

## 第2章 大型有人宇宙システムの統合技術

### 1. 序論

全長約 20m、質量約 30 トンの巨大システム「きぼう」は、スペースシャトルの打上げ能力の制約から、高度約 400km の国際宇宙ステーション (ISS) に 3 回に分けて輸送され、スペースシャトルや ISS のロボットアームにて ISS に結合された。また、「きぼう」に設置される実験ペイロードについても、「きぼう」と共に打ち上げられたものと、HTV (H-II Transfer Vehicle) などの後続フライトで打ち上げられ「きぼう」に設置されるものがある。

このように「きぼう」や実験ペイロードが軌道上に別々に打上げられる場合においても、「きぼう」のシステム要素間、「きぼう」と実験ペイロード間、およびこれら要素とス

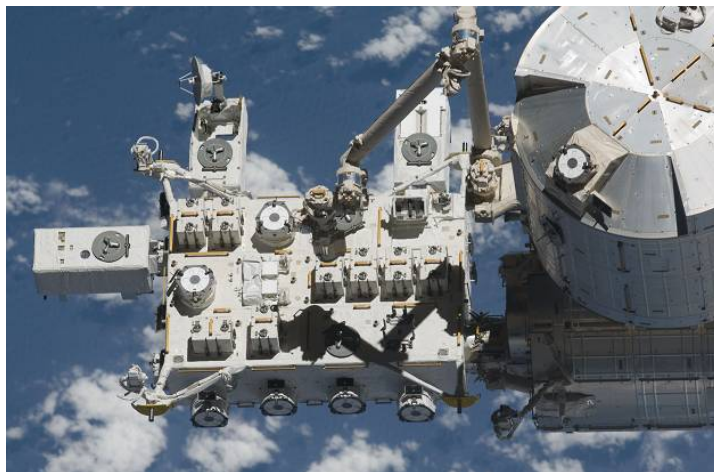
ペースシャトル、ISS および NASA や JAXA の地上管制システムとを結ぶ各部インターフェースにおいて、それぞれの機能が正常に動作するよう、要素自身は勿論、各インターフェースについても、抜けなく検証しておく必要があった。

本章では、「きぼう」の開発で獲得した大規模な有人宇宙システムのシステム統合技術について、インターフェース設計及び検証手法の観点から述べる。

### 2. 「きぼう」のシステム構成と運用インターフェース

#### 2.1 「きぼう」のシステム構成

第 1 図に実験ペイロード取付け後の「きぼう」を示す。

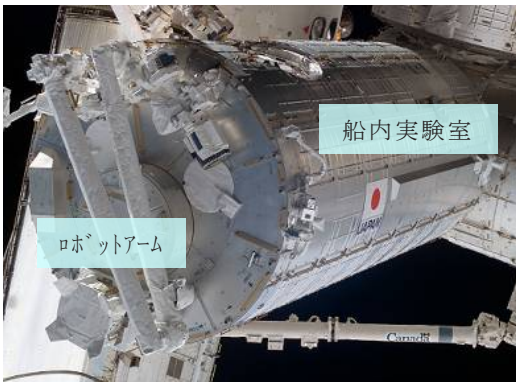


第 1 図 実験ペイロード取付け後の「きぼう」

「きぼう」を構成する 6 つの要素を以下に紹介する。

**(1) 船内実験室 (第 2 図、第 1 表)**

微小重力かつ 1 気圧の環境を実験ペイロードに提供する。電力系、管制通信系、空気・温湿度調整等の管理機能を有する「きぼう」の中核要素であり、ISS 最大の与圧モジュールでもある。



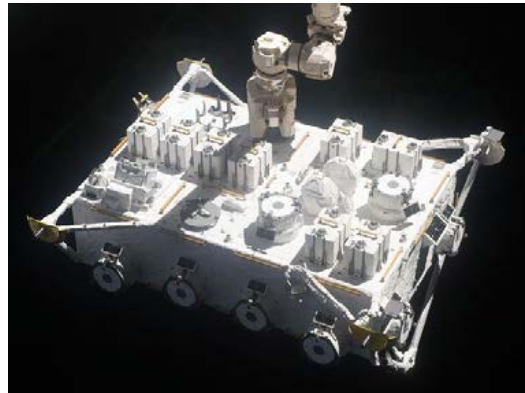
第 2 図 ISS に取り付けられた船内実験室

第 1 表 船内実験室の主要諸元

	諸元
寸法	直径 4.4 [m] × 全長 11.2[m]
質量	14800 [kg] (打上げ時 (4 ラック搭載))
搭載ラック	23 ラック (内実験ラック 10 体)
供給電力	最大 25 [kW] (120 [Vdc])
室内環境	温度: 18.3-26.7[°C], 湿度: 25-70[%]

**(2) 船外実験プラットフォーム (第 3 図、第 2 表)**

ISS で唯一、実験ペイロードに対して電力、通信、排熱等のフルサービスを提供可能な宇宙曝露実験施設である。微小重力環境に加え天体・地球観測等の実験に使用される。



第 3 図 ISS ロボットアームに把持される船外実験プラットフォーム

第 2 表 船外実験プラットフォームの主要諸元

	諸元
寸法	5.6 [m] × 5.0 [m] × 4.0 [m]
質量	3800 [kg] (打上げ時)
搭載ペイロード	最大 10 体 (衛星間通信システムを含む)
供給電力	最大 11 [kW] (120 [Vdc])

**(3) ロボットアーム (JEMRMS) (第 4 図、第 3 表)**

船内実験室左舷に艤装されるロボットアームは、軌道上では宇宙飛行士が船内実験室から操作し、船外実験プラットフォーム用ペイロードの着脱 (第 4 図) や、アーム先端に子アームを取り付けて船外実験プラットフォーム用システム機器の交換を行う。



第4図 ロボットアームによる  
実験ペイロードの取り付け

第3表 ロボットアームの主要諸元

	諸元
寸法	全長 9.9 [m]
質量	800 [kg]
関節自由度	6 自由度
先端移動速度	最大 60 [mm/sec]

#### (4) 衛星間通信システム (ICS) (第5図、 第4表)

衛星間通信システムは、ISS 専用データ回線以外に、我が国独自のデータ伝送回線を確保するために用意した通信装置である。



第5図 ICS-PM (船内系、左) と  
ICS-EF (曝露系、右)

第4表 衛星間通信システムの主要諸元

	諸元
寸法	ICS-PM : 2.0[m]×10[m] ICS-EF : 2.2[m]×2.0[m] (アンテナ展開時)
データ伝達	ICS から地上 : 50[Mbps]/26[GHz] 地上から ICS : 3[Mbps]/23[GHz]

#### (5) 船内保管室 (第6図、第5表)

船内保管室は、船内実験室搭載の冗長側システム機器や実験ラック等を搭載して「きぼう」第1便として打上げられた。軌道上では保管庫として使用されている。



第6図 打上げ準備中の船内保管室

第5表 船内保管室の主要諸元

	諸元
寸法	直径 4.4[m]×全長 3.9[m]
質量	8400[kg] (打上げ時 (8ラック搭載))
搭載ラック	8 体

#### (6) 船外パレット (第7図、第6表)

船外パレットは、船外実験プラットフォーム用ペイロード (ICS-EF、SEDA-AP (宇宙

環境計測ミッション装置)、MAXI (全天 X 線監視装置)) を搭載して打ち上げられた。ペイロードが船外実験プラットフォームへ移設された後、スペースシャトルにて地上に帰還した。

第 6 表 船外パレットの主要諸元

	諸元
寸法	4.9 [m] x 4.2 [m] x 2.2 [m]
質量	2700 [kg] (実験ペイロード 3 体搭載)
搭載ペイロード	3 体

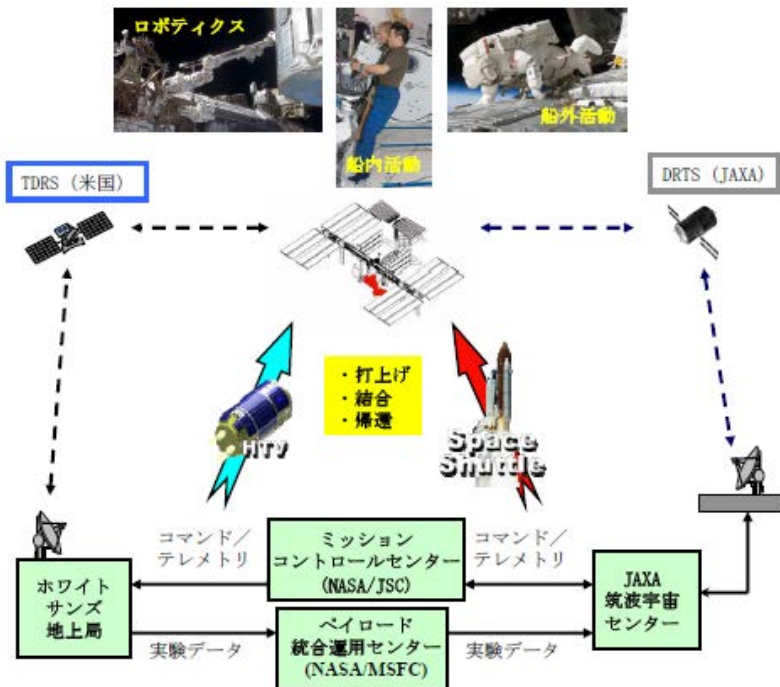


第 7 図 スペースシャトルへの搭載を待つ  
船外パレット

## 2.2 「きぼう」の打上げ・運用インターフェース

このように多くの要素で構成される「きぼう」であるが、「きぼう」自身もその打上げ、軌道上運用にあたり様々なシステム (要素) とインターフェースを有する。

第 8 図に打上げ・運用時の主要なインターフェースを示す。



第 8 図 「きぼう」打上げ・運用インターフェース

第7表に「きぼう」各サブシステムと他要素とのインターフェースをマトリクス形式で示す。「きぼう」は、その打上げ及び運用

において多岐に亘るインターフェースを有する複雑なシステムであることが分かる。

第7表 他要素とのインターフェース

インターフェース サブシステム	ペイロード	シャトル	ISS	HTV	地上局 中継衛星
電力・通信	○	電力のみ	○	○	通信のみ
熱	○	○	○	○	—
構造・機構	○	○	○	○	—
ロボティクス	○	○	○	○	—
クルーインターフェース	○	○	○	—	—

### 2.3 「きぼう」の打上げ・軌道上組み立て

具体的に「きぼう」の打上げ・軌道上組み立て・起動シーケンスを通じて、「きぼう」の有する複雑なインターフェースの一面を紹介する。

「きぼう」は、NASA スペースシャトルの打上げ能力（サイズ及び重量）の制約から、3回のフライトに分けて打ち上げられた。当初は、必要な機器を第1便で船内実験室に搭載して打上げ、その他の要素を第2便で打ち上げる予定であったが、ロシアのISS計画への参加に伴い軌道傾斜角が51.6°に増加し、打上げ能力が低下したため、冗長系機器等を事前に船内保管室で打ち上げるシナリオに変更した。

#### (1) フライト1J/A (STS-123 : 現地2008年3月打上げ)

フライト1J/Aは船内保管室とカナダの特殊目的ロボットアームを中心とするカーゴを打ち上げるフライトである。船内実験室(第2便)の打上げ前に冗長系システム機器(一部)等を打上げ、軌道上で待機する役目を負う。

打上げ以降の組立・起動シーケンスは以下;

- ① エンデバー号から保温用ヒータ電力を受電
- ② エンデバー号がISSにドッキング
- ③ シャトルアーム(SRMS)でISSに結合
- ④ システム起動
- ⑤ 船内保管室への乗員の入室

#### (2) フライト1J (STS-124 : 現地2008年5月打上げ)

フライト1Jは船内実験室(ロボットアーム取付状態)のみがカーゴとなる占有フライトであった(第9図)が、前述の起動傾斜角の変更により、船内実験室搭載機器の一部やOBSS(軌道上でシャトル熱防御タイルの損傷を検査する機器)のオフロードを決断し、全体重量をディスカバリ号の打ち上げ能力の範囲に収めた経緯がある。



第 9 図 ISS にアプローチ中の  
ディスカバリ号

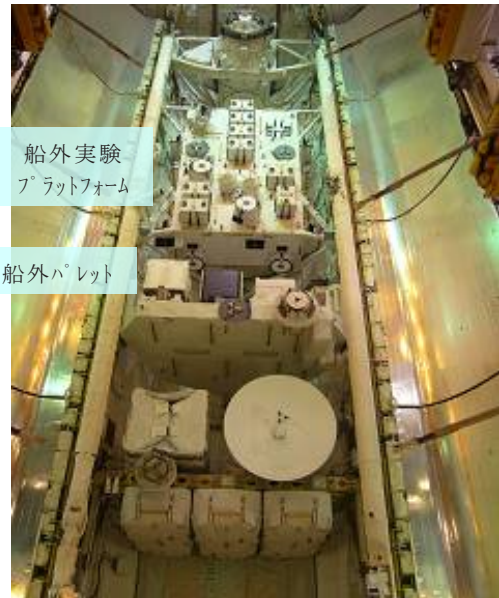
打上げ以降の組立・起動シーケンスは以下；

- ① ディスカバリ号から保温用ヒータ電力を受電
- ② ディスカバリ号が ISS にドッキング
- ③ ISS アーム（SSRMS）で船内実験室を ISS に結合
- ④ システム起動（主系）
- ⑤ 船内実験室へ乗員が入室
- ⑥ 船内保管室から冗長系システム機器等を移動
- ⑦ システム起動（冗長系）
- ⑧ SSRMS で船内保管室を船内実験室上に移設
- ⑨ JEMRMS を打上げ固定状態から開放し、初期展開

### (3) フライト 2J/A (STS-127：2009 年 7 月 打上げ)

フライト 2J/A は「きぼう」の実験ペイロードを含む曝露システム（船外実験プラットフォーム、船外パレット、ICS-EF）、及び ISS 物資を搭載する米国製キャリアからなるフライトである（第 10 図）。5 回におよぶ船外活動と、船外パレットからのペイロード移設に使用する「きぼう」ロボットアームを含む 3 体のロボットアームの操作が複雑に

組み合わさったミッションであり、打上げ直前まで、実フライトのタイムラインに従った詳細熱解析による打上げ対応断熱カバーの打上げ形態を検討し、船外活動クルーによるこれらの断熱カバーの取り外し作業の負荷低減を試みた。



第 10 図 フライト 2J/A のカーゴベイ

打上げ以降の組立・起動シーケンスは以下；

- ① エンデバー号から保温用ヒータ電力を受電
- ② エンデバー号が ISS にドッキング
- ③ SSRMS と SRMS の協調動作で船外実験プラットフォームを船内実験室に結合
- ④ 船外実験プラットフォーム起動
- ⑤ SRMS と SSRMS による船外パレットの結合
- ⑥ 実験ペイロードの移設準備（船外活動）

- ⑦ 「きぼう」ロボットアームによるペイロードの船外実験プラットフォームへの移設
- ⑧ 船外パレットのエンデバー号への再取付け
- ⑨ エンデバー号（船外パレット搭載）の地上帰還

以上の様に、「きぼう」はその打ち上げから起動までのフェーズだけでも多くの系とインターフェースを有する。このような大規模システムの場合、ほとんどのインターフェースが地上での物理的結合が不可能であり、更に「きぼう」完成後に HTV 等で打ち上げられる実験ペイロードは「きぼう」との電氣的結合による検証も不可能となる。

そこで「きぼう」の開発では、多様かつ自由なシステム構成に対応可能なよう設計を施し、インターフェース間の機能についても抜けのない様、検証を進めてきた。このような大規模システムの開発においては、システム間インターフェースにおいて全体システムの機能が維持されるよう、システムを確実に統合する技術が求められる。

次項では、「きぼう」の開発や NASA との技術調整の中で学んだシステム統合の技術について、具体例を交え紹介する。

### 3. システム統合技術と開発への適用例

#### 3.1 システム統合技術

「きぼう」の開発におけるシステム統合の基本的な進め方を以下に示す。

##### 【ステップ 1】システム開発

- システム単体（機器間）の機能検証
- 外部インターフェース規定の明確化と徹底した変更管理

##### 【ステップ 2】システム統合

- 要素を組み合わせてのシステム試験検証
- （試験検証が不可能な場合）精度保証した数学モデルやフライト品特性を有するシミュレータ、CAD 等による解析検証

##### 【ステップ 3】システム拡張（将来ペイロード対応）

- 精度保証した数学モデルやフライト品特性を有するシミュレータ、CAD 等による解析検証

### 3.2 具体的なシステム統合の例

#### (1) 電力・通信システムの統合

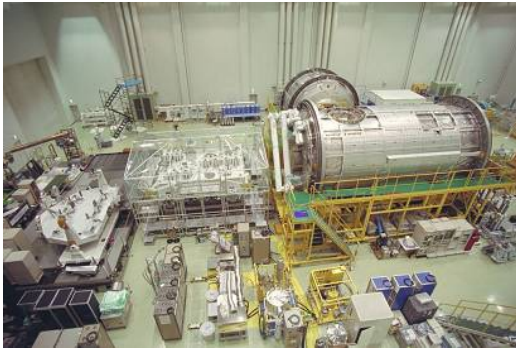
「きぼう」電力システムについては、その開発時には端末につながる機器の電力特性が不明なため、不特定な機器が接続されても系全体の電力供給安定性を維持できるよう構成機器への設計要求を課した。

また「きぼう」の管制通信システムについては、多くのシステムを介して数千個のコマンド・テレメトリを処理する大規模システムであるため、部分的な検証を段階的に組み合わせ、全体の統合を図った。

「きぼう」電力・通信システムの他要素とのシステム統合のプロセスを第 8 表に示す。

第 8 表 電力・通信システムの統合プロセス

システム開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・電力供給安定性重視のインターフェース設計</li> <li>・電磁適合性インターフェースの明確化</li> <li>・インターフェース管理文書の明確化（「きぼう」と各要素間）</li> </ul>
システム統合	<ul style="list-style-type: none"> <li>・JEM 全体システム試験（「きぼう」要素間検証） （第 11 図）</li> <li>・JEM 統合システム試験（対ペイロード，対 JAXA 地上局）</li> <li>・Multi Element Integration Test（MEIT）-III（対 ISS，対クルー）（第 12 図）</li> <li>・KSC End-to-End 試験（対 NASA データ衛星・NASA 地上局）</li> </ul>
システム拡張	<ul style="list-style-type: none"> <li>・PVT（Procedure Verification and Training system）（対ペイロード，対クルー）</li> <li>・JEM 電力系シミュレータ（対ペイロード）</li> <li>・JEM 搭載ソフトウェアシミュレータ（対 ISS）</li> </ul>



第 11 図 JEM 全体システム試験  
（筑波宇宙センター）



第 12 図 MEIT-III 試験  
（ケネディ宇宙センター）

## （2）熱制御システムの統合

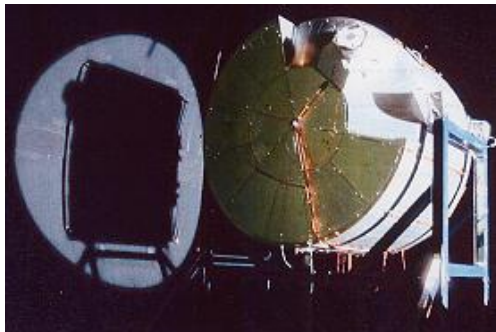
「きぼう」熱制御系は、太陽光入射角や ISS の姿勢、太陽電池パネルの状態等、解析パラメータの数が膨大なため、要素開発時の熱試験でのデータ取得内容や熱数学モデルを試験結果に合わせこむ（コリレーション）際の条件を統一させることが難しく、そのシステム統合は容易ではなかった。様々なケースの熱解析を通じて設計や熱試験との整合性を確認し、数学モデルの精度向上を図ってきた。

「きぼう」熱制御システムの他要素とのシステム統合のプロセスを示す。（第 9 表）

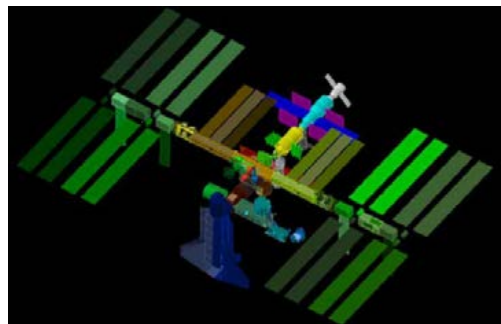


第9表 熱制御システムの統合プロセス

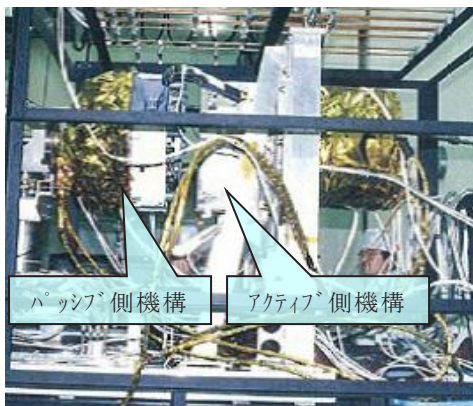
システム開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>熱平衡試験で輻射伝熱特性を確認（第13図） （船内実験室は船内保管室の試験結果から類似性で解析保証）</li> <li>インターフェース部は、部分モデルでインターフェース部の伝熱特性を把握（第14図）</li> </ul>
システム統合	<ul style="list-style-type: none"> <li>熱平衡試験結果を反映した熱数学モデルによる TRASYS/SINDA 熱解析</li> <li>軌道上温度データによるモデルコリレーション</li> </ul>
システム拡張	<ul style="list-style-type: none"> <li>上記熱数学モデルによる検証（第15図）</li> </ul>



第13図 熱平衡試験中の船内保管室  
（筑波宇宙センター）

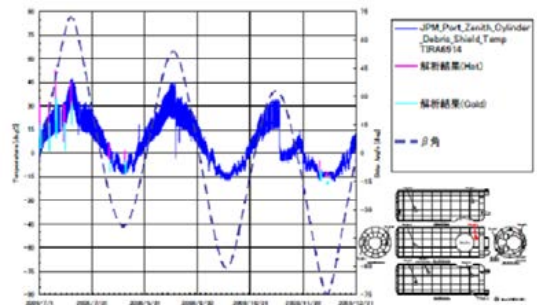


第15図 ISS全体熱数学モデル



第14図 熱試験に供される  
曝露部装置交換機構

フライト 1J での軌道上での温度変化は、事前解析結果と良く一致しており、熱数学モデルのフィデリティが満足できるものであることを裏付けている。（第16図）



第16図 船内実験室  
左舷上部（赤点）温度の予測値と実測値

船内実験室の打上げ後の温度変化を予測値と共に第16図に示す。予測に概ね一致しており、熱解析のフィデリティが満足できるレベルであることを確認した。

### (3) 構造系の統合

構造系は乗員安全に直結する重要なサブシステムのため、NASA からの厳格な数学モデル要求を満足した構造強度解析を通じて保証される（第 17 図、第 11 表）。モデル上の要素間インターフェースはフライト状態を模擬した状態で保証されるため、モデル組み合わせによるシステム統合（スペースシャトル全体モデルや ISS 全体モデル）でも統合後のモデル精度は維持される。

打上げ時のスペースシャトルと「きぼう」とのクリアランスや、ロボットアームによる ISS への結合作業時のクリアランスについても、3次元計測結果を反映した CAD モデ

ルによる静的クリアランスに、各種公差と動的解析（NASTRAN や ADAMS など）による変位量を組み合わせて保証した。これらのクリアランス評価の過程では、ハードウェア設計時に明確でなかった動変位等の条件が明らかになり、結果としてクリアランスが許容値以下、もしくは干渉する部位が存在することが判明した。これらの部位については、フライト品を設計改修し、クリアランスが正となる見込みを得て打上げに臨んだ。（第 19 図、第 20 図）

「きぼう」構造系の他要素とのシステム統合のプロセスを第 10 表に示す。

第 10 表 構造系の統合プロセスシステム

システム開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ モーダルサーベイ試験にて振動モードを把握し、NASTRAN 構造数学モデルに反映（コリレーション）（第 11 表）</li> <li>・ 試験時のインターフェース条件はフライト状態を模擬。（第 17 図）</li> </ul>
システム統合	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ Craig-Bampton 形式にてモデル縮退及び統合された全体構造数学モデルによる柔結合解析（NASTRAN）</li> <li>・ 軌道上検証（加速度センサーによる解析モデルの精度向上）</li> <li>・ クリアランス／干渉評価については、実寸を反映した 3次元 CAD 空間での要素の組立にて評価。（第 18 図、第 19 図）</li> </ul>
システム拡張	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 上記構造数学モデルによる打上げ検証</li> </ul>

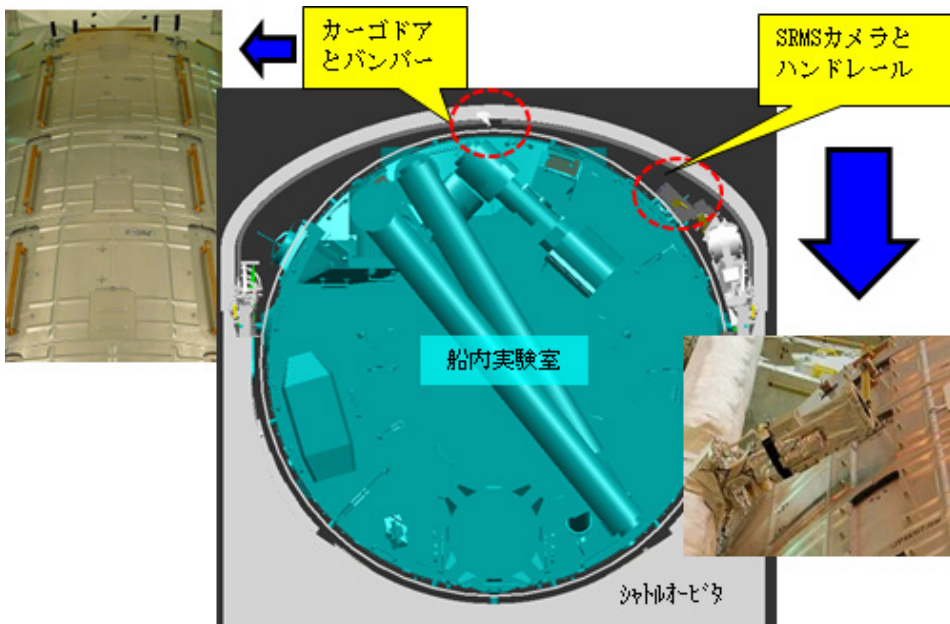


第 17 図 船内実験室のモーダルサーベイ試験

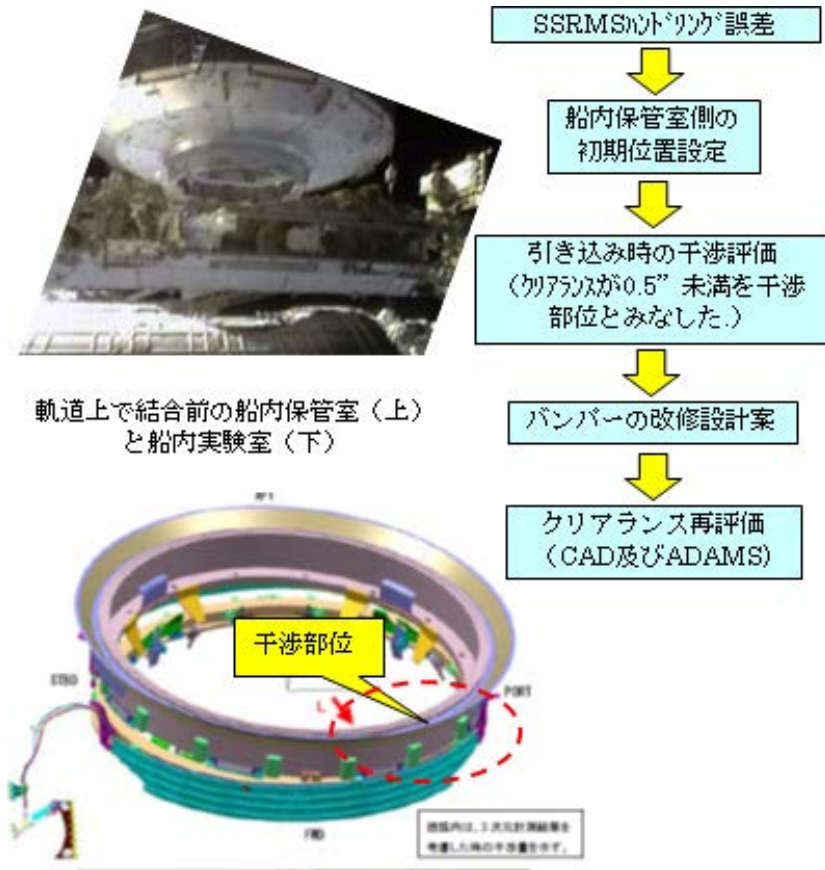
第 11 表 コリレーション要求と船内実験室の場合の結果

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

Test Results Mode No.		Test mode 1	Test mode 2	Test mode 3	Test mode 4	Test mode 5	Test mode 6	Test mode 7	Test mode 8	Test mode 9	Test mode 10	Test mode 11	Test mode 12
Completed Correlation Model	Test Results Case No.	1	3	2	2	1	1	3	2	1	1	2	2
	Test Results Frequency (Hz)	5.82	7.61	10.24	10.50	12.73	13.57	13.74	15.08	15.34	16.36	17.13	17.53
	Mode No.	*1	*2	*3	*4	5	*6	*7	8	*9	*10	*11	*12
	Frequency (Hz)	5.81	7.33	9.97	10.47	13.03	13.36	13.60	14.89	14.99	16.22	17.12	18.01
	Best XOR	0.98	0.97	0.93	0.95	0.84	0.93	0.83	0.90	0.94	0.97	0.92	0.68
	Frequency Difference(%)	0.13	3.77	2.75	0.32	-2.34	1.55	1.08	1.27	2.36	0.84	0.07	-2.64



第 18 図 船内実験室と船内保管室の結合部干渉評価



第 19 図 船内実験室と船内保管室の結合部干渉評価

#### 4. まとめ

日本初の有人宇宙システム「きぼう」の開発を通じて得られた大型システムの統合技術について、具体例を交え紹介した。得られた統合技術は、NASA から学んだものもあれば、開発の中で自ら取得し、NASA の検討手法に反映されたものもある。

当初計画より打上げが遅れた「きぼう」であるが、製造後も様々な審査会や独立評価を経て、打上げ直前まで検証レベルの向上に注力した。運用開始から現時点まで、「きぼう」のシステムに大きな不具合が発生していな

いことは、地上での徹底した開発検証の成果の顕れと考えている。

本章で紹介した「きぼう」の統合開発手法は HTV (H-II Transfer Vehicle) の開発にも踏襲されている。今後の HTV 運用機、更には現在検討中の将来ミッションについても、大型有人システム統合技術の成果が期待される場所である。