

### 2.16 時空標準技術

#### 2.16.1 概要と沿革

時空標準技術においては、時間(周波数)と空間の基準を確立するための研究及び技術開発を行ってきた。具体的には、周波数の源となる周波数標準器の研究開発、その実用展開に不可欠な周波数・時刻の高精度比較・伝送技術の研究開発及び位置基準の構築に必要なVLBI技術の研究開発並びに生活や産業の基盤を支える周波数国家標準及び日本標準時の発生と供給に関する業務を行っている。

周波数標準及び日本標準時に関する技術開発の歴史は、元を辿れば昭和初期にまで遡る。通信省電気試験所での周波数標準器の開発や千葉県の送信所からの標準電波の発射など、国家標準の基盤を支える研究は脈々と引き継がれており、現在の最先端技術の開発につながっている。

またVLBIに関しては、巨大パラボラアンテナを有する鹿島宇宙技術センターは日本におけるVLBI技術開発のパイオニアであり、現在でもIVS技術開発センターとして国際コミュニティに貢献している。

組織としては、第1期中期計画(平成13～17年度)開始時に、電磁波計測部門の所属となり、従来の2研究室1課体制から5グループ制(原子周波数標準グループ、時間周波数計測グループ、日本標準時グループ、精密測位技術グループ、宇宙電波応用グループ)に再編された。平成15年には時間周波数計測グループは完了・解散し、代わって準天頂衛星グループが新設された。加えてタイムスタンププラットフォームグループも新設された。

第2期中期計画(平成18～22年度)においては、所属が新世代ネットワーク研究センターに変更となり、小グループ制が廃止され、「光・時空標準グループ」の名称で大きな1つの研究室として統合される形となった。従来のグループはそれぞれプロジェクトとして研究活動を継続した。

第3期中期計画(平成23年度～)においては、所属が電磁波計測研究所になり「時空標準研究室」の名称となった。研究室を活動内容毎にグループ分けした結果、平成26年度現在、次世代時刻周波数標準グループ(原子時計に関する技術開発)、次世代時空計測グループ(主に衛

星仲介及び光ファイバを用いた比較・伝送技術の開発)、日本標準時グループ、次世代時空計測グループ(鹿島)(VLBI技術の開発)として活動している。準天頂衛星のプロジェクトは総務省委託研究の完了に伴い平成23年度に解散した。

#### 2.16.2 第1期中期計画：電磁波計測部門

##### (1) 周波数標準設定、標準電波発射、標準時通報

日本標準時の定常業務においては、周波数国家標準及び日本標準時を安定に発生・維持・供給した。平成14年にシステム全般に渡り大幅更新した新日本標準時システム(図2.16.1)の開発に着手し、新2号館(平成16年完成)にて平成17年度末に定常運用を開始した。国際的に検討が始まったうる秒廃止の議論に関しては、国内での課題を平成14年より検討した。時刻比較の定常業務においては、平成13年にはがね山標準電波送信所を開局し、GPS/GLONASS衛星による時刻比較、及び静止衛星を利用した衛星双方向時刻比較の双方で定常観測を実施した。平成16年には長波送信所2局に双方向用新モデムを配備した。



図2.16.1 新日本標準時システム

時刻・周波数供給においては、長波標準電波(図2.16.2)、テレホンJJY、TVサブキャリア等によるサービスを安定に運用した。平成16年にはTVサブキャリアサービスを終了するとともにテレホンJJYを新システムに更新(図2.16.3)し、またNTP専用線サービスを開始した。標準電波においては、電波干渉に関する寄与文書2件をITU-Rに平成17年に提出した。



はがね山標準電波送信所

おおたかどや山標準電波送信所

図2.16.2 標準電波送信所



↑ 公開NTP用サーバー

← テレホンJJYシステム

図2.16.3 日本標準時の供給システム

周波数校正においては、平成14年に校正システム(ISO/IEC17025適合)が国家計量標準機関としての認定(ASNITE-NMI認定証)を受けた。また平成15年に計量法に基づく「特定標準器を用いた指定校正機関」として周波数校正サービス(jcss校正)を開始した。平成17年にGPS衛星を用いた遠隔校正業務を開始し、また周波数標準の国際承認(CMC)を取得した。

## (2) 時空標準に関する研究開発

### a) 標準時に関する技術開発

電子時刻認証に関しては、平成13年に民間との共同研究も含め研究を開始した。平成17年にはタイムスタンプ統合化プラットフォームを構築し、タイムビジネスにおける国家時刻標準機関として標準時の提供を開始した。また平成15年より関西先端研究センター(神戸)にシス

テムを設置し、実験を行った。

ネットワーク時刻同期技術に関しては、高精度・高速タイムスタンプを開発し、小金井-大手町間などでの実証試験を経て、平成17年にはインターネット時刻供給サーバ(SNTPサーバ)を公開試験運用するとともに、クライアント側での品質向上技術を開発した。またデータセンター・間利用に適した光ファイバ高精度時刻配信システムを開発した。これらの技術は以降、公開NTPサービスに活用された。

### b) マイクロ波標準

光励起型Cs一次周波数標準器(CRL-O1)の運用では、年数回のペースでBIPMへの報告を行った。不確かさは、特に統計的な部分が運用のたびに多少変動したが、平成13年には確度 $6 \times 10^{-15}$ を達成した。運用実績から、不確かさ $8 \times 10^{-15}$ として評価論文を取り纏め、平成16年にMetrologia誌に掲載された。平成17年にはレーザーやCsオープン交換等の改良と再調整を行ったが、不確かさ $6.8 \times 10^{-15}$ という自己評価の範囲内でBIPM調整値とよく周波数が一致することを確認した。

Cs原子泉型一次周波数標準器の開発では、平成14年にラムゼー共鳴信号の取得に成功し、平成15年に安定化と高S/N化により $10^{-15}$ 台を達成した。平成16年に新2号館にて現NICT-CsF1の実験を始め、ほぼ目標通りの安定度 $6 \times 10^{-13}$ @1秒、 $4 \times 10^{-15}$ @20,000秒を達成した。平成17年には $2 \times 10^{-15}$ 程度の不確かさ見通しを得ることができた。

衛星搭載を目指した小型水素メーザーの開発では、平成13年に検討を開始し、準天頂衛星プロジェクト開始後はその課題の1つとして開発を進めた。

### c) 光標準

光周波数標準の開発では、平成14年に $\text{Ca}^+$ イオントラップ標準器を目指してトラップ装置と精密光周波数計測用光源(クロックレーザー)の開発に着手した。計測システム(光コム)、クロックレーザーなどを整備し、平成16年末に $^{40}\text{Ca}^+$ イオンの捕捉と冷却信号取得に成功した。平成17年には、クロックレーザーの線幅として当時世界トップレベルの数Hzを実現するとともに $^{40}\text{Ca}^+$ シングルイオンのクロック遷移周波数でMHzオーダーの測定結果を得て、標準器としての基本動作を達成した。

### d) 比較・伝送

静止衛星を仲介とする衛星双方向周波数時刻比較技

術の開発においては、時刻比較用モデムを独自開発し、アジア太平洋地域での実運用を平成14年に開始した(図2.16.4)。平成15年に米国との試験観測を開始するとともに、平成17年には日独間の時刻比較精度0.4 ns(相対値)を実証した。また、校正用小型可搬局を整備し、国内予備実験で時刻較正精度2 nsを確認した。



図2.16.4 衛星双方向周波数比較用アンテナ群

GPS 搬送波位相比較法(GPSCP)においては、BIPM キャンペーン実験(平成14~15年)に参加し受信機校正を行うとともに、時刻比較ソフトの開発によりサブナノ秒の見込み精度を確認し、平成17年には日米間実験で平均時間1時間で $3 \times 10^{-14}$ の周波数比較精度を実証した。

ETS-VIII 衛星による高精度時刻比較実験では、衛星搭載機器の開発及び打上げに向けた準備を進めた。

総務省受託研究「準天頂衛星システムの研究開発」(平成15~23年)においては、平成15年に衛星搭載時刻管理系の概念設計を開始し、平成17年にEM製造に着手した。地上系は平成16年に設計を開始した。要素技術としては通信端末に関する基礎研究として、リングフィルタを利用した周波数可変VCOやアンテナを開発し特許化した。

パルサータイミング計測に関しては、3年半にわたる観測データをまとめて平成14年に論文化するとともに、日露間の共同観測データ解析の結果、宇宙空間伝搬媒質における経年変化を検出してロシアと共著論文文化した。

#### e) VLBI・SLR

首都圏広域地殻変動観測プロジェクトの最終年度(平成13年)として成果を取りまとめた。具体的には、平成12年6月下旬に発生した三宅島の噴火活動とこれに起因する海底地殻へのマグマ貫入によって引き起こされた首都圏での広域地殻変動を検出、その収束に至るまでの経緯をリアルタイムVLBI技術を活用して観測し、結果を

気象庁、地震予知連絡会等に提供した。また、宇宙測地観測機器によるコロケーション観測で重要な基準点を結ぶ測量を実施した。国際基準座標系への貢献が評価され、国際地球回転事業(IERS)から感謝状を受けた。

広帯域VLBI、準実時間VLBI技術開発においては、データ交換インターフェースVSIの仕様制定への貢献が評価され、平成13年に国際VLBI事業が総務大臣賞を受賞した。平成14年に開発した16チャンネルIP-VLBIシステム(K5/VSSP)やギガビット関連処理システム(GICO-2)等を統合したK5/VSI観測システム及びデータ処理ソフトウェアが平成17年に完成し、世界最速となる2 Gsps・4 Gbps サンプルングでのVLBI観測及び1 Gbps 高速サンプルングでのリアルタイム関連処理システムの実証実験に成功した。同年9月に国際測地VLBI実験に参加し、時間分解能1時間でのUT1及び極運動の決定精度5.2  $\mu$ sec、0.12ミリ秒角を実証した。

VLBI技術を活用した宇宙飛翔体の準リアルタイム位置測定に関しては、IP-VLBIシステムを用いて探査衛星「GEOTAIL」や「のぞみ」のVLBI試験観測を実施し、狭帯域テレメトリー信号でも群遅延観測が可能なることを実証した。また、小型探査機「ホイヘンス」に関してはESAの要請を受けデータ収集に成功し、国際貢献を果たした。小惑星探査機「はやぶさ」の地球スイングバイや小惑星イトカワへの着陸等においても、VLBI観測による位置計測に成功した。

#### f) アジア地域への貢献

アジア太平洋時間周波数標準中核研究機関計画では、平成13年から隔年で複数の研究者を地域から招聘し、トレーニングプログラムを実施するとともに、平成12年にアジア太平洋で初の時間周波数に特化した国際ワークショップを開催したことを受け、平成14年・平成16年にも継続して国際ワークショップを開催した。また、アジア太平洋地域の計量組織であるアジア太平洋計量計画(APMP)に参加し、傘下の時間周波数技術委員会(TCTF)で委員長を務めるなど国際貢献を果たした。

## 2.16.3 第2期中期計画：新世代ネットワーク研究センター

### (1) 日本標準時の高度化の研究開発及び供給

日本標準時の定常業務においては、前期に開発した新

日本標準時発生システム (NJST システム) により周波数国家標準及び日本標準時を安定に生成した。原子時計データの国際原子時への年間平均寄与率9~11%を実現して期間を通じ世界第2位の貢献度を維持した。

時刻比較の定常業務においては、衛星双方向や GPS 衛星による国際定常時刻比較網を運用し、韓国、中国、シンガポール、台湾の標準機関に対する技術支援を行った。平成19年には日独定常時刻比較に衛星双方向方式を採用し、UTC に対する日本標準時の差の計測の不確かさを0.7 ns から0.5 ns に改善した。さらに平成21年には GPS PPP 法への取組などにより、この計測の不確かさを更に0.5 ns から0.3 ns に改善した。

長波標準電波は2局体制でほぼ100%の運用率を達成したが、東日本大震災における福島第一原子力発電所事故の影響により「おたかどや山標準電波送信所」の停波を余儀なくされ、復旧は平成23年度に持ち越した。テレホン JJY、専用線 NTP サービスでもほぼ100%の安定供給を実現した。NTP に関しては、従来より処理能力を2桁高めた NTP サーバを独自開発し、平成18年に一般ユーザー向けサービス (公開 NTP) を開始した。その後、独自の時刻伝送装置を開発し、平成21年に大手町設置サーバによる公開 NTP サービスを開始した。平成23年1月以降、信頼性向上などのため、大手町の運用を停止し、NICT 本部に一本化してサービスを継続している。また、地下や建物内で電波時計を利用するための電波時計リピータを平成18年より開発し、平成20年にはタイ国内展示会で公開した。

電子時刻認証においては、タイムビジネス (時刻認証事業者) に日本標準時を安定に提供した。平成18年には、クライアント側で時刻認証を行う方式のシステムを開発した。本方式の標準化に関して、技術基準等の報告書を平成20年に国内認定機関へ提出した。また日本のタイムビジネス向け時刻配信方式は、平成22年4月に ITU-R TF.1876 として正式に承認された。この ITU 勧告を基に JIS 標準化案の策定と経済産業省への登録を平成21年に行い、JIS 取得の作業を進めた。

持ち込み校正においては、平成18年に新校正システムを完成させ、このシステムによる指定校正機関及び ASNITE の再申請、審査を経て新システムでの計量法に基づく特定標準器による校正 (jcss) サービスを開始した。平成22年には従来の固定周波数 (1、5、10 MHz) に

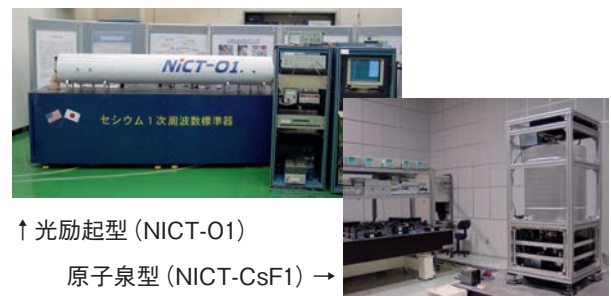
加え、1 Hz ~ 100 MHz の任意周波数にも校正範囲を広げた。遠隔周波数校正においては、GPS を用いたシステムが jcss 国内認可 (平成18年) と ASNITE-NMI 国際認可 (平成21年) を受け、受信装置は技術移転により平成22年に製品化された。平成20年には標準電波を用いた遠隔校正の研究に着手した。

## (2) 次世代時刻周波数標準技術の研究開発

### a) マイクロ波標準

平成18年に平均時間1秒での安定度が水素メーザーより2桁高い超高安定冷却サファイア発振器 (CSO) を導入した。これを Cs 一次周波数標準器や光計測の信号源として用いることにより、超高精度周波数計測が可能となった。

NICT-O1 (図2.16.5左) は平成18年の確度評価を最後に運用を終了した。原子泉型 Cs 一次周波数標準器 NICT-CsF1 (図2.16.5右) については平成19年に不確かさ  $2 \times 10^{-15}$  で国際承認を獲得した。以後 BIPM に各年数回の確度報告を実施した。CSO をマイクロ波信号源として用いることで短期安定度が従来より約3倍向上し、平成22年には不確かさ  $1.4 \times 10^{-15}$  を達成した。さらに新方式を取り入れた NICT-CsF2 の開発に着手した。



↑ 光励起型 (NICT-O1)

原子泉型 (NICT-CsF1) →

図2.16.5 セシウム一次周波数標準器

### b) 光標準

平成18年より広帯域光コム (図2.16.6左) を開発し、10,000 秒で  $10^{-16}$  以上の周波数安定度を実証した。さらに CSO の導入により短時間計測精度が向上し、平成20年には超高安定クロックレーザー (図2.16.6右) の1秒の安定度を世界トップレベルの  $10^{-15}$  台に向上させた。光周波数の校正用に波長  $1.5 \mu\text{m}$  の通信波長帯においてフェムト秒ファイバ光コム及び超狭線幅レーザーを開発した。また、光周波数標準器のクロックレーザーの要となる光共振器においては、国内企業との技術連携により

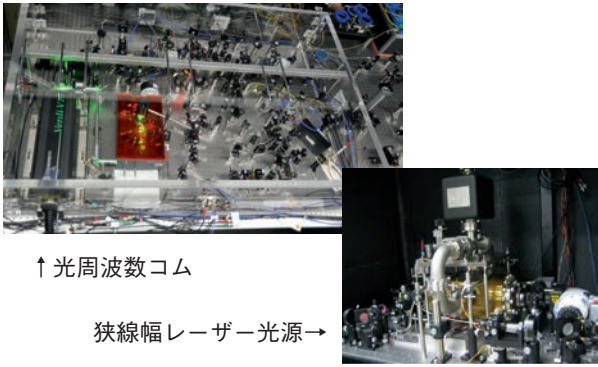
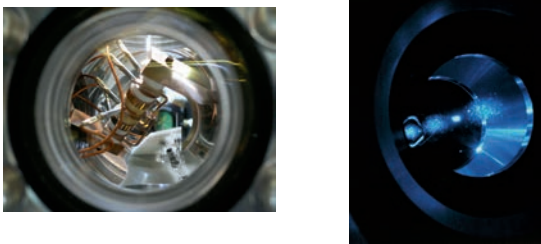


図2.16.6 超高精度光計測の要となる装置

国産化への道を拓き、開発された共振器は第3期中期計画のSr光格子時計において実利用された。

Ca<sup>+</sup>イオントラップ光標準(図2.16.7左)に関しては、平成20年に時計遷移周波数の絶対値を決定し世界に先駆けて論文化した。この結果は平成21年6月に国際度量衡委員会の周波数・波長標準作業部会で承認され、Caイオンの時計遷移が長さ標準を定めるための推奨放射リストに新たに登録される成果となった。平成22年には磁場の影響を抑えることで不確かさを $10^{-14}$ 台から $10^{-15}$ 台へ向上させた。

Sr光格子時計(図2.16.7右)に関しては、平成18年に開発に着手し、平成21年に遷移周波数の絶対値を不確かさ $7 \times 10^{-15}$ で評価した。平成22年度末には国立大学法人東京大学のSr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、以後の詳細な検討により2つの独立した光周波数標準器が $10^{-16}$ 台で一致するという顕著な成果を生んだ(2.16.4 (2) b) 参照)。平成22年には、Ca<sup>+</sup>イオントラップ光標準及びSr光格子時計の光領域での直接比較により、2,000秒で $3 \times 10^{-16}$ の周波数安定度を確認した。

左) Ca<sup>+</sup>単一イオントラップ装置

右) 光格子時計内で捕捉されたSr原子

図2.16.7 光周波数標準器

### (3) 時空計測技術の研究開発

衛星双方向比較方式については、国内外での送受信局較正実験を実施し、局内遅延時間を1 ns程度で決定した。また、新技術である複信号方式を用いた双方向比較の研究を平成18年に本格的に開始し、台湾との長期連続試験において、短期(数千秒以下の平均)で約30 ps、それ以上の長期で約200 nsという従来技術の数倍良い比較精度を実証した。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、静止衛星を利用した場合と同等な結果が得られた。

GPS時刻比較方式については、搬送波位相方式により韓国、台湾及びNICT間で精密時刻比較実験を実施し、平成20年には1日平均で $10^{-15}$ 台の精度を達成した。

ETS-VIII衛星による時刻比較実験については、平成18年の打上げ後に高精度時刻比較ミッションの正常動作を確認した。平成21年には地上の2点間で搬送波位相方式による比較実験を行い、従来方式より1桁程度の高精度化を実証した。平成22年には、1,000秒平均で $7 \times 10^{-15}$ の周波数安定度を確認した。

総務省からの受託研究の準天頂衛星「みちびき」における時刻管理系の研究開発においては、平成21年に衛星搭載機器の開発を完了し、搭載系・地上系の総合システム検証を実施した。サロベツ、父島、カウアイ(米)にモニタ局・時刻管理部を整備した。平成22年9月の打上げ後、定常運用に移行して技術実証実験を開始し、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、L帯3波信号のタイミング計測の各実験で、目標の1 ns以下の精度を達成した。

1.5 μm光通信帯における $10^{-14}$ 台の計測精度を目指して、平成18年に光源などの整備を開始した。1.5 μm帯信号を用いたマイクロ波伝送では、平成20年に東京都内114 kmの光通信網において1日平均での精度 $10^{-18}$ 台で周波数伝送を達成した。平成21年にはJGN2plusの小金井-大手町-白山間通信網を利用して総距離204 kmの伝送に成功した。

### (4) 時空統合標準技術の研究開発

#### a) VLBI

リアルタイム地球姿勢決定の研究では、国際基線によるUT1推定に要する処理時間を5分以内に短縮(従来は3時間)した。この技術は平成20年に国土地理院のUT1

定常観測業務に導入され、2～3日かかっていた処理時間を1日以内に短縮した。平成22年には国土地理院、スウェーデン、ドイツを結ぶ基線において、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。

数値気象予報データを用いて電波伝搬遅延誤差を大幅に軽減するモデル解析手法を開発し、また、世界測地系と整合する位置情報を算出するための解析プログラムを開発した。

平成18年には世界最小口径2.4 m アンテナと国土地理院つくば32 m アンテナ間での測地 VLBI 観測に成功した。平成19年には小型分割可搬型1.6 m アンテナを開発して、この超小型システムにより平成22年に鹿島-つくば間で測地実験を実施し、基線長推定結果の再現性による計測精度評価において、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2.7 mm を上回る2.4 mm の精度を確認した。

VLBI 技術を用いた周波数比較の予備的な評価に着手し、鹿島-小金井基線においては、平均化時間10万秒で $10^{-15}$ の安定度を達成した。また、VLBI と同時観測したETS-VIII、GPS、衛星双方向複製疑似雑音信号方式による周波数比較結果と比較して精度評価を行った。

#### b) 電波資源拡大

電波利用状況を把握し周波数資源を効率的に配分することを目的に、総務省受託研究「広域電波強度分布測定技術の研究開発」を平成19年から開始した（～平成23年）。さらに平成20年には「統計的手法による放射電力測定技術の研究開発課題」の受託研究も開始した（～平成23年）。

### 2.16.4 第3期中期計画：電磁波計測研究所

#### (1) 時空標準の高度利用技術の研究開発

##### a) 標準時業務

日本標準時の定常業務においては、NJST システムにより周波数国家標準及び日本標準時を高精度かつ安定に生成した。新技術として、平成23年に標準時分散構築システムの開発を開始した。未来 ICT 研究所の建物内にシステム整備を進めた。また、光標準とのリンクに必要な計測技術として、平成23年に高周波計測システムの開発に着手した。

周波数供給においては、長波標準電波、テレホン JJY、NTP サービスを安定に実施した。テレホン JJY では月14万アクセスを越え、公開 NTP サービスでは日に2.6億アクセスを突破した（平成26年7月現在）。標準電波においては、平成23年に福島第一原子力発電所事故の影響で、おおたかどや山標準電波送信所の要員退避・運用停止を余儀なくされたが、一時立入により4月より運用を再開し（図2.16.8）、9月には送信装置の遠隔操作化と NICT 本部での24時間監視体制を確立し、以後の運用を続けている。標準電波送信所の老朽化対策として、平成24年にははがね山、平成25年にはおおたかどや山の各標準電波送信所の設備更新に着手した。



図2.16.8 東日本大震災後のおおたかどや山標準電波送信所での復旧作業

電子時刻認証においては、平成23年5月に時刻配信・監査方法が日本工業規格 JIS X 5094 として標準化され、さらに平成26年には国際標準化機構 ISO/IEC 18014 part4の最終国際規格案となった。

周波数校正業務に関しては、標準電波を用いた遠隔校正装置において受信周波数の遠隔切替機能の追加などシステム改良を進めるとともに、沖縄・金沢・サロベツにてデータ取得を継続した。受信状況の変化に対応するべくシステムを改良し、受信同期精度を向上した。

##### b) THz 標準

平成23年に未開拓な THz 領域における周波数標準の確立のための研究に着手した。平成25年までにサブ THz キャリア光源及び THz コムを用いた計測システムを開発し、0.3 THz で $10^{-17}$  台の周波数計測精度を達成し、この結果は Nature Photonics 誌のリサーチハイライトとして紹介された。さらに、世界初の THz 周波数分周

器を開発した。また、分子イオン THz 周波数標準に関する理論論文が Journal of Physics B 誌の平成24年ハイライト論文として選出された。

### c) 国際活動

アジア太平洋計量計画／技術委員会 (APMP/TCTF) における国際活動においては、標準校正の国際相互承認に関するプロセスを標準化ドキュメントにまとめ、TCTF 技術委員会で平成24年に採択された。うるう秒対応議論が平成27年世界無線通信会議 (WRC-15) の議題になったことに伴い、アジア・オセアニア地域無線通信連合 WRC 準備委員会 (APG-15) に平成24年から参加した。

## (2) 次世代光・時空標準技術の研究開発

### a) マイクロ波標準

平成23年より原子泉型 Cs 一次周波数標準器 NICT-CsF1 のオーバーホールと各部改善を実施した。また光トラップ方式を組み込んだ2号機 (NICT-CsF2) の開発では、 $10^{-15}$  台の確度を確認するとともに高確度化に向けた新計測手法の開発を進めている。

### b) 光標準

前期に開発した  $\text{Ca}^+$  イオントラップ光標準器の周波数確度を  $3 \times 10^{-15}$  に向上させた。さらに、 $\text{Ca}^+$  単イオン光時計と Sr 光格子時計を光領域で直接比較することで  $\text{Ca}^+/\text{Sr}$  の周波数比を高い信頼性で確定した。この結果は、平成24年に秒の定義等を議論する国際諮問委員会 CCTF で承認され、 $\text{Ca}^+$ 、Sr 双方ともに CCTF の推奨周波数値の更新に貢献した。平成23年に  $\text{In}^+$  イオントラップ標準器の開発を新たに開始した。平成25年までに  $\text{Ca}^+/\text{In}^+$  共同冷却サブシステムや時計レーザーサブシステム等、時計遷移周波数精密計測システムを構成する主なサブシステムの稼働を開始し、これらを統合運用して時計遷移観測実験に着手した。

Sr 光格子時計においては、平成22年度末の国立大学法人東京大学との周波数比較実験の結果から2局間の標高差 (56 m) による相対論的周波数シフトをリアルタイムに検出した。このシフト補正後の周波数が不確かさ  $7 \times 10^{-16}$  で国立大学法人東京大学と一致したことで、光格子時計の16桁の普遍性を証明した。また、絶対周波数を  $3 \times 10^{-15}$  の確度で決定した。さらに、 $\text{Ca}^+$  イオントラップ用の超高安定クロックレーザーと光コム

でリンクすることで高安定化したクロックレーザーにより Sr 光格子時計の時計動作を実現した。この結果は平成23年に Nature Photonics 誌の技術ハイライトとして紹介された。その後細部の最適化を進め、ドイツの Sr 光格子時計との周波数比較実験で顕著な成果を上げ (次項参照)、絶対周波数確度についても  $1.7 \times 10^{-15}$  に改善した。また新技術開発としては、極低温環境を備えた Sr 光格子時計2号機の開発を平成23年に、単結晶材による光共振器を利用した超高安定光源の開発を平成25年に、それぞれ開始した。

### (3) 次世代光・時空計測技術の研究開発

衛星双方向比較技術においては、複疑似雑音比較方式 (DPN 方式) において、平成23年に非静止衛星による準実時間連続計測を小金井-沖縄及び小金井-鹿島間で実施し、短期 (数秒)・長期 (数日) で100 ps を切る精度を達成した。さらに送信波間の干渉軽減を図り、平成24年の小金井-沖縄間実験において、短期安定度においても GPS 搬送波方式の2.5倍の精度が得られることを実証した。また、新技術開発として、平成23年に搬送波位相方式の研究にも着手した。平成24年に10,000秒で  $4 \times 10^{-16}$  のシステム周波数計測精度を確認し、平成25年には世界でも最長基線 (約9,000 km) となる NICT-PTB (ドイツ) 間にて国内短基線と変わらない測定精度 (0.2 ps@1 s) を実証した。これは搬送波位相を用いない従来方式の精度を2桁以上上回る結果である。また、同基線において衛星双方向比較により、両機関にある Sr 光格子時計同士の間での直接比較を実施し、不確かさ  $1.6 \times 10^{-15}$  で両時計の周波数が一致することを確認した。これは世界初の大陸間の光格子時計直接比較実験であった。

対外活動としては、ニュートリノ速度検証に関して高エネルギー加速器研究機構と共同研究契約を結び、平成25年には J-PARC と岐阜県神岡町との間で精密時刻比較実験を行った。また、ESA が推進する国際宇宙ステーション利用のミッション ACES に関して、日本代表機関として地上局の運用管理を行うことが決定となり、平成25年度に受入れ準備に着手した。

総務省からの受託研究である「準天頂衛星における時刻管理系の研究開発」は平成23年が受託最終年度となり、小金井-沖縄間の比較実験において当初の目標であった1 ns 以下の周波数比較精度を達成した。

光ファイバ伝送技術では、キャリア伝送システムによる周波数比較の実証を行うとともに、マイクロ波伝送システムの市販化に向けた装置を試作した。

#### (4) 時空統合標準技術の研究開発

VLBIの精度向上を目指した広帯域受信系の開発を開始し、平成25年までに、2-15 GHzにおける電波干渉などを考慮した観測周波数4バンドの最適配列を確定した。この帯域に適合する大型カセグレンアンテナ対応広帯域フィード(6.5-15 GHz)を独自設計で開発し、鹿島34 mアンテナへ搭載した(図2.16.9上)。合わせて超小型アンテナ(図2.16.10)の広帯域化を行うとともに、実証実験のため鹿島・小金井・つくば(独立行政法人産業技術総合研究所と協力)の3局へのシステム配備を整えた。データ取得系においては、新規開発した高速A/D変換器の性能評価を行うとともに、RFダイレクトサンプラ(図2.16.9下)のスケジュール観測に対応したデータ記録ソフトの整備も行った。さらに、鹿島-小金井間の高速度回線を整備し、分散処理システムの基盤整備を進めた。



図2.16.10 VLBI用34mアンテナ(左)と超小型アンテナ(右)

統合解析ソフトウェアに関しては、平成25年までにVLBI+GNSSデータ、及び地上測量データを統合解析する機能実装を実現した。このソフトウェアを使ってVLBIとGPSの統合解析を実施し、統合解析の有効性を確認した。さらに、実データを用いてVLBI及びGNSS周波数比較の解析を試行した。この統合解析ソフトウェアの応用として、平成23年にはGPSを用いたリモートセンシング観測を実施し、NICT本部の60 m鉄塔上で連続観測により、降雨による反射率の変化を検出した。

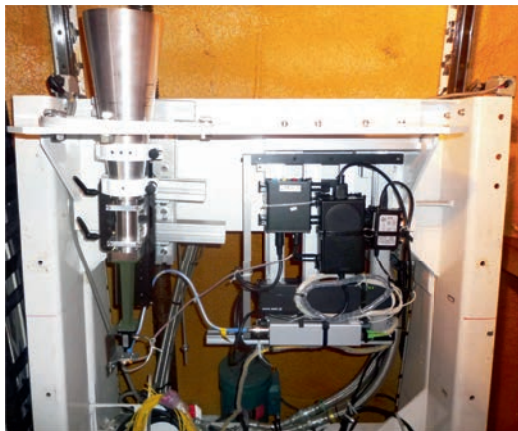


図2.16.9 34mアンテナ用広帯域フィード(上)とダイレクトサンプラ(下)