

「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 11 月 19 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"> ・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。 ・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)。 ・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)。 ・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。 <p>(2) 事業目的の妥当性</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・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。 ・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。 		

・研究開発マネジメントについて

事業の目標	<p>(1) 研究開発目標の妥当性</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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、ICT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。
	<p>(2) 研究開発計画の妥当性</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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と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								
	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)	会計・勘定	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"> ・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。 ・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。 ・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。 ・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。 ・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。 ・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。 	
	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"> ・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。 ・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。 ・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 	

	<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"> ・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 ・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 ・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 ・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 	
<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) の登録の事を表す。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。
OCXO	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の一つ。
（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 ± 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 1×10^{-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 0.08×10^{-6} [1/K]である。
低熱膨張材料	熱膨張係数の絶対値が 1×10^{-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 0.08×10^{-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、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、NEDO 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 JCSS¹の計測標準の種類から 9 量目 12 種類(内、2 つは第期の平成 18 年度から)を NEDO が選び、第 1 期として 5 年間で約 11.3 億円程度、及び第 2 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 1 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 2 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)

¹ 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、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、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箇所で計測された量目は、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、NIST²を中心にSIMnetと称する遠隔校正の研究が進みつつある。

² 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PTB³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、NPL⁴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EUROMET⁵としてGPS⁶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APLAC⁷やILAC⁸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。

³ Physikalisch-Technische Bundesanstalt : ドイツ物理工学研究所

⁴ National Physical Laboratory : 英国国立物理学研究所

⁵ 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。

⁶ Global Positioning System

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

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

1-2.2 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 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

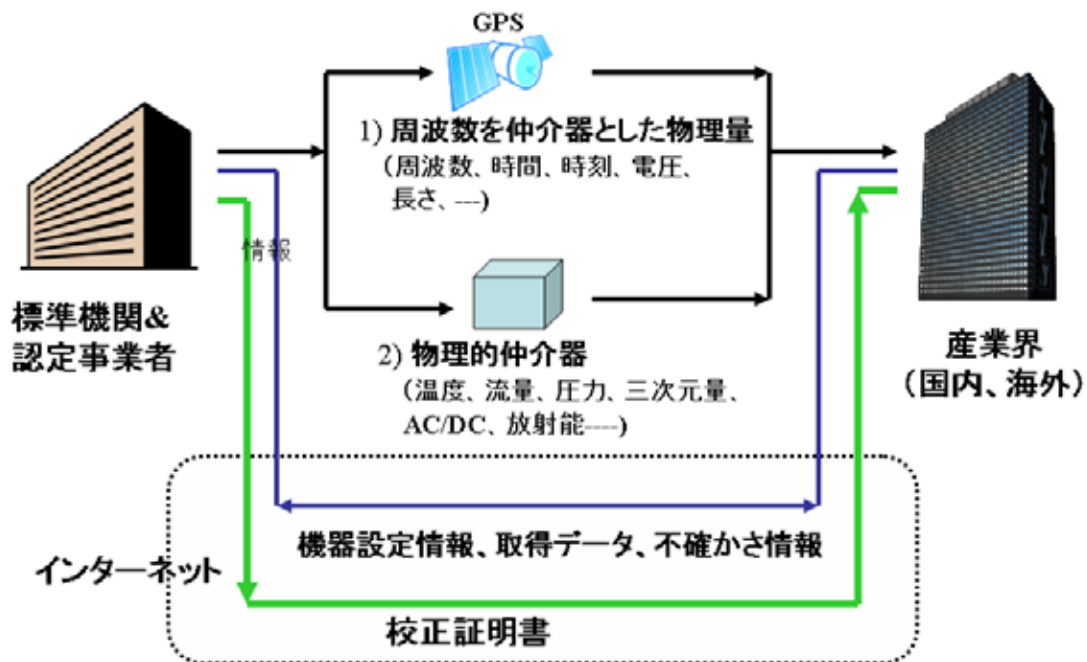


図 - II-1 計量器校正情報システム(e-trace)の概念図

平成 13 年度から 17 年度末までの第 1 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 2 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 2 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 2 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 1 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（コピキタスな）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（ 1×10^{-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

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 μm 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"目"の高精度化）、周波数の安定化（光コムドリフトの抑制）、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 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。

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 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 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 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 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 μ 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 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 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^2 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^2 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 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、産業現場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 1 期、平成 18 年度から平成 20 年度にわたる第 2 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（コピキタスな）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

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ーの周波数安定化、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ー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。

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り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 -1. 実施スケジュール

テーマ名	第 期前期 (H13～15)	第 期後期 (H16～17)	第 期 (H18～20)	備 考
1. 時間標準	→	→→	→	
2. 長さ標準				
1) 波長(波長標準) *	→	→		第 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 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

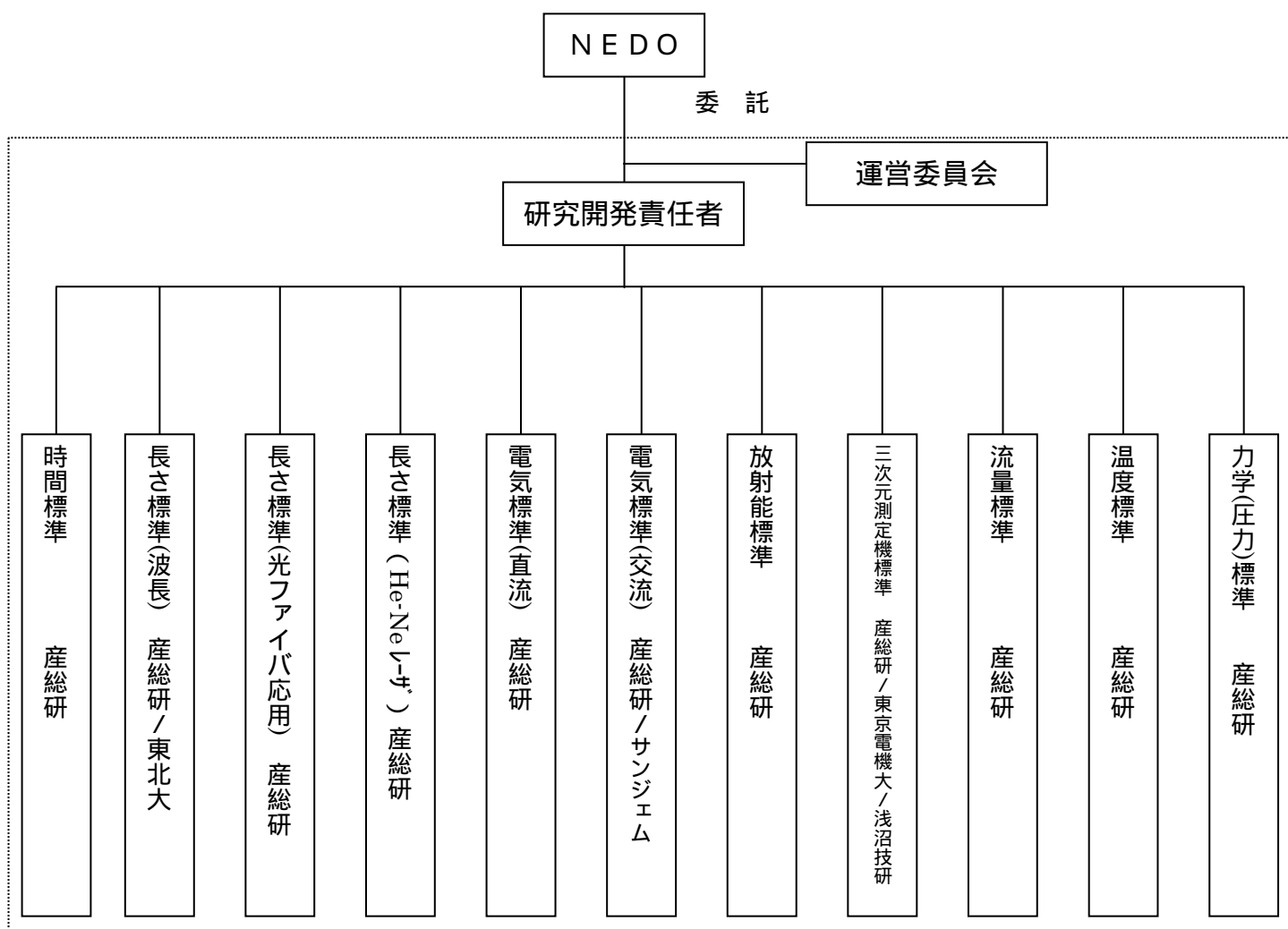
-3.1 研究開発の実施体制

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。

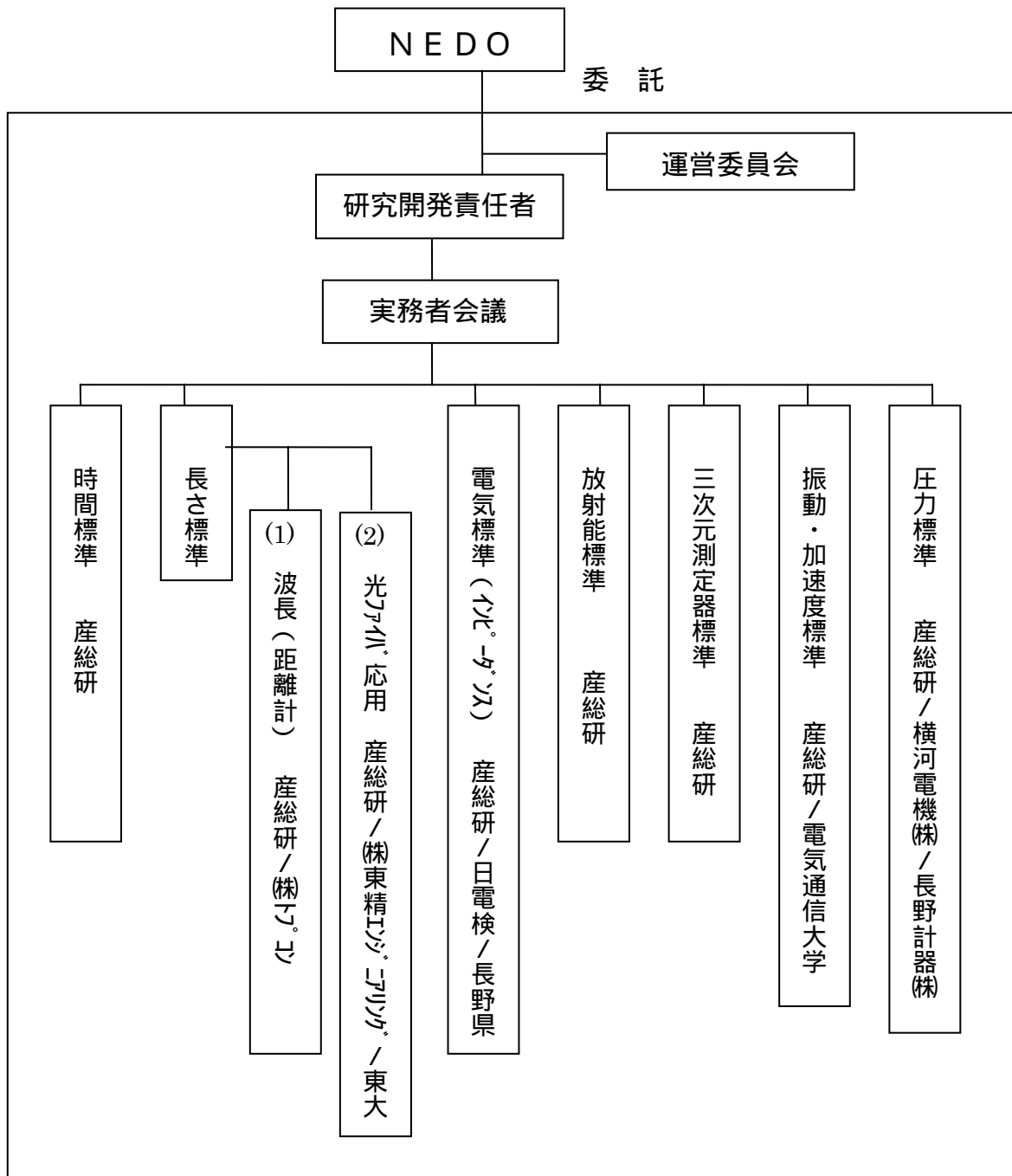
1) 第 期（平成 17 年度まで）の実施体制：

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）
 松本弘一（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	プロジェクトマネージャ
	今江 理人	計測標準研究部門 時間周波数科 周波数システム研究室 室長	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	1)距離標準
	平井亜紀子	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	2) 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	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	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	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	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	振動・加速度標準
小畠 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	圧力標準	

-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 1 期には 4 名、第 2 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 1 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
委 員	
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
事 務 局	
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 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目指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 年度末に前倒して終了した。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。

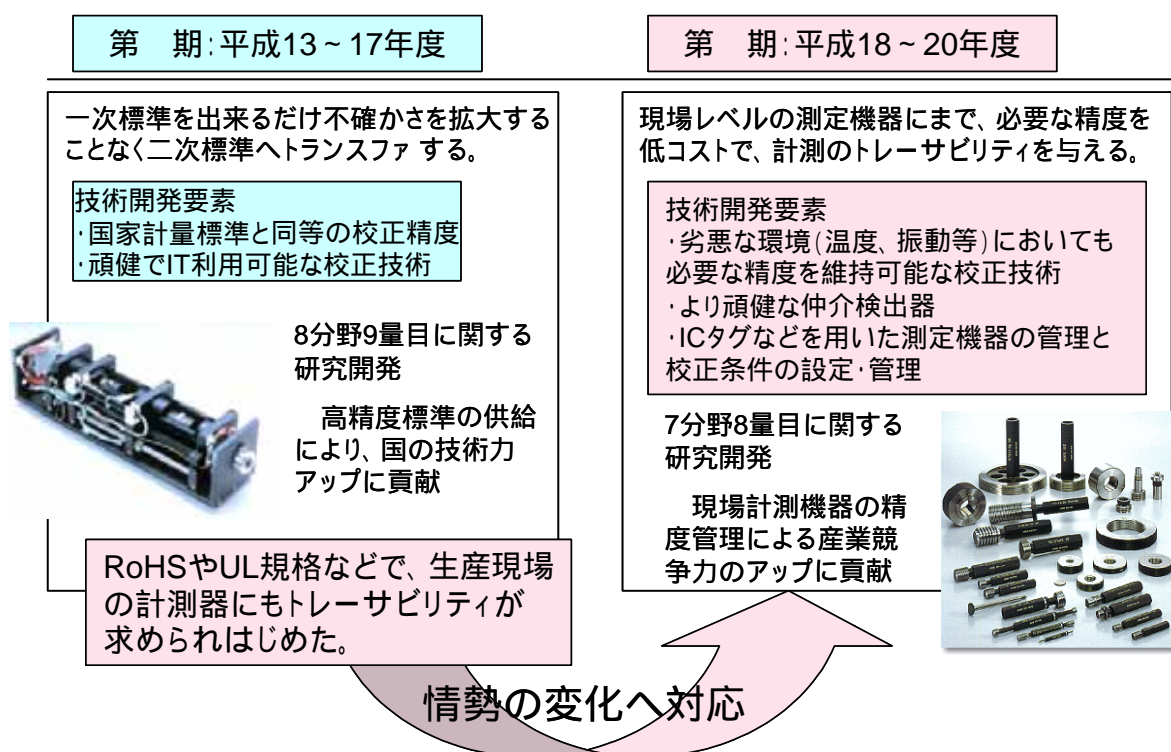


図 -1 情勢の変化に対応した第 期と第 期の開発目標と技術開発要素

即ち、第 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)	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 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 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 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 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ジビリティ・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 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 期 3 年 間 の 事 業 継 続 が 決 め ら れ た。 此 に 伴 い、 18 年 度 の 事 後 評 価 の 替 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けた、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（ <u>ブロックゲージ</u> ）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 1 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 1 期の遠隔校正研究目標達成を目指して事業を推進した。

-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 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 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 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、 - 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 期を含めた事業全体の概要で述べたとおり、第 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 -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 期目標とその達成度

分野	第 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 10^{-13} 台の不確かさで、汎用性の高く（コピキタスな）、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 1×10^{-13} 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。</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 $0.3 \mu\text{m}$ の位相安定性と、位相計限界の周期誤差を実現した。また、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、$2 \mu\text{m}$ 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 $0.2 \mu\text{m}/50 \text{mm}$) 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。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。</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 20mm, 50mm 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 $0.03 \mu\text{m}$ 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 0.3mm 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 200mm において $0.11 \mu\text{m}$、250mm において $0.12 \mu\text{m}$ 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。 $1 \text{kHz} \sim 10 \text{kHz}$ 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 80ppm 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 ($1 \text{kHz} \sim 10 \text{kHz}$ において 80ppm) 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 (144keV, 14.8MeV)、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/s²（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/s² 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 -2 に年度ごとの出願数と
その具体的内容を表 -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 -4 に、プレス発表を表 -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 -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 -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 -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 -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 -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	白田	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	鈴山、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 インピーダンス	佐藤(理) 中村	20
	第 12 回	2008/12/15	光ファイバ応用 放射能標準	平井 佐藤(泰)	11
第 13 回	2009/2/4	振動加速度 圧力標準	白田 小島	26	

表 -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/ア 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（白田）

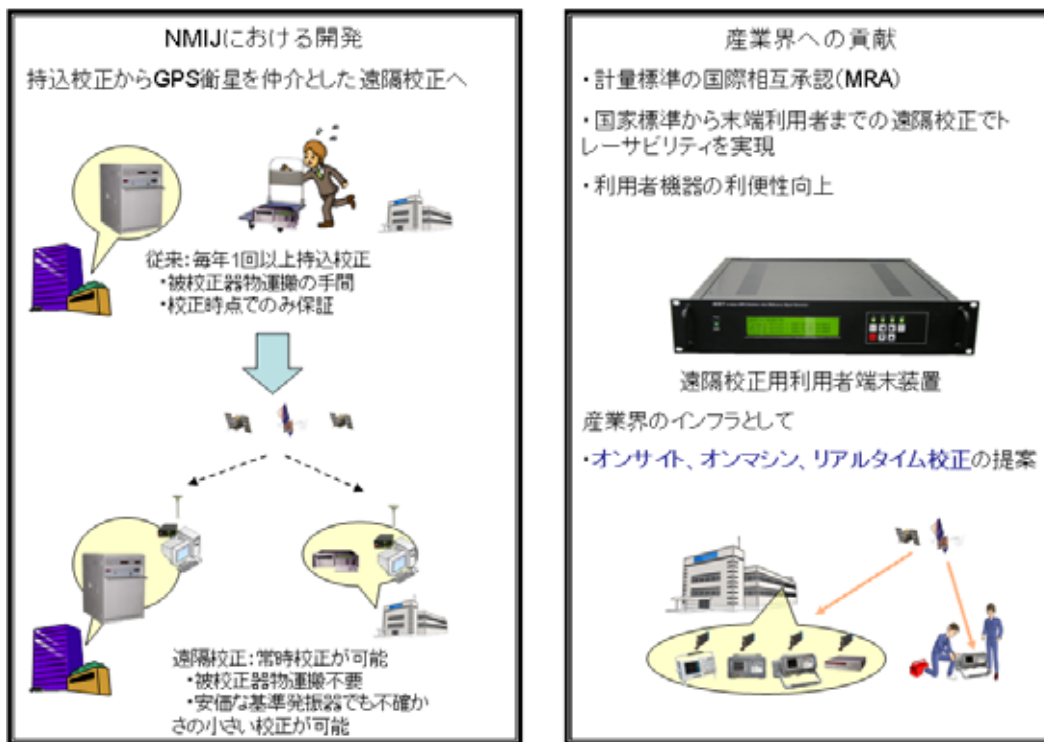
表 -9 . 実証実験

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>jcss : 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 プロトタイプ 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>	

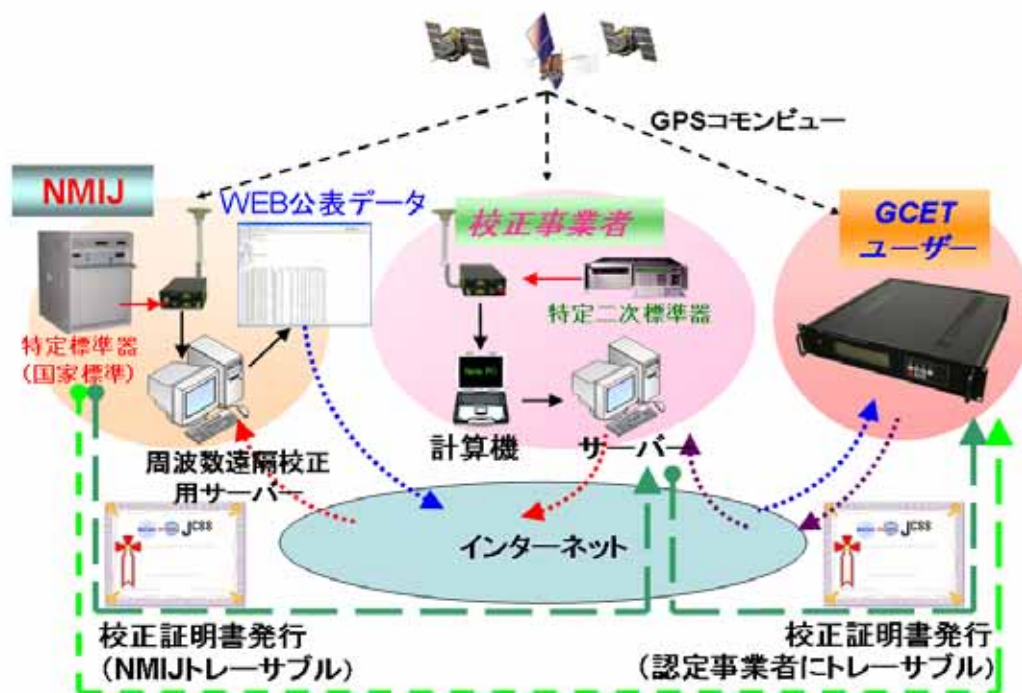
<ul style="list-style-type: none"> ・インダクタンス ・インピーダンス 	産総研-日本電気計器検定所（東京） 産総研-長野県工業技術総合センター（岡谷） 産総研-村田製作所（野洲） 日本電気計器検定所-長野県工業技術総合センター	
4. 放射能標準	産総研-日本アイソトープ協会、仁科記念サイクロトロンセンター、放射線医学総合研究所、日本原子力研究開発機構、韓国標準研究所（KRISS）	依頼試験：5件 （+ jcss3 件を 4 月発行）
5. 三次元測定機標準	産総研-浅沼技研、異機種接続	依頼試験：2件
6. 温度標準	産総研- JEMIC、抵抗温度計・熱電対	
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⁽¹⁾⁽²⁾。

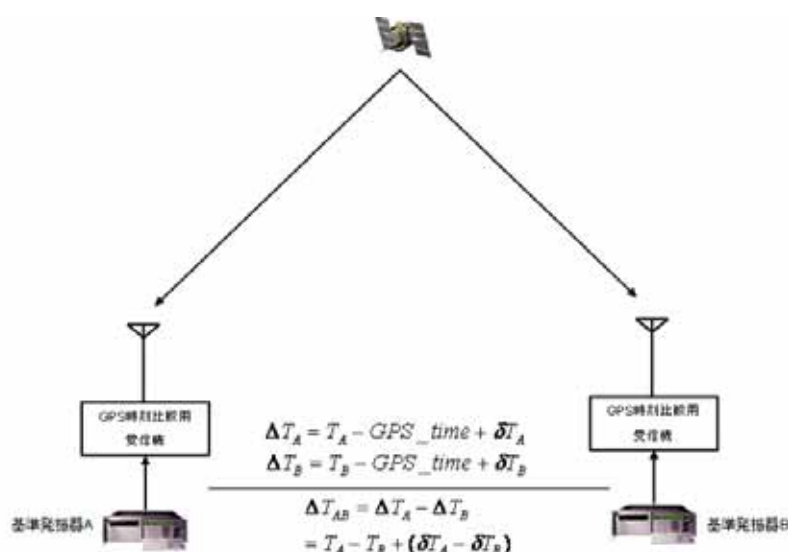


図 2.1-1 GPS コモンビュー法の原理図

(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（コピキタスな）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）。

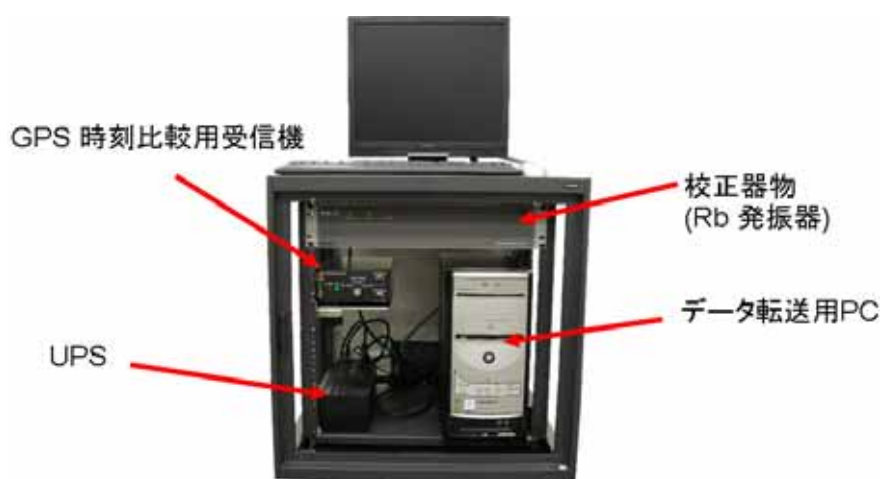


図 2.1-2 校正事業者用周波数遠隔校正システムの一例

(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 - 時間・周波数測定器等 - ”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	1.1×10^{-13}
500 km	1.4×10^{-13}
1600 km	4.9×10^{-13}

この依頼試験での周波数遠隔校正の実績になどから、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、国内数力所（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	L1(1574.42 MHz), 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	CGGTTS 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 (NMIJ-DO 動作) または、GPS time に同期 (GPS DO 動作)
	受信データ転送プロトコル	HTTP protocol
内蔵発振器	ルビジウムタイプ	NMIJ-DO 時 1×10^{-13} @ 1 day (受信環境・設置環境に依存) 3×10^{-11} @ 1 s
	OCXO タイプ	NMIJ-DO 時 5×10^{-12} @ 1 day (受信環境・設置環境に依存) 1×10^{-10} @ 1 s
通信インターフェース		Ethernet (10/100 BASE-T), RS-232C

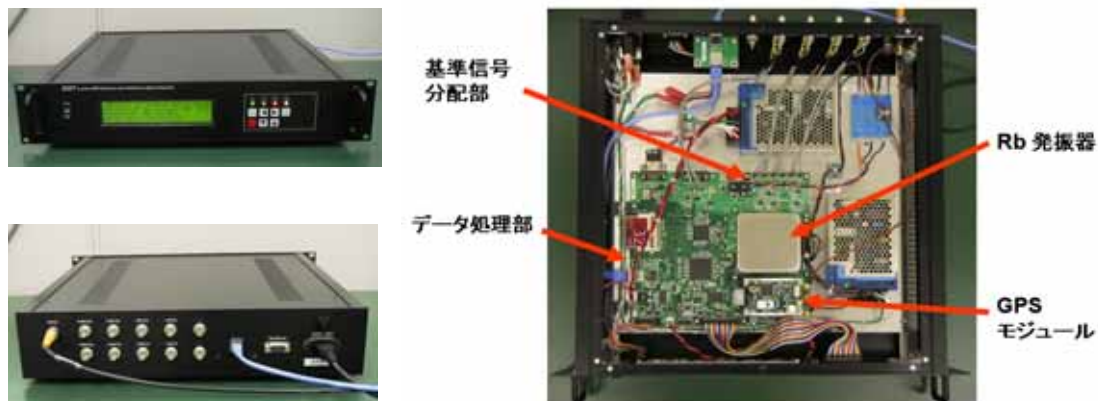
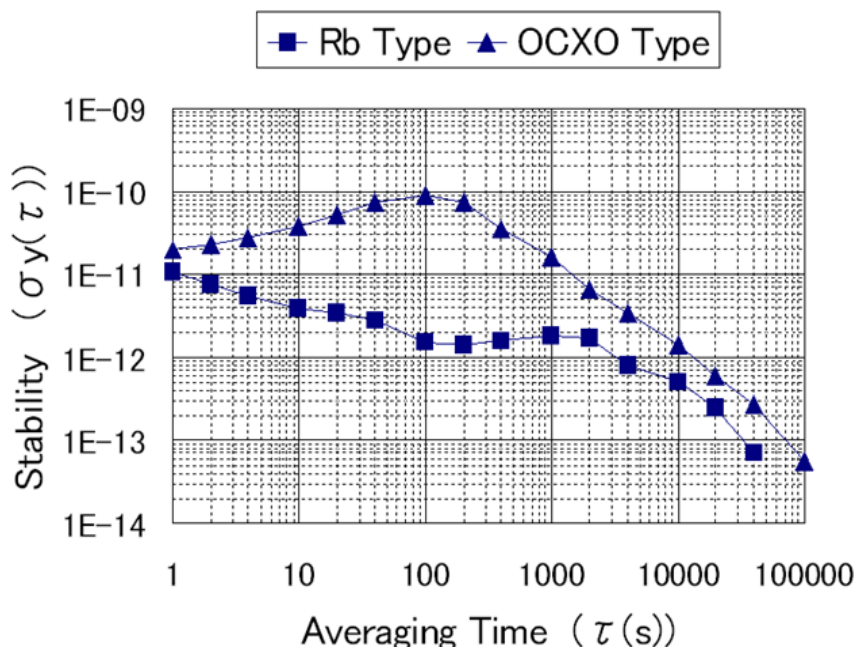


図 2.1-3 開発した利用者端末装置 (GCET) の前面、後面、並びに内部



- 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、 1×10^{-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ンピュータ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

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。

電子計測機器などへの組込可能なプラグイン化

- ・ のより小型化を図ることにより実現可能

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。

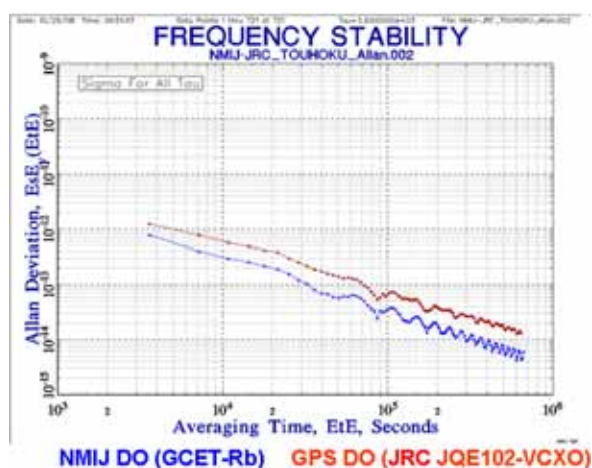
それに加えて、(a)で記した利用者端末装置 GCET を各所に配置して GPS-DO との比

較実証実験を実施した。

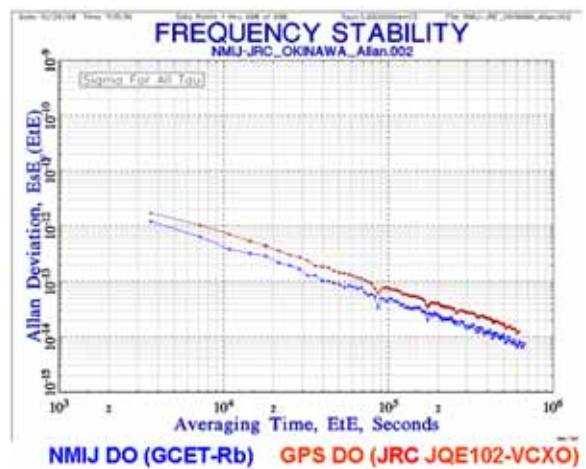
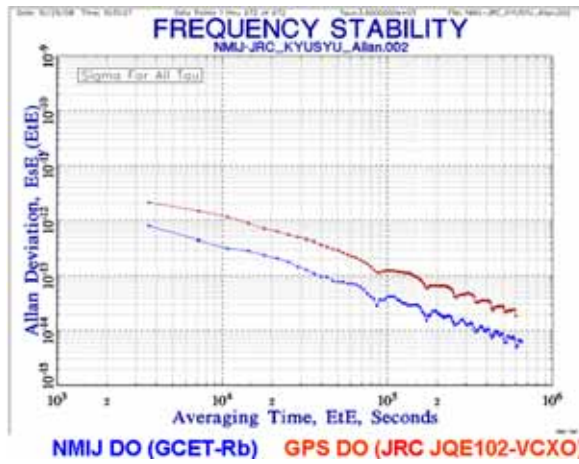
図 2.1-6 に東北（仙台）九州（鳥栖）沖縄における GPS-DO と NMIJ-DO 動作時の GCET の産総研の時間周波数国家標準 UTC(NMIJ)とのコモンビュー比較結果の周波数安定度を示す。図から明らかに、GCET の各所における周波数安定度は、GPS-DO に比べ、優れた値を示しており、コモンビュー処理による UTC(NMIJ)への同期の効果が顕著であることが判る。



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 件ののぼっている。

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。

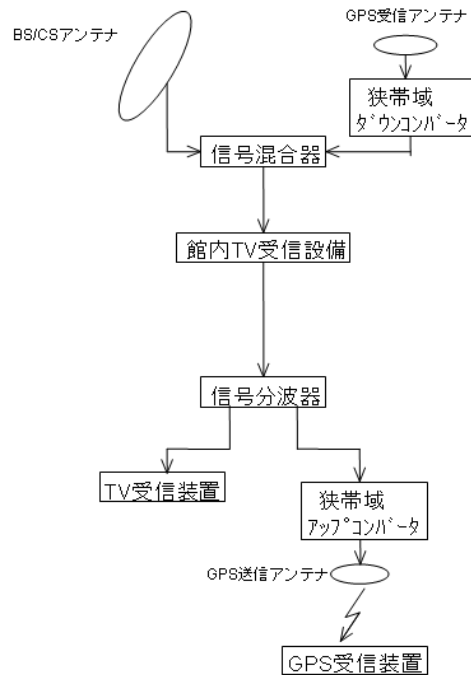


図 2.1-7 TV フィーダ線を用いた GPS 信号再放射システム基本構成

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

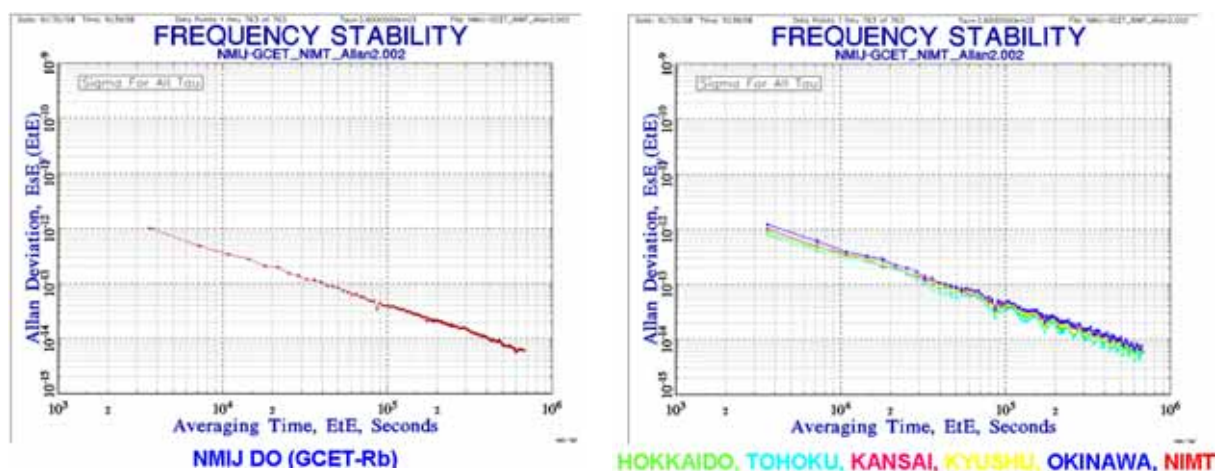
図 2.1-8 に開発したプロトタイプ機器の外観等を示すが、産総研の実験棟で実際に TV フィーダ線を利用して実験室内に信号を再放射して安定に動作することが確認されている。同装置の商用化が協力企業でなされつつあり、GPS を利用した遠隔校正用機器の屋内での安定利用に活用が期待される。

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。

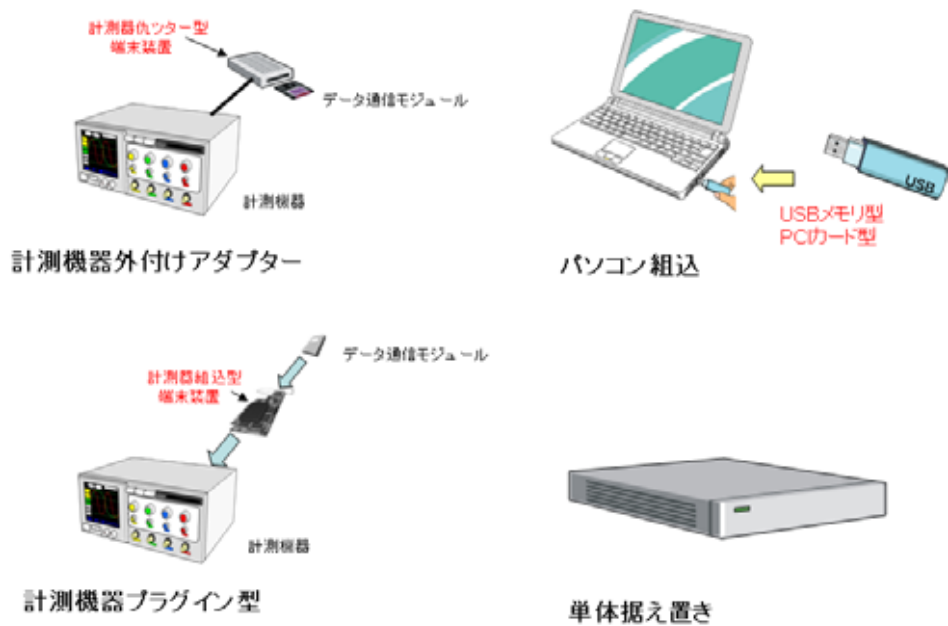


図 2.1-10 小型機器組込型時間周波数遠隔校正用端末装置のイメージ図



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（コピキタスな）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.

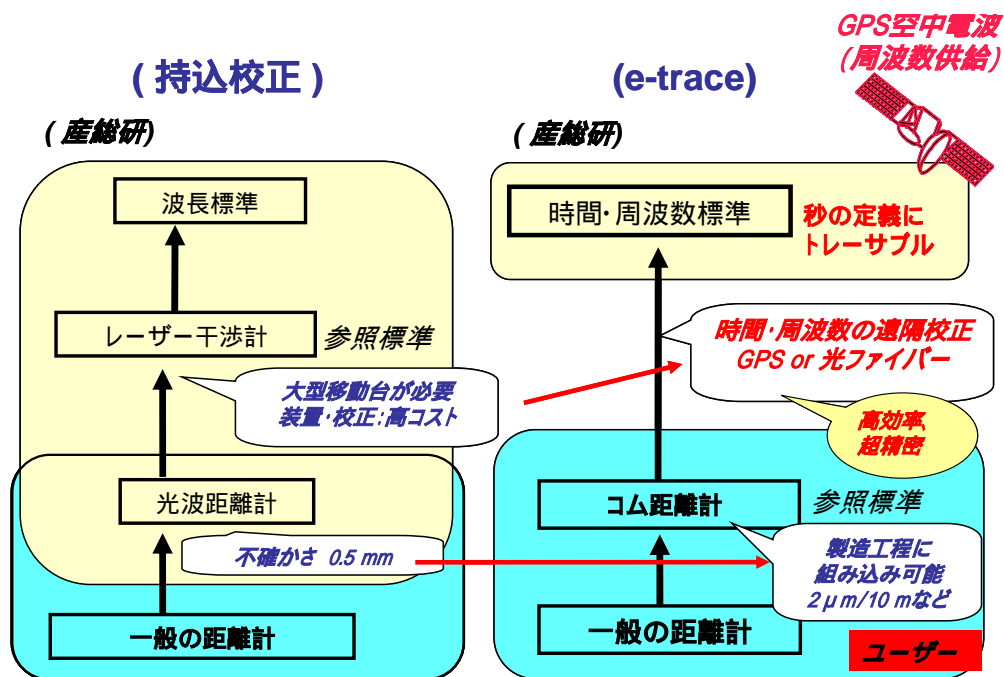
- 2) Tomonari Suzuyama, Michiti Imae, Yasuhisa Fujii, Yusuke Miyamoto, Masaki Amemiya, ”A Frequency traceability system using GPS common-view method for general users,”ATF2008, October 30, 2008.

その他の公表 3件

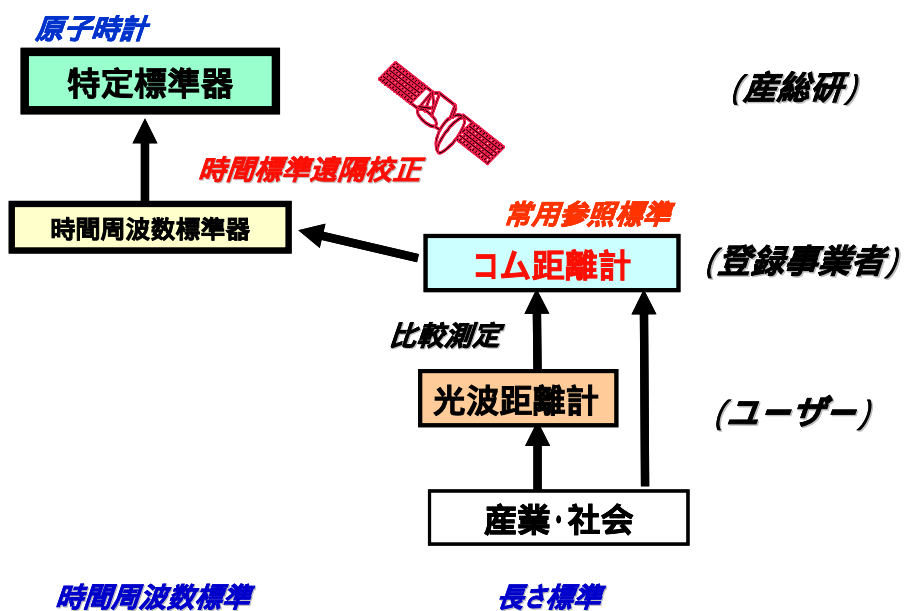
- 1) 西日本総合機械展、小倉（北九州市） 2008年6月26-28日.
- 2) e-trace 成果普及セミナー、産総研（つくば市） 2008年8月27日.
- 3) AEROSPACE2008、横浜市、2008年10月1-4日.

-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ー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ー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 μm 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 μm 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ー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 μm / 10 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櫛状に多数発生する。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。

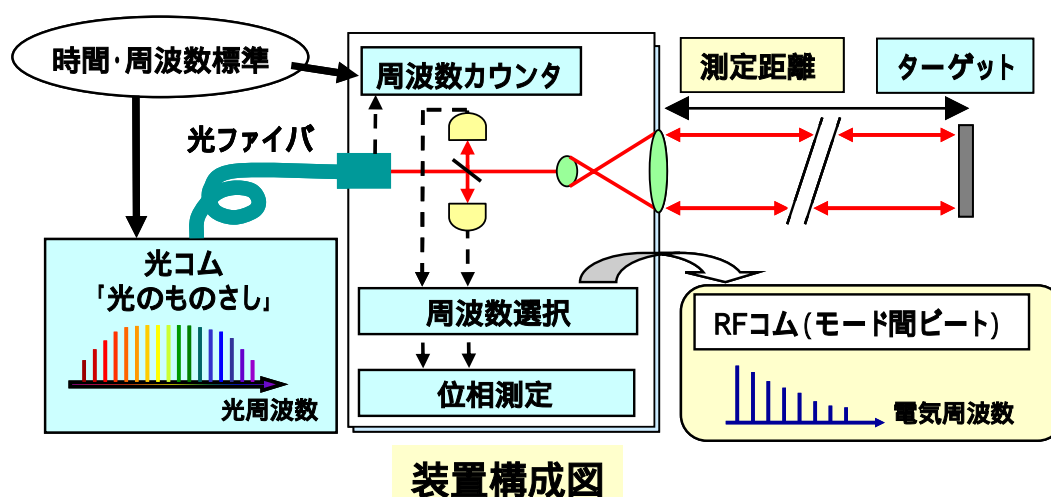


図 2.2.1-1. 光コムを用いた距離計の装置構成図。

(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)。

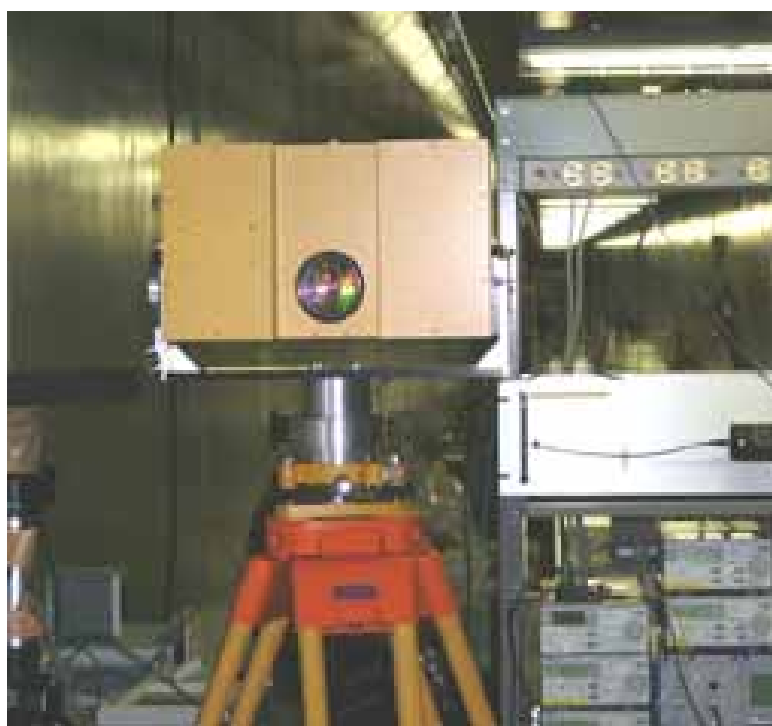


図 2.2.1-2. 改良版 光コム(右ラック)と距離測定装置(左三脚上)

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。

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。

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 5×10^{-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。

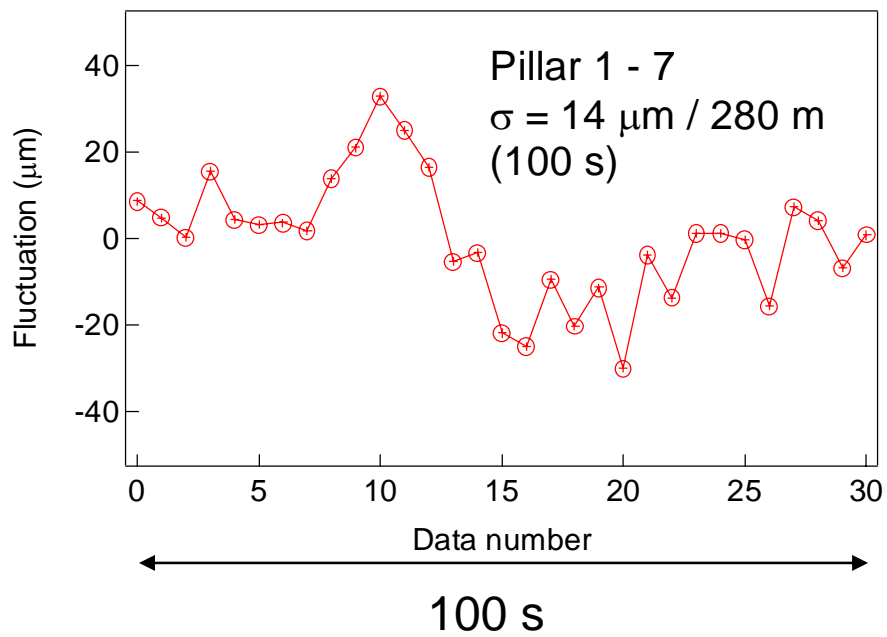


図 2.2.1-4. 屋外測定における安定性。

(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。

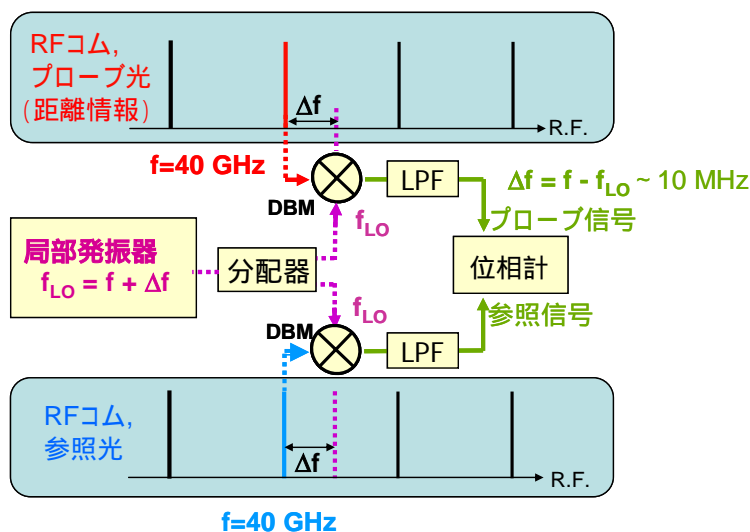


図 2.2.1-5. 測定周波数 40 GHz 位相検出システム

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 μm 、5000 秒においても 0.38 μm 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。

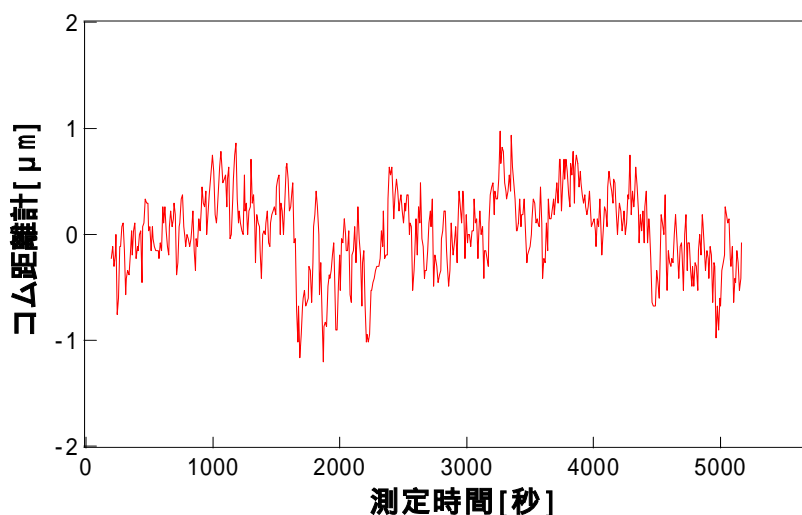


図 2.2.1-6. 距離測定の前止分解能。標準偏差 $0.19 \mu\text{m}$ (500 秒)、 $0.38 \mu\text{m}$ (5000)。

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の前周期に当たる 3.75 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 μm) 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が問題となっている。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 μm 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 μm 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、低線膨張鋳造品ノビナイト(線膨張係数: 2.5×10^{-6} mm/)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

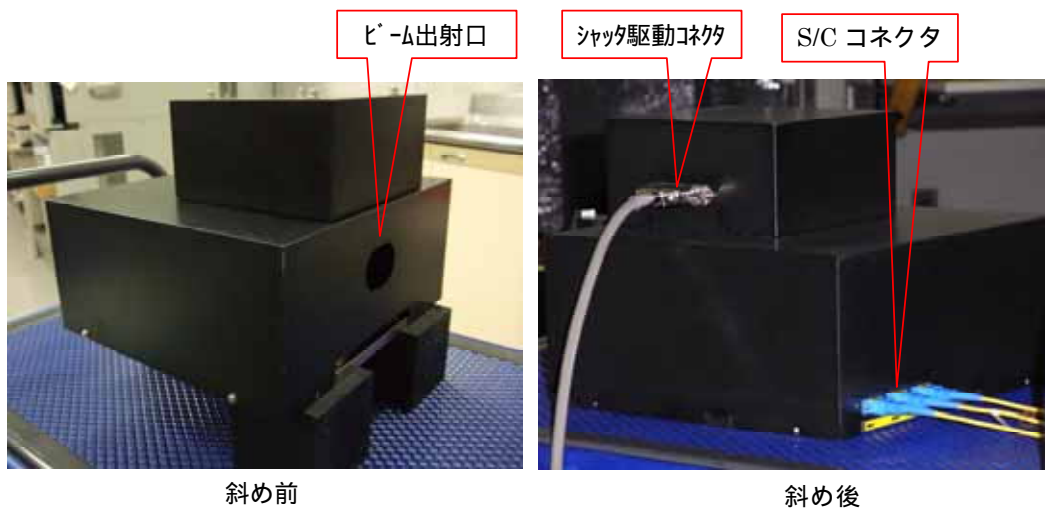


図 2.2.1-8. 分離型距離計の光学系

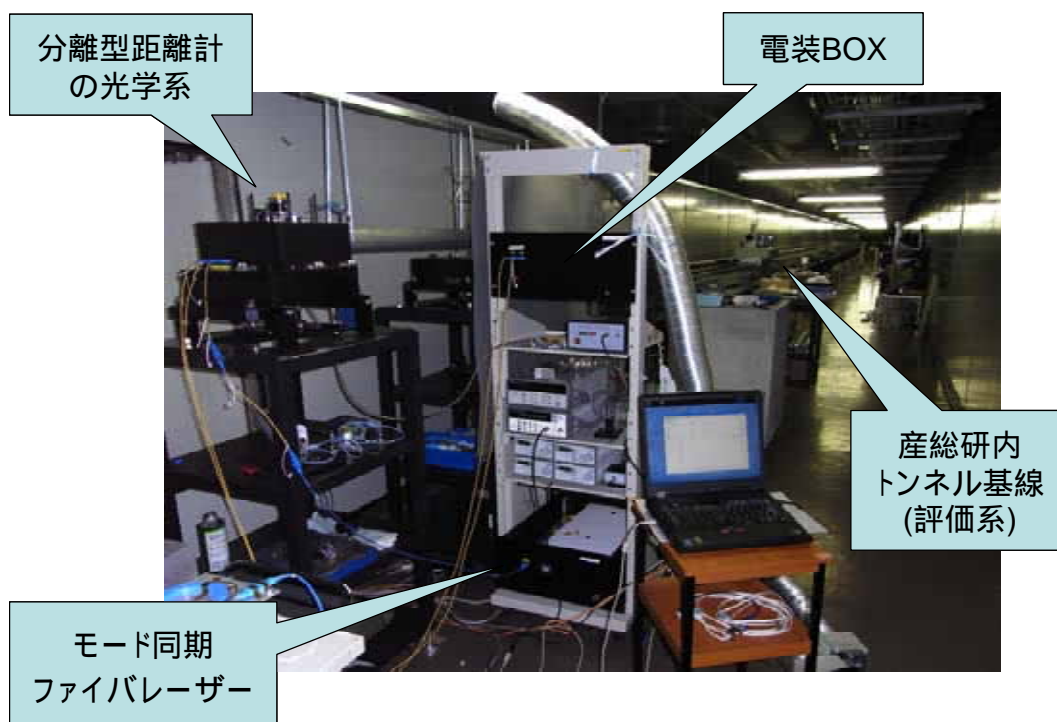


図 2.2.1-9. 分離型距離計と評価システム

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 μm、日間変動 0.02 μm)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 μm 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 μm、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。

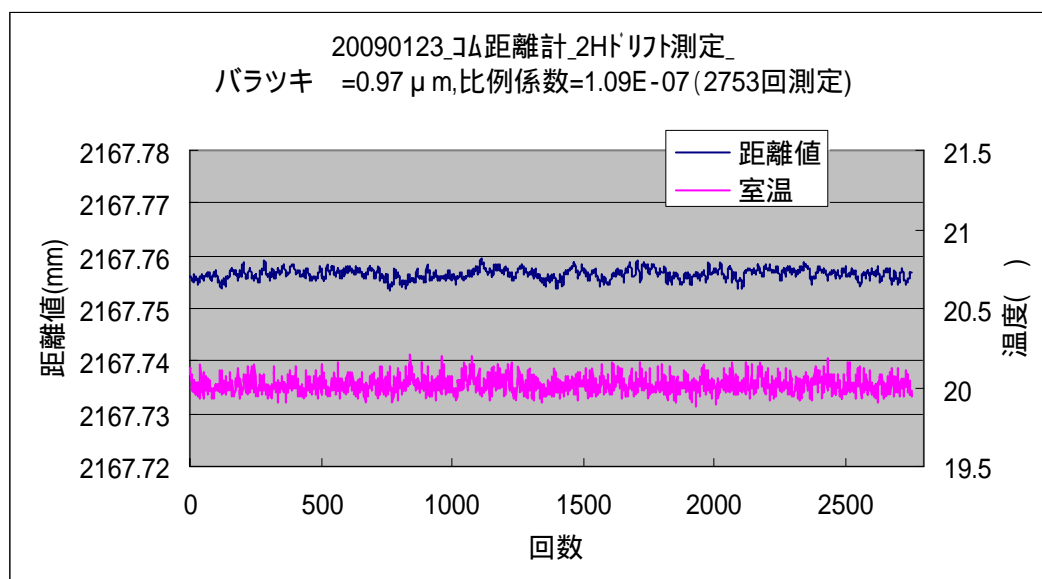


図 2.2.1-10. 安定性

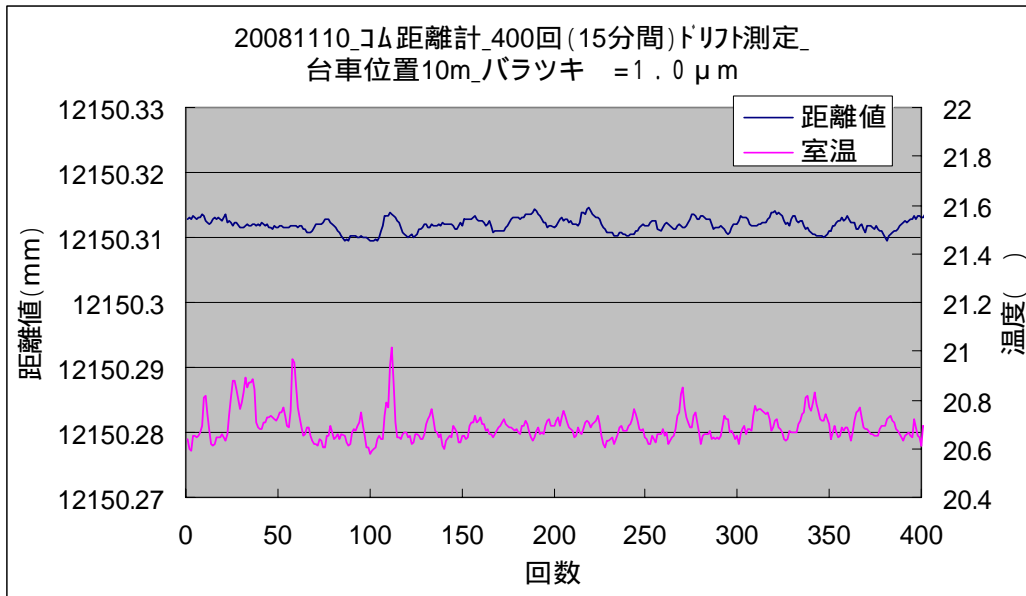


図 2.2.1-11. ドリフト測定 (台車位置 10m)

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 μm 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 mm を 2 mm ステップで測定した結果、一周期 15 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 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。

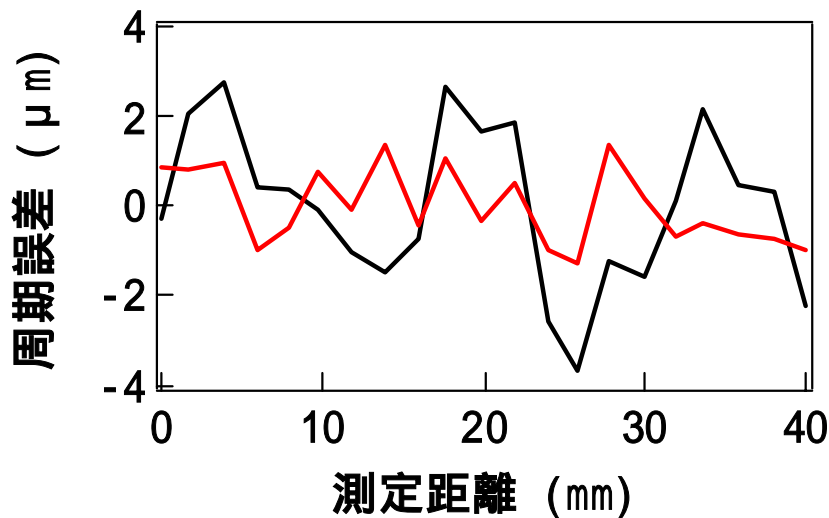


図 2.2.1-12. 位相計回路に起因する周期誤差のキャンセル機構。
(黒：キャンセル無し、赤：キャンセル後)

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。

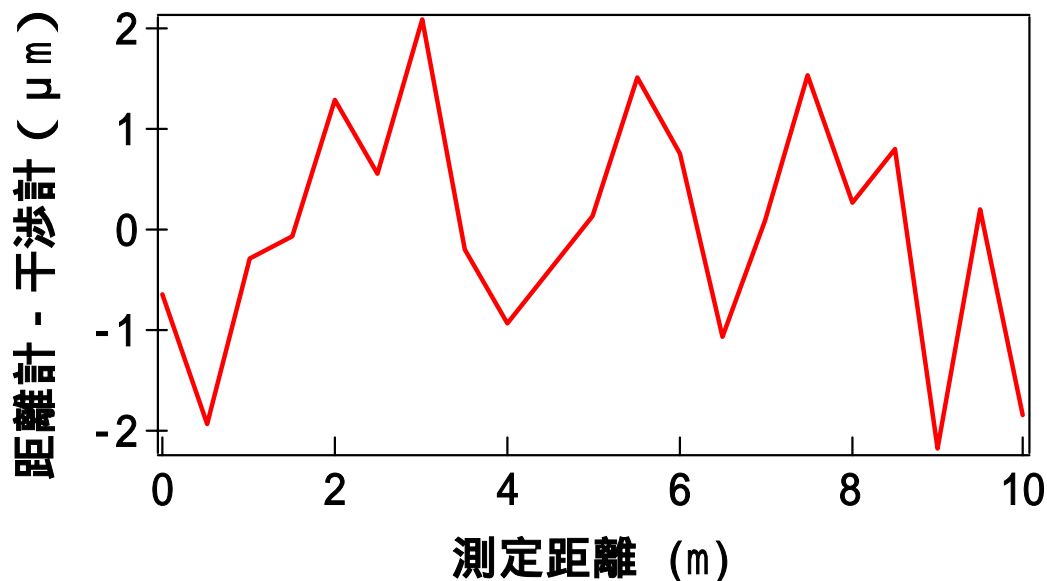


図 2.2.1-13. 参照標準（光波干渉計）との測定比較。

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 ± 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 ± 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 μm 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

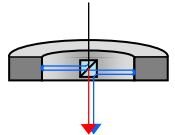
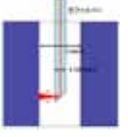


口頭発表 7 件

- 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.

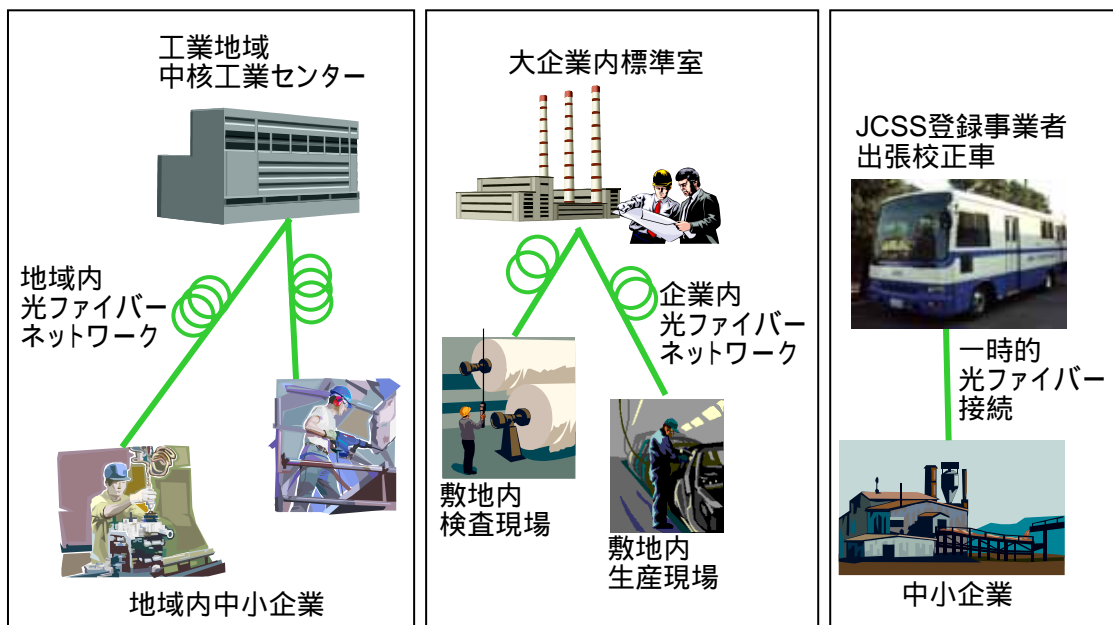
その他の公表 1 件

- 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.

-2.2.2 光ファイバ応用

<p>NMIJ</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>社会・産業界への貢献</p> <ul style="list-style-type: none"> ・国際的相互承認 ・産業界のインフラとして ・速やかな標準供給サービス ・リアルタイム校正による機器の高精度化 ・新規校正技術の提供 
--	--	---

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に加え、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、20、および 50 のリ

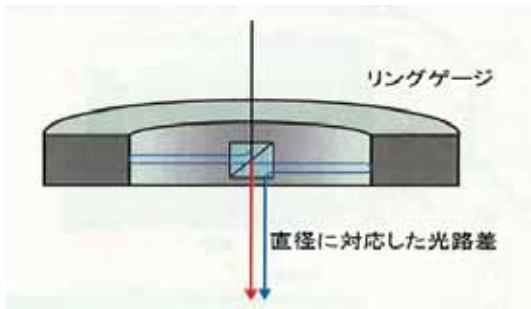


図 2.3-1 リングゲージ内の光路

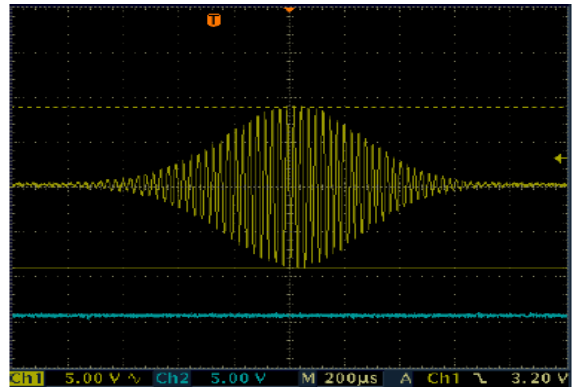


図 2.3-2 リングゲージ干渉信号

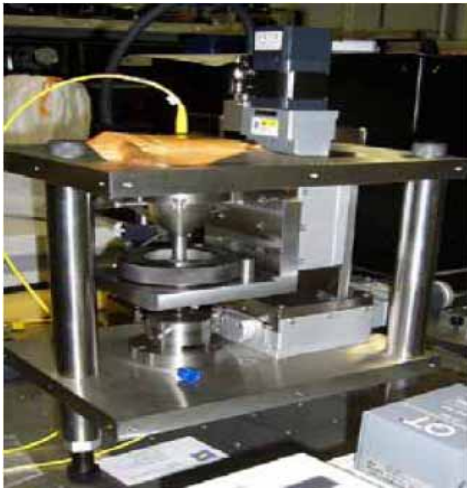


図 2.3-3 試作リングゲージ測定干渉計部

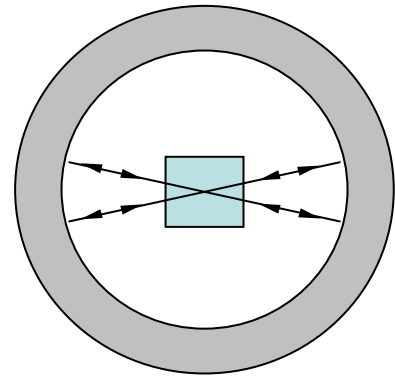


図 2.3-4 円筒レンズによる集光

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、3 mm以下の微小内径への対応のため、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による測長誤差があるため、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 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

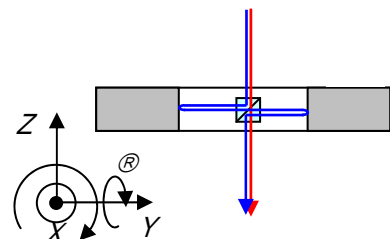


図 2.3-5 リングゲージの調整軸

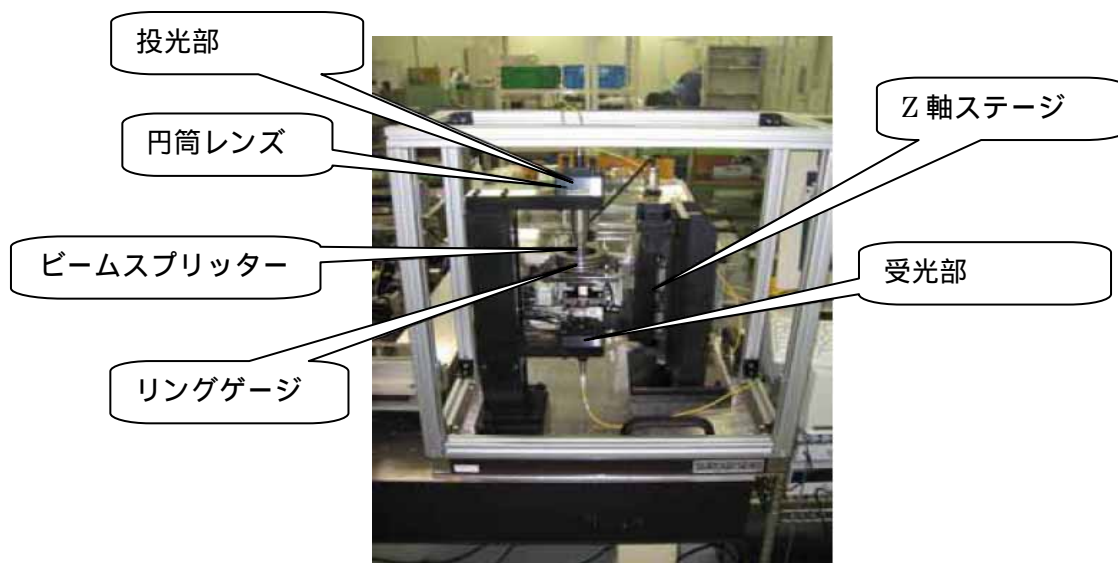


図 2.3-6 改良型リングゲージ測定干渉計部

ジ、上記ビームスプリッターからの光がリングゲージ測定面 軸に対して平行に入射するための 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 μm 、 軸、 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、 軸、 軸は ± 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リニア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】

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。

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 2.3-7 標準干渉計部全景

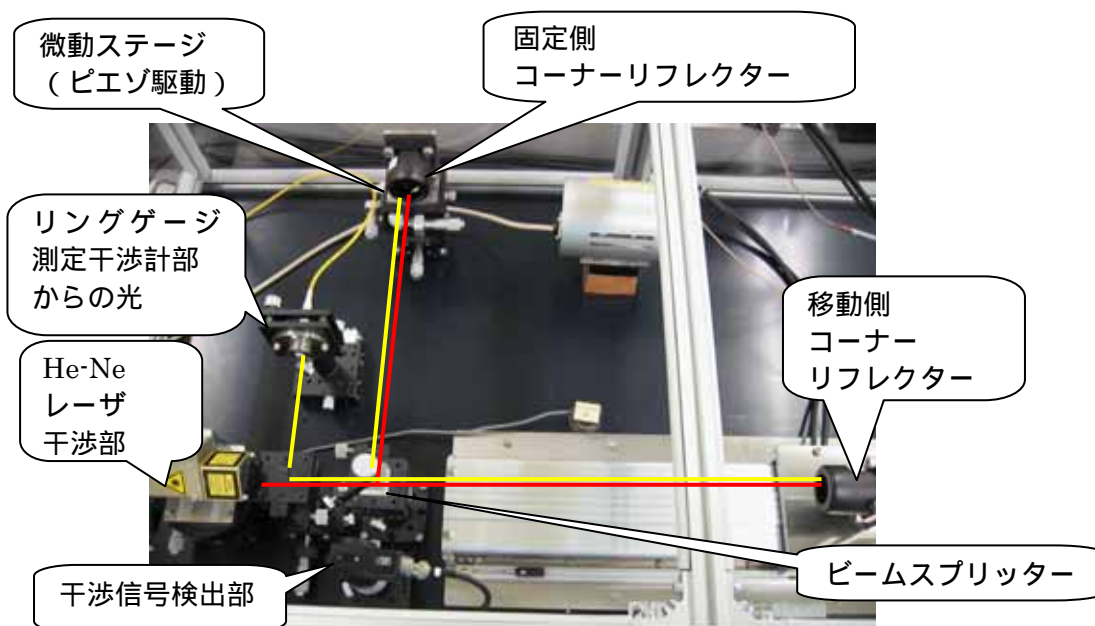


図 2.3-8 標準干渉計部 (コモンパス光学系)

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)

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

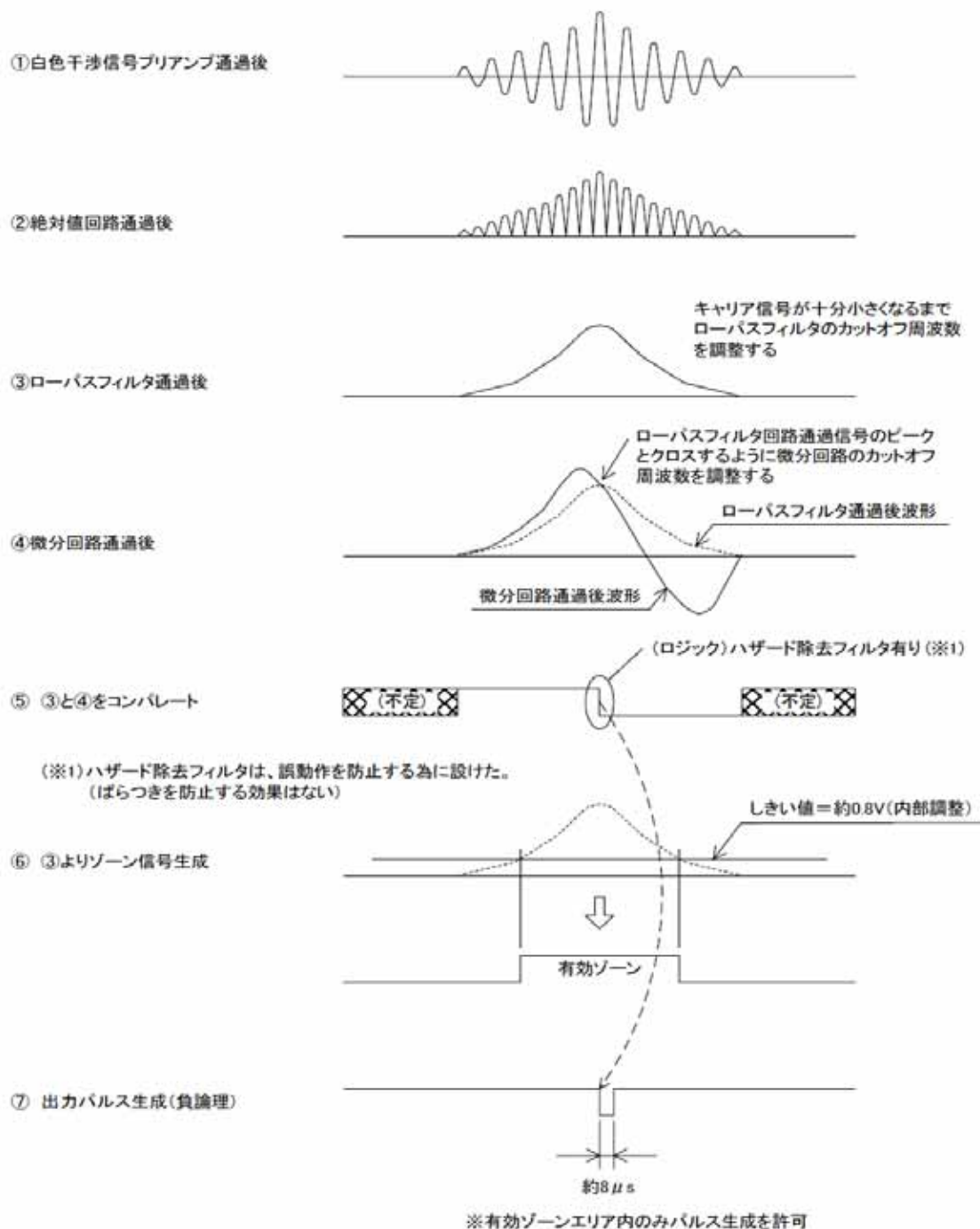


図 2.3-9 ピークトリガ検出回路動作原理

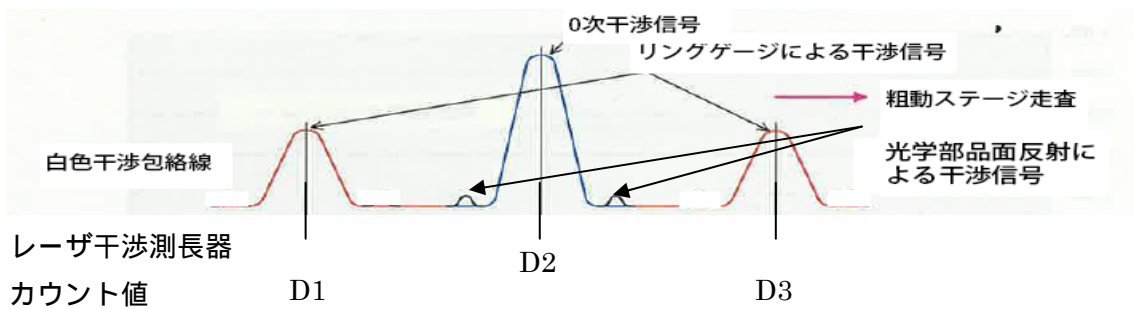


図 2.3-10 白色干渉信号（0次とリングゲージからの反射）

するように位置決めする。

リングゲージ測定干渉部の X、Y、
Z 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）。

次に Z 軸を移動させて、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）。

標準干渉計部のピエゾステージを停止する。

【測定】

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）。

繰返し測定が必要な場合は、上記「 $D1$ 、 $D3$ 」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。

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 ~ 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

研究成果の概要（委託先；東京大学；平成20年度のみ）

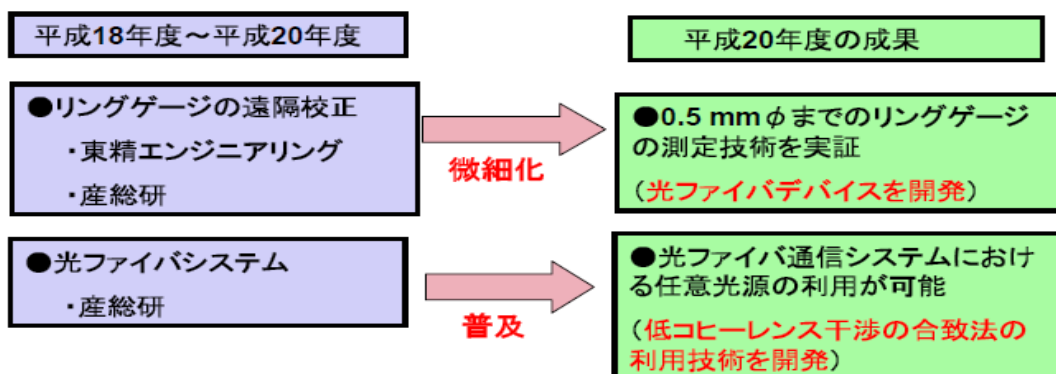


図 2.3-11 研究成果の概要

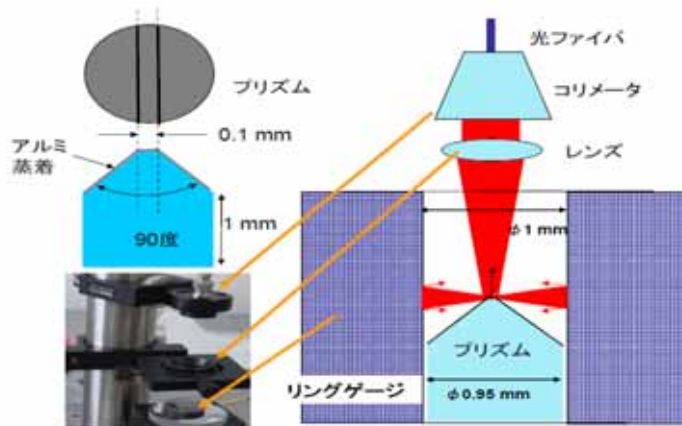


図 2.3-12 プリズム型測定干渉計

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、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）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、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

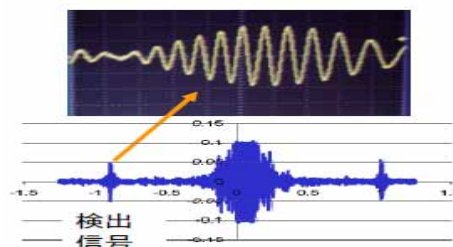


図 2.3-13 光電検出信号（1 mm ゲージ）

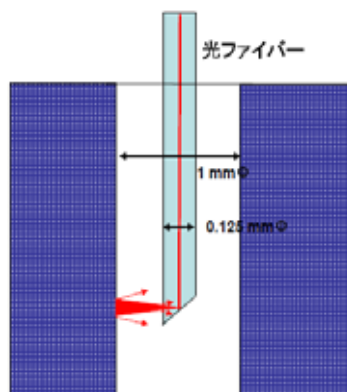


図 2.3-14 光ファイバー型測定干渉計

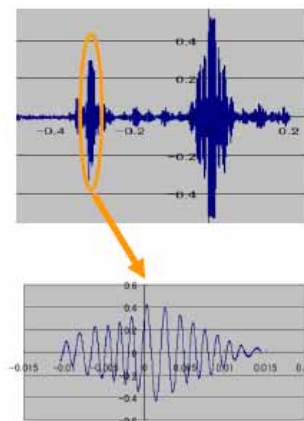


図 2.3-15 検出信号

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。

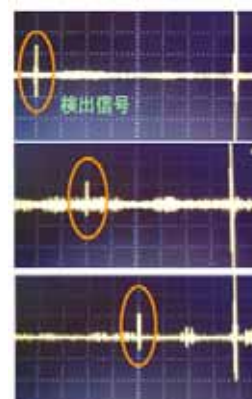


図 2.3-16 BNC コネクタの内径信号

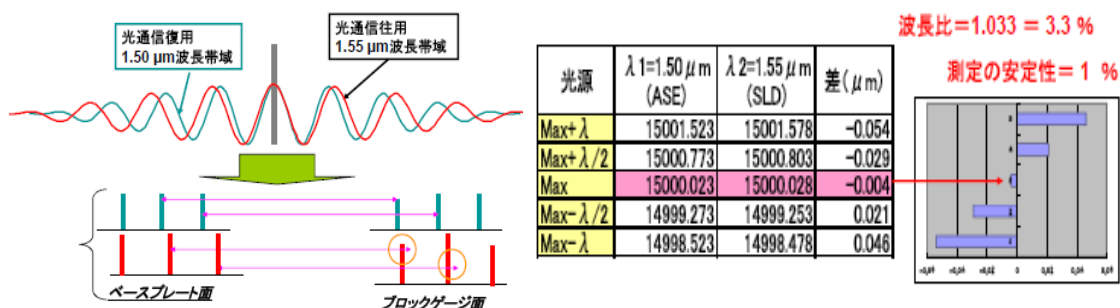


図 2.3-17 低コヒーレンス干渉の合致法の開発

(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幅広く利用されており、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

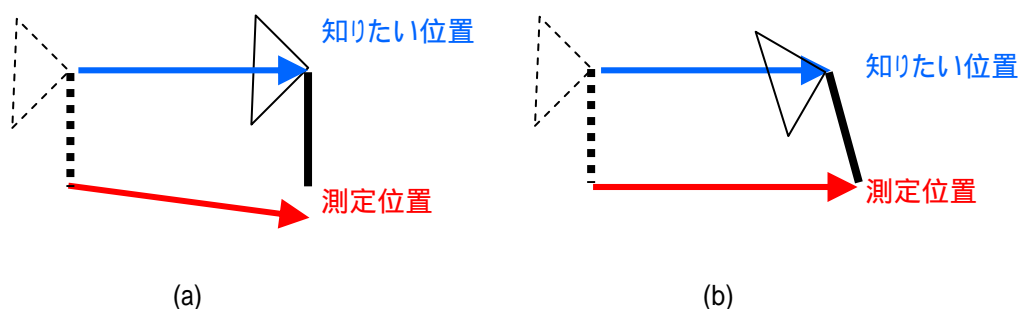


図2.3-18 リニアスケール取り付け時アライメントによる不確かさ原因の例。
(a) ミスアライメントによるコサイン誤差、(b) 軸オフセットによるアッベ誤差

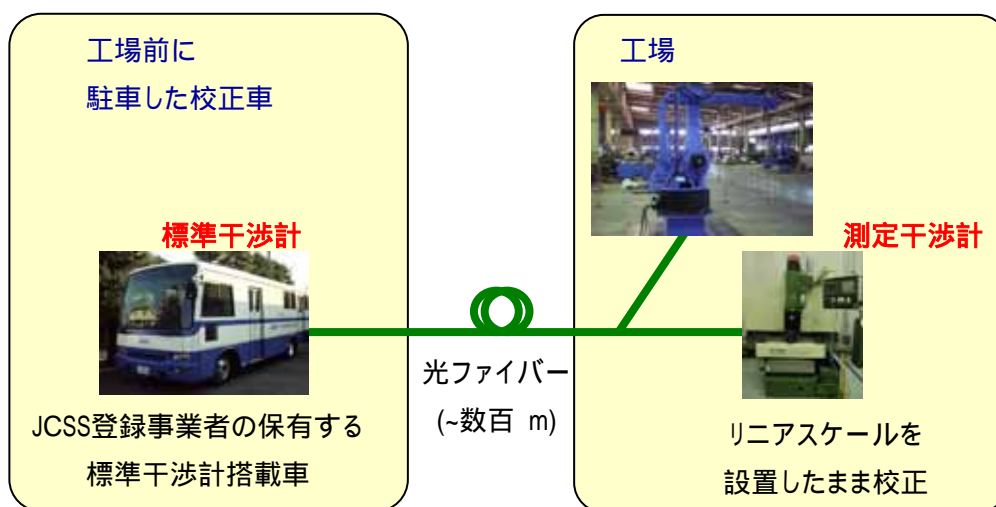


図2.3-19 工作機械等のin-situ遠隔校正

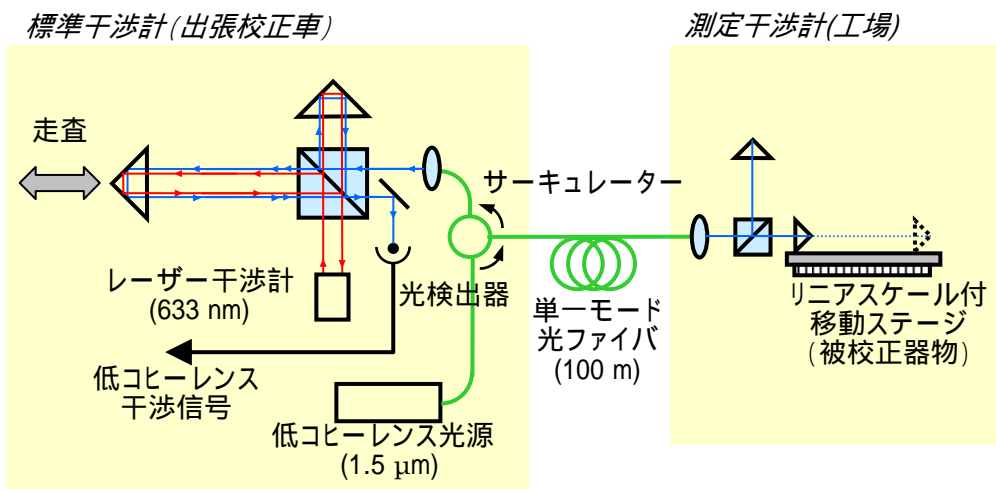


図2.3-20 提案システム光学系

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 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 から 35 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

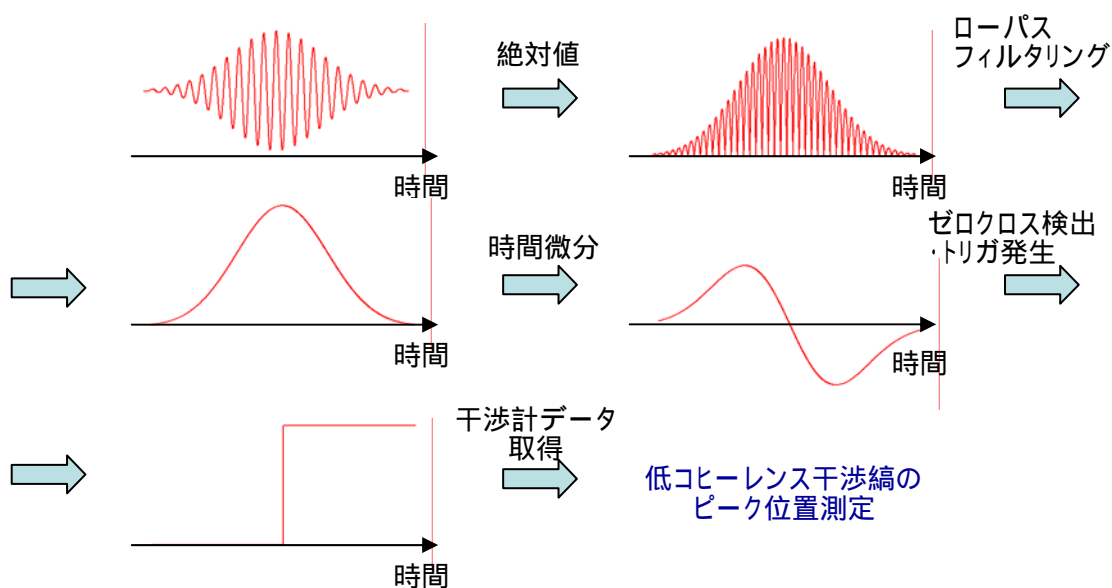


図2.3-21 低コヒーレンス干渉縞のリアルタイム処理

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、レジアスエース（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。

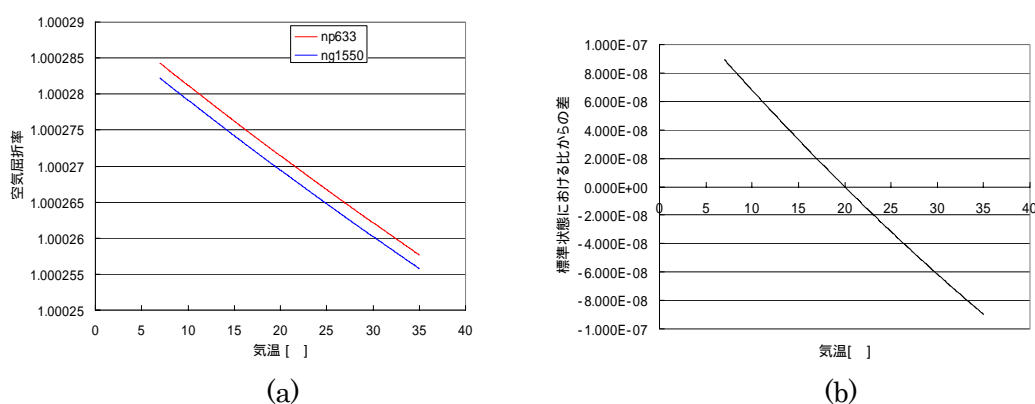


図 2.3-22 空気屈折率への温度の影響。(a) 633 nm での位相屈折率と 1550 nm での群屈折率の温度依存性、(b) 633 nm での位相屈折率と 1550 nm での群屈折率の比の温度依存性

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 から 20.6、標準干渉計の平均気温は 7.4 から 13.0 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、どちらとも、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 $5\ \mu\text{m}$ 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

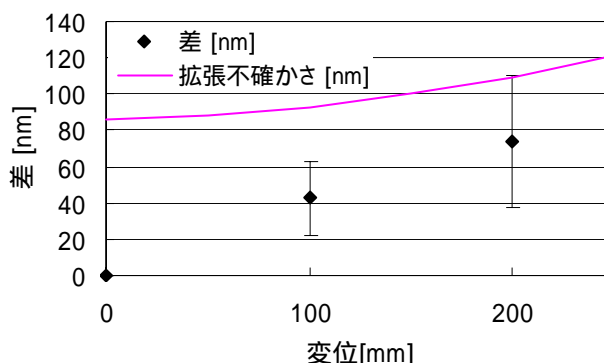


図 2.3-23 実験室内における実験結果。ステージ変位に対する開発システムとレーザ干渉計との測長結果の差を示す。エラーバーは 10 回の測定の標準偏差を示す。



(a)



(b)



(c)

図 2.3-24 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 20 mm (19.99946) と 50 mm (50.00083) の 25 回繰返し精度検証を行った結果、繰返し精度は 50 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

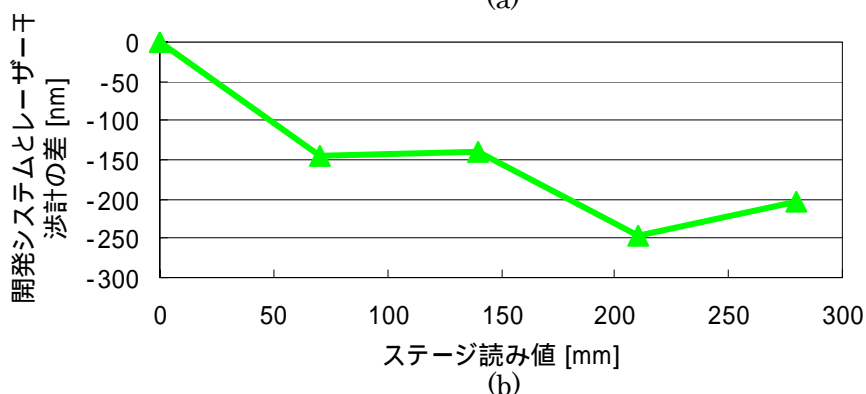
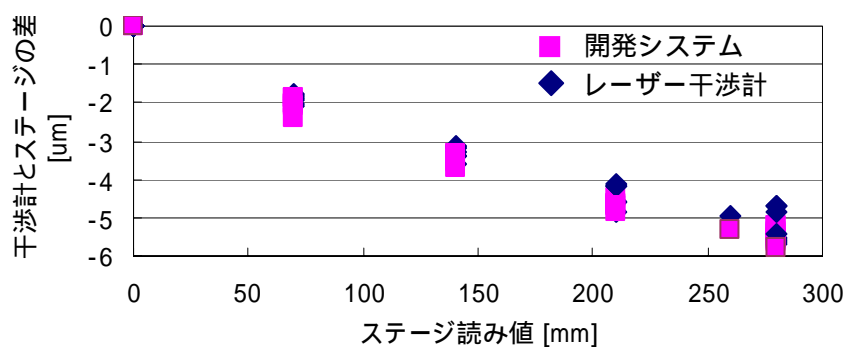


図 2.3-25 工場における工作機械の in situ 校正実験結果。(a)ステージ内蔵リニアスケール読み値に対する開発干渉計、レーザー干渉計の測長結果。(b)ステージ内蔵リニアスケール読み値に対する開発干渉計とレーザー干渉計の差。

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 250mm 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 633nm 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、(韓国濟州島、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 ()” 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)

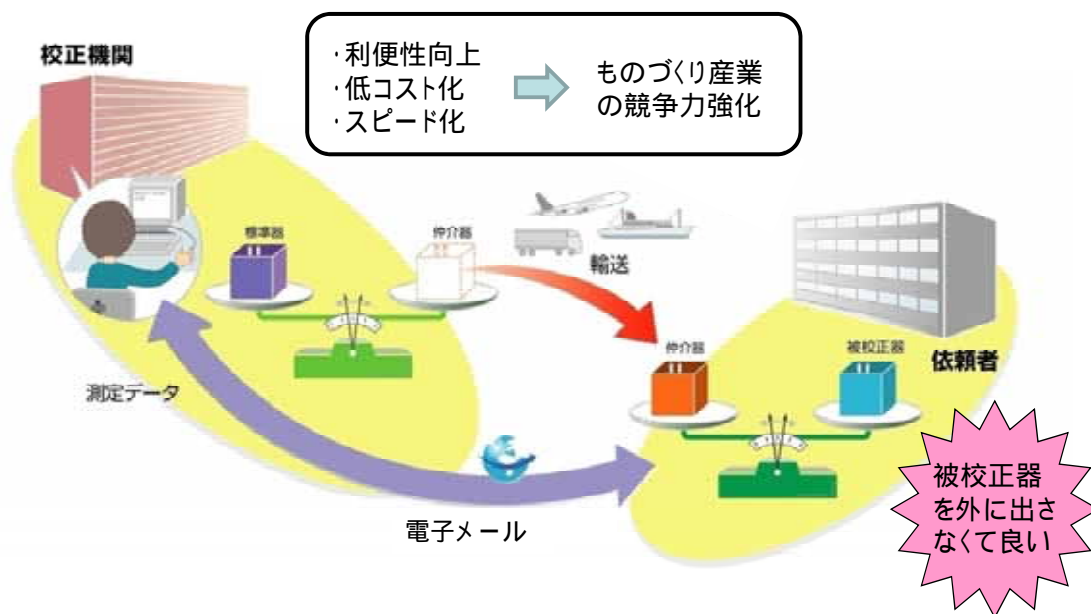
- 1) 松本弘一, “日本の計量標準の現状と今後”, M & E, 2008 年 8 月号, pp.94-98.
(査読あり)
- 2) H. Matsumoto, K. Sasaki, A. Hirai, “Remote Measurement of Refractive Index of Air Using Tandem Interferometer over Long Optical Fiber,” Jpn. J. Appl. Phys., Vol.47, No.9, 2008, pp.7386-7389.
- 3) H. Matsumoto, K. Sasaki, “Remote Measurements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

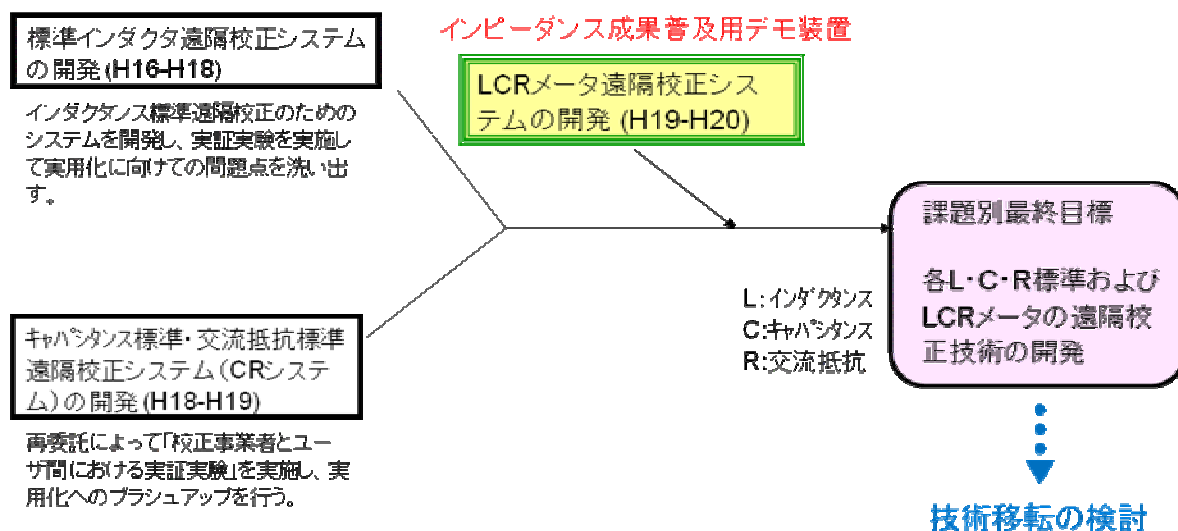
- 1) A. Hirai, J. Kitta, F. Kobayashi, K. Sasaki, H. Matsumoto, “Remote and In-Situ Calibration of Linear Scale by Low-Coherence Tandem Interferometer,” CLEO/QELS2008, San Jose, 2008 年 5 月 5 日.
- 2) 松本弘一, ”日本の計量標準の現状と今後 / e-trace”, 第 5 回日・韓・中 計量・測定協力セミナー, 2008 年 5 月 25 日, 東京国際展示場.
- 3) 平井, 橘田, 松本, ”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() - チャ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が大きいの。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、これらの電氣量に係る標準器、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、遠隔校正のフィジビリティスタディとして、キャパシタンス 0.1 μ F、インダクタンス 10 mH、交流抵抗 1 k Ω 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。

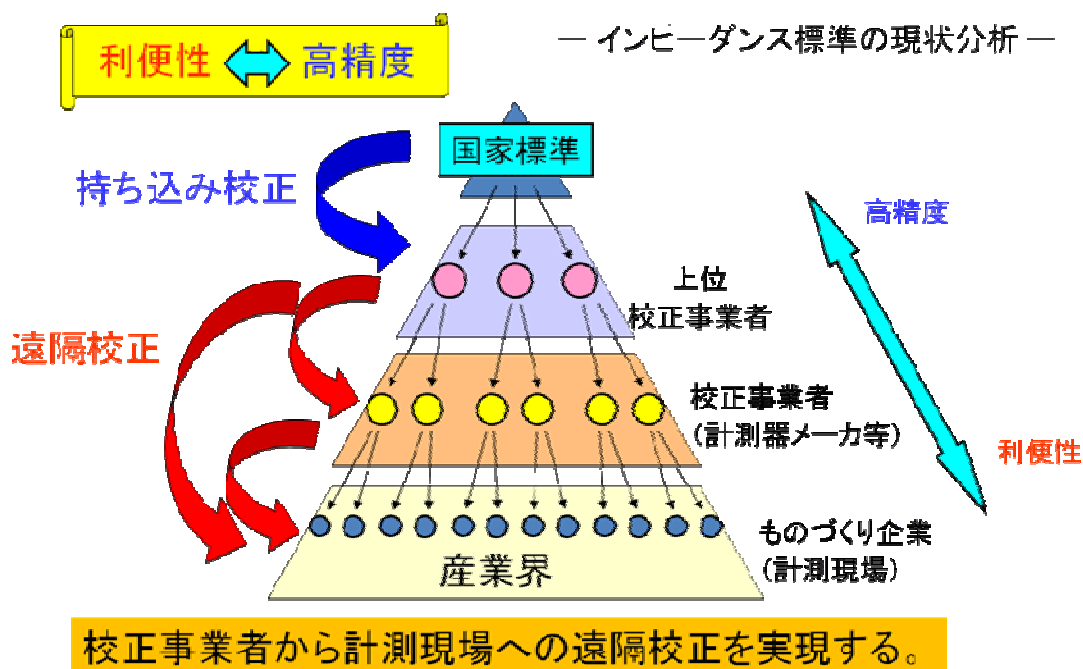


図 2.3-1 遠隔校正に適したトレーサビリティ階層

(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。

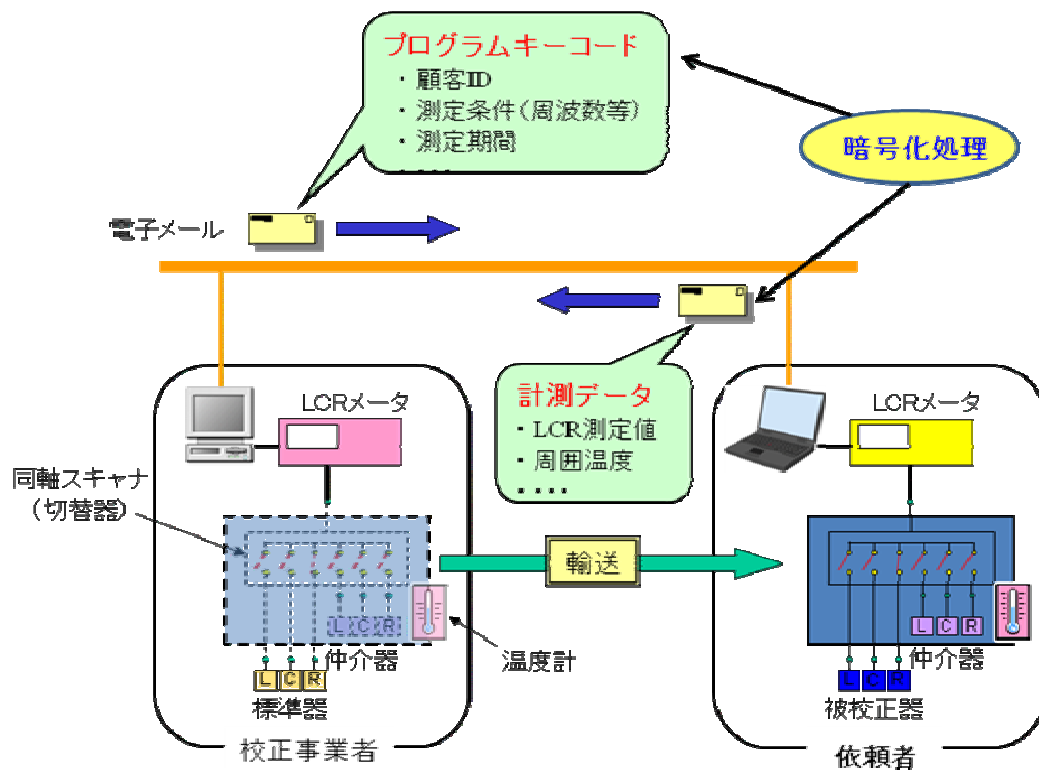


図 2.3-2 遠隔校正の概要 (被校正器：L・C・R 標準器)

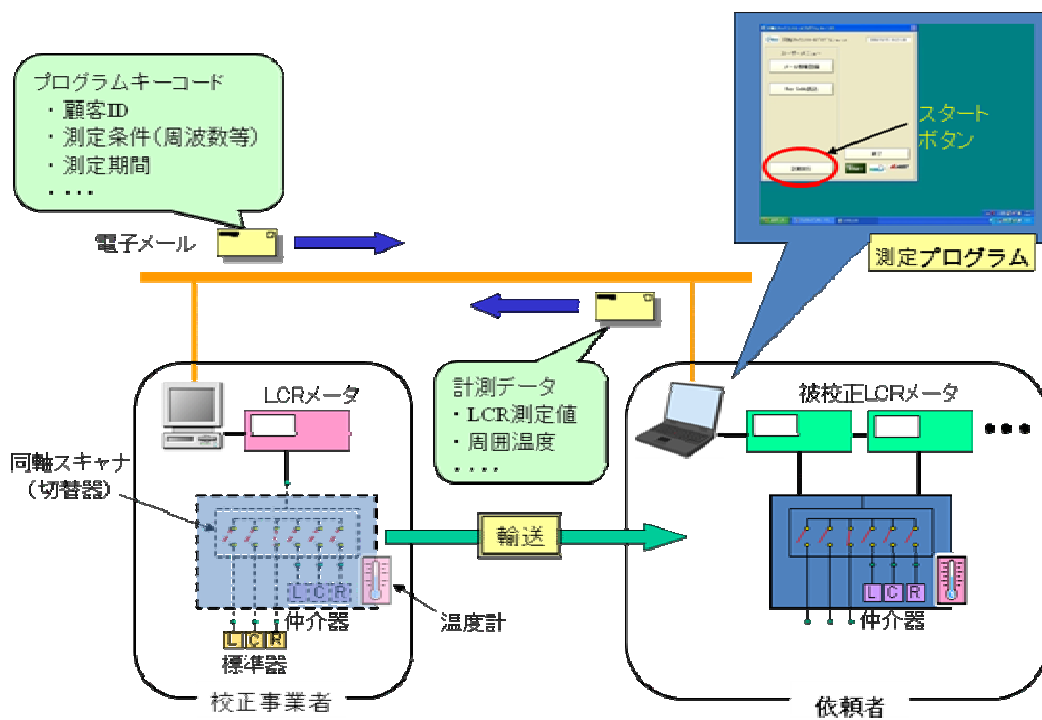


図 2.3-3 遠隔校正の概要 (被校正器：LCR メータ)

(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。

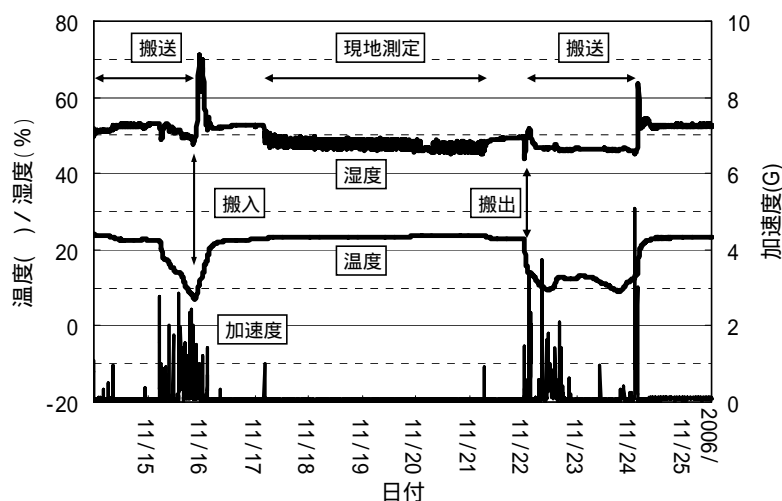


図 2.3-4 仲介器内部温湿度・加速度変化の一例（日電検 長野 日電検）

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。

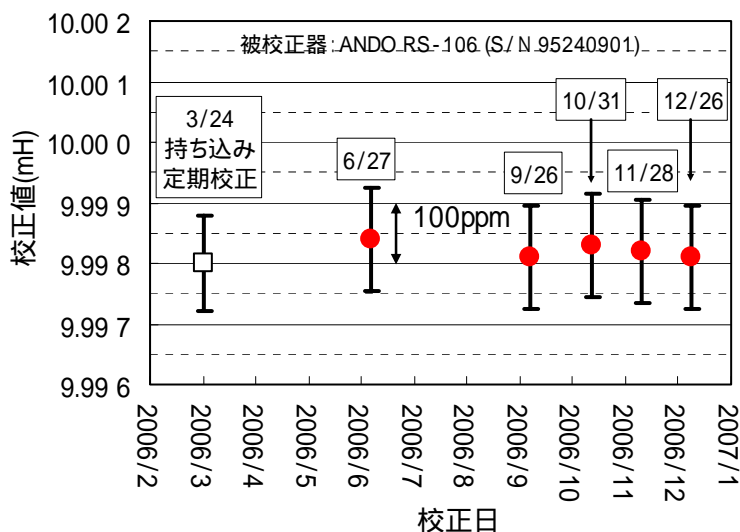


図 2.3-5 標準インダクタ遠隔校正の実証実験結果（校正事業者/依頼者間）

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 μF ）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 k Ω ）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。

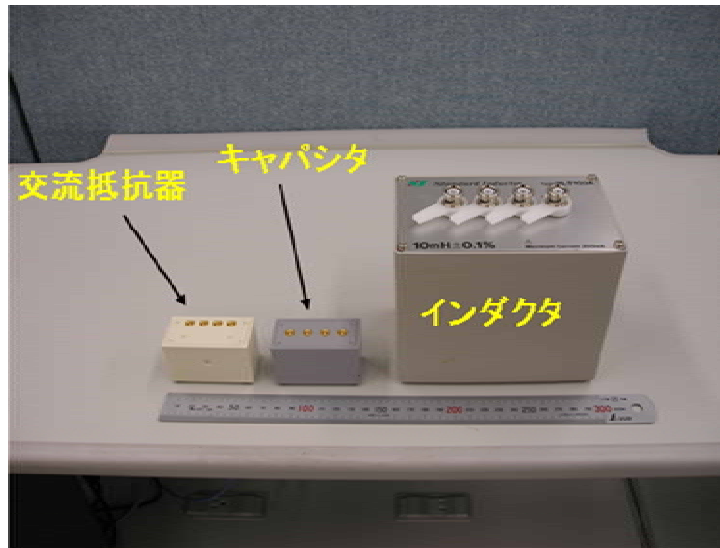


図 2.3-6 仲介器（キャパシタ、交流抵抗器）の外観

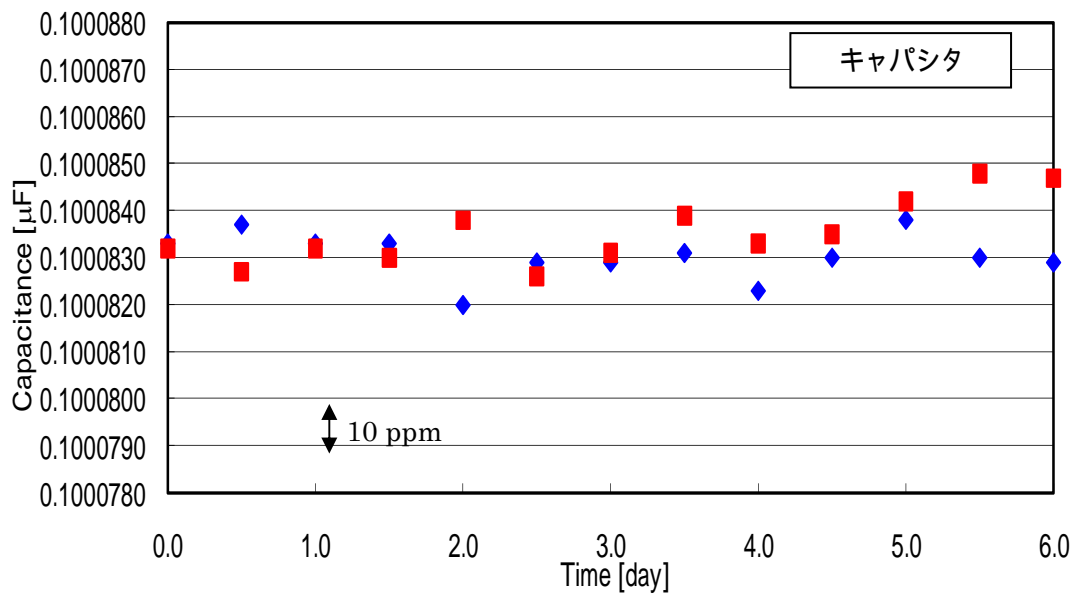


図 2.3-7 仲介器（キャパシタ）の安定度

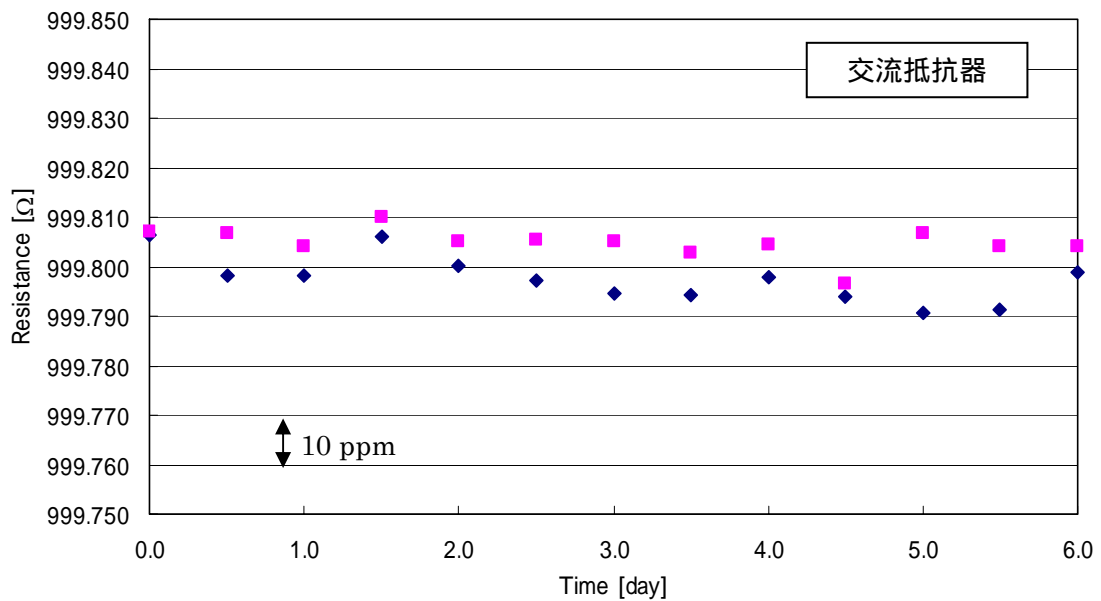


図 2.3-8 仲介器（交流抵抗器）の安定度

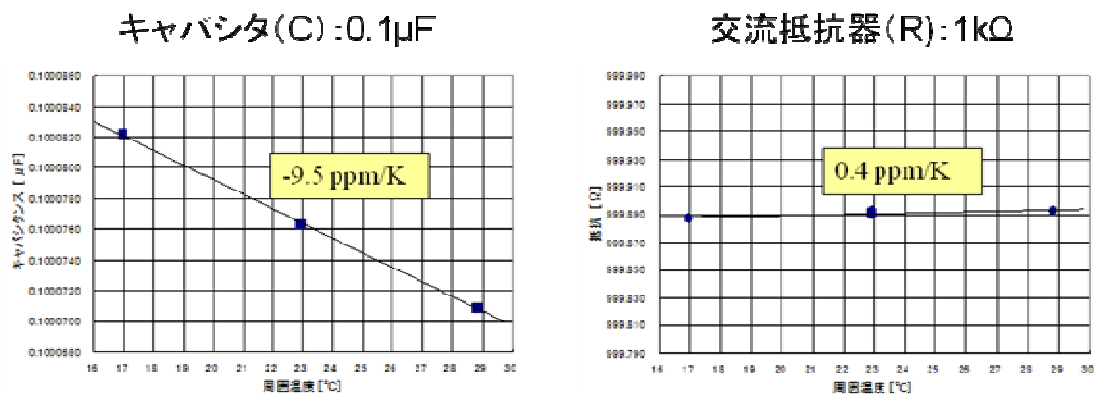


図 2.3-9 仲介器（キャパシタ、交流抵抗器）の温度特性

「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。



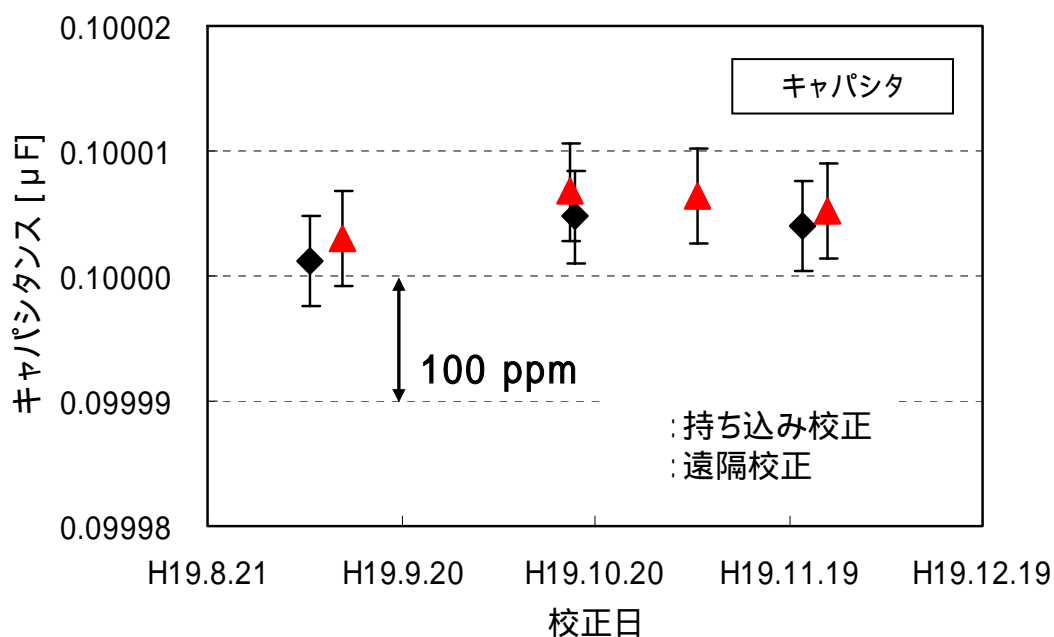
図 2.3-10 キャパシタンス・交流抵抗遠隔校正システムの外観

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 μF 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 最高 30、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 ± 30 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 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 ± 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 μF 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。



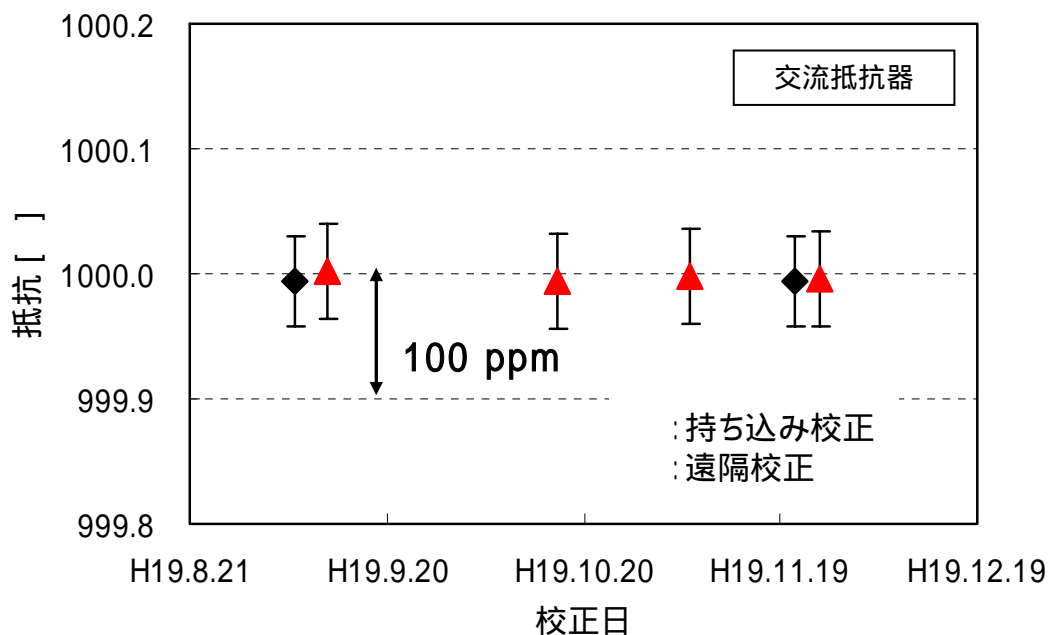


図 2.3-11 標準キャパシタおよび交流抵抗器遠隔校正の実証実験結果

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 μ F レンジおよび 1 k Ω 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 μ F、1 k Ω 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)

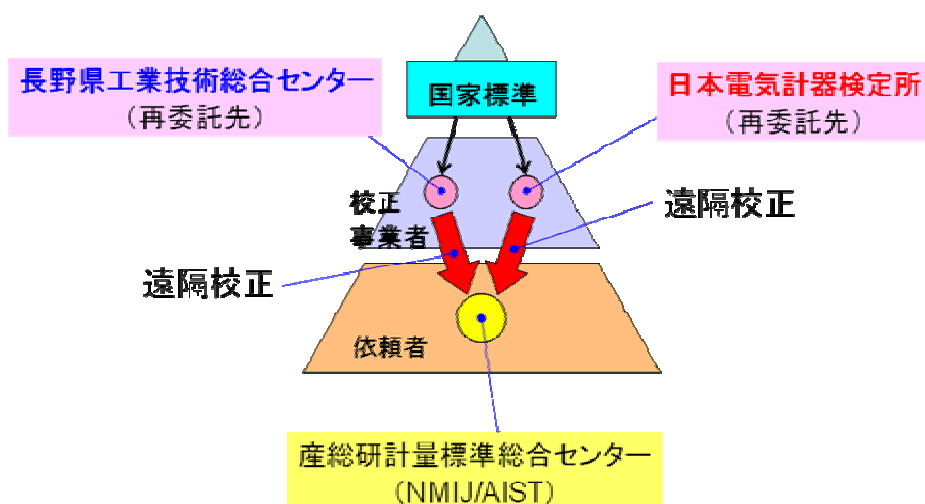


図 2.3-14 LCR メータ遠隔校正実証実験の方法

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内で一致することを確認した上で実施した。

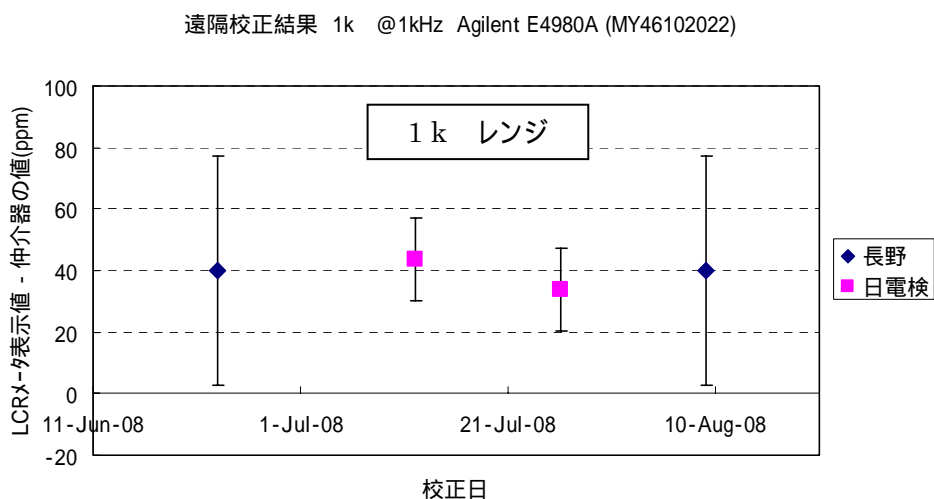
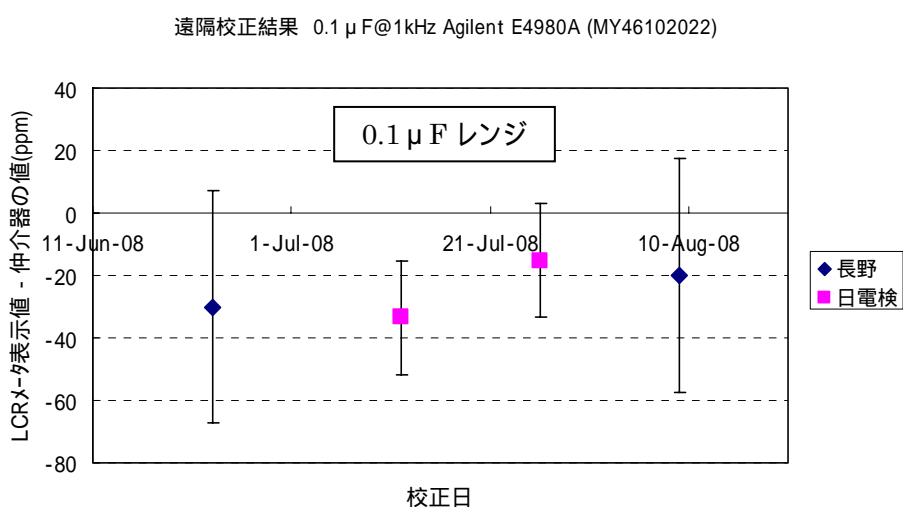
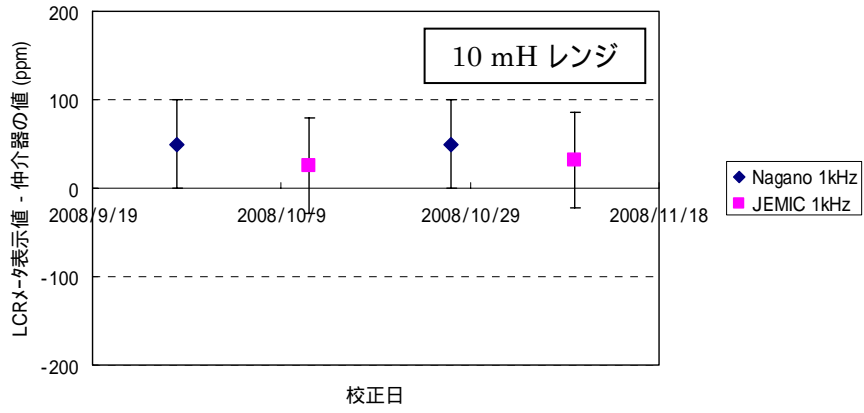


図 2.3-15 LCR メータ遠隔校正実験結果

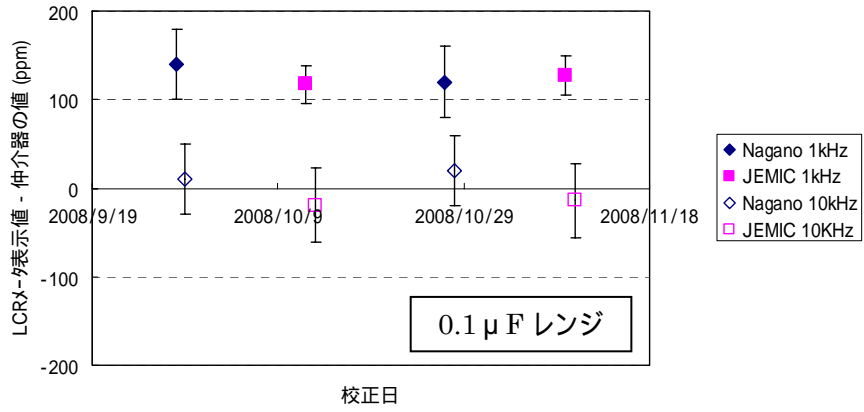
次に、仮想依頼者である NMIJ の被校正 LCR メータを 4 台に増やして、長野県工業技術総合センターと日本電気計器検定所の 2 機関がそれぞれ、交互に、4 台同時に、遠隔校正する実験を行った。4 台の LCR メータは、Agilent 社製のタイプ 4284A が 2 台、同じ

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 μ F・1 k Ω (@1 kHz) および 0.1 μ F・1 k Ω (@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 μ F レンジ、1 k Ω 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) 0.1 μ F, 1 k Ω 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 μ F@1kHz,10kHz Agilent 4284A (MY42101542)



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

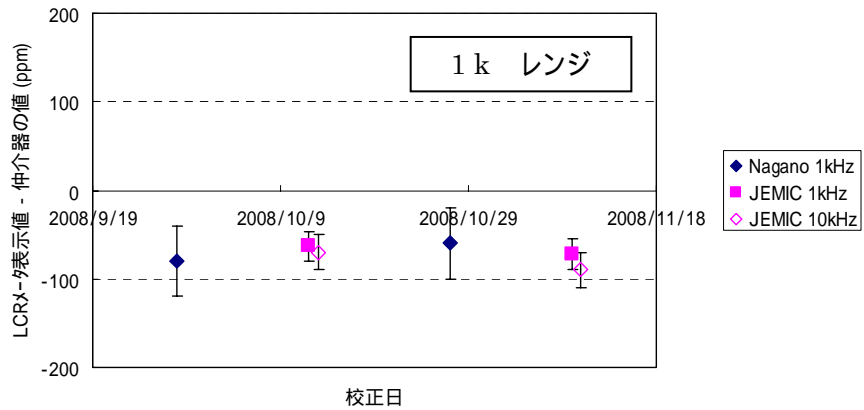
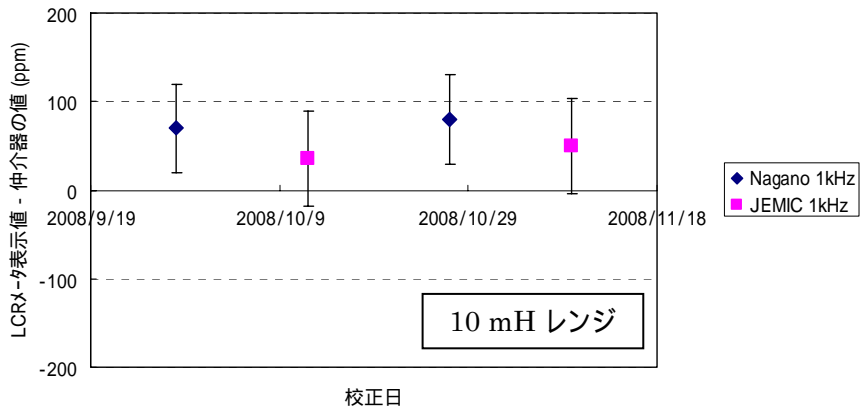
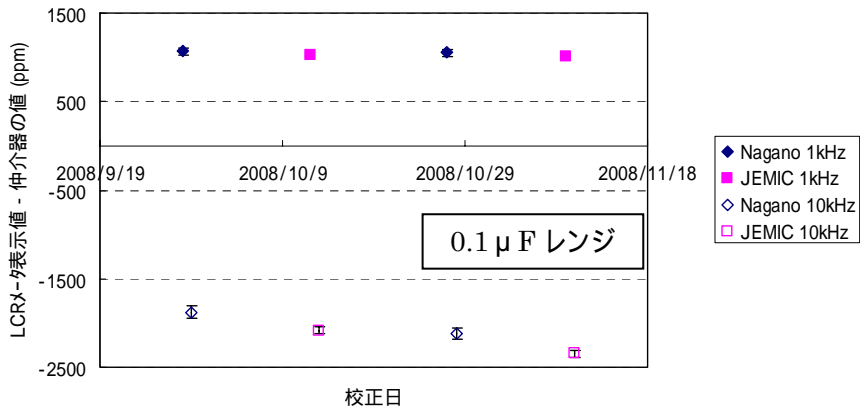


図 2.3-16 LCR メータ遠隔校正実験結果 (LCR メータ)

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



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



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

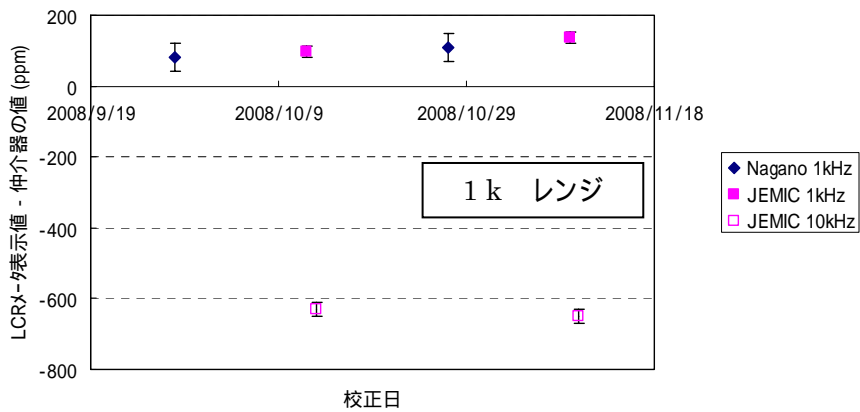
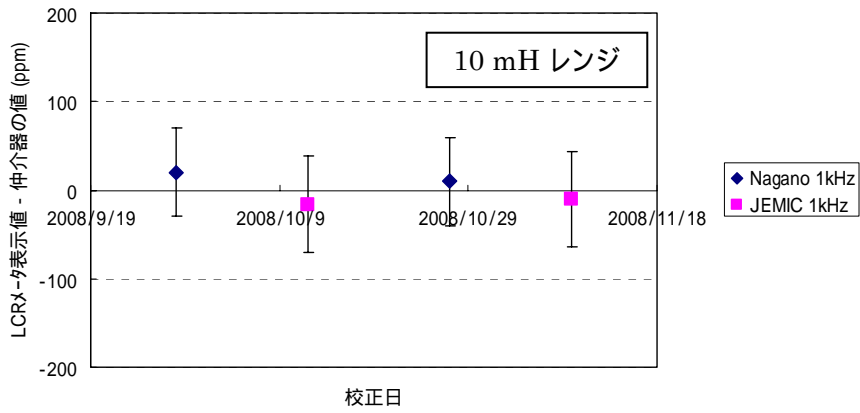
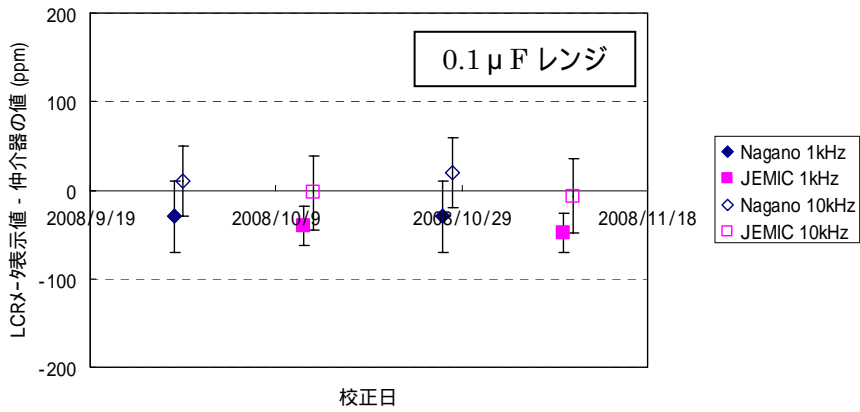


図 2.3-17 LCR メータ遠隔校正実験結果 (LCR メータ)

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



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



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

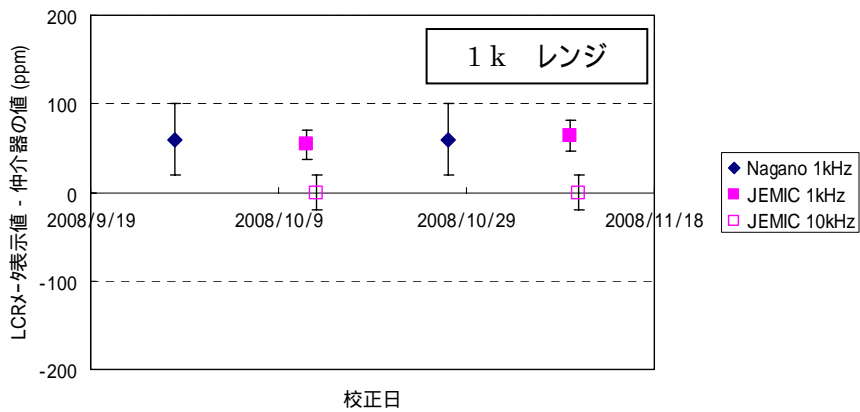
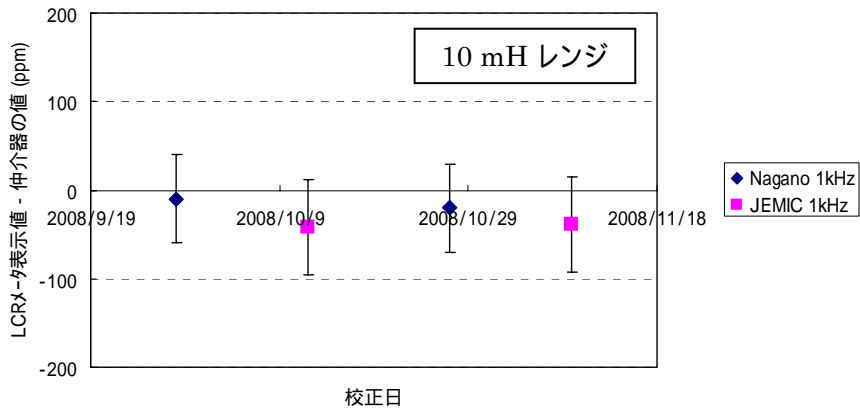
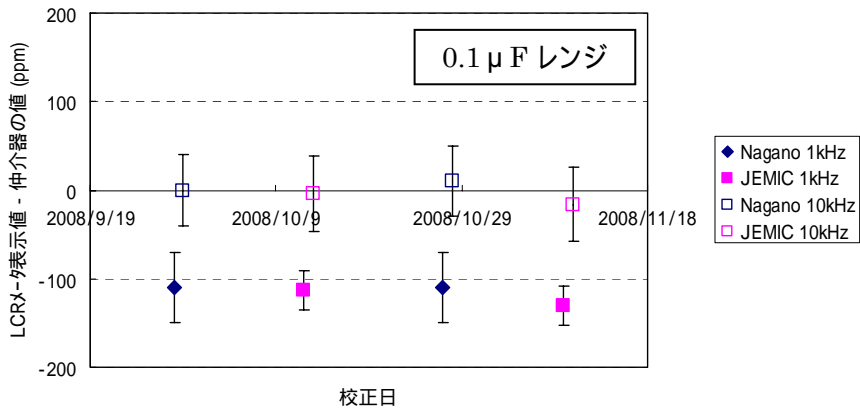


図 2.3-18 LCR メータ遠隔校正実験結果 (LCR メータ)

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



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



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

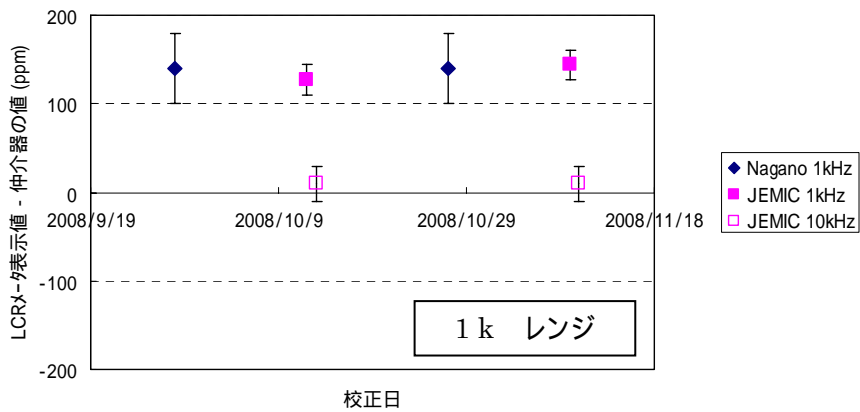


図 2.3-19 LCRメータ遠隔校正実験結果 (LCRメータ)

(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、概ね満足の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