時間周波数標準の発展と応用*

Development and Applications of Time and Frequency Standards

洪 鋒雷**
Feng-Lei Hong

Key words time standard, frequency standard, optical lattice clock, secondary representations of the second

1. はじめに

物理の基本単位に対する定義が変わるのは、科学技術の進歩により、以前の方法よりも精度よく正確にその量を示すことができるようになったときである。時間の単位である「秒」の定義は現在、セシウム原子のマイクロ波遷移に基づく原子時計で実現されている。近年、原子の光遷移に基づく次世代原子時計の研究が非常に盛んで、すでにマイクロ波原子時計の性能を凌ぐ光原子時計が開発されている。時間周波数標準はどのように発展していくのだろうか。ここでは、秒の定義の変遷を振り返りながら、マイクロ波から光への原子時計の発展について説明した上で、時間周波数標準の応用について述べる。

まず図1に秒の定義の変遷を示す。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86400分の1と決められていた。潮汐摩擦などによる地球自転の不整が不確かさの要因であった。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

31556925.9747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。1967年に、第13回国際度量衡総会において「秒はセシウム133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9192631770倍の持続時間である」という新しい定義が採択された。セシウム原子時計の不確かさは、現在では 10^{-16} のレベルに到達している。

2. マイクロ波から光の原子時計へ

時計を構成する3つの要素は、振動子、カウンタおよび表示器である。原子時計の場合、振動子は周波数基準（原子の量子遷移）に同調した電磁波（マイクロ波もしくは光）である。マイクロ波を利用するセシウム原子時計を使って時刻を表示するには、カウンタで9192631770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。

光の周波数はマイクロ波と比べて5桁高いので、光周波数標準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、光周波数標準自身の精度問題に加えて、光周波数をカウントすることが非常に困難であった。1999年ごろから、モード同期超短パルスレーザーによる「光周波数コム」を用いたレーザー周波数カウンタの提案がなされ、この分野において極めて大きな技術革新が起こった¹⁾。

光周波数コムの精度が $10^{-17} \sim 10^{-19}$ であること²⁾を考え、光周波数標準の不確かさがすでに 10^{-18} 台でさらに向上中であること^{3,4)}を考慮に入れると、いずれ秒の定義はマイクロ波のセシウム原子時計から光の周波数標準に替わる可能性が出てくる（図2）。光周波数標準が秒の定義になることは、光周波数標準に時計の針を1秒ずつ動かす仕組みを備える必要があることを意味する。光周波数コムでまず光周波数をマイクロ波周波数に分周し、そこから先は従来のマイクロ波原子時計と同じようにさらに低い周波数へと分周し、最終的に1 Hzの信号を導き出す。このよう

図1 秒の定義の変遷

*原稿受付 平成26年4月24日

**産業技術総合研究所計測標準研究部門（茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第3）

図2 マイクロ波原子時計と光原子時計をつなぐ光周波数コム

に、高精度な光周波数標準と光コムの組み合わせで「光原子時計」が誕生する。

3. 光格子時計の展開

光原子時計は主に「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3)。単一イオン光時計方式では、レーザ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 イオン時計の不確かさは 8.6×10^{-18} に達している³⁾。しかし、イオン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。

光格子時計は東大工学部香取氏の提案によるもので、レーザ光の定在波で作る光格子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、周波数安定度がイオン時計よりもよくなる。また、光格子を作るレーザ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)の存在が見いだされ、光シフトが時計遷移の周波数に影響を及ぼさない。最初に実現された光格子時計は ^{87}Sr によるもので⁵⁾、その後光周波数計測の結果も更新され⁶⁾、今や最も研究されている光原子時計となった。また最近では、 ^{171}Yb を用いた光格子時計も実現され⁷⁾、光格子時計の研究が広がりを見せている。

4. 重力ポテンシャルセンサとしての原子時計

光原子時計の発展の詳細は別の解説⁸⁾に譲るとして、ここでは光原子時計を含む時間周波数標準の応用について述べる。まずは工学的な応用として、重力ポテンシャルの高精度センサのテーマを取り上げる。一般相対性理論では、重力は空間を歪ませ、時間の進みを遅らせる。地球上では、重力場が存在し、重力のない宇宙空間に比べて時間がゆっくり進むことになる(重力赤方偏移)。ここでは、相

図3 単一イオン光時計と光格子時計

対性理論で期待される重力場中の原子時計の遅れ(周波数の低減)を述べ、GPS衛星、日本標準時システムおよび光領域の原子時計による重力赤方偏移の検出を紹介する。

4.1 重力赤方偏移の理論値

一般相対性理論では、重力場中の時計周波数の変化(Δf)は

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta U}{c^2} \quad (1)$$

で表される。ここで f は時計の周波数、 U は重力ポテンシャル、 c は光速である。球形の地球を仮定すると、式(1)は

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{c^2} \left(\frac{-GM}{R+\Delta h} - \frac{-GM}{R} \right) \quad (2)$$

となる。ここで、 G は万有引力定数で、 M と R はそれぞれ地球の質量と半径で、 Δh は高度差である。

4.2 GPS衛星時計への相対論効果

衛星時計の基本周波数は 10.23 MHz である。衛星軌道では地球表面と比べて重力ポテンシャルが小さいため、時計が早く進み、時計の周波数が大きくなる。地球の平均半径を $R=6370$ km、衛星の平均高度を $\Delta h=20200$ km としよう。式(2)に代入して計算すると、 Δf は $5.29 \times 10^{-10} f$ となり、0.00541 Hz だけ周波数が大きくなる。したがって、あらかじめ 0.00541 Hz だけ衛星時計の周波数を小さくセットしておくと、地球表面上の観測者が受け取る周波数がちょうど 10.23 MHz となる。この数値は、単純化した導出にも関わらず、十分に正確である。実際には、衛星は衛星軌道で動いているので、特殊相対論の効果も考慮に入れる必要がある。特殊相対論の効果も入れた Δf は 0.00446 Hz となる⁹⁾。

4.3 日本標準時システムによる重力赤方偏移の検出

地表付近では、式(2)は

$$\frac{\Delta f}{f} \approx \frac{GM}{c^2 R^2} \Delta h = 1.1 \times 10^{-16} \Delta h \quad (3)$$

となる。すなわち、1 m の高さの変化が時計の周波数におよそ 1×10^{-16} の周波数変動を引き起こす。

情報通信研究機構では、日本標準時システムを整備するために、セシウム原子時計を標高 700~800 m の福島県おたかどや山および福岡・佐賀県境のはがね山に運搬し、高度の変化に伴う重力赤方偏移の検出を試みた¹⁰⁾。観測された値は、理論値の $+7.8 \times 10^{-14}$ のおたかどや山におい

図4 Al単一イオン光時計による重力ポテンシャル変化の検出

て $+7.6 \times 10^{-14}$ 、理論値の $+9.0 \times 10^{-14}$ のおおたかどや山において $+12.1 \times 10^{-14}$ である。測定精度が 10^{-14} レベルだったことを考慮すれば、観測結果は理論値と一致しているといえる。

4.4 重力センサとしての光時計

最近では、米国立標準技術研究所（NIST）の研究者たちが光領域の原子時計を使って、地表付近で 1 m 以内の高さの変化による重力ポテンシャルの変動を検出した¹¹⁾。研究者たちは 2 台の Al イオン時計を用意し、そのうち 1 台の時計を 33 cm 上げたところ（図 4）、その周波数が $(4.1 \pm 1.6) \times 10^{-17}$ 変化したと観測した。これは上記のセシウム原子時計による実験と比べて、精度が 1000 倍向上した。さらに、光時計の短い平均時間の安定度もよいので、測定時間はセシウム原子時計を利用した実験の数日から数十分に短縮された。

光時計の性能はまだ向上する余地があるので、将来的には 1 cm レベルの高さ変化に相当する重力ポテンシャルの変動が検出できる可能性がある。このように感度を高めることができれば、測地学や水文学、または宇宙における基礎物理の検証実験にも光時計をさまざまなセンサとして用いることができる。この性能を利用することで、高性能な光時計の鉱物探査や地震予知への応用が期待される。

5. 原子時計のその他の応用

5.1 物理定数の恒常性の検証

NIST では、イオントラップ装置を用いて ^{199}Hg イオンの光領域（282 nm）にある $5d^{10}6s^2S_{1/2} \rightarrow 5d^96s^2^2D_{5/2}$ 遷移の周波数を測定したところ、周波数の基準であるセシウム原子時計の不確かさで測定精度が制限されていることがわかった¹²⁾。イオントラップで得られる Hg イオン遷移周波数自身の再現性が 17 桁あるにもかかわらず、周波数測定の基準となるセシウム原子時計の精度が 16 桁しかないため、測定結果は 16 桁しか得られなかった。これでは、他の研究グループが同じ実験を再現しても、両者の測定結果が 17 桁で一致することは確認できない。

このようなことを回避する手段の一つとして、NIST ではさらにイオントラップされた ^{27}Al イオンの遷移周波数

を測定した。 ^{27}Al イオンの遷移周波数の測定の再現性が 17 桁あるため、Hg イオンと Al イオンの遷移周波数の比を 17 桁の精度で決定することに成功した¹³⁾。これはつまり、セシウム原子時計を基準にではなく、Al イオンを基準に Hg イオンの遷移周波数を精密に決定したことになる。

では、原子の遷移周波数を 17 桁で決定することはどんな物理的な意味があるのだろうか。周波数の精密計測は、その標準への応用の他に、物理の基礎的な問題を解決する上でも役に立つ。宇宙モデルによっては、初期宇宙での基礎物理定数は現在と異なり、さらに現在においても物理定数は変わっていることが示唆されている。実際、キューサーの分光測定結果を解析することにより、微細構造定数 (α) の時間変化が

$$\frac{\dot{\alpha}}{\alpha} = (6.40 \pm 1.35) \times 10^{-16}/\text{y} \quad (4)$$

と有意にゼロからずれた正の値となったとの報告もある¹⁴⁾。しかし、西アフリカのオクロ鉱山の 20 億年前の天然原子炉の解析では

$$\frac{\dot{\alpha}}{\alpha} < 1 \times 10^{-17}/\text{y} \quad (5)$$

となり、ゼロから有意なズレは得られなかった¹⁵⁾。

この問題を解決するもう一つのアプローチが実験室物理の精密計測である。原子時計の周波数測定は数年の時間スケールで行われるのに対して、天文や地球物理は億年単位で変化する現象を扱う。しかし短い測定時間で扱う現象でも、その精度が十分に高ければより有意義な測定結果が得られるかもしれない。NIST で行われた ^{27}Al イオンと ^{199}Hg イオンの周波数比の測定¹³⁾は

$$\frac{\dot{\alpha}}{\alpha} = (-1.6 \pm 2.3) \times 10^{-17}/\text{y} \quad (6)$$

の結論を出し、先に紹介したキューサーの結果を否定し、オクロ鉱山の結果を支持した。しかも、その精度はすでにオクロ鉱山の分析精度に迫っている。

5.2 相対性理論を検証する実験

原子時計は、相対性理論が予測した結果を検証し、時間と空間の性質について調べる道具として用いることができる。特殊相対性理論は「運動する時計は遅れる」と予測している。1971 年に、物理学者のジョー・ハーフェルとリチャード・キーティングが原子時計を飛行機に載せ、世界一周旅行をさせた。飛行機が元の空港に戻ってきってから、地上の原子時計との比較実験を行った。その結果、飛行機内の時計の方が、地上の時計よりも 59 ns 遅れていたことがわかった¹⁶⁾。実験の不確実な部分が 20 ns 程度あり、その不確実な部分の範囲内で実験結果と相対論の予測が一致した。原子時計の精度がよくなると、相対性理論を検証する実験の不確かさが小さくなり、実験もしやすくなる。例えば、18 桁の精度の原子時計があれば、相対性理論の検証実験は人間が歩く速さでできるようになる。

5.3 秒の再定義—「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

図5 国際度量衡委員会の組織図

確かさがセシウム原子時計で制限される事態を招いた。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。国際度量衡委員会とその下部組織である時間・周波数諮問委員会は、秒の二次表現の選定および管理を「周波数標準作業部会」に任せている（図5）。周波数標準作業部会はさらに、同じ国際度量衡委員会の下部組織である長さ諮問委員会から「メートルの定義を実現する波長標準」の選定および管理が依頼されている。つまり、周波数標準作業部会の主な仕事は、光・マイクロ波問わず、ある単一の周波数リストを作成および管理し、その中から時間・周波数諮問委員会のために「秒の二次表現」を選定し、長さ諮問委員会のために「メートルの定義を実現する波長標準」を選定することである。

周波数標準作業部会の勧告を受けた国際度量衡委員会は、2006年10月に、マイクロ波時計の ^{87}Rb および光時計の $^{88}\text{Sr}^+$, $^{199}\text{Hg}^+$, $^{171}\text{Yb}^+$ （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⁸⁾。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、その周波数値および不確かさを改訂した。

周波数標準作業部会は、2012年9月10～11日にパリ郊外の国際度量衡局で会合を開き、光時計の最新研究成果を取り入れ、秒の二次表現を含めた単一周波数リストの更新について議論を行った。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、国際度量衡委員会に勧告した。秒の定義に関わる国際勧告の最新情報は別の解説にまとめた¹⁷⁾。

6. お わ り に

原子時計に関する研究開発は、今後ますます盛んになる。原子時計の高精度化への要求が達成されるにつれ、その応用も広がって、秒の定義も新しく決める必要が出てくる。光時計は最も精密な量子標準であると同時に、物理定数の恒常性を検証する有効なツールや重力ポテンシャルの高精度センサとして、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のないであろう。

参 考 文 献

- 1) 洪 鋒雷：光コム—光科学のイノベーション—, 応用物理, **79** (2010) 546.
- 2) L.-S. Ma, Z. Bi, A. Bartels, L. Robertsson, M. Zucco, R.S. Windeler, G. Wilpers, C. Oates, L. Hollberg and S.A. Diddams: Optical Frequency Synthesis and Comparison with Uncertainty at the 10^{-19} Level, Science, **303** (2004) 1843.
- 3) 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** (2010) 070802.
- 4) 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 (2014) doi: 10.1038/nature12941.
- 5) M. Takamoto, F.-L. Hong, R. Higashi and H. Katori: An Optical Lattice Clock, Nature, **435** (2005) 321.
- 6) F.-L. Hong, M. Musha, M. Takamoto, H. Inaba, S. Yanagimachi, A. Takamizawa, K. Watabe, T. Ikegami, M. Imae, Y. Fujii, M. Amemiya, K. Nakagawa, K. Ueda and H. Katori: Measuring the Frequency of a Sr Optical Lattice Clock Using a 120 km Coherent Optical Transfer, Opt. Lett., **34** (2009) 692.
- 7) T. Kohno, M. Yasuda, K. Hosaka, H. Inaba, Y. Nakajima and F.-L. Hong: One-Dimensional Optical Lattice Clock with a Fermionic ^{171}Yb Isotope, Appl. Phys. Express, **2** (2009) 072501.
- 8) 洪 鋒雷：秒の再定義に向けての原子時計の新しい進展—「秒の二次表現」, 日本物理学会誌, **65** (2010) 80.
- 9) B. ホフマン-ウェレンホフ, H. リヒテネガー, J. コリンズ: GPS 理論と応用, シュプリンガー・フェアラーク東京, (2005).
- 10) 細川瑞彦：日本標準時システムによる重力赤方偏移の検出, 応用物理, **73** (2004) 1536.
- 11) C.W. Chou, D.B. Hume, T. Rosenband and D.J. Wineland: Optical Clocks and Relativity, Science, **329** (2010) 1630.
- 12) J.E. Stalnaker, S.A. Diddams, T.M. Fortier, K. Kim, L. Hollberg, J.C. Bergquist, W.M. Itano, M.J. Delany, L. Lorini, W.H. Oskay, T.P. Heavner, S.R. Jefferts, F. Levi, T.E. Parker and J. Shirley: Optical-to-microwave Comparison with Fractional Uncertainty of 10^{-15} , Appl. Phys. B, **89** (2007) 167.
- 13) T. Rosenband, D.B. Hume, P.O. Schmidt, C.W. Chou, A. Brusch, L. Lorini, W.H. Oskay, R.E. Drullinger, T.M. Fortier, J.E. Stalnaker, S.A. Diddams, W.C. Swann, N.R. Newbury, W.M. Itano, D.J. Wineland and J.C. Bergquist: Frequency Ratio of Al⁺ and Hg⁺ Single-Ion Optical Clocks; Metrology at the 17th Decimal Place, Science, **319** (2008) 1808.
- 14) J.K. Webb, M.T. Murphy, V.V. Flambaum, V.A. Dzuba, J.D. Barrow, C.W. Churchill, J.X. Prochaska and A.M. Wolfe: Further Evidence for Cosmological Evolution of the Fine Structure Constant, Phys. Rev. Lett., **87** (2001) 091301.
- 15) Y. Fujii, A. Iwamoto, T. Fukahori, T. Ohnuki, M. Nakagawa, H. Hidaka, Y. Oura and P. Möller: The Nuclear Interaction at Oklo 2 Billion Years Ago, Nucl. Phys. B, **573** (2000) 377.
- 16) J.C. Hafele and R.E. Keating: Around-the-World Atomic Clocks: Observed Relativistic Time Gains, Science, **177** (1972) 168.
- 17) 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** (2014) 196.

洪 鋒雷

1987年東京大学理学部物理学科卒。1992年同大学大学院理学系研究科物理学専攻博士課程修了。1992年理化学研究所基礎科学特別研究員。1994年工業技術院計量研究所入所。現在産業技術総合研究所計測標準研究部門時間周波数科研究科長。