

2 時間・周波数標準の基礎

2 Basics of Time and Frequency Standard

2-1 時間・周波数の定義と国際原子時／協定世界時

2-1 Definitions of Time and Frequency Standard

森川容雄
MORIKAWA Takao

要旨

時間・周波数標準分野の基本概念である秒や、秒を積算して得られる時系の定義はその時代の科学技術に依存し、決して一定不変のものではない。ここでは秒の定義及び国際原子時並びに協定世界時等の、基本的時系の定義の歴史の変遷を紹介する。

The definition of most basic concepts in the time and frequency standards field, time and timescale, depends on the science and technology level of the times and is never immutable. In this paper, the historical change in the definitions of time and timescales such as International Atomic Time and Coordinated Universal Time are reviewed.

[キーワード]

時間・周波数標準, 標準時, 国際原子時, 協定世界時, SI単位

Time and frequency standard, Standard time, International atomic Time, Coordinated universal time, International system of units

1 時間・周波数標準の歴史

時間、あるいはその逆数の次元を持つ周波数は、長さや質量とともに人間の活動にとって最も基本的な物理量であり、人類は、古代から自然界の様々な物理現象を利用して時間を精密に測る努力を続けてきた。古代エジプトでは、当時の基幹産業である農業が正確な時を必要とし、天体観測から暦が発達したことはよく知られている。17、18世紀のヨーロッパで海外貿易が発達するようになると、安全で効率的な航海技術のために経度を正確に知る技術の確立は国家の最重要課題の一つになり、ヨーロッパ列強はグリニッジ天文台やパリ天文台を設立するとともに、膨大な懸賞金を賭けて正確な時計の開

発を奨励し、マリクロノメータが開発された[1]。現代の科学技術社会でもGPSに代表される衛星測位技術をはじめ、高速デジタル通信網の同期、精密計測技術などの先端科学技術分野で原子時計が重要な役割を果たしている。

2 標準時制度の確立

このように、人類はその時代の最高の科学技術を駆使し、正確な時間計測技術を開発してきたが、計測精度の向上と人類の経済活動の広がりにより、19世紀には時間や時刻の定義が問題になるようになった。18世紀にはヨーロッパ、特にイギリスで機械式時計が中産階級に普及し始めたが、標準時制度はまだ存在せず、各地方

で太陽の南中する正午を時刻の基準としていた。人間の活動が狭い地域に限定されていた当時は、それで特に問題はなかったが、19世紀に鉄道が普及し、短時間に長距離の移動が可能になると各地域間の時差が問題になるようになった。このため、当時のロンドン・ノースウェスタン鉄道は1848年にグリニッジ時間による標準時化を実施した。鉄道の標準時が浸透するにつれ、1880年にはグリニッジ天文台の時刻をイギリスの標準時とすることが法律で定められた[2]。これと並行して国際間の標準時の取決めも進められ、1884年10月に米国ワシントンで世界の標準時を協議する「万国子午線会議 International Meridian Conference」が開催され、以下の項目が決議された[3][4]。

- ① それまでの多種多様な本初子午線に代わり、唯一の本初子午線を採用すること。
- ② この本初子午線としてグリニッジ子午儀を通過するものを採用するよう参加国政府に提案する。
- ③ この子午線から東西両方向に180度まで測り、東経を正、西経を負とする。
- ④ 世界日 (universal day) を採用する。ただし地方時の使用を妨げるものではない。
- ⑤ この世界日は平均太陽日であり、本初子午線の正子から始まるものとし、24時間制とする。
- ⑥ 天文時及び航海日は正子から始まるようにすることを希望する。
- ⑦ 角度や時間に10進法を採用することを希望する。

日本では後述するようにこの決議に基づいて、1886年7月13日に、勅令第51号「本初子午線経度計算法及標準時の件」が發布され[4]、我が国の標準時制度が確立された。したがって、この時点では時間の単位である秒は平均太陽日の1/86 400として定義されたことになる。

3 メートル条約と秒の定義

19世紀後半には、時間と並んで最も基本的な物理量である長さに関しても重要な展開があり、1875年にメートル条約が締結された。実際のメートル条約の運営は4年ごとに開催される最高議

決機関である国際度量衡総会 (CGPM) の下に国際度量衡委員会 (CIPM) が設けられ、その監督の下に国際度量衡局 (BIPM) が種々の計量関連の事業を実施している。1875年以後、メートル条約の枠組みの中で、時間を含む各種の計量単位制度の整備が国際的に進められ、1960年の第11回CGPMの決議12で、現在の単位制度である国際単位系 (SI) が定められた[5]。SI単位は、基本単位と基本単位を結合して作られる組立単位の二つの階級に分けられている。この二つの階級に分類することは物理学的には一意に定まるものではなく、たぶんに恣意的なものがあるが、CGPMは国際交流、教育、学術研究の観点から、全世界で使用される実用的かつ唯一の単位体系を採用することの利点を考慮し、明確に定義された七つの単位 (メートル、キログラム、秒、アンペア、ケルビン、カンデラ、モル (ただし、モルは1971年に基本単位として後から追加された。)) をSI基本単位として採用するとともに、周波数を含む27の物理量を組立単位に定めた。すべてのSI基本単位の正式な定義はCGPMによって承認されているが、この定義も不変のものではなく、その時代の科学技術レベルの進歩を反映し、改訂される。実際、CIPMは1927年以降、同委員会が扱う様々な問題について答申を行うことを目的とした諮問委員会を設置し、そこで各単位の定義の改訂問題なども審議されている。時間の単位である秒に関しても、時間・周波数諮問委員会 (CCTF) において秒の定義が審議される。既に述べたように当初秒は平均太陽日の1/86 400倍として定義されていたが、天文観測結果から地球自転の不規則性が正確さを制限していることが明らかになり、1960年の第11回CGPMで国際天文学連合によって与えられた太陽年に基づく以下の定義を承認した[5]。

「秒は、暦表時の1900年1月0日12時に対する太陽年の1/31 556 925.974 7倍である」

しかしながら、この定義に基づき実際に正確な秒を実現するためには長期の天文観測が必要であるという問題があった。一方で、当時急速に進歩したマイクロ波分光光学に基づき開発されたセシウム原子標準器が、はるかに高い正確さ

で秒を実現できることが明らかになり、1955年から1958年にかけてイギリスのNPLと米国のUSNOが共同でセシウム標準器の周波数を暦表時を基準にして測定し[6]、この結果を基に1967-1968年の第13回CGPMにおいて以下の様に秒の定義は改訂された[5]。

「秒は、セシウム133の原子の基底状態の二つの超微細構造準位の間の変位に対応する放射の周期の9 192 631 770倍の継続時間である」

なお、上記の定義では暗黙のうちに、セシウム原子はすべての物理的外乱のない理想的な状態にあることが仮定されている。この定義は、人類が初めて古代エジプト以前から時間の基準として使用してきた天文時から独立した原子時を正式に採用するという意味で画期的なものである。実際には、第13回CGPM以前から、各国の時間・周波数標準機関は原子時計を運用し原子時系を維持してきており、これを正式に位置付けるために1971年の第14回CGPMの決議1では、CIPMに対し国際原子時(TAI)の定義を与えること及び関連国際機関と協力してTAI実現のために必要な処置をとることが要請された。CIPMはこれに基づき下記のようにTAIを定義した[5]。

「国際原子時(TAI)は、国際単位系における時間の単位である秒の定義に従って、いくつかの機関で運転されている原子時計の指示値に基づいて国際報時局が定める基準となる時刻の座標である」

さらにTAIの定義は相対論を考慮して1980年に下記のように補強された[5]。

「TAIは、回転するジオイド上で実現されるSIの秒を目盛りの単位とした、地心座標系で定義される座標時の目盛りである」

このように、現代の科学技術において正確な時間を考える場合、相対論効果を無視できない。時空に及ぼす相対論の影響については他で詳述されているので参照されたい[7]。なお、TAIは

UT1の1958年1月1日0時0分0秒を起点としている。1969年までは、当時の国際報時局の原子時計群を平均してTAIを実現していたが、1969年からは各国の研究機関の原子時計を平均するようになり、TAIの信頼性や短期安定度が改善された[8]。TAIに貢献している時計の大半は商用セシウム原子時計であり、その確度は 10^{-12} 程度であり、TAIの高確度を実現するためには一次周波数標準器によるTAIの周波数校正が重要な意味を持っている。実際、1976年には米国NBS(現NIST)、加NRC、独PTBのセシウム一次周波数標準器のいずれもが、TAIの周波数が定義よりも約 10^{-12} 高いという測定結果を出し、これに基づき1977年1月1日に -1×10^{-12} の周波数調整が行われた[9]。

このように、現在、時間の基本となっているのは原子時であり、以前の天文時ではない。しかしながら、現実の人間の生活は地球上で営まれており、地球の自転に基づく世界時(UT)も依然として利用されている。しかしながら、世界時は地球の運動に基づくため、不規則であるとともに長期的に遅れる傾向にある。このため放置しておくともTAIとUTは次第に分離してしまうため、必要に応じてTAIに1秒挿入あるいは削除する、いわゆる「うるう秒調整」により、両者の分離が0.9秒以内に収まるようにした時系が協定世界時(UTC)である。各国の時間・周波数標準機関は、標準電波等により協定世界時あるいはUTCを整数時間だけオフセットした標準時を報時している。このため、協定世界時はCGPMではなく、標準電波を含む電気通信を所掌する国際電気通信連合ITUの勧告ITU-R TF460の中で下記のように定義されている。

「UTCはBIPMがIERSの協力により維持する時系であり標準周波数及び時間信号の供給の基礎をなすものである。UTCの歩度は厳密にTAIと一致しているが整数秒だけ異なっている。UTC時系はUT1と近似的に一致させるために1秒だけ挿入、あるいは削除(正あるいは負のうるう秒)する調整を行う。」

UTCが国際的に広く利用されるようになり、1975年の第15回CGPMは決議5で以下のように

UTCを推奨している[5]。

「協定世界時」(UTC)と称される時系が、きわめて広く使用されていること、その時系が多くの場合、報時発信局により放送されていること、かつその放送が利用者に対して、同時に標準周波数、国際原子時及び近似的な一つの世界時(平均太陽時としてもよい)を提供していることを考慮し、この協定世界時が、多くの国で法定常用時の基礎となっていることを確認し、この使用が十分に推奨に値するものであると評価する。

ドイツでは、実際に法律で協定世界時を1時間進めた中部ヨーロッパ時を法定時に定め、それを現示する機関としてPTBを指定している。このように、UTCは現代社会の基準時として広く利用されるようになってきている。

UTCやTAIの国際的な決定のしくみとうるう秒の履歴については文献[9]などに詳しい。

TAIやUTCと並んで時間周波数標準分野で重要な意味を持つようになった時系として、GPSの基準時系であるGPS時がある。これは1980年1月5日0時UTC(USNO)を原点とする時系で、UTC(USNO)と 1μ 秒以内に同期するように運用されているが、UTCのようにはうるう秒調整は行わない[10]。

4 新しい定義の動向

物理量の定義は、実際に物理的に現示(realization)されて初めて意味を持つものである。そのため、その物理量の定義は、既に述べたように、その時代の科学技術に大きく依存し、必要に応じて改訂される。よく知られているように、クリプトン原子の放射光の波長で定義されていた長さの定義が、1893年の第17回CGPMで「メートルは $1/299\,792\,458$ 秒間に光が真空中を伝わる行程である」と改訂された。これは、当時の時間標準の不確かさが非常に向上し、それまでのクリプトン標準による長さの現示よりも、新しい定義による方がより高精度が実現できるようになったためである。

現在、セシウム原子による時間標準の精度 10^{-14} ~ 10^{-15} に達しており、あらゆる物理量の中で最も精度が高いが、現在の定義も既に40年近くが経過している。一方で、最近のレーザ技術の進歩には目を見張るものがあり、光領域の周波数標準の不確かさは将来的には 10^{-18} レベルまで実現される可能性がある[11]。それに伴い現行のセシウム原子による時間・周波数の定義も、将来的には光領域の周波数に改訂される可能性も無視できなくなってきており、将来を見据えた時間・周波数標準の研究開発が不可欠になっている。

参考文献

- 1 デーヴァ・ソベル, "経度への挑戦", 翔泳社, 1997.
- 2 角山 栄, "時計の社会史", 中央公論社, 1984.
- 3 <http://millennium-dome.com/info/conference-finalact.htm>
- 4 青木信仰, "時と暦", 東京大学出版会, 1982.
- 5 計量研究所訳・監修, "国際単位系(SI) 国際文書第6版(1991年)", 日本規格協会, 1992.
- 6 W. Markowitz, et al., "Frequency of cesium in terms of ephemeris time", Phys. Rev. Lett., 1, 3, p.105, Aug. 1958.
- 7 細川 瑞彦, "四次元時空と基準座標系", 通信総合研究所季報, pp.3-18, Vol.45, No.1/2, March/June 1999.
- 8 B. Guinot, P.K.Seidelmann, "Time scales: their history, definition and interpretation", Astron. Astrophys., 194, pp.304-308, 1988.
- 9 今江理人, "原子時系と周波数標準", 通信総合研究所季報, pp.19-26, Vol.45, No.1/2, March/June 1999.
- 10 W. Lewandowski, C. Thomas, "GPS Time Transfer", Proc. IEEE Vol.79, No.7, July 1991.
- 11 Th. Udem, R. Holzwarth, and T. W. Hänsch, "Optical frequency metrology", Nature, Vol.416, 14 March 2002.



もりかわ たかお
森川容雄

電磁波計測部門研究主管
周波数標準、時空計測

時間・周波数標準の基礎／時間・周波数の定義と国際原子時／協定世界時