

3.1.5 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 37 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 22 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 22 年度は、制御パラメータの最適化に関する研究を進め、数日前後の期間における安定度の向上を実現し、年間を通じて協定世界時との差が +24ns から -1ns の範囲という高いレベルを保ちながら運用を行った。さらに、運用中のすべての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引き続き努めた結果、国際原子時への年間平均寄与率は目標の 6% を大きく上回る 10.4% を達成するとともに、年間を通じて世界第 2 位を維持した (表 1)。標準電波送信については、2 局のうちの 1 局である福島県の「おおかたどや山送信所」が東日本大震災の影響により停波せざるをえず、復旧は平成 23 年度に持ち越した。

秒の定義に従った正確な 1 秒を発生できる一次周波数標準器においては、セシウム原子泉型一次周波数標準器 NICT-CsF1 の運用実績を重ね、不確かさ 1.4×10^{-15} の高精度データを国際度量衡局へ 2 回報告し、国際原子時の確度向上に貢献するとともに、源振として使用する基準信号の発生源を水素メーザから冷却サファイア共振器 (CSO) にすることで短期安定度を 3 倍向上させることに成功した。また、2 号機となる NICT-CsF2 の開発においては、光を用いた新方式による原子の捕獲の成功にまで至った。

原子泉型一次標準器 (CsF1)



冷却サファイア共振器 (CSO)



図 1 原子泉型一次周波数標準器

表 1 国際原子時への寄与率

	機関 (国)	平均寄与率
1	USNO (米国)	27.4%
2	NICT (日本)	10.4%
3	F (フランス)	8.1%
4	NTSC (中国)	5.9%
5	TL (台湾)	4.9%
6	NIST (米国)	4.5%
7	SP (スウェーデン)	4.3%
8	IT (イタリア)	2.6%
9	PTB (ドイツ)	2.6%
10	NMIJ (日本)	2.0%

日本標準時の高い品質を確保し、協定世界時構築に大きく貢献するため、NICT では世界各国と協力して衛星双方向時刻比較や GPS 衛星による時刻比較法によって高度な時刻比較定常測定を行っている。平成 22 年度には、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、台湾の標準機関との

国際定常時刻比較網の運用について新たな衛星回線を確保するとともに、GPS PPP（Precise Point Positioning）法時刻比較を継続することによって、日本標準時と協定世界時との時刻差測定の不確かさを0.3nsの高水準に維持した。

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つつ、平成22年2月に大手町インターネットエクスチェンジ（IX）に設置したサーバからの公開NTPサービスを開始した。平成23年1月には、大手町IXの施設計画停電時により運用中の公開NTPサーバが誤動作する事象が発生したため、緊急に同サーバによるサービスを停止してソフトウェアの改良を実施、サービス開始時期は未定である。

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、かねて承認手続き中であったITU勧告案が平成22年4月にITU-R TF.1876として正式に承認された。さらに、この勧告を基に作成し、経済産業省に登録した原案を正式に日本工業規格（JIS）にするための作業を行った。

校正サービスでは、光周波数帯の校正実施のため、光周波数校正システムの検討を行い、小型化した装置を整備した。また、被校正装置を持込んで校正する搬入校正において、平成21年度に校正システムを改良し、1MHz、5MHz、10MHz3つの基本周波数に加え、精度が劣るが1Hzから100MHzの任意の周波数も校正対象周波数として業務を開始した。さらに、新たなサービスとして時刻校正の準備を進め、国際相互承認のため、アジア太平洋計量計画の時間周波数技術委員会の調整のもと、韓国標準研究員の専門家を招へいし、技術的な点検と確認を受けるピアレビューを受検した。遠隔校正では、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2）を改良し、性能向上を図った。

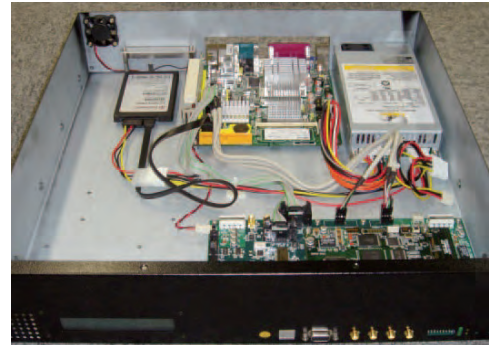


図2 長波標準電波による遠隔周波数校正装置

(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、最良のセシウム周波数標準器が 10^{-15} ～ 10^{-16} 台の正確さを実現しており、それと同程度か、もしくはやや劣るが将来セシウムを超える可能性が高いと考えられる数種類の原子およびイオンの候補が「秒の二次表現」として国際度量衡委員会から認定されており、セシウムを基準とした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）が公表されている。また、数多くの原子の時計遷移からセシウム周波数標準器や「秒の二次表現」に次ぐ確度（およそ 10^{-12} ～ 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、国際度量衡委員会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。



図3 カルシウムイオントラップシステム

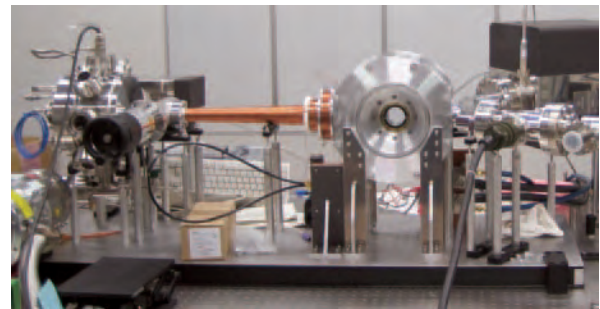


図4 ストロンチウム光格子時計

NICTが主導し、平成21年度に推奨放射リストに登録されたカルシウムイオントラップシステム（図3）においては、磁場の影響を削減する改良により、周波数の不確かさを初号機で達成していた 10^{-14} 台から 10^{-15} 台へと1桁小さくすることに成功した。

既に「秒の二次表現」の1つとして登録されているストロンチウム光格子時計（図4）においては、周波数標準器としての機能を完成させ、 7×10^{-15} の不確かさで絶対周波数の評価を行った。さらに、東京大学のストロンチウム光格子時計との間でファイバ伝送による周波数比較実験を行い、重力ポテンシャルの差によ

る微小な周波数差の検出に成功した。重力ポテンシャルによる影響を補正したあとの両者の周波数は 7×10^{-16} 以内で一致することを確認し、光格子時計の16乗台での信頼性を確立した。

安定度については、カルシウムイオントラップシステム及びストロンチウム光格子時計の双方とも、CSOの高安定マイクロ波を基準に光コム装置を用いた光周波数計測を行い、計測限界値である 1×10^{-15} を確認した。さらに、光領域での直接比較を行ったところ、目標の 10^{-15} 台を大きく超えて2,000秒で 3×10^{-16} の安定度を確認した。

周波数標準器の重要な要素技術である超狭線幅レーザ技術に関しては、イオントラップ方式・光格子時計双方の要となる波長帯に加えて、 $1.5 \mu\text{m}$ 通信波長帯においても半値全幅3Hz以下の超狭線幅レーザを実現した。狭線幅レーザのキーデバイスである光共振器に関しては、新型の超低振動感度光共振器を設計し、国内企業との技術連携により国産化への道を拓いた。

(3) 次世代時空計測技術の研究開発

NICTでは、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、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実施し、数千秒以下の短期では約30ps、それ以上の長期では約200psの精度を得た。同方式は、準天頂衛星による地上局間時刻比較でも採用されており、静止衛星を利用した場合と同等な結果が得られた。

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、平成22年7月から12月にかけて、NICT鹿島宇宙技術センターと国土地理院それぞれに設置した同システム(図5)による測地実験を実施した。このうち、基線解析に成功した8月以降の5回の実験について基線長推定結果の再現性で計測精度を評価したところ、2.4mmという良好な結果を得た。これはGPSの高精度単独測位による基線長推定結果の短期再現性2.7mmを上回る成果である。また、リアルタイム地球姿勢決定の研究開発では、日本(国土地理院)、スウェーデン、ドイツを結ぶ基線でのVLBIデータを用い、10時間以上の観測を実施することで天文時と協定世界時の差を示すUT1-UTCを2マイクロ秒、極運動を40マイクロ秒角の精度で推定できることを確認した。さらに、VLBI技術を用いた時刻比較法を確立することを目的に、鹿島11m局-小金井11m局基線でのVLBI観測を実施し、同時に実施したETS-VIII、GPS、衛星双方向複擬似雑音信号方式による時刻比較結果と比較して精度評価を行った。



図5 超小型VLBI観測システム
(鹿島宇宙技術センター)

(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も実施している。その1つのETS-VIII(きく8号)衛星を経由した高精度時刻比較実験では、2地点間の時刻比較実験を行った結果、1,000秒平均値で 7×10^{-15} の周波数安定度が得られ、遠隔地にある水素メーザの特性が計測可能であることを実証した。また、3年間の長期にわたって搭載原子時計の周波数を測定することにより、周波数偏差とその変化量を高精度に評価することに成功し、160日間における周波数安定度について 3.8×10^{-14} という値を得た。

総務省からの受託研究として、準天頂衛星「みちびき」における時刻管理系の研究開発を推進した。平成22年9月11日の打ち上げ後は、搭載機器の初期機能確認試験を実施し、装置の健全性を確認した。その後、12月11日より定常運用段階に移行して技術実証実験を開始し、実験運用手順を確立するとともに、基本性能を確認するための衛星-地上間の時刻比較、軌道上での搭載原子時計の精密モニター、L帯3波信号のタイミング計測の各実験で、目標の1ns以下の精度を達成した。また、2.4m径の駆動アンテナを有する可搬の時刻制御局(図6)を開発した。



図6 準天頂衛星可搬時刻制御局