

# スペースシャトルでのマニピュレータ実証試験の成果

Results of Manipulator Flight Demonstration aboard the Space Shuttle

長友 正徳  
NAGATOMO Masanori

相浦 正宏  
AIURA Masahiro

池内 正之  
IKEUCHI Masayuki

田中 正樹  
TANAKA Masaki

国際宇宙ステーションの日本実験モジュール（JEM）打上げに先立ち、スペースシャトルを利用して、JEM 精密作業用ロボットアームの飛行実証試験をマニピュレータ飛行実証試験（MFD：Manipulator Flight Demonstration）として、日本初の宇宙ロボットアームを用いて行った。軌道上での運用を通して、無重量環境下でのロボットアームの機能・性能、操作における人間機械系設計の妥当性、軌道上交換装置（ORU）の脱着やドアの開閉の実証ができただけでなく、JEM 遠隔操作マニピュレータシステム（JEMRMS）を含めた将来のロボットへの貴重な知見を得ることができた。

The manipulator flight demonstration (MFD) was carried out to demonstrate the functions and performance of the robot arm, which is similar to the small fine arm of the Japanese experiment module remote manipulator system (JEMRMS), using the space shuttle prior to launching of the Japanese experiment module (JEM). The functions and performance of the robot arm in the space environment were confirmed, and the orbital replacement unit (ORU) detachment/attachment function and the hinged door open/close function were successfully demonstrated.

The design and operational information obtained through the MFD will be utilized in future manned robotics missions including JEMRMS. Crew operation procedures can be effectively reflected in JEMRMS operations.

## 1 まえがき

MFD では、国際宇宙ステーションの JEM 打上げに先立ち、スペースシャトルを利用して、JEM の精密作業用ロボットアーム（JEMRMS SFA）<sup>(1)</sup>の飛行実証試験を日本初の宇宙ロボットアームを用いて行った。

ここでは、軌道上運用の結果得られた成果を中心に述べる。

## 2 MFD ミッション概要

MFD の基本ミッションは、無重量環境下でのロボットアームの機能・性能の実証、ロボットアーム操作での人間機械系設計にかかわる実証、ORU の脱着やドアの開閉にかかわる実証の三つに大別される。

ロボットアームの機能・性能の実証では、クルー操作時の印加力を制限するために設けた力制御の一つであるコンプライアンス制御性能を評価することが特に重要である。人間機械系設計では、クルーが操作を行うワークステーションのアクセシビリティ、表示ビデオおよびデータの視認性などが評価の対象となる。

また、これらの飛行実証試験に加えて、スペースシャトルに搭載された MFD ロボットアームを地上から遠隔操作する GC (Ground Commanding) というロボットアームの技術実験を行った。

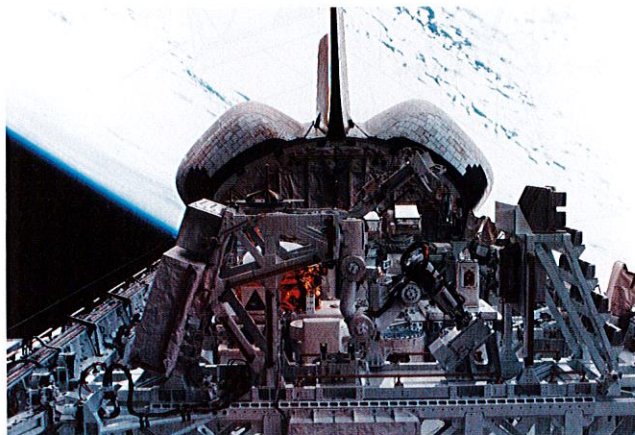


図1. MFD システムの外観 (NASA 提供) スペースシャトルのコックピット窓から見た MFD システムの外観を示す。

View of MFD system from space shuttle aft flight deck (photo courtesy of NASA)

MFD シャトル搭載システム（以下、MFD システムと略記）はスペースシャトルの荷物室に搭載され、JEMRMS SFA と等価な腕部は、把持機能をもつフィンガーとボルトの緩め締め機能をもつツール部を先端に備えている。アームのタスク対象物として JEM の機能を模擬した小型の ORU、および拘束運動を試験するためのドア機構が設けられている。図1に、スペースシャトルの荷物室に搭載された MFD システムの外観を示す。



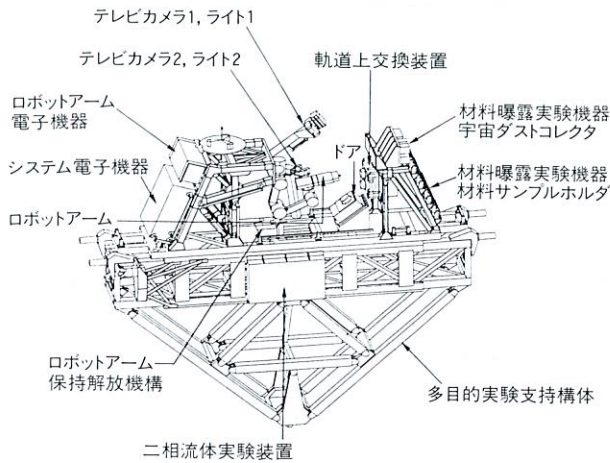


図2. MFDシステムの船外機器配置 ロボットアーム、タスク対象物を中心とした船外機器の配置を示す。

Configuration of MFD system in space shuttle payload bay

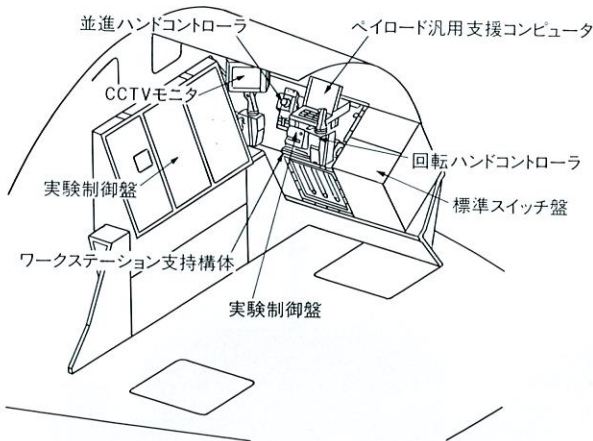


図3. MFDシステム船内機器配置 MFDシステム船内機器は、スペースシャトルの与圧された乗務員室に搭載される。

Configuration of MFD system in space shuttle aft flight deck

図2に船外機器の配置を示す。

ロボットアームの操作制御に必要なハンドコントローラ、実験制御盤、ベイロード汎用支援コンピュータは、軌道上でクルーによって組み立てられるワークステーション支持構体上に取り付けられるが、あらかじめ取り付けられている実験設定盤、標準スイッチ盤、CCTV (Closed-Circuit TeleVision) モニタと併せて、JEMRMSの人間機械系インタフェースを想定し配置している。

図3に船内機器の配置を示す。

### 3 運用結果

スペースシャトルは、現地 KSC (Kennedy Space Center) 時間の 1997 年 8 月 7 日に予定どおり打ち上げられた。表 1 に MFD ミッション試験項目、および実施 FD (Flight Day) を示す。

#### 3.1 システム習熟

この試験では、クルーのハンドコントローラ操作に応じてアームが動作し、単軸駆動では各関節が設定速度どおりに動作することを確認した。また、フィンガー/トルクドライバの動作プロファイルを確認し、打上げ環境によるアームの損傷もなく、正常な動作を確認した。

#### 3.2 アーム制御性能確認試験

この試験では、コンプライアンス制御、負荷時/無負荷時の単体駆動制御、および先端位置決め制御性能などのロボットアーム単体の制御機能を中心とした基本機能の妥当性を確認することができた。以下に、コンプライアンス制御性能評価について評述する。

コンプライアンス制御は、ロボットアームが対象物に接触するときの衝撃力を軽減し、対象物にぶつかるためロボットアームの姿勢を動作させるために設けた機能で、小型の JEMRMS SFA の重要な制御機能の一つである。

表 1. MFD ミッション試験項目

MFD mission tasks

	試験項目	実施 FD (日)
システム習熟	マニュアル制御動作	2
	単軸駆動制御動作	2
	安全機能確認動作	2
	ツール操作	2
アーム制御性能確認試験	コンプライアンス制御性能 (FLEX, MED, HARD)	5
	無負荷時の単軸駆動制御性能	2
	無負荷時の先端位置決め制御性能	2
	負荷時の単軸駆動制御性能	4
タスクエレメント試験	ORU 交換試験 1, 2, 3, 4	4, 5, 7
	ドア開閉試験 1, 2, 3	4
地上遠隔操作	GC 試験	7, 9

FLEX: フレックス MED: ミディアムモード HARD: ハードモード

ロボットアームの作業対象との位置関係を考慮した位置に仮想的なばねを設け、外力に対してばねが変位するようにロボットアームの位置制御を行い、そのばねの剛性を選ぶことにより、外力に対するコンプライアンス特性を変更する。ばね剛性は、並進、回転で2種類用意しており、高剛性のハードモードで並進 300 N/m、回転 50 N・m/rad、低剛性のミディアムモードで並進 150 N/m、回転 10 N・m/rad である。回転については、タスクエレメントの把持部とのインタフェース上、付加トルクに対応した姿勢の倣い性能を向上させたフレックスモードを追加している。

コンプライアンス制御性能試験では、ORU を把持した拘束状態で、あらかじめプログラムされた目標軌道により各軸並進、回転方向に相対変位を 50 mm、5 deg 与える形で力、トルクを印加した。評価対象データとして、ツールの機軸方向への引っ張り時の同方向の力成分の応答を図 4 に、倒れ回転時のトルクの応答を図 5 にそれぞれハードモード、ミディアムモードに分けて示す。図から、定常状態でのアーム先端に加わる反力について考えると、並進方向についてハードモードとミディアムモードを比較すると、付加される力、すなわち引っ張り力はハードモードでの約 12 N に比べてミディアムモードで約 6 N に半減している。

一方、回転トルクについては、トルク付加時の過渡状態

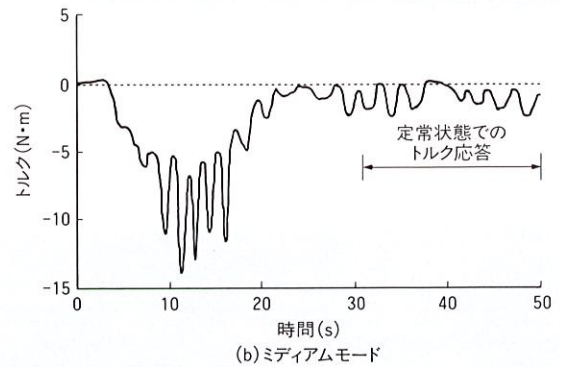
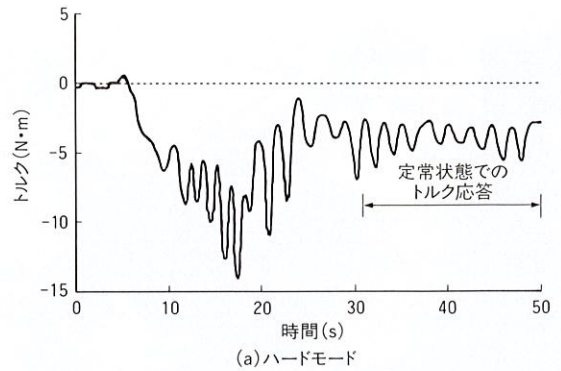


図 5. 倒れ回転時のトルクの応答 トルクを加えたときのミディアムモードでの印加トルク(b)は、ハードモードでの印加トルク(a)に対して定常状態で低減されている。

Torque response in rotation

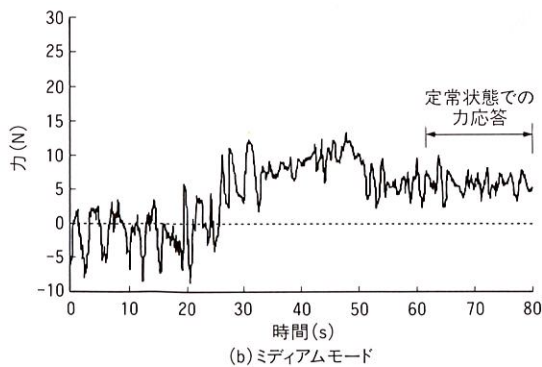
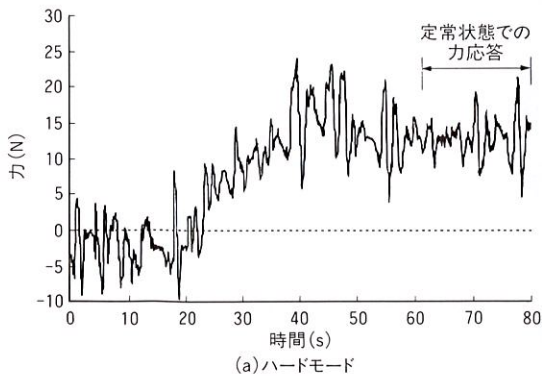


図 4. 引っ張り時の力成分の応答 引っ張り力を加えたときのミディアムモードでの印加力(b)は、ハードモードでの印加力(a)に対して低減されている。

Force response in pulling

時はハードモードおよびミディアムモードともにあまり差はないが、定常時でのトルクのつり合い状態では、ハードモードでの約 4 N・m に比べてミディアムモードで約 1 N・m となり大幅に軽減されている。また、フレックスの応答についてはトルク負荷時のトランジェントも他のコンプライアンス制御より小さく、さらに定常時には 0 N・m 近傍で負荷トルクが落ち着くことを確認した。

以上、剛性比に対応した印加力の発生を確認したことで、並進・回転のコンプライアンス制御系の設計において剛性の選択による印加力・トルクの軽減、また姿勢の倣い性能の向上を図ったコンプライアンス制御設計の妥当性を確認することができた。

### 3.3 タスクエレメント試験

この試験では、ロボットアームとタスクエレメントとの作業インタフェース、および拘束運動下でのコンプライアンス制御によるアームの動作性能の妥当性が確認された。

また、操作については、二人のクルーの操作時間に多少の差はあったが、ツールによるアクセス時にターゲットを、ORU の脱着時にマークを使用する視認、確認などを含む基本的な運用手順の妥当性が確認できた。図 6 にジャンパー飛行士によるワークステーション操作の状況、図 7 に ORU 脱着試験を示す。





図6. ワークステーション操作状況 (NASA 提供) スペースシャトル内から宇宙飛行士ジャン デービスがロボットアームを操作しているようすを示す。

Astronaut operating robot arm (photo courtesy of NASA)

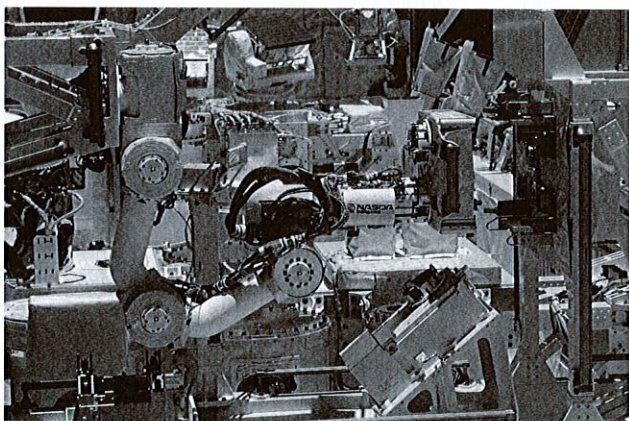


図7. ORU 脱着試験 (NASA 提供) アームにより ORU をつかみ ORU 支持構体から外して、再度取り付けようとしているようすを示す。  
ORU detachment/attachment (photo courtesy of NASA)

なお、クルーは MFD システムを操作するとき、頻繁にシャトルの窓から双眼鏡でアームの動作を確認しており、窓外視野の重要性が確認された。

### 3.4 地上遠隔操作

各研究機関が実験テーマとして定めたアーム軌道データ

を地上から送信して軌道に基づくアームの動作を確認し、テーマごとの運用データを取得して所期の目的を達成することができた。

## 4 あとがき

JEMRMS の飛行実証として実施した MFD ミッション運用の結果、ロボットアームの機能・性能、操作上の人間機械系インタフェースの妥当性、および ORU 交換などのタスクの実現性が実証された。

飛行運用中、あるいは飛行後の解析で得られた知識は、JEMRMS や今後の宇宙ロボットの開発の貴重な情報として活用でき、また今回得られた有人ロボット運用の知識も、今後実施される JEMRMS の運用に反映できる。

## 文 献

- (1) 長友正徳, 宇宙ステーション用リモートマニピュレータシステム, 東芝レビュー, 50, 7, 1995, p.504-507.



長友 正徳 NAGATOMO Masanori

宇宙開発事業団 小型ロケットプロジェクトマネージャー。マニピュレータ飛行実証試験 (MFD) にかかわる開発・運用業務などに従事。日本航空宇宙学会会員。  
National Space Development Agency of Japan



相浦 正宏 AIURA Masahiro

東芝電波システムエンジニアリング株。マニピュレータ飛行実証試験 (MFD) にかかわる開発・運用業務などに従事。  
Toshiba Electronics Engineering Corp.



池内 正之 IKEUCHI Masayuki

小向工場 宇宙情報システム技術部参事。人工衛星・宇宙機の運用システムの設計・開発などに従事。日本航空宇宙学会会員。  
Komukai Works



田中 正樹 TANAKA Masaki

小向工場 宇宙メカトロニクス技術部主務。宇宙機のシステム設計・開発に従事。日本機械学会、日本ロボット学会会員。  
Komukai Works