

4-4 ETS-VIII搭載用時刻比較装置 — その1 搭載機器の開発 —

4-4 Time Comparison Equipment for ETS-VIII Satellite — Part 1 Development of Flight Model —

高橋靖宏 今江理人 後藤忠広 中川史丸 木内 等 細川瑞彦
相田政則 高橋幸雄 野田浩幸 浜 真一
TAKAHASHI Yasuhiro, IMAE Michito, GOTOH Tadahiro, NAKAGAWA Fumimaru,
KIUCHI Hitoshi, HOSOKAWA Mizuhiko, AIDA Masanori, TAKAHASHI Yukio,
NODA Hiroyuki, and HAMA Shin'ichi

要旨

ETS-VIII(技術試験衛星VIII型)は2004年打上げ予定の先端的な共通基盤技術の開発を目的とした衛星であり、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を搭載する。その原子時計の性能評価を目的に通信総合研究所(CRL)は、高精度時刻比較装置(TCE)を提案して、搭載を認められた。現在、搭載機器の製造を終了し、衛星全体での試験に供されている。本稿では本装置の概要、原理、構成等について述べ、伝搬遅延、電離層遅延、送受信機等の遅延等の誤差をできる限り小さくすることにより、10psオーダーで時刻比較が可能であることを述べるとともに、TCEの開発結果を報告する。

The Engineering Test Satellite-VIII (ETS-VIII) is a Japanese geostationary satellite which will be launched in 2004. Its missions will include mobile communication experiments and application experiments using Cesium atomic clocks in space. Using this satellite, the CRL (Communications Research Laboratory) and the NASDA (National Space Development 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 system for precise time transfer between the ground reference clock and on-board clock. The system is designed to make the time transfer at a precision of around 10ps.

【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な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、宇宙開発事業団(NASDA)(現宇宙航空研究開発機構: JAXA)のミッションとして、原子周波数標準器(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が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。

本稿では、ETS-VIII搭載の高精度時刻比較装置(TCE)の概要、原理、構成等について述べ、本

実験計画で伝搬遅延、電離層遅延、送受信機等の遅延等の誤差をできる限り小さくすることにより、10psオーダーで時刻比較が可能なことを述べるとともに、TCEの開発結果を報告する。

2 日本の衛星測位技術開発

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、船舶の測位システム、時刻供給等、GPS[4]を用いたシステムが各方面で大いに利用され、また、地震観測網や標準時刻の国際比較[3]等にも利用されている。

しかしながらGPSは米国の軍用システムであり、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。また、同様の衛星測位システムとして、ロシアのGLONASS[5]が運用を開始しているが、ロシアの国情から、安定運用や将来に関して不透明なところが多い。一方、欧州では、衛星測位システムのあり方についての議論が古くからなされ、上記のGPSに対する危惧やGPSのみに頼ることの危険性などから、GALILEO計画[6]が開始され、現在システム設計のフェーズにある。計画上は、2008年ごろまでの実運用開始を目指して検討が進められている。

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、平成8年ごろ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た。平成9年3月に宇宙開発委員会の分科会報告が出され、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[7]。

- ・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

この中で、衛星搭載原子時計はGPS衛星に搭載されているセシウム原子時計及び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衛星搭載用原子時計[8]の研究開発はCRL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NASDAにより進められることとなった。

NASDAでは、ETS-VIIIにNASDAのミッション

として、セシウム原子時計を搭載する。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、衛星測位技術の要素技術の習得を目的としている。

CRLでは、ETS-VIII搭載の原子時計の衛星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。

その後、準天頂衛星が2008年打上げ予定で計画され、この衛星を用いた衛星測位システムの開発が進められている。このシステムでの時系の管理についてCRLが担当する予定であり、その中の衛星-地上間の時刻比較は、TCEの方式によるものを開発する予定である。

3 ETS-VIII(技術試験衛星VIII型)[1]

ETS-VIIIは図1に示す外観で、2004年に打上げ予定であり、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をはじめ、各種の実験が予定されている。

また、もう一つのミッションとして、ETS-VIIIには、我が国の人工衛星では初めて、NASDAのミッションとして、原子時計が衛星に搭載され、軌道上性能の把握等を行い、衛星測位技術の要素技術を習得すること及び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。



図1 ETS-VIIIの外観

3.1 搭載原子時計

衛星搭載原子時計は、NASDA のミッションとして、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。

その諸元は以下のとおりである。

- ・周波数：10.23MHz-5.5×10³Hz
(相対論的補正項を含む)
- ・重量：13.6kg
- ・精度：±1×10⁻¹¹
- ・安定度：1.0×10⁻¹¹ (1~3.6s)
1.89×10⁻¹¹/√τ (3.6~10³s)
6×10⁻¹⁴ (10⁵~10⁶s)

これ以外の NASDA のミッションとしては、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 アンテナ及び SLR (Satellite Laser Ranging) 用機器等が搭載される。これらを用いて、NASDA では、以下の衛星測位技術に関する要素技術の習得を計画している。

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

3.2 高精度時刻比較装置(TCE)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送信し、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。

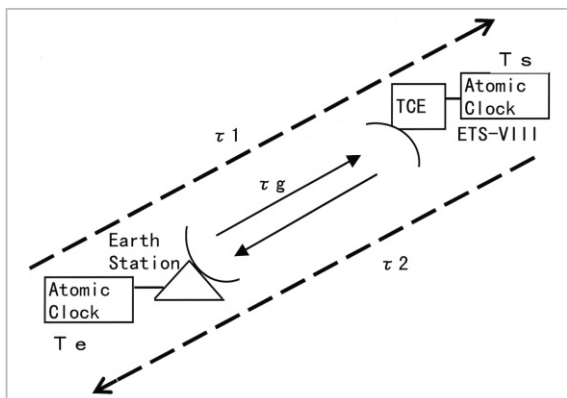


図2 双方向時刻比較の原理図

双方向時刻比較なので、伝搬路上の電離層や大気での遅延とその変動、衛星の運動の影響がほぼ相殺でき、高精度の時刻比較が可能になる。

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 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 ps オーダーの時刻比較が可能となる。

3.3 TCEの原理

本装置による実験は、図2のように衛星から地上へ、地上から衛星へ時刻比較用の信号を送信する。その場合、それぞれで、その受信した信号と時刻差を計測する。その計測値

$\tau 1$: 衛星の時計 T_s を基準に地上からの信号との時刻差の計測値

$\tau 2$: 地上の時計 T_e を基準に衛星からの信号との時刻差の計測値

τg : 衛星-地上間の伝搬時間として、

$$\text{UPLINK} \quad : \tau 1 = \tau g + T_s - T_e \dots\dots(1)$$

$$\text{DOWNLINK} : \tau 2 = \tau g + T_e - T_s \dots\dots(2)$$

この差と和をとる

$$\text{UP-DOWN} = \tau 1 - \tau 2 = 2(T_s - T_e) \dots\dots(3)$$

$$\text{UP+DOWN} = \tau 1 + \tau 2 = 2\tau g \dots\dots\dots(4)$$

となり、差からは時刻差が、和からは伝搬時間が求められる。

伝搬時間からは、衛星-地上間の距離を計算でき、測距データとして用いることが可能である。

実際の計測は、測距信号として送信される 1.023MHz で駆動される PN 符号 (GPS の C/A コード相当) のコードクロック情報と、その搬送波位相情報が用いられ、前者で概略の計測を行い、最終的に後者の情報により高精度の計測がなされる。

3.4 TCEの構成

本装置及び搭載原子時計系の主な諸元は表1に示すとおりである。

表1 TCEと原子時計系の主要諸元

送信出力	5.7W
Sバンド送信周波数	2491.005MHz
受信周波数	2656.390MHz
Lバンド送信周波数	1595.880MHz
PNコード	GPS C/A コード相当
大きさ (TCE)	32cm×32cm×32cm以下
重量 (TCE)	12.4kg以下

図3は、TCE (青色枠内) 及び搭載原子時計系 (太枠外) のブロック図であり、以下の機能を有する。

- ・衛星から地上へ時刻比較用の信号を送信する機能 (送信信号)
- ・地上からの時刻比較用の信号を受信する機能 (受信信号)
- ・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 (送信系校正信号及び受信系校正信号)

この送信信号及び受信信号を用いて、双方向伝送方式で時間差を測定する。また、送信系校正信号及び受信系校正信号により、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

延時間の変動補正を行う。そのため、TCEの信号処理部 (緑色枠内) では、受信信号、受信系校正信号及び送信系校正信号の3チャンネルの信号処理を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。

- ・送信信号：ベースバンド信号合成部により送信搬送波及びPN符号が生成され、PN変調後に、Sバンド送信系で増幅され、1.0mφアンテナから送信される。
- ・受信信号：1.0mφアンテナで受けた電波をSバンド受信系で分岐し、周波数変換後、PN復調し、搬送波位相計測及びコードクロック計測される。
- ・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符号はPN変調後、Sバンド受信系の前の方向性結合器から挿入され、受信信号と共に処理される。
- ・送信系校正信号：送信信号をアンテナの前の方向性結合器で分岐し、その信号は周波数変換後に、受信信号及び受信系校正信号と共に処理される。

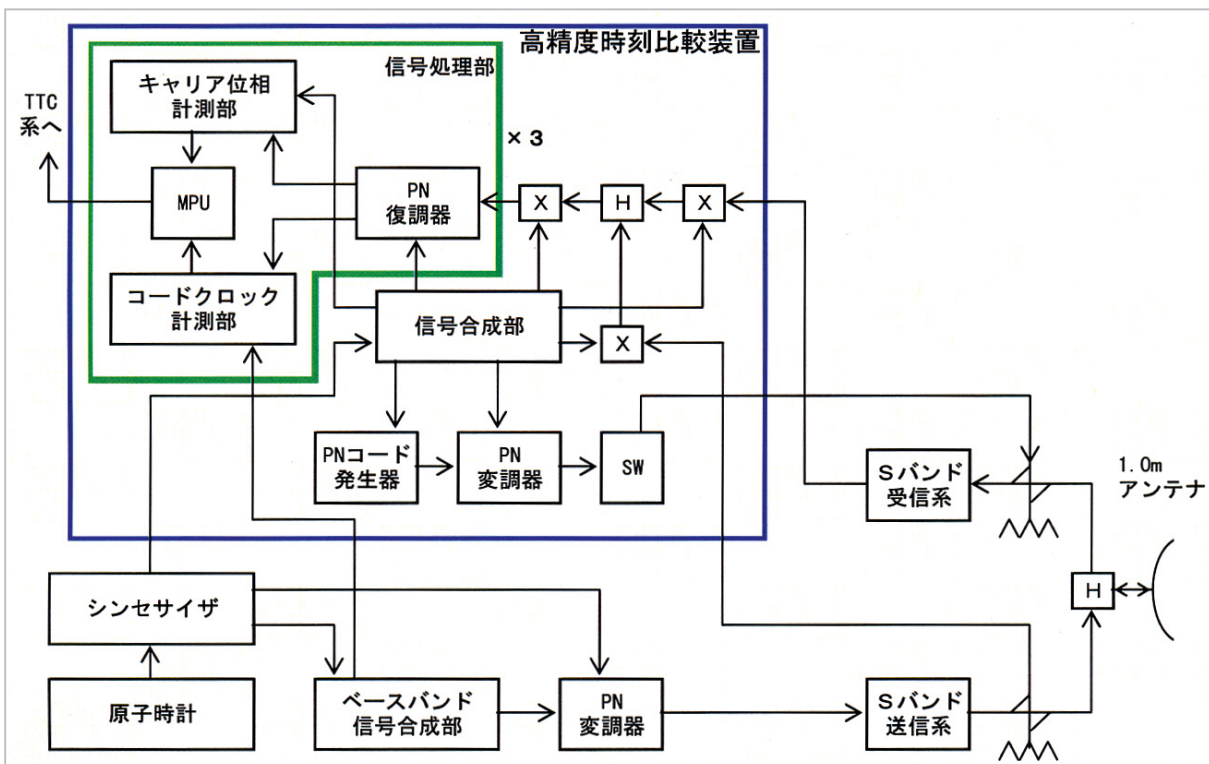


図3 高精度時刻比較系衛星搭載部ブロック図

3.5 地上系

本装置の実験用の地球局として、直径2mのアンテナを持つ地球局を平成14年度から製造中であり、1局はCRL本所に固定、1局は可搬局として移動することを計画している。地球局の時刻比較部分はTCEのEMを改修して使用し、衛星上と同じ測定を地上でも行うとともに、衛星上と同様に送信系及び受信系の校正も行う。

3.6 各種誤差の補正

(1) 伝搬遅延等

双方からの信号が同一の伝搬路を通過するので、電離層及び大気での遅延と、その変動の影響を相殺できる。また、衛星自体の運動の影響も相殺することができる。

以上は、UPLINKの τ_g とDOWNLINKの τ_g を同一とした場合であるが、実際には、双方から電波を出してから受信するまでに、衛星はその軌道上で移動し、地球局は自転により移動する。その移動距離は同じでないことから、UPLINKの τ_g とDOWNLINKの τ_g は同一ではない。しかし、これは、衛星及び地球局の位置が分かれば計算できる値であり、計算により補正することができる。さらに衛星の軌道は理想的な軌道からのずれがあり、これが大きい場合も同様にUPLINKの τ_g とDOWNLINKの τ_g は同一ではなくなるが、衛星の軌道予測値から計算により補正することができる。

(2) 電離層の影響^[9]

本装置で用いるSバンドのUPLINK/DOWNLINKの周波数は2656.390MHz/2491.005MHzであり、約170MHzの差がある。ここで、電離層での群遅延時間の変化に基づく遅延距離 ΔL は、使用周波数を f 、その時の電離層中の単位面積当たりの全電子数を N_e とすると、

$$\Delta L = \frac{40.3}{f^2} N_e \dots\dots\dots (5)$$

で計算でき、それをUPLINK/DOWNLINKの周波数で計算すると、表2のようになり、その差は太陽活動度極小期夜間で0.024m、太陽活動度極大期昼間では0.78mの差となり、電離層による遅延を相殺しきれないことが分かる。しかし、ETS-VIIから送信されるSバンド及びLバンドの2

周波の測距用信号の遅延時間差をリアルタイムで測定することができるので、その2周波での遅延時間の測定値の差 $\Delta \Delta L$ は次式で表され、

$$\Delta \Delta L = 40.3 \left(\frac{1}{f_S^2} - \frac{1}{f_L^2} \right) N_e \dots (6)$$

これにより電離層中の単位面積当たりの全電子数 N_e の計算が可能になる。ここで、 f_S はSバンドの周波数、 f_L はLバンドの周波数である。よって、UPLINK/DOWNLINKの周波数が相違しても計算により補正が可能である。

表2 周波数の相違による遅延距離差

	周波数 (MHz)	電離層での 遅延距離	
		3×10^{16} (m^2)*1	1×10^{18} (m^2)*2
t e c			
uplink	2656.390	0.171m	5.71m
downlink	2491.005	0.195m	6.49m
差		0.024m	0.78m

t e c : 電離層中の単位面積当たりの全電子数

*1 : 太陽活動度極小期夜間天頂方向

*2 : 太陽活動度極大期昼間天頂方向

(3) 通信機器の遅延^[10]

双方向時刻比較であっても、送受信系で共通の経路ではない送信機及び受信機等は、それによる遅延及びその経時変化は相殺することはできない。これは時刻差の測定値の誤差要因になる。しかし、本装置では、その遅延量をリアルタイムに測定する機能があり、補正することが可能である。

3.7 時刻比較精度

本装置を用いた回線計算例と時刻比較精度を表3に示す。これにより、回線品質としては65dB・Hz以上が期待され、時刻比較精度は、1秒間の積分値で、種々の誤差をすべて除いた理想の場合では、拡散用PNコードクロックを用いて1ns程度、また、搬送波位相によりpsオーダーが期待される。実際には誤差を相殺又は除去しきれない部分があるので、この時刻比較精度

表3 回線設計例と時刻比較精度

	Sバンド		Lバンド
	地上→衛星	衛星→地上	衛星→地上
送信電力(W)	18.00	18.00	18.00
送信アンテナ利得(dBi)	31.90	21.30	16.90
給電ロス (dB)	3.00	5.90	2.90
E. I. R. P (dBW)	41.45	27.95	26.55
伝搬損失 (dB)	192.52	191.96	188.10
降雨減衰 (dB)	0.10	0.10	0.10
大気減衰 (dB)	0.40	0.40	0.40
受信アンテナ利得(dBi)	22.30	31.34	27.47
給電損失 (dB)	3.30	3.00	3.00
指向ロス (dB)	0.20	0.20	0.20
アンテナ雑音温度 (T : K)	300.00	100.00	100.00
雑音電力密度 (No = k T : dBW/Hz)	-203.83	-208.60	-208.60
受信信号強度 (C : dBW)	-132.57	-134.42	-134.12
校正信号によるロス (dB)	5.00	5.00	5.00
C/No (dB·Hz)	66.26	67.43	65.83
コード位相計測精度 (m) (BW=1Hz,1sec)	0.43	0.37	0.45
" (nsec)	1.43	1.25	1.50
搬送波位相計測精度 (mm) (BW=1Hz,1sec)	0.16	0.15	0.29
" (psec)	0.55	0.51	0.96
コード位相計測精度 (m) (BW=1Hz,100sec)	0.043	0.037	0.045
" (nsec)	0.143	0.125	0.150
搬送波位相計測精度 (mm) (BW=1Hz,100sec)	0.016	0.015	0.029
" (psec)	0.055	0.051	0.096

は10ps程度になることが予想されるが、それでも、これまでの時刻比較に比べて格段に高精度な測定結果が期待できる。

3.8 プロトフライトモデル(PFM)

TCEのPFMの外観図を図4に示す。PFMは、衛星搭載の認定試験に供され、その後衛星に搭載されるものである。このPFMでは、これまで以下の試験を行ってきた。

- ・各ローカル信号の発振周波数、レベル、安定度
 - ・受信信号に送信及び受信の校正信号を重畳した時の各PN符号及びキャリア位相の計測性能
 - ・熱真空試験、振動試験、衝撃試験、EMC試験
- このうち、2656.390MHz信号の周波数安定度特性を図5に示す。試験結果は時刻比較に十分な性能であることが分かった。

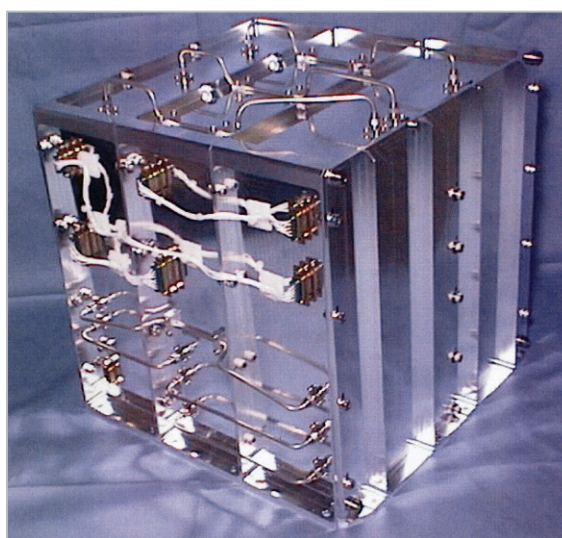


図4 TCEのPFM外観図

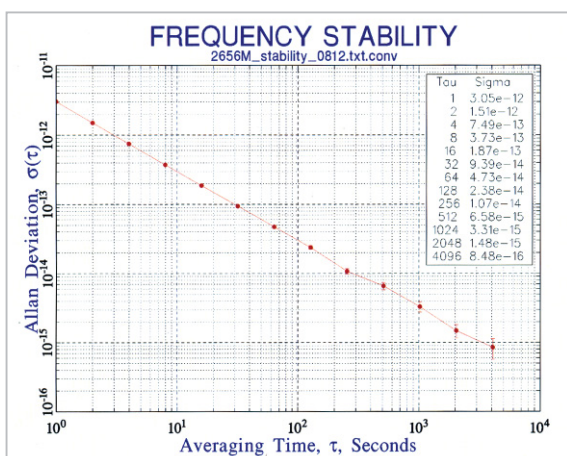


図5 2.65639GHzの安定度測定結果

4 むすび

TCEの原理、構成、諸元等について述べるとともに、本実験計画で伝搬遅延、電離層遅延、送受信機等の遅延、等の誤差をできる限り小さくすることにより、10ps オーダーで時刻比較が可能なことを述べた。本装置は2004年の打上げに向け、PFMの製造・性能評価を終了した。今後、衛星全体の試験を行うとともに、地球局の整備後に地上においての接続試験を行う予定である。

本装置のETS-VIIIへの搭載化に御尽力戴いた関係各位に感謝する。

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 相田政則, "5.時刻周波数標準の発生、維持、供給 5.1 発生と公表の自動化システム", 通信総研季報, Vol.45, No.1/2, Mar/June 1999.
- 4 B. Hofmann-wellenfof, H. Lichtenegger, J. Collins: GPS Theory and Practice, Springer-Verlag Wien, New York, 1994.
- 5 安田明生, "GLONASSの概要と対露ミッション報告," 日本航海学会 GPSシンポジウム'99, No.1.3, Nov. 1999.
- 6 伊東 憲, "GNSS'99とGALILEOの動向," 日本航海学会 GPSシンポジウム'99, No.1.2, Nov. 1999.
- 7 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.
- 8 T. Morikawa, K. Takahei, M. Uehara, M. Tsuda, "DESIGN ANALYSIS OF A SAPPHIRE LOADED CAVITY FOR A SPACEBORNE HYDROGEN MASER," Conference on Precision Electromagnetic Measurements, No.MOP4-3, pp.74-75, Sydney, Australia, May 2000.
- 9 田中寅夫, "誤差要因", GPS—人工衛星による精密測位システム—, 日本測地学会(編), 第7章, (社)日本測量学会, 東京, 1986.
- 10 今江理人, 高橋靖宏, 相田政則, 後藤忠広, 澁谷靖久, 真野和彦, 栗原則幸, "衛星双方向時刻比較における衛星地球局局内遅延時間変動とその測定法," 2001 信学総大, No.B-2-3, Mar. 2001.

たかはし せいひろ
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



いまい ちひと
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

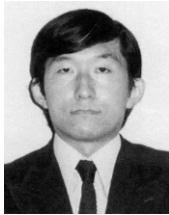


ごとう ただひろ
後藤 忠広

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 しみず
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



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 しみず
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



あいだ まさのり
相田 政則

企画部企画室主任研究員
周波数時刻標準



たかはし ゆきお
高橋 幸雄

情報通信部門けいはんな情報通信融合研究センター研究主管
測位技術、位置天文、VLBI

の だ ひろゆき
野田 浩幸

宇宙航空研究開発機構宇宙利用推進本部 ETS-VIIプロジェクトチーム副主任
開発部員
衛星測位実験システム



はま しいち
浜 貴一

電磁波計測部門準天頂衛星グループリーダー
衛星通信、VLBI