

国際宇宙ステーション日本実験モジュール「きぼう」船内実験室用 実験装置の開発

Development of Experiment Equipment and Racks of the JEM-PM (Japanese Experiment Module-Pressurized Module)

大西三男	株式会社 IHI エアロスペース	宇宙技術部	課長
酒井由美子	株式会社 IHI エアロスペース	宇宙技術部	課長
友部俊之	株式会社 IHI エアロスペース	宇宙技術部	
高田哲也	株式会社 IHI エアロスペース	宇宙技術部	
永島貴穂	株式会社 IHI エアロスペース	宇宙技術部	

国際宇宙ステーション日本実験モジュール与圧部は 2008 年 5 月に打ち上げられ、同年 8 月から宇宙実験が実施されている。与圧部宇宙実験用の供試体・実験ラックの開発を独立行政法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の契約に基づき実施した。開発した供試体・実験ラックの概要と実験結果および今後予定される実験に向けて開発をしている実験ラックの概要について報告する。今回の宇宙実験の成功を足がかりに、次期宇宙実験用供試体・実験ラックに向けて、今回の開発経験を活かし、引き続き宇宙実験の成功に貢献する所存である。

Japanese Experiment Module-Pressurized Module (JEM-PM) was launched to the International Space Station (ISS) on the STS-124 (1J) in June 2008. The experiment equipment (FPEF, SPCF, FPEF experiment cells, Ice cell, Facet cell, and JAXA PCG Cell) and experiment racks (RYUTAI rack, SAIBO rack) developed by IHI Aerospace (IA) under the contract with JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) were installed on JEM-PM. With these experimental cells, Japan performed experiments including Marangoni convection, ice crystal, and facet cell experiments from August 2008 to September 2009. This report describes experiment equipment and racks together with the results of experiments. The racks under development for launching in the future is outlined.

1. 緒 言

国際宇宙ステーション日本実験モジュール (JEM, 「きぼう」) は、2008 年 3 月から 2009 年 7 月の間で 3 回に分けてスペースシャトルで打ち上げられた。JEM の主要構成部品である与圧部 (船内実験室) は、2008 年 6 月 1 日 (日本時間) に打ち上げられ、2008 年 8 月から与圧部内で宇宙実験が行われ、現在も継続してさまざまな実験が行われている。株式会社 IHI エアロスペース (以下、IA と呼ぶ) が開発した実験装置は所定どおり稼働し、期待された実験結果が得られている。

IA は、① 与圧部内で行われる宇宙実験用の実験装置 ② 実験装置が稼働に必要なリソース (電力・ガスなど) の供給機能 ③ データを取得・記録するために必要な実験支援機能をもった実験ラック、の開発を独立行政法人宇宙航空研究開発機構 (以下、JAXA と呼ぶ) との契約に基づいて行った。また、引き続き実施される宇宙実験に備えて新たな実験装置、実験ラックも開発しており、今後の宇宙実験の成功に継続的に貢献する所存である。

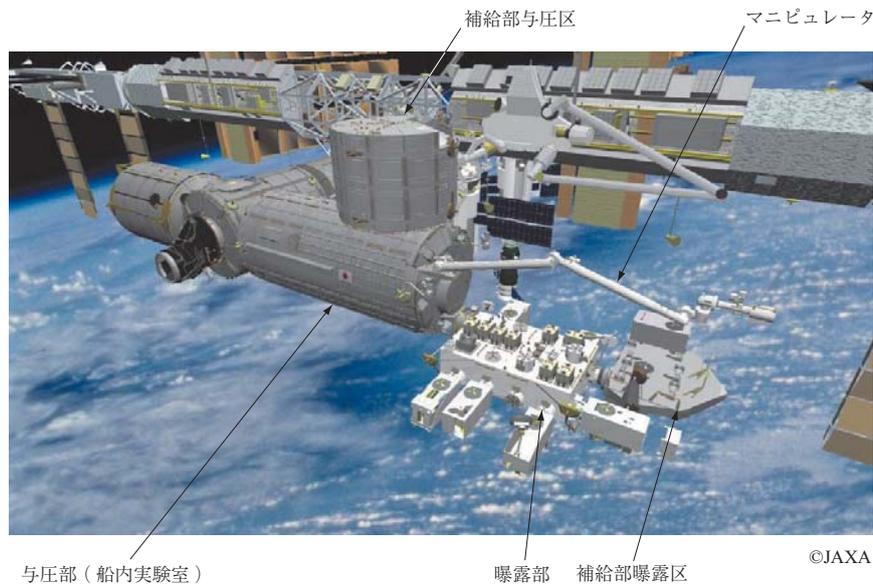
2. JEM 与圧部実験装置

2.1 日本実験モジュール与圧部 (船内実験室)

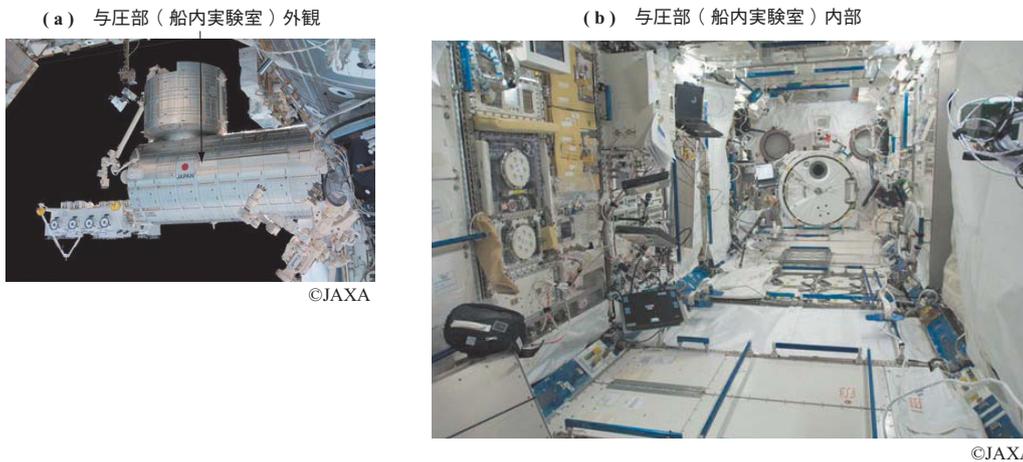
国際宇宙ステーション日本実験モジュール (JEM : Japanese Experiment Module, 「きぼう」) は、① 与圧部 (船内実験室) ② 曝露部 ③ 補給部与圧区 ④ 補給部曝露区 ⑤ マニピュレータ、の五つの主要システムから構成されている (第 1 図)。JEM の構成部品の一つである与圧部は、クルーが宇宙服などの特殊な装備を必要としない環境で活動できる宇宙実験設備である。

与圧部 (第 2 図) では、微小重力などを利用したさまざまな宇宙実験 (材料実験、生命科学実験、宇宙医学実験など) や教育広報活動が行われており、外径 : 約 4.4 m、内径 : 約 4.2 m、全長 : 約 11.2 m の円筒形状をした構造物で、この質量は 14.8 t である。

与圧部の内部には、同一円周上にラックと呼ばれ、さまざまな機器を搭載するための構造 (箱状の収納棚) が 4 台設置され軸方向に 5 ~ 6 列並び、総数 23 台 (内訳はシステム機器用 : 11 台、実験装置用 : 12 台) のラックが



第1図 日本実験モジュール (JEM, 「きぼう」)
 Fig. 1 Japanese Experiment Module (JEM, “Kibo”)



第2図 与圧部 (船内実験室)
 Fig. 2 Pressurized module of JEM

搭載可能である。

2.2 船内実験室搭載実験装置

IAが開発し、現在JEM与圧部で稼働している実験装置と実験装置を搭載するためのラック(実験ラック)の概要について述べる。

2.2.1 細胞培養実験装置用実験ラック(第3図) および流体物理実験ラック(第4図)

細胞培養実験装置用実験ラックは、植物や細胞などを培養して、宇宙環境が生物に与える影響を解明するための実験装置(細胞培養装置、クリーンベンチ)が搭載されている。一方、流体物理実験ラックは、流体物理実験や結晶成長実験などを行い、①流体の物理特性②結晶生成メカニズムの解明③結晶成長制御技術開発、を行うための実

験装置(IAが開発した実験装置については、2.2.2項、2.2.3項参照)が搭載されている。

実験ラックの開発では、宇宙ステーション内で許容される騒音レベル(NC 40)を実験ラックレベルで満足させることが開発上の困難の一つであった。複数の実験装置および実験ラック開発が並行して行われたため、開発日程上、実験装置に騒音低減のフィードバックがかけられなかったことと、実験ラックに搭載して初めて顕在化する騒音があった。このため、吸音材の吸音率データ取得試験を行い、最適な吸音材を選定するとともに、実験ラック全体で騒音試験を行い、騒音レベルを計測しながら騒音源に対して個々に対策を講じ、騒音レベルの低減を達成した。

この結果、実際の軌道上運用では、JEM内は静かであ



第3図 細胞培養実験装置用実験ラック
Fig. 3 SAIBO rack



第4図 流体物理実験ラック
Fig. 4 RYUTAI rack

ると船内活動しているクルーからの評価があり、日本の実験ラックの騒音低減が十分行われ、クルーにとって快適な実験室環境を実現できた。

2.2.2 流体物理実験装置 (FPEF) (第5図)

流体物理実験装置 (FPEF) は、流体物理実験用実験ラックに搭載され、常温に近い温度環境で流体物理実験を行うための実験装置である。宇宙という微小重力環境では自然対流の影響が少なくなるため、マランゴニ対流 (表面張力に起因して生じる対流) が顕著となる。本実験装置

では主に宇宙実験に影響するマランゴニ対流を観察することを目的とする。マランゴニ対流を観察することで、何らかの物理的方法によるマランゴニ対流の制御、気泡除去のためのマランゴニ対流の積極的利用などが考えられている。

FPEF は、① 三次元流速分布計測 ② 表面温度測定 ③ 超音波による速度プロファイルの測定 ④ 表面流速観察、などのその場における観察機能をもっている。現在、シリコンオイルの液柱 (シリコンオイルを用いて形成される円柱) を形成してマランゴニ対流の観察研究が標準的な実験として採用されており、目的に応じた幾つかのタイプの実験供試体 (2.2.4項, 2.2.5項参照) を開発し、すでに宇宙で一部の実験が行われている。

FPEF は、多くの観察機器・光学機器・電子機器および流体系コンポーネントを限られたスペースと質量で機装する必要があった。特に耐振動レベルが不明確な民生品を多く搭載し、かつ質量制限から余裕をもった機装構造設計ができない。このため、打上げ環境に対して十分な耐振動強度をもつか検証することが開発上の困難の一つであった。耐振動環境評価のため、FPEF の音響試験などを実施・評価して、実際の打上げ振動環境を予測し、耐振動性に問題ないことを確認し、高密度機装設計を実現した。

2.2.3 溶液たん白質結晶成長装置 (SPCF)

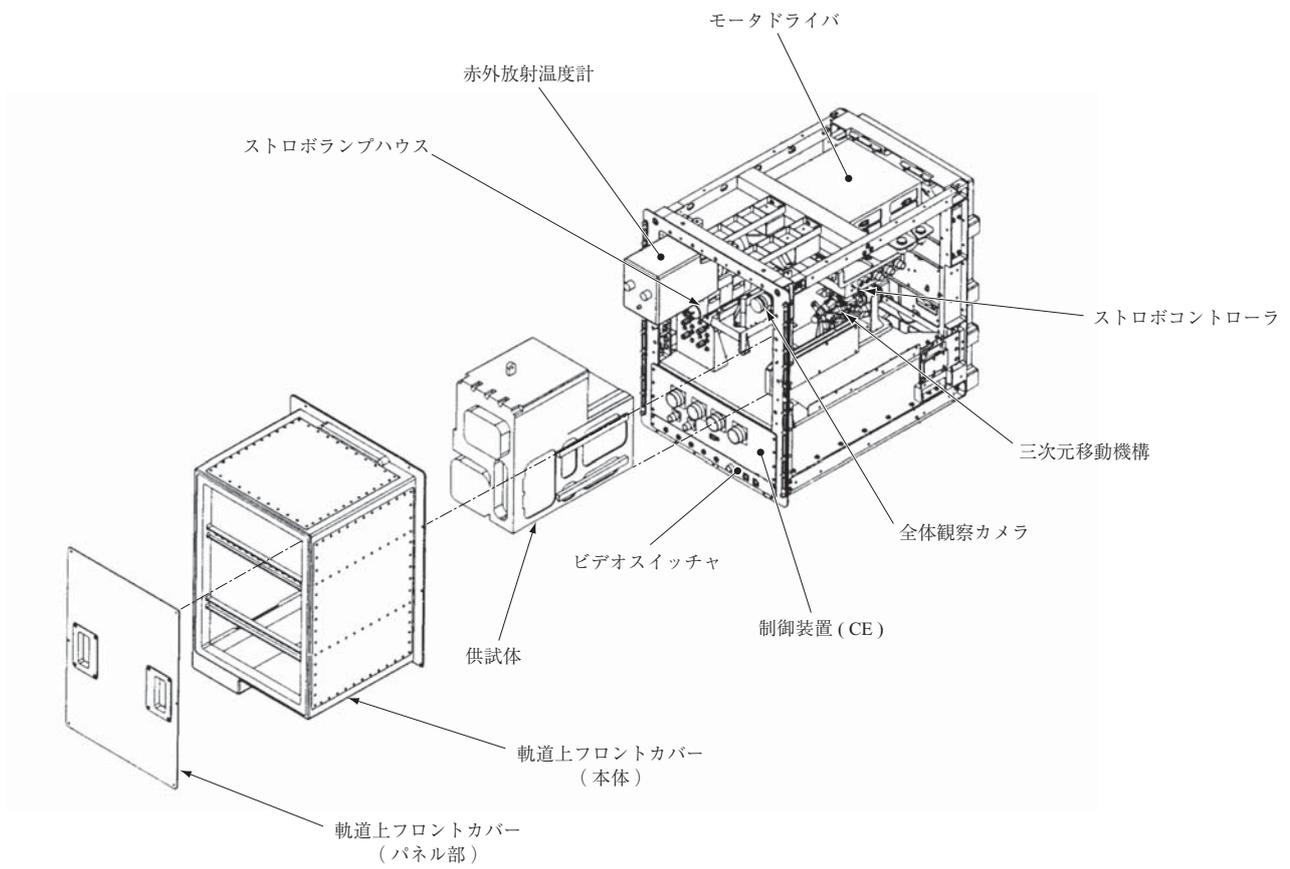
溶液たん白質結晶成長装置 (SPCF) は、溶液結晶化観察装置 (SCOF) とたん白質結晶生成装置 (PCRF) から構成され、流体物理実験ラックに搭載されている。

(1) 溶液結晶化観察装置 (SCOF) (第6図)

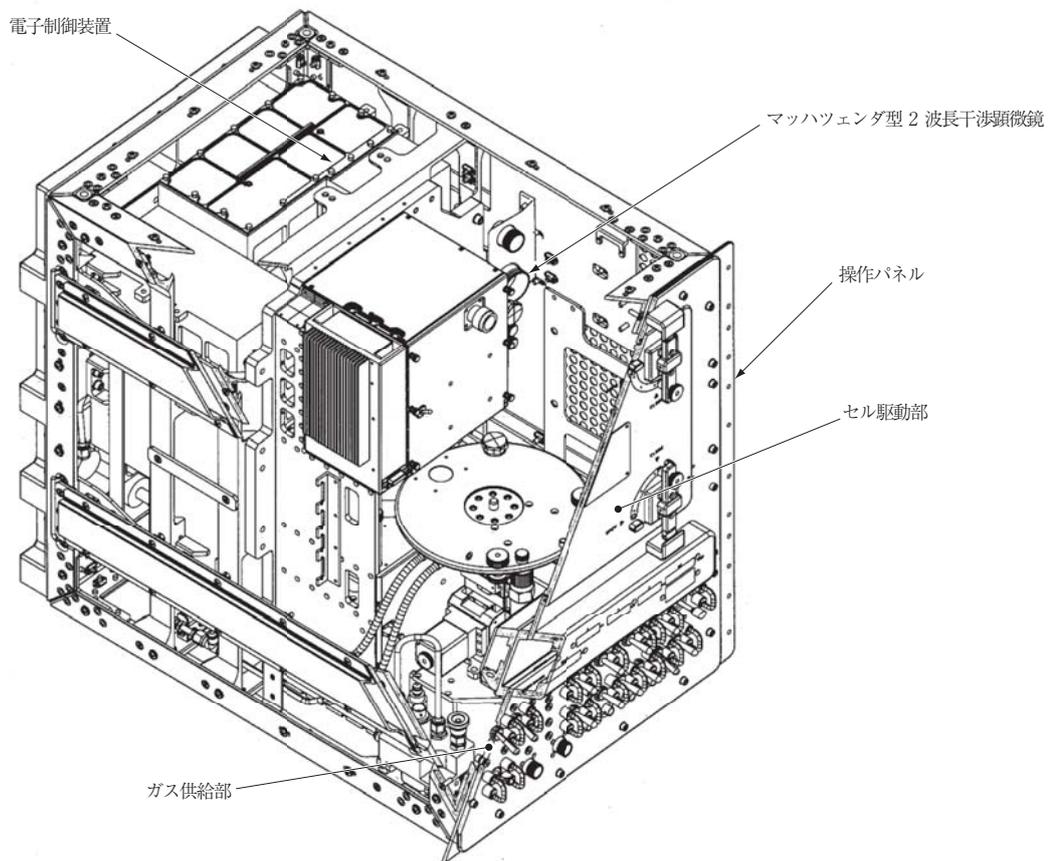
SCOF は、結晶成長のようすをその場において観察できる実験装置である。結晶の形は、結晶成長時の温度や濃度などの条件と関係しており、SCOF にはさまざまな観察装置が装備されている。結晶の形状を正確に観察するための振幅変調顕微鏡、結晶の組織を調べるための偏光顕微鏡、結晶の周りの温度や濃度を測るためのマッハツェンダ型 2 波長干渉顕微鏡をもっている。

SCOF には結晶を成長させるセルカートリッジを搭載することが可能で、最大 4 個の結晶成長セルを搭載し、温度と圧力を制御することで結晶を成長させ各種その場観察を行う。セルカートリッジは、クルーによる操作によって SCOF の前面操作パネルから軌道上での交換が可能で、多数の実験機会を提供できる。

また、実験はあらかじめ設定された実験プログラム・パラメータによって自動実行される。光学系の微



第5図 流体物理実験装置
 Fig. 5 Fluid physics experiment facility



第6図 溶液結晶化観察装置
 Fig. 6 Solution crystallization observation facility

調整および実験パラメータの変更は、実験中に地上からのアップリンクコマンドによって変更が可能である。

(2) たん白質結晶生成装置 (PCRF) (第7図)

PCRFは、主にたん白質や核酸などの結晶成長条件が不明確な実験試料において、可能な限り多様な条件で結晶化実験を行うことを実現するための実験装置である。PCRF内には六つのセルカートリッジがあり、最大6個のセルユニットに多数の結晶成長セルを搭載して温度制御を行うことで、結晶を成長させ各セルを定期的に CCD カメラでモニタする機能をもつ。

セルユニットは、搭乗員による操作によって PCRF の前面操作パネルから軌道上での交換が可能で、多数の実験機会を提供できる。また、実験はあらかじめ設定された実験プログラム・パラメータによって自動実行される。また、光学系の微調整および実験パラメータの変更は、実験中に地上からのアップリンクコマンドによって変更が可能である。

2.2.4 液柱マランゴニ対流実験汎用的供試体 (MS30, MI50) (第8図, 第9図)

液柱マランゴニ対流実験汎用的供試体(以下、汎用的供試体と呼ぶ)は、流体物理実験装置 (FPEF) に搭載され、微小重力下で液柱を形成させ、液柱の両端を加熱・冷

却することで、液柱にマランゴニ対流を発生させることができる供試体である。

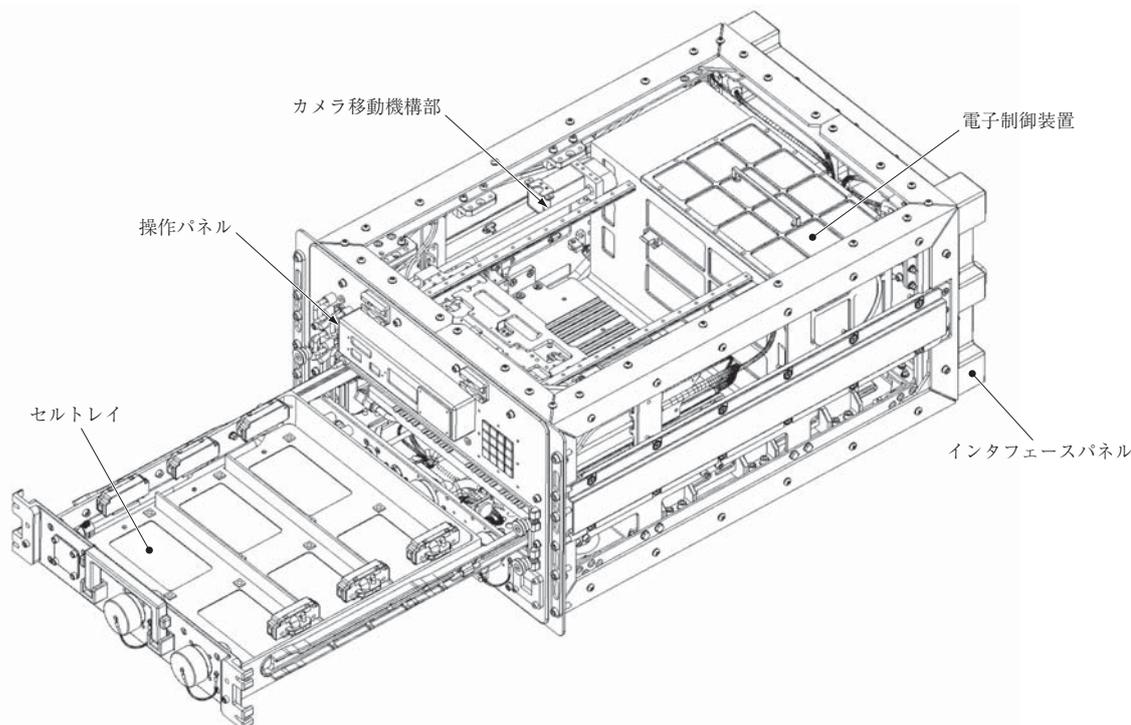
汎用的供試体は、液柱の表面を観察する液柱径が 30 mm の表面観察実験用供試体 (MS30 供試体) と断面を観察する液柱径が 50 mm の断面観察実験用供試体 (MI50 供試体) に大別される。

MS30 供試体によって、シリコンオイルに混ぜた特殊な染料が紫外線レーザーに反応して発色することを利用して液柱表面の流れ観察が行われる。

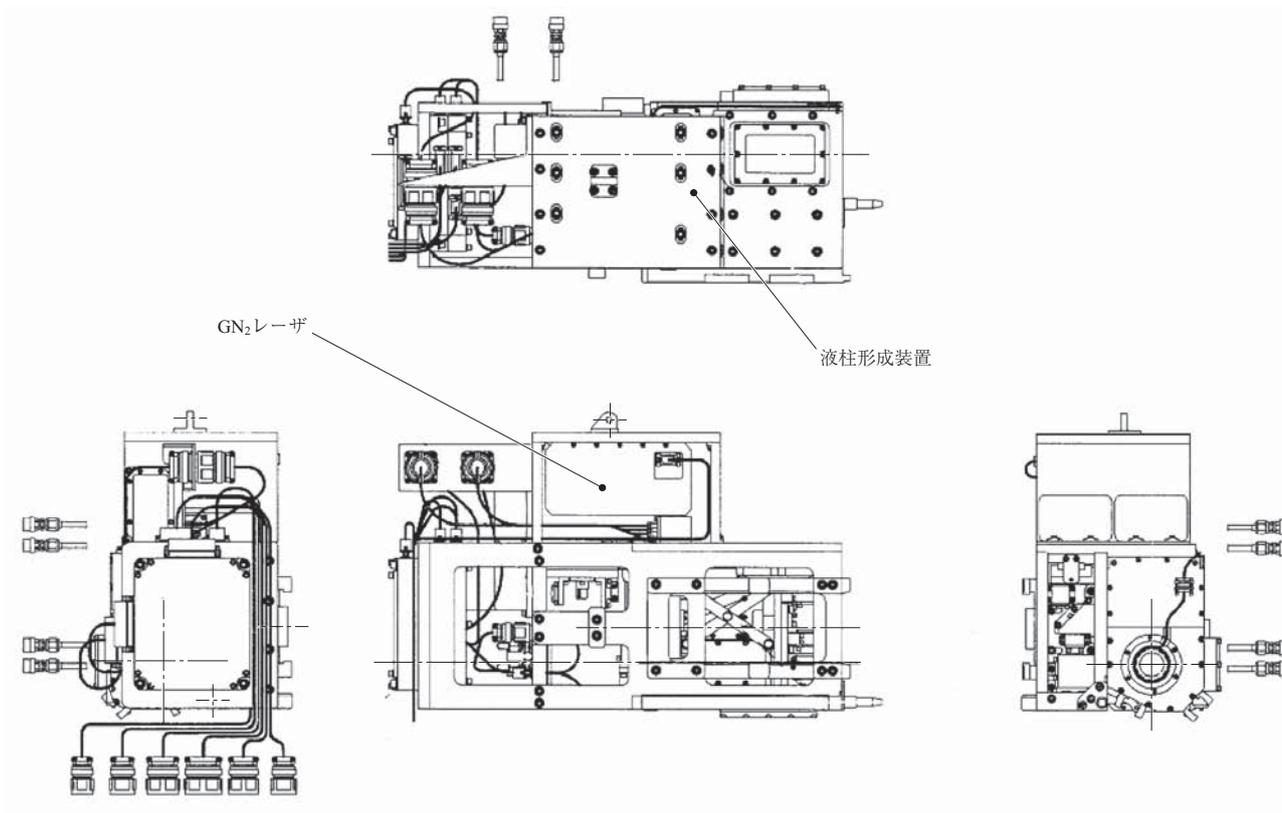
MI50 供試体は、FPEF の観察機能および MI50 供試体の観察計測機能を用いて、① 液柱内流れの三次元観察 (FPEF 3Dカメラ) ② 液柱表面温度分布計測 (FPEF 赤外線カメラ) ③ 液柱全体観察 (FPEF CCDカメラ) ④ 液柱内部の流速計測 (MI50 供試体超音波流速計) ⑤ 液柱内部の温度計測 (MI50 供試体の冷却ディスクの熱電対および液柱径方向からの熱電対挿入)、を行える機能をもつ。

2.2.5 流体物理実験装置用 MIDM 供試体 (MD10, MD30) (第10図)

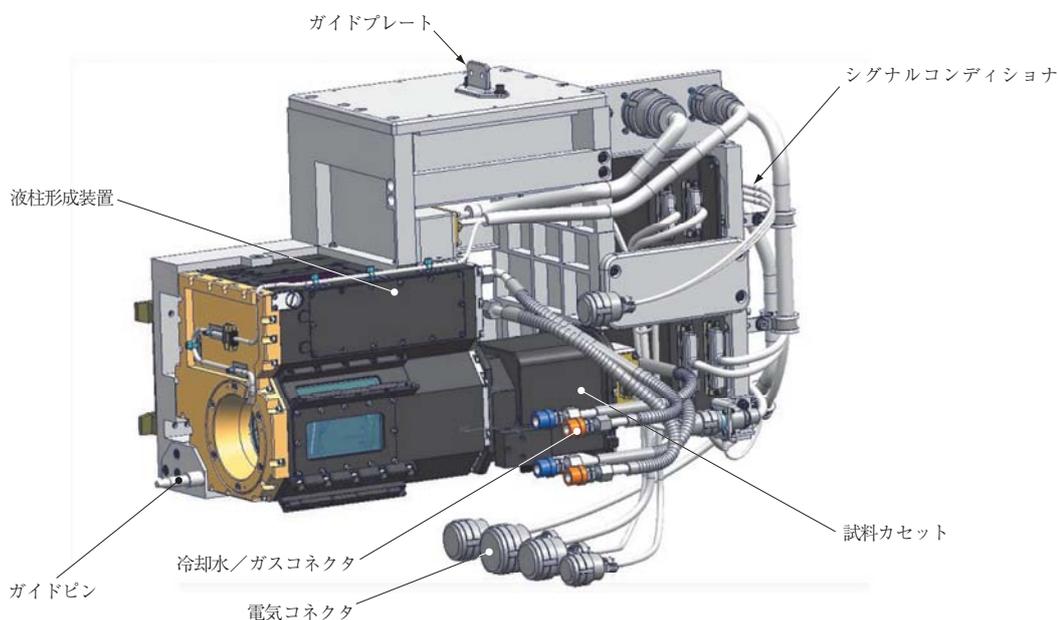
流体物理実験装置用 MIDM (Microscopic Imaging Displacement Meter) 供試体は、形成したシリコンオイル液柱の両端を所定の条件で加熱・冷却することによって発生させたマランゴニ対流の振動流による液柱界面の変動を



第7図 たん白質結晶生成装置
Fig. 7 Protein crystallization research facility



第 8 図 液柱マランゴニ対流実験汎用的供試体 (MS30)
 Fig. 8 FPEF-experiment cell (MS30)

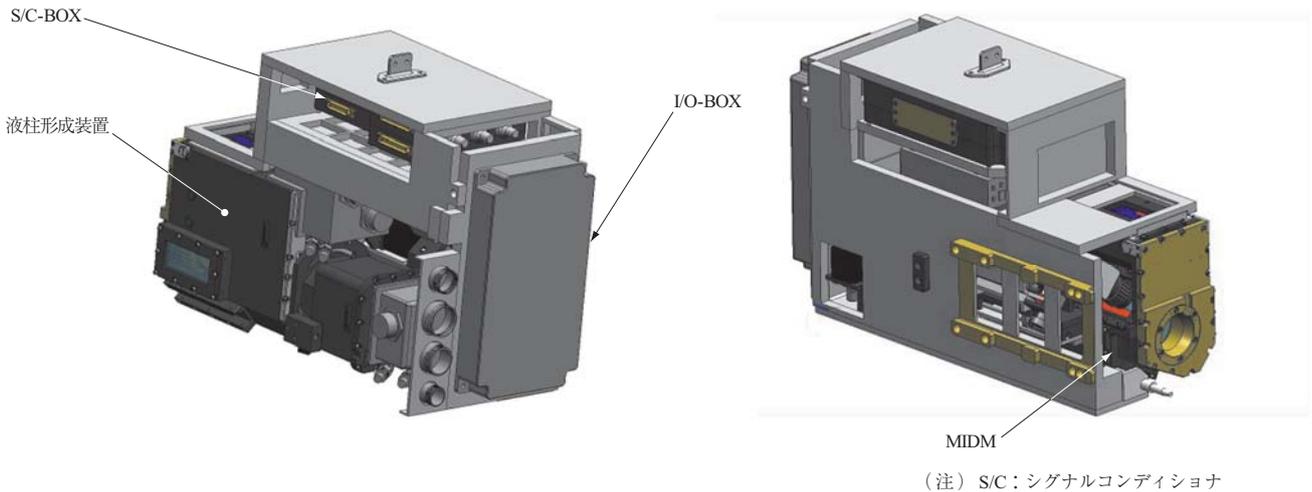


第 9 図 液柱マランゴニ対流実験汎用的供試体 (MI50)
 Fig. 9 FPEF-experiment cell (MI50)

観察する供試体の一つである。液柱径が 10 mm と 30 mm の 2 種類の供試体 (MD10, MD30) がある。

2.2.6 高品質たん白質結晶成長実験用セルユニット (JAXA PCG) (第 11 図)

JAXA PCG はたん白質結晶生成装置 (PCRF) に取り付



第 10 図 流体物理実験装置用 MIDM 供試体 (MD30)
 Fig. 10 FPEF-experiment cell (MD30)

(注) S/C: シグナルコンディショナ



第 11 図 高品質たん白質結晶成長実験用セルユニット
 Fig. 11 JAXA PCG cell

けられて、たん白質生成実験を行う供試体の一つである。JAXA PCG には JAXA 結晶化ボックスユニット (JCB: JAXA が開発した結晶化容器) およびグラナダ結晶化ボックスユニット (GCB: 欧州宇宙機関 (ESA) とグラナダ大学 (スペイン) が開発した結晶化容器) が格納され、PCRf および JAXA PCG によって所定の温度環境に制御され、JCB および GCB 内部でたん白質の結晶化実験を行う。

JCB・GCB 内部では、ゲル層を介してたん白質溶液と結晶化溶液をキャピラリ (毛细管) 内で反対方向に拡散させる方法 (液-液拡散法) によって結晶化を行う。つまり、たん白質がキャピラリ外へ、結晶化溶液はキャピラリ内へ拡散し、生じた濃度勾配が経時的に変化することで結晶化に適した条件になった位置・時間で結晶化が始まる。

JAXA PCG は、① 気密構造で PCRf と機械的・熱的インタフェースを確保するセル構造部 ② JCB および GCB をセル構造部に固定するためのホルダ部 ③ JCB および GCB の温度計測制御を行う温度計測・制御部、から構成される。

温度計測は、NTC 型サーミスタによって行い、計測範囲: 0 ~ 35℃, 計測点: 2 点である。一方、温度制御はペルチェ素子によって行い、制御範囲: 0 ~ 35℃, 制御温度: 20℃である。

2.2.7 ファセット結晶成長実験供試体 (ファセットセル) (第 12 図)

ファセットセルは、溶液結晶化観察装置 (SCOF) に搭載され、溶液結晶成長実験を行う供試体の一つである。

ファセットセル内の石英ガラス製のガラスセルと高温側ブロックに実験試料であるザロール・ブタノール溶液が封入されている。ガラスセル両端の温度制御 (一端を低温、もう一端を高温) によって実験試料に温度勾配が生じ、試料温度が試料融点と等しい位置に固液界面が形成される。この状態を保持することで溶液内濃度が均一 (均質化) となり、ガラスセル両端を同じ速度で冷却することで、固液界面が高温端に向かい結晶成長を始める (一方向凝固)。

均質化時に平らであった界面は、成長に伴ってファセット形状 (小さい面形状をした結晶体) となる。SCOF に備えられた振幅変調顕微鏡で結晶形状を観察する。また、SCOF に備えられたマッハツェンダ型 2 波長干渉顕微鏡で界面近傍の干渉画像を取得する。

ファセットセルは、実験試料を充てんした試料セル筐体

(a) ファセットセル



(b) ファセットセルを SCOF に搭載した状態



第 12 図 ファセット結晶成長実験供試体
Fig. 12 Facet-cell

によって窒素ガス雰囲気中に封入し、温度制御によって結晶成長させる機能をもっている。この温度制御性能は、温度制御範囲：環境温度～90℃（高温側）から-10℃～環境温度（低温側）、温度勾配：10～20 K/cm である。

2.2.8 過冷凝固実験供試体Ⅱ型実験供試体（ICE セル）（第 13 図）

ICE セルは、溶液結晶化観察装置（SCOF）に搭載されて溶液結晶成長実験を行う供試体の一つである。ICE セル内の試料セル（主に核生成セルと結晶成長セルから成る）に実験試料である重水（D₂O：融点 3.82℃）が充てんされている。

試料セルは窒素ガス雰囲気中に保持された筐体に収納されている。結晶成長セルを過冷却状態（ $\Delta T = 0.3 \sim 1.0$ K）に保持後、核生成セルを -5～-8℃程度まで冷却することによって核生成セル内に氷の結晶の核を発生させる。生

成した核は、ガラス製のキャピラリー内を伝わって一次元的な成長を行い、結晶成長セル内のキャピラリーの先端から出現後自由成長を行う。氷の結晶が自由成長するようすは、SCOF に備えられたマッハツェンダ型 2 波長干渉顕微鏡、振幅変調顕微鏡および ICE セル内のマッハツェンダ干渉計、明視野観察装置によって直交 2 軸でその場における観察が行われる。

ICE セルは、実験試料（重水）を充てんした試料セル（結晶成長セルおよび核生成セルから成る）をもち、① 実験試料の温度制御 ② 氷の結晶成長 ③ 結晶を観察する機能、をもつ。この温度制御性能は、結晶成長セル＝温度制御範囲：2.8～3.8℃、核生成セル＝温度制御範囲：環境温度～-10℃である。観察機能は、① マッハツェンダ干渉計＝光源：LD（波長 670 nm）、倍率：1 倍、映像デバイス：1/2 インチ CCD カメラ（モノクロ）② 明視野観察装置光源：LED（波長 590 nm）、倍率：1 倍、映像デバイス：1/2 インチ CCD カメラ（モノクロ）、である。

3. 実験成果

2008 年 8 月から船内実験室でさまざまな宇宙実験が行われている。実験装置および実験ラックは、ほぼ所定どおり稼働し、世界初の実験成果が得られる実験装置の開発に成功した。公表されている実験結果について以下に述べる。

3.1 マランゴニ対流実験

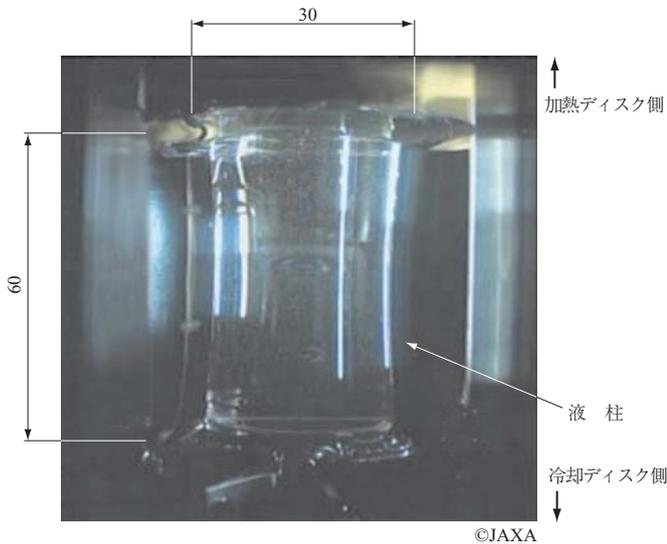
液柱マランゴニ対流実験汎用的供試体（MS30）を用いて、マランゴニ対流実験（実験テーマ名：マランゴニ対流におけるカオス・乱流とその遷移過程（代表研究者：諏訪東京理科大学 河村教授））が行われた。液柱径：



第 13 図 過冷凝固実験供試体Ⅱ型実験供試体
Fig. 13 ICE-cell

30 mm, 液柱長さ: 約 60 mm の液柱形成に成功 (第 14 図) し, 予定されていた実験データが取得された。

60 mm 長さのシリコンオイルの液柱形成は, 地上では実現できない大きさのもので, この詳細かつ鮮明な実験データが世界で初めて得られた。液柱内マランゴニ対流現象の解明に, 新しい知見と成果が得られることが期待され



第 14 図 マランゴニ対流実験形成液柱 (単位: mm)
Fig. 14 Liquid bridge of MS30 (unit: mm)

ている。

3.2 氷結晶成長実験

過凝固実験供試体Ⅱ型 (ICE セル) を用いて, 宇宙で初めて水から氷をつくる氷結晶成長実験 (テーマ名: 氷結晶成長におけるパターン形成 (代表研究者: 北海道大学 古川教授)) が行われた。2008 年の 12 月から約 3 か月にわたって当初予定を越える 130 回以上もの実験が行われた。結晶の形状や成長速度, 結晶周囲の局所的な温度変化が観測され, 多くのデータが取得された。現在, 研究者によってデータの詳細解析評価が行われている。

3.3 たん白質結晶生成宇宙実験

高品質たん白質結晶成長実験用セルユニット (JAXA PCG) を用いて, たん白質結晶生成実験が行われ, 実験装置は所定どおり稼働し結晶生成実験を終了した。2009 年 10 月 11 日に地球に帰還 (ロシア) した。今後実験試料を日本に持ち帰り結晶生成の有無も含め詳細な解析評価が行われる。

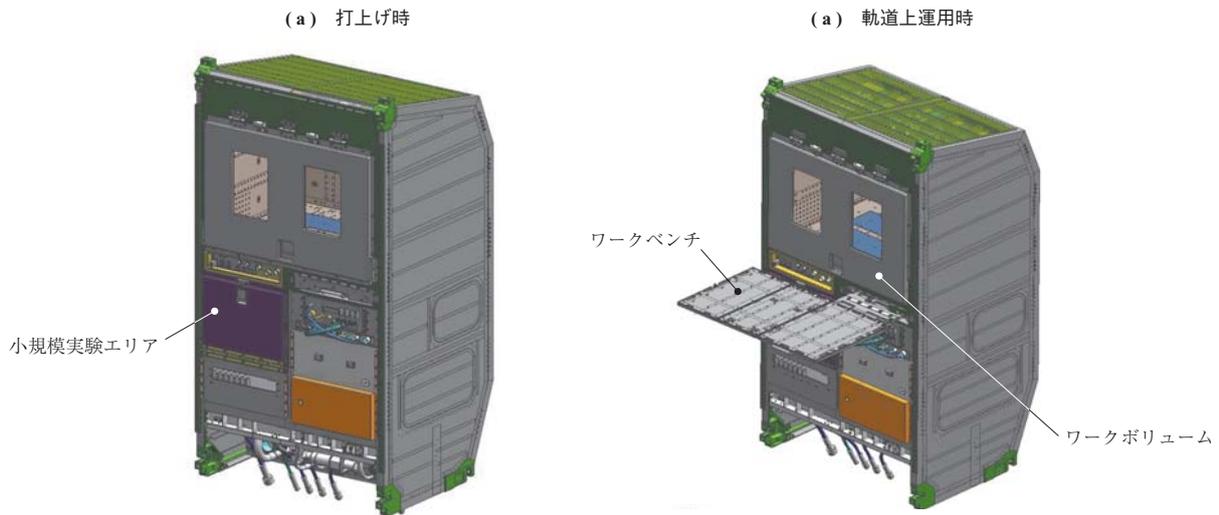
4. 今後の実験装置開発

船内実験室で 2011 年度までに行う宇宙実験テーマとして 14 の実験テーマが選定されており (第 1 表), IA は

第 1 表 与圧部 (船内実験室) で行う今後の実験テーマ
Table 1 Japanese experiments in JEM-PM for JFY 2009 and later

実験種類	番号	実験テーマ名称	実験装置	実験ラック
生命科学分野 (8 テーマ)	1	植物の重力依存的成長制御を担うオーキシン排出キャリア動態の解析	細胞培養装置	SAIBO ラック*1
	2	植物の抗重力反応機構—シグナル変換・伝達から応答まで	細胞培養装置	SAIBO ラック
	3	宇宙空間における骨代謝制御: キンギョの培養ウロコを骨のモデルとした解析	細胞培養装置	SAIBO ラック
	4	オステオポンチン機能仮説の検証	細胞培養装置	SAIBO ラック
	5	メダカ雄性生殖細胞への宇宙環境影響評価	水棲生物実験装置	多目的実験ラック
	6	メダカを使った, 無重力下での循環動態を解析する実験系構築と, 圧力受容体の機能解析	水棲生物実験装置	多目的実験ラック
	7	国際宇宙ステーション内における微生物動態に関する研究	—	—
	8	赤血球膜蛋白質バンド 3 が媒介する陰イオン透過の分子機序解明	たん白質結晶生成装置	RYUTAI ラック*2
物質科学分野 (6 テーマ)	9	微小重力における溶液からのタンパク質結晶の成長機構と完全性に関するその場観察による研究	溶液結晶化観察装置	RYUTAI ラック
	10	生体高分子の関与する氷結晶成長—自励振動成長機構の解明	溶液結晶化観察装置	RYUTAI ラック
	11	温度差表面張力流における不安定性の界面鋭敏性と制御	流体物理実験装置	RYUTAI ラック
	12	微小重力環境下における混晶半導体結晶成長	温度勾配炉	KOBAIRO ラック*3
	13	ランダム分散液滴群の燃え広がりと群燃焼発現メカニズムの解明	燃焼実験装置	多目的実験ラック
	14	宇宙開発の新展開に不可欠な沸騰・二相流を用いた高効率排熱技術のデータベース確立	沸騰・二相流実験装置	多目的実験ラック

(注) *1: 細胞培養実験装置用実験ラック
*2: 流体物理実験ラック
*3: 勾配炉実験ラック



第 15 図 多目的実験ラック
Fig. 15 Multi purpose small payload rack

そのうち、幾つかの実験テーマに使用する実験装置・実験ラックの開発に着手している。

このうち、IA が現在開発を行っている多目的実験ラックの概要について述べる。

多目的実験ラック（第 15 図）は、地上での実験室に近い感覚で利用できる実験空間や作業台をもち、船内実験室で行うさまざまな宇宙実験のために開発されている。現状では、① 燃焼実験 ② 沸騰・二相流実験 ③ 水棲生物実験、を行う計画になっているが、教育・文化・そのほかイベントへの活用も想定されている。

多目的実験ラックは、実験空間であるワークボリュームと小規模実験エリア、作業台であるワークベンチをもち、実験装置などのユーザに電力・通信・流体リソースを提供する機能をもつ。現在、2010 年度に HTV（宇宙ステーション補給機）によって打ち上げるため、開発を進めている。

5. 結 言

JEM 与圧部実験装置・実験ラックの開発において、特に実験装置が発する騒音の低減設計手法、民生品を利用した実験装置開発手法、高密度臓装設計技術を獲得し、今後の実験装置設計・開発検証上の貴重な経験となった。本成果を次期宇宙実験用の実験装置・実験ラックの開発にも活かし、引き続き宇宙実験の成功に向けて株式会社 IHI エアロスペースが大きな役割を担う所存である。

— 謝 辞 —

JEM 与圧部実験装置・実験ラックの開発に当たり多くのご指導とご協力をいただいた、独立行政法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）の関係各位に対し、深く感謝の意を表します。