

3.7.4 電磁波計測研究所 時空標準研究室

研究室長 花土ゆう子 ほか 30 名

日本標準時の発信とともに究極の次世代標準関連技術を開発

【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。この周波数標準のさらなる高精度化、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 24 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

日本標準時と周波数国家標準は年間を通じて安定に発生・供給を行った。特に7月1日のうるう秒挿入実施においては、事前確認と準備を入念に実施し、NICT 本部や標準電波送信所において順調に対応を行った（図1）。

標準時の発生では、標準時分散管理システム構築に関して、未来 ICT 研究所（神戸）内の施設改修工事を完了するとともに、現地での標準時同期時系の発生実験を行い $\pm 15\text{ns}$ 以内の同期精度を得た。また計測精度向上を目的とした計測システムの高周波化に関しては、高精度比較用 $1\text{GHz} \rightarrow 5\text{MHz}$ ダウンコンバータを開発した。

日本標準時の供給では、テレホン JJY では 14 万アクセス / 月を超え（図2）、公開 NTP サービスは 1.8 億アクセス / 日となった（2013 年 3 月時点）。また日本工業規格 JIS X 5094 として平成 23 年度に標準化した日本のタイムスタンプ認定制度における時刻配信・監査方法が、国際標準化機構 ISO/IEC 18014 part4 の委員会原案として承認された。標準電波を用いた周波数遠隔校正に関しては、沖縄、金沢及びサロベツにてデータを取得、受信状況の変化に対応するようソフトウェアの改良に着手した。

標準電波送信では、福島県おおかどや山標準電波送信所一帯が平成 24 年 4 月 1 日に避難指示解除準備区域に変更され、国による除染活動が進む中、随時の一時立入と遠隔操作により安定に運用を行った。はがね山標準電波送信所に関しては、送信設備の老朽化対策として設備更新に着手した。

国際活動としては、国際度量衡局が進める Rapid UTC 構築について、引き続きデータの即日提供で協力体制を維持した。うるう秒対応議論が 2015 年世界無線通信会議（WRC-15）の議題になったことに伴い、WP7A のみならずアジア・オセアニア地域無線通信連合 WRC 準備委員会（APG-15）に参加するなど対応を強化した。

(2) 次世代周波数標準器の研究開発

前年度に引き続き、イオントラップ光時計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。

平成 23 年度から開発を進めている In イオントラップ型においては、要素技術開発の工程がほぼ計画どおり進捗しており、2 個の Ca^+ で 1 個の In^+ を共同冷却し安定化する手法の確立、クロック遷移基本波レーザー（946nm）初期周波数の安定化、二段階第二高調波発生による安



図1 NICT 本部（小金井）におけるうるう秒挿入の実施



図2 テレホン JJY の月別アクセス数

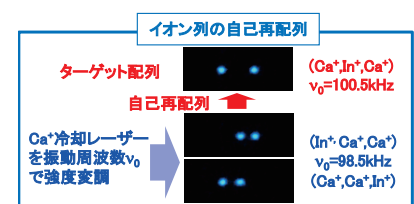


図3 Ca^+/In^+ 共同冷却を可能にするイオン列の制御技術

定なクロック遷移励起光 (237nm) の生成を行った (図 3)。Sr 光格子時計 1 号機については、研究室内に光領域の標準周波数の供給を開始。また平成 23 年 3 月に実施した東大 Sr 光格子時計とのファイバリンク実験の成果が応用物理学論文賞を受賞した。また、計画を進める過程で低温環境では更にさらに確度向上が見込めることがわかったので、低温環境を実現する真空チャンバーを用いた 2 号機を開発中である。2 方式それぞれの実機における評価としては、Ca 単一イオン光時計と Sr 光格子時計双方で、国際周波数リンク精度の上限である 10^{-15} 台の正確さで絶対周波数を確定した。また異なる種類の光標準を持つ強みを活かし、この

2 機を光領域で直接比較することで Ca^+/Sr の周波数比を高い信頼度で確定した (図 4)。これらの結果は主要論文誌に掲載されるとともに、秒の定義等を議論する国際諮問委員会 CCTF でも評価・承認され、 Ca^+ 、Sr 双方において CCTF の推奨する原子周波数の更新に反映された。光周波数標準間の周波数比については国際委員会でも今後勧告がなされる方向であり、NICT の実験はこの流れを加速する貢献となった。また米国 NIST 等主要研究機関から中心的な研究者を招へいして光周波数標準に関する国際ワークショップを NICT にて開催し、現状の情報共有と将来方向に関する意見交換を行った。

マイクロ波周波数標準の分野では、光トラップによる新方式を組み込んだセシウム一次標準器 2 号機 (NICT-CsF2) の開発において 10^{-15} 台の確度を確認するとともに、不確定さをさらに削減するための新計測手法の開発を進めている。また、未開拓領域である THz 周波数標準においては、THz とマイクロ波の間を結合するシンセサイザーを開発するとともに、THz コムを用いた測定で高い周波数安定度を得られることを確認した。また、光格子内の分子、または弦状結晶内の分子イオンを用いた 10^{-16} 台の確度が達成可能な THz 標準を理論提案した。

(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、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 VLBI 技術を活用した周波数比較の研究開発を行った。

光ファイバ伝送技術では、光標準に安定化した 2 つの波長帯の光を伝送し、伝送先でその和周波を生成することで、遠隔地での光標準周波数の利用が可能となる。この二波長伝送に向けて光源の準備を進めている。

衛星を用いた時刻比較では、双方向複疑似雑音比較方式に関して、狭帯域信号で問題となる送信波間の干渉軽減を図り、小金井-沖縄間で精度検証を行い、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事を確認した。また双方向搬送波位相方式に関しては、10,000 秒で 4×10^{-16} のシステム計測精度を確認するとともに、小金井-沖縄間の長基線測定でも短基線とほぼ同じ短期計測精度 0.4ps を達成した。また対外協力としては、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締結し、二周波 GPS 受信機の計測・解析支援を行うとともに、精密タイミング計測システムを J-PARC、神岡に設置し測定を行っている。

VLBI 周波数比較においては、鹿島-小金井間での 11m アンテナ実験により観測帯域幅の拡大が精度向上に有効であることを確認した。また超小型アンテナの電波干渉調査と対策を行い、試験観測に必要な 1 偏波分の広帯域受信機を整備した。また、3.2-14.4GHz の中から 4 つの 1.6GHz 帯域幅の信号を周波数変換なしに取得する新しいダイレクトサンプリング方式の高速サンプリングを試作し、技術実証実験の準備を整えた。広帯域受信系の開発においては、2-15GHz の電波環境調査を複数地点で行い、電波干渉などを考慮して実用的な観測周波数配列 4 バンドを決定し、これに適合する 34m アンテナ用広帯域フィードを数値シミュレーションにより設計した。また統合解析ソフトウェアに関しては、VLBI データ、SLR データ、及び地上測量データを統合解析する機能実装が実現し、地殻変動の事例解析において、VLBI と SLR の個々の解析による時系列に比較して誤差を軽減しつつ明瞭な時間変動検出に成功した。さらに GPS 解析機能もほぼ開発完了しテスト中である。

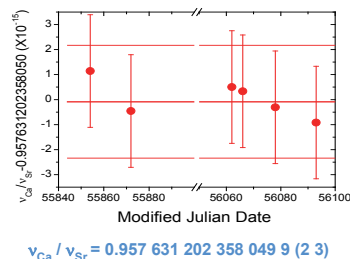


図 4 Ca^+/Sr の周波数比計測結果

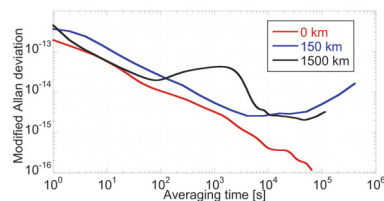


図 5 双方向搬送波方式での時刻比較計測精度

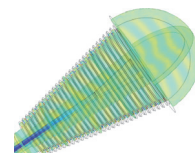


図 6 34 m アンテナ用実用広帯域フィード電磁界シミュレーションモデル