

MFD 飛行運用とその成果

宇宙開発事業団 長友正徳、佐藤隆久、原田 力、和田幸司
久留靖史、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(Manipulator Flight Demonstration; MFD)は、国際宇宙ステーションの日本の実験棟(Japanese Experiment Module; JEM)の打上げに先立ち、JEMのマニピュレーター(JEM Remote Manipulator System; JEMRMS)の子アームと同等のロボットアームを宇宙環境にて試験し、ロボットアームの機能・性能の実証及び技術データを取得するもので、1997年8月7日に打上げられ8月19日に帰還したスペースシャトルディスカバリー号(Space Transportation System; STS -85)を利用して実施された。図1-1にシャトルの荷物室に搭載されたMFDを示す。MFDは、ミッションスペシャリスト(Mission Specialist; MS)のN. Jan Davis飛行士(MS1)とStephen K. Robinson飛行士(MS3)によりシャトル船内から操作され、軌道上で5日間に亘って試験が実施された。図1-2に、船内にて作業中の両飛行士を示す。

宇宙開発事業団(National Space Development Agency of Japan; NASDA)は、MFDシステムの開発を行うとともに、その飛行運用に必要な準備を進め、飛行運用中には、MFD運用隊を組織し、米国航空宇宙局(National Aeronautics and Space Administration; NASA)ジョンソン宇宙センター(Lyndon B. Johnson Space Center; JSC)において、軌道上におけるシャトル搭乗員の運用を支援するための飛行運用管制を実施した。本稿では、まず、飛行運用の概要を述べ、打上げ前に実施した搭乗員訓練及び飛行運用管制準備の概要について述べたあと、軌道上における飛行実証試験の結果及びその評価について述べる。

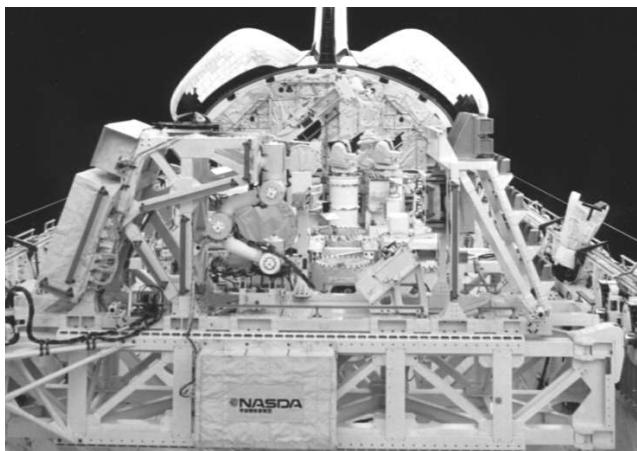


図1-1 シャトル荷物室のMFD (NASA 提供)



図1-2 シャトル船内の搭乗員(NASA 提供)

2. MFDの飛行運用について

2.1 MFDのミッション要求

MFDプロジェクトにおけるミッション要求をまとめると、

- ・MFDロボットアームの飛行試験を実施し、微小重力環境下におけるアームの機能・性能の評価、

及び微小重力環境下での搭乗員のアーム操作に係る人間機械系の評価を行うこと、

- ・MFD ロボットアームの飛行試験を実施し、その成果を JEMRMS 開発に反映するとともに、その経験を JEM の開発と運用に反映すること、
- ・MFD ロボットアームを用いて、宇宙ロボットアームを地上から遠隔操作する技術の修得を目的とした技術実験を行うこと、

また、相乗りミッションとして、

- ・宇宙の曝露環境における材料劣化の評価実験、及び宇宙ダストの捕獲・評価を実施すること、
- ・二相流体ループによる熱制御技術に関する軌道上実験を行うこと、

である。これらのミッション要求の具体的な内容及びそれらを実現する為に策定した飛行運用計画の概要について以下の節で述べる。

2.2 MFD ロボットアーム試験に係る飛行運用要求の概要

MFD ロボットアームはシャトルの荷物室でダイナミックに動作するシステムであり、また、シャトルのシステムと直接的且つ複雑なインターフェースを持つ事から、その操作はペイロードスペシャリストではなく MS が行う事とされた。安全性を確保するとの観点から、2人の MS が交互に操作することとされ、これをを利用して、ハンドコントローラーやスイッチ類の操作性、或いはそれらに対するロボットアームの応答性等について出来る限り客観的な評価を行えるよう配慮した。一方、コンプライアンス制御やアーム先端位置決めといった基本的な機能・性能に係る評価、及び軌道上交換装置 Orbital Replacement Unit; ORU) 脱着・ドア開閉といった試験項目を具体化し(表 2-1 参照)、搭乗員がこれらを効率的に実施出来る様、これらの組合せや順序に配慮した。各搭載ペイロードに標準的に割り当てられる搭乗員作業時間は 1 日 8 時間とされるところ、先の MS 2 人による操作と試験項目数を考慮し、MFD ロボットアームの試験は計約 16 時間で行うこととされた。また、熱環境条件や照明環境条件を考慮して、試験中のシャトル飛行姿勢に対する要求等を設定した。

表 2-1 MFD ロボットアーム試験項目の概要

試験項目名	主な目的
システム習熟	打上げ後のシステムの健全性の確認、及び無重量環境下での操作感覚への習熟
アーム制御性能確認試験	
コンプライアンス制御性能 # 1 ~ # 3	各コンプライアンス制御特性(HARD、MEDIUM、FLEX)の評価
無負荷時の単軸駆動制御性能評価	ORUを把持しない状態での 6 關節各軸毎の制御応答特性の評価
無負荷時の先端位置決め制御性能 1(直線運動)	ORUを把持しない状態でのアーム先端の直線運動での位置決め制御精度の評価
無負荷時の先端位置決め制御性能 2(円運動)	ORUを把持しない状態でのアーム先端の円運動での位置決め制御精度の評価
負荷時の単軸駆動制御性能評価	ORUを把持した状態での 6 關節各軸毎の制御応答特性の評価
負荷時の先端位置決め制御性能 1(直線運動)	ORUを把持した状態でのアーム先端の直線運動での位置決め制御精度の評価
負荷時の先端位置決め制御性能 2(円運動)	ORUを把持した状態でのアーム先端の円運動での位置決め制御精度の評価
ORU脱着試験 # 1 ~ # 4	コンプライアンス制御を含めたツールフィックスチャ把持機能、ボルトの締め緩めや ORU ボックスの脱着等、アーム / ORU 双方に係る総合的な機能・性能のデモンストレーション
トア開閉試験 # 1 ~ # 3	アームの応用動作(コンプライアンス制御下でのドアヒンジ拘束動作)に係る機能デモンストレーション

2.3 地上遠隔操作(Ground Commanding; GC)実験に係る飛行運用要求の概要

GC 実験は、有人の宇宙施設に取り付けられたロボットアームを地上から遠隔操作する技術について、安全性や搭乗員作業負荷軽減等の課題の解決に係る基礎データの取得も含め、将来の宇宙ロボットの運用効率化等を目指した技術開発に資する為の予備的な実験を行う事を目的としている。GC 実験は、搭

乗員によるロボットアーム試験の終了後、4時間の枠内で実施する事として NASA と調整され、NASDA による基礎実験テーマの他に、NASDA 外部の研究機関や大学（航空宇宙技術研究所、通信総合研究所及び東京工業大学）との共同での応用実験テーマが 3 つ設定された。GC の実験では、地上からのコマンドデータ送信時における通信リンクの連続的確保、軌道上における昼夜の照明環境条件やシリーズ実験の実施間隔等について個別の要求があり、これらを配慮した飛行運用タイムラインの設定を NASA と共同で行った。

2.4 相乗りペイロード等に係る飛行運用要求の概要

(1) 材料曝露実験(Evaluation of Space Environment and Effects on Materials; ESEM)

ESEM は、シャトル荷物室のドアが開き、シャトルのロボットアーム(Shuttle Remote Manipulator System; SRMS)が展開されて、ESEM 機器の視界が確保された状態で、シャトルの飛行姿勢を-YVV(ESEM の材料サンプルホルダーやダストコレクターの曝露面が向いているシャトル左舷方向をシャトルの進行方向へ一致させる姿勢)へ変更する事によって実施される。飛行運用要求は-YVV 姿勢を計 40 時間以上確保することであるが、この 40 時間は連続的である必要は無く、また搭乗員による機器の操作も必要無い。なお、-YVV の累積時間は MFD 飛行運用管制班による管制業務の一環として確認される。

(2) 二相流体ループ実験(Two Phase Fluid Loop Experiment; TPFLEX)

TPFLEX は、シャトル船内の搭乗員が実験機器の初期起動や実験パラメーターの設定を行う事により、それ以降の実験が自動的に行われる。本実験は、ヒーター熱入力とポンプ流量を制御パラメーターとして変化させ、作動流体である水と水蒸気の二相について差圧等のデータを取得する事により、宇宙用二相流体熱制御システム、特に蒸発器の設計に有効なデータを取得する事を目的とする。1 回の実験の運用時間は、ラディエーター等の冷却時間も含め、約 9 時間を要するが、搭乗員の作業時間としてはパラメーター設定等に係る 10 数分間である。軌道上での流体ループシステムの挙動特性を把握する為、最低 4 回、状況が許せば 8 回までの実験を行う。各実験におけるパラメーターについては、あらかじめ用意されているが、それまでの実験で得られたテレメトリデータを基に地上で解析を行い、その結果に基づいて搭乗員へ指示することもできる。なお、TPFLEX の運用は MFD ロボットアーム試験や GC 実験とは同時には行われない。

2.5 飛行運用全体計画の概要

前節まで述べてきた各試験・実験に係る要求を基に策定された飛行運用の全体計画について概要を述べる。MFD シャトル搭載システムは、STS-85 に搭載され、高度約 296km、軌道傾斜角 57 度、周期約 1 時間 30 分の軌道上を約 11 日間飛行する。この間、シャトルは各々の搭載ペイロードからの運用要求に基づき、姿勢変更や軌道微調整を行いながら飛行する。また、追跡データ中継衛星システム(Tracking and Data Relay Satellite System; TDRSS)を適宜経由して地上との通信回線を確保する。シャトルに搭載される各ペイロードの飛行運用は、各々の姿勢・データ要求等の運用条件を満足する様に飛行運用タイムライン上で割り当てられる。MFD シャトル搭載システムの飛行運用に係る要求をまとめると表 2-2 の通りである。これらの要求等に基づき、NASA/JSC のペイロード運用ワーキンググループによって決定された STS-85 の飛行運用タイムラインを表 2-3 に示す。

2.6 飛行運用文書

MFD 飛行運用については、MFD 飛行運用計画書を作成し、詳細を定めている。実際にシャトルの搭乗員が実施する飛行運用は飛行データファイル(Flight Data File; FDF)としてまとめられ、シャトルに搭載される。FDF には、2.5 節で述べた MFD の飛行運用計画を含む STS-85 全体の詳細な飛行運用計画であるフライトプラン(Flight Plan)や、MFD 等のペイロードの運用手順書(Payload Operations Checklist; P/L Ops)、マルファンクション手順書(Payload Systems Data and Malfunction Procedures; Mal)等が含まれる。NASDA は、MFD の飛行運用計画や運用手順、その他の要求事項等を NASA に入力し、これを基に NASA が FDF を作成し制定した。

また、FDF には含まれないが、MFD はもとより STS-85 に関する地上及び飛行運用の全てにわたる基本原則を規定したフライトルール(Flight Rules)については、NASA と詳細な調整の後制定された。フライトルールには、飛行運用中に起こり得る各種の状況に対する適切な判断のための条件 / 判定基準が記載されており、安全を始めとして、運用限界、ミッション達成の観点から検討した判断基準 / 判定基準が含まれている。

MFD は、搭乗員が行う操作が多く複雑であるため、これらの文書の作成には多くの時間を要し、打上げ直前まで NASA と調整を行った。

表 2-2 飛行運用の要求

	時間	姿勢	データ
MFDロボットアーム試験	16h	-ZLV	テレメトリ 24kbps, ビデオ
地上遠隔操作実験:GC	4h	-ZLV	テレメトリ 24kbps, ビデオ
二相流体ループ実験:TPFLEX	9hx 4~8	-ZLV	テレメトリ 2kbps
材料曝露実験:ESEM	40h以上	-YVV	

注)飛行姿勢の-ZLVはシャトルの荷物室が地球中心を向く姿勢、-YVVはシャトルの左翼が飛行方向に向く姿勢である。

表 2-3 飛行運用タイムラインの概要

Flight Day	運用項目
FD1	PLBT アクション後、MFD / TPFLEXヒーター起動 / ESEM
FD2	MFD(8h) / ESEM
FD3	TPFLEX# 1 (9h) / ESEM
FD4	MFD(4h) / TPFLEX# 2 (9h) / ESEM
FD5	MFD(4h) / TPFLEX# 3 (9h) / ESEM
FD6	ESEM
FD7	地上遠隔操作実験 (4h) / TPFLEX# 4 (9h) / ESEM
FD8	TPFLEX# 5 (9h) / ESEM
FD9	ESEM
FD10	TPFLEX# 6 (9h) / ESEM
FD11	TPFLEX# 7 (9h) / TPFLEX# 8 (9h) / ESEM
FD12	システム停止、PLBT アクション

注)PLB: Payload Bay(シャトル荷物室)

3. 搭乗員訓練

3.1 搭乗員訓練の目的

MFD 搭乗員訓練は、搭乗員が軌道上に於いて MFD シャトル搭載システムに関する所定の操作を円滑且つ確実に行い、地上との連携によりミッションを最大限に達成出来る様、予め地上に於いて MFD シャトル搭載システムのミッション、構成、運用に関わる知識、及び操作技能等を修得させる事を目的として、NASA との協力の下で実施された。

3.2 MFD 搭乗員訓練の特長と搭乗員訓練システム

MFD の飛行運用は 2 名の MS が担当する事とされ、シャトルのロボットアーム(SRMS)については十分訓練を受けていると言う事が、MFD 搭乗員訓練の計画立案に際しての前提とされた。しかし、SMRS と MFD ロボットアームとはハンドコントローラによる操作という点では同等であるものの、物理的大きさはもとより、操作方法の詳細、機能・性能にかなりの違いがあった。中でも MFD ロボットアームが持つコンプライアンス(Compliance)制御機能は、宇宙用ロボットアームとしては初めてのものであり、搭乗員にとっては概念的に新しい機能であった。コンプライアンス制御は、アーム先端に働く力／トルクを制御するので、ツールフィクスチャ(Tool Fixture)把持や ORU の脱着、ドアの開閉といったアームと対象物の物理的接触を伴うタスクに於いて、アームの挙動が搭乗員のハンドコントローラ操作によるものと違ったものとなる。そこで、このコンプライアンス制御に関する MFD ロボットアームの物理的挙動を搭乗員に如何に修得させるかが重要なポイントとなった。物理的接触に伴うアームの挙動を数値シミュレーションで模擬する事は容易でない事から、MFD ロボットアームを物理的に模擬する MFD トレーナーを、開発の効率化の観点から、JEMRMS 用に開発された試験装置を流用して開発し、搭乗員訓練に供する事とした(図 3-1 参照)。また、MFD ロボットアームはシャトル荷物室内でダイナミックに動作するシステムであり、安全性の観点からその操作方法は複雑化し、この関係で不具合対応手順も多岐に亘った。更に、過去の宇宙実験ミッションとは異なり、搭乗員は自らの操作に応じて刻々と変化するアームの状況を常にモニターし、異常を察知したら即刻停止をかける必要があった。この点でも、搭乗員には不具合対応手順を含む操作手順全般について、過去のミッションに比してより深い理解と習熟が要求され、訓練装置を JSC に設置して十分な訓練時間を確保する必要があった。MFD トレーナーはアームの暴走等の不具合を物理的に模擬する事は技術的に困難(或いは危険)であったため、MFD シャトル搭載システムをコンピューターグラフィクスで模擬する MFD シミュレーターの開発を行い、JSC における訓練に供する事とした(図 3-2 参照)。この結果、MFD 搭乗員訓練では、JSC において MFD シミュレーターを、また筑波宇宙センターにおいて MFD トレーナーを補完的に使用した。



図 3-2 MFD シミュレーター

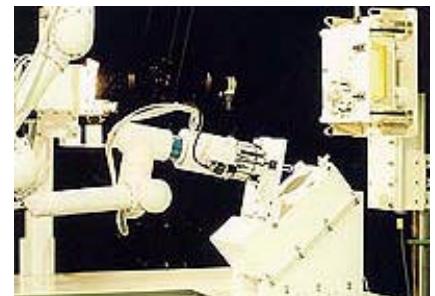


図 3-1 MFD トレーナー

3.3 訓練課程の概要

3.2節で述べた背景を踏まえつつ、訓練の効率的・効果的遂行を目指して訓練課程が立案された。図3-3はMFD搭乗員訓練の主要課程を時系列的に示したものである。特徴的なのは、操作手順全般の習熟のためにJSCにおけるシミュレーター訓練に十分時間を確保したこと

や、アームの物理的拳動への習熟を補完する為のトレーナー訓練を打上げの9ヶ月前と4ヶ月前に筑波宇宙センターで実施した事である。以下、各々の項目について概要を述べる。

図 3-3 MFD 搭乗員訓練スケジュール

1996				1997								1998						
9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
(米国) クレー決定 PFB				打上げ シミュレータ-訓練 SMS スタンドアロ-ン訓練 JIS#1/#3/#6/#7/#8 EVA訓練 デブリ-フィンク'/シミュレータ-評価														
(日本)				トレ-ナ-訓練 トレ-ナ-訓練 デブリ-フィンク'/トレ-ナ-評価														

(1)PFB(Payload Familiarization Briefing)

PFB は、MFD 計画の概要、MFD シャトル搭載システムの構成、飛行運用手順や MFD 固有のフライトルール、及び搭乗員訓練計画等、MFD ミッション全般について講義を行うもので、NASA/JSC に於いて、1996 年 10 月 8 日、STS-85 のシャトル搭乗員及び JSC の飛行運用関係者を対象に実施された。

(2) トレーナー訓練

MFD シャトル搭載システムを物理的に模擬する MFD トレーナーを用いて、ハンドコントローラー操作に対する MFD ロボットアームの物理的挙動やコンプライアンス制御応答の習熟等を目的として、MFD の飛行運用を担当する MS 2 人及び JSC ロボティクス・インストラクター 1 人を筑波宇宙センターに招き、1996 年 11 月 19 日からの 3 日間、及び 1997 年 4 月 8 日からの 4 日間実施された(図 3 - 4 参照)。訓練は効率化の観点から、アームの物理的接触を伴う飛行運用手順を中心に実施した。ここで、アーム先端の力やトルクに敏感なコンプライアンスマード(FLEX)については、重力の影響で MFD トレーナーのロボットアームが良好に動作しない事が分かっていた為、訓練では FLEX モードを他のモード(HARD 或いは MEDIUM)で置き換えて実施した。不具合対応手順の訓練は主にシミュレーターを用いて実施する計画であったが、MFD シミュレーター訓練だけでは不十分な手順もあったため、MFD トレーナー訓練に於いて、アーム手首カメラやハンドコントローラー等の故障を想定して、それらの機器を使用しなくても最低限のタスクが続行出来る様、必要な手順や技能について訓練を行う事とした。その結果、搭乗員は、例えばスイッチ操作による単関節駆動によってもツールのツールフィックスチャからの引き抜きが可能である事を実証した。この結果を受けて新たなバックアップ手順が手順書に加えられる事となった。



(3)MFD ワークステーション組み立て訓練

1回目のトレーナー訓練終了後の 1996 年 11 月 22 日は、(株)東芝京浜事業所に於いて、シャトル後部飛行デッキ(Aft Flight Deck; AFD)に搭載される MFD ロボットアーム操作用ワークステーション(W/S)の軌道上での展開/組立/分解/収納に係る訓練が実施された。その後、MFD シャトル搭載システムがケネディ宇宙センター(John F. Kennedy Space Center; KSC)へ引き渡された後の 1997 年 6 月 14 日、C E I T(Crew Equipment Interface Test)の機会を利用して、AFD の中で搭乗員が飛行用 W/S を用いて展開収納訓練を行った。

図 3 - 4 トレーナー訓練

(4)シミュレーター訓練

MFD シミュレーターを用いた訓練は、JSC において、MFD シャトル搭載システムのノミナル時の操作手順の修得や操作技能の向上、並びに不具合時の対応手順の習熟等を目的として実施された。MFD シミュレーターは、1997 年 1 月に JSC に搬入され、シャトル側訓練装置(Shuttle Mission Simulator; SMS)とのインターフェース試験等を経た後、訓練に供された。シミュレーター訓練は、1997 年 3 月 24 日から打上げ直前の 7 月 30 日までの間、JSC ロボティクス・インストラクターの指導の下で、最新の飛行運用手順書を用いて行われ、訓練時間の合計は両 MS 共に 31 時間に達した。

(5)SMS スタンドアローン訓練

シャトルの模擬装置である SMS と MFD シミュレーターとを用いた SMS スタンドアローン訓練は、MFD の飛行運用を担当する搭乗員と他の搭乗員との連携動作の習得等を目的として、JSC 訓練担当者の指導の下で、JSC に於いて 1997 年 4 月 17 日と 4 月 21 日の 2 回に亘り合計 7 時間実施された。

(6)船外活動(Extra-Vehicular Activity; EVA)訓練

MFD シャトル搭載システムに不具合が生じた場合等に行う EVA 作業の訓練であり、シャトル荷物室及び MFD シャトル搭載システム船外系の実物大モックアップを使用して、JSC の EVA 訓練施設(Neutral Buoyancy Laboratory; NBL)で実施された。本訓練は、NASDA からの要求を踏まえて、JSC の EVA 訓練担当者の指揮の下で行われ、ロボットアームや ORU の収納等、MFD 固有の作業の他、MFD とシャトルとを電気的に接続する ROEU(Remotely Operated Electrical Umbilical)のマニュアル分離等、シャトルシステムに係る作業もカバーされた。EVA 作業は 2 人 1 組で行うこととされており、MFD / STS-85 では Robert L. Curbeam Jr. 飛行士(MS2)と MS3 がその担当で、EVA 訓練はこの 2 人に対して 1997 年 6 月 3 日、6 日、10 日、及び 7 月 10 日の計 4 回実施された。

(7)合同総合シミュレーション(Joint Integrated Simulation; JIS)訓練

JIS 訓練は、シャトル搭乗員、NASA のシャトル飛行運用管制官、及び各ペイロードの飛行運用管制要員が合同で実施する総合的な飛行運用模擬訓練であり、不具合対応を含む各ポジション間の連携動作の確認、飛行/地上運用手順書やフライトルール、及び飛行運用タイムライン等の整合性の確認等を目的とする。MFD 関連の JIS としては、STS-85 の JIS のうち #1、#3、#6、#7 及び #8 が実施され(図 3 - 3 参

照)、MFD 飛行運用管制要員は JSC のペイロード運用管制センター(Payload Operations Control Center; POCC)でこれらの JIS に参加した。各々の JIS では打上げや MFD の飛行運用タイムラインの一部のフェーズが模擬され、最終的には、MFD 飛行運用タイムラインの全ての部分がカバーされた。なお、JIS#8 は STS-83 の再飛行に伴い STS-85 の打上げが延期されたため、NASDA/NASA 双方の飛行運用管制要員のリフレッシュを図るために、後で追加されたものである。また、MFD の JIS では、JSC のシミュレーション担当者が搭乗員の操作とは別の系統から MFD シミュレーターに指令を与えて不具合事象を発生させ、その模擬データが SMS を経由してミッション管制センター(Mission Control Center; MCC)や POCC へ配信された。

(8)飛行後の訓練評価

シャトルの帰還後、JSC に於いて 1997 年 8 月 26 日から 28 日にかけて、MS1 及び MS3 による MFD シミュレーターの評価、並びに搭乗員全員による NASA 要員へのデブリーフィング(飛行運用結果報告)が実施された。また、11 月 13、14 両日、筑波宇宙センターに於いて搭乗員による NASDA に対するデブリーフィング、並びに MS1 及び MS3 による MFD トレーナーの評価が実施された。

4 . 飛行運用管制準備

4 . 1 飛行運用管制の概要

MFD 飛行運用管制は、MFD 飛行運用について、搭乗員による円滑且つ確実な遂行を支援する事を目的として、NASA との協力の下、各試験・実験の進行状況の把握、不具合原因の究明や対応手順の検討・指示、テレメトリやビデオ画像等のデータの処理・表示記録・再生、飛行運用状況に対応した運用計画の変更に係る調整、及び各種運用文書の維持・改訂等を実施するものである。これらの業務は、MFD 運用隊の飛行運用管制班が実施した。MFD 飛行運用管制は、効率化の観点から、NASA/JSC において実施する事とし、MFD 飛行運用管制システムを開発し、それを NASA/JSC の POCC に設置した。実時間飛行運用中は、MFD 飛行運用管制班の各要員は POCC に配置され、POD(Payload Operations Director)の指揮の下、MCC 等の NASA 管制官らと密接な連絡を取りつつ業務を遂行した。また、GC の運用に於いては、コマンドの生成(送信前検証を含む)、伝送(MFD ロボットアームから送り返されてくるコマンドの照合を含む)、及びロボットアーム動作の監視を実施した。

4 . 2 飛行運用管制のための地上システム

1997 年 3 月に MFD 飛行運用管制のための地上システムを日本から輸送し、NASA / JSC のビルディング 30S 3 階の P O C C に据え付けた。

本地上システムは、図4-1に示す通り、大きく分けてテレメトリ、画像、音声及びGC関連の処理を行うサブシステム、並びにMFDシミュレーターの一部であるグラフィックシミュレーターより構成される。実時間飛行運用中、テレメトリ処理部ではMFDテレメトリデータの表示・記録を、画像処理部ではシャトルからのダウンリンク画像の表示・記録を、音声処理部では管制のための交信の録音を、GC地上装置ではGC実行コマンドの送信やGC用軌道ファイルの送受信を、グラフィックシミュレーターではコンピューターグラフィクスによるロボットアームの表示やGC用軌道ファイルの送信前の検証等を行う。

据え付け後は、JISに供されるとともに、その前後で、NASAの地上通信設備とのデータ（テレメトリ、画像、音声、GC用コマンド、GC用軌道ファイル等）のインターフェースを調整・確認した。

また、JIS実施に伴う飛行運用管制要員からの指摘や意見を可能な限り取り込むことにより、MFD飛行運用管制設備の使い勝手の向上を図った。

4.3 飛行運用管制班

MFDの運用（射場運用を含む）及びこれに必要な準備作業を的確且つ円滑に遂行するため、1997年1月にMFD運用隊が編成され、そのうち飛行運用管制班がNASA/JSCにおいてMFDの飛行運用管制を行った。飛行運用管制班は、班長（同代理）が担当するPODの下、計画管理係、MFD技術係、GC技術係、TPFLEX技術係、設備・記録係で構成した。

PODは飛行運用管制班の業務を総括し、NASAのペイロード運用責任者（Payload Officer; P/O）との連絡・調整を、計画管理係は飛行運用管制業務に係る企画、立案及びその纏めや、飛行運用タイムラインの計画・管理を、各技術係はそれぞれのミッション（MFDロボットアーム、GC、TPFLEX）に関する飛行運用状況の監視・技術評価、飛行運用中の不具合への対応、飛行運用タイムライン変更に係る技術検討等を、設備・記録係は飛行運用管制設備の維持・管理、各種データ（テレメトリ、画像、音声等）の表示・記録・管理等を行った。図4-2にPOCCにおける飛行運用管制班の配置を示す。

4.4 飛行運用管制要員訓練

飛行運用管制要員は、実時間飛行運用管制に備えて、必要な知識の習得のための座学訓練や、MFD飛行運用管制設備の操作訓練、飛行運用管制手順書を使った訓練を日本国内で行った後、NASA/JSC

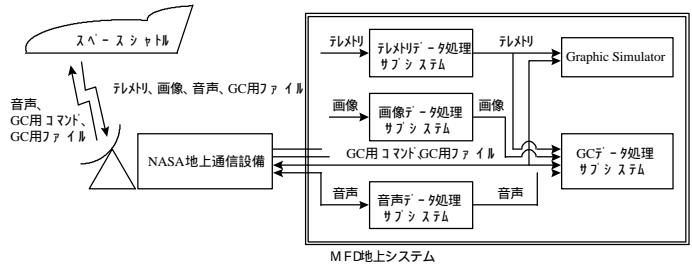


図4-1 MFD飛行運用管制のための地上システム

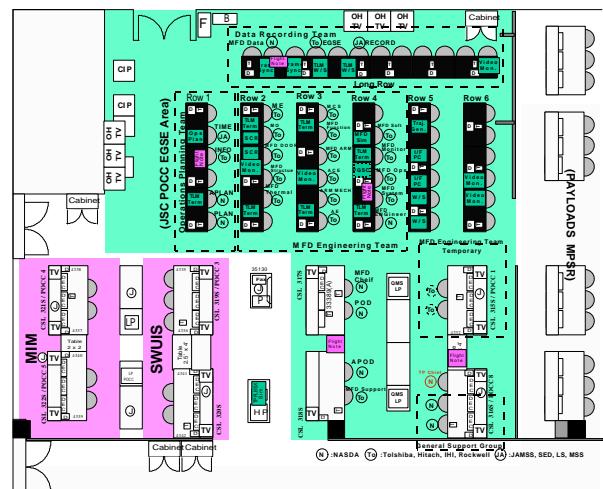


図4-2 POCCにおける飛行運用管制班の配置

の P O C C にて NASA の飛行運用管制設備（運用卓、電子メールシステム、音声交信装置等）の操作訓練、ボイス・プロトコル訓練（NASA の飛行運用管制官を交え飛行運用タイムラインに沿った音声通話手順の訓練）及び J I S を行った。図 4 - 3 に、J I S 中の P O C C の状況を示す。

4 . 5 打上げ前作業

飛行運用管制班は、打上げの 3 日前から P O C C において、システムの最終確認、データベースの確認、運用文書の準備等の最終準備作業を行った。MFD 飛行運用管制班としての最終準備作業は、打上げの 24 時間前にはほぼ終了し、その後は、地上作業の NASA とのインターフェースを規定している J O I P (Joint Operations Interface Procedures) に従って、打上げの 24、12、10、4 時間前の計 4 回、NASA 設備とのインターフェースの確認及び準備状況の報告を行った。打上げ直前までの全ての作業は順調に進行し、打上げ 9 分前の打上げカウントダウンのホールド時には、フライトルールに従って、MFD 運用隊の運用主任(Mission Director; MD)が、打上げ可能である旨の報告を行った。



図 4 - 3 J I S の状況

5 . 実時間飛行運用の概要

5 . 1 飛行運用概要

MFD ロボットアーム飛行実証試験の軌道上における主な運用実績を表 5 - 1 に示す。ロボットアームに係る試験及び実験は、5 日間に亘り合計で約 33 時間実施された。

(1) 打上げ及び MFD システムの起動

MFD シャトル搭載システムは、STS-85 に搭載され、米国東部夏時間 1997 年 8 月 7 日 10 時 41 分（日本時間同日 23 時 41 分）KSC の 39-A 発射台から打上げられ、高度 296km、傾斜角 57 度、周期 1 時間 30 分の円軌道に投入された。STS-85 の打上げの様子を図 5 - 1 に示す。打上げから 1 時間 5 分後、搭乗員により、MFD の主電源であるシステムバスが投入され、ヒータへの電力供給開始とともにサーモスタッフによる温度制御が開始された。打上げから 2 時間 41 分後には MFD の通信ユニットが起動され、MFD のテレメトリ(2kbps)の伝送を開始し、P O C C における MFD データの監視を開始した。2kbps のテレメトリには、温度データやマイクロスイッチの状態データが含

表 5 - 1 MFD の主な飛行運用実績

FD	開始時刻		イベント
	MET	GMT	
DD HH:MM	M/DD	HH:MM	
1	0 00:00	8/7 14:41	打上げ
	0 01:05	15:46	ヘイロードバス起動
	0 02:41	17:22	MFDヘイロード起動(電源起動、テレメトリ送信開始)
2	0 23:20	8/7 14:01	MFDワークステーション組立
	1 00:07	14:48	アーム展開
	1 00:34	15:15	チャックアウト(アーム/単軸操作/制限領域)
	1 01:35	16:16	ORU脱着試験 1(中断)
	1 04:47	19:28	アーム性能単軸制御/アームプログラム制御(ORU非把持)
	1 05:13	19:54	アーム収納/第1回MFD試験終了
4	2 00:07	8/10 10:48	アーム展開
	2 20:31	11:12	ORU脱着試験 3(取り外し)
	2 21:17	11:58	アームプログラム制御/アーム性能単軸制御(ORU把持)
	2 21:44	12:25	ORU脱着試験 3(取り付け)
	3 00:06	14:47	ドア開閉 1, 2, 3
	3 03:48	18:29	アーム収納/第2回MFD試験終了
5	3 19:57	8/11 10:38	アーム展開
	3 20:28	11:09	アームコンプライアンス性能
	3 22:57	13:38	ORU脱着試験 1, 2
	4 03:56	18:37	アーム収納/第3回MFD試験終了
7	5 18:41	8/13 9:22	アーム展開
	5 19:07	9:48	GC実験
	5 23:59	14:40	ORU脱着試験 4
	6 03:41	18:22	アーム収納/第4回MFD試験終了
9	7 19:20	8/15 10:01	アーム展開
	7 19:39	10:20	GC実験
	7 21:06	11:47	アーム収納/GC実験終了
	7 21:58	12:39	MFDワークステーション収納
12	10 16:41	8/18 7:22	MFDヘイロード停止(テレメトリ停止、電源オフ)
	10 19:20	10:01	軌道離脱制御中止(着陸は1日延期)
	10 20:19	11:00	MFDヘイロード再起動
13	11 16:33	8/19 7:14	MFDヘイロード停止(テレメトリ停止、電源オフ)
	11 20:26	11:07	着陸

FD: Flight Day; 打上げ日を1として飛行何日目かを示す。

MET: Mission Elapsed Time; 打上げ後経過時間

GMT: Greenwich Mean Time; グリニッジ標準時

まれる。MFD ロボットアームに関するテレメトリデータの確認結果は、良好であった。



図 5 - 1 ティスカバリ(STS-85)の打上げ(NASA 提供)



図 5 - 2 組立後の MFD ワークステーション(NASA 提供)

(2) 第 1 回 MFD ロボットアーム飛行実証試験：飛行 2 日目

MFD ロボットアームの第 1 回目の飛行実証試験は、飛行 2 日目に行われた。まず最初に、2 人の搭乗員は、実験制御盤及びハンドコントローラーから成る MFD ワークステーションを収納コンテナから取り出し、組み立てた。組み立てられた MFD ワークステーションを図 5 - 2 に示す。システムの起動は正常に行われ、テレメトリのビットレートは 2kbps から 24kbps に自動的に変わり、ロボットアームの全データのモニターが可能となった。POCC におけるモニターの結果、力 / トルクセンサの値が過大であったが、アーム保持解放機構(Arm Hold and Release Mechanism; AHRM)による保持のためアームの展開には支障がないと判断し、AHRM によるラッチの解放、アーム展開(プログラムモード)及びゼロ点リセット(プログラムモード)を実施し正常に終了した。ゼロ点リセット後のコンプライアンスマードオン操作により、力 / トルクセンサの値はゼロリセットされた。展開後のロボットアームを図 5 - 3 に示す。引き続きアームチェックアウトを実施し、搭乗員の操作によるアームの動作、フィンガーの動作及びトルクドライバーの動作が正常に行われることを確認した。次に、単軸操作試験及び制限領域のチェックアウトを実施し、それぞれの機能が正常に作動することを確認した。

ロボットアームの機能及び性能が正常であることを確認した後、予定通り、ORU の脱着試験を開始した。ORU のツールフィクスチャ 1(上側)へのアクセス(コンプライアンス FLEX モード)は、予定より時間がかかったが、正常に行われ、フィンガー開による把持及びフィンガー開後のマイクロスイッチも正常に機能した。続いて、1 回目のツールフィクスチャ把持時に行うことになっていたツールの引っ張り試験を実施したが、搭乗員が並進ハンドコントローラーを - X 方向に引いているにも拘わらず、力 / ツールトルクを示すテレメトリ値は規定の値に達しなかったため中止した。POCC における解析の結果、ツールフィクスチャへのアクセス時に、ツールを押し続けたことにより、コンプライアンスの中心が遠のいていたために迅速な応答が得られなかつたことが分かった。

トルクドライバーによるボルトの緩め回転は正常に行われた。しかし、ボルトを緩め終わったあと、一旦位置保持モードにした後再度マニュアル EE(End Effector)モードに変更した直後に、異常ステータスが表示され自動停止した。POCC における解析の結果、トルクドライバー作動後の位置保持モード設定時に入力ボタンを 2 回押すべき所を 1 回しか押さなかつたために発生したものとわかった。本現象については、あらかじめ用意したマルファンクション手順を実施することにより正常に復帰し、アームを引き抜くことができた。

次に、ORU のツールフィクスチャ 2 (下側) を把持しボルトを緩めるために、ツールをツールフィクスチャ 2 に押し込む作業を行っている時にも異常ステータスが発生し、自動停止した。これは、搭乗員のハンドコントローラー操作が強かったため、FLEX モードでのコンプライアンス制御により、アームの姿勢が + ピッチ方向に回転し、これにより手首根元の参照点が制限領域にかかつたためである。本現象についても、マルファンクション手順書に従った運用により正常に復帰し、その後基準姿勢に戻した。

再度、ORU のツールフィクスチャ 2 へのアクセス(コンプライアンスオフ)を行い、把持することができた。この時点で、ツールフィクスチャ 1 でうまく実施できなかつたツールの引っ張り試験をコンプライアンスオフで実施した。40N の力で引っ張ってもマイクロスイッチは変化せずツールフィンガーブレーキが効いていることが確認できた。

この日、MFD 運用後に予定されていたシャトルの軌道制御が 1 周回早く実施されることになったため、その前にロボットアームを収納する必要があった。この時点で、MFD に割り当てられた運用時間の残りが少なく、ORU の脱着試験の継続を断念した。ORU ツールフィクスチャ 2 のボルトは、まだ緩めておらず、打上げ前に締めた状態(22 回転)で、1 ボルト安全帰還状態にあるため、ツールフィクスチャ 1 のボルトは締めないこととした。

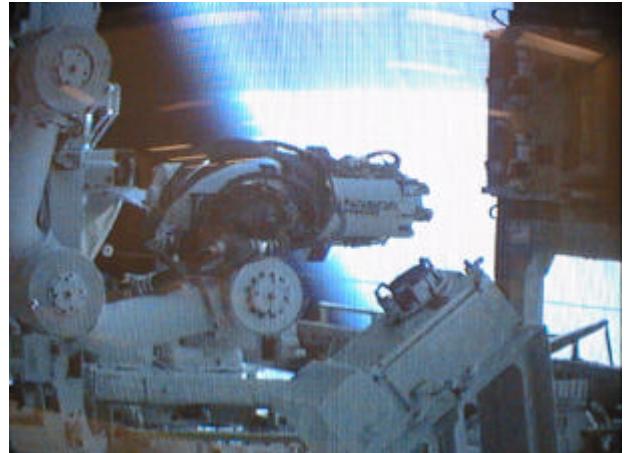


図 5 - 3 展開後のロボットアーム

ORU の試験を取りやめたことにより運用可能な時間ができたため、ORU を把持しない状態でのアーム性能単軸制御(プログラムモード)及びアームプログラム制御(プログラムモード)を実施し正常に終了した。アームプログラム制御性能確認時のロボットアーム先端位置のテレメトリデータを図 5 - 4 に示す。この図は、ロボットアームを横から見たときの先端の動きで、直線運動と円運動の指令に対して正しく動いていることを示している。

アームの収納(プログラムモード)及び AHRM によるラッチも正常に終了し、第 1 回の MFD ロボットアーム飛行実証試験は終了した。

(3) 第 2 回 MFD ロボットアーム飛行実証試験：飛行 4 日目

アーム先端のツールフィクスチャへの挿入時のコンプライアンスマードを FLEX ではなく HARD にすること、ドアの 3 回の開閉試験を連続して行うこと等の手順及び運用タイムラインの変更を行い、第 2 回目の MFD ロボットアーム飛行実証試験を開始し、アーム展開まで第 1 回目と同様正常に終了した。

順番を入れ替えた ORU 脱着試験 3 (HARD) は、ツールフィクスチャ 2 の把持及びボルト緩めから行い、変更した手順に従って実施された。ORU を取り外した後、ORU 把持状態でのアームプログラム制御(プログラムモード)及びアーム性能単軸制御(プログラムモード)を実施し正常に終了した。このとき、ORU を把持した状態でのアーム動作(プログラムモード)中に、アームの先端が振動していた。ORU を取り付け、ツールフィクスチャ 2 側のボルトを締めるとき、搭乗員が当該スイッチを操作してもトルクドライバーが作動しない不具合が発生したが、2 回目のスイッチ操作で正常に回転を始め、正常にボルトを締めることができた。ツールフィクスチャ 1 のボルトについても正常に締め付けることができ、1 回目の ORU 脱着試験は終了した。図 5 - 5 に、ORU を把持している状態で行ったアームブ

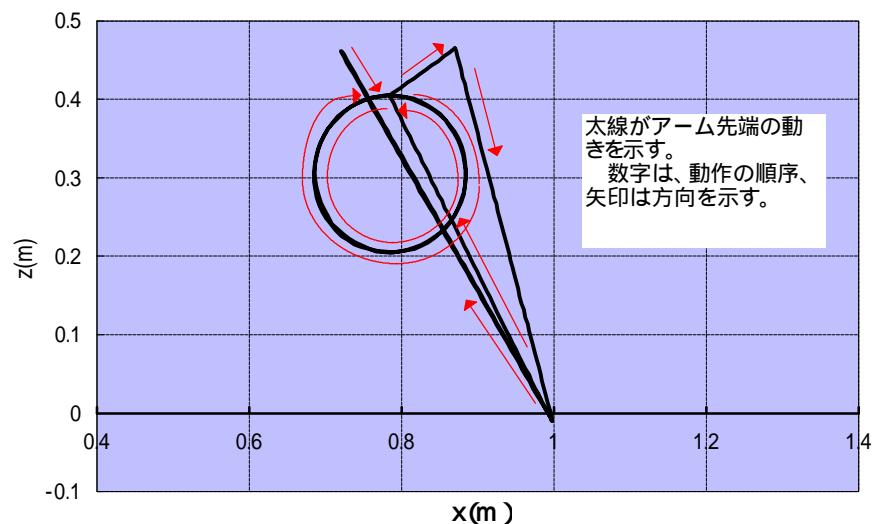


図 5 - 4 ロボットアーム先端の動き(z 平面)

(3) 第 2 回 MFD ロボットアーム飛行実証試験：飛行 4 日目

アーム先端のツールフィクスチャへの挿入時のコンプライアンスマードを FLEX ではなく HARD にすること、ドアの 3 回の開閉試験を連続して行うこと等の手順及び運用タイムラインの変更を行い、第 2 回目の MFD ロボットアーム飛行実証試験を開始し、アーム展開まで第 1 回目と同様正常に終了した。

順番を入れ替えた ORU 脱着試験 3 (HARD) は、ツールフィクスチャ 2 の把持及びボルト緩めから行い、変更した手順に従って実施された。ORU を取り外した後、ORU 把持状態でのアームプログラム制御(プログラムモード)及びアーム性能単軸制御(プログラムモード)を実施し正常に終了した。このとき、ORU を把持した状態でのアーム動作(プログラムモード)中に、アームの先端が振動していた。ORU を取り付け、ツールフィクスチャ 2 側のボルトを締めるとき、搭乗員が当該スイッチを操作してもトルクドライバーが作動しない不具合が発生したが、2 回目のスイッチ操作で正常に回転を始め、正常にボルトを締めることができた。ツールフィクスチャ 1 のボルトについても正常に締め付けることができ、1 回目の ORU 脱着試験は終了した。図 5 - 5 に、ORU を把持している状態で行ったアームブ

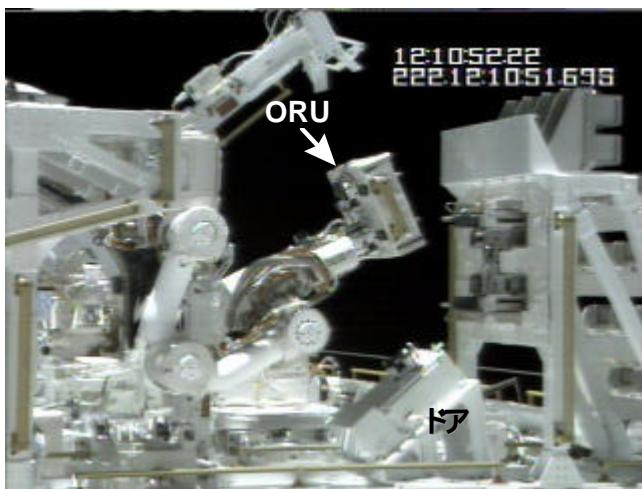


図 5 - 5 ORU 把持時のアーム制御試験

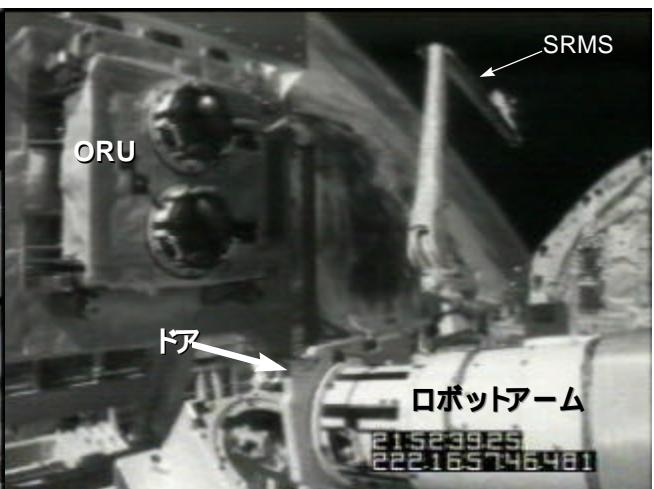


図 5 - 6 ドアの開閉試験(MFD のカメラから)

プログラム制御試験時の様子を示す。

搭乗員の食事に引き続き、ドア運用を開始した。1回目のドア開閉試験（HARD）でドアロックの解除を行い、ドア開動作に移行するところで、異常ステータスで自動停止した。本現象に対応する明確なマルファンクション手順がなかったため、搭乗員及びNASA地上管制官の間では、既存のドア用マルファンクション手順に従い、一通りの作業が行われた。POCCで解析した結果、ドアのロータリラッチへの押し付け力が解放されたことにより、手首ロール関節角が急な動作を行い、一時的に関節角レートが判定値を超えたためと判断し、ドアパネルをラッチした後、一旦ツールを引き抜き異常状態を解除した。ドア開閉試験を再開し、コンプライアンスマード HARD、MED、FLEX による3回の試験は正常に終了した。図5-6にドア開閉試験の様子を示す。

異常対応処置のため、MFD運用時間が少なくなり、予定したORU脱着試験1（MED）は行わないこととした。アームの収納及びAHRMのラッチは正常に行われ、第2回MFDロボットアーム飛行実証試験は終了した。

（4）第3回MFDロボットアーム飛行実証試験：飛行5日目

飛行5日目は、当初予定されていたロボットアーム試験の最終日であったため、残っている3回のORU脱着試験を連続して行い、途中のボルトの締結を省略することにより時間短縮を図り、全ての試験を実施できるタイムラインに変更した。

アームの展開後のコンプライアンス性能確認試験は、予定通り実施され、プログラムモードによりHARD、MED、FLEXの各モードにおけるデータを取得した。

引き続いて、ORU脱着試験1（MED）、2（MED）、4（HARD）を開始した。ORUを取り外すため、ORUツールフィクスチャ1側のボルトを緩めたあと、ツールフィクスチャ2へアームを移動しているときに、搭乗員がアームの異常動作を認めたためアーム作動を停止させた。これは、コンプライアンスがオンの状態で力／トルクセンサがドリフトしたために発生したもので、力／トルクセンサの値をリセットした後作業を再開した。次に、ツールフィクスチャ2を把持するため、ツールをツールフィクスチャ2に押し付けたとき、ORUが傾き4つのソトドックマイクロスイッチのうち3つがオンからオフに変化した。作業は継続し、ツールフィクスチャ2の把持とボルトの緩めは正常に終了した。引き続き、ORU脱着試験1及びボルトを締めないでソフトドック状態から脱着試験2を実施した。ORU脱着試験2の途中、ORUを把持した状態でアームを移動させているとき、異常ステータスによりアームが自動停止した。これは、搭乗員による並進用ハンドコントローラーの操作が過大であったために、手首の関節角センサの値がリミット値に達したためである。異常解除後、ORU脱着試験2におけるORUの取り付けは正常に行われたが、MFDに割り当てられた時間が少なくなったため、ORU脱着試験4は取り止めた。

アームの収納、AHRMのラッチを正常に行い、第3回MFDロボットアーム飛行実証試験を終了した。



図5-7 搭乗員によるロボットアームの操作（SA 提
示）

(5)第4回MFDロボットアーム飛行実証試験：飛行7日目

飛行7日目に、GC実験の後、第4回MFDロボットアーム飛行実証試験として、ORU脱着試験4を実施した。ORU装着後のツールフィクスチャ2側のボルトを締めるとき、第2回MFDロボットアーム飛行実証試験で起こった事象と同様に、最初の締め付け指令が正常に受け付けられず、2回目の指令でトルクドライバーの回転動作が開始した。そのほかの作業は全て正常に終了した。これにより、予定したMFDロボットアーム飛行実証試験は全て完了した。

(6)GC実験

GC実験は、飛行7日目に第4回MFDロボットアーム飛行実証試験に先立って実施し、シャトルの通信システムの計算機の不調等により、一部の実験を残して終了した。残りの実験は、NASAとの調整の結果、飛行9日目に割り当てられ、時間を短縮するためにアームの軌道データを変更して実施した。当初1日で行う予定であったが、最終的に2日に亘る実験の実施により、当初予定したデータを取得することができた。

(7)相乗りペイロードの実験

TPFLEXは、4～8回の要求に対して、飛行前のタイムライン上で8回の実験が割り当てられていたが、飛行初期に発生した不具合のためタイムライン通りではなかったものの、最終的に10回の実験を実施することができた。

ESEMは、-YVVのシャトル姿勢で40時間以上を要求していたが、全飛行期間中で当該姿勢を合計20回で約54時間を達成した。

(8)MFDシステムの停止と着陸

MFD通信ユニットは、帰還準備作業の中で停止されるまで、継続して動作し、テレメトリの伝送を行った。着陸が1日延期になったため、再起動されたが、最終的に停止されるまで正常に動作した。

STS-85は、約12日間の飛行中に全てのミッションを終え、米国東部夏時間8月19日7時7分(日本時間同日20時7分)にKSCに着陸した。図5-8に、着陸の様子を示す。なお、着陸は霧のため当初の予定より1日延期された。



図5-8 ティスカバリ(STS-85)の着陸(NASA提

5.2 飛行試験中の異常事象

表5-2に飛行試験中に発生したロボットアームに関する主な異常事象を示す。このほかにも、ORUのMLI(Multi-Layer Insulator)の剥離、アームをORUに押し付けたとき、押し付け力が均一でなかったために生じたソフトドック検知用マイクロスイッチの状態変化等の異常が発生したが、いずれも飛行運用

上支障はなかった。

表 5 - 2 飛行試験中の主な異常事象

No	異常事象	推定原因	運用時の対応処置
1	ORU把持時でコントローラー操作が1回目のハンドコントローラー操作を行った際、荷重的には問題ないが、ツールフィンカーボー部の潤滑膜について約2倍程度の荷重となっており部分的な潤滑膜の破損が考えられるが、地上試験結果から部分的な損傷は許容できることから運用を継続した。	ORU把持時のアーム引っ張り試験が鈍かったため、2回目の操作をしたところ、操作での荷重の超過(許容値120Nに対して250N)したが250Nまで達した。	
2	ORUツールフィクスチャ#1 移動時の自動停止	位置保持モードに設定するとき設定ボタンを2回押すべき所、1回しか押さなかったため、モード遷移が正しく行われず、次の操作時に異常と判定された。	搭乗員の操作手順の中に、モード設定を確認するモード二ターム項目を追加した。
3	ORUツールフィクスチャ#2 移動時の自動停止	の移動モードでのコントローラー操作下で搭乗員のハンドコントローラー操作が強すぎたため、アームが+ピッチ方向に回転し、手首の参照点が制限領域内に入ったため自動停止した。	コントローラー先端をツールフィクスチャに押し込むまではコントローラーをHARDとし、フィンカーボーを開くときにFLEXにする。
4	ツールのドライバーのボルト締め不能	ツールのドライバー(ソケットレンチ)締め付け動作指令時に回転角のリセットが遅かったため、動作開始と同時に終了と判定されたもので、ソフトウェアの不具合である。	回転角のリセットで動作を開始するため、本現象発生時に回転角のリセットが遅かったため、動作開始と同時に終了と判定されたもので、ソフトウェアの不具合である。
5	ドア開操作時の自動停止	ドアリタッチ解除後、押し付けトルクが取り除かれたときアームの動作は反動を除けば正常で、判定値は越えたもののこの角速度は有害ではないため、異常判定値を越えたため自動停止した。	アームの動作は反動を除けば正常で、判定値は越えたもののこの角速度は有害ではないため、異常判定機能を解除して作業を行った。
6	アームの無指令動作	力/トルクセンサのデータが上昇したため、コントローラー下にあつたアームが動作した。なお、データの上昇は温度によるドリフトであった。	力/トルクセンサのドリフトがあった場合、同センサのデータをリセットする。
7	ORU把持時のアーム微小運動	コントローラーのモータ軸の安定余裕の不足のため、モータと出力軸が共振したとのと考えられる。	運用上問題となる大きさではなかったため、そのまま使用した。
8	コントローラー操作によるアーム引っ張り試験実施不良	本操作の前に実施された押し付け操作によりコントローラー中心が遠のいていたため、アームが搭乗員のコントローラー操作に追随しなかった。	本試験は一旦中止し、ツールフィクスチャ#2把持時に再実施することとした。

6. 飛行試験結果の評価

6.1 MFD システムの評価

飛行運用に係るデータの取得状況については、シャトルオービターを経由して MFD シャトル搭載システムからダウンリンクされるテレメトリ/ビデオ/音声の各データを P O C C に設置した MFD 飛行運用管制システムにより記録した。また、オービターの軌道・姿勢履歴については、オービターの帰還後、NASA から P A T H (Pointing and Trajectory History) データとして提供された。これらのデータに基づき、設計仕様、飛行前後の地上システム試験結果との比較、シミュレーションによるデータの評価等の飛行後解析を行った。

まず、システムの基本機能については、軌道上で予定された全ての運用タスクを実施できたため要求を満足している。飛行運用中に発生した異常事象については、テレメトリデータ等により解析し、ソフトウェアの不具合等を識別し、JEM へ反映すべき事項を表 5 - 2 に示すように明らかにすることができた。

ロボットアームの基本的性能である位置決め精度については、絶対位置決め精度は評価できないものの、ORU 及びドアの各ツールフィクスチャにアクセスしたときのテレメトリデータでは、そのばらつきが先端位置の X で 0.5mm、Y で 1.8mm、Z で 2.3mm、先端姿勢のロールで 0.7deg、ピッチで 0.5deg、ヨーで 0.4deg となっており、いずれも精度要求である並進 10mm、回転 1deg 以内であり、位置決め性能は十分であったと評価する。

視覚系については、ビデオデータを評価した結果、低照度部分に縞状のノイズがある等の問題があつたが、軌道上においても基本的に地上試験時と同じ性能を発揮し、飛行運用には支障がなかった。運用性の向上のために各コンポーネントに付いているマーキング等の視認性については、運用上問題となるものはなかつたが、照明による照度が高いためカメラ中心部で明るすぎて一部見にくいつものがあつた。また、マーキングは基本的に白黒であったが、一部に影との区別がつきにくいものがあり、今後はマ-

キングの色についても考慮する必要がある。

熱制御系は、全飛行期間中において、搭載機器を許容温度範囲に維持させることができ、ヒーター、塗料、MLI 等の熱制御材は正常に機能した。電気系機器、AHRM、ORU 及びドアについては、飛行試験中は正常に機能し、飛行中のテレメトリデータ及び飛行後の機能性能試験結果も特に問題はなかった。

以上述べたように、MFD シャトル搭載システムは、飛行運用において正常に機能し、JEMRMS を踏まえた要求機能及び性能の妥当性を実証できたと言える。

6.2 搭乗員による操作性の評価

ロボットアームの操作性等に関しては、アームを操作中の搭乗員の姿勢や動作等がカムコーダーで録画されると共に、操作の合間に搭乗員によるコメントが軌道上で録音された。帰還後の JSC におけるデブリーフィングでも搭乗員から有効なコメントを得ている。搭乗員のコメント等で不明な点や、飛行運用を通じて改善の余地が見受けられた手順等については、日本におけるデブリーフィングで搭乗員と議論し、必要に応じて MFD トレーナーを用いたデモンストレーションにより確認を行った。これらを通じて得た情報は適宜飛行後解析に反映している。

操作機器の配置や操作性、表示関連機器の見易さや有効性等について搭乗員から得たコメント等の内、ここで特筆するに値すると思われる事項について以下に述べる。

- ・ フィンガー／トルクドライバーの切換状態を確実に確認出来るトークバック或いはテレメトリ表示が必要である。
- ・ トークバックの表示部が一体化されている押しボタンを採用する場合は、トークバックの確認が確実に行える様な手順上の工夫或いは表示部の工夫が必要である。
- ・ アーム手首カメラ (Arm TV Camera; ATVC) に対するターゲットは、ツールフィクチャへのアクセス時のアーム先端の位置決めに非常に有効である。また、ORU 側面の縞状マーカーは ORU の装着時位置決めに有効である。これらの視覚的情報は位置・姿勢のデジタル表示以上に重要である。また、窓外視野はカメラ画像以上に有効である。

6.3 訓練の評価

MFD トレーナーによる最後(2回目)の訓練は、打上げの約 4 ヶ月前に実施されたが、搭乗員が操作の物理的感触を忘れてしまう事が懸念された。MFD トレーナーを JSC に搬入し、打上げ直前にトレーナー訓練が実施出来れば理想的であった。実際、飛行後のデブリーフィングに於いて、打上げ直前に MFD トレーナーでの訓練を行った旨の発言が搭乗員からもあった。一方、MFD シミュレーターを JSC に設置した事から、アームの物理的模擬を必要としない操作手順一般については訓練時間の確保が比較的容易であった。

また、トレーナー訓練では、MFD シャトル搭載システムの設計・試験担当者の支援を受けると共に、NASA インストラクターを事前に招聘しリハーサルを行う事によって、訓練中の搭乗員へのアドバイスや質疑応答等を円滑に進める事が出来た。この事は、JSC におけるシミュレーター訓練の指導を NASA インストラクターへ委任する上でも効果的であり、NASA インストラクターを招聘して訓練に参加させると、情報交換が進み、訓練全般を効率的に進める事が出来ると考えられる。また、技術的内容まで含んだ訓練を短時間で行う為には、NASDA 側インストラクター自身の知識・技能の向上が不可欠である。

MFD トレーナーにおけるコンプライアンス FLEX モードの様に、搭乗員訓練システムでは重力の影響等により高いフィデリティの実現が本質的に困難なものについては、これを補う訓練を別途設定する必

要がある。

MFD では、NASDA から NASA へのペイロード設計情報の伝達が遅れた為に、搭乗員がペイロードシステムの理解の為に使用する参考書(Cargo Systems Manual; CSM)の作成が遅れ、搭乗員訓練に十分活用する事が出来なかった。また、訓練システムとフライトモデルとの差異について訓練教材として整理しておく事も重要である。コンプライアンス制御の様な概念的に新しい機能等については、開発側から NASA を含めた運用側に対して、設計思想や情報を整理して早期に伝達し、これを基に運用側で手順等の確立を図り、訓練等を通じて検証する事が必要である。

7 . JEM への反映

MFD のロボットアームミッションについては、約 12 日間の飛行期間中に予定されていたすべての試験及び実験を成功裏に実施することが出来たが、表 5 - 2 に示すように、軌道上でいくつかの異常事象が発生した。これらの異常事象については、原因究明が行われ、JEM への反映事項としてまとめられた。これらを含め、主な JEM への反映事項を以下に述べる。

(1) 搭乗員訓練の充実

表 5 - 2 の第 1 項のケースは、オフノミナルケースではあったが、搭乗員が過剰にハンドコントローラーの操作を行ったもので、搭乗員訓練において、コンプライアンス制御オフ状態でのアームの操作訓練が十分でなかったものと考えられる。従って、搭乗員訓練では、あらゆる運用手順に対して想定しうるオフノミナルケースを洗い出し、オフノミナルケースについても可能な限り多くのケースについて訓練を行い、その上で搭乗員に操作上の留意事項等を十分周知する必要がある。

また、MFD の様にアーム操作モニター用表示装置の更新速度が、アームの応答速度に比較して遅い場合には、操作者にその特性について十分認識させる必要がある。

特にコンプライアンス制御オフでは、ハンドコントローラーをゆっくり操作し、一度に大きな速度指令を与えるような操作をしないように訓練するとともに、飛行運用手順書等にその旨を明記する必要がある。

(2) 運用確認手順の徹底

表 5 - 2 の第 2 項のケースは、2 度押すべきボタンの操作が 1 回しか行われなかつたため発生したが、これは、スイッチ操作の応答がまぎらわしかったことと、飛行運用手順書にモードの移行を確認する手順が抜けていたことが原因で、そのため搭乗員は本誤操作を発見出来なかった。従って、JEM では搭乗員の誤操作を防止するため、スイッチ操作の応答を分かりやすくするとともに、スイッチ操作の応答に加えてテレメトリ等の確認手順を手順書等に盛り込むことが望ましい。

(3) コンプライアンス制御運用手順の確立と開発情報の運用者への早期ransfer

表 5 - 2 の第 3 項のケースは、コンプライアンス制御の感度が最も高い FLEX モードで、搭乗員がロボットアームの先端を ORU に押し付ける操作を行つたためアームの姿勢が大きく変化して、安全上設けられたアーム動作の制限領域に侵入したために、アームが自動停止したものである。これは、直接的には、搭乗員の操作が過剰であったためであるが、その原因としては、搭乗員に対する情報入力の不足、訓練不足、及び訓練システムの不備等があつたためと考える。

従って、JEMでは、コンプライアンス制御の様な新しい概念を導入したシステムについては、飛行運用に係る情報を早い時期に開発者から運用者にトランスファーし、飛行運用手順書に纏め上げ、それを基に搭乗員訓練を行い、搭乗員に対して新しい概念を十分に理解させるとともに、訓練システムの改善を図る必要がある。

(4)地上試験方法の改善

表5-2の第4項のケースは、操作系を連結したソフトウェアの不具合で、本来は地上試験で発見されるべきものである。これまでの試験結果を調査したところ、地上試験においても同様の不具合が発生していたが、不具合報告がされていなかった。このため、本不具合は飛行運用まで何ら処置・対策等がされることなく、放置されてしまった。

本不具合は、操作系を含む有人システム固有のものであり、システム試験において操作者の判断が入り込む余地が残されていたところに問題がある。JEMでは操作系を含む地上試験において、試験中の異常事象が適切に報告されるように試験方法を改善する必要がある。試験の指揮者と操作者の分業化の徹底を始めとして、少しの異常も見逃がさない様な体制を組むことが重要である。

(5)制御則の変更

表5-2の第5項のケースは、関節制御ループに採用されている積分器出力の零クリア処理の反動として起こったものである。MFDでは、摩擦抵抗に打ち勝って応答速度を速めるために積分補償を採用しているが、立ち上がり時間を平均化するために、速度が整定したところで積分器の出力を零にしている。JEMでは、積分器クリア処理は行わないで、小さな速度指令に対する応答を改善する。

(6)不必要時のコンプライアンスオフ

表5-2の第6項のケースは、力／トルクセンサの温度によるドリフトにより発生したものであるが、力／トルクセンサのドリフトを押さえることは難しい。従って、接触動作に対してのみ有効なコンプライアンス制御は、非接触動作に対してはオフとしておく。

(7)安定余裕の向上

表5-2の第7項の微小振動は、モータ軸の安定余裕が小さかったために、モータ軸と出力軸の間に使用されているハーモニックドライブの固有振動数のところで共振したものと推定される。JEMでは、ハーモニックドライブ等の固有振動数を把握し、安定余裕を向上させる必要がある。

(8)コンプライアンス制御運用手順の確立とシステムの改善

表5-2の第8項のケースは、本試験の前にコンプライアンス制御(FLUX)モードでアーム先端の押し付け操作を行っており、コンプライアンス中心がアームの先端位置よりもかなり先の方向に移動していた為、搭乗員が手順書通りにロボットアームを引く操作を行っても、直ぐにはコンプライアンス中心がアームの先端位置まで戻らず、想定していた引っ張り力が発生しなかったものである。

従って、JEMでは、コンプライアンス制御下で動作方向を逆転するようなアーム操作を行う場合は、コンプライアンス中心を一旦リセットするとか、アームの先端位置とコンプライアンス中心のずれを表示することが望ましい。また、この様な設計情報について、設計者は運用者に適切に伝達する必要が

ある。

(9)制御座標系と表示座標系の一致

MFD ロボットアームのマニュアル操作用のアーム制御座標系(Command Frame)は、アームの先端(End Effector; EE)やアームの手首部に搭載されたカメラの先端(EE Camera)等を原点とする座標系に設定・操作することができる。一方、アーム制御データモニター用の表示座標系 (Display Frame) は、アーム把持の目標点となる O R U やドアの把持部の中心等を原点とする座標系に設定することができるが、いずれもアームの先端 (E E) との位置関係しか表示しない。これでは、アーム手首カメラの先端 (EE Camera) 等を中心にアームのマニュアル操作を行う場合、アームの動作 (制御座標系) と実データの変化 (表示座標系) との対応が取れず、アームの操作がし辛いという指摘が搭乗員訓練において搭乗員よりあった。

よって、アーム制御座標系とデータ表示座標系とは、一致させることが望ましい。

8 . おわりに

以上述べたように、MFD ロボットアームは異常事象はあったものの、ハードウェア及びソフトウェアに故障はなく、軌道上において設計通りの機能・性能を発揮した。また、飛行運用中の地上における飛行運用管制も良好に行われ、異常事象に対する搭乗員への指示を含む対応が適切に行われた。打上げから着陸までの全ての飛行運用期間を通じて予定された全ての試験項目を完遂し、MFD シャトル搭載システムのハードウェア及びソフトウェアに一切の故障が無かった事により、耐環境性を含むシャトル適合性等に関する設計並びに製作・検証方法の妥当性が実証された。

飛行後に実施したシャトル搭乗員に対する質問(デブリーフィング)や、テレメトリデータ等の解析を行い、MFD ロボットアーム及びその飛行運用について、JEM に反映すべき事項が明らかにされた。今後これらの成果を確実に JEM に反映していくことが重要と考えられる。

また、GC 実験、TPFLEX 及び ESEM についても予定された実験を完遂したことにより、MFD ミッションは、所期の目的を達成したものと考えられる。

参考文献

- [1] 長友正徳 他 : マニピュレータ - 飛行実証試験 シャトル搭載システムの開発状況について回第宇宙ステーション講演会 / 第 9 回 有人宇宙飛行技術シンポジウム
- [2] 長友正徳 他 : マニピュレータ - 飛行実証試験に係る地上運用システムの開発状況について 12 開宇宙ステーション講演会 / 第回 有人宇宙飛行技術シンポジウム
- [3] 長友正徳、石井康夫 : MFD の実証ミッション、電子情報通信学会 SANE97-23
- [4] 内堀康弘、長友正徳 他 : MFD (STS-85) に見る有人宇宙ロボティクス運用の特徴、第 41 回宇宙科学技術連合講演会 97-15-11