
研 究

セシウム時計群による平均原子時系の一決定法

今 江 理 人*

(昭和53年8月19日受理)

A TECHNIQUE OF MEAN ATOMIC TIME SCALE
GENERATION BY CESIUM CLOCKS

By

Michito IMAE

This paper presents a technique to generate Atomic Time Scale by several commercial cesium clocks which are continuously operating at Radio Research Laboratories.

There are several technique to generate Atomic Time Scales, which are based on number of clocks, clock modeling, and others.

Our technique is the following: We divide the fluctuation of each clock into two parts, long term part and short term part, and make weighted average of each part, then determine the Atomic Time by the combination of these two weighted averages.

An example of computer simulation of this technique shows comparatively good long term stability. And we applied this technique to the raw clock data. The result of rough estimation of stability of it shows a frequency of $2-4 \times 10^{-14}$ for 10-60 day averaging.

1. ま え が き

「時間」は、物理量の基本単位の一つであり、また、工学、特に、通信・計測などの分野においても重要な基本量である。

「時間」の基準としては、セシウム原子の遷移周波数を利用した「秒」の定義が国際的に広く受け入れられており、各国の研究機関では、より正確な「秒」の実現のため、大型1次周波数標準器の開発が行われている。

この「秒」の定義に基づいた「時刻」——原子時系——は、現在、最も安定で一様であるとされており、その決定法に各研究機関で、数種の方法が用いられている。

原子時系の決定においても、上述の大型1次標準器を

用いることが望ましいが、現段階では、一般に、あまり長時間の連続運転は困難な状態である。

そこで、現在、一般的には、何台かの商用セシウム標準器（以下では、商用セシウム時計、又は、原子時計とよぶ）で構成される時計群を用いて原子時を決定する方法、又は、原子時計群を定期的に1次標準器により較正していく方法とが用いられている。

前者の方法としては、NBS（米国標準局）におけるアルゴリズム⁽¹⁾、USNO（米国海軍天文台）の方法⁽²⁾、BIH（国際報時局）のTAI（国際原子時）決定のための方法などがある。また、後者の方法としては、吉村の方法⁽⁴⁾、上述の文献(1)のNBSの時系に対する1次標準器による較正法⁽³⁾などが挙げられる。

商用セシウム時計群のみによる方法では、本質的に、

* 周波数標準部 周波数標準値研究室

理想時からの時刻の発散という危険性があり、周波数確度の優れた1次標準器により較正していくことが望ましいが、本論文では、現在、当所で保持している商用セシウム時計群のみから原子時系を決定する方法について述べる。

2. 周波数標準器の安定度について

周波数標準器も一種の高安定発振器であり、その出力周波数は、一般の発振器と同様にランダム性雑音、周波数・位相のステップ・ドリフトなどにより汚染されている。周波数安定度は、原子時の一様性を考える上で基礎をなすものであり、以下に簡単に紹介する。

2.1 周波数安定度の尺度⁽⁶⁾

信号発生器の出力電圧の瞬時値は、次式のように表される。

$$V(t) = [V_0 + \varepsilon(t)] \sin [2\pi\nu_0 t + \varphi(t)] \quad \cdots(1)$$

V_0 , ν_0 は、それぞれ電圧振幅、周波数の公称値であり、 $\varepsilon(t)$, $\varphi(t)$ は、電圧振幅、位相の変動分を表す。

位相の瞬時値を、

$$\Phi(t) = 2\pi\nu_0 t + \varphi(t) \quad \cdots(2)$$

とおくと、周波数の瞬時値 $\nu(t)$ は、

$$\begin{aligned} \nu(t) &= \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi(t)}{dt} \\ &= \nu_0 + \frac{\dot{\varphi}(t)}{2\pi} \end{aligned} \quad \cdots(3)$$

と表される。

(3)式の第2項の周波数変動分を公称周波数で規格化したものを、周波数偏差率とよび、 $y(t)$ で表す。

$$y(t) = \frac{\dot{\varphi}(t)}{2\pi\nu_0} \quad \cdots(4)$$

周波数領域における周波数安定度の尺度を、 $y(t)$ の片側スペクトル密度 $S_y(f)$ で定義する。

⇐ (周波数安定度の第1の尺度)

また、 $y(t)$ の τ 秒平均値を、次式のように定義する。

$$\bar{y}_k \equiv \frac{1}{\tau} \int_{t_k}^{t_k+\tau} y(t) dt \quad \cdots(5)$$

$$t_{k+1} = t_k + T$$

次式で与えられる $\bar{y}_k$ の標本分散的なものを考える。

$$\begin{aligned} \langle \sigma_y^2(N, T, \tau) \rangle &= \left\langle \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N \left(\bar{y}_n - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \bar{y}_k \right)^2 \right\rangle \\ &\quad \cdots(6) \end{aligned}$$

$\langle \rangle$ は無限時間平均を表す。

(6)式で、 $N=2$, $\tau=T$ とおいたものを、 $\sigma_y^2(\tau)$ で表し、two-sample variance とよび、(7)式のように表さ

れる。

$$\sigma_y^2(\tau) \equiv \langle \sigma^2(2, \tau, \tau) \rangle = \left\langle \frac{(y_{k+1} - y_k)^2}{2} \right\rangle \quad \cdots(7)$$

この $\sigma_y^2(\tau)$ を、時間領域における周波数安定度の尺度とする。 ⇐ (周波数安定度の第2の尺度)

また、 $\sigma_y^2(\tau)$ の平方根 $\sigma_y(\tau)$ を、two-sample standard deviation とよぶ。

これら二つの周波数安定度の尺度、 $S_y(f)$ と $\sigma_y^2(\tau)$ との間には、次式のような関係がある。

$$\sigma_y^2(\tau) = 2 \int_0^\infty S_y(f) \frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df \quad \cdots(8)$$

2.2 雑音モデル

一般に発振器の安定度(雑音特性)は、次式のようなフーリエ周波数 f のべき乗の形で表すことができる。

$$S_y(f) = h_\alpha f^\alpha \quad \cdots(9)$$

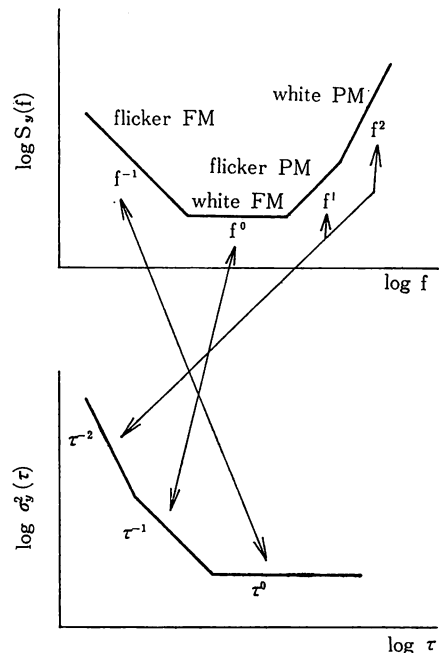
h_α ; スペクトル強度

高性能水晶発振器や、周波数標準器など、高安定発振器の場合、雑音特性は、 $\alpha = -1, 0, 1, 2$ など、各々独立した雑音の合成としてモデル化することができる。

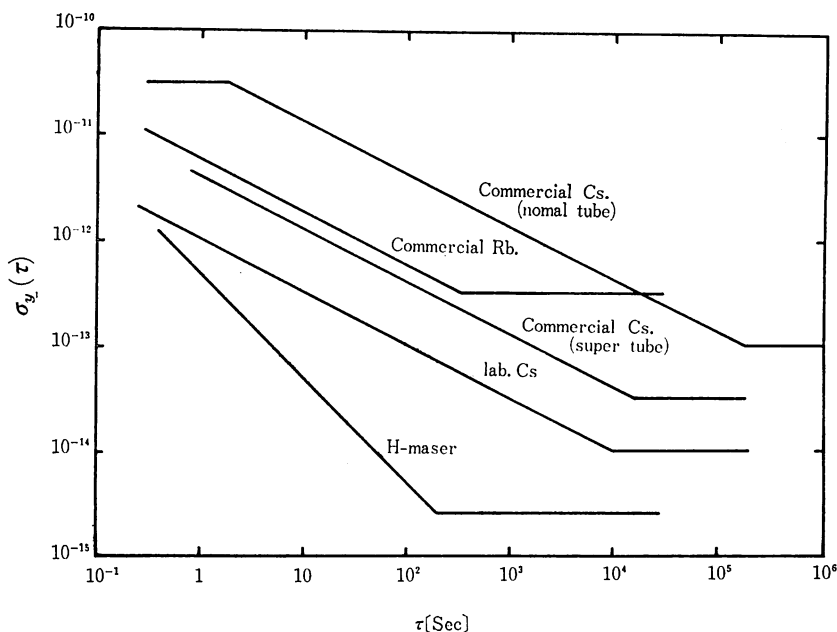
$$S_y(f) = h_{-1} f^{-1} + h_0 f^0 + h_1 f^1 + h_2 f^2 \quad \cdots(10)$$

上式で、第1項はフリッカ雑音FM, 第2項は白色雑音FM, 第3項はフリッカ雑音PM, 第4項は白色雑音PMの特性を示す。

第1図は、このようなスペクトル特性 $S_y(f)$ と、two-sample variance $\sigma_y^2(\tau)$ との関係を表している。



第1図 $S_y(f)$ と $\sigma_y^2(\tau)$ の関係



第2図 各種周波数標準器の特性例

また、第2図は、各種周波数標準器の $\sigma_y(\tau) - \tau$ 特性の例を図示したもので、図からわかるように、 $\tau=1$ [sec] 以上では、白色雑音 FM 及びフリッカ雑音 FM が、主要な雑音形式であると考えられる。

3. 平均原子時計算法

3.1 原子時計の雑音モデル

原子時計群が n 台の独立な時計により構成されるとする。

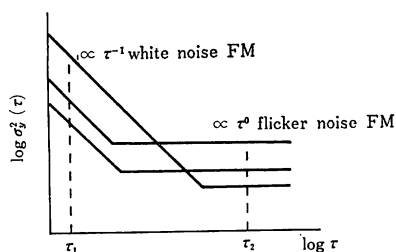
ここでは、完全に一樣な理想時が存在するものとし、この理想時において期間 T ごとに各時計の動きを観測する。

記号 $t(l)$, $t_i(l)$, $x_i(l)$ を、次のように定義する。

$$\left\{ \begin{array}{ll} t(l); & l \text{ 番目の観測における理想時} \\ & (t(l+1) - t(l) = T) \\ t_i(l); & \text{時計 } i \text{ の表示時刻} \\ & (i=1, \dots, n) \\ x_i(l); & \text{時計 } i \text{ の理想時からの時刻偏差 } (x_i(l) = t_i(l) - t(l)) \end{array} \right.$$

この $x_i(l)$ を生じる原因としては、原子時計 i の時刻及び周波数の周期誤差、周波数ドリフトなどの決定論的なものと、ランダムな変動によるものとが考えられる。

前者は、発生時点、大きさが検出できれば、ステップ関数、ランプ関数、2次関数などで補正可能であるが、正確な検出は困難であり、長期的な確度を考える場合、特に、周波数ドリフトなどは問題となる。



第3図 雑音モデル

ここでは、変動の原因としては、ランダムな変動によるもののみを考慮し、また、2.2で述べたように、商用セシウム時計の雑音特性として、 $\tau=1$ 日～数日で主要なものである白色雑音 FM とフリッカ雑音 FM のみを考える。

(周波数領域)

$$S_{yi}(f) = h_{0i}f^0 + h_{-1i}f^{-1} \quad \dots\dots(11)$$

(時間領域)

$$\sigma_{yi}^2(\tau) = \frac{h_{0i}}{2\tau} + 2h_{-1i} \ln 2 \quad \dots\dots(12)$$

ただし、 $\left\{ \begin{array}{l} h_{0i}; \text{時計 } i \text{ の白色雑音 FM のスペクトル強度} \\ h_{-1i}; \text{時計 } i \text{ のフリッカ雑音 FM のスペクトル強度} \end{array} \right.$

3.2 平均原子時計算法

以下では、記述の簡単のため各時計に時刻、周波数のオフセットはないものとする。

このとき、次式のような荷重平均で平均原子時 $t_{ens}(l)$

を決定する場合を考える。

$$t_{ens}(l) = \sum_{i=1}^n w_i(l) t_i(l) \quad \cdots \cdots (13)$$

w_i ; 時計 i の荷重

$t_{ens}(l)$ の周波数偏差率 $y_{ens}(l)$ も同様の形で表される。

$$y_{ens}(l) = \sum_{i=1}^n w_i y_i(l) \quad \cdots \cdots (14)$$

(14)式より、平均原子時の安定度 $\sigma_{y_{ens}}^2(\tau)$ は、次式のよう
に表される。

$$\sigma_{y_{ens}}^2(\tau) = \sum_{i=1}^n w_i^2 \sigma_{y_i}^2(\tau) \quad \cdots \cdots (15)$$

(15)式を最小にする荷重 w_i は Lagrange の未定係数法
により

$$w_i = \frac{1/\sigma_{y_i}^2(\tau)}{\sum_{j=1}^n 1/\sigma_{y_j}^2(\tau)} \quad \cdots \cdots (16)$$

と与えられる。

このように(15)式を最小にする荷重 w_i は、 τ の関数で
与えられる。各時計の雑音特性が、すべて同一かつ単一
特性の場合（白色雑音FMのみ、又は、フリッカ雑音FM
のみなどの場合）、任意の τ での値において荷重を計
算すれば、 τ の全域に対して $\sigma_{y_{ens}}^2(\tau)$ を最小とすること
ができるが、先に仮定したように、各時計の雑音特性
が複数個の雑音の合成として与えられる場合には、上述
の荷重では、それを決定した領域で主要な雑音特性に対
してのみ最適であり、他の領域では一般に適切な荷重と
はいえない（例えば、第3図で、 τ_1 おいて荷重を決定し
ても τ_2 のような領域では $\sigma_{y_{ens}}^2(\tau)$ は最小とならな
い）。

そこで今回述べる計算法では、時計の変動分をフィル
タにより平滑化して長期的傾向と短期的傾向とに分離し
て考える。

$$t_i(l) = \bar{t}_i(l) + \delta t_i(l) \quad \cdots \cdots (17)$$

$$y_i(l) = \bar{y}_i(l) + \delta y_i(l) \quad \cdots \cdots (18)$$

ただし、 $\begin{cases} \bar{t}_i(l), \bar{y}_i(l) & \text{; 時計 } i \text{ の時刻, 周波数偏差} \\ & \text{率の長期的傾向} \\ \delta t_i(l), \delta y_i(l) & \text{; 時計 } i \text{ の時刻, 周波数偏差} \\ & \text{率の短期的傾向} \end{cases}$

この分離した長期的傾向と短期的傾向とを個々に荷重平
均を行い、その合成として平均原子時を計算する。

すなわち、

$$t_{ens}(l) = \sum_{i=1}^n w_{Li} \bar{t}_i(l) + \sum_{i=1}^n w_{Si} \delta t_i(l) \quad \cdots \cdots (19)$$

$$y_{ens}(l) = \sum_{i=1}^n w_{Li} \bar{y}_i(l) + \sum_{i=1}^n w_{Si} \delta y_i(l) \quad \cdots \cdots (20)$$

ここで、 w_{Li} , w_{Si} はそれぞれ時計 i の長期的傾向と
短期的傾向とに対する荷重を表す。

このとき、平均原子時の安定度 $\sigma_{y_{ens}}^2(\tau)$ は、(20)式よ
り、次のように計算される。

$$\sigma_{y_{ens}}^2(\tau) = \sum_{i=1}^n \{ w_{Li}^2 \sigma_{\bar{y}_i}^2(\tau) + w_{Si}^2 \sigma_{\delta y_i}^2(\tau) \\ + w_{Li} w_{Si} \gamma_{\bar{y}_i \delta y_i}(\tau) \} \quad \cdots \cdots (21)$$

$$\text{ただし、} \begin{cases} \sigma_{\bar{y}_i}^2(\tau) = \left\langle \frac{[\bar{y}_i(l+1) - \bar{y}_i(l)]^2}{2} \right\rangle \\ \sigma_{\delta y_i}^2(\tau) = \left\langle \frac{[\delta y_i(l+1) - \delta y_i(l)]^2}{2} \right\rangle \\ \gamma_{\bar{y}_i \delta y_i}(\tau) = \left\langle \frac{[\bar{y}_i(l+1) - \bar{y}_i(l)] [\delta y_i(l+1) - \delta y_i(l)]}{2} \right\rangle \end{cases} \quad \cdots \cdots (22)$$

時計の変動分を滑フィルタにより長期的傾向と短期的
傾向とに分離するが、このフィルタの $\sigma_{y_i}^2(\tau)$ に対する
伝達関数的なもの（入力系列と出力系列との $\sigma_{y_i}^2(\tau)$ の
比）を考え、これを次式で定義する。

$$\left. \begin{aligned} G_L(\tau) &= \sigma_{\bar{y}_i}^2(\tau) / \sigma_{y_i}^2(\tau) \\ G_S(\tau) &= \sigma_{\delta y_i}^2(\tau) / \sigma_{y_i}^2(\tau) \\ G_R(\tau) &= \gamma_{\bar{y}_i \delta y_i}(\tau) / \sigma_{y_i}^2(\tau) \end{aligned} \right\} \quad \cdots \cdots (23)$$

$$G_L(\tau) + G_S(\tau) + G_R(\tau) = 1 \quad \cdots \cdots (24)$$

この G_L , G_S , G_R を(21)式に代入すると $\sigma_{y_{ens}}^2(\tau)$
は、次式のよう表される。

$$\sigma_{y_{ens}}^2(\tau) = \sum_{i=1}^n \{ w_{Li}^2 G_L(\tau) + w_{Si}^2 G_S(\tau) \\ + w_{Li} w_{Si} G_R(\tau) \} \sigma_{y_i}^2(\tau) \quad \cdots \cdots (25)$$

サンプルタイム τ が短かいとき ($\tau = \tau_S$) と長いとき
($\tau = \tau_L$) において、Lagrange の未定係数法により (25)
式を最小にする w_{Si} , w_{Li} を求め $G_S(\tau_S) > G_L(\tau_S)$,
 $G_L(\tau_L) > G_S(\tau_L)$ などを考慮して簡略化すると、次の
ようになる。

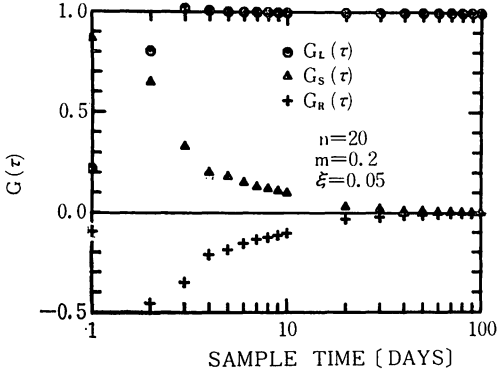
$$w_{Si} \sim \frac{1/\sigma_{y_i}^2(\tau_S)}{\sum_{j=1}^n 1/\sigma_{y_j}^2(\tau_S)} \quad \cdots \cdots (26)$$

$$w_{Li} \sim \frac{1/\sigma_{y_i}^2(\tau_L)}{\sum_{j=1}^n 1/\sigma_{y_j}^2(\tau_L)} \quad \cdots \cdots (27)$$

長期的傾向と短期的傾向との分離用フィルタとして
は、移動平均によるもの、デジタルフィルタによるもの
などが考えられるが、ここでは、リアルタイムの処理
が可能な、次のような2次型フィルタを、 n 段カスケ
ードに接続した形の周波数伝達関数、

$$H(s) = \frac{1}{(1 + 2\xi TS + T^2 S^2)^n} \quad \cdots \cdots (28)$$

を持つものと考え、これを離散型表示したものを用いて
いる (ξ はダンピングファクタ、 $1/T$ は遮断周波数に対
応する)。



第4図 分離用フィルタの特性

$n=1$ のときの離散型では、次のようになる。

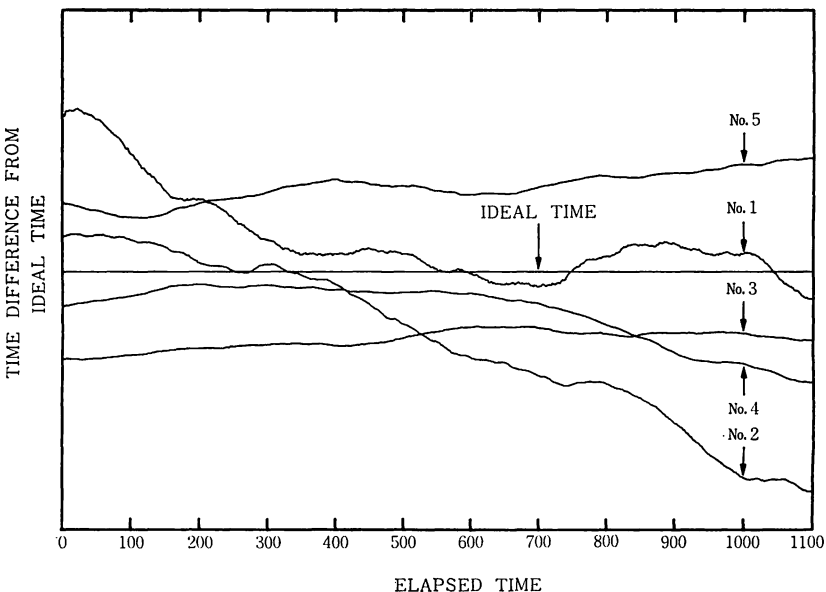
$$\tilde{y}(l) = f_1 y(l) + f_2 \tilde{y}(l-1) + f_3 \tilde{y}(l-2) \quad \dots\dots(29)$$

ただし、
$$\begin{cases} f_1 = \frac{1}{1+2\xi m+m^2} \\ f_2 = \frac{2m(m+\xi)}{1+2\xi m+m^2} \\ f_3 = \frac{-m^2}{1+2\xi m+m^2} \end{cases} \quad \dots\dots(30)$$

フィルタのパラメータ n, m, ξ の最適値を数式的に導くことは困難であり、ここでは、次節のシミュレーション結果や、実際の時計の特性を考慮して、 $n=20, m=0.2, \xi=0.05$ に選んで用いている。第4図は、これらの値に対するフィルタの特性 $G(\tau)$ を図示したものである。

4. 計算機シミュレーション

4.1 シミュレーション用データ



第5図 シミュレーション用データ

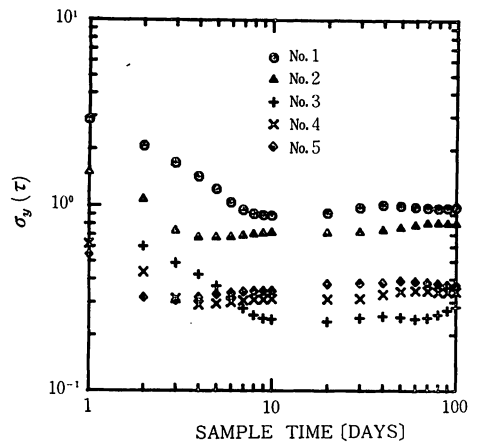
原子時計の雑音特性モデルを先に仮定したように、白色雑音FMをフリッカ雑音FMの合成であるとする。

電子計算機により得られる擬似正規乱数の系列を白色雑音に対応させる。また、この白色雑音の系列を Barns ら⁽⁷⁾による白色雑音⇒フリッカ雑音変換フィルタに通して得られる系列をフリッカ雑音に対応させる。

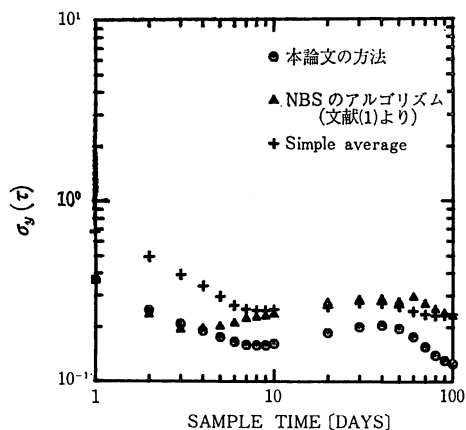
このようにして得られる各々独立な白色雑音系列とフリッカ雑音系列とを合成した系列を理想時に対する擬似時計の周波数偏差率の系列 $\{y_i(l)\}$ として扱う。

第5図は、以上のようにして求めた独立な擬似時計5台について、理想時に対する時刻差の系列 $\{x_i(l)\}$ の形で図示した1例である。

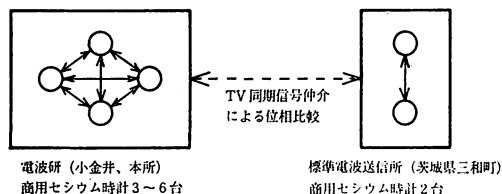
また、第6図は、第5図の各系列の安定度を求めたもので、サンプルタイムの短い領域で $\sigma_y^2(\tau) \propto \tau^{-1}$ の白色



第6図 シミュレーション用データの安定度



第7図 平均原子時の安定度



第8図 電波研の商用セシウム時計の構成

雑音FM, 長い領域で $\sigma_y^2(\tau) \propto \tau^0$ のフリッカ雑音FMの特性を示していることがわかる。

4.2 シミュレーション例

上述のシミュレーション用擬似時計のデータに対して, 前節で述べた計算法を適用して得られる平均原子時の系列 $\{t_{ens}(l)\}$ の安定度を, 第7図に示す。

同図で, ○印が前節の方法を適用した結果, △印は, NBSにおいて商用セシウム群だけに対して用いられているアルゴリズム⁽¹⁾を適用した結果(この計算例では, 短期の安定度に比較的重点をおいた場合について計算したので長期安定度が若干劣化している), また, +印は各系列を単純に平均した場合を示している。

このように, 前節の方法は, 比較的長期の安定度についても良好な結果が得られるものと考えられる。

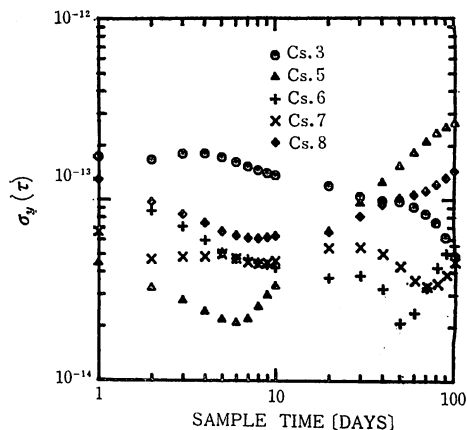
5. 実際の時計データへの適用

5.1 当所における商用セシウム時計群の構成

第8図に, 当所における商用セシウム時計群の構成と, 相互比較システムを示す。

電波研(小金井一本所)に設置されている時計は, 各々温度, 湿度制御された原器室に置かれており, 直接, 時計相互間の位相比較がなされる。

また, 標準電波送信所(茨城県三和町)に設置されている時計(予備器を含め2台)は, TV同期信号を仲介⁽⁶⁾として本所の時計と位相比較がなされている。

第9図 商用セシウム時計の安定度推定値
(1976.1.1~1976.12.31)

なお, この測定は, 現在, 自動データ取得システムにより, 毎日4時間ごとに行われている。

5.2 商用セシウム時計の安定度

各時計の周波数安定度の推定は, それ自身よりもはるかに安定な発振器により測定するか, 又は, 文献(9)に述べられているように, 同程度の安定度の時計3台を1組として, その相互間の安定度から推定して求める。

後者の方法について簡単に説明する。

i, j, k の3台の時計を考え, そのうち2台間の周波数偏差率 y_{ij}, y_{jk}, y_{ki} を測定し, その安定度 $\sigma_{yij^2}(\tau)$ などを計算する。個々の時計の安定度の推定値は, 次式で計算できる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{yi^2}(\tau) &= (\sigma_{yij^2}(\tau) + \sigma_{yki^2}(\tau) - \sigma_{yjk^2}(\tau)) / 2 \\ \sigma_{yj^2}(\tau) &= (\sigma_{yij^2}(\tau) + \sigma_{yjk^2}(\tau) - \sigma_{yki^2}(\tau)) / 2 \\ \sigma_{yk^2}(\tau) &= (\sigma_{yki^2}(\tau) + \sigma_{yjk^2}(\tau) - \sigma_{yij^2}(\tau)) / 2 \end{aligned} \right\} \dots\dots (31)$$

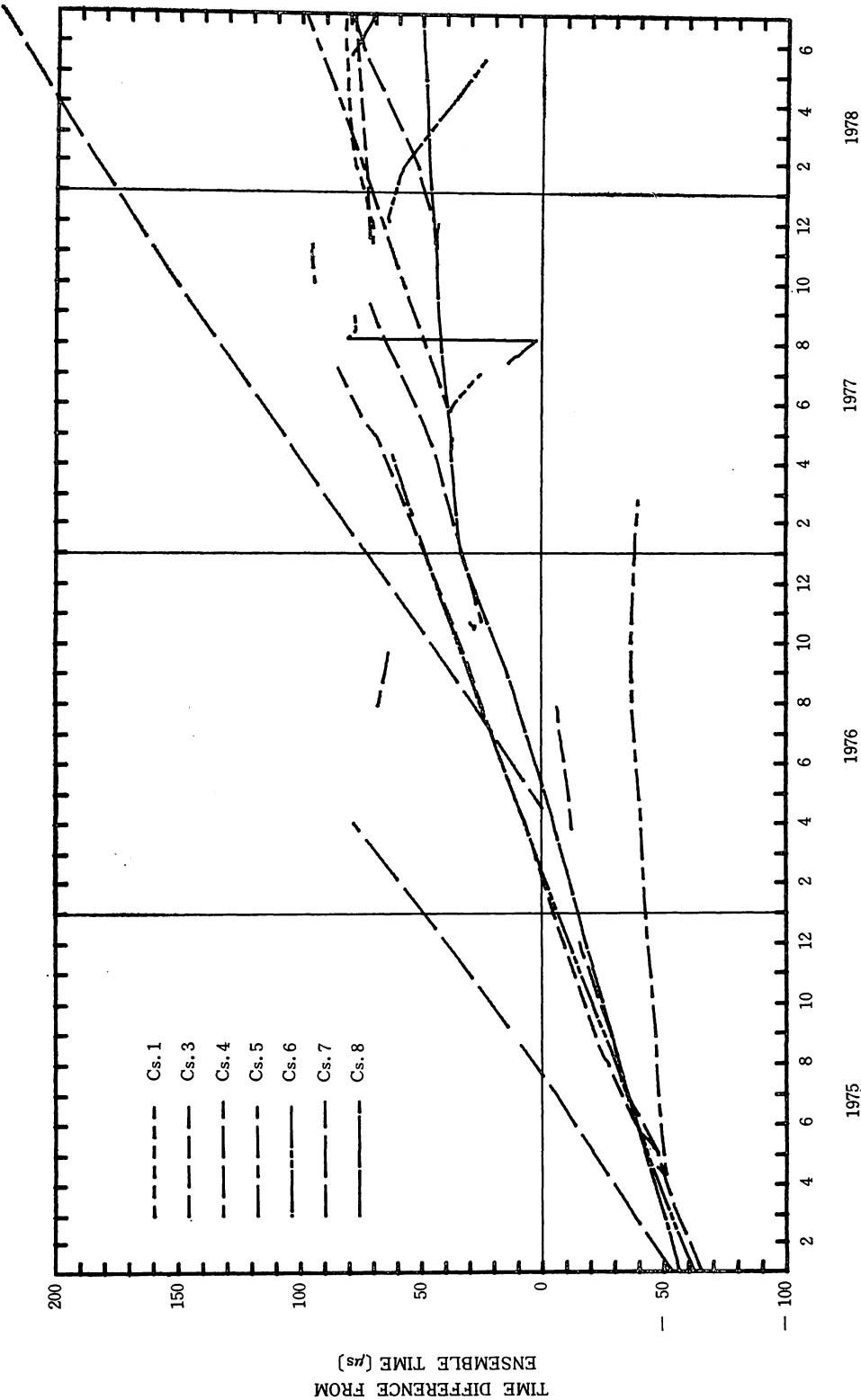
時計台数が n 台のとき, このような推定値は各時計について $(n-1)!/(2!(n-3)!)$ 個与えられ, これらを適当に平均して安定度を求める。

第9図は, 上述の方法で1976年1年間の測定データから推定した各時計の安定度を示すものである。

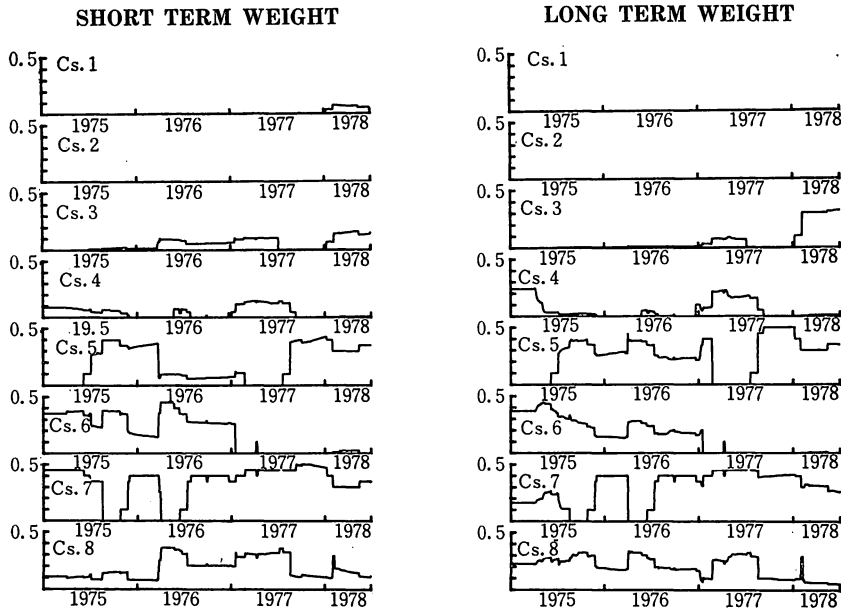
5.3 平均原子時計計算法の適用

ここで用いたデータは, 1975年1月から1978年6月までの3年6か月間のデータで, 各値とも $9h$ J. S. T. ($0h$ UTC) における値を用いている。

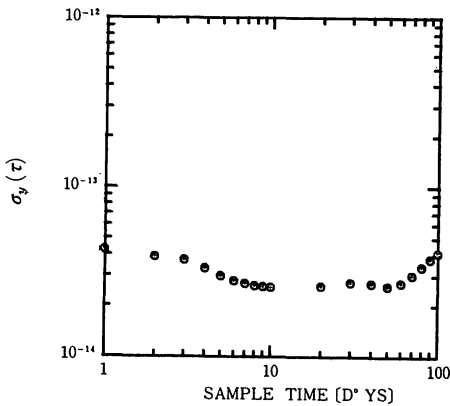
荷重の決定には, 個々の時計が時計群に加わってから原子時を計算する前日までの相互比較データを用い, 短期, 長期の安定度(ここでは, $\tau_S=1$ (day), $\tau_L=10$ (days) とした)を推定し, ②⑥, ②⑦式より計算する。



第 10 図 平均原子時に対する各時計の動き



第11図 短期、長期の荷重の変化



第12図 平均原子時の推定安定度

また、商用セシウム時計の場合、セシウムビーム管の交換のため、あるいは、他の実験などの使用のため、時計群から抜ける場合がある。このようなとき、その後、抜けた時計が、再び時計群に編入された場合、60日間、特性推定期間として原子時の計算には加えない。

5.4 適用結果

第10図は、上述のデータに、5.3で述べた計算法を適用して得られる平均原子時に対する各時計の表示時刻の動きを示すものである。

また、第11図は、この期間における各時計の短期、長期の荷重の変化を示している。図からもわかるように、1台の時計が原子時に対して過度の重みをもたないようその時点における時計台数に応じて、一定の荷重の上限を設定している。

先に述べたように、時計群を構成する時計の台数は一定ではなく、長期間にわたって連続したデータのある時計が少ないが、比較的時間台数、連続したデータのそろっている1976年のデータについて、第9図の各時計の安定度推定値、第4図のフィルタの特性及び荷重を用いて式(2)より、この期間における平均原子時の安定度を評価したものが、第12図である。期間的に短く、各時計の安定度の推定精度が十分ではないため、平均原子時の安定度についても信頼性は高いものではないが、この図に近い値は得られているものと思われる。

5.5 UTC (BIH) との比較

5.4で平均原子時 (UTC (RRL) とする) を計算した期間中に4回 (1975年8月27日、同年10月3日、1976年9月13日、1977年8月5日)、USNO (米海軍天文台) からポータブルクロックが運ばれ、UTC (USNO) と電波研究所の主時計 (UTC (RRL, MC)) との比較が行われている⁽¹⁰⁾。また、BIH (国際報時局) では、各国の原子時計百数十台の相互比較データからUTC (BIH) を決定している⁽¹¹⁾。

これらの比較データと、5.4で試算したUTC (RRL) の比較を、第1表に示す (UTC (BIH) - UTC (USNO) の1977年8月5日の () 内の値は、1977年1月1日に、UTC (BIH) が -1×10^{-12} の周波数調整を行っており、これを取り除いた値である)。

第2表(d)項は、第1表の(a)+(b)+(c)よりUTC (BIH) - UTC (RRL) を求めたもので、(e)項は、(d)項の各値より、最小自乗法で近似直線を求め、その近似直

第1表 各研究機関間の時刻比較

	(a) UTC (BIH) —UTC (USNO)	(b) UTC (USNO) —UTC (RLL MC)	(c) UTC (RRL) —UTC (RRL)
① 1975. 8. 27	5.2 μ S	— 8.9 μ S	—28.93 μ S
② 1975.10. 3	4.7	— 8.6	—24.73
③ 1976. 9. 13	5.5	— 7.2	16.40
④ 1977. 8. 5	0.84(19.5)	—12.4	42.10

第2表 UTC(BIH)—UTC(RRL)

	(d)=(a)+(b)+(c) UTC(BIH) —UTC(RRL)	(e) 近似直線からの 偏差
① 1975. 8. 27	—32.63 μ S	—0.39 μ S
② 1975.10. 3	—28.63	—0.70
③ 1976. 9. 13	14.70	2.30
④ 1977. 8. 5	30.54(49.20)	—1.20

線からの偏差を表している。

この結果、約2年間の試算平均原子時 UTC (RRL) と、UTC (BIH) とは、2～3 (μ S) 程度で同期しているものと考えられる。

6. ま と め

商用セシウム時計群による平均時系の決定法について、各時計の変動を長期変動と短期変動との二つに分離し、それぞれの荷重平均の合成として平均原子時を求めるという方法について述べた。

計算機シミュレーションなどの結果から、比較的長期における安定度についても良好な原子時が得られるものと思われる。

ただし、これは商用セシウム時計群のみによる時系であり、より長期的には、理想時から原子時が発散していく危険性は避けられない。それゆえ、より確度の高い原子時系の確立のためには、周波数確度の優れた1次標準器による較正、及び、人工衛星などを用いた国際的な時刻、周波数の精密比較を行っていく必要がある。

謝 辞

最後に、本研究を行う機会を与えて下さいました佐分利周波数標準部長、安田周波数標準値研究室長、並びに、原子時計の比較データをいただく、当部標準器係の皆様、また、データ整理などに御協力をいただいた元当研究室松浦研究官に感謝致します。

参 考 文 献

- (1) Allan, D.W. et al.; "Time and Frequency; Theory and Fundamentals", NBS Monograph, 140, 205—231.
- (2) Winkler, G.M.R. et al.; "The U.S. Naval Observatory Clock Time Reference and the Performance of a Sample of Atomic Clocks", Metrologia, 6, 4, 126—134, 1970.
- (3) Bureau International de l'Heure, ANNUAL REPORT FOR 1974, 1975.
- (4) Yoshimura, K.; "The Generation of an Accurate and Uniform Time Scale with Calibration and Prediction", NBS Tech. Note 626, 1972.
- (5) Allan, D.W. et al.; "An Accuracy Algorithm for an Atomic Time Scale", Metrologia, 11, 133—138, 1975.
- (6) 電気学会; "周波数安定度とその測定", 電気学会技術報告, (Ⅱ部) 第41号, 昭52.
- (7) Barns, J.A. et al.; "Efficient Numerical and Analog Modeling of Flicker Noise Process", NBS Tech. Note 604, 1971.
- (8) 佐分利義和, ほか; "TV同期信号を利用した時刻と周波数の精密比較", 電波研究所季報, 18, No. 99, 433—444, 1972.
- (9) Gray, J.E. et al., A Method for Estimating the Frequency Stability of an Individual Oscillator, 28-th Annual Symposium on Frequency Control 1974.
- (10) Radio Reserch Laboratories, Standard Frequency and Time Service Bulletin, Annual Report, 1975—1977.
- (11) Bureau International de l'Heure, ANNUAL REPORT FOR 1975—1977.

