

第2章 「きぼう」日本実験棟プロジェクトの概要

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構

JEM 運用プロジェクトチーム 今川 吉郎

JEM 開発プロジェクトチーム 荒井 功恵、下田 孝幸

Outline of Japanese Experiment Module (JEM) “KIBO”

Japan Aerospace Exploration Agency

JEM Operations Project Team, Kichiro Imagawa

JEM Development Project Team, Katsuyoshi Arai, Takayuki Shimoda

ABSTRACT International Space Station (ISS) is a big project by the worldwide participation of fifteen countries. In November 1998, the first ISS module was launched and ISS assembly began. The assembly will be completed by 2010, and Japanese Experiment Module (JEM) “KIBO”, which is the first manned space facility constructed in Japan and attached to the ISS, will be launched by three Space Shuttle Flights and completed as a part of the ISS. This paper shows the outline of JEM “KIBO” project.

1. はじめに

国際宇宙ステーション計画は、世界の 15 カ国が参加し、それぞれの国が独自の宇宙技術を結集して進めている一大プロジェクトである。1998 年から建設が始められ、これまでスペースシャトル等により 40 回以上に分けられて打上が行われ、2010 年の完成を目指して建設が進められている。国際宇宙ステーション(ISS)には、完成すると 6 名の宇宙飛行士が常時滞在し、10 年以上にわたり様々な実験や観測等が行われる。

日本も計画開始当初から ISS 計画に参加してきており、「きぼう」日本実験棟の開発を行ってきた。「きぼう」は、「船内実験室」及び「船外実験プラットフォーム」という 2 つの実験設備、船内実験室に接続する「船内保管室」、船外実験プラットフォームに接続する「船外パレット」、船外実験プラットフォーム上でのペイロードの移設等に用いられる「ロボットアーム」の主要 5 要素から構成され、その他に、実験データ等を日本のデータ中継技術衛星（こだま）を経由して地上に伝送する「衛星間通信システム」を装備している。

本報告では、「きぼう」日本実験棟プロジェクトの概要及び軌道上初期検証・初期実験結果について紹介する。

2. 国際宇宙ステーション計画の概要

国際宇宙ステーション計画は、米国のレーガン大統領が 1984 年 1 月 25 日の年頭一般教書において、恒久的な有人宇宙基地を 10 年以内に建設するように提唱したことから始まった。この宇宙ステーション「フリーダム」計画には、ロンドンサミットでの呼びかけによ

り、カナダ、欧州、日本が参加して始まった。

1986 年 1 月に起きたスペースシャトル「チャレンジャー」の爆発事故の結果を宇宙ステーション計画に、コスト、安全性等の面から反映を行い、また、1989 年 7 月から 10 月、米国航空宇宙局(NASA)は米国内財政の悪化に伴い、宇宙ステーション計画の見なおしをリフェージング (Rephasing) と称して実施し、さらに、1990 年 10 月、NASA の 1991 年度宇宙ステーション予算が総額 230 億ドルまで膨らんだことから米国議会は、総額 190 億ドルまでに削減するよう指示し、NASA は宇宙ステーションの再構築をリストラクチャリング (Restructuring) と称して実施した。

クリントン大統領が選任されると、宇宙ステーション計画の大幅縮小を打ち出した。ここに、宇宙ステーションの更なる設計見直しを「リデザイン」(Redesign) と称して、今までの設計とは大きく異なる新コンフィギュレーションとして、1993 年 6 月に宇宙ステーション「アルファ」を打ち出した。

1993 年 12 月には、宇宙ステーションにロシア要素を組み込んだコンフィギュレーションが構築された。このコンフィギュレーションはロシアン・アルファと呼ばれた。この審査で宇宙ステーションを国際宇宙ステーション (ISS: International Space Station) と呼ぶようになり、現在に至っている。

1998 年 11 月 20 日、最初の打ち上げモジュール FGB「ザーリア」が、ロシアのプロトンロケットによりカザフスタン共和国のバイコヌール基地から打ち上げられ、引き続き 12 月 3 日には、NASA のケネディ宇宙センターからスペースシャトルにより米国の最初のモジュールであるノード 1「ユニティ」が打ち上げられた。ここに国際宇宙ステーションの組み立てが本格的に始まった。

米国財政事情による度重なる宇宙ステーション計画の見なおし、冷戦構造終結によるロシアの参加による宇宙ステーションの計画変更、及び 2003 年のスペースシャトル「コロンビア」の事故などがあり、大幅なスケジュール遅れ等の紆余曲折があったが、現在 2010 年の完成を目指して建設が進んでいる。

3. 「きぼう」日本実験棟の全体システム

3.1 全体システム概要

「きぼう」日本実験棟は、多目的な実験施設で、宇宙の微小重力や真空環境を利用した微小重力実験、地球方向及び天頂方向の視野を必要とする観測実験、理工学実験等を行うことができる。「きぼう」日本実験棟は我が国初の有人宇宙システムとして開発が進められ、以下の 5 つの各部 (要素) から構成され、その他に、衛星間通信システムを装備している。

- a. 船内実験室
- b. 船外実験プラットフォーム
- c. ロボットアーム
- d. 船内保管室

e. 船外パレット

これら各要素は3回のシャトル飛行により打ち上げ、軌道上で組立てられ、国際宇宙ステーション本体に取付け、10年以上の間実験装置を運用する。「きぼう」の運用に当たっては通常は2名の宇宙飛行士が滞在可能である。図1に全体組立コンフィギュレーションを示す。以下には、構成要素の特徴と概要を示す。

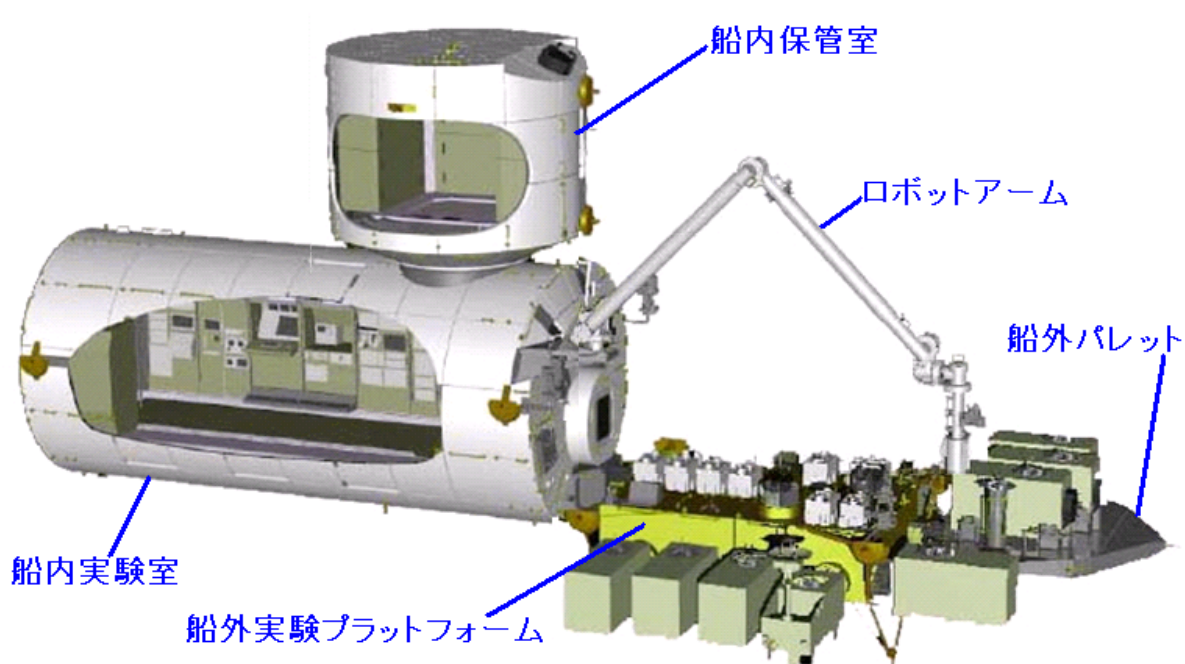


図1 「きぼう」全体コンフィギュレーション

3.2 船内実験室

船内実験室の外観を図2に示す。また、主要諸元を表1に示す。局所的な突起を除いて外径約4.4 m、内径約4.2 m、全長は約11.2 mである。軌道上での質量は搭載される実験ペイロードや他の要素を除いて約15.9 t、打ち上げ時の質量は船内実験室に取付けられた状態で打上げられるロボットアームの親アームを含めて約13.9 tである。

船内実験



図2 船内実験室の外観

室の内部には、同一円周上に「ラック」と呼ばれる機器搭載用の構造を4台搭載する。円周上に隣り合うラックの間の隙間（スタンドオフ部）には、機軸方向に各種のリソース供給ラインが艤装されている。スタンドオフ部を含むラックの実際の搭載状況を図3に示す。このように同一円周上に4つのラックと4つのスタンドオフを配置するレイアウトは、ISSのロシア担当部分を除く主要な与圧モジュールに共通なものである。ラックは船内実験室の機軸方向に6列並び（天井側は5列）合計23台搭載することが出来る。このうち実験ペイロード用に12ラック分（うち2台分は実験用保管容積）が割り当てられている。残りの11台分にはシステム機器搭載ラックとして、電力ラック、情報管制ラック、空気調和及び熱制御装置ラック、ビデオ、オーディオ機器を搭載したワークステーションラック、ロボットアームの操作・制御コンソール、「きぼう」のデータを日本のデータ中継技術衛星を介して地上とやり取りする衛星間通信システム(ICS)の機器が収納される衛星間通信システムラックが搭載される。ラック及び「クローズアウトパネル」と呼ばれる壁板で囲まれる搭乗員の船内通常作業空間（キャビン）は大部分が1辺約2.20mのほぼ正方形の断面となる。船内実験室キャビン空間の概観を図4に示す。

表 1 船内実験室の主要諸元

項目	諸 元
形状	円筒形 (デブリハンパ [®] 装備)
寸法	外径4.4m／ 内径4.2m 長さ11.2m
重量	15.9 t
搭載ラック	23個最大 (実験ラック10個を含む)
電力	最大25kw 120V (直流)
通信制御	32ビット計算機システム 高速データ伝送最大95Mbps
環境制御	温度: 18.3～26.7℃ 湿度: 25～70%
寿命	10年以上

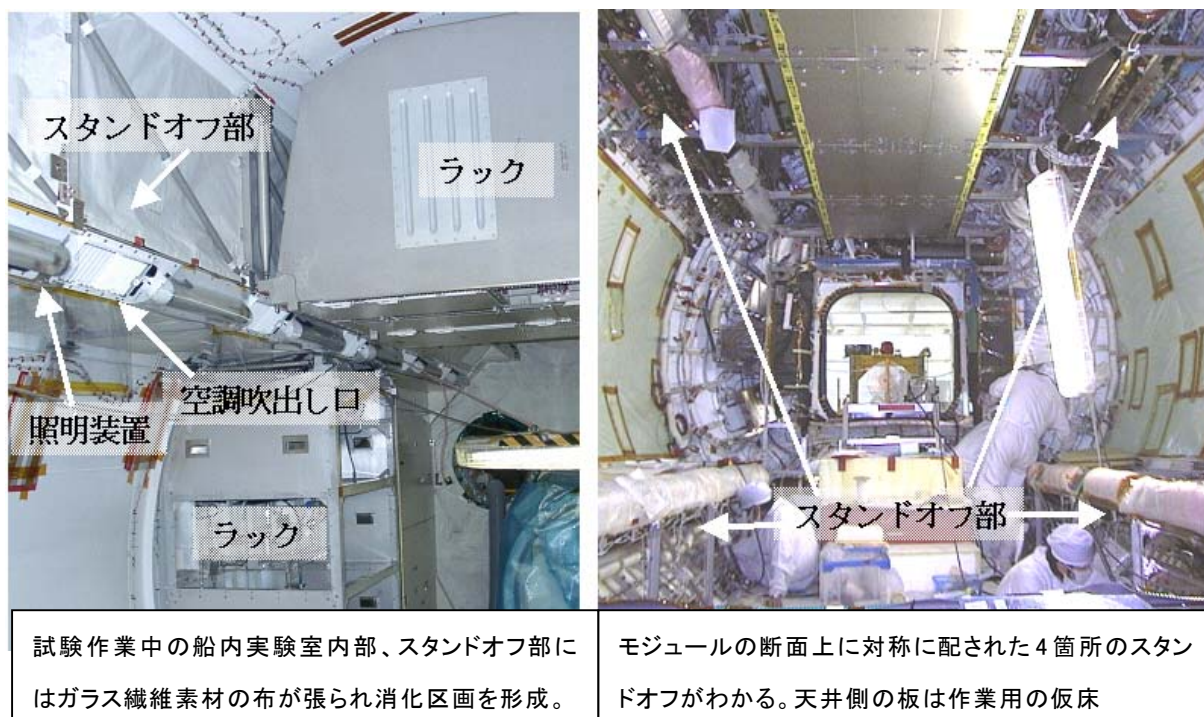


図 3 船内実験室内のラック搭載状況

ISS の進行方向に向かって右舷端部と左舷天頂部にはモジュール間ハッチとモジュール共通結合機構が取付けられており、それぞれ ISS 本体のリソースノード 2（もしくは単にノード 2）と呼ばれる与圧モジュール及び船内保管室と結合しモジュール間通路を形成する。左舷端には「きぼう」の内部と外部で機器の出し入れを行うためのエアロックと外部展望用の窓が 2 つ取付けられている。さらに左舷端外部にはロボットアームの親アーム、船外実験プラットフォームを結合するための結合機構及び船外実験プラットフォームからの排熱を収集する熱交換器が取付けられている。

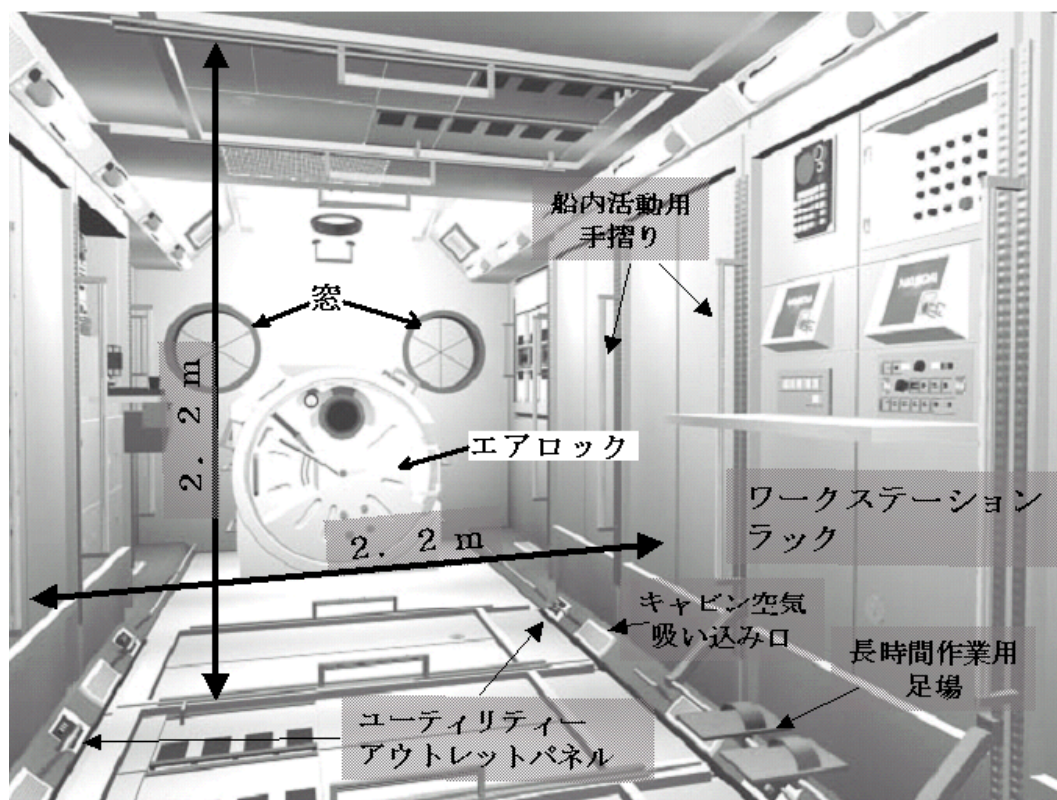


図 4 船内実験室内のキャビン空間

3.3 船内保管室

船内保管室は図 5 に示すように、概略形状としては船内実験室の機軸方向の長さを短くしたもので、直径は船内実験室と同一であり全長は約 3.9 m である。軌道上での、内部に搭載される貨物を含めない船内保管室自体の質量は約 4.2 t、内部に搭載される貨物を含めた打ち上げ時の質量は約 8.4 t である。船内保管室の主要諸元を表 2 に示す。



図 5 船内保管室の外観

船内保管室は船内実験室同様、同一円周上にラックを4台搭載し、機軸方向に2列で合計8台搭載することが出来る。このうち実験ペイロード用に3ラック分相当(実験用保管容積を含む)、またシステム機器搭載用に5ラック分相当(システム機器用保管容積を含む)の容積がそれぞれ割り当てられている。

モジュール間ハッチとモジュール共通結合機構はISS全体の地球方向に取付けられており、船内実験室(第1回目打上げ後の組み立て当初は一時的にISS本体のノード2)と結合しモジュール

間通路を形成する。天頂部外部には船外パレットを一時的に係留するための結合機構が取付けられている。また、HTV近傍通信システム用GPS受信アンテナも取付けられている。

その後、第2回目の打上げで船内実験室が打ち上げられて、ノード2の左舷に取付けられると、船内保管室はISSのロボットアームによって、ノード2から船内実験室天頂側の結合部に移設された。この状態で、船内実験室から電力供給、モジュール間換気、データ通信のサービスを受けるとともにJEMの制御コンピュータの管理下にはいつている。

表 2 船内保管室の主要諸元

項目	諸元
外形	円筒型 (デブリバンパ装備)
寸法	外形 4.4m × 内径 4.2m 長さ 3.9m
重量	4.2t
環境制御	温度: 18.3~29.4 °C 湿度: 25~70 %
搭載ラック数	最大 8個
寿命	10年以上

3.4 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概要を図6に、主要諸元を表3に示す。

船外実験プラットフォームは外形寸法が約5.6m × 5.0m × 4.0mの箱型で、アルミ合金製のフレーム／パネル構造を採用している。

上面にはロボットアームで交換



図 6 船外実験プラットフォームの概要図

可能なシステム機器（R-ORU：Robotics-Orbital Replacement Unit（ロボティクス対応軌道上交換ユニット））8台、実験ペイロードの結合機構である装置交換機構（EFU：Exposed Facility Unit）2台、各種ロボットアーム（ISS、スペースシャトル及び「きぼう」用の各アーム）が把持するグラブフイクスチャ2台、そして「きぼう」ロボットアームの先端に付く子アームを保管する子アーム保管装置（SSE: SFA Storage Equipment）が装備されている。下面にはEVA（船外活動）にて交換可能なシステム機器（E-ORU：EVA対応軌道上交換ユニット）4台が、そして側面には船内実験室との結合機構（EFBM:Exposed Facility Berthing Mechanism）とEFU10台が装備されている。スペースシャトル搭載時の支持構造であるトラニオン上には視覚装置2台が装着され、プラットフォーム上での諸作業のモニタに使用する。そして構体内部にはORU化されていないシステム機器や各種ケーブル、冷媒配管などが収納されている。

12台のEFUの内、船外実験プラットフォームには計10台の曝露実験ペイロード（標準サイズ：約1.00m×0.80m×1.85m）が取付可能である。曝露実験ペイロードはスペースシャトルや、H-IIBで打上げられる宇宙ステーション補給機（HTV）などの輸送手段により軌道に運ばれ、「きぼう」ロボットアームによる遠隔操作で船外実験プラットフォームに結合される。

3.5 船外パレット

船外パレットは、地上から船外実験プラットフォームへ実験ペイロードを輸送し、実験の終了した実験ペイロードを地上に持ち帰る輸送機（キャリア）の役割を持つシステムである。国際宇宙ステーションまでの運搬手段は、米国スペースシャトルを用いる。そのため、システム構成はスペースシャトルの輸送環境に適合するよう、スペースシャトルと構造、電気等のインタフェースを有するものとなっている。船外パレットの主要諸元を表4に示す。スペースシャトルで運搬された船外パレットは、シャトルアーム（SRMS）、ステーションアーム（SSRMS）を用いて船外実験プラットフォームに取付られた後、

表3 船外実験プラットフォームの主要諸元

項目	諸元
形状	箱形
寸法	長さ5.6m×幅5.0m×高さ4.0m
重量	4.1t
実験ペイロード	10個(最大搭載)
電力	最大11kw 120V(直流)
通信制御	16ビット計算機システム 高速データ伝送最大95Mbps
寿命	10年以上

表4 船外パレットの主要諸元

項目	諸元
形状	フレーム型
寸法	長さ4.2m×幅4.9m×高さ2.2m(実験ペイロード含む)
重量	1.2t
搭載実験ラック	3個(最大)
電力	最大1.0Kw 120V(直流)
熱制御方式	ヒータ、断熱材
寿命	10年以上



図 7 船外パレットシステム概要図

JEM ロボットアーム(JEMRMS) を用いて実験ペイロードの着脱や新旧の実験ペイロードの交換が行われる。図 7 に船外パレット外観を示す。主な構成品は、1)主構造、2)ペイロード取付機構 (PAM: Payload Attach Mechanism)、3)制御電子装置 (ECU: Electrical Control Unit)／電力分配装置 (PCU: Power Control Unit)、4)シャトルインタフェース構造 (Trunnion)、5) ペイロード装置交換機構 (PIU) 等である。

システム最大質量としては、ペイロードを搭載しない状態で約 1200kg になる。船外パレットの運搬能力は、0.8m×1.85m×1.0m、最大質量 500kg の実験ペイロードを 3 個搭載可能である。このシステムへの要求としては、複数回の打上げ・地上への回収が可能なこと、可能な限り軽量化を行い、かつペイロードに必要な電力を提供すること等があり、これらを各設計へ反映しつつ開発を行った。

3.6 ロボットアーム

親アーム及び子アームの主要諸元を表 5 に示す。「きぼう」に取付けられるロボットアームは、「きぼう」運用でのクルーによる船外活動の低減と作業負荷の軽減を目的に、

表 5 ロボットアームの主要諸元

項目	諸 元	
	親アーム	子アーム
型式	親子式6自由度アーム	
長さ	約 9.9m	約 1.9m
重量	780kg	200kg
取り扱い量	最大 7,000kg	最大 300kg
位置決め精度	並進 ±50mm	並進 ±10mm
	回転 ±1度	回転 ±1度
先端速度	60mm/s (P/L: 600kg以下)	50mm/s (P/L: 80kg以下)
	30mm/s (P/L: 3,000kg以下)	25mm/s (P/L: 300kg以下)
	20mm/s (P/L: 7,000kg以下)	-
寿命	10年以上	

「きぼう」の構成要素のバーシング、船外実験プラットフォームや船外パレット上にある実験ペイロードや軌道上交換装置の交換作業、及び各種実験支援又は保全作業支援などを行う宇宙用遠隔操作型マニピュレータシステムである。

ロボットアームは主として親アーム、親アームの先端に取付ける子アーム、これらを船内実験室内から遠隔操作する RMS コンソール、その他のサブシステムから構成される。

3.6.1 親アーム

図 8 に示す親アームは、基部を船内実験室の左舷エンドコーンに固定した長さ約 10m、質量 780kg の 6 自由度アームであり、ブーム、関節機構部、関節エレクトロニクス、エンドエフェクタ、肘部及び手

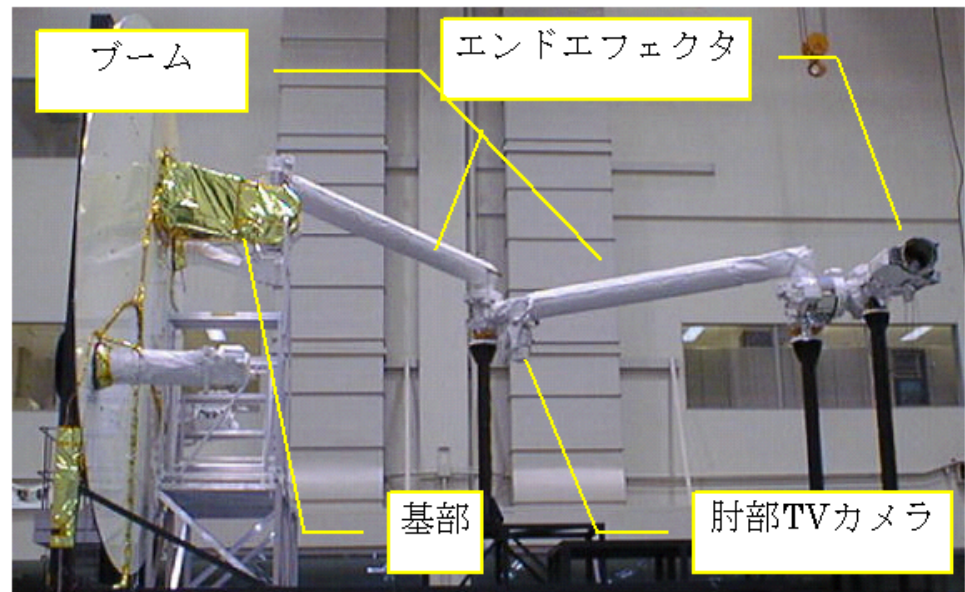


図 8 親アーム外観図

首部視覚装置（TV カメラ、雲台、照明）で構成される。

親アームは、主に実験ペイロード（標準ペイロードで質量 500kg、寸法 1.85×1.00×0.80m）の交換作業に使用する。手首と肘及び肘と肩間のブームには、それぞれ長さ約 3.9m の線膨張係数が小さく、高剛性の炭素繊維強化プラスチック（CFRP）のパイプ構造を使用している。

3.6.2 RMSコンソール

RMS コンソールは、図 9 に示すようにロボットアームの管制機能を司る計算機、操作者であるクルーが船内実験室内でアームの遠隔操作を行うラップトップ端末、並進用と回転用の 2 式のハンドコントローラ、カメラ制御パネル、TV モニタなどの MMI(Man-Machine Interface)機

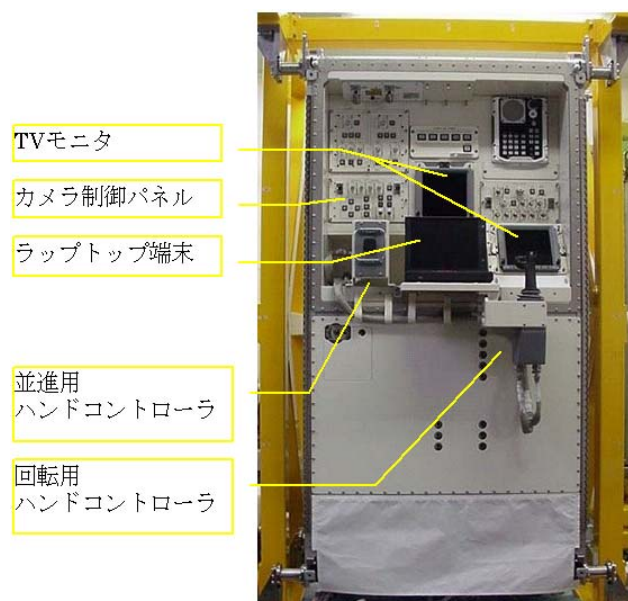


図 9 RMS コンソール外観図

能、及びアーム制御計算機によるアームのリアルタイム制御機能、更に「きぼう」や国際宇宙ステーション本体の上位システムと通信インタフェースを持った集約型のコンソールである。

3.7 衛星間通信システム

衛星間通信システム(ICS：Inter-orbit Communication System、以下「ICS」と呼ぶ)は「きぼう」と筑波宇宙センター地上局との間の双方向マルチメディア通信（データ、画像、音声など）を実現する大容量データ伝送システムである。「きぼう」の膨大な実験データの伝送要求に対して ICS による日本独自の衛星通信回線を提供することにより、日本の先端的な通信技術及び情報技術(IT)による国際貢献が見込まれている。

ICS は日本のデータ中継技術衛星（こだま）(DRTS: Data Relay Test Satellite)を介して「きぼう」と筑波宇宙センター地上局との間の双方向通信を実現する装置である（図 10）。「きぼう」から地上局へのリターンリンクでは「きぼう」内部のシステム機器や各種実験装置から出力される実験データ、システムテレメトリ、中速ペイロードデータ、画像データ、音声データなどを収集／多重化し、最大で合計 11 チャンネル、50Mbps の速度で伝送することが可能である。また、地上局との通信リンクが確保されていない期間においてはデータを一時的に記録し、通信リンク確保後に再生して地上局へ伝送する機能も有している。



図 10 ICS の外観及び運用概念図

ICS は ICS 与圧系サブシステム(ICS-PM: ICS Pressurized Module subsystem)と ICS 曝露系サブシステム(ICS-EF: ICS Exposed Facility subsystem)から構成されている。ICS-PM は ICS の管理制御、各種データの多重化分解処理、変復調処理を行い、「きぼう」全体の管理制御計算機である JEM 管制制御装置(JCP: JEM Control Processor)との通信も行っている。ICS-EF

はデータ中継技術衛星を捕捉追尾するアンテナを有しており、ICS-PM からのリターンリンクデータを高周波変換／増幅してデータ中継技術衛星へ送信し、地上からのフォワードリンクデータを低周波変換して ICS-PM に送信する。ICS-PM は船内実験室に、ICS-EF は船外実験プラットフォームにそれぞれ離れて設置されているため、両サブシステムは船内実験室と船外実験プラットフォームに敷設されている ICS 専用の制御線、データ伝送線を介して接続されている。

4. 開発スケジュールと初期軌道上検証及び初期実験

4.1 開発スケジュール

「きぼう」は 1985 年から予備設計に着手し、米国側の計画変更に対応しつつ、構成要素の設計、試作試験、エンジニアリングモデルの製作・試験、フライトモデルの製作・試験等の段階を経て、開発を進めてきた。「きぼう」の打上げ計画が具体化してきた 2003 年から、打上げ場所である NASA ケネディ宇宙センター(KSC)へ構成要素を 3 回に分けて輸送し、KSC での射場作業を実施してきた。

「きぼう」は、スペースシャトルで 3 回に分けて打ち上げられ、軌道上で宇宙飛行士の船外活動(EVA)及び ISS やスペースシャトルのロボットアームにより組み立てられる。2009 年 2 月時点では、1 回目、2 回目の打上げ及び軌道上組立が完了している。また、2009 年 5 月に 3 回目の打上げ及び軌道上組立が計画されている。図 11 に開発スケジュールを示す。

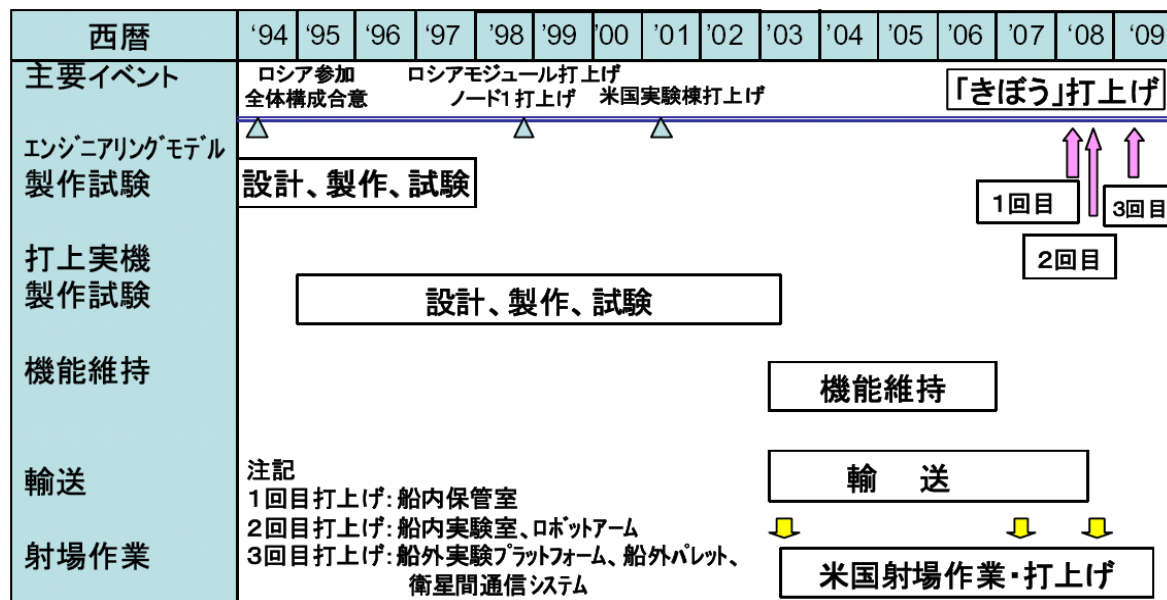


図 11 開発スケジュール

4.2 打上げ・組立・初期検証及び軌道上実験

「きぼう」の構成要素は、スペースシャトルで 3 回に分けて打ち上げられている。

第 1 回目の打上げは 2008 年 3 月 11 日（日本時間）に行われ、土井宇宙飛行士が船内保管室を ISS へ取付けた。船内保管室には、船内実験室に搭載する「きぼう」のシステムラ

ックや実験ラックが搭載された状態で打ち上げられた。本来は船内実験室内に取付けられるが、この第1回目の打上げ時には船内実験室が無いため、ISSの仮設置場所に置かれた。この時の打上げ時の作業概要を図12に示す。

第2回目の打上げ要素は船内実験室とロボットアームで、2008年6月1日（日本時間）に打ち上げられ、星出宇宙飛行士がロボットアーム付きの船内実験室をISSへ取付けた。

第2回目の打上げ期間の中で、船内実験室へのシステムラック及び実験ラックが移され、船内保管室も船内実験室上に移設された。第2回目の打上げ時の作業概要を図13に示す。

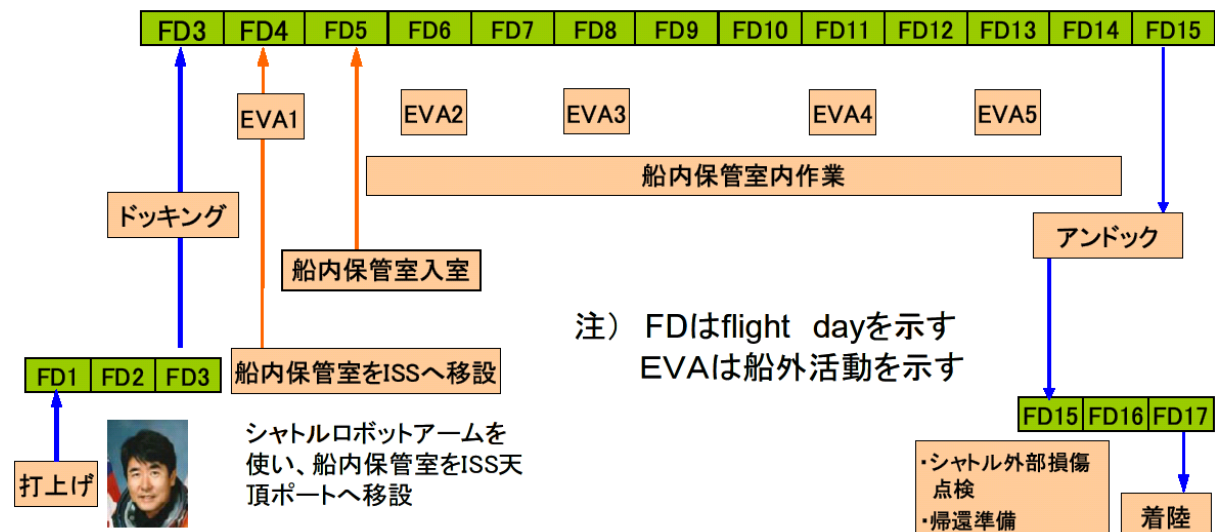


図12 船内保管室の打上げ時の作業概要

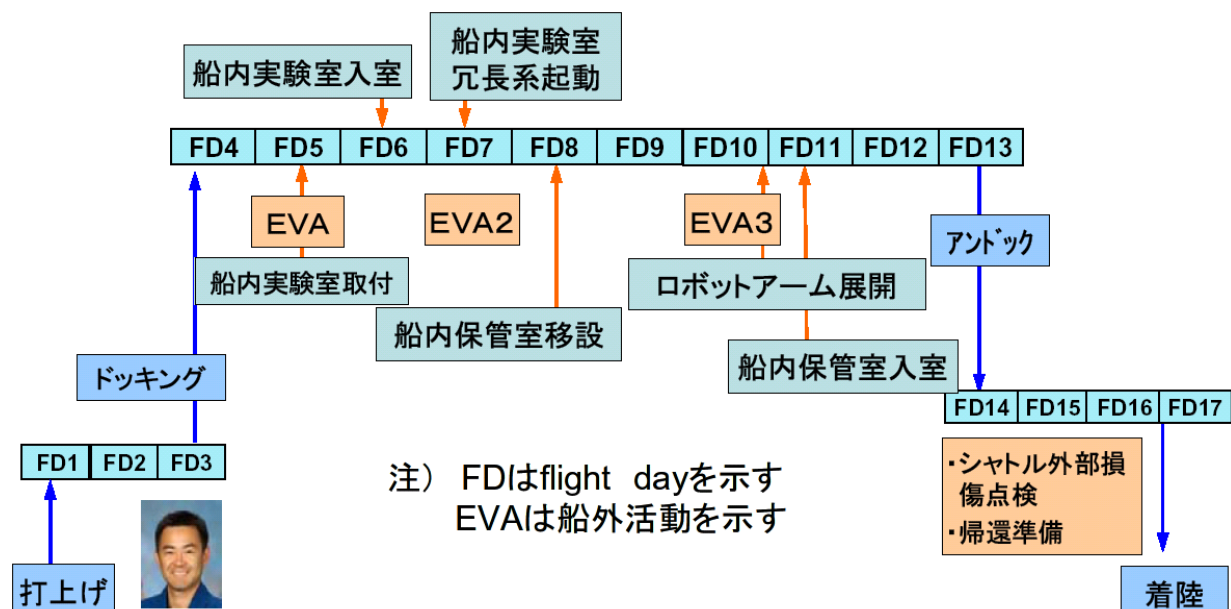


図13 船内実験室の打上げ時の作業概要

第3回目の打上げは2009年5月に予定され、船外実験プラットフォーム、船外パレット、衛星間通信システム及び曝露実験ペイロードが打ち上げられる。この組み立て作業は、

直前のスペースシャトルに搭乗して、ISSに滞在していた若田宇宙飛行士が行うことになっている。

第 2 回目の打上げ以降、初期検証・運用が行われており、大きな不具合も無くほぼ予定通り作業が進んでいる。現段階で致命的な不具合は発生しておらず、順次対策を進めている。

「きぼう」の軌道上実験は、船内実験室内システム機器の性能確認後、2008 年 8 月から開始された。これまでに物質科学分野のマランゴニ対流実験（試料表面の温度差により発生する表面張力の微小な差異により引き起こされる対流現象）が実施され、大きな液柱の形成という初期の成果（図 14）を得ると共に、氷結晶成長実験も開始され、氷の結晶が成長する様子が観察された（図 15）。また、教育・芸術及び有償利用（利用者が利用料金を支払うことで成果を占有できる枠組みとして利用の拡大を促進する利用形態）の一部を実施している。

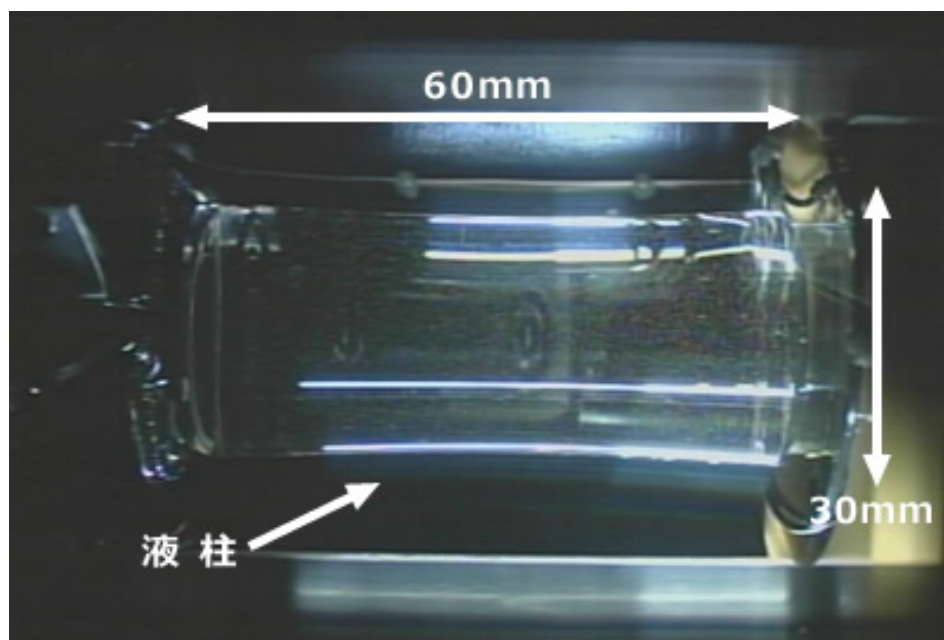


図 14 マランゴニ対流実験における液柱の形成



図 15 氷結晶成長実験における氷結晶成長の様子

5. 「きぼう」の開発による成果と意義

ISS 計画参加のために「きぼう」を開発するにあたっては、参加の意義と目標を設定し、現在それらの目標に向かって進んでいるところである。

「きぼう」の開発、運用及び宇宙飛行士の育成と活動を通じて、国際水準の有人宇宙技術を獲得することとしている。運用段階では、日本の H-IIB ロケットで HTV を継続的に打ち上げることで、日本の宇宙輸送技術の向上に大きく貢献する。また、これらの実施を通じて、大規模で安全なシステム開発とその運用に必須のシステムズ・エンジニアリング及び大規模プロジェクト・マネジメント手法の獲得を目指す。

大規模有人宇宙システムの設計、製造、試験、運用に必要な技術として、「エンジニアリング」と「テクノロジー」が挙げられる。ISS のような複雑で大規模なシステムの設計、製造、試験、運用にとって、「エンジニアリング」が重要な鍵であり、「きぼう」の開発及び初期運用を通じてこれら技術を獲得してきた。

ここでいう「エンジニアリング」とは、複雑で大規模なシステムを確実に開発するための技術で、具体的には開発管理技術（マネジメント技術）、システム統合技術（大規模なシステムを段階的に確認、拡大していく技術）、安全評価・管理技術（設計から運用まで安全性をより厳密に管理評価する技術）、信頼性管理技術（安全性を高めるため、宇宙機の信頼性をより厳密に管理する技術）等である。

また、「テクノロジー」とは、人間が宇宙において安全・安心に長期滞在や活動維持が行える技術で、システム維持機能技術（有人宇宙システム構築に必要な基盤となる技術）、生命維持技術（宇宙空間で搭乗員の生命を安全・確実に維持する技術）、活動支援技術（宇宙空間で搭乗員の活動を支援する技術）等である。

6. まとめ

ISS 計画への参加により、最新有人宇宙技術を習得すると共に、大規模システムの開発、国際協力の進め方などのマネジメントについて経験した。今後は、「きぼう」の開発・運用で習得した技術とマネジメントの経験を、次の有人宇宙計画の立案及び開発等に反映したい。