

## 高精度な周波数と時刻を生成・維持、そして供給する技術の開発

## ■概要

正確な時刻と周波数は、情報通信システムの維持・発展を支えるとともに、精密物理計測の基盤となっている。時空標準研究室では、標準時及び周波数標準の更なる高精度化、高信頼化を目指して、日本標準時やそこから得られる標準周波数の実用技術の開発、次世代周波数標準開発及びその評価や展開に不可欠な比較・伝送技術の開発を行う。平成29年度は中長期計画の2年目であり、日本標準時の分散化システムの構築、 $\text{In}^+$ イオントラップ光時計の開発、Sr光格子時計の時系応用、衛星双方向搬送波技術及びVLBI技術を用いた高精度周波数比較技術の開発を進め、また周波数標準の利活用技術として、無線双方向時刻比較技術及びチップスケール原子時計の開発を進めた。

## ■平成29年度の成果

## 1. 標準時及び周波数標準の発生と供給に関する業務

日本標準時の発生では、定常業務を安定に継続した。平成29年度は供給系設備を中心に設備更新に着手した。電源インフラ設備についても、脆弱部見直しと強化のための設備改修を行った。標準時分散化システムの構築では、日本標準時への同期精度評価を行い通常の水素メーザーなら2 ns、代替信号源のCs時計でも7 ns程度で同期できることを確認した。

日本標準時の供給に関しては、テレホンJJYで月間15万アクセスとなる状況が続くとともに、公開NTPサービスでは1日あたり13億程度のアクセス数が続いている。標準電波においては、送信時間率99.96%で安定運用されている。新たな時刻供給法として前年度実験運用を開始した「光電話回線による時刻供給」では、平成29年度から分散拠点の神戸からも実験運用を開始した。

国際活動においては、原子時計データを継続して提供し世界の標準時構築に貢献するとともに、度量衡の国際委員会 (CCTF) でWGチェア等の委員活動を実施したほか、アジア太平洋地域において域内のGNSS校正高度化を目的とした活動に参画し、また、ITU-Rに日本代表として参加した。タイムビジネス認証制度の時刻配信業務に関する規格JIS X5094について、国際規格のISO/IEC

18014-4と整合を取る改訂作業を実施した。

## 2. 次世代周波数標準器の研究開発

光周波数標準の開発では、まず2017年6月に開催された国際度量衡委員会時間周波数諮問委員会において、当研究室で測定したストロンチウム (Sr) 光格子時計及びインジウムイオン ( $\text{In}^+$ ) 光周波数標準の時計遷移周波数を報告し、これが委員会において採択され、推奨周波数の改訂に大きく貢献した。Sr光格子時計においては仏独の標準研究所から新しく報告された値とかつてない精度で一致し、引き続き光標準で最も小さい不確かさを与えられることになった。 $\text{In}^+$ については、従来の推奨値より一桁以上小さい不確かさで報告し、これまでの推奨値を修正し、不確かさも大きく減少させることができた (図1)。また、Sr光格子時計を間欠運転することで水素メーザーの周波数ドリフトを16乗台程度の不確かさで把握できるようになった結果、日本標準時の周波数をリアルタイムに測定できるようになり、協定世界時に合わせるための周波数調整においてこのデータを参照できるようになった。 $\text{In}^+$ イオントラップ光時計では、磁気副準位による複数の遷移を分裂させ、より線幅の狭い分光スペクトルの取得に成功した。

テラヘルツ周波数標準技術においては、量子周波数標準となることが期待される周波数3 THz域にある一酸化炭素の遷移を励起可能な量子カスケードレーザー光源を

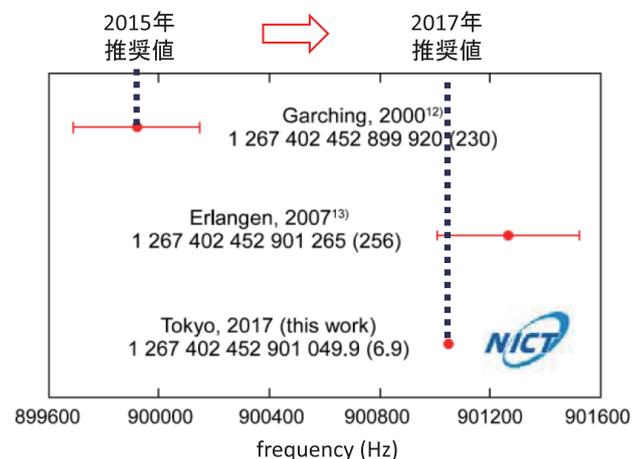


図1 インジウムイオン光周波数標準の測定値

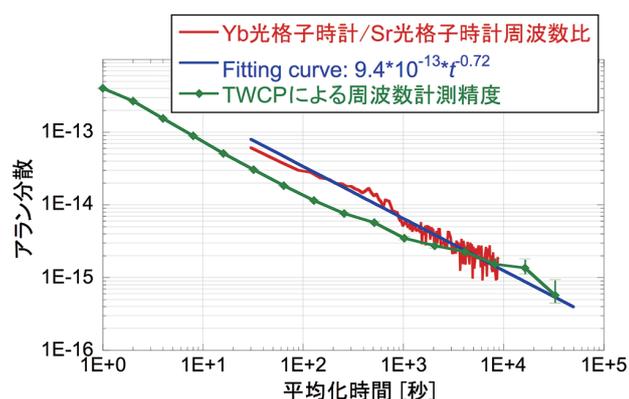


図2 衛星双方向周波数比較-搬送波位相方式によるNICT-KRISST間光標準周波数比較

開発した。また、市販THz測定器の簡易校正用ツールとなり得る、精度6桁程度の可搬型THz標準の開発を目的として、アセチレン ( $C_2H_2$ ) 分子に安定化された、2台の光通信帯レーザーによるTHz差周波発生にも着手し、 $C_2H_2$ 分子のスペクトル観測に成功した。

### 3. 高精度な時刻・周波数比較・伝送技術の研究開発

衛星双方向周波数比較-搬送波位相方式に関して、韓国標準機関KRISSTとの間で、Sr光格子時計 (NICT) とYb光格子時計 (KRISST) の周波数比較測定実験を実施した。その結果、わずか12時間の測定時間で16乗台半ばでの安定度を実証し、論文発表した。これは衛星仲介技術においても16乗台誤差が可能であるという重要な成果である (図2)。

欧州宇宙機関 (ESA) が主導する科学衛星プロジェクトACES参加準備に関しては、日本代表機関として運用する予定の地上局運用に必要な電源供給系、ネットワーク系及び無線免許取得準備等の環境整備を進めた。一方ESAにおける機器開発の遅れにより、地上局設置が2018年初頭から2019年初頭へ、また国際宇宙ステーション (ISS) への実験機器打ち上げが同年夏頃に延期となった旨の連絡をESAから受けた。

VLBI周波数比較では、産業技術総合研究所計量標準総合センター (NMIJ) とNICT本部 (小金井) に設置した小型アンテナを使ってUTC (NICT)-UTC (NMIJ) の比較実験を繰り返し実施し、GPSPPP解析との比較による計測精度の確認を行った (図3)。また、光格子時計を開発しているイタリア国立計量研究所 (INRIM) とその標準信号が光ファイバリンクにて伝送されているイタリア天体物理研究所 (INAF) との共同実験の可能性について議論し、NICTが開発した小型アンテナを2018年にINAFに移設、INRIMの光格子時計とNICTの光格子時計をVLBIにより周波数比較を行うことに同意し、準備を進めている。

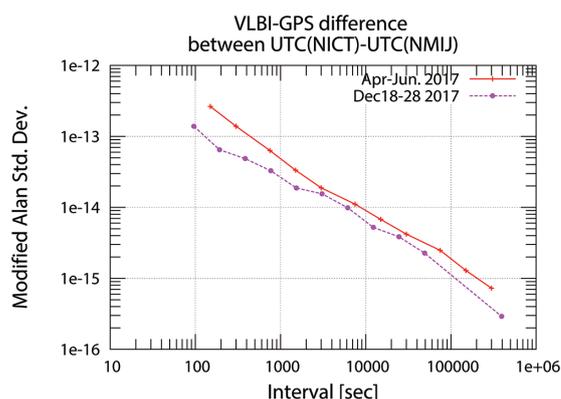


図3 UTC (NICT)-UTC (NMIJ) の時刻差の測定をVLBIとGPSで実施した結果の差から計算した修正アララン分散

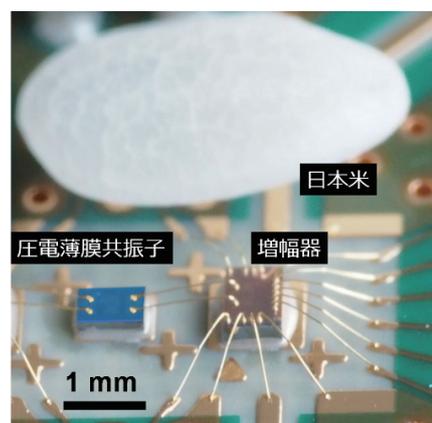


図4 チップスケール原子時計に搭載するための超小型3.4 GHz帯FBAR発振器

### 4. 高精度な時刻・周波数の利活用技術の研究開発

平成28年度に作成した無線双方向時刻比較 (ワイワイ) モジュール試作2号機のファームウェア改良により、高信頼な位同期と、モジュール7台までのネットワーク時空間同期を実現した。距離変動計測精度については、反射波が少ない電波暗室で、移動速度が毎時5 km以下の条件下で10 cmの計測精度を確認した。さらに、見通し距離5 kmでの計測が可能なハイパワー版のワイワイモジュール試作3号機を開発し、サブナノ秒の時刻比較精度を確認した。加えて、フィールドでの社会実装を想定し、バッテリー内蔵の防水型モジュール試作4号機を開発した。

また、MEMS及びIoT技術の発達に呼応するチップスケール原子時計の開発については、より確実に周波数が原子共鳴に安定化される変調法を提案し、その性能を実験的にも確認して論文化を行うとともに、その後FBAR (Film Bulk Acoustic Resonator) を利用した3.4 GHz発振器を開発し (図4)、またMEMSセルを新たに開発した。そしてこれら3つを組み合わせる原子時計動作を実現、その結果、本チップスケール原子時計の短期周波数安定度が商用品を凌駕することが明らかになった。