

**研 究****ロラン C による時刻と周波数の国際比較**

赤塚 耕輔\* 安田 嘉之\* 松浦 豊志\*

(昭和52年8月25日受理)

**INTERNATIONAL TIME AND FREQUENCY  
COMPARISON VIA LORAN-C**

By

Kōsuke AKATSUKA, Yoshiyuki YASUDA and Toyoshi MATSUURA

The results are given of the time and frequency comparison for the period from 1969 to 1976 between Radio Research Laboratories (RRL), Tokyo and the U.S. Naval Observatory (USNO), Washington, D. C. via Loran-C transmission from Iwo-Jima.

Time difference between the master clock of the RRL and UTC (USNO) via Loran-C was compared with that via portable clock of the USNO. Since 1974, the difference was very stable giving the mean value of 5.56  $\mu$ s with the standard deviation of 0.456  $\mu$ s.

Besides, using the data of intercomparison of cesium clocks of the RRL, including the master clock, frequency comparison was made between a group of the cesium clocks of the RRL and USNO, which showed an accuracy of about  $5 \times 10^{-13}$  for recent two years. The accuracy is expected to be improved in future as the number of the cesium clock increases.

**1. はじめに**

ロランCは100 kHzのパルス電波による双曲線航法の一つであるが、その周波数はセシウム原子時計から取り出された安定なものであり、また、時刻比較には地表波成分のみを利用するので極めて高い精度が得られる。

当所(RRL)では1969年以来、北西太平洋チェーンの主局硫黄島の受信を行い、RRLと米海軍天文台(USNO)の間で時刻比較を行ってきた。

また、これとは別にUSNOにより年に2~3回携帯型原子時計(portable clock)による時刻比較も行われてきた。

今回

(1) ポータブル・クロックによる方法とロランCによ

る方法との比較

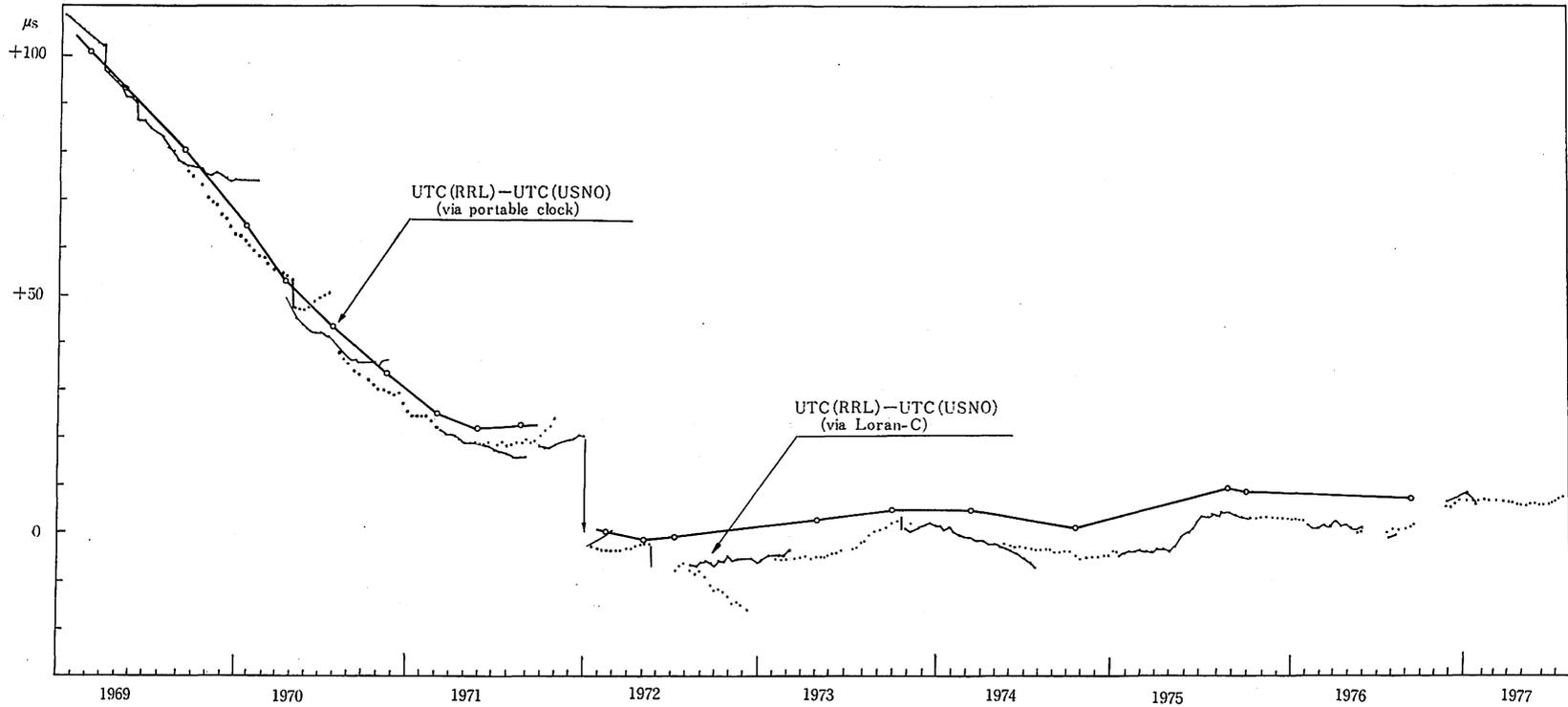
(2) 最近のロランCによる時刻比較を用い、原器群の平均レート(rate)とUTC(USNO)のレートとの比較を行った結果について述べる。ここで、UTCは協定世界時のことである。

**2. ポータブル・クロックとロランCの比較****2.1 比較経過**

RRLとUSNOの時刻比較のために使用したデータは、USNOのDaily Phase Values, Series 4とRRLのStandard Frequency and Time Service Bulletinである。

前者には、UTC(USNO)—Loran-C(Iwo-Jima)及びUTC(USNO)—UTC(RRL)のポータブル・クロ

\* 周波数標準部 周波標準値研究室



第1図 ロランC及びポータブル・クロックによるRRLとUSNOの時刻比較

ックの測定値が発表されている。後者には UTC (RRL) —Loran-C (Iwo-Jima) が発表されている。ここで、UTC (USNO)—Loran-C (Iwo-Jima) はロランC硫黄島からみた UTC (USNO) の時刻である。

RRLとUSNOの相対時刻差は

$$\text{UTC(RRL)} - \text{UTC(USNO)}$$

$$= [\text{UTC(RRL)} - \text{Loran-C(Iwo-Jima)}] - [\text{UTC(USNO)} - \text{Loran-C(Iwo-Jima)}]$$

として求めた。

第1図には10日ごとに上記の値が、また、ポータブル・クロックの測定値が表されている。ロランCによる時刻比較で実線又は点線で交互に繰り返される一連の結果は、USNOにおいてロランC硫黄島の発信値の再較正が続けられながら漸次比較精度が向上してきたことが表されている。

一方、この期間を通じUTC (RRL) を表す主時計にはセシウム原子時計 Cs 2, Cs 3, Cs 4, Cs 8 がそれぞれ用いられた。

第1図の中で、1972年1月の約20 $\mu$ sの時刻のとびは1972年1月1日、9時JSTの直前に国際間の申し合せにより、Old UTC から New UTC に移行のときに国際原子時(TAI)に対して正確に-10秒(遅れ)とするために、USNOでは-0.107600秒、RRLでは-0.107620秒の特別時刻調整を行ったためである。

言うまでもなく、Old UTC は、地球自転時に近似させるために原子時(AT)から一定量周波数をオフセットし、地球自転時との差を0.1秒以内に保つために必要

第1表 ロランCとポータブルクロックの比較結果

period	n	time difference P.C. -Loran-C ( $\mu$ s)	sd ( $\mu$ s)
1969~1973	10	+4.41	1.510
1974~1976	5	+5.56	0.456

に応じ0.1秒の時刻調整を行ったものである。

New UTC は上記のオフセットを廃止し、ATとUTCは全く同一の時間間隔を刻むもので、地球自転時と0.9秒以上離れないように必要に応じ特定の日に1秒の時刻調整(正又は負のうろう秒の挿入)を行うものである。

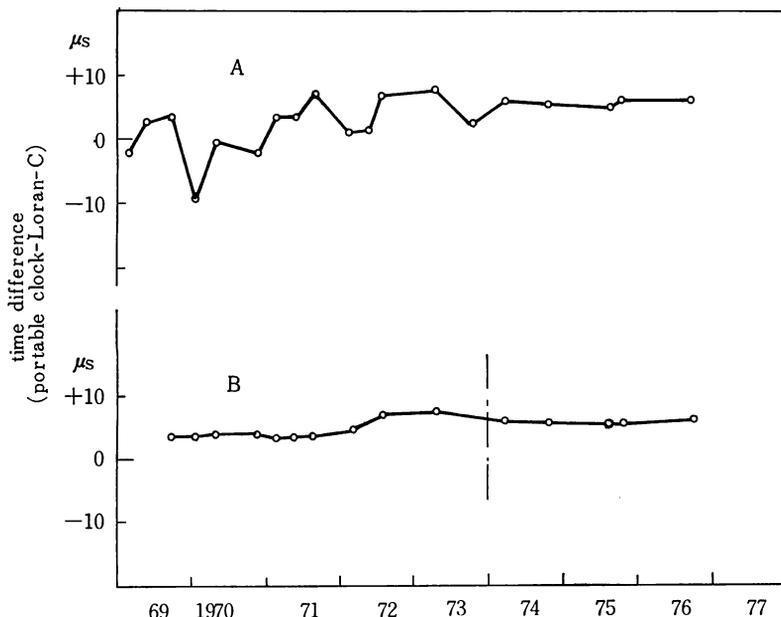
### 2.2 比較結果

第2図はロランCに対するポータブル・クロックの関係を表している。ポータブル・クロックによる時刻比較は合計20回実施されている。

第2図のAはUSNOの最初の較正值(第1図参照)による比較を表している。

第2図のBはUSNOの再較正により改善された比較結果である。この結果では第1図に見られるように再較正のときに時刻のとびのある場合(1971年1月28日、5月16日、1972年5月2日、1973年10月2日)とロランC硫黄島の停波のため比較できなかった場合(1970年7月29日)があり、比較回数は合計15回であった。

第2図のBについて、USNOのロランC硫黄島の較正方法を検討してみると1969年から1973年までの期間は東京都下府中にUSNOのTime Reference Station



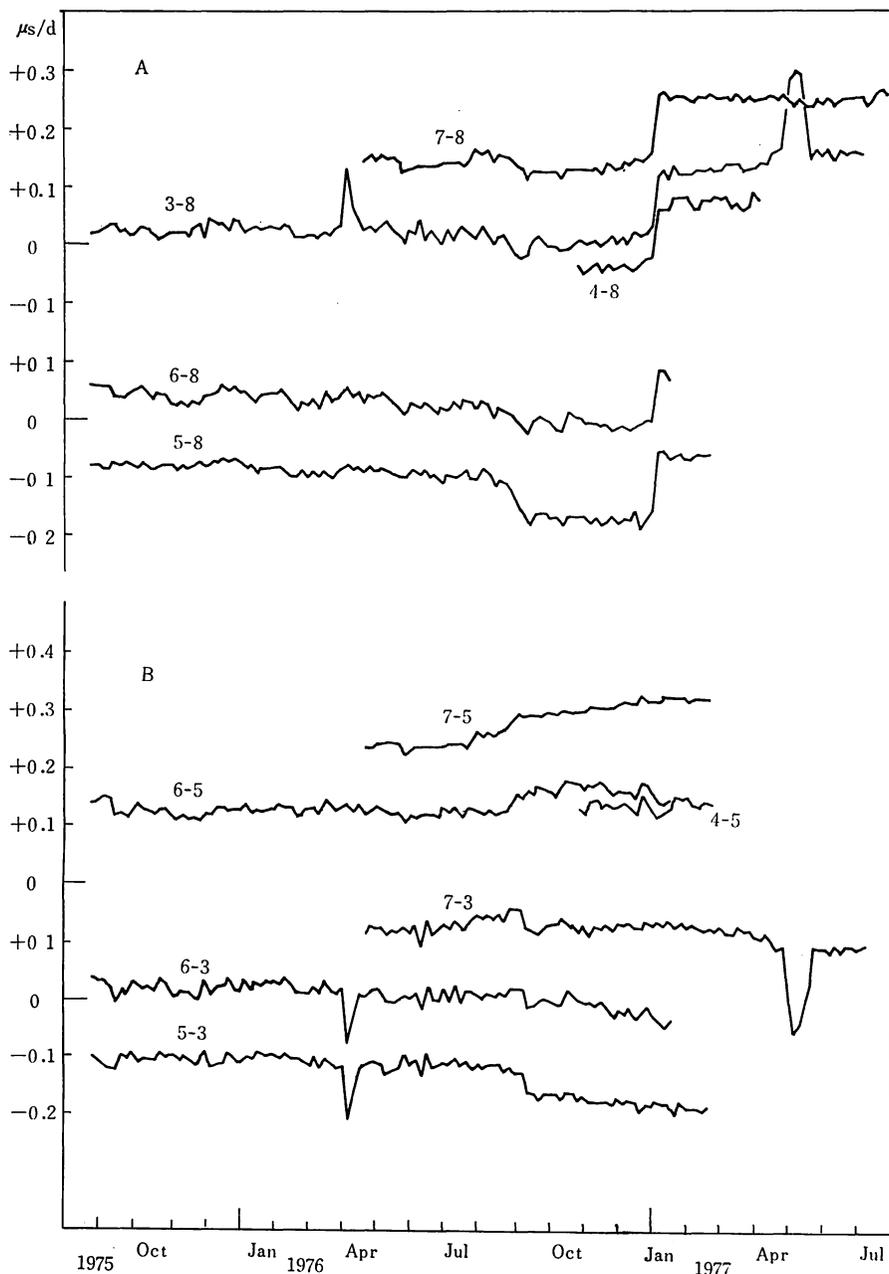
第2図 ロランCとポータブル・クロックの関係

が設置され、数台のセシウム原子時計が運用されていた。府中の時計の時刻はポータブル・クロックによる測定値の補間によって決定されたため、その外挿値の変動は、しばしばロランC硫黄島の較正に影響し再較正の原因となった。(例えば第1図の1969年9月からの再較正は当時硫黄島の較正に使われていた府中のセシウム原子時計 Cs 60 の周波数変動によるものである。)

1974年に入り、ロランC硫黄島の発信値の較正に人工衛星の利用が始められた。すなわち、ホノルルの時計と

沖縄及びグアムの時計が人工衛星により結ばれ、ホノルルの時計の動きは、ハワイ区域の他のセシウム原子時計により十分監視され、また、ロランC硫黄島を較正する沖縄の時計の動きは、RRL, TAO (東京天文台), ILOM (水沢緯度観測所) 及びTCL (台湾電波研究所) におけるロランC硫黄島の受信データにより十分監視されることになった。

第1表は上記の理由から第2図のBの結果を二部分に分けて求めたロランCに対するポータブル・クロックの



第3図 原器群の相互比較

第2表 原器群の相互比較結果

period	comparison	average $\mu\text{s}/\text{d}$	sd $\mu\text{s}/\text{d}$	$\Delta r(8)$ $\mu\text{s}/\text{d}$
75. 8.20-76. 7.30	6-8	+0.03741	0.0132	
"	5-8	-0.08776	0.0090	
"	3-8*	+0.02144	0.0107	
"	6-5	+0.12523	0.0089	
"	6-3*	+0.01566	0.0124	
"	5-3*	-0.10970	0.0092	
76. 9. 3-77. 1. 1	6-8	-0.00878	0.0090	+0.04619
"	5-8	-0.17280	0.0081	
"	6-5	+0.16405	0.0093	
76.10.23-77. 1. 1	4-8	-0.03861	0.0085	
"	4-5	+0.13547	0.0092	
77. 1. 1-77. 4. 3	4-8	+0.07167	0.0105	-0.11028
77. 1. 1-77. 2.20	5-8	-0.06522	0.0053	-0.10758
"	4-5	+0.13726	0.0110	

\* 76.4.1-4.11 の期間は除く

時刻差とその標準偏差 (sd) である。第1表の結果を見ると1974年以後は、それ以前に比し時刻差が極めて一定であり sd も改善されている。

この時刻差は当所において、現在、暫定的に採用している伝搬時間及び受信系の遅れ時間に起因すると考えられる。今後、当所における発信値の決定はポータブル・クロックの結果に合わせ、この時刻差は取り除くべきものである。

### 3. 原器群の平均レートとUTC (USNO) のレートとの比較

#### 3.1 原器群

第3図は1975年8月から1977年7月までの期間における原器群、つまり、セシウム原子時計 Cs 3, Cs 4, Cs 5, Cs 6, Cs 7, Cs 8 のレートの相互比較である。

第3図のAには、Cs 8 に対する各時計のレートが、また、第3図のBには、Cs 5 及び Cs 3 に対する各時計のレートが示されている。時計相互の時刻比較は毎日9時JSTに実施されるが、図ではいずれもその5日平均レート ( $\mu\text{s}/\text{d}$ ) が示されている。

1975年8月から1976年7月までの期間は、第3図の3-8, 5-8, 6-8及び6-5, 5-3, 6-3の関係からCs 3, Cs 5, Cs 6, Cs 8 のレートは一定とみなしうる。

1976年9月から12月の期間では、5-8, 6-8及び6-5の関係に着目し、Cs 6 のレートが一定とするとCs 5 の周波数が下がりCs 8 の周波数が上がったと判断される。Cs 8 のレートの変化量  $\Delta r(8)$  は6-8の関係から求めた。なお、この期間、Cs 3 及びCs 7 のレートには直線的な変化が見られる。

1977年1月から7月の期間では、Cs 8 及びCs 7 のレートは一定で、Cs 3 のレートにはやはり直線の変化が見られる。また、1月にCs 8 の周波数が下がっている。Cs 8 のレートの変化量は4-8, 5-8 の関係から求めた。

第2表は上記の結果を整理したものである。

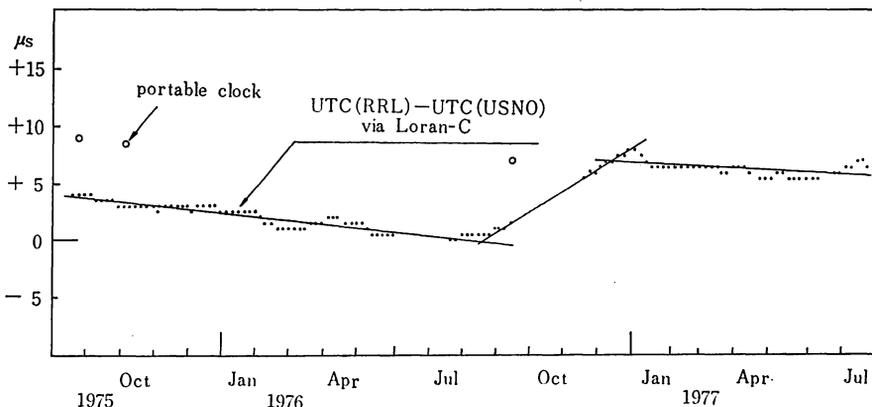
#### 3.2 最近のロランCによる時刻比較

1975年8月20日からUTC (RRL) を表す主時計はCs 4 からCs 8 に切り替えられた。

第4図は、つまり、主時計がCs 8 であるときのロランC硫黄島を仲介にしたRRLとUSNOの間の時刻比

第3表 最近のRRLとUSNOの時刻比較結果

period	$r(8)-r(\text{USNO})$ $(\mu\text{s}/\text{d})$	sd $(\mu\text{s}/\text{d})$
75. 8.20-76. 7.30	-0.01102	0.1873
76. 9. 3-77. 1. 1	+0.06123	0.0411
77. 1. 1-77. 7. 5	-0.00626	0.2574



第4図 最近のRRLとUSNOの時刻比較

較で、図には5日ごとにその値が示されている。実線は3.1に述べたCs8のレートの変化期間に対応して最小自乗法により傾向直線  $T=A+Bt$  をあてはめたものである。

第3表は、B項(USNOからみたCs8のレート)と傾向直線の周りのsdを示したものである。

なお、第4図に見られるようにロランC硫黄島は、1976年6月1日～7月15日及び9月16日～11月15日の期間、停波があった。

### 3.3 原器群の平均レート

1975年8月20日から1976年7月30日までの期間について、 $r(3)$ ,  $r(5)$ ,  $r(6)$ ,  $r(8)$  はセシウム原子時計Cs3, Cs5, Cs6, Cs8のレートを表し、 $r(\text{ave})$  を原器群、すなわちCs3, Cs5, Cs6, Cs8の平均レートと定義する。

$r(8)-r(3)$ ,  $r(8)-r(5)$ ,  $r(8)-r(6)$  の数値は第2表より求められる。

そこで、下式を解き

$$\begin{aligned} r(3)+r(5)+r(6)+r(8) &= 4r(\text{ave}) \\ r(8)-r(6) &= -0.03741 \\ r(8)-r(5) &= +0.08776 \\ r(8)-r(3) &= -0.02144 \end{aligned}$$

$$r(8)-r(\text{ave}) = +0.00722 \text{ を得る。}$$

$r(8)-r(\text{ave})$  は原器群、Cs3, Cs5, Cs6, Cs8の平均レートからみたCs8のレートである。

次に、上記の  $r(8)-r(\text{ave})$  には、前述(3.1)に示されたCs8のレートの変化量  $\Delta r(8)$  を加え、新しく  $r(8)-r(\text{ave})$  が決定される。この結果は、第4表の  $r(8)-r(\text{ave})$  の欄に示されている。

第4表 原器群の平均レートとUSNOのレートとの比較

period	$r(8)-r(\text{USNO})$ $\mu\text{s/d}$	$r(8)-r(\text{ave})$ $\mu\text{s/d}$	$r(\text{ave})-r(\text{USNO})$ $\mu\text{s/d}$	$\times 10^{-13}$
75. 8.20-76. 7.30	-0.01102	+0.00722	-0.01824	-2.1
75. 9. 3-77. 1. 1	+0.06123	+0.05341	+0.00782	+0.9
77. 1. 1-77. 7. 5	-0.00626	-0.05552	+0.04926	+5.7

### 3.4 $r(\text{ave})$ と $r(\text{USNO})$ の比較

第4表には、ロランCから決定された  $r(8)-r(\text{USNO})$  原器群から決定された  $r(8)-r(\text{ave})$  が示されている。

上記の結果から、 $r(8)$  を仲介として  $r(\text{ave})-r(\text{USNO})$ 、すなわち、UTC(USNO)のレートを基準としてみた原器群の平均レートを求めた結果は、第4表  $r(\text{ave})-r(\text{USNO})$  の欄に示されている。今回の比較では、 $5 \times 10^{-13}$  程度の結果が得られた。

## 4. 結 び

RRLとUSNOの時刻比較について、ポータブル・クロックによる方法とロランCによる方法の比較を行った結果、1974年以降については、両者の間に時刻差+5.56  $\mu\text{s}$ , sd 0.456  $\mu\text{s/d}$  の極めて安定した結果が得られた。

また、最近のロランCのデータを用い、主時計Cs8を仲介として原器群の平均レートとUTC(USNO)のレートとの比較の結果は、約  $5 \times 10^{-13}$  であった。この結果は、今後、原器群の充実、計算方法の改善などによって更に精度の向上が期待できる。

## 謝 辞

本報告をまとめるに当たり、平素御指導を頂く佐分利部長、時計比較データを提供された標準電波課小林主任研究官及び同課標準器係の方々、当研究室でロランC受信測定を担当された東吉夫氏(現宇宙開発事業団)並びに加藤清治氏(現標準電波課調査係長)に深謝致します。

## 参 考 文 献

- (1) USNO ;  
Daily Phase Values Series 4,  
No. 100~No. 547.
- (2) RRL ;  
Standard Frequency and Time Service  
Bulletin,  
Annual Report, 1969~1976.  
Monthly Report, No. 142~No. 148.

