

技術試験衛星VII型 (ETS-VII)

Engineering Test Satellite VII (ETS-VII)

山田 重雄
YAMADA Shigeo

山形 史郎
YAMAGATA Fumio

城谷 俊彦
SHIROTANI Toshihiko

山田 充
YAMADA Mitsuru

宇宙開発事業団 (NASDA) は、将来の宇宙活動で必要となる宇宙におけるランデブ ドッキング実験およびロボット実験を主な目的として技術試験衛星VII型 (ETS-VII) を開発し、H-II ロケットにより 1997 年 11 月 28 日に種子島宇宙センターから打ち上げた。東芝はこの ETS-VII の開発で、衛星システムおよびインテグレーション (衛星の組立て)、総合データシステム、ロボット実験系、姿勢軌道制御系、構体系、熱制御系、計装系および GPS (Global Positioning System) 受信機の開発を担当した。また、打上げ以降も初期クリティカルフェーズ^(注1)、初期チェックアウトなどの各作業を支援している。

ETS-VII は現在、搭載ロボットアーム動作、動画像の取得、GPS 相対航法機能の確認などの成果を上げながら飛行中である。

The Engineering Test Satellite VII (ETS-VII), which was developed by the National Space Development Agency of Japan (NASDA), was launched at the Tanegashima Space Center on November 28, 1997 on an H-II rocket. The objectives of ETS-VII are to conduct rendezvous and docking experiments as well as studies in space robotics, which are fundamental technologies for the forthcoming space age. Toshiba is the system integrator for ETS-VII, and is responsible for the total data system, robot subsystem, attitude and orbit control subsystem, structure subsystem, thermal control subsystem, integration subsystem, and global positioning system (GPS) receiver. Toshiba is also supporting the operation of ETS-VII after launching.

ETS-VII is now in flight, activating the robot arm, obtaining animation pictures, and checking GPS relative navigation data.

1 まえがき

将来の宇宙活動では、各種宇宙機への物資の輸送、燃料の補給、宇宙建造物の組立て、ロボット化による宇宙飛行士の作業の軽減、補完といった新しい軌道上サービスシステムが必要となってくる。これを実現するには、二つの宇宙機が接近して結合するランデブ ドッキング (RVD) 技術および軌道上での機器交換、組立てなどのさまざまなサービスを行う宇宙ロボット (RBT) 技術の確立が不可欠である。

ETS-VII は、これらの基礎技術を修得することを目的に NASDA が開発を行った衛星で、97 年 11 月に熱帯降雨観測衛星 (TRMM) と相乗りで H-II ロケットにより種子島宇宙センターから打ち上げられた。

東芝は、衛星システムおよびインテグレーション、総合データシステム、ロボット実験系、姿勢軌道制御系、構体系、熱制御系、計装系および GPS 受信機を開発を担当し、打上げ後の運用にも追跡管制隊として参加している。

2 衛星システム

ETS-VII は、RVD 実験時に主体的に動くチェイサ衛星と目標となるターゲット衛星の 2 機で構成される。衛星の軌道上外観を図 1 に示す。打上げ時の重量は約 2.9 t (チェイサ衛星：約 2.5 t、ターゲット衛星：約 0.4 t)、発生電力はチ

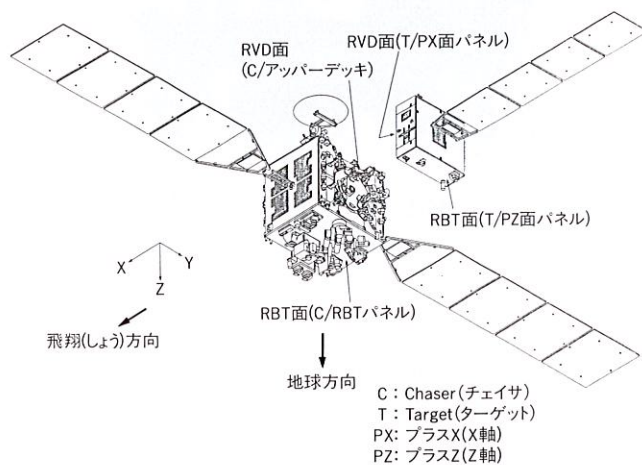


図1. ETS-VII 軌道上外観 ETS-VII の軌道上での飛行状態を示す。(RVD 実験 (チェイサ衛星/ターゲット衛星分離)時)

Configuration of ETS-VII in orbit

エイサ衛星 2,360 W 以上、ターゲット衛星 650 W 以上、設計寿命は 1 年半である。通常はチェイサ衛星がターゲット衛星を機械的に結合した状態で姿勢軌道制御を行い、RVD 実験時にターゲット衛星が分離されると、ターゲット衛星は姿勢制御だけを、チェイサ衛星は姿勢軌道制御を行う。

(注1) 太陽電池パドルおよびアンテナの展開など、衛星の目的を達するのに重要な作業を行う期間。

3 衛星システム開発

ETS-VIIはRVD、RBTという新規技術をもち、チェイサ衛星とターゲット衛星の2機から構成されているが、開発期間は従来衛星の約2/3という厳しいスケジュールで進められた。

95年12月のシステム詳細設計審査後、衛星システムのインテグレーションを東芝小向工場で開始し、筑波宇宙センターでのシステム試験、種子島宇宙センターでの射場搬入後試験を経て、97年10月末に衛星システムの開発を完了した。

図2にシステム試験(構造試験)時の状況を示す。

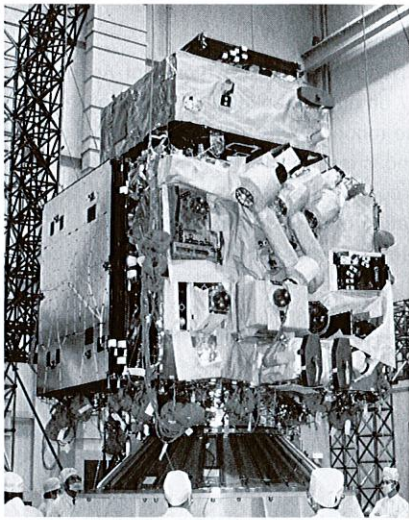


図2. システムPFM(構造試験)の状況 システムPFM(構造試験)の一例として、分離衝撃試験時の状況を示す。

Setup of system structural test

これらのシステム試験期間での不具合などによる遅れはそのまま打上げスケジュールに直結するため、過去の他の衛星での不具合事例などを考慮し、以下のような手段を事前に考慮することでスケジュール確保を図った。

- (1) 計画段階での予備期間の確保 不具合機器返却予定期間を衛星輸送期間(筑波→種子島)などと重ねて仮設定。
- (2) 不具合機器、内容および試験目的に応じた適切な対応手段の検討 チェイサ衛星とターゲット衛星間での共通機器の使い回し、またはエンジニアリングモデルによる代替など。
- (3) 試験自動化装置の導入

今回、この試験中に不具合による機器の取外し/再取付けなども数件発生したが、前記手段により遅れを最小限にし、打上げ時期を守ることができた。

4 ETS-VII軌道上運用

4.1 軌道上運用概要

ETS-VIIは97年11月28日6時27分に種子島宇宙センターからH-IIロケット6号機により打ち上げられ、高度551km×377km、軌道傾斜角35度の楕(だ)円軌道に投入された。衛星は分離を検出後、チェイサ衛星の太陽電池パドル展開、地球捕捉(そく)、三軸姿勢捕捉を自動で行い、その後地上からのコマンドでターゲット衛星の太陽電池パドルの展開などを実施後、定常制御モードへ移行した。その後、高度550kmの円軌道への軌道変換、アンテナ展開などの初期運用を実施するとともに、98年1月から実験系も含む初期チェックアウトを開始した。

以下に、この期間の運用を通して得られた主要成果を示す。

4.2 総合データシステム

ETS-VIIでは地上局との直接回線のほかに、実験時の可視時間(42分/周)の確保と動画などの高データレートの通信確保のために、ETS-VIIと静止軌道上のデータ中継衛星および地上追跡管制システムを統合した総合データシステムを構築する必要があった。チェックアウトで米国航空宇宙局(NASA)のデータ中継衛星(TDRS)を使用し、ETS-VIIの追尾アンテナを利用した高レートのハイゲイン回線通信を行い、TDRSシステムとの適合性も含めた総合データシステムの機能を確認することができた。TDRS運用時のデータシステムの構成を図3に示す。

なお当初はデータ中継衛星としてETS-VIIの後に打ち上げられた通信放送技術衛星(COMETS)を利用する予定であったが、COMETSが静止化できなかったことに伴い、今後もTDRSを利用することを予定している。

また、このデータ送信方式には宇宙データシステム諮問委員会(CCSDS)準拠によるパケット方式^(注2)を日本の衛星では初めて導入し、各実験コマンド、テレメトリ(衛星から送られてくるデータ)の規定、変更、追加などに対して柔軟に対応できるようになっている。

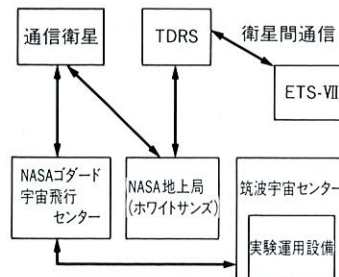


図3. TDRS運用データシステムの構成 データ中継衛星としてTDRSを使用した場合の通信回線構成を示す。

Configuration of TDRS data communications system

(注2) 通信データをデータごとに区切った小包(パケット)で伝送する方式。

4.3 バス系

通信系，データ処理系，電源・太陽電池パドル系，姿勢軌道制御系，推進系，構体系，熱制御系，計装系の各バス系機能については，初期イベント，バス系チェックアウトおよび定常の運用状態での評価を通して，ほぼ所定の機能性能をもっていることを確認している。

なお，軌道上で発生した姿勢異常などについては，軌道上再プログラミング機能を活用し対処している。

4.4 ロボット実験系

ロボット実験系は，2.4 mで6自由度（回転）の関節をもつロボットアームとアーム機能確認用のタスクボード，軌道上交換ユニット（ORU）などの作業対象機器から構成される世界初の無人衛星用宇宙ロボットで，宇宙ロボットによる機器交換，組立てなどの衛星サービスの基礎技術についての実験を行う。ロボット実験系には以下のキー技術が適用されている。

- (1) 姿勢制御系との協調制御 アーム動作反動を，軌道上でリアルタイムに姿勢制御系にフィードフォワード指令を行う技術。
- (2) コンプライアンス制御 外力に従順なアーム動作を行う技術。
- (3) 地上からの遠隔操作 予測シミュレーション技術／オンボード補償技術，バーチャルリアリティなどの地上支援技術。
- (4) 画像処理・認識 軌道上でのカメラ画像処理による運動計測，位置校正，および追従制御技術。

搭載ロボットアームの主要仕様を表1に示す。

チェックアウトでは，まずTDRSを経由した筑波宇宙センターのロボット実験運用設備からの動作指示で，搭載ロボットアーム，RBT搭載計算機，アーム駆動回路などの各種ハードウェアが正常に動作することを確認した。現在は

上記キー技術を含む各機能・性能について順に確認・評価を行い，進めている。

一方，ロボット実験運用設備では，搭載ロボットアームの操作だけでなく，衛星に搭載されたカメラで撮像し，視覚制御回路で圧縮して軌道上から伝送されてくる画像データをリアルタイムに伸展し，運用者に提供する機能をもっている。これにより，わが国で初めてのリアルタイムでの動画像の取得に成功した。

ETS-VIIではRBT実験支援のためにロボットアームの肩部分と先端部分に各1台搭載，またRVD実験用に別に2台の計4台のカメラが搭載されており，同時に2台の画像データが取得できる。図4，図5には実際にロボットアーム先端および肩部分のカメラで取得したロボットアーム搭載面の各機器などの画像データを示す。

4.5 RVD実験系

RVD実験系は，チェイサ衛星がターゲット衛星を分離し離れた後，GPS受信機やレーザレダなどのセンサ情報を

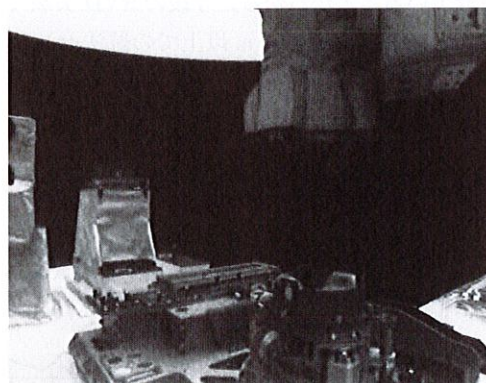


図4. カメラ画像(1) 肩監視カメラでとらえたタスクボードに接近中のロボットアーム。アーム先端の右横にあるのが手先カメラ，上部の白い半円部分は地球を示す。(写真提供：宇宙開発事業団)

Example of animation picture (1)

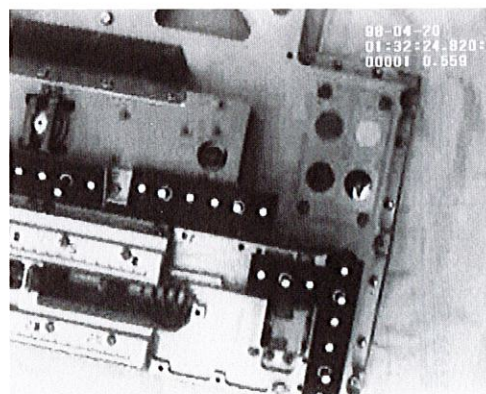


図5. カメラ画像(2) 手先カメラがとらえたタスクボード面を示す。(写真提供：宇宙開発事業団)

Example of animation picture (2)

表1. 搭載ロボットアームの主要仕様

Specifications of in-orbit arm

項目	仕様
アーム長	2.4 m (伸展姿勢)
アーム先端 位置繰返し精度	並進：±2.5 mm (各軸) 以下 (無負荷時)
	回転：0.13 deg (各軸) (無負荷時)
アーム先端 最大速度	並進：50.0 mm/s
	回転：5.0 deg/s
取扱いペイロード	最大質量：430 kg
	最大主慣性能率：700 kgm ²
	最大質量中心オフセット：1.7 m
アーム先端発生力	力：20 N (一部の作業領域では40 N)
	曲げトルク：4.5 N・m 以上
	ねじりトルク：6.0 N・m 以上
制御機能	位置制御，力覚制御
緊急停止性能	並進：70 mm 以下 (最大負荷時)
	回転：6 deg 以下 (最大負荷時)

基に航法・誘導・制御を行い、ターゲット衛星に再度接近し、最終的にはドッキング機構によりターゲット衛星との結合を行う。チェックアウトでは、まず分離していない状態での、各種センサおよび航法・誘導・制御機能の確認を行っている。

4.6 GPS 受信機

RVD 実験系のチェックアウトのなかで、チェイサ衛星、ターゲット衛星に搭載された GPS 受信機の絶対航法機能およびチェイサ衛星の GPS 受信機の相対航法機能が正常に動作することを確認した。特に相対航法機能は、ターゲット衛星搭載の GPS 受信機の測位データをチェイサ/ターゲット衛星間通信を経由してチェイサ衛星の GPS 受信機に取り込み処理することにより、2 機間の相対距離を高精度に測定する機能で、世界でも初の軌道上実証となった。

図 6 にチェックアウト時の相対航法結果を示す。相対航法は最小自乗法で相対位置・速度の初期値を解き、カルマンフィルタによって収束させるが、図 6 により航法開始から 600 秒以内に位置誤差 5 m 以下、速度誤差 1 cm/s 以下に収束させていることがわかる。今後の RVD 実験では実際に分離した後の相対距離 500 m 以上での航法センサとして

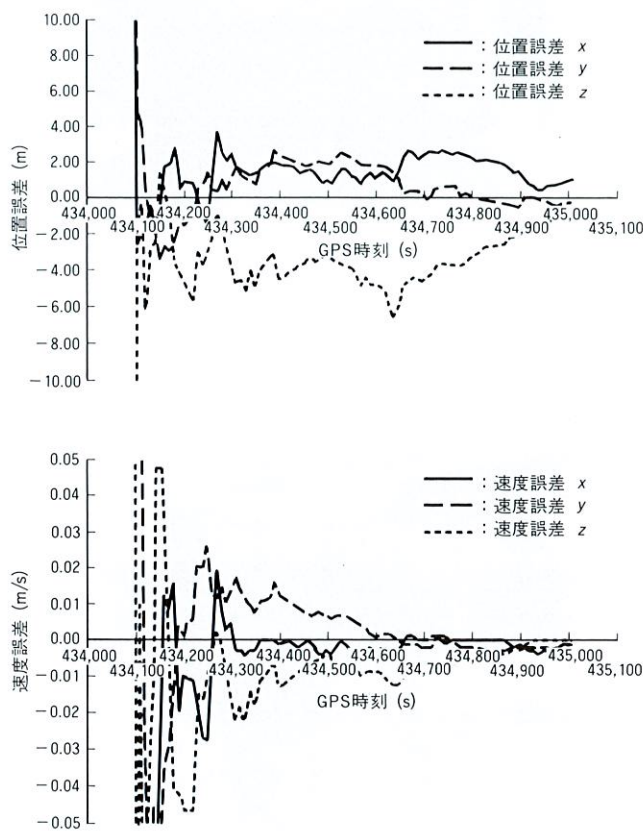


図 6. GPS 相対航法結果 GPS 相対航法実施時の相対位置、速度データを示す。(データ提供：宇宙開発事業団)

GPS relative navigation error

使用される予定である。

4.7 外部機関実験

ETS-VIIには将来の宇宙構造物組立てなどに必要な基礎技術確立を目的として、次の研究機関の実験装置を搭載している。チェックアウトでは各機関機器の主要機能の確認などを実施した。

- (1) 電子技術総合研究所 高機能ハンド実験装置
- (2) 通信総合研究所 アンテナ結合基礎実験装置
- (3) 航空宇宙技術研究所 トラス構造物遠隔操作実験装置

4.8 原子状酸素モニタ

原子状酸素モニタは、衛星軌道上に存在する宇宙飛翔体表面材の劣化要因の一つとなっている原子状酸素を測定することを目的としている。チェックアウトで機器が正常に動作することを確認し、現在取得したデータの詳細評価を行っている。

5 あとがき

ETS-VIIは、前述するように世界初、日本初という着実な成果を上げながら飛行を続けている。RVD、RBT という新規技術をもち、かつ短期、低コストという制約のなかで、衛星を開発し、打上げ、運用できていることは、関係諸機関および関連する会社などの努力のたまものであり、深く感謝する次第である。

今後、本格的な実験運用を行うことになるが、関係諸機関、会社と協力して各実験の成功を期したい。



山田 重雄 YAMADA Shigeo

宇宙開発事業団 軌道上技術開発システム本部 ETS-VIIプロジェクトマネージャ。
National Space Development Agency of Japan



山形 史郎 YAMAGATA Fumio

宇宙開発事業団 軌道上技術開発システム本部 ETS-VIIプロジェクトサブマネージャ。
National Space Development Agency of Japan



城谷 俊彦 SHIROTANI Toshihiko

小向工場 宇宙機技術部参事、ETS-VIIプロジェクトマネージャ。人工衛星機器の設計、品質保証、プログラム管理業務に従事。
Komukai Works



山田 充 YAMADA Mitsuru

小向工場 宇宙機技術部主務。
人工衛星の運用、プログラム管理業務に従事。
Komukai Works