

「計量器校正情報システムの研究開発」  
事後評価報告書

平成22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22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 村田 成二 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32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. 個別テーマに関する評価結果	1-13
2. 1 時間標準	
2. 2 長さ標準 (波長)	
2. 3 長さ標準 (光ファイバ応用)	
2. 4 電気標準	
2. 5 放射能標準	
2. 6 三次元測定機標準	
2. 7 振動・加速度標準	
2. 8 圧力標準	
3. 評点結果	1-29
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、「計量器校正情報システムの研究開発」の事後評価報告書であり、第18回研究評価委員会において設置された「計量器校正情報システムの研究開発」（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25回研究評価委員会（平成22年3月26日）に諮り、確定されたものである。

平成22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

「計量器校正情報システムの研究開発」

事後評価分科会委員名簿

(平成21年11月現在)

	氏名	所属、役職
分科会長	ほんだ さとし 本多 敏	慶應義塾大学 理工学部 物理情報工学科 教授
分科会長 代理	あいだ かずお 相田 一夫	静岡大学 工学部 システム工学科 教授
委員	いぐち てつお 井口 哲夫	名古屋大学大学院 工学研究科 教授
	かがわ としはる 香川 利春	東京工業大学 精密工学研究所 教授
	たかや やすひろ 高谷 裕浩	大阪大学大学院 工学研究科 教授
	つちや としゆき 土屋 智由	京都大学大学院 工学研究科 マイクロエンジニアリング専攻 准教授
	わたなべ やすあき 渡部 泰明	首都大学東京大学院 理工学研究科 電気電子工学専攻 教授

敬称略、五十音順

## 審議経過

- 第1回 分科会（平成21年11月21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. 評価の実施方法について
  4. 評価報告書の構成について
  5. プロジェクトの概要説明
  6. プロジェクトの詳細説明
  7. 全体を通しての質疑
  8. まとめ・講評
  9. 今後の予定、その他、閉会

- 第25回研究評価委員会（平成22年3月26日）

## 評価概要

### 1. 総論

#### 1) 総合評価

科学技術、産業発展のための知的基盤としての計量器校正システムを情報化・ユビキタス化する「e-trace」は重要であり、計量標準の確立は理工学における新発見・発明やもの作りの品質保証等の根幹をなす「知的基盤の整備」そのものである。公共性が高く、NEDO のコーディネート能力と高度な専門家集団である産業技術総合研究所の研究開発能力の双方が連携してはじめて実現できる。極めて挑戦的で難易度の高い技術開発であるが、今回のプロジェクトでは、世界的にも最先端の基礎研究から実用性を配慮した応用技術への展開が、多大な努力によって完遂され、得られた成果も当初の目的を満たしたものである。

現状では、計測量毎の各論的な技術開発の段階であり、今後、「e-trace」の体系化を確立するために、認証や校正データを管理するための情報システムが不可欠であり、これらを様々な計測量について統合するシステムを検討していくべきである。

#### 2) 今後に対する提言

本プロジェクトのテーマは、国際競争力を維持するために、継続的に研究開発を推進することが重要と考える。特に JCSS（計量法トレーサビリティ制度）による標準供給をすみやかに開始するために、8年間の研究成果の中で、実用化の一步手前のような有望技術は、国際的展開を睨んだ産官学支援と重点投資等による早期完成が望まれ、そのための開発援助が必要である。同時に、「e-trace」の社会普及と技術維持および改善の観点から、人材育成の仕組みの構築が望まれる。

今後は多数の企業が参画する大規模な実証実験を展開するとともに、そこから明確化された課題を速やかに解決し、同時に若手の人材育成を進めるためにも、大学との連携を強化した研究開発体制による、本事業のさらなる発展型の継続を強く望む。今回の成果をベースにネットワーク構築技術のモジュール化・共用化など、ソフトの完成度を高め、ハード技術をリファインすることでより使いやすい「e-trace」の実現を目指すべきである。たとえば、被校正対象の計測機器が遠隔校正を受けるときの制御コマンドの共通化、セキュリティ対策など計測機器メーカーの遠隔校正への対応促進が重要である。IT 技術を十分に活用し、仲介器のインテリジェント化、自己校正機能を更に改良することに

についても検討してほしい。

## 2. 各論

### 1) 事業の位置付け・必要性について

本事業が目的とする先進的な情報通信ネットワークをベースにした計量標準遠隔校正システムの開発は、我が国の「もの作り」における国際競争力・信頼性を飛躍的に高める基盤技術であり、日本企業の海外進出、遠隔校正への需要の対応として適切である。本事業の確立は、計量機器の国家標準から民間ユーザーの末端まで高精度かつ効率的なトレーサビリティ技術を開発するという「知的基盤の整備」そのものであり、公共性が高く、NEDO のコーディネート能力と高度な専門家集団である産業技術総合研究所の研究開発能力の双方が連携してはじめて実現できる。また、事業内容、事業規模、波及効果に対して年間2億円程度の予算は妥当であると考えられる。国際競争力を向上させるためには、他国に日本の国家標準を広く浸透させる必要があり、この観点からも今回の事業には、大きな意義がある。

ただし、本事業で実施した研究テーマの中で、先端的な情報技術を用いた計量標準供給体系の枠組みに、必ずしもそぐわないものもあり、「e-trace」としてのテーマ選定段階から、NEDO による調整が必要であった。

### 2) 研究開発マネジメントについて

第I期の評価をもとに、GPS の利用、安定な仲介標準器の開発を通じて、JCSS による標準供給システムを構築しようという目的設定は妥当である。各研究開発項目は、社会的なニーズや技術動向を良く考慮して選定されており、各分野において概ね妥当な具体的目標値が設定されている。各研究テーマでは、概ね必要な要素技術の開発、それらと高度情報通信システムを組み合わせた遠隔校正手法の構築、およびその実証研究と評価の3段階から構成されており、順当な研究計画と言える。研究開発実施の事業体制については、実務者会議を定期的に開催し、運営委員会に産業界からのメンバーを加えるなど、研究レベルと実用レベルの整合性に配慮しながらプロジェクトを遂行しており、事業化の際の委託企業の選択にも問題がない。

ただし、従来の JCSS での標準供給への要求がある計測量については、「e-trace」としての開発が優先されるべきかどうかの判断がなされるべきであった。継続の際には事業内容について精査する必要がある。また、個々の研究チーム間で、「e-trace」における仲介標準器への先進情報通信技術の活かし方や考え方に温度差があり、全体の研究開発計画の方向性にアンバランスを感じる。

今後、各計測量の校正技術の間の連携や「e-trace」の体系化を専門的にマネ

ジメントし、研究開発の戦略を常時チェックできる体制をつくるべきである。

### 3) 研究開発成果について

個々の開発テーマについては、テーマ毎に達成度にバラツキがあるが、設定された目標はクリアされおり、一部は世界的にも独創的で最高水準の成果が得られている。従って、本事業の目的である計量標準供給体系の近代化について、少なくとも一つの雛形を構築できたと言える。成果の普及という観点から、説明会などを実施し、自ら情報発信を行い、産業界からのニーズにこたえ海外や工場での実証試験を行うなど、実際の製造現場環境での実用性に配慮した研究開発が遂行されている。知的財産権の取得に関しては、特許出願を行っており、研究開発成果の権利化に務めてきた。

ただし、論文としての公開が不十分である。また、研究開発テーマによって、技術開発のアプローチおよび国際標準化に向けた取り組みや成果の普及活動の活発さに大きな差が見られる。アジア地域への「e-trace」の展開は評価できる部分もあるが、遠隔校正についての新しい概念を提案しているとは必ずしもいえず、より積極的な成果普及が必要である。

今後、日本の製造業の将来的な国際競争力を維持するためにも、本事業で得られた成果のスピーディーな普及が強く望まれる。

### 4) 実用化の見通しについて

本事業の研究成果の実用化については、研究成果の一部には、既に最先端の技術ニーズに対応した実用レベルの要求精度を満足する結果が得られており、実証試験の結果を見る限り、「e-trace」の特徴、即ち、現在の情報通信ネットワーク技術を活かした遠隔校正、あるいは標準供給システムを構築できる見通しが得られている。

ただし、実用化の観点から見ると、開発テーマによって、「e-trace」に馴染まない成果に留まっており、ユーザー側に十分なメリットが感じられないものもあった。また、JCSSでの供給をおこなうためには、システムとして解決すべき課題が多い。大規模システムの実用化では、最初はハードが主、ソフトが従であるが、実用化目前の総合試作ではソフトがより重要となっている。「e-trace」の実用化においても同様な開発手順が重要と考えられる。将来の実用化を考慮すると、今回の成果をベースにネットワーク構築技術のモジュール化・共用化など、共通のプロトコルの検討を行い、ハード技術をリファインすることでより使いやすい「e-trace」の実現を目指すべきである。また、今回の成果を公共財として実用化していくための運用や維持体制が不十分であり、成果を無駄にしないために、今後の検討が望まれる。

## 研究評価委員会におけるコメント

第25回研究評価委員会（平成22年3月26日開催）に諮り、了承された。  
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	オリンパス株式会社 新規中核事業企画本部 ヘルスケア事業開発部 企画グループ コーディネーター
	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	日本大学 法学部 教授
	大西 優	株式会社カネカ 顧問
	尾形 仁士	三菱電機エンジニアリング株式会社 取締役社長
	小林 直人	学校法人早稲田大学 研究戦略センター 教授
	小柳 光正	国立大学法人東北大学大学院 工学研究科 バイオロボティクス専攻 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 精密機械工学専攻 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
	富田 房男	放送大学 北海道学習センター 所長
	架谷 昌信	愛知工業大学 工学機械学科 教授・総合技術研究所所長
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

科学技術、産業発展のための知的基盤としての計量器校正システムを情報化・ユビキタス化する「e-trace」は重要であり、計量標準の確立は理工学における新発見・発明やもの作りの品質保証等の根幹をなす「知的基盤の整備」そのものである。公共性が高く、NEDOのコーディネート能力と高度な専門家集団である産業技術総合研究所の研究開発能力の双方が連携してはじめて実現できる。極めて挑戦的で難易度の高い技術開発であるが、今回のプロジェクトでは、世界的にも最先端の基礎研究から実用性を配慮した応用技術への展開が、多大な努力によって完遂され、得られた成果も当初の目的を満たしたものである。

現状では、計測量毎の各論的な技術開発の段階であり、今後、「e-trace」の体系化を確立するために、認証や校正データを管理するための情報システムが不可欠であり、これらを様々な計測量について統合するシステムを検討していくべきである。

#### <肯定的意見>

- 科学技術、産業発展のための知的基盤としての計量器校正システムを情報化・ユビキタス化すること（「e-trace」）は重要であり、また得られた成果も当初の目的を満たしたものであり、本プロジェクトの妥当であることを評価できる。
- 日本の技術水準を維持発展するために必要とされる重要な研究プロジェクトである。
- 本研究プロジェクトは、「計量器校正技術」というやや地味な（縁の下の力持ち的）分野の研究開発であるが、理工学における新発見・発明やもの作りの品質保証等の根幹をなす、まさに「知的基盤」の名に相応しい内容である。とりわけ、仲介器等の校正精度を向上させる創意工夫とともに、国家標準から民間ユーザー末端の計測器まで近年の高度情報ネットワークシステムを活用してトレーサビリティを確保する構想はすばらしく、時機に適ったものと言える。
- 計量器の校正を進めるための最新の技術、特にインターネット等の取り入れが行われ、良く検討されている。
- 「e-trace」は、高い汎用性と製造現場への適用性の両立が求められる、極めて挑戦的で難易度の高い技術開発といえる。今回のプロジェクトでは、世界的にも最先端の基礎研究から実用性を配慮した応用技術への展開が、多大な努力によって完遂されており、その目標達成度の高さは十分に評価できる。
- 次世代の校正技術である遠隔校正を実現するため、個々の研究開発において高いレベルの成果が得られている。特に長さ計測、電気計測、圧力計測においては実用性の高い技術と感じた。

○ 産業の基準となる計量器校正の効率を向上させた点で、高く評価できる。

<問題点・改善すべき点>

- 第Ⅰ期でも指摘されているが、得られた成果をすみやかに公刊論文として公開する必要がある。
- 本プロジェクトで選定されている計量標準の研究テーマの必要性は理解できるが、全体としての充足性の点の検討も望まれる。例えば、H13-H15年度に終了した流量、温度標準の成果や本研究で扱っていない質量標準などの「e-trace」への反映のさせ方など。
- 「e-trace」になじむテーマとそうでないテーマに分かれる。
- 現状では、計測量毎の各論的な技術開発の段階であり、「e-trace」の体系化を確立するために共通の基盤技術（例えば測定機器の通信プロトコルや環境計測技術など）として何が必要か、という具体的な共通基盤の技術開発項目が未だ明確になっていない。今後、測定量に依存しない共通の基盤技術の上に、各々の計測量がもつ個別の特性に対応する校正技術の研究開発を進めることによって、「e-trace」の汎用性と柔軟性を確立すべきである。
- 遠隔校正システムを実現するためには、個別の評価技術の開発だけでなく、認証や校正データを管理するための情報システムが不可欠であり、これらを様々な計測量について統合するシステムを検討していくべきであると考えられる。
- 実用化の見通しにおいて“成果の実用化＝遠隔校正の実用化”と述べられているが、時間・周波数分野以外では、この取り組みの成果は十分とは言えない。
- 「e-trace」に合わない分野もあり、継続の際には事業内容について精査する必要があると思われる。

<その他の意見>

- ・ 欧米諸国も同様なプロジェクトが進められていることを鑑み、世界を先導できる斬新な発想の基礎研究とそれを応用展開した変化に柔軟に対応できる技術開発が継続的に必要である。

## 2) 今後に対する提言

本プロジェクトのテーマは、国際競争力を維持するために、継続的に研究開発を推進することが重要と考える。特に JCSS（計量法トレーサビリティ制度）による標準供給をすみやかに開始するために、8年間の研究成果の中で、実用化の一步手前のような有望技術は、国際的展開を睨んだ産官学支援と重点投資等による早期完成が望まれ、そのための開発援助が必要である。同時に、「e-trace」の社会普及と技術維持および改善の観点から、人材育成の仕組みの構築が望まれる。

今後は多数の企業が参画する大規模な実証実験を展開するとともに、そこから明確化された課題を速やかに解決し、同時に若手の人材育成を進めるためにも、大学との連携を強化した研究開発体制による、本事業のさらなる発展型の継続を強く望む。今回の成果をベースにネットワーク構築技術のモジュール化・共用化など、ソフトの完成度を高め、ハード技術をリファインすることでより使いやすい「e-trace」の実現を目指すべきである。たとえば、被校正対象の計測機器が遠隔校正を受けるときの制御コマンドの共通化、セキュリティ対策など計測機器メーカーの遠隔校正への対応促進が重要である。IT技術を十分に活用し、仲介器のインテリジェント化、自己校正機能を更に改良することについても検討してほしい。

### <今後に対する提言>

- ・ JCSS による標準供給をすみやかに開始することが望まれ、そのための開発援助が必要である。
- ・ 本プロジェクトのテーマは、国際競争力を維持するためには、継続的に研究開発を推進することが重要と考える。
- ・ 8年間の研究成果の中で、実用化の一步手前のような有望技術は、国際的展開を睨んだ産・官（・学）支援と重点投資等による早期完成が望まれる。
- ・ 「e-trace」の社会普及と技術維持（および改善）の観点から、人材育成の仕組みの構築が望まれる。
- ・ 実用的に使用し、更なる改善を期待する。
- ・ 日本の製造業は、グローバル化、技術進歩の加速、社会経済環境の急激な変化、環境問題対策への対応など、極めて厳しい環境にさらされている。そのような環境の中で、世界的な優位性を維持していくためには、変化への柔軟性を確保する「e-trace」を実用化し、「品質の見える化」によって“日本製の価値を保証”する体制を早急に確立する必要がある。また、日本の製造業の将来的な国際競争力を維持するためにも、本事業で得られた成果のスピーディーな普及が強く望まれる。従って、今後は多数の企業が参画する大規模な実証実験を展開するとともに、そこから明確化された課題を速やかに解決し、同時に若手の人材育成を進めるためにも、大学との連携を強化した研究開発体制による、本事業

業のさらなる発展型の継続を強く望む。

- 遠隔校正を実用化するためのデータ管理システムを構築する必要がある。
- 計測機器メーカーへの遠隔校正への対応を促すべきである。たとえば被校正対象の計測機器が遠隔校正を受けるときの制御コマンドの共通化、セキュリティ対策などが重要である。
- IT 技術を十分に活用し、仲介器のインテリジェント化、自己校正機能を更に改良し、真の「e-trace」を実現していただきたい。

## 1. 2 各論

### 1) 事業の位置付け・必要性について

本事業が目的とする先進的な情報通信ネットワークをベースにした計量標準遠隔校正システムの開発は、我が国の「もの作り」における国際競争力・信頼性を飛躍的に高める基盤技術であり、日本企業の海外進出、遠隔校正への需要の対応として適切である。本事業の確立は、計量機器の国家標準から民間ユーザーの末端まで高精度かつ効率的なトレーサビリティ技術を開発するという「知的基盤の整備」そのものであり、公共性が高く、NEDO のコーディネート能力と高度な専門家集団である産業技術総合研究所の研究開発能力の双方が連携してはじめて実現できる。また、事業内容、事業規模、波及効果に対して年間2億円程度の予算は妥当であると考えられる。国際競争力を向上させるためには、他国に日本の国家標準を広く浸透させる必要があり、この観点からも今回の事業には、大きな意義がある。

ただし、本事業で実施した研究テーマの中で、先端的な情報技術を用いた計量標準供給体系の枠組みに、必ずしもそぐわないものもあり、「e-trace」としてのテーマ選定段階から、NEDO による調整が必要であった。

#### <肯定的意見>

- 知的基盤整備として国家的にも重要なプロジェクトであり、第3者機関として NEDO がマネジメントにかかわることは必要である。
- 単位系の維持管理に関連する技術開発は国が行うべき重要なテーマである。
- 本事業は、計量機器の国家標準から民間ユーザーの末端まで高精度かつ効率的なトレーサビリティ技術を開発するという「知的基盤の整備」に合致するとともに、高い公共性を有する内容であるため、NEDO の事業として妥当である。また、本事業が目的とする先進的な情報通信ネットワークをベースにした計量標準遠隔校正システムの開発は、我が国の「もの作り」における国際競争力・信頼性を飛躍的に高める基盤技術となる一方、近隣アジア諸国など発展途上国の技術向上にも多大な国際貢献が見込まれる。
- 公共性が高く、NEDO の関与が適当である。
- 国家全体の利益を生み出す「e-trace」は、公共性の高い国家的な事業としてのみ遂行可能である。さらに、計量標準の確立は「知的基盤の整備」そのものであり、NEDO のコーディネート能力と公共性の高く高度な専門家集団である産業技術総合研究所の研究開発能力の双方が連携してはじめて実現できると思われる。
- 日本企業の海外進出、遠隔校正への需要に対する事業として適切であると考えられる。
- 知的基盤整備の達成に寄与していると考えられる。測定機器校正は当然であるが公共性が高く、公の校正機関を NEDO がサポートして事業を進めることには、

十分な意義があると考えられる。事業内容、事業規模、波及効果に対して年間2億円程度の予算は妥当であると考えられる。国際競争力を向上させるためには、他国に日本の国家標準を広く浸透させる必要があり、この観点からも今回の事業には、大きな意義があると考えられる。

<問題点・改善すべき点>

- 「e-trace」としてのテーマ選定段階から、NEDO による調整が必要であった。
- 本事業で実施した研究テーマの中で、必ずしも先端的な情報技術を用いた計量標準供給体系の枠組みに、必ずしもそぐわない（あるいは必要がない）ものもあるのではないか？
- 計量標準の対象となる装置とその装置に詳しい技術者および研究者の多くは企業に集中しており、そのような人材を産業界から集めた別の組織によって、本プロジェクトの開発技術の実証実験を並行的に遂行すべきである。
- 実際にはすべてが産総研への委託となっており、NEDO の関与が本質的に必要であったかどうかは問題が残る。たとえば、産総研の事業として適切な外部評価の元で実施しても同等の成果であった可能性もある。民間企業の研究開発につながる事業を含むべきでなかったかどうか検証する必要がある。
- 事業内容（分野）に関し、精査すべきと思われる。事業全体の構想は優れているが、分野によっては旧態依然とした進め方も見受けられる。

<その他の意見>

- ・ NEDO の寄与を明確にしてほしい。

## 2) 研究開発マネジメントについて

第 I 期の評価をもとに、GPS の利用、安定な仲介標準器の開発を通じて、JCSS による標準供給システムを構築しようという目的設定は妥当である。各研究開発項目は、社会的なニーズや技術動向を良く考慮して選定されており、各分野において概ね妥当な具体的目標値が設定されている。各研究テーマでは、概ね必要な要素技術の開発、それらと高度情報通信システムを組み合わせた遠隔校正手法の構築、およびその実証研究と評価の 3 段階から構成されており、順当な研究計画と言える。研究開発実施の事業体制については、実務者会議を定期的に開催し、運営委員会に産業界からのメンバーを加えるなど、研究レベルと実用レベルの整合性に配慮しながらプロジェクトを遂行しており、事業化の際の委託企業の選択にも問題がない。

ただし、従来の JCSS での標準供給への要求がある計測量については、「e-trace」としての開発が優先されるべきかどうかの判断がなされるべきであった。継続の際には事業内容について精査する必要がある。また、個々の研究チーム間で、「e-trace」における仲介標準器への先進情報通信技術の活かし方や考え方に温度差があり、全体の研究開発計画の方向性にアンバランスを感じる。

今後、各計測量の校正技術の間の連携や「e-trace」の体系化を専門的にマネジメントし、研究開発の戦略を常時チェックできる体制をつくるべきである。

### <肯定的意見>

- 第 I 期の評価をもとに、GPS の利用、安定な仲介標準器の開発を通じて、JCSS による標準供給システムを構築しようという目的設定は妥当である。
- システム全体としての整合性や、ソフトの共通化等を最初のシステム開発から強く求めると、計画の遅延を招きやすい。最初の「e-trace」の実用化である今回のプロジェクトでは個別テーマごとにネットワーク構築が行われており、正しい選択と考えられる。
- 全体的な研究開発において、国内および国際展開を睨んだ戦略性が感じられ、研究成果の達成度を評価するための数値目標も、市場のニーズ等を勘案して、概ね適切に設定されている。
- 各研究テーマでは、部分的に不整合さを感じることもあるが、概ね必要な要素技術の開発、それらと高度情報通信システムを組み合わせた遠隔校正手法の構築、およびその実証研究と評価の 3 段階から構成されており、順当な研究計画と言える。
- 研究開発実施の事業体制について、研究テーマによっては若干人員不足を感じさせるものもあったが、プロジェクトリーダーや各研究チームのメンバーの構成、またチーム内の連携など、本事業を円滑に進める環境が十分整備されていたと判断する。一方、情勢変化への対応等の観点からは、進捗状況やその折々

の社会・技術動向などを適切に反映して、研究テーマの取捨選択がなされたと  
思われる。

- 技術的レベルは本テーマを進めるに当たり適当な体制となっていると考える。
- 各研究開発項目は、社会的なニーズや技術動向を良く考慮して選定されており、さらにそれぞれに設定されている目標は、世界的にも最先端の数値が具体的に掲げられている。また、事業体制については、実務者会議を定期的を開催し、運営委員会に産業界からのメンバーを加えるなど、研究レベルと実用レベルの整合性に配慮しながらプロジェクトを遂行している。
- 産総研単独で実施することに対して、NEDO のプロジェクト管理が寄与することによって情勢変化に迅速、適切に対応することができている部分があったと判断する。
- 国内外の技術動向が調査されており、中庸な目標が設定されている。各分野において概ね妥当な具体的目標値が設定されている。事業化の際の委託企業の選択には問題がないと思われる。

#### <問題点・改善すべき点>

- 従来の JCSS での標準供給への要求がある項目については、「e-trace」としての開発が優先されるべきかどうかの判断がなされるべきであった。  
また、第 I 期での指摘事項がかならずしも履行されていない項目もある。
- 研究マネジメントに関してほとんど問題ないと思われるが、あえて苦言を呈すると、個々の研究チーム間の連携や研究成果のフィードバック等があまりなされていない印象を受ける。その結果、研究テーマにも依存すると思うが、「e-trace」における仲介標準器への先進情報通信技術の活かし方や考え方に温度差があり、全体の研究開発計画の方向性にアンバランスを感じる。
- 各計測量の校正技術の間の連携や「e-trace」の体系化を専門的にマネジメントする独立した専門組織を大学や産業界の人材から構成して、研究開発の戦略を常時チェックできる体制をつくるべきである。
- 「e-trace」を迅速に実用化するためのシステムの構築などについては不十分である。NEDO による関与が見える形にしてほしい。
- 分野によっては、十分な人数がプロジェクトに投入されておらず、成果が十分でない。また、成果の受取手側の関与も不十分な分野があり、ユーザー視点に立った研究開発を徹底すべきである。

#### <その他の意見>

- ・ 世界的な動向と「e-trace」の位置づけを詳細化して、将来的な技術開発戦略を明確にすることが望ましい。

### 3) 研究開発成果について

個々の開発テーマについては、テーマ毎に達成度にバラツキがあるが、設定された目標はクリアされており、一部は世界的にも独創的で最高水準の成果が得られている。従って、本事業の目的である計量標準供給体系の近代化について、少なくとも一つの雛形を構築できたと言える。成果の普及という観点から、説明会などを実施し、自ら情報発信を行い、産業界からのニーズにこたえ海外や工場での実証試験を行うなど、実際の製造現場環境での実用性に配慮した研究開発が遂行されている。知的財産権の取得に関しては、特許出願を行っており、研究開発成果の権利化に務めてきた。

ただし、論文としての公開が不十分である。また、研究開発テーマによって、技術開発のアプローチおよび国際標準化に向けた取り組みや成果の普及活動の活発さに大きな差が見られる。アジア地域への「e-trace」の展開は評価できる部分もあるが、遠隔校正についての新しい概念を提案しているとは必ずしもいえず、より積極的な成果普及が必要である。

今後、日本の製造業の将来的な国際競争力を維持するためにも、本事業で得られた成果のスピーディーな普及が強く望まれる。

#### <肯定的意見>

- 個々の開発テーマについては、設定された目標はクリアされている。
- テーマ毎に達成度にバラツキがあるが、これはテーマ毎に「e-trace」への適合性が異なるためであり、許容範囲内である。
- 本事業で実施したすべての研究テーマの成果において、当初に掲げられた数値目標はほぼ達成されており、技術レベル的にも世界最高水準にあると判断される。従って、本事業の目的である計量標準供給体系の近代化について、少なくとも一つの雛形を構築できたと言える。
- 十分ではないが、途中までの成果は得られている。
- 全ての研究開発項目に対して目標達成度は極めて高く、一部は世界的にも独創的で最高水準の成果が得られている。さらにハードウェアとソフトウェアの両面から、実際の製造現場環境での実用性に配慮した研究開発が遂行されている。
- 全般的に個々の研究開発目標をそれぞれにクリアしている。論文発表は必ずしも十分でないが、特許出願を行っており、研究開発成果の権利化に務めてきたと判断する。
- 多くの分野で目標を達成している点を評価する。通常の“研究”という視点からも高い成果が得られている。説明会などを実施し、自ら情報発信を行っている。

#### <問題点・改善すべき点>

- 第Ⅰ期でも指摘されているが、第Ⅱ期で実用化フェーズにあったとしても、論

文としての公開が不十分である。

- 成果の普及という観点から、セミナー等の一般向けの情報発信の努力は認められるものの、解説・論文等の活字による発表件数が概して少ないように見受けられるので改善が望まれる。
- 研究開発項目によって、技術開発のアプローチおよび国際標準化に向けた取り組みや成果の普及活動の活発さに大きな差が見られる。
- 国際標準化との関係が必ずしも明確でないところもある。アジア地域への展開は評価できる部分もあるが、欧米からの反応は主として、高度化した校正方法にあるところが多く、遠隔校正についての新しい概念を提案しているとは必ずしも感じられなかった。より積極的な成果普及が必要であると感じた。
- 目標値設定の根拠が曖昧な分野がある。実用化までの道筋が曖昧な分野がある。

#### <その他の意見>

- ・ 成果の普及活動は主に勉強会や見学会などの形式で研究開発者自らの活動として実施されているが、研究開発者の時間が費やされるのは好ましくない。
- ・ 「仲介器」の概念を定義してほしい。標準器の一種と考えてもよいのではないか？従来のトレーサビリティを維持できるのかどうかの検証が今後必要である。

#### 4) 実用化の見通しについて

本事業の研究成果の実用化については、研究成果の一部には、既に最先端の技術ニーズに対応した実用レベルの要求精度を満足する結果が得られており、実証試験の結果を見る限り、「e-trace」の特徴、即ち、現在の情報通信ネットワーク技術を活かした遠隔校正、あるいは標準供給システムを構築できる見通しが得られている。

ただし、実用化の観点から見ると、開発テーマによって、「e-trace」に馴染まない成果に留まっており、ユーザー側に十分なメリットが感じられないものもあった。また、JCSSでの供給をおこなうためには、システムとして解決すべき課題が多い。大規模システムの実用化では、最初はハードが主、ソフトが従であるが、実用化目前の総合試作ではソフトがより重要となっている。

「e-trace」の実用化においても同様な開発手順が重要と考えられる。将来の実用化を考慮すると、今回の成果をベースにネットワーク構築技術のモジュール化・共用化など、共通のプロトコルの検討を行い、ハード技術をリファインすることでより使いやすい「e-trace」の実現を目指すべきである。また、今回の成果を公共財として実用化していくための運用や維持体制が不十分であり、成果を無駄にしないために、今後の検討が望まれる。

#### <肯定的意見>

- 海外や工場での実証試験を行うなど、産業界からのニーズにこたえている。
- 通信システムなどの大規模システムの実用化では、通常、複数回の現場試験と総合試作が行われている。最初の総合試作・現場実験ではハードが主、ソフトが従であるが、実用化目前の総合試作ではソフトがより重要となっている。  
「e-trace」システムの実用化においても同様な開発手順が重要と考えられる。
- プロジェクトの継続が可能であれば、今回の成果をベースにネットワーク構築技術のモジュール化・共用化など、ソフトの完成度を高め、ハード技術をリファインすることでより使いやすい「e-trace」の実現が期待される。
- 本事業の研究成果の実用化について、研究テーマにより差があるが、実証試験の結果を見る限り、「e-trace」の特徴、即ち、現在の情報通信ネットワーク技術を活かした遠隔校正、あるいは標準供給システムを構築できる見通しが得られている。
- テーマによっては実用化が十分に行なえる所まできている。
- 実用化のレベルは研究開発項目によって差が見られるが、全ての研究開発項目で実機の開発とその検証や開発技術の実証実験が行われており、着実な成果が挙がっている。さらに、研究成果の一部には、既に最先端の技術ニーズに対応し、実用レベルの要求精度を満足する結果が得られている。
- 個別の研究開発についてはそれぞれ実用化の可能性は高いと感じている。校正事業者からのメリットは十分にある。

- 幾つかの分野では既に実用化されており、本事業の成果が表れている。各分野で標準整備に向けた取り組みが行われている。

#### <問題点・改善すべき点>

- JCSS での供給をおこなうためには、システムとして解決すべき課題が多い。
- 本事業全体を実用化の観点からみると、研究テーマによって、「e-trace」のシステムに馴染まない成果に留まっており、アンバランスな感が否めない。特に、仲介標準器を用いる遠隔校正システムでは、仲介標準器へ共通的な先進情報通信技術（データ相互通信や遠隔操作など）を適用するような設計が可能ではないか？
- 成果の波及効果を定量的に評価できる方法を工夫し、より迅速な技術移転に必要な要素技術や遠隔校正技術が発展的に様々な構成に応用される要因の抽出を解析的に行うことが望ましい。
- 実際に使いやすいものになっているかどうかについてはユーザーからの意見収集が必要である。
- 一部の研究開発についてはユーザー側に十分なメリットが感じられないものもあった。人材育成についてはあまり触れられていない項目がある。
- 今回の成果を公共財として実用化していくためには、運用や維持体制が不十分であると考えられる。これは今回の事業には含まれていないが、成果を無駄にしないために必要不可欠な事項であると思われる。

#### <その他の意見>

- ・ 特に世界的に最高水準の成果が得られている研究開発項目に関しては、海外の企業などを対象とした実証実験を、もっと積極的に遂行して、技術の有用性を国際的にアピールすべきである。
- ・ システムを考えていないので分野間での標準化（共通のプロトコルの検討）が進んでいない。将来の実用化を考慮すると認証システムの開発や維持に必要なコストを最小限にするためにシステムの開発を進めていくべきである。

## 2. 個別テーマに関する評価結果

### 2. 1 時間標準

第 II 期の目標である JCSS への展開、海外への展開を十分な「不確かさ」で実現している。汎用性、実用性の面で十分な達成度であり、技術レベルは世界最高水準にある。本研究の成果として、ソフトウェアを含む遠隔校正用端末装置のコスト低減や汎用システムの構築は、完成度が高く、国内外の時間標準の高精度なトレーサビリティ技術として産業界にとって大きな貢献が見込まれ、ほぼ実用化レベルにある。

ただし、超小型化利用端末装置の開発には大きな開発費が必要であるので、実際の費用対効果についても考慮した検討を行い、超小型化以外の解決方法との比較検討を行っておくべきである。

一方、時間標準は他の計測量に比較して、「e-trace」への適合性が高い研究テーマであり、早期に実用レベルの課題や問題点が抽出できれば、他の計測量への取り組みにも大きな効果が期待できる。今後、長さ標準の遠隔校正に時間標準の成果をもっと積極的に利用するなど、時間周波数の遠隔校正技術を他の標準校正分野へ応用するための技術開発を継続して行う必要がある。

#### <肯定的意見>

- 第 II 期の目標である JCSS への展開、海外への展開を十分な「不確かさ」で実現している。
- 「e-trace」への適合性が高い研究テーマであり、目標設定が重要である。産業界のニーズ、「e-trace」による「不確かさ」の低減効果、ハード技術を勘案した目標設定とその成果が評価できる。
- 本研究の成果は、要素技術の新規性という点ではややインパクトに欠けるが、精度的な目標値を達成しており、技術レベルは世界最高水準にあると判断される。特に、ソフトウェアを含む遠隔校正用端末装置のコスト低減や汎用システムの構築は、国内外の時間標準の高精度なトレーサビリティ技術として大きな貢献が見込まれ、装置の小型化など改善の余地はあるものの、ほぼ実用化レベルにあると言える。
- 十分な成果が得られている。
- 最終目標に対して、不確かさ、汎用性、実用性の面で十分な達成度である。また、距離に依存する不確かさの劣化を根本的に解決しようという研究も着実な成果を挙げており、国際的な展開の面で優位性を確保している。特に時間標準は他の計測量に比較して「e-trace」への適合性が高く、早期に実用レベルの課題や問題点が抽出できれば、他の計測量への取り組みにも大きな効果が期待できるため、プロジェクト全体の進展に大きく貢献できているという点で、時間標準の目標達成度の高さは極めて高く評価できる。
- 遠隔校正システムとして完成度が高い。遠隔校正装置の小型化、低コスト化は

ユーザー、産業界にとって大変メリットのある成果である。

- 設定された目標値は産業応用として十分であり、それを実現し、更に機器の価格を下げつつ、性能・ユーザービリティを向上させた点で高く評価できる。諸外国への普及なども視野に入れ、戦略的な取り組みが成されている。成果については論文で公表するなど十分に取り組んでいる。「e-trace」の理念を十分理解し、実用化を行った点で本事業の中で最も優れた成果を上げたかと判断できる。また他のプロジェクトへの波及効果も期待できる。

#### <問題点・改善すべき点>

- 成果の普及において、口頭発表はともかく、論文・解説が非常に少ない感は否めない。産総研の技報等でもっと活字による成果公表が望まれる。
- 国際的な標準化の観点からは、本研究の技術の要である GPS の精度保証・維持等のあり方にも言及すべきではないか？
- 超小型化利用端末装置の開発には大きな開発費が必要であると考えられる。時間標準の校正は、なるべく早期に広く普及させることが重要であると考えられるので、超小型化利用端末装置も技術的な実現可能性の検討だけではなく、実際の費用対効果についても考慮した検討を行い、超小型化が現実的に開発費に見合う効果が期待できるかどうかについて、超小型化以外の解決方法との比較検討を行っておくべきである。
- 時間周波数の遠隔校正技術を他の標準校正分野へ応用するための技術開発を継続して行う必要がある。また、ユーザーの視点から 1 時間程度の時間間隔での安定度を改善すべきと思われる。

#### <その他の意見>

- ・ 本研究成果のより広範な普及および応用展開にとって、端末装置の超小型化(携帯可能にすること)の技術開発に期待する。また、本研究成果の有難みが必ずしもよく見えないので、経済的な波及効果を具体例で定量的に見積もることができないか？
- ・ 今回の事業で距離計の遠隔校正実証実験を遂行した業績は非常に重要であり、今後、長さ標準の遠隔校正に時間標準の成果をもっと積極的に利用することによって、長さ標準の新しい校正技術への展開を進めて欲しい。
- ・ GPS を基準にして動作するシステムは多数あると思われる。そこに、時間標準による校正を必要とするシステムがどの程度存在するのか未知数であると感じる。

## 2. 2 長さ標準

### (1) 波長

第 I 期で開発した光コム技術をベースとして周波数の遠隔校正に基づいた、可搬型の参照標準を目標通り開発した。本研究成果は、メートル級長さの参照標準距離測定技術として、フェムト秒モード同期パルスレーザー光コム距離計という新方式の提案・試作・性能実証に成功しており、短・中距離の絶対測定精度の目標値を十分達成しており、技術的に世界最高水準のレベルにある。将来的には「e-trace」により「不確かさ」の大幅な低減が期待できる研究テーマであり、より精密で大型の物品製造技術等において、大きなインパクトを与えることが期待できる。

ただし、現時点、開発フェーズが終了した段階であり、今後の標準供給への取り組みが必要である。また、製造工程での組み込みを考慮すると、環境安定性の確保やコスト面の評価、一体型の開発が必要と考えられる。

今後、本技術を「e-trace」として実用的なシステムとするためには、さらに多くの研究課題の解決と技術開発が必要であり、現状の研究者数および予算規模では困難である。大学や企業を広く含む研究体制を構築し、開発スピードを加速させるべきである。

#### <肯定的意見>

- 第 I 期で開発した光コム技術をベースとして周波数の遠隔校正に基づいた、可搬型の参照標準を目標通り開発した。
- 将来的には「e-trace」により「不確かさ」の大幅な低減が期待できる研究テーマである。
- 本研究成果は、メートル級長さの参照標準距離測定技術として、フェムト秒モード同期パルスレーザー光コム距離計という新方式の提案・試作・性能実証に成功しており、短・中距離の絶対測定精度の目標値を十分達成するとともに、技術的に世界最高水準のレベルにあると言える。
- より精密で大型の物品製造技術等において、大きなインパクトを与えることが期待できそう。
- 一応の成果が得られている。
- 光コム光源の研究レベルおよびその応用技術は、学術的にも技術的にも実質的に世界最高水準である。また、実現が非常に困難であるとされてきた、製造現場環境で利用できる超精密絶対距離計測技術として、光コム応用絶対距離計装置は世界初の画期的な技術である。本プロジェクトでその開発に成功した点は大きな成果であり、目標達成度はほぼ 100%と評価できる。さらに、時間周波数標準を利用して常用参照標準器としての距離標準を実現する、新しいトレーサビリティ方式を開発し、「e-trace」への適合性を高めたことも非常に大きな成果として高く評価できる。

- 遠隔校正に適した新しい手法を提案、開発、実証している。
- 長さの計測を時間周波数標準に準拠した方法に改良し、トレーサビリティを向上させた点で評価できる。世界最高水準の測定精度を有する点も評価できる

#### <問題点・改善すべき点>

- 開発フェーズが終了した段階であり、今後の標準供給への取り組みが必要である。
- 実用化の観点から、耐環境性について創意工夫がみられるものの、韓国での屋外国際比較のみの結果しか示されておらず、もう少し系統的な環境試験による検証（適用範囲の明確化）が必要。
- 環境安定性について不十分である。
- 技術の重要度に比して、研究開発体制が脆弱である。本技術を「e-trace」として実用的なシステムとするためには、さらに多くの研究課題の解決と技術開発が必要であり、現状の研究者数および予算規模では困難である。複数の大学や企業を広く含む研究体制を構築し、開発スピードを加速させるべきである。
- 製造工程への組み込みを考えるとコストの面での評価が必要である。
- 遠隔校正手順の説明が不十分であった。測定精度は十分であるが **reference plane** をミクロン単位で保証する方法などの検討が必要であると考えられる。また、ユーザー視点からは一体型の開発も必要と考えられる。

#### <その他の意見>

- ・ 第I期での指摘にしたがい、適切な研究開発が行われた。
- ・ 現時点での目標では「e-trace」による特性向上は小幅にとどまっており、継続研究により更なる目標へのチャレンジに期待したい。
- ・ 本研究のフェムト秒モード同期パルスレーザー光コム技術は、長さ標準の参照機器としてだけでなく、精密距離測定に基づくいろいろなセンシング技術への波及が期待できそう。
- ・ 今回のプロジェクトの成果によって、日本は実質的に、世界最先端の超精密ナノ加工技術と製造工程での利用が可能な光コム絶対距離計測技術の両方を保有する世界で唯一の国となったと言える。このことは、単なる長さ標準の校正システムの実現を遙かに超えるインパクトを持っており、製造分野における日本の圧倒的な優位性を実現するために、世界に先駆けてナノ精度を保証できる製造基盤を確立し、少なくとも日本国内の全ての計測機器メーカーおよび工作機械メーカーに対して光コム絶対距離計測に基づいた校正サービスを無料で行う普及事業に早急に取りかかるべきである。さらに、今回のプロジェクトで開発された技術を日本国内の計測機器メーカーやレーザー光源の製造メーカーなどに広く技術移転することによって、新たな技術領域の開拓、新たな市場の創造・拡大を加速することが期待される。

## (2) 光ファイバ応用

第 I 期での中間評価の指摘に従い種々の校正対象への実用標準器の拡張を行い、校正ニーズの高い、ブロックゲージ、リングゲージおよびリニアスケールを対象として工場等現場での遠隔校正を行い、実際に実用長さ標準のトレーサビリティの目標精度を達成していることは高く評価でき、中間評価での指摘事項も適切に解決されている。特に、本テーマは、ファイバの特性を活用した「e-trace」への適合性が高い研究であり、干渉測長による遠隔校正技術は世界的にも独創性の高い技術であり、システムが単純で信頼性が高い点も評価できる。本技術による測定は、校正に限らず、微小物、アクセスしにくい場所での測定など、従来の手法では計測が困難な計測分野に応用が期待される。

ただし、リニアスケール用の可搬型干渉計の性能については目標性能を達成しているものの、若干系統誤差が生じていることの要因解明が必要である。

今後、JCSS としての供給へ向けた遠隔校正システムとしての整備が望まれる。また、被校正物側での調整が簡単なアダプタ開発やそれらを扱える人材の育成といった問題解決の加速および技術移転のためには現状の体制は不十分であり、大学研究者および企業技術者を多数含み、さらに若手研究者を育成できる研究開発体制を構築する必要がある。

### <肯定的意見>

- 第 I 期での指摘に従い、種々の校正対象への実用標準器の拡張を行い、工場等現場での遠隔校正に成功した。
- ファイバの特性を活用した「e-trace」への適合性が高い研究テーマであり、十分な成果が得られている。
- 本研究の低コヒーレンス干渉計と光ファイバーネットワークを用いて、現場でのリングゲージやリニアスケール等を遠隔校正するアイデアは、「e-trace」に相応しい技術開発であり、実際に実用長さ標準のトレーサビリティの目標精度を達成していることも高く評価できる。
- 低コヒーレンス干渉計を光ファイバで連結した干渉測長による遠隔校正技術は世界的にも独創性の高い技術である。また、校正ニーズの高い、ブロックゲージ、リングゲージおよびリニアスケールを対象とした実証実験を成功させ、高い実用性を示した点において、研究開発の完成度は高く評価できる。特にφ0.5mm の微細リングゲージの非接触測定と工作機械に実装したリニアスケールの in situ 遠隔校正による実証実験は、本技術の波及効果として極めて重要な成果である。以上の点から、目標精度は完全に達成されており、さらに中間評価での指摘事項も適切に解決されている。
- 本技術による測定は、校正に限らず様々な計測分野に応用が期待されると感じた。
- 低コヒーレンス光干渉によりユーザーブロックゲージの出張校正を可能にした

点で評価できる。システムが単純で信頼性が高い点も評価できる。

<問題点・改善すべき点>

- JCSS としての供給へ向けた遠隔校正システムとしての整備が望まれる。
- リニアスケール用の可搬型干渉計の性能については目標性能を達成しているものの、若干系統誤差が生じていることの要因解明が必要ではないか？
- 本手法は、被校正物側への光学系の設置が必要な場合があり、光学系の内蔵された調整の簡単なアダプタの開発やそれらを扱える人材の育成などが課題である。技術移転および上述の問題解決を加速するためにも、現状の体制は不十分であり、大学研究者および企業技術者を多数含み、さらに若手研究者を育成できる研究開発体制を構築する必要がある。
- 遠隔校正という位置づけなのか、新しい計測法としての位置づけがあいまいであると感じた。
- 誤差評価に関する検討が不十分である。
- 提案した方法が最良であるかの検証が十分でない。
- 周波数標準などの高精度システムの活用がなされていない。

<その他の意見>

- ・ 様々な現場での実証を積み重ねることで、本手法の適用範囲のより一層の拡大を望む。
- ・ 特にリニアスケールの *in situ* 遠隔校正技術は実用性が高く、製造現場への波及効果が大きい技術でもあるので、その技術移転および普及体制を早急に整備すべきである。
- ・ 今回の手法は遠隔校正だけでなく、従来の手法では計測が困難な対象（微小物、アクセスしにくい場所の測定）に適用できると考えられる。広い分野への成果展開をしていただきたい。

## 2. 3 電気標準

世界的な水準にあるジョセフソン標準の開発に加え、L(インダクタンス)、C(キャパシタンス)、R(レジスタンス)の遠隔校正のための仲介標準器を開発し、LCRメータの遠隔校正を含め、校正手続きを明確にし、遠隔校正を目標精度で実現できることを実証実験によって示すことができ、実用化レベルにある。本成果は、遠隔校正システムとしての完成度が高く、多数の計測機器を有する電子部品メーカーなどにとって、メリットが非常に大きく、製造現場の品質をサポートする基盤技術として重要である。

今後、第II期の目標であるJCSSの供給へと展開する必要がある。また、仲介標準器に対する評価基準とその根拠を明確にすると同時に、仲介標準器の輸送前後の不変性を担保する仕組み(自己診断機能やインターネットを介した遠隔チェックなど)を付加、あるいは手順を明示する必要がある。

今回の開発では、被校正標準器の種類や周波数範囲等について条件を限定したシステム開発が行われており、今後、より実際の広範なニーズに対応できるようにするための課題について明らかにし、高周波デバイスに対応した校正もできるように、汎用性の高いシステム構築が必要である。

さらに、2次標準に自己校正機能を搭載するなど、これまでの“標準のコピー”とは異なる方法で電気標準を分配する方法についての検討が望まれる。

### <肯定的意見>

- L、C、Rの遠隔校正のための仲介標準器を開発し、LCRメータの遠隔校正を含め、校正手続きを明確にした。
- 製造現場の品質をサポートする基盤技術として重要である。
- 本研究におけるL、C、Rやその計測器の遠隔校正技術は、仲介標準器を用いたオーソドックスなアプローチによって目標精度を達成しており、実用化レベルにあると思われる。
- 世界的な水準にあるジョセフソン標準の開発に加え、実用性の高い、標準インダクタ、標準キャパシタ、交流抵抗器の遠隔校正およびLCRメータの遠隔校正を目標精度で実現できることを実証実験によって示しており、高い目標到達度が認められる。
- 遠隔校正システムとしての完成度が高く、多数の計測機器を有する電子部品メーカーなどにとって、メリットが非常に大きいと感じた。
- 仲介器を用い2次標準を校正事業者サイドに委託する取り組み、およびLCRメータを遠隔校正するためのシステムは、実用性が高く評価できる。

### <問題点・改善すべき点>

- 第II期の目標であるJCSSの供給へと展開する必要がある。第I期で指摘された、電圧標準供給については、JCSSへの展開も同時並行ですすめるべきであ

った。

- 仲介器に対する評価基準とその根拠を明確にする必要があると思われる。
- 仲介標準器の輸送前後の不変性を担保する仕組み（自己診断機能やインターネットを介した遠隔チェックなど）を付加、あるいは手順を明示する必要があるのではないか？
- 今回の開発では、被校正標準器の種類や周波数範囲等について条件を限定したシステム開発が行われており、より実際の広範なニーズに対応できるよう、汎用性の高いシステム構築が必要である。
- 対象とする周波数範囲が狭く限定されている。汎用性を高めるための課題について、明らかにすべきである。
- 2次標準に自己校正機能を搭載するなど、これまでの“標準のコピー”とは異なる方法で電気標準を分配する方法を検討すべきである。今後、現在の電気標準の精度を凌駕する方法やそれを実現するためのシステムを構築していくべきと考える。

#### <その他の意見>

- ・ 本研究の手法がベストであるとは言え、「e-trace」という遠隔校正情報システムの観点から、インターネットによるメール送受信やデータ伝送だけでは物足りない。
- ・ 仲介標準器を利用した校正手法は確実性と実用性の上で避けられないかも知れないが、搬送による影響の少ないより扱いの容易な仲介標準器の開発や遠隔校正に適した新しい手法の検討も進めて欲しい。
- ・ 高周波デバイスに対応した校正に拡充してほしい。

## 2. 4 放射能標準

IC タグ付きの線源、線源校正装置および放射能測定装置を開発し、当初の目的である、種々の線源に対する実証実験を行い、トレーサビリティの「不確かさ」20%以下の数値目標を達成した。20%以下の目標設定はやや不満なもの、本遠隔構成システムの有効性は十分実証されており、今後の実用化への進展が十分期待できる。さらに JCSS に基づく遠隔地の放射能測定装置を操作することで、遠隔校正を行うサービスを世界に先駆けて実現できた。

本成果である IC タグにより、個々の校正線源および測定機器を識別して遠隔校正する手法は、放射線安全管理技術のあり方に大きなインパクトをもつ。更に、IC タグを用いた仲介器、計測器の管理システムは、他の計測手法への展開も期待される。

今後、線種により要求される「不確かさ」の相異に対応できるシステム構成が必要であり、実用化に向けて、現場で利用されている様々な線源や測定器に対し、IC タグによる具体的な管理・運用の方式・手順等を整理すべきである。また、現場支援要員の役割と訓練、問題が発生した場合の責任の所在等の明確化とともに、線源の取り扱いについて、知識のないユーザーでも理解できる表示方法や情報提供方法などの管理体制の構築が必要である。

### <肯定的意見>

- 当初の目的である、種々の線源に対する実証実験まで達成した。また JCSS に基づく遠隔測定を実施した。
- ハードとしての性能は目標をクリアしている。
- 本研究の IC タグにより個々の校正線源および測定機器を識別して遠隔校正するアイデアは、放射能標準のトレーサビリティを現場まで拡張する手法として画期的と考えられ、放射線安全管理技術のあり方にも大きなインパクトを持つと考えられる。
- トレーサビリティの「不確かさ」20%以下の設定はやや不満なもの、本遠隔構成システムの有効性は十分実証されており、今後の実用化への進展が十分期待できる。
- IC タグ付きの線源、IC タグ読込書込装置付線源校正装置および IC タグ付放射能測定装置を開発し、「不確かさ」20%以下の数値目標を達成している。さらに遠隔地の放射能測定装置を操作することで、遠隔校正を行うサービスを世界に先駆けて実現し、画期的な成果を挙げている。
- RFID タグを用いた仲介器、計測器の管理システムの開発は他の計測手法への展開も期待される。
- IC タグの導入により管理体制を強化する取り組みは、危険物を扱う分野において高く評価できる。

<問題点・改善すべき点>

- 線種により要求される「不確かさ」が異なり、対応できるシステム構成が必要である。
- 現場支援要員の役割と訓練、問題が発生した場合の責任の所在等を明確にする必要があると思われる。
- 実用化に向けて、現場で利用されている様々な線源や測定器に対し、ICタグによる具体的な管理・運用の方式・手順等を整理すべきである。少なくとも、研究成果として挙げられている中性子検出器の遠隔校正実験との関連が判然としない。
- 特に校正に関する認知度の低い医療機関に対して遠隔校正を行う場合の、ハードウェアおよびソフトウェア両面での課題が多く残されている可能性があり、実用化にむけて、多数の実証実験の解析に基づいた課題抽出を実施しておくべきである。
- 現時点で管理体制の構築が不十分であり、実用にあたっては“人的資源の的確な確保”と共に改善すべき課題であると考えられる。
- 測定分解能・精度に関してはこれまでの概念にとらわれず、“新しい標準”を作る気持ちで取り組んで頂きたい。

<その他の意見>

- ・ 本研究成果の実用化および普及を早期に図るには、放射線計測関連の産・官・学連携コンソーシアム等の全日本的な検討体制を立ち上げてはどうか？
- ・ 線源の取り扱いについて、知識のないユーザーでも理解できる表示方法や情報提供方法も遠隔校正の安全性を高める上で重要であると考ええる。

## 2. 5 三次元測定機標準

任意微細形状用三次元測定機校正のための低熱膨張材仲介標準器の開発とともに、座標測定の不確かさ推定や現場測定環境モニター手法を開発し、高精度化のための創意工夫がなされ、当初の数値目標を上回る成果が得られている。

特に、熱膨張率の相異なるゲージを用いて、温度環境の異なる測定器の遠隔校正を実現した手法は環境温度のダイナミックな変動の影響を補正できるなど、メリットは大きく、他の遠隔校正へも適用が期待される。

ただし、三次元測定機の測定精度の実証として、例えば、100mm に対し、200nm の不確かさで値付けが可能との根拠データやロジックが明確でない。また、特許や論文・解説などの研究成果の公表等がない。

今後、ユーザー側のメリット、特にコストメリットを明らかにすると同時に、現場支援要員の役割と、その責任の明確化や現場試験を積み上げ、従来手法との比較を行い、今回開発された遠隔校正技術の問題点の分析および実用上の課題抽出を進めるべきである。また、依頼試験ではなく、JCSS としての供給へと展開する必要がある。

### <肯定的意見>

- 任意微細形状用三次元測定機校正のための仲介標準器と、測定環境モニター手法を開発した。
- 高性能な仲介スケールを用いた「e-trace」は環境温度のダイナミックな変動の影響を補正できるなど、メリットは大きい。
- 本研究では、三次元測定機の現場・遠隔校正技術として、低熱膨張材仲介標準器の開発とともに、座標測定の不確かさ推定や現場測定環境のモニター法等に高精度化のための創意工夫がなされ、当初の数値目標を上回る成果が得られている。
- 熱膨張率の相異なる仲介標準器を送付してインターネットによる「不確かさ」を推定する手法は実用的に利用可能であり、波及効果がある。
- 三次元座標測定機の遠隔校正技術は、既存の手法との整合性を配慮した実用性の高い方法によって確立されなければならないという制約がある。そのような厳しい制約の中で、熟練技能に依存せずに、製造現場のユーザーが直接実行できる校正手順の開発と低熱膨張材料仲介標準器や仲介標準器の測定誤差を入力することで幾何学誤差を評価できるプログラムなどの開発によって遠隔校正技術の実用性を高めた成果は高く評価できる。さらにその手法を、将来的にもニーズの大きい任意・微細形状用三次元測定機の遠隔校正に拡張し、十分な目標達成度が得られている。また、そのために新たに開発された Micro CMM 用仲介標準器は世界的にも高い精度を有しており、その波及効果の点で重要な成果である。
- 研究開発において、課題を的確に分析しており、課題への対応が明確に行われ

ている。測定環境の変動を補正する計測原理は他の遠隔校正へも適用が期待される。

- 2種類の温度特性の異なるゲージを用いて、温度環境の異なる測定器の遠隔校正を実現した点が評価できる。

#### <問題点・改善すべき点>

- 依頼試験ではなく、JCSS としての供給へと展開する必要がある。
- 現場支援要員の役割と、その責任を明確にする必要があると思われる。
- 三次元測定機の測定精度の実証が困難であることは理解できるが、例えば、100mm に対し、200nm の「不確かさ」で値付けが可能との根拠データやログブックが必ずしもよくみえない。
- 研究成果の公表等において、特許や論文・解説が 0 件というのはいかがなものか。低熱膨張材仲介標準器やそれを用いた温度補正のアイデアはオリジナル論文にならないのか？
- 実際の製造現場環境に設置された三次元座標測定機の校正を多数遂行し、熟練技術者が行っている従来手法との比較調査データに基づいて、今回開発された遠隔校正技術の問題点の分析および実用上の課題抽出を進める必要がある。
- ユーザー側のメリットが明確でない。出張校正を受けているユーザーが遠隔校正に移行するに十分なメリット、特にコストメリットを明らかにすべきである。
- 遠隔校正の具体的方法や手順が明示されていない。

#### <その他の意見>

- ・ インターネットを介した三次元測定機の遠隔校正概念は概ね理解できるが、もう少し具体的な実例（できれば、複数）を示していただかないと、実用化までのレベルが判断できない。
- ・ 既存の手法との整合性および実用性の点で困難の多い研究であると思われるが、長さ標準との連携によって、光コム技術を利用して値付けが可能な新たな仲介標準器の開発や測定精度評価技術の開発についても、検討する価値は十分あると思われる。

## 2. 6 振動・加速度標準

振動・加速度標準の遠隔校正技術として、仲介標準器となる小型の可搬型校正装置の開発と、電荷増幅器の分離遠隔校正システムを開発し、操作の自動化および校正結果のインターネット送信を可能にすることによって、インターネット経由での遠隔校正を可能にし、さらに目標分解能を超える性能を実現している点で評価できる。

しかしながら、可搬型とはいえ、校正のための振動発生機そのものを校正現場に移動するということは、JCSS による標準供給システムとするための課題が多い。例えば、実用化にあたり、加振機の据付や校正器物の取り付けに一定の技能が要求される点や、無人運転や遠隔運転に配慮が必要とされること、および事前に校正器物の質量などに応じた調整が必要であることなどの点で、未だ改善点が多く残されている。横型の加振器の並進性、ドライバなどを一体化した装置の発熱などの課題の検討や仲介器としての加速度ピックアップの評価も必要である。

今後、他の計測手法と同様な遠隔校正のデモンストレーションを期待したい。

### <肯定的意見>

- 可搬型校正装置の開発と、電荷増幅器の分離遠隔校正システムを開発した。
- 目標値をクリアしており、評価できる。
- 本研究では、振動・加速度標準の遠隔校正技術として、仲介標準器となる可搬型加振器および電荷増幅器校正装置の開発に力点が置かれており、技術的な新規性にやや乏しいものの、コンパクト化や性能安定性の実現に創意工夫がみられる。
- 可搬式加振機の試作は評価できる。
- 可搬型校正装置を小型化し、操作の自動化および校正結果のインターネット送信を可能にすることによって、インターネット経由での遠隔校正を可能にし、さらに目標精度を超える性能を実現している点で評価できる。
- 校正用の小型の加振器はニーズが高いと判断され、可搬性の高い加振器の開発は評価される。また、電荷増幅器の高精度な校正方法の開発は遠隔校正の実現に向けて重要である。
- 可搬の振動装置を用いて加速度計の校正が行える点で評価できる。

### <問題点・改善すべき点>

- 可搬型とはいえ、校正のための振動発生機そのものを校正現場に移動するということは、JCSS による標準供給システムとするための課題が多い。
- 現場支援要員の役割・訓練、その責任を明確にする必要があると思われる。
- 仲介標準器としての目標性能は概ね達成されているようであるが、実際の遠隔校正（例えば、タイ国標準研での実証実験等）で、総合的に目標精度が達成で

きたかどうかについての具体的記述がない。これに関連して、実用化に向けた課題として、例えば、加振器据付や校正器物の取り付けに一定の技能を有するとか、無人運転や遠隔運転の配慮などが挙げられているが、これらの対策にはどの程度の技術的困難さがあるのかにも言及すべきではないか？従って、現時点では、本遠隔校正システム全体の実用化までのレベルにはややギャップがありそうとの印象を受ける。

- 実用化にあたり、加振機の据付や校正器物の取り付けに一定の技能が要求される点や、無人運転や遠隔運転に配慮が必要とされること、および事前に校正器物の質量などに応じた調整が必要であることなどの点で、未だ改善点が多く残されている。
- 横型の加振器は並進性に、ドライバなどを一体化した装置には装置の発熱などの課題があると考えられるが、その点での検討が不十分である。
- 仲介器としての加速度ピックアップの評価が未実施であり、加振器の性能が十分評価されていない。

#### <その他の意見>

- ・ 「e-trace」という遠隔校正情報システムの観点から、インターネットによるデータ伝送だけでは物足りない感がある。
- ・ 他の計測手法と同様な遠隔校正のデモンストレーションを期待したい。

## 2. 7 圧力標準

圧力標準の遠隔校正技術として、開発した気体差圧と液体圧力用の可搬性の高い小型で安定な圧力仲介標準器を用いた遠隔校正手順に基づいて、国内や、中国での遠隔校正実証実験を行い、持込校正との一致や再現性が実証されており、当初目標はほぼ達成されている。さらに従来は校正機関の熟練者が行っていた設置作業を「支援要員」が遂行する測定手順の開発によって簡略化し、現場の「支援要員」の役割と訓練体系を含めて「e-trace」が構築されている。

しかしながら、JCSSによる標準供給システムとするための課題が多い。ユーザーであるメーカー側のコストメリットが十分であるかについての検討が必要である。技術課題として、仲介器の更なる小型化、産業界で多く用いられる各種作動油への対応についての検討が残されている。運用面では、仲介標準器を扱える資格認定の「支援要員」を必要としているが、「e-trace」を活かす意味で、オンラインマニュアルによるその場 e-learning 程度で対応できるような標準仲介器と校正器物の物理的結合の仕方も標準化する必要がある。

### <肯定的意見>

- 気体・液体用の小型で安定な圧力仲介標準器を開発した。また、依頼試験をたちあげるとともに中国への校正実証実験に成功した。
- 現場の「支援要員」の役割と訓練体系を含めて「e-trace」が構築されている。
- 圧力標準の遠隔校正技術として、気体差圧と液体圧力の仲介標準器が開発され、可搬性、安定性、操作性の他、デジタル圧力計による測定データ送信や自己診断機能など、「e-trace」を意識した創意工夫がみられる。
- 仲介標準器を用いた遠隔校正手順について、持込校正との一致や再現性が実証されており、当初目標はほぼ達成されていると判断される。
- 遠隔校正用仲介器の開発は評価できる。
- 気体差圧用仲介器および液体圧力仲介器の小型化、軽量化および低コスト化によって当該装置の可搬性を高め、さらに従来は校正機関の熟練者が行っていた設置作業を「支援要員」が遂行するプロトコルの開発によって簡略化し、従来よりも遠隔校正に適した校正技術を開発している。また、各内外の移送実験によってその有効性を実証しており、実用性が認められる。
- 完成度の高い遠隔校正システムを開発し、実用化に近い成果を実現している。
- 自動校正機能を搭載した仲介器を開発し、高い精度で圧力校正が行えるシステムを構築した点で評価できる。

### <問題点・改善すべき点>

- 加速度同様、JCSS での供給のためには課題が多いが、実証実験の成果もあり推進が期待される。
- 遠隔校正の手順の開発において、仲介標準器を扱える資格認定の「支援要員」を

必要とすることは運用上の弱点である。「e-trace」を活かす意味で、オンラインマニュアルによるその場 e-learning 程度で対応できるような標準仲介器と校正器の物理的結合の仕方も標準化する必要があるのではないか？

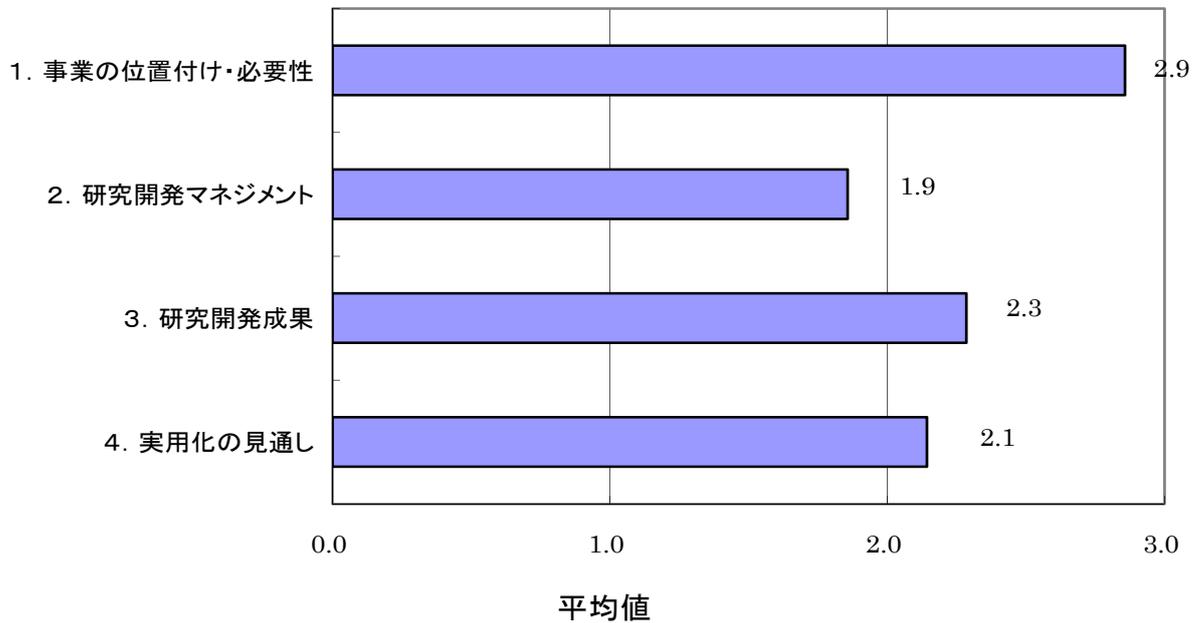
- 作動油が特殊で、通常の油圧には変更が大変である。
- 「支援要員」を必要とする現状の技術では、「e-trace」が目指している完全な遠隔校正システムを実現することは困難と思われる。また、H18～H20 の開発期間において、ある程度気体差圧用仲介器および液体圧力仲介器の軽量化は達成したものの、サイズは僅かしか変わっておらず小型化は十分であるとはいえない。
- メーカー側のコストメリットが十分であるのかの検討が必要である。

<その他の意見>

- ・ 仲介器の技術開発等に関する原著論文（査読あり）が全くないため、世界的な技術水準に対する位置づけが判断できない。
- ・ より広い圧力範囲への対応を進めていただきたい。

### 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	B	A	A	A	
1. 事業の位置付け・必要性について	2.9	A	A	A	B	A	A	A	
2. 研究開発マネジメントについて	1.9	B	B	B	B	B	C	B	
3. 研究開発成果について	2.3	B	B	B	B	A	A	B	
4. 実用化の見通しについて	2.1	B	B	B	B	A	B	B	

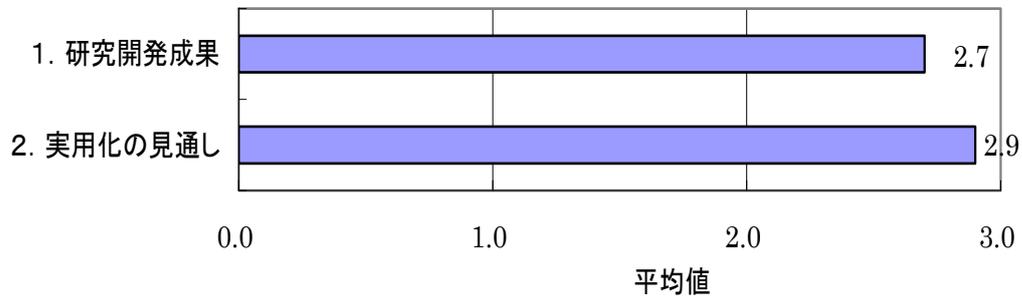
(注) A=3, B=2, C=1, D=0 として事務局が数値に換算し、平均値を算出。

〈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

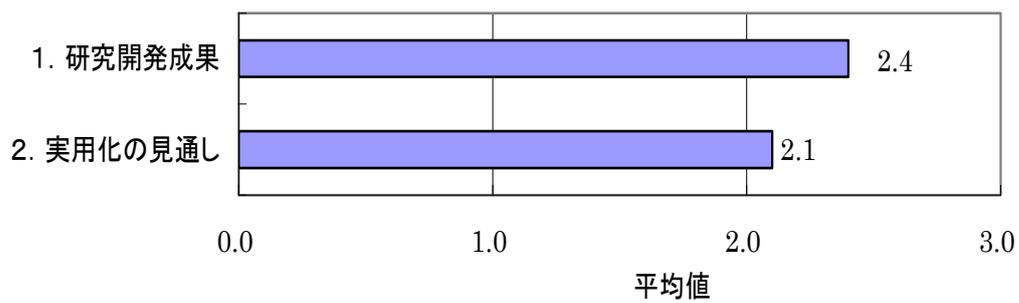
### 3. 2 個別テーマ

#### 3. 2. 1 時間標準

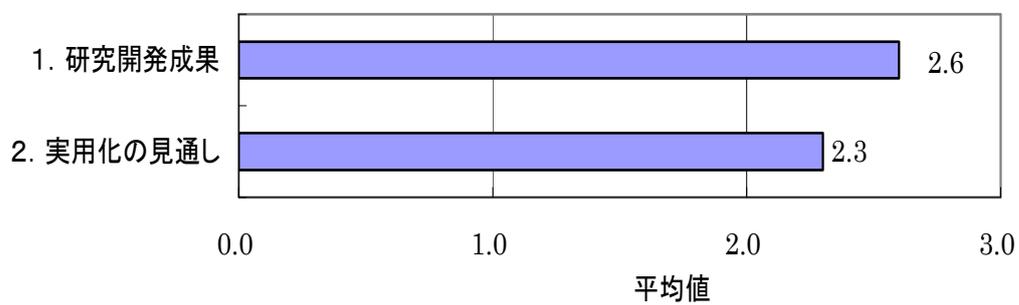


#### 3. 2. 2 長さ標準

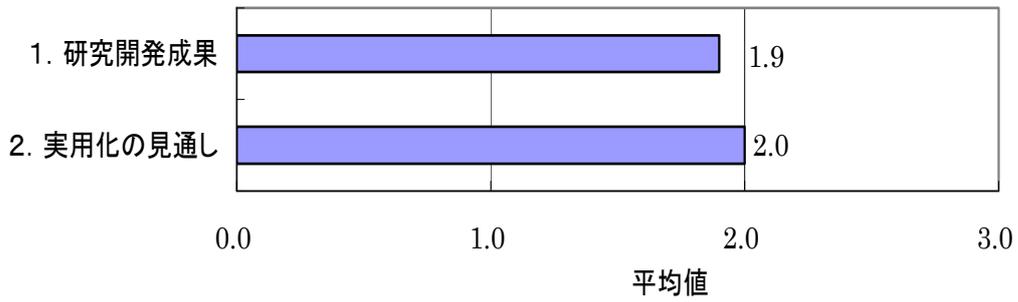
##### (1) 波長



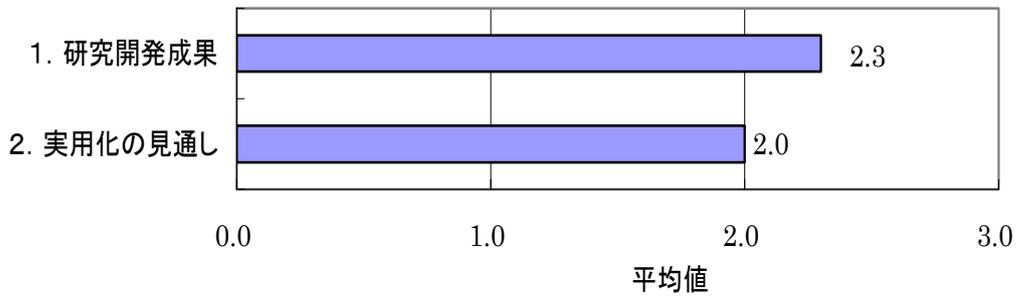
##### (2) 光ファイバ応用



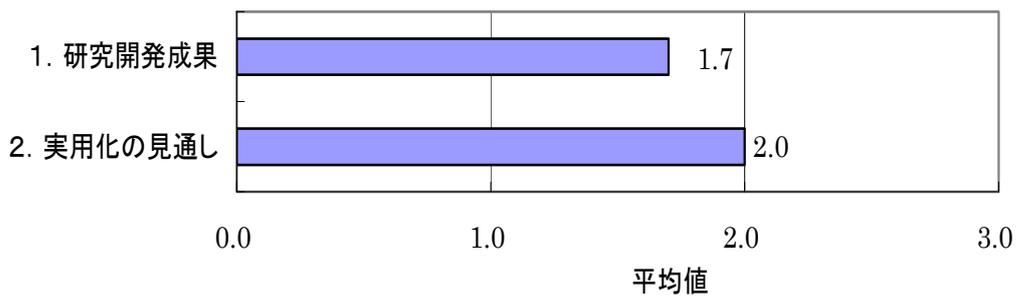
### 3. 2. 3 電気標準



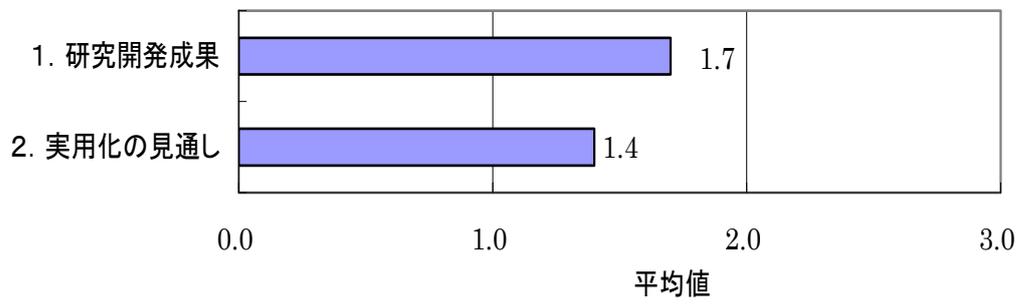
### 3. 2. 4 放射能標準



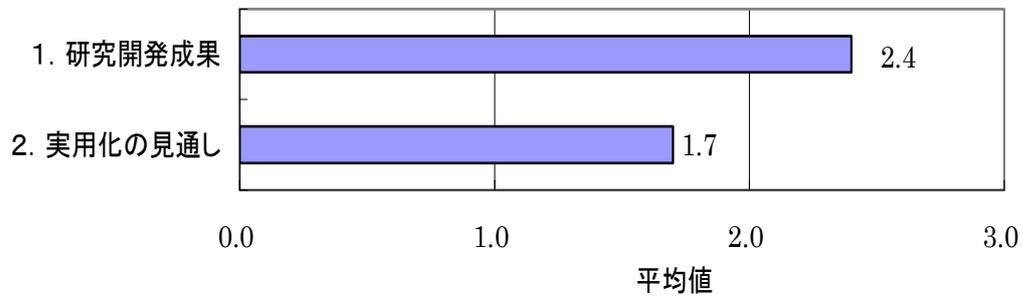
### 3. 2. 5 三次元測定器標準



### 3. 2. 6 振動・加速度標準



### 3. 2. 7 圧力標準



個別テーマ名と評価項目	平均値	素点 (注)							
3. 2. 1 時間標準									
1. 研究開発成果について	2.7	A	A	B	A	A	B	A	
2. 実用化の見通しについて	2.9	A	A	A	B	A	A	A	
3. 2. 2 長さ標準 (1) 波長									
1. 研究開発成果について	2.4	B	B	A	A	A	B	B	
2. 実用化の見通しについて	2.1	B	B	B	B	A	B	B	
3. 2. 2 長さ標準 (2) 光ファイバ応用									
1. 研究開発成果について	2.6	A	A	A	B	A	B	B	
2. 実用化の見通しについて	2.3	A	A	A	B	A	C	C	
3. 2. 3 電気標準									
1. 研究開発成果について	1.9	C	B	B	B	A	B	C	
2. 実用化の見通しについて	2.0	C	C	B	B	A	A	B	
3. 2. 4 放射能標準									
1. 研究開発成果について	2.3	B	A	A	B	A	B	C	
2. 実用化の見通しについて	2.0	B	B	B	B	A	B	C	
3. 2. 5 三次元測定機標準									
1. 研究開発成果について	1.7	C	B	B	A	B	C	C	
2. 実用化の見通しについて	2.0	B	B	B	B	A	B	C	
3. 2. 6 振動・加速度標準									
1. 研究開発成果について	1.7	C	B	B	B	C	B	B	
2. 実用化の見通しについて	1.4	C	C	C	B	B	C	B	
3. 2. 7 圧力標準									
1. 研究開発成果について	2.4	B	A	B	B	B	A	A	
2. 実用化の見通しについて	1.7	B	B	B	C	C	B	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. 研究開発成果について

- ・非常によい
- ・よい
- ・概ね適切
- ・適切とはいえない

2. 実用化の見通しについて

- A ・明確
- B ・妥当
- C ・概ね妥当であるが、課題あり
- D ・見通しが不明

## 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。

# 「計量器校正情報システムの研究開発」

## 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 研究開発推進部
-----	------------------------------------

## 目次

### 概要

### 用語集

I . 事業の位置付け必要性について	---	I-1
I-1 . NEDO の事業としての妥当性	---	I-1
I-1.1 NEDO が関与することの意義	---	I-1
I-1.2 実施の効果（費用対効果）	---	I-1
I-2 . 事業目的の妥当性	---	I-3
I-2.1 本事業の背景と目的	---	I-3
I-2.2 本事業の位置付け	---	I-5
. 研究開発マネジメントについて	---	-1
- 1 . 研究開発目標の妥当性	---	-1
- 2 . 研究開発計画の妥当性	---	-7
- 3 . 研究開発実施の事業体制の妥当性	---	-11
-3.1 研究開発の実施体制	---	-11
-3.2 研究開発の運営管理	---	-14
- 4 . 情勢変化への対応	---	-15
-4.1 中間評価への対応	---	-18
-4.2 評価に関する事項	---	-20
. 研究開発成果について	---	-1
- 1 . 事業全体の成果	---	-1
-1.1 目標の達成度	---	-2
-1.2 成果の意義	---	-5
-1.3 知的財産権の取得及び標準化の取組	---	-6
-1.4 成果の普及	---	-10
- 2 . 研究開発項目ごとの成果	---	-16
-2.1 時間標準遠隔校正技術の開発	---	-16
-2.2 長さ標準遠隔供給技術の開発	---	-36
-2.2.1 長さ標準遠隔供給技術の開発：波長	---	-36
-2.2.2 長さ標準遠隔供給技術の開発：光ファイバ応用	---	-56
-2.3 電気標準遠隔校正技術の開発（インピーダンス）	---	-77
-2.4 放射能標準遠隔校正技術の開発	---	-102
-2.5 三次元測定器標準遠隔校正技術の開発	---	-122
-2.6 振動・加速度標準遠隔校正技術の開発	---	-134
-2.7 圧力標準遠隔校正技術の開発	---	-150
IV . 実用化、事業化の見通しについて	---	IV-1
- 1 . 成果の実用化可能性	---	IV-1
- 2 . 波及効果	---	IV-2

概要

		最終更新日	平成 21 年 12 月 21 日
プログラム (又は施策)名	計量器校正情報システムの研究開発		
プロジェクト名	計量器校正情報システムの研究開発 < e - trace >	プロジェクト番号	P 0 1 0 2 9
担当推進部/担当者	研究開発推進部 標準化・知的基盤グループ/ 玉木 敏夫 ( 1 6 年 4 月 ~ 1 9 年 3 月 ) 研究開発推進部 標準化・知的基盤グループ/ 黒川 俊秀 ( 1 9 年 4 月 ~ ) 研究開発推進部 標準化・知的基盤グループ/ 松川 貴夫 ( 2 0 年 5 月 ~ )		
0 . 事業の概要	本プロジェクトは、経済活動の迅速化やグローバル化に対応する戦略的な社会インフラ整備として、計量標準供給体系の近代化を図るものである。この目的のために、情報通信ネットワーク技術等の先端的情報技術を活用して計量標準の遠隔校正システムを開発する。		
事業の位置付け・必要性について	<p>( 1 ) NEDO の事業としての妥当性</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・知的基盤整備制度の下で本事業を実施しているが、単に当該施策・制度の目標達成のために留まらず、日本産業の活性化のための産業インフラ整備という経済産業省全体の政策に寄与している。</li> <li>・知的基盤整備とは、即ち産業インフラの整備であり、公共的性格が強く、広く国民に公開・提供することが必要である等、民間企業の事業にはなじまず、基本的に国が整備すべきものとされている ( 知的基盤整備特別委員会とりまとめ ) 。</li> <li>・経済産業省においては、産業技術総合研究所は高度な研究開発能力により、国家的研究機関として行うべき知的基盤整備を実施、製品評価技術基盤機構は経済産業行政の実施に密接不可分な技術評価、分析及び調査研究、技術情報の提供、N E D O は国として民間の能力を活用して行う研究開発のマネジメント機関、産学官の協力による研究開発のコーディネート機関と役割分担をしている ( 知的基盤整備特別委員会とりまとめ ) 。</li> <li>・本事業は、産業界の計測機器開発能力、大学等の基礎研究能力及び産業技術総合研究所の計量標準開発・供給能力と産学官の三者の連携が必須であることから、N E D O がコーディネート機関としての役割を担い、実施している。</li> </ul> <p>( 2 ) 事業目的の妥当性</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・本事業の背景には、1980 年代後半からのバブル崩壊後の日本産業の国際競争力低下への反省として、産業インフラの強化という政策動向の一環に知的基盤整備があり、特に計量標準の整備と産業界の要望に即した計量標準供給方法の開発がある。そのような見地から本事業の妥当性は明らかである。また、遠隔校正は国家プロジェクトとして組織的に開発しているものであり、標準供給の近代化として世界に先駆けて国際的な貢献をするものである。</li> <li>・近年安全安心のために欧米を中心に、RoHS 指令や UL 規格認証の義務化など、地域・国家ごとの様々な規制が講じられており、これらに対応するためトレーサビリティの保証された計量標準が求められており、製造現場にまでトレーサビリティを及ぼす効率的な手法が必要と考えられている。</li> <li>・本事業の政策的な位置づけは、科学技術基本計画 ( 平成 1 8 年 3 月閣議決定 ) の「 2 0 1 0 年に世界最高水準を目指して重点整備を進める。」という計画を受け、経済産業省においては計量標準の整備と合わせて、先端の情報通信技術を活用して標準の供給形態の高度化を実現するための研究開発の重要性を指摘 ( 知的基盤整備特別委員会とりまとめ ) されたことに基づくものである。また、経済産業省は知的基盤整備特別委員会の指摘を基準認証政策 ( 中期目標 ) の知的基盤政策の施策である「 知的基盤の整備 」の一つとして「 計量器校正情報システム技術開発事業 」に反映し、本事業を実施している。</li> </ul>		

・ 研究開発マネジメントについて

事業の目標

(1) 研究開発目標の妥当性

・ 本事業は、前章の事業目的の妥当性の項でも述べたように、1980年代後半の日本経済のバブル崩壊後の技術動向、市場動向を踏まえて、産業界ニーズの高い計量標準供給の柔軟化と迅速化を目的とした戦略的な目標設定がなされている。

・ 本事業は、情報通信技術を活用して計量標準の供給形態の効率化を実現するための研究開発であることから、持ち込み校正におけるニーズの実態から校正需要の約90%をカバーするために必要な、不確かさの確保を行うことを目標として定量的に設定した。

・ 産総研が保有する特定標準器（国家計量標準）を用いて行う登録事業者が保有する標準器の校正及び校正事業者が行う製造現場等で用いられる標準器の校正のそれぞれのニーズを対象とした。

・ 第1期（H18～H20）においては、実用の測定機器にまで対象を拡大するため、頑健で実用的な仲介器を用いて、測定結果を自動的に電子メールで送信する方式や、ICタグを用いた測定機器の管理と校正条件の設定などについても、遠隔校正の適用範囲とした。

(2) 研究開発計画の妥当性

・ 本事業の研究開発計画・実施にあたっては運営委員会の指導のもとに、研究開発の目標達成のためのスケジュール検討、重点課題に対するの予算傾斜配分、テーマの見直し（前倒し、追加など）を行っている。

・ 研究開発には各テーマごとに遠隔校正の目標達成に必要な要素技術開発を必ず含めている。

・ 研究フローにおける要素技術間の関係、順序についても各テーマ担当者で議論して進めている。

・ テーマの中には、短期で実用化できるものと長期の技術開発が必要なものが混在しており、実用化の段階に至ったものから順に社会に貢献（遠隔校正実施）を行っている。本事業は全体としては長期プロジェクトであり、産総研から上位の校正事業者への遠隔校正の技術蓄積を実用化の観点から絞り込んで、次の校正事業者から産業界への遠隔校正への技術開発に活用を図ろうとしている。

事業の計画内容

主な実施事項	H13fy	H14fy	H15fy	H16fy	H17fy	H18fy	H19fy	H20fy	総額
時間標準									201.8
長さ標準									339.2
1)波長									186.8
2)光ファイバ応用									
電気標準									258.0
1)直流									49.7
2)交流									
3)インピーダンス(LCR)									
放射能標準									170.3
三次元測定器測定標準									131.9
振動加速度標準									92.2
力学（圧力）標準									100.2
流量標準									37.5
温度標準									38.2
開発予算 (会計・勘定別に事業費の実績額を記載) (単位：百万円)	H13fy	H14fy	H15fy	H16fy	H17fy	H18fy	H19fy	H20fy	総額
一般会計	150	200	300	240	240	225	215	194	1764

	特別会計 (一般・電源・ 需給の別)									
	加速予算 (成果普及費を 含む)									
	総予算額	150	200	300	240	240	225	215	194	1764
開発体制	経産省担当原 課	産業技術環境局知的基盤課								
	プロジェクト リーダー	吉田春雄(平成13年4月~平成18年3月) 松本弘一(平成18年4月~平成20年3月) 桧野良穂(平成20年4月~現在)								
	委託先(*委 託先が管理法 人の場合は参 加企業数およ び参加企業名 も記載)	(独)産業技術総合研究所、東北大学、東京電機大学、株式会社サンジェム、株式 会社浅沼技研 (再委託先)日本電気計器検定所、国立大学法人東京大学、横河電機株式会社、 国立大学法人電気通信大学、長野計器株式会社、株式会社トプコン、株式会社東精 エンジニアリング、長野県工業技術総合センター								
情勢変化への 対応	<p>・情勢変化への対応については、社会的な情勢変化に対応しつつ、「より実用化へ」という方針に そって遠隔校正に適した仲介器・システムの開発を行うことで一貫している。運営委員会の指導の もとに、計画や予算配分の見直しを適宜実施した。</p> <p>・第 期(H13~H17)において、三次元測定器標準、温度標準及び圧力標準に関しては、高度の一 次標準を遠隔的にトランスファするという当初の目的を達成したので、平成15年度に終了した。</p> <p>・実用性があり質の高いサービスを広汎に供給するため、平成17年度までの研究開発期間を、平成 20年度まで3年間延長した(第 期:H18~H20)。この延長に伴い、本事業における校正の対象を、 校正の専門家である国内の約200社の登録事業者が保有する標準器から、製造現場等で用いられて いる標準器までとした。</p> <p>・三次元測定器標準に関しては、製造現場において産業の高度化によりマイクロ部品や装置の計測 技術が必要になったことから、平成18年度から再開することにした。圧力についても、現場での当 該技術の電子化が急速に進み、標準器として利用できるレベルの安定性が確保できる見通しがたっ たので平成18年度から再開することとした。</p> <p>・振動・加速度標準に関して、自動車業界などを中心として多くのニーズが発生するとともに、全 国に配置されている多くの地震計のロバスト性の確保の必要性により、平成18年度から新たに開始 した。</p>									
中間評価結果 への対応	平成17年度中間評価結果への対応 産業界の意見を集約すべきとの指摘に対し運営委員会メンバーに民間ユーザ委員を追加し産業界の ニーズを集約。広報活動が不足との指摘に対しては e-trace セミナーを実施した。リーダーシップを さらに強化したマネジメント体制で実施すべきとの指摘については、各研究グループのリーダーが集 まる実施者会議を定期的開催しマネジメントを強化した。									
評価に関する 事項	事前評価									
	中間評価	15年度 中間評価実施				18年度 中間評価実施				
	事後評価	21年度 事後評価実施								

研究開発成果について	<p>(1) 成果の意義</p> <p>本事業の成果は、社会環境が激変する製造業にもつくりの基本である計量標準を、速く、安く、正確に供給することによって国際的な競争力を向上させることに意義がある。例えば、今日、生産コスト低減のために多くの日本企業が開発途上国に進出しており、途上国に進出した企業は出先の国の計量標準トレーサビリティを受ける建前になっているが、途上国の計量標準は必ずしも高精度のものが整備されているとは限らない。さらに、計量標準の供給の階層が下がるごとに精度の劣化（不確かさの増大）が著しく、それらに基づいて生産した製品は先進国では売れないという深刻な事情がある。本成果の意義は、そのような途上国に進出している日本企業に日本の国家標準にトレースした良質な計量標準を提供するものである。その結果として、日本産業の市場拡大あるいは市場の創造につながるものと期待される。遠隔校正を部分的に行っている国はある（例：イギリス NPL が周波数標準、ネットワークアナライザの校正キットを仲介器として遠隔校正実施）が、日本の場合には本事業を国家プロジェクトとして広範な量について組織的に取り組んでおり、社会システムとして運用できるように法運用整備まで行っている。これらは世界初の取り組みである。その成果は、汎用性があることから、世界中で運用できるように国際試験所認定会議（ILAC）に提案し、遠隔校正方式の認証プロセスへの組込を正式議題に登録させるなど、実際の運用を開始するために必要な品質システム整備を実施した。既に国内的には JCSS トレーサビリティ制度に一部取り入れられており、ILAC に於いて国際相互承認が実現されれば、我が国の遠隔校正システムが実用測定機器へ早く・安く・正確にトレーサビリティを与える標準的な校正手法として世界に通用することとなり、海外に進出した日系企業の様々な計測機器が、校正のために移送する必要がなくなるなど、投入された予算に見合った以上の成果をもたらすと期待できる。</p> <p>(2) 特許の取得</p> <p>本事業は知的基盤整備の一環であり社会システムとしての運用を目指すので、一般的な技術開発プロジェクトと異なり特許取得は多くはない。本事業における特許取得の考え方は、基本特許は他国、あるいは一般企業の特許からの防衛的な意味をもち、個別特許は権利獲得を目指すものである。この考えに沿って特許を出願しており、知的財産権利化の努力をしている。</p> <p>(3) 成果の普及</p> <p>本事業に参加しているテーマは広範であり、詳細個別テーマ成果の項に掲げるように研究論文の発表を行っている。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・2005年には NMIJ-BIPM International Workshop on the Impact of Information technology for Metrology をつくばで開催し、多くの遠隔校正の論文発表とデモンストレーションを行った。2007年にも、同会議を PTB-BIPM ワークショップとしてベルリンで開催し、多くの研究報告をした。</li> <li>・2008年8月にバンコックで"e-trace Workshop"を開催し、遠隔校正に関する講演と、タイ国立標準研究所（NIMT）において ASEAN 地域からの参加者に周波数、圧力、振動加速度に関する遠隔校正の実演つきのワークショップを開いた。将来的には NIMT を核にしてインドシナ半島各国に遠隔校正を普及する構想がある。</li> <li>・2004年以降、毎年開催されている日中計量標準会議（政府間協議）で、継続して遠隔校正の進捗を紹介しており、中国も遠隔校正に取り組む意向を表明している。</li> <li>・遠隔校正の国際的普及を目指して APLAC, ILAC に対して提案しており、ILAC では、2006年11月のメキシコ総会において、遠隔校正認証に関して、従来方式との整合性について検討を開始することが決議された。</li> <li>・国内向けには各テーマごとの勉強会と見学会を NEDO が開催し（e-trace 成果普及セミナー：H16～H20、13回実施）一般に向けて広く情報発信を行っている。</li> <li>・2008年11月に開催された第6回計量標準フォーラムにおいて、遠隔校正の現状と将来展望に関する講演を行った。</li> </ul>	
	投稿論文	「査読付き」52件、「その他」60件
	特許	「出願済」45件、「登録」4件、「実施」件（うち国際出願3件）
	その他の外部発表（プレス発表等）	プレス発表9件
実用化、事業化の見通しについて	<p>(1) 成果の実用化可能性</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・産業界から知的基盤、計量標準整備に対する公共的な需要が旺盛にあり、かつ、その供給方法も従来の持込み校正、現地出張校正では産業界の社会環境激変に対応できなくなりつつあるので、より柔軟で迅速な計量標準供給法が求められていた。本事業は、その計量標準の供給方法を革新するものである。第9回知的基盤整備特別委員会でも計量標準供給方法の効率化・高度化を求めている。</li> <li>・校正事業者を認定する NITE と協力して ISO/IEC17025 のもとでの ASNITE-NMI, ASNITE-CAL 遠隔校正一般要求事項をとりまとめ、JCSS 等技術委員会で承認されたので、公共財としての知的基盤を供給、維持するための体制が整い、時間周波数や放射能標準などにおいては、一次標準(jcss)を遠隔校正手法により供給を開始した。</li> <li>・国際試験所認定規格 ISO/IEC17025 のもとで遠隔校正が可能になるよう、2005年以降 APLAC, ILAC に働きかけており、2006年11月のメキシコ総会で正式審議事項として採択された。現在、継続審議となっているため、承認に向けて国際シンポジウム、セミナー、ワークショップなどのあ</li> </ul>	

	<p>らゆる機会をとらえて広報活動を行っており、根回しを行っているところである。</p> <p>(2)波及効果 以下の産業振興の波及効果が期待される。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・校正にかかわるコスト削減と校正機器の自動化が促進されることによる省力化</li> <li>・海外進出企業の製品の品質向上、およびその結果としての競争力向上</li> <li>・近隣諸国に遠隔校正を普及させることにより、調達する部品レベルの品質向上</li> <li>・簡易な標準を内蔵した安価な計測機器でも頻繁な遠隔校正により計測精度確保</li> </ul>	
<p>・基本計画に関する事項</p>	<p>作成時期</p>	<p>平成13年3月 制定</p>
	<p>変更履歴</p>	<p>平成14年3月中間目標を具体的に明記する等の改訂 平成16年2月、「計量器校正情報システムの研究開発」中間評価結果を踏まえ、研究開発の目標及び内容を改訂 平成17年3月、最終目標を具体的に明記する等の改訂 平成18年3月、研究開発の実施期間等の改訂 平成19年3月、「知的基盤創成・利用促進事業」、「ナノ計測基盤技術開発」等と大括り化し、「安全・安心な社会構築に配慮した知的基盤整備事業」として大括り化運用を図ること及び平成18年度実施の中間評価結果を踏まえ、電気標準に係る研究開発目標の一部を改訂</p>

## 用語集

### 計量器校正情報システムの研究開発 用語の説明

用語	説明
7点基点	距離計の評価において用いる一直線上に配置された7箇所の基点。複数の組み合わせの2点間の距離を測定することにより、再帰的に、基点間隔と、距離計の持つオフセット誤差を求められる。
Am-Be 中性子線源	Am-241(アメリカシウム-241)とBe(ベリリウム)からなる中性子線源。Am-241 から放出される線がベリリウムと衝突して、ベリリウムから中性子が叩き出される。
ASE 光	Amplified Spontaneous Emission 光。光通信帯において利用される光増幅などにより放出されるスペクトル幅の広い光。
C/A code	Coarse/Acquisition Code : GPS 衛星の L1 信号に変調されているコード。1.023 MHz のチップ・レートで、約 1 ミリ秒で繰り返される二値の擬似ランダム雑音 (PRN) コード。
CGGTTs format	Common GPS/GLONASS Time Transfer Standard data format : GPS などを用いた時刻比較データの標準フォーマット。ASCII ファイルで、ヘッダー及びデータで構成。
Ciddor の式	環境パラメータから空気の屈折率を計算する経験式。環境パラメータには、気温、気圧、湿度、二酸化炭素濃度を用いる。
CMC 登録	計量標準の国際相互承認における校正機関の校正測定能力 (Calibration and Measurement Capability) の登録のことを表す。登録に際しては、地域の計量標準組織 (RMO : Regional Metrology Organization) における審査、他の地域の計量標準組織による審査を経て登録が完了する。
GPS	米国が構築・運用している衛星測位システムの代表的なもの。通常、軌道に 24 機以上の GPS 衛星が周回しており、搭載されている原子時計を原振として測位用の信号が Lバンド (通常 1500 MHz 帯と 1200 MHz 帯) で送信されている。
GPS time	GPS モニタ局あるいは GPS 衛星に搭載されている原子時計に基づいて定義される時系。1980 年 1 月 6 日 00:00:00UTC 開始で、閏秒はない。GPS 時刻 UTC+14 秒。
GPS-DO (GPS 従属発振器)	GPS Disciplined-Oscillator : 内蔵している水晶発振器やルビジウム発振器などを、GPS 信号に従属同期させることで、安定な信号が得られる発振器。
GPS コモンビュー方式 GPS コモンビュー法	時刻比較を行う局間で、同時に同一の GPS 衛星からの信号を受信することにより、衛星の時計の誤差を相殺し、高精度な時刻比較を行う方法。
HTTP protocol	Hyper Text Transfer Protocol の略。ウェブサーバとウェブブラウザとの間の通信プロトコル。
Inter RMO 審査	CMC 登録における審査の第 2 ステップである他の地域の計量標準組織における審査のこと。
L1 (1575.42 MHz)	Link 1 : GPS 衛星からの測位用信号を送信する 2 つの周波数帯の 1 つで、中心周波数は、1575.42 MHz。L1 では、二つの信号が送信されている。
L C Rメータ	インピーダンス (インダクタンス、キャパシタンス、交流抵抗) を測定するための計測器。
MEMS 型	Micro Electro Mechanical Systems の略称。各種センサ (圧力・加速度・ジャイロなど)、アクチュエータ、電子回路を一つの基板上に集積化したデバイス。
NMIJ-DO (NMIJ 従属発振器)	産総研の開発した e-trace 用利用者端末装置の動作モードの 1 つで、産総研の GPS 受信結果を参照して内蔵発振器を産総研の国家標準に同期する機能のこと。
OCCO	Oven control X-tal Oscillator の略。オープンで温度安定化を施した水晶発振器のこと。温度安定化していない水晶発振器に比べ、2~3桁安定度が向上。

P E T	Positron Emission Tomography の略称である。生体内に取り込まれた陽電子崩壊する核種の分布を 3 次元的に計測する手法であり、癌の診断、脳機能診断、分子イメージング等に用いられている。
Rb 発振器	原子周波数標準器の 1 つで、ルビジウム原子を用いたもの。原子周波数標準器の中では、小型・安価なものが製品化されている。携帯電話の基地局等の通信分野で広く用いられている。ただし、周波数安定度は、長期的な自走状態では、 $10^{-10}$ 程度のものが多い。
TAI (国際原子時)	International Atomic Time : 世界中の標準研究所などで維持されている原子時計の平均をとり、一次周波数標準器を使って秒の定義に基づく校正を行った時系。
UTC (協定世界時)	Coordinated Universal Time : 各国の標準時の元になる世界の標準時系。UTC と UT1(世界時) との差が 0.9 秒以上ならないように、うるう秒調整を行った時系。
線スペクトロメータ	放射性同位元素から放出される線の個数を計数するとともに、それぞれの線のエネルギーを測定することで、線のエネルギースペクトルを得ることのできる測定装置。このエネルギースペクトルから放射性同位元素の同定と定量が行なえるという特徴を持っている。
アクティビティ図	一連の動作の実行順序や条件、制御などの依存関係を役割ごとに記述した図式表現。
アッペの条件	測長をする場合に、測定系と変位を測定する直線とを同軸に配置して測長誤差を小さくする条件。条件を満たさず、測長軸が変位軸に対して横ずれしていると、変位系のピッチング、ヨーイングに起因する測長誤差が生じる。
コーナリフレクタ	3 枚の鏡を互いに直角に組み立てたもので、入射した光を同じ方向へ反射する光学素子。
コサイン誤差	測長軸が変位軸に対して傾いている場合に生じる測長誤差。
コモンパス光学系	異なる機能をもつ光が共通の光路を通る光学系のこと。ここでは、測定用の光通信帯波長の低コヒーレンス光と、参照用の 633 nm He-Ne レーザ光が同一の光路を通る光学系を意味する。
サーキュレーター	光アイソレーターの応用であり、光をポートに順次出力する光学部品。
サイズモ式センサ	おもりとパネ(ダンパも含む)を用いた構造になっており、パネの変位から対象物の物理量を計測するセンサ。
ジョセフソン接合	弱く結合された二つの超伝導体から成り、ジョセフソン効果を示す素子。
シリコンレゾナントセンサ	感圧部に単結晶シリコン振動子を利用したセンサ。振動子に加えられた張力による共振周波数の変化によって印加圧力を検出する。
シングルモードファイバ	光波の波面の基本モードのみを伝播させる光ファイバ。高精度な波面を利用するために必要。
スーパーモード雑音	高調波モード同期レーザにおける発振縦モード間の利得の競合に起因する強度雑音。
セバケイト	合成潤滑油の一種。Di-2-ethylhexyl Sebacate。
タンデム干渉計	二つの干渉計を直列にならべた干渉計。
ピエゾステージ	電気をかけると歪みをおこすピエゾ効果を利用したステージ。

フェムト秒パルスレーザ	フェムト秒 ( $10^{-15}$ 秒) 台の時間幅を持つパルスが発生する超短パルスレーザ。
フルエンス	単位面積に入射した粒子の数。
ブロックゲージ	耐久性がある材料で作られ、長方形断面で平行な二つの測定面をもつ基準器。その測定面は他のブロックゲージ又は基準平面ともよく密着する性質をもっている。
ペレトロン	電極間に直流電圧を印加し、これにより粒子を加速するバンデグラーフ型静電加速器の一種。
ボイスコイル型	ボイスコイルモータは動電型加振機的一种である。永久磁石による磁界中に置いたコイルに電流を流して、磁界と電流によって発生する力を制御し、垂直方向に振動を発生させる。
マルチワイヤ式比例計数管	荷電粒子測定装置 (電荷を持った高速粒子を測定する装置) の一種。広い面積の面線源を測定できる。
モード間ビート、RF コム	光コムに存在する多数の光周波数モードを同時に高速検出器で検出すると、それらの周波数差によりビート (うなり) が生じる。多数のモード間ビートが、RF 周波数領域に櫛の歯のように並ぶので RF コムという。光コムのモードの周波数差は制御により非常に安定にできるので、安定なモード間ビートが発生でき、RF コムは RF 領域における高精度な基準として用いることができる。
モード同期ファイバレーザ、ファイバリングレーザ	多数の光周波数モードを位相同期させて超短光パルスが発生する手法 (モード同期) によって発生される、ドープした光ファイバをゲイン媒質とする超短パルスレーザ。ファイバがリング型の安定な閉じた構造をしているものをファイバリングレーザという。
モンテカルロシミュレーション	放射線の挙動を計算するための手法の一つであり、乱数を用いて、放射線の反応を模擬しながら、放射線が物質中に付与するエネルギーや、ある面を通過する粒子数等を計算する。
ライン圧力	差圧において基準となる圧力。
リニアスケール	リニアエンコーダ、レーザスケールとも呼ばれる。ものさしとなる目盛と目盛から位置情報を取得する検出器で構成される。工作機械、半導体製造装置などの直動軸方向の精密位置計測に使用される。
リングゲージ	耐久性がある材料で作られたリング形状をした基準器。内径測定器の基準器として用いられる。
ルジャンドル多項式	ある区間における連続関数を近似する際に用いられる直交多項式的一种。
(レーザ) 共振器長	レーザ共振器 (発振器) において光波が共振する長さ。モード同期パルスレーザにおいては、多数のパルスどうしの時間間隔に相当し、それにより発生させる光コムにおいては、モード間隔に相当する。そのため、高精度なモード間ビートの発生のためには、共振器長の安定な制御が必要である。
ロバスト性	外乱や設計誤差などの不確定な変動に対して、システム特性が現状を維持できること。実際の設計開発現場では、設計誤差、物性値の変化、入力信号に含まれるノイズなどの同定が困難な変動に対して、対象となるシステムが安定した特性を得られるように配慮することが求められるので、ロバスト性を考慮して設計業務を遂行する必要がある。
圧電型加速度ピックアップ	圧電素子を用いて加速度計測を行うセンサ。通常、サイズモ式センサの構造になっており、圧電素子がバネ部分に相当する。
位相調整型薄膜抵抗器	2 個の薄膜抵抗器と可変コンデンサを組み合わせることで製作した交流抵抗器。可変コンデンサの容量を微調することで、交流抵抗器の位相をゼロ位相に調整することができる。

依頼試験	法令で実施が義務付けられている特定標準器を使った校正及び法定計量関連試験検査以外に、任意で行っているサービス。
液体シンチレーションカウンタ	液体シンチレーションカウンタは液体状のシンチレータ（放射線を受けると発光する物質）と放射性溶液を混合して放射能を測定する装置である。
液体圧力、液体ゲージ圧力	圧力媒体が液体（本研究開発ではセバケイトを使用）で、大気圧を基準とした圧力。
加圧型電離箱	円筒形や球形の容器に気体を加圧封入した放射能測定装置である。放射線により気体から発生する電荷を収集する。発生する電荷量は、電離箱を通過した放射線の量に比例することから、放射線や放射能を測定する二次標準器として使用される。
加圧型電離箱	円筒形や球形の容器に気体を加圧封入した放射能測定装置である。放射線により気体から発生する電荷を収集する。発生する電荷量は、電離箱を通過した放射線の量に比例することから、放射線や放射能を測定する二次標準器として使用される。
画像測定機	三次元測定機のプロービングシステムとして、イメージセンサ（CCD カメラなど）を取り付けたもの。
干渉縞のフリンジ	干渉計をミラーなどで構成し、その位置に変化を与えて関与する長さを測定する場合、光源の半波長に相当する長さ変化を1周期（1フリンジ）として信号が繰り返す。そのため、1フリンジに相当する以上の長さは、連続的に数を計数するなどの方法で測定する必要がある。
寄生振動	加振機を用いて振動を発生させたときに、意図した振動成分に付随して発生する振動。例えば、地面や空調機器からの外来振動や、加振機自身による共振などの振動成分を意味する。
幾何学誤差測定法	三次元測定機の移動機構が有するスケール誤差、真直度、ピッチング、ヨーイング、ローリング、直角度などの誤差を幾何学誤差と呼び、全部で21個存在する。幾何学誤差をあらかじめ評価しておき、測定結果に補正をかけることで、三次元測定機の性能を向上させることができる。幾何学誤差の測定には、ボールプレートやホールプレートなどの幾何ゲージ、レーザ干渉計、レーザ追尾干渉計など各種の方法が使われる。
気体差圧	圧力媒体が気体（本研究開発では純窒素を使用）で、任意の圧力（ライン圧力）を基準とした圧力。
距離の絶対測定	連続的な変化の測定によらずに、2点間の距離を測定によって決定すること。一般に干渉計では絶対測定ができないが、距離計はできる。
共鳴フィルター	原子核のエネルギー準位を用いて、あるエネルギーをもつ粒子のみを透過させるもの。
近接センサ	リミットスイッチなどの接触式検出方式の代替として、電磁誘導により検出対象となる金属体に発生する渦電流を検出したり、検出対象の接近による電気的な容量の変化を捉える等の原理を用いて、対象物の位置を非接触で検出することを目的とするセンサ。
現場環境	鋳工業における実際の製造現場における温度、湿度環境のこと。測定室環境と比較して、温度、湿度の日間変動、年間変動が大きい。
光コム	モード同期超短パルスレーザからの光は、光周波数軸上で見ると、等間隔のモードが櫛の歯状に多数ならぶ構造をもち、光の周波数（波長）を測定するための「光のものさし」として使用できる。このようなモード構造を光の「櫛の歯」ということで「光コム（Comb）」と呼ぶ。
光コムのドリフトの抑制	光コムはその周波数を安定化しないと、「ものさしの目」にあたる「繰り返し周波数」や「ものさしをどこにあてるか」に相当する「オフセット周波数」が環境により変化する場合がある。その結果、ものさしが間延びしたり、動いていったりする。これが光コムのドリフトである。そのドリフトは、マイクロ波や光領域での基準参照信号を用いてその差を検出し、光コム発生システムに制御をかけることによりそのドリフトを抑制することができる。

光核反応	光子と原子核の相互作用により発生する反応。原子核から陽子や中性子が放出されることがある。
黒鉛パイル	黒鉛でできた直方体であり、中央部に中性子線源を入れることで、この黒鉛パイル内外において熱中性子が得られる。
最大許容誤差	測定機に対して許容される最大の誤差。測定機の検査においては、仲介標準器の校正値の不確かさを考慮して、測定誤差が最大許容誤差を超えないことが要求される。
三次元測定機	JIS B 7440-1:2003 『製品の幾何特性仕様（GPS）-座標測定機（CMM）の受入検査及び定期検査-第1部：用語』の定義では『プロービングシステムを移動させ、測定物表面上の空間座標を決定する能力がある測定システム』。
指頭型検出器	人間の指先程度の大きさを持ち、放射線の線量率を測定する装置。
支援要員	校正が行われる現場（遠隔地）で技術支援を行う要員。圧力遠隔校正においては、仲介器と校正器物の設置など、校正結果に大きな影響を与えない範囲の実作業を行う。
周期誤差	測定信号と同じ周波数を持つ不要な信号が、光学系や電気系において混入することにより、測定信号の位相が誤差を持つ。測定信号の周期の整数倍（または整数分の1）の周期で繰り返すため、周期誤差と呼ばれる。
周波数安定度	発振器の性能を表す指標の1つ。出力信号の安定性を数値で評価するために用いられる。通常、平均化時間（ ）の関数として表され、アラン標準偏差（ $\sigma_y(\tau)$ ）が用いられることが多い。
重錘形圧力天びん	既知の断面積と質量を持つピストンとシリンダ、おもり（重錘）から構成される、圧力の定義を実現する装置。ピストンと重錘の質量によって発生する力と、測定圧力による力を釣り合わせることで、測定圧力を精密に決定する。高精度に圧力を発生することができる。
測定干渉計	タンデム干渉計を構成する二つの干渉計のうちの一つで、被校正器物が設置された干渉計。標準干渉計と単一モード光ファイバで接続されており、測定干渉計の光路差を標準干渉計で補償したときに低コヒーレンス干渉縞が発生する。
単一モード光ファイバ（シングルモードファイバと同義）	ガラスの中に屈折率分布を形成し、光を閉じ込めながら伝送させるもので、光がゼロ次のモードを伝搬するもの。
水晶振動式圧力計	感圧部に水晶振動素子を利用した圧力計。外部から加えられた応力による振動素子の周波数出力の変化を検出する。
測定室環境	鋳工業における試験を実施するための場所として、温度、湿度などが標準状態に近い状態に管理されている環境のこと。三次元測定機を用いた寸法、形状測定を行う場合、その測定室環境は20℃が標準状態の温度である。温度の許容差はJIS Z 8703:1983 『試験場所の標準状態』に定める温度1級程度（変動量 $\pm 1$ ℃）となっている場合が多い。
短半減期核種	放射性崩壊により原子核の数が半分になるまでの時間（半減期）が数時間程度と非常に短い放射性同位元素のこと。移動中等に減衰してしまうため放射能測定機の校正には不向きである。
低コヒーレンス干渉	波長スペクトル幅が比較的広く、時間的コヒーレンスが低い（短い）光によって起こる干渉。二つの光波の光路差がほぼ等しいときのみコントラストの良い干渉が起こる。
低熱膨張材料	熱膨張係数の絶対値が $1 \times 10^{-6}$ [1/K]程度である材料のこと。鋳鉄系、ガラス系、セラミックス系などの材料がある。本研究で使用した低熱膨張材料はセラミックス系であり、その熱膨張係数は $0.08 \times 10^{-6}$ [1/K]である。
低熱膨張材料	熱膨張係数の絶対値が $1 \times 10^{-6}$ [1/K]程度である材料のこと。鋳鉄系、ガラス系、セラミックス系などの材料がある。本研究で使用した低熱膨張材料はセラミックス系であり、その熱膨張係数は $0.08 \times 10^{-6}$ [1/K]である。
電荷増幅器	入力電荷に比例した電圧を出力する。発生した電荷による入力電流を積分するように働き、電圧を発生させる。

電磁誘導型センサ	測定対象物が移動した時、ファラデーの法則によりコイルに発生した電圧を用いて速度を測定するセンサ。
電離層遅延	電磁波が電離層を通過する際に被る遅延時間の変動のことを称しており、通過する経路上の全電子数に比例し、電磁波の周波数の2乗に反比例した影響を受ける。
同軸スキャナ	標準インダクタや標準キャパシタ等の被校正器物と計測器（LCRメータ）の接続を切り替える装置。特に、内部構造がすべて同軸回路で構成されたもの。
搬送波位相（法）	GPS から送信される測距コードだけでなく、搬送波（RF 正弦波信号）の位相を利用して擬似距離測定の高分解能化を図ることで、より高精度な時刻比較を行う方法。
比例誤差	測定距離に依存した誤差の中でも、比例的な傾きの誤差を言う。一般には、誤差は距離に対してより複雑な依存性を持つが、傾きの誤差で代表させることが多い。
飛行時間法	ある決められた距離を飛行する時間を計測することにより、飛行する粒子のもつエネルギーを決定し、エネルギースペクトルを得る方法。
標準干渉計	タンデム干渉計を構成する二つの干渉計のうちの一つで、光路差が可変である。被校正器物が設置された測定干渉計と単一モード光ファイバで接続されており、測定干渉計の光路差を標準干渉計で補償したときに低コヒーレンス干渉縞が発生する。
標準線源	放射能校正のトレーサビリティを保つために使用される、校正機関から校正機関へ移送可能な線源。
放射化法	ある物質に、粒子を入射させることにより、この物質が放射能を持つようになることがあるが、この放射能を測定することにより、入射した粒子のフルエンスを求める方法。
持ち込み校正	被校正器物を依頼者が校正機関に持ち運んで校正を受ける、現在の校正サービス形態。遠隔校正の対比として用いられる用語。

## I . 事業の位置付け・必要性について

### I-1 . NEDO の事業としての妥当性

#### I-1.1 NEDO が関与することの意義

本事業は、国の知的基盤整備計画の中の計量標準整備の一環として実施しているものであり、経済産業省の施策「知的基盤の整備」の「計量器校正情報システム技術開発事業」と位置づけされている。本事業の目標は、計量器校正情報システム技術開発事業の目標である「計量標準主要分野について、情報通信ネットワーク技術等を使用して遠隔校正を行うためのシステムとして、海外国家計量標準機関と比較計測可能な遠隔校正技術の開発、国家計量標準とトレーサビリティのとれた遠隔校正システムの産業界への適用を目的とした技術開発を行う。」に合致しており、施策の目標に寄与するものである。

知的基盤整備は、公共的性格が強く、広く国民に公開・提供することが必要である等、民間企業の事業にはなじまず、基本的に国が整備すべきものとされている。(知的基盤整備特別委員会とりまとめ)

経済産業省においては、①産業技術総合研究所は高度な研究開発能力により、国家的研究機関として行うべき知的基盤整備を実施、②製品評価技術基盤機構は経済産業行政の実施に密接不可分な技術評価、分析及び調査研究、技術情報の提供、③NEDO は国として民間の能力を活用して行う研究開発のマネジメント機関、産学官の協力による研究開発のコーディネート機関と役割分担をしている。(知的基盤整備特別委員会とりまとめ)

本事業は、産業界の計測機器開発能力、大学等の基礎研究能力及び産業技術総合研究所の計量標準開発・供給能力と産学官の三者の連携が必須であることから、NEDO がコーディネート機関として、その役割を担い、実施することに意義が認められる。

#### I-1.2 実施の効果（費用対効果）

当該事業は、百数十ある JCSS<sup>1</sup>の計測標準の種類から 9 量目 12 種類（内、2 つは第Ⅱ期の平成 18 年度から）を NEDO が選び、第Ⅰ期として 5 年間で約 11.3 億円程度、及び第Ⅱ期として 3 年間で約 6.2 億円の資金規模で遠隔校正の技術開発と実証実験を行なった。第Ⅰ期の当初 3 年は遠隔校正の要素技術開発と実証実験、後の 2 年間で登録事業者の保有する下位の標準器との遠隔校正の実証実験、そして第Ⅱ期では量目毎の測定手順（プロトコル）の確立により、より広範囲な実用測定機器へのトレーサビリティの普及を目指した。

当該事業のもたらす効果は次のようなものである。

1) 空間的制約の克服（海外立地、遠隔地に立地した工場でも高度な校正サービスが受けられる）

---

<sup>1</sup> Japan Calibration Service System : 計量法校正事業者登録制度

- 2) 校正時間の短縮による時間的制約の克服（時代の急激な変化への対応）
- 3) 産業技術総合研究所（以下、「産総研」という。）から上位登録事業者、中位登録事業者、下位登録事業者と階層的に精度が劣化する問題の克服（GPS 信号を仲介とすることによる直接的な校正や、仲介器を用いる場合においても標準のトランスファに伴う不確かさの拡大が最小となるものを選択した）

知的基盤は、①利用者個々にとっては、知的基盤の利用によって際立った経済的利益を直接得るといった性質のものではなく、商取引や安全安心などの生活基盤を支えることで、社会全体に薄く広く浸透し役立つもの、②その開発には相当の技術開発力や施設設備を要し、相当な額の集中的・継続的投資が必要である。このため、当該事業を実施することによりもたらされる効果を単純に計算することは困難であるが、具体的な試算として、標準器や電子部品の大規模な製造事業所では出荷製品検査のための汎用測定器が数千台規模で稼働しており、最近の UL 規格ではこれら全てに対して計量トレーサビリティの確保が必要とされている。従来の校正費用を単純に積算すれば、事業所あたり数億円規模の校正費用が発生すると考えられ、また、校正に要する時間的ロスも計り知れない。一方、万一製品に不良品が発生し、その原因が検査の不適切であったとなれば、その回収費用は膨大で、企業の存続に関わる問題となる。このような問題を解決するには、遠隔校正方式による効率的な標準の供給は不可欠で、期待される経済効果は極めて大きい。

## 1-2. 事業目的の妥当性

### 1-2.1 本事業の背景と目的

本事業の立案に至った背景は以下のとおりである。

- 1) 国際市場における技術的評価の信頼性向上・効率化及び産業技術の共通基盤である計量標準の設定・維持・供給は、知的基盤の中でも特に国内産業の競争力の維持・強化、信頼性向上に不可欠なものである。一方、物流の増加に対応して、平成7年に貿易障壁を取り除くためのWTO/TBT協定が締結され、1箇所計測された量目は、相互に承認し合い、通関における再計量の手間を省くことが合意された。しかしそのためには、相互に計測の同等性が保証される必要がある。更に、基準認証分野での国際相互承認を進めるにあたっては、国際的同等性を確立した計量標準の存在が不可欠となった。
- 2) これに対応するため、平成11年10月に、パリの国際度量衡局において、計量標準の国や地域間の整合性を保証し、その計測結果を相互に受け入れる協定(CIPM/MRA)が結ばれ、我が国もこれに参加した。
- 3) この様な背景の下、「科学技術基本計画」(平成8年7月)及び「経済構造の革新と創造のための行動計画」(平成9年5月)において知的基盤整備の重要性が指摘され、それを受けて、産業技術審議会(現、産業構造審議会産業技術分科会)と日本工業標準調査会との合同の委員会である「知的基盤整備特別委員会」(平成10年6月)において、計測標準、標準物質、化学物質安全管理、人間生活・福祉、生物遺伝資源情報及び材料が選定された。その後の審議を経て、それぞれの分野で世界最高水準の整備を、平成22年を目処に達成することが掲げられた。
- 4) 計量標準分野においては、我が国の計量標準の開発・供給は欧米国に比して大きく遅れていた状況において、今後、国際経済、研究開発におけるフロントランナーとして、過酷な国際競争に勝ち抜くことのできる事業環境と技術力を確保するためには、海外に頼らない計量標準供給体制の確保が重要であり、平成22年までに当該分野において世界のトップレベルの規模及び質を目指すべく、物理系の計量標準250種類程度、標準物質250種類程度の整備を目指すこととされた。
- 5) 更に、計量標準の供給の高度化として、計量標準に対するニーズの増大と高度化に対して、急増していく供給業務に適切に対応するため、「先端の情報通信技術を活用して供給形態の効率化を実現するための研究開発の重要性」が指摘された。
- 6) 経済産業省は、上記の指摘を受け、基準認証政策(中期目標)の知的基盤政策の施策である「知的基盤の整備」の一つとして「計量器校正情報システム技術開発事業」に反映し、本事業を実施している。
- 7) 諸外国においても、以下の様な動向がみとめられた。
  - ・米国においては、NIST<sup>2</sup>を中心にSIMnetと称する遠隔校正の研究が進みつつある。

---

<sup>2</sup> National Institute of Standards and Technology : アメリカ国立標準技術研究所

(SIMは Interamerican Metrology System からとったもので、netは internet を介した校正という意味。) SIMnet は現段階では NIST で校正済みの直流電圧、電流、抵抗などの測定機能をもったデジタルボルトメータ (DVM) を中南米諸国に巡回させ、各国の標準との比較結果をインターネットで NIST に報告させている。しかしながら、情報通信網のサイバーテロに備えて NIST のインターネット・セキュリティのファイアウォールは著しく厳密になり、このために中南米諸国との校正結果のやり取りに支障が生じている。

- ・ドイツでも PTB<sup>3</sup>において、e-Calibration という遠隔校正プロジェクトが企画され、日本の e-trace プロジェクトを追走している。
- ・イギリスにおいては、e-Metrology というプログラムがあり、NPL<sup>4</sup>において高周波ネットワークアナライザの校正キットを認定事業者に送り、その校正結果をインターネットを介して NPL に送付させ、その結果が適切な範囲内であれば校正証明書をインターネットを介して送付するというサービスを実施している。それ以外の量目については、NPL 独自ではなく EUROMET<sup>5</sup>として GPS<sup>6</sup>を介した時間・周波数標準供給を行っている。

8) 平成 17 年 5 月 18-20 日につくばにおいて NMIJ-BIPM workshop on the Impact of Information technology on Metrology が開催され、世界 20 カ国から 200 数十人の専門家が集まり、主に遠隔校正などについて議論した。日本の遠隔校正プロジェクトの発表が多く、この分野で世界を先導している印象を与えた。

9) 試験所・校正機関の認定機関である独立行政法人製品評価技術基盤機構に協力し、この事業の成果を国際的な校正機関・試験所の認定機関から成る APLAC<sup>7</sup>や ILAC<sup>8</sup>において提案し、平成 18 年 (2006 年) 11 月の ILAC メキシコ総会で、遠隔校正に関する認定の要求事項が正式審議事項として採択された。

以上の時代背景認識をもとに、計測標準供給方法を近代化し、産業界のニーズに合った標準供給法の確立、さらに言えば単なる知的基盤整備としてではなく、日本経済の活性化をもたらし、再生するために必要不可欠な戦略的な知的基盤整備としての次世代計測標準供給方式の確立が本事業の目的である。

---

<sup>3</sup> Physikalisch-Technische Bundesanstalt : ドイツ物理工学研究所

<sup>4</sup> National Physical Laboratory : 英国国立物理学研究所

<sup>5</sup> European Collaboration on Measurement Standards (European Metrology Collaboration) : 欧州計量標準機関連合。ヨーロッパの地域計量組織。

<sup>6</sup> Global Positioning System

<sup>7</sup> Asia Pacific Laboratory Accreditation Cooperation : アジア太平洋試験所認定協力機構

<sup>8</sup> International Laboratory Accreditation Cooperation : 国際試験所認定協力機構

## **I-2.2 本事業の位置付け**

前節にも述べたように、本事業は「知的基盤整備特別委員会」において選定された計測標準の供給の高度化として行うものであり、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法（平成 14 年法律第 145 号）第 15 条第 1 項第 2 号に基づき実施するものである。その意図するところは、最新の情報通信技術を応用して計測標準の遠隔校正技術を開発し、従来のトレーサビリティ制度の難点であった空間的制約の克服（海外進出した工場にも日本国内と同等の校正サービスを提供）、時間的制約の克服（迅速な校正サービスの実現）、量目によっては階層的トレーサビリティ制約の克服（上位標準機関から企業の生産現場、あるいは精密測定現場への直接供給可能）、かつ校正料金を低減しようとする試みであり、日本経済の再生という戦略的概念をもった知的基盤整備を実現しようとするものである。ただし、遠隔校正は不確かさの信頼性問題や、セキュリティ、コストなどの懸案事項が多くあり、一挙にすべての計測標準量目を遠隔校正にするにはリスクが大きいため、いくつかの分野の計測標準を選んでフィージビリティ・スタディの後に順次適用してゆくこととした。

## ・ 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

本事業は、先端の情報通信技術を活用して標準供給形態の効率化を実現するための研究開発を行うものである。第 I 期においては、この大目標を踏まえ、持ち込み校正におけるニーズの実態を調査し、校正需要の約 90 % をカバーするために必要な、一次標準からトランスファされる不確かさの確保を行うための目標値を、定量的に設定した。具体的には、産総研が保有する特定標準器（国家計量標準）を用いて行う特定二次標準器などの校正、及び一般の校正事業者が行う製造現場等で用いられる測定器の校正などの現状を調査し、あるべき校正手法と不確かさの目標値を設定した。その際、一口に標準と言っても、その校正手法やトランスファ手法は様々であることから、GPS 信号などの「共通の信号」を仲介として、衛星通信やインターネット、光通信など公共的な通信回線を利用して校正するタイプと、「頑健な標準器」を仲介として送付し、測定をテレビ会議的にモニタすることにより、遠隔校正を実現するタイプの 2 通りに大きく分類し、個々の標準に最適な「遠隔校正技術」の展開を図ることとした。図-1 に、この様な遠隔校正システムのイメージを示した。

### e-trace の概念

最新の情報通信技術(インターネット、光通信、GPSなど)を駆使して  
品質保証の原点である標準供給を速く、安く、正確に行う

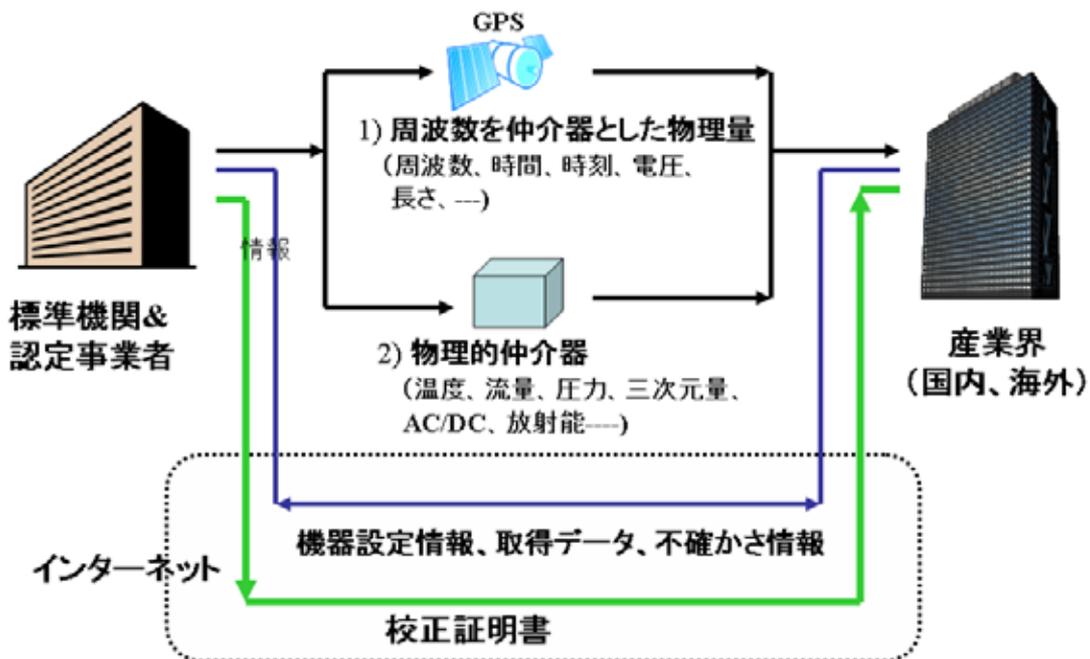


図-II-1 計量器校正情報システム(e-trace)の概念図

平成 13 年度から 17 年度末までの第 I 期目標に従い、遠隔校正に関する研究は順調に進展したが、その間、国民の安全安心を確保する観点から様々な規制が導入され、その結果として現場レベルの測定機器にまで計測のトレーサビリティが求められるようになった。これに伴い、遠隔校正技術は標準供給の効率化を実現出来るすぐれた手法として、より実用的な測定機器にまで範囲を拡大することが期待された。そこで、平成 18 年度より研究期間を 3 年間延長し、第 II 期として遠隔校正の適用範囲を現場レベルに拡大するための研究が進められた。また、第 II 期においては、産業界からの要望の大きな振動加速度標準を新規に追加するとともに、高度の一次標準をトランスファする基本計画を達成し、前倒し終了していた 3 次元計測と圧力についても、実用化を進展させるために再開した。

以下に、量目毎の遠隔校正技術に対する基本概念と、上記過程を経て、第 II 期に向けて設定された具体的な目標値、及びその設定根拠を以下に示す。

## (1) 時間標準

GPS 受信機を介して独立行政法人産業技術総合研究所（以下、「AIST」という。）の原子時計標準と遠隔地の原子時計の時刻及び周波数を高精度で比較するシステムの開発を行い、各種遅延効果等による不確かさの評価を行う。この結果を元に、インターネットを介した遠隔校正により二次標準器の校正システムを確立する。

### ・第 II 期目標：

産総研から最終利用者にいたるトレーサビリティのとれた周波数遠隔校正システムとして GPS コモンビュー法により日本全国に対して 1 日平均で  $10^{-13}$  台の不確かさで、汎用性の高く（ユビキタスな）、現状装置に比べ、40 %以上低廉化した周波数遠隔校正システムの実現を目指す。また、当該技術の国際的な普及を図る。

### ・設定根拠：

不確かさの目標値は、国内での従来の持ち込み校正の不確かさ（ $1 \times 10^{-13}$ ）の最良値と被校正器物として通常考えられる最良のものであるセシウム原子時計の不確かさ（ $\pm 1 \times 10^{-12} \sim \pm 5 \times 10^{-13}$ ）を勘案して設定した。価格の目標値は、普及する際に新規事業者等が導入しやすい価格として第 1 期で構築したシステムの価格を参考として設定した。

## (2) 長さ標準

### ①波長

アセチレン安定化レーザとモード同期ファイバレーザを用いることで、波長 1.5  $\mu\text{m}$  帯の光通信帯において、広帯域で高精度な光周波数計測のための光コムの開発を行う。また、光ファイバを利用して周波数標準・波長標準の供給を行う際の技術的課題を検討する。具体的には、モード同期レーザの繰り返し周波数の高純度化・安定化（光コム of "目" の高精度化）、周波数の安定化（光コム of ドリフトの抑制）、光コ

ムを光ファイバを通して伝送する場合の信号劣化の評価、およびその対策など、技術的検討を行う。

・第Ⅱ期目標：

製造工程組み込みのためにはより精密に絶対距離を測定することが求められる。その実現のために、フェムト秒パルスレーザーのモード間ビートを利用した距離測定技術を高精度化し、周波数の遠隔校正に基づき、また製造現場等の環境を配慮して、距離を  $2 \mu\text{m}/10 \text{m}$  の不確かさで測定する。

・設定根拠：

目標値  $2 \mu\text{m}/10 \text{m}$  は、産業距離計測において製造工程への組み込みのために必要な、絶対距離計測の高精度化と合致するもので、結果判定のための妥当な数値指標である。

## ②光ファイバ応用

数十 nm 以上のブロードなスペクトルを光源とする精密な低コヒーレンス干渉計を開発し、それらを光ファイバで連結することによって、ブロックゲージ干渉計の光ネットワーク化を実現する。実際に、標準研究所の長さ用干渉計とユーザが保有するブロックゲージ干渉計とを光ファイバで連結し、遠隔で精密な校正技術を確立する。

・第Ⅱ期目標：

ブロードなスペクトルを光源とする低コヒーレンス干渉計を光ファイバで連結した光波干渉測長技術を、リングゲージのような曲面を持つ多種類の实用長さ標準器の校正（不確かさ  $0.2 \mu\text{m}/50 \text{mm}$ ）に適用するため、検出系の高感度化や光学素子の小型化を図る。また、大型装置に設置されたリニアスケールなどに関して、多様な設置環境に対応する遠隔校正技術（不確かさ  $0.2 \mu\text{m}/250 \text{mm}$ ）を開発する。

・設定根拠：

ハードディスクの軸受けや燃料噴射ノズルなど、内径標準の小径化、高精度化への要求に応えるため、光波干渉を利用した非接触校正技術で、機械加工、高周波コネクタ、音速ノズルなどで求められる不確かさを目標値とし、さらに燃料噴射ノズルなどの微小内径標準ニーズが増え期間途中から課題を追加した。リニアスケールは、工作機械用ステージで求められる不確かさを目標に設定した。

## (3) 電気標準

（直流）液体ヘリウムを使わない SNS 型 NbN ジョセフソン接合集積技術、GPS 信号から復元した基準周波数、およびインターネットを介して装置の条件設定やデータ伝送などを構成要素とした遠隔校正電圧標準システムを確立する。また、単電子トンネル接合素子による電流量子標準の実現の可能性を検討する。

（交流）交流電圧標準の遠隔校正における信頼性の向上を目的として、ファスト・

リバース DC 方式を用いたインターネット対応型 AC-DC トランスファ標準用校正装置を開発する。また同装置を用いて、AIST と日本電気計器検定所等の認定事業者や海外の標準研究所との間において、インターネット及び仲介標準器を介した遠隔校正試験を行なう。

・第Ⅱ期目標：

インダクタンスの遠隔校正システムの完成と、同様な手法のキャパシタンスや交流抵抗、LCR (インピーダンス) メータ校正への拡大。そのための、同軸スキャナ装置の多チャンネル化、LCR を一つにまとめた仲介器のコンパクト化、遠隔校正システムの高機能化などの実現。1 kHz～10 kHz の範囲で、LCR すべての対象校正器物の標準不確かさとして 80 ppm を目標とする。

・設定根拠：

産業現場で使用されている市販 LCR メータの中で、最も精度の高い機器で、その精度は 500 ppm である。L、C、R の各標準器は、産業現場において主に市販 LCR メータの校正に用いられるため、標準器の不確かさは、LCR メータの精度の 1/5 以下であれば十分である。そこで開発目標を、標準不確かさ 80 ppm に設定し、また最も良く利用される 1 kHz～10 kHz の周波数での開発とした。

(4) 放射能標準

インターネットを利用した双方向画像通信技術と遠隔操作技術を利用し、長半減期の安定した基準線源を参照とする加圧型電離箱システム等の遠隔校正技術を確立し、個々の線源の輸送に伴う煩雑な手間とリスクから解放された、基準線源を標準仲介器として用いた安全でしかも広い供給範囲を持つ、放射能標準供給体制を確立する。

・第Ⅱ期目標：

IC タグを利用した遠隔校正システムの開発を行い、原子力発電施設、放射能測定器メーカー、病院等、一般ユーザへの遠隔校正技術の利用を拡大し、校正時の線源の移動を軽減し、管理を効率的に実施することを可能にするとともに、これまで必ずしも末端の現場測定器まで繋がっていなかった放射線関連量のトレーサビリティを不確かさ 20 %以下で徹底させる。そのために IC タグ、IC タグ入出力装置及び線源が組み込まれた校正装置、IC タグあるいは IC タグ入出力装置付の放射能測定装置、並びに統合管理システムを開発しシステムの実証試験を行う。

・設定根拠：

現場測定器である放射性表面汚染サーベイメータは放射線管理区域に無くてはならない重要な機器であるが、JIS Z 4329 により、機器効率が公称値の 20 %以内であることが求められていることから、トレーサビリティを不確かさ 20 %以下とする目標設定は、機器効率校正の結果判定のために必要な、明確な数値指標であり、また、社会的にも求められている。

## (5) 三次元測定機標準

インターネットを利用した、遠隔操作による三次元測定機の測定の不確かさの算出、ならびに仲介標準器を用いた幾何学誤差測定法を確立する。また、外国標準機関との間で遠隔不確かさ決定の実証を行う。この技術を確立することにより、三次元測定機を使う多くのユーザがトレーサブルな測定を行うことができる体制を確立する。

### ・第Ⅱ期目標：

任意・微細形状標準器を遠隔校正するため、測定長さ 50 mm に対して不確かさ 500 nm 以下で値付けられた仲介標準器（ゲージ）の開発を行う。さらにユーザがゲージを用いて三次元測定機を校正・評価する手続きの確立と標準化を進める。

### ・設定根拠：

MEMS プロセスやマイクロ加工技術による微小機械要素が一般化したことに伴い、これらを検査するために測定範囲 100 mm 立方程度、測定分解能 1nm 程度の三次元測定機が用いられている。これらの測定機の校正に利用可能なゲージとしては、画像測定機向けに供給されているもの（測定長さ 200 mm 程度に対して不確かさ 200 nm）があるだけであり、三次元形状測定機向けに供給されているものはない。通常サイズの三次元測定機では 100 mm 程度の測定長さに対して 1  $\mu$ m 程度（10 ppm）の不確かさで校正されたゲージが供給されていることから、これとの相似則により仲介標準器に求められる仕様として、測定長さ 50 mm に対して 500 nm 程度を設定した。

## (6) 振動・加速度標準（第Ⅱ期スタート）

産業界や社会で重要になっている振動計に関して、加振機とコントローラによる可搬型振動加速度校正装置を開発し、現地への持ち込みにより標準器の校正を可能とし、さらに信頼性・操作性の高いシステムとし、国際ルールの形成に資する。

### ・第Ⅱ期目標：

産業界における振動計や地震による高層ビル振動等への対応を目指し、国家計量標準にトレーサブルで輸送可能な振動・加速度遠隔校正システムを確立するために、振動数で 0.05 Hz、振動加速度振幅では 0.005 m/s<sup>2</sup> を目指した計量標準を開発する。

### ・設定根拠：

産業界における振動計や地震による高層ビル振動等への対応を図るためには、1 Hz までの低周波数領域の遠隔校正を実現する必要がある。振動校正の周波数は ISO 規格に準じて 1/3 オクターブ毎に設定されるため、1 Hz までの周波数範囲では、少なくとも 0.05 Hz 以下の設定分解能が必要不可欠であり、目標値とした。一方、加速度振幅は、ISO 規格に規定されていないが、当該周波数範囲で使用される当所の 1 次校正装置に匹敵する設定分解能 0.005 m/s<sup>2</sup> を目標値として設定した。

## (7) 力学(圧力)標準

デジタル圧力計の性能評価と利用技術の開発による高精度化、及び、遠隔校正システムの構築と自動遠隔校正プロトコルの開発により、電子式デジタル圧力標準遠隔設定システム（気体圧力：10 kPa～1 MPa，液体圧力：1 MPa～100 MPa）を確立する。また、国家標準に基づく 1 kg を基準とし自動分量・倍量機能を持った質量標準遠隔設定システムを開発する。

### ・第Ⅱ期目標：

産業界からの需要の高い、気体差圧 10 Pa～10 kPa（不確かさ：100 mPa または 0.01 % 以下）、液体圧力 10 MPa～100 MPa（不確かさ：0.01 % 以下）のそれぞれの圧力範囲において、標準供給が可能なデジタル圧力計に基づく小型で安定な仲介標準器を開発し、校正手法の高度化を進め、遠隔圧力校正に適した測定手順の開発を進める。

### ・設定根拠：

気体差圧 10 Pa ～10 kPa では簡便に扱える高精度の標準器が存在せず、また液体圧力 10 MPa ～100 MPa は産総研における jcss 校正の件数が最も多い範囲である。これらの圧力範囲においては、産業界から従来より効率的な標準供給技術の確立が望まれていた。また不確かさは、産業界におけるユーザ器物を校正するため、技術的に可能な最小限に設定した。

## - 2 . 研究開発計画の妥当性

前節に述べた目標を達成するために、広い意味での遠隔校正技術開発と実証実験を平成 13 年度から 17 年度までの第 I 期、平成 18 年度から平成 20 年度にわたる第 II 期のそれぞれで、選択した標準毎に具体的な研究開発計画を策定し、実施した。各標準の具体的な研究開発内容を以下に示し、表 1 に具体的な実施スケジュールを示す。

### (1) 時間標準

GPS 受信機を介して独立行政法人産業技術総合研究所（以下「産総研」という。）の原子時計標準と遠隔地の原子時計の時刻及び周波数を高精度で比較するシステムの開発を行い、各種遅延効果等による不確かさの評価を行う。この結果を元に、インターネットを介した遠隔校正により登録事業者の保有する二次標準器及び製造工場等で使用されている標準器（以下「実用標準」という。）への供給を可能にするシステムを開発する。

実施目標としては、GPS コモンビュー法により日本全国に対して 1 日平均で  $10^{13}$  台の不確かさで、汎用性の高く（ユビキタスな）、現状の機器に比べ 40 % 以上低廉化した周波数遠隔校正システムの実現を目指す。具体的には受信機の受信感度の向上による GPS コモンビュー法 の利用環境の広範囲化、顧客と産総研、又は顧客と認定事業者間のデータ伝送法の汎用性やセキュア性の向上、利用者（顧客）用機器の利便性やハードウェア・ソフトウェア面での ロバスト性 の追求などの各研究開発を行う。商用化時の利用者機器は極力低価格で提供できることを想定している。また、当該技術を国際的なガイドラインに提案を行う。

### (2) 長さ標準

#### ① 波長

アセチレン安定化レーザと 光コム を用いることで、波長 1.5 ミクロン帯の光通信帯において、広帯域で高精度な光周波数計測のための 光コム の開発を行う。また、光ファイバを利用して周波数標準・波長標準の供給を行う際の技術的課題を検討する。具体的には、モード同期レーザの繰り返し周波数の高純度化・安定化（光コム の"目"の高精度化）、周波数の安定化（光コム のドリフトの抑制）、光コム を光ファイバを通して伝送する場合の信号劣化の評価、およびその対策など、技術的検討を行う。更に高調波モード同期に特有な スーパーモード雑音 とレーザ発振線幅およびスペクトル変動との関係を明確にする。更に、温度・振動などによる共振器長の変化および励起パワーの変動による線幅の変化を把握する。これらの実験を通じて狭線幅化の主要パラメータを抽出し、更なる狭線幅化を目指す。次に、位相同期法を用いて超高安定なシンセサイザに共振器の繰り返し周波数をロックし、これにより超高安定な 光コム を実現する。

また、周波数の遠隔校正に基づいた、国家計量標準にトレーサブルで製造工程に組み込み可能な高精度距離計測技術を開発し、国際ルール形成に資する。そのために、

フェムト秒パルスレーザの周波数安定化、測距技術の高周波数化、および位相測定の高精度化を実現し、距離計遠隔校正の高精度化を行う。また、フェムト秒パルスレーザの対環境安定性を向上させ、周波数の安定性に対する影響を調べる。

## ②光ファイバ応用

ブロードなスペクトルを光源とする精密な低コヒーレンス干渉計を開発し、それらを光ファイバで連結することによって、ブロックゲージ干渉計の光ネットワーク化を実現する。実際に、産総研の長さ用干渉計とユーザが保有するブロックゲージ干渉計とを光ファイバで連結し、遠隔で精密な校正技術を確立する。この光波干渉測長技術を、リングゲージのような曲面を持つ多種類の実用長さ標準器に適用するため、検出系の高感度化や光学素子の小型化を図る。また、大型装置に設置されたリニアスケールなどに関して、多様な設置環境に対応する遠隔校正技術を開発する。それらの成果を実現するため、光ファイバネットの調査・検討を行い、および国際ルールに反映させる。

## (3) 電気標準

(直流) 液体ヘリウムを使わない SNS 型 NbN ジョセフソン接合集積技術、GPS 信号から復元した基準周波数、およびインターネットを介して装置の条件設定やデータ伝送などを構成要素とした遠隔校正電圧標準システムを確立する。また、単電子トンネル接合素子による電流量子標準の実現の可能性を検討する。産総研と認定事業者間で同システムによる校正実証実験を行う。

(交流) 交流電圧標準の遠隔校正における信頼性の向上を目的として、ファスト・リバース DC 方式を用いたインターネット対応型 AC-DC トランスファ標準用校正装置を開発する。また同装置を用いて、産総研と日本電気計器検定所等の認定事業者や海外の標準研究所との間において、インターネット及び仲介標準器を介した遠隔校正実証試験を行なう。さらに、交流電気標準の主要な量目であるインダクタンスの遠隔校正のために安定な標準仲介器（インダクタンス二次標準器）の開発及び遠隔校正法の開発を行う。このシステムの実用化に向けての問題点を解決および校正事業者とユーザ間における遠隔校正の実証実験を行う。また、同様な手法をキャパシタンスや交流抵抗の遠隔校正に拡張し、さらには LCR メータの遠隔校正も実施できるシステムを開発し、低周波インピーダンス標準全般にわたっての遠隔校正技術の確立、及び国際ルールの作成に資する。

## (4) 放射能標準

インターネットを利用した双方向画像通信技術と遠隔操作技術を利用し、長半減期の安定した基準線源を参照とする加圧型電離箱システム等の遠隔校正技術を確立し、個々の線源の輸送に伴う煩雑な手間とリスクから解放された、基準線源を標準仲介器として用いた安全でしかも広い供給範囲を持つ、放射能標準供給体制を確立する。さらに IC

タグの放射線耐性を評価し、IC タグ、IC タグ入出力装置及び線源が組み込まれた校正装置を開発し、あらかじめ線源の ID 番号や放射能を IC タグに書き込めるようにする。現場の放射線測定装置には IC タグあるいは IC タグ入出力装置を付加し、校正装置の ID 番号、放射能等の情報を読み出して、間違いのない校正が行えるようにする。そして、これらの放射線測定装置および校正装置を統合し、校正結果を管理するシステムを開発する。これらの成果を国際ルールに反映させる。

#### (5) 三次元測定機標準

インターネットを利用した、遠隔操作による三次元測定機の測定の不確かさの算出、ならびに仲介標準器を用いた幾何学誤差測定法を確立する。また、外国標準機関との間で遠隔不確かさ決定の実証を行う。この技術を確立することにより、三次元測定機を使う多くのユーザがトレーサブルな測定を行うことができる体制を確立する。さらに、産業界からの要請が多い任意・微細形状用三次元測定機を遠隔校正するため、仲介標準器（ゲージ）を開発する。またゲージを用いてユーザが装置をトレーサブルに校正、評価する手続きの確立、標準化を進め、遠隔校正時に重要となるユーザ側測定環境モニタ手法を確立する。

#### (6) 振動・加速度標準

時間標準及び長さ標準の遠隔校正技術を用いて、可搬型加振機とコントローラによる振動加速度校正装置を開発し、インターネットを利用した遠隔校正を確立する。国内における持ち込み校正レベルまで不確かさを低減するために必要な、ユーザ側の操作手続き、環境評価（地盤振動、温度）法、可搬型加振機の劣化（振動ひずみ）をモニタする手法を確立する。

#### (7) 力学(圧力)標準

デジタル圧力計の性能評価と利用技術の開発による高精度化、及び、遠隔校正システムの構築と自動遠隔校正プロトコルの開発により、電子式デジタル圧力標準遠隔設定システム（気体圧力：10 kPa～100 kPa）を確立する。さらに、産業界からの需要の高い気体差圧 10 Pa～10 kPa、液体圧力 10 MPa～100 MPaにおいて、それぞれ標準供給が可能なデジタル圧力計に基づく小型で安定な仲介標準器を開発する。さらに、校正手法の高度化を進め、遠隔校正の実証実験を行い、当該分野での国際的なルール形成に資する。

表Ⅱ-1. 実施スケジュール

テーマ名	第Ⅰ期前期 (H13～15)	第Ⅰ期後期 (H16～17)	第Ⅱ期 (H18～20)	備考
1. 時間標準	————→	————→ .....→	————→	
2. 長さ標準				
1) 波長(波長標準) *	————→	————→		第Ⅰ期終了
波長(フェムト秒：光波距離計)		————→	————→	H16 新規、H16-H17 では2)光ファイバ応用 の一つとして実施
2) 光ファイバ応用	————→	————→	————→	
3) He-Ne レーザ	————→ .....→			H15 前倒し終了
3. 電気標準				
1) 直流(PJVS)	————→	————→ .....→		第Ⅰ期終了
2) 交流 (インダクタンス:インピーダンス)		————→ .....→	————→	H16 よりインピーダ ンスに発展
4. 放射能標準	————→	————→ .....→	————→	医療用放射能標準を含 む(H16～)
5. 三次元測定機標準	————→ .....→		————→	H15 前倒し終了、 H18 継続
6. 振動・加速度標準			————→	H18 新規
7. 力学(圧力)標準	————→		————→	H15 前倒し終了、 H18 継続
8. 流量標準	————→			H15 中止
9. 温度標準	————→ .....→			H15 前倒し終了

\*産総研と東北大学の共同研究

注：————→ は機器開発と遠隔校正実証、.....→ は実機試験、————→ は下位階層までの  
の実用標準の遠隔校正開発を表す。

### - 3 . 研究開発計画の妥当性

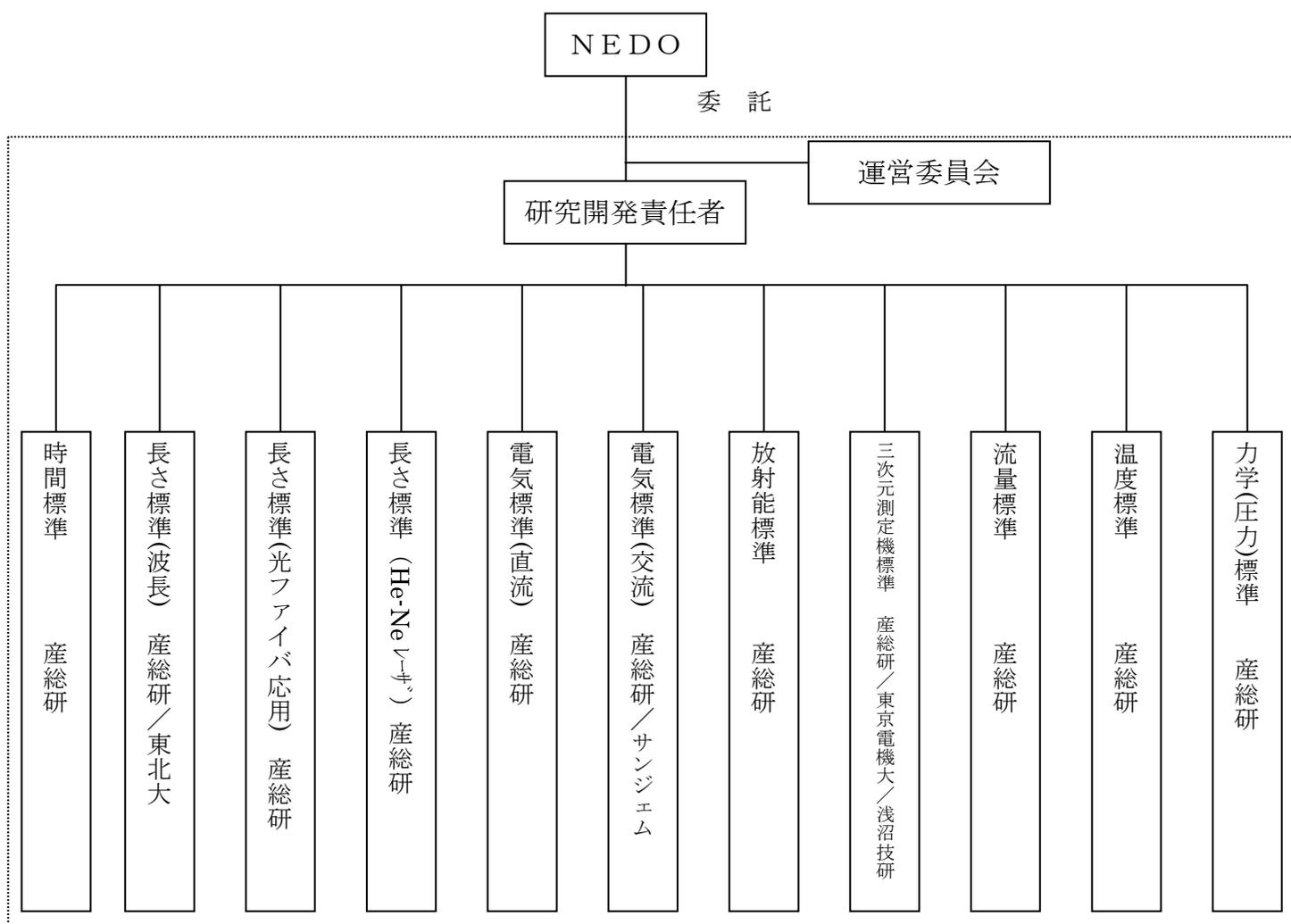
#### II-3.1 研究開発の実施体制

企業，大学，民間研究機関，あるいは独立行政法人等が、共同研究契約等を締結して研究体を形成し、研究体には研究開発責任者を置き、その下で産学官の研究者が協力して効果的な研究開発を実施する。

また、計測標準の公的一貫性及び共通基盤性を確保するために、本プロジェクトで開発される校正技術は国家計測標準にトレーサブルでなければならず、実施に当たっては、責任を有する公的機関（産総研）と密接に協力し、目標の達成にあたる。

#### 1) 第 期（平成 17 年度まで）の実施体制：

研究開発責任者 吉田春雄（平成 13 年 4 月～平成 18 年 3 月、産総研）

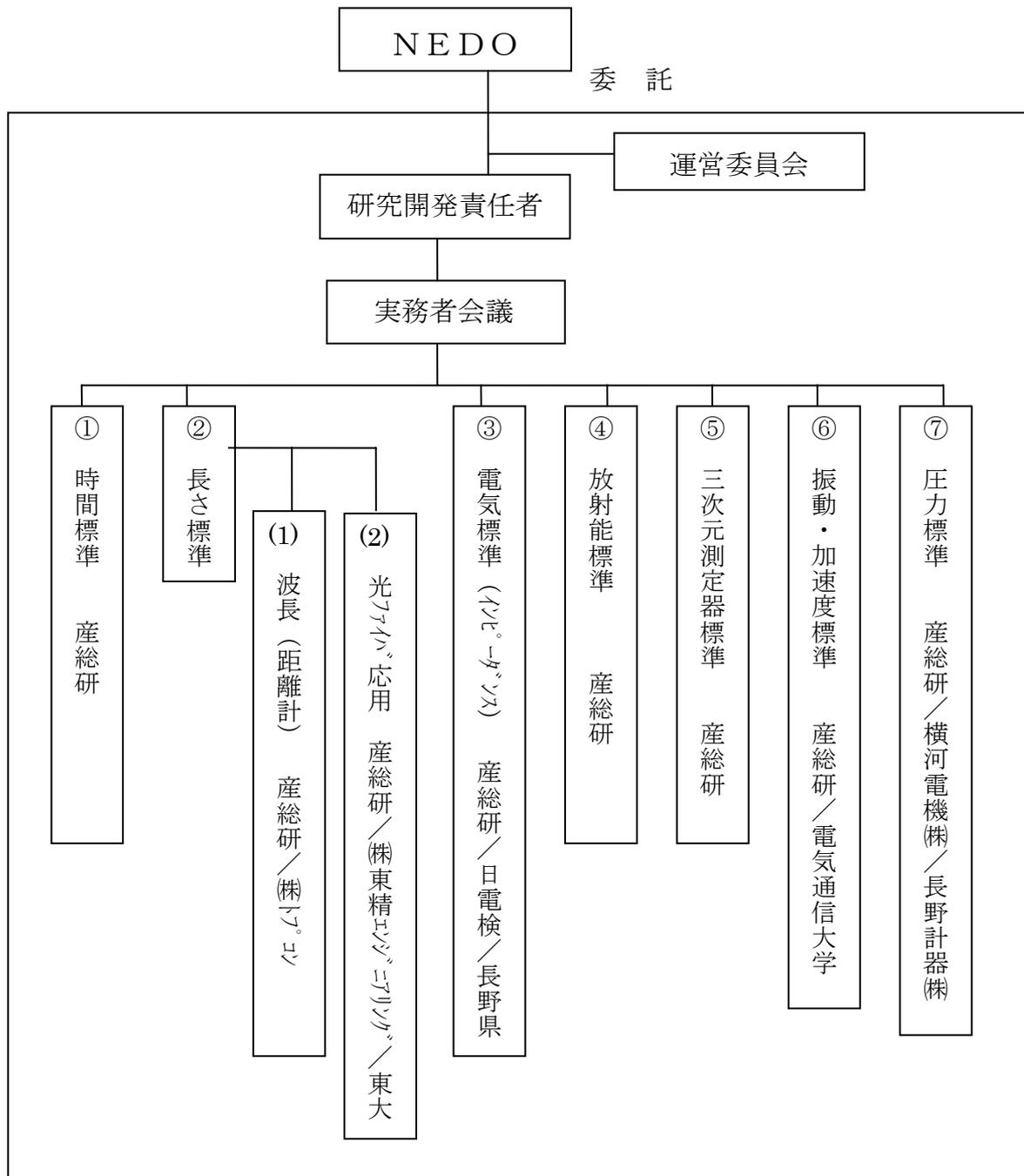


2) 第 期の実施体制

研究開発責任者

松本弘一（平成 18 年 4 月～平成 20 年 3 月、産総研）

桧野良穂（平成 20 年 4 月～現在）



### 3) 研究体制

**表 -2. 研究実施体制（平成 20 年度）**

委託先名	独立行政法人 産業技術総合研究所		
業務管理者	計測標準研究部門 部門長 岡路 正博 TEL. 029-861-4111 e-mail: okaji-masahiro@aist.go.jp		
経理責任者	財務会計部門 経理室長 杉田 実 TEL.029-861-6358 e-mail: sugita-minoru@aist.go.jp		
研究実施場所 及び実務者会 議メンバー	独立行政法人産業技術総合研究所 〒305-8563 茨城県つくば市梅園 1-1-1 (最寄り駅：JR 常磐線荒川沖駅)		
	氏名	所属・役職	担当事業内容
	▽ 桧野 良穂	計測標準研究部門 副研究部門長	プロジェクトリーダー
	▽ 今江 理人	計測標準研究部門 時間周波数科長	① 時間・周波数標準
	▽ 美濃島 薫	計測標準研究部門 長さ計測科 長さ標準研究室長	②1) 距離標準
	▽ 平井 重紀子	計測標準研究部門 長さ計測科 長さ標準研究室 主任研究員	②2) 実用長さ標準 (光ファイバ® 応用)
	▽ 中村 安宏	計測標準研究部門 電磁気計測科長	③ 低周波インピーダンス標準
	▽ 柚木 彰	計測標準研究部門 量子放射科 放射能中性子標準研究室長	④ 放射能標準
	▽ 高辻 利之	計測標準研究部門 長さ計測科 幾何標準研究室	⑤ 三次元測定機測定標準
	▽ 臼田 孝	計測標準研究部門 音響振動科 強度振動標準研究室 室長	⑥ 振動・加速度標準
	▽ 大田 明博	計測標準研究部門 音響振動科 強度振動標準研究室 研究員	⑥ 振動・加速度標準
▽ 小島 時彦	計測標準研究部門 力学計測科 圧力真空標準研究室 主任研究員	⑦ 圧力標準	

### II-3.2 研究開発の運営管理

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、本プロジェクトの目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。必要に応じて、技術審議委員会及び技術検討会等、外部有識者の意見を運営管理に反映させる他、四半期に一回程度研究開発責任者等を通し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。

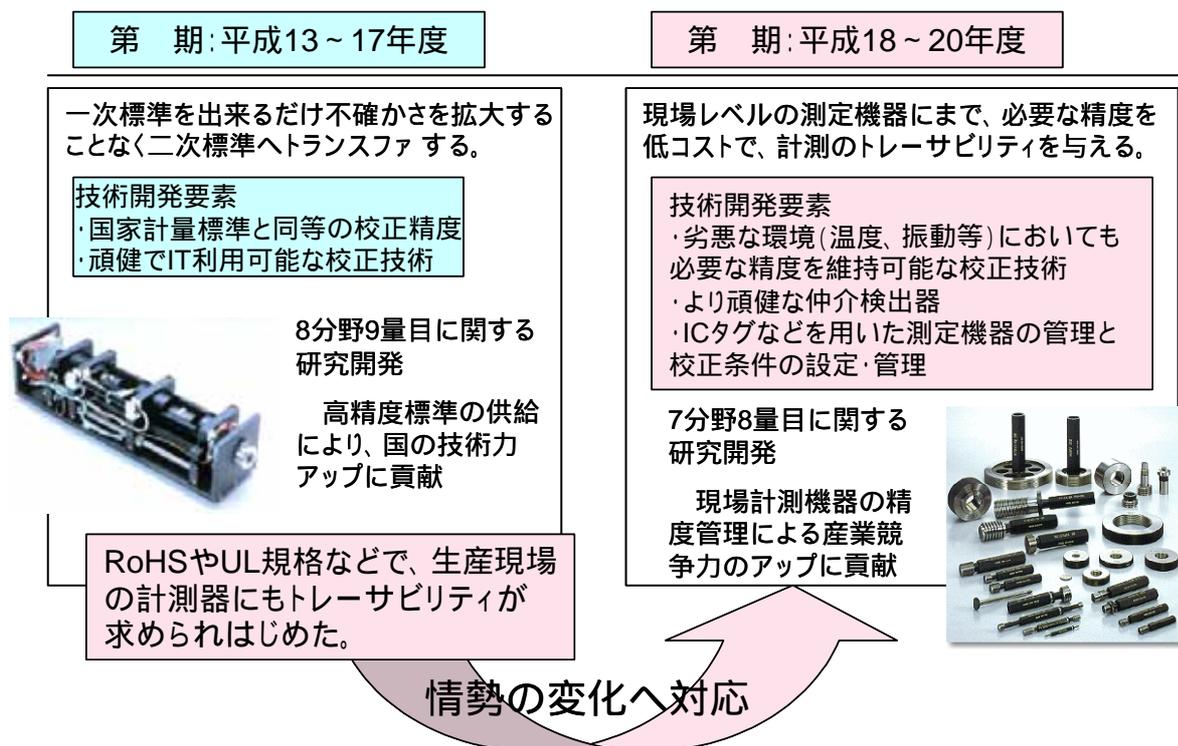
また、研究体内に、学界、産業界を含め第Ⅰ期には4名、第Ⅱ期には、産業界からの委員を加えて計9名の委員からなる運営委員会を設置し、運営に関する助言を得ること等を行う。表3に第Ⅱ期の運営委員会の名簿を示す。

**表 -3. 運営委員会の名簿（平成20年度）**

氏名	所属
<b>委員</b>	
大園 成夫 氏(委員長)	東京電機大学 工学部 機械情報工学科 教授
池田 勝 氏	松下電器産業株式会社生産革新本部 開発設計力強化センター 製品評価技術G 参事
河田 燕 氏	社団法人日本アイソープ協会 常務理事
佐竹 昭弘 氏	応用地震計測(株) 代表取締役社長
鈴木 道秋 氏	日本品質保証機構 計量計測センター長
中村 一則 氏	古河電工(株) 研究開発本部 副本部長兼企画部長
丸國 等 氏	日産自動車株式会社 計測技術部 部長
山口 徹 氏	株式会社 山武 計測標準センター 課長代理
渡部 新一 氏	メトラー・トレード(株) 科学機器事業部 技術顧問
<b>事務局</b>	
桧野 良穂	(独)産業技術総合研究所 計測標準研究部門 副研究部門長
柚木 彰 (幹事)	(独)産業技術総合研究所 計測標準研究部門 量子放射科
中段 和宏	(独)産業技術総合研究所 計測標準研究部門

#### - 4 . 情勢変化への対応

第Ⅰ期においては、産総研の一次標準を出来るだけ不確かさを拡大することなく、登録事業者などの二次標準へトランスファすることを旨として研究が実施された。このため、三次元、温度、及び圧力などの標準に関しては、当初設定した高度の一次標準を遠隔的にトランスファすると目標を達成したので、平成 15 年度末に前倒しで終了した。しかしながらその間、計測機器に関する社会情勢は、不確かさを小さくすることに加えて、国民の安全安心を確保する観点から、欧州では 2003 年（平成 15 年）以降の RoHS 指令や 2004 年（平成 16 年）には電子機器の不要放射（EMC）対策強化などの新たな規制が次々と導入され、その結果として現場レベルの測定機器にまで、計測のトレーサビリティが求められるようになった。本来、遠隔校正技術は標準供給形態の効率化を図るものであることから、このような社会情勢の変化に対応して、より実用性があり質の高いサービスを広汎に供給するため、当初平成 17 年度までとしていた研究開発期間を、平成 20 年度まで 3 年間延長し、より実用化を強く目指すこととした。この延長に伴い、本事業の校正の対象を、校正の専門家である国内の約 200 社の登録事業者が保有する高レベルの標準器から、製造現場等で用いられている実用的な標準器までの校正に必要な研究開発を行うこととした。



図Ⅱ-1 情勢の変化に対応した第Ⅰ期と第Ⅱ期の開発目標と技術開発要素

即ち、第Ⅱ期においては、製造現場での遠隔校正に対応する必要から、特定二次標準器の様に整備された環境におかれた状態とは異なる、劣悪な環境（温度変化、振動等）においても必要とされる精度（不確かさ）を維持可能な校正技術、標準器への対応等を行うこ

ととしている。このため、校正に関しても、衛星通信やインターネットを介する直接的な方式に加えて、測定結果を自動的に電子メールで送信する方式や、IC タグを用いた測定機器の管理と校正条件の設定など、遠隔校正の適用範囲を拡大して研究が進められた。

なお、平成 15 年度前倒し終了した標準の中で、三次元に関しては、製造現場において産業の高度化によりマイクロ部品や装置の計測技術が必要になったこと、及び圧力に関しても、現場での当該技術の電子化とデジタル化が急速に進み、標準器として利用できるレベルの安定性が確保できる見通しがたったので、再開することとした。

さらに、振動・加速度に関して、貿易の関税障壁などの打破をめざして自動車業界などを中心として多くのニーズが発生するとともに、全国に配置されている多くの地震計のロバスト性の確保の必要性により、平成 18 年度から新たに開始することにした。

これらの情勢の変化に対する各標準量目毎の対応を表-4 に示した。

**表 -4. 情勢変化への対応**

標準の種類	概要	H13～15	H16～17	H18～20	特記事項
1. 時間標準	原子時計（標準時計）と遠隔地にある 2 次標準時計の時刻及び周波数を、GPS が発信する周波数に同期をとることにより、高精度で比較・校正するシステム。	技術開発 (不確かさ $10^{-12}$ / 日 の時間校正 技術)	実証実験 改良	技術開発 実証実験 JCSS 開始 国外デモ 国際比較	国内外のより広いユーザに対応できる技術開発を行なうと共に、国際プロトコルの執筆。
2. 長さ標準	1) 波長 光通信で使用されている波長 $1.5\mu\text{m}$ のパルスレーザーを使って、等間隔のパルスが櫛の歯状に並ぶモノサシを作り、これにより光の波長（周波数）を計測。	技術開発 ( $1.5\mu\text{m}$ 帯 の周波数の 安定した レーザー)	実証実験 改良		超精密標準器であるので、上位の登録事業者のみの利用のため第 I 期で終了。
	フェムト秒：光波距離計 超短パルスを用いた、計測範囲 200 m 以上の光波距離計の遠隔校正システム。		技術開発 実証実験 改良	精密化・ 実証実験  国際比較 参加	製造分野ユーザに対応できる距離計の精密化を実現。

	2) 光ファイバ応用 光の干渉を利用して長さを計測する測長用の干渉計を光ファイバで連結し遠隔校正を行うシステム。	技術開発	技術開発 実証実験 ブロック ゲージ	範囲拡大 実証実験 リング ゲージ、 リニア ゲージ	広いグローバルな普及のため、リングゲージ・リニアゲージ技術も開発。
3. 電気標準	1) 直流 ジョセフソン素子を使った電圧標準システム（最大10V）。	技術開発 (10 Kで動作する10 V標準)	実証実験 改良		超精密標準器であるので、上位の登録事業者のみの利用のため第I期で終了。
	2) 交流（インピーダンス） 直流／交流変換を使った高精度な交流電圧標準。	技術開発 インダクタンス	技術開発 実証実験 LCR 交流 インピー ダンス	範囲拡大 実証実験 LCR 交流 インピー ダンス	広いグローバルな普及のため、範囲の拡大を実行。
4. 放射能標準	標準仲介器（放射線源）の発生する電流値をインターネットを介して校正機関で受け取り、校正する。	技術開発 (一定の値を持つ標準仲介器(放射線源)と校正技術の開発)	実証実験 改良 放射線医療機器の校正に応用	範囲拡大 実証実験 JCSS 開始 IC タグ 管理	広いグローバルな普及のため、ニーズの高い社会（病院など）における機器をIC タグによる線源と測定機器の管理システムの確立。
5. 三次元測定機標準	標準仲介器を用いた三次元測定機の不確かさの評価技術。	技術開発 実証実験		現場用の小型仲介校正ゲージ開発	広いグローバルな普及のため、ニーズの高いマイクロ形状の遠隔校正を実行、及び国際プロトコルの執筆。
6. 振動・加速度標準	仲介器による振動・加速度計を用いた遠隔校正システムの構築。	第II期から研究開発を開始		技術開発 実証実験	自動車産業界等で約1億個/年使われ、産業界で強いニーズがあり、緊急性が高い。地震計の信頼性の確保にも貢献。
7. 力学（圧力）標準	デジタル圧力計を用いた遠隔校正システムの構築と自動遠隔校正プロトコル。	技術開発 実証実験		気体・液体の圧力計測。 国内・国外で実証実験	当該分野の急速なデジタル化技術の進展により、新しい展開が開けたので、範囲を拡大して開始。

#### -4.1 中間評価への対応

##### 1)平成 15 年度中間評価への対応

平成 13 年度から 5 年計画で始まった第 I 期の NEDO 委託事業「計量器校正情報システムの研究開発」(略称 e-trace プロジェクト)は、当初は遠隔校正を実現するための要素技術を開発し実証実験を行って実用化のための問題点を洗い出すフェーズビリティ・スタディと位置付けられていた。平成 15 年度の中間評価時の総合的評価は以下のとおりであった。

先進的な計量標準システムを構築する本プロジェクトは、科学技術と産業の発展に重要であること、政策および産業界のニーズと合致していることから、国が積極的に押し進める事業である。実用化した場合、生産現場における低コスト化や工場の海外進出など、産業界を取り巻く社会状況の変化と、国際化した生産体制への適応が期待されるため、社会的な意義も高い。

中間段階の目標に関しては、各標準技術の研究開発から貴重な知見が得られていること、一部の技術は実用化の目処が付いていることなどから、概ね達成していると判断する。しかしながら、各標準技術の進捗状況には、バラツキが見られる(1)。

着手後の 2 年間は、各標準技術の研究開発に重点が置かれていたが、今後は、最終目標である e-trace の構築へ向けて、人力と資力を主要課題へ重点的に配分することが望ましい(1)。また、一部の標準技術は、本プロジェクトの主旨から外れており、e-trace としての方向性などを改善する必要がある(2)。

以上のことから、本プロジェクトは、目標である e-trace を念頭に各計測標準技術を精査し、その上で残された期間の研究開発を継続すべき(1)である。最終的には、実用性があり質の高いサービスを提供できるシステムが構築されることを期待する(3)。

平成 15 年度中間評価における各指摘について、以下の対応を行った。

- (1) 平成 15 年度の中間評価における説明のとおり、温度、三次元測定機等、一部の量目について平成 15 年度で前倒し終了すると共に、主要課題である長さ等について重点を置いて研究開発を行い、進捗の平準化を図った。
- (2) 本プロジェクトの趣旨から外れていると指摘された流量については、平成 15 年度をもって中止した。
- (3) 実用性があり質の高いサービスを供給するため、次の取り組みを行った。

本研究開発事業の成果に基づく計量器の校正結果が社会的に通用するためには、校正証明書が ISO/IEC 17025(JIS Q 17025 : 試験所及び校正機関の能力に関する一般要求事項)に基づき発行されることが必要である。校正機関の認定は独立行政法人製品評価技術基盤機構認定センターが主体として行う事業であったことから、産業技術総合研究所を含めた 3 者で密接な協力関係を構築し、遠隔校正を認定の基準に盛り込むため認定の要求事項の改正に協力した。既に、一部の認定プログラムにおいて遠隔校正を行う校正事業者が認定

を受けたところであり、更に国際的な普及と承認を進めるために国際的な認定機関から成る APLAC や ILAC に提案しているところである。

また、平成 15 年度中間評価コメントの今後への提言で、「ユーザの立場に立った実施形態を念頭に、研究を進めるべきである。」との指摘があったことから、ユーザの意見を研究開発に反映させるため、委託先とユーザとの勉強会を平成 17 年に 5 回実施するとともに、勉強会、見学会実施後にアンケート調査を実施し、委託先研究者への調査結果のフィードバックを実施した。また、委託先とユーザとの実用化に向けた関係構築を実施した。

## 2) 平成 18 年度中間評価への対応

第 I 期の成果を踏まえ、本格的な技術の普及を行うため、平成 18 年度より第 II 期 3 年間の事業継続が決められた。これに伴い、18 年度の事後評価の代わりに、再度の中間評価が行われた。平成 18 年度の中間評価時の総合的評価は以下のとおりであった。

本プロジェクトで進める遠隔校正の構想は、時代の要請と技術の流れに即し、また、国際的にも日本が唱導しており、世界最高水準の整備目標をかかげ、計量器校正情報システムとしての活用を視野に入れた取り組みを明確にしている姿勢は評価できる。また、一部のテーマで、世界初、あるいは世界トップクラスの標準が生み出されている。遠隔校正を推し進めようとするこのプロジェクトは、製造業の基盤を底上げするような大きな効果が期待できるものである。

一方で、本プロジェクトの幅広い計量分野の数多い各テーマの足並みが揃っていないように感じられる。(1) また、広報活動が不足していると思われる。(2) 今後は、国民の社会生活向上、産業への寄与（新規産業やサービス創出、雇用創生等）の観点から、JCSS 第 2 階層までの実用化を実現するための技術開発を完了させるように、技術レベルに応じて着実に進めていくべきである。(3)

実用化に向けて、標準の種類によらない共通の課題が存在することが予想されるため、産業界の意見を集約し、ユーザビリティなどを横断的・共通的に完成度の高いシステムを開発することが望まれる。(4) なお、第 II 期は事業の終了フェーズであり、終了フェーズでの成果はリーダーのマネジメントによるところが大きく、リーダーシップを更なる強化したマネジメントで実施することを望む。(1)

平成 18 年度中間評価における各指摘について、以下の対応を行った。

(1) 本年度より新たなプロジェクトリーダーの下、研究を進めているところであるが、3 ヶ月毎に各テーマのリーダーが集まり、現状の課題、進捗状況等を確認する「実施者会議」を開催することにより指揮系統を明確化し、リーダーが的確に采配できる環境を整備する。

**表 -5 . 実施者会議の開催実績**

回数	開催日	内容
1	2006/10/26	中間評価を反映した今後の活動について 各テーマ責任者から進捗報告
2	2006/12/25	三次元標準、時間標準の紹介と進捗報告
3	2007/02/26	電気標準、放射能標準の紹介と進捗報告
4	2007/08/10	波長標準、振動・加速度標準の紹介と進捗報告
5	2007/12/26	圧力標準、長さ標準（ブロックゲージ）の紹介と進捗報告
6	2008/05/20	各テーマの進捗状況報告と目標確認：時間、波長（距離計）、光ファイバ応用、電気、放射能、三次元、振動・加速度、圧力
7	2008/12/16	セミナー及び普及活動の紹介、共通課題の検討
8	2009/02/05	目標到達度の確認及び今後の予定周知

(2) NEDOホームページで広報して実施している「e-trace 勉強会」を、関係工業会経由でも一般ユーザへ周知する。また、産総研においてもホームページで広報している「NMIJ 計測クラブ」でも計測事業者向けPRを実施する等、更なる周知を図る。

(3) 産総研と NITE（製品評価技術基盤機構）が連携して JCSS 供給に際しての問題点を検討し、遠隔校正の一般要求事項 付属書4「遠隔校正を行う場合の特定要求事項」が JCSS 技術分科会で承認された。今後は、国際認定機関の APLAC(Asia Pacific Laboratory Accreditation Cooperation) や ILAC (International Laboratory Accreditation Cooperation)にも提案し、承認を求めると共に、より適用範囲が拡大可能とすべく、各方面に働きかける。

(4) これまで「運営委員会」は、研究開発の進捗状況の点検を行うことを主目的としていたが、今後は、プロジェクト実施者だけでなく、民間ユーザを委員として迎え、産業界のニーズの集約を図るとともに各テーマ共通の課題の解決を図る。また、二次校正を行う事業者や機器メーカーへ再委託を行うと共に、登録事業者のみならず、実際に遠隔校正を受ける末端のユーザについても、NMIJ 計測クラブ、国際計量研究連絡委員会を通して引き続きニーズを把握し、実施計画に反映する。

これらの対応により、第Ⅱ期においては、一般ユーザが求める校正精度、使用環境に応じ、目標を設定、もしくは見直しを行い、量目毎に定めた第Ⅱ期の遠隔校正研究目標達成を目指して事業を推進した。

#### **II-4.2 評価に関する事項**

（中間・事後評価の評価項目・評価基準、評価手法および実施時期）

NEDO 技術開発機構は、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、外部有識者による研究開発の中間評価を平成 15 年度及び平成 18 年度に、事後評価を平成 21 年度に実施する。また、中間評価結果を踏まえ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。なお、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、適宜見直しを実施した。

## ．研究開発成果について

### - 1 . 事業全体の成果

平成 13 年度に当初 5 年計画で発足した「計量器校正情報システムの開発」(e-trace) プロジェクト(第 I 期)は、国家標準として維持されている一次標準を、不確かさをあまり拡大することなく、遠隔地にトランスファする手段として e-trace 技術が研究された。平成 15 年 6 月の第 1 回中間評価において、実用化を早めるようにとの指摘を受け、社会システムとしての運用を可能にする法的な整備にも力を入れた。即ち、通信技術や情報処理技術を援用する「e-trace : 遠隔校正」という手法は、計量法にも試験所認定国際規格 ISO/IEC17025 にも盛り込まれていなかったため、国内外で認定・認証機関への働きかけを行った。この結果、JCSS 等技術委員会に遠隔校正分科会を設置してこの問題に対処することになり、ASNITE-NMI 遠隔校正(製品評価技術基盤機構認定制度国家計量標準研究所認定サブプログラムに基づく遠隔校正)、ASNITE-CAL 遠隔校正(製品評価技術基盤機構認定制度校正事業者認定サブプログラムに基づく遠隔校正)の一般要求事項 付属書 4 として、「遠隔校正を行う場合の特定要求事項」が承認された。一方、APLAC(Asia Pacific Laboratory Accreditation Cooperation : アジア太平洋試験所認定協力機構)や ILAC (International Laboratory Accreditation Cooperation : 国際試験所認定協力機構)にも同様の提案をし、平成 18 年 11 月の ILAC メキシコ総会で、遠隔校正に関する要求事項が正式審議議題として採択された。

これらの動きをさらに実際の校正現場にまで広げ、本格的な技術の普及を行うため、平成 18 年度より第 II 期 3 年間の事業継続が決められた。平成 18 年度に行われた第 I 期の中間評価において、より広くユーザに普及させるようにとの指摘を受けて、産業界から実用的な標準への要望があった振動加速度や 3 次元測定機の現場校正技術に関する研究を新規に立ち上げた。その一方、ユーザへの普及には、広く産業界の協力を得ることが不可欠であるため、産総研の再委託制度や共同研究制度を活用して、登録事業者やユーザと連携して技術開発を進めた。これらの成果に関しては、学問的成果は国際会議などに発表し、また、技術的ノウハウは特許や国際比較などを通じて国際技術プロトコルの確立に進展させるべく活動した。その結果、時間周波数や放射能などの標準においては、JCSS 制度に基づく標準供給が開始され、3 次元計測や電気標準においても、実用的なトランスファ標準が開発され、幾つかの代表的な民間校正事業者との比較が試みられるなど、目標を達成することが出来た。これらは、全て当初の目標を満たすものであり、圧力標準では、海外の日系企業の校正室と遠隔校正の実証試験を実施するなど、予定以上の成果を上げたテーマもある。それらの詳細に関しては、Ⅲ-2. 「研究開発項目ごとの成果」において詳解する。

### -1.1 目標の達成度

前節の第Ⅰ期を含めた事業全体の概要で述べたとおり、第Ⅱ期における目標は、当初の目標を十分に満たしていると言える。表Ⅲ-1 に、個々のテーマごとに設定した目標と、その達成度を示した。

表 -1. 第Ⅱ期目標とその達成度

分野	第Ⅱ期目標	目標の達成度
1. 時間標準	<p>産総研から最終利用者にいたるトレーサビリティのとれた周波数遠隔校正システムとして <u>GPS コモンビュー法</u>により日本全国に対して1日平均で <math>10^{-13}</math> 台の不確かさで、汎用性の高く（ユビキタスな）、現状装置に比べ、40%以上低廉化した周波数遠隔校正システムの実現を目指す。また、当該技術の国際的な普及を図る。</p>	<p>利用者端末装置として、Rb 発振器を内蔵し、遠隔校正に必要な全ての機能を集約した装置の商用化を実現した。日本国内において <math>1 \times 10^{-13}</math> 以内の不確かさで供給可能であることが実証できている。また、販売価格は従来のシステム（ルビジウム発振器、GPS 受信装置、制御用 PC 合計で 200 万円程度）に比較して 50%以下に低廉化が実現できた。校正実績としては、産総研から校正事業者等への遠隔校正は 10 件程度の契約が既にあり、また JCSS で遠隔校正の認定を取得した事業者が 2 機関存在し、現在準備・検討中の事業者も 2~3 機関あり産総研から末端の利用者にいたる周波数遠隔校正システムの枠組みが構築できたと考えられる。国際的な普及に関しては、中国、タイなどの国家標準機関との連携を図り、開発したシステムの普及を図っている。特にタイでは、本システムを導入する方向で担当者の教育訓練を行いつつある（別予算で実施）。さらに端末装置のより小型化・利便性の向上の検討を実施し、技術的な見通しを得た。</p>
2. 長さ標準 (1) 波長 (光波距離計)	<p>フェムト秒パルスレーザーのモード間ビートを利用した距離測定技術を高精度化し、周波数の遠隔校正に基づき、また製造現場等の環境を配慮して、距離を <math>2 \mu\text{m}/10 \text{m}</math> の不確かさで測定する。</p>	<p>遠隔校正された時間周波数標準に基づき、測定に用いるビート周波数を 40 GHz に高周波数化して、距離測定の高分解能化を実現し、空気揺らぎの影響の少ない近距離において標準偏差 <math>0.3 \mu\text{m}</math> の位相安定性と、位相計限界の周期誤差を実現した。また、環境安定性を向上させた機械系、波面精度を向上させた光学系を設計・製作し、組み込みに適した光学系ヘッドの分離型試作機を設計・作成した。これらの成果を統合し、現在の参照標準である光波干渉計との比較を行ったところ、10 m の測定距離において、<math>2 \mu\text{m}</math> での測定値の一致を得た。開発方式の距離計装置を用いて、韓国において屋外で実施された国際比較に参加し、新方式の距離標準の確立に寄与した。</p>

<p>(2) 光ファイバ応用（リングゲージ、デジタルスケール）</p>	<p>ブロードなスペクトルを光源とする低コヒーレンス干渉計を光ファイバで連結した光波干渉測長技術を、リングゲージのような曲面を持つ多種類の実用長さ標準器の校正（不確かさ <math>0.2 \mu\text{m}/50 \text{mm}</math>）に適用するため、検出系の高感度化や光学素子の小型化を図る。大型装置に設置されたリニアスケールなどに関して、多様な設置環境に対応する遠隔校正技術（不確かさ <math>0.2 \mu\text{m}/250 \text{mm}</math>）を開発する。</p>	<p>リングゲージ測定のための干渉計を構築し、白色干渉検出系の改良を行い、内径 <math>20 \text{mm}</math>、<math>50 \text{mm}</math> のリングゲージを測定し、25回の測定において繰返し精度 <math>0.03 \mu\text{m}</math> 以下を得た。また微小内径リングゲージ用干渉計を設計・作製し、内径 <math>0.3 \text{mm}</math> まで測定が可能となる見通しを得た。さらに、大型装置に設置されたリニアスケールの校正のための耐環境性の高い可搬型干渉計を構築した。実験室内での実験から、合成標準不確かさが <math>200 \text{mm}</math> において <math>0.11 \mu\text{m}</math>、<math>250 \text{mm}</math> において <math>0.12 \mu\text{m}</math> と、最終目標を達成した。また、工場の工作機械の遠隔 in-situ 校正実証実験を行った。</p>
<p>3. 電気標準</p>	<p>インダクタンスの遠隔校正システムの完成と、同様な手法のキャパシタンスや交流抵抗、LCR（インピーダンス）メータ校正への拡大。そのための、同軸スキャナ装置の多チャンネル化、LCR を一つにまとめた仲介器のコンパクト化、遠隔校正システムの高機能化などの実現。1 kHz～10 kHz の範囲で、LCR すべての対象校正器物の標準不確かさとして 80 ppm を目標とする。</p>	<p>インダクタンス、キャパシタンス、交流抵抗の各標準について遠隔校正を実現できるシステムを開発し実証実験により妥当性を確認した。また、LCR メータ遠隔校正システムについても開発を完了し、実証実験によってシステムの妥当性を確認した。さらに、実証実験の結果より、LCR すべての校正器物について、目標とする周波数範囲・標準不確かさ（1 kHz～10 kHz において 80 ppm）での遠隔校正が実現できることを確認した。これにより、当初の目標はすべて達成した。 また、現在までに、3つの企業・機関より、当該システムの導入に関する問い合わせがあり、技術移転の方法について現在検討しているところである。</p>
<p>4. 放射能標準</p>	<p>IC タグを利用した遠隔校正システムの開発を行い、校正時の線源の移動を軽減し、管理を効率的に実施することを可能にするとともに、現場測定器まで放射線関連量のトレーサビリティを不確かさ 20 % 以下で徹底させる。そのために IC タグ、IC タグ入出力装置及び線源が組み込まれた校正装置、IC タグあるいは IC タグ入出力装置付の放射能測定装置、並びに統合管理システムを開発しシステムの実証試験を行う。</p>	<p>IC タグ付きの線源、および、IC タグ読込書込装置付線源校正装置、IC タグ付の放射能測定装置の試験が終了し、統合管理システムを開発して放射能測定装置を使用している校正事業者において不確かさ 20 % 以下でシステムの実証試験を行った。遠隔中性子校正においては、熱中性子、単色速中性子（144 keV、14.8 MeV）、線源による連続スペクトル速中性子標準の仲介検出器を開発し、遠隔校正のできる体制を構築した。また、依頼試験に基づく放射能の遠隔校正はすでに実施しており、JCSS 制度に基づく放射能の遠隔校正も、今年度、開始した。国際計量研究連絡委員会において、計量器校正情報システム開発の進捗を、計量関係者に報告し、エンドユーザまでの実用化への提起を行った。さらに、中間評価の提言を受け、医療用診断装置の遠隔校正のための仲介標準線源の新たな線源校正手法を計算機シミュレーションにより試験した。</p>

<p>5. 三次元測定機標準</p>	<p>産業界からの要請が多い任意・微細形状用三次元測定機を遠隔校正するため、測定長さ 50 mm に対して不確かさ 500 nm 以下で値付けられた仲介標準器（ゲージ）を開発する。あわせて、稼働台数の多数を占める現場環境に設置された三次元測定機への適用を進める。またゲージを用いてユーザが装置をトレーサブルに校正、評価する手続きの確立、標準化を進める。</p>	<p>測定室環境に設置された三次元測定機に対しては依頼試験による遠隔校正を行い、校正証明書を発行できるようになっており、実際の校正実績もある。微細形状用三次元測定機の遠隔校正についてはゲージの校正システムとして、微細形状三次元測定機で直接校正する手法と、画像測定機を用いて間接的に校正する手法とを整備しており、測定長さ 100 mm に対して 200-400 nm 程度の不確かさでゲージを校正する技術を開発した。現場環境に設置された三次元測定機への遠隔校正においても小さい不確かさが達成できるように、低熱膨張材料製ゲージを使用した検証実験を行い、遠隔校正が適用可能であることを確認した。ゲージを用いてユーザが三次元測定機をトレーサブルに校正、評価する標準的な手続きについてまとめ、評価に必要なソフトウェアの整備を行った。</p>
<p>6. 振動・加速度標準</p>	<p>国家計量標準にトレーサブルで輸送可能な振動・加速度遠隔校正システムを確立する。地震計など、振動加速度計校正事業者に持ち込めないユーザを対象に、振動数 1 Hz～160 Hz において校正可能な可搬型校正装置の開発を行う。この際印加する振動数の分解能として 0.05 Hz、振動加速度振幅の分解能として 0.005 m/s<sup>2</sup>（不確かさ 0.1%）を実現する。</p>	<p>当初 2 年間で可搬型の校正装置を開発した。最終年度で実際に外部機関に移送、実地校正、データ転送などの実証実験を行った。可搬型の装置が移送に耐え、従来校正機関に計量器を持ち込まねばならなかった振動加速度計及び関連計測器を、現地で校正出来ることを実証した。現存する校正事業者を想定して、計量器を構成する増幅器を部分的に遠隔校正し、工数を低減した。しかし完全な自動化にはまだ課題があり、ある程度トレーニングされた人材が現地で必要とされる。また、当初設定した振動数範囲である 1～160Hz を達成し、振動数の分解能について 0.05 Hz 以下を、印加加速度の分解能については振動数によるが分解能 0.005 m/s<sup>2</sup> 以下を実現した。</p>
<p>7. 圧力標準</p>	<p>産業界から需要の高い、<u>気体差圧</u> 10 Pa～10 kPa（不確かさ：100 mPa または 0.01 % 以下）、<u>液体圧力</u> 10 MPa～100 MPa（不確かさ：0.01 % 以下）のそれぞれの圧力範囲において、標準供給が可能なデジタル圧力計に基づく小型で安定な仲介標準器を開発し、校正手法の高度化を進め、圧力遠隔校正に適した測定手順の開発を進める。また、当該技術の国際的な普及を図る。</p>	<p>二つの圧力範囲とも安定で可搬型の装置を開発し、校正手法を確立、依頼試験を立ち上げた。移送を含む仲介器の繰り返し性は 0.005 % 以下であり、目標不確かさを達成できることが確認できた。開発したプロトコルを用いることで一般の校正事業者からユーザに対しても遠隔校正を実施できる見通しが得られた。また、中国企業への校正実証実験の成功や、タイで開催された e-trace セミナーにおける装置のデモンストレーションと技術の紹介などにより、他国の多くの計測標準関係者に当該技術の有用性が認知された。</p>

## -1.2 成果の意義

遠隔校正プロジェクトの最終的な目標は、次世代の戦略的社会インフラとして、環境が激変する製造業に、ものづくり基本である計量標準を、速く、安く、正確に供給することによって国際的な競争力を向上させ、途上国に進出している日本企業にも日本の国家標準にトレースした良質な計量標準を提供ことである。

本プロジェクトの成果の一つである時間周波数においては、GPS 信号を介して、世界中どこでも  $10^{-13}$  レベルの、一次標準と同等の不確かさでトレーサビリティの保証された標準供給を受けることが可能となった。また、圧力においては、海外の日系企業の校正室に、仲介器とインターネット通信を介して、標準が供給できることを実証するなどの成果が得られ、標準供給の新しい市場拡大に繋げることが出来た。

計量標準供給方法は、従来手法では「持ち込み校正」か「出張（現地）校正」に限られており、通信技術や情報処理技術を援用した「遠隔校正」という概念は計量法にも試験所認定国際規格 ISO/IEC17025 にも盛り込まれていなかった。この様な状況を打開し、計量標準に関する新しいパラダイムを創造したこれらの成果は、世界初であり、一次標準をそのままトランスファする時間周波数や長さ標準などは、世界最高レベルの不確かさを確保している。仲介器を用いる実用的な標準に関しても、計量標準として、世界的な規制等に対応するに十分な精度を維持しており、遠隔校正により、トレーサビリティの証明を与えることが出来れば、世界的な規模で適用されてゆくものと期待できる。

遠隔校正技術の成果により期待される新たな技術領域として、現場レベルの測定機器の、使用環境における測定結果の確かさの保証である。従来の校正は、測定器物を温度管理のされた校正室に持ち込み、一定環境中で校正されている。しかしながら、近年の品質管理の要求事項では、例えば、ISO10012 に見られるように、製造現場で用いられた測定装置の管理が求められており、また、製造物責任の観点からも、生産現場における測定の確かさが必要となる。このためには、測定機器が使用されている「現場」における校正を実施することが理想的であり、遠隔校正技術は、まさにこのために最適な校正技術と言える。ただし、そのためには、現場環境で劣化しない標準が必要であり、光ファイバによる長さ標準の伝達法や、サーマルコンバータを用いた交流電圧標準を基本とする現場測定システムなど、今後「現場測定器の校正手法」として花開くことが期待できる、多くの研究成果を生み出したことも、本プロジェクトの成果の意義と考えられる。

これらの計測技術及び校正技術は、広く汎用性があり、今後我が国の産業界に広く拡散してゆくものと期待される。計測そのものについての具体的な効果の算定は難しいが、例えば、トヨタなどでは「測定できない物は作れない」をキーワードとして、「乗り心地の快適さ」を如何に数値データとして求めるかを研究している。即ち、レクサスと大衆車の違いは、素材そのものではなく、ネジやバネの素材から「良いものを集めて丁寧に作る」事によって、「より良い乗り心地」が実現されていることである。そのためには、個々の部品の精密な計測が重要とされている。米国の標準研究所 (NIST) の推計では、工業製品の製造コストの約 10%強が、測定機器などの機材費を含む「計測」に充てられていると

言われており、その計測の結果の信頼性を確保できる遠隔校正技術は、「次世代の戦略的  
社会インフラ整備」として、投資効果に十分見合う成果が上げられたと言える。

本プロジェクトの成果は、全て公開されており、特許や具体的な普及手法に関しては、  
次の節で詳解する。

### -1.3 知的財産権等の取得及び標準化の取組

本事業は知的基盤整備の一環であり社会システムとしての運用を目指すので、一般的な  
技術開発プロジェクトと異なり、必ずしも特許取得件数は多くないが、海外特許 3 件を  
含め、総計 35 件の出願が行われた。本事業における特許取得の考え方は、基本特許は他  
国、あるいは一般企業の特許からの防衛的な意味をもち、個別特許は権利獲得を目指すも  
のである。この考えに沿って特許を出願しており、知的財産権利化の努力をしている。基  
本特許は、特許出願 2003-123782「計量機器の遠隔校正システム、および、計量機器の  
遠隔校正」（出願日 2003 年 4 月 28 日、出願人：独立行政法人産業技術総合研究所、発  
明者：吉田 春雄、松本 弘一、檜野 良穂、新井 優、中沢 正隆）である。本特許は米国に  
おいては登録番号 7130752 として既に権利化されている。表Ⅲ-2 に年度ごとの出願数と  
その具体的内容を表Ⅲ-3 にまとめた。

**表 -2. 特許出願件数の一覧**

年度	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20
出願件数	3	4	3	3	6	2	12	2

**表 -3. 特許一覧**

項 番	国	出願者	出願番号	出願日	状態	名称 (分野)	発明者
参 考	JP	産総研	特願 2000- 303811	2000/10/03	特許 3520327	長さ情報伝送方法 (ゲージ)	松本、平井
1	JP	産総研	特願 2001- 355724	2001/11/21	特許公開 2003- 158306	超伝導配線及びそ の作製方法 (直 流)	東海林、吉 田、山森
2	JP	産総研	特願 2001- 364461	2001/11/29	特許公開 2003- 167097	面状放射線源及び その製法 (放射 能)	檜野
3	JP	産総研	特願 2002- 023513	2002/01/31	登録 3735710	超伝導デジタル/アナ ログコンバータ及びその 処理方法 (直流)	吉田

4	JP	産総研	特願 2002- 147491	2002/05/22	特許公開 2003- 338642	多重積層型ジョセフソン接合（直流）	山森、東海林
5	JP	産総研 サン ジェム	特願 2002- 192726	2002/05/28	特許公開 2003- 344460	熱電型交直比較器（交流）	佐々木、臼田
6	JP	産総研	特願 2002- 240313	2002/08/21	特許公開 2004- 079882	ジョセフソン接合の作成方法及び装置（直流）	東海林、山森
7	JP	産総研	特願 2002- 333100	2002/11/18	登録 3834635	電圧標準装置（直流）	石崎、山森、東海林
8	JP	産総研	特願 2003- 123782	2003/04/28	拒絶査定 不服 2008- 009857	計量機器の遠隔校正システム及び計量機器の遠隔校正方法（共通）	吉田、松本、檜野、新井、中沢
9	JP	産総研	特願 2003- 358832	2003/10/20	登録 3944583	光学密着不要なブロックゲージ校正方法および装置（ゲージ）	平井、松本
10	US	産総研	10/697321	2003/10/31	登録 7130752	計量機器の遠隔校正システム及び計量機器の遠隔校正方法（共通）	吉田、松本、檜野、新井、中沢
11	JP	産総研	特願 2004- 254952	2004/09/01	特許公開 2006- 071439	首振り運動光てこ駆動装置（三次元）	高辻、大澤、矢野、木村、鈴木、板部、筒井
12	JP	産総研	特願 2004- 316047	2004/10/29	特許公開 2006- 128460	メアングライン型ジョセフソン接合アレー（直流）	山森、東海林
13	JP	産総研 トプコン	特願 2004- 379689	2004/12/28	特許公開 2006- 184181	距離測定装置（距離計）	美濃島、松本、飯野、吉野、熊谷

14	JP	産総研 トプコン	特願 2005- 123466	2005/04/21	特許公開 2006- 300753	距離測定装置 (距離計)	美濃島、松 本、飯野、吉 野、熊谷
15	JP	産総研	特願 2005- 168938	2005/06/09	特許公開 2006- 344761	準平面導波路型 ジョセフソン接合 アレー (直流)	山森、東海林
16	JP	産総研	特願 2005- 204551	2005/07/13	特許公開 2007- 024355	高温熱処理炉 (温度)	新井、小倉、 山澤、井土
17	JP	産総研	特願 2005- 222786	2005/08/01	登録 4264751	極低温冷却機の温 度安定化制御方法 及び装置 (直 流)	佐々木、東海 林、山森
18	JP	産総研	特願 2005- 281152	2005/09/28	特許公開 2007- 093323	遠隔校正方法及び 方式 (共通)	吉田
19	JP	産総研 横河電 機	特願 2005- 290869	2005/10/04	特許公開 2007- 101335	発振制御装置及び 同期システム (時間)	今江、鈴山、 藤井、霞 荻田、川上
20	CN	産総研 横河電 機	200610141079 .5	2006/09/29		発振制御装置及び 同期システム (時間)	今江、鈴山、 藤井、霞 荻田、川上
21	US	産総研 横河電 機	11/541634	2006/10/03		発振制御装置及び 同期システム (時間)	今江、鈴山、 藤井、霞 荻田、川上
22	JP	産総研	特願 2007- 154940	2007/06/12	特許公開 2007- 263977	計量機器の遠隔校 正システム、およ び方法 (共通)	吉田、松本、 檜野、新井、 中沢
23	JP	産総研 東京精 密	特願 2007- 157830	2007/06/14	特許公開 2008- 309655	寸法測定装置及び 寸法測定方法 (ゲージ)	松本、平井、 佐々木、荒井 大澤、清水
24	JP	産総研 東京精 密	特願 2007- 157941	2007/06/14	特許公開 2008- 309652	寸法測定装置及び 寸法測定方法 (ゲージ)	松本、平井、 佐々木、荒井 大澤、清水

25	JP	産総研 東京精 密	特願 2007- 157945	2007/06/14	特許公開 2008- 309653	寸法測定装置及び 寸法測定方法 (ゲージ)	松本、平井、 佐々木、荒井 大澤、清水
26	JP	産総研 東京精 密	特願 2007- 157952	2007/06/14	特許公開 2008- 309654	寸法測定システム (ゲージ)	松本、平井、 佐々木、荒井 大澤、清水
27	JP	産総研 東京精 密	特願 2007- 157959	2007/06/14	特許公開 2008- 309655	内径測定装置 (ゲージ)	松本、平井、 佐々木、荒井 大澤、清水
28	JP	産総研 東京精 密	特願 2007- 157858	2007/06/14	特許公開 2008- 309645	内径測定装置 (ゲージ)	松本、平井、 佐々木、荒井 大澤、清水
29	JP	産総研 東京精 密	特願 2007- 157831	2007/06/14	特許公開 2008- 309639	寸法測定装置及び 寸法測定方法 (ゲージ)	松本、平井、 佐々木、荒井 大澤、清水
30	JP	産総研	特願 2007- 214663	2007/08/21	特許公開 2009- 047579	利得位相校正装置 (振動・加速度)	臼田、中村、 大田
31	JP	産総研	特願 2007- 285987	2007/11/02	特許公開 2009- 115486	低コヒーレンス干 渉の合致法による 長さ測定方法 (ゲージ)	松本、平井、 佐々木
32	JP	産総研 東京精 密	特願 2008- 023117	2008/02/01	特許公開 2009- 186191	寸法測定装置及び 寸法測定方法 (ゲージ)	松本、平井、 佐々木、荒井 大澤、清水
33	JP	産総研 東京精 密	特願 2008- 022688	2008/02/01	特許公開 2009- 180712	内径測定装置 (ゲージ)	松本、平井、 佐々木、荒井 大澤、清水
34	JP	産総研	特願 2009- 048863	2009/03/03		距離測定装置 (距離計)	峯岸、大石、 岩
35	JP	産総研	特願 2009- 049016	2009/03/03		距離測定装置 (距離計)	峯岸、大石、 神酒、吉村

上記の特許などの知的所有権取得に努める一方、遠隔校正技術が世界中で運用できるように、国際試験所認定会議（ILAC）に提案し、遠隔校正方式を認証プロセスへ組込ませる活動を実施した。即ち、ILAC に於いて国際相互承認が実現されれば、この方式が世界中で運用されるようになり、例えば、我が国からの遠隔校正により、直接現地の測定機器へ、その国で通用するトレーサビリティ証明を与えることが可能となる。このため、ISO/IEC17025 に規定されている支援要員など、遠隔校正を実施するにあたり、実際の運用に必要な品質システムの加筆・修正が必要箇所の精査を、校正事業者を認定する NITE と協力して実施した。その結果は、ISO でこの規格を審議する ISO/CASCO に報告され、次回の見直しにおいて、検討されることとなった。一方、2005 年以降、認証機関の委員会である APLAC, ILAC に積極的に働きかけ、2006 年 11 月のメキシコ総会で、遠隔校正方式の認証に関する提案が正式審議事項として採択された。現在、継続審議となっているため、承認に向けて国際シンポジウム、セミナー、ワークショップなどのあらゆる機会をとらえて、広報活動を実施している。特に、2007 年 11 月の国際度量衡総会に併せて開催された、国家計量機関（NMI）長会議において、遠隔校正の成果である圧力校正の実演ビデオ紹介を行い、好評を得た。

一方、国内的には、ASNITE-NMI, ASNITE-CAL 遠隔校正一般要求事項をとりまとめ、JCSS 等技術委員会で承認され、時間周波数や放射能標準などにおいて、一次標準(jcss)を遠隔校正手法により供給が開始されている。

この様に、遠隔校正は、校正に関する標準的な手法の一つとして、確固たる地位を確立しており、さらに、それぞれの量目ごとに特長あるプロトコル（校正手順）などに関しても、例えば、放射能では、国際度量衡諮問委員会の席で、放射能遠隔校正の実際を紹介し、各国の計量機関の同意を得るなどの活動を実施してきた。

#### **-1.4 成果の普及**

研究の結果得られた成果は、主として学会やシンポジウム、セミナーなどの学術的な会合で報告されている。これらの学会発表件数を表Ⅲ-4 に、プレス発表を表Ⅲ-5 にまとめた。また、15 年度の間評価において、ユーザの要望を取り入れつつ、研究推進を行う必要が指摘されたことから、16 年度には成果発表会を東京で開催し、その後は、各テーマ担当責任者が、横断的な連絡を取る実施者会議に併せて、見学会を年に 3 回程度実施し、関係者以外にも進捗状況の紹介を行ってきた。具体的な報告会・見学会・成果普及セミナーの実績を表Ⅲ-6 に示した。また、本プロジェクトに関連して主催した、国際シンポジウム、セミナー、ワークショップの一覧を表Ⅲ-7 に示した。この他、多くの展示会などにも、成果普及として、時間周波数標準や頑健な仲介器などの実演・展示を行っており、これらの実績を表Ⅲ-8 に示す。

さらに、成果普及の一環として、遠隔校正の実証試験を、産総研と多くの校正機関との間で実施しており、その結果が、JCSS 校正などの開始に大いに寄与している。表Ⅲ-9 に実証試験の記録をまとめた。

これらの表に示された通り、本プロジェクトを通じて、多くの発信がなされており、また、ユーザに着実に届くよう、且つ、広く海外も含めた一般の人々にも、この遠隔校正技術が周知されるよう、広報活動を行ってきた。

**表 -4. 学会口頭発表および論文の発表件数**

発表種別	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20
論文（査読あり）	4	6	11	3	16	2	3	7
論文（査読なし）	6	9	13	6	5	9	4	8
学会口頭発表	17	34	45	36	35	33	38	32

**表 -5. プレス発表**

テーマ	日時	内容	掲載新聞社
全体	H15/01/17	オンラインで遠隔校正	日本経済新聞
全体	H17/06/17	計測器の遠隔校正（法整備・安全確保が課題）	日経産業
時間	H17/04/27	日本国外からの時間周波数国家標準の遠隔校正実験に初めて成功	日刊工業、電気新聞、電波新聞、計量新報
光ファイバ	H15/03/20	光の干渉現象を利用（産総研が遠隔校正技術）	日刊工業、日本工業、科学新聞
光ファイバ	H17/02/03	長さ標準器を遠隔校正（光ファイバ通信使用）	日刊工業、日経産業、常陽新聞、計量新報
直流	H14/06/06	窒化ニオブ・ジョセフソン素子で世界初1ボルト高精度電圧	日本工業、半導体産業、日刊工業、日経産業 化学工業日報
直流	H20/01/29	企業現場で使える国家標準レベルの標準電圧発生装置を開発	フジサンケイビジネスアイ、日刊工業、日経産業
放射能	H16/07/23	放射能測定装置の校正（ネット使い遠隔操作）	日刊工業、日経産業、科学新聞、計量新報、 化学工業日報
放射能	H16/11/08	放射線源紙に印刷	日刊工業、科学新聞
圧力	H19/11/1	圧力（気体差圧）の遠隔校正に日本で初めて成功	日刊工業、フジサンケイビジネスアイ 化学工業日報、電気新聞、計量新報

表Ⅲ-6. 報告会・見学会・成果普及セミナー

年度	項目	開催日	テーマ	講師	参加者数
16年度	成果発表会	2004/5/28	各テーマの概要報告と ポスターセッション		106
	見学会	2004/7/29	テーマ別見学会		44
	第1回	2005/2/16	長さ標準 三次元測定機標準	平野、石川 高辻	14
	第2回	2005/3/18	電気標準 直流 交流	東海林 佐々木	16
17年度	第3回	2005/6/24	放射能標準	佐藤(泰)	11
	第4回	2005/7/13	時間周波数標準	今江	14
	第5回	2005/9/30	フェムト秒長さ標準	美濃島、松本	16
18年度	第6回	2006/11/8	インピーダンス標準	中村	20
	第7回	2007/1/25	振動加速度	臼田	21
19年度	第8回	2007/11/14	光ファイバ応用 (ブロックゲージ)	平井	33
	第9回	2008/2/1	力学(圧力)標準	小島	21
20年度	第10回	2008/8/27	時間標準	鈴木、藤井	33
			長さ(距離計)標準	美濃島	31
	第11回	2008/10/22	三次元測定機	佐藤(理)	20
			インピーダンス	中村	
第12回	2008/12/15	光ファイバ応用	平井	11	
		放射能標準	佐藤(泰)		
第13回	2009/2/4	振動加速度	臼田	26	
		圧力標準	小島		

表Ⅲ-7. 主催した国際シンポジウム、セミナー、ワークショップ

名称	日時	場所	内容
NMIJ-BIPM workshop	H17/5/16,18-20	つくば	参加国：22 参加人数：147名 口頭発表：39件 ポスター発表：28件 サテライトワークショップ：11件

ASEAN seminar & workshop	H17/11/30-12/2	バンコック	セミナー 参加人数：183名 ワークショップ（技術研修） 電気標準(AC/DC) 7カ国 7名 時間・周波数 5カ国 5名
INTERMEASURE 2008 第22回 NMIJ セミナー	H20/04/25	東京	—
e-trace workshop and seminar in Bangkok	H20/8/6-8	バンコック	セミナー 参加人数：41名 ワークショップ（技術研修） 圧力、振動加速度、 時間・周波数

**表 -8 . 展示会等への出展**

名称	会期	場所	出展内容
光ナノテクフェア 2005	2005/06/08～10	パシフィコ横浜	光ファイバを用いた実用長さ標準器の遠隔校正、レーザトラッカ
光ナノテクフェア 2006	2006/06/07～09	パシフィコ横浜	光ファイバを利用した長さ標準の遠隔校正
彩の国ビジネスアリーナ 2006	2006/02/09～10	さいたまスーパーアリーナ	真空セルを用いた空気屈折率の遠隔測定
光ナノテクフェア 2007	2007/06/06～08	パシフィコ横浜	レーザトラッカ
第48回西日本総合機械財団法人 西日本産業貿易コンベンション協会	2008/06/26～28	西日本総合展示場 新館（北九州市小倉北区浅野3丁目8番1号）	周波数遠隔校正用端末装置 インピーダンス遠隔校正装置 交流直流変換標準器
2008年国際航空宇宙展（ジャパンエアロスペース 2008/JA2008）	2008/10/01～05	パシフィコ横浜 展示ホール/A ネックスホール 及び周辺施設	周波数遠隔校正用端末装置
計測標準フォーラム第6回合同講演会	2008/11/21	大田区産業プラザ	遠隔校正の現状と今後の展望（桧野）、デジタル圧力計のための遠隔校正技術の開発（小島）、振動計測の遠隔校正技術（臼田）

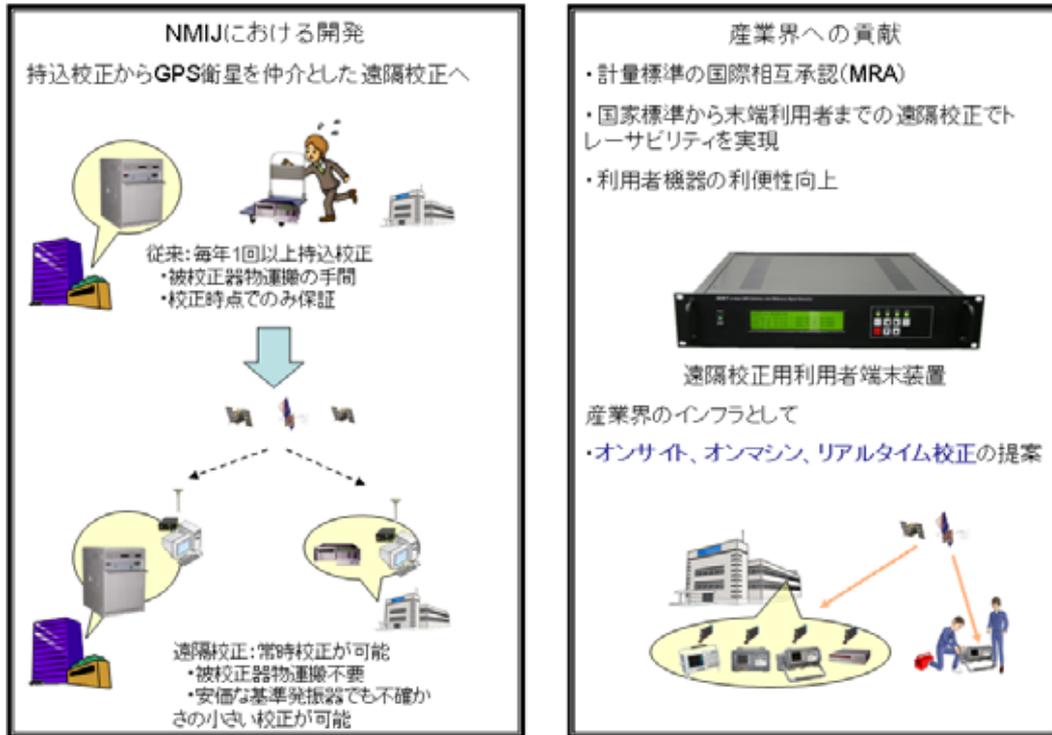
表 -9 . 実証実験

テーマ	実証実験	遠隔校正証明書発行
1. 時間・周波数標準	<p>産総研- 大阪、沖縄</p> <p>産総研- 横河電機（上海、蘇州）</p> <p>産総研- 札幌、仙台、大阪、鳥栖、沖縄、バン コック(GPS-DO 使用)</p> <p>新規開発利用者端末装置の実証・モニタ実験を 周波数クラブ会員 8 機関で実施</p> <p>新規開発利用者端末装置を上記国内 5 箇所に設 置して長期性能評価を実施</p> <p>新規開発利用者端末装置・サーバソフトをタイ (NIMT) に設置して長期実証実験実施</p>	<p>jcass : 8 件</p> <p>依頼試験 : 4 件 (内 2 件 ASNITE-CAL)</p> <p>1 件あたり、年間 12 回校正証明書発 行</p>
2. 長さ標準 ・ 波長 (産総研)  (東北大) (産総研)	<p>土浦市・柏市 (約 47 km) 遠隔校正実験</p> <p>産総研・土浦 (往復 40 km) で光コム伝送実験 室内 450 km 光コム伝送実験</p> <p>韓国標準研 (大田市) 280 m 基線で屋外実験、 及び国際比較。</p> <p>長距離屋外用、及び、近距離精密用プロトタイ プ機製作。</p>	
・ ヨウ素安定化 He- Ne	<p>企業との間で実証実験、製品化</p>	
・ 光ファイバ応用	<p>産総研- 土浦(20 km)、依頼試験開始</p> <p>車載標準干渉計により、企業の工場内工作機械 の in-situ 遠隔校正</p>	
3. 電気標準 ・ 直流(PJVS)  ・ 交流(AC/DC)	<p>冷凍器動作の 1 V PJVS プロタイプ 製作、精 密評価中。→最終的に、10 V PJVS が完成。プ ロジェクト終了後、産総研-KIM-LIPI (イン ドネシア)。</p> <p>産総研- NMA (オーストラリア)、PTB (ドイ ツ)、NIMT (タイ)</p>	

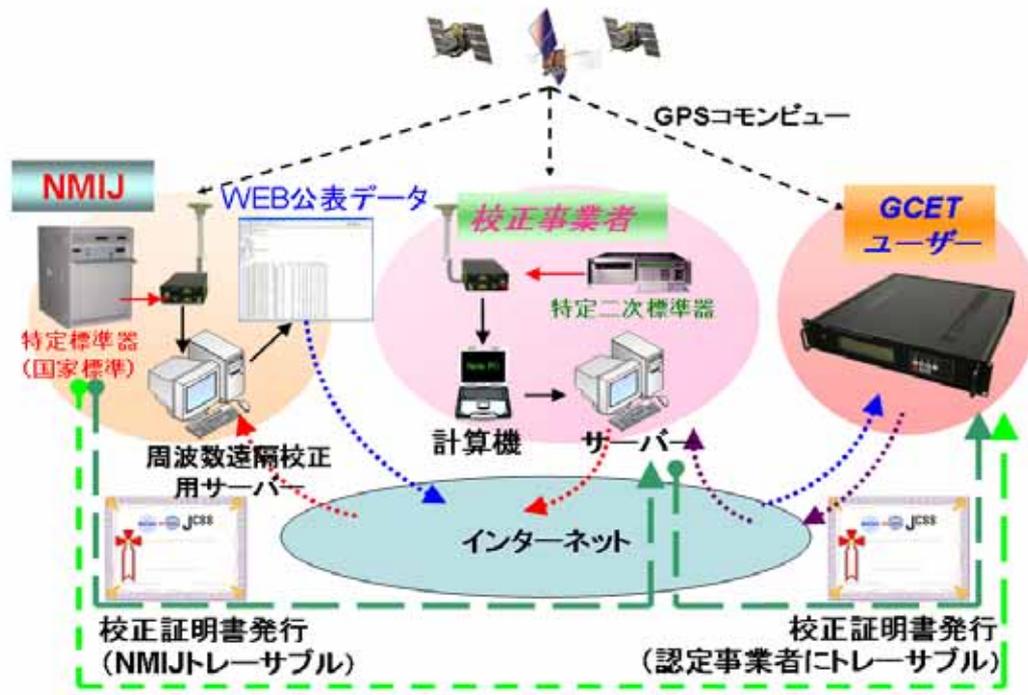
<ul style="list-style-type: none"> <li>・インダクタンス</li> <li>・インピーダンス</li> </ul>	産総研-日本電気計器検定所（東京） 産総研-長野県工業技術総合センター（岡谷） 産総研-村田製作所（野洲） 日本電気計器検定所-長野県工業技術総合センター	
4. 放射能標準	産総研- 日本アイソトープ協会、仁科記念サイクロトロンセンター、放射線医学総合研究所、日本原子力研究開発機構、韓国標準研究所（KRISS）	依頼試験：5件 （+jcss3 件を 4 月発行）
5. 三次元測定機標準	産総研- 浅沼技研、異機種接続	依頼試験：2 件
6. 温度標準	産総研- JEMIC、抵抗温度計・熱電対	
7. 力学(圧力)標準	気体差圧の実証実験： 産総研・横河電機（甲府） 産総研・重慶横河川儀（重慶） 横河電機・横河レンタ・リース（相模原） （階層化の実証実験） 液体圧力の実証実験： 産総研・長野計器（上田） 長野計器（上田）・ナガノ計装（上田） （階層化の実証実験） 各実験において支援要員教育実施 気体差圧，液体圧力の依頼試験開始	
8. 振動・加速度標準	産総研 - タイ：振動校正装置	

- 2 . 個別テーマの毎の成果

-2.1 時間標準



時間（周波数）標準のパラダイム



時間（周波数）標準の遠隔校正体系

## (1) 研究開発の概要

時間（周波数）の遠隔校正の遠隔校正は、図 2.1-1 に記すような GPS 衛星の信号を用いたコモンビュー方式により上位標準と被校正器物間の比較を行い、その変化量を経過時間で除することにより、周波数偏差を求める。

コモンビュー方式の基本原理は、1980 年代初めに提唱され、その後、国際原子時 (TAI) や 協定世界時 (UTC) 構築のために各国の国家計量標準研究機関間の国際時刻比較で長期に渡って主力で用いられて来た方式であり、実績のある方式である<sup>(1)(2)</sup>。

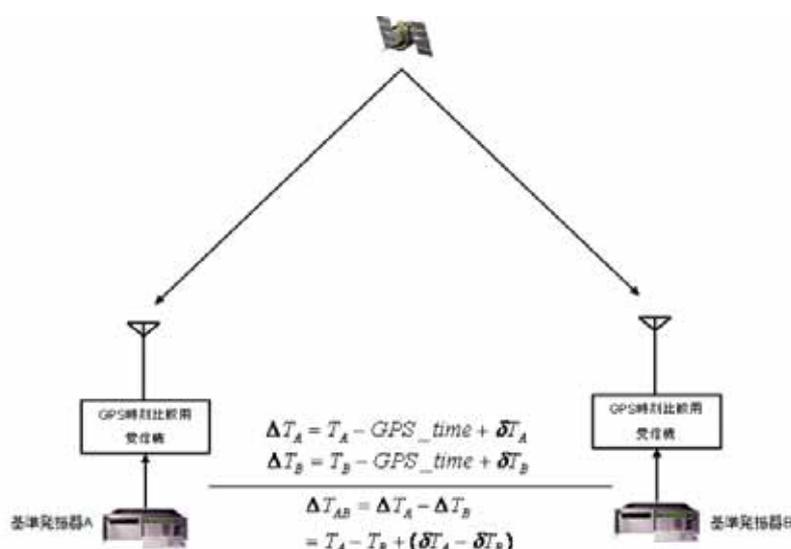


図 2.1-1 GPS コモンビュー法の原理図

## (2) 中間目標

### (a) 15 年度中間目標

GPS を介して産総研の標準原子時計と遠隔地の標準原子時計との間において、不確かさ 10 ns 以内の比較を行う。

### (b) 17 年度中間目標

国家標準による二次標準器の遠隔時間校正をこのプロジェクトで開発されたシステムを使って、測定時間 1 日に対し  $10^{-12}$  以下の不確かさで達成する。

## (3) 最終目標

産総研から最終利用者にいたるトレーサビリティのとれた周波数遠隔校正システムとして GPS コモンビュー法 により日本全国に対して 1 日平均で  $10^{-13}$  台の不確かさで、汎用性の高く（ユビキタスな）、現状装置に比べ、40 %以上低廉化した周波数遠隔校正システムの実現を目指す。また、当該技術の国際的な普及を図る。

#### (4) 本研究内容の構成

##### (a) 周波数遠隔校正用利用者端末装置の開発

周波数遠隔校正の普及に向けて、低廉化した一体化利用者端末装置を開発し、商用化した。本体価格は、90 ～ 100 万円で従来の Rb 発振器、GPS 受信機、制御用 PC の合計価格（200 万円前後）に比し、50 %以下に低減することができた。

##### (b) 周波数遠隔校正用統合ソフトウェアの開発

校正事業者などが円滑に周波数遠隔校正事業に参画できるよう、遠隔校正サーバ計算機用統合ソフトウェアを開発した。

##### (c) 超小型利用者端末装置検討

エンドユーザのすそ野を広げ、周波数遠隔校正の利便性向上に寄与するため、端末装置の小型化、低廉化に向けた検討等を実施した。

##### (d) 高精度化のための基礎研究

GPS コモンビュー方式を用いた周波数遠隔校正のより高精度化に向け、2 周波受信並びに搬送波位相を用いて飛躍的に遠隔校正の不確かさを低減することを目指した基礎実験並びに遠隔校正の高精度化に関する検討を実施した。

##### (e) GPS-DO 受信実験

第 1 期に引き続き、国内 5 箇所において GPS-DO 装置を連続運用させ、その受信精度評価を継続して実施した。さらに、(a)で記した利用者端末装置を各所などで併用してデータ取得することにより、開発した装置の優位性の基礎データを取得した。

##### (f) 実サービス（依頼試験、jcss/JCSS 化）と内外への普及活動

産総研から校正事業者等に対して依頼試験並びに jcss 校正で開始し、平成 21 年度実績で合計 12 件の遠隔校正を実施している。また、JCSS 認定を取得した校正事業者も平成 20 年度末現在で 2 社登録されている。これらの事業者のシステム構築に際して、技術支援を実施すると共に(b)項で記したソフトウェアが採用されている。

また、国内の展示会への出展、タイにおける e-trace セミナー／ワークショップや産総研計測クラブ傘下の周波数クラブにおける会合や時間周波数セミナーなどを通して e-trace の普及に務めた。

##### (g) 他の標準との連携

長さ（距離計）の e-trace 開発と協力して距離計へのトレーサブルな基準信号の提供などを実証実験の実施並びに距離計開発担当メーカなどと意見交換を実施した。

##### (f) その他の活動

- その他の活動として、本プロジェクトとは別枠の予算であるが、
- ・屋内での GPS 利用の安定運用に向けた GPS 衛星信号の再放射システムの開発（中対費）
  - ・タイにおける周波数遠隔校正の普及（産総研内国際部門経費利用）
  - ・ASEAN 地域に対するセミナー（JICA 経費利用）によるタイ並びに周辺 ASEAN 地域の NMI の担当者に対する教育訓練

などを実施した。

## (5) これまでの成果

### (5-1) H17 までの研究成果のまとめ

#### (a) GPS 時刻比較受信機を用いた産総研 - 校正事業者間周波数遠隔校正システムの開発

平成 17 年度までの第 1 期においては、市販の国産 GPS 時刻比較用受信機をベースとして、産総研側受信システム並びに顧客から伝送されるデータ受信・蓄積系、データ処理系等の開発を実施した。図 2.1-2 は、市販 Rb 発振器を被校正器物とした校正事業者などにおける遠隔校正システムの一例を示す（当該システムの導入価格は、Rb 発振器込みで約 200 万円程度）。

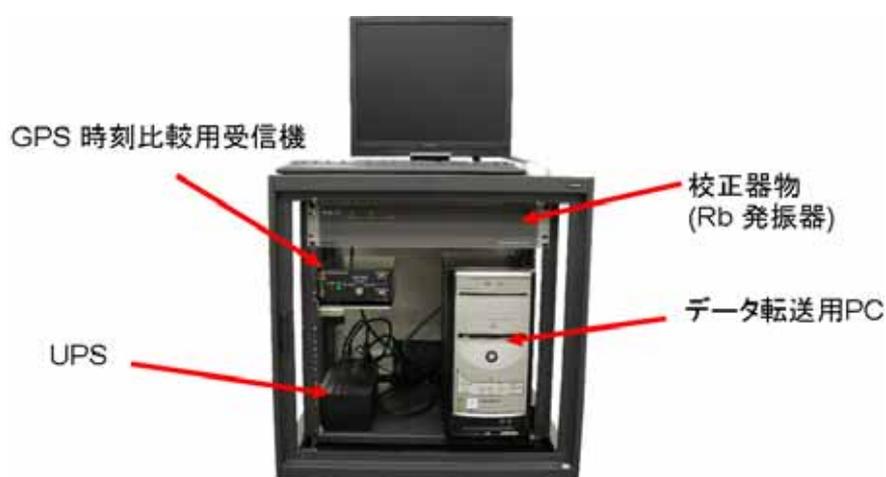


図 2.1-2 校正事業者用周波数遠隔校正システムの一例

#### (b) (a)のシステムを用いた周波数遠隔校正国内外実証実験の実施

国内共同研究企業や沖縄県工業技術センターの協力の下、前項で記した顧客用遠隔校正システムなどを用いて、国内実証実験した。更に、中国に進出している国内企業との連携して中国（上海、蘇州）での国際実証実験を実施した。

これらの実証実験により、遠隔校正の不確かさの実証、顧客側データ伝送に係る課題などの基礎データの収集を行うことができた。

#### (c) 周波数遠隔校正の不確かさバジェットのガイドライン作成

(b)項での実測データや GPS コモンビュー法における不確かさ要因の精査を行い、表 2.1-1 に示すような周波数遠隔校正不確かさバジェットリストを作成した。

当該不確かさバジェットは、産総研の依頼試験並びに jcss 校正での周波数遠隔校正サービスの不確かさ算定の基準として用いている。また、同不確かさバジェットシートは、NITE 発行の“JCSS 不確かさの見積もりに関するガイドー時間・周波数測定器等ー”の遠

隔校正の不確かさのガイドラインとして採用されている。

クライアント側のGPS受信機	産総研とクライアント間距離	不確かさの要因											合成標準不確かさ (電離層遅延は太陽活動極大期で評価)	拡張不確かさ $k=2$
		UTCの不確かさ	平均化時間1日におけるUTC(DM1)の不確かさ	電離層遅延			大気遅延	軌道誤差	搭載時計誤差	受信機位置誤差	受信機雑音	マルチパス		
				太陽活動極大期	太陽活動中長期	太陽活動極小期								
AOA型 TTR-6 [最大観測数 48観測/日]	つくば-東京 [~50 km]	2.00E-15	< 3.10E-14	< 5.00E-14	< 2.31E-14	< 1.00E-14	< 2.31E-14	< 4.25E-16	0	< 3.00E-14	3.00E-14	< 3.00E-14	< 8.19E-14	1.64E-13
	つくば-大阪 [~500 km]	2.00E-15	< 3.10E-14	< 1.00E-13	< 5.79E-14	< 2.50E-14	< 2.31E-14	< 4.25E-15	0	< 3.00E-14	3.00E-14	< 3.00E-14	< 1.19E-13	2.38E-13
	つくば-沖縄 [~1,600 km]	2.00E-15	< 3.10E-14	< 4.60E-13	< 2.31E-13	< 1.00E-13	< 2.31E-14	< 1.57E-14	0	< 3.00E-14	3.00E-14	< 3.00E-14	< 4.65E-13	9.30E-13
JRC型MCR-40A [最大観測数 900観測/日]	つくば-東京 [~50 km]	2.00E-15	< 3.10E-14	< 2.50E-14	< 1.16E-14	< 5.00E-15	< 7.72E-15	< 1.42E-16	0	< 1.00E-14	1.00E-14	< 3.00E-14	< 5.24E-14	1.05E-13
	つくば-大阪 [~500 km]	2.00E-15	< 3.10E-14	< 5.00E-14	< 2.89E-14	< 1.20E-14	< 7.72E-15	< 1.42E-15	0	< 1.00E-14	1.00E-14	< 3.00E-14	< 6.80E-14	1.36E-13
	つくば-沖縄 [~1,600 km]	2.00E-15	< 3.10E-14	< 2.40E-13	< 1.16E-13	< 5.00E-14	< 7.72E-15	< 4.53E-15	0	< 1.00E-14	1.00E-14	< 3.00E-14	< 2.44E-13	4.89E-13

(d) 産総研より依頼試験で遠隔校正サービスの開始

国内外実証実験や不確かさバジェットリストの作成に基づき、平成 17 年初めより産総研から「依頼試験」で周波数遠隔校正サービスを開始した。表 2.1-2 はその不確かさの例である。GPS コモンビュー法の特徴として、2 地点間の距離（基線長）に依存した不確かさとしている。

表 2.1-2 産総研の周波数遠隔校正不確かさ認定値（マルチチャネル受信機の場合）

基線長	CMC(k=2) 平均化時間 1 日
50 km	$1.1 \times 10^{-13}$
500 km	$1.4 \times 10^{-13}$
1600 km	$4.9 \times 10^{-13}$

この依頼試験での周波数遠隔校正の実績などから、平成 18 年 2 月に海外の専門家による Peer review を含む AS-NITE 認定審査が実施され、同年 5 月に AS-NITE 認定を取得している。

(e) その他高精度化や GPS-DO の基礎データ取得に向けた研究開発、データ取得ネットワークの構築

将来の時間周波数遠隔校正のより高精度化を目標として、電離層遅延の影響を多周波で同時受信することにより実測値で補正することや、さらに GPS 衛星からの信号の搬送波位相を用いて飛躍的に不確かさを低減することを目指した基礎実験を実施した。

一方、利用者装置のより簡便化のための基礎データ取得のため、国内数カ所（北海道（札幌）、東北（仙台）、関西（大阪）、九州（鳥栖）、沖縄）に GPS 従属発振器 (GPS-DO) を設置して長期受信評価実験を継続的に行っている。

## (5-2) H18-H20 の成果

### (a) 周波数遠隔校正用利用者端末装置の開発

本プロジェクト第 2 期の主要課題である遠隔校正の普及を図るため、利便性の高い利用者端末装置の開発を主に平成 18-19 年度の 2 ヶ年で実施した。

本利用者端末装置の基本的設計概念を表 2.1-1 に記す。

表 2.1-3 利用者端末装置基本設計概念

	内 容
(1) 操作の容易性	目標としては、電源ケーブル、アンテナを接続、LAN 接続を行い、初期設定後は、電源 on だけで NMIJ トレーサブルな基準信号がえられる。
(2) 低廉化	取得データを NMIJ または校正事業者へ送付することにより、トレーサビリティのとれた校正証明書を発行
(3) UTC(NMIJ) (産総研の周波数国家標準) に同期	NMIJ の GPS 受信データ公表サイトを自動的に参照し、自身の受信結果とコモンビュー演算を行い、UTC(NMIJ) に同期可能。
(4) 校正証明書	取得データを NMIJ または校正事業者へ送付することにより、トレーサビリティのとれた校正証明書を発行

本基本設計概念に基づき開発したスタンドアロンタイプ（校正室や標準室据え置き型）の利用者端末装置（GCET と以下で称する）の主要仕様を表 2.1-4 に記す。本装置の最大の特色の 1 つが表 2.1-3 の(3)項や表 2.1-4 の時間・周波数の同期の項に記されている UTC(NMIJ)（産総研の時間周波数国家標準）への同期機能である。この機能により、本装置は、GPS 衛星を受信して内蔵の Rb 発振器または OCXO と GPS time との時刻差を測定すると同時に産総研の Web site に 1 時間毎に更新される産総研の UTC(NMIJ) と GPS time との時刻差情報を入手することにより、端末装置内でコモンビュー演算を施し、内蔵発振器を UTC(NMIJ) に同期することを可能としている。その結果、同端末装置の出力基準信号が UTC(NMIJ) と同等の周波数を有することを実現している。

図 2.1-3 にその外観（全面、背面、並びに内部）を示す。

表 2.1-4 利用者端末装置の主要仕様

GPS 受信部	受信信号	<u>L1(1574.42 MHz)</u> , C/A code
	同時受信チャンネル数	12 channels
	受信感度	-135 dBm
	位置決め精度	5 m 以内 (受信環境に依存)
	受信データ出力頻度	1 秒毎
入出力信号	入力 (オプション)	(option) 10 MHz
	出力	10 MHz    8 ports
		5 MHz    1 port 1 pps    1 port
時間周波数 比較機能	データフォーマット、受信 スケジュール	<u>CGGTTS</u> format, 国際時刻比較と同一スケ ジュール
	時間・周波数の同期	NMIJ の Web 公表値を用い UTC(NMIJ)へ 同期 ( <u>NMIJ-DO</u> 動作) または、 <u>GPS time</u> に同期 ( <u>GPS DO</u> 動作)
	受信データ転送プロトコル	<u>HTTP protocol</u>
内蔵発振器	ルビジウムタイプ	NMIJ-DO 時 $1 \times 10^{-13}$ @ 1 day (受信環境・設置環境に依存) $3 \times 10^{-11}$ @ 1 s
	OCXO タイプ	NMIJ-DO 時 $5 \times 10^{-12}$ @ 1 day (受信環境・設置環境に依存) $1 \times 10^{-10}$ @ 1 s
通信インターフェース		Ethernet (10/100 BASE-T),RS-232C

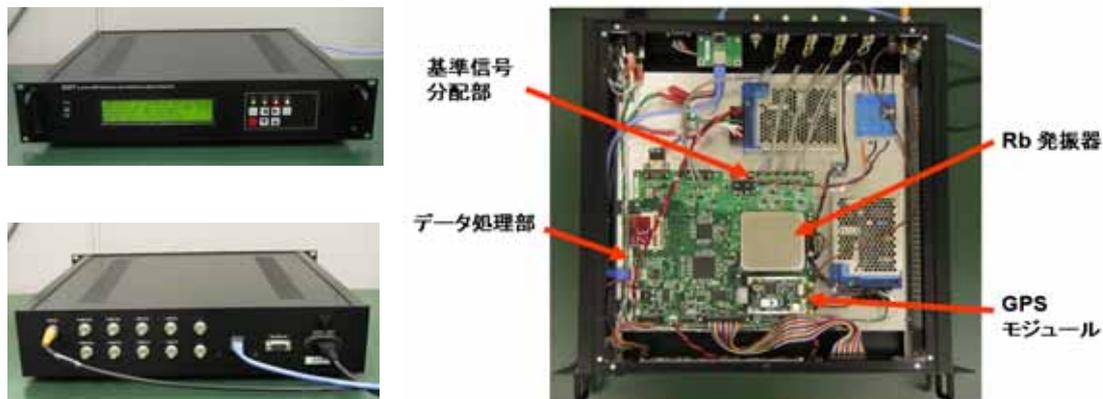
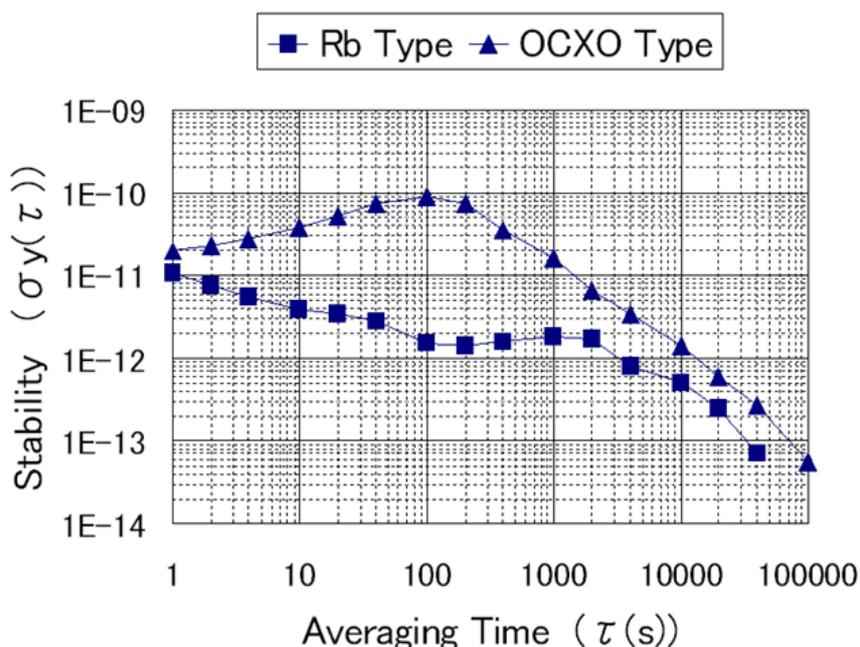


図 2.1-3 開発した利用者端末装置 (GCET) の前面、後面、並びに内部



- つくばにおけるUTC(NMIJ)を基準としたGCETの10 MHz出力信号の周波数安定度
- OCXO Typeは1分毎に制御電圧を調整、Rb Typeは16分毎にUTC(NMIJ)に同期制御

図 2.1-4 GCET の NMIJ-DO 動作時のつくばにおける出力信号の周波数安定度

図 2.1-4 は、Rb 発振器内蔵タイプ並びに OCXO 内蔵タイプの NMIJ-DO 動作時のつくばにおける周波数安定度を示している。Rb 発振器内蔵タイプは、平均化時間 1000 秒前後より、UTC(NMIJ)に位相同期がかかり、1 日平均で  $10^{-14}$  位の周波数安定度に達していることが判る。OCXO 内蔵タイプの場合、自走周波数の変動が Rb 発振器に比べ大きいため、特殊な位相同期法を用いているが、やはり、1 日平均で、 $1 \times 10^{-13}$  程度の周波数安定度に達しており、当初目標の周波数安定度を達成していると考えられる。

### ・モニタ実験の実施

2007年9月より、開発した利用者端末装置試作機を用いて国内8社の協力の下、モニタ実験を実施した。これは、産総研計測クラブの周波数クラブ会員の協力を得て、同装置を実際に使用していただき、性能評価、使い勝手の評価などを行ってもらい、装置の商用化に反映させることを目的として行ったものである。

参加8社とその所在地などは、表2.1-5に記すとおりである。

表 2.1-5 利用者端末装置モニタ実験サイト

		基線長
第1期 (2007/9/17 ~ 11/7)	松下電器産業株式会社 (大阪府門真市)	429 km
	ローデシュワルツジャパン株式会社 (埼玉県さいたま市)	49 km
	マイクロパワー研究所 (東京都文京区)	52 km
第2期 (2007/11/1 ~ 12/3)	(株)アドバンテスト (群馬県邑楽郡)	65 km
	横河電機株式会社 (山梨県甲府市)	151 km
第3期 (2007/12/13 ~ 2008/1 末)	財団法人日本品質保証機構 (東京都世田谷区)	66 km
	丸文株式会社 (東京都江東区)	51 km
	アンリツ計測器カスタマーサービス(株) (神奈川県厚木市)	99 km

モニタ実験の結果は、各所におけるネットワーク環境等との整合性、外部発振器に対する動作などいくつかの要望が出され、その多くは製品版に反映されている。

なお、各所における出力基準信号の周波数安定度などの基本性能は、所期の性能を満たしている。また、産総研との遠隔校正データ処理結果も表2.1-2で記した不確かさよりも小さい結果となっており、性能面で実用に耐え得るものであると考えられる。

### (b) 周波数遠隔校正用統合ソフトウェアの開発

平成19-20年の2ヶ年にわたり、校正事業者が円滑に周波数遠隔校正サービスに参入可能な様に、顧客の遠隔校正用機器からの送付データの収集、蓄積、さらに校正証明書発行のためのコモンビューデータ処理などの一連の処理を統合して行うソフトウェアの開発を実施した。

同ソフトウェアは、産総研の知財登録を経て、商用化の契約が完了している。すでに1社が社内での周波数遠隔校正業務に導入しており、他にも2~3の校正事業者などが導入する方向で検討を進めている。

### (c) 超小型化利用者端末装置検討と技術的見通し

(a)で記した遠隔校正用利用者端末装置は、校正事業者や末端利用者の標準室や校正室などに置いて据え置き型として開発を行ったものである。

今後の方向性として、遠隔校正のより普及に向けて

#### ①利用者端末装置の小型化・低廉化

最新の GPS 高感度受信モジュールを用い、データ処理回路の見直しと BBM による技術的確認を実施した。

その結果、

- ・受信感度： -160 dBm …… 従来比 25～30 dB 改善可能
- ・物理的なサイズ： 130 ×150 mm 程度以内のプリント基板サイズで製作可能 (OCXO 実装時)
- ・低廉化： 従来比で数分の 1 に低廉化の可能性

である見通しを得た。

#### ②電子計測機器などへの組込可能なプラグイン化

- ・①のより小型化を図ることにより実現可能

#### ③データ伝送の汎用化

- ・携帯電話や PHS のパケット通信機能の利用により、利用者のネットワーク環境に依存しない方式の検討を行い、技術的な可能性を確認し、またデータ通信に要する経費について検討を実施した。

を行った。

さらに、(h)項で後述するように、GPS 衛星を利用する際の最大の障害の 1 つである屋内等、GPS 衛星の信号受信が困難な場所での利用をサポートする方策などの開発も別枠で実施した。

### (d) 高精度化のための基礎研究

平成 17 年度までの基礎研究に引き続き、GPS 衛星からの信号の搬送波位相を用いた高精度化への基礎実験を進めている。

平成 18～20 年度では、搬送波位相解析ソフトの自動処理化並びに処理結果を用いて遠隔地に設置した高性能水晶発振器を産総研の時間周波数国家標準である UTC(NMIJ)に高精度に位相同期させることを実現しつつある。

同基礎研究が実用化できると次項(e)で記すような日本の各所にその地域のノード局を設置して、末端利用者は、最寄りのノード局との間のコモンビュー比較を行うことにより、距離に依存する不確かさの劣化を防ぐことが可能となり、一周波利用者端末装置でも日本全国で不確かさの小さい時間周波数遠隔校正を可能とすることができる。

### (e) GPS-DO 受信実験

本 GPS-DO 受信実験も平成 17 年度までの受信実験を図 2.1-5 に記す国内 5 カ所（北海道（札幌）、東北（仙台）、関西（大阪）、九州（鳥栖）、沖縄）で継続して実施し、各所における GPS-DO 受信評価の基礎データ取得を行った。

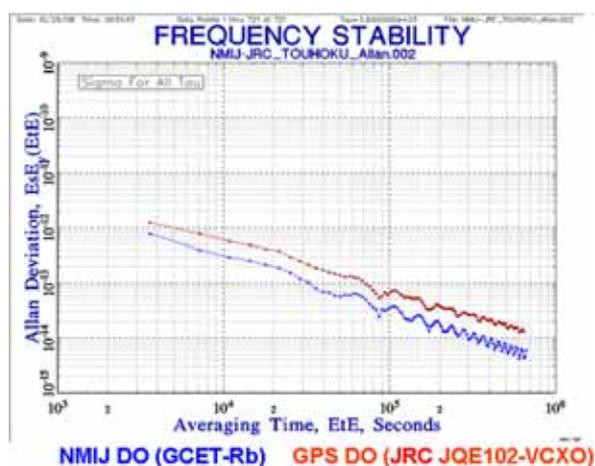
それに加えて、(a)で記した利用者端末装置 GCET を各所に配置して GPS-DO との比

較実証実験を実施した。

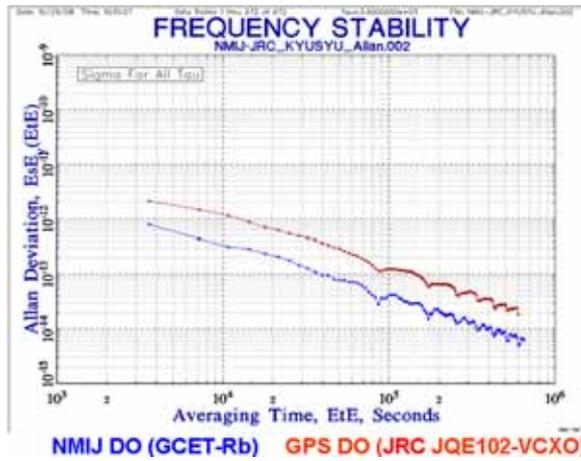
図 2.1-6 に東北（仙台）、九州（鳥栖）、沖縄における GPS-DO と NMIJ-DO 動作時の GCET の産総研の時間周波数国家標準 UTC(NMIJ) とのコモンビュー比較結果の周波数安定度を示す。図から明らかに、GCET の各所における周波数安定度は、GPS-DO に比べ、優れた値を示しており、コモンビュー処理による UTC(NMIJ) への同期の効果が顕著であることが判る。



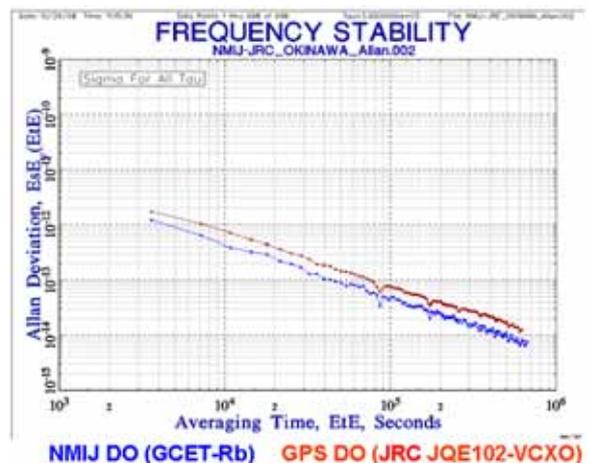
図 2.1-5 GPS-DO 国内受信実験ネットワーク



(a) 東北（仙台）



(b) 九州 (鳥栖)



(c) 沖縄

図 2.1-6 各所における GPS-DO と GCET(NMIJ-DO 動作時)の周波数安定度

#### (f) 実サービス (依頼試験、jcss/JCSS 化) と内外への普及活動

##### 1) 遠隔校正の実サービス

産総研からの遠隔校正の実サービスとしては、既に依頼試験により平成 17 年 2 月から開始し、jcss 校正は、平成 18 年 4 月より実施している。また、現在 CMC 登録申請中であり、Inter RMO の審査中である。

平成 21 年 3 月現在の契約件数は、依頼試験 4 件、jcss 校正 8 件の合計 12 件にのぼっている。

一方、JCSS 校正事業者は、平成 19 年 9 月、平成 20 年 9 月に各 1 社が認定取得を完了しており、さらに、現在申請に向けて遠隔校正システムを準備中の事業者が 2~3 事業者存在する。これらの事業者に対して、技術研修や遠隔校正の導入に関する技術的支援を適宜実施している。

##### 2) 展示会

平成 20 年度に国内の展示会 (西日本総合機械展、AERO-SPACE2008) において開発した周波数遠隔校正用利用者端末装置の普及のため、展示を行い、普及活動に努めた。

##### 3) セミナー、ワークショップ

e-trace 成果普及のため、下記のセミナー、ワークショップに参加した。

- ・ 2008 年 8 月 6 日 タイ (ラマガーデンホテル) で開催された ASEAN seminar と並行して開催された e-trace seminar への参加し、ASEAN 地域の計量標準機関等の参加者へ普及活動を行った。

- ・ 2008 年 8 月 7-8 日 タイ (NIMT) で開催された e-trace ワークショップで、遠隔校正

利用者端末装置などを用いて実際の周波数遠隔校正の実演などを行い、普及活動を実施した。

・2008年8月27日 産総研で開催された e-trace 成果普及セミナー（勉強会）で周波数遠隔校正に関する講演と見学会を行った。参加者からのアンケート結果は比較的好印象の評価を得ている。

・2009年2月10-13日 タイ（タイ科学技術省計量標準機関）で開催されたタイ・アジア太平洋地域 15 カ国に対する計量標準化・短期在外技術研修において時間周波数遠隔校正に関する研修の講師を務め、ASEAN 地域の計量標準機関の担当者へ普及活動を実施した。

・2009年3月12-13日 NMIJ 周波数クラブ並びに光コムクラブ主催の第1回時間周波数セミナー（3月9-13日）において、時間周波数遠隔校正に関する講義並びに機器のデモを実施し、普及に努めた。

#### 4) APMP/TCTF 活動

TCTF 傘下の GNSS に関する作業グループ（Working Group on GNSS）に、2007年の TCTF 会合においてサブ WG を構成し、時間周波数分野における遠隔校正サービスに関する議論を開始した。同サブ WG は、産総研からの TCTF 代表者が取りまとめ役を担い、2007-2008 年度における活動として、TCTF メンバーNMI に対して時間周波数分野の遠隔校正に関する現状のアンケート調査を実施した。同アンケート調査結果を 2008 年 11 月に開催された TCTF 会合に報告すると共に、同サブ WG の 2008-2009 年度の活動計画として、

i) 時間周波数分野の遠隔校正に関するガイドライン素案の作成

ii) トレーサビリティ体系の中で GPS-DO の位置付けに関するガイドライン素案の作成が承認され、同課題にアジア地域の NMI 担当者との意見交換を進めている。

#### (g) 他の標準との協力関係

長さ標準（距離計）の遠隔校正との協力で、トプコン（東京都板橋区）で行われた距離計の遠隔校正実証実験で、周波数遠隔校正用機器を用いた基準信号を提供することにより、トレーサブルな距離測定を実証することができている。

さらに、距離計に(c)項で検討している小型組込型端末装置の組込の可能性などを距離計企業担当者と意見交換を行っている。

#### (h) （参考）その他の活動（利用範囲の拡大に向けた開発(NEDO 委託開発費以外の予算での活動)）

##### 1) GPS 信号の屋内利用

GPS 衛星を用いたシステムの課題の最大のものの 1 つは、屋内で利用するためには GPS 衛星を受信するため受信アンテナを屋外に設置し、その受信信号ケーブルを利用す

る屋内まで敷設する必要があることである。

GPS 受信モジュールなどの受信感度が高感度化されても、高層ビルの低層階や地下などでは、GPS 信号の受信は不可能に近い。さらに自社ビルではない建物の内部で GPS を受信するような場合、新たに GPS 用受信ケーブルを敷設することが困難な場合が非常に多い。

このような環境下での GPS 衛星の利用の 1 つの方向性として、屋外で受信した信号を屋内に導入し、再度屋内に放射アンテナで再放射（リピータ）することが考えられており再放射用の機器が安価で販売されている。

しかしながら単純な再放射システムでは、やはり信号伝送用のケーブルを新たに敷設する必要があり、再放射システムだけでは、根本的な解決にはならない。

そこで、平成 19 年度に中小企業支援事業の 1 課題として、既存の TV フィーダ線を屋外で受信した GPS 信号の伝送に活用するシステムの開発を産総研と共同研究先企業との間で実施し、性能評価を行い、十分実用可能であることを実証した。

図 2.1-7 はその基本構成をしめしたものである。

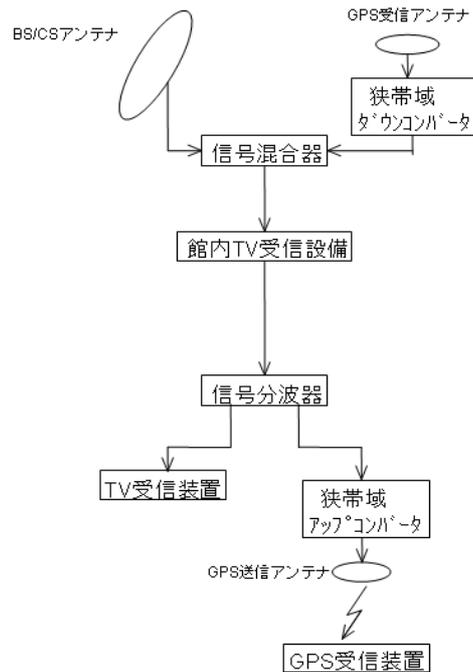


図 2.1-7 TV フィーダ線を用いた GPS 信号再放射システム基本構成

同図に示したとおり、屋外で受信した GPS 衛星の信号は、130 MHz 帯に周波数変換され、BS/CS 等の TV 受信信号と混合され、館内 TV 受信設備を介して屋内の各部屋へ導入される。

GPS 衛星を利用する屋内の各部屋では、TV 受信信号に重畳されて室内に導かれた GPS 信号を分離して再度 1.5 GHz 帯に周波数変換を行い、屋内に小型送信アンテナで再

放射を行う。

これにより、特定の部屋の中で複数の GPS 受信装置に安定に GPS 信号を供給することが可能となる。



図 2.1-8 開発した屋外機器、周波数変換部、並びに屋内実験室内で複数の GPS 受信機器で再放射信号を受信している光景

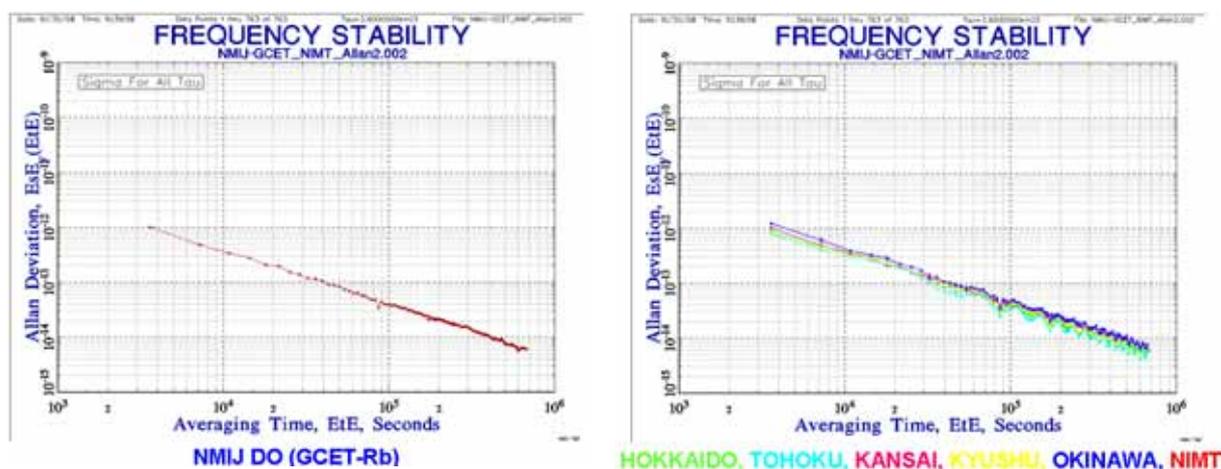
図 2.1-8 に開発したプロトタイプ機器の外観等を示すが、産総研の実験棟で実際に TV フィーダ線を利用して実験室内に信号を再放射して安定に動作することが確認されている。同装置の商用化が協力企業でなされつつあり、GPS を利用した遠隔校正用機器の屋内での安定利用に活用が期待される。

## 2) 産総研内国際共同研究資金、JICA(TICA)経費による ASEAN 地域の普及活動

平成 20 年度より産総研内国際部門のファンドで国際共同研究の枠組みが公募され、産総研計量標準分野では、いくつかの標準分野の連携でタイ (NIMT) との共同研究が採択されている。時間周波数分野では、時間周波数遠隔校正に関して、NIMT との共同研究を提案し、採択課題の 1 分野となっている。

同資金を利用して、平成 20 年度より、NIMT と共同で NIMT から周波数遠隔校正を行うためのシステム構築を進めている。現在、NIMT と共同で、(b)項で記した周波数遠

隔校正用統合ソフトウェアの英語バージョンの開発、NIMT における GCET の受信性能評価実験などを実施した。図 2.1-9(a)は、NIMT において GCET を NMIJ-DO 動作させたときの UTC(NMIJ)とのコモンビュー比較結果の周波数安定度を示したもので、同図 (b)に国内 5 カ所の同様の安定度と同じグラフに記載したものであるが、国内の結果と遜色の無い比較結果が得られている。



(a) NIMT における実証実験結果

(b) 日本国内の 5 カ所との比較

図 2.1-9 NIMT (タイ) 並びに国内 5 カ所の GCET 実証実験結果

## (6) 実用化の見通し

時間（周波数）標準の遠隔校正は、既に jcss/JCSS での供給を開始している。2009 年 3 月現在、産総研からの jcss 並びに依頼試験での供給は、12 件、また JCSS で遠隔校正の認定を取得した事業者が 2 社、AS-NITE 認定取得の事業者が 1 社存在するに至っている。

加えて、第 2 期で開発した利用者端末装置や校正事業者向け遠隔校正用統合ソフトウェアなどにより、既に実用段階にあると考えられる。

また、日本国外においても、中国では我が国のシステムをモデルにした同様のサービスを開始しつつあり、タイを初めとする ASEAN 諸国においても広まりつつある。

利用者端末装置に関しては、第 2 期では、前項(a)で記したルビジウム発振器や OCXO を内蔵した一体型の装置の商用化を実現し、その性能が十分、遠隔校正に応えるものであることが実証できており、既に実用化に至っている。

ただし、開発期間などの制約上、現段階の利用者端末装置は、各事業者の校正室や標準室などで活用する据え置き型の開発に集中して実施した。より末端利用者へ普及するためには、(5-2)(c)項で示したとおり、小型・低廉化した端末装置の開発が効果的である。

そのイメージを図 2.1-10 にいくつかの構想を記す。

これらが構想の具体化により、図 2.1-11 に一例を示すが、オンサイト・リアルタイム校正を実現できると考えている。

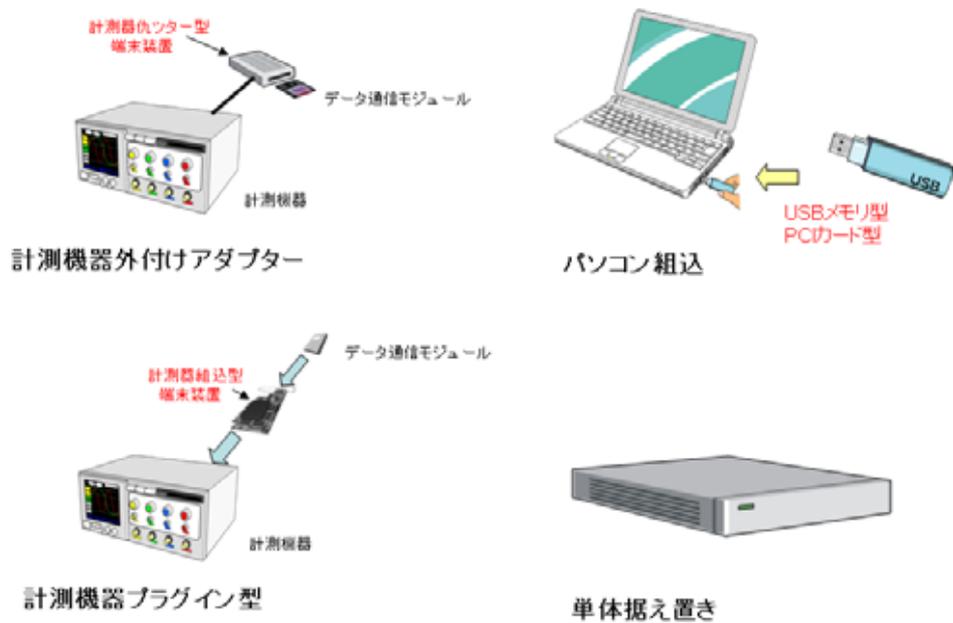


図 2.1-10 小型機器組込型時間周波数遠隔校正用端末装置のイメージ図

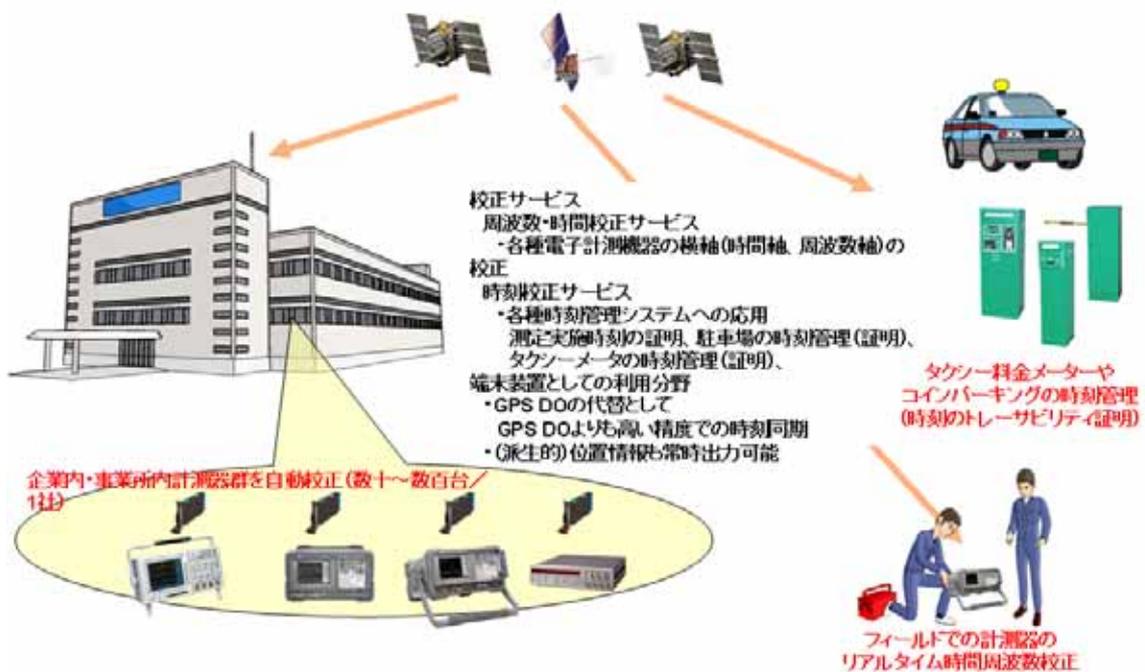


図 2.1-11 オンサイト・リアルタイム時間周波数遠隔校正の応用例

#### (7) 目標の達成状況（基本計画の最終目標に対する達成状況を記載）

上記した通り、最終目標として掲げた「産総研から最終利用者にいたるトレーサビリティのとれた周波数遠隔校正システムとして GPS コモンビュー法により日本全国に対して1日平均で  $10^{-13}$  台の不確かさで、汎用性の高く（ユビキタスな）、現状装置に比べ、40 %以上低廉化した周波数遠隔校正システムの実現を目指す。また、当該技術の国際的な普及を図る。」に関して、十分目標値を達成していると考えられる。

さらに、普及に向けて内外の機関との協力関係を構築しており、国際的に認知度を高めるための努力も進めている。

#### 参考文献

- (1) D.W.Allan, M.A.Weiss, “Accurate Time and Frequency Transfer During Common-View of a GPS Satellite”, 34th Annual Frequency Control Symposium, pp.334-346, May 1980.
- (2) D.W.Allan and C.Thomas, “Technical directives for standardization of GPS time receiver software”, Metrologia, Vol.31, pp.69-79, 1994.
- (3) 日本測地学会編著, 「第 9 章 誤差要因」, 新訂版 GPS・人工衛星による精密測位システム-, 日本測量協会, pp.211-238, 1989.
- (4) Victor S. Zhang, Time and Frequency Transfer Using GPS,” 30th NIST Time and Frequency Meteorology Seminar, June 2005.

#### 外部発表状況

～17FY

##### 特許 1 件

1) 今江理人、藤井靖久、鈴山智也（以上産総研）、霞芳信、荻田英治、川上敏明（以上、横河電機）、特願 2005-290869、平成 17 年 10 月 4 日出願、発振制御装置及び同期システム

18FY

##### 特許 2 件（海外）

- 1) 今江理人、藤井靖久、鈴山智也（以上産総研）、霞芳信、荻田英治、川上敏明（以上、横河電機）、米国、平成 18 年 10 月 3 日出願、発振制御装置及び同期システム
- 2) 今江理人、藤井靖久、鈴山智也（以上産総研）、霞芳信、荻田英治、川上敏明（以上、横河電機）、中国、平成 18 年 10 月 3 日出願、発振制御装置及び同期システム

論文・解説 0件

口頭発表 2件

- 1) Michito Imae, Yasuhisa Fujii, Tomonari Suzuyama, Masaki Amemiya, "DEVELOPMENT OF A FREQUENCY TRACEABILITY SYSTEM USING GPS COMMON-VIEW METHOD FOR GENERAL USERS," ATF2006, New Delhi, December 12, 2006.
- 2) 今江理人、藤井靖久、鈴山智也、雨宮正樹、"GPS衛星仲介周波数遠隔校正用端末装置の開発"、電子情報通信学会2007年総合大会、名城大学（名古屋）、2007年3月21日。

その他の公表 0件

19FY

特許 0件

論文・解説（査読なし） 1件

- 1) 今江理人、"時間（周波数）測定の不確かさ"、はかる no.87、2007.10.15.

口頭発表 3件

- 1) Michito Imae, Yasuhisa Fujii, Tomonari Suzuyama, and Masaki Amemiya, "Development of a Frequency Traceability System using GPS Common-view Method for General Users," PTB-BIPM Workshop on the Impact of Information Technology in Metrology, Berlin, June 7, 2007.
- 2) 今江理人、藤井靖久、鈴山智也、雨宮正樹、"エンドユーザー向け周波数遠隔校正用端末装置の開発"、電気学会電子回路研究会、東京電機大学（東京都）、2007年9月7日。
- 3) 今江理人、藤井靖久、鈴山智也、雨宮正樹、"GPS コモンビュー法による周波数遠隔校正システム"、日本時計学会学術講演会、中央大学理工学部、2007年9月7日。

その他の公表 0件

FY20

特許 0件

論文・解説 0件

口頭発表 2件

- 1) Michito Imae, Yasuhisa Fujii, Tomonari Suzuyama, Masaki Amemiya,

“Time/Frequency Standard,” e-trace seminar in Bangkok, August 6, 2008.

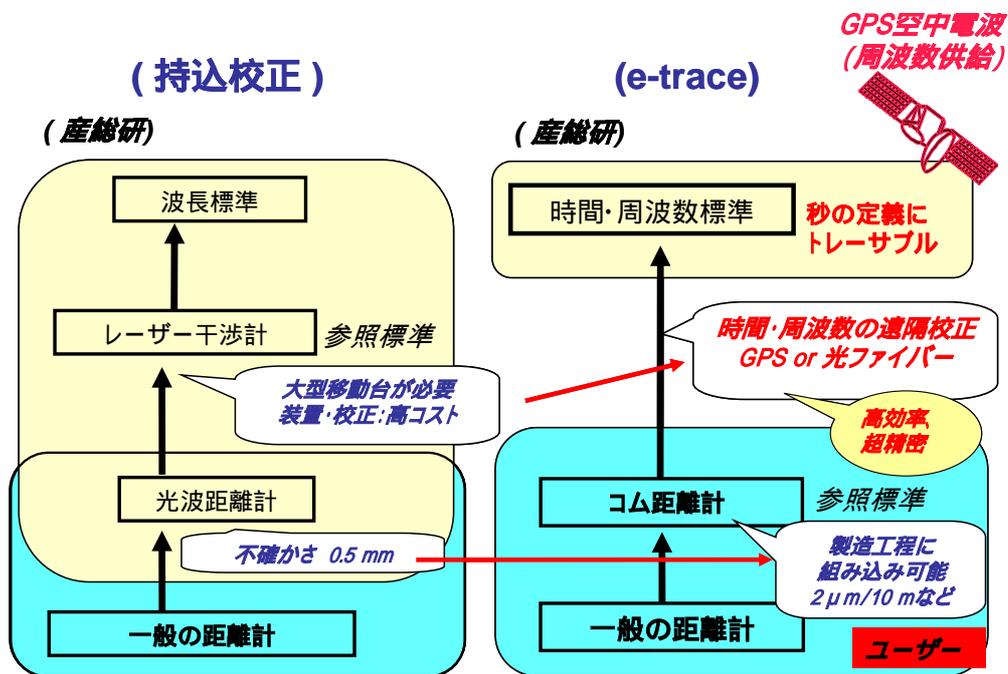
- 2) Tomonari Suzuyama, Michiti Imae, Yasuhisa Fujii, Yusuke Miyamoto, Masaki Amemiya, ”A Frequency traceability system using GPS common-view method for general users,”ATF2008, October 30, 2008.

その他の公表 3件

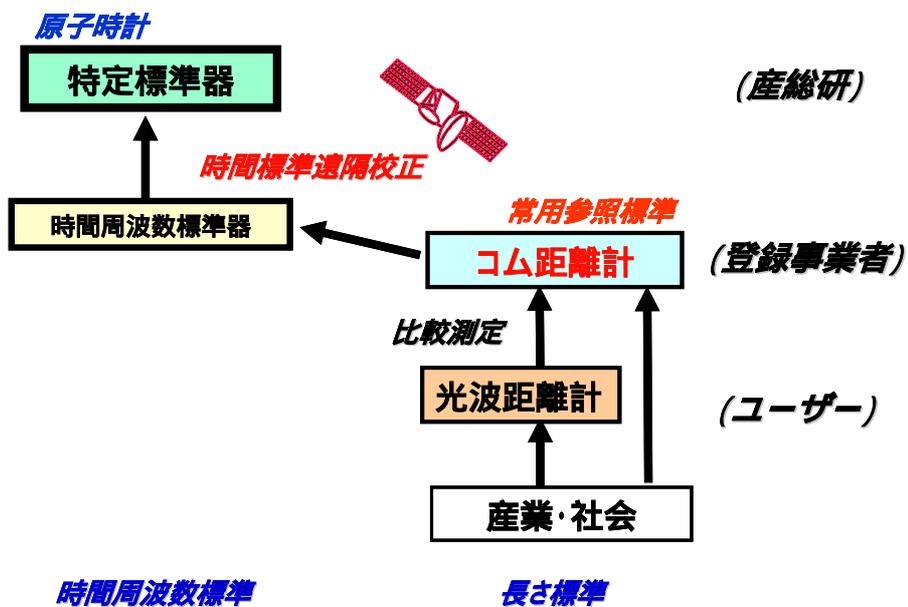
- 1) 西日本総合機械展、小倉（北九州市）、2008年6月26-28日.
- 2) e-trace 成果普及セミナー、産総研（つくば市）、2008年8月27日.
- 3) AEROSPACE2008、横浜市、2008年10月1-4日.

-2.2 長さ標準

-2.2.1 波長（フェムト秒：光波距離計）



長さ標準：波長（フェムト秒：光波距離計）のパラダイム



長さ標準：波長（フェムト秒：光波距離計）の遠隔校正体系

## (1) 研究開発の概要

フェムト秒パルスレーザによる光コムのモード間ビートを利用した距離測定技術において、周波数の遠隔校正に基づいた、国家計量標準にトレーサブルで製造工程に組み込み可能な高精度距離計測技術を開発した。

まず、光源であるフェムト秒パルスレーザの環境安定性を向上させ、周波数の安定性を向上させるとともに、距離測定装置部の環境安定性を高め、屋外測定に対応できる実用的な可搬型装置を開発した。さらに、光ファイバとパルス条件の最適化により、最長 259 m の光ファイバによる光コムの長距離伝送を用いた高精度距離測定を実現した。これらの成果により、韓国標準研において全長 280 m の屋外基線で実施された国際比較に参加し、開発方式の距離計装置を用いて新方式の距離標準の確立に寄与した。

次に、コム距離計自体の持つ誤差要因の高精度評価のために、光コムのビート周波数 40 GHz を用いた距離測定の高分解能化技術を開発した。高速光検出器、固定発振器と帯域制限の緩やかなバンドパスフィルタ、ダブルバランスドミキサを用いた 40 GHz の位相測定系を開発し、距離測定を行った。その結果、距離測定の高分解能化を実現し、空気揺らぎの影響の少ない近距離において標準偏差 0.3  $\mu\text{m}$  の位相安定性と、位相計限界の周期誤差を実現した。また、機械系においても温度変動による変形の小さい材料を用いて環境安定性を向上させ、波面精度を向上させた光学系を構築した。さらに、高精度評価のために、開発した距離計と光波干渉計との一体型評価システムを構築し、両者の波長精度の比較測定を行った結果、1 フリンジ以下の精度で一致し、最終目標達成のために十分な性能が確認された。

以上の要素技術と評価結果を反映させて、実際にプロトタイプ機を開発した。光学ヘッド部と電装部を分けて組み込みやすくすると共に、より安定性の高い分離型距離計を設計・製作した。産総研の光学トンネルにおける現行の距離標準校正システムによる評価を行って測定精度を評価し、光源・位相測定系の改良を行った。その結果、目標の測定距離 10 m において、距離分解能と周期誤差について 2  $\mu\text{m}$  以下を実現し、比例誤差についても 0.1 ppm を実現した。最後に現行の参照標準との比較において、測定距離 10 m までの両者の差は $\pm 2 \mu\text{m}$  となり、不確かさ 2  $\mu\text{m}/10 \text{ m}$  の最終目標が達成された。

## (2) 中間目標

### (a) 15 年度中間目標

該当無し

### (b) 17 年度中間目標（「長さ標準：光ファイバ応用」の項目で実施）

フェムト秒パルスレーザのモード間ビートを利用した距離測定技術を開発し、光ファイバを用いた遠隔校正法によって 0.5 ppm の測定不確かさを達成する。

### (3) 最終目標

製造工程組み込みのためにはより精密に絶対距離を測定することが求められる。その実現のために、フェムト秒パルスレーザーのモード間ビートを利用した距離測定技術を高精度化し、周波数の遠隔校正に基づき、また製造現場等の環境を配慮して、距離を  $2 \mu\text{m}/10 \text{ m}$  の不確かさで測定する。

### (4) 本研究内容の構成

- (a) 環境安定性の向上と国際比較への参加
- (b) 測定周波数の高周波数化による高精度評価
- (c) プロトタイプ機の製作と評価（産総研と再委託先：(株)トプコンとで共同実施）

### (5) これまでの成果

#### (5-1) H17 までの研究成果のまとめ（研究テーマ名「光ファイバ応用」の一部で実施）

平成 16 年度より、フェムト秒モード同期パルスレーザーによる光コムを用いることにより、従来の光波距離計の精度を向上させ、時間周波数標準にトレーサブルで、常用参照標準器として使用可能な、高精度かつ可搬型の光波距離計の開発を開始した。実用機プロトタイプの開発を行い、企業との共同研究により、A4 サイズの可搬型試作機を製作した。

開発した可搬型試作機の光学トンネルにおける評価を行い、位相測定回路のノイズによって制限される安定性と周期誤差を実現した。また、現行の距離計校正において参照標準として使用されている光波干渉計による評価を行った結果、アライメントの最適化条件で、100 - 200 m の長距離領域において目標値である比例誤差 0.5 ppm を実現した。また、干渉計との比較、および 2 台の距離計との比較において、1 週間連続測定を実現した。さらに、長さ 50 m の光ファイバによる光コムの伝送を行い、屋外における測定を行った。GPS による周波数遠隔校正を用いて、時間周波数標準にトレーサブルな距離計遠隔校正法の実証を行った。

#### (5-2) H18-H20 の成果

時間周波数の遠隔校正に基づいた、国家計量標準にトレーサブルで製造工程に組み込み可能な高精度距離計測技術の開発を行った。第 1 期に比べ、産業現場で必要とされるが従来の距離計には困難な領域である、より近・中距離における高精度化を行い、広い分野の産業計測において必要な距離標準技術を開発した。

これらにより、本プロジェクトの時間分野で開発された GPS によって遠隔校正される時間周波数標準（特定二次標準器）を組み立て単位として用いて、常用参照標準器としての距離標準を実現する、新しいトレーサビリティ方式を開発し、広い産業計測分野に適用する技術開発を行った。また、開発する新方式に基づく測定によって、従来方式との間で国際比較を行い、国際ルール形成に資することを目指した。

図 2.2.1-1 に、光コムを用いた高精度で可搬型の距離計の実験概略図を示す。フェムト

秒モード同期パルスレーザからの光コムは、伝送用の光ファイバを通して距離計本体に入力される。ビームの一部は、ビームスプリッタで分けられ、光検出器によって検出されて参照信号として用いられる。ビームの主要な部分はレンズ系でビーム径を広げられた後に測定対象であるコーナリフレクタ、またはプリズムに達し、反射光が再び装置に戻り光検出されてプローブ信号となる。ここで、フェムト秒モード同期レーザからの光コムは光検出されて、モード間ビートを発生する。レーザの繰り返し周波数を  $f_0$  (50 MHz 程度の値を用いている) とすると、その整数倍に相当する周波数成分が楕状に多数発生する。このプローブ信号に含まれる多数の周波数成分の中から、 $f=10$  GHz (50 MHz の 200 次高調波) などの周波数成分を選択し、参照信号との位相差を位相計によって測定し、距離情報を得る。

このとき、光コムのモード間周波数に関して、GPS により遠隔校正された時間・周波数標準に基づき、周波数の制御、または測定を行う。これにより、時間周波数標準にトレサブルな距離測定が実現される。

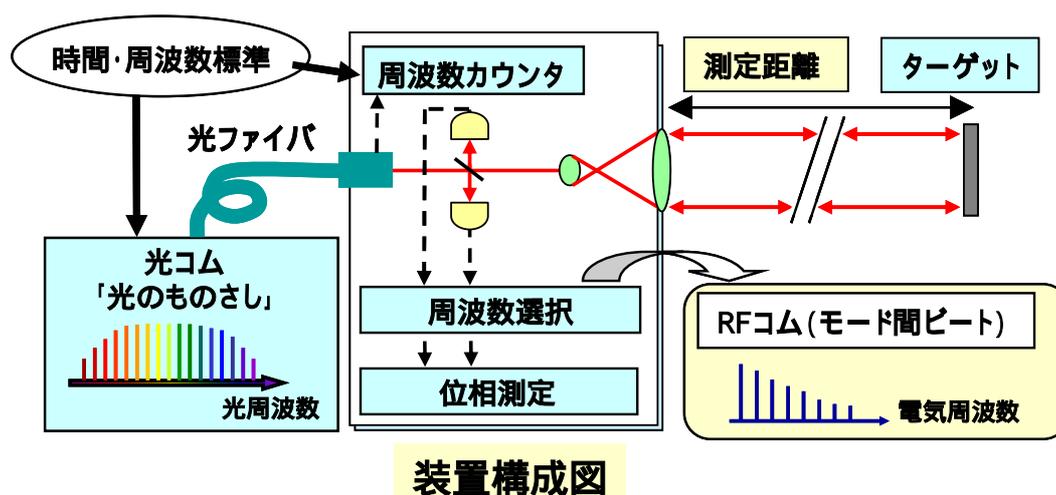


図 2.2.1-1. 光コムを用いた距離計の装置構成図。

#### (a) 環境安定性の向上と国際比較への参加

##### 1) 環境安定性の向上

##### 1-1) 光コムの環境安定性の向上

製造工程に組み込み可能な実用的な距離測定技術の実現には、まず、光コムの環境安定性を高めることが必要である。そのために、まず、フェムト秒パルスレーザのモード同期周波数安定化を行った。開発した装置では、位相測定のために、モード同期周波数を一定範囲 (1 kHz 以内) の値にあわせる必要がある。その上で、距離測定に必要な精度まで制御することが必要である。フェムト秒パルスレーザとしては、安定性に優れた光ファイバ

によって一体化したファイバリングレーザを作成した。さらに温度変化の大きな環境での使用を念頭に入れ、モード同期周波数の制御のために、レーザ共振器の温調、共振器長の粗調と微調の 3 段階の制御を導入した。システム全体の温調により大きな環境変動に対して安定化するとともに、共振器長の可変範囲を 400 kHz に拡大した粗調機構を追加することによって、長時間の環境変動による大きな光路長さ変化に対応させた。これらと独立に、ピエゾ素子による微調によって高精度に位相制御を行った。

## 1-2) 距離計の環境安定性の向上

距離測定装置部の環境安定性を高め、屋外測定に対応できる実用的な装置とするため、これまで開発してきた装置に下記の改良点を加え、新たな設計に基づくプロトタイプ機を製作し、評価を行った(図 2.2.1-2)。



図 2.2.1-2. 改良版 光コム(右ラック)と距離測定装置(左三脚上)

### ① 機械的安定性の向上

筐体、調整部などの剛性を高め、機械部の再設計を行った。同時に、素子の発熱と装置内部の熱の伝播を考慮して素子の配置を見直すと共に、ファイバ素子の適正な導入を行って機械的振動等へのアライメントの安定性を高めた。

## ② 比例誤差の低減

光学系の設計、波面の位相むらを評価・検討し、比例誤差の低減化に対する指針を得て、システムの改良を行った。その結果、光学トンネルでの現行の距離計校正システムでの評価により、距離 200 m までにおいて、評価システムの限界である 0.2 ppm 以下の比例誤差を実現した。これは世界最高性能である。

## ③ アライメント再現性の向上

これまでの装置において問題となっていた、光軸と距離測定軸のアライメント再現性の向上のため、赤外カメラと信号強度によるモニタを導入し、アライメント条件と測定距離の相関について評価した結果、アライメントの最適条件を見出した。

## 2) 光ファイバ伝送の長距離化

屋外測定、及び、製造工程への組み込みに必要な光コムのファイバ伝送の長距離化を行った。ファイバに入力するパルス幅、スペクトルの条件と伝送ファイバの長さを変化させ、比例誤差を測定した。その結果、距離計装置に入射されるパルスの最適条件を見出し、伝送用ファイバの条件を最適化することにより、最長 259 m においても、距離の高精度測定を実現した。

## 3) 国際比較への参加

国際プロトコルの形成に寄与するため、韓国大田市での標準研における国際比較 (APMP supplement) に参加した (図 2.2.1-3)。参加国は、韓国、台湾、フィンランド、日本であった。日本(産総研)からは、従来型の距離計に加え、本プロジェクトで開発した光コムを用いた距離計によって参加し、時間・周波数標準に基づく距離測定の実証を行った。測定は、全長 280 m、屋外の 7点基点で行われた。

測定に際しては、フェムト秒モード同期レーザーを通常環境の空調のない建物内に配置し、屋外の基点に設置された距離計装置に対し、最長 259 m の光ファイバにより光コムを伝送した。距離計装置は、全長 280 m にわたる7箇所を設置された基点間を次々と移動させながら測定を行った (1セット 21 測定。8セット)。開発されたシステムは、これらの屋外測定に対し、十分な環境安定性を示した。

その結果、280 m の距離において、100 秒間の安定性 14  $\mu\text{m}$  (標準偏差) が実現された(図 2.2.1-4)。屋外においても、測定距離の  $5 \times 10^{-8}$  に相当する高い安定性が実現された。

この国際比較によって、本プロジェクトで開発した時間・周波数標準に基づく距離標準の校正方式が実証された。



図 2.2.1-3. 時間・周波数標準に基づく距離標準国際比較。  
韓国 太田市にて。

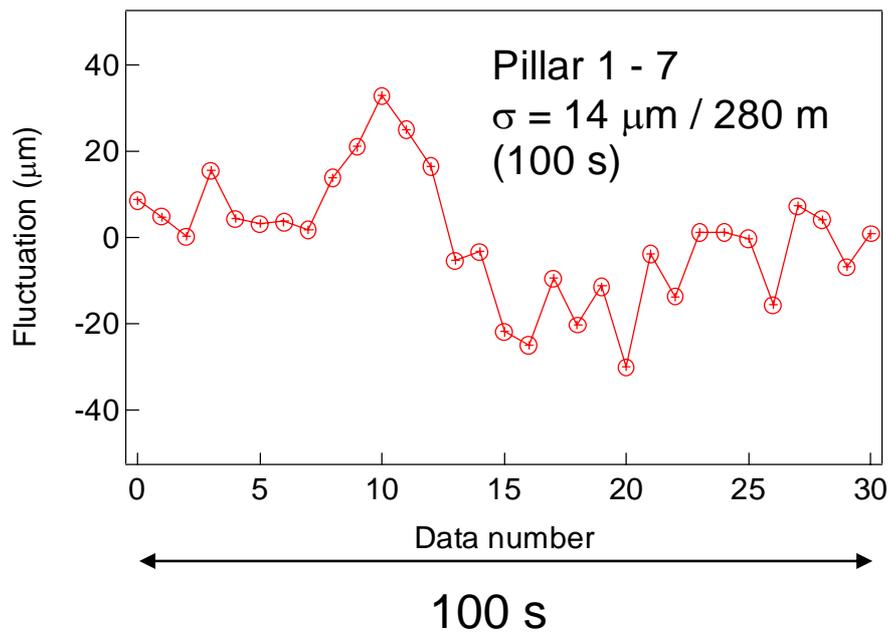


図 2.2.1-4. 屋外測定における安定性。

## (b) 測定周波数の高周波数化による高精度評価

### 1) ビート周波数の高周波化

最終目標の達成のためには、コム距離計自体の持つ誤差要因をサブマイクロメートルレベルで評価する必要がある。そのためには、評価のための位相測定系の高分解能化が必要であるため、その開発を行った。

光コムのビート周波数の位相測定に基づく距離測定の高分解能化のためには、高周波化が有効である。これまでの測定周波数 10 GHz を 40 GHz に向上することにより、分解能が最大 4 倍向上する可能性がある。

従来の距離計においては、測定周波数の高周波化のためには、変調器自体を変更する必要があり、大幅なシステム変更が必要であったが、コム距離計においては光コムの帯域幅は 10 THz 程度まで広がっており、光源の変更なく 10 THz 程度のビート周波数を得ることが可能である。実際に検出される周波数は、検出器や増幅器などの電気系の応答周波数によって制限されるため、検出系の高周波化を行った。

図 2.2.1-5 に、40 GHz 位相検出系の概略図を示す。

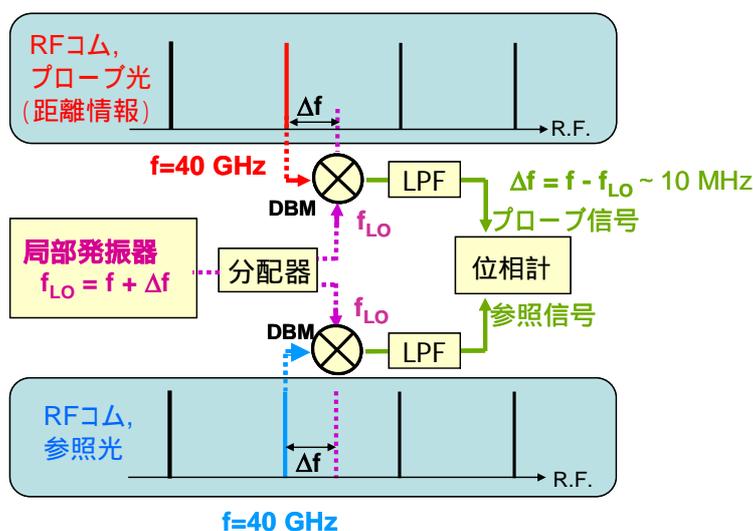


図 2.2.1-5. 測定周波数 40 GHz 位相検出システム

### 2) 距離測定の高分解能化

測定周波数 40 GHz システムにおける距離測定の安定性を図 2.2.1-6 に示す。測定距離は、空気揺らぎの影響の少ない 1 m 以下の短距離であり、積算時間は 10 秒である。固定のターゲットを測定しその安定性から測定分解能が評価できる。その結果、標準偏差として測定時間 500 秒において 0.19  $\mu\text{m}$ 、5000 秒においても 0.38  $\mu\text{m}$  となり、サブマイクロ

メートルの超高分解能を実現した。周期誤差としても、位相計の非線形性によって制限され、サブマイクロメートルレベルにおいても、コム距離計に由来する周期誤差は観測されなかった。

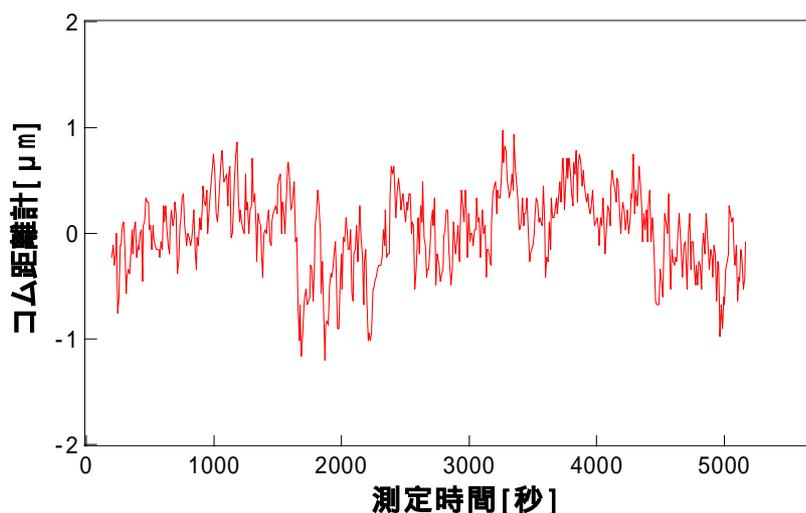


図 2.2.1-6. 距離測定 of 静止分解能。標準偏差  $0.19 \mu\text{m}$  (500 秒)、 $0.38 \mu\text{m}$  (5000)。

### 3) 一体型距離計による評価系の構築

コム距離計のサブマイクロメートルレベルの精度評価のために、光波干渉計との比較を行った。コム距離計においては、距離の基準を与える基準光路と測定光路をシャッターによって順次切り替え、各々の光路について距離測定を行っているが、これらの光路を同時に用いると、お互いに干渉して干渉計として用いることができる。このようにして、共通の光学系と検出系を用いる一体型干渉計を用いてコム距離計の評価を行った。各々の光源も共通の波長であり、また共通のシングルモードファイバにより測定システムに入力されるため、色収差や波面の違いの影響がない。コム距離計のような世界最高レベルの高精度な装置の評価においては、一般に、評価系と基準系とのアライメント誤差や光源の波面の違いなどが問題となるが、一体型装置での比較によって、これらの問題が解消され、測定方式の違いが評価できる。

### 4) 精度の評価

構築した一体型干渉計を用いて、サブマイクロメートルのコム距離計の測定精度を評価した。ターゲットに変位を与えながら、両者の測定結果を比較した。コム距離計の位相測定 of 1 周期に当たる  $3.75 \text{ mm}$  の変位を与え、干渉計による干渉縞のフリンジ数をカウントした。このとき、与えた変位によって生じる干渉縞の数は  $4837.5$  フリンジであったが、

ところ、両者の結果は1 フリンジ (0.78  $\mu\text{m}$ ) 以下で一致し、コム距離計自体の持つ高い精度が確認され、最終目標の達成に十分な性能を持つことが確認された。

このように、これらの基礎技術を生かして、今後、距離計の精度が干渉計の1 フリンジ以下になってくると、光波干渉計とともに用いることにより、超高精度測定が実現する。従来、干渉計はナノ・ピコメートルなどの高分解能測定が可能だが、位相が周期的であるために変位測定しかできないという欠点を持っていた。一方で、距離計は周期が大きく、かつ複数の周波数によって周期が特定できるために長距離の絶対測定が可能である。距離計が高精度化され、ついには干渉計の1周期(フリンジ)以下の精度となったため、両者が切れ目なくリンクされ、数10 mから100 mなどの長距離をナノ・ピコメートルの高精度で絶対測定できる手法への道が開けたことになる。特に、産業計測においては、干渉計の周期性のために揺らぎの小さな安定な環境が必要であること、及び、障害物などによりビームが遮断されると、周期が特定できずに測定結果を失うという大きな欠点の問題となっている。本研究によって、高精度な絶対測定が可能になることにより、これらの問題が解決される。

#### (c) プロトタイプ機の製作と評価 (産総研と再委託先：(株)トプコンとで共同実施)

以上の要素技術の開発と評価結果を踏まえ、実際に最終目標(2  $\mu\text{m}/10\text{ m}$ )を実現する距離計プロトタイプ機を製作した。

##### 1) 距離測定システムの高精度化

最終目標達成のためには、光学系、位相測定の電気系、機械系の熱特性などにおいても、高精度化が必要である。以下に、主たる成果を挙げる。

###### 1-1) 波面精度を保証した光学系の設計・製作

2  $\mu\text{m}$ の精度を達成させるための波面精度を保証した光学系は、使用する光の波長と同じオーダーでの精度の要求であり、対物レンズの収差や光ノイズ、受光ファイバなどが、測定距離値に影響を与える。これらの課題を考慮した光学系を設計・製作した。

###### 1-2) 高精度位相測定器の開発

コム距離計において、2  $\mu\text{m}$ という精度を達成させるためには、位相測定の高精度化と、測定周波数の高周波化が考えられる。本研究においては、実用機に組み込むことを考え、プロジェクト第I期で開発したコム距離計で実績のある、周波数10 GHzの位相測定システムを用いることとし、その高精度化を行った。最終目標を達成させるには、光速( $3 \times 10^8\text{ m/s}$ )と測定周波数から、位相測定システムに要求される精度は $1/7500$ となる。現在トプコンで製造、販売している測量機で使用している位相測定器(以下、現行位相測

定器)の精度は  $1/5000$  以上あり、この位相測定器を改良することで、位相測定システムの高精度化を行った。

また、位相測定器の内部にある位相検出回路は、入力信号の周波数に制限があり、測定周波数を位相検出回路の特性(入力周波数帯域幅 1.6 kHz 以下)に合わせたモード同期ファイバレーザが必要で、高周波化や将来の製品化の課題となっていた。この入力信号の周波数に制限がある PLL 回路の廃止を合わせて行った。

### 1-3) 耐環境性能の向上(温度ドリフト対策)

工業計測用の距離計の実現には、コム距離計の環境安定性を高めることが必要である。コム距離計の距離測定において、測距光と参照光は、同一の発光、受光対物の同一光路を通過させることで温度ドリフトによる機械的な光路長変化(光路長差)をキャンセルしているが、参照光側の一部の光路(ハーフミラーと参照光用プリズム間)は共通ではなく、この2つの光学部品の位置関係が変化すると測定距離値に影響する。このため、実験機においては、モータなどの熱源を光学系の上部に配置し、また、光学ベースの材料として、低線膨張铸造品ノビナイト(線膨張係数： $2.5 \times 10^{-6} \text{ mm}/^\circ\text{C}$ )を採用し、機械的安定性の向上を図った。

また、シングルモードファイバからの光源出力を、距離測定系に入力するコリメータにおいて、微調機構を排除し、より安定性を高めた構造を製作した。実験機では、受発光レンズに対するファイバの位置調整に XYZ ステージを使用して行っていたが、アライメント調整が難しく、安定した受光効率を維持できない。このため、レンズとファイバが一体化した対物部を設計・製作した。

図 2.2.1-7 に対物レンズを示す。左が発光対物で、右が受光対物である。これにより、光学系全体の結合効率が 6.5%まで上がり、ステージ等の調整機構の廃止により、最適効率を安定に維持できるようになった。



図 2.2.1-7. 一体型対物レンズ

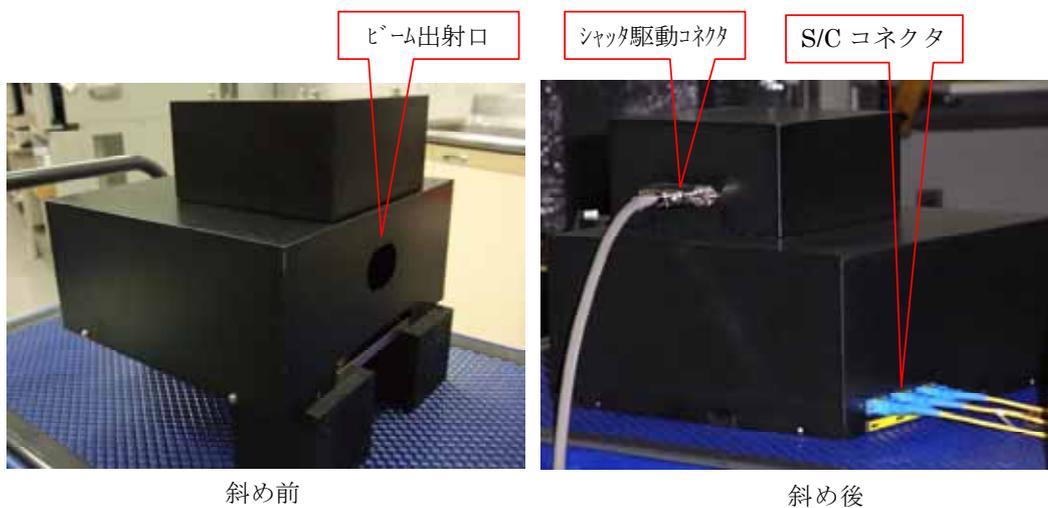


図 2.2.1-8. 分離型距離計の光学系

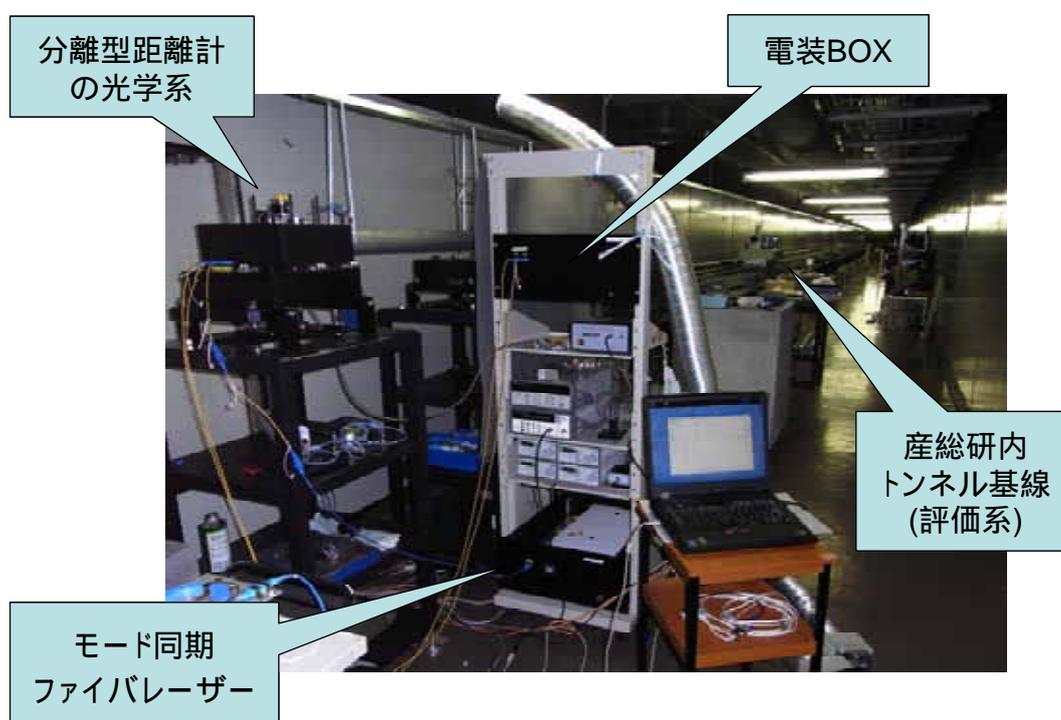


図 2.2.1-9. 分離型距離計と評価システム

## 2) プロトタイプ機の製作・評価

### 2-1) 分離型距離計の設計・製作

システム化の検討を行い、光学系と電装系を分けた「分離型距離計」を開発した。測定部の分離により、装置等に組みやすいシステムを設計した。(図 2.2.1-8、9)

### 2-2) 光学トンネルでの評価

#### 2-2-1) 安定性の評価

分離型コム距離計の環境安定性の確認のため、光学トンネル内（年間変動 18～20 °C、日間変動 0.02 °C）で安定性（ドリフト）測定を行った。測定は、距離計から 3.1 m の位置（基線台車の原点位置）にプリズムを固定し、7200 秒間（1750 回、120 分間）の連続測定を行い、ドリフト量とバラツキ値を求めた。図 2.2.1-10 に、安定性測定の結果を示す。測定の結果について回帰分析を行い比例係数を求めたところ、7200 秒間のドリフトは 0.1 ppm、ばらつきは  $\sigma=0.97 \mu\text{m}$  となり、光学トンネル内の環境下において、良好な結果が得られた。実際の測定は、複数回の測定を平均して距離値を表示するため、例えば、20 回の移動平均値からばらつきを計算すると  $\sigma=0.2 \mu\text{m}$  となり、2  $\mu\text{m}$  の精度測定において十分な安定性となる。

さらに、台車位置 10 m での 1080 秒間（400 回、18 分）連続測定を行った。図 2.2.1-11 に、台車位置 10 m のドリフト測定の結果を示す。その結果、1080 秒間(18 分間)のドリフトはほぼ 0  $\mu\text{m}$ 、バラツキ  $\sigma=1.0 \mu\text{m}$  となり、距離計から最も遠方においても、良好な結果が得られた。

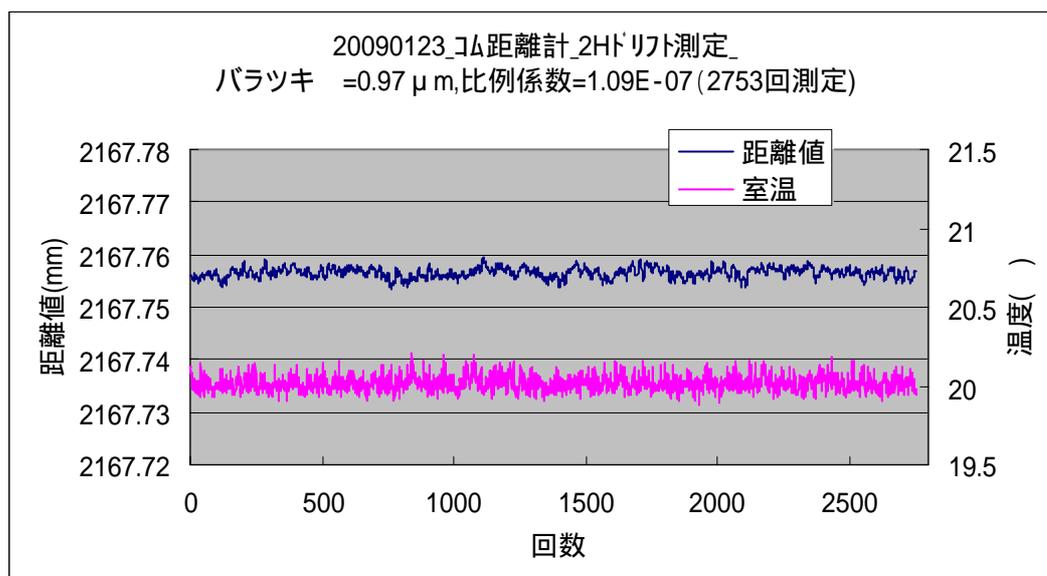


図 2.2.1-10. 安定性

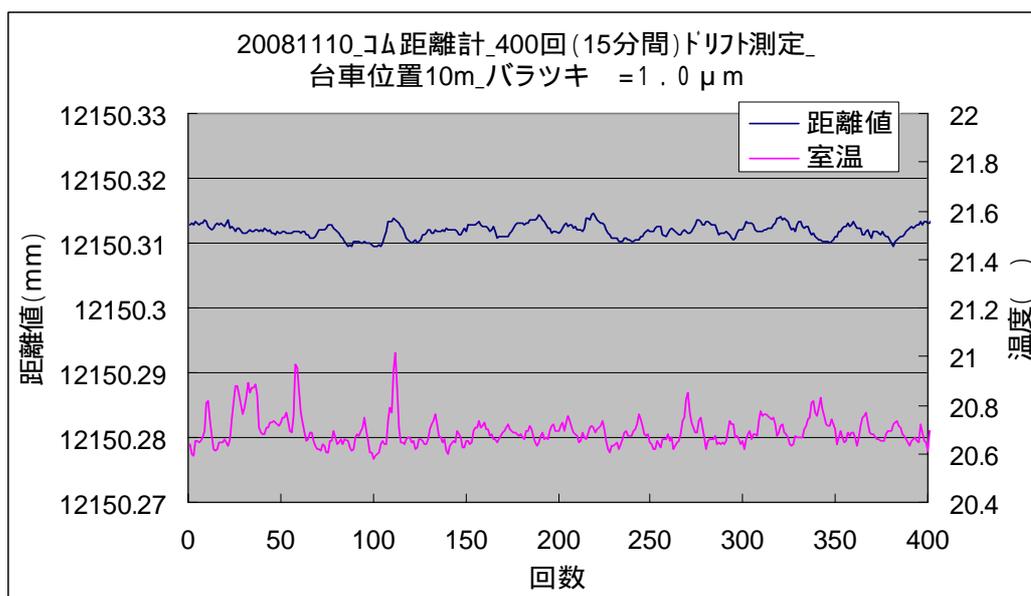


図 2.2.1-11. ドリフト測定 (台車位置 10m)

### 2-2-2) 周期誤差

測定精度が  $\pm 2 \text{ mm}$  である一般的な測量機では、典型的な位相測定回路が持つ数  $\mu\text{m}$  オーダの誤差は問題にならないが、開発している高精度距離計においては問題となる。そのため、まず周期誤差の評価を行った。光学トンネル内基線を使用して、距離  $120 \text{ mm}$  を  $2 \text{ mm}$  ステップで測定した結果、一周期  $15 \text{ mm}$  において  $\pm 2 \mu\text{m}$  の周期誤差が確認された。これは、位相測定回路に起因する周期誤差である。位相測定回路の持つ誤差量は電気回路の工夫で減らすことが可能であるが、完全に無くすることができず、 $\pm 2 \mu\text{m}$  の誤差が残ってしまったことが原因である。しかし、位相測定回路に起因する周期誤差はシステム固有のものであり、再現性が良いと期待されるため、補正が可能である。そこで、最終目標精度  $2 \mu\text{m}$  を達成するために、機械的な光路長切り替え機構を設けた周期誤差の補正方法を開発した。

具体的には、これまでの測距光学系に  $1/2$  周期分の光路差を持つ光学系を追加し、測定時には 2 つの光路を切り替え 2 度測定し、測定結果を平均することで、周期誤差を相殺する。バラツキを含む周期誤差測定データ (基データ) に対し、基データと周期誤差を  $7 \text{ mm}$  ずらしたデータとの平均値を比較した。

図 2.2.1-12 に、2 つの光路による距離値を平均し、周期誤差をキャンセルしたグラフを示す。キャンセル機構無しの場合に周期誤差が  $\pm 3 \mu\text{m}$  あるのに対し、本手法によって平均値により周期誤差を補正すると  $\pm 1.5 \mu\text{m}$  まで相殺できた。

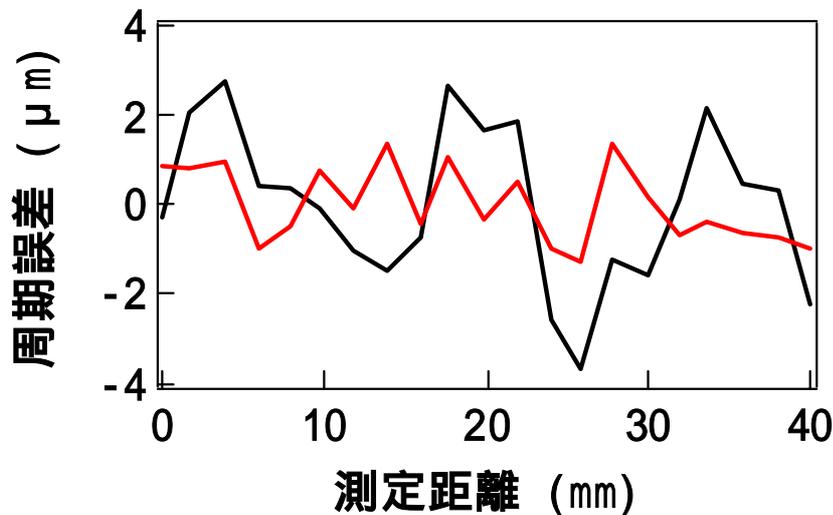


図 2.2.1-12. 位相計回路に起因する周期誤差のキャンセル機構。  
(黒：キャンセル無し、赤：キャンセル後)

### 2-2-3) 比例誤差

これまで評価した安定性や周期誤差特性を踏まえた上で、10 m の直線性を測定し、直線の傾き（比例誤差）、及び、非線形残差を評価した。

干渉計と開発した距離計で比較測定し、回帰分析を行った結果、10 m の距離において、直線の傾きは 0.07 ppm（0.7 μm/10 m）となった。実際には、評価系の不確かさで制限されるが、不確かさ 2 μm/10 m の最終目標に照らして、十分な結果が得られた。このとき、非線形残差には直線的な傾きに加えて、緩やかな構造を持つうねりがあったが、これらは、移動を与えるステージ系が持つ機械的不均一性によるものと考えられ、評価システムの限界と思われる。

### 2-2-4) 現行の参照標準との差

図 2.2.1-13 に、現行の距離標準の参照標準である光波干渉計と開発した距離計との比較測定を行った結果を示す。測定距離を変えながら、両者の距離測定値の差を比較している。測定距離 10 m までの全ての範囲において両者の差は±2 μm にあり、不確かさ 2 μm/10 m の最終目標が達成された。

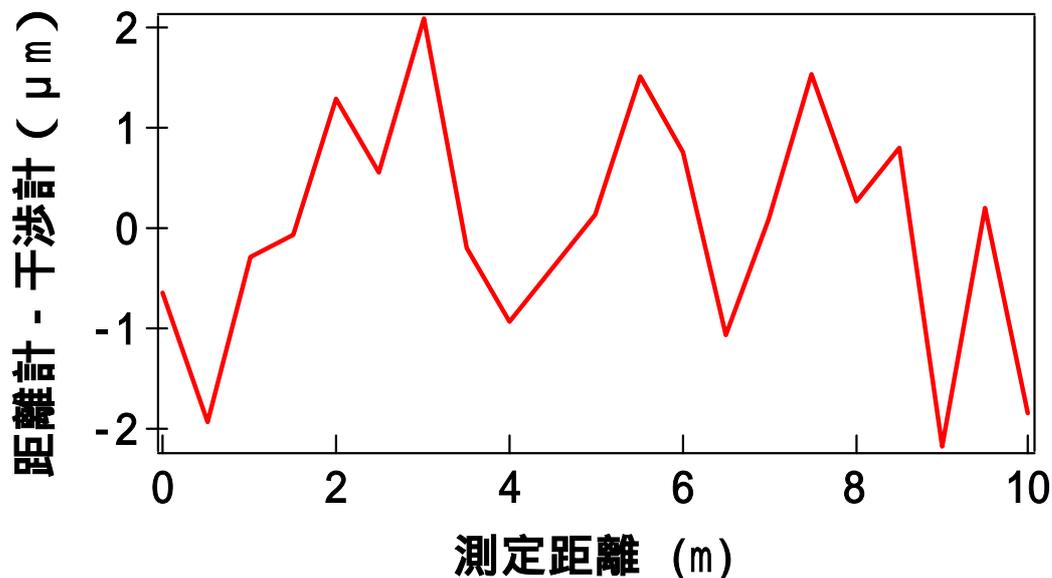


図 2.2.1-13. 参照標準（光波干渉計）との測定比較。

#### 2-2-5) 評価結果

製作したプロトタイプ機において、安定性、周期誤差、比例誤差を評価した結果、ドリフト（長期安定性）は2時間で1 μm、ばらつき（短期安定性）は $\sigma=1$  μm、周期誤差において $\pm 1.5$  μm、比例誤差は10 mまでの距離において0.1 ppm（1 μm/10 m）以下となり、高精度測定を達成できた。最後に現行の参照標準との比較を行った結果、測定距離10 mまでにおいて両者の差は $\pm 2$  μmの範囲にあり、不確かさ2 μm/10 mの最終目標が達成された。

#### (6) 実用化の見通し

本プロジェクトにおいて、産総研と民間企業との共同研究により、製造工程に組み込み可能な参照標準器のプロトタイプ機を開発した。また、国際比較によって、時間周波数標準に基づく距離計校正法の実証を行った。

今後、共同研究先の企業において、GPSによる時間周波数標準の遠隔校正を用いて、参照標準器としての実用化を行っていく予定である。そのために、光源の小型化、低価格化も含めた検討を行っている。具体的には、レーザ干渉計の代替（精密位置決めや市販の距離計を校正する参照標準器としての実用化）、ノンプリズム計測や50 μm以下の精度を持つ3D計測への応用を検討している。まずは、社内での製品評価用の基準器としての使用を計画している。

現在の距離計校正は、光波干渉計を用いて行われており、長距離の移動台等の大型設備を必要とする。開発した高精度距離計によって周波数標準を用いた遠隔校正が実用化され

れば、産業界におけるインパクトは大きい。第 1 期で開発した装置を含めて、既に、外国の標準研（ヨーロッパ、韓国、米国等）より、距離標準器としての製品化に関する問い合わせを受けている。

また、開発された高精度で可搬型の距離計技術は、精密機械、自動車や航空業界などの産業計測、安心・安全のためのセンシング分野におけるインパクトも大きく、すでに、産業界より産業計測器、及び、その標準器としての数多くの問い合わせを受けている。

#### (7) 目標の達成状況（基本計画の最終目標に対する達成状況を記載）

最終目標である実用的な距離測定技術の開発に向けて、これまで開発してきた光コム光源、距離計共において、環境安定化に関する改良を行い、屋外測定に適応できる装置を実現できた。さらに、製造工程への組み込みにおいて不可欠な技術である光ファイバによる光コムの伝送においても、距離測定精度を保ったままの長距離化に成功した。これらの成果を生かし、時間・周波数標準に基づく距離測定によって国際比較に参加し、国際プロトコルの形成に寄与できたことは大きな成果である。

さらに、最終目標の 2  $\mu\text{m}$  精度の実現に向けて、測定周波数の高周波化による距離測定の高精度化を行い、参照標準として従来用いられてきた光波干渉計との高精度な比較を行い、距離計自体の誤差要因を評価した結果、1 フリンジ以下の精度での一致を実現した。さらに、実際にプロトタイプ機の製作を行い、波面精度を保証した光学系の製作と位相測定器の改良、及び、光源の距離測定に即した最適化を行い、製造工程への組み込みを考えて、光源部、光学系と電気系を分離した距離計装置を製作した。これらの成果を統合し、光学トンネルにおける現行の距離校正システムでの評価を行い、距離測定分解能、周期誤差、比例誤差、ドリフトの各性能項目において、最終目標である 2  $\mu\text{m}/10 \text{ m}$  を達成した。以上のように、プロジェクトの最終目標に対し、順調に達成したと言える。

#### 外部発表状況

18FY

特許 0 件

論文、解説 2 件

（査読なし）

- 1) 松本 弘一、美濃島 薫、平井 亜紀子, "進展する長さ標準とその普及", 計測標準と計量管理, 56-1, (2006) pp.30-35
- 2) 美濃島 薫、松本 弘一, "フェムト秒光コムを用いた高精度距離計測技術", 精密工学会誌, 72-8, (2006) pp.959-962

#### 口頭発表 11 件

- 1) (招待講演) K. Minoshima, "Precision length metrology using optical comb", Optics Seminar, Boston, 2006/5/30
- 2) (招待講演) 美濃島 薫, 松本弘一, "光コムを用いた高精度距離計", 光応用産業創出フォーラム, 東京, 2006/08
- 3) (招待講演) K. Minoshima, "Precision length metrology using optical comb", Length Group Seminar, Daejon, 2006/10
- 4) (招待講演) 美濃島 薫, "周波数標準にトレーサブルな距離計測", 自動車技術会講演会, つくば, 2006/11/15
- 5) (招待講演) 美濃島 薫, "光コムを用いた精密計測", 超高速光エレクトロニクス研究会, 淡路夢舞台, 2006/11/18
- 6) (招待講演) K. Minoshima, "Ultrahigh dynamic-range distance meter using an optical frequency comb", KAIST-NMIJ Symposium, Daejon, 2006/12
- 7) (招待講演) K. Minoshima, "High-accuracy long distance measurements using a femtosecond frequency comb", High Accuracy Absolute Distance Measurement Workshop, Munich, 2007/2/6
- 8) 美濃島 薫, 松本 弘一, 飯野 義行, 吉野 健一郎, 熊谷 薫, "Ultrahigh dynamic-range portable distance meter using an optical frequency comb", CLEO/QELS 2006, Long Beach, 2006/05/21
- 9) 美濃島 薫, 松本弘一, "周波数標準にトレーサブルな距離計測", 光計測シンポジウム, 横浜, 2006/6/7.
- 10) 美濃島 薫, 稲場肇, 松本 弘一, 飯野 義行, 熊谷 薫, "光コムを用いた高精度距離標準の開発", 通研産総研合同研究会, 東北大学, 2006/11/13
- 11) 美濃島 薫, 稲場肇, 松本弘一, 飯野義行, 熊谷薫, "光コムを用いた周波数トレーサブルな距離標準器の開発", 計量標準総合センター成果発表会, つくば, 2007/1/19.

#### その他の公表 0 件

19FY

特許 0 件

論文、解説 3 件

( 査読あり )

- 1) 美濃島薫, Thomas Schibli, 稲場肇, 尾藤洋一, 洪鋒雷, 大苗敦, 松本弘一, "光コムを用いた時間・周波数標準に基づく精密長さ計測", レーザー研究 30 巻, pp.642-648, 2007.

(査読なし)

- 1) 美濃島薫, "光コムを用いた精密距離計測技術", 社団法人日本陸用内燃機関協会誌 LEMA 489 号, p.13-21, 2007.8
- 2) 美濃島薫, "超短パルスレーザーによる光コムを用いた高精度距離計", RGB 3 原色・白色光レーザーの開発 (サイエンスアンドテクノロジー), pp.173-186, 2007.7.30.

#### 口頭発表 12 件

- 1) (招待講演) Kaoru Minoshima, Hajime inaba, Hirokazu Matsumoto, Yoshiyuki Iino, Kaoru Kumagai, "Ultrahigh dynamic-range distance measurement using a femtosecond frequency comb", LEOS Summer Topicals, Portland, 2007.7.24.
- 2) (招待講演) Kaoru Minoshima, "Precision length metrology using optical comb", Max-Planck Seminar, Erlangen, 2007.6.8.
- 3) (招待講演) 美濃島薫, "レーザーパルスの時間・周波数関係を利用した空間精密計測", レーザーEXPO セミナー, 横浜, 2007.4.25.
- 4) (招待講演) 美濃島薫, "レーザーパルスの時間・周波数関係を利用した空間精密計測", 精密工学会知的ナノ計測専門委員会, 東京大学, 2007.6.22.
- 5) (招待講演) 美濃島薫, "光周波数コムを用いた超高精度長さ計測", 計測自動制御学会研究会, 2007.12.13.
- 6) (招待講演) 美濃島薫, "光コムを用いた高精度長さ計測", IP2008 プレミーティング 2007, 淡路夢舞台, 2007.12.21.
- 7) (招待講演) 美濃島薫、松本弘一, "生活と産業の基盤としての長さ計測－光コムによる距離計－", 応用物理学会, 日本大学, 2008.3.27.
- 8) Kaoru Minoshima, "Ultrahigh dynamic-range length metrology using optical frequency combs", NMIJ-BIPM symposium on optical comb, Tsukuba, 2007.5.18.
- 9) Kaoru Minoshima, Hajime inaba, Hirokazu Matsumoto, Yoshiyuki Iino, Kaoru Kumagai, "Frequency-Traceable High-Accuracy Distance Standard using an Optical Frequency Comb", PTB-BIPM Workshop, Berlin, 2007.6.4.
- 10) 美濃島 薫, "トレーサビリティ", 国土交通省国土交通大学校, 2007/6/29.
- 11) 美濃島薫, 酒井康宏, 稲場肇, 高橋永斉, 松本弘一, 川戸栄, 神酒直人, 峯岸功, 大石政裕, "光コムを用いた周波数トレーサブルな精密距離標準器の開発", 計量標準総合センター成果発表会, つくば, 2007/12/14.
- 12) 酒井康宏、高橋永斉、稲場肇、川戸栄、美濃島薫、松本弘一、"光コムを用いたサブフリンジ精度の絶対距離測定法の開発", 応用物理学学会, 日本大学, 2008.3.27.

その他の公表 0 件

20FY

特許 2 件

- 1) 峯岸、大石、岩、"距離測定装置"、特願2009-048863、2009/03/03
- 2) 峯岸、大石、神酒、吉村、"距離測定装置"、特願 2009-049016、2009/03/03

論文、解説 1 件

(査読なし)

- 1) 美濃島薫、"精密長さ計測のための光コムによる干渉計測", 光学 vol. 37, No. 10 (2008) pp.576-582

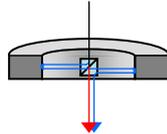
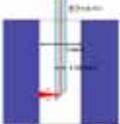
口頭発表 7 件

- 1) (招待講演) 美濃島 薫, "モード同期ファイバレーザーによる光コムを用いた精密長さ計測", 応用物理学会, 筑波大学, 2009/3/31
- 2) 酒井 康宏, 高橋 永斉, 稲場 肇, 川戸栄, 美濃島 薫, "サブフリンジ精度の光コム絶対距離計と一体型干渉計の比較", "Optics Photonics Japan, つくば, 2008/11/5
- 3) 高橋 永斉, 中嶋 善晶, 稲場 肇, 美濃島 薫, "精密計測のためのファイバ・コムに同期した超広帯域絶対周波数可変光源", "Optics Photonics Japan, つくば, 2008/11/5
- 4) 美濃島 薫, "トレーサビリティ", 国土交通省国土交通大学校, 2008/6/23
- 5) 高橋 永斉, 中嶋 善晶, 稲場 肇, 美濃島 薫, "ファイバ・コムに同期した超広帯域絶対周波数リニアスキャン光源", 応用物理学会, 中部大学, 2008/9/2
- 6) 高橋永斉, 中嶋善晶, 稲場肇, 美濃島薫, "精密計測のためのファイバ・コムに同期した超広帯域絶対周波数可変光源", 通研産総研合同研究会, 東北大学, 2008/11/28
- 7) 美濃島薫, 酒井康宏, 稲場肇, 高橋永斉, 岩本裕, 川戸栄, 神酒直人, 峯岸功, 吉村雄一, 大石政裕, "光コムを用いた周波数標準にトレーサブルな距離計の高精度化", 計量標準総合センター成果発表会, つくば, 2008/12/18.

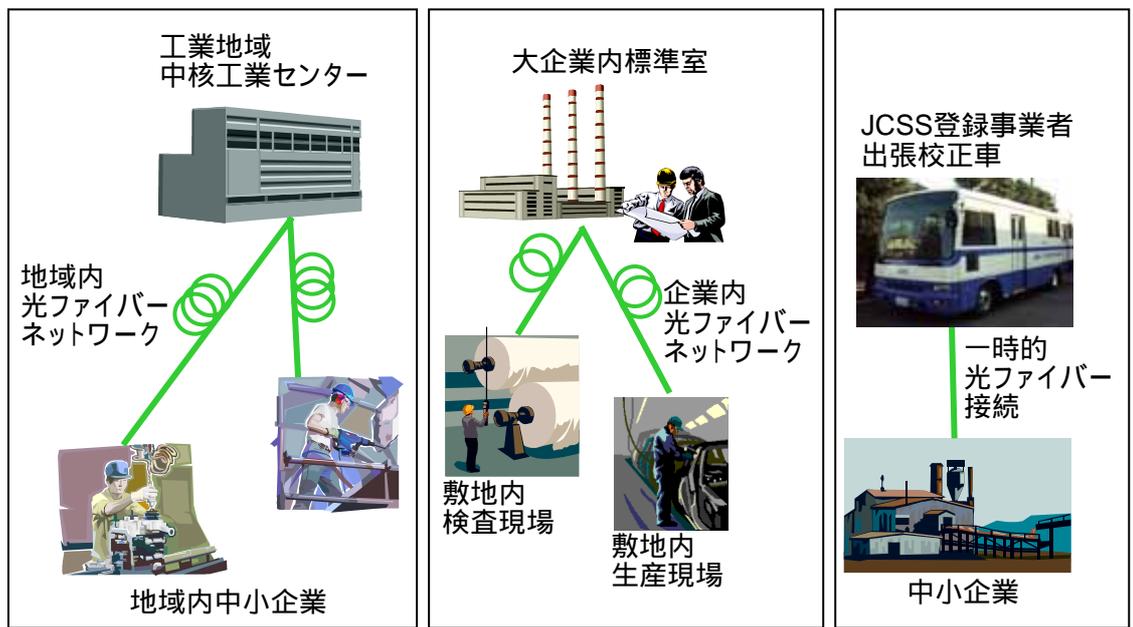
その他の公表 1 件

- 1) 美濃島薫, "長さ標準: 周波数にトレーサブルな距離標準", e-trace 成果普及セミナー, つくば, 2008/8/27.

### Ⅲ-2.2.2 光ファイバ応用

<p><b>NMIJ</b></p> <p>1. リングゲージ非接触校正</p>  <p>2. 微小内径校正</p>  <p>3. リニアスケールin-situ遠隔校正</p> 	<p>タンデム干渉計による遠隔校正技術</p> <p>実用長さ標準器・標準レーザー波長の供給</p>	<p><b>社会・産業界への貢献</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・国際的相互承認</li> <li>・産業界のインフラとして</li> <li>・速やかな標準供給サービス</li> <li>・リアルタイム校正による機器の高精度化</li> <li>・新規校正技術の提供</li> </ul> 
--	--	---

長さ標準（光ファイバ応用）のパラダイム



長さ標準（光ファイバ応用）の遠隔校正体系

## (1) 研究開発の概要

ブロードなスペクトルを光源とする精密な低コヒーレンス干渉計を開発し、それらを光ファイバで連結することによって、ブロックゲージ干渉計の光ネットワーク化を実現する。実際に、産総研の長さ用干渉計とユーザが保有するブロックゲージ干渉計とを光ファイバで連結し、遠隔で精密な校正技術を確立する。この光波干渉測長技術を、リングゲージのような曲面を持つ多種類の实用長さ標準器に適用するため、検出系の高感度化や光学素子の小型化を図る。また、大型装置に設置されたリニアスケールなどに関して、多様な設置環境に対応する遠隔校正技術を開発する。それらの成果を実現するため、光ファイバネットワークの調査・検討を行い、および国際ルールに反映させる。

## (2) 中間目標

### (a) 15年度中間目標

異なる二点間にある測長用低コヒーレンス干渉計を3 km長の光ファイバで連結し、産総研の長さ標準によって实用長さ標準器を遠隔で絶対校正する光波干渉技術を開発し、 $0.1 \mu\text{m}/5 \text{cm}$ の測定不確かさを実現する。

### (b) 17年度中間目標

異なる二点間にある測長用低コヒーレンス干渉計を3 km長の光ファイバで連結し、産総研の長さ標準によって实用長さ標準器を遠隔で絶対校正できる標準供給システムを開発し、 $0.05 \mu\text{m}/0.25 \text{m}$ の測定不確かさを達成する。

## (3) 最終目標

ブロードなスペクトルを光源とする低コヒーレンス干渉計を光ファイバで連結した光波干渉測長技術を、リングゲージのような曲面を持つ多種類の实用長さ標準器の校正（不確かさ $0.2 \mu\text{m}/50 \text{mm}$ ）に適用するため、検出系の高感度化や光学素子の小型化を図る。また、大型装置に設置されたリニアスケールなどに関して、多様な設置環境に対応する遠隔校正技術（不確かさ $0.2 \mu\text{m}/250 \text{mm}$ ）を開発する。

## (4) 本研究内容の構成

### (a) リングゲージの非接触遠隔校正技術の開発

自動車業界、ベアリング業界からの要求が高いゲージとして、リングゲージを遠隔校正対象物として選定した。また、リングゲージを測定するための良い非接触計測機器が無いので、本技術の普及において計測機器としての普及との相乗効果も考えられる。現在、タッチ変位センサープローブをリングゲージの測定面に接触させて径測定を行なっているが、測定面に傷をつけやすい他に、測長においてアッペの条件を満足させることが容易でない。また、微小内径測定の場合はプローブを挿入する事が困難であり、当然測定の不確かさが増大する。反面、内径が1000 mmを超えるような大径測定の場合も、接触式計測

機器の基準となるブロックゲージ入手が困難となり、非接触計測機器の需要が見込まれる。

ここでは、小さなビームスプリッターをリングゲージ内に挿入し、リングゲージ内側の測定面に低コヒーレンス光を照射し、測定面からの正反射光を利用して、リングゲージの内径を測定する技術を開発する。これは、低コヒーレンス干渉が空間の位置決めを精密に行なえる原理を利用するものであり、微小内径から大きな内径までのリングゲージを測定できる可能性があり、開発が期待される。

#### (b) 微細リングゲージの校正技術の開発

微細内径のトレーサビリティの確立に対する社会・産業界からのニーズが日毎に増えている。現在、接触式変位センサープローブで被校正物の測定面をなぞることによって測定が行なわれているので、その測定面に傷が付き易く、また測定に長い時間がかかることその他に、長さ測定の基本であるアップの条件を満足させる測定が困難である。さらに、微細内径になるとプローブを挿入することが困難である。

ここでは、(a)リングゲージの非接触遠隔校正装置を基本とし、リングゲージ内に挿入する測定干渉計のビームスプリッターに替わる新しい光デバイスを検討する。これは、微細であり、さらに、干渉計の調整が簡易となるデバイスとする。

#### (c) リニアスケールの in situ 遠隔校正技術の開発

リニアスケールは高速・高分解能・耐環境性の利点から、半導体検査装置や工作機械などの移動ステージ位置決めに広く利用されており、その市場は増加の一途である。リニアスケールは、ピコメートル、ナノメートルの分解能を持ち、単体では小さな不確かさで校正することが可能である。しかし、リニアスケールの校正の不確かさに比べて、リニアスケールを移動ステージに取り付ける際のミスアライメントやリニアスケールの歪による不確かさが無視できない。そのため、リニアスケールを移動ステージに取り付けた後での in situ（その場）校正が求められている。しかしながら、これら装置のある工場内に標準となる校正用のレーザ干渉計を設置することは、スペース、安全、クリーンルーム化、企業秘密の保守などの問題から難しい。ここでは、リニアスケールを取り付けたステージ上に測定用の干渉計を構築し、それと単一モード光ファイバで接続された標準干渉計を出張校正車に搭載して、工場の駐車場や別室等、支障のない箇所に設置する in situ 遠隔校正技術を開発する。

### (5) これまでの成果

#### (5-1) H17 までの研究成果のまとめ

平成14年度までは、原理実証実験のため800 nm 波長帯域の低コヒーレンス光を使用して、単一モード光ファイバによる遠隔校正の実験を行っていたが、平成15年度から17年度においては、光通信で広く使用されている1500 nm 波長帯域での実証実験を開始した。そして、平成15年度には、実験室内で、133 km 長のファイバを介した伝送実験を行

い、目標の校正不確かさ（50 nm）を実現した。また、平成16年度には、実際に光通信用に敷設されている一般の光ファイバ通信網を土浦市と柏市との間（約47 km）で借用し、実証実験を行った結果、目標の精度で遠隔校正できる見通しを得た。

平成17年度においては、登録事業者側に配置する精密ブロックゲージ低コヒーレンス干渉計と、産総研側に配置する低コヒーレンス干渉/He-Ne レーザ干渉計（国家標準にトレーサブル）を製作し、既存のブロックゲージ干渉計との比較実験などによりその性能評価を行った。ブロックゲージ低コヒーレンス干渉計を土浦市の登録事業者の校正室に配置し、この干渉計と、産総研の標準干渉計とを、東京電力（株）所有の一般のファイバ通信網（約20 km長）によって連結した。本システムを利用して、呼び寸法が100 mm と251 mm のブロックゲージの遠隔校正実証実験を行い、測定の繰り返し性 数 nm を実現できた。この結果、校正不確かさは67 nmとなり、産総研の遠隔校正依頼試験を開始した。また、登録事業者側の装置の簡易化のため、真空セルを利用した光学的空気屈折率測定法の研究にも着手し、長さ標準の分野で広く利用されているCiddorの式による空気屈折率測定結果との差が0.1 ppm以内とよく一致した。

## (5-2) H18-H20 の成果

### (a) リングゲージの非接触遠隔校正技術の開発(再委託先;株式会社東精エンジニアリング)

自動車業界、ベアリング業界からの要求（ニーズ）が高いゲージとして、リングゲージを遠隔校正対象物として選定した。また、リングゲージを測定するための良い非接触計測機器が無いので、本技術の普及において計測機器としての普及との相乗効果も考えられる。現在、タッチ変位センサープローブをリングゲージの測定面に接触させて径測定を行っているが、測定面に傷をつけやすい他に、測長においてアッペの条件を満足させることが容易でない。また、微小内径測定の場合はプローブを挿入する事が困難であり、当然測定の不確かさが増大する。反面、内径が1000 mmを超えるような大径測定の場合も、接触式計測機器の基準となるブロックゲージ入手が困難となり、非接触計測機器の需要が見込まれる。

ここでは図 2.2.2-1 のように、小さなビームスプリッターをリングゲージ内に挿入し、リングゲージ内側の測定面に低コヒーレンス光を照射し、測定面からの正反射光を利用して、リングゲージの内径を測定する。これは、低コヒーレンス干渉が空間の位置決めを精密に行なえる原理を利用するものであり、微小内径から大きな内径までのリングゲージを測定できる可能性があり、開発が期待される。図 2.2.2-2 は、ビームスプリッターの透過光と、リングゲージ内を往復した反射光との低コヒーレンス干渉縞である。干渉縞のピークの位置がリングゲージ内径の情報を含んでいる。

図 2.2.2-3 は平成18年度に試作されたリングゲージ測定干渉計部である。この干渉計部では、図 2.2.2-4 のように、円筒内側の曲面からの反射光を効率よく利用するために、低コヒーレンス光を円筒レンズによってビームスプリッター中央にフォーカスさせ、そこから広がった光が円筒内面で正反射し、再びビームスプリッター中にフォーカスする光学系になっている。試作された測定干渉部を用いた予備実験では、Φ20、および Φ50 のリ

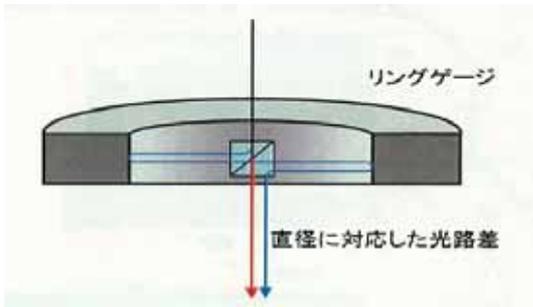


図 2.2.2-1 リングゲージ内の光路

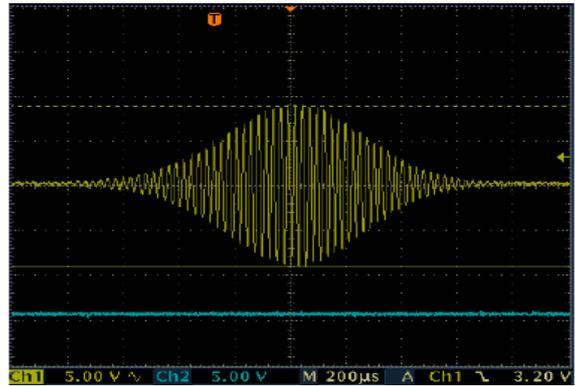


図 2.2.2-2 リングゲージ干渉信号

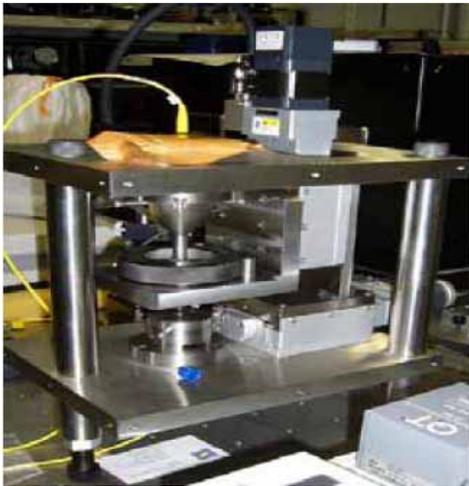


図 2.2.2-3 試作リングゲージ測定干渉計部

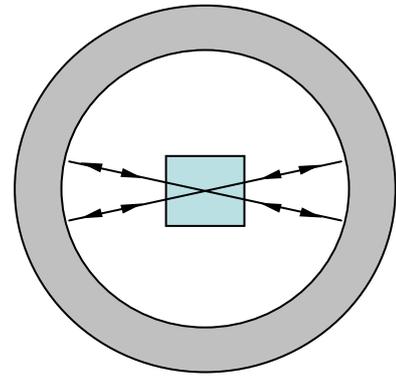


図 2.2.2-4 円筒レンズによる集光

リングゲージの測定を行い、良い再現性を示したので、絶対値を得るために干渉計の改良を行なったものが、図 2.2.2-5 の改良型リングゲージ測定干渉計部である。

また、 $\Phi 3$  mm以下の微小内径への対応のため、 $\square 0.8$  mmのビームスプリッターを試作した。最終的には、この極小ビームスプリッターを使用した測定システムにより広範囲の径をカバーできる可能性がある。

リングゲージの場合、ブロックゲージと同様、ビーム光軸に対するゲージの傾き  $\alpha$  による測長誤差があるため、 $\alpha$  に配慮する必要がある (図 2.2.2-5)。そのため、図 2.2.2-6 に示す改良型測定干渉計部には  $\alpha$  軸調整機能を持たせ、さらに、ビームを径方向に相対的に X 軸方向に動かして最大径を求めるための X 軸移動ステージが備わっている。

また、改良測定干渉計部には、この他にリングゲージを測定位置まで上下移動させる Z 軸ステー

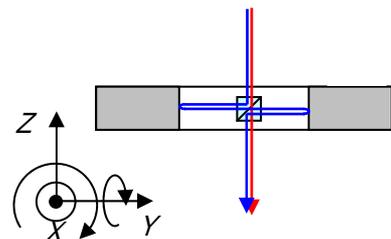


図 2.2.2-5 リングゲージの調整軸

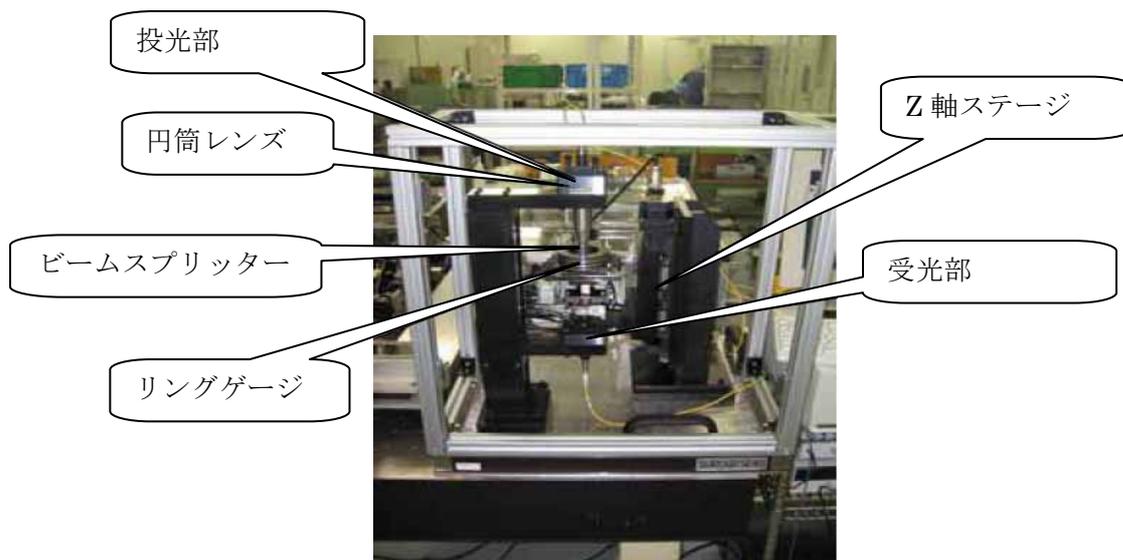


図 2.2.2-6 改良型リングゲージ測定干渉計部

ジ、上記ビームスプリッターからの光が XY 平面に対して平行に入射するための  $\beta$  軸傾斜調整ステージ、上記ビームスプリッター中心に集光した光がリングゲージの中心に位置するよう X 軸と直角の方向である Y 軸位置が調整できる Y 軸移動ステージの合計 5 軸を外部信号で調整できるようになっている。それぞれの最小分解能は X 軸、Y 軸、Z 軸ともに 10  $\mu\text{m}$ 、 $\alpha$  軸、 $\beta$  軸が 0.04 度である。移動範囲は X 軸、Y 軸が 10 mm、Z 軸が 40 mm、 $\alpha$  軸、 $\beta$  軸は  $\pm 1$  度である。

測定時間について実用性に見合ったシステムの高速度化が重要であり、ビームアライメントの簡易化、データ処理の高速度化がポイントとなる。

図 2.2.2-7 は、リングゲージ内径と等価な位置で干渉信号を発生させるための標準干渉計部全景である。

上記標準干渉計部の移動ステージは 30 mm/s の一定速度（速度リップルは 1 %以内）で移動するリニアステージを使用する。リングゲージ測定干渉部から送られた低コヒーレンス光は光ファイバを経由して標準干渉計部に導かれる。この低コヒーレンス光とステージ移動量を測定する He-Ne レーザ光は、アッペ誤差を考慮してコモンパス光学系で構成されている（図 2.2.2-8 参照）。ピエゾ駆動による微動ステージは測定前にリングゲージのアライメントをとる目的で設置され、干渉信号が発生するポイントで微動ステージを静止させて使用する。

測定手順は以下のようになる。

**【事前調整】**

- ① リングゲージ測定干渉部の測定台にリングゲージを設置した後に、Z 軸が自動で決められた測定高さまで移動する。この Z 軸方向の測定位置は、例えばリングゲージの上下 3 点の位置を設定できるようになっている。

- ② 標準干渉計部の粗動ステージが 30 mm/s で移動範囲 (400 mm) 全域を移動する。この時、標準干渉計部の参照光路長 (ビームスプリッターから固定側コーナーリフレクターまでの距離) と測定光路長 (ビームスプリッターから粗動ステージ上移動側コーナーリフレクターまでの距離) が等しくなった位置で干渉ピーク信号が発生する。リングゲージ内径と関係しないこの干渉信号を「0次干渉信号」と呼ぶ。この干渉信号のピーク位置で信号が発生する仕組みはブロックゲージの時と多少異なる。その様子を示したものが図 2.2.2-8 である。粗動ステージが 30 mm/s で等速移動したときに、干渉ピーク信号が発生信号タイミングに時間遅れを発生しないよう電氣的に調整されている。この工夫によりローパス(エンベロープ)信号の非対称性の影響を受けない事になる。



図 2.2.2-7 標準干渉計部全景

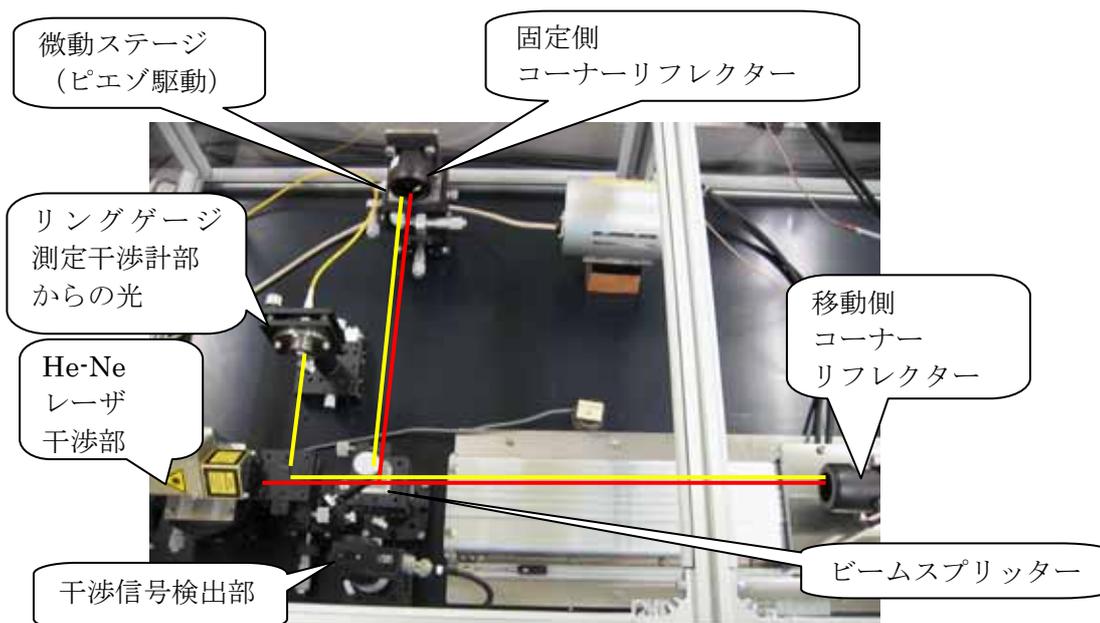


図 2.2.2-8 標準干渉計部 (コモンパス光学系)

- ③ 上記トリガ発生位置を「D2」と呼び、ここを標準干渉計部の「0」と決める。レーザ干渉計のカウンタ値がリングゲージ内径＋光学部品の分散の影響を考慮した位置となるまで、粗動ステージを移動させる。(図 2.2.2-10 参照)
- ④ 標準干渉計部のピエゾステージを周期 10 Hz、振幅約 60 μmで駆動させ、標準干渉計部の粗動ステージを移動させながら、干渉信号が微動ステージ振幅のほぼ中央に位置

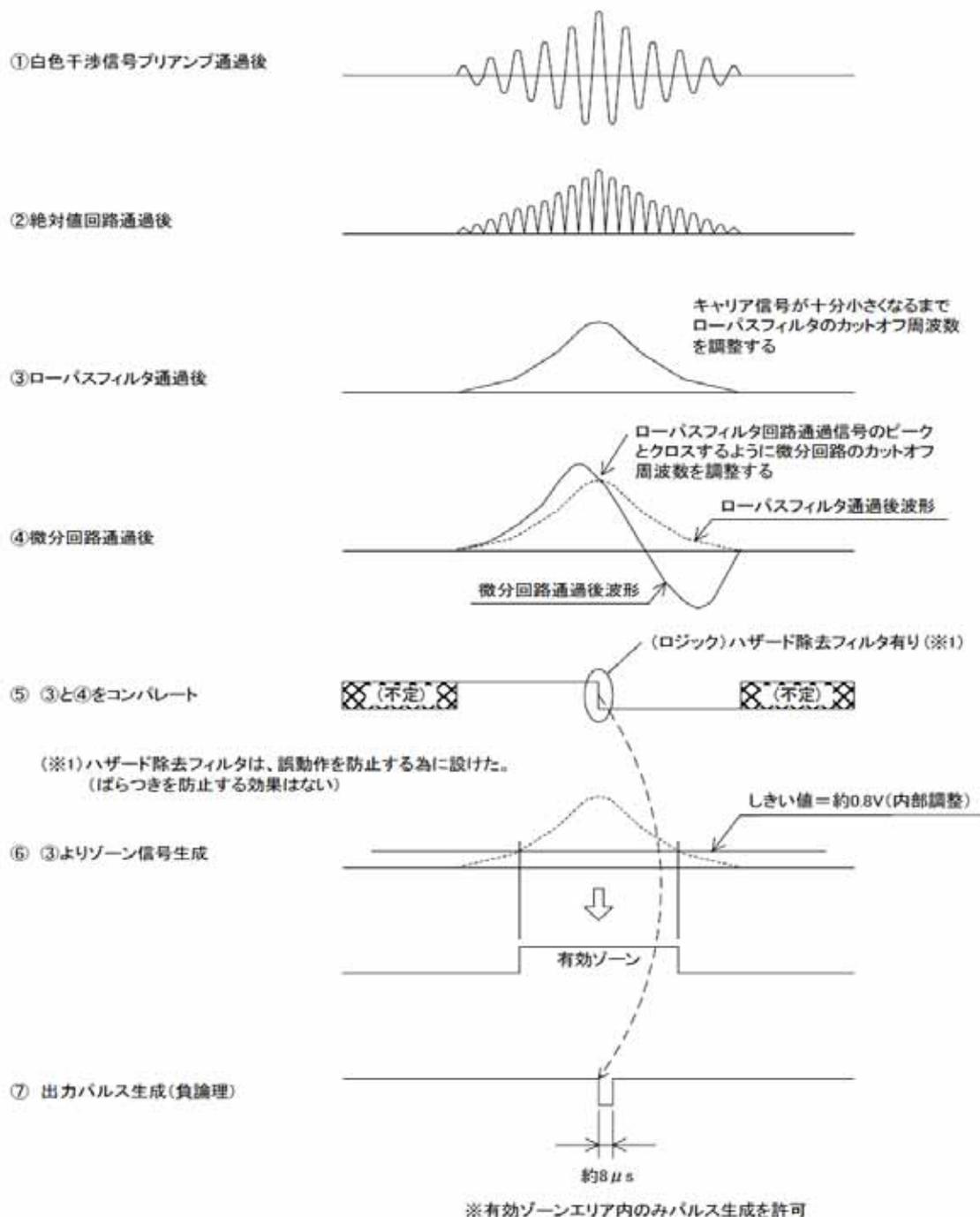


図 2.2.2-9 ピークトリガ検出回路動作原理

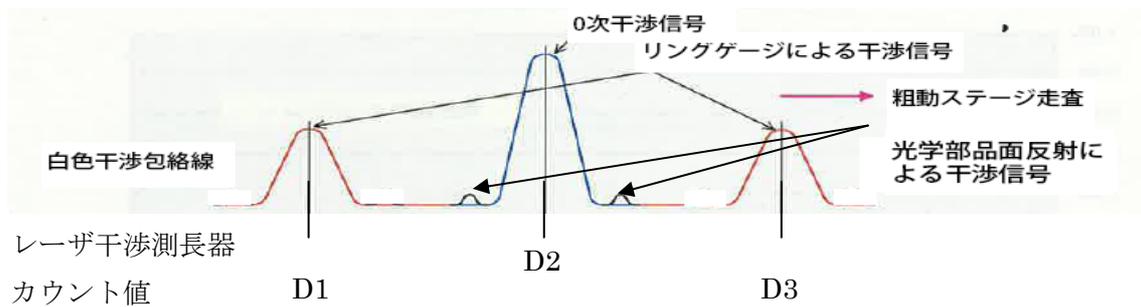


図 2.2.2-10 白色干渉信号 (0 次とリングゲージからの反射)

するように位置決めする。

- ⑤ リングゲージ測定干渉部の X、Y、 $\alpha$ 、 $\beta$  軸を移動させて干渉信号振幅が十分大きくなるように調整する。レーザ干渉計のカウント値が最大値を示すように X 軸を移動させる (リングゲージのセンタ出し)。
- ⑥ 次に  $\alpha$  を変化させて、レーザ干渉計のカウント値が最小値を示すようにする (リングゲージと低コヒーレンス光軸の平行出し)。
- ⑦ 標準干渉計部のピエゾステージを停止する。

#### 【測定】

- ⑧ 再度標準干渉計部の粗動ステージを全域に渡って移動させ、標準干渉計部の「 $D2=0$ 」の両側に発生する干渉信号の各ピーク位置におけるレーザ干渉測長器のカウント値「 $D1$ 、 $D3$ 」を専用ソフトで取り込み、 $(D3-D1)/2$  でリングゲージ内径に相当する測定値を自動検出する (図 2.2.2-10 参照)。
- ⑨ 繰返し測定が必要な場合は、上記「⑧」の自動測定を専用ソフトで任意回数 (例えば 25 回) 設定することで実現できる。このときの繰返し測定値はロギング (CSV) ファイル形式で測定日時をファイル名として自動保存される。
- ⑩ この専用ソフトは、リングゲージによる干渉信号の大きさがリングゲージ内径表面粗さの影響で小さくなる場合、光学部品面反射で発生する干渉信号との区別が難しくなる可能性があるため、0 次干渉信号のレーザ干渉測長器カウント値を中心に相対する間隔がリングゲージ呼び値に相当する干渉信号を選択できるようになっている。

上述の①～⑩の測定手順で測定が完了するまでの時間は概ね 3 分程度であり、従来の接触測定に要する時間約 30 分と比較して高速化を実現する事ができた。改良型システムで、内径 20 mm、50 mm のリングゲージを測定し、25 回の繰返し測定において標準偏差 0.03  $\mu\text{m}$  を得た。

(b) 微細リングゲージの校正技術の開発（再委託先；東京大学（平成20年度のみ））

1) H20年度の成果概要

図 2.2.2-11 は、当課題に関する研究成果の概要である。

2) H20年度の成果の詳細

2-1) 微細リングゲージの校正

微細内径のトレーサビリティの確立に対して、社会・産業界からのニーズが日毎に増えている。現在、接触式変位センサープローブで被校正物の表面をなぞることによって測定が行なわれているので、その表面に傷が付き易く、また測定に長い時間がかかることその他に、長さ測定の基本であるアッペの条件を満足させる測定が困難である。さらに、微細内径になるとプローブを挿入することが困難である。

ここでは、東精エンジニアリングのリングゲージ非接触測定装置を基本とし、測定干渉計のビームスプリッターに替わる新しい光デバイスを検討した。これは、微細でありさらに、干渉計の調整が簡易となるデバイスとした。図 2.2.2-12 は、プリズム型光デバイスによる測定干渉計の例であり、曲面の測定になるのでレンズで集光させてプリズムに入射

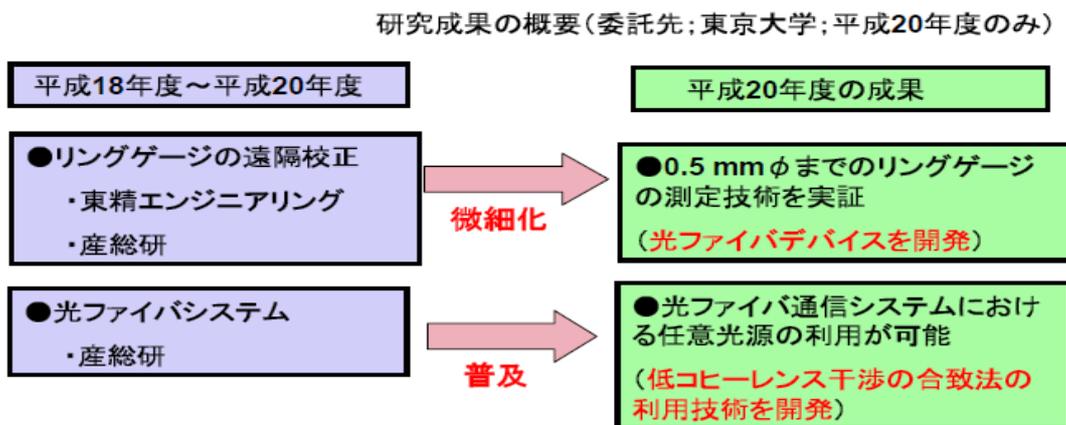


図 2.2.2-11 研究成果の概要

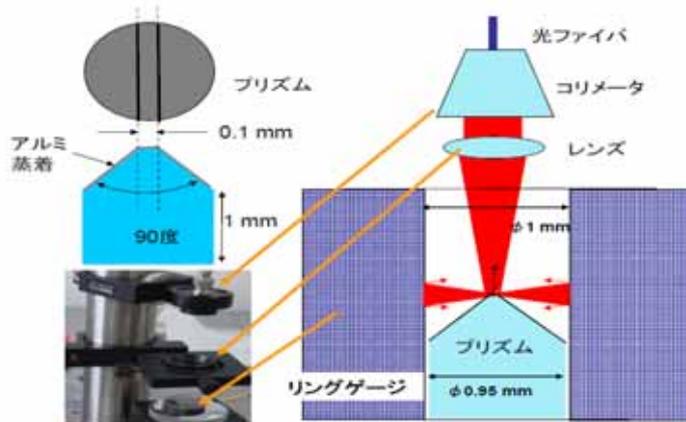


図 2.2.2-12 プリズム型測定干渉計

させた。波面分割型の干渉法であり、プリズムの上面エッジとリングゲージ内面からの反射光が干渉する。干渉計の調整は簡単であり、また、自動調整も容易になるので、遠隔測定用の簡易干渉計として有効である。図 2.2.2-13 に示すように、SN 比の良い信号が得られ、内径 1 mm のリングゲージの位置決めを精密に行なうことができた。この技術は安定な直角プリズムのみを使用し、簡単な構造となっているので、内径測定の高精度化・絶対化を行なっていく予定である。

図 2.2.2-14 は光ファイバデバイスの先端を 45 度に加工し、微小内径を測定する例である。光ファイバの側面での表面反射とリングゲージからの反射光が干渉する。図 2.2.2-15 に示すように、 $\phi 0.5$  mm のリングゲージにおいて SN 比の良い干渉縞信号が得られ、本干渉計に光路調整用機構を付加することによって精密測定できる可能性が実証された。また、図 2.2.2-16 は BNC コネクタ（内径；約 8 mm  $\phi$ ）の内径測定例である。各写真は、プローブの位置を 2 mm ずつ移動させたときの実験結果である。この実証実験から、SN 比の良い信号が得られていることが分かるので、東精エンジニアリングの標準干渉計との連携によって、微小内径の寸法の絶対測定が可能になると言える。本デバイスの利用によって、 $\phi 0.3$  mm までのリングゲージの内径の測定が可能であると考えられる。

## 2-2) 光ファイバシステムの普及

通信用光ファイバ網を直接利用するためには、光通信で使用されている光源を用いるのが有効である。低コヒーレンス干渉法はスペクトル幅が広い光源を用いることで、絶対位置決めを行うが、光通信で使用されている光源のスペクトル幅はあまり広くない。ここでは、スペクトル幅があまり広くない光源(部分コヒーレンス光源)を複数用いる合致法の技術を開発した。図 2.2.2-17

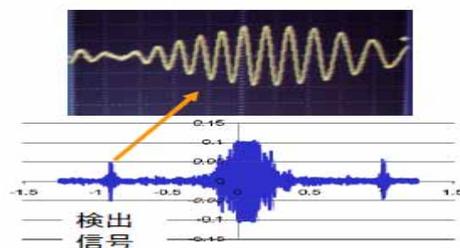


図 2.2.2-13 光電検出信号（ $\phi 1$  mm ゲージ）

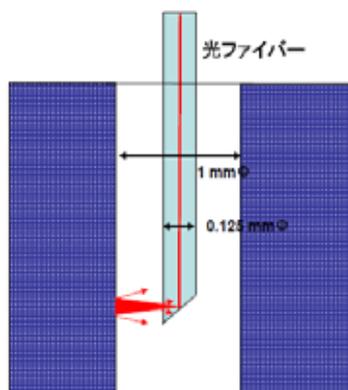


図 2.2.2-14 光ファイバ型測定干渉計

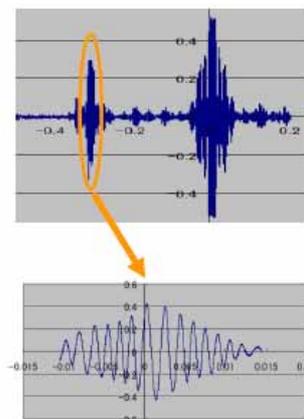


図 2.2.2-15 検出信号

は、中心波長が 1500 nm と 1550 nm の光源を用いた**ブロックゲージ**の測定例である。干渉縞パターンは鋭いピークを持たないので、各波長による干渉縞次数を一般に決定できないが、これらの干渉縞信号においてある適当な干渉縞の位相を各波長において測定し、これらの位相と中心波長とにより、考えられる多くの長さのセットを計算し、これらの中で各波長の合致度を求めると、**ブロックゲージ**の寸法が一義的に決定できることが分かる。表は光源の波長比が 1.033 の場合の合致度の実証実験結果であり、良い合致度が得られている。この結果、光ファイバ網の同一局内であれば、家庭などでも遠隔校正できることが実証された。



図 2.2.2-16 BNC コネクタの内径信号

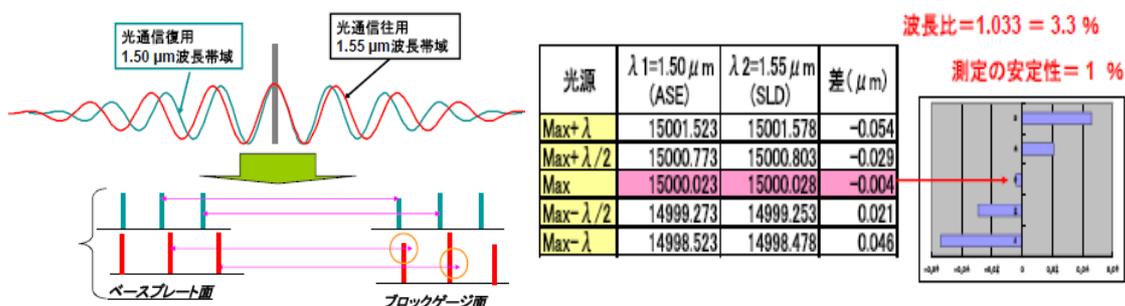


図 2.2.2-17 低コヒーレンス干渉の合致法の開発

### (c) リニアスケールの in situ 遠隔校正技術の開発

リニアスケールは高速・高分解能・耐環境性の利点から、半導体検査装置や工作機械などの移動ステージ位置決めによく利用されており、その市場は増加の一方である。リニアスケールは、ピコメートル、ナノメートルの分解能を持ち、単体では小さな不確かさで校正することが可能である。しかし、リニアスケールの校正の不確かさに比べて、リニアスケールを移動ステージに取り付ける際のミスアライメント (図 2.2.2-18) やリニアスケールの歪による不確かさが無視できない。そのため、リニアスケールを移動ステージに取り付けた後での in situ (その場) 校正が求められている。しかしながら、これら装置のある工場内に標準となる校正用のレーザ干渉計を設置することは、スペース、安全、クリーンルーム化、企業秘密の保守などの問題から難しい。ここでは、図 2.2.2-19 に示すように、リニアスケールを取り付けたステージ上に測定用の干渉計を構築し、それと数百 m 程度の単一モード光ファイバで接続された標準干渉計を出張校正車に搭載して、工場の駐車場や別室等、支障のない箇所に設置する in situ 遠隔校正技術を開発した。

図 2.2.2-20 に提案システムの光学系を示す。被校正器物である、工場内のリニアスケール付移動ステージ上に測定干渉計を構築する。標準干渉計や光源、検出部、信号処理

部は、出張校正車に搭載されており、測定干渉計と仮設の単一モード光ファイバで接続されている。低コヒーレンス光源の波長域は原則的には何でもよいが、光源や光ファイバ素子の種類、性能、コストの面から有利な光通信用の 1.5  $\mu\text{m}$  帯域を使用した。低コヒーレンス光源から出た光は、サーキュレーター、単一モード光ファイバを通じて、測定干渉計に送られる。測定干渉計により光路差を与えられた光は、再び単一モード光ファイバを通り、サーキュレーターの別のポートから標準干渉計に送られる。標準干渉計では、一方のコーナーリフレクターを走査しながら、光検出器で光干渉信号を測定する。標準干渉計がゼロ光路差となったとき、および、標準干渉計の光路差が測定干渉計の光路差を補償したときに

コントラストの良い低コヒーレンス干渉信号が発生する。標準干渉計では、標準となる 633 nm レーザ光も同軸に通り、低コヒーレンス干渉縞が発生したときの移動コーナーリフレクターの位置を測定する。

一般に、工場は校正室に比較して環境安定性が悪いので、測定を早く済ませる必要がある。そのため、低コヒーレンス干渉信号のリアルタイム処理システムを開発した。図 2.2.2-21 に信号処理の概要を示す。低コヒーレンス干渉信号の絶対値取得、ローパスフイ

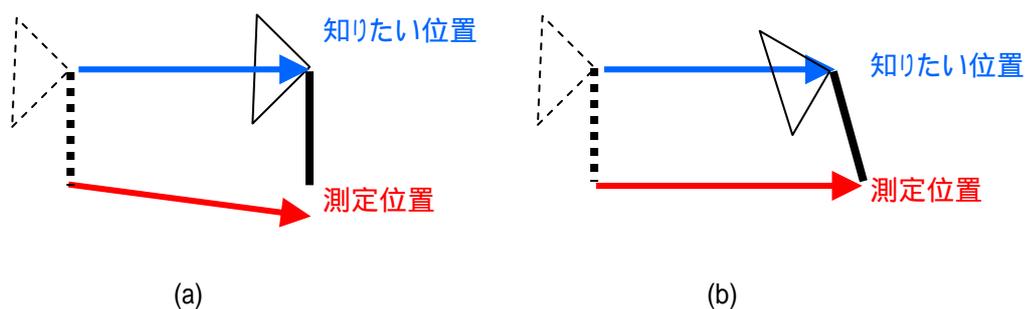


図2.2.2-18 リニアスケール取り付け時アライメントによる不確かさ原因の例  
(a) ミスアライメントによるコサイン誤差、(b) 軸オフセットによるアッベ誤差

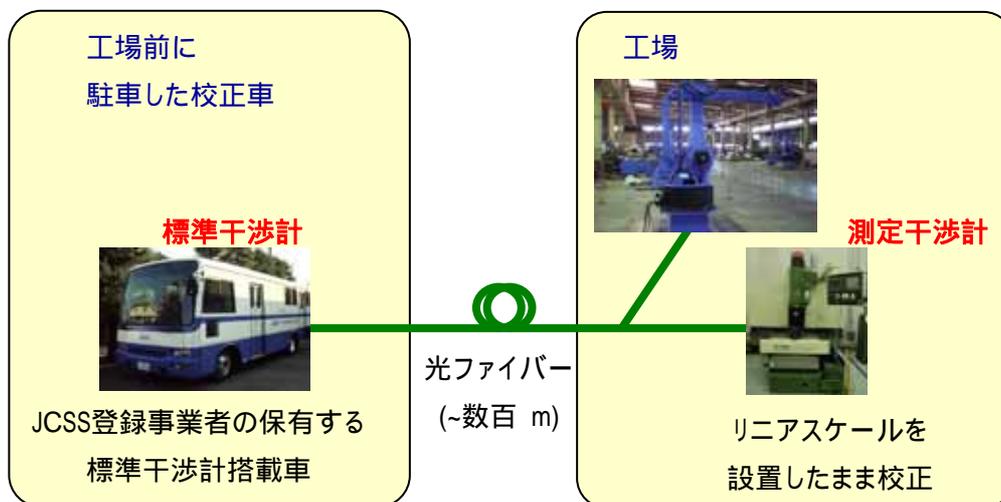


図2.2.2-19 工作機械等のin-situ遠隔校正

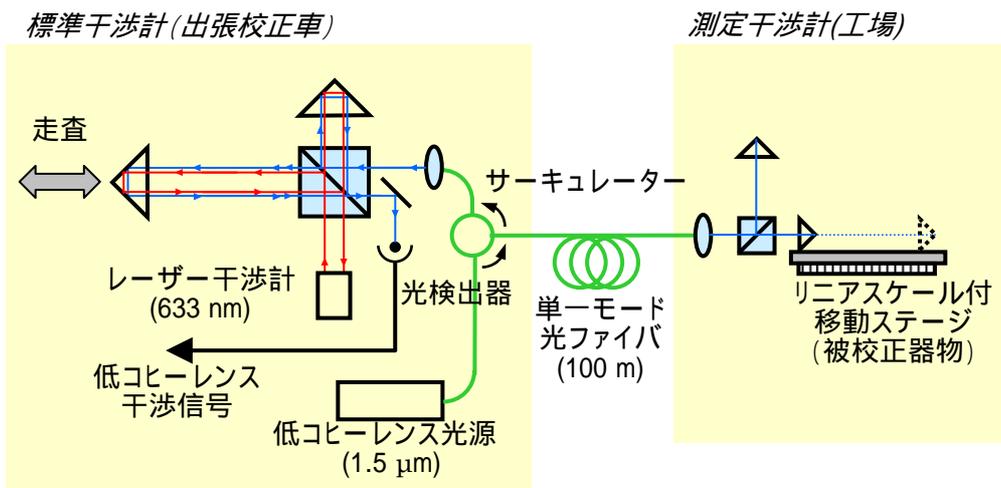


図2.2.2-20 提案システム光学系

ルタリング、時間微分までは、リングゲージ校正装置における処理と同様である。ここでは、微分信号のゼロクロス位置を検出してトリガを発生させ、そのときのレーザ干渉計の測長値を取得する。

また、出張校正車内は、気温を標準温度である 20 °C に制御することは困難で、気温、気圧変動も大きいことが予測されるので、低コヒーレンス光と He-Ne レーザ光が完全に同軸になるようにし、環境の影響をキャンセルするようにした。低コヒーレンス光は空気 の群屈折率が影響し、He-Ne レーザ光は空気 の位相屈折率が影響する。測長結果の導出 にはこれらの比を用いるが、この比の値は環境によらずほぼ一定である。長さ標準の分野 で広く用いられている Ciddor の式を用いて計算すると、図 2.2.2-22 に示すように、気温 が 7 °C から 35 °C の範囲で、この比の値の変化量は $\pm 1 \times 10^{-7}$  以下であることが分かる。 よって、たとえ気温分布や変動が大きくても、低コヒーレンス光と He-Ne レーザ光が同

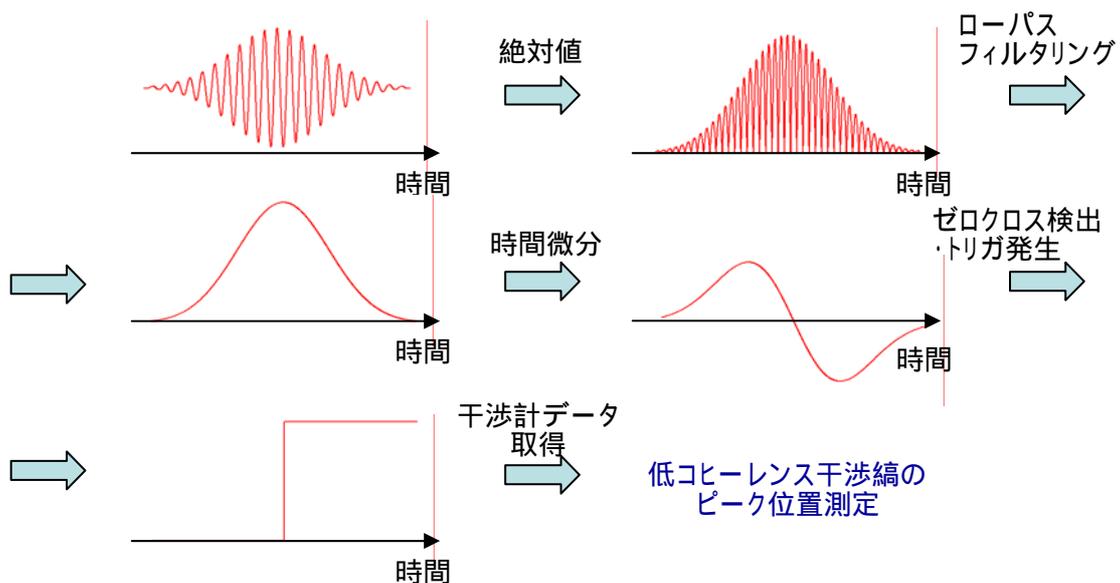


図2.2.2-21 低コヒーレンス干渉縞のリアルタイム処理

軸であれば、その影響は大きく低減できる。気圧や湿度の影響はそれよりさらに小さいので無視できる。

まず、実験室内で、測定干渉計の光路差を変化させ、開発システムと市販のレーザ干渉計とで同時に測定してその結果を比較した。図 2.2.2-23 に結果を示す。±200 mm の変位に対して、開発システムと市販レーザ干渉計との差は±76 nm 以下であった。

開発システムの測定不確かさの要因には、標準干渉計の標準レーザ干渉計、空気屈折率、低コヒーレンス光とレーザ光との光軸アライメント、測定干渉計の空気屈折率、被校正ステージの安定性、検証用レーザ干渉計の不確かさ、光軸アライメント、測定の再現性が挙げられる。それぞれの要因の不確かさを検討し、開発システムの不確かさを見積もった。

見積もられた拡張不確かさ ( $k=2$ ) は  $2 \times \sqrt{(1.7 \times 10^{-7} \cdot L)^2 + (43)^2}$  [nm] ( $L$ : 変位 [mm]) と見積もられ、200 mm において 0.11 μm、250 mm において 0.12 μm と見積もられた。

次に、標準干渉計を出張校正車に搭載して、in situ 遠隔校正の実証実験を行った。被校正装置として、株式会社サムタクの協力を得て、同社工場（東京都町田市）内にある NC フライス盤（可動距離：X 軸 600 mm、Y, Z 軸 400 mm、位置分解能：0.1 μm）を用いた。出張校正車として、図 2.2.2-24 にあるように、レジアスペース（トヨタ自動車）を利用し、車内に標準干渉計を設置し、そこから 100 m の単一モード光ファイバを工場内に引いた。図 2.2.2-24 (c)に示すように、NC フライス盤の主軸に、背中合わせのコーナーリフレクターを取り付けた。一方のコーナーリフレクターは低コヒーレンス光の測定干渉計用で、もう一方は、今回比較のために同時測定した市販 633 nm He-Ne レーザ干渉計用である。ステージの移動量を双方のシステムで両側から測定し、結果を検証した。

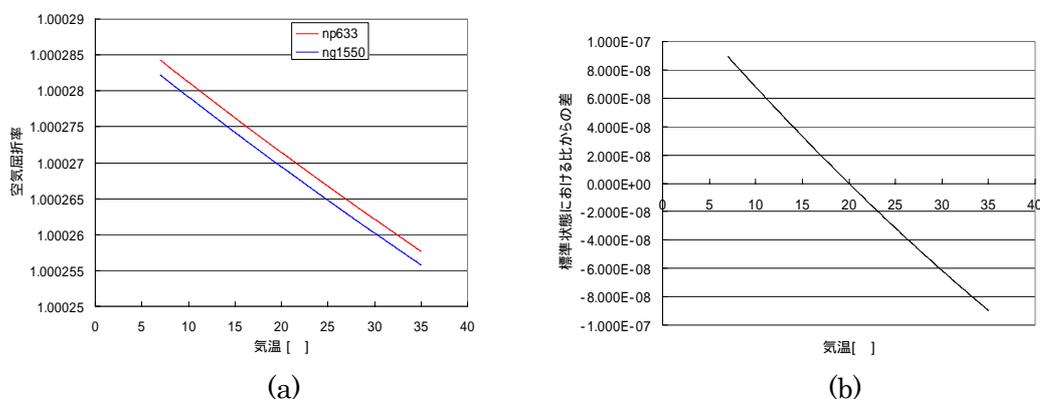


図 2.2.2-22 空気屈折率への温度の影響。(a) 633 nm での位相屈折率と 1550 nm での群屈折率の温度依存性、(b) 633 nm での位相屈折率と 1550 nm での群屈折率の比の温度依存性

ステージは、以下の二つの移動パターンで測定した。

- ・パターン1：0 mm から 280 mm まで、70 mm ステップでの移動を 3 回繰り返し測定
- ・パターン2：0 mm と 280 mm の位置で 1 回測定

測定時には、測定干渉計、標準干渉計の気温、気圧、物体温度を測定し、空気屈折率と物体の熱膨張を補正した。2 日間にわたり 4 回測定した。測定干渉計の平均気温は

19.7 °C から 20.6 °C、標準干渉計の平均気温は 7.4 °C から 13.0 °C であった。本システムとレーザ干渉計での測定値を図 2.2.2-25 に示す。結果を比較したところ、どちらも、NC フライス盤移動ステージに内蔵されている リニアスケール の変位と比べて、280 mm の移動に対して約 5 μm の差があった。これは、スケールが設置されている位置と干渉計光軸との間の距離と、別途測定した移動ステージのピッチングとから求められるアッペ誤差によく合致しており、リニアスケール の in situ 校正が必要なことを示している。一方、開発システムとレーザ干渉計との結果は、250 nm 以下で一致した。被校正ステージの安定

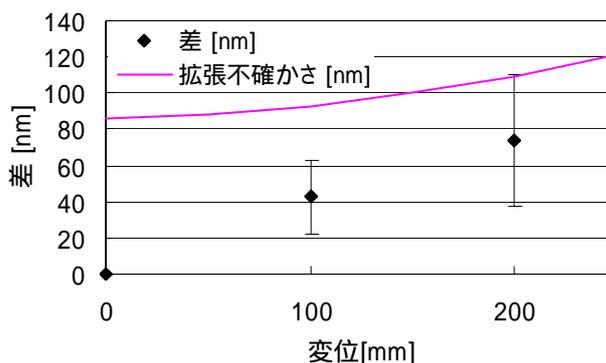


図 2.2.2-23 実験室内における実験結果。ステージ変位に対する開発システムとレーザ干渉計との測長結果の差を示す。エラーバーは 10 回の測定の標準偏差を示す。



(a)



(b)



(c)

図 2.2.2-24 in-situ 遠隔校正実証実験の様子。(a) 出張校正車、(b) 出張校正車内の標準干渉計、(c) 被校正工作機械上に構築された測定干渉計

性が $\pm 1 \mu\text{m}$ 程度あることを考慮すると、充分よく一致していると言え、本システムの有効性が確認された。今回は実証実験のため、検証用のコーナーリフレクターが1個余分に設置されており、干渉計も個別の部品から校正されていて大型であるが、将来は一体型光学素子を用いて、光ファイバを小型の部品に接続するだけで工作機械の校正が行える構成も可能である。

#### (6) 実用化の見通し

改良型リングゲージ測定干渉計部と標準干渉計部を用いて、リングゲージ呼び寸法 $\phi 20 \text{ mm}$  ( $\phi 19.99946$ ) と  $\phi 50 \text{ mm}$  ( $\phi 50.00083$ ) の25回繰返し精度検証を行った結果、繰返し精度は $\phi 50 \text{ mm}$ のゲージに対して $0.03 \mu\text{m}$ であった。

本プロジェクトで開発したリングゲージ校正システムは、産業技術総合研究所関西センターに納入され、今後リングゲージ校正に使用される予定である。

また、リニアスケールの in-situ 遠隔校正システムも JCSS 登録事業者との共同研究を通じて、技術移転、人材育成を行っており、校正サービス開始を目指している。

本プロジェクトで開発したブロックゲージ、リングゲージ、リニアスケール等実用長さ標準器の遠隔校正技術は、国内外の学会発表、展示会出展、成果普及セミナー、プレス

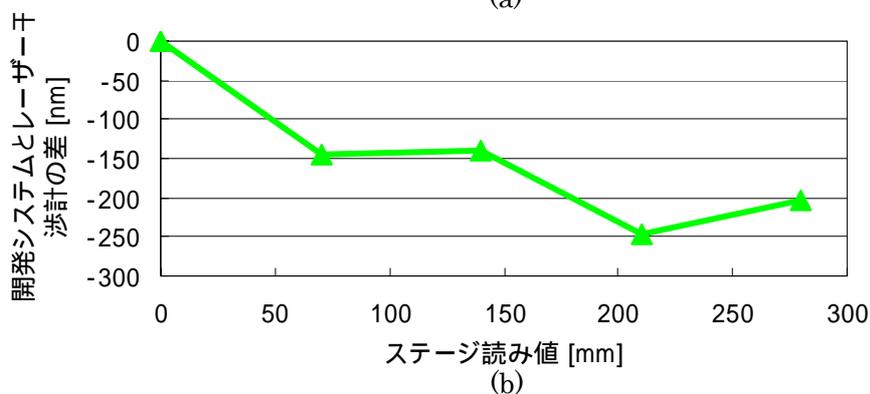
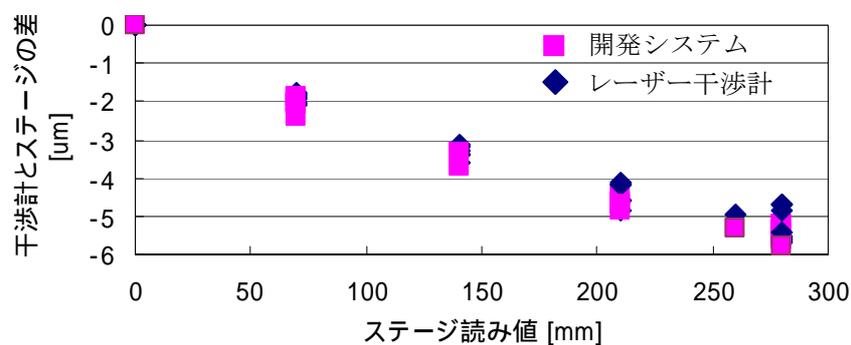


図 2.2.2-25 工場における工作機械の in situ 校正実験結果。(a)ステージ内蔵リニアスケール読み値に対する開発干渉計、レーザー干渉計の測長結果。(b)ステージ内蔵リニアスケール読み値に対する開発干渉計とレーザー干渉計の差。

発表等を通じて積極的に広報しており、複数の企業から興味を持たれている。特に、敷地面積が広い企業内の校正ネットワーク、現状の校正方法では困難な微小内径、大内径の非接触計測、校正機能内蔵の工作機械、等で積極的な問い合わせを得ている。また、他の分野ではあるが、当該技術を応用した濃度標準(液体、ガス)の遠隔校正に関して、企業から技術の有効性の支持を得て、試験研究を開始している。

## (7) 目標の達成状況

リングゲージのような曲面を持つ実用長さ標準器の校正、大型装置に設置されたリニアスケールのような多様な設置環境に対応する校正技術を開発した。本研究の最終目標である、リングゲージの校正における不確かさ  $0.2 \mu\text{m}/50 \text{ mm}$  については、繰返し精度  $0.03 \mu\text{m}$  を達成した。また、リニアスケールの校正における不確かさも、実験室内での実験から  $250 \text{ mm}$  において  $0.12 \mu\text{m}$  と見積もられ、最終目標を達成した。さらに、工場内の工作機械の遠隔 in-situ 校正の実証実験を行い、市販の  $633 \text{ nm}$  He-Ne レーザ干渉計による比較結果と良い一致を示した。

中間評価で指摘頂いた事項へは次に示すように対応した。

- ・産業技術総合研究所とユーザの間を専用の光ファイバで直結することが必須のため、この光ファイバの確保が制限を与える。また、公衆回線(交換機経由)は利用できないため、長距離伝送に利用するには、コストや権益などの障害が大きい。光ファイバ LAN をどのように利用するか、あるいは複合的に利用していくのが課題である。

一般に開放されている光ファイバ網の動向や価格について情報収集を行うとともに、H18 年度からは、企業敷地内の私設光ファイバ網の利用や、校正時のみ一時的に光ファイバを仮設する利用形態でも充分有効な課題を中心に技術開発を行なった。また、通信用光ファイバ網を直接利用するために、現在光通信で使われている波長帯域の狭い光源でも利用可能な手法を開発した。これにより、同一電話局内であれば、既存の通信用光ファイバ網を使用した校正が可能であり、中小企業が集中している地域内での校正ネットワーク網を構築できる可能性を引き続き調査している。

- ・関連する産業界の生の声、要望を集約し、実用化に向けた課題抽出とその対策を具体化して、実用推進スピードを加速すべきである。

国内外の学会発表、展示会出展、成果普及セミナー、プレス発表等を通じて積極的に広報しており、複数の企業から興味を持たれている。特に、敷地面積が広い企業内の校正ネットワーク、現状の校正方法では困難な微小内径、大内径の非接触計測、校正機能内蔵の工作機械、等で積極的な問い合わせを得ている。特に微小内径計測への要望が多く、校正技術の研究を開始した。また、他の分野でも濃度の遠隔校正に関して、企業から技術の有効性の支持を得た。

- ・成果発表、特に査読付き学会論文(外国)への発表を推進すべきである。

H18 年度からは、登録事業者と共同研究を行ないながら、登録事業者からユーザへの校正を想定した応用技術開発が中心となったため、査読付き学会論文への発表よりは特許

申請や口頭発表等の方が多くなったが、学術的な成果に関しては、今後も積極的に査読付き学会論文へ投稿していく予定である。

#### 外部発表状況

15FY-17FY

特許 1 件

18FY

特許 0 件

論文、解説 1 件

(査読なし)

- 1) 松本弘一、美濃島薫、平井亜紀子、“進展する長さ標準とその普及”、計測標準と計量管理、56、30-35(2006)

口頭発表 4 件

- 1) 松本、“計量器校正情報システムの研究開発”、光計測シンポジウム 2006、(パシフィコ横浜、2006 年 6 月)。
- 2) 平井、松本、佐々木、“光ファイバーによる実用長さ標準の遠隔校正技術”、光計測シンポジウム 2006、(パシフィコ横浜、2006 年 6 月)
- 3) 松本、“Remote calibration system “e-trace””,KRISS 計測クラブ、(韓国大田、2006 年 10 月)。
- 4) 松本、“Remote Calibration System of “e-trace” Project”、第 4 回日・韓・中計量測定 の協力セミナー、(韓国済州島、2007 年 3 月)

その他の公表 1 件

- 1) 光ナノテクフェア出展 (横浜、2006 年 6 月)
- 2) 佐々木、“e-trace における光ファイバーの活用”、NMIJ 計測クラブ長さクラブ平成 18 年度第二回会合、江東区、2007 年 2 月 22 日。

19FY

特許 10 件

- 1) 「内径測定装置」、特願 2007-157959
- 2) 「内径測定装置」、特願 2007-157858
- 3) 「寸法測定装置及び寸法測定方法」、特願 2007-157945
- 4) 「寸法測定装置及び寸法測定方法」、特願 2007-157830
- 5) 「寸法測定装置及び寸法測定方法」、特願 2007-157831

- 6) 「寸法測定装置及び寸法測定方法」、特願 2007-157941
- 7) 「寸法測定システム」、特願 2007-157952
- 8) 「低コヒーレンス干渉の合致法による長さ測定方法」、特願 2007-285987
- 9) 「内径測定装置」、特願 2008-022688
- 10) 「寸法測定装置及び寸法測定方法」、特願 2008-023117

#### 論文、解説 0 件

#### 口頭発表 2 件

- 1) H. Matsumoto, K. Sasaki, A. Hirai, “Remote Calibration of Practical Lengths by Using Low-Coherence Interferometry and Optical Fiber Network,” PTB-BIPM Workshop on the Impact of Information Technology in Metrology, Berlin, 2007 年 6 月 6 日（招待講演）.
- 2) 松本、佐々木、平井、“タンデム低コヒーレンス干渉計による空気屈折率の遠隔測定（Ⅱ）” Optics & Photonics Japan 2007, 吹田市, 2007 年 11 月 26 日.

#### その他の公表 2 件

- 1) 平井、佐々木、松本、“実用長さ標準器の効率的校正のための遠隔校正技術の開発” 計測標準フォーラム第 5 回合同講演会, 大田区, 2007 年 11 月 22 日.
- 2) 平井、佐々木、松本、橘田、小林、“低コヒーレンスタンデム干渉計によるリニアスケールの遠隔 in-situ 校正” 2008 年春季第 55 回応用物理学関係連合講演会、船橋市, 2008 年 3 月 29 日.

#### 20FY

#### 特許 0 件

#### 論文、解説 3 件

（査読なし）

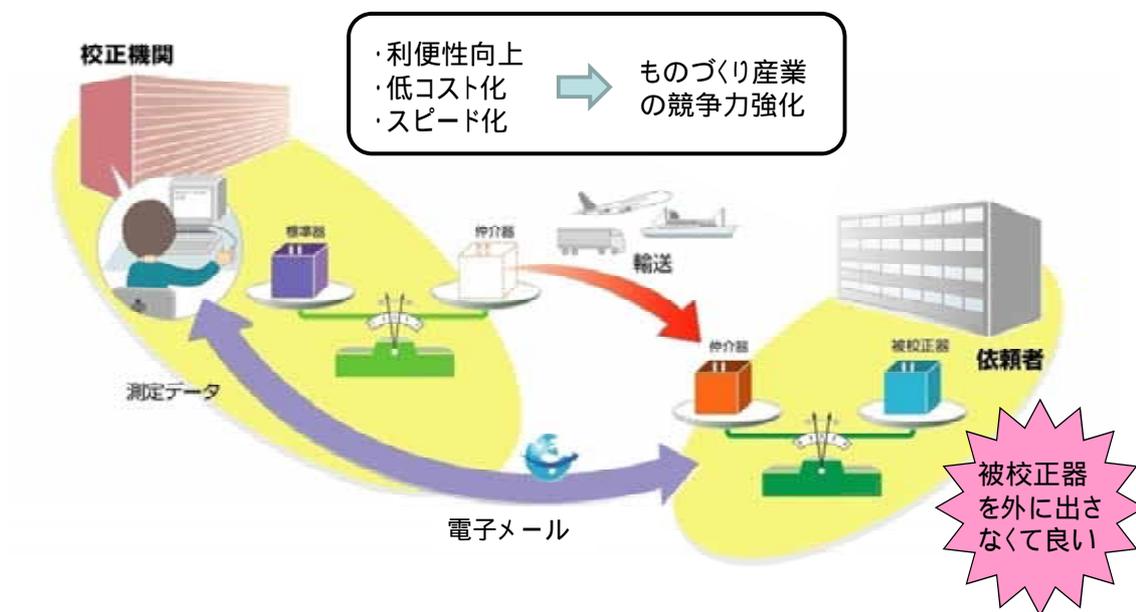
- 1) 松本弘一、“日本の計量標準の現状と今後”、M & E, 2008 年 8 月号、pp.94-98.  
（査読あり）
- 2) H. Matsumoto, K. Sasaki, A. Hirai, “Remote Measurement of Refractive Index of Air Using Tandem Interferometer over Long Optical Fiber,” Jpn. J. Appl. Phys., Vol.47, No.9, 2008, pp.7386-7389.
- 3) H. Matsumoto, K. Sasaki, “Remote Measurements of Practical Length Standards Using Optical Fiber Networks and Low Coherence Interferometers,” Jpn. J. Appl. Phys., Vol.47, No.11, 2008, pp.8590-8594.

口頭発表 5件

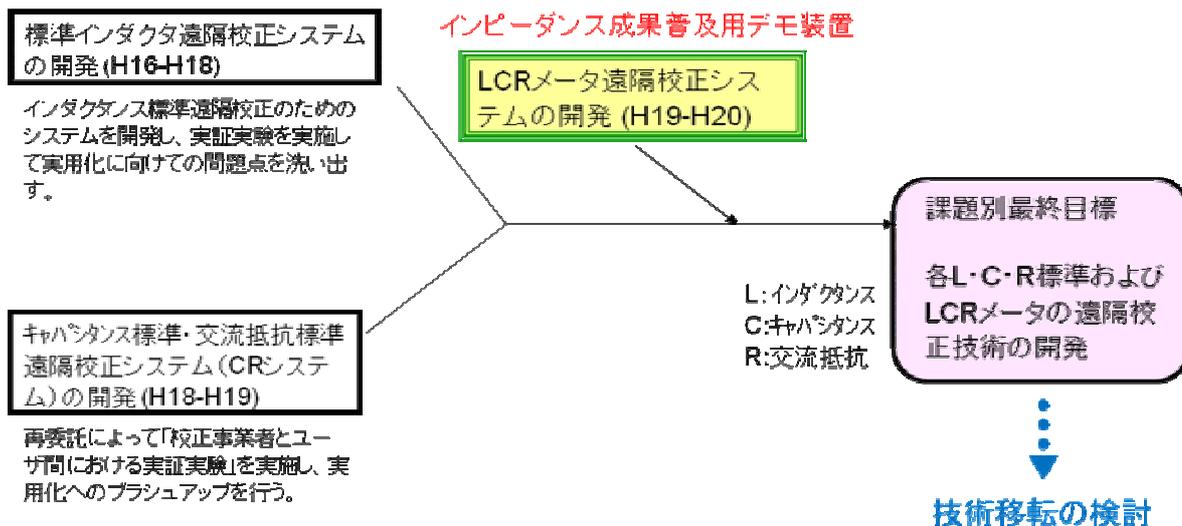
- 1) A. Hirai, J. Kitta, F. Kobayashi, K. Sasaki, H. Matsumoto, “Remote and In-Situ Calibration of Linear Scale by Low-Coherence Tandem Interferometer,” CLEO/QELS2008, San Jose, 2008年5月5日.
- 2) 松本弘一, ”日本の計量標準の現状と今後 / e-trace”, 第5回日・韓・中 計量・測定協力セミナー, 2008年5月25日, 東京国際展示場.
- 3) 平井, 橘田, 松本, ”低コヒーレンスタンデム干渉計によるリニアスケールの遠隔 in-situ 校正(Ⅱ) –チャンネルドスペクトルの利用–”, 2008年秋季 第69回応用物理学会 学術講演会, 春日井市, 2008年9月2日.
- 4) 松本弘一, 佐々木薫, 平井亜紀子, ”長さの遠隔校正のためのタンデム低コヒーレンス干渉計における合致法の適用”, 2008年精密工学会秋季大会学術講演会, 仙台市, 2008年9月17日.
- 5) H. Matsumoto, A. Hirai, “Remote Measurements of Lengths by Excess-Fraction Method Using Optical Fiber Networks and Tandem Interferometer,” Optical Fiber Communications, San Diego, 2009年3月23日.

その他の公表 0件

## -2.3 電気標準



遠隔校正の概念



研究目標達成までのフロー図

## (1) 研究開発の概要

近年のエレクトロニクス産業の発展、取り分け携帯電話に代表されるモバイル情報通信機器産業の発展はめざましい。これらの産業分野においては、機器の性能向上や品質管理の面から計量標準の重要性が再認識され、また顧客より製品の計量トレーサビリティ証明を要求されることが多くなって来ている。このような中、特にインピーダンス分野における標準の拡充と供給を望む声大きい。インピーダンス標準とは、概ね周波数 50 Hz～1 MHz 域におけるキャパシタンス・インダクタンス・交流抵抗の各標準を指す。つまり、これらの電気量に係る標準器、あるいは計測器（LCR メータ）の遠隔校正を実現することが本研究の目的である。現状においては、ものづくり企業の品質管理部署等が、キャパシタンスやインダクタンスあるいは交流抵抗の標準器、または計測器の校正（標準供給）を受けたいとする場合には、自らが自らの負担と責任において、これらの被校正器を校正事業者に運ばねばならない。このため、被校正器に対する移動環境の影響や輸送コスト、あるいは校正期間中は被校正器が使用できないこと等、現状の標準供給体制には様々な問題が指摘されている。これらの問題に対する解決策のひとつが遠隔校正法の実現である。つまり、ユーザは、自身の被校正器を校正事業者を持ち運ぶことなく、校正を受けることができる。これが実現できれば、校正における利便性の向上やスピード化、低コスト化などが図られ、国内ものづくり企業の競争力強化に大きく貢献できると考えられる。

ところで、遠隔校正は標準器あるいは計測器を持ち運ぶことなく校正が実現できる等、利用者にはメリットが大きい反面、原理上それほど高精度な校正は期待できない。（少なくともインピーダンス標準の分野においては、国家標準レベルの高精度な校正が要求される場合には、従来通りの持ち込み校正が望ましい。）すなわち、インピーダンス標準における遠隔校正の利便性と校正の精度は両立させることは難しい。そこで、本手法のメリットを最大限に生かすため、図 2.3-1 に示すように、高精度な校正が要求されないトレーサビリティの階層、すなわち上位校正事業者と一般校正事業者間、あるいは一般校正事業者ともものづくり企業の間のように、校正事業者から計測現場での利用をターゲットに設定して遠隔校正のシステム開発を行う。

しかし一口に、例えば「標準キャパシタ」と言っても、その範囲は、容量において pF から F、周波数において 50～60Hz の商用周波数から MHz 帯と広範囲に亘る。そこで、本研究では、遠隔校正のフィージビリティスタディとして、キャパシタンス 0.1  $\mu$ F、インダクタンス 10 mH、交流抵抗 1 k $\Omega$  の標準器、およびこれらに対応する LCR メータ の測定レンジを具体的校正対象に取り上げ、これらを周波数 1 kHz～10 kHz において、標準不確かさ 80 ppm 以内で遠隔校正するシステム作りを目標とした。

平成 18 年度では前年度までに開発した「標準インダクタ遠隔校正システム」を用いて校正事業者と依頼者（ユーザ）間での遠隔校正の実証実験を行い実用化に向けての問題点を明らかにした。また、次の課題である「キャパシタンス・交流抵抗標準の遠隔校正システム（CR システム）」の開発に着手した。平成 19 年度では、CR システム開発を完了し、CR システムを用いて再委託先の事業所間での遠隔校正の実証実験を行った。（最終的に、

標準インダクタ遠隔校正システムと統合した「L・C・R 遠隔校正システム」として完成した。)平成 20 年度では、最後の課題として、「LCR メータ遠隔校正システム」の開発に取り組み、システムの完成後、再委託先の事業所と産総研 (NMIJ) の間で実証実験を実施した。

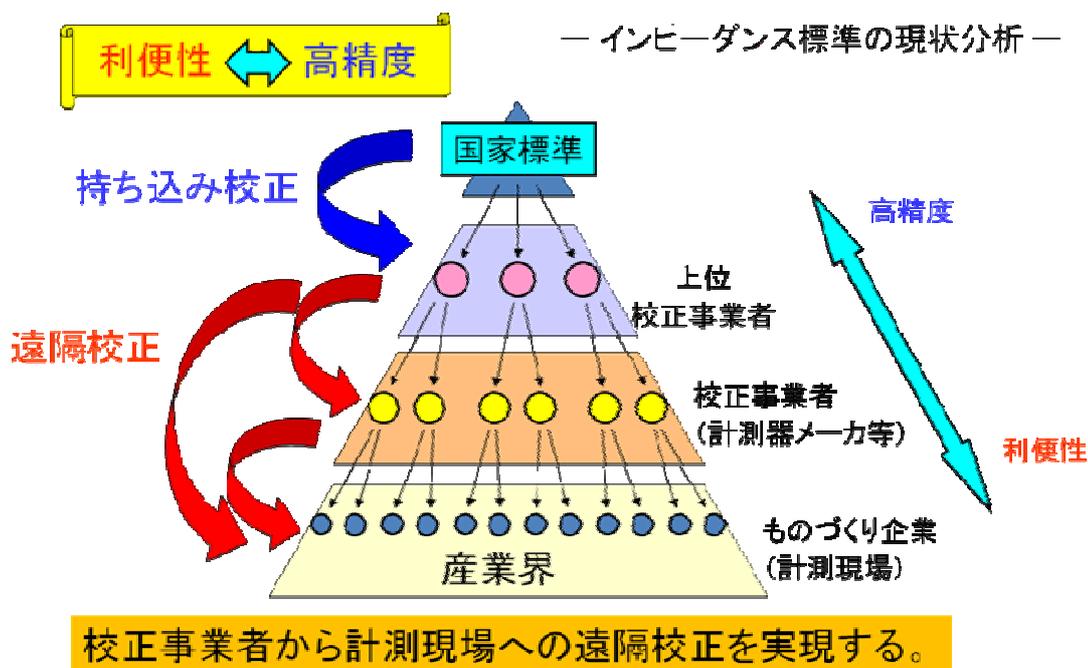


図 2.3-1 遠隔校正に適したトレーサビリティ階層

## (2) 中間目標

### (a) H15 年度中間目標

(直流) 平成 14 年度末までに 1V プログラマブル電圧標準用ジョセフソン接合アレーチップ及び冷凍機システムを開発する。また単電子トンネル接合素子による電流量子標準の実現の可能性を検討する。

(交流) AC-DC トランスファ標準の供給においては、実験室レベルで不確かさ 10 ppm の校正精度を達成する。遠隔校正 (2-5V, 10Hz - 1MHz) を実施して最高不確かさ 10ppm (1kHz) の校正精度を達成する。

### (b) H17 年度中間目標

(交流) 遠隔校正によるインダクタンス標準仲介器の標準不確かさ 50 ppm 以下を達成する。

### (3) 最終目標

(直流) 商用電源が利用できる地球上の任意の場所において電圧標準の供給を可能にするため、GPS 周波数を基準として利用し 10 K 冷凍機による動作が可能なジョセフソン電圧標準システム (電圧: 最大 10 V) を確立し、不確かさ 0.1 ppm を達成する。

(交流) インダクタンスの遠隔校正システムの完成と、同様な手法のキャパシタンスや交流抵抗、LCR メータ校正への拡大。そのための、同軸スキャナ装置の多チャンネル化、LCR を一つにまとめた仲介器のコンパクト化、遠隔校正システムの高機能化などの実現。1 kHz~10 kHz の範囲で、LCR すべての対象校正器物の標準不確かさとして 80 ppm を目標とする。

### (4) 本研究内容の構成

- (a) 標準インダクタの遠隔校正
- (b) 標準キャパシタ・標準交流抵抗器の遠隔校正
- (c) LCR メータの遠隔校正

### (5) これまでの成果

#### (5-1) H17 年度までの研究成果のまとめ

(直流) 10 K 冷凍機による動作が可能な 10V ジョセフソン電圧標準システムを開発し、最終目標である不確かさ 0.1 ppm を達成した (H17 年度で終了)。

(交流) 「標準インダクタ遠隔校正システム」を開発し、中間目標とした標準不確かさ 50 ppm を達成した。また、産総研とユーザ (国内 3 事業所) の間で、遠隔校正の実証実験を実施し、システムの妥当性を確認した。

#### (5-2) H18 年度 - H20 年度の成果

H18 年度においては、本プロジェクトの前期期間 (平成 13 年度-17 年度) に開発した「標準インダクタ遠隔校正システム」の実用化に向け、校正事業者と校正依頼者 (ユーザ) 間での実証実験を実施し、遠隔校正の実現についての問題点の洗い出しを行った。また、キャパシタンス標準および交流抵抗標準の遠隔校正を実現するため新たなシステム作りに着手した。平成 18 年度には、キャパシタンス・交流抵抗遠隔校正システムに用いる仲介用キャパシタおよび仲介用交流抵抗器を開発し、それぞれについて温度特性と安定度の評価を行った。

H19 年度-H20 年度においては、「キャパシタンス・交流抵抗遠隔校正システム (CR システム)」の開発を完了し、再委託先の事業者間で実施した実証実験によってその妥当性を確認した。さらに、校正対象を市販の LCR メータにまで広げ、そのためのシステム (「LCR メータ遠隔校正システム」) を開発した。LCR メータの遠隔校正についても同様に、実証実験を実施して、妥当性を確認した。標準インダクタ、標準キャパシタ、標準交

流抵抗器、および LCR メータのいずれも場合においても、目標とする「1 kHz～10 kHz において標準不確かさ 80 ppm 以内」の遠隔校正を実現した。

#### (a) 遠隔校正の概要

標準インダクタ (L)、標準キャパシタ (C)、標準交流抵抗器 (R) と言った標準器を校正対象とした遠隔校正の概要を図 2.3-2 に示す。これは、所謂仲介器を用いた遠隔校正法である。まず、校正事業者において、校正事業者の所有する標準器を基準に、仲介器の校正を行なう。校正された仲介器は同軸スキャナ (切替器) および温度計と共に校正依頼者に送付される。(これらは接続した状態で輸送用コンテナに収納され送付される。) 次に、依頼者側において、同軸スキャナに被校正器と市販 LCR メータおよびパソコン (PC) を接続して校正システムを構築し、測定プログラムを起動して測定を行なう。(使用する測定プログラムは事前に依頼者の PC にインストールされているものとする。) 校正システムおよび測定プログラムは、開始から終了まで全自動で動作するよう設計され、依頼者側に測定のための特別なトレーニングやスキルを必要としない。依頼者側で行なわれた測定結果は、電子メールによって校正事業者に自動転送され、校正事業者でデータ解析を行ったのち、校正結果を同じく電子メールで返送する。尚、測定プログラムの起動には別途プログラムキーコードが必要で事前にメール等で依頼者に送付される。プログラムキーコードには測定条件や測定期間、依頼者 ID 等が記載されており、依頼者によるシステムの誤操作やデータ改ざん等を防止する機能を果たす。プログラムキーコードおよび測定データは共に暗号化されて送受信される設計となっている。

校正対象を計測器、すなわち LCR メータとする場合も基本的には同様である。ただし、LCR メータの遠隔校正の場合は、図 2.3-3 に示すように、校正対象が依頼者の LCR メータ自体となる。

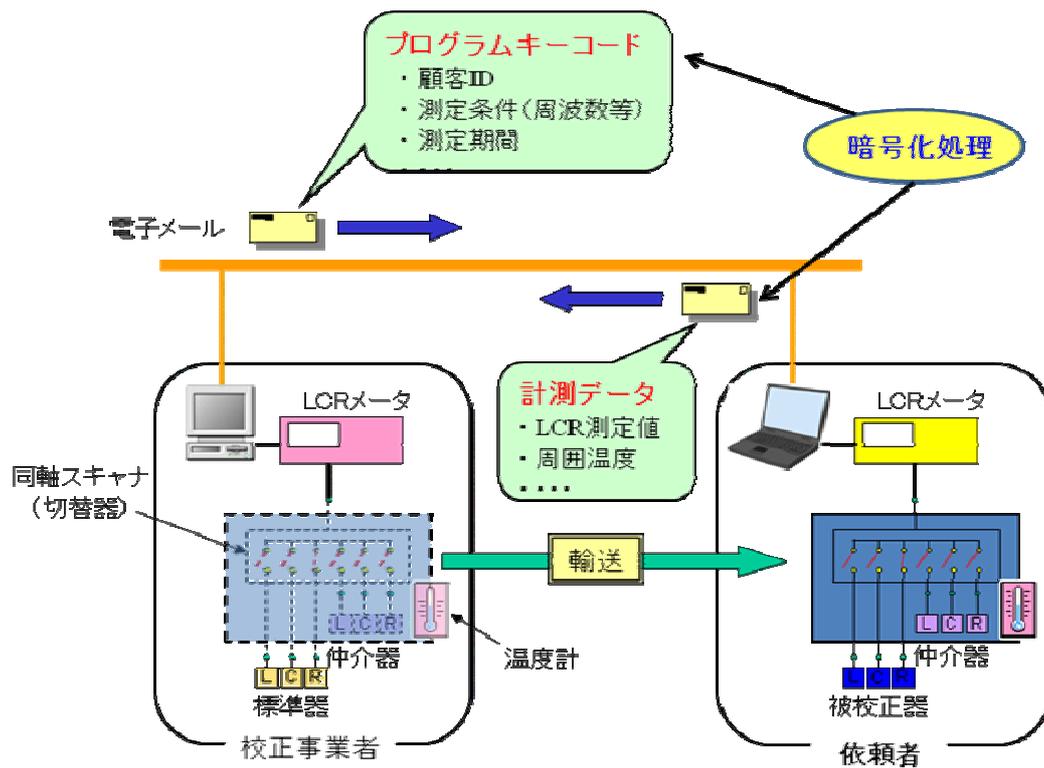


図 2.3-2 遠隔校正の概要 (被校正器 : L・C・R 標準器)

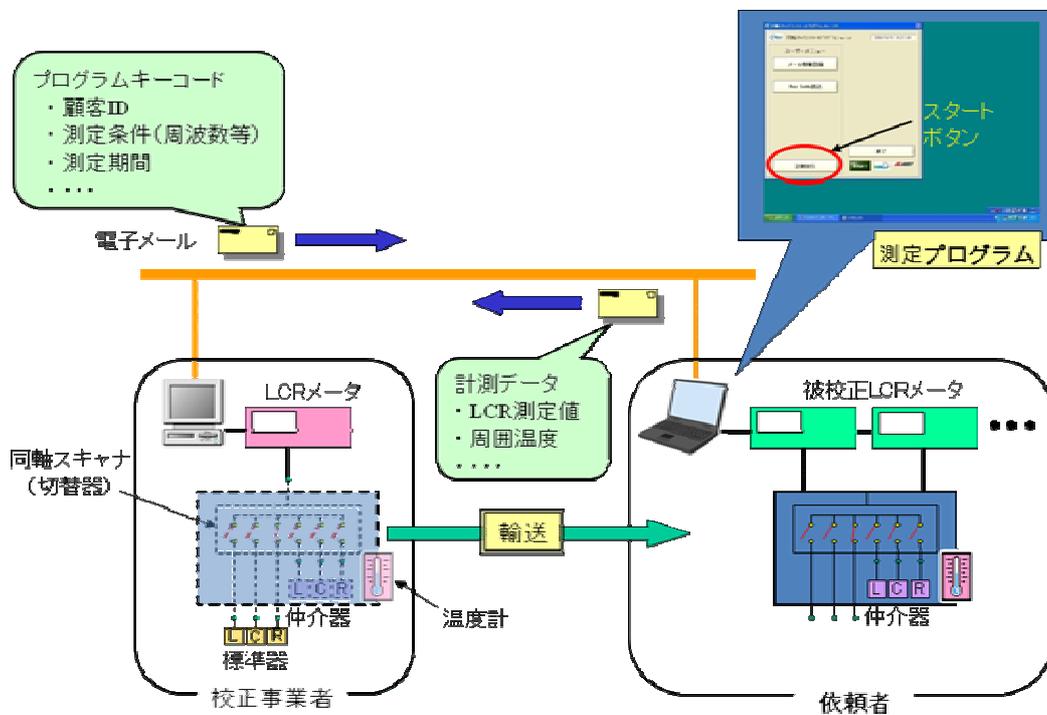


図 2.3-3 遠隔校正の概要 (被校正器 : LCR メータ)

## (b) 遠隔校正システムの開発と実証実験による妥当性評価

### 1) 標準インダクタの遠隔校正

標準インダクタの遠隔校正については、平成 17 年度までに産総研と校正事業者間においては実施され、目標とする不確かさでインダクタンスの遠隔校正が可能なのはすでに確認済みである。これを踏まえ、平成 18 年度では、図 2.3-1 における第二階層以下、すなわち、校正事業者と利用者（計測現場等）の間での同様の実験を行い、実用化に向けての問題点の洗い出しを行った。実験は、校正事業者側の役割を日本電気計器検定所（日電検）に、依頼者側の役割を長野県工業技術総合センター（長野）にそれぞれ委託し、NMIJ で開発した「標準インダクタ遠隔校正システム」を用いて、日本電気計器検定所が長野県工業技術総合センター保有の標準インダクタを遠隔校正する形態で行った。実験スケジュールは下記の通りであり両者の間を 5 回、システムを往復させ実証実験を行った。なお、システムを搬送中の内部温湿度・衝撃加速度は、システムに添付したデータロガーで記録し、輸送中に異常がないかを確認した。

第 1 回 H18/6/12～14（日電検）→H18/6/15～21（長野）→H18/6/22～27（日電検）

第 2 回 H18/9/11～13（日電検）→H18/9/14～21（長野）→H18/9/22～27（日電検）

第 3 回 H18/10/16～18（日電検）→H18/10/19～25（長野）→H18/10/26～31（日電検）

第 4 回 H18/11/13～15（日電検）→H18/11/16～22（長野）→H18/11/23～28（日電検）

第 5 回 H18/12/11～13（日電検）→H18/12/14～20（長野）→H18/12/21～26（日電検）

遠隔校正システムの温度・湿度および衝撃加速度変化の一例を図 2.3-4 に示す。5 回の実験を通し、システム内部の温度は最低 5℃最高 27℃、湿度は最低 43%最高 71%、衝撃加速度は最高 5G を記録した。尚、実用化を念頭にした実証実験であるため、輸送手段には特別な配慮はせず通常の宅配便を用いた。

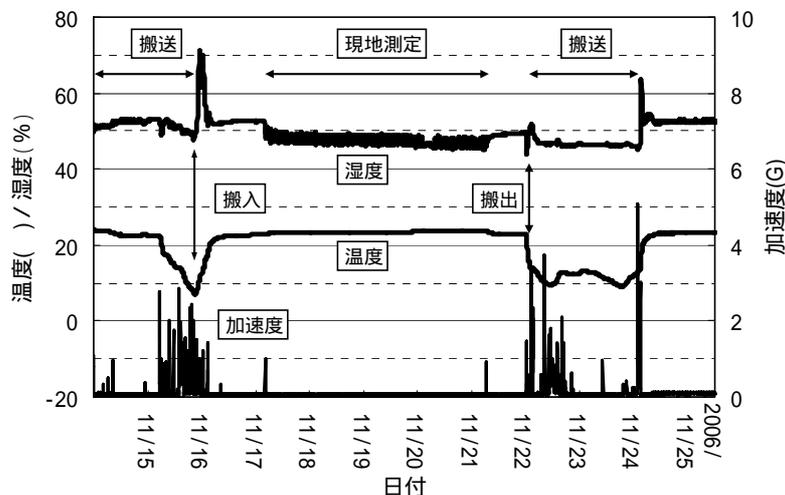


図 2.3-4 仲介器内部温湿度・加速度変化の一例（日電検→長野→日電検）

図 2.3-5 に標準インダクタ遠隔校正の実証実験の結果を示す。被校正器は長野県工業技術総合センター保有の 10 mH 標準インダクタ 安藤電機社製 RS-106 である。仲介器にはサンジェム社製の 10 mH インダクタを 4 台用いた。図中、左端が持ち込み校正による結果、続く 5 点が遠隔校正の結果を示す。同図に示すように、5 回の実証実験において、校正結果の中心値はすべて 20 ppm 以内に収まり再現性の高さが示された。また遠隔校正の標準不確かさは 43 ppm と見積もられ、通常の持込校正と比べても遜色ない不確かさ評価結果が得られた（図のエラーバーは拡張不確かさ、すなわち標準不確かさの 2 倍を示す）。輸送手段に特別な配慮をせず、仲介器の搬送に通常の宅配便を用いた場合でも、校正の再現性と不確かさ評価結果から、10 mH インダクタの校正においては、目標とした標準不確かさ 80 ppm での遠隔校正は十分可能と結論付けられる。

尚、実証実験に参加した日本電気計器検定所および長野県工業技術総合センターから遠隔校正システムについて以下の指摘を受けた。これらの意見を以後のシステム開発に反映させた。

- 標準インダクタ遠隔校正システムに対する再委託事業者からのコメント・改善点
  - ・自身の標準インダクタを搬送せず、現状の持ち込み校正と同等レベルの校正が得られることは、搬送の振動等によるダメージを回避する上で有効である。
  - ・インダクタンス標準だけでなく、キャパシタンス標準、交流抵抗標準についても校正可能なシステムであればより有効に機能する。
  - ・校正事業所への測定データの返送が、自動でおこなわれることが望ましい。
  - ・スケジュール機能を付加し、セットアップ後ノータッチで測定が実行されることが望ましい。加えて、依頼者側で機器が使用されない休日に測定を実施することが望ましい。
  - ・接続ケーブルの断線等システムに不具合がある場合、校正事業者側でその事実を把握する機能を追加することが望ましい。

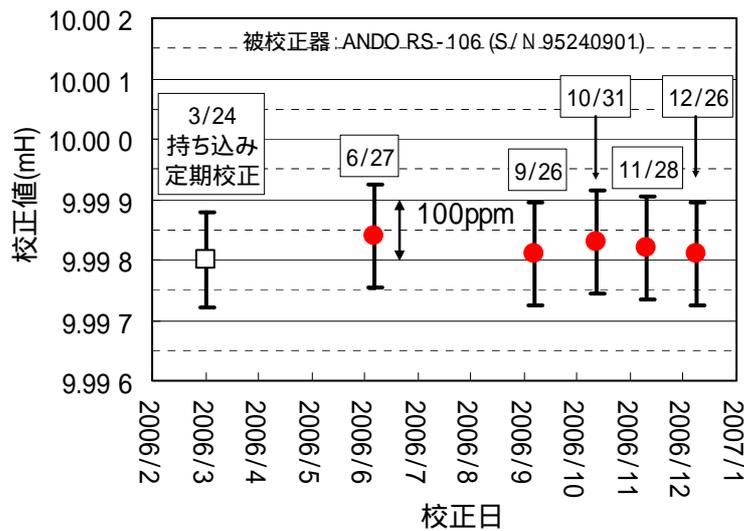


図 2.3-5 標準インダクタ遠隔校正の実証実験結果（校正事業者/依頼者間）

## 2) 標準キャパシタ・標準交流抵抗器の遠隔校正

「標準インダクタ遠隔校正システム」をベースにして、キャパシタンスおよび交流抵抗の遠隔校正システム（CR システム）の開発を行った。上述のように、標準インダクタの遠隔校正においては、概ね良好な結果が得られているが、実用化の面では再委託事業者からのコメントにもあるように、いくつかの問題点も内在する。標準インダクタの実証実験で得られた結果を詳細に検証して、CR システムの設計に反映させた。CR システムの開発にあたっては、まず遠隔校正に用いる仲介器の開発・評価が必要となる。平成 18 年度では、仲介用キャパシタおよび交流抵抗器の開発と安定度・温度特性の評価を行った。仲介用キャパシタ（0.1  $\mu\text{F}$ ）としては小型セラミックキャパシタを、仲介用交流抵抗器（1  $\text{k}\Omega$ ）としては、位相調整型薄膜抵抗器を用いてそれぞれ製作した（図 2.3-6）。尚、図中右端は「標準インダクタ遠隔校正システム」における仲介器である。CR システムの仲介器は、インダクタンスの場合に比べて大幅にコンパクト化することができた。

これら仲介用のキャパシタ、交流抵抗器のそれぞれ 2 個ずつについて安定度と温度特性の評価を行った。評価結果を図 2.3-7、2.3-8 および図 2.3-9 に示す（温度特性は各 1 個についての結果であるが、もう一方の仲介器についてもほぼ同様な特性であった）。開発した仲介器は、キャパシタ、交流抵抗器ともに遠隔校正の目標標準不確かさ 80 ppm に対して十分な性能を有することが分かった。



図 2.3-6 仲介器（キャパシタ、交流抵抗器）の外観

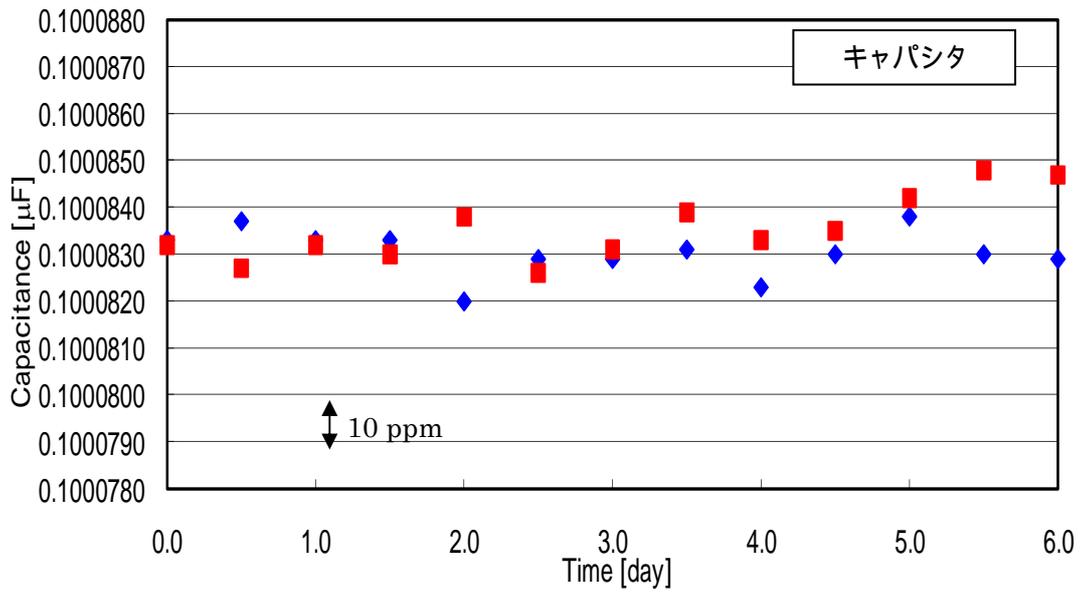


図 2.3-7 仲介器（キャパシタ）の安定度

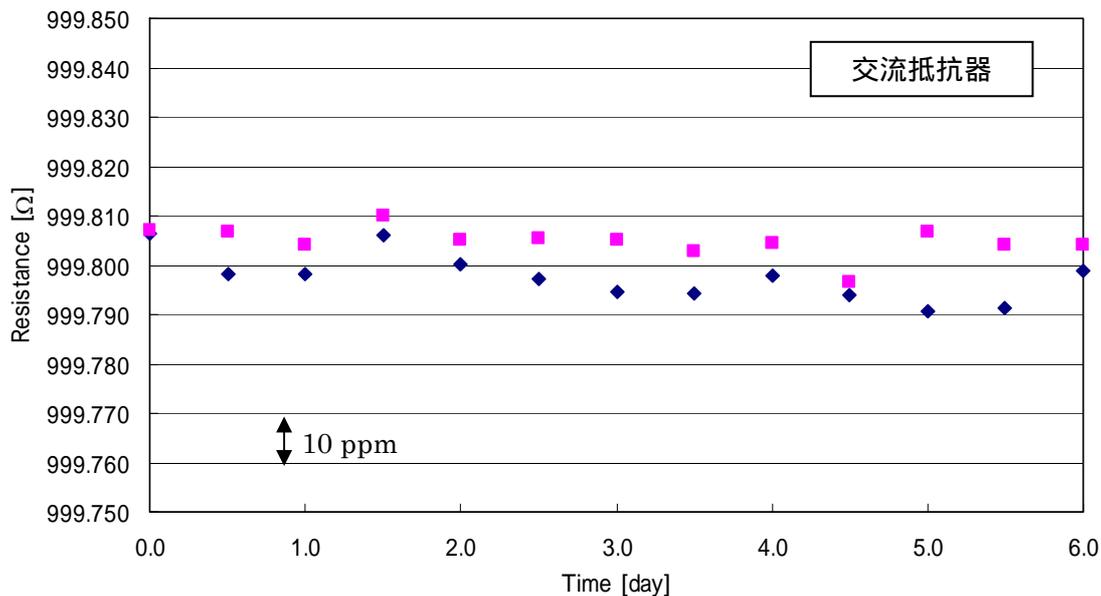


図 2.3-8 仲介器（交流抵抗器）の安定度

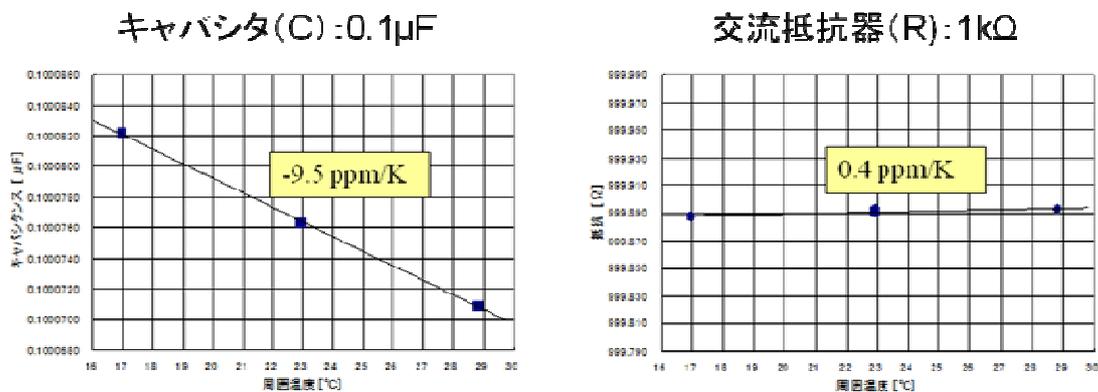


図 2.3-9 仲介器（キャパシタ、交流抵抗器）の温度特性

「キャパシタンス・交流抵抗遠隔校正システム（CR システム）」については、平成 18 年度までに開発した「標準インダクタ遠隔校正システム」をベースにし、これに、キャパシタンスと交流抵抗を加える形でシステムの開発を行った。ハード面では、前述のようにキャパシタンスと交流抵抗用の小型仲介器を製作し、温度特性と短期安定度を評価した後、これらを遠隔校正システム内に追加搭載した。ソフト面においては、キャパシタンスと交流抵抗の測定が実施できるよう測定プログラムを書き換えると共に、インダクタンスでの実証実験を踏まえ、データの信頼性とシステムの操作性をさらに向上させるために、データ自動転送機能や測定スケジュール管理機能等、新たな機能をプログラムに追加した。図

2.3-10 にキャパシタンス・交流抵抗遠隔校正システムの外観を示す。



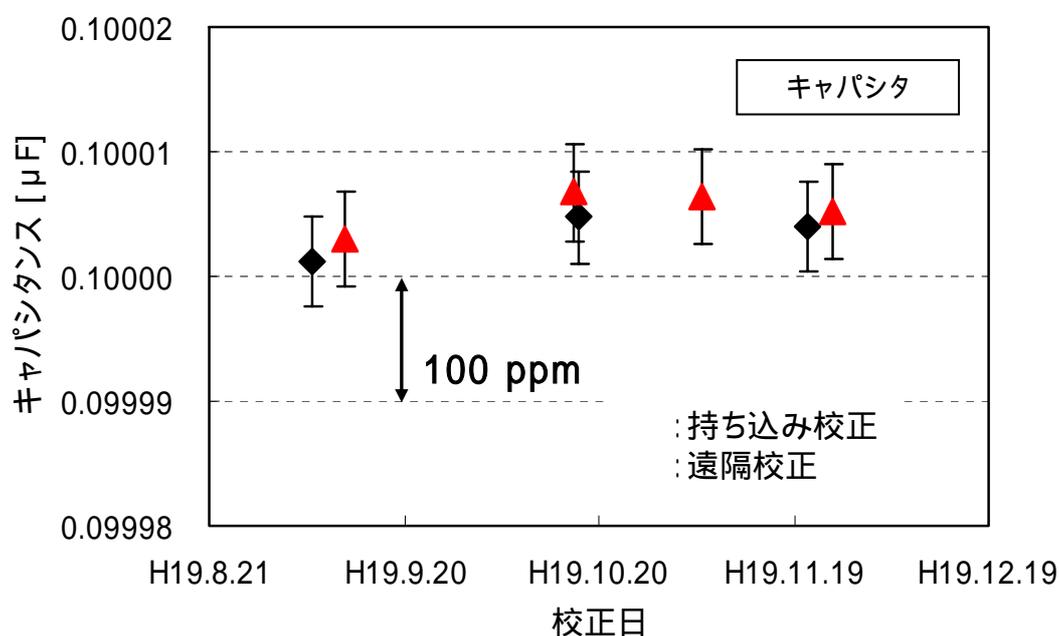
図 2.3-10 キャパシタンス・交流抵抗遠隔校正システムの外観

CR システムによる実証実験は、平成 19 年度に、長野県工業技術総合センター（長野）および日本電気計器検定所（日電検）の 2 機関に再委託し、長野県工業技術総合センターを校正事業者の役割として、日本電気計器検定所を依頼者の役割として実施した。具体的には、長野県工業技術総合センターが、NMIJ の開発した CR システムを用いて、日本電気計器検定所保有の標準キャパシタ  $0.1 \mu\text{F}$  と交流抵抗器  $1 \text{k}\Omega$  を遠隔校正する形態で実施した。システムには、仲介用キャパシタ、交流抵抗器をそれぞれ 2 個搭載した。実験スケジュールは下記の通りであり両機関の間を 4 回、CR システムを往復させ実証実験を行った。なお、輸送中におけるシステム内部の温湿度・衝撃加速度は、システムに添付したデータロガーで記録し、輸送中に異常がないことを確認した。

- 第 1 回 H19/9/1～3(長野) →H19/9/8～12(日電検) →H19/9/15～16(長野)
- 第 2 回 H19/10/6～8(長野) →H19/10/13～17(日電検) →H19/10/13～16(長野)
- 第 3 回 H19/10/27～29(長野) →H19/11/3～7(日電検) →H19/11/10～11(長野)
- 第 4 回 H19/11/17～18(長野) →H19/11/24～28(日電検) →H19/12/1～2(長野)

各実験においてシステム内部の温度・湿度・衝撃加速度を、データロガーでモニタした結果、4 回の実験を通し、システム内部の温度は最低  $6 \text{ }^\circ\text{C}$  最高  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 、湿度は最低 48 % 最高 63 %、衝撃加速度は最高 3G を記録した。図 2.3-11 に実証実験の結果を示す。◆は従来の持ち込み校正、▲は CR システムによる遠隔校正の結果を示す。キャパシタについて、全ての校正結果は $\pm 30 \text{ ppm}$  以内に収まっており、かつ遠隔校正結果と最も近い時期に実施した持ち込み校正との偏差の最大値は  $20 \text{ ppm}$  であった。エラーバー

で示す遠隔校正の標準不確かさは 38 ppm、持ち込み校正の標準不確かさは 37 ppm と見積もられた。交流抵抗器について、全ての校正結果は $\pm 4$  ppm 以内に収まっている。エラーバーで示す遠隔校正の標準不確かさは 38 ppm、持ち込み校正の標準不確かさは 37 ppm と見積もられた。キャパシタンス・交流抵抗を一括で遠隔校正した結果は、器物を移動させる従来の持ち込み校正と標準不確かさの範囲内で一致した。合計 4 回実施した実証実験の結果から、キャパシタ 0.1  $\mu\text{F}$  および交流抵抗器 1  $\text{k}\Omega$  の被校正器に対して、目標とする標準不確かさ 80 ppm 以内で遠隔校正が実現できることを確認した。



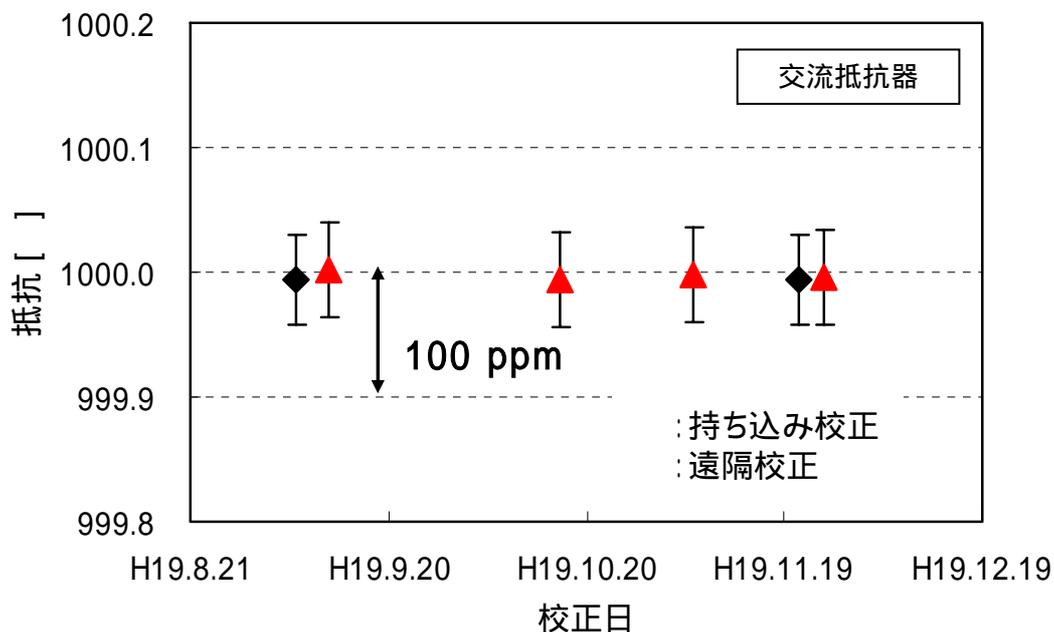


図 2.3-11 標準キャパシタおよび交流抵抗器遠隔校正の実証実験結果

### 3) LCR メータの遠隔校正

「LCR メータ遠隔校正システム」については、新たに多チャンネル同軸スキャナを開発し、校正対象として最大 6 台の被校正 LCR メータと、L・C・R 各 1 個の仲介器をまとめて搭載できるシステムを設計・製作した。さらに、LCR メータ遠隔校正用に、新たに測定プログラムを開発し、LCR メータの校正においては必須となるデータの OPEN・SHORT 補正が自動的に実施できるプログラムを開発した。また、データの暗号化機能を強化した。LCR メータ遠隔校正システムの外観を図 2.3-12 に示す。尚、中間評価でのコメントに基づき、コンパクト化した装置の開発も行った (図 2.3-13)。ただ、産業界の意見を集約したところ、実際の校正現場の状況によっては、コンパクト型 (図 2.3-13) よりも、むしろ可搬型 (図 2.3-12) の方が使いやすい場合もあり、使用状況によってケースバイケースの使い分けが考えられる。尚、コンパクト型では、被校正 LCR メータを最大 4 台、仲介器を最大 6 個とした。



図 2.3-12 LCR メータ遠隔校正システム（可搬型）の外観



図 2.3-13 LCR メータ遠隔校正システム（コンパクト型）の外観

キャパシタ、交流抵抗器の場合と同じく、LCR メータの遠隔校正に関する実証実験を、平成 20 年度に、長野県工業技術総合センターおよび日本電気計器検定所の 2 機関に再委託して実施した。実験は、NMIJ を仮想依頼者とし、長野県工業技術総合センター、日本電気計器検定所が共に校正事業者の役割を担当して行った。具体的には、NMIJ 保有の LCR メータを、両機関がそれぞれ所有する標準器を基準に、NMIJ が開発した「LCR メータ遠隔校正システム」を用いて遠隔校正する形態で実施した（図 2.3-14 参照）。尚、

図 2.3-12 と図 2.3-13 のシステムは、性能において基本的に同等なため、実証実験は図 2.3-12 のシステムを用いて行った。

また、実験は二度に分けて実施した。まず校正対象 LCR メータを 1 台 (Agilent E4980A (MY46102022)) とし、これの 0.1  $\mu\text{F}$  レンジおよび 1  $\text{k}\Omega$  レンジを遠隔校正する実験を行った。(システムに搭載した仲介器は公称値 0.1  $\mu\text{F}$ 、1  $\text{k}\Omega$  であり、各 1 台の小型仲介器を使用した。) 実験スケジュールは下記の通りである。

遠隔校正実験日：

H20/6/23 (長野県工業技術総合センターによる遠隔校正)

H20/7/12 (日本電気計器検定所による遠隔校正)

H20/7/26 (日本電気計器検定所による遠隔校正)

H20/8/9 (長野県工業技術総合センターによる遠隔校正)

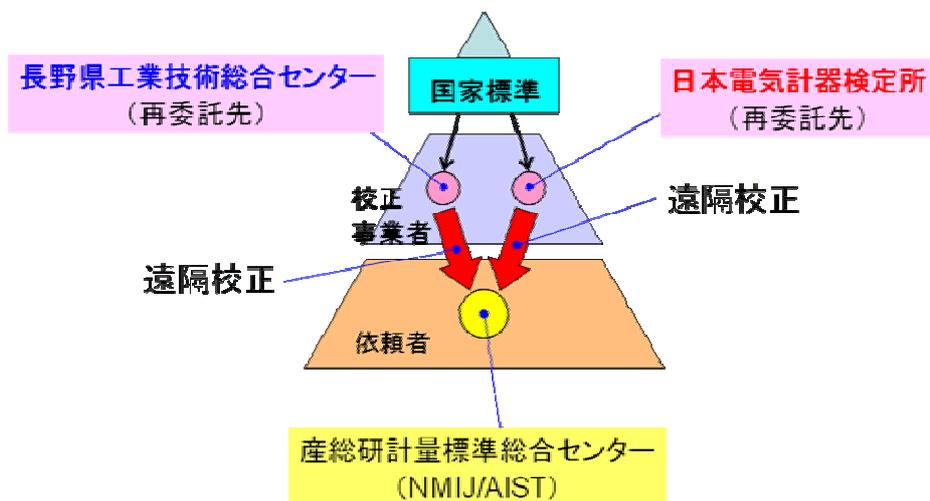


図 2.3-14 LCR メータ遠隔校正実証実験の方法

実証実験結果を図 2.3-15 に示す。グラフ縦軸の「LCR メータの表示値－仲介器の値」を LCR メータの校正値として定義した。また、仲介器の値については、校正事業者 (長野、日電検) と依頼者 (NMIJ) での測定環境の違いによる温度差を考慮して、あらかじめ評価した仲介器温度係数 (図 2.3-9) による補正を行った。◆は長野県工業技術総合センター (長野)、■は日本電気計器検定所 (日電検) による遠隔校正結果、エラーバーはそれぞれの機関が見積もった遠隔校正の標準不確かさである。2 機関で不確かさが異なるのは、それぞれ基準として使用した標準器の不確かさが異なるためである。(日本電気計器検定所は国家標準から直接供給を受けた標準器 (特定二次標準器) を用いているが、長野県工業技術総合センターは国家標準から校正事業者を通して供給を受けた標準器を基準に遠隔校正を行ったため、両者で遠隔校正結果の不確かさが異なっている。) 遠隔校正の

実証実験を 4 回（長野 2 回、日電検 2 回）行った結果、それぞれの校正値は標準不確かさの範囲内で一致した。不確かさは目標とした標準不確かさ 80 ppm より小さく、校正値のばらつきは±10 ppm 程度であった。尚、同実験は、LCR メータを校正事業者へ移動させる従来の持ち込み校正とも標準不確かさの範囲で一致することを確認した上で実施した。

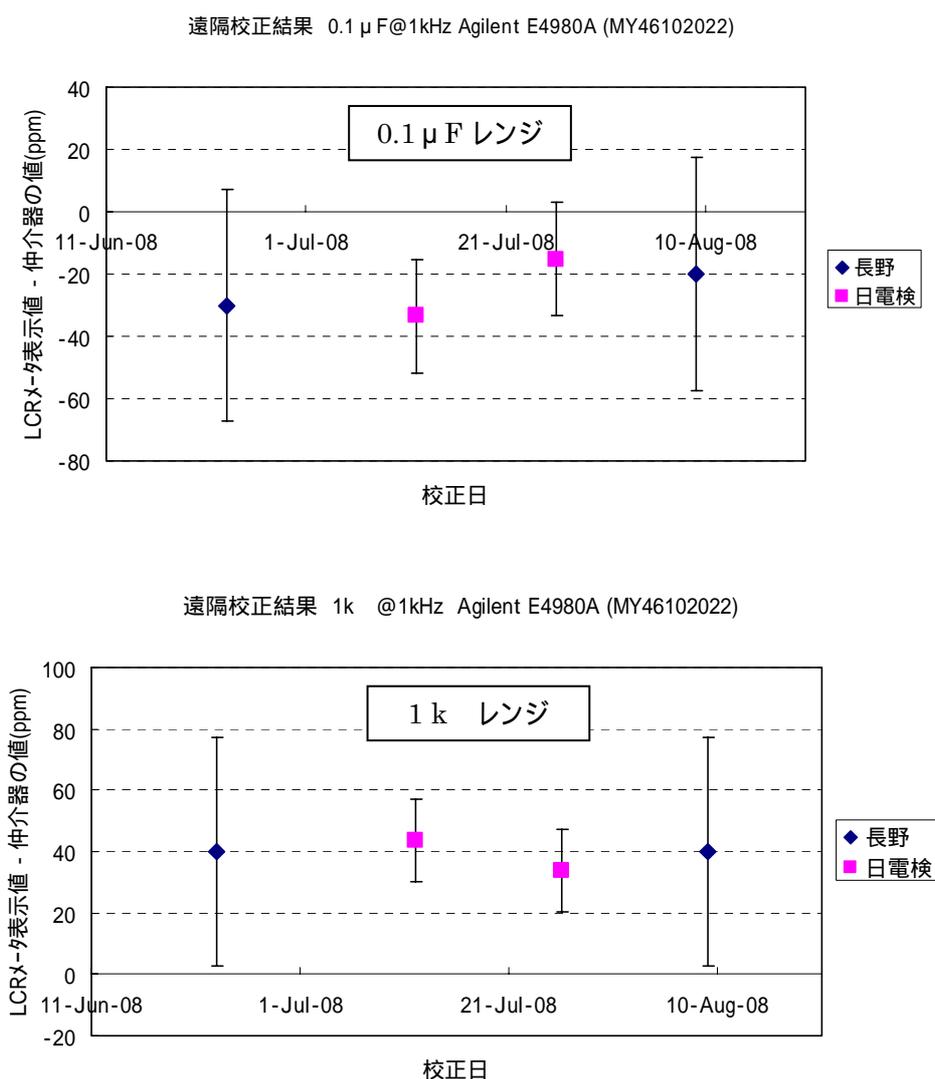
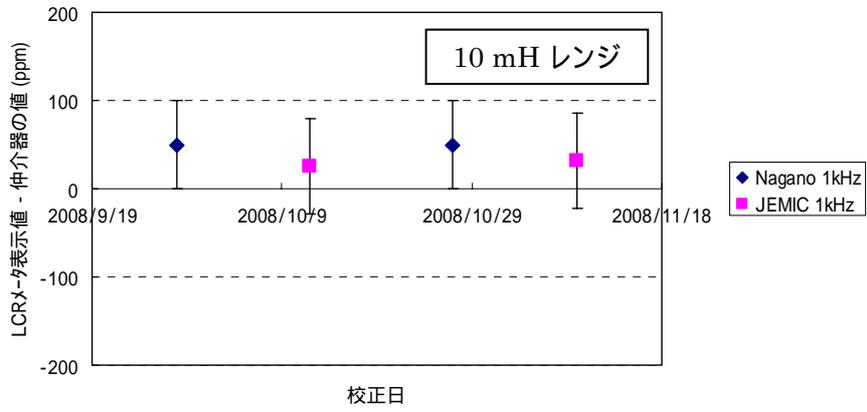


図 2.3-15 LCR メータ遠隔校正実験結果

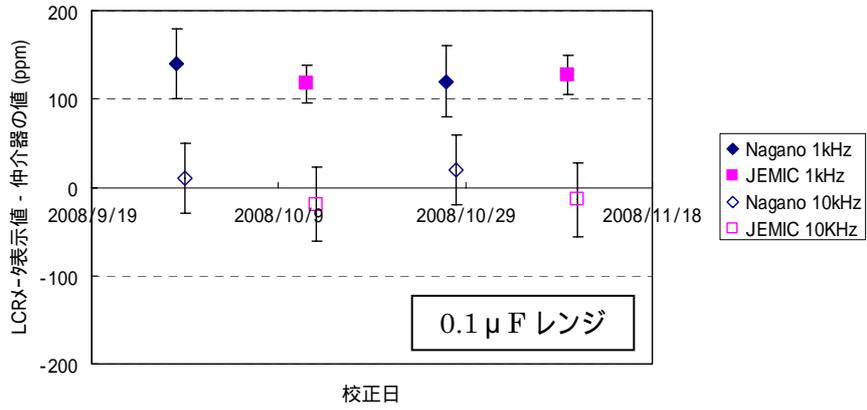
次に、仮想依頼者である NMIJ の被校正 LCR メータを 4 台に増やして、長野県工業技術総合センターと日本電気計器検定所の 2 機関がそれぞれ、交互に、4 台同時に、遠隔校正する実験を行った。4 台の LCR メータは、Agilent 社製のタイプ 4284A が 2 台、同じ

く Agilent 社製のタイプ E4980A が 2 台であり、これらについて、測定レンジ 10 mH・0.1  $\mu$ F・1 k $\Omega$  (@1 kHz)、および 0.1  $\mu$ F・1 k $\Omega$  (@10 kHz) の遠隔校正を実施した。校正対象の LCR メータが 1 台から 4 台、また、校正点が 2 ポイントから 5 ポイントに増えた場合でも、開発した測定プログラムにより効率よい遠隔校正が可能である。得られた実験結果を図 2.3-16~19 に示す。各図とも上から順に 10 mH レンジ、0.1  $\mu$ F レンジ、1 k $\Omega$  レンジの校正結果である。◆は長野県工業技術総合センター (Nagano)、■は日本電気計器検定所 (JEMIC) による遠隔校正結果、エラーバーはそれぞれが見積もった標準不確かさである。同図に示すように各 LCR メータについて遠隔校正の実証実験を 4 回 (長野 2 回, 日電検 2 回) 行った結果、1 kHz、10 kHz のいずれの周波数においても、それぞれのレンジの 4 回の校正値は標準不確かさの範囲内で一致した。尚、図 2.3-17 (LCR メータ②) 0.1  $\mu$ F, 1 k $\Omega$  の結果は、LCR メータのスペックから大きく外れた結果となっており、被校正 LCR メータに何らかの不具合があると考えられる。ただし、2 機関の結果がほぼ不確かさの範囲内で一致していることから、遠隔校正そのものは問題なく実施されたものと判断できる。以上、実証実験の結果から、目標とした「1 kHz~10 kHz において標準不確かさ 80 ppm 以内」での LCR メータの遠隔校正が問題なく実現できることを確認した。

遠隔校正結果 10mH@1kHz Agilent 4284A (MY42101542)



遠隔校正結果 0.1 μF@1kHz,10kHz Agilent 4284A (MY42101542)



遠隔校正結果 1k @1kHz,10kHz Agilent 4284A (MY42101542)

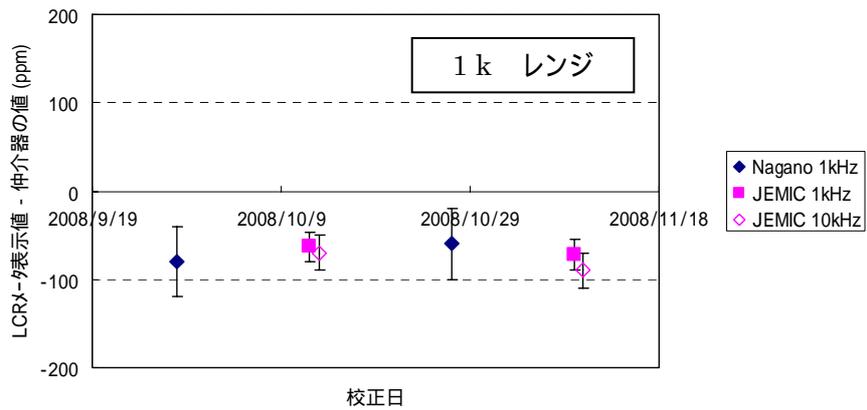
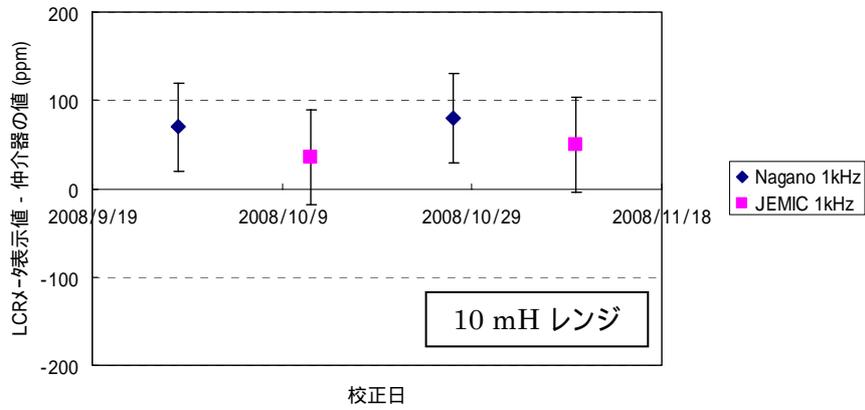
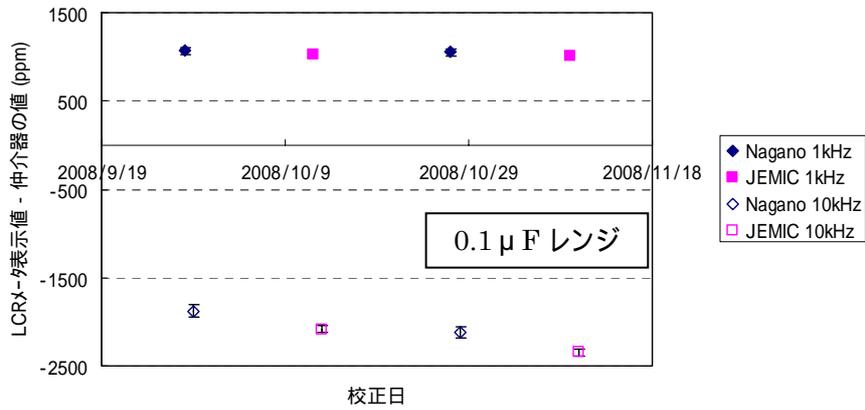


図 2.3-16 LCR メータ遠隔校正実験結果 (LCR メータ①)

遠隔校正結果 10mH@1kHz Agilent 4284A (2940J07834)



遠隔校正結果 0.1  $\mu$ F@1kHz,10kHz Agilent 4284A (2940J07834)



遠隔校正結果 1k @1kHz,10kHz Agilent 4284A (2940J07834)

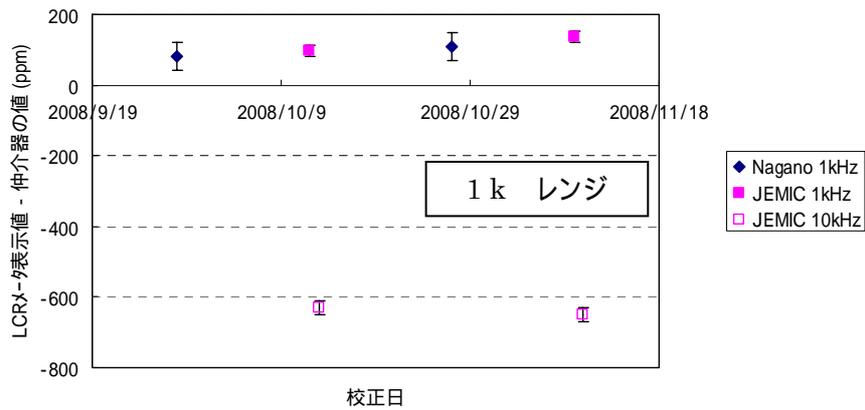
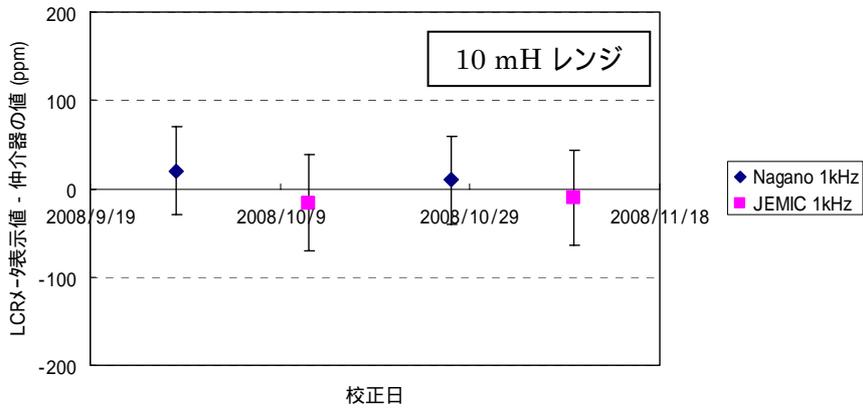
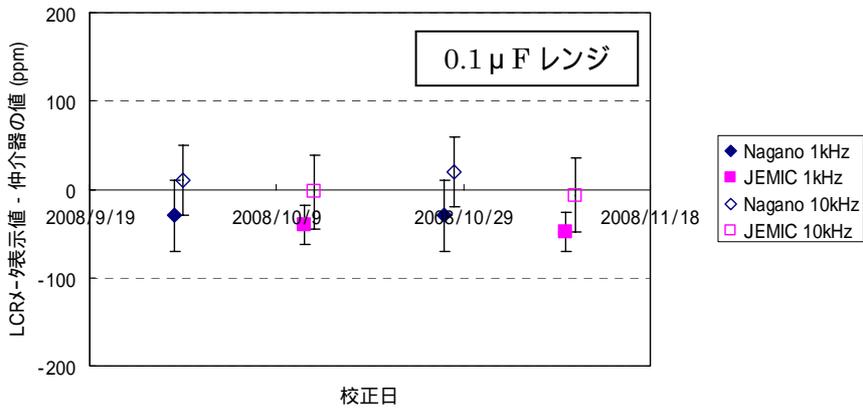


図 2.3-17 LCR メータ遠隔校正実験結果 (LCR メータ②)

遠隔校正結果 10mH@1kHz Agilent E4980A (MY46102022)



遠隔校正結果 0.1 μF@1kHz,10kHz Agilent E4980A (MY46102022)



遠隔校正結果 1k @1kHz,10kHz Agilent E4980A (MY46102022)

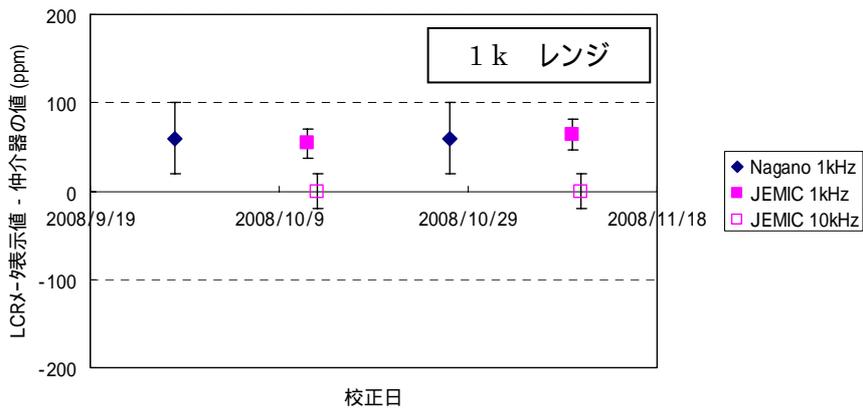
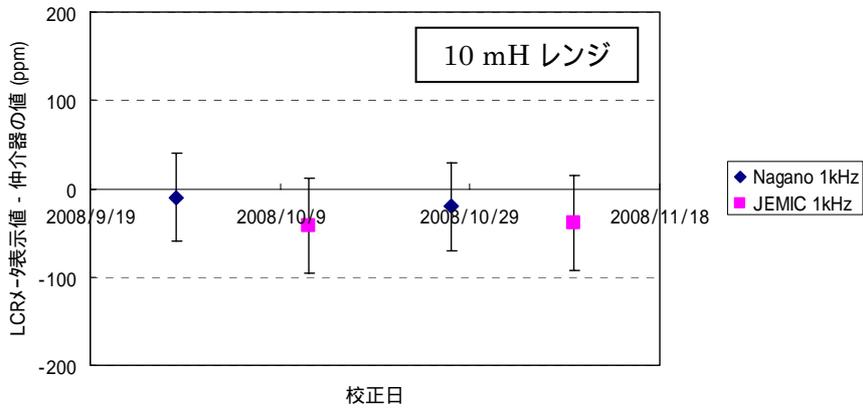
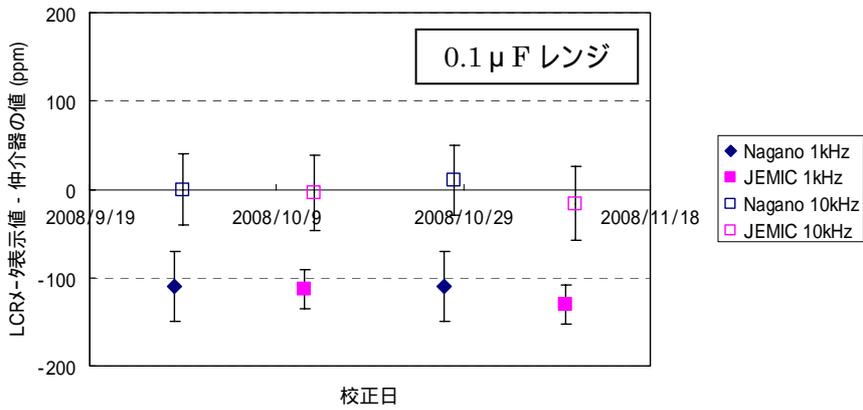


図 2.3-18 LCR メータ遠隔校正実験結果 (LCR メータ③)

遠隔校正結果 10mH@1kHz Agilent E4980A (MY46101814)



遠隔校正結果 0.1 μF@1kHz,10kHz Agilent E4980A (MY46101814)



遠隔校正結果 1k @1kHz,10kHz Agilent E4980A (MY46101814)

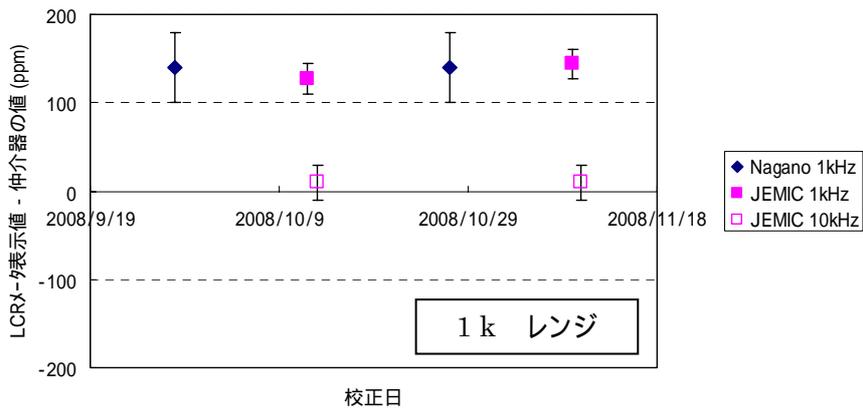


図 2.3-19 LCR メータ遠隔校正実験結果 (LCR メータ④)

## (6) 実用化の見通し

本プロジェクトにおいては、エレクトロニクス産業や情報通信機器産業、あるいは電気機器産業・電子部品産業への波及効果を念頭に研究開発を行なった。本システムの産業界への普及を考え、導入コストの低減を図る目的で、校正システムの一部には、あえて産業界で広く使用されている市販計測器を採用した。また、校正に対する専門知識の少ない依頼者（ユーザ）でも利用できるシステム作りを行い、特にデータの送受信、あるいは測定条件の設定において、ユーザが介入できないようデータ保護・セキュリティ対策には細心の注意を払った。実証実験を繰り返した結果、目標とする「1 kHz～10 kHz において標準不確かさ 80 ppm 以内」での遠隔校正が実現できることを確認した。研究会・講演会等で、逐次、プロジェクトの進捗状況を報告したところ、これまでに 2～3 の企業・機関から当該遠隔校正技術の導入に関して問い合わせを受けている。特にそのうち 1 企業とは具体的な技術移転方法について話し合いを行っているところである。この企業は国内最大手の電子部品メーカーであり、製品の出荷検査のため LCR メータ を数千台有している。これらすべてについて定期的に校正・管理を行っているのが現状である。同企業が現状で行っている校正方法から、本プロジェクトが提案する遠隔校正手法に切り換えることにより、人件費を含むコストが大幅に削減できると期待されている。プロジェクト終了後、同企業をはじめ、産業界への積極的な技術移転・実用化を行いたいと考えている。

## (7) 目標の達成状況

開発したシステムによる標準インダクタ、標準キャパシタ、交流抵抗器の遠隔校正および LCR メータ の遠隔校正は、実証実験の結果から、目標とする周波数範囲および不確かさ（1 kHz～10 kHz において標準不確かさ 80 ppm 以内）で実現できることが明らかとなった。また、測定プログラムの操作性についても、再委託先事業者からの意見を踏まえて改良を行い、概ね満足が行くシステムに仕上がった。ただし、本プロジェクトにおいては、インピーダンス遠隔校正技術のフェージビリティ研究を主眼としたため、被校正標準器の種類や周波数範囲、あるいは、対象 LCR メータ のモデルについては、条件を限定してシステムの開発を行った。今後、当該システムを実際の校正現場で使用する際には、遠隔校正を実施する校正事業者や、遠隔校正を受ける依頼者のニーズに合わせて、若干のシステム変更（主に測定プログラムの変更）が必要になると思われる。

## 外部発表状況

18FY

特許 0 件

論文、解説 2 件

（査読あり）

- 1) Y. Nakamura, A. Yonenaga, N. Sakamoto and A. Shimoyama, “Remote calibration of standard inductors,” IEEJ Trans. FM, Vol. 126, No. 11, pp. 1183-

1186, 2006

(査読なし)

- 1) 中村安宏, “低周波インピーダンスの遠隔校正について,” JEMIC 計測サークルニュース, Vol. 36, No. 1, pp. 1-6, 2007.

#### 口頭発表 3 件

- 1) 中村安宏, “インピーダンス標準遠隔校正の実用化に向けて,” 計測標準フォーラム 第 4 回合同講演会, 2006 年 11 月
- 2) 松沢草介、中村安宏他, “標準インダクタ遠隔校正の実証実験,” 電気学会全国大会, 講演 No.1-126, 2007 年 3 月
- 3) 花岡健一、中村安宏他, “ガス封入形標準キャパシタの温度・気圧特性,” 電気学会全国大会, 講演 No.1-122, 2007 年 3 月

#### その他の公表 0 件

19FY

特許 0 件

論文、解説 0 件

#### 口頭発表 2 件

- 1) N. Sakamoto, K. Kito, Y. Nakamura, K. Hanaoka, S. Matsuzawa, A. Shimoyama, and S. Sakagami, “Remote calibration of standard inductors using a commercial LCR meter,” PTB-BIPM Workshop on the impact of information technology in Metrology, 2007.
- 2) 下山昭彦、堤晋太郎、坂上清一、中村安宏, “高精度な市販 LCR メータの交流抵抗の直線性評価,” 電気学会全国大会, 2008 年 3 月

#### その他の公表 0 件

20FY

特許 0 件

論文、解説 1 件

(査読あり)

- 1) S. Matsuzawa, T. Shimodaira, K. Hanaoka, A. Shimoyama, S. Sakagami, A. Domae, K. Kito, and Y. Nakamura, “Feasibility study on remote calibration of

impedance standards for industrial use,” CPEM 2008 Conference Digest, pp. 348-349, 2008

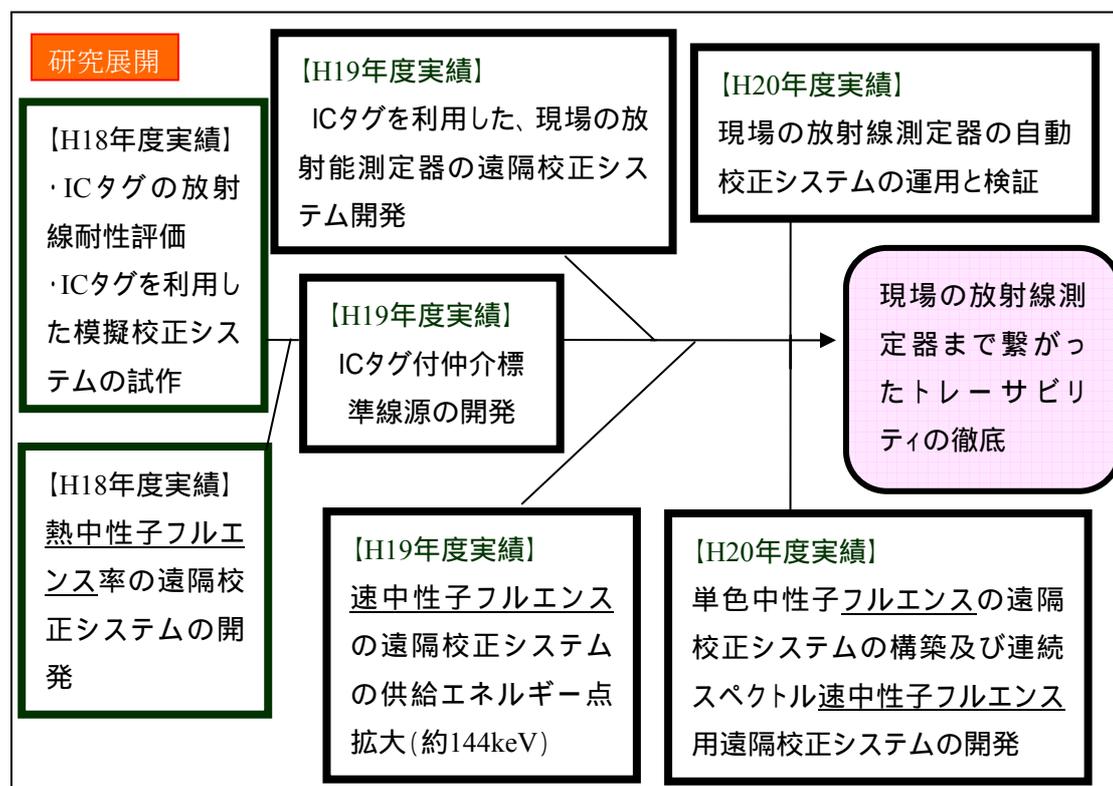
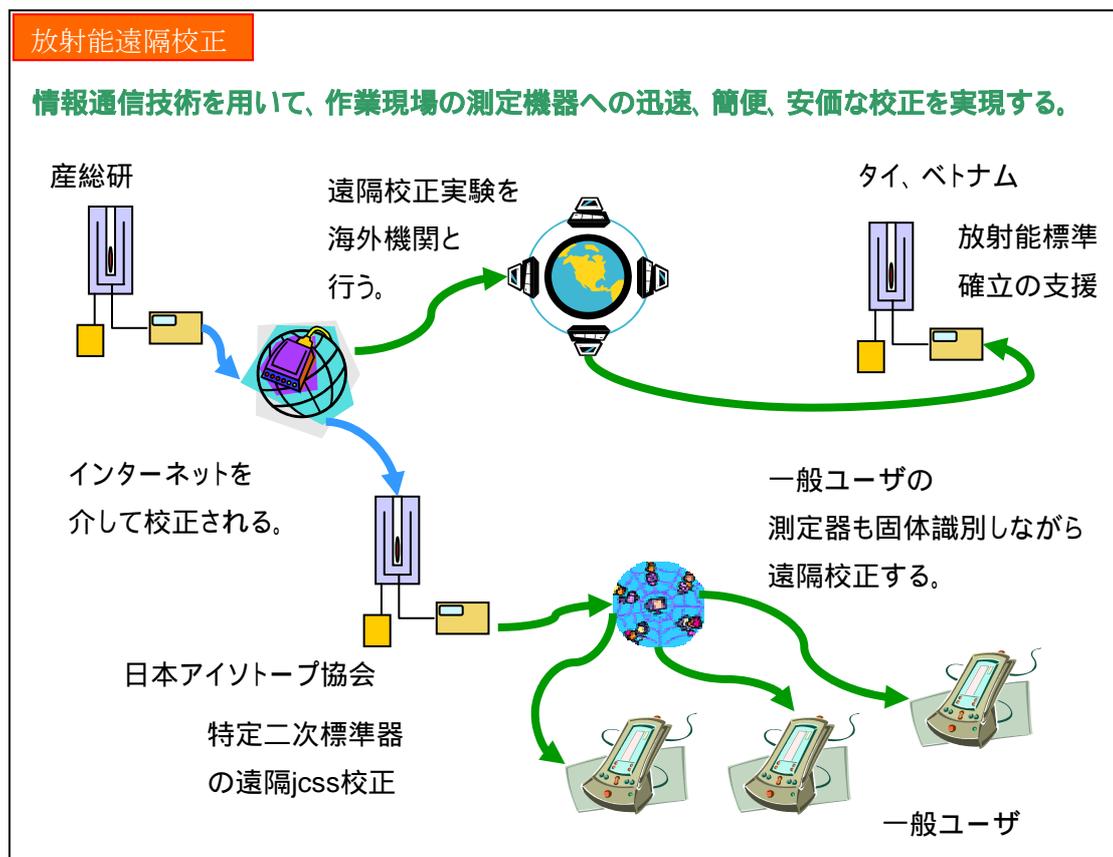
口頭発表 1 件

- 1) 花岡健一他, “L C R 標準の遠隔校正技術の開発,” 第 2 3 回国際計量計測展 (INTERMEASUER 2008) NMIJ 計量標準セミナー, 2008 年 4 月

その他の公表 1 件

- 1) パネル及び遠隔校正システムの展示, “インピーダンス標準の遠隔校正,” 第 4 8 回 西日本総合機械展, 2008 年 6 月

## -2.4 放射能標準



## (1) 概要の研究開発

す校正を天秤いわば、を放射能線源するための校正を測定機器、は供給の放射能標準  
そ、く多が種類は放射性同位元素。されている実施、たせることにより持を役割の分銅  
調で特定標準器を放射能線源の強度した適も最に機器対象、であることから々様も用途の  
に定期的を線源供給の々個としての分銅、ち即。される実施が校正の二次標準器、して整  
事務処理な煩雑、があり制約くの多には移動の放射性線源、しかし。がある必要する実施  
びの運ち持、や医療用極短半減核種している拡大が近年利用範囲、さらに。である必要が  
。である困難することは供給を校正線源に直接、しては関に放射能の状ガスな困難

、し利用を遠隔操作技術、と双方向画像通信技術した利用をインターネット、そこで  
の々個、し確立を遠隔校正技術する関に核種な々様とした基準を線源した安定の長半減期  
の放射能標準に単、これは。す目指を実現の供給の放射能標準、された解放から線源供給  
供給範囲拡の放射能標準な国際的、で有効などにも国際比較の今後、のみならず供給拡大  
。するものである資に精度向上と大

放射能分野の本研究開発の具体的な目的は、以下のものである。登録事業者の持つ特定  
二次標準器に対して、従来の校正と同等程度の不確かさで、遠隔校正を行う技術の開発を  
行う。また、原子力発電施設、放射能測定器メーカ、病院等で利用されている放射線機器  
を 20 %以下の不確かさで遠隔校正を行う技術の開発を行う。これに加え、漏洩中性子線  
の放射線防護のために仲介検出器を用いた広いエネルギー領域に対応した遠隔中性子校正  
に適した測定手法の開発を進める。

## (2) 中間目標

### (a) 15 年度中間目標

他所の特定二次用加圧型電離箱の遠隔校正を、不確かさ0.3 %以内で実施するとともに、  
ガス状放射性核種の標準確立のため、放射性ガス絶対測定システムを構築する。

### (b) 17 年度中間目標

通常の標準核種の他、短半減期核種やガス状放射性核種などの移動困難な放射線源、及  
びGe検出器などの移動困難な特定二次用測定機器の遠隔校正について、不確かさ0.3 %以  
内を達成する。短半減期核種の放射能を、不確かさ0.3 %以内で遠隔測定するシステムを  
構築する。また、放射線については、指頭型検出器を仲介器とした、遠隔制御システムの  
開発を行う。さらに、中性子については、速中性子フルエンス標準用の遠隔校正用仲介検  
出器の開発をおこなう。

## (3) 最終目標

ICタグを利用した遠隔校正システムの開発を行い、原子力発電施設、放射能測定器メー  
カ、病院等、一般ユーザへの遠隔校正技術の利用を拡大し、校正時の線源の移動を軽減し、  
管理を効率的に実施することを可能にするとともに、これまで必ずしも末端の現場測定器  
まで繋がっていなかった放射線関連量のトレーサビリティを不確かさ20 %以下で徹底さ  
せる。そのためにICタグ、ICタグ入出力装置及び線源が組み込まれた校正装置、ICタグあ

るいはICタグ入出力装置付の放射能測定装置、並びに統合管理システムを開発しシステムの実証試験を行う。

#### (4) 本研究内容の構成

本研究内容について以下のように報告する。

- H17年度までの成果
- H18年度からH20年度までの成果
  - 放射能測定装置に関する遠隔校正技術の開発
  - 中性子測定装置に関する遠隔校正技術の開発
- 実用化の見通し
- 目標達成状況

#### (5) これまでの成果

##### (5-1) H17までの研究成果のまとめ

標準加圧型電離箱および医療用放射能測定装置に対する遠隔校正の実証実験を行い、依頼試験（ $\gamma$ 線核種放射能）として標準供給を開始した。遠隔校正を登録事業者である日本アイソトープ協会に対して2件行った。 $\gamma$ 線スペクトロメータを用いた遠隔校正の実証実験を行い、依頼試験（ $\gamma$ （X）線放出率）として標準供給を開始した。液体シンチレーションカウンタ、荷電粒子測定装置の遠隔校正実験を行った。加圧型電離箱校正用標準線源を製作し、APMP各国に頒布した。韓国KRISSと日本アイソトープ協会の間での遠隔校正実験を行った。速中性子フルエンスの遠隔校正実験を原子力機構との間で行った。指頭型検出器を用いた医療用放射線量の遠隔測定実験を放医研との間で行った。

##### (5-2) H18-H20の成果

###### (a) 放射能測定装置に関する遠隔校正技術の開発

###### 1) ICタグの耐放射線性の評価および、ICタグによる遠隔校正システムの妥当性の確認

ICタグ（Integrated Circuit tag）とは、情報を記録するとともに、電磁波を使って管理システムと情報を送受信することができる微小な半導体集積回路である。遠隔校正が全国あるいは海外の事業所に適用されることになった場合、その校正対象は非常に多くなるので、ICタグにより効率よく管理することができると思われる。

最初に、ICタグの耐放射線性を確認した。ICタグとしてはサイズが5 mm角と小さく、プラスチックで成型されており、耐環境性の高い大日本印刷株式会社製IM-0505-SLIを用いた。このICタグを仲介標準線源Cs-137線源6.6 kBqとCe-139線源3.7 kBqに接着し、ICタグにデータを書き込んだ。5ヶ月後にデータを読み出したが、データが破損されず保持されていることがわかった。

## 2) ポータブルγ線スペクトロメータの遠隔校正

ポータブルγ線スペクトロメータは、放射能の汚染があるかどうかを検査するための装置である。この装置は、原子力施設、核医学施設をはじめ、放射性物質を利用する施設で用いられている重要な現場測定器である。このポータブルγ線スペクトロメータは主に現場の担当者により、確認校正されてきたが、JCSSのような認証された校正は必ずしも行われていなかった。かねてより、迅速でかつ簡便で認証のある校正が求められていた。そこで、これらのニーズに応えるため、遠隔校正をポータブルγ線スペクトロメータに適用することを試みた。産総研内で、ポータブルγ線スペクトロメータ遠隔校正システムを構築した。即ち、標準線源とポータブルγ線スペクトロメータの位置関係を校正治具で固定するとともに、ポータブルγ線スペクトロメータを計算機に接続し、遠隔的に校正データを取得できるようにした。さらに、ポータブルγ線スペクトロメータ、および標準線源にICタグを取り付け、校正治具にICタグリーダーを取り付けて、ポータブルγ線スペクトロメータ、標準線源のデータを取得できるようにし、遠隔的に適切な、ポータブルγ線スペクトロメータ、標準線源が使用されているか、確認できるようにした。このシステムを用いて、遠隔校正実験を行った結果、表 2.4-1 のように、従来の校正と不確かさの範囲内で一致する校正結果が得られた。今後、この遠隔校正をポータブルγ線スペクトロメータに適用することで、迅速簡便に、認証のある校正が行えると期待される。

表 2.4-1 遠隔校正実験の結果

エネルギー (keV)	661.66	834.84
核種	Cs-137	Mn-54
計数効率	6.4e-4	5.1e-4
不確かさ (% , $k=2$ )	4	4



図 2.4-1 ポータブルγ線スペクトロメータによる遠隔校正実験

## 3) (X)線放出率についての遠隔校正

γ(X)線放出率は 1 秒間に発生する γ 線光子または X 線光子の数であり、線源の強度

を表す量である。これらの光子を計数するために  $\gamma$  線スペクトロメータが用いられる。 $\gamma$  線スペクトロメータは、光子が入射することで発生するパルスの波高値を計数することで、入射した光子のエネルギーを1光子ごとに計測する。校正器物（線源）の  $\gamma$  (X)線放出率は、この  $\gamma$  線スペクトロメータを介して決定される。方法は以下のとおりである。

- ①特定標準器により  $\gamma$  (X)線放出率を付与された標準線源を、校正依頼者に送付する。
- ②校正依頼者の  $\gamma$  線スペクトロメータ用いて標準線源と校正器物（線源）の  $\gamma$  (X)線スペクトルを取得し、双方のスペクトルの比較から、校正器物（線源）の  $\gamma$  (X)線放出率を求める。

このようにして、実際に日本アイソトープ協会の Ba-133 線源の  $\gamma$  線放出率を遠隔校正して、校正証明書を発行することができた。

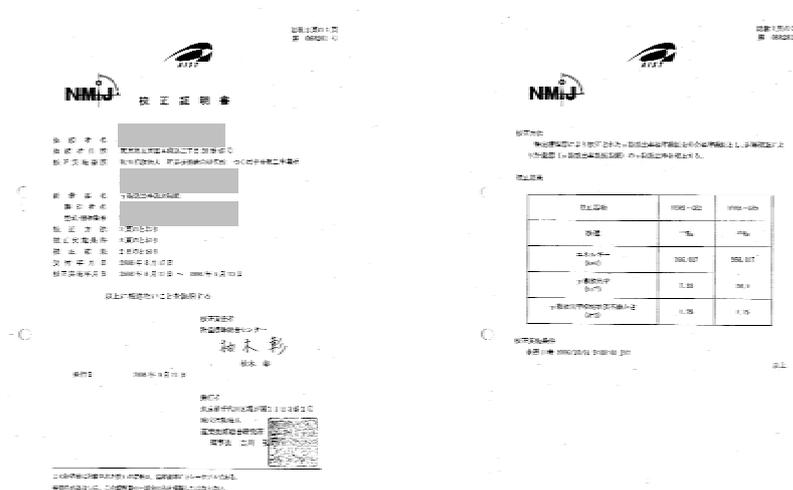


図 2.4-2 遠隔校正により発行された  $\gamma$  線放出率に関する校正証明書

#### 4) PHS を利用した遠隔校正システム及び I-125 シード線源用線量校正装置の遠隔校正

これまでの研究開発では、インターネットを用いて、遠隔校正実験を行ってきた。しかし、インターネットを用いて外部とのデータ通信を許可しない事業所もあると考えられる。そこで、インターネットを用いずに遠隔校正を行う方法として、無線電話を用いた遠隔校正実験を行った。遠隔校正システムの構成は以下のようなものである。リモートコントロール用計算機（産総研に設置）と ISDN ルータはイーサネットケーブルで接続されている。ISDN ルータは、イーサネットと ISDN 電話回線を接続しており、電話番号が割り振られている。ホスト用計算機（遠隔地に設置）には、PHS データ通信カードが装荷されており、PHS データ通信カードから ISDN ルータに電話をかける事により、同一の LAN 内にリモートコントロール用計算機とホスト用 PC を存在せしめることができる。この、無線電話回線を用いた、遠隔校正システムを用いて、産総研と、日本アイソトープ協会との間で I-125 シード線源線量測定装置の遠隔校正実験を行った。I-125 シード線源は、大

大きさが約 4 mm×0.8 mmΦ の非常に小さな線源であり、この線源を約 80 個から 100 個患部に埋め込むことにより、癌細胞に対して放射線照射して、癌を治療するが、この線源の線量を測定することは、患部に適切な線量分布を形成するのに非常に重要である。ここでは、I-125 シード線源の線量測定装置に対して、遠隔校正実験を行った。産総研の I-125 シード線源用線量測定装置を仲介標準器として日本アイソトープ協会に送付し、日本アイソトープ協会にある I-125 線源に線量値を付与し、その I-125 線源を用いて日本アイソトープ協会のもつ電離箱の校正定数を付与した。その結果、校正定数は  $34.9\pm 0.9$  と求められ、遠隔校正が無線電話回線でも行えることが実証できた。



図 2.4-3 I-125 シード線源用線量測定装置の遠隔校正実験に用いた電離箱測定装置

#### 5) GM 管式汚染検査装置の遠隔校正実験

汚染検査装置は、放射能の汚染があるかどうかを検査するための装置である。この装置は、原子力施設、核医学施設をはじめ、放射性物質を利用する施設で用いられている重要な現場測定器である。この汚染検査装置は主に現場の担当者により、確認校正されてきたが、JCSS のような認証された校正は必ずしも行われていなかった。かねてより、迅速かつ簡便で認証のある校正が求められていた。そこで、これらのニーズに応えるため、遠隔校正を汚染検査装置に適用することを試みた。産総研と日本アイソトープ協会の間で、校正用仲介標準線源、汚染検査装置、および汚染検査装置の校正値の統合管理が可能な、PHS を用いた汚染検査装置遠隔校正システムを構築した。即ち、標準線源と汚染検査装置の位置関係を校正治具で固定するとともに、汚染検査装置を計算機に接続し、遠隔的に校正データを、PHS を用いて取得できるようにした。さらに、汚染検査装置、および標準線源に IC タグを取り付け、校正治具に IC タグリーダーを取り付けて、汚染検査装置、標準線源のデータを同時に取得できるようにし、遠隔的に適切な、汚染検査装置、標準線源が使用されているかを、機器を校正治具に置くだけで確認できるようにした。また、これらの機器データと校正値を統合して管理できるシステムとした。このシステムを用いて、遠隔校正実験を行った結果、校正用仲介標準線源、汚染検査装置の機器の識別をしながら、汚染検査装置の校正値としての機器効率を  $0.46\pm 0.04$  と不確かさ 20 %以内で決定することができた。さらに、この技術を日本アイソトープ協会に技術移転した。今後、この遠隔校正を実用に供することで、迅速簡便に、認証のある校正が行えると期待される。



図 2.4-4 IC タグを用いた汚染検査装置への遠隔校正実験

#### 6) 汚染検査装置の遠隔校正の技術移転

汚染検査装置の遠隔校正の技術移転を産総研と日本アイソトープ協会の間で行った。技術移転の実証試験として、東京都文京区に位置する日本アイソトープ協会東京本部と千葉県柏市に位置する同柏分室において、柏分室所有の汚染検査装置を柏分室に設置したまま、東京本部から遠隔校正を行った。この際、汚染検査装置の検出ヘッドと校正用仲介標準線の位置関係を固定すると共に IC タグリーダの付いた遠隔校正用治具を用い、汚染検査装置本体と、汚染検査装置の検出器ヘッド、校正用仲介線源に IC タグを付けることで、個体識別ができるようにした。また、東京本部と柏分室との通信はインターネットを介して行った。この結果、柏分室の汚染検査装置の機器効率を  $0.46 \pm 0.03$  と不確かさ 20 %以内で測定することができた。今後、日本アイソトープ協会が、遠隔校正を、事業や業務に活用するための基盤が形成された。

#### 7) PET 装置用校正線源の線源校正方法（中間評価に対する対応）

PET 装置(Positron Emission Tomography)は陽電子断層撮像を行う装置であり、陽電子崩壊に伴う対消滅放射線を検出し、検出強度分布から、三次元放射能分布を再構成する方法である。PET 測定では、患者に放射性薬剤を注射して、その薬剤の分布を測定するが、分布画像の放射能校正は、以下のように行われている。はじめに、医療用放射能測定装置を用いて、診断用短半減期核種溶液の放射能を測定する。次に、この放射性溶液を希釈し、ファントムと呼ばれる数十リットルの大きさのプラスチック容器に放射性溶液を入れた線源を作成する。このファントムの放射能濃度と画像の画素強度から校正を行う。この方法は、校正ごとにファントムを作成しなければならないため、手間がかかり、かつ、放射能濃度の正確さ、均一性には、担当者の技量に依存するので、より簡便で正確な方法が求められていた。また、半減期 271 日のファントムが市販されているが、不確かさが 10 %程度あり、相対的变化を確認するには用いることが出来ても、放射能の校正には不確かさが大きくて使えなかった。そこで、PET 装置に対して、比較的長半減期で、かつ、点状の小線源を新たに開発し、簡便に安価に遠隔校正することの検討を開始している。今回は、この点状の小線源の線源校正の方法を考案し、EGS5 によるモンテカルロシミュ

レーションで、方法の妥当性を確認した。この線源校正の方法は、多数のシンチレータ素子で、消滅放射線とそれとほぼ同時に放出されるガンマ線を同時計数することにより、線源の放射能絶対値を計算する方法である。線源を Na-22 として、消滅放射線(511 keV)と  $\gamma$  線(1275 keV)を計算機上で発生させ、128 個のシンチレータ素子によりそれらの放射線を計数することをシミュレーションした結果を図 2.4-5 に示す。横軸が消滅放射線の検出効率を示し、縦軸はある検出効率における、放射能絶対値（シミュレーション上での原子核崩壊数）と見かけの放射能の比から 1 を引いたもの、即ち補正係数である。実験的には、検出効率と見かけの放射能が得られるので、この補正係数を用いることで、放射能絶対値が計算できることがわかる。今後、実際に線源校正装置と校正用線源を製作し、この校正用線源を用いて PET 装置の遠隔校正実験を行う予定である。

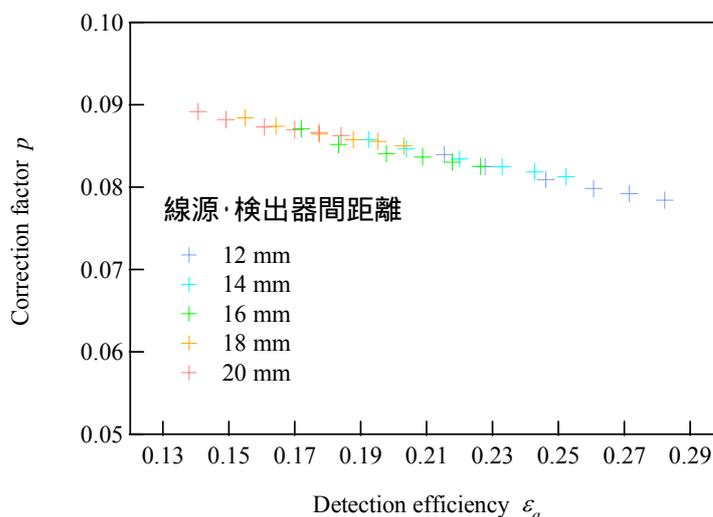


図 2.4-5 検出効率と補正係数

## (b) 中性子測定装置に関する遠隔校正技術の開発

### 1) 熱中性子校正の遠隔校正

熱中性子に対して産総研標準場の中性子スペクトルは、MCNP4C モンテカルロコードで計算して得られている。しかし、黒鉛パイルを用いた熱中性子場は中性子挙動が複雑であり実験的に中性子スペクトルを得るのが難しい。そこで本研究では中性子スペクトルを実験的に精度良く得ることのできる、体系が単純化することのできる原子力機構・3号炉（JRR3）即発ガンマ線分析装置と京都大学原子炉実験所電子線形加速器（京大炉）の2箇所で実験を行った。

以下に示すように、三箇所の熱中性子場は中性子の発生方法や施設の構造が全て大きく異なるため、遠隔校正の可能性と課題を知る上で大変重要な試験となった。

産総研熱中性子場は、図 2.4-6 に示すように 190×190×230 cm の黒鉛パイルの中心に

148 GBq の Am-Be 中性子線源 を装荷することによって構成されている。得られる熱中性子フルエンス率の範囲は、 $50 \sim 10^4 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  であり、線源強度に依存して上限がある。

一方、原子力機構の熱中性子場は研究 3 号炉（通称 JRR-3）から中性子ガイドによって引き出される熱中性子を利用している。中性子は直径約 5.5 mm のビーム状で得られ、途中に  ${}^6\text{Li}$  を含んだ材料で作製されたチョッパーを置くことによって、中性子がパルス的に得られ、中性子飛行時間法を用いて中性子スペクトル（図 2.4-7(a)）を実験的に得られる。この施設の特徴は、熱外中性子（0.5 eV 以上のエネルギーを持つ中性子）成分が大変に少なく、 $10^8 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  以上という非常に高強度な中性子が得られることにある。

京大炉の熱中性子場は、直線型電子線加速器で加速された電子と Ta（タンタル）ターゲットとの光核反応により発生する中性子を水減速材で減速して得られる。中性子はパルス状に得られ、中性子飛行時間法によって中性子スペクトルが実験的に求められる。中性子は、約 20 mm 直径のビーム状で得られ、ターゲットから 11 m の地点で検出器の測定が行われた。

仲介検出器としては、減速材がついていない裸の  ${}^3\text{He}$  比例計数管と直径が 3 インチの減速材付  ${}^3\text{He}$  比例計数管の 2 種類を用いて行った。2 種類の仲介検出器を用いることにより熱中性子と熱外中性子の関係がより鮮明になるためである。



図 2.5-6 産総研の黒鉛パイルによる熱中性子標準場

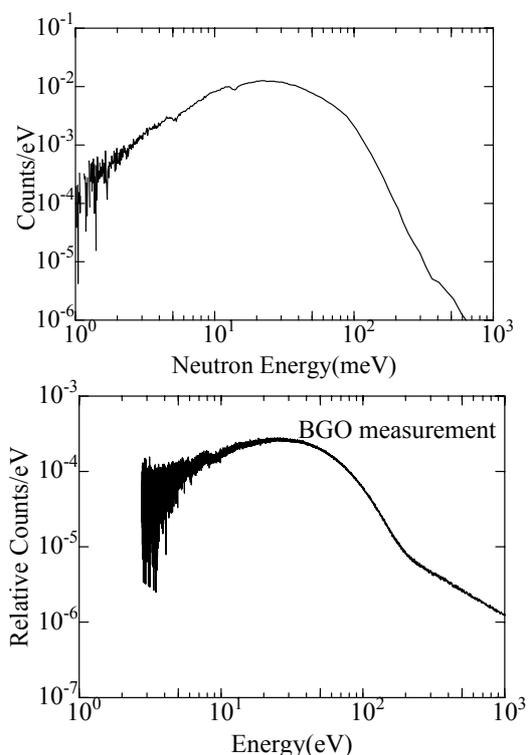


図 2.5-7 (a) 原子力機構と(b) 京大炉の熱中性子場のスペクトル

熱中性子の試験では、金箔の放射化法を用いて検出器への入射中性子数の絶対測定も行った。その結果、入射中性子あたりの計数は各施設で表 2.4-2 のように得られた。熱中

中性子に対する感度はスペクトルの違いによって、10～40 %変化することがわかる。MCNP4C モンテカルロコードを用いて各施設での実験体系で検出感度の計算を行ったところ、実験結果との差は5～13 %であった。すなわち、13 %以下の不確かさでスペクトルの効果を補正することができる。この不確かさの主な要因は、入射ビームの空間分布情報及び飛行時間と検出器の出力波高の関係の不確かさにあった。この点を今後追求することにより不確かさは改善できると期待される。一方で、熱中性子に対する試験では、遠隔校正によってフラックスが大きな場への拡張の可能性を示すことができた。

表 2.4-2 各施設における仲介検出器の検出感度（入射中性子あたりの計数）の違い

	球形 $^3\text{He}$ 比例計数管	ボナー球
京大炉	4.05E-02(3.4%)	5.39E-03(3.4%)
原子力機構	5.64E-02(1.8%)	6.07E-03(4.3%)
相対感度(機構/京大炉)	1.39(3.8%)	1.13(5.5%)
相対感度(計算)	1.46	1.31

## 2) 中速中性子校正 (144 keV)

中速中性子に対する試験は、144 keV のエネルギー一点に対して東京大学弥生炉（以下、弥生）との間で行った。

産総研 144 keV 中速中性子標準場は、4 MV ペルトロン加速器からの陽子ビームと LiF ターゲットによる  $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$  反応によって構成されている。

一方、弥生は原子炉からの中性子を Si の共鳴フィルターを透過させることにより 144 keV 中性子が得られる。照射場の概略図を図 2.4-8 に示す。

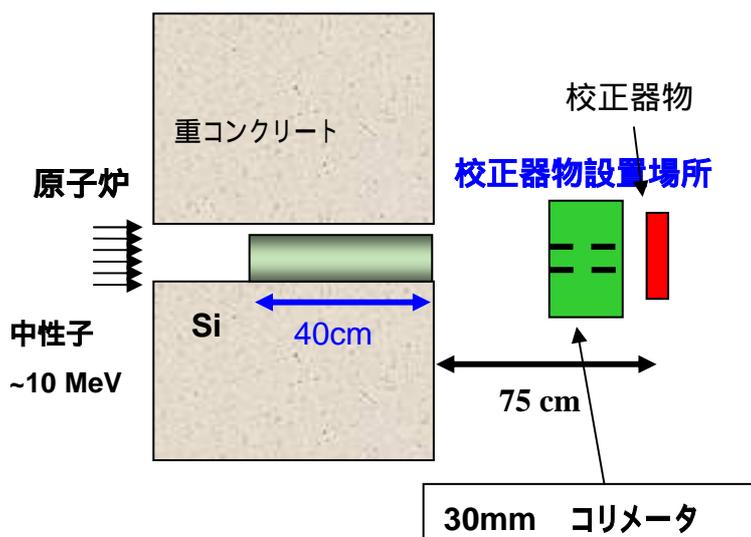


図 2.5-8 弥生の照射体系の概略図

ビーム孔の外に中性子遮蔽材であるボロン入りポリエチレンで作製された 30mmΦ のコリメータを設置してある。校正器物は、そのコリメータの下流に設置される。この照射体

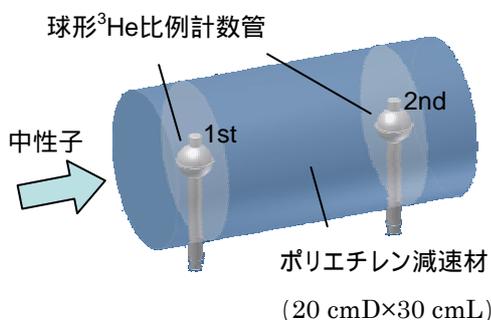
系では、144 keV の他に 50 keV の中性子も存在することと、原子炉からの高エネルギー側のバックグラウンド、熱外中性子バックグラウンドがある。従って、場に合わせたバックグラウンド評価が必要となった。最終的に、原子炉 2 kW で運転時に上記の体系において 144 keV の単色中性子フルエンス率が  $2 \times 10^2 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  であり、不確かさは 10%であった。大きな不確かさの要因は、主にバックグラウンド評価にある。

### 3) 連続スペクトル中性子標準の遠隔校正

#### 3-1) 仲介検出器

連続スペクトル中性子（幅広いエネルギー領域で中性子が生成）の場合は、単色中性子の場合のようにあるエネルギー点でピークを持つような応答の仲介検出器を用いることは難しい。その理由は、連続的にエネルギー分布をもっているので、あるエネルギーに特徴的な検出器を用いれば、飛来する中性子の一部のみを用いて中性子場の評価を行うことになってしまうからである。従って、連続スペクトル中性子に対する仲介検出器としては、減速材を複数（5 個以上）用いる複合的な検出器か、20 MeV までのエネルギー領域で検出効率が一定であるような応答平坦検出器であることが望ましい。輸送にできるだけコストをかけないというコンセプトから、本研究では複数の減速材を利用するのではなく、応答平坦検出器を用いることとした。現在使用されている応答平坦検出器としてはロングカウンタが一般的である。しかしながら、ロングカウンタは重量にして 40~50 kg あるのが一般的で仲介検出器としては適さない。そこで、10 kg 以下の重量の応答平坦検出器を開発した。検出器の概要は図 2.4-9 に示すとおりである。直径 20 cm、長さ 30 cm のポリエチレン減速材の中に、球形  $^3\text{He}$  比例計数管を 2 台装荷する。2 台の検出器の  $^3\text{He}$  ガス圧を調整することにより、2 台の検出器で得られる計数の和はエネルギーによらずほぼ一定となる。

本検出器の開発によって、施設間のスペクトルの微妙な違いによる補正が極めて小さくなり、トランスファに関わる不確かさも小さくなる。



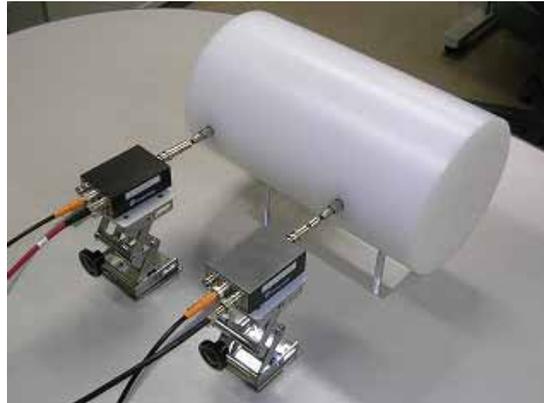


図 2.5-9 連続スペクトル中性子用仲介検出器

### 3-2) RI 中性子線源による校正

民間企業 A が所有する中性子照射場において試験を行った。A の照射場は Am-Be 中性子線源 を中性子源として用いている。

産総研では、Am-Be 中性子線源からの中性子フルエンスは、Am-Be 中性子線源の中性子放出率から計算によって導出される。室内散乱中性子や空気中の散乱の影響については、速中性子と同様の方法で求められる。この試験の不確かさは、表 2.4-3 のようになる。連続スペクトル中性子フルエンスは、線源の中性子放出率から導出する方法もある。この場合、不確かさとしては約 3.0 % (最高測定能力) で校正を行うことができる。今回の試験では、中性子放出率から導出する方法と比較して、線源を移動しなくて良いというメリットと同等の不確かさが得られるということを示すことができた。

表 2.4-3 連続スペクトル中性子に対する遠隔校正の不確かさバジェット

不確かさの要因	不確かさ(%)
産総研での感度校正の不確かさ	2.0~3.0
仲介検出器の設置位置	0.4
仲介検出器の測定不確かさ	0.5
産総研の中性子スペクトルとの違いによる影響	1.0
シャドーコーン法の不確かさ	1.0
空気、線源内散乱中性子の影響	0.3
相対合成不確かさ (k=1)	2.7~3.5

### (6) 実用化の見通し

#### (a) 成果の実用化可能性

整備した遠隔校正によって、依頼試験として既に 5 件、校正証明書を発行している。また、jcss 校正として、2008 年度に 3 件着手して、2009 年 4 月に同件数の校正証明書を

発行し、2009 年度に 8 件、校正証明書を発行する予定となっている。これに加え、日本アイソトープ協会からも近い将来 JCSS 校正が行えると期待され、日本アイソトープ協会から、全国の医療用放射性核種製造事業者や病院に対して、遠隔校正サービスが提供できると期待される。海外に対しては、核医学診断の普及に伴い、放射能標準を立ち上げようとする国々に、遠隔校正技術を利用して、標準の立ち上げを支援する活動を始めた。現在は、ベトナムの放射能標準の立ち上げの支援を開始しつつあるところである。また、タイに対しても遠隔校正実験を行う予定である。

放射能の遠隔校正は、産総研計量標準総合センターの校正サービスの中に組み込まれており、事業として供給、維持する体制が整備されている。

## (b) 波及効果

技術的には、放射線モニタリング装置や放射線治療用線量測定装置など、放射線関連装置についても遠隔校正が適用できると期待される。経済的には、安価に簡便に校正が行えるようになることで、汚染検査装置、医療用放射能測定装置に対して定期校正事業の規模の拡大が期待できる。社会的には定期校正がなされ、計測機器の信頼性が高まることで、国民の安全・安心の獲得が期待できる。

本プロジェクトの実施により、PET 装置の校正用線源の放射能測定手法等、放射能計測法に関する研究開発の促進に寄与することも出来た。また、遠隔校正の定期校正が実施されるようになれば、放射線技師の放射線計測、放射線測定装置の校正に関する、知識や経験の向上が得られると期待される。

## (7) 目標達成状況

### (a) 研究成果の達成状況

放射能分野の最終目標は以下のものであった。ICタグを利用した遠隔校正システムの開発を行い、原子力発電施設、放射能測定器メーカー、病院等、一般ユーザへの遠隔校正技術の利用を拡大し、校正時の線源の移動を軽減し、管理を効率的に実施することを可能にするとともに、これまで必ずしも末端の現場測定器まで繋がっていなかった放射線関連量のトレーサビリティを不確かさ 20 %以下で徹底させる。そのためにICタグ、ICタグ入出力装置及び線源が組み込まれた校正装置、ICタグあるいはICタグ入出力装置付の放射能測定装置、並びに統合管理システムを開発しシステムの実証試験を行う。

この目標に対して、以下の研究活動の成果が得られている。IC タグ付きの線源、および、IC タグ読込書込装置付線源校正装置、IC タグ付の放射能測定装置の試験は終了し、統合管理システムを開発し、放射能測定装置を使用している校正事業者である日本アイソトープ協会とシステムの実証試験を行って、不確かさ 20%以下でシステムの実証試験を行えた。日本アイソトープ協会に汚染検査装置の遠隔校正について技術移転を行い、実証試験を行った。遠隔中性子校正においては、熱中性子、単色中性子、連続スペクトル中性子標準の仲介検出器を開発し、遠隔校正のできる体制を構築した。また、依頼試験に基づ

く放射能の遠隔校正はすでに実施しており、JCSS 制度に基づく放射能の遠隔校正も、H20 年度に開始した。国際計量研究連絡委員会において、計量器校正情報システム開発の進捗を、計量関係者に報告し、エンドユーザまでの実用化への提起を行った。さらに、中間評価の提言を受け、医療用診断装置の遠隔校正のための仲介標準線源の新たな線源校正手法を計算機シミュレーションにより試験した。このように、目標以上の成果が得られている。

## (b) 研究成果の意義

遠隔校正が実現されたことで、簡便に安価に校正が行えるようになった。現在まで校正事業者による定期的な校正が行われてこなかった放射能測定装置についても、定期的校正がしやすい環境が創出された。さらに、近年、国民の安全・安心の観点から、トレーサビリティ要求が高まってきたことと相まって、放射能測定装置の校正のニーズが拡大すると期待できる。

また、遠隔地の放射能測定装置を操作することで、遠隔校正を行うサービスを、世界に先駆けて開始することができた。

遠隔校正により、簡便に安価に校正を行うというコンセプトに基づき、新たな展開を進めようと試みている。核医学診断装置の校正は、現在、医療現場で現場の作業担当者により、短半減期核種を用いて、労力のかかる方法で行われている。そこで、核医学診断装置に対して、比較的長半減期で、かつ、点状の小線源を新たに開発し、簡便に安価に遠隔校正することの検討を開始している。この技術は、疾患の発症前診断、薬効の投薬前診断などの定量評価のためにも転用でき、近年における放射性同位体の利用の減少トレンドの中で、放射性同位体の利用を大きく促進するものであると期待される。

本研究開発の成果は、すでに、電離箱、半導体検出器、液体シンチレーションカウンタ、マルチワイヤ式比例計数管に対して実用化しており、汚染検査装置や、医療用放射能測定装置に対しても実証実験により、実用化が可能な状態となっている。また、単色中性子フルエンス測定装置、連続スペクトル中性子フルエンス測定装置、熱中性子フルエンス測定装置に対しても実証実験により、実用化が可能な状態となっており、汎用性が高いといえる。

上記のような目標を上回る成果、および将来の発展性から鑑みて、投入された予算に見合った成果が得られていると考えられる。

本研究開発の成果は、一般雑誌である「原子力 EYE」、「計測と計量標準」あるいは、産総研の広報誌「産総研 Today( AIST Today)」にも掲載されており、また学術会議、学術雑誌でも発表しており、研究成果の公開性は高いといえる。

## (c) 放射能の遠隔校正サービスと JCSS 制度に基づく遠隔校正

H16 年度より依頼試験制度による遠隔校正サービスを開始していた。依頼試験制度は、産総研独自の校正である。この制度に基づき平成 18 年度から平成 20 年度の間に 3 件校

正証明書を発行した（表 2.4-4）。（平成 17 年には 2 件発行している。）さらに NITE(National Institute of Technology and Evaluation、製品評価技術基盤機構)から本研究開発による遠隔校正サービスが ISO/IEC17025(国際標準化機構及び国際電気標準会議が定めた校正機関に関する基準)の要求事項に適合しているかどうか審査を受けると共に、海外の専門家からピアレビューを受け、その結果、JCSS 制度に基づいて遠隔校正サービスを行えるようになった。2008 年度には 3 件着手して、2009 年 4 月に校正証明書を同件数発行した。2009 年度には 8 件、JCSS 制度に基づく遠隔校正を行う予定である。

表 2.4-4 本研究開発期間中に行った遠隔校正

年度	種別	件数	校正実施場所	校正器物等	仲介器
平成 18 年	依頼試験	1	日本アイソトープ協会	Ba-133 $\gamma$ 線放出率	Ba-133 線源
平成 19 年	依頼試験	1	日本アイソトープ協会	標準線源付電離箱	In-111
平成 20 年	依頼試験	1	日本アイソトープ協会	標準線源付電離箱	Mo-99
平成 20 年	jcss	2	日本アイソトープ協会	マルチワイヤ式比例計数管	Am-241,Cl-36
平成 20 年	jcss	1	日本アイソトープ協会	液体シンチレーションカウンタ	H-3,C-14,Sr-90

#### (d) 知的財産権等の取得及び標準化の取り組み

本研究の基本特許は、特開 2007-93323（発明の名称：遠隔校正方法及び方式、出願人：産業技術総合研究所、発明者：吉田春雄）による。また、国際標準化に向けてはタイとの遠隔校正実験、ベトナムとの遠隔校正による放射能標準の立ち上げの支援を通じて、国際的コンセンサスを獲得しようとしている段階であり、これらの地道な活動を通じて、支持を得ながら標準化の提案をしていきたいと考えている。

標準化については jcss に基づく標準供給体制が整ったことで、JIS 等の工業標準におけるトレーサビリティ要求に対して、ユーザ側での対応が容易になった。

#### (e) 成果の普及

論文の発表は、研究内容を踏まえ、applied radiation and isotopes 誌や AIP conference proceedings 誌、IFMBE proceedings 誌、The 5<sup>th</sup> KOREA-JAPAN Joint Meeting on Medical Physics 誌において行っており、適切に行われていると考えている。

成果の受取手であるユーザに対しては、e-trace セミナー、放射線・放射能・中性子クラブ、国際標準研究連絡会議等に於いて、計量器校正情報システム開発の進捗を、計量関係者に報告し、エンドユーザまでの実用化への提起を行った。

また、キュリーメータ（医療用放射能測定装置）および、PET 装置の校正に関するシンポジウムを行った。キュリーメータおよび PET 装置は癌診断のため広く用いられてい

るが、これらの校正は一部を除き JCSS の枠組みで行われてはいない。特に PET 装置は同じ対象物を測定した場合における装置間或いは施設間での画像の差異の定量的評価が課題となっている。そこで、校正の重要性について理解を深めてもらうため、2008 年 4 月には、JRC2008 大会(Japan Radiology Congress)において、日本医学物理学会と日本放射線技術学会の企画による JRC 合同シンポジウム「PET 装置の校正と定量性の向上」を開催した。この中で、校正サービスとして遠隔校正が行えるようになったことを紹介した。今後、キュリーメータおよび PET 装置の校正について遠隔校正が有用であることを医療に携わる人々にアピールしていく予定である。

登録事業者である日本アイソトープ協会から、近い将来、医療用放射性核種製造事業者や病院等に対して、遠隔校正による校正サービスが開始されると期待されている。

一般向けには、一般雑誌である「原子力 EYE」、「計測標準と計量管理」、「産総研 Today(AIST Today)」において、成果を発表した。

## 外部発表状況

18FY

特許 0 件

論文・解説 4 件

(査読あり) 1 件

- 1) 佐藤 泰、柚木 彰、檜野 良穂、山田 崇裕、藤井香織、"MONTE CALRO CALCULATION FOR AN ABSOLUTE MEASUREMENT OF  $^{99m}\text{Tc}$ ", KEK proceedings, No. 2006-7, (2006), pp.185-190、

(査読無し) 3 件

- 1) 佐藤 泰、柚木 彰、檜野 良穂、黒澤 忠弘、加藤 昌弘、原野 英樹、松本 哲郎、下山 哲矢、工藤 勝久、山田 崇裕、松本 幹雄、鈴木健二、畠山 智、土井幸一、齊藤 義弘、鈴木 敏和、鈴木 和年、福村 利光、宮本 勝宏、寅松 千枝、岩本明憲、遠藤健一、松原昌平、"The remote calibration of radioisotope calibrators", IFMBE proceedings, No.14, (2006), pp.1949-1952、
- 2) 佐藤 泰、柚木 彰、檜野 良穂、山田 崇裕、"Response calculation for standard ionization chambers in APMP using EGS4 Monte Carlo code", APPLIED RADIATION AND ISOTOPEs, No.64, Vol.10-11, (2006), pp.1211-1214
- 3) 佐藤 泰、"放射能測定装置の遠隔校正", 計測標準と計量管理, 56-2, (2006), pp.31-35

口頭発表 5 件

- 1) 医療用放射能測定装置の遠隔校正, 佐藤 泰、柚木 彰、檜野 良穂、黒澤 忠弘、加藤 昌弘、原野 英樹、松本 哲郎、下山 哲矢、山田 崇裕、松本 幹雄、鈴木健二、畠山

智、土井幸一、齊藤 義弘、鈴木 敏和、鈴木 和年、福村 利光、宮本 勝宏、岩本明憲、遠藤健一、松原昌平、日本医学物理学会、横浜、2006/04/08

- 2) 佐藤 泰、柚木 彰、檜野 良穂、黒澤 忠弘、加藤 昌弘、原野 英樹、松本 哲郎、下山 哲矢、工藤 勝久、山田 崇裕、松本 幹雄、鈴木健二、畠山 智、土井幸一、齊藤 義弘、鈴木 敏和、鈴木 和年、福村 利光、宮本 勝宏、寅松 千枝、岩本明憲、遠藤健一、松原昌平、The remote calibration of radioisotope calibrators, World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, ソウル、韓国、2006/08/28
- 3) 佐藤 泰、柚木 彰、檜野 良穂、山田 崇裕、松本 幹雄、放射能遠隔校正の開発と遠隔校正サービス、日本原子力学会、札幌、2006/09/27
- 4) 佐藤 泰、柚木 彰、原野 英樹、松本 哲郎、下山 哲矢、畑 寿起、森山 健太郎、工藤 勝久、檜野 良穂、放射能測定装置の遠隔校正、計量標準総合センター成果発表会、つくば市、2007/02/15
- 5) 松本 哲郎、原野 英樹、下山 哲矢、佐藤 泰、瓜谷 章、堀順一、松江秀明、瀬川麻里子、工藤 勝久、熱中性子標準トランスファにおけるスペクトル効果、第 54 回応用物理学関係連合講演会、東京、2007/3/29

その他の公表 0 件

19 FY

特許 0 件

論文・解説 2 件

( 査読あり ) 1 件

- 1) 放射能絶対測定と国際比較、佐藤 泰、放射線、Vol.33, No.1, (2007), pp.3-10

( 査読なし ) 1 件

- 1) 放射能標準における遠隔校正、佐藤 泰、産総研 Today, Vol.8, No.3, (2008), pp.32-32

口頭発表 9 件

- 1) 佐藤 泰、山田 崇裕、鈴木 敏和、寅松 千枝、柚木 彰、檜野 良穂、原野 英樹、松本 哲郎、下山 哲矢、黒澤 忠弘、加藤 昌弘、工藤 勝久、松本 幹雄、鈴木健二、脇谷 雄一郎、伊藤じゅん、畠山 智、土井幸一、齊藤 義弘、鈴木 和年、福村 利光、宮本 勝宏、岩本明憲、遠藤健一、松原昌平、" Remote calibration of radioisotope calibrators, PTB-BIPM Workshop on the Impact of Information Technology in Metrology, ベルリン、2007/06/07
- 2) 佐藤 泰、山田 崇裕、畑 寿起、森山 健太郎、柚木 彰、檜野 良穂、" The detection

efficiency variation method for  $4\pi\beta-\gamma$  coincidence counting using an ink-jet printer, International Conference on Radionuclide Metrology and its Applications, 南アフリカ、2007/09/03

- 3) 佐藤 泰、村山 秀雄、山田 崇裕、柚木 彰、檜野 良穂、河田 燕,  $^{85}\text{Sr}$  を用いた DOI 検出器の検出効率測定におけるモンテカルロシミュレーション計算, 医学物理学会, 横浜、2007/04/14
- 4) “ $4\pi\beta-\gamma$  同時測定におけるインクジェットプリンタを用いた検出非効率変化法, アイソトープ・放射線研究発表会, 東京、2007/07/04
- 5) 佐藤 泰、山田 崇裕、畑 寿起、森山 健太郎、柚木 彰、檜野 良穂、河田 燕, PET 装置のトレーサビリティの確立, 佐藤 泰, 次世代 PET 研究会, 千葉市、2007/07/30
- 6) 佐藤 泰、原野 英樹、松本 哲郎、山田 崇裕、海野 泰裕、畑 寿起、森山 健太郎、柚木 彰、檜野 良穂、工藤 勝久、河田 燕,  $4\pi\beta-\gamma$  同時計数におけるスピニングによる検出非効率変化法, 日本原子力学会, 福岡県、2007/09/28
- 7) 佐藤 泰、松本 哲郎、原野 英樹、海野 泰裕、畑 寿起、森山 健太郎、柚木 彰、檜野 良穂、工藤 勝久, 汚染検査装置の遠隔校正, 計量標準総合センター成果報告会, つくば、2007/12/14
- 8) 佐藤 泰、福田 大治、田中啓一、黒澤 忠弘、山田 崇裕、海野 泰裕、脇谷雄一郎、柚木 彰、檜野 良穂,  $^{125}\text{I}$  シード線源より放出される X線および  $\gamma$  線のスペクトル測定, 応用物理学会, 千葉県、2008/03/30
- 9) 松本哲郎、原野英樹、工藤勝久、瓜谷章、“中性子測定器の校正技術、応用物理学会放射線分科会 2008 年春のシンポジウム、千葉、2008/3/29

その他の公表 0 件

20FY

特許 0 件

論文・解説 6 件

(査読あり) 2 件

- 1) 佐藤 泰、山田 崇裕、畑 寿起、森山 健太郎、柚木 彰、檜野 良穂, “The detection efficiency variation method for  $4\pi\beta-\gamma$  coincidence counting using an ink-jet printer”, APPLIED RADIATION AND ISOTOPES, Vol.66, No.6, (2008), pp.691-693、
- 2) 佐藤 泰、原野 英樹、松本 哲郎、西山 潤、森山 健太郎、海野 泰裕、山田 崇裕、柚木 彰、檜野 良穂、工藤 勝久, “Measurement of Activated Au foils by  $2\pi\beta+2\pi\beta-\gamma$  Coincidence Counting and EGS5 Monte Carlo Calculation”, AIP Conference Proceedings, Vol.1099, (2009), pp.907-911

( 査読なし ) 4 件

- 1) 佐藤 泰、海野 泰裕、“放射能標準、電気学会原子力研究会資料、No. NE08, (2008), pp. 1-6
- 2) 佐藤 泰、村山 秀雄、長谷川智之、山田 崇裕、海野 泰裕、柚木 彰、檜野 良穂、“Monte Carlo simulation of annihilation radiation -  $\gamma$  ray coincidence measurement for  $^{22}\text{Na}$  standard source used for calibration of PET devices”, The 5th KOREA-JAPAN Joint Meeting on Medical Physics(ISSN 1226-5829), (2008), PS2-15
- 3) 佐藤 泰、村山 秀雄、“PET 装置の校正と定量性の向上、医学物理、Vol.28、No.3、(2008), pp.77-102、
- 4) 佐藤 泰、織田 圭一、村山 秀雄、“PET 装置の校正と定量性の向上、日本放射線技術学会雑誌、Vol. 65、No.1、(2009), pp.65-71、

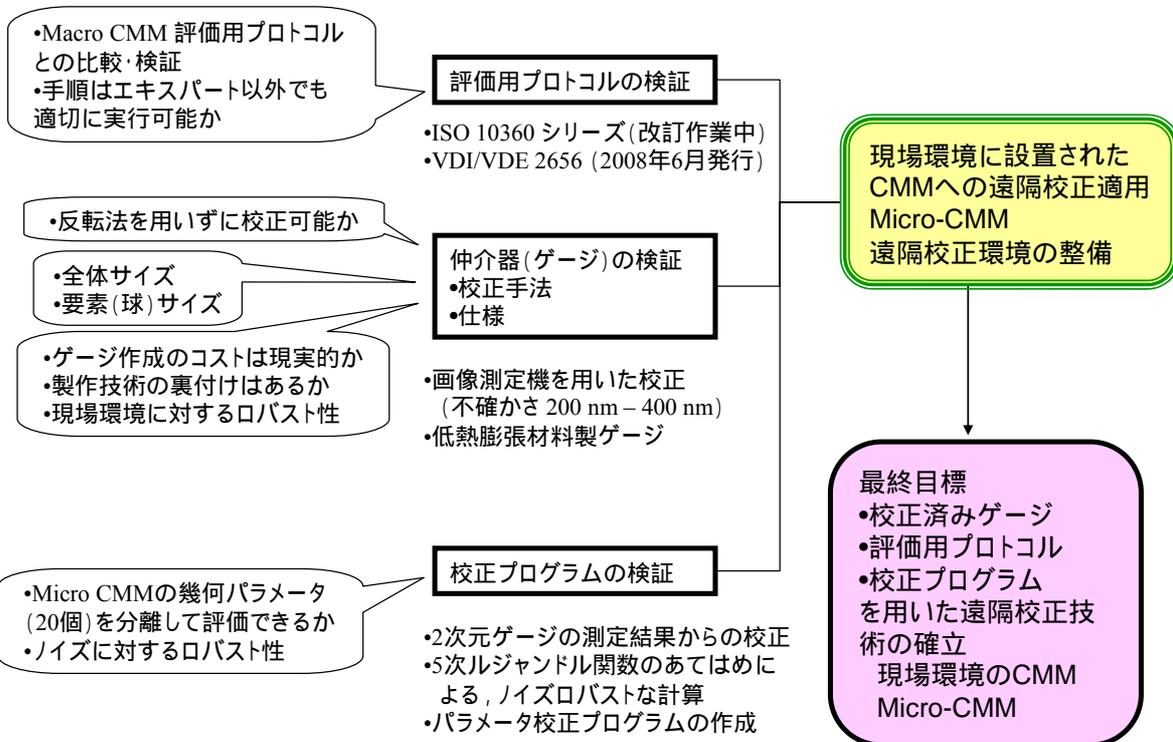
口頭発表 9 件

- 1) 佐藤 泰、山田 崇裕、海野 泰裕、柚木 彰、檜野 良穂、“ $^{111}\text{In}$ 適用の検出効率変化法によるインクジェットプリンタする対に放射能絶対測定の方法”、放射線研究発表会・アイソトープ、東京都、2008/07/05
- 2) 佐藤 泰、海野 泰裕、黒澤 忠弘、山田 崇裕、柚木 彰、檜野 良穂、“I-125遠隔校正実験の用放射線量測定装置、放射線研究発表会・アイソトープ、東京都、2008/07/05
- 3) 佐藤 泰、原野 英樹松本 哲郎、西山 潤、森山 健太郎、海野 泰裕、山田 崇裕、柚木 彰、檜野 良穂、工藤 勝久、“Measurement of Activated Au foils by  $2\pi\beta+2\pi\beta-\gamma$  Coincidence Counting and EGS5 Monte Carlo Calculation”, 20th International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry、米国、2008/08/14
- 4) 佐藤 泰、原野 英樹松本 哲郎、西山 潤、森山 健太郎、海野 泰裕、山田 崇裕、柚木 彰、檜野 良穂、工藤 勝久、“ $2\pi\beta+2\pi\beta-\gamma$  計算モンテカルロと放射能測定の放射化金箔による同時計数、日本原子力学会、高知県、2008/09/04
- 5) 佐藤 泰、海野 泰裕、“放射能標準、電気学会原子力研究会、東京都、2008/09/11
- 6) 佐藤 泰、村山 秀雄、長谷川智之、山田 崇裕、海野 泰裕、柚木 彰、檜野 良穂、“Monte Carlo simulation of annihilation radiation -  $\gamma$  ray coincidence measurement for  $^{22}\text{Na}$  standard source used for calibration of PET devices”, The 5th KOREA-JAPAN Joint Meeting on Medical Physics、韓国、2008/09/11
- 7) 佐藤 泰、山田崇裕、松本哲郎、原野英樹、海野泰裕、西山潤、森山健太郎、柚木彰、檜野良穂、工藤勝久、開発システム計量器校正情報(放射能分野)、第12回 e-traceセミナー成果普及、つくば市、2008/12/15

- 8) 佐藤 泰、山田崇裕、松本哲郎、原野英樹、海野泰裕、西山潤、森山健太郎、柚木彰、  
 桧野良穂、工藤勝久、開発システム計量器校正情報（放射能分野）、  
 開発運営委員会システム計量器校正情報、川崎市、200/01/15
- 9) 佐藤 泰、山田崇裕、松本哲郎、原野英樹、海野泰裕、西山潤、森山健太郎、柚木彰、  
 桧野良穂、工藤勝久、開発システム計量器校正情報（放射能分野）、  
 国際計量研究連絡委員会、つくば市、2009/02/12

その他の公表 0 件

## -2.5 三次元測定機標準



### (1) 研究開発の概要

インターネットを利用した、遠隔校正による三次元測定機の測定の不確かさの算出、ならびに仲介標準器を用いた幾何学誤差測定法を確立する。また、外国標準機関との間で遠隔不確かさ決定の実証を行う。この技術を確立することにより、三次元測定機を使う多くのユーザがトレーサブルな測定を行うことができる体制を確立する。さらに、産業界からの要請が多い任意・微細形状用三次元測定機を遠隔校正するため、仲介標準器(ゲージ)を開発する。またゲージを用いてユーザが装置をトレーサブルに校正、評価する手続きの確立、標準化を進め、遠隔校正時に重要となるユーザ側測定環境モニタ手法を確立する。

## (2) 中間目標

### (a) 15 年度中間目標

産総研の所有する 2 台の三次元測定機を使用して、お互いの測定機をネットワーク経由で遠隔操作できる技術を確立し、実証実験を行う。産総研の外部にある産総研と同機種  
の測定機を使用して、ネットワーク経由で遠隔操作できる技術を確立し、実証実験を行う。

### (b) 17 年度中間目標

三次元測定機の不確かさを算出するために必要な基礎データを、ネットワークを利用して遠隔操作により測定し取得するシステムを確立する。具体的には、産総研の内部・外部  
にある産総研と同機種・異機種の三次元測定機に対応したシステムを確立する。また遠隔  
校正による不確かさは  $3 \mu\text{m} / 1 \text{m}$  を達成する。

## (3) 最終目標

任意・微細形状標準器を遠隔校正するため、測定長さ 50 mm に対して不確かさ 500  
nm 以下で値付けられた仲介標準器（ゲージ）の開発を行う。さらにユーザがゲージを用  
いて三次元測定機を校正・評価する手続きの確立と標準化を進める。

## (4) 本研究内容の構成

本研究では下記の項目について開発を行った。

- (a) 三次元測定の不確かさ推定
- (b) 三次元測定機遠隔校正の標準手順確立
- (c) 三次元測定機遠隔校正の利用利便性向上
- (d) 任意・微細形状用三次元測定機のための遠隔校正環境整備
- (e) ユーザ側測定機環境モニタ手法開発

## (5) これまでの成果

### (5-1) H17 までの研究成果のまとめ

いわゆる三次元測定機（CMM）の校正と呼ばれる作業には二つの異なるものがある。  
一つ目は、ブロックゲージなどの校正済みの長さ標準器を測定し、校正値と測定値の差を  
比較することにより、その CMM の測定精度を評価するものである。もう一つは、装置  
の移動機構が有する真直度を始めとする運動誤差を評価するものであり、ボールプレート  
やレーザ干渉計を用いてその作業は行われる。混乱を避けるため、正しい用語ではないか  
も知れないが、前者を測定精度評価、後者を幾何学誤差評価と呼ぶことにする。

CMM は多機能かつ複雑な装置であり、使い方によって測定の不確かさは大きく変化する。  
したがって装置そのものの校正を完全に行うことは不可能であり、測定誤差評価のみ  
を行って校正とすることが多い。その手順は ISO 10360-2 (JIS B 7440-2) に規定され  
ている。

幾何学誤差評価は、その結果を装置の制御パラメータに反映させることにより、装置の性能を向上させることができる。したがってメーカー自身によって行われるのが普通である。またパラメータに反映しない場合は、幾何学誤差は不確かさの算出に有用な元データとなるが、これについての詳細は省略する。

e-trace によって行う校正は、測定精度評価と幾何学誤差評価の双方が可能であるが、現在主にメーカーによって行われている校正は、より簡便な前者のみである。e-trace プロジェクトで行った技術を用いれば、どちらの校正も可能である。

現在はどちらの校正を行うにしても、十分な知識をもつ熟練した技術者がブロックゲージ、ボールプレート、レーザ干渉計などのゲージや測定機を持って現地に赴き、多大な時間、労力を費やして測定と解析を行わなければならない。それに伴い、依頼者にも多大な費用が課せられる。そこで本研究では、熟練者がユーザ側に出向くことなく、インターネットを利用して CMM の校正を行うことにより、人的、時間的コストの削減を目指したシステム開発を行った。

## (5-2) H18-H20 の成果

### (a) 三次元測定の不確かさ推定

これまでに三次元測定機の測定誤差評価を遠隔で行う技術を開発した。この技術では図 2.5-1 に示すように複数の方向で仲介標準器（ゲージ）を測定し、図 2.5-2 に示すように寸法測定誤差を評価する。ここでは各方向での寸法測定誤差が、メーカーもしくはユーザが規定する最大許容誤差（Maximum Permissible Error: MPE）を超えるか否かの検査を行っている。

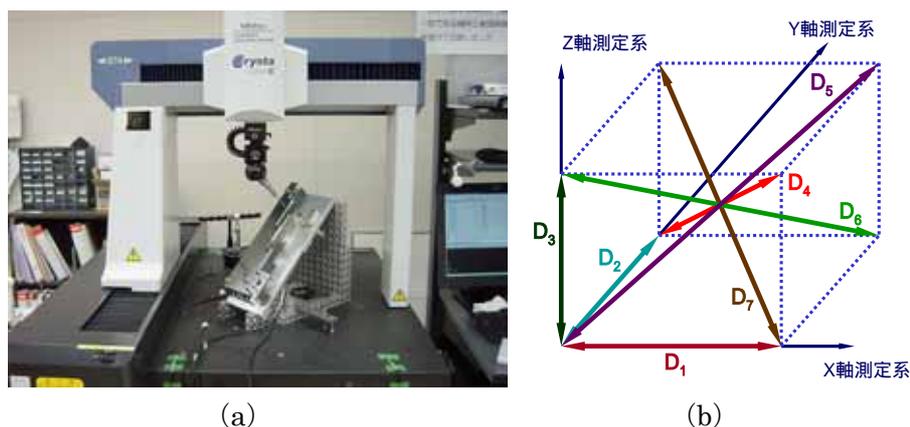


図 2.5-1 三次元測定機による仲介標準器測定 (a) と測定誤差評価方向 (b)

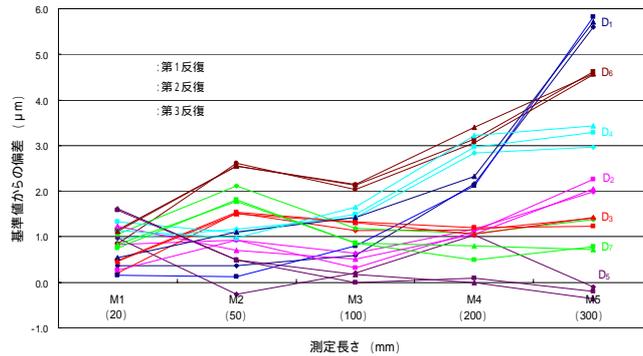


図 2.5-2 各方向での寸法測定誤差

この検査では、三次元測定機による寸法測定誤差がどの程度であるかを知ることにはできないものの、その三次元測定機を用いて座標測定および任意の形状の測定を行ったときの誤差がどの程度であるかを知ることにはできない。一般に三次元測定機ユーザが知りたいのは、その三次元測定機を用いて任意の形状などを測定したときの不確かさである。そこで CDT 研究所の中村哲夫氏の協力を得て、寸法測定誤差評価結果から座標測定の不確かさを推定する手法の開発と検証を行った。

この方法では各方向における寸法測定誤差に対して分散分析を行い、表 2.5-1 に示すような分散分析表を作成する。分散分析表から、下記の計算により座標測定の拡張不確かさを推定する。

$$u_c = \sqrt{\sigma_{e3}^2 + \sigma_{e2}^2 + \sigma_{M \times D}^2 + \sigma_M^2 + \sigma_D^2 + \sigma_m^2}$$

$$U = \pm 2u_c$$

図 2.5-2 の例の場合、拡張不確かさは 3.97 μm となる。

この方法で推定した不確かさは測定における最悪値に近いものであり、やや過大推定になる。本手法は発展途上ではあるものの、単なる寸法測定誤差の評価だけでなく実際の三次元測定機の運用にあたって重要な情報である座標測定の不確かさを推定できるようになったことで、ユーザにとって有益な情報を提供できるようになった。

表 2.5-1 寸法測定誤差についての分散分析表

要因	二乗和	自由度	不偏分散	不偏分散の期待値
m 一般平均	753.0460	1	753.0460 **	$e_3^2+2 e_2^2+10 e_1^2+6 M \times D^2+14 M \times R^2+42 M^2+30 D^2+70 R^2+210 m^2$
R 反復測定	0.3028	2	0.1514 *	$e_3^2+2 e_2^2+10 e_1^2+14 M \times R^2+70 R^2$
D 測定方向	113.2480	6	18.8747 *	$e_3^2+2 e_2^2+10 e_1^2+6 M \times D^2+30 D^2$
e1 一次誤差	1.8356	12	0.1530 *	$e_3^2+2 e_2^2+10 e_1^2$
M 測定長さ	193.4081	4	48.3520	$e_3^2+2 e_2^2+6 M \times D^2+14 M \times R^2+42 M^2$
R × M 交互作用	0.7856	8	0.0982 **	$e_3^2+2 e_2^2+14 M \times R^2$
D × M 交互作用	141.7458	24	5.9061	$e_3^2+2 e_2^2+6 M \times D^2$
e2 二次誤差	4.4852	48	0.0934 **	$e_3^2+2 e_2^2$
e3 繰り返し誤差	2.1119	105	0.0201	$e_3^2$
T		210		

## (b) 三次元測定機遠隔校正の標準手順確立

(5-1) 項で述べたように、三次元測定機の遠隔校正では測定精度評価と幾何学誤差評価の両方が可能である。ここで測定精度評価については ISO 10360 シリーズや JIS B 7440 シリーズなどで方法規格として標準的な評価手順が定められているのに対し、幾何学誤差評価については標準的な評価手順が定められておらず、測定機メーカーや校正者ごとに様々である。今後、産総研が三次元測定機の遠隔校正において幾何学誤差評価を行っていくためには、標準的な幾何学誤差評価手法として以下を定めておく必要がある。

- 1) 仲介標準器の標準的な測定姿勢
- 2) 仲介標準器の測定誤差から三次元測定機の幾何学誤差を算出する標準的な処理

産総研が保有する三次元測定機に対して自ら幾何学誤差評価を行う場合、ホールプレートと呼ばれる二次元的に座標値が校正された仲介標準器を 6 つの姿勢で測定し、その誤差から三次元測定のもつ 21 個の幾何学誤差を評価している。産総研で実施している手法を用いた場合、校正後の三次元測定機の座標測定の不確かさは、用いた仲介標準器の校正値の不確かさの 2 倍程度となる。この方法では仲介標準器に値付けられた座標値を差分測定するため、三次元測定機および仲介標準器の大きさに依らず、仲介標準器の校正値の 2 倍程度の不確かさで三次元測定機を校正できる。

この手順を標準化し、今後の遠隔校正で利用するための環境を整備した。ここでは図 2.5-3 に示す 6 つの姿勢を標準的な仲介標準器測定姿勢とした。

産総研で三次元測定機の幾何学誤差評価を行う場合、仲介標準器の測定誤差から 21 個の幾何学誤差を推定し、それぞれに対して 20 mm ピッチもしくは 40 mm ピッチの指定した点を通るスプライン曲線を当てはめる。この方法では計算が複雑になるため、これを簡略化し、幾何学誤差を 5 次のルジャンドル多項式に当てはめる方法を標準的な計算手順とした。あわせて、それぞれの姿勢における仲介標準器の測定誤差入力することで、三次元測定機のもつ 21 個の幾何学誤差を評価することができるプログラムを作成した。

これにより、遠隔で三次元測定機の幾何学誤差評価を行うためのソフト面での環境が整備できた。

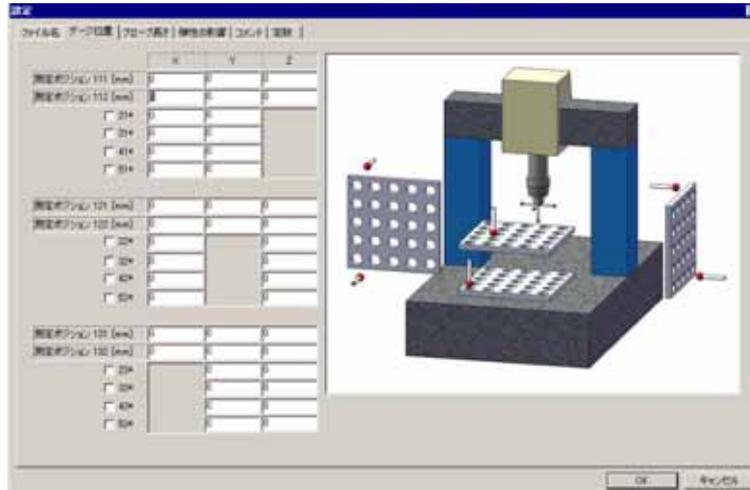


図 2.5-3 幾何学誤差評価のための標準的な仲介標準器測定姿勢

### (c) 三次元測定機遠隔校正の利用利便性向上

これまで産総研では、気温がほぼ  $20^{\circ}\text{C}$  に管理されている測定室環境に設置された三次元測定機に対して測定精度評価を行う遠隔校正を提供してきた。近年では工場などの現場環境にも三次元測定機が設置され、利用される場面が増えてきている。現場環境に設置された三次元測定機は台数が多く、製造ラインの一部をなしているために検査のための停止時間をなるべく短くしたい。そのため、短期間、低コストで検査を行うことのできる遠隔校正への潜在需要がある。

現場環境に設置された三次元測定機に遠隔校正を適用する上で問題となるのは、設置環境の温度変化である。気温が一定となるように管理されている測定室環境とは異なり、工場などの現場環境では日間、年間での温度変化がある。例えば冬期の場合、設置環境の温度は  $15^{\circ}\text{C}$  から  $18^{\circ}\text{C}$  程度と、温度の変動および偏りを持っている。このような環境で遠隔校正を行った場合、測定時の温度変化による影響を補正する必要が生じるため、校正の不確かさが増大する。このうち、仲介標準器についてこの問題を避けるために、低熱膨張材料製（ガラス製およびセラミックス製）の仲介標準器を用意した（図 2.5-4）。これらの仲介標準器は JIS B 7506:2004 に定める K 級ブロックゲージに相当する精度で加工されており、 $20\text{ nm}$  程度の不確かさで値付けられている。これらの仲介標準器を用いることにより、温度変化の大きい環境に設置された三次元測定機に対しても小さい不確かさで測定誤差評価についての遠隔校正を行えるようになった。

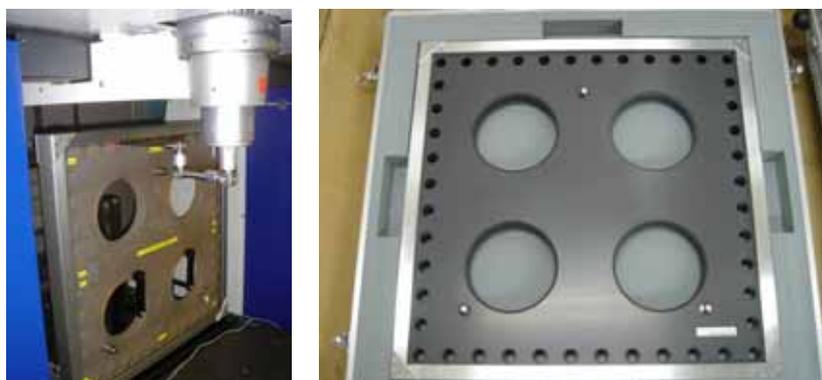


図 2.5-4 低熱膨張材料で作成された仲介標準器

三次元測定機の幾何学誤差評価を行う場合、小さい不確かさで値付けられた仲介標準器が必要となる。産総研でこの評価を行う場合、図 2.5-5 (a) に示す、高品位な仲介標準器を使用する。この仲介標準器は一般には入手が難しく、また産総研からユーザに送付することはほぼ不可能である。そのため、将来、幾何学誤差評価の遠隔校正サービスを提供するには、一般でも入手可能かつ高品位な仲介標準器を用意する必要があった。

産総研では低熱膨張材料製ブロックゲージに使用されている特殊なセラミックスに注目した。この材料は低熱膨張ガラス（現在産総研で使用している仲介標準器に使用されている材料）よりも剛性が高く、加工性が良い。また日本国内で製造、加工が可能である。そこで産総研ではこの低熱膨張セラミックスを用いて、産総研で使用している仲介標準器と同じ設計値をもつ仲介標準器を作成した。これを図 2.5-5 (b) に示す。

新しく作成した仲介標準器は熱膨張せず、かつ従来産総研で用いてきたものと同程度の不確かさ（250 nm）で値付けできる。今後、ユーザの保有する三次元測定機の幾何学誤差を評価する場合には、新しい仲介標準器を使用する。これにより、遠隔で三次元測定機の幾何学誤差評価を行うためのハード面での環境が整備できた。



(a)

(b)

図 2.5-5 幾何学誤差評価のための仲介標準器

低熱膨張ガラス製 (a) および低熱膨張セラミックス製 (b)

#### (d) 任意・微細形状用三次元測定機のための遠隔校正環境整備

これまで三次元測定機は数十 mm から数百 mm の大きさを持つ機械要素などの測定に利用されてきた。近年では商品性能の向上のために機械要素の小型化、精密化が進められており、その製造工程において微小な機械要素の測定が求められており、このような微小機械要素の測定にも三次元測定機が利用されてきている (図 2.5-6)。これらの三次元測定機についても、測定の信頼性を確保する必要があり、測定機の校正を行う必要がある。

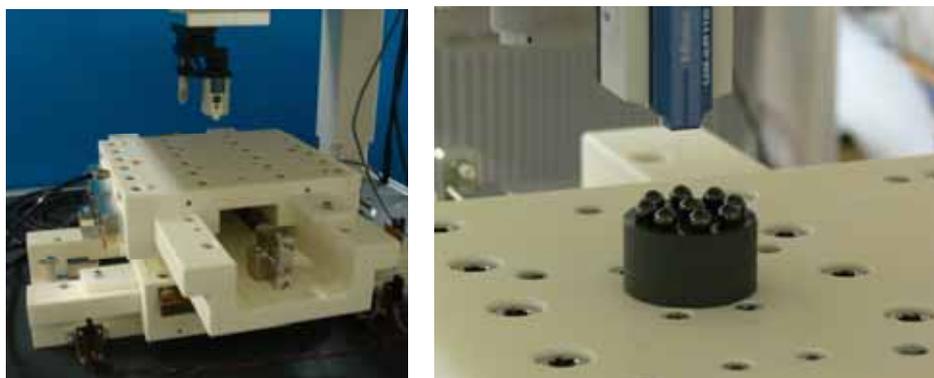


図 2.5-6 産総研で開発した任意・微細形状用三次元測定機

微小機械要素測定用の三次元測定機 (Micro CMM) の校正も、基本的には通常の三次元測定機の遠隔校正と同じく、寸法測定誤差あるいは幾何学誤差の評価を行えばよい。しかし Micro CMM はプローブ姿勢を変化させることができないなど、機構上の制限を持つため、通常の三次元測定機の校正手順をそのまま適用することはできない。そのため、機構上の制限を考慮した校正手順を定める必要がある。また Micro CMM は 1990 年代から研究が始まった比較的新しい装置であり、これを評価するための仲介標準器については、その構造、値付け手法も含めて研究途上であるため、仲介標準器の開発も行う必要がある。

Micro CMM と同様の機構上の制限をもつ座標測定システムの精度評価法としては、走査型プローブ顕微鏡の精度評価法についてのガイドライン、VDI/VDE 2656 Part 1: Determination of geometric quantities by Scanning Probe Microscopes - Calibration of Measurement Systems, 2006. などが存在する。Micro CMM の校正である測定誤差評価については、これを準用すればよい。同ガイドラインは走査型プローブ顕微鏡の持つ幾何学誤差の評価法についても記述しており、Micro CMM の幾何学誤差評価についても準用可能である。

一方、Micro CMM 用の仲介標準器については、未だ未整備である。これは仲介標準器の製造技術よりも値付け技術の能力不足が大きな原因である。測定機の校正では、小さい不確かさで値付けられた仲介標準器が必要である。これは校正に使用した仲介標準器の不確かさが、校正の不確かさの下限值を与えるからである。現状では Micro CMM で仲

仲介標準器を直接値付けする場合、世界的に見てもその不確かさの下限値は 250 nm 程度までしか達成されていない。これは Micro CMM のプローブシステム由来の不確かさが大きいことと、Micro CMM 用仲介標準器の値付けにおいて反転法を利用できないためである。そのため、より小さい不確かさで仲介標準器に値付け可能な手法が必要となる。産総研では画像測定機 (Video CMM) を用いた比較測定により、Micro CMM 用の仲介標準器に値付けを行う方法を開発している。その模式図を図 2.5-7 に示す。



図 2.5-7 任意・微細形状用三次元測定機のための仲介標準器校正

この方法では小さい不確かさで値付けられた Video CMM 用の仲介標準器を用意できれば、それと同等の不確かさで Micro CMM 用の仲介標準器に値付けすることができる。通常サイズの三次元測定機の場合、図 2.5-5 (b) に示した仲介標準器 (校正の不確かさ : 315 nm / 400 mm) との比較測定により、別の仲介標準器に対しを 377 nm / 400 mm の不確かさ (1.2-1.5 倍の不確かさ伝搬) で校正した例があり、Micro CMM 用仲介標準器についても、比較測定により同程度の不確かさ伝搬を実現できると見込んでいる。

産総研では反転法を適用可能な Video CMM 用仲介標準器を開発しており、その値付けの不確かさは測定長さ 100 mm に対して 200 nm 程度である。これは不確かさ 100 nm の標準尺をトレーサとして値付けしたときの値であり、今後、より測定不確かさの小さいレーザ干渉計などをトレーサに使用することで、100 nm 以下の不確かさで Video CMM 用仲介標準器に値付けできる。具体的には、

- ・グリッドパターンの品質向上 (エッジラフネスなど)
- ・高倍率レンズ使用のための基板の薄板化 (中心座標測定の高分解能化)
- ・長さのトレーサを標準尺 (校正値の不確かさ : 200 nm / 100 mm) からレーザ干渉計 (同 : 480 nm / 1 m) へ移行

を行うことにより、将来的に 100 mm 程度の大きさの Video CMM 用仲介標準器を 50 nm 程度の不確かさで校正可能と見込んでいる。これを用いることにより、Micro CMM 用仲介標準器を 120 nm-160 nm 程度の不確かさで校正でき、不確かさの伝搬に

おける安全率も見込んで、Micro CMM を 200 nm / 100 mm 程度の不確かさで校正できる見込みである。

### (e) ユーザ側測定機環境モニタ手法開発

前述したように、温度変化の大きい環境に設置された三次元測定機に対して小さい不確かさで測定誤差評価についての遠隔校正を行うためには、低熱膨張材料製の仲介標準器を用いる。これにより仲介標準器の熱膨張補正に由来する校正の不確かさを低減できる。さらに校正の不確かさを低減するためには、三次元測定機側の熱膨張補正に由来する不確かさを低減しなければならない。

三次元測定機の熱膨張補正量を適切に評価する方法の一つとして、産総研から仲介標準器とともに温度計を送付し、三次元測定機の XYZ 各軸に取り付けられたスケールの温度を測定する方法が考えられる。しかし一般に三次元測定機のスケールはカバーなどで覆われており、外部から温度計を取り付けることが難しい。また温度計の取り付けなどで時間コストなどが増加することから、三次元測定機の校正を短時間かつ低コストで実現する、という遠隔校正の趣旨と矛盾してしまう。

そこで財団法人機械振興協会技術研究所と共同で、簡易に三次元測定機の熱膨張補正量を評価する方法を開発した。この方法は寸法がほぼ同じで熱膨張係数が異なる 2 つの仲介標準器を同じ温度環境に設置し、両者の測定値からその設置環境の温度および三次元測定機の熱膨張補正量を算出するものである。ここで一方の仲介標準器に前述した低熱膨張材料製の仲介標準器を使用することで、三次元測定機の熱膨張補正量を小さい不確かさで算出することができる。図 2.5-8 に、低熱膨張材料性仲介標準器を用いて三次元測定機の熱膨張補正量を求める実験の様子を示す。

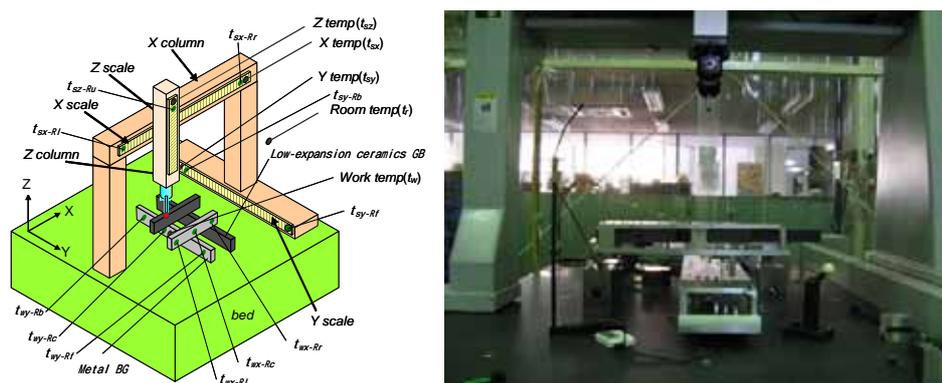


図 2.5-8 低熱膨張材料性仲介標準器の測定を通じた熱膨張補正量算出

工場レベルの温度環境に設置された三次元測定機を用いて行った実験の結果を図 2.5-9 に示す。この実験は冬期に行ったため、設置環境の温度が 16.5 °C から 17.5 °C と、測定室レベルの温度環境よりも低い。この環境下で鋼製、低熱膨張材料製の 2 つの仲介標準器を測定し、熱膨張補正量を求め、仲介標準器の測定量を補正することで、三次元測定機

の寸法測定誤差を求めた。その結果を図 2.5-9 (b) に示す。実験の結果、この手法を用いて低熱膨張材料製の仲介標準器測定結果をすることで、三次元測定機の設置環境の温度が変動しても寸法測定誤差を安定して評価できることが確認できた。

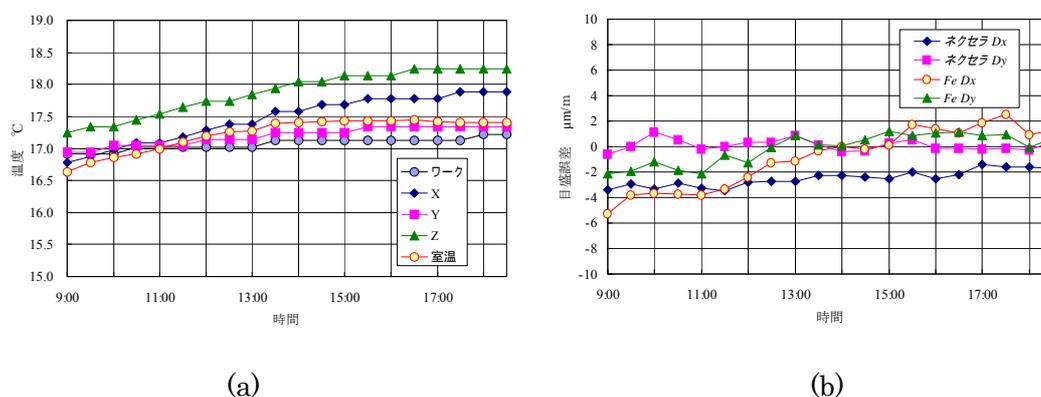


図 2.5-9 低熱膨張材料性仲介標準器の測定を通したユーザ側測定環境モニタ  
(a) 各軸およびワーク温度 (b) 測定結果から計算した寸法測定誤差

## (6) 実用化の見通し

既に本事業の成果を用いて、測定室環境に設置された三次元測定機の測定精度評価を行う遠隔校正サービスを提供している。これに加えて第二期の研究成果により、より設置台数の多い現場環境でも三次元測定機の遠隔校正が行える環境を整備した。また、三次元測定機の幾何学誤差評価を遠隔で行うため、ソフト面、ハード面での環境を整備した。これにより三次元測定機の遠隔校正の対象範囲を広げることができる。

## (7) 目標の達成状況

本事業を通して、ユーザがゲージを用いて三次元測定機の測定精度評価、幾何学誤差評価を行える手順の標準化と、評価に必要なゲージおよびプログラムなどソフト、ハード両面での整備を行った。これにより三次元測定機の遠隔校正の高度化および利便性を高めた。

また任意・微細形状標準器を遠隔校正するために必要となるゲージについて、測定長さ 100 mm に対して不確かさ 200 nm 程度で値付ける手法を開発した。この手法を用いることにより、Micro CMM を 200 nm 程度の不確かさで校正できる見込みである。

## 外部発表状況

H18FY

特許 0 件

論文、解説 0 件

口頭発表 2 件

- 1) 大澤尊光、三次元測定機の遠隔校正技術、光計測シンポジウム 2006、横浜、平成 18 年 6 月 7 日
- 2) 佐藤理、“Coordinate measuring system for large size artefacts -- A laser tracking interferometer system based on trilateration”、KAIST-NMIJ Joint Workshop 2006 on Precision Metrology、大田（韓国）、平成 18 年 12 月 21 日

その他の公表 0 件

H19FY

特許 0 件

論文、解説 0 件

口頭発表 2 件

- 1) 大澤尊光、“Remote calibration system for coordinate measuring machines”、PTB-BIPM workshop、ベルリン（ドイツ）、平成 19 年 6 月 7 日
- 2) 大澤尊光、“Current status on ISO standards of CMMs and precise measuring methods for CMM measurements”、APMP TCL Workshop - CMM Metrology、シドニー（オーストラリア）、平成 19 年 10 月 30 日
- 3) 佐藤理、“Advanced coordinate metrology: from Coordinate Measuring Machines to Coordinate Measuring Systems”、APMP TCL Workshop - CMM Metrology、シドニー（オーストラリア）、平成 19 年 10 月 30 日

その他の公表 0 件

H20FY

特許 0 件

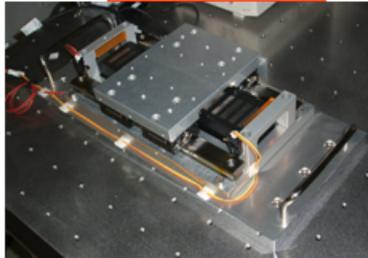
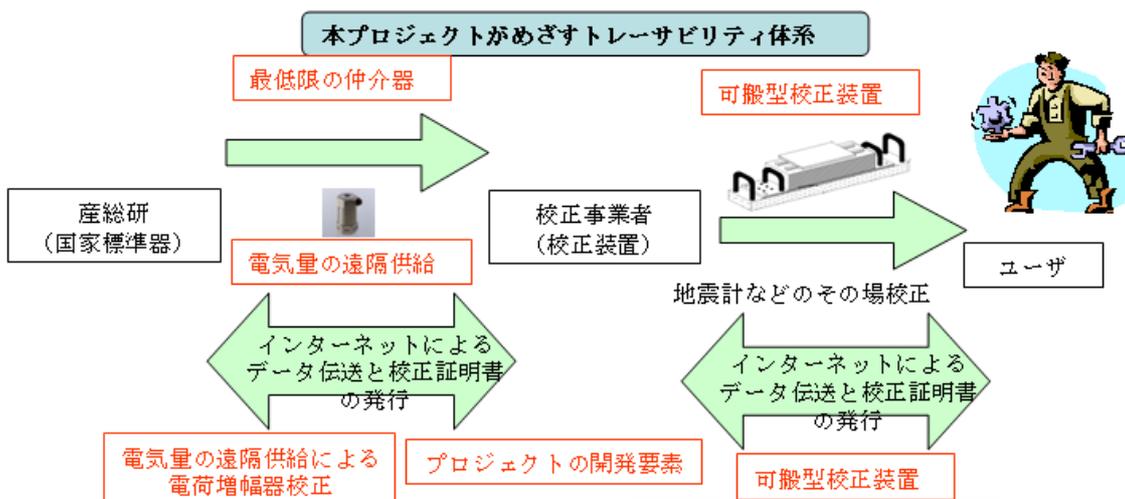
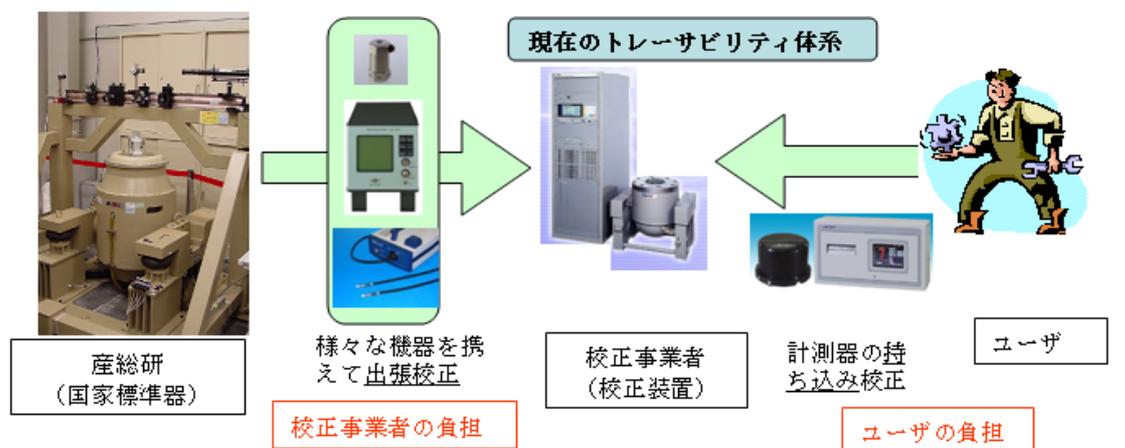
論文、解説 0 件

口頭発表 0 件

その他の公表 2 件

- 1) 佐藤理、第 11 回 e-trace 成果普及セミナー（CMM）”、e-trace 成果普及セミナー、つくば、平成 20 年 10 月 22 日
- 2) 佐藤理、“座標測定機用標準の開発”、産総研 Today Vol.8（2008）No. 11、平成 20 年 11 月 4 日

### III-2.6 振動・加速度標準



波及効果：低コスト、校正事業者の負担軽減、校正器物の拡大、校正装置自体の廉価化

## (1) 研究開発の概要

振動計測は地震などの地質分野、ビルや橋梁など建築分野、手持ち工具の安全性など労働衛生分野、自動車などの開発や設備診断などの工学分野で古くから重要な位置を占めてきた。振動量は構造物の耐震性や手持ち工具の安全性などを評価、確保する上で重要であり、信頼性、客観性、公平性の担保のために、各国標準研究所で国家標準が設定されている。また近年では自動車の衝突エアバッグの起動やノートパソコンの落下検出などに MEMS 型加速度計が用いられ、測定範囲の拡大と共に適用分野が広がっている。振動加速度の JCSS 制度は 1998 年から開始されているが、認定機関による校正の普及と共に、地震計など移動が困難な振動計測装置のその場校正や、MEMS 型加速度計など大量生産された振動計測装置の安価な校正手段が求められている。

振動量は振動数 (Hz) と振幅 (加速度、速度、長さ) によって特徴づけられる、動的組立量である。測定原理 (及び検出量) としては サイズモ式センサ、近接センサ (長さ) 及び 電磁誘導型センサ (速度) などがあげられる。このうち、近接センサや電磁誘導型センサは基準点に対する相対的な測定である。これは地震や移動中の自動車振動など、外部に基準点を求めるのが困難な現象は測定できない。これに対しサイズモ式センサは空間座標に対する振動量を加速度または速度として直接測定できるため、広く用いられている。今日国家標準機関における振動量の標準 (振動加速度標準) とは、このようなサイズモ式センサの校正装置を指している。

図 2.6-1 は国家標準器として用いられる一次校正装置の原理である。校正対象の加速度計は加振機に取り付けられ、正弦状に励振される。振動振幅はレーザ干渉計によって測定される一方、加速度計からも出力 (電気量) され、その感度は単位加速度あたりの電気量 (電圧や電荷など) として与えられる。校正装置全体は空間座標に対して固定されていると見なし得るよう、地面振動や空調機器などの外来振動を十分絶縁する必要がある。また、校正装置自体に加振機という振動源があるため、寄生振動の発生など悪影響が生じぬよう、校正装置全体に十分な剛性が必要とされる。このような校正装置を実現するためには大がかりな防振台を必要とするなど、コストがかかる。さらに振動数に応じた加振機や、振幅に応じた分解能・ダイナミックレンジを有するレーザ干渉計を必要とするため、複数の校正装置により国家標準が維持される。

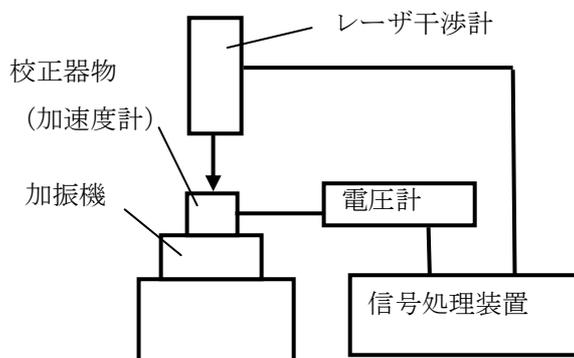


図 2.6-1 一次校正装置の原理図

これに対し図 2.6-2 は一般の校正機関などで用いられる二次校正装置の原理を示している。加振機には校正対象とともに、一次校正装置で校正された加速度計が取り付けられる。この加速度計を参照標準として、校正対象の感度を比較校正する。二次校正装置は、高価なレーザ干渉計を必要とせず、また多少外来振動が重畳されても比較校正においてその外来振動がキャンセルされるため、防振台が簡素化できるなど、比較的安価に校正装置が実現できる利点がある。

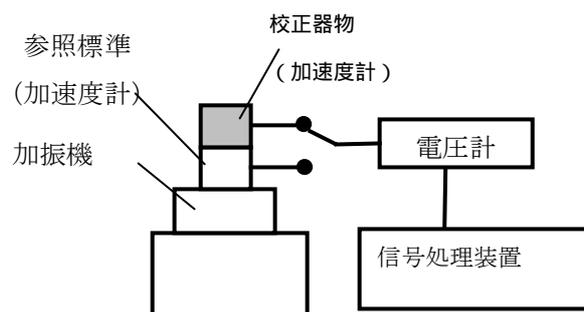


図 2.6-2 二次振動校正装置の原理

二次校正装置の国家標準では、参照標準となる加速度計をトランスファ標準器としてトレーサビリティが確保される。なお、通常振動計測器はピックアップと付帯するアンプなどから構成される。

近年の消費者の安全志向、高付加価値指向に伴い、自動車の衝突安全性や静粛性、家電製品の静粛性などが市場における訴求力となっている。また、高層建築や原子力プラントなどの耐震性評価等に関心が高まっている。これらの産業分野において、振動加速度の測定が重要性を増しており、標準の供給を望む声が大きくなっている状況の中、振動加速度標準に関わる各種技術（校正装置、トランスファ標準器、等）のポータビリティを向上し、最終的に遠隔校正を実現しようとするのが本研究の目的である。

振動加速度標準は、一般に振動を発生させる加振機と、その振動を定量化するレーザ干渉計または参照用振動加速度計（トランスファ標準器）からなり、大規模ゆえ移動することが困難である。本研究テーマでは、可搬型加振機、参照用振動加速度計の評価装置、振動加速度計の電荷増幅器部分の評価装置などを開発する。これらの装置開発により校正コストの低減が可能となり、また地震計などいったん設置すると移送が困難で再校正が難しかった機器のその場校正が可能となる。

## (2) 中間目標

### (a) 15年度中間目標

該当無し

## (b) 17 年度中間目標

該当無し

### (3) 最終目標

産業界における振動計や地震による高層ビル振動等への対応を目指し、国家計量標準にトレーサブルで輸送可能な振動加速度計遠隔校正システムを確立する。現存する校正事業者に対しては、産総研からの出張校正に必要な機器の一部を遠隔校正し、校正不確かさを損なわずに工数・費用を低減するシステムを構築する。地震計など、振動加速度計校正事業者には持ち込めないユーザを対象に、振動数 1 Hz～160 Hz において校正可能な可搬型校正装置の開発を行う。この際印加する振動数、及び、振動加速度振幅の分解能として、0.05 Hz, 0.005 m/s<sup>2</sup> (不確かさ 0.1 %) を実現する。

### (4) 本研究内容の構成 (中テーマ等を箇条書きにして簡潔に説明して下さい)

#### (4-1) 可搬型加振機の開発

通常の加振機ではボイスコイル型の電磁アクチュエータを用いている。しかし移送可能な小型のアクチュエータでは発生力が限られ、励振可能なピックアップの質量は事実上数十グラム程度に限られていた。例えば地震計のピックアップ部 (感振器) は数キログラム以上の質量があり、従来の校正装置ではそのまま励振することが出来ない。今回目的とするように、ユーザサイドでその場校正を実現しようとしたとき、感振器のようなコンポーネントも含む様々な対象を校正出来ることが望ましい。このため従来にない小型軽量、大出力の加振機を必要とする。さらに遠隔校正のために、校正データの取得やある程度の操作をインターネット経由で出来ることが必要となる。以上のことから、加振機にはサーボ制御式のリニアモータを用い、十分な励振力を持つと同時に、インターネット経由で振幅や振動数を制御可能な、可搬型加振機を開発した。

#### (4-2) 振動加速度計の電荷増幅器部分校正装置の開発

JCSS 制度における振動加速度の標準供給では、サイズモ式センサである圧電式加速度ピックアップと、その出力を増幅する電荷増幅器を一体の校正器物として扱い、電圧感度を校正している。しかし、ユーザは対となる加速度ピックアップと電荷増幅器を適時交換することも多く、加速度ピックアップと電荷増幅器を、独立して校正するニーズが大きい。圧電式加速度ピックアップは、加速度に比例した電荷を発生させる。既知の電圧とキャパシタンスにより電荷を発生させ、等価的な電荷量を電荷増幅器に加えることでチャージアンプの校正が可能である。また、電荷増幅器の感度 (単位入力電荷あたりの出力電圧) の他、位相も主要な特性として重要であるが、そのためには位相差計または波形メモリ (デジタルオシロスコープ) が必要となる。これらの電圧源、位相差計または波形メモリは能動デバイスであるため、その定期的な校正が必要となり、また移動や環境変化による影響を受けやすい。標準電圧源や位相差計などの能動デバイスを含まず、安定性に優れた

受動デバイスを主体とする校正装置を開発した。

## (5) これまでの成果

### (5-1) H17 までの研究成果のまとめ

該当無し

### (5-2) H18-H20 の成果

#### (a) 可搬型加振機の開発

通常 of 校正装置では、加振機にボイスコイル型の電磁アクチュエータを用いている。しかし移送可能な小型のアクチュエータでは発生力が限られ、励振可能なセンサの質量は事実上数十グラム程度に限られていた。例えば地震計のピックアップ部（感振器）は数キログラム以上の質量があり、従来の校正装置ではそのまま励振することが出来ない。今回目的とするように、ユーザサイドでその場校正を実現しようとしたとき、感振器のようなコンポーネントも含む様々な対象を校正出来ることが望ましい。このため従来にない小型軽量、大出力の加振機を必要とする。さらに遠隔校正のために、校正データの取得やある程度の操作をインターネット経由で出来ることが必要となる。

以上のことから、加振機にはサーボ制御式のリニアモータを用いた。図 2.6-3 は装置の外観（コンテナを開梱したところ）、図 2.6-4 は校正を行っている状態である。



図 2.6-3 可搬型加振機の外観

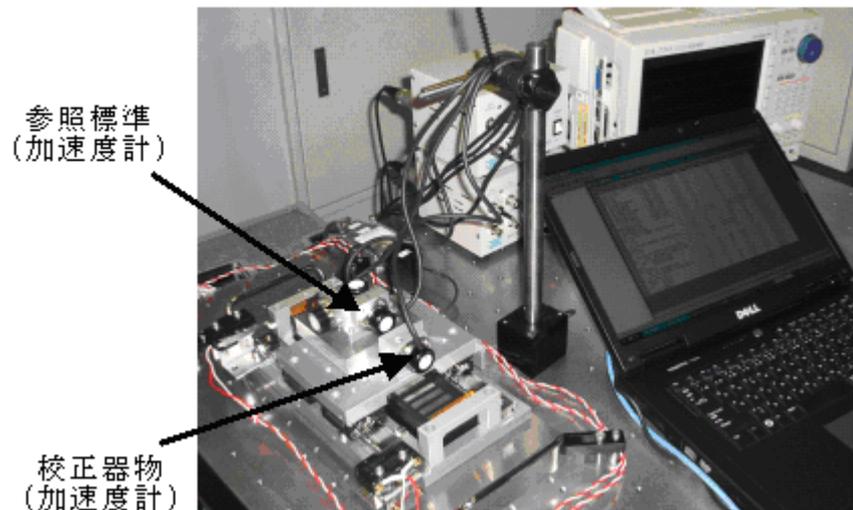


図 2.6-4 可搬型加振機による校正

加振機とドライブアンプ、制御装置および仲介用の加速度計はアルミ製のコンテナにパッキングでき、質量は約 25 kg である。なおユーザは加振機を据付ける剛性が確保されたテーブルを用意する必要がある。加振機の制御装置はインターネット経由で起動、停止、振動数と振幅の制御及び動作のモニタが可能である。加振機の振幅制御には、リニアエンコーダによる変位測定値を用いている。ただしこの変位測定は加振機の制御のみに用いられ、校正値の算出には関与しない。これは冒頭で述べたとおり、リニアエンコーダによる変位測定値は基準点に対する相対値であり、空間座標に対する値と異なる可能性があるためである。特にユーザがテーブルを用意する本方式の場合、地面振動や加振機の励振ノイズによる校正装置全体の揺れが前もって評価できないため、校正値はあくまで参照標準となる加速度計との比較として算出される。算出された校正値が添付ファイルとして電子メールで校正機関に送付されるシステムを、再委託機関と共同で開発した。

本装置に用いた加振機の最大発生力は 270 N であり、ドライブアンプやコントローラを含むシステムとしてボイスコイル型加振機に比べ重量比で数倍～数十倍の加振力を有する。反面ドライブアンプは軽量で、交流二相 100 V で駆動可能である。振幅の制御に用いられるリニアエンコーダの分解能は 0.1 mm 未満であり、校正対象である加速度計の許容加速度などに応じて振幅値を極めて高分解能で設定可能である。(ただし装置を設置するテーブルの剛性不足や外来振動などにより実際に発生される加速度は異なる可能性がある)

図 2.6-5 は校正における参照標準、校正対象の出力を示す。良好な正弦波状の振動が発生されていることが見て取れる。

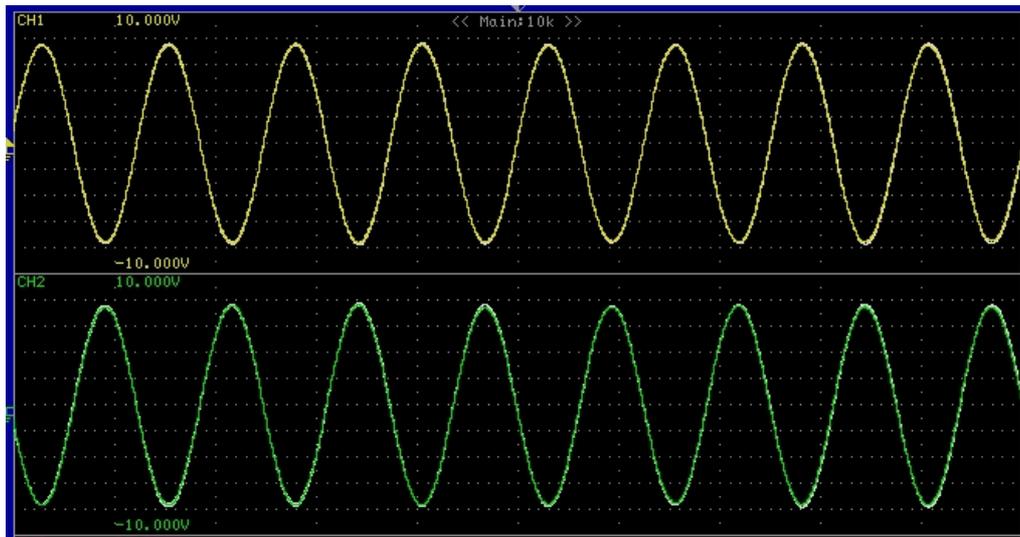


図 2.6-5 160 Hz における参照振動加速度計出力（上段）と校正器物からの出力（下段）

(b) 振動加速度計の電荷増幅器部分の評価装置の開発

1) 概要

JCSS 制度における振動加速度の標準供給では、サイズモ式センサである圧電式加速度ピックアップと、その出力を増幅する電荷増幅器を一体の校正器物として扱い、電圧感度を校正している。しかし、ユーザは対となる加速度ピックアップと電荷増幅器を適時交換することも多く、加速度ピックアップと電荷増幅器を、独立して校正するニーズが大きい。電荷増幅器を独立に校正できればトランスファ標準器が簡素化される。また、電荷増幅器校正においてトレーサビリティが求められる基本量は、電気量、時間に帰着されるため、最終的に遠隔校正が可能である。

2) 原理とプロトタイプ

電荷増幅器の等価回路と校正原理は、図 2.6-6 で与えられる。すなわち圧電式加速度ピックアップからの出力に相当する既知の電荷量を標準キャパシタンスにより発生させることで、入力（電荷）と出力（通常電圧）の比を評価する。この際周波数特性として、増幅率および位相の関係を使用周波数帯域（数十 Hz～数十 k Hz）に渡り評価できることが必要である。

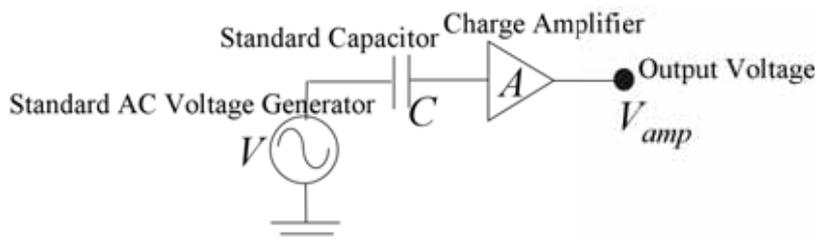


図 2.6-6 電荷増幅器の等価回路と構成原理

このような校正を行うために必要なシステムとしては図 2.6-7 に示すいくつかの構成が

考えられる。

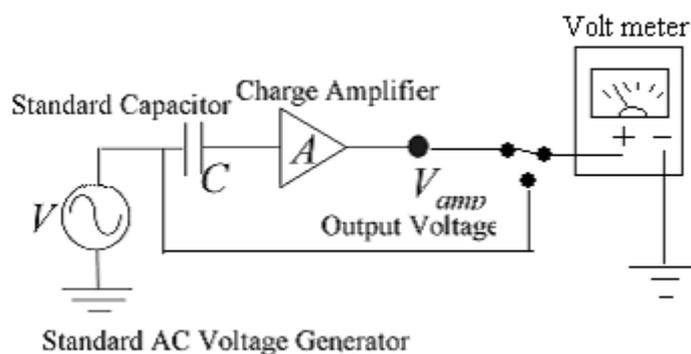


図 2.6-7(a) 電圧計による入力量と出力量の比較

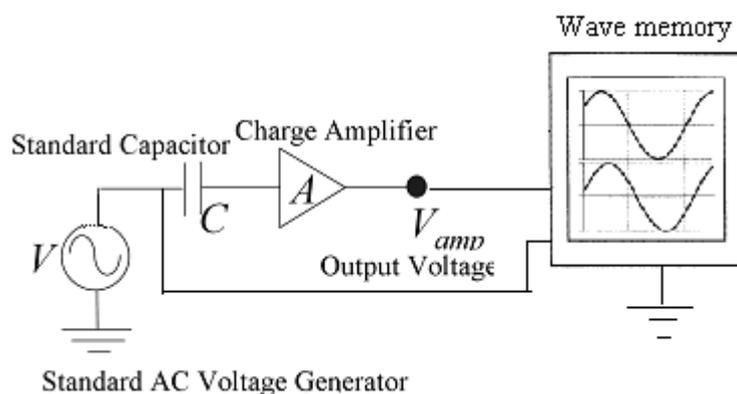


図 2.6-7 (b) 波形メモリによる入力量と出力量の時間領域での比較

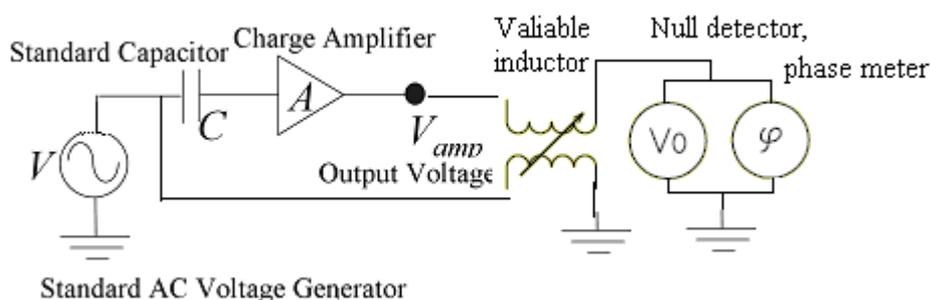


図 2.6-7 (c) 可変相互インダクタと零点検出器、位相差計による比較

これらのうち、(a)は標準キャパシタンス及び電圧計、または交流電圧発生装置がトレーサブルであることが要求される。また位相は評価できない。(b)は位相の評価が可能であるが、波形メモリの各入力におけるリニアリティ評価が必須となる。(c)では電荷増幅器の出力値と入力値とを可変相互インダクタンスでバランスさせることでゲインを、位相差計で位相を評価する方法である。可変相互インダクタは受動デバイスであり極めて安定度が高いこと、零点検出器、位相差計はそれぞれ対称性による自己校正が可能であるこ

と、などから高い可搬性が期待できる。このため図 2.6-7(c)に示した構成を基本とする装置を開発した。なお可変相互インダクタンスは 2 器の誘導分圧器及び電圧注入トランスから構成することが可能である。

図 2.6-8 は装置の概要である。いま、時間を  $t$ 、校正周波数を  $f$ 、信号発生器からの出力電圧振幅を  $\hat{V}_m$  とする。このとき、誘導分圧器 1 及び誘導分圧器 2 への交流入力電圧は、互いに 90 度の位相差をもつように設定され、それぞれ、 $\hat{V}_m \cos 2\pi ft$ 、 $\hat{V}_m \sin 2\pi ft$  と表される。これらの交流電圧は誘導分圧器 1 及び誘導分圧器 2 によってそれぞれ分圧される。電圧注入トランスの 1 次側には、誘導分圧器 2 で分圧された電圧が印加され、電圧注入トランスの 2 次側に、逆方向で巻数比に比例した誘導起電力が発生する。

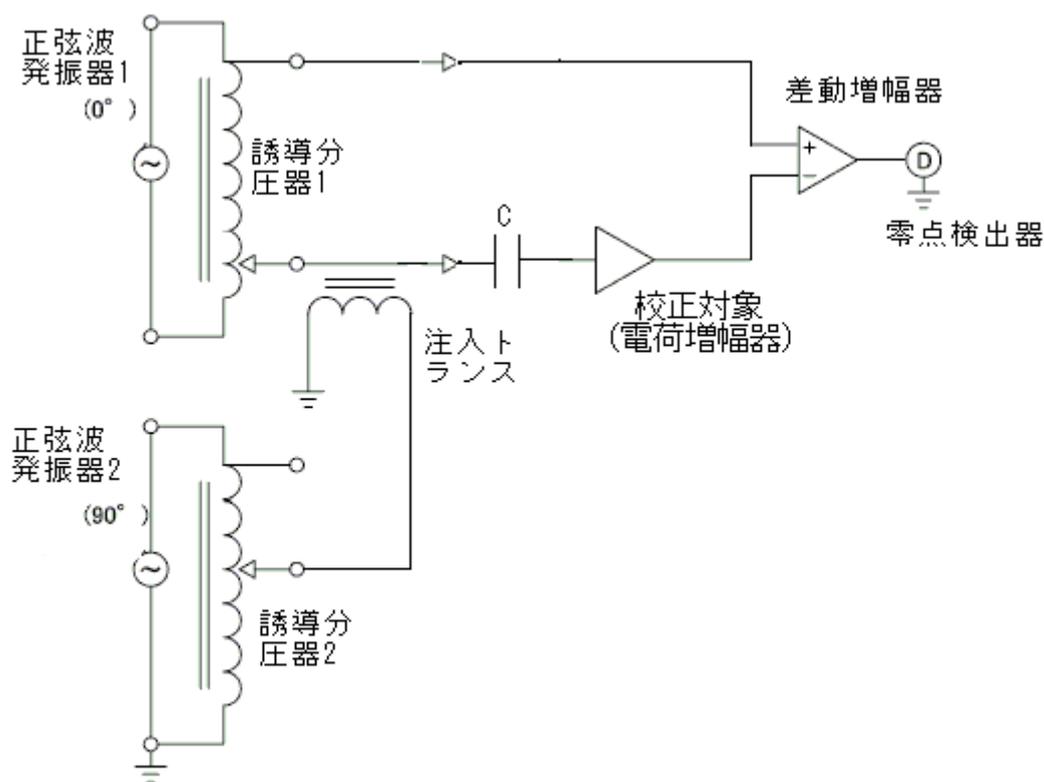


図 2.6-8 校正装置の原理図

したがって、標準キャパシタンスへの入力電圧  $V_{Cin}(t)$  は、誘導分圧器 1 で分圧された電圧と電圧注入トランスを介して加えられる注入電圧の和で表され、次式で与えられる。

$$V_{Cin}(t) = R_1 \hat{V}_m \cos 2\pi ft + R_2 R_3 \hat{V}_m \sin 2\pi ft$$

ここで、誘導分圧器 1 の分圧比を  $R_1$ 、誘導分圧器 2 の分圧比を  $R_2$ 、電圧注入トランスの巻数比を  $R_3$  とする。さらに、この式は以下のように変形することができる。

$$V_{Cin}(t) = \sqrt{R_1^2 + (R_2 R_3)^2} \hat{V}_{in} \cos\left(2\pi ft - \arctan \frac{R_2 R_3}{R_1}\right)$$

次に、 $\hat{V}_{Cin}$  と標準キャパシタンスによって発生する電荷が電荷増幅器に入力される。したがって、電荷増幅器の出力電圧  $V_{Cout}(t)$  は、

$$V_{Cout}(t) = A_{CA} C \sqrt{R_1^2 + (R_2 R_3)^2} \hat{V}_{in} \cos\left(2\pi ft - \arctan \frac{R_2 R_3}{R_1} + \phi_{CA}\right)$$

と表される。ここで、標準キャパシタンスの静電容量を  $C$ 、電荷増幅器の増幅率を  $A_{CA}$ 、電荷増幅器の位相遅れを  $\phi_{CA}$  とする。電荷増幅器の位相遅れを  $\arctan \frac{R_2 R_3}{R_1}$  に等しくなる

ように、且つ、 $\hat{V}_{in} \cos 2\pi ft$  と  $V_{Cout}(t)$  が等しくなるように、分圧比を調整することによって、以下の式が成り立つ。

$$\hat{V}_{in} \cos 2\pi ft = A_{CA} C \sqrt{R_1^2 + (R_2 R_3)^2} \hat{V}_{in} \cos 2\pi ft$$

上式より、電荷増幅器の増幅率は、

$$A_{CA} = \left(C \sqrt{R_1^2 + (R_2 R_3)^2}\right)^{-1}$$

と表され、標準キャパシタンスの静電容量と誘導分圧器の分圧比という高精度に安定した電気量から決定される。

一方、電荷増幅器の位相遅れは、

$$\phi_{CA} = \arctan \frac{R_2 R_3}{R_1}$$

と表され、誘導分圧器の分圧比と電圧注入トランスの巻数比で決定することができる。従って、増幅率及び位相遅れは受動デバイスから決定されることから、外乱やノイズ等の入力電圧の変動の影響を受けることなく、高精度に増幅率及び位相遅れの校正が可能となる。従来の校正法では入力電圧を信号発生器で発生させ、出力電圧を電圧計で取得していたため、信号発生器の電圧変動や校正不確かさが、電荷増幅器の校正不確かさとして、支配的であった。また、外乱やノイズ等の影響が直接不確かさとして反映されていた。本校正法では、誘導分圧器という受動デバイスで増幅率及び位相遅れを求めるため、従来支配的であった不確かさ要因が影響しない。ただし、分圧比計測の不確かさが不確かさ要因として新たに加わるが、信号発生器の校正不確かさや入力電圧変動によるばらつきに比較して、誘導分圧器による分圧比計測の相対不確かさは  $10^{-5}$  オーダー程度と非常に小さいため、電荷増幅器の校正不確かさは小さくなる。また、安定な受動デバイスからなるため、輸送や環境変化の影響を受けにくく、遠隔校正装置に適していると考えられる。

以上の検討の元で、まず原理を確認するためのプロトタイプを作製した。図 2.6-9 はプロトタイプの外観である。実際の機器構成では零点検出器と位相差計はロックインアンプにより構成される。

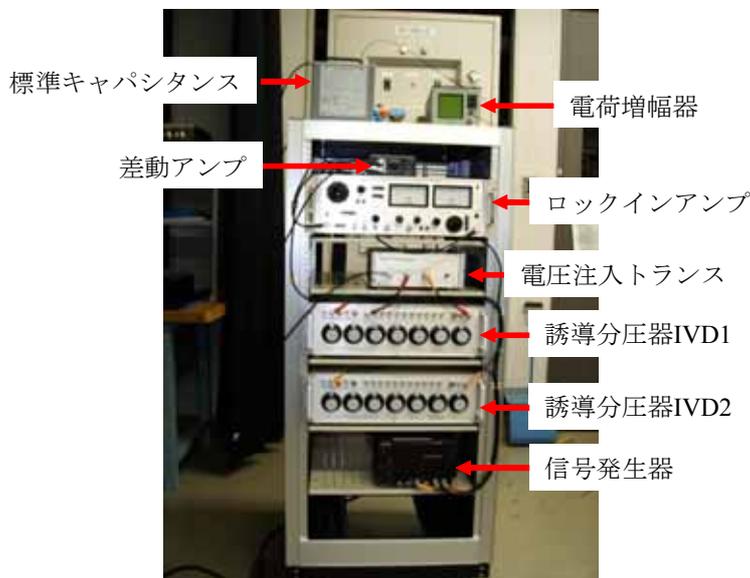


図 2.6-9 校正装置のプロトタイプ

これまでに 20 Hz～10 kHz において、0.001～0.01 %の相対拡張不確かさ ( $k=2$ ) で校正が可能であることを確認している。また、位相特性についても校正が可能である。図 2.6-10 は市販の電荷増幅器の位相特性を評価した例である。

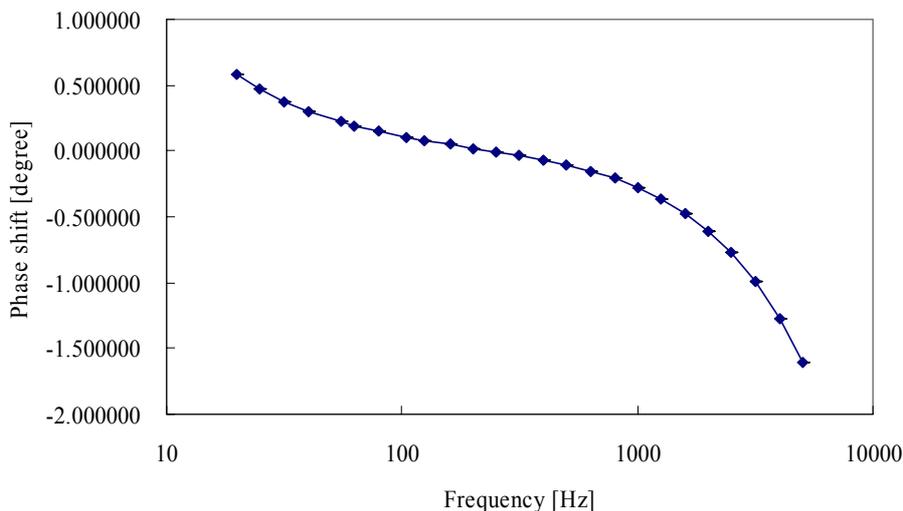


図 2.6-10 電荷増幅器の位相特性評価結果

本校正装置は標準キャパシタンス、可変相互インダクタンス等、安定した受動デバイスから構成されるため、初期特性が長期にわたり得られることが期待できる。また、ロックインアンプなどのその他のデバイスは事実上校正不要である。さらに小型化、自動化の余

地があるため、ユーザレベルで装備することも可能である。以上の成果から、従来加速度ピックアップと電荷増幅器を一体としてトランスファ標準器としていたところ、加速度ピックアップ単体をトランスファ標準器に位置付ける目処がたった。

### 3) 小型化とインターネットによる運用

プロトタイプでは既存の誘導分圧器などを用いたため、装置が大型であった。また操作がすべて手動であった。装置を小型化し、また操作を自動で行い、さらに校正結果をインターネットで送付するための開発を行った。

まず小型化、自動化については、誘導分圧器、電圧注入トランスを一体化し、さらに分圧比をマトリックスリレーで自動的に可変出来る装置を開発した。図 2.6-11 は開発した装置の内部である。

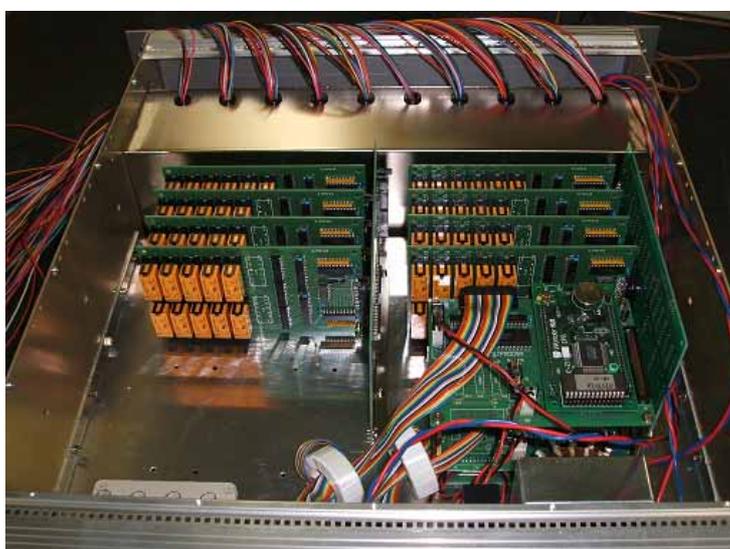


図 2.6-11 開発した一体型誘導分圧器・電圧注入トランス

図 2.6-12 は一体型誘導分圧器・電圧注入トランスを中心に、信号発生器、作動増幅器、電圧計などを組み合わせた校正装置の外観である。可搬型加振機と同様に、アルミ製のコンテナにパッキングされ、搬送可能な物としている。この中に信号発生器、誘導分圧器、電圧注入トランス、標準キャパシタンスなど、電荷増幅器の校正に必要な全ての要素を含んでいる。誘導分圧器の分圧比は基準信号と電荷増幅器からの出力が平衡されるよう、自動的にスキャンされる。図 2.6-13 は校正状態と、校正プログラムの操作画面を示す。校正値は添付ファイルとして電子メールで校正機関に送付される。



図 2.6-12 校正装置の外観

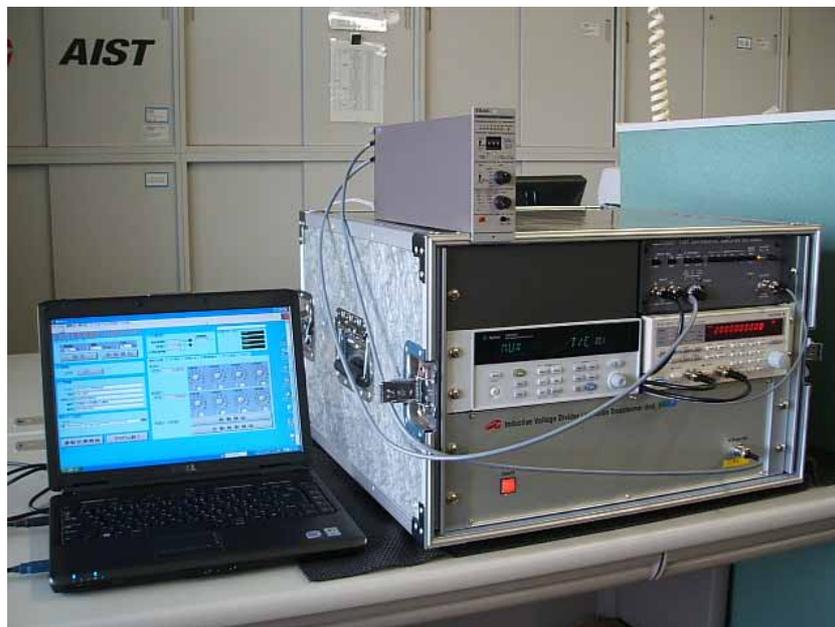


図 2.6-13 校正状態

本装置は既に振動校正装置を有する校正事業者において校正の工数を低減し、ユーザに利便をもたらす手段として有効と期待される。

#### (6) 実用化の見通し

開発した装置をタイに輸送し、現地で実証実験を行った。輸送による影響などが無く、初期の性能を発揮できることなどを確認できた。

今後の展開については下記のような課題が残されている。

- ・現地での加振機の据付や校正器物の取り付けに一定の技能が要求されること
- ・機械的動作を伴うことから、無人運転や遠隔運転には配慮が必要とされること
- ・今回適用したサーボ式の加振機でフィードバックパラメータの設定を行う必要があり、

事前に校正器物の質量などに応じた調整が必要であること。

以上の課題を踏まえ、さらに不確かさの検証や自動化を進めたいと考えている。

#### (7) 目標の達成状況（基本計画の最終目標に対する達成状況を記載）

##### (a) 可搬型加振機の開発

地震計など、振動加速度計を校正事業者を持ち込めないユーザを対象に、振動数 1 Hz～160 Hz において校正可能な可搬型校正装置の開発を行い、この際印加する振動数及び振動加速度振幅の分解能として 0.05 Hz, 0.005 m/s<sup>2</sup>（不確かさ 0.1%）を実現する、という目標に対し、下記の通り実現した。開発した加振機の振動数分解可能は 0.05 Hz 以下と良好な性能を示した。また、加振機振幅の制御に用いられるリニアエンコーダの分解能は 0.1 mm より良好であり、例えば 1 Hz における加速度振幅設定分解能は 0.004 m/s<sup>2</sup>に相当し、目標とした分解能を上回る性能を得た。（ただし装置を設置するテーブルの剛性不足や外来振動などにより実際に発生される加速度は異なる可能性がある）

開発した装置は海外への移送にも耐え、十分な信頼性があると考えられる。

##### (b) 振動加速度計の電荷増幅器部分校正装置の開発

本装置はユーザにおける電荷増幅器校正を実現すると共に、既に振動校正装置を有する校正事業者において校正の工数を低減し、利便やコスト低減をもたらす手段として有効である。本装置は電磁気関係で開発された LCR メータの校正原理を援用しており、プロジェクト全体での融合的な成果である。開発した装置は海外への移送にも耐え、十分な信頼性があると考えられる。

#### 外部発表状況

18FY

特許 0 件

論文、解説 0 件

その他の公表 1 件

1) 振動加速度標準の実用化に向けて、第 7 回 e-trace 成果普及セミナー, 2007/1/25.

19FY

特許 1 件

1) 臼田, 中村, 大田 : “ 利得位相校正装置 ”, 特開 2009-047579 (2009)

論文、解説 1 件

( 査読あり )

- 1) T. Usuda, A. Oota, H. Nozato, T. Ishigami, H. Nakamura, K. Kudo, “Development of charge amplifier calibration system employing substitution method”, Proc. of IMEKO 20th TC3, 3rd TC16 and 1st TC22 International Conference, Merida Mexico(Nov. 2007), ID-106.

口頭発表 1 件

- 1) T. Usuda, “Concept of on-site vibration calibration service employing e-trace scheme”, PTB-BIPM Workshop on the Impact of Information Technology in Metrology, Berlin Germany, 7<sup>th</sup> May 2007.

その他の公表 0 件

20FY

特許 0 件

論文、解説 3 件

( 査読あり )

- 1) T. Usuda, A. Oota, H. Nozato, Y. Hino, H. Aoyama, “Transportable calibration system for vibration transducers”, Proc. of the MME2008, Aachen, Germany (Sep. 2008), pp303-306.
- 2) T. Usuda, A. Oota, H. Nozato, Y. Hino, H. Aoyama, “Transportable vibration calibration system employing e-trace scheme”, Proc. of the IMAC-XXVII, Orland USA(Feb. 2009), Paper No.119.

( 査読なし )

- 1) 白田,振 動計測装置の遠隔校正技術 ” , 計測標準と計量管理, Vol.58, No.4, pp.62-66(2009).

口頭発表 3 件

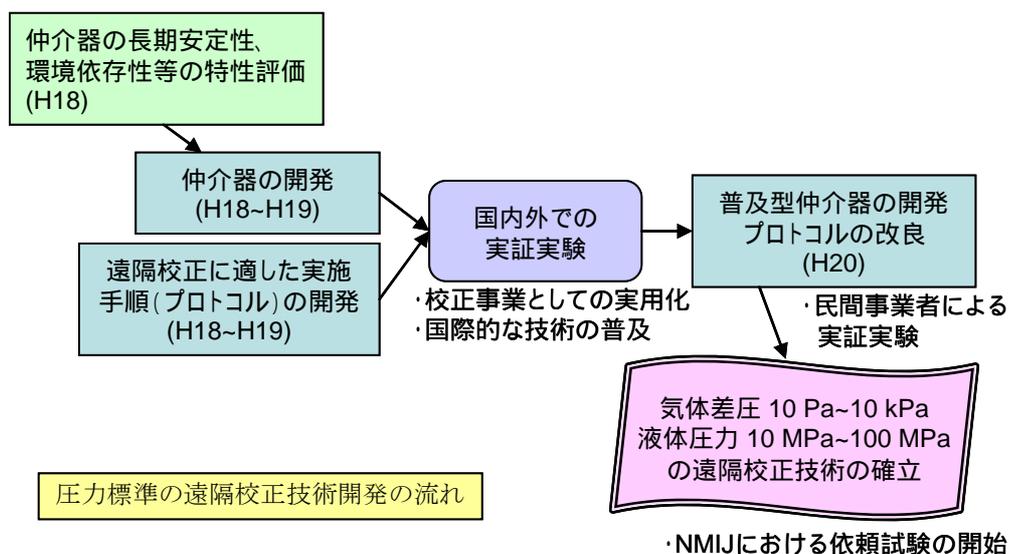
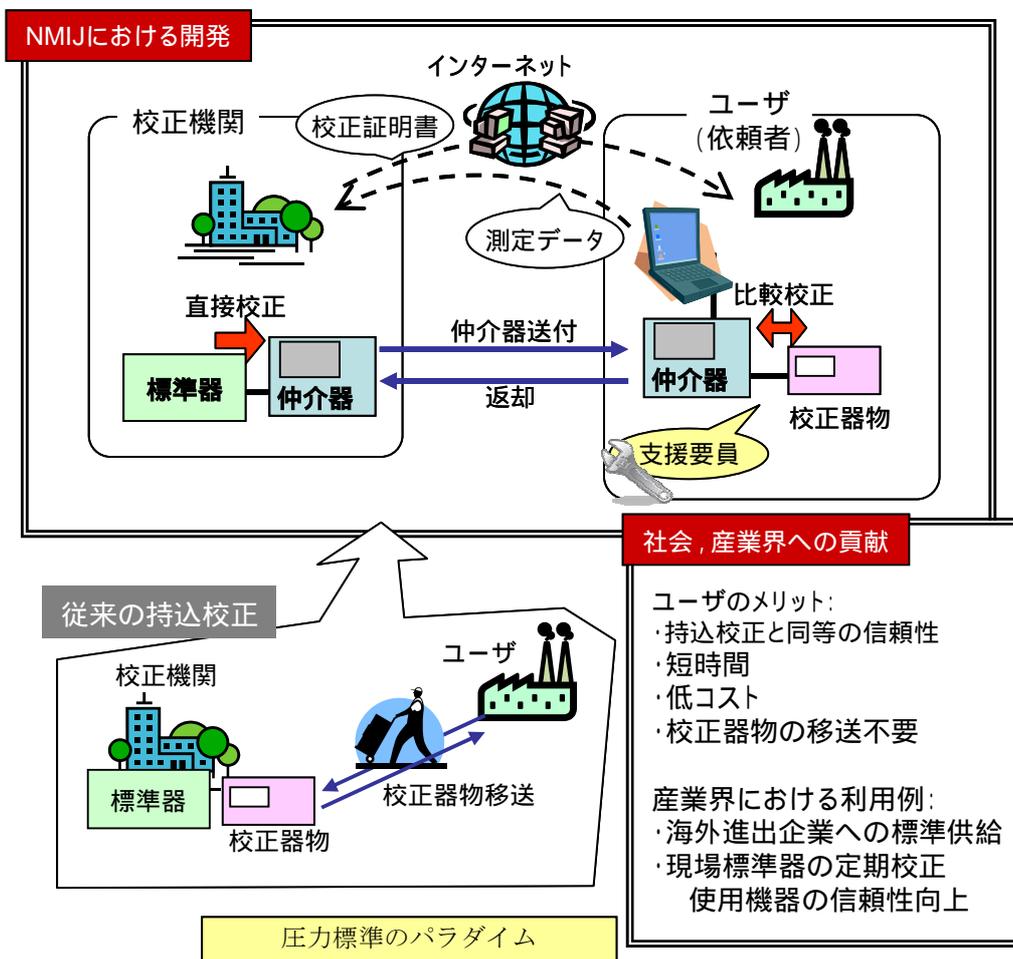
- 1) 白田, “ 振動加速度計の校正における遠隔地校正の試み ” , 第 7 回振動計測クラブ, 2008/7/24
- 1) T. Usuda, A. Oota, H. Nozato, H. Aoyama, “On-Site Calibration Service For Vibration Transducers Employing E-Trace Scheme”, 79th Shock and vibration Symposium, Orland USA, 28<sup>th</sup> Oct. 2008.
- 2) 白田,振 動計測の遠隔校正技術 ” , 計測標準フォーラム第 6 回合同講演会, 大田区産

業プラザ, 2008/11/21.

その他の公表 1件

- 1) e-trace 成果普及セミナー開催、振動加速度標準の遠隔校正について , 第 13 回 e-trace 成果普及セミナー, 2009/2/4.

-2.7 圧力標準



## (1) 研究開発の概要

現在、産業技術総合研究所（以下、産総研）では、大気圧の 10 万分の 1 (1 Pa) から 1 万倍 (1 GPa) の 9 桁に及ぶ圧力範囲で国家標準を整備し、産業界からの様々な校正依頼に応えている。産総研からの標準供給の形態としては、これまでは依頼者の圧力計を校正機関に持ち込んで校正を実施する、いわゆる「持込校正」を行ってきた。民間の校正事業者による JCSS 校正も同様に持込校正で行われているが、この校正方法では校正器物を設置場所から校正機関へ移動させる手間がかかる。そこで、圧力標準トレーサビリティ体系のさらなる拡充のためには、より簡便で効率的な、新たな標準供給形態の検討も必要とされてきた。その手段として圧力分野においても「遠隔校正」の研究開発が進められた。

圧力の遠隔校正においては「物理仲介器」を用いる方法を選択した。校正機関において評価した仲介器を依頼者の校正器物の設置されている場所（遠隔地）に送付することで、校正器物を移動させずに校正を行うことができる。送付された仲介器と校正器物を接続するなどの簡単な作業は「支援要員」と呼ばれる教育訓練を受けた要員が行うものとする。

本研究開発では、産業界からの需要が高く開発が効果的となる 2 つの圧力範囲「気体差圧 10 Pa から 10 kPa」と「液体圧力 10 MPa から 100 MPa」において、圧力標準の遠隔校正技術の開発を進めた。校正対象は高精度デジタル圧力計とし、目標とする校正の拡張不確かさ ( $k = 2$ ) は、それぞれ、気体差圧で 100 mPa または 0.01 %以下、液体圧力で 0.01 %以下とした。

遠隔校正システムを実現するために、上記の 2 つの圧力範囲において高精度デジタル圧力計を利用した物理仲介器を開発し、遠隔校正実施手順（プロトコル）を確立した。仲介器については、本体内部に高精度デジタル圧力計、圧力調整器、環境条件モニタなどを搭載した。この装置をパソコンの測定プログラムで制御して全自動で校正を行い、インターネットなどを通して測定データを校正機関へと送信する。また遠隔校正実施手順については、常に一定の手順で校正が行われるように、遠隔校正の依頼を受けてから校正終了までの手順を、校正機関・支援要員・依頼者それぞれについて定めた。

開発した仲介器や実施手順の信頼性は、実証実験によって確認した。国内の圧力 JCSS 事業者を再委託先事業者とし、気体差圧と液体圧力それぞれの圧力範囲において協力して実証実験を行った。平成 18 年度および 19 年度は産総研から上記校正事業者へ、平成 20 年度はそれらの校正事業者からユーザへと、2 段階に分けて普及に向けた実験を行った。

成果普及としては、国内の学会や講演会での成果報告をはじめとして、国際会議での発表や国外でのデモンストレーションなどを行った。さらに講演会や発表などを通じて、国際的なルール形成のための議論も深めた。

## (2) 中間目標

### (a) 15 年度中間目標

圧力標準遠隔校正システムの実験モデルを試作し、産総研の内部でネットワークを利用して実証試験を実施する。

### (b) 17 年度中間目標

移動モデルの気体圧力標準遠隔校正システムを構築し、産総研外部との間のネットワークを利用して実証試験を実施する。圧力範囲は 10 kPa～100 kPa、不確かさは 0.03 % とする。

### (3) 最終目標

産業界からの需要の高い、気体差圧 10 Pa～10 kPa（拡張不確かさ：100 mPa または 0.01 % 以下）、液体圧力 10 MPa～100 MPa（拡張不確かさ：0.01 % 以下）のそれぞれの圧力範囲において、標準供給が可能なデジタル圧力計に基づく小型で安定な仲介標準器を開発し、校正手法の高度化を進め、遠隔圧力校正に適した測定手順の開発を進める。

### (4) 本研究内容の構成

圧力の遠隔校正は、高精度デジタル圧力計を利用した「物理仲介器」を用いる。具体的な校正の流れの例を図 2.7-1 に示す。まず(1)依頼者から校正の申請があると、(2)校正機関は標準器で校正された「遠隔校正用仲介器」を依頼者のサイトに送付する。現場では「支援要員」と呼ばれる作業者が仲介器と校正器物を接続し、遠隔校正の測定を開始する。(3)自動で測定が行われ、校正データはインターネットなどを通じて校正機関に送信される。(4)測定終了後、仲介器は校正機関に返却される。(5)校正機関において校正値が算出され、校正証明書が発行される。

持込校正と遠隔校正の大きな違いは、校正場所と作業者にある。持込校正は「校正機関において」「校正機関の要員」が校正作業を行うのに対し、遠隔校正では、「依頼者のサイトにおいて」支援要員が簡単な設置作業などを行い、「仲介器が自動で測定」することが特徴である。

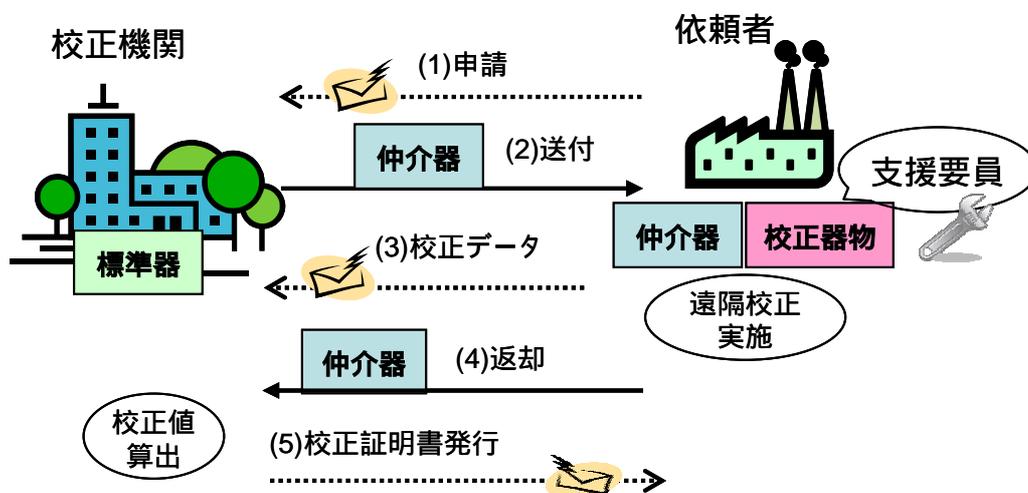


図 2.7-1 圧力遠隔校正の流れ

このようなシステムを構築するために、技術開発を具体的に次の 3 つの項目に分けて進めることとした。「仲介器の開発」、「校正実施手順の開発」、「開発物を検証するための実証実験」である。これらの開発を年度ごとに目標を設定して行った。以下に研究内容の構成を述べる。

- (a) 開発を行う圧力範囲の選択
- (b) 仲介器に搭載する圧力計の特性評価
- (c) 遠隔校正用仲介器の開発
- (d) 遠隔校正用測定手順（プロトコル）の開発
- (e) 実証実験
- (f) 普及活動

## (5) これまでの成果

### (5-1) H17 までの研究成果のまとめ

気体絶対圧力の圧力範囲 10 kPa～100 kPa において、遠隔校正システムの試作を行った。平成 13 年度には仲介器に用いる圧力計として数種類のセンサの特性評価を行い、その結果からシリコンレゾナントセンサを選定した。平成 14 年度には、選定した圧力計を改造し、これと圧力調整器、環境条件モニタなどの機器を組み合わせて自動校正可能な遠隔校正装置のプロトタイプを試作した。開発した装置を用いて、産総研内においてネットワークを経由した測定実験を実施し、同一 LAN 内では装置構成や測定データの送受信に問題がないことを確認した。このプロトタイプは、各機器をそれぞれ校正台上に設置して配管接続した評価用だったが、平成 15 年度には、これを基に搬送可能な仲介器の試作器を製作した。この試作器を用いて産総研（つくば市）と横河電機株式会社（甲府市）との間で、ネットワークを利用した遠隔校正実験を実施し、目標不確かさ 0.03 % に対して 0.02 % の不確かさで校正できる技術的見通しを得た。これにより平成 17 年度の中間目標を前倒しで達成し、終了した。

### (5-2) H18-H20 の成果

#### (a) 開発を行う圧力範囲の選択

今期は、特に産業界からの要請の多い 2 つの圧力範囲を開発対象として選択した。これは、中間評価の際に指摘された「産業界の要請の最も多い範囲から実用化する方がよい」というコメントへの対応としても意義のある圧力範囲である。すなわち、一方の気体差圧の測定は、産業界のあらゆる分野で用いられているクリーンルームの空調制御などに必要不可欠であるが、この圧力範囲の標準器は 2 台の重錘形圧力天びんを用いる装置で装置の規模も大きく複雑なため、持込校正は現実的ではない。もう一方の液体圧力 10 MPa～100 MPa は、産総研から供給している jcss 校正では最も校正件数の多い範囲で、この範囲が簡便に供給できるようになれば、その波及効果は大きいと考えられる。

上記のような理由から 2 つの圧力範囲を選択し、校正の目標不確かさを、校正対象と

なる高精度デジタル圧力計を校正するのに十分な大きさに設定した。本研究開発において圧力媒体は、産総研で通常の標準供給に使用している純窒素（気体）およびセバケイト（液体）を使用することとした。

#### (b) 仲介器に搭載する圧力計の特性評価

今回のような遠隔校正用仲介器の開発が現実的になったのは、近年、優れた性能を有するデジタル圧力計が利用しやすくなってきたためである。圧力の国際比較においても既にこれらの圧力計が仲介標準器として使われている。産総研でも国際比較幹事国としてデジタル圧力計を利用した複数の仲介標準器の開発を行っており、その際に、仲介標準器に搭載する圧力計の特性評価項目、また校正結果の利用方法などの経験を得ている。今回はその経験を活かしてセンサの選定・評価を行った。また対象とする圧力範囲では、特性のよいセンサが手に入りやすいことも普及へのメリットとなる。

その結果として、気体差圧では、国際比較等で優れた実績を持ち、感圧部にシリコンレゾナントセンサを利用する圧力計を採用した。また液体圧力の開発においては、水晶振動素子を感圧部に持つ水晶振動式圧力計を採用した。

これは、中間評価の指摘事項「(仲介器に搭載する) 希望の特性のデバイスは、多数の出来たものの中から選択する必要がある。この点がこの仲介器の特徴であり、問題点でもある。」への対応になる。

平成 18 年度の初めに、選択した各圧力範囲において、それぞれ仲介器に搭載する圧力計をより信頼性の高い機器として使用するためのデジタル圧力計の特性評価技術・校正手法の高度化を行った。

はじめに実用標準器を使用したデジタル圧力計の校正手法について検討し、その結果定められた校正手法を用いて、仲介器に用いる複数の圧力計の校正を定期的に繰り返し、安定性を評価した。すなわち、本校正の実用標準器には、その特性が既知の重錘形圧力天びん、またはデジタル圧力計を使用しているので、事前の特性評価で得られた補正を施し、計算から標準の発生圧力  $P_s$  を求めることができる。各校正圧力点において、 $P_s$  と仲介器の各圧力計 TS から得られる表示値  $I_{Ts}$  との関係を求めることにより、仲介器の特性を評価可能である。仲介器に使用した各デジタル圧力計の短期安定性は目標とする不確かさの 20 % 以下であり、本開発の達成に十分であることがわかった。

図 2.7-2 に気体差圧の圧力計特性評価の一例を示す。3 回の結果が示されているが、それぞれ 3 往復以上の測定から求められている。各圧力点における結果の差は最大でも 20 mPa 以内であり、良好な再現性が示されている。気体差圧では、加圧方法にも工夫をし、ゼロ点ドリフトなどの特性の影響を減らすようにしている。

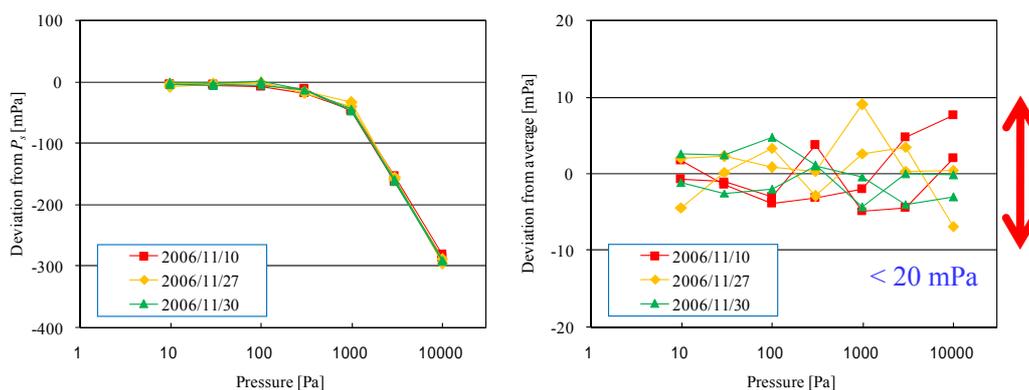


図 2.7-2 仲介器に用いた気体差圧計の特性曲線の例（左:標準からの偏差、右:平均値からの偏差）

同様に、図 2.7-3 に液体圧力の圧力計特性評価の一例を示す。圧力範囲は、1 回目の校正は 100 MPa まで、2、3 回目の校正は 50 MPa までとした。1 回目の測定結果には昇圧時と降圧時に得られた結果にヒステリシスが示されている。但し、各圧力点における相対的な差は最大でも  $20 \times 10^{-6}$  以内であり、本開発の目的達成に十分な再現性が示されている。

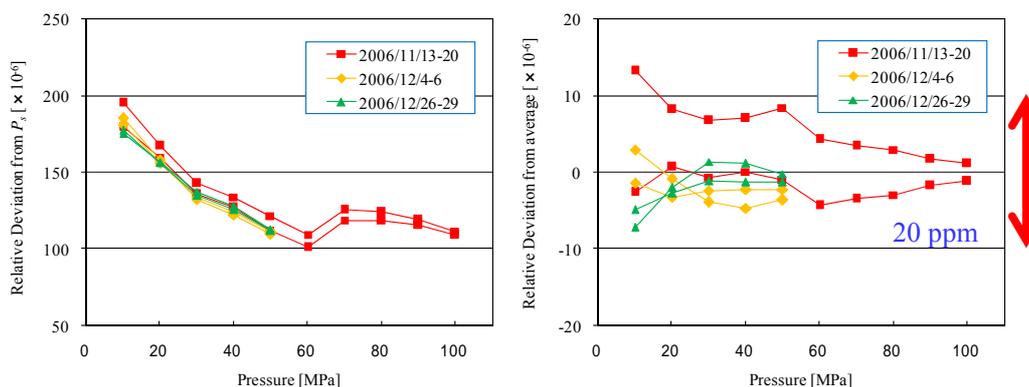


図 2.7-3 仲介器に用いた液体圧力計の特性曲線の例（左:標準からの偏差、右:平均値からの偏差）

### (c) 遠隔校正用仲介器の開発

仲介器は文字通り、校正機関の維持する参照値を校正器物に値付けする際の仲介となる装置である。したがって、標準器に近い高い信頼性をもつシステムであることが求められる。すなわち、

- ・安定性：移送後も常に正しい出力を得られること。
- ・可搬性、堅牢性：一般の宅配業者による移送を可能とするよう堅牢であること。小型・軽量であること。梱包が容易になるように本体部品類はなるべく一体化していること。
- ・操作性：支援要員が圧力校正に関する専門知識を有しない場合でも、間違いなく作業が進められるように、操作が容易であること。 unnecessary 機能にはアクセスできないようにし、

誤操作を防ぐこと。

・安全性：校正準備中及び校正中に、過大圧等の発生を防ぎ、過大圧発生時も校正器物や仲介器を守る。また、支援要員による圧力配管の接続作業で圧力漏れが発生しにくいような構造にすること。

などの性能が同時に求められる。

そして上記の要件を考慮し、仲介器に搭載すべき機能を以下のようにまとめた。

- ・自動計測制御機能：常に一定の手順で校正圧力を発生・調整する。測定データを取得し、記録する。
- ・環境条件測定機能：校正中の環境条件を測定・記録する。移送中の環境条件や振動を測定・記録する。
- ・通信機能：測定データを校正機関に送信する。
- ・自己診断機能：移送後に、搭載した圧力計や内部配管の状態をチェックする。
- ・作業支援機能：(パソコンの画面上に) 作業手順を表示し、支援要員が次に行うべき作業を指示する。

このような必要な機能を搭載した仲介器本体の概要が図 2.7-4 である。

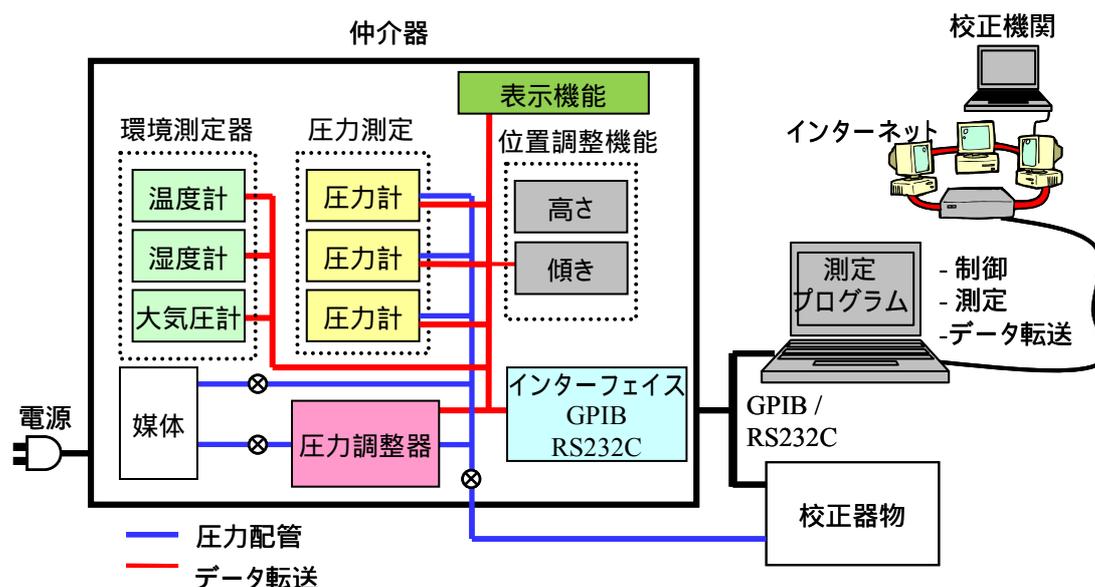


図 2.7-4 遠隔校正用仲介器の概念図

仲介器の開発はまず、仲介器に必要な機能を実現するための性能を持つ装置を組み合わせた「プロトタイプ」の製作からはじめた。このプロトタイプから発展させて、平成 18 年度には、必要な機能を一体の筐体に収めた「統合型仲介器」を製作、翌平成 19 年度には、統合型を高機能化させた「高機能型仲介器」を製作した。最終年度の平成 20 年度には、より低コストで操作性を向上させた「普及型仲介器」を開発した。以下、これらの 4 機種について順を追って説明する。

## 1) プロトタイプ製作

前節(b)で述べた特性評価済みの高精度デジタル圧力計（気体差圧においては、感圧部にシリコンレゾナントセンサを搭載する圧力計、液体圧力においては、水晶振動式圧力計）を複数個、校正圧力を印加するための圧力調整器、校正実施環境条件を記録するための環境モニタ（温度計、湿度計、大気圧計）、圧力計の傾きをモニタするための傾斜計などを組み合わせたプロトタイプを製作した。図 2.7-5 および図 2.7-6 に、それぞれ気体差圧用、液体圧力用の装置写真を示す。全ての装置の制御とデータ取得はノートパソコンで行う。インターフェイスは GP-IB および RS-232C である。

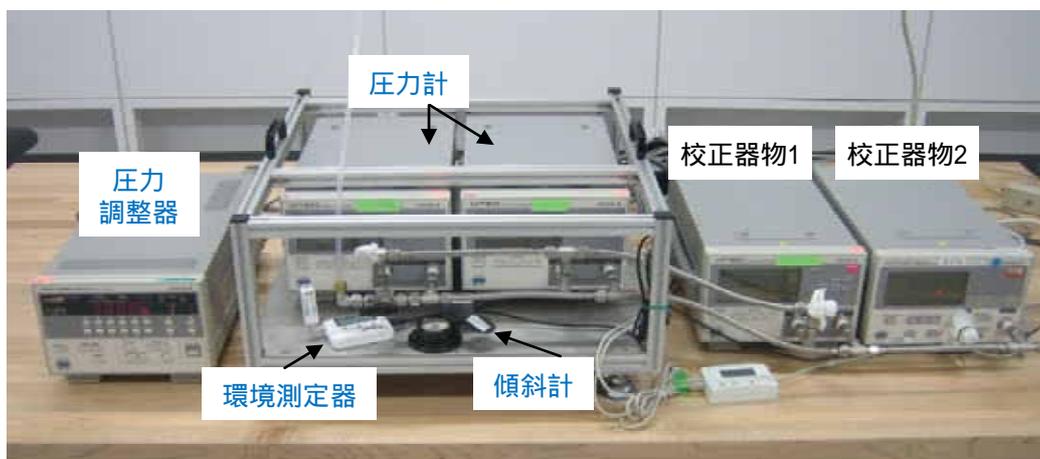


図 2.7-5 気体差圧用伸介器のプロトタイプ

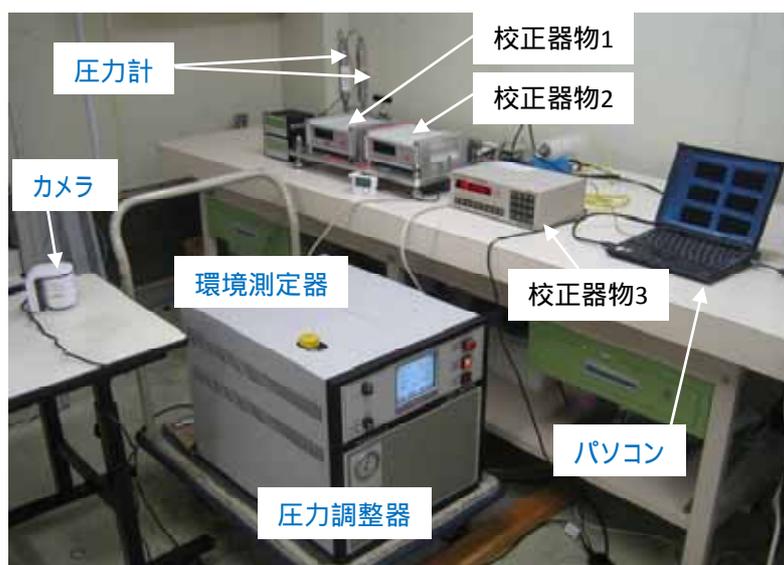


図 2.7-6 液体圧力用伸介器のプロトタイプ

## 2) 平成 18 年度遠隔校正用仲介器（統合型）の開発

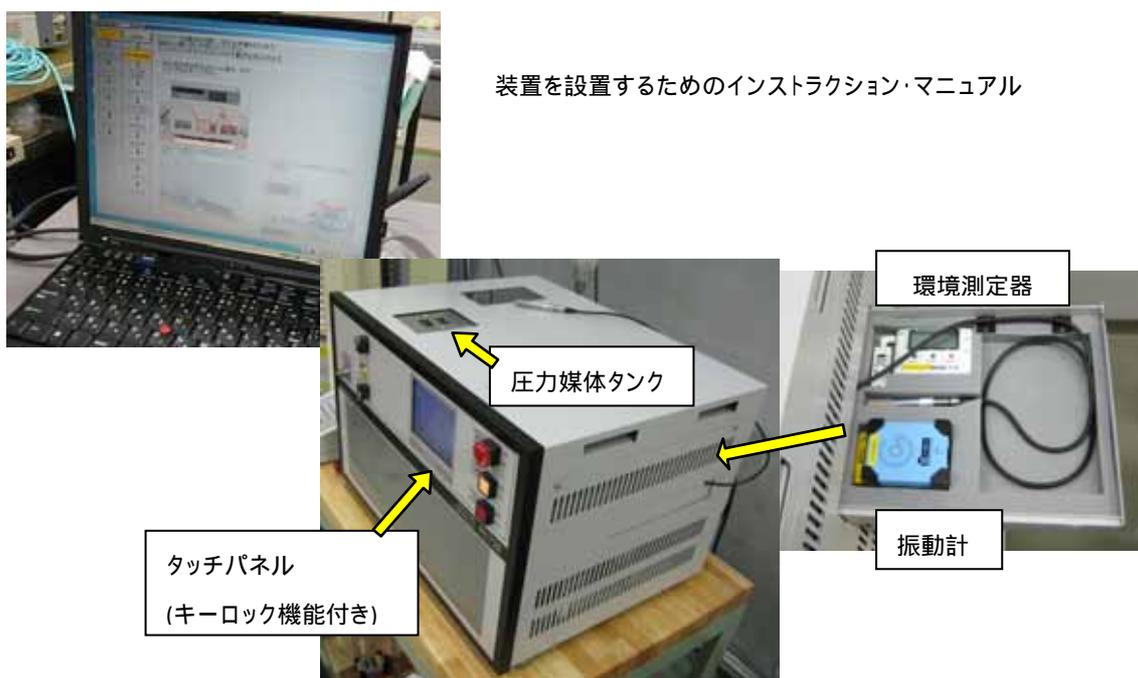
プロトタイプに使用した高精度圧力計・調整器などを一体に組み込んだ仲介器を、気体差圧と液体圧力の各圧力範囲において開発した。仲介器の信頼性を確保するため、各仲介器には複数の高精度圧力計を搭載した（気体差圧には 3 台、液体圧力には 2 台）。図 2.7-7 に両方の仲介器の写真を示す。この仲介器には、図 2.7-5 および図 2.7-6 中に示した圧力計、圧力調整器、環境測定器など全てが一体となって収められている。気体差圧の仲介器は横河電機株式会社、液体圧力の仲介器は長野計器株式会社で製作されたものである。



図 2.7-7 開発した H18 統合型仲介器。（左）気体差圧用、（右）液体圧力用

## 3) 平成 19 年度遠隔校正用仲介器（高機能型）の開発

平成 19 年度には、前年度に製作した統合型仲介器を改良した仲介器を開発した。この仲介器の主要な特徴は、これまで移送箱に直接入れていた移送時の環境モニタなどを本体に組み込むなどして、前年度の仲介器よりも多機能化を図った点にある。さらに操作性および信頼性を向上させるため、次のような工夫も追加した。気体差圧では、ノートパソコンの画面上で支援要員へ作業指示を行うソフトウェアの開発、操作ミスを防ぐために不要なボタン類を削除するなどの本体パネルの改良を行い、主に支援要員の作業面から信頼性を向上させた。また液体圧力では、本体にキーロック機能や自己診断機能、リークチェック機能を持たせることなどによって本体性能の信頼性を向上させた。これらの仲介器の特性試験と校正を産総研において行い、性能を確認した。



装置を設置するためのインストラクション・マニュアル

図 2.7-8 H19 高機能型仲介器。

(左) 気体差圧用の制御ソフトウェアによって表示されたマニュアル画面。

(中、右) 液体圧力用仲介器の改良部分

#### 4) 平成 20 年度遠隔校正用仲介器 (普及型) の開発

H18 仲介器、H19 仲介器による実験などをふまえて、平成 20 年度には新たな仲介器を製作した。開発コンセプトは、より利便性の高い普及型の仲介器である。前年度までの仲介器は複数の圧力計を内蔵し信頼性を高めていたが、そのトレードオフとして本体重量が増し高価になるため、普及への 1 つの障害となることが想定できた。これまでの実験から、現状の設計・移送方法であれば、センサの安定性は短期的には十分に保たれることが確認できていたため、この仲介器では内蔵センサは 1 個に減らすことにした。その他の冗長性をもたせていた部分についてもできるだけスリム化し、本体の小型化、軽量化、低コスト化をはかった。またユーザインターフェイスやソフトウェアの改良も同時に行った。

また、これまでに概要を述べてきた 3 種類の仲介器の特長をそれぞれ気体差圧、液体圧力ごとに以下のスペック表にまとめる。

表 2.7-1 気体差圧用仲介器のスペック

	H18 (S38)	H19 (S41)	H20 (S43)
外形寸法(WxDxH)	430x450x340	430x450x340	430x400x340
重量	約 38 kg	約 39 kg	約 33 kg
搭載圧力計	横河電機 RSG 3 個	横河電機 RSG 3 個	横河電機 RSG 1 個

校正環境モニタ (温湿度、大気圧)	VAISALA HMT100 横河電機 FP101A	VAISALA HMT100 横河電機 FP101A	VAISALA HMT100 横河電機 FP101A
ライン圧力モニタ	横河電機 FP101A	横河電機 FP101A	なし
水準器	丸型気泡式水準器 デジタル傾斜角センサ	丸型気泡式水準器 デジタル傾斜角センサ	丸型気泡式水準器 デジタル傾斜角センサ
移送環境モニタ	(外部取付)	環境測定器 TR-73U 振動計 G-MEN	環境測定器 TR-73U 振動計 G-MEN
追加された機能		専用計測ソフトウェア	測定中の画面消去

表 2.7-2 液体圧力用仲介器のスペック

	H18 (PC72E 0371)	H19 (PC72E 0421)	H20 (PC72E 0476)
外形寸法(WxDxH)	540×506×460	590×450×380	500×400×360
重量	約 50 kg	約 50 kg	約 36 kg
搭載圧力計	Paroscientific, Inc. 9000-15K 2 台	Paroscientific, Inc. 9000-15K 2 台	Paroscientific, Inc. 9000-15K 1 台
校正環境モニタ	環境測定器 TR-73U	VAISALA HMT100 横河電機 FP101A	環境測定器 TR-73U
水準器	気泡式水準器(2方向) デジタル傾斜角センサ	丸型気泡式水準器 デジタル傾斜角センサ	丸型気泡式水準器
移送環境モニタ	(外部取付)	環境測定器 TR-73U 振動計 G-MEN	環境測定器 TR-73U 振動計 G-MEN
追加された機能		キーロック機能 自己診断機能 リークチェック機能	分離可能な媒体タンク 自己診断機能の改良

#### (d) 遠隔校正用測定手順(プロトコル)の開発

「現場担当者の技能教育が必要ではないか」との中間評価指摘事項への対応として：

現場作業は技能教育を受けて、資格認定された「支援要員」のみが現場担当者として作業することとした。これを確実に実行するために、教育訓練のプログラムや資格認定までの手順などを定めた。また、支援要員の作業が校正結果に大きな影響を及ぼさないように手順や装置を工夫した。具体的には、簡単に接続できるような配管形状にする、校正器物を常に同じ高さに設置できるような設置台を用意する、設置後の状況を写真によって校正機関が確認するなどである。

以下に、支援要員の教育訓練を含めた測定手順の開発について述べる。

持込校正である現在の依頼試験や jcss 校正と同等の信頼性を確保するために、研究室で使用している校正手順書に照らし合わせて、遠隔校正の依頼を受けてから校正終了までの手順（プロトコル）を作成した。

プロトコルを作成する上で特に注意したのは、遠隔校正では校正実施場所が依頼者のサイトであり、かつ校正機関の要員が校正システムを直接操作することができない点である。そのため、これまでの持込校正と同等の信頼性を確保するためには、特に遠隔地で校正を行うという観点から、仲介システムなどのハード面および測定手順などのソフト面に十分な安全対策を講じる必要があった。また、校正事業として認定を受ける場合には、校正手順は ISO/IEC 17025 などの規格や指針に適合するように構築されていなくてはならない。遠隔校正に関する要求事項は、たとえば「TCRP21 ASNITE 試験事業者又は校正事業者認定の一般要求事項（第 2 版）」の付属書 4 に記述されており、当面はこの要求事項に適合することを目安にプロトコルを作成した。

プロトコルの作成にあたっては、校正機関・支援要員・依頼者の各役割について、それぞれ権限と責任の範囲を明確にした。作成したプロトコルは、最終的には「アクティビティ図」と呼ぶ全体の流れを示したフローチャートに似た図で管理することとした。この図には校正機関・支援要員・依頼者の作業の相関と時間的な流れや連絡方法、残すべき文

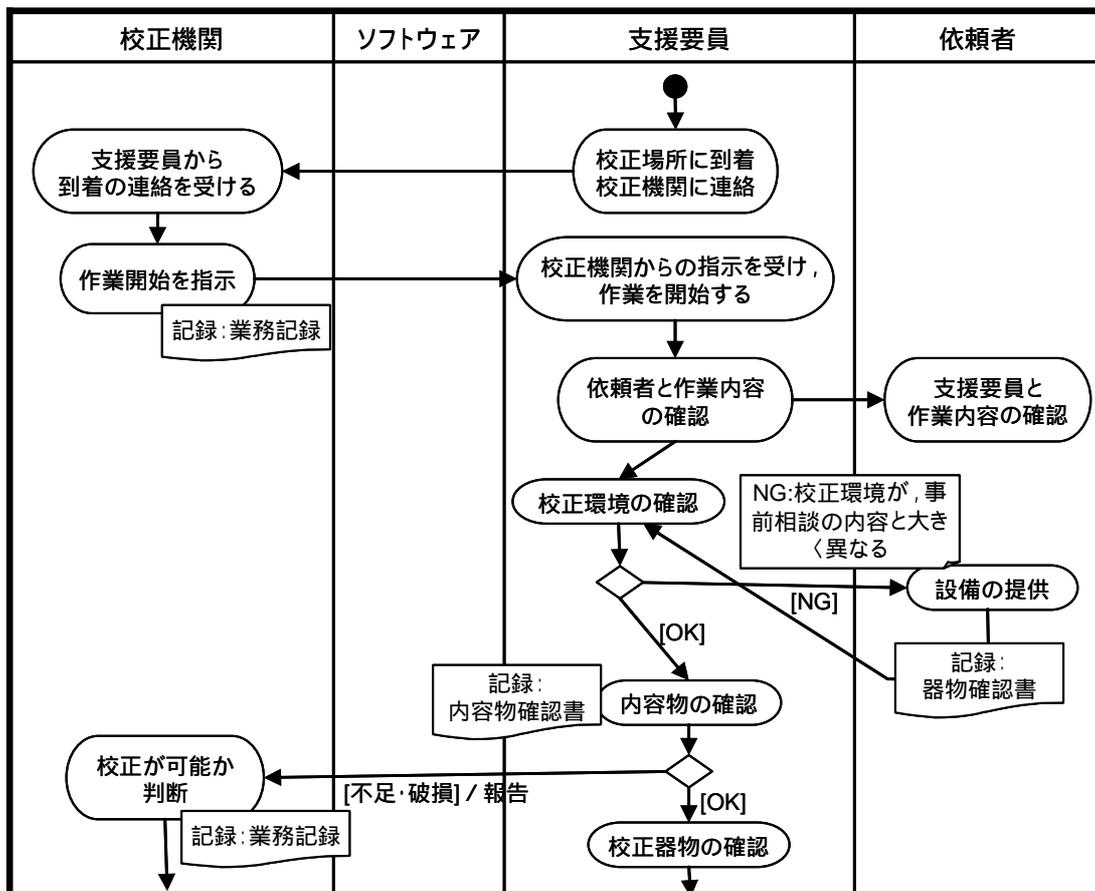


図 2.7-9 アクティビティ図の例（校正依頼～受諾）

書的記録などが明示的に示されている。一例を図 2.7-9 に示す。この図には想定されるエラーに関するフロー（対処方法）も記述している。

プロトコルの中には、仲介器の移送に関する手順、支援要員の作業手順、支援要員の教育訓練や技能評価のプログラムなどが含まれる。特に、支援要員の現場での作業をなるべく簡単にし、作業手順や連絡手順などを記述した詳細なマニュアルを作成した。このマニュアルは実証実験において実際に使用し、再委託先事業者の意見なども参考にしながら改良を加えていった。

操作性のよい仲介器および操作手順を開発し、詳細な作業マニュアルを準備したことは、支援要員に対する教育訓練項目を減らし、教育訓練の確実な実施につながった。また教育訓練のプログラムを策定することで、どの要員に対しても同レベルの教育訓練が行えるようになった。

教育訓練は、校正方法の概要説明と実際に装置を用いた実習から成り、ほぼ半日程度で終了する。実証実験においては、技能レベルの異なる複数の要員がこの教育訓練プログラムの下で教育訓練を受け、それぞれ作業を行ったが、次節(e)で述べるように、いずれも同等の校正結果が得られていることから、教育訓練プログラムが適切であることが確認できた。

## (e) 実証実験

### 1) 平成 18 年度実証実験 -- プロトタイプによる機能確認

圧力遠隔校正に適した測定手順の検討と遠隔校正時における仲介器の安定性評価を目的として、プロトタイプを用いて遠隔校正実験を実施した。このときの遠隔校正実験では、仲介器のプロトタイプを遠隔地に運搬し、制御用パソコンを遠隔操作することにより、遠隔校正を実施した。遠隔地での作業スペースの確保、遠隔地で必要となる電源、ネットワークポート、作動媒体等は、本実験を共同実施したそれぞれの校正事業者（再委託先事業者）により準備された。

一回の遠隔校正実験で、特性評価で使用したのと同じ校正方法を最低 3 往復行った。仲介器に複数の圧力計を用いたので、標準の値  $P_s$  を求める際は、信頼性向上のために各圧力計から得られる値の平均値を用いた。校正器物表示値と標準との差 ( $I_{DUT} - P_s$ ) から、公称表示値における校正値を求めた。

[気体差圧] 再委託先事業者である横河電機株式会社と、10 Pa ~ 10 kPa の圧力範囲の遠隔校正実験を実施した。仲介器プロトタイプを山梨県甲府市にある横河電機株式会社甲府事業所に運搬し、産総研からの遠隔操作により校正を実施した。

第 1 回目：2006 年 12 月 6～7 日

第 2 回目：2006 年 12 月 25～26 日

[液体圧力] 再委託先事業者である長野計器株式会社と 10 MPa ~ 50 MPa の圧力範囲

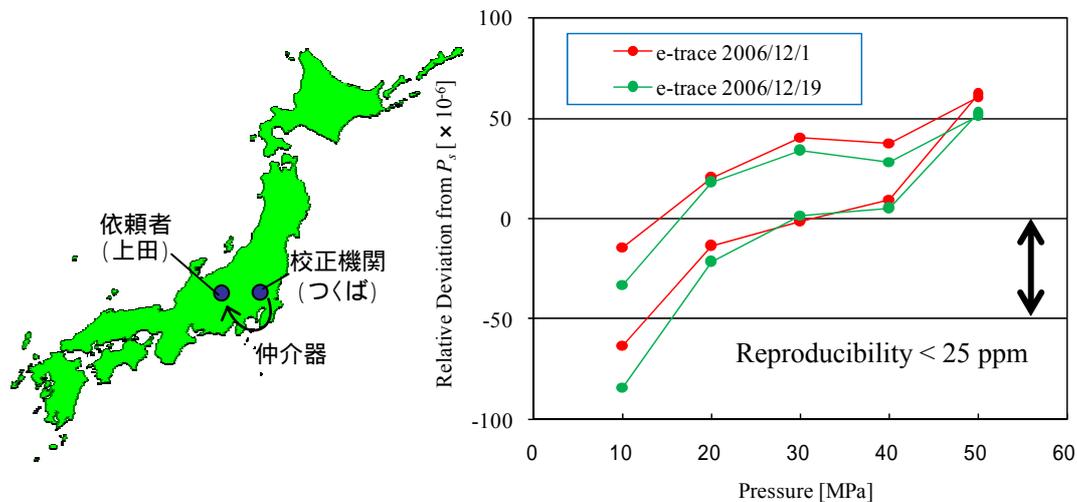


図 2.7-10 液体圧力遠隔校正実験における校正結果

の遠隔校正実験を実施した。仲介器プロトタイプを長野県上田市にある長野計器株式会社上田計測機器工場に運搬し、産総研からの遠隔操作により校正を実施した。

第 1 回目：2006 年 11 月 30 日～12 月 1 日

第 2 回目：2006 年 12 月 18～19 日

図 2.7-10 に液体圧力の遠隔校正実験における校正器物の校正結果の一例を示す。この校正器物に対して、昇圧・降圧毎の各圧力点における 2 回の結果の相対差は、最大でも  $25 \times 10^{-6}$  以内であった。また、本校正器物は再委託先事業者により、遠隔校正実施の前後に重錘形圧力天びんを用いたシステムにより校正され、その特性及び不確かさが評価された。遠隔校正実験の結果と事業者が実施した校正結果との差は、事業者が主張する不確かさに比較して十分小さかった。

どちらの圧力範囲の実証実験においても、プロトタイプに備えた装置の機能は十分で、これらを仲介器として一体に組み上げればよいことがわかった。加えて、信頼性を確保するための確認手順などを含むプロトコルを確立すればよいことが明確になった。

## 2) 平成 19 年度実証実験 -- 国内外の移送実験、プロトコルの確認

平成 18 年度にプロトタイプを基に製作した統合型仲介器の性能評価を行い、校正実施手順（プロトコル）を作成した。この統合型仲介器とプロトコルを用いて、各圧力範囲で再委託先事業者との実証実験を行った。気体差圧は、産総研と横河電機（山梨県甲府市）との間で、また液体圧力は、産総研と長野計器（長野県上田市）との間で、それぞれ 2 回ずつ実証実験を行った。本年度の実験の目標としては、開発したプロトコルの有効性の確認、仲介器が様々な移送環境に耐えられる堅牢性を持っていることの検証とした。気体差圧の実証実験の概念図を図 2.7-11、また実験結果の例を図 2.7-12 に示す。持込校正と

各遠隔校正による値、国内外における遠隔校正、異なる支援要員による作業など、異なる条件下での校正値も一致している。液体圧力においても同様により結果が得られている。

[プロトコルの有効性確認] 各実証実験において、校正機関と支援要員および依頼者の作業や連絡などをプロトコルにしたがって行い、有効に機能することを確認した。

支援要員については、両圧力範囲とも、1 回目は産総研の担当者が作業を行ったが、2 回目は各再委託先事業者の校正担当者が教育訓練を受け、実際の現場作業を行った。平成 18 年度同様に、どの実験においても目標とする不確かさに対して十分小さな再現性で校正値を得ることができた。このことから、校正結果が支援要員の違いによって左右されないようなプロトコルが確立できていること、また支援要員教育プログラムに問題がないことが確認できた。

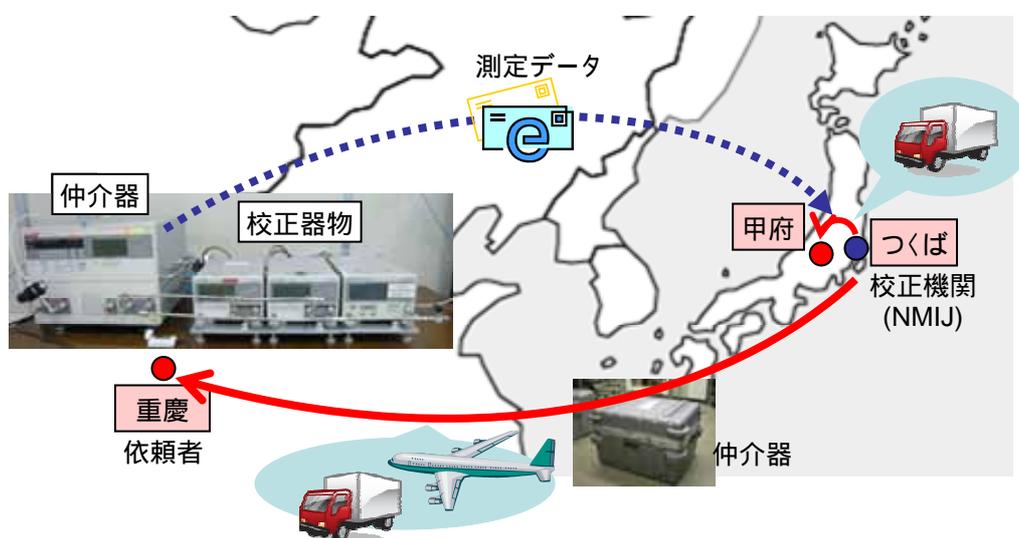


図 2.7-11 実証実験の概念図（気体差圧）

[国外への実証実験] 2007 年 9 月に、重慶（中国）の重慶横河川儀有限公司（横河電機の中国合弁会社）との間でも実証実験を行った。仲介器の移送箱に取り付けた振動計の記録などから、移送中に大きな衝撃を受けたことがわかったが、実験で得られた校正値は、これまでの国内で行った校正値から変化していなかった。このことから仲介器が十分な堅牢性を持つことが確認でき、国外の依頼者に対しても国内と同等に遠隔校正を行えることを実証した。

国内と異なるインフラ環境下での実証実験を行うことで、通信や装置の設置準備に関して事前確認に必要な項目の追加や、通信ソフトウェアの改良につながった。

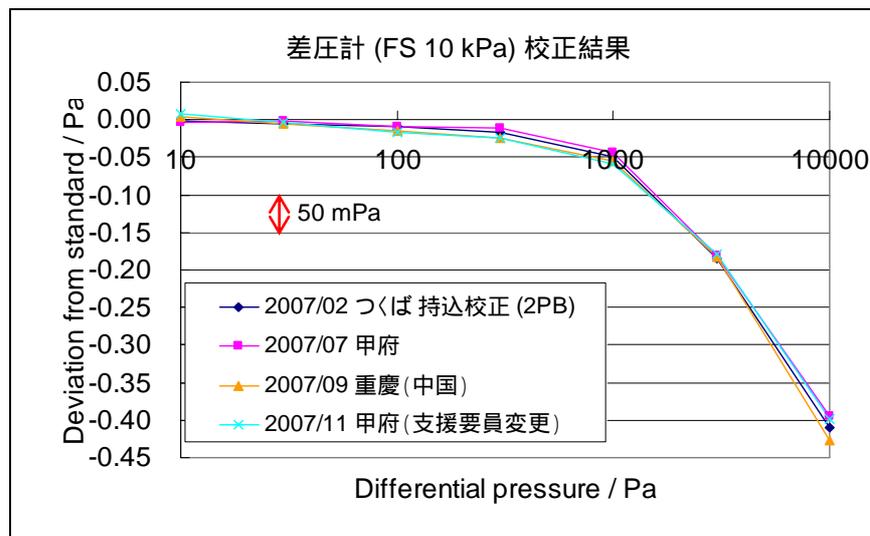


図 2.7-12 気体差圧の差圧計校正結果の例。異なる条件下の校正値も一致している。

### 3) 平成 20 年度実証実験 -- 実用化に向けて

前年度までは産総研から校正事業者（再委託先事業者）への遠隔校正を行ってきたが、最終年度は再委託先事業者である校正事業者が主体となり、校正事業者からユーザへの遠隔校正実験を行った。具体的には、気体差圧は横河電機株式会社が校正機関となり、校正依頼者の横河レンタ・リース株式会社へ、また液体圧力は長野計器株式会社が校正機関となり、校正依頼者の株式会社ナガノ計装へ遠隔校正実験を 2 回ずつ行った。

[気体差圧] 2 回の実証実験のうち、1 回目の支援要員は、前年度に教育訓練を受けた横河電機の校正担当者が務めた。これは校正場所と作業者の両方を一度に変えず、まずは校正場所のみ変化させるという配慮からである。次の 2 回目の実験で、支援要員を依頼者側の要員に変更するために、横河電機の教育担当者が横河レンタ・リースの支援要員に対して教育訓練を行った。

校正現場となる横河レンタ・リースにおいては、社内 LAN 回線を利用せず、データ送信には携帯電話を利用した。ソフトウェアの通信部分の改修やプロトコルの細かい変更などを必要としたが、実験では問題なくデータ送信ができた。社内 LAN を利用しない場合の対処方法について考察することができた。

[液体圧力] 1 回目の実験の前に、長野計器の教育担当者がナガノ計装（依頼者側）の要員に対して教育訓練を行い、2 回の実験で依頼者側要員が支援要員を務めた。2 回とも同じ支援要員で実験を繰り返すことで、手順に関する問題点の抽出を行った。

ここでは初めて校正を行う型式の器物への対処法、依頼者サイトにおいて問題が生じた際の校正機関・支援要員・依頼者の権限と行動について、より詳細な規程が必要であることが明確になった。

#### (f) 国外への普及活動

- ・ 2007年6月4日～8日 ドイツで行われた PTB-BIPM ワークショップに参加し、圧力遠隔校正について講演を行った。
- ・ 2007年11月29日 メキシコで行われた IMEKO TC16 にて、圧力遠隔校正の開発について成果報告を行った。
- ・ 2008年8月6日 タイのラマ・ガーデン・ホテルで開催された e-trace セミナーで装置のデモンストレーションと圧力遠隔校正についての講演を行った。
- ・ 2008年8月7日～8日 NIMT（タイ国国家計量研究所）での e-trace ワークショップにおいて、装置のデモンストレーションと技術の紹介を行った。



図 2.7-13 タイ(NIMT)における e-trace ワークショップでの技術紹介の様子

#### (6) 実用化の見通し

[産総研における依頼試験開始]

2008年2月に、産総研からの遠隔校正による高精度圧力計の依頼試験を開始した。

- ・ 高精度圧力計（気体差圧：遠隔校正）10 Pa 以上 10 kPa 以下
- ・ 高精度圧力計（液体圧力：遠隔校正）10 MPa 以上 100 MPa 以下

本研究開発においては、再委託先事業者からの協力を得て、各圧力範囲において圧力遠隔校正用仲介器を開発した。これらの仲介器を実際に用いることで、校正事業者からユーザへの遠隔校正実験にも成功しており、実験に参加した事業者からはコスト面での問題が解決すれば実用化も期待できるとの意見を得ている。

今後の事業の可能性としては、以下のような利用法が特に有効と考えられる。

- ・ 校正事業者がすでに行っている現場校正の代わりに使用
- ・ 校正機関の要員が立ち入りできない特殊な環境下での校正に使用
- ・ 各地の工場などに分散した計測機器の品質管理に使用

産総研における依頼試験の開始によって、圧力遠隔校正の一つのモデルが確立できたものと考えている。今後は、コストや仲介器の大きさなどの問題を解決することで、実用化につながるものと期待される。

#### (7) 目標の達成状況（基本計画の最終目標に対する達成状況を記載）

気体差圧および液体圧力の 2 つの圧力範囲において安定で可搬型の仲介器を開発し、校正実施手順を確立、依頼試験を立ち上げた。これによって、最終目標は達成できたと考えている。

具体的な内容は以下の通りである。仲介器には高精度デジタル圧力計・調整器を一体に組み込み、発生圧力を自動制御できるものとした。また、校正実施環境なども同時に記録できるようになっている。校正実施手順（プロトコル）に関しては、従来の持込校正と同等の信頼性が確保できるような手順を作成した。圧力校正事業者である再委託先事業者（横河電機株式会社、長野計器株式会社）と協力して遠隔校正実験を実施し、開発した仲介器の性能や校正実施手順の信頼性を確認した。移送を含む校正の再現性は、全ての実証実験を通して 0.005 % 以下であり、目標不確かさを達成できた。また開発したプロトコルを用いることで、一般の校正事業者からユーザに対しても遠隔校正を実施できる見通しが得られた。ここで確立した圧力遠隔校正のモデルを参照することで、校正事業者による遠隔校正の実用化が期待される。

当初の目標に加え、中国企業への校正実証実験の成功や、タイで開催された e-trace セミナーでの装置デモンストレーションと技術の紹介などによって、他国の多くの計測標準関係者にも当該技術の有用性が認知されてきている。今後、遠隔校正により我が国の圧力標準トレーサビリティの拡充が期待される。

#### 外部発表状況

18FY

特許 0 件

#### 論文、解説 2 件

（査読なし）

- 1) M. Kojima, K. Saitou, T. Kobata: “ Characterization of Transfer Standard for Small Differential Pressure, Proceedings of 6th International Conference on Advances in Metrology (AdMet-2006) ”, National Physical Laboratory (NPLI) and Metrology Society of India (MSI), 9 (2006).
- 2) T. Kobata, M. Kojima: “ Pressure Standards and Calibration Services using Pressure Balances at NMIJ/AIST, Proceedings of 6th International Conference on Advances in Metrology (AdMet-2006) ”, National Physical Laboratory (NPLI) and Metrology Society of India (MSI), 45 (2006).

#### 口頭発表 6 件

- 1) 小島、小島、梶川、“圧力標準の遠隔校正技術の開発”、第 23 回センシングフォーラム計測部門大会、計測自動制御学会、つくば、2006/10/2
- 2) 小島、小島、斉藤、“デジタル差圧計の特性評価手法の検討”、第 23 回センシングフォーラム計測部門大会、計測自動制御学会、つくば、2006/10/2.
- 3) M. Kojima, K. Saitou, T. Kobata, “Characterization of Transfer Standard for Small Differential Pressure”, 3rd APMP Pressure and Vacuum Workshop, National Physical Laboratory (NPLI) and Metrology Society of India (MSI), New Delhi, India, 2006/12/11.
- 4) T. Kobata, M. Kojima, “Pressure Standards and Calibration Services using Pressure Balances at NMIJ/AIST”, 6th International Conference on Advances in Metrology (AdMet-2006), National Physical Laboratory (NPLI) and Metrology Society of India (MSI), New Delhi, India, 2006/12/11.
- 5) 小島、小島、梶川、他、“圧力標準における研究開発の現状”、計量標準総合センター第 10 回成果発表会、計量標準総合センター、つくば 2007/1/19.
- 6) 小島、斉藤、小島、“差圧標準供給のためのデジタル圧力計の特性評価”、計量標準総合センター第 10 回成果発表会、計量標準総合センター、つくば 2007/1/19.

#### その他の公表 0 件

19FY

特許 0 件

論文、解説 0 件

#### 口頭発表 7 件

- 1) T. Kobata, M. Kojima, H. Kajikawa, “ Development of remote calibration technology for pressure standards ” , PTB-BIPM Workshop on the Impact of Information Technology in Metrology , PTB and BIPM, Berlin, Germany, 2007/6/7.
- 2) T. Kobata, “ Present State and Prospect of Pressure Standard at NMIJ/AIST ” , 6th ASEAN Seminar and Workshop on Measurement Standards in Bangkok, JICA/NIMT Project and NMIJ, Bangkok, Thailand, 2007/8/22.
- 3) 小島、小島、梶川、圧力標準の遠隔校正技術の開発（第 2 報）”、第 24 回センシングフォーラム計測部門大会、計測自動制御学会、仙台、2007/10/25.
- 4) M. Kojima, K. Saitou, T. Kobata, “ Study on calibration procedure for differential pressure transducers ” , IMEKO 20th TC3, 3rd TC16 & 1st TC22 International

Conference, International Measurement Confederation, Merida, Mexico, 2007/11/29.

- 5) T. Kobata, M. Kojima, H. Kajikawa, “ Towards establishment of remote calibration for pressure standards ”, IMEKO 20th TC3, 3rd TC16 & 1st TC22 International Conference, International Measurement Confederation, Merida, Mexico, 2007/11/29.
- 6) 小島、小島、梶川、他、圧力標準の開発・維持・供給 、計量標準総合センター第 13 回成果発表会、計量標準総合センター、つくば、2008/1/17.
- 7) 小島、斉藤、小島、“ 校正条件によるデジタル差圧計出力への影響評価 ”、計量標準総合センター第 13 回成果発表会、計量標準総合センター、つくば、2008/1/17.

#### その他の公表 1 件（プレス発表等）

- 1) プレス発表圧力（気 体差圧）の遠隔校正に日本で初めて成功（横河電機株式会社、独立行政法人産業技術総合研究所の共同発表）、2007/11/1

20FY

特許 0 件

#### 論文、解説 1 件

（査読なし）

- 1) 小島、梶川、小島、デジタル圧力計のための遠隔校正技術の開発、計測標準と計量管理 Vol.58、No.4、2009.

#### 口頭発表 5 件

- 1) 小島、梶川、小島、“ 圧力標準における遠隔校正技術の開発 ”、第 23 回国際計量計測展／INTERMEASURE 2008、東京国際展示場、2008/4/25
- 2) M. Kojima, H. Kajikawa, T. Kobata, “ Remote calibration system for pressure standards ”, e-trace seminar and workshop, Bangkok, Thailand, 2008/8/6
- 3) 梶川、小島、小島、“ 圧力標準の遠隔校正用仲介器の開発 ”、第 25 回センシングフォーラム計測部門大会、計測自動制御学会、佐賀市、2008/9/26
- 4) 小島、梶川、小島、圧力遠隔 校正に適した測定手順の開発 、第 25 回センシングフォーラム計測部門大会、計測自動制御学会、佐賀市、2008/9/26
- 5) 小島、梶川、小島、“ デジタル圧力計のための遠隔校正技術の開発 ”、計測標準フォーラム第 6 回合同講演会、大田区、2008/11/21

その他の公表 0 件

## IV . 実用化、事業化の見通しについて

### - 1 . 成果の実用化の可能性

これまで述べたとおり、NEDO プロジェクトとしての「計量器校正情報システム研究開発」は、目標を達成しており、成功裡に終わることが出来た。GPS 利用などの直接比較型では、国家標準レベルの超高精度標準が、世界中、どこでも入手可能となっている。これらは、Ⅲ-1.4 の成果普及で述べたとおり、多くの実証実験で証明されており、例えば、時間周波数は、タイのバンコックにあるタイ国国家計量研究所（NIMT）との国際比較が行われた。長さ標準でも、光波距離計の遠隔校正システムを用いて、韓国で開催された国際比較に参加し、良好な結果を得ている。さらに、電気のインピーダンスや、圧力、放射能、3次元などの仲介器を介する方式でも、多くの実証実験が行われてきた。なかでも、圧力における産総研と山梨の工場、産総研と中国の重慶工場の実証試験は、ビデオ映像化され、国際度量衡総会に集まった、世界各国の標準研究所長会議で紹介され、大いに注目を集めることが出来たなど、これらの実証実験は、広報普及活動にも寄与している。

実用化に関する具体的な可能性を知的基盤の活用、供給の観点から検証すると、時間周波数標準は既に産総研からの jcss 校正を開始し、さらに、民間の JCSS 事業者も認証されるに至っている。放射能も、仲介となる線源を介して jcss 校正が開始されており、同様の手法を用いた民間の JCSS 校正も検討が進められているところである。電気標準も、仲介器を用いる方式での JCSS 参加が検討されている。電気標準に関しては、さらに、第1期で進められたジョセフソンの一次電圧標準の小型化も着実に進展しており、実用的なプログラマブルジョセフソン素子と小型冷凍機との組合せにより、液体ヘリウムの入手困難な場所でも電圧の一次標準が入手可能になっている。小型化された装置は国内ベンチャー企業を通して、インドネシア標準研究機関に1台輸出されており、周波数標準と組み合わせて、我が国の一次標準がアジア諸国で活躍する日も遠くないと思われる。これらの他にも、既に個々のテーマ毎の説明において、実用化の可能性が展開されている。

その際重要なポイントは、国際的な合意を形成しつつ、システム整備を行う必要がある点である。即ち、CIPM MRA によって、各国の一次標準の同等性が承認され、ISO/IEC 17025 の導入で計測の品質システムに関する整合性が確立されたとは言え、現状のこれらの体系は、遠隔校正技術が出来る以前のレベルで構築されている。また、各国の規制、特に安全安心に関する規制は、それぞれの国の事情を反映しているため、必ずしも整合性がとれていない部分がある。このため、Ⅲ-1.3 で述べたとおり、ISO/IEC 17025 の見直しを ISO/CASCO に提案しており、ILAC での遠隔校正における認証条件の設定に関する議論にも参加し、積極的な発言を行っている。この様に、遠隔校正システムの国際規格化を進めると共に、このプロジェクトを通じて開発された頑強で輸送に適した仲介標準器などは、今後積極的に JIS 化し、引いては ISO あるいは IEC の規格に採用されるよう、今後とも継続して努力してゆく予定である。

## - 2 . 波及効果

NEDO プロジェクトとして「計量器校正情報システム研究開発」は、「速く、安く、正確に」標準を供給することをキーワードとして研究開発が進められてきた。従って、最も期待される波及効果とは、この研究を通じて確立された技術が、実際に一般の計量機器の校正に利用されることであり、その結果、我が国の校正コストが他国よりも安く設定され、産業基盤の強化に貢献する事である。これは、近年トレーサビリティは「安全・安心」の観点から重視されていることにも密接に関連している。例えば、電子機器には電磁波が周辺電子機器の誤作動を誘発することを防ぐため、不要な電磁放射を制限する電磁両立性（Electro-Magnetic Compatibility (EMC)）試験が各国で義務づけられており、欧米では、試験を行う測定機器のトレーサビリティ証明を求めているようになっている。その他の電気製品も、電気製品安全のための絶縁試験などに用いる測定機器に、トレーサビリティが求められている。しかしながら、例えば、セラミックコンデンサの全品検査を行っているメーカなどでは、一工場あたりに 2000 台もの測定器が並んでおり、これら全てに、従来の校正手法でトレーサビリティを与えるのは不可能である。同様に、自動車工場などにおいても、証明を必要とする計測機器は、一工場で 6000 台に及ぶと言われている。

さらに、中国を始めとする途上国においても、自国製品の品質保証の重要さと、自国産業保護の観点から、ISO10012 の計測マネジメントシステムで要求される測定機器の管理を求めており、この点からも製造現場の計測機器に、如何にしてトレーサビリティを及ぼすかが、今後の重要なポイントとなっている。また、ガンの放射線治療は患者への負担をあまり掛けないことから、近年著しい伸びを見せているが、正常な細胞を出来る限り殺さず、ガン細胞のみにダメージを与えるには、高精度の線量モニタリングが必要で、且つ多くの症例比較を行うにも、トレーサビリティの重要性が認識されてきている。これらの場合に必要なことも、やはり実際の現場で使用される測定機器にまで、トレーサビリティを与えることである。

さらに、この様な品質保証と計測のトレーサビリティの観点から、今後重要となるキーワードは「品質の見える化」である。最近のパソコンをはじめ、特に海外で製造された電化製品には、様々なロゴマークが入っているが、それらの多くは、品質を保証するための製品マークや規格認証マークである。即ち、EMC 試験合格、CE 規格適合などの規格適合に加え、インテル社の CPU 使用とか ISO9000 シリーズ認証取得工場で製造したなどの、ある種の宣伝を兼ねた、品質の表示が行われている。これらの傾向は、欧米や中国で顕著であり、今後我が国の製品も、"Made in Japan"が品質の証、とあぐらをかいていられる状況ではない。この「品質の見える化」を進めるポイントこそ、製品チェックの現場で用いられる計測機器のトレーサビリティである。本プロジェクトで開発された遠隔校正技術は、従来の第 3 者認証が可能な計測機器にはもちろんのこと、汎用のオシロスコープやネットワークアナライザなど、測定対象の幅が広く、様々な量目から複雑に組み立てられている標準に対しても、LCR 交流インピーダンス標準仲介器のような、頑健で、校正プロセスをパッケージした校正ソフトと組み合わせることにより、標準供給が可能と

なっている。

この様に、本プロジェクトにおいて、技術的な基礎は既に固められている。今後はユーザがこの技術を用いて、現場計測機器の「自己校正・データ管理」することが可能な、運用制度面の整備が期待される。即ち、多くの現場計測器を、従来の校正事業者による校正を行うのでは、校正費用が膨大になり、現状に対応させることは不可能である。従って、工場などの製造現場において、日々行われている日常点検業務を「校正」として、トレーサビリティを与えることが出来るシステム作りが求められる。計測のトレーサビリティの定義は、不確かさの評価を含めた、とぎれのない比較校正の連鎖により、SI 標準に繋がることである。従って、日常の計測機器の点検作業において、その計測機器が、必要とされる不確かさの範囲内で、正しく作動していることを確認・記録し、その確認作業に用いた上位計測機器は、自社の測定室において、さらに上位の計測器によって、必要な不確かさの範囲で作動していることを定期的に確認・記録してゆく。この様な、社内点検結果を、例えば Web 上で第 3 者機関に登録し、データ管理することにより、ISO10012 や各種規制に対応した「品質の見える化」を行う際の計測器のトレーサビリティ証明として使えるようシステム設計し、現場計測機器まで過大な負担を求めることなく、トレーサビリティを普及させて行くことが期待される。図-IV-1 にその概念図を示した。

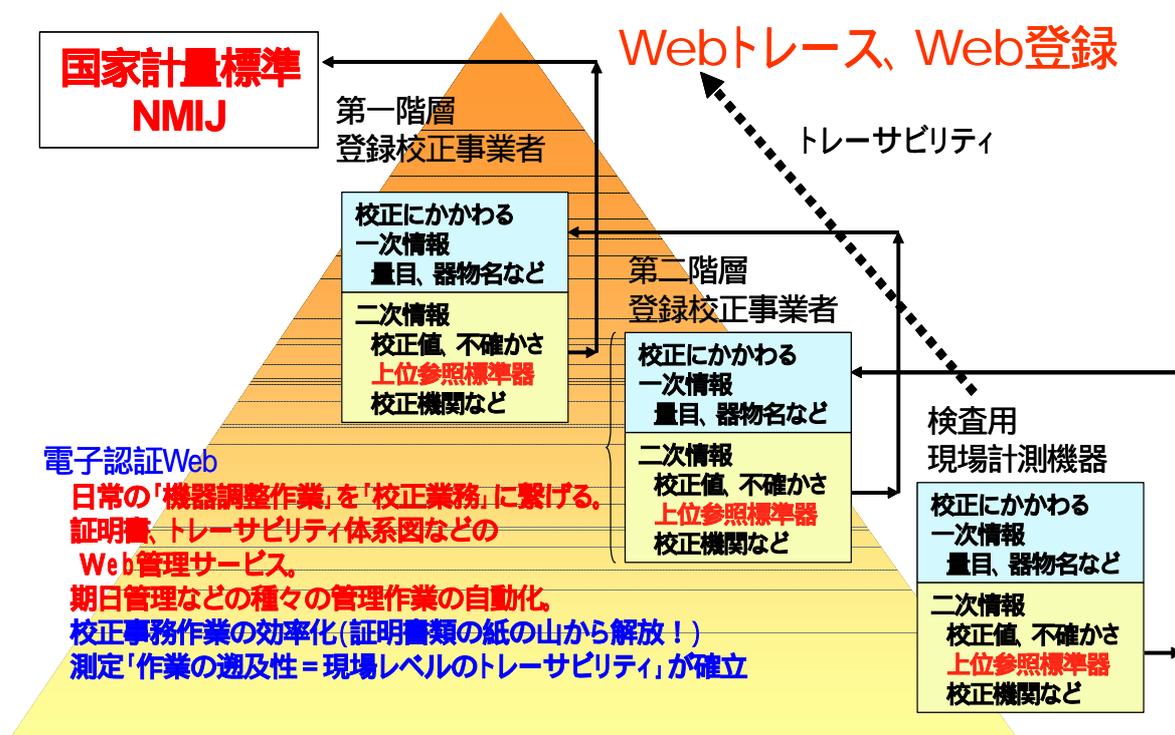


図-IV-1 将来の Web 登録システムを取り入れたトレーサビリティ普及の概念。

加えて、近年のデータ通信技術の進展は、目を見張るものがある。例えば、この遠隔校正プロジェクトを開始した平成 13 年の時点では非常に高価なシステムであったテレビ会

議は、現在では市販の数千円の Web カメラとインターネットに接続可能なパソコンがあれば、簡単に世界中で繋げることが出来る。また、測定機器に通信機能を持たせたり、測定結果を記憶させたりする機能は、既に殆ど全ての上位機器に備わっており、汎用機器にまで及びつつある。さらに、IC タグの入出力システムや情報書き込み用のフラッシュメモリーも、小型化・大容量化・低価格化が一段と進んでおり、測定機器のスマート化は今後ともさらに進化して行くものと考えられる。その際の I C タグによる計測器管理技術などに、本プロジェクトの成果が生かされることが期待される。

また、現場測定機器の自己管理を進めることは、各企業内の校正室の拡充と校正に関わる人材育成にも有効で、しかも前述の「製品の品質の見える化」にも貢献するものである。本来、遠隔校正方式は、大量の測定器の管理や校正結果の Web 登録・情報管理に適している。本プロジェクトの波及効果として、製造や試験・検査の現場で用いられる数多くの測定機器に遠隔校正方式でトレーサビリティを及ぼし、我が国の基礎である製造産業の品質向上や安全安心の様々な規制対応、即ち「品質の見える化」に貢献し、その結果として、JCSS 制度を含む校正事業全体が、産業基盤として我が国の発展に、さらに寄与して行くことが期待される。

「計量器校正情報システムの研究開発」事業原簿の変更箇所新旧対照表（平成 21 年 12 月 21 日作成）

\* 頁及び行は変更後の事業原簿に対応します。

頁*	行*	変更前	変更後	備考
概要-1	1	最終更新日：平成 21 年 11 月 11 日	最終更新日：平成 21 年 12 月 21 日	
Ⅲ-60	図	図の番号が図 2.3-1	図の番号が図 2.2.2-1	Ⅲ-60~76 頁について同様
Ⅲ-60	図 2.2.2-5	Y 軸の角度パラメータの表記が $\theta$	Y 軸の角度パラメータの表記が $\alpha$	
Ⅲ-61	1	ジ、上記ビームスプリッターからの光がリングゲージ測定面 $\beta$ 軸に対して平行に	ジ、上記ビームスプリッターからの光が XY 平面に対して平行に	
Ⅲ-61	16	のアライメントをとる目的で設置され、干渉信号が発生するポイントでリニアステージを	のアライメントをとる目的で設置され、干渉信号が発生するポイントで微動ステージを	
Ⅲ-64	5	⑥次に $\alpha$ 軸を移動させて、レーザ干渉計のカウンタ値が最小値を示すようにする	⑥次に $\alpha$ を変化させて、レーザ干渉計のカウンタ値が最小値を示すようにする	
Ⅲ-126	12	差から三次元測定のもつ 21 個の幾何学誤差を評価している。この手順を標準化し、	差から三次元測定のもつ 21 個の幾何学誤差を評価している。産総研で実施している手法を用いた場合、校正後の三次元測定機の座標測定の不確かさは、用いた仲介標準器の校正値の不確かさの 2 倍程度となる。この方法では仲介標準器に値付けられた座標値を差分測定するため、三次元測定機および仲介標準器の大きさに依らず、仲介標準器の校正値の 2 倍程度の不確かさで三次元測定機を校正できる。 この手順を標準化し、	事後評価分科会での質疑応答内容の反映による。
Ⅲ-130	9	れば、それと同等の不確かさで Micro CMM 用の仲介標準器に値付けすることができる。産総研で	れば、それと同等の不確かさで Micro CMM 用の仲介標準器に値付けすることができる。通常サイ	事後評価分科会での質疑応答内容の反映による。

頁*	行*	変更前	変更後	備考
		<p>は反転法を適用可能な Video CMM 用仲介標準器を開発しており、その値付け</p>	<p>ズの三次元測定機の場合、図 2.5-5 (b) に示した仲介標準器 (校正の不確かさ : 315 nm / 400 mm) との比較測定により、別の仲介標準器に対しを 377 nm / 400 mm の不確かさ (1.2-1.5 倍の不確かさ伝搬) で校正した例があり、Micro CMM 用仲介標準器についても、比較測定により同程度の不確かさ伝搬を実現できると見込んでいる。</p> <p>産総研では反転法を適用可能な Video CMM 用仲介標準器を開発しており、その値付け</p>	
III		<p>CMM 用仲介標準器に値付けできる。これを用いることにより、Micro CMM を 200 nm 程度の不確かさで校正できる見込みである。</p>	<p>CMM 用仲介標準器に値付けできる。具体的には、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・グリッドパターンの品質向上 (エッジラフネスなど)</li> <li>・高倍率レンズ使用のための基板の薄板化 (中心座標測定の高分解能化)</li> <li>・長さのトレーサを標準尺 (校正値の不確かさ : 200 nm / 100 mm) からレーザ干渉計 (同 : 480 nm / 1 m) へ移行</li> </ul> <p>を行うことにより、将来的に 100 mm 程度の大きさの Video CMM 用仲介標準器を 50 nm 程度の不確かさで校正可能と見込んでいる。これを用いることにより、Micro CMM 用仲介標準器を 120 nm-160 nm 程度の不確かさで校正でき、不確かさの伝搬における安全率も見込んで、Micro CMM</p>	<p>事後評価分科会での質疑応答内容の反映による。</p>

頁*	行*	変更前	変更後	備考
			を 200 nm / 100 mm 程度の不確かさで校正できる見込みである。 <del>これを用いることにより、Micro CMM を 200 nm 程度の不確かさで校正できる見込みである。</del>	
III-135	図 2.6-1 図 2.6-2	<b>校正器物 (加速度計)</b>	校正器物 (加速度計)	文字フォントの変更
III-139	12	本装置に用いた加振機の最大発生力は 270 N であり、 <u>ボイスコイル型加振機</u> に比べ重量比で数倍～数十倍の加振力を有する。	本装置に用いた加振機の最大発生力は 270 N であり、 <u>ドライブアンプやコントローラを含むシステム</u> として <u>ボイスコイル型加振機</u> に比べ重量比で数倍～数十倍の加振力を有する。	事後評価分科会での質疑応答内容の反映による。
III-140	3	1)概要の段落の文字フォントがゴシック体	1)概要の段落の文字フォントが明朝体	
III-151	4	産総研からの標準供給の形態としては、これまでは依頼者の圧力計を校正機関に持ち込んで校正を実施するいわゆる“持込校正”を行ってきた。民間の校正事業者による JCSS 校正も同様である。しかしながら、持込校正では校正器物を設置場所から校正機関へ移動させる手間がかかるため、圧力標準トレーサビリティ体系のさらなる拡充のためには、より簡便で効率的な、新たな標準供給の形態を検討することが必要である。	産総研からの標準供給の形態としては、これまでは依頼者の圧力計を校正機関に持ち込んで校正を実施する、いわゆる「持込校正」を行ってきた。民間の校正事業者による JCSS 校正も同様に持込校正で行われているが、この校正方法では校正器物を設置場所から校正機関へ移動させる手間がかかる。そこで、圧力標準トレーサビリティ体系のさらなる拡充のためには、より簡便で効率的な、新たな標準供給形態の検討も必要とされてきた。	
III-151	21	介器には高精度デジタル圧力計、圧力調整器、環境条件モニタなどを搭載し、これらをパソコンの測定プログラムから制御することで全自動で校正	介器については、本体内部に高精度デジタル圧力計、圧力調整、環境条件モニタなどを搭載した。この装置をパソコンの測定プログラムで制御して	

頁*	行*	変更前	変更後	備考
		が行われ、インターネットなどを通して測定データが校正機関へと送信される。また、校正実施手順としては、常に一定した	全自動で校正を行い、インターネットなどを通して測定データを校正機関へと送信する。また遠隔校正実施手順については、常に一定の手順で	
III-151	31	表や国外でのデモンストレーションなどを通じて、国際的なルール形成のための議論も深めた。	表や国外でのデモンストレーションなどを行った。さらに講演会や発表などを通じて、国際的なルール形成のための議論も深めた。	
III-152	2	移動モデルの気体圧力標準遠隔校正システムを構築し、産業技術総合研究所外部との	移動モデルの気体圧力標準遠隔校正システムを構築し、産総研外部との	
III-152	6	産業界からの需要の高い、気体差圧 10 Pa～10 kPa（不確かさ：100 mPa または 0.01 % 以下）、液体圧力 10 MPa～100 MPa（不確かさ：0.01 % 以下）	産業界からの需要の高い、気体差圧 10 Pa～10 kPa（ <b>拡張</b> 不確かさ：100 mPa または 0.01 % 以下）、液体圧力 10 MPa～100 MPa（ <b>拡張</b> 不確かさ：0.01 % 以下）	
III-152	11	圧力の遠隔校正は、高精度デジタル圧力計を利用した「物理的仲介器」を用いる。	圧力の遠隔校正は、高精度デジタル圧力計を利用した「物理仲介器」を用いる。	
III-152	13	標準器で校正された「遠隔校正用仲介器」を	校正済みの「遠隔校正用仲介器」を	
III-152	16	(4)測定終了後、仲介器は校正機関に返却され、校正機関において校正値が算出され、(5)校正証明書が発行される。	(4)測定終了後、仲介器は校正機関に返却される。(5)校正機関において校正値が算出され、校正証明書が発行される。	
III-152	図 2.7-1	—	図中に、校正値算出、を追記。	
III-153	2	進めることとした。(1)仲介器の開発、(2)校正の実施手順の開発、(3)開発物を検証するための実証実験である。	進めることとした。「仲介器の開発」、「校正実施手順の開発」、「開発物を検証するための実証実験」である。	

頁*	行*	変更前	変更後	備考
Ⅲ-153	19	問題がないことを確認した。プロトタイプは各装置を校正台上にそのまま配管接続	問題がないことを確認した。このプロトタイプは、各機器をそれぞれ校正台上に設置して配管接続	
Ⅲ-153	27	圧力範囲を2つ、開発対象として選択した。これは、「産業界の要請の最も多い範囲から実用化する方がよい」との中間評価指摘事項への対応としても意義のある圧力範囲である。すなわち、一方の <u>気体差圧の測定は、産業界のあらゆる分野で用いられているクリーンルームの空調制御などに必要不可欠であるが、この範囲では、標準器（2台の重錘形圧力天びんを用いる装置）を校正事業者が常用に維持するのは負担が非常に大きく、使いやすい標準器が整備されていない実状があった。</u>	2つの圧力範囲を開発対象として選択した。これは、 <u>中間評価の際に指摘された「産業界の要請の最も多い範囲から実用化する方がよい」というコメントへの対応としても意義のある圧力範囲である。すなわち、一方の気体差圧の測定は、産業界のあらゆる分野で用いられているクリーンルームの空調制御などに必要不可欠であるが、この圧力範囲の標準器は2台の重錘形圧力天びんを用いる装置で装置の規模も大きく複雑なため、持込校正は現実的ではない。</u>	
Ⅲ154	1	なる高精度デジタル圧力計を校正するのに十分、かつ、現在の校正能力で対応可能な大きさに設定した。	なる高精度デジタル圧力計を校正するのに十分な大きさに設定した。	
Ⅲ-154	11	いセンサが手に入りやすいこともメリットである。	いセンサが手に入りやすいことも普及へのメリットとなる。	
Ⅲ-154	19	計をより信頼性ある機器として	計をより信頼性の高い機器として	
Ⅲ-154	30	れぞれ3サイクル以上の校正から求められている。	れぞれ3往復以上の測定から求められている。	
Ⅲ-155	6	的な差は最大でも $20 \times 10^{-6}$ 以内であり、本開発の目的に十分な再現性が	的な差は最大でも $20 \times 10^{-6}$ 以内であり、本開発の目的達成に十分な再現性が	

頁*	行*	変更前	変更後	備考
III-155	16	・操作性：支援要員が圧力校正に関する専門知識を有しない場合でも、効率的に間違いなく作業が	・操作性：支援要員が圧力校正に関する専門知識を有しない場合でも、間違いなく作業が	
III-156	9	・環境条件測定機能：校正中の環境条件を記録する。移送中の環境条件や振動を記録する。	・環境条件測定機能：校正中の環境条件を測定・記録する。移送中の環境条件や振動を測定・記録する。	
III-157	図 2.7-5 図 2.7-6	図中の注記：仲介器圧力計 1、仲介器圧力計 2、 圧力発生器	図中の注記：圧力計 圧力調整器 傾斜計	
III-158	2	プロトタイプを基に、プロトタイプに使用した高精度圧力計・発生器などを一体に組み込んだ仲介器を、	プロトタイプに使用した高精度圧力計・調整器などを一体に組み込んだ仲介器を、	
III-158	5	7に両方の仲介器の写真を示す。この仲介器には、図 2.7-5 および図 2.7-6 に見える「仲介器圧力計 1、2」、圧力発生器、環境測定器など	7に両方の仲介器の写真を示す。この仲介器には、図 2.7-5 および図 2.7-6 中に示した圧力計、圧力調整器、環境測定器など	
III-158	12	に組み込むなどして、前年度の仲介器よりも多機能化を図った点にある。さらに気体差圧では、ノートパソコンの画面上で支援要員へ作業指示を行うソフトウェアの開発、操作ミスを防ぐために不要なボタン類を削除するなどの本体パネルの改良を行った。また液体圧力では、本体にキーロック機能や自己診断機能、リークチェック機能を持たせたことなどによって、操作性および信頼性を向上させた。	に組み込むなどして、前年度の仲介器よりも多機能化を図った点にある。さらに操作性および信頼性を向上させるため、次のような工夫も追加した。気体差圧では、ノートパソコンの画面上で支援要員へ作業指示を行うソフトウェアの開発、操作ミスを防ぐために不要なボタン類を削除するなどの本体パネルの改良を行い、主に支援要員の作業面から信頼性を向上させた。また液体圧力では、本体にキーロック機能や自己診断機能、リークチェ	

頁*	行*	変更前	変更後	備考
			ック機能を持たせることなどによって本体性能の信頼性を向上させた。	
III-159	図 2.7-8	(左上) 気体差圧用の制御ソフトウェアによって表示されたマニュアル画面。 (右2枚) 液体圧力用伸介器の改良部分	(左) 気体差圧用の制御ソフトウェアによって表示されたマニュアル画面。 (中、右) 液体圧力用伸介器の改良部分	
III-160	表 2.7-1 表 2.7-2	おんどとり	環境測定器	
III-160	2	「現場担当者の技能教育が必要ではないか」の中間評価指摘事項	「現場担当者の技能教育が必要ではないか」との中間評価指摘事項	
III-160	4	業することとした。これを確実にするための手順なども同時に定めている。	業することとした。これを確実に実行するために、教育訓練のプログラムや資格認定までの手順などを定めた。	
III-161	図 2.7-9	<p>Flowchart description: The process starts with the customer (依頼者) submitting a request (依頼を受ける). The correction unit (校正機関) receives the request and creates a pre-correction plan (通稱校正事前相読書を作成し、依頼者に送る). The support staff (支援要員) sends an email (E-mail) to the customer. The customer then sends the pre-correction plan (通稱校正事前相読書を送達). The correction unit checks the content (NGの内容について検討). If OK, the correction unit receives the request (通稱校正依頼の受領) and determines the correction plan (校正実施計画の確定). If NG, the correction unit sends a message to the customer (通稱校正を実施するための要求事項が満たされなし). The support staff also provides equipment (設備の提供) if needed.</p>	<p>Flowchart description: The process starts with the support staff (支援要員) receiving a request from the customer (依頼者) (校正場所に対して校正機関に連絡). The support staff sends a message to the correction unit (校正機関からの指示を受け作業を開始する). The correction unit sends a message to the support staff (作業開始を指示). The support staff checks the content (依頼者と作業内容の確認). The correction unit checks the environment (校正環境の確認). If NG, the support staff provides equipment (設備の提供). The support staff checks the content (内容物の確認). The correction unit checks the content (内容物の確認). The support staff judges if correction is possible (校正が可能か判断). If not, they report (不足・破損/報告). The support staff confirms the correction (校正器物の確認).</p>	
III-162	2	エラーに関するフローも記述している。	エラーに関するフロー (対処方法) も記述している。	

頁*	行*	変更前	変更後	備考
III-162	3	<p>プロトコルの中には、仲介器の移送に関する手順、<u>支援要員</u>の作業手順、<u>支援要員</u>の教育訓練や技能評価のプログラムなどが含まれる。特に、<u>支援要員</u>の現場での作業は校正の成否に関わるため、現場での作業をなるべく簡単にし、作業手順や連絡手順などを記述した詳細なマニュアルを作成した。このマニュアルは実証実験に使用し、再委託先事業者の意見なども参考にしながら改良を加えた。</p> <p>操作性のよい仲介器および操作手順を開発したことは、<u>支援要員</u>の教育訓練項目を減らし、教育訓練の確実な実施につながった。また教育訓練のプログラムを整備することで、どの要員に対しても同レベルの教育訓練が行えるようになった。具体的には、教育訓練は概要説明と実際に装置を用いた実習から成り、ほぼ半日程度で終了する。技能レベルの異なる複数の要員が作成した教育訓練プログラムで教育訓練を受け、それぞれ実証実験で作業を行ったが、次節(e)で述べるように、いずれも同等の校正結果が得られていることから、教育訓練プログラムの効果がでていることを確認した。</p>	<p>プロトコルの中には、仲介器の移送に関する手順、<u>支援要員</u>の作業手順、<u>支援要員</u>の教育訓練や技能評価のプログラムなどが含まれる。特に、<u>支援要員</u>の現場での作業をなるべく簡単にし、作業手順や連絡手順などを記述した詳細なマニュアルを作成した。このマニュアルは実証実験において実際に使用し、再委託先事業者の意見なども参考にしながら改良を加えていった。</p> <p>操作性のよい仲介器および操作手順を開発し、<u>詳細な作業マニュアルを準備した</u>ことは、<u>支援要員</u>に対する教育訓練項目を減らし、教育訓練の確実な実施につながった。また教育訓練のプログラムを策定することで、どの要員に対しても同レベルの教育訓練が行えるようになった。</p> <p>教育訓練は、<u>校正方法の概要説明と実際に装置を用いた実習から成り、ほぼ半日程度で終了する。実証実験においては、技能レベルの異なる複数の要員がこの教育訓練プログラムの下で教育訓練を受け、それぞれ作業を行ったが、次節(e)で述べるように、いずれも同等の校正結果が得られていることから、教育訓練プログラムが適切であることが確認できた。</u></p>	

頁*	行*	変更前	変更後	備考
Ⅲ161	4	—	「プロトコルを作成する上で特に注意したのは～」の段落をその次の、「プロトコルの作成にあたっては～」の段落と入れ替えました。	
Ⅲ-162	25	一回の遠隔校正実験で、特性評価で使用したものと同一校正方法を最低3サイクル行った。	一回の遠隔校正実験で、特性評価で使用したものと同一校正方法を最低3往復行った。	
Ⅲ-163	15	プロトタイプを基に平成18年度に製作した統合型仲介器の性能評価を行い、プロトコルを作成した。	平成18年度にプロトタイプを基に製作した統合型仲介器の性能評価を行い、校正実施手順（プロトコル）を作成した。	
Ⅲ-163	19	回ずつ実証実験を行った。本年度の実験の目標としては、開発した校正実施手順（プロトコル）の有効性の確認、仲介器が様々な移送環境に耐えられる堅牢性を持っていることの検証とした。気体差圧の実験結果の例を図2.7-12に示す。液体圧力においても	回ずつ実証実験を行った。本年度の実験の目標としては、開発したプロトコルの有効性の確認、仲介器が様々な移送環境に耐えられる堅牢性を持っていることの検証とした。気体差圧の実証実験の概念図を図2.7-11、また実験結果の例を図2.7-12に示す。持込校正と各遠隔校正による値、国内外における遠隔校正、異なる支援要員による作業など、異なる条件下での校正値も一致している。液体圧力においても	
Ⅲ-165	図2.7-12	図2.7-12 気体差圧の差圧計校正結果の例。持込校正と各遠隔校正による値、国内外における遠隔校正、異なる支援要員による作業など、異なる条件下での校正値も一致している。	図2.7-12 気体差圧の差圧計校正結果の例。異なる条件下の校正値も一致している。	
Ⅲ-165	7	[気体差圧] 2回目の実験で、横河電機の教育担当者が	[気体差圧] 2回の実証実験のうち、1回目の支援要員は、前年度に教育訓練を受けた横河電機の校正	

頁*	行*	変更前	変更後	備考
			担当者が務めた。これは校正場所と作業者の両方を一度に変えず、まずは校正場所のみ変化させるという配慮からである。次の2回目の実験で、支援要員を依頼者側の要員に変更するために、横河電機の教育担当者が	
III-165	16	[液体圧力] 1回目の実験の前に、長野計器の教育担当者がナガノ計装の支援要員に対して教育訓練を行い、2回とも同じ支援要員	[液体圧力] 1回目の実験の前に、長野計器の教育担当者がナガノ計装（依頼者側）の要員に対して教育訓練を行い、2回の実験で依頼者側要員が支援要員を務めた。2回とも同じ支援要員	
III-167	1	(7) 目標の達成状況（基本計画の最終目標に対する達成状況を記載）	産総研における依頼試験の開始によって、圧力遠隔校正の一つのモデルが確立できたものと考えている。今後は、コストや仲介器の大きさなどの問題を解決することで、実用化につながるものと期待される。  (7) 目標の達成状況（基本計画の最終目標に対する達成状況を記載）	
III-167	5	気体差圧および液体圧力の2つの圧力範囲において安定で可搬型の装置を開発し、	気体差圧および液体圧力の2つの圧力範囲において安定で可搬型の仲介器を開発し、	
III-167	8	仲介器には高精度圧力計・発生器を一体に組み込み、発生圧力を自動制御できるものとした。従来の持込校正と	具体的な内容は以下の通りである。仲介器には高精度デジタル圧力計・調整器を一体に組み込み、発生圧力を自動制御できるものとした。また、校正実施環境なども同時に記録できるようになって	

頁*	行*	変更前	変更後	備考
			いる。校正実施手順（プロトコル）に関しては、従来の持込校正と	
III-167	13	介器の性能や校正実施手順の信頼性を確認した。移送を含む校正の繰り返し性は、	介器の性能や校正実施手順の信頼性を確認した。移送を含む校正の再現性は、	
III-167	14	実験を通して 0.005 % 以下であり、目標不確かさを達成できることが確認できている。また開発したプロトコルを用いることで、一般の校正事業者からユーザに対しても遠隔校正を実施できる見通しが得られた。	実験を通して 0.005 % 以下であり、目標不確かさを達成できた。また開発したプロトコルを用いることで、一般の校正事業者からユーザに対しても遠隔校正を実施できる見通しが得られた。ここで確立した圧力遠隔校正のモデルを参照することで、校正事業者による遠隔校正の実用化が期待される。	
III-167	21	標準トレーサビリティの拡充されていくことが期待される。	標準トレーサビリティの拡充が期待される。	

以上