

# うるう秒の誕生

飯島重孝\*

## 1. まえがき

現在の時刻は平均太陽時に、時間の刻みはセシウム原子振動に基づいている。この全く異質の時刻と秒間隔を同時に表わすための一妥協策として、UTC (協定世界時) による報時方式が 1961 年頃から国際的に用いられて来た。UTC は世界時 UT2 を折線近似して表わしたものと見える。しかし 1972 年の年初から内容を一新して新しい UTC がスタートする。改訂の大すじは、現在の UTC で採られている周波数オフセットを全廃して、定義に基づく正しい秒間隔で報時信号が発信されるほか、この UTC の示す時刻を世界時 UT1 の  $\pm 0.7$  秒以内に収めるために、必要に応じて丁度 1 秒のステップ調整が加えられる。この際挿入 (または削除) される 1 秒を「うるう秒」という。現在の地球自転速度の様相では、うるう秒は当年 1 年に 1 回程度と見られる。最初のうるう秒は、1972 年 7 月 1 日 08<sup>h</sup>59<sup>m</sup>60<sup>s</sup> (日本時間) が予定されている。うるう秒が導入されることになった経緯を理解して戴くために、まず、これまでの時刻や秒の経過を簡単にたどってみたい。

## 2. “秒”の変遷

平均太陽時は S. ニューカムによる“平均太陽”の導入に始まる (太陽表, 1898 年)。平均太陽は等角速度で天の赤道を 1 年かけて 1 周する仮想の天体である。平均太陽時はこの平均太陽の時角に 12<sup>h</sup> を加えたもので、地球自転速度が一定な限り均斉な時刻系であり、その刻みはそのまま時間間隔の単位としての“秒”に直結する。現実には恒星の時角または子午線通過を直接観測して、まず、恒星時を求め、平均太陽の赤経値を介して平均太陽時が定められる。このようにして観測された平均太陽時のデータは人工時計を仲介として平滑化され、連続維持される。平均太陽時の内、経度 0° の子午線に対するものを UT (世界時) と呼ぶ。世界時の時刻を丁度 9<sup>h</sup> 進めたものが現在の日本標準時である。

その後、人工時計としての水晶時計の発達や、無線報時信号の利用による国際時刻比較の精密化につれて、世界時の中の各種短周期変動が問題とされ始めた。地球自転速度の季節的変化と経度変化である。季節的変化の

内、年周変化は偏西風の強弱変化が主因であり、また半年周変化は太陽の引力による地球潮汐で、太陽の赤緯値 (絶対値) につれて地球の変形の模様が変わるのが主因である。一方扁球状地球の自由章動によって地上の北極位置が刻々に移り変わる。これを極運動という。これにより地上に据えた望遠鏡の向きが天球に対して変わり、観測結果にみかけ上変化を生ずる。この南北方向成分は緯度変化として古くから知られている。経度変化はこの東西方向成分に当る。地球自転の季節的変化はすべての天文台に共通に現われるのに対して、経度変化は観測地点の緯度、経度により異なる。

やがて、これらの短周期変動が正式に取上げられ、この既知変動成分を世界時から引抜くこととなった。第 9 回 IAU (国際天文学連合) 総会 (1955 年) での決議である。つまり観測から直接得られた生の世界時を UT0、これに経度変化の補正 ( $\Delta\lambda$ ) を加えたものを UT1、さらにこれに季節的変化の補正 ( $\Delta S$ ) を加えたものを UT2 と名付けて区別することとなった。UT1 は全地球的に一義的な世界時で、平均太陽に対する地球の自転角度を正確に表わす。UT2 はこれをさらに時量的に平滑化したもので、1956 年以降これが代表的な世界時として正式に用いられて来た。 $\Delta\lambda$  は年間大略  $\pm 10$  ミリ秒 (東京) で年周および 1.2 年周の合成周期、 $\Delta S$  は大略  $\pm 30$  ミリ秒の振幅で年周および半年周期で変わる。

こうして世界時の短周期項は補正され、一応均斉な刻みが辛うじて保たれることとなった。しかし世界時の均斉を根底からくつがえす大問題が、すでに 1920 年代から台頭し始めていた。月、太陽、内惑星の運行の観測結果が、それらの理論式に比べて加速し変動する事実であった。この問題の最終的整約が S. ジョーンズによってまとめられた (1939 年)。結局理論式に間違いはなく、その中に時間引数として用いられている平均太陽日の長さが変動するためと結論された。こうして地球自転の永年減速と不規則変動が実証されたわけである。前者は月の引力による海洋潮汐に起因し、後者は地球内部の流体核の不規則な動きによると考えられている。永年減速の方は兎も角、不規則変化に関しては予測や補正は不可能である。いまや世界時の刻みは、秒単位としての座を追われる破目となった。

これに代わり不変の秒単位を規定するための新しい天文時が定義された。これが ET (暦表時) である。いま

\* 東京天文台

Shigetaka Iijima: Birth of the Leap Second

太陽の平均黄経を  $L$  と書くと、

$$L = \alpha + \beta T + \gamma T^2$$

の形に表わすことが出来る。ここで  $\alpha, \beta, \gamma$  は定数、 $T$  は 1900 年 1 月 0 日 12<sup>h</sup> UT より 36525 平均太陽日を単位として測る。この  $T$  に現実の値を用いて  $L$  を算定すると、この値は観測からきまる  $L$  (観測) と合致しない。地球自転速度がその後遅くなり、平均太陽日の 1 日が長くなる、つまり  $T$  の数字が小さく用いられているからである。そこで、

$$L(\text{観測}) = \alpha + \beta(T + \Delta T) + \gamma(T + \Delta T)^2$$

として、 $T$  の代わりに  $(T + \Delta T)$  を用いて、理論と観測とが合致するように  $\Delta T$  を選ぶことが出来る。この  $(T + \Delta T)$  が ET に当る。ET は天体力学の理論を充たす時系という意味で、天体力学時とも呼ばれる。

第 8 回 IAU 総会 (1952 年) では、この ET に基づいて、恒星年で表わした秒定義が決議された。次いで第 9 回の IAU 総会 (1955 年) では、太陽年による秒定義に修正、これが第 45 回 CIPM (国際度量衡委員会) で採決された。1956 年のことである。これに伴いわが国の計量法の中の秒定義も 1958 年になって次のように改訂された。

「秒は、明治 32 年 12 月 31 日午後 9 時における地球公転の平均角速度に基づいて算定した 1 太陽年の 31,556,925.9747 分の 1 として東京天文台が現示する」

こうして世界時 UT 2 の刻みは秒単位としての座を追われることとなった。しかし時刻の拠り所は依然として UT 2 に、そして秒単位は ET によるという、時刻と時間間隔の複合体系が始まったわけである。

前述した太陽の平均黄経  $L$  の式の係数  $\alpha$  や  $\beta$  は 1900 年をささむ約 150 年間の観測データをもとに決められている。つまり ET の秒は、この期間の平均の UT の秒に近いものといえる。その後、地球自転速度は変わり、したがって UT 2 の秒から ET の秒への転換の際には、若干の量的のとびが起こる。10<sup>-8</sup> の桁で 1~2 であった。

ET は太陽の平均黄経の式で定義されているが、実際の決定は月の位置観測を通して行なわれている。太陽ではその位置観測精度が低いからである。月の位置を観測して、その結果を月の運動理論(天体暦)に照して、その位置に該当する ET を逆補間して決める。しかし月の位置観測にしても、その観測精度は 1 年間のデータを総合してやってやっと  $\pm 0.05$  の程度である。したがって少なくとも数年にわたり、安定な人工時代を仲介として、データを平滑化し、維持しなければならない。差当りは  $\Delta T = \text{ET} - \text{UT2}$  の値を、UT2 の時計を仲介として追跡することにより ET が維持された。

ET が論議され始めた 1950 年前後には、次の秒単位の担い手がすでに胎動を始めていた。量子力学に基礎を

おく原子、分子の振動の利用である。1949 年にはライオンズ (米) らによって早くもアンモニア分子時計が組立てられた。しかしその後本命となったのはセシウム原子振動である。エッセン (英) らによるセシウム原子標準は 1955 年頃から実用の一步を踏み出し、年を追って各国セシウム標準も相次いでこれに加わった。

当初セシウム振動は、水晶時計を仲介として積算された。これを積算原子時という。この積算原子時と ET との比較が開始された。セシウム標準の振動数を ET の秒に基づいて決定するためである。年を追って原子標準の精度向上は目覚ましく、相互比較を通してその安定性はますますゆるぎないものとなった。やがて文字通りセシウム原子時計の形態も生れ、超長波電波やロラン C 信号を介して高精度の時刻および周波数の国際比較が行なわれるようになった。これら相互比較データはパリ天文台構内にある BIH (国際報時局) へ集計され、ここで最終的な積算原子時が形成される。こうして 10 数年にわたる原子時と ET の比較から、セシウム原子標準の振動数が 9,192,631,770 Hz (ヘルツ) と測定された。

原子時計の刻みの一定不変性は、量子力学的に裏付けられていて、この点水晶時計のそれとは意義を異にする。いまや原子時計は ET のこの上ない担い手となった。その振動数も一応決定したので、セシウム原子時計の刻みから時々刻々に定義の秒間隔や標準周波数を得ることが出来る。第 13 回の URSI (国際電波科学連合) 総会 (1960 年) および第 11 回の IAU 総会 (1961 年) では、セシウム原子標準の振動数 9,192,631,770 Hz の公認と、これに基づく標準電波報時の新しい国際同期方式を決議した。これが現行の UTC (協定世界時) のはじまりである。

第 53 回 CIPM (1964 年) はセシウム標準を暫定的な秒定義および周波数標準として指定し、次いで第 13 回 CGPM (国際度量衡総会) (1967 年) は暦表秒に代わる新しい秒定義を次のように決定した。

「秒は、セシウム 133 原子の基底状態の 2 つの超微細構造準位間の遷移に対応する放射の、9,192,631,770 周期の継続時間とする」

これに伴うわが国の計量法の改訂は目下手続き中である。こうして秒定義は、最初の世界時の刻みから暦表時の刻みへ、さらに原子秒へと二転して現在に至っている。暦表秒から原子秒への転換に際しては、秒単位の量的なとびはない。暦表秒に基づいてセシウム標準の振動数が決められたからである。その後 ET は天文学だけに限定使用されることとなった。天体暦の中の時刻は 1960 年以降すべてこの ET で表わされている。

こうして時刻は相変わらず世界時に、秒単位は原子振動によるという時刻と時間間隔の複合体系はなお続いて

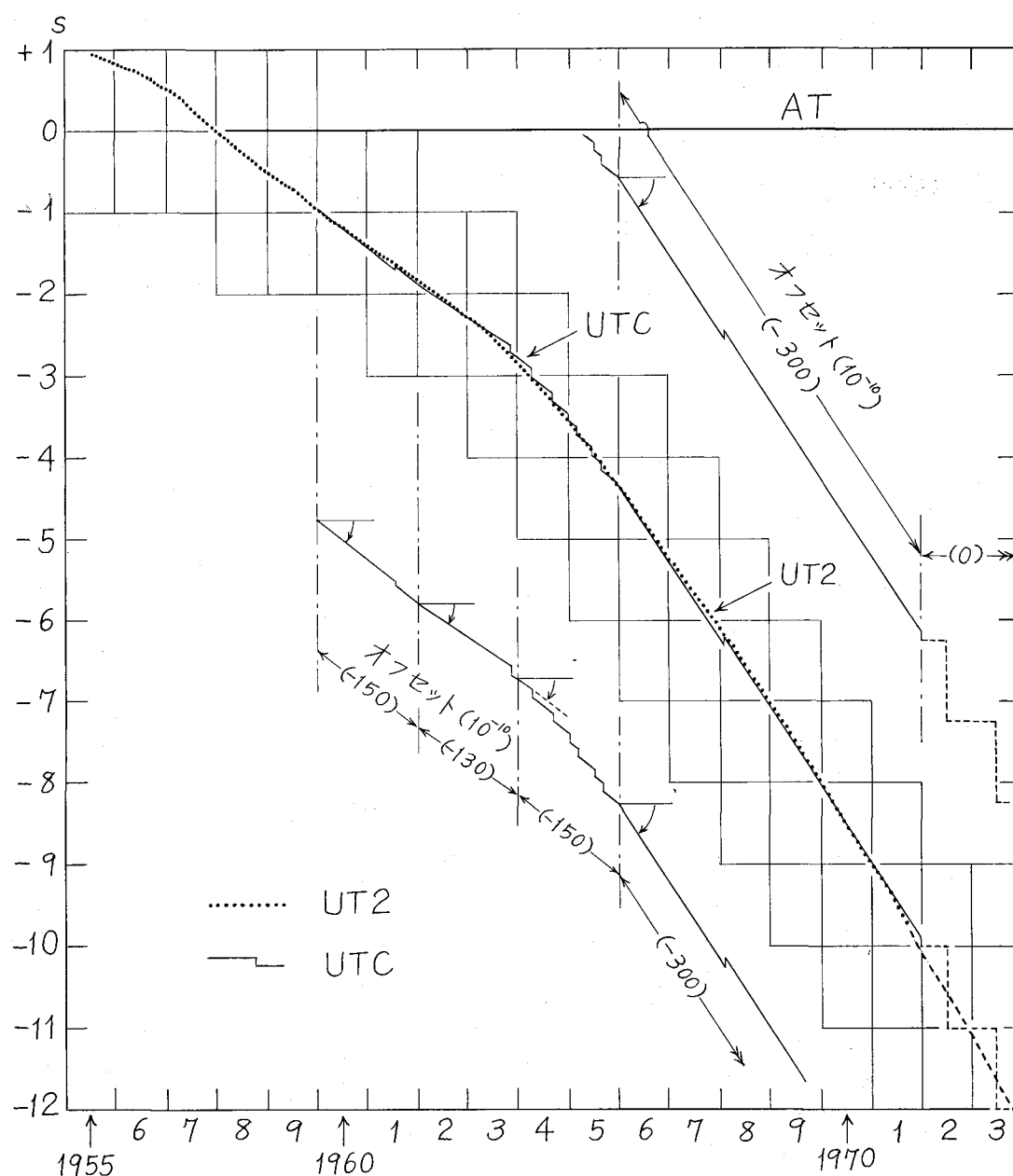
いる。

### 3. 現行の協定世界時

セシウム原子時計の実用化が進み、各国標準電波もこれを基準として電波発射を行なうようになった。一方、人工衛星の国際観測も盛んとなり、これらの全世界データを整約するために、国際的に統一した方式で UT2 の時刻を利用出来ることが強く望まれた。1959 年にはアメ

リカおよびイギリスの標準電波局が中心となって、標準電波の周波数および報時信号の国際同期に関する打合わせが行なわれた。同期目標は報時信号について  $\pm 1$  ミリ秒、標準周波数について  $\pm 1 \times 10^{-10}$  であった。1960 年の URSI 総会や 1961 年の IAU 総会では、これら国際同期の問題が討議され、具体化された。現行方式は 1964 年の第 12 回 IAU 総会の決議によるものである。

世界時は地球の自転角度に基づくものでその時刻は天



第1図 原子時 (AT) に対する世界時 (UT2) および協定世界時 (UTC) の関係  
縦軸 (秒) は (UT2-AT) および (UTC-AT) を示す

文航法や測地上欠くことが出来ないばかりでなく、太陽を中心とするわれわれの日常生活に直結している。一方、時間間隔の秒はセシウム原子振動に基づく、一定不変の時間単位で、物理学や電波科学に不可欠である。標準電波報時はこの異質の両者を同時に通報することになっている。このために考えられた1つの妥協策が UTC である。

世界の原子時計の相互比較データが BIH へ集計され、ここで最終的な原子時が定められることは前述した。この原子時は 1958 年 1 月 1 日 0<sup>h</sup> UT において UT2 に時刻合わせされたもので、これを AT という。現行の UTC はこの AT から周波数オフセットと秒信号のステップ調整という2つの手段で作られる。オフセットは標準周波数を正規の標準値よりある一定値だけズラせる操作で、これにより駆動される時計の歩度が平均的に UT2 の歩度に近くなるように選ばれる。これだけでは電波報時の時刻と UT2 が離れてゆく場合が起こる。そこで必要に応じてさらに 0.1 秒の時刻調整を行なって、電波報時の時刻を UT2 へ階段的に近付ける。これがステップ調整である。オフセット値は年毎に選ばれ、ステップ調整の時期は必要に応じて月の初日に実施される。どちらも BIH が関係天文台や研究所とはかって決定する。

第1図はこれまでの UT2, UTC の経過を画いたので、細かい点々は UT2 の動きを、これに重畳した細かい折線のグラフは UTC の動きを示している。UTC のオフセットとステップ調整の模様をはっきりさせるために、上下にズラせた位置にその形をぬき出して画いてある。あとになってみると 1964, 1965 年のオフセット値が不適当であったために、この期間ではかなり頻繁なステップ調整の跡がみられる。また 1966 年以降のオフセット値はうまく適合していたので最近までの6年間で、たった1回のステップ調整が行なわれただけである。

#### 4. 新しい協定世界時

現行の UTC では、発射される標準周波数や秒間隔は定義に基づく正しい値ではなく、ある一定値ズレたものであること、しかもオフセット値が時々変わるので実用上いろいろな不便と煩雑さをもたらすこと、さらに 0.1 秒のステップ調整の前後で秒の刻みが不連続となることなどが次第に不満とされるようになった。そこで現行 UTC の大幅な改善策が打出された。これは第14回の IAU 総会 (1970年) で決議され、また CCIR (国際無線通信諮問委員会) の中間会議 (1971年) でも細部の具体策をも含めて決定されたものである。この新方式では、

1) 1972 年 1 月 1 日 0<sup>h</sup> UT 以降、周波数オフセットを全廃する。つまり定義に基づく正しい標準周波数と秒間隔がそのまま発信される。

2) 通報される時刻を UT1 から  $\pm 0.7$  秒以内に収める。このため必要に応じて 1.0 秒のステップ調整が行なわれる。

3) ステップ調整の時期は、12 月 31 日および 6 月 30 日 UTC のいずれかあるいは両者の最後の秒とすること。

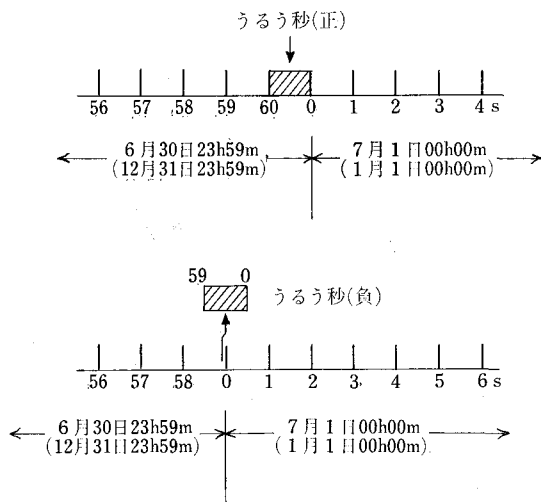
4)  $-1.0$  秒のステップ調整は、結局 UTC へ余分の 1 秒を加えることに当り、これを“うるう秒”と呼ぶ。将来  $+1.0$  秒のステップ調整もあり得るので、この場合引抜かれる 1 秒を“負のうるう秒”と呼ぶ。

5) UT1-UTC の時刻差を 0.1 秒の桁で予報したものを DUT1 と名付け、この値を毎分指定されたコード形式で放送すること。

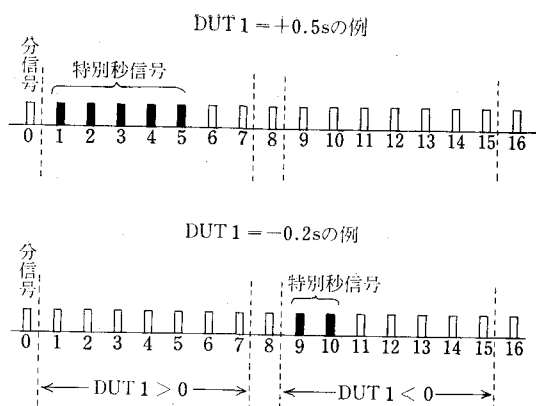
6) 1972 年年初には特に特別ステップ調整が行なわれる。これは AT の 1972 年 1 月 1 日 0<sup>h</sup>00<sup>m</sup>10<sup>s</sup> の瞬間に、新 UTC の示す時刻が 1 月 1 日 0<sup>h</sup>00<sup>m</sup>00<sup>s</sup> となるように調整される。

7) この新しい UTC の時刻を共通の常用時刻とみなす、つまりわが国の場合でいえば、新 UTC の時刻を丁度 9<sup>h</sup> 進めたものが従来の日本標準に該当することになる。

第1図の右下部分に点線で新しい UTC の動き (予想図) が示されている。いままでのようなオフセットと 0.1 秒のステップ調整によるきめ細かい折線近似に代わって、今後は 1 秒ステップの階段状の荒い近似が採られる。この新 UTC 方式では、ステップ調整を丁度 1.0 秒としているので、この調整の前後でも刻みの連続性はくずれない。一方、UT への近似の度合いは、従来の UT 2 から  $\pm 0.1$  秒以内に代わり、UT1 から  $\pm 0.7$  秒以内へとかなり幅広くなった。しかし DUT1 の値を毎分知



第2図 正のうるう秒 (UTC を 1 秒おくらす場合) と 負のうるう秒 (UTC を 1 秒すすめる場合)



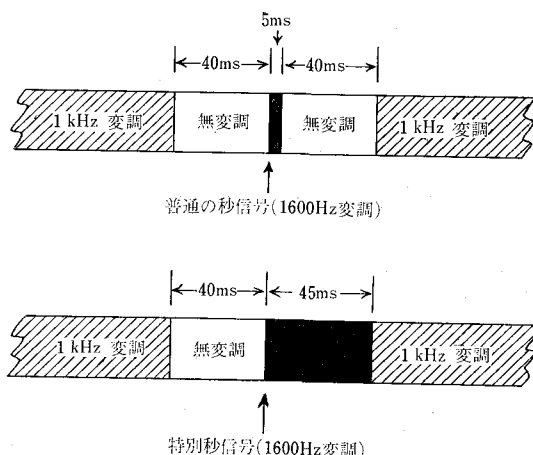
第3図 DUT1 の表示コード

らせるので、この補正を用いれば、従来と同じ程度の精度で UT1 を刻々に利用出来るはずである。もちろん、UT1-UTC の正確な値は後で天文台から公表される結果を利用すればよい。この点は従前通りである。今回、UT2 から UT1 へと乗換えたのは、UT1 が地球の自転角度そのものを示し、UT2 は単にこれを時量的に平滑化したもので、測地や天文航法には UT1 の方がより直接的だからである。

UTC は AT から導かれ、これと一次式の関係で結ばれている。1972 年 1 月 1 日 0<sup>h</sup> UT における (UTC-AT) の値は -9.8922423 秒となることが計算される。1972 年以降の新 UTC ではステップ調整は 0.1 秒となるので、(UTC-AT) の値の秒以下の端数は将来このままついてまわることになる。そこで 1972 年の年初に UTC を -0.1077577 秒だけステップ調整して、(UTC-AT) の値を丁度 -10.000 秒に揃えようというわけである。これが年初の特別調整の意味であり、この場合 UT2 とは全く無関係の話である。

第2図は正(負)のうるう秒がどのように加えら(引抜か)れるかを示している。正のうるう秒の場合には、6月30日または12月31日の、例えば 23<sup>h</sup>59<sup>m</sup>60<sup>s</sup>.3 というような時刻表示が生ずる。この場合 59<sup>m</sup>台は 60<sup>s</sup>でなく1秒多い 61<sup>s</sup>となるからである。負のうるう秒の場合には、最後の 59<sup>m</sup>台は 60<sup>s</sup>でなく 59<sup>s</sup>となる。そして例えば 23<sup>h</sup>59<sup>m</sup>59<sup>s</sup>.8 というような 59<sup>s</sup>台の時刻は消失する。なお日本時間でいえば、このうるう秒の起こるのは7月1日または1月1日の 08<sup>h</sup>59<sup>m</sup>の終端である。

第3図は DUT1 を表わすコード形式を示したので、DUT1 の値が  $+0.1 \times m$  秒の場合には、第1秒から第  $m$  秒までの秒信号を特別秒信号として特徴づける。逆に  $-0.1 \times n$  秒の時は第9秒から第  $(8+n)$  秒までの秒信号が特別秒信号となる。図は  $m=5, n=2$  の場合の例を示している。この特別秒信号の形をどのように選ぶかは各国標準電波局に任されている。郵政省電波研究所が管理



第4図 DUT1 表示のための特別秒信号の形式 (JJY の場合)

しているわが国の標準電波 JJY の場合には、1600 Hz 変調の 5 ミリ秒幅で表わされる通常秒信号を、45 ミリ秒に引伸すことで特徴づけることになった。この模様を第4図に示した。正の“うるう秒”挿入の直後は DUT1 の値は正で、その後時間とともに小さくなり、やがて負になる。そして、次の“うるう秒”挿入の直前、その絶対値が最も大きい。これがここ当分の間の DUT1 の傾向となる。

## 5. あとがき

この新しい UTC 方式では、定義に基づく標準周波数と正しい秒間隔が発射されるので、物理学や電波科学の利用者には全く支障を来さない。またその示す時刻は、1.0 秒のステップ調整で UT1 へ近似され、その概算修正値が毎分通報されるので、航法や測地学あるいは人工衛星観測などの利用者に対してもその支障を最少限に食い止めている。現在この UTC は国際的に  $\pm 0.5$  ミリ秒の範囲で同期している。各天文台の標準時計もまたこの UTC で保持され、UT0, UT1, UT2, ET あるいは AT などの各種時系もすべてこの UTC が仲介となる。したがって事象の起きた時刻を UTC に結んでおきさえすれば、後からどの時系への換算も自由である。天文台または BIH の公表する各種修正値が従前通り利用出来るからである。

地球自転の現状から推すと、正のうるう秒は 1972 年 7 月 1 日の午前 8<sup>h</sup>59<sup>m</sup>60<sup>s</sup> を皮切りに、当分の間毎年 1 回の割合で続くものと思われる。この新しい UTC 方式は原子秒の刻みで UT1 の時刻を示すもので、時刻に関する限り世界時が中核となっている点は従来通りである。こうして、時刻と時間間隔の複合体系はなお引続いている。