

5-2 高精度時刻比較装置を用いた実験計画

5-2 Experimental Plans using Time Comparison Equipment

高橋靖宏 今江理人 後藤忠広 中川史丸 藤枝美穂 木内 等
細川瑞彦

TAKAHASHI Yasuhiro, IMAE Michito, GOTOH Tadahiro, NAKAGAWA Fumimaru,
FUJIEDA Miho, KIUCHI Hitoshi, and HOSOKAWA Mizuhiko

要旨

ETS-Ⅷ(技術試験衛星Ⅷ型)では、衛星測位の要素技術の習得を主な目的に、日本で初めて衛星に原子時計が搭載される。その原子時計の性能評価を目的に高精度時刻比較装置(TCE)が搭載される。TCEではキャリア位相計測及びコード位相計測により psec オーダーでの時刻比較を行うことにより搭載原子時計の性能評価を行う。本稿では本装置を用いた実験計画について、各実験項目の説明を行う。

The Engineering Test Satellite-Ⅷ (ETS-Ⅷ) missions will include application experiments using Cesium atomic clocks in space. Using this satellite, the CRL (Communications Research Laboratory) and the JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) is planning to conduct a precise time and frequency transfer between an atomic clock on-board the satellite and a ground-reference clock. This paper describes the experimental plan for precise time transfer between the ground reference clock and on-board clock.

[キーワード]

技術試験衛星, 衛星測位, 衛星搭載原子時計, 時刻比較

ETS-Ⅷ, Satellite positioning system, On-board atomic clock, Time comparison

1 まえがき

ETS-Ⅷ(技術試験衛星Ⅷ型)^[1]は、2004年に打上げ予定の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た衛星で、大型展開アンテナを用いた移動体通信実験^[2]をはじめ、各種の実験が予定されている。

また、ETS-Ⅷには、我が国の人工衛星では初めて、宇宙航空研究開発機構(JAXA)のミッションとして、原子時計が搭載され、その応用実験として、衛星測位技術に関する基礎研究を行うことが予定されている。^[1]

当該原子時計の衛星軌道上での性能評価を主目的として、搭載原子時計と地上の原子時計との間の高精度時刻比較法に関してCRLから提案した時刻比較方式が、CRLのミッションとしてETS-Ⅷに搭載されることが認められ、搭載機器の開発を進めてきた。現在は搭載機器の製造を

終了し、衛星全体の試験に供されている。

本装置で用いる時刻比較方式は、2008年に打上げ予定の準天頂衛星を用いた衛星測位システム^[3]の時刻管理でも同様のものが採用される予定^[4]であり、本装置を用いた実験の成功が期待されている。

本稿では、ETS-Ⅷ搭載の高精度時刻比較装置(TCE)を用いた実験について、各実験項目の説明を行う。

2 ETS-Ⅷ開発計画

ETS-Ⅷでは、JAXAのミッションとして、我が国で初めて原子時計が衛星に搭載される。これは、原子時計の開発を目的としてではなく、GPSにも用いられているセシウム原子時計を導入し、原子時計の軌道上性能の把握等を行うとともに、衛星測位技術に関する要素技術の習得

を計画している。

CRLでは、ETS-Ⅷ搭載原子時計の軌道上での性能評価のため、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、本装置で用いている双方向時刻比較方式を提案し、そのための実験機器がCRLのミッションとしてETS-Ⅷに搭載されることとなった。

3 時刻比較原理の概要

ETS-Ⅷ搭載原子時計と、地上の基準時計の間の高精度時刻(周波数)比較の原理図を図1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、その差の1/2を求めることにより衛星搭載原子時計と地上の基準時計の時間差を求める双方向伝送方式時刻比較法を用いる。

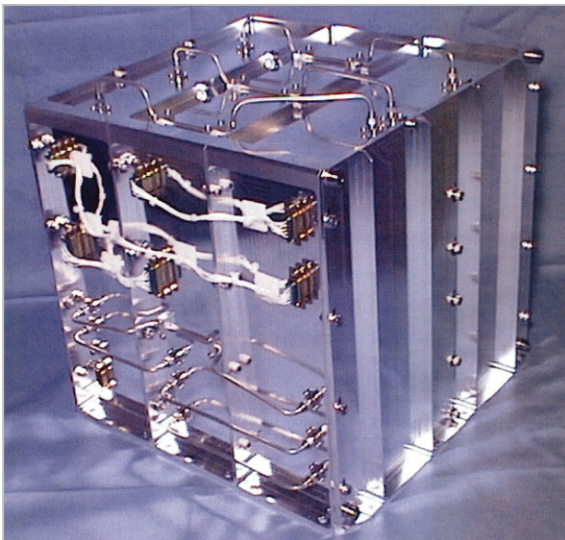


図1 双方向時刻比較の原理図

一般的に双方向時刻比較では、伝搬路上の電離層や対流圏での遅延とその変動、衛星の運動の影響が原理上相殺でき、高精度の時刻比較が可能になる。しかし、TCE実験においてはSバンドのアップリンク周波数と、ダウンリンク周波数が異なるので、電離層での遅延は相殺しきれないため、衛星からのSバンド及びLバンドの信号を受信して、計算により補正することとしている。また、通信機器でも、送受で共通の系は、その温度変化等による影響を相殺できるが、共通でない系は相殺できないので、TCE、TCE地球局ともにその遅延時間を測定して、計算により補正することとしている。

双方向時刻比較では、上記のように測定値の差の1/2から衛星-地上間の時刻差を求めるが、測定値の和から衛星-地上間の往復のレンジを求めることが可能である。

4 使用実験機器の概要

4.1 衛星搭載機器

JAXAのミッションである測位技術の基礎研究を行うためのHAC (High Accuracy Clock)及びCRLのミッションである衛星-地上間の高精度時刻比較を行うTCEについて、その全体構成は図2のとおりであり、以下にその概要を述べる。

なお、TCEの信号処理部(TCE-PRO)及び高周波部の詳細については別稿[5][6]を参照されたい。

4.1.1 HACの概要

HACは原子時計、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1.0mφアンテナ

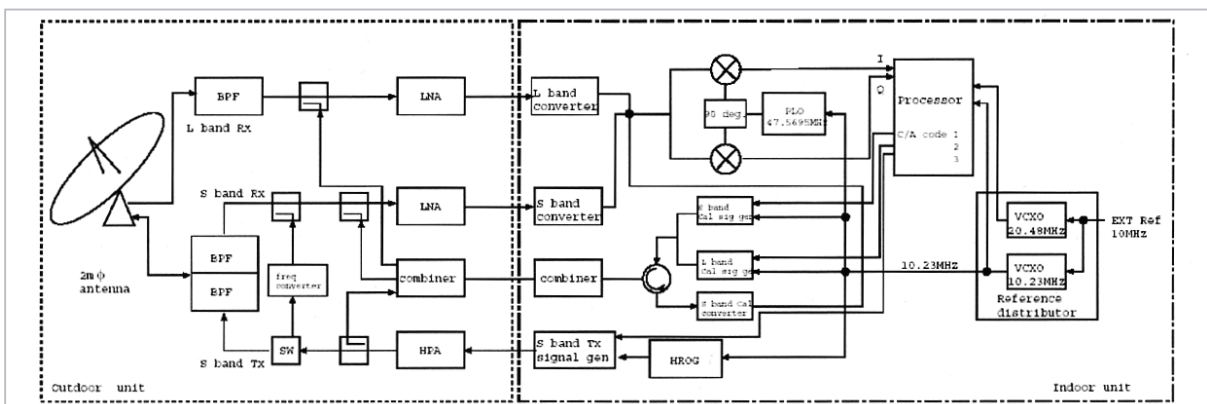


図2 HACとTCEの全体構成

及びSLR (Satellite Laser Ranging) 用機器等から構成される。原子時計は、GPSにも用いられている米国FTS社製のセシウム原子時計を導入し、衛星測位技術の要素技術の習得を目的としている。この原子時計 (CFS : Cesium Frequency Standard) の諸元は以下のとおりである。

- ・ 周波数 : $10.23\text{MHz} - 5.5 \times 10^3\text{Hz}$
(相対論的補正項を含む)
- ・ 重量 : 13.6kg
- ・ 確度 : $\pm 1 \times 10^{-11}$
- ・ 安定度 : 1.0×10^{-11} ($1 \sim 3.6\text{s}$)
 $1.89 \times 10^{-11} / \sqrt{\tau}$ ($3.6 \sim 10^5\text{s}$)
 6×10^{-14} ($10^5 \sim 10^6\text{s}$)

また、Sバンドの受信信号を周波数変換し、Sバンド及びLバンドで送信する中継器モードでの使用が可能である。

4.1.2 高精度時刻比較装置(TCE)の概要

TCEのPFM (Proto Flight Model) の外観を図3に示す。TCEはEM (Engineering Model)、PFMの順に開発された。EMは電気設計及び機械設計の確認を行い、PFMは衛星搭載の認定試験等に供され、その後衛星に搭載される。

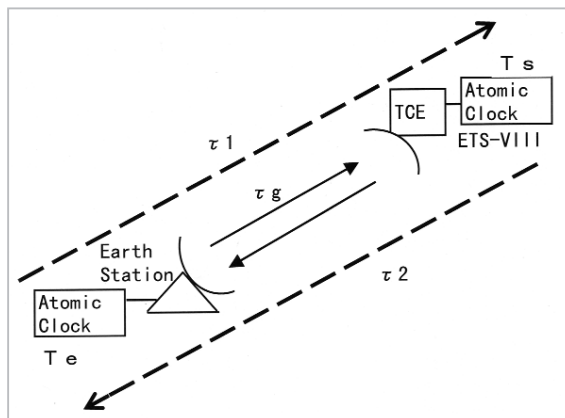


図3 TCE-PFMの外観

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、距離にしてmmオーダー、時刻比較精度でpsecオーダーの時刻比較が可能となる。

4.2 TCE地球局の概要

TCE地球局は、図4に示す構成であり、固定局、可搬局の2台を製造する。固定局は直径2.4

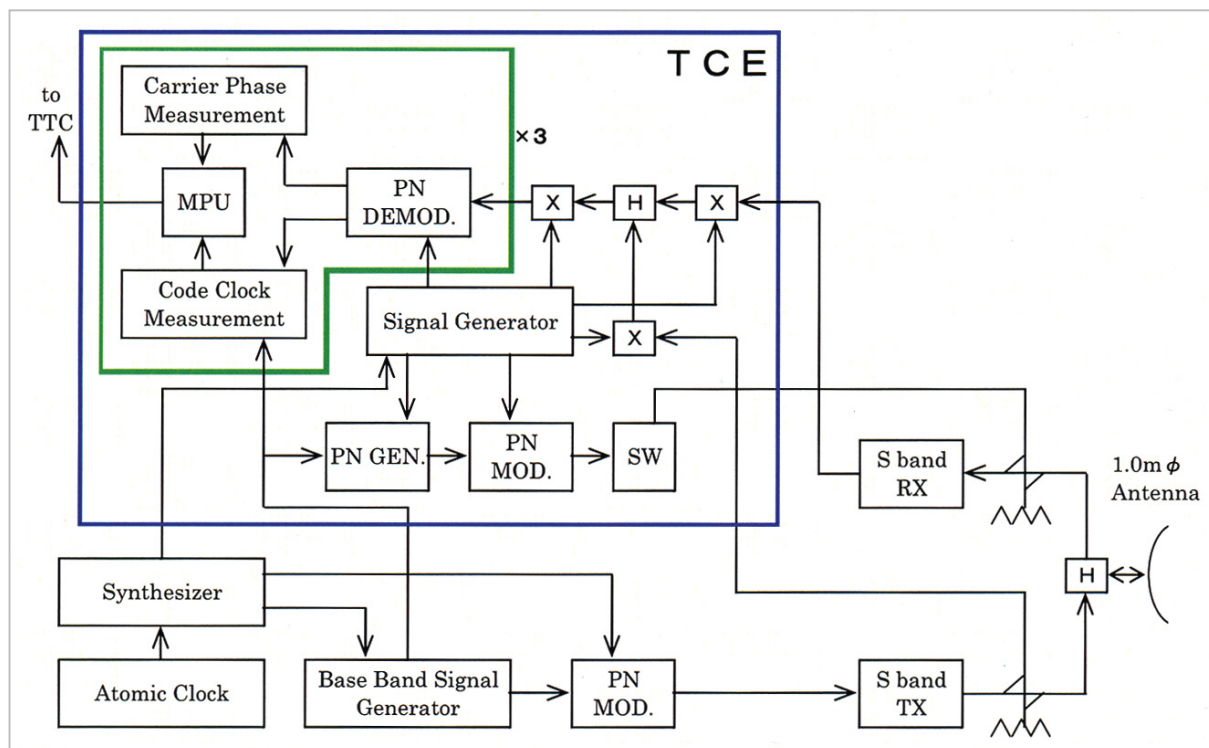


図4 TCE地球局ブロック図

mのアンテナを持ち、CRL本所(東京都小金井市)に設置して、同一場所で実験を行う。可搬局は、直径1.8mの分割型のアンテナを持ち、CRL本所をベースとして、日本内外の原子時計の有る場所に移動して実験を行う予定にしている。

TCEは衛星搭載の制約等から、信号処理能力が制限されているため、TCE地球局では以下についてTCEと異なる機能、TCEを補完する機能を持たせている。

- ・送信パワーの調整
 - ・コード位相測定の高分解能化
 - ・送信コード、搬送波位相調整
 - ・ドップラー周波数の除去と送信周波数の補正
- なお、TCE地球局の詳細については別稿[7]を参照されたい。

5 TCE 実験計画

TCE、TCE地球局を用いた実験又はTCEを用いないHAC、TCE地球局のみを用いる実験は、現在まで以下のとおりの計画である。

なお、TCE及びTCE地球局における信号処理並びに取得データの処理の詳細については別稿[8]を参照されたい。

5.1 初期試験

初期試験は、衛星打上げ後の初期チェックアウト時又はその直後のTCE実験にて、搭載機器の動作確認を行う。

5.1.1 動作確認試験

動作確認試験は、以下について行う。

(1) TCE 単体試験

TCE単体試験は、TCE単体でTCEが動作することを以下により確認する。

- ・TCEの電源をコマンドによりonにし、TCEからのテレメトリが、TCE地球局に併設するテレメトリ・コマンドの装置(テレコマ装置)まで正常に到来すること。
- ・TCEにテレコマ装置から主なコマンドを送出し、TCEのテレメトリが所期の変化をすること。
- ・TCEの温度テレメトリが所期の変化をすること。

(2) TCEとHACの試験

TCEとHACの試験は、衛星だけを用いて、以下の信号によりTCE-PROの動作を確認する。

- ・TCEから校正信号をHACに送出し、HACの受信系を経由してTCEに戻った信号(校正信号)。
- ・HACの送信信号を送出し、HACからTCEに入る信号(送信信号)。
- ・上の二つの信号を、TCEに同時に入力する。

(3) TCE地球局単体試験

TCE地球局単体試験は、(4)の試験前に(1)(2)と同様の試験を実施する。

(4) TCE、TCE地球局対向試験

TCE、TCE地球局対向試験は、以下の信号によりTCE及びTCE地球局の信号処理部が正常に動作することを確認する。

- ・TCE地球局からの送信電波をHACで受信後、TCEに入力される信号(受信信号)。
- ・上記に校正信号を加えた2信号重畳信号。
- ・上記に送信信号を加えた3信号重畳信号。
- ・HACからのSバンド送信電波をTCE地球局で受信した信号(地球局Sバンド受信信号)。
- ・上記に、地球局のSバンド受信系の校正のための信号を加えた2信号重畳信号。
- ・上記に、地球局の送信系の校正のための信号を加えた3信号。
- ・HACからのLバンド送信電波をTCE地球局で受信した信号(地球局Lバンド受信信号)。
- ・上記に、地球局のLバンド受信系の校正のための信号を加えた2信号重畳信号。

5.1.2 機能確認試験

機能確認試験は、5.1.1動作確認試験の後にTCE及びTCE地球局の機能が正常に動作するか確認を行う。

(1) TCE、TCE地球局の時刻比較機能

衛星-地上間の時刻比較を行い、その結果の評価を行う。

(2) TCE、TCE地球局の校正機能

TCE、TCE地球局の双方で、校正信号の処理結果が正しいことを確認し、温度に応じてどう変化するかを把握する。

(3) ドップラー周波数の除去と送信周波数の補正

TCE地球局の機能によるドップラー周波数の除去と送信周波数の補正及びTCEで取得したデ

ータの補正が正常にできることを確認する。

5.2 性能確認試験

性能確認試験は、以下により、初期試験後に行うとともに、その後も定期的実施する。

(1) 時刻比較精度

衛星-地上間の時刻比較を行い、その精度の検証を行う。

(2) アンビギュイティ除去

コードによる時刻比較では、チップレートに1.023MHz、コード長1023bitのPNコードを用いていることによるアンビギュイティが約1 μ sec(距離にして約300m)あるが、JAXAから伝送される軌道情報から解けることの確認を行う。

キャリア位相による時刻比較では、キャリア周波数がアップリンク周波数2656.390MHz、ダウンリンク周波数2491.005MHzによるアンビギュイティが約0.4nsecあり、それをコード位相による時刻比較から解けることの確認を行う。

(3) 電離層補正精度

電離層補正のため、衛星から送信されるSバンド及びLバンドの測距信号をTCE地球局で受信し、計算により補正量を求めるが、その値がどれくらい正しいか、時刻比較結果での評価及び事後に他機関のTECデータにより評価を行う。

(4) 校正系での温度補正、温度の計測値での温度補償

TCE・HAC及びTCE地球局で、通信機器の温度変化、経年変化等により、遅延量に変化がある可能性があり、それぞれの校正系で、その遅延を測定して補正する。その補正の評価を行う。

衛星からのテレメトリのTCEの温度(2か所)、HACの各部の温度及び衛星構体温度並びに地球局の各部の温度から、上記補正との評価を行う。

(5) C/Noに対する精度の確認

TCE-PRO及び地球局-PROの計測機能では、C/Noが良いと計測精度は向上するが、計測の直線性が悪くなるという傾向があり、C/Noが悪いとその逆という傾向がある。以下によりC/Noを変えて測定し、特性を測定する。

- ・ TCE地球局送信パワーの調整
- ・ HAC送信アッテネーターの調整
- ・ TCE地球局の受信信号の調整

- ・ TCE地球局の受信信号にノイズを付加
- ・ 太陽雑音妨害時に測定(太陽雑音妨害は、夏至前後の衛星直下点の12時ごろに太陽が衛星の後ろを通過することにより、地球局の受信に妨害を与え、ノイズが増加する現象。)

5.3 パラメータ設定

(1) 温度補償

5.1.2(2)の結果から校正系の温度補正の係数を定める。

また、校正系が使えないとき(TCE地球局2局から信号を出す場合。故障時。レベルが相違して、同時に校正できない場合。ノイズが大きすぎて校正信号を重畳できない場合等。)に温度テレメから補正するための係数の設定を行う。

(2) C/No

5.2(6)の特性測定結果から、通常使用するC/Noを決定し、それにより地球局送信パワー、HACの送信アッテネーター等を決定する。

5.4 基本実験

5.4.1 HAC-CFSの周波数安定度測定

HAC-CFSの軌道上での振る舞いを確認するために周波数安定度の測定を行う。周波数安定度の測定は、理想的には、実験期間(3年の予定)を通して常時、測定できればよいが、他の実験が有る時間はできないので、長期安定度測定と、短期安定度測定に分けて実施する。それは、おおむね以下のとおりである。

- ・ 長期：1回2～4時間の測定を、定期的に週に0.5～2回、3年間。
- ・ 短期：1回24時間×4～7日連続の実験を、年に4回程度。

この中で、他の実験の関係もあるので、実際は以下のような予定である。

- ・ 長期：1回3時間の測定を、週に1回、3年間
- ・ 短期：1回24時間×7日連続の測定を、打上げから1年間は3か月に1回、3年目に2回。

これで測定できるのは、短期では、1秒から、24時間×7日×1/4 \approx 1.5 \times 10⁵秒である。長期では、24時間×7日 \approx 6 \times 10⁵秒から、24時間×365.25日×3年×1/4 \approx 2.3 \times 10⁷秒となる。

これは、1秒から2.3 \times 10⁷の期間の周波数安定度を測定できることとなる。しかし、1.5 \times 10⁵～

6×10^5 については測定できない。また、HAC-CFSの特性測定の意味からは、 2.3×10^7 は十分すぎる期間であるが、HAC-CFSの経年変化を見るために3年間の実験期間を通して測定を行う。

5.4.2 外乱時の測定

TCE、HACの条件の変化について、適宜、確認試験を行う。

(1) 温度変化

温度の日変化・年変化・食時の変化等に対する時刻比較への影響を調べる。

また、校正信号による温度補正、温度テレメトリによる温度補正の妥当性の確認も行う。

(2) 姿勢

食の出入り時、ホイールアンロード時及びマヌーバ時等の姿勢が乱れる時並びにアンテナパターン測定時などの姿勢を振る場合に通常の状態よりも大きく姿勢が変化するとされている。姿勢が変化すると、HACアンテナの位相中心と衛星重心が異なることから、TCE地球局とのレンジが変化する。その変化をTCEで計測できるかどうか、計測できれば、その値が正しいかどうかの評価を行う。

(3) 電源

電源電圧の変動(日変化、食時ほか)についてTCEの測定値に変化があるかどうか確認する。

(4) 軌道

通常時は日周運動で、マヌーバ時は1方向に軌道が変化する。それに伴い、TCEとTCE地球局間のレンジの長さが変化する。それをTCEで計測できるかどうか、計測できればその値が正しいかどうかの評価を行う。

5.4.3 移動実験

(1) 他のサイトで

CRLでは通信衛星を用いる衛星双方向時刻比較又はGPSコモンビューによる時刻比較を国内、国外の標準機関と定常的に行っているが、そのうちHACのアンテナカバレッジエリア内の機関に可搬局を持っていき、TCEを用いた時刻比較

を行う。

その方法としては、地上の時計と衛星の時計の比較を、固定局のあるCRL(小金井市)と、可搬局の移動先の2地点で行い、衛星搭載時計を仲介とした比較。もう一つは、HACの折り返しモードとし、HACを中継器として利用し、地上の2地点間の時刻比較を行う。

その二つの方法による時刻比較結果の差、また他の方法による時刻比較結果の差を測る。

また、海外に移動したときに、ETS-Ⅷの測距を行うモニタ局よりも高精度な局として、測距の局の1局として測距を行い、測距性能についての確認を行う。

(2) SLRと付け合わせ

HACのSLR実験を、CRLの光センター又は他のSLR局で行う際に、その近傍に可搬局を移設して試験を行い、SLRでの測距と、TCE、TCE地球局での測距の性能差の確認を行う。

5.5 応用実験

応用実験的なものとして、以下に掲げるものを予定している。その詳細については別稿[9]を参照されたい。

- ・一般相対論効果の検証。
- ・HAC-CFS基準として、TCE地球局2局間の時刻比較。
- ・HACを中継器モードとして、TCE地球局2局間の時刻比較。
- ・光と電波による測距の比較。

6 むすび

現時点におけるTCEの各種実験計画について説明した。今後、実験計画をより具体化し、実験計画書としてまとめる予定である。また、準天頂衛星を用いた測位システムによる必要性から、実験項目が増えることも予想されるが、適宜実験項目を見直し、TCE実験を更に有意義なものにしていく所存である。

参考文献

- 1 M. Homma, S. Yoshimoto, N. Natori, Y. Tsutsumi, "Engineering Test Satellite-8 for Mobile Communication and Navigation Experiment", IAF, No.IAF-00-M.3.01, pp.256-263.
- 2 Y. Kawakami, S. Yoshimoto, Y. Matsumoto, T. Ohira, T. Ide, "S-Band Mobile Satellite Communications and Multimedia Broadcasting Onboard Equipment for ETS-VIII", IEICE Trans.Commun., Vol.E82-B, No.10, pp.74-81, Oct. 1999.
- 3 河野功, 小暮聡, 空野正明, 梶井誠, 伊藤憲, 江州秀人, 今江理人, 岩田敏彰, "準天頂衛星による高精度測位実験計画", 第47回宇宙科学技術連合講演会.
- 4 高橋靖宏, 今江理人, 藤枝美穂, 森川容雄, 木村和宏, 伊東宏之, "準天頂衛星利用測位システムの時刻管理系の全体計画", 第47回宇宙科学技術連合講演会.
- 5 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, "3-10-2 データ処理部", 本特集.
- 6 高橋靖宏, 後藤忠広, 中川史丸, 藤枝美穂, 今江理人, 木内等, 細川瑞彦, 野田浩幸, 佐野和彦, "3-10-1 高周波部", 本特集.
- 7 藤枝美穂, 高橋靖宏, 後藤忠広, 中川史丸, 今江理人, "4-8-1 高精度時刻比較実験用地球局", 本特集.
- 8 中川史丸, 後藤忠広, 藤枝美穂, 高橋靖宏, 今江理人, 木内等, "4-8-2 データ処理・解析部", 本特集.
- 9 後藤忠広, 細川瑞彦, 中川史丸, 高橋靖宏, 藤枝美穂, 今江理人, 木内等, 相田政則, 高橋幸雄, "4-2-5 ETS-VIII搭載用時刻比較装置 -その2 精密時刻比較計画-", 通信総合研究所季報, Vol.49, Nos.1/2, Mar/Jun. 2003.

たか ぼし やす ひろ
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



いま え ち と
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



ごとう ただ ひろ
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

なか がわ しみ 丸
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

ふじ えだ み ほ
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

きうち ひとし
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



ほそかわ みず ひこ
細川瑞彦

電磁波計測部門原子周波数標準グループリーダー 理学博士
原子周波数標準、時空計測

