

## 第 6 章 有人システム維持機能技術

### ～ロボットアーム運用のための軌道上荷重検証技術

#### 1. 序論

日本実験棟「きぼう」は、2008年3月に船内保管室、2008年6月に船内実験室とロボットアーム（第1図）の親アームが打ち上げられ、軌道上での運用が始まっている。

軌道上運用時の「きぼう」には、国際宇宙ステーションへのロシア宇宙船のドッキング衝撃荷重や、軌道上昇（リブースト）時の加速度、宇宙飛行士の船外活動による荷重などが掛かる。これらの軌道上荷重環境下においても、「きぼう」ロボットアーム（JEMRMS：Japanese Experiment Module Remote Manipulator System）によるペイロード移設などのロボットアーム運用（第2図）は、有人システムの安全を確保しながら遂行されなければならない。

このため、国際宇宙ステーションのロボットアーム運用においては、軌道上での運用前に、各種の軌道上荷重に対するロボットアーム運用の規定を整理することになっており、実時間の運用では、それら運用規定に基づき、ロボットアーム運用が行われている。もちろん、JEMRMSの運用規定を整理するためには、軌道上荷重に対するJEMRMSの挙動を予測する必要がある。

本章では、軌道上荷重に対するJEMRMSの挙動予測と運用規定の設定への取り組みを示し、「きぼう」で獲得した有人システム維持機能技術として、ロボットアーム運用の

ための軌道上荷重検証技術を報告する。

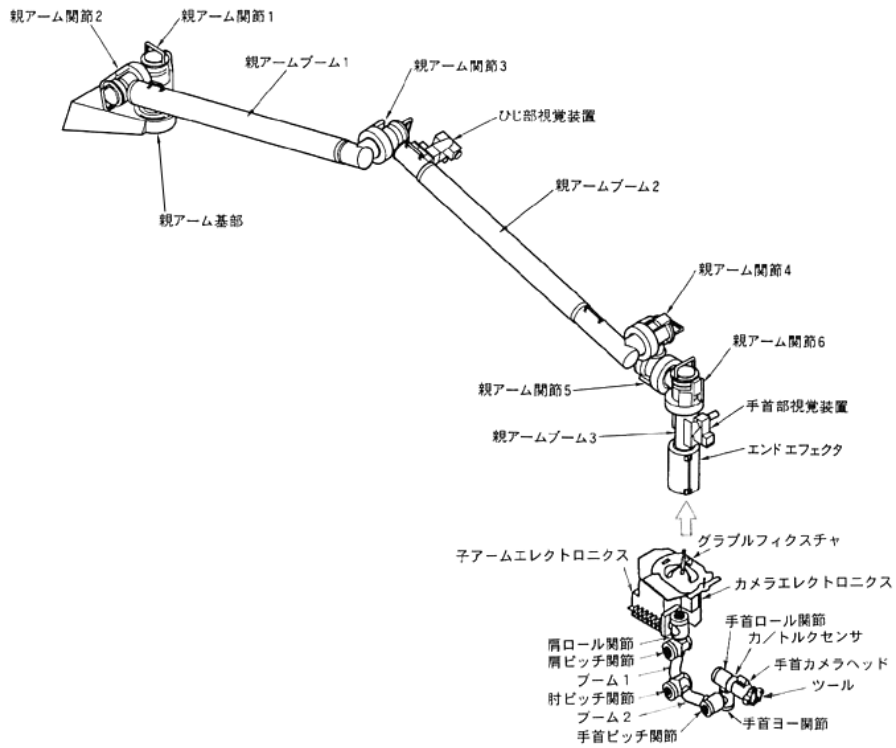
#### 2. 軌道上荷重に対する JEMRMS の挙動予測

##### 2.1 軌道上荷重

軌道上を周回する国際宇宙ステーションでは、通常の人工衛星と同様に、定期的な軌道上昇や姿勢制御が行われている。また、国際宇宙ステーションの建設は段階的に進み、かつ軌道上では機器メンテナンスが定期的に行われている。さらに、有人システムであるが故に、宇宙飛行士は国際宇宙ステーションの船内や船外で様々な活動を行っている。これらの日常的な活動の中でも、軌道上荷重が発生してJEMRMSに掛かってくるため、軌道上運用時のJEMRMSの挙動を予測するためには、様々な軌道上荷重を考慮する必要がある。軌道上荷重の一例を第1表に示す。

JEMRMSの挙動予測で考慮される軌道上荷重は、軌道上計測結果を基に定式化されたものや姿勢制御情報（スラストの噴射間隔など）を基にモデル化されたものなどがあり、不確定性を含む定義になっている。不確定性が含まれる理由は、大きく二つに分けられる。一つ目は、JEMRMSの挙動を予測する時点では確定できない運用上の要素があるからである。二つ目は、軌道上荷重が適用される数学モデル（軌道上H/Wを模擬した有限要素モデル）と軌道上H/Wとのコリレーショ

ン誤差を、比較的変更が容易な軌道上荷重に、では、一つ目の理由について、例を挙げて紹介する。  
不確定性として含めているからである。ここ



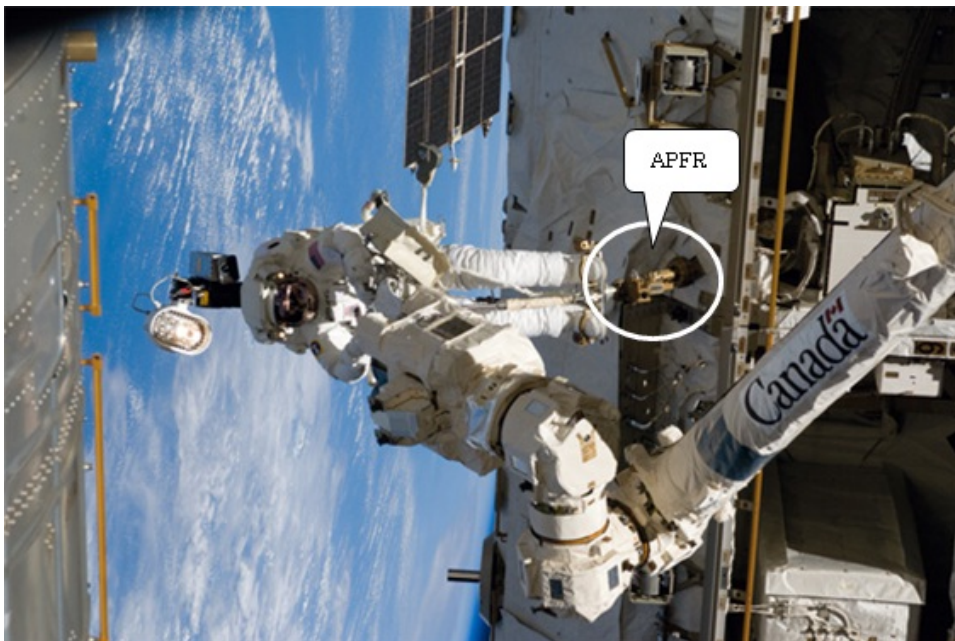
第1図 「きぼう」ロボットアーム



第2図 ペイロード移設中の JEMRMS

第 1 表 軌道上荷重の一例

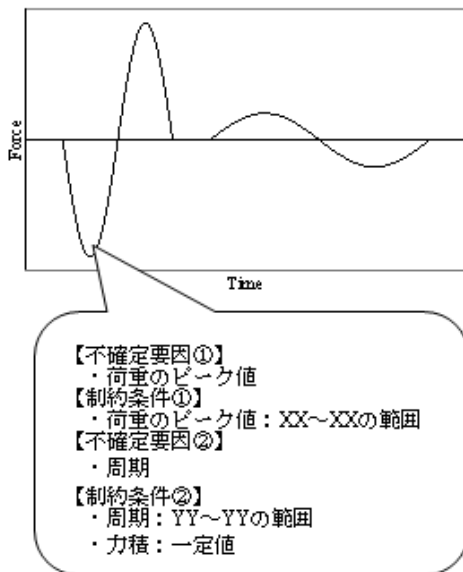
カテゴリ	軌道上荷重
Extravehicular Activity (宇宙飛行士の船外活動)	ORU Handling APFR Layback APFR Quick Grab Kick-Off Tether APFR Ingress / Egress Free-Float / Cyclic Loading
Intravehicular Activity (宇宙飛行士の船内活動)	Push-Off and Landing SM Ergometer Flywheel Exercise Device
Attitude Control (姿勢制御)	USTO Hold and Maneuver RS MCS Hold and Maneuver CMG Momentum Desaturation Orbiter Reaction Control System (VRCS/PRCS)
Docking (ドッキング)	Russian Vehicle Docking Orbiter Docking
Undocking (アンドッキング)	Russian Vehicle Undocking Orbiter Undocking
Reboost (軌道上昇)	Station Reboost Orbiter Reboost
SSRMS Operations (宇宙ステーションロボットアーム (SSRMS) の運用)	SSRMS Emergency Braking Payload Berthing



第 3 図 船外活動中の宇宙飛行士

宇宙飛行士の船外活動“APFR Layback”（船外活動時の足場（APFR：Articulating Portable Foot Restraint）（第3図）で宇宙飛行士が動くことに起因する軌道上荷重）について言うと、船外活動を行う宇宙飛行士は、それぞれ体重が異なり、また同一人物であっても毎回動作量は異なることが予想されるため、これらは軌道上荷重の不確定要因として考える必要がある。“APFR Layback”の軌道上荷重で考えられている不確定性のイメージを第4図に示す。

また、姿勢制御全般について言うと、実時間の運用時の制御量などに応じて適切に設定されるスラスタの噴射間隔などは、不確定要因として考える必要がある。



不確定要因①の決定後、不確定要因②の決定

第4図 軌道上荷重の不確定性（イメージ）

なお、これら軌道上荷重は、同時に発生し得ることも忘れてはいけない。例えば、国際宇宙ステーションのスラスタを使ったリブ

ースト運用中に、一人の宇宙飛行士が船内を移動し、別の宇宙飛行士が Ergometer を使ったエクササイズを行うことは、軌道上では日常的に起こり得ることである。この事象に対する JEMRMS の挙動を予測しようとした場合、“Station Reboost”と“Push-Off and Landing”と“SM Ergometer”の軌道上荷重を複合して、JEMRMS の挙動を予測する必要がある。

## 2.2 挙動予測

JEMRMS の挙動予測は、国際宇宙ステーションにおける軌道上荷重を考慮した解析（大規模ではあるが線形で考えられる解析）と JEMRMS の詳細な挙動を予測するための非線形性（関節のバックラッシュなど）を考慮した解析を弱連成した、二段階の解析（第5図）により行われている。

ここで、強連成解析を採用しなかった理由は、JEMRMS のローカルな非線形性のために、国際宇宙ステーション全体の大規模な非線形解析を行うのは、非効率だと考えたからである。また、国際宇宙ステーションと JEMRMS の質量比を考えると、国際宇宙ステーションレベルでの予測解析における JEMRMS 基部（国際宇宙ステーションとの境界位置）での応答は、JEMRMS が線形モデルか非線形モデルかではなく、国際宇宙ステーション側の要因に支配的であると考えられる。



第5図 挙動予測の概要

まず、国際宇宙ステーションレベルでの予測解析では、2.1項で示した軌道上荷重と国際宇宙ステーション全体の有限要素モデルを用いた過渡応答解析を行い、軌道上荷重に対する JEMRMS 基部（親アーム基部）での荷重・加速度を予測する。

この際、安全側の予測になるよう、不確定性の範囲内で、JEMRMS にとって厳しい（JEMRMS 基部での荷重がワーストとなる）軌道上荷重を設定する必要があり、軌道上荷重が有する周波数特性と JEMRMS の固有振動数をできるだけ近づける（共振させる）ことがポイントとなる。

次に、JEMRMS 単体での予測解析では、上記で予測した JEMRMS 基部での加速度を入力として、JEMRMS ダイナミクスシミュレータを用いて、より詳細な JEMRMS 挙動を予測する解析を行い、関節角度や先端

（親アームのエンドエフェクタ）の位置・姿勢の変動量などを予測する。また、JEMRMS 搭載 S/W は軌道上で各種の異常検知処理を実施しているため、予測解析においても同様な処理を行い、異常検知の有無を予測しておく必要がある。

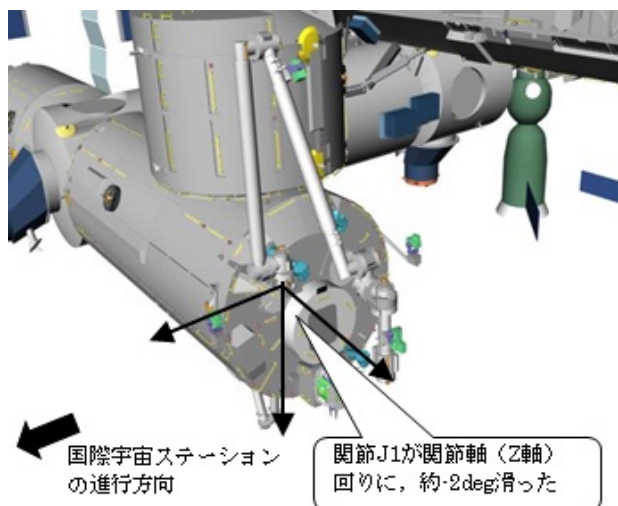
いずれの予測解析も、JEMRMS の運用と軌道上荷重の組合せで解析ケースが設定されるため、解析ケース数は膨大になる。

### 2.3 予測値と軌道上実績値の比較

2009年の初めに、軌道上の JEMRMS において、ブレーキを掛けていた関節が滑る事象（第2表、第6図）が発生した。主な原因は、国際宇宙ステーションで行われたサービスモジュールによるリブーストであると考えられているが、軌道上での事象を再現するために、2.2項に示した挙動予測を行った。

第2表 軌道上実績値 -出力軸の変動量-

J1[deg]	J2[deg]	J3[deg]	J4[deg]	J5[deg]	J6[deg]
-1.97	0.32	-0.11	-0.03	-0.01	0.00

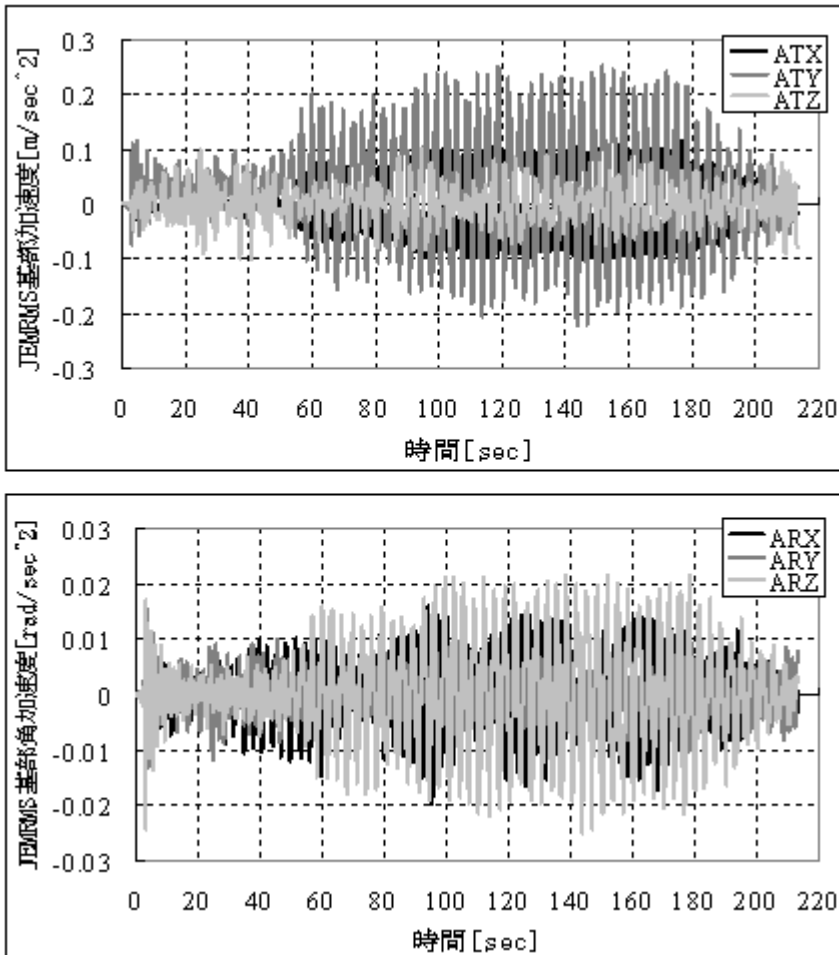


第6図 軌道上での事象（イメージ）

国際宇宙ステーションの各部には加速度センサが取り付けられており（なお、JEMRMS には取り付けられていない）、今回の事象が発生した時も加速度が計測されていた。

そこで、2.1 項で示した軌道上荷重の不確定性を考慮しながら、加速度センサ位置での

軌道上計測結果と予測値が合うように、リブースト荷重を同定した。そして、そのリブースト荷重を用いた国際宇宙ステーションレベルでの予測解析により、サービスモジュールによるリブーストが発生した時の JEMRMS 基部加速度(第 7 図)を予測した。



第 7 図 リブースト時の JEMRMS 基部加速度（予測値）



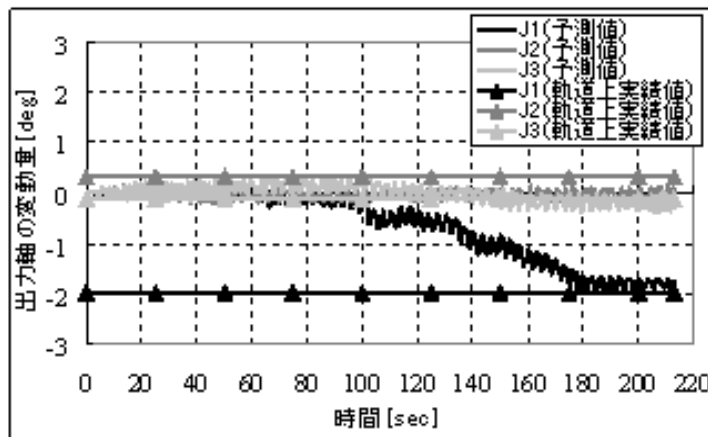
続いて、JEMRMS 基部加速度（予測値）を用いて、JEMRMS 単体での予測解析を行った。出力軸の変動量について、予測値と軌道上実績値を比較した結果（バックラッシュ角の範囲内で変動していた J4、J5、J6 については省略）を第 8 図、第 3 表に示す。同様に、先端位置の変動量についての比較を第 9 図、第 4 表に示す。なお、先端位置の変動量（軌道上実績値）は、軌道上で計測したのではなく、出力軸の角度（軌道上実績値）を基に算出したものである。

第 8 図、第 3 表より、出力軸の変動量が大きかった関節 J1 については、予測値と軌道上実績値は同等であることが分かる。また、その他関節における出力軸の変動量も含めて JEMRMS 全体の挙動を比較するために、

先端位置の変動量について予測値と軌道上実績値を比較する（第 9 図、第 4 表）と、予測値は軌道上実績値以上の変動を示していることが分かる。

これらより、予測解析は、軌道上での JEMRMS の挙動を予測（再現）しつつ、安全側の予測になっていることが分かり、本稿で紹介している挙動予測プロセスが妥当であることを確認した。

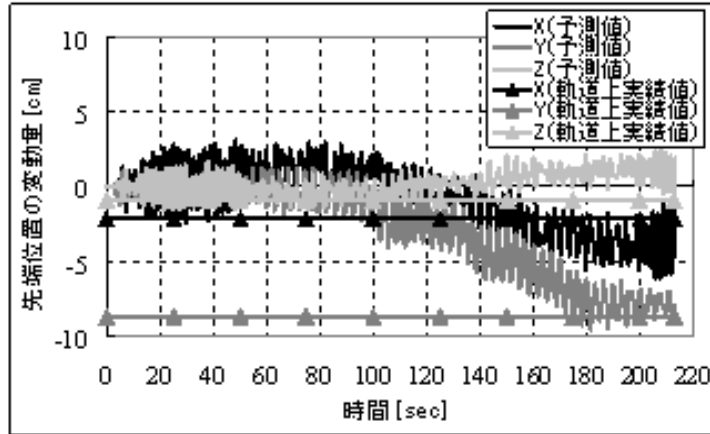
但し、予測値と軌道上実績値の比較は、今回紹介した 1 ケースしか実施できていない。今後は、リブースト以外の軌道上荷重のケースなどとの、より多くの比較を行い、挙動予測プロセスの妥当性をさらに確認していきたいと考える。



第 8 図 予測値と軌道上実績値の比較 -出力軸の変動量-

第 3 表 予測値と軌道上実績値の比較 -出力軸の変動量-

	J1[deg]	J2[deg]	J3[deg]
予測値のワースト	-1.95	-0.21	-0.40
軌道上実績値	-1.97	0.32	-0.11



第 9 図 予測値と軌道上実績値の比較-先端位置の変動量-

第 4 表 予測値と軌道上実績値の比較-先端位置の変動量-

	X[cm]	Y[cm]	Z[cm]
予測値のリスト	-6.12	-9.52	2.52
軌道上実績値	-2.20	-8.66	-0.90

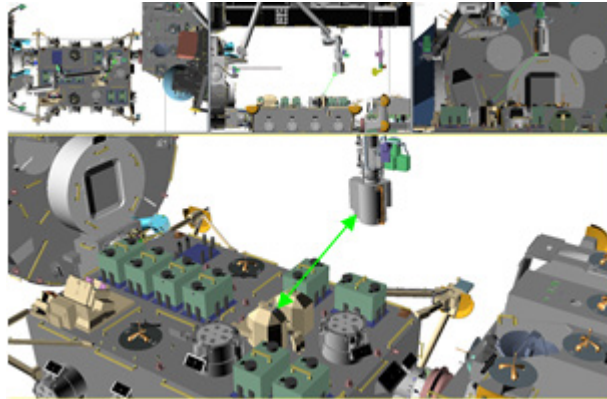
### 3. 運用規定の設定

JEMRMS の運用規定を設定する際は、予測した JEMRMS 挙動毎に、二つの評価項目に照らし合わせて、軌道上荷重を許容できるか否かを決定する。

一つ目の評価項目は、軌道上荷重により不意に JEMRMS が動くことで、近接した H/W

に衝突することがないかである。JEMRMS と近接した H/W との衝突はあってはならない事であり、十分なクリアランスがあることを確認する必要がある。JEMRMS と近接した H/W とのクリアランスは、国際宇宙ステーション全体の 3 次元 CAD モデルを用いて確認することができる (第 10 図)。





第 10 図 クリアランス確認の一例

二つ目の評価項目は、JEMRMS 搭載 S/W が有する異常検知機能により、JEMRMS が緊急停止することがないかである。位置保持・動作制御中の JEMRMS に軌道上荷重が掛かった場合、制御偏差が拡大して関節およ

び先端の位置・速度のリミット値を超え、JEMRMS が緊急停止する可能性がある。緊急停止からの復旧には時間を要するため、JEMRMS 運用の遂行上は緊急停止しないことが好ましい。

第 5 表 JEMRMS 運用規定の一例

ATTITUDE CONTROL & OPS JEMRMS ACTIVITIES	ISS ATTITUDE CONTROL		OPERATIONS		
	MOM MGMT WITH DESATS	USTO	EVA OPS	REBOOST	SSRMS OPS
STOWED	OK	OK	OK	OK	OK
MNVR TO JLE INSTALL VIEWING	OK	OK	OK	NOT OK	
AT JLE INSTALL VIEWING	OK	OK	OK	OK	OK

JEMRMS の運用と軌道上荷重の組合せで、許容できるか否かを決定した後は、第 5 表に示すようなマトリクス形式の表に、“OK”

(JEMRMS の運用において、軌道上荷重を許容できる場合)、“NOT OK” (JEMRMS の運用において、軌道上荷重を許容できない

場合)、斜線(何らかの理由により、許容できるか否かを評価していない場合)のいずれかを埋めることで、運用規定を設定する。

#### 4. まとめ

国際宇宙ステーションにおける JEMRMS の運用を通して、軌道上荷重に対するロボットアームの挙動を予測する手法を考案し、軌道上でのロボットアーム運用規定を設定する手法を実現した。また、考案する手法を用いて、軌道上で発生した実挙動を再現し、その妥当性を確認した。

今後の有人宇宙システムにおいても、ロボットとの協調運用は必要不可欠であると考えられ、「きぼう」で獲得したロボットアーム運用技術は、我が国における貴重な技術の蓄積であったと考える。

今回、国際宇宙ステーションレベルでの解析においては、NASA/Boeing から多大なる知見を頂けた事を、この場を借りて感謝致します。