Vol.45 Nos.1/2 通信総合研究所季報 March/June 1999
pp.19－26

解　説

# 3. 原子時系と周波数標準

今 江 理 人*

# 3. ATOMIC TIME SCALE AND FREQUENCY STANDARDS

By
Michito IMAE

According to rapid progress of science and technology, the definition of second was changed several times in 1900's, such as from the solar time to the ephemeris time and the atomic time.

The atomic time has been generated by using atomic frequency standards which are one of the most accurate and stable one among the measurement standards. Nowadays the accuracy of better than $2\times10^{-15}$ has been realized by the most accuracy primary atomic Cs standard.

This paper shows the history of change of definition of second, introduction of atomic Cs standards and the generation system of International Atomic Time (TAI) and Coordinated Universal Time (UTC).

［キーワード］ 秒の定義，時系，原子時，周波数標準
Definition of second, Time scale, Atomic time, Frequency standard

## 1. は じ め に

周波数標準およびその逆数の関係にある時間標準は，各種標準の中でも最も正確さおよび安定度の高いものであり，その正確さは現在 $2\times10^{-15}$ よりも高いものが実現されている[1]．このように正確な周波数標準は，電気通信を初めとする産業界や各種科学計測における基準となっていると同時に，時刻を刻む元にもなっている．

本稿では，1秒の長さの定義の変遷，原子周波数標準の概要，現在の時系決定法の仕組みなどを概説し，当該分野の研究開発の必要性などに関して述べる．

## 2. 時系の歴史

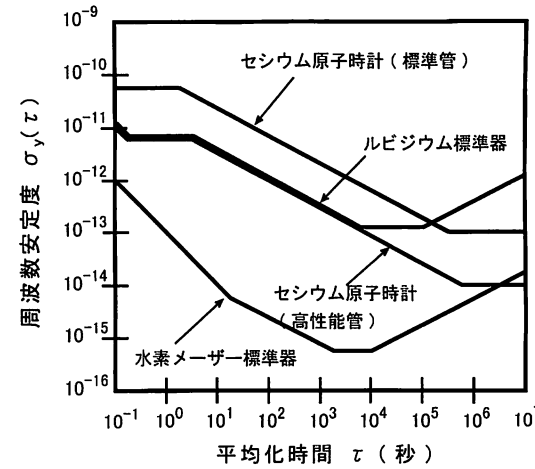
### 2.1 1秒の長さの定義[2-4]

時刻の基準となる1秒の長さは，1956年までは，天体観測などにより平均太陽日の1/86,400として定義づけられていた．これは，時刻が太陽の見かけ上の動きにより決められることから，生活に即した自然な定義ではあった．しかしながら人工的な「時計」が発展するにつれ，地球の自転速度は長期的な低速化，また海流や大気循環等の地球流体部分角運動量変動の影響で生じる短期的揺らぎのため，不変とは言えないことがあきらかになってきた．そこで，1956年には1秒の長さの定義が，地球の公転速度に基づく「暦表時」に改訂された．しかしながら，暦表時は，観測するために長時間（基本的に1年間）を要し，精度も $10^{-9}$ 台であることから，1967年には地球の運動と独立した原子標準に基づくものに定義が変更されている．ここで重要な点は，1967年までは，天体の運行，すなわち地球の自転や公転に依存していた1秒の長さの定義が，1967年以降は，天体の運行に依存しない「原子」の刻む定義に移行した点にある．1秒の長さの定義に基づき時刻の定義も「天文時」から「原子時」へ移行し，国際原子時（TAI：International Atomic Time）が1956年1月1日における世界時（UT 2）に一致するように原点が定められ，原子時計を元に決定されている．原子時は，天文観測から決定される世界時（UT，UT 1）に比べ正確さは数桁上回り，かつ，一様性も高いものである．しかしながら，天体観測

* 標準計測部 時空計測研究室

第1表　秒の定義の遷移

| 時　期 | 定　義 | 備考，特徴 |
|---|---|---|
| ～1956年 | 平均太陽日の 1/86 400 | 約－1×$10^{-10}$／年の長期的減速 ～$10^{-8}$の短期的変動 |
| 1956 ～1967年 | 暦表時－1太陽年の 1/31 55 925.9747 | $10^{-9}$程度の観測精度 |
| 1967年～ | Cs原子の遷移周波数で定義 1秒＝Cs原子の基底状態の超微細エネルギー準位間の遷移周波数の 9 192 631 770の周期 | $\Delta E = h\nu$：原子エネルギー準位に基づく不変のもの 正確さ$10^{-12}$～$10^{-15}$ ：年々正確さが向上 |




第1図　各種原子周波数標準器の周波数安定度の典型例

や日常生活上は，世界時に準拠したものが自然であるとの考えから，協定世界時（UTC：Coordinated Universal Time）が考案された．UTCも1972年までの「旧協定世界時」と1972年以降の「新協定世界時」に分けられる．「旧協定世界時」は，原子時計からの時刻を基準とするが，1秒の長さを調整（$10^{-8}$台）し，かつ，適宜50msの整数倍のステップ調整を行うことで，時刻が世界時（UT 1）に近似するように決定されていた．すなわち，旧協定世界時の時期は，1秒の長さそのものが国際原子時と異なるものを用い，しかも時期により協定世界時の1秒の長さが異なるものを用いていた．このため1秒の長さは本来不変のものであるべきとの立場から，1972年以降の「新協定世界時」では，1秒の長さは，UTCもTAIも全く同一のものを用い，UTCがUT 1と±0.9秒以内に維持されるように「うるう秒」調整を行いつつ運用されるようになった．

ちなみに，TAIとUTCとの差は，1972年当初で10秒の差があり，2000年1月1日現在で32秒の差となっている．

第1表は，1秒の長さの定義や時系の変遷等を示すものである．

### 2.2　原子周波数標準器とその安定度[4-9]

原子周波数標準器は，第1表に記したように量子論的（$\Delta E = h\nu$）に決定する原子のエネルギー遷移を利用することにより原理的にはどの原子でも実現可能であるが，原子のエネルギー準位を選別しやすいこと，物理的に実現しやすいことなどから，ほとんどの場合原子のエネルギー構造が比較的単純なアルカリ金属（最外核に電子が1つのみ存在）が用いられる．今日までに実用化されている主な原子周波数標準器としては，

- 水素メーザ型周波数標準器
- ルビジウム原子周波数標準器
- セシウム原子周波数標準器

が挙げられる．

これらの周波数標準器は，各々構造により特色があるが，周波数安定度$\sigma y(\tau)$と平均化時間（$\tau$）の関係から見た各標準器の典型例を第1図に示す．水素メーザ型周波数標準器は，短期安定度に優れているが，長期安定度はおとる．一方，セシウム原子周波数標準器においては短期安定度は，水素メーザ型周波数標準器に比べ劣るが，長期安定度は，現存する周波数標準器の中で最も優れている．以下に，これらの周波数標準器の概要を紹介する．

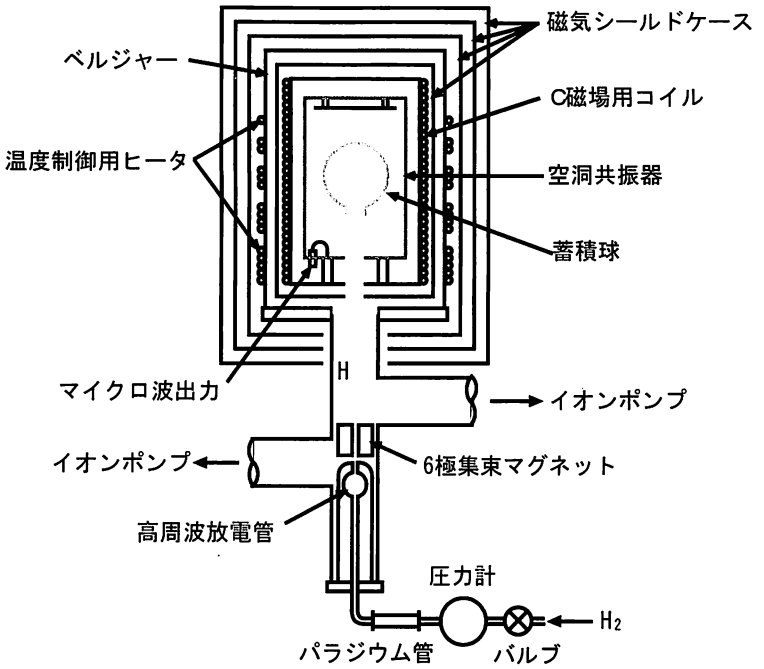
(1) 水素メーザ型周波数標準器

本方式においては，第2図に構成を示すように，放電によりエネルギー状態を励起した水素原子をマグネットで準位選別し水素蓄積球に蓄積する．水素蓄積球は，水素原子の発振周波数（1.4GHz帯）の固有振動数を持つ共振器内に位置し，励起した水素原子がメーザ発振により位相のそろった電磁波を放出して連続的に発振を行う．このメーザ発振の信号をピックアップアンテナで受信の後増幅し，位相同期回路により5 MHz，10MHzなどの基準信号として出力する．

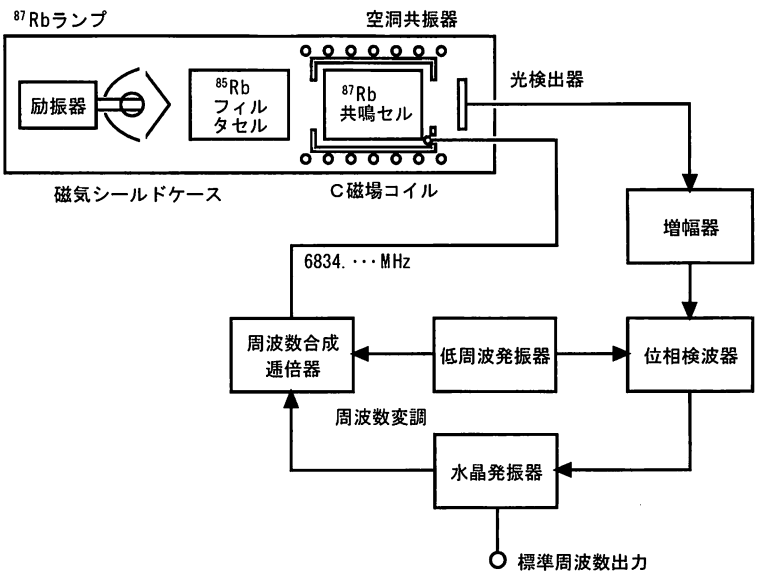
水素メーザ型周波数標準器は，第1図に示したとおり，実利用されている他の原子周波数標準器に比べ，短期安定度が非常に高く，信号純度が高い．ただし，共振器の温度による物理的な寸法の変化に伴う共振周波数の変動などにより，長期安定度が劣化する．この特徴を活用した水素メーザ型周波数標準器の応用分野としては，超長基線電波干渉計（VLBI：Very Long Baseline Interferometer）の独立ローカル信号源としての利用が代表例として挙げられる．

(2) ルビジウム原子周波数標準器

ルビジウム原子周波数標準器は，第3図に示すように，ルビジウム原子を封じ込めたガスセルにルビジウムランプからの光源を照射してエネルギー準位をポン




第 2 図　水素メーザ型周波数標準器の構成



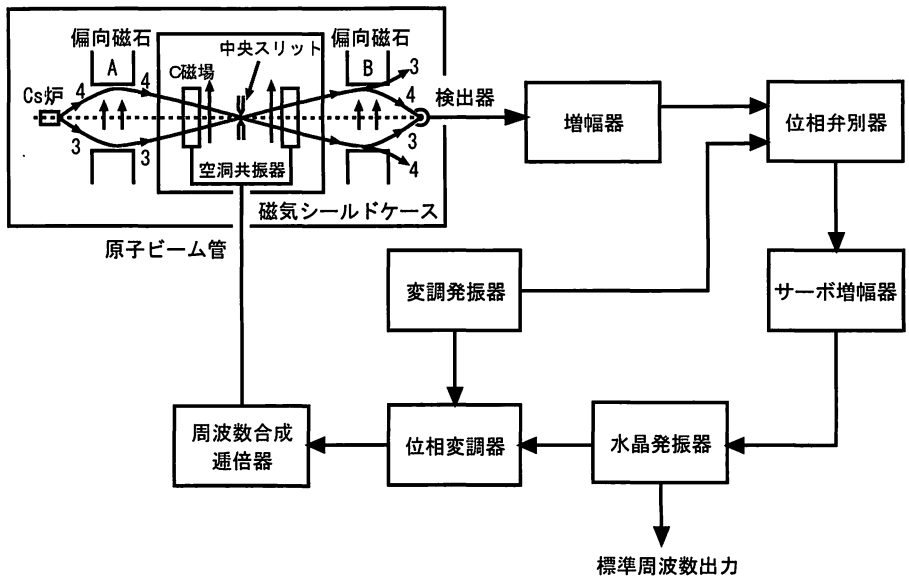

第 3 図　ルビジウム原子周波数標準器の構成

ピングアップする．このガスセルに遷移周波数付近のマイクロ波を注入し相互作用させ，エネルギー準位を変化させる．ガスセルの光源とは反対側に光検出器を配置し，基底状態からポンピングアップに使われる光エネルギーを検出することにより，マイクロ波の周波数をルビジウムの遷移周波数に同期させる．この操作により遷移周波数にマイクロ波の原振が同期し，正確な周波数を取り出すことができる．

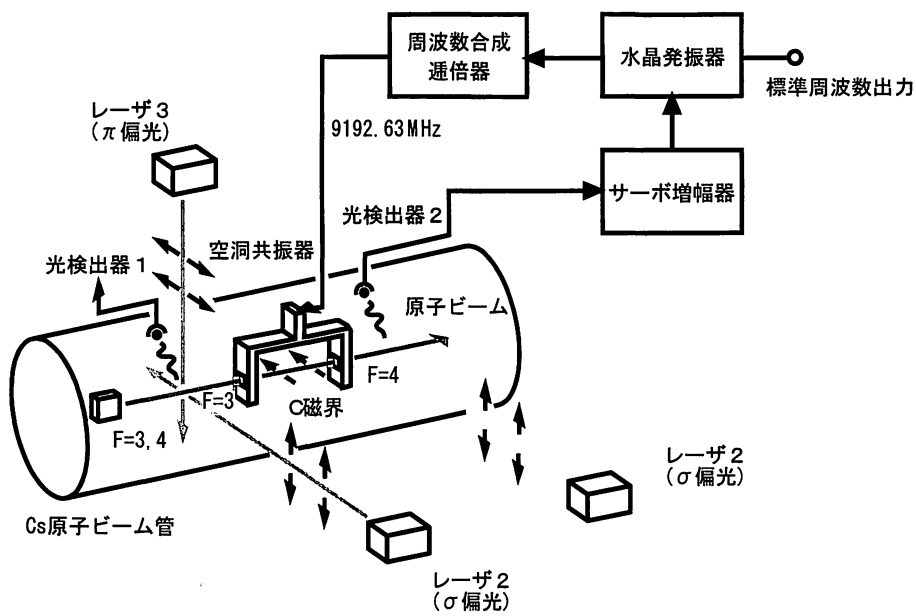
ルビジウム原子標準器は，封じ込めたルビジウムガスセルを使用するため，真空ポンプ等を用いる必要が無いことなどから小型軽量化並びに低廉化が図られており，通信・放送分野の基準信号源として広く活用されている．その周波数安定度は第 1 図に示した様に，短期安定度はセシウム原子周波数標準器と同程度であるが，長期安定度は，セシウム原子周波数標準器に比べると劣る．

(3) セシウム原子周波数標準器

セシウム原子周波数標準器は，第 4 図に構成を記すが，セシウムオーブンで加熱されたセシウムビームを真空容器中を走行させ，その間に，マグネットで希望のエネルギー準位の原子を選別する．さらに，真空容器中に遷移周波数に等しい導波管型共振器を配置し，




第4図　従来型セシウムビーム原子周波数標準器の構成



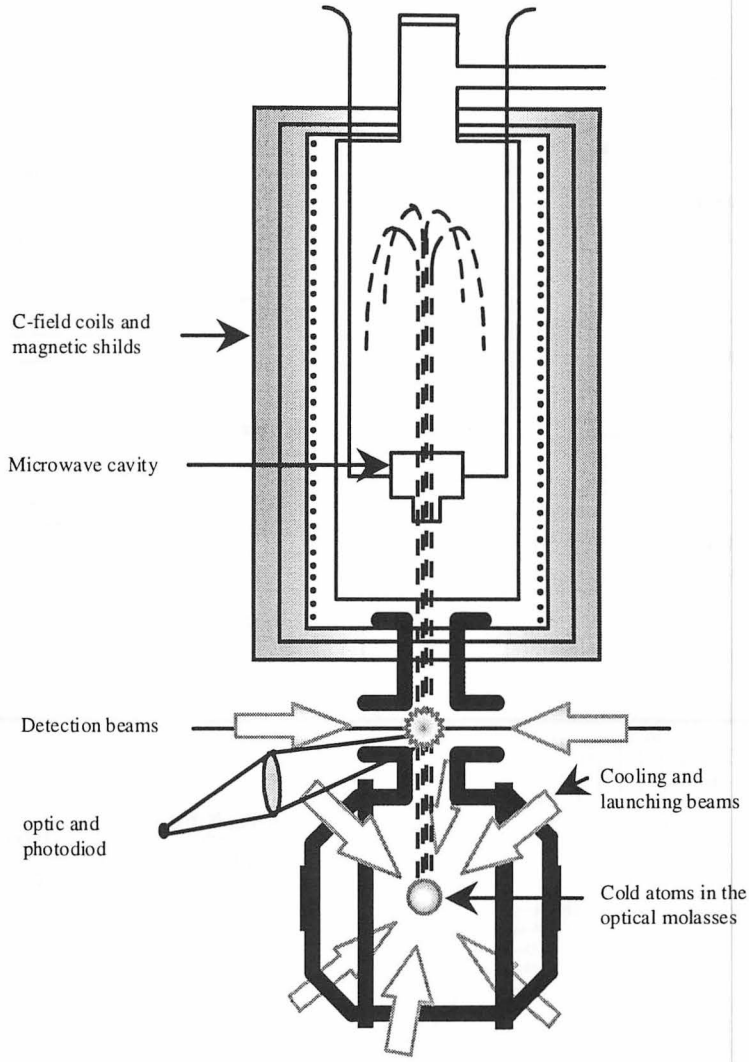

第5図　光励起型セシウムビーム原子周波数標準器の構成

遷移周波数のマイクロ波と相互作用させ，エネルギー準位を変化させる．このエネルギー準位の変化した原子の数を検出器で検出し，マイクロ波の原振を制御し，常に遷移する原子の量が最大，すなわち，マイクロ波の周波数が遷移周波数に一致するように同期をかける．

セシウム原子周波数標準器の特徴は，周波数安定度が短期安定度は，水素メーザ型周波数標準器に比べ劣るが，長期安定度は，現存する原子周波数標準器の中で最も優れており，そのため，1秒の長さの定義として用いられている．さらに，第5図に示すように，セシウム原子の準位励起や遷移検出にレーザーを用いるタイプ（光励起型セシウム原子周波数標準器）が開発され，従来準位選別等に用いていたマグネットの磁場の影響をなくすことができ，1秒の長さの物理的な実現の正確さを飛躍的に向上できている．

より正確さの高いセシウム原子周波数標準器として第6図に示すような原子泉方式が考案され，この方式の標準器で $10^{-15}$ 台のものが実現されている．

以上が主な原子周波数標準器の概要であるが，より正確さの向上を目指した研究開発が世界各国で行われている．将来，セシウム原子周波数標準器よりも正確さの高いものが実現されれば，1秒の長さの定義も変更される可能性もある．




第6図　原子泉型セシウム原子周波数標準器の構成

## 3. 国際原子時と協定世界時

### 3.1 国際原子時（TAI）と協定世界時（UTC）決定の仕組み[9-10]

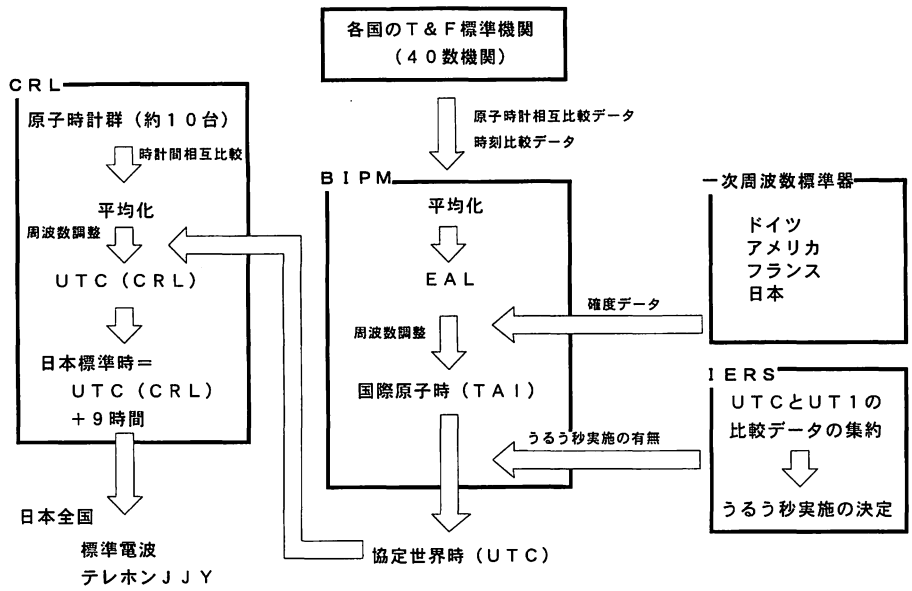
国際原子時は，2.1節で述べたとおり1958年1月1日を起点とし，この時点におけるUT 2と一致する様に原点が決められている．TAIの発足当時は，国際報時局（BIH）が決定していたが，BIHの発展的解消により，その業務の地球回転に関する部門が国際地球回転事業（IERS：International Earth Rotation Service）に，また，国際原子時に関する部門が国際度量衡局[10]（BIPM:Bureau International des Poids et Mesures）へ引き継がれ現在に至っている．

現在BIPMで決定されるTAIには，世界40数機関が参加しており，原子時計の総数は，200数十台に達し，また，各国の一次周波数標準器の確度評価データがTAIの周波数調整に利用されている．

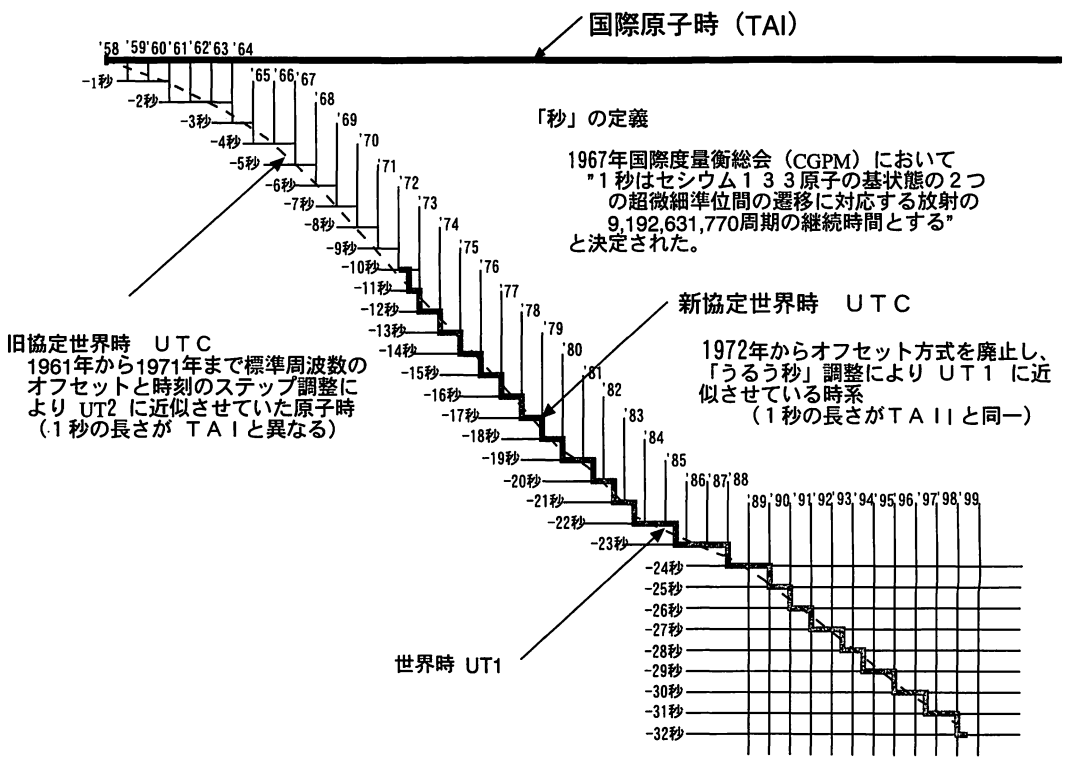
第7図はTAIやUTCの決定の仕組みを図示したものである．各国の周波数・時間標準研究機関においては，その国の基準となる時系を協定世界時（UTC）にできるだけ一致したものとして実時間で発生させて運用されている．

各機関では，機関内の原子時計相互間の時刻比較計測が定期的に実施され，その機関の基準時系UTC（k）との間の時刻差データを5日毎（修正ユリウス日（MJD）の末尾が4及び9の日における0:00UTC）の値を1ヶ月毎にBIPMに報告する．同時に各研究機関は，機関間の国際時刻比較結果をBIPMに報告する．

BIPMでは，これらの時計データと時刻比較データを用い，ALGOSと呼ばれるソフトウェアにより，各原子時計毎に重みを決定し，加重平均によりEALと呼ばれる時系を計算する．さらに，一次周波数標準器の確度評価のデータを加味して，EALの周波数調整を行い，最終的な時系としてTAIを決定する．TAIとUTCとは




第７図　原子時発生の国際的な仕組み

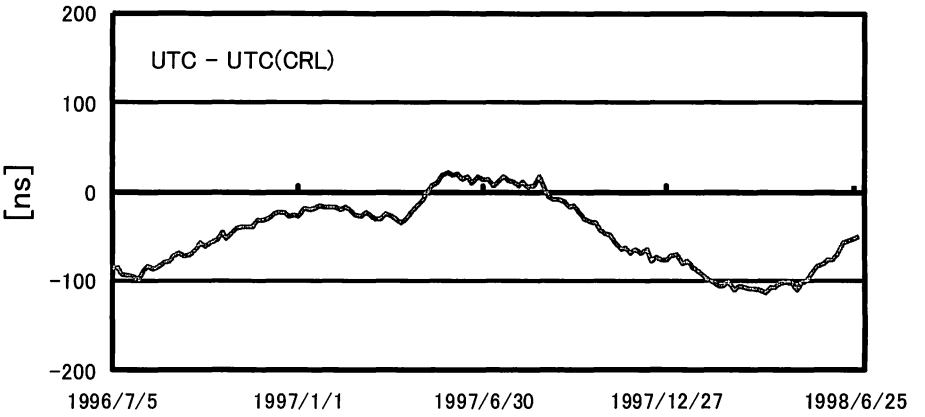



第８図　国際原子時と世界時（UTI），協定世界時（UTC）の関係

うるう秒の積算分の違いはあるが，各時間・周波数標準機関の発生する時系 UTC (k) と UTC との時刻差の速報値が次月の中旬に BIPM の発行する Circular-T により公表される．また，各原子時計の加重に関しても定期的に報告がなされる．

協定世界時は，1972 年以降は，2.1 節で記したとおり，１秒の長さは全く同一の時系で，UTC は地球自転速度の変化に依存して UT 1 との差が 0.9 秒以内に保つように「うるう秒」調整がなされる．「うるう秒」の実施に関しては，IERS が責任を持ち，VLBI を初めとする地球回転観測結果を集約して決定される．

ちなみに，現在の「うるう秒」実施の方針は，UTC において毎月末（日本時間では，毎月初めの 9 時の直前）に実施することが可能であるが，実施する場合の優先順位が規定されており，UTC で 12 月末または 6 月末（日本時間で 1 月 1 日または 7 月 1 日）が第一順位，また同




第 9 図　当所の協定世界時（UTC(CRL)）の維持精度

3月末，および 9 月末（日本時間で 4 月 1 日，および 10 月 11 日）が第二順位として規定されている．1972 年に現行方式の UTC の決定法が開始され，約 30 年を経過するが，これまでのところ，うるう秒の実施は，第 1 順位の日にちにすべて実施されている．第 8 図は，TAI が制定されて以降における TAI を基準とした各時系（UTC, UT 1 等）の経過を示すものである．

### 3.2 当所の時系

我が国における周波数・時間標準に関する研究機関は歴史的な経過もあり，複数の機関がその責任の下に分担して実効的に機能している．当所は，郵政省設置法に基づき，我が国の周波数国家標準に責任を有しており，また，標準電波等で提供する標準時を ITU-R の勧告[11]等に基づき，協定世界時（UTC）にできるだけ近いものとして発生している．

第 7 図に国際原子時・協定世界時の仕組みを図示した中にあわせて当所における協定世界時 UTC（CRL）の決定法とそれを 9 時間進めたものとして日本標準時が決定される仕組みを記した．すなわち，UTC（CRL）は，BIPM から公表される UTC との差を参考にして周波数調整がなされ，長期的に UTC±100ns 以内で維持されている（第 9 図）．長期的にこの範囲で維持されている時系は，世界的に見ても最も精度の高い時系の一つである．しかしながら，実時間でより UTC に近い時系の必要性は，今後も高まりつつある．そこで，当所では，より短期安定度が高く，かつ長期的にも一様性の高い時系として UTC（CRL）を発生することを検討している．その実現のためには，一次周波数標準器の研究開発のみならず，

(1) 連続運用可能な実用周波数標準器の維持運用法
(2) 周波数・時間の精密計測法
(3) 周波数・時間の精密国際比較法
(4) 時系アルゴリズム
(5) 超長期的な時系の安定度向上のためのミリ秒パルサータイミングに関する研究開発

など，多岐に渡る各種研究開発が必要であり，当所ではこれらを総合的に進めているところである．

## 4. まとめと時系の今後

本章では，1 秒の長さや時刻の決定方法の変遷を記し，その元になる周波数標準器に関して概説した．原子周波数標準器の進歩に伴い，時系はますます高確度・高精度化が達成されつつある．一方，科学や技術における原子周波数標準の必要性は高まる一方であり，例えば衛星測位システムなどは，周波数・時間標準器が基盤技術の一つであると共に，その運用上も実時間での高精度な時系の必要性が高い．

さらに本特集号でも記されているように，原子周波数標準器だけでなく，超高安定ミリ秒パルサータイミングの時系への応用が考えられている．

当所では，3.2 節であげた様に，周波数標準に関する総合的な研究開発を進めており，また，より使いやすい形で標準時を供給するための技術開発を進めている．

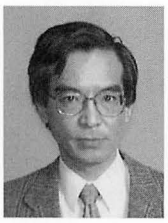
## 参 考 文 献

(1) A. Clairon, et al., "Preliminary accuracy evaluation of a cesium fountain frequency standard", Proc. 5th Symp. Freq. Standards and Metrology, pp.49-59, 1995.
(2) 安田，"周波数・時間標準とは"，電波研季，28, 149, pp,3-12, Feb. 1987.
(3) 青木信仰，時と暦，東京大学出版会，1987.
(4) ITU-R, "HANDBOOK : SELECTION AND USE OF PRECISE FREQUENCY AND TIME SYSTEMS", 1997.
(6) 吉村，古賀，大浦，"周波数と時間"，電子情報通信学会，平成元年.
(7) P. カルタショフ，"時と周波数"，福与他（訳），講談社，1980.
(8) 電波季，"周波数・時間標準特集号"，29, 149, 1983.

(9) C. Thomas, "Impact of New Clock Technologies on the Stability and Accuracy of the International Atomic Time TAI", IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol.44, No.3, pp.693-700, May 1997.

(10) T. J. Quinn, "The BIPM and the Accurate Measurement of Time", Proc. of IEEE, Vol.79, No.7, pp.894-905, July 1991.

(11) ITU-R Recommendation TF. 486.



今江　理人
Michito IMAE
標準計測部　時空計測研究室
周波数標準
E-mail: imae@crl.go.jp