

世界初、国家標準時の維持に光格子時計を利用 ～NICT が持つ時計のみで協定世界時との同期が可能に～

【ポイント】

- 世界で初めて、光格子時計を参照した国家標準時を生成
- 標準時システムに光格子時計を加えることで、協定世界時に対して 10 億分の 5 秒以内の時刻維持が可能
- 標準時を光格子時計に基づいて運用することは秒の再定義のために望まれる条件の一つ

国立研究開発法人情報通信研究機構エヌアイシーティ(NICT、理事長: 徳田 英幸)は、間欠運転をする光格子時計^{*1}を参照して標準時を生成することに世界で初めて成功しました。光格子時計が発生する 1 秒を基準として標準時が刻む 1 秒の長さ(刻み幅)を調整することで、標準時の協定世界時(UTC)^{*2}に対する時刻差を従来の 10 億分の 20 秒から 10 億分の 5 秒以内へと 4 分の 1 以下に抑制可能です。

これにより、開発した光格子時計をこれまでの標準時生成で培ってきた複数時計の合成時刻生成技術と組み合わせることで、UTC や GPS 時刻等他国の時計に頼ることなく、長期にわたり正確な時刻を刻むことが可能となります。また、本成果は、2030 年に想定されている国際単位系の秒の再定義^{*3}の実現を大きく後押しします。

【背景】

近年、第 5 世代移動通信システム(5G)や衛星測位、さらには超高速取引等、マイクロ秒を超えてナノ秒領域での時刻精度が求められる分野が増えており、国際的な基準時刻である UTC にリンクした正確な時刻を維持することの重要性が高まっています。

UTC は国際度量衡局(BIPM)^{*4}によって提供されており、各国の標準時は UTC を参照し、時差(日本の場合+9 時間)を付けて同期する形で生成・維持されています。しかし、UTC は世界中の原子時計のデータを集めてその重み付き平均を取り、半月以上遅れて数値データとして決定される時刻です。したがって、UTC に完全に同期した時刻を社会に供給することは不可能であり、NICT 等の標準時を生成する機関は自ら原子時計を運用し、できるだけ UTC と近い時刻を生成した上で、必要に応じて後から UTC との時刻差を把握できる形で時刻を供給しています。

NICT で生成・供給する時刻は、一般に日本標準時と呼ばれ、これまでは原子のマイクロ波領域の遷移周波数を基にした水素メーザ原子時計^{*5}やセシウム原子時計^{*6}を利用して生成し、標準電波、NTP^{*7}など多彩な手段で社会に供給してきました。また、NICT では、この標準時の生成・供給業務を遂行するとともに、光領域の遷移周波数を利用することで、より高い精度を期待できるストロンチウム光格子時計を開発してきました。近年では、光格子時計によって UTC が刻む 1 秒の長さを校正^{*8}する役割を果たすなど、世界の時刻維持に大きく貢献しています。

【今回の成果】

この度、NICT では光格子時計を参照して日本標準時の刻み幅を調整することで、より高精度な時刻を生成することに成功し、日本標準時の UTC に対する時刻差を従来の 4 分の 1 以下に抑えることが可能であることを実証しました。これは、国家標準時に光格子時計を利用する取組として世界で初めてです。

日本標準時は 2006 年以來、水素メーザ原子時計と約 18 台のセシウム原子時計を組み合わせることで、安定な時刻を発生してきましたが、これらのマイクロ波領域の商用原子時計は、多数台の平均を取っても発振周波数が 15

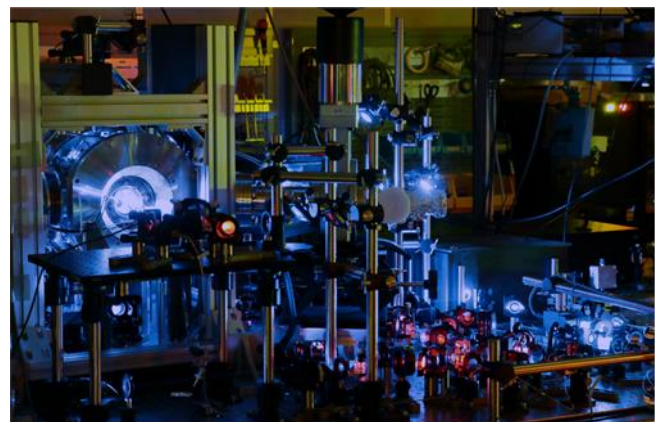


図 1 ストロンチウム光格子時計

桁目で変動し、その結果、数か月という期間で UTC との時刻差が 10 ナノ秒以上に広がってしまうことが起こり、そのたびに BIPM から半月以上遅れて公表される時刻差データを参照してマニュアルで日本標準時の周波数を調整する必要がありました。

一方、NICT が開発したストロンチウム光格子時計は、ストロンチウム原子の光学遷移に安定化された光を生成します。この遷移の固有周波数は、過去 10 年近くの間、NICT を含む世界中の多数の機関で測定されてきた結果、相対不確かさ 1.9×10^{-16} の範囲内で、429 228 004 229 872.99 Hz であることが分かっています。そして、この極めて小さい周波数不確かさを持つ光は、光周波数コム⁹ を利用して精度を劣化させずにマイクロ波の電気信号に変換することができ、これを日本標準時のマイクロ波出力周波数と比べることで、日本標準時の刻み幅がどの程度ずれているかを 16 桁の精度で正確に計測することができます。

NICT では、2021 年 6 月から週 1 回以上の頻度でこのストロンチウム光格子時計による標準時の刻み幅の妥当性評価を行い、2021 年 8 月から週 1、2 回、標準時の周波数調整を継続的に実施することにより、標準時の UTC に対する変動を抑えることができました(図 2 参照)。

近年、光時計¹⁰の進展は目覚ましく、2030 年を目途に、秒の定義を現在のセシウム原子のマイクロ波領域の遷移から原子の光領域にある遷移周波数によるものに変更するという「秒の再定義」が、時刻・周波数標準を扱う国際的な委員会¹¹で検討されています。光時計によって標準時の精度を維持することは、秒の再定義に向けて満たされることが望ましい条件の一つであり、今回の成果は、これを満たす初の実証例となります。

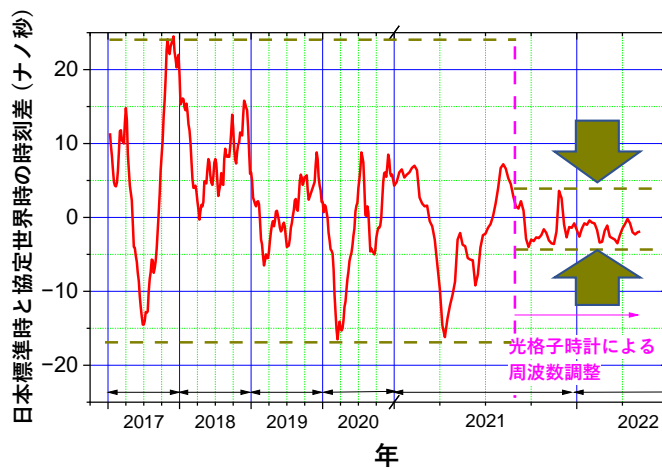


図 2 光格子時計の導入によって低減した日本標準時と協定世界時の時刻差

【今後の展望】

NICT では、日本標準時として常時生成することが期待されるこの高い精度の時刻や周波数を、次世代の通信技術(Beyond 5G/6G)や相対論による測地技術等に活用する方法を開発し、提案していきます。

現在、カーナビや無線通信網の基地局等は GPS から時刻を取得していますが、近年、過度な GPS への依存に対して世界的に注意が喚起され、米国では GPS への依存度を下げる方策を検討することが大統領令¹²として出されるに至っています。今回の成果は、我が国が UTC や GPS 等他国によって生成された時刻に依存せず、自らが持つ原子時計群で正確な時刻を刻むことができるという経済安全保障にもつながるものです。

今後は、耐災害性の観点から、NICT 本部(東京都小金井市)の原子時計のみによる標準時生成を NICT 神戸副局等を利用して分散化することにも取り組み、精度と耐災害性のバランスの取れた強靱な標準時を目指していきます。

< 本件に関する問合せ先 >

国立研究開発法人情報通信研究機構
電磁波研究所
電磁波標準研究センター
時空標準研究室
井戸 哲也
E-mail: stsl_inquiry@ml.nict.go.jp

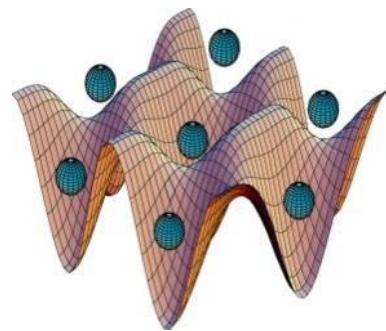
< 広報(取材受付) >

広報部 報道室
E-mail: publicity@nict.go.jp

<用語解説>

*1 光格子時計

2001年に東京大学大学院工学系研究科の香取秀俊准教授(当時)によって提案された光時計の方式であり、現在 NICT を含む 6 機関が開発したストロンチウム、もしくはイッテルビウムの光格子時計は二次周波数標準として国際的に認められ、協定世界時(UTC)^{*2} が刻む 1 秒を校正する能力を持つ。NICT の光格子時計は、パリ天文台に続き世界 2 例目の二次周波数標準となり、2018 年 12 月から不定期ながら UTC が刻む 1 秒の長さを評価しており、直近では 2021 年 8 月から継続的に UTC の 1 秒を校正するデータを国際度量衡局(BIPM)^{*4} に提供、UTC の維持に寄与している。



光格子時計の概念図

*2 協定世界時(UTC)

実質的な世界標準時となっており、日本を含めて各国の標準時がこれに同期している時刻系。国際度量衡局(BIPM)^{*4} が、世界中の計量標準や天文学の公的研究所で運用されている原子時計 400 台以上の平均を取り、その進み具合をセシウム一次標準及び二次周波数標準によって校正して計算した結果(=国際原子時)に、うるう秒調整を加えたもの。計算は、5 日ごとの 0 時(日本標準時では 9 時)ちょうどの瞬間だけについて行われ、5 日ごとの各国の標準時等と UTC の時刻差という形で毎月 10 日頃に前月のデータが公表される。

*3 秒の再定義

国際単位系(SI)の 1 秒は現在セシウム原子のマイクロ波遷移の周波数を 9 192 631 770 Hz とすることで定義されているが、近年、光学遷移を利用する光時計の開発が進み、これを利用すれば、より小さい不確かさで 1 秒を生成することが可能になる。このため、時刻周波数標準のコミュニティでは 1 秒の定義を変更すること(再定義)が議論されているが、再定義のためには、社会生活の基準時刻である UTC が刻む 1 秒についても新しい定義に即して光時計でその精度を確認できることが必須とされている。国家標準時についても、これを生成する機関が自ら光時計を運用してその精度を確認することが秒の再定義のための望ましい条件とされる。なお、メートル条約の加盟国が集う最高議決機関である国際度量衡総会はおよそ 4 年に一度開催される。2022 年秋に開催される国際度量衡総会においては、2030 年での秒の再定義を目指す旨の決議がなされる予定となっている。

*4 国際度量衡局(BIPM)

1875 年に締結されたメートル条約に署名した国々が創設した恒久的な学術機関。加盟国政府の代表者が集う最高議決機関である国際度量衡総会及びその下部組織である国際度量衡委員会の指示に基づき、計量標準に関する事業を行う。パリ郊外のセーブルにあり、時間周波数分野については、ほとんどの条約加盟国が国家標準時を決定する際に参照する UTC を計算・決定する大きな役割を担っている。

*5 水素メーザ原子時計

水素原子のマイクロ波領域における遷移の共鳴周波数を基準にした原子時計。マイクロ波原子時計としては位相雑音が小さいが、系統誤差の経時変化を抑制するのが難しく、長期的に周波数が変化する。

*6 セシウム原子時計

秒の定義であるセシウム原子を実際に搭載し、セシウム原子のマイクロ波遷移に共鳴した周波数を得ることで、安定した周波数を得る商用時計。定義に基づくが共鳴周波数を得る際に誤差が入り、精度としては 13 桁程度になる。



水素メーザ原子時計

*7 NTP

Network Time Protocol の略であり、インターネットにおける時刻合わせに利用される最も代表的なプロトコル。NICT ではこのプロトコルによる時刻問合せに回答する専用サーバーを運用している。

*8 光格子時計によって UTC が刻む 1 秒の長さを校正

関係する過去の NICT の報道発表やお知らせは、以下のとおり。

- ・2019 年 2 月 7 日、NICT 報道発表
世界で初めて光時計が直近の協定世界時の一秒の長さを校正
<https://www.nict.go.jp/press/2019/02/07-1.html>
- ・2022 年 4 月 22 日、NICT お知らせ
NICT の光格子時計が史上最高精度で協定世界時の 1 秒の正確さを評価
<https://www.nict.go.jp/publicity/topics/2022/04/22-1.html>

***9 光周波数コム**

光周波数とマイクロ波周波数の間の周波数変換を行うパルスレーザー。パルスレーザーは、周波数軸上の光学領域で等間隔の櫛状のスペクトル(コム、comb)を持つ。この櫛の 1 本を連続光に安定化すると、そのパルスレーザーのマイクロ波領域にある繰り返し周波数は、連続光から精度劣化なくマイクロ波に周波数変換した周波数となる。

***10 光時計**

原子の光周波数領域の遷移周波数に安定化された光を生成し、光周波数領域の標準周波数を発生するもの。レーザー光による光格子に閉じ込めた中性原子を利用する光格子時計と単一のイオンを電場で閉じ込めたものを利用する単一イオントラップ時計があり、2005 年以降双方共に性能を向上してきている。これらは、それ自身は基準となる光周波数を発生するのみで時刻を表示したりせず、時刻を数え上げたりする機能はないため、「光周波数標準」と呼ばれることも多い。

***11 時刻・周波数標準を扱う国際的な委員会**

国際度量衡委員会の下部組織である時間・周波数諮問委員会のことであり、国際度量衡総会から国際度量衡委員会に委託された時刻・周波数に関する技術的な研究課題はこの委員会で技術的な議論が行われる。委員は時刻・周波数標準に関する研究実績を持った計量標準機関を中心に構成され、日本からは NICT 及び産業技術総合研究所から複数名の委員が参加している。

***12 大統領令**

2020 年 2 月 12 日、米国大統領令 13905

“Strengthening National Resilience Through Responsible Use of Positioning, Navigation, and Timing Services”