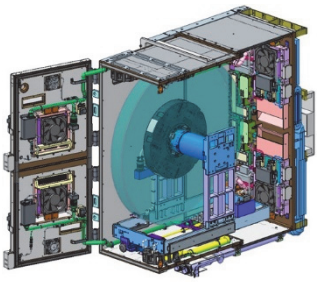
国際宇宙ステーション向け大型遠心実験装置の開発

Development of Large scale Centrifuge Facility
for the International Space Station



提 祐樹 *1 Yuki Sage
竹田 順哉 *1 Junya Takeda
萩原 裕介 *2 Yusuke Hagiwara
村瀬 浩史 *3 Hirochika Murase
小野 裕義 *4 Hiroyoshi Ono
小浜 晃正 *3 Terumasa Kohama

ライフサイエンス系の宇宙実験は，地球生命にとって普遍的に存在する重力が生命に与える影響を研究することを重要な目的の一つとして，人工衛星やスペースシャトルなどを用いて行われてきた。軌道上で重力の影響を評価するためには，宇宙線や電磁波などの重力以外の環境をなるべく同一にした対照実験を行い，重力だけの影響を特定することが重要になる。軌道上の環境を地上で再現することは難しいが，軌道上に重力環境を構築することで対照させることが可能となる。軌道上で重力環境を構築するには，回転体を用いて遠心力を発生させる必要があり，コリオリ力や重力勾配の影響を小さくするために大きな回転径が望ましいものの，宇宙機に搭載可能なスペースには制約がある。国際宇宙ステーション(ISS)日本実験棟“きぼう”の船内実験室では，搭載可能スペースを最大限に活用した，ISS 最大規模の回転径を有するライフサイエンス系の遠心実験が可能となっている。また，遠心力を使って重力を発生させることにより，地上では発生させることが困難な1G 未満の重力を長期間安定的に付加することが可能となり，月面や火星等の重力環境の模擬も可能となっている。本報は，当社が開発し 2020 年より運用を開始した大型遠心機(回転半径 38cm)を搭載する実験装置の開発及び初ミッションについて紹介する。

1. はじめに

当社は，国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)との契約にて ISS 搭載実験装置の開発を行ってきた。細胞培養装置をはじめとして，水棲生物実験装置や小動物飼育装置を開発した。表1にライフサイエンス系実験装置の開発実績を示す。

細胞培養装置(CBEF:Cell Biology Experiment Facility)は遠心機を搭載する実験装置の初号機であり，2008 年の“きぼう”の運用開始とともに実験基盤として多数の実験に使用されてきた。

運用開始以降，マウス飼育ミッションニーズに対応させるためのアップグレードや，耐故障性向上のために新たに開発した制御装置に置き換えて運用を継続している。2014 年には，より大型の遠心機を搭載する細胞培養装置追加実験エリア(CBEF-L)の計画検討に着手し，2020 年に軌道上での初ミッションが完了した。次章以降，細胞培養装置(CBEF)初号機の運用実績と，大型遠心機を搭載する CBEF-L の開発概要及び初ミッションの結果について示す。

*1 防衛・宇宙セグメント宇宙事業部技術部
*2 防衛・宇宙セグメント宇宙事業部技術部 工博
*3 防衛・宇宙セグメント宇宙事業部技術部 主席技師
*4 防衛・宇宙セグメント宇宙事業部技術部 主席チーム統括

表1 ISS 搭載ライフサイエンス実験装置

初運用	装置名	略称	概要
2008 年	細胞培養装置	CBEF: Cell Biology Experiment Facility	遠心機(R=17.5cm)を搭載するインキュベータ
2012 年	水棲生物実験装置	AQH: Aquatic Habitat	・メダカなどの淡水魚を 90 日間飼育 ・水質維持・観察機能を有する
2016 年	小動物飼育装置	MHU: Mouse Habitat Unit	・マウスが 30 日間飼育 ・給餌・給水・観察機能を有する
2020 年	細胞培養装置 追加実験エリア	CBEF-L: Cell Biology Experiment Facility-Left	大型遠心機(R=38cm)を搭載するインキュベータ

2. 遠心機搭載実験装置 初号機の運用実績

CBEF は，細胞培養のみならず植物育成などの実験研究の基盤として使用されてきた。インキュベータとしての基本機能は，温度制御・加湿制御・CO_2 濃度制御することであり地上一般品と類似であるが，インキュベータ内部に遠心機を搭載することで，実験試料に対して人工重力を負荷する実験と，微小重力下の実験を同時に実施して，従来不可能であった(注)重力のみの影響を比較することができる世界初の実験装置である。

（注：従来は，軌道上（微小重力）と地上での実験を比較していたが，軌道上サンプルは，打ち上げ/回収時の加速度の影響が排除できなかった。）

2016 年に実施されたマウス飼育ミッションは，宇宙環境下でマウスを約1か月間長期間飼育し，生体への重力影響を調査するために CBEF が使用された。2016 年には，耐故障性の向上や後述する大型遠心機用モータを駆動することを目的として，既設の制御装置と互換性のある機能向上品を開発した。2008 年から運用を開始した CBEF は，2021 年現在に至るまで打ち上げ時の構成品を変更しながら運用を継続している。

3. 大型遠心機搭載実験装置 開発実績とミッションの結果

3.1 装置概要

CBEF-L は，従来の初号機で CBEF の隣に設置され，実験供試体に対する実験環境を提供する装置である。外観を図1に，構成ツリーを図2に示す。また，主要スペックを表2に示す。

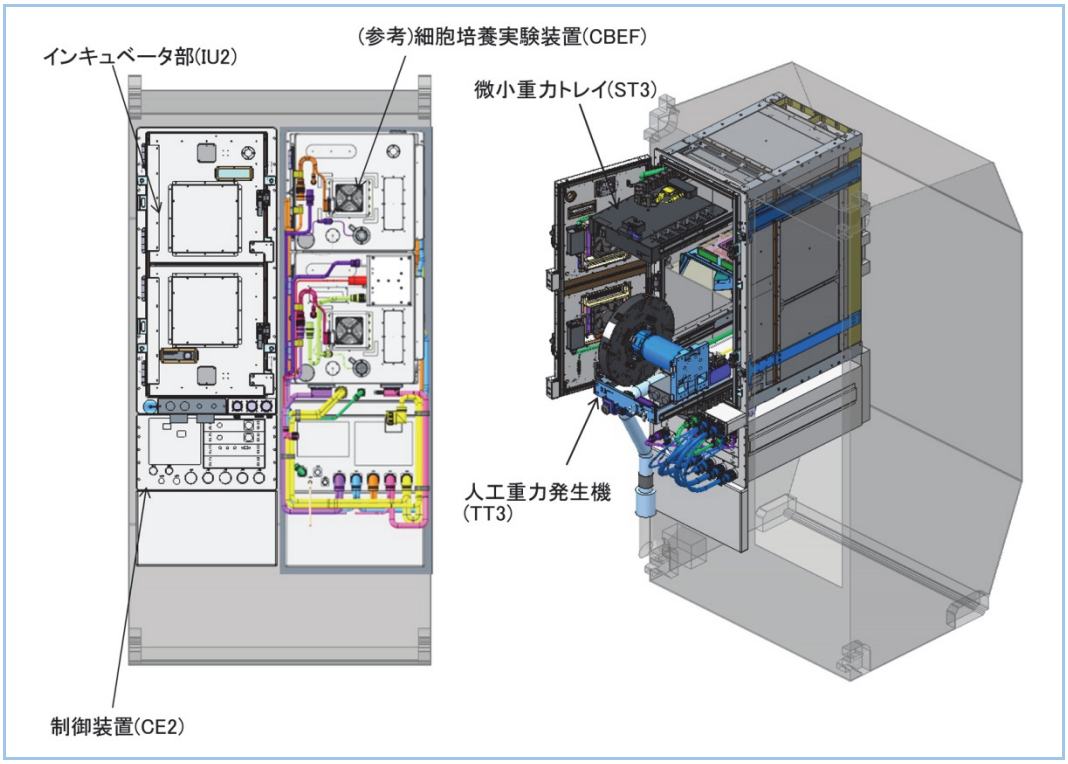


図1 細胞培養装置追加実験エリア 外観

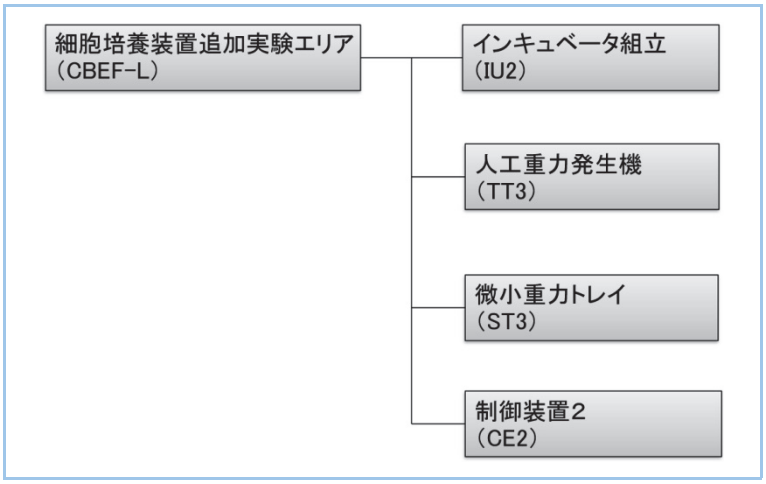


図2 細胞培養装置追加実験エリア 主要構成ツリー

表2 細胞培養実験装置追加実験エリア 主要スペック

インキュベータ環境制御	温度制御	制御範囲:15 - 40 deg. C 温度分布:±1℃
	湿度制御	制御範囲:30 - 65%(加湿のみ) 制御精度:±5%
	CO2 制御	制御範囲:0 - 10%Vol (最低濃度は環境に依存)
人工重力制御	回転半径	標準型:175 mm **大型: 380 mm**
	回転数制御(標準型)	制御範囲:15 - 140 rpm 制御精度:±2rpm
	回転数制御(大型)	**設定範囲:15 - 82 rpm** **制御精度:±1rpm**
ユーザユーティリティ	供給電力	DC +5V, +12 V, +/- 15 V, **+24 V** **(電力合計 190 W まで)**
	通信	RS485(LAN 変換による) **LAN(イーサネット)**
	ビデオ	NTSC (balanced) 1ch NTSC (unbalanced) 6ch+2ch **HD-SDI 12ch**

アンダーラインは, 初号機からの追加機能や機能向上を示す

初号機と比して最大の特徴は, 人工重力環境に関し, 従来の遠心機回転半径を大型化(2倍以上)し, かつ回転数制御の制御精度を向上させていることである。これにより, 大型サンプルへの対応や, 重力勾配の低減(半径方向での位置の違いによる重力差の低減)に成功し, 実験環境を拡充している。また, 宇宙飛行士が, インキュベータの構成を大幅に変更できるようにすることで, 多様なバリエーションに対応することが可能となっている(図3)。

その他, 初号機からの主要な違いとして, イーサネット通信などのインタフェースを追加したこと, 及び実験供試体が使用可能な電力を約2倍に増大させるためにインキュベータの排熱能力を向上させたことが挙げられる。

以下に, 主要構成機器について説明する。

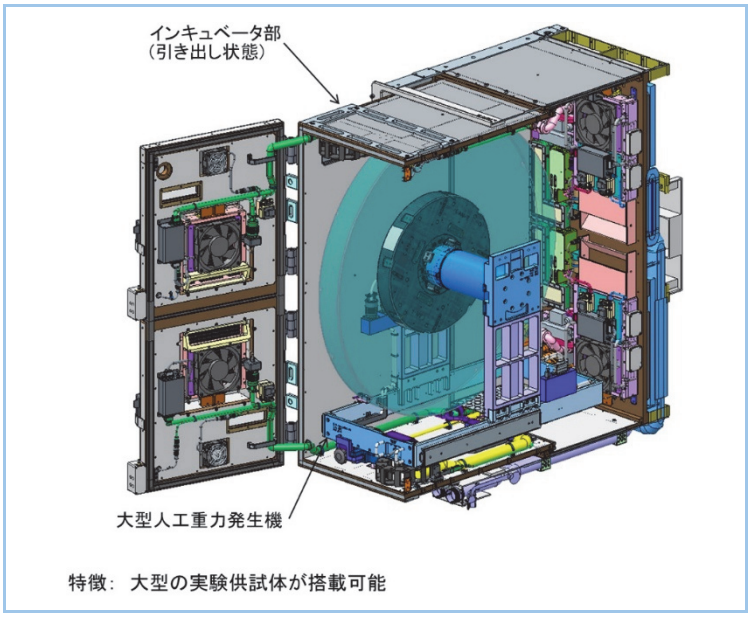


図3 形態1(大型人工重力発生機 搭載)

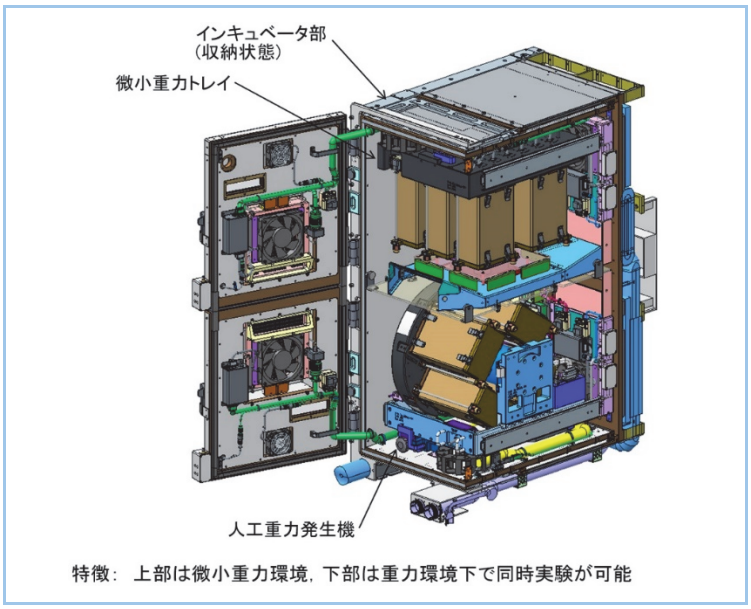


図3 形態2(微小重力トレイ, 人工重力発生機 搭載)

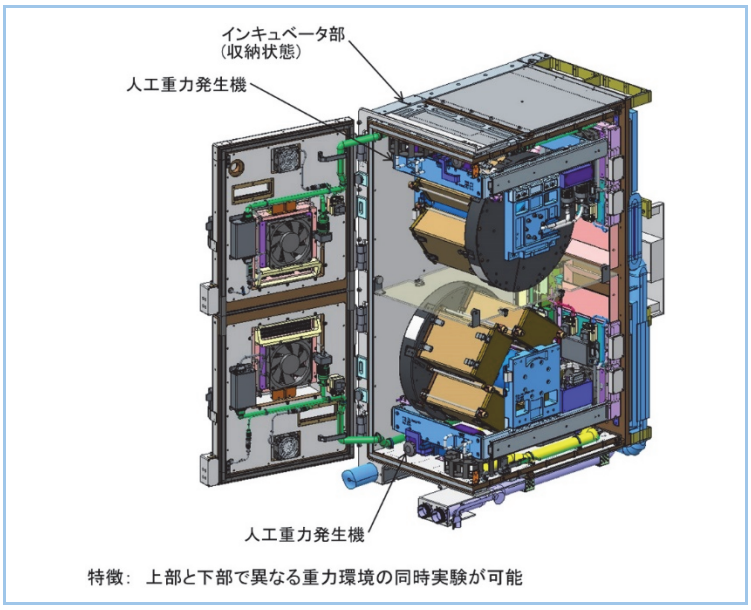


図3 形態3(人工重力発生機 x2 搭載)

(1) インキュベータ部

インキュベータ部は，“きぼう”船内実験室内の実験ラックに搭載され，システムから供給される電力・データ通信・冷却水・CO_2などを使用し，内部の空間を実験環境として提供する。

構成は，求められる強度・断熱性能を確保しつつ低コスト化を実現するため，従来機の樹脂ハニカム構造から，二重壁構造に変更し(外壁をアルミニウム，内壁を樹脂)，二重壁間に真空断熱材を挿入している。前述の形態変更に対応するため，側面壁をテレスコピック構造とし，インキュベータ自身の容積を拡大/縮小して実験によって最適化することが可能である(図4)。

その他の特性として，クルーの不意な衝突等に耐える構造強度や，内部環境のエア温度・CO_2濃度が維持できるための断熱・気密性を有する。

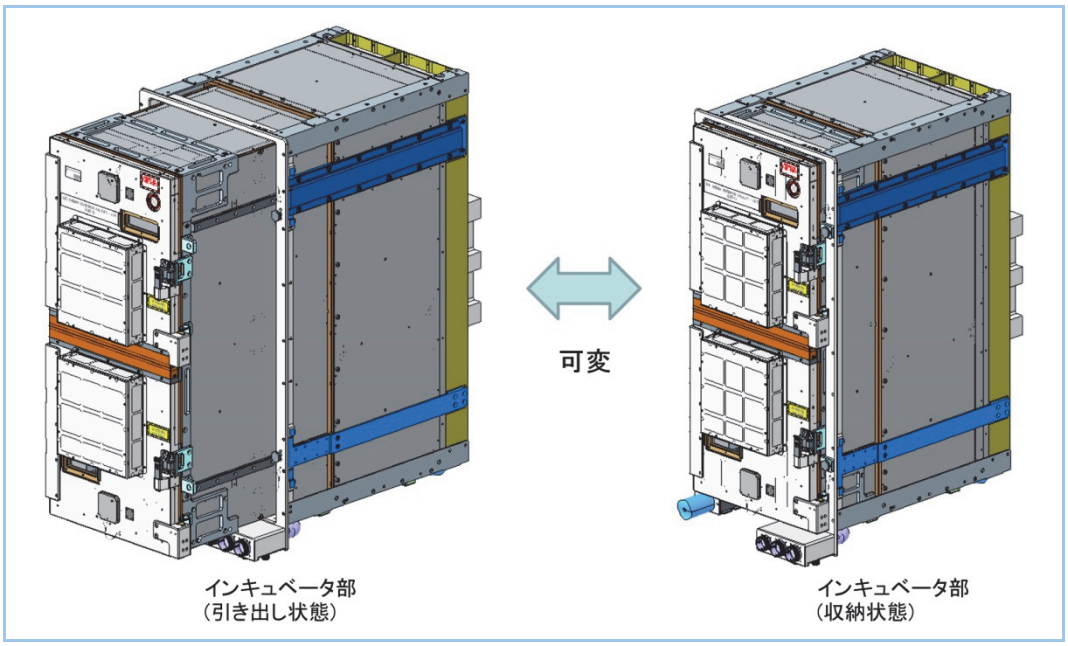


図4 インキュベータ部各状態(引き出し，収納)

(2) 人工重力発生機，微小重力トレイ

人工重力発生機，及び微小重力トレイは，インキュベータ部(実験空間)に設置され，実験供試体を保持し，電力・データ通信を提供する。

人工重力発生機: 0.1～2G の人工重力環境を提供

微小重力トレイ: 微小重力環境(“きぼう”船内の重力環境)を提供

人工重力発生機は，フレームを交換することで回転径が可変可能で，モータを搭載する回転部は共用する(図5)。初号機から通信機能が拡充しており，イーサネット通信及びハイビジョンに対応したビデオ伝送が可能となっている(微小重力トレイも同様)。多極スリップリングと光ファイバーを用いて，回転体に搭載する実験供試体との電力・データ通信インタフェースを確立している。

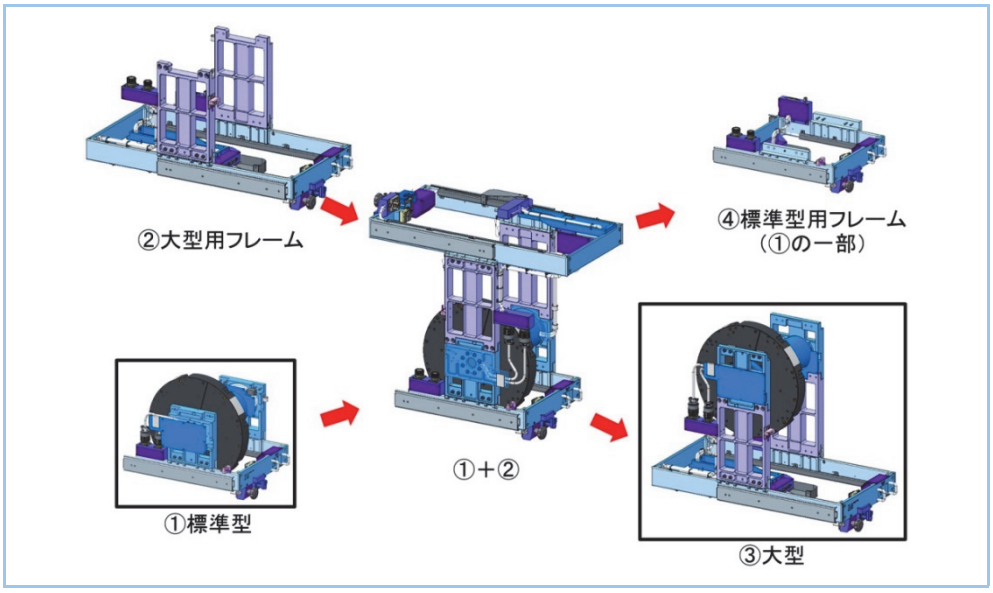


図5 人工重力発生機 形態変更

(3) 制御装置

制御装置は，初号機のスペアとして開発された制御装置と基本構成が共通となっており，実験ラック用電力分配器から電力供給を受け起動し，搭載機器/センサ類への電力供給や計測・制御，及び，実験供試体への電力供給・データ収集を行う。また，きぼうの通信システム機器を介してイーサネットや MIL-STD-1553 ラインを利用して，地上の運用システムとの間でコマンドアップリンクやテレメトリデータのダウンリンクなどのリアルタイム双方向通信が可能である。

構成は，ボード群を搭載する筐体と軌道上で交換可能な複数のボードからなり，ボード単位での保全補給が可能である。また，搭載アプリケーションソフトウェアはイーサネットを利用したファイル転送でバージョンアップが可能である。

CBEF-L 向けには，人工重力用のモータドライバボードを新たに開発した。2台の人工重力発生機を同時制御できるだけでなく，初号機と比較して，加速・減速制御機能の追加と速度制御精度の向上を行った。急激な重力変化に敏感な実験試料に対応するために，加速度・減速度を細かく設定・制御できる機能を実装した。また，大型遠心機は標準型よりも回転半径が大きいため円周上における回転速度の揺らぎの影響が大きい。人工重力モータの位置検出センサの見直しと，モータドライバの回路，及び制御ソフトウェアの見直しにより，初号機 CBEF より制御精度を向上させた。

3.2 初ミッション

CBEF-L の初めての実験運用は，マウスを軌道上で飼育する5回目のミッションであった。マウスを飼育するミッション機器(MHU：Mouse Habitat Unit))は，JAXA との契約にて当社が開発した国内初の宇宙向け小動物飼育装置である[1]。本装置は 2016 年を初回として 2021 年現在計6回の小動物飼育ミッションに使用されている。

マウスを飼育するケージは小径の人工重力発生機と微小重力トレイに搭載可能な仕様として開発されたが，CBEF-L の初のミッションでは大型遠心機とのインタフェース機器類のみを新たに開発することで，開発済みの飼育ケージを大型遠心機に搭載可能とした(図6)。ミッションは，月面を模擬した地上の 1/6 の低重力環境下での長期小動物飼育を実施し，マウスの全数生存帰還に成功している。

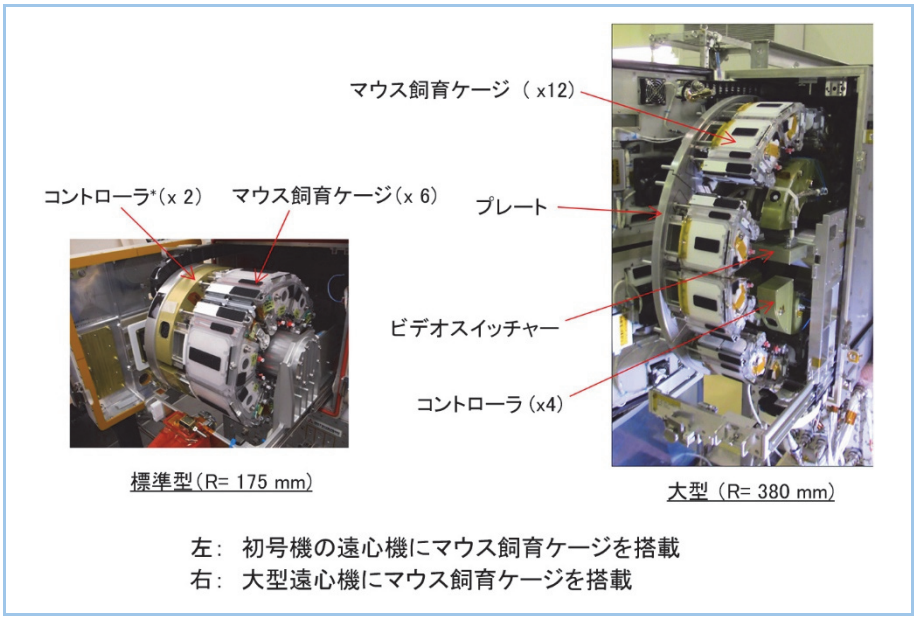


図6 初期ミッション時の大型遠心機（マウス飼育ケージ搭載）

4. まとめ

限られたスペースなどのリソース制約の下，ISS で最大規模となる大型遠心機を搭載する追加の実験装置 CBEF-L を開発した。初号機 CBEF との互換性を維持しつつ，新たなユーティリティを追加し，初号機 CBEF と合わせて多彩な装置形態のバリエーションが可能であり，今後宇宙環境を利用する実験や研究において多様なニーズに貢献できるものと考える。

新たに追加開発した実験装置 CBEF-L により，以下が可能となった。

- 回転半径が最大 38cm までの遠心実験が可能となり，ミッション機器の大型化やサンプル数の増大に貢献
- 初号機 CBEF と合わせて最大で3つの遠心機の同時使用が可能となり，それぞれ異なる重力下の実験が同時実行可能

宇宙環境利用実験がより身近なものとなるためには，より早く・より低コストで実現可能な製品開発力が必要となる。当社がこれまでに培った開発・運用実績をもとにして，宇宙環境利用実験のニーズにこたえていきたい。

参考文献

(1) 萩原ほか，マウス個別飼育可能な国際宇宙ステーション向け小動物飼育装置の開発，三菱重工技報 Vol.53 No.4 (2016)