

MFDプロジェクトとその成果

宇宙開発事業団 長友正徳、佐藤隆久、原田 力、久留靖史
和田幸司、森下謙次、伊藤圭一

1. はじめに

マニピュレーター飛行実証試験（MFD：Manipulator Flight Demonstration）は、国際宇宙ステーションの日本の実験棟（JEM：Japanese Experiment Module）の打上げに先き立ち、その構成要素のうち重要でかつ技術的に高度な要素の一つである操作系を含む精密作業用ロボットアーム（JEMリモート・マニピュレーター・システム（JEM RMS：JEM Remote Manipulator System）の子アーム）の飛行実証試験をスペースシャトルを利用して行うものである（図1-1及び図1-2参照）。この試験に供されるMFDロボットアームは、日本初の宇宙ロボットアームであり、精密作業用としては世界初のものである。



図1-1 シャトル荷物室に搭載されたMFDペイロード
JEMの構成

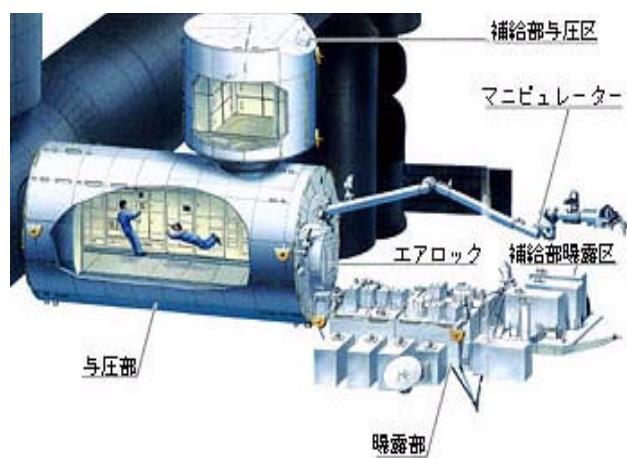


図1-2

JEM RMSは、JEMの構成要素のなかで重要で、かつ技術的に高度な要素の一つであることから、JEM RMSが宇宙で確実に作動し所要の機能・性能を発揮することを、JEMの打上げに先立って確認しておく必要がある。特に子アームについては、軌道上交換装置(ORU:Orbital Replacement Unit)等を把持・交換する際に、相手に加える力やトルクを適切に制御するコンプライアンス制御など、世界に先駆けたロボット技術が盛り込まれている。この宇宙ロボットアームは、微少重力環境下で作動するように設計されていることから、地上で3次元6自由度の試験が困難なことや、微小重力環境下での関節機構の摩擦抵抗や噛合い状態の確認は、地上では困難であることから、実際に微小重力環境下で試験を行う必要がある。また、JEM RMSを操作するためのハンドコントローラー等の人間機械系機器の操作性を確認するためには、やはり微小重力

環境下で搭乗員が宙に浮いた状態で試験する必要がある。

そこで、JEMの打上げに先立ち、スペースシャトルを利用してJEM RMS子アームの飛行実証試験を行うMFDプロジェクトが設定された。この試験のため、1997年8月7日10時41分（米国東部夏時間）にJEM RMS子アームと同等の機能・性能を有するMFDロボットアームを搭載したスペースシャトルディスカバリー号／STS-85が、米国航空宇宙局（NASA：National Aeronautics and Space Administration）ケネディ宇宙センター（KSC：Kennedy Space Center）から打上げられ、同19日7時7分にKSCに着陸するまでの約12日の飛行期間に各種実証試験を行った。

ここでは、MFDロボットアームをシャトルの荷物室に搭載し、これをシャトル船内から搭乗員がハンドコントローラーを用いて操作して、ロボットアームの微小重力環境下での機能・性能に係る実証試験や、ORUの交換や、ドア開閉の実証試験を行った他、シャトル上のMFDロボットアームを地上から遠隔操作するという技術実験（GCR：Ground Commanding 実験）や、相乗り実験として宇宙曝露環境下での材料の劣化特性データ等を取得する材料曝露実験（ESEM：Evaluation of Space Environment and Effects on Materials）、及び微小重力環境下での二相流体による熱制御技術を試験する二相流体ループ実験（TPEX：Two Phase Fluid Loop Experiment）を行った。

本稿では、MFDロボットアーム飛行実証試験用のシャトル搭載システムの開発を中心としたMFDプロジェクトの概要と成果について紹介する。なお、MFDプロジェクトの範囲のうち、飛行運用及び飛行試験後評価に係る詳細や、ロボットアームの地上遠隔操作実験、相乗り実験として実施された材料曝露実験と二相流体ループ実験の詳細は、別稿で紹介される。

2. MFDプロジェクトの目的

MFDプロジェクトは、宇宙ステーション開発プログラムの一環として、JEMの打上げに先立ち、スペースシャトルを利用して、操作系を含むJEM RMSの子アームの飛行実証試験を行い、その成果をJEM RMSの開発に反映するとともに、その経験をJEMの開発・運用に反映することを目的としている。

このロボットアームの実証試験では、シャトル荷物室に搭載したJEM RMS子アームと同等の機能・性能を有するMFDロボットアームを、シャトル船内から搭乗員がハンドコントローラーを用いて操作することにより、

- 1) ロボットアームの微小重力環境下での機能・性能の実証試験、
 - 2) ロボットアーム操作に係る人間機械系の実証試験、
 - 3) ORUの脱着や、ドア開閉の実証試験
- を行うことを目的としている。

また、MFDロボットアームに係る飛行実証試験に加えて、将来の有人宇宙施設に搭載されるロボットアームの効率的な運用に資することを目的として、スペースシャトルに搭載されたM

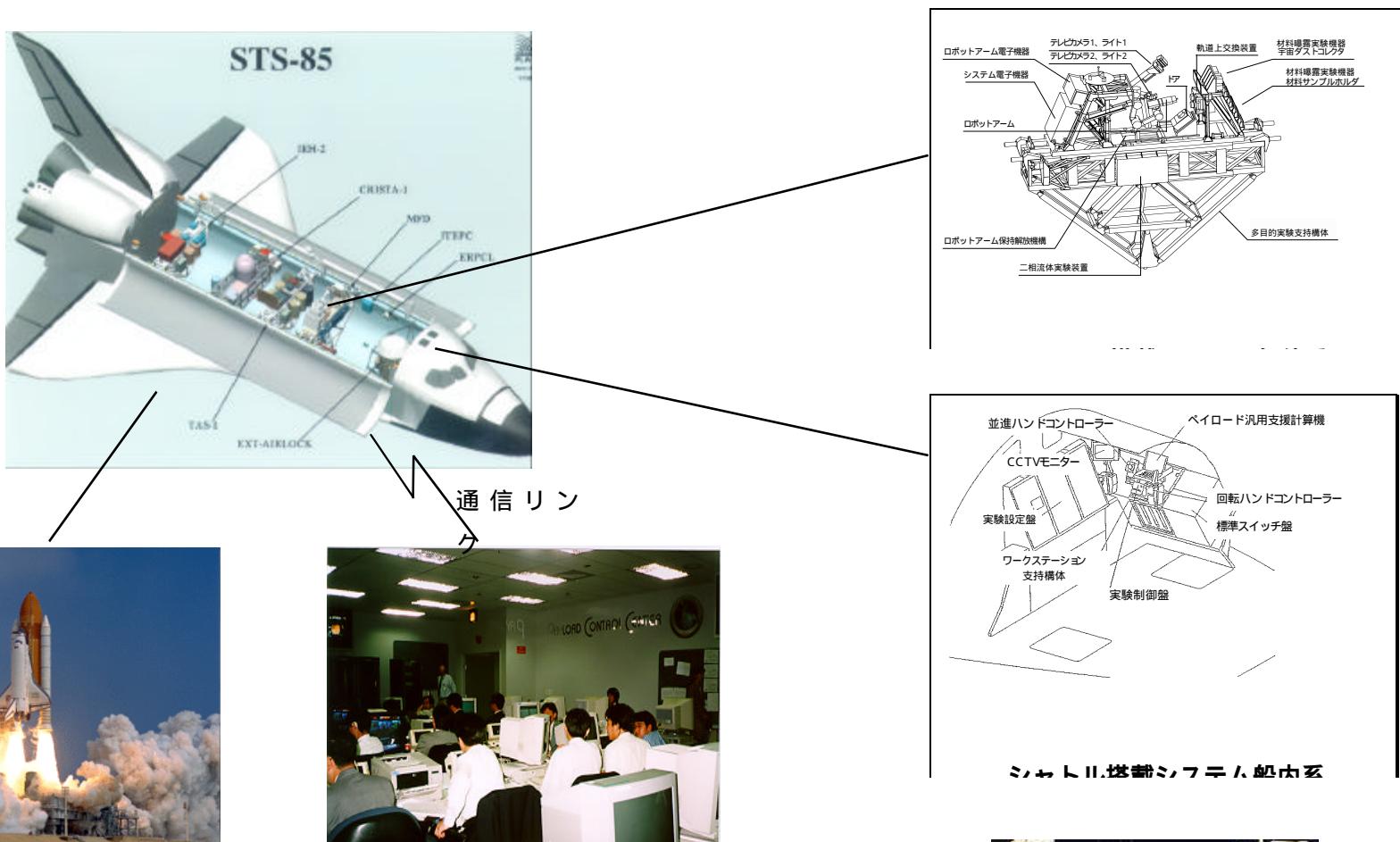
Dロボットアームを地上から遠隔操作するというロボットアーム地上遠隔操作実験を行う。併せて、数少ない打上げ機会を有効に利用するとの観点から、相乗り実験として、材料曝露実験と二相流体ループ実験を行う。

3 . MFDシステム

MFDシステムの概念を図3-1に示す。MFDプロジェクトにおいて開発したMFDシステムは、シャトル搭載システムと地上運用システムとから構成される。

3.1 シャトル搭載システム

MFDシャトル搭載システムは、スペースシャトルの荷物室に搭載される船外系と、後部飛行デッキ（A FD : Aft Flight Deck）に搭載される船内系から構成される。

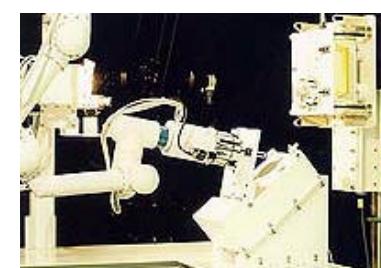


ケネディ宇宙センター

地上支援装置 (GSE)

ジョンソン宇宙センター
/ バイロード運用管制センター (POCC)

飛行運用管制システム
MFD シミュレータ搭乗員訓練システム



筑波宇宙センター

図3-1 MFDシステムの概念

3.1.1 船外系機器

船外系は、JEM RMSの子アームと同等の機能性能を有するMFDロボットアームを中心として、その操作対象であるORUやハンドル付きドア、打上げ及び帰還時にロボットアームを保持するアーム保持解放機構（AHRM : Arm Hold and Release Mechanism）、ロボットアーム操作に必要とされる視覚情報を提供するためのテレビカメラやライト等の実験機器と、それらを搭載するNASAマーシャル宇宙飛行センター（MSC : Marshall Space Flight Center）から借用した多目的実験支持構体（MPESS : Multi Purpose Experiment Support Structure）から構成される（図3-2参照）。

ロボットアームGC実験に係るシャトル搭載システムは、上述のロボットアーム実証試験に係るシャトル搭載システムの一部を改修して構成した。

相乗り実験に係るシャトル搭載システムは、TPFLEXに係るもののがMPESSに、ESEMMに係るもののがORU支持構体に搭載された。

以下に、船外系を構成する主要機器であるロボットアームや、AHRM、ORU、ドアについて、安全設計を含む技術的特徴について述べる。また、システムレベルでの技術的特徴として、有人ミッション特有の安全性要求に対応するためのジェティソン（軌道投棄）機構、船外活動（EVA : Extra Vehicular Activity）対応設計、及び衝突耐性構造設計について述べる。

（1）ロボットアーム

全長約1.5mのMFDロボットアームは、6つの関節（肩関節のロール／ピッチ、肘関節のピッチ、手首関節のロール／ピッチ／ヨー）と2つのブームから構成され、3次元6自由度運動が可能である（図3-3参照）。

ロボットアームの先端にはツールが装着されていて、ORU、及びドアといった対象物を掴むことができる。対象物の把持は、外側に開く3本の指によって対象物に取り付けられたツールフィックスチャをラッチすることにより行われる。また、ツール内部のトルクドライバーにより、ORUを脱着するためのボルトを緩めたり、締めたりすることができる（図3-4参照）。このトルク供給機構には、過大なトルクによるボルトの損傷を防ぐためにメカニカルトル

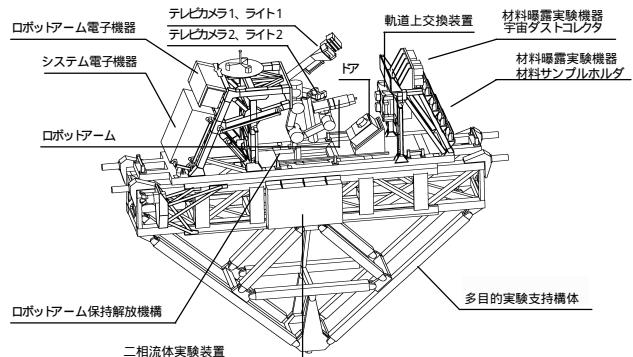


図3-2 シャトル搭載システム船外系

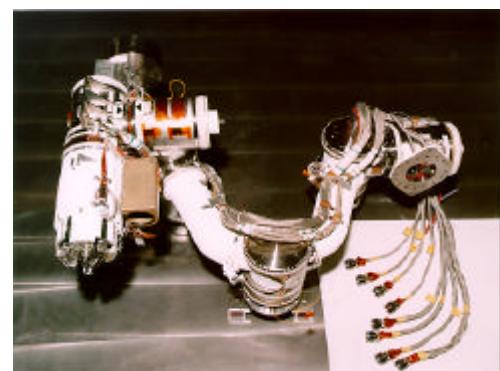


図3-3 ロボットアーム

ルクリミッタが装備されている。更にMFDロボットアームは特徴的な機能として、対象物との接触等により、ロボットアームが対象物に印可する力やトルクを力／トルクセンサにより検出し、その力やトルクを適切な値にするべくロボットアーム先端部を自動制御するといった機能（コンプライアンス制御機能）を有している。ロボットアームの関節やツールの操作は、AFDからハンドコントローラー等を用いて行われる。船内系機器からのアーム制御信号は、船外系機器であるアーム制御コンピューター（ACC：Arm Control Computer）を経由して、アームエレクトロニクス（AE：Arm Electronics）に送信され、そこで関節のモータの駆動電流に変換される。

また、ロボットアームの操作は、船外系機器である2つのカメラ、及びロボットアームの先端に取り付けられた手首カメラからの画像を見ながら行われる。特に、ロボットアームが対象物に接近したところでは、ロボットアームの先端に取り付けられた手首カメラの画像が使用される。

ロボットアームの関節には、ブレーキが装備されており、ロボットアームの姿勢保持、及び緊急停止が可能である。このブレーキは、電磁石、及びスプリング等から構成され、電源オフの時に作動するタイプのものである。緊急時には、搭乗員が緊急停止スイッチを操作することにより、ロボットアームへの電源供給が遮断され、ブレーキが作動しロボットアームが停止する。また、関節には、機械的なストッパーが装備されていて、それ以上は動かないようになっている。

ロボットアームは、機器等の故障で操作不能となった場合、搭乗員のEVAにより、AHRMに収納できるように設計されている。具体的には、ロボットアームの関節は、EVAリリースボルトを緩めることにより、容易に動かすことができる。また、関節には、収納状態を示すマーカーが付けられていて、これらをEVA作業で合わせることによりロボットアームを帰還のための姿勢にることができる。

（2）ロボットアーム保持解放機構（AHRM：Arm Hold and Release Mechanism）

AH RMは、シャトルの打上げ、及び帰還時にロボットアームの手首部を保持する機器である。ロボットアームは、手首部の他に肘部がVブロックで保持される。ロボットアームは、このAH RMとVブロックの保持により、シャトルの打上げ、及び帰還時の荷重に対して耐えることができる（図3-5及び図3-6参照）。

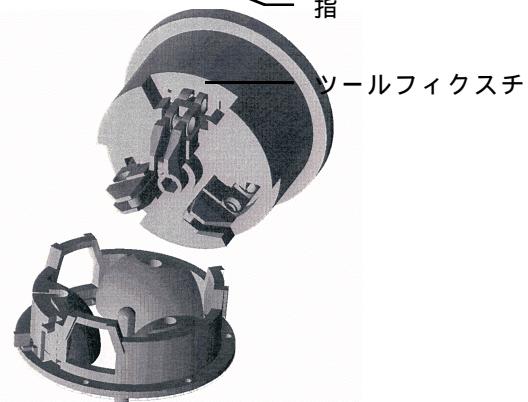


図3-4 ツールとツールフィクスチャ

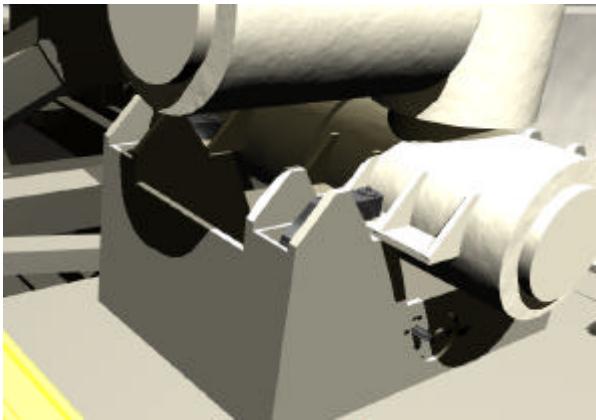


図 3 - 5 A H R Mによるアームの固定イメージ

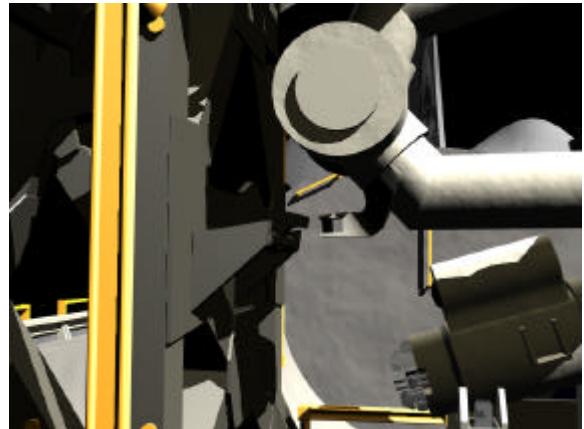


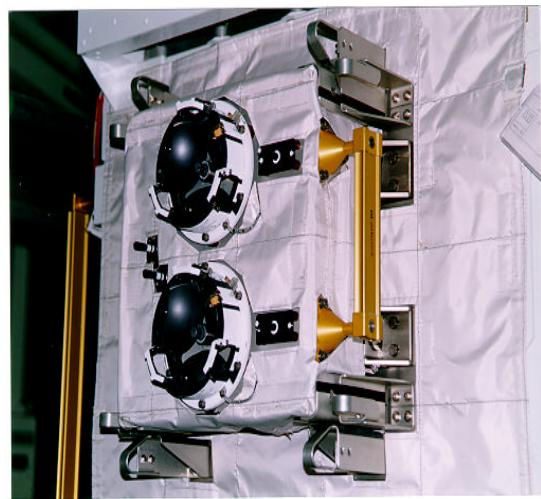
図 3 - 6 アーム肘関節とVブロック

A H R Mは、モータで駆動される4つのラッチにより、ロボットアームを保持したり、保持状態から解放したりすることができる。なお、A H R Mのモータを含む電気系は、ミッション成功や安全の観点から冗長構成となっている。A H R Mには、内部にマイクロスイッチが装備されていて、この信号によりロボットアームの保持や解放動作を確認することができる。また、ロボットアームを確実に保持するために、ロボットアームがラッチの保持可能領域にあることを確認した上で、ラッチを駆動する。この確認にもA H R M内のマイクロスイッチを使用している。A H R Mは、故障等に備え、E V Aによりラッチを駆動し、ロボットアームを保持・解放することができる。この作業には、E V Aツール（E V A専用工具）が使用される。また、ラッチ状態（保持／解放）の確認のために、E V Aのためのマーカーが付けられている。

（3）軌道上交換装置（O R U : Orbital Replacement Unit）

O R Uは、J E Mの軌道上交換装置を模擬したもので、ロボットアームを用いて軌道上で脱着される。このO R Uは、J E MのO R Uに比べると脱着機構は同じであるものの、寸法、及び重量等は小さめである。

O R Uは、O R Uボックス、O R Uマウントプレート、及び2つのツールフィクスチャから構成されている。O R Uボックスは、2本のボルトでO R Uマウントプレートに固定され、打上げられる（図3 - 7参照）。軌道上試験では、ロボットアーム先端に取り付けられているツールの3本の指がO R Uボックス上のツールフィクスチャを掴み、ツール内のトルクドライバーによってO R UボックスをO R Uマウントプレートに固定しているボルトを緩める。O R Uボックスを掴む際のロボッ



トアーム先端の位置決め操作は、主にORU上に装着されたターゲットマークをアーム先端に取り付けられているテレビカメラで取得した画像をCCTV(Closed Circuit Television)モニターで見ながら行われる。この際、ロボットアームの各関節に内蔵されている磁気エンコーダのデータを用いて算出されるアーム先端位置情報が参照される。ORUボックスを取り外す際は、2本のボルトを緩めた後、ロボットアームを引き抜く方向に操作する。また、ORUは、ボルトによる固定前に、スプリングを利用したソフトドック機構によって仮固定ができる。ORUの仮固定状態、及びボルトによる固定状態は、ORU内のマイクロスイッチの信号により確認することができる。帰還時のORUボックスの固定は、打上げ時同様2本のボルトを規定数だけ回転させることによって行われる。2本のうち1本のボルトの締結が困難な場合は、1本のボルトだけでも帰還することが可能である。いずれの場合もプリロードはかけない使い方であるが、これは、オバートルギングを2故障許容で防止する手段がなかったために安全の観点から取られた方法である。

更にORUでは、EVAによりボルトを締めて、ORUボックスを固定することができる。ボルトを回転させるためには、EVAツールが使用されるが、ボルトの締め付け状態が分かるように、ビジュアルインジケータが付けられている。このビジュアルインジケータは、船内のCCTVモニターでも確認できる。また、万が一ツールがツールフィックスチャを掴んだ状態のままツールの操作ができなくなった場合でも、EVAにより安全な状態にすることができる。先ず、ORUをツールフィックスチャから取り外し、ORUはORUマウントプレートに、ツールフィックスチャはロボットアームツールに固定する。次に、ロボットアームをAHRMに固定することにより、帰還に対して安全な状態にすることが可能である。

(4) ドア

ドアは、ドアパネル、ドアパネルマウント、及びツールフィックスチャから構成されている(図3-8参照)。ドアパネルは、ロータリーラッチ機構により、ドアパネルマウントに固定され、打上げられる。軌道上試験では、ORU同様、ロボットアームがツールフィックスチャを掴み、ロータリーラッチを解除する。ロータリーラッチは、ロボットアームの手首ロール関節を回転させることによって解除、及び固定することができる。ロータリーラッチを解除した後、ロボットアームを用いてドアパネルの開閉試験が行われる。

試験終了後、ドアパネルを固定するが、機器の故障等でロータリーラッチによる固定ができなくても、安全に帰還することが可能なようにドアパネルに対してバランス設計が採用されている。また、万が一ツールがツールフィックスチャを掴んだ状態のままツールの操作が不能となっても、ORUと同様、EVAによりロボットアームとドアパネルを分離させることができ、ロボットアームと



図 3 - 8 ドア

ドアパネルをそれぞれ A H R M とドアパネルマウントに固定することにより、帰還に対して安全な状態にすることが可能である。

(5) ジェティソン機構

シャトルの荷物室に搭載される船外系機器は、万が一機器等の故障が生じても、搭乗員やシャトルの安全な帰還を妨げるものであってはならない。M F D シャトル搭載システムの場合、ロボットアームの不具合等により、安全帰還のための要求が満たされていない場合には、時間がある場合は E V A により修理して、時間がない場合は M P E S S を含む船外系を宇宙空間に放出(ジェティソン : Jettison)することにより、シャトルの安全帰還を妨げないように設計されている。例えば、ロボットアームが故障等により保持解放機構への収納・固定が困難な場合、ロボットアームは着陸時の荷重に耐えられないため、E V A またはジェティソンが必要になる。ジェティソンのために、M P E S S とシャトルとを結合する部分にはシャトル側で準備された分離機構が採用されており、放出の方法としては、分離機構解放後に、シャトルが後退していくバックアウェイ(Back-away)方式と、シャトルのロボットアーム(S R M S : Shuttle Remote Manipulator System)により船外系を把持したのち分離機構を解放し放出する R M S 放出方式が可能である。また、ロボットアーム自体に不具合が無い場合でも、シャトル側の不具合により緊急帰還要請が出され、かつロボットアームを A H R M に格納する時間がない場合においても、バックアウェイ方式でジェティソンすることが可能性となっている。

(6) E V A 対応設計

船外系実験機器は、上述したように、試験中に想定されるロボットアーム等の故障に備え、ロボットアームや、A H R M 、O R U 、ドアを搭乗員の E V A により安全な状態に戻すことができる。また、ミッション成功のために、A H R M の故障に備え E V A によりロボットアームを解放できるように設計されている。これらの E V A を可能とするために、M F D シャトル搭載システムには E V A 用のハンドホールドや携帯用足拘束具取付けのためのソケットが取り付けられている。さらに、ロボットアーム、O R U 、及びドアには、それぞれの安全状態を確認するためのビジュアルマーキングが施されている。安全確保の手段として、時間がある場合は E V A が、時間がない場合にはジェティソンが採用されることとなる。

上述のジェティソン機構やEVA対応設計については、NASAの協力の下で行われた。特に、EVA対応設計については、その設計の妥当性を確認するためにNASAジョンソン宇宙センター（JSC：Johnson Space Center）内にある無重力環境試験施設（WETF：Weightless Environment Training Facility）で水槽試験を実施した（図3-9参照）。



図 3 - 9 WETFでのEVA対応設計確認試験

（7）衝突耐性構造設計

ロボットアームの不具合によっては、ロボットアームが暴走し、ロボットアーム自体や、これに把持されたORUが、船外系実験機器に衝突する可能性がある。この衝突によって構造部材の強度が低下し、帰還時の荷重に耐えられなくなったり、飛散物が搭乗員あるいはシャトルに損傷を与える可能性がある。ロボットアームの衝突に関する危険を制御する方法としては、本来衝突が起きないような設計とすべきであるが、MFDの場合これが困難であったため、衝突しても帰還荷重に耐えられ、かつ破片が生じないような衝突耐性構造設計が採用された。この設計に当たっては、ワーストケースとして、電源系が故障した場合の最大電圧によるアームの暴走速度を基にアームの衝突時の衝突荷重を求めた。この衝突荷重によって安全が脅かされる箇所に対して、十分な構造強度を持たせることで対応した。また、衝突により飛散物が発生する可能性のあるテレビカメラやライト等については、プロテクターを取り付けることにより対応した。

3.1.2 船内系機器

船内系は、ロボットアームを操作するためのハンドコントローラを中心として、ハンドコントローラ電子機器（HCEL：Hand Controller Electronics）、実験パラメータ等を設定する実験設定盤（ESP：Experiment Setup Panel）及び実験制御盤（ECP：Experiment Control Panel）、ロボットアームの動作状況をモニターするCCTVモニター、テレメトリデータ等を表示するペイロード汎用支援計算機（PGSC：Payload General Support Computer）、それらを支持するワークステーション支持構体等の機器から構成される（図3-10参照）。

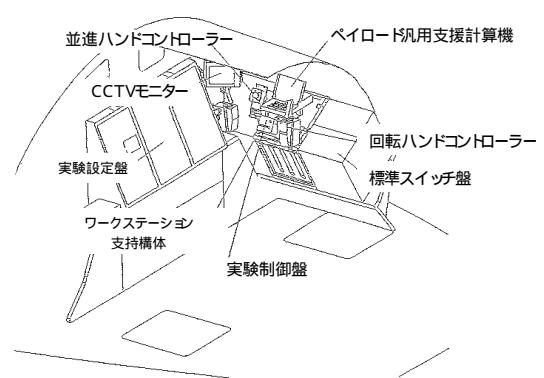


図 3 - 10 シャトル搭載システム船内

ワークステーションを構成する並進／回転用ハンドコントローラー、PGSC、ECP、及びワークステーション支持構体は、打上げ時／帰還時は後部飛行デッキのワークステーションコンテナーに、PGSCは中部デッキロッカーに収納される。このワークステーションは、軌道上で搭乗員により組立てや、収納が行われる（図3-11及び図3-12参照）。



図3-11 ワークステーション
ワークステーションの収納状態



図3-12 ワークステーションの収納状態

3.2 地上運用システム

ロボットアーム飛行実証試験に係る地上運用システムは、搭乗員のロボットアームの操作訓練に使用する搭乗員訓練システム、射場運用作業に使用される射場地上支援装置（GSE：Ground Support Equipment）、シャトル搭載システムからのデータを処理するための飛行運用管制システムから構成される。搭乗員訓練システムは、ロボットアームの操作を原寸大の模擬アームを用いて模擬するハードウェア・トレーナーと、コンピュータグラフィックを用いてロボットアームの動きを模擬するグラフィックシミュレーターから構成される。前者は宇宙開発事業団（NASDA：National Space Development Agency of Japan）筑波宇宙センターに設置され、後者は、NASA JSCに設置され、搭乗員の訓練に供された。射場GSEは、ロボットアームの機能確認試験においてロボットアームを吊ってバランスをとるアーム展開試験支援装置等を含む機械的地上支援装置（MGSE：Mechanical GSE）や、試験用テレメトリ復調機能やシャトル模擬電源供給機能等を持つ船外系試験装置等を含む電気的地上支援装置（EGSE：Electrical GSE）から構成される。これらの射場GSEについては、国内でシャトル搭載システムのシステム試験に使用されたGSEの一部が活用された。

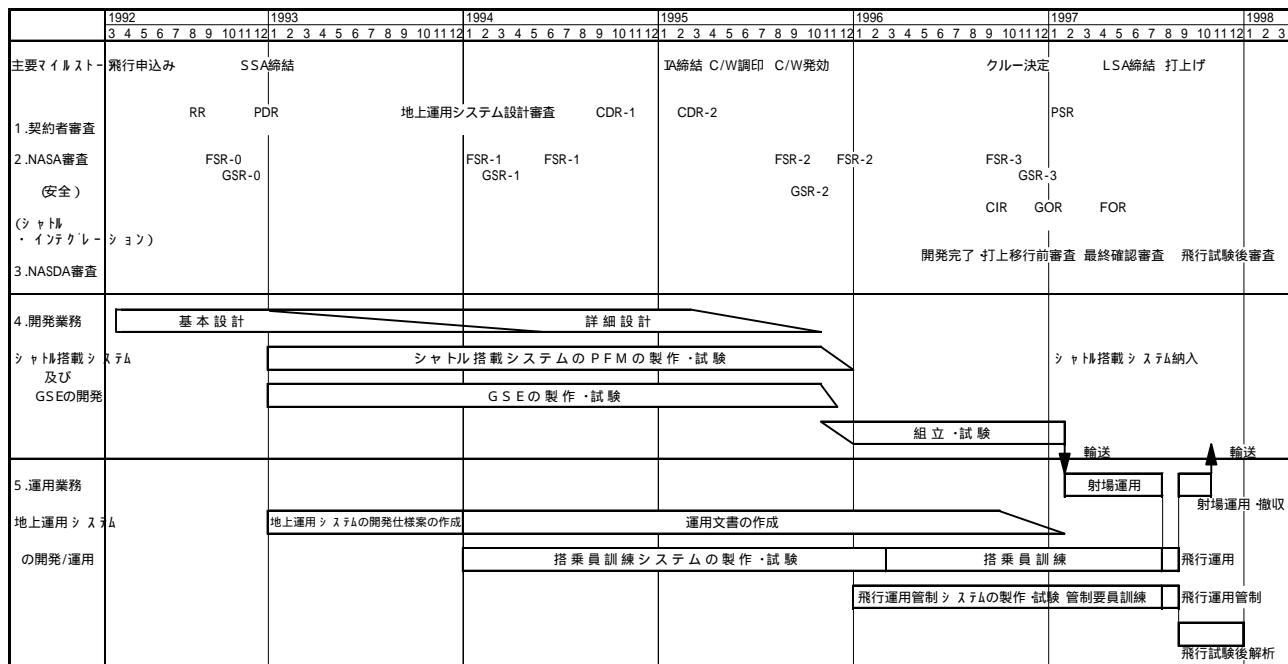
飛行運用管制システムは、テレメトリ・データ処理装置等から構成され、NASA JSCのペイロード運用管制センター（POCC：Payload Operations Control Center）において実時間の飛行運用管制に供された。

G C 実験に係る地上運用システムは、アーム軌道生成や軌道データの出力機能等を有する G C 地上装置と、上述の飛行運用管制システムやグラフィックシミュレーター等から構成され、 N A S A J S C P O C C において実時間の G C 実験に供された。

相乗り実験の一つである T P F L E X については、独自の搭乗員訓練装置や、射場 G S E 、飛行運用管制システム付加装置が開発された。

4 . M FD プロジェクトのスケジュール

M FD システムの開発・運用業務の M FD プロジェクトのマスタースケジュール(実績)を図



RR(Requirement Review) : 要求審査
PSR(Pre-Shipment Review) : 出荷前審査
CIR : Cargo Integration Review
GSE : Ground Support Equipment
PMCR : Payload Management Countdown Review
LSA : Launch Service Agreement
FSR-0/FSR-1/FSR-2/FSR-3 : NASA飛行安全審査

PDR(Preliminary Design Review) : 基本設計審査
GOR : Ground Operations Review
FCR : Flight Certification Review
FRR : Flight Readiness Review
SSA : Shuttle Service Agreement
PRR : Payload Readiness Review
GSR-0/GSR-1/GSR-2/GSR-3 : NASA地上安全審査

CDR(Critical Design Review) : 詳細設計審査
FOR : Flight Operations Review
LRR : Launch Readiness Review
L-2 : Launch minus 2-day Review
IA : Interim Agreement
C/W : Cross-Waver協定

4 - 1 に示す。

図 4 - 1 M FD プロジェクトのマスタースケジュール(実績)

M FD プロジェクトに係る開発・運用業務を効率的、かつ確実に遂行するために、各開発・運用段階の開始に当たって、図 4 - 1 に示す審査等を行い、当該業務が計画書及び仕様書等に沿って適切に実施されていることを段階的に確認した。さらに、 M FD プロジェクトの成果を効果的に J E M R M S の開発に反映することが重要であることから、打上げ目標時期が極力維持できるように、開発運用業務の進捗状況を把握し、不断の見直しを行った。

M FD シャトル搭載システムの設計は 1992 年に開始され、 1995 年には同設計が終了した。これと並行して製作試験が行われ、 1996 年 12 月に国内での検証試験が全て終了し、 1997 年 1 月に射場である N A S A K S C に搬入された。その後、輸送後点検、機能性能確認

試験が行われ、NASAへ引き渡され、NASAのシャトル模擬試験設備（CITE：Cargo Integration Test Equipment）とのインターフェース試験を経て、1997年5月にスペースシャトルディスカバリー号の荷物室に搭載され、同年6月にディスカバリー号本体とのインターフェース確認試験を実施した。

ディスカバリー号 / STS - 85 は 1997 年 8 月 7 日に予定通りに NASA KSC より打ち上げられ、同 19 日に KSC に無事着陸しミッションを終了した。なお、KSC の天候の都合で着陸は 1 日延期された。この間、相乗り実験を含め計画されていた全ての試験・実験が成功裏に実施された。

着陸後は、シャトル荷物室からシャトル搭載システムの取り外し作業が行われ、飛行後の機能性能確認試験等が実施され、日本に輸送された。その後、クルーに対する質問（デブリーフィング）を含む飛行試験後解析が行われるとともに、JEMへの反映事項の識別が行われた。

5 . 検証試験

シャトル搭載システムを構成するコンポーネントや GSE の製作・試験は、1993 年から開始され、1996 年初頭にはシャトル搭載システムを構成する主要サブシステムであるロボットアーム系の製作・試験が終了し、システムへ組み込まれ、1996 年 5 月からはシステム試験が開始された。システム試験では、検証の目的に応じて相乗り実験機器についても組み込まれた状態で実施された。

MFD システムの開発においては、JEM で開発された要素技術は利用できたものの、エンジニアリングモデル無しでいきなりフライトモデルが開発された。このため、フライトモデルのシステム検証試験において改修を必要とする不具合が多発した。こうした不具合に対しては、システム試験を中断してソフトウェアやハードウェアの改修を行い、その後改修後試験が行われた。改修による試験スケジュールの遅れを取り戻すために、検証試験の順番を組み替えたりして射場（KSC）への搬入予定日を確保した。

一方、GC 実験や相乗り実験に係る GSE を含めた地上運用システムは、1996 年に製作・試験が終了し、搭乗員訓練や飛行運用管制要員訓練に供された。

シャトル搭載システムの基本的な試験のフローとしては、最初にロボットアームの制御ソフトウェアの確認のための試験（静的閉ループ試験、動的閉ループ試験）を行い、その後、環境試験（熱真空・熱平衡試験、音響試験等）を行った。各種環境試験の前後には動作確認を兼ねた機能試験を実施した。また、システム試験に際しては、可能な限り軌道上と同等の環境条件を設定することに努めた。

以下に、MFD 特有な検証試験の概要について述べる。

（1）電磁適合性（EMC : Electromagnetic Compatibility）試験

EMC 試験は、軌道上でさらされる各種電磁環境下においても機器が正常に作動することを確認するものである。試験に際しては、実際にロボットアームを作動させ、ロボットアームの発生するノイズや、外部からのノイズに対する耐性を測定する必要があるが、システムレベルでロボ

ットアームの全関節を動かしながらの試験が困難なため、ロボットアーム作動下でのEMC試験は、ロボットアーム単体にとどめた。ロボットアーム以外のコンポーネントについてもコンポーネント単体でEMC試験を行い、それらの結果を足し合わせて総合システムとしてのEMC特性として評価した。基本的には各コンポーネント間に、EMC特性についてお互いに干渉し合う要素がないため、単純にコンポーネントデータを足し合わせた値、または最も耐性の低いコンポーネントの値をシステムのEMC特性値とした。但し、各コンポーネントの電源投入／切断時の過渡電圧の測定は、システムハーネスのインピーダンスが影響するため、これについてはシステムレベルで測定した。

(2) 動的閉ループ試験

動的閉ループ試験は、ロボットアームを含めたライトモデルを用いた、ロボットアーム制御プログラムとロボットアームの機能・性能を確認するための試験である。この試験では、二次元定盤上でエアペアリングによってロボットアームを浮かせることによって重力の影響を補償しつつ、水平面内でロボットアームが操作された。図5-1に試験コンフィギュレーションを示す。但し、試験コンフィギュレーションの制約上、ロボットアームは水平面内でしか動作できないため、ロボットアーム制御プログラムの一部を変更して二次元動作に限定して試験が行われた。

(3) 機能試験

ロボットアームをアーム支持構体に取り付けた状態でMFDシステムごと定盤の上に設置して、動的閉ループ試験と同様にロボットアームにエアペアリングを取り付け、重力補償を施しロボットアームを水平面内で動作させてロボットアームの動作や、ORUの着脱、ドアの開閉、AHRMの保持解放、ライトの照度等の、各機能の確認並びにテレビカメラの視認性の確認を行った。

また、熱真空・熱平衡試験後のMFDシステムの健全性を確認するための機能試験では、吊り具を使用してロボットアームをバランス良く保持し、若干ではあるがロボットアームを三次元的に動かし、ロボットアーム及びAHRMの機能が正常であることを確認した。図5-2に試験コンフィギュレーションを示す。なお、この試験コンフィギュレーションは、射場(KSC)での機能確認試験と同一であり、射場での確認試験の設備・手順の検証も兼ねていた。

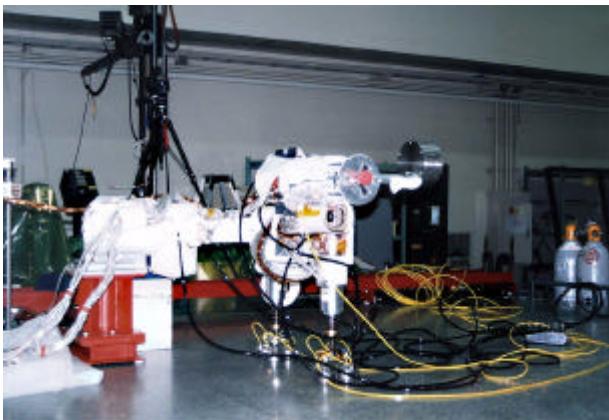


図 5 - 1 DCLT 試験コンフィギュレーション

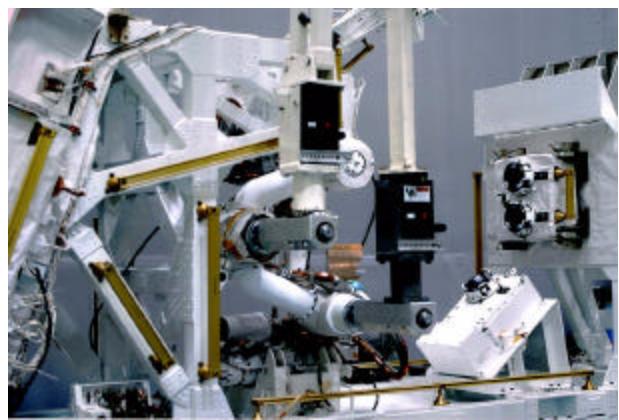


図 5 - 2 機能試験コンフィギュレーション

6. 射場運用

射場運用は、M F D シャトル搭載システムの各機器を貨物専用機で日本から米国 N A S A K S C へ輸送する作業、射場 (K S C) での打上げ準備作業、及び帰還後の機能性能確認作業と日本への輸送作業に大別できる。射場での打上げ準備作業としては、実験機器の機能性能確認試験、M P E S S への搭載、シャトルとのインターフェース試験などが行われた。

以下に、M F D の射場運用に係る作業の概要を述べる。

(1) N A S A / K S C への輸送

射場運用のために E S E M と T P F L E X の各相乗り実験機器を含むシャトル搭載システム、及びその射場運用に供される機械的 / 電気的 G S E が輸送された。それぞれ専用コンテナや木箱に収納され、国内輸送はトラックによる陸送、日本・米国間は空輸、米国内は再びトラックによる陸送により、1997年1月に K S C へ搬入された。日米間の空輸については、船便と比較して航空便が輸送中の振動条件に優れること、輸送日数が少ない事を考慮して採用されたものである。輸送ルートとしては、成田・ニューヨーク間が空輸、ニューヨーク・K S C 間が米国内陸送とされ、途中アトランタで通関手続きが行われた。

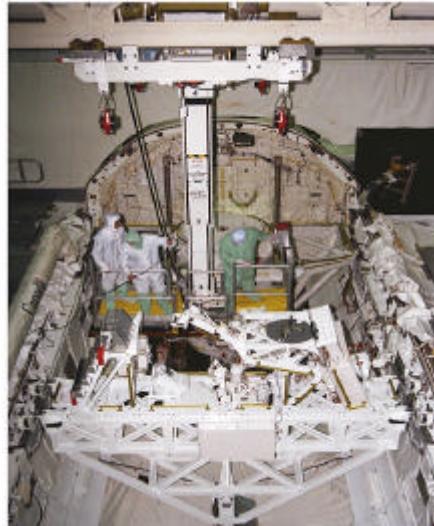
(2) 打上げ準備作業

射場 (K S C) に輸送された M F D シャトル搭載システムは、N A S A の宇宙ステーション試験設備 (S S P F : Space Station Processing Facility) に搬入された。S S P F は、宇宙ステーションの組立・検証作業のために K S C に新設された施設である。この S S P F では、先ず N A S D A が主体となって、輸送後の開梱、輸送後の点検、E S E M 材料サンプルホルダー等の取り付け、及び T P F L E X や G C 実験を含むシャトル搭載システムの機能性能確認試験を実施した。この試験では、電気性能試験、及びシステム機能試験を行い、輸送によるシャトル搭載システム

の損傷等が無いことを確認した。

NASAによるシャトル搭載システムの組立及び機能確認後、MFDシャトル搭載システムはNASAに引渡され、船外系実験機器はMESSに搭載された。その後、CITEを用いてシャトルとのインターフェースの確認が行われた。この試験で、シャトルと電気的に結合するPDA (Payload Disconnect Assembly) ケーブルの配線やシャトル電源ケーブルの配線に誤りがあることが発見されたため、射場に作業者を派遣して必要な修復作業を行った。CITEでのインターフェースの確認後、実際のシャトルの荷物室に搭載するために、MFDシャトル搭載システムは、SSPFからオービターコンピュータ整備施設 (OPF : Orbiter Processing Facility) に運ばれた。OPFでは、スペースシャトルディスカバリー号の荷物室への搭載後、シャトルとMFDシャトル搭載システムとのインターフェースの確認試験が実施された（図6-1参照）。

こういった確認試験の実施後、打上げの約2ヶ月前の1997年6月中旬にはMFDシャトル搭載システムの打上げ準備が整った。なお、ESEMについては曝露実験材料等に対する地上環境でのコンタミネーションを防止する観点からサンプルカバーが取り付けられており、同カバーは打上げ直前の8月4日に射点上で取り外しが行われた。



（3）帰還後作業及び日本への輸送

ディスカバリー号は12日間の軌道上運用を終えた後、1997年8月19日7時7分（米国東部夏時間）にKSCへ帰還した。着陸後は、再びOPFに運ばれ、MFDシャトル搭載システムの取り外し作業が行われた。取り外されたMFDシャトル搭載システムの各機器は、整備点検棟 (O&C : Operation & Checkout Building) に運ばれて、船外系実験機器がMESSから取り外された。なお、これに先立ち、ESEMの材料サンプル及びダストコレクターについては、写真撮影及びサンプルカバーの取り付けが行われた。これらの作業終了後、MFDシャトル搭載システムはNASAからNASDAに返還された。NASDAは、返還後、O&C内でシャトル搭載システムの飛行後機能性能確認試験を行った。この試験は、打上げ準備作業で実施した機能性能確認試験と同等の試験を行うことにより、MFDシャトル搭載システムが打上げ、軌道上運用、帰還によって損傷を受けていないことを確認すること目的として行われた。

KSCでの確認試験終了後、MFDシャトル搭載システムを梱包して、日本へ輸送した。輸送にあたっては、米国からの輸出手続き、日本への再輸入手続きが行われ、筑波宇宙センターに輸送された。輸送方法及び輸送ルートは、米国への輸送時と基本的には同じであった。

7. 飛行運用・飛行運用管制

M F D シャトル搭載システムを搭載したスペースシャトルディスカバリー号 / S T S - 8 5 は、1 9 9 7 年 8 月 7 日 1 0 時 4 1 分（米国東部夏時間）N A S A K S C より打上げられ、同 1 9 日 7 時 7 分に K S C に着陸した。この間、M F D ロボットアームに係る試験及び実験は、飛行 2 日目から 9 日目の間の計 5 日間にかけて実施され、N A S A J S C の試験や実験時間の延長等に係る協力があったこともあり、以下のとおり予定していた全ての試験や実験が成功裏に実施された。

（1）ロボットアーム飛行実証試験

ロボットアーム飛行実証試験に係る飛行運用は、シャトル搭乗員が A F D 上で、テレビモニターを見ながら、ハンドコントローラーを用いて、荷物室に搭載されたロボットアームを操作して、O R U の脱着やドアの開閉を行うといった形で実施された（図 7 - 1 及び図 7 - 2 参照）。

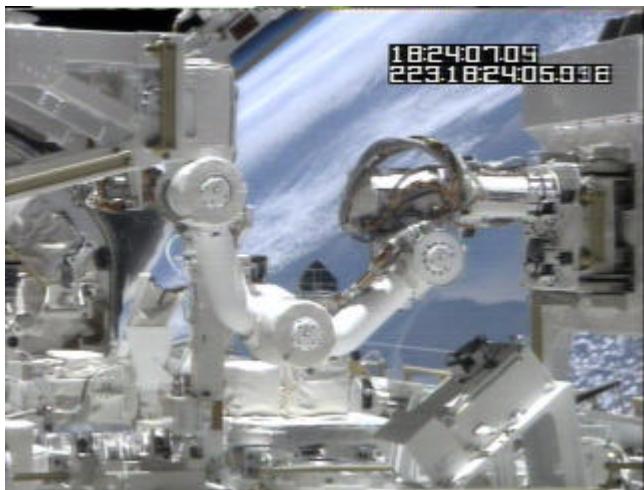


図 7 - 1 O R U の脱着

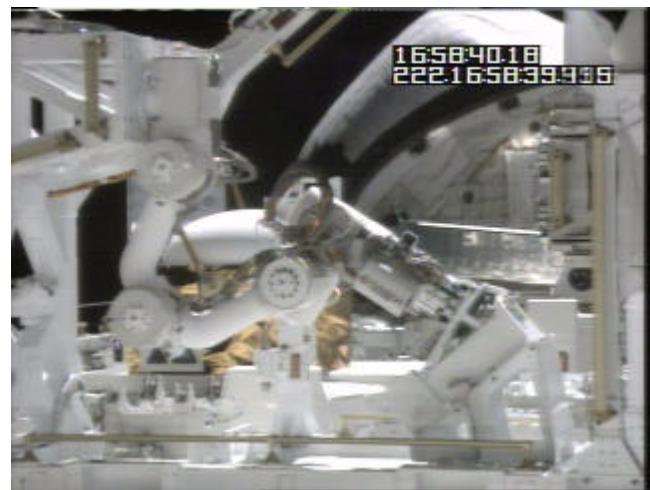


図 7 - 2 ドアの開閉

ロボットアームによるO R U の脱着や、ドアの開閉といった実証試験を始めとして、予定していた全ての試験が実施され、ロボットアームの機能性能や、人間機械系に係る貴重なデータが取得された。ロボットアームがO R U を把持する際の接触動作において、コンプライアンス制御という自動制御と、ハンドコントローラによる手動制御とが矛盾するといった現象を始めとして、いくつかの不測の現象が散見されたが、搭乗員の操作を地上から支援したことにより、予定していた全ての試験が成功裏に実施された。

（2）ロボットアーム地上遠隔操作(G C) 実験

航空宇宙技術研究所、通信総合研究所、及び東京工業大学との共同研究に係る実験を含め、予定されていた実験は全て成功裏に実施され、有人宇宙システム上のロボットアームの地上遠隔操作(G C) に係る貴重なデータが取得された。なお、有人宇宙システム上のロボットアームを地上から遠隔操作するという実験は世界初のものであった。

(3) 相乗り実験

TPFLExについては、流体ループへの気泡等の混入に係るトラブルが発生したが、当初予定していた4~8回の実験に対し、10回の実験が実施され、微小重力下での二相流体による熱制御に係る貴重なデータが取得された。

また、SEMについては、材料サンプルホルダーと宇宙ダストコレクターをシャトルの速度ベクトルに向ける時間（累積）が、当初の目標40時間に対して結果的には約54時間となり、宇宙環境下での材料の劣化特性データの取得や宇宙ダストの収集にとって良好な環境が確保された。

8. おわりに

MFDプロジェクトは、JEMの打上げに先立ち、スペースシャトルを利用して、JEM RMS子アーム（操作系を含む。）と同等の機能・性能を有するMFDロボットアームの飛行実証試験を行い、その成果をJEMRMSの開発に反映するとともに、その経験をJEMの開発・運用に反映することを目的としたものであるが、MFDシステムの開発や、打上げ前の運用が適切に行われ、去る1997年8月にKSCから打上げられたスペースシャトルディスカバリー号 / STS-85を利用してMFDロボットアームの飛行実証試験が成功裏に実施された。

MFDロボットアームの実証試験では、シャトル荷物室に搭載されたMFDロボットアームを、シャトル船内から搭乗員がハンドコントローラーを用いて操作することにより、ロボットアームの無重量環境下での機能・性能の実証試験や、ロボットアーム操作に係る人間機械系の実証試験、ORUの脱着や、ドア開閉の実証試験が成功裏に実施された。そして、クルーに対する質問（デブリーフィング）を含む飛行試験後解析が行われ、その成果の評価が適切に行われるとともに、その成果のJEMRMS設計・開発への反映事項や、実時間飛行運用等で得られた経験のJEM開発・運用への反映事項が識別された。

併せて、将来の宇宙ロボット技術の研究開発に資するための技術実験として、MFDロボットアームの地上遠隔操作実験が成功裏に実施され、その成果の評価が適切に行われた。また、数少ない打上げ機会を有効に利用するとの観点から、相乗り実験として、材料曝露実験と二相流体ループ実験が実施され、実験実施に係る成果の評価が適切に行われた。

よって、MFDプロジェクトの目的は達成された。