

## 第5章 有人システム維持機能技術～構造・機構系技術

### 1. 序論

日本実験棟「きぼう」の各構成要素には構造強度上さまざまな要求があるが、その中でも、スペースシャトルによるフライト荷重及び軌道上運用時の各種荷重に対する構造強度耐性を、構造数学モデルを用いた振動応答解析により検証するプロセスが構造検証上重要だった。この構造数学モデルは、NASAの厳格なコリレーション要求に基づき、モデルサーベイ試験結果等で取得されるフライト品の構造特性を有する必要があった。

また「きぼう」の各要素（船内実験室、船内保管室、船外実験プラットフォーム、船外パレット及び実験ペイロード）は、互いを結合する結合機構を有しており、「きぼう」ロボットアームや国際宇宙ステーション（ISS）のロボットアームによって捕獲、引き込み、構造結合される。結合機構の他にも、船内実験室と船外の間での物資の移動を可能とするエアロックや、軌道上交換ユニットなど、「きぼう」独自の特徴的な機構系を有していると言える。

本章では、「きぼう」構造検証の要となる構造数学モデルに対するコリレーション要求とコリレーション結果例を報告するとともに、「きぼう」ユニークな機構系の開発成果について紹介したい。

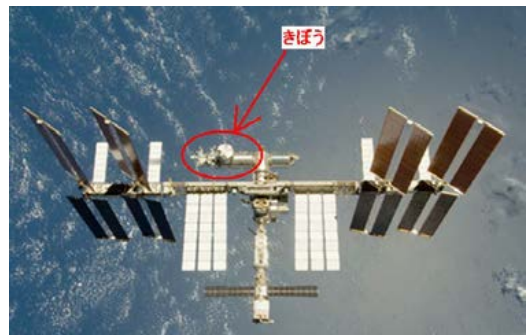
### 2. ISSの概要

ISS計画は1984年に始まり、当初、米国、

欧州宇宙機関、カナダ、日本の4機関が参加した。その後何回かの計画見直しや体制の見直しが行われ、1994年のロシアの参加などを経て、現在は15カ国（米国、日本、カナダ、ベルギー、デンマーク、フランス、ドイツ、イタリア、オランダ、ノルウェー、スペイン、スウェーデン、スイス、イギリス、ロシア）が参加する計画となっている。

ISSは1998年に建設が開始され、2011年に完成した。

第1図にISSの外観を示す。



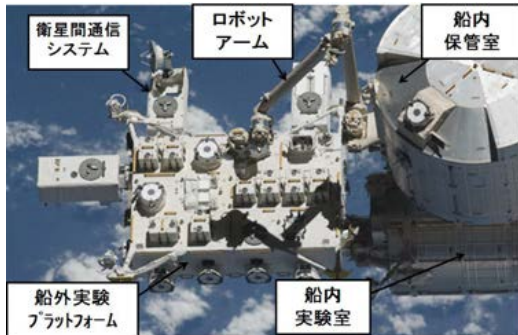
第1図 ISSの外観

### 3. 「きぼう」の概要

「きぼう」は、主に「船内実験室」、「船外実験プラットフォーム」、「船内保管室」、「ロボットアーム」、「衛星間通信システム」および曝露ペイロードのキャリアである「船外パレット」の6要素から成り立っている。但し、「船外パレット」は「きぼう」完成後地上に

持ち帰ったため、現在は設置されていない。  
「きぼう」の運用に必要な空気、電力、熱のリソースは ISS 本体から供給され、「きぼう」内へ分配される。

完成した「きぼう」の外観を第 2 図に示す。



第 2 図 完成した「きぼう」の外観

#### 4. 「きぼう」の構造系概要

第 1 表に「きぼう」各構成要素の構造仕様の概要を示す。

各構成要素は、打上げ・着陸時の荷重や、軌道上運用時の各種荷重 (ISS へのロシア宇宙船などのドッキング時の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) に強度上耐えられるように設計されている。

##### 4.1 船内実験室・船内保管室の構造

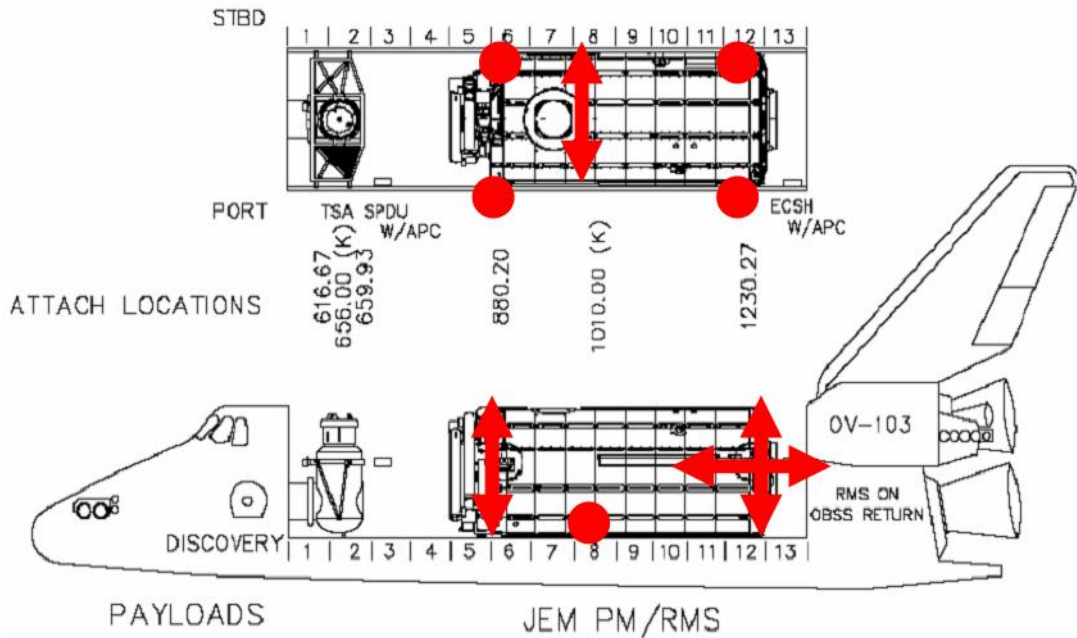
船内実験室は内側にアイソグリッドを有する直径 4.4m のアルミ合金製シリンダ部とエンドコーン・プレート部を溶接した与圧構造 (1 気圧) である。第 3 図に示す様に打上げ時には 5 箇所のトランオンにて、7 自由度拘束でスペースシャトルに固定される (この拘束条件は全ての要素に共通である)。軌道上では、共通結合機構を介して ISS に結合される。

第 4 図に船内実験室の一次構造を示す。

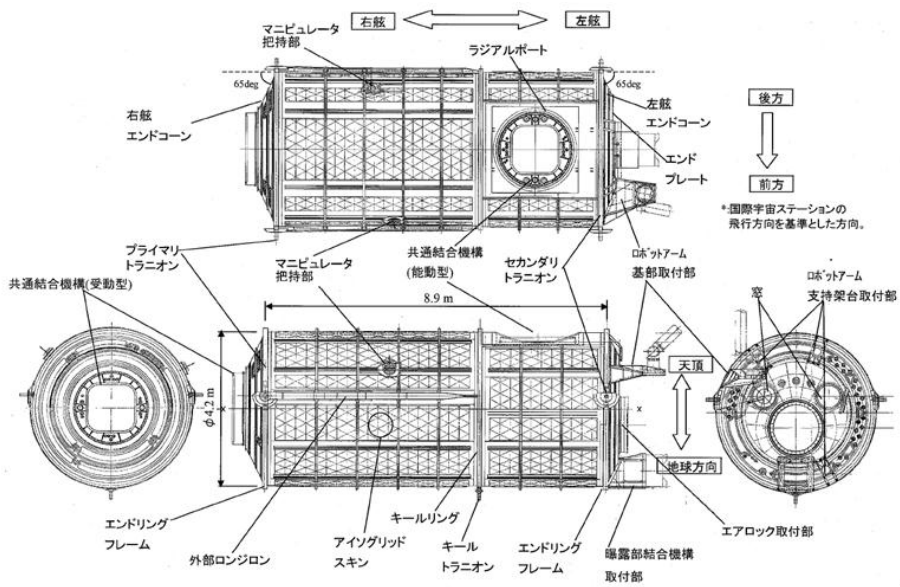
船内保管室の構造も全長が異なるのみで、基本的には船内実験室と同形式である。

第 1 表 「きぼう」の構造仕様<sup>1)</sup>

	船内実験室	船内保管室	船外実験プラットフォーム	船外ハレット	ロボットアーム
主構造様式	・アルミアイソグリッド <sup>®</sup> パネル ・溶接円筒構造		アルミパネル フレームコック構造	アルミグリッド <sup>®</sup> パネル構造	6 自由度関節付アーム
主な構造材料	・シリンダ部: Al2219 ・その他部位: Al7075		・パネル/フレーム: Al7075 ・グリッドパネル: Al7075		CFRP チューブ構造
内、トランオンピン	ニッケル基超合金 (INCONEL-718)				-
寸法 [m]	外径 4.4 内径 4.2 長さ 11.2	外径 4.4 内径 4.2 長さ 4.2	幅 5.0 高さ 4.0 長さ 5.6	幅 4.9 高さ 2.2 長さ 4.2	長さ 9.9
シャトル搭載時結合方法	5 箇所のトランオンがシャトルラッチ機構に支持される (7 自由度支持)				船内実験室に 4 箇所支持
軌道上運用時結合方法	共通結合機構で ISS Node2 へ結合	共通結合機構で船内実験室へ結合	曝露部結合機構で船内実験室へ結合	曝露部装置交換機構で船外実験プラットフォームへ結合	船内実験室に 1 箇所支持



第3図 シャトル搭載時の拘束

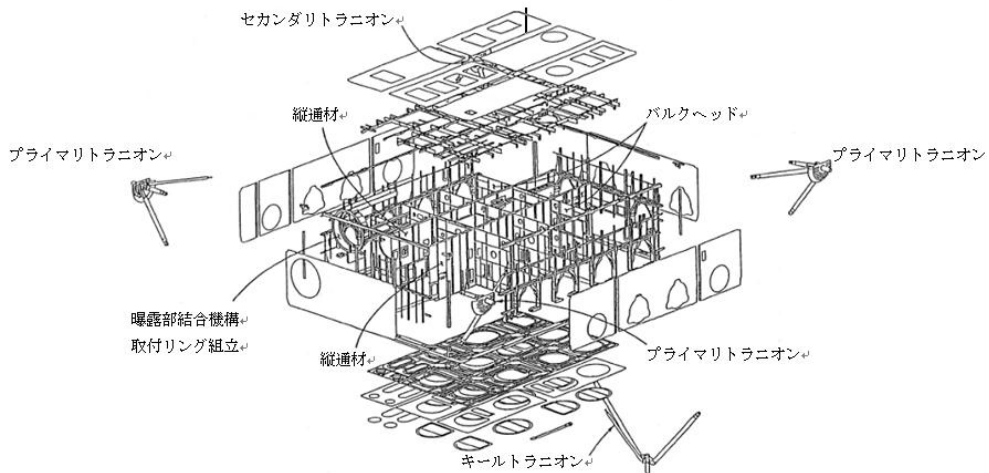


第4図 船内実験室 主構造概要<sup>1)</sup>

## 4.2 船外実験プラットフォーム・船外パレットの構造

第5図に、船外実験プラットフォームの主構造概要を示す。主構造はアルミ合金

Al7075 材を主に用いたパネル／フレーム構造である。軌道上では、曝露部結合機構の構造ラッチボルト（4本）によって船内実験室に構造結合される。



第5図 船外実験プラットフォーム 主構造概要

船外パレットの主構造は同様にアルミ合金 Al7075 材を用いたグリッドパネル構造である。フライト時はペイロード取付機構を介してペイロード 3 式を搭載可能である。軌道上では、装置交換機構を介してそのラッチアーム（3本）で船外実験プラットフォームに構造結合される。

## 5. 構造数学モデル検証要求と検証結果の例

### 5.1 構造数学モデル検証要求

#### (1) スペースシャトル搭載時

スペースシャトルに搭載される「きぼう」各構成要素に対して最も厳しいフライト荷重は、打上げ時のスペースシャトルメインエ

ンジン着火に続く固体ロケットの点火衝撃や音響、着陸時のランディングギヤの接地等による荷重である。

これらの荷重により「きぼう」各要素へ負荷される荷重は、スペースシャトルの構造数学モデルに「きぼう」各要素の構造数学モデルを結合し、シャトルの外力条件を入力とする振動応答解析（CLA： Coupled Loads Analysis）によって求められる。この振動応答解析に使用する構造数学モデルに対しては、スペースシャトルの振動モードや外力条件とのカップリングの可能性のある周波数範囲（50Hz 以下）において、モーダルサーベイ試験結果との厳格なコリレーション要求が NASA から課されている（第2表）。

第2表 構造数学モデルへのコリレーション要求<sup>2)</sup>

項目	モデルコリレーション要求
周波数誤差	試験と解析でのモード周波数の差異が、主要モードは5%以下、副モードは10%以下であること。(*)
モード形状	主要モードについて、試験と解析のモードベクトルの相互直交性行列が以下を満足すること。 ・対角項 : 0.9 以上                      ・非対角項 : 0.1 以下

(\*) 主要モード、副モードの定義は以下のとおり。

- ・主要モード：有効質量比が10%以上のモード
- ・副モード：有効質量比が5～10%のモード

## (2) 軌道上運用時

軌道上運用時の「きぼう」各構成要素には、ISS へのシャトルやロシア宇宙船等のドッキング荷重、リブースト時の加速度、宇宙飛行士の船内外活動による荷重等が負荷される。これらの荷重は、ISS 全体の構造数学モデルを用いた過渡振動応答解析によって算出される。

この振動応答解析に使用する「きぼう」各要素の構造数学モデルにも、フライト時と同様、軌道上運用時の拘束条件でのフライト品とのコリレーション要求に従い、モデル精度を保証する必要がある。

## 5.2 構造数学モデル検証結果の例

### (1) 打上げ形態検証（船外実験プラットフォーム）

船外実験プラットフォームの主構造に搭載機器のダミーマスあるいはエンジニアリングモデルを搭載し、スペースシャトルとのインターフェース部を支持した形態で、モデルサーベイ試験を実施した。試験形態を第6図に示す。

なお、試験に当たっては事前解析によりターゲットモードを決定し、それらのモード形状が取得できるよう、加速度センサを配置している。



第6図 船外実験プラットフォーム  
モデル試験

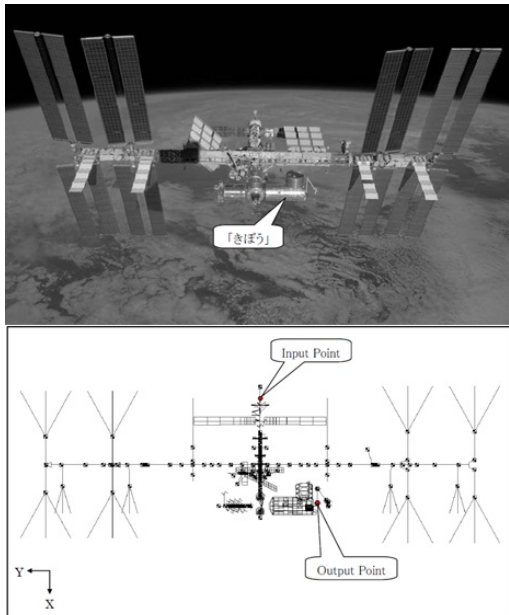
試験結果を基に構造数学モデルのコリレーションを実施し、要求を満足することを確認した。本結果に NASA スペースシャトルプログラムも合意し、シャトル搭載時の振動応答解析に供され、打上げに問題のないことを確認した上で2009年7月に無事打上げられた。

### (2) 軌道上形態検証

軌道上荷重解析に供される構造数学モデルには、NASA と合意したコリレーション要求を満足した「きぼう」の各要素モデルが「きぼう」の軌道上荷重解析用モデルとして統合され、NASA 側へ提示されている。そのモ

デルでは、運用時の搭載位置が変わりうる船内実験ラックや曝露実験ペイロードについては、解析時に構造数学モデルの搭載位置を変更できるよう配慮が施されている。同様に、軌道上で様々な姿勢を取り得るロボットアームについても、関節角度の設定により容易に構造数学モデルの姿勢を変更できるよう配慮されている。

軌道上運用時の「きぼう」には、前述した様々な荷重が負荷される。「きぼう」各構成要素間インターフェースに負荷される荷重は、ISSの詳細モデルを用いた軌道上荷重解析(NASA側で担当)により算出され、インターフェース荷重を基に、JAXAでISSの簡易モデル(第7図)を用いた軌道上荷重解析を実施し、「きぼう」各構成要素自身の強度評価を行っている。



第7図 ステージ15AのISS(上)と  
解析モデル(下)

各軌道上荷重は、フォーシングファンクションとして、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を基にモデル化されたものを使用し、可変パラメータの範囲内で、評価対象にとって厳しい荷重条件となる様、工夫している。同様に、軌道上運用時には、各軌道上荷重が同時に発生する場合も考えられるため、各軌道上荷重による応答を複合した評価も行っている。

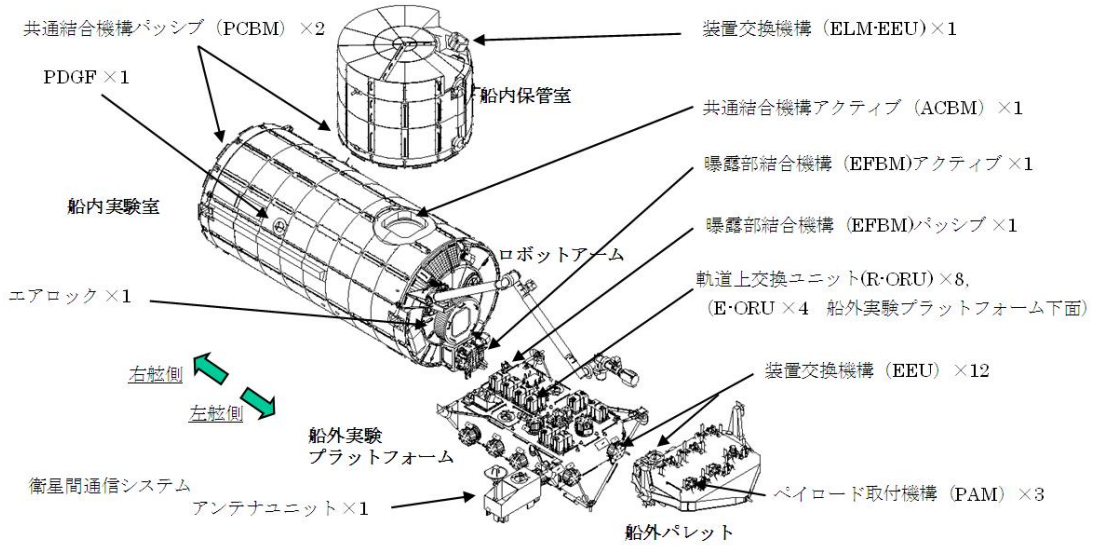
3回に分けて打ち上げられ、ISSに結合された「きぼう」の各モジュールは、軌道上荷重解析の結果、強度および剛性の要求を満足することを事前に確認済みであり、軌道上における運用を無事行っている。

## 6. 「きぼう」の機構系概要

「きぼう」機構系を第8図に、各機構の説明を第3表に示す。「きぼう」は結合機構として、ISS共通結合機構(CBM: Common Berthing Mechanism)、曝露部結合機構(EFBM: Exposed Facility Berthing Mechanism)、装置交換機構(EEU: Equipment Exchange Unit)、ペイロード取付機構(PAM: Payload Attach Mechanism)を有する。



これらの結合機構はアクティブ側とパッシブ側から構成され、捕獲/引き込み/結合の各動作を行なう。結合機構は、軌道上荷重が負荷されても材料降伏しない強度と結合面の分離に至らない剛性を要求されると共に、各々の要素間を結ぶリソースラインの結合機能も有する。

CBMはNASAが開発した機構で、ロシアを除くISS全ての与圧モジュールの結合に使用される。アクティブ機構(ACBM: Active CBM)とパッシブ機構(PCBM: Passive CBM)から構成され、ISS側(ACBM)と船内実験室右舷側(PCBM)間、および、船内実験室上部(ACBM)と船内保管室(PCBM)間の結合に使用されている。


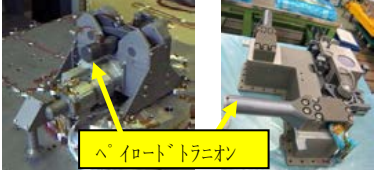



第 8 図 「きぼう」の機構サブシステム

第 3 表 (1/2) 「きぼう」の主要な機構

機構	機能	外観
共通結合機構 (CBM)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 与圧モジュール同士の結合に使用。</li> <li>・ 位置決めは中央窓からのカメラターゲット方式。</li> <li>・ 16 個のボルトナットによる締結。</li> <li>・ 3 重の O リング（結合面上）による船内空気の保持。</li> <li>・ 電力通信ケーブル、冷媒配管、空調ダクト等のリソースラインは結合後にクルーにて実施。</li> </ul>	 <p>船内実験室上部の ACBM</p>
曝露部結合機構 (EFBM)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 船外実験プラットフォームの船内実験室への結合に使用。</li> <li>・ 位置決めは側面からのカメラターゲット方式。</li> <li>・ CBM に類似の設計（構造締結ボルトは 4 本）。</li> <li>・ 電力、通信、冷媒のリソースラインは自動結合。</li> </ul>	

第3表 (2/2) 「きぼう」の主要な機構

機構	機能	外観
装置交換機構 (EEU)	<ul style="list-style-type: none"> <li>船外パレットやペイロードの船外実験プラットフォームへの結合に使用。</li> <li>位置決めは上面からのカメラターゲット方式。</li> <li>3本のラッチアームで捕捉から引き込み、構造締結までの全機能を実施。</li> <li>電力、通信、冷媒のリソースラインは自動結合。ライン結合部を保護するシャッターも自動で開。</li> </ul>	 <p>左：EFU 右：PIU</p>
ペイロード取付機構 (PAM)	<ul style="list-style-type: none"> <li>曝露実験ペイロードの船外パレットへの結合に使用。</li> <li>構造締結を担う4式のSLM (Structural Latch Mechanism) でペイロードを把持し打上。ロボットアーム引き抜き前にペイロードトランンを開放。</li> <li>電力、通信、冷媒のリソースラインは自動結合。</li> </ul>	 <p>左：船外パレット側 右：ペイロード側</p>
エアロック	<ul style="list-style-type: none"> <li>船内実験室と船外間での物資の移動に使用。</li> <li>「きぼう」小アームや船外実験プラットフォームの軌道上交換ユニットを伸展テーブルに固定可能。</li> </ul>	

EFBM は船外実験プラットフォームを船内実験室に結合する機構で、CBM 同様、構造締結とリソースラインの結合機能を有するが、CBM とは異なり、リソースラインは自動で結合される。

EEU は船外実験プラットフォームと船外パレットや曝露ペイロードを結合・分離する機構で、アクティブ機構 (EFU: Exposed Facility Unit) が船外プラットフォームに12基設置される。結合対象の船外パレットや、実験ペイロード側にはパッシブ機構 (PIU: Payload Interface Unit) が艤装される。

PAM はフライト時にペイロードを船外パレットに固定する機構である。ロボットアームによる取外しの前にペイロード把持部を

開放する機能を有する。

また、結合機構以外の「きぼう」の機構系としてエアロックと軌道上交換ユニットを紹介する。

エアロックは、船内実験室左舷端に取り付けられたシリンダ状構造物であり内部を船外環境まで減圧、もしくは船内環境まで加圧し、物資を船内外間で移送する機能を有する。船内外間を移送される物資はエアロックテーブルに固定され、船外でロボットアームやその先に取り付けられる子アーム (SFA: Small Fine Arm) で把持され、テーブルから取外される。

軌道上交換ユニットは船外実験プラットフォーム上のシステム機器で、「きぼう」の子アームにて分離・取付・ハンドリング可能



なロボティクス対応軌道上交換ユニット（R-ORU：Robotics-compatible Orbital Replacement Unit）と、宇宙飛行士の船外活動（EVA）により結合・分離する機構をもつEVA対応軌道上交換ユニット（E-ORU：EVA-compatible ORU）がある。

これら機構系は、真空中での摩擦特性等の材料特性やモータ・アクチュエータの動作特性の把握は勿論のこと、クルーやロボティクスとの協調動作、更には機構の故障許容と全体の安全性を保証することが求められる。これらの設計要素は有人宇宙安全に特有の考え方が適用されるため、日本にとって初めての開発となる「きぼう」の機構系開発では、ロボットアームの特性や、NASA安全審査を通じての「きぼう」の安全設計の考え方がフィックスした後に、再度評価を行うケースが多々あった。

## 7. まとめ

すべての「きぼう」のモジュールは、静・動特性の検証された構造数学モデルを用いた統合解析により最終的な構造検証を完了した上で、無事、打上げを完了し、軌道上運用を開始している。これは、本報告で紹介した構造数学モデルの検証も含めた、構造検証の妥当性を示すものとする。

「きぼう」の機構系は、目的の違いにより各々がユニークな特性となっている一方、有人宇宙システム特有の安全性要求が設計に反映されており、ロボットアームやクルー船内外活動との協調動作が確実かつ安全に遂行できる様に配慮されている。これらの機構系は軌道上での動作確認が無事終了し、開発成果の妥当性が確認された。