時間標準の現状と動向*

Present and Current Trends in Time and Frequency Standards

中段 和宏**

Yasuhiro NAKADAN

Key words : time and frequency standards, cesium beam frequency standard, TAI, international atomic time scale, UTC, coordinated universal time, time comparison, Ramsey resonance, laser cooling

1. はじめに

現在の時間・周波数標準¹⁾は10万年で1秒もずれない正確さ(精度が 10^{-13} 以上)で、物理量の標準としては最も精度が高いと言われる。同時に分かりにくいとも言われる。時刻から時間(時間間隔)が決められていた経緯があり、時刻と時間は混用されることが多い。時間が不変的な周期運動を利用しようというのに対して、時刻は元来、太陽が真南にあるのを正午とする。地球の自転周期は、月とか太陽から受ける摂動の大きさから、水晶発振器と比較して不安定(10^{-8})であることが見いだされたのは60年近くも前のことである。このようなことから絶対的な標準として原子、分子が注目され、セシウム原子を用いた秒の定義となった。

時間・周波数の安定度および正確さの向上は、遠隔地での時間・周波数、時刻の同期、特に独立同期が可能となり利用分野が広まった。独立同期は、VLBI(超長基線電波干渉計)やGPS(汎地球測位システム)衛星などの測地や航法及びデジタル通信やTVの多元同期などの分野で広く利用されている。また、時間標準は新しいメートルの定義、電圧、相対論的効果などの計測の分野でも利用されている。高精度化が要請されている理由は、例えば、時間測定から距離測定を行うとき、 $1\mu\text{s}$ のタイミング誤差は300mの距離誤差になり、特に独立同期の時には、たとえ 1×10^{-13} の正確な原子時計でも、1年後には約 $3\mu\text{s}$ の不

確かさになり1km程の誤差となることから明白である。

本稿では、セシウム周波数標準の原理と協定世界時や国際原子時などの国際的な体系、および時間標準の現状と研究の動向について解説する。

2. 秒の定義と周波数標準の原理

現在の時間の単位である秒は、1967年の国際度量衡総会で次のように定義された。「秒はセシウム(Cs)133原子の基底状態の二つの超微細準位間の遷移に対応する放射の9 192 631 770周期の継続時間である」。この定義を理解するため、原子標準の一般的な原理を簡単に述べる。

原子や分子の持つ特定の二つのエネルギー準位に着目し、それぞれ E_1, E_2 とする。いま、この二つの準位間で遷移が可能とし、その遷移周波数を ν とし、 h をプランクの定数とすると、 $E_2 - E_1 = h\nu$ の関係がある。 E_1, E_2 は、原子や分子によりそれぞれ固有の値をもつので、 ν も固有のものとなる。取り扱う原子や分子によって、その特質を生かすための方式に違いがあり、それによって困難さも異なるが、どこでも、だれでも再現性の良い標準を得ることができるようにしようというのが、原子標準の考え方である。

ところで、定義にはセシウム原子の特定の準位間の遷移のみが規定されていて何らの仕様も示されていない。これは全く外界の影響を受けない孤立原子を仮想しているのと、定義を実現するための方式は自由であることを意味している。外界の影響が全くない理想状態は実現不可能で、現実には計測手段も含めて、原

* 原稿受付 平成元年3月10日

** 計量研究所(つくば市梅園1-1-4)

図1 セシウム 133 原子の基底状態のエネルギー準位

子に種々のじょう乱が加わるので、準位の間隔は定義の値から少し偏る。偏りそのものの大きさよりも、どの程度精密に補正できるかで正確さが決まる。なお、偏りの量が分かれば、周波数合成技術によって正しい秒なり周波数は簡単に作りだせる。

3. セシウム時間・周波数標準器

セシウム原子はアルカリ金属であり、満たされた外殻電子の外側に 1 個の電子があって、水素原子によく似てエネルギー準位は比較的単純である。基底状態は図 1 に示すように原子核スピンの基づく $F=4, 3$ の二つの超微細構造をもち、弱い磁界中では 16 本のゼーマン副準位に分岐する。周波数標準としては最も磁界の影響の少ない二つの準位 ($F=4, m_F=0$), ($F=3, m_F=0$) 間の遷移 (クロック遷移) が用いられる。

図 2 は、従来型と呼ばれている偏向磁石を使用するセシウムビーム型時間・周波数標準のブロック図である。セシウムのビーム (流線) を発生させる電熱炉、

A, B 二つの偏向磁石、ビームに対して二つの励振 π を持つ空洞共振器、検出器、及びマイクロ波発生器を含む制御装置から構成される。

さて、セシウム金属を炉で約 100°C に加熱すると、セシウム原子は蒸気となり、0.5 mm 程のスリットから高真空中 ($\sim 10^{-6}$ Pa) に放出され、原子ビームとなって互いに衝突がない状態で偏向磁石 A、空洞共振器、偏向磁石 B を通って検出器に達する。原子は強い不均一磁界をもつ偏向磁石 A 及び B では、そのエネルギー準位によってそれぞれ定まった角度で偏転される。空洞共振器では遷移周波数に近い周波数で励振されていて、そこを通ったセシウム原子は遷移し、偏向磁石 B によって A で受けた時と反対の力を受けて検出器に集束される。最大の遷移を引き起こす励振周波数が 9 192 631 770 Hz であるので、つねに最大遷移に励振マイクロ波の周波数が一致するように制御する。

制御の方法は、高安定な水晶発振器から作ったマイクロ波が、わずかに周波数変調されていると、検出器からは変調周波数に対応した電気信号が出力されるので、この信号と変調周波数とを同期検波すれば共鳴線の微分信号が得られることを利用する。この直流出力電圧は正負の向きも含めて励振の中心周波数と遷移周波数の差に比例するので、これを励振マイクロ波源の水晶発振器の可変容量ダイオードに加えて、発振周波数を制御する。このような方式を受動型方式という。

このようにして得られる水晶発振器の周波数はセシウム原子の遷移周波数に周波数の n 倍次数を介して結びつけられているので、その精度もセシウム原子の遷移周波数の精度まで向上する。一般に取り扱いやすい周波数は 1 MHz とか 10 MHz などの周波数であるので、これらは周波数合成器によって作られ、標準周波数として利用される。

図2 セシウム時間・周波数標準器のブロック図

ところで、ビームに対して二つの励振口を持つ空洞共振器を使用する方式は Ramsey 方式と呼ばれ、共鳴線幅を狭くする上で非常に有効である。線幅はビーム方式によってドップラー広がりの影響はほとんどなくなり、原子とマイクロ波の相互作用時間の長さで決まる。そのため、二つの励振口の間隔は長いほどよい。しかし、二つの励振口でのマイクロ波の位相がずれたり、空洞共振器付近にかける静磁界の一樣性が得にくくなったり、真空装置も大がかりになるので、空洞共振器の長さは数 m までのものが用いられる。

最も大きな偏りの量は空洞共振器近傍の一樣な静磁界の強さの違いによって遷移周波数が変わるので、ゼーマン副準位間の遷移 ($\Delta m_F = \pm 1$) などによって磁界を十分な精度で測定しておき、計算による補正から標準周波数を求める。また、空洞共振器の位相差は原子ビームの方向を逆転することによって求める。このような補正ができる装置を 1 次標準器と呼び、その正確さは各国の標準研究所ごとに誤差の見積りの考え方に多少の差異があるが、 $2 \times 10^{-14} \sim 8 \times 10^{-13}$ の値が得られている。

セシウム標準が他の周波数標準器と比較して正確さが最も優れているのは、受動型であることから周波数シフトの要因が少なく、ビームであるため 1 次のドップラー効果や原子間の衝突の影響を避けることができることにあると思われる。しかし、偏向磁石を使う方式は、ビームが直線でないためにビーム反転時の軌道の不一致と強磁界が持つ悪影響を評価するには限度にきたと考えられるようになった。原子標準ではあるが、現実に精度を決めているのは、二つの励振口の位相差の小さい空洞共振器を作ること、ビーム反転の軌道を合致させることなどの工作精度に大きく依存している。

4. 国際的な時間・時刻体系

原子時計で得られた 1 秒を積算すると時系 (time scale) ができる。積算の起点が明確であれば、地球の自転の 10^5 倍も一樣な流れでかつ正確な時を刻む時計として用いることができる。時間、周波数及び時刻は他の標準器と異なり、電波によって簡単に、しかも連続して国際比較ができるため、国際的な時系が形成されている。1958 年 1 月 1 日 0 時を起点にした原子時系は国際原子時 (TAI) と呼ばれる。TAI は、世界各国の原子時計約 200 台のデータがパリの国際度量衡局 (BIPM) によって比較総合され、極めて一樣な流れの時刻が作られ、これをさらにセシウム 1 次標準器によって測定し、時刻が $\pm 0.2 \mu\text{s}$ 、周波数が $\pm 1 \times$

10^{-13} の正確さで維持されている。

一方、常用時は天文航法や測地の必要性から地球の自転に基づいているが、自転速度に変動と永年減速があるため、国際原子時と天文時 (経度変化の影響を考慮した世界時 UT 1) の間はずれてくる。そこで、原子時の正確な秒を刻みつつ天文時の動きに近似させ、世界一斉に同時刻に 1 秒ステップ調整 (うるう秒) を行う世界時を協定世界時 (UTC: coordinated universal time) といい、(UTC-UT 1) が $\pm 0.9 \text{ s}$ を越えないように管理されている。うるう秒は近年、2~3 年に 1 回の割合で挿入されている。

このように時刻体系が複雑になったのは、地球自転に基づく時刻と、標準としての正確な秒の刻み (周波数) の要求を妥協させるために必要となったもので、天文、電波、標準など様々な研究機関の協力によって維持・管理がなされている。

天文航法や測地では UT 1 が必要なので、標準電波によって DUT 1 (=UTC-UT 1) の値が 0.1 秒の精度 (赤道で約 50 m の測位精度に相当) で常時通報されている。

なお、我が国の標準時 (JST) は、UTC を 9 時間進めた時刻である。また、グリニッジ標準時 (GMT) は UTC ができたことによって消滅したが、慣用からか時々使われることがある。存在しない時系なので UTC と読みかえるのが正しい。

5. 時間・周波数の比較校正法

時計や基準発振器の周波数安定度は、一般に τ 秒平均 (周波数カウンタのゲート時間) の周波数変動率の分散を Allan 分散と呼び、その平方根 (α) で表す。

図 3 は一般的な標準器の周波数安定度を示したもので、受動型の標準器では測定時間の平方根に逆比例するが、水晶発振器や水素メーザのような能動型では測定時間に逆比例する。測定時間が長くなると $1/f$ 雑音の影響で時間に関係なく一定値を示し、さらに長くなるとドリフトの影響で安定度は悪くなる。

周波数安定度が良くても偏差やドリフトがあることから、必要精度に応じて周波数値の比較校正を行う必要がある。それには、周波数と秒信号 (時刻) を用いる 2 種類がある。電波で直接周波数比較を行うと、ドップラー偏移と異なった伝搬路の合成波の影響を直接受けるので、遠距離で高精度な比較を行うには、時刻パルスの比較から周波数比較とする場合が多い。

時間・周波数の比較校正の方法と精度を表 1 に示す。国内の時間・周波数比較には、標準器との直接比較校正、短波標準電波、長波標準電波、TV の水平同期及

図3 周波数標準器等の周波数安定度

表1 時間・周波数の比較・校正精度

比較・供給方法		周波数	時刻	備考
短波標準電波† (JJY) (2.5, 5, 8, 10, 15 MHz)		$10^{-7} \sim 10^{-8}$	~1 ms	外国との混信あり 8 MHzは混信なし
長波標準電波† JG 2 AS (40 kHz)		~ 10^{-11} (1日平均)	~1 ms	安定な受信可能
TV 信号*†	水平同期パルス	10^{-11} (1日平均)	0.1 μ s	ルビジウム発振器を 基準にして放送して いる局を利用
	カラーサブキャリア (3.58 MHz)	5×10^{-12} (10分平均)	—	ネットワークの範囲 内
ロランC電波* (100 kHz)		$< 10^{-12}$ (1日平均)	~0.1 μ s	1969年以来国際原 子時の決定に利用
移動衛星* 時計搭載		1×10^{-13} (1日平均)	<10 ns	GPS衛星は国際原 子時の決定に使用
静止衛星* 通信, 気象等		~ 10^{-13} (1日平均)	<数† ns	実験段階
VLBI*		~ 10^{-13}	<1 ns	実験段階

* 利用者側に安定な周波数源が必要である。

† 発射精度は毎月の電子情報通信学会誌に掲載されている。

びカラーサブキャリア, 時計運搬が用いられる。このほかに, 精度は悪いが電話, ラジオ, TVの報時 (> 0.1 s), 商用電源周波数 (~ 10^{-5}) も用いることができる。国際比較にはロランC電波, GPS衛星およびVLBI等が用いられている。

ところで, 秒信号を受信して時刻校正をする場合には, 伝搬遅延時間は単に空間的な距離の差から生じる遅延だけでなく, アンテナや受信機内の遅延 (数百 μ s) に対する補正も行うことが必要である。比較精度が高い場合, 電波による測定ではSagnac効果と呼ばれる地球自転の影響に対する補正も考慮される。

一般に, 高精度な周波数標準器や標準時計は周波数の微調整を逐次行うのではなく, 校正値を知ることによって補正する方法がとられる。また, 時刻比較による校正は, 毎日1回または1週間に1回など定時に測

定することによって, 電離層などの日周変化に基づくばらつきを小さくできる。

6. 今後の展開

時間・周波数標準は1940年代の開発当初と比較して5けたも精度が向上した。しかし, ここ10年程はさほどの向上がみられず, 従来技術では限界ではないかと考えられる状況にある。そのため, 偏向磁石を用いない光ポンピング方式²⁾や原子やイオンの運動を制御して, かつ止めるレーザー冷却³⁾などの新方式の研究が活発に行われるようになった。

レーザー冷却は分光にとつての最大の障害であったドップラー効果や衝突の影響をなくし, スペクトル線幅を非常に狭くするうえで画期的な技術である。原子が光を吸収するときには力を受けるが, 光子1個がもつ運動量は極めて小さいので, 大きく運動方向を変えるには多数の光子を吸収させる必要がある。これは, 光を吸収して励起状態に上がった原子が自然放出によって再び元の状態に戻るなどの場合に可能となる。自然放出光の方向は平均すれば等方的であるのに対し, 光の入射方向が1方向とすれば, 吸収・自然放出の過程を繰り返すうちに, 原子は光の入射方向の速度成分が減速 (冷却) されることになる。この技術は単一モードで連続発振する可変波長レーザーの出現とその周波数制御によって可能となった。

周波数標準への応用としては, レーザー冷却によって減速した原子ビームを垂直方向に打ち上げ, 原子の上昇時と下降時に2回マイクロ波と相互作用させRamsey共鳴を得ようというもので, 原子泉 (Fountain) と呼ばれる方式が考えられているが, 色々な方式が考案されるのはこれからという状況にある。

参考文献

- 1) 時間関係の総合図書として, カルタショフ (福与人八ほか訳): 時と周波数, 講談社 (1980), 1965年以前の事情については, 時研究会編: 時の科学, コロナ社 (1966)。
- 2) 古賀保喜ほか: 光ポンピングCsビーム周波数標準器の試作, 電気学会論文誌C, 108-C (1988) 685。
- 3) J. Opt. Soc. Amer., B2 11, (1985)。この号はレーザー冷却特集である。