

4 原子周波数標準

4 *Frequency Standards Based on Quantum Transitions*

4-1 秒の再定義に向けた国際動向

4-1 *International Trend toward the Redefinition of the Second*

井戸哲也 花土ゆう子 細川瑞彦

Tetsuya IDO, Yuko HANADO, and Mizuhiko HOSOKAWA

光周波数標準がマイクロ波周波数標準の性能を凌駕するようになり、国際単位系の1秒を再定義することが議論されている。本稿では、現在の光周波数標準が到達している性能について簡単にまとめるとともに再定義のための条件として時間周波数標準の研究者間で認識されている5つの条件について述べる。

The fact that optical frequency standards have surpassed microwave standards has triggered a discussion toward the redefinition of the SI second. Here, we first summarize the current status of optical frequency standards and then present what are shared by the community of time and frequency standards as prerequisites to realize the redefinition.

1 まえがき

時間・周波数は国際単位系の基本単位の中で圧倒的に小さい不確かさで実現できることはよく知られている。1967年に1秒はセシウム¹³³Cs)原子の超微細構造遷移の周波数を9 192 631 770 Hzとすることで定義され、この天文時から原子時への定義変更は原子時計の高精度化やコンパクト化等への動機付けとなり、その結果、時間の精度向上のみならず衛星測位技術という形でカーナビゲーションシステム等を実現して、我々の生活様式を変えるほどのインパクトをもたらした。現在運用されているセシウム周波数標準の中で最も小さい系統誤差の不確かさは 1.7×10^{-16} である[1]。他の物理量の標準を実現する際の不確かさは高々10桁であることを考えると時間・周波数標準(以下、周波数標準)の能力は突出している。このため、多くの時間以外の物理量は周波数標準を利用して実現されている。例えば2019年5月に、質量の定義がキログラム原器からプランク定数を定数とする形に変わったが、この再定義においても1984年に光速を定数とすることで長さの定義を改訂したのと同様に、やはり質量が周波数標準に依存して実現されることとなった。したがって計量標準の世界の根幹を形成しているのは1) 光速を普遍的な物理定数とする相対論、2) プランク定数を普遍的な物理定数とする量子論、そして3)

技術的に極めて小さい不確かさで標準量を実現できる周波数標準という見方すらできるかもしれない。

このように他の物理量から見ると盤石に見える現在の秒の定義であるが、セシウムの超微細構造遷移によって定義された1967年以降、周波数標準の分野では更なる精度向上を目指す継続的な努力がなされてきた。セシウム周波数標準においては、原子状態の選別手法の改良(磁気選別型から光励起型へ)や、原子とマイクロ波の共鳴線の取得法の改良(熱ビーム型から原子泉型へ)などにより高精度化が図られ、異なる原子種の開拓(ルビジウム周波数標準)も2000年頃に進められた。そして、2000年以降は原子のマイクロ波遷移でなく光学遷移を利用した周波数標準の開発が急激に進歩しており、2010年頃には標準器として確度・安定度共にセシウム周波数標準を凌駕する周波数標準が出現した。このため、周波数標準の研究者の間では2015年頃より、秒の定義を光学域にある他の原子遷移に求める「秒の再定義」の議論が始まった。本稿では、これら秒の再定義への動向をまとめるとともに、秒の再定義の方法やそのための必要条件等を議論する。

2 放射リストと秒の二次表現

図1に周波数標準の系統的な不確かさが低減されてきた推移を示す。セシウム周波数標準は2010年頃より

4 原子周波数標準

系統的な不確かさが 2×10^{-16} 程度でリミットされる一方、光周波数標準は 1990 年以來、10 年で 2 桁というトレンドをほぼ保っていることが見て取れる。

光周波数標準は 2000 年代初頭に原子時計動作を開始した。米 NIST (National Institute of Standards and Technology) においては水銀イオン (Hg^+) 光周波数標準とカルシウム (Ca) 光周波数標準が動作を開始し、光周波数コム の出現によって、これら波長が離れた 2 種の光周波数標準間の安定度を計測できるようになった [2]。光周波数コムが出現する前は、相対安定度を計測するためには光周波数差をビート周波数として検出可能な同一原子遷移を利用する光周波数標準を 2 つ用意する必要があった。また、セシウムマイクロ波標準との比較によって光周波数標準の絶対周波数を測定することも技術的に不可能であった。光周波数コムによって絵に描いた餅であった光周波数標準が SI 単位系にトレーサブルとなり、周波数標準研究者のひとつの究極の目標「セシウムを超える性能を持つ光周波数標準の開発による秒の再定義」が、このときはるか彼方ながらもはっきり認識されたのであった。

国際度量衡委員会会長諮問委員会 (CCL) は、前世紀より原子の共鳴線に安定化したレーザーの波長によって長さ標準とできる放射リスト (List of Radiation, LoR) を作ってきた [3] が、2000 年頃には水銀イオン ($^{199}\text{Hg}^+$)、イッテルビウムイオン ($^{171}\text{Yb}^+$ (E2))、カルシウム (Ca) の光周波数標準において 1×10^{-14} 程度の不確かさが実現し、相対的不確かさのセシウム原子泉標準に対する差が一桁程度に抑えられてきた。また、セシウム原子泉標準では衝突シフトが大きな不確かさ要因となっていたが、ルビジウム (^{87}Rb) についてはセシウムよりも衝突シフトが小さいためより小さい系統的な不確かさが期待されていた。これを受けて時間周波数諮問委員会 (CCTF) では 2001 年の会議において、このようなセシウム周波数標準を代用できる可能性がある原子周波数標準のリスト (秒の二次表現) を今後作っていく方針を recommendation として採択した。この後、2003 年には CCL と CCTF は二次表現を採択する合同作業部会を立ち上げ、ここで二次表現として採択する基準を「その不確かさがセシウム周波数標準の不確かさの 10 倍以内に収まっていること」とした。明くる年 2004 年には CCTF 会議にて ^{87}Rb のマイクロ波遷移が秒の二次表現として採択され、次の CCTF 会議 (2006 年) では $^{199}\text{Hg}^+$ 、 $^{171}\text{Yb}^+$ (E2)、ストロンチウムイオン ($^{88}\text{Sr}^+$)、ストロンチウム (^{87}Sr) という光学遷移が秒の二次表現として採択された。

表 1 に上述の秒の二次表現を含み、現在 CCL と CCTF が合同で示している周波数・長さの標準として使用することができる原子遷移のリストを示す。

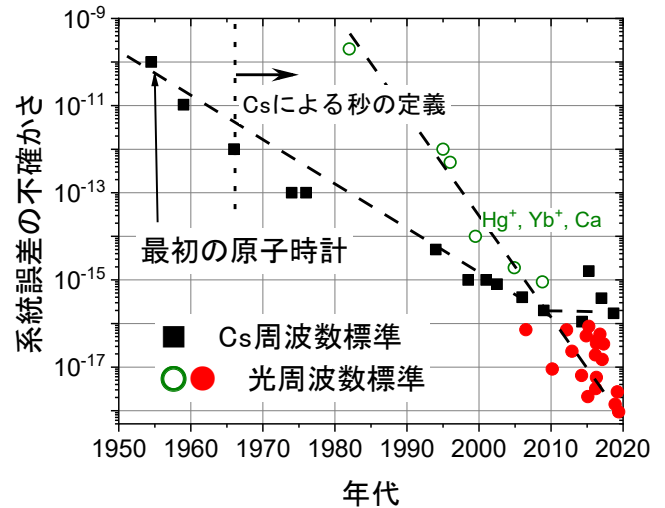


図 1 周波数標準の系統誤差の不確かさの変遷。2010 年頃にセシウム周波数標準の不確かさ減少が止まると同時に光周波数標準がより小さい系統誤差の不確かさを示すようになり、秒の再定義を促している。

u_{LOR} は当該遷移の絶対周波数の不確かさを示し、 u_{sys} はその遷移の周波数標準を実現する際の系統的な不確かさとして報告のあった最も小さい値である。 u_{sys} が最も不確かさの小さいセシウム周波数標準の値より小さくなると、 u_{LOR} はおおむねセシウム周波数標準でリミットされる値となり、現在の二次表現はほとんどがこの限界値となっている。これは国際単位系の 1 秒よりもより小さい不確かさで実現できる周波数標準が林立している現状を示しており、単位系として決して望ましくない状態である。

NICT は、単一カルシウムイオン (Ca^+) トラップによる周波数標準を立ち上げ、2009 年には Ca^+ の原子遷移周波数リスト登録に貢献し [4]、2012 年には更に小さい 2.9×10^{-15} の不確かさ [5] を CCTF に報告している。また秒の二次表現である Sr 光格子時計については、2006 年の東大、米 JILA、仏 SYRTE (Système de Références Temps-Espace) に続き、2012 年に独 PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) と共に 4 番目となる周波数の報告を行い [6]、以降 2015 [7]、2017 [8] 年と 3 回の CCTF 全てにおいて周波数及び不確かさの更新に貢献してきた。それらで用いる ^{87}Sr については、2012 年より秒の二次表現として最も小さい不確かさとなっており (4×10^{-16} @CCTF2017)、これまで 7 機関から 16 の絶対周波数の報告があった。

現在 CCTF 作業部会において推奨周波数を決定する際には、セシウム周波数標準との比較によって得られる絶対周波数測定のみでなく、異なる光周波数標準間の周波数比の報告値も考慮して、最小二乗法 [9] やグラフ理論 [10] によって周波数標準間の周波数比の最も優^う値を決定し、そのうえで定義に基づいてセシウムの周波数を $9\,192\,631\,770$ Hz とすることで他の標準周

表1 CCTF2017での光及びマイクロ波周波数標準の推奨周波数決定に利用されたデータ。太字の原子遷移は秒の二次表現。 u_{LOR} , u_{sys} はそれぞれ CCTF2017での推奨周波数の不確かさと報告された周波数標準の系統誤差の不確かさ。

	不確かさ		報告数		光-光周波数比における計測ペア										機関名			
	u_{LOR} (10^{-16})	u_{sys} (10^{-17})	vs. マ イ ク ロ 波	vs. 光	$^{115}\text{In}^+$	^{199}Hg	$^{27}\text{Al}^+$	$^{199}\text{Hg}^+$	$^{171}\text{Yb}^+$ (E2)	$^{171}\text{Yb}^+$ (E3)	^{171}Yb	$^{88}\text{Sr}^+$	^{88}Sr	^{87}Sr		$^{40}\text{Ca}^+$		
$^{115}\text{In}^+$	160	370	3													NICT		
^{199}Hg	5	8.4	3	2				4								SYRTE, RIKEN		
$^{27}\text{Al}^+$	19	0.095	1	1					5.5							NIST		
$^{199}\text{Hg}^+$	19	1.9	1	1				1								NIST		
$^{171}\text{Yb}^+$ (E2)	6	61	5	2												NPL, PTB		
$^{171}\text{Yb}^+$ (E3)	6	0.27	5	1					1							NPL, PTB		
^{171}Yb	5	0.14	6	3											5.5	KRISS, INRIM, NIST, NMIJ, RIKEN		
^{40}Ca	180		2													NIST, PTB		
$^{88}\text{Sr}^+$	15	1.5	5												2.3	NPL, NRC		
^{88}Sr	6	58	3	1												UT, NCU		
^{87}Sr	4	0.21	17	7										2	3	1	250	JILA, NICT, NIM, NMIJ, PTB, RIKEN, SYRTE, UT,
$^{40}\text{Ca}^+$	24	7.7	4	1												1	Innsbruck, NICT, WIPM	
^{87}Rb	7		3	2										1		1	SYRTE	

波数も決定される。表1に報告を寄せた機関名と、2017年の作業部会で考慮されたこれまでのすべての周波数比の報告数を示す。絶対周波数測定、光-光周波数比測定、双方において ^{87}Sr が多数の報告を占めており、光周波数標準の中でハブとして機能していることが分かる。またマトリクスの上右半部分にはこれまで報告があった光-光周波数比測定における不確かさを青色にて示した。現在、アルミニウムイオン(Al^+)について 9.5×10^{-19} の不確かさが報告され、これが最小値となっており、その他に $^{171}\text{Yb}^+$ (E3), ^{87}Sr , ^{171}Yb において18乗台前半の不確かさが報告されている。

3 再定義への必要条件

CCTFにおける秒の再定義へ向けての具体的な議論は2015年に初めてなされ、これを受け2017年のCCTFに向けて、Strategic Planning作業部会、周波数標準作業部会が合同で技術的な議論を開始した。これらの議論とCCTF2017での議論の結果は[11]にまとめられて出版され、現時点でのコミュニティの共通認識となっている。そこでは再定義のための必要条件として5つが上げられている。

1 少なくとも3個体以上の光周波数標準がその時点での最も不確かさの小さいセシウム周波数標準よ

- り2桁以上小さい不確かさを実現すること
- 少なくとも一方が1に当たる周波数標準間で独立した周波数比較が3つ以上行われ、 5×10^{-18} 以下の不確かさでその周波数一致が確認されること。この周波数一致は、可搬周波数標準、遠距離周波数比較、複数原子種間の周波数比のクロージャー、で行われる。
- 1の周波数標準の絶対周波数測定が3つ以上の独立したセシウム周波数標準でなされ、この測定がセシウム周波数標準の不確かさで制限された形でその周波数一致が確認されること
- 光周波数標準が国際原子時の維持に定常的に貢献すること
- 光周波数標準の5つ以上の組合せによる周波数比について、複数の研究機関で測定がなされ、それらが 5×10^{-18} 以下の不確かさで一致すること

1については、本稿執筆の時点(2019年7月)で最も確度の高いセシウム周波数標準の不確かさが 1.7×10^{-16} [1]であり、一方NISTの Al^+ [12]及び ^{171}Yb [13]がこれを2桁以上上回る不確かさとなっている。またJILAの ^{87}Sr 、PTBの $^{171}\text{Yb}^+$ の不確かさはそれぞれ 2.1×10^{-18} [14]、 2.7×10^{-18} [15]となっており、おおむね満たされていると言える状態である。

2については、可搬周波数標準の開発が進んでいるがまだ18乗台に到達していない。遠距離周波数比較ではファイバリンクが可能であれば18桁の比較は既に可能な状態である。しかし大陸間での比較をファイバリンクで行うことは現状不可能であり、衛星リンク等の改善が望まれている。周波数比のクロージャ測定については、最も簡単な2種の周波数比の一致を検証する、という点では ^{87}Sr と ^{171}Yb の光格子時計間の比率測定が、RIKEN(同一ラボ内)[16]、PTB-INRIM(可搬Sr)[17]、NICT-KRISS(衛星双方向比較)[18]、JILA-NIST(光ファイバリンク)等で行われており、これらの測定された比率が一致することが求められる。このクロージャ測定については、より望ましいのは3種類以上の遷移を利用して、 $(A/B) \times (B/C) \times (C/A)$ が1になることを確認することである。現状では欧州のファイバリンク、米国コロラド州ボルダーにおけるファイバリンク、東京首都圏のファイバリンクによって3種類の光周波数標準がリンクされて実現することが想定される。

ここでは18乗台が一定のマイルストーンとして意識されているが、これは現在のジオイド高の不確かさが数cm程度となっているためである。仮に系統誤差要因を積み上げた値が19桁の周波数標準が実現したとしても、遠隔地にある周波数標準を比較する際はその比較の不確かさはジオイド高の不確かさで制限されてしまい、19桁の周波数同一性を確認することは出来ない。18桁は腰だめの数字でなくこのような事情から設定された。

3は現行のセシウムに基づく絶対周波数を正確に計測することで、新しい定義値を決定しこれにより再定義以前と以降で1秒の長さを一致させるためである。おおむね満たされているように見えるが「3つ以上の独立したセシウム周波数標準でなされ」という点において、現在安定に動作しているセシウム原子泉標準がPTB及びSYRTEの2機関にしか所在しないことから、もう1機関のセシウム原子泉標準が安定に動作することが強く期待されている。

4は秒の再定義をする以上、国際原子時の校正は新しい定義である光周波数標準によってなされるべきである。本研究報告における4-4 N. Nemitzの稿においては、 ^{87}Sr 光格子時計による国際原子時の歩度校正を報告しており、これは秒の再定義へ向けたこの必要条件を強く意識したものである。

5は、複数種の光周波数標準間の周波数の関係がつかじつまとの合ったものであることを要請している。これが満たされることによって、仮に特定の遷移を一次標準と再定義したとしても、二次表現となる他の二次標準も不確かさの増大を伴うことなく使用できる。これ

によって、今まで各研究機関がそれぞれの原子系で開発してきた周波数標準を引き続き使用していただけることとなる。

4 まとめ

過去の例を見ると、計量標準の再定義が決議される国際度量衡総会CGPMはおおよそ4年に1度程度の頻度で開催され、直近では2018年に開催されており、このことから時間周波数標準のコミュニティでは最速で2026年の秒の再定義の可能性を検討している。従来、秒の再定義については国際度量衡委員会CIPMの諮問委員会の中ではCCTFのみで議論されていたが、2019年にはCCU(単位諮問委員会)でも議論が開始され、ますます現実的なものとなりつつある。上述した必要条件是決して簡単なものではないが、再定義は新しい定義によってどの程度の利益を我々が得られるか、にも依存する。近年の光周波数標準とその周波数リンク技術の発展は、光周波数標準を測地センサとして利用する可能性を示唆している[17][19][20]。このような応用技術の発展が(性能面でなく)利用者からの強い要請となり、再定義への動きが加速する可能性がある。

また、今後多数の光周波数標準によって協定世界時(UTC)の歩度の継続的な評価がなされた場合、光周波数標準の方が安定に評価できることが示される可能性がある。これまでは光周波数標準がセシウム周波数標準よりも優れているといえども、その恩恵は一部の計量関係の科学者に限られていた。しかし、日々の生活で使用する時刻のトレーサビリティの頂点にあるUTCに光周波数標準の精度が貢献するようになると、測地利用等の応用技術と共に時系維持の用途が動機となり光周波数標準の商用化やコンパクト化の動きが加速され、その結果更に光周波数標準を利用する時系が有利になってくる可能性がある。そのような場合、上述の再定義の条件が完全に満たされない状況でも秒の再定義を行う、若しくは光周波数標準のCIPM推奨値の不確かさ(u_{LOR})が個々のセシウム原子泉標準の系統的な不確かさを下回することで実質的に光周波数標準を中心にしてUTCが維持されることもあるかもしれない。

二桁正確さが向上した新たな秒の定義とその実現が、基礎科学はもちろん、情報通信技術や測地技術などに更なる非連続的な発展の道を開き、それがまた時間周波数標準の向上の原動力となる。近未来での実現が期待される秒の定義改定が、そのような循環の契機となることを期待したい。

【参考文献】

- 1 S. Weyers et al., Metrologia 55, pp.789–805, 2018.
- 2 S. A. Diddams et al., Science 293, pp.835–828, 2001.
- 3 BIPM website. <https://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/standard-frequencies.html>
- 4 K. Matsubara et al., Appl. Phys. Express 1, 067011, 2008.
- 5 K. Matsubara et al., Opt. Express 20, p.22034, 2012.
- 6 A. Yamaguchi et al., Appl Phys. Express 5, 022701, 2012.
- 7 H. Hachisu and T. Ido, Jpn. J. Appl. Phys. 54, 112401, 2015.
- 8 H. Hachisu, G. Petit, F. Nakagawa, Y. Hanado, and T. Ido, Opt. Express 25, p.8511, 2017.
- 9 H. S. Margolis and P. Gill, Metrologia 52, pp.628–634, 2015.
- 10 L. Robertsson, Metrologia 53, pp.1272–1280, 2016.
- 11 F. Riehle, P. Gill, F. Arias, and L. Robertsson, Metrologia 55, pp. 188–200, 2018.
- 12 S. Brewer et al., Phys. Rev. Lett. 123, 033201, 2019.
- 13 W. F. McGrew et al., Nature 564, p.87, 2018.
- 14 T. L. Nicholson et al., Nat. Comm. 6, p.6896, 2015.
- 15 C. Sanner et al., Nature 567, p.204, 2019.
- 16 N. Nemitz et al, Nat. Photonics 10, p.258, 2016.
- 17 J. Grotti et al., Nat. Phys. 14, p.437, 2018.
- 18 M. Fujieda et al., IEEE Trans on UFFC. 65, pp.973–978, 2018.
- 19 T. Takano et al., Nat. Photon. 10, p.662, 2016.
- 20 C. Lisdat, et al., Nat. Comm. 7, 12443, 2016.



井戸哲也 (いど てつや)

電磁波研究所
 時空標準研究室
 室長
 博士(工学)
 光周波数標準、光周波数計測

花土ゆう子 (はなど ゆうこ)

電磁波研究所
 上席研究員
 博士(工学)
 時刻・周波数標準、高精度計測



細川瑞彦 (ほそかわ みずひこ)

情報通信研究機構
 理事
 理学博士
 時空計測、時刻・周波数標準