

## 4-8-2 データ処理・解析

### 4-8-2 Time Comparison Equipment for ETS-Ⅷ —Data Processing, Analysis and Capability of Time Comparison—

中川史丸 今江理人 高橋靖宏 木内 等 後藤忠広 藤枝美穂  
NAKAGAWA Fumimaru, IMAE Michito, TAKAHASHI Yasuhiro, KIUCHI Hitoshi,  
GOTOH Tadahiro, and FUJIEDA Miho

#### 要旨

2004年打ち上げ予定の技術試験衛星Ⅷ型(Engineering Test Satellite Ⅷ:ETS-Ⅷ)には、衛星測位技術の基礎研究のために、日本で初めて原子時計が搭載される。通信総合研究所(以下、「CRL」という。)では、衛星搭載原子時計と地上原子時計の時刻比較を行うことを目的とした高精度時刻比較装置(TCE:Time Comparison Equipment)の開発を行ってきた。TCEはTCE地球局との間で、双方向時刻比較による高精度時刻比較を行い、原子時計の間の時刻差を計測する。また、TCE、TCE地球局には、電離層遅延量推定、受信・送信機内遅延時間計測の機能を有しており、これらのデータを用いた補正を行うことで、より高い精度での時刻比較が期待される。TCEのEM(Engineering Model)を用いた地上試験の結果から、TCEはコード位相でnsオーダー、搬送波位相でpsオーダーの計測精度を有しており、双方向時刻比較、電離層遅延補正、受信・送信機内遅延補正のデータを処理することで、衛星搭載原子時計との時刻比較が高精度で行えることを確認した。

Engineering Test Satellite Ⅷ (ETS-Ⅷ) is planning to be launched in 2004 for fundamental studies on satellite positioning technologies and is the one first to be installed a highly precise cesium clock. To measure the clock offset between the satellite and the TCE Earth station, Time Comparison Equipment (TCE) has been developed in the CRL. The TCE will be used to improve TWFT (Two Way Time and Frequency Transfer) and to measure both code and carrier phases. It is possible to compare two clocks with high precision. Moreover, TCE and TCE Earth stations have abilities to remove the delay by terrestrial ionosphere or in the receivers and transmitters.

From the examinations using TCE-EM (Engineering Model), we confirmed that TCE is able to measure the phases of clock with precision of a few nanoseconds by code observation and of a few picoseconds by carrier phase observation. Using these results, we estimated errors of time correction and found that TCE can perform on the TWFT with high precision.

#### [キーワード]

ETS-Ⅷ, 衛星測位, 時刻比較, 原子時計  
ETS-Ⅷ, Satellite positioning, Time transfer, Atomic clock

## 1 はじめに

2004年打ち上げ予定の技術試験衛星Ⅷ型(Engineering Test Satellite Ⅷ:ETS-Ⅷ)は移動体通信技術、高精度衛星測位技術など今後の宇宙

開発に必要とされる先端的な基盤技術の開発を目的に開発された衛星である[1]。測位ミッションとして、我が国で初めて原子時計(HAC:High Accuracy Clock)が搭載され、衛星測位システムの基盤技術の習得を行う。通信総合研究所(以下、

「CRL」という。)では地上の原子時計と、衛星搭載原子時計との時刻比較を行う目的で、高精度時刻比較装置(TCE:Time Comparison Equipment)の開発を行い、衛星軌道上での原子時計の性能評価を行う予定である。

TCEは地上に設置されるTCE地球局との間で、双方向時刻比較による衛星搭載原子時計と地上原子時計との間の時刻比較を行う。また、TCE、TCE地球局はそれぞれのデータを同時に処理することにより、時刻比較の際に問題となる機内遅延の変動、電離層による遅延を補正できるように設計されており、補正を行うことでより高い精度での時刻比較が期待される。TCE、TCE地球局で取得したデータは、地球局に付随するデータ処理部に送られ、これらの補正、時刻比較の処理が行われる。

本稿では、2でTCEの構成及び時刻比較の原理、3でデータ処理部における処理の詳細について、4ではTCE-EMを用いた試験結果から期待される時刻比較の精度について紹介する。

## 2 双方向時刻比較

### 2.1 構成

TCE及びTCE地球局の構成図を図1、2に示す。時刻比較には、GPSのC/Aコードと同じ擬似雑音(PRN:Pseudo Random Noise)符号を用いた拡散変調による測距信号を使用し、搬送波位相及びコード位相の2段階で計測を行う[2]。送受信にはS-bandを使用するが、L-bandでの衛星から地球局への片方向の通信も行う。衛星から地球局への送信信号は、HAC内の衛星搭載原子時計を基準として生成される。

TCEはHACから供給される10.23MHz及び1kppsを基準として動作し、S-band受信、S-band受信校正及びS-band送信校正の各信号について、それぞれのコード位相、搬送波位相を計測する。受信校正信号はTCEで生成され、アンテナフロントエンド部の方向性結合器により受信信号に重畳させ、受信機内遅延変動の計測を行う。送信校正信号は、S-band送信信号をアンテナフロントエンド部の方向性結合器で折り返し、送信機内遅延変動を計測する。これらの校正信号の計測値は、機内遅延補正時に使用する。

TCE地球局は、UTC(CRL)を基準として動作し、衛星からのS-band、L-band測距信号の受信、計測、S-band測距信号の生成、送信を行う。TCE地球局ではTCEと同様のS-band受信校正、S-band送信校正のほかに、L-band受信校正信号の計測も行う。これらの校正信号は、機内遅延補正の際に使用するほか、電離層遅延補正を行う際にも使用する。

TCEによる3信号の計測データ(S-band受信、S-band受信校正、S-band送信校正)、TCE地球局による5信号の計測データ(S-band受信、S-band受信校正、S-band送信校正、L-band受信、L-band受信校正)を使用し、データ処理部で双方向時刻比較、補正処理を行う。データ処理部での補正により、コード位相で数ns、搬送波位相では、波数不確定の問題をコード位相の情報から推定することにより、数psの精度での時刻比較を目指す。

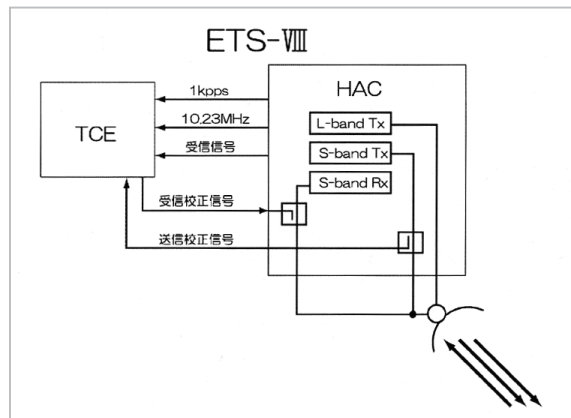


図1 ETS-Ⅷ搭載TCE構成図

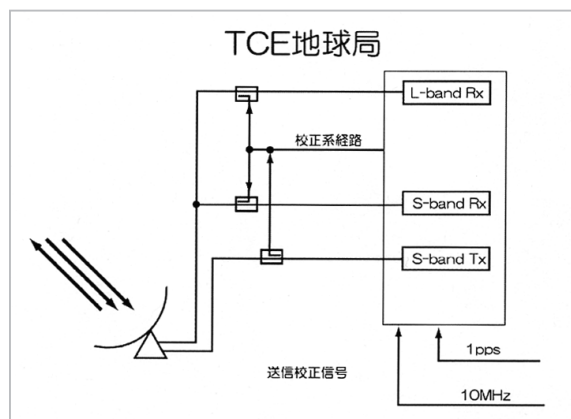


図2 TCE地球局構成図

## 2.2 時刻比較の原理

最初にコード位相での時刻比較を考える。TCE 及び TCE 地球局で計測したコード位相をそれぞれ  $C^s$ 、 $C_e$  としたとき、以下の式で表される[3]。

$$C^s = \tau_g + dt^s - dt_e + I_u + T + d_{eTx} + d_{Rx}^s \quad (1)$$

$$C_e = \tau_g + dt_e - dt^s + I_d + T + d_{Tx}^s + d_{eRx} \quad (2)$$

ここで、

$\tau_g$ : 衛星、地球局間の距離に依存した伝搬時間

$dt^s, dt_e$ : 衛星搭載原子時計及び UTC (CRL) のずれ

$I_u, I_d$ : uplink、downlink それぞれの電離層による遅延時間

$T$ : 対流圏による遅延時間

$d_{Rx}^s, d_{Tx}^s$ : 衛星受信・送信機内遅延時間

$d_{eRx}, d_{eTx}$ : 地球局受信・送信機内遅延時間

である。TCE では位相を計測しているため、波数不確定性を持つが、コードの周期は 1ms と長く、軌道情報から波数を推定することが可能であり、上式では省略している。ここで、上の二つの式の差を計算すると、

$$C^s - C_e = 2(dt^s - dt_e) + (I_u - I_d) + (d_{Rx}^s - d_{Tx}^s) - (d_{eRx} - d_{eTx}) \quad (3)$$

となり、衛星地球局間の距離に依存する伝搬時間  $\tau_g$ 、対流圏による遅延時間  $T$  が相殺される。(3) 式には衛星搭載原子時計と UTC (CRL) の時刻差のほかに、uplink、downlink の周波数が異なることによる電離層遅延の差、衛星及び地球局受信・送信機内遅延差の項が残っており、これらを除去する必要があるが、これについては、3 で述べる。

搬送波位相 ( $\Phi^s, \Phi_e$ ) は、コード位相と同様に以下の式で表される。

$$\Phi^s = \tau_g + dt^s - dt_e - I_u + T + d_{eTx} + d_{Rx}^s + \Phi^s(0) \quad (4)$$

$$\Phi_e = \tau_g + dt_e - dt^s - I_d + T + d_{Tx}^s + d_{eRx} + \Phi_e(0) \quad (5)$$

搬送波位相の電離層遅延は、群遅延ではなく、位相遅延になるため符号が負になる。搬送波の場合、その周期が約 400ps と小さいため、波数不確定性による初期位相の項 ( $\Phi^s(0), \Phi_e(0)$ ) が残る。コードの時と同様に二つの式の差を計算する。

$$\Phi^s - \Phi_e = 2(dt^s - dt_e) - (I_u - I_d) + (d_{Rx}^s - d_{Tx}^s) - (d_{eRx} - d_{eTx}) + (\Phi^s(0) - \Phi_e(0)) \quad (6)$$

コードと搬送波で、電離層遅延差、機内遅延差を取り除くことができれば、計測する時刻差 ( $dt^s - dt_e$ ) は同じであることから、搬送波の初期位相 ( $\Phi^s(0) - \Phi_e(0)$ ) はコード位相から推定することが可能になる。また、1 回の実験内でサイクルスリップが起きなければ初期位相は一定として、実験中の波数を求めることができる。

## 3 データ処理

双方向時刻比較では、それぞれの局で取得したコード、搬送波位相の差分を計算することで、幾何遅延や対流圏による遅延の影響を相殺できるが、送受信周波数の違いによる電離層遅延、受信・送信機内遅延は残ってしまう。TCE、TCE 地球局では、取得したデータを元に、これらの遅延量を除去、補正することが可能である。TCE、TCE 地球局で計測したデータは、データ処理部で、補正、時刻比較の処理を行う。ここでは、データ処理部で行われるデータ処理の手

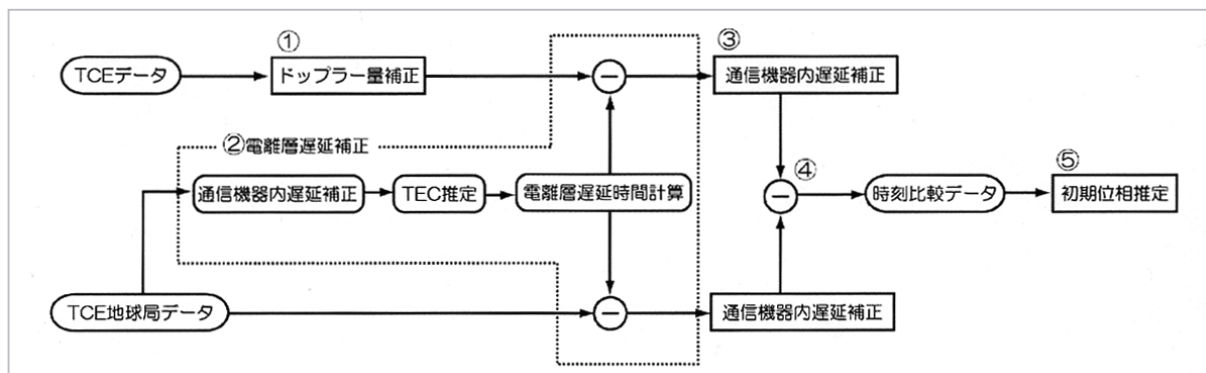


図3 データ処理の流れ



順について、順を追って説明していく(図3)。

①ドップラー量補正

TCEでは測距信号をIとQの成分に分け、1秒間の積分値を計測し、その  $\tan^{-1}$  から搬送波位相を求める[2]。このため1Hzを超えるようなドップラー周波数の偏移が生じたとき、積分値は0に近くなるため搬送波位相を計測することが難しくなる。そこで、TCE地球局ではドップラーを打ち消し合うように測距信号の周波数を補正して送信するが[4]、TCEでは補正後の位相を計測することになり、補正した分の位相を元に戻す処理が必要となる。時刻  $t$  における地球局で補正した周波数を  $\delta f(t)$  とすると、ドップラー補正による位相  $\phi(t)$  は以下の式で計算できる。

$$\phi(t) = \int_0^t \delta f(\tau) d\tau \quad (7)$$

TCE地球局では、DMTD(Dual Mixer Time Difference)[5]を使用して、ドップラー周波数補正前後の位相差  $\phi(t)$  を高い精度で計測する予定で、このデータを元に補正を行う。

②電離層遅延補正

電離層による群遅延及び位相遅延  $I(s)$  は搬送波周波数  $f(\text{Hz})$  を用いて以下の式で表される。

$$I = \pm \frac{1.345 \times 10^{-7}}{f^2} \int_L N ds \quad (8)$$

符号が正の時は群遅延、負の時は位相遅延を表す。ここで、 $N(\text{m}^{-3})$  は電子密度であり、右辺の積分は、電子密度の経路上における積分を表し、TEC(Total Electron Content)と呼ばれている。TCEではuplinkとdownlinkの周波数が異なるため、電離層による遅延量が異なり、双方向時刻比較の際にこの影響が残る(表1)。また、コード位相と搬送波位相では、群遅延と位相遅延の違いから符号が異なるため、初期位相を求める際に問題となる。

表1 uplink, downlink 周波数での、電離層遅延時間(天頂方向)

TEC	電離層遅延時間	
	太陽活動度極大期日間 $1 \times 10^{18}(\text{m}^{-2})$	太陽活動度極小期夜間 $3 \times 10^{16}(\text{m}^{-2})$
uplink (2656.390MHz)	19.0(ns)	0.57(ns)
downlink (2491.005MHz)	21.6(ns)	0.65(ns)
差分	2.6(ns)	0.08(ns)

TCE地球局ではS-bandとL-bandの2周波で測距信号の到達時刻を計測していることから、到達時刻差のデータを用いTECを推定することができる。この段階では、搬送波の初期位相は分からないため、TECの推定にはコード位相を使用する。TCE地球局で計測されるS-band及びL-bandの到達時刻差  $C_{S-L}$  は以下のように表される。

$$C_{S-L} = (I_{Sd} - I_{Ld}) + (d_{STx}^s - d_{LTx}^s) + (d_{SeRx} - d_{LeRx}) \quad (9)$$

右辺第2項はHACのS-band、L-band送信機内遅延差、第3項はTCE地球局のS、L-band受信機内遅延差である。TCE地球局ではS-band、L-bandそれぞれの受信校正系の計測データから、次節に述べる機内遅延補正と同様の方法を用い、受信機内遅延差を計算できる。一方、衛星側ではL-bandの送信校正系を持っていないため、正確な補正はできないが、あらかじめ計測しておいたHAC内での遅延差を、一定の値として補正する。補正を行うことにより、電離層によるS-band、L-band遅延差  $\hat{C}_{S-L} = (I_{Sd} - I_{Ld})$  が分かり、S-band、L-bandの搬送波周波数  $f_S(\text{Hz})$ 、 $f_L(\text{Hz})$  から、TEC( $\text{m}^{-2}$ )は次式で計算できる。

$$TEC = \frac{\hat{C}_{S-L}}{1.345 \times 10^{-7}} \times \frac{f_S^2 f_L^2}{f_S^2 - f_L^2} \quad (10)$$

ここで求めたTECを基に、各周波数での遅延時間を計算し補正することで、電離層による遅延を取り除く。

③通信機器内遅延補正

次にTCE、TCE地球局それぞれの受信機及び送信機内遅延補正を行う。S-bandではTCE、TCE地球局とも送信校正信号、受信校正信号を計測しており、それぞれの差を計算することで(3)、(6)式の  $d_{Rx}^s - d_{Tx}^s$ 、 $d_{eRx} - d_{eTx}$  を計算でき、受信・送信機内遅延の影響を取り除くことができる。

校正系の概念図を図4に示す。送信信号はアンテナフロントエンドの方向性結合器で分配され、送信校正信号として校正系経路を通りTCEに戻る。一方、受信校正系信号はTCE内部で生成され、校正系経路を通り、同じく方向性結合器で受信信号に重畳されTCEに戻る。TCE地球局でも同様の校正系を有している。校正系経路は、地球局では一本のケーブルであり、送信校正系

と受信校正系は同じ経路を通る。TCEでは、異なるケーブルを通るが、同じ箇所を配線していることから、その経路長は同じであるとする。ここで、送信機内遅延を  $d_{Tx}$ 、受信機内遅延を  $d_{Rx}$ 、校正系経路での伝搬時間を  $\alpha$  とすると、

送信校正系及び受信校正系で計測される時刻 ( $T_{CTx}$ 、 $T_{CRx}$ ) は以下の式で表される。

$$T_{CTx} = d_{Tx} + \alpha \quad (11)$$

$$T_{CRx} = d_{Rx} + \alpha \quad (12)$$

差を取ると校正系経路での伝搬時間が打ち消され、

$$T_{CRx} - T_{CTx} = d_{Rx} - d_{Tx} \quad (13)$$

となり、受信機内遅延、送信機内遅延の差が計算でき、受信・送信機内遅延の影響を取り除くことができる。

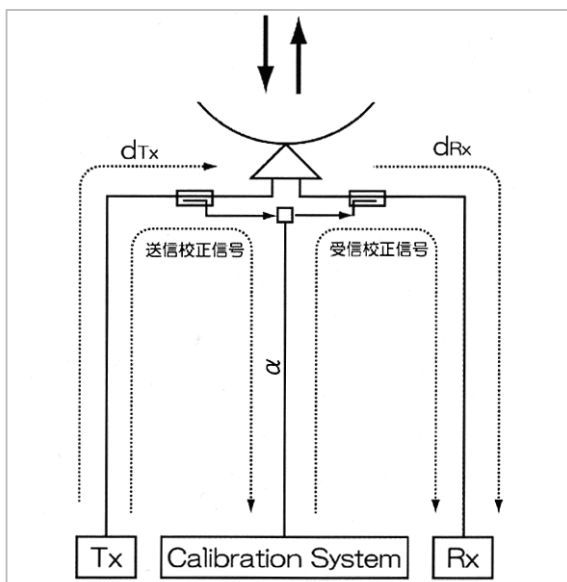


図4 校正系の概念図

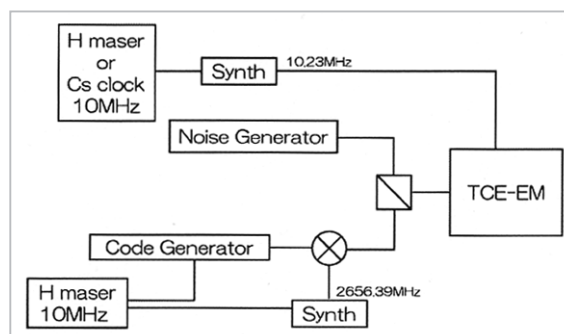


図5 試験ブロック図

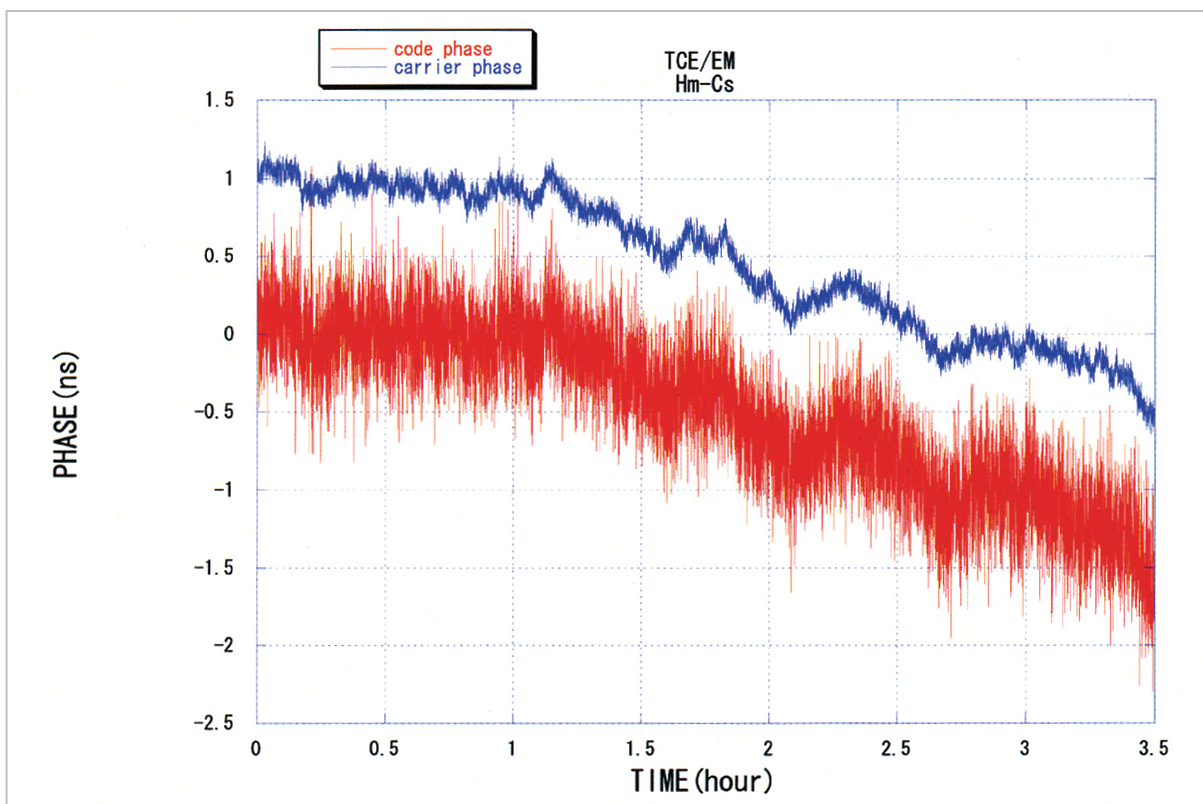


図6 TCE-EMを用いた水素メーザー、セシウム原子時計の時刻比較試験結果

赤がコードによる計測、青が搬送波による計測。

④時刻比較、⑤搬送波初期位相推定

補正したTCE、TCE地球局データの差分を求め、衛星搭載原子時計とUTC(CRL)の時刻差が決まる。搬送波位相の差分データには、初期位相の項が残っているが、いずれのデータも、計測する時刻差の情報は同じであることから、それぞれ補正したコード位相と搬送波位相の差分から、搬送波位相初期位相の推定を行う。これにより、搬送波位相での時刻比較が可能となる。

## 4 時刻比較精度

本章ではコード及び搬送波位相の計測精度から、実際の実験時に期待される補正及び時刻比較の精度を考えていく。

### 4.1 TCEの計測精度

TCEのコード及び搬送波位相の計測精度を調べるため、TCEの技術試験モデル(EM:

Engineering Model)を用い、図5に示す構成で試験を行った。試験では、測距信号の基準信号に水素メーザー原子時計、TCEの基準信号に同じ水素メーザー原子時計又はセシウム原子時計を用いた。この試験では、装置内遅延及び経路長の時間変化がほとんどないことから、各基準信号が同じ場合はTCE-EMの計測精度を、水素メーザー原子時計とセシウム原子時計の場合は各時計の差を相対的に計測していることになる。

TCEの基準信号にセシウム原子時計を用いた時に計測されたコード位相、搬送波位相の結果を、図6に示す。t=0でのそれぞれの初期値を0、1nsとして表示している。コード位相と搬送波位相が同じ変化を示しており、搬送波位相ではセシウム原子時計の分散に近い数10psオーダー、コード位相でもnsオーダーの精度を有していることが分かる。

図7に図6の試験時のコード位相及び搬送波位相の安定度、搬送波位相計測でのシステム安定度、HAC原子時計の安定度を示す。搬送波位相

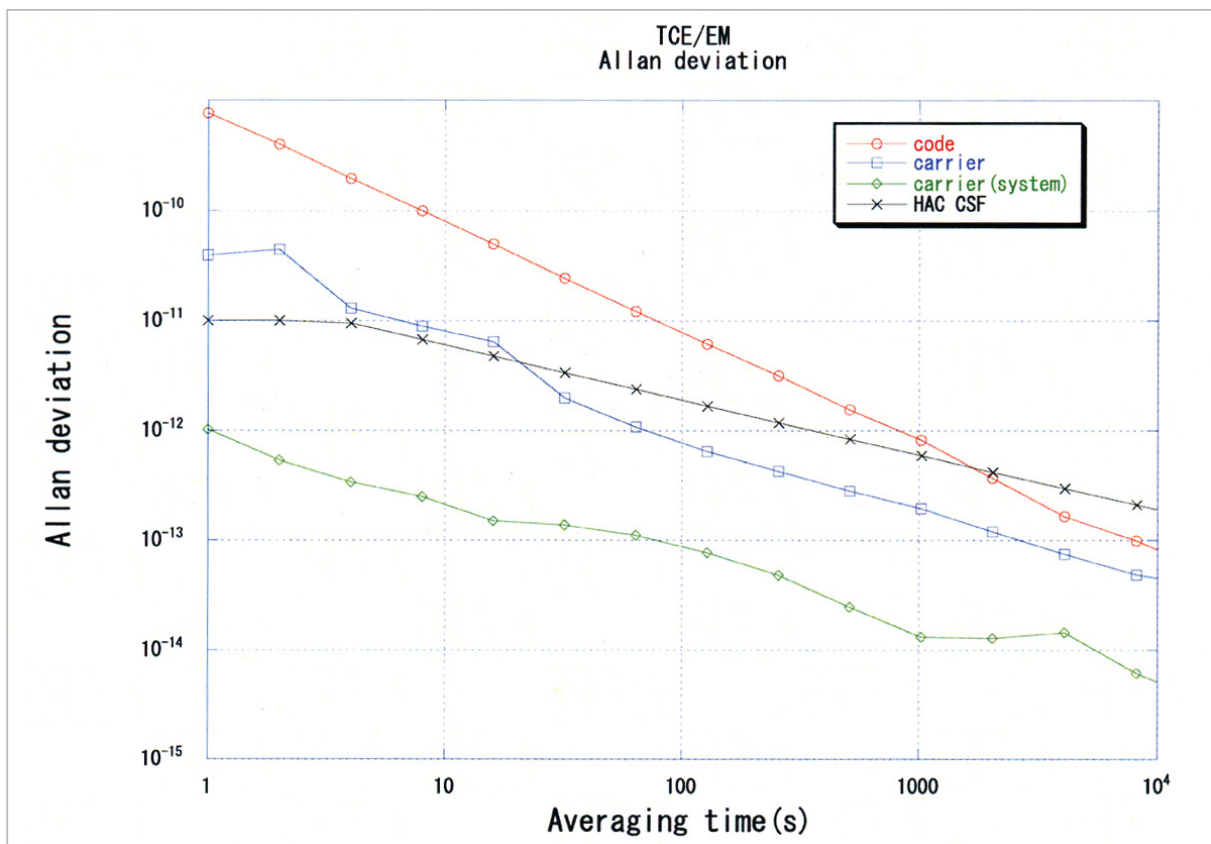


図7 水素メーザー、セシウム原子時計の時刻比較によるアラン分散

それぞれコード位相(赤)、搬送波位相(青)。参考に搬送波位相計測のシステム安定度(緑)、衛星搭載原子時計安定度(黒)をプロットしてある。



での計測では、1秒でのシステムの安定度が $1.0 \times 10^{12}$ と非常に高く、psオーダーでの計測が可能であり、また、コードによる計測でも1000秒前後でHACの安定度に達しており、十分な観測精度が得られていることが分かる。

#### 4.2 電離層遅延補正精度

2周波によるTECの推定精度について考えてみる。TCE地球局受信・送信機内遅延が完全に除去できたとし、S-band、L-bandの到達時刻差の測定誤差( $\delta C_{S-L}$ )のみを考えた場合、TECの誤差 $\delta TEC$ は以下ようになる。

$$\delta TEC = \frac{\delta C_{S-L}}{1.345 \times 10^{-7}} \times \frac{f_S^2 f_L^2}{f_S^2 - f_L^2} \quad (14)$$

この時のSバンドの電離層遅延補正誤差 $\delta I_S$ は、

$$\delta I_S = \frac{f_L^2}{f_S^2 - f_L^2} \delta C_{S-L} \quad (15)$$

となる。前節の試験から、コード位相の計測精度 $\delta C_{S-L}$ を1nsと仮定した場合、 $\delta I_S$ は約700psとなる。ただし、これは計測時間が1秒での値であり、データ数を増やすことで $\delta I_S$ を小さくすることが可能となる。また、地球局ではコード位相の計測精度の向上が見込まれており、更なる精度の向上が期待される。

#### 4.3 初期位相推定精度

4.1節の試験結果のデータを用い、搬送波の初期位相の推定精度を計算してみる。図8は搬送波位相とコード位相の差の分布関数で、その分布がきれいな正規分布であることが分かる。初期位相は、実験内で一度だけ推定してやればよく、推定精度は、一回の実験時間に依存する。例えば、実験時間が3時間であれば、得られるデータ点数は10800点となる。この時、信頼係数95%で初期位相の区間推定を行うとその精度は、 $\pm 4.26ps$ となり、十分な精度で初期位相の推定が行えることが

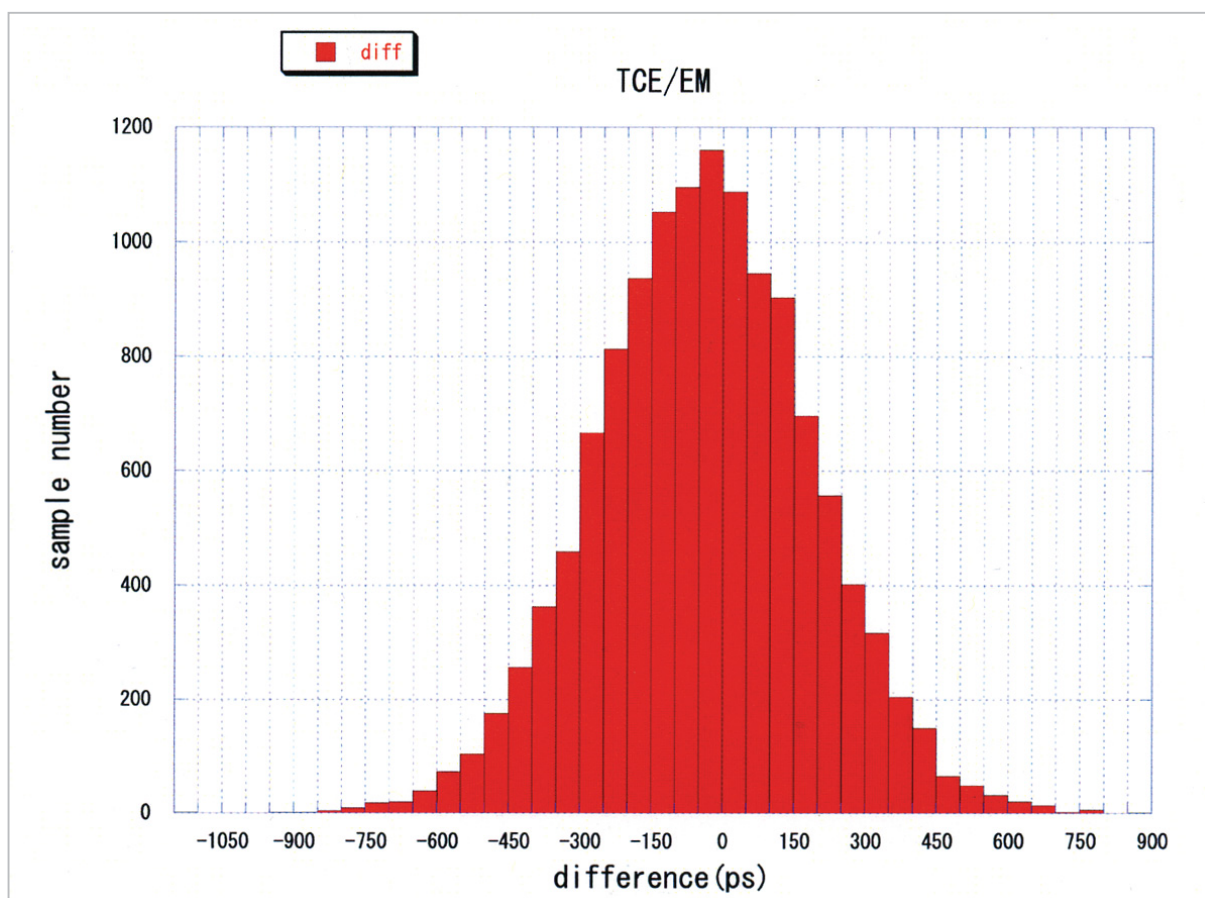


図8 コード位相と搬送波位相差分ヒストグラム

この結果から搬送波初期位相を計算する。

分かる。

## 5 まとめ

TCE、TCE地球局による双方向時刻比較では、受信信号の位相計測のほかに、校正系での位相計測を行っており、これらのデータはデータ処理部に送られる。データ処理部でこれらのデータを複合的に処理することで、最終的に非常に高い精度での時刻比較が行えることを示した。また、TCE-EMを用いた試験から、TCEの測定精度を計測し、これらの結果からデータ処理部

で行う補正、推定が十分に高い精度で行えることを明らかにした。

TCE、TCE地球局による高精度時刻比較は、衛星測位システムの基盤技術の取得が目的であり、今後打ち上げが予定されている準天頂衛星への応用が期待される。

## 謝辞

TCEの開発、地上試験に御尽力頂いた日本通信機株式会社の方々に感謝いたします。

## 参考文献

- 1 M. Homma, S. Yoshimoto, N. Natori, and Y. Tsutumi, "Engineering Test Satellite-8 for Mobile Communication and Navigation Experiment", IAF, No. IAF-00-M3.01, pp.256-263.
- 2 木内等, 今江理人, 高橋靖宏, 後藤忠広, 中川史丸, 藤枝美穂, 細川瑞彦, "データ処理部, 搭載処理部(TCE-PRO)の構成等", 本特集.
- 3 P. J. Teunissen and A. Kleusberg, GPS for Geodesy, 2nd Edition, Sec. 5, Springer, 1998.
- 4 藤枝美穂, 高橋靖宏, 後藤忠広, 中川史丸, 今江理人, "高精度時刻比較実験用地球局", 本特集.
- 5 小宮山牧児, "周波数と時間の計測法", 電波研究所季報, Vol.29, No.149, pp.39-53, 1983.

### 中川史丸

電磁波計測部門時間周波数計測グループ専攻研究員 博士(理学)  
衛星測位、衛星時刻比較



### 今江理人

電磁波計測部門時間周波数計測グループリーダー  
周波数標準、特に高精度時刻比較

### 高橋靖宏

電磁波計測部門時間周波数計測グループ主任研究員  
衛星通信、衛星測位システム

### 木内 等

無線通信部門光宇宙通信グループ主任研究員 博士(工学)  
電波干渉計、空間光伝送



### 後藤忠広

電磁波計測部門時間周波数計測グループ研究員  
GPS時刻比較

### 藤枝美穂

電磁波計測部門時間周波数計測グループ専攻研究員 博士(理学)  
衛星測位、衛星時刻比較