

第1回「高集積・複合MEMS製造技術開発
プロジェクト」(事後評価)分科会
資料5-1

「高集積・複合MEMS製造技術開発プロジェクト」

事業原簿

公開版

作成者	新エネルギー・産業技術総合開発機構 機械システム技術開発部
-----	----------------------------------

— 目 次 —

概要	3	
I. 事業の目的・政策的位置付けについて		
1. NEDO の関与の必要性・制度への適合性	21	
1.1 NEDO が関与する意義	21	
1.2 実施の効果（費用対効果）	24	
2. 事業の背景・目的・位置づけ		
2.1 事業の位置付け・必要性	26	
2.2 国のプログラムとの関連性	27	
II. 研究開発マネジメントについて		
1. 事業の目標	29	
2. 事業の計画内容	31	
2.1 研究開発の内容	31	
2.2 研究開発の実施体制	36	
2.3 研究開発の運営管理	39	
3. 情勢変化への対応	40	
4. 中間評価結果への対応	41	
5. 評価に関する事項	41	
III. 研究開発成果について		
1. 事業全体の成果	42	
2. 各テーマの成果まとめ	46	
IV. 実用化の見通しについて		55

V. 委託テーマの成果詳細

V-1. 研究開発項目① MEMS/ナノ機能の複合技術の開発

- (1) 選択的ナノ機械構造体形成技術 (東京大学) 57
- (2) バイオ材料 (タンパク質など) の選択的修飾技術 (産業技術総合研究所) . . . 201
- (3) ナノ材料 (CNT など) の選択的形成技術 (産業技術総合研究所) 243

V-2. 研究開発項目② MEMS /半導体の一体形成技術の開発

- (1) MEMS-半導体プロセス統合モノリシック製造技術
 －新たなセンシング原理の探索－ (立命館大学) 271
- (2) MEMS－半導体横方向配線技術
 - (2)-1. MEMS－半導体横方向配線技術の研究開発 (東北大学) 344
 - (2)-2. MEMS /半導体の一体形成技術の開発－MEMS-半導体横方向配線技術－
 (産業技術総合研究所) . . . 364

V-3. 研究開発項目③ MEMS/MEMS の高集積結合技術の開発

- (1) 多層ウェハレベル接合体の低ストレスダイシング技術
 (レーザー技術総合研究所/東北大学) 460

V-4. 研究開発項目④ 高集積・複合MEMS 知識データベースの整備

(マイクロマシンセンター) 504

V-5. 研究開発項目⑤ 高集積・複合MEMS システム化設計プラットフォームの開発

(マイクロマシンセンター) 532

(添付資料)

- 1. 「ロボット・新機械イノベーションプログラム」基本計画 651
- 2. (新製造技術プログラム)「高集積・複合MEMS 製造技術開発プロジェクト」基本計画 . 657
- 3. 技術戦略マップ 670
- 4. 事前評価関連資料 701
- 5. 特許論文リスト 706

概 要

	作成日	平成 21 年 9 月 17 日	
制度・プログラム名	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	高集積・複合MEMS製造技術 開発プロジェクト	PJコード	P06022
担当推進部・担当者	機械システム技術開発部 犬塚肇		
0. 事業の概要	<p>我が国のMEMS (Micro Electro Mechanical Systems : 微小電気機械システム) 産業の国際競争力を確保することを目的として、MEMSデバイスの高集積化・高密度化を実現する高度で先進的な製造技術を開発する。上記の目標を達成する為、①MEMSとナノ機能との融合、②MEMSと半導体との一体化及び、③異なるMEMSの結合といったMEMSの集積・複合化に向けた技術課題に取り組むと同時に、開発成果の産業界への普及促進に向けた環境整備の為、④成果の知識データベース化と⑤高集積・複合MEMS用設計開発ツールの開発を並行して行う。</p>		
I. 事業の位置付け・必要性について	<p>我が国には、材料産業や機能性部品産業といったものづくり産業を基盤とした「高度部材産業集積」があり、これが、我が国の製造業の国際競争力を支えてきた。新産業創造戦略にも指摘があるように、我が国がこうした高度部材産業集積を形成していることが、ものづくりに不可欠な要素技術（精密微細加工や特殊素材合成等）のネットワーク化を通じた、迅速かつ高度な摺り合わせを実現してきたといえる。また、川下（最終製品）、川中（材料・部品・装置）、川上（素材、原材料）の分厚い産業集積に育まれた摺り合わせのネットワークが、新技術の素地となり、次のイノベーションにつながってきたのである。他方、近年、韓国、中国、台湾を初めとする東アジア諸国の技術力向上を背景として、製造技術における国際競争が、ますます激化している。こうした中、経済面では、我が国の景気は、100年に一度と言われる昨年来の世界同時不況により、多くの企業で業績の急激な低下が見られたものの政府による一連の景気対策や在庫調整の一巡などの効果により緩やかに回復しつつあり、エコカー関連など一部の製造業は生産を伸ばしてきている。しかしながら、製造業の中核の一つである電子部品・デバイス産業は、その業績が半導体や液晶の景気サイクルに左右されがちであるとともに、先端技術であるが故に国際的開発競争が熾烈であり、先行きが不透明等、予断ならない状況にある。その一方で、電子部品・デバイス産業は高性能機械の重要な構成要素であることから、同産業の業績が、我が国製造業の今後の業績に大きな影響を及ぼしうると考えられる。</p> <p>近年の電子部品・デバイスの小型化・高性能化に大きく寄与している技術が、MEMSである。MEMSとは、微細な電気要素と機械要素を一つの基板上に組み込んだ部品をいい、半導体製造技術やレーザー加工技術等各種の微細加工技術を用いて製造される。情報通信、医療・バイオ、自動車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</p>		

	<p>イスとして期待されている。このため、我が国の製造業の競争力維持・強化を目指す経済産業省の「ロボット・新機械イノベーションプログラム基本計画」においても、MEMSは、我が国製造業の「川中」の一角をなす基幹部品の国際競争力強化等の観点から、重要な分野と位置づけられている。</p> <p>現在、MEMSが既に実用化されている自動車用のセンサやインクジェットプリンタヘッドでは日本企業が健闘しているものの、光MEMSやバイオMEMSの分野では欧米企業が一部先行しており、今後成長が期待されるMEMS産業の国際競争力を確保するためには、製造技術の一層の高度化（高集積化・複合化）によりMEMSの更なる小型化・高性能化を図ることが必要である。実際、欧米の一部では、既に、従来型のMEMSにLSI演算処理回路を集積したり、MEMS間を結合する高集積・複合MEMSの開発が着手されており、研究開発促進の時期を逸すると、MEMS関係市場（2015年で国内市場2.4兆円）を海外メーカーに席卷されるおそれがある。</p> <p>このため、MEMSの「技術戦略マップ」を踏まえ、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、次世代の基幹部品を支える高集積・複合MEMSを開発すべく、重要な技術課題に対して、選択的・集中的に取り組むべく、本事業を行う。さらに、本事業の成果に基づき、高集積・複合MEMSの新たな産業化を促進するための環境整備を行う。</p>
--	--

II. 研究開発マネジメントについて

<p>1. 事業の目標</p>	<p>【全体の目標】</p> <p>今後成長が期待される市場である自動車、情報通信、安全・安心、環境、医療等において必要不可欠となる、小型・省電力・高性能・高信頼性の高集積・複合MEMSデバイスを製造する技術を開発する。また、上記技術開発を通じて得られた製造技術に関わる知識を集約し、データベースを整備し公開する。</p> <p>【研究開発項目別の目標】</p> <p>研究開発項目① 「MEMS／ナノ機能の複合技術の開発」</p> <p>(1) 選択的ナノ機械構造体形成技術</p> <p>L/S：50nm以下、縦方向：80nm以上、可動部を擁する場合は150nm以下のギャップを保持するナノ機械構造体を所定の領域（位置精度：±1μm以下）に選択的に形成できる技術を確立するとともに、それがナノ機能を発現することを示す。さらに、構造体の形状・寸法やその動きと発現するナノ機能の関係も明確にする。</p> <p>(2) バイオ材料（タンパク質など）の選択的修飾技術</p> <p>2種類以上のバイオ材料（改変されたタンパク質など）を、その配向性が制御された状態で、複雑構造体の所定の領域に選択的に形成する技術を確立するとともに、そのバイオ材料が生体機能を模倣したメカニズムで疾患</p>
-----------------	--

関連などの生体物質を認識できることを示す。

(3) ナノ材料 (CNT など) の選択的形成技術

サイズ直径: $1\ \mu\text{m}$ 以下或いは厚み精度: $0.1\ \mu\text{m}$ 以内のナノ材料を所定の領域 (位置精度: $\pm 1\ \mu\text{m}$ 以下) に選択的に形成する技術を確立するとともに、それがナノ機能を発現することを示す。特に、CNT の選択的形狀制御においては、高アスペクト比 (1:10 以上)、高密度充填 (充填率: 50% 以上) の数 μm から数百 μm スケールの MEMS 向け配向 CNT 構造体を製造する CNT 成長技術を開発する。直線形状で架橋させた場合には、架橋率: 70% 以上を目指す。また、その機械的、化学的特性を評価、改善し、具体的デバイスへの適応を目指す。

(4) ナノ機能を組み込んだ MEMS デバイスの製造技術

少なくとも、プロセス温度が $400\text{ }^\circ\text{C}$ 以下で、ナノ機能を所定の領域に選択的にウェハレベルで形成し、かつナノ機能形成プロセスにより MEMS が損傷を受けることなく、逆に MEMS 形成プロセスによりナノ機能が劣化することがない MEMS 一貫プロセスを確立するとともに、MEMS 一貫プロセスにより試作されたナノ機能付加 MEMS デバイスが、従来よりも優れた性能を発揮することを示す。

研究開発項目②「MEMS/半導体の一体形成技術の開発」

(1) MEMS - 半導体プロセス統合モノリシック製造技術

MEMS 製造プロセスとして、 180 nm 技術ノード CMOS・LSI 材料プロセス互換を目指す。MEMS 製造技術ロードマップに基づく統合プロセスによる MEMS の加工目標として、最小加工寸法: $0.5\ \mu\text{m}$ 以下、アスペクト比: 20 以上、残留応力: $0.1\ \text{GPa}$ 以下 (膜厚: $0.1\sim 10\ \mu\text{m}$)、MEMS と複数種類の異なった機能要素 (電子回路、受動素子など) の多層・モノリシック集積化を目指す。

半導体センサの微細化により発現する新たな MEMS センシング原理の探索については、製造プロセスは問わないが、1 つ以上の新たな MEMS センシング原理を見出すことを目指す。

(2) MEMS - 半導体縦方向配線技術

将来の 65 nm ルールまでの CMOS・LSI と MEMS (バルク型も含む) を多層に集積するために、穴径: $5\ \mu\text{m}$ 以下、アスペクト比: 50 以上の貫通孔配線を形成するとともに、CMOS・LSI と MEMS を 3 層以上に渡って接合し、確実な電氣的接続を実現する。

インターポーザルについては、インターポーザル内の貫通配線構造に従来のない分岐構造を導入し、インターポーザル内部での三次元インターコネクションを実現する。そのサイズとしては、インターポーザル厚: 30

0 μm以下で、貫通配線（穴径：100 μm以下）の横方向へのシフト量：500 μm以上を達成する製造技術を目指す。

(3) MEMS - 半導体横方向配線技術

L/S：1 μm/1 μm以下の微細配線を形成し、CMOS・LSIとMEMSの間の確実な電氣的接続を実現する。さらに、横方向集積型MEMSパッケージの薄型化（厚さ：100 μm程度）を目指す。

この他、三次元表面上への高密度配線パターンの低温で高速な直接微細描画技術と受動部品の高密度な低温積層一体化実装技術を確立する。高密度配線パターンとして、垂直乗り越え段差：100 μm以上、パターン寸法：5～10 μm、成膜温度：400℃以下、成膜速度：10 μm/min以上および描画速度：1 cm/min以上を目指す。

研究開発項目③「MEMS/MEMSの高集積結合技術の開発」

(1) 異種材料多層MEMS集積化技術

ウェハサイズ：直径100 mm以上、3層以上、異種材料（シリコン、ガラス、樹脂など）をウェハレベルで接合し、面方向：±1 μm以下の位置決め精度、垂直（z）方向：±0.5 μm以下の組立精度で、複数回の接合に耐えられることを目指す。

(2) ビルドアップ型多層MEMS集積化技術

各ウェハ（直径100 mm以上）の接合精度および加工精度は、面方向：±1 μmを目指すとともに、各ウェハ接合工程の間に加工工程（エッチング、実装、機能部材・異種材料形成、など）を設けながら、ダメージを与えることなくウェハ3層以上を順次接合できることを目指す。

化合物半導体チップの高精度位置決め接合技術については、位置決め精度：±1 μm以下、傾き精度：0.05 deg以下を目指す。

(3) 多層ウェハレベル接合体の低ストレスダイシング技術

多層ウェハレベル接合体の低ストレスダイシングについては、異種材料で構成される3層以上のウェハレベル接合体（直径100 mm以上）に対して、チップング、層間剥離およびMEMS可動部破損などの破損率について、トータルで1%以下を目指す。

研究開発項目④「高集積・複合MEMS知識データベースの整備」

高集積・複合MEMS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、特許情報及び特に委託事業を中心としたプロジェクトの研究成果も含めて）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で開発が行われているMEMS用設計解析支援システムに付加する。

研究開発項目⑤ 「高集積・複合MEMSシステム化設計プラットフォームの開発」

研究開発項目①～③及びその周辺に関わる高集積化MEMS設計プラットフォームとしての等価回路モデルに関する情報を整理し、Web閲覧システムとして構築する。また、MEMS用設計解析支援システムの回路シミュレーション・モデルを高集積・複合MEMSに適用される等価回路モデルに拡張し、その内容をWeb閲覧システムに掲載する。

2. 事業の計画内容	主な実施事項	平成 18 年度	平成 19 年度	平成 20 年度	備 考
	①MEMS /ナノ機能の複合技術の開発			→	
	②MEMS /半導体の一体形成技術の開発			→	
	③MEMS /MEMS の高集積結合技術の開発			→	
	④高集積・複合MEMS 知識データベースの整備			→	
	⑤高集積・複合MEMS システム化設計プラットフォームの開発			→	平成 19 年度より開始
【開発予算】 助成事業の助成率：1/2	(単位：百万円)	平成 18 年度	平成 19 年度	平成 20 年度	
	一般会計	1,077	1,116	762	
	特別会計	0	0	0	
	総予算額 2,956	1,077	1,116	762	
【開発体制】	経済省担当原課	製造産業局産業機械課			
	運営機関	新エネルギー・産業技術総合開発機構			
	プロジェクトリーダー	東京大学 大学院情報理工学系研究科 研究科長 教授 下山 勲			

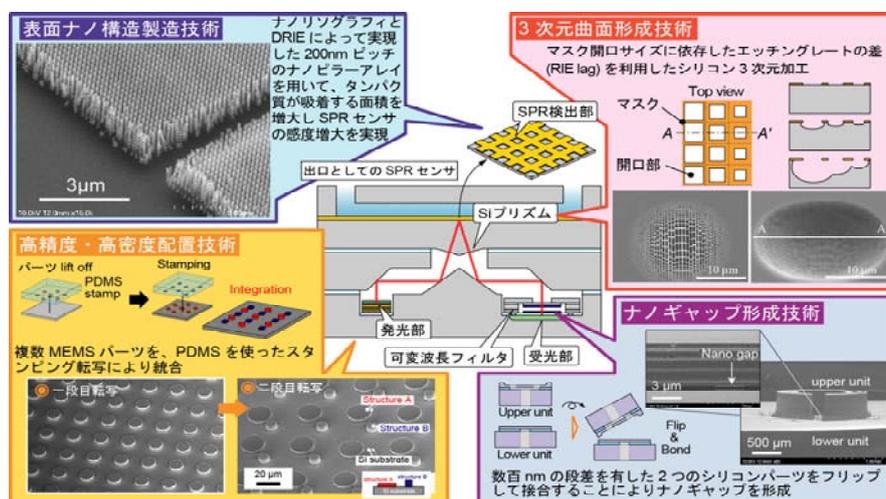
	<p>委託先/助成先 (* 委託先が 管理法人の場 合は参加企業 数も記載)</p>	<p><委託先> 国立大学法人東京大学、独立行政法人産業技術総合研 究所、学校法人立命館大学、国立大学法人東北大学、 財団法人レーザー技術総合研究所、財団法人マイクロ マシンセンター</p> <p><助成先> 三菱電機株式会社、株式会社日立製作所、オムロン株 式会社、株式会社フジクラ、株式会社東芝、オリンパ ス株式会社、パナソニック 電工株式会社、横河電機株 式会社</p>
<p>【情勢変化への 対応】</p>	<p>プロジェクト開始後、米国を中心として設計プラットフォームを用い た表面集積化の動きが活発化し、MEMSに関わる製造技術、設計技術 の両面を備えたトータルな研究開発により、MEMS製品の成功事例が 増加して来た。しかしながら、高集積・複合MEMS製造技術の研究開 発項目であるMEMS/ナノ機能の複合、MEMS/半導体の一体形成 技術、MEMS/MEMSの高集積結合技術に共通する統一的な設計手 法の開発はほとんど行われていなかった。高集積。複合MEMSの開発 から実用化までの期間を大幅に短縮し、国内市場の更なる活性化と国際 的な優位性の確保する為、MEMS構造体と異種材料との複合化や集積 化に対応する高集積・複合MEMSシステム化設計プラットフォームに 関する開発を平成19年度より開発項目に加えた。</p>	

Ⅲ. 研究開発成果について

①MEMS/ナノ機能の複合技術の開発

(1) 選択的ナノ機械構造体形成技術(東京大学)

SPR センサを構成する要素として、3 つのナノ構造形成技術、および、センサパーツ配置技術の開発を行った。まず、金膜ナノ格子構造を最小 50nm の線幅で構成し、SPR センサの光学系の設計自由度を高め、センサの小型化をはかる基礎技術を確立した。次に、マスク開口面積依存性のシリコンエッチングレート差を利用して、最大 51° のスムーズな斜面を形成する技術を確立した。また、スタンピング技術を用いて、シリコンのナノギャップ構造を形成し、近赤外光用 Fabry-Perot 干渉器を開発した。さらに、スタンピング技術を応用し、複数の MEMS パーツを集積対象の基板に高精度に配置する技術を開発した。



(2) バイオ材料(タンパク質など)の選択的修飾技術(産総研)

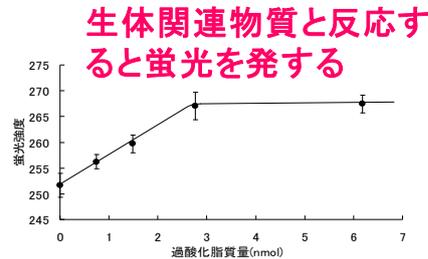
①MEMS 基板上において、癌細胞の増殖・転移、更には種々の生活習慣病と密接に関係する血管内皮細胞増殖因子 (VEGF) などの疾病関連マーカータンパク質、ヒドロキシシリン酸 (HODE) などの酸化傷害バイオマーカーなどの生体分子を特異的に認識し、光学特性の変化といった物理的シグナルを用いて検出するための分子認識素子の構築、②MEMS 基板などの担体上への分子認識素子の固定化法の開発および③微細加工プロセスと融合し、MEMS の技術を利用したバイオセンサーへの適応の可能性を示した。

①分子認識素子の開発

血管内皮細胞増殖因子(VEGF)と過酸化脂質の検出を実証



分子認識素子 + VEGF

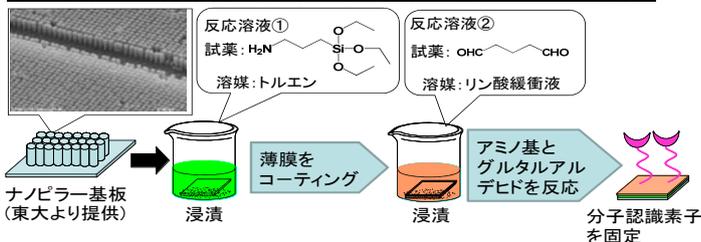


過酸化脂質検出の検量線

②固定化方法の開発

分子認識素子を基板に固定する技術

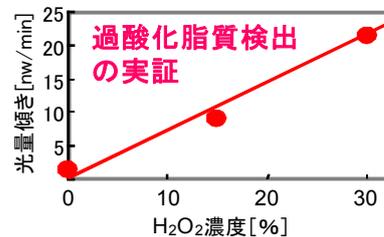
VEGF検出用分子認識素子のナノピラー基板上への固定化



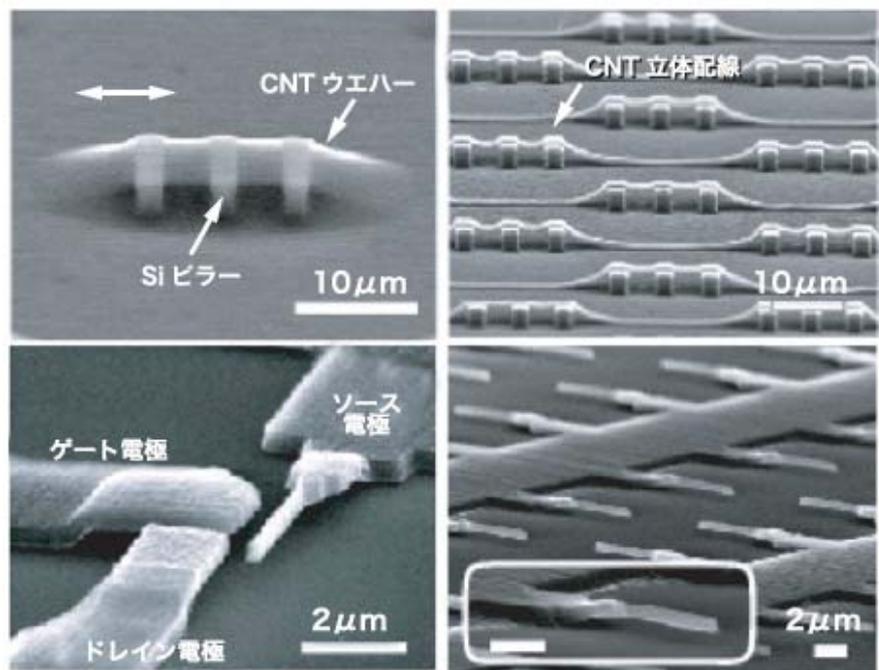
③バイオMEMSセンサへの適用



光学式バイオセンサ



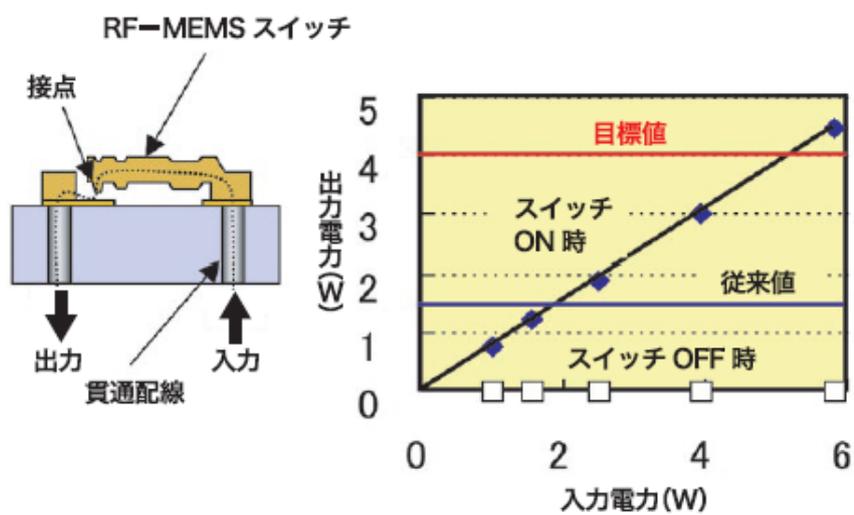
(3) ナノ材料 (CNT など) の選択的形成技術 (産業技術総合研究所) カarbonナノチューブ (CNT) の持つ優れた電気、機械的特性に注目し、MEMS デバイスへの応用展開が可能な CNT ウエハーの作製と微細加工技術を開発した。基板上に CNT が多数配向集合したバルク材料 (CNT ウエハー) を作製し、この素材から微細加工技術により、CNT のカンチレバー、立体配線、リレーを作製することに成功した。



(4) ナノ機能を組み込んだMEMS デバイスの製造技術

(三菱電機株式会社)

本開発では新たな接点材料としてカーボンナノチューブ(CNT)に着目し、CNT が均一に分散された金メッキ膜を形成する技術の開発に成功した。CNT 分散金メッキ膜を貫通配線が形成されたRF-MEMS スイッチの接点に適用することで、電力が常に印加された状態でのスイッチング試験において当社従来比3倍となる4.5Wでのスイッチ開閉動作を実現した。



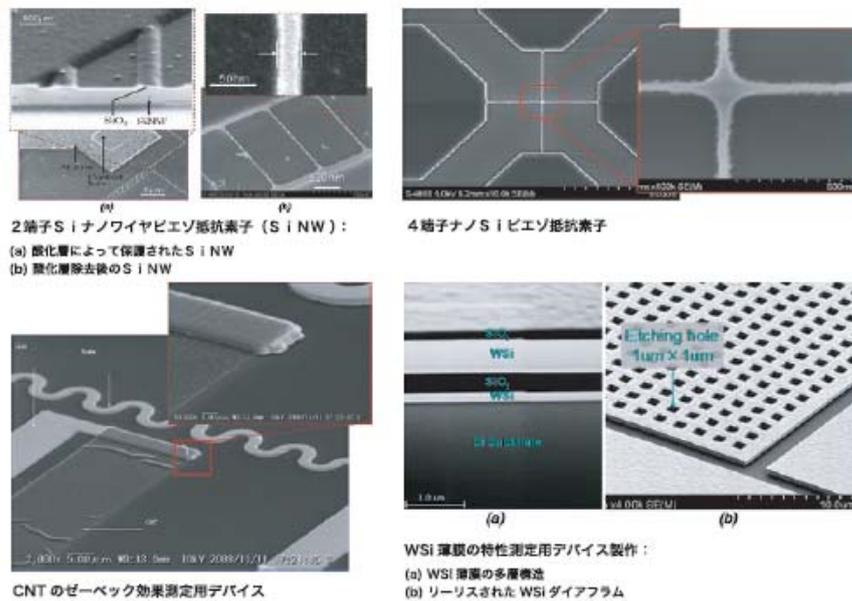
CNT を用いた RF-MEMS スイッチの耐電力性試験結果

②MEMS /半導体の一体形成技術の開発

(1)MEMS-半導体プロセス統合モノリシック製造技術

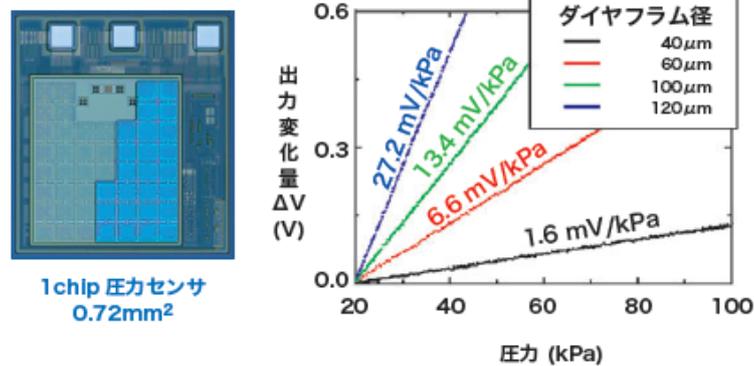
・新たなセンシング原理の探索(立命館大学)

LSI 素子材料の Si、LSI 配線材料の WSi、さらには、カーボンナノチューブに着目し、超微細加工技術で形成したナノスケール構造体について、センサとしての機能・特性を解明した。WSi ナノメカニカル構造の機械的性質(ヤング率、高サイクル疲労特性)、ナノスケール Si やカーボンナノチューブの piezo 抵抗効果などを実験的に明らかにして試験デバイスを製作したほか、電子状態計算に基づく piezo 抵抗物性解析理論により、ナノスケール Si の piezo 抵抗効果面方位依存性を予測した。



・半導体モノリシック集積化基盤技術開発(日立製作所)

LSI の配線層に MEMS を集積化する“配線 MEMS 技術”を開発し、圧力センサのプラットフォームを構築した。開発成果を基に MEMS を LSI の配線上に集積化した 1chip 超小型圧力センサを試作した。



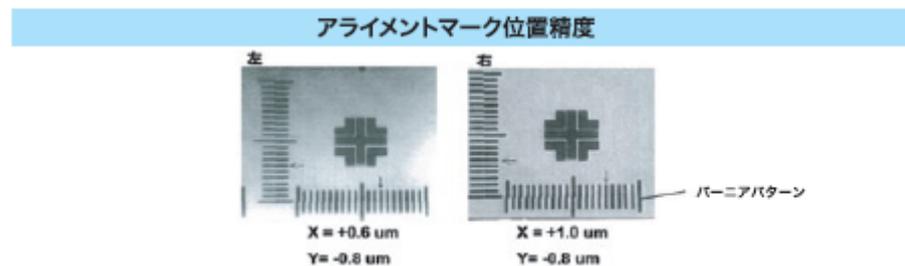
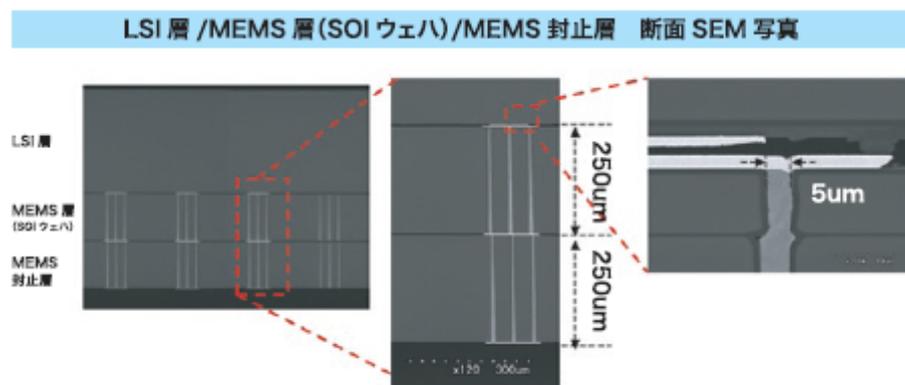
チップ写真および圧力応答特性

(2) MEMS-半導体縦方向配線技術

・縦方向集積MEMS デバイス製造技術の開発 (オムロン)

次世代MEMS の高集積化技術として、高アスペクト TSV (Through Silicon Via) 形成 と高精度ウェハ接合に取り組み、下記の仕様を実現した。

- ① TSV : $\phi 5\mu\text{m}$ アスペクト比 50
- ② ウェハレベル接合 : 常温接合、位置精度 $\pm 1\mu\text{m}$



・配線の自由度を向上できる 3次元配線構造を持つ高信頼性インタポーザル技術の開発 (フジクラ)

3次元貫通配線を実現するために、フェムト秒レーザー改質/ ウェットエッチングによる微細孔形成技術と、熔融金属吸引法による金属充填技術を開発した。本技術により、厚さ $300\mu\text{m}$ の石英基板内部に、クランク形状及び Y字分岐形状を有する 3次元貫通配線を世界に先駆けて作製することに成功した。



(3)半導体横方向配線技術

・高集積MEMS 擬似 SOC 製造技術の研究開発(東芝)

異種デバイス集積を実現するハイパーシステムインテグレーション技術を開発した。

1) ウェハ再構築技術

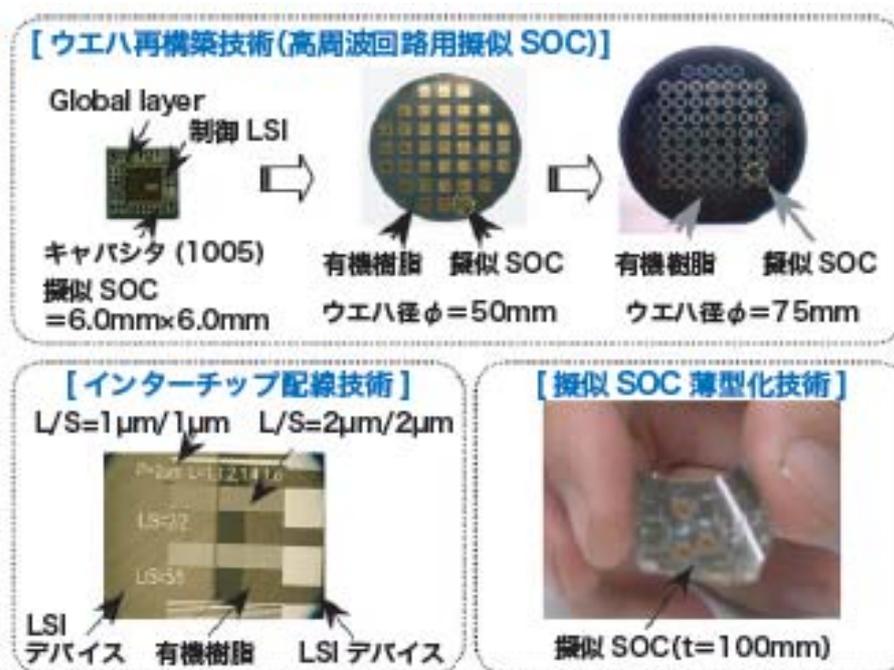
再構築ウェハの大口径化を異種デバイスを精密再配置して、全体に有機樹脂を充填することを真空印刷技術により達成(擬似 SOC ウェハ径 $\phi = 75\text{mm}$)

2) インターチップ配線技術

グローバル配線の微細化を有機樹脂表面の凹凸制御技術により達成(配線幅 Line/Space= $1\mu\text{m}/1\mu\text{m}$)

3) 擬似 SOC 薄型化技術

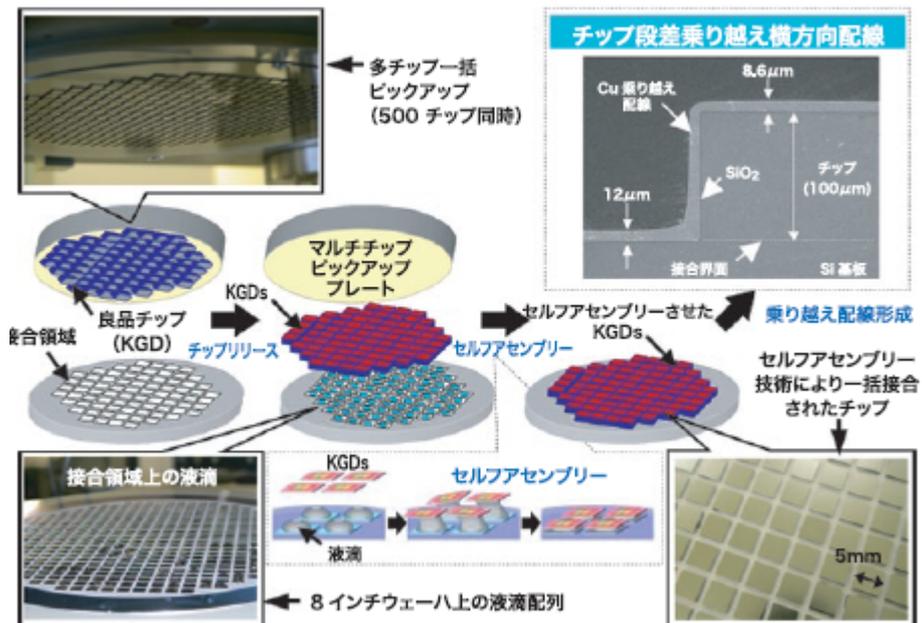
擬似 SOC 薄型化をMEMS 薄膜封止により実現(デバイス厚 $t=100\mu\text{m}$)



・MEMS - 半導体の低温高密度一体化実装技術(東北大学)

液体の表面張力を利用して、500 個以上のチップを 8 インチウェーハ上へ一括搭載するための自己組織化実装装置を開発した。また、平坦化リフトオフ法を用いて、フレキシブル基板上に $5\mu\text{m}$ 角のマイクロバンプを狭ピッチで形成する技術を開発した。さらに、チップ上にコンデンサやインダクタ等の受動素子を形成する技術を開発し、Cu 配線間に磁気ナノドットを充填することにより、自己インダクタンスを約 20% 増大させた。また、キャビティ構造の導入により、周波数特性を大幅に改善させた。

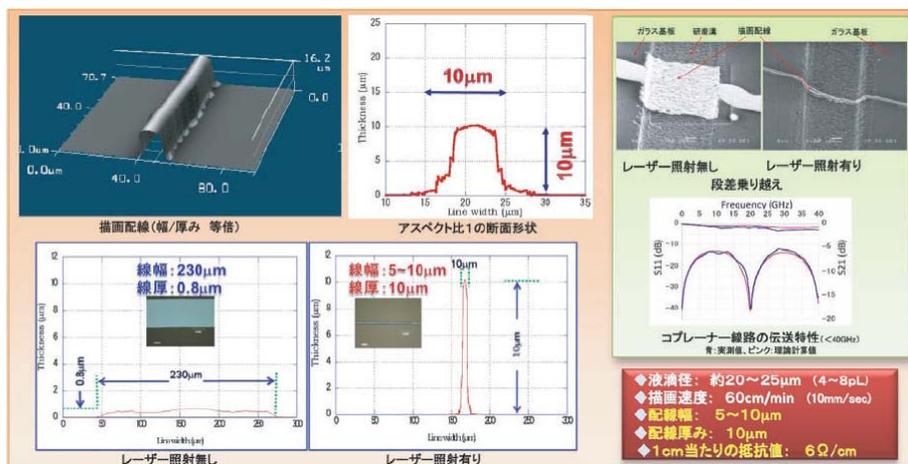
8インチウェーハを用いたセルフアセンブリー工程



・高速微細配線描画技術(産業技術総合研究所)

フレキシブルな樹脂部材や低コストな金属部材上とチップの3次元的表面上に高密度な配線や膜状受動部品を積層一体化できる高速実装プロセス実現の為、下記の技術を開発した。

- 1) レーザー援用インクジェットによる高速微細配線描画技術
- 2) ガスデポジション法で形成した錐形バンプによる低ストレス実装技術
- 3) ケミカル・フリップチップ接続法による低温・無加圧ウェハスケール実装技術

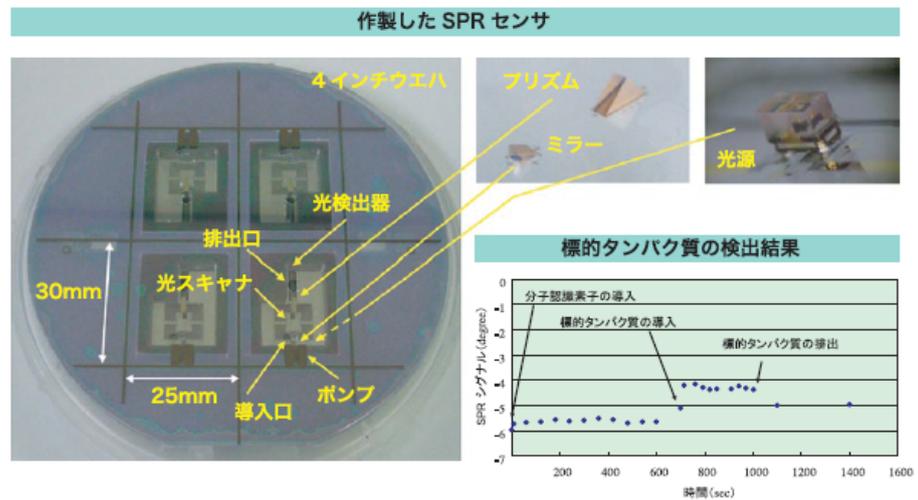


レーザー援用インクジェットによる高速微細配線描画技術

③ MEMS/MEMS の高集積結合技術の開発

(1) 異種材料多層MEMS集積化技術(オリンパス)

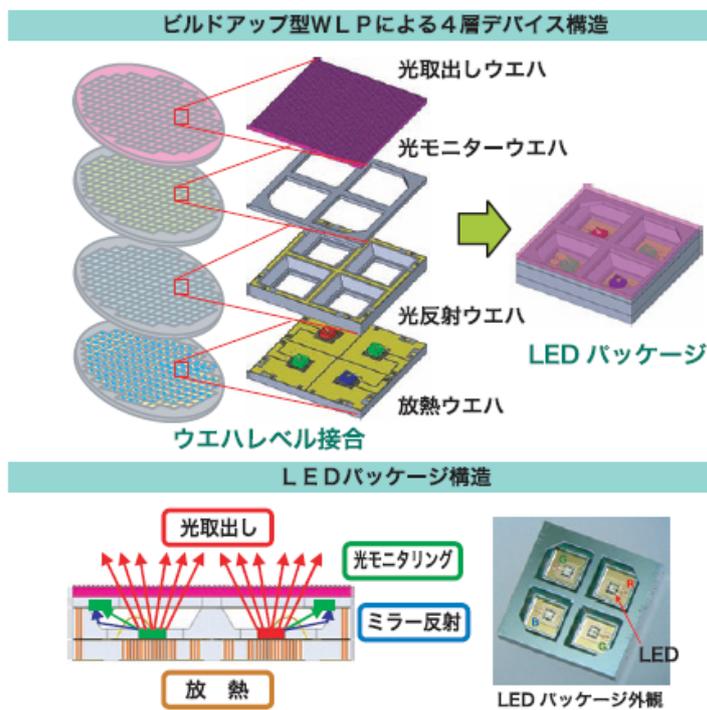
チップレベル接合とウエハレベル接合を組み合わせ、電気、流体、光学等の機能を搭載した SPR センサを開発した。



(2) ビルドアップ型多層MEMS集積化技術

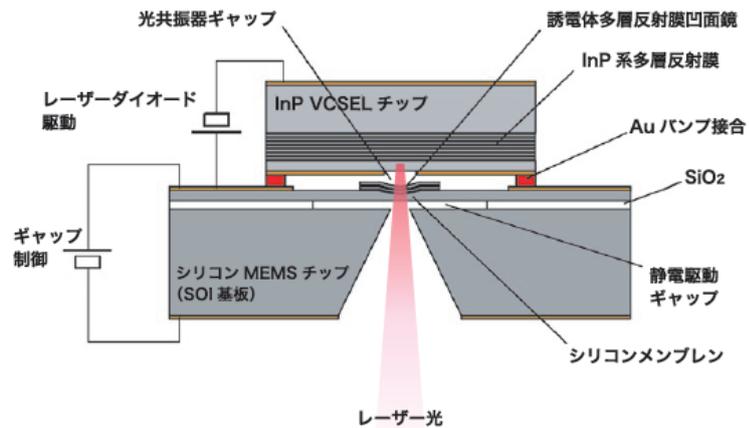
・機能集積化MEMS デバイスを実現するビルドアップ型ウエハレベルパッケージング技術の開発(パナソニック電工)

ウエハ接合→ 3次元加工→ 研磨→ チップ実装などを繰り返すビルドアップ型ウエハレベルパッケージングを実現し、半導体 I C (電子回路)、MEMS (センサ、光)、インターポーザ (配線、放熱) をウエハレベルで積層薄型集積化することに成功した。



・光化合物半導体の高精度接合技術(横河電機株式会社)

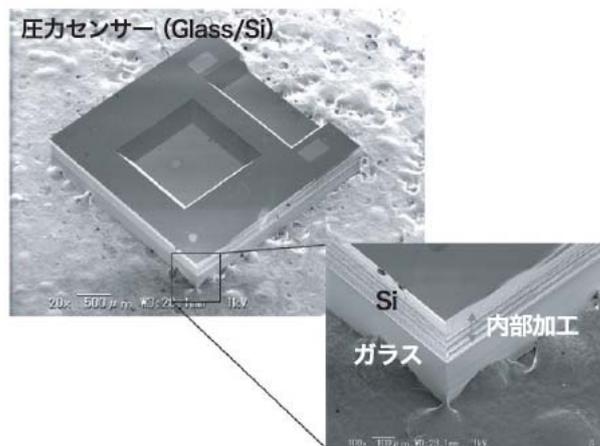
開発した波長可変 VCSEL (面発光レーザー) の構造を示す。InP 系の化合物半導体チップとメンブレンを形成したシリコン MEMS チップを Au バンプで高精度に接合した構造となっている。静電駆動ギャップにギャップ制御電圧を印加することによりメンブレンを動かし波長を変化させることができる。波長可変幅が約 50nm と広く、1 個の電圧による単純な波長制御と、高速に連続波長掃引が可能であることが特長である。



(3) 多層ウェハレベル接合体の低ストレスダイシング技術

(レーザー技術総合研究所／東北大学)

MEMS 素子は内部に可動機構やダイヤフラムなどの脆弱構造を有しており、半導体集積回路の様に水を掛けながら回転刃でウェハを切断すると素子が破損しやすい。そこで、パルスレーザーによるウェハの内部加工に着目し、工業的に広く用いられている高繰り返し Nd:YV04 レーザーやファイバーレーザー、CO2 レーザー等を用いて低コストにドライで切削粉の出ないダイシング技術を開発した。従来のダイシング技術に比べて、製造工程の簡素化、歩留まりの向上を可能とする。



④ 高集積・複合MEMS 知識データベースの整備(マイクロマシンセンター)

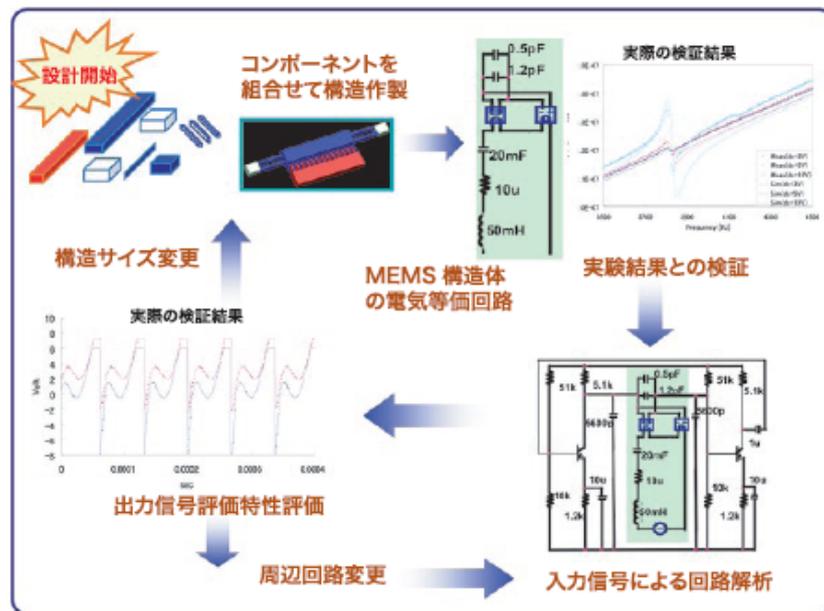
ファインMEMS 開発・製造に係わる研究者・技術者の支援、裾野拡大を図ることを狙いとして、ファイン MEMS プロジェクトの一環として整備したファインMEMS知識データベースを、ウェブを通じてわが国産業界に広く公開した。



⑤ 高集積・複合MEMSシステム化設計プラットフォームの開発

(マイクロマシンセンター)

コンポーネントで構成されるMEMS 構造体の電気等価回路抽出方法を世界に先駆けて開発、実験的に検証した。成果は、Web ライブラリーシステムとして、サービスの提供を開始した。



	【発表・特許出願、その他の指標】				
		論文	口頭発表	特許出願	学会賞
	①MEMS／ナノ機能の複合技術の開発	7	32	19	2
	②MEMS／半導体の一体形成技術の開発	18	95	48	9
	③MEMS／MEMSの高集積結合技術の開発	7	33	41	2
	④高集積・複合MEMS知識データベースの整備	0	2	0	0
	⑤高集積・複合MEMSシステム化設計プラットフォームの開発	8	3	1	0
	合計	40	165	109	13
IV. 実用化、事業化の見通しについて	<p><u>①実用化研究（助成）</u> 本プロジェクトの開発成果を応用したデバイスを各社の事業戦略に沿って2011～2015年を目処に量産化する計画である。例えば、横河電機は、今回、開発した可変波長レーザーを用いた多成分分析計の開発がNEDOのイノベーション推進事業に採択され、その製品化を目指している。</p> <p><u>②基礎的・基盤的研究（委託）</u> 。東大ー産総研ーオリンパスの3者によるSPRセンサ開発に代表される様に、主として、今回のプロジェクトで培われた関係を活かし、共同開発を継続し、実用化を目指す。また、東北大学のセルフアセンブリー技術の様に設備メーカーとの共同開発による設備としての実用化の動きも有る。</p> <p><u>③知的基盤・標準整備などの研究開発（委託）</u> 知識データベース、設計プラットフォームともに09年6月よりマイクロマシンセンターのホームページにて公開を開始した。知識データベースはマイクロマシンセンターの自主事業としてデータ更新等を継続する。設計プラットフォームは、日本機械学会と電気学会に関連研究会を発足し、成果の普及と今後の開発ニーズの把握を行う。</p>				
V. 評価に関する事項	事前評価	平成17年11月			
	評価予定	平成21年度 事後評価実施予定			
VI. 基本計画に関する事項	策定期期	平成18年3月 策定			
	改訂履歴	平成19年5月 及び 平成20年7月 改訂			

I. 事業の目的・政策的位置付けについて

1. NEDO の関与の必要性・制度への適合性

1.1 NEDO が関与する意義

規格品の工業製品の製造が大きく中国へシフトしているなか、我が国の製造業は研究開発型産業への転換が求められている。これらの新しい製造業の1分野としてMEMS（Micro Electro Mechanical System：微小電気機械システム）の産業の牽引役としての役割が期待されている。現在、MEMSが既に実用化されている自動車用のセンサやインクジェットプリンタヘッドでは日本企業が健闘しているものの、光MEMSやバイオMEMSの分野では欧米企業が一部先行しており、今後成長が期待されるMEMS産業の国際競争力を確保するためには、製造技術の一層の高度化（高集積化・複合化）によりMEMSの更なる小型化・高性能化を図ることが必要である。

これまでのMEMSは機械部品の小型化・低コスト化による置き換え需要が中心であったが、今後は自動車のインテリジェント化による安全性向上に向けたセンサへの機能向上や小型・低コスト化への要求、情報通信端末の小型・高機能化に向けたRFデバイスの小型化・高機能化・長寿命化の要求、更には、健康志向と医療費の抑制を背景とした医療分野へのセンサニーズの高まりが予想される。（図1）



図1. 今後、成長が期待される市場とMEMSへのニーズ(プロジェクト立案時の資料)

MEMS と LSI やバイオ・ナノ材料など異種分野との融合或いは異種の MEMS を組み合わせることにより既存の MEMS を凌駕する高機能・新機能を有する MEMS（第2世代 MEMS）を実現することで、これらの市場の要求に応え、MEMS の市場拡大が実現できると期待される。（図2）

既存のMEMSの枠を超えたデバイスで新規市場を開拓

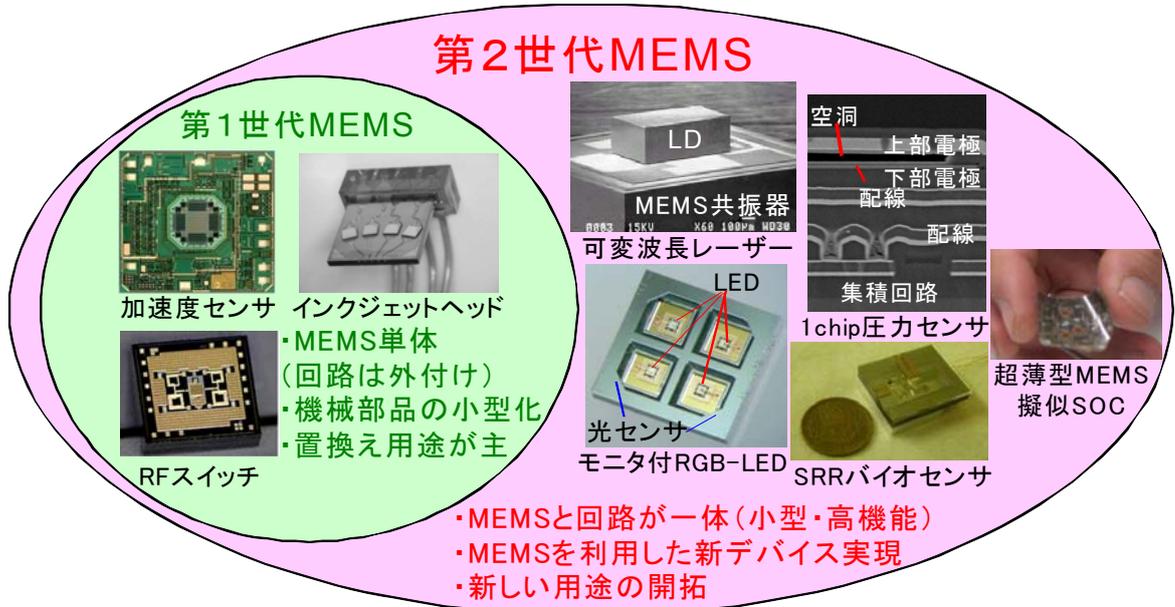
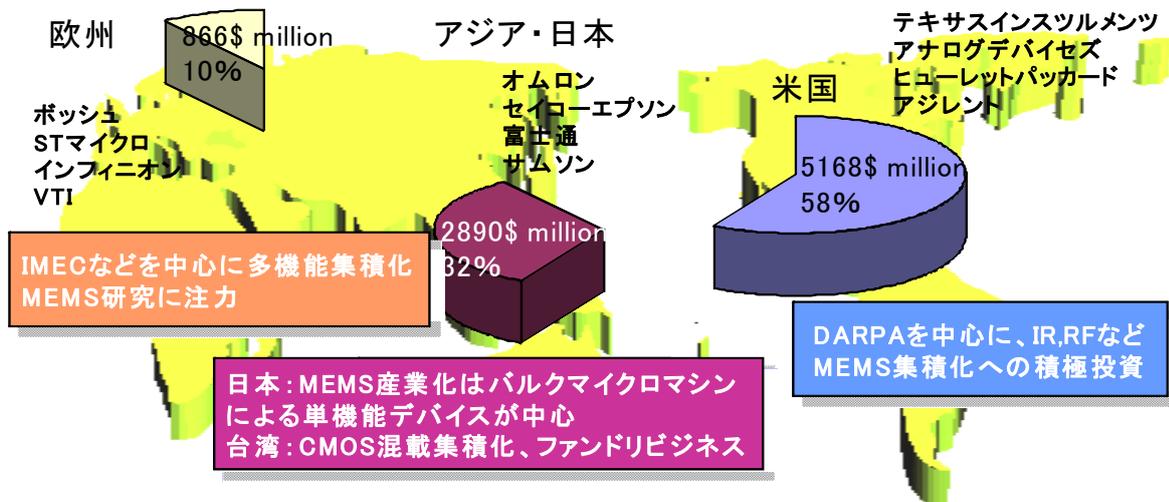


図2. MEMS の高集積化・複合化による適用範囲拡大の可能性

海外においては、米国及び台湾は半導体技術の延長上による MEMS の集積化を指向し、大規模な投資によるファブリービジネスが立ち上がっている。一方、欧州では、多機能集積による MEMS の高度化を指向しており、IMEC や LETI などに開発拠点を活用し、ハイブリッド化を主体とした MEMS 集積の研究開発が進められている。（図3） その為、欧米の一部では、既に、従来型の MEMS に LSI 演算処理回路を集積したり、MEMS 間を結合する高集積・複合 MEMS の開発が着手されており、研究開発促進の時期を逸すると、MEMS 関係市場（2015 年で国内市場 2.4 兆円）を海外メーカーに席卷される恐れがある。

我が国における MEMS 開発は微小三次元構造的加工による単機能 MEMS デバイスを中心として発展してきた。また、ナノ機能研究は世界のトップレベルで、今後は、その活用先として MEMS への期待が高まっている。従って、我が国が成長市場である MEMS の市場を確保する為には、ナノ材料を始めとする MEMS の複合化や集積化で勝機を見出すのが戦略的に望ましいと考えられる。（図4）

第2世代 MEMS の市場は多種多様であり、各企業が個別に市場参入するのを待っているのは、IMEC や DARPA などを中心に大規模な開発を進めている欧米に日本が後れを取る可能性が高いため、NEDO 技術開発機構は、これまで育ててきた MEMS 産業基盤を発展させて、日本の強みを生かした MEMS 産業育成の為、高集積・複合 MEMS 製造技術開発プロジェクトに着手することにした。



欧米やアジア諸国ではMEMSの集積化の動きが活発化
→市場獲得に向け、日本もMEMSの集積・複合化が急務

図3. MEMS の集積化に向けた各国の動き(プロジェクト立案時の資料)

取り組むべき方向

次ステップとして、新たな機能複合と集積化によるMEMS産業強化が不可欠

注力すべきMEMS基盤技術の方向は、3次元化の強化と異種材料の活用による機能・知能の集積化

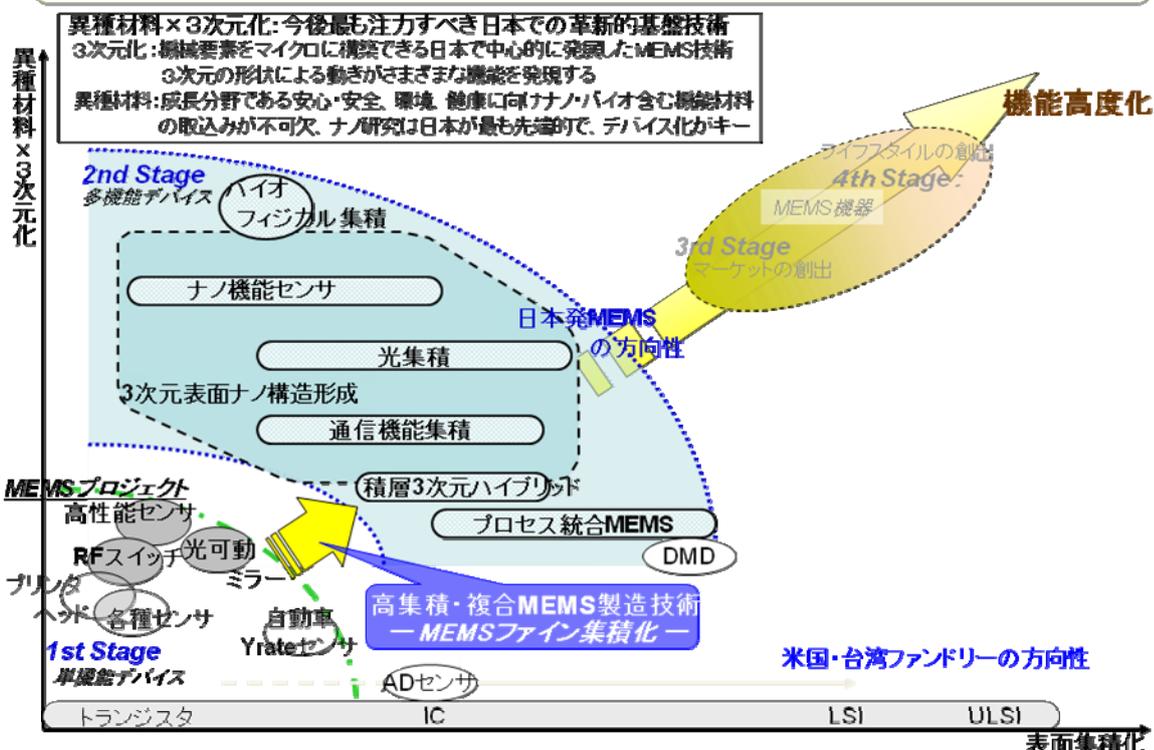


図4. 我が国が目指すべき方向性

1.2 実施の効果(費用対効果)

図5に2005年から2015年に掛けての我が国におけるMEMS関連市場の予測を示す。

2010年から2015年に掛けて、自動車や情報通信機器、医療福祉などの分野を中心に我が国のMEMS関連市場は約1.2兆円の伸びが期待されている。この新市場の獲得には、MEMSの集積化や複合化による新規デバイスの実現とその製品化がキーとなる。

高集積・複合MEMS製造技術に立脚した産業を育成するに当たり、次の観点が重要である。すなわち、一定規模の市場有する高集積・複合MEMS応用製品の早期具現化、広範囲の応用分野の開拓、製造基盤技術と関連産業の育成、の3点である。これらの観点に対応する企業群も、類別ができる。第2世代MEMSである高集積・複合MEMSの事業化において、早期の応用製品具現化を目指すのはMEMS技術にある程度の経験を持つ企業に対応する。一方、この技術にはあまりなじみがないが、その企業固有の応用対象にMEMS技術を導入して、新たな製品展開を模索していきたいと考えている企業は、広い範囲で応用分野を開拓する役割を果たす。最後に、製造技術に関連するのは、製造装置産業、解析設計ツール産業、エンジニアリング産業、コンサルティング産業、設計・製造代行産業、などハードウェア・ソフトウェアに関係する企業である。

NEDOが本プロジェクトを実施する効果として、以下の3つが挙げられる。

(1) 我が国の高集積・複合MEMS市場の早期具現化

MEMSの集積化・複合化による応用範囲の拡大が期待されているが、その可能性は多岐に渡っており、どの市場から立ち上がって行くのか具体的な形は見えていない。自然発生的に市場が立ち上がるのを待っているのは、欧米に出遅れ、市場を席卷される恐れが有る。本プロジェクトでは、助成事業による実用化研究にMEMS分野で実績の有る企業のプロジェクト参画により高集積・複合MEMSの市場を早期に具現化し、国内企業のこの分野への参入を促進することを狙っている。

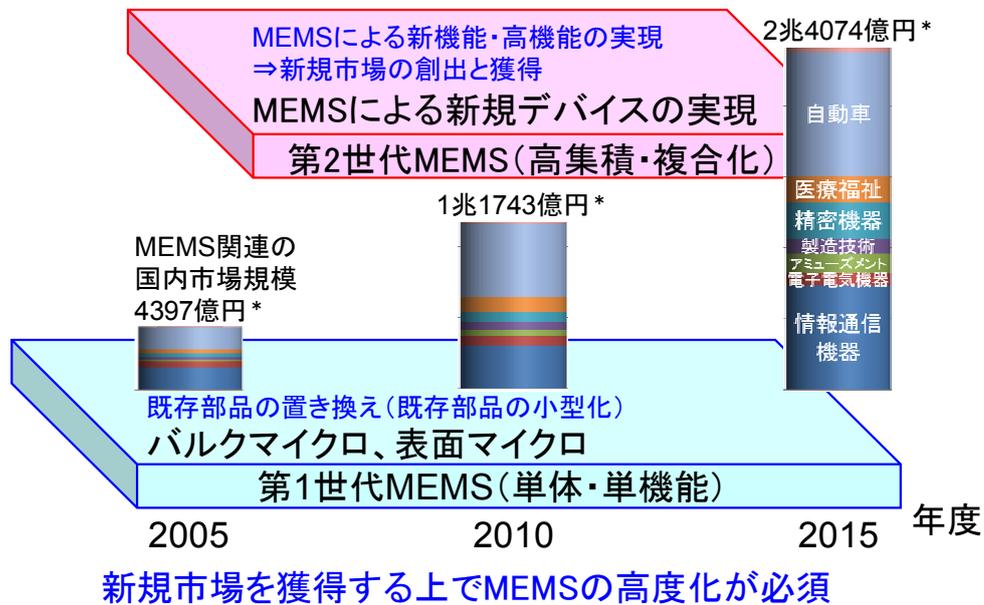
(2) 高集積・複合MEMS製造技術の国際競争力の向上

本プロジェクトにより高集積・複合MEMSの製造技術が進展し、することにより、我が国の競争力の強化が図られる。本プロジェクトでは、委託研究は原則、成果を公開することになっている為、大学や公的研究機関と装置メーカーとの共同研究により、装置産業の高集積・複合MEMSに関する裾野を拡大する効果も期待できる。

(3) 新規参入者の拡大と多様な高集積・複合MEMS製品の開発加速

本プロジェクトでは、開発成果のデータベース化と高集積・複合MEMSシステム化設計プラットフォームの開発を行い、その成果を広く公開することでMEMSに経験の少ない企業でも参入し易い環境を構築する。これにより、新規参入者の拡大とプレイヤーの増加による多様な高集積・複合MEMS製品の開発加速が期待できる。

本プロジェクトの総実績額は約 30 億円であるが、上述の 6 つの分野への効果が期待でき、MEMS の高集積・複合化により今後、生まれる予想される 1 兆円余りの国内市場獲得に貢献できれば、費用に対する効果は妥当であると考える。



* 市場規模は、平成18年 MEMS の技術戦略マップのローリングに関する調査報告書
(マイクロマシンセンター、日鉄技術情報センター)より引用

図5. MEMS関連国内市場の予測とMEMSの高集積・複合化の必要性

2. 事業の背景・目的・位置付け

2.1 事業の位置付け・必要性

我が国には、材料産業や機能性部品産業といったものづくり産業を基盤とした「高度部材産業集積」があり、これが、我が国の製造業の国際競争力を支えてきた。新産業創造戦略にも指摘があるように、我が国がこうした高度部材産業集積を形成していることが、ものづくりに不可欠な要素技術（精密微細加工や特殊素材合成等）のネットワーク化を通じた、迅速かつ高度な摺り合わせを実現してきたといえる。また、川下（最終製品）、川中（材料・部品・装置）、川上（素材、原材料）の分厚い産業集積に育まれた摺り合わせのネットワークが、新技術の素地となり、次のイノベーションにつながってきたのである。他方、近年、韓国、中国、台湾を初めとする東アジア諸国の技術力向上を背景として、製造技術における国際競争が、ますます激化している。

こうした中、製造業の中核の一つである電子部品・デバイス産業は、その業績が半導体や液晶の景気サイクルに左右されがちであるとともに、先端技術であるが故に国際的開発競争が熾烈であり、先行きが不透明等、予断ならない状況にある。また、電子部品・デバイス産業は高性能機械の重要な構成要素であることから、同産業の業績が、我が国製造業の今後の業況に大きな影響を及ぼしうると考えられる。

近年の電子部品・デバイスの小型化・高性能化に大きく寄与している技術が、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems : 微小電気機械システム) である。MEMS とは、微細な電気要素と機械要素を一つの基板上に組み込んだ部品をいい、半導体製造技術やレーザー加工技術等各種の微細加工技術を用いて製造される。情報通信、医療・バイオ、自動車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、「技術戦略マップ」においても、MEMS は、我が国製造業の「川中」の一角をなす基幹部品の国際競争力強化等の観点から、重要な分野と位置づけられている。

そのため、図6に示す様に NEDO 技術開発機構は、「MEMS プロジェクト」（平成15～17年度）及び「MEMS-ONE プロジェクト」（平成16～18年度）を通じて、日本国内の MEMS 産業の環境整備を行って来た。MEMS の複合化や集積化により、これまで育ててきた MEMS 産業基盤を欧米に後れをとることなく発展させて、日本の強みを生かした MEMS 産業を育する為、高集積・複合 MEMS 製造技術開発プロジェクトに着手することにした。

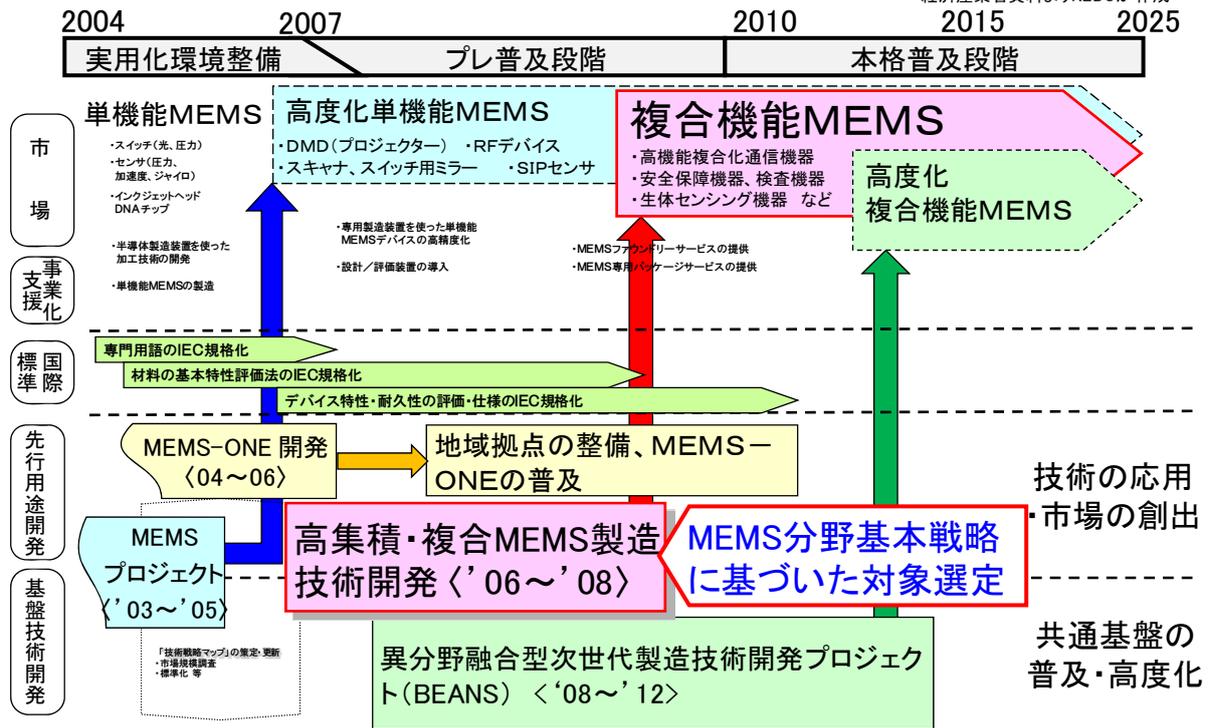


図6. 我が国における MEMS 開発の基本戦略と流れ

2.2 国のプログラムとの関連性

高集積・複合MEMS製造技術開発プロジェクトは経済産業省の「ロボット・新機械イノベーションプログラム」の下で実施されている。「ロボット・新機械イノベーションプログラム」の目的は、ロボット技術・機械技術を基盤とし、IT技術目的の一つとして、IT技術・知能化技術など先端の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・強化を目指すことにある。図7に示す様に本プログラムの目的達成に向け、NEDOでは終了したものを含め、10以上のプロジェクトを実施して来た。

本イノベーションプログラムでは機械分野の達成目標は次の様に設定されている。

「(1) 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。」

新機械技術の1つとして位置付けられるMEMSをナノ材料や半導体、異種MEMSなどの先端的要素技術と融合させることで、MEMSの高機能化、高集積化を実現し、産業や医療など幅広い分野へのMEMSの応用展開を実現し、市場を広げると共に、開発成果のデータベースや半導体集積回路などの周辺回路とMEMSデバイスをシームレスに設計できる設計プラットフォームをWeb上で無償公開することでMEMSの事業化に関わるプレーヤの底辺を拡大し、我が国の製造業の競争力の維持・強化を目指すものであり、「ロボット・新機械イノベーションプログラム」の目的と合致している。

また、高集積・複合MEMS製造技術開発プロジェクトは、図6に記載されている様に先行用途開発に比重をおいたプロジェクトであり、助成事業を基本として早期に成果を実用化することを目指していることから、イノベーションプログラムで一例として示された2015年頃に革新的MEMSの本格普及にも貢献できるものと考えている。

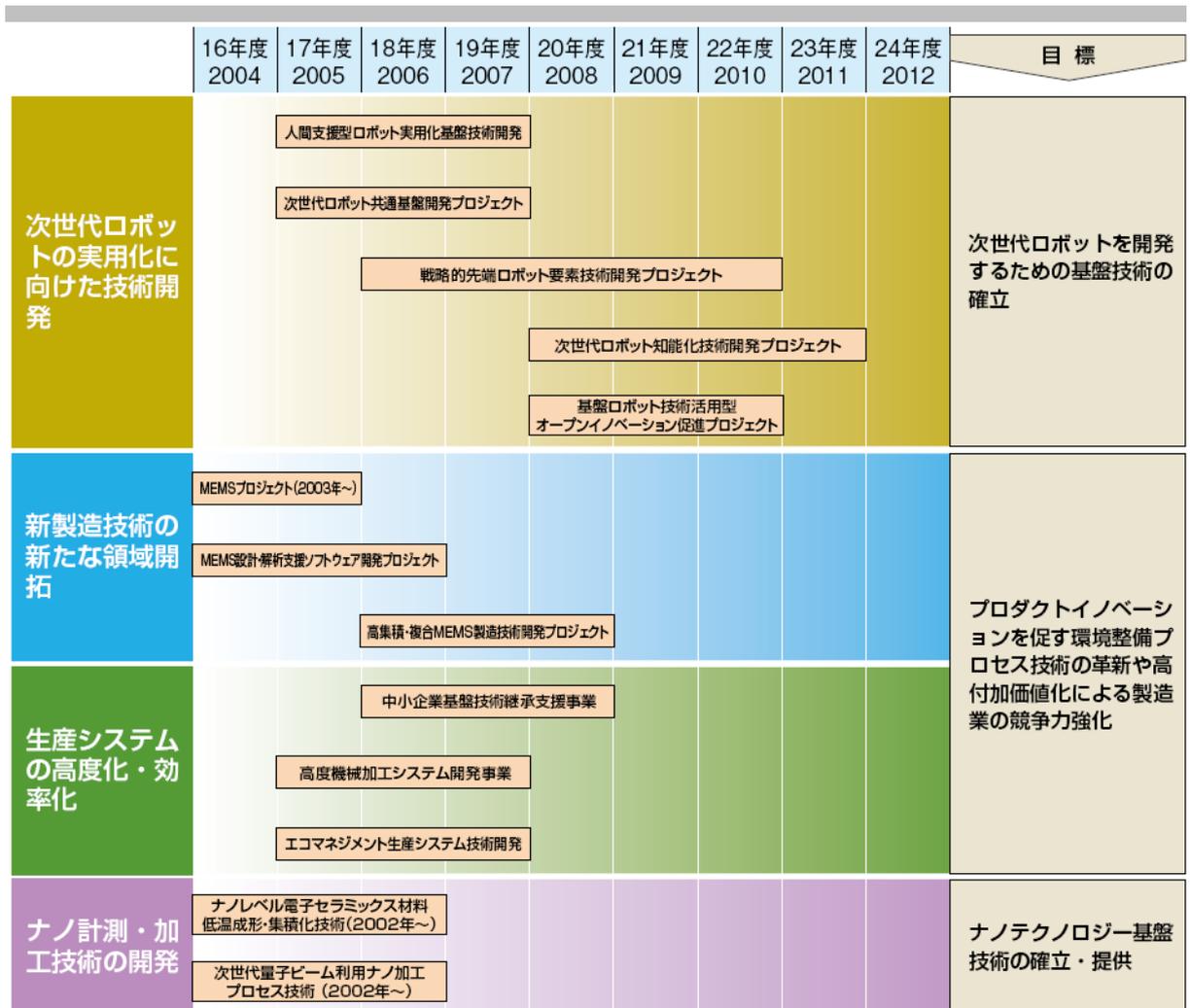


図7. NEDOの「ロボット・新機械イノベーションプログラム」関連プロジェクト

II. 研究開発マネージメントについて

1. 事業の目標

高集積・複合MEMS製造技術開発プロジェクトの目標

今後成長が期待される市場である自動車、情報通信、安全・安心、環境、医療等において必要不可欠となる、小型・省電力・高性能・高信頼性の高集積・複合MEMSデバイスを製造する技術を開発する。また、上記技術開発を通じて得られた製造技術に関わる知識を集約し、データベースを整備し公開する。

上記の目標を達成に向け下記の①～③の3分野に渡る製造技術開発とそれらの成果を集約し、広く普及を図るための2つの基盤整備事業（④⑤）に取り組んだ。

- ①MEMS / ナノ機能の複合技術の開発
- ②MEMS / 半導体の一体形成技術の開発
- ③MEMS / MEMS の高集積結合技術の開発
- ④高集積・複合MEMS 知識データベースの整備
- ⑤高集積・複合MEMS システム化設計プラットフォームの開発

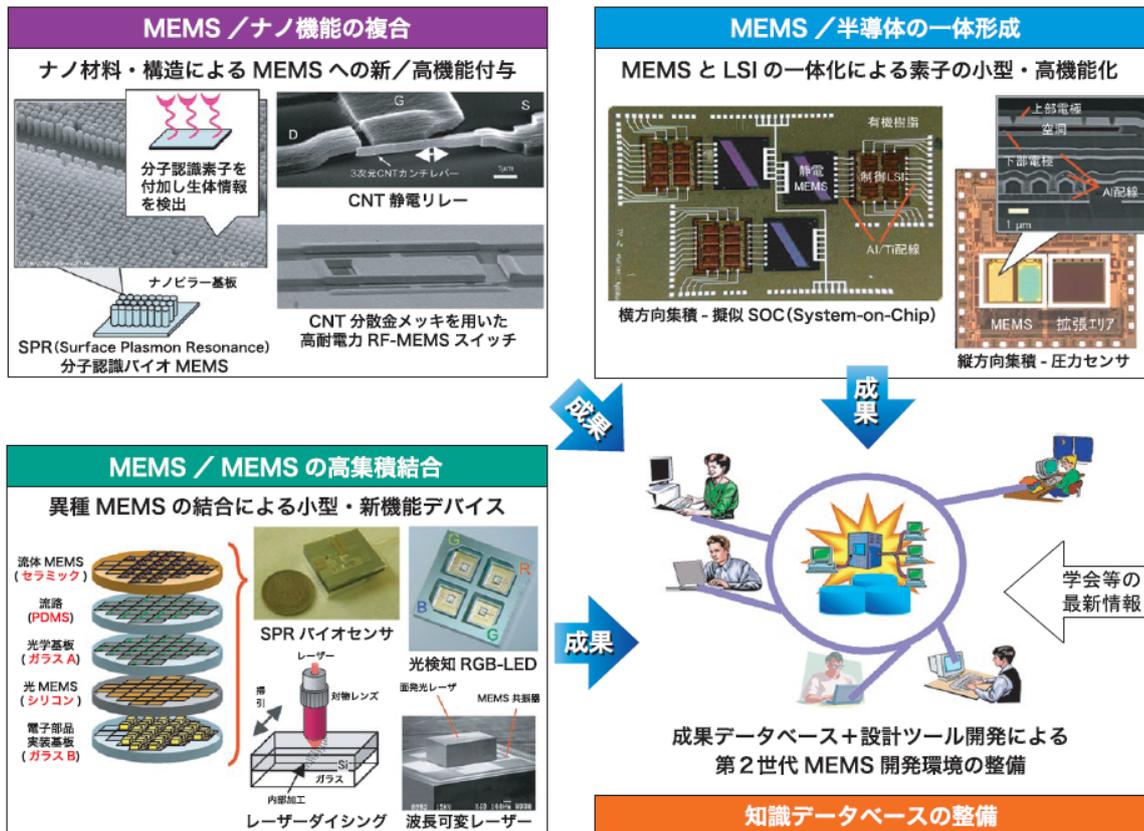


図8. 高集積高集積・複合MEMS製造技術開発プロジェクトの構成

研究開発項目①～⑤はプロジェクト終了時における達成目標を設定し、その目標値を基本計画に織り込んだ。

研究開発項目①～⑤の目標の詳細に関しては、本事業原簿に添付された本プロジェクトの基本計画をご参照頂きたいが、目標値の設定に当たってはMEMS分野のロードマップで将来動向が予測されている技術に関しては、図9に示す様に、助成テーマに関しては、実現間近の要素技術を使って、プロジェクト期間中にデバイスの形に仕上げられる様に目標を設定した。委託テーマに関しては、助成テーマが狙うに較べて数年先に実現が予想される要素技術に焦点を当て、目標を設定した。また、全くの新規分野で定量的な数値が予想されていない項目に関しては定性的な目標設定に留めた。

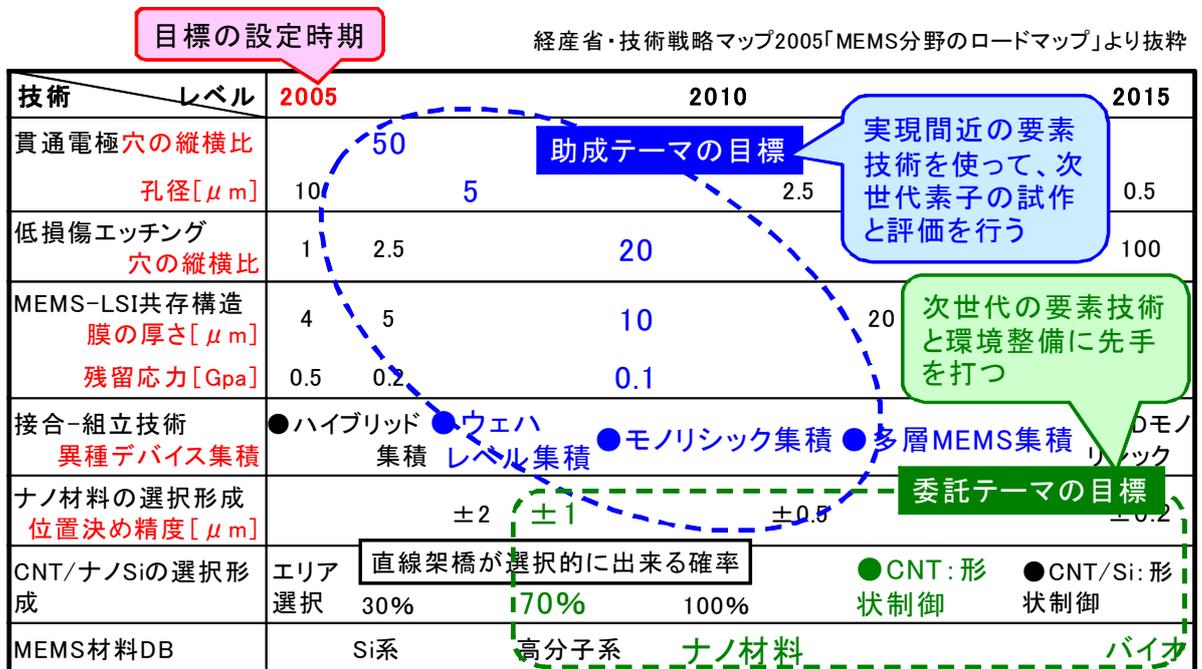


図9. 研究開発項目の目標値設定の考え方

2. 事業の計画内容

2.1 研究開発の内容

2.1.1. 研究開発項目①「MEMS／ナノ機能の複合技術の開発」

(1) 選択的ナノ機械構造体形成技術

リソグラフィー、エッチングや表面修飾などによってできる、波長オーダー以下のナノ機械構造体やその動きが、MEMSの光学的な特性を大きく変える可能性があるため、センサや表示デバイスとしての利用が期待されている。機能を発揮するに十分な加工精度と低加工損傷性をもつナノ機械構造体を所定の領域に選択的に形成する技術、ナノ機械構造体の解析および発現した特性を評価する技術を研究開発するとともに、MEMSデバイスへの適用の可能性を示す。

(2) バイオ材料（タンパク質など）の選択的修飾技術

MEMS基板上において、生体を利用、または模倣したセンシング技術の実現を目指し、改変されたタンパク質などのバイオ材料を所定の領域に選択的に修飾する技術および微細加工プロセスとの融合技術を研究開発するとともに、MEMSセンシングデバイスへの適用の可能性を示す。

(3) ナノ材料（CNTなど）の選択的形成技術

CNTに代表されるナノ材料の持つ柔軟性、導電性、耐摩耗性、耐食性、低摩擦係数、強靱性などの優れた機能をMEMSデバイスに応用することを目的に、構造制御されたナノ材料（CNTなど）の形成技術、それを所定の領域に選択的に形成する技術および欠陥制御技術を研究開発するとともに、MEMSデバイスへの適用の可能性を示す。

(4) ナノ機能を組み込んだMEMSデバイスの製造技術

従来よりも優れた機能を発揮するRF-MEMS等のMEMSデバイスを実現するために、上記(1)、(2)または(3)の選択的にナノ機能を発現する修飾、形成プロセスも含めたMEMSデバイス製造の一貫プロセスを開発する。

達成目標

(1) 選択的ナノ機械構造体形成技術

L/S：50nm以下、縦方向：80nm以上、可動部を擁する場合は150nm以下のギャップを保持するナノ機械構造体を所定の領域（位置精度：±1μm以下）に選択的に形成できる技術を確認するとともに、それがナノ機能を発現することを示す。さらに、構造体の形状・寸法やその動きと発現するナノ機能の関係も明確にする。

(2) バイオ材料（タンパク質など）の選択的修飾技術

2種類以上のバイオ材料（改変されたタンパク質など）を、その配向性が制御された状態で、

複雑構造体の所定の領域に選択的に形成する技術を確立するとともに、そのバイオ材料が生体機能を模倣したメカニズムで疾患関連などの生体物質を認識できることを示す。

(3) ナノ材料 (CNT など) の選択的形成技術

サイズ直径：1 μm 以下或いは厚み精度：0.1 μm 以内のナノ材料を所定の領域 (位置精度： $\pm 1 \mu\text{m}$ 以下) に選択的に形成する技術を確立するとともに、それがナノ機能を発現することを示す。

特に、CNT の選択的形狀制御においては、高アスペクト比 (1 : 10 以上)、高密度充填 (充填率：50% 以上) の数 μm から数百 μm スケールのMEMS 向け配向CNT 構造体を製造するCNT 成長技術を開発する。直線形状で架橋させた場合には、架橋率：70% 以上を目指す。また、その機械的、化学的特性を評価、改善し、具体的デバイスへの適応を目指す。

(4) ナノ機能を組み込んだMEMS デバイスの製造技術

少なくとも、プロセス温度が400°C 以下で、ナノ機能を所定の領域に選択的にウェハレベルで形成し、かつナノ機能形成プロセスによりMEMS が損傷を受けることなく、逆にMEMS 形成プロセスによりナノ機能が劣化することがないMEMS 一貫プロセスを確立するとともに、MEMS 一貫プロセスにより試作されたナノ機能付加MEMS デバイスが、従来よりも優れた性能を発揮することを示す。

2.1.2. 研究開発項目②「MEMS / 半導体の一体形成技術の開発」

(1) MEMS - 半導体プロセス統合モノリシック製造技術 【助成事業、委託事業】

CMOS・LSI 材料互換プロセスを用いて、先端CMOS・LSI とセンサを始めとした様々なMEMS デバイスをモノリシックに集積化可能なMEMS 製造プロセスを開発する。先端LSI との混載メリットを最大限活かした高感度化・低電圧化・小型化を実現するため、最小加工寸法 (ギャップ) サブ μm ~ nm レベル + 高アスペクト比の低損傷エッチング技術、低ストレス成膜技術、大面積のオンチップ空洞形成封止技術、MEMS と異なった機能要素 (電子回路、受動素子など) の多層・モノリシック集積技術および外部との電気接続技術などが含まれる。さらに、集積化センサ試作、オンチップ機械特性広範囲制御により、本手法の有効性の実証なども行う。

この他、ナノ半導体セラミックセンサ、ナノワイヤ圧電体等、半導体センサの微細化により発現する新たなMEMS センシング原理の探索を行う。

(2) MEMS - 半導体縦方向配線技術

上記CMOS 互換プロセス統合技術に加え、MEMS の搭載自由度を上げることも重要である。これに対応する製造技術として、別々に製造されたCMOS・LSI とMEMS をウェハレベル

で多層に接合する技術が必要となる。そのために、将来の65nmルールまでのCMOS・LSIウエハやバルク型も含めたMEMSウエハに対して、小径で、高アスペクトな貫通孔配線を形成し、多層にCMOS・LSIとMEMSを電氣的に接続する技術を開発する。

また、配線の自由度を飛躍的に向上できる3次元配線構造を持つ高信頼性インターポーザル技術の開発も縦方向への集積化に重要な要素として開発する。

(3) MEMS－半導体横方向配線技術

上記と同様の目的で、以下のMEMS－半導体横方向配線技術を開発する。別々のウエハ上に製造されたMEMSデバイスとCMOS・LSIを検査選別した後、それらをチップレベルで隣接して配置し、ウエハ状に再配列する。このMEMS－CMOS・LSI一体疑似ウエハに対して、集積化したいチップ間を、半導体プロセスにより微細配線で電氣的に接続する。この横方向配線技術により、従来技術のSIP (System In Package) では達成できない小型化と、従来技術のSOC (System On Chip) では達成できない高性能化とを実現できる。

この他、フレキシブルな樹脂部材や低コストな金属部材上とチップの3次元的表面上に高密度な配線や膜状受動部品を積層一体化できる高速実装プロセスの開発も必要となる。そのため、絶縁層と導電層、バンプおよび高誘電体層や抵抗体層を、低温で高速に直接微細描画することにより、チップの垂直段差への配線等の3次元表面上への高密度配線、高精度フリップチップ接続やコンデンサ、抵抗などの受動部品の高密度な低温積層一体化実装技術を確立する。

達成目標

(1) MEMS－半導体プロセス統合モノリシック製造技術

MEMS製造プロセスとして、180nm技術ノードCMOS・LSI材料プロセス互換を目指す。MEMS製造技術ロードマップに基づく統合プロセスによるMEMSの加工目標として、最小加工寸法：0.5 μ m以下、アスペクト比：20以上、残留応力：0.1GPa以下(膜厚：0.1～10 μ m)、MEMSと複数種類の異なった機能要素(電子回路、受動素子など)の多層・モノリシック集積化を目指す。

半導体センサの微細化により発現する新たなMEMSセンシング原理の探索については、製造プロセスは問わないが、1つ以上の新たなMEMSセンシング原理を見出すことを目指す。

(2) MEMS－半導体縦方向配線技術

将来の65nmルールまでのCMOS・LSIとMEMS(バルク型も含む)を多層に集積するために、穴径：5 μ m以下、アスペクト比：50以上の貫通孔配線を形成するとともに、CMOS・LSIとMEMSを3層以上に渡って接合し、確実な電氣的接続を実現する。

インターポーザルについては、インターポーザル内の貫通配線構造に従来にない分岐構造を導入し、インターポーザル内部での3次元インターコネクションを実現する。そのサイズとしては、インターポーザル厚：300 μ m以下で、貫通配線(穴径：100 μ m以下)の横方向へのシフト量：500 μ m以上を達成する製造技術を目指す。

(3) MEMS - 半導体横方向配線技術

L/S : $1\ \mu\text{m}/1\ \mu\text{m}$ 以下の微細配線を形成し、CMOS・LSIとMEMSの間の確実な電氣的接続を実現する。さらに、横方向集積型MEMSパッケージの薄型化(厚さ: $100\ \mu\text{m}$ 程度)を目指す。

この他、三次元表面上への高密度配線パターンの低温で高速な直接微細描画技術と受動部品の高密度な低温積層一体化実装技術を確立する。高密度配線パターンとして、垂直乗り越え段差: $100\ \mu\text{m}$ 以上、パターン寸法: $5\sim 10\ \mu\text{m}$ 、成膜温度: 400°C 以下、成膜速度: $10\ \mu\text{m}/\text{min}$ 以上および描画速度: $1\ \text{cm}/\text{min}$ 以上を目指す。

2.1.3. 研究開発項目③「MEMS/MEMSの高集積結合技術の開発」

(1) 異種材料多層MEMS集積化技術

MEMS - MEMSの高集積結合技術においては、多層の異種材料ウェハレベル接合技術が基本となる。具体的には、異種材料(シリコン、ガラス、樹脂など)のウェハを、平面方向に高精度に位置決めするばかりでなく、垂直(Z)方向にも高精度に組立ができる技術を開発するとともに、機能を損なうことのない、例えば低温、低応力の接合技術を開発する。

(2) ビルドアップ型多層MEMS集積化技術

上記のようにさまざまな異種材料ウェハ上にMEMSを形成した後、それらを順次または一括でウェハレベル接合するだけでなく、エッチング、機能部位形成・異種材料形成、実装など各種加工を施したMEMSウェハを、別のMEMSウェハと接合し、さらにこれらの工程を繰り返すことで、さらに高密度な多層MEMSを実現できる。そのために、接合するウェハ状態にあわせた機能損傷がない各種ウェハレベル接合手法と接合されたウェハ状態にあわせた各種加工方法を開発する。

なお、発光素子等の高価な化合物半導体素子を実装する場合は、チップレベルで接合する必要があり、さらに、発光素子においては所望の光軸方向を保持した接合が求められるため、チップレベルの高精度接合技術も必要に応じて開発する。

(3) 多層ウェハレベル接合体の低ストレスダイシング技術

多層ウェハレベル接合体には、Siのみならず、酸化物、金属、化合物、樹脂、等、種々の材料が混在し、かつ積層界面はウェハ母材より低強度である場合が多い。またチップサイズに対してチップ厚さ比が大きくなり、ダイシング時のチップング等損傷の影響がより大きくなる。したがって、できるだけ低ストレスで多層ウェハレベル接合体を切断できるダイシング技術を開発する。

達成目標

(1) 異種材料多層MEMS集積化技術

ウェハサイズ：直径100mm以上、3層以上、異種材料（シリコン、ガラス、樹脂など）をウェハレベルで接合し、面方向：±1μm以下の位置決め精度、垂直（z）方向：±0.5μm以下の組立精度で、複数回の接合に耐えられることを目指す。

(2) ビルドアップ型多層MEMS集積化技術

各ウェハ（直径100mm以上）の接合精度および加工精度は、面方向：±1μmを指すとともに、各ウェハ接合工程の間に加工工程（エッチング、実装、機能部材・異種材料形成、など）を設けながら、ダメージを与えることなくウェハ3層以上を順次接合できることを目指す。

化合物半導体チップの高精度位置決め接合技術については、位置決め精度：±1μm以下、傾き精度：0.05deg以下を目指す。

(3) 多層ウェハレベル接合体の低ストレスダイシング技術

多層ウェハレベル接合体の低ストレスダイシングについては、異種材料で構成される3層以上のウェハレベル接合体（直径100mm以上）に対して、チップング、層間剥離およびMEMS可動部破損などの破損率について、トータルで1%以下を目指す。

2.1.4. 研究開発項目④高集積・複合MEMS知識データベースの整備

高集積・複合MEMS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。

達成目標

高集積・複合MEMS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、特許情報及び特に委託事業を中心としたプロジェクトの研究成果も含めて）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で開発が行われているMEMS用設計解析支援システムに付加する。

2.1.5. 研究開発項目⑤「高集積・複合MEMSシステム化設計プラットフォームの開発」

高集積・複合MEMS製造技術開発の研究開発項目①～③及びその周辺に関わる高集積・複合MEMSに適した設計プラットフォームとしての等価回路モデルに関する情報を整理し、Web閲覧システムとして構築する。さらに、CADモデルと等価回路モデル間の相互生成技術に関して調査を行う。

達成目標

研究開発項目①～③及びその周辺に関わる高集積化MEMS設計プラットフォームとしての等価回路モデルに関する情報を整理し、Web閲覧システムとして構築する。また、MEMS用設計解析支援システムの回路シミュレーション・モデルを高集積・複合MEMSに適用される等価回路モデルに拡張し、その内容をWeb閲覧システムに掲載する。

2.2 研究開発の実施体制

本研究開発はNEDO技術開発機構が、単独ないし複数の原則、本邦の企業、研究組合、公益法人等の研究機関から公募によって研究開発実施者を選定し実施した。

図10に本プロジェクトのテーマ及び事業者の構成を示す。本プロジェクトは市場化に向けた産業界の具体的な取り組みを支援する実用化研究開発に主眼をおいている為、助成（助成率1/2）を基本としているが、NEDO技術開発機構が主体となっていくべき基礎的・基盤的研究開発或いは知的基盤・標準整備等の研究開発であると判断される研究開発内容の事業は委託により実施した。

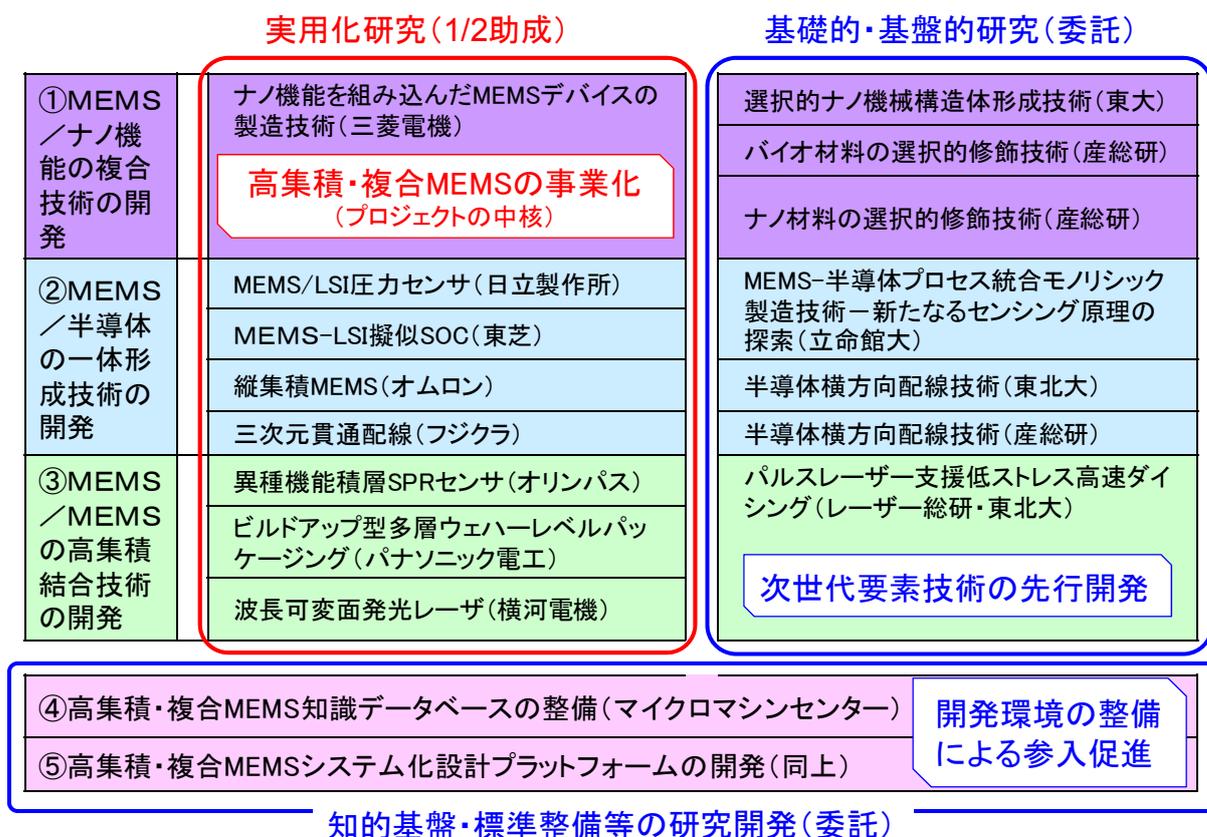


図10. プロジェクトのテーマ構成

共同研究開発に参加する各研究開発グループの有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、研究体にはNEDO技術開発機構が委託先決定後に指名する研究開発責任者（プロジェクトリーダー）を置き、その指導の下に個別テーマの開発を進めると共に事業者を可能な限り連携して効果的な研究開発を実施した。

プロジェクト開始直後及び08年5月以降の実施体制をそれぞれ図11及び図12に示す。本プロジェクトは研究開発課題が互いに関連し合うものであることから、全体を統括するプロジェクトリーダーは、東京大学の下山勲教授に委嘱し、プロジェクトサブリーダーとして立命館大学の杉山進教授を委嘱した。本プロジェクトはテーマ数が多いことから、下山PLと杉山サブPLがテ

一まごとに分担し、研究進捗シートのチェックや個別指導を行うこととした。

<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">NEDO</div>		<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">プロジェクトリーダー : 下山 勲 東京大 教授</div>	
		<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">サブプロジェクトリーダー: 杉山 進 立命館大 教授</div>	
大項目	中項目	助成先	委託先
MEMS/ナノ	ナノ機械構造体		東大
	選択的バイオ修飾		産総研
	選択的ナノ材料修飾		産総研
	ナノ機能デバイス	三菱電機	
MEMS/半導体	プロセス統合モノリシック	日立	
			立命館大
	縦方向配線	オムロン	
		フジクラ	
	横方向配線	東芝	
			産総研
		東北大学	
MEMS/MEMS	異種材料多層集積	オリンハス	
	ビルドアップ多層集積	ハナソニック電工	
		横河電機	
	低ストレスダイシング		レーザー総研・東北大
知識データベース			マイクロマシンセンター

青字：下山PL担当、赤字：杉山サブPL担当

図11. プロジェクト開始直後の運営体制(06年7月)

<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">NEDO</div>		<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">プロジェクトリーダー : 下山 勲 東京大 教授</div>	
		<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">サブプロジェクトリーダー: 杉山 進 立命館大 教授</div>	
大項目	中項目	助成先	委託先
MEMS/ナノ	ナノ機械構造体		東大
	選択的バイオ修飾		産総研
	選択的ナノ材料修飾		産総研
	ナノ機能デバイス	三菱電機	
MEMS/半導体	プロセス統合モノリシック	日立	
			立命館大
	縦方向配線	オムロン	
		フジクラ	
	横方向配線	東芝	
			産総研
		東北大学	
MEMS/MEMS	異種材料多層集積	オリンハス	
	ビルドアップ多層集積	ハナソニック電工	
		横河電機	
	低ストレスダイシング		レーザー総研・東北大
知識データベース			マイクロマシンセンター
設計プラットフォーム			マイクロマシンセンター

青字：下山PL担当、赤字：杉山サブPL担当

図11. 変更後のプロジェクトの運営体制(08年5月～設計プラットフォームを追加)

実施者間の連携体制

実施者間の連携による相乗効果を期待し、共同開発の可能性を検討した。

1. SPRバイオセンサ開発

産総研（選択的バイオ修飾）－東大（ナノ機械構造体）－オリンパス（異種材料多層集積）の3者によるSPRバイオセンサの開発を行った。この取り組みで、①選択的バイオ修飾の出口イメージの具体化、②東大が開発した液体プリズムの新規用途開拓などの成果が得られた。

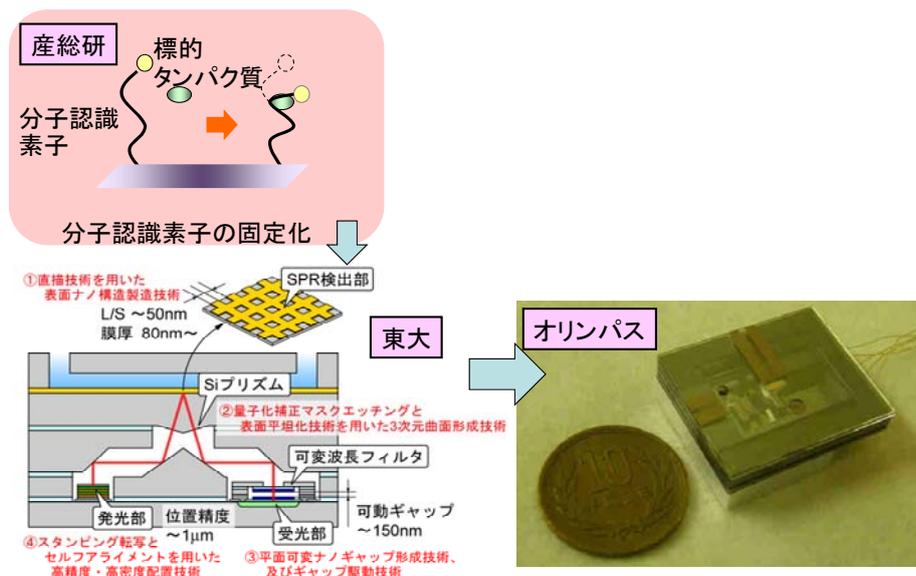


図12 SPRバイオセンサ開発における役割分担

2. レーザーアシストインクジェット配線技術の擬似SOCプロセスへの適用検討

産総研の開発したレーザーアシストインクジェット配線技術を東芝の擬似SOCウェハの配線に適用した。企業の視点で評価することで実用化に向けた課題を抽出することが出来た。

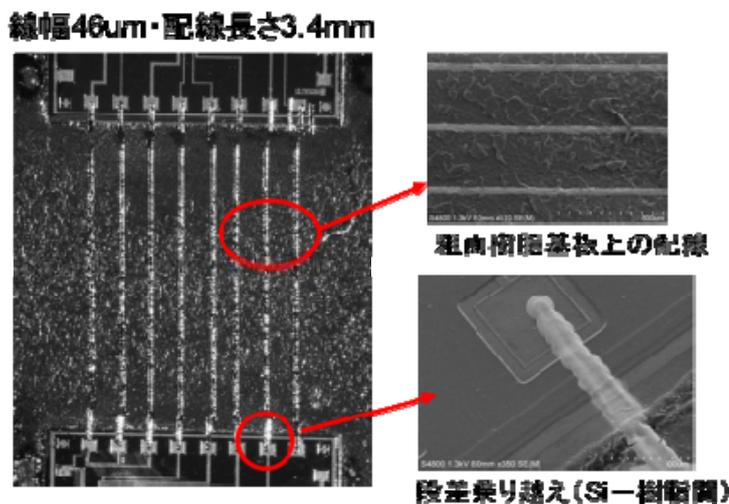


図13 擬似SOCウェハへのレーザーアシストインクジェット配線例

2.3 研究開発の運営管理

本プロジェクトの目的・目標達成に向け、プロジェクトを円滑に推進するために、表1に示すような運営体制を設けた。

①プロジェクト推進連絡会

進捗状況の把握と指導、情報の共有化による新規アイデアの醸成と実施者間の共同研究の推進を目的として、3か月に一回（原則として、3月、6月、9月、12月）の頻度で実施者全員が一堂に会して、進捗報告（IPに係る部分は除外）などを行うプロジェクト推進連絡会を全11回開催した。

尚、プロジェクト推進連絡会の開催に当たっては、マイクロマシンセンターに事務局を依頼し、開催案内の送付や議事録の作成などにご協力を頂いた。

②個別指導会

プロジェクトリーダー、サブプロジェクトリーダーの担当テーマに関し、NEDO同行の下で進捗・実施内容を個別に指導（0.5～1回／年・実施者）を行った。開発現場で設備を前に議論をすることで詳細な進捗状況を把握することが出来、IPに係る部分まで報告を受けることで推進連絡会の場よりも詳細な指導が可能になった。

③次年度予算などの検討会議

プロジェクトリーダー、サブプロジェクトリーダー、NEDOから成るメンバーで年度末に開催し、テーマの進捗や情勢の変化などを基に予算配分の見直し、加速予算の申請などの審議を行った。

表1. 運営体制の一覧

プロジェクト推進連絡会	・全体の進捗管理（IPに係る部分は除外） ・テーマの進捗・実施内容の指導 ・普及関連、環境整備関連 ・必要に応じて外部の有識者にアドバイスを頂く
個別指導会	・プロジェクトリーダー、サブプロジェクトリーダーに担当テーマを割り当て、NEDO同行で進捗・実施内容を個別に指導（0.5～1回／年・実施者）
次年度予算などの検討会議	・プロジェクトリーダー、サブプロジェクトリーダー、NEDOから成るメンバーで年度末に開催し、予算配分の見直し、加速予算の申請などの審議

3. 情勢変化への対応

3.1 新規テーマの追加

プロジェクト開始後、米国を中心として設計プラットフォームを用いた表面集積化の動きが活発化し、高集積MEMSに関わる製造技術、設計技術の両面を備えたトータルな研究開発により、高集積MEMS製品の成功事例が増加して来た。しかしながら、高集積・複合MEMS製造技術の研究開発項目であるMEMS／ナノ機能の複合、MEMS／半導体の一体形成技術、MEMS／MEMSの高集積結合技術に共通する統一的な設計手法の開発はほとんど行われていなかった。高集積・複合MEMSの開発から実用化までの期間を大幅に短縮し、国内市場の更なる活性化と国際的な優位性の確保する為、MEMS構造体と異種材料との複合化や集積化に対応する高集積・複合MEMSシステム化設計プラットフォームに関する開発を平成19年度より開発項目に加えた。テーマ追加前後の体制は図10及び図11を参照願います。

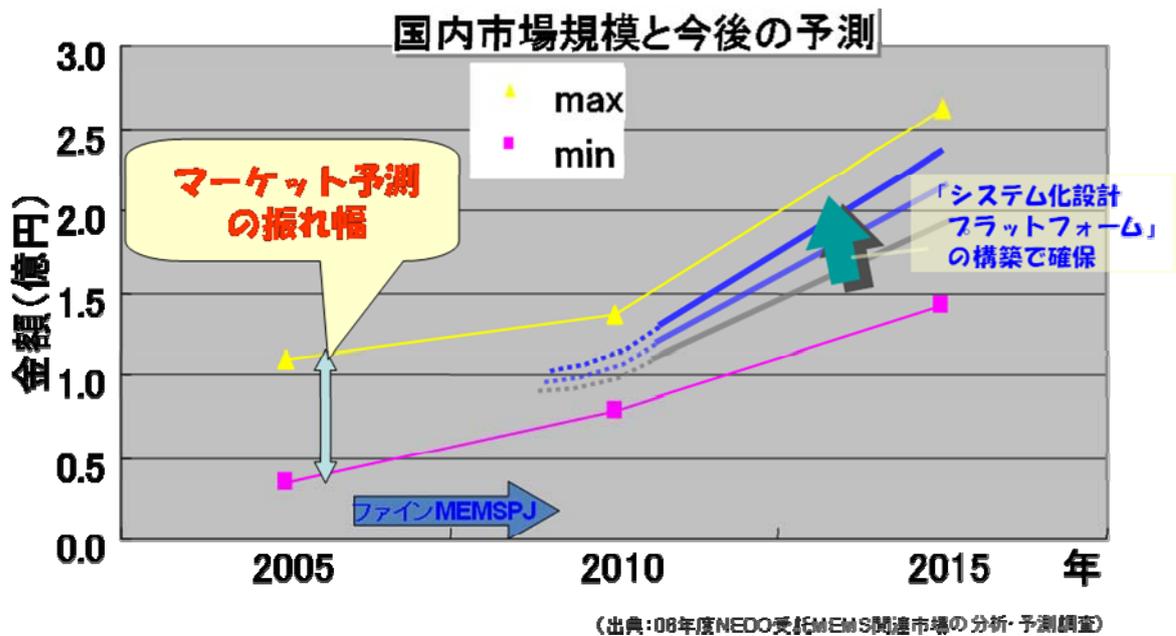


図12. MEMS市場規模予測と設計プラットフォーム開発の必要性

4. 中間評価結果への対応

本事業は、開発期間が3年間のため中間評価は実施していない。

5. 評価に関する事項

NEDOは技術的及び政策的観点から見た技術開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等の観点から、外部有識者による技術開発の事後評価を平成21年度に実施する。

Ⅲ. 研究開発成果

1. 事業全体の成果

(1) 成果概要

高集積・複合 MEMS 製造技術開発プロジェクト（通称：ファイン MEMS プロジェクト）を平成 18 年度から平成 20 年度の 3 年間に渡って実施した。本プロジェクトでは、センサや通信など異種の MEMS や LSI の一体化と MEMS へのナノ機能付与による第 2 世代 MEMS の実現を目指して、大学・研究機関・企業の連携の下、「MEMS/ナノ機能の複合」、「MEMS /半導体の一体形成」、「MEMS / MEMS の高集積結合」の 3 分野に渡る製造技術開発と、開発成果の活用を支援するための「知識データベースの整備」及び「設計プラットフォームの開発」に取り組んだ。

全体目標に対する目標達成状況を表 2 に示す。第 1 の目標である高集積・複合 MEMS デバイスの製造技術開発に関しては、図 1-3 に示す様に様々な高集積・複合 MEMS デバイスを試作し、当初、計画した性能を実現できたことで目標を達成できたと判断する。また、プロジェクトで得られた知識を集約する件に関しては、知識データベースが 09 年 6 月よりマイクロマシンセンターのホームページで一般公開されたことから同様に達成できたものと判断する。

表 2. 高集積・複合 MEMS 製造技術開発プロジェクトの目標達成状況

目 標	結 果	判 定
今後成長が期待される市場である自動車、情報通信、安全・安心、環境、医療等において必要不可欠となる、小型・省電力・高性能・高信頼性の高集積・複合 MEMS デバイスを製造する技術を開発する	・MEMS/ナノ、MEMS/半導体、MEMS/MEMS の 3 分野について高集積・複合 MEMS 製造技術を開発し、それぞれ SPR センサ、圧力センサ、可変波長レーザーなどを試作した。	○
上記技術開発を通じて得られた製造技術に関わる知識を集約し、データベースを整備し公開する	09 年 6 月より、マイクロマシンセンターホームページにて、知識データベース及び設計プラットフォームの公開を開始した。	○

個別テーマの目標達成に関しては、詳細は各テーマの成果詳細の項を参照して頂きたいが、基本計画の目標はすべて達成し、自主目標に関しても、一部条件付きでの達成が有るものの概ね目標を達成できた。

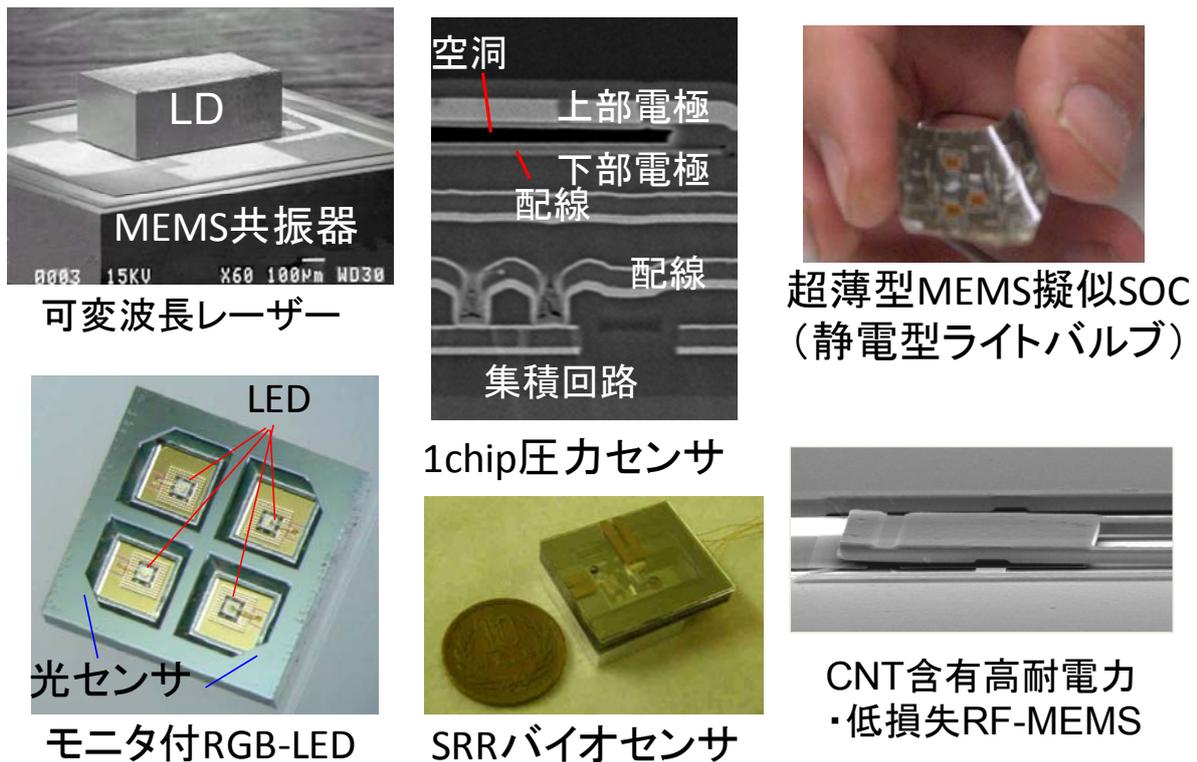


図13. 本プロジェクトで開発された複合 MEMS デバイスの例

(2) 成果の意義

本プロジェクト全体の意義としては、次の4つを上げることが出来る。

- ①複合化・集積化による MEMS の高機能化や新機能の発現をデバイスの形で提示し、高集積・複合 MEMS 実用化の可能性を示した。
- ②高集積・複合 MEMS の更なる高度化に向けた要素技術（図 1 4 参照）を開発し、一層の高集積・複合化に布石を打った。
- ③知識 DB や設計プラットフォームの整備により第2世代 MEMS への新規参入を支援する環境を整備した。
- ④オリンパスと東大、産総研の協力による SPR センサの実現に代表される様に、プロジェクト活動を通して、企業や大学、公的研究機関の連携が行われたことで、MEMS の研究者・技術者と異分野の研究者との協力関係から新たに展開の可能性が芽生えた。

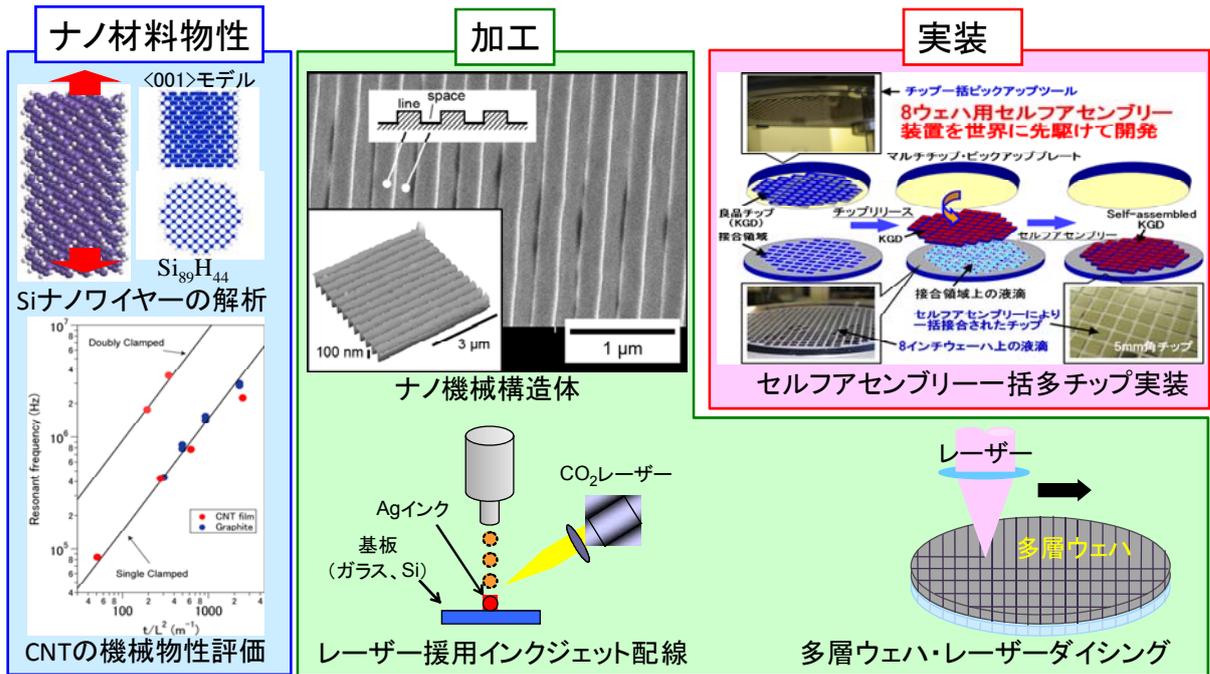


図14. 本プロジェクトで開発された要素技術の例

(3) 特許の取得

本プロジェクトでは、25件の海外出願を含め、計109件の特許を出願した。特許の内訳については添付資料5-1をご参照願いたい。

(4) 論文発表・成果の普及

① 論文発表

表3に本プロジェクトに関する論文、口頭発表、学会賞の件数をまとめた。詳細については添付資料5-2をご参照願いたい。

本プロジェクトでは、39件の論文発表、166件の口頭発表を行い13件の学会賞を受賞した。

表3. 論文、口頭発表、学会賞の件数

研究開発項目	論文	発表	学会賞
①MEMS／ナノ	7	32	2
②MEMS／半導体	18	95	9
③MEMS／MEMS	7	33	2
④知識データベース	0	2	0
⑤設計プラットフォーム	8	3	0
合計	40	165	13

②成果普及

マイクロマシン MEMS 展及び Nanotech で計5回のプロジェクト成果展示と3回のプロジェクト成果発表会を行い、成果普及に努めた。また、成果広報用の広報ビデオとパンフレットを作成し、展示会などで配布した。また、これらのビデオやパンフレットは NEDO のホームページにも掲載されており、でもした。また、実施者分を含めて、プレス発表や雑誌、新聞などのメディアへの発表・取材は約20回行われている。

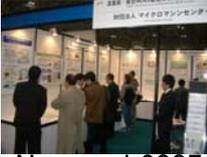
2006年～2007年	2008年	2009年
 Hannover messe 2007	 Nanotech2008	 Micro Electro Mechanical Systems
 Nanotech2007	 Hannover messe 2008	 パンフレット
 第17回マイクロマシン展	 第19回マイクロマシン展	 第20回マイクロマシン展
 第18回マイクロマシン展		 第20回マイクロマシン展
<p>成果展示8回、成果発表3回、プレス発表・取材等約20回、広報ビデオ、パンフレットの作成</p>		

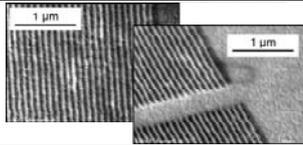
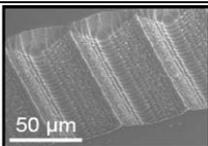
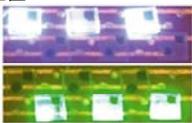
図15. 広報活動

2. 各テーマ成果まとめ

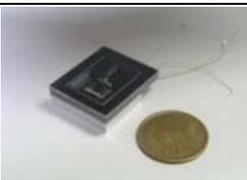
達成度の判定基準 ×: 目標未達成、△: 条件付で目標達成、○: 目標達成、◎: 目標を大幅に上回る成果

①MEMS/ナノ機能の複合技術の開発

(1) 選択的ナノ機械構造体形成技術 (東京大学)

	項目	目標	成果	達成度
基本計画の目標	直描技術を用いた表面ナノ構造製造技術	①L/S: 50nm ②アスペクト比 1:2 ③面積: 5mm x 5mm	①L/S: 50nm ②アスペクト比 1:2 	○
	3次元曲面形成技術	①傾斜角: 45° ②表面粗さRa: 50nm ③Peak-Valley値: 250nm	①傾斜角: 51° ②Ra: 平面で10 nm、斜面で35 nm ③Peak-Valley値: 200nm 	◎
	平面可変ナノギャップ形成技術、及びギャップ駆動技術	①ギャップ間隔: 80nm ②平面範囲: 50μm x 50μm ③Peak-Valley値: 20nm	①ギャップ間隔: 80nm以下 ②駆動ミラー直径: 500 μm ③Peak-Valley値: 20nm ミラーを静電駆動することによりギャップ間隔変化800 nmを実現。 	○
	スタンピング転写とセルフアライメントを用いた高精度・高密度配置技術	①多種構造の利用 ②配置精度1μm以下 ③面積: 2cm x 2cm	①多種類のMEMS/パーツを同一基板に配置 ②位置精度標準偏差0.6μm ③面積: 5cm x 5cm 低融点ハンダを用いたセルフアライメントを融合し、LEDチップのフレキシブル基板上へのアライメントを実現。 	◎

(2) バイオ材料 (タンパク質など) の選択的修飾技術 (産業技術総合研究所)

	研究項目	目標	成果	達成度
基本計画の目標	分子認識素子の構築	血管内皮細胞増殖因子 (VEGF)および過酸化脂質を検出するための分子認識素子の開発	標的物質と特異的に反応し、蛍光を発する分子認識素子の開発に成功  分子認識素子	○
	固定化方法の開発	・分子認識素子を基板上に精密に固定化 ・シグナルの検出を確認	Au基板、ナノピラー基板、ガラス基板上に有機薄膜を介して分子認識素子の固定化に成功。シグナルの検出を確認	○
	MEMS基板の作製および評価	・MEMS構造体中の基板上に分子認識素子を固定化 ・シグナルの検出を確認	東京大学及びオリンパスが作製したMEMS基板上に分子認識素子を固定化→シグナルの検出を確認  オリンパス製バイオセンサ	○
自主目標	検出方法	2種類以上の光学的検出方法に対応した素子の構築	SPR法、蛍光検出法、エバネッセント励起法に対応した素子を開発し、その特性を評価した。	○

(3) ナノ材料 (CNT など) の選択的形成技術 (産業技術総合研究所)

	項目	目標	成果	達成度
基本計画の目標	CNT 選択形成	①サイズ直径：1 μ m以下或いは厚み制度：0.1 μ m以内 ②所定の領域（位置精度： \pm 1 μ m以下）に選択的に形成 ③ナノ機能を発現する	①厚み：70nm以上で100nm精度 ②位置精度： \pm 50nm ③ナノリレーとして動作確認（サイズ：40nm精度）	○
	CNT 構造体 作製	①高アスペクト比（1：10以上） ②高密度充填（充填率：50%以上） の数 μ mから数百 μ mスケールの配向CNT構造体	①アスペクト比10 ②充填率：50% サイズ：40nm-100 μ m（ビームでは1 μ m-30 μ m。 （サイズ：40nm精度）	○
	CNTの 架橋率	・架橋率：70%以上	・架橋率：100%	◎
自主	CNT 評価技術	・機械的、化学的特性を評価	・ヤング率、熱拡散率、抵抗率の評価技術を開発し、特性を評価した	○

(4) ナノ機能を組み込んだ MEMS デバイスの製造技術 (三菱電機株式会社)

	項目	目標	評価	備考
基本計画の目標	低温でのナノ材料形成技術	400 $^{\circ}$ C以下	◎	50 $^{\circ}$ C~60 $^{\circ}$ Cで実現
	低損失貫通配線	0.2dB以下	○	0.1dB @15GHzを実現
	スイッチ耐電力性	4W以上	◎	4.5Wを実現 (世界最高レベル)
自主目標	スイッチ 通過損失	0.5dB以下	○	0.5dBを実現
	スイッチ アイソレーション	20dB以上	○	30dBを実現
	貫通配線形成温度	400 $^{\circ}$ C以下	○	210~230 $^{\circ}$ Cで実現

②MEMS /半導体の一体形成技術の開発

(1) MEMS-半導体プロセス統合モノリシック製造技術

- ・新たなセンシング原理の探索 (立命館大学)

	研究項目	目標	成果	達成度
基本計画	半導体センサの微細化により発現する新たなMEMSセンシング原理の探索	製造プロセスは問わないが、1つ以上の新たなMEMSセンシング原理を見出す	第一原理計算によるバンド構造を用いて、任意のキャリア濃度・温度でのピエゾ抵抗効果のシミュレーションが可能な手法を確立。 <001>方位p型Siナノワイヤーで、バルクSiの約10倍のピエゾ抵抗係数が得られる予測を得た。	○
	ナノメカニカル構造の実現とナノ弾性特性の解明	① LSI材料として用いられる厚さ300nm以下の金属シリサイド(WSi)のセンシング素子構造材料としての定量的評価。 ② CNT(産総研)でナノメカニカル構造を形成しその機械・電気特性を測定し、新たなセンシング素子としての可能性を実験的に評価。	①様々な熱処理履歴のWSi薄膜を製作し、硬さ・ヤング率の測定、および、高サイクル疲労試験を実施。その結果、機械量センサとしてSiの3倍の感度が期待でき、繰返し寿命も $N > 10^{11}$ 回と高く、センサ構造材料としてきわめて有望。 ②CNTは金属に近い特性を示し、ゲージ率は金属の約3倍高い結果を得た。	○
自主目標	ナノスケールシリコンのピエゾ抵抗効果の解明	面方位<100>、長手方向結晶方位<100>、<110>、伝導型p型、目標最小線幅100nmのSiナノワイヤーの製作とピエゾ抵抗特性の評価	集積化プロセス(EB直描)による幅30-500nmのp型Siナノワイヤーを製作(日立)し、I-V特性およびピエゾ抵抗係数の測定を行った。 <100>方位、幅60nmでバルクの約2.4倍の縦方向ピエゾ抵抗係数を観測。	○

- ・半導体モノリシック集積化基盤技術開発 (日立製作所)

	項目	目標	結果	評価	備考	
基本計画の目標	製造技術	大面積、狭ギャップ構造	500 μ m角、0.25 μ mギャップ	500 μ m \times 700 μ m、0.25 μ mギャップ ¹⁾	○	1)ダイアフラム
		立体配線の可動構造	0.5 μ m以下	タマシMEMS 0.2 μ m幅	◎	
		プロセス封止技術	処理温度450°C以下、PCT試験耐性	450°C以下、PCT、熱衝撃、他	○	
		マルチセンサ混載技術	圧力、モーションセンサ	圧力、モーションセンサ	○	
自主目標	圧力センサ仕様	チップサイズ	2mm \times 2mm以下	1.9 \times 1.7mm 0.9 \times 0.8mm ²⁾	◎	2)圧力に機能限定
		消費電流	1.5mA以下	0.7mA(typ.)	◎	
		圧力測定範囲	50~150kPa	50~150kPa ³⁾	○	3)サイズで範囲制御
		フオー検知(圧力計測)	分解能:5m以下	分解能:約1m	◎	

(2) MEMS-半導体縦方向配線技術

- ・縦方向集積 MEMS デバイス製造技術の開発 (オムロン)

開発項目	最終目標値	成果	達成度
①-1 貫通孔形成技術	φ5um 深さ250um (=A/R 50)	・高アスペクト比貫通孔形成条件を確立 ・高アスペクト比貫通孔形成用エッチングマスクの採用 ・高アスペクト比貫通孔側壁への絶縁膜形成方法を確立	・φ5um 深さ250umの貫通孔形成を達成 ・φ5um 深さ250umの側壁絶縁膜形成を達成 ○
①-2 貫通孔配線技術	φ5um 深さ250um (=A/R 50)	・高アスペクト比貫通配線形成する専用装置を開発し、高アスペクト貫通配線形成技術を確立	・φ5um 深さ250um の貫通配線形成を達成。2Ω/本の電気抵抗を達成。 ○
② ウェハレベル 接合技術	3層電氣的 精度 <±1um	・接合界面として、Si/Si、Si/TEOS、メタル/メタル 等の種々のバリエーションを持つ接合技術を確立 ・装置の工夫とパターン工夫によって高精度アライメント接合技術を確立	・LSIを含む3層ウエハの積層を行い、電氣的導通を達成。 ・最大ズレ量0.8umを確認。 ○
	気密封止	・貫通配線付きウエハを用いた封止構造を作製し、接合による気密性を確認	・MIL規格に基づいた試験実施し、リーク量< $5 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ を達成。 ◎

- ・配線の自由度を向上できる 3 次元配線構造を持つ高信頼性インターポザル技術の開発

(フジクラ)

	項目	目標	実績	達成度	
基本計画の目標	成微細孔形	孔径	100 μm以下	60 μm	◎
		横方向シフト量	500 μm以上	600 μm	○
		基板厚	300 μm以下	200 μm	○
	導体充填	屈曲(クランク形状)孔	完全充填	完全充填	○
		分岐(Y字形状)孔	完全充填	完全充填	○
		気密性(リークレート)	$5 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$ 以下	$1 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$ 以下	◎
	電気特性	抵抗値(クランク孔:径100 μm、長さ800 μm)	50m Ω以下	29.4m Ω	◎
ビア間絶縁		1M Ω以上	10M Ω以上	◎	
自主目標	電気特性	高周波特性	貫通配線の高周波特性を評価する	40GHzまでの伝送特性を評価した	◎
	試作	インターポザルの試作	インターポザルを試作し、機能を実証する	MEMSデバイスを実装して動作を確認	◎

(3) 半導体横方向配線技術

・高集積 MEMS 擬似 SOC 製造技術の研究開発 (東芝)

	項目	目標	成果	達成度
基本計画の目標	インターチップ配線	配線幅: Line/Space=1 μ m/1 μ m	配線幅: Line/Space=1 μ m/1 μ m	○
	MEMSデバイス薄型化	デバイス厚: t=100 μ m	デバイス厚: t=100 μ m	○
自主目標	ウエハ再構築	ウエハ径: ϕ =75mm	ウエハ径: ϕ =125mm	◎
	3-D混載MEMS擬似SOC	MDW技術※と段差配線技術の擬似SOC応用検証	産総研・東北大学との共同研究にて実証	○
	加速度センサ	中空封止による動作確認	社内製MEMSチップとのモジュール化	○
	ライトバルブ	要素技術確認	形状確認 動作未検証⇒再チャレンジ	△

・MEMS - 半導体の低温高密度一体化実装技術 (東北大学)

	研究項目	目標	成果	達成度
基本計画	セルフアセンブリーを用いたMEMS-LSI一括実装	高密度な低温積層一体化実装技術を確立する	①常温で400 μ m厚、1mm厚MEMSチップの合わせ精度 \pm 1 μ m、100 μ m厚の半導体チップで \pm 0.5 μ m ③8インチウエハ用セルフアセンブリー装置開発 ④8インチウエハに500個以上のチップを一括接合。	◎
自主目標	高密度マイクロバンプ形成	①バンプ寸法: 5 μ m \square 、厚さ2 μ m、間隔10 μ m ②セルフアセンブリーによるマイクロバンプ接合(合わせ精度 \pm 1 μ m)	①インプリント技術により8インチウエハ上にマイクロバンプを一括形成。5 μ m \square 、厚さ2 μ m、間隔10 μ m ②合わせ精度 \pm 1 μ mで10,000対のマイクロバンプを一括接合。寸法5 μ m \times 5 μ m	○
	チップ乗り越え配線形成	①厚さ400 μ m以上のMEMSへの乗り越え配線形成 ②100 μ m厚の半導体チップへの乗り越え配線形成(配線幅: 10 μ m、配線間隔: 10 μ m)	①TSV付Siキャップを用いて、400 μ m厚、1mm厚のMEMSチップに乗り越え配線形成 ②100 μ m厚の半導体チップへCu乗り越え配線形成(配線幅: 10 μ m、配線間隔: 15 μ m)。	△
	チップ上への受動素子形成	①磁性ナノ粒子充填シリコン酸化膜と埋め込みCu配線を用いたインダクタ形成(インダクタンス値増大: 30%) ②High-K膜を用いたキャパシタ形成	①Co磁気ナノドット膜とCuダマシ法を用いてキャビティ付インダクタ作製。(インダクタンス値増大: 約20%) ②HfO ₂ 膜を用いてキャパシタ作製形成。	△
	テストモジュール作製	MEMS、LSI、インダクタ、キャパシタ各チップを一体化したテストモジュールの試作	MEMS、LSI、インダクタ、キャパシタ各チップを搭載したテストモジュールを試作し、基本特性を確認。	○

・高速微細配線描画技術（産業技術総合研究所）

	研究項目	目標	成果	達成度
基本計画の目標	マテリアル・ダイレクト・ライティング (MDW) 技術の開発	直描線幅: 5~10 μ m 成膜厚み: 5~10 μ m 描画速度: 1cm/min以上 成膜速度: 10 μ m/min以上	線幅: 7~10 μ m 配線厚み: 5~16 μ m (重書き無し) 描画速度: 60cm/min 最小配線間隔: 30 μ m (複数平行配線のギャップ間隔) @Si、ガラス、ポリイミド、セラミックス基板上、粗面基板上への描画も可能、密着強度増	◎
	段差乗り越え直接描画配線技術の開発	段差: 100 μ m以上 配線プロセス温度: 400°C以下 (以下は自主目標) 段差傾斜角度: 80°以上 配線表面粗さ: 表皮深さの値の1/10 (Ra=0.1mm以下: 3GHz相当)	段差: 500 μ m 最大傾斜角度: 84° @ヘッドは基板面に対し垂直固定状態 体積抵抗率: $3 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ @ポストアニールなし Ra=60nm以下、コプレーナ型伝送路 (50 μ m線幅) で40GHzまでの伝送特性を確認。	○
自主目標	低温複合組み立て実装技術の開発	フリップチップ実装接合技術 接合形成温度: 150~200°C 接合寸法: 10~30 μ m シエアー強度測定 位置合わせ制御条件の最適化	30 μ m径円錐バンブにより1/80低荷重 無電解めっき法のブリッジ接続により、無加圧かつ60°Cで低温形成 フリップチップ実装精度2 μ m達成	◎

③MEMS/MEMS の高集積結合技術の開発

(1) 異種材料多層 MEMS 集積化技術 (オリンパス)

	項目	目標	成果	達成度
基本計画の目標	1. 異種材料多層MEMS集積化 (ウエハレベル接合)	基板サイズ: 直径100mm以上、3層以上、異種材料 (シリコン、ガラス、樹脂など) を基板レベルで接合し、面方向: $\pm 1 \mu\text{m}$ 以下の位置決め精度、垂直 (z) 方向: $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 以下の組立精度で、複数回の接合に耐えられる異種材料多層MEMS集積化技術を開発する。	基板サイズ: 直径100mm、5種の材料で、7層接合、面方向: $\pm 1 \mu\text{m}$ 以下、垂直 (z) 方向: $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 以下	◎
	2. 機能MEMS基板集積化 (チップレベル接合)	直径100mm以上の基板にその体積が0.5mm ³ 以下の微小な異種部材を2種類以上、面方向: $\pm 1 \mu\text{m}$ 以下の位置決め精度で、実装できる高機能MEMS異種基板集積化技術を開発する。	チップサイズ: 2種の材料を実装 電子部品 (半田付け)、ガラス光学部品 (接着) 面方向: $\pm 1 \mu\text{m}$ 以下 45 μm 狭ピッチ実装	◎
	3. 異種材料多層MEMS集積化の評価技術	10 μm 以下の分解能で局所応力を評価・解析できる異種材料多層MEMS集積化の評価・解析技術を開発する。	分解能: 1 μm 以下	○
	4. 異種材料多層MEMS集積化によるモジュール開発	①~③の技術を応用して、少なくとも3層の異種材料基板を積層・集積化して成る、総厚5mm以下のSPRセンサモジュールと、総体積1cm ³ 以内の大きさの蛍光センサモジュールを作製する。	・SPRセンサ 総厚: 5.9mm (7層) で動作実証。 ・蛍光センサ 総体積: 1cm ³ で動作実証。	◎

(2) ビルドアップ型多層 MEMS 集積化技術

- 機能集積化 MEMS デバイスを実現するビルドアップ型ウエハレベルパッケージング技術の開発 (パナソニック 電工)

	項目	目標	成果	達成度
基本計画の目標	(2)機能化MEMSウエハ接合技術開発	①電子デバイスに機能損傷ない接合、ウエハ接合精度 $\pm 1 \mu m$	①電子デバイスに機能損傷なし、ウエハ接合精度:0.2~1.0 μm	○
	(3)ビルドアップ型ウエハレベルパッケージー貫工程開発	③研磨、開口加工、チップ実装を繰り返しながらウエハ3層以上を積層集積	③BU-WLP一貫工程プロセスにより4層構造MEMS-LEDパッケージを実現	○
自主目標	(1)機能化MEMSウエハ開発 (熱伝導/光配向/光検知の機能を有するMEMSウエハの開発)	LEDパッケージに必要な下記機能ウエハの開発 ①熱伝導機能ウエハ ②光配向機能ウエハ ③光検知機能ウエハ	①低熱抵抗基板の実現 ②必要な反射率を確保するミラー構造を形成 ③高分解能光検知機能の確認	○
	(2)機能化MEMSウエハ接合技術開発 (素子機能損傷を抑えたウエハレベル高精度接合技術開発)	②ウエハへの低機能損傷LEDチップ実装 ③ポリマーウエハの低温形成	②LEDチップに機能損傷のないウエハレベル実装を実現 ③シリコン3次元加工部へポリマー凹凸形状を低温でミクロンレベル精度で形成	○
	(3)ビルドアップ型ウエハレベルパッケージー貫工程開発 (放熱/光学/光検知機能を集積化したMEMS-LEDパッケージ設計と試作による検証)	①超小型LED/パッケージの設計 ②・低熱抵抗パッケージ設計 ・高分解能光モニタリングパッケージの設計	①超小型/薄型の設計及び試作完了 ②・高放熱パッケージ設計と試作による検証 ・必要な低ノイズ光モニタの試作検証	◎

- 光化合物半導体の高精度接合技術 (横河電機株式会社)

	項目	目標	結果	評価
接合	XY位置合わせ精度	$\pm 1 \mu m$ 以下	$\pm 0.7 \mu m$ 以下	◎
	傾き精度	$\pm 0.05 \text{deg}$ 以下	$\pm 0.05 \text{deg}$ 以下	○
	ギャップ精度	$\pm 0.2 \mu m$ 以下	$\pm 0.2 \mu m$ 以下	○
	接合強度	50gf 以上	100gf 以上	◎
特性	レーザー出力	2mW 以上	2.2mW 以上	○
	波長可変幅	40nm 以上	50nm 以上	◎
	スペクトル線幅	10MHz以下	10MHz以下	○
	偏波特性	偏波方向のジャンプ無し	設計マージンの把握が不十分。今後の課題。	△

(3) 多層ウェハレベル接合体の低ストレスダイシング技術

(レーザー技術総合研究所／東北大学)

	研究項目	目標	成果	達成度
基本計画	多層MEMS構造の切断技術開発	多層構造3種類以上についてレーザダイシング試験を行い、試料の破損率1%以下を達成する。	多層構造3種類以上についてレーザダイシング試験を行い、試料の破損率1%以下を達成。	○
自主目標	MEMS構成材料のレーザー加工・改質特性調査	Siとガラスにおいて1～2μmの波長帯域で、Siにおいて10ns～200nsのパルス幅範囲でレーザー加工・改質特性を確認	広範囲な波長域、パルス幅領域でレーザ加工・改質特性を確認することにより、ガラス/Si積層体に対して新たなダイシング手法を見いだした。	◎
	分割支援構造の評価・設計・製作・検討	破損率を定義・評価できる試料を製作	破損率評価に適宜サンプルを提供	○

④高集積・複合 MEMS 知識データベースの整備 (マイクロマシンセンター)

	目標	達成度	備考
基本計画目標	全研究開発項目に係わる知見のDB化	○	1500件超の知識データをDB化 特許情報4500件超をDB化
	MemsONE知識DBに実装	○	全データをMemsONEデータとして統合
自主目標	知識の体系化	○	ファインMEMS/MemsONEカテゴリの相関マトリックスを構築
	知識データ収集用システム構築	○	Wikiベースの知識データ収集用システムをマイクロマシンセンターに構築
	DB入力・表示機能開発	○	データ入力初期設定・全文検索機能、各種ランキング・新着知識表示を実装
	公開用DBシステムの構築	○	一般ユーザーの利用規約、ユーザーアカウント作成機能等を実装し、マイクロマシンセンターに構築
	MemsONEデータ入力形式に変換	○	変換スクリプトを作成し、全データをMemsONEデータに変換

⑤高集積・複合 MEMS システム化設計プラットフォームの開発（マイクロマシンセンター）
平成 19 年度の目標

研究項目	19年度目標	成果	達成度
1. ファインMEMS等価回路モデルの構築	生成データ(ネットリスト)を利用した回路計算結果が実デバイスの動作や機械形状の依存性を的確に表現し特性の変化を評価できること	デバイスモデル化終了。CNTカンチレバー及び櫛歯角速度センサ完了。 MEMS同士の練成のモデル化について方策を検討H20年度の取り組み課題とした。	○
2. MEMS等価回路モデルの収集・登録	範囲：櫛歯(角速度センサ、アクチュエータ3種類)、梁2種類、平行平板2種類、磁気回路、振動子等価回路モデルコンテンツの数：10件	等価回路モデル化終了。MEMS同士の練成のモデル化について方策を検討H20年度の取り組み課題とした。	○
3. MEMS等価回路モデル閲覧用Webライブラリの構築	等価回路モデルの閲覧及び汎用電子回路シミュレータで利用可能なデータ(ネットリスト)でダウンロード可能なこと	Webライブラリ構築終了。	○
4. 単位要素モデル、MEMS構成要素モデルの検討	Webライブラリシステムに掲載された等価回路モデルの汎用電子回路シミュレータで利用可能なリスト生成に必要なばね定数などの機械構造の特性値を抽出できること	終了。櫛歯角速度センサについて実装含め完了。	○
5. 等価回路モデル・3次元CADモデル相互生成技術調査	3次元CADシステムと等価回路システム間の形状データの相互変換技術に関する課題を明確化できていること	技術課題を抽出しを完了し、相互変換処理の検討を終了した。H20年度の取り組み課題とした。	○

平成 20 年度の目標

研究項目	H20年度開発目標	成果	達成度
1. ファインMEMS等価回路モデルの構築	外力を扱えるモデル3件、および基本的MEMS-MEMS接続モデルを開発し、モデルの検証を完了する。新規MEMS等価回路モデルとして圧電デバイス、音響デバイスの2件開発する。	①櫛歯・平行平板・磁気回路デバイスに関しコンポネント化想定の外力等価回路モデルを開発 ②それらの外力端子を活用した接続モデルを開発 ③櫛歯とバネなどの接続モデル実験的に検証 ④圧電・音響デバイスの外力を扱える等価回路モデルを追加	○
2. MEMSデバイスモデルの等価回路導出と登録、及び文献調査	MEMSデバイスの等価回路導出に関する定式化手法を開発し、等価回路モデルの定式化を完了する。MEMS2008およびセンサシンボを調査し、基礎データを収集、開発対象とするMEMSデバイスコンポーネントを決定する。	①上記に相当する等価回路モデルの定式化と理論的検証を終了。導出法として、特許一件出願。 ②定式化手法は、特許化するともに、Sensor Symposium08で報告した。 ②MEMSデバイスに関する基礎データを収集、随時開発内容に取り込んだ	○
3. 単位要素モデル、MEMS構成要素モデルによる機械パラメータ等抽出の検討	Webシステムに登録されたMEMS等価回路モデル、およびMEMS-MEMS接続モデルを対象として、その回路定数を決定する為に必要な機械パラメータ、及び電気パラメータのモデル仕様を確定し、パラメータ抽出ソフトの実装およびテストを完了する。	①各デバイス・コンポーネントに対応した各機械パラメータ抽出ソフトを開発した ②この成果の一部は、Sensor Symposium08で報告した。	○
4. 電氣的特性および機械的特性抽出機能の開発	H19年度構築したWebシステムに項目1のMEMS等価回路の生成と周辺回路の接続機能、電気回路シミュレーションの実行環境、および電気・機械的特性抽出機能の実装を完了し、Webシステムを一般に公開する。	①等価回路モデルおよび入力システム、機械等パラメータ抽出ソフト、3DCAD中間データ取り込み、およびSPICEを活用した電気・機械的特性解析モジュールをWebシステムとして作成 ②全体としての、解説書を合わせて収録。 ③H19年度版と合わせ、Web公開を6月末に完了	○
5. 等価回路モデル・3次元CADモデル相互変換の開発	3次元CADシステム(MemsONE)とWebシステム間の形状データ、および材料物性データの相互変換機能の実装を完了し、システム間の連携を確認する。	3次元CADモデルの形状データ・材料物性値の生成とその逆システムを中間ファイルとして扱う方式を開発(MemsONE CADを利用)	○

IV. 実用化、事業化の見通しについて

(1) 成果の実用化可能性

① 実用化研究(助成)

各実施者共、目標とした製造技術を開発し、高集積・複合MEMSデバイスを作製し、当初の目標とする性能を得た。 今後は、各社の事業計画に沿って、2011年～2015年の市場投入を目標に開発を継続する。

一例として、横河電機は本プロジェクトで開発された可変波長レーザーを用いた多成分分析計の開発がNEDOのイノベーション推進事業に採択され、今後は分析計のシステム開発として製品化に向けた開発を行う。

② 基礎的・基盤的研究(委託)

基礎的・基盤的研究開発は、次の3つの方向性で実用化を進める。

- 1) 助成先との共同研究継続による要素技術の移管
- 2) 装置メーカーとの共同研究による製造設備としての実用化
- 3) デモ機による加工受託や新規プロジェクトへの参画によるアプリケーションの開拓と応用技術開発

研究開発項目	テーマ名	助成先と共同開発	企業との設備開発	応用技術開発
①MEMS/ナノ	選択的ナノ機械構造体形成技術	○		
	バイオ材料(タンパク質など)の選択的修飾	○		
	ナノ材料(CNTなど)の選択的形成技術			○
②MEMS/ 半導体	MEMS - 半導体プロセス統合モノリシック製造	○		
	MEMS-半導体横方向配線技術-1	○	○	○
	MEMS-半導体横方向配線技術-2		○	
③MEMS/MEMS	多層ウエハレベル接合体の低ストレスダイシング		○	○

③知的基盤・標準整備などの研究開発(委託)

知識データベース、設計プラットフォーム共に09年6月よりマイクロマシンセンターのホームページで公開を開始した

1. 知識データベース

- ・9月12日時点でアクセス件数：9万6千件（約1000件／日）
- ・マイクロマシンセンターの自主事業としてデータ更新等を継続

2. 設計プラットフォーム

- ・日本機械学会と電気学会に関連研究会を発足した。(09年9月までの研究会開催：3回)
- ・マイクロマシンセンター内にMEMS等価回路ジェネレータ普及検討委員会を立ち上げ、継続的な普及を進める