

光技術を利用した時計で目指す秒の再定義

井戸哲也 (国立研究開発法人 情報通信研究機構 時空標準研究室)

秒を定義する?

筆者が所属する情報通信研究機構 (NICT) 時空標準研究室では日本標準時を作り、電波時計や電話回線、インターネット (公開 NTP) サービス等で国民の皆様にも正確な時刻を配信している。日本標準時は NICT 小金井本部にあるきわめて周波数が安定な複数の発振器 (原子時計) の発振周期を数え上げ続けることで、発生・維持されている。原子には離散的なエネルギー状態があり、このエネルギー差に相当する電波を受けるとエネルギー状態が変わる。これを周波数の指標としているものが原子時計であり、きわめて正確かつ安定な周波数源を作ることができる。

▷現在の秒の定義

さて、1秒とは何か?と聞かれた場合、数ある回答には

1. 1分の60分の1の時間の長さ
2. 1日の $24 \times 60 \times 60 = 86,400$ 分の1の時間の長さという2つも含まれるだろう。どちらもほかの基準となる時間の長さの分数比で表現しているが、その基準を実現できるかどうか、という点では大きな違いがある。1日は太陽がほぼ同じ位置に来るまでの時間として実現できるが1分を実現する自然現象はない。基準を人間が恣意的に決めるのではなく、自然に基準を生成させた方が当然再現性が良く、いつでも誰でもどこでも同じ時間の基準を持つことができる。また、権威あるところから信号を受け取らなくても自らの技量を磨くことによってより正確な

1秒を手にすることができる。そして基準が確立していれば「1s」とたった2バイト (?) の情報量で時間の長さを表現・伝達できる御利益がある。

太陽の日周運動は分かりやすい自然現象ではあるが、地球の自転周期 (≈ 24 時間) は1年間に1~2ms程度変動することが科学技術の進歩により分かってきた。そのため、ちょうど半世紀前の1967年に時間の基準は天体現象から原子の遷移周波数に変更された。具体的には「1秒はセシウム133原子の基底状態の超微細構造遷移に相当する電磁波の9,192,631,770周期分の時間の長さ」となった。また、時間の定義は長さの定義も決めている。我々は光速を299,792,458 m/sと定義値にすることで長さの標準としている。一方、定義値でない物理定数には測定の限界に伴い不確かさが () の形で付随している (例: プランク定数 $h = 6.626070040(81) \times 10^{-34}$ J \cdot s) ので、物理の教科書等の裏表紙によくある物理定数表等で確認されたい。長さ標準を実現する自然現象もあるがその再現性は現在12桁あるかどうかである。一方、セシウムに基づく基準時間は現在16桁の精度で実現できるため、相対論の前提である光速不変則を信じると時間を使って長さを定義する方がより正確に長さの標準を得ることができるのである。

これらの事実からも推し量られるが、数ある物理量の中で時間の標準は圧倒的な精度を持っており、時間の標準の精度を向上させることは人類がどこまで自然を高分解に捉えられるか、という命題への挑戦である。なお、高分解に捉えるとは、情報系の言葉で言えば浮動小数点数の指数部でなく仮数部の桁数と言える。一般に測定の誤差を超えて仮数部の桁

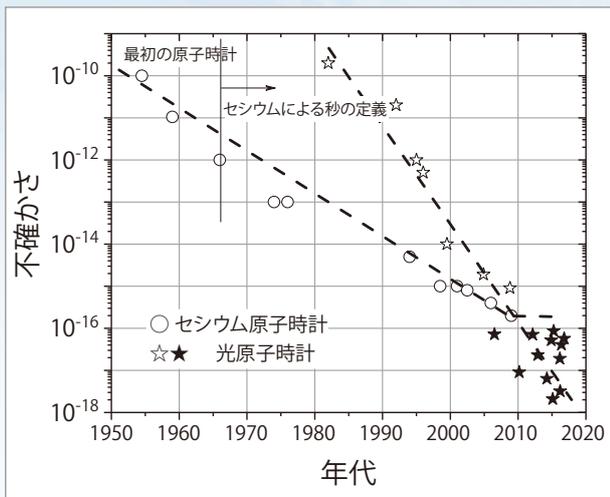


図-1 原子時計の精度向上の歴史. 2000年代半ばよりセシウム原子時計より不確かさが小さい光原子時計が出現した

数を増やして測定結果を表現しても意味がない。そして、測定するという事は、被測定値と標準値の比率を測定し、これに標準値を掛けて値を得ることである。したがって比率測定の技術を向上しても、標準値を実現する精度を上げないと測定の精度は上がらないのであり、これは換言すると所与の物差しを取り扱う技術をいくら上げて物差しがふらふらする限りその程度に測定の精度は限定される、ということである。結局、現在国際単位系に基づく時間の測定においては標準を実現する精度である16桁を超えることはできないのである。

▷セシウムを超える標準

図-1にこれまでの原子時計の精度向上の歴史を示した。白丸が現在の秒の定義であるセシウム原子時計であり、最高精度が16乗台前半にある。一方、これを超える標準が近年実現していることが示されている。これらはセシウム原子時計とは異なり原子の光学遷移を用いる原子時計である。セシウムの場合超微細構造のエネルギー差は約9GHzであり、この周波数の電波をセシウムに照射して中心周波数であることを確認する。そして出力はマイクロ波の電気信号である。一方、近年開発されて17乗台以下の不確かさを実現しているものは光原子時計と呼ばれるものである。レーザー光を原子に当てて遷移周波

数の中心を得て標準とするものであり、出力される基準信号はレーザー光である。これを時計に利用するためには振動を数え上げる必要がある。光領域の周波数(数百THz)の振動を直接検出して数え上げることができる高速なカウンタは存在しないが、前世紀末に発明された光周波数コムという技術によって光振動を正確に数百万分の1の周波数の電気信号に変換することができるようになった。これにより光学遷移を利用した時計も可能となってきた。

▷セシウム幕府崩壊で世は戦国時代？

国際単位系の基準となっているセシウム標準が16桁しかないのに、どうしてそれを超える精度が出せるのか不思議に思う読者もおられるかもしれない。ここで表した光原子時計の精度はセシウム基準で測定した精度ではなく、知り得る精度を悪くする物理的要因をすべて考慮してもこの程度しかずれることはないはず、という値である。また、同じ原子種で時計を2つ作って相互に比較して、謳っている不確かさと矛盾しない差での一致が確かめられているものもある。

このような状況では国際単位系を無視してより精度が出る標準(ものさし)を利用し、より不確かさが小さい測定を行おうとする流れが出てくる。より具体的には、国際単位系での測定、すなわち「セシウムの周波数に対する比率」でなく、光学遷移の周波数標準に対する比率として周波数の測定を行うことである。たとえば、2016年に理化学研究所のグループはストロンチウム原子の光学遷移周波数に対するイッテルビウム原子の遷移周波数の比率を 5×10^{-17} の相対的不確かさで測定している¹⁾。これはセシウムを基準として測定する限り到達できない精度である。

こうなってくると国際単位系の権威失墜とも言うことができる。そこで近年秒の定義をセシウムでなく光原子時計の遷移に変更することが議論されており、実現すれば半世紀ぶりということになる。時間の定義は長さ等ほかの標準にも影響を及ぼすため現在慎重に議論されており、定義変更は2025年頃か

と言われている。光原子時計の研究者にとって新しく秒を定義する光学遷移が自ら研究した原子遷移となり、その定義値の決定に自らの計測結果が貢献することは究極の夢である。それまでは多様な原子種・方式のデッドヒートが続く戦国時代となるかもしれない。上述の比率測定は、「ストロンチウム原子の遷移で秒を定義したら 17 桁で周波数を表現できるのに……」と暗に主張しているのである。

▷リアルに倍精度浮動小数点で間に合わない世界

面白いことに 16 桁というのは、情報処理の世界から見ても 1 つのマイルストーンかもしれない、と最近思うことがある。光時計の出現により我々は 17 桁に及ぶ精度の計算を時々行う機会が生じてきた。この場合これまで通り行おうとすると答えの精度がでなくて困ることになる。そう、情報処理学会員である読者であればすぐお気づきになるかと思うが、64bit (倍精度) の浮動小数点数では仮数部に 52bit を費やし、 $\log_{10}2^{53}=15.955$ であるため、16 桁に突入すると 64bit 浮動小数点数では間に合わないことになる。結果、通常の表計算ソフト等では計算できないのである。光原子時計により、初めて我々はリアルな物理量の測定において倍精度浮動小数点数で間に合わない世界に到達したとも言える。

光時計で刻む時刻系信号

筆者はストロンチウム原子の光学遷移を利用した光原子時計の方式である「光格子時計」をその黎明期より日米 2 カ国で研究してきた。「光格子時計」は日本発の技術であり、現在は日米欧アジアの大多数の時刻周波数標準の研究機関で研究がなされている。NICT においては 2006 年に開発に着手した後、2011 年に動作を開始、徐々に精度を上げてきて現在では世界最高精度のセシウム時計を超える 17 乗台の不確かさとなっている²⁾。しかしながらこれらのほとんどは正確な時間を作り出す研究であり、筆者を含めて 2 年前まではここから時刻信号を生成する研究はなされていなかった。日本標準時を生成す

る NICT では、日本発の光格子時計を利用してより高精度な時刻信号を生成することはミッションの 1 つと考えており、昨年よりこれに取り組んできているのでここに紹介したい。

それにしても研究室で研究に没頭するだけでなく日本標準時等リアルな社会インフラの現実を目の当たりにする機会が増えてくると、改めて「時刻」と「時間」の違いを感じる人が多い。同じ時間は不確かさの範囲内で再現できるが同じ時刻は二度とやっつけない。時刻の基準を生成し続けるのはきわめてプレッシャーが強い仕事である。また時刻と時間の違いを意識すると「時計」には「時刻計」と「時間計」の 2 つの機能があることに気づく。日常生活では前者の用途が圧倒的、後者の用途はキッチンタイマー、ストップウォッチといったところであろうか。また、賢明な読者はこの 2 つが微分・積分の関係にあることをおぼろげに勘づいておられるかもしれない。時を分割して時間を得るか、時間を積分して時刻を得るかということである。高性能な「時間計」がなかった昔は、日の出日の入りという時刻の基準を分割して時間を決めていたときもあったが、科学技術が発展した現代社会では原子時(間)計を積分して時刻としている。前章で示したように、従来のセシウム標準より圧倒的に優れた「光時間計」(= 光原子時計)を作る技術はほぼ確立されつつある。そして、「光時間計を積分して時刻を作る」技術の確立が 1 つの課題である。この積分技術の確立と、できあがった時刻系(時刻計)を全世界で共有することが可能になると光原子時計の恩恵が多様なユーザにもたらされる。時刻系を共有できれば誰しもがオンデマンドに、そこから正確な時間を得ることができる。正確な「時間計」を持っている人をお願いして、自分が必要なときに合わせて基準時間信号を出してもらう必要がなくなるのである。

▷光格子時計による時刻信号生成

光格子時計による時刻系信号の生成を狙い、我々はストロンチウム光格子時計を基準とした信号の生成実験を 2016 年の 4 月～9 月までの 6 カ月間にわ

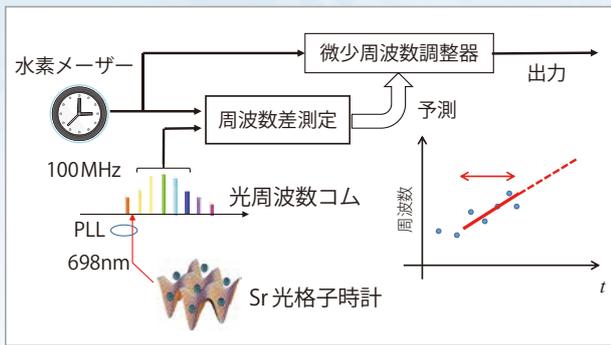


図-2 光原子時計を利用した時刻系信号の生成

たって行った。我々が開発した光格子時計は世界最高精度のセシウム時計を超える 17 桁の不確かさを持っている²⁾。半年近い実験期間の間、光格子時計を継続して動かしたと想像する読者が多いと思うがそうではない。実は稼働期間は 1 週間に 1 度たった 3 時間程度の運用でこれを半年間行っただけである。しかしながらこれでも十分精度が高く、各国の標準時が指標とする国際原子時よりもより正確に時を刻んでいることを明瞭に示す結果が得られた。

図-2 にブロックダイアグラムを示す。時刻系のシステムを構成する場合、基準となる原子時計を 100% 連続運転することは通常しない。時系信号は決して停止してはならないため、時間的な周波数変動が小さく発振が停止する確率がきわめて低い source oscillator (原振) をまず用意し、その発振周波数を原子時計で評価して、その結果に応じて原振の信号に周波数の微調整を行って時系信号とするのが普通である。

この仕組みは次のようにサーキットを周回する壊れにくい市販車と F1 カーで考えるとイメージしやすいかもしれない。我々のゴールは決して止まらない、正確に一定速度で周回する車を実現することである。このために取る手段は次のようになろう。

1. 壊れにくい市販車を冗長性を持たせて複数台、常に走らせておく。
2. 時折、必要に応じてきわめて正確な速度で走る F1 カーを汎走させ、速度調整を行う。

ここで、F1 カーは自ら基準となる必要があり、より正確な速度で走るために、エンジンの回転数、空気抵抗を決める気圧・気温、路面の状態等あらゆる

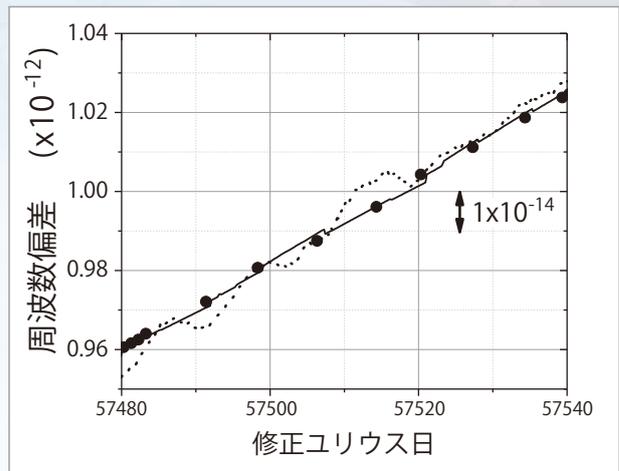


図-3 17 桁の精度を持つ光格子時計によって評価した水素メーザー原子時計の周波数ドリフト特性

パラメータを把握し、異常がないことを常時監視する必要がある。異常なパラメータが見つかったら、停止させて精密に検査する必要もあろう。この場合信号の生成は停止してしまうわけで、時刻生成としては失格、つまり F1 カーだけでは時刻信号は生成できない。

我々は上述の市販車に相当する原振として現行の日本標準時でも利用している水素メーザー (マイクロ波) 原子時計を使用し、その発振周波数を F1 カーに相当する光格子時計で 1 週間に一度評価した。そして、過去 26 日間に計測した 4 点のデータからメーザーの発振周波数変動を予測して、その反対の周波数変動を周波数調整器に入れることによって安定な時刻系信号を得た。

図-3 は 2 カ月程度について 1 週間に 1 度水素メーザーの周波数を光格子時計で評価した結果であり、水素メーザーの周波数がドリフトしていくのが見える。なお、点線は現在の日本標準時による評価であり、このふらつきは現在の日本標準時の 15 桁の精度限界を示している。

得られた時刻系信号を世界の標準時である国際原子時に対する時刻差として示したものが図-4 である。ドリフトを推定するために最初の 1 カ月を準備期間とし、5 月 1 日時点で時刻差をゼロとして初期化しそこからの変化量を示している。5 カ月間にわたり、時刻差が徐々に 8 ns にまで広がるのが分か

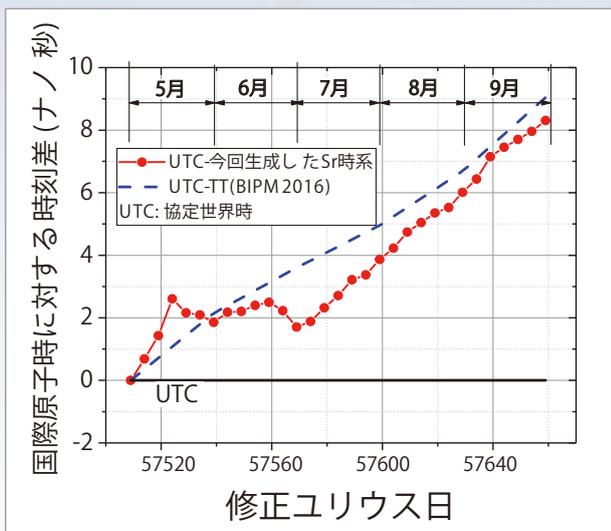


図-4 生成した光格子時系の国際原子時に対する時刻差。点線は国際度量衡局がすべての時計データを計算に取り込んで生成する現在得られる最も正確な時系信号

る。5カ月間で8 ns というのは

$$8 \times 10^{-9} / (5 \times 30 \times 24 \times 3600) = 6 \times 10^{-16}$$

より1秒の長さがわずか0.6 fs (フェムト秒) 短いことになり、精度16桁の信号を5カ月間に渡り継続して出すことができたと言える。さらに面白いことにこの時刻差は実は国際原子時の刻み幅の方が本来の秒の定義から乖離しているからであることが分かっている。図-4で破線は、国際度量衡局 (BIPM) が後処理によって1年後にまとめて発表するより正確な時刻系を示しており、我々が生成した信号はこちらとよい一致を示している。

実は国際原子時はBIPMが世界中の公的研究機関にある400台以上の商用原子時計の加重平均を計算機上で計算し、それを世界中の精度16桁のセシウム原子泉周波数標準で校正して周波数オフセットを与えることによって作られている。あくまで計算結果にすぎないから、チクタクと動く信号は国際原子時には存在しない。特定の時計がどの程度国際原子時からずれているか、そのときに知ることは不可能であり、1カ月近く経過した後はこの計算結果から分かるだけである。またBIPMによる周波数調

整のためのオフセット値は本来の1秒に対して16乗台程度のずれであれば変化させず放置されている。そして、世界中のセシウム原子泉周波数標準による国際原子時の校正データが1年間たまった後に1年に一度、BIPMが推定して本来の1秒で刻んでいたからこのような時系になっていたはず、と計算したものが破線のTT (BIPM2016) である。これは、リアルタイムではないが世界中の400台以上の商用原子時計と10台近い精度16桁のセシウム標準の総力を結集して作った最も正確な時刻の指標である。

ここに示す結果は1台の (日本製) 水素メーザーと周波数調整器、そして1台の (日本発) スترونチウム光格子時計でそれに比肩する、もしくはすでに超えているかもしれない時刻系信号が生成できることを意味している。また、TT (BIPM2016) に対する決定的な違いは、今回生成したものはリアルに1秒1秒時を刻む信号ということである。月差50億分の1秒という実際にチクタクと動く時計がここにできあがったのであり、これは現行の日本標準時に対して1桁以上の性能向上である。

日本の時刻は日本発のイノベーションである光格子時計を参照して刻む、そういう時代が近づいていることが感じられる。実際の日本標準時に適用するには、冗長性の確保や異常検知法の確立等まだまだ運用上の課題は多いが一步一步確実にこれらを克服していく所存である。

参考文献

- 1) Nemitz, N. et al. : Nat. Photon. 10, 258 (2016).
- 2) Hachisu, H., Nakagawa, F., Hanado, Y. and Ido, T. : Opt. Express 25, 8511 (2017).

(2017年4月4日受付)

井戸哲也 ido@nict.go.jp

1998年東京大学大学院博士課程修了。同年より科学技術振興事業団ERATO五神プロジェクト。2002～06年JILA (米国NIST&コロラド大学共同研究機関) 博士研究員を経て2006年より情報通信研究機構。博士 (工学)。