

日本実験モジュール“きぼう”の開発

The development of Japanese Experiment Module“ KIBO ”

名古屋航空宇宙システム製作所 福田 信彦^{*1}

国際宇宙ステーション（ISS）の構成要素である日本実験モジュール“きぼう”は国内初の恒久的有人宇宙施設である。国際共同プロジェクトであるがゆえ、米国による計画提唱後の再三にわたる構想縮小化、ロシアの参画に伴う形態見直し等により“きぼう”自身も少なからず影響を受けながらの開発であった。国内的には、宇宙開発事業団を中心とした宇宙関連企業8社による“ All Japan ”の体制で、その開発が推進されてきた。当社は船内実験室（JEM 与圧部）と船内保管室（JEM 補給部与圧区）の開発を担当し、要素技術試験、EM（Engineering Model）製作試験を得て、フライト実機の製作と検証試験を平成13年9月に完了した。

Japanese Experiment Module, "KIBO" is Japan's first manned space activities facility. Considering the inexperienced technical area, National Space Development Agency of Japan (NASDA) and eight Japanese Space development companies are involved. Mitsubishi Heavy Industries (MHI) is responsible for developing the Pressurized Module (PM), central part of KIBO and the Experiment Logistics Module-Pressurized Section (ELM-PS), a KIBO storage that accommodates experiments and consumables. MHI completed all manufacturing and testing at the MHI site in September 2001.

1. ま え が き

日本は米国が提唱した国際宇宙ステーション（以後ISSと称す）計画に実験モジュール“きぼう”を提供することで参画しているが、当社としてはその主要構成要素の船内実験室（JEM 与圧部）と船内保管室（JEM 補給部与圧区）の開発を担当してきた。ここではこれらの開発経緯、主要技術課題と特徴、ISSプログラムに対する今後の取組方針等について述べる。

なお、開発段階においては、日本実験モジュール“きぼう”はJEM（Japanese Experiment Module；以下JEMと称す）、船内実験室は与圧部、船内保管室は補給部与圧区と各々呼称されていたため、引用する図表には同名称が使用される場合がある。

2. 開 発 経 緯

米国レーガン大統領の年頭教書により宇宙ステーション計画が発表されたのは1984年である。それを受けて1985年に日本国内でJEMプログラムが立ち上がり、予備設計作業が開始された。その後、米国側では初期構想が膨れ上がるのを押さえる目的で、再設計（リデザイン）活動による構想の縮小検討が行われた。また、東西冷戦の崩壊に伴いロシアの参画が決定し、宇宙ステーション本体側の構想はまたもや見直されることになる。このような国際情勢に基づく大きな動きにより、全体スケジュール、基本開発要求、インタフェース要求等は流動的にならざるを得ない時期もあったが、1998年11月にISS構成要素である基本機能モジュール（ザリヤ）が初めてロシアより、同年12月に接続モジュール（ノード1/ユニティ）が米国より打上げられ、それ以後各構成要素の打上げと軌道上での組立て作業が本格化することになる。また、2000年11月からは3人の宇宙飛行士の滞在も開始さ

れている。

当社における開発の流れは表1のとおりである。最終目標である打上げ時期は再三延期が繰り返されてきたこともあり、設計期間が非常に長くならざるを得なかった等の特徴もあるが、基本的には、ロケットや人工衛星と同等の段階的な開発方式を取り入れてきた。それは表1に示すように、開発基礎試験、EM（Engineering Model）製作試験、PFM（Protoflight Model）製作試験の3つのフェーズに分類することができ、随所で審査会を実施して各々得られた成果が次フェーズに反映されることを確認してきた。

また、平成13年10月より宇宙開発事業団（以下、NASDAと称す）筑波宇宙センタで全体システム試験が、その後米国のケネディ宇宙センタで射場作業が行われる。平成13年9月時点における打上げスケジュールはISS全体の組立て計画と整合された結果、平成16年である。

3. “きぼう”の概要

“きぼう”は図1に示すように、船内実験室（与圧部）、船内保管室（補給部与圧区）、船外実験プラットフォーム（曝露部）、船外パレット（補給部曝露区）、ロボットアーム（マニピュレータ）から構成される。当社が担当した部位の特徴は以下のとおりである。

（1）船内実験室（与圧部）

“きぼう”の中の中心的な施設で、宇宙飛行士が滞在して実験作業と“きぼう”のシステム全体のコントロールを行う。ここに搭載される機器は、“きぼう”全体のシステムを維持管理するためのシステム機器と、実験を行うための実験装置に分類できるが、当社が担当したのは前者である。船内実験室は電力系、熱制御系、通信制御系、環境制御系、火災検知消火系、実験支援系、機構系、管制システム系、乗員支援系といった各サブシステムより構成され

^{*1}宇宙機器技術部主席

表 1 船内実験室（与圧部）／船内保管室（補給部与圧区）の開発の流れ
JEM PM and ELM-PS development schedule

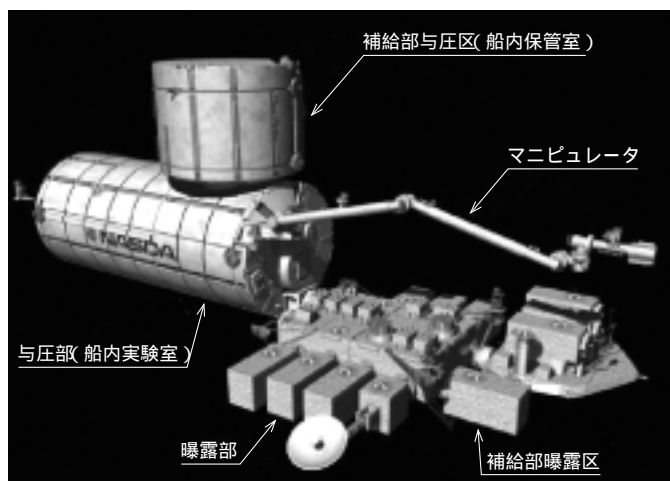
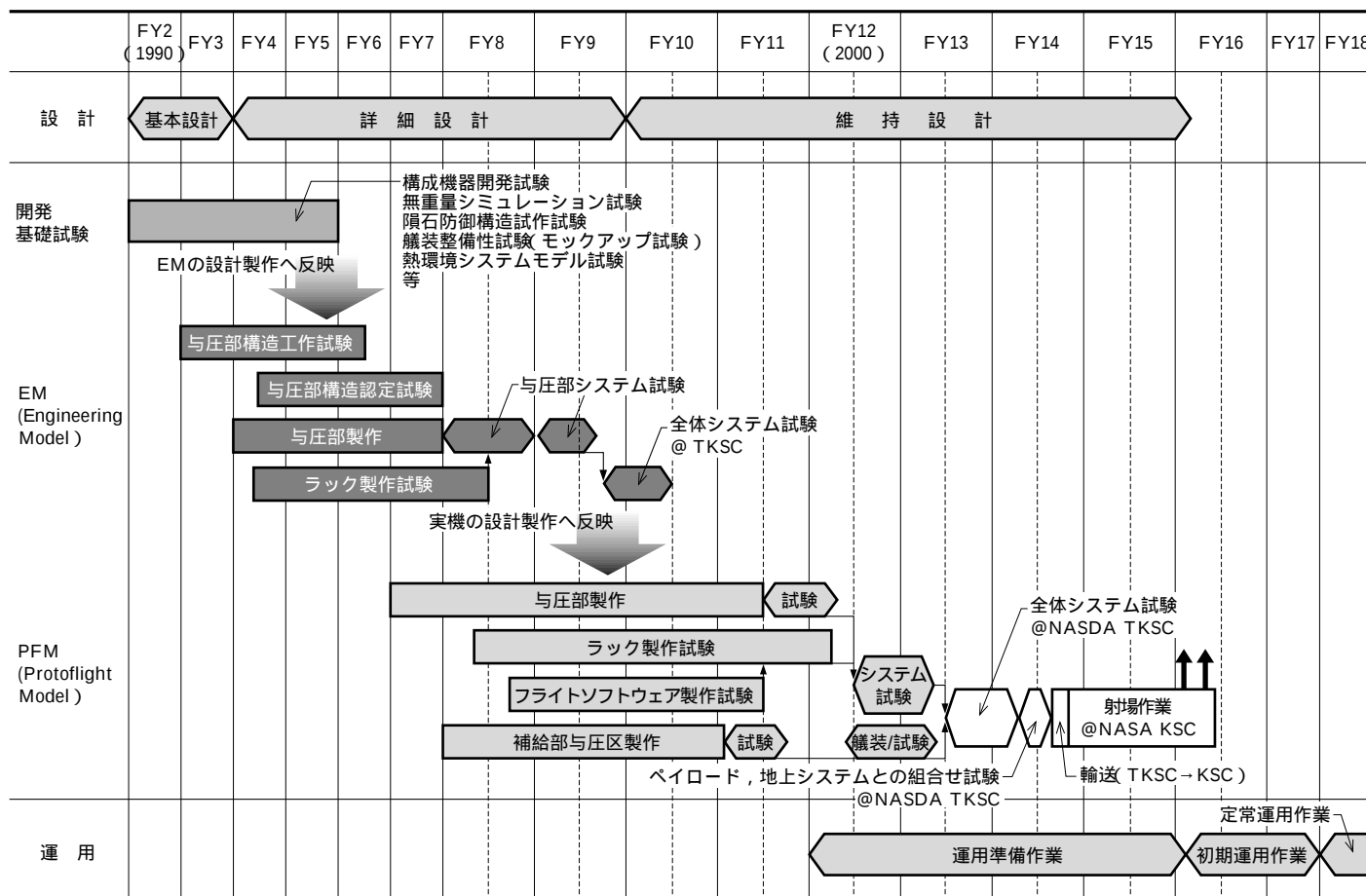


図1 “きぼう” 外観 “きぼう”の外観と国際宇宙ステーションの中への取付位置を示す。
KIBO overview

る。

一方、実験装置は“きぼう”のユーザによって準備され、実験ラックに搭載されて、船内実験室に取り付けられる。船内実験室は合計10体の実験ラックに対して必要なリソース（電力、データ通信、冷却水等）を供給できる能力を有する。

(2) 船内保管室（補給部与圧区）

船内実験室と同様に宇宙飛行士が活動できる環境が整備されているが、軌道上では保管庫として使用されるもので、ラック8体を搭載するスペースを有する。船内保管室はISS（ノード）や船内実験室に取り付けられて運用されることを想定されており、それ自身実験を行う機能は持たないため、船内実験室に比べるとシンプルなシステム構成である。

4. 国内開発体制

“きぼう”は多くの宇宙関連企業の能力を生かした“All Japan”の開発体制がNASDAとりまとめの下に構築された。図2に示す如く、当社は、NASDAの下で全体システムインテグレーション支援と、前述の如く船内実験室（与圧部）と船内保管室（補給部与圧区）の開発を担当した。搭載されるサブシステム機器については当社と主副契約を締結した各メーカー（KHI, IHI, NEC, MELCO）が開発を実施した。また、システム上クリティカルな機能をつかさどる主要構成機器（コンピュータ、電力分電盤、熱制御装置、空気調和装置、エアロック等）については、NASDAの直接契約によってNEC, IHI, KHI, MELCO各社が開発を担当した。これらはNASDA支給品として当社に供給された。同様に、船外実験プラットフォーム（曝露部）、船外パレット（補給部曝露区）、ロボットアーム（マニピュレータ）についても各々IHI, IA（IHI Aerospace）、NTスペース各社がNASDA直接

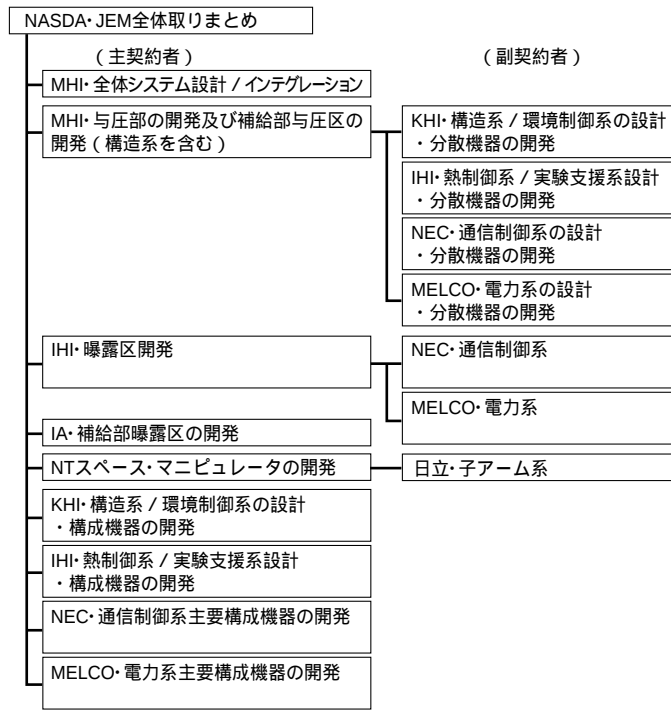


図2 “きぼう”開発体制 NASDAをとりまとめとする国内各社による開発体制を示す。
KIBO development organization in Japan

契約の位置づけで開発を担当した。

5. 開発の特徴

“きぼう”の開発に当たっては開発経験のないシステムではあるが、これまで経験してきたロケットや航空機の開発手法、設計手法をベースとする開発計画を立案した。基本的な考え方としての不整合は無かったが、宇宙ステーション特有な事項として以下を考慮する必要があった。

(1) 日本で初めての有人宇宙施設であること

全く新しいシステムであるがゆえ、それを構成するハードウェア、ソフトウェアをすべて新規に開発する必要があった。ISS共通品として米国メーカで開発されたもの、“きぼう”のために国内各社により開発されたものがあるが、いずれにしても宇宙ステーションのために新しく作られたものであり、言い換えると全く実績が無いものによりシステムを構築する作業であったといえる。それゆえ、常に不具合発生リスクがあったし、不具合発生時においてもその識別作業等は複雑なものにならざるを得なかった。

また、ISSではすべての構成要素に対して軌道上で10年以上運用期間が要求された。換言すると、10年間故障しない、あるいは故障しても宇宙飛行士の手によって修復できるようにするというのである。そのために保全性整備性設計を適用し、その実証方法としては、宇宙飛行士に直接工場に出向いてもらって製作試験に参画してもらったり、あるいは水中で実施した無重量シミュレーション試験で確認してもらう手法をとった。

さらに、有人システムとして非常に重要なものに安全要

求が挙げられる。安全性については、設計審査と平行してNASDAやNASAによる安全審査会が実施され、ISS全体に適用される安全性要求がハードウェア、ソフトウェアの設計に適用されていることが確認されてきた。また、NASDA内及び各社内には設計とは独立した形態で安全性を評価する組織を設立し、それによって安全性の管理が行われてきた。

(2) 国際共同プロジェクトであること

ISS計画は米国、ロシア、ヨーロッパ、カナダ、日本が参画しているが、開発経緯でも記したように、米国内での再設計活動、ロシアの参加等の流動的要因は少なからず“きぼう”の開発に影響を及ぼした。特に、打上げスケジュールは再々延期され、国内計画の変更を余儀なくされた。

また、“きぼう”は日本の開発担当部位であるとはいえその上位開発要求はNASA側の要求事項が適用される。開発要求が文書体系に沿って下位文書まで、さらにはハードウェア、ソフトウェアに確実にフローダウンされることを体系的に管理するのは、NASAの開発手法の特徴であるが、そのための管理作業は膨大なものとなった。

6. 要素技術開発

クリティカルと考えられる要素技術について、構成要素の試作試験を行い、必要な設計データの取得を行った。代表例を以下に記す。

(1) 無重量シミュレーション試験 (水中試験)

宇宙飛行士の手による保全を期待するためには、無重量環境での動作を考慮した機器設計、レイアウトが必要である。その手法としては米国、ロシアで既に実績のある水中試験が適用された。これは大規模な水槽に実機大のモックアップを沈め、宇宙服を着用した宇宙飛行士に宇宙空間を想定したシミュレーションを実施してもらうものである。

(2) 隕石防御構造試験

軌道上で隕石/デブリをどのように防御するかという問題は、宇宙ステーション計画が提案された当時から非常に重要なものであった。ISSの飛行高度における隕石・デブリの衝突速度は平均で約7～8 Km/sである。その高速衝突現象を解明するために当社所有の2段式水素ガスガンが使用され、最終的には防御構造 (バンパパネル) の最適設計データの取得を行った。

(3) モジュール構体製作試験

船内実験室 (与圧部)、船内保管室 (補給部与圧区) 共に、シャトルで打ち上げる関係上、直径4.4 mの円筒与圧構造である。これは同時期に開発が始められたH-IIロケットのタンク構造と寸度、構造様式共に類似であったこともあり、製作プロセス、設備等はロケットのものを流用することが可能であった。しかしながら、ロケットタンクに比べて板厚が厚いこと (4.8 mm)、スキンのパターンの裏と表が逆であること等の相違点もあり、工作試験を行うことにより新たなプロセスを確立した。

モジュール構体の開発においては船内実験室 (与圧部) 実機と全く同等の構造体を構造認定試験用として製作し、

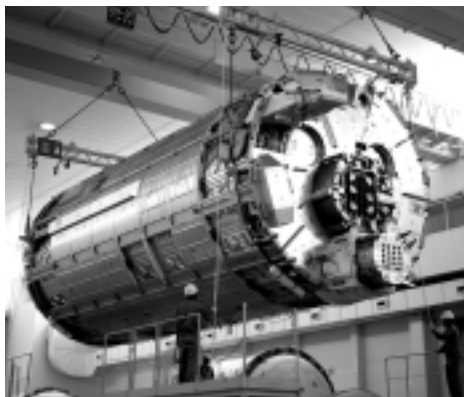


図3 船内実験室（与圧部モジュール組立）
外観
JEM Pressurized Module



図4 船内保管室（補給部与圧区モジュール組立）外観
JEM Experiment Logistics Module-Pressurized Section



図5 与圧部システム試験概要 与圧部システム試験の実施状況を示す。
PM system test

圧力試験，シャトルインタフェース荷重試験，モールドサーベイ，マニピュレータ組合せ試験等を実施し，構造体製作プロセスと仕様を認定した。

7. EM (Engineering Model) 製作試験

要素技術開発で得られた個々の成果に基づき，実機と同等の地上試験用供試体を製作し，システムとしての機能・性能の確認を行った。ただし，実機と同等とはいえ，コストとスケジュールを考慮して以下のような方策を採用している。

- ・安価な民生品や，仕様を削減したEMユニーク品の活用
- ・システムの簡易な船内保管室（補給部与圧区）のEMは省略
- ・メインコンピュータ（JCP）は主系のみ

これらの処置は実機開発に対して若干のリスクを残す可能性はあるが，試験プロセス等は実機と全く同等に行われ，試験手法/手順，不具合処置等について十分な経験を積むことができた。

8. PFM (Protoflight Model) 製作試験

実機品の製作に当たっては，各構成機器，ラック組立，モジュール組立の各レベルにおいて，詳細設計審査（CDR）あるいは製造着手確認会を実施して製作可否を判断した。当社の工場内での製作単位は以下のとおりである。

- ・システムラック組立（7体）
- ・フライトアプリケーションソフトウェア
- ・与圧部モジュール組立（図3参照）
- ・補給部与圧区モジュール組立（図4参照）

実機品の試験はすべて検証としての位置づけにより，①ラックインテグレーション試験（各ラック単位での機能性能確認），②与圧部分散システム試験（ラックを搭載する前のモジュールについて機能性能確認），与圧部システム試験（図5参照）（システムラック（7体）をモジュールに搭載したコンフィギュレーションでシステム機能性能確認）の流れで行われた。特に③においてはフライトアプリケーション

ソフトウェアとハードウェアの適合性を評価した。なお，実験ラックはダミーを使用した。

フライト品の開発完了はPQR（開発完了審査）によって確認されるが，PQRではすべての開発要求が検証されたことを示す必要がある。すなわち，5章ではNASA，NASDAの上位開発要求が社内の設計文書にフローダウンされることを記したが，さらにこれらの内容すべてが，対応する検証作業（試験，解析，検査）によって当初の設計どおり実現されていることを実証する。前述の各システム試験はその一つの手段である。

9. 全体システム試験と射場作業

船内実験室（与圧部），船内保管室（補給部与圧区）共に，各々のPQRを終了した後，当社飛島工場からNASDA筑波宇宙センタへ輸送され，全体システム試験に供される。この試験は，船外実験プラットフォーム（曝露部），船外パレット（補給部曝露区），ロボットアーム（マニピュレータ）等“きぼう”の他の構成要素との組合せ試験であり，各々のインタフェースの検証と，“きぼう”全体システムとしての成立性の確認を目的とするものである。

また，筑波宇宙センタでの作業が終了すると，各々の構成要素はコンテナに搭載され，米国のNASAケネディ宇宙センタに輸送される。ケネディ宇宙センタではSSPF（宇宙ステーション整備棟）の中に設置され，輸送後の機能確認，打上げ前の組立作業が実施され，最終的にはシャトルに搭載するためにNASA側に引き渡される。

10. む す び

非常に長期に渡る開発期間であったが，平成13年9月時点で“きぼう”に関するすべての工場作業は完了した。しかしながら打上げまでに実施すべき作業は多々あり，技術的問題が生じる可能性もあるが，将来の運用作業への参画に当たっては，開発メーカーの特性を生かした提案を行いつつ，有人宇宙分野に確実に貢献していきたいと考える。