

時間の単位「秒」についての基礎解説と最新動向

洪 鋒雷*、安田 正美**

*横浜国立大学 工学研究院知的構造の創生部門 教授

**産業技術総合研究所 計量標準総合センター 物理計測標準研究部門 時間標準研究グループ長

1 はじめに

時間は国際単位系 (SI) の七つの基本量の一つであり、記号は t 、単位は「秒」で、単位の記号は s である。また、古くから使われている「分」、「時」、「日」の三つの時間単位も SI と併用することが認められている。時間は、あらゆる計測量の中で、最も正確に計測できるもので、長さや電圧など、他の基本単位の精度を支えている。例として、GPS ナビゲーションシステムでは、衛星に搭載されている原子時計の信号を使って、距離計測を行い、車などの物体の位置を精度良く決めている。

時間を計るのは時計なので、ここで時計の原理を説明しておこう。時計は、周期現象を伴う振動子とその周期を数えるカウンター (計数器) から構成されている。人間が太古の時代から使ってきた日時計は、地球の自転という周期現象を利用し、太陽光の影をカウンターとして使った。また 17 世紀に発明された振り子時計は、振り子の振動を数えて時計の針を進める仕組みを持っている。振り子の振動数は、周波数ともいい、単位はヘルツ (Hz) である。この周波数という物理量は、時間と密接に関係し、周期現象において時間と逆数関係にある。周波数が決まれば時間も一義的に決まるので、時間の定義を実現する時間標準は周波数標準とも呼ばれ、時間を計ることはすなわち周波数を測ることもある。さて、時間を精度良く計るには、時間をより細かく分割する、つまり時計に利用される周期現象の周波数を上げる必要がある。このことが、まさに時間を計る技術が発展する歴史の中で貫かれている基本線であり、この解説の中でも随所に登場する。

この解説では、秒の定義の変遷を振り返りながら、原子時計の原理やその応用について説明する。また、時計比較の重要性を言及しながら、GPS、通信衛星、光ファイバーネットワークなどによる比較方法を紹介する。さらに、原子時計から作られる国際原子時や協定世界時などの時系について説明し、これらの時系が周波数校正や日本標準時などサービスを通じて産業界や日常生活に貢献していることを紹介する。最後に、次世代原子時計である「光時計」を紹介しながら、秒の再定義への道のりと今後の展望について

述べる。秒の再定義は、このリレー解説の中心となっている、キログラム、アンペア、ケルビン、モルの 4 単位の基礎定数を用いた定義への改定¹⁾とは別に、今後次世代原子時計の研究成果がまとまった段階で行われる予定である。

2. 秒の定義とその変遷

秒の定義は、他の単位と同様に常に不確かさの小さいものを目指して変化してきた。さらに、より普遍的な定義の仕方を求めて、「もの」による標準から量子力学の原理を利用した「量子標準」へと進化してきた。図 1 に秒の定義の変遷を示す。

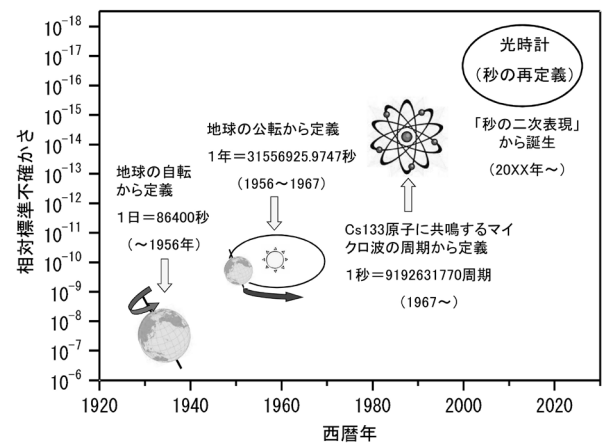


図 1 秒の定義の変遷

1956 年までは、1 秒は地球の自転から定義され、1 日 (平均太陽日) の 86 400 分の 1 と決められていた。測定の不確かさは 10^7 程度で、潮汐摩擦などによる地球自転の不整が不確かさ要因であった。1956 ~ 1967 年の間では、1 秒は地球の公転から定義され、1 太陽年の 31 556 925.9747 分の 1 とされていた。この定義による秒の不確かさは約 2×10^9 である。この定義は、惑星の運動を司るニュートン力学を拠り所としており、地球という「もの」による前の定義よりは進歩したと言える。しかしこの定義では、利用している周期現象の地球の公転は、自転よりも長い周期を持っているので、小さい不確かさを実現するにはかなり長い年月の測定が必要であった。

1956 年に、国際度量衡委員会において SI に統合しうるような秒の定義について助言するための諮問

委員会が創設され、翌 1957 年にその第 1 回会合が開かれた。この会合では、イギリス国立物理学研究所 (NPL) のエッセン (Essen) 氏が 1×10^{-10} の不確かさをもつセシウム時計ができていたので 1 日も早くこれを採択すべきだと主張したが、まだ研究途上という理由で採り入れられなかった。最終的には 10 年後の 1967 年に、第 13 回国際度量衡総会において「秒はセシウム 133 の原子の基底状態の 2 つの超微細準位間の遷移に対応する放射の周期の 9 192 631 770 倍の持続時間である」という新しい定義が採択された。ここで基準として用いられるセシウム原子の超微細構造は量子力学によって決まっている。ついに秒の定義は量子標準へと進化し、物理学者の手に委ねられるようになった。この定義が利用する原子の周期現象は約 9 GHz の周波数を持ち、地球の自転と比べて約 10^{15} 倍、公転と比べて約 10^{17} 倍周波数が高いので、時間の測定精度を高める上で重要な役割を果たしている。このセシウム原子に基づく時間の定義は今日まで使われている。

3. 原子時計

上記秒の定義を実現するのが、セシウム原子時計である。セシウム原子時計は大きく分けて、一次周波数標準器と商用セシウム原子時計がある。一次周波数標準器は、世界の少数の標準研究機関で実現されている最高精度のセシウム原子時計である。一方、商用セシウム原子時計は大多数の標準研究機関が所有し、各国の時間標準として運用している。また多種多様なニーズに対応するために、水素メーザー、ルビジウム原子時計、チップスケール原子時計などの原子時計が開発されている。さらに、次世代の原子時計として、光時計の研究開発も進んでいるが、その詳細は第 6 章で述べる。

3.1 一次周波数標準器

^{133}Cs はアルカリ原子であり、原子核を取り巻く電子の閉殻の外側に 1 個の電子を配置した構造になっている。基底状態 ($6^2S_{1/2}$) では最外殻電子の軌道角運動量がゼロなので、核スピン $I=7/2$ と最外殻電子スピン $S=1/2$ が結合し、全角運動量 $F=4$ と $F=3$ の超微細構造となる。この二つの準位がそれぞれ角運動量を有しているため、磁場があれば 9 本と 7 本のゼーマン準位に分裂する (図 2 a)。この中で磁場による変動の最も少ない $[F=4, m_F=0]$ と $[F=3, m_F=0]$ の二つの準位間の遷移がセシウム原子時計の時計遷移として用いられている。ここで、さらに $m_F=0$ 同士の時計遷移でも磁場によるわずかな周波数のシフトがあるので、磁場を正確に測定し、その周波数補正を行っ

ている。

さて、一次周波数標準器は大きく分けて、原子ビーム方式と原子泉方式がある。過去 20 年間においては、レーザー冷却技術を用いた原子泉方式の実現が大きなステップとなった。原子泉方式では、原子集団を約 $2 \mu\text{K}$ 程度まで冷却し、上方に打ち上げて自由落下させることにより約 1 s の長い滞空時間、すなわち実効的な相互作用時間を確保している (図 2 b)。これにより、約 1 Hz の線幅のラムゼイ共鳴スペクトルが得られ (図 2 c)、原子ビーム方式と比べて 1 桁以上小さい不確かさを実現している。セシウム原子時計の不確かさは、これまで約 10 年に 1 桁の割合で減少し、エッセンの原子時計から 50 年以上経過した現在では 10^{-16} のレベルに到達している。この不確かさの主な要因は原子の衝突による周波数シフトである。

一次周波数標準器は、フランス、アメリカ、ドイツ、イタリア、イギリス、日本、ロシアで運用されており、日本では、産業技術総合研究所と情報通信研究機構が運用している。

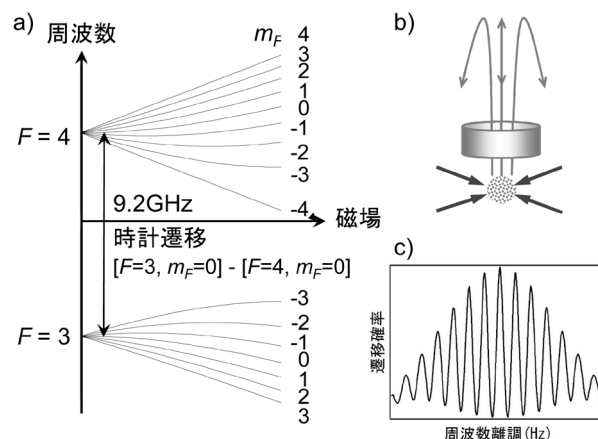


図 2 a) セシウム原子基底状態の超微細構造を使った時計遷移 ; b) 原子集団がレーザー冷却され、打ち上げられる様子 ; c) 原子のラムゼイ共鳴スペクトル

3.2 商用セシウム原子時計

商用のセシウム原子時計 (型番 5071A、米国 Microsemi FTD 社) は、長期安定度が極めて優れており、メンテナンスフリーの連続運転が可能である。平均時間 5 日以上で周波数安定度が $< 1 \times 10^{-14}$ となり、数ヶ月にわたってそれを維持することが可能である。単体での秒の定義の実現能力を周波数不確かさで表すと 5×10^{-13} となる。多くの標準研究機関が 1 つもしくは複数の商用のセシウム原子時計を運用して、その研究機関の現地版協定世界時を作り出している (詳細は第 5 章を参照)。この時計の内部にバッテリーが搭載されており、最長 45 分間の継続運転が可

能で、外部バッテリーを使えば運転しながらの長距離移動も可能となる。

3.3 水素レーザー

水素原子の基底状態では、電子スピン $1/2$ と原子核である陽子スピン $1/2$ が結合し、全角運動量 $F=1$ と $F=0$ の超微細構造が存在する。この超微細構造間のマイクロ波遷移の周波数が約 1.42 GHz である。この遷移によるレーザー発振を利用したのが水素レーザーである。水素レーザーの周波数変動要因は、マイクロ波共振器の周波数変動、遷移の二次ゼーマンシフト、スピン交換シフト及び二次ドップラーシフトで、これらの変動要因を抑えるには、共振器の温度、磁場及び水素原子ビーム量を精度良く制御する必要がある。水素レーザーの一番の特徴は、短期周波数安定度の良さである。積算時間 1 秒において、商用セシウム原子時計と比べて数十倍良く、さらに数時間の積算時間で 1×10^{-15} の安定度に到達する。したがって、一日以内の測定時間において高安定な参照基準が必要な応用では欠かせない存在となっており、後述する光時計の絶対周波数計測でも大いに活躍する。1 つもしくは複数の水素レーザーを運用して、現地版協定世界時を作り出す標準研究機関も多い。

3.4 ルビジウム原子時計

ルビジウム原子の基底状態では、核スピン $I=3/2$ と最外殻電子スピン $S=1/2$ が結合し、全角運動量 $F=2$ と $F=1$ の超微細構造が存在する。この超微細構造間のマイクロ波遷移の周波数が約 6.835 GHz である。この遷移を周波数基準として用いて、低雑音の水晶発振器を制御して作られるのがルビジウム原子時計である。積算時間 1 秒における短期安定度が約 2×10^{-11} で、1 ヶ月の周波数変動が 5×10^{-11} 以下である。ルビジウム原子時計は、小型・安価で、標準研究機関以外の大学及び企業などの研究機関でよく使われる実用標準器である。ルビジウム原子時計と GPS 受信機の組み合わせで高精度な周波数標準を実現する。さらに第 5 章で述べる周波数校正サービスを受ければ、国家標準へのトレーサビリティも確保できる。

3.5 チップスケール原子時計

ルビジウム原子時計は、光とマイクロ波の二重共鳴方式を使い、原子にマイクロ波照射を行うための共振器を必要とするので小型の限界がある。一方、レーザー光のみを用いるコヒーレント・ポピュレーション・トラッピング (CPT) 方式では光学的な現象を用いてマイクロ波遷移を検出するため、小型化が可能となる。この原理を利用したセシウムチップス

ケール原子時計では、米粒より小さいガスセルやマッチ箱サイズの標準器が実現されている。積算時間 1 秒における短期安定度が 2.5×10^{-10} で、エージングによる 1 ヶ月の周波数変動が 3×10^{-10} 以下である。GPS 信号の届かない水中探査や地下の掘削などの機器に組み込んで使うことができる。

3.6 原子時計から 1 秒を作る

時計を動作させるには、振動子の振動を数えて時計の針を進める必要がある。機械式時計では、心臓部にテンプという振動する部品が入っており、典型的なものはその振動を 8 回数えて時計の針を 1 秒進める。また、今日我々が日常的に使っている腕時計には、水晶振動子が入っており、水晶の振動を 32768 回数えて時計の針を 1 秒進める。セシウム原子時計を使って時刻を表示するには、カウンターで 9 192 631 770 回の電磁波振動を測って、時計の針を 1 秒動かすような仕組みを使う必要がある。また、約 9.2 GHz の周波数を低い周波数へと分周し、最終的に 1 Hz の信号を導き出して、時計の針を 1 秒ずつ動かす方法もある。

4. 時計の比較

19 世紀の初期、イギリスのグリニッジ天文台がその屋根に「報時球」を設置し、午後 1 時ちょうどの時刻に球を落下させ、ロンドン港に訪れる船に時計を合わせるサービスを提供していた。航海する船にとって、自分の位置を正確に割り出すのに、時計の正確さがとても重要である。現代では、ナビゲーションだけではなく、情報通信から株の取引まで正確な時間が必要とされている。ここではまず、正確な時間を作り出すために、原子時計がどのように比較されているかを見てみよう。

4.1 GPS 衛星

GPS ナビゲーションシステムは、30 個の非静止衛星で構成され、受信者が自身の現在位置を知るシステムであるが、原子時計による時刻信号も放送している。この時刻信号を用いて、高精度な時計比較を実施することが可能で、よく用いられるのは GPS コモンビュー (common view) 法である (図 3)。2 つの遠隔地にある地上局は GPS 衛星の時刻情報を同時に受信し、それぞれ自局の時計との時刻の差を記録する。それらのデータの差をとることにより、GPS 衛星の時刻情報が相殺され、遠隔地におかれた時計の時刻比較が行われる。さらに、時間において測定することにより、時刻比較結果の差から周波数比較を行うことができる。

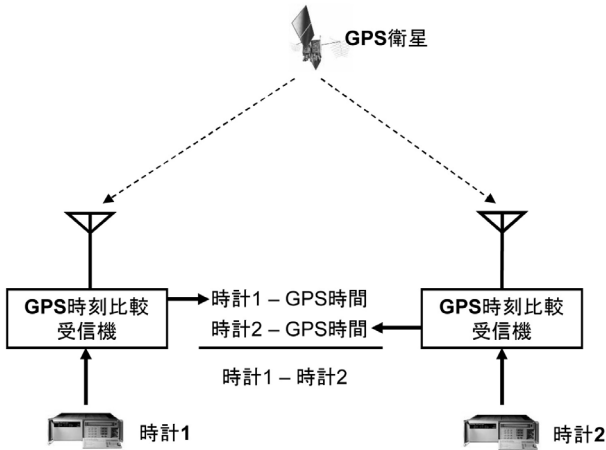


図3 GPS コモンビュー法による時計比較の原理図

GPS コモンビュー法において、15分間平均すると、実験データのばらつきから求められる不確かさが約数ナノ秒 (ns) となる。これを周波数不確かさに直すと、

$$\text{ns}/15 \text{ min} = (1 \times 10^{-9}) / (15 \times 60) \sim 1 \times 10^{-12}$$

となる。この周波数不確かさは、平均時間に反比例するので、5日間の平均で 10^{-15} 台の時計周波数比較ができる。なお、GPS コモンビュー法において、時刻比較方法のバイアス値の不確かさも存在するが、この不確かさは周波数比較には寄与しない。GPS コモンビュー法は、第5章で述べる周波数遠隔校正サービスで応用されている。また、後述する国際原子時を決定する際にも GPS コモンビュー法が用いられていたが、最近では GPS 軌道情報や電離層パラメーターの精度向上により、複数衛星の観測から自局の時計の時間を計算するオールインビュー (All in view) 法が採用されるようになった。さらに、ロシアの衛星ナビゲーションシステム (GLONASS) を利用した時計比較も広く行われるようになった。他にも、最近では中国の BeiDou、欧州の Galileo も利用されている。

4.2 より高精度な時計比較方法

原子時計の性能向上により、一層高精度な時計比較方法が求められるようになった。原子泉方式のセシウム原子時計の不確かさが 10^{-16} で、さらに第6章で述べる光時計の不確かさが 10^{-18} まで向上している。特に、光時計は短期の安定度が非常に優れているので、短時間で高精度な比較方法の研究開発が重要である。以下にいくつかの例を示す。

1) GPS 搬送波位相法

この方法は、GPS の時刻情報の載っているコード信号ではなく、周波数が約 1000 倍大きい搬送波の位相情報を用いて時計の比較を行う。時刻比較の不確かさが数十ピコ秒 (ps) なので、1日の平均時間で 10^{-15}

を切る不確かさで周波数比較を行うことができる。

2) 衛星双方向搬送波位相法

この方法では、両方の地上局から通信で使う静止衛星を経由して自局の時計信号を送信しあうので、2つの信号が同一の経路を通過して電離層や対流圏の遅延の影響がキャンセルされ、不確かさが小さくなる。この方法による時刻比較の不確かさが数 ps から 10 ps なので、1日の平均時間で $10^{-15} \sim 10^{-17}$ の不確かさで周波数比較を行うことができる。

3) 光ファイバー双方向周波数比較

この方法は、実際に敷設されている光ファイバーを利用して、伝搬する光信号そのものを使って周波数比較を行う。通常、振動や温度変化によって光ファイバー中の実行光路長が変化し、その結果光信号の位相が大きく乱れ、時計の周波数比較に悪影響を及ぼす。受け取った信号光をもう一度送り返すことにより、ファイバー光路長の変化を検出することができる。そして、検出した光路長の変化をフィードバック制御によりキャンセルすることができる。この比較法による周波数比較の不確かさが1秒の平均時間で 10^{-15} を切るので、平均時間を増やせば 10^{-18} の不確かさで時計の周波数比較が実現できる。

5. 時系

時系は時間を表す基準である。同一時刻でも、用いる時系によって表現する時間が違ってくる。例えばこの章で述べる協定世界時 (UTC) と国際原子時 (TAI) とでは 2014 年現在、UTC による時刻は TAI による時刻よりも 35 秒遅れた値となる。原子時計が誕生する前に、よく用いられた時系として、地球の自転にもとづく世界時 (UT) と地球の公転にもとづく暦表時 (ET) があった。もっと昔を遡れば、グリニッジ子午線 (経度 0 度) における平均太陽時であるグリニッジ標準時 (GMT) が世界時間の基礎を作り、航海などで使われていた。

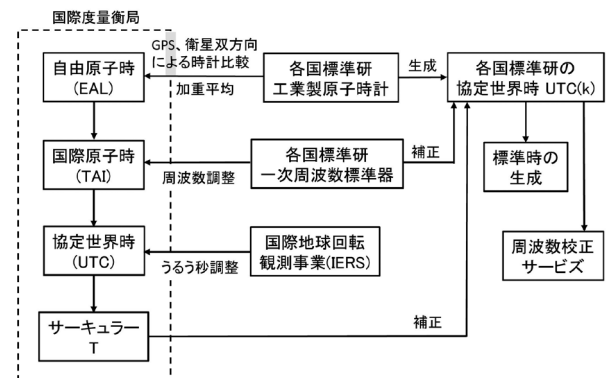


図4 国際原子時と協定世界時

5.1 国際原子時

時系は、時間の流れを表現する基準で、途切れることなく続くものである。原子時計が発明された当初は、メンテナンスなどの理由から、果たして原子時計は時系を維持できるかどうか、疑問があった。この心配は、たくさんの原子時計集合体で時系を維持することで解消された。原子時計の時系である国際原子時 (TAI) は、世界各国約 70 の標準研などの機関で稼働している 420 台前後の工業製原子時計 (商用セシウム原子時計や水素メーザー) 及び一次周波数標準器の相互比較のデータや機関間の比較データをもとに構築されている (図 4)。機関間の時計比較は、GPS 衛星や衛星双方向比較法などを用いて行われている。国際度量衡局に報告された工業製原子時計比較データは、各時計の加重平均として計算される自由原子時 (EAL) と呼ばれる時系を作るのに使われる。自由原子時が目指すのは長期間安定な時系である。この自由原子時に対して、一次周波数標準器による評価結果を加味して周波数が微調整され、国際原子時 (TAI) と呼ばれる時系が計算される。調整の結果、国際原子時の 1 秒と一次周波数標準器で実現される SI 秒の差が 10^{-16} 位の低いところで抑えられている。このように、正確さを保ちつつ、その中長期の安定性を損なわない方法で国際原子時が運用されているのである。

5.2 協定世界時

国際原子時による時間は刻み方が非常に正確で、その時間と地球の自転にもとづく世界時との間にずれが生じてしまう。つまり、地球の回転がふらふらしているため、国際原子時と世界時がどんどん離れていってしまい、天文観測や日常生活にも支障をきたすおそれがある。この問題を解決するために、原子時と世界時が 0.9 秒以上離れないよう国際原子時に対してうるう秒調整を行い、協定世界時 (UTC) という時系を構築した。うるう秒の実施は国際地球回転・基準系事業 (IERS) によって発表される。協定世界時の 1 秒の長さは国際原子時と同じだが、うるう秒が挿入されているため現在の協定世界時の時刻は国際原子時の時刻と比べて遅れている。

各国の標準研究所では、1 台もしくは複数の工業製原子時計を運用して現地版の協定世界時 UTC(k) という時系を作っている。国際度量衡局は、毎月 1 回、先月分の協定世界時と現地版協定世界時の差 [UTC - UTC(k)] を 5 日間毎に分けて、サーキュラー T という形でホームページを通じて公表している。サーキュラー T はいわば UTC(k) の成績表のようなもので、70

の標準研の内、約 20 の標準研が [UTC - UTC(k)] を ± 10 ns に近い精度で運用している。各国の標準研究所はこのサーキュラー T の情報、もしくは自前の一次周波数標準器の情報をもとに、UTC(k) に補正をかけることができる。サーキュラー T で発表される UTC が 1 ヶ月前の情報であるため、UTC は実時間で生成されるものではない。それに対して、UTC(k) は実時間で生成しているため、時間・周波数関連の各種サービスに用いることが可能である。日本では、産業技術総合研究所計量標準総合センター (NMIJ) と情報通信研究機構 (NICT) がそれぞれ UTC(NMIJ) と UTC(NICT) の運用を行っている。

5.3 UTC(NMIJ) を用いた周波数校正サービス

産業技術総合研究所計量標準総合センターでは、UTC(NMIJ) を運用して、各種の時間・周波数関連業務を行っている。その中でもっともユーザーに近い業務は、各種測定器メーカーが利用する周波数校正サービスである。周波数校正サービスは、大きく分けて持込校正と遠隔校正の 2 つの形態がある。持込校正では、顧客に校正器物を研究所に持ち込んでもらい、UTC(NMIJ) で直接校正を実施する。一方、遠隔校正は校正器物を顧客のサイトに置いた状態で校正を行う。遠隔校正では、第 4 章で紹介された GPS コモンビュー法による測定を行い、校正器物と UTC(NMIJ) の周波数差を出して、校正証明書に記載する。周波数校正サービスは産業界の発展に寄与するものである。

5.4 UTC(NICT) を用いた日本標準時

情報通信研究機構では、UTC(NICT) を運用して、各種の時間・周波数関連業務を行っている。その中でもっともユーザーに近い業務は、日本標準時 (JST) の供給サービスである。日本標準時は UTC(NICT) を 9 時間 (東経 135 度分の時差) 進めた時刻である。日本標準時を載せた標準電波 (JJY) は、福島県のおおたかどや山標準電波送信所 (40 kHz) 及び佐賀県のがね山標準電波送信所 (60 kHz) から送信され、常時ユーザーに供給されている。日本国内で広く普及している電波時計は、この標準電波を受信することによって、日本標準時に合わせている。日本標準時の供給サービスは日常生活や時計産業に貢献している。

6. 光時計と秒の二次表現

原子時計の性能をさらに上げるために、原子 (またはイオン) の基底状態と励起状態間の光遷移を周波数の基準として用いる「光時計」の研究開発が進められている。光の周波数はマイクロ波と比べて 5

桁高いので、光時計を用いることで時間をより細かく測定することが可能となり、時間分解能が一気に5桁上がる。しかし20世紀の終わりまでは、光周波数をカウントすることが非常に困難であった。1999年頃から、ドイツと米国のグループで、モード同期超短パルスレーザーによる「光周波数コム」²⁾を用いたレーザー周波数カウンターの提案がなされ、この分野において極めて大きな技術革新が起こった。高精度な光周波数標準と光周波数コムの組み合わせで「光時計」が誕生する。

ここで光周波数コムのもう1つの応用に言及しておこう。産総研の「光周波数コム装置」は長さの国家標準であり、UTC(NMIJ)と合わせて、超精密な波長標準を実現し、長さのトレーサビリティの頂点に位置している³⁾。これも時間標準がほかの計測を支える好例である。

6.1 光時計

光時計は主に「単一イオン光時計」と「光格子時計」の2つのタイプがある(図5)。単一イオン光時計では、レーザー冷却された単一イオンがトラップポテンシャルの底に置かれ、相互作用時間が長いなどの長所がある。最新の報告によると、Al単一イオン光時計の不確かさは 8.6×10^{-18} に達し⁴⁾、33 cmの高低差による時計の遅れ(相対性理論)を確認することに成功した。しかし、イオン光時計は単一の粒子からの弱い信号を使うため、周波数安定度が上がらないという欠点がある。

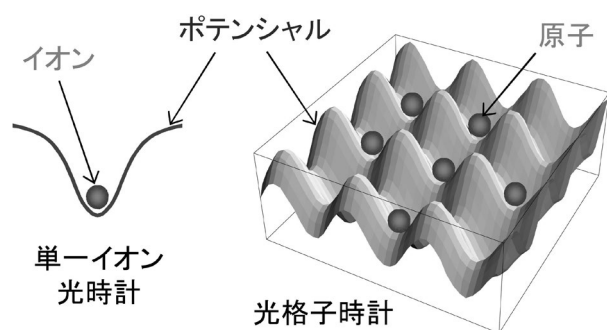


図5 単一イオン光時計及び光格子時計の概念

光格子時計は東大工学部香取の提案によるもので、レーザー光の定在波で作る光格子ポテンシャルに閉じ込められる多くの原子がすべて信号に寄与するので、周波数安定度が単一イオン光時計よりもよくなる。光格子を作るレーザー光の強度に依存した時計遷移の周波数シフト(光シフト)に関しては、上準位と下準位の光シフトが等しくなる光格子波長(魔法波長)の存在が見出され、光シフトが時

計遷移の周波数に影響を及ぼさない⁵⁾。最初に実現された光格子時計は ^{87}Sr によるもので、今や最も研究されている光時計となっており、 6.4×10^{-18} という光時計の不確かさのチャンピオンデータを出している⁶⁾。また最近では、 ^{171}Yb や ^{199}Hg を用いた光格子時計も実現され、光格子時計の研究が広がりを見せている。

6.2 秒の二次表現

光時計に関する研究の飛躍的な発展は、光時計の測定不確かさがセシウム原子時計で制限される事態を招いた。つまり、光時計同士の直接比較によって光時計がより良い再現性を持っていることを示しても、秒の定義であるセシウム原子時計の正確さ以上に周波数を測る(セシウム原子時計の正確さ以上の桁数で光時計の周波数を表現する)ことは原理的にできない。国際度量衡委員会は、このような状況を分析し、「秒の二次表現」という秒の再定義の候補リストを構築することを決めた。もちろん、秒の二次表現の正確さはセシウムを超えることはできない。しかし、この候補リストの構築は、秒の再定義の準備過程における異なる標準の比較にとってたいへん有用である。

2006年に、国際度量衡委員会はマイクロ波時計の ^{87}Rb 及び光時計の $^{88}\text{Sr}^+$ 、 $^{199}\text{Hg}^+$ 、 $^{171}\text{Yb}^+$ (四重極子遷移)、 ^{87}Sr が秒の二次表現として使えることを決めた。2009年には、秒の二次表現である ^{87}Sr 光格子時計の新しい研究成果を取り入れて、その周波数値及び不確かさを改定した。また2013年には、各国から報告された光時計の測定結果を検討した結果、新たに ^{171}Yb 、 $^{171}\text{Yb}^+$ (八重極子遷移)、 $^{27}\text{Al}^+$ の三種類の光時計を秒の二次表現に加えることを決めた。2017年には新たに ^{199}Hg が追加された。表1に、現在勧告されている全9種類の秒の二次表現を示す。これらの秒の二次表現の勧告値を決める上で、日本から報告された測定結果も多く採択されているが、詳細は別の解説に譲る⁷⁾。

表1 秒の二次表現(2017年)

方式	時計の周波数(Hz)	不確かさ
^{87}Sr 光格子時計	429228004229873.0	4×10^{-16}
^{171}Yb 光格子時計	518295836590863.6	5×10^{-16}
^{199}Hg 光格子時計	1128575290808154.4	5×10^{-16}
^{171}Yb 単一イオン光時計 (四重極子遷移)	688358979309308.3	6×10^{-16}
^{171}Yb 単一イオン光時計 (八重極子遷移)	642121496772645.0	6×10^{-16}
^{88}Sr 単一イオン光時計	444779044095486.5	1.5×10^{-15}
^{199}Hg 単一イオン光時計	1064721609899145.3	1.9×10^{-15}
^{27}Al 単一イオン光時計	1121015393207857.3	1.9×10^{-15}
^{87}Rb マイクロ波時計	6834682610.9043126	6×10^{-16}

今は原子時計の大競争時代で、秒の二次表現はどれ

も新しい秒の定義となる可能性をもっている。では、秒の再定義への道のりはどのようになるのだろうか。新しい秒の定義となる光時計は複数の国際機関で実現されていることが望ましい。光格子時計の研究開発においては、各国の標準研究機関が多くのリソースの投入をしている。多くの研究者が光格子時計に将来性を見出していることは確かである。また、新しい秒の定義となるには現行の国際原子時への寄与が求められる。現在の1次周波数標準と同じように、決められた報告期間中の測定結果を国際度量衡局に報告し、その結果を使って国際原子時を決めることとなる。

7. 秒の再定義

秒の再定義候補として、秒の二次表現リストが作成され、順調に更新されているが、次に考えるべきことは、秒の再定義が、どのように、いつごろ行われるか、ということである。

7.1 秒の再定義アルゴリズム

秒の再定義の方法（アルゴリズム）については、P. Gillによる以下の5つの提案がある⁸⁾。

1) リュードベリ定数を不確かさゼロの定数に固定することによって得られる定義

2018年のSI単位大改定は、この考え方に基づくものであり、プランク定数（質量）、素電荷（電流）、ボルツマン定数（温度）、アボガドロ定数（物質質量）が、それぞれの基礎物理定数に相当する。秒（周波数）については、リュードベリ定数が相当する。さて、単一の陽子と電子の組み合わせである水素原子については、最も高い精度でエネルギー準位構造を計算することが可能である。非相対論的な水素原子の記述によれば、そのエネルギー準位 E_n は以下のように与えられる。

$$E_n \sim -hcR_\infty/n^2$$

ここで、 n は主量子数、 c は光速、 h はプランク定数、 R_∞ はリュードベリ定数である。水素原子の1S-2S遷移周波数の直接的な測定結果と、ラムシフト周波数を適切に比較するためには、ディラック方程式に相対論的効果を全面的に取り入れるだけでは不十分であり、量子電磁力学（QED）的効果をも考慮しなくてはならない。現在、水素原子の1S-2S遷移の精密レーザー分光による測定の不確かさは、 1.4×10^{-14} であり、ラムシフトの見積りのための水素原子の他の遷移の測定不確かさとも合わせて、リュードベリ定数の最小の不確かさは、 6.6×10^{-12} となっている。もしもこの定義が実現されれば、7つのSI基本単位のすべてが基礎物理定数に基づくものとなり、「上がり」の

状態となるが、リュードベリ定数の不確かさは、現状の光周波数標準で実現されている不確かさには遠く及ばないものである。この不確かさを低減するためには、高次のQED理論の精密化と同時に、水素原子、または、水素様ヘリウムイオンの高精度レーザー分光技術の向上が求められるが、それらの質量が小さいことに由来する2次のドップラーシフトの低減や、レーザー冷却に必要となる光源の波長が100 nm程度と短いことなどが実験的な困難さにつながっている。

2) ある単一の光時計遷移に基づく定義

第6章に、秒の再定義候補としての、秒の二次表現リストが掲載されている。特に、レーザー冷却された単一イオンや、魔法波長の光格子に捕獲された中性原子を参照に用いる光時計が、候補となると考えられる。もっとも単純な定義改定の方法は、このリストの中から、「最も良い」遷移を選びだすことであるが、これは思ったよりも簡単なものではないことが分かる。2010年代初頭においては、最も小さな不確かさを誇っていたのは、 Al^+ イオン時計であった。もっとも小さな不確かさを持つ時計が、最も良い時計である、という単純な考え方によれば、この Al^+ イオン時計が再定義候補ということになるが、当時、量子情報的手法によって時計遷移を測定していた Al^+ イオン時計が実現されていたのは、米国のNISTのみであった。その後、SrやYbを用いた光格子時計が、 Al^+ イオン時計の性能を上回ることが実証された。光格子時計を保有する研究機関は世界に広く分布しており、この点も標準の観点からは望ましいものと考えられる。

3) 単一の光時計遷移と、光周波数比セットとの組み合わせによる定義

2017年現在の秒の二次表現リストの不確かさ項目を見てわかるように、ある種の光時計の不確かさが突出して（桁違いに）小さい、ということはなく、多くの光時計の不確かさは、おおむね同等な桁に収まっているといえる。（この不確かさを制限しているのは、光時計自身の不確かさではなく、Cs一次標準器比較のための光リンクの不確かさであることから）この事実により、まず、最も小さな不確かさを持つ、単一イオン時計、または、光格子時計を一次標準とし、この一次標準と比べて不確かさが10倍以下に収まるような単一イオン、または、光格子時計を秒の二次表現セットとするシナリオも想定可能である。光周波数コムによる光周波数の比較精度は、 10^{-19} 以下であるので、定義へのトレーサビリティは容易に確保できると考えられる。このシナリオによれば、一次標準、または、二次表現リストのうちのいずれかの標準を用いることによって、主要な時間周波数標準

研究所間、また、トレーサビリティ的に下位の2次の標準機関への時間周波数の配信が可能となる。この選択肢によれば、国家計量研究所間の適切な遠隔時計比較技術が導入された場合に、最も正確で効率的な時間周波数標準供給のためのインフラを提供できると考えられる。

4) 「最良の」光時計遷移の組み合わせ (マトリックス) に基づく、「仮想的」周波数による定義

この方法では、個々の原子種の最も正確に測定された値を組み合わせることで、再定義の時点における、周波数比のセットと、周波数マトリックス値の重み付き平均値が用いられる。その後、適切な時期に、個々の原子種の周波数値は、そのバイアスと不確かさが更新されていくこととなる。このアイデアの欠点は、周波数マトリックス値は仮想的なものであり、物理的な実体を持たないということである。また、定期的な更新も必要となることと、新しい周波数が導入された場合には、周波数マトリックス値が大きく変更される可能性もあるという欠点もある。

5) 真空紫外域、または、X線領域の高周波数遷移に基づく定義

最後に考慮するのは、真空紫外 (VUV)、または、X線 / 極端紫外 (XUV) 領域に属する高周波数遷移である。これは、より高いQ値を持つ吸収線を探索してきた流れの延長線上にある。もちろん、この方向性を追求するためには、これらの周波数領域で定常的に動作できる狭い線幅の光源の確保という技術的課題の解決が必要となる。水素の1S-2S遷移をプローブするという従来からの分光学的手法とは別に、最近の研究においては、可視光領域の光周波数コムの高調波発生によって、VUVやXUV領域の周波数と、光周波数との比較が可能となってきている。この周波数領域における測定精度と、測定機器の支援体制については、まだ研究の余地がある。

このような高エネルギー領域においては、電子のX線遷移に加えて、原子核の γ 線遷移を励起できる可能性が浮上してくる。そのような核遷移は、マイクロヘルツ領域のきわめて狭い自然幅を持ち、潜在的には 10^{20} のオーダーのQ値を持つ。ただし、自由な原子における場合には、反跳効果や、それに伴う大きなドップラーシフトの影響により、この手の遷移を観測することは困難である。この問題はメスbauer分光法によって回避されてきた。すなわち、固体中の格子によって反跳を吸収させるというものである。ここ何年かの間、トリウム放射性同位体 ^{229}Th を原子核時計として利用する可能性についての関心が高まってきた。 ^{229}Th は、基底状態から測って、わずか7.6(5) eVと、異常に低いエネルギーの異性核

状態を持つ。これは、波長で表すと、163 nmに相当し、周波数で表すと、1840(120) THzに相当する。実験的提案としては、 $^{229}\text{Th}^{3+}$ の核遷移を、固体結晶中、または、rfトラップ中に捕獲された孤立イオン中でプローブするというものがある。一般的に、核遷移は、電子遷移と比べて、外部環境からの摂動から遮蔽されている。固体結晶中における場合には、反跳効果が結晶格子によって抑制されるという利点があるが、結晶場の強い影響を適切に見積もらなくてはならない。rfトラップ中に捕獲する場合には、レーザー冷却法によりドップラー広がりを抑制できるし、その他の電子遷移に起因するシフトは大幅に抑制できるか存在しなくなる。しかし、現在の大きな課題は、そもそもその遷移が見つかっていないということである。現在、242 THzもの広大な周波数掃引範囲の中から、狭線幅紫外遷移の探索が試みられている。この核遷移を検出するために、二重共鳴量子跳躍法が提案されている。これは、核遷移を探索しつつ、強く許容された電気双極子遷移をプローブするという手法である。核遷移が励起された場合には、核モーメントとスピンの変化し、その結果、電子の超微細分裂と角運動量に変化が生じることとなる。このことが、電子共鳴の損失につながり、核励起が検出されるという手法である。この探索に向けた努力は、ドイツ、アメリカ、そして、わが国においても精力的に行われている。しかし、核遷移の共鳴周波数が特定されたとしても、この原子核時計が定義として採用されるまでに成熟するためには、まだ一定の時間を要すると考えられる。

以上、5つのアルゴリズム候補を紹介したが、筆者の主観によれば、3) が最も可能性が高いと考えられる。

7.2 秒の再定義に向けたマイルストーン

第6章、6.2 秒の二次表現、のリストに示されるように、多くの光時計の不確かさは、それ自体の不確かさというよりも、Cs一次標準器もしくは、それら同士の比較の不確かさで制限されるようになってきた。光時計自身の不確かさは、最善のものについてはすでに、 10^{-18} 台前半の性能をたたき出しており、さらには、 10^{-19} 台の不確かさも視野に入りつつある。しかし、正確な重力ポテンシャルについての知識が限られたものであることから、地上においてそのようなレベルで実用的な時間スケールを取り扱うことは困難であると考えられる。 10^{-18} 台の相対不確かさを議論するためには、重力赤方シフトを正しく取り扱うために、cmレベルで重力ポテンシャルを決定しなくてはならない。このような観点から、秒の再定

義のタイミングとして適切なのは、光時計の典型的な不確かさとして、およそ 10^{-18} のレベルを示せるようになるときであろう。また、その不確かさは、その時点でのセシウム原子泉時計の不確かさよりもおおむね二けた小さなものであろう。上記の考え方を背景として、秒の再定義のタイミングを適切に予測するために、CCTF WGSP（時間周波数諮問委員会戦略企画作業部会）にて、秒の再定義を行うにあたり達成すべき条件としてのマイルストーンが設定され、それを時間軸上に配置したロードマップが提示された⁹⁾。マイルストーンは全部で5つあり、以下のように列挙される。まず、光時計がセシウム一次標準器よりも二桁小さな不確かさをもつことを立証するために、以下のマイルストーン1)と2)が設定された。

1) 少なくとも3つの異なる光時計（異なる研究機関、または異なる原子種）が、その時点での最高性能のセシウム原子時計よりもおよそ2桁小さな不確かさ（ 10^{-18} 乗前半）を示すこと。（以下、この条件を満たす光時計をマイルストーン1時計と呼ぶ。）

2) 異なる研究機関における、マイルストーン1時計との独立な比較測定が少なくとも3つ行われること。（ $< 5 \times 10^{-18}$ ）比較方法としては、可搬型時計、高性能光リンク、周波数比閉包測定のいずれでも良い。現在の秒の定義との連続性を確保するために、以下のマイルストーン3)が設定された。

3) マイルストーン1時計のセシウム一次時計による絶対周波数測定が少なくとも3つ独立に行われること。（ $< 3 \times 10^{-16}$ ）

秒の二次表現というステータスに認定された光時計が定期的にTAIに貢献することは、時系の精度向上と、時刻比較のための技術的、また、手続きの進んだ方法を開発するという観点からも望ましいものである。よって以下のマイルストーンが設定される。

4) 秒の2次表現リストに掲載された光時計が定常的に国際原子時（TAI）に貢献すること。

第7章、7.1 秒の再定義アルゴリズム、の3)で表されたように、 10^{-18} レベルでの時計の評価は、異なる光時計同士の比較によってのみ可能となる。また、これまで長年かけてどの光時計（原子種）が最も良いかを探索するために開発されてきた種々の光時計のリソースを引き続き有効利用するという観点からも、光周波数比の決定は重要である。よって以下のマイルストーンが設定される。

5) 少なくとも5つの光時計間の光周波数比測定が行われること；各々の周波数比が独立な研究機関で少なくとも2回行われ、例えば、 5×10^{-18} よりも小さな不確かさで一致すること。

7.3 秒の再定義ロードマップ

秒の再定義について、国際度量衡総会（CGPM）への発議がいつ頃なされるかは、国際度量衡委員会（CIPM）が責任を持って決める事項である。CCTFとCGPMが開催されるタイミングと上記のマイルストーン達成状況から判断して、秒の定義改定が行われるのは、おそらく2026年または2030年ころではないかと考えられている。秒の再定義後は、従来の時間周波数標準は、これまでと同等の不確かさで秒を実現できる、秒の二次表現として働くこととなる。また、セシウム原子時計の改良は、すでに確立された枠組み内で、秒の二次表現として定常的に評価されることとなる。

7.4 秒の再定義に向けた現在の動向

マイルストーン1)については、すでにわが国（理研・東大）、並びに、米国（JILA）にて 10^{-18} 台前半の不確かさを持つ光時計（Sr光格子時計）が実現されている。よって、このマイルストーン1)の達成が最も早く期待される。また、マイルストーン2)については、日米欧の各地域において、光ファイバーを用いた遠隔周波数比較実験が行われている。その中でも、ヨーロッパのものは、数か国をつないだ最も大規模なものである。また、ドイツ物理工学研究所（PTB）で開発された可搬型Sr光格子時計は、イタリアやフランスに運搬されて、相対論的測地学の原理検証実験も含めた、精密比較実験において大いに活躍している。2017年6月に開催されたCCTFにおいて、10年あまりの歳月をかけて、Srの時計遷移周波数の絶対値が、不確かさの範囲内で収束してきたことが示された。これは、前節のマイルストーン3)の条件が満足されつつあることを意味している。国際原子時（TAI）への光時計の定常的な貢献を謳った、マイルストーン4)については、フランス時空標準機構（SYRTE）のSr光格子時計が予備的な報告を行い、サーキュラーTにその結果が報告された。また、イギリスNPLのYb⁺時計や、わが国のNICTにおけるSr光格子時計も光時系の生成に向けて、研究開発が精力的に行われている。マイルストーン5)については、²⁷Al⁺/¹⁹⁹Hg⁺、⁴⁰Ca⁺/⁸⁷Sr、¹⁷¹Yb⁺(E3)/¹⁷¹Yb⁺(E2)、¹⁹⁹Hg/⁸⁷Sr、¹⁷¹Yb/⁸⁷Sr、¹⁹⁹Hg/⁸⁷Rbなど、数多くの周波数比の測定が行われている。上記の周波数比測定と、セシウム一次標準器による絶対周波数測定のデータセットは、未知数の数よりも方程式の数の方が多いものとなる。よって、全体として不確かさを最小に保つために、基礎物理定数の決定の際に用いられる手法が用いられた。例えば、Margolisらによる最小二乗法や、

Robertsson らによるグラフ理論を用いた解析などである^{10),11)}。

7.5 懸念事項

秒の再定義という歴史的イベントに向けて、世界的な盛り上がりを見せている現在であるが、その一方でいくつか懸念事項も指摘されている。それは、現在の秒を維持管理するシステムについてである。まず、TAIの校正に寄与しているセシウム一次周波数標準器（ファウンテン時計）の数が漸減傾向にあることである。マイクロ波による時計から、光時計へと移行しつつある時期であり、そのような状況では、リソースの投入も難しくなる可能性もある。これが事実かどうかを確認するために、2010年以降のサーキュラー T の記述を元にして、TAIの校正に寄与した1次周波数標準器（または、それによる校正イベント）の個数をプロットしたのが下の図である。

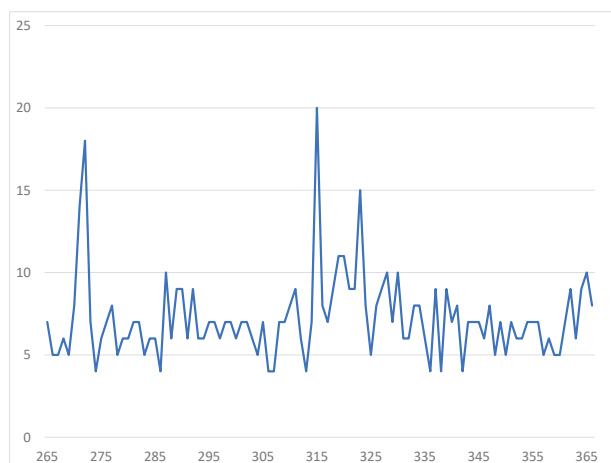


図6 TAIの校正に寄与したセシウム一次標準器の個数の履歴（横軸：サーキュラー T の発行番号。おおむね2010年から2018年に相当する。縦軸、セシウム一次標準器の個数）

この図を虚心坦懐に眺めれば、危惧されるほどの個数の減少傾向は見られない。しかし、不確かさの小ささからその寄与の重みが大きなセシウム原子泉時計を定常的に運転できているのが、実質的にドイツ PTB とフランス SYRTE の2か国である場合が多いというのが現状である。中国の NIM も健闘しているといえるが、SI秒の信頼性の確保のためには、わが国を含めたアジア諸国、そして北米諸国のさらなる貢献も望まれるところである。さらに光時計による TAI の校正が頻繁に行われるようになれば、懸念が低減されるとともに、秒の再定義を促進するようになる。もう一つ指摘された懸念事項は、衛星双方向方式を含めた時刻比較にかかわる機器の老朽化の現状を意

識した、インフラ投資の呼びかけである。これらのインフラ機器は、停止することが許されるものではなく、また、秒の再定義後も引き続き重要な役割を果たすので、適切な維持・管理が望まれる。

8. 終わりに

次世代原子時計は、秒の再定義のほかにどのような応用があるのだろうか。光時計は最も精密な量子標準であると同時に、相対性理論の効果を身近に観測するツールとなり得る。また、物理定数の恒常性を検証する上でもたいへん有効であることがわかってきた。さらに、重力ポテンシャルの高精度センサーとして、鉱物の探査や地殻変動の観測にも役に立つと期待されている。次世代原子時計である光時計は基礎科学と実用技術の両面で多くの研究成果を生み出すことは間違いない。

参考文献

- 1) 白田孝：国際単位系 (SI) の体系紹介と最新動向について (概論), 計測と制御, **53**, 74/79 (2014)
- 2) 洪鋒雷：光コム-光科学のイノベーション, 応用物理, **79**, 546/549 (2010)
- 3) 産総研プレスリリース (2009年7月16日発表). http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2009/pr20090716/pr20090716.html
- 4) C. W. Chou, D. B. Hume, J. C. J. Koelemeij, D. J. Wineland and T. Rosenband: Frequency comparison of two high-accuracy Al^+ optical clocks, *Phys. Rev. Lett.*, **104**, 070802 (2010)
- 5) M. Takamoto, F.-L. Hong, R. Higashi and H. Katori: An optical lattice clock, *Nature*, **435**, 321/324 (2005)
- 6) B. J. Bloom, T. L. Nicholson, J. R. Williams, S. L. Campbell, M. Bishof, X. Zhang, W. Zhang, S. L. Bromley and J. Ye: An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10^{-18} level, *Nature*, **506**, 71/75 (2014)
- 7) 洪鋒雷：原子時計の発展と秒の定義に係わる国際勧告, 日本物理学会誌, **69**, 196/203 (2014)
- 8) P. Gill: When should we change the definition of the second?, *Phil. Trans. R. Soc. A*, **369**, 4169/4130 (2011)
- 9) F. Riehle, P. Gill, F. Arias and L. Robertsson: The CIPM list of recommended frequency standard values: guidelines and procedures, *Metrologia*, **55**, 188/200 (2018)
- 10) H. S. Margolis and P. Gill: Determination of optimized frequency and frequency ratio values from overdetermined sets of clock comparison data, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **723**, 012060 (2016)
- 11) L. Robertsson: On the evaluation of ultra-high-precision frequency ratio measurements: examining closed loops in a graph theory framework, *Metrologia*, **53**, 1272/1280 (2016)