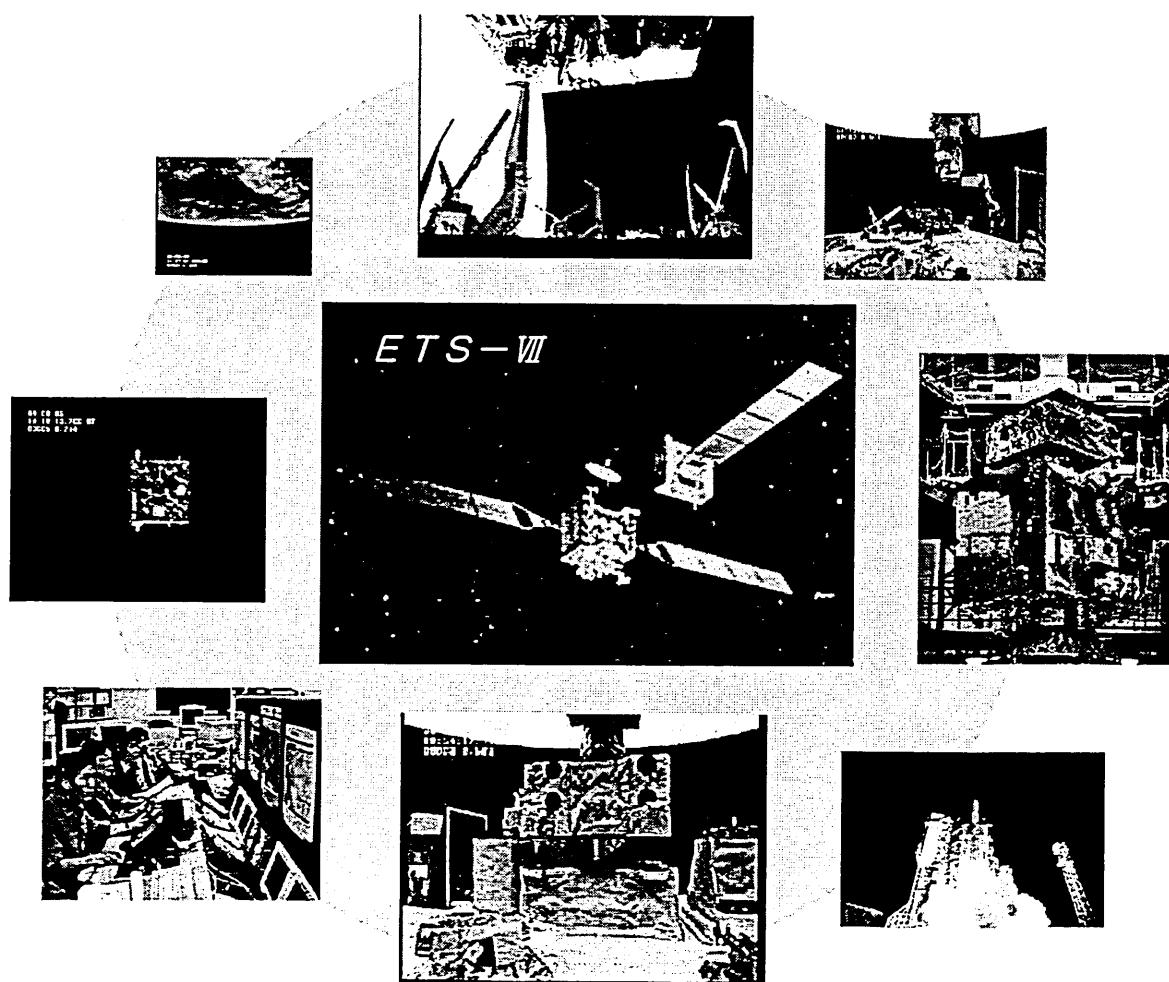


技術試験衛星Ⅶ型(ETS-Ⅶ)「おりひめ・ひこぼし」の 定常段階実験運用の成果について

平成11年6月16日
宇宙開発事業団

目次

1. E T S - VII計画の目的と経緯	1 頁
2. 定常段階実験運用の概要と成果	2 頁
3. 今後の予定	6 頁
4. まとめ	8 頁
添付-1 ランデブ・ドッキング (R V D) 実験系の成果	9 頁
添付-2 ロボット (R B T) 実験系の成果	2 5 頁
添付-3 衛星及び運用システムの成果	3 7 頁
添付-4 技術データ取得装置／原子状酸素モニタの成果	3 9 頁



1. ETS-VII計画の目的と経緯

- (1) 21世紀の宇宙開発では、宇宙ステーションへの物資の輸送や人工衛星の軌道上での組立て、点検・修理、回収といった、高度な宇宙作業が必要とされる。技術試験衛星Ⅶ型(ETS-VII)「おりひめ／ひこぼし」は、日本が得意とする自動・自律化、ロボット及び通信応用等の技術を活かして無人システムにより、将来の宇宙作業を安全かつ効率的に行うために必要となる技術を、世界に先駆けて開発・実証することを目的とした技術試験衛星である。

ETS-VIIの実験ミッション:

- ① 自動ランデブ・ドッキング(RVD)技術
 - ② 地上遠隔制御型の宇宙ロボット(RBT)技術
 - ③ 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による先行的な宇宙ロボット要素技術
 - ④ RVD実験時の2衛星同時運用やRBT遠隔操作等の高度な運用に対応するため、我が国として初めて採用したデータ中継衛星による運用方式とCCSDS(宇宙データシステム諮問委員会)準拠のパケットデータ通信システム技術
 - ⑤ 原子状酸素モニタ(AOM)技術データ取得装置の搭載
- (2) ETS-VIIは、平成9年11月28日6時27分(日本標準時)に、H-IIロケット6号機により熱帯降雨観測衛星(TRMM)と相乗りで打ち上げられた。
- 打上げ後、ETS-VIIには姿勢系や通信系の異常、データ中継衛星システムをCOMETS(通信放送技術衛星「かけはし」)から米国 TDRS(追跡データ中継衛星)に変更することによる運用上のトラブル等が発生したが、これに対してソフトウェア書き換え及び運用手順の改良等の対策を行い、平成10年5月28日当初のトラブルを克服して、定常段階実験運用へ移行した。

2. 定常段階実験運用の概要と成果

(1) ランデブ・ドッキング(RVD)実験

RVD実験については、定常段階に2回の実験飛行を実施した。

ア 第1回実験飛行(平成10年7月7日)

秒速約8kmで飛行する「おりひめ」と「ひこぼし」を自動制御により、2メートルの距離で分離飛行させ、再び結合させるという、技術的に最も難しい自動制御による高精度の近傍域ランデブ飛行と低衝撃・捕獲型のドッキング技術の実証に成功した。

イ 第2回実験飛行(平成10年8月7日～平成10年8月27日)

高精度のレーザ・レーダによる初期離脱、ランデブ飛行に成功した後、再接近時に推進系のスラストの一部が噴射しなくなる異常が発生し、ドッキングまで約3週間を要した。

- ・ この間の飛行で第3回と第4回の実験の目的であったGPS相対航法機能や異常対応機能等が実証され、結果的に当初計画のRVD実験課題の大半が達成された。GPS相対航法によるランデブ飛行の実証は世界初であり、他のセンサも世界最高レベルの高精度を達成した。
- ・ 当初計画を超える範囲(分離距離で計画値9kmに対して実行12km、飛行時間にして当初計画の総計値約60時間に対して実行約240時間)でRVDシステムの機能が実証され、異常時の緊急対策運用の経験を含め、多くのデータを得た。
- ・ 異常原因については、最終的な究明に至っておらず地上試験を含めて継続作業中であるが、これまでの検討からソフトウェアを含むRVD制御システムに問題は無いと考えられる。

この結果、世界最先端の自動ランデブ・ドッキング技術を確立することができた。
低衝撃の捕獲型ドッキングや自動・自律化はRVD技術の応用範囲を拡げるもので、宇宙ステーションへの無人補給システムや故障した人工衛星の捕獲、月惑星ミッション等、より高度な機能が要求されるシステムの開発等に反映される。

一方、未達成の課題は搬送波位相GPS相対航法、Rバー接近、及び遠隔操縦等の応用機能の確認であり、定常段階終了後も実験期間を追加して、実施する予定である。

RVD実験の詳細な成果を添付ー1(9頁)に示す。

(2) ロボット実験

遠隔制御型の宇宙ロボットの特徴は、研究者や技術者が地上に居ながら宇宙作業を行える点にある。一方で、データ通信時間による遅れや通信回線容量の制約を克服して、いかに自然な作業環境を操作者に与えられるかが課題となる。

このような遠隔制御型ロボット技術の確立と宇宙作業への応用実証を目的に、ETS-VIIのロボット実験では地上から無人衛星上のロボットアームを操作するための遠隔手動／遠隔自動操作に関する種々の技術実験、衛星上でロボットアームを作動させる場合の衛星姿勢との協調制御実験、軌道上サービス基礎実験、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)による先行的な宇宙ロボット要素技術実験、及び欧州宇宙機関(ESA)、ドイツ航空宇宙センタ(DLR)との共同実験等を実施した。

計画した実験は全て成功裡に終了し、地上遠隔制御型の宇宙ロボット技術が将来の軌道上作業に適用可能なことを世界に先駆けて実証することができた。また、ロボットアームは打上げから1.5年、軌道上で累積100日以上動作した後も性能に劣化は見られず、多くの実験成果を挙げることもできた。

更に、若田宇宙飛行士の協力を得て実施した地上からの遠隔操作実験では、ETS-VIIロボットアームが地上遠隔制御型にもかかわらず、米国スペースシャトルのロボットアーム以上の良好な操作、作業性を有するとの感想を得た。

これらの成果は、今後宇宙ステーション等における宇宙飛行士の作業負荷の軽減に役立つものと期待される。また、宇宙飛行士による作業が困難な静止軌道や極軌道上の衛星に対するサービス、故障した人工衛星やデブリの回収など危険を伴う作業、月・惑星上での作業等、多様な宇宙活動の実現に向けた技術開発に反映される。

ロボット実験の詳細な成果を添付-2(25頁)に示す。

(3) 衛星システム

我が国初のデータ中継衛星利用によるシステム運用、及びCCSDS準拠のパケットデータ通信システムを採用した衛星運用システムは、実験運用や異常時対応の運用においても有効に機能し、実用性が実証された。

特に異常時対応を含め、米国でもほとんど経験の無いデータ中継衛星を用いた無人宇宙作業システムの運用経験は日本が将来、宇宙ステーション等の高度なミッションに独自に対応するための貴重な技術の蓄積機会となった。

衛星及び運用システムの成果を添付－3(37頁)に示す。

(4) 原子状酸素モニタ(AOM)

AOMは原子状酸素観測のための技術データ取得を目的に搭載されたもので、これまでのところセンサ自体は安定に動作しているが計測ノイズレベルが高く、原子状酸素データが分離できない状態が続いている。これは衛星からのアウトガスが予想より大きいことによるものと推定されるが、これまでのところ改善の傾向は見られず、当面モニタを継続する予定である。

AOMの成果を添付－4(39頁)に示す。

以上より、ETS-VIIはRVD応用実験に一部未達成の課題はあるものの、基本的な自動RVD技術を確立し、ロボット技術については全ての実験に成功して、打上げ1. 5年後の平成11年5月31日に定常段階の実験運用を終了した。

ETS-VIIの定常段階実験運用の達成度を表－1に示す。

表－１ ETS-VIIミッションの達成度

要求レベル	サクセスレベル	サクセスレベルの定義	衛星システムとしての課題	ロボット(RBT)実験として達成すべき課題	ランデブ・ドッキング(RVD)実験として達成すべき課題
ETS-VII ミッションの 主目的である RVD、 ロボット、 システム 基本技術 の実証	ミニマム サクセス	ETS-VII以降の計画への影響を最小限に抑えるため、 <u>最低限実証する必要のある課題の達成</u>	データ中継衛星経由の通信(RVD/RBT実験、ADEOS-II等に必須) <u>達成(◎)</u>	ロボットアームと衛星姿勢の協調制御実験(ETS-VII以降の既存計画では実施できない) <u>達成(◎)</u>	HTVに不可欠なチェイサ衛星の自律的なランデブ飛行機能の実現 <u>達成(◎)</u>
	ミッション サクセス	<u>ランデブドッキング／宇宙ロボット技術の基礎を実証・確立するための課題の達成</u>	(ミッションサクセスレベルの実験が行えること。→ 達成)	ロボットアームの遠隔制御技術実験(実験装置の把持・操作等を含む) <u>達成(◎)</u> (更に、若田宇宙飛行士による遠隔操作実験を行いSTSマニピュレータとの操作性を比較評価)	FP1～FP3の実施(RVD機器/自動RVDシステム技術の実証) <u>FP2実験中に達成(◎)</u>
RVD、 ロボットの 応用技術 の実証	フル サクセス	RVD、RBT基本機能を用いた <u>応用実験の達成</u>	(フルサクセスレベルの実験が行えること → 達成)	軌道上サービス基礎実験(目視検査、機器交換、推薬補給実験等) <u>達成(◎)</u>	FP4～FP6の実施(オフミナル対応、遠隔操縦、Rバー接近等) <u>オフミナル対応は達成(○)</u> 遠隔操縦、搬送波位相 GPS、Rバー接近は未実施(△)
発展的な実験を可能な範囲で実施	エクストラ サクセス	公募等による追加実験実施	(適用せず)	<u>公募共同利用実験(△)</u> <u>点検捕獲技術実験(△)</u>	<u>点検捕獲技術実験(△)</u>

◎ 達成済み ○ ほぼ達成 △ 定常段階終了後実施予定

3. 今後の予定

ETS-VIIは、一部実験課題を残したまま平成11年6月より当初設計要求を越える運用期間に入る。また、ETS-VIIの地上実験運用設備の一部が計算機 2000 年問題に対応したシステムとなっていないこと等もあり、ETS-VIIの実験運用については実質的に平成12年以降は困難な状況である。しかしながら、衛星自体は機能しており、残推薬、発生電力の点でも当面は実験運用が可能なることから、平成11年11月末頃まで実験期間を追加し、次の実験を行う予定である。

(1) ランデブ実験

現在、スラスタ噴射異常の原因究明とともにソフトウェアの変更等による対処策の準備を進めているが、異常の原因がハードウェアにある可能性が高く、その場合、ソフトウェアの変更や手順の工夫では対策に限界がある。また、現在正常に機能しているスラスタでも、今後同じ異常が発生する可能性がある。このため、スラスタ噴射異常に対する完全な対策を取ることは困難であり、再度ランデブ実験を行った場合、再びドッキング不能となる可能性がある。

しかしながら、実験可能期間が限られていること、他の実験については当初の予定をほぼ達成したことから、再実験においてドッキング不能となり、ターゲット衛星の制御も不能となる可能性はあるが、本ミッションによりできるだけ多くの成果を得るため、残されたランデブ実験(Rバー(下方からの)接近、遠隔操縦、衝突防止機能)の実証を行うこととする。なお実験は、リスクを出来る限り小さくするため、最終的にドッキングに至らない場合でもこれらの課題を達成できるよう、1回のランデブ飛行で残された実験課題を全て行う計画とする。その後、異常原因究明やドッキングに関する追加データ取得を目的に可能な範囲でドッキング実験を試みる。

ランデブ実験の実施は、現在進めている原因究明作業の反映及び運用準備作業のため、平成11年10～11月頃となる予定である。なお、本実験に先立ちターゲット衛星を結合した状態でソフトウェアの事前確認、及び搬送波位相 GPS 相対航法実験を平成11年7月頃に実施する予定である。

(2) ロボット利用実験

宇宙ロボット研究者の要望に応じた公募による共同実験、関係各機関の追加実験等を可能な範囲で実施する予定である。

(3) ターゲット衛星点検・捕獲技術実験

将来の人工衛星の軌道上点検、回収等に必要な技術データの取得を目的に、ロボットアームによるターゲット衛星の捕獲技術実験を行う予定である。

今後の実験予定を表-2に示す。

4. まとめ

ETS-VII「おりひめ・ひこぼし」は、我が国が得意とする自動・自律化、ロボット及び通信応用技術やこれまでの宇宙技術の研究開発成果を有効に活用することで開発された、世界に例の無い無人軌道上作業実験システムであり、世界初や世界最高レベルの技術成果を数多く達成して定常段階の実験運用を終了した。

一方、ETS-VIIは複雑なシステム構成となっており、開発段階での検証作業等が難しく、運用初期段階においてトラブルが発生したこと、及び定常段階においてRVD応用実験の一部に未達成課題が生じたことは今後への反映事項となる。今後は、得られたことを後継プロジェクトに反映するとともに、技術成果を内外に広く報告する。また、異常原因の究明とともに残された課題を含めて追加実験の達成を目指すこととする。

以上

表－2 定常段階終了後のETS－Ⅶ実験運用予定

		平成11年						
		6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
		5 10 15 20 25 30	5 10 15 20 25 30	5 10 15 20 25 30	5 10 15 20 25 30	5 10 15 20 25 30	5 10 15 20 25 30	5 10 15 20 25 30
ロールバイアス期間(発生電力低下期間)		▲6/10 ▼6/27	▲7/28 ▼8/11			10/14 ▲10/25 10/24～10/30		▲12/1 ▼12/17
RVD実験可能ウィンドウ		▲－▲ 6/5～7	▲－▲ 6/26～28	▲－▲ 7/26～28	▲－▲ 8/10～8/14	▲－▲ 8/24～9/4	▲－▲ 9/14～9/30	▲－▲ 10/9～10/14
主要マイルストーン		▲定常段階終了審査 (6/7)	▲S/W改修確認 軌道上試験 (7/E)	▲ ターゲット衛星捕獲技術実験 (8/E)		▲－▲ FP-6実験 (10/M)	(予備実験期間)	
RVD実験時姿勢異常 原因究明	原因究明、スラスト地上試験							
RVD実験 FP-6改(仮称)実験	ソフトウェア／地上系改修 ノミナル／異常運用手順検討 運用手順書作成／検証 訓練準備／訓練 最終運用手順書作成							
他のRVD実験運用	ソフトウェア改修確認軌道上試験							
ロボット／RVD協調 実験	ターゲット点検捕獲技術実験							
ロボット実験	公募共同実験等の利用実験 (RVD実験の間に延べ20実験日実施)							

1. ランデブ・ドッキング(RVD)実験系の成果

1.1 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。米国では軌道上で宇宙飛行士が宇宙船を操縦して RVD を行っているが、NASDA で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こと、また、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ことを考慮して自動RVDシステムを選定し、技術試験衛星Ⅶ型(ETS-Ⅶ)により軌道上実証実験を行うこととした。

ETS-Ⅶで開発、実証を目指す自動 RVD システムは、以下のような特徴を有する。

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

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。

また、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、今後の宇宙機の RVD を考えた場合、多くの宇宙機が大型の太陽電池パドル等の柔軟構造物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。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とした。

1. 2 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、各フェーズ毎に必要な誘導制御技術とシステム運用管制技術がある。

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 技術の実証実験を行うこととした。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 実験を通じて技術検証を行うことができる。

当初計画では、近傍域から遠方域へと段階的に技術実証するために、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 RVD 実験飛行を通じて、自動及び遠隔操縦 RVD に必要となる、以下の 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、ターゲット衛星「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 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。

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、自動的にスラスト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、米国のデータ中継衛星 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。

1. 3 実験運用結果

RVD 実験では、平成 10 年3月～4月にかけて初期機能・性能確認を実施後、以下の実験を行った。

・ 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7日～27日

(1) 分離性能確認試験

分離性能確認試験は、RVD 機器の最終チェックアウトとして6月5日に実施し、成功裏終了した。夜 10 時頃、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 の速度で分離し、宙に浮いた「おりひめ」をドッキング機構の捕獲領域内で捕獲し、再度結合した。この間の近傍センサ等のデータより、ドッキング機構が所定の分離性能を有していること及び、ドッキング機構の捕獲領域内にあるハンドルバーを捕獲し、結合できることが確認できた。

(2) 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 技術の中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。

(3) 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し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の改修や運用上の対処を行い、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。

1.4 実験結果の評価

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、当初計画を上回る 12km の距離まで離れ、そこから復帰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(Hill 方程式の Clohessy-Wiltshire 解を利用した誘導方式)、搭載系の自動飛行管理やディスプレイアポートによる安全確保機能、退避点からの復帰運用等を確認できた。RVD 実験の FP2 までの技術検証実績を、当初計画と比較して表-1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。さらに、難易度／新規性に着目すると、ETS-VIIの目的である、世界に先駆けて開発した自動 RVD 技術の軌道上実証は大半を終了し、良好な性能を示すことが確認できた。

これらに加え、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。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、以下のような数多くの技術を開発し、世界初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1 cm 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
- ⑦ GPS 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。等々

表－１ RVD実験の技術検証項目（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（新規性）			分離／ドッキング	初期離脱最終接近	総合RVD	ワノミナルI	遠隔操縦ワノミナルII	R/V-接近
a	a-1) ドッキング機構	W	①					
	a-2) 近傍セパ	W	①					
	a-3) ランデブレーダ	W		②				
	a-4) GPS 受信機	W			◎*1			
	a-5) 加速度計				②			
	a-6) 視覚系機器			◎*2				
b	b-1) PXS 航法	W	①					
	b-2) RVR 航法	W		②				
	b-3) GPS 相対航法 (PNコード)	W			◎*3			
	b-4) GPS 絶対航法		①					
c	c-1) 分離	W	①					
	c-2) 基準軌道誘導			※				
	c-3) C-W 誘導				◎*4			
	c-4) VIC 誘導				◎*4			
	c-5) 相対6DOF制御	W	①					
	c-6) ドッキング制御	W	①					
	c-7) LOS 指向制御			②				
	c-8) CAM 制御						未	
	c-9) 夜間ドッキング						②	
	c-10) 遠隔操縦制御	W					未	
d	d-1) 自動状態監視	W		②	②			
	d-2) 自動異常管理	W				②	②	
	d-3) 実践的コフ運用					◎*5	◎*5	
	d-4) 遠隔操縦運用	W					未	
	d-5) 2衛星同時運用			◎*6	◎*6	◎*6	◎*6	
	d-6) データ中継衛星運用				◎*7	◎*7	◎*7	
F P 6	e-1) R/V-投入							未
	e-2) R/V-接近							未
	e-3) GPS 相対航法 (搬送波位相)	W						未

W：世界に先駆けて開発した技術の軌道上実証。

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により計画以上の実証ができた項目。

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。接近中にスラッシュ噴射異常による中断もあったが、最終的には実証できた。

◎で当初計画を越える実証の内容は以下の通り。

*1：ROMに焼いたアルマック（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超まで主航法セパとして実証

*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、ワノミナル機能の活用と、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（スワッチ）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

主要な成果の概要を以下に示す。

a. RVD 機器技術

(a-1) ドッキング機構 (DM)

低衝撃分離／ドッキングを実現するための3点ラッチ／能動制御方式のドッキング機構を世界に先駆けて開発し、軌道上で実証した。分離／ドッキング時の機能／性能とも良好であり、3体同時駆動の性能も良好であった。

(a-2/b-1) 近傍センサ (PXS)

ドッキング・フェーズにおいて相対6自由度制御を実施するために、画像処理を使ったランデブ航法センサであるPXSを世界に先駆けて開発し、軌道上で実証した。PXSの結合状態における計測値は表-2に示す通りであり、地上試験時の計測値と比較して、0.6mm、0.2degの程度で一致している。また、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（距離：20mm、姿勢：0.8deg）を十分満足している。

表-2 近傍センサの計測精度

	平均値			ランダム (3 σ) 軌道上
	地上試験	軌道上	差	
相対位置 x (m)	0.4315	0.4321	0.0006	0.0002
y (m)	-0.0004	0.0002	0.0006	0.0001
z (m)	0.0001	0.0000	0.0001	0.0000
相対位置 ロール (deg)	0.272	0.275	0.003	0.018
ピッチ (deg)	0.167	-0.003	0.170	0.017
ヨー (deg)	0.052	-0.099	0.151	0.059

(a-3/b-2) ランデブ・レーダ (RVR)

ランデブ航法センサとして3次元計測可能な光レーザ・レーダであるRVRを世界に先駆けて開発し、軌道上で実証した。RVRの結合状態における計測値は表-3に示す通りであり、地上試験時の計測値と比較して距離：2cm、LOS角：0.1degの程度で一致しており、要求精度を十分満足している。また、RVRのFP1における分離からドッキングまでの計測値は、レンジで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。

表-3 ランデブ・レーダの計測精度

		平均値			ランダム (3 σ) 軌道上
		地上試験	軌道上	差	
測距	レンジ(m)	0.4957	0.4782	0.0175	0.0053
測角	A z(deg)	0.0238	0.0362	0.0124	0.0070
	E l(deg)	-0.0052	-0.1346	0.1294	0.0041

(a-4) GPS 受信機 (GPSR)

ランデブ航法センサとして使用するために GPS 相対航法を行う GPSR を世界に先駆けて開発し、軌道上で実証した。GPS 相対航法の精度は世界最高レベルであることが実証できた。(後述)

また、ROM に焼いたアルマナックデータ (95 年の軌道要素) で捕捉/計測可能であることが確認でき、アルマナックロードの運用負荷を軽減することができた。

(a-5) 加速度計

人工衛星搭載の微小加速度計を軌道制御用の閉ループ制御センサとして我が国で初めて開発し、軌道上実証を行った。

(a-6) 視覚系カメラ

ランデブ接近時の状態モニタ、ドッキング時の挙動モニタのために人工衛星搭載カメラを我が国で初めて開発し、「ひこぼし」搭載のビューイングカメラにより当初計画 (500m) を上回り 1.5km まで「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 V バー離脱中)

b. RVD 航法技術

(b-3) GPS 相対航法 (PN コード)

GPS 相対航法システムを開発し、世界に先駆けて閉ループの航法手段としてランデブ接近を実施した。GPS 相対航法と RVR で計測した距離を比較して図-1 に示す。両者は 1m 程度の精度で良好に一致している。また、結合状態における相対位置の推定結果を図-2 に示す。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行えることが確認できた。

(b-4) GPS 絶対航法

GPS 絶対航法を開発し、我が国で初めて軌道 1 周回以上の連続軌道推定を実施した。GPS 絶対航法と追跡管制の軌道決定値を比較した結果、両者は 100m 程度の精度で良好に一致している。これにより、GPS 絶対航法、軌道決定値共に 100m 程度の精度を有するものと推定される。

c. RVD 誘導制御技術

(c-1) 分離

分離時には低衝撃／低速度分離を実現するために、ドッキング機構を能動的に 3 体同時駆動する必要がある。ドッキング機構の分離性能 (PXS 計測値) を表-4 に示す。X 軸方向の分離速度は、1.75cm/s と許容誤差の 10%、横方向速度や姿勢レートも許容誤差の 10~60% の値であった。このため「おりひめ」搭載の PXS マーカの分離時における PXS 視野中心からの変動はわずかであった。

表-4 分離性能 (PXS 計測値)

	FP-1	FP-2	要求値
速度 V_x (mm/s)	17.71	17.52	18 ± 4.1
V_y (mm/s)	-0.4	-0.4	± 1.0
V_z (mm/s)	0.1	0.4	± 1.0
角速度	-0.014	-0.013	± 0.07
roll (deg/s)			
pitch (deg/s)	0.026	-0.044	± 0.09
yaw (deg/s)	0.043	0.051	± 0.09

(c-2) 基準軌道誘導

Vバー接近時における基準軌道誘導結果を図-3 に示す。Vバー離脱／接近時における位置／速度 (RVR 航法値) は、トランジェントを除いてコマンドに追従しており、基準軌道誘導の精度は、RVR 航法と同程度と考えられる。

(c-3) C-W 誘導

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-4 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、C-W 誘導が高精度であったため、計画 (520m) よりも近い 150m を TF 点として、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。

(c-4) VIC 制御

相対接近フェーズでは軌道変換マヌーバ時に加速度を積分し、 ΔV が制御指令値に達した時点で噴射を停止する VIC 制御方式を開発し、軌道上実証を行った。VIC 制御の精度をテストマヌーバ前後の軌道決定値の変化や、加速度レベルと噴射時間の積等から評価した結果、5%程度の精度で制御できていることが確認できた。

(c-5) 相対6自由度制御

ドッキング時にドッキング軸方向から接近し、ドッキング機構が3体同時にハンドルバーを捕獲するために、世界に先駆けて相対6自由度制御方式を開発し、軌道上実証を行った。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-5に示す。トランジェントを除く相対位置／姿勢誤差は各軸とも許容値の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。

(c-6) ドッキング制御

ドッキング時には約1 cm/s で接近し、ハンドルバーがドッキング機構の捕獲領域に入ったことを近傍センサにより検知し、接触前にドッキング機構を閉じて捕獲する非接触捕獲／低衝撃ドッキング方式を世界に先駆けて開発し、軌道上実証を行った。VP 点出発 144 秒後に「ひこぼし」は「おりひめ」のハンドルバー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の通り捕獲中心から1 cm 以内で、ほぼ中心で捕獲しており、姿勢も保持時と同等の精度であった。また、ドッキング時の加速度の最大値は9 mm/s²（1 mG 以下）であり、低衝撃ドッキングの実現を確認できた。

d. RVD 運用管制技術

(d-1) 自動状態監視

無人宇宙機が自動・自律制御で RVD を実施するために、自動状態監視やモード／シーケンス管理機能を有する自動飛行管理系を開発し、軌道上実証を行った。誘導制御計算機（GCC）が機器や姿勢、航法等を監視し、収束判定を行ってモード移行したり、異常判定を行ったり、実際の運用で有効に機能することが確認できた。

(d-2) 自動異常管理

RVR の異常を検知して、異常にはデイスブル・アポートによる安全確保処置を行う等、GCC による自動異常管理が有効に機能することが確認できた。

(d-3) 実践的コンティンジェンシー対応運用

想定外のコンティンジェンシーの発生に対し、搭載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を成功裡に行うことで、実践的で高度な運用技術を修得できた。

(d-5) 2衛星同時運用

我が国で初めて2衛星の同時運用を実施した。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）、さらに、2衛星の軌道を安全に保つ軌道保持等の高度な運用を実施、修得できた。

(d-6) データ中継衛星経由運用

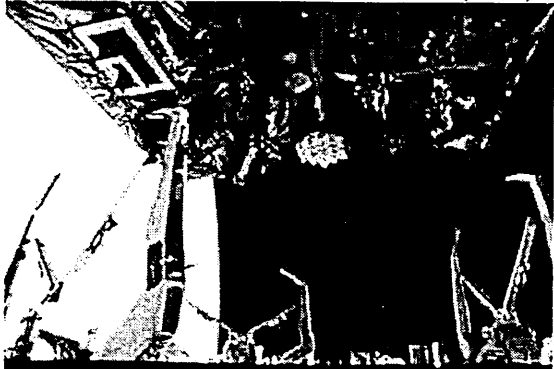
チェイサ衛星と TDRS の軌道要素を管理し、ハイゲイン・アンテナを捕捉／追尾させて衛星間通信リンクを確保する運用や、NASA と国際協力での運用、時間遅れや等時性変動の大きい TDRS での運用等を実施、修得できた。

1. 5 今後の実験計画

ETS-VII RVD 実験では、平成 10 年 8 月までに 2 回の実験飛行を実施し、表 1 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 で発生したスラスタ噴射異常の原因究明をまとめ、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行う。現在、技術研究本部と協力して、上記の実証を 1 実験飛行で行うための FP6 実験計画の見直しを進めるとともに、スラスタ噴射異常に備えて、スラスタアサイン変更ロジックを含む計算機プログラムの改修を実施している。FP6 改（仮称）実験はプログラムの改修後に軌道上での確認試験を実施した後、11 月までに実施する計画である。また、11 月までの後期利用期間を利用し、軌道上サービスの基礎技術の修得を目指し、ロボットとの協調実験であるターゲット衛星点検／捕獲実験等の実施について検討を進めていく計画である。



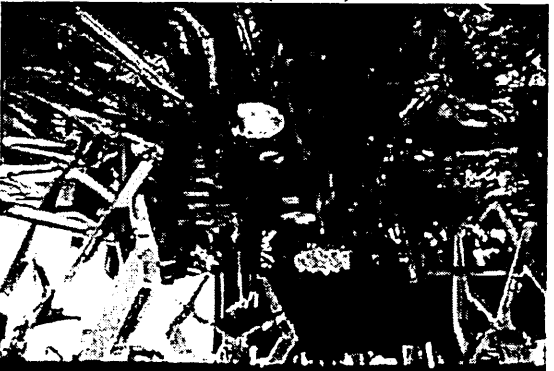
1) ドッキング最終許可コマンド送信(1.5m)



2) 接近中(1.2m)



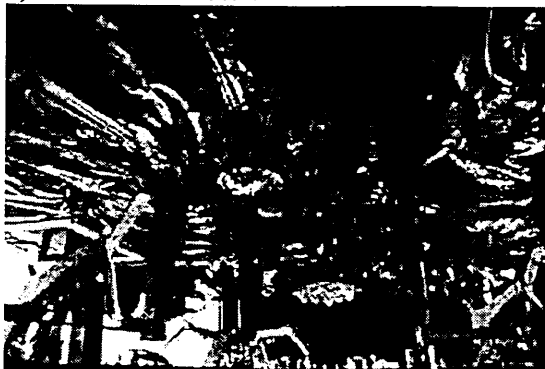
3) アウタマーカ通過 (0.75m)



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)

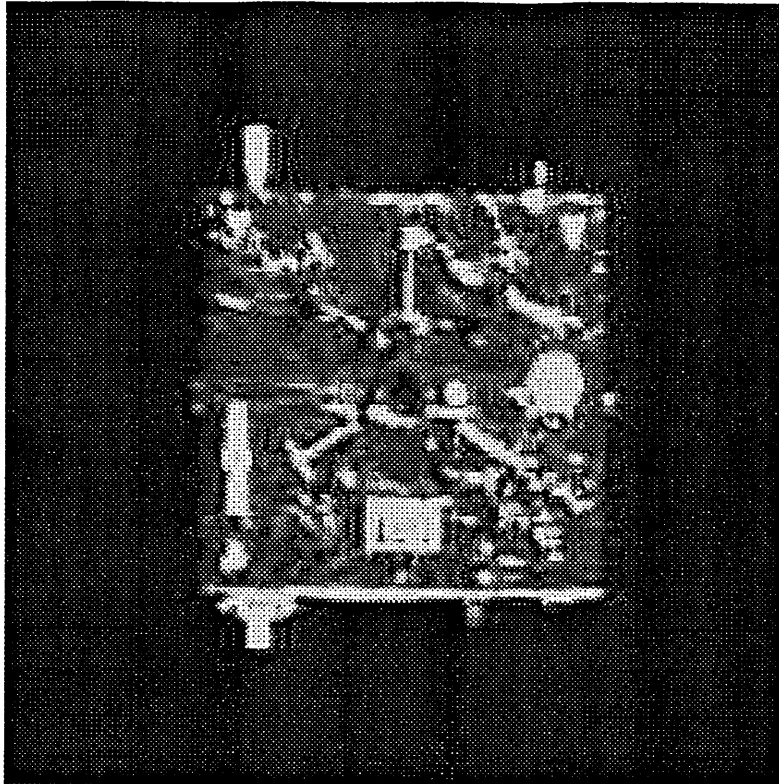


写真2 ビューイングカメラが撮った「おりひめ」衛星の画像
(10m 付近を離脱中)

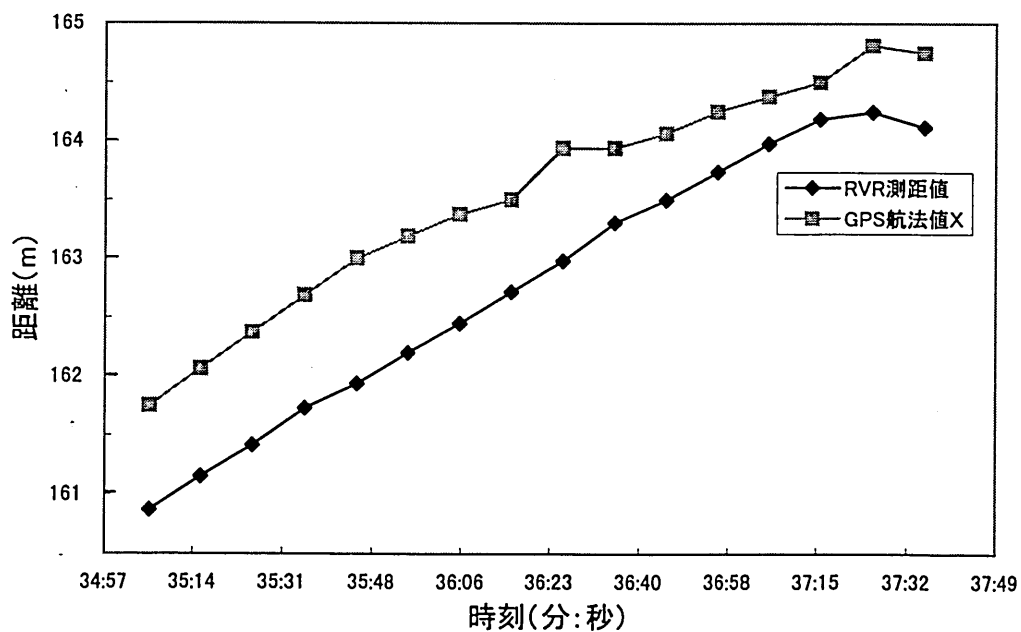


図-1 GPS 相対航法と RVR 計測値の比較

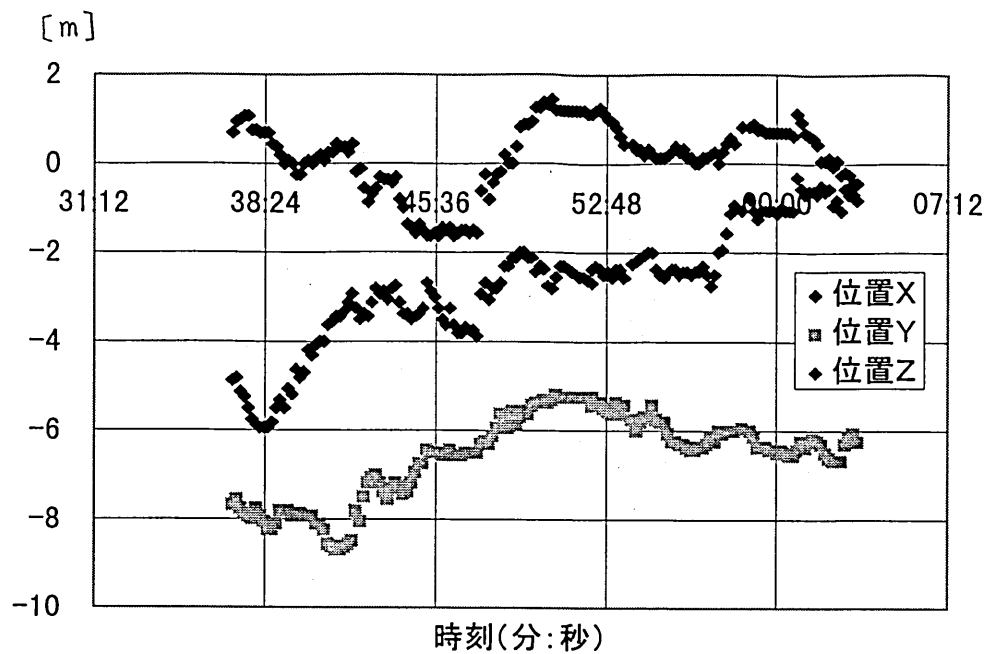


図-2 結合状態におけるGPS相対位置推定結果 (1 / 2)

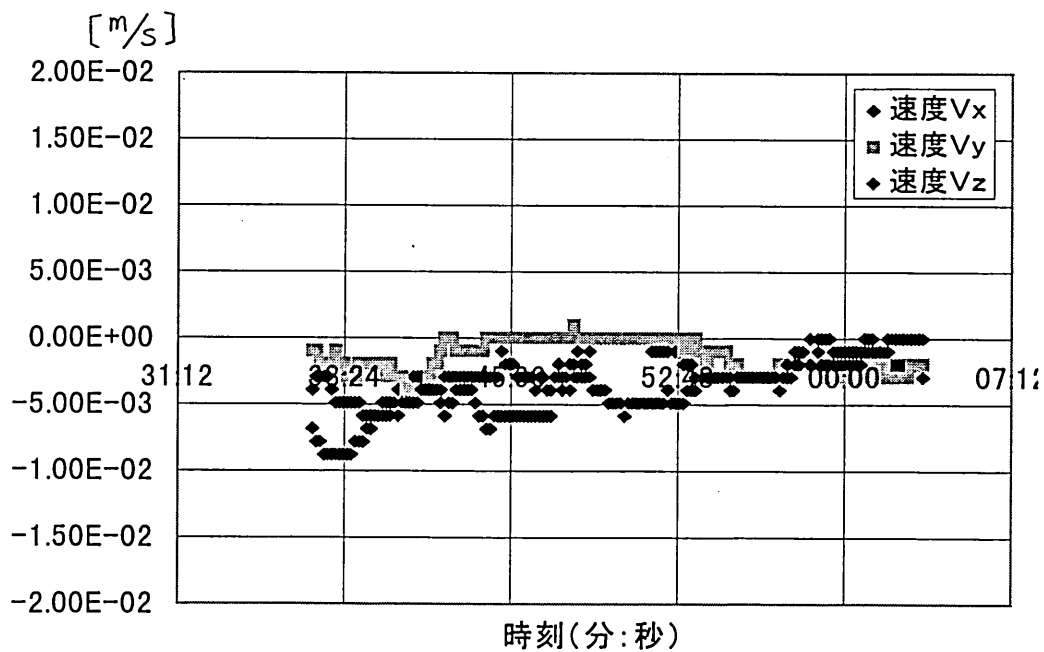


図-2 結合状態におけるGPS相対速度推定結果 (2 / 2)

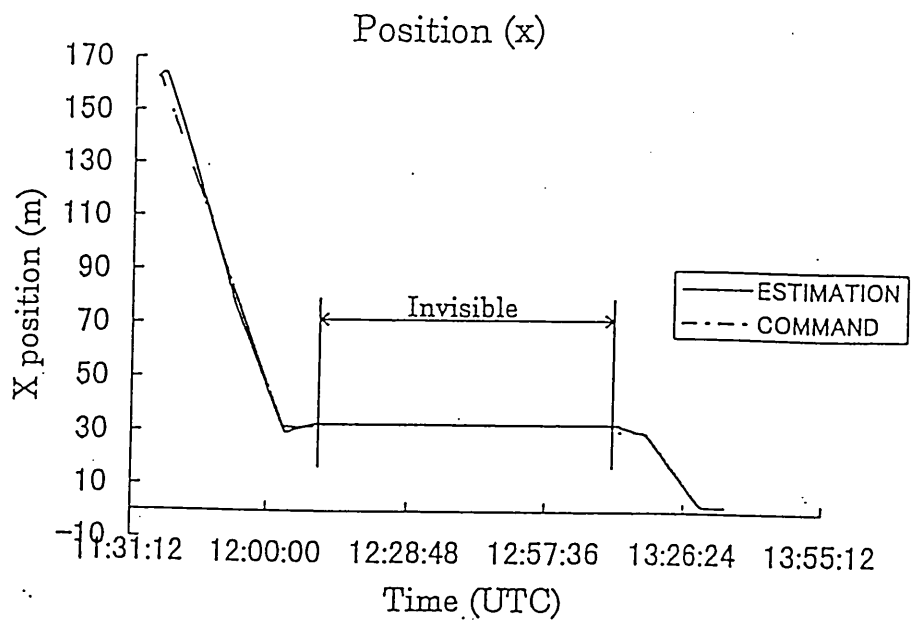


図-3 基準軌道誘導によるVバー接近

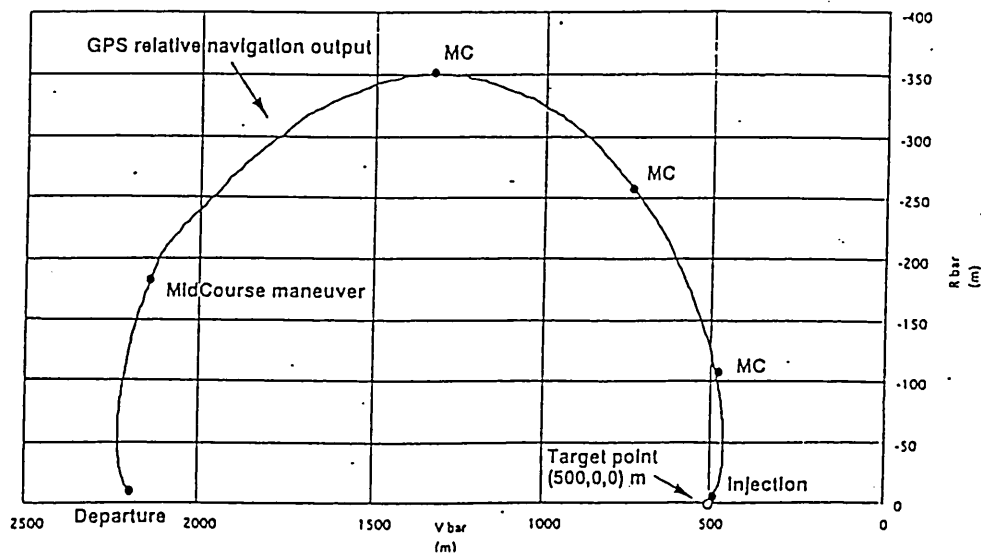


図-4 C-W誘導によるTF点への投入

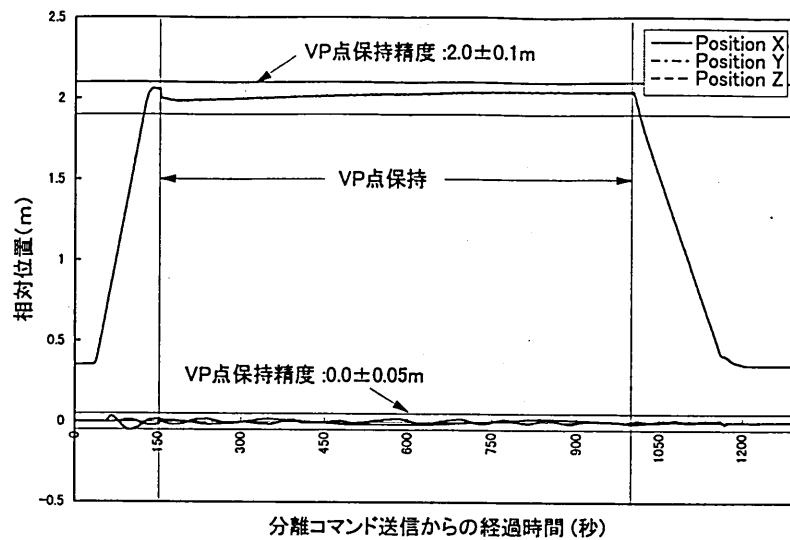


図-5 相対6自由度制御結果（相対位置：P X Sデータ）（1/2）

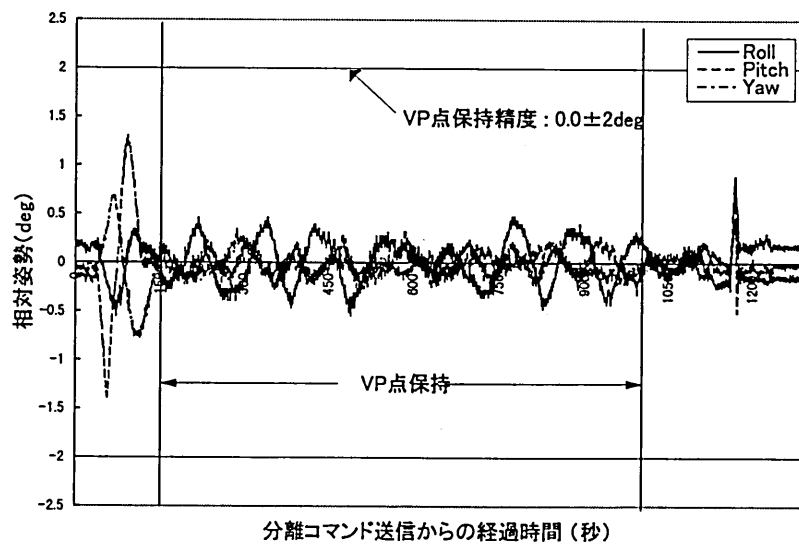


図-5 相対6自由度制御精度（相対姿勢：P X Sデータ）（2/2）

2. ロボット(RBT)実験系の成果

ETS-VII では、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)のロボット実験を行い、当初のミッション期間内に予定した全てのロボット実験を実施した。

2. 1 ロボット実験の計画と実績

ETS-VII で計画されたロボット実験は以下の通りである。

(1)NASDA のロボット実験

①衛星搭載ロボットの軌道上での機能性能の評価

ETS-VII に搭載されたロボットは、これまでに打ち上げられたロボット(スペースシャトルに搭載されたマニピュレータ、MFD 等)と比べて、はるかに長期間、宇宙空間で運用されるため、宇宙での長期間運用におけるロボットの機能性能の評価を行う。

②衛星搭載ロボットアームと衛星姿勢の協調制御技術実験

ETS-VII のロボットアームは、世界で初めて人工衛星に搭載されたものである。ベースが固定されていない衛星上でロボットアームを動作させた時に、ロボットアームの動作時の反力に対して如何にして衛星の姿勢安定を保つかの実験を行う。

③衛星搭載ロボットアームの地上からの遠隔制御実験

スペースシャトル搭載マニピュレータの様に、宇宙飛行士がロボットの近くから操作するものを第一世代の宇宙ロボットとすると、ETS-VII のロボットははるかに遠隔地から操作される第二世代の宇宙ロボットである。通信時間遅れや通信容量の制約がある中で、如何に安全、確実、簡単にロボットの遠隔制御を行うかの技術実験を行う。

④衛星搭載ロボットを使用した各種軌道上サービス基礎実験

宇宙ロボットが今後の各種のミッションに適用可能なことを示すために、搭載ロボットアームを用いて各種の作業実験(搭載機器の目視点検、機器の交換、燃料の補給、衛星の操作等)を行う。

(2)各機関によるロボット実験

①通商産業省のロボット実験:高機能ハンド技術実験

各種のセンサ(距離計、触覚センサ、視覚カメラ)を組み込んだ高機能ハンドによる各種作業実験(コネクタ・ボルト・ワイヤ等の操作)

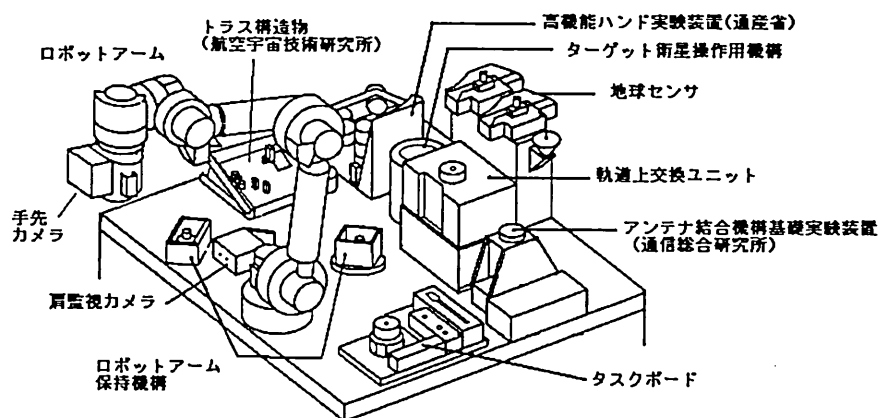
②郵政省通信総合研究所のロボット実験:アンテナ結合機構基礎実験

大型のアンテナを宇宙空間で組み立てる際に必要となるアンテナ結合機構をロボットアームで操作する実験

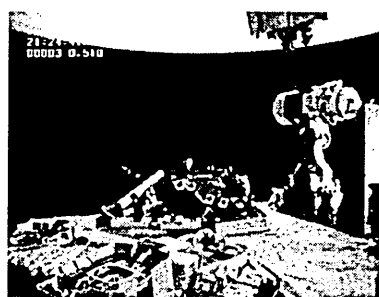
③科学技術庁航空宇宙技術研究所のロボット実験:トラス構造物遠隔操作実験

宇宙空間で大型の構造物を組み立てる際に必要となるトラス構造物をロボットアームの遠隔操作により組み立てる実験

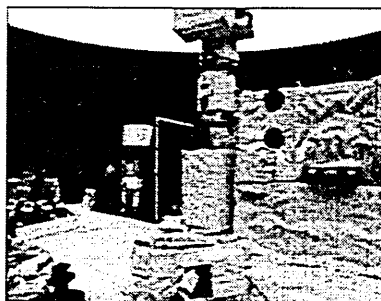
また、上記の実験に加え、NASDA と外国宇宙機関(ESA、DLR)との共同ロボット実験を NASDA の実験機器/地上設備、及び相手機関が製作した地上運用装置を用いて行った。



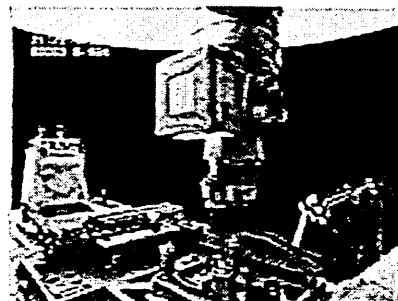
ETS-VII 搭載ロボット実験機器



左: NAL トラス構造物
右: MITI 高機能ハンド実験装置



中央: ターゲット衛星操作ツール
右: 軌道上交換ユニット(ORU)



左: CRL アンテナ結合機構
右: タスクボード

図-1 ETS-VII に搭載されたロボット実験機器

NASDA は、NASDA のロボット実験を表 1 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 日の宇宙開発委員会に報告)

なお、外国機関との共同実験以外の利用実験については、当初より ETS-VII の定常段階終了後に追加的に可能な範囲で実施する計画となっている。

表-1 NASDA の ETS-VII ロボット実験の実施状況／成果概要

ミッション 達成区分	達成基準	実験内容	実施状況／成果概要
ミニマム サクセス	基本実験の一部を実施 ETS-VII 以降の計画に 悪影響を与えないこと	• 衛星搭載ロボットの軌道上 での機能性能の評価	• 実施済み これまでのどの宇宙ロボットよりも長期間(1 年以上)に渡って宇宙 空間で安定動作し、性能の劣化も見られない。
		• 衛星搭載ロボットと衛星姿 勢の協調制御	• 実施済み ロボットの動作反力の実時間推定による反動の予測補正、及び過大 な反動を与えるロボット動作の自動的な抑制により、ロボット動作 時においても通常の衛星並みの姿勢制御精度を実現
ミッション サクセス	基本実験の成功 ETS-VII の目的達成 (遠隔操作型宇宙ロボ ット開発に必要な技術 の基礎の修得)	• 衛星搭載ロボットの地上か らの遠隔制御(遠隔自動操作 ／遠隔手動操作)実験	• 実現済み 6 秒以上の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 衛星搭載ロボットを遠隔制御を行うため、遠隔自動操作技術、遠隔 手動操作技術を開発した。また、若田宇宙飛行士による遠隔操作実 験により、スペースシャトルのマニピュレータよりも操作しやすい ことを示した。
フル サクセス	応用実験の成功 ETS-VII プロジェクト としての全課題達成	• 軌道上サービス基礎実験	• 実施済み 搭載実験機器の目視検査、機器の操作・交換、燃料補給模擬実験、 ターゲット衛星操作等を実施し、衛星搭載ロボットにより各種の軌 道上作業が可能であることを示した。
エクストラ サクセス	利用実験の成功 課題達成後の衛星の有 効利用	• 外国宇宙機関との共同実験	• 実施済み NASDA/ESA 共同実験(99/4/6～4/8) NASDA/DLR 共同実験(99/4/19～21)
		• ターゲット衛星の点検・捕獲 実験等、追加の実験実施 • 公募等による追加実験	• 準備中 • 準備中

(注) 外国宇宙機関との共同実験以外の利用実験は、ETS-VII の定常段階終了後に可能な範囲で追加的に実施するものである。

2. 2 実験結果の概要と得られた成果

ETS-VII のロボット実験では、実験の遂行に係る重大な不具合は無く、実験は順調に推移した。

年 月	主要な作業	特記事項
9 年 11/28	ETS-VII 打ち上げ	衛星姿勢喪失(11 月 30 日)
12 月	軌道変換、姿勢制御系点検	
10 年 1 月	衛星バス系の点検	
2 月	通信回線の点検	ハイゲイン回線の不調 (2 月 2 日～6 月 11 日)
3 月	RVD/RBT 実験系の初期点検	ロボットアーム第 1 関節にオフセット
4 月	同上	
5 月	同上、初期点検終了	定常段階移行(5 月 28 日)
6 月	各機関のロボット実験	
7 月	RVD 実験(FP-1)、各機関のロボット実験	
8 月	RVD 実験(FP-2)	FP-2(8 月 5 日～8 月 27 日)
9 月	TDRS 回線で遠隔操作を行うための搭載計算機の S/W 改修作業実施	
10 月	各機関のロボット実験(遠隔操作実験他)	
11 月	各機関のロボット実験(遠隔操作実験他)	
12 月	各機関のロボット実験(遠隔操作実験他)	
11 年 1 月	各機関のロボット実験(遠隔操作実験他)	
2 月	各機関のロボット実験(遠隔操作実験他)	
3 月	各機関のロボット実験	若田飛行士による実験(3/16) ターゲット衛星操作実験(3/25)
4 月	NASDA/ESA 共同ロボット実験(4/6～8) NASDA/DLR 共同ロボット実験(4/19～21) NAL,CRL ロボット実験	NASDA 実験終了(4/21)
5 月	MITI ロボット実験 NAL,CRL ロボット実験	MITI 実験終了(5/20) NAL,CRL 実験終了(5/28)
定常段階に予定していた全てのロボット実験を終了(5/28)		
平成 11 年 11 月末まで ETS-VII の実験運用を継続し、追加の実験を実施予定		

①衛星搭載ロボットの軌道上での機能性能の評価

ETS-VII 搭載ロボットアームは全長約2m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、ツール機構部及び第一関節上に視覚系カメラを搭載している。

ロボットアームは軌道上での初期点検において、第一関節に 30 度のオフセットがあることが発見されたが、衛星搭載ロボット制御用計算機のプログラムを修正(ロボットアームの関節角度の計算にバイアスを加えることにより地上からの指令に対して本来あるべき関節角となる様にした)で対応した。本修正により、事前に準備されていた実験手順は変更を加えることなく使用でき、全ての実験が予定通り実施できた。

更に、ロボットアームは上記の関節バイアスの補正等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、繰返し精度で 1.5mm 以内)を実現していること、さらには、宇宙ロボットとしては ETS-VII 搭載ロボットアームで初めて採用されたロボットアームと相手物体との間に発生する力が指示された値となる「力制御機能」を含むロボットアームの力覚制御機能(コンプライアンス制御等)が正常に機能しており、実験機器の脱着等、相手機器との接触を伴う作業が容易に行えることを確認した。

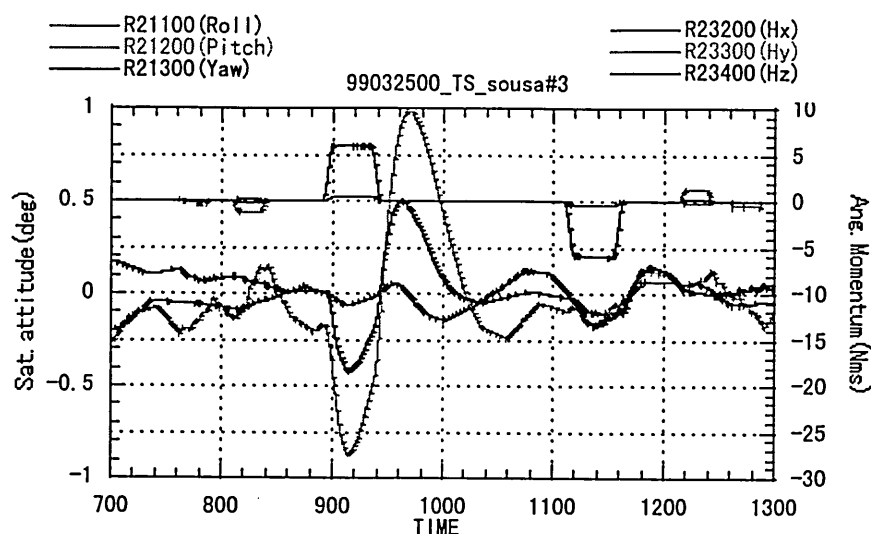
また、ETS-VII 搭載ロボットアームは、これまでに宇宙空間で使用されたどのロボットアーム／マニピュレータよりも長期間に渡って運用されており(打ち上げから 1 年半、ロボット実験を実施した日数は 100 日以上)、その間においても特に性能の劣化は見られない。ロボットアーム以外の各種実験機器についても、いずれもミッション期間を通じて正常に機能している。

②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。これらの協調制御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衛星並みに抑えることが可能なことを確認した。

図-2にチェイサ衛星(質量:2.5 t)に搭載されたロボットアームでターゲット衛星(質量 410kg)を把持して移動操作を行っている時の衛星の姿勢角、及びロボットアームの発生角運動量を示す。この時の衛星の姿勢制御にはガスジェットスラスタを使用し、1100 秒までは通常の姿勢制御を、1100 秒以降は協調姿勢制御を行っている。協調姿勢制御により、衛星の姿勢誤差が大きく改善されている。

また、ターゲット衛星以外の実験機器を把持操作する際には、発生角運動量がそれ程大きくないことから、リアクションホイールを使用した姿勢制御でも衛星の姿勢を良好に保てることを確認している。



図ー2 ロボットアームでターゲット衛星を操作した際の衛星の姿勢変動
(1100 秒までは通常制御。その後は協調制御を使用。アクチュエータはガスジェットスラスタ)

③衛星搭載ロボットアームの地上からの遠隔制御実験

ETS-VII の搭載ロボットアームを地上から遠隔制御する際、通信による時間遅れが往復で 6～8 秒程度発生する。この時間遅れは地上の実験運用設備と衛星搭載ロボットの間の通信が複雑な計算機ネットワークを利用したパケット交換により行われているため生じるもので、ネットワークの負荷の状態により通信時間遅れは変動する。

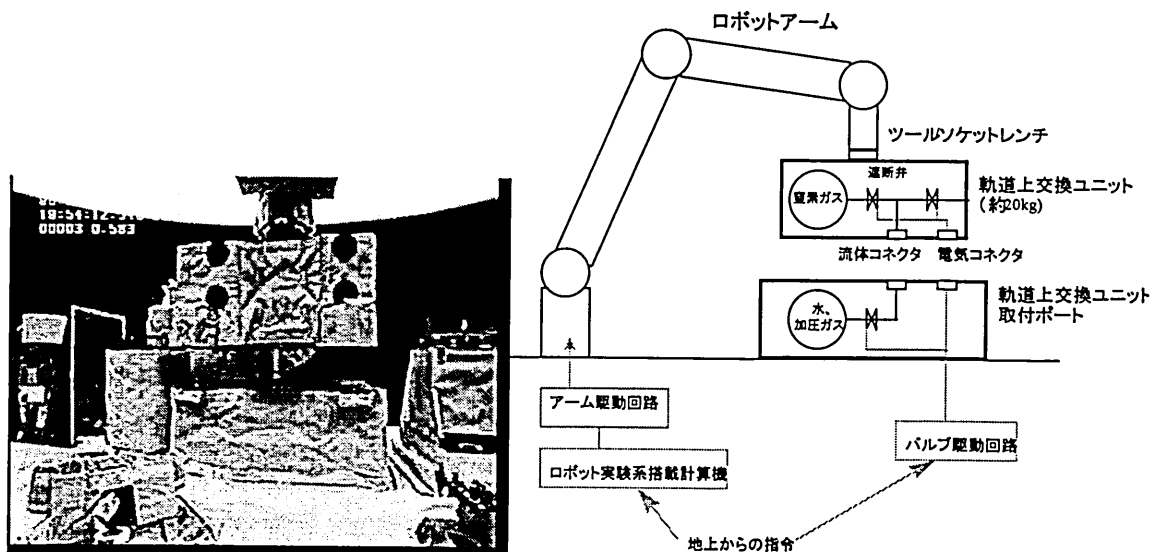
NASDA の搭載ロボットアームの遠隔制御システムは、この様な大きな環境の中でも、小人数のオペレータで、安全、確実、簡単に作業が行えること目標に、電子手順書による自動操作、及びハンドコントローラを使用した遠隔操作により各種の実験作業を行った。電子手順書を使用した実験運用では、実験の作業手順はフローチャート形式の電子手順書で記述され、実験に先立って同手順書を実験運用設備に内蔵された衛星搭載ロボット系シミュレータ上で実行することにより手順書の検証を行い、実際の運用時には電子手順書により指令は自動的に送出され、オペレータはその実行状態を監視するだけでよい様になっている。また、一度、作成・検証・使用された電子手順書は、別の作業手順を作成される時にも利用され、短期間での電子手順書の作成を可能にしている。一方、目視検査等、自動化が困難な作業では、ハンドコントローラを使用した遠隔操作も可能になっている。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。これ

らの技術のおかげで、ロボットアームを使用した作業は、短期間の準備、及び小人数のオペレータで行える様になっている。実際、平成 11 年 3 月 16 日に実施した若田宇宙飛行士による遠隔操作実験(ロボットアーム先端の位置、及び発生力の同時制御が必要なタスクボード表面にロボットアームを押し付けながらなぞる作業)では、2 日間の訓練にも拘わらず、正常に作業が行え、シャトルマニピュレータよりも操作し易いとの評価だった。

④軌道上サービス基礎実験

(a)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。図一3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。また、本 ORU、及び下部の ORU ポートの内部には推薬タンク、バルブ、配管が組み込まれており、両者は流体コネクタ、電気コネクタで接続されている。流体コネクタ、電気コネクタは、ORU の脱着の際、ロボットアーム側からのトルク供給により脱着される様になっている。平成 10 年 10 月 29 日に本実験装置を使用した推薬補給実験が行われ、模擬推薬(ヒドラジンと化学的特性が似ている水)の移送が行われた。軌道上での推薬移送は世界的に見てもロシアのみが保有する技術(宇宙ステーション MIR への燃料補給に使用)であり、今回の実験(ORU 交換、燃料補給模擬実験)は無人の人工衛星上で行ったものとしては世界で初めてのものである。



図一3 ロボットアームによる軌道上交換ユニットの操作、及び推薬補給実験

(b)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)

衛星搭載機器の目視検査は、衛星からの映像を見ながら、搭載ロボットアームを遠隔操作することにより行われたが、ETS-VII 搭載ロボットの遠隔操作システムがロボットの専門家以外でも容易に操作できる様に設計されていたこともあって、目視検査作業は非常に容易であった。このことから遠隔操作ロボットを使用した衛星搭載機器の目視検査が今後の軌道上作業として充分利用可能であることが確認された。

(c)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。図-6にロボットアームの先端にタスクボード操作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、平成11年5月には通産省の高機能ハンド実験装置のハンド部分を NASDA のロボットアームの先端に取り付けて、ターゲット衛星上の機器を操作する実験が通産省との共同実験として行われた。これらの実験を通じて、ロボットアームの先端に各種のツールを取り付けて各種の作業を行うことの妥当性が確認された。また、ターゲット衛星操作実験では、ロボット実験系とランデブドッキング実験系の協調的な作業が可能なることも確認された。

⑤外国宇宙機関との共同ロボット実験

NASDA は、欧州宇宙機関(ESA)、及びドイツ航空宇宙センタ(DLR)と ETS-VII を使用した共同ロボット実験を行う了解覚え書きを交換している。

- DLR(当時の DARA)との了解覚え書き: 1996.5.13 付け
- ESA との了解覚え書き: 1997.7.2 付け

これらの共同実験は、相手機関が製作したロボット実験用地上装置(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、ETS-VII に搭載されたロボットアームの遠隔制御実験を行おうとするものである。

(a)ESA との共同実験

ESA との共同実験は、平成 11 年 4 月 6 日～8 日に行われ、以下の実験が行われた。

■ Interactive Autonomy と ESA が称する半自動的なロボットアーム制御実験

ロボットに行わせようとする作業をいくつかのサブタスクに分割し、サブタスクの実行管理を計算機により行わせることにより、オペレータの作業負荷を軽減しようとする実験

■ 画像処理を利用したロボットアームの自動的な制御

ロボットアーム先端の手先カメラで撮像された実験機器の映像を処理することにより、相手機器までの移動距離等を計算して自動的にロボットアームを制御しようとする実験。

(b)DLR との共同ロボット実験

DLR との共同ロボット実験は平成 11 年 4 月 19 日～21 日に行われ、以下の実験が行われた。

■ 衛星搭載ロボットアーム動作時の衛星の姿勢運動の評価

人工衛星上でロボットアームが動作した場合に、動作反力により衛星の姿勢は変動する。今回の実験では、DLR 側で開発したロボットアームを含む衛星のダイナミクスシミュレーションプログラムの検証を兼ねて、衛星の姿勢制御を行わない状態で、衛星に姿勢変動をできるだけ与えない様にロボットアームを動かす実験を行い、同プログラムによる姿勢変動の予測の精度を評価した。

■ バーチャルリアリティによる衛星搭載ロボットの遠隔操作

NASDA、及び国内各機関のロボットアームの遠隔操作実験では、各種のハンドコントローラが使用されたが、本実験では、立体映像とオペレータの手先／指の動きを取り込むデータグローブを使用して、衛星搭載ロボットアームに遠隔操作指令を送る実験を行った。

これら、外国機関との共同実験の実施は、実験実施に伴う直接的な技術成果もさることながら、日本が主導権を持ちながら国際協力により作業を進めたことから、今後の各種の国際協力プロジェクトの推進において貴重な経験となった。

2.3 軌道上サービス実験の検討

ETS-VII実験運用評価プロジェクトの一環として定常段階中に実施した軌道上サービス実験の検討結果を以下にまとめる。

(1) 地上観測による受動物体の軌道および運動の同定

ドイツ航空宇宙センタ(DLR)との共同ロボット実験に係る協力の一環として、ドイツ応用物理学研究所(FGAN)が所有する地上電波レーダーにより、機能を喪失し軌道上を周回するADEOSの連続観測画像と推定軌道要素の提供を受けた。本画像の解析により機能喪失後およそ1年を経た時点で、ADEOSは太陽電池用マストの方向を地球方向を中心としてゆっくりと揺動させる運動をおこなっていることが観察され、シミュレーションでも予想される重力傾斜トルクに支配された運動を行っていることが確認できた。また、本解析の結果は、別途DLRから提供されたFGANが行った解析結果とも一致している。

また、ETS-VIIランデブー実験時のターゲット、チェイサー間距離をFGANの地上観測により推定した値を、ランデブーレーダーの計測結果と比較したところ、相対距離400mから3kmにわたる広い測定範囲で誤差200m以下の精度をもって推定できていることがわかった。なおFGANからは、本推定はアルゴリズムの改良により精度を更に数倍向上させることも可能であるとのコメントを得ている。

本解析により、低軌道を周回する衛星大の大きさを持つ受動的物体は、地上レーダーの観測により、その軌道および剛体運動の推定が可能であることが実証された。

(2) 軌道上サービス実験の検討

ETS-VIIで修得された技術では、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、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。

現状の技術では軌道上サービスを楽しむためにはユーザー側に大がかりなランデブー用センサやドッキング機構を用意する必要があり、またサービスの提供にはサービスを受ける衛星が健全であることが前提条件となる。軌道上サービスをより広めるためにはこのようなユーザー側の負担を軽減し、提供できるサービスの範囲を拡大する必要がある。

故障衛星やより一般的な衛星へのサービス提供技術の修得を目的として、ETS-VIIの利用実験で、一旦分離したターゲット衛星の周囲をチェイサー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以降の計画としてよりユーザー衛星側の負担を必要としない方式で、接近、捕獲、機能回復

及び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、上述の地上観測の技術検討を含めて現在進めている。

2.4 今後の実験計画

ETS-VII のロボット実験は、平成 11 年 5 月末までに、NASDA、通産省、NAL、CRL のいずれの機関も定常段階に予定していた全ての実験を実施した。ETS-VII は、残っているランデブドッキング実験、及び追加のロボット実験を行うため、引き続き、平成 11 年 11 月末まで ETS-VII の実験運用を継続する予定である。

追加のロボット実験は、NASDA、及び各機関により行われるが、NASDA は以下の実験を予定している。

(1) ターゲット衛星の点検・捕獲技術実験

本実験は、将来、軌道上で故障して漂っている衛星に接近して状態を観察した上で、ロボットアームで捕獲回収することを念頭においた実験で、ターゲット衛星をチェイサ衛星から分離した後、ターゲット衛星の周囲を周回する様にチェイサ衛星を飛行させ、チェイサ衛星側の視覚カメラ(ビューイングカメラ、ロボットアーム搭載カメラ)でターゲット衛星の状態を観察する。さらにその後、チェイサ衛星をターゲット衛星の前方に相対停止させ、ロボットアームを行う。

なお、本実験は、非常に難易度が高いこと、及びランデブドッキング実験の一部が未実施で残っていることから、場合によっては半開状態のドッキング機構の中でターゲット衛星を半浮遊状態にし、その上ロボットアームにより捕獲するなど、実験の具体的な方法を現在検討中である。

(2) 定常段階中に実施した実験の追加データの取得

長期間の軌道上運用におけるロボットアームの制御性能等のデータを定常段階に引き続き取得する。

(3) 外部の研究者との共同研究による追加のロボット実験

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、外部の大学、研究機関、企業等の研究者に対して、NASDA との共同研究による共同ロボット実験を呼びかけている。

以上

3. 衛星及び運用システムの成果

3. 1 衛星システムの成果及び評価

定常段階期間中、ETS－Ⅶ衛星システム機器は、姿勢制御、発生電力、通信・データ処理機能、熱制御機能について、要求される機能・性能を満足しランデブ・ドッキング(RVD)／ロボット(RBT)実験を遂行することが出来た。

衛星システム機器の得られた成果を表－1に示す。

表－1 衛星システム機器の得られた成果

システム機器名称	得られた成果
1. 視覚系	設計・開発の妥当性を確認し、取得された画像の品質がRVD実験及びRBT実験で有効に活用されることを確認した。
2. 通信系	設計・開発の妥当性を確認し、以下の技術の検証を実施した。 (1)データ中継衛星システムで用いるスペクトラム拡散通信方式による衛星間通信技術の確立 (2)地上局通信と衛星間通信で異なる変調方式を一つのトランスポンダで利用可能とした共用化技術 (3)畳み込み符号化／ビット復号化の有効性の検証
3. データ処理系	設計・開発の妥当性を確認し、以下の技術の検証を実施した。 (1)CCSDSパケット方式のRVD／RBT実験への適用とその有効性の検証 (2)リート・ソロモン符号化の有効性の検証
4. 電源・太陽電池パドル系	設計・開発の妥当性を確認した。 発生電力：要求値2360Wに対し約2580W(チェイサ) ：要求値650Wに対し約696W(ターゲット)
5. 姿勢軌道制御系	設計・開発の妥当性を確認した。以下の技術の検証を実施した。 (1)姿勢制御要求ロール/ピッチ/ヨー： $\pm 0.5/\pm 0.5/\pm 1.0$ 度に対して各軸を約0.01度で制御出来た (2)RBT実験における協調制御機能の有効性を検証した(協調制御なし：1.0度の姿勢変動→協調制御あり：0.2度程度の姿勢変動) (3)衛星間通信用アンテナ追尾時のフィード・フォワード機能の有効性の検証 (4)ソフトウェア書き換え機能の有効性
6. 推進系	要求される機能・性能を満足することを確認した。 残推薬量：チェイサ衛星約230kg ターゲット衛星約3.5kg
7. 熱制御系	設計・開発の妥当性を確認した。

3. 2 TDRSを利用したスペースネットワーク実験

ETS-VIIがNASAのデータ中継衛星システム(TDRSS)を利用して実験運用を行う中で、SSA通信リンクでの実ユーザ宇宙機を利用した衛星間通信の運用技術修得及び国際相互支援の実証を目的とした、ETS-VII/TDRSデータ中継・追跡実験を実施した。

実験の項目概要と得られた成果を表-2に示す。

表-2 ETS-VII/TDRSデータ中継・追跡実験の項目概要と成果

実験項目概要	得られた成果
1. TDRSを利用した運用性実験 (1)運用計画要求の検証 (2)リアルタイム運用性の検証	・運用計画の検証についてはNASA側とのインターフェースは良好であった ・リアルタイム運用の検証については、NASAからユーザ端末までの伝送時間が約6秒掛かること、情報更新周期が約5秒であることから、リアルタイム性には若干かけていた
2. データ伝送特性実験 (1)遅延時間の検証 (2)データ伝送系回線品質の検証 (3)リード・ソロモン復号の検証 (4)COP-1コマンド再送の検証	・遅延時間の検証については、要求時間10秒以下に対して約6秒であり満足できるものであった ・データ伝送系回線品質の検証については、データのゆらぎ、破損／欠損について検証したが、高い回線品質が得られていることが確認できた ・リード・ソロモン復号の有効性を検証した ・COP-1コマンド再送処理が正常に実施されていることを確認した
3. 2衛星(チェイサ/ターゲット)同時運用性試験	ETS-VII/TDRS実験システムとNASAのTDRSシステムも含めて、2衛星を同時に運用することが可能であることが検証でき、1衛星運用時の実験データと比較し、全ての項目において大きな差異のないことが検証できた。

4. 技術データ取得装置／原子状酸素モニタ装置の成果

4.1 実施内容

初期チェックアウトは平成 10 年 3 月に行い、すべての機能が正常であることを確認した(但し予定外のオムニアンテナモードで実施した)。定常運用は平成 10 年 4 月から開始した(予定通りのハイゲインモードで実施した)。定常運用において合計 11 回の計測を実施した。実験の優先度と TDRS パス要求から、ランデブードッキング実験期間及びロールバイアス運用期間を除くロボット実験運用パスでデータを取得した。

4.2 計測結果

定常運用の測定データから原子状酸素の検出はできなかった。その理由は原子状酸素の検出が可能になる感度(検出部の MCP*電圧 900V 相当)の約百分の一の感度(MCP*電圧約 400V)で出力が飽和してしまい、それ以上感度を上げることが出来無いためである。これは ETS-VII 周囲のアウトガスを考慮した真空度が想定 of 真空度(10^{-6} Pa)より 100 倍以上高い 10^{-4} Pa の真空度環境であることに起因し、その結果、現状の AOM の性能で原子状酸素(分圧 10^{-8} Pa)の検出は困難であることが判明した。真空度実測結果を図-1 に示す。

この衛星周囲の真空環境は衛星自身から放出されるアウトガスの影響が想定(自然の真空度より 100 倍程度)した以上に多かったためと考えられる。軌道上の真空度計測はスペースシャトル、SFU で行われているが、人工衛星周囲の真空度が自然の真空度より 100 倍程度高いこと、運用条件によって変動することは SFU の計測によって明らかになっている。また食中の前半、中央、後半等計測ポイントを変えて断続的に真空度の計測を行ったが、真空度の低下は見られなかった。図-2 に真空度の季節変化を示す。打上げ前の地上試験では、 10^{-6} Pa の真空度での実験しか行っていなかったため、軌道上の実環境の真空度 10^{-4} Pa で、地上に残っている BBM を用いての地上試験を平成 10 年 10 月末に行った。その結果、真空度が 10^{-4} Pa においても AOM の真空計測に関わる機能には問題ないことを確認している。

平成 10 年 11 月 17 日～18 日の獅子座流星群の遭遇予定時に、AOM で真空度の計測を行った。この目的は流星が衛星に衝突すれば、速度の 4 乗に比例するエネルギーのプラズマが発生し、圧力の急激な上昇が計測できる期待があったからである。計測データの解析結果、計測した範囲内で顕著な圧力上昇はなかった(図-3)。

注 * ; MCP: Micro Channel Plate; 光電子増倍機能素子

4. 3 今後の課題等

ETS-VII搭載 AOM での本来の計測目的の原子状酸素の検出は困難なものとなった。しかし、衛星周囲の真空環境の計測は可能であるので、今後は各軌道上の位置(日照、食、運用モード(スラスト制御時、ホイール制御時)等)における衛星周囲の真空環境の計測及びその季節変化等をメインにデータの取得を行い、今後の宇宙環境計測機器(主に中性ガス粒子計測器)の開発、アウトガス、コンタミネーションの変化等の基盤研究に寄与するデータを可能な範囲で継続して収集することとする。

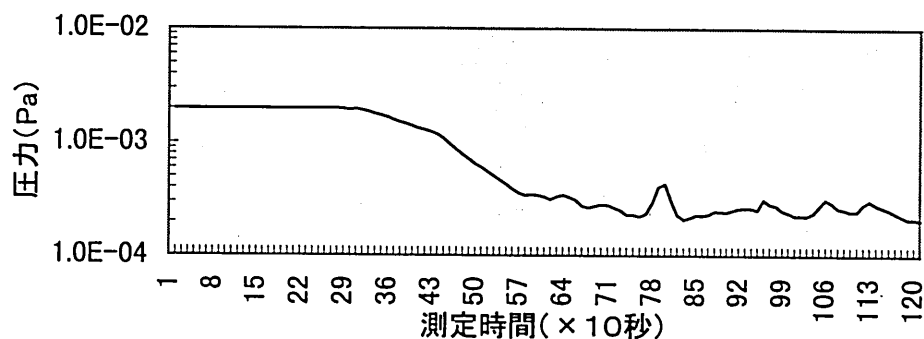


図-1 ETS-VII周囲圧力(98/4/8 8:20UT)

(計測開始後暫くは、フィラメント点灯によるデガス(蒸発)効果で一時的に圧力値が高く出力される。)

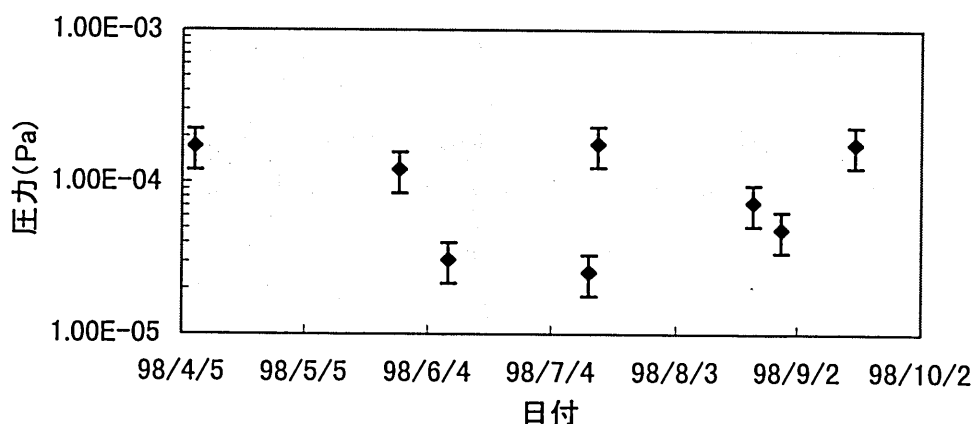


図-2 ETS-VII周囲圧力の季節変化

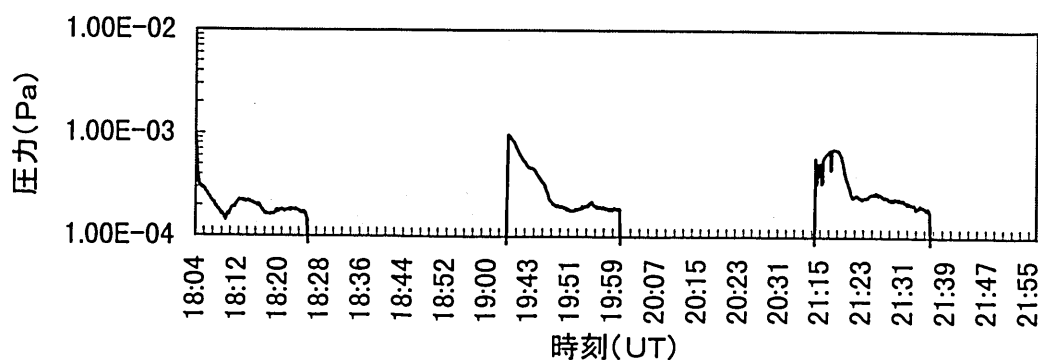


図-3 ETS-VII周囲圧力(98/10/17)

略語集

【A】

ADEOS	Advanced Earth Observing Satellite	地球観測プラットフォーム技術衛星
AOM	Atomic Oxygen Monitor	原子状酸素モニタ

【B】

BBM	BreadBoard Model	試作試験用モデル
-----	------------------	----------

【C】

CAM	Collision Avoidance Maneuver	衝突回避マヌーバ
CCSDS	Communication Committee For Space Data Systems	宇宙データシステム諮問委員会
COMETS	Communication & Broadcasting Engineering Test Satellite	通信放送技術衛星
CRL	Communication Research Lab.	通信総合研究所
C-W	Clohesy - Wiltshire	HILL方程式の解析解

【D】

DARA	Deutschen Agentur fur Raumfahrtangelegenheiten GmbH	ドイツ航空宇宙機関
DLR	Deutsche Forschungs und Vevsuch-Sanstalt fur Luft-und Raumfahrt	ドイツ航空宇宙センター
DM	Docking Mechanism	ドッキング機構
DOF	Degrees Of Freedom	自由度

【E】

ESA	European Space Agency	欧州宇宙機関
ETS-VII	Engineering Test Satellite-VII	技術試験衛星VII型

【F】

FGAN	Forschungsgesellschaft fur Angewandte Naturwissenschaften	応用自然科学研究協会
FP	Flight Path	飛行経路

【G】

GCC	Guidance Control Computer	誘導制御計算機
GPS	Global Positioning System	全地球的位置決めシステム
GPSR	GPS Receiver	GPS受信機

【H】

HTV	H-II Transfer Vehicle	宇宙ステーション補給機
-----	-----------------------	-------------

【I】

ISS	International Space Station	国際宇宙ステーション
-----	-----------------------------	------------

【J】

【K】

【L】

LEO	Low Earth Orbit	低軌道
LOS	Line Of Sight	視線方向

【M】

MCM	Mission Command Manager	パケットコマンド処理装置
MCP	Micro Channel Plate	光電子倍增機能素子

MFD MITI	Manipulator Flight Demonstration Ministry Of International Trade And	マニピュレーター飛行実証試験 通商産業省
【N】		
NAL	National Aerospace Lab.	航空宇宙技術研究所
NASA	National Aeronautics and Space Administration	米国航空宇宙局
NASDA	National Space Development Agency of Japan	宇宙開発事業団
【O】		
ORU	Orbital Replacement Unit	軌道上交換ユニット
【P】		
PXS	Proximity Sensor	近傍センサ
【Q】		
【R】		
RBT	RBT Subsystem	ロボット実験系
ROM	Read Only Memory	読み取り専用メモリー
RVD	Rendezvous Docking Subsystem	ランデブ・ドッキング実験系
RVR	Rendezvous Radar	ランデブ・レーダ
【S】		
SFU	Space Flyer Unit	宇宙実験・観測フリーフライヤ
【T】		
TDRS	Tracking and Data Relay Satellite	追跡・データ中継衛星(米国)
TF	Terminal Phase Finalization	接近開始点
TI	Terminal phase Initiation point	相対接近開始点
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission	熱帯降雨観測ミッション
TRR	Target Retaining & Releasing Mechanism	ターゲット衛星保持解放機構
【U】		
【V】		
VIC	Velocity Inclement Cut-off	速度増分検出による噴射量制御
VP	Vicinity Point	近接開始点
【W】		
【X】		
【Y】		
【Z】		