

技術試験衛星* 型搭載 高精度時刻基準装置の開発

Development of High-Accuracy Clock for ETS-8

浜本 直和
HAMAMOTO Naokazu

野田 浩幸
NODA Hiroyuki

高橋 環
TAKAHASHI Tamaki

佐藤 友一
SATO Tomoichi

地上からの可視性に優れている静止衛星である技術試験衛星* 型(ETS-*)に搭載される高精度時刻基準装置(HAC)は、測位基盤技術の修得と測位システムの高機能・高精度化のための技術データ取得を目的としたミッション機器である。この技術及びシステムにより、将来的には地上ユーザーの既存のGPS衛星による測位性能の向上(完全性,連続性,有効性,精度)を図ることができる。

HACは、安定した時刻をユーザーに提供するためにセシウム原子時計を搭載しており、これを基に生成される航法信号(Lバンド,Sバンド)を地上の各ユーザーに送信する“原子時計モード”,及び地上で生成された航法信号を受信して地上に折り返す“測位信号中継モード”の二つの機能を持っている。

現在までにエンジニアリングモデルの開発が終了し、所望の性能を得られることが確認された。

The high-accuracy clock (HAC) is an item of equipment for navigation that will be carried on board the geostationary Engineering Test Satellite * (ETS-*). The purpose of installing the HAC is to establish the basic techniques for navigation. In the future, this technique and system will improve the performance of navigation by the existing global positioning system (GPS) in such areas as integrity, continuity, availability, and accuracy.

The HAC has two modes: an atomic clock mode and a bent-pipe mode. In the atomic clock mode, the navigation signal is generated from the onboard cesium atomic clock and transmitted to the user on the ground. In the bent-pipe mode, the navigation signal is generated in the ground station and relayed by the HAC to the user on the ground.

To date, development of an engineering model of the HAC has been completed and the desired performance has been confirmed.

1 まえがき

HAC(High Accuracy Clock)は、2003年に打上げ予定のETS-8(Engineering Test Satellite 8)に搭載されるミッション機器の一つであり、測位基盤技術の修得と測位システムの高機能・高精度化のための技術データ取得を目的としたミッションを行うための機器である。将来的には、既存のGPS(Global Positioning System)衛星に測位ミッションを搭載した静止衛星を加えることで測位性能の向上が図れることになる。HACは、1998年に宇宙開発事業団(NASDA: National Space Development Agency of Japan)の受注を受けて開発を進めている。

2 静止衛星による測位システム性能の向上

米国が保有するGPSシステムは、複数の周回衛星から構成されるシステムであり、ユーザーは、4~5個のGPS衛星からの航法信号を受信し、自分の位置あるいは時刻の情報を得ている。これに対して、HACが搭載されるETS-8は静止衛星であり、サービスエリア内の地上局からの可視性が優れているという利点から、以下に示す測位性能の向上が図れる。

(1) 完全性の向上 完全性とは、航法誤差が要求値を

超えた場合に、リアルタイムでユーザーに警報を発する能力である。HACシステムでは、複数の地上局において測位を行うことにより、一つのGPS衛星に異常があった場合にそれを検知できる。将来的には、その情報を衛星から送信される信号(航法メッセージ)などにより各ユーザーに伝えることで、完全性の向上が図られる。

(2) 連続性の向上 連続性とは、一定時間にわたって航法システムがサービスし続ける能力である。HACは、静止衛星に搭載されており、サービスエリア内の地上局に対して連続性の向上が図られる。

(3) 有効性の向上 有効性とは、システムが所要の航法精度を満足して稼働する能力である。GPS衛星に加えて、HACも一つのGPS衛星と見立てることで、測位精度の向上が図られる。

(4) 精度の向上 GPS衛星は、米国国防省の所有であり、故意の精度劣化(SA: Selective Availability)の影響を受けている。これに対し、HACシステムでは、複数の地上局において測位を行うことにより、この誤差を検出できる。将来的には、(1)と同様に、その情報を各ユーザーに伝えることで、地上ユーザーの測位精度の向上が図られる。また、地上で収集された電離層遅延の誤差情報なども、同様に各ユーザーに伝えることができる。

3 HAC 全体システムの構成

地上系を含めたHACシステムの全体構成を図1に示す。HAC全体システムは、以下の設備から構成され、現在はこのシステムの一部となる衛星搭載機器を開発している。

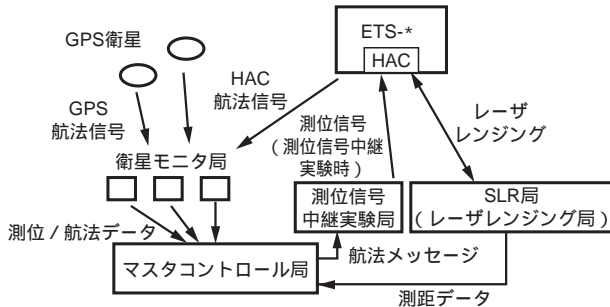


図1 HAC全体システムの構成 GPSの航法信号に加えてHACの航法信号が衛星モニタ局で受信され、測位データがマスタコントロール局へ送られる。

Total navigation system of HAC

- (1) HAC ETS-8 に搭載される機器であり、航法信号の送信を行う。
- (2) マスタコントロール局 データ収集、衛星の標定などのデータ処理を行う。
- (3) 測位信号中継実験局 測位信号中継実験において、アップリンク信号の送信(航法信号、パイロット信号)を行う。
- (4) 衛星モニタ局 HAC及びGPS衛星からの信号を受信し、受信データをマスタコントロール局へ転送する。
- (5) SLR局 レーザレンジングを行う。

4 HAC

4.1 HACの機能

ETS-8 に搭載されるHACサブシステムは、測距を行うための擬似ランダム(PN: Pseudo random Noise)コードに、衛星の軌道情報などを含む航法メッセージを重畳した航法信号をLバンド及びSバンドの2周波で送信する。2周波を必要とする理由は、電波が電離層を通過する際に遅延が発生するので、この遅延時間を補正する(周波数依存性があるため、2周波数の遅延時間の差を比較することで、遅延時間補正が可能になる)ためである。

HACは、航法信号を送信する方式として、次の二つのモードを持っている。

- (1) 原子時計モード 衛星内にセシウム原子時計を所有し、この発振周波数を基に搬送波、PNコードを発生し、地上に送信する。航法メッセージについては、地上

で生成されてHACにアップロードされるが、一部のデータはHAC内で上書きされる。

- (2) 測位信号中継実験モード 地上局内にセシウム原子時計を所有し、これを基に航法信号及びパイロット信号が生成される。航法信号は、HAC内で周波数変換されて地上に送信される。周波数変換を行うためのローカル信号は、パイロット信号を基に生成される。

HACは、この二つのモードのうち、どちらかを選択して運用を行う。(1)の原子時計モードは、GPSシステムを構築する衛星(NAVSTAR)と同じ方式であり、衛星が自律しているために地上局の負担を軽減できる長所がある一方、衛星の重量/電力が増えること、及び原子時計のため特別な温度制御などが必要となる短所がある。(2)の測位信号中継実験モードでは、衛星の構成が簡単になる長所がある一方、衛星を維持管理する地上局の負担が増えるという短所があり、HAC実験では、これらの二つのモードにおける測位性能の比較(精度、標定方法など)を行うことも実験目的の一つとしている。

4.2 HACの構成

衛星に搭載されるHACの構成を図2に示す。

HAC-CFSは、今後のGPSに搭載予定の原子時計と同種のもの海外から調達したものである。原子時計の発振周波数は、電源電圧、温度、磁場などの影響を受けやすく、これらの環境に注意を払うとともに、温度についてはヒータなどによる特別な温度制御を実施している。

HAC-SYNTHは、原子時計モード時にはHAC-CFSからの基準周波数を原振として動作し、測位信号中継実験モードにおいては地上から送信されるパイロット信号に対してHAC-SYNTH内部のVCXO(Voltage Controlled Xtal (crystal) Oscillator)及びHAC-SBPR内部の位相比較器により全体でPLL(Phase Locked Loop)を形成し、これを原振として動作する。これらの原振を基にして、搬送波周波数、ローカル信号などを生成している。

HAC-LMPA、HAC-SMPAは、18 W級のSSPA(Solid State Power Amplifier)を搭載しており、これにより航法信号を増幅して出力する。また、原子時計モードにおいては、L/Sバンド搬送波をPNコードでBPSK(Binary Phase Shift Keying)変調する。

HAC-BPUは、原子時計モードにおいてPNコードを生成する機能以外に、衛星システムのデータ処理機器と1553 Bバス^(注1)によりインタフェースしてHAC内の機器のテレメトリ・コマンド制御を行うこと、及び原子時計の温度制御及び安定化電源の供給をしている。また、各機器及び接続同軸ケーブルの温度変動による遅延時間変動を補正するため、各部の温度モニターを行いリアルタイムで遅延時間の補正値を計算して、航法メッセージに上書きする。

(注1) 米軍規格で規定されている多重データバスの一つ。

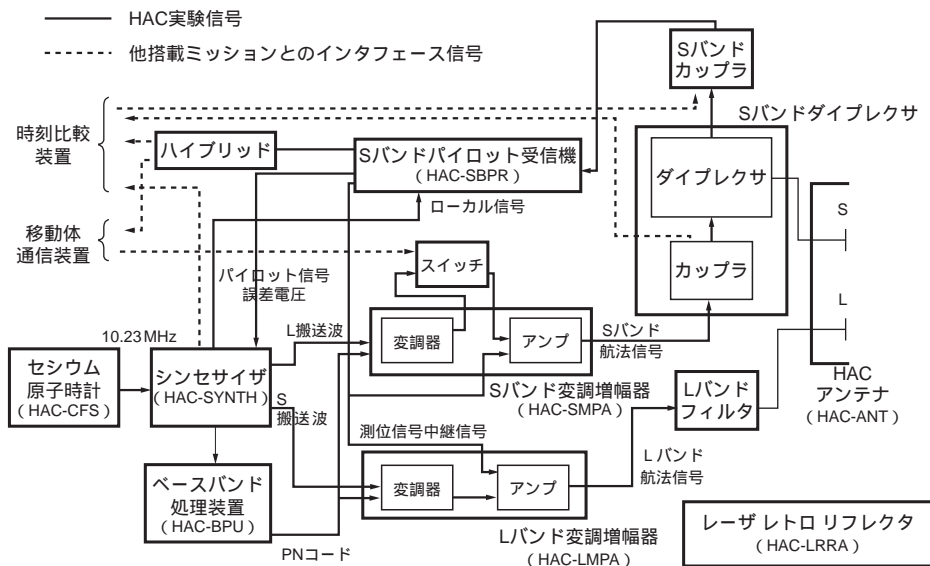


図2 . HACの構成 HACは、セシウム原子時計、ベースバンド処理装置、L/Sバンド送信系、Sバンド受信系などから構成される。
Configuration of HAC for ETS-*

HAC-ANTはセンタフィードパラボラアンテナであり、Lバンド(右旋円偏波)/Sバンド(左旋円偏波)共用のパッチアンテナにより給電している。

HAC-LRRAは、他の機器とはまったく独立に機能するものであり、レーザレンジングを行うことにより、PNコードによる測距とは別に、地上局-衛星間の距離を正確に測定することができる。

これらの機器により、原子時計モード及び測位信号中継実験モードにおいて、航法信号を地上に送信する。

更に、HACは、ETS-8の他の搭載ミッションである移動体通信装置及び時刻比較装置とのインターフェースもっており、それぞれHAC機器を介した移動体通信信号の送受信、衛星/地上局の原子時計の時刻比較実験も行う。

4.3 HACの実験目的

ETS-8に搭載されているHACは、2章に示した静止衛星による測位性能の向上を目指すものであり、HACで予定されている実験項目は次のとおりである。

- (1) 原子時計(HAC-CFS)の軌道上における挙動の評価
複数局による航法信号の受信データ及びレーザレンジングによるデータなどから、搭載原子時計の挙動を推定する。
- (2) 測位信号中継方式の運用/有効性の評価
原子時計モードと測位信号中継モードとの比較を行う。
- (3) 衛星/地上局間の時刻比較実験
時刻比較装置とインターフェースして、衛星に搭載している原子時計と地上にある原子時計との時刻比較を行う。
- (4) 衛星の精密軌道決定
位置が既知の複数の地上局から測位を行い、衛星自身の測位(軌道決定)を行う。
- (5) 測距精度のコード幅依存性
一般に開放されているGPSシステムのPNコード幅(1.023 Mbps)以外に3種

のコード幅による測距も行い、測距精度比較を行う。

- (6) ユーザー測位実験
既存のGPSシステムによる測距に加えてHACによる測距も行うことで、測距性能が向上されることの確認(2章に示す内容の確認)を行う。
- (7) 測位システム運用技術の習得
地上局を含めたHAC全体システムのオンライン/オフライン運用の構築を行う。

4.4 HACの性能

HACの主要性能を表1に示す。

表1 . HACの主要性能
Main performance characteristics of HAC

項目	内容	備考	
L/Sバンド送信信号	周波数(Lバンド) (Sバンド)	$f_c \times 156 \pm 0.00160 \text{ Hz}$ $f_c \times 487/2 \pm 0.00250 \text{ Hz}$ ($f_c : 10.23 \text{ MHz} \cdot 5.52328 \text{E} \cdot 3 \text{ Hz}$)	約 1,595.88 MHz 約 2,491.005 MHz
	送信 EIRP (L/Sバンド)	58.6 dBm 以上 / 60.8 dBm 以上	- 3 dB エリア
	変調方式	BPSK	
	PNコード チップレート	1.023 Mbps/1.705 Mbps /3.410 Mbps/5.115 Mbps	測位信号中継実験モード時は 1.023 Mbps だけ
	航法メッセージ データレート	50 bps	
	偏波(L/Sバンド)	右旋円偏波 / 左旋円偏波	
Sバンド受信信号	周波数 (航法信号/ パイロット信号)	2,656.39 MHz / 2,659.8 MHz	
	受信 G/T	- 8.4 dB/K 以上	- 2 dB エリア
	偏波	左旋円偏波	

EIRP : Equivalent Isotropic Radiated Power
G/T : Gain to noise Temperature ratio

4.5 HACの試験結果

HAC-ANT以外のHAC機器については、99年8~9月に



図3 . HACサブシステム(アンテナを除く)の外観 アンテナを除く HAC機器の全体を示す。右端がセシウム原子時計。
HAC subsystem (excluding HAC antenna)

において、エンジニアリングモデル(図3)によるサブシステム試験を実施し、所望の電気性能が得られることを確認した。サブシステム試験は、図3に示すとおり、2枚のアルミ板の上に衛星搭載時の機器配置と同じ位置に取り付けて試験を実施した。

また、HAC-ANT(図4)については、99年12月にフライトモデルによる試験が終了しており、所望の電気性能が得られていることを確認している。HAC-ANTは写真に示すとおり、ETS-8 に搭載される移動体通信用の大型アンテナ(開口径



図4 . HACアンテナ(1m) 反射鏡の左右にあるのが大型アンテナとの干渉を回避するための遮蔽板である。
HAC antenna

表2 . HAC(エンジニアリングモデル)の試験結果
Test data of HAC engineering model

項目	要求値	試験結果	備考
Lバンド送信 EIRP (原子時計モード / 測位信号中継実験モード)	58.6 dBm 以上	58.98 dBm / 58.82 dBm	ピーク - 3 dB
Lバンド送信周波数	fc±0.0016 Hz	- 0.0002 Hz	
Sバンド送信 EIRP (原子時計モード / 測位信号中継実験モード)	60.8 dBm 以上	63.41 dBm / 63.40 dBm	ピーク - 3 dB
Sバンド送信周波数	fc±0.0025 Hz	+0.0014 Hz	
Sバンド受信 G/T	- 8.4 dB/K 以上	- 6.8 dB/K	ピーク - 2 dB

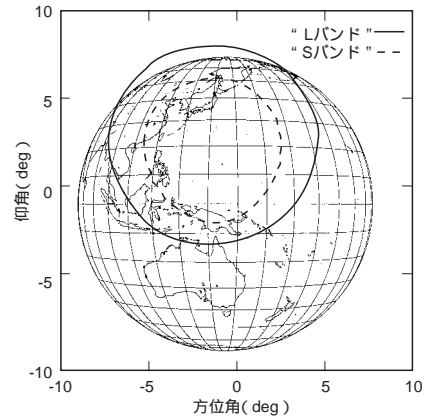


図5 . Lバンド / Sバンドサービスエリア アンテナのピーク - 3 dB領域であるサービスエリアを示している。衛星モニタ局を海外にも配置することを考慮したエリアとしている。
Service areas of L-band and S-band

13 m)との干渉回避のため、2か所に遮蔽(しゃへい)板を付加している。

主な試験結果は表2に示すとおりである。また、アンテナ試験結果に基づくLバンド / Sバンドのサービスエリアをそれぞれ図5に示す。

5 あとがき

HACについては、現在までにエンジニアリングモデルの開発を終了し、所望の性能が得られることが確認されている。引き続きフライトモデルの開発に向けて、今後はエンジニアリングモデルで確認された電気性能を維持しつつ、耐環境(振動 / 温度 / 放射線など)性に優れ、信頼性の高いフライトモデルの開発を行う予定である。



浜本 直和 HAMAMOTO Naokazu

宇宙開発事業団 衛星システム本部 ETS-8 プロジェクトチーム主任開発部員。技術試験衛星8 型の開発に従事。電子情報通信学会、米国IEEE 会員。
National Space Development Agency of Japan



野田 浩幸 NODA Hiroyuki

宇宙開発事業団 衛星システム本部 ETS-8 プロジェクトチーム開発部員。技術試験衛星8 型の開発に従事。
National Space Development Agency of Japan



高橋 環 TAKAHASHI Tamaki

情報・社会システム社 小向工場 宇宙システム技術部主務。衛星搭載用通信機器の設計・開発に従事。
Komukai Operations



佐藤 友一 SATO Tomoichi

情報・社会システム社 小向工場 宇宙システム技術部主査。衛星ミッション解析、衛星測位システムの設計・開発に従事。
Komukai Operations