

I. 周波数・時間標準とは

安田 嘉之*

1. 周波数と時間の定義

周波数は、例えば電氣的振動や機械的振動のような、周期的現象の1秒間当たりの繰返し回数で定義され、単位にはヘルツ(Hz)が使われる。したがって、このような現象が t 秒間に n 回繰り返される場合、周波数 f は

$$f = n/t \text{ Hz} \quad \dots\dots(1)$$

である。この式で n の計数は、技術的には種々問題があり得るが、原理的には誤差ゼロで行えるので、周波数 f は時間の t 値が決まればそれで確定する。これは上述の定義の組立て方から当然のことである。初めに時間標準があるということになる。確かに、時間の尺度がなければ現象の周期性を認識できない。しかし、一たび現象の周期の一定不変性が確認されれば、それに基づいて時間の定義ができる。これは(1)式を

$$t = n(1/f) \quad \dots\dots(2)$$

と書き直すことに相当する。いうまでもなく、 $1/f$ は現象の周期である。下記の原子秒はこの形で定義されており、周波数標準が時間標準になっている。このような意味で、これら二つの標準は表裏一体の関係にある。

初めに現行の秒の定義を掲げる。

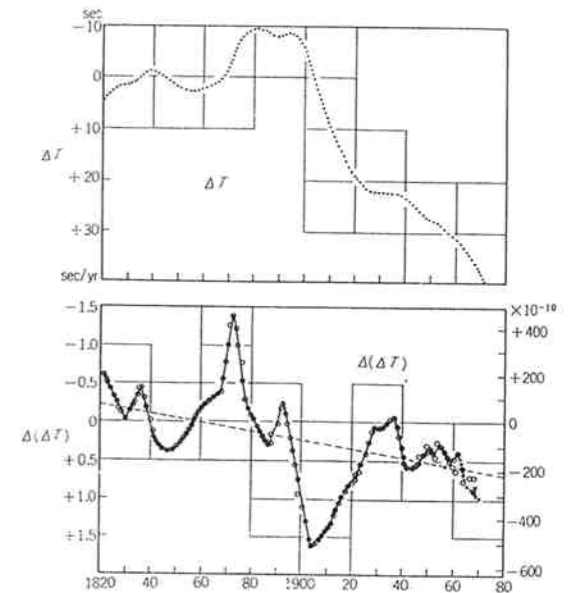
秒の定義(1967年、第13回国際度量衡総会(CGPM)で決議):

“秒は、セシウム133の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”。

2. 周波数・時間標準の沿革

2.1 天文時計から原子時計へ^{(1)~(4)}

秒の定義の基礎は、地球の自転から公転へ、更に原子の振動へと大きく移り変わった。初め、秒は太陽に対する地球の自転角度に基づき、“平均太陽日の8640分の1”で定義されていたが、この定義は、1956年、地球の公転周期に基づいた暦表時の秒に置き換えられた。それは地球自転速度の変動が大きく、しかも予測がつかないことによる。自転速度変動には、潮汐摩擦による永年減速(1年につき -1×10^{-10} くらい)、周期的変動(季節変動など)及び不規則変動があるが、特に不規則変動



第1図 地球自転速度の不規則変動
(下図破線は永年減速を示す)

は変動量も大きく、しかも予測ができない。これの主な原因は、地球内部にある流体核の不規則運動といわれている。第1図⁽¹⁾は世界時(平均太陽時)と暦表時との時刻差と歩度差を示している。不規則変動の存在は、1930年ころから認められていたが、その後、水晶時計の高性能化が進み、また、原子時計も実用され始めた結果、ますます明確になり、上記の秒の定義は、時代が要求する精密な時間の測定には明らかに適さなくなった。

暦表時による秒の定義は、1956年、国際度量衡委員会(CIPM)で採択された。また、我が国の計量法もこれに伴って1958年4月に改正された。

暦表時による秒の定義:

“秒は、1900年1月0日暦表時12時における地球公転の平均角速度で計った1太陽年の31 556 925. 9747分の1とする”。

暦表時は、地球自転とは無関係な、天体力学に基づいた、理論的に一様な時系であり、これと量子力学を基盤とする原子時との長期比較は興味深く、また、有意義である。しかし、現実に暦表時による時間標準を決める場合、天体観測(月の観測)の精度の影響などにより、1

*周波数標準部

年間の観測値を用いても、 1×10^{-9} くらい精度しか得られないため、実用性がなく、タイム・キーパの役割を原子時計が担うようになって行った。

原子時計（原子周波数標準）の研究は、1948～49年の米国国立標準局（NBS）による吸収方式アンモニア原子時計の試作を皮切りに、セシウム原子ビーム標準、アンモニアメーザ、水素メーザなど、種々の原子、分子と方式にわたって繰り広げられていった。特に、セシウムビーム標準の研究は、NBS、英国国立物理研究所（NPL）など多数の機関で広く行われたが、1955年、上記2機関はこの標準をそれぞれの国の周波数標準（精度 10^{-10} のけた）に採用した。

原子時計が実用段階に入ったこのころ、原子標準の採用をも含めた秒の定義の検討を目的とする“秒の定義に関する諮問委員会（CCDS）”が前記 CIPM の下に設立され、これの最初の会合（1957年）で、原子周波数標準の研究促進と標準の国際比較の早期実現が勧告された。原子時計の国際比較には、1954年、J.A. Pierceらが、GBR局（16 kHz, Rugby, 英国）を用いた大西洋横断の VLF 伝搬実験で μs 程度の位相安定度を確保して以来、VLF 仲介による方法が非常に有力な手段として用いられていた。この国際比較は、1958年ころから本格的になり、英米両国のほか、スイス、フランスなどの諸国も加わり、GBR局や NBA局（24 kHz, Balboa, Canal Zone, 米国）を仲介として行われ、天文観測とあまってセシウム原子の遷移周波数が決められて行った。そうして1960年の第13回国際電波科学連合（URSI）総会（ロンドン）は、セシウム原子の遷移周波数として、 $9\,192\,631\,770\text{ Hz}$ （暦表時）を採用することを決議した。次いで1963年秋の第14回 URSI 総会（東京）は、この決議を更に前進させ、秒を原子周波数標準で定義することを勧告した。また、これに呼応して、同年冬に開催の第3回 CCDS は、原子秒の正式採用ではないが、暫定的に原子周波数標準による秒の定義を認めるよう勧告し、1964年の第12回 CGPM は、この暫定的な秒の定義を認め、原子周波数標準の実質的採用が実現した。

このような暦表秒から原子秒への変革の過程で、原子時計研究者で代表される一般物理・計測学者と天文学者の間でかなりの論争があった。一般の物理学者は、ほとんど時間の長さや周波数だけに関心を示すのに対し、天文学者はむしろ時刻を重視する。したがって、後者のグループが、原子時計の正確さは認めながらも、この信頼性や連続性を問題にしたとしても不思議はなく、更に、原子時計の周波数が重力の影響で変化するという一般相対論効果とその補正法も問題になった。このよう

に、若干の問題を残しはしたが、冒頭で述べたように、1967年の第13回 CGPM で新しい秒の定義が正式に承認され、計量単位の原子標準化という意味で画期的な出来事となった。

原子時計の刻む時間尺度が原子時であるが、原子秒の積算値という意味で積算原子時とも呼ばれる。国際原子時は、国際報時局（BIH）が1958年1月1日 UT2 を紀元とし、世界各国の原子時計の相互比較値を用いて決定、管理している計算上の時計で、1971年の CGPM で承認された（TAI と略記する）。原子時は、当然ではあるが、地球自転時とは無関係であり、最近の10年間では、両者間で1年で1秒程度の時刻差が生じている。標準電波の周波数オフセットは、後述のように、この時刻差が生じないように、放送される“標準周波数を秒の定義による基準値からずらせる運用方法で、1960年から12年間続いた。しかし、1967年、原子秒が正式承認されて後、周波数オフセット廃止の意見が強く出され、再び物理・計測グループと天文・測地グループ間で激しい論争の末、両者の意見の折衷として現行の協定世界時（UTC）システムが誕生し、1972年から世界一斉に運用に入った。

2.2 標準電波⁽⁵⁾

標準電波は現在、周波数、時間及び標準時の供給源として、科学技術の広い分野で重要な役割を演じているが、この業務は約半世紀前、無線局の電波規正を主目的として開始された。この業務の技術面の調査研究は現在、国際無線通信諮問委員会（CCIR）第7研究委員会（SG7）が担当し、その成果としての勧告、報告などは無線主管庁会議における討議の技術的根拠となる。CCIR SG7 の所掌事項（1982年第15回総会）は

- (1) 標準電波業務の世界的見地による調整（Coordination）
 - (2) 衛星の利用を含む上記業務における送受信技術及び測定精度の改善に関する研究
- である。以下 CCIR の見地から標準電波業務の変遷につき述べる。

(1) 標準電波の発射と相互干渉

初めに標準電波に割り当てられた周波数帯、標準電波の発射精度（CCIR 勧告値）及び局数の変遷を第1表⁽⁶⁾に示す。標準電波が CCIR の研究対象として初めて取り上げられたのは、1931年の第2回総会（コペンハーゲン）であるが、現在の標準電波の基礎は第2次世界大戦後最初の第5回総会（1948年、ストックホルム）で築かれた。この総会では、米、英、仏、伊の4か国が会合し、古く1923年に開局の WWV 局（米国）を土台に、置局計画、変調方法、報時信号の形式、電波の干渉

第1表 標準電波の割当周波数帯（1次業務）・発射精度（勧告）・局数の変遷など

回	年・場所	割当周波数 (主管庁会議)	周波数		時刻		局数	備考
			偏差	基準	偏差	基準		
5	1948 ストックホルム	$2.5 \pm 0.005\text{ MHz}$ (第1地域は $2.5 \pm 0.002\text{ MHz}$)	$\pm 2 \times 10^{-9}$	平均太陽秒	UTにできるだけ近く	UT	WWVほか	
6	1951 ジュネーブ	$5 \pm 0.005\text{ MHz}$	"	"	"	"	5 ⁽¹⁾	(1)JJY 4 及び8 MHzを含む
7	1953 ロンドン	$10 \pm 0.005\text{ MHz}$ $15 \pm 0.01\text{ MHz}$ $20 \pm 0.01\text{ MHz}$	"	"	"	"	6 ⁽²⁾	(2)JJY 4 及び8 MHzの外2.5, 5, 10MHz試験発射
8	1956 ワルシャワ	$25 \pm 0.01\text{ MHz}$	"	原子秒	$\pm 50\text{ ms}$	UT2	14 ⁽³⁾ (割当て) 5 ⁽¹⁾ (その他)	(3)JJY 2.5, 5, 10, 15 MHz 試験発射 1956年 CIPM ET による秒
9	1959 ロスアンゼルス	(アトランティックシティ, 1947)	UT2の秒に近く、ET秒とはできるだけ一定差に保つ $\pm 5 \times 10^{-9}$ (各年間)			$\pm 50\text{ ms}$	15 ⁽⁴⁾ (割当て) 6(その他)	(4)1957年からJJY 2.5, 5, 10, 15 MHz
10	1963 ジュネーブ	上記に $20 \pm 0.05\text{ kHz}$ を追加	$\pm 5 \times 10^{-10}$	原子秒から一定量オフセットした値		約 $\pm 100\text{ ms}$	16(割当て) 1(ロランC) 16(その他)	1961年、標準電波の周波数オフセット開始
11	1966 オスロ	(ジュネーブ, 1959)	$\pm 1 \times 10^{-10}$	"	"	"	17(割当て) 1(ロランC) 20(その他)	1964年 CGPM 原子標準による秒の定義暫定採用 1964年から JJY 新発射形式 1966年から JG2AS(40 kHz) 発射
12	1970 ニューデリー		"	"	"	"	16(割当て) 22(航法) ⁽⁵⁾ 22(その他)	1967年第13回 CGPM で原子標準による秒の定義を採択 (5)ロランC及びオメガ (以下同じ)
13	1974 ジュネーブ	上記に衛星用に $400.1 \pm 0.025\text{ MHz}$ を更に追加 (ジュネーブ, 1971)	"	原子秒		$\pm 1\text{ ms}$	21(割当て) 27(航法) 25(その他)	1972年から UTC 方式実施 1974年 UTC 運用細則決まる (1971年の細則修正)
14	1978 京都		"	"	"	"	20(割当て) 44(航法) 26(その他)	
15	1982 ジュネーブ		"	"	"	"	(割当て) (航法) (その他)	

などにつき討議の末、全世界的標準電波業務の開設と運用の基本方針を与える勧告（No. 18）が採択された。この勧告は、1947年の無線主管庁会議で標準電波に割り当てられた周波数（第1表）の実験局を設置し、これらのサービスエリアと相互干渉の実験的調査、最適の変調周波数と変調プログラムの調査を行うこと、秒信号はなるべく1000 Hz の5サイクルから成るパルス（いわゆる重畳式秒信号）を用いることなどを規定している。このような基本方針に沿った研究の成果として、最適の変調周波数は第7回総会（1953年）で440 600及び1000 Hz が勧告され、また、秒信号は第8回総会（1956年）で、200 nHz の n サイクルのパルスを用いるという勧告が出された。我が国は大戦後は第6回総会（1951年）から参加したが、2.5, 5及び10 MHz の発射試験における搬送波切断式報時信号（当時 JJY で採用）と重畳式報時信号（CCIR 勧告）の受信精度の比較（第7回総会）や搬送波中断の部分に短い時刻パルスを挿入する報時信号（現在 JJY で採用）の実験結果（第8回総会）など、特に報時信号に関してかなりの寄与ができた。このように、変調周波数と報時信号の形式について

は一応の解答が得られ、現在日米をはじめ、大多数の局がこの方式を採用している（現在の CCIR 勧告には、変調周波数や報時信号形式についての規定は特でない）。

標準電波局の増加とともに、地域によっては局相互の干渉が生じ、第8回総会では、音声周波数による変調時間の短縮や発射休止時間を設けること、また、SSB方式や搬送波抑圧の DSB方式の研究などが勧告され、更に第9回総会（1959年）では、従来の干渉低減対策のほかに、最小の帯域幅で所要の情報と精度が得られるような変調方法、発射の時分割、標準電波の割当バンド内での送信周波数のスタガリング（例えば5 MHz の場合、4996 kHz や 5004 kHz のような周波数も使う）などについての調査が提案された（No. 155）。このスタガリング方式は、現在ソビエト連邦が採用している搬送周波数オフセット方式の原型である。

相互干渉は、局の密度の高い西ヨーロッパでは当時かなり深刻で、MSF（英国）、HBN（スイス）などの局では、音声周波数による変調を廃止又は削減するとともに、時分割送信を行い、第10回総会（1963年）当時には、既に相当の成果を挙げていた。アジアでは1958年

以後、JJY と BPV (上海) の相互干渉が西日本で相当あり、我が国は1962年の中間会議に寄与文書で時分割による軽減策を提案した。CCIR はこれに対し2国間交渉を示唆したが、当時の情勢ではそれもできず、我が国はこの問題を保留することにした。我が国は1964年、JJY の報時信号形式を従来の切断式から、(当時の) CCIR 勧告に沿った現行方式に変更した。これは秒パルス (1600 Hz の8サイクル) の前後 40 ms を無変調とするもので、類似の方法を採用している WWV 局などとともに干渉に強い方式として国際的に評価が高い。

干渉の問題は、1976年の中間会議への我が国の寄与文書「日本周辺における標準電波の電界強度分布」(Doc. 7/5) が一つのきっかけとなって再燃し、第13回総会(1974年)で干渉低減対策を調査するための中間作業班(IWP 7/3)の設置が決まり、当然我が国もメンバーとして参加した。このIWPは、時分割送信、音声周波数による変調の削減、SSB送信、追加周波数帯(割当て以外の周波数)の利用など、従来の相互干渉低減策に対して、前述の搬送周波数オフセット方式(例えば、5 MHzのほか、5.404 MHz、4.996 MHzの搬送周波数も使用、現在ソ連で実施中)をより有望な方法として取り上げ、これを第14回総会(1978年、京都)への報告にまとめた(Doc. 7/1012、総会で採択)。また、この搬送周波数オフセット方式は、最終会議での十分討論なしに京都総会に勧告案として提出されたが、我が国をはじめ米国、印度、カナダなど多数の国が反対し、この案は不採択となった。我が国の反対理由は(1)、この方式は周波数較正に不便、(2)報時信号の受信精度低下、(3)受信機の高価格化、(3)干渉低減効果が疑わしく、また、データが不足などであった。1979年には、一般問題を取り扱うための世界無線通信主管庁会議(WARC-G)が開かれ、標準電波の周波数割当も再検討された。この会議に我が国は、搬送周波数オフセット方式の対策として検討していた、短波帯追加周波数帯の割当てを提案し、4、8及び16 MHzの第3地域での使用が認められ、不十分ではあるが干渉低減に役立つ可能性が生じた。

しかし、現在アジア、西太平洋地域では、JJYのほか、ATA(印度)、BPM(西安、中国)、BSF(台湾)、WWVH(ハワイ)、RID(イルクーツク)などの局があり、1982~83年にはHLA局(韓国)が開局予定である。国内では現在、JJY 8 MHz は問題がないが、上記の局のうち、JJY、BPM、WWVH、RID が干渉し合い、特に西日本で著しい。この地域では、相互干渉は今後増加の傾向にあるので、我が国としては、標準電波の利用動向を正しく把握したうえで、長波や衛星の利用も含めた技術及び行政の両面からこの問題の解決に努力すべき

である。

(2) 秒の定義と UTC 方式^{(1)~(4)}

時間の単位が平均太陽秒で決められていた1956年までは、時間(又は周波数)と時刻は、いわば同じものであった。しかし、それ以後は暦表秒の採用により、時間と時刻は別のものになった。原子時計が事実上暦表時を刻んでいたことは2.1で述べたとおりである。一方標準電波で放送される搬送波の位相と報時信号とは一定の関係になければならないことになっている(勧告460)。標準電波の周波数オフセットは時間(周波数)を時刻の方に合わせるための手段で、周波数を基準値から故意にずらし、これを積算した時刻信号が世界時 UT 2 に近似するようになっている。周波数オフセット値は、地球自転速度変動に応じて、毎年 BIH が決め、必要に応じて時刻信号のステップ調整を行った。この方法は、1960年から12年間続いた。第2表⁽⁴⁾はこの間のオフセット値とステップ調整の回数と調整量を示している。元来この方法は、周波数や時間の標準の立場からすれば変則的であり、不合理であったが、1967年の第13回 CGPM における原子秒の正式採択を機会に、オフセット廃止の意見が多くなり、前述のように、一般物理・計測グループと天文・測地グループ間での激しい論争の末、両グループの妥協により標準電波発射の基本となる新しい UTC (協定世界時) 方式の基本案ができ、第12回総会(1970年)で承認された。この方式は標準電波の周波数と時間間隔は原子周波数標準による秒の定義に対応した一定値とし、これの積算により生ずる世界時 UT 1 との差を1秒のステップ調整で補うもので、1971年の中間会議で実施細則が決まり、1972年から世界一斉に運用に

第2表 周波数オフセットと時刻調整

年	オフセット値	ステップ回数
1960	-150×10 ⁻¹⁰	0
61	-150	1 (+50ミリ秒)
62	-130	0
63	-130	1 (-100ミリ秒)
64	-150	2 (")
65	-150	4 (")
66	-300	0
67	-300	0
68	-300	1 (+100ミリ秒)
69	-300	0
70	-300	0
71	-300	(0)

入った。その後 UTC と UT 1 の差の許容限界や1秒調整の実施時期に関し若干の議論があったが、1974年の総会でそれも決着がつき、現在では新しい UTC システムは世界中で使われる公式時間の基礎として定着している。しかし、この UTC と国の法定時との関係は今後問題である。

(3) 時刻と周波数の高精度供給

標準電波の発射精度は、第1表のように、水晶発振器から原子周波数標準の採用により著しく向上した。しかし、短波標準電波を受信して周波数較正を行う場合、10⁻⁹の精度を得ることはドップラ効果や雑音妨害などのため、一般には極めて難しい。そこで、第8回総会(1956年)では、100 kHz 以下及び30 MHz 以上の周波数帯の標準電波に関する研究問題(Question)“追加周波数帯における標準電波”(No. 142)が新設された(現在 Q 2/7 として存続)。

VLF は、当時既に GBR 局を用いた大西洋横断の伝搬実験などにより、その位相安定度の優秀さが実証されていたが、特に1968年ころまで、原子時計の国際比較で重要な役割を演じた。LF 帯では JG2AS (40 kHz、日本)、WWVB (60 kHz、米国)、DCF 77 (77.5 kHz、西独)など多数の局があり、高精度の周波数供給のほか、報時にも重用されている。VLF と LF の受信精度などについて多数の報告がある(報告271及び363)。

30 MHz 以上のローカルな標準電波は、現在、100 MHz (スウェーデンと南アフリカ共和国)と150 MHz (スウェーデン)だけである。TV 信号(色副搬送波及び同期信号)を用いる方法は、既存のネットワークが使

え、そのうえ高精度が特長である。特定の同期信号を仲介にして測定する受動的な方法と時刻や周波数の情報を重畳して伝送する能動的な方法がある。後者の実験は米国で行われたが、世界各国で定期的に用いられているのは前者である。欧米諸国ともに我が国も同期信号と色副搬送波を仲介とした測定結果(1970-1974期間)、受信機器と測定方法の改善(1974-1978期間)及び同期信号仲介による長期時刻比較結果(1978-1980期間)につき報告し関連の報告(363)の改訂に有効に寄与した。

調査計画(Study Programm)“衛星からの標準電波”は1963年(第10回総会)に設定されたが、これに対応する報告(518)は(1970-1974)期間から始まり、(1974-1978)期間で米国からの寄与を中心に非常に充実した。1978年の第14回総会で、衛星を利用した世界的時刻供給に関するIWP(7/4)が設立され、この方面の調査、研究はますます盛んとなった(我が国もIWPに参加)。また、1979年のWARC-Gでは、第3表に記載のように、将来の高精度比較のためのSHF及びEHF帯(帯域幅はいずれもGHzオーダー)の割当てがあった。(1978-1982)期間では衛星実験やIWP活動は非常に活発となり、我が国もBSを用いた周波数と時刻の供給実験を行い、報告(518)の修正に寄与した。また、この報告はIWPの調査結果も加えて大幅に修正された。IWPは第16回総会まで存続の予定であり、まだ推奨すべき衛星システムを、標準の供給用に限っても、一つ又は二つ程度に絞ることができないが、システムは高精度もさることながら、その信頼性や永続性が更に重要であることがメンバー間で合意されている。なお、第15回

第3表 標準電波に割り当てられた周波数帯

周波数帯	分配表での取扱い	備考
14-70 kHz (20±0.05 kHzを除く)	脚注	JG2AS: 40 kHz
20±0.05 kHz	一次業務	
72-84 kHz, 86-90 kHz	脚注	第1地域 WARC-79 による
2.5 MHz±5 kHz*, 5 MHz±5 kHz, 10 MHz±5 kHz, 15 MHz±10 kHz, 20 MHz±10 kHz, 25 MHz±10 kHz	一次業務	*第1地域は ±2 kHz
4 MHz±5 kHz, 8 MHz±5 kHz, 16 MHz±5 kHz	脚注	第3地域 WARC-79
400.1 MHz±50 kHz (宇宙→地球)	一次業務	発射は±25 kHzに制限
4202±2 MHz (宇→地), 6427±2 MHz (地→宇)	脚注	
13.4-14 GHz (地→宇), 20.2-21.2 GHz (宇→地), 25.25-27 GHz (地→宇), 30-31.3 GHz (宇→地)	二次業務	WARC-79

総会(1982年)で、意見(Opinion)“気象衛星による時刻供給”が承認されたことも IWP 活動の成果の一つである。

3. 周波数・時間標準の現状⁽⁶⁾

3.1 周波数標準の研究

(1) セシウム原子標準器

1955年ころから実用(精度 1×10^{-9} 程度)されて以来、5年間で約1けたの割合で精度が向上し、現在、西独(国立物理工学研究所, PTB, 1台)、カナダ(国立研究会議, NRC, 大形1台, 小形3台)、米国(NBS, 大形1台, 小形1台)の各標準器は既に 1×10^{-13} の精度が報告され実用中である。ソ連、英国、フランス、日本、中国などは実験又は開発中である。我が国では、計量研究所の NRLM-II が、1977~1978年に、TAI との比較で、 5×10^{-13} の精度を得ている。当所の実験器は現在精度評価中であるが、 $1 \sim 2 \times 10^{-13}$ 程度は得られる可能性が高い。

セシウム標準器の精度を制限する要因には、従来からいわれているように、(1)ラムゼイ型共振器両端間の位相差、(2)二次ドップラシフト、(3)C磁界の不均一さ、(4)マヨラナ効果、(5)励振信号のスペクトル純度、(6)サーボ系などがある。一般に(1)が最も大きい、 10^{-13} の精度を要する場合、(3)、(4)も問題であり、(5)も軽視できない。また、最近、空洞内の黒体輻射による周波数のずれ(-1.7×10^{-14})も報告されている。いずれにしても、精度は限界にきているので、かなり原理的な改善が必要である。

光励起型セシウム標準器は、その意味で有望視されている。これは準位選別を従来の偏向磁石の代わりにレーザー光を用い、マイクロ波による遷移もこれで検出するもので、利点は次のようである：

- (1) 準位選別の効率、したがって S/N が少なくとも2倍以上、最大16倍まで可能。
- (2) 偏向磁石が不要なので、これによる不均一磁界が無くなり、C磁界の一様性が増す。また、マヨラナ遷移が無くなる。
- (3) 原子ビームが直線状であるから、ビーム反転法を用いたラムゼイ共振器両端間の位相差に起因する誤差評価が精密にできる。
- (4) 光を用いた検出により、速度分布が選択できる。
- (5) 原子を $F=3, m_F=0$ の状態に集められれば、近傍遷移が避けられる。

などである。また、欠点又は問題点は、光源としてのレーザーの周波数安定化が困難なことと遷移周波数の光シフ

トがあることである。

この方法は現在、米国(NBS)、フランスなどで盛んに研究されているが、NBS では数年後に実用化を目指しているようである。当所でも基本的実験に着手した。

なお、共振器位相差の影響を除去するために NBS が提案した2周波2空洞型の実験はまだ行われていないようである。

(2) 水素メーザ

水素メーザの研究は我が国(当所)のほか、米国(NASA, スミソニアン天文台)、フランス(原子時計研究所 LHA)、カナダ(NRC, ラバール大学)、中国(上海天文台その他)などで研究されている。特に、米国では VLBI や深宇宙探査などへの応用のためであろうか、研究開発は特に活発に行われている。受動型水素メーザの研究は NBS で盛んで、大形の空洞のほか、誘電体を負荷した小形の空洞の実験も行っており、既に高安定度の時計として実用化に入ったとのことである。また、極低温での実験でスペクトル Q の実測値 10^{12} も報告され、 10^{-16} の安定度も期待されている。当所では、マヨラナ効果を利用した準位選別により不均一磁場シフトが除かれ、かつ、短期及び長期安定度も改善の見通しがついている。また、VLBI 日米共同実験用の可搬型メーザの特性改善も着実に進められている。

(3) イオンストレージ型標準器

電磁場でトラップを作り、そこにイオンを閉じ込めることにより得られる鋭いスペクトル線を周波数の標準とする方式である。イオンの実効温度を正確に決め難いので、二次ドップラ・シフトの補正の不確かさや S/N が低いことが問題であったが、最近レーザー・クーリングの技術が発展し、イオンを数十 mK まで冷却できる可能性が確かめられ、Q 値も向上し(10^{10} 程度)、この方式の標準器が有望になってきた。この方式の特長は、(1)イオンをトラップ内に長時間閉じ込めるので、共鳴線幅を極めて狭くできる、(2)電磁トラップを用いるので、Wall shift がほとんどない、(3)レーザー・クーリングにより、イオン温度を 0 K 近くまで下げられるので、2次ドップラ・シフトをほとんど除き得ることである。NBS は水銀イオンによる標準器を提案しているが、 10^{-16} の安定度と 10^{-15} の精度を期待している。

3.2 国際原子時

国際原子時は、1958年1月1日0時 UT 2を紀元として、BIH が世界各国の原子時計(セシウム)の相互比較を用いて決定、維持している時系である。1967年の第13回 CGPM における原子秒の承認に引き続いて、1971年の第14回 CGPM では、秒の定義(原子秒)に基づく時間尺度として国際原子時(TAI)が定義され、

正式に承認された。

TAI は IV. で述べるように、世界各国約100台のセシウム時計(ほとんど商用)の、主としてロランCと運搬セシウム時計を仲介とした、相互比較データを ALGOS と称する計算プログラムで処理し、これを NBS, NRC, PTB の一次標準器で監視し、必要の際は周波数の調整を 2×10^{-14} 刻みで行うことにより決定されている(ただし、調整間隔は2か月以上空ける)。精度は $\pm 1 \times 10^{-13}$ くらいである。

TAI 決定上の問題点は次のとおりである：

- (1) 商用の時計と一次標準時計の間に季節的な周波数変動($\pm 1 \times 10^{-13}$ 程度)がある。原因はまだ不明だが、時計(商用又は一次標準又は両方)にもロランCにも問題があるらしい。
- (2) ロランCのカバレッジの関係で、ヨーロッパ、北米、北アフリカしか利用できない。

このため、更に高精度かつ広い地域で使える比較手段を用いること及び原子時計の設置環境の改善、一次標準の精度(10^{-14} くらい)の向上が必要である。

3.3 周波数・時間標準の利用⁽⁶⁾

この標準の特長は、基本的な標準であり、その精度が他の標準に比べて格段に高いこと、電波により非常に正確に遠隔地点に伝送できること、また、このような特性のために、国際性が強いことである。ここでは、この標準の利用を次の五つの分野に分けて述べる。

(1) 計量標準⁽⁷⁾

物理量の測定を、不変と考えられる基礎定数を仲介として、時間の測定に置き換え、精密化しようとする努力がされている。その例として長さ及び電圧標準がある。

長さ標準(m)は可視光領域のクリプトン86の放射の波長の1650763.76倍で定義されている。この標準の再現性はおよそ $\pm 1 \times 10^{-8}$ であるが、メタンの吸収線で安定化されたヘリウム・ネオンレーザーのような高安定度のレーザーとマイクロ波帯周波数から赤外周波数への周波数通倍技術の進歩により、クリプトン86よりはるかに高精度の長さ標準が得られることが確実となった。周波数 ν (高精度測定が可能)と波長 λ が独立に決定できれば、光速は $c = \lambda \nu$ で決定される。このような測定の結果、 $c = 299792458 \text{ ms}^{-1}$ (精度 $\pm 4 \times 10^{-9}$) 現在得られている。このようにcの値を定めれば、長さ標準は $\lambda = c/\nu$ で決まり、長さの測定が周波数測定で置き換えられる。

また、電圧は、交流ジョセフソン効果の関係式、 $\nu = 2eV/h$ により、普遍定数 $2e/h$ を用いて周波数に関連づけられる。eとhはそれぞれ電子の電荷とプランク定数である。この電圧対周波数の関係の普遍性は多数の

研究者により実験され、 10^{-8} のけたまでは確かである。現在、この電圧標準が標準電池に代わって実用されている。

このような標準の原子標準化とは関係がないが、電圧、温度など各種のデジタル計測器におけるA-D変換も、周波数と時間の応用であることには違いない。

(2) 科学(航法を含む)

航法、測位、測地などは、いうまでもなく、時間の測距機能の利用であるが、近年非常に注目されている分野である。オメガ及びロランCでは、それぞれに必要な局間時刻同期精度(オメガは約 $1 \mu\text{s}$ 、ロランCは約 $0.1 \mu\text{s}$)を維持するために、いずれも商用のセシウム原子時計が用いられている。1980年代後半以後の高精度測位・航行システムとして米国国防省が開発中のGPS(世界測位システム、三次元測位精度数m)の時刻同期精度は更に厳しく(ns程度)、衛星には、水晶発振器、ルビジウム及びセシウム原子時計が搭載されている。

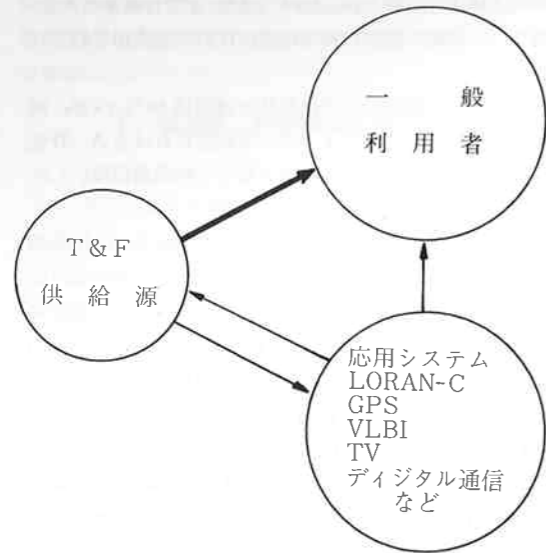
深宇宙追跡と超長基線電波干渉計(VLBI)は最も高度な応用であろう。前者では追跡局間の時刻同期精度約10nsが要求され、そのため水素メーザが使われる。また、VLBIについては、当所と米国航空宇宙局(NASA)による共同実験計画(1984年開始予定)があり、現在システム開発中である。基線長の測定精度数cmを得るため、これも水素メーザ(周波数安定度 10^{-15} オーダ)が使われ、またpsオーダの精度で各種遅延時間の測定が行われる。このほか、海洋測地、しゅんせつなどでは場合によってはns程度の時刻同期が必要となる。

一般の科学分野では、相対論効果の検出には、一般に、極めて高い周波数安定度が必要である。このほか、天文学、地震観測(必要精度約10ms)、電離圏研究などがある。

(3) 通信・放送

標準電波は元来、電波監理の目的で始められたが、現在はむしろ、高精度の標準を積極的に電波の有効利用に使っているといえる。カラーテレビジョンの多元同期中継、TV同期放送はその例で、独立同期の場合、前者では 10^{-12} 程度(十~数十分)、後者では 10^{-10} 程度の周波数安定度を必要とする。デジタル通信網間の同期保持には、独立方式(plesiochronous方式)の場合、各通信網のマスタークロックの周波数安定度 1×10^{-11} が必要とされており、セシウム標準器の利用が計画されている⁽⁸⁾。この問題は、CCIRとCCITT(国際電信電話諮問委員会)の共同研究課題(IWP 7/5, “周波数標準器と基準時計の精度と信頼性”)である。通信・放送用機器の製造工業も周波数標準の重要な利用分野である。

(4) その他



第2図 周波数・時間標準応用システムの再利用

航空、鉄道などの交通機関、電力周波数の維持などの公共的事業のほか、市民生活にも直接的及び間接的に深いかわりあいを持っている。

以上、時間と周波数標準の利用分野につき述べたが、

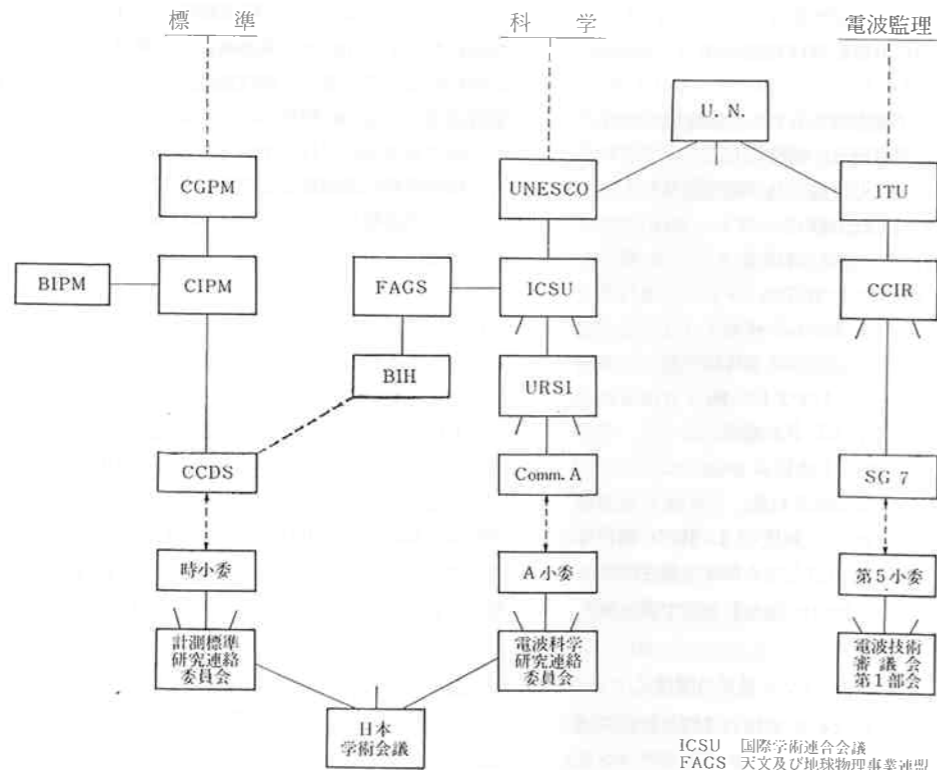
各分野における必要性は標準の高性能化を促進し、これがまた、新しい利用分野を開拓することになる。また、時間と周波数標準の一般利用者への分配、供給は、普通、標準電波により行われるが、前述のような精密な時間と周波数を利用したシステム、例えば、ロラン C や TV 放送網（同期信号系周波数安定化の場合）などは、それら自身、標準の供給源として再利用されていることは興味深く、周波数・時間標準の利用と供給の多様化が見られる（第2図）。

4. 国際的関連

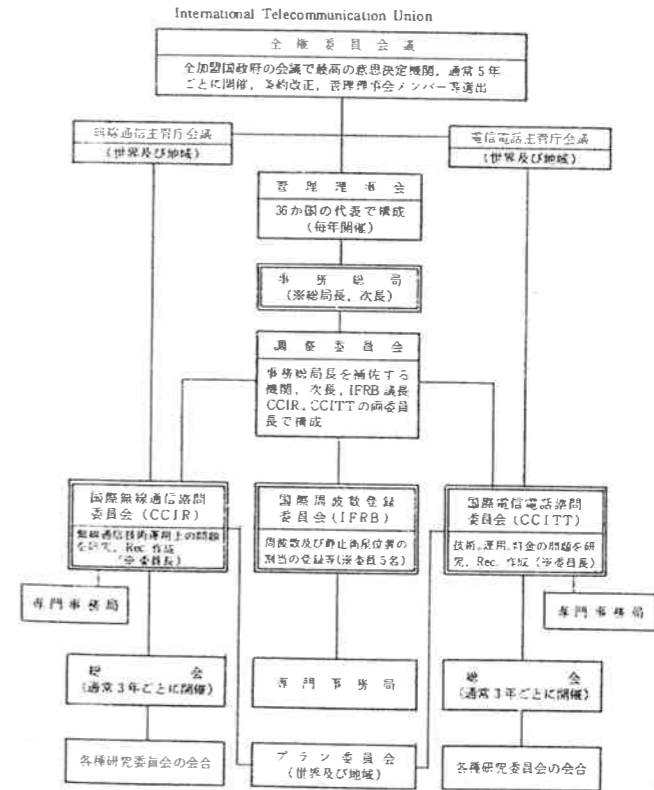
3.3 で述べたように、周波数・時間標準の三つの主要な利用分野、すなわち、計量標準、科学、通信・放送に対応した国際機構を関連国内組織も含めて第3図⁽⁹⁾に、また、特に ITU に関しては第4図⁽⁹⁾に示してある。

5. まとめ

以上、現在の原子秒に至るまでの秒の定義の変遷、国際原子時と現行の協定世界時の発足、ITU、CCIR の立場から見た標準電波業務の沿革、現状と問題点につき述べた。また、周波数・時間標準の現状として、原子周波数標準の研究、国際原子時、利用分野などにつき、問題



第3図 周波数・時間標準関連国際機構



※は選挙される役員 □は常設機関

第4図 ITU の機構図

点を混えて記述した。

周波数・時間標準は、基本的かつ高確度であり、電波により遠隔地間の同期、比較ができ、また、これらの特性のために国際性が非常に強いという特長を持っている。現在、この分野での国際的な問題として、

(1)国際原子時の確度、安定度の改善 ($<1 \times 10^{-13}$)——周波数標準器、原子時アルゴリズム、国際比較方法が関係する。

(2)短波標準電波の相互干渉軽減と供給確度の改善——長波と衛星の利用促進。

(3)標準の応用——特に高い周波数帯での高安定発振器、測定・比較技術が関連する。

などがあるが、正に当所が当面する問題でもあり、これらに対する着実、かつ独自のアプローチが望まれる。

終わりに、本資料作成にあたり、御協力下さった佐分利総合研究官、林室長、吉村室長、小林課長、中桐、占部、森川各主任研究官、梅津研究官ほか当所各位に感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 時研究会編、時の科学、コロナ社、pp.1-342、1966.
- (2) 虎尾正久、時とは何か、講談社、pp.1-222、1969.
- (3) 須川力、地球の回転、日本放送出版協会、pp.1-260、1978.
- (4) 佐分利義和；“標準電波発射方式の改訂と新標準時の実施について”、電波時報、26、11、pp.62-65、1971年11月。
- (5) 羽倉幸雄、佐分利義和；“CCIR 50年の動き、電波伝搬・標準電波”、電波時報、'78、3、pp.34-36、1978年6月。
- (6) 安田嘉之；“周波数標準に関する最近の動向”、第61回電波研究発表会予稿、pp.109-123、昭56.10.
- (7) 磯部孝編、物理測定と標準、共立出版、pp.1-243、1975.
- (8) Byron E. Blair, Editor, "Time and Frequency: Theory and Fundamentals, NBS Monograph 140,