

II-9 時刻同期系

佐藤得男* 栗原則幸** 相田政則*

(昭和59年7月3日受理)

1. ま え が き

原子時計並びに時刻同期技術の発達は、VLBI で要求される同期精度及び確度を独立同期で実現するに至り、基線長の飛躍的な延長の可能性をもたらした。すなわち、大陸間の観測局が、それぞれ、独立の時計で観測データに時間目盛を入れ、同時記録された磁気テープを持ちより、相関処理を行うシステムに発展してきた。

本、K-3型 VLBI システムでも、当然この独立同期を前提として、システム開発が行われた。

理想的には、基線の両端で使用される時計は、その周波数及び時刻が完全に一致していることが望ましい。しかし、このような状態を長期間にわたって維持することは、現在の原子時計をもってしても不可能である。

そこで、III. に述べられているように、期待される同期精度を $1 \mu\text{s}$ 以内とし、相関処理を行うことにしている。このため、電波星からの受信信号と同時記録される時間目盛には、短期安定度のすぐれた水素メーザが、又地上局相互の時刻同期用には長期安定度の良いセシウム原子時計を用いて、必要な安定度と同期精度を得ることにしている。

今回の VLBI 実験では、5か国10局以上の参加が予定されている。このため地上局相互の時刻同期は、それぞれの国の標準時保時機関と同期し、保時機関相互の国際時刻比較網を利用するのが、最も基本的な考え方であり、現実的であろう。したがって、鹿島局の場合も時刻は、電波研究所 (RRL) が設定維持している協定世界時 UTC (RRL) と結ばれている。

ここでは、国際時刻比較の現状と、本所一鹿島局間の時刻同期について述べる。

2. 国際時刻比較の現状

国際原子時 (TAI) は、各国の原子時計の動きを平均化して決められており、現在、最も均一な時系と考えられている。又、協定世界時 (UTC) は、TAI に“うるう秒”調整をほどこし、天文時 (UT1) との差が0.9秒以上にならないように管理運用されている時系で、

TAI とはちょうど整数秒だけ異なる。

この、TAI あるいは UTC は、各国保時機関から報告される国際時刻比較データをもとに、国際報時局 (BIH) により平均化及び決定の作業が行われている。

現在、欧米諸国間には、互に結合したロランC網があって、これらの電波を仲介に、保時機関相互の時刻比較が精度良く (約 $0.1 \mu\text{s}$) 行われている⁽¹⁾。

同一の送信局から発射されたロランC電波を、それぞれの保時機関で受信し、原子時計と比較したデータを交換することにより原子時計相互の動きが求められる。時刻差の絶対値は、この結果を受信点の地理座標から計算した伝搬遅延時間で補正して求めるが、随時原子時計を運搬して較正する方法がとられている。

しかし、アジア地域で利用できるロランCは、欧米地域のロランC網とは直接むすばれておらず、比較可能地域は日本周辺及びその南方海上に限定されている。したがって、我が国を始めアジア地域の原子時計は、国際原子時の決定には十分寄与することができなかった。

この問題を解決する全世界的時刻比較法として期待されているのが GPS (Global Positioning System) 衛星とこの VLBI である。

GPS は、 120° ずつ隔った3つの軌道に、それぞれ6個、合計18個の衛星を配置し、地上のあらゆる地点から常時4個以上の衛星の信号が受信でき、即時に受信地点の位置を数メートルの高精度で決定しようとするもので、現在、米国国防省が開発中のものである⁽²⁾。

この GPS 衛星には、セシウム、又はルビジウム原子時計が搭載されており、それを基準とする測距信号や軌道情報等が送信されている。又、この原子時計の時刻は、米国海軍天文台 (USNO) の保持する協定世界時 UTC (USNO) で較正されており、受信点の位置と GPS 衛星の軌道がわかれば時刻比較が可能となる。1984年4月現在で5個の衛星が運用されており、うち4個が USNO を始め BIH、米国標準局 (NBS)、西独国立物理工学研究所 (PTB) 等の保時機関で時刻比較に利用されている。RRL でも目下受信機の整備を進めており、今年 (1984) 中ごろにはこの GPS による国際時刻比較に参加できる見通しである。

GPS による時刻比較精度は、比較方法や利用できる

* 周波数標準部 標準電波課

** 鹿島支所 第三宇宙通信研究室

軌道情報コードの種類にもよるが、10 ns~100 ns が得られるとされている。

VLBI による時刻比較は、VLBI 技術を電波天文、測地などの分野に利用するのは逆の利用法ということになる。つまり、電波源及び基線長に関する量をいったん既知量として取り扱えば、地上局間の時刻差が逆に求められるもので、比較精度は1 ns あるいはそれ以上の高精度が期待できる。

この他に、現在最も信頼性(確度)の高い方法として、運搬原子時計による直接比較があり、日本ではUSNO によって1年に1~2回実施され、前記ロランCやGPS 等による比較の校正にも利用されている。比較精度は、原子時計の安定度や一回の比較に要した移動回数にもよるが、ほぼ0.1 μ s~0.2 μ s である。

3. UTC (RRL) と UTC (USNO) の比較

VLBI 実験で、データ処理に最低必要な同期精度1 μ s を得るにはGPS の利用で十分であり、RRL でも現在準備中であることは2. で述べたが、ここでは、ロランC電波仲介と運搬原子時計の二つの方法で比較した、日米両国の標準時、UTC (RRL) と UTC (USNO) の動きを見てみたい。

3.1 ロランC電波による比較

ロランC電波は、本来双曲線航法用の電波で、主局と2~4局の従局からなるチェーンで構成されており、主局と従局、及び従局と従局の電波の到達時間差の組合せから受信点の位置決定を数百m~数km の精度で行うものである。

この主局の発信パルスは、そのチェーンによって決められた一定の時間間隔で、UTC (USNO) の秒時刻と一致するようにUSNO によって運用されており、時刻比較に利用することができる。

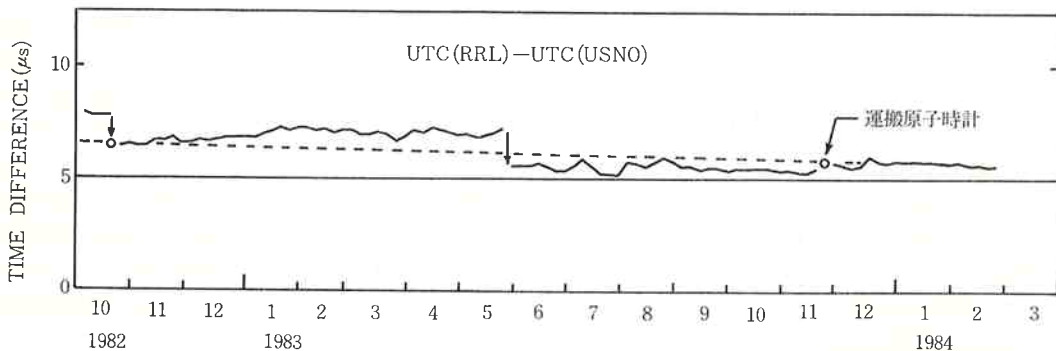
我が国で受信できる北西太平洋チェーン(主局硫黄島)の場合は、パルスの繰り返し周期が99.7 ms で、そのた

め、16分37秒ごとにUTC (USNO) と一致し、その一致時刻(Time of Coincidence ; TOC) のテーブルはUSNO から公表されている。したがって、UTC (RRL) でこのUTC (USNO) と一致する時刻のロランCのパルスの受信時刻を測定し、伝搬遅延時間及び受信システムの遅延量を差し引けば、UTC (RRL)-UTC (USNO) の時刻差が求められる。しかし、UTC (USNO) と TOC (IWO-JIMA) の同期精度は公称5 μ s であり、後にUSNO から、この較正值が公表される。第1図は、RRL の受信測定とUSNO 公表の較正值を用いて求めたRRL とUSNO の時刻差である。途中の時刻ステップは、USNO の較正值決定方法に原因するもので、実際は点線のような動きをしていたと見るべきであろう。なぜならば、USNO は米国のロランCモニタ施設の他にRRL、東京天文台、計量研究所等のロランC受信データから、TOC (IWO-JIMA) の動きを推定し、較正值として発表しているもので、更に3.2で述べるように年に1~2回上記の各機関のUTC と運搬原子時計で比較した結果で最終校正を行っているためである。

このような方法で運用されているロランC (IWO-JIMA) 電波による比較の精度は、運搬原子時計で較正された直後で0.1~0.2 μ s、それ以後は時間の経過と共に悪くなり1年後には2~3 μ s 程度と考えられるので、VLBI の時刻同期手段として適当とはいえない。

第1表 運搬原子時計によるRRL とUSNO の時刻比較結果

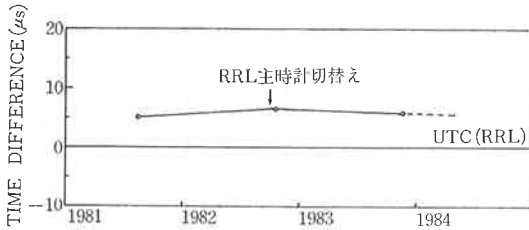
比較年月日	UTC (RRL)-UTC (USNO)	
21. Aug. 1981	5.0 μ s	$\pm 0.1 \mu$ s
18. Oct. 1982	6.5 μ s	$\pm 0.2 \mu$ s
20. Nov. 1983	5.80 μ s	$\pm 0.04 \mu$ s



第1図 ロランC電波仲介で求めたUTC (RRL) とUTC (USNO) の時刻差

3.2 運搬原子時計による比較

第1表及び第2図は、USNOの運搬原子時計による日米両国の標準時、UTC(RRL)—UTC(USNO)の比較結果である。



第2図 運搬原子時計による時刻比較結果

1982年10月1日に、UTC(RRL)を発生維持している主時計の切替えを実施したので、UTC(RRL)のレートが変っている。この主時計切替え後の、1982年10月と1983年11月の比較では、両者の時刻差は0.7 μs 近づいたことになり、これを平均周波数差に換算すると 2×10^{-14} である。

両国の原子時計の周波数がこのまま安定に維持されるならば、VLBIで要求される同期精度1 μsは、次の運搬原子時計で直接比較が行われるまで十分確保できるであろう。

しかし、実用型セシウム原子時計の公称長期安定度は、高安定型でも 3×10^{-12} (ビーム管の寿命期間) であり、仮りに 1×10^{-12} の変化があると、時刻差は1年間で

$30 \mu s$ 以上にも達する。したがって、運搬原子時計で直接比較された時点から1年経過後の推定時刻誤差を $1 \mu s$ 以内とするためには、両者の原子時計の周波数安定度を 3×10^{-14} 以内に保つ必要がある。

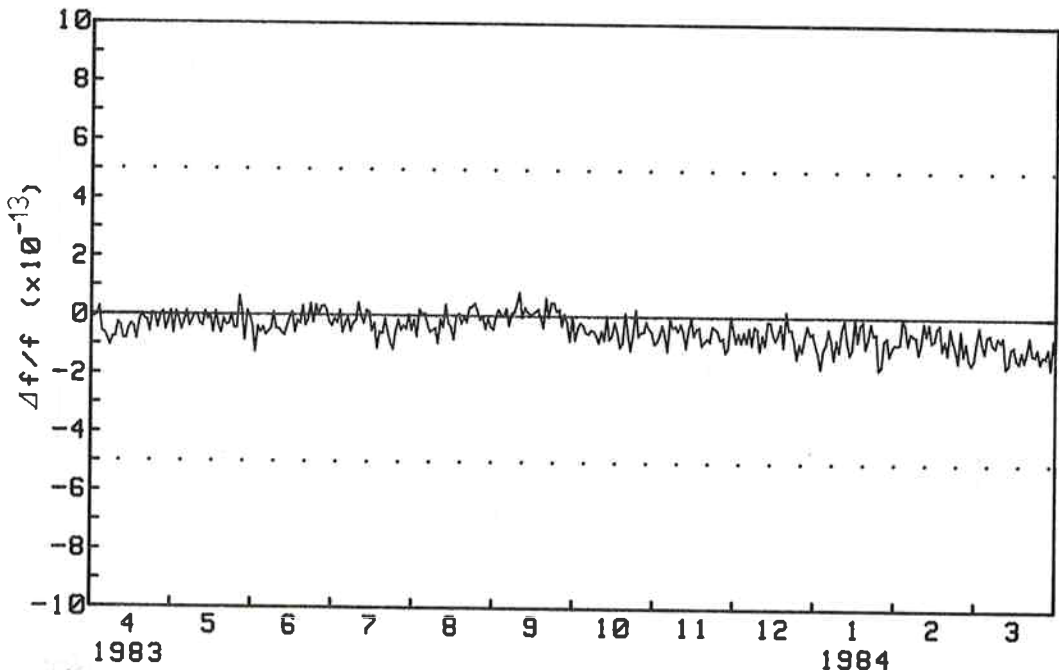
RRLでは、TAI決定法と同様に、複数の原子時計の動きを平均し、この平均原子時計でUTC(RRL)を監視する方法を採用している。1978年から公表を開始した平均原子時計TA(RRL)は、RRLの5~6台の原子時計の動きを、独自に開発したアルゴリズム⁽³⁾を用いて荷重平均したものである。しかし、このTA(RRL)は、実在しない計算上のタイムスケールのため、日常のUTC(RRL)の高精度監視には適さない。そこで、このTA(RRL)と同じ考え方で実時間合成原子時(RTA)の発生システムを開発し、UTC(RRL)と常に比較を行っている。第3図はこの比較結果である。

このような方法を用いても、UTC(RRL)の周波数の変動を 10^{-14} の桁で把握していくことはそれほど容易なことではない。したがって同期精度1 μsを得るためには、運搬原子時計による直接比較の間隔を短くするか、GPSの利用などを考慮する必要がある。

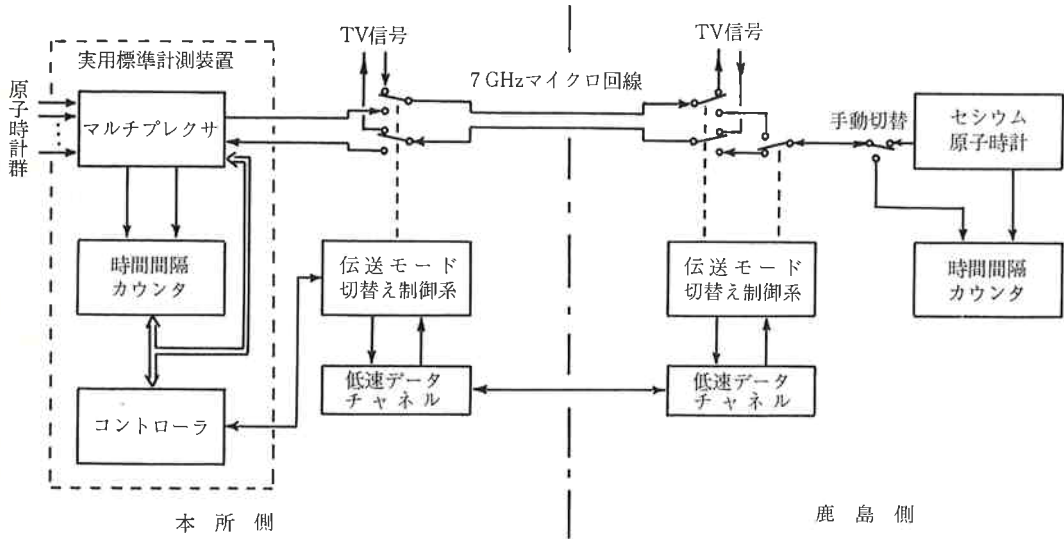
4. UTC(RRL)とUTC(KASHIMA)の同期

4.1 同期方法

鹿島局の時計をUTC(RRL)に0.1 μs程度の確度で同期することは、現在の時刻同期技術からすればさほど



第3図 実時間合成原子時(RTA)に対するUTC(RRL)の周波数偏差



第4図 本所—鹿島間時刻比較測定系

難しいことではない。その手段としては、ロランC電波仲介、運搬原子時計の他に、TV同期パルス仲介法、広帯域マイクロ回線利用、人工衛星の利用等がある。

本所—鹿島局間には、既設の実験用7GHzマイクロ回線があり、これと運搬原子時計を併用して時刻同期を行っている。このため、7GHz無線端局装置の一部改造を行い、第4図のような測定系を構成している。

回線の切替え、及び測定は、本所の実用標準計測装置の定時測定の中で1日に6回、4時間間隔で自動的に行われている。

伝送回線の遅延量は、運搬原子時計で測定すると共に随時手で回線を切替え、相互に秒信号を送受信してチェックを行っている。

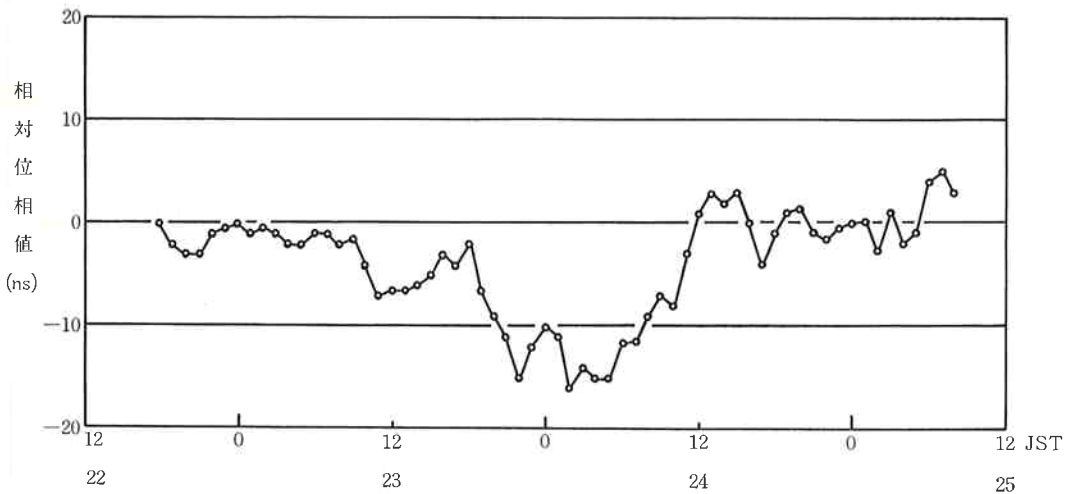
4.2 マイクロ回線の安定度

この7GHzマイクロ回線は、帯域5MHzの高速データ(又はTV)回線1回線と、24回線の低速データ回線があり、秒信号の伝送には、高速データ回線を使用している。

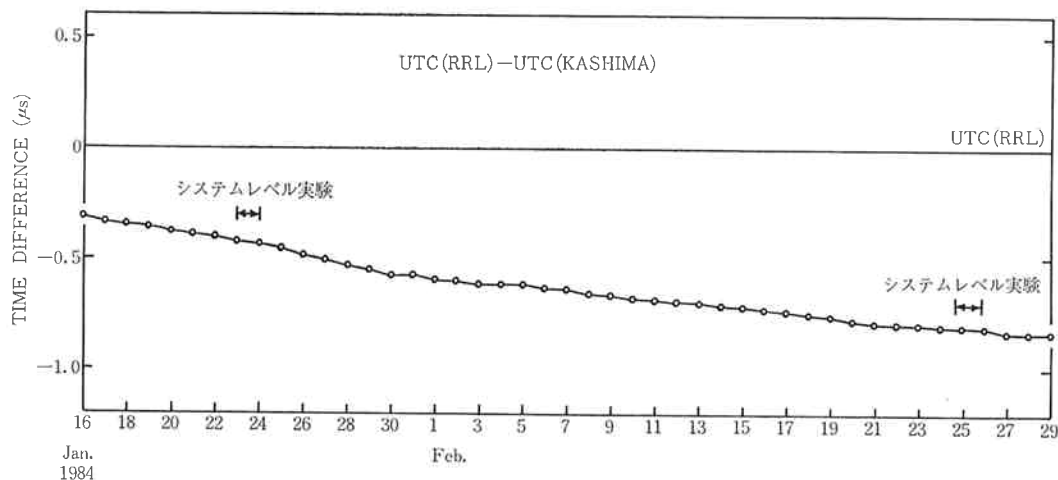
本所で、この回線に5MHzを送出し、鹿島側で折り返した信号と、送り出しの信号を位相比较し、回線の遅延安定度を調べた結果が第5図で、約3日間の測定期間中の変動は往復で30ns以下であった。

4.3 同期精度

鹿島局に設置したVLBI用セシウム原子時計は、あらかじめ本所において約1週間UTC(RRL)と直接周波数及び時刻比較を行い、その状態で運搬設置された。



第5図 本所—鹿島折り返し7GHzマイクロ回線遅延変動(5MHz)



第6図 協定世界時 UTC (RRL) に対する鹿島局セシウム原子時計の動き

これによって、7 GHz マイクロ回線の遅延量を決定すると共に、相互に秒信号を送受して測定した遅延量と比較を行った。又、その後行った運搬原子時計による遅延量とも、それぞれ10~20 ns で一致しているので、本所一鹿島局間の時刻同期精度は ± 20 ns が得られているものと考えられる。

第6図は最近の UTC (RRL) に対する鹿島局セシウム原子時計の動きで、これから1984年1月及び2月に実施された日米システムレベル実験時、の日米両局の時刻差を推定し、相関処理が支障なく行われた。

5. む す び

国際時刻比較の現状と K-3 型 VLBI 観測システムの時刻同期系について述べた。

本、K-3 型 VLBI 観測システムを用いて、日米間で実験を行う場合に、期待される同期精度 $1 \mu\text{s}$ を得る手段としては、現在のところ運搬原子時計のみであるが、電波研究所では、GPS による時刻比較システムを開発中であり、日米間本実験には利用できる見通しである。

又、当所で独自に設定維持される協定世界時 UTC (RRL) は、複数のセシウム原子時計による合成原子時により管理されているので、運搬原子時計による直接比較がこれまでのように1年に1~2回の頻度で行われる

ならば、上記の同期精度維持は達成できるものと思われる。

VLBI 技術の応用としての、数ナノ秒を目標とする高精度日米時刻比較実験も予定されており、この実験が定期的実施されれば、時刻同期はより確実なものとなるであろう。

終りに、本報告をまとめるにあたり、御指導いただいた、小林三郎標準電波課長並びに吉村和幸標準値研究室長に感謝の意を表します。又、鹿島支所第三宇宙通信研究室の方々には有意義な討論と助言をいただき、ここに深謝いたします。

参 考 文 献

- (1) Cyrus E. Potts and Bernard Wieder "Precise Time and Frequency Dissemination via the Loran-C System" Proc. IEEE Vol. 60, No. 5 May 1972 pp. 530-539.
- (2) Spilker, J. J., Jr.; "GPS Signal Structure and Performance Characteristics", Journal of the Navigation, 25, 2, pp. 121-146, 1978.
- (3) 今江理人; "平均原子時 TA(RRL) の決定", 電波季, 29, 149, Feb. 1983, pp. 193-199.