

おりひめ、ひこぼしの実験運用

Flight Operations of Engineering Test Satellite VII

山田 重雄
YAMADA Shigeo今井 良一
IMAI Ryouichi城谷 俊彦
SHIROTANI Toshihiko山田 充
YAMADA Mitsuru

宇宙開発事業団(NASDA)は、将来の無人宇宙活動で必須(す)な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97年11月28日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受信機の開発を担当し、打上げ後も追跡管制、各種実験運用の支援を行なっている。実験系を含む搭載機器のチェックは98年5月に完了、6月から実験運用を開始した。ETS-VIIは、主体的に動くチェイサ衛星(愛称;ひこぼし)と目標となるターゲット衛星(愛称;おりひめ)の2機からなり、データ中継衛星を利用して、2機の同時追跡運用を国内で初めて行い、地上からの遠隔操作による世界初のロボットおよびランデブ・ドッキング実験を行なっている。

The Engineering Test Satellite VII (ETS-VII), nicknamed "Orihime and Hikoboshi" after two stars that are said to meet once a year, 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 on space robotics, which are fundamental technologies for the coming 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 receiver (GPSR). Toshiba has also been supporting the operations of ETS-VII after launching.

This paper described the flight operations of the spacecraft from launching through the experimental phase.

1 まえがき

将来の宇宙開発では各種宇宙機への物資の輸送・回収、燃料の補給、修理・交換、宇宙建造物の組立てなどの新しい無人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の基礎技術として2機の宇宙機を軌道上で接近、結合、分離させるための“ランデブ・ドッキング(RVD)技術”、また、宇宙機に対して修理・交換などのサービスを行うための“宇宙ロボット技術(RBT)”がある。さらに、これらを地上から遠隔操作、制御するための地上系を含めた総合的な運用システム、すなわち、“総合データシステム技術”が重要な基礎技術となる。

ETS-VII(以後、“おりひめ・ひこぼし”と呼ぶ)はこれらの基礎技術を修得するための軌道上実験を行うことを目的とし、97年11月28日に熱帯降雨観測衛星(TRMM)と同時に種子島宇宙センターから打上げられた。引続き“おりひめ”、“ひこぼし”のおのおの搭載機器のチェックが行われ、98年5月に終了、6月より実験運用を開始した。RBT、RVD実験は、数々の世界初の実験をこなし、着々と成果を上げている。

東芝は衛星システム、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、実験運用に参加、支援を行なっている。

2 実験を支える衛星システム

2.1 衛星の概要

“おりひめ・ひこぼし”の2機の衛星はRVD実験などのため独立に飛行することが可能である。このとき“おりひめ”は3軸姿勢制御だけ行い、“ひこぼし”が姿勢軌道制御を行なって“おりひめ”からの分離、離脱、接近を行う。通常結合時は“ひこぼし”が全体の姿勢軌道制御を行う。分離時の軌道上外形を図1、主要諸元を表1に示す。打上げ時、“おりひめ”と“ひこぼし”は保持開放機構により結合状態にある。運用軌道初期においてこれを開放し、RVD実験系のドッキング機構(DM)により把持する。ドッキング機構を図2に示す。分離飛行時すなわちRVD実験時以外はDMで結合されているが、熱的、電気的には“おりひめ”と“ひこぼし”はまったく独立でありおのおの熱、電力バランスを確保している。以下に実験時の主な機能について述べる。

2.2 衛星との通信(総合データシステム)

データ中継衛星(TDRS)との通信実験時間(42分/周)の

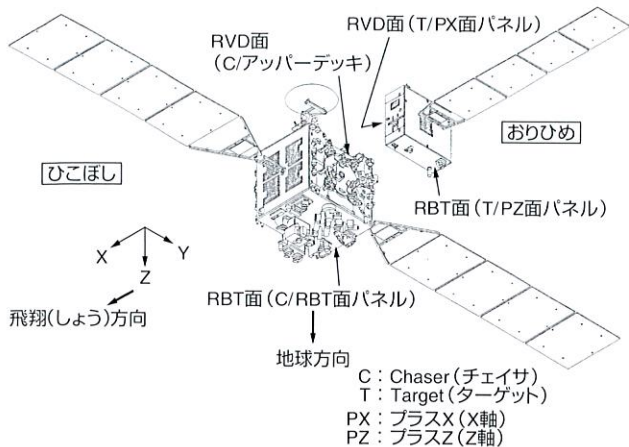


図1. “おりひめ・ひこぼし”軌道上外観 “おりひめ・ひこぼし”の軌道上での飛行状態を示す。

(RVD実験“おりひめ・ひこぼし”分離時)

Configuration of ETS-VII in orbit

表1. “おりひめ・ひこぼし”主要諸元

Key specifications of ETS-VII

項目	“ひこぼし”	“おりひめ”	備考
重量 (kg)	約 2,450	約 410	
発生電力(W)	約 2,360	約 650	EOL, $\beta=35^\circ$
姿勢制御方式	ゼロモーメントム 3 軸姿勢制御		
通信方式	SSA(衛星間)および通信回線(衛星・地上間)		TDRS 使用
軌道	高度約 550 km, 傾斜角約 35°		
設計寿命	1.5 年		

EOL(End Of Life): ミッション末期

$\beta=35^\circ$: パドル法線面に対しての太陽光入射角

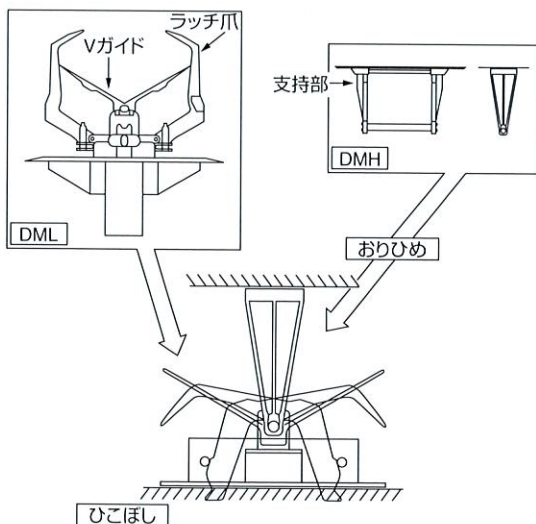


図2. ドッキング機構 同心円上に3か所あり, “ひこぼし”のラッチ爪の開閉で“おりひめ”の分離, 把持を行う。“おりひめ”のドッキング機構ラッチハンドル(DMH)のバーと“ひこぼし”のドッキングラッチ機構部(DML)のVガイドが接触したことを検知し, 接触検知ステータスを発生する。

Configuration of docking mechanism

確保と動画像などの高データレートの通信を確保するため “おりひめ・ひこぼし”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が用いられた。なお, 従来の地上局との直接回線による運用も可能となっている。また, “おりひめ”, “ひこぼし”間の衛星間通信機能ももち, 分離時は“ひこぼし”経由で “おりひめ”とのデータ通信を行う。これらの通信方式として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がわが国の衛星として初めて導入された。TDRSを用いたデータシステムの構成を図3に示す。

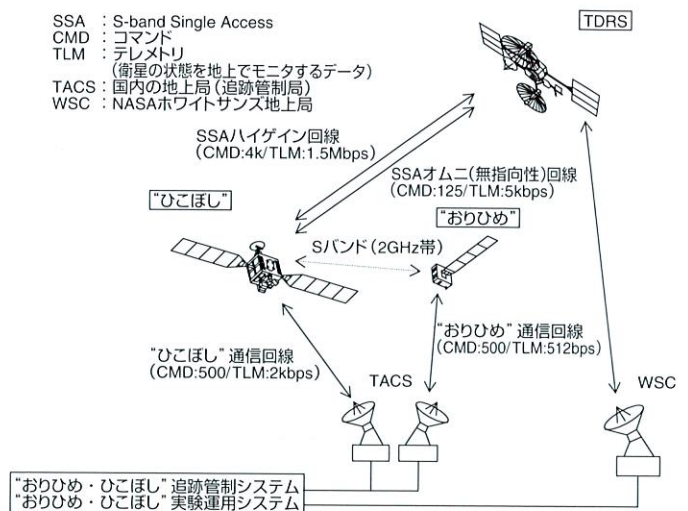


図3. TDRSを用いたデータシステム構成 TDRSを使用した“おりひめ”, “ひこぼし”との通信回線構成を示す。

Configuration of TDRS data communication system

2.3 姿勢, 軌道などの制御

“ひこぼし”には衛星システムとして姿勢軌道制御系(AOCS)の計算機(AOCE), RVD実験系にはランデブ実験用の計算機(GCC), RBT実験系にはロボット実験用計算機(RMOC)が搭載されている。これらの計算機は実験時相互に必要なデータの通信を行い協調動作する。

RBT実験時はAOCEが衛星の姿勢, 軌道制御, TDRS追尾のためのアンテナ駆動, 太陽電池パネル(パドル)の太陽追尾を行う。このときの姿勢制御は主にリアクションホイールを用いた制御となる。なお, ロボットアームの動作による外乱を吸収するための制御モードが用意されている。

RVD実験時には姿勢軌道制御だけRVD系の計算機(GCC)に切り替えられ, スラスタ(ガスジェット)を用いた制御となり, AOCEはGCCからの姿勢情報などによりアンテナおよびパドルの駆動制御を行う。また, 実験中に異常が生じた場合GCCからの異常信号によりAOCSの制

御に切替わり姿勢の再捕捉(そく)、通信の確保を図るため通信系の切替え制御などを行い、衛星の安全を確保する。

“おりひめ”の姿勢制御はRVD実験時だけ“おりひめ”搭載の姿勢制御系の計算機(ACE)が行う。アクチュエータは窒素ガスを推進に用いたスラストである。

これらのシステム側の計算機(AOCE, ACE)は、軌道上での実験に合わせた機能追加、変更などに対応するためプログラムの自在な変更が可能な軌道上再プログラムの機能をもっている。また、RMOC, GCCには実験開始時に制御プログラムを地上からアップロードして、実験を行なっている。

3 実験運用

3.1 実験運用準備

3.1.1 運用手順の作成 実験運用は衛星システム側(衛星管制班, 衛星技術班, 通信ネットワーク班, 軌道力学班)と実験系(RBT, RVD)との協調作業である。1パスの可視時間は42分の制約があり、時間内に作業が完了するように実験を組立てなくてはならない。実験を行うための指令(コマンド)はシステム側が管理するコマンドと実験系のコマンドが合体して作られるものである。したがって、実験系が作成した実験計画に従って実験ごとにシナリオが作成されるが、このシナリオを基にシステム側と実験系が互いに吟味、調整して実験の手順書(コマンド列)を作成していく。また、必要に応じ地上でのシミュレーションにより検証, リハーサルを行い確認を行なっていく。

3.1.2 異常対応手順 システム側と実験系にとって重要なのは実験中の異常に対していかに安全確保が図られるかである。あらかじめ機能ごとに標準的な手順書が用意されているが、これらを組み合わせ、あるいは必要な場合手順を補い、考えられる異状時の対応を確実に実行できるように準備することがもっとも重要な作業となる。

3.2 実験の進行

実験運用は衛星システム側と実験系側に別れての作業であるが、互いに音声により確認を行いながら進行する。最初にシステム側はTDRSとの通信を確保し、必要に応じてシステム側のコマンドを用いて初期設定を行い衛星状態を確認した後衛星の制御権を実験系側に渡す。これをH/O(Hand Over)と呼ぶ。実験系が実験を行なっている間は衛星の状態をモニタする。衛星が危険と判断された場合は、システムは実験の中止を指示し実験系から制御権をH/Oさせる。実験が終了した場合、実験側は使用権をシステム側へH/Oし、システム側は次パスに必要な終了処理を行い1パス(42分最大)の運用が終了し、衛星は不可視域に入る。この繰返しによって軌道上実験は進行する。このような運用形態は、今までにない初めての試みである。

4 軌道上実験運用成果

4.1 RVD 実験

RVD実験は“おりひめ”, “ひこぼし”による無人宇宙機同士の自動ランデブ・ドッキングおよび“ひこぼし”の遠隔操縦である。これらの実験では相対距離に応じて近傍センサ(PXS), ランデブレーダ(RVR)およびGPS受信機(GPSR)の3種のセンサを切り替えて使用する。これまでにこなした実験を(1)から(3)に示す。

(1) 分離・ドッキング実験飛行(FP-1) 7月6日~7日にかけて初めての分離およびドッキングを実施した。この飛行はPXSの計測範囲(0~2m)でランデブ, およびドッキングを行うものである。7月7日, AM7時09分に分離, 2m点で停止したあと接近し, 7時33分ドッキングに成功した。

(2) 初期離脱・最終接近飛行(FP-2) 8月6日よりRVRの計測範囲(~500m)でのランデブ飛行性能の確認およびランデブ・ドッキングの性能確認を目的としたFP-2を開始した。実験途中で“ひこぼし”のスラストの噴射異常が発生し, 当初の8月7日の未明のドッキングは実施できず, 最大10km以上離れたこともあったが, その結果GPSR相対航法などの計測性能を十分に確認でき, RVD実験側の多くの機能の確認ができた。また, システム側は単独飛行中の“おりひめ”の姿勢制御パラメータを変更し, 推進消費の低減を図り, 電力確保の対策を実行し, 安全を確保した。最終的には8月27日深夜にドッキングに成功した。

4.2 ロボット実験

“ひこぼし”に搭載しているRBT実験機器のようすを図4に示す。搭載ロボットアーム(ARA)がその中心である。このアームは全長約2mで6関節をもち, 先端にはツール機構(物体を把持するつめとソケットレンチ)が取り付けられている。これまでに実施した実験の成果を以下に示す。

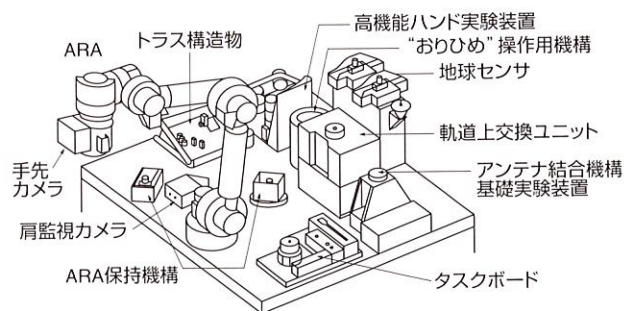


図4. “ひこぼし”搭載ロボット実験機器 地球指向面に搭載された各種実験機器の配置を示す。

ETS-VII robot system

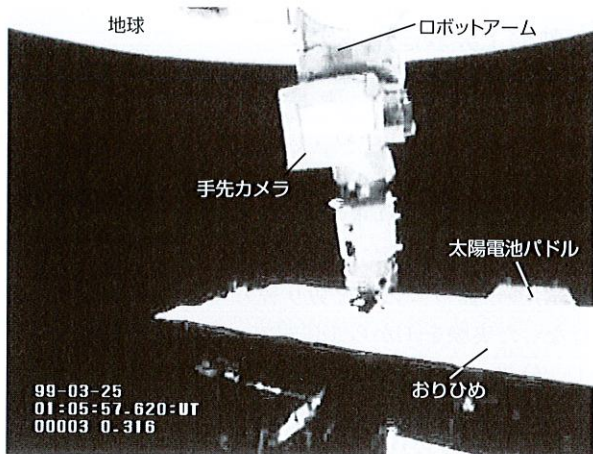


図5. ターゲット衛星操作実験 “おりひめ”を把持し移動させるロボットアーム。上方の白い画像は地球，“おりひめ”の右端に突き出ているのは“おりひめ”の太陽電池パドル。

“ORIHIME” handling experiment

- (1) 軌道上機能性能評価 98年3~5月の初期点検, 6月の搭載機器固定解除後, 7月にロボットアームの制御精度の評価を実施した。アーム先端位置のキャリブレーションなどを行なった後, コンプライアンス, 力追従, アクティブリンプなどの力覚制御の性能の評価を実施した。
- (2) ARAと姿勢制御の協調制御実験 衛星上でのロボットの動作は衛星の姿勢外乱源である。5~6月にはスラスタとリアクションホイールの双方の姿勢制御モードについてフィードフォワード補償での姿勢安定化の有効性が確認できた。
- (3) 遠隔操作実験 9月にはこれまでの全自動でのアーム制御に代えてTDRSでの等時性コマンドによる遠隔操作機能の確認評価を実施した。この機能はNASDA, 外部機関の実験に活用され, 成果を上げている。
- (4) 軌道上サービス基礎実験 6月に軌道上交換ユニット(ERU)の脱着, 7月にはタスクボード(TB)上の機械的スイッチ, スライドハンドル操作, 小型浮遊物の引出し/収納などを実施した。11月にはERU推葉補給実験を実施した。
- (5) 99年1月, 画像フィードバックによる対象の追尾に成功した。これはRMOCでロボットアームの手先カメラ画像を処理し, この情報をフィードバックしてロボットアームに対象の追尾動作を行わせる技術であり, 今後“おりひめ”の捕獲実験に使用される予定の技術である。
- (6) 99年3月, RVD系とRBT系が協力し, ロボットアームで“おりひめ”をつかんで移動させる実験(タ

ーゲット衛星操作実験)に成功した。図5に実験のようすを示す。

- (7) 外部機関(MITI, NAL, CRL)実験 外部機関として通商産業省(MITI)の高機能ハンド技術実験, 航空宇宙技術研究所(NAL)のトラス構造物遠隔操作実験, 通信総合研究所(CRL)のアンテナ結合機構基礎実験もNASDA実験と並行して, 実施している。おのおのの実験運用設備を設置しNASDAのARAの実験運用設備と連携して順調に進められている。

5 今後の実験計画

RVD, RBT実験は今まで述べたとおり確実に成果を上げてきた。これらの成果をベースに, より高度な実験としてRVDモードで接近する“おりひめ”をロボットアームでつかむキャプチャバーシング実験(ターゲット捕獲実験)や外国機関との共同実験も計画されている。

6 あとがき

“おりひめ・ひこぼし”は以上のように世界初, 日本初という着実な成果を上げながら飛行を続け, さらなる成果が期待されている。このプロジェクトにかかわった関連諸機関, メーカーに深く感謝するとともに今後の各実験の成功を期したい。



山田 重雄 YAMADA Shigeo

宇宙開発事業団 衛星システム本部 衛星ミッション推進部 衛星ミッション推進センター 招聘開発部員。
National Space Development Agency of Japan



今井 良一 IMAI Ryouichi

宇宙開発事業団 衛星システム本部 ETS-VIIプロジェクトチーム 主任開発部員。日本航空宇宙学会, 電子通信学会, 米国航空宇宙学会(AIAA)会員。
National Space Development Agency of Japan



城谷 俊彦 SHIROTANI Toshiniko

情報・社会システム社 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。人工衛星搭載電子機器の設計, 品質保証, プログラム管理業務に従事。日本機械学会会員。
Komukai Operations



山田 充 YAMADA Mitsuru

情報・社会システム社 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 Operations