

||||| 特集 2 : JEM「きぼう」船外実験プラットフォームを利用した科学 (解説) |||||

## 「きぼう」船外実験プラットフォーム利用の概要

高柳 昌弘

### Outline of JEM Exposed Facility Utilization Plan

Masahiro TAKAYANAGI

#### Abstract

Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) has completed the construction of Japanese Experiment Module (JEM) or “KIBO”, i.e. the nickname of JEM, on orbit till 2009 after three times STS flights. The Exposed Facility of JEM (JEM-EF) is one of the most characteristic accommodations on ISS to provide an environment directly exposed to the outer space. JEM-EF is expected to be suitable for experimental missions of a wide variety of field such as earth and space sciences and technological development. In this paper, JEM-EF and its payload are outlined, the interface between them and some significant constraints which must be taken into consideration on using JEM-EF are also discussed. Four missions now on JEM-EF and two being prepared for next utilization stage are introduced. I close this paper by the discussion of the strategies to make JEM-EF utilization be wider and more fruitful.

#### 1. はじめに

国際宇宙ステーション(以下、ISS: International Space Station)は、日米欧露加の参加による国際プロジェクトであり、日本実験モジュール(Japanese Experiment Module: JEM, 1999年、公募により「きぼう」と命名された)の開発は、日本のこのプロジェクトへの参加の最大の柱である。「きぼう」は、2008年および2009年の2年間に行われた、STS-123 (1J/A)、STS-124 (1J)およびSTS-127 (2J/A)の3回のスペースシャトル飛行により打ち上げられ、完成した。2008年8月の船内実験室利用の流体実験を皮切りに、現在、数々の科学実験が行われている。

Fig. 1 に示すように、「きぼう」は主として、船内実験室(Pressurized Module: PM)、船外実験プラットフォーム(Exposed Facility: EF)、船内保管室(Experiment Logistics Module-Pressurized Section: ELM-PS)、船外パレット(Experiment Logistics Module-Exposed Section: ELM-ES)、ロボットアーム(JEM Remote Manipulator System: JEMRMS)および衛星間通信システム(Inter-Satellite Communication System: ICS)から成る。この内、船外実験プラットフォームは宇宙空間に直接曝された環境を提供するための施設として、ISSの中でも最も特徴的な施設のひとつである。船外実験プラットフォ

ーム利用の特集の冒頭として、本稿では、その概要を紹介すると共に、科学研究に適応する際に、特に留意すべき技術的制約などを解説する。また、現在の利用状況および利用計画を概観する。

#### 2. 船外実験プラットフォームの概要

きぼう船外実験プラットフォーム(以下、JEM-EF)は、2009年7月、STS-127 (Flight 2J/A)により打ち上げられ、

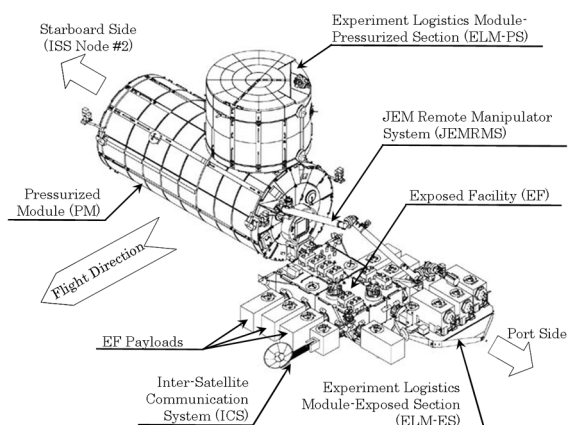


Fig. 1 Japanese Experiment Module (JEM)

(独) 宇宙航空研究開発機構 ISS 科学プロジェクト室 〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1  
ISS Science Project Office, Japan Aerospace Exploration Agency, Sengen 2-1-1, Tsukuba, Ibaraki 305-8505 Japan  
(E-Mail: takayanagi.masahiro@jaxa.jp)

Table 1 Resources to Payloads form JEM-EF

項目	内容	取付位置数	備考	
	ペイロード取り付け位置総数	10ヶ所	#1~#6, #8, #9, #11, #12	
電力	実験用：3kW(120VDC)×1系統 保存用：0.1kW(120VDC)×2系統	8ヶ所	(下欄以外)	
	実験用：3kW(120VDC)×2系統 保存用：0.1kW(120VDC)×2系統	2ヶ所	#1, #2	
通信・制御	ペイロードバス系：主1系統/従1系統	10ヶ所	MIL-STD-1553B	
	高速データ系：1系統	8ヶ所	FDDI	
	ビデオデータ系：1系統	8ヶ所	NTSC カラー-TV 方式	
	ハウスキーピングデータ：主2系統/従2系統	10ヶ所	アナログテレメトリ	
	イーサネット：1系統	7ヶ所		
能動熱制御	冷媒による排熱 ペイロードへの冷媒供給温度：16~24 システムへの冷媒返却温度：16~50	10ヶ所	流体：パーフロロカーボン	
	容量	最大3kW×1系統	8ヶ所	(下欄以外)
		最大6kW×1系統	2ヶ所	#1, #2
質量	最大500kg(標準)	8ヶ所	(下欄以外)	
	最大2500kg(大型)	2ヶ所	#2, #9	

それ以前に打ち上げられた船内実験室に接続された。現在、本特集に記事の寄せられている2ミッションを含む4つのペイロードが接続され、順調に運用されている。

JEM-EFは、12個のペイロード接続点(#1~#12)を持ち、この内、システム機器に使用される#7(ICS用)および#10(ELM-ES用)以外の10箇所が、ユーザ実験ペイロードで使用できる。電力(DC120V, 最大3kW, 取付点#1および#2では2系統)、通信(MIL-1553Bによるバスライン、イーサネットおよび光ファイバ)および熱制御用流体(パーフロロカーボン)などの、きぼうシステムからのサービスは、この接続点を介して行われる。これらの供給リ

ソースについて、Table 1に纏める。

JEM-EFの標準的なペイロードのエンベロープは、約1.85m×0.8m×1.0mであり、許容最大質量は500kg(取付点#2, #9では2,500kg)である(Fig. 2)。船外実験プラットフォームを利用するミッションは、基本的にこの形態の実験装置により実施される。また、2,500kgまでの質量が許容される取付点#2および#9では、より大きなサイズの実験装置が許容される可能性があるが、現状、具体的な利用計画はない。

Fig. 2に示すように、JEM-EFのペイロードは、JEM-EF接続、ロボットアーム把持および輸送の3つの形態に対応して、それぞれ、実験装置側装置交換機構(Payload Interface Unit: PIU)、グラブルフィクスチャ(Grapple Fixture: GF)およびペイロードトラニオン(Payload Attach Mechanism-Payload Unit: PAM-PU)の3つの構造インターフェースを有する。ペイロードとJEM-EFは、PIUにより接続される。ペイロード上面のGFは、JEMRMSおよび米国のロボットアーム(Space Station Remote Manipulator System: SSRMS)共通のインターフェースであり、これによりISS上でのペイロードのハンドリングが行われる。また、PAM-PUはペイロード下面の4本のトラニオン構造から成り、ペイロードの軌道上への輸送や回収・廃棄のためのキャリアであるELM-ESとのインターフェースを受け持つ。ここで、ELM-ESは、STSによりペイロードを輸送するためのパレット状の構

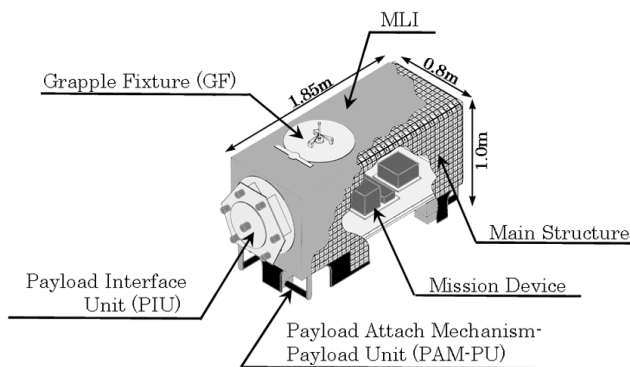


Fig. 2 JEM-EF Standard Payload

造を持つキャリアであるが、宇宙ステーション補給機(H-II Transfer Vehicle: HTV)により輸送する場合は、打上げ保持機構(HCAM-P: HTV Cargo Attachment Mechanism - Passive)と呼ばれる、PAM-PUとは異なる構造インタフェースとする必要がある。

### 3. きぼう船外実験プラットフォーム利用上の制約

#### 3.1 全般

JEM-EF を利用したミッションを計画する場合、JEM-EF やキャリアとのハードウェアとしてのインタフェース条件や ISS やきぼうの軌道上運用条件との適合が求められる。これらについては、文献 1)に詳しいが、科学利用に際して、主要な項目および特に注意を要する課題となる項目について以下に述べる。

#### 3.2 搭載場所および ISS 共通リソースの利用権

ISS の日本要素である「きぼう」が提供する実験装置・ペイロードの搭載空間については、日本が 51%の利用権を有するが、JEM-EF でも同様に、日本は同時に 5 個までの搭載位置を占めることが出来る。また、電力および通信(ダウンリンク容量)等、ISS 共通リソースについては、12.8%の利用権が日本の実験に割り当てられており、実験運用計画は、船内実験室利用を含めて、これらを最適にシェアすることが肝要となる。

例えば、電力について、現状 ISS 全体での実験電力は約 30kW であり、この 12.8%の約 3.8kW が日本の実験全体で使用出来る。特に観測ミッション等、常時 ON が基本的な要求となるミッションは、運用上の制約が致命的とならないよう、省電力設計を行うことが望ましい。第 2 章に述べた、最大 3 kW という値は、船外実験プラットフォームとのインタフェースに関するハードウェアの能力についての述べたものであり、当然のことながら、全ての結合点での、この電力の同時運用を許容するものではない。

#### 3.3 軌道・姿勢・視野

ISS の外部施設である JEM-EF は、観測ミッションへの適応が期待され、実際、現在運用中の、本特集で言及の 2 ミッション(全天 X 線監視装置およびサブミリ波リム放射サウンダ)および米国の 1 ミッション(沿岸海域用ハイパースペクトル画像装置および大気圏/電離圏リモート探知システム)は、天体および地球観測ミッションである。これら観測ミッションへの適用の際は、観測範囲、指向方向の精度などの要求に照らして、軌道・姿勢・視野等の条件への適合性には特に考慮を要する。この点が、単独の観測衛星や科学衛星との大きな差異である。

例えば、軌道傾斜角は 51.6 度であり、陸域の大部分を

カバーしているが、極域の Nadir 観測は不可能である。また、ノミナル姿勢である LVLH (Local Vertical/Local Horizontal)姿勢への制御は、微小重力環境提供のため、常時これを行うという運用は行われない。このため、姿勢変動・擾乱は単独の衛星よりかなり悪いものとなる。例えば、LVLH 姿勢からのずれの許容値の仕様値は、ロール・ピッチ・ヨー各軸 20 度以下であり、その他、姿勢変動レート、配信姿勢情報の決定精度等に鑑み、ミッションを計画する必要がある。場合によっては、実験ペイロード固有の姿勢検出方法を持つ等の対策が必要となる。

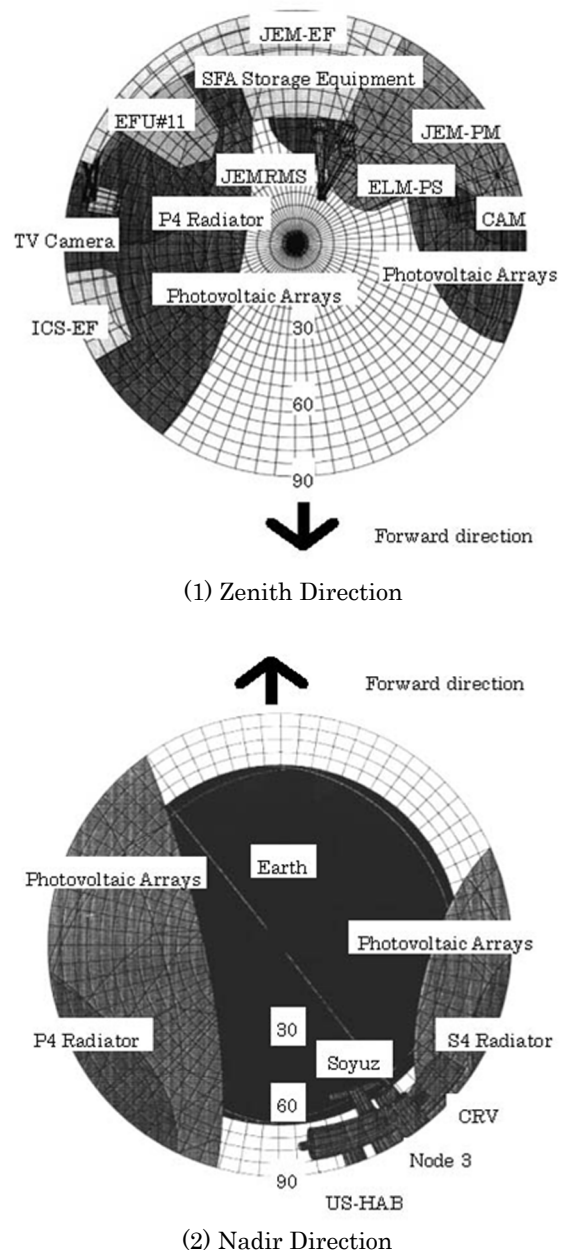


Fig. 3 Field of View from #1 Payload of JEM-EF

ISS は 110m×75m, 総質量 415 トンという, およそサッカースタジアム程のサイズの大規模構造物であり, 船外実験プラットフォームペイロードの取付位置からの, 地球または天体方向の視野は, ある程度 ISS 自身の構造物により遮られる. 太陽を指向して周回毎にトラスを軸に回転する, 太陽電池アレイは, 特に大きな遮蔽物となる. これらについては, 取付点, 視線方向毎に視野解析を行い, ミッション適合性の考慮, 取付点要求や運用要求の最適化等を図る必要がある.

以上に述べた姿勢擾乱や視野等については詳細な解析が行われており, その結果は文献 1) に詳述されている. 一例として, 取付点#1 から見た視野解析結果を Fig. 3 に示す. この図で, (1)および(2)は, それぞれ, 取付点#1 に接続されたペイロードの上面中央から天頂方向を, および下面中央から地球方向を見た時の視野解析結果である. 本図中, Photovoltaic Array と表示された, 大きな円弧状の影は ISS 本体の太陽電池アレイの旋回の包絡域である.

### 3.4 汚染

ISS 周辺は, 構造物からのアウトガス, 船内からのベント・リーク, ISS や輸送機のスラスタからのブルーム等による数々の汚染源があり, 特に外部環境で使用する JEM-EF のペイロードについては, これらについて十分な配慮が必要となる. 汚染については, 分子付着率(MD), 分子カラム濃度(MCD)等の仕様が設定され, これに対する適合性が求められるている. しかし, 解析的アプローチにも限界があり, 実測値が得られるまでは, 光学部品, 冷却デバイス等汚染が集中しやすく, また, 汚染が性能に致命的な影響を与える構成品を含むミッションは, 何らかの付加的対策を設けることも考慮する必要がある. HTV, ソユーズなどの係留, ISS のリブースト等, 特に汚染源が多くなると予想されるイベントは, 実施時期が

既知であり, 頻度も限られているため, 運用を休止するなどの汚染対策を考慮することも, 現実的かつ有効と考えられる. ISS 構造からのアウトガス, リブーストによるプレューム, STS や与圧モジュールからのベント等, ISS システムの汚染源につき, その排出量, 排出頻度等を現状明らかな範囲の情報に基づき解析した, 分子カラム濃度の一例を Fig. 4 に示す<sup>2)</sup>. この図では, 取付点#1 に接続されたペイロードの, 上面中央から天頂方向を臨んだ時の, 各々の方向の単位断面積当りの汚染ガスの濃度を, 無限遠まで積分した値をコンターで示している. 等高線の数値が大きい方角に, より多くの汚染ガスが存在していることになる.

## 4. JEM-EF 利用の現状および計画

### 4.1 現在の利用状況

2011 年 1 月現在, JEM-EF には以下の 4 件の装置が接続され, 各々のミッションが進められている.

- (1) 全天 X 線監視装置(MAXI: Monitor of All-sky X-ray Image)(接続ポート: #1)
- (2) 超伝導サブミリ波リム放射サウンダ(SMILES: Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder) (接続ポート: #3)
- (3) 宇宙環境計測ミッション装置(SEDA-AP: Space Environment Data Acquisition equipment - Attached Payload) (接続ポート: #9)
- (4) 沿岸海域用ハイパースペクトル画像装置および大気圏/電離圏リモート探知システム実験装置(HREP: HICO & RAIDS Experimental Payload, ここで, HICO: Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean/RAIDS: Remote Atmospheric & Ionospheric Detection System, 即ち, 略語の二重構造である) (接続ポート: #6)

以上の内, (1)および(3)は, 2009 年 7 月, Flight 2J/A で, JEM-EF 本体と同時に, (2)および(4)は, 2009 年 9 月, HTV 初号機で打ち上げられた. また, (1)~(3)の 3 件は, 1996 年度に行われた国内公募により選定された, 日本のミッションであり, 選定以来, 10 年余の期間を経て, 漸く打ち上げられたことになる. 何れも, 大きな成果を上げているが, 科学観測ミッションである(1)および(2)の成果については, 本特集に取り上げられている各々の解説を参照されたい. (3)は, 中性子, プラズマなどの 6 個のセンサ, 材料曝露実験および電子部品評価実験をひとつの標準ペイロードに搭載し, 宇宙環境に関する総合的な計測を行うミッションである. また, (4)は米国海軍研究所(Naval Research Center)の地球観測ミッションであり, 装置仕様や現状の成果の詳細は不明である.

### 4.2 次期利用計画

現在, ミッション選定され, 開発および打ち上げ・運

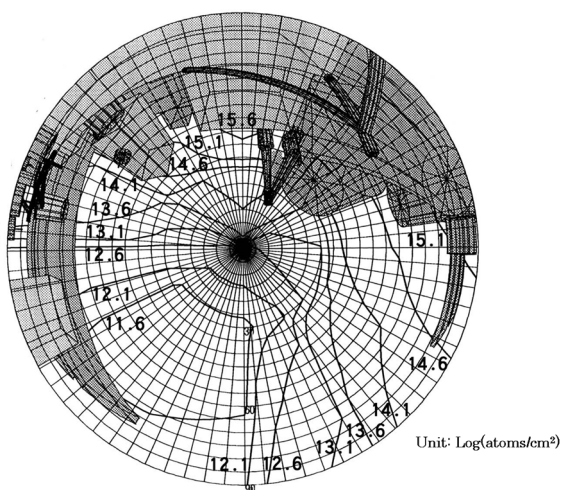


Fig. 4 Molecular Column Density in Zenith direction from #1 Payload

用計画が明確になっている JEM-EF 利用ミッションは、以下の 2 件である。

- (1) ポート共有型実験装置(MCE: Multi-Mission Consolidated Equipment)
- (2) 高エネルギー電子・ガンマ線観測装置(CALET: Calorimetric Electron Telescope)

(1)は、5 件の小規模ミッションを 1 つの標準ペイロードに混載した装置で、内 2 件が地球高層大気観測ミッション(地球超高層大気撮像観測/スプライト及び雷放射の高速測光撮像センサ)であり、他の 3 件が、インフレータブル構造、ロボティクスおよびハイビジョンカメラ(HDTV)の技術実証ミッションである。本年夏季予定の HTV3 号機での打ち上げを目指して、ミッション機器の開発を完了し、現在、フライトモデルのインテグレーションが行われている。JEM-EF への接続点は、現在も空きポートである、#8 を使用する。

(2)は、高エネルギー宇宙現象の包括的解明を目指して、高エネルギーの電子、ガンマ線、原子核などの宇宙線を総合的に観測する宇宙科学ミッションであり、現在、HTV5 号機による 2013 年の打ち上げを目指して開発が進められている。3 種のセンサが標準ペイロードエンベロープに収められ、SEDA-AP のミッション終了後、#9 に接続される予定である。

## 5. おわりに

ISS に於いて、外部に曝露した実験環境を提供する施設は、JEM-EF 以外に、米のトラス上のパレット(Express Pallet)、ロシアのモジュールの 1 つである、科学・電力プラットフォームがある。また、欧州も与圧モジュールであるコロバスユニット(COF)の外壁にアタッチポイントを設置している。しかし、これらの施設からのミッションへのサービス提供は、基本的に、電力および MIL-1553B による通信だけであり、高速通信や流体による能動熱制御が出来る施設は、JEM-EF のみである。特に、この流体による能動熱制御の機能は、JEM-EF の最大の特徴であり、第 2 章に示した容積・重量の宇宙機器としては圧倒的に大きな電力消費(最大 3kW)を可能としている。その他、標準化されたインタフェースの設定等、数々の特徴を有する JEM-EF は、今後も、一層の有効利用を図ることが求められる。

10 箇所ある搭載インタフェースが、未だに 4 箇所しか埋まっていないこと、特に米国は 5 箇所の利用権を持ちながら、現状 1 箇所を利用しているに過ぎず、加えて、当面利用計画がないことも問題である。2.5 トンもの大型ペイロードを許容する接続点が 2 箇所(#2 および#9)用意されているにも関わらず、そのような大型ミッションの

計画がないこと、船内実験室との間で、宇宙飛行士の船外活動なしに、装置・サンプルなどをやり取りできる施設であるエアロックを有効に活用した計画がないことなど、このような高機能の JEM-EF であるが、それが十分に使い切られていない状況は、投資対効果という視点でも、大いに批判を受ける状況と考えられる。

例えば、簡便でターンアラウンドの短い技術実証は、他の分野の宇宙利用の推進のために必須であり、JEM-EF の大きな需要がそこにあると思われる。4.2 項で述べた MCE による混載ミッションは、この課題の解決のためのひとつのヒントを与えているが、この場合も、最終的に、標準ペイロードヘインテグレーションされること、開発期間に於いてもコストに於いても、結局、大きな負担になっている。JEM-EF の技術実証のテストベッドとしての活用を推進するためには、より小規模な装置単位であり、現状はユーザ機器としては位置付けられていない軌道上交換ユニット(ORU: Orbital Replaceable Unit)をミッション機器として活用すること、エアロックを活用して、ソフトバッグでの与圧環境での打ち上げとすることで、輸送時の耐環境要求を低減するなどの工夫が考えられる。一方で、宇宙および地球観測の科学推進は、本格的なセンサ開発を伴った、標準ペイロード程度またはそれ以上の規模にならざるを得ないが、大きな観測ミッションはそれに見合うサイズのサイエンスコミュニティのサポートが必要である。国際協力の推進は、この視点でも必須の事項であるが、ミッションの協力に加えて、ISS の各国際パートナーの、ISS の外部ペイロード全体として、整合性を持った効果的な相互利用、例えば、統一テーマの下で、各国のインフラの特徴を生かした複数ミッションの総合的推進などの協力も推進されるべきである。

## 参考文献

- 1) 宇宙航空研究開発機構：きぼう船外実験プラットフォーム利用ハンドブック，  
[http://kibo.jaxa.jp/library/fact/data/JFE\\_HDBK\\_all.pdf](http://kibo.jaxa.jp/library/fact/data/JFE_HDBK_all.pdf)，2010。
- 2) 松原正季，高柳昌弘，林哲夫，浦山文隆，武田直道：第 44 回宇宙科学技術連合講演会講演集，日本航空宇宙学会，p1285-1290，1999

(2011 年 1 月 19 日受理)