

委 8 - 2

技術試験衛星Ⅶ型「おりひめ・ひこぼし」(ETS-Ⅶ)の
運用状況について

平成11年2月24日

宇宙開発事業団

1. 報告事項

技術試験衛星Ⅶ型(ETS-Ⅶ)の定常段階移行から現在に至る実験運用を中心とした運用概況と今後の予定について報告する。

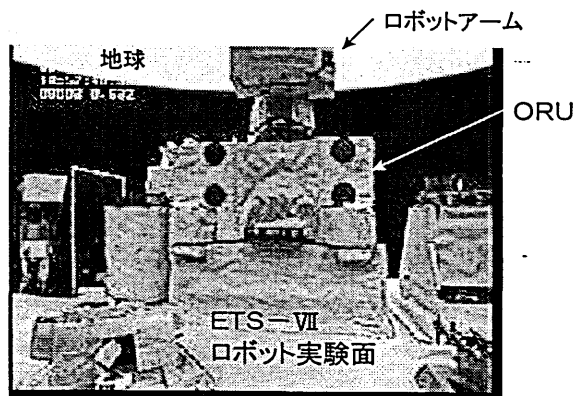
2. これまでの運用の経緯

- (1) ETS-Ⅶは、平成9年11月28日に、H-IIロケット6号機によりTRMMとの相乗りで打ち上げられた。
- (2) 初期段階運用では姿勢異常の発生や、COMETS利用不可に伴う我が国としては初のTDRS回線の本格的利用などの事態が生じたが、ソフトウェア書き換えによる対策やチェックアウト運用を通じて宇宙ネットワーク運用の習熟を高めることでこれを克服し、平成10年5月28日に定常段階運用へ移行した。
- (3) 初期段階におけるトラブルに対しては、ソフトウェアの書き換え、実運用経験に基づく手順の見直し等による運用上の対策を行い一応の成果を得たが、ETS-Ⅶの実験運用に万全を期すため、実験運用隊を組織し、隔週回毎に欠かさず衛星状態監視を行うなどの方策を立て、実験運用を進めることとした。
- (4) ロボット(RBT)実験については、NASDA及び外部機関(通商産業省、郵政省通信総合研究所、科学技術庁航空宇宙技術研究所)の実験、及び国外機関(DLR、ESA)との共同実験準備は、全て順調に進行している。
- (5) ランデブ・ドッキング(RVD)実験については、平成10年7月7日に第1回目の実験を行い、無人の衛星同士の自動分離・ドッキングに成功した。
- (6) 平成10年8月7日の第2回目のRVD実験において、再接近中の「ひこぼし」に姿勢異常が発生し、安全モードに移行する不具合が生じた。搭載ソフトウェアの書き換えや接近手順の変更等の対策の結果、8月27日にドッキングに成功した。RVD実験については現在異常原因の究明と対策作業を継続中である。

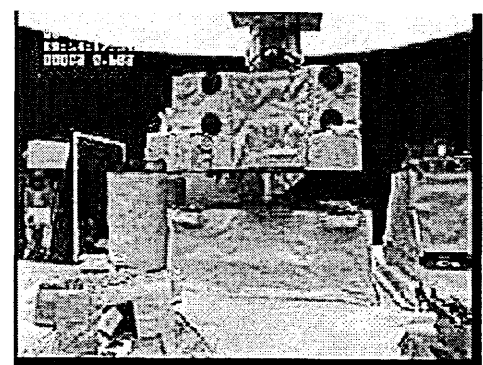
3. 定常段階における成果（中間報告）

(1) ロボット（RBT）実験系

- ロボットアームの遠隔制御実験として、自動指令に基づくロボットアームの制御や地上オペレータによる遠隔操作制御、及び遠隔操作における時間遅れの補償技術等に関する実験を実施し、宇宙ロボットの遠隔操作技術に関する評価データの取得を行った。
- ロボットアームと衛星姿勢の協調制御実験では、フィードバック制御及びフィード・フォワード制御等による実験を実施し、無人衛星上のロボットアーム制御に関する評価データの取得を行った。
- 軌道上サービス基礎実験では、各種の遠隔制御モード下でスイッチ操作やペグ挿入、ハンドル操作等の基礎作業を行い評価データの取得を行った。また軌道上交換ユニット（ORU）をロボットアームにより分離・結合する操作実験及び将来の推薬補給サービスを模擬したORU間の模擬推薬移送実験に成功した。
- これまでの実験で取得された評価データやデモンストレーション結果から、無人衛星上のロボットアームの基礎的動作特性の把握、遠隔操作における時間遅れの補償技術の有効性確認を行い、遠隔操作型の宇宙ロボットが各種軌道上サービス作業に対して有人作業並の実効性を有する可能性を実証することができた。
- 図-1に作業例として、ロボットアームによるORU操作作業の画像を、表-1にこれまでのRBT実験で達成された成果の概要を示す。

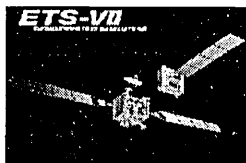


ORUを把持したところ



ORUを持ち上げたところ

図-1 ロボットアームによるORU操作実験の画像



表－１ 宇宙ロボット技術実験の達成状況

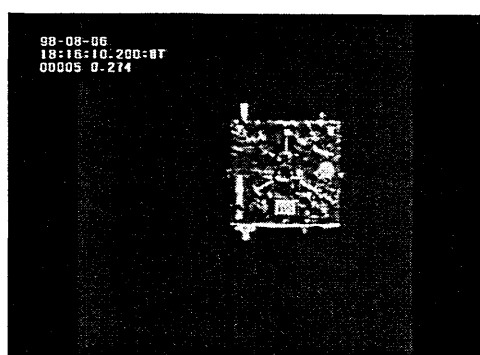
技術検証 項目 実 験	搭載ロボ ット実験 系の性能 評価	衛星姿勢と搭載 ロボットアーム の協調制御		搭載ロボットアームの遠 隔制御			軌道上サービス基礎実験			外国宇宙機関と の共同ロボット 実験	
	ロボットア ームの制御 精度の評 価、キャ リブレー ション等	ロボッ トアーム の動作 反力を 吸収す る衛星 の姿勢 制御実 験	衛星の 姿勢安 定を乱 さない ロボッ トアーム 制御実 験	自動操 作によ るロボ ットア ームの 制御	遠隔操 作によ るロボ ットア ームの 制御	低容量 の通信 回線に よる遠 隔制御	ロボッ トアーム による 各種作 業実験	推薬補 給模擬 実験	ターゲ ット衛 星操 作実験	DLR（ド イツ航 空宇宙 研究所） との共 同実験	ESA（欧 州宇宙 機関）と の共同 実験
ロボット実験	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	○

（凡例） ◎：実証済み、○：未実証

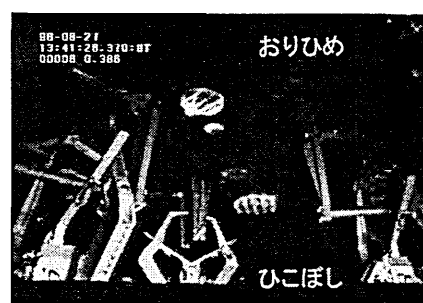
(2) 通商産業省、航空宇宙技術研究所、通信総合研究所による先行的なロボット実験についても各機関の協力を得て、順調にデータ取得が進んでいる。

(3) ランデブ・ドッキング (RVD) 実験系

- 第1回目の分離・ドッキング実験飛行で、近傍域（相対距離2m）における自動飛行・制御技術、ドッキング技術、及びセンサ技術の実証を行った。
- 第2回目の初期離脱・最終接近実験飛行では、分離後レーザ・レーダ等を用いて相対距離520mまで離れ、ランデブー飛行後の再接近時にガスジェット噴射が一時的に正常に機能しなくなり安全モードに移行する異常が発生した。この結果、当初計画を超えて相対距離12kmまで離れる事態に至ったが、ソフトウェアの変更等の対策を取ることで再ドッキングに成功した。
- 異常原因については現在究明中であるが、異常に伴う対策飛行中にGPS相対航法機能の実証等を含め、当初計画を越える機能の実証やデータ取得を行うことができた。特にレーザ・レーダやGPS等を用いた自動ランデブ飛行制御の軌道上実証は世界初であり、センサ技術についてもトップレベルの精度が得られていることが実証された。
- 図-2にRVD実験時の画像を、表-2に当初実験計画とこれまでのRVD実験で達成された成果の状況を示す。



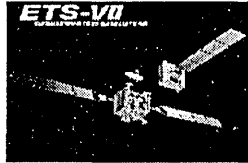
分離時の「おりひめ」衛星



←ドッキング機構

食中のドッキング (8月27日)

図-2 RVD実験時の画像



表－２ランデブ・ドッキング実験の達成状況

技術検証項目 実 験 飛 行		機 器					航 法					誘 導 制 御							システム運用						FP6					
		ドッキング機構	近傍センサ	ランデブレード	GPS受信機	加速度計	視覚系機器	PXS航法	RVR航法	GPS相対航法PR	GPS相対航法CP	GPS絶対航法	分離	基準軌道誘導	CW誘導	V/C誘導	相対6自由度制御	ドッキング機構	LOS指向制御	CAM制御	夜間ドッキング	遠隔操縦制御	状態監視運用	異常管理運用	実践的コンテ運用	遠隔操縦運用	2衛星同時運用	データ中継衛星	Rバー投入	Rバー接近
FP-1	分離・ドッキング実験飛行	◎	◎	-	-	-	-	◎	-	-	-	◎	◎	-	-	-	◎	◎	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FP-2	初期離脱・最終接近実験飛行	-	-	◎	-	-	◎	-	◎	-	-	-	-	△	-	-	-	-	◎	-	-	-	◎	-	-	-	◎	-	-	-
FP-3	総合RVD実験飛行	-	-	-	◎	◎	-	-	-	◎	-	-	-	-	◎	◎	-	-	-	-	-	-	◎	-	-	-	◎	◎	-	-
FP-4	オフノミナル実験飛行Ⅰ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	◎	◎	-	◎	◎	-	-	
FP-5	遠隔操縦／オフノミナル実験飛行Ⅱ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	◎	○	○	-	◎	◎	○	◎	◎	-	-
FP-6	Rバー接近実験飛行	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○

(凡例) ◎:実証済み、○:未実証、△:離脱は実証したが、接近は不具合原因究明中

(用語) GPS相対航法PR:コードGPS相対航法、GPS相対航法CP:搬送波位相GPS相対航法、V/C誘導:ベロシティ・インクリメント・カットオフ誘導

(略語) GPS:Global Positioning System 全地球的位置決めシステム、PXS:ProXimity Sensor 近傍センサ、RVR:RendezVous Radarランデブレード、

C-W:Clohessy-Wiltshire ヒル方程式の特解、LOS:Line Of Sight 視線方向、CAM:Collision Avoidance Maneuver 衝突回避マヌーバ

(4) 総合データシステム技術

世界初の無人衛星上のロボット操作、自動RVD実験の実施を通じて、CCSDS（宇宙データ諮問委員会）準拠のパケット通信を採用した本システムが、地上と宇宙（筑波の実験運用設備～米国のゴダード宇宙飛行センタ～ホワイトサンズTDRS地上局～TDRS～ETS-VII）をネットワークした総合的なデータ通信・運用システムとして遠隔操作コマンド等に柔軟に対応し、実用的に機能することを実証した。

(5) 原子状酸素モニタ（TEDA/AOM）

AOMについては、衛星本体からのアウトガスの影響と考えられるノイズが大きく、原子状酸素データの識別が困難な状況である。当面、衛星アウトガス量のデータ取得と評価を主眼に観測を継続していく予定である。

4. 定常段階中における主な異常事象とその原因及び処置対策状況

ETS-VIIのこれまでの定常段階運用において発生した主な異常事象の原因究明と処置対策状況を以下に示す。

(1) RVD実験時のガスジェット噴射異常

本件については引き続き鋭意原因究明中であり、これらの状況については技術評価部会に報告しつつ進めている。ここまでの検討概要を以下に示す。

- 異常はZ方向（地心方向）の並進制御に用いられるペア・スラストの一方が何らかの原因で推力低下（極端な場合は噴射しない）を起こし、姿勢が維持できなくなることである。但し、噴射異常を起こしたスラストはその後機能を回復する（異常の発生、回復の原因は現時点では不明）。
- 異常を起こしているスラストは計5本で、主系・従系に関係なく発生する。
- 異常発生時の制御系の動作解析及び衛星バス電流調査から、制御信号は妥当であり、これに見合ったスラスト駆動電流の増加が観測されているにもかかわらず、スラスト推薬弁が開かないか弁は動作するものの推薬が流れていないと考えられる結果が得られている。
- 異常の発生はRVD制御時のみであり、AOCS／スラスト制御時には発生していない（但し、衛星バス姿勢制御系にハンドオーバーした後も異常が継続した例がある）。

以上より、ソフトウェアを含む制御系システムには異常は見られず、異常の原因は推進系まわり（特にスラスト及び推薬の流路に関係する部分・事象）に

ある可能性が高いと考えている。今後、地上での試験及び軌道上試験等の実施によりできるだけ早期に原因究明を進めるとともに、これらの結果をHTV実証機のRVDシステム等に反映し、十分な対策を立てる。また、残るRVD実験については、同様の異常が再発しても姿勢制御が維持されるようソフトウェア書き換えによる対策を原因究明と並行して検討している。

(2) Sバンド・トランスポンダB系の受信異常

平成10年8月28日以降、チェイサ衛星Sバンド・トランスポンダのB系(従系)オムニ回線で捕捉はずれ、捕捉不可の異常が発生している。原因はTDRSとの衛星間通信時に使用されるスペクトラム拡散変調のための疑似コードの捕捉・同期回路部の異常と推定している。現在、異常が生じているB系においても回線マージンの大きいTDRSハイゲイン回線や地上局との通信に使用されるUSB回線は機能していること、主系であるA系は全て正常に機能していることから、直ちに通信回線の異常にはつながらないが、注意深く状況監視を継続している。

5. 今後の予定

これまでの実験運用でRBT実験、RVD実験ともかなりの実験項目を達成しているが、一方でRVD実験時の異常原因の究明と対策作業が継続中である。また、衛星は推奨及び発生電力的に余裕を有しており定常段階終了後も追加的な実験利用が可能なことから、以下の方針で今後の実験運用を行うこととする。

(1) RBT実験

RBT実験は、外部機関実験及び国外機関(DLR、ESA)との共同実験準備とも順調に進んでおり、当初予定の期間(平成11年5月末)内において当初計画のミッションを全て達成するよう運用計画を維持する。

(2) RVD実験

RVD異常の原因究明と残された実験項目の達成を第一に考え、原因究明のため実機を用いた軌道上試験を平成11年3月に実施する。この結果を反映し、現在進めているソフトウェア上の異常対策と併せて、RVD実験再開のための対策とスケジュールを設定する予定である。再開RVD実験については、残されたRVD実験課題(Rバー接近、遠隔操縦、衝突防止マヌーバ等)を1回の実験飛行に集約して効率的に実施する計画を検討している。

(3) 追加的な利用実験

- 平成11年5月末以降は、残されたRVD実験の実施に係る作業を第一優先とし、これに影響せずかつ可能な範囲で、RBT実験系を中心に追加的な利用実験を行う。
- 利用実験の実施に当たっては、NASDA及びETS-VIIに実験機器を搭載している国内の機関に加えて大学等からの参加要望に応えるために共同研究機会を設けることとし、NASDAホームページ等を利用して参加案内を行う。

(4) 実験運用の期間

ETS-VIIの実験運用期間は、RVD実験及び利用実験を含めて、実験運用設備の制約(計算機2000年問題)及び半年程度の実験運用期間の追加で利用実験の要望に概ね応えられることから、平成11年11月末頃までとする(平成11年12月は発生電力低下時期にあたり、実験運用は困難な見込みである)。

(5) 実験運用終了以降の運用計画

実験運用を終了した、平成11年12月以降の衛星の運用については衛星システムの長期データ取得の有用性等を検討した上で別途決定する。

(6) 今後の運用予定を図-3に示す。

図-3. ETS-VII実験運用スケジュール

[illegible]

技術試験衛星 VII 型 (ETS-VII) のロボット実験の進捗状況

平成 11 年 2 月 24 日

宇宙開発事業団

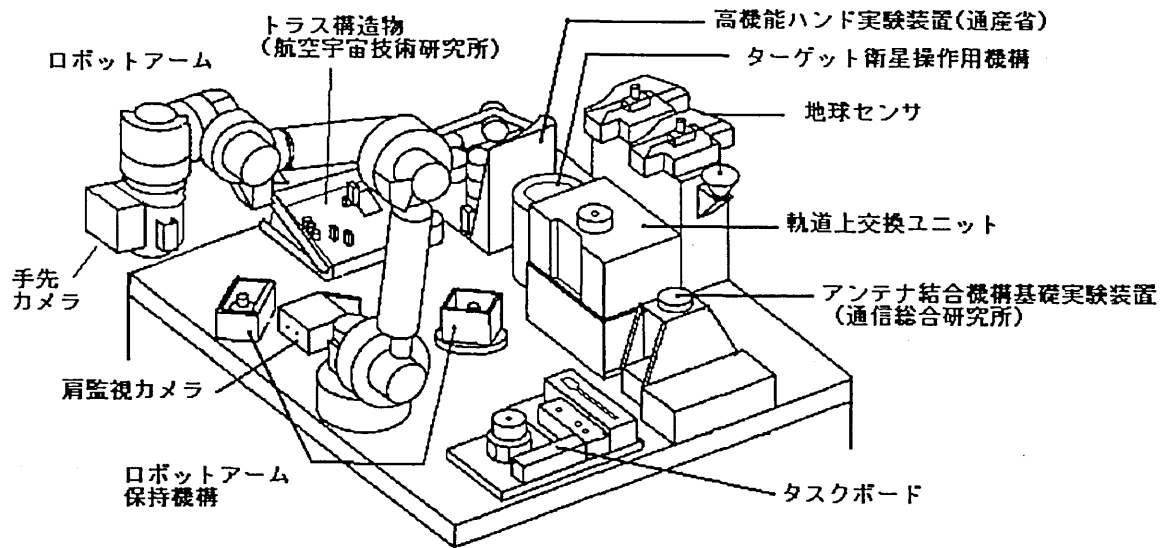
1. 実験の目的

今後の宇宙活動においては、宇宙ステーションへの補給物資の輸送、軌道上における人工衛星の点検・保守、地上からの遠隔操作による宇宙実験の実施、月惑星探査の実施等が行われ、そのためにはランデブドッキング技術と共に遠隔制御型の宇宙ロボットが必要となってくる。

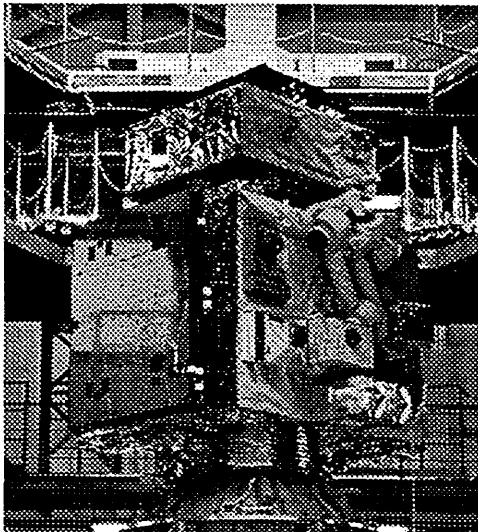
宇宙開発事業団では、地上から遠隔制御可能な第二世代の宇宙ロボット (JEMRMS 等、宇宙飛行士に操縦されるものを第一世代とする) の実現に必要な技術の開発・実験を ETS-VII により行っている。また、ETS-VII は宇宙ロボットの貴重な軌道上実験機会であることから、通商産業省、科学技術庁航空宇宙技術研究所、郵政省通信総合研究所のロボット実験機器も搭載され、NASDA はこれらの機関によるロボット実験を支援している。さらには、NASDA と外国宇宙機関 (DLR、ESA) との共同ロボット実験も予定している。

2. ETS-VII のロボット実験システム

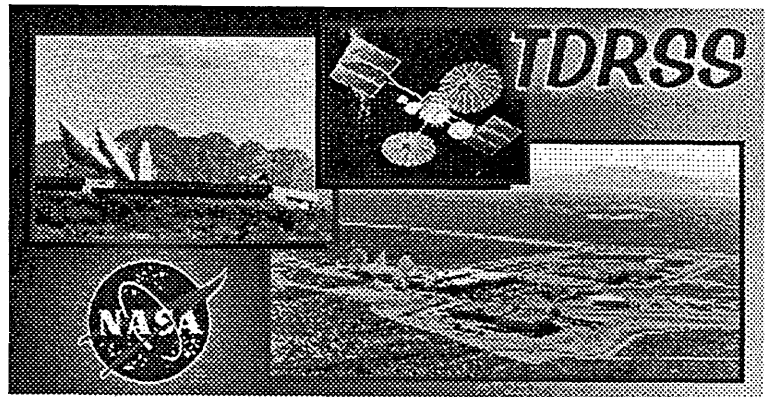
ETS-VII を使用したロボット実験は、ETS-VII (主にチェイサ衛星) に搭載されたロボット実験機器 (約 2 m の 6 自由度ロボットアーム、ロボット実験用搭載計算機、ロボットアームで操作される各種実験機器)、筑波宇宙センタに設置されたロボット実験運用設備、及び両系を支えるインフラ系 (衛星本体、追跡管制設備、データ中継衛星を含む通信ネットワーク) から構成されている。図-1 に全体システムの概要を示す。



ETS-VII 搭載ロボット実験機器



H-II ロケット上の ETS-VII



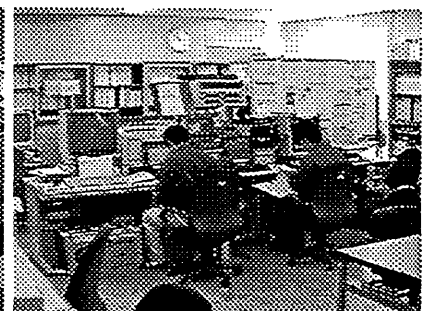
NASA のデータ中継衛星システム(TDRSS)



NASDA ロケット実験運用設備



ETS-VII 追跡管制設備



データ中継管制設備

図-1 ETS-VII のロボット実験システムの全体構成

3. NASDA のロボット実験計画

ETS-VII のロボットは世界で初めて人工衛星に搭載され地上から遠隔制御されるものであるという特徴を活かして、NASDA は以下のロボット実験を予定している。

- 衛星搭載ロボットアームの軌道上での機能性能の評価
- 衛星搭載ロボットアームと衛星姿勢の協調制御実験
- 衛星搭載ロボットアームの遠隔制御実験
- 軌道上サービス基礎実験

(衛星搭載機器の目視点検・操作・交換、推薬補給、ターゲット衛星操作等)

また、ETS-VII が宇宙ロボットの貴重な軌道上実験機会であることから、通商産業省、科学技術庁航空宇宙技術研究所、郵政省通信総合研究所のロボット実験を支援すると共に、NASDA と外国宇宙機関(DLR、ESA)との共同実験をも予定している。また、ETS-VII の衛星状態が良好なため、当初のミッション期間(打上げ後1年半)終了後も引き続き ETS-VII の実験運用を行い、追加の実験(利用実験)を予定している(後述)

NASDA は上記の実験を以下の様に、基本実験、応用実験、利用実験と区分してそれぞれの達成目標を以下の様に設定した。(平成9年11月19日 宇宙開発委員会に報告)

ミッション達成区分	達成基準	内容	実施状況
ミニマムサクセス	基本実験の一部を実施	●ロボットアームの機能性能評価を実施 ●衛星姿勢との協調制御実験実施	・実施済み ・実施済み
ミッションサクセス	基本実験の成功	●遠隔制御実験実施	・実施済み
フルサクセス	応用実験の成功	●軌道上サービス基礎実験の実施	・大半を実施済み
エクストラサクセス	利用実験の実施	●ターゲット衛星点検捕獲実験実施 ●外国機関との共同実験の実施 ●公募等による追加実験の実施	・準備中 ・準備中 ・準備中

4. 実験運用状況

ETS-VII のロボット実験は、平成 9 年 11 月 28 日の打上げ以降、概略、以下の日程で行われている。ロボット実験に係る重大な不具合はなく、実験は順調に推移している。

- ロボットアームの打上げ固定の解除(通信用アンテナの固定解除と同時) :
平成 9 年 12 月 19 日
- 視覚系の機能確認 :
平成 10 年 2 月～3 月
- ロボットアームの機能性能確認 :
平成 10 年 3 月～5 月
- ロボットアームによる搭載実験機器の固定解除 :
平成 10 年 5 月～6 月
- 衛星搭載ロボットアームの遠隔制御実験 :
 - ・ 電子手順書を使用した自動操作による遠隔制御 平成 10 年 5 月～8 月
 - ・ NASA のデータ中継衛星を使用していることによる遠隔操作機能の不備(等間隔のコマンド伝送が行えない)の改善 :
平成 10 年 9 月
 - ・ ハンドコントローラを使用した遠隔操作実験 :
平成 10 年 10 月～11 月
- 衛星搭載ロボットアームと衛星姿勢の協調制御実験 :
平成 10 年 5 月～11 月
- 遠隔制御されたロボットアームによる各種作業実験 :
平成 10 年 6 月～現在
 - ・ 軌道上交換ユニットの脱着(機器交換実験)
 - ・ タスクボードの操作(ハンドル操作、小型部品操作等) :
 - ・ 衛星搭載機器の目視点検(スラスタ/軌道上交換ユニットの目視点検)
 - ・ 推薬補給模擬実験

一方、外部機関(通商産業省、航空宇宙技術研究所、通信総合研究所)のロボット実験も以下の様に順調に行われている。

- 通商産業省のロボット実験(高機能ハンド技術実験:30日間予定)
 - ・ 第1回(平成10年3月)、第2回(平成10年7月)、第3回(平成10年10月)、第4回(平成10年12月)、第5回(平成11年5月予定)
- 航空宇宙技術研究所のロボット実験(トラス構造物の遠隔操作実験:28日間予定)
 - ・ 平成10年3月以降、概ね1回(毎回2～3日)/月程度の頻度で実施中
- 通信総合研究所のロボット実験(アンテナ結合機構基礎実験:22日間予定)
 - ・ 平成10年3月以降、概ね1回(毎回2日)/月程度の頻度で実施中

5. 実験結果

以下に、これまでに得られた主要な実験結果を示す。

(1) ロボットアームの機能性能

ETS-VII 搭載ロボットアームは全長約 2 m で 6 個の回転関節を有し、先端にツール機構部を有している。また、ツール機構部上、及び第一関節上に視覚系カメラを搭載している。ETS-VII 搭載ロボットアームは JEMRMS の技術(アーム機構は JEMRMS の親アームの技術、ツール機構は子アームの技術)を利用し、さらに衛星搭載用、遠隔制御用、各種ロボット実験用の各機能(ロケット打上げ時のアーム保持機構の採用、ロボット実験系搭載計算機の開発、遠隔制御に係る機能の強化等)を追加することにより実現している。

ロボットアームは衛星打上げ後の軌道上でのキャリブレーションにより、非常に高い制御精度(先端位置決め精度で数 mm 以内、繰り返し精度で 1.5mm 以内)を有していることが確認された。

(2) ロボットアームの遠隔制御実験

ETS-VII 搭載ロボットアームを遠隔制御する際の往復の通信時間遅れは 6 秒程度である。この時間遅れは、実験運用設備と衛星との通信がパケット方式により行われているため計算機間でパケット伝送する際に生じるものが支配的である。

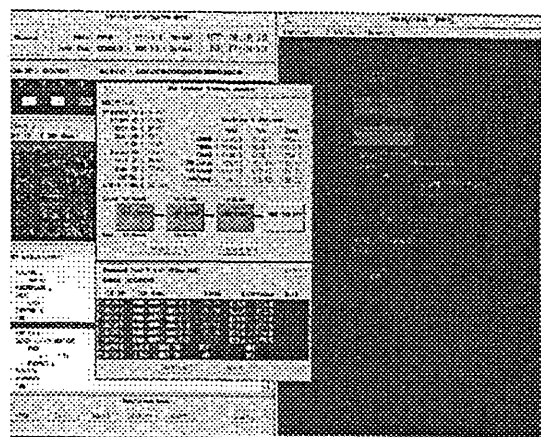
NASDA の搭載ロボットアームの遠隔制御システムは、このような大きな通信時間遅れがある中でも、オペレータに負担をかけずに、小人数で安全、確実に作業を行うことを目標に、電子手順書による自動操作を中心として、必要に応じてハンドコントローラを使用した遠隔操作が可能な様に設計されている。

電子手順書を使用した実験運用では、実験運用設備の計算機画面上で、主としてマウス操作により作業手順をフローチャート形式の電子手順書に記述し、同じく実験運用設備に内蔵された衛星搭載ロボット系シミュレータに対して電子手順書を実行することにより同手順書の妥当性を検証し、検証された手順書を用いて実験を行っている。また、一旦、使用され、または検証された電子手順書、及びその構成要素(作業フローの一部をなす作業単位)は実験運用設備に登録され、別の作業手順を作成される時に利用され、短期間での作業手順作成を可能にしている。

一方、事前の作業計画が難しい作業（目視検査等）では、目標位置近傍まで上記の自動操作によりロボットアームを誘導した後に、ハンドコントローラを使用した遠隔操作が可能な仕組みとなっている。本遠隔操作時においても、通信時間遅れによる操作性の劣化を補うために、ロボットアームの動作状態を予測的に表示する等の対策が取られている。



NASDA のロボット実験運用設備



70-チャート形式のコマンド送信画面



図-2 NASDA のロボット実験の様子

(3) 衛星搭載ロボットアームと衛星姿勢の協調制御実験

人工衛星上でロボットアームを動作させた場合、ロボットアームの動作反力による衛星の姿勢変動が無視できない。特に姿勢変動が急激、あるいは大きな場合、衛星間通信アンテナの指向方向維持が困難になったり、姿勢計測用センサによる衛星の姿勢計測が不可能となり、衛星の運用が中断される恐れがある。ETS-VII では、ロボットアーム動作時の動作反力を角運動量として実時間で推定し、衛星の姿勢制御系でフィードフォワード補償を行うことにより、姿勢変動を抑えると共に、過大な角運動量を発生するロボットアームの動作を禁止する機能が組み込まれている。これらの機能を使用することにより、ロボットアーム動作時の衛星の姿勢変動を通常の姿勢制御状態の数分の1に抑えることが可能なことを確認した。図-3 に協調制御を行っている場合、及び行っていない場合に衛星の姿勢変動の様子を示す。(前半が協調制御なし、後半が協調制御あり)

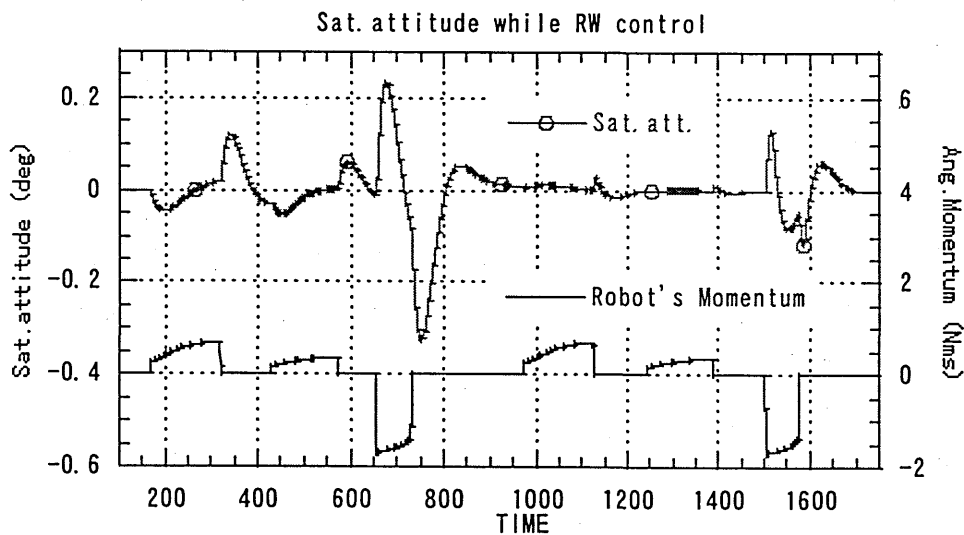


図-3 ロボットアームの動作による衛星の姿勢変動

900 秒までは協調制御なし。その後、協調制御を使用
(衛星の姿勢制御はリアクションホイールによる)

(4) 軌道上サービス基礎実験

(4a) ロボットアームによる軌道上交換ユニット(ORU)の操作

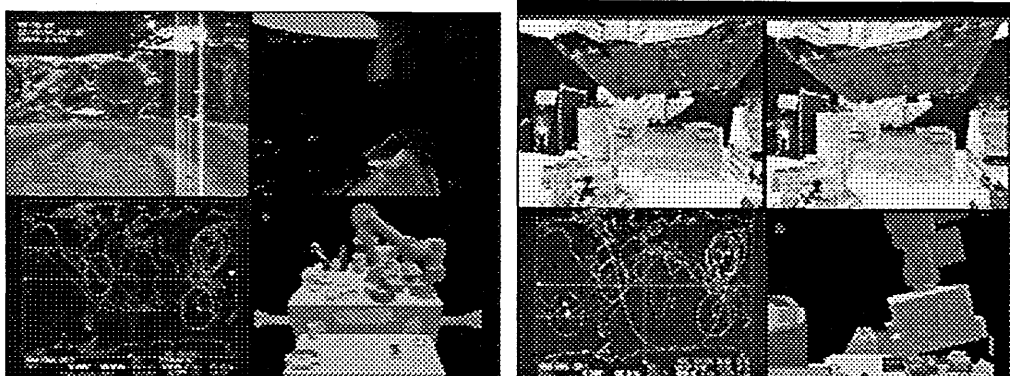
ETS-VII に搭載された軌道上交換ユニット本体は、概略、電子レンジ程度の大きさ・質量 (500mm×400mm×300mm、約 20kg) で、ロボットアーム先端のツールに内蔵されたソケットレンチにより ORU 内部の固定機構を動作させ、固定解除／固定が行われる。図-4 にロボットアームによる軌道上交換ユニットの操作の様子を示す。



図-4 ロボットアームによる軌道上交換ユニットの脱着操作

(4b) 衛星搭載機器の目視検査

ロボットアームの先端、及び第一関節上には視覚カメラが搭載されており、同カメラを使用して衛星搭載機器の目視検査が可能である。平成 10 年 8 月の第 2 回ランデブドッキング実験時に不具合が疑われたガスジェットスラスタの外観をロボットアーム先端の手先カメラにより目視検査を行ったが、外観上、異常は見つからなかった(平成 10 年 9 月 3 日実施)。また、後述の推薬補給実験に使用された軌道上交換ユニットの流体コネクタ付近をロボットアーム第一関節上の肩監視カメラにより目視検査を行った。(平成 11 年 1 月 19 日実施)



(ガスジェットスラスタの目視点検)

(軌道上交換ユニットの目視点検)

図-5 ロボットアーム搭載視覚カメラを利用した衛星搭載機器の目視点検

(4c) 衛星搭載実験機器の操作

ETS-VII のロボットアームは軌道上交換ユニットの様な機器を操作しやすい(把持しやすい。一旦把持すると不用意には外れない) 設計となっているが、ETS-VII 上には各種形状、寸法の実験機器が搭載されており、これらを単一のツールで操作することは出来ないため、ロボットアームの先端に追加のツールを取り付けての作業が可能となっている。追加のツールとしては、タスクボード上の小型の実験機器を操作するためのもの、ターゲット衛星を操作するためのものがある。また、通産省が開発した高機能ハンド実験装置のハンド部分を取り付けることも可能である。図-6 にロボットアームの先端にタスクボード操作用ツールを取り付けて、タスクボード上の小型部品(鎖につながれた金属球)の操作の様子を示す。また、図-7 にターゲット衛星を操作するためのツールを取り付けている様子を示す。(ツールは筒状の容器に収納されている)

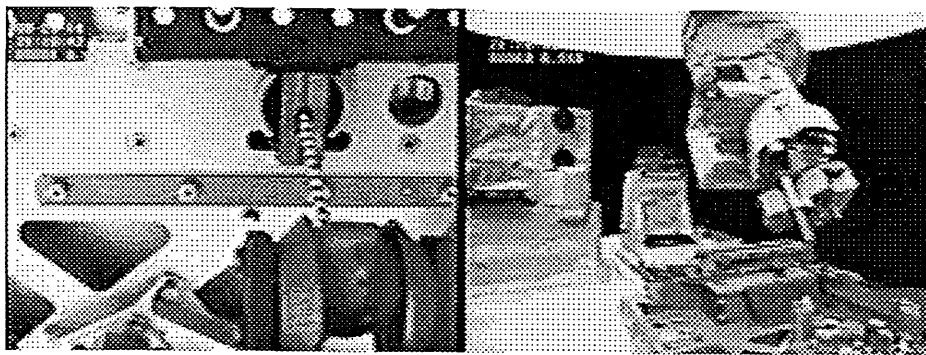


図-6 タスクボード操作用ツールによる小型部品の操作

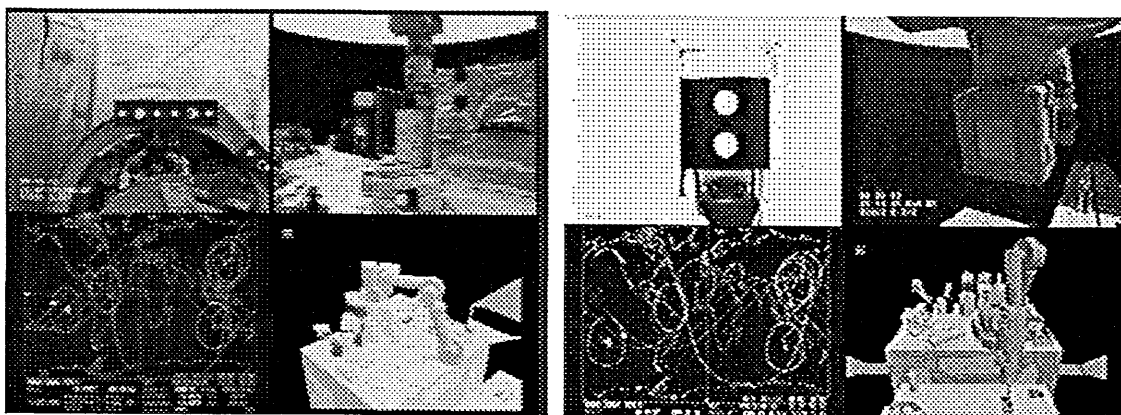


図-7 ターゲット衛星操作用ツールを取り付けたロボットアームによるターゲット衛星の操作

(4d) 推薬補給模擬実験

ETS-VII に搭載されている軌道上交換ユニットには推薬補給模擬実験を行うためのタンク、配管、バルブ、流体コネクタ、電気コネクタが組み込まれており、ロボットアームによる軌道上交換ユニットの脱着に併せて、流体コネクタ、電気コネクタの脱着が行われる。本実験機器を使用して平成 10 年 10 月 29 日に推薬補給模擬実験が行われた。実験は、ロボットアームにより軌道上交換ユニットが脱着された後に、地上からの指令により、同ユニット内のバルブを操作することにより行われた。実験は、まず、流体コネクタ部分に窒素ガスを導入して同コネクタからのリークが無いことを確認した後に、窒素ガスの排出、模擬推薬（ヒドラジンと沸点・凝固点等の化学的特性が近い純水を使用）の移送（衛星本体側のタンクから軌道上交換ユニット側のタンクへの移送）を行い、実験は正常に終了した。

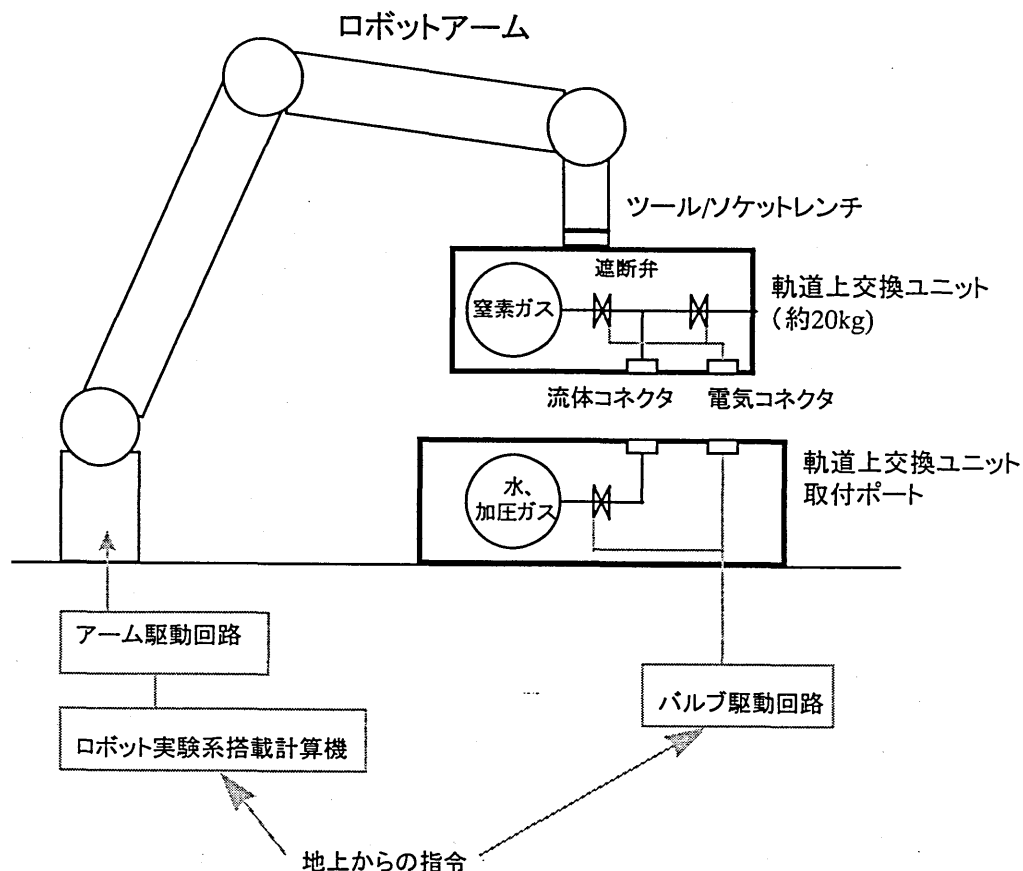


図-8 軌道上交換ユニットを用いた推薬補給実験

6. 今後のロボット実験計画

NASDA、及び各機関（通商産業省、郵政省通信総合研究所、科学技術庁航空宇宙技術研究所）のロボット実験はいずれも順調に推移しており、本年5月末までの当初のミッション期間（打ち上げ後1年半）内には、各機関共、予定したロボット実験を完了できる見込みである。

NASDA は、今後、本年5月末までに、以下の実験を予定している。

■ ターゲット衛星操作実験

ロボットアームでターゲット衛星を把持し、移動する実験。

なお、ターゲット衛星の放出は行わない。（平成11年3月に実施予定）

■ 欧州宇宙機関(ESA)との共同ロボット実験

ESAが開発したロボット遠隔制御装置を筑波宇宙センタに持ち込み、NASDAのロボット実験運用設備と併用することにより、搭載ロボットアームの遠隔制御実験等を実施する。（平成11年4月に実施予定）

■ ドイツ航空宇宙技術研究所(DLR)との共同ロボット実験

DLRが開発したロボット遠隔制御装置を筑波宇宙センタに持ち込み、NASDAのロボット実験運用設備と併用することにより、搭載ロボットアームの遠隔制御実験等を実施する。（平成11年4月に実施予定）

■ 通産省との共同ロボット実験

NASDAの搭載ロボットアームの先端に通産省の高機能ハンド実験装置のハンドを取り付け、ターゲット衛星上の実験機器（通産省が開発したタスクパネル）を操作する実験。（平成11年5月に実施予定）

■ ターゲット衛星の点検・捕獲実験実施に向けた準備作業

視覚系カメラの映像を衛星搭載計算機に取り込み、実時間で画像処理することにより、動きのある相手物体にロボットアームを追従させ捕獲するための搭載ソフトウェアの開発試験。（実験は後述の延長した実験運用期間の平成11年11月頃に実施予定）

7. 定常段階終了後に追加で予定しているロボット実験

平成 11 年 5 月末に当初予定のロボット実験（基本実験、応用実験）が終了した後も、平成 11 年 11 月末まで以下の追加のロボット実験(利用実験)を予定している。

■ ターゲット衛星の点検・捕獲実験(NASDA)

独立して飛行するターゲット衛星の周囲をチェイサ衛星が飛行しながら、視覚系カメラによりターゲット衛星の状態を点検する。さらに、ロボットアームによるターゲット衛星の捕獲を試みる。なお、本実験はこれまで独立に運用されていたランデブドッキング系とロボット系を同時に運用する必要があり、非常に難度が高く、3 項で示したミッション達成区分のエクストラサクセスレベルの実験である。(平成 11 年 11 月頃実施予定)

■ 外部研究機関等との共同研究による共同ロボット実験

- ・ 大学、試験研究機関等との共同研究による共同実験
- ・ ETS-VII にロボット実験機器を搭載している機関との共同研究による共同ロボット実験（相互に相手機関の実験機器を使用しての実験）

■ 各機関(通産省、航空宇宙技術研究所、通信総合研究所)による追加のロボット実験

8. ETS-VII 以降の構想

ETS-VII は今後の宇宙活動に必要なランデブドッキング技術と遠隔制御型宇宙ロボット技術の基礎を修得することを目的とした衛星で、ほぼ予定した全ての課題が達成可能な見込みである。ETS-VII で修得される技術では、地球周回低軌道にある協力的なターゲット宇宙機に接近・結合して行う相手宇宙機の点検、機器交換、燃料補給等までがカバーされる。

一方、今後宇宙空間に打ち上げられる人工衛星の数はますます増加し、それらはミッション終了後もデブリとして軌道上に残り、他の衛星・宇宙機との衝突の可能性は今後ますます高まる。また、打ち上げられる人工衛星の中には ADEOS の様に、非常に高価な衛星でありながら、故障によりミッションを達成できなかった衛星も数多い。将来的にはこの様な非協力的なターゲット宇宙機・衛星に接近し、ロボットアーム等により捕獲した上で、機能の回復を図ったり、あるいは軌道から離脱させる等の作業が必要となってくる。そのため、ETS-VII では、基本／応用実験終了後の追加の実験である利用実験として、一旦分離したターゲット衛星の周囲をチェイサ衛星により周回飛行しながら視覚カメラによる点検、ロボットアームによる捕獲実験を行うことを計画すると共に、ETS-VII 以降の計画として非協力的なターゲットに接近し、捕獲、機能回復、軌道離脱等の作業を行う宇宙機、及び同宇宙機の実現に必要な要素技術の検討を現在進めている。

9. 学会等への発表実績

ETS-VII の実験状況・成果は、インターネット上の

- ETS-VII ホームページ(<http://oss1.tksc.nasda.go.jp/ets-7/>)
- おりひめ・ひこぼしワールド(<http://oss1.tksc.nasda.go.jp/pr>)

等で常時公開しているが、さらに関連学会への発表を積極的に進めている。

(ロボット実験に関する主要な学会発表)

- Iwata, et.al., "Development of the Second Generation Space Robot", The 40th International Astronautical Congress(IAF89), 1989, IAF-89-051
- M.Oda, I.Kawano and F.Yamagata; "ETS-VII (Engineering Test Satellite VII) - a Rendezvous Docking and Space Robot Technology Experiment Satellite", 46th International Astronautical Congress(IAF95), Oslo, Norway, Oct.2-6,1995, IAF-95-U.2.01
- M.Oda, et al. "ETS-VII, Space Robot In-Orbit Experiment Satellite", Proc. of 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation", April 22-28, 1996, Minneapolis, USA, pp.739-744
- M.Oda and T.Doi, "Teleoperation system of ETS-VII robot experiment system", Proc. of IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robotics and Systems (IROS'97), pp.1644-1650, Sept.7-11, 1997, Grenoble, France
- M.Nishida and M.Oda, "Space telerobot experiment system based on NASDA's ETS-VII satellite", Proc. of AIAA Guidance and Control Conference, Aug. 1997.
- Oda, "Motion control of the satellite mounted robot arm which assures satellite attitude stability", Acta Astronautica Vol.4, No.11, pp.739-750, 1997
- Oda, "Space robot experiments on NASDA's ETS-VII satellite", Proc. of the 29th International Symp. on Robotics (ISR'98), Apr.27-30, 1998, Birmingham, UK, pp.77-83, ISBN 0 9524454 7 6
- M.Oda, "Space robot experiments on NASDA's ETS-VII satellite -Preliminary overview of the experiment results-", to be presented at IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 1999, May 10-15, Detroit, USA
- 小田, "ETS-VII (おりひめ・ひこぼし) による自動ランデブドッキング実験と遠隔制御ロボット実験", 計測自動制御学会総会における特別講演, 1999年2月22日

—以上—

技術試験衛星VII型 (ETS-VII) ランデブ・ドッキング実験の進捗状況

平成11年2月24日

宇宙開発事業団

1. 実験の目的

21世紀の宇宙開発を進めていくためには、国際宇宙ステーション (ISS) や軌道上宇宙機に物資を補給したり、実験機器や消耗品の交換を行ったり、1機のロケットでは打ち上げ困難な大型宇宙構造物を軌道上で組立てたりする必要があり、このためには、軌道上の宇宙機に接近し、結合するランデブ・ドッキング (RVD) 技術が不可欠である。ジェミニ、アポロからスペースシャトルまで、アメリカでは宇宙飛行士が宇宙機を操縦して RVD を行っているが、NASDA では 21 世紀初頭のわが国の宇宙活動を考え、無人宇宙機が自動・自律で RVD するシステムを基本システムとして選定し、技術試験衛星 VII 型 (ETS-VII) によって軌道上実証実験を行うこととした。

ETS-VIIで開発し、実証しようとしている RVD システムは、以下のような特徴を持った RVD システムである。

1. 低軌道 (LEO) への地上打上げ型 RVD システム
2. 無人宇宙機による自動 RVD を基本とし、遠隔操縦による RVD も可能なシステム
3. ISS 等の有人宇宙機への RVD を可能とする、安全性の高いセーフ RVD システム
4. 能動的なチェイサ宇宙機が受動・協力的なターゲット宇宙機へ接近する RVD システム
5. 秒速 1cm 程度で接近し、非接触状態にて捕獲し、結合する低衝撃型ドッキング

これらの内、自動 RVD システムは人間の能力に左右されずに高精度化が可能であり、信頼性の高いシステムとすることができる。また、将来の月・惑星宇宙機への拡張性を考えた場合、通信時間遅れに左右されない高い自律性を有するシステムが望まれる等の点を考慮して、自動 RVD システムを選定した。また、将来の様々なミッションに柔軟に対応するために、地上からの遠隔操縦 RVD の実験も可能なシステムとした。

これまでのアポロ宇宙船、ソユーズ宇宙船等 米口のドッキングは、宇宙機間の相対速度を 5~20cm/s 程度とし、両宇宙機の慣性力を利用してドッキング機構を勘合する衝撃型ドッキング (Impact Docking) であるが、NASDA では今後の宇宙機の RVD を考え、多くの宇宙機が大型の太陽電池パドルを有しており、衝撃や振動は好ましくないこと、宇宙機本体やドッキング機構の重量をなるべく小さく抑えたいこと、また接近速度が小さいほど緊急時の対処が容易で安全性が高いこと等から、約 1cm/sec の低速度で接近し、光学センサで位置を計測し、接触する以前にドッキング機構でターゲット宇宙機を捕獲し、結合する非接触低衝撃型のドッキング (Low Impact Docking) 方式を選定した。これにより、簡単な把持構造を具備するのみで、一般の人工衛星に対するドッキングが可能となる等、広範な応用が開けることとなる。一方で、低衝撃ドッキング方式は、非常に高い制御精度が必要となる大変難しい技術であるが、これを世界に先駆けて開発することに成功した。

2. ETS-VIIのRVD実験システム

ETS-VIIは図1に示すように、チェイサ衛星「ひこぼし」(約2500kg)/ターゲット衛星「おりひめ」(約400kg)の2つの衛星から構成され、「ひこぼし」が「おりひめ」を分離し、自動及び遠隔操縦RVD実験を行う。

ETS-VII RVD実験は、「おりひめ」「ひこぼし」両衛星のバスシステム(姿勢軌道制御系、推進系、通信系等)、両衛星に搭載されたRVD実験系機器、地上の追跡管制設備と、米国のデータ中継衛星TDRSを利用した通信リンク等によって実行される。図2、及び図3にRVD実験関連システムの概要と、ドッキング面の機器配置を示す。

無人宇宙機が自動RVDを実現するためには、相手宇宙機との相対的な位置を高精度で推定し、自動的に軌道制御を実施して接近を行うための航法・誘導制御機能が必要になる。ETS-VIIでは「おりひめ」と「ひこぼし」の距離に応じ、500m以遠の相対接近フェーズではGPS相対航法を、500mから2mの最終接近フェーズでは高精度のレーザ・レーダであるランデブ・レーダ(RVR)を、2m以近のドッキングフェーズでは相対6自由度(位置/姿勢)の計測を行うために、画像センサである近傍センサ(PXS)を使って両衛星間の相対位置や速度を推定し、自動制御でランデブ・ドッキングを行う。

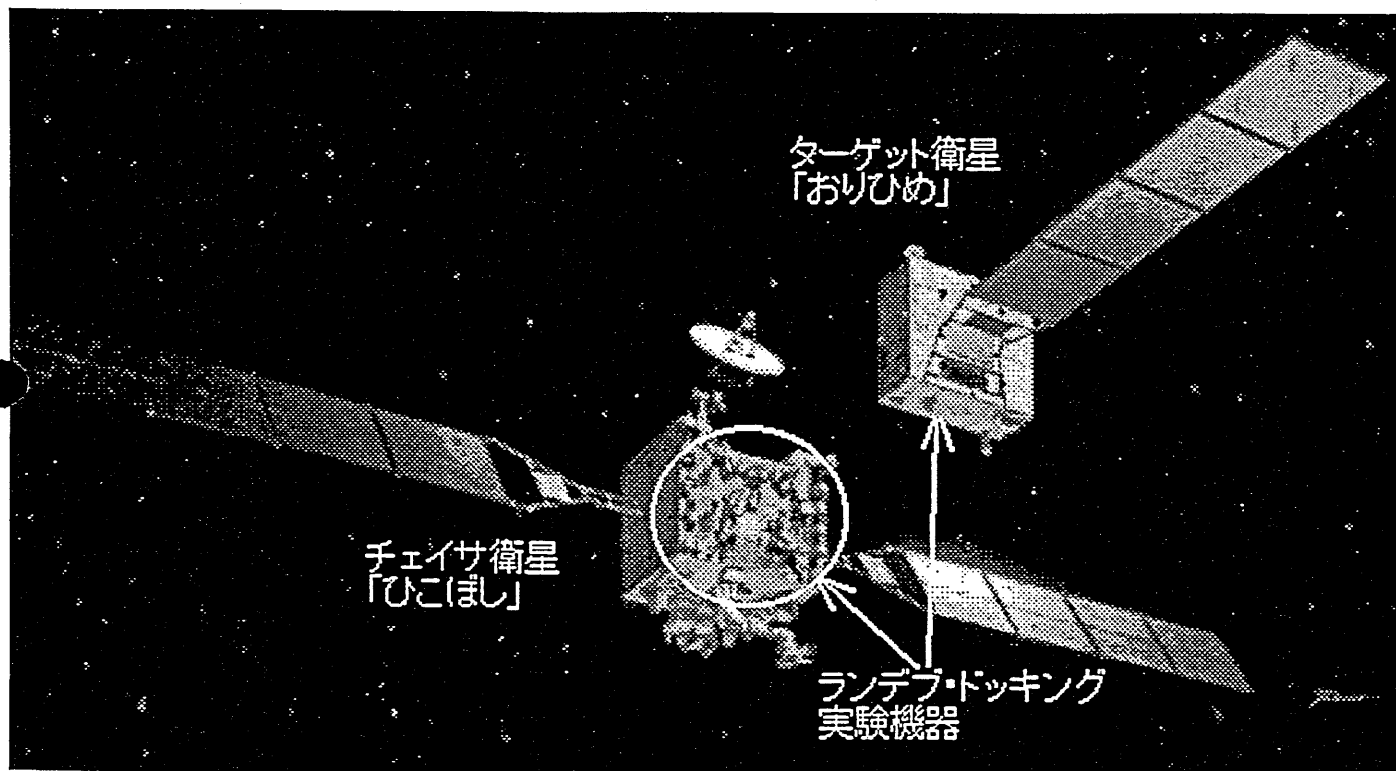


図1 ETS-VII (チェイサ衛星「ひこぼし」とターゲット衛星「おりひめ」)

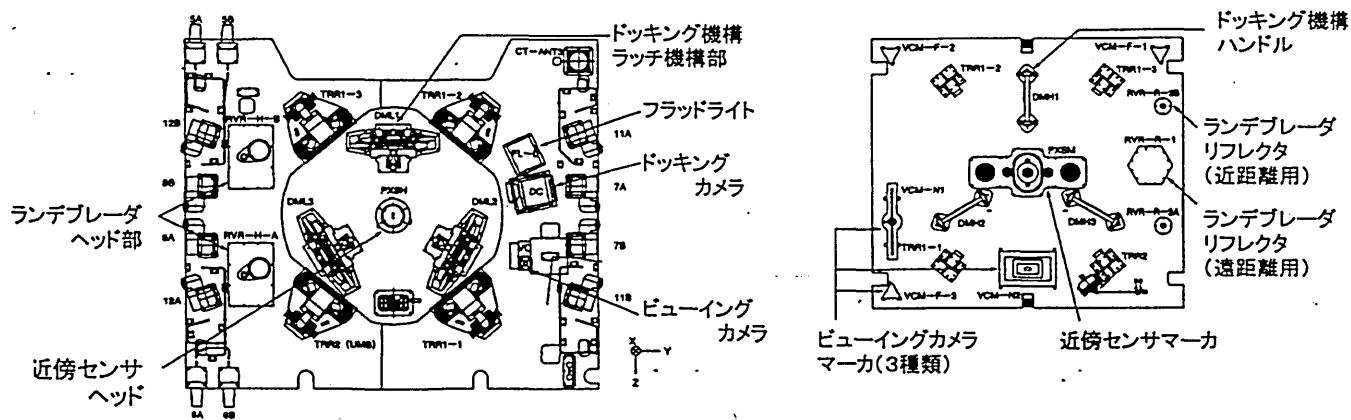


図2 ドッキング面の機器配置

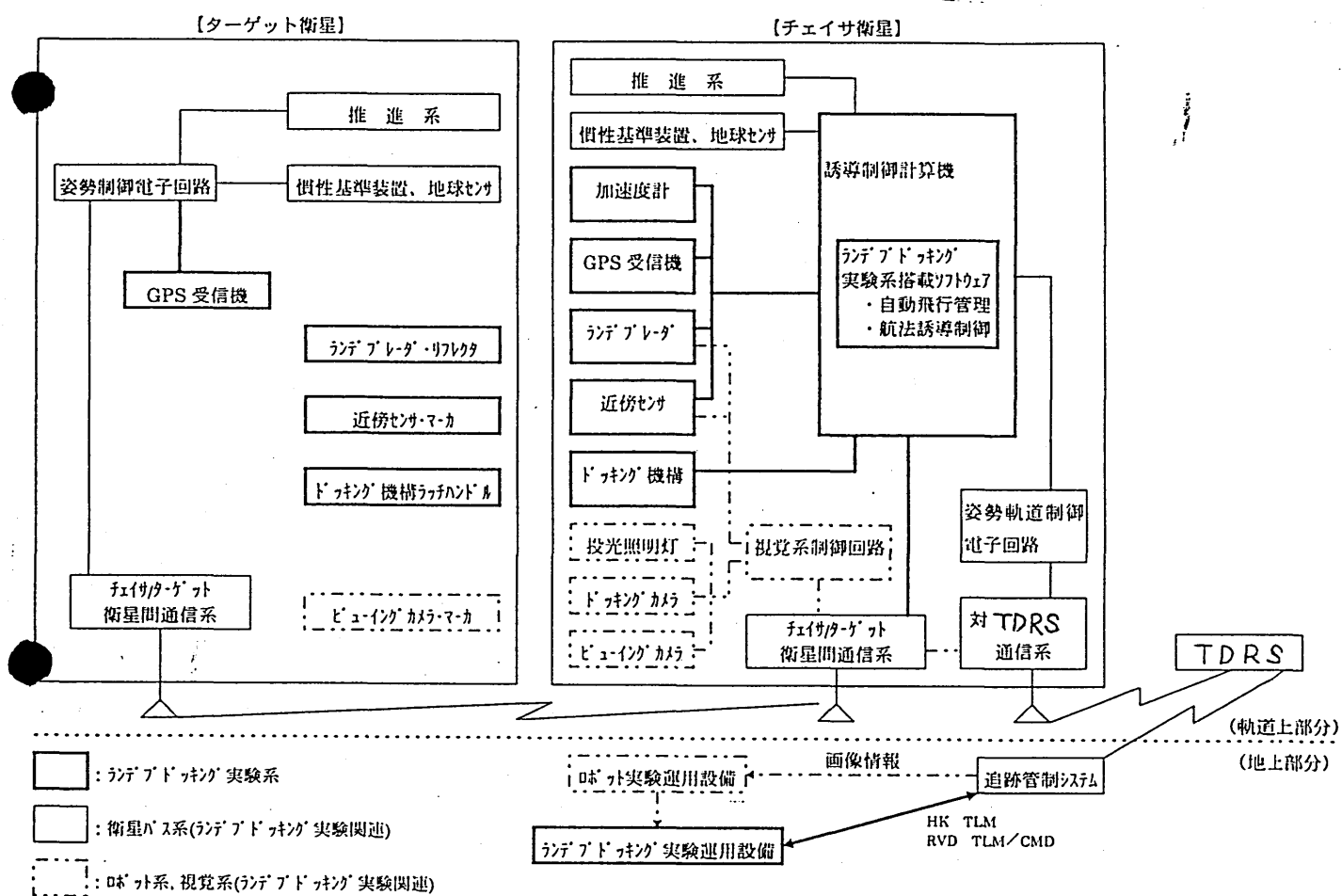


図3 ランデブ・ドッキング実験関連システム

3. RVD 実験計画

地上から打上げられる宇宙機が軌道上宇宙機に RVD (Ground-up RVD) を行うためのシーケンスは、(1)打上げフェーズ、(2)軌道変換フェーズ、(3)相対接近フェーズ、(4)最終接近フェーズ、(5)ドッキングフェーズ の5つのフェーズに分類される。各フェーズ毎に、ターゲットまでの接近距離、フェーズ終了時の投入精度、航法・誘導制御技術とシステム運用管制技術を整理したものを表1に示す。

ETS-VII RVD 実験は、これらの技術の軌道上実証を行うものであるが、熱帯降雨観測衛星 (TRMM) との相乗り打上げであること等により、RVD の全フェーズの実験を行うことは困難であるため、5つのフェーズの中で、投入精度要求が高く、技術的にも重要な相対接近フェーズからドッキングフェーズにおける RVD 技術の実証実験を目的としている。

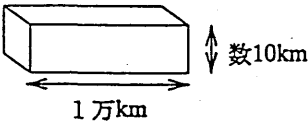
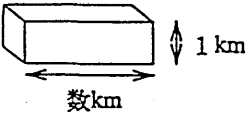
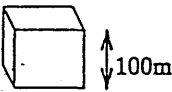
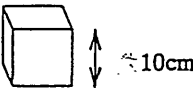
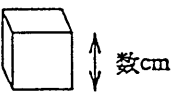
なお、軌道変換フェーズの主要な技術は、GPS 絶対航法と、それを利用した自動軌道変換であり、これらの技術も ETS-VII RVD 実験を通じて検証することができる。

当初の実験計画では、近傍域から遠方域へと段階的に技術実証するために、チェックアウトと FP1 から FP6 までの6回の RVD 実験飛行を行う予定であり、これらの7種類の RVD 実験飛行を通じて、以下に示す通り、自動及び遠隔操縦 RVD に必要となる①機器技術、②航法誘導制御技術、③運用管制技術の軌道上実証を行う計画であった。

① RVD 機器技術

自動 RVD を行うために必要な、相手宇宙機との位置や接近速度等を計測するための GPS 受信機 (GPSR)、ランデブ・レーダ (RVR)、近傍センサ (PXS) や、「おりひめ」を低速で分離し、低衝撃ドッキングを行うためのドッキング機構 (DM) 等、ETS-VII RVD 実験用に世界的に見ても初めて開発された先端的な RVD 機器が、打上げの時の激しい振動／衝撃環境に耐えて、宇宙空間で設計通りに作動することを確認する。

表1 ランデブ・ドッキングのフェーズと航法・誘導制御、運用管制技術

RVD 飛行フェーズ	ターゲットとの距離	投入精度	航法	誘導・制御	システム運用管制
打上げ	～数万km		慣性航法 (従来技術)	ロケットによる 面合せ誘導制御	打上管制 (従来技術)
軌道変換	～10km		GPS 絶対航法	ランデブ軌道変換 誘導(ターゲティング VIC/LRDV誘導)	地上追跡管制による 複数字宙機の協調運用
相対接近	～数100m		GPS 相対航法	相対接近誘導 (C-W誘導、 VIC誘導)	衛星間通信に基づく わが-ド 自動飛行管理
最終接近	～数m		RVR 航法	最終接近誘導 (基準軌道誘導 LOS指向制御)	衛星間通信に基づく わが-ド 自動飛行管理 (CAMを含む)
ドッキング	～0		PXS 航法	ドッキング制御 (ドッキング軸誘導 相対6自由度制御)	衛星間通信に基づく わが-ド 自動飛行管理 (CAM、強制分離を含む)

PXS : 近傍センサ

RVR : ランデブレーダ

VIC : ペロシティインクリメントカットオフ

② RVD 航法誘導制御技術

自動 RVD を行うためには、航法センサの計測データより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や姿勢を保って飛んでいく（制御）一連の機能が必要である。ETS-VIIはこれらの一連の航法・誘導・制御の能力を持った本格的な自動 RVD 宇宙機であり、自動 RVD が計画通りに実施できることを確認する。

③ RVD 運用管制技術

無人宇宙機が有人の ISS に自動的 RVD を行うためには、非常に高い安全性、信頼性が要求され、「ひこぼし」の RVD システムは「同時に2つの故障が続いて発生しても『おりひめ』との衝突に到らない」ように設計されている。「ひこぼし」の誘導制御計算機（GCC）上の計算機プログラムには安全処置の機能が組み込まれており、例えば 30m 以内の至近域で、航法センサが2重に故障した場合には、自動的にスラスタ噴射を行って安全領域に退避できる。（衝突回避マヌーバ：CAM）また、RVD 実験時には、地上にいるパイロットが「ひこぼし」を遠隔操縦して「おりひめ」に接近したり、2つの衛星を地上から同時に運用管制したり、これまでにない高度の運用管制が行われる。特に、遠隔操縦ランデブ実験では、アメリカのデータ中継衛星 TDRS を使用するために、通信距離にして 10 万 km 近く離れた衛星を、地上から実時間で高精度に操縦してやる必要がある。このような自動の RVD 安全管理がうまく機能するか確認するとともに、安全に RVD を行うために必要な高度の運用管制技術を経験し、修得する。

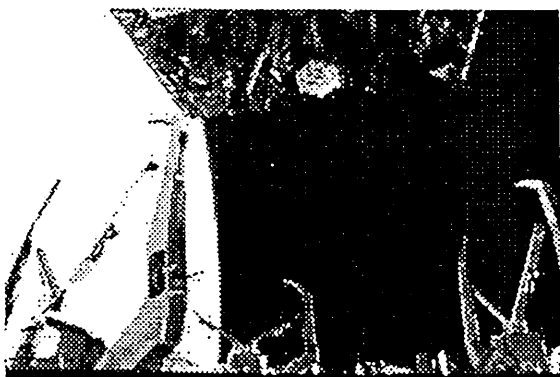
4. 実験運用結果

ETS-VII RVD 実験は、平成9年11月28日の打上げ以降、以下の日程で行われた。

・ RVD 実験系の初期機能・性能確認	平成 10 年 3 月～4 月
・ 分離性能確認試験	6 月 5 日
・ 第 1 回 RVD 実験 (FP1)	7 月 7 日
・ 第 2 回 RVD 実験 (FP2)	8 月

4.1 第1回 RVD 実験(FP1)

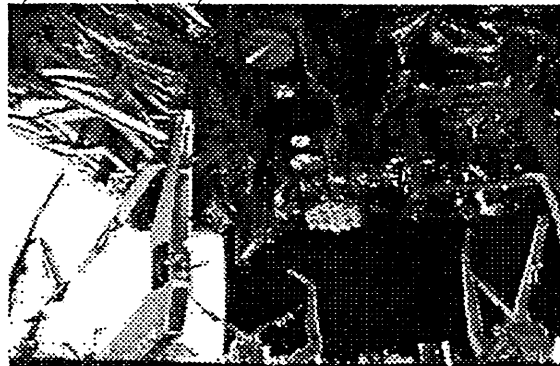
第1回 RVD 実験 (FP1) は7月7日に実施し、成功裏に終了した。分離からドッキングまでは、TDRS で通信リンクが取れる1可視の間（42 分以内）で実施した。朝7時過ぎ、筑波宇宙センターよりのコマンド指令を受けて、「ひこぼし」がドッキング機構により「おりひめ」を 1.8cm/s で分離した。「ひこぼし」は近傍センサで相対位置と姿勢を計測し、相対6自由度制御を行い、VP 点（2m）に停止した。VP 点で約15分間、一定の距離を保って飛行した後、コマンド指令により「ひこぼし」は再び接近を開始した。相対6自由度制御を行いながら「おりひめ」に1 cm/s で接近して、ドッキング機構で「おりひめ」を捕獲・結合し、自動ドッキング実験に成功した。写真1に VP 点よりドッキングまでの接近の様子を衛星搭載のドッキングカメラがとらえた画像を示す。ドッキング機構の真ん中に制御されていることがわかる。FP1 の成功により、自動 RVD 技術の内で最も難易度の高い自動ドッキング技術を実証することができた。



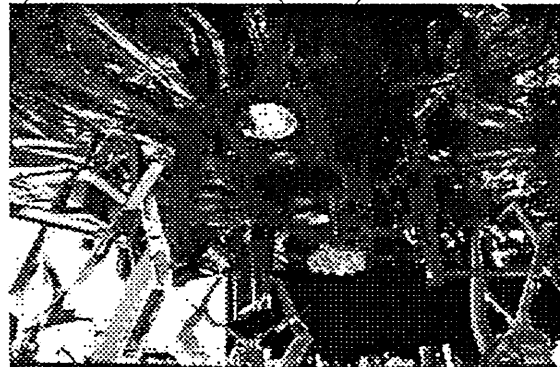
1) ドッキング最終許可コマンド送信(1.5m)



2) 接近中(1.2m)



3) アウタマーカ通過 (0.75m)



4) 非接触状態での捕獲 (0.58m)



5) コンタクトの瞬間



6) 結合位置への引き込み



7) プリロード



8) ドッキング完了

上方:「おりひめ」衛星
 下方:「ひこぼし」衛星
 左方の明るい物体:地球

写真1 VP点からのドッキングの様子(ドッキングカメラ画像)

4.2 第2回 RVD 実験(FP2)

第2回 RVD 実験は8月7日に開始した。当初計画では520mまで離脱し、その点からVバー接近を行って、ドッキングを行う予定であり、RVRによる相対位置計測と、基準軌道誘導の確認が主目的であった。しかし、接近中にスラスタが正常に噴射できなくなる現象が数回発生し、姿勢精度を維持できなくなったので、その都度安全確保のために接近を中断した。このスラスタ噴射異常の原因は不明であったが、「おりひめ」の姿勢制御用推進薬の枯渇が懸念されたため、誘導制御計算機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等の対策を施して再接近を試み、8月27日にドッキングに成功した。

5. 実験結果の評価

5.1 全体評価

FP2では当初計画(3パス)をはるかに上回る150パスに渡ってRVD実験モードにて飛行し、相対距離も当初計画の20倍以上の12kmまで離れ、そこから復帰の飛行を行ってドッキングを行うことができた。このため、GPS相対航法やC-W誘導、搭載系に異常事象が発生した際のデベロップメントによる安全確保機能と、退避点からの復帰運用等を確認できた。RVD実験の各飛行毎の技術検証項目を、当初計画とFP2までの実績を比較して表2に示す。当初は6回の実験飛行で検証する計画であったが、FP2までの飛行でミッションサクセスレベルの実証を終え、フルサクセスレベルの半分の技術項目まで実証できたことがわかる。これに加え、予定外の飛行によって、当初計画以上の範囲の実証ができた技術項目も数多い。^{注)}特に、想定外の現象に対し、オンボード機能と地上運用の活用により実践上対処し、今後の宇宙ステーション時代に向けて、高度の実運用技術を修得できたという点で意義が大きい。

ETS-VIIのRVD実験は世界に先駆けたRVDシステムの実証実験であり、数多くの先端的な技術を開発し、以下のような世界初/世界一の軌道上実証データを取得することができた。

- ①国際宇宙ステーションを念頭に置いた本格的な自動・自律RVDシステム
 - ②自律宇宙機の自動RVD飛行管理・安全管理技術
 - ③秒速1cmで接近する世界一制御精度の高いドッキング技術
 - ④非接触低衝撃ドッキングを実現する(ロボットに近い)ドッキング機構
 - ⑤画像センサによる計測と、これを使った相対6自由度の自動RVD制御
 - ⑥レーザレーダを使った自動ランデブ制御
 - ⑦GPS相対航法を使った自動ランデブ制御、GPSによる自動軌道制御も世界初。
- GPS相対航法精度も世界一 等々

注) 表2中で、当初計画以上の実証が行われた内容は以下の通り。

- #1: ROMに焼いたアルマナック(95年の軌道要素)での捕捉/計測
- #2: 1.5kmでターゲット衛星を撮像
- #3: 150m~10km超まで主航法センサとして実証(誤差は要求の1/5程度)
- #4: 150mへのTI投入。高精度の軌道保持。
- #5: 想定外のコンティンジェンシーに対し、オンボード機能の活用と、地上運用により対処。
- #6: コンティンジェンシー対処のためのアンテナ切替(ストアード)運用。2衛星軌道保持運用。
- #7: 時間遅れや等時性変動の大きいTDRSでの運用。外国機関と協力しての運用。

表2 RVD実験飛行と技術検証項目（当初計画とFP2までの実績）

サクセスレベル		ミッションサクセス			フルサクセス		
実験飛行（FP）		FP1	FP2	FP3	FP4	FP5	FP6
技術検証項目		分離／ドッキング実験飛行	初期離脱 最終接近 実験飛行	総合RVD 実験飛行	初ミナル 実験飛行	遠隔操縦 /初ミナルII 実験飛行	RA-接近 実験飛行
機 器	ドッキング機構	①					
	近傍センサ	①					
	ラダブレダ		②				
	GPS受信機			◎*1			
	加速度計			②			
	視覚系機器		◎*2				
航 法	PXS航法	①					
	RVR航法		②				
	GPS相対航法 (PNJ-D)			◎*3			
	GPS絶対航法	①					
誘 導 制 御	分離	①					
	基準軌道誘導		※				
	C-W誘導			◎*4			
	VIC誘導			◎*4			
	相対6DOF制御	①					
	ドッキング制御	①					
	LOS指向制御		②				
	CAM制御					未	
	夜間ドッキング					②	
	遠隔操縦制御					未	
運 用 管 制	状態監視運用		②	②			
	異常管理運用				②	②	
	実践的運用				◎*5	◎*5	
	遠隔操縦運用					未	
	2衛星同時運用		◎*6	◎*6	◎*6	◎*6	
	データ中継衛星 経由運用			◎*7	◎*7	◎*7	
F P 6	RA-投入						未
	RA-接近						未
	GPS相対航法 (搬送波位相)						未

①：FP-1により実証できた項目。

②：FP-2により実証できた項目。

◎：FP-2により計画以上の範囲を実証できた項目。

未：実証が終わっていない項目。

※：離脱については実証できた。接近はスラスタ噴射異常による中断もあったが、最終的には実証できた。

5.2 RVD 機器技術

(1) 近傍センサ (PXS)

PXS の結合状態における計測値は、地上試験時の計測値と比較して、位置 0.1mm、姿勢 0.05deg の程度で一致しており、FP1 における分離からドッキングまでの主系/冗長系の計測値も良好に一致しており、要求精度 (位置 10mm、姿勢 1deg) を十分満足していると判断される。

(2) ランデブ・レーダ (RVR)

RVR の FP1 における分離からドッキングまでの計測値を PXS と比較して図 4 に示す。両者には 10cm 程度の差が見えるが、取付け位置による差を補正すると、4~7cm の精度で良好に一致しており、RVR のバイアス精度 (10cm) を満足していると判断される。

(3) 視覚系カメラ

「ひこぼし」搭載のビューイングカメラにより当初計画 (500m) を上回る 1.5km にて「おりひめ」を撮像できることを確認した。ビューイングカメラがとらえた「おりひめ」の画像を写真 2 に示す。(10m 付近を離脱中)

5.3 RVD 航法誘導制御技術

(1) GPS 相対航法

GPS 相対航法と RVR で計測した距離を比較して図 5 に示す。両者は 1m 程度の精度で良好に一致している。また、結合状態や保持点での航法値等より、GPS 相対航法の精度は 5m 程度と推定され、要求仕様 (26m) の 5 倍の高精度で相対航法が可能と判断している。また、GPS 相対航法は、12km の距離域まで安定して動作することが確認できた。

(2) 分離

分離時は姿勢/軌道制御系への干渉を避けるために両衛星のスラスタ制御を中断する。制御再開時に PXS の捕捉・計測を維持するために、ドッキング機構の分離性能が重要である。X 軸方向の分離速度は、1.75cm/s (要求仕様: 1.80 ± 0.40 cm/s)、横方向速度や姿勢レートも許容誤差の 4~80% の値であった。このため「おりひめ」搭載の PXS マーカの PXS 視野中心からの変動はわずかであった。

(3) 相対 6 自由度制御

分離、接近時の相対 6 自由度制御は正常に行われた。分離からドッキングまでの相対位置/姿勢 (PXS 計測値) を要求仕様と比較して図 6 に示す。トランジェントを除く相対位置/姿勢誤差は許容値の 1/3~1/5 程度に収まっており、要求仕様を十分満足していることが確認できた。

(4) ドッキング制御

ドッキング時には、VP 点出発 144 秒後に「ひこぼし」は「おりひめ」のラッチハンドル (把持部) をドッキング機構の捕獲領域に捉えた。捕獲時の位置は、写真 1 からわかる通り捕獲中心から 1 cm 以内で、ほぼ中心で捕獲しており、姿勢も保持時と同様の精度であったことが確認できた。

(5) C-W 誘導、VIC 制御

GPS 相対航法が要求仕様よりも 5 倍も高精度であったために、要求精度 (80m) 以上の 20m 程度の精度で投入可能であることが確認できた。図 7 に 500m 点に投入した際の GPS 相対航法の位置推定値を示す。また、計画 (520m) よりも近い 150m を TF 点とし、ここまで相対接近を行い、以降を RVR を使用した最終接近とする運用も修得できた。

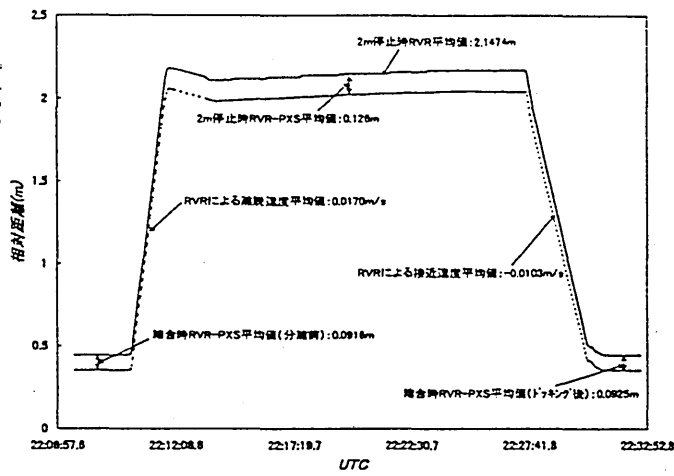


図4 RVR計測値とPXS計測値の比較

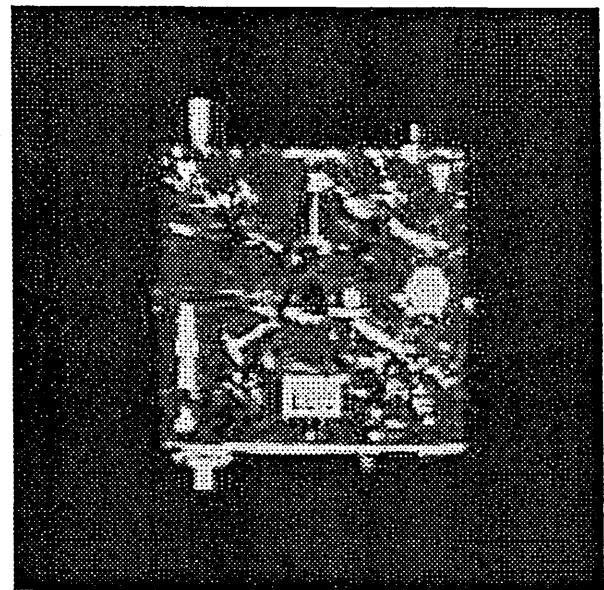


写真2 遠さかる「おりひめ」
(ビューイングカメラ画像)

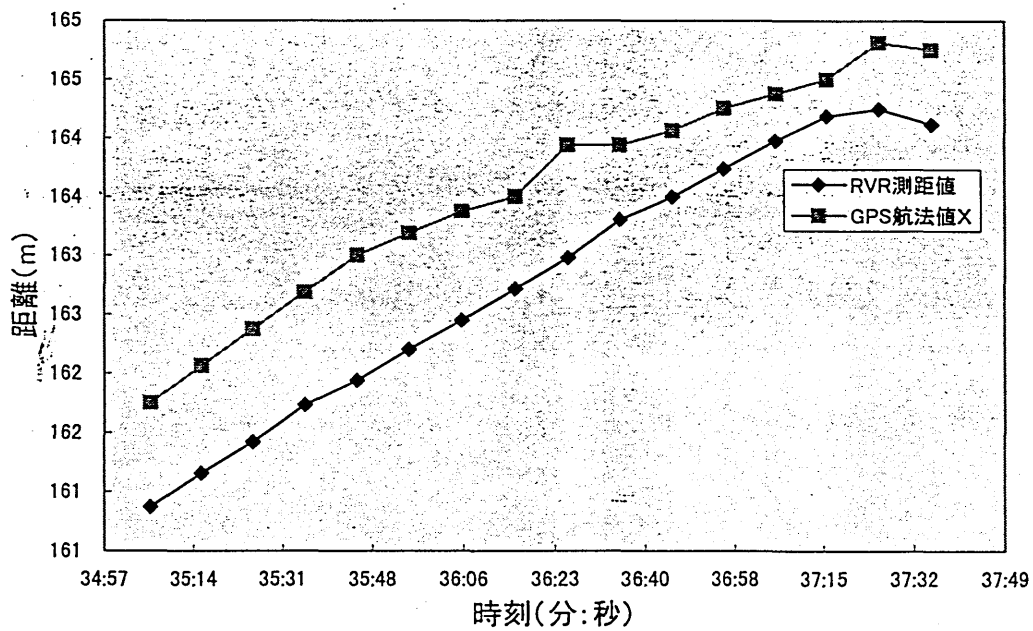


図5 GPS 相対航法とRVR計測値の比較

図6-1 相対6自由度制御結果(相対位置:PXSデータ)

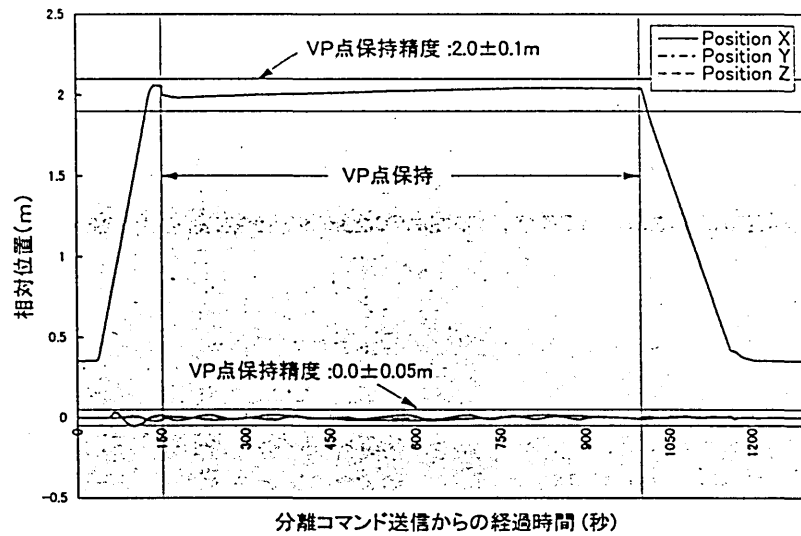


図6-2 相対6自由度制御精度(相対姿勢:PXSデータ)

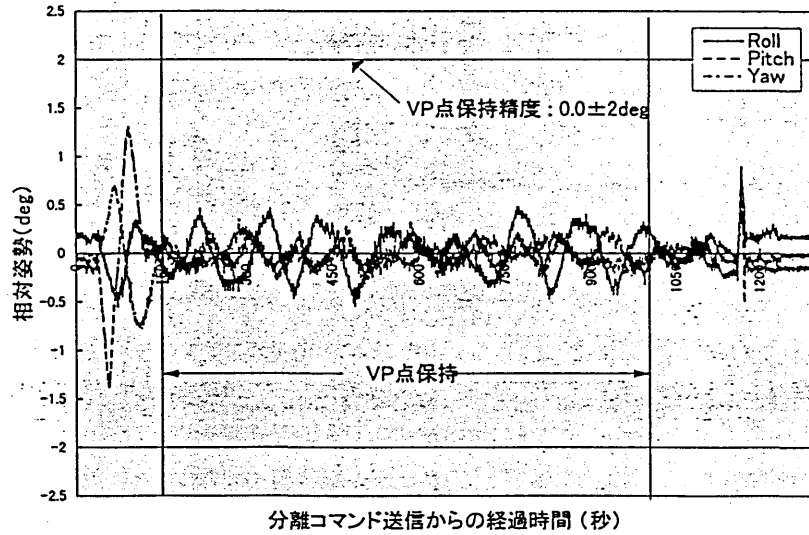


図6 相対6自由度制御 (FP1)

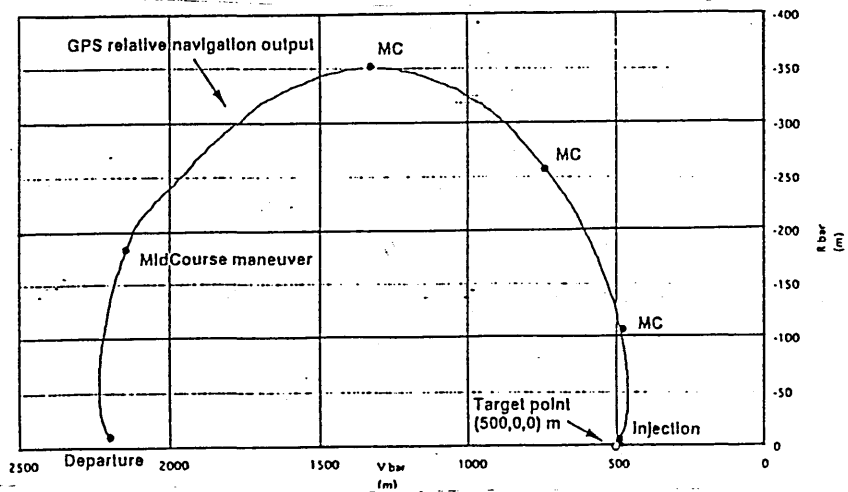


図7 C-W誘導によるTF点への投入

5.4 RVD 運用管制技術

(1) 異常管理／コンティンジェンシー対応運用

RVR の自動故障検知／分離機能やデューブル・アップ機能等、搭載計算機の自動飛行管理機能が確認できた。また、想定外のコンティンジェンシーに対し、オンボード機能の活用と地上運用によって対処し、復帰からドッキングまでの運用を実施、修得できた。

(2) 2 衛星同時運用

分離／ドッキング時のチェイサ／ターゲット衛星の協調運用や、チェイサ／ターゲット間通信リンクを確保するためのアンテナ切替運用（含むストアード運用）。また、2 衛星の軌道を安全に保つ軌道保持運用等を実施、修得できた。

(3) データ中継衛星経由運用

チェイサ衛星と TDRS の軌道要素を管理し、ハイゲイン・アンテナを捕捉／追尾させて衛星間通信リンクを確保する運用や、NASA と国際協力での運用、時間遅れや等時性変動の大きい TDRS での運用等を実施、修得できた。

6. 今後の実験と将来への展開

ETS-VII RVD 実験では、8 月までに 2 回の実験飛行を実施し、表 2 に示したように、ミッションサクセスを達成し、フルサクセスの半分程度の技術検証を終えている。今後は、FP2 で発生したフラスタ噴射異常の究明のための軌道上確認試験を実施するとともに、計算機プログラムを改修し、噴射異常に対する措置を施した上で、残りの技術検証項目である遠隔操縦 RVD、Rバー接近、搬送波位相 GPS 相対航法等の実証実験を、夏頃までを目途に実施する計画である。また、11 月までの追加的な利用実験期間を利用して、ロボットとの協調実験であるターゲット衛星捕獲実験等を目標に検討を進める。

ETS-VII の RVD システムは、無人宇宙機による自動及び遠隔操縦 RVD を行うものであり、世界に先駆けて自動・自律 RVD システムと、非接触による低衝撃ドッキング方式等を開発し、軌道上実証実験に成功した。ETS-VII で開発・実証した RVD 技術は、国際宇宙ステーションへの補給機 HTV に踏襲される。今後は、ETS-VII の RVD 技術をベースに静止衛星や月・惑星探査機の RVD 技術や、故障衛星等の非協力的ターゲットへの RVD 技術の修得に向けて、技術開発を続けていく計画である。図 8 に ETS-VII RVD 技術の展開構想を示す。

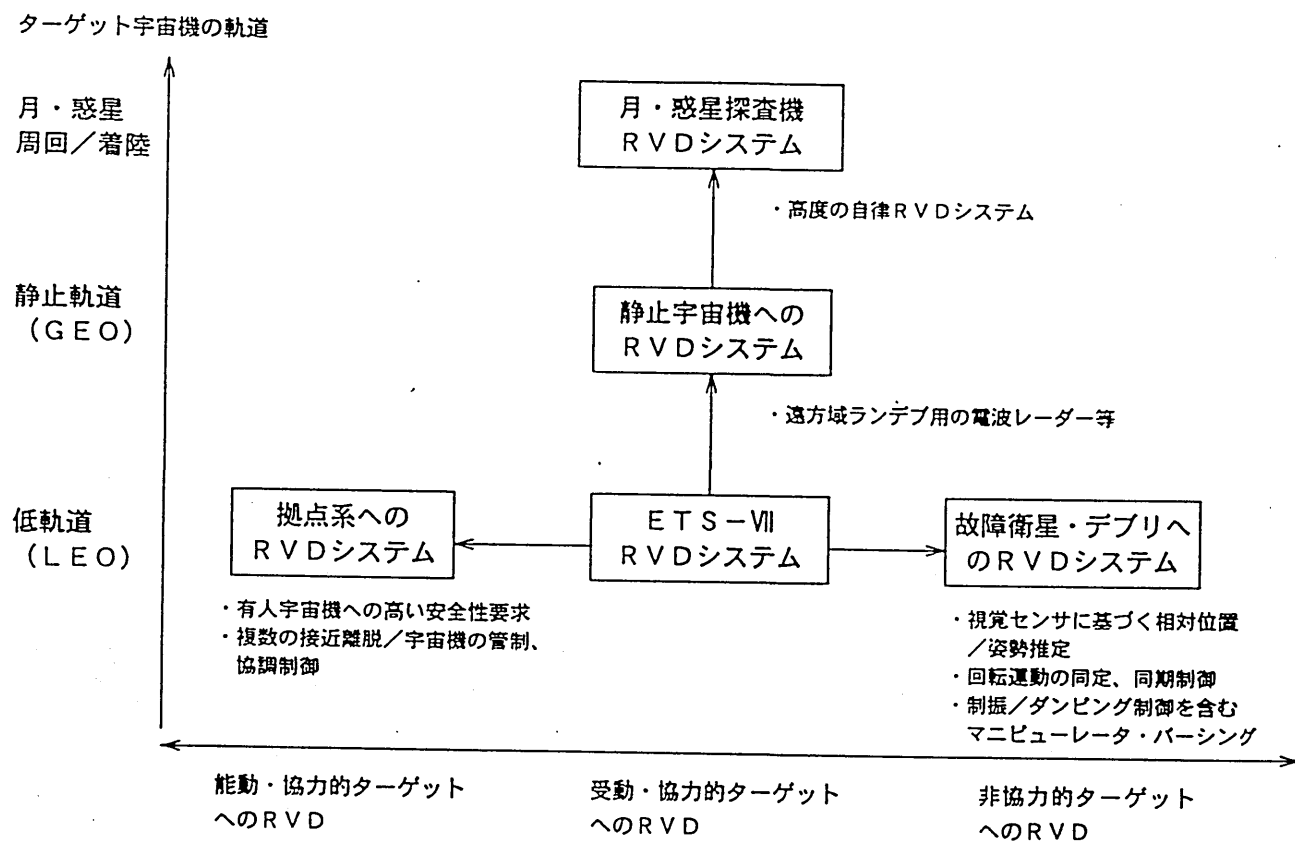


図8 ETS-VII RVDシステム技術の展開シナリオ

7. 学会等の発表実績

ETS-VIIの RVD 実験 (FP1、FP2) の様子は、ロボット実験の様子とともに、インターネットによって生中継し、宇宙空間での実験としては珍しい公開実験として実施している。

また、実験を通じて得られた貴重な技術データについては評価、解析を進め、以下の学会で論文発表を行った。

- (1) 電子情報通信学会 宇宙航行エレクトロニクス研究会 (98 年 9 月 : 金沢)
 - ・ ETS-VII 自動ランデブ・ドッキング軌道上実験結果 (第一報)
- (2) 第 49 回国際宇宙航行連盟会議 (98 年 9 月 : メルボルン)
 - ・ First Result of Autonomous Rendezvous Docking Technology Experiments on NASDA's ETS-VII Satellite
- (3) 第 42 回宇宙科学技術連合講演会 (98 年 10 月 : 調布)
 - ・ 技術試験衛星VII型によるランデブ・ドッキング実験結果 (FP1)
 - ・ 技術試験衛星VII型によるランデブ・ドッキング実験 (FP1) データ評価結果
 - ・ 技術試験衛星VII型 (ETS-VII) ドッキング機構の軌道上性能評価
 - ・ 技術試験衛星VII型 (ETS-VII) 近傍センサの軌道上性能評価
 - ・ 技術試験衛星VII型 (ETS-VII) 搭載ランデブレーダの軌道上評価
 - ・ 技術試験衛星VII型 GPS 相対航法システムの飛行データ評価(I)
- (4) 日本機械学会 第 7 回スペース・エンジニアリング・コンファレンス (98 年 11 月 : つくば)
 - ・ ETS-VIIのドッキング機構
- (5) 計測自動制御学会 第 15 回誘導制御シンポジウム (98 年 12 月 : 東京)
 - ・ ETS-VIIランデブ・ドッキング実験の結果
 - ・ 技術試験衛星VII型 GPS 相対航法システムの飛行データ評価(II)
- (6) 第 22 回 A A S (米国宇宙航行学会) 誘導制御会議 (99 年 2 月 : コロラド州)
 - ・ Experimental Results of Autonomous Rendezvous Docking on Japanese ETS-VII Satellite
- (7) 電子情報通信学会 宇宙航行エレクトロニクス研究会 (99 年 2 月 : 東京)
 - ・ ETS-VII 自動ランデブ実験における GPS 相対航法結果
- (8) i-S A I R A S (国際人工知能・ロボット・自動化技術シンポジウム : 99 年 6 月 : ノルドバイク) にて発表予定
 - ・ Result of Autonomous Rendezvous Docking Experiment on Engineering Test Satellite VII