

## 5-2 ETS-VIII 搭載高精度時刻比較装置を用いた時刻比較実験結果

### 5-2 Experimental Results of Time Comparison Using the Time Comparison Equipment on Board ETS-VIII

高橋靖宏 中川史丸 田淵 良 中村真帆 国森裕生 雨谷 純  
土屋 茂 浜 真一 野田浩幸

TAKAHASHI Yasuhiro, NAKAGAWA Fumimaru, TABUCHI Ryo, NAKAMURA Maho, KUNIMORI Hiroo, AMAGAI Jun, TSUCHIYA Shigeru, HAMA Shin'ichi, and NODA Hiroyuki

#### 要旨

ETS-VIII (技術試験衛星 VIII 型、きく 8 号) は、2006 年 12 月に打ち上げられた静止衛星であり、大型展開アンテナを用いた移動体通信実験が実施されており、また日本の衛星では初めて原子時計が搭載され、これを用いた衛星測位の基礎実験が行われてきている。情報通信研究機構 (NICT) では、衛星測位の基礎実験の一環として、衛星 - 地上間高精度時刻比較実験を世界で初めて実施するとともに、その応用実験として衛星の中継機能を利用した地上 - 地上間高精度時刻比較、及び測距実験を実施してきている。

The Engineering Test Satellite type VIII (ETS-VIII) was a geo-synchronous satellite launched on December, 2006. Using ETS-VIII, mobile telecommunications experiment using the large deployable antennas is executed. ETS-VIII is first satellite in Japan bearing atomic clocks, and basic experiments of satellite positioning are carried out.

In National Institute of Information and Communications Technology (NICT), highly precise time and frequency comparison experiment between the satellite and the ground is executed for the first time in the world. Highly precise time comparison experiment between ground stations using an on-board bent-pipe function and ranging experiment are also executed.

#### [キーワード]

技術試験衛星, 衛星測位, 時刻比較, 測距

Engineering test satellite, Satellite positioning, Time comparison, Ranging

## 1 まえがき

NICT では、ETS-VIII を用いて衛星測位の要素技術の修得や、衛星搭載原子時計の軌道上特性の把握を目的として、衛星 - 地上間高精度時刻比較実験を実施してきており、また、応用実験として地上 - 地上間時刻比較や、測距実験を行ってきている。これらの成果は既にスタートしている準天頂衛星プロジェクトに生かされている。本稿では、ETS-VIII 搭載高精度時刻比較装置 (TCE) を用いた時刻比較実験について、その構成等を概説し、実

験結果について報告する。

## 2 日本における衛星測位の技術開発

今日の日本では、カーナビゲーションシステムをはじめとして、携帯電話での測位、及び船舶・航空機の航法等、GPS (全地球測位システム) を用いたシステムが各方面で大いに利用され、また、地震や津波観測、簡易に高精度な時刻を得る場合にも利用されている。

しかしながら GPS は米国のシステムであり、米

国の政策上、現在のところ利用者に対しては課金を行わない方針であるが、有事の際や将来に関しては常に不安が存在する。GPSに対する危惧やGPSのみに頼ることの危険性などから、ロシアではGLONASSが以前から運用されており、欧州ではGALILEO計画が開始され、現在試験機2機が打上げられ、中国やインドでも独自の測位システムの構築に向けて進み出している。

日本においては、衛星測位システムに関する研究開発は遅れていたが、1996年頃から我が国の衛星測位システムの技術開発のあり方について議論が進められてきた。1997年3月に宇宙開発委員会の分科会報告[1]が出され、当面は以下の衛星測位システムの要素技術を開発することとされた。

- 衛星搭載原子時計
- 衛星群時刻管理技術
- 高精度衛星軌道決定技術

日本に於ける衛星測位の技術開発は、衛星搭載原子時計はGPSに搭載されているセシウム原子時計や、ルビジウム原子時計より周波数安定度の良い水素メーザの研究開発[2]はNICTで、また、衛星群時刻管理技術及び高精度衛星軌道決定技術の研究開発は宇宙航空研究開発機構(JAXA)及びNICTにより進められることとなり、研究開発が開始された。

JAXAでは、ETS-VIIIにセシウム原子時計を搭載し、衛星測位技術の要素技術の修得を始めとして、衛星測位技術の基礎研究を行うこととした。

NICTでは、ETS-VIII搭載の原子時計の衛星軌道上での性能評価を目的として、搭載原子時計と地上の原子時計の高精度時刻比較法に関して、双方向時刻比較方式を提案し、認められ、そのための実験機器であるETS-VIII搭載高精度時刻比較装置(TCE)がNICTのミッションとして搭載されることとなった。

その後、官民共同プロジェクトで準天頂衛星計画が開始され[3]、日本上空からの通信・放送サービス、及び衛星測位の補強・補完サービスの研究・開発が2003年度から開始された。その後、民による通信・放送ミッションの非搭載が決まり、準天頂衛星により衛星測位の実証実験をすることに計画が変更された[4]。NICTは、この準天頂衛星を用いた高精度測位実験システム[5]で用いる全ての時計の比較を行う時刻管理系[6]を分担してお

り、これにはNICTに於いてETS-VIIIで研究開発されてきたTCEの成果が活かされている。

### 3 ETS-VIIIとその測位ミッション機器

#### 3.1 ETS-VIII

ETS-VIII [7]は、2006年12月18日に種子島宇宙センターから打ち上げられた図1に示す外観の静止衛星であり、今後の宇宙活動に必要となる先端的な共通基盤技術の開発を行うことを目的とし、大型展開アンテナを用いた移動体通信実験が実施されてきている。また、衛星測位の基礎実験のため、我が国の人工衛星では初めて原子時計が搭載され、JAXA、及びNICTでは衛星測位の要素技術の修得を目的に各種実験を実施している。

#### 3.2 高精度時刻基準装置(HAC)[8]

HACはJAXAのETS-VIII搭載の衛星測位実験のミッション機器で、搭載原子時計(CFS)、Sバンド送受信機、Lバンド送信機、SバンドLバンド共用の直径1.0mアンテナ、及びSLR(Satellite Laser Ranging)用機器から構成されている。そのCFSは、GPSにも用いられている米国製のセシウム原子時計を導入した。その諸元は表1のとおり。

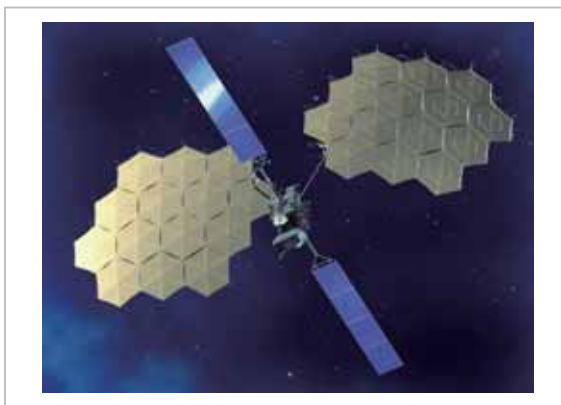


図1 ETS-VIIIの外観

表1 ETS-VIII搭載原子時計の諸元

周波数	10.23MHz
重量	13.6kg
確度	$\pm 1 \times 10^{-11}$
安定度	$1 \times 10^{-11}$ ( $\tau = 1 \sim 3.6$ 秒) $1.89 \times 10^{-11} \times \tau^{-0.5}$ ( $\tau = 3.6 \sim 10^5$ 秒) $6 \times 10^{-14}$ ( $\tau = 10^5 \sim 10^6$ 秒) ( $\tau$ : 平均化時間)

これらを用いて、JAXA では、以下の衛星測位技術に関する要素技術の修得の実験を行ってきた。

- 搭載原子時計の軌道上性能評価及び軌道上管理技術の修得
- 衛星群時刻・地上時刻の精密管理技術の修得
- 高精度軌道決定技術の評価

### 3.3 高精度時刻比較装置 (TCE)<sup>[9]</sup>

#### 3.3.1 概要

TCE は NICT の ETS-VIII 搭載のミッション機器で、CFS の衛星軌道上での性能評価を行うための、世界で初めて衛星-地上間高精度時刻比較を行うための機器である。

CFS と、地上の基準時計の間の高精度時刻・周波数比較の構成図を図 2 に示す。衛星から地上へ、地上から衛星へ時刻比較用の信号を伝送し、それぞれで、その受信した信号と時刻差を測定し、その差を求めることにより 2 個の時計の時間差を求める双方向伝送時刻比較法を、衛星-地上間で世界で初めて用いている。双方向時刻比較法は原理的に、伝搬路上の電離圏や対流圏の遅延とその変動、衛星の運動の影響が相殺でき、高精度の時刻比較が可能な方式である。

また、衛星上、及び地上の双方に高安定原子時計が置かれ、搬送波信号、変調信号等がすべて GPS の測位信号と同様にコヒーレントに生成されることから、変調信号のみならず、搬送波信号の位相情報を利用することが可能となり、ps ( $10^{-12}$  秒) オーダーの精度で時刻比較が可能となる。

TCE の開発では、搭載品である PFM (Proto Flight Model) の製作に先立ち、まず EM (Engineering Model) を製作し、性能の確認、及び衛星全体のシステム電気試験に供された。PFM は試験後に衛星に取り付けられ、衛星全体での試験に供され、打ち上げられた。TCE の PFM の外観は図 3 に示すとおりであり、少ない面積を効率的に使用できる形状になっている。

#### 3.3.2 構成

HAC・TCE の主な諸元は表 2 に示すとおりである。図 4 は、TCE (太い枠線内) 及び HAC のブロック図である。衛星から地上へ時刻比較用の信号を送信 (送信信号) し、また地上からの時刻比較用の信号を受信 (受信信号) して、双方向伝送で時

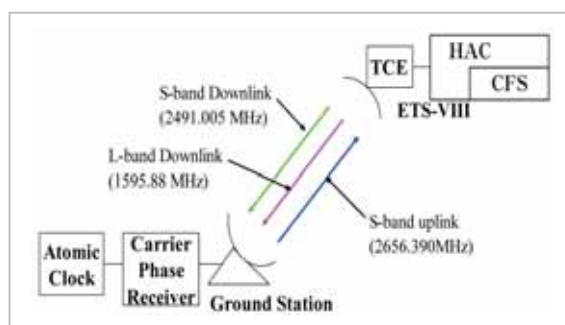


図 2 時刻比較の構成図



図 3 TCE-PFM の外観

間差を測定する機能を持つ。それに加え、衛星内の送信系、及び受信系の遅延時間をリアルタイムで測定する機能を有しており、それにより温度変化や経年変化等による送受信系で共通でない経路の遅延時間の変動の補正が可能な構成になっている。このことから、受信信号、受信系校正信号、及び送信系校正信号の 3 信号が重畳された信号を計測するため、TCE の信号処理部 (薄い枠線内) では、3 チャンネルの処理部を持ち、それぞれのチャンネルで PN 復調しキャリア位相計測及びコード位相計測が同時にできるようになっている。

以下、各信号の経路に沿って説明する。

##### (1) 送信信号

ベースバンド信号合成部により基準信号 (10.23 MHz、1 kPPS (1 秒間に 1000 パルス)) に基づいた送信搬送波及び擬似ランダムノイズ (PN) コードが生成され、変調後に、S バンド送信系で増幅され、ダイプレクサ (DIP) を介し、直径 1.0 m アンテナから送信される。



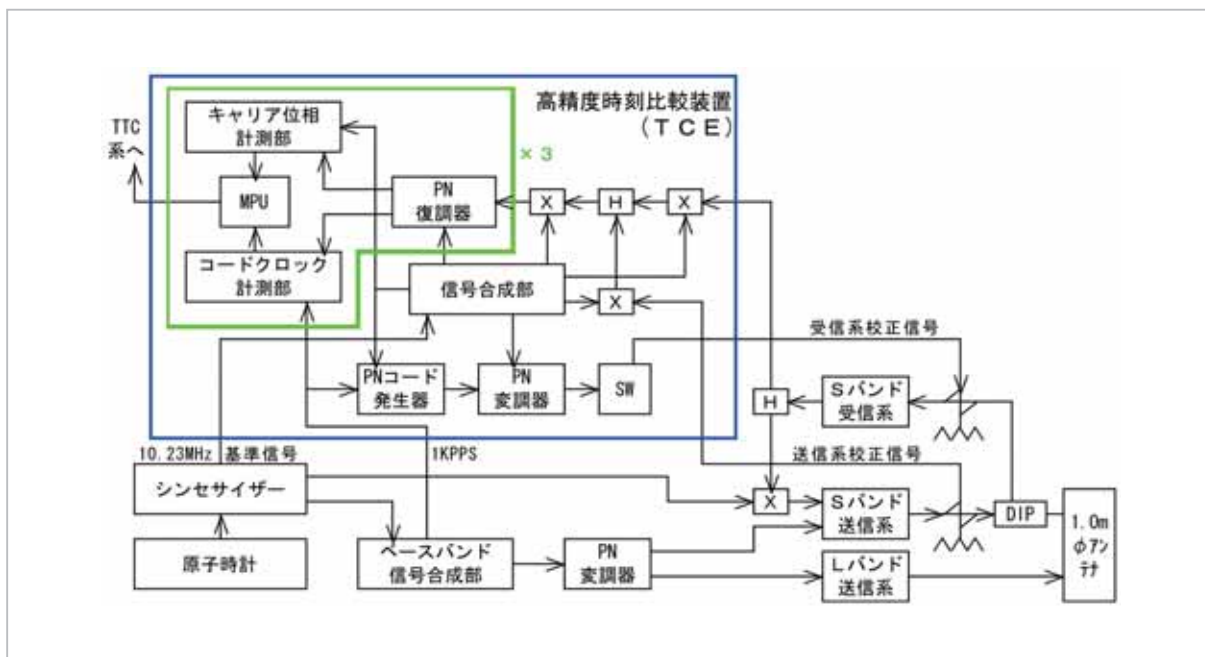


図4 HAC・TCEのブロック図

表2 HAC・TCEの主要諸元

送信 Power	S-band	5.7W
	L-band	18W
S-band	送信 Frequency	2491.005MHz
	受信 Frequency	2656.390MHz
L-band	送信 Frequency	1595.880MHz
PN Code	Same as GPS C/A Code	
Size (TCE)	320mm×320mm×325mm	
Mass (TCE)	12.3kg	

(2) 受信信号

直径1.0 m アンテナで受けた電波をSバンド受信系で増幅し、TCE内で周波数変換され、信号処理部でPN復調し、計測される。

(3) 受信系校正信号

信号合成部で生成された搬送波、及びPNコード発生器で生成されたPNコードは変調後、スイッチ(SW)を介しSバンド受信系の入力側の方向性結合器から挿入され、受信信号にミキサ(X)で重畳され、信号処理部でPN復調し、計測される。この信号は使用しないことも可能。

(4) 送信系校正信号

送信信号の一部をアンテナの前の方向性結合器で分岐し、TCE内で周波数変換後に、分・合波器(Hybrid)で受信信号及び受信系校正信号に重畳され、信号処理部でPN復調し、計測される。

## 4 地上系

TCEの実験用の地球局(TCE地球局)として、図5に示す直径2.4 mのアンテナを持つ固定局、及び可搬局を整備した。TCE地球局は、Sバンド送信機を有し、時刻比較部分は衛星上と同じように、コード位相計測、及びキャリア位相計測を行い、送信系及び受信系の遅延時間校正もできるようにしており、また、Sバンド、Lバンドの2周波での計測を可能にしている。

TCE地球局を2局整備したのは、衛星-地上間高精度時刻比較を行うことに加え、地上-地上間高精度時刻比較を行うことを目的としている。これは、2つのTCE地球局を異なる場所に置き、それぞれの場所で異なる基準信号で計測することにより、地上-地上間高精度時刻比較を可能にするもので、これも応用実験として行っている。

双方向時刻比較法を用いることから、衛星上での計測値を地上に伝送する必要があり、TCEのテレメトリで伝送している。これはTCEの監視の機能、及びコマンドでの制御の機能も含め、追跡管制を実施しているJAXA筑波宇宙センターと専用回線で接続し、データの授受を行っている。

固定局はNICT本部(東京都小金井市)2号館に設置し、UTC(NICT)を基準信号として用いてい



図5 TCE 地球局アンテナ (固定局、可搬局)

る。可搬局は日本全国に移動が可能であり、5.5、及び 5.6 の実験は固定局と同じ NICT 本部にあり 2 号館から約 150 m 離れた光センタに設置して水素メーザを基準とした。

## 5 実験結果

NICT による TCE 実験の実験項目と、実験結果を以下に示す。

### 5.1 性能確認試験

#### (1) 時刻比較性能

TCE、及び TCE 地球局の時刻比較性能については、5.2 短期安定度計測で述べるが、打上げ後の初期チェックアウト、及びその後の定期的な計測により、所期の性能を満足することを確認した。

#### (2) 電離層補正

TCE、及び TCE 地球局を用いた時刻比較は、双方向時刻比較法を用いており、原理的には伝搬路上の電離圏、及び対流圏の遅延や、衛星の運動は相殺できる方式であるが、Sバンドのアップリンク (2656.390 MHz) とダウンリンク (2491.005 MHz) の周波数に差があり、その分だけ電離層遅延が残る。これについては、SバンドダウンリンクとLバンドダウンリンク (1595.88 MHz) の計測値から計算で補正することが可能である。

固定局の計測結果から、電離層遅延の補正量を計算した結果の一例を図 6 に示す。実験期間を通して太陽活動は平穏期であり、電離層遅延は小さいので、その補正量も最大で 150 ps と少なく、補正を要する程ではなかった。

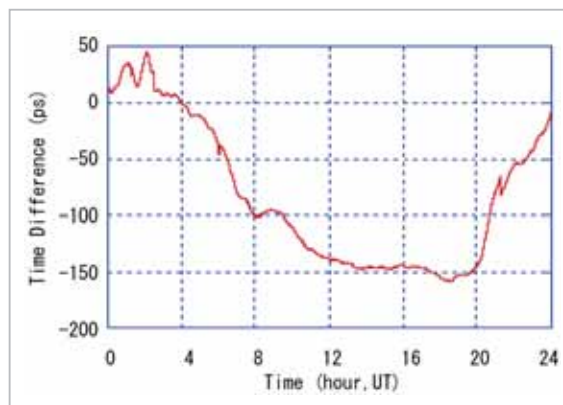


図6 電離層遅延の補正量の計算結果の一例

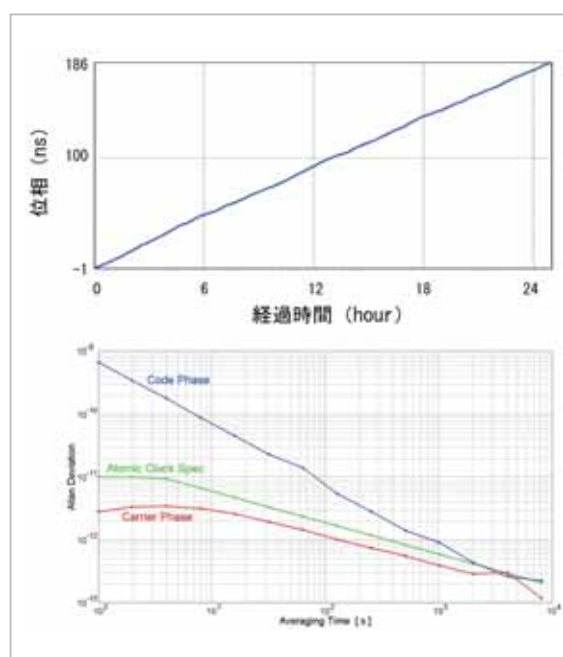


図7 時刻比較結果の一例

上: (a) 比較結果、下: (b) アラン分散

### 5.2 短期安定度計測

実験期間を通して短期安定度測定を実施した。これは、衛星 - 地上間高精度時刻比較を行い、地上の基準時計として日本標準時である UTC (NICT) を用いた。UTC (NICT) はセシウム原子時計 (Cs) 18 台と水素メーザ標準器 3 台を組み合わせたもので CFS より 2 桁程度安定度の良いものである。

衛星 - 地上間高精度時刻比較の結果の一例を図 7 に示す。このうち (a) は UTC (NICT) と CFS の差を現しており、殆ど CFS の動きと考えられ

る。これは25時間で187 nsの変化があったことを示し、一様に変化していることからCFSの周波数10.23 MHzが約0.02 mHz相違していることになる。(b)は、(a)の1次ドリフト成分を除去した後、周波数安定度(アラン分散)を計算したものである。コード位相計測の計測精度は1秒平均値で0.7 nsであり、キャリア位相計測では1秒平均値で約3 psである。キャリア位相計測の安定度は、CFSの仕様値より良く、1秒からCFSの安定度が見えていると考えられる。

### 5.3 長期安定度計測

当初予定では、定期的な衛星-地上間時刻比較の結果から、長期安定度を求める予定であったが、まだその絶対値を求めるに至っていない。CFSの長期的評価としては、図7の(b)に示す周波数安定度は、約2年間の変化が見られないことから、CFSの安定度に有意な変化は無いものと考えられる。図7の(a)に示す時刻比較結果の傾きである周波数の差については、その約2年間の変化をプロットしたものを図8に示す。これは、周波数の変化(約 $2 \times 10^{-12}$  Hz/s)を基準信号の10.23 MHzの差として表したもので、CFSとUTC(NICT)の周波数の差であるが、その殆どはCFSの変化であると考えられる。この傾きである変化率は $-1.35 \mu\text{Hz}/\text{年}$ であった。

### 5.4 外乱時の測定

外乱時の測定としては、温度変化、姿勢変化、軌道変化、電源電圧の変化、及び送受信レベルの変化が考えられるが、これまで時刻比較に大きな

影響を与えるものは見られていない。また、これ以外では、電離層擾乱による変化に有意なものが有ることが、最近になってわかってきている。固定局の計測結果から、計算により求めた電離層擾乱時の全電子数の変化の一例を図9に示す。このときは最大10 TECU(TECUは全電子数の単位であり、1TECUは $1\text{ m}^2$ あたりの電子数が $10^{16}$ 個)の変化が見られている。このときに時刻比較に与える影響は約100 psになっているが補正は可能である。これは太陽活動が平穏期でこの程度であり、太陽活動の極大期にはこの10倍程度に達することがあると予想される。

### 5.5 地上-地上間時刻比較

地上-地上間の高精度時刻比較は、時刻の国家標準同士など、2箇所の地上の原子時計の高精度時刻比較が行われており、GPSの測位信号を用いたものや、静止通信衛星を中継し、コード位相計測の双方向時刻比較法を用いて実施されている。TCE、及びHACを用いた応用的な実験として、地上-地上間時刻比較があり、これは、以下の2つの方式がある。

#### (1) 衛星時計仲介時刻比較

衛星-地上間時刻比較を2箇所で同時に行い、CFSを仲介として、計算により地上と地上の時刻の差を求める。

#### (2) 衛星中継時刻比較

HACは測位信号中継実験のために中継機能を有しており、これを用いて地上-地上間で時刻比較を行う。これは、一般的な通信衛星の中継器とは異なり、衛星上の周波数変換のローカル信号に

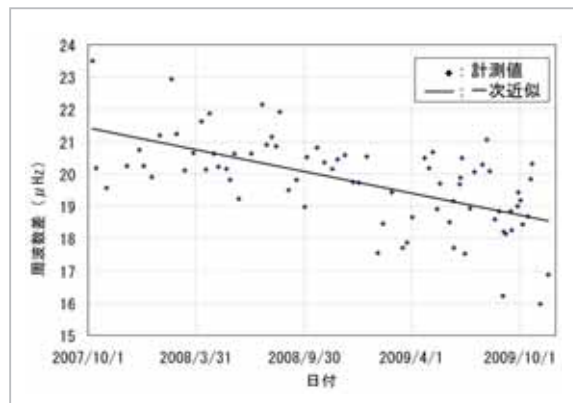


図8 周波数差の経年変化

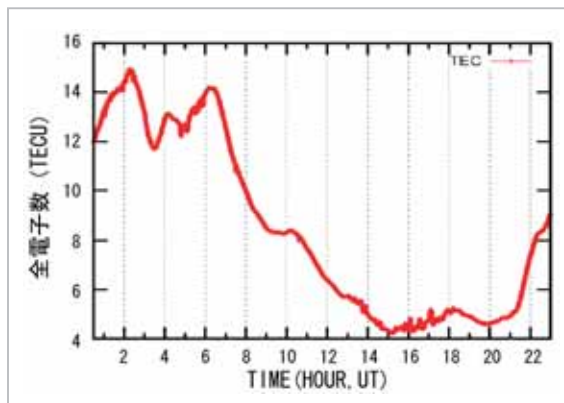


図9 電離層擾乱による変化の一例



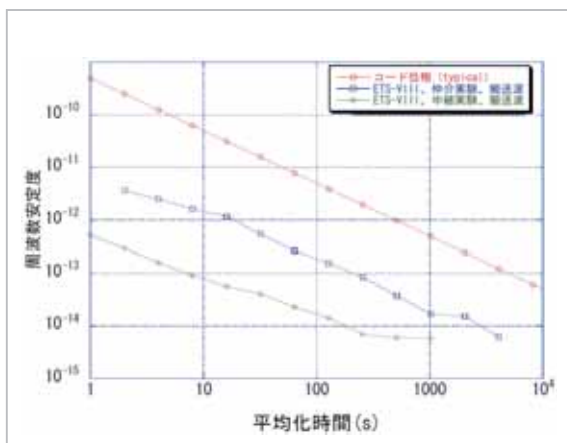


図 10 地上 - 地上間時刻比較結果の一例

原子時計の信号を用いることから高安定な中継が可能となる。

この2つの方式により、固定局と可搬局の間の地上 - 地上間時刻比較の周波数安定度の一例を図 10 に示す。これは、従来の方式である静止通信衛星を中継したコード位相による時刻比較、衛星時計仲介時刻比較(キャリア位相計測)、衛星中継時刻比較(キャリア位相計測)を示しており、衛星時計仲介は静止通信衛星中継のコード位相によるものより1~2桁良い結果となり、衛星中継は更に1桁良い結果となった。これは、地上の高安定度の原子時計の時刻比較を可能にするものである。

### 5.6 測距実験

双方向時刻比較法は、その原理から、計算を変えると衛星 - 地上間の距離を求める測距が可能であり、これは、原理的に双方の原子時計の動きが相殺でき、高精度な測距ができる可能性がある。

時刻比較のデータから測距計算した結果の一例を図 11 に示す。これは NICT 光センタでの SLR (衛星レーザ測距) の測距結果との差を取ったものである。TCE を用いた測距は、その絶対値が不明であり相対値ではあるが、SLR の結果と ± 80 cm 以内の差で計測できており、高精度軌道決定に有

### 参考文献

- 1 宇宙開発委員会 計画調整部会, “衛星測位技術分科会報告: 我が国における衛星測位技術開発への取り組み方針について,” 1997.

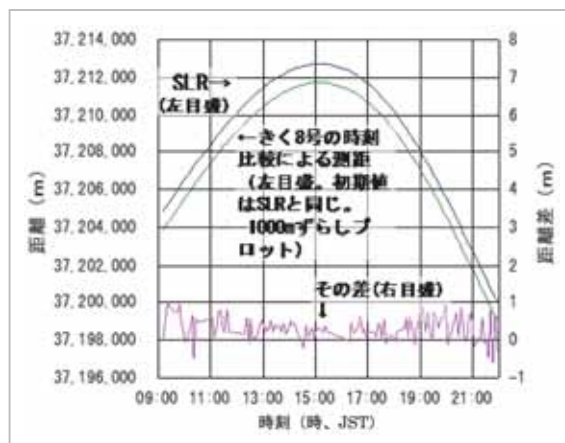


図 11 測距結果の一例

用ではないかと考えられる。

## 6 おわりに

NICT では、ETS-VIII 搭載高精度時刻比較装置を用いた時刻比較実験を実施してきており、その成果は準天頂衛星を用いた高精度測位実験システムに引き継がれる。準天頂衛星(QZS-1)「みちびき」は2010年9月11日に打ち上げられ、初期機能確認試験を終え、技術実証実験が開始されている。今後、日本独自の測位システムの構築に向け実験を実施して行くことになっている。

## 謝辞

ETS-VIII 及び追跡管制設備の開発・運用を担当された JAXA の関係各位、HAC、TCE、及び地上設備の開発を担当された(株)東芝(現、日本電気(株)及び NEC 東芝スペースシステム(株))、日本通信機(株)、コスモリサーチ(株)、及び宇宙技術開発(株)の関係各位に深謝する。これまで TCE 実験に協力戴いた関係各位、及び TCE とその地上系の開発に携われた NICT 関係各位に感謝する。

- 2 伊東 他, “準天頂衛星搭載用水素メーザエンジニアリングモデルの開発,” 第 49 回宇科技連, No. 2D13, pp. 731-734, 2005. 11.
- 3 長野, 藤山, “準天頂衛星システムのプロジェクト構想,” 第 48 回宇科技連, No. 2G01, pp. 1068-1074, 2004. 11.
- 4 測位・地理情報システム等推進会議, “準天頂衛星システム計画の推進に係る基本方針,” 2006. 3. 31.
- 5 岸本 他, “準天頂衛星システムの開発状況と実験計画,” 第 53 回宇科技連, No. 2E18, pp. 1292-1295, 2009. 9.
- 6 浜真一, 高橋靖宏, 木村和宏, 伊東宏之, 雨谷純, “準天頂衛星計画,” 情報通信研究機構季報, 本特集号, 5-3, 2010.
- 7 本間 他, “Engineering test satellite-8 for mobile communication and navigation experiment,” 第 51 回 IAF, No. IAF-00-M.3.019.
- 8 野田 他, “技術試験衛星Ⅷ型 (ETS-Ⅷ) 測位実験システムと測位実験,” 日本航海学会航空宇宙研究会, 2004. 10.
- 9 高橋 他, “ETS-Ⅷ搭載用高精度時刻比較装置による実験計画,” 信学論 (B), Vol. J84-B, No. 12, pp. 2101-2107.



たか ばし やす ひろ  
高橋靖宏

新世代ネットワーク研究センター  
光・時空標準グループ主任研究員  
衛星通信、衛星測位システム



なか がわ る み まる  
中川史丸

新世代ネットワーク研究センター  
光・時空標準グループ主任研究員  
博士(理学)  
時間・周波数標準

た ぶ ち り ょ う  
田渕良

新世代ネットワーク研究センター  
光・時空標準グループ技術員



なか む ら ま ほ  
中村真帆

新世代ネットワーク研究センター  
光・時空標準グループ専攻研究員  
博士(工学)  
超高層大気、情報工学



くに も り ひ ろ あ き  
国森裕生

新世代ワイヤレス研究センター宇宙通  
信ネットワークグループ主任研究員  
衛星レーザ測距



あ ま が い じ ゅ ん  
雨谷純

新世代ネットワーク研究センター  
光・時空標準グループ研究マネー  
ジャー  
時刻周波数比較、電波干渉計



つ ち や し げ る  
土屋茂

新世代ネットワーク研究センター  
光・時空標準グループ主任研究  
員標準電波、電波伝搬



は ま し ん い ち  
浜真一

新世代ネットワーク研究センター  
光・時空標準グループ研究マネー  
ジャー  
衛星測位システム、衛星通信

の だ ひ ろ ゆ き  
野田浩幸

独立行政法人宇宙航空研究開発機構宇  
宙利用ミッション本部準天頂衛星シス  
テムプロジェクトチームミッションサ  
ブマネージャー  
衛星測位システム