

### 3.2.5 新世代ネットワーク研究センター 光・時空標準グループ

グループリーダー 小山泰弘 ほか 35 名

#### 情報通信の基盤として産業、学術、一般社会に貢献する周波数・時空標準の構築と供給

#### 概要

時刻、周波数及び位置の情報は、情報通信をはじめとする極めて広範な科学技術分野において基本的な物理量であり、その標準は情報通信を支える基盤である。また、時刻と空間における位置はあらゆるデジタル情報の重要なインデクスであり、その正確さと信頼性を抜きに ICT 社会の安心・安全を語ることはできない。このような認識のもと、世界最高水準の時刻・周波数標準を確立し、正確で安定な日本標準時を着実に生成、維持、運用してあまねく便利に供給するとともに次世代時刻周波数標準技術、次世代時空計測技術、衛星時空計測技術の研究開発を実施して、国民一人一人が安心・安全に利用できる情報通信社会の実現に不可欠なユビキタス時空基盤の構築を目指している。

#### 平成 21 年度の成果

##### (1) 日本標準時の高度化の研究開発及び供給

NICT は、18 台のセシウム原子時計と 4 台の水素メーザ原子時計を合成することにより極めて高精度な日本標準時を連続的に生成し、さらに確度を向上させるため原子泉型一次周波数標準器 NICT-CsF1 (図 1) を運用している。その品質は、安定度の優秀さと、国際度量衡局によって約 1 ヶ月遅れで公表される協定世界時との差をいかに小さく維持したかで評価される。平成 21 年度は、制御方法の着実な改良と機器の安定した運用により、年間を通じ協定世界時との差は +20ns から -10ns の範囲を維持し、世界的に高いレベルを一層向上させた。さらに、標準電波送信所など遠隔地に置かれた原子時計を含めた原子時計群のデータを継続して国際度量衡局に報告し、国際原子時への寄与に努めた結果、国際原子時への年間平均寄与率は目標として設定している 6% を大きく上回って 10.3% を達成し、年間を通じて世界第 2 位を維持した (表 1)。原子泉型一次周波数標準器 NICT-CsF1 (図 1) は、 $10^{-15}$  台の確度による運用実績を蓄積し、各回約 20 日の運用データを国際度量衡局へ 3 回報告し、国際原子時の確度向上に貢献した。また安定度の改良を目指し、超高安定な冷却サファイア共振器 (CSO) の周波数信号を試験導入し、短期安定度では従来のシステムと比較して約 3 倍の向上の目処を得た。

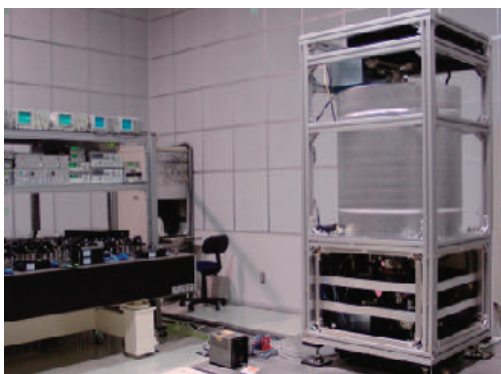


図 1 CsF1 原子泉型一次周波数標準器

表 1 協定世界時への機関別平均寄与率 (平成 21 年)

	機関 (国)	平均寄与率
1	USNO (米国)	27.3%
2	NICT (日本)	10.3%
3	F (フランス)	7.3%
4	NTSC (中国)	6.4%
5	TL (台湾)	6.0%
6	NIST (米国)	4.3%
7	SP (スウェーデン)	4.0%
8	PL (ポーランド)	3.8%
9	PTB (ドイツ)	2.8%
10	IT (イタリア)	2.4%

日本標準時の高品質確保のため、並びに協定世界時構築に貢献するために、NICT は世界各国と協力し、衛星双方向時刻比較や GPS 衛星による時刻比較等による高度な定常測定を行っている。平成 21 年度は、アジア・太平洋地域での時間周波数標準の中核的機関として、韓国、中国、台湾の各国の標準機関との国際定常時刻比較網の運用を継続して行うとともに、GPS PPP (Precise Point Positioning) 法時刻比較への取り組みなどにより、日本標準時と協定世界時との時刻差測定の不確かさを従来の 0.5ns から 0.3ns へと改善させた。

このように生成した高品質で信頼性の高い日本標準時を様々な用途で活用するための供給方法として、NICT 本部からの公開 NTP (Network Time Protocol) サービスの運用を継続し、さらに一芯光ファイバ時分

割双方向方式による時刻伝送装置の実用化を行い、大手町インターネットエクスチェンジに設置したサーバからの公開 NTP サービスを開始した。日本標準時と大手町サーバは約 4ns の精度で合わせる事ができ、利用者のネットワーク状況に影響されることなく安定した精度が期待できる。また、利用者の集中にもさらに余裕を持って耐えられるシステムとなった。

日本のタイムビジネス認定制度で確立した時刻監査の仕組みを世界標準とするため、時刻認証技術の標準化勧告案を作成し、ITU-R の科学業務委員会 (SG7) へ提案し、ITU 勧告として承認された。さらに、この勧告を基に国内標準化のために JIS 原案作成委員会を設立し、JIS 標準化案の策定と経済産業省への登録を行った。

周波数校正サービスでは、国際度量衡局に登録を申請していた周波数遠隔校正業務が承認され国際相互承認の対象となった。また、同時に持ち込み周波数校正の性能向上も承認された。測定周波数を従来の 1MHz、5MHz 及び 10MHz の固定周波数から、1Hz から 100MHz までの可変周波数に対応できるようにシステムの改修を完了した。遠隔校正では、遠隔校正用 GPS 受信装置の性能安定化と低廉化を実現し、製造メーカーに技術移転をして製品化した (図 2)。また、新たな遠隔校正用受信装置として長波標準電波を用いた装置 (図 3) を試作・開発し、性能評価と問題点抽出を行った。

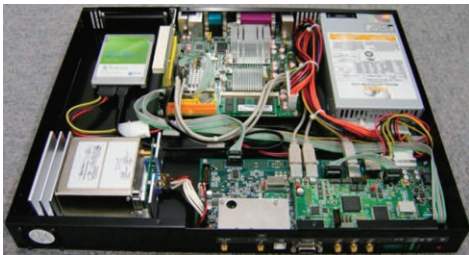


図 2 遠隔校正用 GPS 受信装置



図 3 長波標準電波による遠隔周波数校正装置 (試作機)

## (2)次世代時刻周波数標準技術の研究開発

現在の秒の定義を実現するセシウム周波数標準器よりも高性能な周波数標準を求め、世界各国の研究機関が光周波数標準の研究開発を競っている。現状では、定義に基づく最良のセシウム周波数標準器が  $10^{-15} \sim 10^{-16}$  台の正確さを実現しており、それと同程度か、やや劣るが将来セシウムを超える可能性が高いとして選りすぐられた数種類について、セシウムを基準とした各原子の時計遷移周波数の値と、それぞれの不確かさ (いずれも  $10^{-15}$  台) が国際度量衡委員会から「秒の二次表現」という認定を受けている。また、数多くの原子の時計遷移からこれらに次ぐ確度 (およそ  $10^{-12} \sim 10^{-14}$ ) を得たと報告され、厳しい審査の後に光周波数や波長の実用標準として認定されたもの約 20 種類が、国際度量衡局により実用標準のための放射の推奨リストとしてまとめられている。NICT でも、カルシウムイオンのトラップシステム (図 4) と、ストロンチウム原子を用いた光格子時計 (図 5) の 2 方式で光周波数標準を実現する研究開発を進めている。



図 4 カルシウムイオントラップシステム

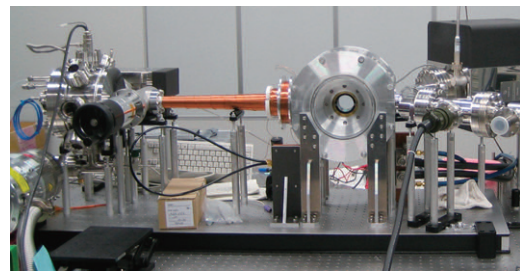


図 5 ストロンチウム光格子時計システム

カルシウムイオントラップ法では、1 個のイオンを捕獲 (トラップ) する装置、イオンをレーザー冷却するシステム、時計遷移を起こさせるための超高安定狭線幅クロックレーザー、光周波数を周波数国家標準にトレーサブルに計測するための光コム装置などを開発してきた。平成 20 年度に  $4 \times 10^{-14}$  という高い確度で測定し論文発表した遷移周波数の測定結果を平成 21 年 6 月に国際度量衡委員会の周波数・波長標準作業部会に報告し、カルシウムイオンの時計遷移が新たな遷移として推奨放射リストに登録されるという大きな成果を得た。今回のカルシウムイオンは、NICT とオーストリアのインスブルック大学の同時報告となったが、審査の結果登録

された遷移周波数の不確かさには NICT が発表した論文の結果が用いられ、その信憑性が高く評価されている。平成 21 年度はさらに、遷移周波数計測の確度を  $1.2 \times 10^{-14}$  に向上させ、またクロックレーザーをカルシウムイオンの時計遷移に同期させるロックシステムを実現して、カルシウムイオンを基準とした光周波数標準を実現させて、 $10^{-15}$  台の安定度を達成した。

多数のストロンチウム原子を光格子ポテンシャルに閉じ込める光格子時計は、世界で 3 つの機関の報告により、既に秒の二次表現の一つとして登録されており、各機関の追加報告を受けた平成 21 年 6 月の審査により、認定された不確かさは  $1 \times 10^{-15}$  と非常に小さくなった。NICT では平成 21 年度末、 $^{87}\text{Sr}$  原子の遷移スペクトルを世界で 4 番目に観測することに成功したのち、スペクトル線幅を 390 Hz まで狭窄化し、統計的不確かさを  $7 \times 10^{-15}$  まで改善した。この時に測定された時計遷移周波数は、秒の二次表現に登録されている値と、NICT 側の計測の不確かさである  $7 \times 10^{-15}$  の範囲内で一致しており、標準器と計測方法がともに問題ないことを示唆している。

また光領域での周波数の精密計測では、周波数コムと呼ばれる計測システムの開発を進めているが、広帯域なチタンサファイア光コムを定常運用することに加えて、波長  $1.5\mu\text{m}$  の通信波長帯をカバーするフェムト秒ファイバ光コムを開発した。この装置による周波数安定度の計測精度は平均時間 1 秒で  $4 \times 10^{-14}$  を達成した。

### (3)次世代時空計測技術の研究開発

NICT では、現在国際原子時の構築のために定常的に用いられている時刻比較法の精度を大きく改善することを目指して、複信号方式の衛星双方向比較法や超長基線電波干渉計 (VLBI) を用いた精密時刻比較法などの独自技術や、光通信網による周波数伝送など、次世代の計測技術の研究開発を進めている。

複信号方式衛星双方向時刻比較法については、TL(台湾) - NICT 間で長期連続測定を伴う実運用試験を開始し、短期では約 30ps の精度を得る目処をつけた。

光通信網による標準信号伝送システムの開発では、これまでに開発した装置の小型・汎用化を行い、2 セットの RF 伝送システムをカスケード化して NICT が提供する高機能研究開発テストベッド JGN2plus の小金井 - 大手町 - 白山間通信網を利用して実リンクでの最長距離となる総距離 204km の伝送を行うことに成功した。

位置計測の分野では、VLBI の原理を応用した距離基準計測システムの開発を進めており、平成 21 年 6 月に超小型 VLBI 観測システム (図 6) 1 台による初の測地実験に成功、12 月には同システム 2 台によって鹿島 - つくば (国土地理院) 間で約 2mm の基線長計測精度を達成した。リアルタイム地球姿勢決定においては、地球の自轉變動を表わす UT1 の実時間計測に加えて、地球自転の極運動の迅速計測のため、海外 2 箇所の観測局を含む 3 基線以上で e-VLBI 実験ができるように標準データフォーマットの策定、データ伝送プログラムの開発を行って、日本・フィンランド・スウェーデン間でリアルタイムデータ伝送実証実験に成功した。



図 6 距離基準計測システム  
超小型 VLBI 観測システム

### (4)衛星時空計測技術の研究開発

NICT では、時空計測技術の応用として、衛星測位の基盤技術の研究開発も実施している。その 1 つ、ETS-VIII (きく 8 号) 衛星による高精度時刻比較実験では、地上の 2 地点間の時刻・周波数比較実験として、衛星の中継モードで搬送波位相比較実験を行い、従来の衛星時計仲介法に比較して一桁程度の高精度化が可能であることを実証した。DMTD (Dual Mixer Time Difference) 計測装置による直接比較を行った結果、両者はおおむね 10ps 以内で一致することを確認した。

また、総務省からの受託により平成 22 年夏期打ち上げ予定の準天頂衛星における時刻管理系の研究開発を推進した。準天頂衛星に搭載する機器の開発を完了し、衛星バスシステムとの組み合わせ試験、及び地上系とも組み合わせた総合システム検証を実施、また地上局用ソフトウェアは他機関も含めたインターフェイス試験を実施して健全性を確認した。また、打上げ後の実験に向けて、サロベツ、父島、カウアイ (米国) にモニタ局時刻管理部 (図 7) を整備した。



図 7 衛星双方向時刻比較用  
アンテナ (カウアイ局)