencor 製 P-16) で測定した。結果は図 V.2.2.1-5.1.1-1 の通り。温度依存はなく、3 分で平均約 1250Å ± 8% で要求仕様を満たすことから 1000Å 狙いで処理時間を 2 分 20 秒と決定した。

表 V.2.2.1-5.1.1-1 Pt 成膜条件

Item	Unit	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4	Step 5
Step time	min	0	0	0	3	0
Step time	sec	15	10	10	0	10
DC Power	W	0	0	500	500	0
RF Power	W	0	0	0	0	0
Sub.Rotation Speed	Pa	10	10	10	10	10
Shutter Pos.	O/C	Close	Close	Close	Open	Close
MFC(Ar) Flow	sccm	0	50	50	50	0
MFC(O ₂) Flow	sccm	0	0	0	0	0
MFC(N ₂) Flow	sccm	0	0	0	0	0
Heater temp	°C	0	0	0	0	0
Gas Triger time	sec	0	0	1	0	0

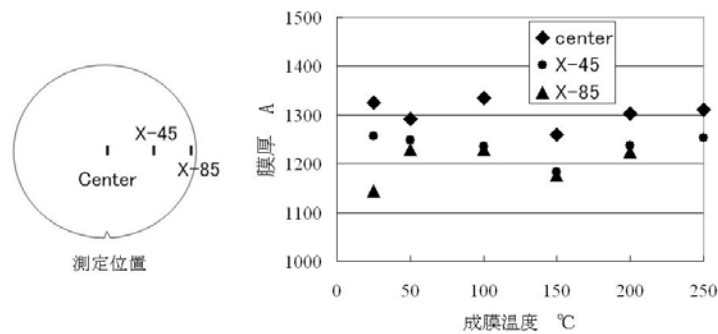
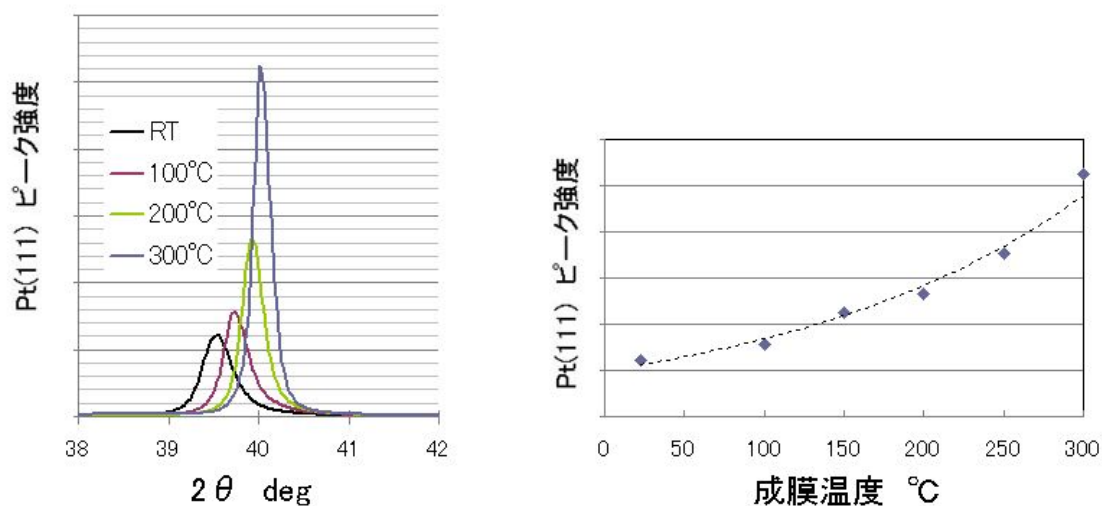


図 V.2.2.1-5.1.1-1 電極成膜(Pt)の温度特性

() -5.1.2 X線回折測定

成膜温度毎にX線回折測定（リガク製X線回折装置マルチフレックス）を実施した。結果は図V.2.2.1-5.1.2-1の通り、Pt(111)配向のピーク強度は温度が高くなるにつれて増加する。



図V.2.2.1-5.1.2-1 XRD測定結果

() -5.2 電極エッチング加工

Panasonic製メタルエッチング装置（E658-I）にてPtエッチング条件を評価した。Ptエッチング条件は表V.2.2.1-5.2-1および結果は図V.2.2.1-5.2-1の通り。印加安定性およびPt/Re選択比よりPtエッチング条件は2Paで決定した。

表V.2.2.1-5.2-1 Ptエッチング条件

Item	Unit	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4	Step 5
Step time	mm:ss	0:10	1:20	1:00	1:00	1:00
CL2	cm ³ /min	60	60	0	0	0
O2	cm ³ /min	40	40	0	0	0
Ar	cm ³ /min	0	0	100	100	100
Pressure	Pa	2	2	8	8	8
ICP Power	W	1000	1000	100	100	100
Bias Power	W	500	500	0	0	0
冷却He流量	cm ³ /min	15	8	1	0	0
冷却He圧力	Pa	1200	700	50	0	0
ESC使用		する	する	する	しない	しない
ESC電圧1	V	1000	500	-500	0	0
ESC電圧2	V	-1000	-500	500	0	0
除電突き上げ		しない	しない	しない	しない	する

圧力	0.5Pa	1 Pa	2 Pa	3 Pa	5 Pa
中心部 SEM Image × 50k					
X-85 SEM Image × 50k					
Etch-Rate nm/min	119	104	94	44	24
Uniformity	---	---	± 13%	± 27%	± 25%
Pt / Resist	---	---	0.14	0.06	0.03
Plasma Stability	△	△	○	○	○

図V.2.2.1-5.2-1 Pt エッチング加工結果

() -5.3 シリコン深堀加工

シリコン深堀加工装置(住友精密工業製 Pegasus-N)にて8インチ試作用途に合わせて、高速用、高データ率用、PPS用、TSV用 計4種類条件を作成、各々の特性を比較した。加工条件と基本特性は表V.2.2.1-5.3-1の通りである。

表V.2.2.1-5.3-1 シリコン深堀加工条件と基本特性

目的		高速用			高データ率用			PPS用			TSV用		
スペック		エッチレート ≥ 10um/min			データ率 >99% ブラックシリコン(跡)なし			BOX層止め ノッチなし			φ50um 深さ425um 保護層(AL)止め		
Item	Unit	Depo	Etch 1	Etch 2	Depo	Etch 1	Etch 2	Depo	Etch 1	Etch 2	Depo	Etch 1	Etch 2
Step time	sec	2.5	1.5	2.5	1.2	1.5	0.5	1.2	1.2	0.4	1.2	1.8	1.2
SF6	sccm	0	400	400	0	400	400	0	400	400	0	400	400
C4F8	sccm	400	0	0	300	0	0	400	0	0	400	0	0
Pressure	Pa	6	4	20	6	3	3	6	3	3	10	4	12
Coil Power	W	2200	2200	2200	1200	1200	1200	1500	1500	1500	2600	2600	2600
Platen LF Power	W	0	150	30	0	100	20	0	90	20	0	120	20
Pulse Frequency	Hz	50			50			50			56		
Pulse On Duty	%	25			25			15			28		
エッチレート ^(*)	um/min	10			4			3			9		
面内分布	± %	18			4			2			7		

*1) Target 1mm エッチング時間 5分

() -5.3.1 ブラックシリコン

シリコン深堀加工では、図 V.2.2.1-5.3.1-1 のように(a)C4F8 プラズマにより CF_n ポリマーが側面・底面に形成される、(b)底面のポリマーがイオンにより除去される、(c)露出された底面のシリコンが SF₆ プラズマより生成される F ラジカルによりエッチングされる、を繰り返すことにより高アスペクトな形状が形成される。しかしウェハ面内のエッジ部において (d) シリコンのエッチングにより発生した反応生成物である SiO_x 等が被エッチング面に堆積する(e)堆積物の無い部分のみがエッチングされる、ことによりブラックシリコンと呼ばれる柱状の突起物が発生する場合があります。高速用、高データ率用、PPS 用条件にてポジ・ネガパターンのある TEG ウェハを使用し中心部とウェハエッジ部（中心より 85mm）を顕微鏡・SEM で観察した。結果は、図 V.2.2.1-5.3.1-2 の通り、高速用と PPS 用は程度の差はあるもののエッジ部+ネガパターン(高データ率)部にブラックシリコンが発生した。

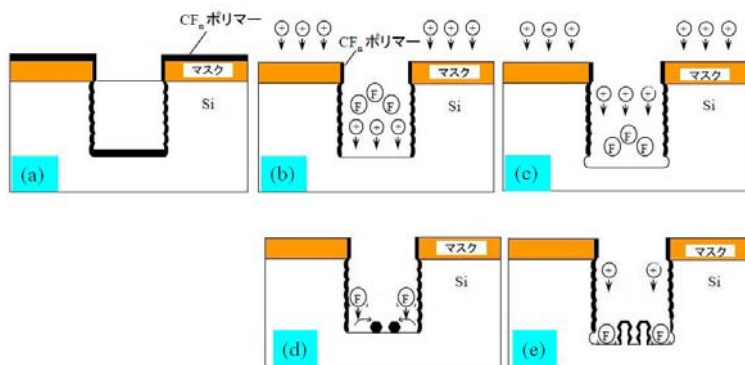


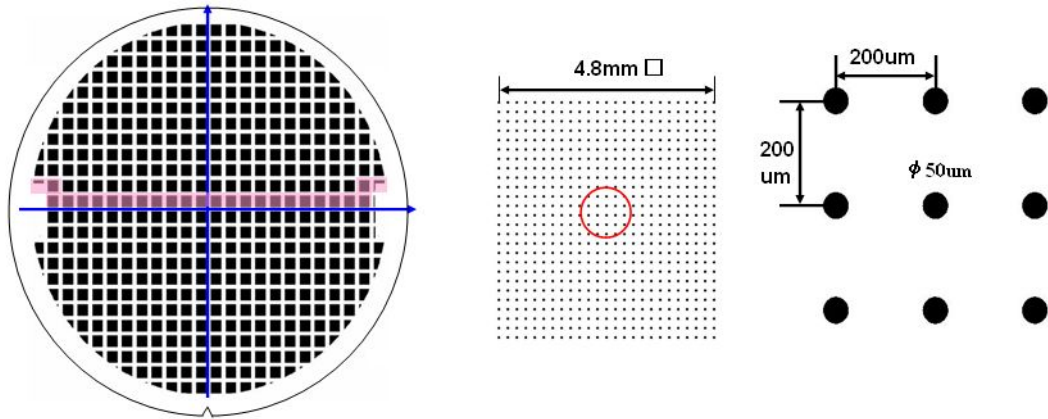
図 V.2.2.1-5.3.1-1 ボッシュプロセス

検査装置	条件		高速用	高データ率用	PPS用
光学 顕微鏡	Center	低倍			
		高倍			
	X-85	低倍			
		高倍			
SEM ポンプ	Center	低倍			
		高倍			
	X-85	低倍			
		高倍			

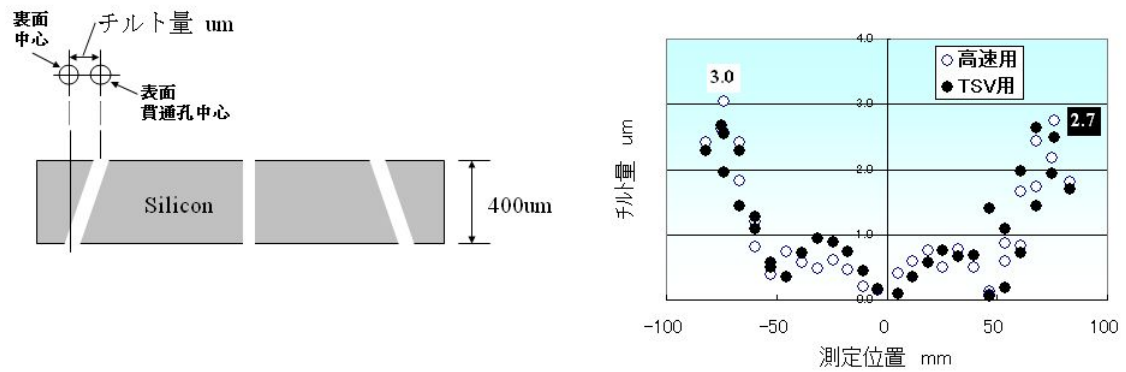
図 V.2.2.1-5.3.1-2 シリコン深堀加工特性

() -5.3.2 チルト特性

TSV (Through Silicon Via) 用、高速用条件にて図V.2.2.1-5.3.2-1 TSV-TEG を使用し8インチウェハ面内のチルト量を測定した (SUSS 製裏表測定器)。結果は図V.2.2.1-5.3.2-2 の通りである。中心部から50mm 地点を境にチルト量が大きくなる傾向がある。2条件によるチルト差は小さく最外周部 (X-85mm) 地点で最大3um である。



図V.2.2.1-5.3.2-1 TSV-TEG



図V.2.2.1-5.3.2-2 チルト結果

() -5.4 装置内環境

本試作にかかわる 8 インチライン主要装置の装置内元素分析（理学製全反射蛍光 X 線装置 TXRF 3750W スィープ測定）を実施した。処理条件は表 V.2.2.1-54-1、結果は図

.2.2.1-5.4-1 の通りである。Metal-RIE は、PZT、Pt、Ti 等金属を塩素、フッ素ガスでエッチングしている為各種元素が検出された。拡散炉は通常処理の場合検出限界であるが AL 熱処理後に金属が検出された。

表 V.2.2.1-5.4-1 処理条件

装置	ウェハ処理条件	検査機・ウェハ情報
ダミー	ケース内保管	分析機種 :TXRF 3750W 理学/全反射蛍光X線分析装置 管電圧 :40kv 管電流 :40mA 試料基板 :Si ウェハ 試料サイズ:8インチ
HF ⁺ ウェハ	酸化膜エッチング (1分)	
Metal-RIE	酸素プラズマ (1分)	
Metal-RIE(Ash)	酸素プラズマ (1分)	
SiO ₂ -RIE	酸素プラズマ (1分)	
コーター	純水ブロー+スピン乾燥	
DRIE	酸素プラズマ (1分)	
拡散炉	熱処理 (1分)	
拡散炉(AL処理後)	熱処理 (1分)	

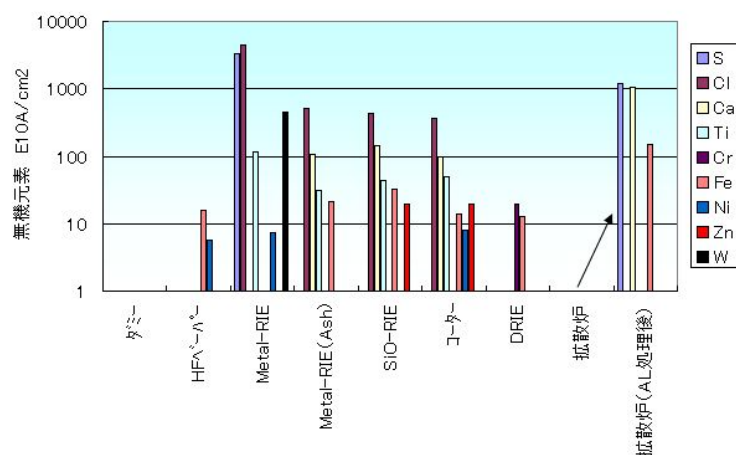
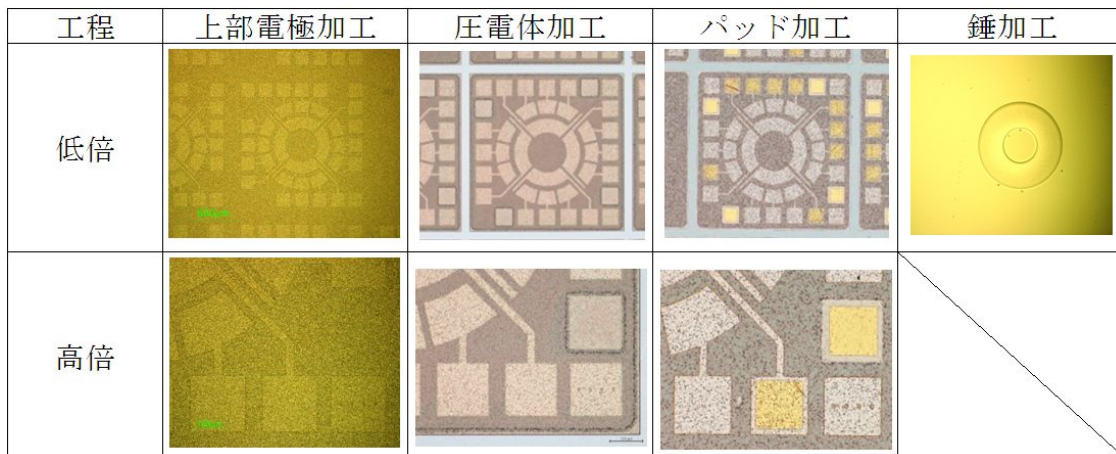


図 V.2.2.1-5.4-1 装置内環境測定

() -6 試作結果

() -6.1 外観

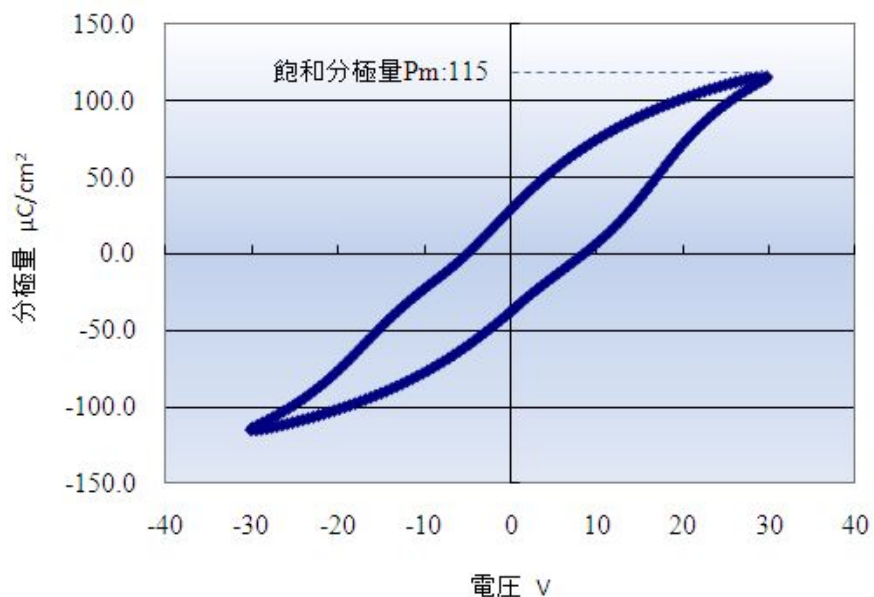
絶縁膜成膜からシリコン深堀（錘加工）までの工程を流動した。図V.2.2.1-6.1-1は各工程の顕微鏡写真である。



図V.2.2.1-6.1-1 各工程の顕微鏡観察

() -6.2 強誘電特性

錘加工前後において8インチ面内17点の分極量（東陽テクニカ製強誘電体特性評価装置 FCE）を測定した。図V.2.2.1-6.2-1は面内1点の分極量結果、図V.2.2.1-6.2-2 錘加工前後における飽和分極量8インチ面内分布である。



図V.2.2.1-6.2-1 分極量

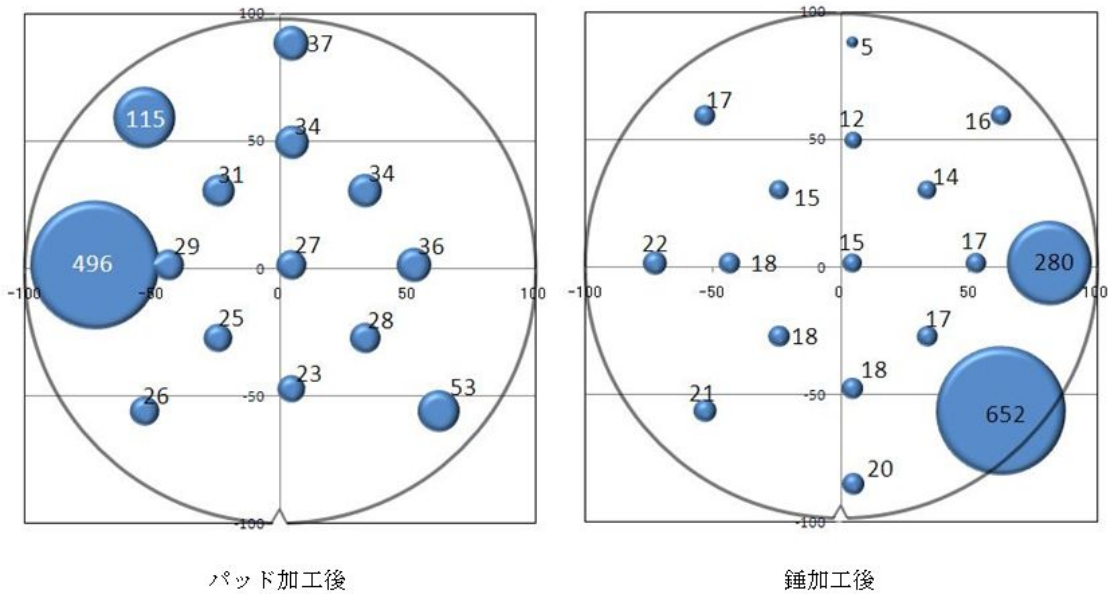


図 V.2.2.1-6.2-2 8 インチ分極量バラツキ

() -7 まとめ

8 インチラインを用いて PZT を用いた圧電薄膜ジャイロの試作を実施した。試作まとめは表 V.2.2.1-7-1 の通りである。試作当初より本試作の肝である PZT 成膜は研究所内で処理できない為、外部委託を検討した。選定は 8 インチ MEMS として実績のある外注先に絞ったが納期が長く、結果的に本試作における評価期間が十分に取ることができなかった。本試作結果で数値を取得できたのは、強誘電特性のみで、最終的なパッケージ形状およびセンサ特性評価はもちろんのこと、カンチレバーの製作ができなかった。今後、試作結果から要因分析を行いプロセス設計の見直しを実施する予定である。

表 V.2.2.1-7-1 試作まとめ

種類	項目	単位	目標値	結果
強誘電特性	飽和分極量	$\mu\text{C}/\text{cm}^2$	30	最大 652 最小 リーク
	カンチレバー変位	圧電定数	pm/V	---
センサ特性	最大検出角速度	deg/sec	300	---
	検出感度	$\text{mV}/\text{deg}/\text{sec}$	0.7	---
8 インチ TEG ウェハ	面内分布	%	± 5	---

2. 2. 2 異分野融合型次世代デバイス製造技術を適用したデバイス作製

(i) 中性粒子ビームエッチングプロセスを適用したセンサ TEG の作製

(i) .1 概要

現代半導体デバイス製造の根幹として微細加工、表面改質、薄膜体積等のキープロセスで反応性プラズマが多く用いられており、今や原子層レベルの加工や体積精度が要求されている。しかしながら、今後の主流となるナノオーダの極微細デバイスにおいて、プラズマから照射される電子やイオンによる電荷蓄積や真空紫外光等の放射光による欠陥生成などのデバイス特性を劣化させるダメージがより深刻な問題となってきた⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。ナノデバイスではわずかな欠陥でも大きくデバイスの特性を左右する。これらの問題を解決する手段として S.Samukawa らによって開発されたパルス変調プラズマを用いた中性粒子ビーム生成手法が注目を集めている。中性粒子ビームはプラズマからの荷電粒子や、放射光の基盤への放射を抑制し、運動エネルギーをもった中性粒子のみを照射することでダメージフリーの高精度プロセスが可能であるとして期待されている⁽⁵⁾。その実証として、 SF_6/Cl_2 中性粒子ビームにより加工したアンテナ MOS キャパシターは通常のプラズマエッチングと比較し、絶縁膜である酸化膜の劣化が抑制され、ゲートリーク電流がおよそ一桁小さくなることが同じく S.Samukawa らから報告された⁽⁵⁾。また、BEANS プロジェクト「3次元ナノ構造形成プロセス技術開発」平成 21 年度の成果としてカンチレバー表面のダメージとその機械特性を評価する理論的手法を新たに考案し、中性粒子ビームでカンチレバーの厚みを加工することにより、機械特性が劣化しないことが実験的に確認された⁽⁶⁾。このように、中性粒子ビーム加工がダメージレスであることを、電氣的、機械的側面から確認されてきている。しかし、中性粒子ビーム生成手法の実用化には、エッチングレート、アスペクト比の向上、大口径化等、多くの問題が残されている。こうした背景から、本プロジェクトではカンチレバー表面のダメージとその機械的特性を評価する特性評価用素子(以下、TEG)を大口径(8インチ)ウェハ上に作製し、中性粒子ビームのウェハ内特性ばらつきを明確化し、中性粒子ビームエッチング技術の実用化に向けた取り組みを加速することを行った。以下に、平成 22 年度の取り組み内容について述べる。

(i) .2 設計理論

まず、平成 21 年度に考案したカンチレバー表面のダメージとその機械特性を評価する TEG の理論および作成方法について述べる。

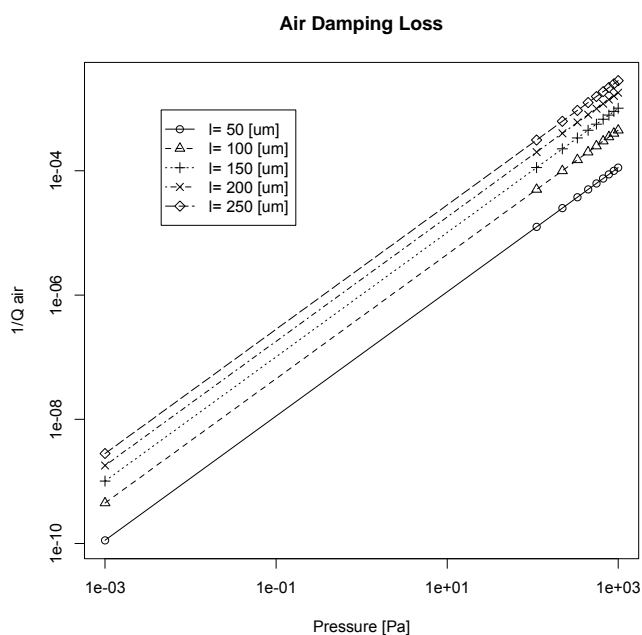
カンチレバーの機械特性は、その共振周波数における Q 値によって評価できる。Q 値とは振動計の減衰を示す数値であり、一般的に共振周波数で振動するカンチレバーの Q 値はいくつかの原因によるエネルギーロスの影響を受けて次のように表される。

$$Q_{Total}^{-1} = Q_{Air}^{-1} + Q_{TED}^{-1} + Q_{Support}^{-1} + Q_{Surface}^{-1} \quad (1)$$

ここで、 Q_{Air} 、 Q_{TED} 、 $Q_{Support}$ そして $Q_{Surface}$ は、それぞれエアダンピング・ロス、

熱弾性損失、サポート・ロス、サーフェース・ロスの各エネルギーロスが起因する Q 値を表す。このなかでサーフェース・ロスがカンチレバー表面の欠陥等を顕著に表すロスであり中性粒子エッチングのダメージレス効果を検証することが可能と考えた。それぞれのロスについて詳細に検討し、サーフェース・ロスが支配的になるようカンチレバーの厚み、長さ、幅、測定環境をそれぞれ適切に選択した。

(i) .2.1 エアダンピング・ロス



図V.2.2.2 (i) .2-1. エアダンピング・ロス の Q 値の逆数と圧力の関係。カンチレバーの長さがそれぞれ 50, 100, 150, 200[μm]の場合を計算した。

エアダンピング・ロスは空気中に存在する分子が振動するカンチレバー表面と衝突し発生する粘性抵抗を表したロスであり、カンチレバー雰囲気中の圧力に起因する。F.R.Blom らは理想気体の状態方程式等の理論的検討からエアダンピング・ロスを次式のよう導いた⁽⁷⁾。

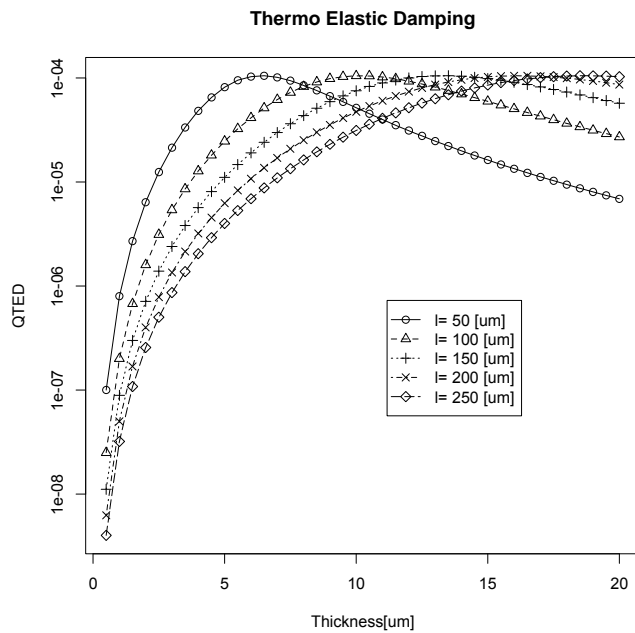
$$Q_{Air} = \frac{k_n}{k_{m,p}} \left(\frac{h}{l}\right)^2 \sqrt{\frac{\rho_{Si} E_{Si}}{12 p}} \quad (2)$$

ここで、 k_n はn次振動定数、 h 、 l はそれぞれカンチレバーの厚さと長さ、 ρ_{Si} はシリコンの密度、 E_{Si} はシリコンのヤング率、 p は雰囲気中の圧力を示し、 $k_{m,p}$ は以下の式で導かれる。

$$k_m = \left(\frac{82M}{9\pi RT} \right)^{0.5} \quad (3)$$

ここで、 M 、 R 、そして T はそれぞれ雰囲気中の物質質量、気体定数、気体の熱力学温度である。空気中では、 $M = 28.96[g/mol]$ 、 $R = 8.314 \times 10^3[J/K]$ 、 $T = 300[K]$ であるとする。カンチレバーのパラメータを、 $\rho_{Si} = 2330[kg/m^3]$ 、 $E_{Si} = 169[MPa]$ 、そして厚みを $h = 2[\mu m]$ として、 Q 値と圧力の関係をカンチレバーの長さ l がそれぞれ50、100、150、200、250 $[\mu m]$ である場合を図 2.2.2 (i) .2-1 に示す。一般的に 0.1[Pa]以下の真空であれば、他の損失が支配的となることが知られている⁽⁸⁾。

(i) .2.2 熱弾性損失



図V.2.2.2 (i) .2-2. TED の Q 値と厚みの関係。カンチレバーの長さがそれぞれ 50, 100, 150, 200, 250 $[\mu m]$ の場合を計算した。

熱弾性損失(以下、TED。TED は Thermo elastic Energy Dissipation の略称)は、カンチレバーの厚みに対する上面と下面で発生した不可逆的熱流から発生するロスである。そのため、カンチレバーの構造と温度に関係し、T.V.Roszhart らは次式のように表現した⁽⁹⁾。

$$Q_{TED} = \frac{2\rho_{Si}C_p}{T\rho_{Si}\alpha_{Si}^2} \cdot \frac{1}{f_n/F_0} \quad (4)$$

ここで、 α_{Si} 、 C_p はそれぞれシリコンの熱拡散係数、比熱である。 f_n は共振周波数、 F_0 は

特性周波数であり、次式のように表現される。

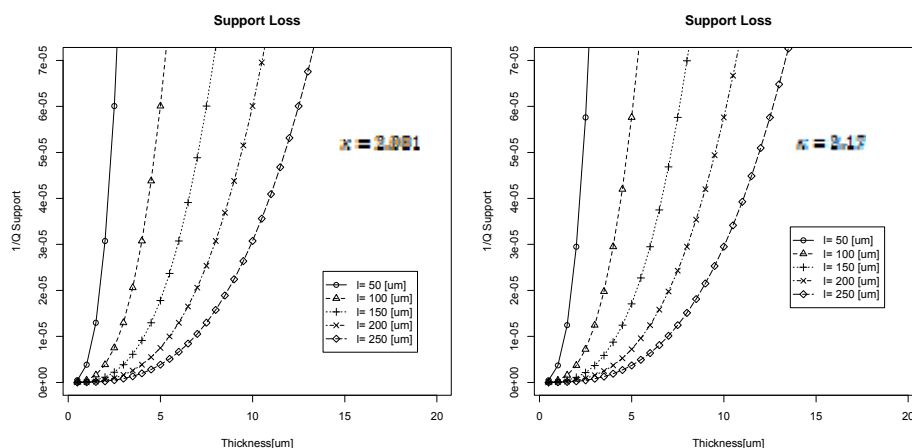
$$f_n = \frac{k_{Si}^2 h}{3\pi L^2} \sqrt{\frac{E_{Si}}{12\rho_{Si}}} \quad (5)$$

$$F_Q = \frac{\pi k_{Si}}{2\rho_{Si} C_p h^2} \quad (6)$$

k_{Si} は、シリコンの熱伝導率を示す。シリコンの熱伝導率を $k_{Si} = 150 [W/mK]$ 、熱拡散係数を $\alpha_{Si} = 2.6 \times 10^{-6} [K^{-2}]$ 、比熱を $C_p = 700 [J/kg K]$ 、として、Q 値と厚みの関係をカンチ

レバーの長さ L がそれぞれ **50, 100, 150, 200, 250[μm]**である場合を図V.2.2.2 (i) .2-2 に示す。カンチレバーの厚みが 10[μm]以下である場合無視できると言われているが、カンチレバーの長さによって熱弾性損失の編曲点が変わり、100[μm]以下の長さでは無視できないことが予測される。しかし、厚みが大きなカンチレバーでも長さを正しく設計することで、その影響が支配的でない状況を作ることも可能である。

(i) .2.3 サポート・ロス



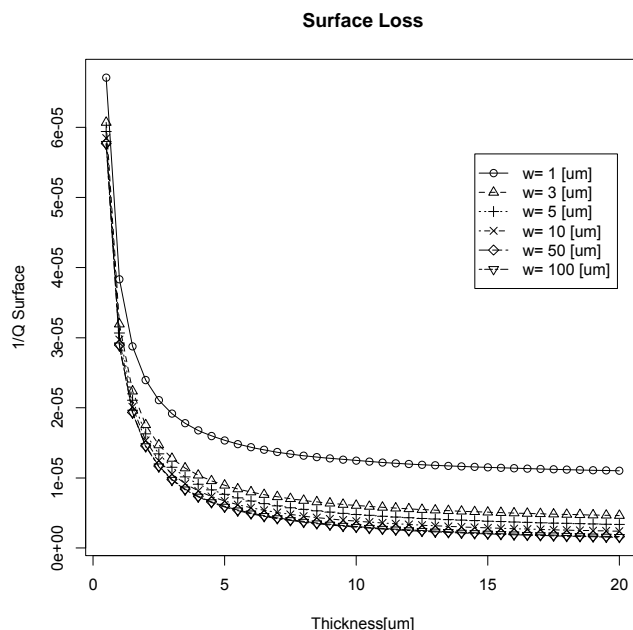
図V.2.2.2 (i) .2-3.サポート・ロスの Q 値と厚みの関係。カンチレバーの長さ L がそれぞれ 50, 100, 150, 200, 250[μm]の場合を計算し、 κ の値が 0.34, 2.081, 2.17 の場合を示す。

サポート・ロスカンチレバーの振動に大きな損失をもたらすロスの一つである。カンチレバーのサポート部分を半無限弾性体として考え、弾性エネルギーの減衰は厚さと長さの比の 3 乗に比例する。つまり、 $Q_{support} \propto (H/L)^3$ であり、次式となる。

$$Q_{support} = \kappa \left(\frac{L}{H}\right)^3 \quad (7)$$

κ はカンチレバーの Q 値について多くの論文による報告から算出すると、次のような値となっている $\kappa = 2.17^{(10)}, 2.081^{(11)}$ 。(10)の文献についてはナイトライド薄膜で作製したカンチレバーでの例であるため、やはり材質の依存がないロスであると思われる。それぞれの κ の値でサポート・ロスと厚みの関係を図V.2.2.2 (i) .2-3に示す。

(i) .2.4 サーフエース・ロス



図V.2.2.2 (i) .2-4. サーフエース・ロスの Q 値と厚みの関係。カンチレバーの幅がそれぞれ 1, 3, 5,10, 50,100[μm]の場合を計算した。

サーフェース・ロスは、カンチレバー表面層の吸着や欠陥が原因のエネルギーロスであり、カンチレバーの厚さが薄くなり表面層の厚みと幅の断面比が増すことにより支配的になる。次の式で表される⁽¹⁴⁾。

$$Q_{\text{Surface}} = \frac{E_{\text{el}}}{\delta E_{\text{ds}}} \frac{wt}{2(3w+h)} \quad (8)$$

ここで w はカンチレバーの幅、 δE_{ds} はヤング率の損失と欠陥層の厚みを考慮した項であり表面層への分子の吸着、内部欠陥が起因すると考えられ、 δE_{ds} の値がカンチレバー表面の状態を表す項であると言ってよい。 Q_{Surface}^{-1} と厚みの関係を図V.2.2.2 (i) .2-4 に示した。欠陥のない表面状態に近づけば近づくほど、 δE_{ds} の値が小さくなり、欠陥が多く理想的な状態から離れれば δE_{ds} の値は大きくなる。サーフェース・ロスは表面の欠陥層を顕著に表すロスであるため、この影響が顕著になるようなカンチレバーの設計、測定環境を適切に選択すれば、表面欠陥層の定量的な比較が可能となる。

具体的に、カンチレバーの幅を 30[μm]長さを 150[μm]厚み 1.5[μm]以下で設計したカンチレバーを 0.1[Pa]以下の真空環境で測定を行うことと決定した。カンチレバー幅については、小さくすればするほどサーフェース・ロスの影響を選択的に大きくすることが可能であるが、計測装置の仕様から測定面積が 15 × 15[μm^2]以上必要であり、その効果も少ないため、計測に十分な幅を確保することとした。図V.2.2.2 (i) .2-4 に示したグラフをか

らわかるように、 $10[\mu\text{m}]$ 以上の幅であれば Q 値への影響は大きくはならず、 $h \ll 3W$ の条件を十分満たす状況であると考えられる。またカンチレバーの長さも、長ければ長いほど TED、サポート・ロスの影響は小さくなるが、エアダンピング・ロスの影響が大きくなること、経験的に作製時スティッキングによるデバイスの破壊が起こりづらい現実的な長さとして決定した。

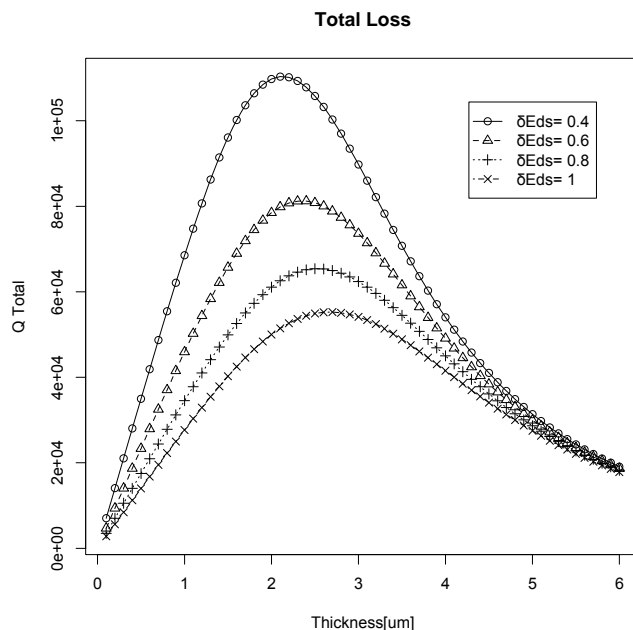
上記のカンチレバー設計値で式(1)に表した Q_{Total} の影響を計算したものを図 V.2.2.2 () .2-5 にて示す。エアダンピング・ロスについては測定環境が $0.1[\text{Pa}]$ 以下の真空であることを想定し、今回の報告で検討した以外のロスの影響は無視している。 δE_{dis} がそれぞれ $0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ の時について Q 値とカンチレバーの厚みの関係を算出している。図 .2.2.2 () .2-5 からはサポート・ロスとサーフェース・ロスの支配的な状況が切り替わる地点で、 Q 値のピークを見ることができる。さらに、 Q 値の定量的な評価を行うため、次のような変換を行う。カンチレバーはサーフェース・ロスの式(8)に対して $h \ll 3W$ の条件を満たすと考えれば、次式のように書き換えられる。

$$Q_{\text{Surface}} = h \times \frac{1}{\delta} \frac{\partial Q}{\partial h} \quad (9)$$

次に、式(5)に示す共振周波数と Q_{Surface} との比を取ると、

$$Q_{\text{Surface}} / f_n = \frac{1}{\delta} \frac{\partial Q}{\partial h} \frac{1}{\sqrt{\frac{3}{8} \frac{\rho V g^3}{E I}}} = \text{Constant} \quad (10)$$

となり、厚みの影響はなくなる。そしてその値は δE_{dis} の大きさに上下することとなり表面の欠陥層を評価できる。以上の理論検討から、カンチレバーの共振周波数と Q 値の初期値を計測したカンチレバー表面へ中性粒子ビームエッチングを施し、その Q/f の特性評価をすることでダメージレスなエッチングが行えているかどうかを確認可能である。(i) .7 付録にグラフを取得するための計算プログラムソースを示す。



図V.2.2.2 (i) .2-5. カンチレバーの幅が 30[μm]、長さが 150[μm]の場合に、TED とサーフェース・ロス、サポート・ロスの影響を考慮した Q 値と厚みの関係。表面の欠陥量を表す係数 δE_{ds} が 0.4,0.6,0.8,1.0 の場合を計算した。

(i) .3 中性粒子 TEG 作製

この項では、中性粒子 TEG(カンチレバー)の作製プロセスフローについて述べる。今年度は3度の試作を行った。それぞれ、事前のプロセス条件出しとして行った4インチウェハを用いた産業技術総合研究所クリーンルームでの試作、外部ファウンダリでの試作、Gデバイスセンターつくば8インチラインでの試作である。これらのプロセスフローそして、完成した8インチウェハについて寸法精度の詳細な検討について報告する。実際の計測には外部完成したウェハ枚数等の関係から外部ファウンダリで試作した中性粒子 TEG を使用した。

(i) .3.1 4インチウェハでのカンチレバープロセスフロー

8インチウェハ上でカンチレバーを作製するにあたり、プロセス条件出しのために産業技術総合研究所(略称:AIST)2G-CRにて4インチウェハでのプロセスを行った。プロセスフローと完成したカンチレバーTEGの全体像を図V.2.2.2 (i) .3-1に示す。プロセスフローを説明する。まず、デバイス層が1.5[μm]のSOIウェハを用意する。一般的なウェハメーカーでは、厚みの公差がおおよそ±0.5[μm]で販売しており、カンチレバーの共振周波数に大きなばらつき(おおよそ90~70[kHz])が発生することが予想されるが、SOIウェハデバイス層を研磨で仕上げる工程上、これ以上の精密な公差を安価なウェハで実現するのは難しい。

4 インチウェハでのプロセスでは、デバイス層の厚み 1.15~2.39[um] 中間酸化膜層 0.48~0.51[um] 基盤層厚さ 520~521[um] の 4 インチ SOI ウェハを使用した。デバイス層にフォトリソグラフィ技術でマスクパターンを作製し、Deep-RIE でデバイス層をエッチングし、基盤層を裏側から同じく Deep-RIE エッチングを施しカンチレバー部分のリリースとデバイス把持部の形成を行う。その後、中間酸化膜をフッ酸で除去して完成である。図

.2.2.2 (i) .3-1 の右側の写真を見ればウェハ面内一様にデバイスが形成できていることがわかる。4 インチウェハでの試作による条件だしから様々な問題点が見つかった。まず、基盤層のエッチングには 520[um] 以上の深い長さをエッチングする必要がある。8 インチウェハでは十分な強度を確保するため、さらに基盤層の厚い(およそ 725[um])ウェハが一般的である。この基盤層エッチング行程には、時間と、エッチングガスを多量に使用し、寸法ばらつきから特性ばらつきを引き起こす。8 インチウェハを使用したプロセスでは、基盤層の裏抜きを行わないプロセスフローへ変更することとした。

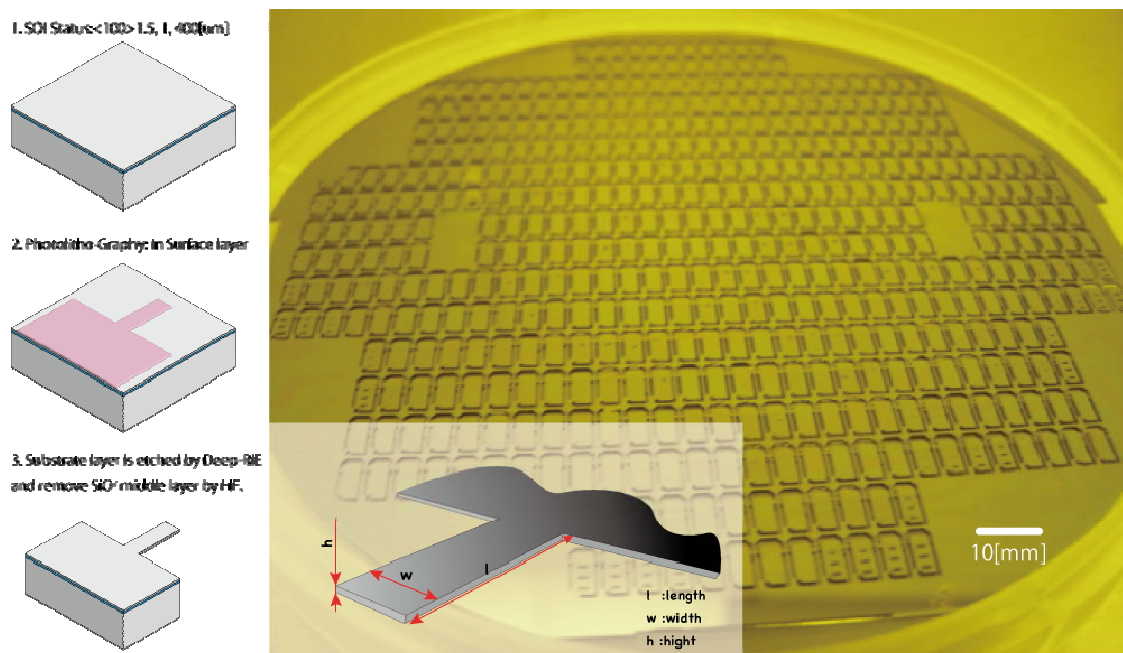


図 V.2.2.2 (i) .3-1. 中性粒子 TEG の 4 インチウェハを使用したプロセスフローと完成したウェハの全体像。

(i) .3.2 外部ファウンドリによる 8 インチウェハでの試作

大口径 8 インチウェハでのプロセスを行うため、プロセスを裏側からの基盤層加工によるカンチレバー部リリース行程から、カンチレバー直下の中間酸化膜層をフッ酸のサイドエッチングでリリースするものへと変更した。この変更によりプロセス時間の大幅な削減、プロセスの単純化による寸法ばらつきの低減が期待できる。

8 インチウェハを用いたカンチレバーの試作を外部ファウンドリへ委託した。ファウンドリでの試作プロセスフローを図 V.2.2.2 (i) .3-2 に示す。プロセスフローについて説明

する。デバイス層の厚み 1.5[um]中間酸化膜層 2.0[um]基盤層厚さ 725[um]の SOI ウェハを使用する。まず初めに LPCVD による酸化膜をおよそ 1um 形成し、フォトリソグラフィ技術によりマスクパターンを形成する。さきほど成膜した表面酸化膜をエッチングし、これをマスクとしてカンチレバーの形状にシリコンのデバイス層を加工する。最後に HF-Vapor 装置で約 15[um]カンチレバー下の中間酸化膜層をサイドエッチし、カンチレバーをリリースして完成である。HF-Vapor 装置を使用することで、カンチレバーと基盤層のスティッキング現象は起こらない。完成したカンチレバーの寸法ばらつき測定グラフ結果と SEM 画像を図 V.2.2.2 (i) .3-3.に示す。完成ウェハ 11 枚の面内 5 点 (上、中、下、左、右) での平均値と 3 値をグラフにした。設計値 30um であるカンチレバー幅についてすべての測定点での平均を計算すると 30.4um、3 値は±1.69um であった。3 値は正規分布に従う確率変数の観測値が平均値から 99.7%の区間に入ることを示し、デバイスを設計する際の指針となる値である。HF-Vapor のサイドエッチ量でも同様の計算を行った。設計値 20um に対し、平均値は 23.84um、3 値は±17.53um であった。ウェハ面内分布を見てみると中心部分のエッチングレートが遅く、周辺部特に上右のレートが早いのがわかる。これは HF-Vapor 装置のガス導入口と関係がある。3 値が設計に対して大きすぎるので、正確な設計値を反映することが難しいプロセスであることがわかった。

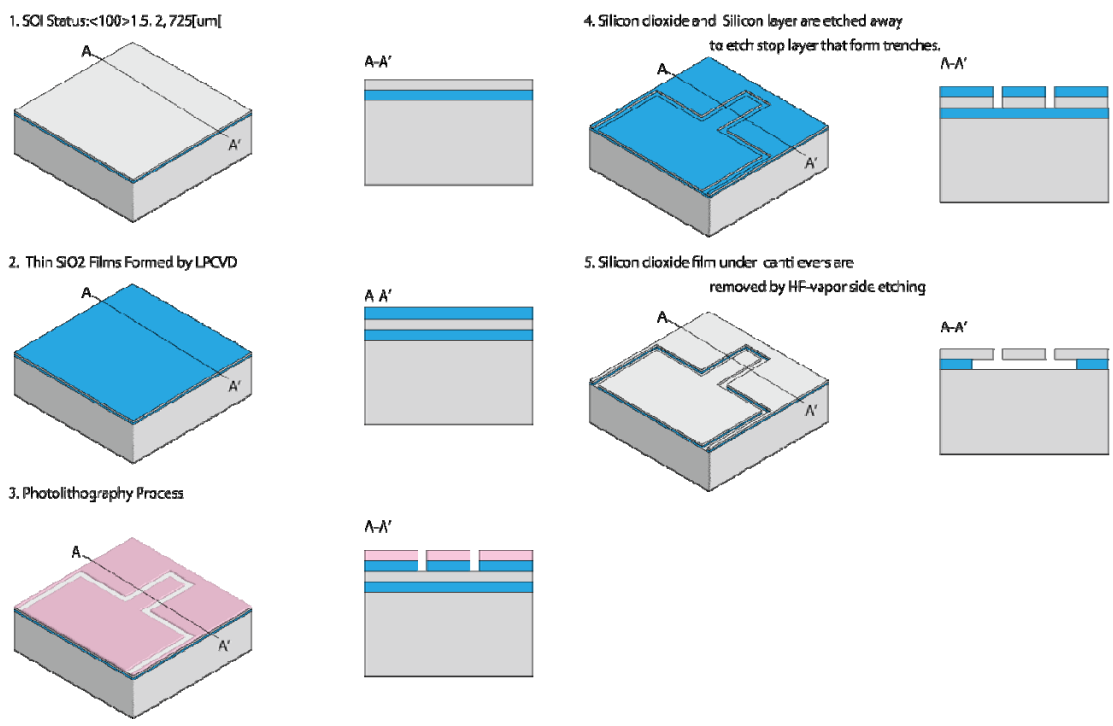
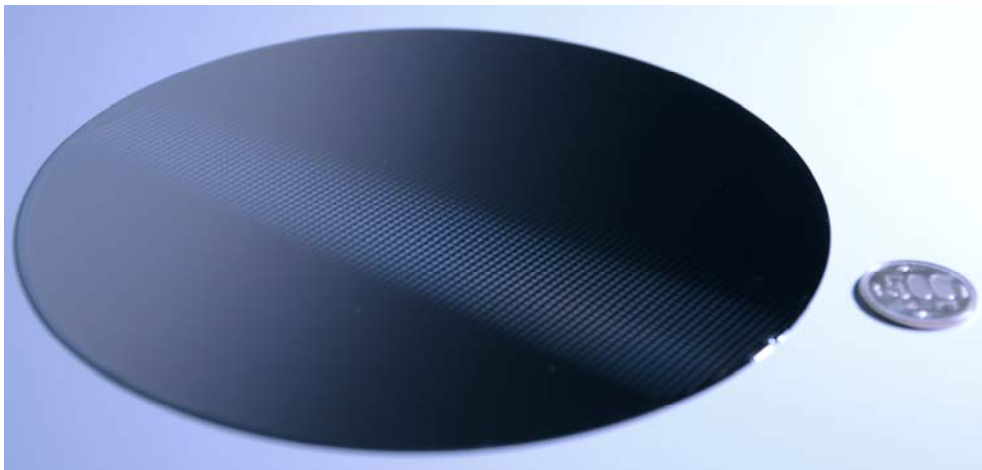
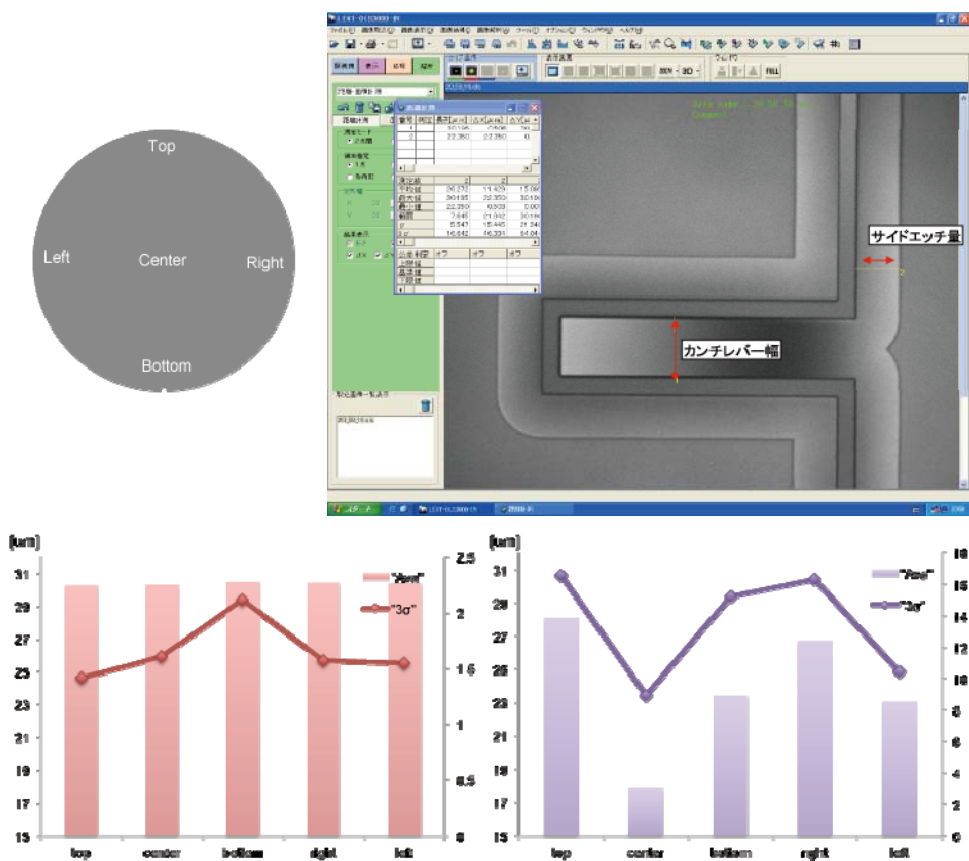


図 V.2.2.2 (i) .3-2. 中性粒子 TEG の 8 インチウェハを使用したファウンダリでのプロセスフロー



図V.2.2.2 (i) .3-3. ファウンダリで外注した中性粒子 TEG の全体像。8 インチウエハ面内一様に形成されている。



図V.2.2.2 (i) .3-4. ファウンダリで外注した 8 インチウエハ上に形成されたカンチレバーの SEM 画像と面内 5 点の完成ウエハ 1 枚の寸法比較結果 (下側のグラフ)。

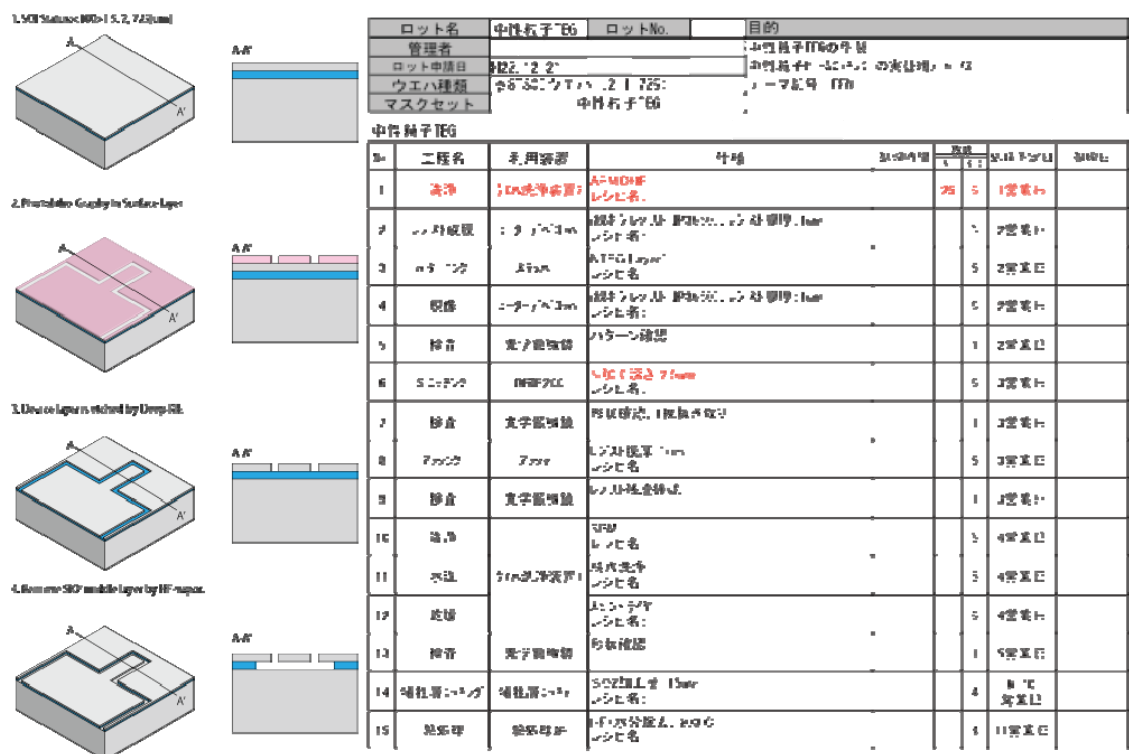
(i) .3.3 G デバイスセンターによる 8 インチウェハでの試作

G デバイスセンタークリーンルームでも中性粒子 TEG(カンチレバー)の試作を行った。G デバイスセンタークリーンルームで実施したプロセスフローとコントロールカードを図

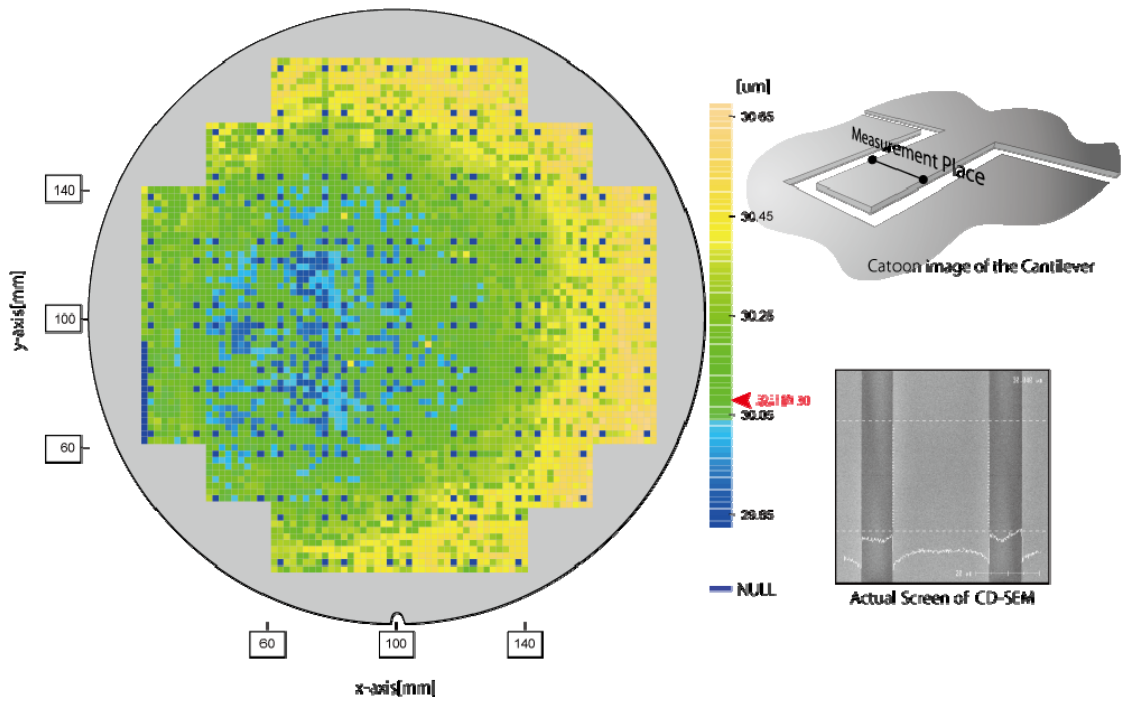
.2.2.2 (i) .3-5.に示す。G デバイスセンタークリーンルームでは CVD 装置が 12inch 対応のものしかないので、ファウンドリプロセスからフォトレジストのみでパターンを形成するプロセスへと変更した。完成したウェハは CR の立ち上げ遅延等の理由から 1 枚しか確保できなかったが、面内の加工精度について測長 SEM を用いて詳細に検討した。図

.2.2.2 (i) .3-6.に G デバイスセンタークリーンルームで試作した 8 インチウェハ、カンチレバーの寸法ばらつき測定結果を示す。カンチレバー幅の平均値は 30.24[um]、3 値は 0.5050[um]であった。中心からおよそ 20[um]左側に中心をシフトしたところから同心円上にカンチレバー幅が大きくなっている。次に HF-Vapor の加工精度について検討した。

図 V.2.2.2 (i) .3-7.に G デバイスセンタークリーンルームでの HF-Vapor 加工結果を面内 9 点での顕微鏡撮像結果を示す。暗視野モードで撮像することで、中間酸化膜のエッチング状況が明確にわかる。図 V.2.2.2 (i) .3-7.の左上で示すのが、条件出しのためにファウンドリで HF-Vapor 手前までの加工をしたものを G デバイスセンタークリーンルームの HF-Vapor 装置で加工した際の画像であるが、一様にエッチングされている様子がわかる。しかし、G デバイスセンタークリーンルームで初めからプロセスを流したウェハでは (図 V.2.2.2 (i) .3-7.右側 9 枚) いびつな形状でエッチングが進行してしまった。使用した SOI ウェハは同じメーカーから同条件で購入したものを使用しており、中間酸化膜の条件からおこったものであることは考えづらい。Deep-RIE で発生するデポ物が洗浄により取りきれいでなかったことが原因にあると考えられる。

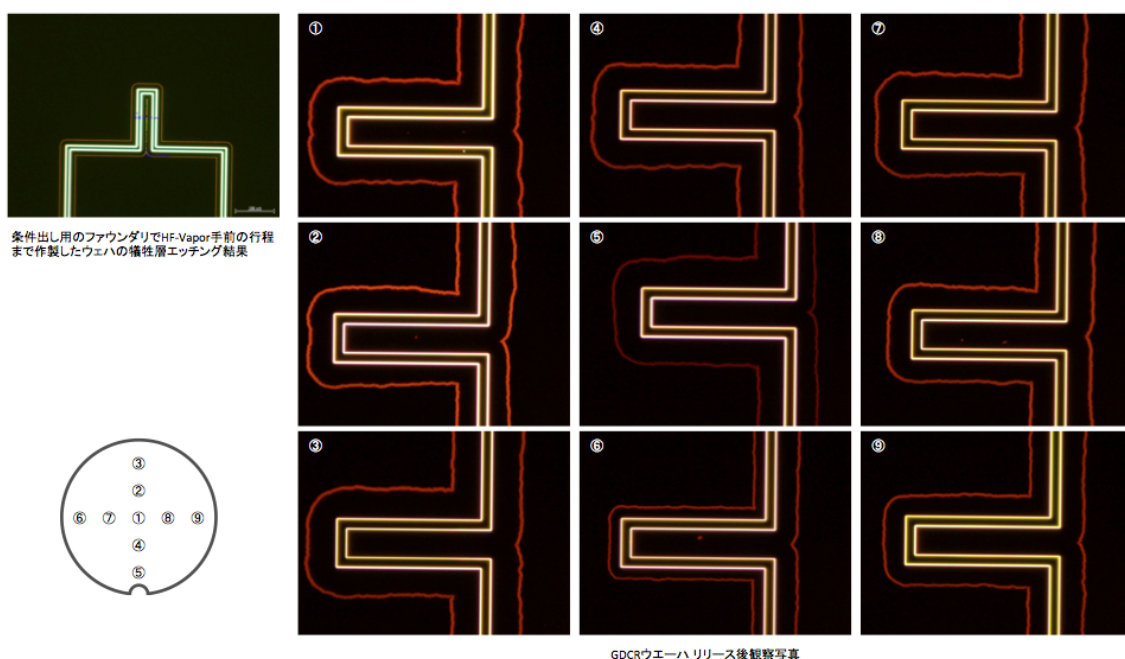


図V.2.2.2 (i) .3-5. G デバイスセンタークリーンルームでの 8 インチウエハを使用したプロセスフローとコントロールカード。



図V.2.2.2 (i) .3-6. G デバイスセンタークリーンルームで作製した 8 イン

チウエハ上のカンチレバー幅の測定結果。面内 4993 点について計測を行った。



図V.2.2.2 (i) .3-7. G デバイスセンタークリーンルームでの HF-Vapor 加工結果。8 インチ面内 9 点で顕微鏡暗視野モードでの撮像を行った。

(i) .4 計測

中性粒子 TEG(カンチレバー)の特性を評価するために、カンチレバーの共振周波数と Q 値の値を正確に測定しなければならない。又、計測環境として (i) .2.1 で説明したようにエアダンピング・ロスの影響を無視するため真空環境下での計測が必要不可欠である。さらに、面内特性分布の安定な計測のために、8 インチウエハも挿入可能な大型のチャンバーを必要とする。機械振動の測定方法は、レーザドップラー計測方を採用し、カンチレバーの加振にはシリコンでの吸収率が高い波長 405nm のレーザから熱拡散による曲げモーメントを発生させて振動させる加振法、光熱励振法を採用した⁽¹⁰⁾。この励振法ではピエゾ加振に比べ周波数のスプリアスが極めて少ない⁽¹¹⁾。以上のような環境、測定法を実施するために今回新たに測定装置の開発にも取り組んだ。この装置は、他のセンサ TEG デバイスの計測を行うために真空プローバとレーザドップラー計測を同時に実現可能なよう設計している。また中性粒子ビームエッチング装置、8 インチ対応化のためにアパーチャの設計に取り組みその妥当性を理論と実験から検証した。中性粒子ビームエッチング、ダメージレス効果面内分布測定のために、8 インチウエハ面内 52 点についてカンチレバーの共振周波数と Q 値の初期特性を計測し、中性粒子ビームエッチング後の特性推移を観察した。

(i) .4.1 計測装置

今回、中性粒子ビームエッチング装置の面内特性分布を正確に測定するため、完成したウェハをチップ化後の計測では効率も悪く測定箇所も計測毎に大きく変化してしまう可能性がある。8インチオンウェハ状態で機械振動計測を行う装置は一般的に存在しない。専用の装置開発を行う必要があり、8インチウェハ上に存在するカンチレバーの共振周波数とQ値を容易に計測できるような計測装置を考案した。カンチレバーの振動を計測するにあたり、高周波数での計測が可能なレーザドップラー計測方法を採用した。レーザドップラー計測法とはドップラー効果と光ヘテロダイン法を利用して、振動速度、振動周波数を検出するものである。光の周波数は非常に高くドップラーシフトを直接検出するのは困難なため、フォトダイオード、アバランシュフォトダイオード(Avalanche Photo Diode : APD)などの二乗検波特性を持つ光検波器を使用する。周波数偏移する前の光を参照光として同時に入射し干渉させることにより周波数を検出する方法を、光ホモダイン検波という。参照光の周波数を音響光学変調器(Acoustic Optical Modulator : AOM)によりシフトしておき、周波数偏移の符号まで検出可能にしたものが光ヘテロダイン法である。カンチレバーの励振方法には光熱励振法を採用した。光熱励振法とはカンチレバーの梁にレーザ光をあてることで熱エネルギーを与え、カンチレバーの上面と下面に温度差を発生させる。レーザに当たった上面付近は熱膨張による伸長からたわみが生じるため、レーザ強度を変調させることによってカンチレバーを任意の周波数で加振することが可能となる。一般的に励振法に用いられるピエゾ励振はピエゾ接触面からカンチレバー先端までの機械的特性が付加される影響からスプリアスが多く発生するが、光熱励振では直接カンチレバーのみ振動エネルギーを与えるのでこの影響が少ない。これらの理由から光熱励振法を採用した。また励振レーザ波長はSiでの光吸収率が高い405nmの半導体レーザを使用した。図V.2.2.2(i).4-1.に装置の構成図、図V.2.2.2(i).4-2.に装置の全体像を示す。装置構成図について説明する。真空チャンバー内にはX、Y、Zのステージを内包する構造となっている。プローバはチャンバー上面からアプローチし、先端針把持部までの手の長さを極力短くできるように工夫した。また、プローバには押し圧センサを設けており、電極パッド等への押し当て状況を把握できるようになっている。センサ、XYZステージ、そして真空ポンプは専用ソフトによりPC上で一括制御できるようになっている。また、ウェハ上のデバイスアプローチ状況をTCP/IP接続により送受信することにより測定のオートメーション化を可能としている。

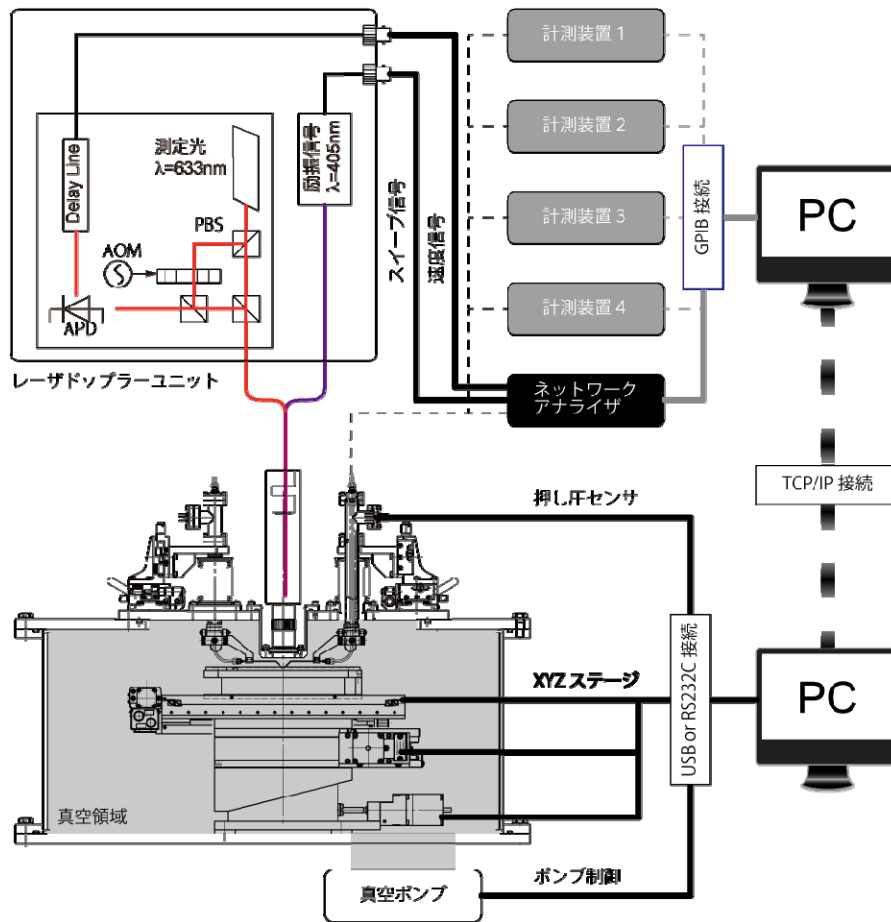


図 V.2.2.2 (i) .4-1. 計測装置の構成図

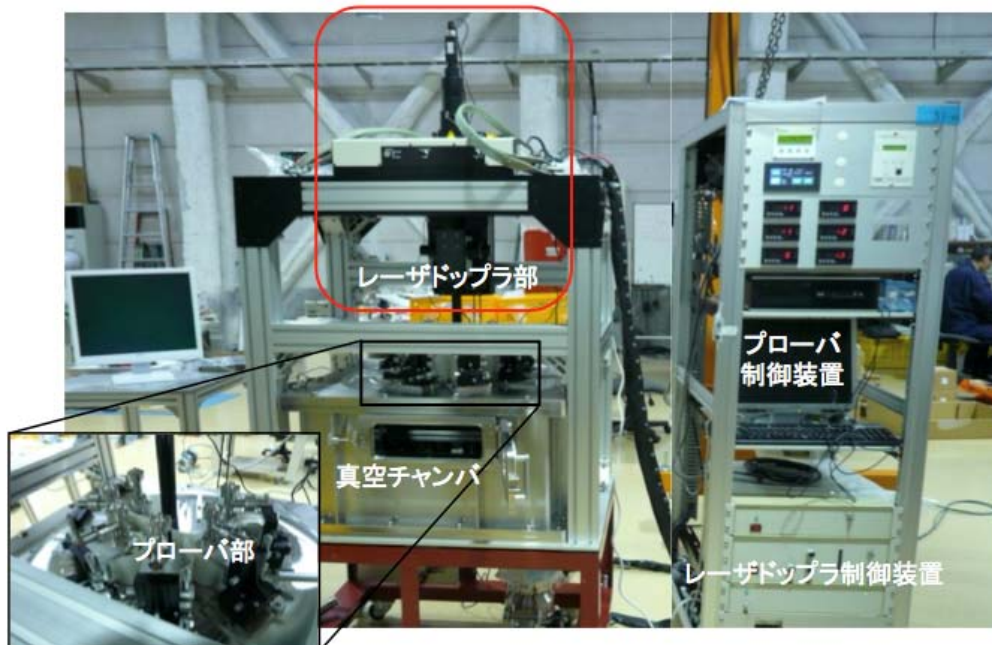


図 V.2.2.2 (i) .4-2. 計測装置の全体写真

(i) .4.2 中性粒子ビームエッチング装置 8 インチ用アパーチャ設計

8 インチ対応中性粒子ビーム装置を開発するに当たり、アパーチャの設計が重要なポイントとなる。まず、ガスの流れおよび圧力が大口径化によりどのように変化するかを理解し、制御すること。それから、大口径化した際の実際のエッチング特性 (エッチング形状、面内均一性) を調べ、最適化することが重要である。まず、8 インチ対応とするためには、アパーチャ上下の圧力をそれぞれ望ましい範囲にしなければならない。アパーチャ上下の圧力は主に、装置の真空ポンプの能力・アパーチャのコンダクタンス・ガス流量によって決まる。ここで、アパーチャ上側とは図 1 のプラズマ室で、プラズマが生成される空間、アパーチャ下側とは図 V.2.2.2 (i) .4-3. のプロセス室で、エッチング対象物が置かれ、アパーチャ上側で生成したプラズマからビームが引き出されてエッチング対象物の加工が起こる空間である。アパーチャ上側にはガス導入ラインとプラズマ生成のためのアンテナ、アパーチャ下側にはエッチング対象物のほかに真空ポンプへの接続が存在する。

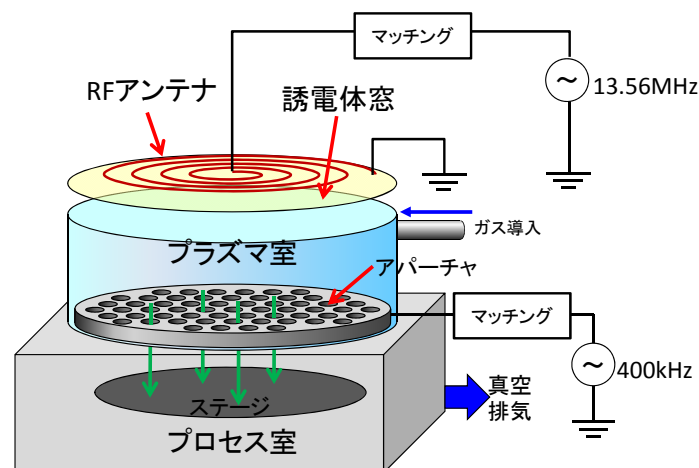


図 V.2.2.2 (i) .4-3. 中性粒子ビーム装置の概略図

次に、エッチング特性を維持することが必要である。アパーチャの開口率が低くなるとレートが低くなるばかりかエッチング特性に細かな分布が生じる恐れがある。極端な場合には、アパーチャの穴の形状や分布がそのまま被エッチング物に転写される恐れもある。これを防ぐには、アパーチャとステージとの距離 (20mm) とアパーチャアスペクト比、アパーチャの穴の分布を考慮して設計する必要がある。8 インチ全体でのマクロな均一性を維持するためには、プラズマそのものの均一性が達成されることが第一に必要となる。これについては平成 21 年度までに達成されている。また、アパーチャとステージの間の空間に圧力勾配が生じると均一性を損なう可能性がある。圧力勾配を生じさせないため、あるいは圧力勾配が生じてでも無視できるようにするためには、圧力を十分に下げる必要がある。中性粒子ビーム装置内の圧力を求めるに当たり、アパーチャを、多数の配管が並列につながったものとみなすことができると考えた。配管をガスが流れるとき、その流量 Q は両端

の圧力を P_1 、 P_0 として、

$$Q = C (P_1 - P_0) \quad (1)$$

と表現することができる。ここで、 C をコンダクタンスと呼ぶ。ガスの流れ方は、ガスの平均自由行程 と系のサイズ L の大小関係で大きく異なる。クヌーセン数 $K_n = \lambda / L$ を導入し、 K_n が小さいときを粘性流領域、大きい時を分子流領域という。粘性流領域と分子流領域ではコンダクタンスも異なる。ここで、アパーチャのサイズは mm サイズ、平均自由行程は cm サイズの領域を扱うので、分子流領域である。Knudsen によると、配管が短い極限、つまりオリフィスでは、コンダクタンスは以下の式で表される。

$$C_{om} = 11.43 (T / M)^{0.5} a^2 \quad (2)$$

ここで、ここで C_{om} は L/s 単位のコンダクタンスで、添え字 o はオリフィス、 m は分子流を意味している。T は温度でケルビン単位、M は分子量で g/mol 単位、a は配管の半径で cm 単位である。配管が長い極限では、流量は

$$Q_{lm} = (8a / 3l) C_{om} (P_1 - P_0) \quad (3)$$

と表される。ここで l は配管の長さで cm 単位である。この式は真空技術の教科書などで広く紹介されているが、配管が短い場合は現実の値からずれてくる。そこで、透過係数 を導入し、

$$Q_m = C_{om} (P_1 - P_0) \quad (4)$$

と表現することを Clausing が提案した。この を求める数表や式は、Clausing 自身のものも含め、いくつか発表されている。ここでは、Santeler が提案した、簡単かつ正確な式を採用する。この式は、以下の通りである。

$$= 1 / (1 + 3l' / 8a) \quad (5)$$

ここで、 l' は以下の式で表される。

$$l' / l = \{4/3 + k(l/a)^e\} / \{1 + k(l/a)^e\} \quad (6)$$

ここで、 k と e は、 $k = 0.128089$ 、 $e = 1.10669$ のとき絶対誤差が最小となり（最大 0.001165）、 $k = 0.168958$ 、 $e = 0.935413$ のとき相対誤差が最小となる（最大 0.428%）。単純には、 $k = 1/7$ 、 $e = 1$ のとき、

$$l' / l = 1 + 1 / \{3 + 3l / 7a\} \quad (7)$$

と単純な形となり、相対誤差の最大値は 0.7% となる。

アパーチャを構成する 1 個の穴のコンダクタンスは、上記の式で求めることができる。アパーチャ全体のコンダクタンスは、これを穴の個数倍したものと考えられる。穴の個数 N は、穴の半径（たとえば 0.5mm）を a 、アパーチャ範囲の半径（たとえば 100mm）を r 、開口率（たとえば 0.5）を R とすると、

$$N = R (r/a)^2 \quad (8)$$

と求めることができる。これらから、アパーチャ全体のコンダクタンス C_{all} は

$$C_{all} = N C_{om} \quad (9)$$

と求められる。

アパーチャのコンダクタンスが求まると、アパーチャ上下の圧力を求めることができる。まず、定常状態では、アパーチャを通るガスの流量はガスの供給量と同じであることから、アパーチャ下側の圧力 P_b をまず決定できる。ガス流量を Q_0 、真空ポンプの排気能力を P とすると、

$$P_b = Q_0 / P \quad (10)$$

次に、ガス流量とアパーチャのコンダクタンスから、アパーチャ上側と下側の圧力差が求められる。アパーチャ上側の圧力を P_a とすると、

$$Q_0 = C_{all} (P_a - P_b)$$

$$P_a = P_b + Q_0 / C_{all} \quad (11)$$

と求められる。

口径 10cm タイプの中性粒子ビーム装置を用いて、アパーチャ上下の圧力を実測し、上記の計算式による計算結果と比較した。計算に当たっては、ポンプの排気能力とアパーチャ上側圧力を未知数とし、ガス流量（設定条件であり既知である）とアパーチャ下側圧力（通常の装置セットアップで測定可能である）を与えてアパーチャ上側の圧力を計算した。この計算値を、特別な装置セットアップで測定したアパーチャ上側圧力と比較した。図

.2.2.2 (i) .4-4.は、このときの、アパーチャ上側の圧力の計算値と実測値の比率をプロットしたものである。なお、このときのアパーチャは、穴径 1mm、厚さ 10mm、アパーチャ範囲 100mm、開口率 50%である。

この結果を見ると、計算は実測とよい一致を示していることが分かる。流量が低い領域では誤差が大きいが、これは非常に低い圧力を測定するため、測定値の誤差が大きいためだと考えられる。なお、このように、アパーチャを設計する上で重要な圧力の計算ができていることが示された。計算の有効性が証明されたことにより、この計算方法を用いて、様々なアパーチャを用いたときの上下圧力を予測することが可能となる。すなわち、圧力予測に基づいたアパーチャの設計が可能となる。

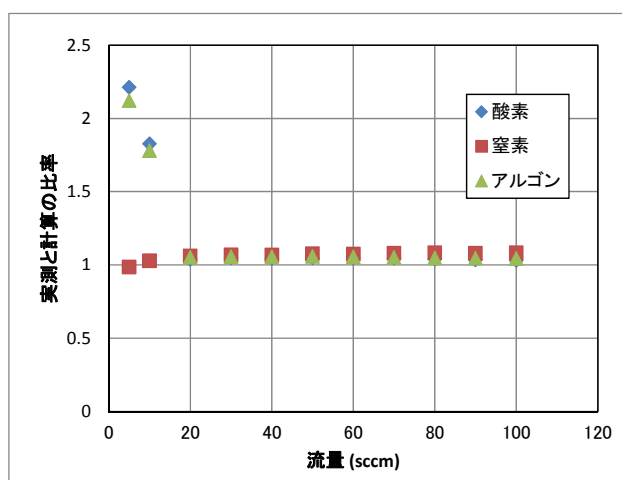


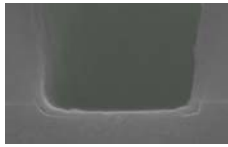
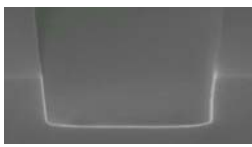
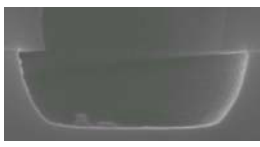


図 V.2.2.2 (i) .4-4. アパーチャ上側圧力の実測と計算の比率

平成 21 年度までは直径 120mm 範囲のアパーチャを用いていたが、直径 200mm 範囲のアパーチャを用いたエッチングの検討を行った。これまで標準で用いていた、穴径 1mm ・厚さ 10mm ・範囲 120mm ・開口率 50%のアパーチャを用い、塩素ガス 80sccm を流しアパーチャ下圧力が 0.29Pa のとき、アパーチャ上圧力は 3.22Pa であると求められる。ガス流量は多い方がエッチングレートの上昇につながることが分かっている。これはアパーチャ上側の圧力が高くなることでプラズマ密度が高くなり、ビームフラックスが向上するためだと考えられる。しかし、ガス流量を増やすとアパーチャ下側の圧力も上がってしまう。アパーチャ下圧力が 0.29Pa のとき、ビームの平均自由行程は約 2cm であり、これ以上圧力を上げると、アパーチャから放出されたビームが加工対象のウェハ（アパーチャから 2cm の距離に設置される）に到達するまでに減衰してしまうと考えられる。すなわち、アパーチャ下圧力が 0.29Pa となるようにガス流量を調節するのが最適と考えられる。

ここで、穴径・厚さ・開口率はそのままで、範囲を 200mm としたアパーチャを用いた。アパーチャ下の圧力はアパーチャのコンダクタンスに依存しないため、120mm の場合と同じく塩素ガス 80sccm、下圧力 0.29Pa とした。式(11)を用いて、このときのアパーチャ上圧力は 1.35Pa と求められた。およそ 1Pa 以上でプラズマが正常に生成すると考えられる。従って、この条件はアパーチャ上では正常にプラズマが生成し、かつアパーチャ下ではビームがほとんど減衰せずに基板に到達する条件であると考えられる。なお、塩素ガス流量を 60sccm としたとき、アパーチャ上下の圧力はそれぞれ 1.01Pa と 0.22Pa と計算される。すなわち、このアパーチャを用いた場合、ガス流量の調節可能範囲は 60sccm~80sccm であると予想される。

この条件でエッチングを行った結果を図 V.2.2.2 (i) .4-5.に示す。塩素 80sccm の条件では、 V_{pp} が高い条件では堆積が起こってしまうが V_{pp} を下げた条件ではエッチングが可能となった。エッチレートを上げるために、塩素を徐々にフッ素に置き換えていった。フッ素 6sccm+塩素 74sccm の条件では、エッチング形状が垂直なまま、エッチレートが上昇した。さらに、フッ素 40sccm+塩素 40sccm ではエッチレートが大きく上昇した。

Vpp	Cl ₂ +F ₂ (sccm)	80+0	74+6	40+40
	200V		hx280, 2.93nm/min a=0(垂直), r=0.727 	hx290, 4.6nm/min a=0(垂直), r=0.731 
500V		hx277, ---- nm/min depo, ----- 	hx288, 6.3nm/min a=0(垂直), r=0.852 	hx284, 36nm/min a=0.438, r=0.922 

図V.2.2.2 (i) .4-5. 200mm 範囲のアパーチャを用いたエッチング結果

エッチングレートの面内均一性については、以下のように考えることができる。本装置は市販の8インチエッチャーを元に構築したため、プラズマ源の面内均一性は非常によい。プラズマ粒子は容器の壁面に到達すると消滅するため、容器中央付近でプラズマ密度が高く、壁面付近で低くなる。そのため、市販の装置では、チャンバー中心付近でアンテナ密度を低く、周辺のアンテナ密度を高めるような仕組みとし、結果として面内均一性が得られるように設計されている。中性粒子ビーム装置では、装置内にアパーチャを導入するためにチャンバー壁面に改造を加えており、面内分布が変化する可能性がある。

エッチングレートの面内均一性を実際に評価するため、直径8インチの範囲のうち、中央と端付近（中央から8cmの位置）についてエッチングレートを比較した。その結果を、中央と橋付近におけるエッチングレートをそれぞれ ER_c と ER_e とし $r = ER_e / ER_c$ というパラメータで表現することとし、その値を図Vに記載した。いずれも r 値は1よりわずかに低い値で、中央付近の方が周辺部分と比較しエッチングレートがわずかに早い結果となっている。しかし、エッチングレートの面内均一性は±4%から、最大でも±15%以内となっており、問題のない値だと考えられる。

なお、エッチング形状（アスペクト比）向上のために、よりアスペクト比の高いアパーチャを用いる可能性がある。たとえば、穴径 0.5mm ・ 厚さ 10mm ・ 範囲 200mm ・ 開口率 50%のアパーチャを用いると、塩素 80sccm を流したとき、アパーチャ上下の圧力はそれぞれ 2.22Pa と 0.29Pa と予想される。さきほどの穴径 1mm のアパーチャと比較し、アパーチャ上下の圧力差が大きくなっている。これは、穴径を小さくすることでコンダクタンスが低下するためである（穴径を小さくするとアパーチャ1個あたりのコンダクタンスは穴径の3乗で低下し、穴数は穴径の-2乗で増加するため、全体としてコンダクタンス

は穴径に比例して低下する)。一方、塩素 36sccm を流したときはそれぞれ 1.00Pa と 0.13Pa と予想される。すなわち、ガス流量の調節可能範囲は 36sccm~80sccm となり、さきほどの穴径 1mm の場合と比較して広がった。これは、エッチング条件を最適化できる範囲(自由度)が広がったことを意味する。すなわち、エッチング形状向上のためにアパーチャのアスペクト比を向上させたことが、結果として、プロセスウインドウの拡大に貢献したと言える。

(i) .4.3 特性評価

カンチレバーの特性計測にはネットワークアナライザを使用し、周波数のスイープ信号で励振レーザの変調を行う。励振レーザはカンチレバーの根元付近に照射し、設計したカンチレバーの共振周波数付近(今回の設計では 50kHz~100kHz)の信号を送れば、一次の振動モードでカンチレバーを共振振動させることが可能である。振動の速度信号は、一次振動モードで速度が最大となるカンチレバー先端付近へ測定レーザをエイミングし計測可能する。ただ、測定信号が工学系へと還らないような荒れた表面や、測定レーザに対して垂直でない面に対しては計測することができない。レーザドップラーの FM 検波回路や、フィルター等を介して出力された速度信号をネットワークアナライザへ入力することで、共振周波数と Q 値を計測した。実際の測定画面を図 V.2.2.2 (i) .4-6. に示す。測定は、カンチレバーの初期特性を面内 52 点で計測したウェハで、中性粒子ビームエッチング後の特性推移を観察する手法を取った。ウェハは外部ファウンドリで試作したウェハを使用した。外部ファウンドリで作製したウェハはプロセス途中でデバイス層への LP-CVD 酸化膜成膜を行っているため、表面へプラズマダメージが加わっている。そのため初期の表面欠陥状況は低い値を示した。しかし、その後中性粒子ビームエッチングを行った結果、表面状態が理論値へと近づいてく様子が観察できる。中性粒子ビームエッチングがダメージレスなエッチング方法であることが証明されたと考える。また、表面状態は 2 分間、およそ 100nm エッチング行ったところで特性のサチュレーションが起り、その後の更なる追加エッチングでは特性の状態がほぼ変化しない結果となった。表面状態の推移を図 V.2.2.2 (i) .4-7. に示す。

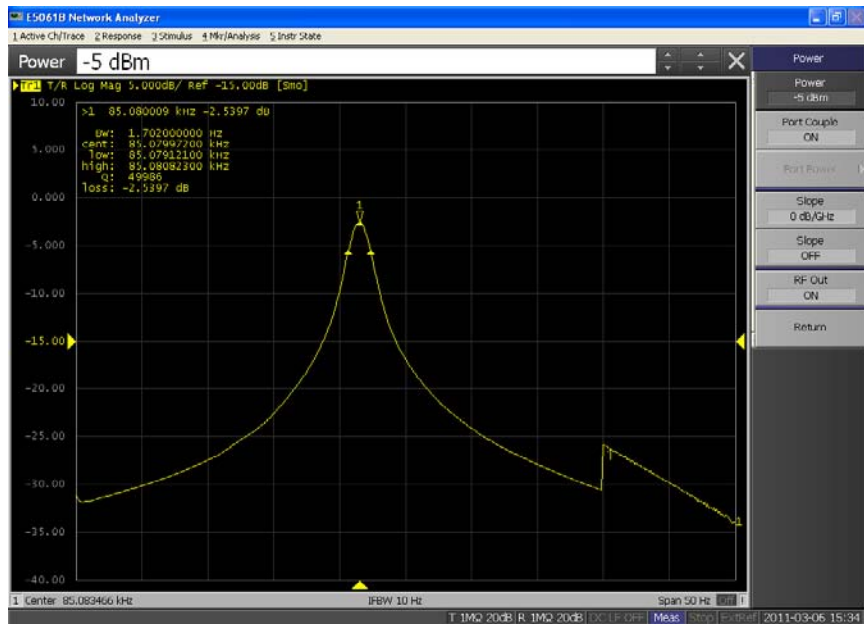


図 V.2.2.2 (i) .4-6. ネットワークアナライザでの測定画面

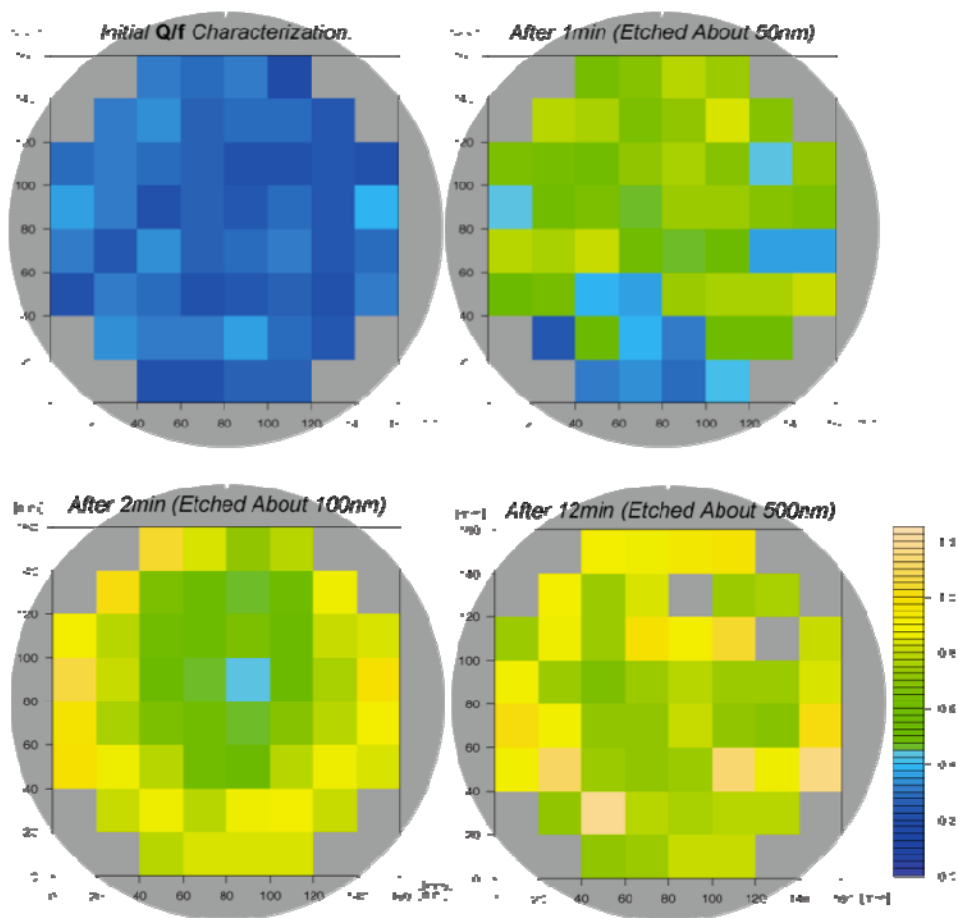
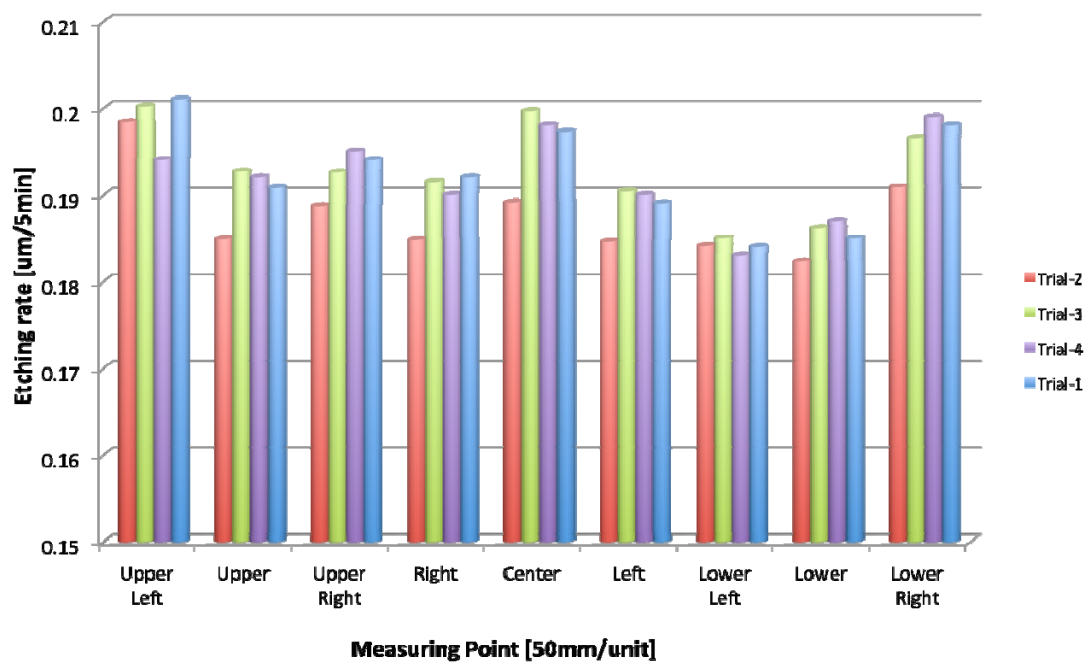


図 V.2.2.2 (i) .4-7. 中性粒子エッチング後の特性推移。

(i) .4.4 考察

中性粒子ビームエッチング装置のアーチャ上下の圧力を計算する方法について検討し、その妥当性を実験によって示した。さらに、大口径（範囲 200mm）アーチャを用いたエッチングの検討を行い、200mm 範囲でのエッチングが可能であること、エッチングレートの面内分布は中央付近が周辺部分より若干エッチングレートが高いものの、面内均一性の観点からは問題ないことが示された。図V.2.2.2 (i) .4-8.にエッチングレート分布を面内 9 点について計測した結果を示す。

ここで、図V.2.2.2 (i) .4-7.を今一度見てみると、中性粒子ビームエッチングのエッチングレートのみによる分布を表しているとは考えづらい。約 50nm エッチング後の特性分布のみを考えればおおよそエッチングレートとの相関だと思われるが、その後の 100nm エッチング後の特性分布は周辺部で表面特性が良く、中心部で表面特性はほぼ変化していない。中性粒子ビームエッチング、真の大口径化のためにはエッチングレートの平滑化のみではなくこれらのダメージレス効果の分布と合わせてアーチャの設計を行うことが必要であると思われる。



図V.2.2.2 (i) .4-8. 中性粒子エッチングの面内 9 点のエッチングレート分布

(i) .5 まとめ

カンチレバーのエネルギーロス理論について検討し、共振周波数で振動するカンチレバーの Q 値についてカンチレバー表面の欠陥状態を表す Q_{surface} が支配的な条件を測定環

境と設計値を適切に選択することにより実現した。カンチレバーの試作について平成22年度は3度の試作を行った。それぞれ、8インチウェハを使用するプロセス、事前の条件出しとして行った4インチウェハを用いた産業技術総合研究所クリーンルームでの試作、外部ファウンダリでの試作、G デバイスセンターつくば8インチラインでの試作である。また、完成した8インチウェハについては寸法精度等の詳細な検討を行った。カンチレバーの特性を評価するために、8インチウェハも挿入可能な大型の真空チャンバー内で、機械振動を測定するレーザドップラー測定機構、光熱励振機構、プローバによる電気特性評価機構、を同時に計測可能な世界で初めての測定装置開発を行った。そして、中性粒子ビームエッチング装置については8インチ対応化のために適切なアパーチャの設計に取り組みその妥当性を理論と実験から検証した。8インチウェハ面内に一様作製したカンチレバーを中性粒子ビームエッチング、ダメージレス効果面内分布測定のために、ウェハ面内52点についてカンチレバーの共振周波数とQ値の初期特性を計測し、中性粒子ビームエッチング後の特性推移を観察し、これからの中性粒子ビームエッチング装置開発に重要な指針となるデータを取得できた。

(i) .6 参考文献

- (1) H. Ootera: Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 33(1994) pp. 4276-4280.
- (2) K. P. Cheung and C. S. Pai: IEEE Device Lett. Vol. 16(1995) pp. 220-222.
- (3) J. R. Woodworth and B. P. Aragon: J. Vac. Sci. & Technol. A Vol. 17(1999) pp. 3209-3217.
- (4) T. Nozawa and A. Nakaue: Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 34(1995) pp. 2107-2113.
- (5) S. Samukawa and M. Okigawa: Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 40(2001) pp. L1346-L1348
- (6) S. Ueki, Y. Nishimori, G. Hashiguchi: Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 50(2011) pp. 026503
- (7) F. R. Blom and J. H. J. Fluitman: J. Vac. Sci. & Technol. B Vol. 10(1992) pp. 19-26
- (8) K. Y. Yasumura and D. Rugar: J. Microelectromech. Syst. Vol. 9(2000) pp. 117-125
- (9) T. V. Roszhart: Solid-State Sens. Actuator Workshop Hilton Head SC(1990) pp. 13-16
- (10) H. Hosaka and S. Kuroda: Sens. and Actuators A; Physical. Vol. 49(1995) pp. 87-95
- (11) Z. Hao and F. Ayazi: Sens. and Actuators A; Physical. Vol. 109(2003) pp. 156-164
- (12) S. Nishida, D. Kobayashi and H. Kawakatu: Rev. Sci. Instrum. Vol. 79(2008) pp. 123703
- (13) K. Nakagaawa, G. Hashiguchi and H. Kawakatsu: Rev. Sci. Instrum. Vol. 80(2009) pp.095104

(i) .7 付録

カンチレバーのQ値を総合的に計算するプログラムを下記に示す。このプログラムを実行することで、図V.2.2.2 (i) .2-5.のグラフが取得できる。なお、本プログラムはR言語を使用している。R言語は有名な統計言語『S言語』をオープンソースとして実装し直した

統計解析ソフトであり、さまざまなプラットフォーム（OS）に対応し、誰でも自由にダウンロードすることができる。それにもかかわらず、世界中の専門家が開発に携わり、日々新しい手法・アルゴリズムが付け加えられている。計算が速く、グラフィック機能も充実しているため数値計算などに最適な言語である。

```

#変数、定数宣言
Eds      <-seq(0.4,1, by=0.2)                #複素ヤング率
Esi      <-1.69*10^11#ヤング率
kn       <-1.875
Psi      <-2330
km       <-3.625*10^-3
kapa <-150
Cp       <-700
alpha<-2.6e-6
Temp<-300
Width    <-30e-6                            #カンチレバーの幅
Hight   <-seq(1e-7, 6e-6, by=1e-7)         #カンチレバーの厚み
Length  <-150e-6  #カンチレバーの長さ
Press   <-seq(1e-3, 1000, length=10)       #雰囲気中の圧力
#surface loss:関数の定義
Qsurface<-function(x,y){1/(x*Width/(2*(3*Width+x))*Esi /y)}
#support loss:関数の定義
Qsupport<-function(x,y){1/(2.081*(y/x)^3)}
#Air flow loss:関数の定義
Qair <-function(x,y){1/(kn^2/(km*x)*(2e-6/y)^2*sqrt(Psi*Esi/12))}
#F0
F0<-function(x)(pi*kapa/(2*Psi*Cp*x^2))
#resonant frequency
ResFreq <-function(x,y)(kn^2/2/pi*x/y^2*sqrt(Esi/12/Psi))
#Thermo elastic damping
QTED<-function(x,y)(1/(2*Psi*Cp/(alpha^2*Esi*Temp)*(1+(ResFreq(x,y)/F0(x))^2)/(2*ResFreq(x,y)/F0(x))))
#グラフのx座標とy座標の関数
X1      <-Hight*1e6

```

```

Y1      <-1/(outer(Hight, Eds, Qsurface)+Qsupport(Hight,Length)+QTED(Hight,
Length))
#X2      <-Hight*1e6
#Y2      <-outer(Hight, Length, Qsupport)
#X3      <-Press
#Y3      <-outer(Press, Length, Qair)
#X4      <-Hight*1e6
#Y4      <-outer(Hight, Length, QTED)
#plotプロパティの変数化
y1label  <-"Q Total"           #ylabプロパティに使用
y2label  <-"1/Q Support"
y3label  <-"1/Q air"
y4label  <-"QTED"
x1label  <-"Thickness[um]"     #xlabプロパティに使用
x2label  <-"Thickness[um]"
x3label  <-"Pressure [Pa]"
x4label  <-"Thickness[um]"

title1 <-"Total Loss"         #mainプロパティに使用
title2 <-"Support Loss"
title3 <-"Air Damping Loss"
title4 <-"Thermo Elastic Damping"

color    <-T                  #colプロパティに使用
plotline1 <-c(1:length(Eds))  #ltyプロパティに使用
plotline2 <-c(1:length(Length))
plotline3 <-c(1:length(Length))
plotline4 <-c(1:length(Length))
plotpoint1 <-1:length(Eds)    #pchプロパティに使用
plotpoint2 <-1:length(Length)
plotpoint3 <-1:length(Length)
plotpoint4 <-1:length(Length)
#グラフ作成
matplot(X1, Y1, type="o", ylab=y1label, xlab=x1label, col=color,
main=title1, pch=plotpoint1, lty=plotline1)
#凡例:locator(1)命令でマウスクリック箇所から座標の決定

```



```

legend(locator(1),pch=plotpoint1, lty=plotline1, col=color,
       legend=paste("δEds=", Eds))
#quartz()
#matplot(X2, Y2, type="o", ylab=y2label, xlab=x2label, col=color,
#main=title2, pch=plotpoint2, lty=plotline2, ylim=c(0,7e-5))
#凡例:locator(1)命令でマウスクリック箇所から座標の決定
#legend(locator(1),pch=plotpoint2, lty=plotline2, col=color,
# legend=paste("l=", Length*1e6,"[um]"))
#quartz()
#matplot(X3, Y3, type="o", ylab=y3label, xlab=x3label, col=color,
# main=title3, pch=plotpoint3, lty=plotline3, log="xy")
#凡例:locator(1)命令でマウスクリック箇所から座標の決定
#legend(locator(1),pch=plotpoint3, lty=plotline3, col=color,
# legend=paste("l=", Length*1e6,"[um]"))
#quartz()
#matplot(X4, Y4, type="o", ylab=y4label, xlab=x4label, col=color,
# main=title4, pch=plotpoint4, lty=plotline4, log="y")
#凡例      :locator(1)命令でマウスクリック箇所から座標の決定
#legend(locator(1),pch=plotpoint4, lty=plotline4, col=color,
# legend=paste("l=", Length*1e6,"[um]"))

```

(ii) μ プローブTEGの設計・試作

(ii) -1 背景

可動部位を有することは、従来の電気回路デバイスに対するMEMSデバイスの本質的な優位点の一つである。しかしその反面、MEMSデバイスの動作中に可動部位の摺動面や接点において生じる摩擦・摩耗、接触抵抗変動等のトライボロジ的な現象をいかに的確に把握し、管理するかという点もまた本質的な課題となる。

BEANS 研究所 3D-BEANS センターにて平成 20~21 年度にかけて開発されてきた、3次元構造物に対して機能性ナノ構造を位置選択的に配置した耐摩耗構造プローブに対して、この課題は同様に当てはまる。nm オーダの先端径を有するプローブ先端と接触面間において生じる摩擦・摩耗などの各種物理現象を的確に測定・評価し、物理モデルへとブレイクダウンすることは、所望の機能を実現する上では避けて通ることのできない重要項目の一つである。

以上のような背景から、3D-BEANS センターではプローブ先端におけるナノレベルの接触面間相互作用（摩耗現象・通電現象など）を測定しモデル化するナノトライボロジ評価技術の確立を目的とした研究活動を続けている。具体的には、平成 21 年度までにシングルプローブの先端と接触対象媒体の間の nN レベルの物体間作用力と、両者の電気的コンタクト特性を計測するナノトライボロジ評価系を立ち上げるとともに、シングルプローブ先端におけるナノサイズ領域の電気的コンタクト特性と物体間接触力との相関関係に着目し、媒体表面の洗浄処理有無やプローブ先端曲率半径などの各種条件が非摺動接触時の接触抵抗値及びそのばらつきに与える影響についての定量的な分析、等を実施してきた（図 2.2.2()1-1）。

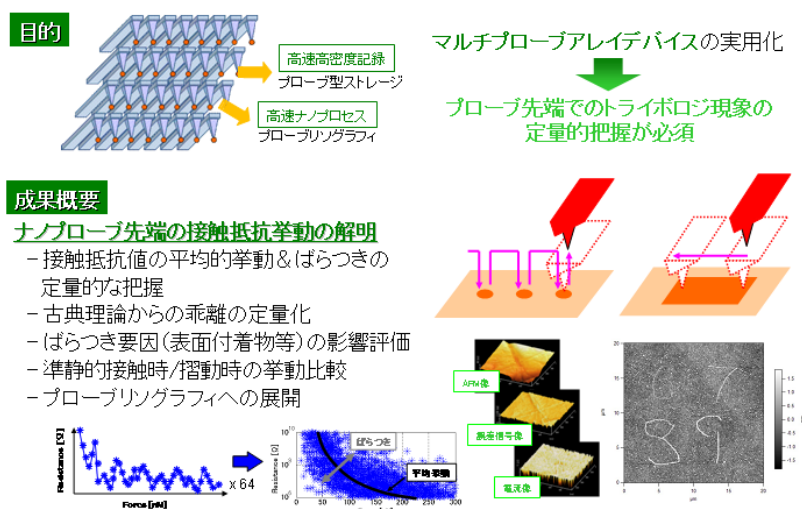


図 V.2.2.2()1-1 3D-BEANS センターにおけるナノトライボロジ研究

これを受け、Gデバイスセンターでは平成 22 年度、マルチプローブの特性バラツキの抑制に貢献するマルチ環境下での技術課題抽出と原因の分析を行い、各種センシングデバイス、新原理センサの産業的な実現性を判断する基礎データの構築にむけ以下の検討を行う。

- ・最先端 8 インチラインを活用して先端部の有効径・幅がサブミクロンであるマルチプローブアレイを試作し、マルチプローブ評価装置を導入してシングルプローブでの検出感度を維持しながら、ウェハ内、及びロット間の形状・特性のバラツキを評価する。

- ・また、作製したマルチプローブアレイが 8 インチラインの検査デバイスとして適用できるかの可能性を検討する。

(ii) -2 マルチプローブ評価装置

マルチプローブアレイデバイスにおける複数プローブの先端のナノトライボロジ現象計測（接触抵抗値計測など）は、今年度最先端 8 インチラインに導入されたマルチプローブ評価装置（住友精密工業）を用いて実施した（図 V.2.2.2().2-1）。マルチプローブ評価装置は、正式名称を **Scanning Multi-Probe Nano Lithography System** といい、高スループットのプローブリソグラフィを主目的として開発された装置であるが、マルチプローブ先端のナノトライボロジ現象の評価装置としても適用可能である。具体的には、最大 20 本のプローブに対して電圧一定、電流一定の各条件下で電圧を印加し、個々のプローブ先端に流れる電流値を個別に計測することができる。更に、2 式の光てこ機構を有し、マルチプローブアレイの両端のプローブカンチレバーの撓み量を計測することで、プローブアレイと摺動対象媒体が平行になるようチルトを調整し、全プローブの接触荷重がほぼ等しくなるように制御できる（図 V.2.2.2().2-2）。

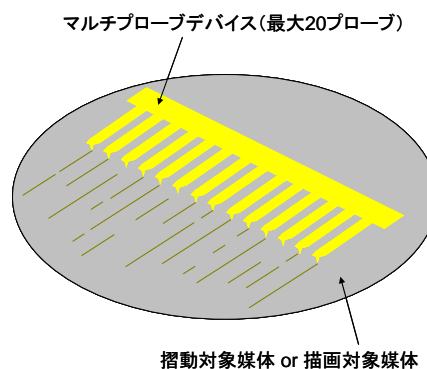


図 V.2.2.2().2-1 マルチプローブ評価装置と評価方法のイメージ図

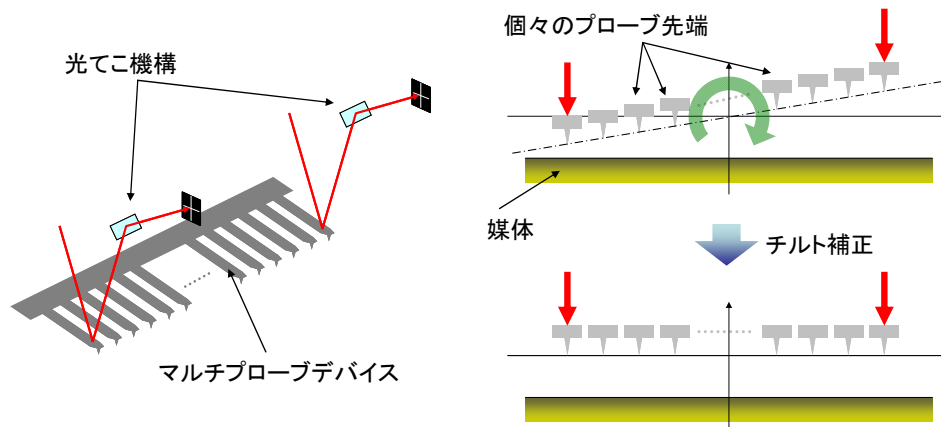


図 V.2.2.2().2-2 2式光てこによるチルト補正機構

(ii) -3 4インチラインによるプレ試作の実施

(ii) -3.1 プロセスフロー

マルチプローブアレイデバイスの最先端8インチラインでの試作を実施するに際し、プロセスフローの最適化及び各プロセスの条件出しを行う目的で、4インチラインでのプレ試作を実施した。試作に先駆けて立案されたプロセスフローは表V.2.2.2().3.1-1 に示す3種類である。

表V.2.2.2().3.1-1 4インチライン試作のプロセスフロー

プロセスフロー			
工程	プロセス①	プロセス②	プロセス③
1	マスク1リソ	マスク1リソ	マスク1リソ
2	SiNエッチング	DRIE	DRIE
3	TMAH	マスク2リソ	マスク2リソ
4	Wet酸化	DRIE	DRIE
5	マスク2リソ	マスク3リソ	Wet酸化
6	SiNエッチング	スパッタ	SiNエッチング
7	TMAH	リフトオフ	TMAH
8	Wet酸化	表面保護	SiO2エッチング
9	SiNエッチング	マスク4リソ(裏)	マスク3リソ
10	TMAH	DRIE	スパッタ
11	SiO2エッチング	SiO2エッチング	リフトオフ
12	マスク3リソ	洗浄	マスク4リソ
13	スパッタ		DRIE
14	リフトオフ		マスク5リソ(裏)
15	マスク4リソ		DRIE
16	DRIE		SiO2エッチング
17	マスク5リソ(裏)		洗浄
18	DRIE		
19	SiO2エッチング		
20	洗浄		

プロセス①は、SiN 膜および Wet 酸化膜をエッチマスクとした TMAH による異方性エッチングを 2 回使用することで、プローブの先端を半ピラミッド状に鋭利に尖らせることを狙ったプロセスである。プロセス①を用いてデバイスを完成させた場合のプローブ先端推定形状を図 V.2.2.2()3.1-1 に示す。しかし、本プロセスフローは難易度が高く、実際に 8 インチラインを駆使して試作する段階になって条件出し等の時間が十分に確保できないリスクがあったため、本プロセスを用いたプレ試作は実施を見送った。

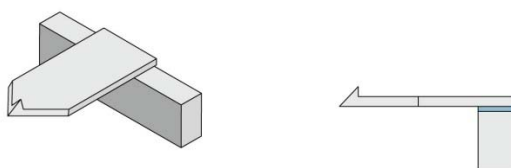


図 V.2.2.2()3.1-1 プロセス①によるデバイス完成予想図

プロセス②は、プローブの先端を 2 次元的に鋭利に加工することで先端を尖らせることを狙った、TMAH による異方性エッチングを用いない最も簡便なプロセスである。先端を鋭利に尖らせるために、先端部の加工を 2 枚のフォトマスクに分けて別々に行うという工夫をしている (図 V.2.2.2()3.1-2)。仮に本プロセスを用いて、先端部の有効径・幅がサブミクロンであるマルチプローブアレイを作成でき、なおかつシングルプローブでの検出感度を維持しながら個々のプローブのナノトライボロジ特性の評価を実施できるのであれば、8 インチラインでの試作は本プロセスを採用することが有望となる。

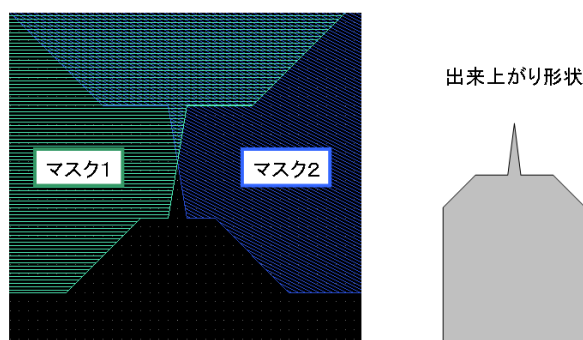


図 V.2.2.2()3.1-2 プロセス②③における先端 2 段加工法

プロセス③は、プロセス①と同様に、TMAH 異方性エッチングによりプローブ先端を 3 次元的に鋭利に尖らせることを狙っているが、プロセス②の先端部を 2 段加工するテクニックを併用することで、TMAH エッチングの回数を 1 回だけで済むように簡素化したプロセスである。

なお、プローブ先端に電流を印加するための電極材料には、Ti 膜(厚さ 20nm)を下地とした W 膜(厚さ 80nm)を使用した。W 膜はウェット加工が困難であり、またドライ加工の際にカンチレバー母材となる Si との選択比が取りづらいため、今回は W 膜の加工にはリフトオフプロセスを利用した。なお、プローブ先端から電流を流すために電圧を印加する電極とは独立して、プローブ先端摺動対象媒体との間に交流電圧を印加することでプローブを静電力で加振するための加振用の電極を設けている。これは、プローブをタッピングすることによるプローブ先端摩耗量の低減を狙ったものだが、今年度はこれを利用したプローブ加振試験は実施しなかった。

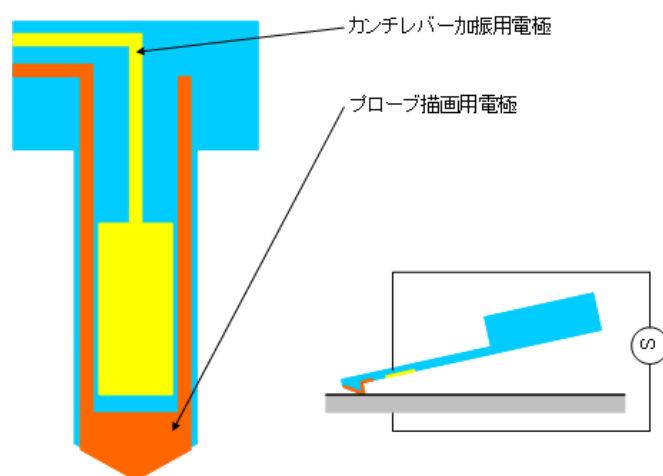


図 V.2.2.2().3.1-3 プローブ電極膜の分割

(ii) -3.2 作成されたデバイス

プロセス②及び③にて4インチラインで試作を行い、完成したデバイスの SEM 画像をそれぞれ図 V.2.2.2().3.2-1、図 V.2.2.2().3.2-2 に示す。いずれの試作においても、プローブ先端の尖り角度が鈍角なもの鋭角なものとの2種類のサンプルを作成したが、いずれにおいても先端が鋭利な、先端有効径がサブミクロンであるプローブを作成できている。また、プロセス③については、TMAH を用いてプローブ先端を3次的に尖らせることに成功している。但し、2枚のマスクの合わせずれにより、プローブが若干左右非対称な形状になっている点が課題である(図 V.2.2.2().3.2-3)。

リフトオフプロセスを用いた W 電極膜の加工についても、電極膜の剥がれなどを発生させることなく、良好なパターンニングを実施できていることが分かる。

なお、参考までに、完成したプローブを、最先端8インチライン検査工程に導入された X 線 CR スキャナ装置で観察した結果を図 V.2.2.2().3.2-4 及び図 V.2.2.2().3.2-5 に示す。十分な空間分解能を持って、デバイスの複雑な形状を3次的に計測できていることが分かる。また、W 電極部と Si カンチレバー部の材質の違いも明確に識別できている。後者のサンプルは、リフトオフプロセス時に W 電極膜剥がれが発生した NG 品であるが、こうし

た NG 品のスクリーニングにも使用できることを示唆している。

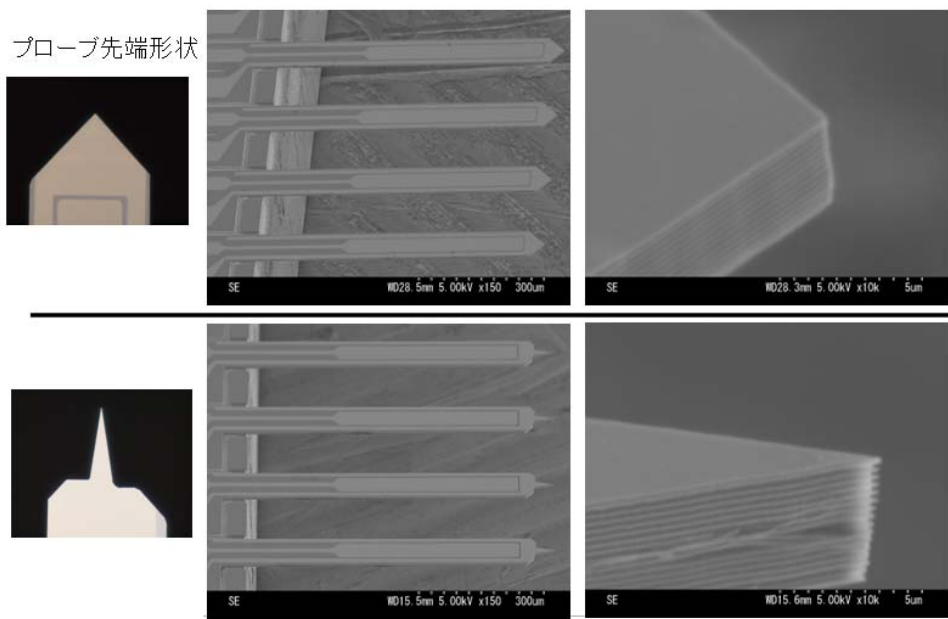


図 V.2.2.2().3.2-1 プロセス②完成サンプルの SEM 画像

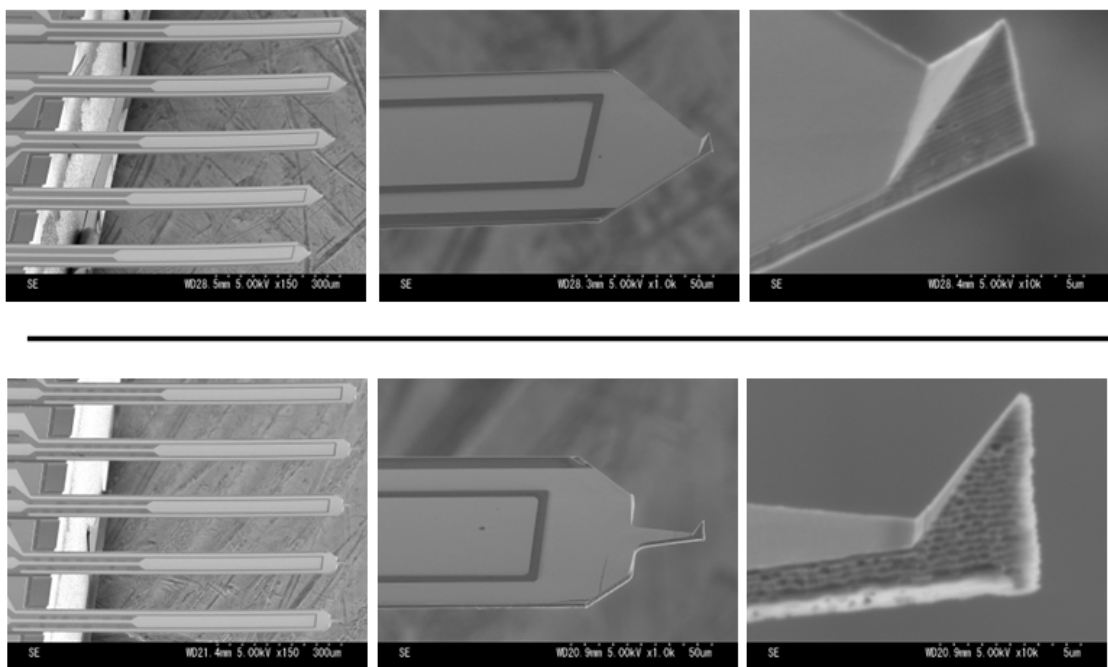
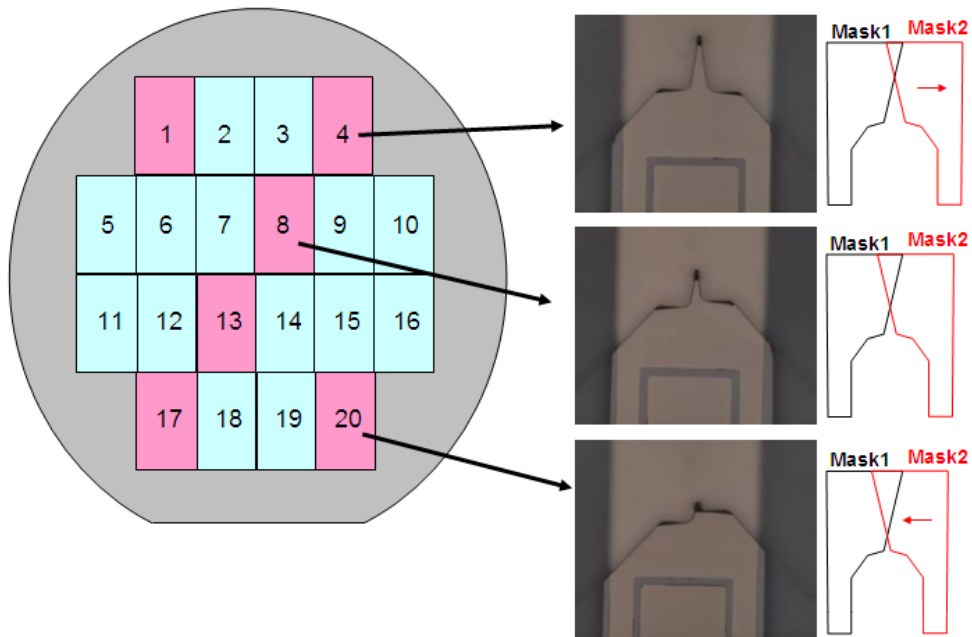
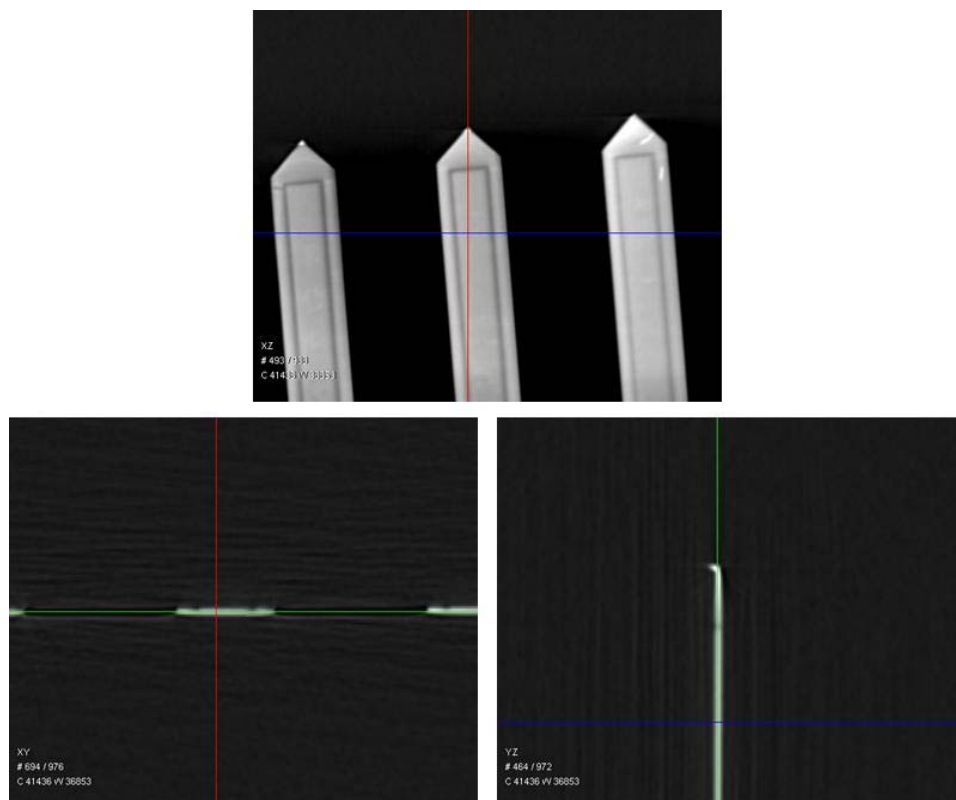


図 V.2.2.2().3.2-2 プロセス③完成サンプルの SEM 画像



図V.2.2.2().3.2-3 マスク合わせズレに起因する形状ばらつき



図V.2.2.2().3.2-4 X線CTスキャナによる形状測定（プロセス③：鈍角先端）

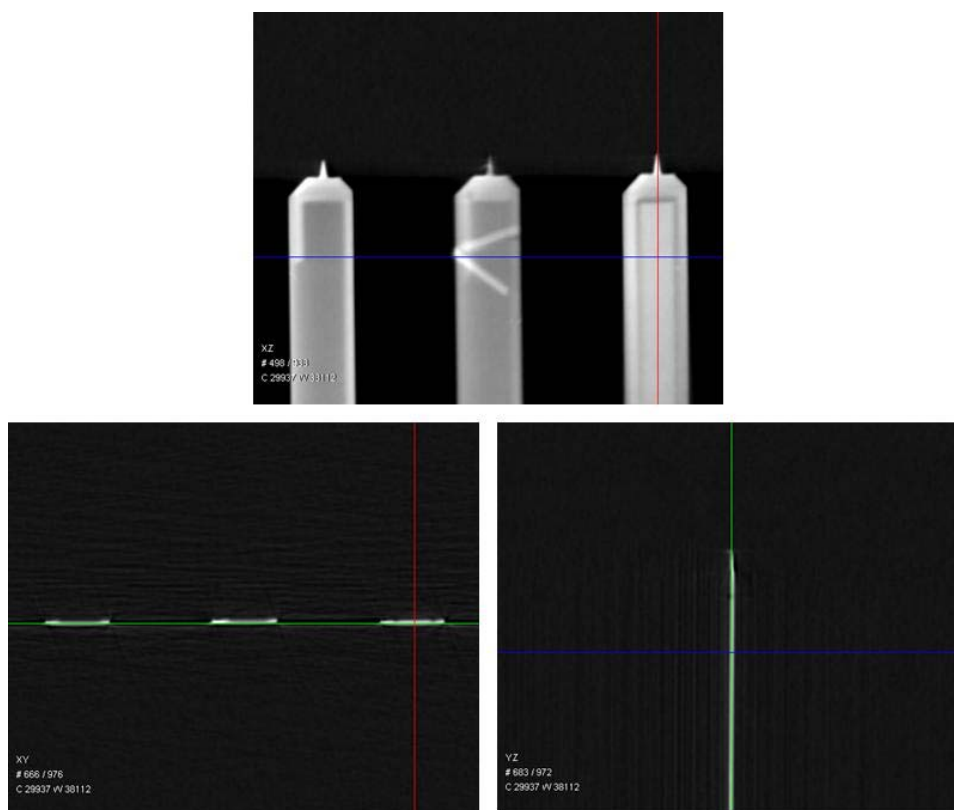


図 V.2.2.2()3.2-5 X線 CT スキャナによる形状測定（プロセス③：鋭角先端）

(ii) -4 4 インチラインサンプルの評価

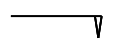
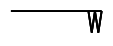
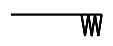
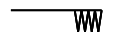
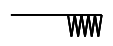
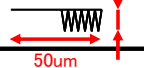
(ii) -4.1 陽極酸化による描画実験

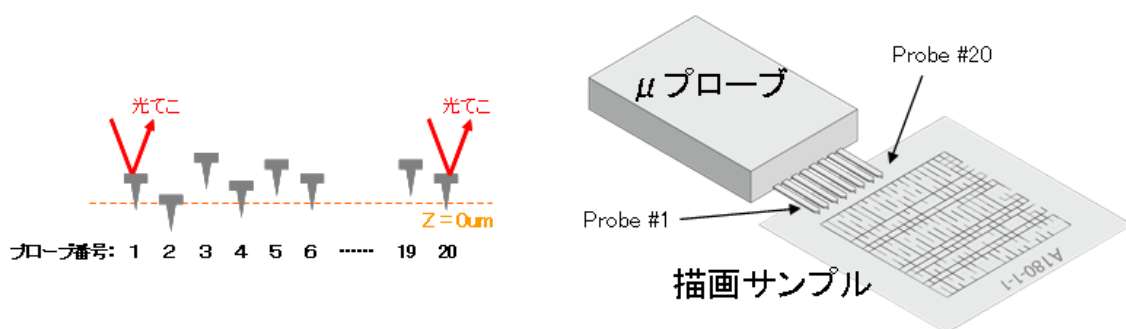
完成した4インチラインサンプルに対して、マルチプローブ装置を用いた評価を実施した。第一には、Si ウェハに対してマルチプローブデバイスの先端を摺動させながら、プローブ先端電極に電圧を印加することで Si ウェハ媒体に対して電流を流し、それによってウェハ上を局所的に陽極酸化させてパターンを描画する、所謂局所陽極酸化法（LAO: Local Anodic Oxidation）による描画試験を実施した。

描画に用いる Si ウェハは、事前に硫酸過水による洗浄を実施したのち、希フッ酸処理により表面酸化膜を除去する。これに対して表 V.2.2.2()4.1-1 に示した描画条件で、6つのパターンを描画する。“撓み量”は実際に光てこによる計測が可能な両端のプローブについてのものであり(図 V.2.2.2()4.1-1 参照)、仮にプローブ先端の高さにばらつきが発生し、一部のプローブが両端のプローブ高さより高い位置にいた場合、撓み量が小さい場合にはプローブ先端が Si 媒体と接触しないことがあり得るが、撓み量を増大するに伴って徐々に全てのプローブが媒体に接触するようになると考えられる。“摺動速度”は、プローブを媒体に対して摺動させる際の両者の相対速度を示している。プローブ先端に印加する電圧は全ての試行で 4V 一定とした。なお、各デバイスに 20 本ずつあるプローブのうち、#1~#10

に電圧を印加し、10本同時の描画を行った。

表V.2.2.2().4.1-1 描画条件

Trial	撓み量 [um]	印加電圧 [V]	摺動速度 [um/s]	描画形状
1	0.1	4.0	3.0	
2	0.6			
3	1.1			
4	1.6			
5			6.0	
6			9.0	



図V.2.2.2().4.1-1 光てことプローブ番号

描画が終了した後、Si ウェハを TMAH で軽く (60 40sec) エッチングし、陽極酸化で描画された SiO₂ パターンを顕在化させ、SEM での描画パターン観察が容易になるようにした。プロセス③で試作したデバイス、プロセス②で試作したデバイスのうち先端が鈍角のものと鋭角のもの、の計3サンプルについて描画試験を実施し、上記処理で顕在化させた描画パターンを SEM 観察した結果を図V.2.2.2().4.1-2 に示す。プロセス②、③のどちらのプロセスで作成したサンプルも、何らかのパターンを描画することが実現できている。しかし、それぞれのデバイスとも 10 本のプローブで描画を行っているうち、実際に何らかの描画を実施できているものは 2 ~ 4 本程度となっている。また。描画の成否は表 .2.2.2().4.1-1 に示した描画条件に全く依存していなかった。

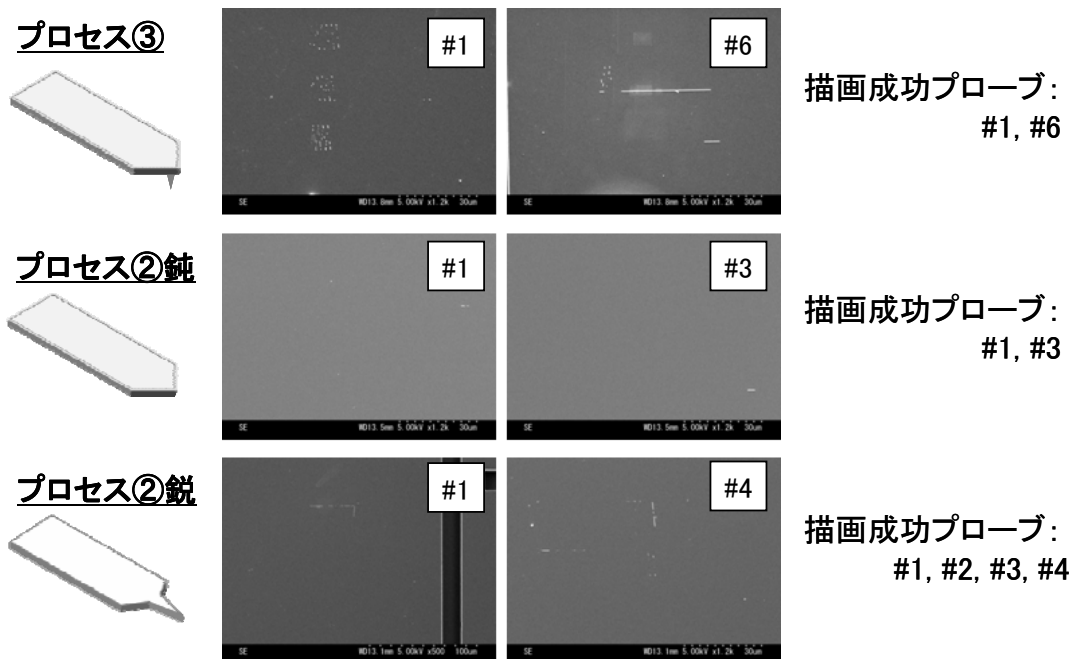


図 V.2.2.2().4.1-2 描画されたパターンの SEM 画像

(ii) -4.2 陽極酸化後のプローブ先端

(ii) -4.1 節にて、電圧を印加した 10 本全てのプローブでは描画が成功しなかったことの原因として、プローブ先端部分の出来栄が不十分だった可能性を検証するため、描画に用いたマルチプローブデバイスの先端 SEM 観察を実施した。結果を図 V.2.2.2().4.2-1~3 にそれぞれ示す。

プロセス③のデバイスについては、描画に成功しなかったプローブ#2~#5において、表面の W 電極膜が剥離したような状態になっていることから、プローブ先端の状態と描画成否にある程度の相関関係を有していることがわかる。しかし、プロセス②で作成したデバイス 2 者については、各プローブともほとんど同様の形状を有しており、描画成否とプローブ先端状態の間に相関は見られなかった。

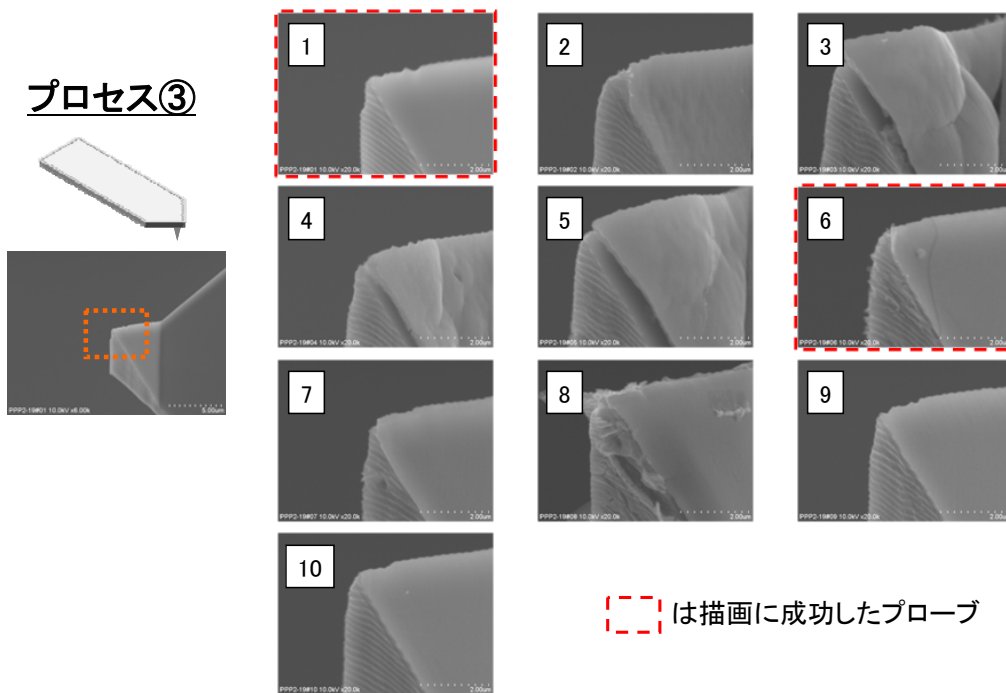


図 V.2.2.2().4.2-1 プローブ先端の SEM 画像 (プロセス③)

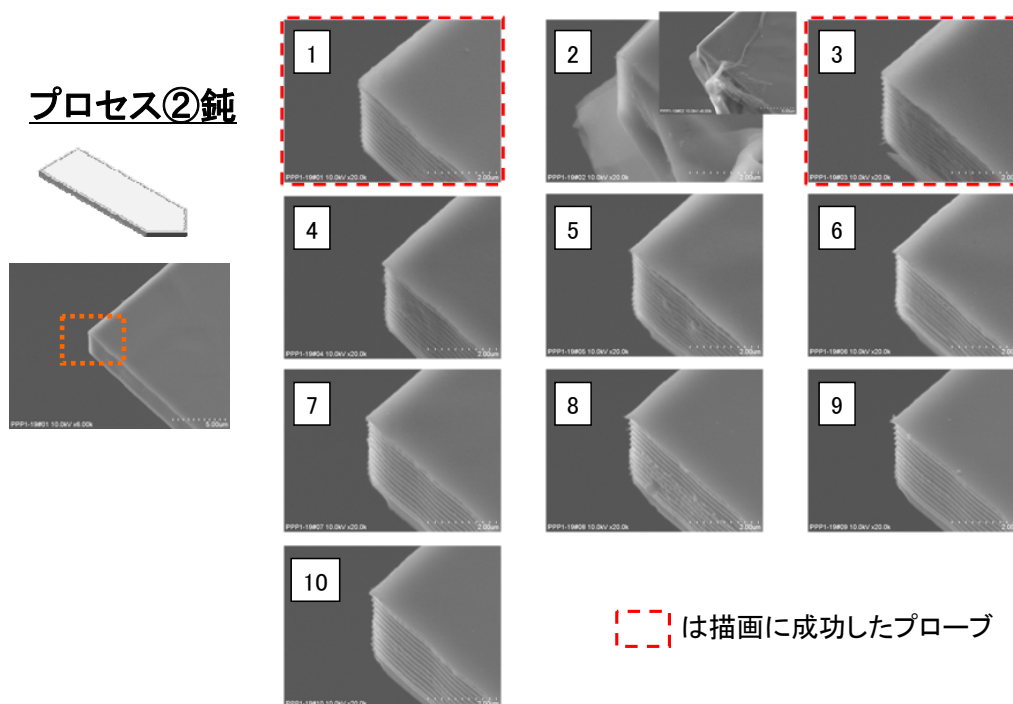
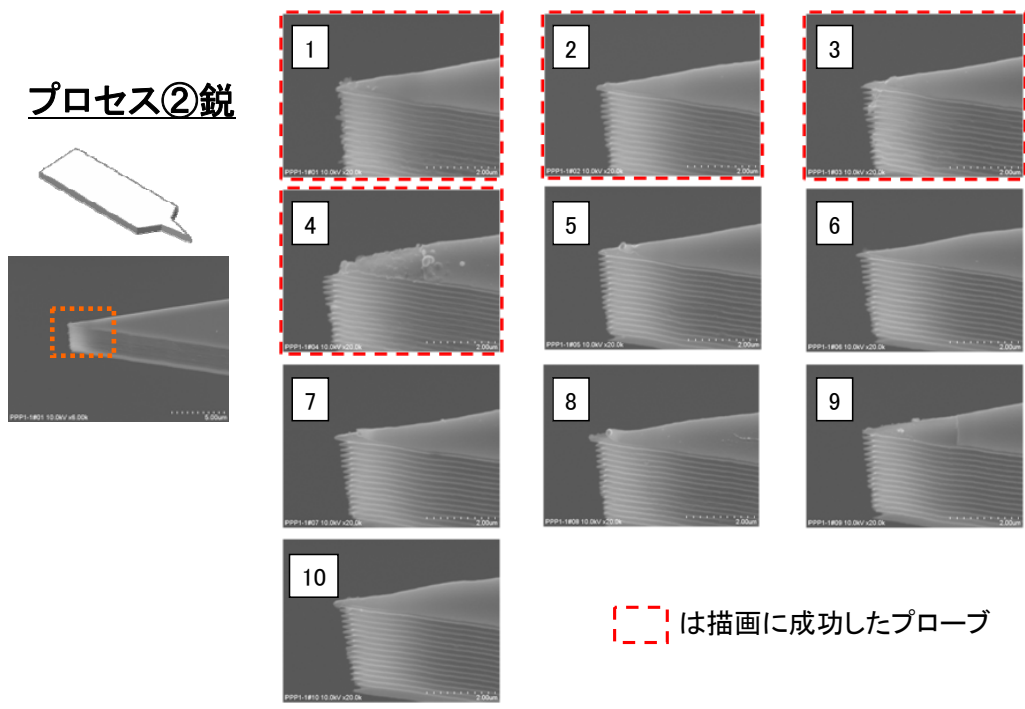


図 V.2.2.2().4.2-2 プローブ先端の SEM 画像 (プロセス② : 鈍角先端)



図V.2.2.2().4.2-3 プローブ先端の SEM 画像 (プロセス②：鋭角先端)

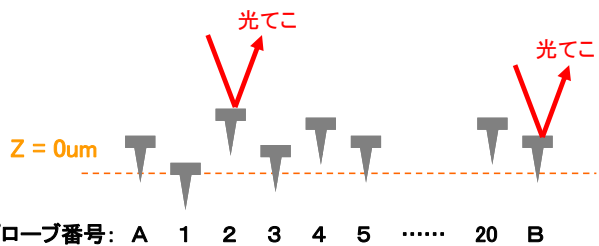
(ii) -4.3 両端付近プローブの先端高さ計測

個々のプローブの描画成否を支配している要因の可能性として、図V.2.2.2().4.1-1 に示したプローブ先端の高さばらつきが挙げられる。この可能性を検証するため、プローブ先端高さの直接測定を実施した。

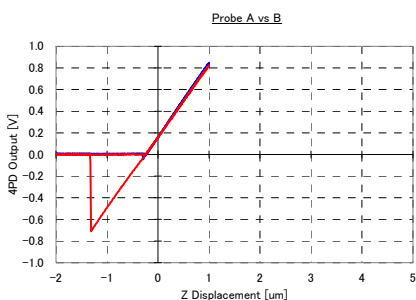
測定に用いているマルチプローブ評価装置は、図V.2.2.2().2-2 に示すように、プローブアレイ全体のチルトを補正するための2つの光てこ機構を有しているが、これを利用して、片方の光てこを意図的に両端以外のプローブに当てつつフォーカスを測定することにより、両端のプローブ高さから決まる平面に対してそのプローブがどのくらいの高さズレを有しているかを直接計測することができる(図V.2.2.2().4.3-1)。但し、この手法で計測できるのは、光てこの照射可能レンジ内に存在している、両端から2～5本程度のプローブに限られる。

描画を行った3つのデバイスについて、上述の方法でプローブ高さを測定した結果を図V.2.2.2().4.3-2～4にそれぞれ示す。

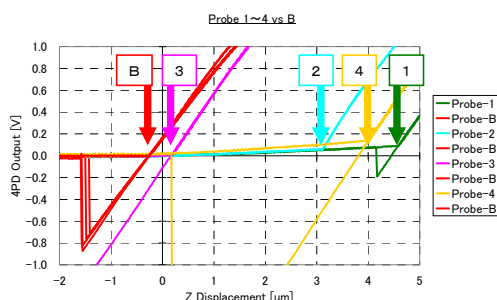
プローブAとBの高さを揃えた後で、
Aの光てこレーザスポットを
隣接するプローブ上に移動させ、
そのままフォースカーブを測定



↓
各プローブが接触するときのZ変位から
プローブ高さばらつきが計測可能
(但し両端からプローブ4~5本まで)



最初にAとBの高さを合わせた時のフォースカーブ



プローブ1~4とBのフォースカーブ同時測定

図 V.2.2.2().4.3-1 光てこによるプローブ先端高さ測定

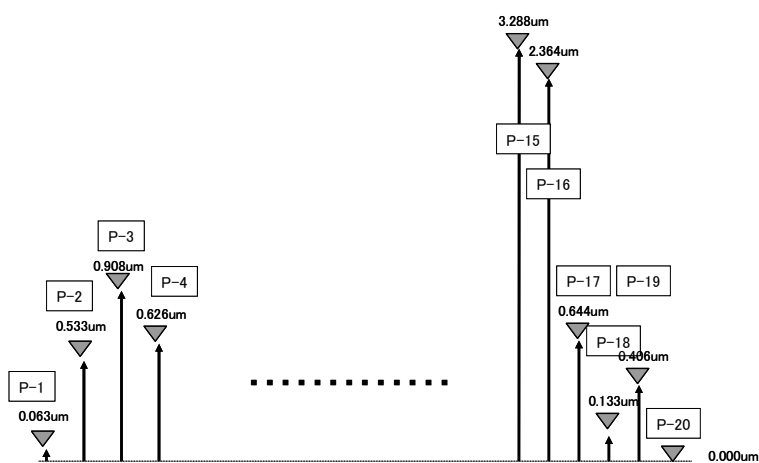


図 V.2.2.2().4.3-2 プローブ高さ計測結果 (プロセス③)

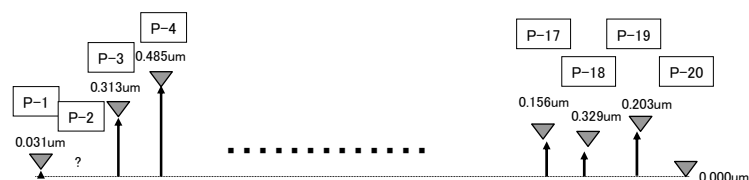


図 V.2.2.2().4.3-3 プローブ高さ計測結果 (プロセス②: 鈍角先端)

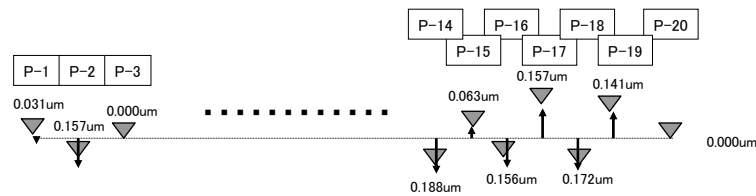


図 V.2.2.2() 4.3-4 プローブ高さ計測結果 (プロセス② : 鋭角先端)

プロセス③で作成したデバイスの場合、両端のプローブと比較して中央部分のプローブの高さが高くなる傾向が見られている。特に#15、#16は基準平面から1.6um以上離れていることから、最もプローブの撓み量が大きい試行(表V.2.2.2() 4.1-1のTrial 4,5,6)でもプローブ先端がSiウェハ表面に接触していないことになる。恐らく、プローブ#7~#10において描画が行われなかった原因は、こうした傾向からそもそもプローブ先端がSiウェハ表面に接触していなかったのではないかと推測される。

しかし一方で、プロセス②で作成したデバイス2つは、計測できたプローブ先端の高さばらつきが全て±0.5um以内に収まっており、極めてばらつきが小さい。こうした傾向から鑑みるに、恐らく少なくとも撓み量が最も大きい試行(Trial 4,5,6)では全てのプローブ先端がSiウェハ表面に接触していると推測される。よって、プローブ先端の接触/非接触を描画成否の主要因と判断することはできず、他の何らかの要因を推定する必要がある。

なお、こうした高さばらつきの傾向がプロセスによって異なる理由としては、まずプロセス③はTMAH異方性エッチングによりカンチレバーを厚さ方向にエッチングしているため、カンチレバー厚みにばらつきが生じやすいことが挙げられる。更にプロセス③で試作したデバイスではカンチレバー厚みがエッチングされて最終的に約2umになっているのに対し、プロセス②で試作したデバイスのカンチレバー厚みは約4umと倍近いため、曲げ剛性の弱いプロセス③のデバイスのほうが、W電極膜等の残留応力によるカンチレバー反りの影響を受けやすく、その分プローブ先端の高さがばらつき易いものと考えられる。

(ii) -5 8インチラインサンプルの試作

(ii) -5.1 プロセスフローの選択と変更

4インチラインにて試作評価を行ったサンプルでは、プロセス②、③のどちらのプロセスで試作したデバイスでも、同様に局所陽極酸化法によるパターン描画を実施することができた。このことから、どちらのプロセスでもプローブ先端から電流を流すという機能は問題なく発現させることができると分かった。一方、プロセス②はカンチレバー厚さ方向のエッチングを行わないためプローブ先端高さばらつきが小さく、また何よりTMAHを使用しないためプロセスが簡素なことから、条件出し作業負荷の低減と試作期間の短縮の観点も加味し、8インチラインにおける試作ではプロセス②を採用することにした。

一方、電極に用いる金属膜は、4インチライン試作における W 膜 (Ti 下地) から、Au 膜 (Cr 下地) に変更することにした。W 膜は硬度が高く耐摩耗性に優れるため、今回のデバイスのように微小コンタクト領域で激しい摺動摩耗に晒される用途には最適と考えたのが W を選定した理由であったが、一方で W は比較的酸化されやすく、大気中で膜表面に高抵抗の酸化膜が形成されてしまうという欠点がある。4インチラインサンプル試作評価において、電極が Si ウェハ表面に接触しているにもかかわらず描画ができなかったプローブが存在していた理由として、この表面酸化膜によってプローブ先端～Si ウェハ間の良好な電氣的導通が阻害された可能性を考え、代替として Au 膜を選択した。Au は極めて酸化されにくいいため表面に酸化絶縁層が構築されず、理想的な電気接点の電極材料としてよく使用されるものであるが、一方で硬度、ヤング率ともに金属としては低い部類であり、摺動により容易に摩耗してしまう。こうした欠点を補うため、Au の膜厚は4インチライン試作時 W 膜 (80nm) よりも厚く (>100nm) した。

なお、Au 膜は W 膜と異なり、Si との十分な選択比を取りながら Wet エッチングによるパターニングが可能である。しかし今回はプロセスフローを大きく変更することに伴うリスクを回避するため、8インチライン試作でも4インチと同様にリフトオフプロセスによる電極膜のパターニングを実施することとした。

(ii) -5.2 試作結果について

前節の方針に沿って8インチラインでの試作を行い、サンプルマルチプローブデバイスを完成させた。完成したサンプルの SEM 観察画像を図 V.2.2.2()5.2-1 及び図 .2.2.2()5.2-2 に示す。外形上は4インチライン試作時と同様のプローブが形成できていることが分かる。ただ、プローブの先端部分を拡大して観察すると、図 V.2.2.2()5.2-2 のようにプローブの先端が欠けてしまう現象が観測された。これは、図 V.2.2.2()3.1-2 に示す2段階加工を実施した段階までは4インチラインと同様に鋭利な先端が構成できていたものの、その後 Au 電極膜をリフトオフする段階で膜が W と同様に速やかに剥離しなかったため、やむなくウェハ全体を超音波洗浄することで膜の剥離を推進させたところ、その際にプローブ先端が欠けてしまったことが原因である。本結果については、次回以降の試作にフィードバックする予定である。

なお、これらのプローブは先端が欠けてはいるものの、実際に媒体とコンタクトする点は欠けたエッジの部分になると考えられるため、コンタクトする領域はサブミクロンサイズになると推測される。このことから、このような出来栄のデバイスでも評価への投入に値するものと判断した。なお、プローブの先端が確実に媒体に対してコンタクトするように、プローブは媒体に対してある程度の傾斜をもつ形で装置に取り付けられる。このため、プローブの先端欠けの長さばらつきは、媒体への接触点の高さばらつきとして計測されることになる。こうした点に着目しながら、サンプルの評価を行うこととした。

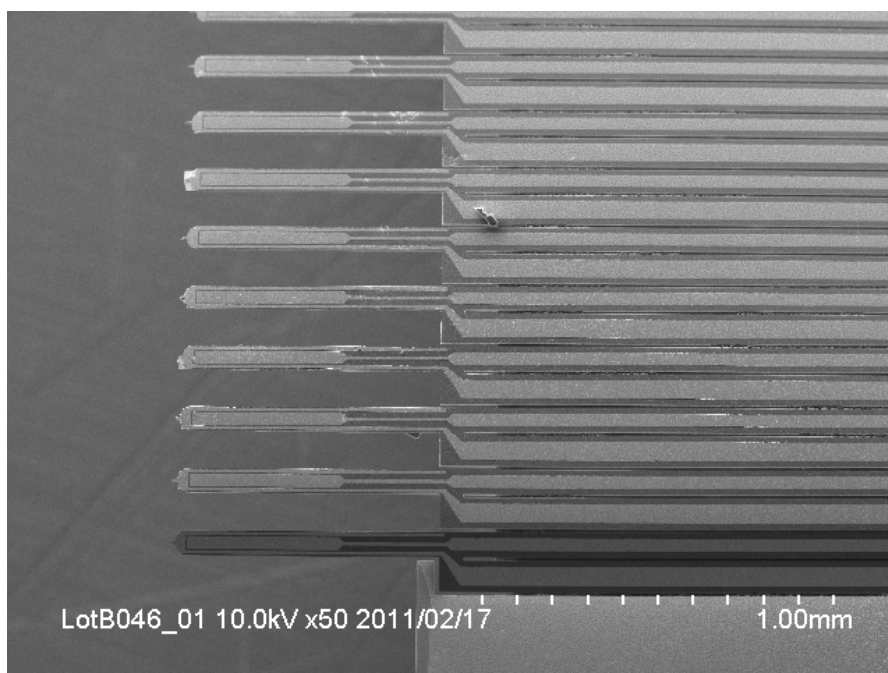


図 V.2.2.2().5.2-1 8 インチラインで試作したマルチプローブデバイス

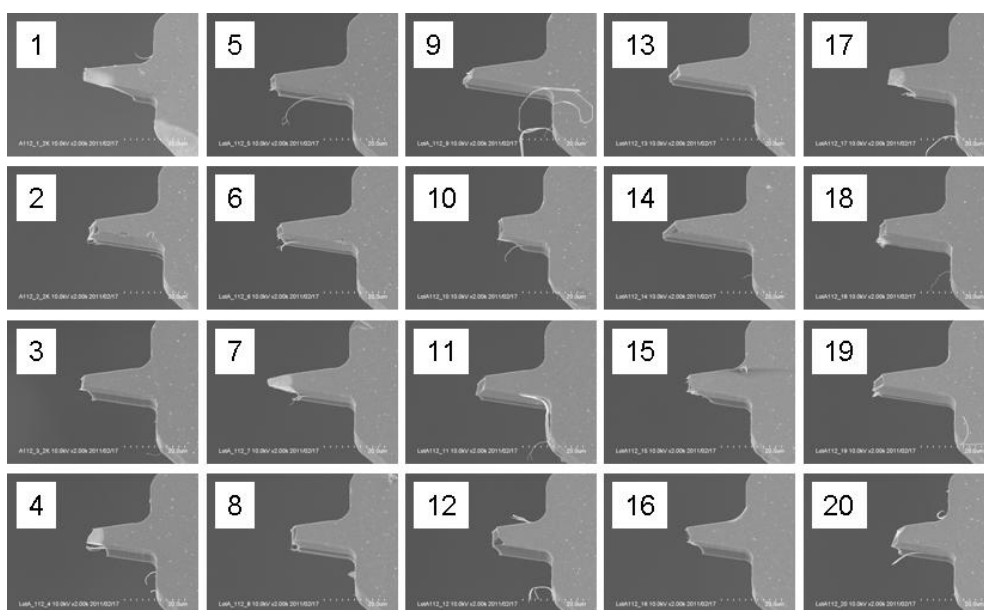


図 V.2.2.2().5.2-2 マルチプローブデバイスの先端部拡大図 (#A-112)

(ii) -6 接触時の電流値計測による形状ばらつき評価

(ii) -6.1 接触電流値の計測について

4インチラインのサンプルを評価する際には、プローブ先端に電圧を印加して Si に対する LAO 法描画を実施するという手段を採用したが、この手法では Si の陽極酸化という物理現象が介在するため、作成したデバイスのプロセス起因形状ばらつきを把握するために

は、描画条件や描画環境を最適化し、陽極酸化起因のばらつき要因を除外する必要があることが課題である。8インチラインサンプルの評価に当たっては、こうした介在要因を極力排除し、より直接的に形状要因ばらつきのみの抽出を行うため、プローブ先端に流れる電流値を計測する手法を採用することとした。

上記手法についての具体的な根拠として、昨年度までに 3D-BEANS センターにて実施した下記の評価結果が上げられる。資料台にバイアス電圧印加可能な AFM 装置を用いて、図 V.2.2.2().6.1-1 に示した実験系により、プローブの接触荷重と接触抵抗値の関係を調査した。具体的には、測定開始点や測定点の間隔、プローブ押付け&引離し速度、最大押込み変位などを指定し、図に示すように測定場所を少しずつ変えながらプローブの押付け→引離しを繰り返して実施できる測定モードを利用する。試料台に一定の電圧をかけた状態でこのモードによる測定を行い、プローブの押付け時のプローブ接触荷重と接触抵抗値の関係を計測した。得られたデータは1回1回の測定ごとに大きくばらつくため、一つの試験条件について64回の繰り返し測定を実施し、それを一つのグラフ上に重ね書きして、全体の傾向とばらつきを評価した(図V.2.2.2().6.1-2)。

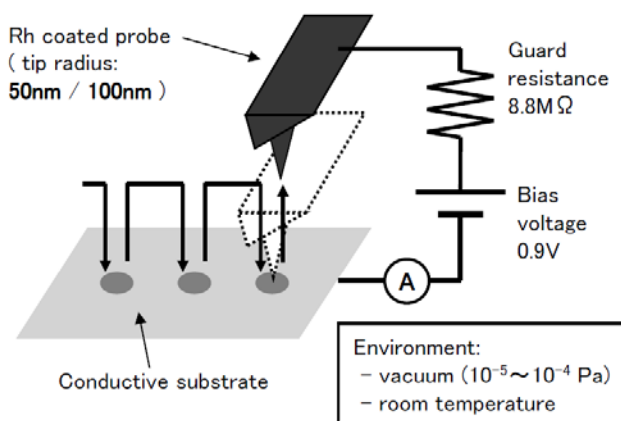


図 V.2.2.2().6.1-1 AFM を用いたシングルプローブの接触抵抗評価

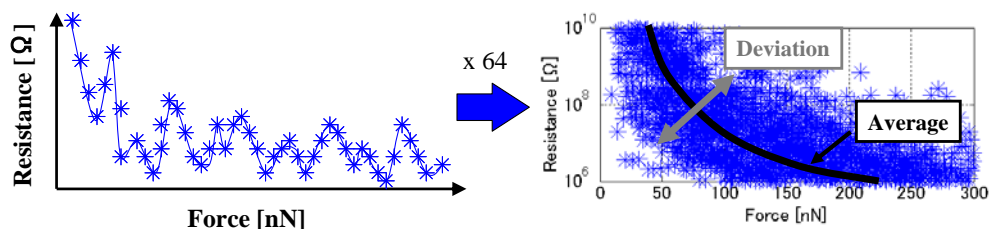
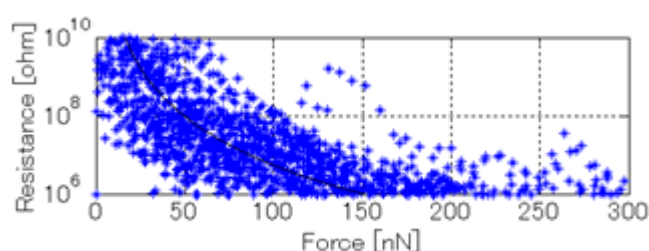


図 V.2.2.2().6.1-2 計測結果の平均的挙動とばらつき

上記の実験手法を用いて、先端半径約 50nm のプローブを、表面を超音波洗浄した Ru スパッタ膜に対して、1.4nN/ms の荷重増減速度で接触させた際の接触荷重と接触抵抗値の

値を評価した。結果を図V.2.2.2().6.1-3に示す。多少のばらつきはあるものの、概ね接触荷重が200nN以上の領域において、接触抵抗値が 10^6 以下まで安定して低下していることが分かる。8インチラインにて試作したマルチプローブデバイスの個々のカンチレバーのバネ剛性の設計値は約0.5N/mである。よって荷重200nNはカンチレバーの撓み量で約400nmに相当することになる。従って、同様にマルチプローブデバイスの先端を、非常に導電性の良好な貴金属媒体に対して接触させ、その際のプローブ先端電流値をリアルタイム計測することで、プローブ先端の接触有無を高さ400nmの分解能で計測できることになる。



図V.2.2.2().6.1-3 シングルプローブ接触抵抗値評価結果の一例

前述したように、マルチプローブ評価装置ではプローブ先端に電圧一定、電流一定のどちらかの条件で制御しつつ電圧を印加することができる。今回の実験のため装置にオプション改造を施し、電圧一定、電流一定の両条件下で、20本全てのプローブの先端に流れている電流値をリアルタイムで計測できるようにした。

次節以降で報告する実験は電圧一定、電流一定の両方の条件で実施したが、結果として電流一定条件下では、プローブ先端の接触有無を安定して計測することができなかつたため、本報告書では電圧一定条件下のみの測定結果を示す。なおこれは、(特に摺動条件下において) プローブ先端の接触荷重増減に起因する接触抵抗値の変化があまりに急峻すぎるがゆえに、電流値制御回路の制御系が追従しきれず、制御が発振してしまったことが原因と考えられる。制御回路のフィードバックゲインやパラメータを適切な値に変更することにより、電流一定モードにおいても同様の評価が可能になるものと推測される。これは次年度以降の課題である。

(ii) -6.2 プローブ押付け変位と接触電流値

前節で述べた手法を用いて、いくつかの試作デバイスの評価を実施した。試作した2枚のロットのうち、ロットAから1デバイス(サンプル番号#A112)、ロットBの同一ウェハ内からウェハのエッジ周辺(同#B007)及び中央付近(同B046)の2デバイスをピックアップし、3サンプルを評価することでデバイスのロット間ばらつき及びウェハ面内ばらつきを比較した。更に4インチラインで試作したデバイス(8インチラインサンプルと同じ

プロセス③にて試作し、先端形状も同様に鋭角のもの)を比較対象として評価に投入した。

具体的な手順としては、まず2式の光てこを用いて、マルチプローブアレイの両端プローブ(#1、#20)と接触対象媒体を平行に揃え、この両プローブで定まる平面を $Z=0$ の面とする。この上で、撓み量 Z を $-2\mu\text{m}\sim 4\mu\text{m}$ まで変化させながら、フォースカーブ測定を4点連続で行う。この際の個々のプローブ先端電流値をリアルタイム計測し、電流波形の立ち上がり位置に着目する。個々のプローブの波形が、#1や#20と比較して早く立ち上がっていればその分プローブ先端の高さは低く、逆に遅く立ち上がっていればプローブ先端の高さが高いことをそれぞれ意味することになる(図V.2.2.2().6.2-1)。

なお、接触対象媒体は超音波洗浄したRuスパッタ膜(表面粗さ $R_a=0.35\text{nm}$)を用いた。貴金属であるRuは膜表面に酸化膜が形成されにくく、また例え形成されたとしても酸化膜の抵抗率はそれほど高くないため、こうした接触抵抗値を評価する実験には適している。また、媒体表面粗さはプローブ高さばらつきオーダの数10～数100nmと比較して十分小さいため、本測定において媒体表面側の高さばらつきの影響は無視してよいと考える。電流経路内の保護抵抗値は 1M であり、印加電圧は 80mV と設定した。これにより計測される最大電流値は 80nA となる。計測環境は大気中とした。

4個のデバイスにおける評価結果を図V.2.2.2().6.2-1～図V.2.2.2().6.2-4にそれぞれ示す。評価に用いた全てのサンプルにおいて、プローブ番号#12～#15の4本については全く電流値が計測されなかった。この4本については測定系、もしくはデバイスマスク設計の不具合の可能性が懸念されるため、以降の考察の対象からは除外している。

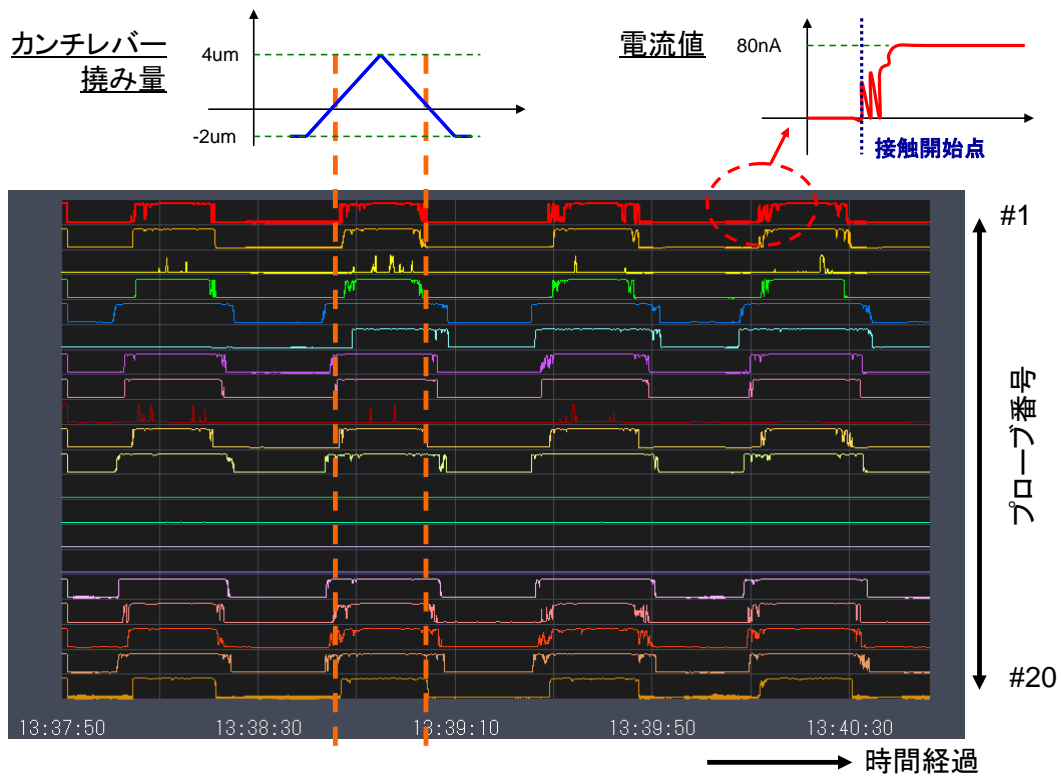


図 V.2.2.2().6.2-1 マルチプローブの押付け変位と接触電流値 (#A112)

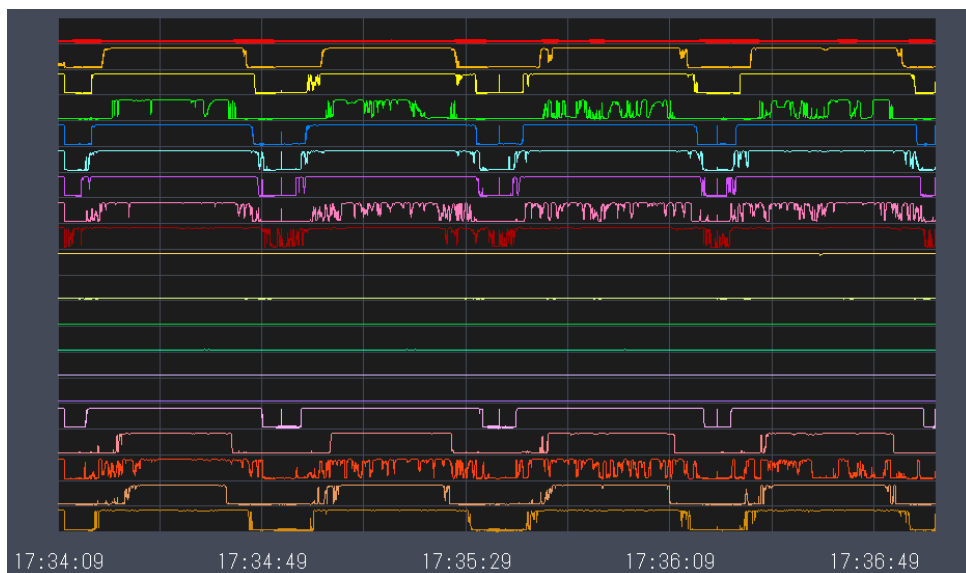
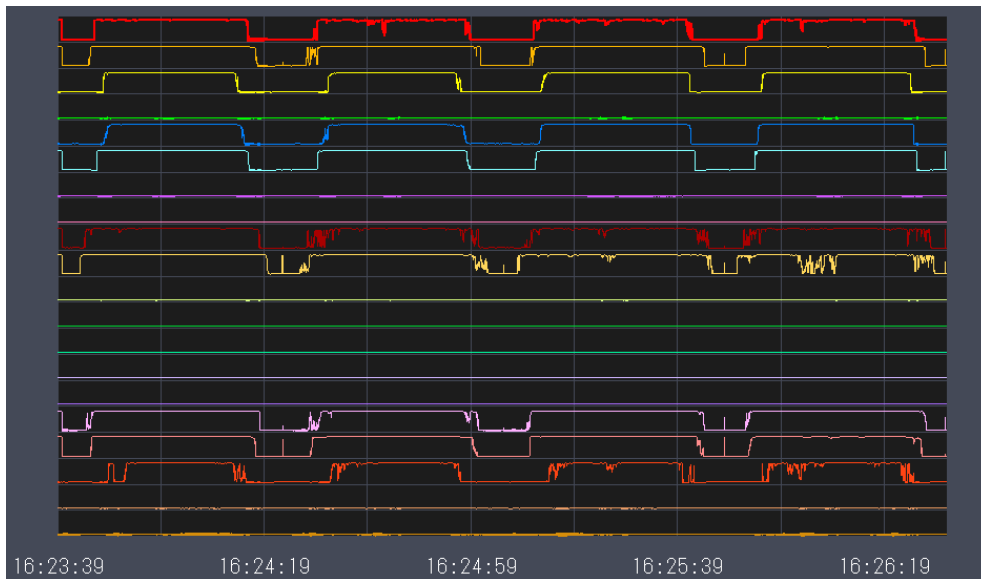
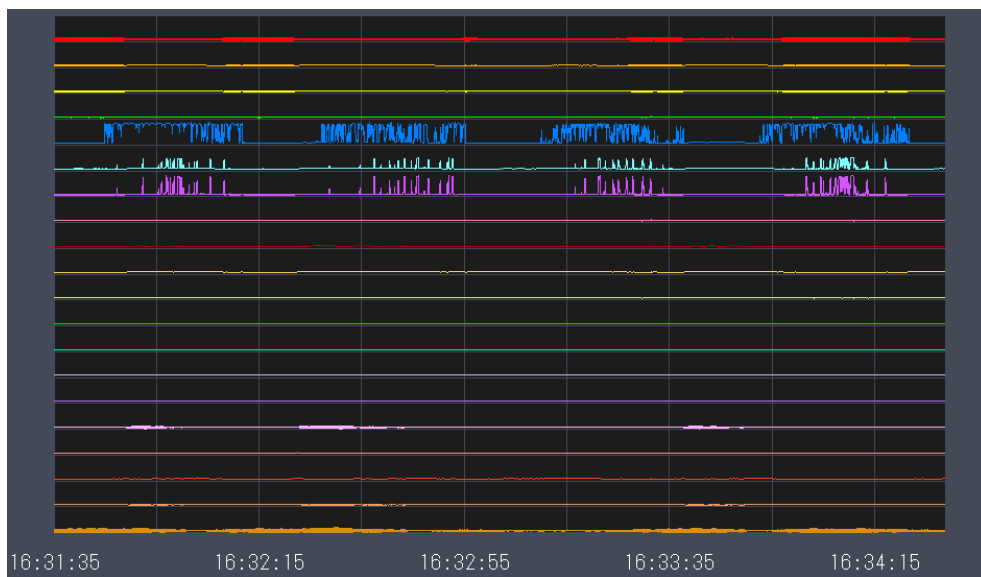


図 V.2.2.2().6.2-2 マルチプローブの押付け変位と接触電流値 (#B007)



図V.2.2.2().6.2-3 マルチプローブの押付け変位と接触電流値 (#B046)



図V.2.2.2().6.2-4 マルチプローブの押付け変位と接触電流値 (4インチラインサンプル)

8インチラインサンプル3点に着目すると、いずれも両端のプローブ (#1、#20) と比較して中央付近のプローブのほうが早く媒体に接触していることから、図V.2.2.2().4.3-2の傾向とは逆に、中央付近のプローブ高さが低くなる傾向にあることを示唆している。一方、その高さばらつきの程度については3つのサンプル間で顕著な差は見られず、ロット間、ウェハ内の特性ばらつきはいずれも小さいことが分かる。また、サンプル#A112の測定結果(図V.2.2.2().6.2-1)とプローブ先端SEM観察結果(図V.2.2.2().5.2-2)を比較すると、欠けの位置が先端に近いものが必ずしも早く媒体に接触している訳ではないこ

とが分かる。このことから、プローブ先端高さばらつきの主要因は先端欠けではなく、電極膜の残留応力等に起因するプローブ反りであることが示唆される。

これに対し、同様の測定を4インチラインで行った結果を見ると、殆ど電流値が得られていないことが分かる（それでも一部のプローブには電流が流れているので測定系の不良ではない）。特に両端のプローブである#1、#20は間違いなく媒体に接触していることが光てこにより確認されているが、その両プローブについても電流は流れていない。このことから、電極材料であるWの表面に形成された高抵抗率の酸化膜が、接触箇所の良好な導電性を大きく阻害していることが分かる。4インチライン試作サンプルを用いて実施した描画実験において良好な描画が実現できなかったひとつの理由はこれであると考えられる。

なお、8インチライン試作サンプルについても、ロットBの一部のプローブでは同様に電流が計測されていない。これは、もちろんプローブの先端高さが+4 μm 以上大きく反り上がっているという解釈も成り立つが、プローブ先端に繋がる電極配線パターンなどに不良が生じている可能性も高い。ロットAでは（#12～15除く）全てのプローブで何らかの電流が計測されていることから、ロット間の電極膜形成プロセスの差異が計測されているものと考えられる。本評価手法は、こうした個々のプローブの不良を一括スクリーニングするのにも適していると言える。

(ii) -6.3 プローブ先端摺動時の接触抵抗分布

マルチプローブ装置が、8インチラインの検査装置として使用できるだけでなく、AFMシングルプローブ評価系と同等の検出感度でトライボロジ現象を計測するツールとして利用できるかを確認するため、プローブ先端の摺動接触時における接触抵抗値の同時計測を実施した。デバイスはサンプル#A112を用いた。摺動媒体は前節と同様に超音波洗浄したRuスパッタ膜を用いた。やはり前節同様、保護抵抗は1M Ω 、印加電圧は80mV（電圧一定モード）、計測環境は大気中とした。摺動速度は1 $\mu\text{m}/\text{s}$ 、総摺動距離は20 μm とし、摺動が行われる20秒間の個々のプローブ先端電流値を10 μsec 間隔で計測して得られた20sec/10 μsec = 2000点の計測結果から接触抵抗値の度数分布を求めた。更に、2式の光てこ機構を用いて両端のプローブの撓み量を0.5 μm 、1.0 μm 、1.5 μm 、2.0 μm の4水準に調整することで、接触荷重の依存性を評価した。

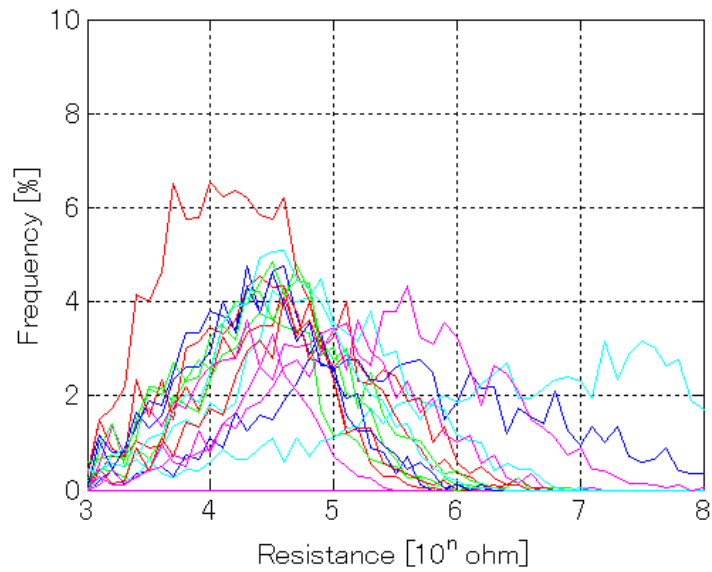


図 V.2.2.2().6.3-1 接触抵抗ばらつきの度数分布

同時計測された 20 本のプローブ先端接触抵抗値のばらつきを度数分布で表したものの例として、撓み量 2.0 μm における計測結果を図 V.2.2.2().6.3-1 に示す。昨年度までの 3D-BEANS センターでの研究により、摺動接触時のプローブ先端の接触抵抗値はワイブル分布を示すことが明らかになっているが、上記グラフに重ね書きされた 16 本のグラフ（プローブ #12~15 は除外）のいずれもほぼワイブル分布の形をしており、個々のプローブの挙動の傾向はシングルプローブの場合とほぼ変わらないことが分かる。また、接触抵抗値は $10^3 \sim 8$ のオーダで計測できており、従来 3D-BEANS センターで使用していた AFM の検出レンジと比較して遜色はない。

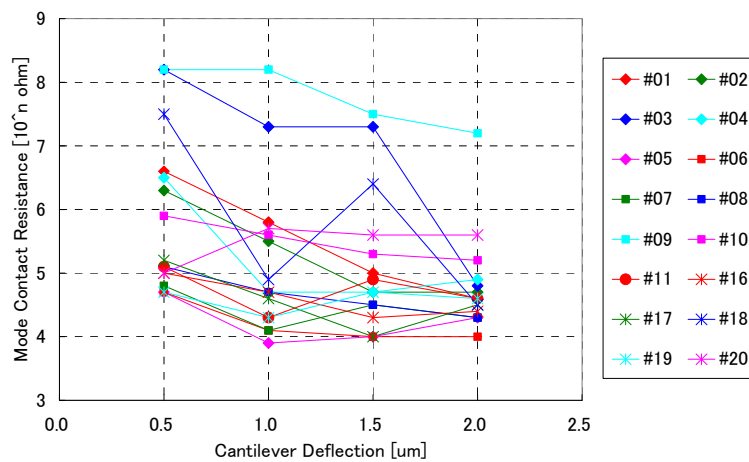


図 V.2.2.2().6.3-2 接触抵抗値の荷重依存性

更に、図V.2.2.2().6.3-1 のようにして得られた度数分布におけるピーク値（最頻値）に着目し、横軸をプローブ撓み量、縦軸を接触抵抗ピーク値としてまとめてプロットしたものを図V.2.2.2().6.3-2 に示す。全体として、撓み量（接触荷重に比例）の増加に伴って接触抵抗値が減少していくという、シングルプローブと同様の傾向が得られている。

(ii) -7 結論

今年度の実施計画に沿って、先端部の有効径・幅がサブミクロンであるマルチプローブデバイスのプロセスフローを立案し、4インチラインでの試作によりこれを実証した。同プロセスフローにより、最先端8インチラインを活用したマルチプローブアレイの試作を実施し、マルチプローブ評価装置を導入してこの評価を行った。

マルチプローブ評価装置を用いたマルチプローブデバイスの評価手法として、局所陽極酸化(LAO)法による描画、光てこを用いた直接高さ測定、プローブ先端接触電流値のリアルタイム計測の3つの手法を提案し、プローブ先端のSEM画像との相関を取ることで、これらの方法がデバイスの形状、特性ばらつきを検証するのに有効かどうかを検討した。結果として、電流値のリアルタイム計測法が最も直接的かつ容易にデバイスの特性ばらつき計測や不良スクリーニングをできることが分かった。

上記の電流値リアルタイム計測法を用いて、最先端8インチラインで試作したマルチプローブデバイスのロット間、及びウェハ内ばらつきを評価した。結果として、ロット間、ウェハ内での顕著な形状ばらつきは見られなかったものの、ロット間の電極配線形成プロセスの品質に差があることが示唆された。このことから、本デバイスを用いた手法が、最先端8インチラインの検査デバイスとして適用し得る可能性を示した。更に、電極材料の異なる4インチラインで試作したサンプルとの間で特性差が検出されたことから、電極材料の違いによる電氣的ナノトライボロジ現象の差異の検証についても本手法が有効であることを示した。

マルチプローブ評価装置の検出感度を検証するため、マルチプローブ先端摺動接触時の接触抵抗値評価を実施し、従来3D-BEANSセンターで活用していたAFMを用いたシングルプローブ評価系と同等の検出レンジでのナノトライボロジ現象評価が実現できることを確認した。

2.2.3 欠陥・ばらつき評価におけるモデリング・計測技術開発

(1) 研究の目的

半導体の製造時には素子により製造ばらつきが生じる。MEMS デバイスにおいては、機械要素が含まれるため、この機械要素の大きさや形状のばらつきにより電気的特性や機械的な特性にばらつきを生じる。

半導体 LSI では、ウエハレベルの測定を行い、ばらつきを評価し設計にフィードバックをかけデバイス特性のばらつきを最小化している。MEMS デバイスにおいても製造ばらつきは歩留まりへ悪影響を与える要因であり、今後大口径化、デバイスの複雑化が進むとその影響はより大きくなる。SEM を用いて複数の素子構造を観察・比較することで、特性ばらつきの原因を解析することも可能であるが、SEM による観察は手間や時間がかかる。

そこで、本開発では電氣的・機械的特性よりばらつきの要因を容易に特定し、歩留まりの早期立ち上げを行い、設計工程の生産性・経済性を向上(スマート化)を目指した等価回路モデルパラメータによるばらつき評価手法の開発を行った。本開発では、

- 1.等価回路モデルを利用したばらつき要因を特定する手法開発
- 2.センサ TEG を用いた手法評価

の2つを実施した。以下で実施した内容について述べる。

(2) MEMS 等価回路モデルの概要とばらつき評価への応用

欠陥・ばらつき評価におけるモデリング・計測技術開発を行った。技術開発は MEMS 等価回路モデルを利用して行っている。以下に MEMS 等価回路モデルの概要とばらつき評価への応用について述べる。

(2) - 1 等価回路手法の一般

一般に運動方程式を電気等価回路で表し、回路シミュレーションを用いて解析をおこなう手法が行われてきた。この手法は、運動方程式以外にも、圧電や音響といった特性解析でも用いられる。等価回路手法の基礎となっているのは、系のアナロジーである。

簡単な例で説明する。図 V.2.2.3-1 に機械的な系、図 V.2.2.3-2 に電氣的な系を示す。

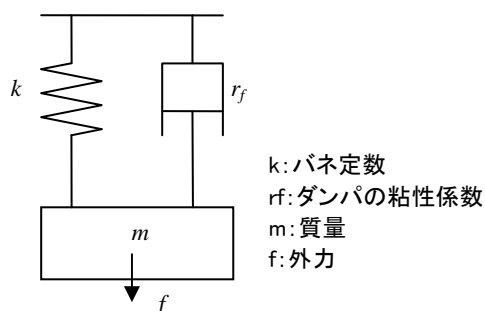


図 V.2.2.3-1 機械的な系

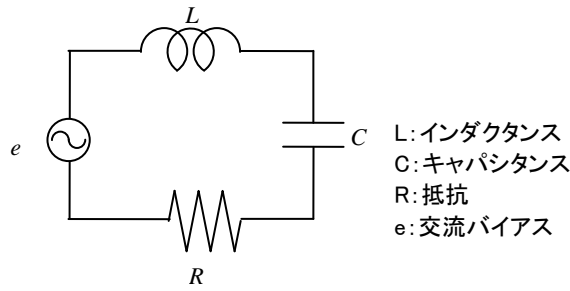


図 V.2.2.3-2 電氣的な系

これらの系を表す基本方程式は、それぞれ、(数式 1-1)、(数式 1-2)のようになる。

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + r_f \frac{dx}{dt} + kx = f \quad (\text{数式 1-1})$$

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = e \quad (\text{数式 1-2})$$

x : 変位

q : 電荷

t : 時間

系の関係を表す基本方程式の形式が同じであり、係数間の対応や状態変数間の対応が得られる。対応のとり方は複数あるが、本MEMS等価回路モデルで採用している対応を表 V.2.2.3-1に示す。

表 V.2.2.3-1 機械系変数と電気系変数の対応

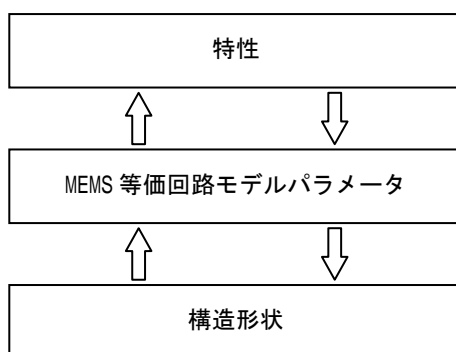
機械系変数	電気系変数
変移 x	電荷 q
速度	電流
質量 M	インダクタンス L
コンプライアンス k	キャパシタンス C
機械抵抗 r _f	電気抵抗 R

これらの対応により、運動方程式が与えられたときに、この方程式の解を回路シミュレーションで解くことができる。

(2) - 2 MEMS 等価回路モデル

MEMS 等価回路モデルは、前述の等価回路手法を基にしている。MEMS デバイスの微小振動の機械的特性を系のアナロジーにより等価回路で表すと共に、電気系と機械系のエネルギーの変換を含めた等価回路表現である。

機械的特性をアナロジーで等価回路表現した機械回路は、集中質点系モデルに近似したものに相当する。このため、不純物ドーピングをおこなわない場合など均一な材料とみなせる場合には、MEMS等価回路モデルのパラメータは形状にのみ依存するものとなる。よって、MEMS等価回路モデルパラメータは、形状との関連が明確であり、MEMSデバイスの特性値と形状とを見通しよく説明できる(図V.2.2.3-3)。



図V.2.2.3-3 等価回路モデルパラメータの位置付け

MEMS等価回路モデルは、回路シミュレータを用いて特性のシミュレーションをおこなう手法である。MEMS等価回路モデルと呼ぶものは、回路シミュレータへ入力データであるネットリストの形で表される。MEMS等価回路モデルは、回路素子の組み合わせ方とインダクタンスやキャパシタンスといった各回路素子の値からなる。各回路素子の種類と値の集合をMEMS等価回路モデルパラメータと呼ぶ。MEMS等価回路モデルパラメータの算出方法は、MEMSの形状から算出する方法と、MEMSの特性値から算出する方法がある。それぞれの関係を図V.2.2.3-4に示す。

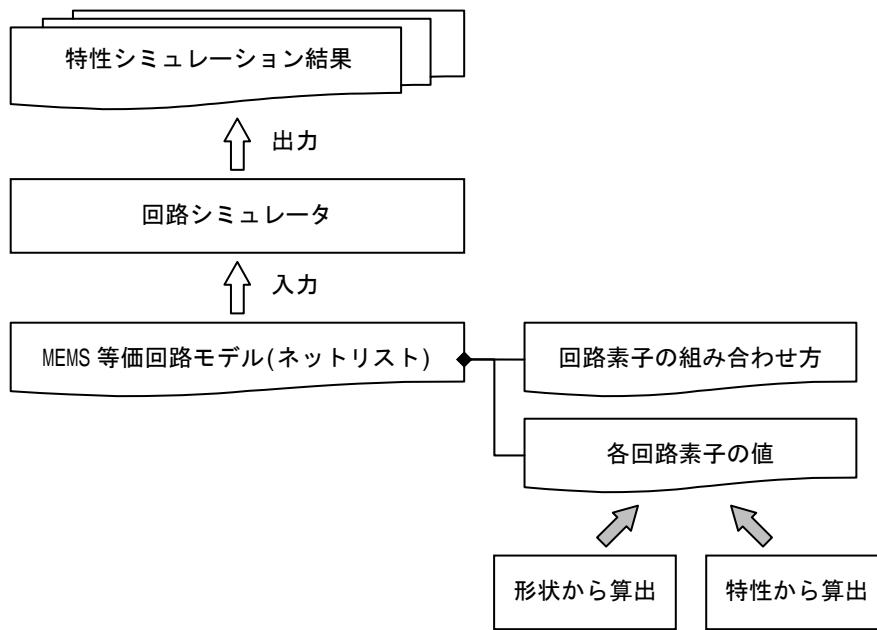


図 V.2.2.3-4 MEMS 等価回路モデルの構成

(2) - 3 等価回路モデルパラメータによるばらつき評価への応用

図 V.2.2.3-3 に示したように、形状から MEMS 等価回路モデルパラメータを算出し、特性値をシミュレーションすることが可能である。また、逆に、測定で得られた特性値を再現するような MEMS 等価回路モデルパラメータを決定することができる。いわゆるパラメータ抽出である。MEMS 等価回路モデルパラメータを基本とし、パラメータ抽出をおこなうことによって以下のような応用が可能である。

回路設計への応用

周辺回路を含めた回路設計から見て、MEMS デバイスの動作特性を等価回路モデルで表現することにより、MEMS デバイスを通常の回路素子と同様に回路シミュレーションが可能となる。

作製した MEMS デバイスの特性から等価回路モデルパラメータを抽出することにより、プロセスの実力を考慮した等価回路モデルパラメータを回路シミュレーションで利用可能となる。よって、回路設計の精度が向上する。

加えて、形状ばらつきに起因する特性ばらつきを回路設計で考慮するためのマージン設定に応用することができる。特性ばらつきを等価回路モデルパラメータの分布としてモデル化し、統計的な回路設計手法に用いることができる。

ウエハプロセスへの応用

ウエハ上に作成した MEMS デバイスの評価指標として、従来は、測定した特性値や観察による測長値などが用いられてきた。MEMS 等価回路モデルパラメータのパラメータ抽出を評価指標に加えると、従来の評価指標である特性値と測長値の関連性を把握することができる。また、MEMS 等価回路モデルパラメータは、比較的直接的形状と結びついているので、抽出した MEMS 等価回路モデルパラメータでばらつき評価をおこなうことで、測長値の評価を代替できる可能性がある。

(3) ばらつき評価手法

(3) - 1 評価手法

製造時に素子により製造ばらつきが生じる。MEMS デバイスにおいては、機械要素が含まれるため、この要素の大きさや形状のばらつきにより電気的特性や機械的な特性にばらつきを生じる。この場合、SEM を用いて複数の素子構造を観察・比較することで、特性ばらつきの原因を解析することも可能であるが、SEM による観察は手間や時間がかかる。また、素子の内部構造を観察するためには、断面 SEM 等を用いる破壊検査が必要である。

今回開発した手法は、等価回路パラメータと構造寸法の相関関係を利用し、電気的・機械的特性から効率よくばらつきを評価する手法である。

図 V.2.2.3-5 に評価の流れを示した。電気的・機械的特性から等価回路パラメータを抽出し、等価回路パラメータでばらつきを評価する。等価回路パラメータと構造寸法の相関関係を利用して等価回路パラメータばらつき評価から、構造寸法のばらつき評価を行う。

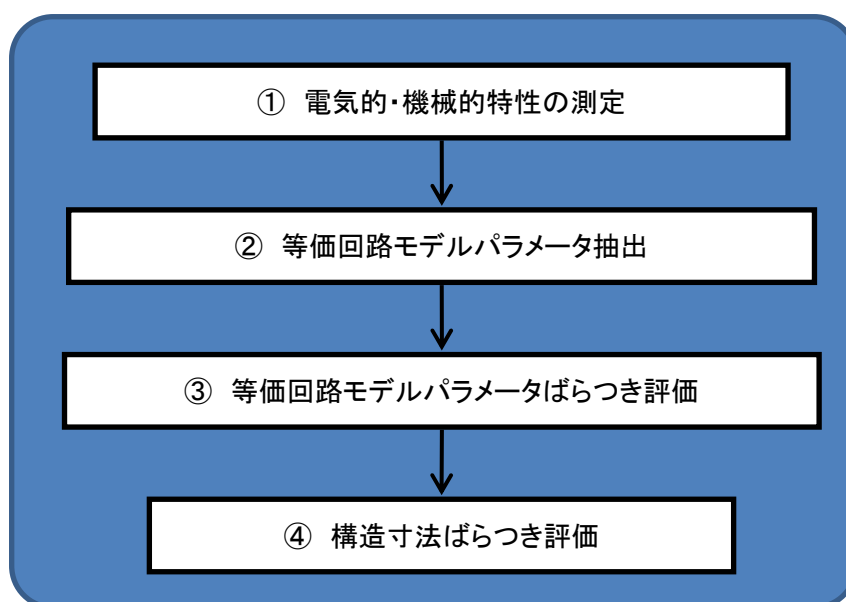


図 V.2.2.3-5 評価の流れ

以下、本評価手法で用いる要素技術について説明する。

(3) - 2 電氣的・機械的特性の計測技術

半導体 LSI では、ウエハレベルの測定を行い、ばらつきを評価し設計にフィードバックをかけデバイス特性のばらつきを最小化している。MEMS デバイスにおいても製造ばらつきは歩留まりへ悪影響を与える要因であり、今後大口径化、デバイスの複雑化が進むとその影響はより大きくなる。

しかし、MEMS デバイスの評価を行うためには半導体 LSI の評価にはない機能が求められる。MEMS デバイスは LSI と異なり機械的な構造をもつため機械特性を測定する必要がある。また、機械的な構造は構造スケールが小さなため空気による影響が大きく、真空パッケージがなされ場合がある。そのため、真空での特性を評価する必要がある。

まとめると、MEMS デバイスの評価を行う測定装置には以下の条件が求められる。

- 電気特性（電流値一周波数）と機械特性（振動速度一周波数）を同時に測定することができる。
- ウエハレベルで測定することができる。
- 真空状態での測定することができる。

現在、この条件を同時に満たす市販の装置がない。今回、これらの条件を満たす「MEMS デバイス特性評価装置」を新たに開発した。

本装置は電気特性（電流値一周波数）と機械特性（振動速度一周波数）を同時に測定ことができ、可動部をもつセンサの動きを直接測定できる。また、ウエハレベルで計測が可能であるため、ウエハ面内のばらつきを容易に測定することができる。測定を真空チャンバ内で行うため、大気状態の他に真空状態での計測が可能である。

装置の外観を図 V.2.2.3-6 に示す。

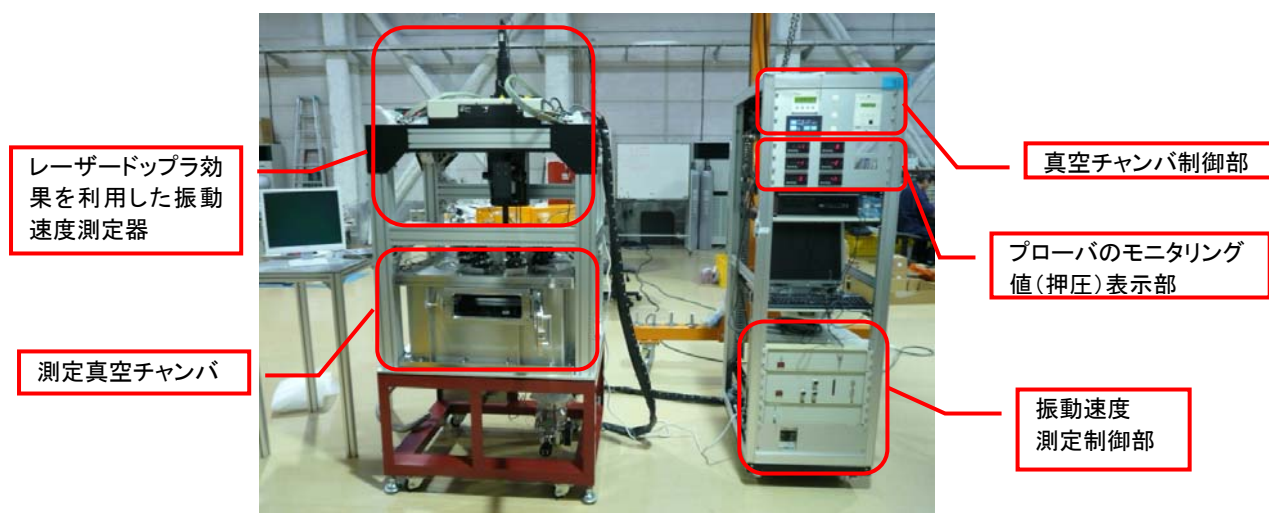
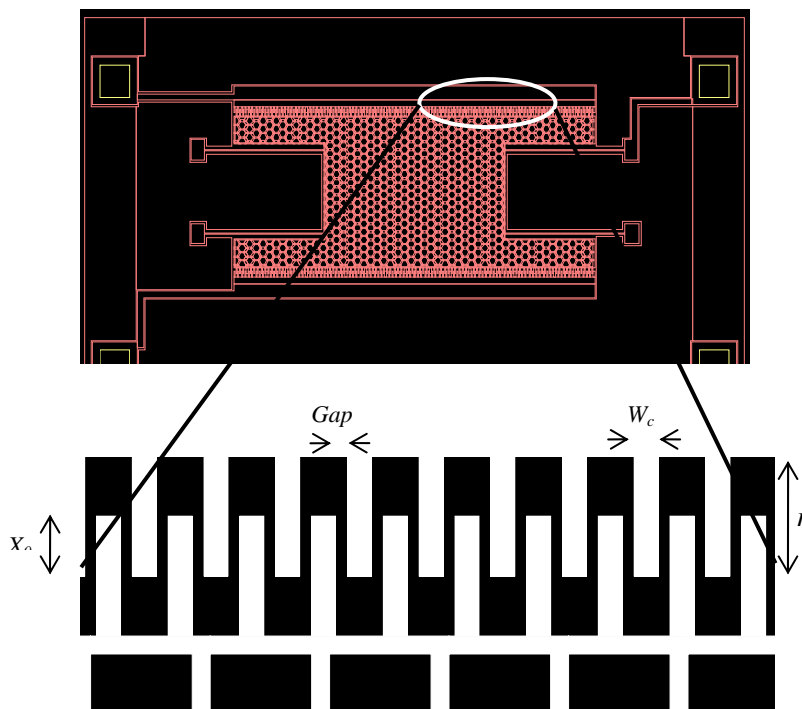


図 V.2.2.3-6 MEMS デバイス特性評価装置

(3) - 3パラメータ抽出

図V.2.2.3-5に示した評価の流れの中の②の等価回路モデルパラメータ抽出手法を以下に述べる。図V.2.2.3-7に示す3端子の静電型櫛歯加速度センサのMEMS等価回路モデルパラメータを出力特性から解析的に求める方法を検討した。



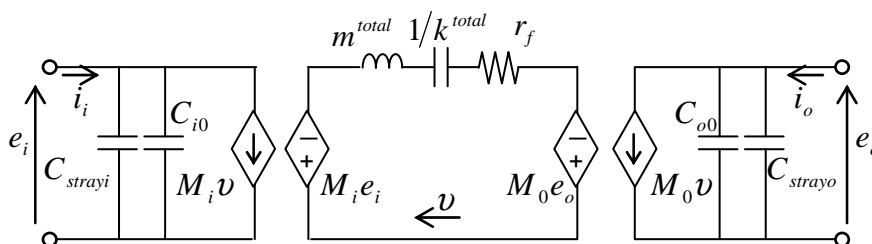
図V.2.2.3-7 静電型櫛歯加速度センサ

可動電極の両端に固定電極を有し、3つの電極端子を持つ静電型のMEMS等価回路は同様の抽出手順で、MEMS等価回路モデルパラメータを抽出できる。

抽出方法

アドミタンス行列

図V.2.2.3-8に外力が働いていない状態での静電型加速度センサの等価回路図を示す。簡単のため、固定電極間に並列に入る浮遊容量は無視している。



図V.2.2.3-8 静電型櫛歯加速度センサの等価回路図(外力印加がない場合)

表V.2.2.3-2 MEMS 等価回路モデルパラメータ

回路図中記号	説明	次元
e_i, e_o	交流電圧源	電圧、位相
i_i, i_o	交流電流	電流、位相
f	外力	電圧、位相
v	可動部速度	電流、位相
L_m	可動部等価質量	インダクタンス
C_k	等価コンプライアンス	キャパシタンス
R_f	機械抵抗	レジスタンス
C_{i1}, C_{o2}	固定電極と可動電極の電極間容量	キャパシタンス
C_{strayi}, C_{strayo}	固定電極と可動電極間に付随する浮遊容量	キャパシタンス
C_{stray}	固定電極間に付随する浮遊容量	キャパシタンス
M_i, e_i, M_o, e_o	電圧増幅率	無次元
M_i, i_i, M_o, i_o	電流増幅率	無次元

2 端子対回路であるので、端子対の電流と端子電圧の関係をアドミタンス行列で表すことができる。アドミタンス行列 \mathbf{Y} を

$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix} \quad (\text{数式 1-3})$$

とすると、

$$\begin{pmatrix} i_i \\ i_o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_i \\ e_o \end{pmatrix} \quad (\text{数式 1-4})$$

である。ここで、

$$Z_m = j\omega m^{total} + \frac{k^{total}}{j\omega} + r_f \quad (\text{数式 1-5})$$

：角周波数

j ：虚数単位

とする。可動部の速度 v は、

$$v = \frac{M_i e_i - M_o e_o}{Z_m} \quad (\text{数式 1-6})$$

と表すことができ、端子対電流 i_i i_o は

$$i_i = \left(j\omega(C_{i0} + C_{stray_i}) + \frac{M_i^2}{Z_m} \right) e_i - \frac{M_i M_o}{Z_m} e_o \quad (\text{数式 1-7})$$

$$i_o = -\frac{M_i M_o}{Z_m} e_i + \left(j\omega(C_{o0} + C_{stray_o}) + \frac{M_o^2}{Z_m} \right) e_o \quad (\text{数式 1-8})$$

と表せる。

可動電極の電流

他方の固定電極と可動電極が短絡されるのと等しい場合、 $e_o=0$ である。端子対電流 i_i は、

$$i_i = \left(j\omega(C_{i0} + C_{stray_i}) + \frac{M_i^2}{Z_m} \right) e_i \quad (\text{数式 1-9})$$

となる。これを等価回路図で表すと図 V.2.2.3-9 のようになる。

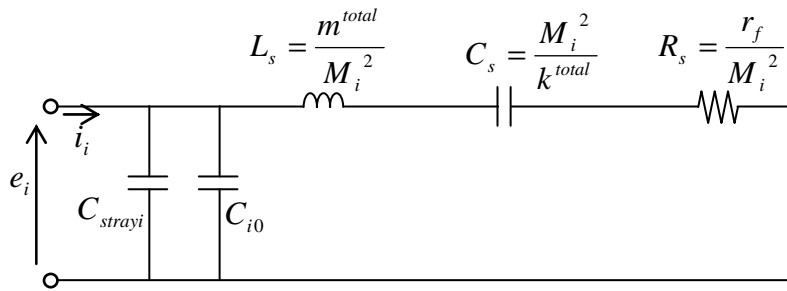


図 V.2.2.3-9 i_i から見た等価回路図

(数式 1-9)を横軸に角速度、縦軸に電流値の模式グラフで表すと、図 V.2.2.3-10になり、
傾きが電極間容量と浮流容量の和 $C_{i0} + C_{strayi}$ に相当する。

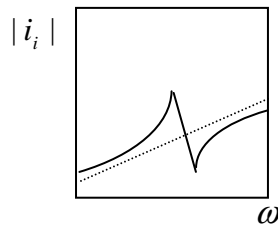


図 V.2.2.3-10 可動電極電流特性模式図

固定電極の電流

同様に端子対電流 i_o は、

$$i_o = \frac{M_i M_o}{Z_m} e_i = \frac{M_i M_o}{j\omega m^{total} + \frac{1}{j\omega k^{total}} + r_f} e_i \quad (\text{数式 1-10})$$

である。これを等価回路図で表すと図 V.2.2.3-11 のようになる。図 V.2.2.3-11 からわかるように、機械系回路である直列 LCR 回路を見ていることに相当する。

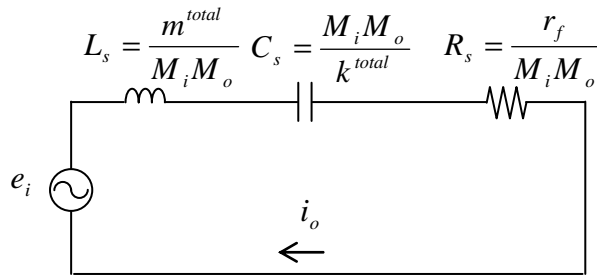


図 V.2.2.3-11 i_o から見た等価回路図

直列 LCR 回路インピーダンス Z は、次式で表せる。

$$Z = \frac{e_i}{i_o} = j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} + R_s = R_s + j\left(\omega L_s - \frac{1}{\omega C_s}\right) \quad (\text{数式 1-11})$$

(数式 1-11) を横軸に角速度、縦軸にインピーダンスの模式グラフで表すと図 V.2.2.3-12 のようになる。

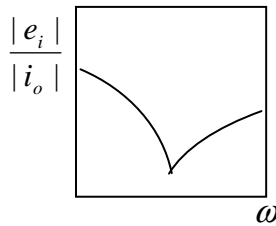


図 V.2.2.3-12 直列 LCR 回路インピーダンス模式図

インピーダンスの大きさは次式で表せ、

$$\left| \frac{e_i}{i_o} \right|^2 = R_s^2 + \left(\omega L_s - \frac{1}{\omega C_s} \right)^2 \quad (\text{数式 1-12})$$

インピーダンスの極小値が、直列抵抗である。

$$\underline{\underline{R_s = \min\left(\left| \frac{e_i}{i_o} \right| \right)}} \quad (\text{数式 1-13})$$

直列回路では、

$$Q = \frac{\omega_0 L_s}{R_s} \quad (\text{数式 1-14})$$

であるから

$$\underline{\underline{L_s = \frac{R_s Q}{\omega_0}}} \quad (\text{数式 1-15})$$

によってインダクタンスを算出することができる。

ここで、 Q は Q 値である。

$$Q = \frac{\omega_0}{\omega_1 - \omega_2} \quad (\text{数式 1-16})$$

ω_0 は、変位が最大となる角速度である。 ω_1 の ω_2 は、変位が最大値の $1/\sqrt{2}$ になる角速度である。

共振周波数と直列インダクタンスから直列キャパシタンスを求めることができ、

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}} \quad (\text{数式 1-17})$$

であるから、次式で求めることができる。

$$\underline{\underline{C_s = \frac{1}{\omega_0^2 L_s}}} \quad (\text{数式 1-18})$$

可動部速度

エネルギー関数から運動方程式を導出する過程で

$$v = \frac{M_i}{j\omega m^{total} + \frac{1}{j\omega k^{total}} + r_f} e_i \quad (\text{数式 1-19})$$

が得られる。これを等価回路図で表すと、図 V.2.2.3-13 のようになる。

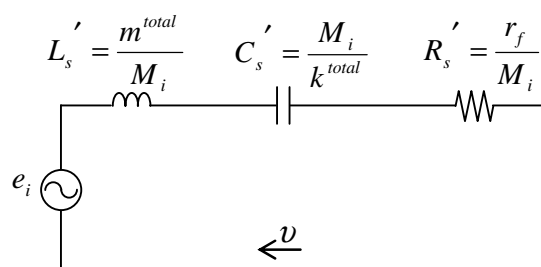


図 V.2.2.3-13 v から見た等価回路図

直列 LCR 回路であるので、速度と周波数の特性が得られれば、同様に回路素子パラメータを決定することができる。

また、(数式 1-11) と (数式 1-19) から 電気機械結合定数 M_i を算出することができる。

$$\underline{\underline{M_i}} = \frac{i_o}{v} \quad (\text{数式 1-20})$$

抽出方法の検証

前述の手順に従って、MEMS 等価回路パラメータの抽出方法の検証をおこなった。

MEMS等価回路モデルパラメータ抽出に使用した測定データを図 V.2.2.3-14および図 V.2.2.3-15に示す。図 V.2.2.3-14が可動電極の電流-周波数特性であり、図 V.2.2.3-15が固定電極の電流-周波数特性である。

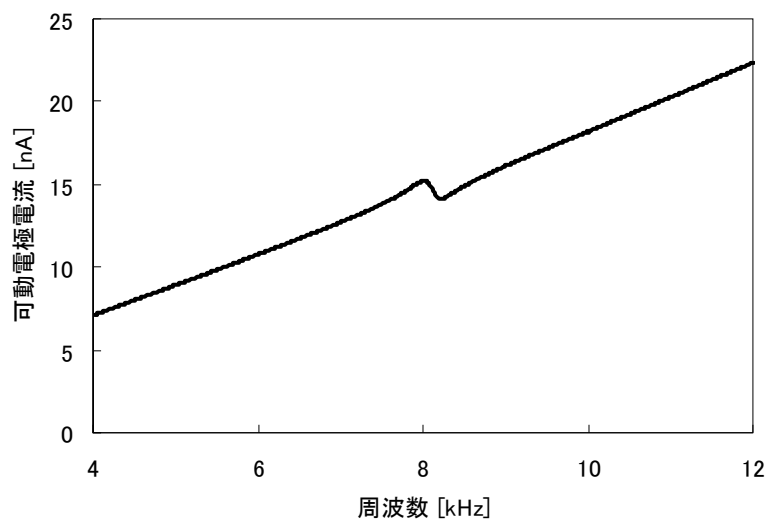


図 V.2.2.3-14 可動電極電流-周波数特性測定データ

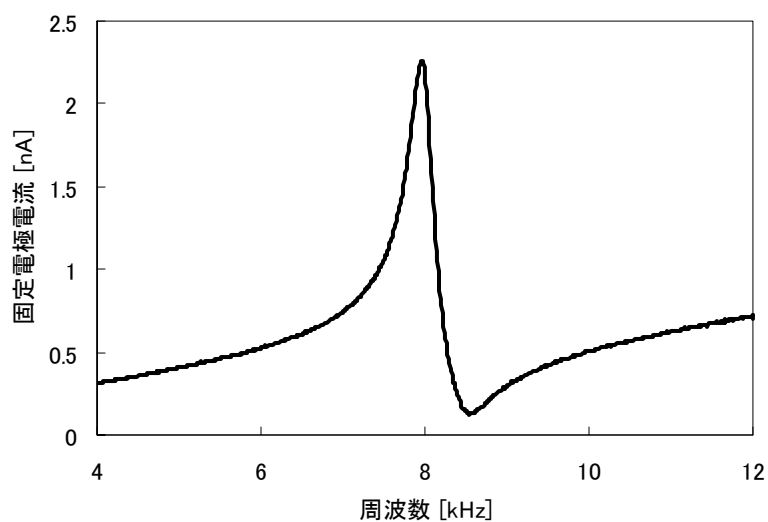
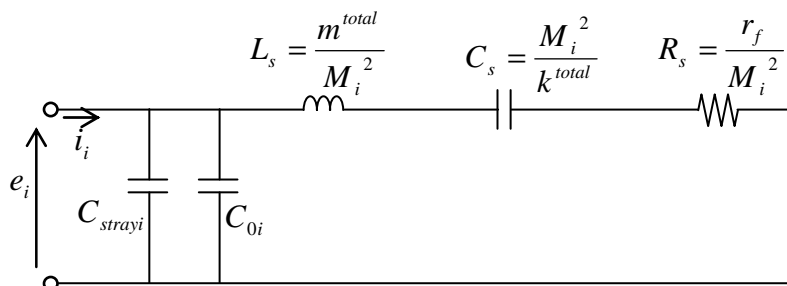
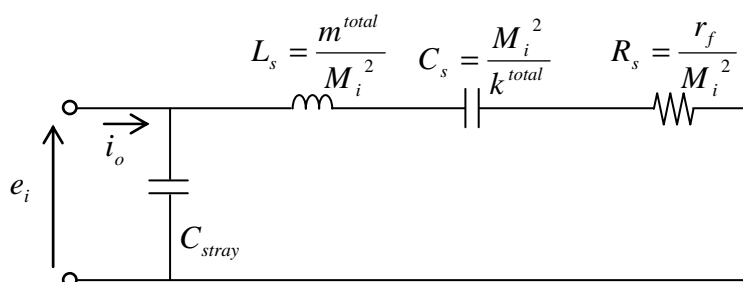


図 V.2.2.3-15 固定電極電流-周波数特性測定データ

MEMS等価回路モデルパラメータ抽出の対象とした構造は、可動電極と固定電極の電極間の静電容量を構成する構造が対称である。このため、電気機械結合定数（図V.2.2.3-9および図V.2.2.3-11の M_i 、 M_o ）は等しい。図V.2.2.3-9、図V.2.2.3-11は、それぞれ図V.2.2.3-16、図V.2.2.3-17のように書き換えられる。また、図V.2.2.3-17には、固定電極間に並列に入る浮遊容量 C_{stray} を描き入れている。



図V.2.2.3-16 i_i から見た等価回路図(対称なデバイスの場合)



図V.2.2.3-17 i_o から見た等価回路図(対称なデバイスの場合)

測定した出力特性から算出したMEMS等価回路モデルパラメータの値を表V.2.2.3-3に示す。

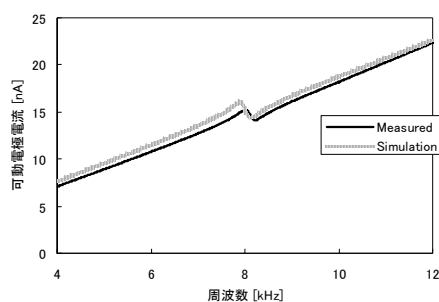
表V.2.2.3-3 MEMS 等価回路モデルパラメータ抽出結果

回路記号	値
$C_{i0} + C_{strayi}$	2.897×10^{-13} [F]
C_{stray}	1.134×10^{-14} [F]
R_s	4.616×10^8 [・]
L_s	2.565×10^5 [H]
C_s	1.543×10^{-15} [F]

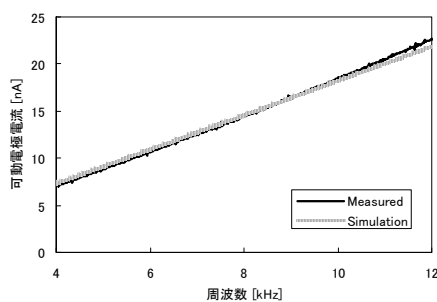
算出したMEMS等価回路モデルパラメータの値(表V.2.2.3-3)でシミュレーションを行い、抽出した値が特性値を再現するものであることを確認する。

比較結果を図V.2.2.3-18、図V.2.2.3-19および図V.2.2.3-20に示す。図V.2.2.3-18は、2端子モードの「電流計A」の値を比較したものである。シミュレーションの方が、わずかに電流が大きめである。また、共振周波数の値が若干低めである。全体的に実測の形状を再現できている。図V.2.2.3-19は、3端子モードの値を比較したものである。共振特性を示さない傾向を再現できている。図V.2.2.3-20は、3端子モードの値を比較したものである。シミュレーション値は、実測特性とよく一致している。

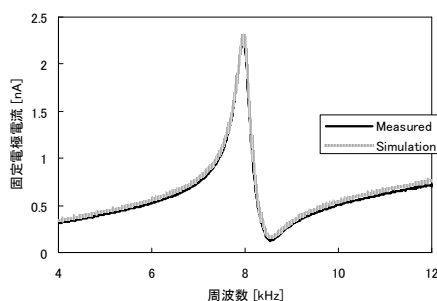
以上から、実測特性から算出したMEMS等価回路モデルパラメータの値は、実測値をよく再現することが確認できた。



図V.2.2.3-18 2端子モード測定電流比較



図V.2.2.3-19 3端子モード測定電流比較



図V.2.2.3-20 3端子モード測定電流(電流計C)比較

(3) - 4 構造寸法と電氣的・機械的特性のばらつきの関係

はじめに、静電型楯歯加速度センサの構造寸法を測長 SEM を利用して測定し、その測定結果を入力としてシミュレータで各電氣的・機械的特性（等価回路モデルパラメータ）に対する感度解析を行うことで構造寸法と電氣的・機械的特性のばらつきの関係を検討した。

測長値をヒストグラムで表したものを図 V.2.2.3-21 から図 V.2.2.3-25 に示す。それぞれ、板バネの幅、折り返しバネの幅、楯歯の幅、四角形格子の幅、六角形格子の幅の測長結果である。測長結果はおおよそ正規分布に従うことがわかる。

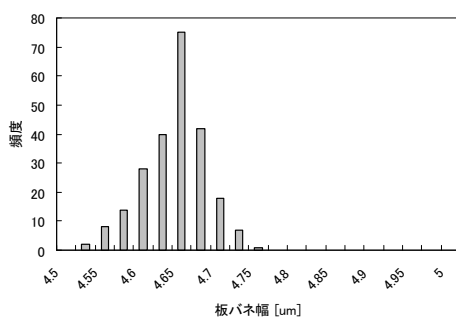


図 V.2.2.3-21 板バネ幅測長値ヒストグラム

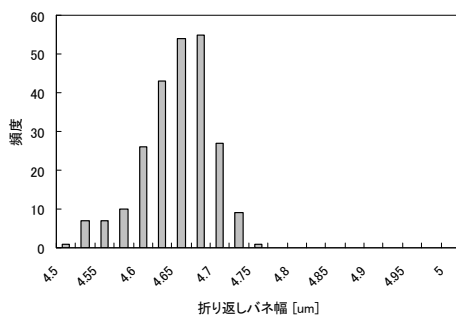


図 V.2.2.3-22 折り返しバネ幅測長値ヒストグラム

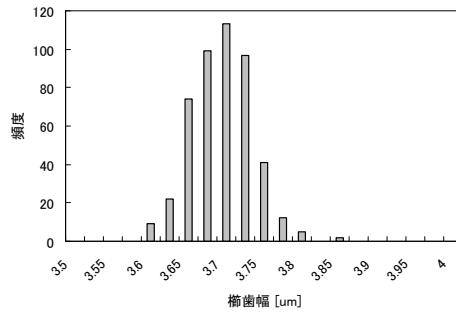


図 V.2.2.3-23 櫛歯幅測長値ヒストグラム

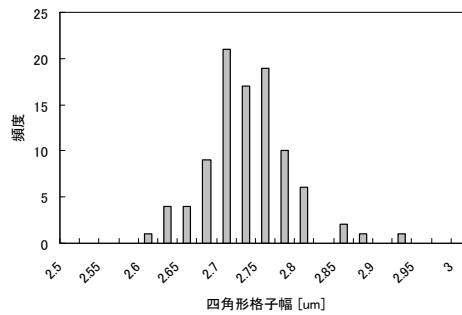


図 V.2.2.3-24 四角形格子幅測長値ヒストグラム

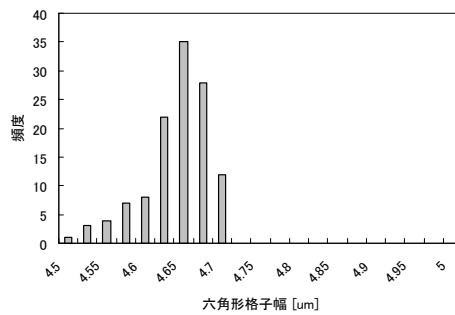


図 V.2.2.3-25 六角形格子幅測長値ヒストグラム

測長値の平均値と標準偏差を表 V.2.2.3-4 に示す。測長箇所によらず、平均値とマスク寸法の差はおおよそ $0.37\mu\text{m}$ 小さい値であり、標準偏差は $0.04\mu\text{m}$ である。測長箇所によらず、標準偏差がおおよそ同程度の正規分布に従うことがわかる。

表 V.2.2.3-4 測長値平均、標準偏差

測長箇所	マスク寸法	サンプル数	平均値	平均値とマスク寸法の差	標準偏差
板バネ幅	5 μm	240	4.629 μm	0.371 μm	0.040 μm
折り返しバネ幅	5 μm	240	4.632 μm	0.368 μm	0.046 μm
櫛歯幅	4 μm	474	3.683 μm	0.317 μm	0.040 μm
六角形格子幅	5 μm	120	4.628 μm	0.372 μm	0.041 μm

次に、測長値間の相関を確認した。同一デバイスの梁幅と櫛歯の幅をグラフにしたものが、図 V.2.2.3-26 である。同様に櫛歯幅と四角形格子幅のグラフが図 V.2.2.3-27、櫛歯幅と六角形格子幅のグラフが図 V.2.2.3-28 である。測長値間には、正の相関が見られる。よって、測長箇所ごとの測長値のばらつきは独立ではなく、相関がある。つまり、櫛歯幅が平均より大きく形成されたデバイスは、櫛歯幅、格子幅ともに同程度に平均より大きいということである。これを確かめるために、軸を平均値との差に取り直したグラフを図の右側に併せて示す。

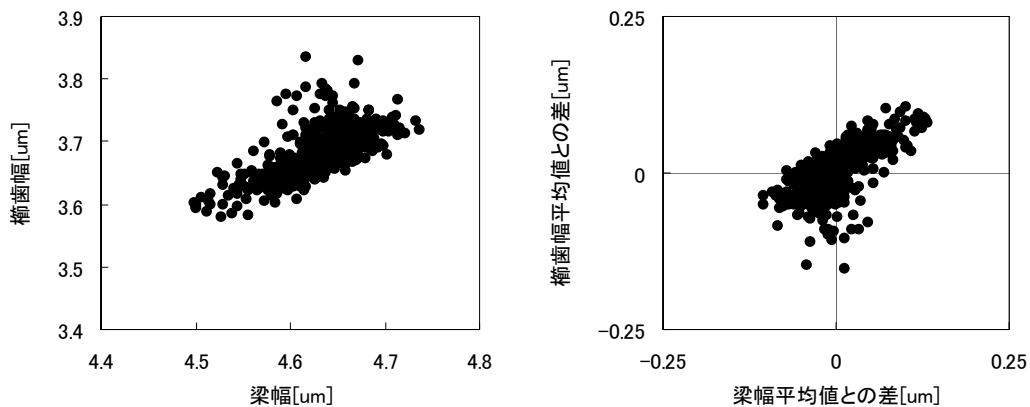


図 V.2.2.3-26 梁幅と櫛歯幅測長値の相関

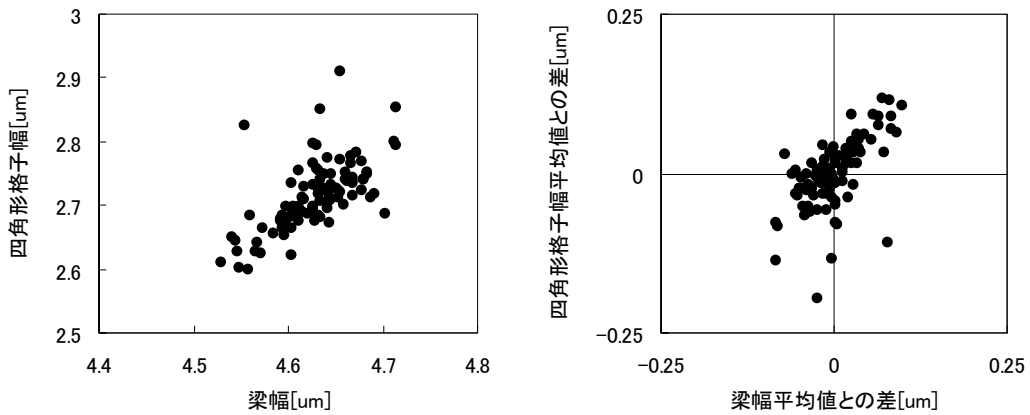


図 V.2.2.3-27 梁幅と四角形格子幅の相関

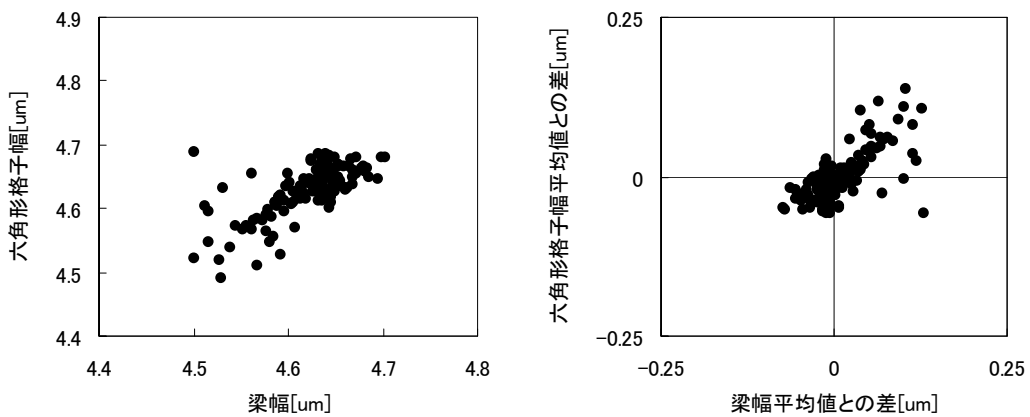


図 V.2.2.3-28 梁幅と六角形格子幅の相関

標準偏差が測長箇所によらず同程度であること、測長箇所間には測長値の相関があることがわかった。形状ばらつきをモデル化するために、マスク寸法とできあがり形状との差 X_s を変数とする。できあがり形状はマスク寸法から一律に X_s だけ差を持つとする。全測長箇所のマスク寸法との差をヒストグラムで表すと図 V.2.2.3-29 のようになる。 X_s の平均値と標準偏差は表 V.2.2.3-5 のとおりである。よって、形状ばらつきモデルとし、マスク寸法とできあがり形状との差 X_s を平均値 $0.341 \mu\text{m}$ 、標準偏差 $0.052 \mu\text{m}$ に従う正規分布としてモデル化する。

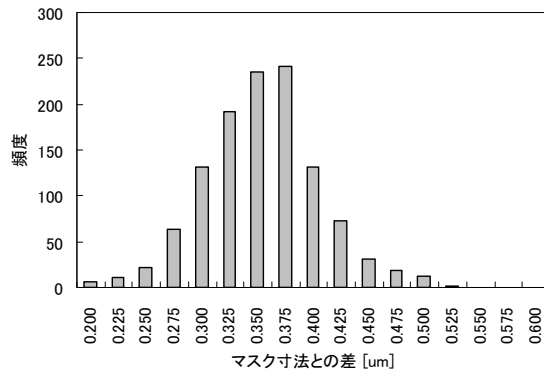


図 V.2.2.3-29 全測長箇所のマスク寸法との差のヒストグラム

表 V.2.2.3-5 全測長箇所のマスク寸法との差の平均、標準偏差

平均値 μ	0.341 μm
標準偏差 σ	0.052 μm

形状ばらつきをモデル化したパラメータであるマスク寸法との差異 X_s を表V.2.2.3-5に示す平均値、標準偏差で表される正規分布と仮定し、共振周波数のばらつきをシミュレーションした。

シミュレーションは、 X_s を μ 、 $\mu \pm \sigma$ 、 $\mu \pm 2\sigma$ 、の5ケースをおこなった。図V.2.2.3-30にシミュレーション結果を示す。実測は、横軸を梁幅測長値のマスク寸法との差をとった。シミュレーションは、 X_s が増加すると共振周波数が減少する形状を再現しており、減少の傾きが実測と同様の傾向が得られた。

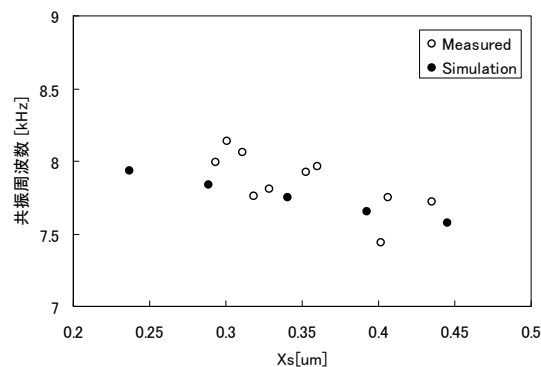


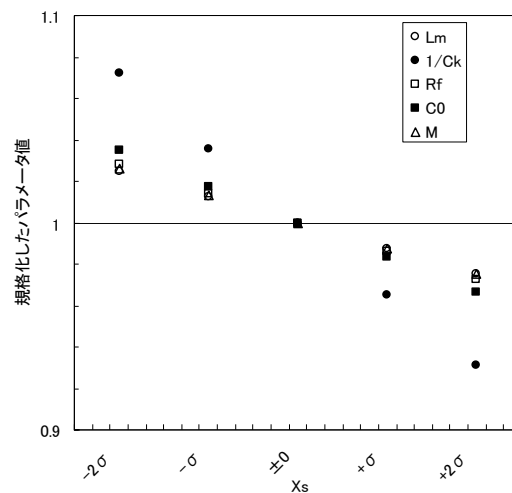
図 V.2.2.3-30 形状ばらつきと共振周波数の関係

モデル化した形状ばらつきをもとに、 X_s に対する MEMS 等価回路モデルパラメータの感度を求めた。

X_s の平均を μ 、標準偏差を σ で表すとき、 X_s を μ 、 $\mu \pm \sigma$ 、 $\mu \pm 2\sigma$ とした5ケースに関し、MEMS 等価回路モデルを算出した。 X_s が平均値でのMEMS等価回路モデルパラメータで規格化し値を図V.2.2.3-31に示す。この結果より以下の事が分かる。

- C_k 以外は構造寸法のばらつきに対して負の相関を持つ
- C_k の逆数が最も感度が高い

機械系の変数との対応を表V.2.2.3-6に示す。 C_k は、集中質点系へ近似した場合のバネ定数に相当し、特性ばらつきを抑制するためには、バネ構造に相当する梁のばらつきを抑えることが効果的であることが分かる。



図V.2.2.3-31 X_s に対する MEMS 等価回路モデルパラメータ値の変化率

表V.2.2.3-6 機械系の変数との対応

機械系変数	電気系変数
質量	Lmインダクタンス
コンプライアンス (ばね定数)	Ckキャパシタンス
機械抵抗	Rf電気抵抗

(4) 評価手法の検証

(4) - 1 電氣的・機械的特性の計測

本プロジェクトで作成したセンサ TEG 内の静電型楯歯加速度センサのパターン Variable_b3 に関して評価を実施した。

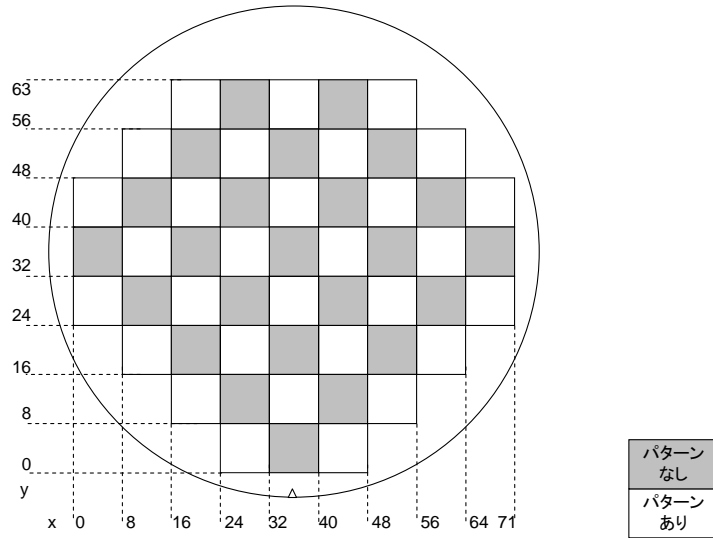
図V.2.2.3-32にショット内の配置を示す。左右に同じ配置を持つ。太線で囲まれた範囲がショット内のデバイス配置単位(以降、チップと呼ぶ)である。太線の枠の中に点線で上下に分割したものは、1つのチップの中に、2つのデバイスを持つことを表す。Variable_b3を灰色で塗りつぶし表示した。

右と同じレイアウト	Variable_c1	Variable_b1	Variable_a1	Sensor_a1
	Variable_c2	Variable_b2	Variable_a2	Sensor_a2
	Variable_c3	Variable_b1_3um	Variable_a1_3um	Sensor_a1_3um
	Variable_c4	Variable_b2_3um	Variable_a2_3um	Sensor_a2_3um
	Noise_2um	Variable_b3	Variable_a3	Sensor_a3
	Noise_3um	Variable_b4	Variable_a4	Sensor_a4
	Noise_2.5um	Variable_b3_3um	Variable_a3_3um	Sensor_a3_3um
	Noise_3.5um	Variable_b4_3um	Variable_a4_3um	Sensor_a4_3um
	Variable_a1_0comb	NBE	Membr_R700_4	Gyro_A210_4
	Variable_a2_0comb			
	Variable_a3_0comb	Gyro_A500_4_X2um	Membr_R700_8	Gyro_A210_8
	Variable_a4_0comb			
	Variable_b1_0comb	Gyro_A500_4_X5um	Membr_R800_4	Gyro_A500_4
	Variable_b2_0comb			
	Variable_b3_0comb	Gyro_A500_4_X2_L125	Membr_R800_8	Gyro_A500_8
	Variable_b4_0comb			

図V.2.2.3-32 ショット内配置

図V.2.2.3-33にセンサTEGのウエハ内の配置を示す。図V.2.2.3-32に示すパターンを持つ部分と持たない部分が千鳥格子状に配置されている。パターンのある区画が 30 であり、1 ショットに同じデバイスが 2 つ配置されているので、ウエハ内には同一デバイスが 60 個存在する。

ウエハ内のチップ位置を表す座標は、ノッチ側を下にしたときの左下を(0,0)として、チップに対して割り当てる。



図V.2.2.3-33 ウエハ内配置

測定したチップ座標と測定モードを表V.2.2.3-7に示す。○印が付いているものが測定を実施したことを示す。

表V.2.2.3-7 測定デバイス

番号	x 座標	y 座標	2 端子モード	3 端子モード
1	17	45	○	
2	1	29	○	
3	25	37	○	
4	25	5	○	
5	33	13	○	
6	33	29	○	○
7	41	37	○	
8	41	5	○	
9	49	45	○	
10	57	53	○	○
11	61	21	○	
12	65	29	○	
13	9	21	○	
14	9	53	○	○
15	21	45		○
16	37	13		○
17	37	29		○
18	37	61		○
19	53	45		○
20	5	29		○
21	69	29		○

2 端子モードで測定した場合の、可動電極の電流-周波数特性を図V.2.2.3-34に示す。3 端子モードで測定した場合の、固定電極の電流周波数特性を図V.2.2.3-35に示す。特性カーブ

がばらつきを持っていることがわかる。

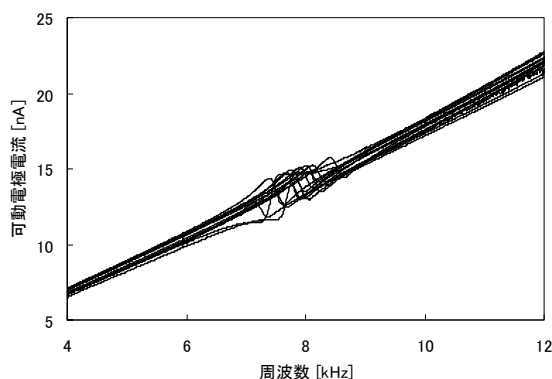


図 V.2.2.3-34 2 端子モード可動電極電流特性

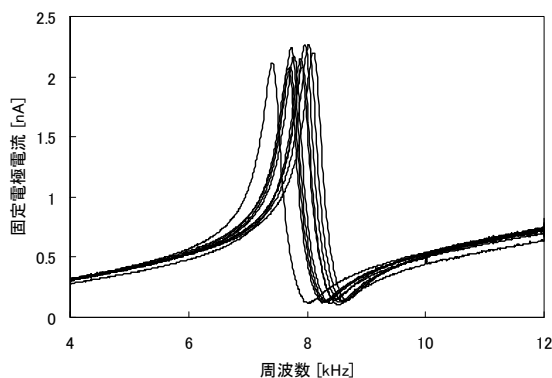


図 V.2.2.3-35 3 端子モード固定電極電流特性

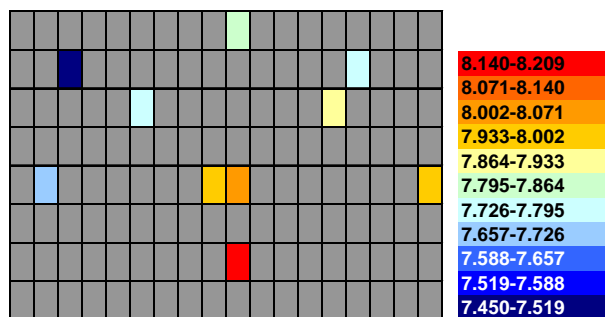
共振周波数とQ値を表V.2.2.3-8に示す。共振周波数およびQ値は機械的な特性から決めた。(数式 3-9)と(数式 3-17)からわかるように、3 端子モードの固定電極電流は、速度特性の定数倍であるので、3 端子モードの固定電流から求めると機械的な特性から決めるのと同様である。

共振周波数の平均値は 7.858kHz、標準偏差は 0.190kHz である。Q 値の平均値は 27.118、標準偏差は 0.831 である。

表 V.2.2.3-8 出力特性値

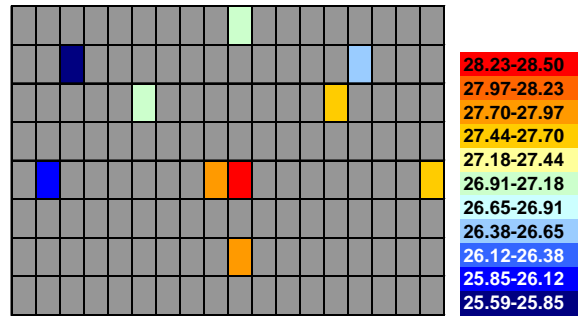
番号	x 座標	y 座標	共振周波数 [kHz]	Q 値
1	17	45	—	—
2	1	29	—	—
3	25	37	—	—
4	25	5	—	—
5	33	13	—	—
6	33	29	8.000	27.930
7	41	37	—	—
8	41	5	—	—
9	49	45	—	—
10	57	53	7.750	26.498
11	61	21	—	—
12	65	29	—	—
13	9	21	—	—
14	9	53	7.450	25.589
15	21	45	7.770	26.992
16	37	13	8.140	27.967
17	37	29	8.060	28.233
18	37	61	7.810	26.983
19	53	45	7.920	27.458
20	5	29	7.720	26.005
21	69	29	7.960	27.523
平均			7.858	27.118
標準偏差			0.190	0.831

図 V.2.2.3-36 および図 V.2.2.3-37 に共振周波数と Q 値のウエハマップ表示を示す。いずれも中心からノッチ側の値が高く、上側は値が低くなっており、共振周波数と Q 値の分布傾向は似ている。図 V.2.2.3-38 は、共振周波数と Q 値を平均値で規格化した値をグラフ化したものである。このグラフからも共振周波数と Q 値の分布はほぼ同じ傾向を示すことが分かる。



(ノッチ側)

図 V.2.2.3-36 共振周波数ウエハマップ表示



(ノッチ側)

図 V.2.2.3-37 Q 値ウエハマップ表示

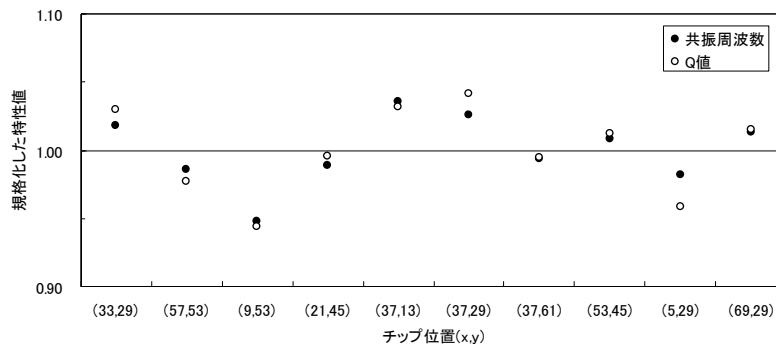


図 V.2.2.3-38 共振周波数と Q 値の傾向

(4) - 2等価回路モデルパラメータ抽出

測定した電気・機械特性からMEMS等価回路モデルパラメータの抽出を行った。抽出を行った等価回路モデルパラメータは電極間容量 C_0 、浮遊容量 C_{stray} 、抵抗値 R_s 、インダクタンス L_s 、キャパシタンス C_s である。その値を表V.2.2.3-9に示す。

表V.2.2.3-9 MEMS 等価回路モデルパラメータ抽出結果

番号	x 座標	y 座標	$C_{i0} + C_{stray}$ [F]	C_{stray} [F]	R_s [\cdot]	L_s [H]	C_s [F]
1	17	45	2.884E-13	—	—	—	—
2	1	29	2.727E-13	—	—	—	—
3	25	37	2.912E-13	—	—	—	—
4	25	5	2.837E-13	—	—	—	—
5	33	13	2.860E-13	—	—	—	—
6	33	29	2.897E-13	1.134E-14	4.616E+08	2.565E+05	1.543E-15
7	41	37	2.900E-13	—	—	—	—
8	41	5	2.791E-13	—	—	—	—
9	49	45	2.850E-13	—	—	—	—
10	57	53	2.798E-13	1.097E-14	5.052E+08	2.749E+05	1.534E-15
11	61	21	2.775E-13	—	—	—	—
12	65	29	2.756E-13	—	—	—	—
13	9	21	2.791E-13	—	—	—	—
14	9	53	2.878E-13	1.096E-14	4.926E+08	2.693E+05	1.695E-15
15	21	45	—	1.141E-14	4.653E+08	2.573E+05	1.631E-15
16	37	13	—	1.158E-14	4.770E+08	2.608E+05	1.466E-15
17	37	29	—	1.144E-14	4.622E+08	2.577E+05	1.513E-15
18	37	61	—	1.090E-14	4.807E+08	2.643E+05	1.571E-15
19	53	45	—	1.017E-14	4.817E+08	2.658E+05	1.519E-15
20	5	29	—	1.103E-14	5.058E+08	2.712E+05	1.567E-15
21	69	29	—	1.138E-14	5.066E+08	2.788E+05	1.434E-15

(4) - 3モデルパラメータばらつき評価

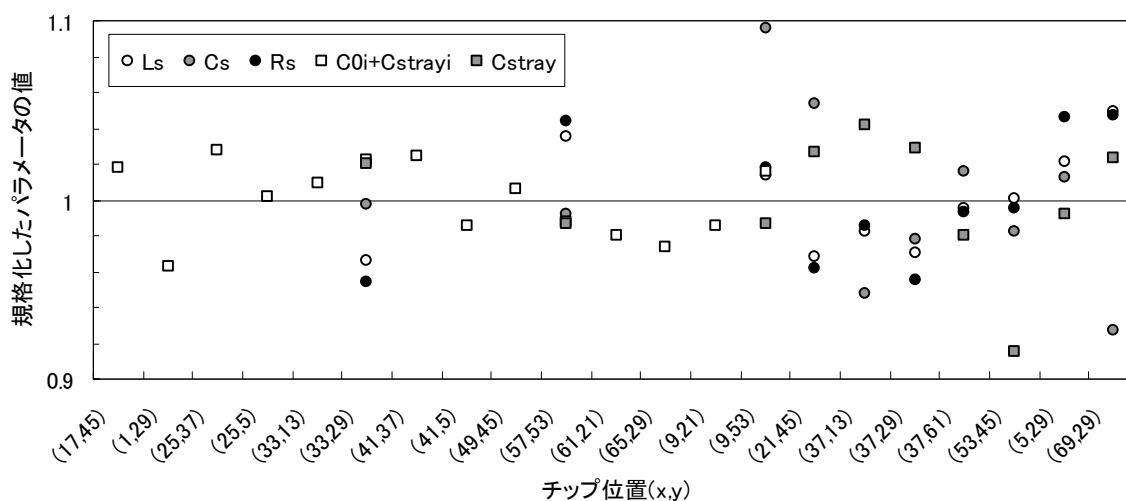
各パラメータの平均と標準偏差、変動係数を表V.2.2.3-10に示す。平均および標準偏差は次元を持つ値であり、異なるパラメータを比較するには適していない。変動係数は、標準偏差を平均で除した値であり、無次元であり、相対的な標準偏差といえる。

表V.2.2.3-10 MEMS 等価回路モデルパラメータ統計値

回路記号	平均		標準偏差		変動係数(=標準偏差/平均)	
$C_{i0} + C_{stray}$	2.833×10^{-13}	[F]	5.785×10^{-15}	[F]	2.04	%
C_{stray}	1.112×10^{-14}	[F]	3.891×10^{-16}	[F]	3.50	%
R_s	4.839×10^8	[.]	1.705×10^7	[.]	3.52	%
L_s	2.656×10^5	[H]	7.387×10^3	[H]	2.78	%
C_s	1.547×10^{-15}	[F]	7.165×10^{-17}	[F]	4.63	%

各パラメータの平均値で規格化した等価回路モデルパラメータ値を図V.2.2.3-39にグラフ化する。Csの変動幅がもっとも大きいことがわかる。

Csは機械系のコンプライアンスを電気機械結合定数で除した値であり、梁の形状のばらつきが大きいことを示唆している。シミュレーションを用いた感度解析で、実効的なバネ定数の感度がもっとも高い結果となったことと一致している。

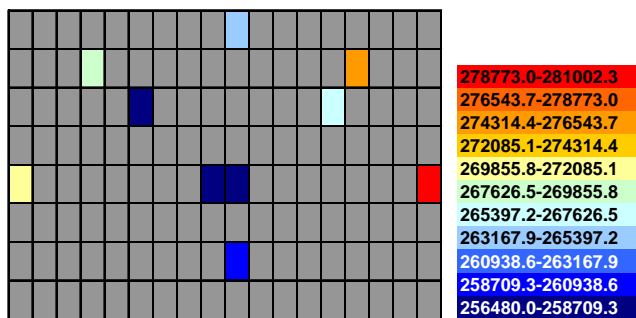


図V.2.2.3-39 規格化したパラメータの傾向

図V.2.2.3-40から図V.2.2.3-44に実測特性から算出した各MEMS等価回路モデルパラメータのウエハマップ表示を示す。

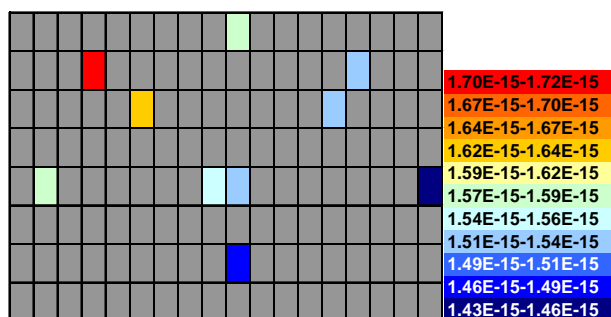
共振周波数はウエハ中心の共振周波数が高く、周辺の共振周波数が低い傾向を示した。

これに対して、 L_s 、 C_s 、 R_s のウエハマップ表示図V.2.2.3-40、図V.2.2.3-41、図V.2.2.3-42は、おおよそウエハ中心の値が低く、周辺の値が高い傾向を示す。共振周波数と L_s 、 C_s 、 R_s には負の相関があるというシミュレーション結果と一致すると考えられる。



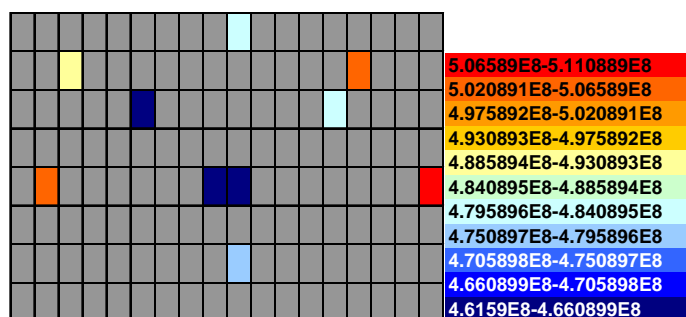
(ノッチ側)

図V.2.2.3-40 L_s ウエハマップ表示



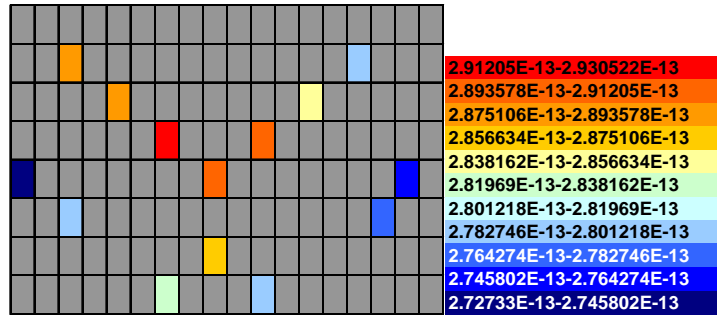
(ノッチ側)

図V.2.2.3-41 C_s ウエハマップ表示



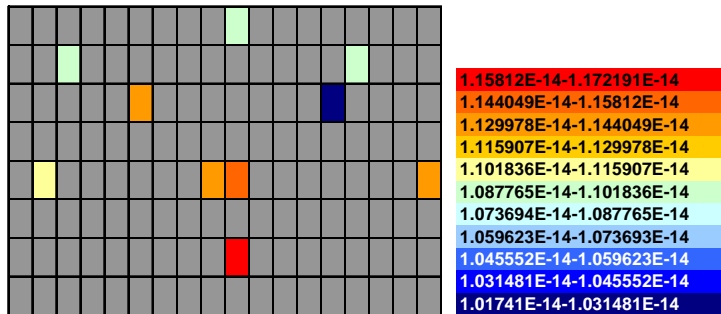
(ノッチ側)

図V.2.2.3-42 R_s ウエハマップ表示



(ノッチ側)

図 V.2.2.3-43 $C_{i0} + C_{stray_i}$ ウエハマップ表示



(ノッチ側)

図 V.2.2.3-44 C_{stray} ウエハマップ表示

(4) - 4 構造寸法ばらつき評価

等価回路モデルパラメータのばらつきより構造寸法のばらつき評価を行う。ここでは、ばらつきの評価項目としてウエハ面内分布の検証を行う。図 V.2.2.3-45、図 V.2.2.3-46 に等価回路モデルパラメータ L_s と R_s のウエハ面内分布を示す。いずれのパラメータも分布には以下の特徴がある。

1. ウエハ中心での値が小さい
2. ウエハ周辺部では、右上と左側の値が大きい。

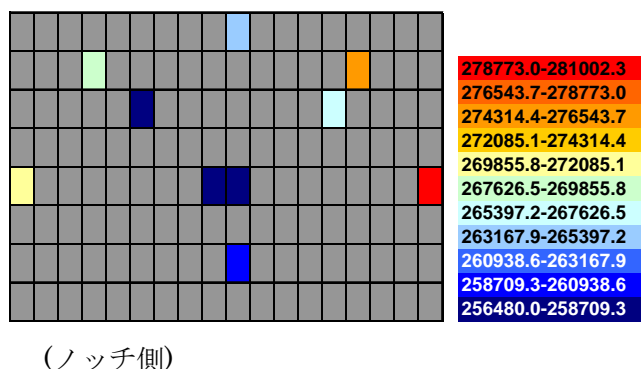


図 V.2.2.3-45 等価回路モデルパラメータ L_s のウエハ面内分布

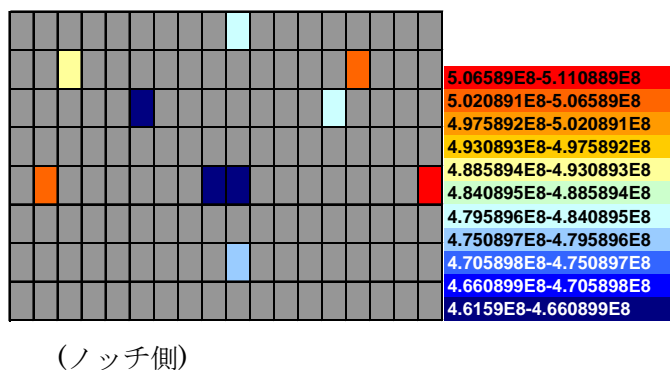


図 V.2.2.3-46 等価回路モデルパラメータ R_s のウエハ面内分布

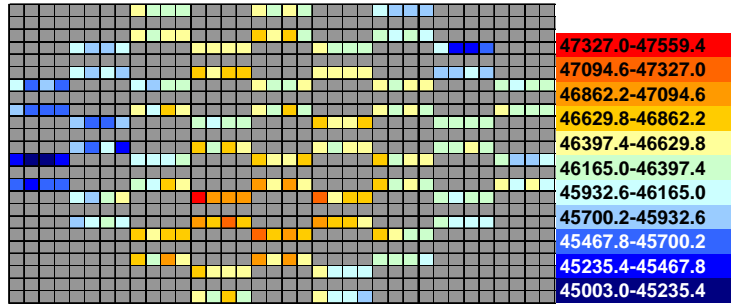
図 V.2.2.3-31 に示したように等価回路モデルパラメータと構造寸法のばらつきには負の相関がある。よって、図 V.2.2.3-45、図 V.2.2.3-46 の面内分布結果より、構造寸法のウエハ面内は逆となり、以下の傾向があることが予測できる。

1. ウエハ中心での値が大きい
2. ウエハ周辺部では、右上と左側の値が小さい。

SEM で測定したサイズのデータを用いて、上記の等価回路モデルパラメータのばらつき

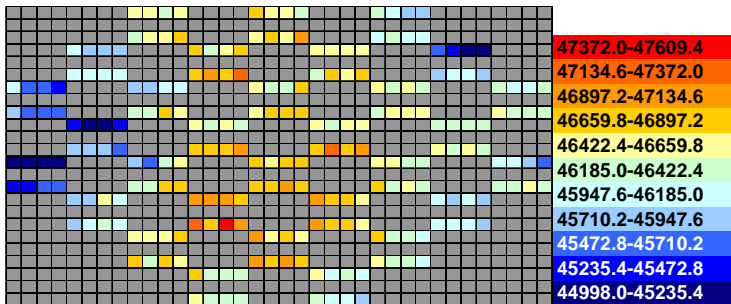
より予測した構造寸法のばらつきの結果が正しいか検証を行う。

図V.2.2.3-47に板バネの幅、図V.2.2.3-48に折り返しバネの幅、図V.2.2.3-49に櫛歯の幅の測長値をウエハマップ表示で示す。どの箇所も中心付近の測長値が大きく、周辺の右上と左側の測長値が小さい傾向を示しており、予測した構造寸法のばらつきと一致しており、等価回路モデルパラメータのばらつきから構造寸法のばらつきが正しく評価できることが確認できた。



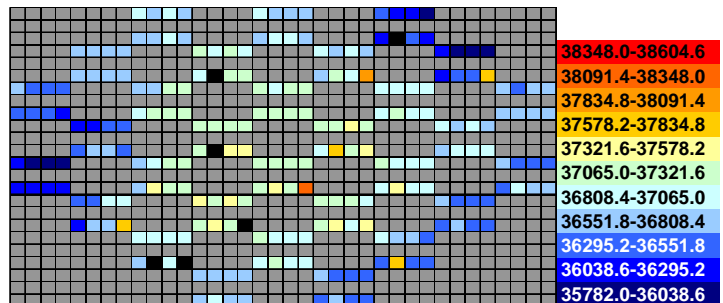
(ノッチ側)

図V.2.2.3-47 板バネ幅



(ノッチ側)

図V.2.2.3-48 折り返しバネ幅



(ノッチ側)

図V.2.2.3-49 櫛歯幅

(5) 設計へのフィードバック

0節で示したように、測長箇所によらず、1次近似的には、設計（マスク）寸法とできあがり形状との差 X_s でモデル化できることを示した。このモデルを元に行った0章の検証から分かった設計へフィードバックすべき事項を以下にまとめた。

- 設計（マスク）寸法と実寸の差は場所によらず、値と標準偏差が一定である。
- 測長箇所ごとの構造寸法は正の相関があり、ばらつきは独立でなく相関がある。
- 静電型楯歯加速度センサで Ck の逆数が構造寸法ばらつきに対して最も感度が高い
- Ck は集中質点系へ近似した場合のバネ定数に相当する。静電型楯歯加速度センサの特性ばらつきを抑制するためには、バネ構造に相当する梁のばらつきを抑えることが効果的である。

また、図 V.2.2.3-31 の構造寸法変化に対する電氣的・機械的特性に対する感度を用いることで設計時に電氣的・機械的特性のばらつき幅を推定することができる。

(6) まとめ

(6) - 1 考察

MEMS 等価回路モデルによるばらつき評価技術の開発をおこなった。

まず、MEMS等価回路モデルを用いたばらつき評価方法について0章で述べ、評価に必要な要素技術として0章でパラメータ抽出の方法と0章で構造寸法と電氣的・機械的特性のばらつきの関係を示した。

次に、MEMS等価回路モデルを用いたばらつき評価方法の検証を0章で行った。複数のデバイスの測定を行い、それぞれのMEMS等価回路モデルパラメータを算出した。算出した等価回路モデルパラメータのばらつきより構造寸法のばらつき評価を行い、等価回路モデルパラメータのばらつきから構造寸法のばらつきが正しく評価できることを確認した。

(6) - 2 課題

今回の検証から分かった今後の課題は以下である。

MEMS等価回路モデルに関する課題

形状から MEMS 等価回路モデルパラメータを算出し、特性をシミュレーションする際の課題を記す。

- **ハードスプリング効果の見積もり**

形状から MEMS 等価回路モデルパラメータを算出する場合に、直流電圧による静電力によって実効的にバネ定数が高くなる、いわゆるハードスプリング効果の見積もりが小さめとなった。また、同様にある直流電圧における電極間容量の見積もりも小さめとなる。これらを考慮し、MEMS 等価回路モデルパラメータ算出方法を改善することが課題である。

- **直流電圧依存を含む MEMS 等価回路モデル**

現状の MEMS 等価回路モデルは、デバイスおよび端子が決定すると等価回路の回路構成が決定する。各回路素子の値は、直流電圧によって決まるため、直流電圧が異なるとネットリストを作り直す必要がある。

直流電圧値を考慮したネットリストが作成可能であれば、直流電圧によってネットリストを作成し直さずに済み、回路シミュレーション上で直流電圧を変化させるだけ使用可能である。

MEMS等価回路モデルパラメータ抽出に関する課題

測定した出力特性から MEMS 等価回路モデルパラメータを抽出する際の課題を記す。

- **直流電圧を変化させた出力特性からの MEMS 等価回路モデルパラメータ抽出**

測定出力特性のピーク値を使用して算出する MEMS 等価回路モデルパラメータが存在する。ピーク値はより精度の高いものが望ましいが、測定のサンプリング間隔とも関連し、再現性よく測定することは困難である。これを改善する 1 つの方法として、複数の直流電圧での出力特性を測定し、全測定データを利用し MEMS 等価回路モデルパラメータを抽出することが考えられる。この場合の抽出手順検討が課題である。

以上

2. 3 低環境負荷型深掘りエッチング技術開発

(1) 研究の目的

全世界的課題として環境エネルギー問題への対応が各国毎、各産業毎に強く求められており、省資源や高効率、低環境負荷化として温室効果ガス排出量 25%削減などに向けた取組みが重要となる。一方、MEMS の製造技術の中心となる深掘りエッチング加工は一般に数 10 μm のエッチング深さを必要とするため、半導体加工と比べ長時間の加工時間を要し、それにもなってエッチングガスや電力量の消費が大きい。

また、今後のトレンドとしてウェハの大口径化やエッチング開口径の微細化が進んでいくことが必須であるが、エッチング形状を維持しつつスループットの向上ニーズが強いなどエッチング装置への要求は厳しく、プロセス時間短縮のためにエッチングガスの消費量や電力量が今後増大することが予想される。これまで、エッチングガスとしては安価で取扱いに優れる SF6 ガスが一般的に使用されてきたが、SF6 ガスは温暖化係数が高いことから、上記課題に対応するためには温暖化係数の低い代替ガスへの切り替えと、ガスの消費量や電力量を抑えつつエッチング速度を高速化するために、リアルタイムにプロセス状況をモニタリングし、適正なガスの消費量や投入電力などのプロセス条件にフィードバックして最適化を図るエネルギー消費効率の向上が必須となる。

本研究では、低環境負荷の深掘りエッチング技術を確立するために、SF6 ガスの代替ガスの探索と、代替ガスのポテンシャルを最大限発現させるためのエッチングの高効率化、最適化技術として、以下の3つの内容に取り組んだ。

i) 低環境負荷代替ガスの選定

-)リアルタイムモニタリングによるエッチングの高効率化
-)フィードバック制御手法を用いたエッチング最適化

i) 低環境負荷代替ガスの選定

1. エッチング装置について

エッチング装置は、高密度プラズマの生成可能な NLD (磁気中性線放電 : Magnetic Neutral Loop Discharge)プラズマを用い、代替ガスエッチングと、エッチレート高速化についても技術指針を得ることを目的とした。図 2.3)-1 は NLD エッチングチェンバーの断面模式図を示す。弱い磁場によって真空中に形成される磁場零のループ付近に濃いプラズマが形成される。このループ径は磁場コイル電流によって制御可能である。このプラズマ源は、1 Pa 以下の低圧域にわたり高密度・低電子温度のプラズマが形成されることが大きな特徴となっており、一般的な ICP 装置と同等以上の高密度プラズマによってエッチレートの高速化が期待されることから、今回適用した。

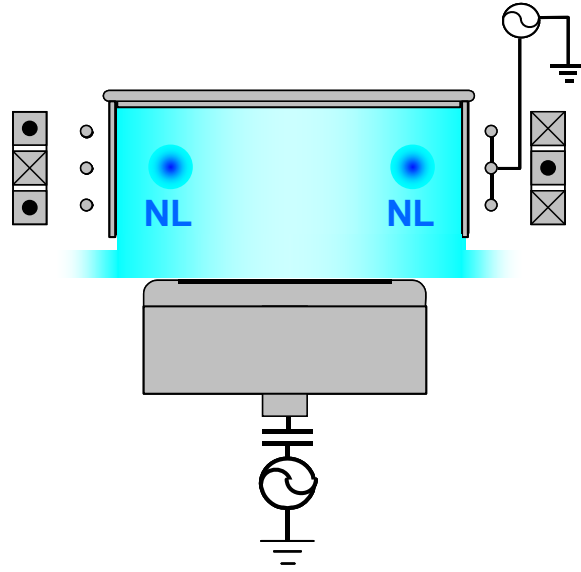


図 V.2.3)-1 磁気中性線放電(NLD)プラズマエッチング装置

2 .

低環境負荷ガス(代替ガス)の検討と選定

2-1. 机上検討によるスクリーニング (1次選定)

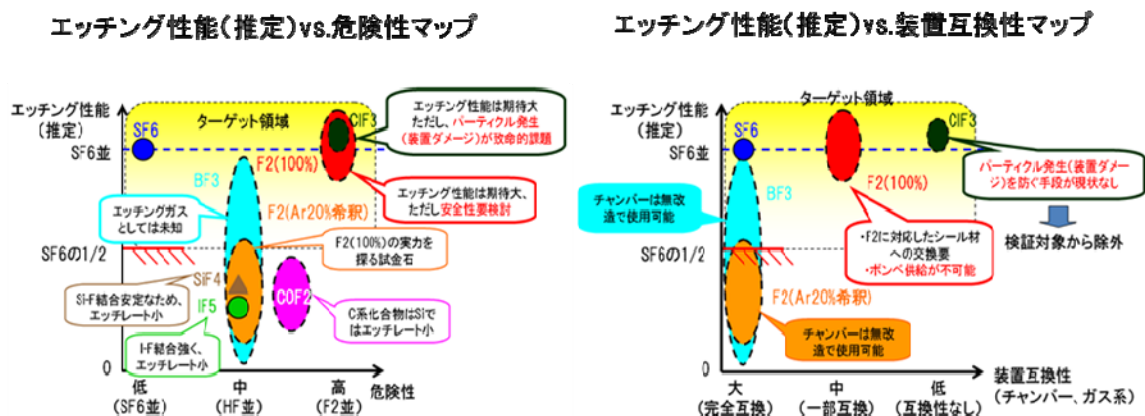
シリコンエッチングのフッ素供給ガスとして用いられている SF_6 ガスの大気温暖化係数 (GWP) は 23900 と算出されている。本研究での SF_6 代替ガス選定の基本条件としてまず GWP が零乃至は極めて小さいガスであること。次に、シリコンのエッチャントであるフッ素ラジカルが供給できるガスであること。そして、安全性や取り扱いのしやすさが事前に把握できるという観点から、半導体プロセスあるいは MEMS プロセスで使用実績のあるガスであること。以上を選考条件とし、第 1 次選定時調査の結果、 SiF_4 、 COF_2 、 IF_5 、 ClF_3 、 F_2 、 BF_3 が代替ガスとして検討選出できた(表 1)。 SiF_4 と BF_3 は半導体製造プロセスではごく一般に取り扱われているガスで、入手も比較的容易である。GWP が算出されていないが、ガスそのものは反応性が高いことから、GWP は極めて小さいと判断した。

表 2.3)1 代表ガス候補選定 (一次選定)

化学式	SF6	NF3	SiF4	COF2	IF5	ClF3	F2	BF3
物質名	六フッ化硫黄	三フッ化窒素	四フッ化ケイ素	フッ化カルボニル	五フッ化ヨウ素	三フッ化塩素	フッ素	三弗化硼素
分子重	146.05	71	104.09	66	221.9	88	38	67.81
気体比重 (空気=1)	5.11	2.49	1.59	0.987	3.21	1.31 ~ 1.54	2.34	2.34
沸点(°C)	昇華点-63.5	0	-65	-83	104.5	11.75	-223	-100.3
融点(°C)	-50.8	-216.6	-77	-111.26	9.43	-76.3	-188	-126.8
腐食性	なし	なし	不燃性	強い	強い	強い	強い	強い
燃焼性	なし	不燃性	不燃性	不燃性	不燃性	不燃性	不燃性	不燃性
爆発性	難溶	支燃性	反応	水、アルコール等と反応し腐食性のHFを発生する。	水を含む物質及び多くの有機化合物と強く反応する。	水及び多くの有機溶媒と即座に反応する。	支燃性	水332g/l、アルコールと反応し錯塩を作る。
ガス特性	水への溶解度	不溶	加水分解してフッ化物、フッ化水素等を生成する。	水、アルコール等と反応し腐食性のHFを発生する。	水と爆発的に反応する。強酸物質であり、殆どの有機物やガラスを侵す。アルカリ性物質と強烈に反応する。	三フッ化塩素は酸素より強い支燃性を帯び、このガスが吸い込まれると呼吸器の粘膜が侵される。皮膚、眼、粘膜への刺激。	支燃性	単独系では極めて安定。アルコール、エーテル等との錯体は強力なルイス酸触媒。
反応性	単純窒素以外には毒性作用がないと考えられる。危険な反応を起こす可能性のある物質：ジシラン	強力な酸化剤であるが、常温高圧では他の点では不活性。熱せられると爆発し、火花で発火するおそれがある。	加水分解してフッ化物、フッ化水素等を生成する。	水、アルコール等と反応し腐食性のHFを発生する。	水と爆発的に反応する。強酸物質であり、殆どの有機物やガラスを侵す。アルカリ性物質と強烈に反応する。	三フッ化塩素は酸素より強い支燃性を帯び、このガスが吸い込まれると呼吸器の粘膜が侵される。皮膚、眼、粘膜への刺激。	支燃性	単独系では極めて安定。アルコール、エーテル等との錯体は強力なルイス酸触媒。
高圧ガス	○	○	○	○	○	○	○	○
毒性	許容濃度 1000ppm	10ppm	AGGIH TLV(フッ化物、Fとして)=2.5 mg/m3(TWA)	2ppm	ACGIH 2007 年度版) 2.5 mg/m3 フッ化物	0.1ppm	1ppm	0.3~1ppm
低環境負荷	GWP(100年値) <1	×(10800)	不明だが○と推定	○(<1)	○(0)	○(0)	○(0)	不明だが○と推定
エッチング性能	F含有比 >0.75	○(0.86)	○(0.80)	×(0.50)	○(0.83)	○(0.75)	○(1.00)	○(0.75)
取扱いやすさ	危険性 エッチング液度 蒸置互換性 (チャンパー、ガス系)	別途ガス	別途ガス	別途ガス	別途ガス	別途ガス	別途ガス	別途ガス

2-2. 机上検討によるスクリーニング（2次選定）

次に表1を元に、シリコンエッチング装置への導入にあたり、「エッチング性能（推定）vs.危険性」及び、「エッチング性能（推定）vs.装置互換性」の考察観点を持ってマッピングを行った(図V.2.3)-2)。結果、希釈F₂とBF₃の2ガスを代替ガスとして選定した。以下は各ガスの検討考察を示す。



図V.2.3)-2 代替ガス候補選定（2次選定）

1-2-1. SiF₄：シリコンのエッチング生成物として良く議論される分子であるが、エッチングプロセス中においてはフッ素ラジカルを供給するガスというよりも、むしろエッチング異方性を支援する役割であるとの報告事例もあり、代替エッチングとしては適しないと判断した。

1-2-2. COF₂：分子中に炭素が含有している為、経験的にエッチングレート抑制につながるかと判断した。

1-2-3. IF₅：ヨウ素とフッ素の結合が極めて安定な為、フッ素ラジカルの供給制御マージンが狭いであろうと考えられる。室温では液体の為、配管をヒータ加熱する必要があるだけでなく、SiCl₄のようなボンベ供給システムが確立されておらず、100sccm以上の流量を安定に得るためには複数ラインが必要な点も含め、装置への導入は困難と判断した。

1-2-4. CIF₃：プラズマ放電無くとも反応するガスで、最近ではクリーニングガスとして半導体分野でも取り扱われている。一方、チャンバ内部パーツとの反応によるパーティクル発生懸念、ガスそのものの危険性が非常に高い点等、実用化された装置に代替ガスとして導入するには困難と判断した。

1-2-5. F_2 : 100%高純度 F_2 はその反応性の高さゆえ、現在ボンベでの供給は行われていない。100%高純度 F_2 用いるにはオンサイトで生成する方法があり、そのひとつとして固体ソースから F_2 ガスを得る装置を供給可能なメーカを調査したが、現在は生産中止となっている。一方、TFT 分野において、チャンバクリーニング用途に大量に F_2 ガス供給する設備として実用化されている装置が存在することが判明した。取り扱いメーカは現在世界で 1 社のみとなっている。HF の電気分解から F_2 ガスを供給する方式であり、設備としては安全面・ガス流量も安定的に大流量が確保できる。

しかしながら、100% F_2 を既存のエッチング装置に導入するには、 ClF_3 同様チャンバ内部パーツの互換性を確認する必要がある、初動研究としては困難と判断した。ただし、フッ素ラジカルを供給可能なガスとしてはシンプルな分子構造であり検討する価値は高いと判断し、現在ボンベで入手可能な Ar 希釈の 20% F_2 ガスを選定した。

1-2-6. BF_3 : 化合物エッチング分野において BCl_3 が高レートエッチングガスとして取り扱われている点を参考とした。B は C と周期律表では隣同士であることから、特性が類似の可能性が高い。しかし結合エネルギーで調査すると、Si-B:68.9kcal/mol、Si-C:107.9kcal/mol と大きく異なる為、プラズマ化し、フッ素ラジカルが供給できた場合、堆積性とエッチング性の両方を持ち合わせたガスとしての可能性に期待し、代替ガス候補として選定した。

3. 低環境負荷ガスを用いたエッチング基礎実験

3-1. F_2 /Ar プロセス

F_2 が Ar で希釈されており、Ar ガスの添加の影響を確認するために、比較のため SF_6 も Ar 希釈してエッチレートを評価した。図 V.2.3)-3 に 2 μ m Via のエッチングレートに対する 20% F_2 / Ar 及び SF_6 / Ar 混合比依存性結果をそれぞれ示す。結果は、予想に反して 20% F_2 及び 20% SF_6 共に殆どエッチングされなかった。40% SF_6 で 1 μ m / min 以上のエッチング速度が確認できたが、形状は等形状となる。

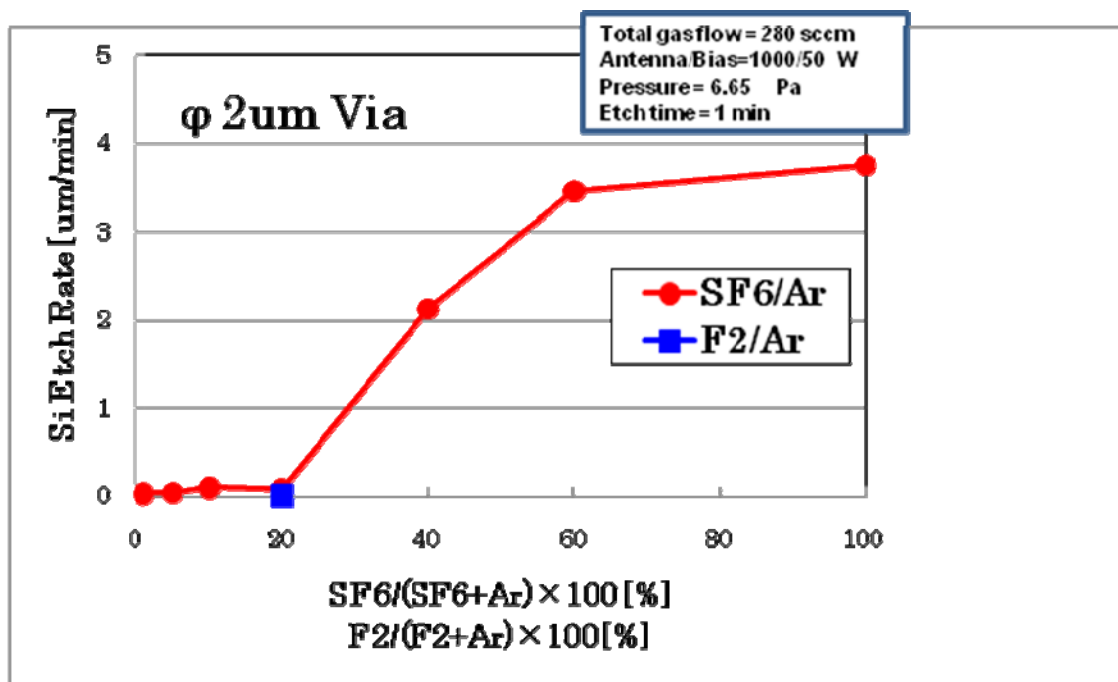
この原因について以下のように考察した。

20% F_2 / Ar、20% SF_6 / Ar ではガスのうち 80%が Ar であり、その状態でプラズマになっているため、 F_2 、 SF_6 とも十分解離していると考えられる。この状態で Ar のイオン化は 15eV、 F_2 、 SF_6 の F 1 個の解離エネルギーは 2.5~3.5eV であることから、F はラジカル状態にあると思われる。ただし、F の絶対量がエッチレートを決定すると考えると、 SF_6 は 6 個の F、 F_2 は 2 個の F であり、F の数が 3 : 1 と同じ流量で比較すると SF_6 の方が F 量が多いため、有利であるとも考えられる。

また、 SF_6 / Ar の SF_6 濃度を高くすると急激にエッチングが起きることから、プラズマによってチャンバの構成部品から酸素が放出され、Si 表面で酸化とエッチングの競合反応が起きている可能性がある。

したがって、今回の結果は以下のようなになる。

- ・ F の絶対量が少なく、チャンバの構成部品から放出される酸素により、Si 表面で酸化とエッチングの競合反応が起きていると考えられる。
- ・ SF₆/Ar と同様、F₂濃度を高めると、エッチレート向上の可能性はある。



図V.2.3)-3 Si エッチレートの 20% F₂ / Ar 及び SF₆ / Ar 混合比依存性

3-2. BF₃ / Ar プロセス

図V.2.3)-4 は 2um Via における BF₃ 及び SF₆ の Ar 添加率依存の結果である。特徴的なのは、10% BF₃ で予測に反しデポ膜が確認されたことである。グラフではデポレートをマイナスで表記している。BF₃ 堆積速度は混合率によらず、10%~100% 範囲で 0.5um/min 前後のデポレート推移の結果を得た。

現状のボッシュエッチングでは C₄F₈ がデポ工程で使われているが、GWP は 8700 と大きい。C₄F₈ の代わりに BF₃ を使うことで、GWP がゼロのデポ工程が可能となる結果を得た。

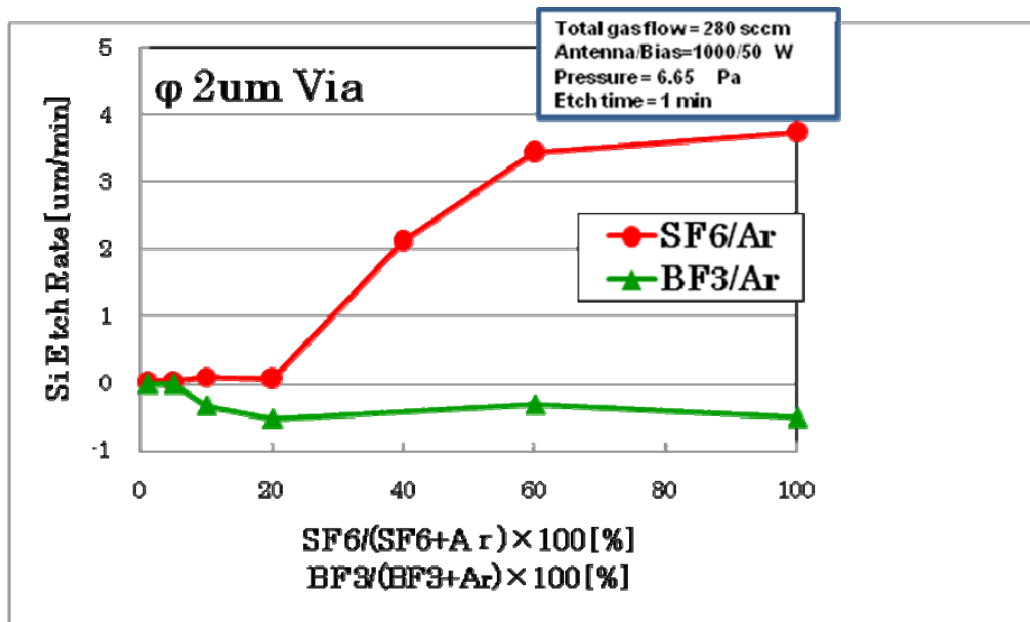


図 V.2.3 (4) ϕ 2um Via の Si エッチングレートの 20% F_2 / Ar 及び SF_6 / Ar 混合比依存性

3-3. BF_3 / O_2 プロセス

BF_3 がフロロカーボンガスの炭素と同じ役割を持つならば、酸素添加によってシリコンエッチレート向上が見られる可能性も考えられたため、 BF_3 / O_2 混合プロセスの実施を試みた。

図 V.2.3 (5) に 2umVia における BF_3 / O_2 混合率依存の結果を示す。しかし、結果はどの混合比においてもデポ膜が形成されることが確認され、60% BF_3 で約 2.5 um / min の高速のデポレートであった。図 V.2.3 (4) の Ar 添加プロセスでの膜とは違い、酸素添加は B-O 系の膜が成膜されているものと思われる。以上の結果から、 BF_3 ガス単体では、デポ性のガスであることが明らかになった。デポレート 2.5 um / min は従来ボッシュエッチングのデポ工程でみると、最速レートではないかと思われる。

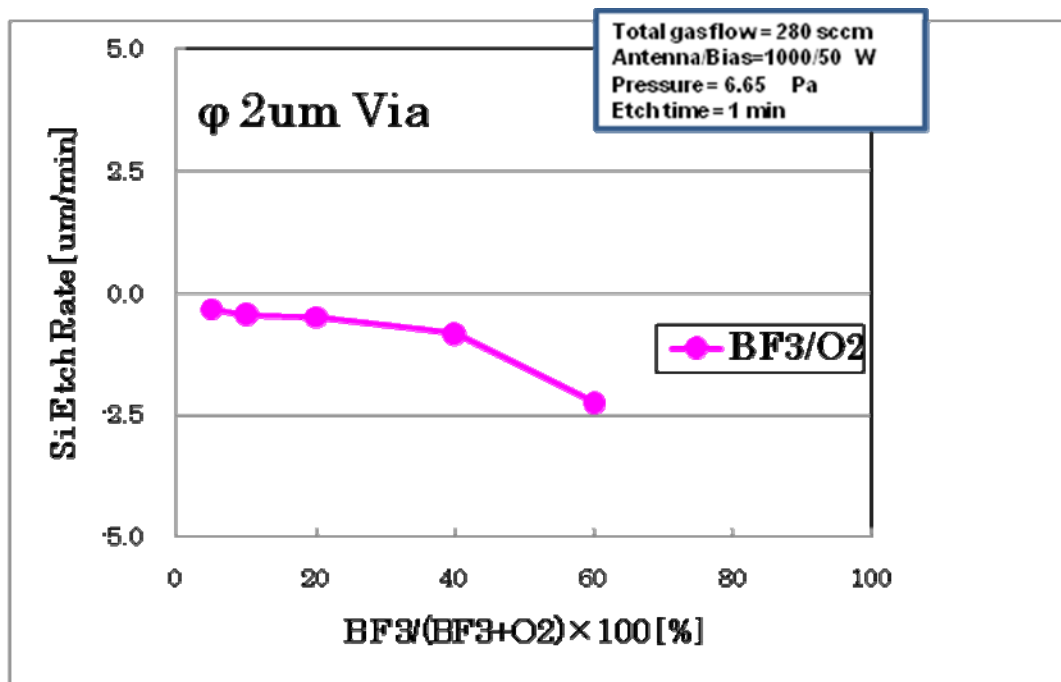


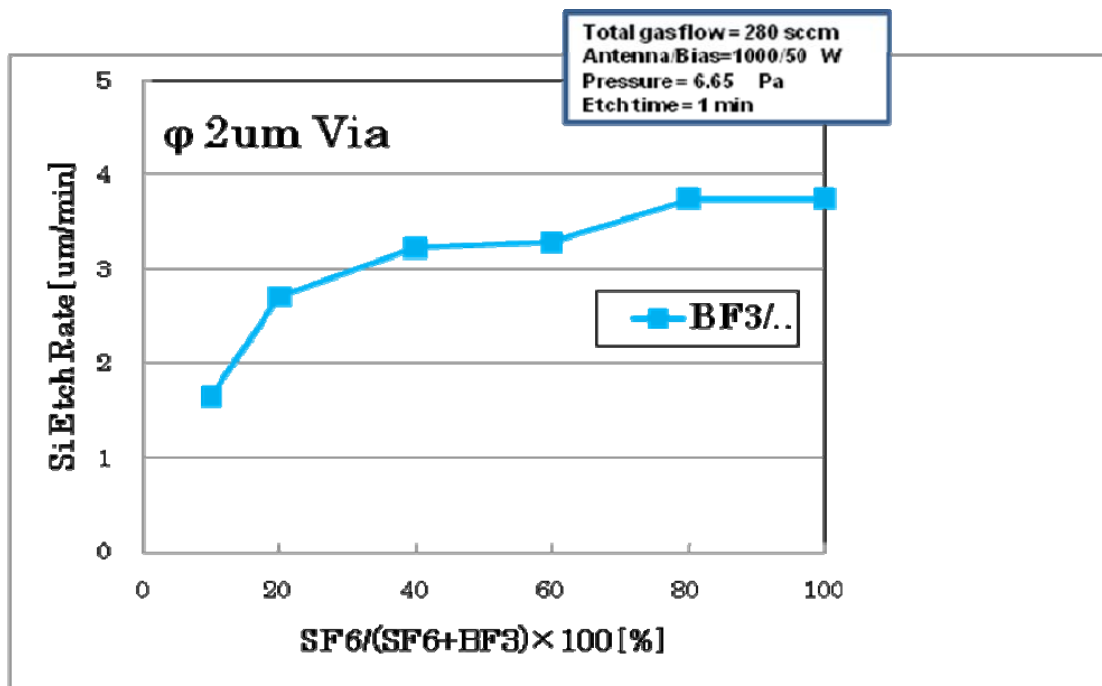
図 V.2.3 (5) Si エッチングレートの BF₃ / O₂ 混合比依存性

3-4. BF₃ / SF₆ プロセス

BF₃ の堆積結果から、等方性である SF₆ エッチングにデポ性である本 BF₃ を混合させ、異方性の現象が見られるか確認した。図 V.2.3 (6) に BF₃ / SF₆ 混合比依存性を示す。BF₃ 添加とともにエッチング速度は低下するが、この条件下では異方性形状に転じる結果は得られなかった。

しかしながら、80%BF₃ / SF₆ となる領域でも、100% SF₆ に対して 3 割程度のエッチレート低下しか見られない。すなわち、この結果は GWP が高い SF₆ に BF₃ を添加すると、QWP を下げつつエッチレート低下が抑えられるため、結果的に低環境負荷の代替ガスとなりうることを意味する。

よって、更なる効率向上を狙い、アンテナパワー、バイアスパワー依存性を次に検討した。



図V.2.3)-6 Si エッチングレートの BF₃ / SF₆ 合比依存性

4. エッチング特性向上検討

4-1. 高パワー条件仕様確認

4-1-1. アンテナパワー依存性

図V.2.3)-7 はエッチング速度 UP を目的にプラズマ密度増加とエッチングレート相関を確認目的とし、実験を行ったが、SF₆(20%) / Ar、F₂(20%) / Ar 共にエッチング速度には変化が見られなかった。BF₃(20%) / Ar はアンテナパワー増加と共にデポレートが増加する傾向を得た。これは高パワー化によって BF₃ の解離が進み、デポ性が増加したものと考察される。BF₃ を用いたプロセスでデポレートをより向上させるには酸素添加と高密度化が有効であると考えられる。

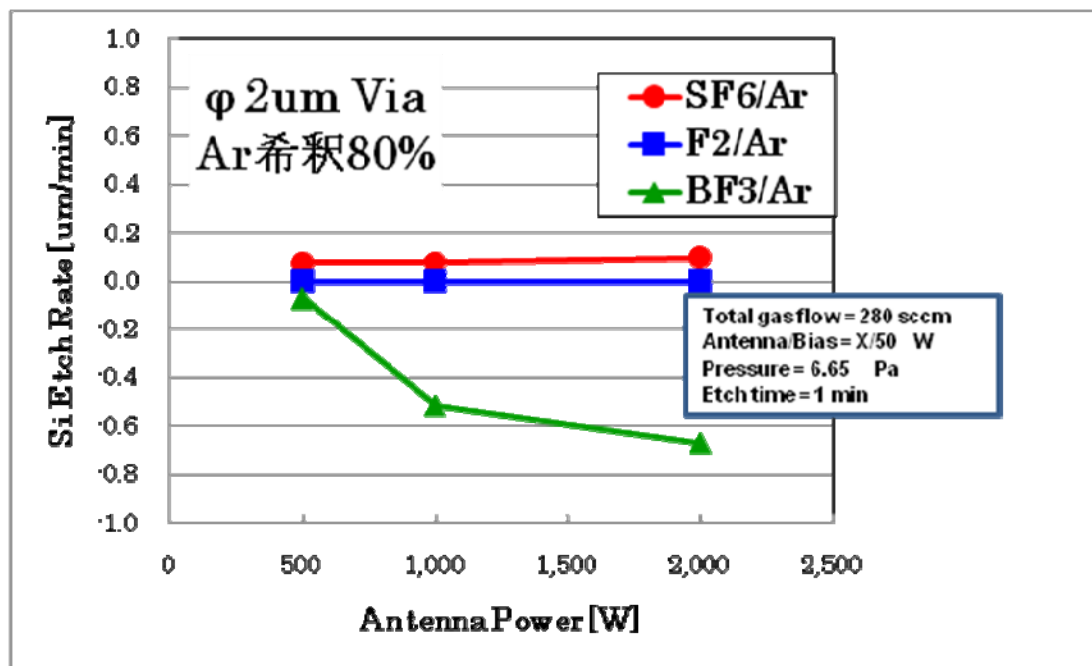


図 V.2.3)-7 Si エッチングレートのアンテナパワー依存性

4-1-2.バイアスパワー依存性

図 V.2.3)-8 にバイアスパワー依存性を示す。図中には Ar 添加プロセスである SF₆(20%) / Ar、F₂(20%) / Ar、BF₃(20%) / Ar、SF₆(20%) / Ar と、これに加えて BF₃(80%) / SF₆、SF₆(20%) / O₂ 混合プロセスをそれぞれ示す。どの混合プロセスも SF₆ あるいはそれに代わるガスの使用量が総流量の 20% となる条件にて比較した。SF₆(20%) / Ar では、バイアスパワー100W で急激にエッチレートが上昇し、それ以上では緩やかにレートが下降する傾向を得た。エッチレートは速くなるものの、マスクのエッチングも速くなることからスパッタ主体のエッチング機構と考えられる。同様に F₂(20%) / Ar プロセスもバイアスパワー増加に伴い、エッチレートが向上する結果を得た。バイアスパワー500W で 0.5 um / min のエッチレートが得られた。

F₂(20%) / Ar プロセスは、MEMS 向けの深堀エッチングにはレート面で足りないが、次世代低消費電力 LSI 光インターコネクションデバイスや環境センサなどで応用が検討されている回折格子構造、フォトニック結晶構造等の低レートで精密且つナノ微細加工制御が要求される分野には有用であり、SF₆ を一切使用しない「低環境負荷な微細加工 Si エッチングプロセス」として有効であるといえる。

また、BF₃(80%) / SF₆ プロセスにおいては、バイアスパワー100W で異方性形状が初めて確認された。対マスク選択比は 15 前後と SF₆(20%) / Ar と比べて約 2 倍と高く、かつ

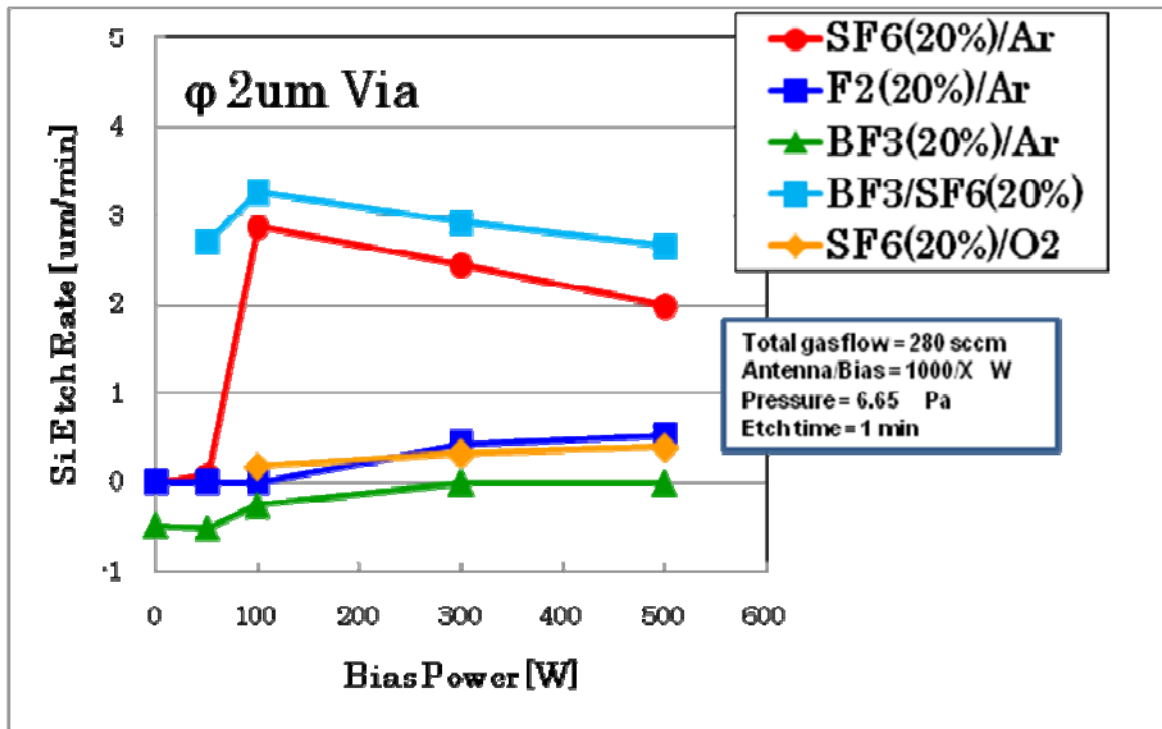


図 V.2.3 (8) Si エッチングレートのバイアスパワー依存性

NLD プラズマを用いた非ボッシュエッチング法を踏襲している為、側壁が平滑なスキヤロップフリーの加工形状となる。図 V.2.3 (9) に図 V.2.3 (8) 中の SF₆(20%) / Ar 及び BF₃(80%) / SF₆ プロセスの SEM 写真を示す。

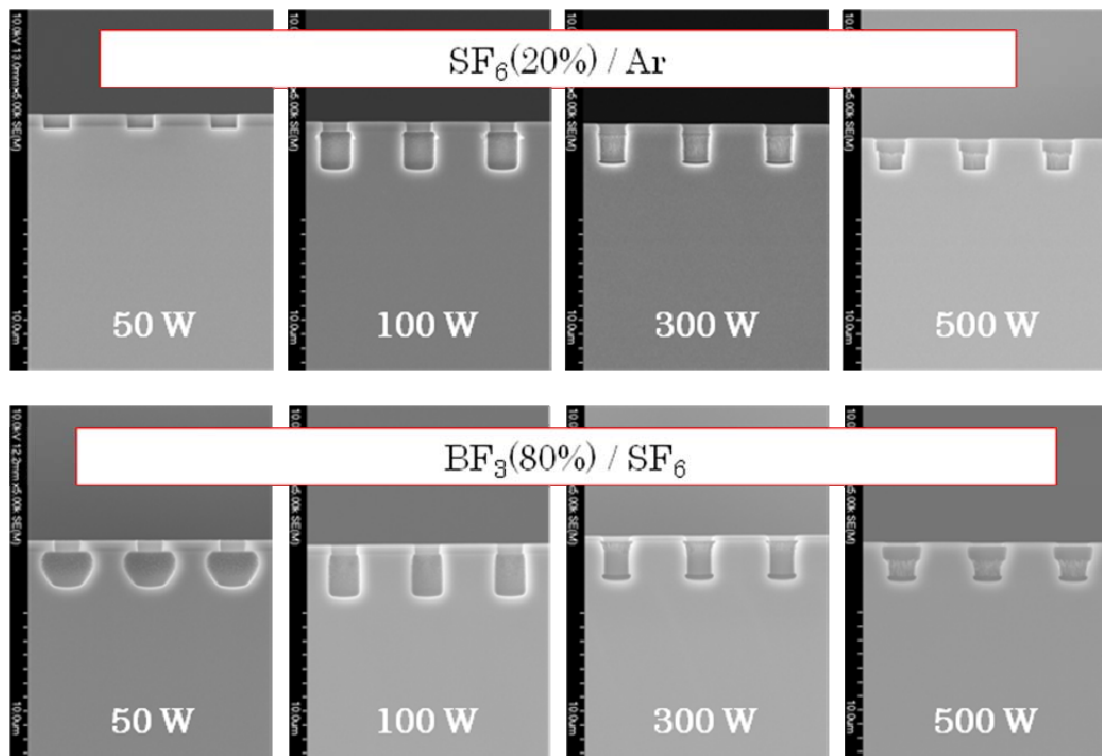


図 V.2.3)-9 Si エッチングレートのバイアスパワー依存性(SEM 写真)

以上の結果から、 BF_3/SF_6 混合プロセスにより、Si の異方性エッチングが可能となることが明らかになった。

4-1-3.従来 SF_6 / O_2 非ボッシュ技術との比較

図 V.2.3)-10 は本研究で見出した新規 $\text{BF}_3 / \text{SF}_6$ エッチングプロセスについて、従来プロセスである SF_6 / O_2 混合プロセスとの比較を示す。 SF_6 / O_2 混合プロセスでは SF_6 が 80% で異方性形状を得る。エッチング速度は $4 \text{ um} / \text{min}$ 。一方で、 $\text{BF}_3(80\%) / \text{SF}_6(20\%)$ は $3.25 \text{ um} / \text{min}$ 、 $\text{BF}_3(90\%) / (10\%) \text{ SF}_6$ で $2.0 \text{ um} / \text{min}$ で両方とも異方性形状である。図 V.2.3)-11 は SF_6 / O_2 混合プロセスと $\text{BF}_3 / \text{SF}_6$ 混合プロセス各々エッチング時間を延長した結果を示す。両形状共に異方性形状を維持していることが分かる。以上の結果から、 $\text{BF}_3 / \text{SF}_6$ 混合プロセスは低環境負荷型 Si 深堀エッチング技術として極めて新しい方法を見出したと言える。表 2 は本プロジェクト成果の $\text{BF}_3(80\%) / \text{SF}_6(20\%)$ プロセスを元に、NLD を用いた非 Bosch プロセスの代替ガスのまとめを示す。結果、 $\text{BF}_3(80\%) / \text{SF}_6(20\%)$ プロセスにて、69% の削減見込み(計算値)を得た。

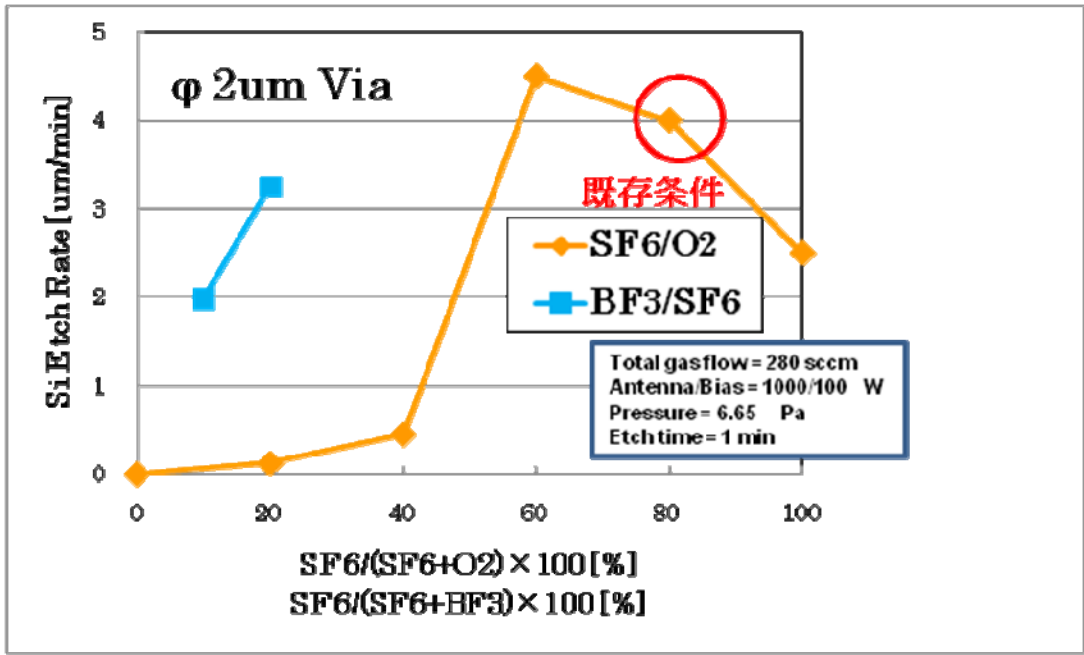


図 V.2.3 (10) Si エッチングレート of SF₆ / O₂ 混合比及び BF₃ / SF₆ 混合比依存性

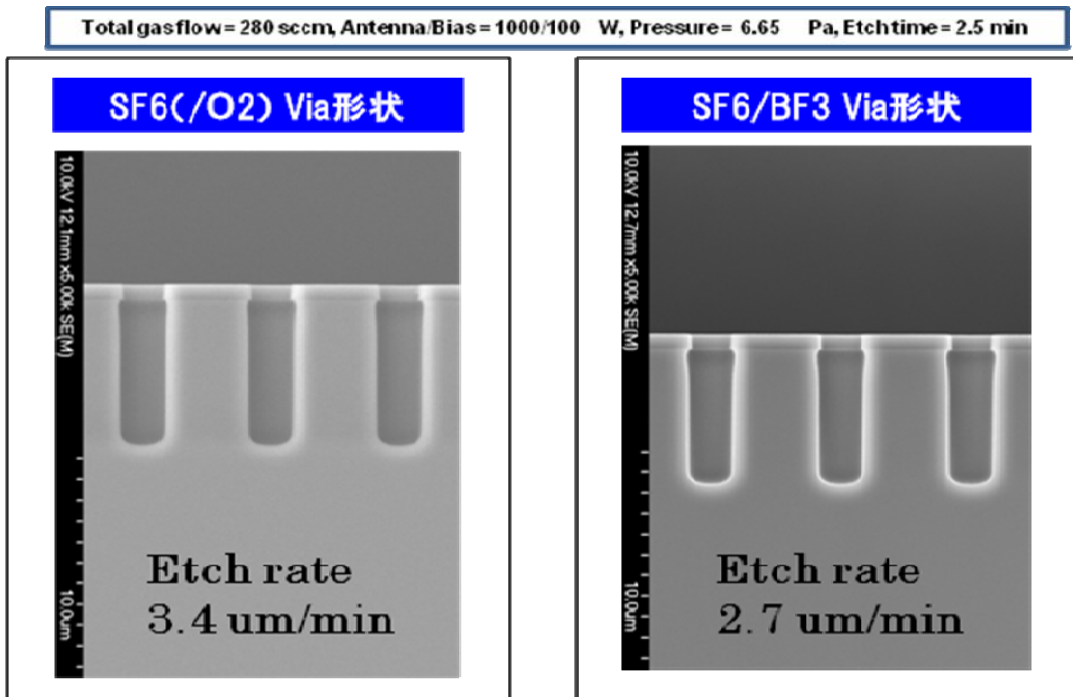


図 V.2.3 (11) SF₆ / O₂ プロセスと BF₃ / SF₆ プロセスにおける Si エッチング形状比較

表 V.2.3)2 代替ガスエッチングまとめ (NLD装置にて)

	Ref. SF6+20%O2	Ar+20%F2 混合ガス	SF6+80%BF3 混合ガス
エッチレート	4.0 μm/min	エッチングせず	3.25 μm/min
形状	————	エッチングせず	SF6/O2と同等
安全性	————	互換性あり	互換性あり
コスト (現在のガス購入代より試算)	1		4.1
温暖化係数	19120 (SF6:23900×80%)	0	4780(混合ガス)
温暖化ガス 削減率 (エッチレート同等として計算)	————	————	69%

4-1-3.代替ガスのコスト見積もり

代替ガスのコストについて、既存の SF₆ / O₂ プロセスと 80% BF₃ / SF₆ を対象に机上検討を行った。

試算 1 : 既存プロセスの TSV エッチング

SF₆ / O₂ = 224 / 56 sccm

- ・ SF₆ 使用量 : 224sccm × 2.5 分/wafer = 560 sccm/wafer
- ・ 原料 COO : 6 円/g × 3.64g/wafer = **21.8 円/wafer**

試算 2 : 代替プロセスの TSV エッチング

BF₃ / SF₆ = 224 / 56 sccm

- ・ BF₃ 使用量 : 224sccm × 2.5 分/wafer = 560 sccm/wafer
 - 原料 COO : 50 円/g × 1.7g/wafer = 85 円/wafer
 - ・ SF₆ 使用量 : 56sccm × 2.5 分/wafer = 140 sccm/wafer
 - 原料 COO : 6 円/g × 0.91g/wafer = 5.5 円/wafer
- 85 + 5.5 = **90.5 円/wafer**

以上の計算より、現時点において BF₃ / SF₆ を用いた代替ガスコストは、既存プロセスの約 4 倍という結果を得た。今後需要の増加等によりコストは低減されていくものと考えられる。

4-2. バイアス周波数との相関把握

上項にて、エッチング速度及び形状の改善はバイアスパワーが最も有効であったため、本項はバイアスパワーに着目し、より高性能なプロセス指針を得る目的でバイアスの周波数と、そのエッチング相関関係を調査した。シリコンエッチングは、フッ素ラジカルだけでも室温レベルでは自発的に反応する自発反応エッチング機構を持つ。

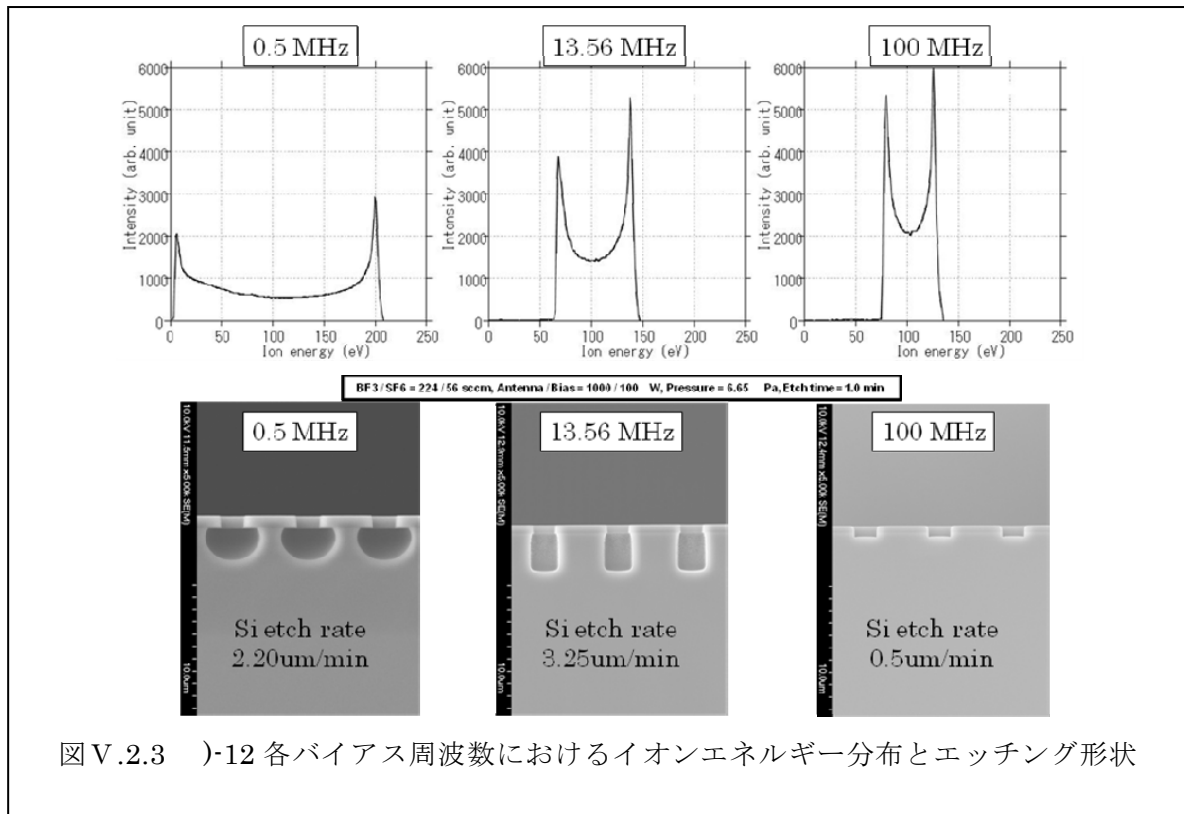


図 V.2.3)-12 各バイアス周波数におけるイオンエネルギー分布とエッチング形状

一方、ラジカル曝露下でイオンエネルギーを与えるとエッチング速度が数倍以上に増加するイオン誘発エッチングの機構も有する為、高密度なフッ素ラジカル生成も重要ではあるが、イオン制御もエッチング性能向上には不可欠な知見と考えられる。本研究では、エッチング性能向上検討のもう一つの検証として、イオン、ラジカルとの相関関係の調査を目的に、イオンの入射エネルギー分布(IED : Ion Energy Distribution)とエッチング性能に着目した。IEDは印加バイアス周波数で制御可能である。図 V.2.3)-12 は各種バイアス周波数における一般的なIEDを示す。バイアス周波数が高い程、入射エネルギーは単色化し、低周波ほど 2 局在化いわゆるバイモダル(bimodal)なピーク波形を得る。エッチング機構としては低周波バイアスでは高エネルギーイオンが寄与し、高周波程バイアスでは低エネルギーイオン主体のエッチング機構がとなることを予測される。実験は 0.5MHz電源及び 100MHz電源を準備し、中心条件のバイアス周波数である 13.56MHzとの比較を行った。実験条件は、13.56MHzで得た条件(BF₃(80%) + SF₆(20%)混合プロセス、圧力 = 6.67 Paにてアンテナ/バイアスパワー = 1000/100W)とした。同図 V.2.3)-12 中

に各バイアス周波数でのエッチング結果SEM写真を示す。中心条件である 13.56MHzでは異方性形状を得ているが、低周波では等方性形状を得た。一方、高周波バイアス(100MHz)ではシリコンはほとんどエッチングされなかった。一方、低周波バイアス場合、等方エッチング形状となった。以上の結果からバイアス周波数は 13.56MHzが良いと結論を得た。また、気相で生成したプラズマから基板に反応種を引き込む過程で、最適なバイアス周波数が存在し、Siエッチングの性能向上にはこれらパラメータ制御も重要であることを示唆する結果を得た。

また、低環境負荷エッチング技術の動向調査と代替ガスおよびエッチング効率化に関する情報収集のため、IMAPS2010, 43rd International Symposium on Microelectronics と AVS 57th International Symposium & Exhibition (AVS2010)に参加した。その結果、我々が検討している代替ガスと同じガスでの研究実績はなく、また TSV のアスペクト比が向上するにしたがってエッチレートが低下しコストアップにつながることから、本プロジェクトで検討した代替ガスは新規であり、代替ガスに求められることとしてエッチレート低下を最小限にする必要があることが確認された。したがって、本研究成果は、環境負荷低減の目的のみならず、ユーザ側のニーズにも合致する成果であると考えられる。

5. まとめ

SF_6 ガスの代替ガスとして、エッチング性能および取り扱いのしやすさを基準に机上検討の結果、 F_2 と BF_3 を選定した。しかし、 F_2 については反応性の高さから 100%純度の F_2 はボンベでの取り扱いはなく、オンサイトでフッ素生成装置による供給のみとなることから、年間という短期間で検証可能な実験として、ボンベで購入可能な Ar 希釈 20 % F_2 と BF_3 について検証を実施した。

その結果、Ar 希釈 20 % F_2 は、同じ希釈率の Ar 希釈 20 % SF_6 に比べ著しくエッチレートが遅い結果となった。一方、 BF_3 単体ではエッチングは起こらずデポ性のガスとして寄与するが、 SF_6 との混合ではエッチレートの低下は起きるものの、($\text{BF}_3(80\%) + \text{SF}_6(20\%)$)混合において3割の低下にとどまる。

よって、NLD を用いた非 Bosch プロセスにおける温暖化ガス削減率は、69%の削減見込み(計算値)を得た。また、($\text{BF}_3(80\%) + \text{SF}_6(20\%)$)混合ガスのコスト試算では、現在の価格で算出すると SF_6/O_2 プロセスの約 4 倍という結果を得た。今後、ガスの需要の増加により、コスト低減を図ることは可能と考えられる。

F_2 については、100%純度 F_2 での検討が出来ず、希釈率の大きい条件での結果のため、100%純度 F_2 における検証は今後の課題である。しかしながら、仮に 100%純度 F_2 での性能がよい結果となったとしても、①オンサイトでフッ素生成装置の設置、②既存チャンバーの耐腐食性対応、③ランニングコストの上昇等がコストアップ要因になることは明らかである。したがって、費用対効果の点からみると、上記③ランニングコストの上昇分のみで対応可能な $\text{BF}_3 + \text{SF}_6$ 混合ガスの方がメリットが高いと考えられる。

)リアルタイムモニタリングによるエッチングの高効率化

1. プロセスモニタリング手法の必要性

温暖化ガスの排出量を削減するにはガス代替のほかに、エッチングプロセスそのもの高効率化、すなわちエッチングの高速化の1つの手段である。単純なエッチレート向上策としては、プロセス設定条件での最適化（ガス圧増加、RFパワー増加等）が従来から知られている。しかし、これら方法ではエッチレートは向上するが、エッチングの異方性（深さ方向エッチレート／幅方向エッチレート）は低下する。例えば圧力を増加させると、エッチング種の密度は増加するものの、同時に平均自由行程は短くなってイオンシース内で入射イオンが散乱される確率が高まることが広く知られている。結果として入射イオンの角度分布が広がり、幅方向へのエッチングが相対的に促進されるためである。これでは今後さらにニーズが高まるエッチングの高精度化に対応することはできない。

そこで本テーマではエッチングの高速化と高精度化を同時に達成するため、プロセス制御の高度化を目指す。具体的にはプロセス時のリアルタイムモニタリング手法を確立し、それを活用してフィードバック制御することを検討する。モニタリング手法としては、プロセスに対する非干渉性と簡便性から発光分光計測（OES）を選択する。

計測対象としては、本テーマではプラズマ源として ICP（誘導結合プラズマ）の他、NLD（磁気中性線放電）を扱い、プロセス方式としてボッシュ法と非ボッシュ法を扱うため表1に示すように4つのケースが考えられる。

(表1)

	ICP	NLD
ボッシュ法	①	②
非ボッシュ法	③	④

このうちプロセス方式の比較では、非ボッシュ法では連続的、静的な放電であり、プロセス進行とプラズマ状態の変動はほとんど関連がない。唯一基板上でエッチング領域の断面アスペクト比（エッチング深さ／開口幅）のみ徐々に大きくなっていくが、この幾何学的な変化がプラズマに影響を与えてOES上で検出できるとは考えにくい。一方、ボッシュ法は元来保護膜堆積とエッチングを交互に繰り返すという点で時々刻々とプロセスが進行し、プラズマ状態の推移をOESを通して検出しやすく、リアルタイムモニタリングとそれを用いたフィードバック制御を活かすことができるプロセスといえる。

一方、プラズマ源の比較ではNLDはICPと同等以上の高密度プラズマ生成が可能と報告[1]されているが、OESを実施する際の観測窓位置についてはICP方式の方が若干自由度が高く、空間的な分布まで観測するにはICP方式の方が有利と考えられる。つまり時間的、空間的分解能の高いOESによるモニタリング手法を確立するために、対象をICP方式のボッシュ法に絞り込んだ。

ただし、ボッシュ法では通常数秒単位で保護膜堆積とエッチングのステップを繰り返

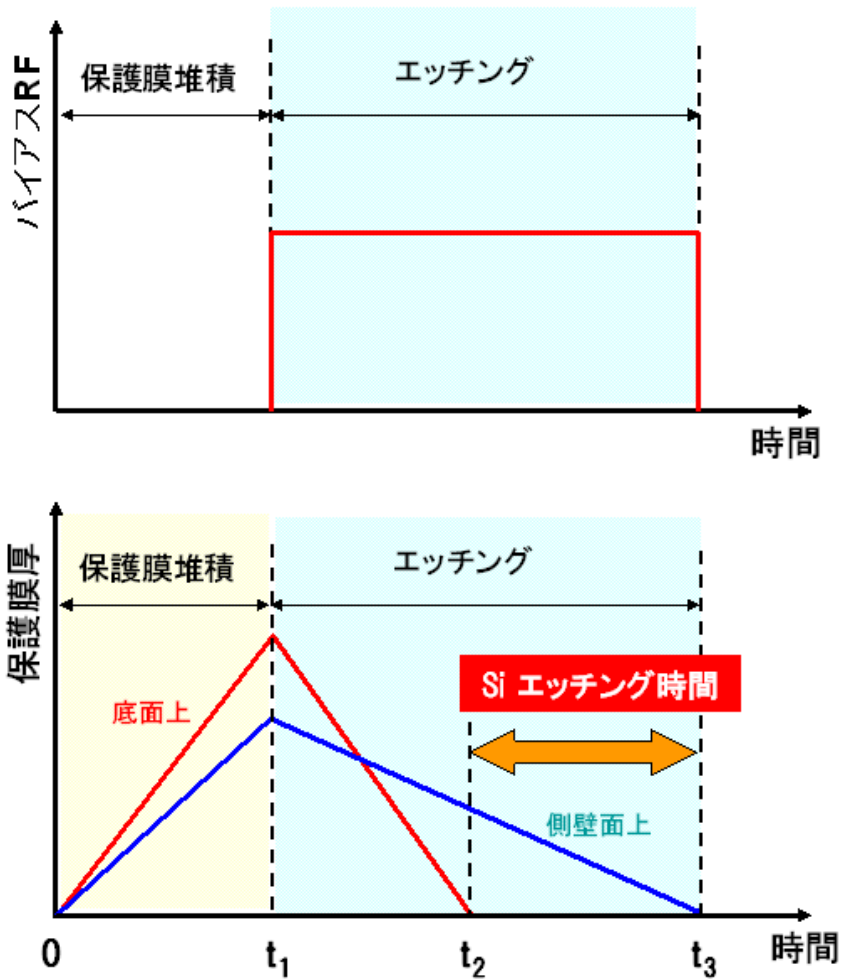
すため、リアルタイムでこの変化を十分捉えることのできるサンプリング周波数が必要である。そこで本テーマでは 10Hz 以上のサンプリング周波数を持つモニタリング手法を確立することとした。

2. モニタリング手法とフィードバック制御によるプロセス高速化

2-1.現状のボッシュ法における課題

まずプロセス高速化に対して、現状のボッシュ法の課題を考える。このプロセスは保護膜堆積とエッチングを数秒単位で交互に切り替えるプロセスとして知られている。図 1 に保護膜厚をパラメータとしたプロセス進行の様子を示す。保護膜堆積ステップ時に保護膜はトレンチ内壁面に堆積する。エッチングステップに切り替わると、初期に底面上の保護膜が除去された後に Si エッチングがスタートする。その後側壁面上の保護膜も入射イオン等の影響を受けて除去されるため、エッチングステップを終了して保護膜堆積ステップに戻ることになる。

ここで直接的な対象である Si をエッチングしている時間割合を概算で見積もる。保護膜堆積ステップとエッチングステップの時間が同等であり、エッチングステップの初期 1/3 程度の時間が底面保護膜の除去に費やされると仮定すると、1 サイクルにおける Si エッチング時間の割合は 1/3 程度ということになる。無論、この割合はプロセス条件の設定によっても前後するが、保護膜堆積とエッチングを同時に進める他のプロセス[2]と比べて効率が低い。つまり、ボッシュ法は精密な形状を実現することと引き換えにエッチングレートは低くならざるを得ないプロセスといえる。

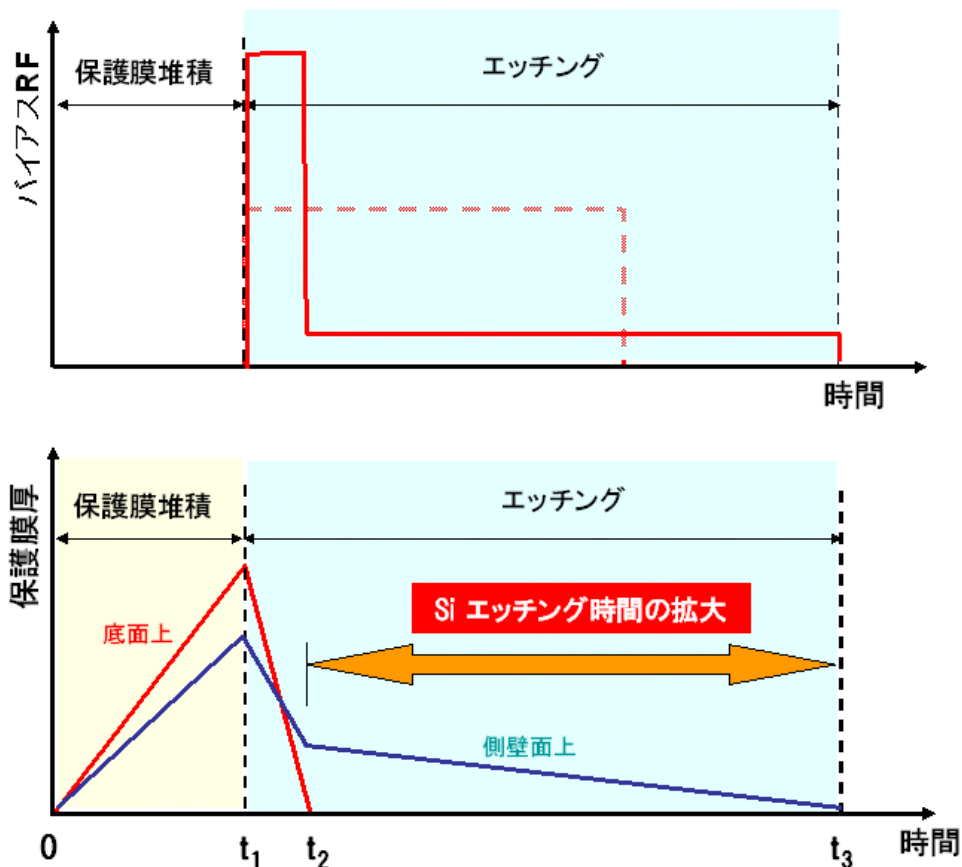


(図1)

2-2.課題解決の切り口と従来技術との相違

本プロジェクトでは、先述したボッシュ法におけるプロセス高速化の課題を解決するべく図2に示す手法を提案する。

プロセス全体に占める Si エッチング時間の割合を増加させるため、バイアス RF 値を2段階に制御する。つまりエッチング初期に底面上に形成された保護膜を除去する段階では高いバイアス RF 値を設定してこれを短時間で除去し、それ以降の Si エッチング時にはバイアス RF 値を低下させる。Si は F と強い反応性を持つことからこの段階では高いバイアス RF 値は必要ではない。他方、バイアス RF 値を下げることで入射イオンのスパッタ効果を抑制できるため側壁面上の保護膜が除去されるまでの時間を延ばすことができる。これは断面形状の変形を抑えながら Si エッチング時間の割合を増やせることを意味する。



(図2)

つまり、エッチングステップ期間内において底面上、側壁面上の保護膜消滅タイミングを基準としてバイアスRF値のHigh値からLow値への切替、エッチングステップから保護膜堆積ステップへの切替を行えば、トレンチ断面形状の劣化（幅の広がり）を抑えながらエッチングレートを向上できると考えられる。

エッチングステップ期間内でバイアスRFをHigh値からLow値に切替える手法はすでに装置メーカーから公開、市販されている。しかしながら、この方法は切替タイミングをプロセス前に予め設定するものであり、実際のプロセス進行とは無関係に決めることになる。このため、例えばHigh値の時間を底面保護膜除去に要する実際の時間よりも長く設定した場合、側壁面上の保護膜は必要以上に長い時間、高いスパッタ作用を受けてより短時間で消滅するため、トレンチ幅の増大等、断面形状の劣化を招く。今回提案する手法はプロセス進行に伴う底面上、側壁面上の保護膜消滅タイミングを正確に検出するリアルタイムモニタリング手法を確立することで、プロセス条件切替タイミングにフィードバックし、断面形状の劣化を抑えたままエッチングレートを向上させることを狙っている。

2-3.モニタリング手法の着想

次に必要とされるリアルタイムモニタリング手法について検討する。本プロジェクト

では先述したようにプロセスに干渉しないという点で OES（発光分光計測）を選択しているが、ここでは OES で保護膜除去タイミングを検出するための方策を考える。

保護膜が除去されると、表面に Si が露出して（1）式に示すように F とのエッチング反応が始まる。

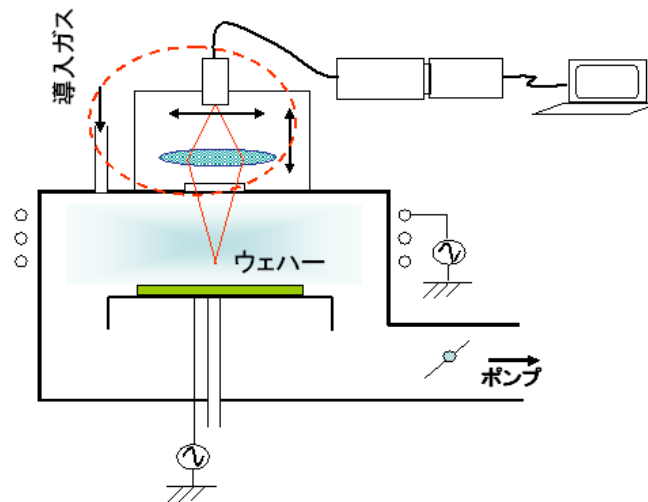


プラズマ中の F ラジカル濃度は生成と消滅・消費のバランスで決定するため、エッチング反応が開始して消費量が増えると濃度が下がる。従って F ラジカルの発光に着目すれば、底面上、側壁面上の保護膜が消滅した後は発光強度が低下するはずである。他方、（1）式に示されるように反応生成物 SiF_4 が発生するが、この一部はプラズマ中で再度解離して SiF_x ($x=1\sim3$) が生成する。こちらは Si とのエッチング反応が開始した後は発光強度が増加すると考えられる。

つまり、F ラジカル、 SiF_x ラジカルの発光強度変化に着目すれば保護膜消滅タイミングを検出できるはずであり、ボッシュ法におけるプロセス進行を把握できると考えられる。

3. OES によるリアルタイムモニタリング技術の確立

最初に OES を用いたモニタリング実験の装置構成を図 V 示す。使用した計測器は英プリンストンインストルメンツ社製の PI-max3 であり、可視光帯域の光を波長 $< 1\text{nm}$ で計測可能である。また時間分解能においても 10Hz 以上でのサンプリングが可能であり、当初想定していた仕様を満たすことができる（表 2）。



(図3)

計測すべきエッチングチャンバー内のプラズマ発光は、観測窓の外側に設置した集光レンズを通して集められて光ファイバーに導かれ、分光器、そして検出器に導入される。従って、チャンバー内空間の平均したプラズマ発光だけでなく、チャンバー空間内の特定の計測箇所からの発光をレンズを通して集光可能である。この計測箇所は水平、垂直方向に 10cm 程度移動可能である。

(表2)

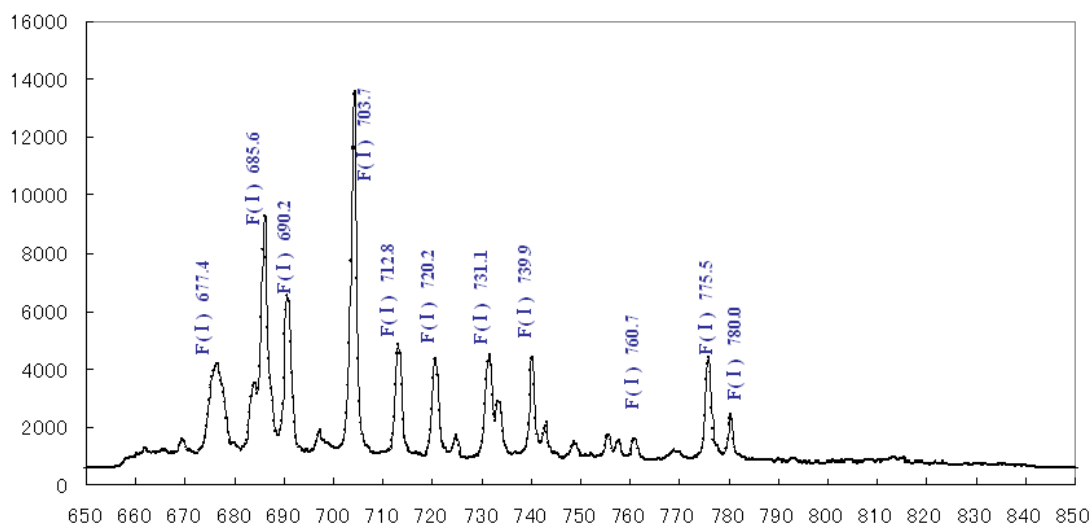
計測波長範囲	200~900nm
同時計測可能波長範囲	180nm
計測波長分解能	1nm<
計測時間分解能	100ms<

検出器を通して計測したデータは、リアルタイムで PC に送られて保存される。モニタリング技術が確立すればこの信号を使ってプロセス中にフィードバック制御が可能である。図4に実際にエッチング装置チャンバー周囲に設置した発光分光計測器の外観写真を示す。



(図4)

次にチャンバー内にベア Si ウェハを設置して、エッチングステップと同じプロセス条件の SF₆ プラズマを生成した。このときの発光スペクトルの計測例を図5に示す。

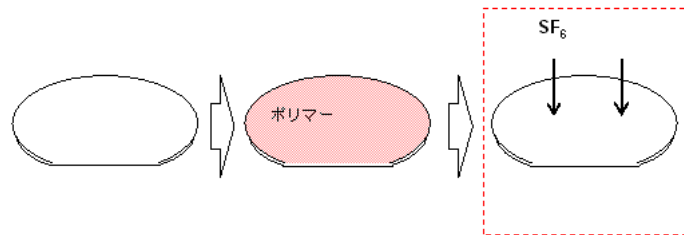


(図5)

600~800nm の波長範囲で比較的強い F ラジカルピークが 10 本以上計測できた。これら

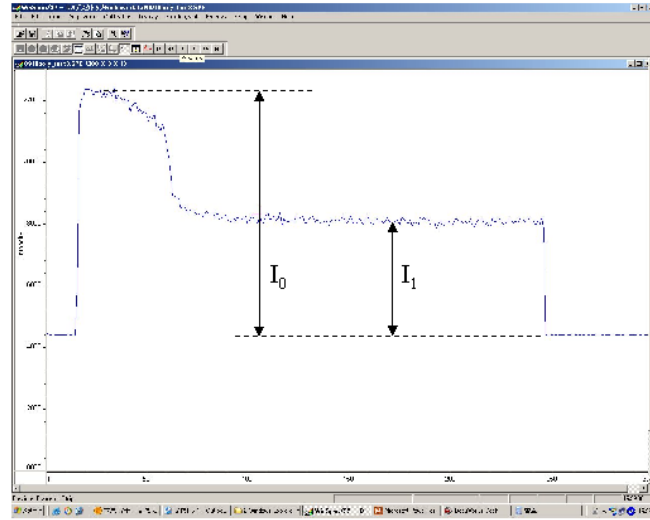
の中からプロセスモニタリングに適したピーク波長を選択することが次の課題となる。
波長選択のための実験を図 6 に示す手順で行った。

- (1) チャンバー内にベアウェハを設置。
- (2) 自然酸化膜を除去後、保護膜堆積ステップを実施してウェハ全面に保護膜を形成。
- (3) エッチングステップを実施することで、保護膜を除去したあと Si エッチングまで行う。この間、各 F ラジカル発光ピークの時間変化を計測する。

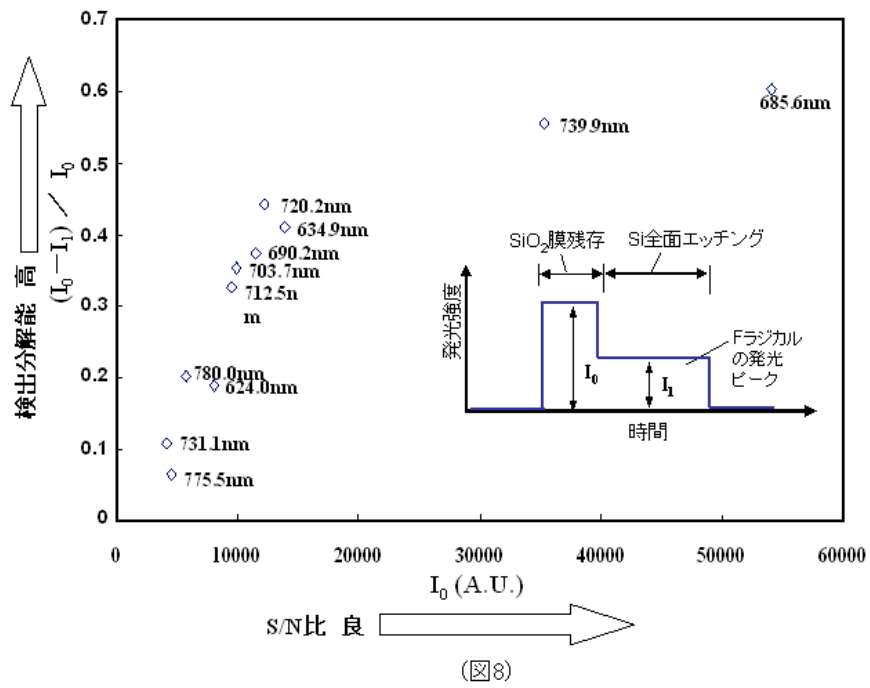


(図6)

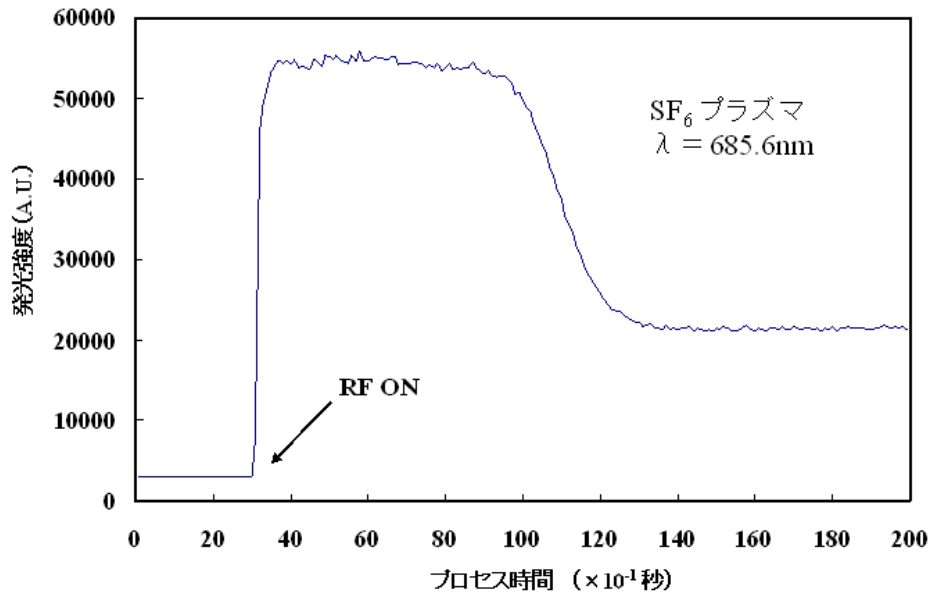
計測結果の一例を図 7 に示す。エッチングステップ開始初期はウェハ全面が保護膜で覆われているため F の消費はなく、発光強度は一定のレベル ($I=I_0$) を示すが、保護膜が除去されて Si 面が露出し、エッチング反応が開始することで $I=I_1$ のレベルまで低下する。これは前節で考察した予想通りである。ただしより高い検出感度を得るためには相対変化率 $I = (I_0 - I_1) / I_0$ がより高い波長の選択が必要になる。また S/N 比の観点から I_0 の絶対値が大きいことも必要である。各波長ピークに対してこれらの指標から計測結果を比較した結果を図 8 に示す。この図において右上ほどモニタリングに適した波長ということになり、この結果から $\lambda = 685.6\text{nm}$ の波長を選択した。この波長は図 5 の元波形で見るとピーク高さでは 2 番目であるが、半値幅も含めて考えると絶対強度、変化率とも最も大きな波長であることが分かった。この波長とその他の波長を比較すると、この波長での計測が S/N 比、感度とも高いものであることが分かる (図 9)。



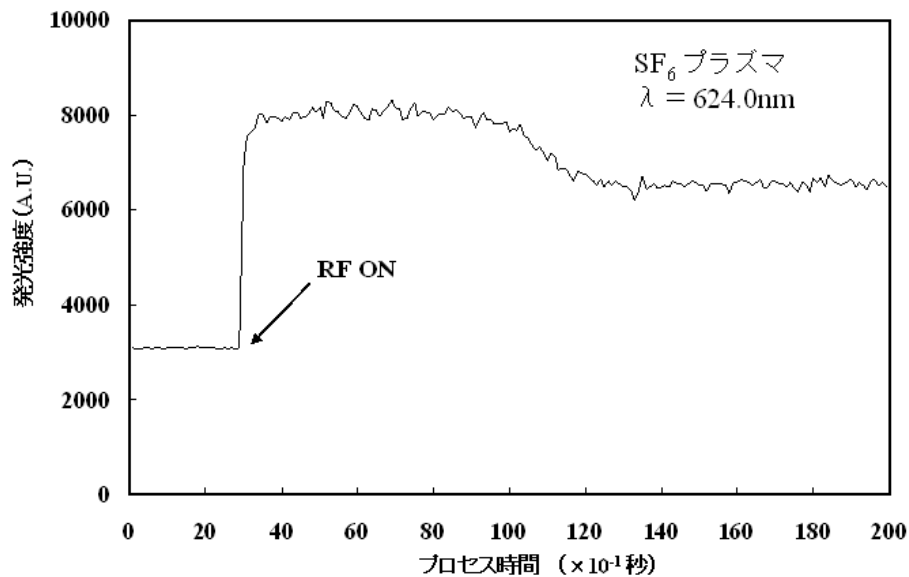
(図7)



(図8)



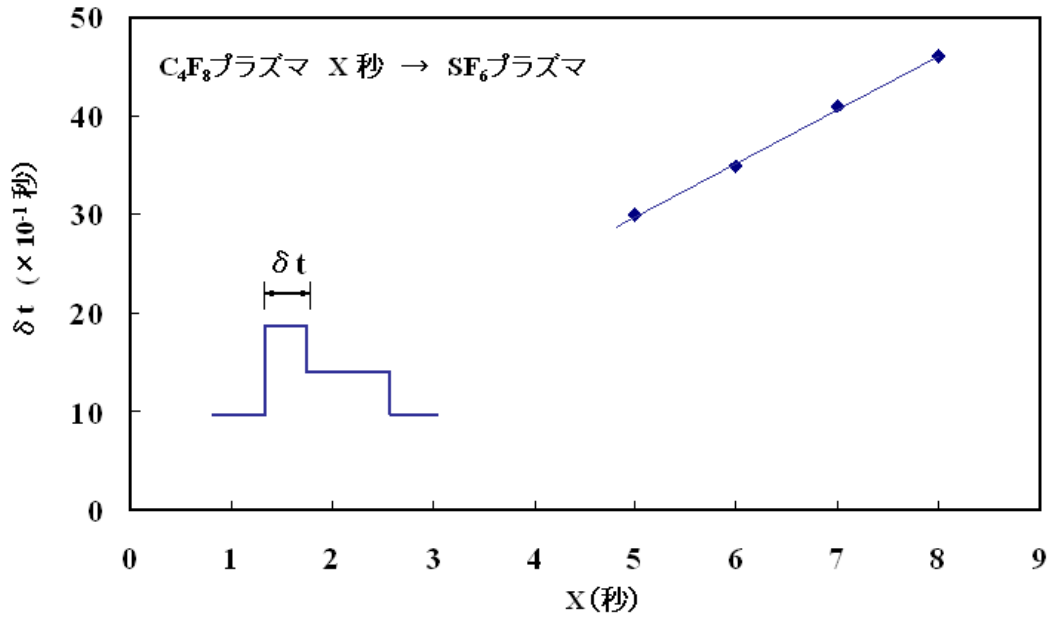
(a)



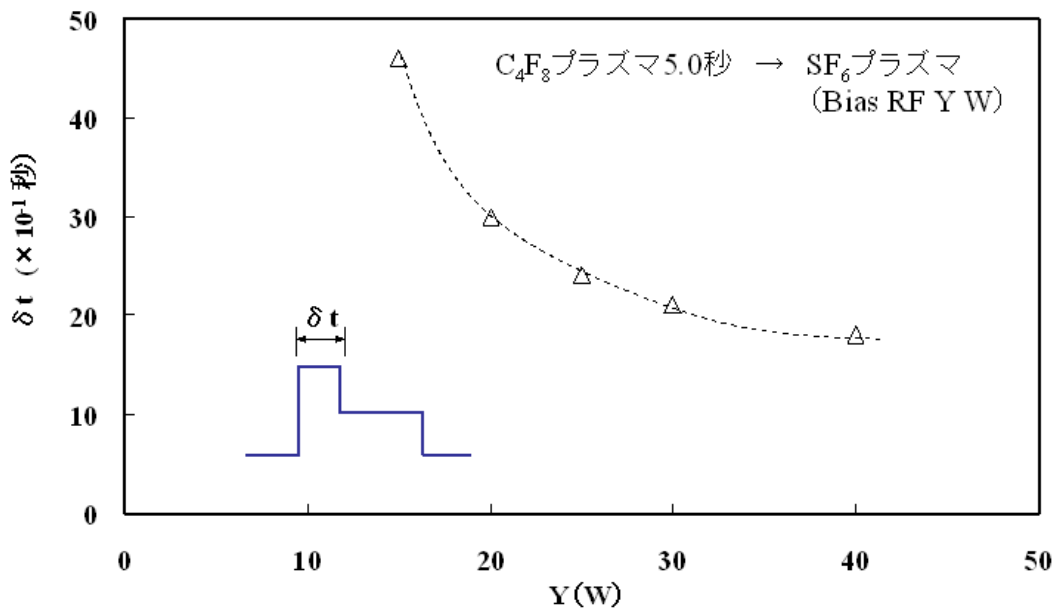
(b)

(図9)

ベアウェハでの計測時、発光強度 I_0 から I_1 に低下するまでの時間 T を (2) の保護膜堆積ステップ時間をパラメータとして計測すると図 10(a)に示す結果を得る。堆積ステップ時間と膜厚が比例するため、 T も比例的な関係になると考えられる。つまり T が保護膜除去までの時間を表すと考えられる。一方、(3) のエッチングステップでのバイアス RF 値をパラメータとして計測すると図 10(b)に示す結果を得る。この結果からバイアス RF 値が高くなるにつれて T は短縮することが分かる。これは入射イオンエネルギーが増して保護膜除去レートが高まったためと考えられる。つまり、底面上の保護膜をより短時間で除去するためには、エッチングの初期のみ高バイアス値を印加することが有効であると裏付けられた。



(a)



(b)

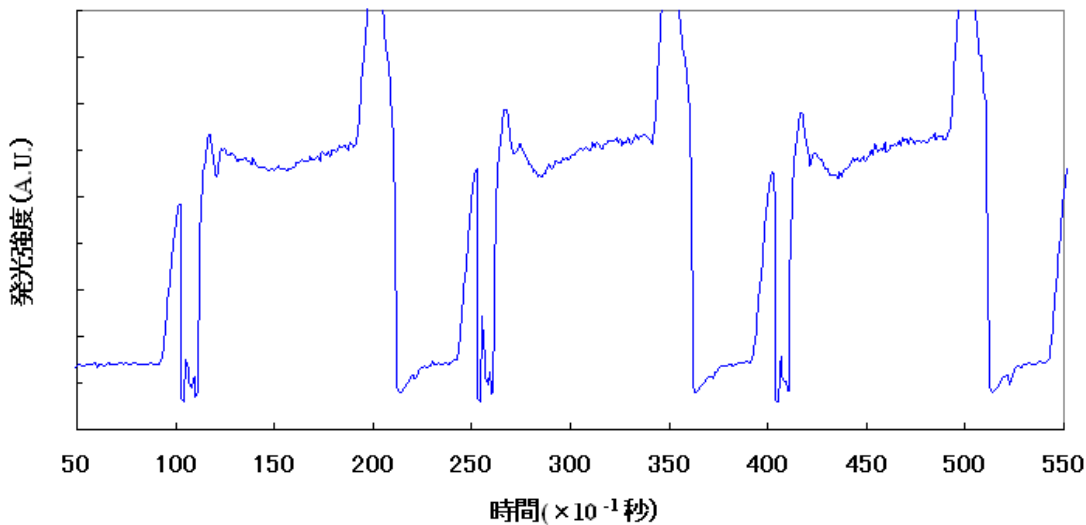
(図10)

次にパターン付ウェハに対して通常のボッシュ法でエッチング処理を行い、同様に $=685.6\text{nm}$ での発光強度変化を計測した。その結果を図 11 に示す。ここではパターン自体が計測結果に及ぼす影響を単純化するために、 $1\ \mu\text{m}$ 幅の周期的なトレンチパターンのみがパターンニングされた開口率 20% のウェハを用いた。ベアウェハでの計測結果 (図 9) とは次の 2 点で異なっている。

- (1) 波形変化が連続的であり、ステップの切替タイミングの前後でノイズ的な強度変化が重畳している。

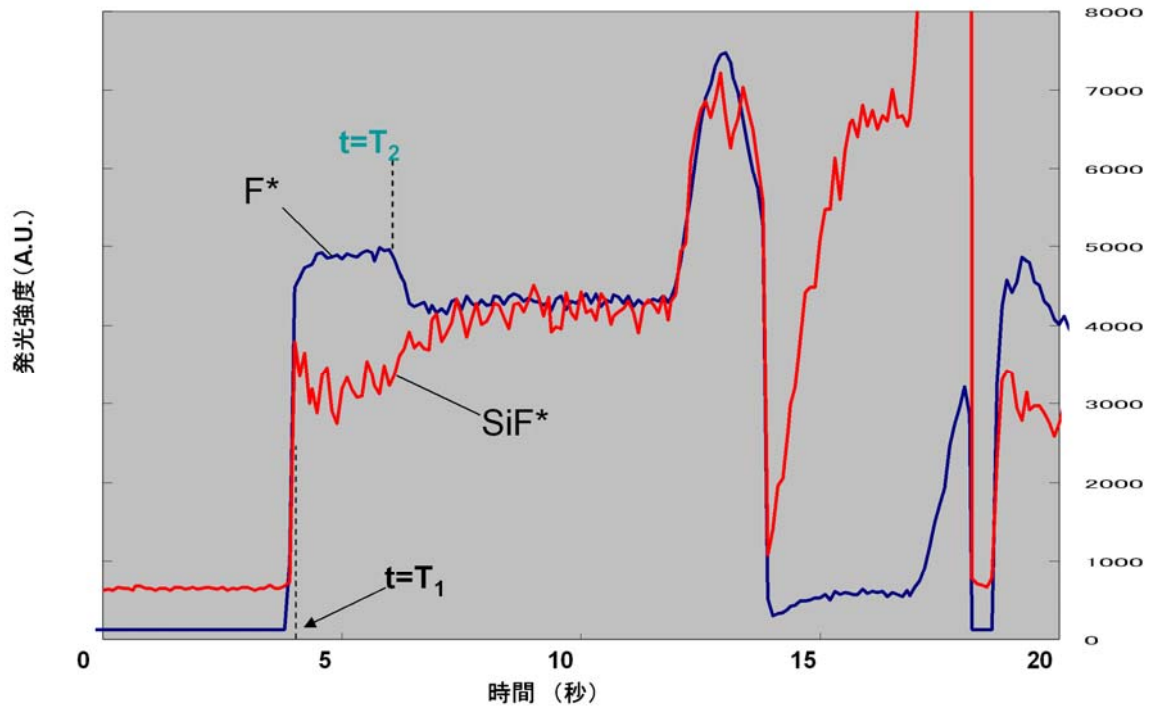
(2) 底面保護膜除去に伴う強度変化 (I) が小さい。

(1) は実際のボッシュ法がステップの切替タイミングの直前から次のプロセスガスがオーバーフローを始め、置換に一定の時間を要することに起因する。つまり切替タイミングの前後で導入ガス、圧力等が変動する過渡状態が存在するため、これに関連してプラズマ発光強度が過渡的に変動することによると考えられる。(2) についてはベアウェハのケースでの開口率変化 (0% 100%) と異なり、パターン付ウェハで底面保護膜が除去されたことによる開口率変化は 0%からパターン開口率 (この場合は 20%) であり、その分 F 消費量の増加幅が小さいことによる。(1) の切替タイミングに伴うノイズについては、過渡状態をなくすためのプロセス面での工夫を加えて再度発光強度変化を計測した。



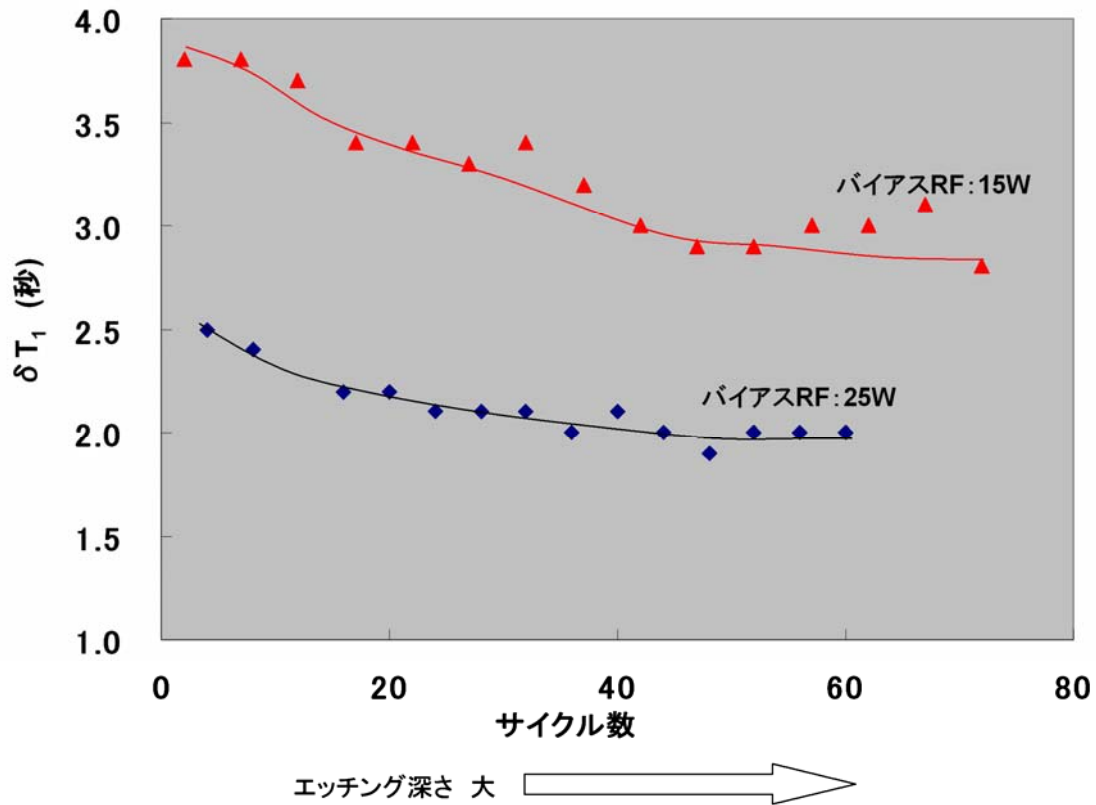
(図11)

その結果を図 12 に示す。図 11 との比較からも分かるように過渡状態に伴うノイズを抑制することができ、Fラジカルピークの発光強度低下を検出できている。また、SiFラジカル ($\lambda = 777.0\text{nm}$) の発光強度増加も同時に検出できている。つまり予想通り (1) 式の反応に伴う発光強度の変化を検出できることが確認できた。これらの結果からこの時点が底面保護膜消滅のタイミング ($T=t_2$) であると考えられる。両者を比較すると SiFラジカルの方がノイズが大きい。一方、エッチングが進行してトレンチが深くなった場合に Fラジカルの強度変化は徐々に小さくなっていくのに対し、SiFラジカルの強度変化はあまり変化がない。こうした特徴を踏まえ、実際にモニタリングに用いる際はどちらかの波形、もしくは両方の波形の差分、比を用いればより明確に検出できると考えられる。



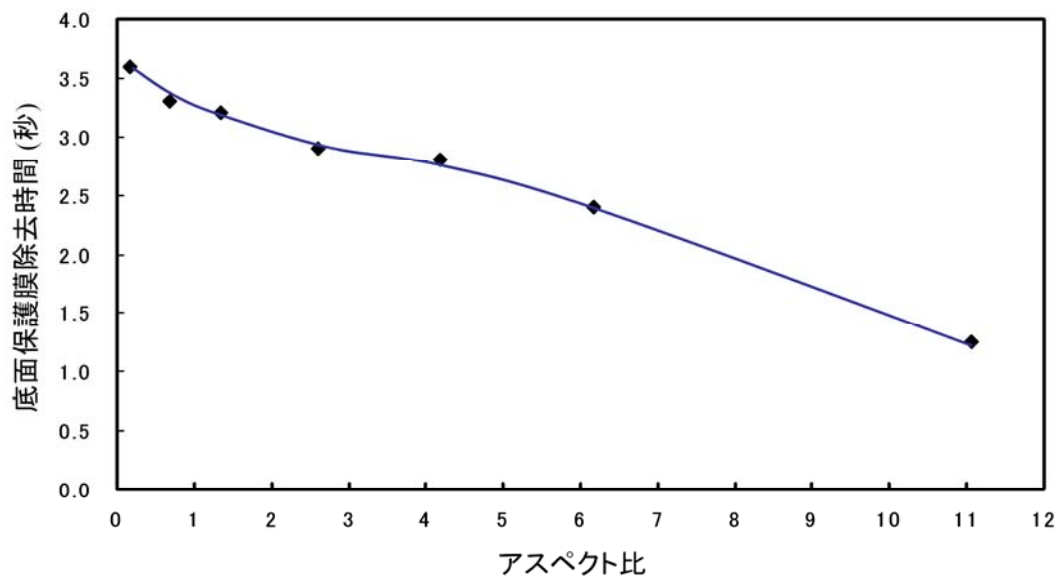
(図12)

エッチングステップ開始から底面保護膜が除去されるまでの時間 $T_1 (= t_2 - t_1)$ をエッチングの進行 (ステップ数) とバイアス RF 値をパラメータとして計測した結果を図 13 に示す。この結果からエッチングの進行と共に保護膜の残存時間: T_1 は短くなっていくことがわかる。これはトレンチが深くなるにつれて底面上に形成される保護膜厚は薄くなるのに対し、底面にほぼ垂直方向から入射するイオン密度には大きな変化はなく除去レートがほぼ一定であるためと考えられる。



(図13)

参考までに実際の各アスペクト比におけるエッチング結果とプロセス時間の関係から、断面アスペクト比とその時点での底面保護膜除去時間との関係を算出したグラフを図14に示す[3]。プロセス条件に若干の相違があるので単純な比較はできないが、この結果からもアスペクト比が増加するにつれて保護膜除去時間が短縮する傾向があり、今回のモニタリング結果の妥当性を示すデータといえる。



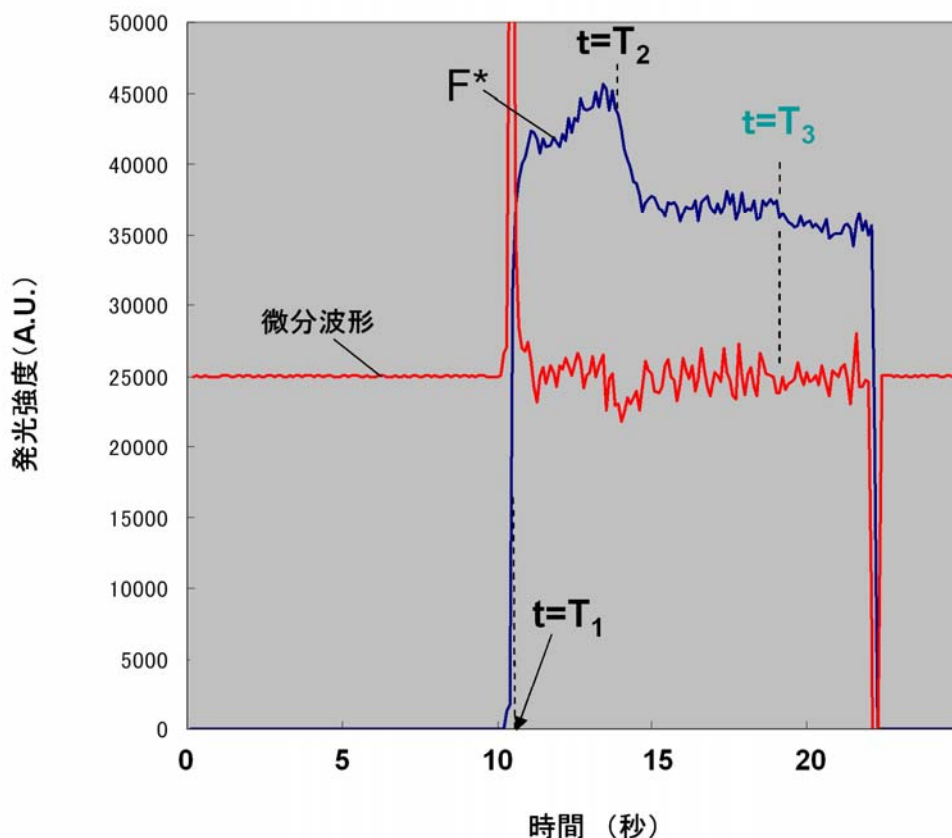
(図14)

一方、側壁保護膜の消滅タイミング ($T=t_3$) は t_2 ほど明瞭には検出できなかった。原理的には側壁保護膜についても消滅の前後で発光強度変化が見られるはずである。プロセス開始から3～4サイクル目までは t_2 と同様、F ラジカルのわずかな強度低下のタイミングが検出できた (図 15)。しかし SiF ラジカルの発光強度変化はノイズが大きく検出できなかった。また4サイクル目以降では F ラジカルの発光強度変化も見られなくなった。これは、

- (1) 入射イオンが多少斜め方向から側壁面に衝突したとしてもスパッタ効果が小さいため、完全除去のタイミングが底面ほど明確でない。
- (2) 特にトレンチが深くなるほど、内部には F ラジカルが滞留気味になり、反応生成物 (SiF_x) との置換に時間を要するようになる。

という2つの理由によると考える。しかしながら検出した $T_2 (=t_3-t_1)$ はほぼ妥当な値と考えられる。なぜなら1回あたりのエッチングステップ時間をこれよりも長く設定したプロセス条件では、トレンチ幅は徐々に拡大していくためである。

プロセスが進行してトレンチが深くなっていった場合、 T_2 も T_1 と同様に徐々に短縮すると考えられる。しかしながら今回のモニタリング手法ではこの傾向を精度良く検出することができないため、プロセス開始初期に計測した T_2 を代表値としてフィードバック制御に反映することとする。今後、 T_2 検出の高感度化が課題である。

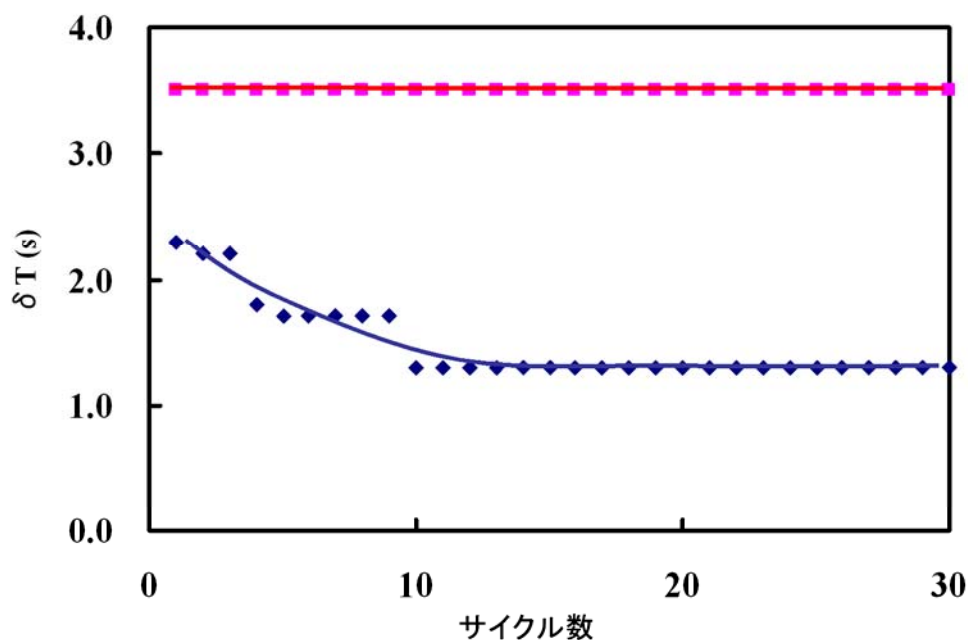


(図15)

4. モニタリング結果を用いた模擬フィードバック制御エッチング

最後に、今回得られたモニタリング結果を用いてプロセス条件にフィードバック制御をかけた場合に、エッチング結果に及ぼす効果を検証した。今回の装置構成では実際にフィードバック制御を行うことはできなかつたため、予めモニタリング結果から求めた t_2 を用いて1サイクル毎にバイアス RF 値の切替タイミングを、 t_3 からエッチングステップ時間を設定して模擬的なフィードバック制御状態を設定してエッチング結果を調べた。参考のために従来からあるバイアス RF の 2 値制御、つまりモニタリング結果を用いずに、バイアス RF 値の切替タイミングとエッチングステップ時間を予め設定した場合(ケース1)と、通常のボッシュ法のプロセス条件(ケース2)で同一時間のエッチングを行い、3つのケースにおいてエッチングレートと断面形状を比較した。

模擬フィードバック制御と、ケース1の場合におけるバイアス切替タイミングの相違を図16に示す。模擬フィードバック制御時にはモニタリング結果に合わせてステップ数と共に徐々に切替タイミングを短縮しているのに対し、ケース1では3.5sに固定している。エッチングステップ時間はどちらのケースでも12.6s/回に統一している。また両ケースともエッチングステップ時のバイアス RF の High 値、Low 値はそれぞれ36W,5Wに統一している。つまり両者の違いはバイアス RF 値の切替タイミングをプロセス進行の実情に合わせて徐々に変化させていくか、予め設定した値で固定するかの違いのみである。なお、ケース2の通常のボッシュ法ではエッチングステップ内でバイアス RF 値は一定である。3つのケースにおけるプロセスパラメータの比較を表にまとめる。



(図16)

(表3)


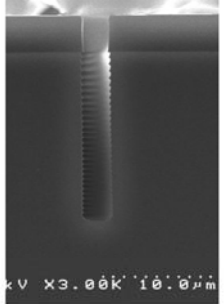
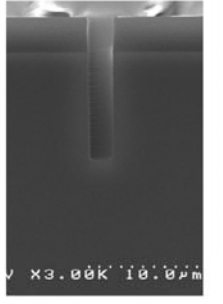
	模擬フィードバック	ケース1	ケース2
保護膜堆積ステップ時間	5.0 秒		
エッチングステップ時間	12.6秒		7.0秒
バイアス切替	Hbias 2.3~1.3秒 Lbias 10.3~11.3秒	Hbias 3.5秒 Lbias 9.1秒	—
SF ₆ 流量	170sccm		
C ₄ F ₈ 流量	120sccm		
プラズマ生成RF	600W		
バイアスRF	Hbias 36W Lbias 5W		23W
サイクル数	30		44
プロセス時間	528秒		

エッチング結果の比較を図 17 に示す。模擬フィードバック制御を行った場合は、通常のボッシュ法でのエッチング結果に比べて 1.8 倍程度エッチレートが向上した。切替タイミングを固定した場合（ケース1）に比べてもエッチレートが向上している。さらにエッチングの異方性で比較しても、ケース1では通常のボッシュ法（ケース2）に比べて低下しているのに対し、模擬フィードバック制御時にはこれらよりも向上する結果が得られた。これは模擬フィードバック制御時にはプロセス進行に合わせたバイアスRF 値の切替で、エッチングステップ期間中ほぼ側壁面上に保護膜が残存できているのに対し、ケース1ではバイアスRFのHigh値の設定時間が実際よりも長すぎるため、側壁面上の保護膜が消滅が早まり、ステップの終盤で側壁表面にSiが露出してエッチングされるためだと考えられる。

つまり、今回確立したモニタリング手法とそれを用いたフィードバック制御を用いれば、エッチング異方性を維持、もしくは向上させつつエッチレートも向上させることが可能になる。これは従来のエッチレート向上手法では不可能であったことであり、今回開発したプロセスモニタリング手法の意義は大きいといえる。

なおこのプロセス高速化を、温暖化ガスの排出量という観点から換算すると、同一の深さまでエッチングする際の温暖化ガス排出量はプロセス時間短縮によって45%程度低減することになる。

今回の結果は、模擬的なフィードバック制御の効果を見積もったものであり、実際にエッチング装置にフィードバック機構を追加して、モニタリング用の発光分光器からの計測結果をリアルタイムに反映させれば、さらに効果が向上すると考えられる。

	模擬フィードバック制御 (切替タイミング可変)	ケース1 (切替タイミング固定)	ケース2 (通常のボッシュ法)
設定条件	(depo5s/Etch@Hbias2.3 ~1.3s+Lbias10.3~11.3s) ×30cycle	(depo5s/Etch@ Hbias3.5s+Lbias9.1s) ×30cycle	(depo5s/Etch7s) ×44cycle
	Hbias=36W, Lbias=5W		bias=23W
プロセス時間	528秒		
			
エッチレート	2.06 μm/min.	1.77 μm/min.	1.14 μm/min.
上部/底部(μm)	2.30/2.15	2.44/2.59	2.22/2.15
エッチング異方性	60.3	26.4	45.5

(図17)

5. まとめ

本プロジェクトでは、温暖化ガス排出量の削減を目指してSi深堀エッチングプロセスの高速化に取り組んだ。着眼点としてはボッシュ法に対してプロセス進行状況のリアルタイムモニタリング手法を確立し、その信号をプロセスにフィードバック制御することで実質的なSiエッチングの時間割合を増やすというものである。モニタリング手法としては、OESをベースとしてボッシュ法に付随するガス切替等の過渡状態に留意しつつFラジカルの発光強度変化を計測することで、特徴タイミングが検出できることが分かった。このタイミングを用いてバイアスRF値、エッチングステップ時間をフィードバック制御することで、通常のボッシュ法に対してエッチングレートを1.8倍程度に向上させつつエッチング異方性も向上させることができ、当初の狙いを実際に確認することができた。今回のエッチレート向上は、温暖化ガスの削減率に換算すれば約45%であり、代替ガスと併せれば排出量の大幅な削減が期待できる。

6. 参考文献

- [1] Y.Morikawa, T. Koidesawa, T. Hayashi, K. Suu, "A Novel deep etching technology for Si and quartz materials", Thin Solid Films, Vol. 515, pp.4918-4922 (2007)
- [2] S. Aachboun and P. Ranson, "Deep anisotropic etching of silicon", J. Vac. Sci. Technol., A(17), pp.2270-2273 (1999)
- [3] J. Ohara, K. Asami, Y. Takeuchi and K. Sato, "Development of RIE-lag Reduction Technique for Si Deep Etching Using Double Protection Layer Method", IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol.5, pp.125-130 (2010)

)フィードバック制御手法を用いたエッチング最適化

1. 実施内容

技術研究組合 BEANS 研究所殿が提示する「異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト」に係る低環境負荷型深掘エッチングのためのフィードバック制御に関する以下の作業を実施した。

- ・2つ以上のプラズマ源、および2種類以上のプロセスにおいてリアルタイムモニタリングにより測定される物理量と、プロセスパラメータ（表面反応に関連するパラメータ）との対応関係やプロセスパラメータ算出手法の開発を行い、双方の関連を明らかにした上で整理した。

- ・前記項目で明らかにしたプロセスパラメータを用いて、プラズマエッチングシミュレーションを実施する。あわせて実加工形状に対するエッチングシミュレーション結果の再現性を評価した。

- ・プラズマエッチング装置の変更可なパラメータであるガス流量や出力、バイアス電圧などの装置条件と、リアルタイムモニタリングで得られる物理量との対応を明らかにした上で整理した。

- ・装置条件を用いたプラズマエッチングシミュレーションを実施し、実加工形状の再現性の評価をした。

- ・プラズマエッチングシミュレーション結果から、エッチングプロセスを最適化する条件を検討し、装置条件へとフィードバックするとともに、前述で実施する各種パラメータ・条件の対応関係整理結果とあわせてデータベースとして利用可能な情報として整理した。

- ・エッチングプロセスおよびエッチング加工形状の最適化のためのフィードバック制御技術確立のための設計指針・評価手法を開発した。

上記、実施内容の関連性を図 18に示す。

実施内容は相互に深く関連しており、同時に作業を行ったものもある。次章以降において、作業結果を報告する。

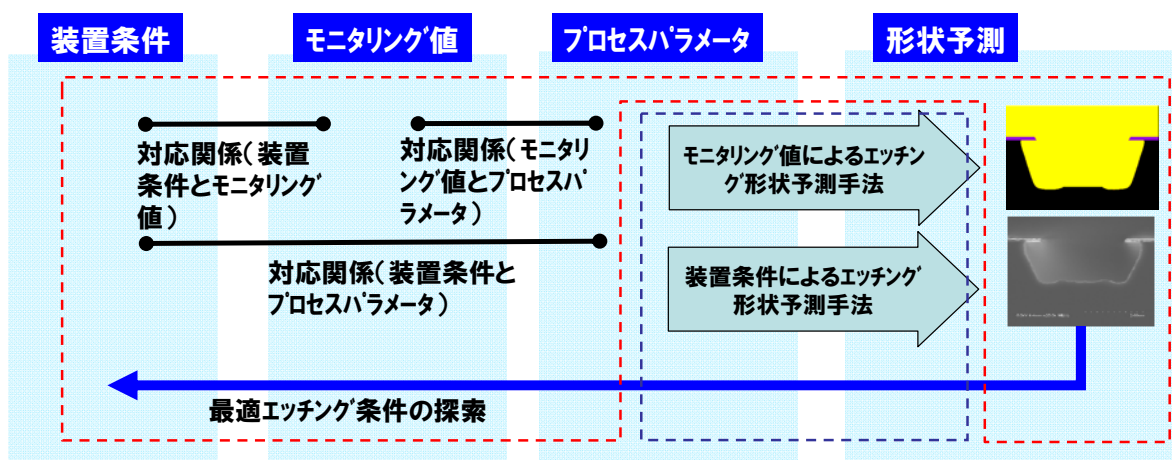


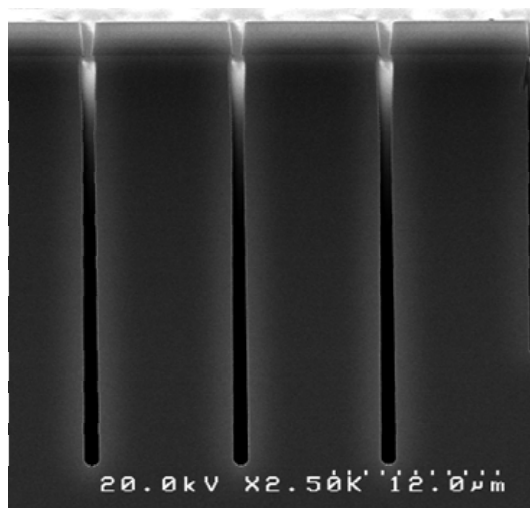
図 18 実施内容の関連性

2. リアルタイムモニタリング値および装置条件をもとにした Bosch プロセスシミュレーション手法の開発

本章では、Bosch プロセスを対象とし、実加工形状を再現可能なシミュレーション手法の開発を行う。

2-1. 対象とした実加工形状

対象としたのは、Bosch プロセスによる深掘エッチングである。Bosch プロセスシミュレーション手法を開発するにあたり、参考とした実加工形状の例を図 19 に示す。Bosch プロセスでは SF6 をプラズマ源としたエッチングプロセス、C4F8 をプラズマ源としたデポジションプロセスを交互に繰り返すことにより深掘エッチングを実現している。この例では、1 サイクルあたりのエッチングプロセス時間を 7 秒、デポジションプロセスを 7 秒、としており、トータルのプロセス時間は約 40 分である。なお、エッチング時のバイアスパワーは 36W である。



加工条件

プロセス時間:約40分
エッチングプロセス:7秒
デポジションプロセス:7秒
バイアスパワー:36W

加工結果

深さ:約30um
底面保護膜除去時間:約3秒

図 19 Bosch プロセスによる実加工形状例

この例では 30um の深掘エッチングが実現している。また、発光分光によるリアルタイムモニタリングにより、底面保護膜の除去時間が約 3 秒であることがわかっている。

シミュレーション手法の開発に当たっては、バイアスパワーを 5W、20W とした場合の実加工形状も対象とし、次項に示すパラメータの同定を行った。

2-2. プロセスパラメータの同定

プラズマエッチングシミュレーションによる加工形状予測を行うためには、シミュレーションで必要となる各種パラメータを同定する必要がある。パラメータとして代表的なものは

- ・ 化学反応に関するもの（反応素過程、反応率等）
 - ・ プラズマから照射するフラックスに関するもの（角度分布、エネルギー分布）
- がある。

本節においては、実加工形状、加工条件およびリアルタイムモニタリング結果（底面保護膜除去時間）をもとに、各種パラメータを同定する。

2-2-1. パラメータ同定のための情報

パラメータの同定に利用できる情報は以下の通りである。

- ・ 実加工形状（寸法、形状）
- ・ 加工条件（バイアス値、エッチング／デポジション時間）
- ・ リアルタイムモニタリング結果（底面保護膜除去時間）

加工条件については、ガス流量やプラズマ圧力等の変更により加工形状が変化するため重要な情報となるが、今回の実験においてはバイアス値およびエッチング／デポジション時間のみをパラメータとしていたため、これらの情報のみを利用することとした。

2-2-2. 反応素過程および反応パラメータの同定

前述の通り Bosch プロセスは SF₆ をプラズマ源としたエッチングプロセス、C₄F₈ をプラズマ源としたデポジションプロセス（保護膜形成）を交互に繰り返すことにより深掘エッチングを実現しているプロセスである。そのため、反応素過程としては、エッチングプロセスにおける反応、デポジションプロセスにおける反応、のそれぞれを定義する必要がある。本研究においては、対象とする加工形状を再現するため、表 V.2.3 iii) 1 に示す 11 の反応を定義した。

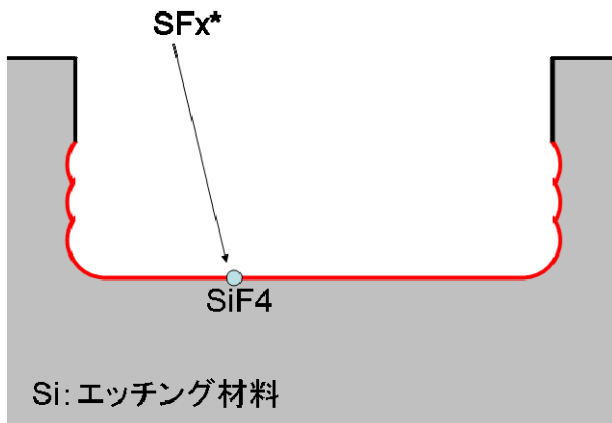
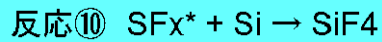
エッチングプロセスでは、イオンアシスト反応、中性粒子の吸着反応、熱励起反応の 3 つを、デポジションプロセスでは、中性粒子の吸着反応を考慮した。同表には、加工形状を再現するためにあわせこみを行った反応パラメータ（吸着率、エッチング収率、反応係数、活性化エネルギー）もあわせて示す。

なお、ここで示した反応素過程および反応パラメータは加工条件であるバイアス値やエッチング／デポジション時間には依存しないものとした。また、今回対象としている加工条件ではイオンやラジカルの照射エネルギーは大きく変化しないため、各反応パラメータはエネルギーにも依存しないものとした。

表 V.2.3 iii) 1 Bosch プロセスシミュレーションにおいて設定した反応素過程および反応パラメータ

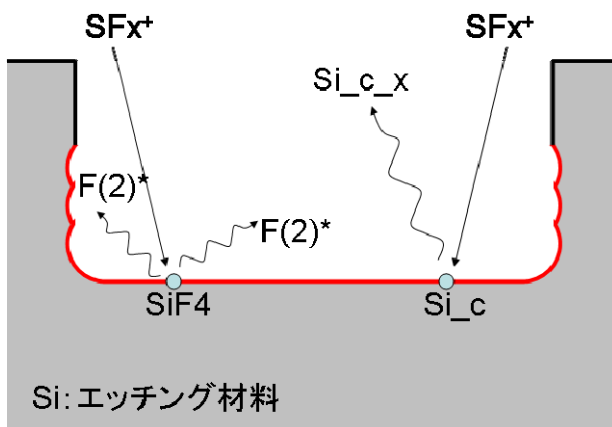
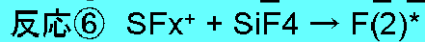
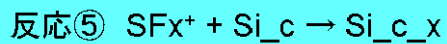
NO.	反応式	エッチング/デポ	表面反応モデル	モデルパラメータ	固定値	単位	備考
1	$CxFy^* + Si \rightarrow Si_c$	デポジションプロセスにおける反応	中性粒子の吸着過程	吸着率	0.048	[-]	・ Si 上に付着し保護膜 Si_c を形成
2	$CxFy^* + Si(2) \rightarrow Si_c$		中性粒子の吸着過程	吸着率	0.048	[-]	・ 同上
3	$CxFy^* + Si_c \rightarrow Si_c$		中性粒子の吸着過程	吸着率	0.0099	[-]	・ 同上
4	$CxFy^* + SiF4 \rightarrow Si_c$		中性粒子の吸着過程	吸着率	0.06	[-]	・ 同上
5	$SFx^* + Si_c \rightarrow Si_c_x$	エッチングプロセスにおける反応	イオン・エッチング過程	エッチング収率	1.78	[-]	・ 保護膜 Si_c のエッチング
6	$SFx^{*+} + SiF4 \rightarrow F(2)^*$		イオン・エッチング過程	エッチング収率	3.7	[-]	・ 蒸発物 SiF4 のエッチング ・ 反応生成物として F(2)*フラックスを定義
7	$F(2)^* + Si \rightarrow Si(2)$		中性粒子の吸着過程	吸着率	0.25	[-]	・ Si 上に蒸発物 Si(2)を形成
8	$F(2)^* + SiF4 \rightarrow Si(2)$		中性粒子の吸着過程	吸着率	0.25	[-]	・ 同上
9	$Si(2) \rightarrow Si(2)$		熱励起エッチング過程	反応係数 活性化エネルギー	0.5E16 0.0477	[1/ 秒] [eV]	・ 蒸発物 Si(2)の蒸発 (離脱)
10	$SFx^* + Si \rightarrow SiF4$		中性粒子の吸着過程	吸着率	0.25	[-]	・ Si 上に蒸発物 SiF4 を形成
11	$SiF4 \rightarrow SiF4$		熱励起エッチング過程	反応係数 活性化エネルギー	1.55E16 0.0477	[1/ 秒] [eV]	・ 蒸発物 SiF4 の蒸発 (離脱)

以下に、各反応の概要を示す。



反応⑩ プラズマ側からのラジカル照射により、Si上に蒸発物SiF4を形成

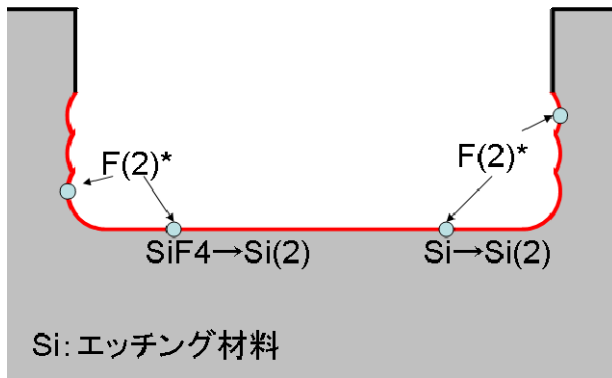
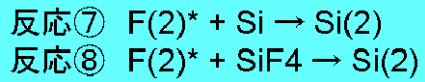
図 V.2.3)-3 エッチングプロセスにおける中性粒子の吸着過程 (プラズマからのラジカル照射)



反応⑤ プラズマ側からのイオン照射により、Si上の保護膜Si_cをエッチング。生成物は系外に除去

反応⑥ プラズマ側からのイオン照射によりSiF4をエッチング。反応生成物F(2)*はフラックスとして2次反応に寄与

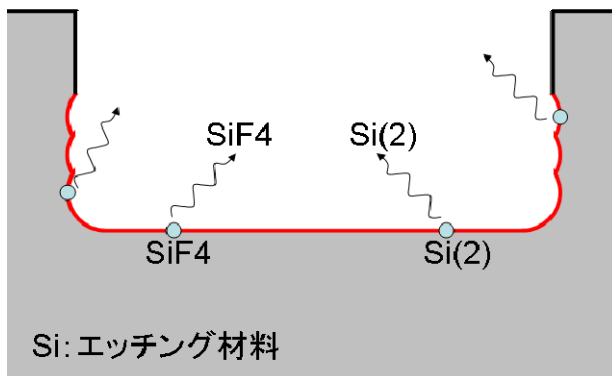
図 V.2.3)-4 エッチングプロセスにおけるイオン・エッチング過程 (プラズマからのイオン照射)



反応⑦ 反応生成物 $F(2)^*$ がSiと反応してSi上に蒸発物Si(2)を形成

反応⑧ 反応生成物 $F(2)^*$ が SiF_4 と反応してSi上に蒸発物Si(2)を形成

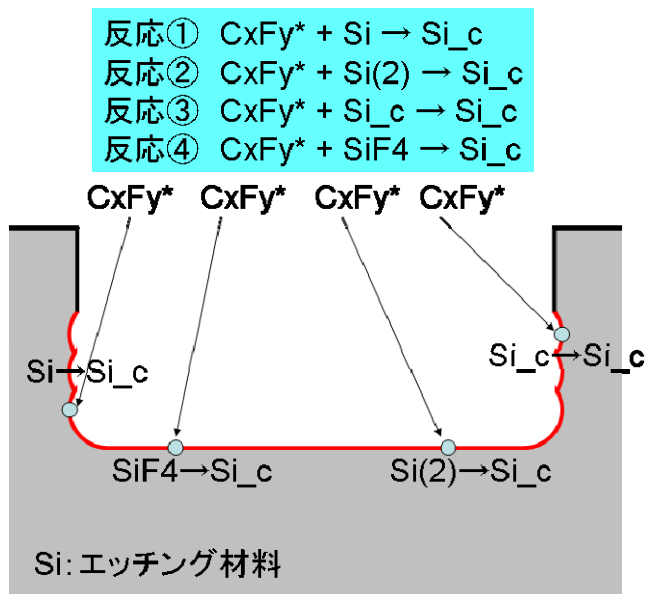
図 V.2.3)- 5 エッチングプロセスにおける中性粒子の吸着過程 (反応生成物照射)



反応⑨ 熱励起反応により蒸発物Si(2)が離脱

反応⑩ 熱励起反応により蒸発物 SiF_4 が離脱

図 V.2.3)- 6 エッチングプロセスにおける熱励起エッチング過程



反応①～④ プラズマ側からのラジカル照射によりSi上に保護膜Si_cを形成

図 V.2.3)-7 デポジションプロセスにおける中性粒子の吸着過程 (プラズマからのラジカル照射)

2-2-3. フラックスの同定

プラズマからはイオンやラジカルが照射されており、それらによる反応を起因として、エッチングやデポジション反応が起きる。また、反応過程において生成された反応生成物が加工面に再照射することによる反応も起きている。これら照射フラックスを決めるのが本節の目的である。

本手法の開発で定義した化学反応および実現象の検討を行い、中性粒子の吸着反応については等方的なフラックスであり、フラックスの総量のみがパラメータとなるものと仮定した。イオン・エッチング反応に関連するフラックスについては急峻な角度分布であるものとし、実加工形状を再現できる分布として、半値半幅 0.5° のガウス分布であるものとした。この場合も総量のみがパラメータとなる。

以下、今回検討したフラックス総量の同定手法について説明する。本研究においては装置条件としてバイアス値がパラメータとなっているが、ガス流量 (flow rate) やコイルパワーに対するあわせこみ手法も検討したので、あわせて示す。

なお、以下のあわせこみにおいて、リアルタイムモニタリング結果 (底面保護膜除去時間) を再現できるようフラックスの総量を決定している。

< 基準エッチング形状の合わせ込み >

- (1) 1 個の基準エッチング形状 (実測値) に対する合わせ込みの場合
デポ過程のラジカルフラックスを設定する。

エッチング過程のイオンフラックスを設定する。
 エッチング過程のラジカルフラックスを設定する。
 計算を実行する。
 結果を評価する。

-1 側壁が壊れた場合、①に飛びデポ過程のラジカルフラックスを、例えば、25%程度増やし、再度計算を実行する。

-2 エッチング深さが実測値の半分以下の場合、②に飛びエッチング過程のイオンフラックスを、例えば 50%程度増やし、再度計算を実行する。

-3 それでも、エッチング深さが変わらないならば、③に飛びエッチング過程のラジカルフラックスを、例えば倍にし、再度計算を実行する。

-4 それでも、エッチング深さが変わらないならば、①に飛びデポ過程のラジカルフラックスを、例えば 50%減らし、再度計算をする。

-5 エッチング深さ L_{cal} が実測値 L_{exp} に近い場合、③に飛びエッチング過程のラジカルフラックスを $L_{\text{exp}}/L_{\text{cal}}$ 倍し、再度計算を実行する。

(2) 数個の基準エッチング形状に対する合わせ込みの場合

この場合も上記(1)と同じである。

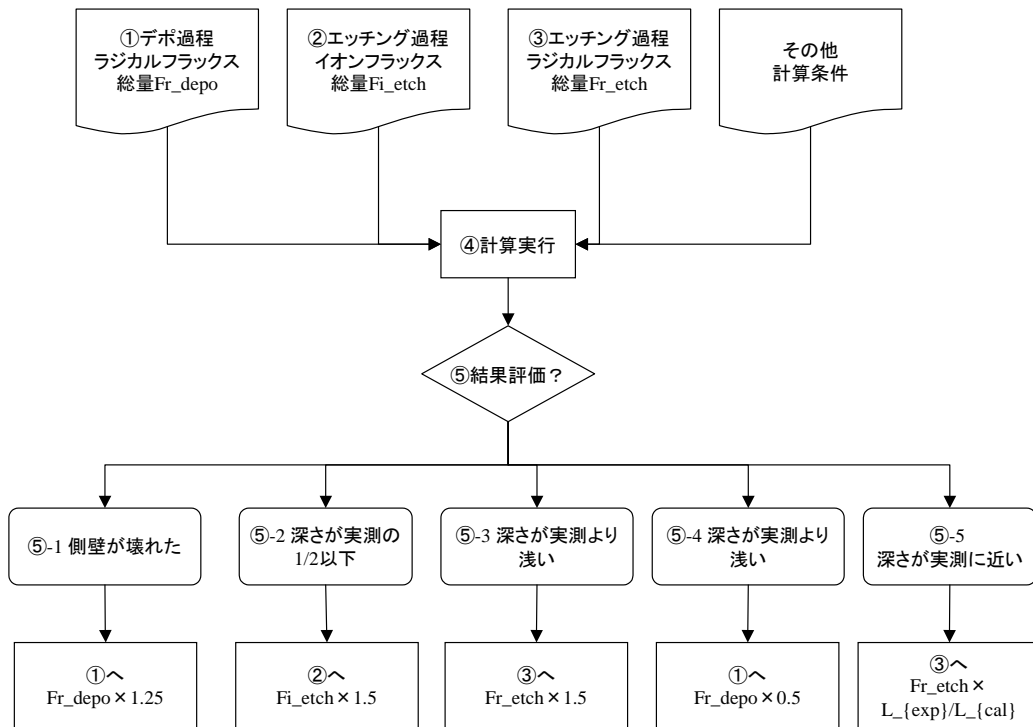


図 V.2.3)- 8 基準エッチング形状に対する合わせ込み手順

<SF6 flow rate に対する合わせ込み>

(1) フィッティングパラメータ

SF6 の **flow rate** が変化した場合、フィッティングパラメータを決めるのに次のことを仮定する。

デポ過程におけるラジカルフラックスは変わらない。

エッチング過程におけるラジカルフラックスの総量が増える。

エッチング過程におけるイオンフラックスの総量は増えるが、角度分布、エネルギー分布は変わらない。

従って、フィッティングパラメータはエッチング過程におけるラジカルフラックスの総量とイオンフラックスの総量となる。

(2) 合わせ込み手続き

ラジカルフラックスの基準値での総量を **flux-rad-sf6**、イオンフラックスの基準値での総量を **flux-ion-sf6** で表す。

総量が **flux-rad-sf6/3.0**、**flux-rad-sf6/2.5**、**flux-rad-sf6/2.0**、**flux-rad-sf6/1.5**、**flux-rad-sf6**、**flux-rad-sf6×1.5**、**flux-rad-sf6×2.0**、**flux-rad-sf6×2.5**、**flux-rad-sf6×3.0** のラジカルフラックスを準備する。

総量が **flux-ion-sf6/3.0**、**flux-ion-sf6/2.5**、**flux-ion-sf6/2.0**、**flux-ion-sf6/1.5**、**flux-ion-sf6**、**flux-ion-sf6×1.5**、**flux-ion-sf6×2.0**、**flux-ion-sf6×2.5**、**flux-ion-sf6×3.0** のイオンフラックスを準備する。

上で作成したラジカルフラックスとイオンフラックスの組み合わせに対して、エッチング形状を計算する。

計算したエッチング形状とある SF6 **flow rate** での測定値との比較から、測定値を再現するラジカルフラックスとイオンフラックスの組を取り出す。

上の手続きで、SF6 **flow rate** の離散的な幾つかの値に対するラジカルフラックスとイオンフラックスの量がきまる。これらの量を再現するように、SF6 **flow rate** の関数としてのラジカルフラックスとイオンフラックスの関数系（例えば、4 次の多項式）を決める。

⑤で決めた多項式を用いれば、任意の SF6 **flow rate** でのラジカルフラックスとイオンフラックスが求まるので、任意の SF6 **flow rate** でのエッチング形状が計算できる。

<C4F8 flow rate の合わせ込み>

(1) フィッティングパラメータ

C4F8 の **flow rate** が変化した場合、フィッティングパラメータを決めるのに次のことを仮定する。

エッチング過程におけるラジカルフラックスは変わらない。

エッチング過程におけるイオンフラックスは変わらない。

デポ過程におけるラジカルフラックスの総量のみが増える。

従って、フィッティングパラメータはデポ過程におけるラジカルフラックスの総量となる。

(2) 合わせ込み手続き

ラジカルフラックスの基準値での総量を flux-rad-c4f8 で表す。

総量が flux-rad-c4f8/3.0、flux-rad-c4f8/2.5、flux-rad-c4f8/2.0、flux-rad-c4f8/1.5、flux-rad-c4f8、flux-rad-c4f8 × 1.5、flux-rad-c4f8 × 2.0、flux-rad-c4f8 × 2.5、flux-rad-c4f8 × 3.0 のラジカルフラックスを準備する。

上で作成したラジカルフラックスに対して、エッチング形状を計算する。

計算したエッチング形状とある C4F8 flow rate での測定値との比較から、測定値を再現するラジカルフラックスを取り出す。

上の手続きで、C4F8 flow rate の離散的な幾つかの値に対するラジカルフラックスの量がきまる。これらの量を再現するように、C4F8 flow rate の関数としてラジカルフラックスの関数系（例えば、4 次の多項式）を決める。

④で決めた多項式を用いれば、任意の C4F8 flow rate でのラジカルフラックスが求まるので、任意の C4F8 flow rate でのエッチング形状が計算できる。

<Coil power の合わせ込み>

(1) フィッティングパラメータ

Coil power が変化した場合、フィッティングパラメータを決めるのに次のことを仮定する。デポ過程におけるラジカルフラックスは変わらない。

エッチング過程におけるラジカルフラックスの総量が増える。

エッチング過程におけるイオンフラックスの総量は増えるが、角度分布、エネルギー分布は変わらない。

従って、フィッティングパラメータはエッチング過程におけるラジカルフラックスの総量とイオンフラックスの総量となる。

(2) 合わせ込み手続き

ラジカルフラックスの基準値での総量を flux-rad-coil、イオンフラックスの基準値での総量を flux-ion-coil で表す。

総量が flux-rad-coil/3.0、flux-rad-coil/2.5、flux-rad-coil/2.0、flux-rad-coil/1.5、flux-rad-coil、flux-rad-coil × 1.5、flux-rad-coil × 2.0、flux-rad-coil × 2.5、flux-rad-coil × 3.0 のラジカルフラックスを準備する。

総量が flux-ion-coil/3.0、flux-ion-coil/2.5、flux-ion-coil/2.0、flux-ion-coil/1.5、flux-ion-coil、flux-ion-coil × 1.5、flux-ion-coil × 2.0、flux-ion-coil × 2.5、flux-ion-coil × 3.0 のイオンフラックスを準備する。

上で作成したラジカルフラックスとイオンフラックスの組み合わせに対して、エッチング形状を計算する。

計算したエッチング形状とある coil power での測定値との比較から、測定値を再現するラジカルフラックスとイオンフラックスの組を取り出す。

上の手続きで、coil power の離散的な幾つかの値に対するラジカルフラックスとイオンフラックスの量が決まる。これらの量を再現するように、coil power の関数としてのラジカルフラックスとイオンフラックスの関数系（例えば、4次の多項式）を決める。

⑤で決めた多項式を用いると、任意の coil power でのラジカルフラックスとイオンフラックスが求まるので、任意の coil power でのエッチング形状が計算できる。

<Bias power の合わせ込み>

(1) フィッティングパラメータ

Bias power が変化した場合、フィッティングパラメータを決めるのに次のことを仮定する。

デポ過程におけるラジカルフラックスは変わらない。

エッチング過程におけるラジカルフラックスは変わらない。

エッチング過程におけるイオンフラックスの総量は変化するが、角度分布、エネルギー分布は変わらない。

従って、フィッティングパラメータはエッチング過程におけるイオンフラックスの総量となる。

(2) 合わせ込み手続き

イオンフラックスの基準値での総量を flux-ion-platen で表す。

総量が flux-ion-platen/3.0、flux-ion-platen/2.5、flux-ion-platen/2.0、flux-ion-platen/1.5、flux-ion-platen、flux-ion-platen×1.5、flux-ion-platen×2.0、flux-ion-platen×2.5、flux-ion-platen×3.0 のイオンフラックスを準備する。

上で作成したイオンフラックスに対して、エッチング形状を計算する。

計算したエッチング形状とある platen power での測定値との比較から、測定値を再現するイオンフラックスを取り出す。

上の手続きで、platen power の離散的な幾つかの値に対するイオンフラックスの量がきまる。これらの量を再現するように、platen power の関数としてのイオンフラックスの関数系（例えば、4次の多項式）を決める。

④で決めた多項式を用いれば、任意の platen power でのイオンフラックスが決まるので、任意の platen power でのエッチング形状が計算できる。

以上の手法を用いて同定したフラックス（バイアス依存性）を表V.2.3 iii)、図V.2.3)-8および図V.2.3)-1に示す。

表V.2.3 iii) 2 吸着反応のフラックス（等方的）

項 目	ラジカル・イオン種	フラックス値[個/cm ²]
エッチングプロセスにおける吸着反応	SFx*	6.4 × 10 ¹⁷
エッチングプロセスにおける吸着反応	CxFy*	4.8 × 10 ¹⁷

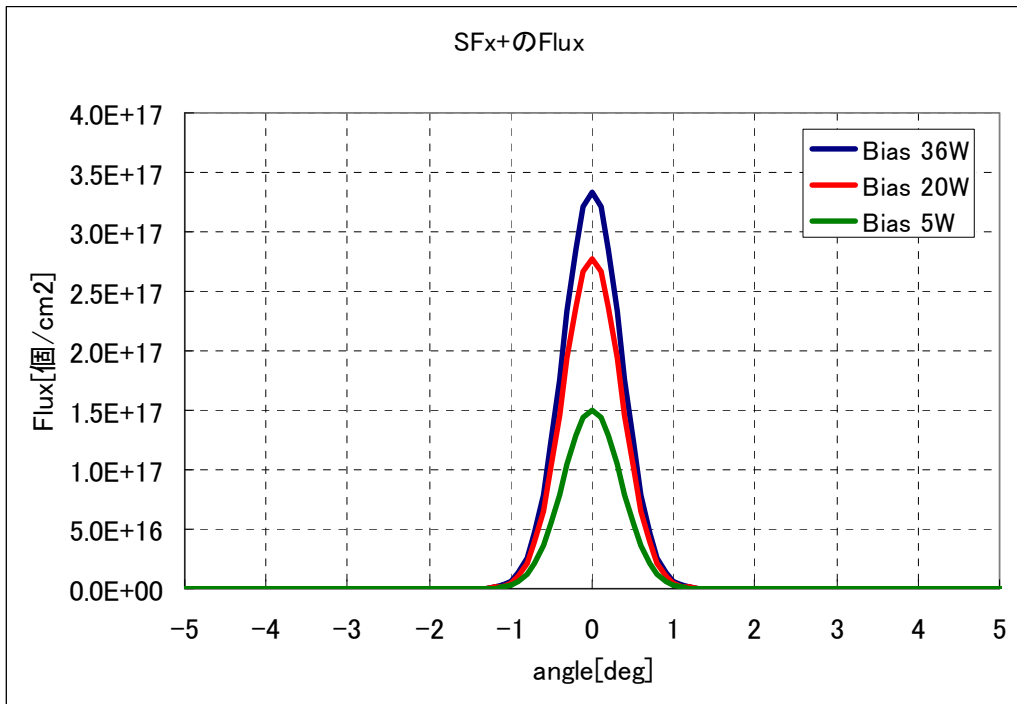


図 V.2.3)- 8 SFx+のフラックス分布 (イオンアシスト反応)

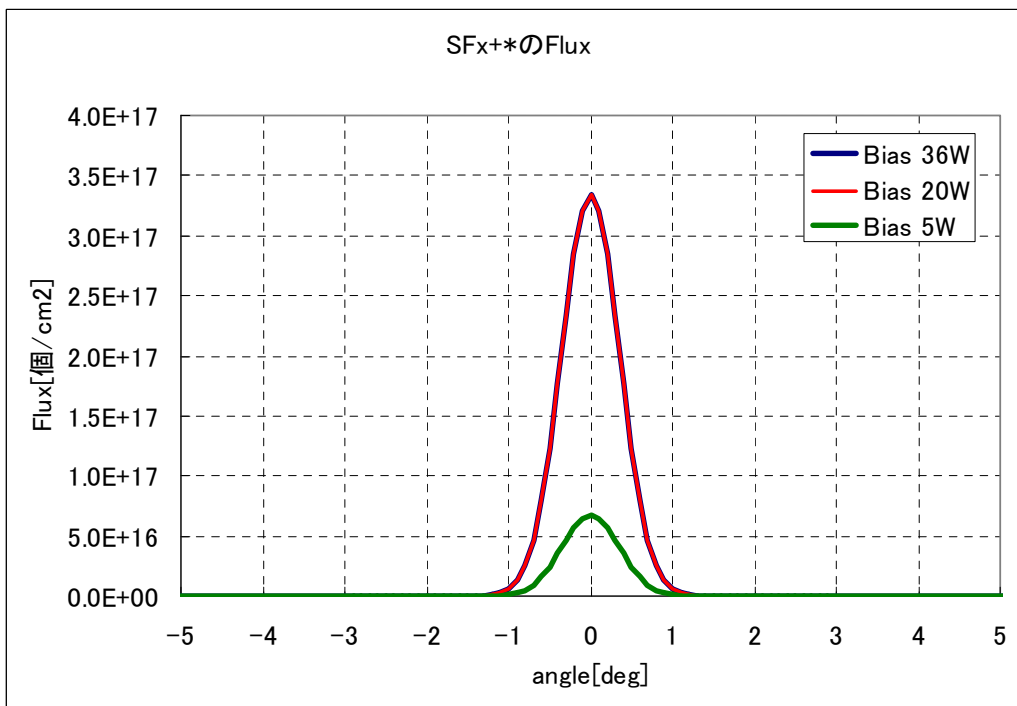


図 V.2.3)- 1 SFx+*のフラックス分布 (イオンアシスト反応)

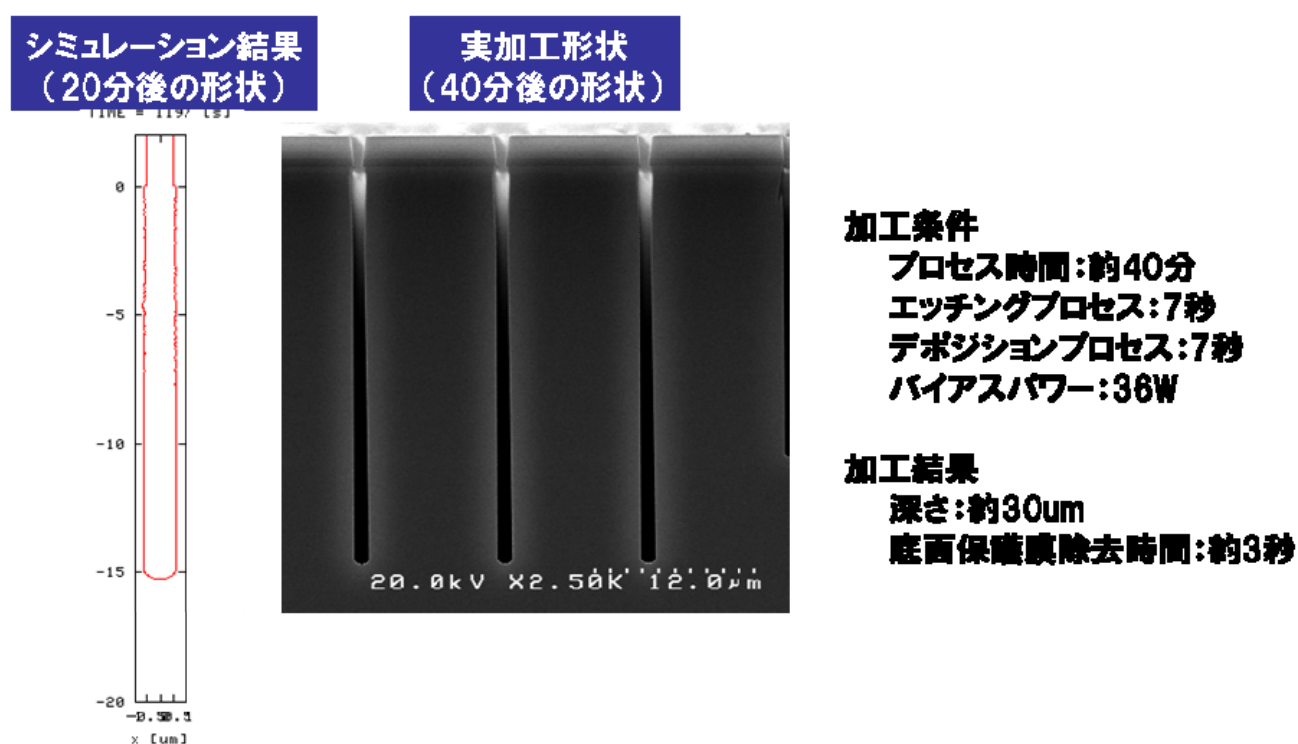
2-3.加工形状再現性の確認

前節までに同定した反応パラメータ、フラックスを用いて、実加工形状（図V.2.3)-2)の再現性確認計算を実施した。

図V.2.3)-2にシミュレーションによる加工形状予測結果と実加工形状の比較結果を、図V.2.3)-3にエッチング深さの時系列を、図V.2.3)-4にエッチングレートとデポジションレートの時系列を示す。

シミュレーションによる加工形状予測結果は実加工形状とよく一致しており、エッチングレートも実加工結果とほぼ一致していることがわかる。

以上より、リアルタイムモニタリング値（底面保護膜除去時間）および装置設定条件をもとにした Bosch プロセスシミュレーション手法が確立できた。



図V.2.3)-2 加工形状の再現性確認結果

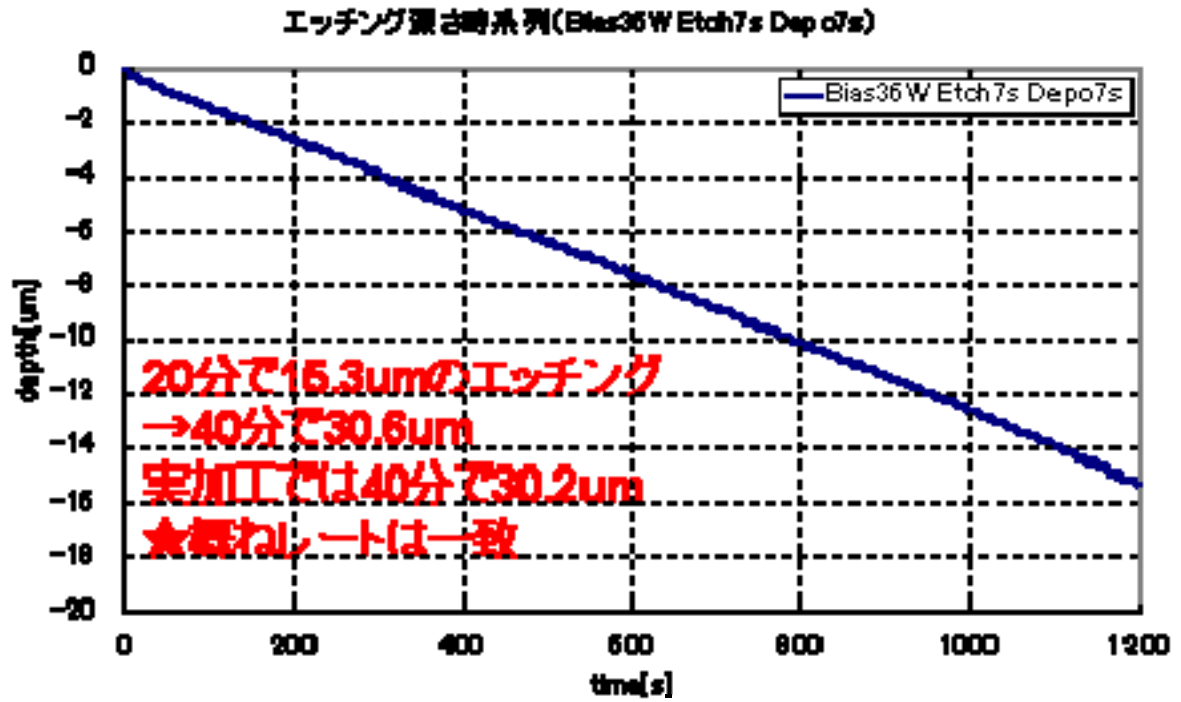


図 V.2.3)- 3 エッチング深さの時系列

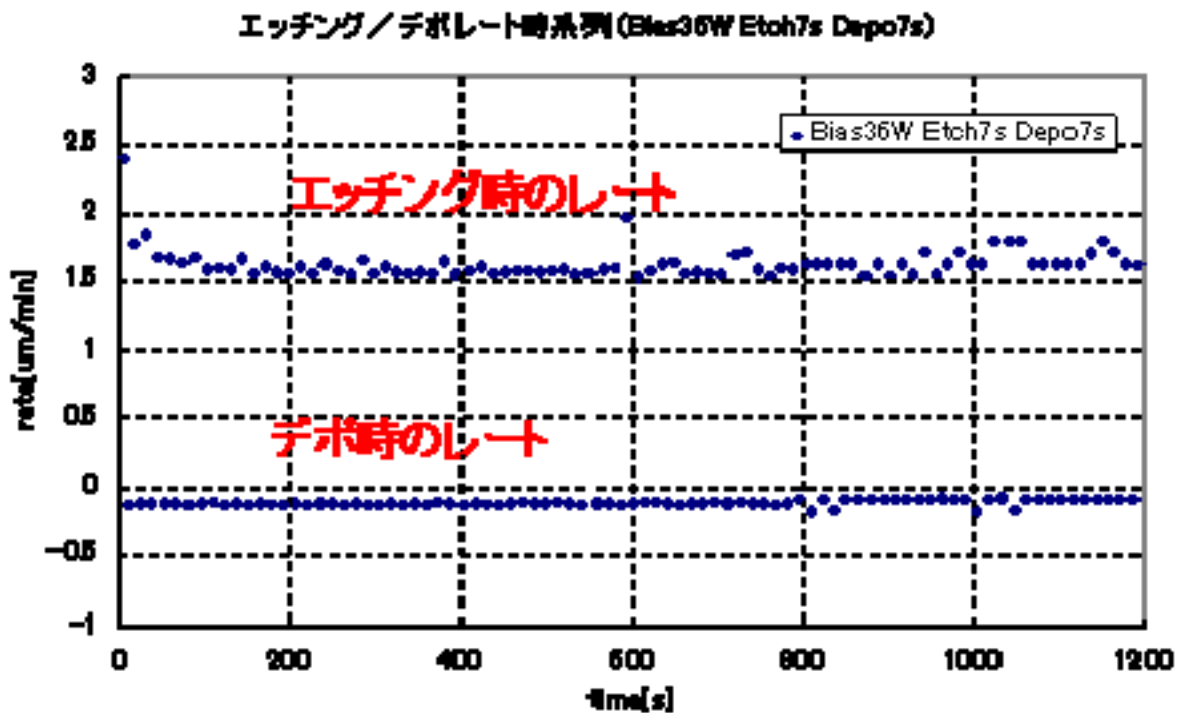


図 V.2.3)- 4 エッチング及びデポジションレートの時系列

3. 保護膜除去タイミングの解析

3-1. 底面保護膜除去タイミングの解析

定義した化学反応に基づきシミュレーションを実施しているため、保護膜の除去タイミングをシミュレーションにより評価することが可能である。

図 V.2.3)-6 に前章で示した Bosch プロセスのシミュレーション例を示す。エッチングプロセスの後にデポジションプロセスが開始され、パターン壁面に保護膜が形成される。その後、エッチングプロセスに入り、まずは底面の保護膜が除去され、その後、底面に現れた Si のエッチングが行われる。この過程は詳細にシミュレーションにより計算されており、図 V.2.3)- に示すように、底面保護膜除去時間を評価することが可能である。

なお、ここで得られている底面保護膜除去時間は、リアルタイムモニタリングで得られている除去時間を再現している。

ここでは、実際に得られているリアルタイムモニタリング値（底面保護膜除去時間）との比較を行ったが、装置条件や加工条件を変更した場合のシミュレーションにより、事前に底面保護膜除去時間を把握することも可能である。

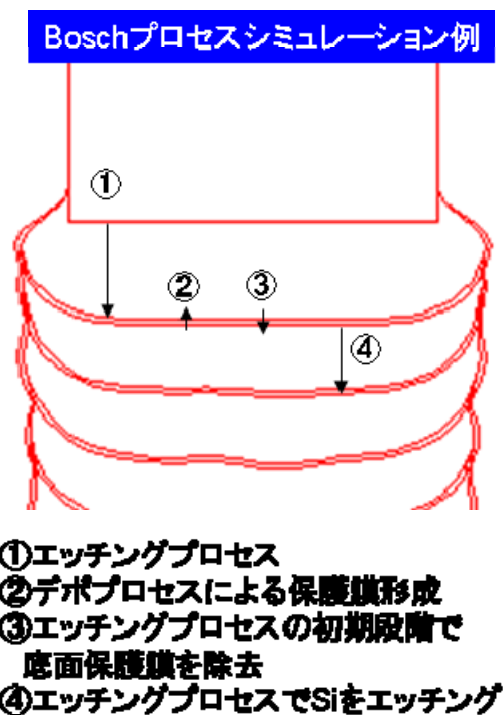


図 V.2.3)- 5 底面保護膜除去の概要

底面保護膜除去時間の推移

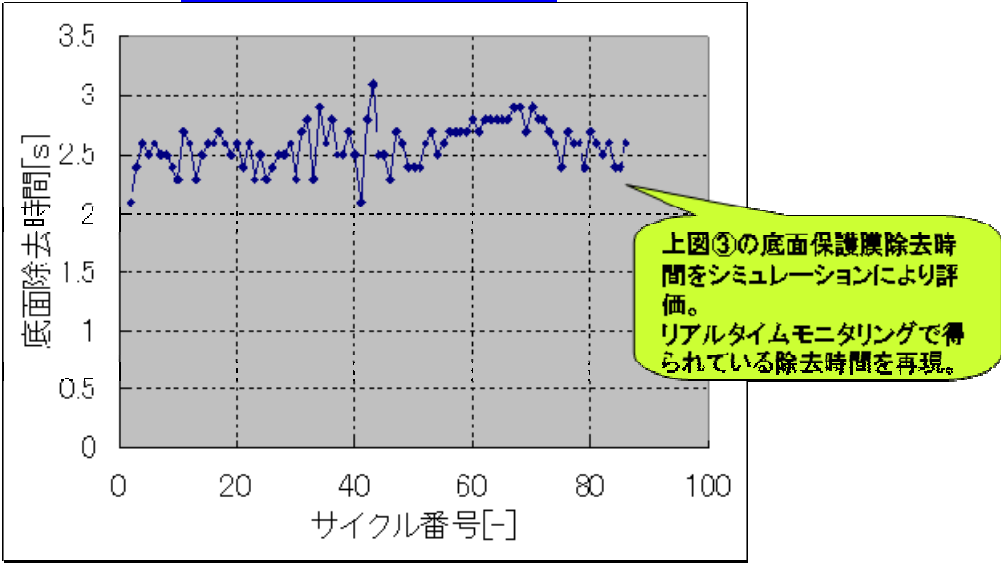


図 V.2.3)- 6 底面保護膜除去時間の推移

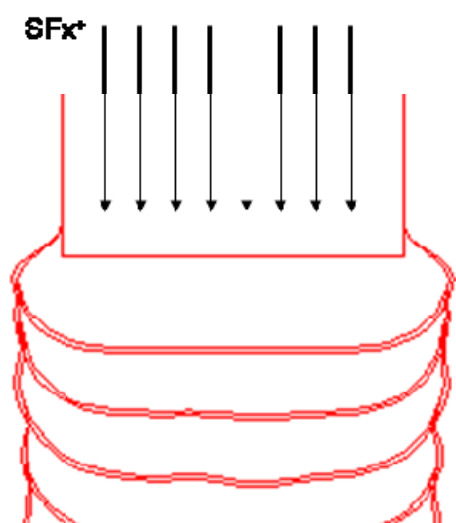
3-2.側壁保護膜除去タイミングの解析

前項で示した通り、底面保護膜の除去タイミングについては、フラックスがほぼ垂直に照射するため、底面の保護膜の除去レートは大きく、形状変化量も大きいため、現状のシミュレーションで評価可能であった。

一方で、側壁保護膜の除去タイミングについては、フラックスがほぼ垂直に照射するため、側壁の保護膜の除去レートは極めて小さい。そのため形状変化量も底面保護膜の場合と比較すると非常に小さいものとなる。この変化をシミュレーションにより評価するためには膨大なメッシュが必要となり、現在の環境では評価が困難であった。

但し、原理的には側壁保護膜除去タイミングを評価することは可能である。

プラズマからのフラックス照射概要



エッチング時にフラックスはほぼ垂直に照射

図 V.2.3)- 15 プラズマからのフラックス照射の概要

4. フィードバック制御によるエッチング最適化

4-1. エッチング形状予測

Bosch プロセスを最適化する方法として、従来のエッチング/デポジションの 2 ステップのサイクルではなく、

デポジションプロセスにより保護膜を形成

保護膜を除去するまでの間は高バイアスによるエッチング

除去後の Si エッチングは低バイアスで行う

という、3 ステップのサイクルを行うことが検討されている。

前章までに確率されたシミュレーション手法により底面保護膜除去時間は予測可能であるので、その結果を装置条件（エッチング時間）にフィードバックすることにより、Bosch プロセスの最適化検討が可能となる。

4-1-1. 3step 制御による Bosch プロセスでの加工形状予測

図 V.2.3)-16 に、3step 制御 Bosch プロセスのバイアス設定条件を示す。リアルタイムモニタリング及びシミュレーションにより底面保護膜除去時間は 3 秒程度とわかっているので、底面保護膜除去のためのエッチング時間は 3.5 秒と設定した。3step 制御の効果を検討するため、比較として従来の 2step 制御の条件も示す。

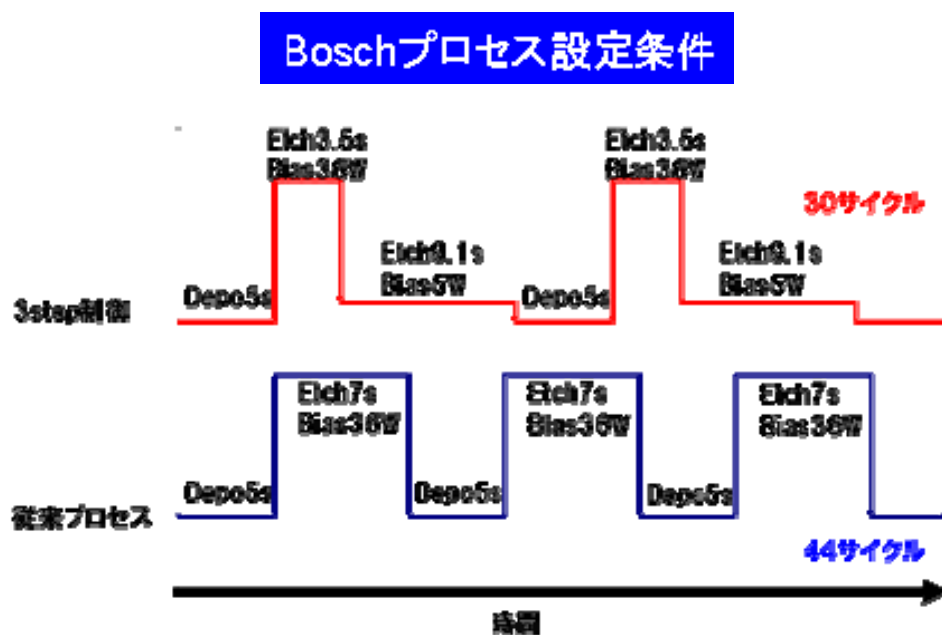


図 V.2.3)-16 3step 制御 Bosch プロセスの設定条件

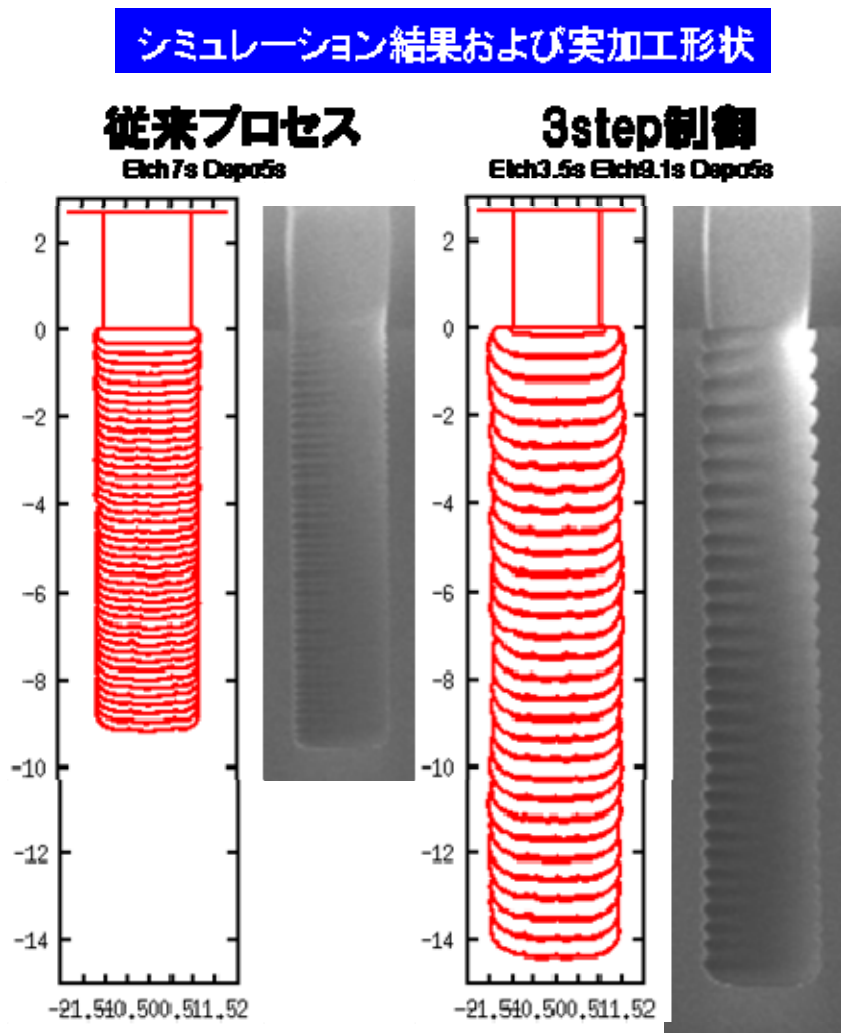
これまでに同定してきた反応パラメータ、フラックスおよび上記設定条件を用いてシミュレーションによる加工形状予測を行った。図 V.2.3)-17 にシミュレーション結果および実加工形状を示す。

従来プロセス、3step 制御プロセスともに、実加工形状をよく再現していることがわかる。3step 制御ではエッチング時間が長くなるためスキャロッピングが顕著に出ているが、

その様子もシミュレーションにより再現されていることがわかる。また、パターン底部で加工形状に若干の広がりが見られるが、その再現もできている。

以上の結果から、本研究において開発した手法を用いることにより、実測と解析の誤差 $\pm 10\%$ 以下の精度でエッチング形状予測が可能であることがわかった。

参考までに、図V.2.3)-18 及び図V.2.3)-19 に、エッチング深さ時系列、エッチングレート/デポジションレート時系列を示す。



図V.2.3)- 17 シミュレーションによる加工形状予測結果と実加工形状

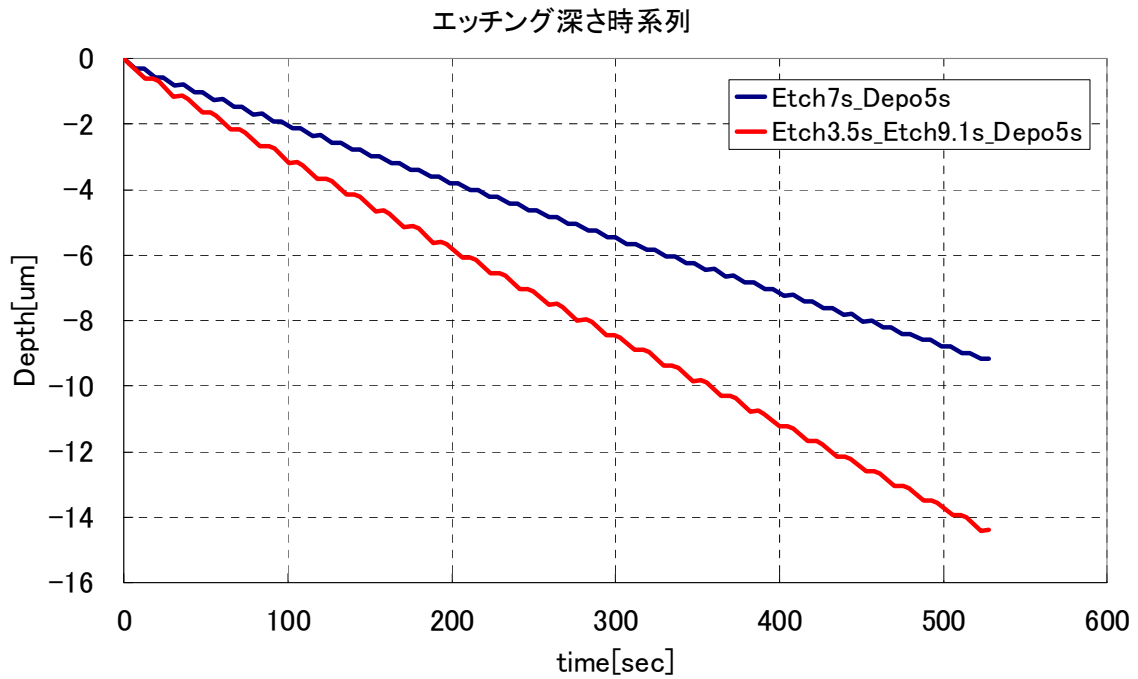


図 V.2.3)- 18 エッチング深さ時系列

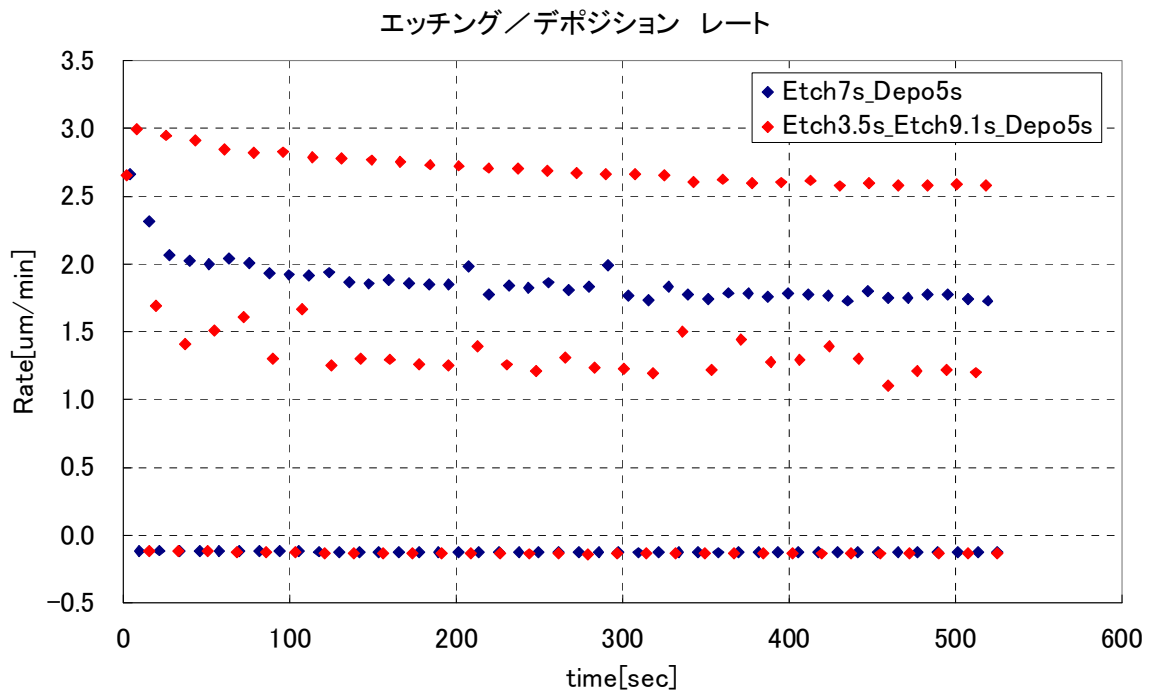
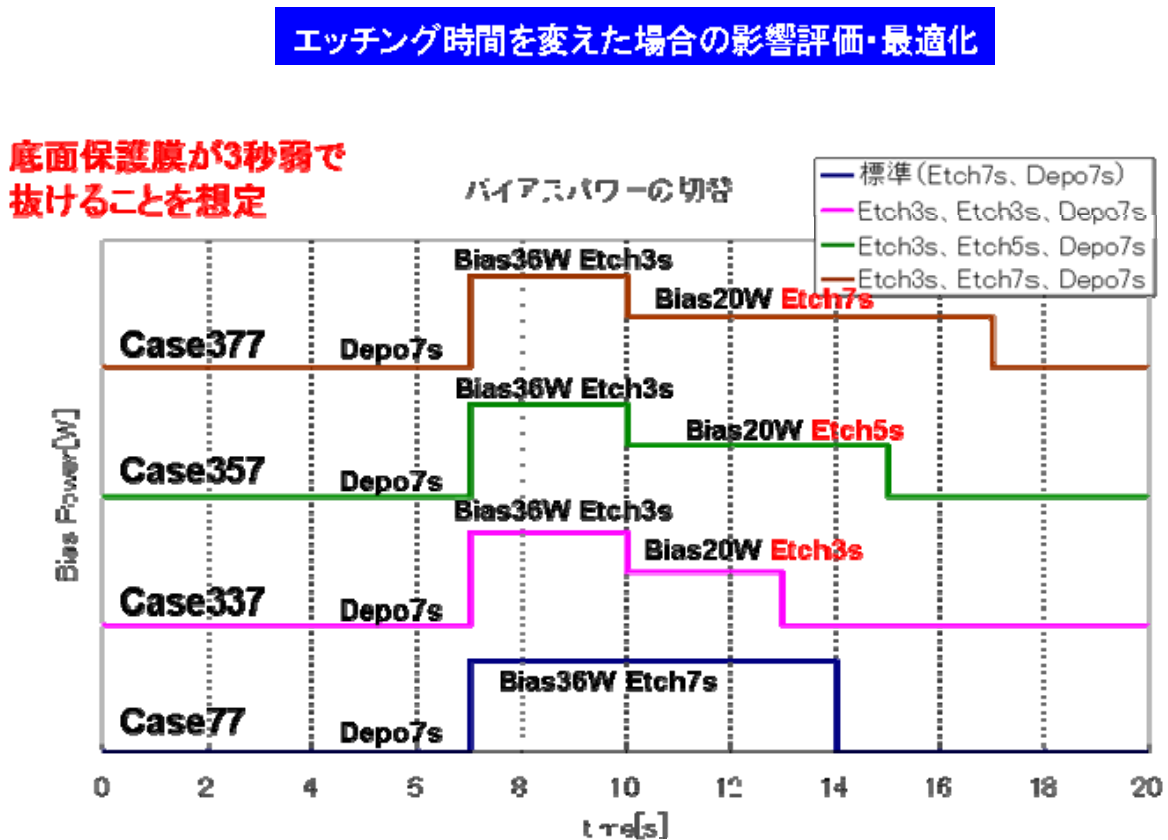


図 V.2.3)- 19 エッチングレートおよびデポジションレートの時系列

4-2.最適エッチング条件の探索

これまででは、底面保護膜除去時間を最適化のためのパラメータとして検討してきた。ここでは、2段階目のエッチング時間についての検討を行い、エッチング深さ（レート）のみならず、加工形状まで含めたエッチング条件の最適化検討を行う。

図V.2.3)-20 に 3step制御Boschプロセスのエッチング時間／バイアス値の設定条件を示す。1段階目のエッチング時間は底面保護膜除去時間にあわせて3秒と設定している。2段階目のエッチング時間は3秒、5秒、7秒と設定した。また、参考のために従来の2step制御Boschプロセスも示している。



図V.2.3)-20 3step 制御 Bosch プロセスの設定条件

図V.2.3)-21 にシミュレーションによる加工形状予測結果を示す。トータルのエッチング時間が長くなる程、エッチング深さが深くなっていることがわかる。一方で、2段階目のエッチング時間を7秒と最も長く設定したケースでは、それまで見られなかったスキヤロッピングが顕著に現れる結果となった。デバイスによってはスキヤロッピングが許容できないものも存在する。そのような場合にはレートをあげるためにエッチング時間を長くするだけの検討ではなく、本手法を用いて形状評価まで行うことにより、事前にエッチング時間の最適化を行うことができるようになる。

以上のことから、本研究で開発した手法を用いることにより、底面保護膜除去時間を考慮

したフィードバック制御のみならず、加工形状まで含めた最適な予測・評価が可能であることがわかった。

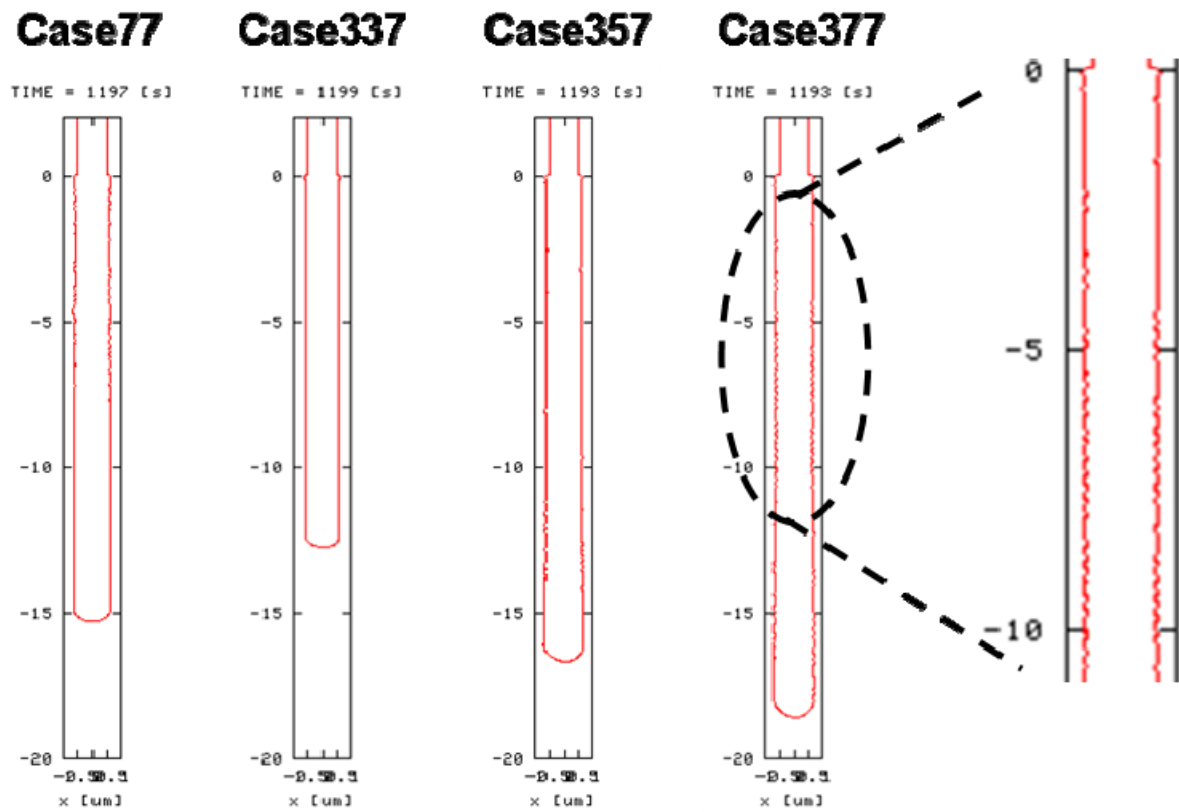


図 V.2.3)- 21 シミュレーションによる加工形状予測結果

5. まとめ

本研究では、**Bosch** プロセスを対象とし、装置条件およびリアルタイムモニタリングにより測定される物理量とを用いたプラズマエッチングシミュレーション手法の開発を行った。

プロセスパラメータ（表面反応に関連するパラメータやフラックス）と装置条件・リアルタイムモニタリング値（底面保護膜除去時間）との対応関係を明らかにするとともに、シミュレーションによる実加工形状の再現性確認を行った。今回対象とする **Bosch** プロセス（及び実加工で利用されている装置）に対しては、±10%の精度で加工形状を予測可能であることが確認できた。

また、エッチングプロセスを最適化するため、本手法により底面保護膜除去時間を評価しそれを装置条件へとフィードバックする手法や、エッチング時間最適化への適用可能性を検討した。その結果、本手法はエッチングプロセスおよびエッチング加工形状の最適化に適用可能であることが確認できた。

以上のことから、エッチングプロセスおよびエッチング加工形状の最適化のためのフィードバック制御技術確立のための設計指針・評価手法ができたものとする。

<課題>

本研究においては、実験においてガス流量やプラズマ圧力を固定していたため、プロセスパラメータのガス流量依存性やプラズマ圧力依存性は検討していない。しかし、実際の加工においてはこれらは代表的な装置パラメータであり、様々な値に設定し、プロセスの最適化を図 V.2.3-っている。ガス流量・プラズマ圧力をパラメータとした実加工を実施し、その上でプロセスパラメータを同定し、データベース化していくことが課題である。

底面保護膜除去時間については、長時間にわたる時間変動の検討・実加工との比較ができていない。リアルタイムモニタリングにより長時間にわたる底面保護膜除去時間の推移を測定し、それとシミュレーションによる評価との比較検討を行うことが課題として残っている。

今回は **Bosch** プロセスを対象としたが、他のプラズマ源、プロセスにも本手法は適用可能である。様々なプラズマ・プロセスに本手法を適用し、得られたプロセスパラメータと装置条件・リアルタイムモニタリング値・実加工形状との対応関係をデータベース化し、プラズマエッチングプロセスの最適化を図 V.2.3-っていくことも将来的な課題である。

目標に照らした達成状況

本研究では、低環境負荷の深掘りエッチング技術を確立するために、SF6 ガスの代替ガスの探索と、代替ガスのポテンシャルを最大限発現させるためのエッチングの高効率化、最適化技術として、以下の3つの内容に取り組んだ。

i)低環境負荷代替ガスの選定

-)リアルタイムモニタリングによるエッチングの高効率化
-)フィードバック制御手法を用いたエッチング最適化

その結果、BF3+SF6 混合の代替ガスにより、69%の削減率、エッチングの高効率化および最適化により45%の削減率となり、トータル90%の削減率（BOSCH プロセス、計算値）を達成した。

結果まとめ

全体目標		結果	達成度
現状のSF6ガスに対し、温暖化ガス排出量を90%以上削減可能とする最適代替ガスの選定指針を得る。		トータル90%削減見込み <内訳> 代替ガス:69%削減 モニタリング/フィードバック制御:45%削減	◎
開発項目	自主目標		
代替ガスの選定	温暖化ガス排出量を90%以上削減可能とする最適代替ガスの選定指針を得る。	SF6とBF3の混合ガスとすることで、温暖化ガス排出量の削減指針を得た。	○
リアルタイムモニタリングによる高効率化	ラジカル密度を、10Hz以上の周期でリアルタイムモニタリングする手法を確立する。	F,SiFラジカル密度を10Hz以上の周期でモニタリングすることで、エッチレート1.8倍となる高効率化を確立した。	○
フィードバック制御によるエッチング最適化	モニタリング物理量とシミュレーション入力データとの対応関係を整理し、実加工と解析結果の再現性を評価する。	保護膜除去タイミング及びパイアスパワーと入射イオンフラックスとの相関が求まり、フィードバック制御に適用するための形状予測に必要な実加工と解析結果の誤差を±10%以下とした。	○

温暖化ガス削減率まとめ

プロセス	非BOSCH (連続プロセス)		BOSCH	
	Ref.	代替ガス (実測)	Ref.	代替ガス+モニタリング /フィードバック (計算)
使用ガス	SF6+20%O2	SF6+ 80%BF3	SF6/C4F8	(SF6+80%BF3)/BF3
温暖化係数	19120	4780	23900/8700	4780/0
エッチレート比	1	0.81	1	1.33
温暖化ガス 削減率	—	69%	—	90%

研究発表・講演、文献、特許等の状況

(1) 研究発表・講演

・GDMS2011 (2011.2.9)

2-2 文献

なし。

2-3 特許等

・エッチングモニタリング方法 (デンソー、産総研)

・Fラジカル発生ガスとB含有ガスを用いたシリコン深堀エッチング方法 (アルバック)

・解析技術 (みずほ情報総研)

2-4 成果普及活動 (プレス発表等)

なし。

【付録】

プラズマエッチングシミュレーションによる解析方法の概要

表面反応

プラズマ・エッチングプロセスにおける表面反応として次に述べる 4 種類の要素反応を考慮する。

- 1) 飛来吸着した反応性ラジカルによる等方的な熱励起型化学反応
- 2) 高エネルギーを持って飛来した非反応性または反応性イオンによって引き起こされる異方的なスパッタリング反応：前者は物理的スパッタリング反応であり、後者は物理的及び化学的スパッタリング反応である。
- 3) 反応性吸着ラジカルによる化学反応が同時に入射する高エネルギーイオンによって加速される異方的なイオン・アシストエッチング反応
- 4) 非反応性ラジカルが飛来し被エッチング材料膜上に吸着したデポジション

以上の仮定から、このモデルでは反応性ラジカルと非反応性ラジカルのみが表面に吸着する。

表面反応モデル

被エッチング材料表面を微小面積要素に分割する。(2次元解析なので線素を考えれば充分であるが、奥行き方向の自由度を考慮して考える。) この微小面積要素の中から任意の一つを取り出し、その微小面積要素を考える。各吸着ラジカル^{††} m によって占有される表面積の被覆率を Θ_m 、また清浄な被エッチング材料膜が表面に現れている表面積の割合を Θ_0 で表す。更に、位置 r 、時刻 t において

$$\Theta_0(r,t) + \sum_{m=1}^N \Theta_m(r,t) = 1 \quad (1.1)$$

$$\Theta_m(r,t) \geq 0 \quad \text{for } m = 0, 1, \dots, N \quad (1.2)$$

なる規格化条件と拘束条件を課しておく。ここで、 N は解析の対象となる吸着ラジカル種数である。

簡単のため、表面吸着/反応層は表面の 1 原子層だけと仮定し、清浄な表面の全吸着サイトの面密度を σ_s で表す。このとき、付録 A に詳しく説明してあるように、各点各時刻における各微小表面の被覆率の時間変化は

$$\sigma_s \frac{d\Theta_0}{dt}(r,t) = - \sum_{m=1}^N [G_m(r,t) - H_m(r,t)] \quad (1.3)$$

$$\sigma_s \frac{d\Theta_m}{dt}(r,t) = G_m(r,t) - H_m(r,t) \quad \text{for } m = 1, \dots, N \quad (1.4)$$

で与えられる。ここで、 $G_m(r,t)$ はラジカル m の単位時間当たりの全吸着数であり、入射ラジカル m が単位時間当たりに直接表面に吸着した個数と m とは異なる他の入射ラジカルが表面に吸着し被エッチング材料表面上に形成されたラジカルと反応し単位時間当たりにラジカル m を表面上に生成する個数の和とからなる。また、 $H_m(r,t)$ はラジカル m が単位時間当たりに表面から消滅する全個数であり、表面上に吸着しているラジカル m が熱励起によって単位時間当たりに直接表面から離脱する個数、表面に吸着しているラジカル m が入射ラジカルと反応し単位時間当たりに他のラジカルを生成する個数及びイオンアシスト反応によって表面に吸着しているラジカルが単位時間当たりに表面から削り取られる個数の和とからなる。

上で説明したように、 G_m と H_m とは^{‡‡}

$$\begin{aligned} G_m &\equiv G_m^{(1)} + G_m^{(2)} \\ H_m &\equiv H_m^{(1)} + H_m^{(2)} + H_m^{(i)} \end{aligned}$$

と表すことができる。ここで、 $G_m^{(1)}$ は入射ラジカルが単位時間当たりに直接表面に吸着する個数を、 $G_m^{(2)}$ は m と異なる入射ラジカルと被エッチング材料表面上に形成されたラジカルとが反応し単位時間当たりに表面上にラジカル m を生成する個数を表す。また、 $H_m^{(1)}$ は被エッチング材料表面上に吸着しているラジカルが熱励起によって表面から単位時間当たりに直接離脱する個数を、 $H_m^{(2)}$ は表面に吸着しているラジカル m が入射ラジカルと反応し単位時間当たりに m とは異なるラジカルを生成する個数を、 $H_m^{(i)}$ はイオンアシスト反応によってラジカル m が単位時間当たりに表面から削り取られる個数を表す。

更に、各 $G_m^{(j)}$, $H_m^{(j)}$ ($j = 1, 2$) と $H_m^{(i)}$ は

1. $G_m^{(1)}$ について

$G_m^{(1)}$ はラジカル m の吸着率 σ_m とフラックス F_m を用いて、 $G_m^{(1)} = \sigma_m F_m$ と表せる。これを更に詳しく表すと

$$G_m^{(1)} = \left[\sigma_{m0} \Theta_0 + \sum_{k \neq m} \sigma_{mk} \Theta_k \right] F_m \quad (1.5)$$

となる。ここで、 σ_{m0} および σ_{mk} はそれぞれ、ラジカル m と清浄な被エッチング材料膜との間のおよび飛来したラジカル m と被エッチング材料膜上に形成されたラジカル k の吸着膜層との間の吸着率である。また、 k についての和は被エッチング材料膜上に形成されたラジカル k がラジカル m で置き換わる全ての k に互る。

2. $G_m^{(2)}$ について

$G_m^{(2)}$ は、表面に飛来する m と異なったラジカル l が被エッチング材料表面上に形成されたラジカルと反応しラジカル m を生成する生成率 $\sigma_l^{(m)}$ とラジカル l のフラックス F_l を用いて、 $G_m^{(2)} = \sum_{l \neq m} \sigma_l^{(m)} F_l$ と表せる。これを更に詳しく表すと

$$G_m^{(2)} = \sum_{l \neq m} \left[\sigma_{l0}^{(m)} \Theta_0 + \sum_{k \neq m} \sigma_{lk}^{(m)} \Theta_k \right] F_l \quad (1.6)$$

となる。ここで、 $\sigma_{l0}^{(m)}$ および $\sigma_{lk}^{(m)}$ はそれぞれ、飛来するラジカル l と清浄な被エッチング材料膜との間の反応でおよび飛来したラジカル l と被エッチング材料膜上に形成されたラジカル k の吸着膜層との間の反応でラジカル m が生成される生成率である。また、 l についての和は m とは異なる入射ラジカル全体に互る。更に、 k についての和は被エッチング材料膜上に形成されたラジカル k がラジカル l と反応しラジカル m を生成する全ての k に互る。

3. $H_m^{(1)}$ について

$H_m^{(1)}$ は被エッチング材料表面上に吸着したラジカル m が熱励起によって単位時間当たりに直接表面から離脱するラジカル m の個数であるから

$$H_m^{(1)} = \frac{1}{\tau_m} \sigma_s \Theta_m \quad (1.7)$$

と表せる。ここで、 τ_m はラジカル m が被エッチング材料表面上に吸着している平均時間、 $\sigma_s \Theta_m$ は単位表面上に吸着しているラジカル m の個数である。

4. $H_m^{(2)}$ について

$H_m^{(2)}$ は、表面に飛来する m と違ったラジカル k が被エッチング材料表面上に形成されたラジカル m と反応し m と異なったラジカル l を生成する生成率 σ_{km} とラジカル k のフラックス F_k を用いて、 $H_m^{(2)} = \sum_{k \neq m} \sigma_{km} F_k$ と表せる。これを更に詳しく表すと

$$H_m^{(2)} = \sum_{k \neq m} \sum_{l \neq m} \sigma_{km}^{(l)} \Theta_m F_k \quad (1.8)$$

となる。ここで、 $\sigma_{km}^{(l)}$ は飛来するラジカル k と被エッチング材料膜上に形成されたラジカル m の吸着膜層との間の反応で m とは違ったラジカル l が生成される生成率である。また、 k についての和は m とは異なる入射ラジカル全体に互る。更に、 l についての和は被エッチング材料膜上に形成されたラジカル m がラジカル k と反応し m とは違ったラジカル l になる全ての l に互る。

5. $H_m^{(i)}$ について

$H_m^{(i)}$ は被エッチング材料表面上に吸着したラジカル m が入射イオンによって単位時間当たりに被エッチング材料表面から削り取られるラジカル m の個数であるから、エネルギー ϵ を持った入射イオン k がフラックス $F_k^{(i)}(\epsilon)$ で被エッチング材料表面に入射したときに表面から離脱するラジカル m の個数は

$$H_m^{(i)} = \int_0^{\epsilon_{max}} \left[\sum_l Y_{km}^{(l)}(\epsilon) \right] \Theta_m F_k^{(i)}(\epsilon) d\epsilon$$

と表せる。ここで、 ϵ_{max} は入射イオンの最大エネルギー、 $Y_{km}^{(l)}(\epsilon)$ は表面反応層から離脱する反応生成物 l の収率であり、ラジカル m がラジカル l に分解することも考慮している。従って、表面反応層からのラジカル m の消滅個数は

$$H_m^{(i)} = \sum_{k \neq m} \int_0^{\epsilon_{max}} \left[\sum_l Y_{km}^{(l)}(\epsilon) \right] \Theta_m F_k^{(i)}(\epsilon) d\epsilon \quad (1.9)$$

と表せる。ここで、 k に対する和は全ての入射イオンに関してである。

と表すことができる*。

反応表面層内での粒子の輸送・反応過程

ここでは、各粒子の輸送と反応過程について記述する。今回のモデルで考慮する粒子の種類は

- 1) 反応性高エネルギーイオン
- 2) 非反応性高エネルギーイオン
- 3) 反応性ラジカル
- 4) 非反応ラジカル（反応生成物）

である。以下にこれらの粒子の輸送・反応過程について詳細を述べる。

反応性高エネルギーイオンの輸送・反応過程

反応性高エネルギーイオンによって引き起こされる反応の記述は、反応性高エネルギーイオンの弾性散乱と非弾性散乱を用いて行なう。反応性高エネルギーイオンの追跡は非弾性散乱が起こった段階で打ち止めとする。また、簡単のため、弾性散乱の追跡も1度だけとする。即ち、今回考慮する反応性高エネルギーイオンの反応過程は

- 1) 非弾性散乱
- 2) 弾性散乱 + 非弾性散乱

であり、その他の多重散乱は全て無視する。このような仮定の下で、反応性高エネルギーイオンの輸送を記述する。

反応性高エネルギーイオンは、基盤表面上のシース領域で加速され基盤表面にほぼ垂直に入射する。しかし、プラズマ中での熱運動による速度分布の広がりにはほぼそのまま生き残っている。従って、基盤表面での入射エネルギー ϵ を持った入射イオンに対するフラックスの角度依存性は、 $dF^{(i)}(\epsilon) = F_0^{(i)}(\epsilon)G^{(i)}(\theta)\cos\theta d\theta$ と表すことができる。ここで、 $F_0^{(i)}(\epsilon)$ はプラズマから基盤表面へのイオンの入射フラックスである.**

次に、非弾性散乱が起きる点での反応性高エネルギーイオンのフラックスを計算する。

- 1) 直接反応における反応性イオンのフラックス

シース領域からパターン内の点 P へエネルギー ϵ を持って直接入射するイオンのフラックス $F_i^{(1)}(P, \epsilon)$ は、マスク端と点 P との幾何学的配置で決まる角度により制限され ($\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$)、

$$F_i^{(1)}(P, \epsilon) = F_0^{(i)}(\epsilon) \int_{\theta_1}^{\theta_2} G_i(\theta) \cos(\theta - \psi) d\theta \quad (1.10)$$

と表せる。ここで、 $\phi = \theta - \psi$ は反応表面への入射角度である。この式によって、点 P でのフラックスが計算される。

- 2) 反射を含む反応性イオンのフラックス

反応性イオンの反射過程のモデル化には反応性ラジカルの輸送過程とのアナロジーを参考にする。アナロジーは

- 入射ラジカルの吸着率 σ_r に対応して入射イオンの吸収率 σ_i を導入する。ここで用いた反応性イオンの吸収率はフラックス F_i を持って入射した反応性イオンの内、単位時間に $\sigma_i F_i$ 個の反応性イオンが表面上で反応を起こすことを意味する。
- フラックス F_r を持って入射したラジカルは単位時間に $\sigma_r F_r$ 個が表面に吸着するので、残りの $(1 - \sigma_r)F_r$ 個は表面から再放出される。同様に、フラックス F_i を持って入射した反応性イオンは単位時間に $\sigma_i F_i$ 個が表面に吸収され表面上で反応を起こすが、残りの $(1 - \sigma_i)F_i$ 個は表面に影響を与えずに表面から再放出される。

- 。表面から再放出される過程は、反応性ラジカルでも反応性イオンでも同じであると仮定する。また、再放出過程ではエネルギーの変化はないと仮定する。

に基づいている。このアナロジーを用いると、反射による点 P における反応性イオンのフラックス $F_i^{(2)}(P, \epsilon)$ は

$$F_i^{(2)}(P, \epsilon) = \int_{\text{Profile}} \frac{1}{2r} (1 - \sigma_i(Q, \epsilon)) F_i^{(1)}(Q, \epsilon) \cos \phi_P \cos \phi_Q ds \quad (1.11)$$

と書き表せる。ここで、反応性イオンの反射は“diffuse re-emission model”で記述できると仮定した。また、 $\sigma_i(Q, \epsilon)$ は点 Q におけるエネルギー ϵ をもった反応性イオンの吸収率、 $F_i^{(i)}(Q, \epsilon)$ は点 Q における入射イオンフラックス、 r は点 P と点 Q を結ぶ直線距離、 $\cos \phi_P$ は点 P における法線と直線 \overrightarrow{QP} とのなす角、 $\cos \phi_Q$ は点 Q における法線と直線 \overrightarrow{PQ} とのなす角、 ds は Profile に沿った線素である。

以上のことから、点 P における反応性イオンの全フラックス $F_i(P, \epsilon)$ は

$$F_i(P, \epsilon) = F_i^{(1)}(P, \epsilon) + F_i^{(2)}(P, \epsilon) \quad (1.12)$$

で与えられることが判る。ここで、 $F_i^{(1)}(P, \epsilon)$ は (1.10) 式で、そして $F_i^{(2)}(P, \epsilon)$ は (1.11) 式で与えられる。しかし、反応性ラジカルの場合と違って、 $F_i(P, \epsilon)$ を self-consistent に求めることはしない。何故なら、(1.11) 式の右辺のフラックスが $F_i^{(1)}(Q, \epsilon)$ となっているためである。

非反応性高エネルギーイオンの輸送・反応過程

非反応性高エネルギーイオン散乱の数学的な表現形式は反応性高エネルギーイオンのそれと同じ仮定を用いる。即ち、非反応性高エネルギーイオンの散乱は弾性散乱と非弾性散乱を用いて記述される。また、非反応性高エネルギーイオンの追跡は非弾性散乱が起こった段階で打ち止めとする。更に、簡単のため、弾性散乱の追跡も 1 度だけとする。即ち、今回考慮する非反応性高エネルギーイオンの反応過程は

- 1) 非弾性散乱
- 2) 弾性散乱 + 非弾性散乱

であり、その他の多重散乱は全て無視する。このような仮定の下で、非反応性高エネルギーイオンの輸送を記述する。

非反応性高エネルギーイオンは、基盤表面上のシース領域で加速され基盤表面にほぼ垂直に入射する。しかし、プラズマ中での熱運動による速度分布の広がりほぼそのまま生き残っている。従って、基盤表面での入射エネルギー ϵ をもった入射イオンに対するフラックスの角度依存性は、 $dF^{(i)}(\epsilon) = F_0^{(i)}(\epsilon) G^{(i)}(\theta) \cos \theta d\theta$ と表すことができる。ここで、 $F_0^{(i)}(\epsilon)$ はプラズマから基盤表面への入射エネルギー ϵ をもったイオンの入射フラックスである。^{††}

次に、非弾性散乱が起きる点での非反応性高エネルギーイオンのフラックスを計算する。

- 1) 直接反応における非反応性イオンのフラックス

シース領域からパターン内の点 P へ入射エネルギー ϵ を持って直接入射するイオンフラックス $F_i^{(1)}(P, \epsilon)$ は、マスク端と点 P との幾何学的配置で決まる角度により制限され ($\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$)、

$$F_i^{(1)}(P, \epsilon) = F_0^{(i)}(\epsilon) \int_{\theta_1}^{\theta_2} G_i(\theta) \cos(\theta - \psi) d\theta \quad (1.13)$$

と表せる。ここで、 $\phi = \theta - \psi$ は反応表面への入射角度である。この式によって、点 P でのフラックスが計算される。

2) 反射を含む非反応性イオンのフラックス

非反応性イオンの反射過程のモデル化には非反応性ラジカルの輸送過程とのアナロジーを参考にする。アナロジーは

- 入射ラジカルの吸着率 σ_r に対応して入射イオンの吸収率 σ_i を導入する。ここで用いた非反応性イオンの吸収率はフラックス F_i を持って入射した非反応性イオンの内、単位時間に $\sigma_i F_i$ 個の非反応性イオンが表面上に影響を与えることを意味する。
- フラックス F_r を持って入射したラジカルは単位時間に $\sigma_r F_r$ 個が表面に吸着するので、残りの $(1 - \sigma_r) F_r$ 個は表面から再放出される。同様に、フラックス F_i を持って入射した非反応性イオンは単位時間に $\sigma_i F_i$ 個が表面に吸収されるが、残りの $(1 - \sigma_i) F_i$ 個は表面に影響を与えずに表面から再放出される。
- 表面から再放出される過程は、非反応性ラジカルでも非反応性イオンでも同じであると仮定する。また、再放出過程ではエネルギーの変化はないと仮定する。

に基づいている。このアナロジーを用いると、反射による点 P における非反応性イオンのフラックス $F_i^{(2)}(P, \epsilon)$ は

$$F_i^{(2)}(P, \epsilon) = \int_{\text{Profile}} \frac{1}{2r} (1 - \sigma_i(Q, \epsilon)) F_i^{(1)}(Q, \epsilon) \cos \phi_P \cos \phi_Q ds \quad (1.14)$$

と書き表せる。ここで、非反応性イオンの反射は“diffuse re-emission model”で記述できると仮定した。また、 $\sigma_i(Q, \epsilon)$ は点 Q におけるエネルギー ϵ を持った非反応性イオンの吸収率、 $F_i^{(1)}(Q, \epsilon)$ は点 Q における入射イオンフラックス、 r は点 P と点 Q を結ぶ直線距離、 $\cos \phi_P$ は点 P における法線と直線 \vec{QP} とのなす角、 $\cos \phi_Q$ は点 Q における法線と直線 \vec{PQ} とのなす角、 ds は Profile に沿った線素である。

以上のことから、点 P における非反応性イオンの全フラックス $F_i(P, \epsilon)$ は

$$F_i(P, \epsilon) = F_i^{(1)}(P, \epsilon) + F_i^{(2)}(P, \epsilon) \quad (1.15)$$

で与えられることが判る。ここで、 $F_i^{(1)}(P, \epsilon)$ は (1.13) 式でそして $F_i^{(2)}(P, \epsilon)$ は (1.14) 式で与えられる。しかし、非反応性ラジカルの場合と違って、 $F_i(P, \epsilon)$ を self-consistent に求めることはしない。何故なら、(1.14) 式の右辺のフラックスが $F_i^{(1)}(Q, \epsilon)$ となっているためである。

反応性ラジカルの輸送・反応過程

反応性ラジカルが関与する散乱過程には

- 1) 弾性散乱
- 2) 表面への吸着
- 3) 熱励起による表面反応層からの離脱
- 4) イオンアシスト反応に伴う表面反応層からの離脱

がある。これらの過程を全て考慮し、イオン反応の場合に対して仮定したようなことはこの場合しない。即ち、上に述べた散乱過程を忠実に考慮して反応性ラジカルの輸送を記述する。

反応性ラジカルは、基盤表面上のシース領域で衝突を繰り返した後、基盤表面にはほぼ等方的に入射する。しかし、プラズマ中での熱運動による速度分布の広がりにはほぼそのまま生き残っている。プラズマ中での反応性ラジカルの速度分布は等方的であるが、シース領域での衝突でその等方的分布が崩れる可能性がある。^{*}そこで、基盤表面での入射ラジカルフラックスの角度依存性を考慮し、 $dF_n = F_n^0 G_n(\theta) \cos \theta d\theta$ と表す。ここで、 F_n^0 はプラズマから基盤表面への反応性ラジカルの入射フラックスである。また、速度分布に対して等方性を仮定すれば、 $G_n(\theta) = 1/2$ となる。

次に、種々の散乱過程によって生じる反応性ラジカルのフラックスの表現を与える。

1) 直接吸着における反応性ラジカルのフラックス

シース領域からパターン内の点 P へ直接入射する反応性ラジカルのフラックス $F_n^{(1)}(P)$ は、マスク端と点 P との幾何学的配置で決まる角度により制限され ($\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$),

$$F_n^{(1)}(P) = F_n^0 \int_{\theta_1}^{\theta_2} G_n(\theta) \cos(\theta - \psi) d\theta \quad (1.16)$$

と表せる。ここで、 $\phi = \theta - \psi$ は反応表面への入射角度である。この式によって、点 P でのフラックスが計算される。

2) 再放出された反応性ラジカルのフラックス

入射ラジカル n の表面に対する有限の吸着率 σ_n に由来する表面からのラジカルの再放出効果を考える。ラジカル n の入射フラックスを F_n とする。また、このラジカルの吸着率は $\sigma_n = \sum_k \sigma_{nk} \Theta_k$ と一般に表すことができる。ここで、 σ_{nk} は飛来するラジカル n の被エッチング材料膜上に形成されたラジカル k に対する吸着率である。また、 Θ_k は表面が単位面積当たりラジカル k で覆われている比率である。

このとき、フラックス F_n を持って入射したラジカル n は $\sigma_n F_n$ だけ吸着するから、残りの $(1 - \sigma_n) F_n$ は表面から再放出される。この再放出された反応性ラジカルの点 P におけるフラックス $F_n^{(2)}(P)$ は、“diffuse re-emission model” を用いて

$$F_n^{(2)}(P) = \int_{\text{Profile}} \frac{1}{2r} [1 - \sigma_n(Q)] F_n(Q) \cos \phi_P \cos \phi_Q ds \quad (1.17)$$

と表せる。ここで、 r は表面上の 2 点 P, Q の間を結ぶ直線距離、 $\cos \phi_P, \cos \phi_Q$ はこの直線と表面上の点 P, Q それぞれの法線とのなす角、 ds は被エッチング表面の断面に沿った線素であり、 σ_n の定義は上に述べてある。また、点 Q から放出されるラジカルの方向依存性は $\cos \phi_Q$ に比例すると仮定している。

3) イオン反応により表面から放出された反応性ラジカルのフラックス

反応性ラジカルの供給源として、被エッチング材料表面に吸着したラジカル n が入射イオンによって削り取られる場合がある。この場合、表面での反応も考慮すると、一般的な (1.9) 式より、入射エネルギー ϵ を持ったイオンによって生成される反応性ラジカルの個数は $\sum_{k \neq m} \sum_m Y_{km}^{(n)}(\epsilon) \Theta_m F_k^{(i)}(\epsilon)$ と表すことができる。ここで、 $Y_{km}^{(n)}(\epsilon)$ は表面反応層から離脱する反応生成物 n の収率、 Θ_m は表面が単位面積当たりラジカル m で覆われている比率、 $F_k^{(i)}(\epsilon)$ はエネルギー ϵ も持ったイオン k のフラックスである。

一度反応性ラジカルができてしまえば、後は上に述べた再放出される反応性ラジカルの吸着と同じになるから、この場合、点 P におけるフラックスを $F_n^{(3)}(P)$ であらわせば

$$F_n^{(3)}(P) = \sum_{k \neq m} \sum_m \int_0^{\epsilon_{max}} \int_{\text{Profile}} \frac{1}{2r} Y_{km}^{(n)}(\epsilon) \Theta_m(Q) F_k^{(i)}(Q, \epsilon) \cos \phi_P \cos \phi_Q ds d\epsilon \quad (1.18)$$

で与えられる。ここでも、“diffuse re-emission model” を使用した。また、 ϵ はイオンのエネルギー、 ϵ_{max} は最大のイオンエネルギーである。

4) 表面反応層からの熱励起離脱に基づく反応性ラジカルのフラックス

他の反応性ラジカルの供給源として、被エッチング材料表面に吸着したラジカル n が熱励起によって直接表面から離脱する場合も考えられる。この場合、反応性ラジカル n が表面から離脱する個数は、一般に (1.7) 式より、 $\sigma_s \Theta_n / \tau_n$ で与えられる。ここで、 σ_s は清浄な表面の全吸着サイトの面密度、 Θ_n は反応性ラジカル n が占有している表面の被覆率、 τ_n は反応性ラジカル n が被エッチング材料表面上に吸着している平均時間である。

あるフラックス F_m と吸着率 σ_m を持って入射したラジカル m は被エッチング材料表面に $\sigma_m F_m$ だけ吸着し、残りの $(1 - \sigma_m) F_m$ は表面から再放出される。この再放出されるラジカルと熱励起により表面から離脱するラジカルとの違いは、単に遅れの時間だけ（即ち、放出までの時間は、前者では瞬間であるが後者ではある有限な時間 τ_m である。）であり他のダイナミクス等は同じであると仮定する。この仮定のもとで熱励起により表面から放出されるラジカルの点 P におけるフラックス $F_n^{(4)}(P)$ は

$$F_n^{(4)}(P) = \frac{\sigma_s}{\tau_n} \int_{\text{Profile}} \frac{1}{2r} \Theta_n(Q) \cos \phi_P \cos \phi_Q ds \quad (1.19)$$

で与えられる。ここでも、再放出されるラジカルの場合同様、表面からのラジカルの離脱に対しても“diffuse re-emission model” を仮定する。

以上のことから、点 P における反応性ラジカルの全フラックス $F_n(P)$ は

$$F_n(P) = F_n^{(1)}(P) + F_n^{(2)}(P) + F_n^{(3)}(P) + F_n^{(4)}(P) \quad (1.20)$$

で与えられることが判る。ここで、 $F_n^{(1)}(P)$ は (1.16) 式で、 $F_n^{(2)}(P)$ は (1.17) 式で、 $F_n^{(3)}(P)$ は (1.18) 式で、そして $F_n^{(4)}(P)$ は (1.19) 式で与えられる。

非反応性ラジカルの輸送・反応過程

非反応性ラジカルが関与する散乱過程には

- 1) 弾性散乱
- 2) 表面への吸着
- 3) 熱励起による表面反応層からの離脱
- 4) イオンアシスト反応に伴う表面反応層からの離脱

がある。これらの過程を全て考慮し、イオン反応の場合に対して仮定したようなことはこの場合もしない。即ち、上に述べた散乱過程を忠実に考慮して非反応性ラジカルの輸送を記述する。

非反応性ラジカルは、基盤表面上のシーズ領域で衝突を繰り返した後、基盤表面にはほぼ等方的に入射する。しかし、プラズマ中での熱運動による速度分布の広がりにはほぼそのまま生き残っている。プラズマ中での非

反応性ラジカルの速度分布は等方的であるが、シース領域での衝突でその等方的分布が崩れる可能性がある。[†]そこで、基盤表面での入射ラジカルフラックスの角度依存性を考慮し、 $dF_n = F_n^0 G_n(\theta) \cos \theta d\theta$ と表す。ここで、 F_n^0 はプラズマから基盤表面への反応性ラジカルの入射フラックスである。また、速度分布に対して等方性を仮定すれば、 $G_n(\theta) = 1/2$ となる。

次に、種々の散乱過程によって生じる非反応性ラジカルのフラックスの表現を与える。

1) 直接吸着における非反応性ラジカルのフラックス

シース領域からパターン内の点 P へ直接入射する非反応性ラジカルのフラックス $F_n^{(1)}(P)$ は、マスク端と点 P との幾何学的配置で決まる角度により制限され ($\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$),

$$F_n^{(1)}(P) = F_n^0 \int_{\theta_1}^{\theta_2} G_n(\theta) \cos(\theta - \psi) d\theta \quad (1.21)$$

と表せる。ここで、 $\phi = \theta - \psi$ は反応表面への入射角度である。この式によって、点 P でのフラックスが計算される。

2) 再放出された非反応性ラジカルのフラックス

入射ラジカル n の表面に対する有限の吸着率 σ_n に由来する表面からのラジカルの再放出効果を考える。ラジカル n の入射フラックスを F_n とする。また、このラジカルの吸着率は $\sigma_n = \sum_k \sigma_{nk} \Theta_k$ と一般に表すことができる。ここで、 σ_{nk} は飛来するラジカル n の被エッチング材料膜上に形成されたラジカル k に対する吸着率である。また、 Θ_k は表面が単位面積当たりラジカル k で覆われている比率である。

このとき、フラックス F_n を持って入射したラジカル n は $\sigma_n F_n$ だけ吸着し、残りの $(1 - \sigma_n) F_n$ は表面から再放出される。この再放出された非反応性ラジカルの点 P におけるフラックス $F_n^{(2)}(P)$ は “diffuse re-emission model” を用いると

$$F_n^{(2)}(P) = \int_{\text{Profile}} \frac{1}{2r} [1 - \sigma_n(Q)] F_n(Q) \cos \phi_P \cos \phi_Q ds \quad (1.22)$$

と表せる。ここで、 r は表面上の 2 点 P, Q の間を結ぶ直線距離、 $\cos \phi_P, \cos \phi_Q$ はこの直線と表面上の点 P, Q それぞれの法線とのなす角、 ds は被エッチング表面の断面に沿った線素であり、 σ_n の定義は上に述べてある。また、点 Q から放出されるラジカルの方向依存性は $\cos \phi_Q$ に比例すると仮定している。

3) イオン反応により表面から放出された非反応性ラジカルのフラックス

非反応性ラジカルの供給源として、被エッチング材料表面に吸着したラジカル n が入射イオンによって削り取られる場合がある。この場合、表面での反応も考慮すると、一般的な (1.9) 式より、入射エネルギー ϵ を持ったイオンによって生成される非反応性ラジカルの個数は $\sum_{k \neq m} \sum_m Y_{km}^{(n)}(\epsilon) \Theta_m F_k^{(i)}(\epsilon)$ と表すことができる。ここで、 $Y_{km}^{(n)}(\epsilon)$ は表面反応層から離脱する非反応生成物 n の収率、 Θ_m は表面が単位面積当たりラジカル m で覆われている比率、 $F_k^{(i)}(\epsilon)$ はエネルギー ϵ を持ったイオン k のフラックスである。

一度非反応性ラジカルができてしまえば、後は上に述べた再放出された非反応性ラジカルの吸着と同じになるから、この場合、点 P におけるフラックスを $F_n^{(3)}(P)$ であらわせば

$$F_n^{(3)}(P) = \sum_{k \neq m} \sum_m \int_0^{\epsilon_{max}} \int_{\text{Profile}} \frac{1}{2r} Y_{km}^{(n)}(\epsilon) \Theta_m(Q) F_k^{(i)}(Q, \epsilon) \cos \phi_P \cos \phi_Q ds d\epsilon \quad (1.23)$$

で与えられる。ここでも、同様に、“diffuse re-emission model” を用いた。また、 ϵ はイオンのエネルギー、 ϵ_{max} は最大のイオンエネルギーである。

4) 表面反応層からの熱励起離脱に基づく非反応性ラジカルのフラックス

他の非反応性ラジカルの供給源として、被エッチング材料表面に吸着したラジカル n が熱励起によって直接表面から離脱する場合も考えられる。この場合、非反応性ラジカル n が表面から離脱する個数は、一般に (1.7) 式より、 $\sigma_s \Theta_n / \tau_n$ で与えられる。ここで、 σ_s は清浄な表面の全吸着サイトの面密度、 Θ_n は非反応性ラジカル n が占有している表面の被覆率、 τ_n は非反応性ラジカル n が被エッチング材料表面上に吸着している平均時間である。

あるフラックス F_m と吸着率 σ_m を持って入射したラジカル m は被エッチング材料表面に $\sigma_m F_m$ だけ吸着し、残りの $(1 - \sigma_m) F_m$ は表面から再放出される。この再放出されるラジカルと熱励起により表面から離脱するラジカルとの違いは、単に遅れの時間だけ（即ち、放出までの時間は、前者では瞬間であるが後者ではある有限な時間 τ_m である。）であり他のダイナミクス等は同じであると仮定する。この仮定のもとで熱励起により表面から放出されるラジカルの点 P におけるフラックス $F_n^{(4)}(P)$ は

$$F_n^{(4)}(P) = \frac{\sigma_s}{\tau_n} \int_{\text{Profile}} \frac{1}{2r} \Theta_n(Q) \cos \phi_P \cos \phi_Q ds \quad (1.24)$$

で与えられる。ここでも、再放出されるラジカルの場合同様、表面からのラジカルの離脱に対しても“diffuse re-emission model”を仮定する。

以上のことから、点 P における非反応性ラジカルの全フラックス $F_n(P)$ は

$$F_n(P) = F_n^{(1)}(P) + F_n^{(2)}(P) + F_n^{(3)}(P) + F_n^{(4)}(P) \quad (1.25)$$

で与えられることが判る。ここで、 $F_n^{(1)}(P)$ は (1.21) 式で、 $F_n^{(2)}(P)$ は (1.22) 式で、 $F_n^{(3)}(P)$ は (1.23) 式で、そして $F_n^{(4)}(P)$ は (1.24) 式で与えられる。

エッチングレート

エッチングレートは一般に

$$ER_{\text{total}} = ER_{\text{thermal}} + ER_{\text{physical}} + ER_{\text{ion assisted}} \quad (1.26)$$

と分解することができる。ここで、 ER_{thermal} は吸着ラジカルに被覆されている表面における熱励起型化学反応によるエッチングレートを、 ER_{physical} は高エネルギーイオンによる清浄な被エッチング材料表面に対する物理的スパッタリングによるエッチングレートを、そして $ER_{\text{ion assisted}}$ は高エネルギーイオンによる吸着ラジカルに被覆されている表面に対する物理的及び化学的スパッタリング（イオンアシスト反応）によるエッチングレートを表す。

以下に、エッチングレート ER_{thermal} 、 ER_{physical} 及び $ER_{\text{ion assisted}}$ について具体的な形を与える。

熱励起型化学反応によるエッチングレート

点 P における熱励起型化学反応によるエッチングレートは

$$ER_{\text{thermal}}(P) = \frac{1}{\rho} \sum_n k_0^{(n)} \Theta_n(P) \exp\left(-\frac{E_a^{(n)}}{k_B T}\right) \quad (1.27)$$

で与えられると仮定する。ここで、 ρ は基盤の密度、 $k_0^{(n)}$ はラジカル n に関係した定数、 Θ_n はラジカル n の表面占有率、 $E_a^{(n)}$ は活性化エネルギー、 k_B は Boltzmann 定数そして T は基盤の温度である。また、 n についての和は全てのラジカルに亘ってである。

物理的スパッタリングによるエッチングレート

点 P における物理的スパッタリングによるエッチングレートは

$$ER_{\text{physical}}(P) = \frac{1}{\rho} \sum_i \int_0^{\epsilon_{max}} Y_i^{\text{physical}}(\epsilon) F_i(P, \epsilon) \Theta_0(P) d\epsilon \quad (1.28)$$

で与えられる。ここで、 ϵ_{max} は入射イオンの最大エネルギー、 $Y_i^{\text{physical}}(\epsilon)$ はイオン i による物理的スパッタリング収率、 $F_i(P, \epsilon)$ はエネルギー ϵ を持つ点 P における入射イオン i のフラックス ((1.12) または (1.15) で与えられる。)、 $\Theta_0(P)$ は点 P における清浄な基盤表面の占有率である。また、 i についての和は反応性イオンと非反応性イオンの両方に亘ってである。

イオンアシスト反応によるエッチングレート

点 P におけるイオンアシスト反応によるエッチングレートは

$$ER_{\text{ion assisted}}(P) = \frac{1}{\rho} \sum_i \sum_j \int_0^{\epsilon_{max}} Y_{ij}^{\text{ion assisted}}(\epsilon) F_i(P, \epsilon) \Theta_j(P) d\epsilon \quad (1.29)$$

で与えられる。ここで、 ϵ_{max} は入射イオンの最大エネルギー、 $Y_{ij}^{\text{physical}}(\epsilon)$ はイオン i によりラジカル j が表面反応層から離脱する収率、 $F_i(P, \epsilon)$ はエネルギー ϵ を持つ点 P における入射イオン i のフラックス ((1.12) または (1.15) で与えられる。)、 $\Theta_j(P)$ は点 P におけるラジカル j の表面占有率である。また、 i についての和は反応性イオンと非反応性イオンの両方に亘ってであり、 j についての和は基盤材料を含むようなラジカル j 全体に亘ってである。しかし、基盤材料だけの場合は除く。

デポジションレート

デポジションレート DR_{total} は一般に

$$DR_{\text{total}} = DR^{(1)} + DR^{(2)} - DR^{(3)} \quad (1.30)$$

と分解することができる。ここで、第 1 項は堆積物が降り注ぐ効果による、第 2 項は入射ラジカルと表面反応層のラジカルとが反応し堆積物が生成される効果による、最後の項はイオンアシスト反応によって表面反応層から堆積物が離脱する効果によるデポジションレートを表す。

堆積物が降り注ぐ効果によるデポジションレート

点 P において堆積物が降り注ぐ効果によるデポジションレートは、(1.5) 式を用いて

$$DR^{(1)}(P) = \frac{1}{\rho_d} \sum_m \left[\sigma_{m0} \Theta_0(P) + \sum_k \sigma_{mk} \Theta_k(P) \right] F_m(P) \quad (1.31)$$

で与えられる。ここで、 ρ_d はデポジション層の密度、 σ_{m0} および σ_{mk} はそれぞれ、ラジカル m と清浄な被エッチング材料膜との間のおよび飛来したラジカル m と被エッチング材料膜上に形成されたラジカル k の吸着膜層との間の吸着率である。また、k についての和は被エッチング材料膜上に形成されたラジカル k がラジカル m で置き換わる全ての k に互る。更に、m についての和は全ての堆積物に互ってである。

堆積物の生成によるデポジションレート

点 P において入射ラジカルと表面反応層のラジカルとが反応し堆積物が生成される効果によるデポジションレートは、(1.6) 式より

$$DR^{(2)}(P) = \frac{1}{\rho_d} \sum_m \sum_{l \neq m} \left[\sigma_{l0}^{(m)} \Theta_0(P) + \sum_{k \neq m} \sigma_{lk}^{(m)} \Theta_k(P) \right] F_l(P) \quad (1.32)$$

と表せる。ここで、 $\sigma_{l0}^{(m)}$ および $\sigma_{lk}^{(m)}$ はそれぞれ、飛来するラジカル l と清浄な被エッチング材料膜との間の反応でおよび飛来したラジカル l と被エッチング材料膜上に形成されたラジカル k の吸着膜層との間の反応で堆積物 m が生成される生成率である。また、l についての和は m とは異なる入射ラジカル全体に互る。更に、k についての和は被エッチング材料膜上に形成されたラジカル k がラジカル l と反応し堆積物 m を生成する全ての k に互る。最後に m についての和は堆積物全体に互る。

イオンアシスト反応によるデポジションレート

点 P においてエネルギー ϵ を持ったイオンによるイオンアシスト反応によって表面反応層から堆積物が離脱する効果によるデポジションレートは、(1.9) 式より

$$DR^{(3)}(P) = \frac{1}{\rho_d} \sum_m \sum_{i \neq m} \int_0^{\epsilon_{max}} \left[\sum_l Y_{im}^{(l)}(\epsilon) \right] \Theta_m(P) F_i(P, \epsilon) d\epsilon \quad (1.33)$$

で与えられる。ここで、 $Y_{im}^{(l)}(\epsilon)$ は表面反応層から離脱する反応生成物 l の収率であり、堆積物 m がラジカル l に分解することも考慮している。また、i に対する和は全ての入射イオンに関してであり、m についての和は全ての堆積物に互ってである。

表面移動速度

表面移動速度（基盤内部に向かって正）は $v = ER_{total} - DR_{total}$ で与えられる。 $v > 0$ であればエッチングが進み、 $v < 0$ ならばデポジションが進む。また、v の進行方向は表面の法線方向である。

このように算出された表面移動速度を用いて微小時間 Δt の間に被エッチング材料膜上表面の各点の形状を変化させ新しい表面形状を算出する。次に、この新しい表面形状で新たに表面移動速度を算出する。この繰り返しで最終的な表面形状が得られる。処で、時間の進行に伴った表面形状の変化はストリングモデルで表現する。

計算手法の概略

基礎式

表面反応に関する基礎式

表面反応に関する基礎式は, (1.3), (1.4) 式より, 空間各点 P において

$$\sigma_s \frac{d\Theta_0}{dt}(P, t) = - \sum_{m=1}^N [G_m(P, t) - H_m(P, t)] \quad (2.1)$$

$$\sigma_s \frac{d\Theta_m}{dt}(P, t) = G_m(P, t) - H_m(P, t) \quad \text{for } m = 1, \dots, N \quad (2.2)$$

で与えられる. ここで, σ_m は清浄な表面の全吸着サイトの綿密度, Θ_m は吸着ラジカル m による表面被覆率, Θ_0 清浄な被エッチング材料膜による表面被覆率である. ただし, この Θ_0 と Θ_m とは

$$\begin{aligned} \Theta_0(P, t) + \sum_{m=1}^N \Theta_m(P, t) &= 1 \\ \Theta_m(P, t) &\geq 0 \quad \text{for } m = 0, 1, \dots, N \end{aligned}$$

なる規格化条件と拘束条件を満足する. また, $G_m(t)$ はラジカル m の単位時間当たりの全吸着数, $H_m(t)$ はラジカル m が単位時間当たりに表面から消滅する全個数であり,

$$\begin{aligned} G_m(P, t) &\equiv G_m^{(1)}(P, t) + G_m^{(2)}(P, t) \\ H_m(P, t) &\equiv H_m^{(1)}(P, t) + H_m^{(2)}(P, t) + H_m^{(i)}(P, t) \end{aligned}$$

と書くことができる. (以下では, 時刻 t を省略する.) ただし, $G_m^{(1)}(P)$ は (1.5) 式より

$$G_m^{(1)}(P) = \left[\sigma_{m0} \Theta_0(P) + \sum_{k \neq m} \sigma_{mk} \Theta_k(P) \right] F_m(P) \quad (2.3)$$

で与えられ, $G_m^{(2)}(P)$ は (1.6) 式より

$$G_m^{(2)}(P) = \sum_{l \neq m} \left[\sigma_{l0}^{(m)} \Theta_0(P) + \sum_{k \neq m} \sigma_{lk}^{(m)} \Theta_k(P) \right] F_l(P) \quad (2.4)$$

で与えられ, $H_m^{(1)}$ は (1.7) 式より

$$H_m^{(1)} = \frac{1}{\tau_m} \sigma_s \Theta_m \quad (2.5)$$

で与えられ, $H_m^{(2)}$ は (1.8) 式より

$$H_m^{(2)} = \sum_{k \neq m} \sum_{l \neq m} \sigma_{km}^{(l)} \Theta_m F_k \quad (2.6)$$

で与えられ, $H_m^{(i)}$ は (1.9) 式より

$$H_m^{(i)} = \sum_{k \neq m} \int_0^{\epsilon_{max}} \left[\sum_l Y_{km}^{(l)}(\epsilon) \right] \Theta_m F_k^{(i)}(\epsilon) d\epsilon \quad (2.7)$$

で与えられる. ただし, ϵ はイオンのエネルギー, ϵ_{max} はイオンの最大エネルギーである. 上の式において, F_n ($n = m, l, k$) はラジカル n のフラックスであり, (1.20) または (1.25) 式より, 積分方程式

$$F_n(P) = F_n^{(1)}(P) + F_n^{(2)}(P) + F_n^{(3)}(P) + F_n^{(4)}(P) \quad (2.8)$$

を満足する。ただし、(1.16) ~ (1.19) 式または (1.21) ~ (1.24) 式より、

$$\begin{aligned} F_n^{(1)}(P) &= F_n^0 \int_{\theta_1}^{\theta_2} G_n(\theta) \cos(\theta - \psi) d\theta \\ F_n^{(2)}(P) &= \int_{\text{Profile}} \frac{1}{2r} [1 - \sigma_n(Q)] F_n(Q) \cos \phi_P \cos \phi_Q ds \\ F_n^{(3)}(P) &= \sum_{k \neq m} \sum_m \int_0^{\epsilon_{max}} \int_{\text{Profile}} \frac{1}{2r} Y_{km}^{(n)}(\epsilon) \Theta_m(Q) F_k^{(i)}(Q, \epsilon) \cos \phi_P \cos \phi_Q ds d\epsilon \\ F_n^{(4)}(P) &= \frac{\sigma_s}{\tau_n} \int_{\text{Profile}} \frac{1}{2r} \Theta_n(Q) \cos \phi_P \cos \phi_Q ds \end{aligned}$$

である。また、イオンのフラックス $F_k^{(i)}(P, \epsilon)$ は、(1.12) または (1.15) 式より

$$F_k^{(i)}(P, \epsilon) = F_k^{(1)}(P, \epsilon) + F_k^{(2)}(P, \epsilon) \quad (2.9)$$

で与えられる。ただし、(1.10) と (1.11) 式または (1.13) と (1.14) 式より

$$\begin{aligned} F_k^{(1)}(P, \epsilon) &= F_0^{(i)}(\epsilon) \int_{\theta_1}^{\theta_2} G_i(\theta) \cos(\theta - \psi) d\theta \\ F_k^{(2)}(P, \epsilon) &= \int_{\text{Profile}} \frac{1}{2r} (1 - \sigma_k(Q, \epsilon)) F_k^{(1)}(Q, \epsilon) \cos \phi_P \cos \phi_Q ds \end{aligned}$$

エッチングレートに関する基礎式

エッチングレートに関する基礎式は、(1.26) 式より、点 P において

$$ER_{\text{total}}(P) = ER_{\text{thermal}}(P) + ER_{\text{physical}}(P) + ER_{\text{ion assisted}}(P) \quad (2.10)$$

で与えられる。ただし、(1.27), (1.28) 及び (1.29) 式より、 ER_{thermal} 、 ER_{physical} 及び $ER_{\text{ion assisted}}$ は

$$\begin{aligned} ER_{\text{thermal}}(P) &= \frac{1}{\rho} \sum_n k_0^{(n)} \Theta_n(P) \exp\left(-\frac{E_a^{(n)}}{k_B T}\right) \\ ER_{\text{physical}}(P) &= \frac{1}{\rho} \sum_i \int_0^{\epsilon_{max}} Y_i^{\text{physical}}(\epsilon) F_i(P, \epsilon) \Theta_0(P) d\epsilon \\ ER_{\text{ion assisted}}(P) &= \frac{1}{\rho} \sum_i \sum_j \int_0^{\epsilon_{max}} Y_{ij}^{\text{ion assisted}}(\epsilon) F_i(P, \epsilon) \Theta_j(P) d\epsilon \end{aligned}$$

デポジションレートに関する基礎式

デポジションレートに関する基礎式は、(1.30) 式より、点 P において

$$DR_{\text{total}}(P) = DR^{(1)}(P) + DR^{(2)}(P) - DR^{(3)}(P) \quad (2.11)$$

で与えられる。ただし、(1.31), (1.32) 及び (1.33) 式より $DR^{(1)}$ 、 $DR^{(2)}$ 及び $DR^{(3)}$ は

$$\begin{aligned} DR^{(1)}(P) &= \frac{1}{\rho_d} \sum_m \left[\sigma_{m0} \Theta_0(P) + \sum_k \sigma_{mk} \Theta_k(P) \right] F_m(P) \\ DR^{(2)}(P) &= \frac{1}{\rho_d} \sum_m \sum_{l \neq m} \left[\sigma_{l0}^{(m)} \Theta_0(P) + \sum_{k \neq m} \sigma_{lk}^{(m)} \Theta_k(P) \right] F_l(P) \\ DR^{(3)}(P) &= \frac{1}{\rho_d} \sum_m \sum_{i \neq m} \int_0^{\epsilon_{max}} \left[\sum_l Y_{im}^{(l)}(\epsilon) \right] \Theta_m(P) F_i(P, \epsilon) d\epsilon \end{aligned}$$

表面移動速度に関する基礎式

表面移動速度（基盤内部に向かって正）は $v = ER_{\text{total}} - DR_{\text{total}}$ で与えられる。 $v > 0$ であればエッチングが進み、 $v < 0$ ならばデポジションが進む。ただし、 v の進行方向は表面の法線方向である。このように算出された表面移動速度を用いると、微小時間 Δt の間に被エッチング材料膜表面上の各点の移動距離は $v\Delta t$ で与えられる。

2. 4 低環境負荷型集積化プロセス基盤技術開発

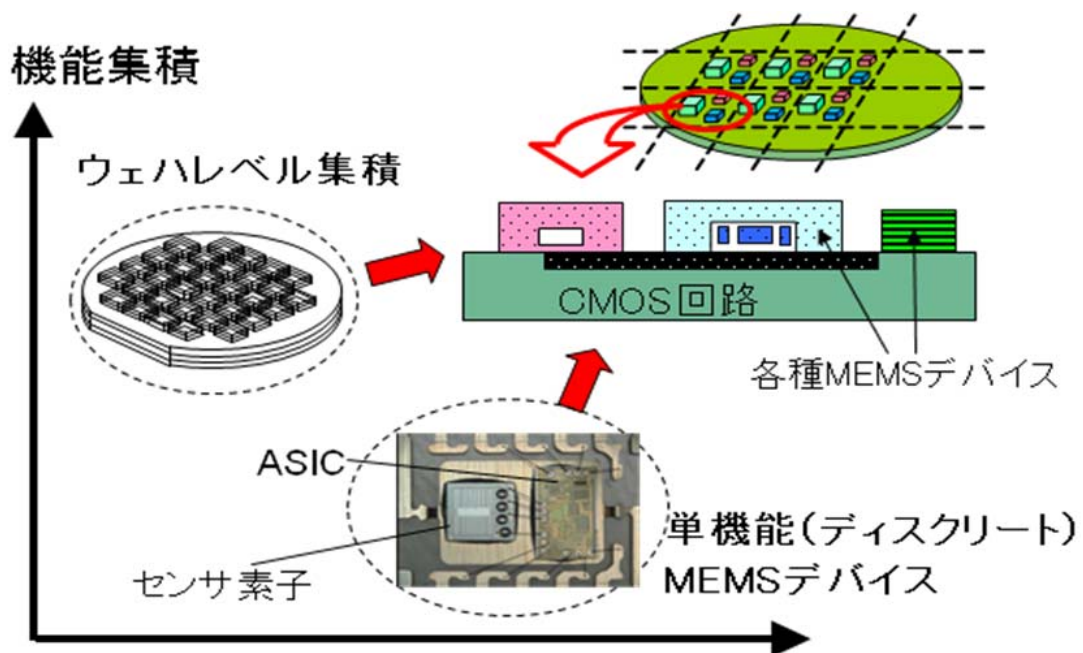
(1) 研究の目的

様々な異種デバイス、電子回路などと複合化した集積化 MEMS を低環境負荷で製造するためには、それぞれのデバイスを最適なウエハサイズ・プロセスで製造することが有効である。そのため、個別に製造された MEMS デバイスや電子回路その他のデバイスを集積化するための、接合技術の開発が必須である。そのための接合法には以下のような特性が要求される。

加速度センサ、ジャイロ、RF スイッチなど様々な MEMS においては、振動型の構造が多く用いられている。そのような振動型の構造では固有振動数と Q 値がデバイス性能に大きく影響する。これらを制御するには、デバイス構造に加え、封止構造内の気体の圧力の調整が必要であり、ジャイロなどでは高い Q 値を得るために真空での封止が、一方、加速度センサなどでは低圧から大気圧程度での封止が必要とされる。このため、MEMS の接合法には、真空から大気圧までの圧力範囲において封止接合が可能であることが求められている。

一方で接合プロセスには、プロセス自体の環境負荷の低減ばかりではなく、デバイスへのダメージ低減の観点から、プロセスの低温化が強く求められている。なかでも近年、上記のような封止された振動型構造の MEMS デバイスにおいて、可動部の固着（スティッキング）によるデバイスの不良が大きな問題となり、歩留まりの低下や信頼性の低下などの原因となっている。そのための対策として各種の単分子膜によるコーティングが用いられているが、このような単分子膜の特性を損なわないプロセス温度の上限は 250°C 程度であることが分かっている¹⁾。このため、接合プロセス温度はそれ以下であることが必要であり、これにより各種の MEMS デバイスの製造プロセスの歩留まりと信頼性が向上し生産性の向上に基づいた観点で環境負荷の低減が可能となる。

以上の理由から本研究開発では、ウエハ・ツー・ウエハとチップ・ツー・ウエハ技術を組み合わせた、ウエハサイズ、チップサイズに制限されることのない、様々な異種デバイスのウエハレベル一括集積化技術を実現するための基盤技術として、250°C 以下で大気圧付近から真空雰囲気まで封止できる接合プロセスについて検討したのでその報告をする。



図V.2.4.1-1 異種デバイスのウェハレベル一括集積化技術

(2) 接合技術

MEMS デバイスの製造に用いられているウェハレベルでの接合技術として、図V.2.4.2-1 に示すような陽極接合が知られている。陽極接合は、1960 年代後半に米国の Mallory 社で開発された接合方法で、最初は Mallory 法と呼ばれていた。シリコンとガラスの研磨面を重ねて 400~500℃に加熱し、ガラス側に 500~1000V 程度のマイナス電圧を印加すると、ガラスに含まれる Na⁺などのアルカリイオンがマイナス電極側に移動し、ガラスの接合面側に空間電荷層が形成される。その結果、ガラスとシリコンとの間で静電引力が働き界面で原子間結合が起きることによって、大きな接合力を得ることが出来る。陽極接合は大きな接合強度を得ることは出来るが、いくつかの問題を含んでいる。接合には 500~1000V の高電圧が必要で、静電引力による曲がり、電子回路、内部素子の破壊が生じる場合がある。また、400℃以上の高温で接合するため、接合後、常温に戻した場合にガラスとシリコンの熱膨張係数の違いにより、基板の反りが発生する。さらには、ガラス中のアルカリイオンの析出などが挙げられる。

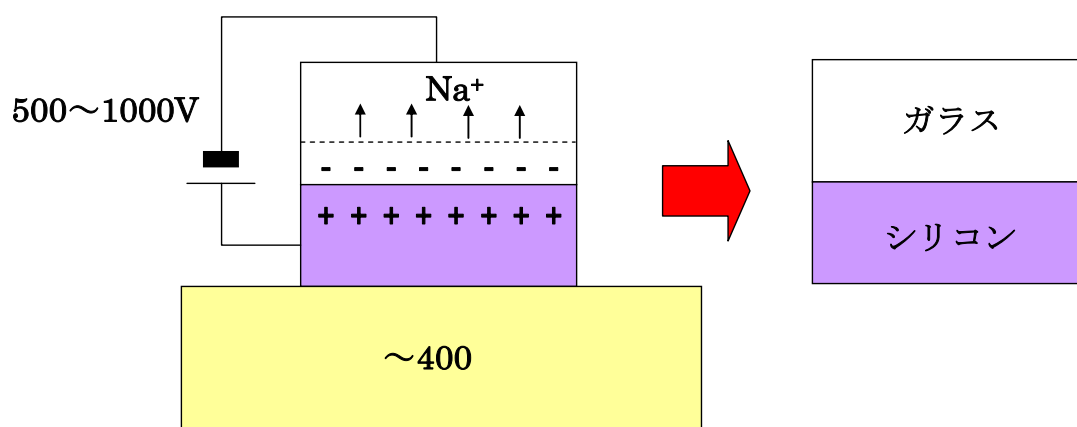
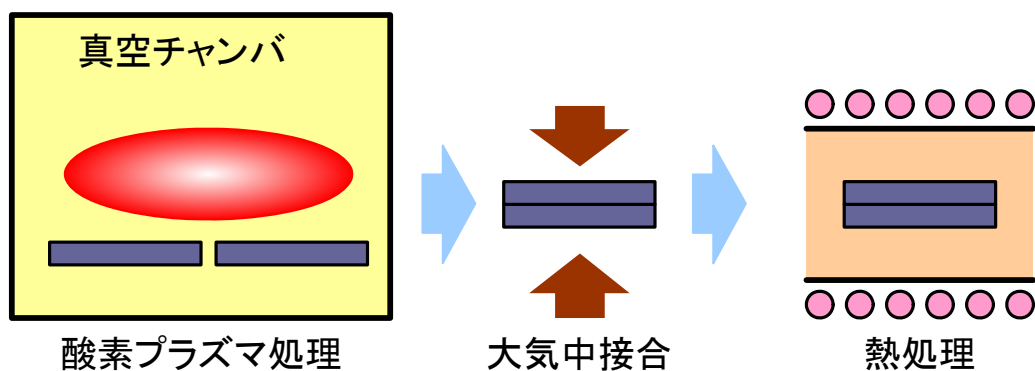


図 V.2.4.2-1 陽極接合の原理図

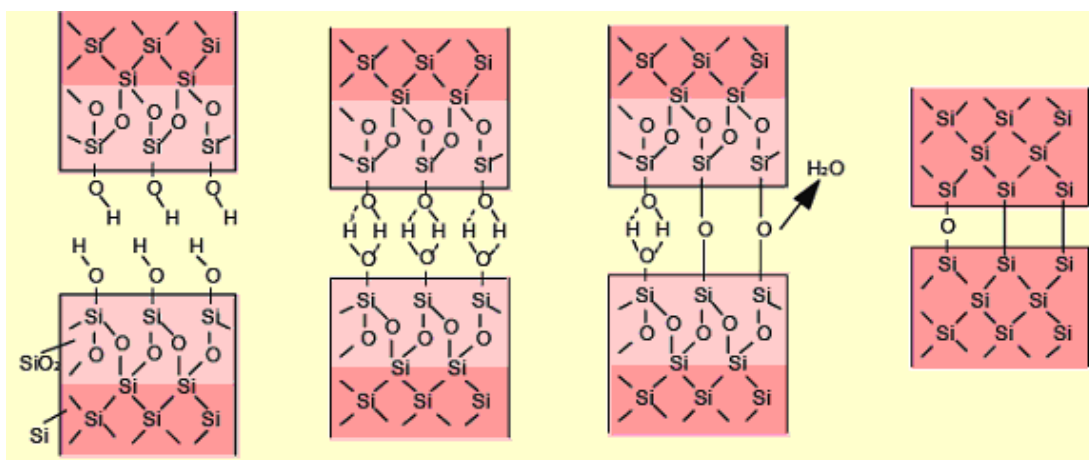
陽極接合に代わる電圧を印加しない接合方法として、ウエハ直接接合が挙げられる。ウエハ直接接合は、CMP などにより研磨加工された、非常に粗さの小さい面同士を貼り合わせ、加熱処理により接合する技術である。ウエハ直接接合では、ウエハの表面を硝酸や、硫酸過酸化水素水混合液などで親水化処理を行なった後、ウエハを貼り合わせ水素結合により弱接合する。この状態で熱処理を行なうと、ほとんど無加圧で接合を得ることが出来る。しかしながら、実用的な強い強度を得るためには、1000℃以上の熱処理が必要である。

ウエハ直接接合の熱処理温度を低減するため、接合界面をプラズマで改質することで接合をおこなう技術が仏 LETI や独 Max Planck 研究所などで研究されている。例えば、図 2.4.2-2 に示すように、接合表面をプラズマ処理することで OH 基が形成され、OH 基間の水素結合力による仮接合、および低温アニールによる水分子の脱離により接合がおこなわれる。低温アニール工程において水分子等によりガス発生するので、接合界面での気泡発生課題を解決する必要がある²⁾。

本研究では低温で強固な接合が可能なプラズマ表面活性化処理による接合について検討したのでそれを報告する。



接合の原理



図V.2.4.2-2 プラズマ表面処理によるウエハ直接接合の原理図

(3) 集積化プロセス要素技術の評価

(3) -1 技術課題

チップサイズや種類の異なる機能デバイスを同一ウエハ上へ、フレキシブルに集積化するためには、図V.2.4.3-1-1に示すような技術課題がある。

1) フレキシブルに仮接合、剥離を可能とする接合強度の制御

キャリアウエハを用い、一括で集積化接合するためには、各デバイスチップがキャリアウエハに対して、運搬可能な程度に接合され、本接合後、容易に剥離可能となる接合強度の制御が必要である。

2) 機能膜の機能を低下させることのない低温接合（250℃以下）

構造体がスティッキングするのを防止する固着防止膜の機能を劣化させないためには250℃以下での低温接合が必須である。また、異種材料のデバイスの接合など熱膨張係数が異なる材質の接合では、接合後の残留応力の低減などの観点からも低温での接合が望ましい。

3) 大気圧付近から真空雰囲気での気密封止

デバイスには、ジャイロ等、真空雰囲気での封止が必要なものもある。また、特性の安定化のためには封止内部は気密状態が望ましい。

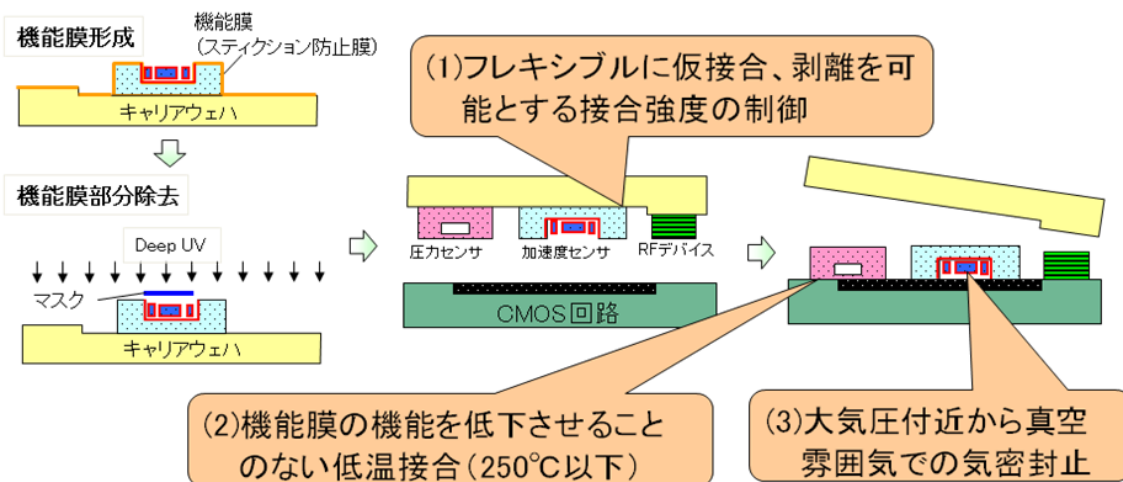


図 V.2.4.3-1-1 一括集積化の技術課題

これらの技術課題を解決するために、本年度は次の開発を実施した。

(i) 接合強度制御技術と気密封止技術

一括集積化のためにキャリアウエハへの仮接合の接合強度を、正規の接合強度の 1/10 以下に安定して制御することを目指す。

具体的には接合表面の(a)長周期粗さ、(b)短周期粗さ、及び(c)表面改質により、接合強度制御、及び気密封止の実現を図る。(a)~(c)の実施検討項目について以下に示す。

(a)長周期粗さ

シリコン深堀エッチング又は異方性ウェットエッチングを用い、凸形状、ライン&スペースなどをシリコン基板に形成して接合強度を制御する。

(b)短周期粗さ

プラズマ強度、照射時間、材料ガス(Ar、O₂ など)などのパラメータ制御により、シリコン基板に微細な凹凸を形成して接合強度を制御する。また、CMP (Chemical Mechanical Polishing)の条件設定により、シリコン基板上に堆積したポリシリコンの短周期粗さ制御も検討する。

(c)表面改質

Ar、O₂ プラズマによる表面活性化処理などで接合表面の状態の改質により接合強度の制御、及び気密封止の実現を図る。

(ii) 機能膜の機能を低下させない低温接合技術

機能膜としては、振動型構造の MEMS デバイスにおいて、可動部の固着(スティッキング)を防止する SAM (Self-Assembled Monolayer)膜を用いる。SAM 膜の特性が劣化しない、250°C以下の低温接合技術実現に向け、接合面に付着した機能膜の影響把握と、機能膜の部分的除去方法確立に向けた課題抽出を行なう。機能膜の部分的除去法については、ステンシルマスクを使用した UV 照射やプラズマ照射などを検討する。

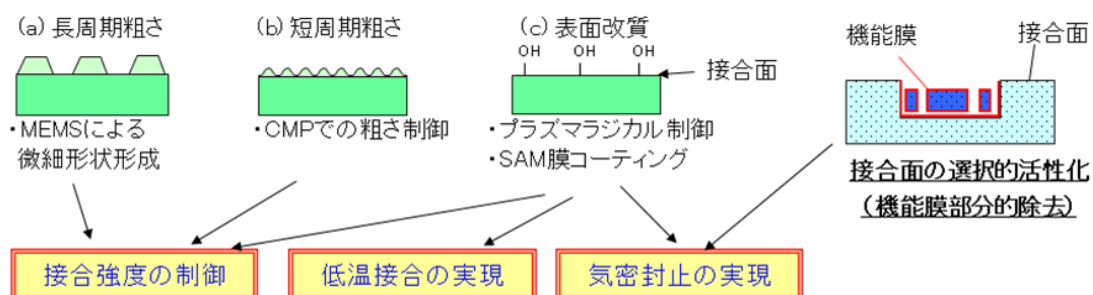


図 V.2.4.3-1-2 接合制御の概略図

(3) -2 接合強度制御技術と気密封止技術

(3) -2-1 長周期粗さ

図 V.2.4.3-2-1-1 に今回接合に使用したパターンを示す。接合ウエハは 8 インチシリコンウエハで、明るい部分が凸形状で接合する部分である。形状は Deep-RIE にて 10 μm エッチングして製作した。

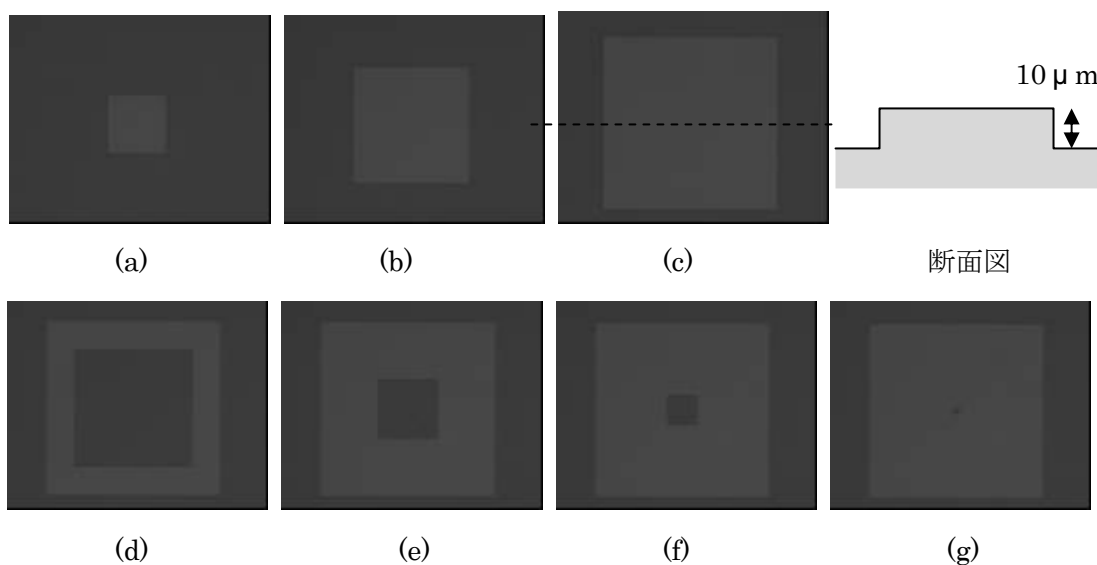


図 V.2.4.3-2-1-1 接合パターン

- (a) 1mm 角
- (b) 2mm 角
- (c) 3mm 角
- (d) 3mm 角に 2mm 角の穴
- (e) 3mm 角に 1mm 角の穴
- (f) 3mm 角に 0.5mm 角の穴
- (g) 3mm 角に 0.1mm 角の穴

接合は本プロジェクトで導入したボンドテック株式会社製プラズマ表面活性化接合装置(WAP-1000M)により接合を行なった。接合条件は次の通りである。

[接合条件]

表面活性化処理

シーケンシャルプラズマ³⁾

O₂ プラズマ：出力 30W、ガス流量 20ml/min、圧力 60Pa、時間 30sec

N₂ ラジカル：出力 250W、ガス流量 20ml/min、圧力 60Pa、時間 15sec

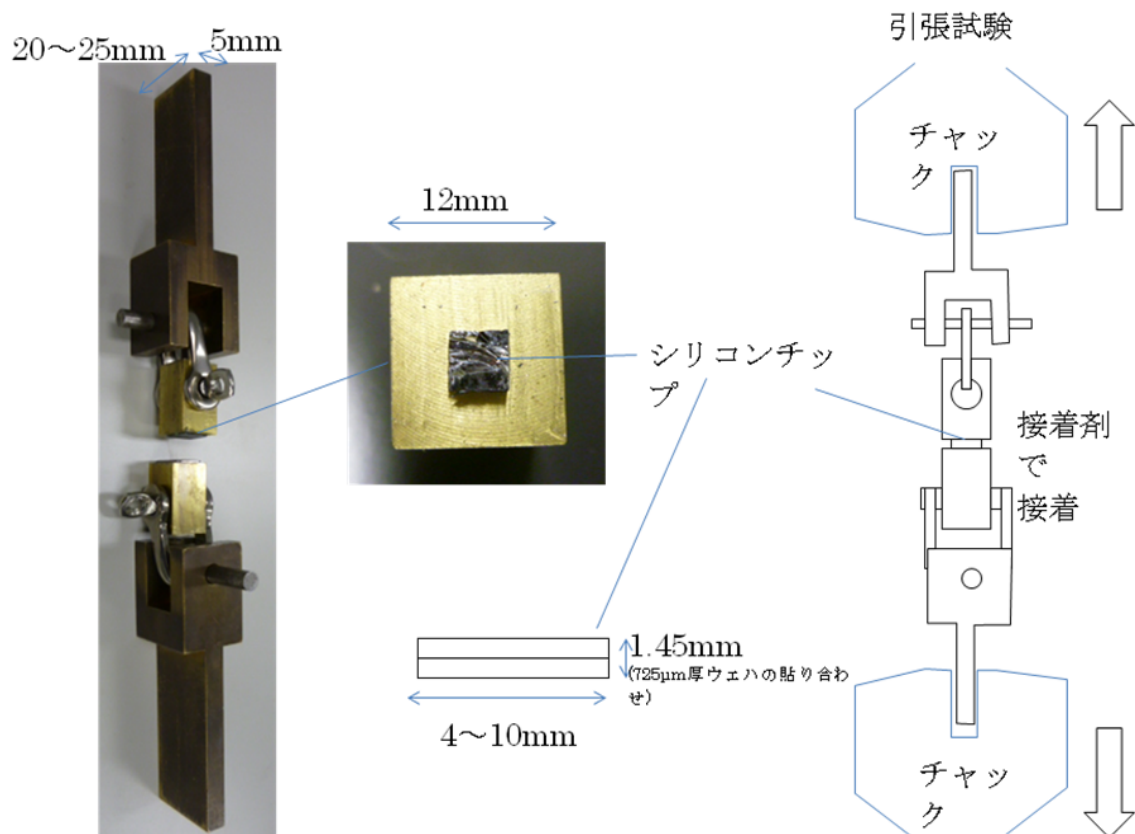
接合前状態

クールプレートによる温度制御で湿度 65%に制御して貼り合わせ

接合

温度 250°C、加圧 1t、時間 1hr

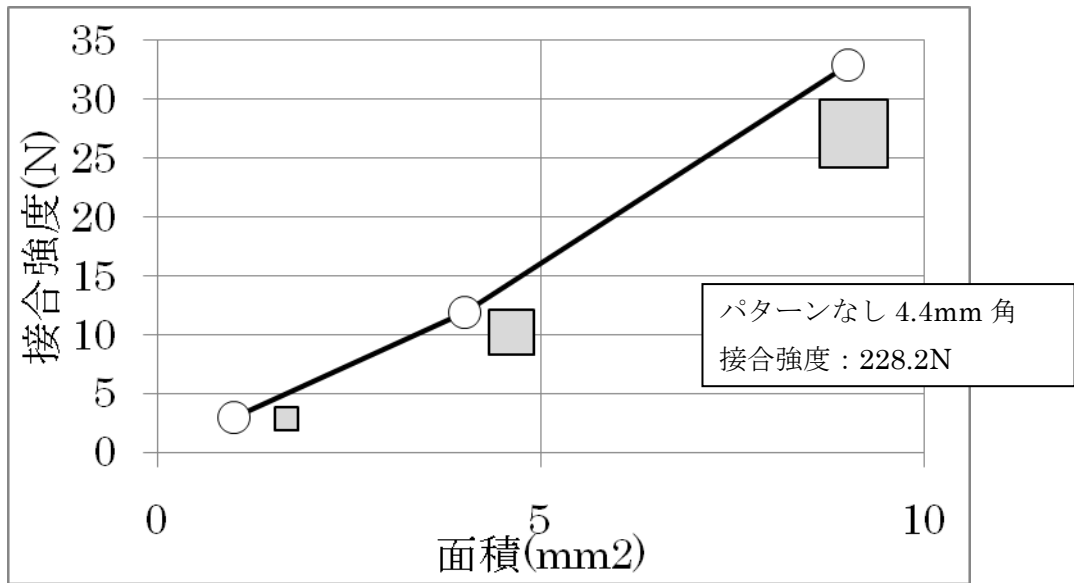
接合後のシリコンウエハをステルスダイシング装置にて 4.4mm 角にダイシングし、図 .2.4.3-2-1-2 に示す治具を使用し引張試験を実施した。シリコンチップを接着剤で真鍮治具中央に接着し、出来るだけ斜め方向へ力が生じないようにしている。引張試験装置は本プロジェクトで導入した広栄商事株式会社製引張試験装置(MX-2000N、500N)を用いた。



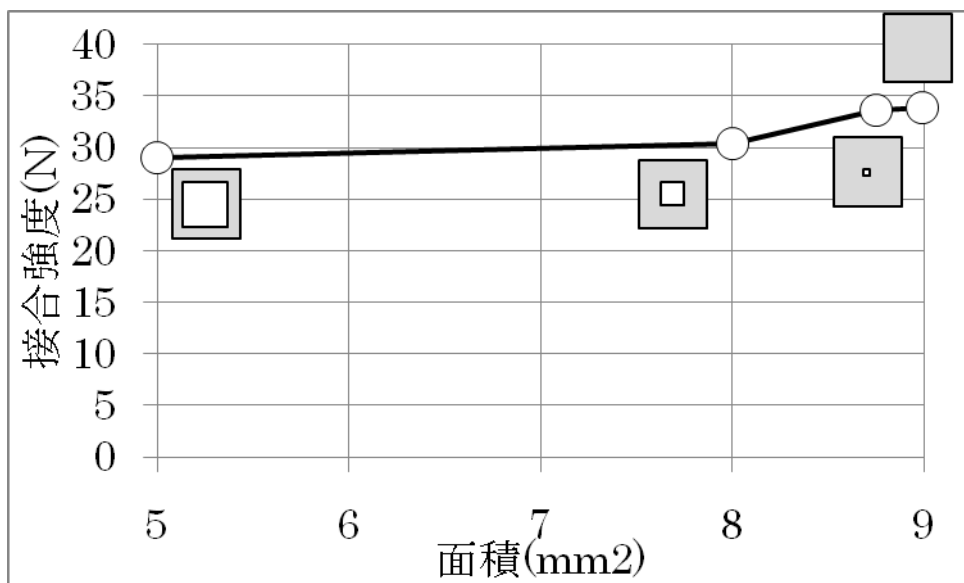
図V.2.4.3-2-1-2 引張試験治具

.3-2-1-3 に引張試験による接合強度評価結果を示す。接合強度はそれぞれ各 10 チップの平均値である。

(1)の正方形パターンでは、ほぼ面積に比例して接合強度が変化することが判る。それに対して、(2)のくり抜きパターンでは接合強度は面積に大きく依存しないことが判る。また、パターン形成なしの 4.4mm 角の正方形パターンの場合は 228.2N と非常に大きな値を示すことから、応力集中の影響が大きいと思われる。図V.2.4.3-2-1-4 に示すように、パターンが存在する場合は、接合部に切り欠きが発生するため、この部分に応力集中が発生すると考えられる。切り欠き形状は各チップでほぼ同一であるため、接合強度は応力集中が発生する外周形状に依存することとなると考えられる。したがって、接合パターンの外周形状を制御することで、パターンなしの正規の接合強度に対して、1/10 の接合強度を制御することが可能となる。今回の例では接合パターンを 2.6mm 角 (面積 6.76mm²) 程度にすることで、正規の接合強度 228.2N に対して、約 1/10 の接合強度とすることが可能となる。

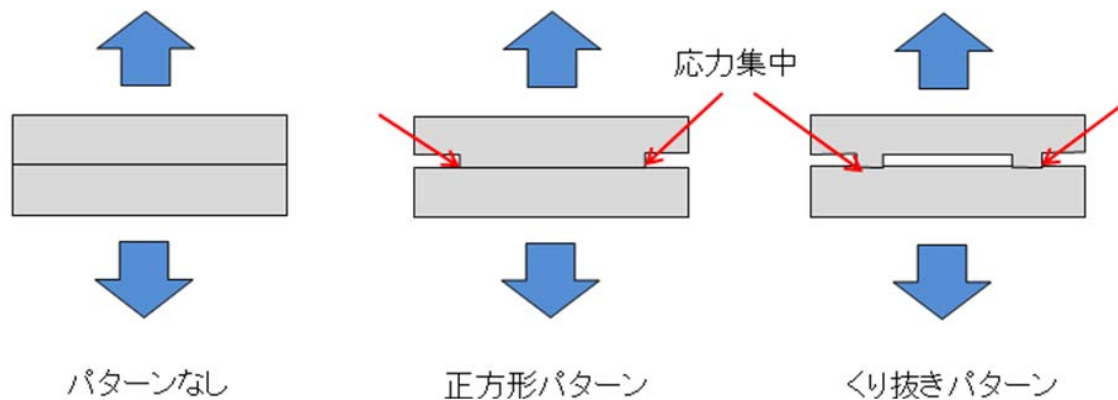


(1) 正方形パターン



(2) くり抜きパターン

図V.2.4.3-2-1-3 接合強度評価結果

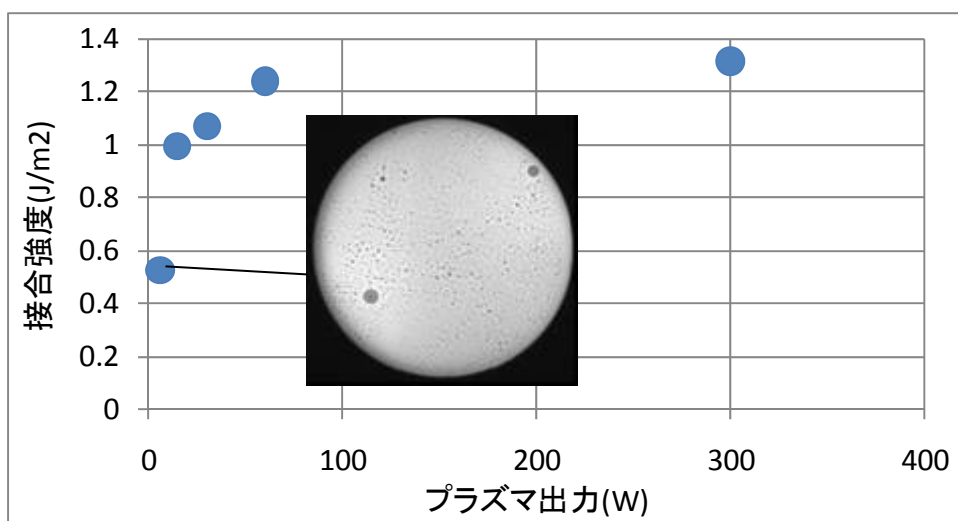


図V.2.4.3-2-1-4 応力集中

(3) -2-2 短周期粗さ

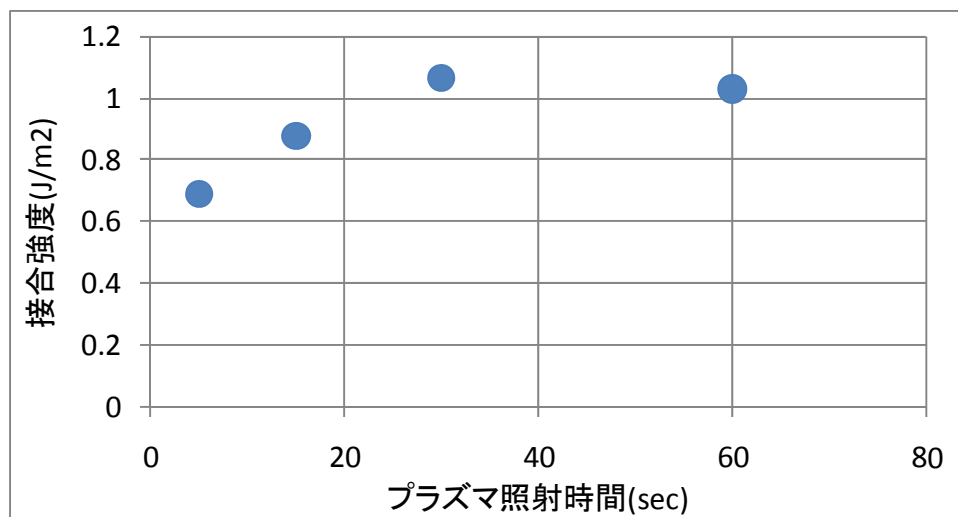
図V.2.4.3-2-2-1 にプラズマ出力と接合強度の関係を示す。今回は O₂ プラズマによる表面活性化接合を実施した。出力以外は前回接合条件と同様である。また、接合強度はカミソリ刃を挿入するブレードテスト⁴⁾にて評価した。観察は本プロジェクトで導入した浜松ホトニクス株式会社製赤外観察装置(C9597-11)と PVA TePla Analytical Systems 社製超音波観察装置(SAM300)を用いた。

プラズマ出力が高くなるほど接合強度が増加する。プラズマ出力が 6W と低い場合、図中に示すように活性化が非常に弱いため未接合部(ボイド)が多く存在することが判る。プラズマ出力を高くした場合、表面が荒れ接合強度が低くなることを推定していたが、本装置の限界出力である 300W まででは接合強度の低下は生じていない。プラズマ処理による表面粗さの影響は小さいものと考えられる。



図V.2.4.3-2-2-1 プラズマ出力と接合強度の関係

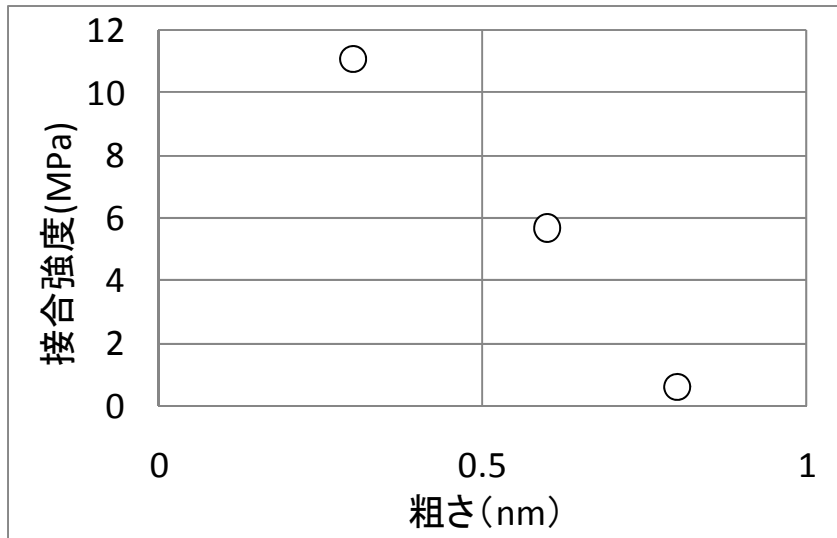
図V.2.4.3-2-2-2に、プラズマの照射時間と接合強度の関係を示す。図V.2.4.3-2-2-2より、照射時間が増加することで増加することが判る。30sec照射で頭打ちになることが判る。また、5sec程度の照射時間でも、ある程度の接合強度を得ることが可能であることを確認した。



図V.2.4.3-2-2-2 プラズマ照射時間と接合強度の関係

図V.2.4.3-2-2-3に、表面粗さと接合強度の関係を示す。接合に使用したウエハはシリコンウエハ上にノンドーパポリシリコン膜を2 μ m堆積した後、CMPを実施した。表面粗さは0.3,0.6,0.8nmの3種類用意し、同じ表面粗さを持ったウエハ同士を接合した。接合はシーケンシャルプラズマを使用し、加圧は0.5t、その他の条件は先の条件と同様で実施している。CMPを実施していない場合はポリシリコン膜の表面粗さは約50nmであり、この場合は接合不可であることが判っている。接合強度評価はパターンなしの10mm角のチップの引張試験により評価を行なった。

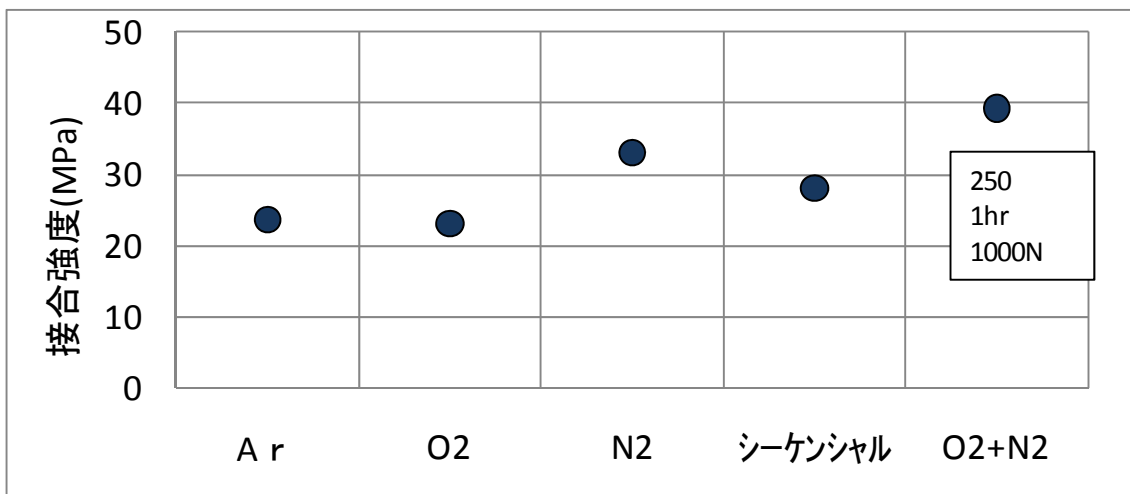
図V.2.4.3-2-2-3より、表面粗さが小さいほど接合強度が大きくなることが判った。ポリシリコン膜のCMPによる最小粗さの限界値は0.3nm程度であるが、接合強度10MPa以上と母材破壊と同等の接合強度を得ることが可能であることを確認した。以上のように、表面粗さを制御することで正規の接合強度に対して、1/10の接合強度を制御することが可能となることを確認した。



図V.2.4.3-2-2-3 表面粗さと接合強度の関係

(3) -2-3 表面改質

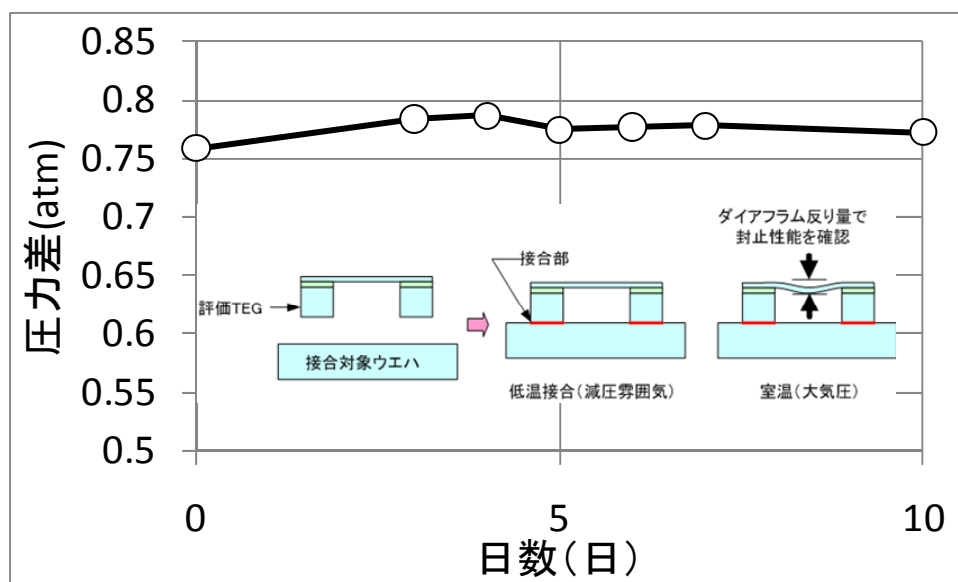
.3-2-3-1 にプラズマガス種の違いによる接合強度を示す。接合条件は加圧 1000N でガス種以外は先の条件と同様である。接合強度評価はパターンなしの 4.4mm 角のチップの引張試験により評価を行なった。図V.2.4.3-2-3-1 より、単純に比較すると O₂+N₂ ガスプラズマによる表面活性化処理が最も接合強度が高いことになるが、全ガス種で母材破壊を確認しているので接合強度に関してはガス種による大きな違いは見られないものと思われる。



図V.2.4.3-2-3-1 ガス種による接合強度の違い

次に気密封止の確認のために、接合後のダイアフラムの反りを測定した。ダイアフラムは SOI ウェハ(5/2/400 μm)で作製し、シーケンシャルプラズマによる表面活性化後、真空

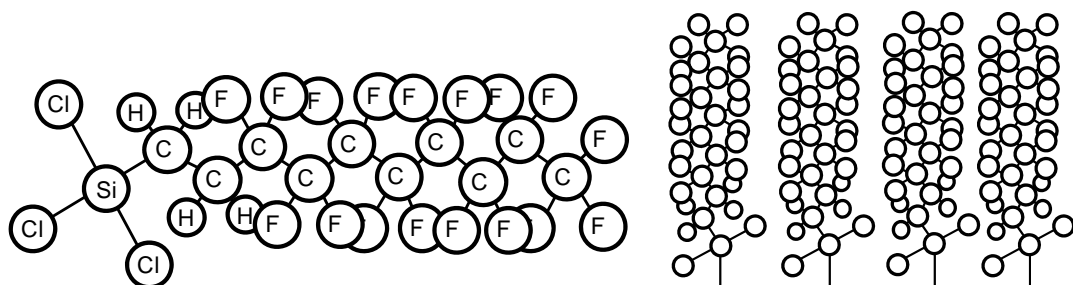
雰囲気中で封止接合(接合条件は先と同様)を実施した。図V.2.4.3-2-3-2 に真空封止後の圧力変動を示す。SOI ウェハで作製したダイアフラムは円形状で、半径 600 μm 、シリコン厚さ 5 μm で形成しており、その反り量から圧力差を計算した。図V.2.4.3-2-3-2 より圧力差の変動はほとんどないことが分かり、気密封止されていることが確認出来た。



図V.2.4.3-2-3-2 真空封止後の圧力変動

(3) -3 機能膜の機能を低下させない低温接合技術

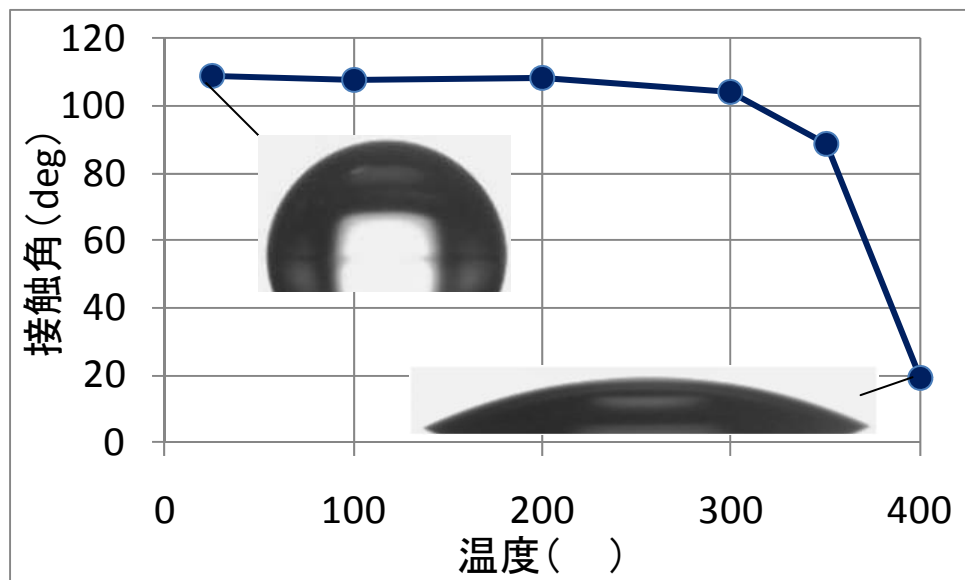
構造体のスティクションを防止する固着防止膜として使用する SAM 膜の評価を行なった。SAM 膜として FDTS(ペルフルオロデシルトリクロロシラン)膜を選択した。図 .2.4.3-3-1 に FDTS 膜の分子構造を示す。FDTS 膜は本プロジェクトで導入した IST 社製表面改質気相成膜装置(RPX-540)を使用してシリコンウェハ上に単分子層として成膜した。



図V.2.4.3-3-1 FDTS 膜

まず、FDTS 膜の温度依存性を確認した。図V.2.4.3-3-2 に FDTS 膜の水接触角温度依存性を示す。実験は大気中ホットプレート上にウェハを 30min 置いた後に接触角の測定を行

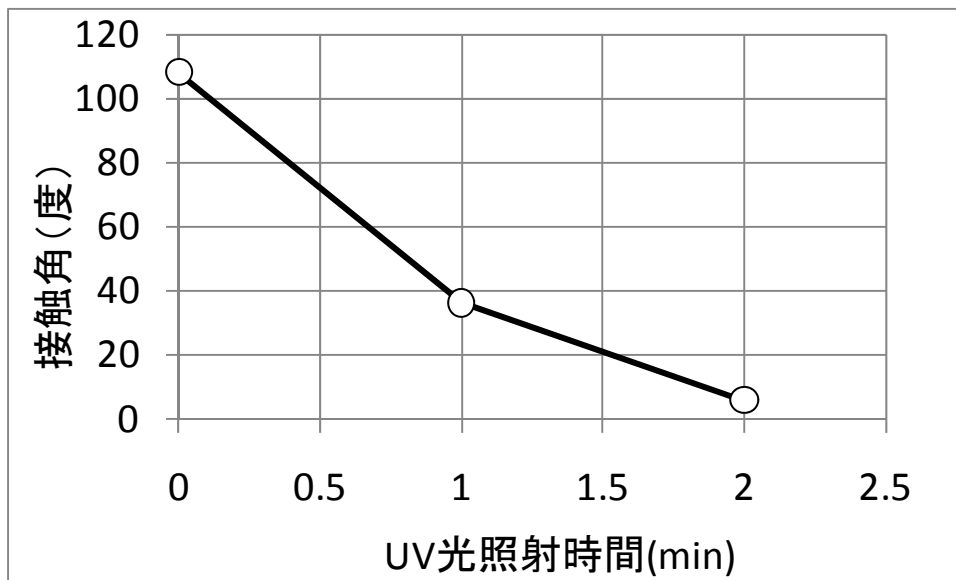
なった。



図V.2.4.3-3-2 FDTS膜の接触角温度依存性

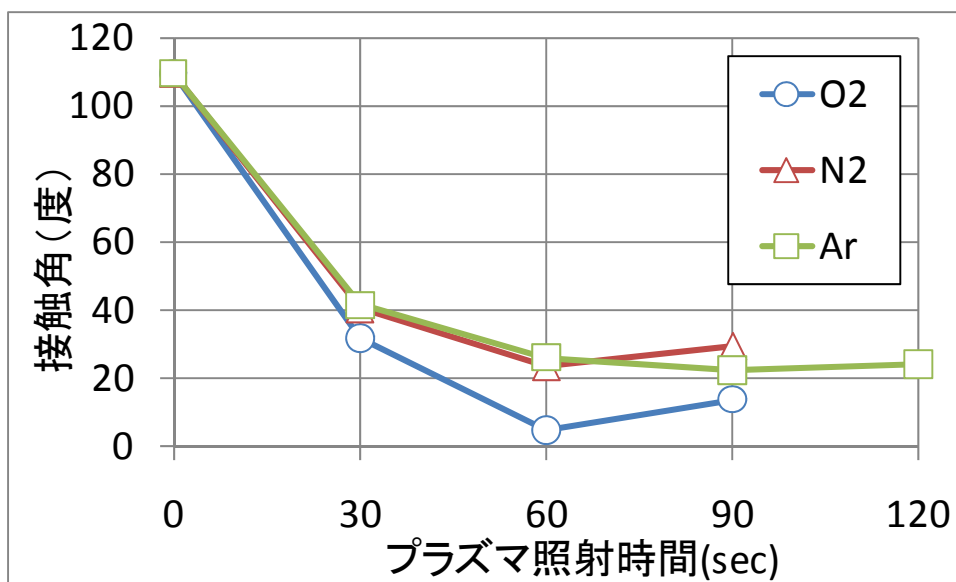
図V.2.4.3-3-2より、接触角は成膜直後には約110度と高い撥水性を示すが、温度が300を超えたあたりから接触角は低下し、400°Cでは約20度となり親水性を示すことが判った。このことから、250°C以下の低温接合技術の確立が必要であることが確認できる。

次にFDTS膜にDeepUV光(合成石英ランプ：波長184.9nm+253.7nm)を照射し接触角の変化を測定した。UV照射には、セン特殊光源株式会社製UV照射装置(PL2003N)を使用した。UV照射後の接触角の変化を図V.2.4.3-3-3に示す。UV光を2min程度照射することで接触角を10度以下にすることが出来ることが判った。また、オゾンが発生する波長184.9nmが出ないオゾンレス石英ランプ(波長253.7nmのみ)を使用した場合、10min照射後も接触角が変化しないことが判っている。そのため、FDTS膜の分解にはオゾンの寄与が大きいものと考えられる。



図V.2.4.3-3-3 UV 光照射時間と接触角の関係

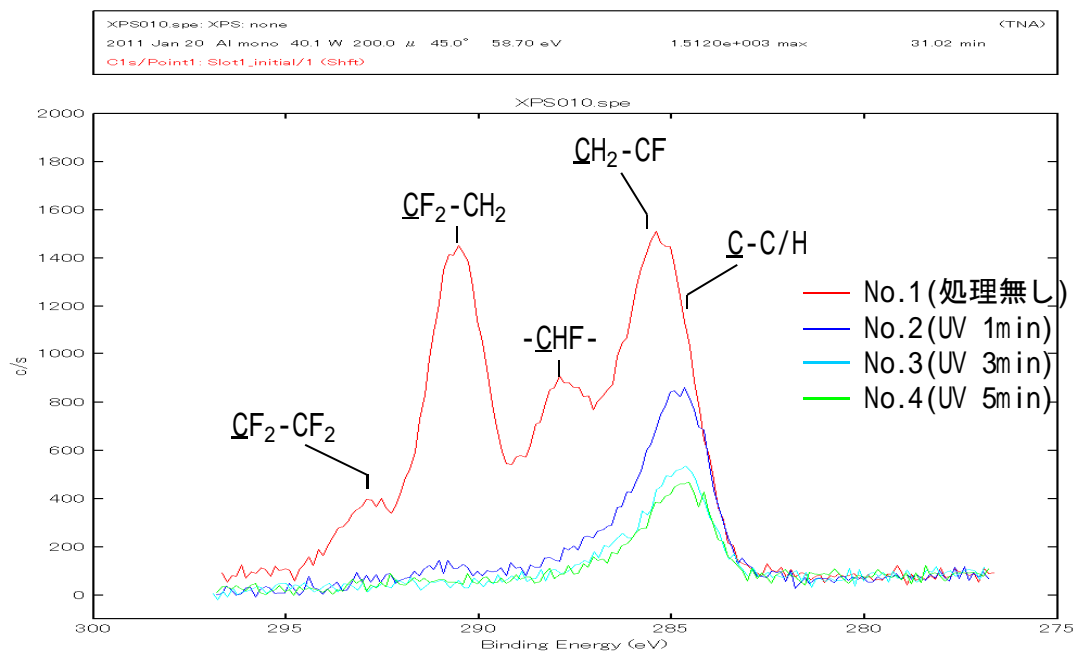
図V.2.4.3-3-4 に各種プラズマを照射した場合の接触角の変化を示す。O₂、N₂、Ar のプラズマガスを用いた。どの場合も 60sec 照射すれば接触角は十分な低さを示すことが判る。特に、O₂ プラズマはより親水性を示すことが判り、表面改質としては O₂ プラズマの効果が大きいことが判った。



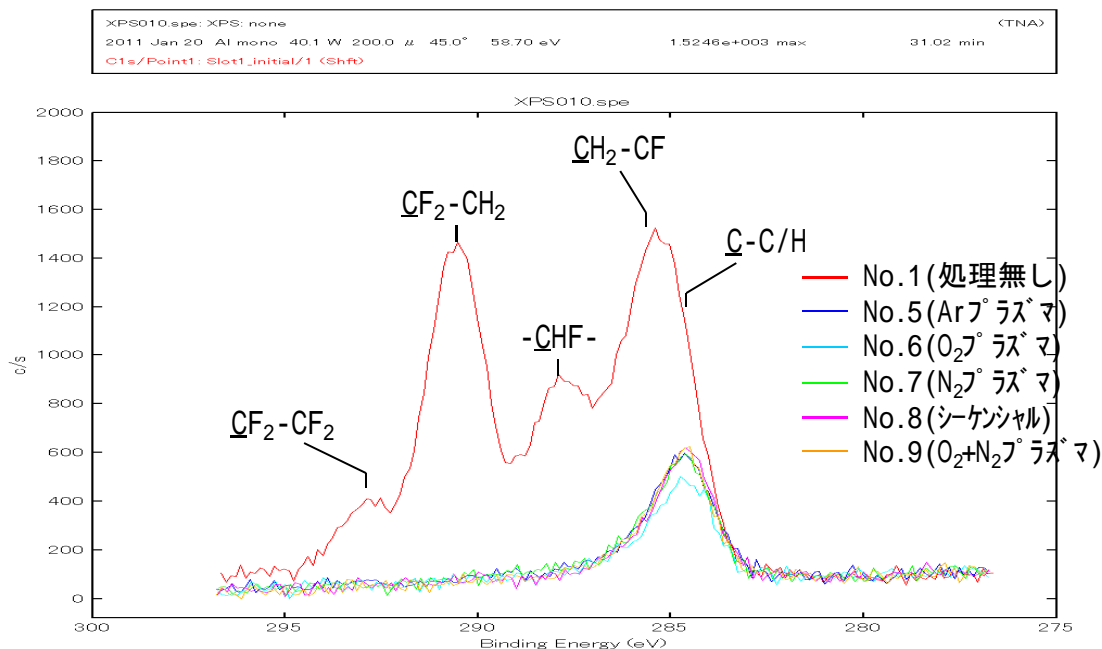
図V.2.4.3-3-4 プラズマ照射時間と接触角の関係

さらに、UV 光、プラズマ照射の影響を確認するため、UV 光、プラズマを照射した場合

の表面組成の変化を XPS(X 線光電子分光)で分析した。図 V.2.4.3-3-5 に XPS 分析結果を示す。使用した試料はシリコンウエハ上に FDTS 膜を成膜し、その後 UV 光照射、プラズマ照射をしたウエハを使用した。



(a) UV 光



(b) プラズマガス種

図 V.2.4.3-3-5 XPS 分析

[試料内容]

- No.1(処理無し)
- No.2(UV 光 1min)
- No.3(UV 光 3min)
- No.4(UV 光 5min)
- No.5(Ar プラズマ)
- No.6(O₂プラズマ)
- No.7(N₂プラズマ)
- No.8(シーケンシャル:O₂プラズマ後 N₂ラジカル処理)
- No.9(O₂+N₂プラズマ)

UV 光は前述合成石英ランプを使用 (波長 184.9nm+253.7nm)
プラズマガスの照射条件は接合条件と同様

XPS 装置は PHI 社製 Quantum-2000 を使用した。

処理無しの No.1 については、FDTS 膜由来の CF₂-CF₂, CF₂-CH₂, -CHF-, CH₂-CF, C-CH 結合成分が認められた。

UV 光を照射すると時間とともに各結合が減少し、No.3 の 3min 以上の照射でほとんど無くなることが判った。

プラズマ照射ではガス種に関わらず、全ての処理で FDTS 膜がほとんど残っていないことが確認出来た。特に No.6 の O₂ プラズマ照射では C-CH 結合の低下が最も大きく、FDTS 膜の除去能力が高いことが判った。

次に、FDTS 膜を除去した後に接合可能か確認をした。図 V.2.4.3-3-6 に、FDTS 膜を UV 光、N₂、O₂ プラズマ照射で除去後、真空封止した場合の圧力変動結果を示す。ダイアフラムは先の実験と同様の SOI 構造を使用している。UV 光照射の場合はダイアフラム(SOI ウエハ)側はシーケンシャルプラズマを照射して接合している。FDTS 膜に N₂、O₂ プラズマを照射した場合は、ダイアフラム側は同種のプラズマガス種(N₂、O₂)で表面活性化をしている。

図 V.2.4.3-3-6 より圧力変動はほとんどなく十分な気密封止が達成出来ていることが判る。したがって、FDTS 膜を成膜し、UV 光やプラズマを照射することで FDTS 膜を除去することが可能となることが判った。

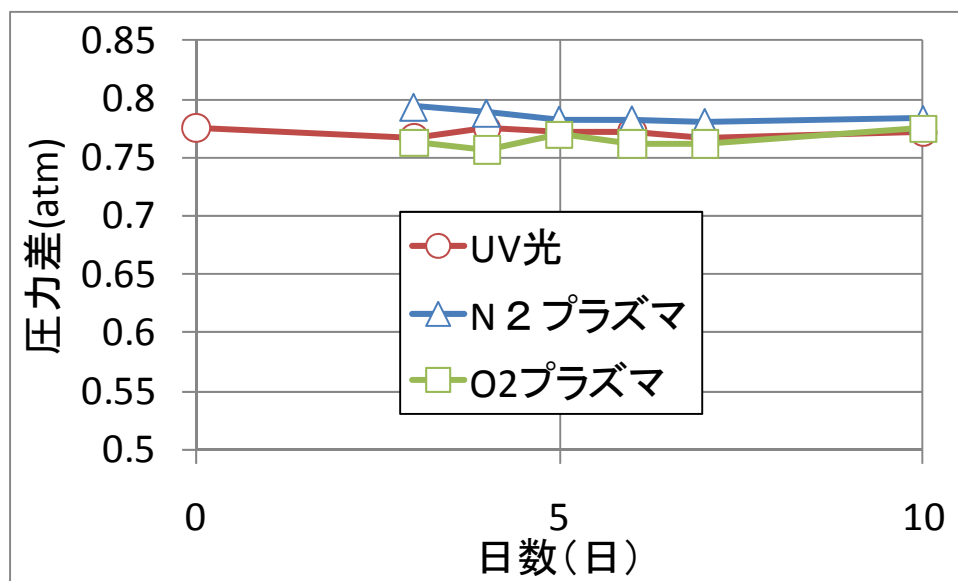


図 V.2.4.3-3-6 真空封止後の圧力変動

図 V.2.4.3-3-7 にシリコンチップをステンシルマスクとした場合のパターニング結果を示す。FDTS 膜を成膜したウエハ上に 1～10mm 角のシリコンチップを配置し、(a)UV 光 5min、(b)N₂ プラズマ、(c)O₂ プラズマを照射した。

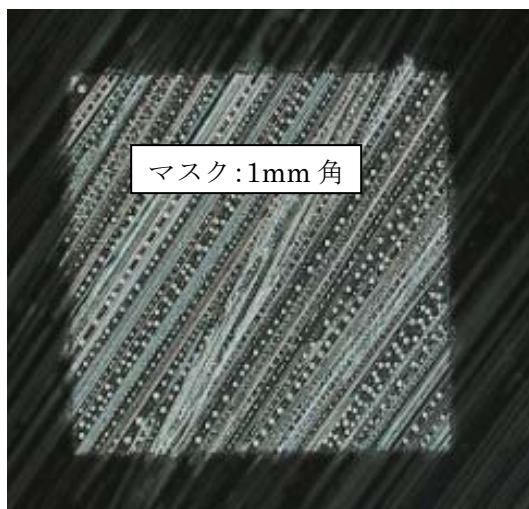
(a)UV 光照射の場合、パターン形状がはっきり観察できるが、斜線も観察された。このことより、パターニングは可能であるが、FDTS 膜の除去能力が低いことと、僅かではあるが裏面に回り込んで FDTS 膜を損傷するものと考えられる。

(b)N₂ プラズマ照射の場合、ほぼ回り込みが無く、パターニングが可能であることを確認した。Ar プラズマでも同様の結果を得た。

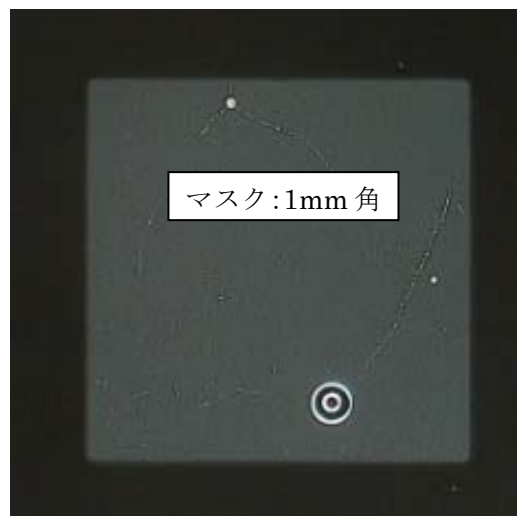
(c)O₂ プラズマ照射の場合、回り込みが大きく、3mm 角チップをステンシルマスクとしても、FDTS 膜の領域が 1mm 角程度まで小さくなるが判った。シーケンシャル、O₂+N₂ プラズマでも同様の結果を得た。

このことから、以下のことが考察される。

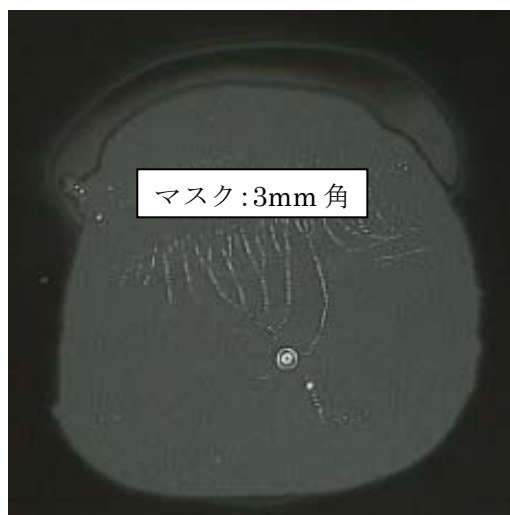
- ・オゾンは吸着してさらに UV 光が照射されることで、初めて除去能力が生じる。
- ・N₂、Ar プラズマではイオンの衝撃効果によって膜が除去される。
- ・O₂ プラズマで発生するオゾン等の活性種には、FDTS 膜を除去する効果がある。



(a)UV 光



(b)N2 プラズマ



(c)O2 プラズマ

図V.2.4.3-3-7 ステンシルマスク保護での FDTS 膜除去

(4) まとめ

以上の研究開発によって、次のことが判明した。

- 1) 表面粗さや接合パターンを制御することで、一括集積化のためにキャリアウエハへの仮接合の接合強度を、正規の接合強度の 1/10 以下に安定して制御することが可能となることが判った。
- 2) 接合強度は接合パターンの外枠の影響が大きいことが判った。
- 3) SAM 膜(FDTS 膜)は UV 光、プラズマ照射で除去可能であり、除去後の接合で十分な気密封止が得られることが判った。
- 4) FDTS 膜のパターニングは N2、Ar プラズマが最良である。UV 光では除去が不十分

であることと裏面への多少の回り込み、O₂プラズマはFDTS膜の除去能力は大きい、回り込み量が大きいことが判った。

本研究開発の結果から、表面粗さや接合パターンを制御して接合することで、一括集積化技術を実現するための接合が可能であることが判った。本技術を発展させることで、ウエハサイズ、チップサイズに制限されることのない、様々な異種デバイスの集積化を実現することが可能となる。

(5) 参考文献

- 1) “Thermal stability of self-assembled octadecyltrichlorosilane monolayers on planar and curved silica surfaces”, S. A. Kulkarni, et. al., Thin Solid Films, 496(2006), 420
- 2) “Wafer 接合の技術動向”、高木秀樹他、産業技術総合研究所
- 3) “Sequential Plasma Activated Process for Silicon Direct Bonding”, M. M. R. Howlader, T. Suga, H. Itoh, M. J. Kim, ECS Transactions, 3 (6) 191-202 (2006)
- 4) “Double-Cantilever Cleavage Mode of Crack Propagation”, P. P. Gillis and J. J. Gilman, J. Appl. Phys. 35, 647 (1964).

． 2. 5 スマートファブシステム技術開発

(1) 背景・目的

環境負荷の低減は持続可能な文明の実現へ向けた地球規模の課題であり、特に近年、地球温暖化への対応として、温室効果ガスの削減の必要性が強調されてきている。温室効果ガスには、二酸化炭素、メタン、六フッ化硫黄等の様々な化学種が存在するが、最新の IPCC 第 4 次評価報告書によれば、人為的に排出されている温室効果ガスの中では二酸化炭素の影響量が最も大きいと見積もられている。

産業界においては、エネルギー供給産業や輸送産業をはじめとし食品加工業や機器製造業など、温室効果ガスの削減に向けた取り組みが近年盛んになってきている。このような取り組みの中では、ライフサイクルアセスメント (LCA) の概念が導入され、製品の製造、輸送、販売、使用、廃棄、再利用までの各段階における環境負荷を明らかにすることで低炭素社会の実現を目指す取り組みが活発化しつつある。LCA の概念に基き二酸化炭素の排出量を表示することで環境負荷の低い製品・サービスを消費者に対して訴求する仕組みである「カーボンフットプリント」は、英国をはじめとする欧州、米国、韓国、タイなど世界中に広がっており、我が国においても経済産業省により「カーボンフットプリント制度試行事業」が実施されている。

このような社会的状況の中で、末端消費者・最終組み立てメーカー一体となった社会的な要請により、MEMS 製品についても環境負荷の低い製品へのニーズが生じてくることが想定され、MEMS 製品での環境負荷の低減が課題になっている。

MEMS に先駆けて一大産業となった半導体産業における環境負荷の低減は、「高環境負荷プロセスガスの排出量低減」と「製造工場（製造工程）のスマート化」といった方策で取り組まれている。前者は、半導体加工で用いられる CF_4 、 C_2F_6 、 C_3F_8 、 C_4F_8 、 CHF_3 、 SF_6 、 NF_3 等の排出量を減らすという取り組みであり、使用量自体の削減・代替ガス利用というアプローチがとられている。後者の「製造工場（製造工程）のスマート化」に関しては萌芽期にあり、センサーネットワークを活用した工場全体の空調や清浄度管理の最適化や印刷技術を用いた新たな製造工程の構築といったアプローチが検討され始めている状況である。

製造工場（製造工程）のスマート化では、まず、工場全体の稼働に関わる情報や、製造された製品品質に関する情報、製造装置の稼働状況に関する情報、および、これらを元に得られる環境負荷情報を収集することが必要である。環境負荷の低減のためには、さらに、このようにして収集した情報を如何に環境負荷低減へと結びつけるかが重要である。

本研究開発では、上記の観点に立ち、設計から実際の製品へと至る流れにおいて、開発・製造の効率化と製品の歩留まりの向上に資する計測データの設計へのフィードバックに関する技術と、環境情報も含め製造工程に関する情報を共有化し設計へのフィードバックを可能にするデータベースシステムの設計・プロトタイプ開発を行った（3次元設計・計測情報の共有化技術の開発）。また、製造時において、環境負荷の高い装置・工程・項目の分析を可能とする二酸化炭素排出量の算定手法、および、算定のための情報共有化についての技術開発を行った（環境情報共有化技術の開発）。

3次元設計・計測情報の共有化技術の開発では、X線CT装置による形状データや機械特性・電気特性の計測データから、デバイス設計・プロセス設計改善の示唆を可能にするための技術開発を行った。MEMS製品では作製されたデバイスの形状が、機械特性・電気特性に大きく影響を与えることから、製品性能のばらつき低減や歩留まりの向上のため、設計に対してよりの確な指針を与えることが必要になっている。このため、X線CT装置での測定条件、形状データの変換手法の検討や、形状データ・特性データに基づくモデリング手法の検討を行った。併せて、これらの情報共有のためのデータベースシステムの設計・プロトタイプ開発を行った。

環境情報共有化技術の開発では、プロジェクトにて構築される製造ラインにて製造される製品の二酸化炭素排出量の算定方法を開発した。MEMSに関連の深い半導体製造業界では、大規模な調査に基づき半導体パッケージの足型とピンの数から環境負荷を推定するツールが作られる¹など、LCAの実績と知見の集約が進みつつある。しかしながら、MEMSが半導体電子デバイス以上に多種多様なデバイス構造や製造工程を有すること一因があると考えられ、MEMSの製造工程ではLCAの実施が進んでおらず、個々の製品に対するLCAの実施例は見られない。低環境負荷製品を実現するためには環境負荷の算定が不可欠であることから、算定方法を早期に確立することが必要になっている。

¹ 半導体専用LCA算出ツール JLCAS 社団法人電子情報技術産業協会 半導体部会
半導体環境安全専門委員会

(2) 3次元設計・計測情報の共有化技術の開発

本研究開発項目は、MEMS製品の設計、開発、製造のフローにおける情報の共有を推進し、開発や製造の効率化・歩留まりの向上を通して、環境負荷の低減に貢献することを目的としている。この目的に即し、MEMS製品の製造時のレシピや稼働状況、形状・特性の計測データを効果的に設計へとフィードバックするフローの構築のための開発を行った（図V.2.5.2-1）。



図V.2.5.2-1 情報共有化による設計へのフィードバックフローの構築

この目的の実現のため、情報共有のための3次元構造計測技術・計測情報変換技術の開発と、MEMS統合設計データベースシステムの基盤構築を行った。

情報共有のための3次元構造計測技術・計測情報変換技術の開発では、X線CT装置計測によるMEMSの3次元構造の取得、および、計測された3次元構造情報や機械特性・電気特性を設計に活用に関するための研究開発を行った。

MEMS統合設計データベースシステムの基盤構築では、情報共有のためのインフラストラクチャとしてのデータベースシステムの設計・プロトタイプ作成を行うとともに、設計データ、装置のレシピおよび稼働に関するデータ、計測・検査データを共有し、設計時での活用を可能とする情報共有化フレームワークの要求仕様を策定した。

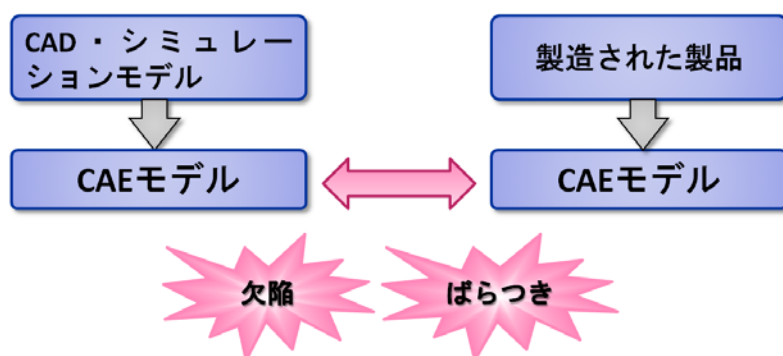
(2) -1 情報共有化のための3次元構造計測技術・計測情報変換技術

MEMSは、半導体プロセスと同様なプロセスで作製されるが、通常の半導体デバイスとは異なり、製造時の形状のばらつきがデバイス特性のばらつきに直結する。歩留まりの向上やデバイス特性の均質化のためには、シリコン基板上に作製された μm サイズのデバイスの形状を観察し、製造プロセスの改善を行う必要がある。このデバイス製造プロセスの改善に向け、X線CT装置を用いシリコン基板上に作製されたデバイスの3次元形状を計測し、設計時とのデバイス特性の差異を解析するための方法について検討を行った。

MEMSセンサでは、可動部に印加された力を、構造体の歪みや固定電極との相対位置の変化による静電容量の変化等により検出する。そのため、可動部および周囲の形状・サイズがデバイスの検出・出力特性に大きく寄与する。設計時にはシミュレーションを用い、所望のデバイス特性を満足するように構造体形状の設計が行われる。

MEMS製造においては、半導体デバイスと同様な微細加工プロセスが使用される。工程は複雑な半導体デバイスには及ばないが、数十を越える工程によって製造が行われる。一方で、半導体デバイスにはない可動部を構築するためのプロセスを有することを特徴とする。実際のデバイス形状を設計形状に近づけるため、様々なプロセスの組み合わせと条件設定が必要になっている。

このようにMEMSでは意図した動作特性の実現のため、構造設計と併せ製造プロセスの設計も重要であるが、作製されたデバイスの動作特性の評価のみから直接プロセス改善への示唆を得ることは困難である。しかしながら、計測により3次元構造が得られ設計データと比較可能なデータとして利用できれば、設計との形状の差異がどこに生じているのか、形状の差異がどのような動作特性の差異に関連するのかを把握することができる。また、形状が直接利用できない場合でも3次元形状を反映したデバイスのモデル化によって形状と動作特性の関連を把握することで、計測した機械特性・電気特性と設計時に意図した機械特性・電気特性との差異の原因を推測することができる。



図V.2.5.2-2 設計データ（CAD・シミュレーションモデル）と計測データ（製品）の比較

このようなリバースエンジニアリングやモデル化（図V.2.5.2-2）を通して、デバイス形状や製造プロセス設計での指針を与えることが可能になると期待される。

本研究開発項目では、上述の狙いの実現に向け、MEMS に対して X 線 CT 装置による 3 次元構造計測、および、設計時の形状や力学特性との比較を可能とする計測構造データの変換技術について開発を行った。同時に、機械特性・電気特性計測データを用いて設計への示唆を与えることを可能にするデバイスのモデル化法について検討を行った。

（2）-1.1 X 線 CT 装置によるマイクロスケール構造体の 3 次元形状評価

X 線 CT 装置による機械部品の 3 次元構造計測は、これまでに多数行われてきているが、MEMS についてはほとんど行われていない。特に、構造物全体が μm サイズであるものについては、研究実施例が見当たらない。

このような微小な構造を計測するため、図V.2.5.2-3に示すX線CT装置 (MicroXCT-400、Xradia) を使用した。この装置の最大分解能は $1.0\ \mu\text{m}$ であり、このときの視野は $700\ \mu\text{m}$ 程度である（対物レンズ 40X 使用時）。

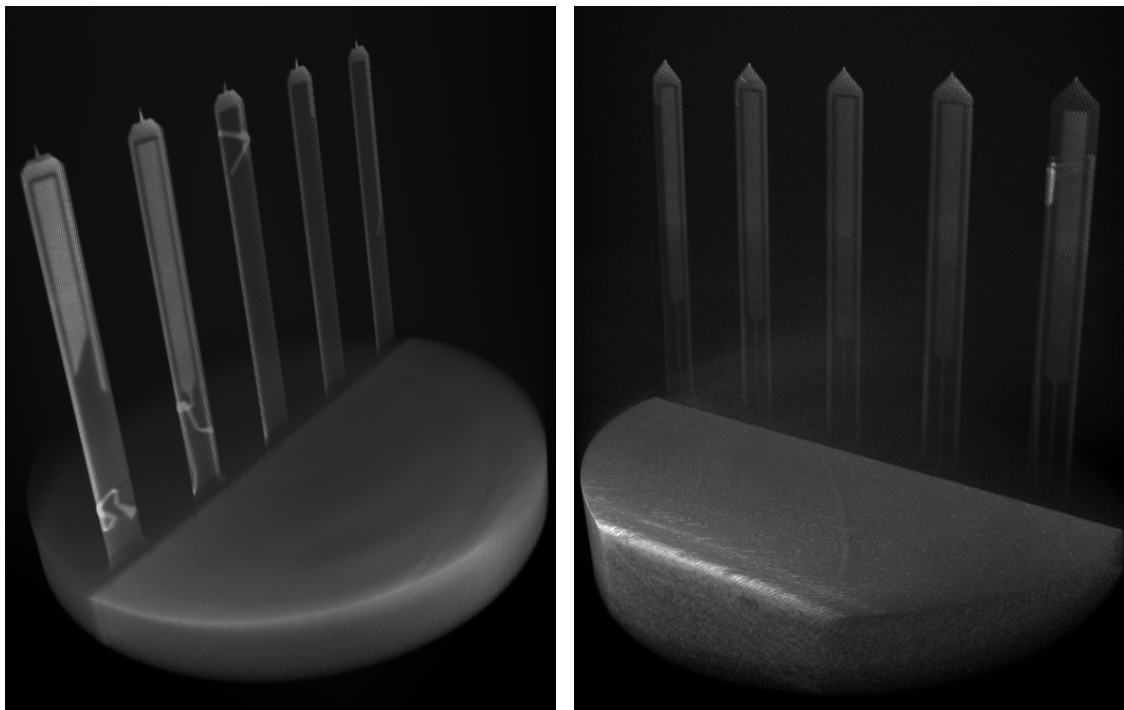


図V.2.5.2-3 MicroXCT-400 外観

シリコンは通常の金属と比較して X 線が透過しやすいため、空気とのコントラストを得るため、管電圧、管電流、撮像枚数、1 枚あたり露光時間などの検討を行い、撮像条件を決定した。

TKB812 で試作されたマルチプローブについて、対物レンズ 20X を用いて X 線 CT 計測を

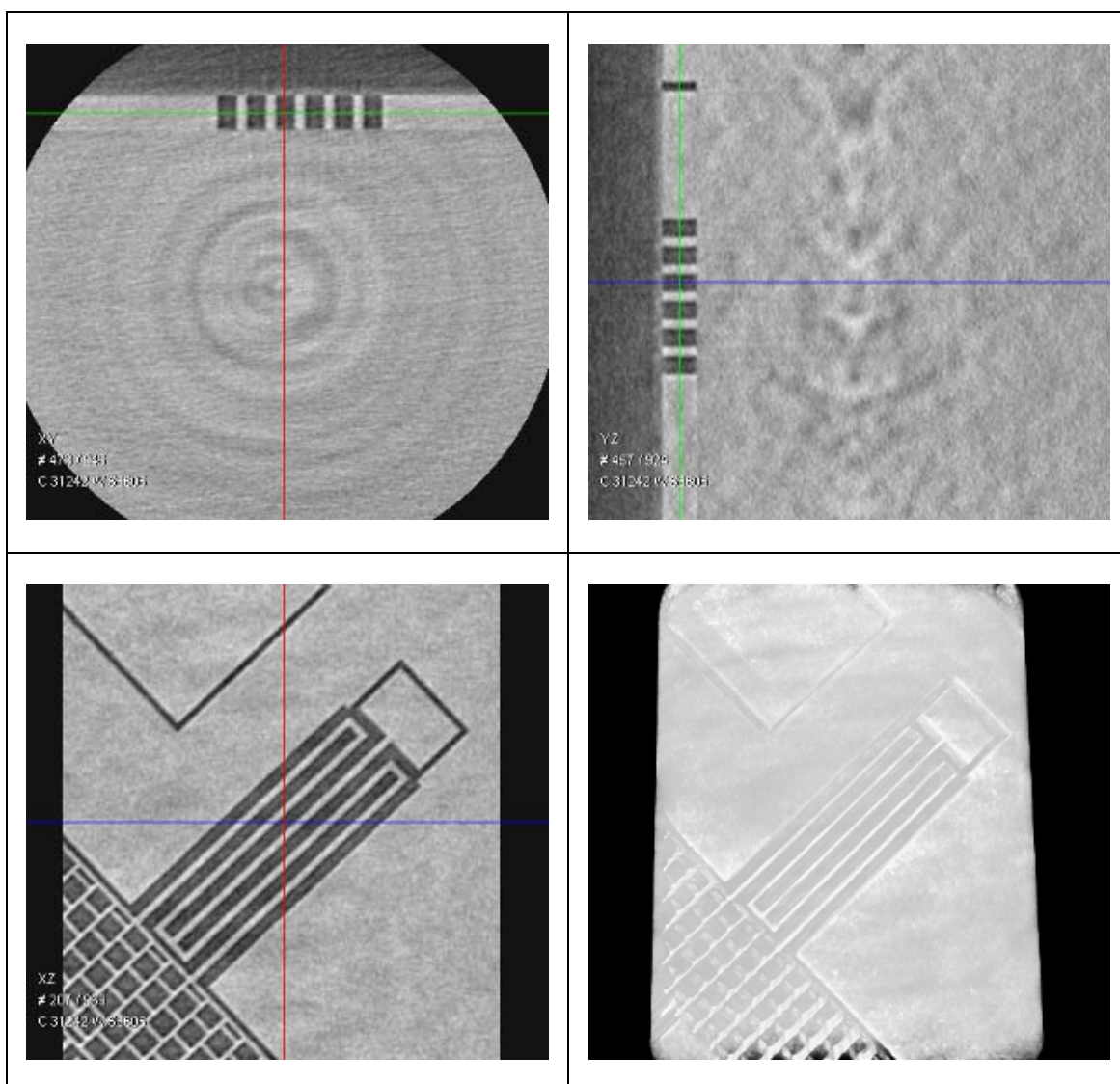
行い、透過画像から3次元に再構成した画像を図V.2.5.2-4に示す。マルチプローブは、シリコン基板のエッジに形成された長さ $500\mu\text{m}$ ・幅 $80\mu\text{m}$ の薄い板状のプローブであり、表面に電極が作製されている。図V.2.5.2-4では、先端の細かい形状の違いや電極が剥離している状況を捉えることができる。



図V.2.5.2-4 マルチプローブ：先端形状鋭角（左）、直角（右）

同様にTKB812で試作された櫛歯折り返し梁について、MicroXCT-400の最高倍率となる対物レンズ40Xを用いてX線CT計測を行い、透過画像から3次元に再構成した画像を図

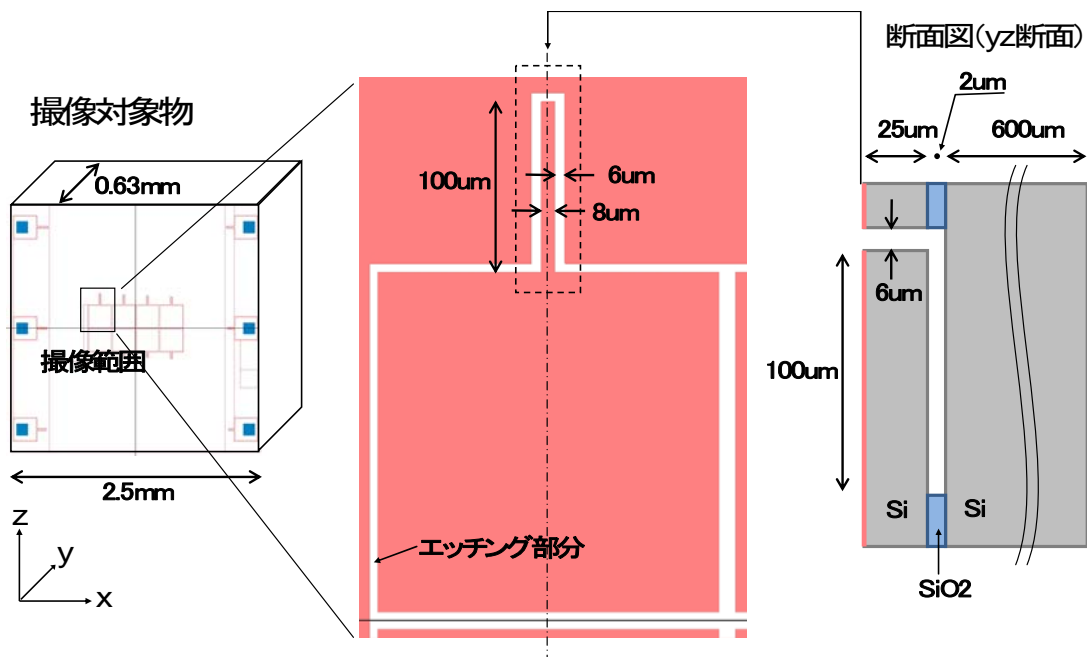
.2.5.2-5に示す。櫛歯折り返し梁は 2cm 角のチップ上に作製されており、梁の大きさは長手方向が約 $220\mu\text{m}$ 、幅は $5\mu\text{m}$ 、周囲に掘ったトレンチの幅は $10\mu\text{m}$ 、深さは $25\mu\text{m}$ である（埋め込み酸化膜は除去されていない）。リングアーチファクトや斑模様のアーチファクトが見られるが、構造物の細部の形状を捉えることができる。



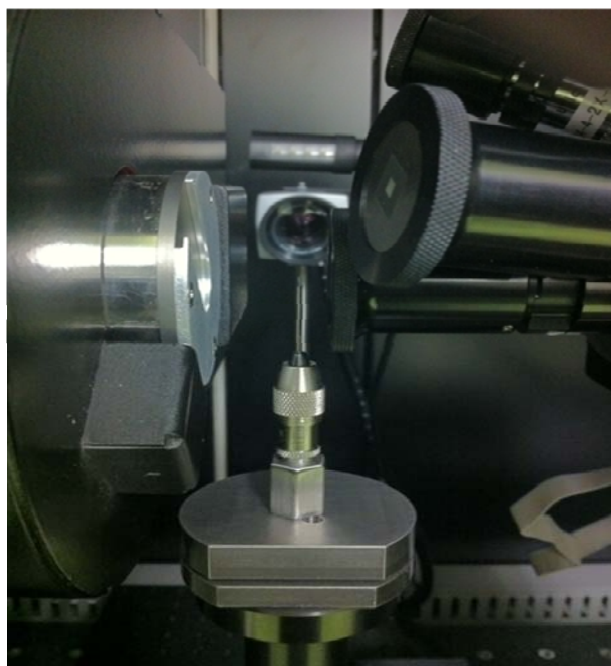
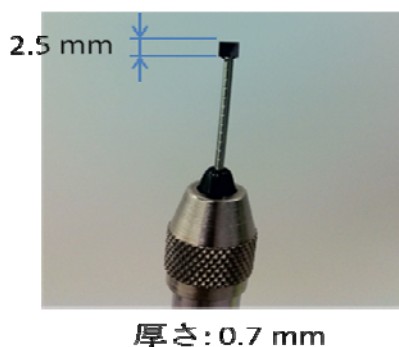
図V.2.5.2-5 櫛歯折り返し梁（上段：基板厚さ方向断面、下段左：基板表面に平行な断面、
下段右：3次元像）

更に小さい長さ $100\ \mu\text{m}$ のカンチレバー（片持ち梁）についてもX線CT計測を行った。撮像の対象は、図V.2.5.2-6に示すシリコンをベースとするチップである。埋め込み酸化膜が除去され可動な構造物としてカンチレバー（片持ち梁）が形成されている。

実際の撮影では、撮影対象をX線源-検出器の間に配置し、撮像範囲中心部分を通りz軸にほぼ平行な直線を回転軸として回転させて、断層撮影を行った（図V.2.5.2-7）。撮像条件は、管電圧 40kV 、管電流 $4\ \mu\text{A}$ 、対物レンズ $40\times$ 、回転角 $-91^\circ \sim 91^\circ$ 、撮像枚数 1639 枚、1枚あたり露光時間 60 秒である。



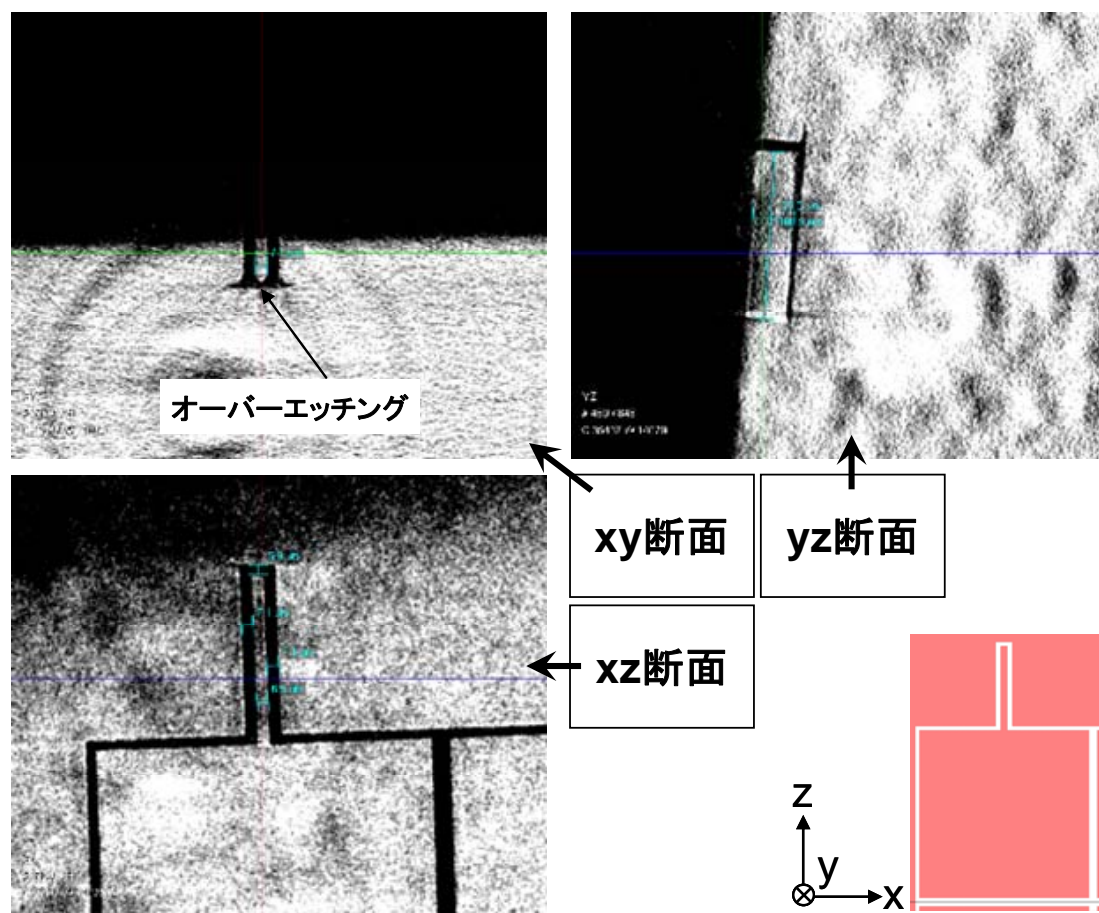
図V.2.5.2-6 カンチレバーと撮像対象物



図V.2.5.2-7 カンチレバーのX線CT計測状況

撮影の結果得られた透過像から再構成フィルタをかけて再構成した断層画像を図 .2.5.2- 8に示す。シリコンと空気とのコントラストはつきづらいため、図ではコントラストを際立たせるように処理を行っている。画像から、エッチングされたパターンの形状はうまく再現されていることがわかる。また、基板内部の埋め込み酸化膜 (SiO₂) がエッチ

リングにより除去されている様子や、埋め込み酸化膜近傍のシリコンの形状がオーバーエッチングによって角が取れている様子も把握できる。一方で、構造のないバルクシリコン部において、リングアーチファクトやまだら模様などのアーチファクトが見られる。



図V.2.5.2-8 カンチレバー再構成断面

(2) -1.2 X線 CT装置撮像データの設計へのフィードバック

設計データとの形状・力学特性比較

X線CT装置計測によって得られたカンチレバーの3次元画像データ（図V.2.5.2-8）からデータ変換を行い、設計データとの形状や力学特性の差異を評価した。

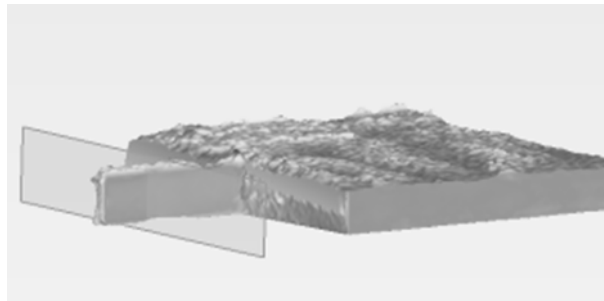
データ変換手法の検討

計測によって得られたデータは、Siと空気とのコントラストがつかづらいことの反映として、かなり間隙の多いデータとなっている。そのため、まず3次元画像データに対してメディアンフィルタ・ガウスフィルタをかけて平滑化を行い、続けて、Marching Cubes法によってポリゴンデータへ変換した。このポリゴンデータを以下に述べる評価の出発点と

して使用した。

形状比較

リバースエンジニアリング用のソフトウェアPointMaster (Wenzel ScanTec. 販売：日本ビジュアルサイエンス株式会社) によって、ポリゴンデータを読み込み、修正を施した後、設計データと比較した (図V.2.5.2-9)。計測によるポリゴンデータでは、表面にかなりの凹凸が見られるが、これらはアーチファクトによるものと思われる。また、カンチレバーの断面では、カンチレバーの横幅が細くなっている様子が見られる。また、上下方向にはサイズが大きくなっている。詳細な形状については、アーチファクトの影響が大きく実際の形状を反映していないと思われる。



図V.2.5.2-9 計測・設計データの形状比較

力学特性の比較

CAE解析用の構造データ処理ソフトウェアTSV-Pre (株式会社テクノスター) を用い、ポリゴンデータから4面体要素により構造体を充填するボリュームメッシュを生成した。生成したボリュームメッシュを使用して、MEMS設計開発用統合システムであるMemsONE (MemsONEコンソーシアム、みずほ情報総研株式会社、日本ユニシス・エクセリションズ株式会社、株式会社数理システム) により構造解析を行った。

計測および設計データに基づくカンチレバーのモデルについて、振動モードを解析した結果の比較を図V.2.5.2-10に示す。1次モードと2次モードは似通っている。しかし、3次モードでは違いが見られ、計測によるモデルではカンチレバーのねじれが見られるのに対して、設計データからのモデルでは横方向の振動の高次モードとなっている。

それぞれの振動モードの固有振動数を表V.2.5.2-1に示した。

振動の様子が計測・設計モデルで似ている1次モードの固有振動数は、計測・設計モデルで同程度である。一方、同様に振動の様子が似ている2次モードでは、差異が大きくなっている。振動の様子が異なる3次モードでは、設計モデルの2倍となっている。

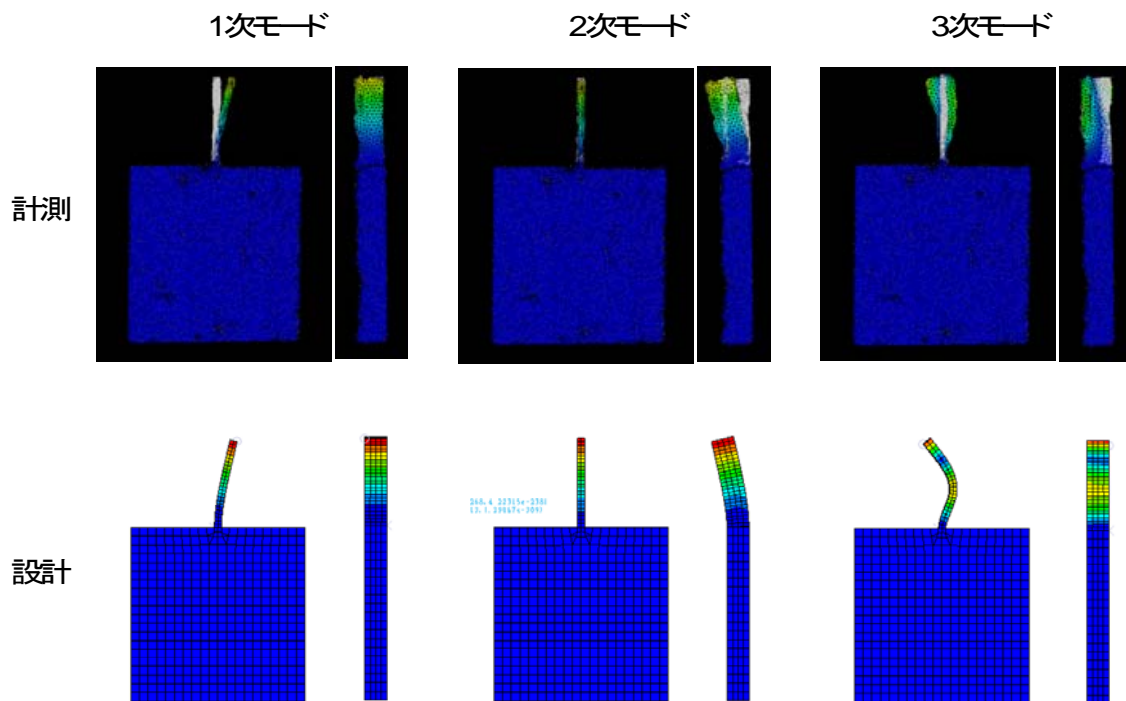


図 V.2.5.2- 10 計測・設計構造モデルの振動モードの比較

表 V.2.5.2- 1 計測・設計構造モデルの固有振動数[MHz]の比較

モデル	モード		
	1次	2次	3次
計測	1.174	4.043	6.832
設計	1.044	2.991	3.343

デバイス・プロセス設計への示唆

構造データにはアーチファクトの影響による構造の不確定性が見られるが、得られたデータが実際の構造をそのまま反映していると仮定すると、製造プロセスに対して次のような示唆が得られる。

振動モードの固有振動数に関する設計モデルとの差異は、カンチレバーの形状が異なることによる質量・ばね定数が変化に起因すると考えられる。再構成断面形状からオーバーエッチングである状況もみられるため、エッチング条件の検討によりオーバーエッチングを回避する必要があることが示唆される。また、デバイスの可動部を構成しているシリコンの厚さの精度や酸化膜の除去の程度にも注意を払う必要があるといえる。

(2) -1.3 電気特性、機械特性データの設計へのフィードバック

MEMS 製造プロセスによって作製されるデバイス構造体の形状は、マスク形状を正確に再現するものにはならない。このため、電気的特性や機械的特性は、マスク形状を仮定した場合に予測される値と、実測される値とは異なる。実測される電気特性や機械特性と、マスク形状を仮定し予測される特性とを比較することにより得られる知見を、設計へフィードバックする方法について検討を行った。

特性評価の対象としたデバイスは、櫛歯の電極を持つ静電容量型の加速度センサを模したものである。可動電極は 4 本の梁で支持されており、2 つの固定電極と対向する。マスク形状と主な寸法を図 V.2.5.2- 11、表 V.2.5.2- 2 に示す。評価対象デバイスを電氣的に駆動し、その電気特性として電流の周波数特性、機械特性として速度の周波数特性を評価した。

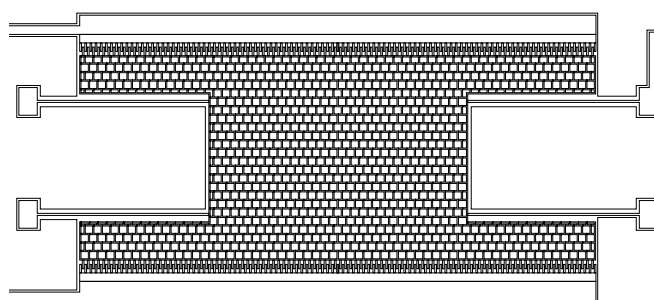
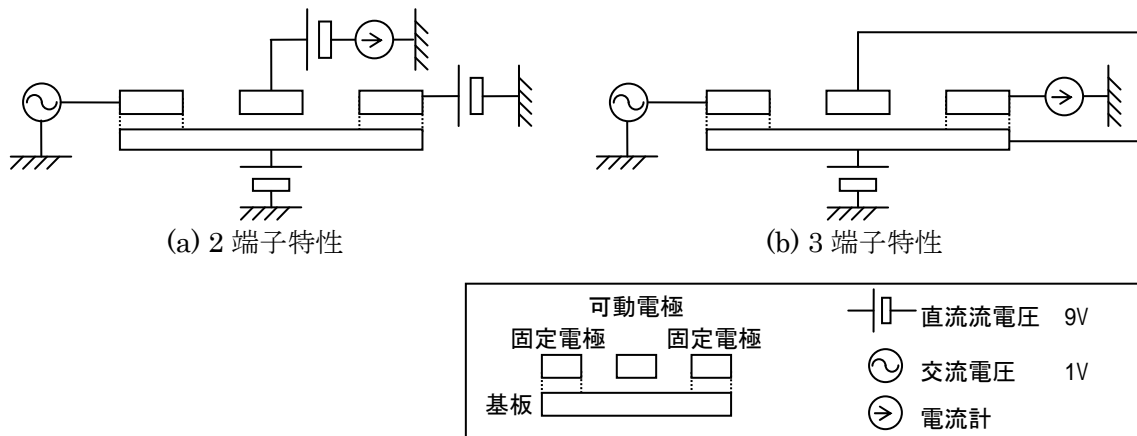


図 V.2.5.2- 11 特性評価デバイスマスク形状

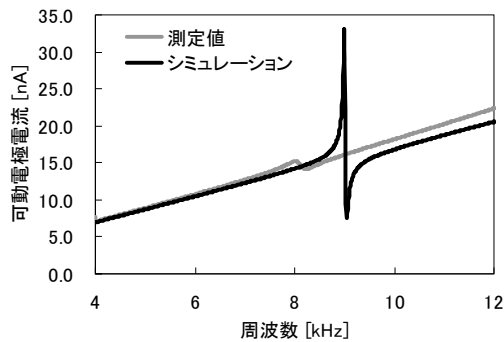
表 V.2.5.2- 2 特性評価デバイスマスク寸法

電極長さ L_m	1204 μm
電極幅 W_m	480 μm
格子穴長 L_{grid}	17 μm
格子幅 $L_{lattice}$	3 μm
櫛歯長さ L_c	20 μm
櫛歯幅 W_c	4 μm
櫛歯対向長さ X_0	10 μm
対向櫛歯間隔 Gap	2 μm
梁長さ L_{beam}	400 μm
梁幅 W_{beam}	5 μm

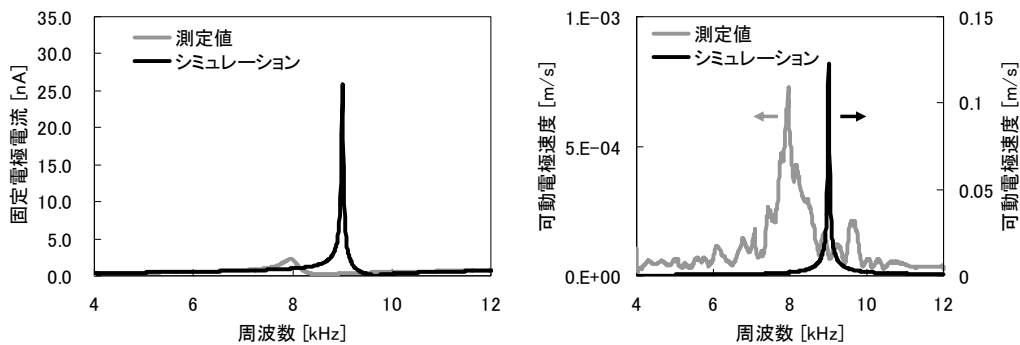
特性測定時の端子設定を図 V.2.5.2- 12 に示す。(a)2 端子特性の測定では、可動電極の電流を測定した。(b)3 端子特性の測定では、固定電極の電流と可動電極の速度を測定した。それぞれの値の周波数特性を図 V.2.5.2- 13 および図 V.2.5.2- 14 に示す。併せて、デバイス形状がマスク形状の通りである場合を仮定し、特性シミュレーションした結果を示す。



図V.2.5.2- 12 測定時端子設定



図V.2.5.2- 13 2端子特性可動電極電流



図V.2.5.2- 14 3端子特性 (左)固定電極電流 (右)可動電極速度

可動部の運動に伴う雰囲気流体の挙動は非常に複雑であり、特性シミュレーション時に機械的な抵抗を精度よく見積もることは非常に困難である。したがって、機械的な抵抗に大きく影響を受ける電流や速度のピーク値を比較することは難しい。一方、ピークとなる周波数（以降、共振周波数と呼ぶ）は機械的な抵抗の影響をほとんど影響受けないので、

ここでは、共振周波数の比較を行った(表V.2.5.2- 3)。シミュレーション値の方が実測値に比べ高い共振周波数になっている。これは、実形状が設計時のマスク形状とは異なることに起因する。

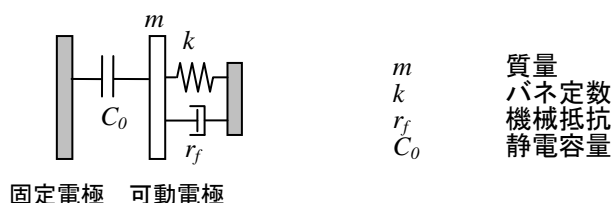
表V.2.5.2- 3 実測とマスク形状モデル特性シミュレーション共振周波数

使用特性カーブ	実測値	シミュレーション
2 端子特性可動電極電流	8010 Hz	8997 Hz
3 端子特性固定電極電流	7970 Hz	9005 Hz
3 端子特性可動電極速度	7950 Hz	9005 Hz

実形状とマスク形状との差をもう少し詳しく見るために、集中質点系モデルを用いて、デバイス形状の見積もりを行った。対象デバイスの集中質点系近似モデルを図V.2.5.2- 15に示す。

マスク形状の集中質点系モデルのパラメータは、構造体の厚さ、密度、ヤング率等の基本的な物性値から解析的に算出した。実形状の集中質点系モデルパラメータは、集中質点系モデルで解析的に得られる特性カーブを目的関数とし、SEMで得られた測長値を制約条件として、最適化手法によって算出した。算出結果を表V.2.5.2- 4に示す。

実形状として推定される、質量、バネ定数ともにマスク形状よりも小さい値である。実形状は、マスク形状よりも「細った」形状であることが考えられる。さらに、実形状として推定されるパラメータ値とマスク形状モデルパラメータ値の差異は、バネ定数をもっとも大きい。よって、表V.2.5.2- 3に示す共振周波数の差は、梁形状の「細り」による、バネ定数の変化が大きく影響していることがわかる。



図V.2.5.2- 15 集中質点系モデル

表V.2.5.2- 4 集中質点系モデルパラメータ

パラメータ	実形状	マスク形状	差異*
質量 kg	7.37e-9	7.98e-9	-7.64%
バネ定数 N/m	17.95	25.55	-29.75%
機械抵抗 N·s/m	1.57e-5	1.71e-5	-8.19%
静電容量 F	2.48e-13	2.64e-13	-6.09%

*差異(=実形状-マスク形状)/マスク形状)

集中質点系モデル近似は、設計時における特性見積もりに広く用いられる方法であり、モデルパラメータと共振周波数等の特性値との関連が明確で扱いやすい。実測される電気特性および機械特性から実形状の集中質点系モデルパラメータという形で設計へフィードバックすることは、マスク形状との差異を把握するのに有益である。

(2) -1.4 まとめ・課題

MEMS の形状計測によりデバイス・プロセス設計への示唆を得るための手法の検討として、シリコンチップ表面に作製されたカンチレバーに対して X 線 CT 装置により 3 次元構造計測を行い、得られた構造から設計時の形状や力学特性の比較を行った。機械特性、電気特性の計測データと設計形状とを、集中質点系モデルを介在させて比較する手法を検討した。

3 次元構造計測による設計へのフィードバックについては、X 線 CT 装置計測、3 次元構造データの再構成、ポリゴンデータへの変換、設計および解析のためのデータ変換、形状・力学特性の比較、という一連の手続きについてひとつおりの検討を行い、デバイス・プロセス設計改善への指針を提示し得ることを示すことができた。X 線 CT 装置による計測では、かなりのアーチファクトの影響があり、計測からデータ変換の一連の手続きの中でこれらを克服する手法・手段の検討が課題である。

機械特性・電気特性計測による設計へのフィードバックについては、計測データからの集中質点系モデルのパラメータの推定により、設計へと効果的に示唆を与えることが可能となった。

(2) -2 MEMS 統合設計データベースシステムの基盤構築

本研究開発は、MEMS の設計に関わる様々なデータを共有し、デバイス設計、プロセス設計の効率化に寄与することを目的とする。特に、計測・検査データおよび環境負荷情報の共有化による有効活用を促し、製品のばらつきを抑え、歩留まりを向上させることで、環境負荷の低減に貢献することを目的としている。

MEMS 統合設計データベースシステムの基盤構築のため、データベースシステムに対する要求分析を行い、データベースシステムの設計として、ソフトウェアアーキテクチャ、ソフトウェア詳細、データベーステーブルを定めた。さらに、設計に基き MEMS 統合設計データベースシステムのプロトタイプを作成を行った。

併せて、設計データ、装置のレシピおよび稼動に関するデータ、計測・検査データを共有し、設計時での活用を可能とする情報共有化フレームワークの要求仕様を策定した。

(2) -2.1 要求分析

デバイス作製に対して、設計データ、工程フローは入力に相当し、評価データ、計測データ、出力に相当する。入力と出力間の関連をトレースできることは、設計データや工程フローの再利用を促し、開発効率の向上につながる。設計データ、工程フロー、計測データの関係性を含めて、MEMS 統合設計データベースシステムで共有できる必要がある。

また、材料物性は設計時に実施するシミュレーションにおいて基本となる値であり、設計時に参照できるよう共有化する必要がある。

さらに、製造プロセス開発時に環境負荷も考慮した製造プロセス選択を行えるように、環境負荷データを共有化する必要がある。

上述のように、設計時に必要となる情報を同一インターフェイスで参照できるシステムを構築することによって、設計効率の向上を目指す。

図 V.2.5.2- 16 に MEMS 統合設計データベースシステムの概要図を示す。

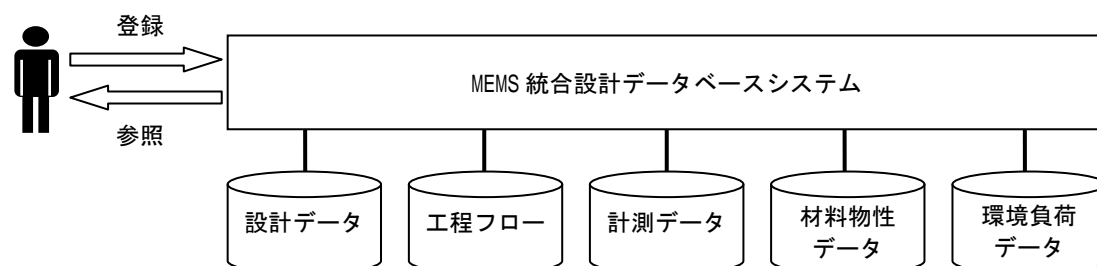


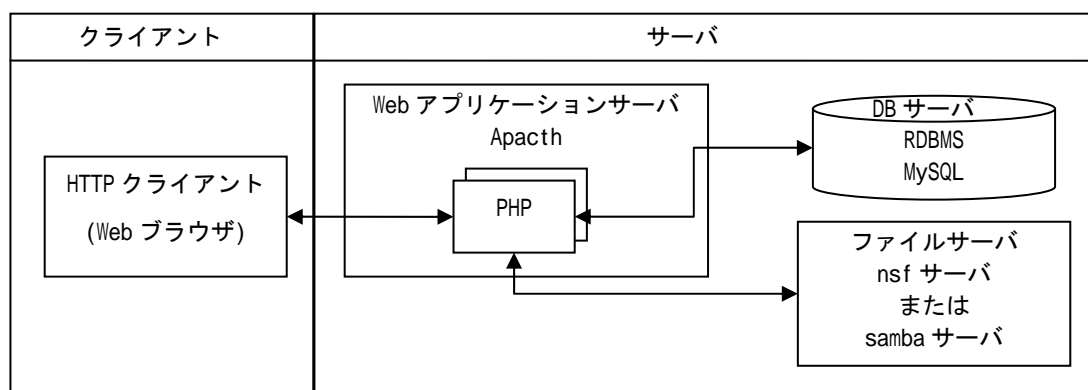
図 V.2.5.2- 16 MEMS 統合設計データベースシステム概要図

(2) -2.2 ソフトウェアアーキテクチャ

MEMS統合設計データベースシステムは、図V.2.5.2- 17のような構成とする。

- ユーザが接続する Web ページは PHP で作成する。
- ユーザが作成し、登録したデータの関連はデータベースへ蓄積される。
- ユーザが作成し、登録するファイルは、ファイルサーバへ格納する。

ファイルサーバのファイルを共有できるような環境にすると、MEMS 統合設計データベースシステムを物理的配置に制限なく構築することができる。



図V.2.5.2- 17 MEMS 統合設計データベースシステムソフトウェア全体構成図

(2) -2.3 ソフトウェア詳細設計

MEMS 統合設計データベースシステムは、設計データ、計測データ、シミュレーションデータ、工程フロー、材料物性、環境負荷情報の共有を目的としたデータベースシステムである。

MEMS統合設計データベースシステムは、次のデータベースから構成される (図V.2.5.2-18)。

- 設計・計測データベースシステム
- 材料物性データベースシステム
- 環境負荷情報データベースシステム
- CO2 換算量原単位データベースシステム

データベースシステムとユーザとの橋渡しを行うユーザインターフェイス機能を、データベースシステムごとに用意した。

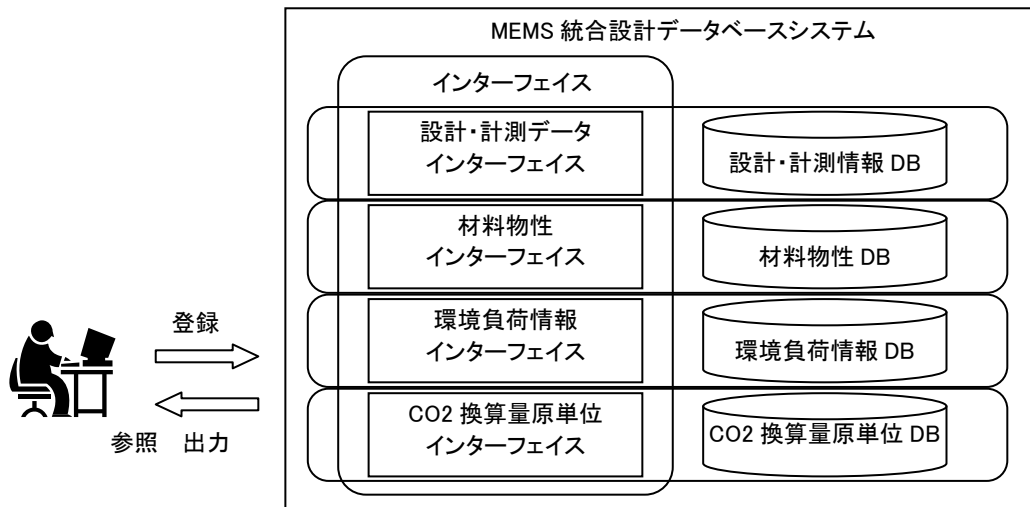


図 V.2.5.2- 18 MEMS 統合設計データベースシステム構成図

(2) -2.4 データベーステーブル

データベース構築のためデータモデリングを行った。データ間の関連を E-R 図 (Entity Relationship Diagram) を用いて示す。

E-R 図はデータの関連を図示したものである。データの実体 (Entity) と関連 (Relationship)、および属性 (Attribute) の 3 つを構成要素としてモデリングを行う手法である。

■ 設計・計測データベース、環境負荷情報データベース

設計・計測データベース、環境負荷情報データベースは、一部テーブルを共有している。E-R図を図 V.2.5.2- 19に示す。

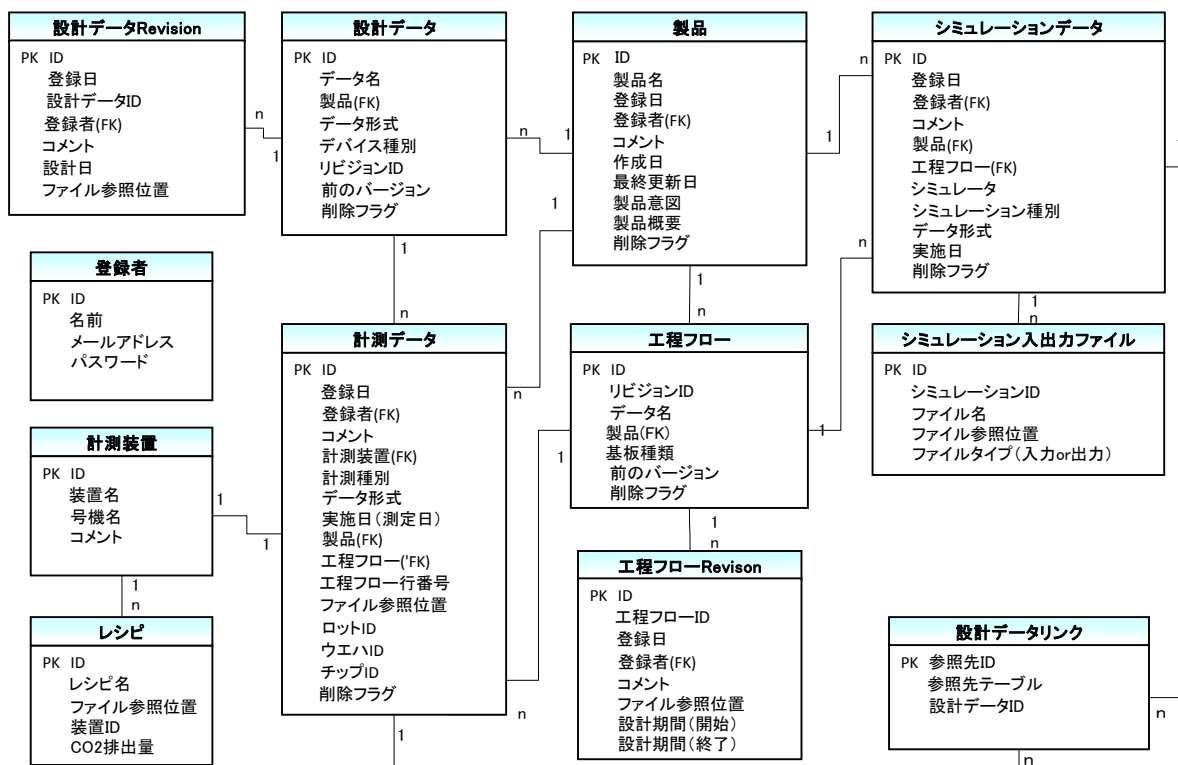


図 V.2.5.2- 19 設計・計測データベース E-R 図

■ 材料物性データベース

材料物性データベースに関するE-R図を図 V.2.5.2- 20に示す。

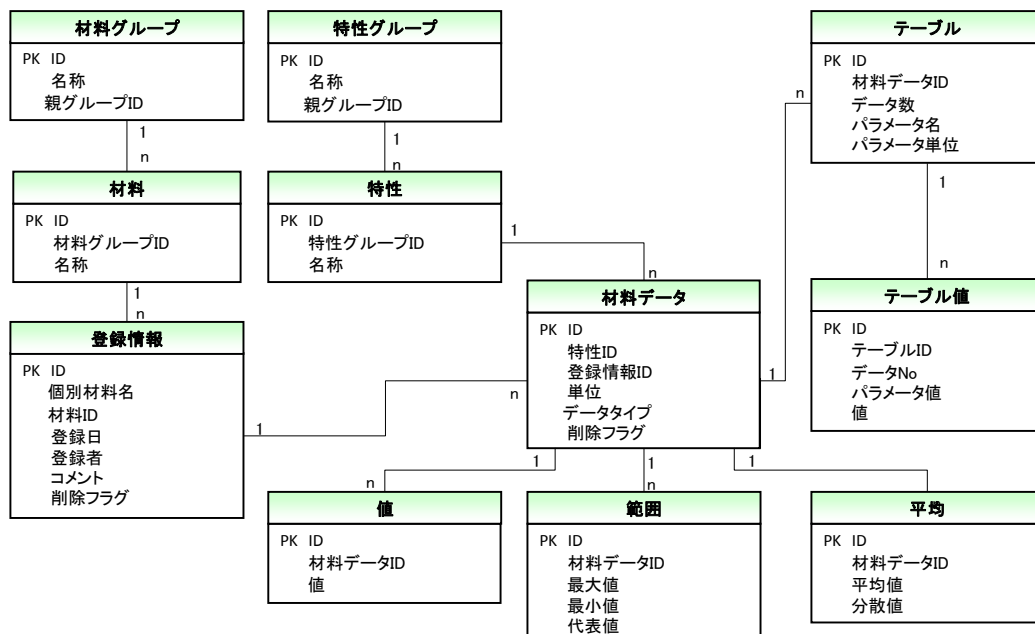


図 V.2.5.2- 20 材料物性データベース E-R 図

■ CO2 換算量原単位データベース

CO2 換算量原単位データベースでは、エンティティはただ一つのみである。E-R図を図 V.2.5.2- 21に示す。

原単位
PK ID
名称
大分類
小分類
単位
GHG排出量
出典
作成日
コメント

図 V.2.5.2- 21 CO2 換算量原単位データベース E-R 図

(2) -2.5 プロトタイプシステム作成

作成した MEMS 統合設計データベースシステムのプロトタイプでは、Web アプリケーションサーバ、DB サーバ、ファイルサーバを同一サーバに配置した。

使用したミドルウェア一覧を表 V.2.5.2- 5に示す。

表 V.2.5.2- 5 ミドルウェア一覧

ミドルウェア	バージョン	機能
Apache	2.0.52	<ul style="list-style-type: none"> ・アプリケーションサーバ ・プレゼンテーション基盤の WEB アプリケーションがデプロイされる ・サービスの WEB サービスがデプロイされる
MySQL	4.1.22	<ul style="list-style-type: none"> ・RDBMS (データベース)
Red Hat Enterprise Linux WS	release 4	<ul style="list-style-type: none"> ・サーバ機のオペレーティングソフトウェア
PHP	5.2.0	<ul style="list-style-type: none"> ・開発言語
Subversion	1.6.12	<ul style="list-style-type: none"> ・プレゼンテーション基盤、ワークフロー、サービスのプログラムリソースの管理ツール ・リソースのバージョン管理を行う
Windows XP	Version 2002 ServicePack3	<ul style="list-style-type: none"> ・クライアント機のオペレーティングソフトウェア
Internet Explorer	7.0 以上	<ul style="list-style-type: none"> ・Web ブラウザ

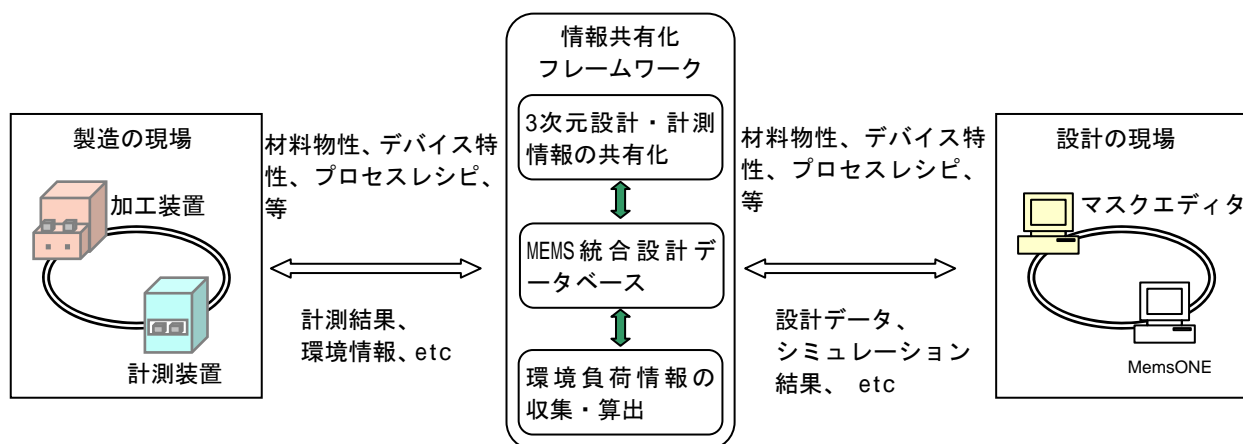
(2) -2.6 情報共有化フレームワークの要求仕様

設計データ、装置のレシピおよび稼動に関するデータ、計測・検査データを共有し、設計時での活用を可能とする情報共有化フレームワークについて検討を行い、検討の結果策定した要求仕様を以下に記載する。

(2) -2.6.1 前提条件

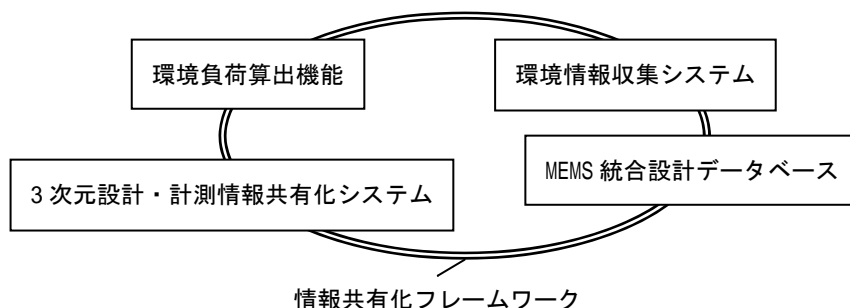
情報共有化フレームワークの概要図を図V.2.5.2- 22に示す。

設計時に生成される、構造設計データや、マスクデータ等を共有化すると共に、製造時に生成される、レシピや装置稼動に関するデータや、特性評価時に生成される計測データや検査データを共有する。製造時および評価時に生成されるデータを設計時に活用できるような枠組みである。



図V.2.5.2- 22 情報共有化フレームワーク概要図

情報共有化フレームワークでは、情報の内容に応じたサブシステムを定義しサブシステム間の連携を行う枠組みを提供する(図V.2.5.2- 23)。情報共有化フレームワーク上で動作させるサブシステムの一覧を表V.2.5.2- 6に示す。



図V.2.5.2- 23 情報共有化フレームワークにおけるサブシステムの連携

表 V.2.5.2- 6 情報共有化フレームワークのサブシステムの定義

番号	サブシステム	定義
1	MEMS 統合設計データベース	設計データ、プロセスフロー、計測データ、材料物性、環境負荷情報を統合的に蓄積するデータベースシステム
2	環境負荷算出機能	8 インチラインに導入される加工装置および評価装置の環境負荷を算出する機能
3	環境情報収集システム	環境負荷算出に必要な情報のうち、8 インチラインの装置から取得する情報を収集するシステム
4	3 次元設計・計測情報共有化システム	3 次元計測で 3 次元形状を、リバースエンジニアリング技術により設計での活用を支援するシステム

(2) -2.6.2 システム要求

情報共有化フレームワークのサブシステムの関連を図 V.2.5.2- 24 に示す。

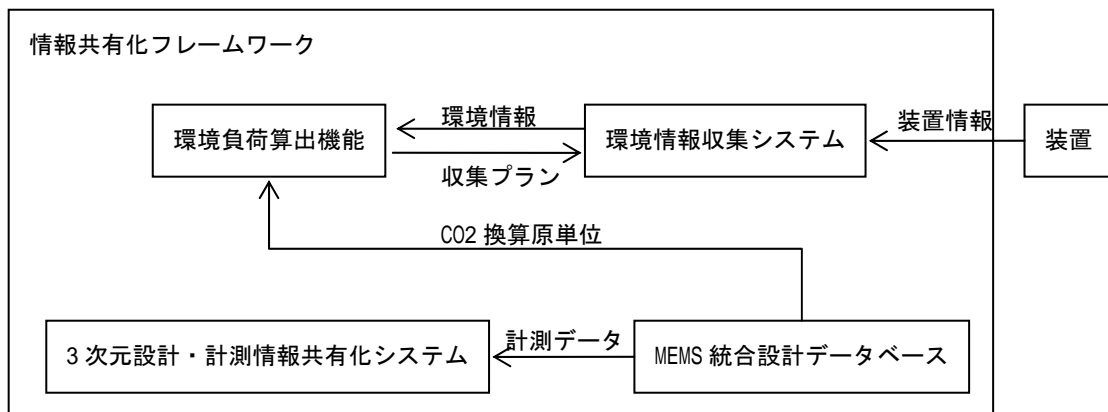


図 V.2.5.2- 24 情報共有化フレームワークのサブシステムの関連

■ 環境負荷算出機能と環境情報収集システムの連携

環境負荷算出機能が、能動的に環境情報収集システムへアクセスする。環境情報収集システムは、環境負荷算出システムに対して受動的であり、要求があるまではデータ提供を行わない。

環境負荷算出機能は、装置から得られる環境情報を環境情報収集システムから取得する。また、環境負荷算出機能が必要とするデータ収集プランを環境情報収集システムへ指示する。

■ 環境負荷算出機能と MEMS 統合設計データベースの連携

環境負荷算出機能が、能動的に MEMS 統合設計データベースへアクセスする。MEMS

統合設計データベースは、環境負荷算出機能に対して受動的であり、要求があるまではデータ提供を行わない。

環境負荷算出機能は、必要とする CO2 換算原単位を MEMS 統合設計データベースから取得する。

■ 3次元設計・計測情報共有化システムと MEMS 統合設計データベースの連携

3次元設計・計測情報共有化システムが能動的に MEMS 統合設計データベースへアクセスする。MEMS 統合設計データベースは、3次元設計・計測情報共有化システムに対して受動的であり、要求があるまではデータ提供を行わない。

3次元設計・計測情報共有化システムは、必要とする設計データまたは3次元計測データを MEMS 統合設計データベースシステムから取得する。

インターフェイスに関して、以下のように定義する。

■ 装置インターフェイス

装置は、情報共有化フレームワークの範囲に含めない。装置とのインターフェイスは、装置ごとに個別対応が必要となる。サブシステムである環境情報収集システムにおいて、各装置とのインターフェイスを構築する。

3. 2. 5. 2-2.6.3 シナリオ分析

情報共有化フレームワークに関するユースケース図を図 V.2.5.2- 25 に示す。

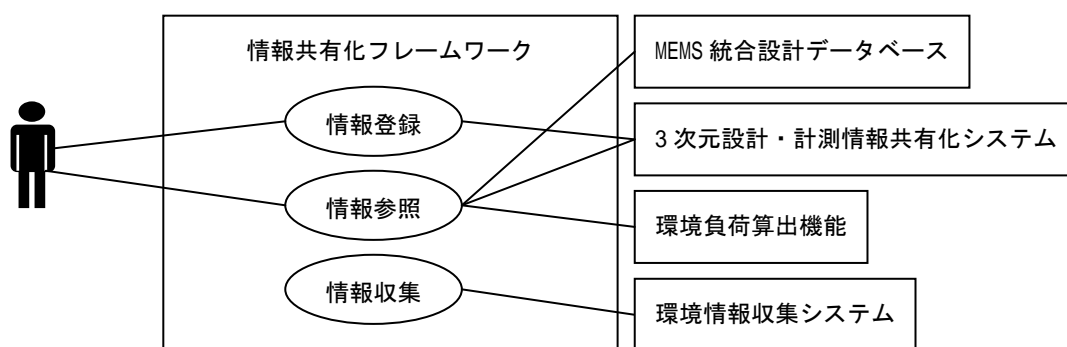


図 V.2.5.2- 25 情報共有化フレームワークのユースケース図

ユースケース「情報参照」のシナリオ例として、3次元計測データのリバースエンジニアリングを示す。計測データをリバースエンジニアリング技術によって、CAD形式の形状データに変換する。得られるCAD形式データを解析ツールであるMemsONEの形状入力として利用し数値計算を行う。この場合のアクティビティ図を図 V.2.5.2- 26 に示す。

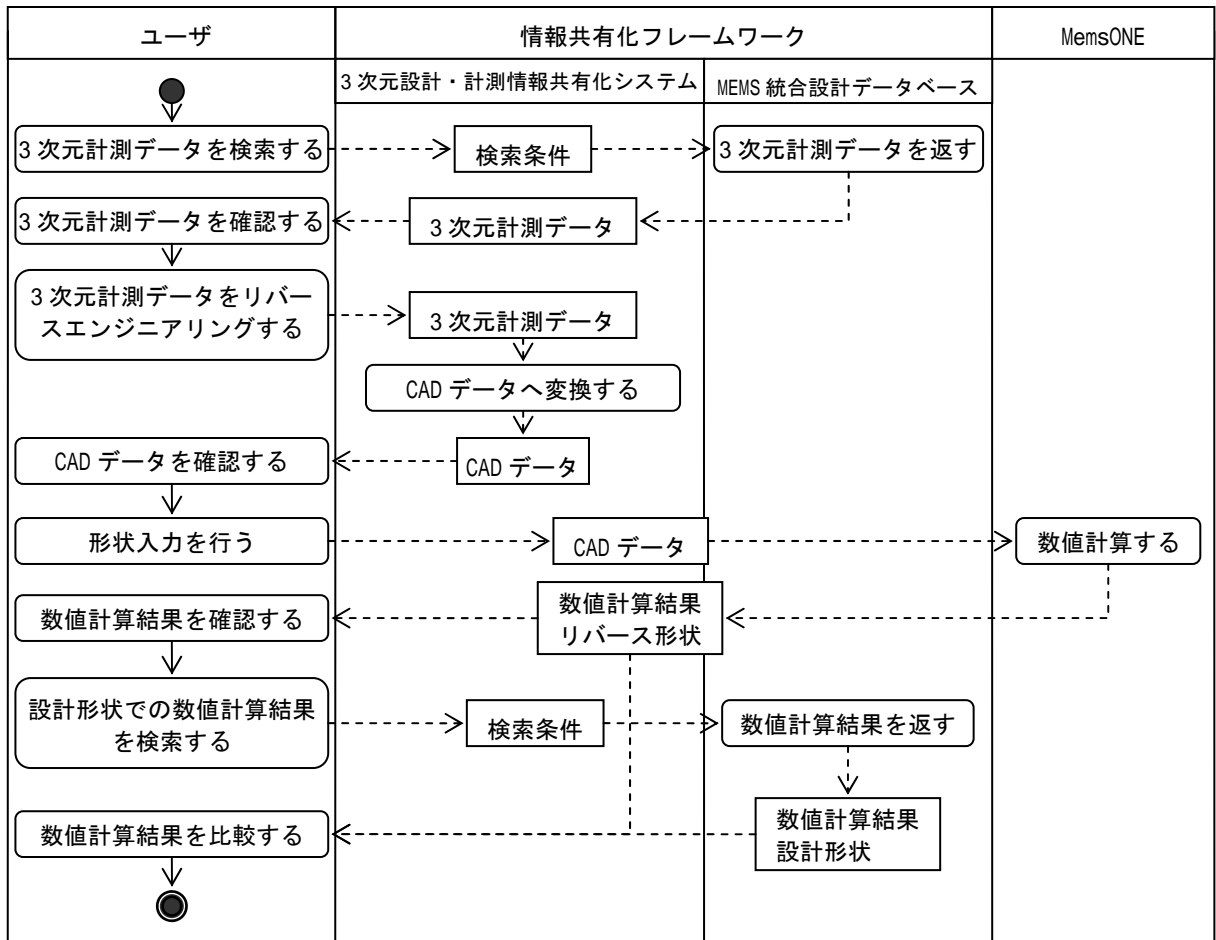
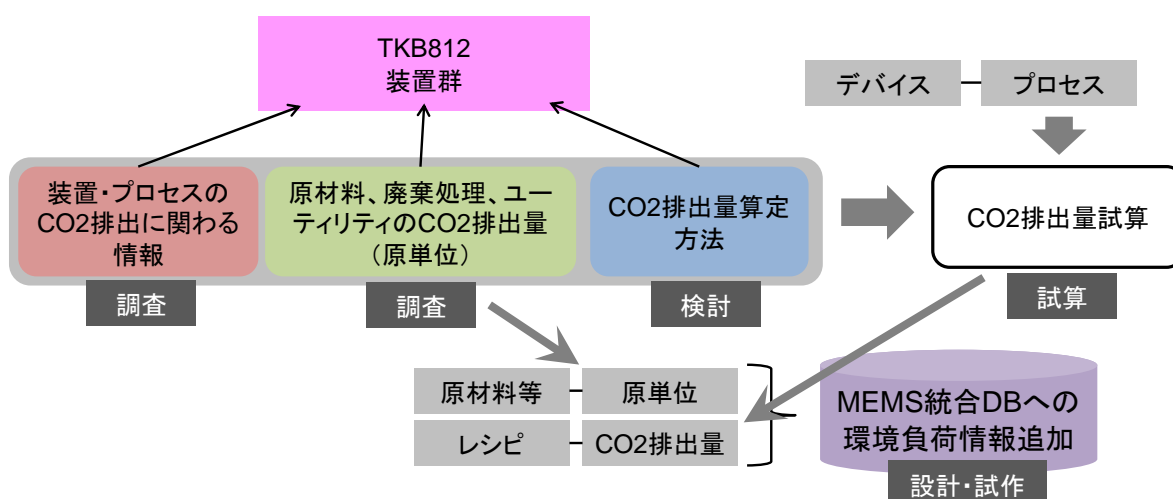


図 V.2.5.2- 26 リバースエンジニアリングのアクティビティ図

(3) 環境情報共有化技術の開発

低環境負荷 MEMS デバイスの実現のためには、環境負荷の算定が必須である。環境負荷の算定に当たっては、製品ライフサイクル（原材料調達、生産、流通、使用・維持管理、廃棄・リサイクル）を考慮し、製品の存在に関わるあらゆる段階の環境負荷を算定し、全体の環境負荷を低減することが必要である。

本研究開発項目では、MEMS製品の環境負荷として、二酸化炭素やPFCガス（CF₄、C₂F₆、C₃F₈、C₄F₈、CHF₃、SF₆、NF₃）の排出量について、温室効果（100年間）の強さをもとに二酸化炭素相当の排出量に換算した「二酸化炭素換算排出（以下、二酸化炭素排出[略記：CO₂排出]と記載）量」の算定方法の開発を行った。特に、MEMS製造プロセスは二酸化炭素排出に関連する原材料・工程・装置などが複雑であり排出量算定が困難であるため、製造プロセスでの二酸化炭素排出量の算定手法の開発を行うとともに、MEMS設計段階での利用を可能にするよう排出量の算定に関わる情報を集積するため、MEMS統合データベースへの環境負荷情報の追加機能の設計・試作を行った（図V.2.5.3-1）。



図V.2.5.3-1 環境情報共有化技術の開発

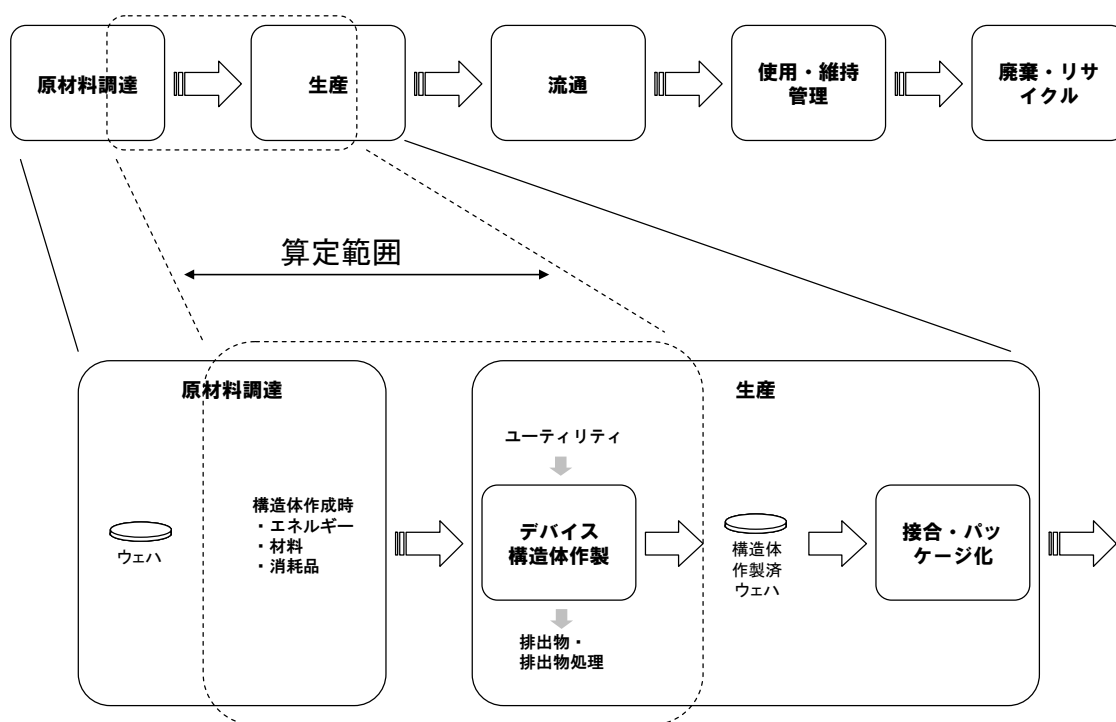
(3) -1 MEMS 製造プロセスの CO₂ 排出量算出手法の開発

本開発項目は、MEMS 製造時の二酸化炭素排出量の算定を行なうシステムの基本設計を検討することを目的とする。この目的のため、TKB812 に導入される製造装置・評価装置の電力使用量、原材料・ガス使用量、冷却水使用量などに関する装置仕様や計測データ、見える化システムによって収集・蓄積されたデータをもとに二酸化炭素排出量の算定方法を検討した。検討の結果得られた排出量算定の方法に基づき実際に排出量を算定し、算定システムの前案とした。

二酸化炭素排出の要因に関する情報を、すべての装置・工程に対して完備するためには多大な労力を必要とする。二酸化炭素排出量に対する寄与を数値化することではじめて項目間・処理間・装置間の比較が可能になり、寄与の大きい項目・工程・装置を明らかにしていくことができるという点が重要である。このような観点に立ち、不足する情報については概算や類推により極力数値を設定するように努めた。

なお、本開発項目にて実施した製造プロセスの二酸化炭素排出量の算定は、LCAの手法を用いて製品・サービスのライフサイクル全体にわたる環境負荷を算定するカーボンフットプリントの枠組みのなかでは、生産段階および原材料調達の一部である（図V.2.5.3-2）。

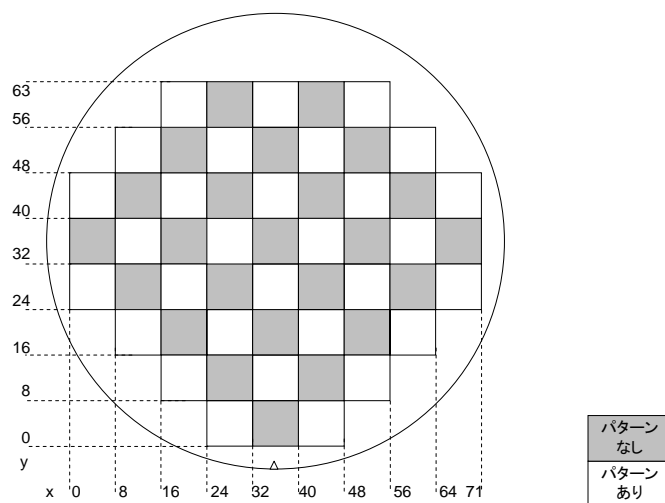
MEMS製品ライフサイクル



図V.2.5.3-2 MEMS製品のライフサイクルと二酸化炭素排出量算定範囲

(3) -1.1 二酸化炭素排出量算定の対象

二酸化炭素排出量の算定の対象製品は、TKB812へ導入された装置を使用し製造ラインの検証のため試作されたセンサTEG（図V.2.5.3-3）とした。センサTEGでは、8インチSOIウェハ（活性層25 μ m、埋め込み酸化膜4 μ m、基板725 μ m）を開始材料とし、ウェハ内に1920個（パターン区画30 \times 64個）のデバイスが作成された。



図V.2.5.3- 3 センサTEG 作製ウェハ

装置についてはセンサTEGの製造工程（表V.2.5.3- 1）に使用されたプロセス装置を二酸化炭素排出量の算定対象とした（表V.2.5.3- 2）。プロセス装置へ供給されるユーティリティに関わる装置についても二酸化炭素排出量の原単位算定を行なった。

TKB812に構築された見える化システムでは、表V.2.5.3- 2の列項目について10分間隔での計測を行なっている。また、必要に応じて、電力計にて1秒～1分間隔での電力を別途計測し、これらの計測値を二酸化炭素排出量の算定に用いた。

表V.2.5.3- 1 センサTEGの製造工程

No.	工程名	使用装置	仕様
1	レジスト成膜（1μm）	コーターデベロッパ	i線ホジレジスト（IP3650）、レジスト膜厚：1um レシピ名：1
2	パターニング（360ms）	ステッパ	SensorTEG_Layer2 レシピ名：SENSOR-TEG-1（360msec）
3	現像（1μm）	コーターデベロッパ	i線ホジレジスト（IP3650）、レジスト膜厚：1um レシピ名：9
4	裏面露光（1s）	ステッパ	レチクルなし、1000msec レシピ名：REWORK
5	裏面アッシング（40s）	アッシャー	O2=100sccm, 200W, 40sec レシピ名：2
6	Siエッチング（0.1μm）	シリコン深堀加工装置	Si加工深さ：0.1um レシピ名：PPS-Align
7	アッシング（1μm）	アッシャー	レジスト膜厚：1um, O2=50sccm, 500W, 15min レシピ名：1

8	洗浄 (SPM、HF)	ウェハ洗浄装置 1	SPM : 10min HF : 5min 洗浄 : 3min スピンドライヤ : 1min
9	アルミ成膜 (2 μm)	スパッタ	アルミ膜厚 : 2um レシピ名 : PPS-AL
10	レジスト成膜 (1 μm)	コーターデベロッパ	i 線ボジレジスト (IP3650)、レジスト膜厚 : 1um レシピ名 : 1
11	パターニング (360ms)	ステッパ	SensorTEG_Layer2 レシピ名 : SENSOR-TEG-1 (360msec)
12	現像 (1 μm)	コーターデベロッパ	i 線ボジレジスト (IP3650)、レジスト膜厚 : 1um レシピ名 : 9
13	アルミエッチング (2 μm)	ウェハ洗浄装置 1	アルミエッチング : 5min 純水洗浄 : 3min スピンドライヤ : 1min
14	アッシング (1 μm)	アッシャー	レジスト膜厚 : 1um, O2=50sccm, 500W, 15min レシピ名 : 1
15	熱処理 (400°C、30min)	ボロン拡散炉	アルミ N2 アニール、400°C、30min レシピ名 : 11. SUZUKI_AL
16	レジスト成膜 (1 μm)	コーターデベロッパ	i 線ボジレジスト (IP3650)、レジスト膜厚 : 1um レシピ名 : 1
17	パターニング (360ms)	ステッパ	SensorTEG_Layer1 レシピ名 : SENSOR-TEG-2 (360msec)
18	現像 (1 μm)	コーターデベロッパ	i 線ボジレジスト (IP3650)、レジスト膜厚 : 1um レシピ名 : 9
19	裏面露光 (1s)	ステッパ	レチクルなし、1000msec レシピ名 : REWORK
20	裏面アッシング (40s)	アッシャー	O2=100sccm, 200W, 40sec レシピ名 : 2
21	Si エッチング (25 μm)	シリコン深堀加工装置	Si 加工深さ : 25um レシピ名 : PPS-25um
22	アッシング (1 μm)	アッシャー	レジスト膜厚 : 1um, O2=50sccm, 500W, 15min レシピ名 : 1
23	犠牲層エッチング (4 μm)	HF 犠牲層エッチャー	SiO2 加工量 : 4um

24	熱処理 (200°C)	ホットプレート	HF・水分除去、昇温 10min、200°C (10min)
----	-------------	---------	--------------------------------

表V.2.5.3-2 二酸化炭素排出算定対象装置と見える化システムでの計測項目

装置名称		電力量	SF6	CHF3	高純度窒素	精製窒素	薬品	超純水	上水	冷却水	熱一般排気	有機排気	酸・アルカリ排気
プロセス・評価	ウェハ洗浄装置 1												
	ウェハ洗浄装置 2												
	コータデベロッパ												
	有機ドラフト												
	ウェットエッチング装置												
	マスク露光機												
	ステッパ												
	アッシャー												
	シリコン深掘加工装置												
	金属機能性材料エッチング装置												
	HF 犠牲層エッチャー												
	金属機能性材料膜形成装置												
	酸化炉												
	拡散炉 (ボロン)												
	熱処理炉												
	膜厚測定装置												
ユーティリティ	高純度窒素精製装置												
	超純水精製装置												
	ハロゲン除害装置												
	PFC 除害装置												
	熱排気ファン												
	有機排気処理装置												
酸・アルカリ排気処理装置													

(3) -1.1 MEMS 製造装置の CO2 排出量の分析項目

前項に記載した各装置について、プロセス時の温室効果ガス排出量の算定に寄与する要因を整理した (図 V.2.5.3- 4)。

電力が主となる「エネルギー」、「導入系」としてプロセス時に必要となる材料や消耗品、「放出系」として、プロセス時に発生する排出物とその処理、「ユーティリティ」としてプロセス時に必要となるその他の装置について分類した。さらにプロセス・評価装置の稼働時の状況をもとに、導入系、放出系、ユーティリティについて詳細化し、二酸化炭素排出の要因となる要素についてリストアップした (表 V.2.5.3- 3)。

ユーティリティは、製造装置に対する材料・消費材や用力の供給、製造装置からの排出物の処理を行なうものであるため、ユーティリティの使用による二酸化炭素の排出量については、「導入系」での供給量や「放出系」での排出量によって寄与を考慮することとした。

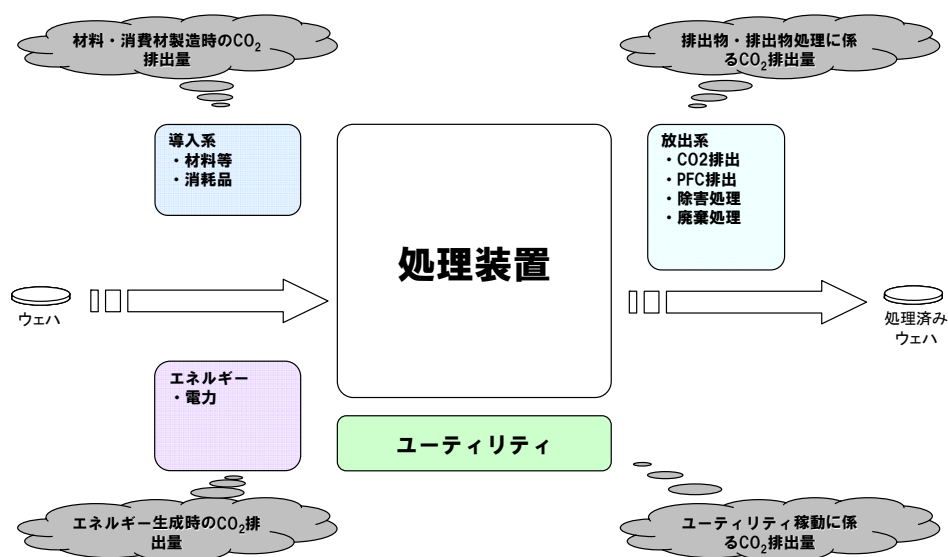


図 V.2.5.3- 4 温室効果ガス排出に係る情報整理

表 V.2.5.3- 3 二酸化炭素排出量の分析項目

エネルギー	電力		精製窒素	
導入系	SF6		圧縮乾燥空気	
	C4F8		超純水	
	CF4		冷却水	
	HF(ガス)	放出系	SF6 (排出)	
	O2		C4F8 (排出)	
	Ar		CF4 (排出)	
	He		PFC 除害	
	H2		ハロゲン除害	
	高純度窒素		熱・一般排気	
	純水 (ポンペ)		酸・アルカリ排気	
	H2SO4		有機排気	
	H2O2		廃液タンク排水	
	HF(50%)		ポリタンク回収	
	HMDS		ユーティリティ	高純度窒素供給
	レジスト			精製窒素供給
	リンス液 (リソ)			超純水供給
	現像液	圧縮乾燥空気供給		
	レジスト剥離液	冷却水		
	Ti	PFC 除害		
	Pt	ハロゲン除害		
	Cr	熱一般排気処理		
	Au	酸・アルカリ排気処理		
	Al	有機排気処理		
	SiO2			
	Mo			
	Ni			

(3) -1.2 原材料・廃棄処理・ユーティリティの CO2 排出量原単位算定

二酸化炭素排出量の分析項目 (表 V.2.5.3- 3) ごとに二酸化炭素排出量原単位の収集・算定を行なった。

原単位の情報源としては、経済産業省カーボンフットプリント事業²によって公開されて

² <http://www.cfp-japan.jp/> カーボンフットプリント

いる「カーボンフットプリント制度試行事業CO₂換算量共通原単位データベース（暫定版）ver. 2.01」を利用した。薬液の成分や固体物質などの化学種のなかには公開情報として原単位の存在しないものがあるため、推定により原単位を導出したものもある。典型的には、次のような推定を行なった。

原料の化学種の原単位が既知である場合は合成反応と合成プロセスに基づき算定した。このような算定ができない場合において、骨格構造を同一にする類似化学物質の原単位からの類推、情報が非常に少ない場合には同種物質との価格の比較などから原単位を推定した。

TKB812でのユーティリティ・廃棄処理関連の原単位については、次表（表V.2.5.3-4）に記載の方針に従って算定を行なった。

表V.2.5.3-4 ユーティリティ・廃棄処理の原単位算定方法

カテゴリ	項目	適用	装置・処理方法	原単位算定方法
導入系	高純度窒素供給	N ₂ （純度 6N）	高純度窒素供給装置(CE-N2)	高純度窒素精製に関する公開原単位を使用
	精製窒素供給	N ₂ （純度 4N）	高純度窒素精製装置(PSA-N2)	TKB812F での窒素製造装置の単位精製窒素量当たりの電力量で概算
	超純水供給	DIW	超純水精製装置	TKB812F の超純水精製装置の単位純水供給量当たりの電力量・上水使用量などから概算
	圧縮乾燥空気供給		圧縮乾燥空気供給装置	TKB812F の CDA 供給用の圧縮乾燥空気供給装置の仕様（単位処理量当たりの電力使用量）から概算
	真空供給		真空供給用ポンプ 2 台、真空ピンセット用	TKB812F のプロセス・評価装置では使用していないため、原単位を算定しない
	冷却水供給		産総研の冷却水供給系	工業用の冷却システムの仕様から概算
放出系	ハロゲン除害	プロセスガス（HBr、BCl ₃ 、Cl ₂ 、HF、ClF ₃ ）、生成化合物	ドライエッチング廃ガス除害装置 処理後は、(1) 酸・アルカリ排気、 (2) PFC 除害を経て酸・アルカリ排気へ廃棄される 2 系統	TKB812F のハロゲン除害装置の単位処理時間当たりの電力使用量から概算
	PFC 除害	プロセスガス（SF ₆ 、C ₄ F ₈ 、CF ₄ 、CHF ₃ ）、生成 F 化合物	PFC 除害装置 処理後は酸・アルカリ排気へ	TKB812F の PFC 除害装置の単位処理時間当たりの電力使用量から概算

カテゴリ	項目	適用	装置・処理方法	原単位算定方法
	熱一般排気	熱排気、一般排気	熱排気ファン	TKB812F の熱一般排気ファンの単位排気量当たりの電力使用量から概算
	有機排気	有機排気	有機処理装置	TKB812F の有機排気ガス処理装置の単位処理量当たりの電力使用量から概算
	酸・アルカリ排気	酸性排気、アルカリ性排気	酸・アルカリ排気処理装置	TKB812F の酸・アルカリ排気ガス処理装置の単位処理量当たりの電力使用量から概算
	ポリタンク回収	酸・アルカリ (SPM、APM、HPM+DHF、5%DHF)、有機溶剤	20L ポリタンクによる原液回収処理	回収業者の回収処理状況から推定
	廃液タンク排水	1次・2次洗浄排液	廃液タンクへの排水・回収処理	回収業者の回収処理状況から推定
	研究排水	3次以降洗浄排液	産総研の研究排水への排出	薬品製造などの下水処理に関する公開原単位を使用

(3) -1.3 MEMS 製造プロセスの二酸化炭素排出量算定方法

収集・算定した原単位を用い、以下の考え方にに基づき二酸化炭素排出量を算定した。なお、調査対象の装置の中には取得できる計測値や処理時間、流量速度に関する情報にばらつきがあるため、装置仕様や推定による概算値を用いて以下の式に当てはめる方針とした。

表 V.2.5.3- 5 二酸化炭素排出量算定方法

エネルギー	
◇ 電力	(ウェハー一枚加工あたりの CO ₂ 排出量) =(ウェハー一枚加工あたり電力使用量<測定値>) × (電力の原単位)
導入系・排出系	
◇ 流量がパラメータとなる気液物質	(ウェハー一枚加工あたりの CO ₂ 排出量) =(物質流量) × (ウェハー一枚あたりの加工時間) × (物質原単位)
◇ 一処理あたりの使用量がパラメータとなる気液物質	(ウェハー一枚加工あたりの CO ₂ 排出量) =(ウェハー一枚処理あたりの物質使用量) × (処理回数) × (物質原単位)
◇ 使用時間がパラメータとなる物質	(ウェハー一枚加工あたりの CO ₂ 排出量) =(ウェハー一枚処理あたりの加工時間) × (時間当たり原単位)

装置の使用状況については、MEMS 製品を大量生産する状況を仮定した。したがって、

次のような仮定を置いている。

- 常時電源オンで待機状態にある装置については、連続稼働による処理中の 1 ロット分を切り出して活動量を算定
- 処理時に電源を入れる装置は、電源 On から Off までの活動量を算定
- 製造装置自体の製造・設置、非製造時運用に関する二酸化炭素排出量は考慮していない

また、TKB812 のライン検証としてのセンサ TEG の作製工程により、算定は次の範囲となる。

- ウェハ上へのデバイス構造体の作製過程について算出
 - MEMS 製品としての完成品の歩留まりを考慮していない（歩留まり 100%）
- 原材料・消耗品・ユーティリティなどについての算定は、次の範囲となる。
- 製造時に直接必要となる原材料・消耗品については、基本的に全て算定に含まれている
 - 故障時交換品、長期（1年以上）使用後交換品については、算定に含めていない
 - ユーティリティとして供給されるものについて（精製窒素、超純水など）は、供給のための電力、原材料は考慮されているが、供給装置において稼働に必要な消耗品は考慮されていない
 - 温調装置・空気清浄装置などクリーンルーム内の空調、クリーンルーム内の照明その他付帯的設備にかかる二酸化炭素排出は考慮されていない

（3）－1.4 二酸化炭素排出量試算結果

前項で記載した個別の装置（表 V.2.5.3- 2）に対して、表 V.2.5.3- 1 のセンサ TEG 製造工程ごとに、ウェハ 1 枚当たりの二酸化炭素排出量を試算した。

図 V.2.5.3- 5 に、全工程で合算した二酸化炭素排出量（41.6kg-CO₂e）の内訳を示した。電力、および、精製窒素がいずれも 35% と大部分を占めている。次いで、圧縮乾燥空気 9%、さらに、超純水、レジスト剥離液、廃液タンク排水がいずれも 3% となっている。合算結果からは、二酸化炭素排出量の削減には、電力、および、精製窒素の削減が効果的であるといえる。

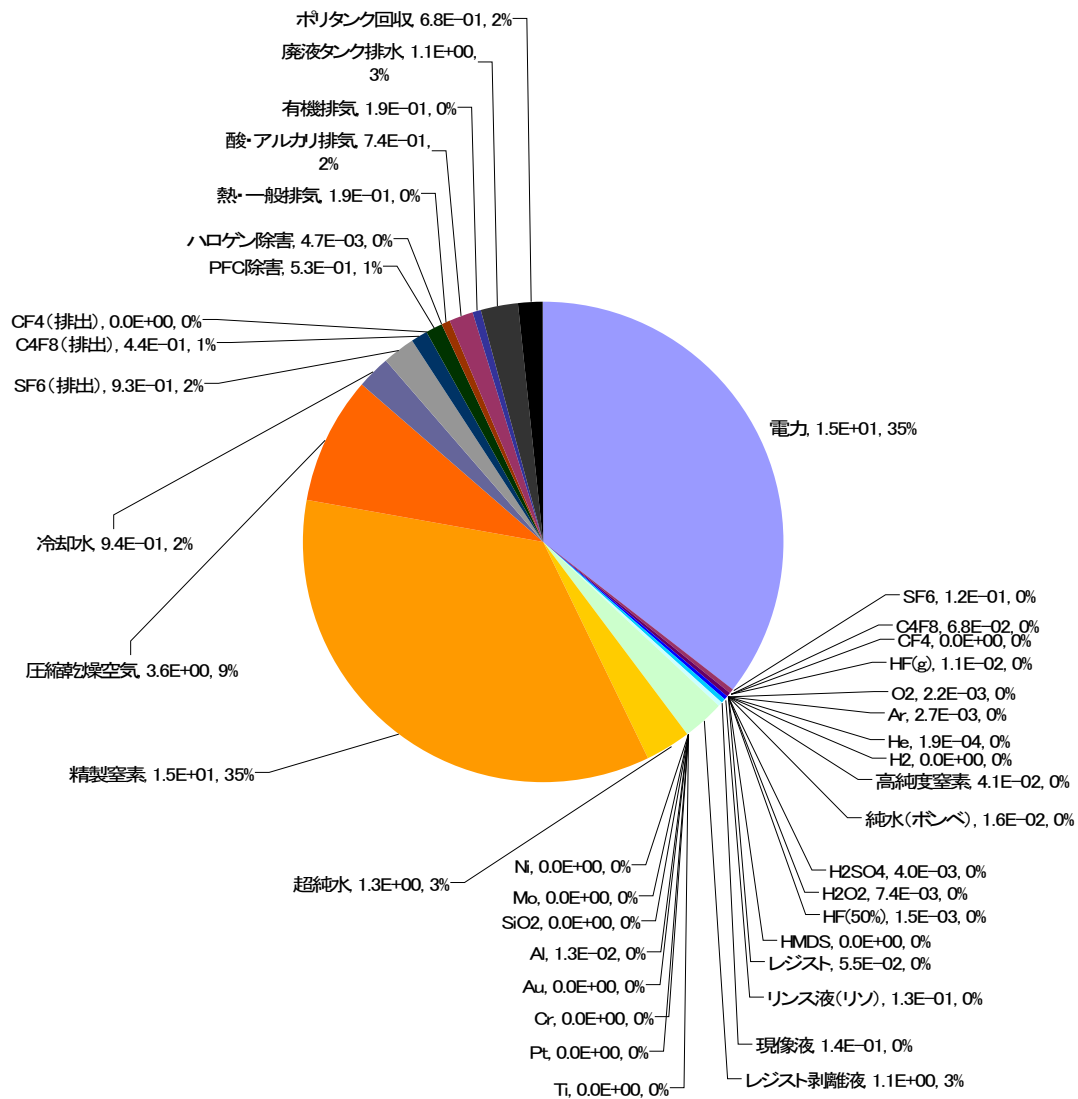


図 V.2.5.3- 5 センサ TEG 全製造工程の二酸化炭素排出量

図 V.2.5.3- 6 にセンサ TEG の作製における製造工程ごとの二酸化炭素排出量を示した。工程の中では、アルミエッチング (2 μm)、Siエッチング (25 μm)、洗浄 (SPM、HF) 工程の二酸化炭素排出量が多い。全工程内の項目を比較した場合には、現像 (1 μm) での精製窒素、アルミ製膜 (2 μm) での電力、Siエッチング (25 μm) での電力、アルミエッチング (2 μm) での電力と圧縮乾燥空気からの二酸化炭素排出量が多い。

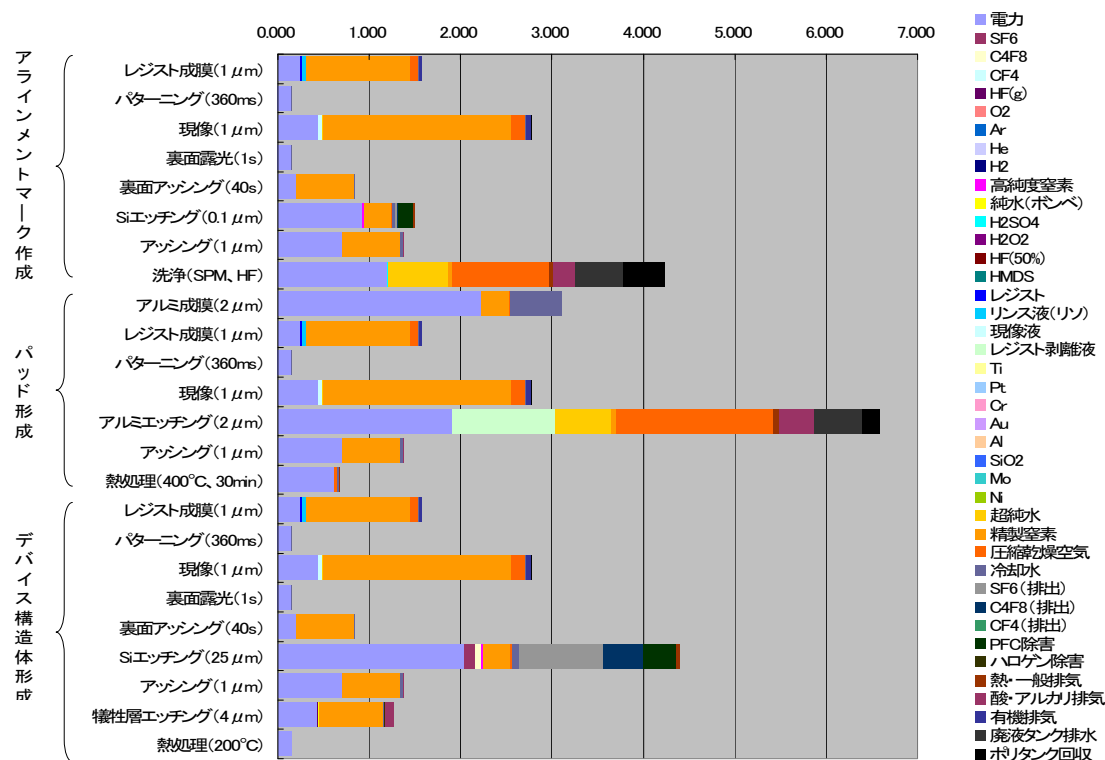


図 V.2.5.3- 6 センサ TEG の製造工程ごとの二酸化炭素排出量

図 V.2.5.3- 7 にセンサ TEG の全製造工程での製造装置ごとの二酸化炭素排出量を示す。コータデベロッパ、ウェハ洗浄装置 1、シリコン深堀装置、アッシャーからの排出量が多い。

コータデベロッパを使用する工程は、全 24 工程のうち 6 工程あり (表 V.2.5.3- 1)、これらからの寄与が積みあがっている。これらの中では精製窒素の使用による二酸化炭素排出量への寄与が大きい。

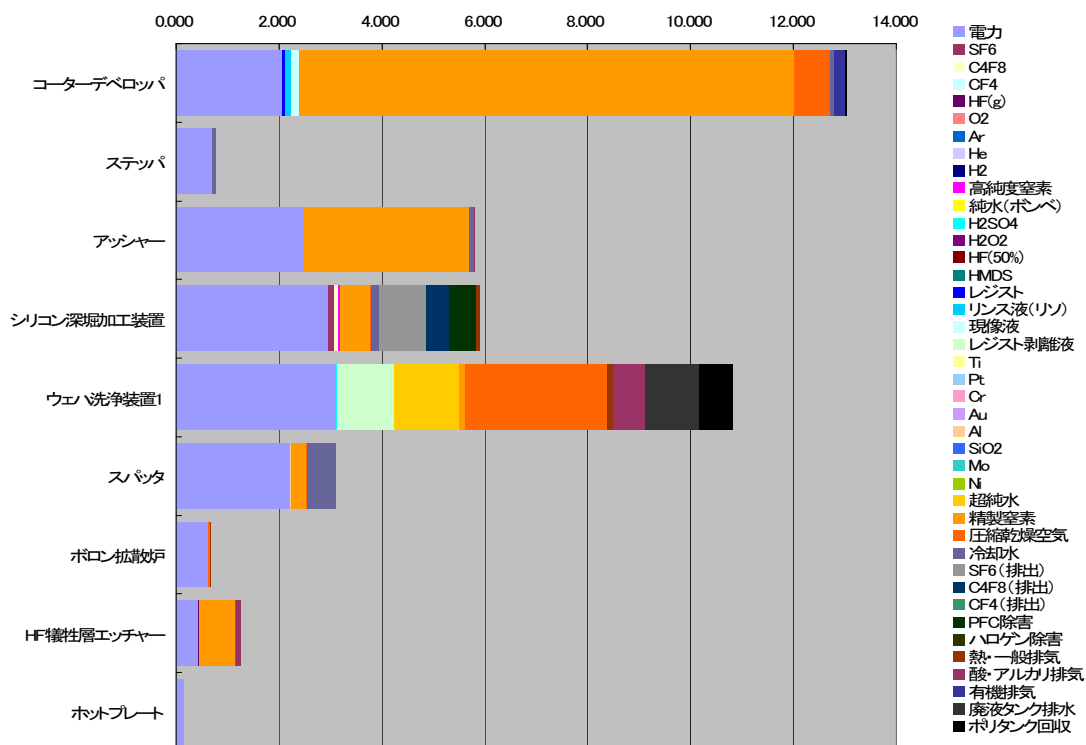
ウェハ洗浄装置 1 を使用する工程は、洗浄 (SPM、HF)、アルミエッチング (2 μm) の 2 工程であり工程間の比較でも二酸化炭素排出量の多い工程である。項目では、電力、および、圧縮乾燥空気の二酸化炭素排出量が多い。

シリコン付加掘装置では、Si エッチング (25 μm) 工程のみである。電力による二酸化炭素排出量が多い。

アッシャーは、全 24 工程のうち 5 工程あり (表 V.2.5.3- 1)、これらからの寄与が積みあがっている。精製窒素、および、電力からの二酸化炭素の排出量がほとんどを占めている。

全装置の全項目間を比較すると、コータデベロッパおよびアッシャーの精製窒素、コータデベロッパ、アッシャー、シリコン付加掘装置、ウェハ洗浄装置 1、およびスパッタの電力、ウェハ洗浄装置 1 の圧縮乾燥空気、からの二酸化炭素排出量が多くなっている。全

製造工程からの二酸化炭素排出量の削減を検討する場合には、これらの項目からの二酸化炭素排出量削減の効果が高いといえる。



図V.2.5.3- 7 センサ TEG 製造工程の装置ごとの二酸化炭素排出量

表V.2.5.3- 6に、MEMS製品についてのデバイス構造体作製と使用時の二酸化炭素排出量を示す。デバイス構造体作製時については、本研究開発でのセンサTEG作製時の二酸化炭素試算結果に基づいている。使用時については、消費電力を1mWと仮定し5年間の連続使用を仮定した。二酸化炭素排出量は、ほぼ同程度の値であると見積もられる。

表V.2.5.3- 6 MEMS 製品についての作製・使用時の二酸化炭素排出量

	デバイス構造体作製 (原材料調達、および、生産の一部)	使用
二酸化炭素排出量	21.6g-CO2e	21.0g-CO2e
算定条件	本研究開発でのセンサ TEG (8 インチ、1920 デバイス) に関する試算	消費電力 1mW、5 年間連続使用

(3) -1.5 課題

本研究開発では、MEMS のデバイス構造体の製造工程について、工程ごとに排出に寄与する項目を調査し、寄与を積算することで二酸化炭素排出量を算定した。算定の結果により、排出量の多い装置・工程・項目に注目することで、装置・工程・項目に対する排出量の削減への指針を得ることができた。

MEMS 製品の構造や製造工程は多種多様であることから、今後、今回開発した算定手法を他の製品・製造工程に適用し情報を統合して、MEMS 製品の二酸化炭素排出量に関する情報をデバイスおよびプロセスの設計時に生かせるようにする必要がある。

MEMS 製品のライフサイクルを通じた二酸化炭素排出量の算定のためには、本研究開発での製造工程での排出量試算において除外した項目を組み入れる必要がある。さらに、原材料としてのウェハ製造、デバイス構造体と同一チップ上または別チップに作製される信号処理量用 IC の製造、および、パッケージングなどの生産段階、流通段階、最終製品に組み込まれた後の使用・維持管理段階、廃棄・リサイクル段階についても算定を進める必要がある。

(3) -2 MEMS 統合 DB 環境負荷データ登録・参照機能の開発

MEMS 製造プロセスの CO₂ 排出量算出結果を MEMS 統合設計データベースへ登録する機能、および参照する機能を開発した。

(3) -2.1 画面レイアウト

■ 登録

登録画面レイアウトを図 V.2.5.3- 8 に示す。CO₂ 排出量は、製造装置のレシピごとに算出される。レシピ名、装置名、レシピファイル、CO₂ 排出量を登録する。

事前に装置管理を行うメニューで、登録しておいた 8 インチライン導入された装置の一覧がプルダウンで表示される。

図 V.2.5.3- 8 登録画面レイアウト

■ 参照

登録された CO₂ 排出量は、一覧形式で表示される。画面レイアウトを図 V.2.5.3- 9 に示す。

	装置	レシピ名	CO ₂ 排出量
1 削除	ACD-12802C-3H 1	R10	3.132
2 削除	ACD-12802C-3H 1	R1	1.484
3 削除	ACD-12802C-3H 1	R9	13.813
4 削除	ACD-12802C-3H 1	R12	17.210

図 V.2.5.3- 9 参照画面レイアウト

(3) -2.2 データベーステーブルの定義

画面レイアウトで表示するデータを考慮し、データベーステーブルの設計を行った。E-R 図を図 V.2.5.3- 10に、テーブル定義を表 V.2.5.3- 7および表 V.2.5.3- 8に示す。

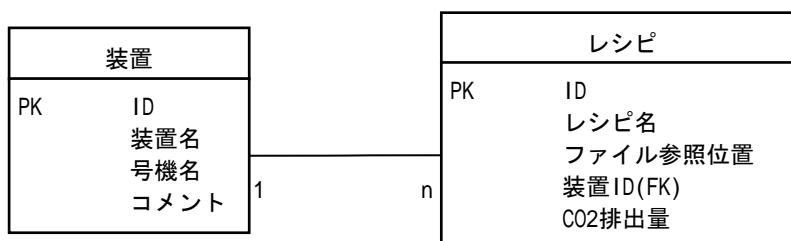


図 V.2.5.3- 10 CO2 排出量 DB E-R 図

表 V.2.5.3- 7 装置テーブル定義

テーブル名(理名)		装置						
テーブル名(物理名)		measuring_equipment						
番号	項目名(理名)	カラム名	データ型	数	NOT NULL	キー(PK)	外部キー(FK)	説明
1	ID	measuring_equipment_id	Number	7	NOT NULL	PK		
2	装置名	equipment_name	CHAR	256	NOT NULL	PK		
3	号機名	equipment_number	CHAR	256		PK		
4	コメント	comment	CHAR	512				

表 V.2.5.3- 8 レシピテーブル定義

テーブル名(理名)		レシピ						
テーブル名(物理名)		recipe						
番号	項目名(理名)	カラム名	データ型	数	NOT NULL	キー(PK)	外部キー(FK)	説明
1	ID	id	Number	7	NOT NULL	PK	FK	
2	レシピ名	name	CHAR	32				
3	ファイル参照位置	archive_position	CHAR	256	NOT NULL			レシピファイルのパス
4	装置 ID	equipment_id	Number	7	NOT NULL		FK	装置テーブルの ID
5	CO2 排出量	CO2emission	Real					

(3) -2.3 総括

MEMS 製造における環境負荷の低減のためには、工場全体の稼働に関わる情報や、製造された製品品質に関する情報、製造装置の稼働状況に関する情報、および、これらを元に得られる環境負荷情報を、実際に環境負荷低減へと結びつける手段を確立することが重要である。本研究開発ではこの目的に資するため、3次元設計・計測情報の共有化技術の開発、および、環境情報共有化技術の開発を行った。

3次元設計・計測情報の共有化技術の開発では、**MEMS** の形状計測によりデバイス・プロセス設計への示唆を得るための手法の検討として、シリコンチップ表面に作製されたカンチレバーに対して X線 CT装置により3次元構造計測を行い、得られた構造から設計時の形状や力学特性の比較を行った。機械特性、電気特性の計測データと設計形状とを、集中質点系モデルを介在させて比較する手法を検討した。併せて、情報共有のためのデータベースシステムの設計・プロトタイプ開発を行った。

3次元構造計測による設計へのフィードバックについては、X線 CT装置計測から形状・力学特性の比較という一連の手続きにより、デバイス・プロセス設計改善への指針を提示し得ることを示すことができた。機械特性・電気特性計測による設計へのフィードバックについては、設計へと効果的に示唆を与える得ることを示した。

今後は、開発した設計へのフィードバック手法・技術を更に改良・発展させ、多種多様な**MEMS**デバイスへの適用を可能にすることが必要である。X線 CT装置による計測では、計測からデータ変換の一連の手続きの中で撮像時のアーチファクトを克服する手法・手段の検討が課題である。また、データベースシステムについては現在のプロトタイプシステムをもとに開発を進め、実用に供するシステムを実現することが必要である。

環境情報共有化技術の開発では、プロジェクトにて構築される製造ラインにて製造される製品の二酸化炭素排出量の算定方法を開発した。**MEMS** のデバイス構造体の製造工程について、工程ごとに排出に寄与する項目を積算することで二酸化炭素排出量を算定した。算定の結果により、装置・工程・項目に対する排出量の削減への指針を得ることができた。

MEMS 製品の構造や製造工程は多種多様であることから、今後、今回開発した算定手法を他の様々な製品・製造工程に適用して知見を集約し、**MEMS** 製品の二酸化炭素排出量に関する情報をデバイスおよびプロセスの設計時に生かせるようにする必要がある。

MEMS 製品のライフサイクルを通じた二酸化炭素排出量の算定のためには、本研究開発での製造工程での排出量試算において除外した項目、原材料としてのウェハ製造、信号処

理量用 IC の製造、および、パッケージングなどの生産段階、流通段階、最終製品に組み込まれた後の使用・維持管理段階、廃棄・リサイクル段階についても算定を進める必要がある。

MEMS 製品に関する計測データの設計へのフィードバックによる開発効率向上・歩留まり向上や、二酸化炭素排出量の算定によるデバイス・プロセス設計時の環境負荷の算定が可能になれば、低環境負荷製品の早期市場投入を促進し、MEMS 分野の国際競争力の強化に寄与することができる。

ロボット・新機械イノベーションプログラム基本計画

1. 目的

我が国の製造業を支えてきたロボット技術・機械技術を基盤とし、IT技術・知能化技術など先端的要素技術との融合を促進することにより、家庭、医療・福祉、災害対応など幅広い分野で活躍する次世代ロボットや新機械技術の開発・実用化を促進し、生産性の向上と人間生活の質の向上を実現するとともに、我が国経済社会の基盤である製造業の競争力の維持・強化を目指す。

2. 政策的位置付け

○科学技術基本計画(2006年3月閣議決定)

ロボット・新機械技術は、特に重点的に研究開発を推進すべき分野(重点推進4分野)の一つである情報通信分野や、推進分野であるものづくり技術分野、社会基盤分野に位置付けられている。

○「経済成長戦略大綱」(2006年7月財政・経済一体改革会議。2007年6月改定版を経済財政諮問会議に報告)

産学官連携による世界をリードする新産業群の一つとして位置付けられ、次世代ロボット市場の拡大に向けて、サービスロボット市場の整備、ロボットの認識技術の開発等必要な取組を継続することとしている。

またITによる生産性向上と市場創出のためのIT革新を支える産業・基盤の強化技術として、新機械技術の重要分野であるMEMS技術の重要性が位置付けられている。

○「新産業創造戦略」(2005年6月経済産業省取りまとめ)

先端的な新産業分野として、「ロボット」を戦略7分野の一つとして掲げ、2010(平成22年)までの市場規模、その成長に向けたアクションプログラムを盛り込んでいる。当該アクションプログラムには、ユーザ(施設、地域)を巻き込んだ実証試験を中心としたモデル開発事業による先行用途開発、モデル事業と連携した重要な要素技術や共通インフラ技術の開発支援、及び人間とロボットの共存に必要な安全性の確保と、保険制度等の制度基盤の整備が提示されている。

新機械技術の重要分野であるMEMS技術について、当該新産業群の創出を支える重点4分野(「科学技術基本計画」による)の分野間の融合による推進が指摘されている。

○「イノベーション25」(2007年6月閣議決定)

ロボット・新機械技術は、生涯健康な社会や多様な人生を送れる社会の実現に向けて、中長期的に取り組むべき課題として、新たな走行車等の普及促進のための環境整備、高度みまもり技術導入のためのルール作りなどの安全・安心な社会形成、また、ユビキタスネットワークや民生用ロボットの本格普及に向けた環境整備、低侵襲診断・治療技術の実現、安全・安心な社会のための将来デバイスの実現、さらに世界的課題解決に貢献する社会のための新しいものづくり技術など、今後の研究開発の進展等によって、その成果を社会に適用していく上で取組が必要であるとともに、随時見直しをし、その取組を加速・拡充していくことが必要とされている。

○「ロボット政策研究会」(2006年5月経済産業省取りまとめ)

ロボットを実際に市場に導入するための政策の強化、ロボットが現実に使われることを想定した安全性の確保、及び具体的な用途を想定したロボット技術の開発の推進を検討の視点として、これら課題への対応の方向性をまとめた。

3. 達成目標

(1) 我が国製造業の高度化に必要不可欠な基盤技術である機械分野においては、バイオ技術やIT技術等の異分野技術を活用した従来の機械の概念を超えた新しい機械の創造及びその計測技術の確立を図ることを目標とする。例えば、2015年頃に革新的MEMSの本格普及を目指すことにより、安全・安心な社会の構築に貢献する。

(2) 安全・安心な社会、便利でゆとりある生活の実現のために必要不可欠なロボットは、信頼性技術、高機能化・知能化技術、システム化技術が特に重要であり、これら技術を開発することで、2015年頃には、自律的に多様な作業を行うロボットの実用化を目指す。

4. 研究開発内容

[プロジェクト]

I. ロボット技術開発

(1) 基盤ロボット技術活用型オープンイノベーション促進プロジェクト(運営費交付金)

①概要

これまでの研究開発プロジェクトの成果を活用し、生活環境やロボットで使用される各種要素部品をRT(Robot Technology)システムで利用しやすい共通の接続方式、制御方式の下で利用可能な形で提供(RTコンポーネント化)するための基盤を開発する。これにより既存の生活環境を簡単にRTシステム化し、それらを活用することにより様々な生活支援機能の提供、基盤ロボット技術の普及と標準化を推進する。

②技術目標及び達成時期

2010年度までに、共通の通信インターフェースとRTミドルウェアで動作させる基盤通信モジュール、既存の要素部品をRTコンポーネント化したRT要素部品、それらを用いたRTシステム

を開発する。

③研究開発期間

2008年度～2010年度

(2)次世代ロボット知能化技術開発プロジェクト(運営費交付金)

①概要

生活空間や多品種少量生産の製造現場など状況が変わりやすい環境下では、ロボットの使用条件や用途は大きく限定されている。これを克服するため、ロボットが確実性(ロバスト性)をもって稼動し、ロボットの環境・状況認識能力等の向上とともに、ロボットの知能要素をモジュール化し、その蓄積管理及び組合せ等を可能とする技術を開発する。

②技術目標及び達成時期

2011年度までに、次世代ロボットが高度な作業(タスク)を行う上で必要な効率的で実用的な知能化技術を開発する。具体的には、魅力的でニーズが高いタスクを設定し、知能化技術モジュールを開発し、高機能なロボットシステムの構築を実証する。

③研究開発期間

2007年度～2011年度

(3)戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト(運営費交付金)

①概要

市場ニーズ及び技術戦略マップに基づき、約10年後にロボット技術の活用により達成するミッションを設定した上で、これを達成するために必要なロボットシステム及び要素技術開発を、関係府省の連携の下で実施する。

②技術目標及び達成時期

市場ニーズ及び技術戦略マップに基づき、約10年後にロボットを活用して達成するミッションを設定した上で、これを達成するために必要なロボットシステム及び要素技術の開発を実施する。具体的かつ先端的なRT開発を支援することで、我が国のRT競争力の維持・発展を図るとともに、研究開発成果の他分野(自動車、情報家電等)への波及を図る。

③研究開発期間

2006年度～2010年度

II. MEMSの技術開発・新機械産業の領域開拓

(1)高集積・複合MEMS製造技術開発プロジェクト(運営費交付金)

①概要

従来個別に開発されてきた各種センサならびに通信用デバイスについて、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 製造技術を用いて一体形成、高集積化、ナノ機能付加することで、小型・省電力・高性能・高信頼性のMEMSデバイスを製造する技術を開発する。

②技術目標及び達成時期

2008年度までに、以下の開発を行う。

- ・MEMS／半導体の一体形成技術の開発
- ・MEMS／MEMSの高集積化技術の開発
- ・MEMS／ナノテク機能の複合技術の開発

③研究開発期間

2006年度～2008年度

(2) 異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト

①概要

高信頼性が必要な医療分野や特殊環境等で活用され、医療や安全・安心等の社会的課題を解決する、小型・高性能・省エネルギーな次世代デバイスの基盤プロセス技術を、MEMS製造技術とナノ・バイオ等の異分野技術の融合により開発する。

②技術目標及び達成時期

2012年度までに、次世代デバイス製造に必要不可欠な基盤プロセス技術群である、バイオ・有機材料融合プロセス技術、3次元ナノ構造形成プロセス技術、マイクロ・ナノ構造大面積・連続製造プロセス技術を開発すると共に、得られた知見を系統的に蓄積しデータベース化し、従来の技術情報と統合的に取り扱える知識データベースシステム整備を行う。

③研究開発期間

2008年度～2012年度

Ⅲ. 分析機器産業の技術開発支援

(1) 高度分析機器開発実用化プロジェクト

①概要

燃料電池・情報家電・ナノテクといった先端新産業において、材料解析・性能評価・品質管理等で必要とされる超微量・超低濃度試料の分析技術や機器の開発を行う。これら産業化の各フェーズに適した分析技術を開発することにより、先端新産業の事業化や製品の高付加価値化を図る。

②技術目標及び達成時期

2010年度までに希ガスイオン源を搭載した集束イオンビームの開発、低加速・高分解能・

高感度の元素分析用顕微鏡の開発、超微量試料用分離・分析技術の開発を行う。

③研究開発期間

2006年度～2008年度

5. 政策目標の実現に向けた環境整備(成果の実用化、導入普及に向けた取組)

〔実用化・導入普及促進〕

ロボットやその関連部品等の見本市の開催等を支援することによって、システム開発者、要素部品の開発者、ロボットユーザ等とのマッチングを図り、中小・ベンチャーや異業種企業のロボット産業への参入を促進する。

また、市場創出に貢献するロボットを表彰し、ロボットユーザ、メーカーから一般の方まで広くPRする表彰制度「今年のロボット」大賞を共催機関と協力して実施している。

開発したソフトウェア等の成果については、広く一般に提供するなど積極的な普及を図ることにより、より多くの開発主体がロボット技術開発に参加できる環境を創出し、ロボット技術開発の裾野の拡大を図る。

将来のロボットは人に接する場面が多くなるであろう。したがって、ロボットの導入・普及を促進するためには、安全に対する考え方を整理し、周知することが重要である。平成19年7月には人間と共存する次世代ロボットの安全性を確保するための基本的な考え方をまとめた「次世代ロボット安全性確保ガイドライン」をとりまとめた。今後は、普及や具体化に向けた取組みが求められており、技術開発と並行して安全に係るルールなどの整備を推進することで普及をより現実化させることが必要である。

MEMSの一層の実用化促進を図るため、異分野や製造設備を有していない企業でも容易にMEMSビジネスに参入できるように、MEMS用設計・解析支援システムを開発した。その成果を活用しつつ、実習を中心とした人材育成及び試作環境の充実、製造拠点(ファンドリー)強化などMEMS産業全体の競争力の維持・強化を図る。

〔標準化〕

各プロジェクトで得られた成果のうち、標準化すべきものについては適切な標準化活動(国際規格(ISO/IEC)、日本工業規格(JIS)、その他国際的に認知された標準団体(OMG等)への提案等)を実施する。

特に、ロボットの安全基準や性能の評価基準については、過去に実施した研究開発プロジェクト等による実証データや「次世代ロボット安全性確保ガイドライン」の活用を図りつつ我が国発の国際標準としての提案について検討し、拡大するロボット市場における国際競争力の確保を目指す。

なお、これまでの研究施策の成果である、ロボット部分品の接続の共通化を目指したRTM(ロボット・テクノロジー・ミドルウェア)が、OMG(ソフトウェア技術の国際標準化団体)において、平成19年12月に標準仕様として採択されている。

MEMS技術・製品を世界市場に広く普及するために技術戦略マップに基づくMEMS標準

化戦略の策定、国際規格案の開発、提案、推進等の標準化活動に継続的に取り組む。

6. 研究開発の実施に当たっての留意事項

事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金により実施されるもの(事業名に(運営費交付金)と記載したものは、中期目標、中期計画等に基づき、運営費交付金の総額の範囲内で、当該独立行政法人の裁量によって実施されるものである。

7. 改訂履歴

- (1)平成14年2月28日付け、21世紀ロボットチャレンジプログラム基本計画制定。
- (2)平成15年3月10日付け制定。21世紀ロボットチャレンジプログラム基本計画(平成14・02・25産局第3号)は、廃止。
- (3)平成16年2月3日付け制定。21世紀ロボットチャレンジプログラム基本計画(平成15・03・07産局第11号)は、廃止。
- (4)平成17年3月31日付け制定。21世紀ロボットチャレンジプログラム基本計画(平成16・02・03産局第16号)は、廃止。
- (5)平成18年3月31日付け制定。21世紀ロボットチャレンジプログラム基本計画(平成17・03・25産局第18号)は、廃止。
- (6)平成19年4月2日付け制定。21世紀ロボットチャレンジプログラム基本計画(平成18・03・31産局第7号)は、廃止。
- (7)平成14年2月28日付け、新製造技術プログラム基本計画制定。
- (8)平成15年3月10日付け制定。新製造技術プログラム基本計画(平成14・02・25産局第6号)は、廃止。
- (9)平成16年2月3日付け制定。新製造技術プログラム基本計画(平成15・03・07産局第9号)は、廃止。
- (10)平成17年3月31日付け制定。新製造技術プログラム基本計画(平成16・02・03産局第11号)は廃止。
- (11)平成18年3月31日付け制定。新製造技術プログラム基本計画(平成17・03・25産局第5号)は、廃止。
- (12)平成19年4月2日付け制定。新製造技術プログラム基本計画(平成18・03・31産局第6号)は、廃止。
- (13)平成20年4月1日付け、ロボット・新機械イノベーションプログラム基本計画制定。21世紀ロボットチャレンジプログラム基本計画(平成19・03・15産局第2号)及び新製造技術プログラム基本計画(平成19・03・19産局第3号)は、本イノベーションプログラム基本計画に統合することとし、廃止。

(ロボット・新機械イノベーションプログラム)

「異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト」基本計画

機械システム部

1. 研究開発の目的、目標及び内容

(1) 研究開発の目的

我が国産業は、強力な競争力を有する製造業を柱に成長してきたが、情報ネットワーク技術の進展や経済のグローバル化によって、激しい国際競争にさらされており、更に少子高齢化による技術伝承の困難さ、地球環境問題への対応等、様々な課題に直面している。このような中で、製造業が我が国の産業競争力を支えていくためには、新たな製造技術の開発により、新しい産業を創出し、製造業での高付加価値化を更に進めることが必要である。そのためには、これまでの縦割りの技術の深耕ではなく、様々な分野の技術、科学的知見を融合した新しい製造技術を創り上げていくことが必要である。

代表的な新しい製造技術であるMEMS (Micro Electro Mechanical Systems : 微小電気機械システム) 技術は、90年代に世界に先駆け我が国では産学官での挑戦が始まり、2000年以降自動車、各種製造機器、情報機器、通信機器等の小型・高性能化をもたらし、わが国の産業競争力強化に貢献してきた。

MEMS技術は、直近の産学官の取り組みである「高集積・複合MEMS製造技術開発プロジェクト」において、MEMS技術と半導体技術、ナノ技術とを融合し、高集積化・複合化による多機能デバイスの創出を狙う新たな製造技術を実現したが、今後、2015年以降2025年に向けて革新的イノベーションを起こし、更なる市場の拡大を図るには、従来電子・機械製造技術と完全に異分野とされてきた技術とを融合させる等により、これまでの製造技術の概念・常識を打ち破った技術を創出することが肝要である。

MEMS技術戦略マップ2007年版では、「MEMSはトップダウンプロセスである微細加工とボトムアッププロセスであるナノ・バイオプロセスとを融合させたマイクロ・ナノ統合製造技術の確立により、その応用範囲を急速に広げ国家・社会的課題である「環境・エネルギー」、「医療・福祉」、「安全・安心」分野で新しいライフスタイルを創出する革新的デバイスとして広く浸透する。」と記載されている。例えば、「医療・福祉」分野では、人体に与える負荷を極小化させる医療診断システムや、「安全・安心」分野として、広くセンサネットワークを構築し、災害監視や地球観測に適用可能な宇宙で使えるような革新的デバイスの創出が望まれている。この革新的デバイスを創出するためには、その基盤技術であるプロセス技術の確立が必須である。

また、全世界的課題として環境エネルギー問題への対応が国や産業毎に強く求められており、革新的次世代デバイスの実用化においては製造プロセス自体の省資源や高効率

な製造プロセスの実現による低環境負荷化が期待されている。

このため、本プロジェクトは、サイエンスとエンジニアリングを融合させ、将来の革新的次世代デバイスの創出に必要な新しいコンセプトに基づき、基盤的プロセス技術群を開発し、かつ、そのプラットフォームを確立することを目的とする。

さらに、低炭素社会づくりに貢献する高機能MEMSセンサおよびそれを活かしたネットワークシステムの構築と、革新的次世代デバイスの実用化における低環境負荷型製造プロセス技術を確立することを目的とする。そのため、我が国のものづくりを支える中核デバイスの国際競争力強化を目的とした「ロボット・新機械イノベーションプログラム」の一環として行う。

(2) 研究開発の目標

MEMS技術戦略マップ2007のロードマップによる2025年以降の技術等を見越し、研究開発の目的に即した革新的製造プロセス技術を抽出し、その技術を確立することを目標とする。更に、本技術開発を通じて得られた共通基盤製造技術に関わる知識を集約し、データベースを整備する。

具体的な目標としては、プロジェクト3年経過時点において別紙の研究開発計画の研究開発項目①から④の中間目標を、プロジェクト終了時において別紙の研究開発計画項目の①から④の最終目標を達成することとする。

さらに成果の早期実用化に向け、平成21年度より別紙の研究開発項目⑤を実施し、平成22年度末において当該研究開発項目の最終目標を達成することとする。

(3) 研究開発の内容

上記目標を達成するために以下の研究開発項目について、各項目間の連携にも配慮しながら、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を実施する。

本研究開発は、実用化まで長期間を要するハイリスクな「基盤的技術」に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ちより協調して実施する事業であり、委託事業として実施する。

[委託事業]

- ① バイオ・有機材料融合プロセス技術の開発
- ② 3次元ナノ構造形成プロセス技術の開発
- ③ マイクロ・ナノ構造大面積・連続製造プロセス技術の開発
- ④ 異分野融合型次世代デバイス製造技術知識データベースの整備
- ⑤ 高機能センサネットシステムと低環境負荷型プロセスの開発

2. プロジェクトの実施方式

(1) 研究開発の実施体制

本研究開発は、経済産業省により、企業、民間研究機関、独立行政法人、大学等から

公募によって研究開発実施者が選定され、大学や公的研究機関を中心に企業等が参画する集中研方式で平成20年度より委託により実施している。平成21年度より、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下「NEDO」という。）が本研究開発を運営・管理するに当たっては、平成20年度の進捗状況を踏まえた研究開発内容・計画及び実施体制の妥当性について、外部有識者による審議を含めた評価を行った上で最適な研究開発体制を構築し、委託して実施する。

研究開発ポテンシャルの最大限の活用により効率的な研究開発の推進を図る観点から、NEDOが指名する研究開発責任者（プロジェクトリーダー）技術研究組合BEANS研究所 所長 遊佐 厚氏を置き、その下に研究者を可能な限り結集して効果的な研究開発を実施する。研究開発責任者は、本研究目的が革新的基盤プロセス技術の開発ではあるが、一方で我が国の競争力のある産業を創るという基本を踏まえて、出口を明確に意識した研究マネジメント体制を構築し研究を進める責務を持つ。

（2）研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDOは、経済産業省及び研究開発責任者と密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的及び目標、並びに本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。具体的には、必要に応じて、研究体にプロジェクトの総合調整を行うNEDO職員を配置すること、NEDOに設置する委員会及び技術検討会等の外部有識者の意見を運営管理に反映させる他、プロジェクトリーダー等を通じてプロジェクトの進捗について報告を受けること等を行う。

3. 研究開発の実施期間

本研究開発の実施期間は、平成21年度から平成24年度までの4年間とする。平成20年度から経済産業省により「異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト」として実施された研究開発項目①～④については、平成21年度よりNEDOの事業として平成24年度まで実施する。研究開発項目⑤については、平成21年度よりNEDOの事業として平成22年度まで実施する。

4. 評価に関する事項

NEDOは、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義ならびに将来の産業への波及効果等について、研究開発項目①～④については、外部有識者による研究開発の中間評価を平成22年度に、事後評価を平成25年度に実施し、中間評価結果を踏まえ、必要に応じその結果を後年度の研究開発に反映することとする。ただし、研究開発項目②（3）宇宙適用3次元ナノ構造形成技術については、平成22年度に事後評価として、最終目標の評価を実施する。研究開発項目⑤については、中間評価は行わず、事後評価を平成23年度に実施する。なお、平成24年度までの各年度末に推進委員会等で各研究開発内容を内部評価し、必要に応じ、プロジェクト

の加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

5. その他の重要事項

(1) 研究開発成果の取扱い

①成果の普及

実施者は、得られた研究成果の普及について、可能な限り、保有する特許等の活用も含め、最善の努力をするものとする。NEDOは、実施者との緊密なる連携の下、標準化活動を含め必要とされる環境整備等について十分な配慮をするものとする。

更に得られた知見を逐次データベース化するとともに、MEMS用設計・解析支援システム開発プロジェクトや高集積・複合MEMS製造技術開発プロジェクトによる知識データベースと連動しつつ公開する仕組みを構築し、産業界等に広く普及させる。

同時に委託研究成果の普及による産業化促進の観点から知的財産を広くライセンスングする等の仕組みを構築する。

②知的基盤整備事業又は標準化等との連携

得られた研究開発の成果については、知的基盤整備または標準化等との連携を図るため、データベースへのデータ提供、標準案の提案等を積極的に行う。

また、先端分野での国際標準化活動を重要視するという観点から、研究開発成果の国際標準化を戦略的に推進する仕組みを構築する。

③知的財産権の帰属

委託研究開発の成果に関わる知的財産権については、「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に基づき、原則として、すべて委託先に帰属させることとする。

④人材の育成

将来の研究開発リーダーの育成を図るため、若手研究者等の研究参加を促進する環境を整備する。

(2) 基本計画の変更

NEDOは、研究開発内容の妥当性を確保するため、社会・経済的状況、内外の研究開発動向、政策動向、プログラム基本計画の変更、第三者の視点からの評価結果、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、研究開発体制等、基本計画の見直しを弾力的に行うものとする。

(3) 根拠法

本プロジェクトは、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第15条第1項第2号に基づき実施する。

(4) 成果の産業化

本プロジェクトは、将来の革新的次世代デバイスの創出に必要な新たな基盤的プロセス技術を開発することを目指すものであるが、そこに至る途中段階でも実用化が可能な研究成果については、円滑で迅速な実用化を促進する。

6. 基本計画の改訂履歴

- (1) 平成21年3月、制定。
- (2) 平成21年12月、研究開発項目⑤「高機能センサネットシステムと低環境負荷型プロセスの開発」を追加
- (3) 平成22年3月、研究開発項目②「3次元ナノ構造形成プロセス技術の開発 (3) 宇宙適用3次元ナノ構造形成技術」の研究開発の目標を産業化の進展を踏まえ、改訂
- (4) 平成23年3月、中間評価結果を踏まえ改訂

(別紙) 研究開発計画

研究開発項目①「バイオ・有機材料融合プロセス技術の開発」

1. 研究開発の必要性

(1) 健康・医療・環境分野で、将来必要とされている次世代デバイスとして、常時健康管理のための体内埋め込みデバイス、超高感度オンサイト予防・診断デバイス、環境改善及び保全のためのオンサイト環境制御デバイス、環境エネルギー有効活用のためのエネルギーハーベスティングデバイスなどが挙げられている。

(2) これらのデバイス開発には、高感度、高効率、生体・環境適合などの機能や機構を実現する必要がある。このためには、従来のシリコンを中心とする無機材料に加え、生体分子、細胞、組織、微生物や合成有機分子などのバイオ・有機材料の持つ特異的な機能を活かす融合プロセスの研究開発が不可欠である。具体的には、各種材料の融合の際に、各々の優れた機能を発揮させるため、界面及びナノ間隙における制御プロセス技術が必要である。またデバイスとして機能するためには、バイオ・有機材料を体内などの使用環境において長期間安定させるためのプロセス開発が必要である。さらに、人工細胞・組織や高効率エネルギーハーベスティングを実現するために、同種または異種のバイオ・有機材料を高次構造化させるプロセスの開発が不可欠である。これには、微小器官や細胞の3次元ヘテロ組織化、有機材料のナノピラー構造やナノポーラス構造を形成するプロセスなどが含まれる。

(3) 本研究開発項目は上記を踏まえ、ナノ界面融合プロセス技術、及びバイオ・有機高次構造形成プロセス技術を開発することにある。

2. 研究開発の具体的内容

(1) ナノ界面融合プロセス技術

バイオ・有機材料特有の生体適合性、特異的分子認識能、高効率多段階反応能、高効率エネルギーハーベスティングなどの機能を最大限に活用するために、材料の配向や選択的配置、固定化、高密度被覆を実現する界面制御プロセス、及びナノ間隙への材料の高密度充填プロセスと充填後の平坦化プロセスを研究開発する。また、生体組織内、体表面、体外でのハイドロゲルや人工脂質二重膜などのバイオ・有機材料の長期間安定形成プロセスを研究開発する。さらに、上記のプロセスをモデル化し、界面構造の最適化に向けた解析を実施する。

(2) バイオ・有機高次構造形成プロセス技術

人工細胞や人工組織、高性能有機半導体など、バイオ・有機材料を構造化することで高度な機能を発現させるために、材料の相互作用を利用した3次元構造の組立プロセス、微小器官・細胞の3次元ヘテロ組織化プロセス、材料の自己組織化能を利用した3次元ナノピラー構造やナノポーラス構造などのナノ構造形成プロセスの研究開発を行う。さ

らに、上記バイオ・有機材料を高次構造化するプロセスを評価し、モデル化する。

3. 研究開発の目標

(1) 最終目標

① ナノ界面融合プロセス技術

ナノ構造体表面で、生体分子、細胞、組織や合成有機分子の生体適合性、特異的分子認識能を発現させる。

機能性分子を脂質二重膜に導入したセンシングモジュールを試作し、24時間以上の生化学的な機能発現を電流計測等により実証する。

有機半導体のキャリア拡散距離である 200nm 以下の間隔を有するナノ構造体表面に低分子有機材料の配向・高分子材料の被覆プロセスを開発する。プロセスの有効性確認のため、まず有機薄膜の分子配向制御プロセスを開発し、光電変換デバイスの変換効率が 20% 向上することを示す。また、陽極（透明導電膜）上へのナノ構造形成プロセスを開発し、光電変換デバイスの変換効率が 20% 向上することを示す。さらに陰極（金属電極）上にナノ構造形成プロセスを開発し、発光デバイスの光取り出し効率が 20% 向上することを確認する。有機薄膜の損傷によるデバイス特性の低下を 10% 以下に抑える中性粒子ビームエッチングプロセスを開発する。

② バイオ・有機高次構造形成プロセス技術

バイオ・有機異種材料による 3次元組立プロセス技術を開発する。

ハイドロゲルの高次構造形成プロセスを開発し、血糖値観察が可能な埋め込み型デバイスへ適用し、生体内において 3カ月の機能確認を実証する。

毛細胆管構造などの微細組織構造を再構成するプロセスを開発し、少なくとも 1つの典型基質由来代謝物を蛍光光度等を用いて測定し、定量可能な代謝物量を抽出できる細胞の配置や添加物、培養日数を決定する。

また、径 50 nm 以下の有機分子ナノピラー構造、100 nm 以下の均一ポアを有する有機分子ナノポーラス構造、ライン・アンド・スペース (L/S) = 100 nm 以下の網目や直線構造などのナノ構造を自己組織的に形成するプロセスを開発する。開発されたナノ構造を熱電変換デバイスおよび光電変換デバイスに適用し、熱電特性（パワーファクター） $P = 10\text{mWm}^{-1}\text{K}^{-2}$ 以上、および光電変換効率従来比 20% 向上することを示す。

(2) 中間目標

① ナノ界面融合プロセス技術

最終目標に示されている生体適合性、特異的分子認識能、高効率多段階反応能を発現させるための、材料及び手法を選定する。配向や被覆プロセス、材料充填プロセス、表面平坦化プロセスを実現するための材料や手法を確定する。体内で機能するハイドロゲルなどのバイオ・有機材料及び人工脂質二重膜を安定形成する基本技術を確立し、最終

目標値を達成するための手法を決定する。ナノ界面融合プロセスモデル構築のための、基本パラメータ群を導出する。

② バイオ・有機高次構造形成プロセス技術

バイオ・有機異種材料の組立プロセス技術を開発し、最終目標を達成するための手法を決定する。有機分子ナノピラー構造、有機分子ナノポーラス構造、直線及び網目構造などのナノ構造形成のための手法を選定する。バイオ・有機高次構造形成プロセスモデル構築のための、基本パラメータ群を導出する。

研究開発項目②「3次元ナノ構造形成プロセス技術の開発」

1. 研究開発の必要性

(1) 安全・安心・健康な社会を実現するためには、効果的なセンサネットワークを構築する必要があり、そのためには、センサの感度向上、省電力化、自立電源化、高い耐環境性が重要となる。さらに、効率的に広域を観測するためには、センサネットワークを拡大し、宇宙空間から観測網を実現することが重要である。そのための基盤技術として、シリコン等の3次元構造にナノ構造材料を集積し、シリコンのみでは得られない機能を発現させる必要がある。これら3次元ナノ構造そのものや、ナノ構造によって実現できる超高感度センシング、高密度エネルギー貯蔵・変換、複雑な3次元アクチュエーションなどの機能をMEMSに付与し革新的次世代デバイスを創出できる。

(2) 上記のデバイスを製造するためには、高アスペクト比・高密度の複雑な3次元ナノ構造を形成する革新的構造形成技術、及びトップダウン手法により形成された構造にナノ粒子等のナノ材料の自己組織化を利用したボトムアップ手法により形成された構造を組み合わせた集積構造の形成が必要となる。さらに、これらナノ構造が革新的機能をデバイスに付与するためには、構造の表面物理・化学が重要である。例えば、原子層レベルでの表面平滑性は、電子移動度や励起子輸送特性の向上、あるいは光学散乱の低減に寄与する。また、ナノ領域における表面修飾やトライボロジーの制御はナノオーダーのギャップを利用した電気・機械特性の向上に、複数の構造パターンを有する3次元ナノ構造は宇宙空間からのマルチバンド観測に必要なフィルタにおける複数の光に対する透過性向上にそれぞれ寄与する。

一方、上述した複雑な構造形成や革新的機能・諸特性の付与のためには、高アスペクト比・高密度3次元ナノ構造を超低損傷かつ十分なスループットで製造する技術、必要とされる部位に選択的にナノ材料を自己組織化させる技術、3次元ナノ構造表面を局所的に修飾する技術、3次元構造表面に均一にナノ構造を転写形成する技術、さらにこれらのプロセスを理論的に設計・制御する技術の確立が必要である。

(3) 本研究開発項目は上記を踏まえ、超低損傷・高密度3次元ナノ構造形成技術、異種機能集積3次元ナノ構造形成技術、宇宙適用3次元ナノ構造形成技術を開発することにある。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 超低損傷・高密度3次元ナノ構造形成技術

原子層レベルで平坦かつダメージフリーな被エッチング面を有し、従来のMEMS技術では不可能であった複雑な3次元ナノ構造を形成できる技術を開発する。材料はシリコンに限定せず化合物半導体や誘電材料・光学材料等への展開を図る。あわせてこれらの新規プロセスを設計・制御するためのシミュレーション技術を開発する。さらに、大規模3次元構造のウェハレベルでの作製が可能なまでに高速化、かつウェハ面内の均一

性を確保する。

(2) 異種機能集積 3次元ナノ構造形成技術

超低損傷シリコン 3次元構造表面に機能性ナノ構造を形成するために、ナノトライボロジー、改質など表面の物理・化学的性質を評価・制御してナノ粒子を規則的に配列する技術を開発する。また、同様な機能性ナノ構造を成膜プロセスにおいて自己組織化的に形成する技術を併せて開発する。

高アスペクト比 3次元ナノ構造に機能性材料層を形成するために、3次元ナノ構造深部まで原料を供給し、かつ界面張力による微細構造のスティッキングを防止するコーティング技術、成膜技術を開発する。さらに、スルーポットやウェハ面内均一性の向上を図る。

このように形成した異種機能集積 3次元ナノ構造を解析し、機能のモデル化・予測を可能にする。

(3) 宇宙適用 3次元ナノ構造形成技術

宇宙空間からのマルチバンド観測に必要なフィルタに、複数の波長の光を選択的に透過させることのできる複数の構造パターンを有する 3次元ナノ構造を形成するために、トップダウンにより形成された 3次元構造に均一にナノ構造を転写形成する技術を開発する。

さらに、3次元ナノ構造を形成したフィルタにより宇宙空間において複数の波長の光が選択的に検出できることを検証する手法を確立する

3. 研究開発の目標

(1) 最終目標

①超低損傷・高密度 3次元ナノ構造形成技術

超低損傷エッチングにおいて±10%の精度で予測・設計できるシミュレーション技術を活用して、被エッチング面の粗さが原子層レベルの超低損傷シリコン 3次元ナノ構造(ナノサイズの開口でアスペクト比が 100 以上) をエッチング速度 0.3um/min 以上により形成するプロセスを開発する。

超低損傷エッチング技術を活用し、300MHz 帯での動作可能な高周波デバイスを試作し、超低損傷エッチングの有効性を確認する。

シリコン以外の材料の検討としては、バイオチップ等に用いられる石英、ホウ珪酸ガラス等に対して、フェムト秒レーザーアシストエッチングにより、水平方向、垂直方向のアスペクト比がそれぞれ 10000、100 を実現するプロセスを開発する。

②異種機能集積 3次元ナノ構造形成技術

3次元構造表面の特定箇所に対し、100 nm 以下の径のナノ粒子・自己組織化ドット等

を配置し、粒子間隔・密度をデバイス構造に対応して高精度に制御する。

プローブ先端におけるナノトライポロジーモデルを構築するとともに、先端電極部を100nm以下まで微細化した耐摩耗マルチプローブを試作し、摺動距離1mを経たプローブの接触抵抗値を1Ω以下に抑えられることを実証する。

3次元構造へのナノ粒子配列プロセス技術を開発し、ガスセンサに適用し、エタノールを対象に濃度500ppmのガス存在下の抵抗変化比5を実現する。また、検出対象ガス種を拡大し、VOC、SOX、NOX等の検出が可能であることを確認する。

各種金属・半導体表面とナノマテリアルとの2重認識バイнда分子を構築し、MEMS構造上への自己組織的ナノ配列プロセス技術を開発し、3次元形状表面のナノチューブ修飾による潤滑化を検討し、無修飾時に比べ摩擦抵抗を1/10を実現する。また、直径100nm以下のナノチューブバンドルを均一性10%以上でプローブ尖塔に修飾するプロセスを開発する。

また、3次元ナノ構造の微細溝や孔（ナノサイズの開口でアスペクト比が100以上）に、金属あるいは酸化膜を空隙なく埋め込む技術を確立する。

③宇宙適用3次元ナノ構造形成技術

宇宙空間でのマルチバンド観測を実現する3次元ナノ構造形成技術として、トップダウンにより形成された3次元構造に均一に100nmレベルのナノ構造を転写形成する技術を構築する。

さらに、3次元ナノ構造を形成したフィルタにより宇宙空間において複数の波長の光が選択的に検出できることを検証する手法を確立する。

(2) 中間目標

①超低損傷・高密度3次元ナノ構造形成技術

被エッチング面の粗さが原子層レベルの超低損傷シリコン3次元ナノ構造（ナノサイズの開口でアスペクト比が30以上）をエッチングにより形成し、側壁の傾斜角や等方性・異方性を制御する。また、超低損傷3次元ナノ構造の形状を予測・設計できるシミュレーションモデルを構築する。

②異種機能集積3次元ナノ構造形成技術

3次元構造表面の特定箇所に対し、100nm以下の径のナノ粒子・自己組織化ドット等を配置するための表面制御技術を構築する。その際必要となるナノ構造の接触物間作用力を実用的な精度で測定する技術を開発する。また、3次元ナノ構造の微細溝や孔（ナノサイズの開口でアスペクト比が30以上）に、金属あるいは酸化膜を埋め込む。

研究開発項目③「マイクロ・ナノ構造大面積・連続製造プロセス技術の開発」

1. 研究開発の必要性

- (1) 環境・エネルギー、健康・医療分野では、メートル級大面積エネルギーハーベスティングデバイスの大幅な低コスト化とともにマイクロ・ナノ構造搭載による高機能化が期待されている。また、ウェアラブル発電、安全安心ジャケット、シート型健康管理デバイス等の3次元自由曲面に装着可能な新形態のフレキシブルシートデバイスの実現が望まれている。これらの製造に際し、従来の半導体製造装置をベースとした製造技術の延長では、真空プロセス装置の大型化の限界、基板の大面積化の限界などの問題が顕在化してきている。将来のメートル級大面積デバイスの高機能化、低コスト化のためには、マイクロ・ナノ構造を有する高品位機能膜をメートル級の基板に真空プロセス装置を用いずに形成する製造技術の創出が必要となる。また、基板の大面積化を伴うことなく、メートル級のフレキシブルシートデバイスを実現する、製織技術などを活用した新たな製造技術の創出が重要である。
- (2) メートル級の面積基板にマイクロ・ナノ構造を有する高品位機能膜を高速直接形成する技術として、ナノ粒子など機能材料の塗布プロセスをベースに雰囲気ガスや温度などの局所環境制御によりナノ機能材料を活性化する技術、ナノ機能材料の密度や配列を制御する技術などを融合した革新的次世代非真空プロセスが必要である。さらに、基板の大面積化を伴うことなくメートル級のフレキシブルシートデバイスを実現するため、繊維状基材に上記非真空プロセスによる高品位機能膜を高速に連続形成する技術、ならびにこの繊維状基材を新たな製織集積化プロセスにより機能化・大面積化する技術が必要である。
- (3) 本研究開発項目は上記を踏まえ、非真空高品位ナノ機能膜大面積形成プロセス技術、繊維状基材連続微細加工・集積化プロセス技術を開発することにある。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 非真空高品位ナノ機能膜大面積形成プロセス技術

局所雰囲気制御下でのナノ材料の塗布プロセスや自己組織化プロセスなどの非真空薄膜堆積プロセスにより、電子的、機械的、光学的な機能を発現する機能膜、すなわち、MEMSのみならず電子デバイス全般に適用可能なマイクロ・ナノ構造の高品位機能膜を形成するプロセスを開発するとともに、その高速化に関する研究開発を行う。

また、この高品位機能膜形成プロセスをスケラブルにメートル級の面積基板に拡張するために、面積基板の全面に亘り、局所雰囲気を維持したまま高品位機能膜形成装置を相対移動させるスキャニング技術、高品位機能膜をむら無く形成させる均質塗布技術、及びその装置化要素技術を開発する。さらに、高品位機能膜形成プロセスとメートルレベルのスキャニングとのナノ・マクロ連成解析モデルを構築し、上記プロセスの最適化に向けた解析を実施する。

(2) 繊維状基材連続微細加工・集積化プロセス技術

上記非真空高品位ナノ機能膜形成プロセスなどを用いて、繊維状基材上に連続的に均質な高品位機能膜を被覆することが可能なプロセスを開発する。

また、高品位機能膜が被覆された繊維状基材に3次元ナノ構造を高速連続形成する加工技術と、それら多数の異種繊維状基材を製織によって機能化・集積化する技術とを開発することにより、メートル級のフレキシブルシートデバイスを実現する一連の新規製造プロセスを開発する。

3. 研究開発の目標

(1) 最終目標

①非真空高品位ナノ機能膜大面積形成プロセス技術

局所雰囲気制御下で非真空薄膜堆積プロセスにより電子移動度 $1 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 以上の電子的機能膜やマイクロ・ナノ構造を構成する機械的機能膜を形成可能とする塗布ヘッドを開発し、メートル級の面積基板にスキヤニングして、膜厚均一性 $\pm 10\%$ 以下及び現行真空装置以上の成膜速度 $60\text{nm}/\text{分}$ で面積基板に形成可能とするプロセスを確立する。さらに、それを実現する装置仕様を決定する。

②繊維状基材連続微細加工・集積化プロセス技術

繊維状基材上に、電子的機能膜としての有機薄膜、マイクロ・ナノ構造を構成する機械的機能膜としての圧電薄膜、電極薄膜、絶縁薄膜を、各々連続的に $50\text{m}/\text{min}$ 以上の線速にて形成するプロセスを開発する。

また、繊維状基材に3次元ナノ構造を加工速度 $20 \text{ m}/\text{min}$ 以上で形成するプロセスを開発する。

さらに、タッチセンサ、超音波アレイや発電シートなどさまざまなデバイスに対応する汎用的な素子実装技術と製織技術を開発し、デバイス面積 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 以上で3種類以上の素子が密度 $400 \text{ 個}/\text{m}^2$ で集積されたメートル級布状デバイスを実現する。

(2) 中間目標

①非真空高品位ナノ機能膜大面積形成プロセス技術

最終目標に示される電子的機能膜、機械的機能膜を形成する基本プロセスを開発する。また、面積化に関しては、最終目標の膜厚均一性、パターンニング分解能 ($200 \mu\text{m}$ 以下)、及び成膜速度を達成する手法を決定する。

②繊維状基材連続微細加工・集積化プロセス技術

繊維状基材上に、上記非真空薄膜堆積プロセスにより、最終目標に示される電子的機能膜、機械的機能膜、及び光学的機能膜を形成する基本プロセスを開発する。また、ナノ機能膜が被覆された繊維状基材に3次元ナノ構造を形成するプロセスを構築する。さ

らに、シート型デバイスを実現する製織集積化基本プロセスを開発する。

研究開発項目④「異分野融合型次世代デバイス製造技術知識データベースの整備」

1. 研究開発の必要性

- (1) 現状において異分野融合型次世代デバイス製造技術に関しては未知の分野であり、科学技術的知見の蓄積・整理が強く望まれている。
- (2) 異分野融合型次世代デバイス製造技術の開発の成果あるいはこれに関連する新たな知見については、これら革新的次世代デバイスの開発を目指す企業研究者・技術者が容易に利用できるようにすることにより、新製品開発・実用化や新たな産業の創造に資することが期待される。
- (3) 本研究開発項目は上記を踏まえ、異分野融合型次世代デバイス製造技術知識データベースの整備を行うことにある。

2. 研究開発の具体的内容

異分野融合型次世代デバイス製造技術の研究開発項目①～③にかかわる新たな知見を系統的に収集・蓄積し、データベース化する。

3. 研究開発の目標

(1) 最終目標

異分野融合型次世代デバイス製造技術の研究開発項目①～③にかかわる新たな知見（文献情報、特許情報、及び研究成果を含めて）を系統的に蓄積してデータベース化するとともに、MEMS用設計・解析支援システム開発プロジェクトや高集積・複合MEMS製造技術開発プロジェクトなどでこれまで蓄積した技術情報を統合的に取り扱える知識データベースシステムを開発する。また、蓄積するデータ数は1,500件以上とし、この知識情報をMEMS用設計・解析支援システムで活用できるようにする。

(2) 中間目標

異分野融合型次世代デバイス製造技術の研究開発項目①～③にかかわる新たな知見（文献情報、特許情報、及び研究成果を含めて）を系統的に蓄積してデータベース化するとともに、MEMS用設計・解析支援システム開発プロジェクトや高集積・複合MEMS製造技術開発プロジェクトなどでこれまで蓄積した技術情報を統合的に取り扱える知識データベースシステムを開発する。また、蓄積するデータ数は500件以上とし、この知識情報をMEMS用設計・解析支援システムで活用できるようにする。

研究開発項目⑤「高機能センサネットワークシステムと低環境負荷型プロセスの開発」

1. 研究開発の必要性

(1) 工場等の製造現場において、原材料や使用資源のきめ細かい状況モニタリングと制御を行う微細・極小、高機能なセンサの実用化により、製造プロセスの省資源化、高効率化の実現が期待されている。

(2) 小型で低コスト、かつ信頼性の高いワイヤレスセンサとすることで、設置にあたっての大がかりな工事を必要とせず、既存施設にも低コストでの導入が可能となる。合わせて、センサの製造において低環境負荷型の製造プロセス技術の開発を行うことで、生産システムの低炭素化にも貢献が可能となる。

(3) そこで、本プロジェクトの研究開発項目①から③で開発したプロセス技術等を活用し、高機能センサネットワークシステム・センサモジュールの事業化と、低環境負荷型製造プロセスの確立に向けた開発・実証研究を行う。

2. 研究開発の具体的内容

① 高機能センサネットワークシステム開発

大口径MEMS用クリーンルームにおける各製造・評価装置や空調、純水製造等の周辺装置の消費エネルギー、温度、圧力、風量、異物粒子、ガスなどをセンシングすることにより、省資源、高効率に最も適した集積化センサチップ及びセンサネットワークシステムを検証し、省エネルギー、低炭素化などに関する効果を分析するための、センサネットワークシステムを試作する。

また、低環境負荷型及び異分野融合型次世代デバイス製造技術で開発したプロセス技術を活用した高機能集積化センサチップの開発に向け、ワイヤレス通信、エネルギーのワイヤレス自立、小型・薄型化と、エネルギー、温度、圧力、風量、異物粒子、ガスなどの高感度センシング機能、新たなセンシング原理を開発し、これらの数値を収集する。

② 低環境負荷型プロセス技術開発

シリコン貫通深掘り加工において、温室効果ガス排出量削減に向けて、温暖化係数の高いSF₆から代替ガスへの切り替えと、エッチレート高速化によるガスの消費量低減およびエネルギー消費効率の向上など環境負荷の小さい高効率なエッチングプロセスの開発をする。

また、ウェハ・ツー・ウェハとチップ・ツー・ウェハ技術を組み合わせて、ウェハサイズ、チップサイズ、チップ厚さに関わらず、様々な異種デバイスをウェハレベルで一括集積化する技術も開発する。さらに、従来のシリコンに比べ高い機械特性を有するポリマー材料を使ったMEMSを開発するとともに、従来のシリコンMEMSと異種材料MEMSとの多層集積化技術を開発し、環境負荷低減プロセスを提示する。

さらに本プロジェクト成果のデバイス機能検証のためのTEG (Test Element Group) ウ

ェハを設計開発及び試作すると共に、大口径TEGのデバイス・プロセス設計及び試作を行う。

3次元構造かつ可動部から構成される高機能センサ製造に不可欠となる設計―検査間の情報共有化フレームワークを構築し、そのフレームワーク上でマスク、3次元構造、及び機械的・電気的特性に関する設計情報を製造・検査に利用するだけでなく、非破壊検査装置の計測データを設計にフィードバックし、歩留まり・品質、スループットの向上を図るとともに、製造設備の電力使用量や温室効果・有害ガスの排出量などのデータを活用し、デバイス設計時から環境負荷を考慮した情報共有化技術を開発する。

3. 研究開発の目標

(1) 最終目標

① 高機能センサネットシステム開発

検証用のクリーンルームにおいて、従来比（1990年比）CO₂削減60%のセンサネット制御システムを開発する。また、一辺30mm、厚み10mm以内に複数のMEMSセンサと処理回路、無線回路、エネルギーデバイスとの融合を想定したセンサモジュールプラットフォームを作製する。

② 低環境負荷型プロセス技術開発

現状のSF₆ガスに対し、複数の代替候補ガスを調査・検討し、温暖化ガス排出量を90%以上削減可能とする最適代替ガスの選定指針を得る。また高機能デバイス薄膜の集積化に関し、250℃以下で大気圧付近から真空中で封止できる接合方式を決定する。さらに生体適合性ポリマーを用いたMEMS製造プロセスにおいて、シミュレーションを用いて機械特性などの機能数値を具体的に示す。

大口径MEMS用試作ラインにて、センサ用途等TEGの設計および試作を複数種類行い、歩留まり、生産性、効率性のデータとデバイスの動作を妨げる製造装置、製造プロセス、デバイス構造起因の欠陥・ばらつき等の課題を抽出する。研究開発項目②「3次元ナノ構造形成プロセス技術開発」の成果である中性粒子ビームエッチングをセンサTEGに適用し、デバイス性能への効果を検証する。

設計・計測・ファブ環境情報において共有化する情報を類型化し、データ共有化のためのデータフォーマット、それに付随する基本ソフトウェアの開発を行い、MEMS-TEGを用いてデータ交換および設計手法の検証を行う。また、クリーンルームおよび製造・検査装置に関わる消費エネルギー、二酸化炭素排出量など環境情報の収集管理の方法を決定する。

MEMS 分野

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems: 微小電気機械システム) とは、電気回路 (制御部) と微細な機械構造 (駆動部) を一つの基板上に集積させたセンサやアクチュエータなどのデバイス・システムのことであり、我が国の強みである半導体製造技術やレーザー加工技術等の微細加工技術に代表されるナノテクノロジーや各種材料技術等を駆使して製造される。MEMS の最大の特徴は、様々な機能を持ったデバイスの小型化や集積化を実現している点にある。例えば、MEMS の代表格であるセンサは小さい方が望ましく、微小化することで、軽量化、省スペース、高速化は当然ながら、物理量や化学量を測る際、小さいほど測定対象に影響を与えにくく、ピンポイントで測定点の正確な情報を感度良く得ることができる。また、MEMS は半導体製造技術を使って大量生産するため、部品が小さくなるほど、同じ材料や手間でもより多くのデバイスを製造することができ、資源や消費エネルギーの節約につながり単位当たり製造コストが低減されるとともに、シリコン単結晶などの機械的特性に優れた材料を使用するため、製品の信頼性が向上する。さらに、異種のセンサや電子回路を集積化することで、単体では得られない機能や性能を高いレベルで得ることができ、新しいシステムの創製につながる等、数々のメリットがある。MEMS は情報通信、医療・バイオ、自動車、ロボット、航空・宇宙、福祉など多様な分野における小型・高精度で省エネルギー性に優れた高性能のキーデバイスとして期待されている。このため、基幹部品の高付加価値化による我が国製造業の国際競争力の強化のみならず、新しい価値を生み出す革新的な MEMS の開発を通して新産業の創出を支える観点からも重要な技術分野である。

以上の点から、今後 20 年程度を見据えて、日本の MEMS 産業の国際競争力維持・強化及び革新的な MEMS デバイスの創出に必要とされる、高機能化、小型化、低コスト化、異分野融合等の MEMS 製造技術を俯瞰し、要素技術を抽出するとともに、今後の技術の発展をロードマップとして描いた。

MEMS 分野の技術戦略マップ

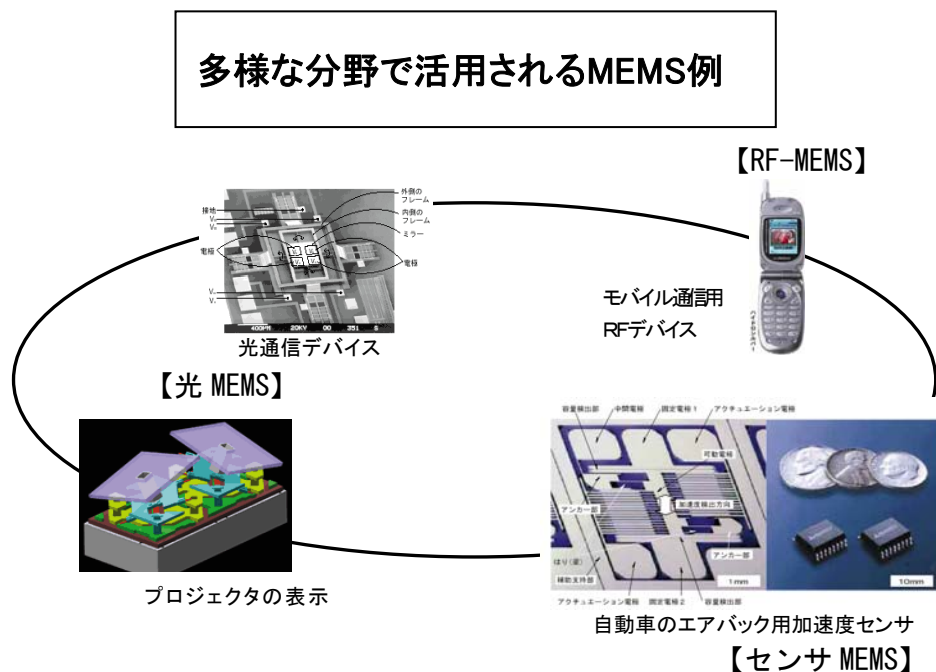
I. 導入シナリオ

(1) MEMS 分野の目標と将来実現する社会像

既に実用化されている単機能 MEMS については、自動車用センサやインクジェットプリンタヘッド等の分野で日本企業も健闘しているが、通信やプロジェクタ等に使われる光 MEMS や、今後の実用化が期待されるバイオ MEMS の分野では欧米諸国が一部先行している。我が国製造業の国際競争力を確保するためには、製造業の基盤を支えるキーテクノロジーの1つとなる MEMS の製造技術を一層高度化する必要がある。

一方、MEMS 産業の裾野を拡大し、多様な分野において多様な主体が MEMS 製品の開発・実用化に取り組むことが同分野の基盤強化のために重要である。特に、製造設備を有する大手企業のみならず、MEMS を活用した製品アイデアを有する異業種のベンチャー企業等が容易に MEMS 開発に取り組める環境を整備することが必要である。

以上の点から、①IT 技術、各種異分野技術等の先端的要素技術との融合を促進することにより MEMS の製造技術の一層の高度化をはかること、②MEMS デバイスの開発・実用化を促進するための環境整備を通して MEMS 産業の裾野拡大をはかり、人間生活の質の向上を実現するとともに、我が国経済社会の基盤である製造業の競争力の維持・強化を図ることを目的とする。これにより、後述するような環境・エネルギー分野、医療・福祉分野、安全・安心分野を実現する革新的な MEMS 製品群を生み出すプロセス技術を開発する。



10年後のMEMS製品の具体的イメージ

(参考)

【光 MEMS】

MEMS 技術を用いることにより、光通信網で用いられる小型、高性能の光スイッチが実現し、従来の光電変換型のスイッチに比べ、省スペース、省エネルギー、低コスト化の効果が得られる。これにより、通信速度の向上とともに災害時のバイパス回路の冗長度が増すなど高度情報通信社会の一層の高速化、信頼性向上に貢献することが期待される。さらに、AO(Adaptive Optics)やイメージング装置等の光の計測の高分解能・高機能およびマイクロ波フォトニック分野での応用が期待される。このような光 MEMS の実現には、立体構造上へのパターン形成技術、機能性材料の開発とその厚膜形成技術、制御用素子との集積化技術などが重要と考えられる。

【RF-MEMS】

携帯電話等のモバイル機器に用いられている高周波部品の多くが MEMS 部品に置き換わることにより、低消費電力、低コストでの数十 GHz の通信帯域が利用可能になり、有線 LAN 並みの情報伝達能力が実現される。また同時に高周波部品の一体化製造が可能となり、携帯電話の省電力、省スペース化、高機能化が図られる。このような RF (Radio Frequency) -MEMS の実現には、機能性材料の開発とその厚膜形成技術とナノ材料局所形成技術などが重要と考えられる。

【センサ MEMS】

自動車のエアバッグ作動スイッチとして既に用いられている加速度センサ等の MEMS が、より小型化、低コスト化、高機能化することで、現状では高級車にしか採用されていないようなセンサ(各種姿勢制御用センサ、赤外線センサアレイ、障害物探知用のレーザーレーダ等)を小型の一般車に採用することができ、交通のより一層の快適性、安全性の向上に資する。また、携帯電話をはじめとする通信分野、アミューズメント分野、セキュリティ分野、宇宙分野等幅広い分野で小型・高機能センサが使用される。このようなセンサ MEMS の実現には、MEMS・半導体共存構造の成形技術と MEMS・半導体共存の接合・組立技術などが重要と考えられる。

【バイオ MEMS】

携帯可能な安価で小型の生体成分検査キット・バイオセンサを用いたウェアラブル MEMS デバイスが開発され、病院外(在宅や屋外)での診断や予防医療が広く行われるようになる。携帯電話やインターネットに接続した情報端末との組み合わせによりその効果は更に大きくなる。各種バイオ MEMS の実現には、化学的・バイオ的表面修飾技術とナノインプリンティング技術、MEMS をプラットフォームとした細胞・生体高分子の研究用デバイスおよび細胞・組織両方を対象とする再生医療用プラットフォームの実用化が重要と考えられる。この実現には、分子・細胞と融合した計測方法技術および MEMS 構造の構築やマニピュレーション技術等と生体適合性材料の技術が重要と考える。

上記に加え、それぞれの MEMS が他の MEMS や CMOS_{※1}-LSI などの半導体回路と一体集積化され、一層の小型・高機能化、及びトータルとしてのコストパフォーマンスの向上が図られることにより、自動車分野での用途拡大や情報・通信分野、医療・福祉分野、食品分野でのコンシューマ用途への展開などを主として、広範囲なアプリケーションの拡大が予想される。

※1 CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)：相補型金属酸化膜半導体

20 年後の MEMS 製品の具体的イメージ

(参考)

MEMS はトップダウンプロセスである微細加工と、ボトムアッププロセスであるナノ・バイオプロセスとを融合したマイクロ・ナノ統合製造技術の確立により、その応用範囲を急速に広げ国家・社会的課題である「環境・エネルギー」、「医療・福祉」、「安全・安心」分野で新しいライフスタイルを創出する革新的キーデバイスとして広く浸透している。

◆環境・エネルギー分野

【エネルギー・ハーベスティングデバイス】

光・熱・振動・生体物質等周辺環境からエネルギーを吸収し、蓄電する小型デバイスが、マイクロ加工とナノ・バイオ融合によるエネルギー変換効率の向上と、実効表面積の向上の両立によって実現する。このデバイスは未利用エネルギーを有効に利用できる優れた環境性を有するが、さらに省電力・高効率化が進んだ各種センサ、アクチュエータと組み合わせられ、大きな波及効果を生む。例えば、ワイヤレスセンサネットワークを構築する際に、本デバイスを各ノードに組み込むことで、電池交換不要等のメンテナンスフリーとなり、社会全体に広がり快適・安全・安心な社会が実現される。また、体内埋込機器のエネルギー自給が可能となり、健康・医療分野での QOL (生活の質) 革新に寄与する。このデバイスの実現には、3次元ナノ構造形成技術と、新規の有機機能材料、バイオ材料に加え、それら材料とナノ構造表面との界面制御技術が必要となる。また、実用化に際し、十分な電力供給を可能とするため cm オーダーの面積が必要となるが、ナノ構造を広い面積全体に実現していく大面積化もポイントとなる。

【オンサイト環境浄化デバイス】

大気、及び水質の浄化は人口の急速な増加が現実のものとなる 21 世紀半ばにおける世界規模の課題である。大気浄化に関しては自動車、湯沸かし器、メタノール使用小型燃料電池などから排出される二酸化炭素、窒素酸化物、硫黄酸化物などの大気汚染物質を、発生源に極めて近い場所、すなわちオンサイトで固定し、大気中への排出を防ぐ小型デバイスが実現される。一方、水質浄化は水の有効利用ニーズの高まりに対応し、使用後の上水を浄化した中水を利用する小型オンサイト水浄化システムが一般家庭に普及する。これらデバイス、システムはマイクロ加工と、ナノ

構造製作技術、微生物を利用するナノ・バイオ融合により実現する。これらの汚染物質は、いったん排出されれば極めて低濃度となり回収が不可能となる。しかし、高濃度である排出源近傍において高効率に汚染物質を固定することができる本デバイスは、大きな優位性を有する。例えば、二酸化炭素においては、これまで排出量のほぼ半数を占めておりながら、回収が全く不可能であった分散排出源からの二酸化炭素を回収することで、地球温暖化防止に対し極めて大きな貢献となる。このデバイスの実現には、汚染物質を分離するフィルタ製作のためのナノ構造作製技術、汚染物質を吸収・固定するナノ構造をもつ新規材料及びその加工技術、また有害物質固定を実現する微生物や生体物質をナノ構造表面上で機能させるためのナノ・バイオ界面制御技術が重要となる。実用化に際しては、汚染物質排出量に応じ、cm オーダーにまで大面積化する技術、およびパッケージング技術がポイントとなる

【超高感度環境物質検出デバイス】

極微量の環境物質を、高感度に、かつオンサイトで検出する小型デバイスが実現される。金属ナノ構造による表面電場増強の利用、自己組織単分子膜（SAM）の選択的成膜などによる表面機能付加による検体の選択的吸着、マススペクトロメータや THz 分光分析装置のような高性能であるが大型、高価な装置をダウンサイズしてコモディティ化するような技術開発により実現する。本デバイスは特にマイクロ加工により小型化された流路、反応チャンバなどの化学分析システムと組み合わせることによりオンサイト計測が可能となり大きな波及効果をもつ。例えば、センサネットワークのセンサとして機能し、各地の環境汚染物質をリアルタイムで高感度に検出することで、安全・安心な社会へとつながる。実用化に際しては、再現性が高く、また使い捨てが可能な安価な製作プロセスの開発が不可欠である。

◆医療・福祉分野

【超小型体内留置デバイス】

体内局所に長期間留置可能な超小型デバイスが実現される。腹腔や皮下、消化器官内・血管内などに滞在し長期間の物理センシングおよび生体成分センシングを可能にする。一定の場所に位置する他、受動的な移動、自ら能動的に移動することでがんなどの病変部を高い確率で発見し、必要に応じて病変部を治療することもできる。このため早期発見率、治癒率が向上する。バッテリーにより電氣的に駆動されるデバイスの他、高周波給電によるワイヤレス駆動や、電源を必要としない原理の超小型型デバイスも考えられる。例えば、微粒子型デバイスとして体外からの X 線や超音波、磁気などの働きかけによって周囲の環境によって造影状態が変化する造影剤のように機能し、デバイス周辺の血糖値や温度、圧力などの情報を 24 時間モニタリングできる。血液循環において肝臓の門脈などに小型のデバイスを長期間滞在させることが可能であり、糖尿病患者の血糖管理などに役立つ。これらの体内留置デバイスの実現には、異種材料により構成される 3 次元構造形成と、長期間の体内留

置を可能とするナノ界面制御技術が不可欠である。

【生体機械ハイブリッドデバイス】

生体分子や細胞などが融合したハイブリッドなデバイスが実現される。生体材料や機能的な高分子材料を用いることで生体情報や環境情報を、従来のセンサに比べ、高速・高感度にセンシングすることができる。これらは、生体に馴染む材料や機構から成り立っているため、生体と機械とのインタフェース(BMI(Brain Machine Interface)など)の強力なツールとなる。例えば、生体分子として膜タンパク質などが活性を維持したまま人工膜上に再構成され、においセンサや味センサなどの超高感度化学量センサとして機能する。また、フレキシブル基板上に神経細胞が3次元培養され、これらを脳表面に当てることで、神経細胞が脳内に軸索を伸ばし、所望の細胞とシナプス結合できるようになる。人工デバイスで制御可能な細胞を通じて、フレキシブル基板から電気・化学的な信号を計測したり、刺激が行なえるようなインタフェースが実現する。これらのデバイスの実現には、生体材料の活性を維持したまま組み込むナノ界面制御技術が必要となる。

【シート型健康管理デバイス】

体表面に湿布のように貼り付けることによって、健康を管理するウェアラブルデバイスが実現される。フレキシブルな多層構造の中に無数のセンサやアクチュエータが分布し、貼った部分の組織表層ばかりでなく内部の情報をセンシングし、裏面ディスプレイに可視化表示したり、貼った部分からのセンシングに基づいた、きめ細かい体内への投薬操作や傷口の治癒促進など簡単な作用を施すことができる。このようなウェアラブルデバイスは、携帯電話やインターネットに接続した情報端末との組み合わせにより、情報の集積分析、リアルタイムな診断が可能となり、その効果は更に大きくなる。例えば、画像診断においては、シート表面に薄型超音波センサアレイが集積化され裏面には平面フレキシブルディスプレイがあるデバイスでは、取得した超音波エコー画像を素人でも2次元の大面積で観察できる。侵襲なく貼り付けることができるため、健康者でも血流や心臓の様子などを判断でき、健康管理に利用できる。また、手術時に医師が容易に体内を観察できるツールにもなる。このようなデバイスの実現には、伸縮性のある配線やデバイス技術、大面積集積化技術が重要となる。

◆安全・安心分野

【ユビキタスセンサネットワーク用多機能センサデバイス】

多数で多様なセンサが分散配置され、センサ同士がアドホックネットワークを形成して、ネットワークを通じて様々な状況や情報の入手が可能となり、防犯・セキュリティ、環境リスクへの対応、農産物のトレーサビリティの向上が図れ、安全・安心な社会を実現するユビキタスセンサネットワークを構成する多機能センサデバイスが実現される。さらに、効率的に広域を観測するために、センサネットワーク

を拡大し、宇宙空間からの災害監視や地球観測が可能な革新的なセンサデバイスが実現される。これらデバイスの実現には、高アスペクト比・高密度 3 次元ナノ構造を低損傷かつ十分なスループットで製造する技術、必要とされる部位に選択的にナノ材料を自己組織化させる技術、3次元ナノ構造表面を局所的に修飾する技術、3次元構造表面に均一にナノ構造を転写形成する技術等が必要となる。

【雰囲気伝送・再生デバイス】

人と人とのコミュニケーションをよりやさしく容易にする未来デバイスが実現される。例えば、人間の五感のうち、20世紀よりすでに実用化されている聴覚、視覚伝送デバイスに加え、臨場感の元になるにおいや触覚のセンシングと伝送を可能とするデバイスが出現する。本デバイスは化学物質や触感などを検知するセンサと、再生のためのアクチュエータを基礎部品とし、それらを携帯端末に実装した「集積化タイプ」と、壁紙並みに薄くて軽量大面積シート中にちりばめられた「壁紙タイプ」として実装され、視覚や聴覚素子と組み合わせて超臨場感を手軽に、いつでも、どこでも得ることができるようになる。

【壁紙型アンビエントインテリジェンスデバイス】

壁紙のように軽量かつ大面積を覆うシートエレクトロニクスデバイスが、視覚、聴覚、触覚、嗅覚などの雰囲気伝送に重要な役割を果たすとともに、安全・安心・豊かな生活に貢献する。例えば、シール状のデバイスを張り合わせるだけで作製可能なインタラクティブ掲示板により、見る人に合わせた情報をリアルタイムで提供するとともに、ネットワーク検索機能や翻訳機能により人と人とのコミュニケーションをより自然に行う手助けをしてくれる。また、壁紙デバイスが環境の異常を検知し、携帯端末と連動して安全・安心な暮らしをサポートする。

このようなデバイスの実現には、大面積シートの加工技術や機能素子のシートへの埋め込み技術、量販店で購入した部品をシール貼りの要領で重ねるだけで配線が自動的に形成される自己組織的配線技術、その場で柔軟に状況認識を行うことのできる集積回路システム技術、などが必要となる。

【万能携帯】

壁紙型デバイスと連携して、視覚、聴覚、触覚、嗅覚などの雰囲気伝送に重要な役割を果たすとともに、安全・安心・豊かな生活に貢献する。顔と名前的一致しない人の記憶を呼び覚ましてくれたり、翻訳機能により言葉や習慣の違う人々の交流を容易にしたりと、人と人とのコミュニケーションをより自然に行う手助けをしてくれる。また、携帯端末に実装可能に小型化されたレーダー、環境センシングデバイス、ヘルスケアデバイスがすべて「万能携帯」に実装されることにより、暴漢・自動車などの接近、危険な化学物質濃度の上昇などの危険な状態を避けることを可能にし、急病や急な事故などを自動的に検知し救助を求めることができるようになる。これらにより、安全・安心・豊かな生活に貢献する。デバイスの実現のために

は、マクスペクトロメータや THz 分光分析装置のような、高性能であるが大型、高価な装置をダウンサイズしてコモディティ化するための技術開発、特に深掘り3次元構造と、3次元構造上への成膜技術、その場で柔軟に状況認識を行うことのできる集積回路システム技術、などが必要となる。

(2) 研究開発の取組

研究開発の推進については、MEMS の一層の高度化に資する技術開発が重要である。例えば、高集積化・複合化・ナノ機能付加を図るとともに、次世代キーデバイスを生み出すための革新的デバイス基盤技術を確立するため、産学官連携のもと、従来異分野とされてきたバイオテクノロジー等との融合を図りながら研究開発を促進することが必要である。

このため、MEMS の一層の高度化に資する技術開発(高集積・複合化・ナノ機能付加技術、革新的デバイス基盤技術、等)を実施する。

(3) 関連施策の取組

MEMS 技術・製品を世界市場に広く普及するために技術戦略マップに基づく MEMS 標準化戦略の策定、国際規格案の開発、提案、推進等の標準化活動に継続的に取り組むことが重要である。

MEMS の一層の実用化促進を図るため、他産業の企業や製造設備を有していない企業でも容易に MEMS ビジネスに参入できるように、MEMS 用設計・解析支援システムを開発した。その成果を活用しつつ、実習を中心とした人材育成及び試作環境の充実、製造拠点(ファンドリー)強化など MEMS 産業全体の競争力の維持・強化を図ることが重要である。

これらの取組は、MEMS の新たな製造技術開発の進捗に合わせていち早く実行することが重要である。

[導入補助・支援]

- ・研究開発施策の成果を活用した MEMS 用設計解析ソフト(MemsONE Ver. 1.0)の商用展開や、MEMS ファンドリーサービス(MEMS 設計・試作・製造の受託サービス)のネットワーク展開が図られている。
- ・MEMS 関連産業の活性化を目指し、特に産業強化と裾野拡大のため、研究開発や試作・実証支援の場を整備し、MEMS 開発を容易にすることで、ファンドリー産業などへのスムーズな橋渡しを支援する。

[基準・標準化]

- ・IEC/TC47(半導体デバイス)において、MEMS 構成材料の試験方法、加工プロセスの評価法、基盤共通複合分野の試験法等が検討されている。

[知的基盤整備]

- ・研究開発プロジェクトにおいて、研究開発の成果を MEMS 知識情報データベースとして整備する取組が進展している。

例 1) 高集積・複合 MEMS 製造技術開発プロジェクト (事業期間:2006 年度～2008 年度) では、成果として得た知識データの収集・整理を実施している。

例 2) 異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト(2008 年度より実施)では、開発によって得られる新たな知見について、系統的に収集・蓄積してデータベース化することが研究開発計画に位置付けられている。

〔広報・啓発〕

- ・世界最大規模の MEMS 等に関する国際展示会である、マイクロマシン/MEMS 展の開催を支援。

〔人材育成〕

- ・産学連携製造中核人材育成事業(経済産業省委託事業)において、以下の人材育成が実施されている。

例)「MEMS 人材育成実証講座」、「次世代産業基盤技術となる MEMS 関連産業人材育成システム」や「マイクロ・ナノ量産技術と応用デバイス製造に関する新事業開拓イノベーション人材育成」などのプロジェクトを通して MEMS 開発の中核をなす人材育成の試みがなされている。

〔産学官連携〕

- ・一つの研究開発拠点に大学、複数企業が集まる集中研方式にて、2008 年度より異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクトが実施されている。

(4) 海外での取組

- ・海外での大学等の MEMS 関連研究開発機関の代表例として以下が挙げられる。

◆欧州

ドイツ： フラウンフォーファー研究所 (Fraunhofer-Gesellschaft) IZM (Institute for Reliability and Microintegration)、IMS (Institute for Molecular Science)、IIS (Institute for Integrated Circuits)、IPMS (Institute for Photonic Microsystems)

フランス： 原子力庁電子情報技術研究所 (Leti, Laboratoire d'Electronique de Technologie de l'Information)
国立科学研究センター (CNRS, Centre de la National Recherche Scientifique)

スイス： ニューシャテル大学マイクロ・テクノロジー研究所
CSEM (Swiss Center for Electronics and Microtechnology, Inc.)
スイス連邦工科大学 (EPFL, Ecole Polytechnique Federal de Lausanne: Federal Institute of Technology)

ベルギー： IMEC (Interuniversity MicroElectronics Center)

フィンランド： 技術開発研究センター (VTT (Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus) Technical Research Centre)

◆北米

- 米国: カリフォルニア大学 BSAC (Berkeley Sensor and Actuator Center)
- スタンフォード大学 CIS (Center for Integrated Systems)
- ミシガン大学集積化ワイヤレスマイクロシステム研究センター (WIMS、Center for Wireless Integrated Microsystems)
- マサチューセッツ工科大学 MEMS@MIT (Massachusetts Institute of Technology)
- ジョージア工科大学 CMMT (Center for MEMS and Microsystems Technologies)
- サンディア国立研究所 (SNL, Sandia National Laboratories)

◆アジア

- シンガポール: IME (Institute of Microelectronics)
- シンガポール製造技術研究所 (SIMTech, Singapore Institute of Manufacturing Technology)
- 台湾: ITRI (Industrial Technology Research Institute)
- 中国: 清華大学
- 北京大学
- 上海交通大学
- 上海マイクロシステム・情報技術研究所 (SIMIT, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology)
- 韓国: 韓国科学技術院 (KAIST, Korea Advanced Institute of Science and Technology)
- KIMM (Korea Institute of Machinery and Materials)

- ・ MEMS 関連の欧州、米国、中国における国家レベルのプロジェクトの状況は以下の通りである。

◆欧州

欧州の大規模プロジェクトである「FP7 (EU 第 7 次研究枠組み計画)」は 2007 年にスタートし、2013 年までの 7 年間に 8 兆 5,000 億円を投じて広範囲の研究開発を進める。

この中でマイクロ・ナノデバイス関連テーマである「ナノサイエンス・ナノテク・材料・新生産手法」には 3,960 億円が投じられる。テーマのキーワードは「コンバージェンス (融合)」であり、さまざまな機能を 1 つのデバイスに集約することを目的としている。

◆米国

DARPA (国防総省高等研究計画局) が「Nano-MEMS Program」プロジェクトを推進。2006 ~2009 年に 128 億円を投じる。ハイリスク・ハイリターンである 74 テーマを推進している。バイオを含む多様な機能と LSI などとの融合を進める研究テーマが多数あ

る。

◆中国

中国では 2005～2010 年の 6 年間で 45 億円を投じ、MEMS/NEMS (Nano Electro Mechanical Systems: ナノ電気機械システム) 関連研究を加速させる。これは年間 10 億円弱の規模となる。

(5) 改訂のポイント

- 今回は改訂を行っていない。

II. 技術マップ

(1) 技術マップ

MEMS は、小型で省エネルギー性に優れた高性能の部品を作ることが出来るため、通信、自動車等の既存の産業分野における部品の小型化・高機能化・省エネルギー化のための代替部品やバイオ分野における部品の小型化による新規部品としてのニーズが高まると見込まれている。

また、MEMS は、トップダウンプロセスである微細加工と、ボトムアッププロセスであるナノ・バイオプロセスとを融合したマイクロ・ナノ統合製造技術の確立により、その応用範囲を急速に広げ国家・社会的課題である「環境・エネルギー」、「医療・福祉」、「安全・安心」分野で新しいライフスタイルを創出する革新的キーデバイスとして広く浸透すると予測される。(上記の参考:10年後および20年後のMEMS製品の具体的イメージ)

このようなニーズに対応するためには、MEMS 製品の高機能化（高速スイッチング、小型化等）及び MEMS 製造プロセスにおける低コスト化と、設計・解析技術等の基盤技術の確立が喫緊の課題であり、技術マップにおいて、技術課題をエッチング技術、成膜技術、成形技術、形成技術、異種融合技術、プロセス連続化・大面積化技術、前・後処理技術、実装技術、検査・評価技術、設計・解析技術、製造システム技術等に大別した上で、それぞれについて詳細に示した。個々の技術の「出口」については、MEMS 製品が非常に広範囲に適用されうるものであることを踏まえ、主として想定される応用分野を技術ごとに示した。

(2) 重要技術の考え方

MEMS の広範な活用のために、次の 2 つが重要と考えられる。

- ① MEMS の高機能化、または低コスト化に大きく貢献する技術
- ② MEMS 全般に広く貢献する基盤技術

また、2025 年までを考えると、その技術が中期的な視点で重要なものか、長期的な視点で重要なものかを評価しておくことが必要である。そこでこれらの視点から技術を評価し、色分けして示した。

(3) 改訂のポイント

- エッチング技術、低環境負荷プロセス、成型技術、低環境負荷成型技術等の要素技術を追加した。

Ⅲ. 技術ロードマップ

(1) 技術ロードマップ

技術マップに示した重要技術課題ごとに、研究開発により達成されるべきスペックを示した。

(2) 改訂のポイント

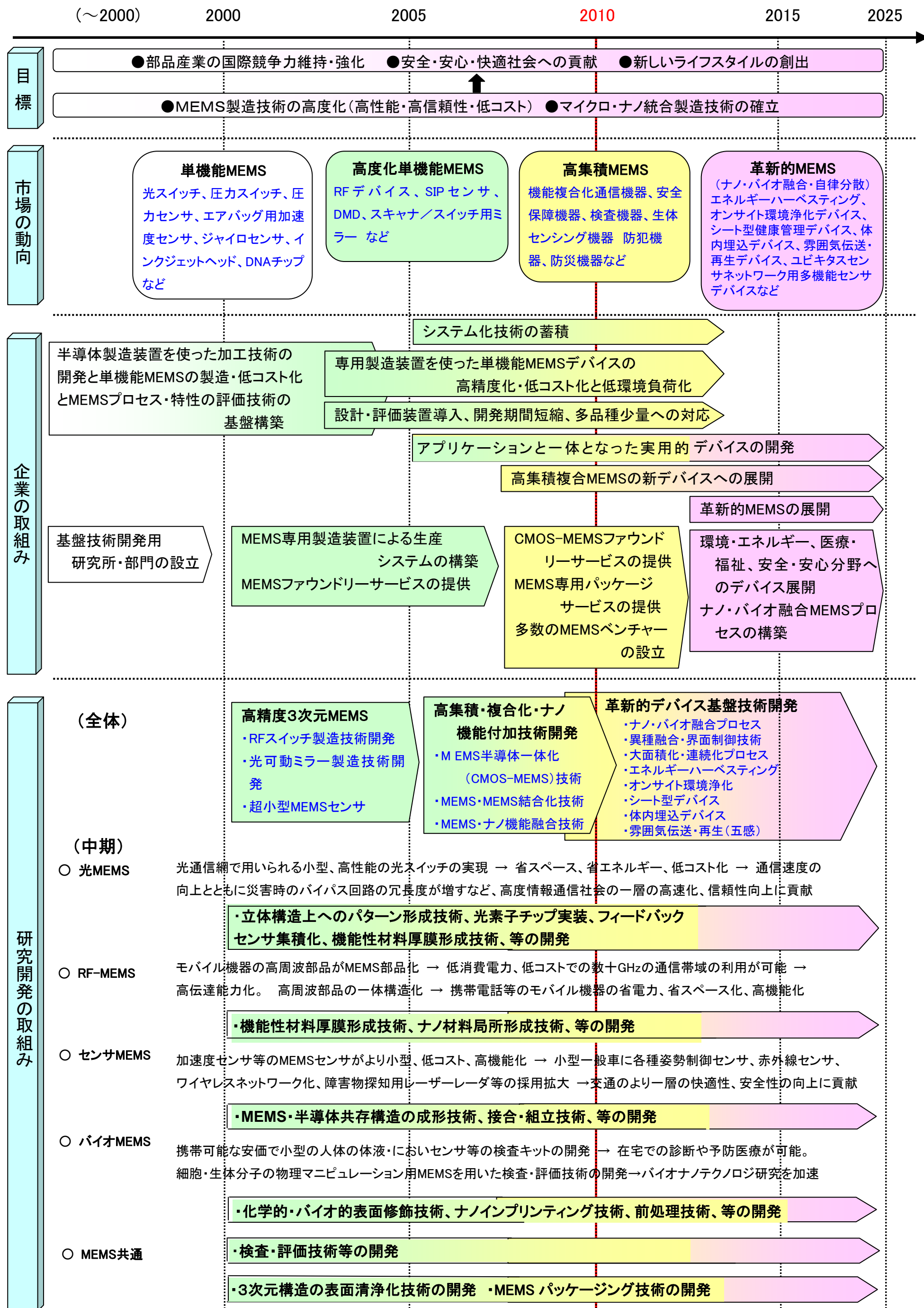
- エッチング技術、低環境負荷プロセス、成型技術、低環境負荷成型技術等の各要素技術のスペックについて、詳細に見直しを行った。

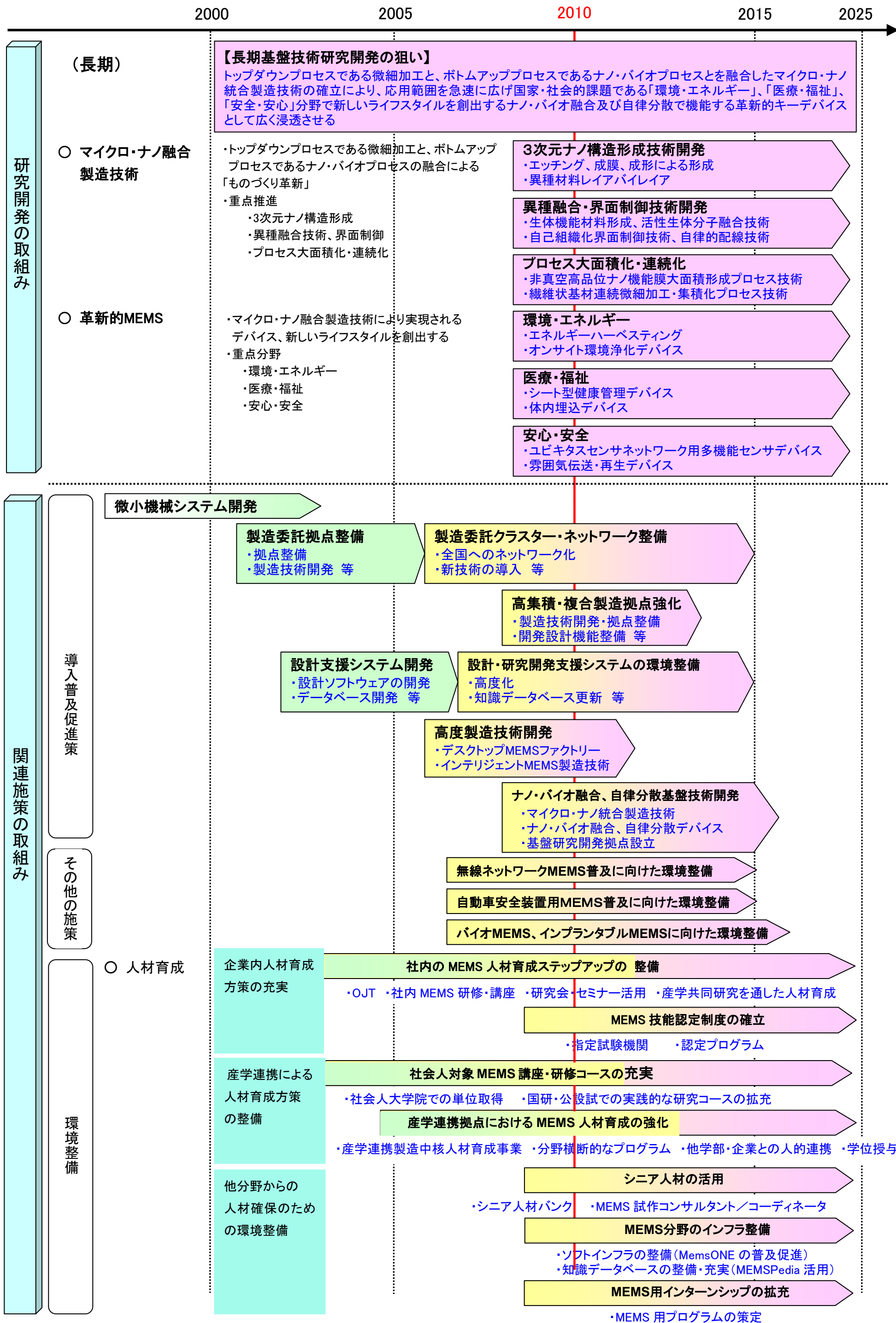
Ⅳ. その他の改訂ポイント

○応用事例の追加

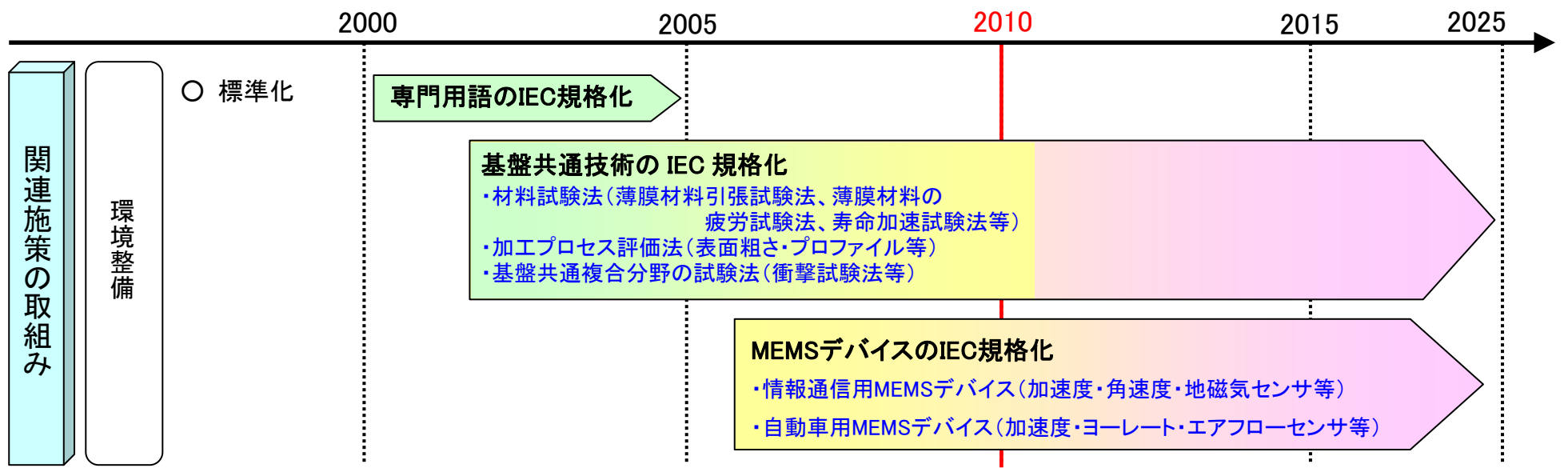
- MEMS 製品等デバイスの将来像をイメージし易くするため、センサネットワークに焦点をあて、CO2 削減目標の達成や少子高齢化に対応した安全・安心の確保等の社会課題を解決する具体的なシステムを対象として、6 分野の課題解決型 MEMS デバイス技術について応用事例を取りまとめた。【参考資料：応用事例～課題解決型 MEMS デバイス技術～】

MEMS分野の導入シナリオ(1/3)





MEMS分野の導入シナリオ(3/3)



MEMS要素技術			分野	
エッチング技術	高精度・微細エッチング技術	0101	高アスペクト比貫通孔形成技術	共通
		0102	高アスペクト比ナノトレンチ加工技術	共通
		0103	ディーブドライエッチング技術	共通
		0104	高精度微細エッチング技術	共通
		0105	ウエハレベル均一エッチング技術	無線通信、バイオ、共通
		0106	非シリコン材料加工技術	共通
		0107	無損傷加工技術	共通
	3次元ナノ構造形成技術	0108	3次元表面加工技術	無線通信
		0109	自由曲面加工技術	エネルギー
		0110	立体構造上へのパターン形成技術	共通
		0111	シングルポイントプロセス技術	共通
		0112	ナノピラー形成技術	共通
		0113	ナノポーラス形成技術	共通
		0114	ナノプローブ・エッチング加工技術	バイオ、情報通信、共通
ナノプローブ加工技術	0115	MEMS・半導体共存構造の低損傷エッチング技術	共通	
	0116	SF6代替ガスエネルギー消費削減プロセス解析技術	環境、共通	
成膜技術	高品位厚・薄膜成膜技術	0201	機能性材料厚膜形成技術	共通、無線通信
		0202	非真空薄膜形成技術	安心・安全、環境、エネルギー
		0203	機能性材料ナノ薄膜多層形成技術	安心・安全、環境、エネルギー
		0204	平滑・低残留応力薄膜形成技術・3次元低温成膜技術	光、無線通信、共通
	3次元ナノ構造形成技術	0205	3次元形状表面上成膜技術	光、共通
		0206	シングルポイントプロセス技術	共通
		0207	ナノポーラス膜形成技術	共通
		0208	ナノピラー/ドット形成技術	共通
		0209	MEMS・半導体共存構造の低ストレス・高耐久性薄膜形成技術	共通
成形技術	マイクロプレス成形技術	0300	ナノインプリンティング技術・低損傷パターンニング技術	共通、バイオ
		0301	ナノフォーミング技術	共通
		0302	ナノ転写・形成複合プロセス技術	共通
		0303	マイクロエンボス加工技術	光
	0304	ナノ粉体成形加工技術	共通、バイオ	
	0305	貫通孔埋め戻し技術	共通	
	3次元ナノ構造形成技術	0306	3次元マイクロ立体型成形技術	共通
		0307	3次元表面ナノ加工技術	共通
		0308	3次元自由曲面エンボス加工技術	共通
	0309	3次元表面修飾技術	共通	
	0310	3次元形状めっき成形技術	共通	
0311	低環境負荷成型技術	光、医療、バイオ		

MEMS要素技術			分野		
形成技術 (機能化・表面改質)	ナノ機能材料選択的 形成技術	0401	ナノ材料局所形成技術	無線通信、バイオ	
		0402	ナノ材料ウエハレベル形成技術	共通	
		0403	ナノ材料ビルドアップ技術	共通	
		生体機能材料形成技術	0404	生体分子配向技術	エネルギー、環境、医療・福祉
			0405	細胞配置・カプセル化技術	エネルギー、環境、医療・福祉
			0406	細胞の組織化技術	医療・福祉
		機能性表面形成技術 (界面制御・表面修飾技術、加工損傷回復技術)	0407	化学的・バイオ的表面修飾技術	エネルギー、環境、医療・福祉
	0408		分子の自己組織化現象応用界面制御技術	安心・安全	
	0409		ナノ粒子自己整列技術	共通	
	0410		脂質二重層形成技術	共通	
	0411		金属・有機半導体の界面制御技術	共通	
	0412		有機・絶縁膜の界面制御技術	共通	
	0413		印刷方式表面修飾技術	共通	
	0414	加工損傷回復技術	共通		
LSIプロセス融合成形技術	0415	MEMS・半導体共存構造の成形技術	共通		
	0416	可動ナノ構造の形成技術	共通		
	異種融合技術	0501	界面制御技術	環境、医療・福祉	
0502		活性細胞融合技術	環境、医療・福祉		
0503		活性生体分子融合技術	環境、医療・福祉		
ナノ・有機材料融合技術	0504	有機ナノピラー形成技術	エネルギー、環境、医療・福祉		
	0505	有機ナノポーラス形成技術	エネルギー、環境、医療・福祉		
	0506	ナノ間隙への有機充填技術	エネルギー、環境、医療・福祉		
	3次元構造形成技術	0507	異種材料レイアバイレイア積層技術	共通	
		0508	異種材料の厚膜積層技術	共通	
		0509	パターン付き成膜および多層化技術	共通	
		0510	メカ/バイオ/半導体ハイブリッド積層技術	共通	
	0511	3次元ナノ構造移植・積層技術	共通		
自己組織化技術	0512	セルフアライメントによる位置決め技術	共通		
	0513	マルチCNTプローブ製造技術	共通		
配線技術	0514	ナノホール選択金属成長技術	共通		
	0515	ナノワイヤ選択配線技術	共通		
	0516	CNT成長用触媒粒子の自己組織化配列技術	共通		
	0517	CNT配線技術	共通		
	0518	自律的配線形成技術	共通		
	0519	伸縮性導体形成技術	共通		
組立技術	0520	界面制御を利用した自律組立技術	共通		
	界面物性評価技術	0521	界面物理化学評価技術	共通	
0522		ナノ領域におけるトライボロジー評価技術	共通		

注: は、中期的な視点での重要技術
 は、長期的な視点での重要技術

MEMS要素技術			分野	
プロセス 連続化・ 大面積化 技術	非真空プロセス による成膜技術	0601	高品位ナノ機能膜形成技術 (塗布型)	共通
		0602	マイクロナノ印刷技術	共通
	プロセス大面積 化技術	0603	高品位機能膜のメータ級大 面積形成技術	共通
		0604	繊維状基材の製織集積化 技術	共通
		0605	メータ級大面積アライメント 技術	共通
	プロセス連続化 技術	0606	繊維状基材連続微細加工 技術	共通
		0607	大面積印刷のレジストレー ション(重ね合わせ)技術	共通
		0608	ナノインプリント連続成形技 術(含むローラー式転写技 術)	共通
		0609	連続EBプロセス技術	共通
		0610	連続FIBプロセス技術	共通
前・後処 理技術	表面清浄化技 術	0701	構造表面洗浄技術	共通
実装技術	組立技術	0801	高精度位置決め技術	共通
		0802	MEMS・半導体共存の接合・ 組立技術	共通
	接合技術	0803	低温・低応力接合技術	光、無線通信、 バイオ、共通
		パッケージ技術	0804	封止技術
	0805		高度実装技術	共通
	0806		トリミング技術	センサ
	0807		カッティング技術	共通
	0808	低環境負荷実装技術	共通	
検査・評 価技術	各種検査・評価 技術	0901	形状測定技術	共通
		0902	強度等デバイス特性評価技 術	共通
		0903	システム信頼性評価技術	無線通信
		0904	生体情報評価技術	バイオ、 医療・福祉
		0905	微小領域における物理量計 測技術	共通
		0906	検査評価用解析技術	共通
設計・解 析技術	MEMSシミュレ ーション技術	1001	機構解析技術	共通
		1002	プロセス解析技術	共通
		1003	システム化解析技術	共通
	マルチスケール シミュレーション	1004	ナノ/マイクロ/マクロ解析モ デリング技術	共通
	マルチフィジクス シミュレーション	1005	電場・磁場・構造・熱・流体 の連成解析技術	共通
	データベース構 築	1006	材料・界面・プロセス	共通
		1007	知識	共通
		1008	環境負荷	共通
製造シス テム技術		1101	多品種少量・省エネ・フレキ シブル加工システム	共通

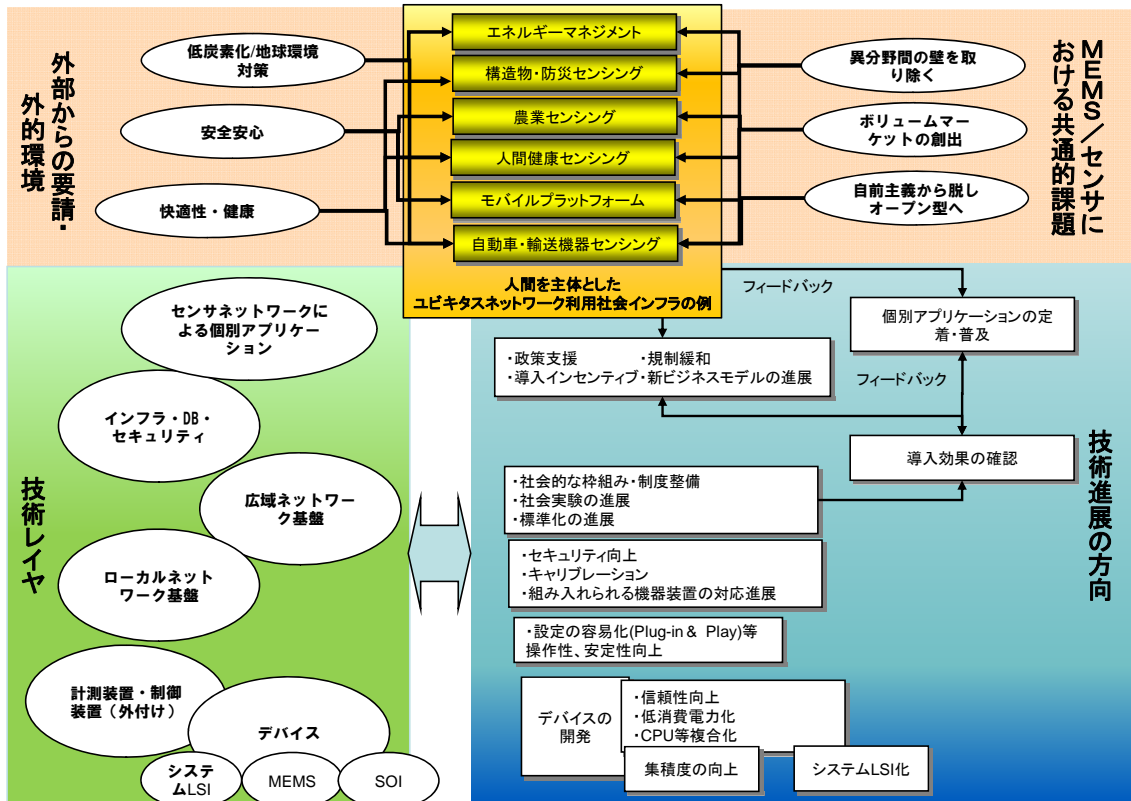
応用事例

～課題解決型MEMSデバイス技術～

これまでの技術開発は技術の発明や改良が重視され、先行してきたが、今後は人が主体となり人のために働く技術や、社会課題解決に資するという視点から技術が展開されることを考慮すべきである。MEMS技術についてもその応用範囲は、10年後には現状の機械・電子分野以外へもさらに拡大する見込みであり、ネットワークやITシステムあるいは機器・装置に組み入れられることによって、利便性の高い、社会的課題解決に資する“課題解決型MEMSデバイス技術”を活用したセンサーネットワークシステムが創出されることとなる。例えば、海外での事例として、需要側消費電力を消費機器毎にリアルタイムに計測し、供給側に通知することで供給側の制御や利用側の省エネにつなげる（「スマート・グリッド」）システムと電力・環境センサデバイス、農地にセンサを配置し気象状態モニタリングによって給水や肥料を調節するシステムとその気象・土壌センサデバイス、などが知られている。また、モバイル機器の心臓部（CPU・周辺部）もオープン化され、プラットフォーム化し、MEMSセンサ等異メーカーのデバイスがソフトウェア共々実装され多様な価値を生み出している。

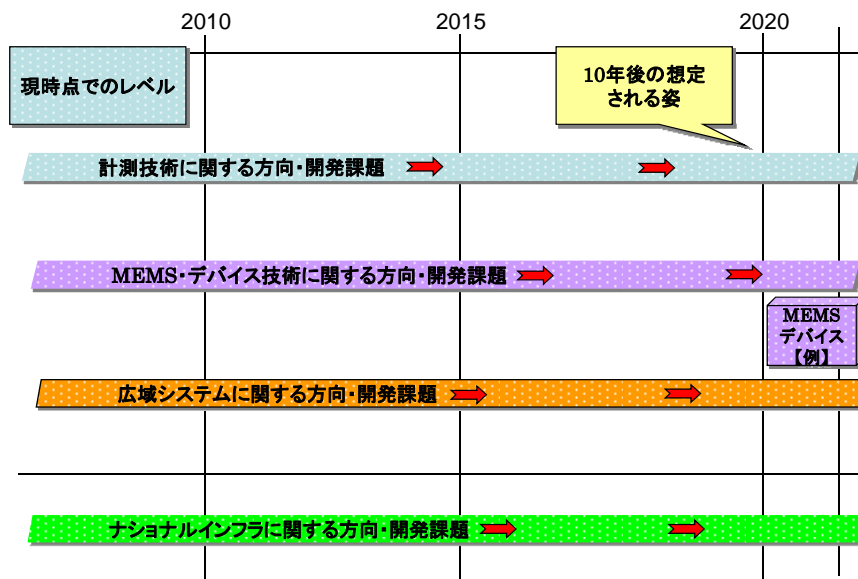
本応用事例ではセンサネットワークに焦点をあて、CO2削減目標の達成や少子高齢化に対応した安全・安心の確保等の社会課題を解決する具体的なシステムを対象として、MEMS・センサ等デバイスの将来像をイメージし易くするため、(1) エネルギー・マネジメント・システム、(2) 構造物・防災センシング技術、(3) 農業センシング技術、(4) 人間の健康に資するセンシング技術、(5) MEMSによるモバイルプラットフォーム技術、(6) 自動車・輸送機器センシング技術、の各分野において横断的見地から整理し、代表的な技術、課題及び方向性をとりまとめ、全体システムのイメージを掲示するとともにマップに展開した。（応用事例Ⅰ～Ⅵ）

10年後のセンサネットワーク全体システムのイメージ



分野によっては、デバイスとしての技術課題以上に、計測技術、システム技術、データベースインフラ、ネットワーク、社会システムといった周辺環境に問題点や大きな研究開発要素があることも考慮しつつ、上記事例のような利用システムがどのように展開していくかを技術ロードマップに描くことで、開発課題や実現のためのネックを明らかにすることを目指した。

技術ロードマップの凡例



応用事例 I (エネルギー・マネジメントに資するセンサ技術)技術マップ

～10年後のエネルギー・マネジメント・システムの姿～

CO2削減

省エネ向上

快適性との両立

フレキシブルな

マネジメント

トレンド

① 産業用に加え民生用、小規模オフィス等のCO2削減進展、② きめが細かく大きな省エネの実現、③ 柔軟性・広域性の拡大

現状

概要

- 個別機器について、センサを活用して省エネを行うものが登場。
- 環境については体感程度、システムも機器メーカー単位。

センシング・制御

- 器具や室内にセンサ機能が付与、入退室の感知、判断。
- 入退室の感知等によるOn/Off。
- 洗濯機や冷蔵庫等の家電製品でセンシングによる制御機能が実現。
- 広域に及ぶシステムは未実現。

デバイス・ネットワーク

- 一般利用できるセンサデバイス未実現。
- ネットワーク仕様未確立、未標準化。
- 一部商用化されているものの、メーカー独自仕様でコンパティブルでない。
- 一部商用化されているデバイスもあるが、消費電力大、信頼性未確立。
- ネットワークもメーカー独自。

環境と消費エネルギー量の把握とそれによる制御

- ✓ 消費エネルギーのきめ細かい把握技術
- ✓ 快適性のモニタリング技術

広域にわたるセンシングデータの活用

- ✓ 中央集中型配電システムにローカルな発電システムが付加・管理技術進展
- ✓ 複数サイトにまたがる省エネルギーマネジメントシステムの進展

デバイス・ネットワークの普及と標準化によるユーザー選択向上

- ✓ 安価で高信頼性デバイス普及
- ✓ 安定的で導入の容易なネットワーク体系の普及
- ✓ 普及に資する設定やメンテナンス技術の確立
- ✓ 長寿命化技術、メンテナンスレスシステム

概要

- 器具・装置や空間単位での消費エネルギーのリアルタイム、時系列把握と制御が実現。
- 環境についてのきめ細かい把握や快適性計測がエネルギーマネジメントに取り入れ。

センシング・制御

- 器具や部屋で必要とされる機能に応じてエネルギーが投与されるシステム。
- 個人の快適性に配慮したエネルギーの調節。
- 単独の製品や住戸単位でなく複数の製品や住戸間でセンシングによる制御機能が実現(ピークシフトやピークカットなど)。
- 新エネルギー・ローカルエネルギーの利用のシステムへの取り入れ。

デバイス・ネットワーク

- 外付け型、内蔵型種々のタイプのセンサデバイスが普及。
- ネットワーク仕様が標準化され、ユーザーはプラグアンドプレイ式で操作可。
- ネットワークの広域への接続が進む。
- デバイスの消費電力小、自己給電、信頼性向上、メンテナンスフリー化。

将来

応用事例Ⅱ(構造物・防災センシング技術)技術マップ

～10年後の構造物・防災センシング技術の姿～

社会資本ストックの
合理的管理

メンテナンス性向上

安全な構造物

構造物寿命延伸

トレンド

- ① 構造物損傷・劣化の程度、耐震性、変位等のセンシング技術が進展、
- ② 保守の効率化、予防保全の進展、
- ③ トータルとして安全性と快適性の向上

現状

概要

- 構造物のメンテナンスについては、現状は目視、非破壊検査など、一部地震計、ストレイン・ゲージ、加速度センサなどが利用。
- 計測データと構造の因果関係解明は不十分。
- 防災土滞位置ずれセンサネットワーク実験。

センシング

- 非破壊検査(超音波、X線等)は内部の組成等を分析。
- ストレイン・ゲージによる応力歪み計測、動き観測に加速度センサ活用、変位の計測にはポテンシオメータ等が利用されている。
- 以上を目的によって組合せているがデータと現象との相関未解明。

デバイス・ネットワーク

- デバイスは一般の機械計測用がそのまま使用されている。MEMS応用は未。
- ネットワークは特定小電力、ZigBee、Mote(米国仕様)等が実験レベルで利用されている。
- 線状、面状構造物には既成デバイスを工夫して応用、eテキストスタイル研究開発中。

センシング活用によるメンテナンスの高度化

- ✓ センシングデータと損傷・劣化度、耐震性能、部品交換・補強等との相関性明瞭化
- ✓ センシング技術や対象物の拡大によるモニタリング能力の向上
- ✓ モニタリングによる予防保全ないし耐用年数の延長

デバイスとネットワーク進展による構造物センシング技術の向上

- ✓ 安価で高信頼性デバイス普及
- ✓ 安定的で導入の容易なネットワーク体系の普及、無線通信の普及
- ✓ 長寿命化技術、メンテナンスレス、キャリブレーション組み入れ型計測システム

概要

- 国内では新規投資よりメンテ投資が主となる。
- 目的別のセンサ技術が明らかとなり、標準的な計測システムが確立、実用化される。
- 計測デバイスの精度、校正方法についても標準が確立。

将来

センシング・制御

- 変位、加速度、応力、等の標準的センシング技術が確立。
- 構造物の組成や組織変化の標準的モニタリング技術が確立。
- 地震・災害対応へのセンシング応用が進展。
- 接合部や部材・部品など構造以外部のチェック・モニタリングシステムが導入。

デバイス・ネットワーク

- メモリやCPU内蔵複合型センサデバイスが普及し、構造物の履歴把握等に活用される。
- デバイスへのMEMS採用が進展。
- 無線ネットワーク仕様が標準化。
- ネットワークの広域への接続が進む。
- デバイスの消費電力小、自己給電、信頼性向上、メンテナンス・キャリブレーションフリー化。

応用事例Ⅲ(農業センシング)技術マップ ～10年後の農業センシング技術の姿～

生産性向上

安全安心・省エネ

品質向上・コスト削減

トレンド

① 農業へのセンシング技術取り入れが進展、② それを実現するデバイスの開発と通信機能取り入れ、③ 耐環境、使い捨て等周辺アプリケーションの取り込み進展

現状

概要

- 土壌分析に基づく給肥、給水(バッチ式、ノウハウ主体)。
- pH、ECセンサの試作と実験。
- 海外でワインぶどう畑への実システム稼働(気象観測と給水等制御が主)。

センサ

- 温度、雨量、照度等の気象環境センサはまだ大型で高価。
- pH、ECセンサが半導体プロセスで試作されている。
- 土壌粒度、土壌組成等はディスクリートレベル。

デバイス・ネットワーク

- 海外で、ネットワーク(ZigBee等適用)化が進展。
- わが国では、中継装置の仕様とセンサ電源供給に課題、ネットワーク化は給水管理程度。
- センサデバイスは研究開発途上。

農業生産性向上のために計測すべきデータの明確化

- ✓ 計測技術とデバイスの進展により農業関連の自然データと生産性との関係が解明される
- ✓ データの蓄積(気象、土壌、その他環境、収穫物の性格)
- ✓ 化学量や粒度のようなデータ計測のための高集積回路が開発

センサネットワークの実農場への適用・活用

- ✓ 厳しい周囲環境に対応したセンサの開発
- ✓ ロバストなセンサネットワーク仕様の確立
- ✓ 自律分散型センサ管理技術の研究開発
- ✓ 電力供給課題解決

(注)

pH:potential Hydrogen、水素イオン濃度指数、酸性アルカリ性の度合いを示す

EC:Electric Conductivity、電気伝導度又は導電率

概要

- 気象と土壌の状態に関するセンサが実用化され農業への適用が進む。
- 気象、施肥、給水、成育度間のデータ蓄積。

センサ

- 土壌の、水分、pH、EC、粒度、リン、窒素、カリ等センサが実用化され農業に用いられる。
- 温度、湿度、圧力、照度、雨量、風力センサ等の利用が一般化。
- それらセンサデータと植物、動物の態様が徐々に明らかとなる。
- 気象データと植物、動物(細菌等)の因果関係が次第に明らかとなる。

デバイス・ネットワーク

- ネットワーク化が進み普及、ただし用途次第でバッチ式センシングシステムも普及。
- 省電力型、自己発電型、使い捨て型のチップが市場化。
- 自律分散型デバイスの管理技術が進展、標準化。
- MEMSデバイスの消費電力小、自己給電、信頼性向上等。

将来

応用事例Ⅳ(人間の健康に資するセンシング技術)技術マップ

～10年後の人間健康センシング・システムの姿～

24Hモニタによる
医療レベル向上
生活習慣病対策進
展
予防型医療の進展
センシングデータ
で病の因果関係示

トレンド

- ① ネットワーク型センサデバイスにより24時間型のモニタリングが進展、② 対応する遠隔医療への抵抗減、予防型医療が緒につく、③ 未解明の病気等の因果関係が次第に明らかに

現状

概要

- いくつかの器具について通信機能付モデルが製品化、しかし普及はこれから。
- Bluetooth、Zigbee、小電力などがローカルに利用、広域はインターネットが主。

センシング・制御

- 血圧計や体重計にBluetooth等の通信機能が付与。
- 計測機器には情報処理能力がないため、PC等を組み入れたシステム構築が必要。
- センシングに関する医学的なオーソライズはなされていない。

デバイス・ネットワーク

- 非侵襲、ポータブルなデバイスとしては心電計程度(但し非オーソライズ)、他は既存製品に通信機能を織り込んだレベル。
- ローカルネットワーク仕様にはまだ不安定さ大、操作性も低レベル。
- 計測と広域通信とを(同時に)行うにはプロトコルが確立したとは言い難い。

予防医療の進展とそのためセンサネットワークが進展

- ✓ 予防型医療の進展により総医療費の節約が進む
- ✓ そのためのセンサモニタリングが進展

安定信頼性あるセンシング技術の活用

- ✓ センシング機器が医療機器として承認
- ✓ 価格や精度による複数レベルの計測デバイスが標準化
- ✓ LSI/MEMS化が進む

デバイス、ネットワークの技術向上とユーザー利便性の向上

- ✓ 医療用アンプ、A/D変換部の高集積化
- ✓ ローカルセンサネットワークの安定性、操作性の向上
- ✓ 広域ネットワーク上でのデータ連携技術の向上
- ✓ デバイス長寿命化技術、メンテナンスレスシステム開発

概要

- 通信付センサが普及し、24Hデータ収集が普及→医療高度化、通院頻度減。
- センサデータ活用による病気因果関係把握高度化と予防医療の進展。

センシング・制御

- 非侵襲/侵襲、ポータブルなデバイス(心電計、血圧計、血糖値計、脳波計)が普及。医療器具として承認、精度複数レベルで標準化。
- デバイスが小型化(MEMS化)し取り込んだ機器装置が登場(携帯電話、パソコン等)。
- センシングデータと病理との因果関係抽出が進む。

デバイス・ネットワーク

- 現在大型の計測装置が小型化、MEMS化。
- ローカルネットワーク仕様が向上(混信防止、無設定、ユーザーはプラグアンドプレイ式で操作可)。
- ネットワークの広域への接続が進み、計測操作と一体化(広域データ連携が進展)。
- デバイスの消費電力小、自己給電、信頼性向上、メンテナンスフリー化。

将来

応用事例 V (MEMSによるモバイルプラットフォーム技術) 技術マップ

～10年後のモバイルプラットフォームの姿～

よりポータブル
安全安心への貢献
予防型医療への貢献
周辺機器との機能
コンパチ進展

トレンド

① 複数のモバイル通信方式搭載が進展、② それを実現するデバイスの高集積化、③ センサ等周辺機能の取り込み進展

現状

概要

- LTEで始めて世界的に方式統一。
- 端末実装で半導体での高集積化は進んでいるが、基本はディスクリート回路の置き換え、回路部品点数は多い、方式毎に基本的に機種は別。

センサ

- GPS(の一部)、電子コンパス、加速度センサ、歩数計程度が取り入れられている。
- 医療計測装置、エネルギーモニタ機器等の中継する装置としての実験が進展。
- (ソフト)ブラウザ等との連携が一部実装。

デバイス・ネットワーク

- 一部無線LAN、Bluetooth、ZigBee等のセンサネットワークデバイスを搭載。
- ただし、部品としては個別でそれぞれに対応するチップにより実装。
- マルチ方式の実装も個別のチップによる。
- プラットフォームでは日本は海外の後塵。

回路簡素化を実現する LSI・MEMS技術進展

- ✓ LSIの高集積化とMEMS取り入れによりRF回路の簡素化が進展
- ✓ マルチRF(広域とローカル)回路が実現、進展
- ✓ アナログ回路にCPUやメモリ等を取り入れた高集積回路実装が進展

センサや情報処理機能の取り込みとセンシングデータの予防医療・省エネ等への活用

- ✓ センサのMEMS化による小型化、モバイル機器への実装可能に
- ✓ センサデータ(アナログ信号)取得と処理機能のLSI/MEMS化によりモバイル機器への実装が可能に
- ✓ PC等との情報処理機能のコンパチ化が進展

将来

概要

- 各国別の複数RF処理技術が一般化。
- 計測系デバイスを取り込んだシステムLSI。
- 種々の回路へMEMSの取り入れ。

センサ

- 心電計などとの連携が進み予防医療等に用いられる。
- プロジェクター、HD/3Dビデオ、位置センサ等の実装。
- 家庭等の機器のエネルギー監視機能の実装(ローカルネットワーク利用)。
- 転倒予知、救急医療向け基盤、等としての利用進展。

デバイス・ネットワーク

- 種々のタイプの無線通信方式対応のデバイスが普及。
- ローカル無線もチップ内に取り入れられる。
- センサネットワークと広域ネットワーク接続標準化。
- MEMSデバイスの消費電力小、自己給電、信頼性向上等。

応用事例Ⅵ(自動車・輸送機器センシング技術)技術マップ ～10年後の自動車・輸送機器センサ技術の姿～

CO2削減
省エネ向上
快適性と両立
安全な輸送

トレンド

① 内燃機関車、HEVそれぞれで燃費改善とCO2削減進展、EVの進展、② 高度ITS進展などによる渋滞の減や快適性向上、③ 鉄道でのセンサ利用進展、④ 安全性の向上

現状

概要

- 内燃機関車については、エンジン燃焼制御、エアバッグ、ナビ、タイヤ空気圧等多数センサが搭載。
- HEVが伸長中、EVへの期待高。
- 鉄道では構造物・土木への応用研究中、車両に導入(振り子式)。

センシング・制御

- 圧力、流量、酸素やNOx計測、加速度や角(加)速度、位置等の計測装置やセンサが搭載されている。
- 燃料噴射、エアバッグについてはセンサ+制御機能。一部操舵制御機能も。
- トンネル、土堤の位置センシング。

デバイス・ネットワーク

- 耐久性、信頼性の高いセンサデバイスが中心、MEMS応用は未。
- ネットワークは車内有線が主(CAN等)、外部とは高速料金徴収でDSRC、ナビ関係でモバイルネットワーク。
- タイヤ空気圧計測には無線が応用(外付けが主)。
- 鉄道では既成のNW(有線)利用が主。

自動車全般に燃費の向上と安全性の向上が進む

- ✓ 内燃機関車、HEV燃費がさらに向上
- ✓ HEV、EVが伸長、経験積み重ねにより性能と安全性の向上

センシングデータの活用による安全性向上

- ✓ 車外物件や障害物検知システムが普及、管理技術進展
- ✓ 車内人体センシングによる安全な運転管理や駐車管理システムの進展
- ✓ 足回りのセンシング・モニタリングを取り入れた燃費の向上技術

ITS進展によるCO2削減と快適性の向上

- ✓ 安価、高信頼性、長寿命、堅牢、メンテナンスレスデバイス普及
- ✓ 自動車、道路、鉄道に適するネットワーク体系の普及、無線通信の普及

将来

概要

- 内燃機関車はまだ相当利用されているが、燃費が圧倒的に向上。EVも徐々に普及。
- HEVの普及は大きく進み、燃費も大幅改善。

センシング・制御

- エンジン・モーター系のセンサネットワークがさらに進展、タイヤ等駆動系を取り込んだセンシングと制御機能進化。
- MEMSによる高度エンジン室モニタ・制御。
- 保守系業務へのセンシング機能応用が進展。
- 高度で安価な安全モニタリングシステム(人の自動検知、交差点での障害物検知等)。
- 車内人のモニタリングによる安全面高度化。
- ITSの高度化(渋滞ゼロ)。

デバイス・ネットワーク

- 堅牢、長寿命なMEMS含む種々のセンサデバイスが普及。
- 無線ネットワーク仕様が標準化され、タイヤ-車両間、人-車両間、障害物-車両等に適用進む。
- システムの複雑化により大容量の車内ネットワーク標準化(自動車、車両)。
- ネットワークの広域への接続が進む。

「異分野融合型次世代デバイス製造技術開発基本計画（案）」に対するパブリックコメント募集の結果について

平成 22 年 1 月 5 日
NEDO
機械システム技術開発部

NEDO POST 3 において標記基本計画（案）に対するパブリックコメントの募集を行いました結果をご報告いたします。
みなさまからのご協力を頂き、ありがとうございました。

1. パブリックコメント募集期間

平成 21 年 12 月 25 日～平成 22 年 1 月 4 日

2. パブリックコメント投稿数＜有効のもの＞

計 2 件

3. パブリックコメントの内容とそれに対する考え方

ご意見の概要	ご意見に対する考え方	基本計画への反映
全体について		
<p>[意見 1] (1 件)</p> <p>異分野融合型次世代デバイス製造技術プロジェクトの中での 1 年間という短期間であり、効果的に 1st ステップでのあるべき姿を描こうとしているように見え、これも、社会情勢、技術動向を適切に反映させていく視点から慎重なアプローチとして良好だと考えます。ただ、短期間で革新的な成果を出すべく、必要な資源を配置、乃至は有効活用して、関連機関の総力を挙げて取り組める内容と開発体制を整備していくべきかと考えます。その意味で、公的研究機関でのオールジャパンでの集中的研究と、各機関の設備や知識を効率的に活用した取り組みができる研究開発体制が不可欠といえます。さらに、そこからえられた知見を踏まえた高機能集積化チップを開発しきることが最も重要と考え、それに向けた後継のプロジェクトの準備も必要と考えます。</p>	<p>[考え方と対応]</p> <p>ご意見、拝承しました。 関係機関とも連携しながら研究を推進して参ります。</p>	<p>[反映の有無と反映内容]</p> <p>特になし</p>

添付資料

A-4

2. 研究開発の実施期間		
<p>[意見 2] (1 件)</p> <p>これまでの異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクトでのプロセス開発を、出口を見据えて進めることは、低炭素化社会づくりの加速、早期実用化による産業競争力強化の観点で大変重要であると考えます。</p> <p>計画では平成 22 年度までの目標となっていますが、約 1 年間で達成できる内容は限られていると思います。短期のみならず中長期でのより高い目標をもって継続して取り組むことが低炭素化社会づくりのさらなる加速、そして産業力強化に繋がると考えます。平成 22 年度末での目標だけでなく、中長期目標も併せて示して取り組んでいただくことを期待します。</p>	<p>ご意見、拝承しました。</p> <p>本プロジェクト終了後、将来にわたり取り組むべき課題として念頭におきつつプロジェクトを実施したいと考えております。</p>	<p>特になし</p>

以上

特許論文リスト

1. 特許出願リスト

番号	出願者	出願番号	出願日	名称	発明者	所属
1	みずほ情報総研	特願 2011-04405	2011/3/1	素子解析システム、素子解析方法及び素子解析プログラム	藤原信代 浅海和雄 橋口原	みずほ情報総 みずほ情報総
2	セイコーインスツル 産業技術総合研究所	特願 2011-05422	2011/3/11	パーティクルカウンタ	桑名健太 磯崎瑛宏 富松 大 新荻正隆 伊藤寿浩	BEANS研究所 BEANS研究所 BEANS研究所 セイコーインスツル 産業技術総合研究所
3	セイコーインスツル 産業技術総合研究所	特願 2011-05422	2011/3/11	粒子検出器	桑名健太 磯崎瑛宏 富松 大 新荻正隆 伊藤寿浩	BEANS研究所 BEANS研究所 BEANS研究所 セイコーインスツル 産業技術総合研究所
4	セイコーインスツル 産業技術総合研究所	特願 2011-05422	2011/3/11	マイクロ構造の製造方法、マイクロ構造体、受光素子及び粒子検出器	桑名健太 磯崎瑛宏 富松 大 新荻正隆 伊藤寿浩	BEANS研究所 BEANS研究所 BEANS研究所 セイコーインスツル 産業技術総合研究所
5	アルバック	特願 2011-95426	2011/4/21	ドライエッチング法及び装置	森川泰宏 村山貴英	アルバック

2. 論文・学会発表

- 1) M. Honzumil at al., "High-Speed Electret Charging Method Using Vacuum UV Irradiation", Power MEMS 2010, pp173-176.
- 2) K. Yamashita at al. "Vibration-driven MEMS energy harvester with vertical electrets", Power MEMS 2010, pp165-168.
- 3) 植木 真治他、「ゲート・チャンネル間電気機械相互作用を考慮した Vibrating-Body Field Effect Transistorのモデリング」
日本機械学会第2回マイクロ・ナノ工学シンポジウム2011、くにびきメッセ（島根）
- 4) 阿波寄 実他、「金属酸化物微粒子の自己整列構造を用いたガスセンサ」、
精密工学会 2011 年度春季大会学術講演会（東洋大学）
- 5) 磯崎瑛宏他、「パーティクルセンサの小型化に関する研究」、

精密工学会 2011 年度春季大会学術講演会（東洋大学）

- 6) 藤原信代他、「MEMS 等価回路ジェネレータによる特性ばらつき解析」、
平成 23 年電気学会全国大会（大阪大学 豊中キャンパス）
- 7) 石垣彰一、他、「X 線 CT 装置計測を用いた MEMS リバースエンジニアリング 第 1
報 試作サンプルによる計測実験とデータ解析例」、
精密工学会 2011 年度春季大会学術講演会（東洋大学）
- 8) 谷村他、「デバイス製造プロセス改善のための MEMS リバースエンジニアリング」
日本非破壊検査協会春季講演大会（2011 年 5 月 25 日～26 日）
- 9) M. Honzumil at al., “High-speed electret charging using vacuum UV
photoionization”, Appl. Phys. Lett. 98, 052901 (2011)
- 10) T. Fujimori at al., “Low Power Analog to Digital Convertor with Digital
Calibration for Sensor Network”, SYMPOSIUM on Design, Test, Integration
& Packaging of MEMS/MOEMS, Aix-en-Provence, France, 11-13 May 2011
- 11) M. Abasaki at al., “Large surface area 3D self assembled nano- porous
structure for high sensitivity gas-sensing”, Transducers’11 conference,
June 5-9, 2011, Beijing, China.
- 12) A. Isozaki at al., “Photodiode with Micro Texture for Improving Sensitivity
at Large Angle of Incidence for Particle Sensors”, Transducers’11 conference,
June 5-9, 2011, Beijing, China.
- 13) K. Yamashita at al., “Vibration-driven MEMS Energy Harvester with Vacuum
UV-Charged Vertical Electrets”, Transducers’11 conference, June 5-9, 2011,
Beijing, China.
- 14) T. Matsushita, et.al., “Piezoelectric energy harvesters of PZT films
deposited on Ti cantilevers”, PowerMEMS2011 (IEEE)
- 15) A. Shibuya, et.al., “Development of a Miniaturized NO₂ Gas Sensor
Based on Nanoparticles WO₃ Thin film on Interdigitated Electrodes”, IEEE
Sensors 2010

2. 分科会における説明資料

次ページより、プロジェクト推進・実施者が、分科会においてプロジェクトを説明する際に使用した資料を示す。

「異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト／ 高機能センサネットシステムと低環境負荷型 プロセスの開発」 事後評価分科会資料

—プロジェクト概要説明— 平成23年11月28日

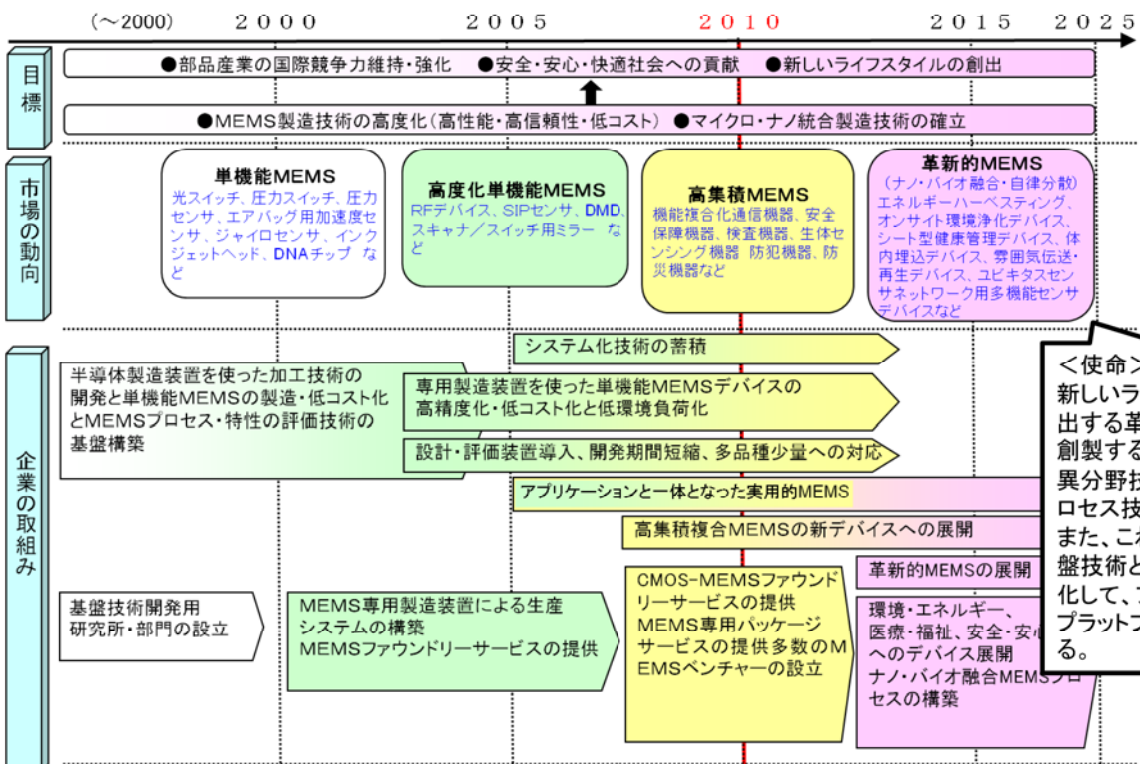
独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
技術開発推進部

1/37

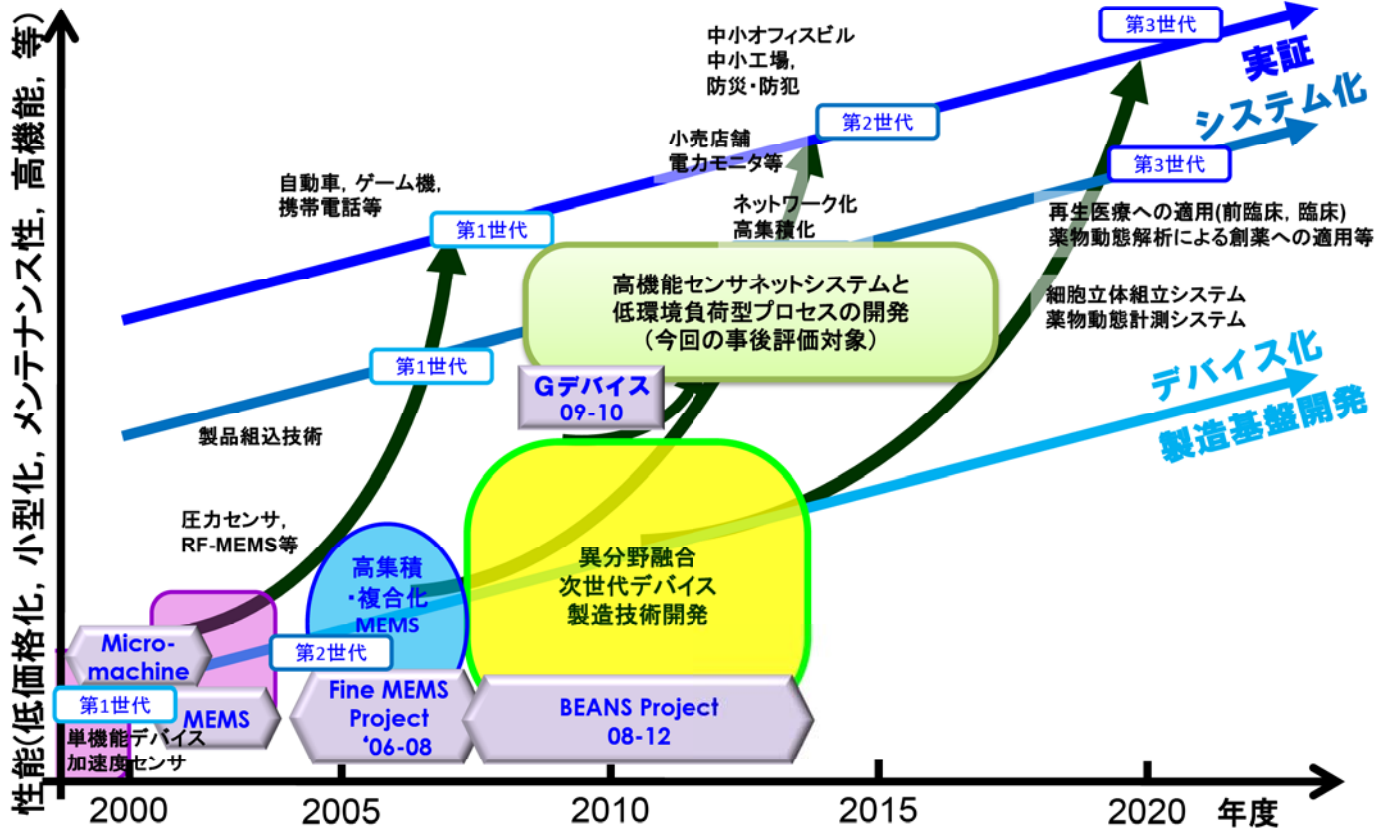
1. 事業の位置付け・必要性について (1)NEDO事業としての妥当性

MEMS技術ロードマップ

MEMS分野の導入シナリオ



MEMS関連プロジェクトの流れ



国のプログラムにおける位置付け

経済産業省「ロボット・新機械イノベーションプログラム」

1. 目的

我が国の製造業を支えてきたロボット技術・機械技術を基盤とし、IT技術・知能化技術などの先端的要素技術との融合を促進することにより、家庭、医療・福祉、災害対応など幅広い分野で活躍する次世代ロボットや新機械技術の開発・実用化を促進し、生産性の向上と人間生活の質の向上を実現するとともに、我が国経済社会の基盤である製造業の競争力の維持・強化を目指す。

2. 達成目標

(1) 我が国製造業の高度化に必要不可欠な基盤技術である機械分野においては、**バイオ技術やIT技術などの異分野技術を活用した従来の機械の概念を超えた新しい機械の創造**及びその計測技術の確立を図ることを目標とする。例えば、2015年頃に革新的MEMSの本格普及を目指すことにより、**安全・安心な社会の構築に貢献**する。

異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト

- ① 新しい機械→異分野融合による革新的MEMSの実現
- ② 2015年→途中段階でも実用化が可能な研究成果については、スピンアウトし実用化を促進
- ③ 安全・安心→健康・医療への応用

上位プログラムの目標達成に貢献できる

21年度補正予算(第2号)への対応

全世界的課題として環境エネルギー問題への対応が国や産業毎に強く要請されている中、「異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト」(BEANS)は、平成21年度補正予算(第2号)「明日の安心と成長のための緊急経済対策」を実施するために措置された「環境・エネルギー技術への挑戦」に位置付けられる。



NEDOはこれに早期に対応すべく、BEANSの研究開発項目⑤「高機能センサネットシステムと低環境負荷型プロセスの開発」として**緊急に実施**。

<委託先選考までの経緯>

・公募の事前周知 (公募予告)	平成21年12月25日
・公募期間 (開始日～締切日)	平成22年1月8日～2月8日 (32日間)
・公募説明会	平成22年1月18日
・採択審査委員会	平成22年2月23日
・契約・助成審査委員会	平成22年3月9日 (公募締切から採択決定までの日数:30日間)

事業概要・目的

<背景>

➢工場等の製造現場において、原材料や使用資源のきめ細かい状況モニタリングと制御を行う微細・極小、高機能なセンサの実用化により、製造プロセスの省資源化、高効率化の実現が期待されている。
➢小型で低コスト、かつ信頼性の高いワイヤレスセンサとすることで、設置にあたっての大きがかりな工事を必要とせず、既存施設にも低コストでの導入が可能となる。合わせて、センサの製造において低環境負荷型の製造プロセス技術の開発を行うことで、生産システムの低炭素化にも貢献が可能となる。

<目的>

研究開発項目⑤「高機能センサネットシステムと低環境負荷型プロセスの開発」では、BEANSで開発したプロセス技術等を活用し、高機能センサネットシステム・センサモジュールの事業化と、低環境負荷型製造プロセスの確立に向けた開発・実証研究を行うことを目的とする。これは、補正事業の趣旨に合致し、本プロジェクトの早期の実用化を期待するものである。

<内容>

1. 研究開発項目:

- ① バイオ・有機材料融合プロセス技術の開発
- ② 3次元ナノ構造形成プロセス技術の開発
- ③ マイクロ・ナノ構造大面積・連続製造プロセス技術の開発
- ④ 異分野融合型次世代デバイス製造技術知識データベースの整備
- ⑤ 高機能センサネットシステムと低環境負荷型プロセスの開発【事後評価対象テーマ】

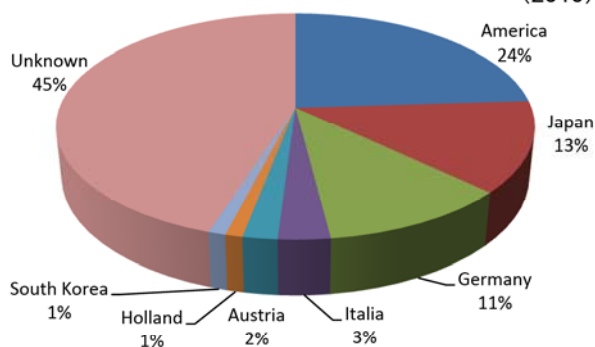
2. 研究開発期間: 平成22年3月～平成23年3月(1年間)

3. 予算額: 33.1億円

海外の動向

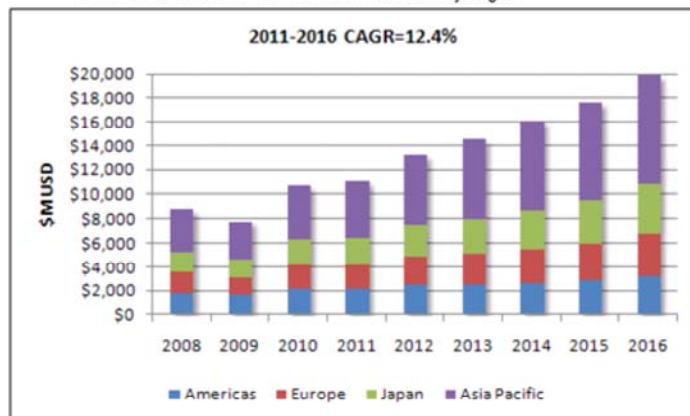
- ▶ 日本は、センサ・MEMSでは、世界トップクラスのシェアを占めつつも、欧米各国と激しい競争が行われている。
- ▶ センサ・MEMSの世界市場は今後も大きく成長すると予想されている。

世界シェアTop20のメーカーの占める世界シェアを国別に整理 (2010)



Databeans の資料をもとにNEDOが作成

Worldwide Sensors and MEMS Revenue Forecast by Region



Databeans Estimates

Gデバイスを実施することにより、BEANSで開発したプロセス技術等を活用し、本プロジェクトの成果をいち早く創出することで国際競争力の向上に資する。

研究開発目標(1)

(以降、事後評価対象である、研究開発項目⑤「高機能センサネットシステムと低環境負荷型プロセスの開発」(Gデバイス)について説明)

MEMS技術戦略マップのロードマップを踏まえつつ目標を設定。高機能センサネットシステム開発として製造現場に多数のセンサを配置したセンサネットワークシステムを構築し、空調制御することで省エネ化の有効性や、多数配置可能なMEMSセンサ端末課題の把握を行うことと、MEMSプロセス自体の低環境負荷化を目標とした。

具体的な最終目標は以下のとおり。

① 高機能センサネットシステム開発

<最終目標>

検証用のクリーンルームにおいて、従来比(1990年比)CO2削減60%のセンサネット制御システムを開発。また、一辺30mm、厚み10mm以内に複数のMEMSセンサと処理回路、無線回路、エネルギーデバイスとの融合を想定したセンサモジュールプラットフォームを作製。

<目標設定のねらい・意義>

これらの取り組みや目標に関してはMEMS技術戦略マップ2010の応用事例としてその重要性が取り上げられ、既存の半導体クリーンルームで未達成のCO2削減量であり、複数のセンサ機能を搭載したモジュールを目標サイズで達成した例はない。

研究開発目標(2)

② 低環境負荷型プロセス技術開発

<最終目標>

シリコン貫通深掘り加工において、温室効果ガス排出量削減に向けて、温暖化係数の高いSF6ガスに対し、複数の代替候補ガスを調査・検討し、温暖化ガス排出量を90%以上削減可能とする最適代替ガスの選定指針を得る。また高機能デバイス薄膜の集積化に関し、250℃以下で大気圧付近から真空中で封止できる接合方式を決定。さらに生体適合性ポリマーの機械特性などの数値を求める。

大口径MEMS用試作ラインにて、センサ用途等TEGの設計および試作を複数種類行い、歩留まり、生産性につながるデバイスの動作を妨げる製造装置、製造プロセス、デバイス構造起因の欠陥・ばらつき等の課題を抽出する。BEANSの成果である中性粒子ビームエッチングをセンサTEGに適用し、デバイス性能への効果を検証。

設計・計測・ファブ環境情報において共有化する情報を類型化し、データ共有化のためのデータフォーマット、それに付随する基本ソフトウェアの開発を行い、MEMS-TEGを用いてデータ交換および設計手法の検証を行う。また、クリーンルームおよび製造・検査装置に関わる消費エネルギー、CO2排出量など環境情報の収集管理の方法を決定。

<目標設定のねらい・意義>

深掘りエッチングにおけるSF6の代替ガスや低温接合によるフレキシブル集積化は従来から課題視されていたものの未達成領域であり、ポリマーのMEMS化を含めMEMS技術戦略マップ2010のロードマップ数値をクリアすることを狙いとする。

研究開発の具体的内容

① 高機能センサネットワークシステム開発

1) 8インチMEMSクリーンルームセンサネットワークシステム開発

8インチMEMS用クリーンルームをセンサネットワークシステムの実験場として、各製造・評価装置や空調装置、純水等の周辺装置の消費エネルギー、温度、圧力、風量、異物粒子、ガスなどを現状のネットワークシステムと現状のセンサ群の多数配置によるきめの細かいセンシングネットワークシステムを試作・検証。

2) 8インチMEMSプロセスライン及びクリーンルームの構築

BEANSの実証及び集積化MEMSセンサデバイスの試作を可能にする8インチシリコンウェハベースMEMSラインを産総研つくば東事業所内に構築。これをセンサネットワークシステムの実験場として活用。装置には、MEMS/LSIの前工程から後工程、評価までカバーする一貫ラインとして、ウェハの洗浄、リソグラフィー、拡散、酸化、成膜、エッチングから、接合・封止、デバイスチップ切断、実装用配線、さらに、デバイス表面及び内部の形状評価までを実施する装置を導入。

3) 植物工場センサネットワークシステムの開発

東京農業大学内に植物工場を新設し、そこをセンサネットワークシステムの実験場として、野菜の育成状況を温度、湿度や照度と植物工場の稼働に必要な消費エネルギーを現状のネットワークシステムとセンサ群を多数配置し、きめ細かなセンシングネットワークを試作・検証することにより、省資源、高効率生産に最も適したセンサネットワークシステムを検証。

4) 高機能センサモジュール技術開発

自立型ワイヤレスMEMSセンサ端末に関し、モジュール試作及び想定モジュールのプラットフォームを検討。センサ(温度、湿度、圧力、加速度など)の追加、差し替え可能なプラットフォームモジュールに関する課題を明確化。さらに、自立型ワイヤレスMEMSセンサに必要なセンサ処理LSIの低消費電力化の検討と試作を実施。

研究開発の具体的内容

② 低環境負荷型プロセス技術開発

1) 低環境負荷ポリマー・MEMS融合プロセス技術開発

従来のシリコンを中心とする無機ドライ材料に加え、有機材料の持つ特異な機能を活かす融合プロセスに関して、特にアクチュエータMEMSの性能予測が可能なシミュレーション技術及びナノインプリントによる製造プロセスの開発を実施。

2) スマートプロトタイプング技術開発

新設した8インチMEMSプロセスライン活用のためにプロセス条件の確立、レシピの整備等、プロセスプラットフォームの構築が重要。特に、BEANSの実証及び集積化MEMSセンサデバイスの試作が可能となるよう、以下の開発課題を実施。

- ①シリコンベースセンサTEGの試作
- ②BEANSを適用したデバイスの作製
 - (i) 中性粒子ビームエッチングのデバイス性能向上実証
 - (ii) マルチプローブの特性ばらつきの抑制、先端部サブマイクロサイズの試作、形状・特性のばらつき評価
- ③欠陥・ばらつき評価におけるモデリング・計測技術の開発

3) 低環境負荷型深堀エッチング技術開発

シリコン深堀エッチングにおける低環境負荷化への取り組みとして、SF6排出量90%削減に向けた代替ガスの選定指針の検討、リアルタイムモニタリングによるエッチングの高効率化、フィードバック制御手法を用いたエッチング最適化を検討。

4) 低環境負荷型集積化プロセス基盤技術開発

MEMS集積化に不可欠なチップ、ウェハ接合技術の低環境負荷化として、250℃以下の低温接合を基本として、一括集積化のための強度の仮接合技術に関して、表面粗さ、表面改質、本接合における機能膜の活用などについて検討。

5) スマートファブシステム技術開発

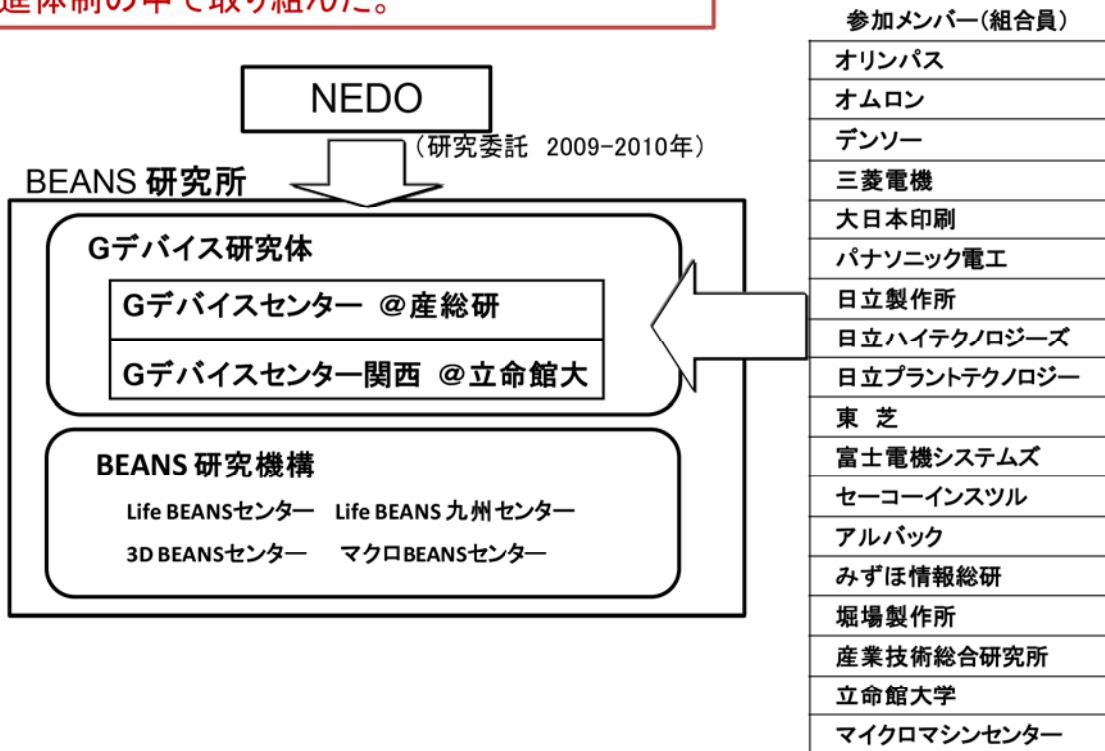
- ①3次元設計・計測情報をMEMS統合設計データベース、MEMS ONE等の設計ツール等と連携して活用するための情報共有化フレームワークの要求仕様を作成。
- ②環境負荷データ共有化データベース基盤の構築、MEMS製造プロセスに用いられる主要な原材料と作製されたセンサTEGの環境負荷算出に必要なデータを収集。

研究開発計画

事業項目	H21年度	H22年度			
	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
① 高機能センサネットシステム開発					
1) MEMSクリーンルームセンサネットシステム開発		センサネット・制御システム構想検討		センサネット・制御システム試作・効果検証	次世代オンデマンドシステムの検討
2) 8インチMEMSプロセスライン構築	設備仕様検討		設備導入・設置		
3) 植物工場センサネットシステム開発	センサネット構想検討		設置	センサネット効果検証	
4) 高機能センサモジュール開発		仕様検討		試作	評価
・自立型複数センサモジュール開発		仕様検討		試作	評価
・低消費電力LSI開発					
・新センサデバイス原理検討					
BEANS適応センサデバイス					
他センサデバイス					
			ナノガス、低電力デバイス原理検討		
			デバイス原理検討(パーティクル、汚染ガス、小型発電、パワーマネジメント、位置推定、温度センサ用機能薄膜)		
② 低環境負荷型プロセス開発					
1) 低環境負荷ポリマー・センサ融合プロセス技術開発		原理、特性検討		試作	評価
2) スマートプロトタイプング技術開発		設計検討	事前試作	8インチライン条件出し試作・評価	
・シリコンベースセンサTEG試作		設計検討	予備試作等検討	8インチライン条件出し試作・評価	
・BEANS適用デバイス試作		構想検討		評価検討	
・欠陥・ばらつきモデリング・計測技術開発					
3) 低環境負荷型深堀エッチング技術開発		代替ガス調査選定			
			プラズマモニタリングエッチング効率化		
4) 低環境負荷型集積化プロセス基盤技術開発		接合強度制御、気密封止検討			
			機能膜を劣化させない低温接合検討		
5) スマートファブシステム技術開発					
・3次元構造の設計・計測情報の共有化		構想検討		データ収集、情報共有化検討	
・環境情報共有化		構想検討		データ収集、情報共有化検討	

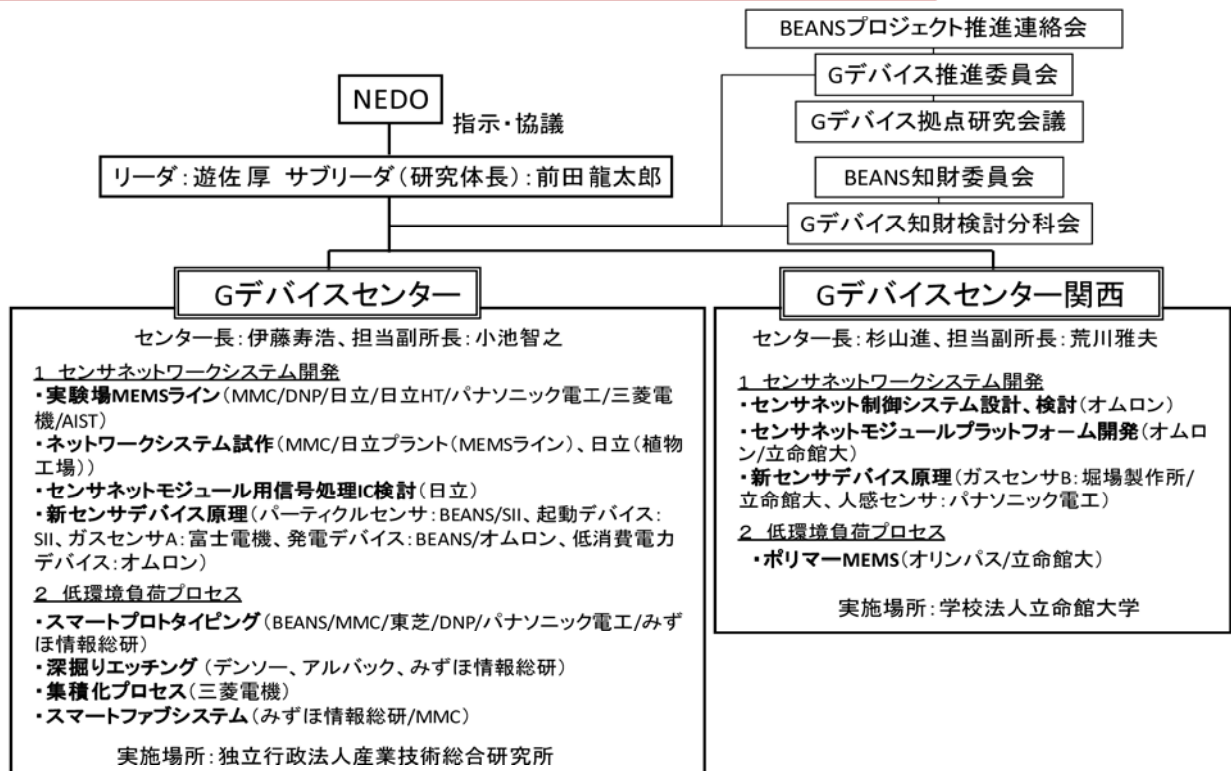
推進体制

Gデバイスは、BEANSの下に追加実施されたものであり、BEANSの推進体制の中で取り組んだ。



研究体制

研究体長をサポートし、効果的な開発推進および開発進捗を管理



プロジェクトの運営管理(スケジュール)

Gデバイス マネジメント関連スケジュール

	22年度												23年度	
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5
進捗確認シート			作成			作成			作成					▲ 5/20 成果報告書
BEANSpj 推進連絡会		▲第1回		▲第2回		▲第3回		▲第4回						
Gデバイス 推進委員会	▲第1回		▲第2回		▲第3回		▲第4回							
拠点毎研究会議	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲		
イベント			7/28-30 マイクロマシン展 専用ブース概要説明	8/30-31 日韓中 ジョイントセミナー 概要報告			12/7 TIA-NMEMS 8インチライン見学会			2/9 GDMS2011 成果報告				
現地ヒアリング		6/11 Gデバイス関西 サイトビジット			11/11 Gデバイスつくば サイトビジット		12/10 植物工場 サイトビジット		12/22 Gデバイス関西 サイトビジット					
検査・契約関連		▲ 概算払い		▲ 概算払い			12/16 ▲ 第1回 中間検査 ▲ 概算払い		3/9 ▲ 第2回 中間検査 ▲ 概算払い			▲ 確定検査 (書面) ▲ 6/28 フォローアップ検査		

プロジェクト運営管理(委員会・会議等)

プロジェクトを円滑に推進するために、各種委員会・会議等を設置し適切な運営を実施

委員会・会議等	目的・内容	開催実績
Gデバイス推進委員会	研究体長をサポートし効果的な開発推進および開発進捗を管理するために、開発に参加する企業や大学研究者と研究員との緊密な連携を取りながら効果的に成果が得られるよう、BEANSプロジェクト推進連絡会の下に設置したGデバイス推進委員会を四半期に一度実施。委員会の委員は、組合員企業と大学の有識者から21名で構成。	4回
Gデバイス研究会議	研究拠点として、Gデバイスセンター(産総研つくば東事業所内)とGデバイスセンター関西(立命館大学びわこ草津キャンパス内)を設け、Gデバイスの研究会議を実施。研究会議は、短期集中で目的の成果を得るための取り組みについて、毎月初めに、研究体長と各センター長の出席により、研究開発の進捗状況、優先順位の判断、アドバイス等をタイムリーに行う狙いで開催。	各9回(うち合同研究会議3回)
Gデバイス知財検討分科会	本研究開発課題に新規参画した企業メンバーを主に想定し、本体プロジェクト(BEANS)の知財規程の周知徹底を図るために、BEANS知財委員会の下にGデバイス知財検討分科会を設置して実施。分科会メンバーは組合員企業の知財部門等から18名で構成。	1回

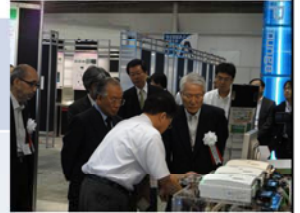


プロジェクト運営管理(普及活動)

約一年間という短期間の研究開発の中、前半は取り組み概要を広く周知することを目的に普及活動を実施。後半は8インチMEMSプロセスラインの完成を機に関係者から見学会を実施、また2月に国際ワークショップを開催しその研究成果を広く公開。

1) マイクロマシン・MEMS展への取り組み概要展示

国内イベントの中で、MEMS関連企業、研究者が最も多く集まる本展示会が7月28日～30日、東京ビッグサイトで開催され、プロジェクトの取り組みを説明。



2) The 1st Japan-Korea-China Joint Seminar on MEMS/NEMS for Green and Life Innovationへの展示

グリーンイノベーション、ライフイノベーションに貢献するマイクロナノ技術をテーマとする日韓中セミナーが、平成22年8月30日～31日、札幌コンベンションセンターで開催。日韓中の関係する先端研究者に取り組みをアピールするため、ポスターセッションにて展示を実施。



3) 8インチMEMSプロセスライン見学会

12月7日に開催されたつくばイノベーションアリーナNMEMSの関係者が集うワーキンググループ(TIA-NMEMS WG)で、ほぼ完成した8インチMEMSプロセスラインの見学会を実施。

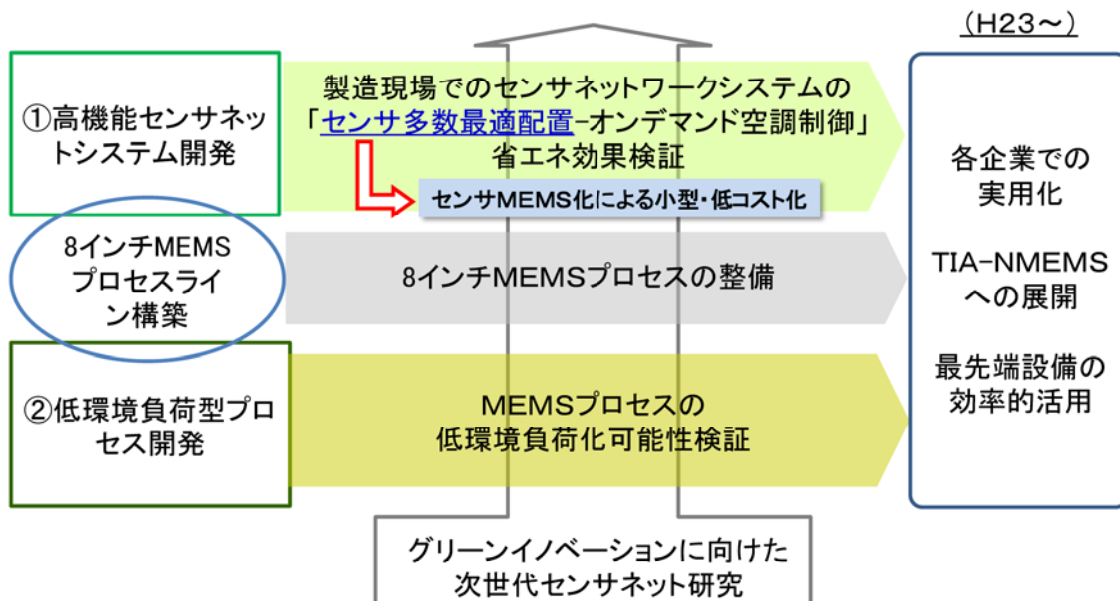


4) International Workshop on Green Devices and Micro Systems (GDMS2011)開催

3月の事業終了前に、成果について国内外に報告するため、本国際会議を平成23年2月9日(水)に産業技術総合研究所つくば中央共用講堂で開催。

環境利用エネルギーハーベスティングやRFMEMSの研究で著名なProf. Stepan Lucyszyn、商業店舗などのエネルギーマネジメントに関する研究で著名な東大藤本教授の招待講演を実施。その後、二つの研究拠点Gデバイスセンター長が両拠点での取組みや成果の概要について報告、ポスターセッションでのテーマごとの報告、及び代表的テーマのオーラルセッションを実施。最先端8インチMEMSライン見学については、3回に分けて実施し、すべて、定員一杯で事前登録で締め切るほどの盛況。

研究開発の成果展開・実用化

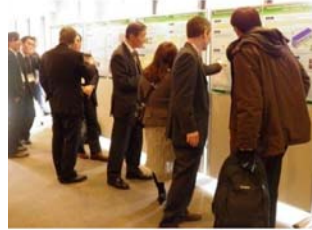


Gデバイスの成果を踏まえて、参加企業での実用に対する取り組み及び、つくばイノベーションアリーナ(TIA-NMEMS)への展開について、実施内容を検討。

TIA-NMEMSの本格的な研究開発試作拠点形成に向け8インチMEMSラインに配置した国内有数な装置などの見学会を開催し、我が国関連産業にいち早く周知されるような取り組みを実施。

情勢変化への対応

Gデバイスは、平成21年度補正予算(第2号)により措置され、緊急に実施した事業であり、更に1年間の短期間であったため、その成果を効率的に出すべく、前述の通り推進委員会や研究会、積極的な普及広報活動を通じてきめ細かいマネジメントを行い対応した。



International Workshop on Green Devices and Micro Systems (GDMS2011)開催

GDMS2011会場風景



また、プロジェクト期間中に発生した東日本大震災の影響で産業技術総合研究所つくば東事業所の被災とGデバイスセンターの機能が一時停止したが、Webによる掲示板等で被害・復旧状況等を関係者と情報共有するなど、遅滞なく研究開発の成果取り纏め、予定通り事業を完了した。



全体の研究開発の目標と成果

研究課題	目標	成果
高機能センサネットワークシステム開発	<ul style="list-style-type: none"> ①製造現場としてMEMSクリーンルームにセンサネットワークシステム・空調制御でCO2削減60%(’90年比) ②上記検証用クリーンルームと大口径MEMSプロセスラインを構築 ③製造現場としてセンサネットワーク適用の植物工場を構築し省エネ効果20% ④高機能MEMSセンサモジュール試作(自立型、複数センサ、30×30×10mm)及び新センサデバイス原理を検討 	<ul style="list-style-type: none"> ①8インチMEMS一貫プロセスラインの空調、ライン装置等のエネルギー見える化システムを設置。多数配置センサによるオンデマンド空調制御で、90年度施設比60%のCO2削減見込みを確保 ②8インチMEMS一貫プロセスラインの構築完了 ③植物工場に多数配置センサネットワークを設置し、葉物野菜、トマトなどの育成で、20%省エネ効果を検証、収率は10%向上 ④複数センサ搭載自立センサモジュール試作、小型化達成。合計8種の新センサデバイス原理の可能性を把握。
低環境負荷型プロセス開発	<ul style="list-style-type: none"> ①ポリマMEMS基本プロセス確立とミラーデバイス基礎データ把握 ②深堀エッチング:代替ガス及びエッチング効率の最適化で温暖化ガス排出量90%削減の指針を得る ③集積化接合:部分的接合強度制御と250℃以下の気密低温接合課題抽出 ④大口径MEMSプロセスラインTEG試作を実施。3次元計測情報を設計ツールと連携するフレームワーク要求仕様作成プロセス環境負荷情報データベース構築とデータ収集、欠陥ばらつきモデリング技術を確認 	<ul style="list-style-type: none"> ①低環境負荷型プロセスとしてポリマミラーデバイスの可能性についての基本プロセス、基礎データ等、方向性を確保した。 ②深堀エッチング:目標をクリアし、低環境負荷型プロセスへの指針を確保 ③集積化接合:目標をクリアし、低環境負荷型プロセスへの指針を確保 ④8インチMEMS一貫プロセスラインでの7種類のTEGを試作、プロセス条件を確保、一年間の短期の取り組みで、すぐ使える試作ラインを構築。同ラインでのプロセスを想定した、デバイス特性ばらつき、3次元設計・検査情報共有化等のフレームワーク指針を確保、設計検査の面でも基盤を構築。

高機能センサネットシステム開発 目標と成果内容、達成度

研究課題	目標	成果内容	達成度
半導体クリーンルームセンサネットシステム開発	クリーンルームでのCO2排出量削減を検討できる制御管理システムの開発を行う。 検証用クリーンルームでCO2削減(90年度比60%削減)を実証	・パーティクル量等の441点を計測評価できるエネルギーマネジメント統合管理システム(つくば産業総合研究所)を開発した。 ・塵埃負荷および熱負荷を与えた時のパーティクル量、パーティクル拡散量、温度上昇などのデータを基に1990年度比、CO2_60%削減の検証を実施した。	○
8インチラインの構築	MEMS/LSIの前工程から後工程、評価までカバーする一貫ライン、デバイス表面及び内部の形状等の評価装置の導入	MEMS/LSI前工程プロセスラインとして、ウェハ洗浄、0.35 μmリソグラフィー、ウェハ熱酸化・拡散、CVD・スパッタ成膜、ウェット及びドライエッチングライン(TKB812F)と、後工程プロセス・評価ラインとして、ウェハ接合・封止、ダイシング、実装配線、デバイス表面・内部性状・電気的特性評価ライン(TKB812B)を導入し、8インチMEMSプロセスの試作検証に適用した。	○
植物工場センサネットシステムの開発	センサネットを適用した省エネ評価用植物工場を構築し、センサネットの効果及びMEMSデバイスの実用化を検討	東京農大にセンサネット植物工場の開発環境を構築した。リーフレタス、ミニトマトを栽培し、細霧冷却、補光照明、冬季暖房、土壌灌水の4つの提案方式に関して、それぞれ、エネルギー20%の削減を達成した。補光照明、冬季暖房、土壌灌水の3つの提案方式に関して、植物の収穫量10%改善を確認できた。	○

高機能センサネットシステム開発 目標と成果内容、達成度

研究課題	目標	成果内容	達成度
高機能センサモジュール技術開発			
高機能センサモジュール	・無線センサモジュール(30mmx30mmx10mm)試作開発 ・アプリケーション分野の明確化と新たなセンサネットの活用検討	・センサ機能に温度、湿度、圧力、加速度を搭載、電池、信号処理回路、無線送信回路、アンテナを実装。植物工場も含め用途に応じセンサ機能を差替え可能な30mmx30mmx10mm以内のプラットフォームモジュールを試作した。 ・半導体クリーンルーム応用に特定し、事業化課題と進め方を明確化した	○
低消費電力LSI	センサモジュールの長寿命/バッテリー交換レス化を目標に、低消費電力アナログ回路要素技術開発を行う。複数センサ信号を増幅・デジタル化するアナログフロントエンドLSIを試作、課題を抽出	アナログフロントエンド回路を低電力化するために、低電圧(1.2V)、短時間動作回路要素技術を開発。平均消費電力4 μW程度(従来比60%以上削減)で動作可能あり、目標であるセンサモジュールの長寿命化の要素技術開発に成功した。	○
新センサデバイス原理検討			
ナノ構造ガスセンサ	センサ小型化及び性能検証: トレンチにSnO2粒子をポーラス状に埋め込み、センサ部の面積を1/2以下の省スペース化とセンシング感度維持を両立 粒子配列プロセスの大面积化: プロセスの大面积化に伴う課題抽出を行う。	・センサ部の面積を1/2以下の省スペース化とセンシング感度維持を両立するために、トレンチ埋め込み型ガスセンサを評価、平坦基板と比較し高濃度ガス中での感度が向上した。 ・粒子配列プロセスの大面积化の課題抽出として、4inch Si基板上へのディップコートを検討し、メニスカス先端部への微粒子供給を阻害しないような容器設計が必要こと、ウェハ表面を清浄に保つ必要があることを見出した。	○
低消費電力センサ・無線モジュールへの検討	高効率な容量型センサや高効率高周波デバイス、そしてさらなる小型化・低消費電力化に向け、デバイスの試作を通じて課題検証	超低損傷ドライエッチング技術を低消費電力センサ・無線モジュールに適用した場合の課題検証を実施。シミュレーションでは、専用設計ツールを構築し計算結果からゲート長・幅などのデバイス構造の課題を抽出。8インチファンドリ試作ではインプラ工程やCMP工程などのプロセス課題を抽出した。	○
パーティクルセンサのMEMS化	小型化、低コスト化が困難なパーティクルセンサのMEMS化を検討する	・検出方法として、光学的・電気的方法を複数検討、小型化のために新光学系を提案、パーティクル(線香の煙)を検出することができた。 ・センサの流路断面積5×5 mm ² 、ダウンフロー流速を0.3 m/s、対象粒径0.5 μmとし、10個のセンサで1秒間サンプリングを行うとして、JIS規格のクリーン度を見積ることができた。	○

高機能センサネットシステム開発 目標と成果内容、達成度

研究課題	目標	成果内容	達成度
汚染ガスセンサ	汚染ガス(NH ₃ , H ₂ S等)をppbレベルで計測するための酸化物半導体のセンサ開発	低消費電力化された高感度MEMSガスセンサを開発した。耐熱温度500℃以上で、NH ₃ に対する検出限界を2ppb、消費電力を31mWに低減、H ₂ Sに対する検出限界を0.02ppb、消費電力を48mWに低減を達成した。	○
振動発電を中心とした小型高効率発電デバイス	垂直エレクトレットの新しい高速荷電方法の開発を目指すとともに、小型化に有利な櫛歯型エレクトレット発電器の原理検証を行う	真空紫外線による電離を用いた荷電法を開発し、コロナ荷電、軟X線荷電よりも極めて高速に荷電できることを明らかにし、当初目標を達成した。また、原理検証として、櫛歯状の垂直エレクトレットへの真空紫外線荷電の検証と1uWオーダーの発電が可能であることを示した。	○
センサ用パワーマネジメントデバイス	センサーネットワーク端末の電力削減のため起動スイッチの原理検証と通信方式の検証する	ゾルゲルPZTと流路形状デバイスにより発電型の低消費電力起動スイッチの可能性を得た。起動スイッチ向け無線として起動スイッチを用いた場合の通信シーケンスチャート、データフォーマット、通信タイミングチャートを策定。消費電力推定の基礎データを取得。	○
位置推定センシング原理	作業者の位置推定の原理開発を行う	ワイヤレス給電型慣性センサとRFIDを組合せた無線方式センサモジュールで作業者位置をリアルタイム計測し、RFIDタグ検出時の位置補正、サーバには作業者位置表示・タグ位置設定・履歴表示・シミュレーション機能を具備した作業者位置追跡システムを開発した。	○
高感度温度センシング用機能薄膜	環境に優しい非鉛系強誘電体材料におけるセンサとしてのデバイス原理開発	非鉛系強誘電体材料BaTiO ₃ 薄膜をスパッタ法で形成し、焦電係数は10~20pC/N、圧電定数は10pC/(cm ²)を達成し、センサとして十分な性能を得た。	○

低環境負荷型プロセス技術開発 目標と成果内容、達成度

研究課題	目標	成果内容	達成度
低環境負荷ポリマー・MEMS融合プロセス技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・ポリマーデバイス作製プロセス：電鍍成型金型の基本プロセスの確立 ・アクチュエータMEMS(ミラーデバイス)を2回製作し、駆動電圧、ミラー部反射率、ミラー部表面粗さの特性を評し、生体適合性への課題を抽出 	PMMAポリマー材料による静電型ミラーデバイスを電鍍成型金型によるプロセスにて開発した。試作(2回)及び特性評価した結果、生体適合性に問題ないことを確認した。	○
スマートプロトタイプング技術開発			
シリコンベースセンサTEGの試作	<ul style="list-style-type: none"> ・シリコンベースセンサTEGの試作に向けて、各プロセス(成膜・リソグラフィ・エッチング・洗浄)装置の要素技術を開発 8インチラインを用いて試作を行い、ラインの特性ならびに製造環境を評価し、MEMSデバイス製造の基盤を構築 	8インチウエハによる酸化膜、SiN、i線露光、Si異方性エッチング、Si-DRIE、メタルドライエッチング、犠牲層ドライエッチングの条件出し、応力解析、断面形状、寸法評価、ウエハ面内均一性を評価し、さらに5種類のセンサTEGの試作とそのセンサの特性評価により、8インチ試作に適用できるプロセスプラットフォームの構築を完了した。同時に8インチプロセス装置、計測装置のレシピの蓄積を行った。	○
中性粒子ビームエッチングのデバイス性能向上実証	中性粒子ビームエッチングの大口径(8インチ)化によるウエハ内の特性ばらつきをセンサTEGの試作により評価	8インチウエハ面内に作製したカンチレバーに中性粒子ビームエッチングを行ない、カンチレバーの共振周波数とQ値の初期特性を計測し、ウエハの表面状態が回復すること、100nmエッチング行ったところで特性のサチュレーションが確認でき、中性粒子ビームエッチング装置開発に重要な指針となるデータを取得できた。	○

低環境負荷型プロセス技術開発 目標と成果内容、達成度

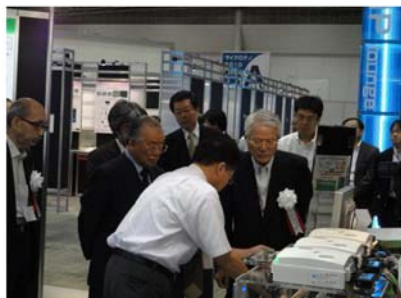
研究課題	目標	成果内容	達成度
μプローブTEGの設計・試作	先端部の有効径・幅がサブミクロンであるマルチプローブアレイを8インチウエハで試作し、ウエハ内、及びロット間の形状・特性のバラツキを、マルチプローブ評価装置を用いて評価する。さらに、8インチラインの検査デバイスとして適用できるかの可能性を検討	マルチプローブ評価装置を用いた評価手法として、局所陽極酸化(LAO)法による描画、光てこを用いた直接高さ測定、プローブ先端接触電流値のリアルタイム計測の3つの手法を提案し、電流値リアルタイム計測法が最も直接的かつ容易にデバイスの特性ばらつき計測や不良スクリーニングできることを見出した。 上記計測法で8インチラインで試作したデバイスの、ロット間、ウエハ内形状ばらつきを評価、顕著な形状ばらつきは見られなかったものの、ロット間電極配線形成プロセスの品質差を把握、本デバイスを用いた手法が、最先8インチライン検査デバイスとして適用し得る可能性を示した。	○
欠陥・ばらつき評価におけるモデリング・計測技術開発	ばらつき評価に有効なセンサTEGを設計・試作、最終パッケージ(真空中)やテスト(外力印加)段階と同様の擬似環境下でウエハ内の電気的・機械的特性計測技術及び解析結果を基に構造依存のばらつき特性近似モデリング技術を開発	8インチウエハに作製した複数デバイスについて、真空中・大気中で電気的・機械的計測を行い、それぞれのMEMS等価回路モデルパラメータを算出した。算出した等価回路モデルパラメータのばらつきより構造寸法のばらつき評価を行い、等価回路モデルパラメータのばらつきから構造寸法のばらつきが正しく評価できることを確認した。	○

低環境負荷型プロセス技術開発 目標と成果内容、達成度

研究課題	目標	成果内容	達成度
低環境負荷型深掘りエッチング技術開発	低環境負荷代替ガスの探索を少なくとも3種類以上のガスについて行い、エッチング効率化/最適化と組み合わせ、SF6ガスに対し温暖化ガス排出量を90%以上削減可能とする最適代替ガスの選定指針を得る。	F2, BF3, SiF4など5種類の候補ガスについて、10Hz周期の高速リアルタイム・プラズマ発光モニタリングにより得られた高効率エッチングレシピとプロセスシミュレーションによるフィードバック制御の組合せにより、温暖化ガス排出量をSF6比で90%削減できる低環境負荷代替ガス選定指針を得た。	○
低環境負荷型集積化プロセス基盤技術開発	(1)ウエハとデバイスチップ仮接合強度を、正規接合強度の1/10以下に安定制御する集積化プロセスを開発。 (2)可動部固着防止用機能膜の特性が劣化しない250℃以下の低温接合技術実現に向け、接合面に付着した機能膜の影響を把握し、機能膜の部分的除去方法確立に向けた課題を抽出	合面の表面粗さと面積の制御、環状くり抜きパターンの選定により、正規の接合強度の1/10以下に安定して制御できることが判った。 機能膜として、SAM膜(自己組織化単分子膜、FDTS膜)はUV光、プラズマ照射で除去可能であり、除去後の250℃表面活性化接合で十分な気密封止が得られること、パターンニング方法としては、N2、あるいはArプラズマ照射が適していることが判った。	○
スマートファブシステム技術開発	(1)3次元設計・計測情報を、MEMS統合設計データベース、MemsONE等の設計ツール等と連携して活用するための情報共有化フレームワークの要求仕様を作成 (2)環境負荷データを情報共有化するためのデータベースの基盤を構築し、センサTEGの製造時における環境負荷を算出するのに必要なデータを収集・登録	(1)X線CT装置により3次元構造計測を行い、得られた構造から設計時の形状や力学特性の比較を行った。機械特性、電気特性の計測データと設計形状とを、集中質点系モデルを介させて比較する手法を検討した。併せて、情報共有のためのデータベースシステムの設計・プロトタイプ開発を行い情報共有化フレームワークの要求仕様をまとめた。 (2)30種類のMEMSデバイス用原材料と最先端8インチライン(TKB812)にて試作されたセンサTEG構造体の製造工程についてCO2排出に寄与する項目をデータ収集し、それらを積算することで排出量を算定した。算定の結果により、装置・工程・項目に対する排出量の削減への指針を得た。	○

研究開発の全体成果まとめ

- ・短期間での8インチラインの導入整備とグリーンセンサネットの実証
- ・Beansプロジェクト等の基礎研究の量産実証
- ・国際会議創設や展示会等での世界に先駆けたグリーンイニシャティブ情報発信



2010マイクロマシン・MEMS展(東京ビッグサイト)での概要展示



8インチMEMSプロセスライン見学会



GDMS2011会場風景

特許出願

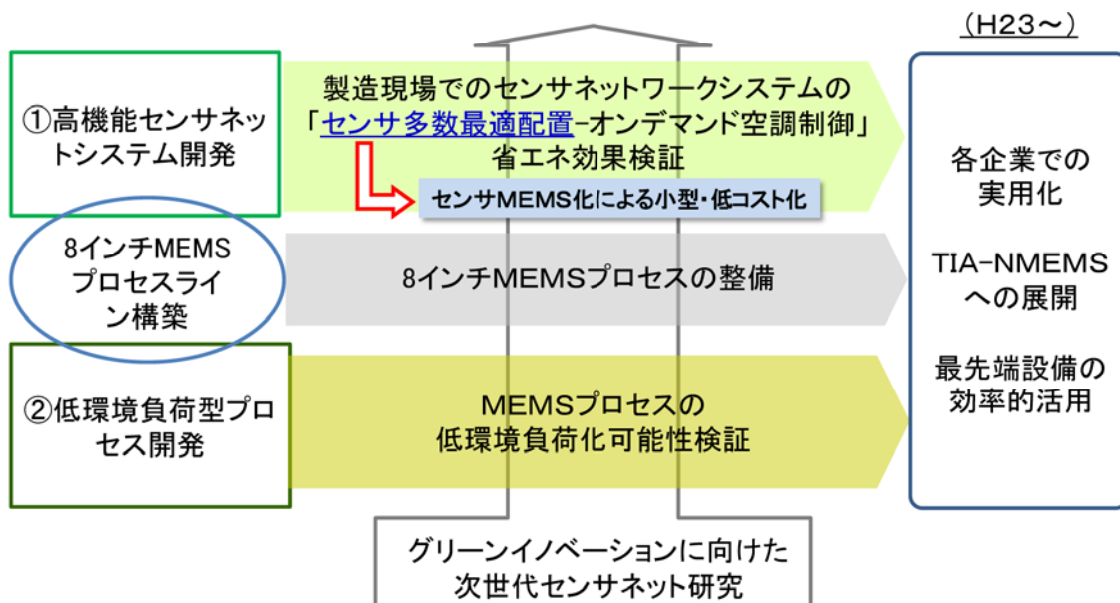
番号	出願者	出願番号	出願日	名称	発明者	所属
1	みずほ情報総研	特願 2011-044058	2011/3/1	素子解析システム、素子解析方法及び素子解析プログラム	藤原信代 浅海和雄 橋口原	みずほ情報総 みずほ情報総
2	セイコーインスツル産業技術総合研究所	特願 2011-054222	2011/3/11	パーティクルカウンタ	桑名健太 磯崎瑛宏 富松 大 新荻正隆 伊藤寿浩	BEANS研究所 BEANS研究所 BEANS研究所 セイコーインスツル 産業技術総合研究所
3	セイコーインスツル産業技術総合研究所	特願 2011-054223	2011/3/11	粒子検出器	桑名健太 磯崎瑛宏 富松 大 新荻正隆 伊藤寿浩	BEANS研究所 BEANS研究所 BEANS研究所 セイコーインスツル 産業技術総合研究所
4	セイコーインスツル産業技術総合研究所	特願 2011-054224	2011/3/11	マイクロ構造の製造方法、マイクロ構造体、受光素子及び粒子検出器	桑名健太 磯崎瑛宏 富松 大 新荻正隆 伊藤寿浩	BEANS研究所 BEANS研究所 BEANS研究所 セイコーインスツル 産業技術総合研究所
5	アルバック	特願 2011-95426	2011/4/21	ドライエッチング方法及び装置	森川泰宏 村山貴英	アルバック

他三件出願手続き中

研究発表・講演

- 1) M. Honzumi et al., "High-Speed Electret Charging Method Using Vacuum UV Irradiation", Power MEMS 2010, pp173-176.
- 2) K. Yamashita et al., "Vibration-driven MEMS energy harvester with vertical electrets", Power MEMS 2010, pp165-168.
- 3) 植木 真治他、「ゲート・チャンネル間電気機械相互作用を考慮した Vibrating-Body Field Effect Transistorのモデリング」
日本機械学会第2回マイクロ・ナノ工学シンポジウム2011、くにびきメッセ(島根)
- 4) 阿波寄 実他、「金属酸化物微粒子の自己整列構造を用いたガスセンサ」、精密工学会2011年度春季大会学術講演会
- 5) 磯崎瑛宏他、「パーティクルセンサの小型化に関する研究」、精密工学会2011年度春季大会学術講演会(東洋大学)
- 6) 藤原信代他、「MEMS等価回路ジェネレータによる特性ばらつき解析」、平成23年電気学会全国大会
- 7) 石垣彰一、他、「X線CT装置計測を用いたMEMSリバースエンジニアリング 第1報 試作サンプルによる計測実験とデータ解析例」、精密工学会2011年度春季大会学術講演会
- 8) 谷村 他、「デバイス製造プロセス改善のためのMEMSリバースエンジニアリング」2011年日本非破壊検査協会春季講演大会
- 9) M. Honzumi et al., "High-speed electret charging using vacuum UV photoionization", Appl. Phys. Lett. 98, 052901 (2011)
- 10) T. Fujimori et al., "Low Power Analog to Digital Converter with Digital Calibration for Sensor Network",
SYMPOSIUM on Design, Test, Integration & Packaging of MEMS/MOEMS, Aix-en-Provence, France, 11-13 May 2011
- 11) M. Abasaki et al., "Large surface area 3D self assembled nano-porous structure for high sensitivity gas-sensing",
Transducers'11 conference, June 5-9, 2011, Beijing, China.
- 12) A. Isozaki et al., "Photodiode with Micro Texture for Improving Sensitivity at Large Angle of Incidence for Particle Sensors",
Transducers'11 conference, June 5-9, 2011, Beijing, China.
- 13) K. Yamashita et al., "Vibration-driven MEMS Energy Harvester with Vacuum UV-Charged Vertical Electrets",
Transducers'11 conference, June 5-9, 2011, Beijing, China.
- 14) T. Matsushita, et al., "Piezoelectric energy harvesters of PZT films deposited on Ti cantilevers", PowerMEMS2011 (IEEE)
- 15) A. Shibuya, et al., "Development of a Miniaturized NO2 Gas Sensor Based on Nanoparticles WO3 Thin film on Interdigitated Electrodes", IEEE Sensors 2010

全体の実用化の方向性



- ・ポスト3. 11への対応(クリーンルーム、植物工場から、オフィス、家庭へ)
- ・システム、デバイスや装置、プロセスの企業での実用化
- ・8インチMEMSラインの産業界への有効活用(Commercialization Gap克服)

全体の実用化の見込み

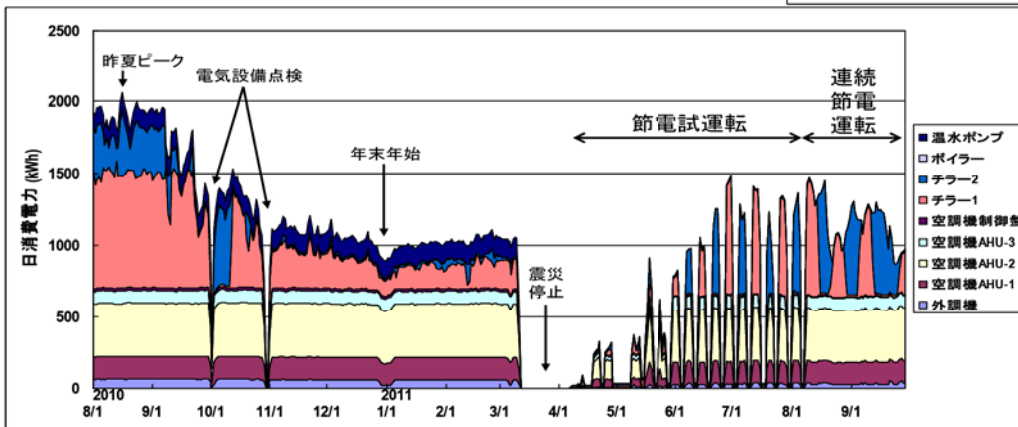
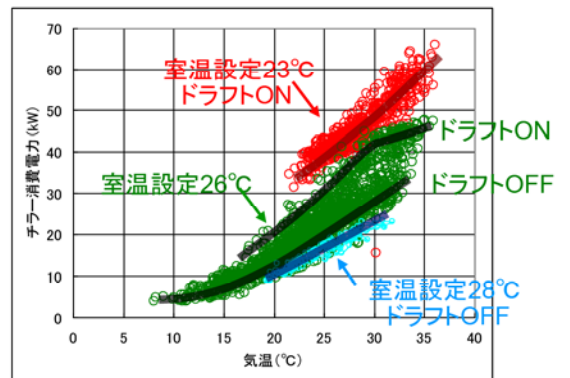
研究課題	成果	実用化の見込み
高機能 センサネットシ ステム開発	①8インチMEMS一貫プロセスラインの空調、ライン装置等のエネルギー見える化システムを設置。多数配置センサによるオンデマンド空調制御で、90年度施設比60%のCO2削減見込みを確保。 ②8インチMEMS一貫プロセスラインの構築完了。 ③植物工場に多数配置センサネットを設置し、葉物野菜、トマトなどの育成で、20%省エネ効果を検証、収率は10%向上。 ④複数センサ搭載自立センサモジュール試作、小型化達成。合計8種の新センサデバイス原理の可能性を把握。	①多数配置センサによるオンデマンド空調制御システムの事業化を、半導体クリーンルームで積極的に展開する(オムロン)。 ②8インチラインはTIA-NMEMSの基幹設備として、活用する。活用主体は、MMCに新設されたMNOICとなる見込み。 ③植物工場のセンサネットワークシステムは、検証した4方式を実際の民間植物工場の実態に合わせて適用する等、実用化を進める(日立)。 ④自立センサモジュールや低消費電力LSI技術、新センサデバイス原理検討から、継続して各社で数年後の実用化を目指す。(オムロン、日立、パナソニック電工、SII、堀場、富士電機)
低環境負荷型 プロセス開発	①深堀エッチング: 目標をクリアし、低環境負荷型プロセスへの指針を確保。 ②集積化接合: 目標をクリアし、低環境負荷型プロセスへの指針を確保。 ③8インチMEMS一貫プロセスラインでの7種類のTEGを試作、プロセス条件を確保、一年間の短期の取り組みで、すぐ使える試作ラインを構築。同ラインでのプロセスを想定した、デバイス特性ばらつき、3次元設計・検査情報共有化等のフレームワーク指針を確保、設計検査でも基盤を構築。 ④低環境負荷型プロセスとしてポリマーミラーデバイスの可能性についての基本プロセス、基礎データ等、方向性を確保。	①深堀エッチング: 高集積センサやプロセス装置への実用化に取り組む(デンソー、アルバック)。 ②集積化接合技術: 高集積センサ等へ4年後の実用化を目指す(三菱電機)。 ③TIA-NMEMSの8インチMEMS一貫ラインでのTEGレジピやプロセス条件として活用。活用主体はMMCに新設されたMNOICとなる見込み。3次元キャラクタリゼーションの提供サービスを本年度実用化見込み(みずほ情報総研)。 ④ポリマーMEMS技術は、低環境負荷プロセスとして検討を継続。さらにVOC濃度センサとして病院施設等や、医療応用匂いセンサの実用化を目指す(オリンパス)。

ポスト3.11への対応(クリーンルーム、植物工場から、オフィス、家庭へ)

・3月11日以降の情勢への対応

- 機器の省エネと群マネージメント
- センサネットのさらなる適用拡大
- コスト、メンテナンスと取付容易性

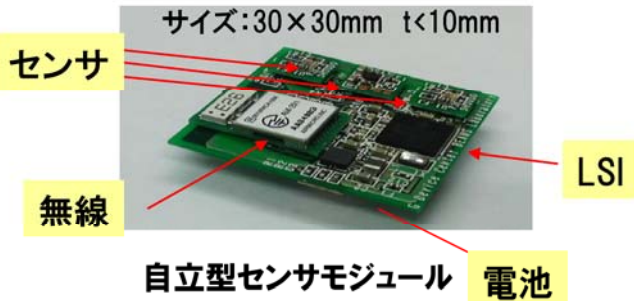
ピーク電力約30%削減を実施



システム、デバイスや装置、プロセスの企業での実用化

システム

- ・見える化によるCR電力削減とオンデマンドクリーンルームの提唱
- ・環境負荷の見える化
- ・植物工場への展開

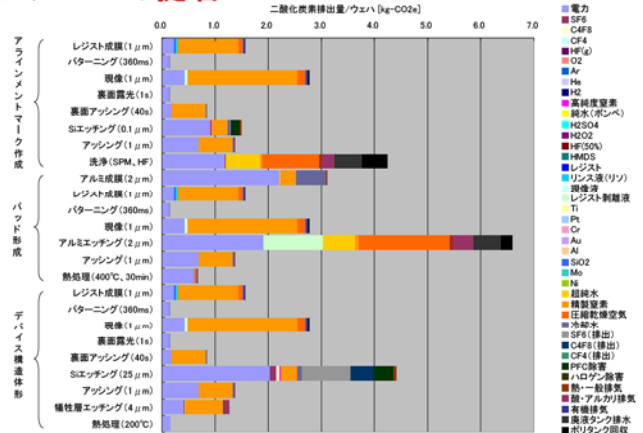


デバイス

- ・自立型センサモジュール
- ・プラットフォーム 省エネLSI
- ・量産センサの作成
- ガスセンサ、パーティクルセンサ、人感センサ

低環境プロセス

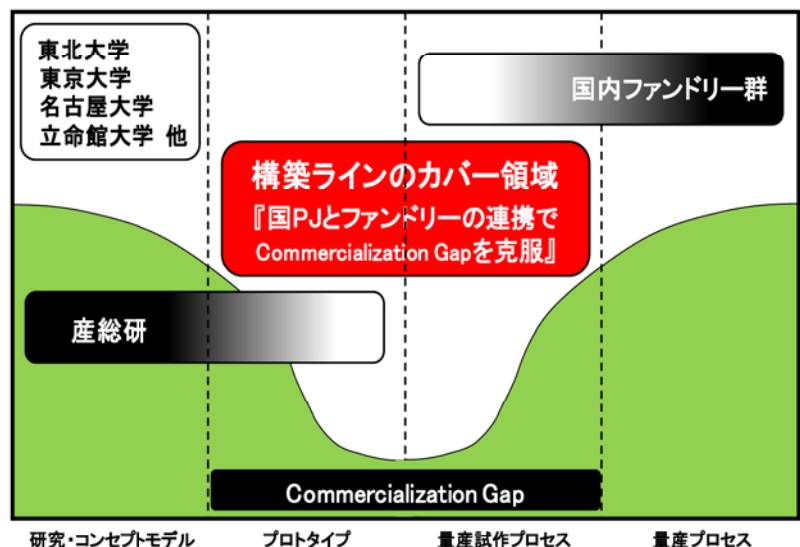
- ・DRIE代替ガス デンソー



センサTEG(ウエハ1枚あたり)の製造工程ごとの二酸化炭素排出量算出(41.6kg-CO2e)

波及効果: 8インチラインの有効活用

- ・最先端レベル8-12インチ対応
 - ・エネルギー見える化・グリーン製造
 - ・プロトタイピングから、小規模量産まで
- ⇒ “Commercialization Gap” 克服



“Commercialization Gap” の克服を目指すTKB812

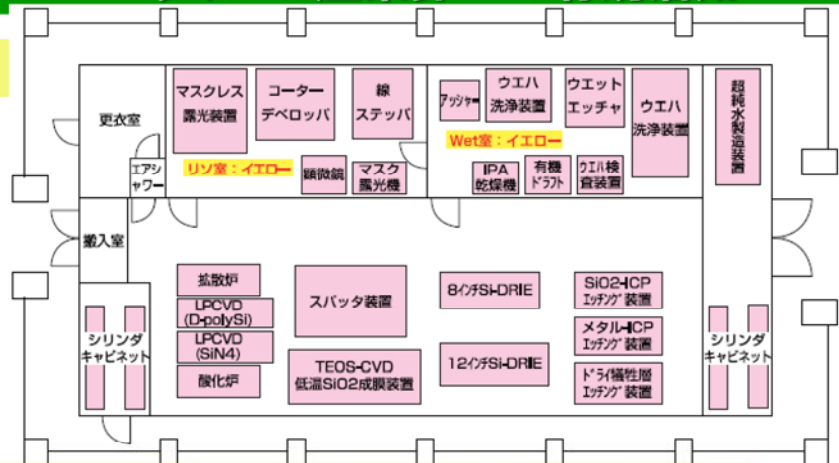
TIA-NMEMS拠点としての展開

MNOIC運営による産学連携共同研究用インフラ設備として活用。
ファブレスメーカーの製品開発を支援、製造現場として提供。

波及効果:8インチMEMSラインの産業界への有効活用

最先端MEMS関連設備 (その1)

前工程クリーンルーム
(TKB812F)設備配置図
約350m²、クラス1000



重要



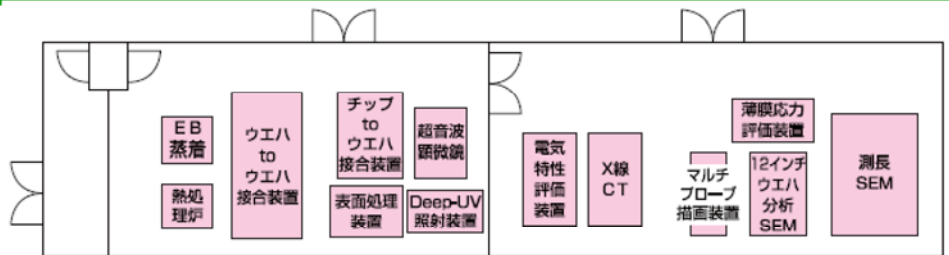
重要



波及効果:8インチMEMSラインの産業界への有効活用

最先端MEMS関連設備 (その2)

後工程・評価クリーンルーム
(TKB812B)設備配置図
約150m²、クラス1000



重要



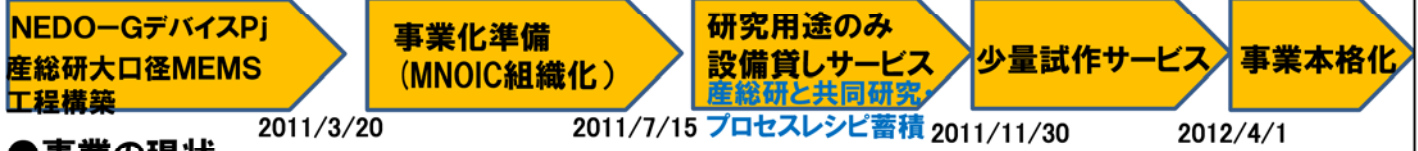
重要



重要

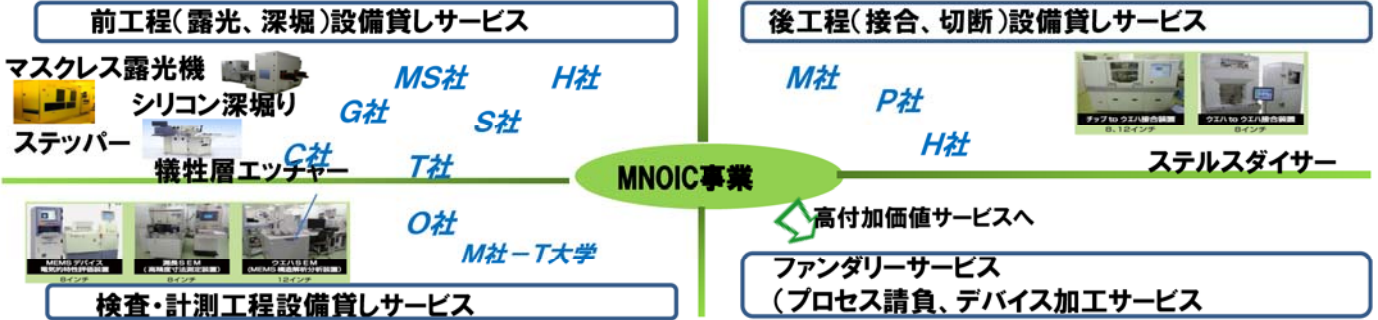


8インチMEMSラインの産業界への有効活用(実用化スケジュール)



●事業の現状

1. 初ロット(20枚)サービス完了(2011/10/28)
2. 大口径対応及び対投資効果の魅力

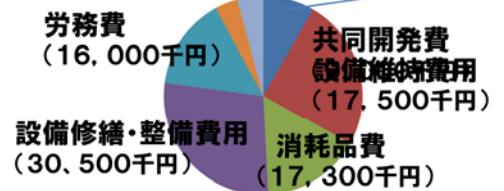


●事業内訳

H23, 収入
108,150千円



H23, 支出
108,150千円



「異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト／ 高機能センサネットワークシステムと低環境負荷型 プロセスの開発」 事後評価分科会資料

ープロジェクト詳細説明ー
平成23年11月28日

高機能センサネットワークシステムの開発

- ・半導体クリーンルームセンサネットワークシステム開発
- ・8インチMEMSプロセスラインの構築
→スマートプロトタイピング技術開発
- ・植物工場センサネットワークシステムの開発

＜高機能センサモジュール技術開発＞

- ・センサモジュール
- ・低消費電力LSI
- ・新センサデバイス原理
 - (i) ナノ構造ガスセンサ, (ii) 低消費電力センサ・無線モジュールへの検討
 - (iii) パーティクルセンサのMEMS化, (iv) 汚染ガスセンサ開発,
 - (v) 振動発電を中心とした小型高効率発電デバイス,
 - (vi) センサ用パワーマネジメントデバイス,
 - (viii) 高感度温度センシング用機能薄膜

研究の概要

- 産総研つくば3D/3B/2G棟にエネルギーマネジメント統合管理システムを開発・導入！
- 検証用クリーンルームにて、1990年度比CO2_60%削減の検証を行い、目標を達成！
- 産総研つくば3B棟にClean On Demand空調制御システムを開発・導入！

技術内容

■ エネルギーマネジメント統合管理システム

- ・見える化項目として、エネルギーおよびエネルギーに影響を与える項目の見える化を実現！
- ・いつでも、どこでも、だれでも、簡単にクリーンルームのエネルギーに関する情報が共有できるようにユーザフレンドリーな情報端末(iPad)を採用！

■ CO2_60%削減について

検証用クリーンルームにて、パーティクル、温湿度に関する基本データを取得し、その知見を空調自動制御(On Demand制御)システム開発に反映！

クラス10、100、1000クリーンルームを擬似的に再現し、塵埃負荷および熱負荷を与えた時のパーティクル量、パーティクル拡散量、温度上昇などの基本データを取得し、1990年度比、CO2_60%削減の検証を実施！

■ エネルギー最適_空調(FFU)自動制御システム(Clean On Demand)

パーティクル量に応じたFFU (Fan Filter Unit)自動制御システムを導入！

用途

■ エネルギーマネジメント統合管理システム

クリーンルームにおけるエネルギーの見える化を行い、クリーンルームのエネルギー削減に繋げる。

■ Clean On Demand空調制御システム

クリーンルームにおける空調機をパーティクル量に応じて自動制御することにより空調電力の削減に繋げる。

目標：

- エネルギーマネジメントシステムの導入
- CO2_60%削減の検証@1990年比

成果まとめ：

- 1) エネルギーマネジメントシステム: 400点以上の見える化項目を実現！
- 2) CO2_60%削減の検証: 検証用CRにて検証完了！

成果の具体的説明

■ エネルギーマネジメント統合管理システム

見える化項目

電力量(生産設備、空調設備、付帯設備)、ガス使用量(N2、SF6、C4F8)、純水使用量、温湿度(多点)、設備排気量、パーティクル量(多点)、人在室情報、設備稼働情報。

合計: 441点(3D棟157点、3B棟179点、2G棟105点)

■ CO2_60%削減について

2010年度までに1990年度比: 50%が実現済み。

更に10%を上積みし60%を実現するためには、空調機(FFU)の電力量(≒CO2)64%削減が必要。

検証の結果、空調機電力を64%にまで低下させても、パーティクル量と室内温度が許容範囲以内であることを検証用クリーンルームで実証完了！

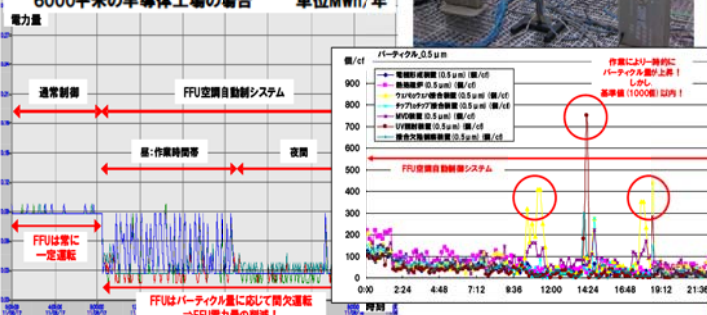
■ エネルギー最適_空調(FFU)自動制御システム

温湿度を満足しつつ、パーティクル量に応じたFFU自動制御システムの実機をつくば3B棟に導入した。



半導体工場(一例)	1990年	2010年	BEANS
冷凍機	6850	3050	3050
冷却水ポンプ	995	590	590
冷却塔	380	260	260
冷水ポンプ	550	300	300
フリークーリング	0	200	200
空調機(FFU)	3700	1800	650
小計	12475	6200	5050
比率	100%	50%	40%

6000平米の半導体工場の場合 単位MWh/年



①オムロンとして事業展開を決定！

- ・オムロン社内にて、BEANS研究所Gデバイスでの研究成果とともにオムロン野洲工場での取り組み成果を共有し、事業化する方向で進めることを決定。プレスリリース(日本経済新聞2011年7月9日)済み。
- ・1Stepとして、顧客を絞って、社外での実績を作り上げ、2012年度以降に本格展開を図る。現在、社外顧客に提案中。



野洲工場

②クリーン度に応じた顧客提案！

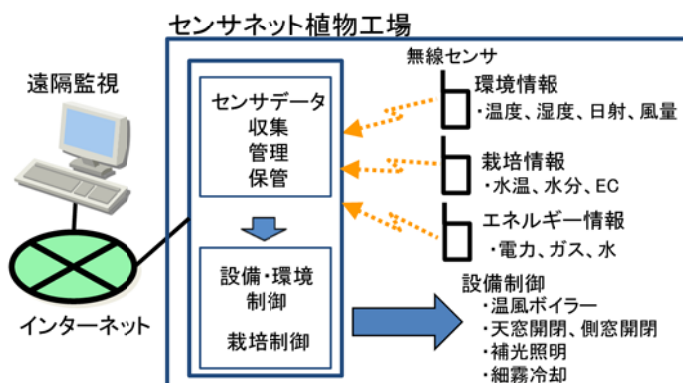
- ・ハイクラスクリーンルーム
 - 電気料金も大きいため、一定規模以上の客先投資金額が見込めるため、数メートル間隔でセンサを設置するシステム構成。
- ・ミドルクラスクリーンルーム
 - 安価なシステム構成とするため、最低限度必要な人感センサとパーティクルセンサでシステム構成。

研究の概要

センサネットを適用した省エネ評価用植物工場を構築し、センサネットの効果及びMEMSデバイスの実用化を検討

技術内容

(1)植物工場の省エネ評価環境構築



(2)植物工場の省エネ制御方式提案

実験内容	A棟(従来棟)	B棟(センサネット)
細霧冷却	・ノズル ・温度とタイマによるオンオフ制御	・ファン+ノズル(2ブロック分割制御) ・温度、湿度を監視してオンオフ制御
補光照明	・ナトリウムランプ ・日射量によるオンオフ制御	・LED(4ブロック分割制御) ・日射量によるオンオフ制御
冬季暖房	・ガスボイラー ・温度によるオンオフ制御	・ガスボイラー+ヒートポンプ(2台) ・温度によるオンオフ制御
土壌灌水	・灌水システム ・タイマーによるオンオフ制御	・灌水システム(3ブロック分割制御) ・土壌水分によるオンオフ制御

植物工場の写真(東京農大世田谷キャンパス)



栽培状況(レタス)



栽培状況(トマト)



目標:

植物工場の省エネを実現する方式の提案

- ・省エネ目標 エネルギー20%削減
- ・植物収穫量 10%改善

成果まとめ:

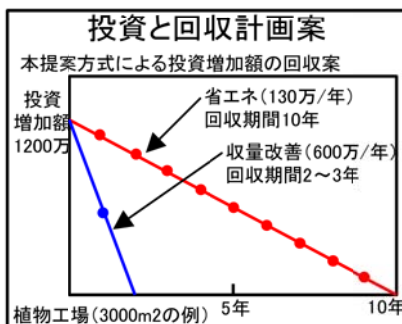
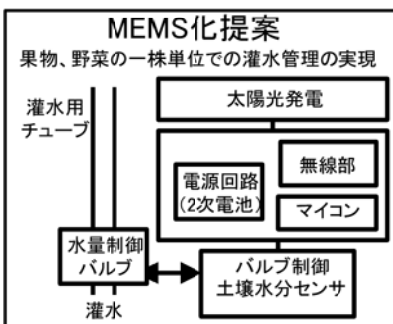
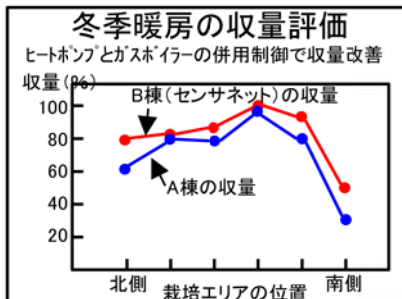
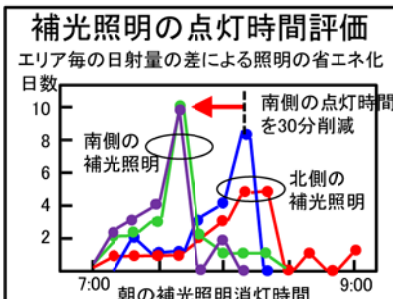
- 1) 植物工場向の省エネ制御方式として、4方式提案
- 2) 省エネ 20%削減、収穫率10%改善
- 3) 灌水ノズルのMESM化提案
- 4) 実用化時の投資回収計画案

省エネ:10年で回収、収量改善を考慮:2~3年で回収見込

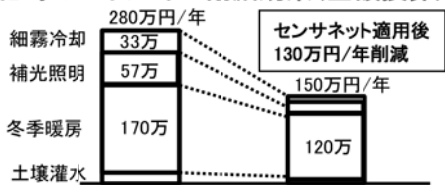
成果の具体的説明

植物工場省エネ実験結果

NO	実験項目	省エネ	秀品率
1	細霧冷却	水の使用量 約75%削減	-
2	補光照明	電力量 約70%削減	リーフレタス秀品率 約10%改善
3	冬季暖房	CO2排出量 約30%~40%削減	リーフレタス秀品率 約10%改善
4	土壤灌水	水の使用量 約80%削減	トマトの糖度 約20%改善



実用化時のエネルギー削減効果(金額換算)



V-75~104 植物工場(3000m2の例)

事業展開

(1)既存植物工場

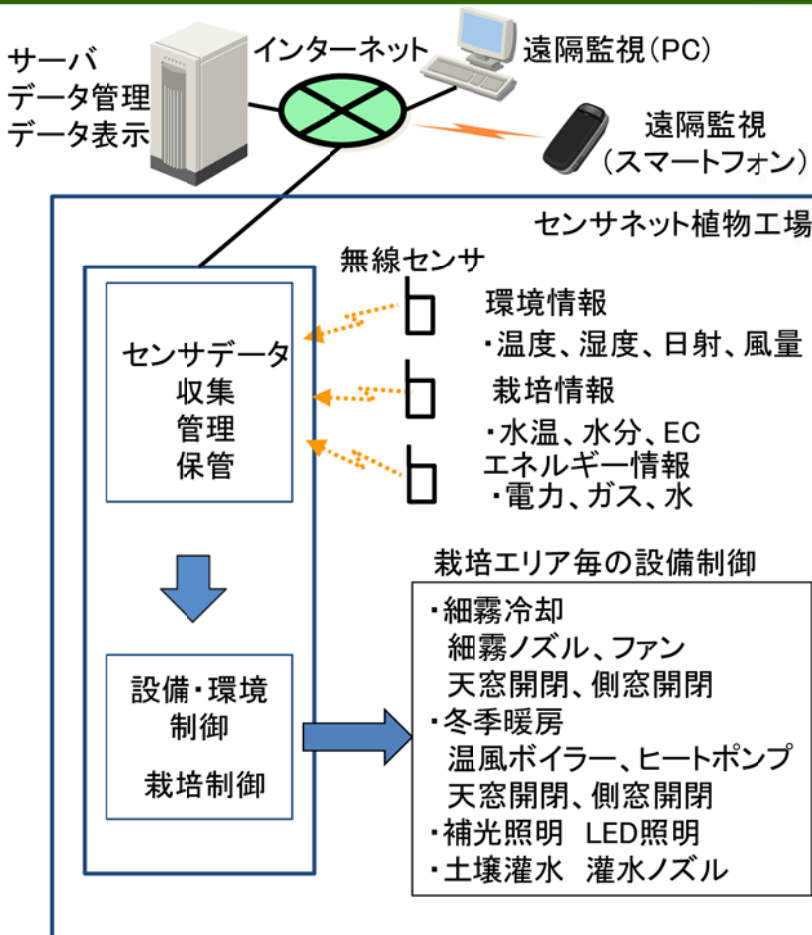
導入が容易な環境、栽培、エネルギー情報計測用センサネットの導入を提案し、植物工場の見える化を推進する。収集したデータは、サーバで管理し、スマートフォン等での遠隔監視に対応する。

(2)新規植物工場

本研究で提案した省エネと収量を改善可能な、細霧冷却、補光照明、冬季暖房、土壤灌水の4つの方式の導入を提案する。どの方式を導入するかは、植物工場の立地条件や栽培する植物に応じて提案する。

(3)露地栽培

環境計測用センサネットは、露地栽培の分野へも提案する。



国内植物工場運営事業市場規模予測



矢野経済研究所推計(2009年)

目標:

クリーンルームの省エネに適したセンサネットワーク用高機能センサモジュール(30mm×30mm×10mm以内)の試作。

成果まとめ:

クリーンルームに適したセンサモジュールプラットフォームを作製。複数のセンサ・無線方式・電池容量から、目的に応じて最適モジュールを構築可能。最小寸法で30mm×30mm×10mmの寸法を達成。

成果の具体的説明

クリーンルームに適したセンサモジュールプラットフォームを作製。(図1)

クリーンルーム内で温・湿度、パーティクル、加速度(ワーク、装置)、気体流量、圧力、等の想定センシング項目をセンシングし無線送信。



[図1]

- 1) 消費電力・電池寿命・サイズ・測定頻度に応じて、図1の基板を活用してモジュールを構成。(図2, 図3)
- 2) 加速度(ワークの移動検知)、気体流量等の常時監視が必要なセンシングについては図1の基板を用いてイベント起動型を構成。(図3)
- 3) 新センサ原理各テーマで構築したセンサ、アルゴリズムの評価に活用できるインターフェースを構築。
(新規購入センサ、位置推定テーマ(RT)での確認)



[図2]



[図3]

開発成果のまとめ

(1) 目標の達成度

・定周期版 平均消費電流	110 μ A	→ 目標どおり	達成
・定周期版 外形寸法(30×30×10mm以内)		→ 目標どおり	達成
・搭載センサ数	3種(最大15種から選択)	→ 搭載3種(最大31種から選択)	達成
準備したセンサ:	温・湿度、照度、フロー(ヒータ式、ピエゾ式)、UV、加速度、ジャイロ)		
無線:	Zigbee、特定省電力(2.4GHz)		
・同時接続モジュール数	定周期 100台	→ 100台	達成
	イベント 50台	→ 50台	達成
・最大通信距離	10m	→ 10m	達成
・サーバ機能		→ 目標通り	達成

(2) 成果の意義

- ・上記寸法内に3種以上のセンサを複数のセンサから選択してコネクタで搭載できる無線方式センサ、モジュールは他に例がない。
- ・センサによっては常時センシングを行い、イベント起動(変化次に信号を送る)タイプも必要である。本センサモジュールは同一回路基板を用いてイベント起動型にも対応している。
- ・センサモジュールは取り付け位置によって、必要なセンシング機能、タイミング等が異なる。実証実験の中で最適なセンサ組合せ、センシング条件の抽出を行う自由度の高いセンサモジュールが必要である。多品種センサの同時搭載が可能な本センサモジュールは本検討に最適なツールである。

(3) 今後の展開

将来的には、環境発電、超低消費電力LSI&無線、イベント起動による待機電力削減等の活用によりメンテナンスフリー(電池レス)化を進めることが普及に向けて重要である。

(4) 論文・特許出願予定

- ・イベント起動型の無線品質向上策(社内調査中)

【事業化見込み】

高機能センサモジュールによって、複数センサ&多点計測による安価で、きめ細かい環境制御が実現でき、省エネルギー化に大きく貢献することができる。

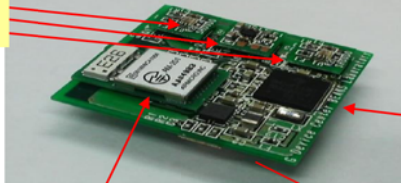
本研究開発の終了後、G/R、製造現場、オフィス等の環境・空調制御による省エネルギー化をターゲットとして実用化に向けて、次の改良を引き続き進める。

- 1) メンテナンスフリー化に向けたバッテリーの長寿命化
- 2) 振動・湿度等に外部環境に耐えられるI/F、センサ等の堅牢な構成



サイズ:30×30mm t<10mm

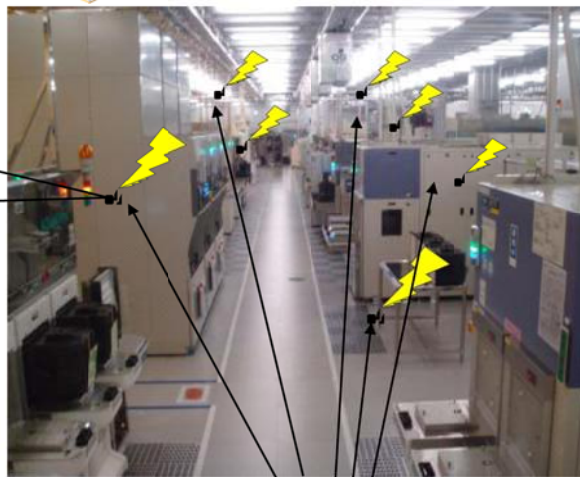
センサ



LSI

無線

電池



センサモジュール

IV-6

■ 研究の概要: 無線センサモジュールの低消費電力化を実現する、実用的なチップ面積と測定精度を有する低消費電力アナログフロントエンド回路の要素技術開発

■ 技術内容:

無線センサモジュールの長寿命化/バッテリーレス化を実現するための要素技術として、低電力アナログ回路技術を開発。

無線センサモジュールにおいて、RF回路に次いでピーク電力の大きいアナログ-デジタル変換回路(ADC)を中心に、アナログフロントエンド(AFE)回路(図1)の消費電力削減技術を開発し、試作実証(図2)。

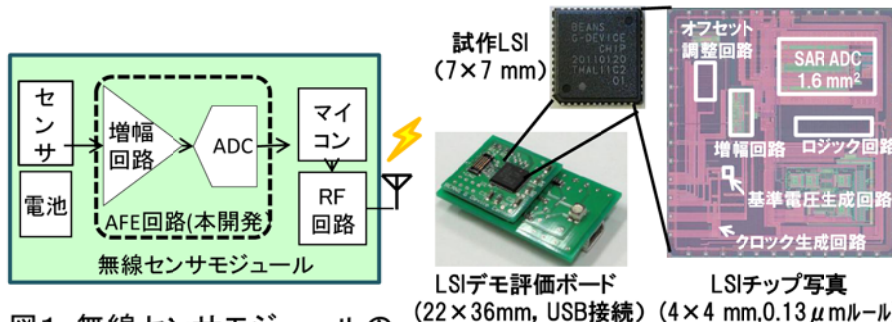
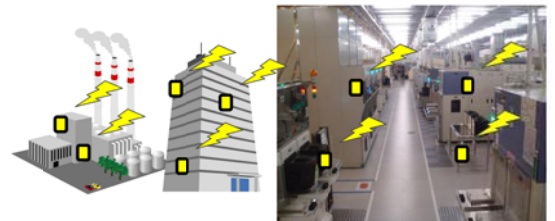


図1: 無線センサモジュールのアナログフロントエンド回路

図2: 試作LSIおよび小型デモボード

■ 用途:

AFE回路はセンサシステム構築に必須であり、センサを使用するモジュール・装置・システム全般へ応用可能な基盤技術と成り得る。



HEMS、BEMS他、都市・産業システムの無線センサネットワークシステム



自動車や医療産業機器等のセンサ制御

● 低消費電力LSI(2)

目標:

センサモジュールの長寿命化を目標とした、低消費電力アナログ回路の要素技術開発を行う。センサ信号を増幅・デジタル化するAFE回路LSIを試作し、課題を抽出する。

成果まとめ:

アナログ回路部をデジタル補正することにより、世界最高クラスの低電力性能(2mW)で有効分解能11.7bitのADC回路を小面積(1.6mm²)で実現した。本回路により、アナログフロントエンド回路の消費電力を60%削減できる見通し。

1) アナログ回路の製造ばらつきをデジタル補正することにより、低電圧(1.2V)かつ高速サンプリング(1 μsec)動作のADCを設計し、

■消費電力 2mW、有効分解能11.7 bit

⇒世界最高クラスの低電力性能

■回路実効面積 1.6mm²

⇒一般的な同等性能ADC比で90%以上低減を試作・実証した。

2) 無線センサモジュールの間欠測定動作を想定した場合、AFE回路全体で、

■平均消費電力 ~10 μW以下(1回測定/秒)

の見込みを得た。

⇒従来比60%以上の消費電力削減の見通し

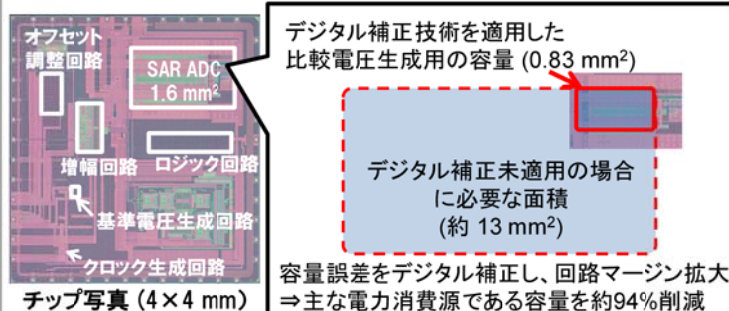


図: 試作LSIとデジタル補正による面積縮小効果

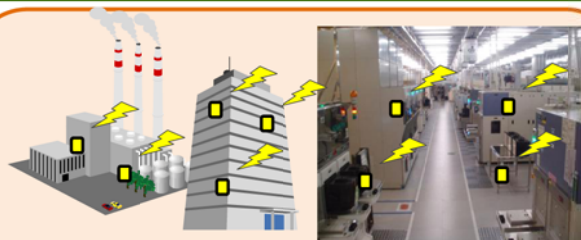
表: ADC性能 (@ サンプル速度 1 μsec)

項目	目標	設計SIM	実測
実効面積 (mm ²)	2.25	1.6	
消費電力 (mW)	5	3	2.06
実効分解能 (bit)	11	~12.5	11.7

■国際学会2件発表: GDMS2011 (2011/2), DTIP2011 (2011/5)

● 低消費電力LSI(3)~実用化見通し

本開発技術をIPプラットフォーム化し
各種センサ応用システムへの適用を検討



HEMS、BEMS等都市・産業システムの
無線センサネットワークシステム

センサ用アナログ回路
IPプラットフォーム



自動車や医療産業機器等のセンサ制御

試作LSI (7×7 mm)
LSIデモ評価ボード (22×36mm, USB接続)
USBコネクタ

低電力・高精度
アナログフロントエンド回路技術
(本開発)

NMEMS研究成果
TIAを活用した開発

位置づけ・目標

1) ターゲットガスの選定

有機ドラフトで使用するガスがSnO₂ガスセンサで検出可能か確認しターゲットガスを選定する

2) センサ小型化及び性能検証

トレンチにSnO₂粒子をポーラス状に埋め込み、センサ部の面積を1/2以下の省スペース化とセンシング感度維持を両立

3) 粒子配列プロセスの大面積化

プロセスの大面積化に伴う課題抽出を行う。

主な成果とその意義

1) ターゲットガスの選定

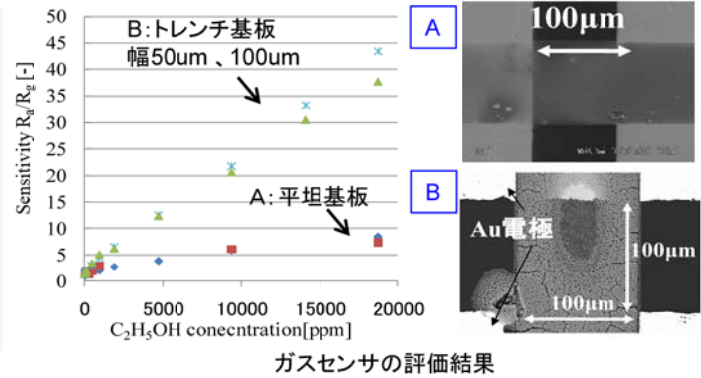
エタノール、アセトン、IPA、シクロヘキサン、トルエン、ヘキサン、クロロホルム、DMF、PGMEA が検出可能。エタノールをターゲットにデバイスの評価実施

2) センサ小型化及び性能検証

センササイズを1/2にし、平坦基板に作製したサンプルと比較してエタノールに対する感度が向上

3) 粒子配列プロセスの大面積化

メソスカ先端部への微粒子供給を阻害しないような容器設計が課題



実用化の見通し

本研究では、堆積材料の拡張性やローコストプロセス等に期待の高いディップコート法を用いてガスセンサを作製している。したがって、検出する対象ガスに合わせて材料を容易に変更する点や、複数ウエハの同時一括処理を実現できる可能性がある為、CR周辺のドラフト溶媒検出用途のみならず幅広い用途に適用できる可能性があり、同時に高い生産性も期待される。しかしながら、ウエハレベルのプロセスには、課題点もあり現状センサをヒーター一括型のMEMSガスセンサへ適用すると数年は要すると考えられる。

位置づけ・目標

<オムロン>

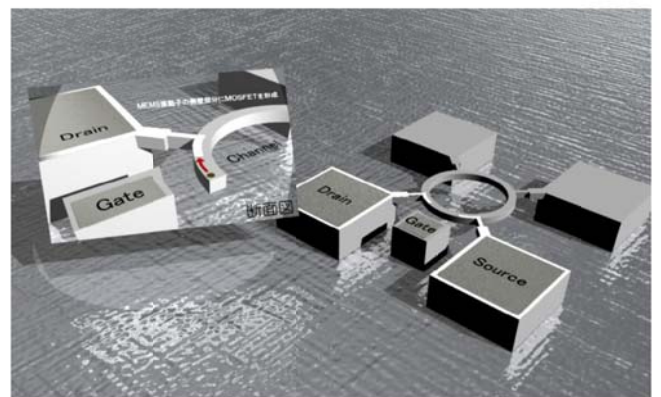
中性粒子ビームをデバイスに適用することで、高効率な容量型センサや高効率高周波デバイス、そしてさらなる小型化・低消費電力化が期待される。本研究ではデバイスの試作を通じて課題検証する。

主な成果とその意義

成果まとめ:

1) 世界で初めてMEMS等価回路設計技術を用いた独自の設計ツールを構築し、MEMSとトランジスタのいいとこ取り設計を実施。寸法や構造について指針を示した。

2) デバイスの試作を通じて、プロセス課題を明確にできた。



実用化の見通し

本デバイスは、MEMSとトランジスタの集積による特徴的な特性を活かし、SAWやFBARなどの高周波デバイスにかわるチューナブルバンドパスフィルタの実現や加速度センサやジャイロセンサなどにも応用し周辺部品点数削減・低消費電力化などが期待できる。特にチューナブルバンドパスフィルタは、マルチバンド化した携帯電話・スマートフォンなどの携帯端末市場においてニーズが高く、数百億円規模の市場であるため、事業化するメリットは非常に大きいと考えられる。また、加速度センサやジャイロセンサなどにおいてもセンサネットワークの省電力化ニーズが高いことから同様に期待できる。

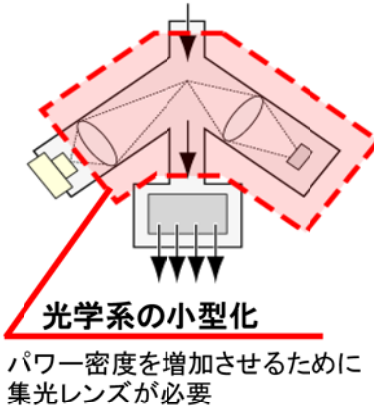
位置づけ・目標

CR内センサネットのキーデバイスであるパーティクルセンサ小型化へ向けて検出方法の検討・原理確認を行う

主な成果とその意義

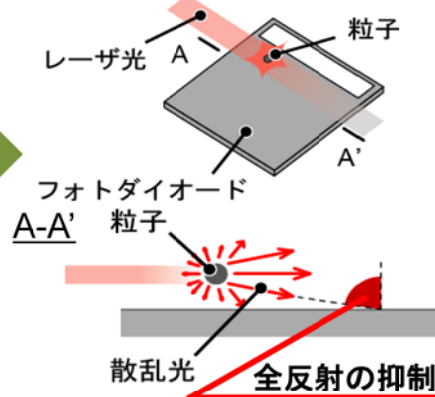
特許:3件 学会発表:国内学会1件, 国際学会1件

従来のセンサ

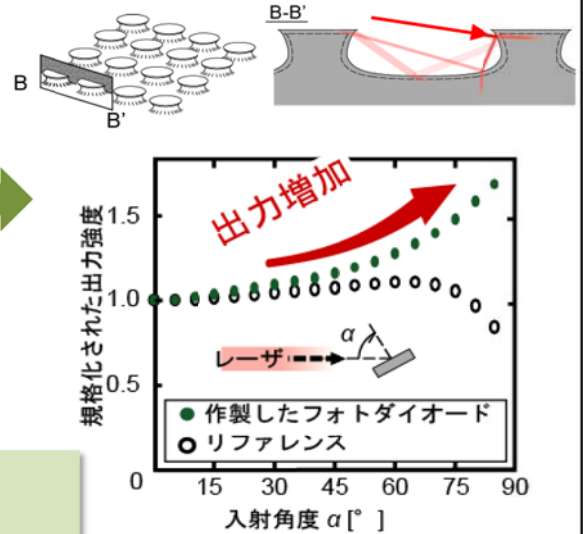


センサ構造の提案

ミー散乱の前方散乱の利用



要素技術の原理確認



光学系小型化の要素技術開発に成功
⇒ パーティクルセンサ小型化の可能性を示した

実用化の見通し

現在; レンズなし構成の可能性を見出せた

今後; 本構成案実現のため、課題検討を実施し
小型、低消費電力パーティクルセンサを目指す

➔ SIIで持っている **センサネットへの適用** なども含め実用化を目指す

目標: 小型化の課題であるパーティクルの検出方法を複数比較・検討し、その結果に基づき試作および検出原理の確認を行う。また、小型化に伴い、少量サンプルからのクリーン度を統計的に見積もる方法を検討する。

成果まとめ:

- (1) 検出方法の比較検討を行い、光学量計測方法の優位性を示した。
- (2) 小型パーティクルセンサの要素技術、特に、マイクロ構造を有するフォトダイオードの試作・評価を行った。
- (3) センサの計測可能なクリーン度をセンサの形状などから見積もる方法を提案した。

特許:3件 学会発表:国内学会1件, 国際学会1件

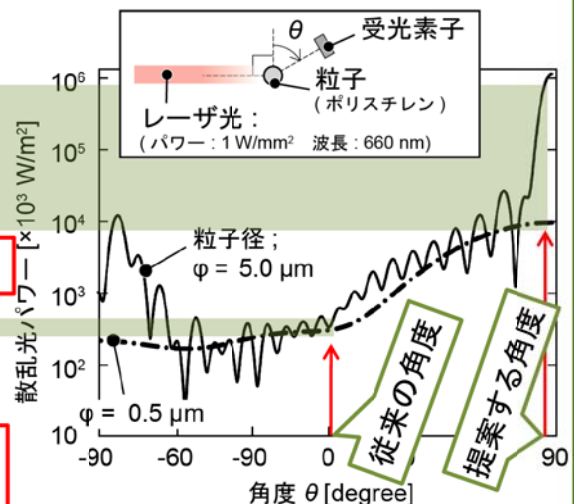
成果の具体的説明 (1)検出方法の比較検討

検出方法の比較

検出方法	感度	寿命	小型化
電気特性計測型	× (信号変化率が約 10^{-7})	△	○
質量計測型	○	× (18時間で感度約1/10)	○
光学量計測型	○	○	△ (光学系が大)

数字は典型的な粒子・センササイズを仮定して計算

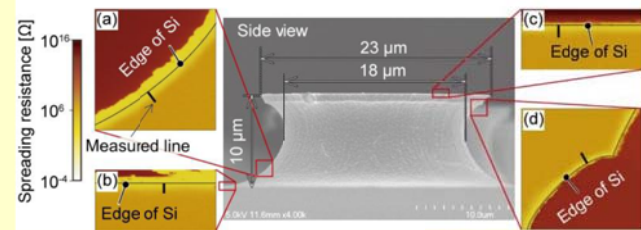
ミー散乱の空間強度分布をシミュレーション



90度付近の散乱光を検出する光学系に変えることで、従来の約100倍の散乱光を検出可能

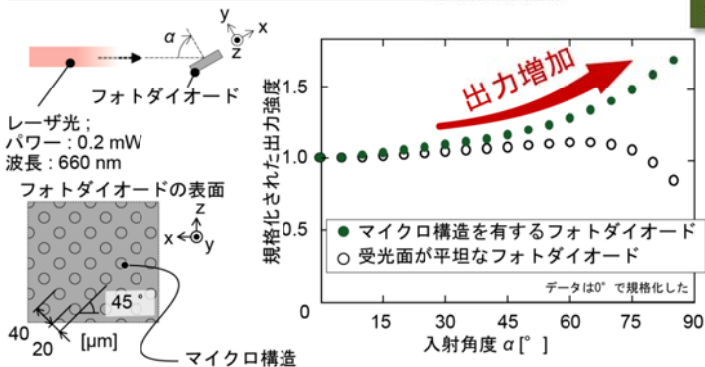
成果の具体的説明 (2)要素技術の試作・評価

① 作製したマイクロ構造

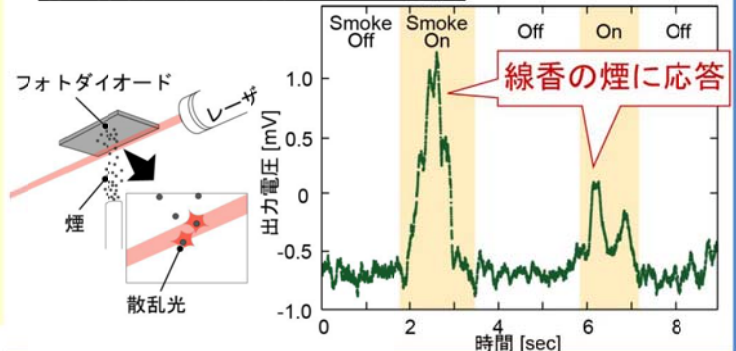


- ・ 逆テーパ構造作製プロセスを実現
- ・ マイクロ構造全体にドーパ層形成を確認

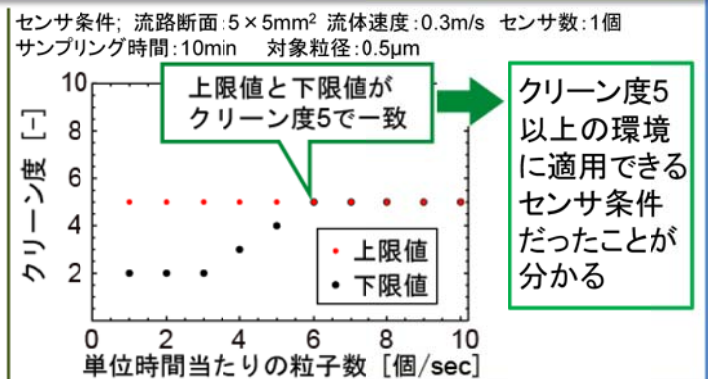
② 光の入射角度に対するPDの受光強度



③ 線香の煙に対するPDの応答



成果の具体的説明 (3)センサ条件とクリーン度



位置づけ・目標

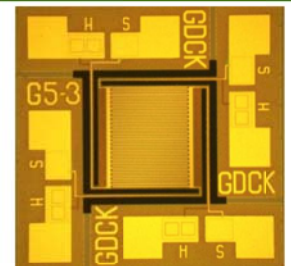
クリーンルーム内汚染ガス(酸・アルカリ系)をppbレベルで計測可能で省エネルギーなWO₃を用いたガスセンサの開発

主な成果とその意義

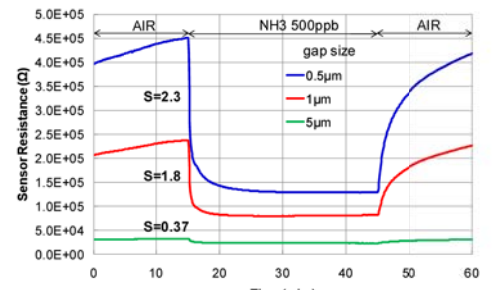
- MEMSセンサチップ最適化設計により、高感度・低消費電力ガスセンサを実現
 - ・ 検出限界NH₃=2ppb、H₂S=0.02ppbの高感度ガスセンサの実現
 - ・ 従来のMEMS構造に比べ、消費電力を1/15に低減
- スパッタ成膜によるWO₃薄膜センサの性能確認
 - ・ H₂Sはppbレベルで検知可能
 - ・ 従来のWO₃膜に比べ、最適動作温度が大幅に低く、更なる消費電力の低減に効果的
- ナノギャップ櫛歯電極による高感度化の効果確認
 - ・ 櫛歯電極のギャップサイズを5μmから0.5μmにすることで、感度が約6倍向上

実用化・事業化の見通し

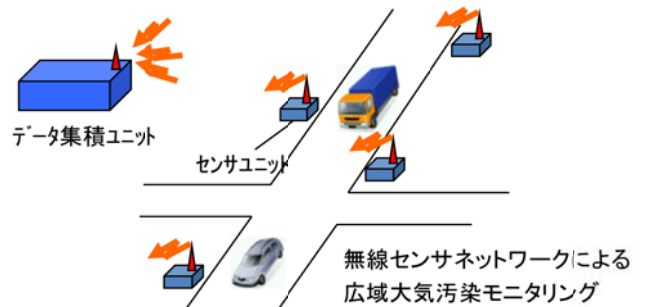
- 【高機能センサネットワークアプリケーション例】
- ・ クリーンルームの消費電力削減のためのドラフトの排気量制御
 - ・ 都市環境の広域大気汚染モニタリング
 - ・ 工場・オフィス等の室内の換気制御



試作したMEMSセンサチップ



ナノギャップ櫛歯電極センサのNH₃感度評価結果



位置づけ・目標

垂直エレクトレットの新しい高速荷電方法の開発を目指すとともに、小型化に有利な櫛歯型エレクトレット発電機の原理検証を行う。

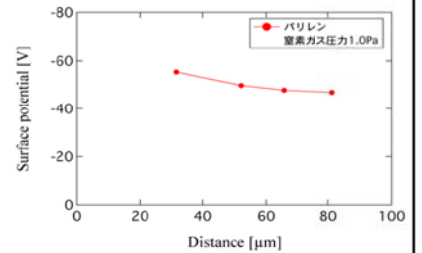
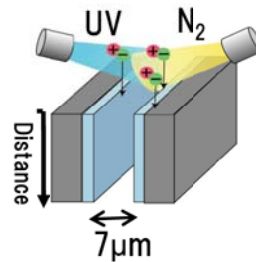
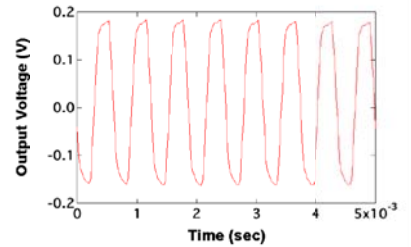
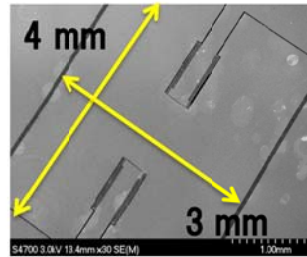
主な成果とその意義

<成果まとめ:>

- 1) 真空紫外線による電離を用いた荷電法を開発し、コロナ荷電、軟X線荷電よりも極めて高速に荷電できることを明らかにし、当初目標を達成した。
- 2) プロトタイプの発電実験により3nWの出力を得て、モデル計算との比較から原理確認した。

<意義>

真空紫外線を用いた高速荷電を用いることにより、実用的な荷電時間で櫛歯状の垂直エレクトレットへ形成することが可能になった。垂直エレクトレットを持つMEMS発電機が実現できたことにより、組立が不要となり、低コスト化、小型化が容易になった。



実用化の見通し

垂直エレクトレットを用いたMEMS発電機は、低コスト化が可能であり、産業技術としての適用可能性が拡大した。今後は、低共振周波数化、エレクトレット材料の改良などにより、発電機の発電性能を上げ、実用化へ向けて取り組んでいく。

位置づけ・目標

電池持続時間、センシング頻度もしくは連続センシング時間に制限のないセンサーネットワーク端末を実現するための基盤技術として、センサネットワーク端末をイベントの発生に応じて必要なときに動作させる起動スイッチについて検討する。

主な成果とその意義

1) 起動スイッチの低消費電力化の検討

起動スイッチとしてセンシングに電力を消費しないPZTを用いたフローセンサの開発を行い(図1)、ほぼ線形な出力特性を確認した(図2)。

2) 起動スイッチ向け無線検討

起動スイッチを用いた無線端末では、実用的な条件において、ボタン電池で電池寿命5年以上を実現できる可能性を示した(図3)。

3) 起動モジュールと無線部の要求仕様の策定

起動スイッチを用いた端末の無線部に対する要求仕様を策定した。

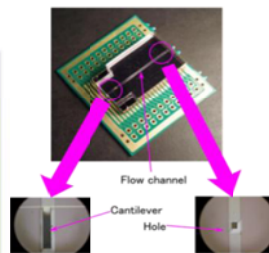


図1 起動スイッチ外観

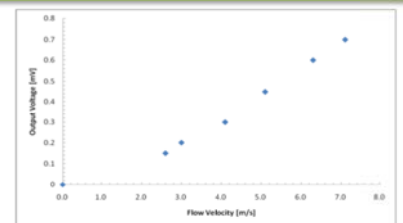


図2 フローセンサ出力特性

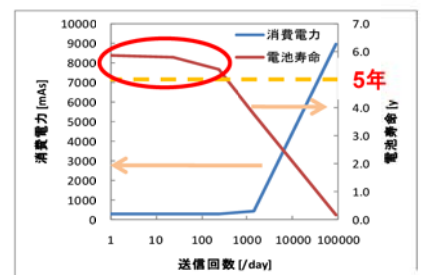


図3 送信回数に対する電池寿命の変化

実用化の見通し

本研究で開発した起動スイッチは、センサネットワーク端末はもちろん、センサ全般に適用可能な基盤技術であり、起動スイッチなしでは、電池寿命の問題からセンサーネットワークは実現は困難である。本開発で起動スイッチがセンサ端末の電池寿命向上、メンテナンス性に対して有効な画期的技術であることが示せた。そこで、まずは本技術の実用化、事業化に向け課題となる、起動スイッチとセンサのユニット化、システム化を検討し、早期実用化を目指す。

位置づけ・目標

<パナソニック電工>

人の存在や位置情報を正確に検出し照明、空調等を最適運転できる集積化自立センサネットワークモジュールを目指し、キーとなる温度センサや自立発電デバイスに向けた非鉛系強誘電体薄膜を開発する。

主な成果とその意義

非鉛系薄膜の作製

スパッタ法によりBaTiO₃の成膜基本条件を確立し、MgO基板上に高いc軸配向性を持つ膜を得た。

強誘電体特性

自発分極：10uC/cm²、抗電界：20kV/cm

焦電係数：20nC/(cm²・k) → Si上のPZT膜と同等性能

⇒ 温度センシング用薄膜としての可能性を見出した。

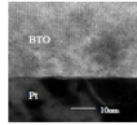


図1 BaTiO₃薄膜の透過電子顕微鏡写真

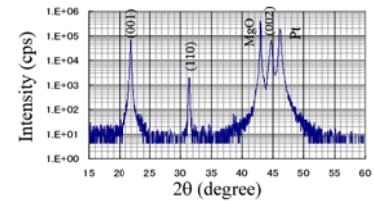


図2 BaTiO₃薄膜のX線回折図形

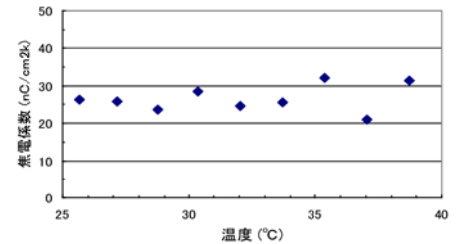


図3 BaTiO₃薄膜の焦電係数の温度依存性

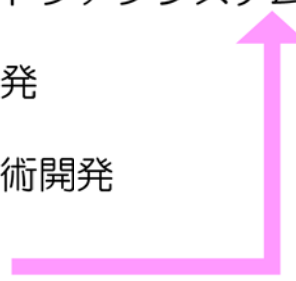
実用化の見通し

パナソニック電工においては既に、非鉛系材料を用いたバルク焦電体からなる人感センサを開発し、センサユニットおよびセンサ搭載照明器具を販売している。またMEMS技術を応用した圧力センサ、加速度センサも販売しており、MEMSデバイス製造販売に関しては豊富な実績を有している。今後、本プロジェクトで開発した技術をベースに、低環境負荷である非鉛強誘電体薄膜を応用し、省エネ化が可能でかつ快適空間創出につながる照明・空調制御を主としたセンサネットワークモジュールの開発を進めると同時に市場性を判断して、数年後をメドに実用化・事業化についての見通しを立てる。

V-306~317, IV-10, 11

低環境負荷型プロセスの開発

- ・低環境負荷ポリマー・センサ融合プロセス技術開発
- ・スマートプロトタイピング・スマートファブシステム技術開発
- ・低環境負荷型深堀エッチング技術開発
- ・低環境負荷型集積化プロセス基盤技術開発
- ・スマートファブシステム技術開発

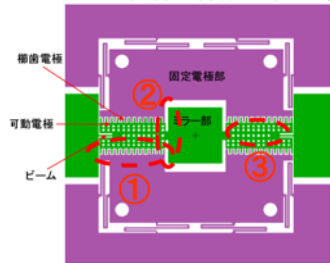


研究の概要:

アクチュエータMEMSデバイス(静電型ミラーデバイス)を2回に渡り製作し、アクチュエータ駆動電圧、ミラー部反射率、ミラー部表面粗さの特性を評価する。アクチュエータMEMSについては、性能予測が可能なシミュレーション技術及びナノインプリントによる製造プロセスを開発する。

技術内容:

1)ポリマー材料の特徴である大変位を活かす静電型ミラーの構造設計(図-1)



- ①可動電極部(可動歯)と固定電極部(固定歯)からなる垂直静電アクチュエータはミラー部の両側に対称に配置し、固定歯を押し下げて、可動歯と固定歯の間に段差がつくように設計した。
- ②振れ角度が大きい場合でもミラーの平面性がほぼ保持されよう、アクチュエータ部とミラー部の間にスリットを配置した。
- ③可動支持体に変位応力分散用に多数のダンパーを配置し、低消費電力駆動を可能にした。

・特許出願 1件(現在手続き中)

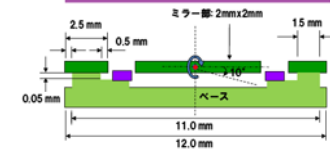


図-1 静電型ミラーデバイスの構造

2)製造プロセスの開発

成型装置、接合装置及び研磨装置の新設による4インチ試作ラインを構築し、静電型ミラーデバイスの基本製造プロセスを確立する(図-2)

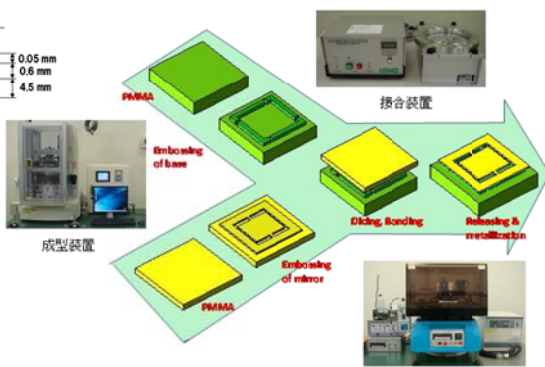
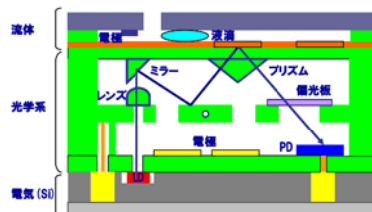


図-2 4インチ試作ライン

用途

ポリマー化の有用性

- ・高機能化(脱シリコン、材料特性より機械特性向上)
⇒シリコンに比べて同じ大きさで大きな角度
- ・低コスト化(ホットエンボス加工)
⇒シリコンプロセスと比べて約1/10の製造コスト
- ・生体適合性
- ・低廃棄時負荷、高リサイクル性



■ ポリマー化した部品
ポリマー化した高機能モジュール例

目標:

アクチュエータMEMS(静電型ミラーデバイス)を製作し、以下の項目に対し性能評価を行う。①駆動電圧:30V以下、②ミラー部反射率:90%以上、③ミラー部表面粗さ:100nm以下

成果まとめ:

- 1) 静電型ミラーデバイスの性能評価
 - ・駆動電圧、ミラー部反射率、ミラー部表面粗さは目標値をクリアした。
- 2) 製造プロセスの開発
 - ・静電型ミラーデバイスの基本製造プロセスを確立することができた。シリコンプロセスとの比較において、CO2排出量は98%大幅削減可能であることが試算できた。

成果の具体的説明

1) 静電型ミラーデバイスの性能評価

■ デバイス製作(試作回数3回)

今回開発した構造をインプリント技術にて製作し、従来にない特徴の静電型ミラーデバイスを実現した。(図-3)

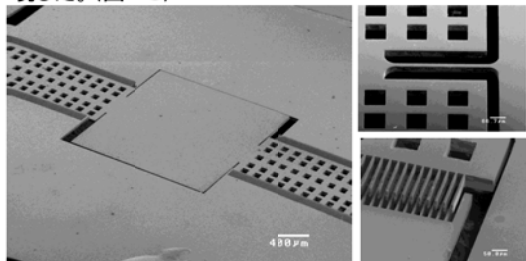


図-3 製作した静電型ミラーデバイスのSEM写真

① 駆動電圧評価

ミラー振れ角2.0度を駆動電圧30Vで得ることができた。計算結果とは概ね合致しており、同構造のシリコン静電型ミラーの約1/7~1/8程度である。(図-4)

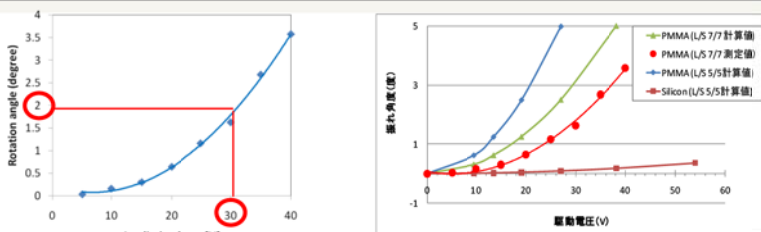


図-4 駆動電圧に対するミラー回転角度

② ミラー部反射率評価

静電ミラーデバイス全面に、反射膜としてAu200nmの成膜を実施し、ミラー部の反射率測定を行った。スカナなどでよく使われる波長1000nm以上で90%以上の反射率が得られた。(図-5)

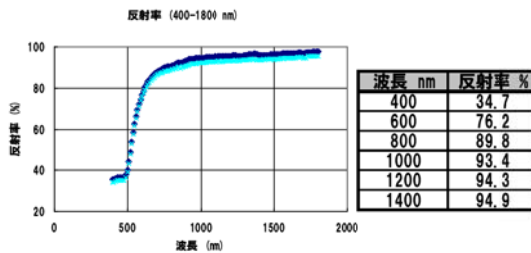


図-5 ミラー部の反射率測定結果

③ ミラー部表面粗さ評価

ポリマーミラーデバイスのプロセスでは、残膜を研磨することで構造体をリリースするが、レーザー顕微鏡による評価ではRa=30nmという良好な結果が得られた。

2) 製造プロセスの開発

構築した4インチ試作ラインを使って、静電型ミラーデバイスの基本製造プロセスを確立することができた(図-6)。成型に用いるNi電鍍金型については、無電解めっき法の適用により20 μ m L&S製作可能な目処が確認できた(図-7)。この製造プロセスは、主にプロセスで使用する温室効果ガスの削減により、シリコンプロセスとの比較において、CO2排出量を98%大幅削減可能であることが試算できた(表-1)。また、製造コスト1/10(静電型ミラーデバイス4インチウエハ3枚/ロット)の目処も得ることができた。

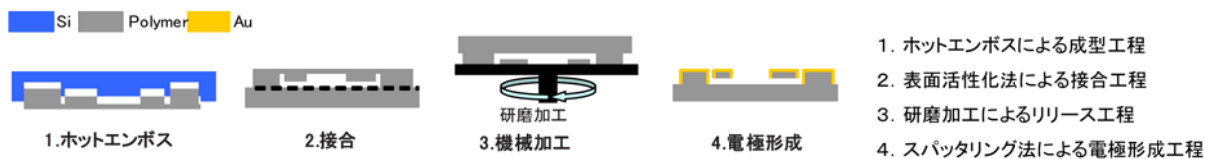


図-6 静電型ミラーデバイスの基本製造プロセス

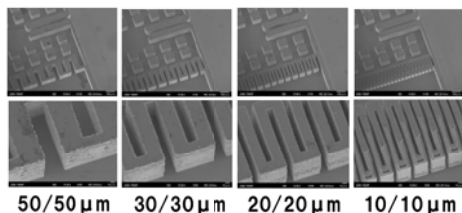


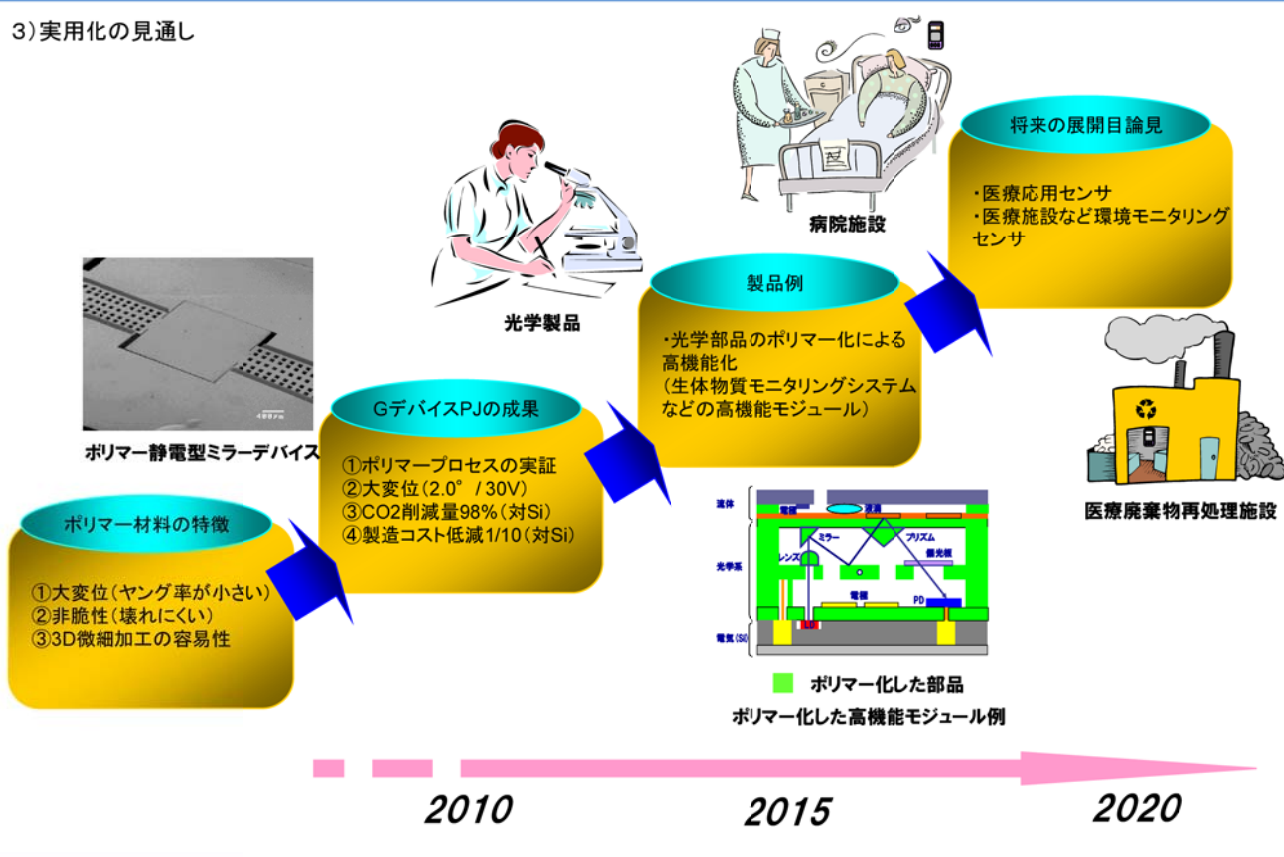
図-7 Ni電鍍金型のSEM写真

表-1 4インチウエハ1枚あたりのCO2排出量

	単位: CO2-kg			対Si削減率(全体)
	プロセス	温室効果ガス	合計	
シリコン	142.3	7,098.1	7,240.4	-
ポリマー(Si型)	121.0	354.9	475.9	93.4%
ポリマー(金型)	121.0	3.5	124.5	98.3%

※温室効果ガスについて現状は、排ガス処理装置にて対処
 ※ポリマー(Si型)の温室効果ガス排出量は、20ショット以上使用可能として算出
 ※ポリマー(金型)の温室効果ガス排出量は、Si型に対し100ショット以上使用可能として算出
 ※温室効果ガス排出量を除いた場合のCO2削減率は約15%

3) 実用化の見通し



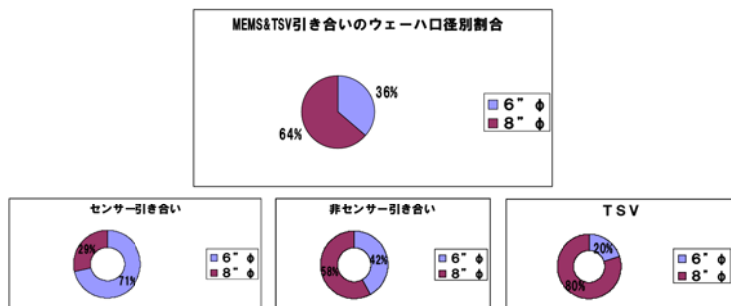
<DNP, パナ電, 東芝, みずほ情報他>

■技術開発の目的:

- ★MEMS大口徑(8インチ化)プロセスプラットフォーム構築による開発・試作から量産化フェーズへのスマートな(低コスト・短期間)移行の実現
- ★8インチMEMS製造プロセスの環境負荷量算出手法の開発と試作デバイスの実評価によるスマートな(デバイス製造の環境負荷を予測、ネットワークを通じた環境負荷見える化)ファブの構築

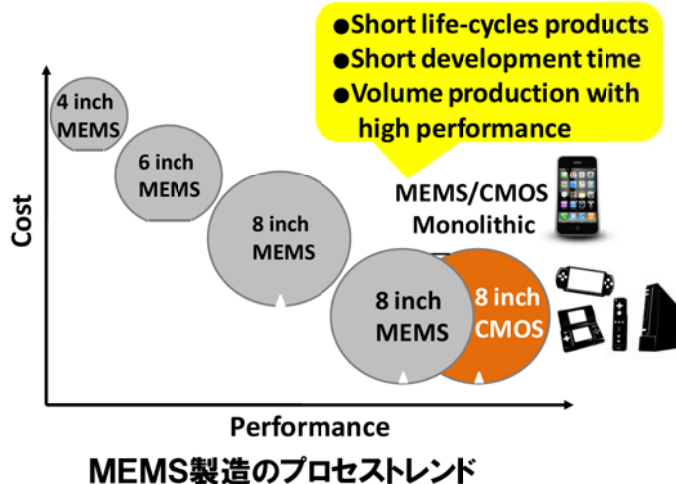
■最先端8インチ試作ライン構築の効果

- ★国内MEMSファンドリとの連携による開発プロセス共有化、ファンドリ少量試作ラインとして共有化
- ★MEMSのプロセストレンド(8インチ化 & CMOSモノリシックへの移行)の促進

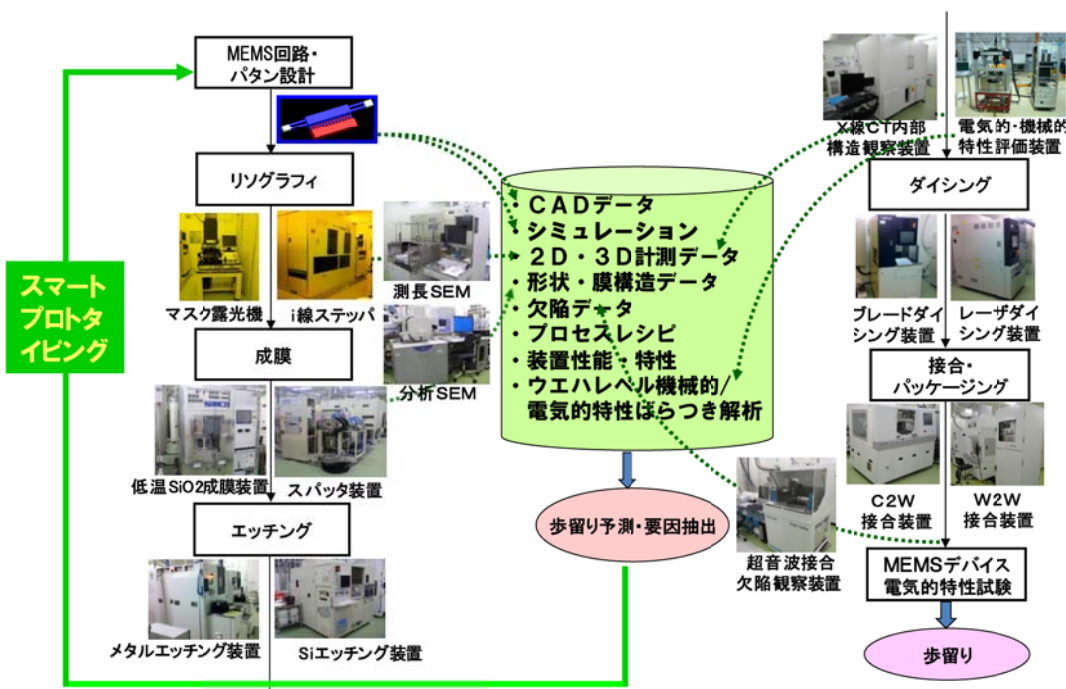


DNPへのMEMS&TSVファウンドリー引き合いは8"φが60%を超える。特にTSVは80%が8"φでの引き合い。12"φの引き合いも有。TSVは半導体プロセスとの親和性が必要であり、大口徑化が必須MEMSでも非センサーで8インチ化が進んでいる。

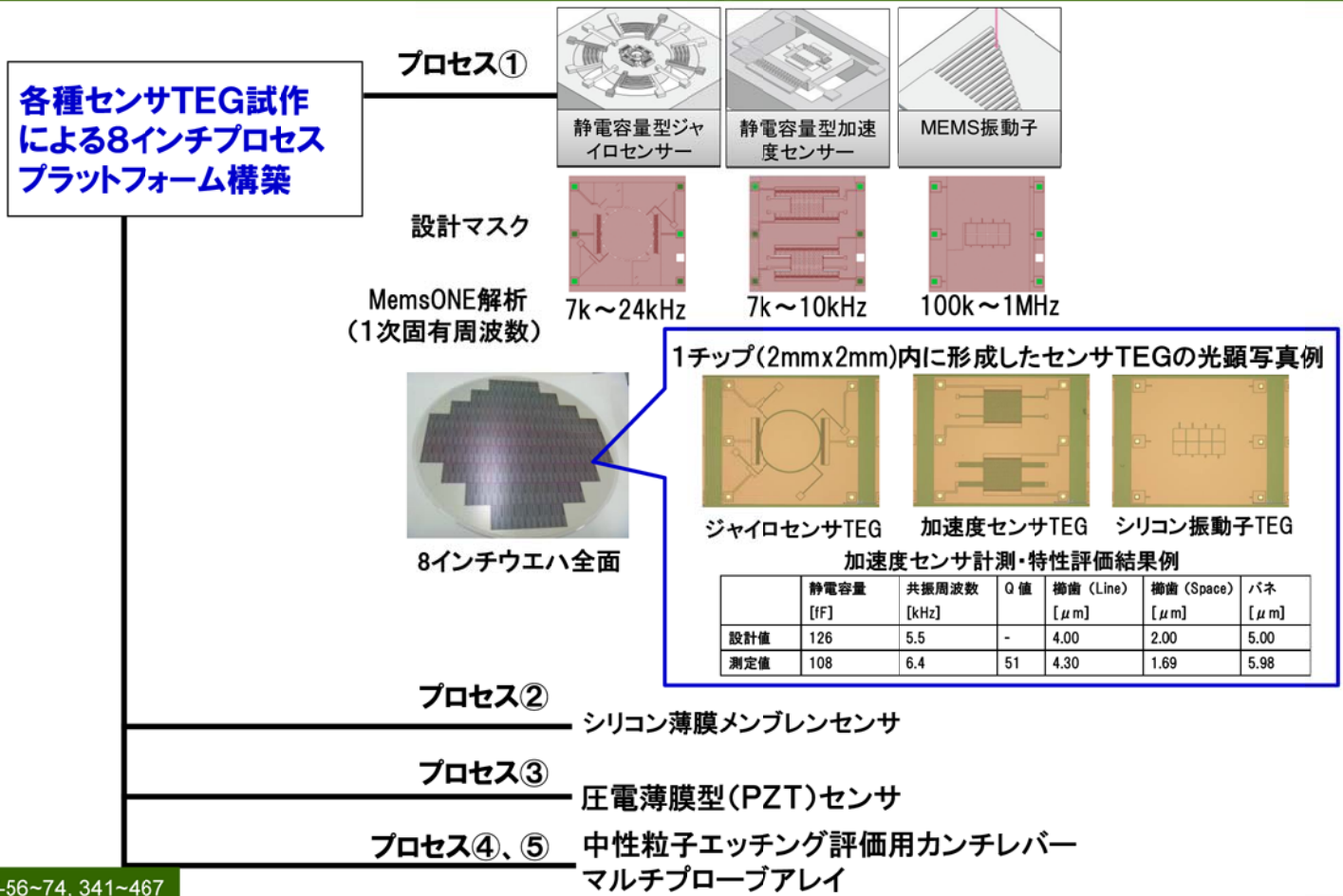
出典:マイクロマシン/MEMS展同時開催TIA-NMEMSシンポジウム Part I
"大口徑MEMS生産の時代来る TIAのMEMS量産技術" 大日本印刷資料より抜粋



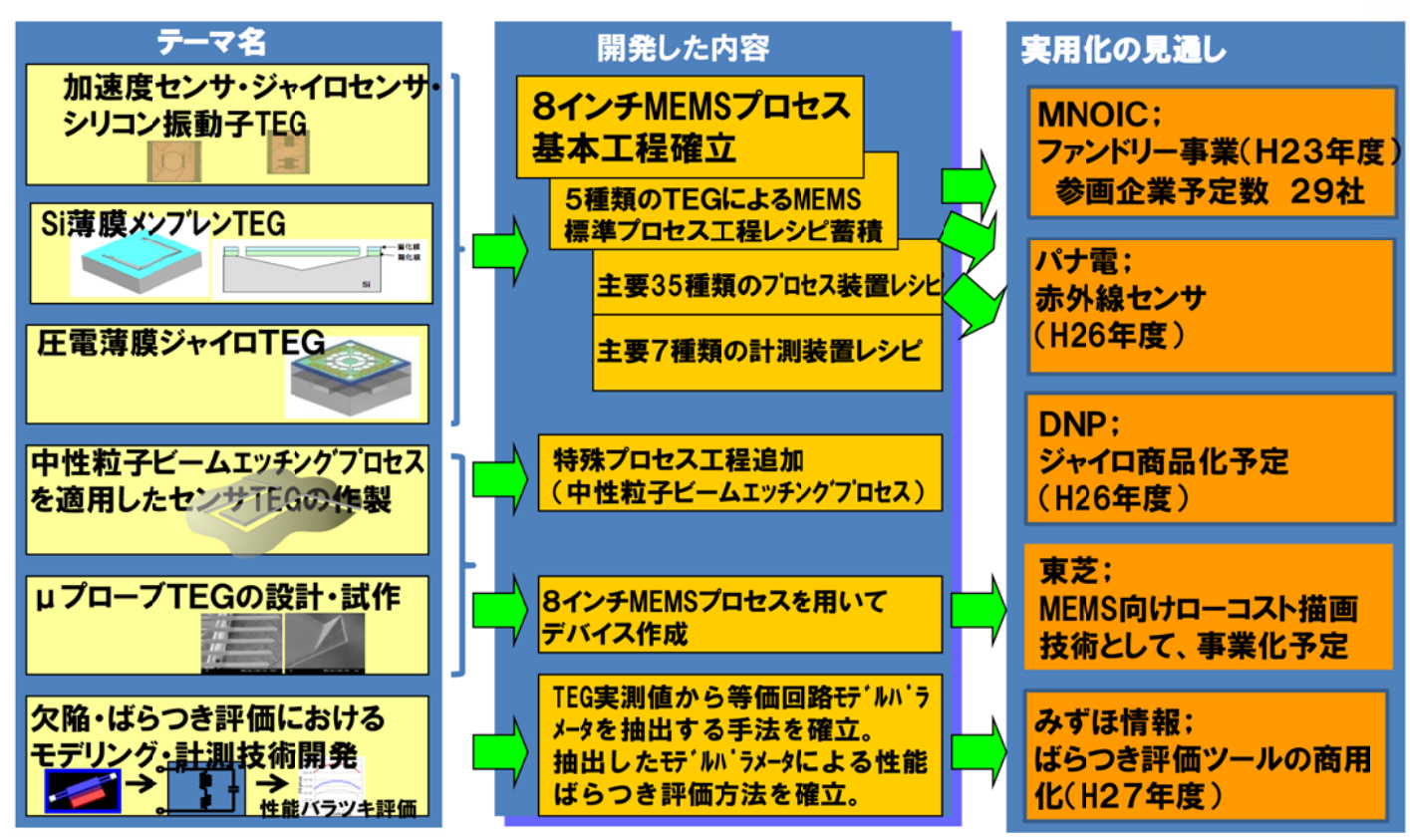
- 研究開発の概要:8インチウエハプロセスにおける高品位プロセスの構築、プロセスレシピの構築、ウエハレベル計測・解析技術の開発、ばらつき要因評価方法の開発
→歩留まり・生産性向上によるMEMSラインの環境負荷低減



8インチラインにおけるプロセスフローとウエハレベル計測・解析評価に基づく歩留り向上の流れ

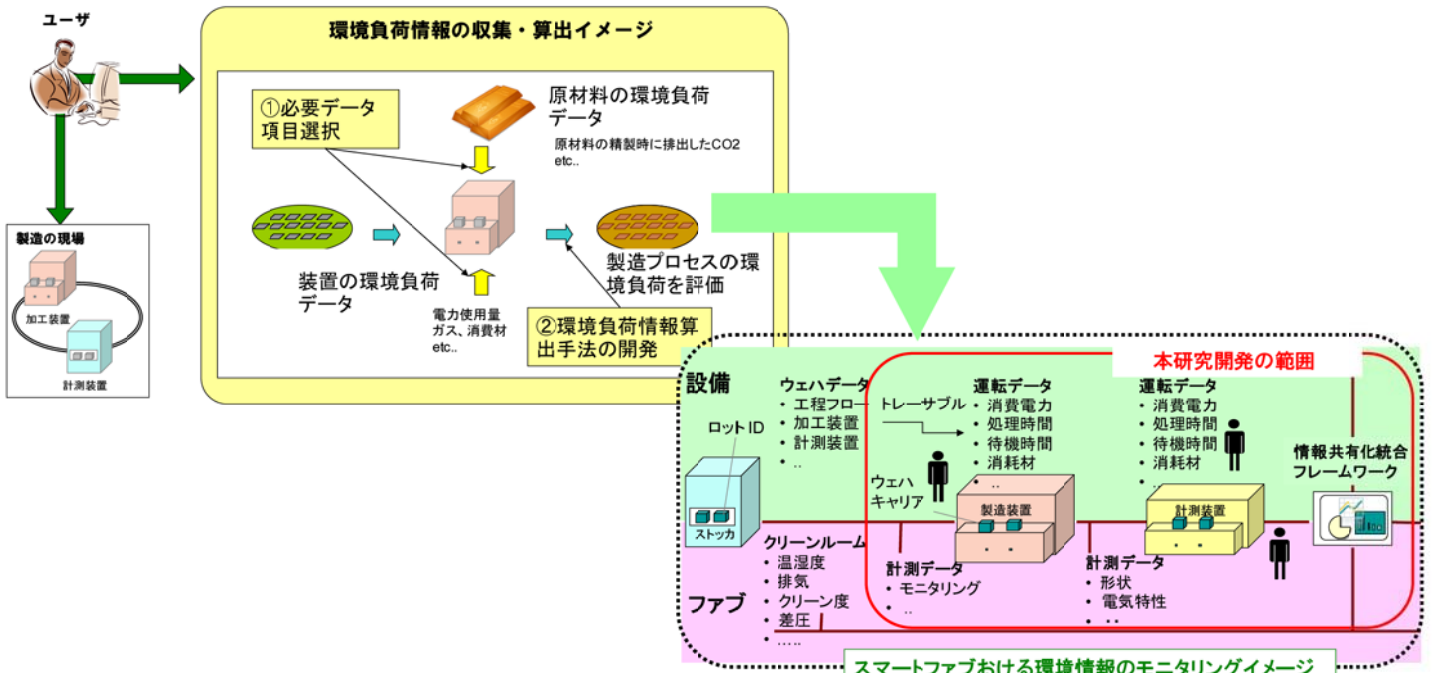


V-56~74, 341~467

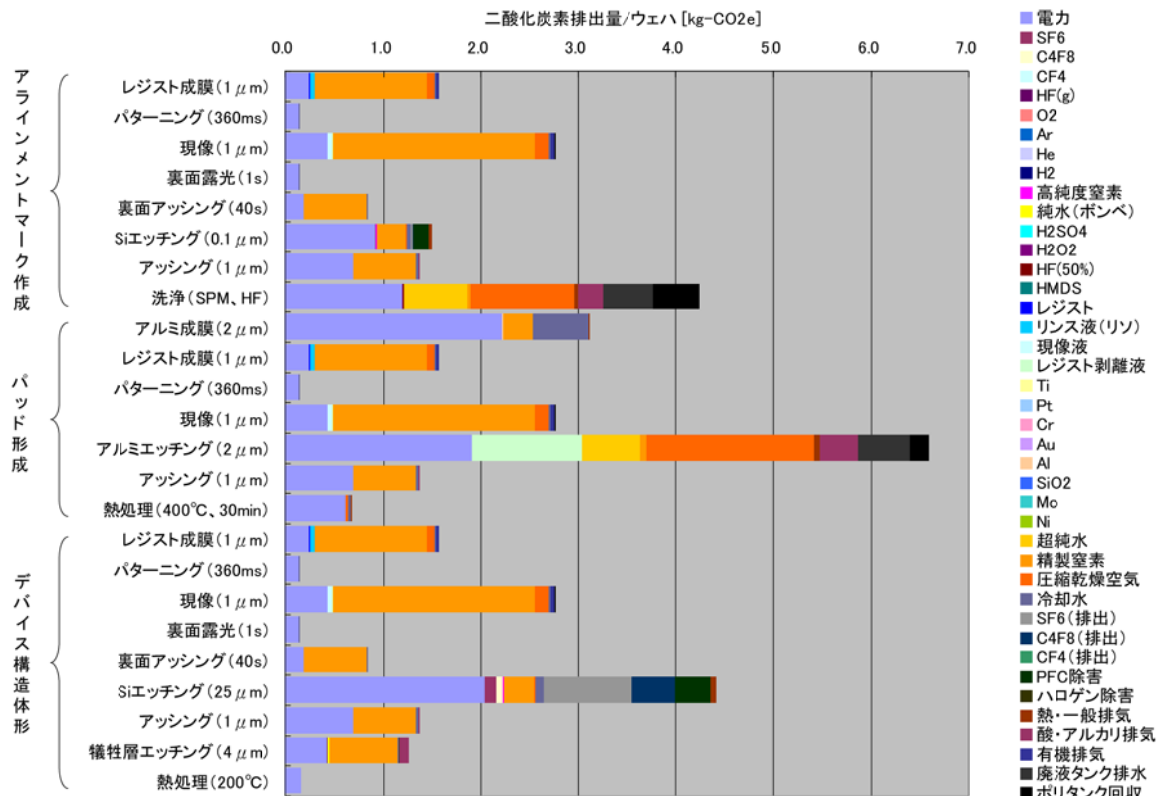


IV-4, 13-14

■研究開発の概要:8インチラインの各装置からの電力使用量、温室効果ガス排出量を収集・管理できるデータフォーマットの開発、MEMS製造プロセスのCO₂排出量算出手法の確立、およびTEGデバイス試作による算出方法の検証
 →プロセス設計最適化による環境負荷低減



MEMS製造のCO₂排出量算定イメージと8インチラインにおける環境モニタリングの範囲



センサTEG(ウエハ1枚あたり)の製造工程ごとの二酸化炭素排出量算出(41.6kg-CO2e)

成果の実用化

項目	①X線CT装置を用いた計測とシミュレーションによる3次元構造・特性解析	②MEMS製造プロセスの温室効果ガス排出量分析	③MEMS統合設計データベース
内容	<ul style="list-style-type: none"> ✓X線CT装置による3次元構造計測 ✓3次元構造に基づいた力学特性・構造解析 ✓機械・電気特性と構造との相関を分析 ✓MNOIC@TIAのX線CT装置を利用 	<ul style="list-style-type: none"> ✓プロセスの低環境負荷化に向けたCO2排出量の分析 ✓設計ツールでのCO2排出量算定・分析機能の提供 ✓生産管理システムでのCO2排出量の可視化 	<ul style="list-style-type: none"> ✓設計・計測、材料物性、環境負荷情報、CO2排出量原単位などのデータベース ✓MemsONEなどの設計ツール、生産管理システムからの利用
実用化形態・時期	<ul style="list-style-type: none"> ✓「3次元キャラクタリゼーション」としてサービス提供(2011/7/12プレスリリース済) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓MemsONEへの組み込みによる分析ツール提供(マイクロマシンセンターと共同で提供、2013年予定) ✓MNOIC@TIA装置(レシピ)へのCO2排出量ラベリング 	<ul style="list-style-type: none"> ✓MNOIC@TIAの装置に対応したデータベースシステムの提供(2013年予定) ✓MemsONEとの統合化(2015年)
波及効果	<ul style="list-style-type: none"> ✓売り上げ 9000万円/年間(2014年) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓製造プロセスのCO2排出量削減 9万t-CO2e/年間(2019年):MEMS全出荷数ベース、分析の結果25%削減されると仮定 	<ul style="list-style-type: none"> ✓設計時間の削減 6000時間/年間(1サイト・20デバイス開発相当)
課題	<ul style="list-style-type: none"> ✓計測の高精度・高分解能化 	<ul style="list-style-type: none"> ✓多様なデバイス・装置・工程への対応・ライフサイクル全体を通じた評価 ✓カーボンフットプリント等の標準化施策 	<ul style="list-style-type: none"> ✓商用データベースシステムの開発 ✓データデザインの拡張 ✓データコンテンツの拡充

IV-16,17

【研究の概要】

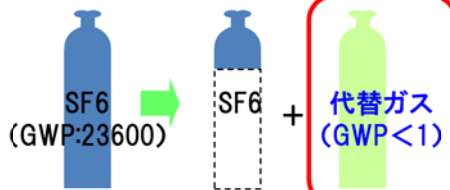
温暖化係数が1以下の代替ガス候補の選定、リアルタイムモニタリングによるエッチングの高効率化、及びフィードバック制御手法を用いたエッチング最適化を行う。

【技術内容】

1. SF6の特長を維持可能な低環境負荷代替ガスの探索

SF6の特長:

- ・高エッチレート
- ・高い安全性
- ・安価



2. エッチング効率化/最適化

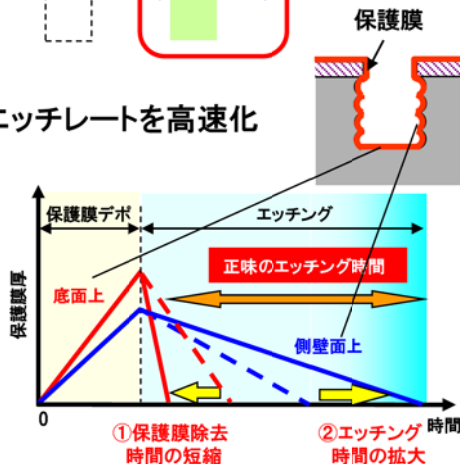
：形状を維持しつつ、更なるエッチレートを高速化

(着眼点)BOSCHプロセスの効率化

- ①底面の保護膜除去時間短縮
- ②エッチング時間の拡大



プラズマ発光のリアルタイムモニタリング



【用途】

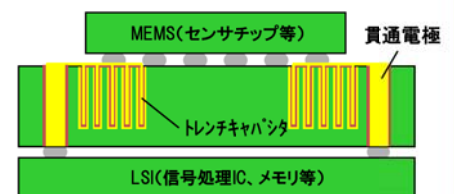
- ・MEMSとLSIとの三次元集積化
- ・蓄電デバイス

【ニーズ】

- ・TSV加工の高スループット化
- ・小型低コスト化

【適用デバイス】

- ・貫通電極、大容量トレンチキャパシタ形成の深堀エッチング



トレンチキャパシタ内蔵Siインターポサ

V-504~576

【目標】

現状のSF6ガスに対し、温暖化ガス排出量を90%以上削減可能とする最適代替ガスの選定指針を得る。

【成果まとめ】

温暖化ガス排出量をトータル90%削減できる指針を得た。

<内訳>

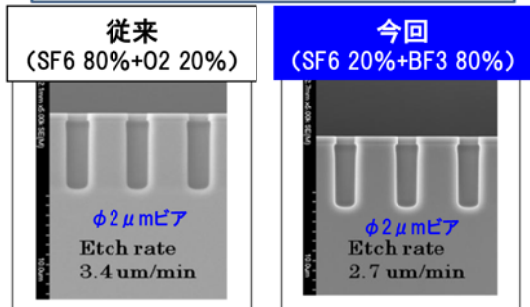
- ・SF6とBF3の混合ガスで、69%削減
- ・F、SiFのラジカル密度のモニタリングとプロセス条件へのフィードバックにより45%削減

【成果の具体的説明】

1. 低環境負荷代替ガスの探索

候補ガスSiF4、IF5、ClF3、F2、BF3の中から低GWP、エッチレート、安全性の観点でスクリーニングを行い、BF3を選定

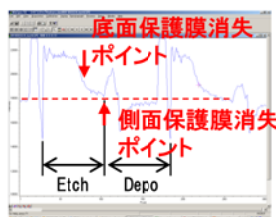
Total gas flow = 200 sccm, Antenna Bias = 1000-100 W, Pressure = 6.65 Pa, Etch time = 2.5 min



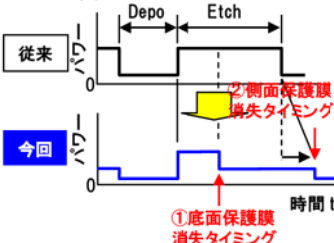
エッチング形状に問題ないことを確認

2. エッチング効率化/最適化

プラズマ発光(F; λ = 635.0nm)



<RFバイアス>



保護膜消失ポイントをモニタリングし、プロセス条件へフィードバック

	従来条件 BOSCHプロセス	リアルタイム モニタリング
形状		
エッチレート	1.14 μm/min	2.06 μm/min
向上率	1.0	1.8

3. その他 特許出願:3件、学会発表:1件

従来条件に比べ、1.8倍のレート向上を達成

温暖化ガス削減率試算結果

プロセス	非BOSCH (連続プロセス)		BOSCH		トータル
	Ref.	代替ガス (実測)	Ref.	モニタリング/ フィードバック (実測)	
使用ガス	SF6+20%O2	SF6+80%BF3	SF6/C4F8 (エッチ/デポ)	SF6/C4F8 (エッチ/デポ)	(SF6+80%BF3)/BF3 (エッチガスをSF6+80%BF3、 デポガスを100%BF3と想定)
温暖化係数	19120 (23900×80%)	4780 (23900×20%)	23900/8700 (12.6/5sec)	23900/8700 (12.6/5sec)	(4780/0) (12.6/5sec)
温暖化係数比	1	0.25	1	1	(0.17) (BOSCH Ref.に対して)
エッチレート (μm/min)	3.4	2.75	1.14	2.06	(1.66) (2.06 μm/min×0.81)
エッチレート比	1	0.81	1	1.8	(1.46) (BOSCH Ref.に対して)
温暖化ガス削減率*	—	69%	—	45%	90%

*温暖化ガス削減率=1- $\frac{\text{温暖化係数比}}{\text{エッチレート比}}$

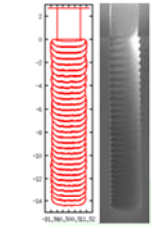
代替ガス+モニタリング/フィードバックで90%削減見込み

【実用化の見通し】

ユーザとしての本技術導入のうれしさ：
エッチング高速化(1.8倍)によるスループット向上(=低コスト)



アルバック：
MEMS深堀エッチング装置、
半導体エッチング装置への適用検討中



みずほ情報総研：
エッチング解析ソフトへの
プラグイン化を検討中



デンソー：
車載用高集積センサ、ECU用LSIへの
適用に向けてデバイスの技術成立性を検討中



将来はエッチング装置
への組み込みを想定

研究の概要

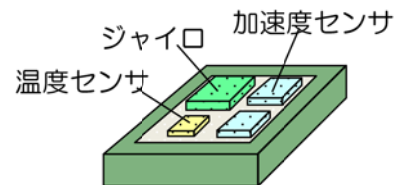
ウエハ・ツー・ウエハとチップ・ツー・ウエハ技術を組み合わせた、ウエハサイズ、チップサイズに制限されることのない、様々な異種デバイスのウエハレベル一括集積化技術を実現するための基盤技術として、250℃以下で大気圧付近から真空雰囲気中で封止できる接合プロセスについて検討する。

技術内容

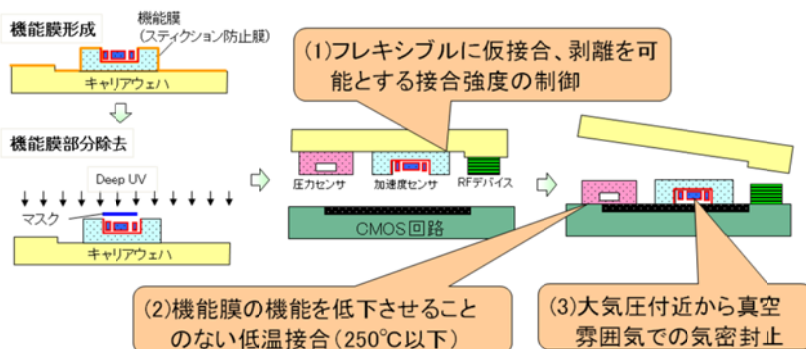
- (i) 接合強度制御技術と気密封止技術
一括集積化のためにキャリアウエハへの仮接合の接合強度を、正規の接合強度の1/10以下に安定して制御することを目指す。
- (ii) 機能膜の機能を低下させない低温接合技術
機能膜の特性が劣化しない、250℃以下の低温接合技術実現に向け、接合面に付着した機能膜の影響把握と、機能膜の部分的除去方法確立に向けた課題抽出を行なう

用途

チップ・ツー・ウエハ接合による集積化、歩留まり向上と接合の低温化による、小型、低コスト、低消費電力のセンサモジュール



車両制御用センサモジュール(例)



目標：

チップサイズに依存しない集積化技術を実現する基盤技術として、250℃以下で大気圧付近から真空雰囲気まで封止できる接合プロセスについて検討し、接合方式を決定する。

成果まとめ：

本研究開発の結果から、表面粗さや接合パターンを制御して接合することで、一括集積化技術を実現するための接合が可能であることが判った。本技術を発展させることで、ウエハサイズ、チップサイズに制限されることのない、様々な異種デバイスの集積化を実現することが可能となる。

成果の具体的説明

- 1) 表面粗さや接合パターンなどのパラメータを制御することで、一括集積化のためにキャリアウエハへの仮接合の接合強度を、正規の接合強度の1/10以下とするための指針を得た。
- 2) SAM膜はUV光、プラズマ照射で部分的除去可能であり、除去後の接合も可能であることが判った。

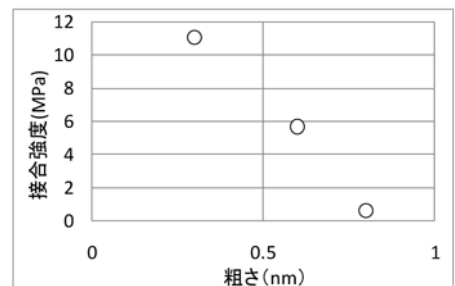


図1 表面粗さと接合強度の関係

<グリーン化に向けて>

初動研究として得た本技術を発展させることで、

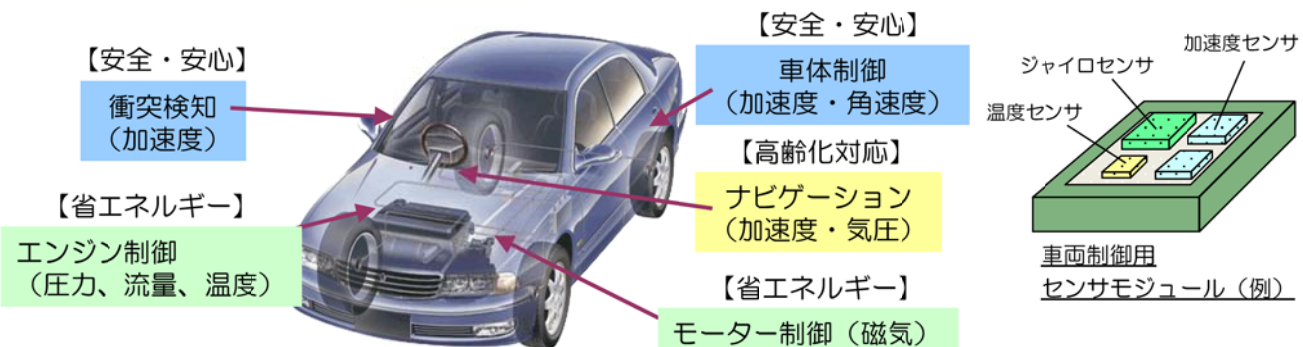
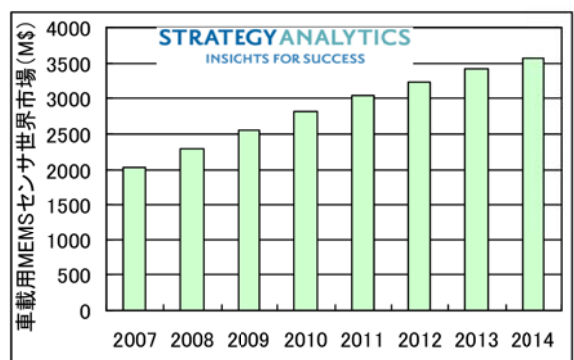
仮接合時の接着剤削除による廃液処理の低減と、歩留まり向上等による低消費電力化により、環境負荷を低減できる。

例えば、チップ取れ数が2倍になれば、20%程度電力は削減されるとされており、MEMS1兆円規模市場(国内2010年度)において、電力20%が削減されたとすると、 $500\text{万トン} \times 0.2 = 100\text{万トン}$ CO2削減 となる。

【実用化の見込み】

本研究開発の終了後、省エネ、安全・安心が要求される自動車分野に対して、高機能・高信頼性デバイスの実装技術として製品適用に向けた開発を実施する。

本成果（センサの集積化）により、多機能車載センサの小型化、低コスト化を実現



センサ高機能化による二輪・四輪車のエネルギー効率・安全性向上

今回得られた要素技術の知見をもとに、4年程度を目処に実用化の見通しを立てる。事業化については、その時点での市場動向や事業性を勘案して判断する。

番号	出願者	出願番号	出願日	名称	発明者	所属
1	みずほ情報総研	特願 2011-044058	2011/3/1	素子解析システム、素子解析方法及び素子解析プログラム	藤原信代 浅海和雄 橋口原	みずほ情報総 みずほ情報総
2	セイコーインスツル 産業技術総合研究所	特願 2011-054222	2011/3/11	パーティクルカウンタ	桑名健太 磯崎瑛宏 富松 大 新荻正隆 伊藤寿浩	BEANS研究所 BEANS研究所 BEANS研究所 セイコーインスツル 産業技術総合研究所
3	セイコーインスツル 産業技術総合研究所	特願 2011-054223	2011/3/11	粒子検出器	桑名健太 磯崎瑛宏 富松 大 新荻正隆 伊藤寿浩	BEANS研究所 BEANS研究所 BEANS研究所 セイコーインスツル 産業技術総合研究所
4	セイコーインスツル 産業技術総合研究所	特願 2011-054224	2011/3/11	マイクロ構造の製造方法、マイクロ構造体、受光素子及び粒子検出器	桑名健太 磯崎瑛宏 富松 大 新荻正隆 伊藤寿浩	BEANS研究所 BEANS研究所 BEANS研究所 セイコーインスツル 産業技術総合研究所
5	アルバック	特願 2011-95426	2011/4/21	ドライエッチング法及び装置	森川泰宏 村山貴英	アルバック

他三件出願手続き中

添付資料A-5

- 1) M. Honzumi et al., "High-Speed Electret Charging Method Using Vacuum UV Irradiation", Power MEMS 2010, pp173-176.
- 2) K. Yamashita et al., "Vibration-driven MEMS energy harvester with vertical electrets", Power MEMS 2010, pp165-168.
- 3) 植木 真治他、「ゲート・チャネル間電気機械相互作用を考慮した Vibrating-Body Field Effect Transistorのモデリング」日本機械学会第2回マイクロ・ナノ工学シンポジウム2011、くにびきメッセ(島根)
- 4) 阿波寄 実他、「金属酸化物微粒子の自己整列構造を用いたガスセンサ」、精密工学会2011年度春季大会学術講演会
- 5) 磯崎瑛宏他、「パーティクルセンサの小型化に関する研究」、精密工学会2011年度春季大会学術講演会(東洋大学)
- 6) 藤原信代他、「MEMS等価回路ジェネレータによる特性ばらつき解析」、平成23年電気学会全国大会
- 7) 石垣彰一、他、「X線CT装置計測を用いたMEMSリバースエンジニアリング 第1報 試作サンプルによる計測実験とデータ解析例」、精密工学会2011年度春季大会学術講演会
- 8) 谷村 他、「デバイス製造プロセス改善のためのMEMSリバースエンジニアリング」2011年日本非破壊検査協会春季講演大会
- 9) M. Honzumi et al., "High-speed electret charging using vacuum UV photoionization", Appl. Phys. Lett. 98, 052901 (2011)
- 10) T. Fujimori et al., "Low Power Analog to Digital Converter with Digital Calibration for Sensor Network", SYMPOSIUM on Design, Test, Integration & Packaging of MEMS/MOEMS, Aix-en-Provence, France, 11-13 May 2011
- 11) M. Abasaki et al., "Large surface area 3D self assembled nano-porous structure for high sensitivity gas-sensing", Transducers'11 conference, June 5-9, 2011, Beijing, China.
- 12) A. Isozaki et al., "Photodiode with Micro Texture for Improving Sensitivity at Large Angle of Incidence for Particle Sensors", Transducers'11 conference, June 5-9, 2011, Beijing, China.
- 13) K. Yamashita et al., "Vibration-driven MEMS Energy Harvester with Vacuum UV-Charged Vertical Electrets", Transducers'11 conference, June 5-9, 2011, Beijing, China.
- 14) T. Matsushita, et al., "Piezoelectric energy harvesters of PZT films deposited on Ti cantilevers", PowerMEMS2011 (IEEE)
- 15) A. Shibuya, et al., "Development of a Miniaturized NO2 Gas Sensor Based on Nanoparticles WO3 Thin film on Interdigitated Electrodes", IEEE Sensors 2010

添付資料A-5

研究課題	目標	成果内容	達成度
半導体クリーンルームセンサネットシステム開発	クリーンルームでのCO2排出量削減を検討できる制御管理システムの開発を行う。 検証用クリーンルームでCO2削減(90年度比60%削減)を実証	・パーティクル量等の441点を計測評価できるエネルギーマネジメント統合管理システムを開発し産総研に設置。 ・塵埃負荷及び熱負荷時のパーティクル量、パーティクル拡散量、温度上昇等のデータから1990年度比、CO2 60%削減検証を実施。	○
8インチラインの構築	MEMS/LSIの前工程から後工程、評価までカバーする一貫ライン、デバイス表面及び内部の形状等の評価装置の導入	MEMS/LSI前工程プロセスラインとして、ウェハ洗浄、0.35μmリソグラフィ、ウェハ熱酸化・拡散、CVD・スパッタ成膜、ウェット及びドライエッチングライン(TKB812F)と、後工程プロセス・評価ラインとして、ウェハ接合・封止、ダイシング、実装配線、デバイス表面・内部性状・電気的特性評価ライン(TKB812B)を導入し、8インチMEMSプロセスの試作検証に適用した。	○
植物工場センサネットシステムの開発	センサネットを適用した省エネ評価用植物工場を構築し、センサネットの効果及びMEMSデバイスの実用化を検討	東京農大にセンサネット植物工場の開発環境を構築。リーフレタス、ミニトマトを栽培、細霧冷却、補光照明、冬季暖房、土壌灌水の4提案方式に関して、それぞれエネルギー20%の削減を達成。補光照明、冬季暖房、土壌灌水の3提案方式に関して、植物の収穫量10%改善を確認。MEMSデバイスの実用化可能性を検討した。	○

研究課題	目標	成果内容	達成度
高機能センサモジュール技術開発			
高機能センサモジュール	・無線センサモジュール(30mmx30mmx10mm)試作開発 ・アプリケーション分野の明確化と新たなセンサネットの活用検討	・センサ機能に温度、湿度、圧力、加速度を搭載、電池、信号処理回路、無線送信回路、アンテナを実装。植物工場も含め用途に応じたセンサ機能を差替え可能な30mmx30mmx10mm以下のプラットフォームモジュールを試作した。 ・半導体クリーンルーム应用到に特定し、事業化課題と進め方を明確化した	○
低消費電力LSI	センサモジュールの長寿命/バッテリー交換レス化を目標に、低消費電力アナログ回路要素技術開発を行う。複数センサ信号を増幅・デジタル化するアナログフロントエンドLSIを試作、課題を抽出	アナログフロントエンド回路を低電力化するために、低電圧(1.2V)、短時間動作回路要素技術を開発。平均消費電力4μW程度(従来比60%以上削減)で動作可能あり、目標であるセンサモジュールの長寿命化の要素技術開発に成功した。	○
新センサデバイス原理検討			
ナノ構造ガスセンサ	センサ小型化及び性能検証: トレンチにSnO2粒子をポーラス状に埋め込み、センサ部の面積を1/2以下の省スペース化とセンシング感度維持を両立 粒子配列プロセスの大幅面積化: プロセスの大幅面積化に伴う課題抽出を行う。	・センサ部の面積を1/2以下の省スペース化とセンシング感度維持を両立するために、トレンチ埋め込み型ガスセンサを評価、平坦基板と比較し高濃度ガス中での感度が向上した。 ・粒子配列プロセスの大幅面積化の課題抽出として、4inch Si基板へのディフュージョンを検討し、メニスカス先端部への微粒子供給を阻害しないような容器設計が必要こと、ウェハ表面を洗浄に保つ必要があることを見出した。	○
低消費電力センサ・無線モジュールへの検討	高効率な容量型センサや高効率高周波デバイス、そしてさらなる小型化・低消費電力化に向け、デバイスの試作を通じて課題検証	超低損傷ドライエッチング技術を低消費電力センサ・無線モジュールに適用した場合の課題検証を実施。シミュレーションでは、専用設計ツールを構築し計算結果からゲート長・幅などのデバイス構造の課題を抽出。8インチファウンドリ試作ではインプラ工程やCMP工程などのプロセス課題を抽出した。	○
パーティクルセンサのMEMS化	小型化、低コスト化が困難なパーティクルセンサのMEMS化を検討する	・検出方法として、光学的・電気的方法を複数検討、小型化のために新光學系を提案、パーティクル(線香の煙)を検出することができた。 ・センサの流路断面積5×5mm ² 、ダウンフロー流速を0.3m/s、対象粒径0.5μmとし、10個のセンサで1秒間サンプリングを行うとして、JIS規格のクリーン度を見積ることができた。	○

研究課題	目標	成果内容	達成度
汚染ガスセンサ	汚染ガス(NH3, H2S等)をppbレベルで計測するための酸化半導体のセンサ開発	低消費電力化された高感度MEMSガスセンサを開発した。 耐熱温度500℃以上で、NH3に対する検出限界を2ppb、消費電力を31mWに低減、H2Sに対する検出限界を0.02ppb、消費電力を48mWに低減を達成した。	○
振動発電を中心とした小型高効率発電デバイス	垂直エレクトレットの新しい高速発電方法の開発を目指すとともに、小型化に有利な櫛歯型エレクトレット発電器の原理検証を行う	真空紫外線による電離を用いた荷電法を開発し、コロナ荷電、軟X線荷電よりも極めて高速に荷電できることを明らかにし、当初目標を達成した。また、原理検証として、櫛歯状の垂直エレクトレットへの真空紫外線荷電の検証と1μWオーダーの発電が可能であることを示した。	○
センサ用パワーマネジメントデバイス	センサネットワーク端末の電力削減のため起動スイッチの原理検証と通信方式の検証する	ゾルゲルPZTと流路形状デバイスにより発電型の低消費電力起動スイッチの可能性を得た。起動スイッチ向け無線として起動スイッチを用いた場合の通信シーケンスチャート、データフォーマット、通信タイミングチャートを策定。消費電力推定の基礎データを取得。	○
位置推定センシング原理	作業者の位置推定の原理開発を行う。	ワイヤレス給電型慣性センサとRFIDを組合せた無線方式センサモジュールで作業者位置をリアルタイム計測し、RFIDタグ検出時の位置補正、サーバには作業者位置表示・タグ位置設定・履歴表示・シミュレーション機能を具備した作業者位置追跡システムを開発した。	○
高感度温度センシング用機能薄膜	環境に優しい非鉛系強誘電体材料におけるセンサとしてのデバイス原理開発	非鉛系強誘電体材料BaTiO ₃ 薄膜をスパッタ法で形成し、焦電係数は10~20pC/N、圧電定数は10pC/(cm ²)を達成し、センサとして十分な性能を得た。	○

研究課題	目標	成果内容	達成度
低環境負荷ボリマー・MEMS融合プロセス技術開発	・ボリマーデバイス向け電鍍成型金型基本プロセス確立 ・アクチュエータMEMSを2回製作、駆動電圧、ミラー部反射率、ミラー部表面粗さの特性を評価、生体適合性への課題抽出	PMMAボリマー材料による静電型ミラーデバイス(アクチュエータMEMS)を電鍍成型金型によるプロセスにて開発した。試作(2回)及び特性評価の結果、生体適合性に問題ないことを確認した。	○
スマートプロトタイプ化技術開発			
シリコンベースセンサTEGの試作	・シリコンベースセンサTEGの試作に向けて、各プロセス(成膜・リソグラフィ・エッチング・洗浄)装置の要素技術を開発 8インチラインを用いて試作し、ラインの特性と製造環境を評価、MEMSデバイス製造基盤を構築	・8インチウエハによる酸化膜、SiN、i線露光、Si異方性エッチング、Si-DRIE、メタルドライエッチング、犠牲層ドライエッチング条件出し、応力解析、断面形状、寸法、ウエハ内均一性を評価。5種センサTEG試作とそのセンサ特性評価により、8インチ試作に適用できるプロセスプラットフォームを構築。8インチプロセス装置、計測装置のレンビ蓄積を行った。	○
中性粒子ビームエッチングのデバイス性能向上実証	中性粒子ビームエッチングの大口径(8インチ)化によるウエハ内の特性ばらつきをセンサTEGの試作により評価	8インチウエハ内面に作製したカンチレバーに中性粒子ビームエッチングを行ない、カンチレバーの共振周波数とQ値の初期特性を計測し、ウエハの表面状態が回復すること、100nmエッチング行ったところで特性のサチュレーションを確認、中性粒子ビームエッチング装置開発に重要な指針となるデータを取得できた。	○
μプローブTEGの設計・試作	先端部の有効径・幅がサブミクロンであるマルチプローブアレイを8インチウエハで試作し、ウエハ内、及びロット間の形状・特性のバラツキを、マルチプローブ評価装置を用いて評価する。さらに、8インチラインの検査デバイスとして適用できるかの可能性を検討	マルチプローブ評価装置を用いた評価手法として、局所陽極酸化(LAO)法による描画、光てこを用いた直接高さ測定、プローブ先端接触電流値のリアルタイム計測の3つの手法を提案し、電流値リアルタイム計測法が最も計測かつ容易にデバイスの特性ばらつき計測や不良スクリーニングできることを見出した。 上記計測法で8インチラインで試作したデバイスの、ロット間、ウエハ内形状ばらつきを評価、顕著な形状ばらつきはなかったが、ロット間電圧配線形成プロセスの品質差を把握、本デバイスを用いた手法が、8インチライン検査デバイスとして適用し得る可能性を示した。	○
欠陥・ばらつき評価におけるモデリング・計測技術開発	ばらつき評価に有効なセンサTEGを設計・試作、最終パッケージ(真空中)やテスト(外力印加)段階と同様の擬似環境下でウエハ内の電気的・機械的特性計測技術及び解析結果を基に構造依存のばらつき特性近似モデリング技術を開発	8インチウエハに作製した複数デバイスについて、真空中・大気中で電気的・機械的計測を行い、それぞれのMEMS等価回路モデルパラメータを算出した。算出した等価回路モデルパラメータのばらつきより構造寸法のばらつき評価を行い、等価回路モデルパラメータのばらつきから構造寸法のばらつきが正しく評価できることを確認した。	○

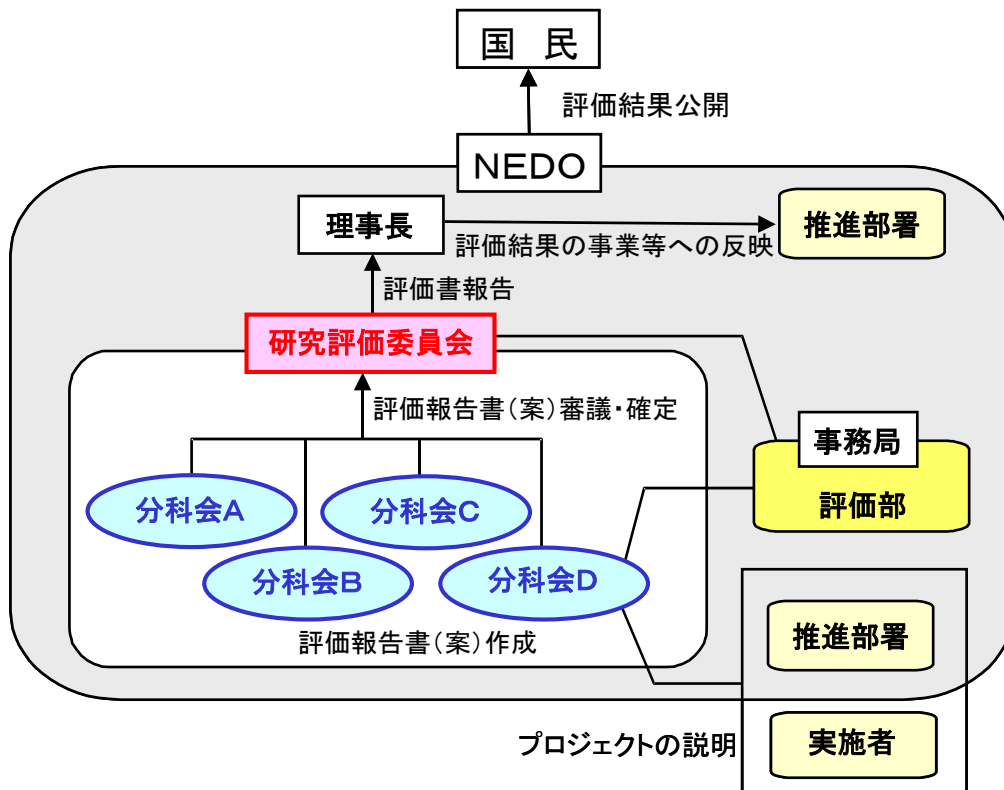
研究課題	目標	成果内容	達成度
低環境負荷型深掘りエッチング技術開発	低環境負荷代替ガスの探索を3種類以上のガスについて行い、エッチング効率化/最適化と組合せ、SF6ガスに対し温暖化ガス排出量を90%以上削減可能とする最適代替ガスの選定指針を得る。	F2, BF3, SiF4など5種類の候補ガスについて、10Hz周期の高速リアルタイム・プラズマ発光モニタリングにより得られた高効率エッチングレシビとプロセスシミュレーションによるフィードバック制御の組合せにより、温暖化ガス排出量をSF6比で90%削減できる低環境負荷代替ガス選定指針を得た。	○
低環境負荷型集積化プロセス基盤技術開発	(1)ウエハ/チップ仮接合強度を、正規接合強度の1/10以下に安定制御する集積化プロセスを開発。 (2)可動部固着防止用機能膜が特性劣化しない250℃以下の低温接合技術実現に向け、接合面に付着した機能膜の影響を把握、機能膜部分的除去方法確立の課題を抽出	合面の表面粗さと面積の制御、環状くり抜きパターンの選定により、正規の接合強度の1/10以下に安定して制御できることが判った。 機能膜として、SAM膜(自己組織化単分子膜、FDTS膜)はUV光、プラズマ照射で除去可能であり、除去後の250℃表面活性化接合で十分な気密封止が得られること、パターンング方法としては、N2、あるいはArプラズマ照射が適していることが判った。	○
スマートファブシステム技術開発	(1)3次元設計・計測情報を、MEMS統合設計データベース、MemsONE等の設計ツール等と連携して活用するための情報共有化フレームワークの要求仕様を作成 (2)環境負荷データを情報共有化するためのデータベースの基盤を構築し、センサTEGの製造時における環境負荷を算出するに必要なデータを収集・登録	(1)X線CT装置により3次元構造を設計・得られた構造から設計時の形状や力学特性を比較した。機械・電気特性の計測データと設計形状を、集中質点系モデルを介在させて比較する手法を検討した。併せて、情報共有データベースシステムの設計・プロトタイプ開発を行い情報共有化フレームワークの要求仕様を纏めた。 (2)30種類のMEMSデバイス用原材料と8インチライン(TKB812)で試作されたセンサTEG構造体の製造工程でのCO2排出に寄与する項目をデータ収集し、それらを積算して排出量を算定した。算定の結果により、装置・工程・項目に対する排出量の削減への指針を得た。	○

参考資料 1 評価の実施方法

本評価は、「技術評価実施規程」（平成 15 年 10 月制定）に基づいて研究評価を実施する。

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）における研究評価の手順は、以下のように被評価プロジェクトごとに分科会を設置し、同分科会にて研究評価を行い、評価報告書（案）を策定の上、研究評価委員会において確定している。

- 「NEDO 技術委員・技術委員会等規程」に基づき研究評価委員会を設置
- 研究評価委員会はその下に分科会を設置



1. 評価の目的

評価の目的は「技術評価実施規程」において。

- 業務の高度化等の自己改革を促進する
- 社会に対する説明責任を履行するとともに、
経済・社会ニーズを取り込む
- 評価結果を資源配分に反映させ、資源の重点化及び業務の効率化を
促進する

としている。

本評価においては、この趣旨を踏まえ、本事業の意義、研究開発目標・計画の妥当性、計画を比較した達成度、成果の意義、成果の実用化の可能性等について検討・評価した。

2. 評価者

技術評価実施規程に基づき、事業の目的や態様に即した外部の専門家、有識者からなる委員会方式により評価を行う。分科会委員選定に当たっては以下の事項に配慮して行う。

- 科学技術全般に知見のある専門家、有識者
- 当該研究開発の分野の知見を有する専門家
- 研究開発マネジメントの専門家、経済学、環境問題、国際標準、その他社会的ニーズ関連の専門家、有識者
- 産業界の専門家、有識者
- ジャーナリスト

また、評価に対する中立性確保の観点から事業の推進側関係者を選任対象から除外し、また、事前評価の妥当性を判断するとの側面にかんがみ、事前評価に関与していない者を主体とする。

これらに基づき、分科会委員名簿にある6名を選任した。

なお、本分科会の事務局については、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構評価部が担当した。

3. 評価対象

平成21年度に開始された「異分野融合型次世代デバイス製造技術開発プロジェクト／高機能センサネットシステムと低環境負荷型プロセスの開発」プロジェクトを評価対象とした。

なお、分科会においては、当該事業の推進部署から提出された事業原簿、プロジェクトの内容、成果に関する資料をもって評価した。

4. 評価方法

分科会においては、当該事業の推進部署及び研究実施者からのヒアリングと、それを踏まえた分科会委員による評価コメント作成、評点法による評価及び実施者側等との議論等により評価作業を進めた。

なお、評価の透明性確保の観点から、知的財産保護の上で支障が生じると認められる場合等を除き、原則として分科会は公開とし、研究実施者と意見を交換する形で審議を行うこととした。

5. 評価項目・評価基準

分科会においては、次に掲げる「評価項目・評価基準」で評価を行った。これは、研究評価委員会による『各分科会における評価項目・評価基準は、被評価プロジェクトの性格、中間・事後評価の別等に応じて、各分科会において判断すべきものである。』との考え方に従い、第1回分科会において、事務局が、研究評価委員会により示された「標準的評価項目・評価基準」（参考資料1-7頁参照）をもとに改定案を提示し、承認されたものである。

プロジェクト全体に係わる評価においては、主に事業の目的、計画、運営、達成度、成果の意義や実用化への見通し等について評価した。各個別テーマに係る評価については、主にその目標に対する達成度等について評価した。

評価項目・評価基準

1. 事業の位置付け・必要性について

(1) NEDOの事業としての妥当性

- ・ 「ロボット・新機械イノベーションプログラム」の目標達成のために寄与しているか。または、補正予算による事業の場合、その目的に合致しているか。
- ・ 民間活動のみでは改善できないものであること、又は公共性が高いことにより、NEDOの関与が必要とされる事業か。

(2) 事業目的の妥当性

- ・ 内外の技術開発動向、国際競争力の状況、エネルギー需給動向、市場動向、政策動向、国際貢献の可能性等から見て、事業の目的は妥当か。

2. 研究開発マネジメントについて

(1) 研究開発目標の妥当性

- ・ 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。
- ・ 具体的かつ明確な開発目標を可能な限り定量的に設定しているか。
- ・ 目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

(2) 研究開発計画の妥当性

- ・ 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマ毎の配分を含む）となっているか。
- ・ 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
- ・ 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。
- ・ 継続プロジェクトや長期プロジェクトの場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んだうえで活用が図られているか。

(3) 研究開発実施の事業体制の妥当性

- ・ 適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか。
- ・ 真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。
- ・ 全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか。

- ・ 目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携が十分に行われる体制となっているか。
- ・ 実用化シナリオに基づき、成果の受け取り手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、関与を求める体制を整えているか。

(4) 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性

- ・ 成果の実用化につなげる戦略が明確になっているか。
- ・ 成果の実用化につなげる知財マネジメントの方針が明確に示され、かつ妥当なものか。

(5) 情勢変化への対応等

- ・ 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向に機敏かつ適切に対応しているか。
- ・ 計画見直しの方針は一貫しているか（中途半端な計画見直しが研究方針の揺らぎとなっていないか）。計画見直しを適切に実施しているか。

3. 研究開発成果について

(1) 目標の達成度

- ・ 成果は目標値をクリアしているか。
- ・ 全体としての目標達成はどの程度か。
- ・ 目標未達成の場合、目標達成までの課題を把握し、課題解決の方針が明確になっているか。

(2) 成果の意義

- ・ 成果は市場の拡大或いは市場の創造につながることを期待できるか。
- ・ 成果は、世界初あるいは世界最高水準か。
- ・ 成果は、新たな技術領域を開拓することが期待できるか。
- ・ 成果は汎用性があるか。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- ・ 成果は、他の競合技術と比較して優位性があるか。

(3) 知的財産権等の取得及び標準化の取組

- ・ 知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、または実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。

(4)成果の普及

- ・ 論文の発表は、研究内容を踏まえ適切に行われているか。
- ・ 成果の受取手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

4. 実用化の見通しについて

(1)成果の実用化可能性

- ・ 実用化イメージ・出口イメージが明確になっているか。
- ・ 実用化イメージ・出口イメージに基づき、開発の各段階でマイルストーンを明確にしているか。それを踏まえ、引き続き研究開発が行われる見通しは立っているか。

(2)波及効果

- ・ 成果は関連分野への波及効果（技術的・経済的・社会的）を期待できるものか。
- ・ プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果を生じているか。

標準的評価項目・評価基準（事後評価）

2010. 3. 26

【事後評価 標準的評価項目・評価基準の位置付け（基本的考え方）】

標準的評価項目・評価基準は、第25回研究評価委員会（平成22年3月26日付）において以下のとおり定められている。（本文中の記載例による1…、2…、3…、4…が標準的評価項目、それぞれの項目中の(1)…、(2)…が標準的評価基準、それぞれの基準中の…が視点）

ただし、これらの標準的評価項目・評価基準は、研究開発プロジェクトの事後評価における標準的な評価の視点であり、各分科会における評価項目・評価基準は、被評価プロジェクトの性格等に応じて、各分科会において判断すべきものである。

1. 事業の位置付け・必要性について

(1) NEDOの事業としての妥当性

- ・ 特定の施策（プログラム）、制度の下で実施する事業の場合、当該施策・制度の目標達成のために寄与しているか。
- ・ 民間活動のみでは改善できないものであること、又は公共性が高いことにより、NEDOの関与が必要とされる事業か。
- ・ 当該事業を実施することによりもたらされる効果が、投じた予算との比較において十分であるか。

(2) 事業目的の妥当性

- ・ 内外の技術開発動向、国際競争力の状況、エネルギー需給動向、市場動向、政策動向、国際貢献の可能性等から見て、事業の目的は妥当か。

2. 研究開発マネジメントについて

(1) 研究開発目標の妥当性

- ・ 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。
- ・ 具体的かつ明確な開発目標を可能な限り定量的に設定しているか。
- ・ 目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

(2)研究開発計画の妥当性

- ・ 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマ毎の配分を含む）となっているか。
- ・ 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
- ・ 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。
- ・ 継続プロジェクトや長期プロジェクトの場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んだうえで活用が図られているか。

(3)研究開発実施の事業体制の妥当性

- ・ 適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか。
- ・ 真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。
- ・ 研究管理法を介する場合、研究管理法が真に必要な役割を担っているか。
- ・ 全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか。
- ・ 目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携 and/or 競争が十分に行われる体制となっているか。
- ・ 実用化シナリオに基づき、成果の受け取り手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、関与を求める体制を整えているか。

(4) 研究開発成果の実用化、事業化に向けたマネジメントの妥当性

- ・ 成果の実用化、事業化につなげる戦略が明確になっているか。
- ・ 成果の実用化、事業化につなげる知財マネジメントの方針が明確に示され、かつ妥当なものか。

(5)情勢変化への対応等

- ・ 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向に機敏かつ適切に対応しているか。
- ・ 計画見直しの方針は一貫しているか（中途半端な計画見直しが研究方針の揺らぎとなっていないか）。計画見直しを適切に実施しているか。

3. 研究開発成果について

(1)目標の達成度

- ・ 成果は目標値をクリアしているか。(※)

(※事後評価前倒し実施の場合は、「成果は目標値をクリアする見込みか。」)

- ・ 全体としての目標達成はどの程度か。
- ・ 目標未達成の場合、目標達成までの課題を把握し、課題解決の方針が明確になっているか。

(2)成果の意義

- ・ 成果は市場の拡大或いは市場の創造につながる事が期待できるか。
- ・ 成果は、世界初あるいは世界最高水準か。
- ・ 成果は、新たな技術領域を開拓することが期待できるか。
- ・ 成果は汎用性があるか。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- ・ 成果は、他の競合技術と比較して優位性があるか。

(3)知的財産権等の取得及び標準化の取組

- ・ 知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、または実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、得られた研究開発の成果に基づく国際標準化に向けた提案等の取組が適切に行われているか。

(4)成果の普及

- ・ 論文の発表は、研究内容を踏まえ適切に行われているか。
- ・ 成果の受取手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

4. 実用化、事業化の見通しについて

(1)成果の実用化可能性

- ・ 産業技術としての見極め（適用可能性の明確化）ができているか。
- ・ 実用化に向けて課題が明確になっているか。課題解決の方針が明確になっているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。

(2)事業化までのシナリオ

- ・ NEDO後継プロジェクト、NEDO実用化助成、企業内研究等、プロジェクト終了後の事業化までの道筋は明確か。
- ・ 市場の規模や成長性、コストダウン、競合技術との比較、導入普及、事業化までの期間、事業化とそれに伴う経済効果等の見通しは立っているか。

(3)波及効果

- ・ 成果は関連分野への波及効果（技術的・経済的・社会的）を期待できるものか。
- ・ プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果を生じているか。

※基礎的・基盤的研究及び知的基盤・標準整備等の研究開発の場合は、以下の項目・基準による。

*基礎的・基盤的研究開発の場合

2. 研究開発マネジメントについて

(1)研究開発目標の妥当性

- ・ 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。
- ・ 具体的かつ明確な開発目標を可能な限り定量的に設定しているか。
- ・ 目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

(2)研究開発計画の妥当性

- ・ 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマ毎の配分を含む）となっているか。
- ・ 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
- ・ 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。
- ・ 継続プロジェクトや長期プロジェクトの場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んだうえで活用が図られているか。

(3)研究開発実施の事業体制の妥当性

- ・ 適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか。
- ・ 真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。
- ・ 研究管理法人を経由する場合、研究管理法人が真に必要な役割を担っているか。
- ・ 全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか。
- ・ 目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携 and/or 競争が十分に行われる体制となっているか。
- ・ 実用化シナリオに基づき、成果の受け取り手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、関与を求める体制を整えているか。

(4) 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性

- ・ 成果の実用化につなげる戦略が明確になっているか。
- ・ 成果の実用化につなげる知財マネジメントの方針が明確に示され、かつ妥当なものか。

(5)情勢変化への対応等

- ・ 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向に機敏かつ適切に対応しているか。
- ・ 計画見直しの方針は一貫しているか（中途半端な計画見直しが研究方針の揺らぎとなっていないか）。計画見直しを適切に実施しているか。

3. 研究開発成果について

(1)目標の達成度

- ・ 成果は目標値をクリアしているか。（※）
（※事後評価前倒し実施の場合は、「成果は目標値をクリアする見込みか。」）
- ・ 全体としての目標達成はどの程度か。
- ・ 目標未達成の場合、目標達成までの課題を把握し、課題解決の方針が明確になっているか。

(2)成果の意義

- ・ 成果は市場の拡大或いは市場の創造につながることを期待できるか。
- ・ 成果は、世界初あるいは世界最高水準か。
- ・ 成果は、新たな技術領域を開拓することが期待できるか。
- ・ 成果は汎用性があるか。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- ・ 成果は、他の競合技術と比較して優位性があるか。

(3)知的財産権等の取得及び標準化の取組

- ・ 知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、または実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、得られた研究開発の成果に基づく国際標準化に向けた提案等の取組が適切に行われているか。

(4)成果の普及

- ・ 論文の発表は、研究内容を踏まえ適切に行われているか。
- ・ 成果の受取手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

4. 実用化の見通しについて

(1)成果の実用化可能性

- ・ 実用化イメージ・出口イメージが明確になっているか。
- ・ 実用化イメージ・出口イメージに基づき、開発の各段階でマイルストーンを明確にしているか。それを踏まえ、引き続き研究開発が行われる見通しは立っているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。

(2)波及効果

- ・ 成果は関連分野への波及効果（技術的・経済的・社会的）を期待できるものか。
- ・ プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果を生じているか。

* 知的基盤・標準整備等の研究開発の場合

2. 研究開発マネジメントについて

(1)研究開発目標の妥当性

- ・ 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、戦略的な目標が設定されているか。
- ・ 具体的かつ明確な開発目標を可能な限り定量的に設定しているか。
- ・ 目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

(2)研究開発計画の妥当性

- ・ 目標達成のために妥当なスケジュール、予算（各個別研究テーマ毎の配分を含む）となっているか。
- ・ 目標達成に必要な要素技術を取り上げているか。
- ・ 研究開発フローにおける要素技術間の関係、順序は適切か。
- ・ 継続プロジェクトや長期プロジェクトの場合、技術蓄積を、実用化の観点から絞り込んだうえで活用が図られているか。

(3)研究開発実施の事業体制の妥当性

- ・ 適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか。
- ・ 真に技術力と事業化能力を有する企業を実施者として選定しているか。
- ・ 研究管理法人を経由する場合、研究管理法人が真に必要な役割を担ってい

るか。

- ・ 全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか。
- ・ 目標達成及び効率的実施のために必要な実施者間の連携 and/or 競争が十分に行われる体制となっているか。
- ・ 実用化シナリオに基づき、成果の受け取り手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、関与を求める体制を整えているか。

(4) 研究開発成果の実用化に向けたマネジメントの妥当性

- ・ 成果の実用化につなげる戦略が明確になっているか。
- ・ 成果の実用化につなげる知財マネジメントの方針が明確に示され、かつ妥当なものか。

(5) 情勢変化への対応等

- ・ 進捗状況を常に把握し、社会・経済の情勢の変化及び政策・技術動向に機敏かつ適切に対応しているか。
- ・ 計画見直しの方針は一貫しているか（中途半端な計画見直しが研究方針の揺らぎとなっていないか）。計画見直しを適切に実施しているか。

3. 研究開発成果について

(1) 目標の達成度

- ・ 成果は目標値をクリアしているか。（※）
（※事後評価前倒し実施の場合は、「成果は目標値をクリアする見込みか。」）
- ・ 全体としての目標達成はどの程度か。
- ・ 目標未達成の場合、目標達成までの課題を把握し、課題解決の方針が明確になっているか。

(2) 成果の意義

- ・ 成果は市場の拡大或いは市場の創造につながることが期待できるか。
- ・ 成果は、世界初あるいは世界最高水準か。
- ・ 成果は、新たな技術領域を開拓することが期待できるか。
- ・ 成果は汎用性があるか。
- ・ 投入された予算に見合った成果が得られているか。
- ・ 成果は公開性が確保されているか。

(3)知的財産権等の取得及び標準化の取組

- ・ 研究内容に新規性がある場合、知的財産権等の取扱（特許や意匠登録出願、著作権や回路配置利用権の登録、品種登録出願、営業機密の管理等）は事業戦略、または実用化計画に沿って国内外に適切に行われているか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、得られた研究開発の成果に基づく国際標準化に向けた提案等の取組が適切に行われているか。

(4)成果の普及

- ・ 論文の発表は、研究内容を踏まえ適切に行われているか。
- ・ 成果の受取手（ユーザー、活用・実用化の想定者等）に対して、適切に成果を普及しているか。また、普及の見通しは立っているか。
- ・ 一般に向けて広く情報発信をしているか。

4. 実用化の見通しについて

(1)成果の実用化可能性

- ・ 整備した知的基盤についての利用は実際にあるか、その見通しが得られているか。
- ・ 公共財として知的基盤を供給、維持するための体制は整備されているか、その見込みはあるか。
- ・ 国際標準化に関する事項が計画されている場合、国際規格化等、標準整備に向けた見通しが得られているか。
- ・ J I S 化、標準整備に向けた見通しが得られているか。注）国内標準に限る
- ・ 一般向け広報は積極的になされているか。

(2)波及効果

- ・ 成果は関連分野への波及効果（技術的・経済的・社会的）を期待できるものか。
- ・ プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果を生じているか。

参考資料 2 評価に係る被評価者意見

研究評価委員会（分科会）は、評価結果を確定するにあたり、あらかじめ当該実施者に対して評価結果を示し、その内容が、事実関係から正確性を欠くなどの意見がある場合に、補足説明、反論などの意見を求めた。研究評価委員会（分科会）では、意見があったものに対し、必要に応じて評価結果を修正の上、最終的な評価結果を確定した。

評価結果に対する被評価者意見は全て反映された。

本研究評価委員会報告は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）評価部が委員会の事務局として編集しています。

平成24年3月

NEDO 評価部

部長 竹下 満

主幹 三上 強

担当 梶田 保之

* 研究評価委員会に関する情報は NEDO のホームページに掲載しています。

(http://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu_index.html)

〒212-8554 神奈川県川崎市幸区大宮町1310番地

ミュージア川崎セントラルタワー20F

TEL 044-520-5161 FAX 044-520-5162