

量子標準体系の高度化に関する研究

研究代表者：松本 弘一（㈱産業技術総合研究所）

I 試験研究の全体計画

1. 研究の趣旨

新素材分野、超精密加工分野における技術革新に裏打ちされた量子エレクトロニクスや原子物理学の進歩により、さらに高度で精度の高い標準技術と新たな利用技術の展開が求められている。現在の単位系では基礎的な標準は相互に密接な関係を有している。光周波数標準は時間・周波数標準と表裏一体であり、時間標準の高度化は直接光周波数標準の高度化につながる。時間・周波数標準は、ジョセフソン効果に基づく電圧標準の基準を与えており、光周波数標準は長さ標準の基準を与えるなど、他の標準の設定にも必要とされる。従って、ユーザーが使いやすいものにするのが重要であり、新しいアイデアや先端のデバイスを入れた研究開発が必要である。この研究開発により、お互いの標準の高精度化につながるという相乗効果が生まれる。また、高エネルギーフォトン量子標準は未整備エネルギー領域の新しいフォトン量子標準として期待されていると共に、新たに核内のエネルギーレベルや核反応断面積に関する基礎定数を与えてくれる。しかし、そこで使用するレーザーの周波数や測定の精度を決定する要因である時間間隔などは、光周波数標準や時間・周波数標準にトレーサブルでなければならない。従って、このような量子標準相互の技術的な結合を図ることにより、より高精度で整合性のとれた標準体系を構築し、メートル条約の単位系の確立に資すると共に、科学技術開発のための知的基盤を整備することが必要となっている。

本研究課題では、量子標準体系の高度化に資するために、最も基本的な量子標準の確立と高精度化、さらにそれらの利用技術の高度化を目指し、以下の研究を行う。

- (1) 超高精度なセシウム時間・周波数標準器を開発し、それらを相互に比較するための技術開発を行う。第Ⅱ期においては、第Ⅰ期の成果をふまえてシステムとして完成させ、精度評価、相互比較、実証実験を行う。
- (2) セシウム時間・周波数標準器を用いて、光の絶対周波数を測定するための要素技術の開発を行う。第Ⅱ期において高効率化とシステム化を行い、光周波数の測定実験を行う。
- (3) 高エネルギーフォトン量子標準場を開発するための要素技術開発を行う。第Ⅱ期においては、システム化して標準場を実現し、量子標準体系との整合性の確保のための研究を行う。

2. 研究の概要

先端的科学技術の研究開発に必要な標準計測技術を提供し、また高度な製品の開発や通信・情報等の産業界の発展に寄与する、国際的に最も正確で安定度の優れた量子標準体系の基盤を整備するための研究開発を実施する。

1. 時間・周波数標準の高度化に関する研究

超高精度時間・周波数標準器を実現するための研究と、標準器の性能評価や時系の比較のための高精度な時刻比較法の研究を行う。

(1) 高精度時間・周波数標準器の研究

10^{-15} ~ 10^{-16} 台の正確さを目指した高精度標準器を開発・整備し、その精度評価を行うと共に、そのレベルでの計測技術に関する研究を行う。このような高精度の標準器の評価には、複数の同程度の標準器を相互に比較することが必要である。更に、独自に異なる技術によって開発された標準器を、異なる環境において動作させて比較することが重要である。このような条件を満たすために、産業技術総合研究所、通信総合研究所において原子泉型標準器及び高安定型標準器を開発する。

① 原子泉型時間・周波数標準器の開発に関する研究 (㈱産業技術総合研究所)

レーザー冷却されたセシウム原子を鉛直上方に打ち上げる原子泉方式セシウム周波数標準器の開発を行う。平成14年度は、セシウム原子泉周波数標準器の周波数安定度を向上させる。セシウム原子泉周波数標準器について下記の周波数シフト要因を調べ、正確さを評価する。また、セシウム原子泉を用いて、国際原子時(TAI)の校正を行う。

② 高安定型時間・周波数標準器の開発に関する研究 (㈱通信総合研究所)

高安定型時間・周波数標準器を開発し、その性能評価を行うとともに、産業技術総合研究所が開発する原子泉型周波数標準器と相互に比較し、 10^{-15} 台の精度を確立する。平成14年度は、これまでに開発してきた量子部と周波数同期制御装置を組み合わせた高安定周波数標準器の性能評価を行う。高安定周波数標準器の要素技術、総合化、比較による性能評価をまとめる。

③ 冷却原子の特性に関する研究 (山口東京理科大学基礎工学部)

空間中に捕捉され、極低温に冷却された原子、分子、イオンの物理特性の計測及び解析を行う。平成14年度は、280nm レーザー光の強度をあげる。レーザー光源を高出力半導体レーザーを製作してそれに置き換える。得られた280nmのレーザー光を用いてrfトラップ中のマグネシウム

マイオンを冷却する。rfトラップのトラップパラメーター（ポテンシャルの深さなど）を変化させたときの共同冷却による到達温度を計測し、第I期に構築した理論的モデルを検証し、共同冷却されたイオンの到達温度を下げる。

④ 参照用発振器の開発に関する研究（小型低温共振器系の研究）（近畿大学生物理工学部）

水素メーザ周波数標準器の周波数安定度を一桁弱改善できる要素技術である小型、低温マイクロ波共振器技術を開発する。平成14年度は小形低温マイクロ波共振器系の実験をすすめとともに、TE111低温マイクロ波共振器系関連のソレノイド、円盤コイルを設計、制作する。共振器周辺技術について従来の周波数安定度を約1桁弱改善するマイクロ波共振器系を開発する。水平形2マイクロ波共振器系の共振器の低温化、周波数安定化を図る改造を行う。

（高安定化技術の研究）（アンリツ㈱）

短・中期の周波数安定度に優れた水素メーザを開発し、その周波数安定度をさらに向上させることにより、高精度比較システムとして高精度な標準器の評価に給する。平成14年度は前年度の周波数安定度の評価を継続し、その結果から必要な改良を加えて周波数安定度の向上を図る。高精度な周波数標準器の参照発振器として比較評価に給する。

(2) 高精度時刻比較法の研究

① 測地衛星による時刻比較法に関する研究（㈱産業技術総合研究所）

② 衛星双方向時刻比較法に関する研究（㈱通信総合研究所）

衛星双方向高精度時刻比較、GPSやGLONASS等の測地衛星を用いた高精度周波数/時刻比較に関する研究を国内、国際機関間で実施してそのシステムの構築を行い、国内の周波数標準器を 10^{-15} 以上の高精度で比較するための基盤整備、並びに、国際的貢献（国際原子時（TAI）や協定世界時（UTC）の精度向上）のための整備を行う。平成14年度は、時刻比較システム全体を高性能化し、信頼性の向上を継続して行うための評価用GPS受信機を整備する。合わせて、当研究課題の最終年度として、総合評価を実施する。すなわち、通信総合研究所と産業技術総合研究所で開発された高精度周波数標準器、高安定周波数標準器間の時刻・周波数比較を衛星双方向時刻比較方式で高頻度で実施する。このため、基準信号伝送のための低損失・低温度係数同軸ケーブルを整備し、また、時刻比較装置の校正信号測定系の温度安定化のため、室内の恒温化筐体を準備して温度環境の向上を図る。また、高頻度の比較を実施するため、衛星回線使用時間を長く設定し、最終評価を行う。

2. 光領域の絶対周波数計測に関する研究

光の絶対周波数を決定するため、近年進展の著しい光パ

ラメトリック発振器や光コム発生器などを用いた光周波数計測技術の高性能化をはかり、システム化を行って光周波数絶対測定装置の開発を行う。上記の目的のため、光パラメトリック発振器等に必要とされる非線形光学結晶の波長変換効率の高効率化を行う。

(1) 光周波数計測システムの研究（㈱産業技術総合研究所）

光の絶対周波数を 10^{-13} 以上の精度で決定するための技術の開発を進める。特に、近年進展の著しい光パラメトリック発振器や光コム発生器などを用いた光周波数計測技術の開発と高性能化を進め、光周波数絶対測定装置のシステム化をはかる。平成14年度はシステム化を行って光周波数絶対計測装置の整備を行う。また、長さ標準として用いられる波長安定化レーザーの周波数を測定する。あわせて、前年度までに開発された光パラメトリック発振器を用いて光周波数計測システムの不確かさの評価を行うとともに、光周波数コム発生器をドライブするために開発された低位相雑音マイクロ波発振器の雑音評価を行い、システムの改善を図る。

(2) 光周波数変換用デバイスの研究（㈱物質・材料研究機構物質研究所）

量子標準化を目的として、1ミクロン波長帯近傍における波長可変光源を実現するため、強誘電体分極反転を用いた疑似位相整合により、高精度、高効率、波長変換デバイスの作成技術開発を行う。平成14年度は、1ミクロン近傍の波長光を光パラメトリック発振させ発振波長の広帯域化にかなう光源開発を目指すとともに、その高性能化を図る。また、量子標準体系への応用性について検討を行う。さらに、X線トポグラフ等により評価する結晶の品質と、デバイス特性を結びつけ、材料へのバックアップをもとに特性の改善をめざす。

3. 高エネルギーフォトン量子標準に関する研究（㈱産業技術総合研究所）

まだ標準が確立されていない、2 MeV から 20 MeV の範囲の高エネルギーフォトン量子標準を確立するために必要な、発生技術、計測技術および校正技術についての研究を行う。特に、量子発生量の増加技術、パルスビーム固有の検出器信号パイルアップ抑制技術や細かいビームを用いた校正技術に関する各要素技術を研究し、標準場開発のための基盤技術を確立する。平成14年度はこれまでに完成した高エネルギーフォトン発生技術、計測技術、校正関連技術を統合するとともに、被校正用検出器に照射した積算フルエンス量をその場でリアルタイム測定するための透過型モニタリング装置を試作する。本装置の開発により、高エネルギーフォトン量子標準の確立に必要な基盤技術の開発を完了する。

3. 年次計画

研究項目	10年度	11年度	12年度	13年度	14年度
1. 時間・周波数標準の高度化に関する研究					
(1) 高精度時間・周波数標準器の研究		原子泉型標準器の開発・整備		単独精度評価	
		高安定型標準器の開発・整備		単独精度評価	
				相互比較実験	
		評価技術の高度化		評価技術の実証	
					評価・まとめ
(2) 高精度時刻比較法の研究		測地衛星による時刻比較システムの高度化		実証実験	
					評価・まとめ
		衛星双方向国内比較実験			
		高性能衛星双方向時刻比較装置の開発		衛星地球局の改造と実証実験	
					評価・まとめ
		衛星双方向国際比較実験			
2. 光領域の絶対周波数計測に関する研究					
(1) 光周波数計測システムの研究	システム化技術の開発		システムの開発	光周波数の測定実験	
					評価・まとめ
(2) 光周波数変換用デバイスの研究	高効率化の研究		広帯域化・高効率化の研究		
					評価・まとめ
(3) 光周波数計測用デバイスの研究	デバイスの開発		高性能化と応用技術の開発		
3. 高エネルギーフォトン量子標準に関する研究	発生技術の開発		校正技術の開発	システムの開発	
		計測技術の開発			評価・まとめ
4. 研究運営					
所要経費(合計)	215百万円	204百万円	209百万円	230百万円	211百万円

II 平成14年度における実施体制

研究項目	担当機関	研究担当者
1. 時間・周波数標準の高度化に関する研究		
(1) 高精度時間・周波数標準器の研究		
① 原子泉型時間・周波数標準器の開発に関する研究	(独)産業技術総合研究所	黒須隆行
② 高安定型時間・周波数標準器の開発に関する研究	(独)通信総合研究所	細川瑞彦
③ 冷却原子の特性に関する研究	山口東京理科大学基礎工学部電子基礎工学科	清水忠雄
④ 参照用発振器の開発に関する研究 (小型低温共振器系の研究) (高安定化技術の研究)	近畿大学生物理工学部電子システム情報工学科 アンリツ(株)	中桐紘治 津田正宏
(2) 高精度時刻比較法の研究		
① 測地衛星による時刻比較法に関する研究	(独)産業技術総合研究所	○萩本憲
② 衛星双方向時刻比較法に関する研究	(独)通信総合研究所	今江理人
2. 光領域の絶対周波数計測に関する研究		
(1) 光周波数計測システムの研究	(独)産業技術総合研究所	○池上健
(2) 光周波数変換用デバイスの研究	(独)物質・材料研究機構物質研究所	北村健二
3. 高エネルギーフォトン量子標準に関する研究	(独)産業技術総合研究所	○工藤勝久
4. 研究運営	(独)産業技術総合研究所	◎松本弘一

(注：◎は研究代表者，○はサブテーマ責任者)

III 運営委員会

委員	所属
○松本弘一	(独)産業技術総合研究所 副部門長
池上健	(独)産業技術総合研究所 室長
今江理人	(独)通信総合研究所 グループリーダー
北村健二	(独)物質・材料研究機構物質研究所 主管研究員
木原雅巳	日本電信電話(株) 未来ねっと研究所 主幹研究員
工藤勝久	NTT(株) 産業技術総合研究所 室長
清水忠雄	山口東京理科大学 電子基礎工学科 教授
高橋浩之	東京大学 大学院工学系研究科 助教授
津田正宏	アンリツ(株) 厚木事業所研究所 開発部長
中川賢一	電気通信大学 レーザー新世代研究センター 助教授
中桐紘治	近畿大学 生物理工学部電子システム情報工学科 教授
森川容雄	(独)通信総合研究所 研究主管
萩本憲	(独)産業技術総合研究所 主任研究員

(注：○は運営委員長)