

きぼう利用プラットフォーム中間評価

「健康長寿研究支援プラットフォーム」
報告書

2025年7月

JAXA 有人宇宙技術部門
宇宙環境利用推進センター

はじめに

国際宇宙ステーション(ISS: International Space Station、以下、「ISS」という)は、日本、米国、欧州、カナダ及びロシアの国際協力のもとに建設された有人宇宙施設である。我が国はISSの構成要素の一つである、「きぼう」日本実験棟(以下、「きぼう」という)の開発及び運用・利用を中心としてISS計画に参加している。2008年2月にきぼうが打ち上げられ、我が国の地球低軌道(以下、「LEO」という)における宇宙空間利用が本格的に開始されて以来、微小重力環境の利用が有効に作用する有望な分野の探索・特定と利用方法(技術)を構築してきた。

JAXA及びきぼうに求められる役割が時代と共に大きく変化してきており、2030年のISS運用終了を見据え、より多くの研究者や民間企業からの参画を得てきぼう利用の成果最大化を進めて行くとともにLEO利用をポストISSへとシームレスにつなげるため、JAXAとして目指す姿や目標等を掲げ、戦略的かつ組織的にきぼう利用を推進する目的で「きぼう利用戦略」を策定している。

きぼう利用戦略では、ポストISS(2035年頃)のLEO利用の目指す姿として「きぼう利用を通じて、LEOにおける宇宙環境利用が人類の社会・経済活動の一部として定着している」ことを掲げ、JAXAが取り組むべき3つの活動領域「JAXA事業利用(技術実証・獲得、超長期有人宇宙滞在技術・探査技術獲得の推進)」、「公的利用(知の創造/国の課題解決型研究・学術研究の推進)」、「商業活動利用(民間利用オープンイノベーションの推進)」の利用配分がバランスのとれた配分となることを目標に設定し、それぞれの領域の推進と成果の最大化を図ることを、きぼう利用推進の基本的な考え方としている。

きぼう利用の目指す姿の実現に向けた具体的な取組の1つが「プラットフォーム(以下、「PF」という)」である。宇宙実験の実績・成果があるきぼう利用のうち、繰り返し実施が可能であり、国の科学技術施策の実現や民間企業の研究開発等に貢献でき、JAXA内外から利用ニーズがある取組をきぼう利用の柱として位置付け、その領域の研究を支える研究開発基盤を「PF」と定義し、それぞれの業界・分野・コミュニティの中での定着及び利用の拡大を推進してきた。きぼう利用戦略では、5つのPFを定義している。

また、PFでは、利用者の参加を促進するために、宇宙実験の入り口から成果創出までを支える一連の実験技術の定型化・定時化・高頻度化・低価格化等を図り、実験ごとにサービスを定型化することにより、きぼう利用の需要を喚起するよう努めてきた。

本報告書は、健康長寿研究支援PFについて、これまでの成果を取り纏め、今後のPF利用の方向性を議論するためその取組や計画を報告する。

<プラットフォーム一覧(きぼう利用戦略(第4版)掲載)>

- | | | |
|------|-------------|-----------------------------|
| i. | 新薬設計支援PF | タンパク質の構造に基づく薬剤設計支援 |
| ii. | 健康長寿研究支援PF | 「きぼう」を使ったヒトの健康長寿に関連する研究への貢献 |
| iii. | 革新的材料研究支援PF | 無容器処理技術を利用した材料研究への貢献 |
| iv. | 超小型衛星放出PF | 超小型衛星放出サービスの提供 |
| v. | 船外ポート利用PF | 船外ポートを利用した戦略的利用推進 |

1. 緒言

健康長寿研究支援 PF の設置概念

微小重力や放射線などの宇宙環境に対する統合的な生物応答メカニズムの解明は、重力生物学と宇宙放射線生物学における ISS ならではの最先端の科学的知見の獲得とともに、地上における生物の進化過程の解明につながる。成果をヒトへ外挿し易い(ヒトへの適用や還元が図りやすい)マウス等の小動物を対象として、生物個体レベルでの長期的な環境影響変化とそれに対する環境適応を把握し、基礎的・網羅的な影響評価を行うことは強く求められていたが、宇宙で小動物を飼育する能力(装置や技術)は日本にはなかった。そのため、日本初の宇宙で小動物を飼育する能力を獲得することで、健康長寿社会実現に向けた国の課題解決にかかる研究(地上還元研究)を推進するとともに、有人活動領域拡大の科学基盤構築のための研究(有人探査研究)を推進することを健康長寿研究支援 PF の目的とした。

さらに、将来の有人月面探査を見据え、ヒトが地球外でより「安全」に活動できることに加え、有人探査の「科学」的意義を生み出すには、宇宙ミッションをハード(装置や技術)とソフト(研究)の両面から推進できる「人材」の育成が必須である。本 PF の宇宙科学ミッションを推進することで、これらの技術獲得・科学成果創出・国際協力活動といった宇宙機関としての求められる人材育成に貢献できることが期待される。

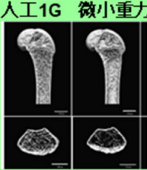
本中間報告書は、2013 年から 2025 年 6 月までの活動をまとめたものである。

地上還元研究

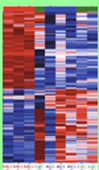
微小重力環境での変化と加齢様現象の類似性に着目

健康長寿社会実現（科学成果創出～国際競争）

- わずか35日間の宇宙飼育で重度の骨粗しょう症と同様の骨量減少。人工1Gでは減少せず（世界初）。
➢ Sci Rep, 2017
- JAXA装置(個別ケージ等)の優位性
 - NASAに先駆けオスマウスによる次世代影響評価
➢ Sci Rep, 2019; iScience, 2020
 - ばらつきのないデータによる遺伝子の詳細解析
➢ 筋萎縮、腎機能、免疫機能などを評価
➢ Sci Rep, 2021; Comm.Biol., 2021; Kidney Int., 2022など
 - 詳細比較による筋分化決定因子同定（特許出願済み）
➢ Cell Rep., 2023



人工1G 微小重力



➢ 筋萎縮、腎機能、免疫機能などを評価
➢ Sci Rep, 2021; Comm.Biol., 2021; Kidney Int., 2022など

3) 詳細比較による筋分化決定因子同定（特許出願済み）
➢ Cell Rep., 2023

宇宙から地上へ、マウスからヒトへ

- 健康長寿社会実現を目指し、東北メディカル・メガバンク機構 (ToMMo)と連携。
- 本当に宇宙でのマウス飼育は加齢のモデルか？
ToMMoの年代別のコホートデータと比較し、有意な関連を示した (Comm.Biol., 2020; Comm.Biol., 2021)
→ 宇宙環境では加齢の加速試験が可能
- ToMMo連携のもと、宇宙マウスデータベースを構築(Cell, 2020)：厳密な遺伝子データとして製薬企業等への利用拡大を狙う。



Cell
kidney



宇宙マウス (極限環境マウス) ToMMo

有人探査研究

人工重力環境、ISSでのみ実現可能な長期低重力環境活用

有人活動領域拡大の科学基盤構築（国際協力）

■ 長期有人宇宙探査に向けた課題解決：視覚系影響解析

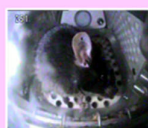
- 日米協力(JP-US OP3)の下、JAXA取得眼球サンプルの共同解析。
→ 眼球組織障害の軽減に人工重力負荷の有効性を初めて示した。(Int.J.Mol.Sci., 2018)

低重力でのマウス飼育で世界をリード

- 低重力環境でマウスを飼育できるのはJAXAのみ。2019年、世界初、月の重力環境(1/6G)を長期飼育 (Comm Biol., 2023)



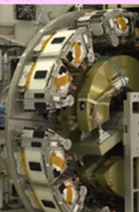
微小重力環境：
ふわふわ浮いた状態



人工1/6G環境：
浮いた状態からケージ底面に“着地”

- 有人宇宙探査に向け、人工重力に関する研究能力が倍増。哺乳類への長期低重力環境の影響解析に置いて、国際的な優位性が飛躍的に向上。
- 日米協力枠組み（JP-US OP3）のもと、NASAと共同で大規模(6匹x4重力条件)のミッションを実施/成功（2023年春）。火星重力の生体影響などの評価中。NASAと連名で2024年投稿・審査中

■ 遠心機の回転速度を変えることで、月や火星の低重力を実現可能(左:従来遠心機、右:直径を2.3倍に大型化した新型遠心機)

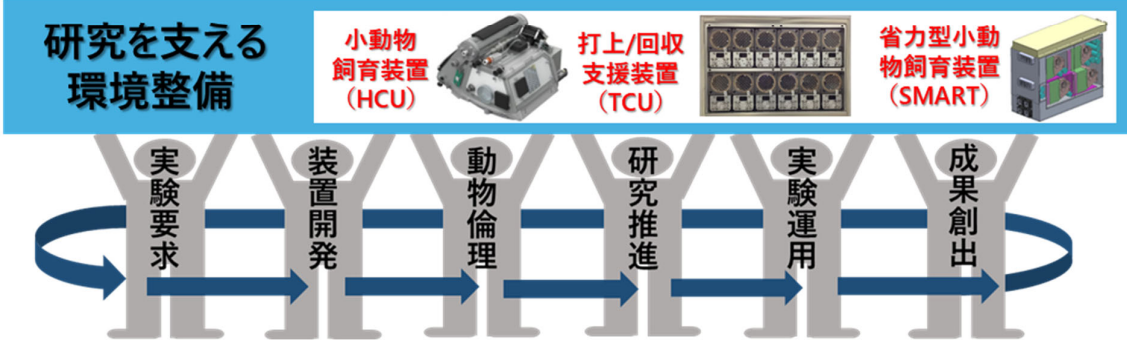


図1 健康長寿研究支援 PF の戦略的推進

PF の位置づけ

健康長寿研究支援 PF では、生命医科学分野の基礎科学研究のみならず、ヒトへの応用を視野に入れたモデル生物(マウス等)を用いた実験・研究を対象とする。小動物飼育ミッション(MHU ミッション)を中核的な宇宙ミッションとして位置付け、小動物飼育及び実験に関連する装置を新規に開発すると同時に、軌道上実験の運用面でのノウハウや実施体制等、実験環境全体をゼロから構想・整備・開拓することに着手した。加えて、宇宙飛行士(クルー)を対象とした血液等の生体試料の解析を主とするヒト研究をターゲット領域とした医学ミッションにも取り組んでいる。2012 年度から開始した国内公募では、ヒトの健康長寿に関する研究テーマを対象として、これまでに 18 テーマ(マウス対象 11 テーマ、ヒト対象 4 テーマ、マウス・ヒト対象連携 3 テーマ)を選定してきた。マウス研究からヒト研究へ、将来の LEO 利用に繋がる科学的成果を創出するとともに、ポスト ISS 時代を視野に入れた継続的な宇宙環境利用を支える体制を整備し、低軌道商業宇宙ステーションへの橋渡しとしての役割を果たす将来ビジョンにつなげていく。

きぼう利用状況と重点領域における取組

きぼう利用 PF の運営指針である「きぼう利用戦略第 4 版」に示すように、今後 ISS 退役までのきぼう利用期間のビジョンとして、人類社会・経済活動の一部として地球低軌道における宇宙環境利用が定着している姿を描いている。その中で、本 PF では、国の課題解決型研究への貢献や学術研究の推進を目指す「公的利用」と、超長期有人宇宙滞在技術や探査技術の獲得のための「JAXA 事業利用」の 2 つの領域に重点をおく。きぼう全体として掲げるもう 1 つの活動領域の「商業活動利用」については、ポスト ISS に向けた民間需要拡大・事業育成・事業者自立への前段階として、民間利用推進に資する取組を展開していく。

公的利用と JAXA 事業利用で目指す姿

「公的利用」として、生命医科学分野でマウスを使用した基礎研究からヒトへの応用は、我が国が今まさに直面している超高齢社会の現状とその課題解決への取組に貢献するものである。本 PF は、老化や寝たきりの状態に似た変化が加速的に研究できる実証基盤として、きぼう利用の価値を創出している。また、もう一つの重点領域である「JAXA 事業利用」では、日本の宇宙開発戦略(宇宙基本計画)の観点から、月・火星を目指す国際宇宙探査においては、地球外でより安全な有人活動を可能にするために役立つ研究を推進し、基盤データを蓄積することで、国際協力の強化と我が国の科学技術分野におけるプレゼンスを示すことに寄与する。第 1 回 MHU ミッション(MHU-1)で JAXA 独自の飼育実験装置や世界唯一の小動物用可変人工重力環境を利用した宇宙ミッションを成功させて以降、これらの JAXA 開発装置の強みを生かし国際競争力を高める科学的成果を創出している。

科学・技術成果の達成状況

これまでに、MHU ミッションと医学ミッションを合わせた本 PF 全体では、軌道上ミッションの解析結果で 37 報、地上予備実験で 9 報、合計 46 報の学術論文が発表されている。宇宙ミッションへの取組のほか、国内外の研究機関との共同研究契約等を通して実施してきた未解析組織を活用したサンプルシェア・プログラムや、東北大学東北メディカル・メガバンク(ToMMo)との連携によるマウス・ヒトをつなぐ宇宙生命医科学統合バイオバンク(ibSLS)での蓄積データの公開やデータセット拡張等の取組においても、きぼう利用の裾野拡大や科学技術成果の最大化に貢献している。なお、ISS での小動物飼育ミッションは、日本のほかにも米国およびイタリアが実施していた。それぞれの特色を表 1 に示す。ミッション実施回数は米国の半分に満たないに関わらず、発表された学術論文のインパクトファクター 5 以上の成果論文数は、他国のミッションと比べても多い。

表 1 日本・米国・イタリアの小動物飼育ミッション実施状況

	日本 健康長寿研究支援PF	米国 Rodent Research	イタリア Mice Drawer System Program
ミッション実施	2016年～	2014年～2024年	2009年（1回）
宇宙ミッション数	9回	21回	1回
飼育装置	小動物飼育装置	Animal Enclosure (AEM)	Mice Drawer System
軌道上飼育期間	14日～35日	14日～90日	91日
人工重力発生装置	あり	なし	なし
個別飼育/群飼育	個別飼育（1匹/ケージ） 最大24匹	群飼育（5匹/区画） 最大40匹	個別飼育（1匹/区画） 最大6匹
生存帰還	あり	あり	あり
軌道上サンプル・データ取得	あり	あり	なし
成果論文数(軌道上実験)	33	40（*2）	17（*2）
うち、IF5以上論文数(*1)	10	7	1
注記 （IF5以上の論文について）	他国のミッションに比べて、幅広い分野（骨格筋系、循環器系、泌尿器系、脂質代謝等）の研究や月の重力の影響の研究が実施されている。	骨格筋やmicrobiomeの研究に強い。	1ミッションのみで、打上げ6匹中、3匹のみの生存帰還であったが、軌道上長期（90日）飼育を生かした骨格筋への影響研究を実施。

*1 2023年版IF（インパクトファクター）。 *2 Space Station Research Explorer調べ。

きぼう利用で目指す姿を実現するための取組と実施体制

このように成果の最大化を目指したターゲット領域への取組については、PF の成熟度に合わせて4つのフェーズ（第1～第4フェーズ）を設定し、フェーズごとに主となる戦略や重点項目を策定してきた。各MHUミッションの実施において、定期的に行われるテーマ選考評価委員会やJAXA審査会等での審査・評価を受け、その結果に基づきPFを支える装置開発・実験系コンセプトの深化を推進している。また、宇宙環境という閉鎖的で、人的にも物理的にも限られた条件下で、安全に地上のような実験環境を再現するために、飼育装置等の開発や改良に取り組み、取得データの精度を確保する等のサイエンスリターンを最大限に考慮してきた。それと同時に、さまざまな実施支援体制（JAXA 動物実験委員会、JAXA 獣医師、各種アドバイザリ委員会の助言・監修）での連携のもとに、マウスの飼育環境や健康管理などの倫理面に十分配慮した MHU ミッションの仕組みをきぼう利用を通して実現し、定常化を図ってきた。現在、ポスト ISS への移行期に向けて、これまでにきぼう利用を通じて蓄積してきた宇宙環境利用技術や科学研究に関するノウハウを民間事業者に移管するための準備作業を推進している。

国際協力からの科学成果の創出

このように、我が国独自の宇宙環境利用を進める一方で、ISS 国際パートナーの一員として国際協力の枠組みの中で我が国が果たすべき役割は大きい。2023 年、有人宇宙探査活動に向けた知見獲得を目指し、日米協力枠組み（Japan-U.S. Open Platform Partnership Program: JP-US OP3）のもと、JAXA の小動物飼育装置等を使用して JAXA-NASA 共同低重力ミッション（NASA-JAXA Joint Partial-gravity Rodent Research/Mouse Habitat Unit-8）を実施した。本ミッションでは、軌道上において0～1Gの間の4つの異なる重力環境でマウスの長期飼育を行い、現在、日米4つの研究チームにて詳しいサンプル解析が行われており、学術論文が発表され始めている。さらに、将来的なジョイントミッションの実現に向けて新たな協力可能性について検討を進めている。

より自立した PF 運営へ

最近の米国における NASA に対する大幅な国家予算削減等、宇宙環境利用を取り巻く国際情勢の変化を背景として、MHU ミッション運営にかかり大きな転換期を迎えている。従来の NASA リソース（おもに軌道上及び射場がある米国での地上作業に関連する人的・物的リソース）に依存した体制から、日本国内での JAXA リソースを主体とした自立的な体制へ、ミッション運営変更の必要性が明確になった。そのために、宇宙飛行士（クルー）に依存する作業スケジュール（クルータイム）の大幅削減を可能にする省力型飼育装置（SMART）の開発や国内射場施設等の整備に優先的に取り組んでいる。

PF の将来ビジョン： 低軌道商業宇宙ステーションに継承可能な研究基盤として

これらの取り組みの先には、ポストISS時代の低軌道商業宇宙プラットフォーム（Commercial LEO Destinations、CLD）へと、本 PF の運営をシームレスに継続していく将来ビジョンを描いている。その実現のために、これまでにきぼう利用を通じて蓄積してきた宇宙環境利用技術やノウハウを文書化する等、継承可能な形に整備することや、宇宙ミッションの End-to-End 運用を可能とする人材の育成やその支援体制の強化を通して民間事業者への技術移管を促進する等、低軌道商業宇宙ステーションの基盤となる環境づくりに積極的に取り組んでいく。本 PF の詳細については、以下の JAXA 有人宇宙技術部門ウェブページを参照。（<https://humans-in-space.jaxa.jp/kibouser/provide/mhu/>）

健康長寿研究支援 PF の主な成果等

PF 前	2012 年度	・きぼう利用テーマ重点課題区分でマウス及びヒト連携テーマを選定。 ・JAXA 小動物実験装置アドバイザー委員会を設置。
	2013 年度	・小動物実験装置の開発を開始。
第1フェーズ	2015 年度	・小動物飼育装置の開発完了。
	2016 年度	・第 1 回小動物飼育ミッション（MHU-1）で、微小重力環境（μ G）及び人工重力環境（1G）でのマウス飼育を実現。 ・打ち上げた全匹数のマウスを無事に生存帰還させることに成功。 ・宇宙航空研究開発機構理事長賞の受賞（社会貢献分野）。
第2フェーズ	2017 年度	・<u>世界初</u>、可変人工重力環境での小動物飼育研究にかかる論文発表。 ・第 2 回小動物飼育ミッション（MHU-2）に成功。 ・きぼう小動物利用研究アドバイザー委員会を設置。
	2018 年度	・第 3 回小動物飼育ミッション（MHU-3）に成功。 ・マウスサンプルシェアテーマ募集を開始。 ・ISS Research Award 受賞。
	2019 年度	・第 4 回小動物飼育ミッション（MHU-4）に成功。 ・<u>世界初</u>、人工月面重力環境でマウス飼育・全匹生存帰還に成功。 ・東北メディカル・メガバンク機構（ToMMo）と連携協定を締結。 ・日米協力枠組みのもと、低重力ミッションの共同実施をアメリカ航空宇宙局（NASA）と合意。 ・ISS Research Award 受賞。
	2020 年度	・第 5 回小動物飼育ミッション（MHU-5）に成功。 ・ToMMo と共同で宇宙生命医科学統合バイオバンク（ibSLS）のデータベースを構築し、公開。 ・令和 2 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰（科学技術賞 科学

		技術振興部門)を受賞。
第3フェーズ	2021 年度	・第 6 回小動物飼育ミッション(MHU-6)に成功。 ・遺伝子機能発光イメージング解析装置(Tele-Luminescence Analysis System: TELLAS)をきぼうに設置。 ・ISS Research Award 受賞。
	2022 年度	・第 7 回小動物飼育ミッション(MHU-7)に成功。 ・ibSLS の公開データを大幅に拡充。
	2023 年度	・JAXA-NASA 共同低重力ミッション(MHU-8)で 4 つの異なる重力環境で長期飼育に成功。 ・タイとのきぼう利用マウスサンプルシェア協定の締結。 ・ISS Research Award 受賞。
	2024 年度	・第 9 回小動物飼育ミッション(MHU-9)に成功。
	2025 年度 (現在)	・ポスト ISS を見据えた省力型小動物飼育装置(SMART)を開発中。 きぼうでの 2027 年度技術実証を目指す。

2. PF 運営・推進

PF の運営・推進に関わる取組について、以下の 4 項目に分けて報告する。

- (1) 利用拡大に向けた取組状況とその発展について
- (2) 新たな概念・価値を創出する実験サービス(枠組み、装置等)の提供状況とその発展について
- (3) PF 運営上の課題識別とその対応について
- (4) ノウハウの蓄積と継承(サービス提供を含む)

(1) 利用拡大に向けた取組状況とその発展について

健康長寿研究支援 PF の効果的な利用推進にあたり、その推進方策として第 1 フェーズから第 4 フェーズまで分けし、PF の成熟度に合わせ、外部有識者からなるアドバイザリ委員会を組織し、利用拡大に向けた取組を発展させてきた(JDX-2018129_健康長寿研究支援プラットフォームミッションシナリオ)。以下に、その詳細を報告する。

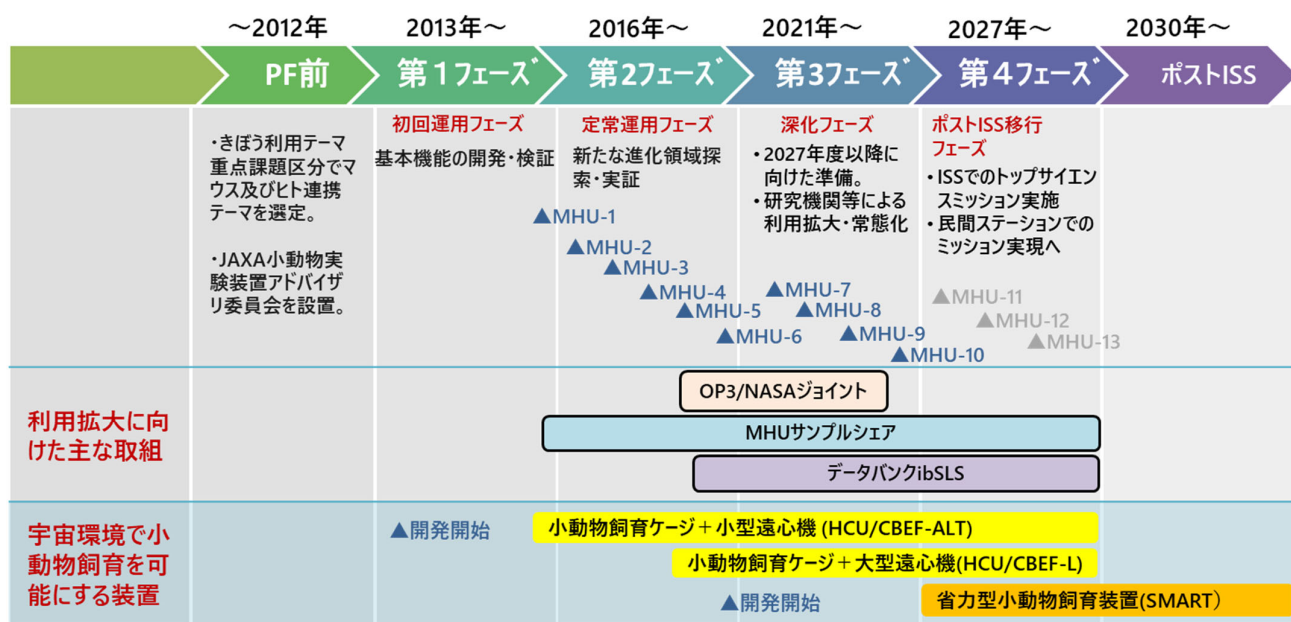


図 2 健康長寿研究支援 PF の取組と発展

第1フェーズ(初回運用フェーズ：2013年～2016年前半、MHU-1 ミッション実施)：「基本機能の開発・検証」

第1フェーズでは、小動物飼育の技術開発及び宇宙実験の発展性や方針の探索を行った。小動物飼育の基本機能を有し、複数の実験に共通的に利用し、かつ、効率的/効果的に成果を出すことのできる装置を開発するため、JAXA 小動物実験装置アドバイザー委員会を設置し、実験装置に対する要求仕様案、試作試験、各種検討・設計結果等に対し助言を頂きつつ、有人宇宙技術部門での審議を経て、開発を進めた。その結果、初回の MHU-1 では、小動物飼育装置(HCU)を小型遠心機付き細胞培養装置(CBEF—ALT)の人工重力発生装置(ターンテーブル)と組み合わせて使用することで、微小重力(μ G)及び地球の重力(1G)環境での小動物飼育を実現させ、軌道上で1Gを模擬できる、世界唯一の可変人工重力環境飼育システム(MARS: Multiple Artificial-gravity Research System)の構築に成功した。また打ち上げた全匹数のマウスを無事に生存帰還させることに成功した。これにより、PF の基盤となる MHU フライトミッション形態(図3)を確立した。

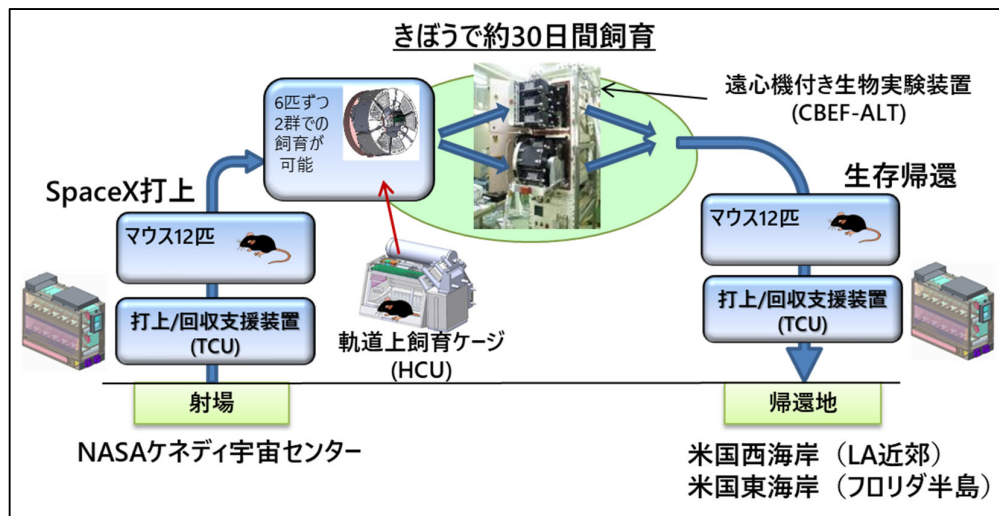


図3 MHUフライトミッション概要

第2フェーズ(定常運用フェーズ：2016年後半～2021年、MHU-2～MHU-6 ミッション実施)：「新たな進化領域探索・実証」

第2フェーズでは、人類社会の課題の取込みと成果の提示及び宇宙実験の多ユーザ化の探索を行った。将来の有人宇宙探査研究及びPFの発展に向けた、小動物を用いた生命医科学研究の長期計画の効果的・戦略的立案の実現に資するためのきぼう小動物利用研究アドバイザー委員会を設置し、提言を受けつつ、有人宇宙技術部門での審議を経て、小動物利用研究を推進した。なお、本フェーズ期間において、当初より課題として1ミッション当たりの定常経費やクルータイム等のリソース面での負担が大きいことが挙げられていた。その課題の解決策の1つとして、軌道上での計画安楽死及びサンプルの凍結回収することでリソースの低減を図るミッション形態を確立した(MHU-6)。関連する課題については、後述の「(3)PF 運営上の課題識別とその対応について」でまとめる。

地上での加齢研究等に有効なインパクトの高い成果を得ることを目標に、研究の領域を骨・筋から宇宙ストレス耐性、免疫系、炎症応答など哺乳類ならではの研究課題へ拡大し、遺伝子組換えマウス搭載、中枢神経系病態マウスやリンに着目した老化マウスを用いた軌道上実験、全数生存帰還と根拠あるサイエンスデータを MHU-2～MHU-5 で持続的に取得した。

また、日米協力ミッションのベースラインとなるデータを蓄積するため、MHU-4 では短腕遠心機を

備える CBEF—ALT で月の重力環境(地球のおよそ 1/6)を模擬してマウスの長期飼育を実施した。MHU-5 では、JAXA が新規開発した長腕遠心機を装備する生物実験装置(CBEF-L)を用い、月の重力環境を模擬し、マウスの長期間飼育を実施した。世界初の低重力環境(Partial-G)の評価を行った。

さらに、超高齢社会の健康寿命延伸対策としての予防・先制医療(骨格・中枢系の機能減弱予防)を見据え、軌道上ミッションで取得したデータと地上データとの連携や、より多くの研究者へ届ける仕組みとして、東北メディカル・メガバンク機構との連携協定を 2019 年に締結し、ヒト・マウスをつなぐ宇宙生命医科学統合バイオバンク(ibSLS)構築を開始した。また、MHU-1~MHU-5 で取得したサンプルの有効利用ときぼう利用の裾野の拡大を目標として、2018 年度にサンプルシェア国内公募開始し、2022 年度までに 4 回実施した。選定したテーマは計 38 テーマに対して提供サンプルは 93 組織に及ぶ。

第 3 フェーズ(深化フェーズ: 2021 年~2027 年、MHU-7~MHU-11 実施予定): 「2027 年度以降に向けた準備。研究機関等による利用拡大・常態化」

第 3 フェーズでは、地上研究 PF との連携の深化、地球低軌道での有人運用の自動化・自律化の促進、及び月や火星探査ミッションへの橋渡しを進めるため、第 2 フェーズで確立した技術を基に、「深化・研究機関等による利用拡大・常態化」を目標に、軌道上でのデータ取得が可能な遺伝子機能発光イメージングへの挑戦や、持続性のある低軌道実験利用の場を可能とするためのミッション「自動化」にかかる SMART の開発を開始した。

MHU-7 では、宇宙滞在による臓器連関の変化から見る加齢性筋骨格系疾患研究というサイエンス成果の推進に加え、NASA ケネディ宇宙センター(米国フロリダ州)での ISS 環境模擬室(温度、湿度、CO²)を利用した地上対照実験や、従来の小型遠心機付き CBEF-ALT に加え、大型遠心機を備える CBEF-L の 2 区画でミッション運用を実施した。

NASA-JAXA 共同低重力ミッションとして実施した MHU-8 では、日米オープンプラットフォーム・パートナーシッププログラム(JP-US OP3)のもとに、2023 年 3~4 月に、JAXA 飼育装置を使用して NASA とのジョイントミッションを実現し、ミッション 1 回の実施において日米 4 チームが解析・研究に取り組むことで科学成果の最大化及び国際協力の強化に大いに貢献した。

2023 度に以下のフラッグシップ 2 テーマを選定し、現在、第 4 フェーズ内での宇宙ミッションに向けて代表研究者チームと準備を進めている。

「宇宙マウス研究から健康長寿社会の実現に向けて」(東北大学・山本 雅之)

「宇宙環境で作る生殖細胞の継世代影響の解明」(東京大学・小林 俊寛)

民間利用による利用拡大と常態化への取組として、小動物飼育ミッションの有償利用への枠組み構築は進行中であり、現時点では有償利用の実績はない。そのため、三菱重工業株式会社(MHI)がとりまとめている国内製薬企業が参画する宇宙創薬協議会との対話を通じ潜在的な民間ニーズや可能性を調査している。

また、宇宙産業の開発が加速する中で、米国内で NASA に対する大幅な予算削減等、JAXA を取り巻く国際情勢の変化を背景として、従来の NASA リソース(おもに軌道上及び射場がある米国での地上作業に関連する人的・物的リソース)に依存したミッション運用(クルー訓練、打上げ準備、運用等)から、JAXA リソースを主とした自立的宇宙ミッションへ大きく方向転換することが急務となった。そのために、PF 運営の最優先課題として、JAXA 主体の実施体制に基づき、クルータイムの

大幅削減を可能にする省力化を図る SMART の開発や国内射場施設等の整備を加速化して取り組んでいる。

第4フェーズ(ポストISS移行フェーズ：2027年～2030年、MHU-12～)：「ISSでのトップサイエンスミッション実施、民間ステーションでのミッション実現へ」

第4フェーズでは、きぼうの歴史に残る成果創出及びポストISSにつながるSMARTの装置開発と継続的なミッションを支える体制の構築を目標とする。ポストISSにおける地球低軌道での宇宙利用の民営化への最終段階となるこの時期に、フラッグシップテーマとして2023年度に選定された2テーマを通して歴史に残る成果の創出を目指す。

第4フェーズは、ISSからポストISS時代の低軌道商業ステーション(CLD)へ移行する環境づくりの総括的な時期として、これまでにきぼう利用を通じて蓄積してきた宇宙環境利用技術やノウハウの文書化等に取り組むと同時に、宇宙ミッションのEnd-to-End運用を可能とする人材の育成やその支援体制の強化を通して、民間事業者が参入しやすくなるような利用コンテンツを識別し、その実現に向けて具体的な取組を促進する。2030年以降のポストISSにおいて、SMARTを使用した省力化ミッションの安定的な運用を実現し、LEO以遠でのマウス飼育ミッションが実施可能となるように目指す。

また、国際有人宇宙探査に資する重力応答を体系的に評価したデータ蓄積(ibSLSにおけるデータ提供)及び生命の変化を分子レベルで評価可能なマウス飼育システム提供において、JAXAが中心的・先導的な立場を確立している状況を目指すさまざまな取組を通して、我が国の宇宙環境利用に貢献したい。

(2) 新たな概念・価値を創出する実験サービス(枠組み、装置等)の提供状況とその発展について

本PFの対象ミッションは2つあるが、医学ミッションは定型での実施のため、主にMHUミッションに関して、軌道上でマウスを健康に飼育することが可能な飼育装置を新規開発し、研究の質を担保するための射場作業、軌道上運用、帰還処理などの一連のサービスを整備したことによって創出した新しい実験概念や価値についてまとめる。

第1～2フェーズ：小動物飼育装置の開発から定常運用へ

第1フェーズでは、小動物飼育装置(HCU)と細胞培養装置(CBEF-ALT)と組み合わせた可変人工重力環境飼育システム(MARS: Multiple Artificial-gravity Research System)を構築した。JAXA小動物飼育装置(MHU)は、輸送用の飼育装置(TCU)ときぼう船内での長期飼育を可能にする飼育ケージ(HCU)から構成される。また、細胞培養装置(CBEF-ALT)は微小重力区画と人工重力発生装置(ターンテーブル)を装備した人工重力発生部から構成される(図4)。

これらの装置を使用した、JAXA独自の実験系の特徴を以下に挙げる。

- ・軌道上の微小重力環境と遠心機による人工重力環境の両方で飼育ができ、両群の比較により重力の影響を詳細に調べることが可能である
- ・個別ケージ(1匹1ケージ)で飼育が可能であり、また、マウスの雌雄や系統に依存しない設計である
- ・飼育ケージ内で取得できる飼育ビデオ画像により、マウスの健康状態や行動を詳細に観察できる

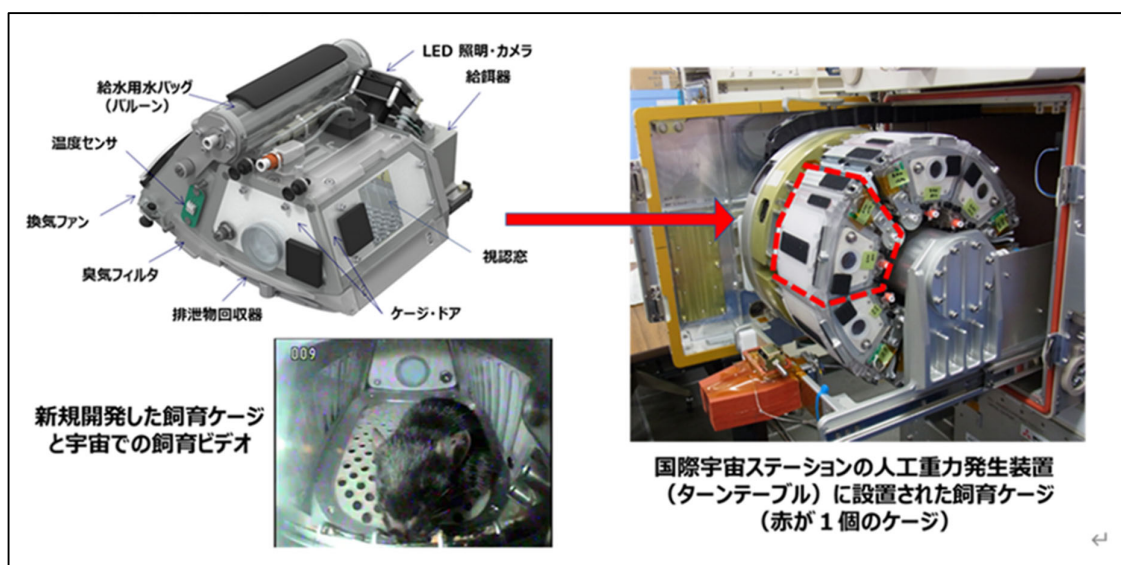


図 4 JAXA 小動物飼育装置と人工重力発生装置

第 2 フェーズでは、生命医科学実験への発展的なニーズに対応するため、CBEF-ALT の搭載供試体数・容積の拡張、人工重力環境の改善をした追加実験エリア (CBEF-L) を軌道上に新たに配備した。MHU-1～MHU-4 は CBEF-ALT を用いたミッションであったが、MHU-5 で初めて CBEF-L を用いた。CBEF-ALT と CBEF-L を統合して運用することにより、複数の運用パターンを選択することができるようになった (図 5)。そのことにより、サンプル数の増加、人工重力のバリエーション増加に寄与することができるようになった。

さらに、採血やサンプル凍結のためのツールも整備し、試料数を大きく向上させたことにより、サンプルシェアを行うことができた。

	CBEF-ALT	CBEF-ALTとの統合運用による改善		
		運用パターン 1	運用パターン 2	運用パターン 3
改善内容	---	人工重力発生機の大型化	搭載供試体数の増加	搭載供試体数の増加
μG部	1 区画	1 区画 (大型供試体)	1 区画	2 区画
1G部	1 区画	1 区画 (大型供試体)	3 区画	2 区画
人工重力発生機	通常型 1 台	大型 (R380mm) 1 台	通常型 (R175mm) 3 台	通常型 (R175mm) 2 台

図 5 CBEF-ALT/CBEF-L

第 3 フェーズ: 小動物利用研究の拡大・発展のための装置開発

科学技術的価値を創出する取組として、小動物ミッションの成果等から得られた疾患候補遺伝子

が宇宙環境で「いつ、どの段階で機能しているか」という経時的情報が必要となるため、生きたままの小動物の遺伝子機能を継続的に観測できるシステム（遺伝子機能発光イメージング解析装置（TELLAS））を軌道上に新たに配備した（図 6）。

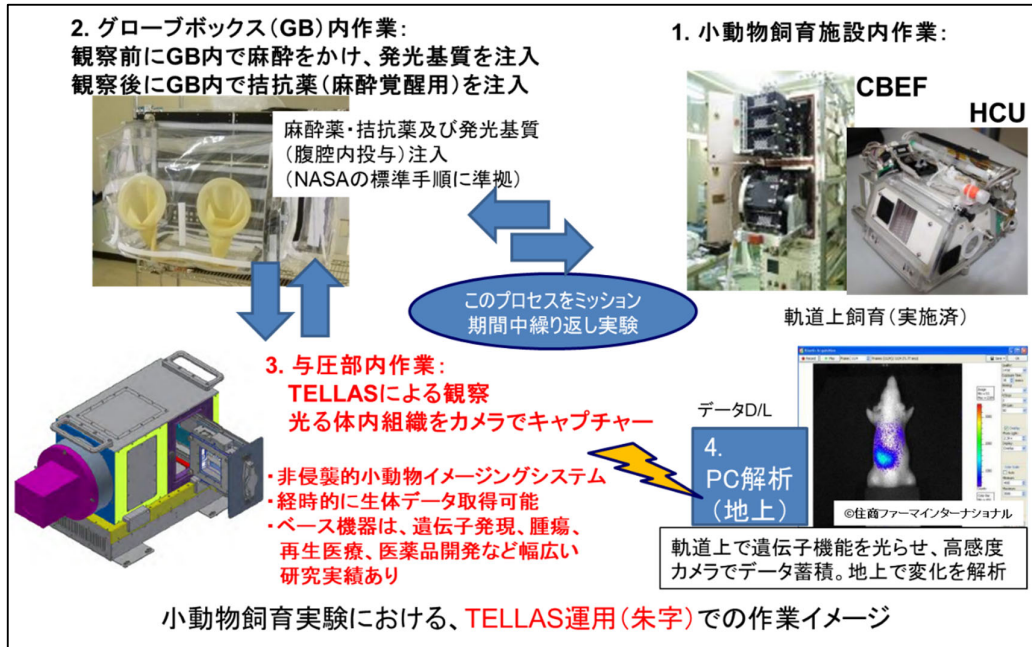


図 6 遺伝子機能発光イメージング解析装置 (TELLAS)

また、ポスト ISS においても MHU ミッションを引き続き実施していくため、軌道における基本飼育（給餌・給水・排泄物交換）にかかるクルー操作を必要としない省力化を図った新型飼育装置の SMART を開発中である（図 7）。また、SMART は輸送時の飼育装置と軌道上での飼育装置を一体化させ、省力化を推進する設計となっており、従来必要であった軌道上でのマウス移し替え作業が不要である。

摂餌量/摂水量のリアルタイムモニタといった基本飼育機能の強化に加え、体温・心拍などのバイタルサインをテレメトリで取得可能となっており、新たなサイエンスが期待される。

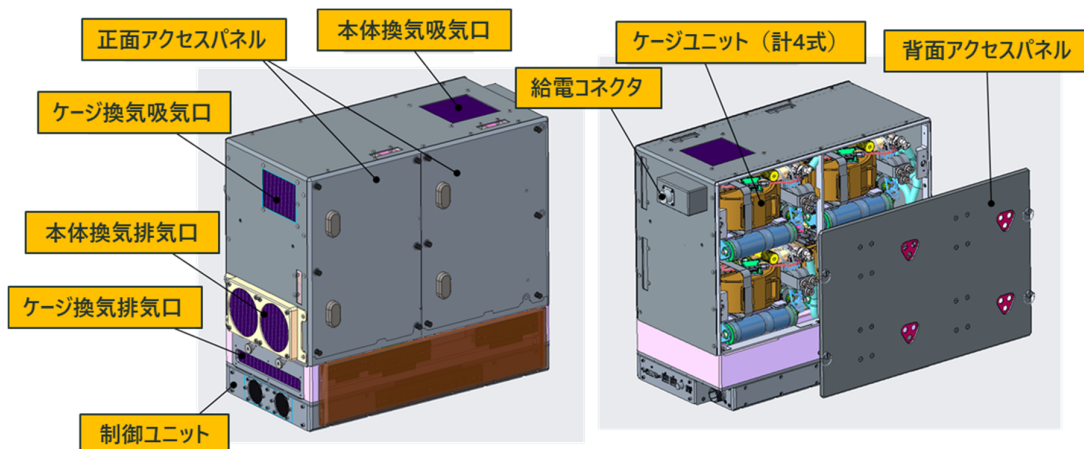


図 7 省力型飼育装置 (SMART) 本体の外観図

(3) PF 運営上の課題識別とその対応について

PF 運営上の課題識別サイクル

宇宙ミッションを実施済みの MHU-1～MHU-9 において、JAXA 内の審査会を通じて各ミッションで得られた教訓(Lessons & Learned)を体系的に整理し、後続ミッションへの反映を行ってきた。これにより、Plan(計画)、Do(実行)、Check(評価)、Action(改善)の 4 つの段階(PDCA サイクル)の循環を確立し、継続的な改善と効率的なミッション運営が可能となっている。

また、低軌道商業ステーションへの段階的な移行を見据え、JAXA がインテグレートしていた体制から一部民間事業者への技術移管を進めている。PF 運営に関わる実験試料や軌道上で使用する物品の準備・輸送、射場作業、サンプルの回収など、ノウハウに関わる部分についても各種手順書に反映し、民間事業者がインテグレート可能な体制・手順の構築を進めている。

事業面の課題と対応策

事業面における大きな課題の一つは、TCU/HCU や CBEF-ALT を使用したミッション形態では、1 ミッション当たりの定常経費、クルータイム、物品打上コスト(アップマス)といったリソース面で負担が大きく、JAXA の配分リソースでは長期的に MHU ミッションを維持することは非常に困難である点だ。特にクルータイムについては、これまでの MHU ミッションにおいて総計 50～100 時間相当、インクリメント期間(ISS 運用期間の単位で通常、約半年間)の 1/3～1/2 に相当する時間が割り当てられている。

初期ミッションからクルータイムの削減は継続的に検討されてきたが、既存の軌道上飼育装置では週 1 回のクルーによるメンテナンスを前提に設計されており、最低限の飼育タスク及び機器チェックアウト(基本的な飼育に必要なクルータスク)だけでも 1 ミッションあたり約 50 時間程度のクルータイムが必要となる。

この課題に対する対応として、第 8 回ミッションでは NASA との共同ミッションを推進し、JAXA 以外からクルータイムを調達するなどの工夫を行った。さらに、クルータイムの削減、アップマスの低減、運用効率の向上(必要な作業へのクルータイムの最適配分)、そして将来的な低軌道利用への円滑な移行を目指し、新たな省力型小動物飼育装置(SMART)の開発を進めている。

また、MHU-1～MHU-5 の生存帰還のミッション形態において、有償利用案件の拡大が推し進められる状況下において、民間による MHU ミッションのサービス利用のハードルを高くしていると考えられた。サイエンスへの影響に関わる視点においても、生存帰還後、試料処置(サンプリング)を実施する研究施設まで輸送するのにある程度の時間を要するため、帰還後の重力影響による状態変化への懸念があった。この課題を解決する対応としては、MHU-6 では JAXA として初めて軌道上計画安楽死及びサンプルの凍結回収を遂行した。これにより、1 ミッションあたりのリソース負担を軽減することができるミッション形態を確立できたばかりではなく、サイエンス面でも微小重力環境で生じた変化を維持し、生存帰還後の解剖等のサンプル取得までのタイムラグの間に起きる地上再適応の影響を解決することができるようになった。さらに、凍結回収により、打上げ機の係留期間や、その回収時期に依存することのない運用が可能となった。つまり、生存帰還の際には要件だった同一機で打上げ/回収をする必要がなくなった点は MHU ミッションの運用面において大きな利点である。このようなミッション形態でより柔軟なミッション計画や運用が可能になり、サイエンス面においても、対応できる実験系の幅が広がった。

SMART の導入と今後の展望

SMART は、輸送時の飼育装置と軌道上での飼育装置を一体化させ、省力化を推進する設計と

なっている。これにより、従来必要であったマウスの移し替え作業が不要となり、打上リソースを削減できるためクルータスクを最小限に抑えたマウスミッションの実現が可能となる。SMART の設計は、ISS 運用終了後の民間事業者による低軌道商業宇宙ステーションの構築を目指す CLD に限らず、将来的には民間のフリーフライヤなどへの適用も視野に入れている(図 8)。なお、過去ミッションで取得したデータとの比較が可能となるように、SMART は既存の飼育装置(HCU)と同等の飼育が行えるように設計されている。また、現在の SMART の設計は、ISS での MHU ミッションの実施を想定して設計されているため、ポスト ISS においては CLD のインターフェースに合わせた改修対応が必要である。今後の課題としては、ユーザインテグレーション契約の取りまとめ企業が SMART を用いたミッション推進のリードを担うために、ロケット打上げコストの低減が見込まれる中で、SMART のリカリングコスト(再利用・量産時のコスト)の最適化、事業展開活動、広報活動などを含む連携の構築が重要となる。

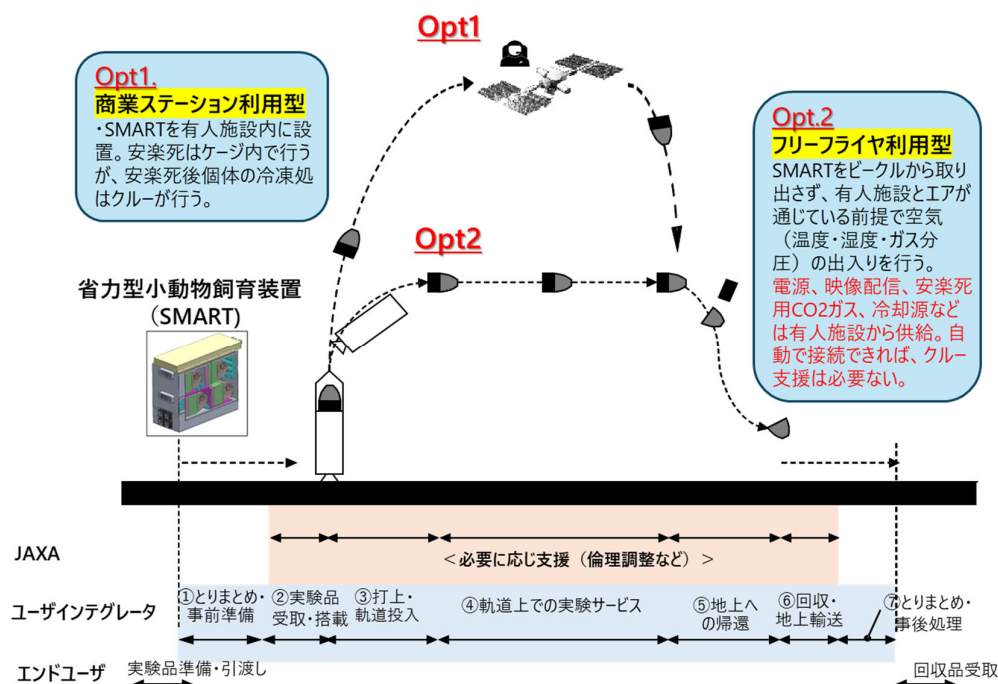


図 8 省力化 SMART 導入ミッションの将来ビジョン

新たなミッション運営に向けた課題

2025 年 3 月に NASA の Rodent Research プログラム(マウスなどのげっ歯類をモデル生物とした NASA の生物科学研究プログラム)の中止が報じられたことに加え、同年 5 月 2 日付で米国ホワイトハウスが発表した 2026 年度(2025 年 10 月～2026 年 9 月)予算案における NASA 予算の大幅削減により、JAXA の MHU ミッションにも多大な影響が及んでいる。この予算案により、それまで JAXA が MHU ミッションで支援を受けていた NASA の実験動物施設(Animal Care Facility)が完全に閉鎖されたため、それ以降、MHU ミッションにおいては従来の NASA リソース(おもに軌道上及び射場がある米国での地上作業に関連する人的・物的リソース)に依存したミッション体制から、JAXA リソースでの自立的な宇宙ミッションの実現に向けた調査・検討・調整への取組が急務となっており対応を進めている。これらの対応は、今後の PF 利用の継続性と発展性を確保する上で極めて重要である。詳細については「3. 研究開発成果(7)その他」において、今後の PF 利用に向けた課題及び改善点として記載している。

(4) ノウハウの蓄積と継承(サービス提供を含む)

緒言の冒頭で述べたように、人類が地球外でより「安全」に活動できることに加え、有人探査の

「科学」的意義を生み出すには、宇宙ミッションをハード(装置や技術)とソフト(研究)の両面から推進できる「人材」の育成が不可欠である。当初、すべての作業を JAXA が取りまとめ(インテグレート)していた体制からスタートし、その後、一部民間事業者への技術移管を経て、現在では低軌道商業ステーションへの段階的な移行を推進している。そのような取組の結果として JAXA が描く将来ビジョンは、民間事業者による自立したサービス提供が実現し、JAXA はそのサービスを利用する 1 ユーザとなることである。ここでは、MHU ミッションで培ってきた宇宙実験のノウハウの蓄積と継承についてまとめる。

JAXA インテグレートから、民間への技術移管

宇宙ミッションで生物モデルを扱う実験特有の作業条件や制約等を考慮した実験準備や関連作業(地上及び軌道上での作業を含む)について、各作業の手順や要領を技術資料にとりまとめ、ミッション実施毎の教訓(L&L)を加えて継続して改訂している。それらの文書化された技術資料には、軌道上で作業を行う宇宙飛行士への訓練(クルートレーニング)、生体試料(マウス)の準備、射場がある米国への試料輸送、射場近隣施設でのマウスの飼育馴化、打上、軌道上飼育、生存帰還、試料の処置/サンプリング、回収したサンプルの日本への輸送等、一連の作業を包括する。

一方で、実験のサイエンス要求は研究者によって異なるため、宇宙実験特有の制約を加味しつつ、実験要求をそれぞれの関連作業に取り込む必要がある。研究者の要求についても、技術資料(実験要求書)として取りまとめ、それを上位文書として、上述の文書を規定していく。この研究者調整作業も含め、ユーザインテグレーション業務として統合している。宇宙ミッションでは非常に多くの人員がそれぞれ別の作業に関わることから、このような文書ベースで作業条件などを規定することで、ミッション遂行に関する共通認識を図ることができる。このように文書化によってノウハウを蓄積することで、人材の育成をより容易にし、民間事業者への技術移管を進める。

低軌道商業宇宙ステーションへの段階的な移行

将来的に、JAXAが宇宙環境利用サービスの1ユーザとなることを目指して、JAXA主体のインテグレーションから民間事業者が取りまとめる範囲を広げることで、実験全体を取りまとめることのできる企業を育成してきた。その結果、現在ではミッションインテグレーション業務の大部分を民間が主導して実施しており、JAXAが民間からサービスを調達するという目指す姿に近づいている。従って、民間のインテグレーション範囲を更に拡大させ、従来はJAXAが実施していた全体計画の立案も企業が主体的に進める形態とし、JAXAとしては要求するアウトプットの提示に留めるようにする。このようにして民間事業者の裁量及び責任範囲を拡大することで、インテグレーションの効率を高め、MHUミッションの更なる成果の創出を目指すと共に、最終的にはJAXAも1ユーザとしてサービスを利用できる仕組みを目指す。

民間事業者による自立したサービス提供の実現のために

将来的には、国内外のJAXA以外の研究機関等からのサービス受注を目指し、市場開拓に向けた検討、既存PFを活用した利用拡大、きぼう利用プロセスの効率化検討業務を新たに発注する。潜在的な顧客に向けたアピールや提供できるサービスの向上が期待され、新たな顧客獲得に資する取組を継続的に行っていく。将来的には、企業がJAXA以外の顧客を獲得することにより、現状以上のサービスをより少ないリソースで調達できることが期待される。

現在のMHUミッションは、NASAのリソース及びISSきぼうのシステムに依存している部分がある。それらの依存度を低減し、可能な限り自立したPFを構築することが自立したサービス提供にもつながる。今年NASA Rodent Researchプログラムが中止となり、NASAからのサポートが減少したが、これを好機ととらえ、NASA依存度を低減させる。具体的には、これまでMHUミッションでは実績がなかった国内での打上に係る射場設備や打上機搭載に係る作業の整備や、定常的にNASAジョンソン宇宙センターで実施してきた基本的なクルー訓練(マウスの取り扱い等を含む)を国内で実施できるように関連施設や実施手順等の整備に取り組んでいく。また、従来のミッション形態において、輸送

時に使用する打上/回収支援装置(TCU)や軌道上実験時に使用するHCUが依存する遠心飼育装置CBEF-ALTなどはきぼうのシステム非依存的であるため、新規開発中の輸送/飼育一体型のSMART開発を早期に完了させ、ISS退役までにSMARTを使用したミッション形態を定常化することで、民間事業者による商業宇宙ステーションでも利用可能な、より自立したPF運営やサービス提供を目指す(図9)。

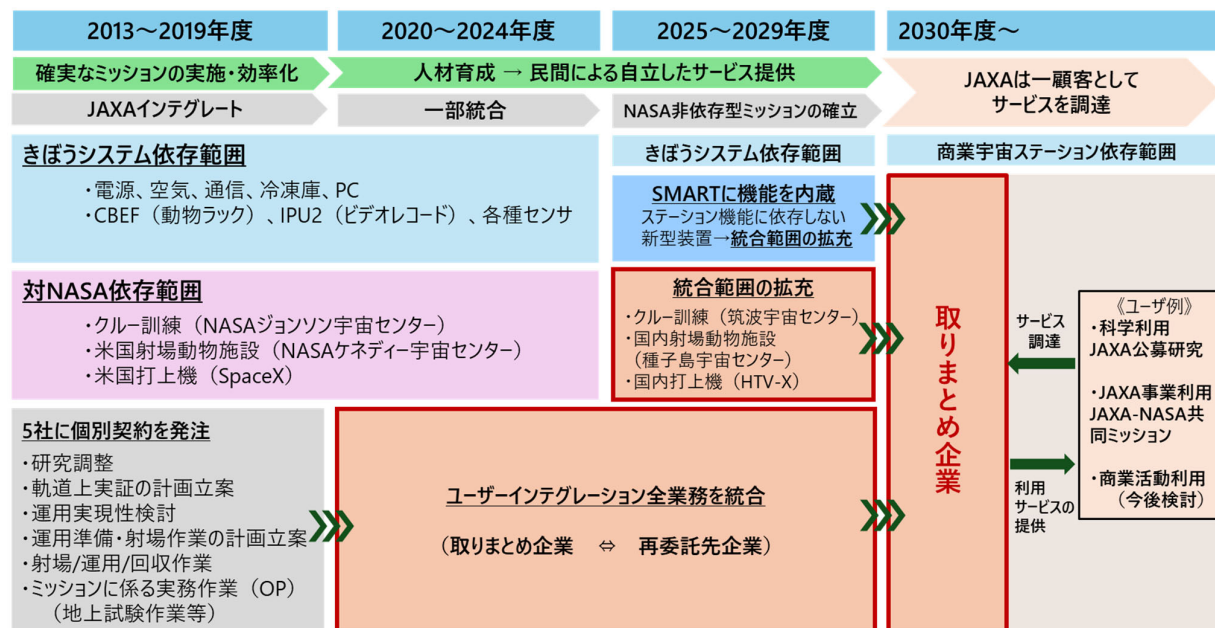


図9 民間事業者による自立した PF 運用やサービス提供

3. 研究開発成果

本 PF の最大の成果は、これまで科学コミュニティが求めてきた日本にはなかった宇宙環境で小動物を飼育する能力(装置や技術)を獲得し、研究環境を研究者に継続的に提供できたことである。以下の7項目において、PF での研究開発及びその成果の詳細をまとめる。

- (1) PF 目標の科学技術的意義及び達成度
- (2) 科学技術的価値を創出する取組
- (3) 研究開発成果を創出する実施体制
- (4) 科学/技術的成果
- (5) 研究開発成果の活用、波及効果
- (6) 今後の利用需要（科学/民間）に繋がる基礎データの蓄積、発展性
- (7) その他

(1) PF 目標の科学技術的意義及び達成度

本 PF の目標は、PF の在り方や現状の目標達成状況、そして PF や宇宙利用全体を取り巻く環境の変化に合わせて定期的に見直され、「きぼう利用戦略」で改訂される。本 PF では、最新版の「きぼう利用戦略(第4版)」に掲げるように、『社会課題解決あるいは知の創造』及び『人類の宇宙(特に、月や火星)への進出』の2つの方向性に資する宇宙ミッションの実施を主軸として、以下の3つの目標を挙げる。

1. LEO における地上への還元を目的とした研究について、従来の公募型研究を継続すると

ともに、研究者の裾野を広げるために、宇宙ミッションにかかる学術データ公開や未解析サンプルの活用を積極的に進める。

2. 人類の宇宙への進出に関しては、世界唯一の小動物用可変人工重力環境を活用した研究や、個別飼育システムの利点を活用した研究など、国際的な有人宇宙探査活動を支える基盤データの蓄積を行う。
3. 本 PF を推進する民間事業者の参入を促進するために、宇宙ミッションの End-to-End 運用を可能とする人材の育成やその支援体制を強化する。それと同時に、利用者側のニーズに応じてタイムリーな宇宙ミッションを実現するためのミッション形態（定型化したミッション等）や有償利用等の枠組みについて検討を進める。潜在的な民間ニーズや可能性を調査し、民間主体の利用コンソーシアム等の構築を目指す。また、クルータイムを大幅に削減可能な新型装置の開発にも優先的に取り組み、民間が本 PF 利用を推進できる環境づくりを行う。

社会課題解決あるいは知の創造への貢献

超高齢社会である我が国の高齢化率（65歳以上人口）は、令和5年10月1日現在において29.1%に達しており、この社会課題に向けた健康長寿への取り組みは我が国にとって重要な施策の一つである。宇宙環境は、骨量減少、筋萎縮、内耳機能（バランス感覚）低下、免疫機能低下など、地上の高齢者や寝たきりの状態に類似した生物影響の加速的な変化を提供できると考えられる。本PFを活用することで、MHUミッションを中心としたJAXAの生命医科学・宇宙医学実験技術などによる個別化予防、先制医療などの次世代医療研究を推進し、地上での健康維持や高齢化社会への対応などの健康長寿社会形成に貢献できることが期待される。

宇宙実験は、地上での実験とは異なる様々な制約のもと実施する必要がある。これらの制約には、実験スペースや実験に使用できる時間（クルータイム）、安全性などが含まれ、研究者が日常的に実施している実験とは大きく異なる。そのため、公募で採択された研究者の「社会課題解決あるいは知の創造」に資するアイデアを損なわないように宇宙実験の制約に合わせてその実現性検討を研究者とともに進めていく必要がある。本PFでは、このような研究者調整を含め、宇宙実験実現に向けたPF実施体制を構築した。宇宙実験の結果を地上の社会課題解決のために還元することを目指し、これまでに本PFでは、18テーマを選定している（表2）。

研究者のアイデアを取り込み、それを具現化することが可能なPF体制構築の達成により、多くの論文成果を生み出している。その一例として、MHU-1では、筋肉を速筋タイプにする転写因子として大Maf群転写因子の同定に成功したので、加齢や病気で低下した筋機能の改善方法開発に期待できる。大Maf群転写因子を創薬のターゲットにすれば、加齢や病気によって変化した筋繊維のタイプを再プログラム化し、筋肉の質を改善させる方法の開発が期待でき、また、将来的には、肉質制御による食肉産業への応用、さらにはアスリート向けなどのトレーニングプログラムの開発にもつながると考えられる。

表 2 健康長寿研究支援 PF の研究テーマ（18 テーマ）

	PF に含まれる個別ミッション	代表研究者 (PI)	ステータス
1	【MHU-1】マウスを用いた宇宙環境応答の網羅的評価	高橋 智 (筑波大学)	科学成果評価済み
2	【MHU-2・クルー対象】宇宙環境における健康管理に向けた免疫・腸内環境の統合評価	大野 博司 (理化学研究所)	科学成果評価済み
3	【MHU-2・クルー対象】きぼうを利用した骨粗鬆症に係わる蛋白質の臨床プロテオーム研究	木村 弥生 (横浜市立大学)	科学成果評価済み

4	【MHU-3】宇宙ストレスにおける環境応答型転写因子 Nrf2 の役割	山本 雅之(東北大学)	科学成果評価済み
5	【MHU-4】重力刺激による脊髄背側血管への血管ゲート形成と分子発現の解析	村上 正晃(北海道大学)	科学成果評価済み
6	【MHU-5】JAXA 小動物飼育ミッション月面低重力環境設定の技術実証	技術実証ミッション: 芝 大(JAXA)	JAXA 内審査済み
7	【MHU-6・ヒト対象】微小重力の環境で老化が加速するメカニズムの研究	黒尾 誠(自治医科大学)	解析中
8	【MHU-7】臓器連関の視点から解き明かす加齢性筋骨格系疾患の発症機構	佐藤 信吾(東京科学大学)	科学成果評価済み
9	【MHU-8】JAXA-NASA 共同低重力ミッション	国際共同ミッション: 日米国際研究チーム(4PI)	解析中
10	【MHU-9】生体防御機能強化による宇宙ストレス克服法の開発	山本 雅之(東北大学)	解析中
11	【ヒト対象】宇宙滞在中の液体生検による血漿中核酸のゲノム・エピゲノム解析 ～cfDNA 等を用いた低侵襲体内モニタリングに向けて～	村谷 匡史(筑波大学)	科学成果評価済み
12	【ヒト対象】宇宙空間で生じる体液分布変化から生体を防御する潜在適応能力の同定	西山 成(香川大学)	実験準備中
13	【ヒト対象】宇宙環境による遺伝子発現制御変動の1細胞解析	秋山 泰身(理化学研究所)	実験準備中
14	【MHU】遠隔操作による安定的な人工冬眠を動物に実現するための宇宙デバイスの研究開発	櫻井 武(筑波大学)	フィジビリティスタディ実施中
15	【MHU-10】宇宙での微小重力環境におけるガンの進行	高橋 昭久(群馬大学)	実験準備中
16	【フラグシップミッション】【MHU】宇宙マウス研究から健康長寿社会の実現に向けて	山本 雅之(東北大学)	フィジビリティスタディ実施中
17	【フラグシップミッション】【ヒト対象】宇宙飛行士デジタルツイン:iPS 細胞と人工知能の応用による宇宙個別化医療の展開	村谷 匡史(筑波大学)	フィジビリティスタディ実施中
18	【フラグシップミッション】【MHU】宇宙環境で作る生殖細胞の継世代影響の解明	小林 俊寛(東京大学)	フィジビリティスタディ実施中

人類の宇宙進出における日本のプレゼンス

MHU ミッションの宇宙実験の結果は、地上への成果還元とともに、人類の宇宙進出のための基礎データとしても有用である。月・火星を目指す国際宇宙探査においては、有人活動を可能にする生命医科学的成果を提供できる研究を推進し、基盤データを蓄積することで、国際協力を強化し我が国の科学技術分野におけるプレゼンスを示すことへの貢献を目指す。

哺乳類に対する人工重力環境を発生させる世界唯一のターンテーブルを用い、MHU-1 では人工重力環境 1G を用いた長期飼育を実施し、地上 1G での飼育群とおおむね同程度の状態で維持で

きる機能であった。この成果により、軌道上 uG と地上 1G とを直接比較できることが証明され、重力が動物の身体そのものの形作りを決定づけることを明らかにした。この MHU-1 では、ISS における貴重な宇宙実験機会をより効率的、効果的に活用し、その成果を最大化するための日米協力の枠組みである「日米オープン・プラットフォーム・パートナーシップ・プログラム(JP-US OP3)」のもと、組織サンプルの日米共同解析を実施し、微小重力群マウスで検出された網膜組織障害が人工重力負荷の環境では軽減されることを示し、国際協力強化にもつながった。

MHU-1 に続き、MHU-4、5 では、世界で初めて重力が地球のおよそ 1/6 である月の重力環境をきぼうで模擬し、マウスの長期間飼育と全数生存帰還に成功した。重力負荷によって制御されているマウス骨格筋の恒常性が、質的と量的にそれぞれ別の重力閾値によって制御されていること、そして月面重力の負荷は微小重力環境の影響による組織形態変化及び遺伝子発現変化を部分的に軽減することなどを示す世界初の成果を得た。

2023 年に ISS きぼう日本実験棟において JAXA-NASA 共同低重力ミッションとして実施した MHU-8)では、4 つの異なる重力環境でのマウスの長期飼育を行った。ISS においてきぼうのみが有する小動物人工重力研究環境を最大限に活用した世界初の結果であり、JAXA が本ミッションに先駆けて実施した上述の 1/6G の成果に加え、人類の宇宙進出における新たな知見の獲得が期待される。現在、日米 4 つの研究チームにて詳しいサンプル解析が行われている。

今後の有人宇宙探査活動に向けた知見獲得における JAXA の生命医科学研究への取組としては、宇宙での人工冬眠技術にかかる研究テーマや、宇宙滞在時のストレスに対抗するためにストレス耐性の制御遺伝子に着目したストレス応答を研究するテーマや、宇宙環境が生殖細胞発生に及ぼす影響を解析するテーマ等が国内公募で選定され、現在、宇宙ミッション実施のための準備が進められている。

ISS 国際パートナーの米国において、国家的な科学技術問題等に対して提言を行う独立非営利組織である米国ナショナルアカデミーがNASAの生命医科学研究に推奨される研究の方向性や宇宙利用の在り方を報告書(Decadal Survey on Biological and Physical Sciences Research in Space 2023-2032)にまとめている。その中で示されているNASA生命医科学分野に対する提言には、前述の JAXA の今後の研究領域と関連性を示すものが多く含まれている。宇宙環境利用を通じた国際協力の枠組みの中で、有人活動領域拡大の科学基盤の構築・強化のために、ミッションの共同実施等の国際連携を積極的に推進する。同時に、JAXA独自の個別飼育実験装置や世界唯一の小動物用可変人工重力環境(月面や火星の重力を模擬した環境)を活用した研究は、MHU ミッションの強みであり、これらの特色を活かした科学成果の創出を目指していく。

(2) 科学技術的価値を創出する取組

宇宙での実験については小動物ミッションに限らず、その打上機会や予算等を含め、貴重な機会となるため、MHU-1 において確実に成果が得られるように従前に準備する必要がある。そのため、初回ミッションの実施前に、地上においてロケットの打上げ及び実験試料の回収時、並びに ISS 内での短腕遠心機付き実験装置の CBEF-ALT での飼育環境を想定し、温湿度、振動・衝撃、騒音などの環境条件が装置に与える影響を整理した上で、各条件に対する試験をミッション実施前に実施した。また、飼育装置においては、地上で一般的に使用されているケージの仕様とは異なり、宇宙環境を考慮した設計が求められた。例えば、床面構造、給水・給餌方式、並びに地上では不要な換気や排泄物回収のための風速設定など、宇宙特有の要件に対応する必要があった。これらの仕様についても、すべて地上試験により検証を行い、装置の信頼性及び安全性を確認した[36]。これらの打上・軌道上環境への適合性、新規開発装置に対する適合性の確認試験(以下、適合性試験と

する)に当たっては、適合性試験の計画からJAXA小動物実験装置アドバイザー委員会において議論を行った。また、結果についても継続的に当該委員会にて報告を行い、その信頼性について継続して議論を行った。

なお、適合性試験の実施に当たっては、小動物の飼育が可能で、かつ温度・湿度環境を調節できる人工気象機能を備えた実験室を整備し、飼育環境の再現性を高めた。さらに、短腕遠心機下での重力勾配や回転数の揺らぎ、打上げ時の準静的加速度などの影響については、地上に模擬遠心機を整備し、実環境を模した試験を行った[34][38]。この地上遠心機の整備により、重力負荷時の影響を加重側でも確認可能となり、予備実験の一環として得られた試験結果は論文化にもつながった[35][37][39]。なお、この短腕遠心機の取組は、委託研究へと発展し、重力影響の評価を体系的に解析するための基盤となった[40]。さらにこの地上試験の実施に合わせ、軌道上から帰ってきたマウスの解析手法について検討する機会を設けた。生存帰還の場合は解剖フローの検討、また実験試料を凍結回収する場合は凍結試料の解析検討等を宇宙実験の実施後ではなく実施前に確実に解析できる体制を整えている。

また、クルー対象研究においても、軌道上採血後に地上へ血液サンプルを戻すための治具開発を行い、JAXA 独自のクルー血液解析を可能とする準備を進めている[46]。

(3) 研究開発成果を創出する実施体制

研究開発成果を創出する実施体制を維持管理するために、フェーズごとに、JAXA 内外の有識者から編成される委員会(JAXA 小動物実験装置アドバイザー委員会、きぼう小動物利用研究アドバイザー委員会、JAXA 動物実験委員会、遺伝子組換え委員会)の評価体制を経て、実施計画の制定・評価を行ってきている。また、実施計画・実施結果の評価を将来の技術開発や PF の発展性方針の検討に反映すると共に、定期的に実施するきぼう利用テーマ募集やミッション実施の優先順位の検討に取込み、社会のニーズとの接点・親和性のあるサステナブルな舵取りが可能な実施体制としている(図 10)。

開発支援体制の構築

小動物飼育装置の開発については、提案依頼書(RFP)の募集により三菱重工株式会社(MHI)が落札をした。一方で、JAXA 及び MHI とともに小動物の飼育・実験を行った経験はゼロに等しく、生命医科学の実験経験者を含めた開発体制の構築を行った。開発においては、前述の通り、JAXA 小動物実験装置アドバイザー委員会を設置し、外部から適合性試験計画・結果等のコメントをいただくとともに、JAXA動物実験委員会においても開発仕様書の策定などにあたり、国内外の倫理規範等の観点からアドバイスをいただいた。また、適合性試験の実施においては、MHI/JAXAともに小動物の実験室の確保・構築、作業実施者の確保、作業手順及び教育訓練の整備等を一から実施した。また宇宙での作業手順の確立にあたっては、きぼう運用経験者でかつ動物実験の経験者を複数確保し、動物実験の運用実現性(フィジビリティ)の観点及び宇宙の特殊環境で作業するための安全性の観点から検討できる体制を構築した。

ミッション運用体制の構築

宇宙実験の実現には、前述の通り、ユーザ(提案者)からの科学的要求を宇宙環境の制約に照らして調整する作業、地上での予備試験や適合性試験の実施、試験結果の文書化と軌道上運用手順への反映、軌道上での実際の運用、帰還後のサンプル解析支援など、異なる専門性を要する多岐にわたる作業が含まれる。

PF の初期段階では、これらの専門的な人材を確保し、継続的な体制構築を可能とする教育・訓

練体制の整備を進め、JAXA がミッション全体を取りまとめている。また、軌道上での運用においては、動物倫理の観点から、健康観察の実施と異常時の迅速な対応が求められるため、これを踏まえ、NASA と調整の上で不具合時に最優先で対応可能なフライトルールを設定し、獣医師を含む小動物の観察体制を構築している。軌道上ミッション運用時には、JAXA 獣医師をはじめとする複数の獣医師の参画を得て、ミッション期間中はほぼ毎日、マウスの健康観察を実施している。

その後、きぼう利用により利用技術が成熟してきたことや、LEO の民間利用拡大が拡大しつつある背景、限られた JAXA リソースで国際宇宙探査と LEO 利用を両立するために、今後は民間事業者を主体としたインテグレートで MHU ミッションを実施できるよう、ミッション全体の実施体制の検討を進めてきた。1つの企業が複数の専門性を有していることは期待できず、複数の企業の支援が宇宙ミッションを実施するためには必須である。ユーザーがワンストップで宇宙ミッションのサービスを受けるためには、これらの企業をまとめる企業を置き、再委託先企業として専門性を有する企業を含めることが望ましい。MHU ミッションでは、MHU-6(2021 年 4 月打ち上げ及び軌道上実験を実施)から民間インテグレートで業務を実施できるよう体制変更を行った。ユーザインテグレーション全業務について取りまとめ企業の公募を行い、三菱重工業株式会社が取りまとめ企業として選定されてきた。さらに、民間事業者主体による推進体制についても、前述の通り準備を進めており、体制移管に向けた検討と実施を段階的に進めている。

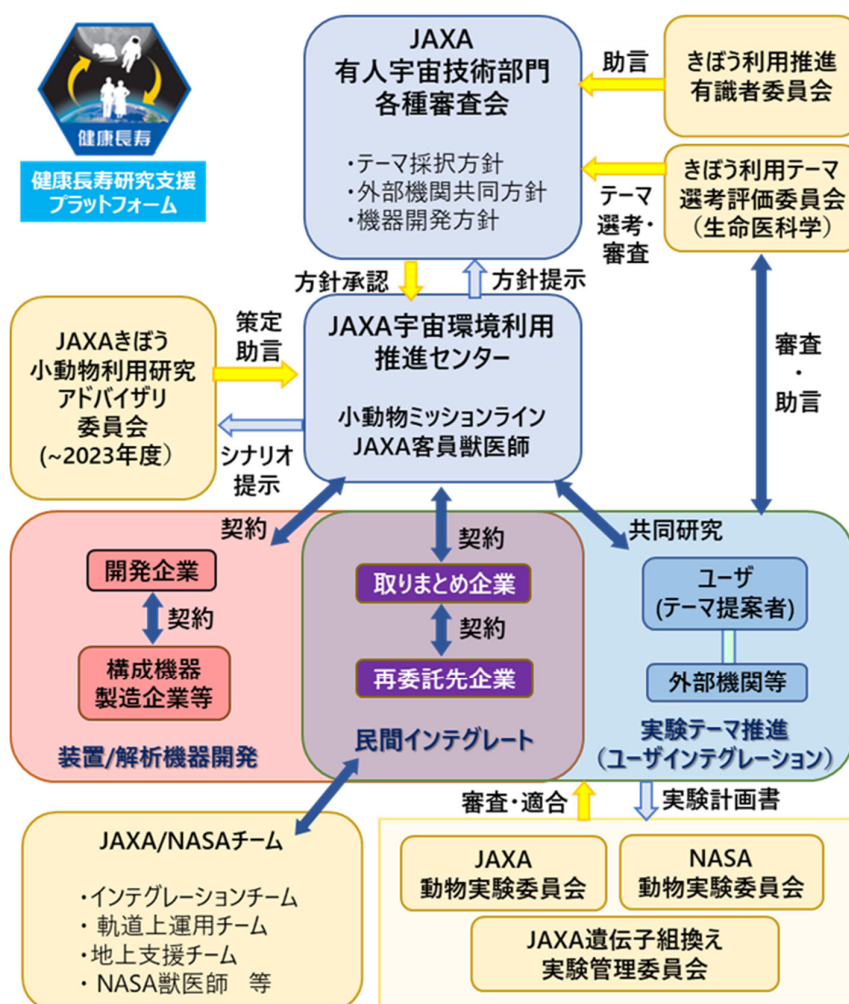


図 10 MHU ミッション推進における実施体制(2025 年現在)

そのほか、米国でのマウス調達、日本からの輸送、米国射場での馴化作業、ロケットへの搭載準備など、NASA の協力のもとでミッションを推進してきた。ミッション初期から、NASA との連携体制の構築を重視し、継続的な協力関係を築いている。

2025 年 6 月現在、本 PF の 18 テーマ(国内公募 16 件、技術実証 1 件、国際共同ミッション 1 件)のうち 11 テーマが宇宙実験を完了している。これらの研究成果をまとめた学術論文は、MHU ミッションと医学ミッションを合わせた PF 全体で、軌道上ミッションの解析結果について 37 報、地上予備実験では 9 報、合計 46 報が発表されている。この集計には、サンプルシェアにおける 7 報が含まれる。モデル生物であるマウスそのものの研究結果(図 11)と、地上のヒト研究やクルー対象研究の結果を比較解析することで、よりインパクトの高い科学成果として学術論文を発表できるよう取り組んだ。本 PF の科学的成果の詳細については、本報告書に添付の成果リスト及び JAXA 有人宇宙技術部門ウェブページを参照(https://humans-in-space.jaxa.jp/kibouser/subject/tag_10.html)。

外部評価委員会による科学成果評価結果

宇宙実験実施済みの 11 テーマのうち うち 7 テーマについて実験実施後(24 か月後)の評価を完了し、ISS・きぼう利用ミッション科学成果評価結果が公開されている(表 3)。この評価結果は、生命医科学分野のきぼう利用テーマ選考評価委員会による審査(書類審査、面接審査)を経て、最終的に 4 段階の総合評価指標及び提言として取りまとめられたものである。以下に評価指標を示す。これまで成果評価を受けた7件はすべて A 以上の評価を受けた(S 評価 2 件、A 評価 5 件)。

S: 目標を高度に達成し、特筆すべき成果を上げた(エクストラサクセス相当)。

A: 目標を十分に達成した(フルサクセス相当)。

B: 目標を一部達成した(ミニマムサクセス相当)。

C: 成果として不足・不十分であり、目標を達成していない。

科学成果評価の詳細及び研究内容や成果については、JAXA 有人宇宙技術部門ウェブページを参照。

(<https://humans-in-space.jaxa.jp/kibouser/information/result/>)

表 3 科学成果評価の結果(7 テーマ)

	研究テーマ・ 代表研究者	評価
1	【MHU-1】 マウスを用いた宇宙環境応答の網羅的評価(Mouse Epigenetics) 代表研究者: 高橋 智(筑波大学)	2018年度きぼう利用テーマ・船内科学研究に係る科学成果評価 総合評価 S
	【講評】 個体レベルでの宇宙環境応答に対し、マウスを用いて、多くの組織・臓器について、分子・細胞・組織レベルで詳細な解析・網羅的な評価を行い、遺伝子発現変化及びエピゲノム変化を明らかにした。重力環境変化による遺伝子発現変化・修飾が次世代に引き継がれることが示されるなど、インパクトのある成果を挙げた。宇宙での妊娠、出産、成長に関する基盤を与える、将来の有人宇宙探査技術として重要な成果であると共に、基礎的な医科学領域への波及効果も期待される。 併せて、残った臓器の一層の活用、また、継世代マウスの作成など、意義高い提案も行われており、是非、実現に向けて継続して欲しい。 また、多くの研究者による対象臓器毎の解析の分担や優れた学術誌への計画的な論文報告が行われたことは、適切な研究マネジメントによるものでもあった。一方、世界で初めて、宇宙空間で可変の人工重力負荷が可能なマウス飼育装置を開発し、有効性を実証したことも、高く評価される。 学術論文 [1] [2] [3] [5] [7] [11] [12] [13][15][20] [21] [22] [23]	
2	【MHU-2・ヒト対象】 宇宙環境における健康管理に向けた免疫・腸内環境の統合評価 代表研究者: 大野 博司(理化学研究所)	2022年度きぼう利用テーマ・船内科学研究に係る科学成果評価 総合評価 A
	【講評】 本研究は、宇宙環境に起因する腸内細菌叢の変動と免疫との関係性を評価することを目標として、マウス及びヒトを対象とした実験を計画したものである。宇宙環境における免疫・腸内環境をMulti-Omics解析により総合的に評価できることを示し、微小重力下におけるマウス糞便中のバイオマーカーとなり得る候補を見出すなど、大変興味深い知見を得た。これらの優れた成果は、軌道上でのヒトの健康維持のみならず、近年重要性を増す腸内環境研究にも寄与することも期待される。 一方で、これらの貴重な実験データに基づく優れた成果の多くが、現時点で論文公表に至っていないため、これらの研究成果を早急に論文化することを期待する。 学術論文 [5] [6]	
3	【MHU-2・ヒト対象】 きぼうを利用した骨粗鬆症に係わる蛋白質の臨床プロテオーム研究(Medical Proteomics) 代表研究者: 木村弥生(横浜市立大学)	2023年度きぼう利用テーマ・船内科学研究に係る科学成果評価 総合評価 A

	【講評】本研究は、タンパク質の発現を網羅的に解析するプロテオーム法を用いて、宇宙環境に起因する血液、骨、骨格筋の発現変動タンパク質を明らかにするとともに、宇宙環境に起因する骨量減少と地上における骨粗鬆症との関連性を明らかにすることを目標として、マウス及びヒトを対象とした実験を計画したものである。その結果、宇宙滞在したマウス及びヒトの試料から骨量減少関連タンパク質を検出・同定し、宇宙と地上での骨量減少の解析結果の異同を検討し、関連性を示した。しかし、その中には既に骨代謝に関連するものが含まれているので、その他のタンパク質の解析も期待する。 また、骨量減少・骨粗鬆症診断のための客観的指標としての臨床的有用性や骨量減少メカニズムに関連するタンパク質等を明らかにした。さらに、本成果の一部を知財化（特許出願）し、企業と共同研究に取り組むなど、大変多くの成果を上げた。 一方で、SPARC1の機能解明を含めた分子メカニズム解析などへの取組みや、解析成果のデータベースへの登録などについて今後に期待したい。	
	学術論文 [9] [16] [43] [45] [25] [26] [27]	
4	【MHU-3】宇宙ストレスにおける環境応答型転写因子Nrf2の役割（Mouse Stress Defense） 代表研究者：山本雅之（東北大学）	2021年度きぼう利用テーマ・船内科学研究に係る科学成果評価 総合評価 S
	【講評】本研究では、世界で初めて遺伝子ノックアウトマウスを用いて宇宙実験を行った。形態学的解析、トランスクリプトーム解析、メタボローム解析などを駆使して、宇宙ストレス環境下でNrf2転写因子が活性化され、Nrf2シグナルが宇宙ストレスに関与することを示した。Nrf2の宇宙における作用を種々の臓器、組織で詳細に解析し、特筆すべき成果を上げたものと評価する。東北メディカル・メガバンク機構の有する膨大なヒト遺伝子データベースを活用した研究体制を確立したこと、及び、JAXAと連携して本ミッションの成果を基盤とした宇宙生命医科学複合バイオバンク(Integrated Biobank for Space Life Science; ibSLS)を構築したことも評価できる。	
	学術論文 [8] [10] [13] [14] [18] [19] [24] [29]	
5	【MHU-4】重力刺激による脊髄背側血管への血管ゲート形成と分子発現の解析（Gravity gateway reflex） 代表研究者：村上正晃（北海道大学）	2022年度きぼう利用テーマ・船内科学研究に係る科学成果評価 総合評価 A
	【講評】本研究の目的は、重力刺激による脊髄背側血管への血管ゲート形成と分子発現を解析することである。ISSにおける微小重力下でのマウスの長期飼育という、他に得られない環境を活用し、また、JAXAとの連携の下、周到に準備された実験計画により、重力刺激の喪失で血管ゲート形成が観られないことを実証し、世界をリードする成果を得たと評価する。骨、筋肉における変化の分子メカニズムの解明、さらに、多発性硬化症等の免疫システムが関与している疾患の治療法や予防法の開発を含め、今後の研究の深化、進展に期待する。 一方、本研究により得られた主要な成果が未公表であり、分野コミュニティの評価を得るためにも、早期に論文として纏め、公表を行うことを強く推奨する。	
	学術論文（未公表）	
6	【MHU-7】臓器連関の視点から解き明かす加齢性筋骨格系疾患の発症機構 代表研究者：佐藤 信吾（東京科学大学）	2024年度きぼう利用テーマ・船内科学研究に係る科学成果評価結果 総合評価 A
	【講評】本研究の目的は、微小重力環境が、筋肉・骨組織での感覚神経・血管系に与える影響を、組織の構造・機能的及び遺伝子学的な手法を用いて解析すること、及び重力環境の変化によって変動する血中miRNAに着目した加齢性疾患の発症メカニズムの解明である。実験制約下において軌道上固定サンプルでの筋骨格系の神経及び血管の可視化に成功し、微小重力飼育下での神経の量的変化が骨量低下に関与する可能性を示したことは高く評価する。臓器連関の視点では、重力環境の変化によって変動する血中miRNAを同定し、筋骨格系組織への影響を評価した。今後これらのmiRNAの由来臓器が見いだされることを期待したい。 なお、軌道上の変化と加齢現象及び加齢性疾患の関連性については、さらに慎重に考察していただきたい。 一方、本研究により得られた主要な成果が未公表であり、分野コミュニティの評価を得るためにも、早期に論文として纏め、公表を行うことを強く推奨する。	
	学術論文（未公表）	

7	【ヒト対象】 宇宙滞在中の液体生検による血漿中核酸のゲノム・エピゲノム解析 ～cfDNA等を用いた低侵襲体内モニタリングに向けて～ 代表研究者：村谷 匡史(筑波大学)	2022年度きぼう利用テーマ・船内科学研究に係る科学成果評価 総合評価 A
	【講評】 本研究は、宇宙飛行士の飛行前・中・後の細胞外DNA、RNA及び、細胞外小胞の詳細な解析を行い、宇宙環境の人体組織への影響を調査したものであり、宇宙滞在が、様々な臓器、組織に影響を与えている可能性を提示するなど、重要な成果を得た。また、リキッドバイオプシーを用いた解析手法を確立したことは、月面長期滞在など、国際有人宇宙探査計画の具体化が進む中、必須となる宇宙医学の発展に向けて、大きなインパクトのある成果であると評価する。 一方、本研究による成果の多くが未公表であり、提示されている出版計画に従い、早期の公表を目指して、論文纏めに注力して欲しい。その評価を基盤として、地上生命の重力への応答に関わる新規課題の提案を期待する。地上における老化メカニズムに対する新たな知見の蓄積にも期待する。	
	学術論文 [41] [42] [44]	

MHU サンプルシェア：宇宙ミッションから派生したきぼう利用の成果

MHU ミッションから派生した利用拡大・成果の最大化の取組である未解析組織を活用したサンプルシェアでは、2024 年度までに、この「MHU サンプル活用の優先順位」に基づくテーマ選定を通して、宇宙ミッションを実施済みの 5 ミッション(第 1 回～5 回 MHU ミッション)から、計 52 の研究テーマを選定し、134 組織の提供を完了した。特に、2018 年度から開始した「きぼう」利用マウスサンプルシェアテーマ募集(国内公募)においては、2022 年度までに提案テーマ募集を 4 回実施し、選定した 38 テーマに対して、93 組織を提供した(表 4)。

表 4 マウスサンプルシェア国内公募の実施状況

年度	応募テーマ数	選定テーマ数	提供組織数	対象ミッション
2018	7	6	8	MHU-1
2019	9	9	18	MHU-1、MHU-2
2020	10	8	19	MHU-1、MHU-2、MHU-3
2022	22	15	48	MHU-4、MHU-5
合計	48	38	93	

全サンプルシェアからの成果創出としては、これまでに成果論文 7 報、学会等での受賞 3 件の報告を受けている。MHU サンプルシェアの詳細については、以下の JAXA 有人宇宙技術部門ウェブページを参照。(https://humans-in-space.jaxa.jp/kibouser/subject/life/73390.html)

MHU サンプルシェアは、今後の宇宙関連研究者の育成にも貢献できると考えられ、継続実施する予定である。

その他の成果

学術論文以外に、各種受賞 6 件や工業取得権(特許)2 件等の JAXA の成果詳細については、本報告書添付の成果リストを参照。また、JAXA 発信情報(プレスリリース等)や取材報道等のパブリシティについても、本 PF からの情報発信・提供の記録として成果リストに記載する。

(5) 研究開発成果の活用、波及効果

健康寿命延伸にかかる民間の取組として、宇宙実験(MHU-1)での研究成果を活用した筋力を維持回復する新薬の共同開発を東レと筑波大学で開始するなど、宇宙実験成果を活用した地上での取組が始まってきている。

また、宇宙実験の成果(遺伝子発現変化等の実験生データ)は、宇宙ミッションとして競合する NASA はウェブ上で公開し、外部の研究者が利用できるように整備している(NASA Life Sciences Portal、<https://nslsp.nasa.gov/explore/page/home>)。これらのデータを外部研究者が二次活用し再解析する学術成果も生み出されてきている。JAXA ミッションも後述する宇宙生命医科学統合バイオバンク(ibSLS: Integrated Biobank for Space Life Science)として公開しており、今後これらデータを活用した研究が発展することが期待される。

(6) 今後の利用需要(科学/民間)に繋がる基礎データの蓄積、発展性

将来的な科学研究ニーズにおいては、最近行われた『社会課題解決あるいは知の創造に貢献する研究』および『人類の宇宙(特に、月や火星)への進出に貢献する研究』を対象としたフラグシップテーマ公募(2023 年)が参考となる。この募集では、全体の研究応募数のうち、約 6 割をマウス及びヒト対象研究が占めていた。なお、全体の研究応募数 43 件のうち採択されたのは 5 件であった(採択率は 11.6%)。今後ポスト ISS にフェーズにおいても、マウスやヒトを対象とする研究ニーズが期待される。

MHU ミッションの科学成果は、これまでフライト実験の成果として 33 報の論文として発表している。また、後述のデータバンク ibSLS からのデータ公開とともに、PF の基盤となる科学データは積極的に公開し、科学/民間利用の需要の喚起に努めている。科学/民間利用に繋がる特筆すべきミッション成果として 2 テーマを記す。

宇宙実験応用: MHU-1 の成果から民間事業者との共同研究へ

MHU-1 の解析から、加齢や病気によって変化した筋線維のタイプを再プログラム化し、筋肉の質を改善させる方法の開発が期待できる創薬ターゲットの同定に成功した。宇宙実験から新規創薬ターゲットを発見できるというこの成功例は、民間利用への呼び水として重要である。この MHU-1 では、ISS に約 1 ヶ月間滞在したマウスの骨格筋で発現している遺伝子を解析し、大 Maf 群転写因子(Mafa, Mafb, Maf)と呼ばれる3種類の遺伝子の発現が顕著に上昇していることを発見した。これら遺伝子群の働きを詳細に調べるため、骨格筋に発現する大 Maf 群転写因子をすべて欠損させたノックアウトマウスを作製し、このマウスの筋肉は、速筋タイプの中でも最も速筋線維の特性が強い IIb タイプが消失し、IIa と IIx だけで構成されることを見出した。上記とは反対に、大 Maf 群転写因子を筋肉で過剰に発現させると、本来は IIb 線維を持たない筋肉で IIb 線維を作出できることが分かり、大 Maf 群転写因子が筋肉を速筋タイプにすることに重要な役割を果たしていることが明らかになった。

NASA との国際連携: ジョイントミッション(JPG-RR/MHU-8)/ NASA-JAXA Joint Partial-gravity Rodent Research/Mouse Habitat Unit-8 (JPG-RR/MHU-8)

JAXA-NASA共同低重力ミッションとして2023年に実施したMHU-8は、ミッション全体としての飼育に関わるリソース(クルータイム、物品打上/回収コスト)及びNASA軌道上・地上施設使用経費等は100%NASA負担となった。

NASAサイエンスを実施するため、サイエンスの取り分(PI数、

NASA:JAXA=3:1)に応じて、NASAがリソースを提供した。本ミッションにおいて、NASAとの協力がなければ成し得ない大規模なミッションの効率的実施(2ミッション相当を1ミッション以下の経費・リソースで実現)が可能となった。JAXAとしても、これまで蓄積したMHU-1、MHU-4、MHU-5での0, 1/6, 1Gのデータと合わせて、さらに2点以上の低重力環境(Partial-G)の体系的なデータを蓄積する。重力応答閾値の存在等の新たな発見や、今後の探査における有人活動支援に向けた貴重なデータ



となる。今後の有人探査等に向けた当該分野の研究やリスク評価等の国際協働活動において、JAXAが中心的・先導的な立場を確立することを目指す。

また、参画した米国研究者が「JAXA飼育システムを使用し」科学論文を世界に公開する。JAXA飼育システムのサイエンス価値広告につながるとともに、さらなる国際協力ミッションの呼び水となることが期待される。本ジョイントミッションを通じ米国研究者からの要望に応えることで、将来的により遠方でのSMARTミッションの共同実施につながることを期待している。

本ミッションでは、軌道上において、0～1Gの間の4つの異なる重力環境下で同時に4グループのマウスを飼育し、重力影響に関する網羅的な分析を行うための骨・筋・免疫・前庭機能のほか、腸内細菌・サーカディアンリズム・生殖機能を標的としたデータを取得した。1つの宇宙実験で軌道上4群(μG、0.33 G、0.67 G、1 G)、地上対照実験1群の計群による生物の重力応答を体系的に評価できるサンプルの取得に成功した。本ミッションによる基礎データの取得により、JAXAがこれまで蓄積した0G、1/6G、1Gのデータ(MHU-1、MHU-3、MHU-5)とあわせて、本ミッションにより体系的な評価が可能となった。反応閾値の存在などが明らかになれば、世界で初めての知見になるとともに、将来の月・火星探査における有人活動の支援に向けた貴重なデータとなることが期待される。

NASA研究者の3チーム及びJAXA研究者の1チームが解析する組織は、計画通り取得完了・解析が進んでおり、その成果はNASA-JAXA共著として学術論文として発表を計画中である。また、本ミッションでの連携成功により、次のジョイントミッションの調整を含め、さらなる国際協力が期待される。

基礎データの蓄積(ibSLS)

① 基礎データの蓄積にかかる背景と目的

マウスからヒトへの幅広い応用や地上社会への還元を図り、ゲノム医療や創薬研究へ貢献、およびきぼうを利用した健康長寿社会形成への貢献を目指すため、“宇宙と地上をつないだ”オンライン・ストレスデータセットの構築とそのデータシェアリングの仕組みを整備に取り組んだ。それにより、宇宙実験をしたことがない研究者も宇宙実験から取得したデータセットを利用することが可能になった。

JAXAと東北メディカル・メガバンク機構(ToMMo)は、MHU-3として実施した「宇宙ストレスにおける環境応答型転写因子 Nrf2 の役割」において連携協力した実績等があり、きぼうにおける成果と地上の最先端研究を結び付け、健康長寿社会形成へ貢献する基本的な意義を共有していることから、きぼうを利用した健康長寿への貢献を目指した取組に関し戦略的に推進することに合意し、2019年2月8日に連携協定を締結した。これにより、ToMMoは協定に基づき、きぼうにおける小動物飼育ミッションの実施及びサンプルシェア試料の優先的使用を可能となり、さらに宇宙飛行士の血液サンプルの入手、高品質タンパク質結晶生成実験の実施を想定し、きぼう利用PF間の横の広がりが可能となるよう設定とした。

② ヒト・マウス統合データベース ibSLS 構築と公開

本連携による協定締結のもと、JAXAとToMMoは宇宙環境を利用したマウス飼育ミッション等で得られたデータとコホート研究を活用し、MHU ミッションで得られた成果から、宇宙長期滞在によって加齢変化が加速すること、および東北メディカル・メガバンク計画(TMM)コホート研究で得られた血液データとの比較により、宇宙滞在によるマウス血液代謝物変化は、ヒトの加齢と有意な関連を示すことを明らかにした[18]。さらに、本連携において、宇宙と地上の研究をつなげるためのヒト・マウス統合データベースibSLS(宇宙生命医科学統合バイオバンク、Integrated Biobank for Space Life Science)のデータベースを構築し、公開した。これにより、地上研究で蓄積された膨大なヒトデータベースとの統合解析が可能となることで、実施機会が限られる宇宙ミッションの研究精度向上・価値創出が期待され個別化予防、先制医療などの次世代医療の研究を推進すると共に、ヒト疾患への

対策や加齢に関する仕組みの解明を目指している。さらに、この ibSLS にかかる説明を含む宇宙ライフサイエンスミッションの総説を、NASA を含めた国際宇宙機関と共同執筆し、公開した [10]。

公開当初は宇宙滞在マウス組織の遺伝子発現解析データを公開したが、2022 年 5 月には血漿メタボローム解析データも追加し、大幅に機能拡充した。ibSLS では、ToMMo の有する日本人多層オミックス参照パネル (Japanese Multi Omics Reference Panel; jMorp※) における加齢にともなう血液代謝物の変化とこの宇宙滞在マウスのメタボローム解析結果をワンクリックで比較することが可能となった。これにより、ヒト (一般成人) とマウス (宇宙滞在) の比較から、加齢変化にともなう様々な疾患研究の加速になることが期待される。また、宇宙ミッションを実施していない多くの研究者でも、宇宙環境でマウスの生体内の代謝がどのように変化しているのかを容易に解析することが可能となった。

今後も継続的に MHU ミッションの遺伝子発現解析データおよび血漿メタボローム解析データを蓄積し、ミッション間での横断的な研究も可能とすることで、将来の有人宇宙探査に向けた基礎データを蓄積したデータベースを目指す。なお、宇宙飛行士の血液サンプルおよび、高品質タンパク質結晶生成実験については引き続き調整を進めている。

※jMorp では世界最大規模の総計 4.6 万人の血漿の網羅的メタボローム解析情報を取得、公開している。

③ 今後の展望

将来の有人宇宙探査時代に向け、宇宙滞在における健康リスクの克服を目指し、多くの研究者が ibSLS を活用することが期待される。しかしながら、宇宙実験は打上機会、各実験のサンプル数ともに非常に限られており、科学的証明のための実験の繰り返しが困難となっている。各実験の成果から最大限の価値を創出するためには、解析手法が均一で、必要な詳細情報を集約した汎用性の高いデータベースが必要不可欠である。今後は ibSLS の維持に加え、今後も実施する MHU ミッションで得られる成果を用いてデータベースの拡大することでミッション間を統合的に解析する横断研究が可能となる。さらに他のデータベースとの差別化を図り、ユーザ機能拡張を行い、成果の最大化及び研究者のすそ野を広げることを目指す。これらの取組により、本データベースが有人宇宙探査における研究基盤となることを目指す。ibSLS の詳細については、公式ウェブページ (<https://ibsls.megabank.tohoku.ac.jp/>) を参照。

(7) その他

研究開発に関する総合評価・提言

本 PF では、最新版の「きぼう利用戦略 (第 4 版)」に掲げるように、『社会課題解決あるいは知の創造』及び『人類の宇宙 (特に、月や火星) への進出』の 2 つの方向性に資する宇宙ミッションの実施を主軸として、公募で採択された研究者のアイデアを損なわないように、数々ある宇宙実験の制約に合わせてその実現性検討を研究者とともに行っていくことを可能な PF 実施体制を構築した。装置開発の面では、各種地上試験による検証を行い、JAXA 小動物実験装置アドバイザー委員会を設置し、外部から適合性試験計画・結果等のコメントをいただき、装置の信頼性及び安全性を確認した。また、小動物の飼育が可能で、かつ ISS の温度・湿度環境を調節できる人工気象機能を備えた実験室を整備し、地上対照実験のための飼育環境の再現性を高め、PF の科学技術的価値を高めた。さらに、JAXA 動物実験委員会、遺伝子組換え委員会を設置して、法令に従った PF 運営ができる枠組みを構築した。

2025 年 6 月現在の時点、本 PF の 18 テーマのうち 11 テーマが宇宙実験を実施済みである。これらの研究成果をまとめた学術論文は、MHU ミッションと医学ミッションを合わせた PF 全体では、

軌道上ミッションの解析結果について 37 報、地上予備実験では 9 報、合計 46 報が発表されている。この集計には、実施済みの 5 ミッション(第 1 回～5 回 MHU ミッション)から、計 52 の研究テーマを選定し、134 組織の提供を完了しているサンプルシェアの取組みにおける 7 報が含まれる。これまで成果評価を受けた7テーマはすべて A 以上の評価を受けた(S 評価2件、A 評価5件)。

国際協力に関しても本 PF は貢献している。日米協力の枠組みである「日米オープン・プラットフォーム・パートナーシップ・プログラム(JP-US OP3)」のもと、2023 年に ISS のきぼう日本実験棟において実施した JAXA-NASA 共同低重力ミッション(MHU-8)では、4 つの異なる重力環境でのマウスの長期飼育を行い、今後の宇宙探査にも資する、ISS においてきぼうのみが有する小動物人工重力研究環境を最大限に活用した世界初の成果が期待される。

本 PF の利用の裾野拡大のために、ヒト・マウス統合データベース ibSLS 構築と公開を行った。JAXA と連携協定を締結した東北メディカル・メガバンク機構(ToMMo)の最先端研究ときぼうのアセットとの連携により“宇宙と地上をつないだ”オンリーワン・ストレスデータセットの構築とそのデータシェアリングの仕組みを整備することで、マウスからヒトへの幅広い応用や地上社会への還元を図り、産学利用のすその拡大を通じてゲノム医療や創薬研究へ貢献、及びきぼうを利用した健康長寿社会形成への貢献を目指している。

今後の PF 利用に向けての課題・改善すべき点

これまで記述したように、JAXA 独自のハードウェア開発、ユーザインテグレーション作業やその作業体制の構築によって、MHU ミッションはこれまで 9 回の成功を収めている。将来的に、省力化を推進する(SMART の装置開発が完了し、定常運用が可能となれば、ISS きぼうの装置への依存性からも脱却可能となり、MHU ミッションに関わる部分については、JAXA 単独で実施可能となっている一方で、例えば米国からのロケット射場併設の動物飼育施設の利用など、ミッション実施のベースとなる部分については、いまだに NASA の支援が必要である。この事実は、米国の方針によって MHU ミッションの実施可否が左右されることとなり、継続的な PF 利用の課題のひとつと考える。より自立した PF 確立のために、以下に現在識別している NASA からの支援事項を列挙し、それに対する改善案を示す。

射場動物施設の整備・調達

MHU ミッションでは打上前に飼育装置への馴化作業などを実施する必要があり、射場近隣に小動物(マウス)を飼養する設備が必須である。そのため、マウスの清浄度(SPF)を維持しつつ使用できる移設可能な設備を準備している(図 12)。NASA の実験動物施設閉鎖により、ケネディ宇宙センターからの打上のためには近隣の商業ラボ施設のレンタルが必要となる。また、国内射場からの打上のための施設も必要となる。

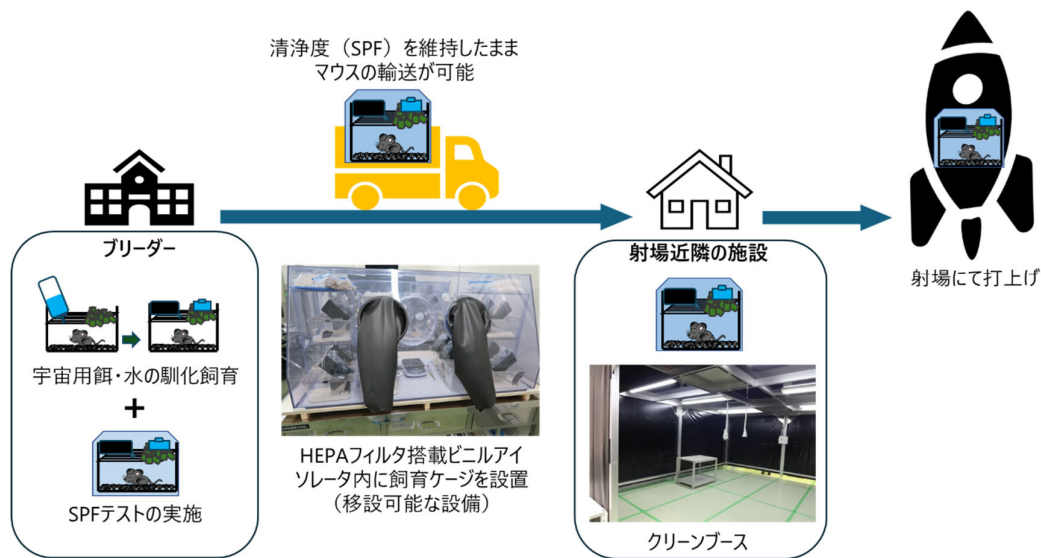


図 12 動物施設を持たない射場からの小動物の打上げに向けた検討

実験で使用する麻酔の調達

前述の生きたままの小動物の遺伝子機能を継続的に観測できるシステム（発光を利用した遺伝子機能解析装置 TELLAS）を用いた観察時やサンプリング時にはマウスへの麻酔が必要である。軌道上での注射麻酔薬はこれまでは打上を実施するケネディ宇宙センターにて NASA によって調達されていた。今後は JAXA が調達できるように国内法との整理を行う。

冷蔵・冷凍品の打上・回収

宇宙実験実施の際に冷蔵・冷凍を必要とする試薬や帰還サンプルは多く存在する。国内打上の場合、現状の設備では冷蔵・冷凍品の打上、回収は困難であることから、冷蔵・冷凍品の打上品は事前号機で、回収は事後号機を使用する必要がある、宇宙実験で使用もしくは研究者による地上での解析までの期間が長期化することが見込まれる。そのために、試薬や帰還サンプル等の冷蔵・冷凍品に対する保管試験など追加試験の実施を検討する。

軌道上サンプリング（クルー訓練）

NASA 実験動物施設の閉鎖は、クルーへのマウスを使った基礎訓練にも影響する。これまで NASA で基礎訓練を完了したクルーに対して MHU ミッションに特異的な作業について日本でクルー訓練を実施してきた。今後は、マウスの取り扱いに関する基礎訓練も含めて日本国内でクルー訓練を実施することを検討する。

4. 結言

本 PF の最大の成果は、これまで科学コミュニティが求めてきた日本にはなかった宇宙環境で小動物を飼育する能力（装置や技術）を獲得し、研究環境を研究者に継続的に提供できたことである。本 PF では、以下の成果が得られた。

<2. PF 運営・推進、(1) 利用拡大に向けた取組状況とその発展について>

本 PF の効果的な利用推進にあたり、その推進方策として第 1 フェーズから第 4 フェーズまで分けし、PF の成熟度に合わせ、外部有識者からなるアドバイザリ委員会を組織し、利用拡大に向けた取組を発展させてきた。

<2. PF 運営・推進、(2) 新たな概念・価値を創出する実験サービス(枠組み、装置等)の提供状況とその発展について>

MHU ミッションでは、軌道上でマウスを健康に飼育することが可能な飼育装置を新規開発し、研究の質を担保するための射場作業、軌道上運用、帰還処理などの一連のサービスを整備した。

<2. PF 運営・推進、(3) PF 運営上の課題識別とその対応について>

事業上の課題であるクルータイム等の低減に向けた SMART の開発や異なるミッション形態の実施等、これまでのミッションにおいて成果だけではなく、LL についても識別し PDCA が回るように対応している。

<2. PF 運営・推進、(4) ノウハウの蓄積と継承(サービス提供を含む)>

宇宙ミッションの定常的な作業手順や実験要求、また各ミッションの教訓を技術資料にまとめておくことで、ノウハウを蓄積することで全体計画の立案も企業が主体的に進められる PF 形態とし、JAXA としては要求するアウトプットの提示に留めるようにして企業の裁量及び責任範囲を拡大することで、インテグレーションの効率を高め、MHU ミッションの更なる成果の創出を目指すと共に、最終的なサービス調達を目指す。

<3. 研究開発成果、(1) PF 目標の科学技術的意義及び達成度>

『社会課題解決あるいは知の創造』及び『人類の宇宙(特に、月や火星)への進出』の2つの方向性に資する宇宙ミッションの実施のため、研究者のアイデアを取り込み、それを具現化することが可能な PF 体制を確立し、これまでにヒト対象の医学ミッション2つを含めて11の宇宙ミッションを実施した。

<3. 研究開発成果、(2) 科学技術的価値を創出する取組>

実験装置及び軌道上実験において想定される環境に対する適合性試験をミッション実施前に実施し、軌道上実験を確実にできるように取り組み、新たな研究成果についても創出することができた。

<3. 研究開発成果、(3) 研究開発成果を創出する実施体制>

JAXA 内外の有識者から編成される委員会(JAXA 小動物実験装置アドバイザー委員会、きぼう小動物利用研究アドバイザー委員会、JAXA 動物実験委員会、遺伝子組換え委員会)の評価体制を経て、実施計画の制定・評価を行っている。

<3. 研究開発成果、(4) 科学/技術的成果>

2025 年 6 月現在、18 テーマのうち 11 テーマが宇宙ミッションを実施済みで、そのうち 7 テーマについて成果評価が完了(S 評価2件、A 評価5件)し、MHU ミッションと医学ミッションを合わせた本 PF 全体では、軌道上ミッションの解析結果について 37 報、地上予備実験では 9 報、合計 46 報を発表した。

<3. 研究開発成果、(5) 研究開発成果の活用、波及効果>

宇宙ミッションでの基礎データをもとに、代表研究者機関と民間事業者との共同研究が開始されるなど、宇宙での成果が地上の研究・開発活動につながる事例が出てきたところである。今後、宇宙成果を地上研究へつなげる活動が活性化されることが期待される。整備している ibSLS データの幅広い研究者の利用も開始され、幅広い研究者が宇宙成果に触れることで、新しい視点での研究提案などポスト ISS に向けた研究領域発展が期待される。

＜3. 研究開発成果、(6) 今後の利用需要(科学/民間)に繋がる基礎データの蓄積、発展性＞

NASA との共同研究の成功は、本 PF が他国の宇宙機関との連携研究の強力なツールとなることを示している。NASA 予算削減を受けた米国の宇宙マウスミッションの中止は、JAXA が世界で唯一のマウス研究の capability を提供できる機関として、この分野の科学研究を支えることが期待されている。

＜3. 研究開発成果、(7) その他((1)～(6)の PF 利用に向けての課題、改善すべき点)＞

MHU ミッション運営に関わる部分について、JAXA 単独で実施可能となっている一方で、ミッション実施のベースとなる部分については、いまだに NASA の支援が必要であり、より自立した PF 活動には、これらの依存度を減らしていく必要がある。

以上

略語集

略語	英語	日本語
CBEF-ALT	Cell Biology Experiment Facility Centrifuge-equipped Biological Experiment Facility-ALT	細胞培養装置 遠心機付き生物実験装置
CBEF-L	Cell Biology Experiment Facility-Left	細胞培養装置追加実験エリア 遠心機付き生物実験装置
CLD	Commercial LEO Destinations	低軌道商業プラットフォーム
HCU	Habitat Cage Unit	軌道上飼育ケージ
ISS	International Space Station	国際宇宙ステーション
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency	国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構
JPG-RR/MHU-8	NASA-JAXA Joint Partial-gravity Rodent Research/Mouse Habitat Unit-8	JAXA-NASA 共同低重力ミッション (第 8 回小動物飼育ミッション)
JP-US OP3	Japan-United States Open Platform Partnership Program	日米オープン・プラットフォーム・パートナーシップ・プログラム
LEO	Low Earth Orbit	地球低軌道
MARS	Multiple Artificial-gravity Research System	可変人工重力環境飼育システム
MHI	Mitsubishi Heavy Industries Ltd.	三菱重工株式会社
MHU	Mouse Habitat Unit	小動物飼育装置
NASA	National Aeronautics and Space Administration	アメリカ航空宇宙局
PF	Platform	プラットフォーム/成熟した技術領域
SMART	SMART: Single-CTB Mouse Automated Rearing Transporter	省力型小動物飼育装置
SPF	Specific Pathogen Free	特定病原微生物を持たない正常な状態
TCU	Transportation Cage Unit	打上/回収支援装置
TELLAS	Tele-Luminescence Analysis System	遺伝子機能発光イメージング解析装置
ToMMo	Tohoku Medical Megabank Organization	東北メディカル・メガバンク機構

添付

参考資料

- ・きぼう利用戦略きぼう利用成果最大化に向けて AGENDA 2030 第 4 版(2024 年 3 月発行)
- ・JDX-2018129_健康長寿研究支援プラットフォームミッションシナリオ
- ・米国ナショナルアカデミーズ報告書(Decadal Survey on Biological and Physical Sciences Research in Space 2023-2032)

成果リスト

1. 学術論文リスト(軌道上実験、地上予備実験)
2. 受賞歴リスト
3. 工業所有権(特許)リスト
4. JAXA プレスリリース及び JAXA ウェブリリース
5. 取材・報道等パブリシティ

1. 学術論文リスト

(1) 小動物飼育ミッション:軌道上実験

- [1] Shiba D. et al. Development of new experimental platform ‘MARS’—Multiple Artificial-gravity Research System—to elucidate the impacts of micro/partial gravity on mice. *Scientific Reports*, 7(1):10837, 2017.
- [2] Mao XW. et al. Impact of Spaceflight and Artificial Gravity on the Mouse Retina: Biochemical and Proteomic Analysis. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(9):2546, 2018
- [3] Horie K. et al. Down-regulation of GATA1-dependent Erythrocyte-Related Genes in the Spleens of Mice Exposed to a Space Travel. *Scientific Reports*, 9(1):7654, 2019
- [4] Tominari T. et al. Hypergravity and microgravity exhibited reversal effects on the bone and muscle mass in mice. *Scientific Reports*, 9(1):6614, 2019.
- [5] Horie K. et al. Impact of spaceflight on the murine thymus and mitigation by exposure to artificial gravity during spaceflight. *Scientific Reports*, 9:19866, 2019.
- [6] Matsuda C. et al. Dietary intervention of mice using an improved Multiple Artificial-gravity Research System (MARS) Under Artificial 1 g. *npj Microgravity*, 5:16, 2019.
- [7] Matsumura T. et al. Male Mice, caged in the International Space Station for 35 days, sire healthy offspring. *Scientific Reports*, 9(1):13733, 2019
- [8] Suzuki T. et al. Nrf2 contributes to the weight gain of mice during space travel. *Communications Biology*, 3:496, 2020.
- [9] Ohira T. et al. Proteomic analysis revealed different response to hypergravity of soleus and extensor digitorum longus muscles in mice. *Journal of Proteomics*, 217:103686, 2020.
- [10] Afshinnekoo E. et al. Fundamental biology features of spaceflight: advancing the field to enable deep space exploration. *Cell*, 183(5):1162-1184, 2020.
- [11] Shimomura M. et al. Study of mouse behavior in different gravity environments. *Scientific Reports*, 11(1): 2665, 2021.
- [12] Okada R. et al. Transcriptome analysis of gravitational effects on mouse skeletal muscles under microgravity and artificial 1 g onboard environment. *Scientific Reports*, 11(1):9168, 2021.
- [13] Yumoto A. et al. Novel method for evaluating the health condition of mice in space through a video downlink. *Experimental Animals*, 70(2):236-244, 2021.
- [14] Hayashi T. et al. Nuclear factor E2-related factor2 (NRF2) deficiency fast fibre type transition in soleus muscle during space flight. *Communications Biology*, 4:787, 2021
- [15] Yoshida K. et al. Intergenerational effect of short-term spaceflight in mice. *iScience*, 24(7):102773, 2021.
- [16] Ohira T. et al. Effects of microgravity exposure and fructo-oligosaccharide ingestion on the proteome of soleus and extensor digitorum longus muscles in developing mice. *npj Microgravity*, 7(1):34, 2021.
- [17] Kurosawa R et al. Impact of spaceflight and artificial gravity on sulfur metabolism in mouse liver: sulfur metabolomic and transcriptomic analysis. *Scientific Report*. 11(1): 21786, 2021.
- [18] Uruno A. Nrf2 plays a critical role in the metabolic response during and after spaceflight. *Communications Biology*, 4:1381, 2021.
- [19] Suzuki N. et al. Gene expression changes related to bone mineralization, blood pressure and lipid metabolism in mouse kidneys after space travel. *Kidney International*, 101(1):92-105, 2022.

- [20] Nishiyama A. et al. Blood pressure adaptation in vertebrates: comparative biology. *Kidney international*. 102(2): 242-247, 2022.
- [21] Yoshikawa M. et al. Comparing effects of microgravity and amyotrophic lateral sclerosis in the mouse ventral lumbar spinal cord. *Molecular and Cellular Neuroscience*, 121(1):103745, 2022.
- [22] Hayashi T. et al. Lunar gravity prevents skeletal muscle atrophy but not myofiber type shift in mice. *Communications Biology*, 6:424, 2023.
- [23] Sadaki S. et al. Large Maf transcription factor family is a major regulator of fast type IIb myofiber determination. *Cell Reports*, 42(4):112289, 2023.
- [24] Shimizu R. et al. Nrf2 alleviates spaceflight-induced immunosuppression and thrombotic microangiopathy in mice. *Commun Biol*, 6:875, 2023.
- [25] Egashira K. et al. Identification of gravity-responsive proteins in the femur of spaceflight mice using a quantitative proteomic approach. *Journal of Proteomics*, 288(1):104976, 2023.
- [26] Kimura Y. et al. Identification of gravity-responsive serum proteins in spaceflight mice using a quantitative proteomic approach with data-independent acquisition mass spectrometry. *Proteomics*, 24(9): 2300214, 2024.
- [27] Ohira T. et al. Plasminogen deficiency exacerbates skeletal muscle loss during mechanical unloading in developing mice. *Journal of Applied Physiology*, 2024.
- [28] Ouchi T. et al. Upregulation of Amy1 in the salivary glands of mice exposed to a lunar gravity environment using the multiple artificial gravity research system. *Frontiers in Physiology*. 15:1417719, 2024.
- [29] Siew K. et al. Cosmic kidney disease: an integrated pan-omic, physiological and morphological study into spaceflight-induced renal dysfunction. *Nature Communications*, 15:493, 2024.
- [30] Okamura Y. et al. Impact of microgravity and lunar gravity on murine skeletal and immune systems during space travel. *Scientific Reports*, 14:28774, 2024.
- [31] Kremesky I. et al. Artificial Gravity Attenuates the Transcriptomic Response to Spaceflight in the Optic Nerve and Retina. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(22):12041, 2024.
- [32] Ikeda Y. et al. Changes of iron dynamics in the duodenum and bone marrow under partial gravity condition in mice. *Life Sciences in Space Research*. 46: 2214-5524, 2025.
- [33] Sato K. et al. Lunar life drives jawbone formation. *Journal of Dental Sciences*. In press. 2025.

(2) 小動物飼育ミッション：地上予備実験

- [34] Morita H. et al. Feasibility of a short-arm centrifuge for mouse hypergravity experiments. *PLoS One*, 10(7):e0133981, 2015.
- [35] Tateishi R. et al. Hypergravity Provokes a Temporary Reduction in CD4+CD8+ Thymocyte Number and a Persistent Decrease in Medullary Thymic Epithelial Cell Frequency in Mice. *PLoS One*. 10(10):e0141650, 2015.
- [36] Shimbo M. et al. Ground-based assessment of JAXA mouse habitat cage unit by mouse phenotypic studies. *Experimental Animals*, 65 (2):175-187, 2016.
- [37] Ishikawa C. et al. Effects of gravity changes on gene expression of BDNF and serotonin receptors in the mouse brain. *PLoS One*. 12(6):e0177833, 2017.
- [38] Morita H. et al. Impact of a simulated gravity load for atmospheric reentry, 10 g for 2 min, on conscious

mice. Journal of Physiological Sciences. 67(4):531-537, 2017.

[39] Horie K. et al. Long-term hindlimb unloading causes a preferential reduction of medullary thymic epithelial cells expressing autoimmune regulator (Aire). Biochemical and Biophysical Research Communication, 501(3):745-750, 2018.

[40] Abe C. et al. Changes in metabolism and vestibular function depend on gravitational load in mice. Journal of Applied Physiology. 00555, 2022.

[41] Ino Y. et al. Identification of mouse soleus muscle proteins altered in response to changes in gravity loading. Scientific Reports, 13(1):15768, 2023.

(3) ヒト対象：軌道上実験

[42] Rutter L. et al. A New Era for Space Life Science: International Standards for Space Omics Processing. Patterns, 1(9):100148, 2020.

[43] Cope H. et al. Routine Omics Collection is a Golden Opportunity for European Human Research in Space and Analogue Environments. Patterns, 3(10):100550, 2022.

[44] Kimura Y. et al. Changes in the astronaut serum proteome during prolonged spaceflight. Proteomics, 24:2300328, 2024.

[45] Husna N. et al. Release of CD36-associated cell-free mitochondrial DNA and RNA as a hallmark of space environment response. Nature Communications, 15:4814, 2024.

(4) ヒト対象：地上予備実験

[46] Ishii, H. et al. Establishing a method for the cryopreservation of viable peripheral blood mononuclear cells in the International Space Station. npj Microgravity, 10:84, 2024.

2. 受賞歴リスト

	受賞日	表彰業績名	関連ミッション
1	2016 年 10 月 4 日	宇宙航空研究開発機構理事長賞 社会貢献分野 きぼう利用成果の最大化と社会貢献 受賞者：白川正輝、水野浩靖、芝大、小林拓恵、本馬敦子、湯本茜、小川志保 表彰者：(国研)宇宙航空研究開発機構	MHU 装置 国際協力 (日米協力枠組み)
2	2018 年 7 月 26 日	ISS Research Award (Compelling Results in Biology and Medicine) Transcriptome analysis of gravitational effects on muscles of mice 受賞者：高橋智(筑波大学)、JAXA マウスエピジェネティクスチーム 表彰者：アメリカ宇宙 航空協会 [JAXA ウェブリリース] きぼうで行われた日本の研究成果が、ISS R&D Conference において、“2018 ISS Award for Compelling Results”を受賞しました	MHU-1 サンプルシェア
3	2019 年 8 月 1 日	ISS Research Award (Innovation in Biology and Medicine) Development of A Unique Rodent Research Capability Which Can Reveal Gravitational Effects To Mice With An On-Orbit Centrifuge 受賞者：きぼうマウスミッションチーム 表彰者：アメリカ宇宙 航空協会	MHU 装置

		<u>[JAXA ウェブリリース] きぼうのマウス飼育システムが 2019 年の ISS Research Awards (Innovation in Biology and Medicine 分野)を受賞！！</u>	
4	2020 年 4 月 7 日	令和 2 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰(科学技術賞 科学技術振興部門)「宇宙マウス飼育システム開発から健康長寿と有人探査への貢献」 受賞者: 白川 正輝(JAXA)、高橋 智(筑波大学)、芝 大(JAXA)、水野 浩靖(JAXA) 表彰者: 文部科学大臣 <u>[JAXA プレスリリース] 日本独自の宇宙マウス飼育システムの令和 2 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰及び本システムを用いた JAXA-NASA 共同低重力ミッションの実施合意締結について</u>	MHU 全般 MHU-8
5	2021 年 8 月	ISS Research Award (Compelling Results in Biology and Medicine) 表彰業績名はわかりますか？ 受賞者: 山本雅之(東北大学)、MHU-3 ミッションチーム 表彰者: アメリカ宇宙 航空協会 <u>[JAXA ウェブリリース] 4 件のきぼう利用ミッションが 2020 年、2021 年の ISS Research Awards を受賞</u>	MHU-3
6	2023 年 8 月	ISS Research Award (Compelling Results in Biology and Medicine)「人工月面重力下での小動物飼育ミッション」 受賞者: 高橋 智(筑波大学)、MHU ミッションチーム 表彰者: アメリカ宇宙 航空協会 <u>[JAXA ウェブリリース] 2 件のきぼう利用ミッションが 2023 年の ISS Research Awards を受賞！</u>	MHU-4、MHU-5

3. 産業財産権（特許）リスト

1	特許名: 液体供給装置 出願日: 2014 年 11 月 10 日 (特願 2014-227891) 公開日: 2016 年 5 月 23 日 (特開 2016-088602) 登録日: 2019 年 10 月 4 日 (特許第 6593671 号) 登録者名: 株式会社塚田メディカル・リサーチ, 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構, 三菱重工業株式会社 塚田 修, 仲佐 昭彦, 金井 健悟, 清水 正人, 小池 春菜, 畠山 奈巳, 瀧澤 直希, 白川 正輝, 水野 浩靖, 本馬 敦子, 芝 大, 湯本 茜, 村瀬 浩史, 大平 真
2	特許名: 飼育ケージユニット及び飼育装置 出願日: 2019 年 3 月 29 日 (特願 2019-068491) 公開日: 2020 年 10 月 8 日 (特開 2020-162543) 登録日: 2023 年 3 月 16 日 (特許第 7246047 号) 登録者名: 三菱重工業株式会社, 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 落合 俊昌, 大平 真, 萩原 裕介, 児玉 浩明, 村瀬 浩史, 白川 正輝, 芝 大, 水野 浩靖, 湯本 茜

4. JAXA 発信情報リスト(プレスリリース、ウェブリリース等)

(1) JAXA プレスリリース

https://www.jaxa.jp/press/2025/index_j.html

	公開日	内 容	関連ミッション
1	2019 年 2 月 8 日	<u>健康長寿社会実現への貢献を目指したきぼう利用に係る東北メディカル・メガバンク機構との連携協定の締結について</u>	(連携協定) MHU 全般
2	2020 年 4 月 14 日	<u>日本独自の宇宙マウス飼育システムの令和 2 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰及び本システムを用いた JAXA-NASA 共同低重力ミッションの実施合意締結について</u>	(文部科学大臣表彰) MHU 全般 MHU-8
3	2020 年 9 月 9 日	<u>宇宙マウス研究から健康長寿のヒントを発見—宇宙環境で加速する加齢変化を食い止める遺伝子—</u>	MHU-3
4	2023 年 4 月 21 日	<u>人類の月面生活実現への新たな一歩となる月面重力下におけるマウスの筋肉の量と質の変化の違いを解明</u>	MHU-1、MHU-4、 MHU-5

(2) JAXA 有人技術部門ウェブリリース

<https://humans-in-space.jaxa.jp/kibouser/pickout/>

ミッション実施・進捗

	公開日	内 容	関連ミッション
1	2016 年 10 月 13 日	<u>国際宇宙ステーション・きぼうにおける、長期飼育マウスの全数生存帰還の世界初の達成ならびに次世代仔マウスの誕生について</u>	MHU-1
2	2016 年 12 月 5 日	<u>35 日間の長期飼育で骨や筋肉の量が顕著に減少 ～きぼうにおける、長期飼育マウスの地上分析速報～</u>	MHU-1
3	2017 年 9 月 8 日	<u>世界初、宇宙空間で μg から 1g を可変できる実験環境“MARS”が完成</u>	MHU-1
4	2017 年 10 月 25 日	<u>第 2 回マウス長期飼育ミッションの終了後 1 か月速報</u>	MHU-2
5	2017 年 12 月 28 日	<u>第 2 回マウス長期飼育ミッションの終了後 3 か月速報</u>	MHU-2
6	2018 年 4 月 6 日	<u>「きぼう」にて、第 3 回小動物飼育ミッションが開始されました。</u>	MHU-3
7	2018 年 5 月 11 日	<u>世界初、遺伝子ノックアウトマウス(特定遺伝子を欠失したマウス)の全数生存帰還に成功</u>	MHU-3
8	2019 年 6 月 7 日	<u>小動物飼育ミッション:世界初、「炎症疾患モデルマウスによる病原体や免疫細胞などが中枢神経系等に入りやすい侵入口(ゲート)解明ミッション」を実施。4 回連続の全数生存帰還を達成。</u>	MHU-4
9	2019 年 6 月 21 日	<u>世界初!月の重力環境を国際宇宙ステーションで実現してマウスを長期飼育～深宇宙への人類の活動領域拡大に向けた第一歩～</u>	MHU-4
10	2020 年 5 月 18 日	<u>きぼう小動物ミッションの飼育能力が倍増。新規飼育ラック・新規大型遠心機を用いた日米協力ミッションのベースラインとなるデータを蓄積 ～第 5 回 JAXA 小動物飼育ミッションが成功裏に完了～</u>	MHU-5
11	2021 年 12 月 21 日	<u>遺伝子機能発光イメージング解析装置(TELLAS)の準備作業を行いました</u>	TELLAS
12	2023 年 4 月 28 日	<u>JAXA-NASA 共同低重力ミッション(MHU-8):有人宇宙探査活動に向けた知見獲得を目指し、きぼうで 4 つの異な</u>	MHU-8

		る重力環境での長期小動物飼育を完了	
--	--	-------------------	--

研究成果(論文・表彰・研究許力等)

	公開日	内 容	関連ミッション
1	2018 年 7 月 27 日	きぼうで行われた日本の研究成果が、ISS R&D Conference において、“2018 ISS Award for Compelling Results”を受賞しました	(ISS Research Award) MHU-1
2	2019 年 2 月 21 日	きぼう利用を通じた健康長寿社会への貢献「ToMMo × JAXA 連携」協定締結式が行われました	(連携協定) MHU 全般
3	2019 年 5 月 17 日	平成 27 年度選定きぼう利用フィジビリティスタディ(FS)テーマ「新規な質量分析イメージングによる筋・骨格系疾患の発症機構解明」の FS の成果が論文に掲載されました	FS テーマ
4	2019 年 7 月 11 日	宇宙でのマウス研究システム MARS(Multiple Artificial-gravity Research System)を改良し、餌介入試験に成功	MHU 装置
5	2019 年 8 月 8 日	きぼうのマウス飼育システムが 2019 年の ISS Research Awards(Innovation in Biology and Medicine 分野)を受賞！！	(ISS Research Award) MHU 装置
6	2019 年 10 月 18 日	国際宇宙ステーション・きぼうでのマウス飼育により宇宙滞在が精子受精能力に及ぼす影響を解析	MHU-1
7	2019 年 12 月 27 日	宇宙滞在による免疫機能低下の機構を解明 ー無重力環境が引き起こす胸腺の萎縮と人工重力による軽減ー	MHU-1、MHU-2
8	2024 年 9 月 12 日	Integrated Biobank for Space Life Science(リンク先英文)	ibSLS
9	2020 年 11 月 26 日	宇宙ライフサイエンス研究は新たなステージへ ～宇宙生命医科学統合バイオバンク「ibSLS」の公開と Cell 誌掲載～	ibSLS
10	2021 年 4 月 28 日	宇宙環境で引き起こされる骨格筋萎縮は人工重力 1G 負荷により防ぐことができる	MHU-1
11	2021 年 6 月 29 日	宇宙マウス飼育のデータから骨格筋の性質維持にはたらく Nrf2 の新たな機能を発見	MHU-3
12	2021 年 7 月 6 日	宇宙小動物飼育ミッション：父親の宇宙滞在経験が、子供の遺伝子発現に影響することを発見	MHU-1
13	2021 年 11 月 25 日	2019 年度選定きぼう利用マウスサンプルシェアテーマ「含硫代謝物及び遺伝子発現を指標にした無重力が酸化還元状態に及ぼす影響の解明」の組織解析の成果が論文掲載されました	サンプルシェア MHU-2
14	2021 年 11 月 29 日	宇宙旅行によって血圧や骨の厚みが増加するしくみを解明	MHU-3
15	2021 年 12 月 10 日	ストレス対応で宇宙環境に身体をアジャスト！	MHU-3
16	2022 年 3 月 28 日	4 件のきぼう利用ミッションが 2020 年、2021 年の ISS Research Awards を受賞	(ISS Research Award) MHU-3
17	2022 年 5 月 31 日	宇宙生物科学統合バイオバンク「ibSLS」の公開データを大幅拡充	ibSLS
18	2022 年 7 月 27 日	2018 年度及び 2020 年度きぼう利用マウスサンプルシェアテーマ募集からの成果：皮膚組織の解析データが発表されました	サンプルシェア MHU-1、MHU-3
19	2022 年 7 月 27 日	第 1 回宇宙小動物飼育ミッション(MHU-1)成果：微小重力環境がマウスの中枢神経系(脊髄)に与える影響を解析したデータが発表されました	MHU-1
20	2023 年 1 月 11 日	宇宙生物科学統合バイオバンク「ibSLS」の公開データを拡充	ibSLS

21	2023 年 3 月 29 日	<u>筋肉を速筋タイプにする転写因子を同定 ～加齢や病気で低下した筋機能の改善方法開発に期待～</u>	MHU-1
22	2023 年 8 月 31 日	<u>2 件のきぼう利用ミッションが 2023 年の ISS Research Awards を受賞！</u>	(ISS Research Award) MHU-4、MHU-5
23	2023 年 9 月 1 日	<u>小動物飼育ミッション成果：宇宙ストレスによる炎症・微小 血栓形成を Nrf2 が抑制！</u>	MHU-3
24	2023 年 9 月 4 日	<u>きぼうを活用したアジア科学利用の拡大 ～タイとのきぼ う利用マウスサンプルシェア協定の締結～</u>	サンプルシェア MHU-4、MHU-5
25	2024 年 1 月 30 日	<u>Medical Proteomics 研究の成果が公表されました～長期 宇宙滞在ミッションに伴うヒト血清プロテオーム変化を解 明～</u>	MHU-2
26	2024 年 7 月 19 日	<u>2022 年度選定きぼう利用マウスサンプルシェアテーマ 「低重力環境における口腔歯科医学展開にむけた基礎 研究基盤」の組織解析の成果が論文に掲載されました</u>	サンプルシェア MHU-4、MHU-5
27	2024 年 11 月 25 日	<u>第 5 回宇宙マウス飼育ミッション(MHU-5)成果：微小重力 及び人工月面重力環境がマウスの骨格系や免疫系に与 える影響を解析したデータが発表されました</u>	MHU1、MHU-4、 MHU-5
28	2025 年 4 月 9 日	<u>きぼう利用マウスサンプルシェアにおいて、2022 年度選 定テーマ「微小重力が消化管鉄吸収へ与える影響の解 明」の組織解析の成果が論文に掲載されました</u>	サンプルシェア MHU-4、MHU-5
29	2025 年 4 月 11 日	<u>きぼう利用マウスサンプルシェアにおいて、2022 年度選 定テーマ「『きぼう』船内微小重力環境における歯槽骨代 謝機構の解明」の組織解析の成果が論文に掲載されまし た</u>	サンプルシェア MHU-4、MHU-5

インタビュー：ミッションを支えるスペシャリストたち

	公開日	内 容	関連ミッション
1	2018 年 12 月 22 日	<u>質の高いデータが得られるようきぼうでの実験を最大限 サポートしたい(有人宇宙技術部門 きぼう利用センター 技術領域主幹 白川 正輝)</u>	(宇宙実験) MHU-1
2	2019 年 3 月 7 日	<u>きぼう」の小動物飼育装置をあなたの研究にも活かそ う！(筑波大学医学医療系 教授 高橋 智)</u>	MHU-1
3	2023 年 4 月 27 日	<u>宇宙におけるマウスの行動解析手法を開発、さらに精緻 な行動分析や宇宙酔いの解明などにも期待！(有人宇宙 技術部門 きぼう利用センター 客員研究員 下村 道彦)</u>	MHU 全般
4	2023 年 6 月 30 日	<u>充実度が高まるマウスの飼育ミッション ～解析結果のデ ータベースも公開～(有人宇宙技術部門 きぼう利用セン ター 研究開発員 岡田 理沙)</u>	MHU 全般、 宇宙生命医科学統合 バイオバンク(ibSLS)

5. 取材・報道等パブリシティ

・2014 年～ JAXA 小動物飼育ミッションライン調べ及び、2019 年 12 月～2025 年 5 月末までの JAXA 広報部の集計より、新聞掲載及びテレビ放映をまとめる。

新聞掲載

掲載日	新聞名	内容	関連ミッション
2014 年 8 月 19 日	日刊工業新聞	「DNA の変化探る マウス宇宙飼育 微小重力で骨量減少・筋肉萎縮 生 殖への影響研究」	MHU 全般
2015 年 10 月 18 日	日本経済新聞	「宇宙ステーションフル稼働中 動植 物を使い成長への影響を調べる 無重力、子孫残せるか探求」	MHU 全般

2016 年 6 月 19 日	朝日新聞	「ISS 活用の時代 新薬・滞在 実用化見すえ実験」	MHU-1
2016 年 6 月 30 日	読売新聞	「七夕に夢見た宇宙へ 大西卓哉飛行士『新しい体験わくわく』」	MHU-1
2017 年 4 月 5 日	毎日新聞	「大西宇宙飛行士 ISS 長期滞在ミッション報告会 宇宙で挑む、未来への「きぼう」」	MHU-1
2017 年 9 月 22 日	科学新聞	「大西宇宙飛行士 ISS 長期滞在ミッション報告会 宇宙で挑む、未来への「きぼう」」	MHU-1
2018 年 5 月 24 日	日刊工業新聞	「宇宙実験 効率的に、メンテ短時間で安全 『きぼう』恩恵大きく日本宇宙開発支える宇宙でマウス飼育遺伝子改変で新知見」	MHU-3
2018 年 5 月 24 日	日刊工業新聞	「マウス宇宙で飼育 金井飛行士リポート」	MHU-3
2018 年 11 月 7 日	愛媛新聞	「人工重力で目の健康維持」	MHU-1
2018 年 11 月 9 日	熊本日日新聞	「人工重力で網膜損傷改善」	MHU-1
2018 年 11 月 14 日	北海道新聞	「人工重力で目の健康維持」	MHU-1
2018 年 11 月 19 日	静岡新聞	「人工重力で目の健康維持」	MHU-1
2018 年 12 月 2 日	中国新聞	「人工重力 目や骨の健康維持」	MHU-1
2019 年 4 月 1 日	四国新聞	「宇宙でむくむ皮膚 仕組み共同研究へ JAXA と香川大医学部 老化予防へ応用期待」	サンプルシェア
2019 年 5 月 15 日	日刊工業新聞	宇宙での筋力低下予防 重力負荷で維持 東京農工大が実証	FS テーマ
2019 年 12 月 28 日	朝日新聞夕刊	宇宙滞在で免疫低下？ マウス実験 細胞作る「胸腺」縮小 無重力影響か	MHU-1、MHU-2
2019 年 12 月 28 日	日本農業新聞朝刊	宇宙で免疫低下 解明	MHU-1、MHU-2
2020 年 5 月 15 日	読売新聞朝刊	2022年 宇チューの旅 マウス ISSで1か月 有人月探査へ 日米調査	MHU-8
2020 年 5 月 15 日	読売新聞(大阪)朝刊	宇宙でマウス飼育実験へ 日米	MHU-8
2020 年 9 月 10 日	日刊工業新聞朝刊	宇宙長期滞在で加齢化 JAXA・東北大が解明 疾患予防・治療に応用	MHU-3
2020 年 9 月 20 日	日本経済新聞朝刊	長寿のヒント、宇宙マウスで、東北大などが実験、他。	MHU-3
2021 年 8 月 6 日	日経産業新聞	宇宙滞在、人工重力で筋力維持、動物実験装置、月や火星進出見据え(NextTech2050)	MHU-1
2021 年 11 月 19 日	日刊工業新聞朝刊	宇宙で腎臓の遺伝子変動 東北大など 血圧・骨量変化を解明	MHU-3
2021 年 12 月 19 日	日本経済新聞朝刊	宇宙旅行で血圧・骨が変化、東北大など、腎臓の働き解明。	MHU-3
2023 年 4 月 22 日	日本経済新聞夕刊	月面重力でも筋肉量維持 持久力・瞬発力は低下 筑波大・JAXAが実験	MHU-4、MHU-5

2023 年 4 月 22 日	茨城新聞朝刊	月面重力で筋肉量減らず 筑波大と JAXA 研究	MHU-4、MHU-5
2023 年 4 月 22 日	信濃毎日新聞朝刊	地球の1/6月面重力で筋肉量減らず 筑波大・JAXA	MHU-4、MHU-5
2023 年 4 月 22 日	京都新聞朝刊	地球に比べて重力6分の1ですが…月面、筋肉減らない！ JAXA「きぼう」で実験	MHU-4、MHU-5
2023 年 4 月 24 日	日刊工業新聞朝刊	速筋化の抑制 不十分 月面重力 JAXAなどが解明	MHU-4、MHU-5
2023 年 4 月 22 日	岩手日報朝刊	月面重力でも筋肉量減らず 筑波大、JAXA発表	MHU-4、MHU-5
2023 年 4 月 22 日	秋田魁新報朝刊	月面重力 筋肉減らさず 筑波大と JAXAの研究 マウス実験 持久力維持は難しく	MHU-4、MHU-5
2023 年 4 月 24 日	中日新聞朝刊	月面重力 筋肉量減らず 筑波大など 有人探査に備え実験	MHU-4、MHU-5
2023 年 4 月 24 日	大阪日日新聞朝刊	月面重力で筋肉量減らず 筑波大など、有人探査へ基礎データ	MHU-4、MHU-5
2023 年 4 月 26 日	神戸新聞夕刊朝刊	月面重力で筋肉量減らず	MHU-4、MHU-5
2023 年 10 月 30 日	東京新聞朝刊	ドキ時(ドキ)！サイエンス(18) 宇宙も地上も筋肉が肝心【茨城版】	MHU 全般

テレビ放映

放映日	放送局・番組名	内容	関連ミッション
2016 年 7 月 6 日	NHK ニュース 7	大西さん宇宙へ “老化”解明に迫る日本初の実験で	MHU-1
2016 年 7 月 7 日	TBS News23	セカイは今「老化のメカニズム解明」に…大西さん宇宙で世界初実験	MHU-1
2016 年 7 月 8 日	NHK くらし☆解説	大西飛行士のミッション内容紹介	MHU-1
2017 年 12 月 17 日	NHK ニュース 7	JAXA Nr12 マウス(遺伝子欠失マウス)を打ち上げる	MHU-3
2022 年 3 月 17 日	NHK ヒューマニエンス 40 億年のたぐらみ	小動物ミッションの成果と科学を支える装置の説明	MHU 全般

以上

補足資料

本報告書の対象期間(～2025 年 6 月)以降に発表された学術論文を以下に示す。

1. 学術論文リスト

(5)2025 年 6 月以降に発表された学術論文

[47] Hayashi H. et al. Bone mineral loss damages renal tubules in mice. Communications biology, 2026.

[48] Tsujii R. et al. 0.33G Mitigates Muscle Atrophy While 0.67G Preserves Muscle Function and Myofiber Type Composition in Mice during Spaceflight. Science Advances, in press, 2026.