

### 3.7.4 電磁波計測研究所 時空標準研究室

室長 花土ゆう子 ほか 33 名

#### 日本標準時の発信とともに究極の次世代標準を開発

##### 【概要】

周波数標準は、無線通信における利用周波数帯の拡大や、光通信技術の開発と導入による超大容量化等が進む情報通信システムの維持・発展を支えるとともに、時刻の定義や広範な精密物理計測の基盤となっている。この周波数標準の一層の高精度化、高信頼化等を図り、この分野における国際競争力を一層強化することを目的として、テラヘルツ帯など現在実現されていない新たな領域の周波数標準を確立することなどの高度利用技術、これまでのマイクロ波領域に代わる光領域の周波数標準の開発、及びその評価のための時空計測技術の高度化等の研究開発を行う。

##### 【平成 23 年度の成果】

#### (1) 標準時および周波数標準の発生と供給に関する業務と研究開発

NICT 本部（小金井）で運用する原子時計群により、日本標準時と周波数国家標準を年間を通じて安定に発生・供給した。

標準時の発生に関しては、正確な 1 秒の基準となるセシウム一次標準器の 1 号機（NICT-CsF1）のオーバーホールと各部改善を実施。また開発中の 2 号機（NICT-CsF2、図 1）では最終評価に向け、高い周波数安定度を確認した。合成原子時のアルゴリズム研究においては、水素メーザ原子時計を用いた新しい時系のシミュレーションで高い安定度を確認した。また標準時分散管理の実現に向け、神戸の未来 ICT 研究所に分散システムを構築するための建物工事設計を実施した。

標準時の供給に関しては、テレホン JJY では 14 万アクセス / 月を超え（12 月）、公開 NTP サービスでは 1.4 億アクセス / 日を確認した（3 月）。標準電波送信においては、福島第一原子力発電所事故に起因する要員退避により、おたかどや山標準電波送信所の運用を一時停止したが、4/21 の緊急立入（図 2）を初回とし、一時立入を繰り返す体制で運用を再開。秋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。

タイムスタンプに関しては、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、さらには国際標準化機構 ISO/IEC 18014 の part4 として制定するための提案が、セキュリティ技術専門委員会第 2 作業グループの作業文書として採択された。

周波数校正に関しては、標準電波を用いた遠隔校正システムの開発において、沖縄及びサロベツにおける受信データをもとにシステムを改良し、さらに、遠隔から 40kHz と 60kHz の受信周波数を切替え可能とした。またアジア太平洋計量計画 / 技術委員会（APMP/TCTF）における国際活動として、標準校正の国際相互承認に関するプロセスを整理し、国際ワークショップを主催してとりまとめた標準化ドキュメントを TCTF 技術委員会に提出し採択された。

#### (2) 次世代周波数標準器の研究開発

前期に引き続き、次世代の周波数標準として究極の光標準の開発を進めた。イオントラップと光格子時計の両方式を開発の両輪とし、新しい原子種と高安定光源による光領域の周波数標準器の開発を進めた。

イオントラップに関しては、従来開発した  $\text{Ca}^+$  イオン標準器の遷移周波数を決定することで精度が  $5 \times 10^{-15}$  に向上した。また武漢物理数学研究所（中国）およびインスブルック大学（オーストリア）と協力関係を構築し、武漢とは国際周波数比較実験を実施した。今期から開発を開始した  $\text{In}^+$  イオントラップ標準器（図 3）では、基礎技術開発の初年度工程（ $\text{In}^+/\text{Ca}^+$  イオントラップ真空槽システムおよび協同冷却レーザーシステ



図 1 NICT-CsF2



図 2 おたかどや山送信所における緊急立入作業

ム)を完了、また周波数安定度の要であるクロックレーザーの基本性能を確認した。Sr 光格子時計に関しては、昨年度末に実施した東大とのリンク実験(図4)結果を詳細に解析し、各局の標高差による周波数の微小差をもリアルタイムに検出可能であることを確認した。周波数が東大の装置と確度 $5 \times 10^{-16}$ で一致したことで、国際原子時との比較による手法では検証不能であった光格子時計の16桁の普遍性を証明した。また絶対周波数についても $3 \times 10^{-15}$ の確度で決定した。17桁の確度を目指す2号機の開発においては、液体窒素温度で動作する冷却真空チャンバーに関して新方式を考案・確定し具体的設計を開始した。新たな試みとしては、イオントラップと光格子の双方のメリットを活かすハイブリッド光標準を提案し、量子ICT研究室と連携して研究を開始、基本動作実証により計測制御系の信頼性を確認した。また、 $\text{Ca}^+$ イオントラップのクロックレーザーと光コムでリンクすることで安定度を上げたSr光格子時計のクロックレーザーを利用して原子時計動作を実現し、本方式の標準器としての実現可能性を実証した。この結果はNature Photonics誌の技術ハイライトとして取り上げられた。

これら光標準の開発に加え、未開拓領域であるTHz帯における周波数標準の開発も本年度より開始し、マイクロ波標準通信倍法で発生するTHz波の出力特性を評価し、THzコムの基本動作を確認した。さらに0.3THz発振器とTHzコムの相互比較に成功した。また $10^{-16}$ 台の確度が達成可能なTHz標準の理論を提案した。

### (3) 高精度な時刻・周波数比較・伝送技術の研究開発

光領域の周波数標準器の高精度評価を実現するため、従来用いられてきたファイバ伝送技術、衛星双方向時刻比較技術のさらなる高度化を行った。また新規課題としてVLBI技術を活用した時刻比較の研究開発を行った。

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い論文化するとともに、マイクロ波変調伝送システムの市販化に向けた試作を行った。衛星双方向時刻比較技術に関しては、非静止衛星を利用した複疑似雑音方式の準実時間連続計測を小金井-沖縄および小金井-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。また、さらなる精度向上を目指し搬送波位相方式の研究に着手した。具体的には短基線(小金井-鹿島間)実験を実施し、従来方式及びGPSでの結果との一致を確認するとともに短期(1秒)で1psを切る非常に高い測定精度を達成した。対外活動としては、ニュートリノ速度検証に関して関係研究機関より衛星時刻比較に関する問合せ・連携依頼があり、技術協力を開始した。

VLBI広帯域受信系の開発に関しては、広帯域フィードを試作し(図5)高開口率が見込めるフィードの形状をほぼ確定した。また条件が整えば1日の測定で $10^{-16}$ の安定度達成が理論的に可能であることを計算機シミュレーションで確認した。実観測としては、鹿島-小金井間において衛星双方向、GPS、及び11mアンテナによる同時実験を行い各手法による比較を行った。また新技術であるダイレクトサンプリング方式による測地VLBI実験に成功した。統合解析ソフトウェアに関しては、新たな物理モデルの導入、Kalmanフィルターの実装を開始し、GPSデータ解析の設計などを進めた。ソフトウェア開発ではさらに、GPSデータを用いたリモートセンシング技術開発に着手し、60m鉄塔上での連続観測により降雨による反射率の変化を検出した。またGLONASS衛星を用いた干渉方式の開発に着手した。

総務省受託研究である「準天頂衛星における時刻管理系の研究開発」は、受託最終年度の活動を行った。平成22年度に開発した準天頂可搬型TMS(時刻制御実験局:図6)を用いて小金井・沖縄における時刻・周波数比較実験を行い、予測性能を実証実験で確認した。時刻管理系搭載機器及び地上系を用いた時刻比較実験を行い、当初の目的であった1 ns以下の精度を達成した。

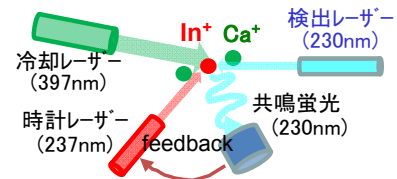


図3  $\text{In}^+/\text{Ca}^+$ イオントラップ方式

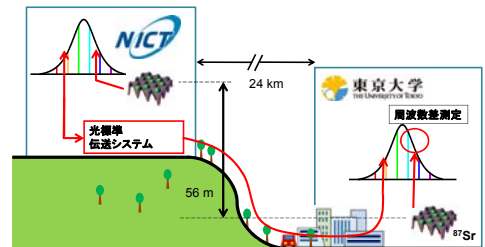


図4 Sr光格子時計の東大リンク実験

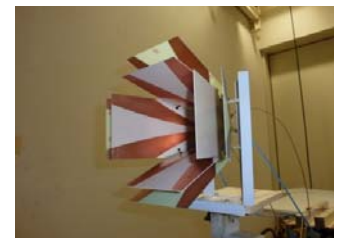


図5 広帯域フィード試作機



図6 準天頂可搬型TMS