

山形 史郎  
F. Yamagata

飯塚 功  
I. Iizuka

鳥山 芳夫  
Y. Toriyama

伊藤 浩式  
K. Itô

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 H-II ロケットにより 1997 年度夏期に打ち上げることを目標に開発を進めている。

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、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、現在は 1994 年 10 月のシステム基本設計審査 (PDR) を完了して、1995 年 10 月に予定しているシステム詳細設計審査 (CDR) に向けて詳細設計作業および開発モデルの製作・試験を実施している。

The National Space Development Agency of Japan (NASDA) is now developing the Engineering Test Satellite-VII (ETS-VII), which is scheduled for launching in the summer of 1997. 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 era.

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.

Basic design work for ETS-VII was completed in October 1994, and work on the detailed design and the development model are currently in progress.

## 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・回収、無人プラットフォームの運用、軌道上作業機による衛星などへの軌道上のサービスの提供、さらには自動化、ロボット化による宇宙飛行士の作業の軽減や補完といった、これまでの使い捨て型の人工衛星とはまったく異な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。これを実現するためには、まず二つの宇宙機が接近し、結合するためのランデブ・ドッキング技術および軌道上で宇宙機に対するサービスを行うロボット技術、さらにこれらの作業を地上から支援するための総合的なデータシステム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として、1997 年夏期の打上げを目ざして、NASDA が開発を進めている衛星である。

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 受信機の開発を担当し、現在 CDR に向けて詳細設計作業と開発モデルの製作・試験を実施している。

## 2 軌道上実験と運用

### 2.1 ロボット実験

将来の軌道上作業機のロボットアームによる各種操作、制御、運用技術の確立を目的に、次の実験を行う。

- (1) 宇宙機のバッテリーや実験機器交換を模擬した ORU (軌道上交換ユニット) 交換実験
- (2) 宇宙機の推薬補給の基礎となる推薬補給実験
- (3) 軌道上での部品装着などのロボットアームによる微細作業を模擬した各種操作実験
- (4) 衛星とロボットアーム動作時のダイナミック干渉の防止技術確立のための衛星本体とロボットとの協調制御実験
- (5) 伝送時間遅れのある状況での宇宙ロボットの遠隔操作実験

### 2.2 ランデブ・ドッキング実験

ホープ (HOPE) などの往還機による軌道上宇宙機への物資輸送・改修などのために、無人宇宙機への自動および地上からの遠隔操作によるランデブ・ドッキングの基礎技術の確立を目的に、次の実験を行う。

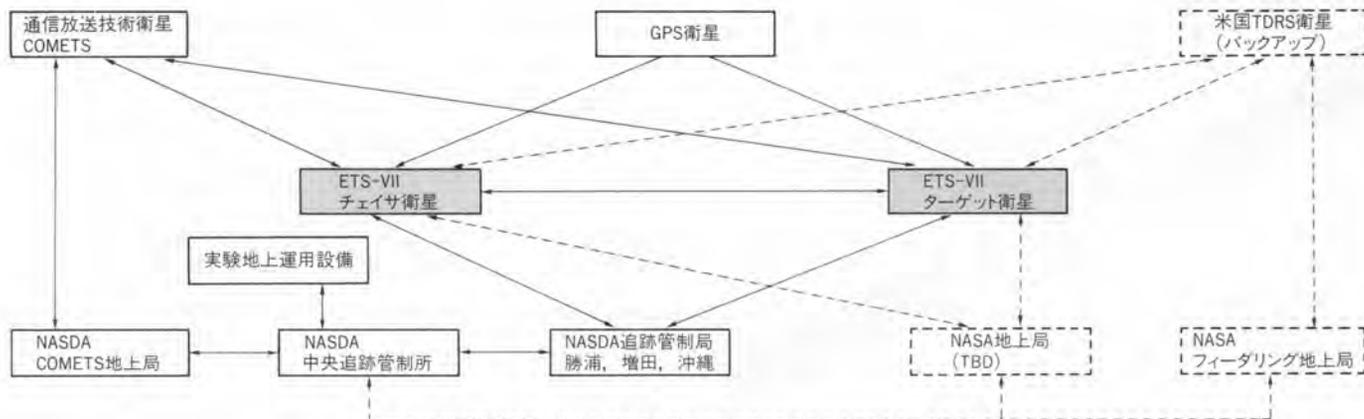


図1. 総合データシステムの全体構成 ETS-VIIとそれを運用する地上システム、データ中継衛星に関する通信回線構成を示す。  
Block diagram of data communications system

- (1) 正常な飛行パターンに従ったランデブ・ドッキング実験
- (2) 異常時対応技術を確認するための機器故障を模擬した実験
- (3) 日照条件のドッキング機能への影響を評価するため、ドッキング時の日照条件を変えた実験

### 2.3 外部機関実験

将来の宇宙構造物組立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を行う。

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

### 2.4 原子状酸素モニタ

衛星表面材の特性変化の原因と予測されている原子状酸素および中性ガスの質量分布を観測する実験を行う。

## 3 総合データシステム

ETS-VIIではデータ中継衛星として通信放送技術衛星(COMETS)を利用した追跡運用、遠隔操作運用(テレオペレーション)、ETS-VIIを構成するターゲット衛星、チェイサ衛星の2機同時運用などを行う。新たな運用形態に対応するため、衛星システムと地上追跡運用システムを統合したETS-VII総合データシステムの構築が重要な課題となっている。

ETS-VIIではデータ中継衛星回線を用いることにより、地上システムからの衛星運用時間を従来の直接地上回線よりも長時間確保できるため、連続的軌道上実験が可能となる。ETS-VIIのチェイサ、ターゲット分離時(ランデブ・ドッキング実験時)のターゲットとの通信はチェイサ経由で伝送され、さらにCOMETS経由で地上システムへ伝送される。これにより、地上システムから同時に2衛星を追跡する必要がなく運用性の向上が図れる。

ETS-VIIの実験系運用のため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を用いている。パケット方式は各実験で必要となる実験コマンド、実験テレメトリの規定、変更、追加などに対して柔軟に対応できる特徴をもつとともに、遠隔操作運用で必要となる長大かつ連続的なテレオペレーションコマンドを構成するのに適した方式である。また、この規格は国際標準化されており国際相互支援運用が可能である。

また、ランデブ・ドッキング、ロボット実験時に取得される画像データはデータ圧縮され、他の実験テレメトリとともに多重化され地上の実験運用者に伝送される。

図1に総合データシステムの構成を示す。

## 4 衛星システム

### 4.1 衛星システム概要

ETS-VIIはチェイサ衛星とターゲット衛星の2機により構成される。打上げ時は結合状態でH-IIロケットのフェアリング下部に搭載され、熱帯降雨観測衛星(TRMM)と同時に打ち上げられる。軌道上でのランデブ・ドッキング実験中はのおの独立に飛行可能である。衛星の主要諸元を表1に、また、衛星の軌道上外観を図2に示す。

表1. ETS-VII 主要諸元  
Key parameters of ETS-VII

項目	諸元
打上げ時期	1997年(平成9年)夏期
打上げロケット	H-II (TRMMとの同時打上げ)
打上げ時質量	約2.8t(チェイサ:2.4/ターゲット:0.4)
発生電力	約2.4/0.6kW(チェイサ/ターゲット)
主要ミッション	ランデブ・ドッキング/ロボット実験
軌道	高度約550km, 傾斜角約35°
運用形態	COMETSによるデータ中継
運用期間	約1.5年

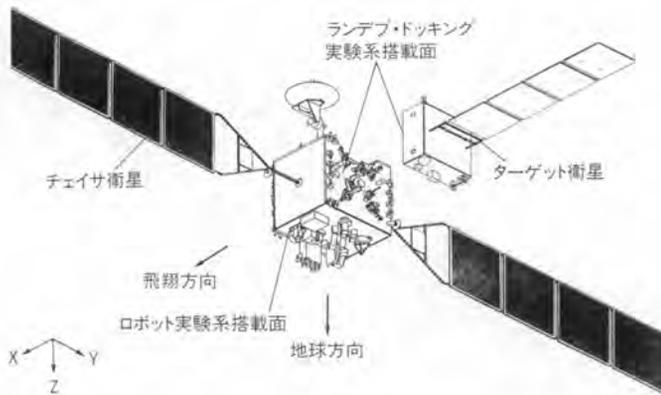


図2. ETS-VII 軌道上外観 ETS-VII の軌道上での飛行状態 (チェイサ/ターゲット分離時)。

Configuration of ETS-VII in orbit

## 4.2 姿勢および軌道制御

ETS-VIIは、チェイサ、ターゲットおのおのに姿勢軌道制御系を搭載し、実験の遂行、衛星の保持に必要な姿勢軌道の制御を行う。チェイサ姿勢軌道制御系は、ロケット/衛星分離後の直接地球捕そく方式による初期三軸姿勢確立、ロボット実験時を含めた定常段階での三軸姿勢維持を行う。制御方式としては、三軸ゼロモーメントストラップダウン制御方式を採用し、高精度に対応可能なシステムとしている。このほか、軌道変換のための軌道制御、太陽電池パドルの太陽指向制御、COMETS との衛星間通信を行うアンテナ指向制御などを実行できる複数の基幹サーボ制御を同時に行う複合制御システムを構成している。なお、ランデブ・ドッキング実験時には、これらの機能に実験専用の機器を加えて、ランデブ・ドッキング実験を行うための軌道・姿勢制御を実現している。

ターゲット姿勢制御系は、ランデブ・ドッキング実験時に単独飛行するターゲット衛星の地球指向三軸姿勢を維持し、ランデブ・ドッキング実験を行う環境を提供している。

## 4.3 熱構造

従来、二つの衛星の同時打上げは、両衛星それぞれがロケットに結合されていたが、ETS-VIIではチェイサ衛星だけがロケットに結合し、ターゲット衛星を支えた状態で打ち上げられるので構造上の設計条件が厳しい。また、軌道上で分離結合実験を行うため衛星の形態が大きく変わり、設計条件の衛星への太陽光、地球赤外、地球アルベド熱入力パターンが多様であるので効率のよい熱設計が必要となる。

打上げ時の剛性・強度を確保するため、打上げ時の保持解放機構をランデブ・ドッキング実験用分離結合機構とは別に設ける。

ターゲット衛星では太陽電池パドルなどの搭載機器からの荷重を保持解放機構取付部へ円滑に伝達するため、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) スキンのハニカムパネルをいげた状に組んで中心構造とし、一方チェイサ衛星では、ターゲッ

ト衛星の全荷重とロボット実験機器、衛星間通信実験アンテナ、太陽電池パドルなどの重量物を支えるため、CFRP スキンハニカムパネルを円筒状に組み中心構造として採用した。

また、チェイサ衛星の電子機器パネルのうち3枚のパネル内部には、一度にたくさんの熱を輸送できるヒートパイプを埋め込み、それぞれ連結して不確定性の高い外部熱入力からの影響を最小化し、かつ断熱部の機器の熱を速やかに放熱面に輸送できるように配慮した。これにより衛星の内部に用意したヒータが効率よく軌道上の多実験モードに対応し、機器の温度制御ができるように設計している。

設計確認として使用する熱構造モデル (STM) は、現在東芝京浜事業所宇宙棟で製造が進められており、1995年3月~11月まで主に筑波宇宙センターで開発試験を実施する予定である。

## 4.4 計装

同時打上げによる H-II ロケットの下部フェアリングに、2機の衛星を組み合わせた形で搭載することとなるため、従来の衛星より実装密度が高く、ライン数も多い。このため、組立性を考慮したハーネス用のインタフェースコネクタの設定、信号ライン用に AWG (American Wire Gauge) 28 電線の採用、低損失同軸ケーブルも使用している。

# 5 ロボット実験系

## 5.1 ロボット実験系の概要

ロボット実験系は、6自由度ロボットアームと作業対象機器から構成される初の無人衛星用宇宙ロボットであり、宇宙ロボットによる衛星サービス (衛星保守、修理、機器交換、補給、組立) の基礎技術に関する実験を行う。

## 5.2 実験内容

地上からの遠隔操作および自動動作により、以下に示す機器を対象に交換、展開、組立、ターゲット衛星操作などの実験を行う。

- (1) 実験用 ORU 着脱可能な推薬補給模擬装置ユニット
- (2) タスクボード ならい、ベグインホールなどの基礎試験
- (3) ターゲット衛星 独立飛行可能な衛星
- (4) 展開トラス トラス展開、組立実験用トラス機構
- (5) 組立アンテナ 組立式パラボラ用結合機構装置
- (6) 高機能ハンド アームに着脱可能な3本指ハンド装置

## 5.3 キーとなる技術

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) 地上からの遠隔操作 (テレオペレーション) 予測シミュレーション技術、オンボード補償技術、操作性向上のためのグラフィカルユーザインタフェース (GUI)、バ

ーチャルリアリティ (VR) などの地上支援技術。

- (2) コンプライアンス制御 (外力に従順なアーム動作)
- (3) 画像処理・認識 テレビカメラ画像処理による運動計測, 位置校正およびフィードバック制御による追従
- (4) 32ビットマルチCPU搭載計算機 最先端搭載計算機技術を適用した制御計算機
- (5) 姿勢制御系との協調制御 アーム動作反動を姿勢制御系にフィードフォワード指令

搭載ロボットアームの主要性能諸元を表2に、ロボット実験系開発試験設備全体の外観を図3に示す。

表2. 搭載ロボットアームの主要性能諸元  
Specifications of in-orbit robot arm

項目	性能
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 回転: 0.13 deg (各軸) 以下
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: 500 kg 最大主慣性能率: 700 kgm <sup>2</sup> 最大質量中心オフセット: 1.7 m
アーム先端発生力 ( )内は一部の作業領域に適用	力: 20 N (40 N) 以上 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

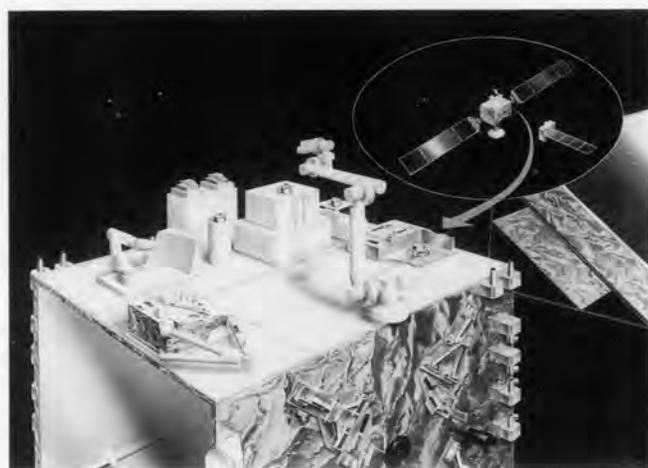


図3. ロボット実験系開発試験設備 ETS-VIIの軌道上のロボット面のイラストである。この図と同一のロボット系開発試験設備を製作し、試験を実施中。

Test bed for robot subsystem

## 6 GPS 受信機

GPS 受信機は、チェイサ衛星およびターゲット衛星にそれぞれ搭載され、GPS 衛星からの GPS 信号を受信することで、チェイサ/ターゲット衛星の絶対位置・速度情報およびそれ

ぞれの衛星間の相対位置・速度情報を出力し、以下の機能を備えている。

- (1) GPS 信号受信機能
- (2) GPS 衛星選択機能
- (3) C/A コード (拡散符号) 捕そく/追尾機能
- (4) アンテナ選択機能
- (5) 搬送波位相捕そく/追尾機能
- (6) GPS メッセージ解読機能
- (7) GPS 単独絶対航法機能
- (8) GPS 相対航法機能
- (9) 時刻同期機能
- (10) 故障検知機能
- (11) データ出力機能/捕そく支援データなどの入力機能

## 7 あとがき

ETS-VIIの開発は、1993年1月から予備設計、1994年1月から基本設計に着手し、1994年10月のPDRから詳細設計フェーズに移行している。

これまでの設計結果では、要求されている機能性能を満たすことができる見通しが得られ、現在は基本設計結果に基づく開発モデルの製作試験の段階で、これまでの設計の妥当性を確認している段階である。

これも、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、打上げ予定の1997年夏期まで、各製作などは続くが、関係諸機関、会社と協力して効率の良い確実な作業により、このプロジェクトの成功を期したい。



山形 史郎 Fumio Yamagata

1972年宇宙開発事業団入社。現在、軌道上技術開発システム本部技術試験衛星グループ主任開発部員 (次長待遇)。  
National Space Development Agency of Japan



飯塚 功 Isao Iizuka

1971年宇宙開発事業団入社。現在、軌道上技術開発システム本部技術試験衛星グループ主任開発部員。  
National Space Development Agency of Japan



鳥山 芳夫 Yoshio Toriyama

1971年入社。人工衛星のシステム設計、プログラム管理業務に従事。現在、小向工場 ETS7プログラム担当部長。  
Komukai Works



伊藤 浩式 Kôji Itô, D.Sc.

1979年入社。人工衛星のシステム設計、プログラム管理業務に従事。現在、小向工場 ETS7プログラム担当主幹、理博。  
Komukai Works