

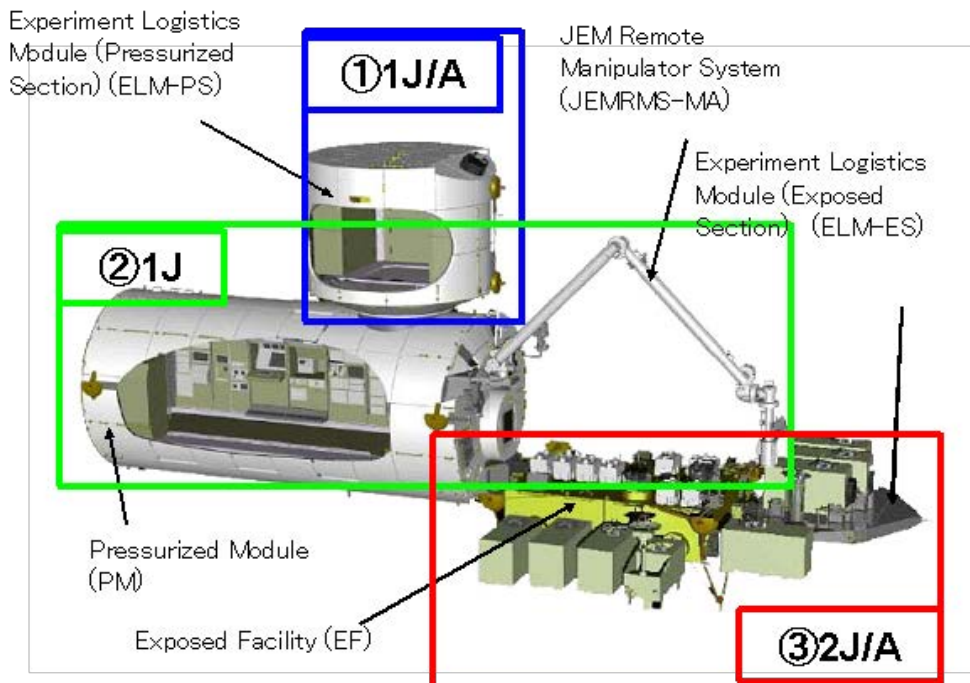
第 11 章 有人宇宙活動支援技術

～ロボティクスによる軌道上組立～

1. 序論

有人宇宙活動の中でも、国際宇宙ステーション（以下 ISS）の組立は、複数の船内・船外のクルーが係る重要な活動の一つである。3 度に分割して打ち上げる日本実験モジュール「きぼう」（第 1 図参照）においても、スペースシャトルの「フライト 1J/A」と「フライト 1J」にて打ち上げられた船内保管室

（ELM-PS：Experiment Logistics Module Pressurized Section）と船内実験室（PM：Pressurized Module）は、クルーの主要な活動として、シャトルアーム（SRMS：Shuttle Remote Manipulator System）および宇宙ステーションアーム（SSRMS：Space Station Remote Manipulator System）により ISS へ連結された。



第 1 図 日本実験モジュール「きぼう」と打ち上げ

PMに搭載され、折り畳まれて「フライト1J」にて打ち上げられた「きぼう」ロボットアーム（JEMRMS：JEM Remote Manipulator System）もPMをISS連結直後に、クルー操作により展開され、その後の軌道上クルー運用にて、段階的にチェックアウトを完了した。

3便目となる「フライト2J/A」にて打ち上げられた、船外実験プラットフォーム（EF：Exposed Facility）・船外パレット（ELM-ES：Experiment Logistics Module Pressurized Section）および3体の実験装置は、SRMS、SSRMS、JEMRMSの3体のロボットアームを駆使して、クルー操作によりPMあるいはEFに組み付けられた。その後、宇宙ステーション補給機（HTV：H-II Transfer Vehicle）に搭載されISSに運搬された、曝露パレット（EP：Exposed Pallet）および2体の実験装置は、SSRMSとJEMRMSの2体のロボットアームのクルー操作により、EFに組み付けられた。

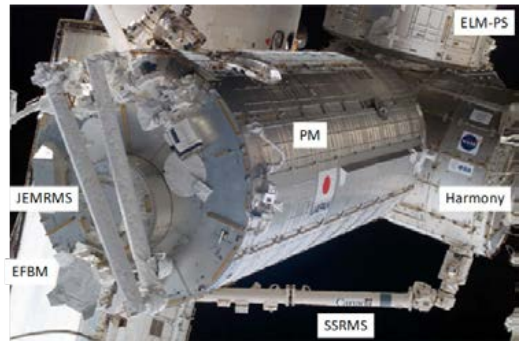
本報告では、「きぼう」で獲得した有人宇宙活動支援技術の一つとして、ロボットアームによる軌道上組立技術について、技術課題とその対策、実運用結果について述べる。

2. 船内保管室（ELM-PS）・船内実験室（PM）の組立

ELM-PSは「きぼう」第1便（フライト1J/A）としてスペースシャトルにて2008年3月に打ち上げられた。土井宇宙飛行士が操作するSRMSにてシャトルのカーゴベイから取り出された後、ISSのハーモニーの天頂部に一時的に組み付けられた。

PMは第2便（フライト1J）として3ヶ月後に打ち上げられ、星出宇宙飛行士が操作するSSRMSにてシャトルのカーゴベイか

ら取り出された後、ISSのハーモニーの左舷部へ組み付けられた（第2図参照）。その後、ELM-PSは再度SSRMSにてISSより取り外され、PMの天頂部に最終的な組み付けを行った。



第2図 ISSに取付された船内実験室と船内保管室

ELM-PS、PMおよびISSとの結合機構は、与圧モジュール間を結合するISSの共通結合機構（CBM：Common Berthing Mechanism）を使用したため、ELM-PSのISS上への仮置きが可能となった。また、軌道上での結合には、過去の運用実績によりNASAが確立していた以下の手法が採用された。

- 結合面に設けたボアサイトカメラにより、相手側結合面のターゲットマーカを視準し、相対位置補正および位置決めをロボットアームの操作クルーが実施する。
- CBMの機構に設けられている捕獲可能領域の有無を示すリミットスイッチにより、捕獲操作の開始判定（RTL：Ready to Latch）を船内クルーにより実施する。

従って、船外活動（EVA）に頼らずに、船内活動（IVA）だけで、ロボットアームおよび結合機構の操作、RTL 判定、結合作業が完了できた。

3. 船外実験プラットフォーム（EF）の組立

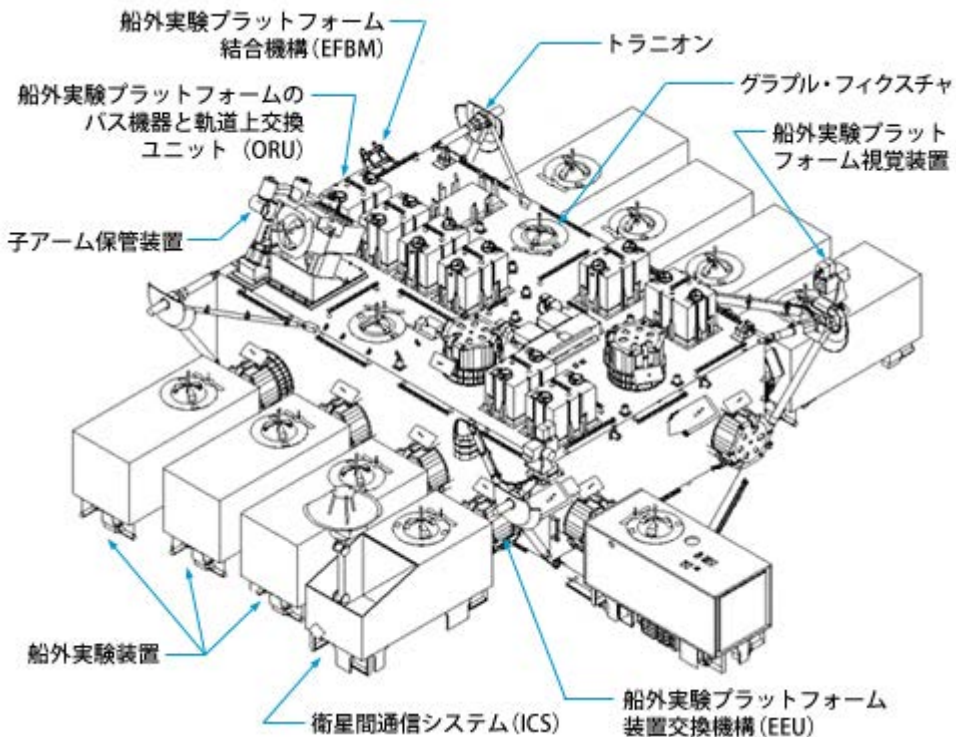
EF は微小重力、高真空等の宇宙曝露環境を利用して、科学・地球観測、通信・理工学・材料実験等を実施可能な多目的設備である（第 3 図参照）。「きぼう」第 3 便（フライ

ト 2J/A）にて 2009 年 7 月に打ち上げられ、その形状は長さ・幅約 5m の箱型で、重量は約 4t である。

EF の組立では、ELM-PS および PM の組立と以下の点が主に異なる。

A) 最終組み付け位置がスペースシャトルから遠方にあるため、取り外しから組み付けまでの作業範囲を 1 台のロボットアーム単独でカバーすることができない。

B) 結合機構が「きぼう」独自の機構であるため、CBM で確立した結合手法が利用できず、新たに結合手法を開発する必要がある。



第 3 図 船外実験プラットフォーム

(1) EF の組立シーケンス

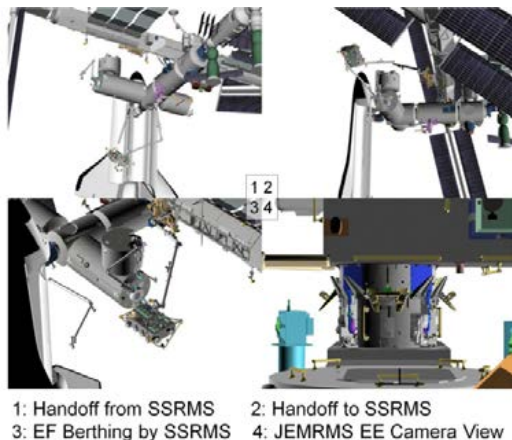
A) に対応するため、EF の軌道上での組み立ては以下のシーケンスにより実施され

ることになった。

- ① SSRMS は EF をシャトルのカーゴベイから取り出し、SRMS へ一時引き

渡す（第4図の左上）。

- ② SSRMS が基部を入れ替える Walk-off を行い、自身の基部をシャトル近傍のハーモニーから ISS トラス上へと移す。
- ③ SRMS が EF を引き渡し易い位置へ姿勢変更し、SSRMS は EF を受取る（第4図の右上）。
- ④ SSRMS は EF を PM の取り付け位置へ位置決めする（第4図の左下）。



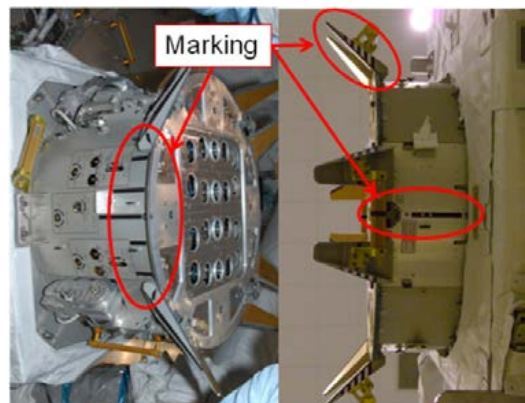
第4図 船外実験プラットフォームの
組立順序

SRMS への一時引き渡しは、SSRMS の基部を替えて、EF の取り付け位置を SSRMS の作業領域に含めるように実施する。開発当初は SSRMS が EF を把持して、トラス上のレール移動により基部位置を変更する予定であったが、時間短縮および、トラス移動中の電力遮断のリスク回避のため、上記方式が採用されることとなった。

(2) 船外実験プラットフォーム結合機構 (EFBM)

EF の結合には船外実験プラットフォーム

結合機構（EFBM：Exposed Facility Berthing Mechanism）が使われる（第5図参照）。EFBM は、Active 側が PM に Passive 側が EF に装備される。Active 側には捕獲範囲にある Passive 側を引き込み結合面を一致させる初期ラッチ、構造的にボルト締結する構造ラッチ、電気流体 QD を接合するアンピリカルラッチおよび、各ラッチの操作・制御装置から構成される。操作は IVA により行われ、電氣的異常に備えて、EVA にて駆動できるバックアップ機構を有する。



第5図 船外実験プラットフォーム結合機構写真
(左：Active、右：Passive)

(3) EVA-GCA のマーキング

B) に対応するため、NASA/CSA と協力しながら、安全・確実に組み立てできる方式を検討・開発してきた。開発当初には、ISS の組立手法として、計測用マーカを複数配置する SVS (Space Vision System) にて位置決め・RTL する手法が提案・実行されていた。

しかし、NASA の方針変更により、SVS は ISS の組立に段階的に使われないことになった。一方、SVS に替わって EVA-GCA

(EVA Ground Control Approach) 方式が提案・採用され、EF の組立の際にも、SVS から EVA-GCA へと方針転換された。

EVA-GCA は、結合面付近に EVA を配置して、EVA の指示により、接近制御を行う方式であり、EVA 実施中のみ取りうる方式である。後述する Force Fighting 対策として、EVA が相対位置を接近させて判定できるようなマーキングを設置した(第 5 図参照)。シミュレータを用いたクルーによる評価の結果、本マーキングを用いれば、並進残留偏差 1cm、角度残留誤差 0.6deg の範囲まで接近可能であることが確認できた。その後、打ち上げ前の運用準備の検討段階で、EF の取付には、A) で示したように、移設作業に時間を要し、EVA での実施時間が十分確保できない事態になることが判明した。そのため、「きぼう」やロボットアーム、ISS のカメラを駆使して、EVA に頼らずに IVA だけで、接近・RTL 判定を実施する方式に変更した。2008 年 11 月に、EFBM 周辺のマーキングおよび接触挙動を模擬した地上ダイナミクスシミュレータを用いて、若田宇宙飛行士等の実際に軌道上で操作するクルーにより、カメラ故障ケースを含めた評価を実施し、IVA だけで EF 結合の接近・位置決め・RTL が実施できる目処を得た。

(4) Force Fighting 対策

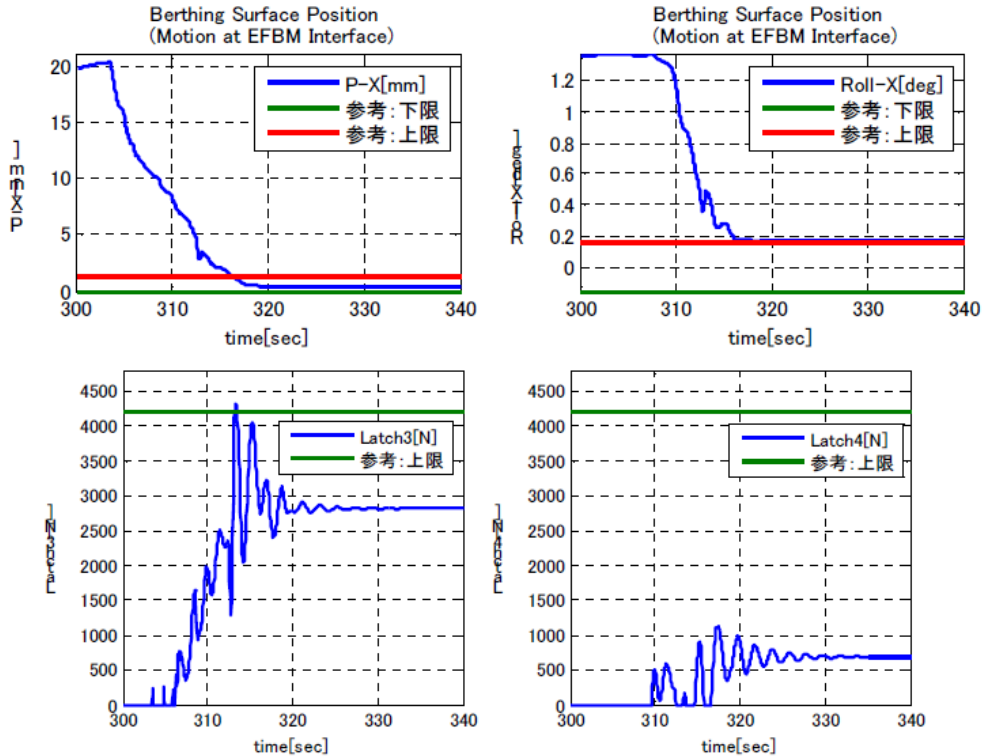
SSRMS と EFBM との協調運用は、4 本の初期ラッチ機構が EFBM の Passive 側を引き込むことから開始され、結合面を一致させることで完了する。EFBM の動作中には、SSRMS は EFBM の引き込みに従動するリンパ状態にする。しかしながら、初期ラッチ機構の操作開始後に、ISS あるいは SSRMS の異常により安全化してブレーキ状態にな

ると、ラッチ機構の引き込み力と SSRMS のブレーキ力とが拮抗して、EF が引き合う Force Fighting 事象が発生する。Force Fighting の最悪の事態は、SSRMS が把持する EF 上のグラップルフィクスチャや EFBM の初期ラッチアームが許容荷重を逸脱することである。

許容荷重の逸脱の有無を確認するため、(1) 解析環境の構築、(2) 解析条件の設定、(3) 解析の実施を行った。解析環境の構築では、EFBM のコンタクトモデルの構築を行い、NASA/CSA 側に提供した。コンタクトモデルは接触を模擬したソフトウェアモデルであり、Active 側と Passive 側の相対位置関係により接触力を発生する。また、機構の引き込みの動作および動作時の発生力を模擬している。本コンタクトモデルと SSRMS の動的モデルとを統合して NASA/CSA 側にて解析を実施した。

解析条件の設定では、ノミナル条件だけでなく、故障も模擬した解析条件の設定を行った。具体的には、4 本の初期ラッチアームのうち、任意の 1 本ないし、対角の 2 本のラッチアームが動作しない条件、および、SSRMS が安全化する条件につき、解析を実施した。

解析ケースは捕獲領域内の様々な初期ミスアライメントをランダムに 500 ケース選定し、すべての解析条件について解析を実施し、各種部位が許容荷重を満足するかを評価した。解析結果の例を第 6 図に示す。SSRMS が結合の最終段階(304 秒)で安全化すると、ロール軸補正(右上図)と同時期にラッチ#3 のアーム先端荷重が急激に増大(左下図)し、荷重逸脱となったケースである。



第 6 図 結合解析のシミュレーション結果の例

最終引き込み時の荷重逸脱は比較的短時間（10 秒以内）に発生するため、クルーが操作を停止する方策は採用できない。このような荷重逸脱に対応するため、様々な対処策を検討した結果、グラップルフィクスチャを把持するエンドエフェクタにて対策を実施することにした。本対策は、エンドエフェクタがグラップルフィクスチャを把持した後に、内部のスネヤワイヤーの張力を部分的に緩める処置である。

これらの対策により、機器の故障が結合操作の最中に発生したとしても、各部の許容荷重を逸脱することはなく、EF の組立が安全・確実に実施できることが確認できた。

(5) 船外実験プラットフォーム (EF) の結合

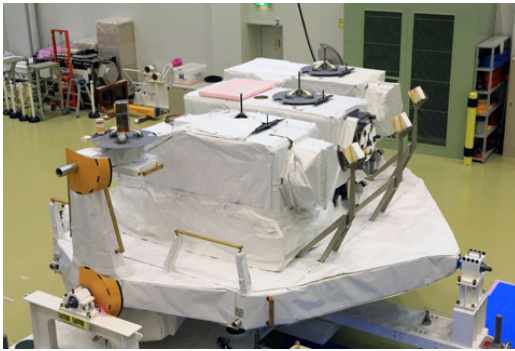
2009 年 7 月 19 日、若田宇宙飛行士による SSRMS の操作により、EF が接近し、RTL が確認された（第 7 図参照）。その後の EFBM との協調運用により、初期ラッチ機構等が正常に作動し、EFBM による EF の引込動作が完了し、EF の結合作業が完了した。



第 7 図 「きぼう」カメラによる RTL の判定

4. 船外パレット (ELM-ES) の取付・取外

ELM-ES は、船外実験装置や EF システム機器等を搭載し、EF への補給・回収、実験装置の移送を行うために開発された。「フライト 2J/A」では 3 体の船外実験装置を搭載して打ち上げられ (第 8 図参照)、EF に取り付けた状態で船外実験装置が EF に移設された後に、EF より取り外されて、シャトルに格納され、クルーとともに帰還する。ELM-ES は船外実験装置の搭載状態で 2.7t、搭載なしの状態では 1.2t である。

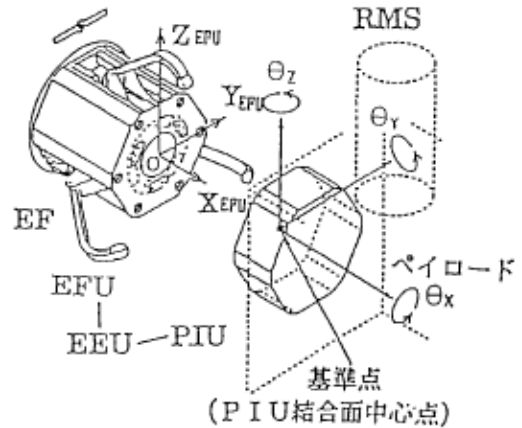


第 8 図 船外パレット

ELM-ES の取付の際には、ISS 左舷側の EF の最遠部に取り付ける必要がある。SRMS がシャトルカーゴベイから引き抜いた後、SSRMS への受け渡しを行い、SSRMS にて EF の結合ポートへの組み付けを行う。

ELM-ES の結合には装置交換機構 (EEU : Experiment Exchange Unit) が使われる。EEU は、EF 側に実装される EFU (Exposed Facility Unit) と ELM-ES や実験装置側に実装される PIU (Payload

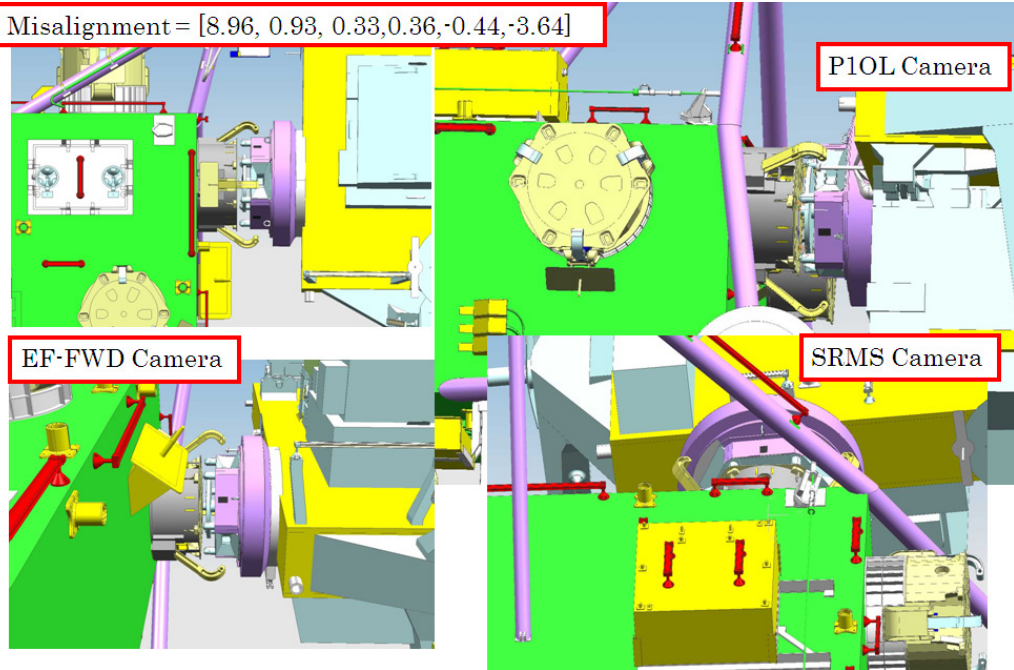
Interface Unit) とから構成される (第 9 図参照)。



第 9 図 装置交換機構の外観図

SSRMS により ELM-ES の PIU を EF の EFU に対して位置決め後、クルーにより RTL 判定を実施する。EVA 時間の短縮のため、EF の組み立て時と同様に、EVA-GCA による RTL 判定から、ISS のカメラを駆使して RTL を実施する方式に変更された。グラフィクスシミュレータを用いたクルーの評価により、RTL 判定可能であることを確認した (第 10 図参照)。

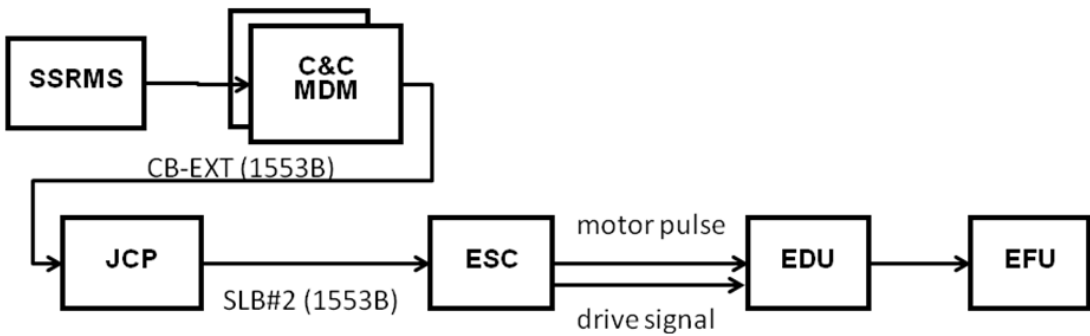
RTL 判定後の EEU の操作は IVA クルーにより実施される。EFU は捕獲範囲内にある PIU を引き込みながら機械的なミスアライメントを調芯するとともに、結合の最終段階において、電氣的・流体的結合も同時に実施する。EEU 動作の最中は、SSRMS は EEU の動きに従動するリンプにする。しかし、SSRMS が安全化のためにブレーキモードになると、EEU に従動できず、Force Fighting が発生する。



第 10 図 船外パレットの結合時のカメラ視野

ELM-ES の結合の際には、Force Fighting 事象が発生した場合、荷重逸脱に至る時間的余裕があったため、SSRMS の安全化を C&C-MDM (ISS の計算機) が検知すると EFU の緊急停止コマンドを発行するソフトウェアを実装する処置とした(第 11 図参照)。

さらに、2 故障を想定し、C&C-MDM が故障 (SSRMS は安全化) した場合でも、JCP (「きぼう」の計算機) が C&C-MDM の異常を検知して EFU を自動停止するプロシージャを実装した。



第 11 図 EFU の停止コマンド処理のブロック図

実際の運用は、SSRMS のクルー操作により、EF 取付の 3 日後に、ELM-ES を EF に取り付け、その 5 日後には EF から取り外した。ELM-ES を EF に接近させた際には、RTLを確認した後、EEU との協調運用により、ELM-ES を結合させた。また、Force Fighting 事象が発生しなかった。

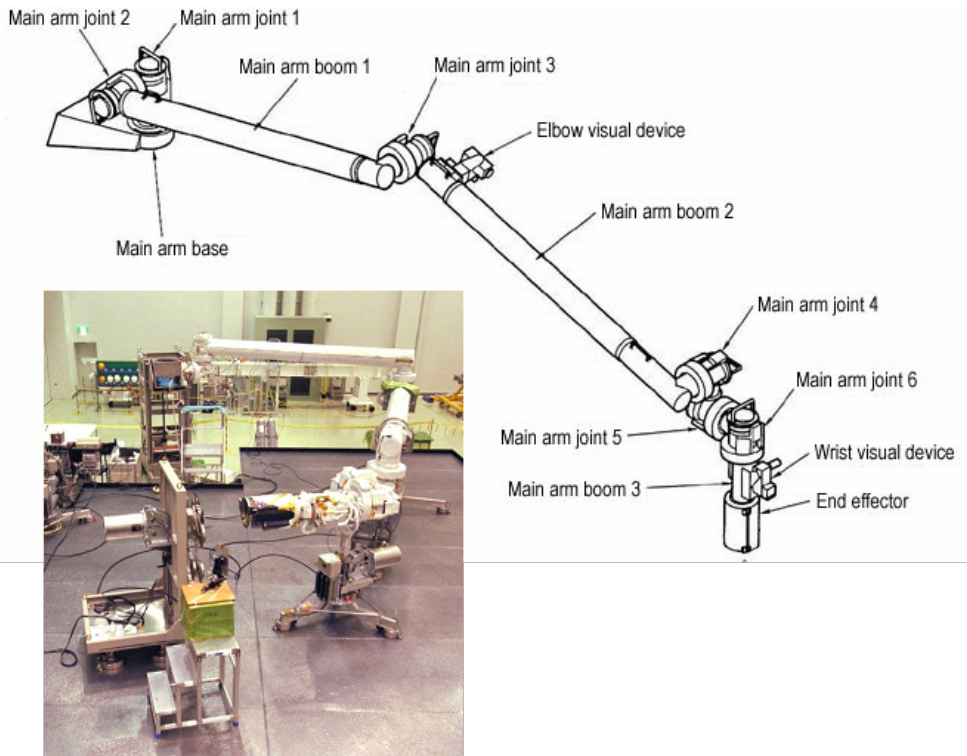
5. JEMRMS による実験装置の取付

(1) ロボットアーム (JEMRMS) の概要

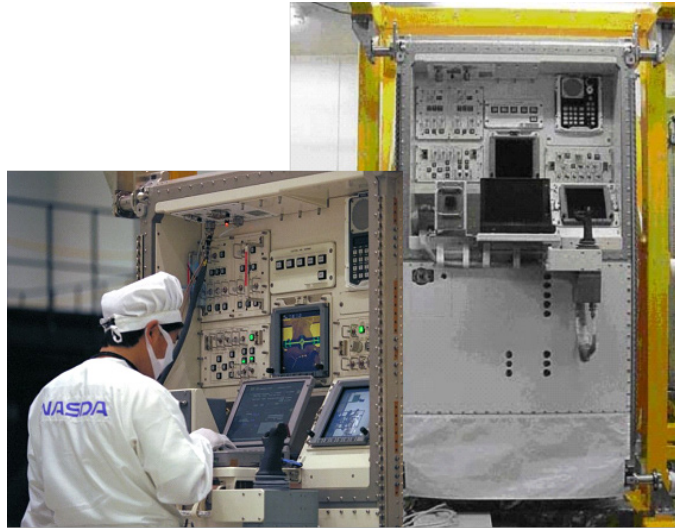
JEMRMS は船内クルーにより船外実験の支援作業を遂行するマニピュレータである。船外の実験装置を把持し空間上の任意の位置へハンドリング可能な 6 自由度を有する全長 10m・質量 780kg の親アーム (Main

Arm、MA、第 12 図参照) と、並進・回転操作用の 2 種の操縦桿およびテレビモニタ・アーム制御装置等を組み込んだ操作卓 (第 13 図参照) とから構成される。

JEMRMS は PM に組み込まれて、2008 年 6 月に「フライト 1J」にて打ち上げ後、折り畳まれた JEMRMS を軌道上にて展開し、運用が開始できる運用待機姿勢へと移行した。さらに、2009 年 1 月までに JEMRMS のチェックアウト運用を段階的に完了させ、EVA 支援に活用する等本格的な運用の準備を整えた。2009 年 7 月には、「フライト 2J/A」に搭載された実験装置を移設する実運用、同年 9 月には、HTV に搭載された EP の取付・取外とその実験装置を移設する実運用を実施した。



第 12 図 きぼうロボットアーム (JEMRMS)



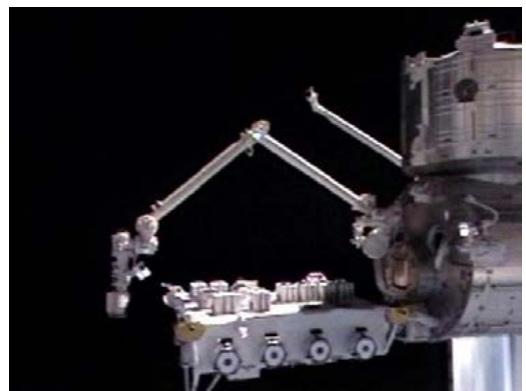
第 13 図 JEMRMS 操作卓の写真

(2) JEMRMS による RTL

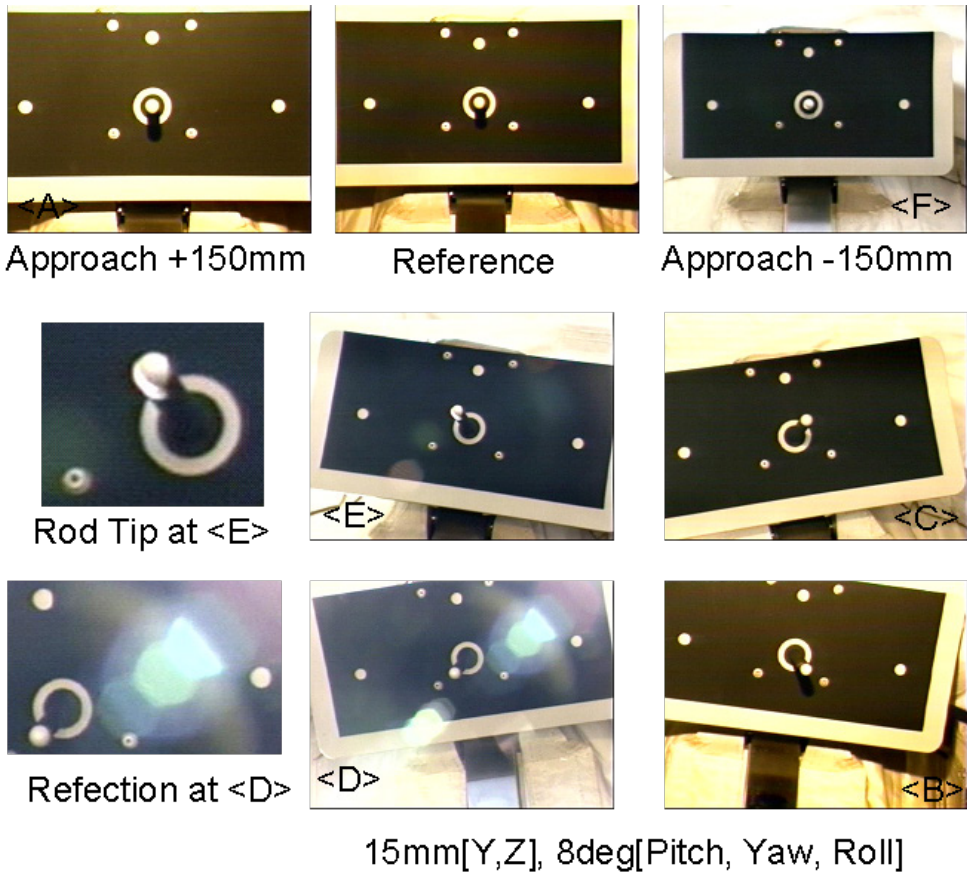
EF に取り付けられた ELM-ES および EP に搭載された実験装置は JEMRMS によって移設される。実験装置を移設の際に、最もクリティカルな運用は実験装置の取り付け操作である。JEMRMS による実験装置の取付では、結合機構の操作を開始するための RTL 判定が課題であった。RTL 判定を安全に行うため、画像計測および関節角度検出器の複数センサによる同時判定方式を採用した。また、判定時に確実に運用継続ができるように、実験装置の移設に先立って、EFU 近傍に設けたターゲットマーカ（以下マーカ）を視覚装置にて撮像し、撮像画像を地上にて画像計測して結合位置を事前に推定することとした。

実験装置を取り付ける数日前に、実験装置の結合位置の事前推定を実施した（第 14 図参照）。また、マーカを用いて EFU 位置を推定するためには、視覚装置のキャリブレーションが必要になる。視覚装置は打ち上げ前の地上試験にて、外界センサを用いてその内

部・外部パラメータを取得済みである。そのため、軌道上でのチェックアウトの際、マーカの画像を 7 方向の位置・姿勢から撮像（第 15 図参照）し、画像および画像を取得した時の JEMRMS の関節角度より、マーカの位置および視覚装置のパラメータを推定し、打ち上げ環境等によるパラメータ変動がないことを確認した。



第 14 図 EFU の位置推定実施中の写真



第 15 図 キャリブレーションに用いたターゲットマーカ画像

最初の実験装置（第 16 図参照）における RTL 位置では、画像系の通信回線がたまたま確保できない時間帯と重なったため、急遽、軌道上クルーにより画像マーカの特徴 4 点を指示してもらい、その特徴点より地上側での画像計測を実施する手順にて RTL 判定を行う等、通常とは異なる方式にて RTL 判定を実施したが、予定通り 1 日間（約 8 時間）で、3 体の実験装置の移設を完了できた（第 17 図参照）。また、HTV フライトの際には、2 体の実験装置の移設を予定通り実施した他、SSRMS と JEMRMS との間で EP の受取・受渡を実施し、JEMRMS により EF への EP の取付・取外を実施した。



第 16 図 JEMRMS による最初の実験装置の取り付け



第 17 図 実験装置 3 体取付後の
船外実験プラットフォーム

合計 5 体の実験装置を移設後、EFU の結合位置を設計値と比較した結果、偏差が大きく、JEMRMS 基部と EF 取付部との間にオフセット偏差が生じていることがわかった。EFU の実結合位置をもとに、オフセット偏差を予測し、設計値と比較したのが第 1 表である。設計時に想定した上下限値を逸脱する箇所もあるが、予測誤差も考慮すれば、設計値の上下限付近に実結合位置あり、PM の与圧変形が主要員であることが推定される。

第 1 表 オフセット量の推定結果

	EF Coordinates@RMS Coordinates					
	X[mm]	Y[mm]	Z[mm]	R[deg]	P[deg]	Y[deg]
Design	-20.3	-9.6	22.3	-0.02	-0.71	-0.37
Estimated Error	2.5	1.6	3.9	0.00	0.08	0.06
Max in Design	-22.8	-11.1	18.5	-0.02	-0.79	-0.43
Min in Design	-17.7	-8.0	26.2	-0.02	-0.63	-0.31
Estimated Offset	-28.1	-6.3	16.8	0.15	-0.75	-0.53
Difference	5.3	1.8	1.6	0.17	○	0.10

マーカを用いて EFU の結合位置推定を事前に取得しておかなければ、実験装置を把持した状態で本事象を知ることになり、補正量が予想以上に大きい(最大 10cm)ことから、視覚装置の故障の可能性も否定できず、実験装置の移設に予想以上に時間を要することになったと想定される。実験装置の位置を事前に推定しておくことは JEMRMS の運用面でも効果的であったと考えられる。

(3) JEMRMS による Force Fighting

実験装置の取り付けに当たってのもう一つの課題は、Force Fighting である。JEMRMS における実験装置の結合動作においても、JEMRMS の異常によりリンプモードからブレーキモードに移行する際、Force

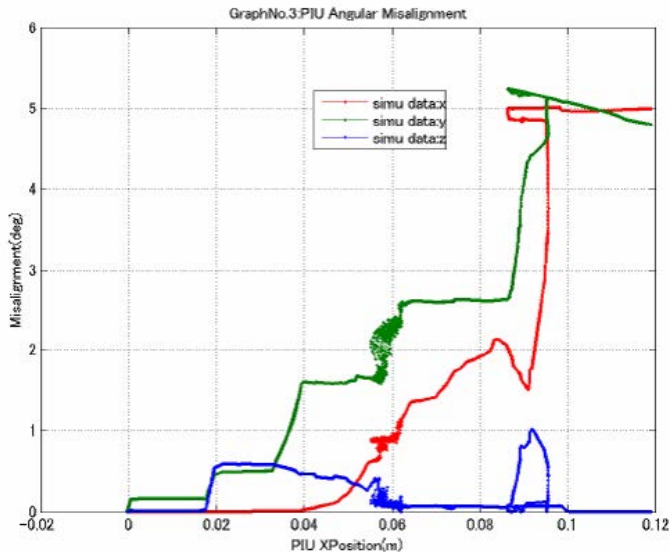
Fighting による荷重逸脱の有無をシミュレーション解析により確認した。EEU のコンタクトモデルと、JEMRMS のダイナミクスシミュレータとを連結・動作させる環境を整備した後、結合解析を実施した。

解析後の評価において、ブレーキが滑りながら、EFU が引き込みを継続する機構の挙動を確認した。特殊なケースを除き、JEMRMS がたとえブレーキ状態であっても、RTL 状態の標準的な実験装置を最初から最後まで引き込み、把持点荷重および JEMRMS の許容荷重を逸脱することはないことが確認できた。特殊なケースとは、EF 取付位置と反対側の遠方に取り付ける実験装置を結合する場合、コネクタ嵌合が開始さ

れる X 方向（横軸）40mm において、角度ミスアライメント（縦軸）が最大 1.7deg 残留し、コネクタ嵌合ができないケースがあった。しかしながら、JCP には JEMRMS のブレーキ移行により EFU の動作を自動停止するソフトウェアが実装されているため、実際

にこのような事象が発生することはない。

軌道上で得られた実データと同一条件にて解析したデータとを比較した結果、実データと解析データは一致し、解析手法の妥当性、実データの健全性を確認できた（第 18 図参照）。



第 18 図 結合解析結果の例（結合中の角度誤差の補正履歴）

6. まとめ

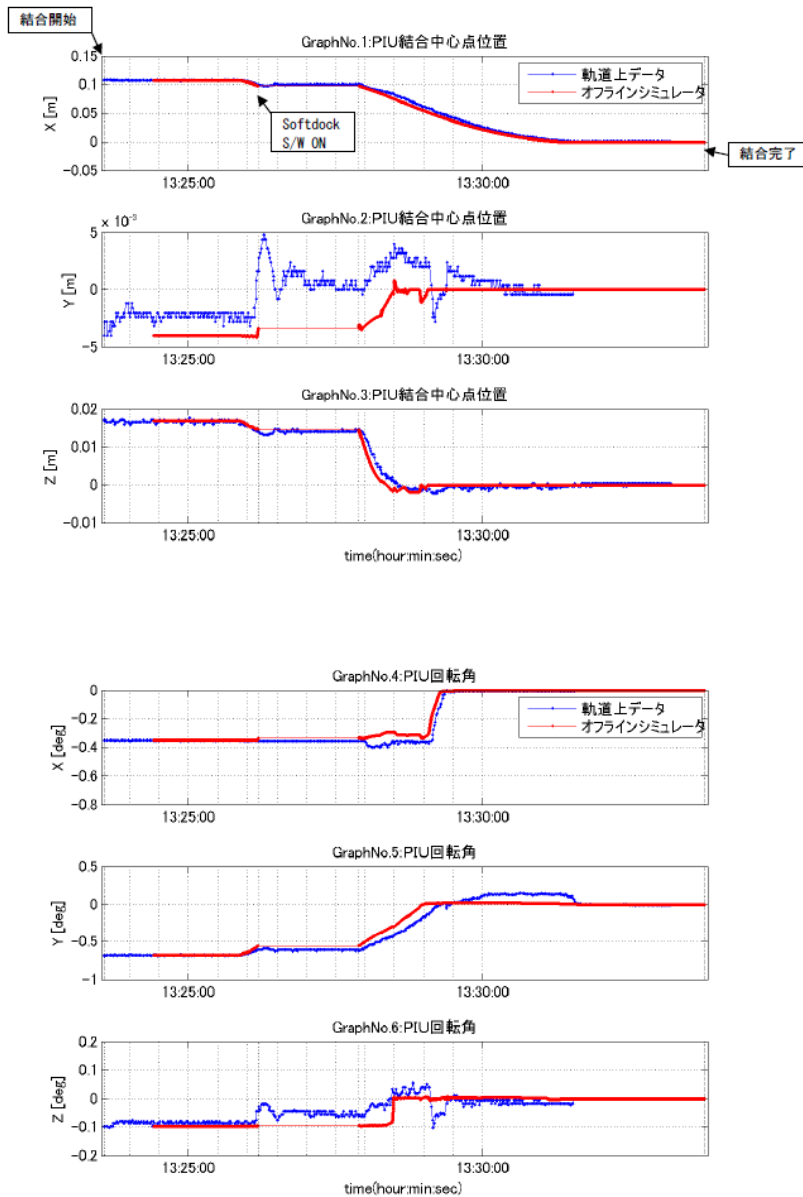
有人宇宙活動の中でも、国際宇宙ステーションの組立は、複数の船内・船外のクルーに係る重要な活動の一つである。本章では、「きぼう」の結合機構、ロボットアームに係る軌道上組立について、技術課題とその対策、実運用結果を報告した。船外プラットフォームおよび船外パレットの組立には日本で独自に開発した結合機構が使われる。宇宙ステーションアームとの協調運用においては、アームと結合機構とが互いに引き合う Force Fighting が課題であった。NASA/CSA と協

力し、結合機構へのマーキング追加、制御ソフトの変更、クルーによる接近操作評価、結合荷重解析評価等を繰り返し、安全・確実に組み立てできる方式を開発し、結合の実運用を完了した。

「きぼう」ロボットアームによる実験装置の取付では、結合機構の操作を開始するための RTL (Ready to Latch) 判定が課題であった。RTL 判定を安全に行うため、画像計測および関節角度検出器の複数センサによる同時判定を採用した。また、確実に RTL 判定を得るため、事前にキャリブレーションする方式を開発し、軌道上チェックアウトの

際に本方式の妥当性を軌道上にて確認した。これらの方式を用いて、これまでに船外実験プラットフォームへ5体の実験装置、および

曝露パレットの取り付け運用を完了した。第19図に曝露パレット結合時の時系列応答の実データの例を参考に示す。



第 19 図 曝露パレット結合時の時系列応答