

ランデブ・ドッキング実験運用評価

Rendezvous-Docking Experiments of Engineering Test Satellite VII

鈴木 孝
SUZUKI Takashi河野 功
KAWANO Isao山田 充
YAMADA Mitsuru前田 裕昭
MAEDA Hiroaki

技術試験衛星VII型(ETS-VII)の“おりひめ”と“ひこぼし”は、1998年7月7日に最初のランデブ・ドッキング実験として相対距離2mまで分離し、その後自動ドッキングを行うことに成功した。約1か月後の第2回実験では、当初1日の実験予定が、スラスタ(ガスジェット)の噴射異常現象が発生し、3週間に及ぶ分離飛行の後にドッキングに成功することができた。東芝はこれらの実験運用にETS-VIIのシステムメーカーとして、かつ、ランデブ実験の主要センサであるGPS受信機の主担当メーカーとして参画し、この実験の成功に寄与した。

The first automatic rendezvous-docking (RVD) experiment of the Engineering Test Satellite VII (ETS-VII) was successfully performed on July 7, 1998. In the second such experiment about one month later, an attitude anomaly occurred. As a result, instead of the scheduled docking experiment with a duration of one day, docking was accomplished after three weeks of separate flight.

Toshiba participated in these experiments as an integrator of ETS-VII and as a manufacturer of the global positioning system (GPS) receiver, thus contributing to their successful outcome.

1 まえがき

ETS-VIIでは、主要ミッションの一つとしてランデブ・ドッキング(RVD)技術の基礎技術の修得を目的とした軌道上実験を実施しており、東芝はETS-VIIのシステムメーカーとして、またRVD技術の主要技術項目の一つであるGPS(Global Positioning System)相対航法の開発担当としてこの実験運用に参加している。

ここでは、ETS-VIIのRVD実験の概要と、この実験運用での東芝の役割、およびGPS相対航法結果などについて述べる。

2 RVD技術の概要

RVD実験時は、主体的に動くチェイサ衛星“ひこぼし”が目標となるターゲット衛星“おりひめ”を分離した後、ある距離まで離れ、そこから“ひこぼし”が姿勢制御だけ行っている“おりひめ”を目標に接近し、ドッキングを行う。

ETS-VIIのRVD実験運用に関する主要機器など、システム構成を図1に示す。ETS-VIIでは、この実験を通じて、以下の技術を修得することを目的としている。

- (1) RVD 機器技術 ランデブレータなどの航法センサ、ドッキング機構などの機器データを取得し、RVD機器の機能・性能の軌道上実証を行う。
- (2) RVD 航法・誘導・制御技術 航法センサの計測

データから相手宇宙機との位置や接近速度などを推定し(航法)、接近するための目標軌道を自動的に作り出し(誘導)、スラスタを噴射しながら正しい軌道・姿勢を保って飛行する(制御)一連の機能を確認する。この機能は大きく下記のフェーズごとに分類することができる。

- (a) 相対接近フェーズ 500m以遠で、GPS相対航法により相対位置を推定し接近する。
- (b) 最終接近フェーズ 500m~2mではレーザー光を用いたランデブレータを使用して相対位置を推定し接近する。
- (c) ドッキングフェーズ 2m以近では電荷結合素子(CCD)カメラを利用した近傍センサによる相対6自由度^(注1)制御を行う。“ひこぼし”は相対速度1cm/sで接近し、“おりひめ”のハンドルがドッキング機構の捕獲領域に入ったところで捕獲する低衝撃型ドッキングを行う。
- (3) RVD 飛行管制技術 RVD実験時に米国航空宇宙局(NASA)のデータ中継衛星(TDRS)を用いて2機の衛星を同時に管制する運用技術や、地上からの遠隔操縦による接近などの高度の運用技術について修得する。

(注1) 仮に“おりひめ”を固定した座標系として考えると、“ひこぼし”は“おりひめ”に対して、並進(X, Y, Z方向)の3自由度と回転(X, Y, Z方向の回転)の3自由度、合わせて6自由度をもつ。

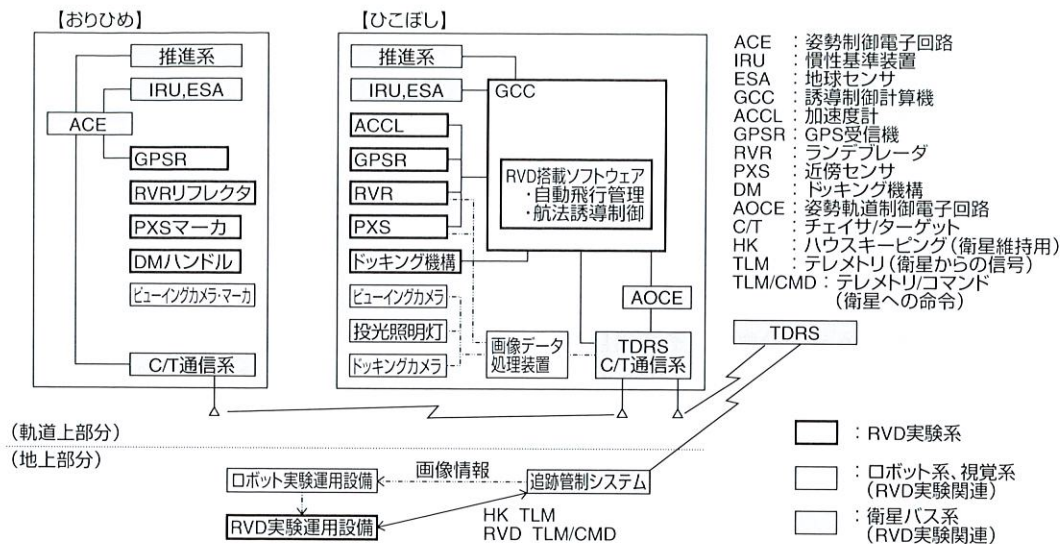


図1. RVD 実験システム “おりひめ”にはGPSRとRVD機器の受動機器(マーカ、リフレクタなど)が搭載されている。
RVD experiment system

3 RVD 実験計画

ETS-VIIでは2項に示したRVD技術について、近傍から遠方域へと段階的に実証するために以下のように初期点検と6回のRVD実験飛行(FP:フライトパス)を行う計画であった。

- (1) 結合状態でのRVD実験機器の初期点検
- (2) FP1:2mまでの分離とドッキング実験
- (3) FP2:500mまでの離脱と接近実験
- (4) FP3:9kmまでの離脱と接近する総合実験
- (5) FP4:異常対応運用の実験
- (6) FP5:遠隔操縦による接近と異常対応運用の実験
- (7) FP6:ターゲットの下方から接近する実験

上記実験について(1),(2)を確認後,(3)を実施した時点でスラスタ噴射異常が発生したが、3週間に及ぶ分離飛行後にドッキングに成功した。

東芝はこの実験においてETS-VIIのシステムメーカーとして主に“ひこぼし”の通信、電力などのバスシステムおよび“おりひめ”の運用管理、カメラ画像取得に関する視覚系設備の運用、そしてGPS相対航法に関する運用を担当した。以下に実際に分離飛行したFP1,FP2の各実験結果および運用における東芝の役割などについて示す。

4 FP1 分離・ドッキング実験

98年7月7日に実施したFP1では“ひこぼし”のドッキング機構が“おりひめ”を1.8cm/sで分離、その後“おりひめ”が姿勢制御を開始し、“ひこぼし”は近傍センサのデータに基づき約15分間相対停止した。その後、地上

からの指令で1cm/sで接近し、ドッキング機構で“おりひめ”を捕獲・結合した。

図2にドッキング時の状態を、“ひこぼし”のドッキング面に設置したカメラで撮像した画像を示す。

この実験を行うにあたっては、約2か月前の事前準備から実際の運用まで以下のような検討作業などを実施した。

- (1) 実験実施のための軌道条件、TDRSの利用可能時期などを考慮した日程決定および各運用パスごとの手順の作成
- (2) 実験中の各イベントごとの異常事象の想定、それに対する対策、対応手順などの準備
- (3) 準備した手順などの運用者への教育、および運用卓でのリハーサルによる運用者のスキル(技能)の向上

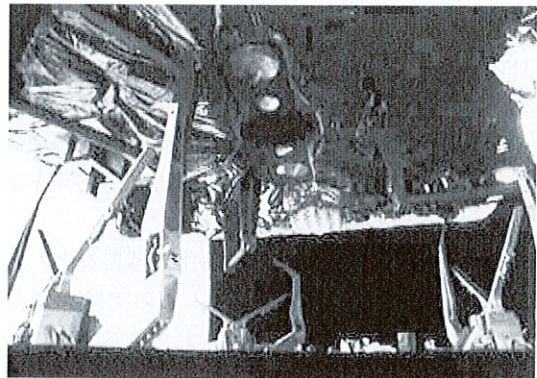


図2. FP1時の画像 “ひこぼし”のドッキング面に搭載したカメラで取得した画像。下が“ひこぼし”のドッキング機構の爪が開いた状態を示す。

Photograph of 1st RVD experiment

- (4) 実験前日に、実際に分離する以外は実験当日とほぼ同一の時間帯、手順で軌道上の衛星を使って搭載機器と手順の確認を行う運用を実施
- (5) 当日のFP1運用では、実際に運用を行う宇宙開発事業団筑波宇宙センター(TKSC)の運用チームとは別に、サブシステムの設計者などについては東芝の工場にて待機し、異常時のバックアップ体制も整えた上で実施

5 FP2 500 m までの離脱と接近実験

FP2は、1か月後の8月7日に開始した。事前準備作業はFP1と同様であるが、FP1の成果を受けて、FP2固有部分を中心に異常対応検討や訓練・リハーサルを実施することにより1か月の短時間で実験を開始できた。

当初の予定は以下のように実際に分離してからは3パスで終了するはずであった。

- (1) 第1パス “おりひめ”の分離/500 mへの移動開始
 - (2) 第2パス 500 mへの移動確認/500 mでの相対停止/500 mからの接近開始
 - (3) 第3パス 接近状態の確認/ドッキング
- 実際の実験では第2パスまではほぼ順調に実施された。図3に分離途中の“おりひめ”の撮像画面を示す。

500 mからの相対接近途中で“ひこぼし”のスラスタの一部が正常に噴射できなくなる現象が発生し、姿勢精度を維持できなくなったことから、衛星の安全処置機能が動作し、“ひこぼし”は接近を中止し、離れていく方向に飛行した。この異常現象はその後の接近時にも再発し、この原因を特定できなかったが、RVD実験系の搭載ソフトウェアを改修し、スラスタ噴射回数を低減するなどの対策を実施し、最終的には8月27日にドッキングに成功した。

この運用では最終的に150パスの連続運用を行い、相対距離も12 km近くまで離れたため、FP3,4で行う予定であったGPS相対航法を使用した500 m以遠からの接近と、搭載系の異常対応機能の確認、また異常時の運用管制技術まで修得できた。

FP2の異常対策運用にあたって、東芝はシステムメーカーとして以下のような作業を実施した。

- (1) 姿勢制御、通信、電源、温度などを含むシステムとしての“おりひめ”と“ひこぼし”の24時間のモニタ監視
- (2) 異常発生時のシステム側の対応の検討およびそれに伴う手順の作成、実行
- (3) 相対距離、位置に適合した“おりひめ”と“ひこぼし”間の通信アンテナ、出力の選択、切替運用の実施
- (4) “おりひめ”、“ひこぼし”の軌道条件による電力取

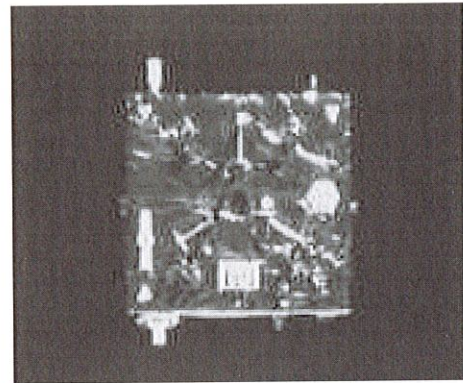


図3. FP2時の画像 “ひこぼし”から撮像した分離中の“おりひめ”のドッキング面(相対距離約10 m)。“おりひめ”の上下の突起物は、それぞれ通信用アンテナ保護カバーを示す。

Photograph of 2nd RVD experiment

支の検討およびそれに伴う運用提案

- (5) “おりひめ”のスラスタ残推薬の評価と推薬消費の節約方法の検討など
 - (6) 不具合原因の究明作業と各対策会議の資料作成、出席など
- またこの異常運用に対して、以下の3チームを構成した。

- (1) TKSCの運用卓について衛星モニタ、手順の作成などを行う、2交代の衛星運用チーム
- (2) TKSCにて運用と平行して不具合原因究明作業と各対策会議などへの出席を行うチーム
- (3) 東芝の工場において、原因究明、対策および衛星評価などを支援するチーム

FP2運用は当初の予想を越えた長期の運用となったが、上記のような事前の準備、体制と現場での適切な判断、対応、関係各社との協力関係により成功することができた。

6 GPS 相対航法評価

FP2実験中のGPS相対航法結果の例を図4、図5に示す。座標は“おりひめ”を原点として“おりひめ”の進行方向をX軸、地球方向をZ軸、両方に直行する軸をY軸としている。図4の左縦軸は相対航法出力のY軸とZ軸に相当し、右の縦軸はX軸に相当する。このとき、“ひこぼし”は“おりひめ”の前方約500 mの場所を飛行していたが、図4のプロファイルでも位置Xは500 mに近い値を示している。

“ひこぼし”は軌道面内と軌道面外の軌道制御を14分ごとに交互に実施していたが、この軌道制御に対応する結果が図5の速度プロファイルに見られる。例えば軌道面に対応するX軸とZ軸については、標準世界時刻(UT)の19

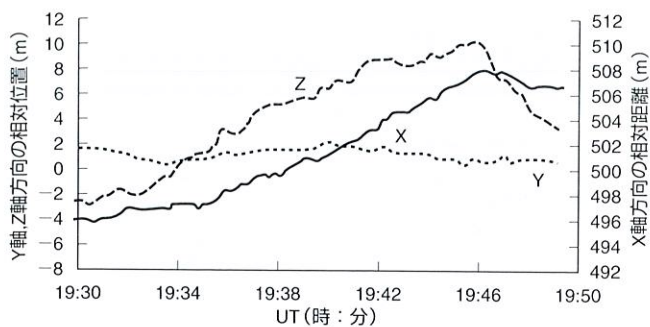


図4. GPS 相対航法結果(位置) “ひこぼし”は“おりひめ”の前方500m近傍を飛行していることがわかる。
GPS relative navigation results (position)

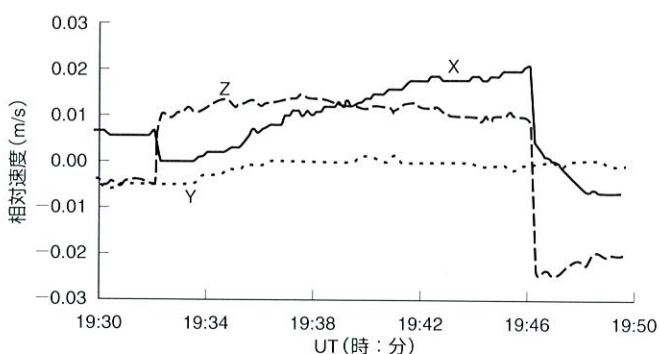


図5. GPS 相対航法結果(速度) 図4と同一期間の速度データ。19:32:46の速度の変化は軌道制御実施によるものである。
GPS relative navigation results (velocity)

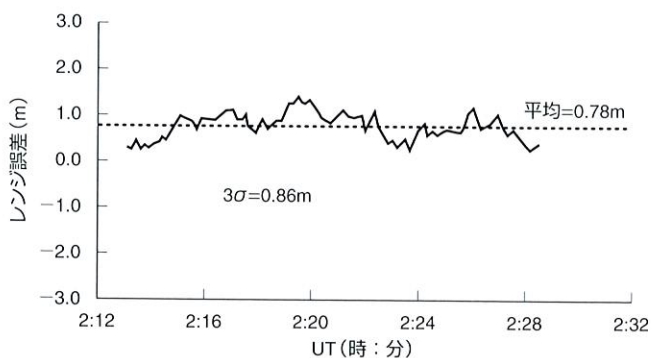


図6. GPS 相対航法結果とランデブレーダ航法結果の比較 500mより近くの比較において、より正確なランデブレーダの結果と比較すると、GPS 相対航法の結果が非常に高精度であったことがわかる。
Range difference between GPS relative navigation and rendezvous radar

時32分と19時46分に軌道制御に対応した速度の不連続点が見られる。“ひこぼし”のGPS受信機では、この軌道制御に関してRVD実験系の誘導制御計算機からそのスラスト噴射量に対応する加速度情報を受け取り、推定状態の伝搬に使用している。そのため不連続ではあるが、その後のトランジェントは見られず、状態の伝搬がスムーズに行われていることがわかる。

図6は98年8月9日に取得したデータを、同一期間のランデブレーダ航法結果と比較したものである。このケースでは、ほぼ0.8mを中心に変動しているが、この距離はランデブレーダとGPSアンテナの取付位置との差に起因するものである。他のケースでも同様の結果を得ており、GPS相対航法が要求仕様よりも約5倍の高精度を実現できたことが確認できた。

7 あとがき

ETS-VIIのRVD実験はFP2において異常事象が発生したが、逆にそれゆえに当初の予定以上の成果を得ることができた。東芝はこの実験にシステムメーカーとして運用面、技術面において参画するとともに、GPS相対航法については高い評価を得ることができた。

FP2終了後はスラスト異常原因の調査を実施している。今後はこの調査状況と合わせて、残っている実験項目を整理し、実験計画を見直す予定である。



鈴木 孝 SUZUKI Takashi

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 プロジェクトマネジャー
National Space Development Agency of Japan



河野 功 KAWANO Isao

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副主任 開発部員。ETS-VIIのランデブ・ドッキング実験系の設計・開発・実験に従事。日本航空宇宙学会、計測自動制御学会会員。
National Space Development Agency of Japan



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



前田 裕昭 MAEDA Hiroaki

情報・社会システム社 小向工場 宇宙機技術部主務。人工衛星用GPS受信機システム・GPS受信機を使用した航法システムの開発・設計に従事。日本自動制御学会会員。
Komukai Operations