

### 3.1.3

## 時空標準研究室

室長 花土 ゆう子 ほか31名

### 高精度な周波数と時刻を生成・維持し、社会に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、次世代周波数標準の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28年度は中長期計画の1年目であり、日本標準時の分散管理システム構築、 $\text{In}^+$ イオントラップ光時計の開発、Sr光格子時計の高精度化及び時系応用、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、無線双方向技術及びチップスケール原子時計の開発を新たに開始した。

#### ■平成28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するとともに、1月1日にうるう秒調整を着実に行った(図1)。日曜の元旦の実施となったが、当日の説明会及び見学には400名超が訪れたほか、9社の取材対応を行った。また標準時分散化システムの構築では、信頼性向上のための試験を行い、また神戸副局のみでも安定した合成原子時が生成可能であることを確認した。

日本標準時の供給に関しては、テレホンJJYで月間14万アクセスを超える状況が続くとともに、公開NTPサー

ビスのアクセス数は平成28年9月には1日あたり20億に到達した。標準電波においては、前年度完了した設備更新以降、新設備での運用を安定に継続した。

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、アジア太平洋地域でも国際比較調整などで活動を牽引し、ITU-Rに日本代表として参加した。

##### 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、ストロンチウム(Sr)光格子時計において、真空槽内電荷の除去などによりSr系の不確かさを従来比2/3に低減( $5.7 \times 10^{-17}$ )し、さらに、国際原子時を利用して不確かさ $4.3 \times 10^{-16}$ で絶対周波数を評価した。ここで開発した手法は特定のCs(セシウム)原子泉に依存しないため、将来の秒の再定義において定義値を決定するのに貢献することが期待される。また、光格子時計を間欠的に運用し、その周波数を基準として水素メーザー信号の周波数のオフセット及びドリフトを予測し、それを打ち消す周波数調整を連続的に入れることによってリアルタイム連続原子時系を構築することに成功、結果確度・安定度ともに16乗台の信号を半年間にわたって生成し続けることに成功した(図2)。

$\text{In}^+$ イオントラップ光時計では、光源やイオンに照射する光学系の改良等を通じて、安定した時計遷移の励起が可能となり、先行研究の不確かさを1桁以上上回る



図1 うるう秒挿入の瞬間(NICT本館の時計表示)

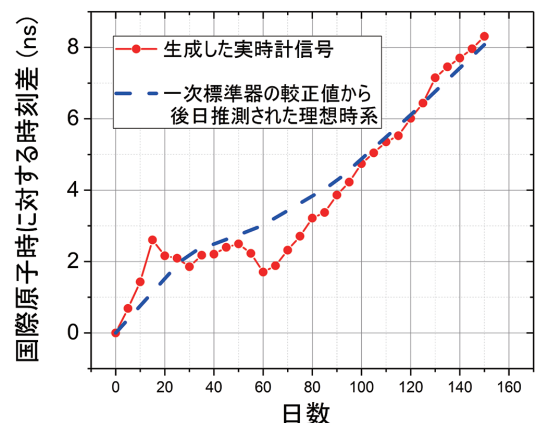


図2 Sr光格子時計による時系実信号の生成

15乗台の不確かさで絶対周波数を測定することに成功した。当該時計遷移の遷移周波数については2つの先行研究の間で13乗台での周波数不一致があったが、本測定によってどちらがより真値に近いか一定の結論を得ることができ、本測定結果は国際度量衡委員会が決定している $\text{In}^+$ 時計の推奨周波数を大きく変えることになることが予測されている。

テラヘルツ周波数標準技術においては、1～3 THz帯を網羅する広帯域THzカウンターを設計し、その動作実証に向けた開発に着手した。THz帯と光領域を位相同期したままリンクさせ、これを利用した新たなTHz基準周波数伝送システムにおいて精度18桁で位相コヒーレントに長距離伝送(20 km)できることを実証した。また酸素分子 $\text{O}_2^+$ イオンを用いた確度17桁が達成可能な中赤外周波数標準を理論提案し、論文発表した。

### 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(TWSTFT-CP)に関して、韓国標準機関KRISSとの間での実験を12月に開始した。TWSTFT-CPの結果をGPSのPPP(Precise Point Positioning/精密単独測位)解析及びInteger PPP(整数値バイアス固定方式PPP)解析による結果と各々比較した。特に、TWSTFT-CPとIPPPとの比較では、 $10^{-16}$ を切る安定度及び周波数差で一致する成果を得た(図3)。さらに、Sr格子時計(NICT)とYb格子時計(KRISS)との間での直接周波数比測定が実現した。また、今年度よりコード位相及び搬送波位相の双方を測定可能な新モデルの開発を開始した。

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設置時期がESAから平成30年初頭と提

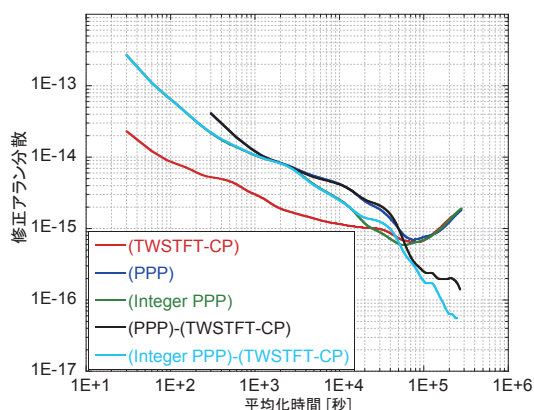


図3 平成29年1月19日より13日間にわたって実施したNICT-韓国KRISSでのTWSTFT-CP実験の結果

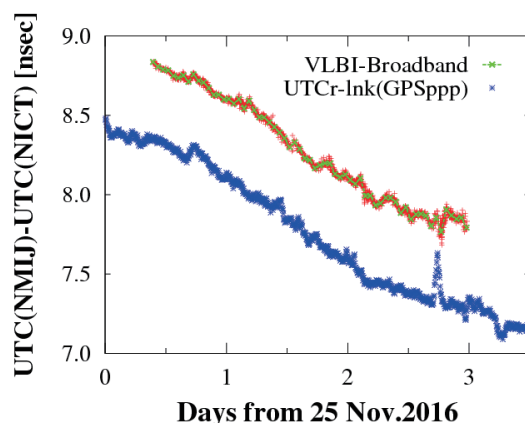


図4 UTC(NMIJ)-UTC(NICT)の比較をVLBI観測及びGPS観測それぞれの方法で測定した結果

示され、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とされたことを踏まえ、免許取得等、実験に向けての準備を進めている。

VLBI(超長基線電波干渉法)を用いた周波数比較では、高速サンプラを使ってRF信号を周波数変換なしに取得する方法により、安定した精密遅延計測が可能となった。観測精度を上げるため、小型アンテナの主鏡と受信システムを(口径1.6 m一次焦点から2.4 mカセグレン型へ)改善し、観測の感度を4倍以上向上させた。更に小型アンテナ2基と大型アンテナ1基を使った広帯域VLBI観測の精度評価実験を産業技術総合研究所計量標準総合センター(NMIJ)との間で繰り返し実施し、2 m級小型アンテナ間でも遅延計測精度が、1ピコ秒以下の精度となることを実証した。これは、従来の大型アンテナを使ったVLBI観測でも実現できなかった世界最高の精度である。また、超小型VLBI局を使った周波数比較性能がGPS PPP解析と同等以上であることを確認した(図4)。

### 4. 高精度な時刻・周波数の利活用技術の研究開発

本年度より無線双方向時刻比較(ワイワイ)技術の開発を開始し、通信無線を利用した時刻同期及び距離変動計測をソフトウェア無線機を利用して実証した。また、同時に本技術に対応した半導体チップ及びモジュール基板の製作に成功し、手軽に利用できる技術へと進めることができた。

また、MEMS及びIoT技術の発達に呼応してチップスケール原子時計の研究開発を開始し、デスクトップサイズの原子時計を構築して時計動作を実現するとともに、コンパクトな量子部の開発に向けてMEMSセルの試作を行い、原子遷移による吸収を確認した。