

国際宇宙ステーションの 利用成果年間ハイライト

2019年10月1日~2020年10月1日



国際宇宙ステーションの利用成果の年間ハイライト

2019年10月1日～2020年10月1日

本報告書は、カナダ宇宙庁（Canadian Space Agency, CSA）、欧州宇宙機関（European Space Agency, ESA）、宇宙航空研究開発機構（Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA）、米国航空宇宙局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）、国営宇宙公社ロスコスモス（State Space Corporation Roscosmos, ROSCOSMOS）のメンバーの協力により作成されたものである。本報告書のハイライトと引用、およびこれまでに収集されたすべての国際宇宙ステーション（ISS）の成果と引用は、www.nasa.gov/stationresults で見ることができる。

編集責任者

Ousmane Diallo, NASA

Pilar Archila, Barrios Technologies

編集長

Kirt Costello, NASA

表紙：

NASA の Andrew Morgan 宇宙飛行士が、国際宇宙ステーションの宇宙粒子検出器であるアルファ磁気分光器（iss061e058254）の修理のために船外活動を行う様子。

目次

はじめに	1
出版物のハイライト :	
生物学とバイオテクノロジー	9
出版物のハイライト :	
人を対象とした研究	14
出版物のハイライト :	
物理科学	19
出版物のハイライト :	
技術開発と実証	23
出版物のハイライト :	
地球・宇宙科学	27
ISS 研究成果出版物	31
詳細については	58

はじめに

今年、国際宇宙ステーション（ISS）に宇宙飛行士が滞在を開始してから20周年を迎え、宇宙環境利用にとって記念すべき節目の年となった。

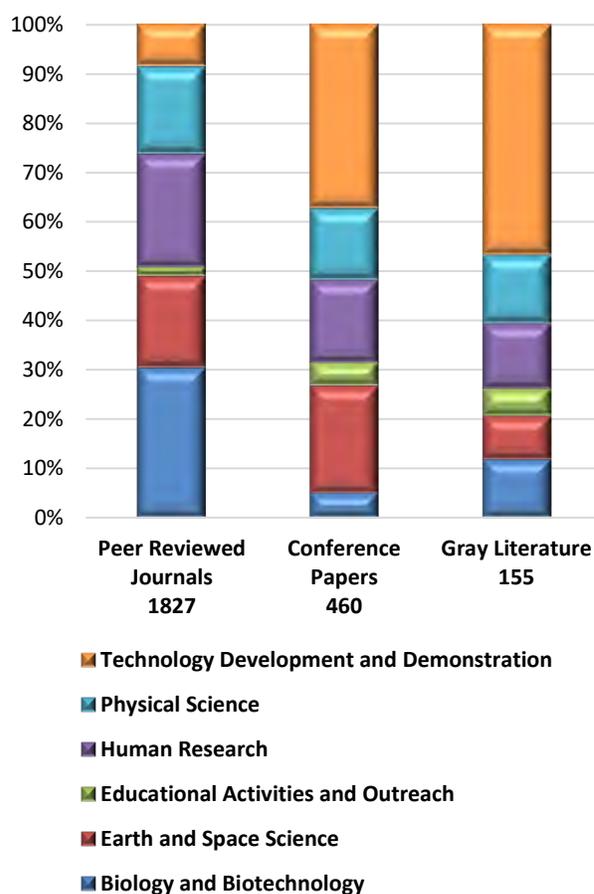
ISSは、安定的な微小重力環境を有しており、地球上では成し遂げられない微小重力研究の実験室となっている。ISSでは、技術開発・実証、教育活動、生物学・生物工学、地球・宇宙科学、人を対象とした研究、物理学の分野で、革新的で先端的な実験が実施されている。

人類の、宇宙での生活及び活動が20年間途切れることなく継続されたことを記念したい。また、関係機関間で長期有人宇宙活動に向けた課題を議論し、今後数十年の間に月や火星で有人宇宙活動を行うための協力関係が構築されたことを記念したい。

ISSでの微小重力研究は、宇宙の極限環境での生活に役立つだけでなく、地球上の生活の質を向上させる画期的な発見をもたらしてきた。ヘルスケア（製薬、イメージング、医療など）や、物理学での研究成果がその代表例である。また、ISSの船外には気象事象を捕らえることができる観測装置が設置されており、地球観測プラットフォームとしても機能している。

今年の年次ハイライトでは、植物の苗の成長や宇宙での骨粗鬆症の早期発見などの生命科学に関する研究成果から、ボーズ-アインシュタイン凝縮の理解や静電浮遊法を利用した新たな物性の解明まで、幅広い分野の成果を報告する。ISSプログラムサイエンスオフィス（PSO）では、2019年10月1日から2020年10月1日の間に出版された312件の科学的な出版物を収集した。このうち、286報は査読付きジャーナルに掲載された論文である。ま

ISS Results Publications



た、この312件のうち29件は2019年10月1日以前に出版されたものであるが、2019年10月1日までプログラムサイエンスオフィス(PSO)で認識していなかったため、本対象期間に含めた。

本報告書で紹介する成果は、米国航空宇宙局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）、ロシアのロスコスモス（State Space Corporation Roscosmos, Roscosmos）、日本の宇宙航空研究開発機構（Japanese Aerospace Exploration Agency, JAXA）、欧州宇宙機関（European Space Agency, ESA）、カナダ宇宙庁（Canadian Space Agency, CSA）、イタリア宇宙機関（Italian Space Agency, ASI）の研究活動の成果である。本報告書では、今年1年の312件の出版物のリストを掲載するとともに、特に注目すべき研究成果の紹介を行う。これらは、人類に恩恵をもたらし、科学研究及び世界の宇宙開発の発展に貢献する成果である。

2020年10月1日現在、ISSプログラムサイエンスオフィス(PSO)は1999年以降、査読付き論文や会議での報告書、灰色文献を含むISSの研究成果に係る合計2850報の出版物を確認している。これらは、世界中の5000人以上の科学者による研究成果である（図1）。今年の研究成果に係る出版物の数は、1年前の出版物の件数と比較して17%増加している。

ISSプログラムサイエンスオフィス(PSO)には、ISSのすべての利用活動から生じる研究成果を継続的に収集してアーカイブする専門家チームがある。この専門家チームが作成したアーカイブには、www.nasa.gov/iss-science からアクセスできる。また、このアーカイブは、ISSで実施された研究概要と研究成果を収録しており、各研究概要の紹介ページには、www.nasa.gov/stationresults で公開された出版物や特許を引用している。

¹ Diallo, O. N., Ruttley, T. M., Costello, K., Hasbrook, P., Cohen, L., Marcil, I., ... & Karabadzha, G. (2019). Impact of the International Space Station Research Results. The 70th International Astronautical Congress. 2019

宇宙ステーションの影響の測定

ISS は微小重力環境という特殊な環境にある実験施設であり、多様な分野の研究が実施されている。

また、研究は学際的で国際協力に基づき実施されており、投資の意義も大きい。そのため、ISS で行われる研究の科学的なインパクトを分析することは大変重要であるが複雑であり、ISS プログラムサイエンスオフィス(PSO)では、様々な方法を用いて ISS で行われた科学研究のインパクトを調査している。

ISS で行われた実験の科学的成果の意義及び価値を評価するために、ISS の全参加機関の論文の引用数とジャーナルのアイゲンファクター (Eigenfactor) のランキングを調査している。研究分野によって論文が引用される基準や引用期間が異なるため、アイゲンファクターは、過去 5 年間の Clarivate Analytics®の Web of Science (科学

	Clarivate Analytics® Rank by Eigenfactor	Source (# of ISS publications)
ISS Publications in Top 100 Sources	1	PLOS ONE (3)
	3	Scientific Reports (4)
	4	Nature (1)
	5	Science (1)
	6	Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (1)
	11	Physical Review Letters (3)
	22	The Astrophysical Journal (19)
	28	Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (10)
	37	Circulation (1)
	46	Astronomy and Astrophysics (2)
	49	Science Advances (2)
	58	Frontiers in Microbiology (3)
	67	Journal of Alloys and Compounds (1)
	95	Frontiers in Plant Science (5)

表1：アイゲンファクター別に世界のトップ100誌に収集された2019年～2020年のISSの出版物。2019年10月1日から2020年10月1日までに、Clarivate Analytics®の2019 Journal Citation Reportsに報告された。

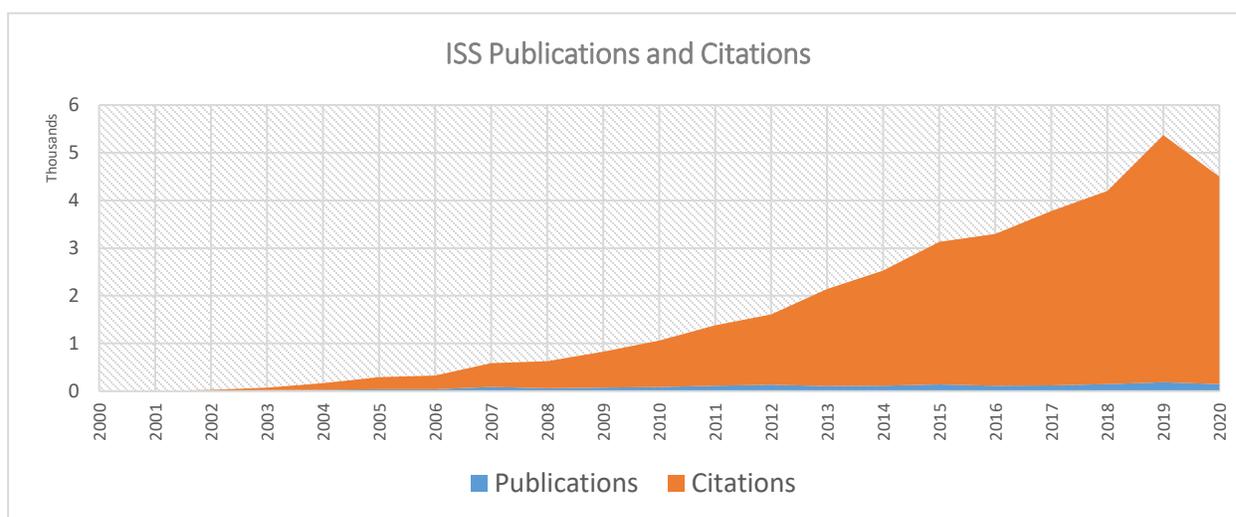


図2. ISS 発足以来の出版物と引用の増加を示している。

Web) の引用ネットワーク全体を使用したアルゴリズムを使用している²。このアルゴリズムは、各ジャーナルの相対的な重要性を反映する規準を作成するものである。アイゲンファクターは、自然科学と社会科学の両方のジャーナルの引用数をカウントし、論文の自己引用を排除して、研究者がジャーナルを読むのに費やした時間を反映する基準である。2019年10月1日から2020年10月1日までの期間で、アイゲンファクターが高い上位100誌で、56報のISS関連の論文が出版された。そのうち10報の論文は、アイゲンファクターが高い上位10誌に掲載されている(表1)。

図2のグラフは、ISSでの研究成果に係る出版物の数の長期的な推移を示したものである。図2には2020年10月1日までに発行された論文が含まれている。これらのデータは、ISSでの研究成果の普及が他の研究分野にも影響を与え、新しいアイデアの創出に貢献していることを示唆している。軌道上実験が開始された10年前よりも、実験に参加する研究者の数は増加し、研究領域は多岐に渡っている。その結果、ISSで行われる科学実験は、教育に影響を与え、責任感や創造力を持った新たな科学者を生み出し、若い世代の好奇心を掻き立てている。

ISSプログラムサイエンスオフィス(PSO)では、ISSでの研究のインパクトを調べるために、計量書誌学(bibliometrics)の手法を取り入れている。計量書誌学とは、文献を構成する要素を定量的に分析する学問であり、科学的・学術的な出版物の分析に利用されている。研究者は、計量書誌学を利用することで、自分の研究分野の概要や近隣の研究分野との関連性を把握することができる。計量書誌学は、研究管理や研究評価における幅広い課題に対処するために利用することもできる。例えば、研究機関の経営陣による戦略的意思決定の支援や、研究機関や研究グループの評価を支援するために計量書誌学を応用できる。³

計量書誌学の手法により得られたデータを視覚化することは、ISSでの科学研究への理解を向上するために有益である。データを視覚化することで、研究分野や共著、引用などの繋がりが分かる。また、著者の繋がりを視覚化することにより、出版物の世界的な広がりを知ることができる。

宇宙ステーション成果の国際共著の進展

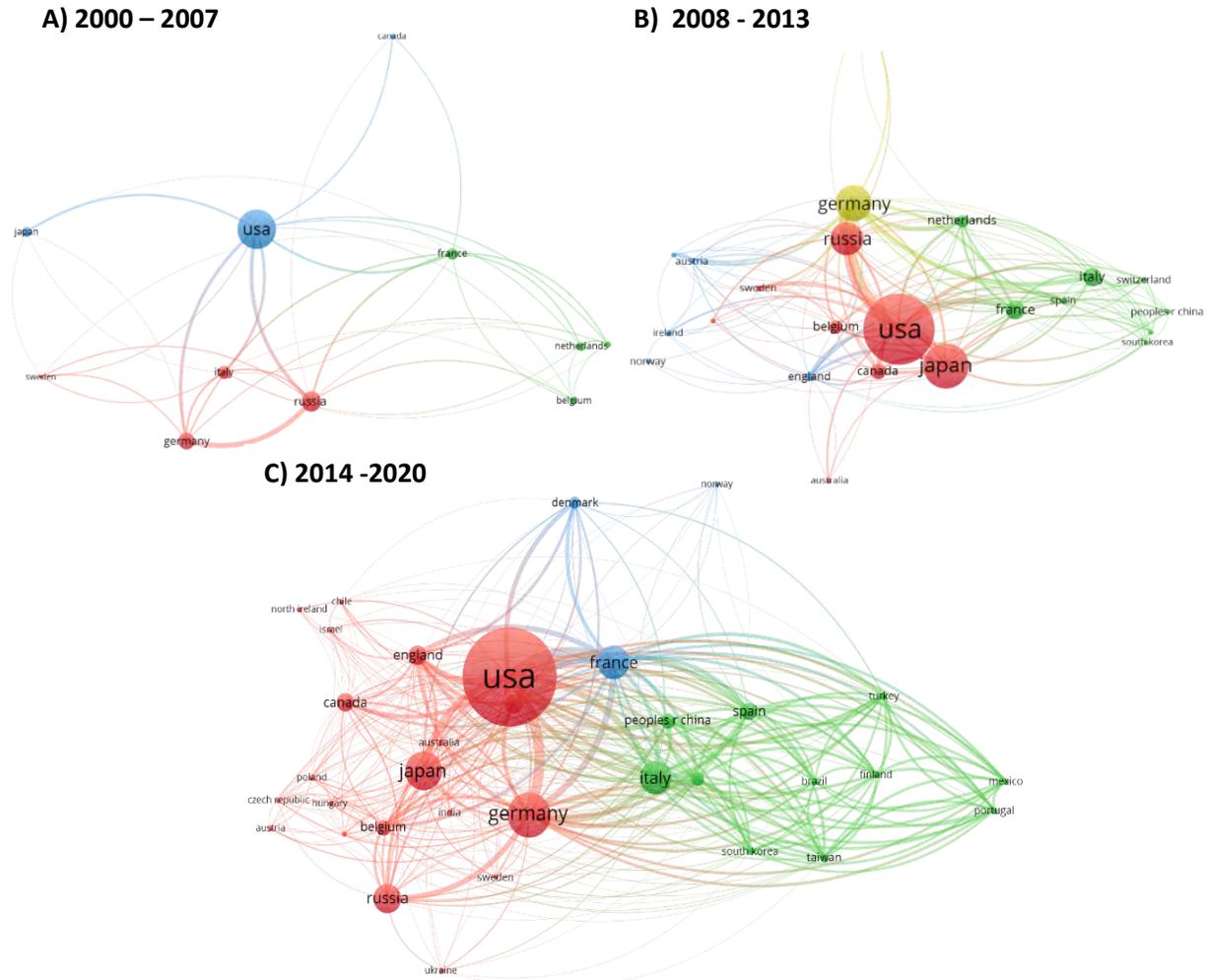


図4. 国別の共著の VOSviewer 視覚化。共著の増加は、パネル A、B および C 全体で見られる。A) 2000 年～2007 年の共著データ。B) 2008 年～2013 年の共著データ。C) 2014 年～2020 年までの共著データ。ノードの大きさは、ラベル付けされた国の出版物の数を示す。ノード間のリンクは国間の共著を示す。

図 3 は、ISS での実験開始から 2020 年 10 月 1 日までに収集された ISS での全研究成果論文を用いて、20 年に渡る ISS 運用期間の前半の 10 年（2000 年～2010 年）と後半の 10 年（2011 年～2020 年）に収集された研究トピックのキーワードについて VOSviewer ネットワーク分析を行い、視覚化したものである。ISS の発足以来、ISS での研究がどのように広がり、多様化してきたのかを確認できる。ノードの大きさは、ラベル付けされた研究課題に関連

する出版物の数を示す。例えば、微小重力に関連する研究はこの数年で成長し、発展してきたことがわかる。また、各色のカテゴリ内のリンクの数は、ISS における研究が扱っている研究課題の多様性を表すものである。

例えば、物理学の研究課題は、図 3A の黄色で示される 9 つのノードから図 3B の緑色で示される 60 のノードまで研究トピックが拡大・多様化している。

別の例として、「遺伝子」(gene)および「遺伝子発現」(gene-expression)の発展を示す。図 3A のネットワークでは「遺伝子」ノードは小さく、ISS 研究の生物学およびバイオテクノロジー分野及び人を対象にした研究に関連するトピックと関連があることを示している。一方、図 3B においては、「遺伝子」に関わる大きなノードが、主に人を対象とした研究と密接かつ相互に接続されていることを示している。このノード間の接続の様相の変化は、ISS での遺伝子研究が、初期には植物に関連したものが中心であったが、今日では典型的には、ヒトや動物に関連した研究へと質的に変化してきたことを物語っている。

図 4 は、図 3 とは別の VOSviewer 分析として、国際共著出版物における国ごとのネットワークを 3 つの期間に分け示している。ノードの大きさは、ラベル付けされた国の出版物の数を示し、ノード間のリンクは国家間の共著を示している。パネル A では、ISS 利用の初期には米国が中心となり、他国（ドイツ、ロシア、イタリア、フランス、日本、カナダ）との共同研究を推進していることを示している。パネル B では、米国が共同研究の重要な参加者であり続けることに変わりはないが、日本、ロシア、ドイツがそれぞれ独自にスペイン、オランダなど他の国との共同研究を推進していることが分かる。現在の ISS の状況を示すパネル C では、引き続き米国が共同研究の発展のために重要であることが示されているが、英国、デンマーク、ドイツ、ロシアなどの国々が精力的に、他の国々との共同研究を実施していることが分かる。この図では、米国をはじめ、ドイツ、日本、ロシア、フランス、イタリアなどの国々が、この 20 年間に、他国との連携を何倍にも増やして、画期的な発見をしてきたことを示している。

宇宙ステーションの成果の進化

ISS で行われる研究のアーカイブは 2004 年にオンライン化された。以来、プログラムサイエンスオフィス(PSO)では ISS 研究の追跡方法に多くの変更を加えてきた。PSO は、研究数が増え研

究分野が多様化することに伴い、従来の研究分野をより細分化し、また、新たな研究分野を識別してきた。当初、PSO は、ISS での科学的な研究成果に係る出版物や特許に係る情報を収集していた。最近では、プログラム・サイエンス・データベース（PSDB）に以下の種類の出版物を含めている。

- ISS の成果 - ISS、あるいは ISS への輸送機で実施した研究。また、当該設備の性能と成果に関する情報を含む出版物。
- 特許 - ISS、あるいは ISS への輸送機で実施した研究。また、当該設備の性能と成果に基づいて出願された特許。
- 関連出版物 - 研究、設備、またはプロジェクトの発展につながる出版物。

PSO は、データベースを継続的に分析してきた結果、研究成果の追跡方法に更なる変更が必要と判断した。「ISS の飛行準備での成果」と「派生成果」という 2 つの新しいカテゴリの研究成果を ISS の成果に含めることとした。

「ISS の飛行準備での成果」とは、ISS での軌道上運用に先立って行われた研究、設備、またはプロジェクトの開発作業に関する論文である。「派生成果」とは、ISS で実施した研究のデータを利用した論文である。この場合、当該論文の著者は ISS で実施された研究チームのメンバーではない。「派生成果」として識別する論文は、ISS での研究に直接関与していない研究者に生データへのアクセスを許容するオープン・データ・イニシアチブの成果として出現してきたものである。これは、ISS の研究で取得したデータを広く公開し、幅広い研究者がデータにアクセスできる環境を整備することで、ISS で得られた知見を世界的に拡大するものである。2020 年 10 月 1 日現在、PSO 研究成果チームは、「ISS の飛行準備での成果」として 78 報の出版物を、「派生成果」として 107 報の出版物を確認している。本報告書は、ISS での研究成果の出版物にスポットライトを当てているが、新たに追加したカテゴリに係る出版物は、プログラム・サイエンス・データベース（PSDB）で確認することができ、ISS で得られた科学的な知見の普及に貢献している。

宇宙ステーションのメリットをつなぐ

ISS の研究成果は、人類の宇宙探査、人類への恩恵、科学的発見の進展につながるものである。今年の国際宇宙ステーションの年間成果ハイライトには、期間中に ISS の全パートナー機関から発表された成果のほんの一部を掲載するにすぎない。



このマークは、主に宇宙飛行士の健康に与える放射線影響の理解、骨や筋肉の減少への対処、微小重力下での流体を扱うシステムの設計の改善、環境管理を効率的に維持する方法の決定などの課題に取り組むことで、宇宙での生活や仕事をより効果的に行うための最新の知見をもたらすISSの研究成果を表す。



物理学、生命科学、地球・宇宙科学に新たな科学的知見をもたらすISSの研究成果を表す。



気候の理解や病気の治療への貢献、既存の材料の改良など地球での生活をより豊かに便利にし、さらに、次世代の科学者、臨床医、技術者、エンジニア、数学者、芸術家、探検家を鼓舞するISSの研究成果を表す。



日本の「きぼう」実験棟のモジュール内で、生命科学グローブボックスを使って研究活動を支援している NASA の Nick Hague 宇宙飛行士。Hague は Cell Science-02 骨治癒・組織再生実験の科学的作業を実施している。(ISS060E019982)。

出版物のハイライト：

生物学とバイオテクノロジー

ISS の実験モジュールは、生物科学研究のためのプラットフォームを提供しており、そこでは微小重力環境に対する生物の複雑な反応を探ることができる。実験室の設備は、微生物や細胞生物学から多細胞植物や動物の統合機能に至るまで、生物学的システムの研究を支援している。



植物はクルーのために呼吸可能な空気を生成し、またクルーの食料源にもなる。ESA の **Seedling Growth-1** 調査は、植物の発育に対する重力と光の影響を解明することを目的に実施された。植物の根や莖の成長の方向を決める主な要因は重力であり、次いで光であると考えられている。この研究では、国際宇宙ステーションに搭載された欧州モジュール栽培システム（European Module

Cultivation System、EMCS）を用いて、微小重力、月、火星、地球、低重力などさまざまな重力条件で栽培されたシロイヌナズナの苗の微小重力環境への適応性が調査された。苗を白色光に 96 時間さらし、それから青色光に 48 時間さらした後、地上で詳細な分析を行うために軌道上で凍結した。苗の RNA を抽出の上配列を決定し、差次的に発現する遺伝子

（differentially expressed genes、DEG）を同定した。

分析の結果、すべての重力条件で 1 つの遺伝子のみが差次的に発現していることが明らかになった（図 5）。また、微小重力、月の重力、および減少重力については、14 個の同じ遺伝子が差次的に発現しているように見えた。これらの DEG は、光と光合成、化学反応やホルモン反応、細胞膜の構造や機能と関連していた。全体として、地球重力に近づくほど DEG の数は減少した。更に、低重力で栽培したシロイヌナズナの芽生えは、青色光を与えると光合

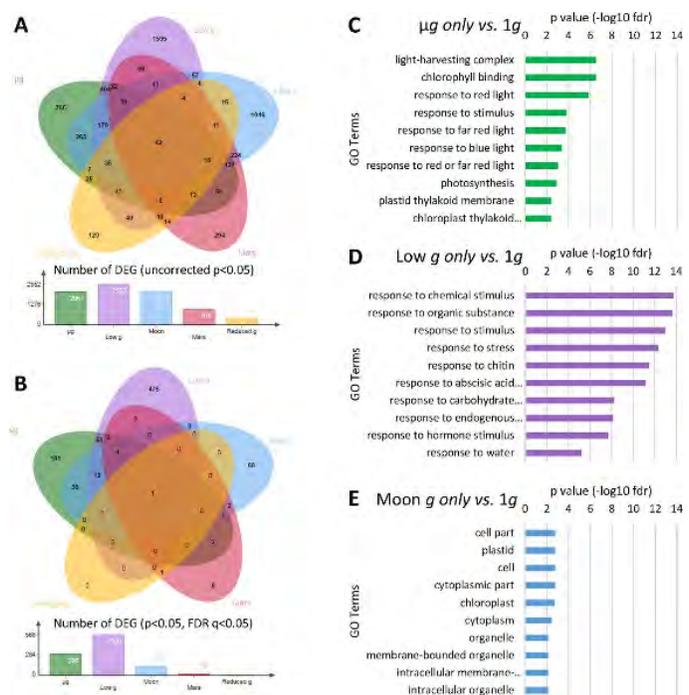


図5. さまざまな重力レベルでの DEG。パネル A と B は、補正前と補正後の結果を示す。パネル C、D および E は、さまざまな重力レベルにおける最も有意な遺伝子オントロジーを示す（画像提供：Herranz R, et al, *Frontiers in Plant Science*, 2019）。

成に関連する遺伝子の発現が減少し、重力と光知覚反応の間には共通の経路があることが示唆された。

本研究の結果は、現在と将来の宇宙での生物再生型生命維持システムにつながるものである。

He rranz R, Vandenbrink JP, Villacampa A, Manzano A, Poehlman WL, Feltus FA, Kiss JZ, Medina F. RNAseq Analysis of the Response of *Arabidopsis thaliana* to Fractional Gravity Under Blue-Light Stimulation During Spaceflight. *Frontiers in Plant Science*. 2019 November 26; 10: 11 pp. DOI: 10.3389/fpls.2019.01529.

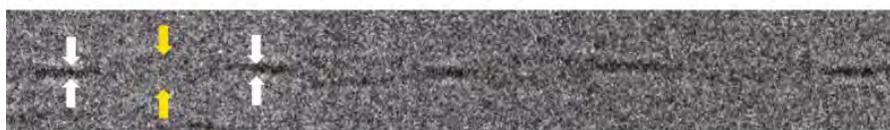


JAXA の微小重力環境下でのアミロイド線維形成と性状評価：神経変性疾患の発症機構解明に向けて (Amyloid) の研究では、パーキンソン病やアルツハイマー病などの治療薬の開発に向けて、アミロイド β 線維形成のメカニズムについて調べた。アミロイド β 線維は、神経変性疾患に関与するタンパク質である。この研究では、宇宙と地上でのアミロイド β 線維の成長（核形成と線

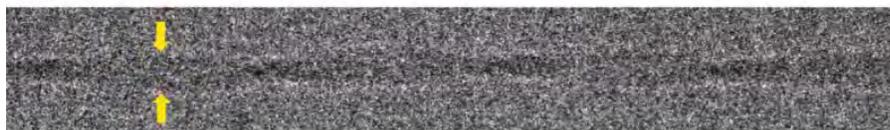
維伸長）を比較した。アミロイド β (1-40) サンプルを国際宇宙ステーション (ISS) へ運搬し、サンプルを 37°C で解凍してアミロイド β 線維を培養した。培養開始から 6 時間後、1 日後、3 日後、9 日後にサンプルを取り出し、再び凍結保存した。地上でも同じ試料を用いてアミロイド β 線維を培養し、対照線維とした。研究グループは、地球に戻ってきたサンプルについて、アミロイド β 線維を培養時に結合して発色する蛍光色素を用いて、アミロイド β 線維が

どの程度伸長しているかを調べた。さらに、3 次元的構造の再構成が可能なクライオ電子顕微鏡を用いてアミロイド β 線維の構造を調べた (図 6)。その結果、微小重力下で形成したアミロイド β 線維は、互いに見分けることが難しい、2 つの構造があることが分かった。宇宙で培養したアミロイド β 線維は、タンパク質結晶成長実験の時と同じ

(a) Type-1



(b) Type-2



(c) Type-G



図6. ISS 内で生成されたアミロイド β 線維 (タイプ1とタイプ2) と地上で生成されたアミロイド β 対照線維 (type-G)。画像提供：Yagi-Utsumi, M, et al, npj microgravity, 2020 年。

ように、地上で培養した時よりもはるかにゆっくりと成長することが分かった。

宇宙では対流や沈殿の影響を受けないため、地上とは異なる成長速度や構造のアミロイド β 線維が形成されたと考えられる。

この研究は、ISS の微小重力環境の利用が、アミロイド形成メカニズムや、より一般的には生体高分子結晶の自己形成メカニズムの探索に有効であることを示した。これらの成果により、アミロイド線維の形成を抑制できる医薬品開発、さらにアルツハイマー病をはじめとする神経変性疾患の予防・治療への進展に大きく役立つことが期待される。

Yagi-Utsumi M, Yanaka S, Song C, Satoh T, Yamazaki C, Kasahara H, Shimazu T, Murata K, Kato K. Characterization of amyloid β fibril formation under microgravity conditions. npj Microgravity. 2020 June 12; 6(1): 17. DOI: 10.1038/s41526-020-0107-y.



製薬企業 Eli Lilly and Co. (イーライリリー・アンド・カンパニー) と ISS ナショナルラボがスポンサーとなった、NASA の「長期の宇宙飛行にさらされたマウスの骨格筋の萎縮と弱体化を防ぐためのミオスタチン阻害の評価 (Rodent Research-3-Eli Lilly)」では、宇宙におけるげっ歯類の筋骨格系の分子的及び物理的变化を研究した。宇宙飛行にさらされたマウスは、筋ジストロフィー、骨粗鬆症、加齢に伴う筋骨格系の虚弱などの重篤な筋肉や骨の疾患モデルなど、廃用性筋萎縮や骨量減少の原因を理解し、標的化し、治療するための貴重なモデルになり得る。

最近の論文では、YN41 抗体の投与によるミオスタチンの阻害が、宇宙環境で予想される骨格筋量の減少を防ぐことができるかどうかについての研究結果が報告されている。マウスには、ISS への打上げ 1 日前と宇宙滞在 2 週間後と 4 週間後に、それぞれ YN41 を投与した。6 週間の実験のさまざまな時点で、マウスの握力と体組成を測定した。実験終了時に、マウスは安楽死後に宇宙で凍結保存されたが、右後肢は室温で保存された。

地上では、後肢からさらに腓腹筋、ヒラメ筋、足底筋を摘出、画像化し、筋繊維の断面積が測定された。

骨は染色され、定量的マイクロCTを用いて分析された。

その結果、ミオスタチンの処置で、微小重力によって誘発される除脂肪量、握力、筋重量（ヒラメ筋を除く）のすべての減少が抑制されることが示された（図7）。また、YN41が施されたマウスは心臓の重量減少も防ぐことができた。

さらに、ミオスタチンの阻害は、骨ミネラル密度に有害な影響を及ぼさなかったが、骨の損失を防ぐことはできなかった。

本研究では、宇宙という過酷な環境において生じる筋肉の減少を防ぐためには、ミオスタチン阻害が有効な対策であることが示された。

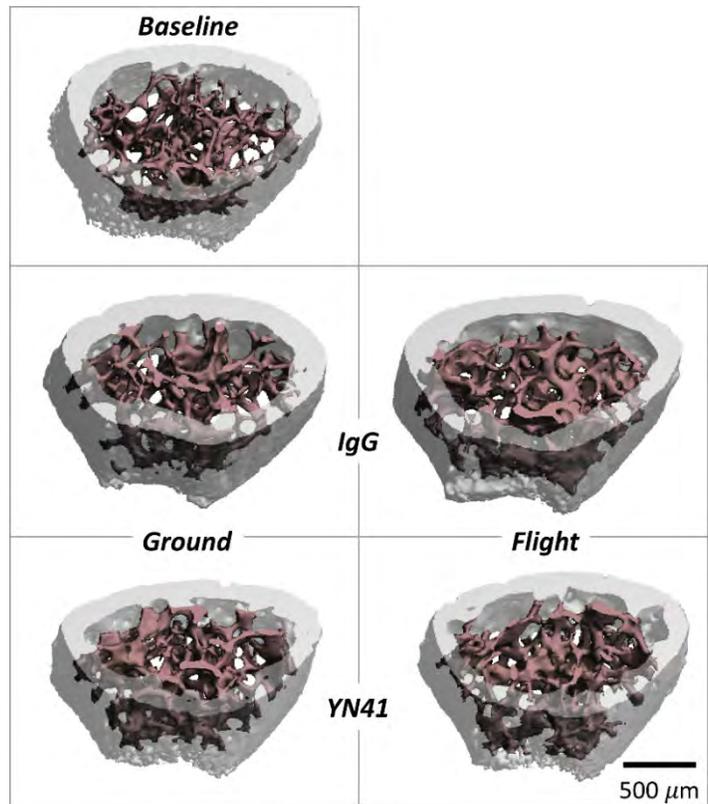


図7：IgG または YN41 が処置されたマウスの大腿骨遠位部から得られた、ベースライン、地上、および飛行群のマイクロCT撮影画像。IgG、地上群と比較して、飛行群では、海綿骨および皮質部位の両方の微小構造は、微小重力にさらされて有意に減少したが、ミオスタチン阻害では変化しなかった。画像提供：Smith RC.ら、PLOS ONE、2020年。

Smith RC, Cramer MS, Mitchell PJ, Lucchesi J, Ortega AM, Livingston EW, Ballard D, Zhang L, Hanson J, Barton K, Berens S, Credille KM, Bateman TA, Ferguson VL, Ma YL, Stodieck LS. Inhibition of myostatin prevents microgravity-induced loss of skeletal muscle mass and strength. PLOS ONE. 2020 April 21; 15(4): e0230818. DOI: [10.1371/journal.pone.0230818](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230818).



ロスコスモスは、**国際宇宙ステーションのRS (Rastenia-Pshenitsa (Plants-Wheat))**における植物の生育・発達の特徴と宇宙飛行中の培養技術の研究を行い、国際宇宙ステーションでの植物栽培方法の最適化を目指した。主な研究目的は、宇宙飛行が植物の発達に与える影響を研究することで、特に長期間微小重力にさ

らされた後の季節学(phenology)と遺伝子発現への影響を調べることであった。

新たな研究として、研究者らは、超矮性の小麦の種子を国際宇宙ステーションのロシアセグメントに搭載されている Lada 宇宙温室で育てた。90 日間にわたって成長させ、小麦の全サイクルを包含させた。乾燥させた小麦は地球に持ち帰り、穀粒の糠は走査型電子顕微鏡で形態学的に分析した。

宇宙で栽培された小麦の種子は、地上の対照試料よりも著しく大きく、重かった。

また、毛の長さや傾斜角度も大幅に減少した。種子の側面(頬)には大小の折り目があり、クロスセルと呼ばれる、イネ科植物のみに見られる横方向に伸びる細胞間の距離が有意に減少していた。また、種子壁の内表皮で成長する管状細胞の幅も減少していた。

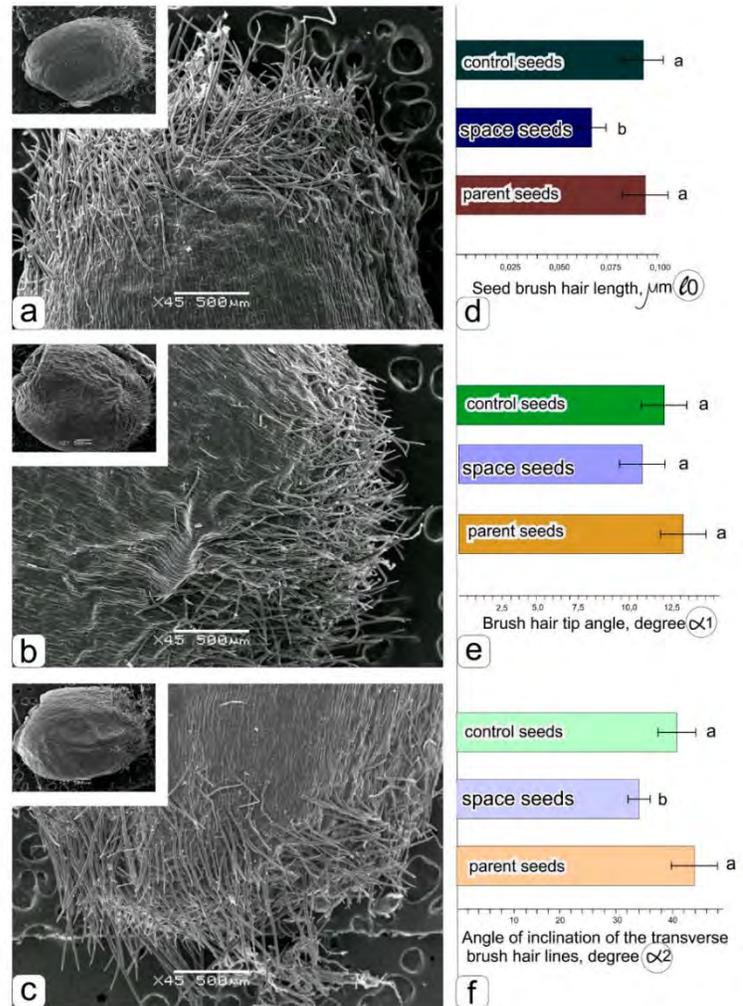


図8. 得られた穀物の穀粒とブラシ毛の表面：宇宙ステーション上の「Lada」温室で培養した a)地上条件および b)軌道上、そして、c)収穫された親種子。ヒストグラムは、d)ブラシ毛の長さ、e)毛先の角度、f)横方向のブラシ毛線の傾斜角度を示す。(画像提供：Baranova, EN.

これらの結果から、宇宙環境はカーネル表面の細胞の組織構造に様々な乱れを引き起こすが、これらの違いが宇宙での小麦植物の適切な発達を阻害するものではないことを示唆している。

Baranova EN, Levinskikh MA, Gulevich AA. *Wheat Space Odyssey: "From Seed to Seed". Kernel Morphology. Life.* 2019 October 25; 9(4): 81. [DOI: 10.3390/life9040081](https://doi.org/10.3390/life9040081).



ロシアの MBI-21 PnevmoCard（ニューモカード）実験の 4 回目のセッションであるエクスペディション 27 のフライトエンジニアで宇宙飛行士の Andrey Borisenko（アンドレイ・ボリゼネコ）。写真はズヴェズダサービスモジュール（ISS027E015221）で撮影された。

出版物のハイライト：

人を対象とした研究

ISS では、宇宙探査に伴う健康リスクを研究している。多くの研究は、微小重力環境や放射線環境との関係、栄養や睡眠、人間関係など宇宙生活に関わるリスクのメカニズムを調べている。その他には、これらのリスクを軽減する対策の開発とその試験設計も行われている。これらの一連の研究成果は、月面へのミッションや将来の火星探査ミッションの実現に欠かせないものとなっている。



宇宙での貧血は、人類が初めて宇宙に滞在した時から見られた。原因として疑われていたのは、体液シフトに早急に適応しようとするための赤血球の大規模な破壊（溶血）であった。しかし、最近の長期ミッションのデータでは、宇宙飛行士が ISS に滞在する間には貧血にはなっていないことが示された。そこで、CSA の

MARROW プロジェクトでは、宇宙貧血の問題点を明らかにし、その原因を突き止めるための方法設計を試みた。

過去 50 年に渡る宇宙飛行士のデータを調査した結果、MARROW は、体液シフトの後、地球帰還後に宇宙貧血が発生することを明らかにした。この研究の統計学的に強固な疫学のアプローチは、赤血球の損失は宇宙滞在時間に比例し、宇宙貧血からの回復にはミッション期間に応じて 1 か月から 3 か月かかることを示した。

また、本研究に係る別の論文では、微小重力環境下でのヒトの溶血マーカを測定する手法が述べられている。これは溶血と血液中の一酸化炭素濃度に相関があることに着目し、一酸化炭素

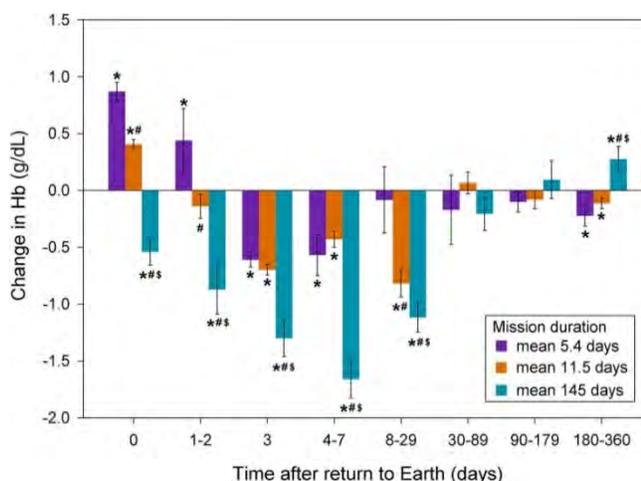


図9. ミッション期間別の帰還後のヘモグロビン (Hb) 濃度の変化。すべての宇宙飛行士は宇宙飛行後に Hb 濃度の低下を示したが、長期ミッションに参加した宇宙飛行士では最も顕著に低下した。(画像提供：Trudel, G. et al., American Journal of Hematology, 2019 年)

をマーカーとして、内因的に生成される一酸化炭素の濃度を 10 億分の 1 の精度で測定するものである。

MARROW では、宇宙飛行士の呼気サンプルを採取して一酸化炭素を調べ、宇宙貧血の原因を特定する計測手法の試験に成功した。これらの新たな研究結果は、宇宙貧血の問題を明らかにし、その原因に関するより多くの知見の獲得につながった。これは、宇宙貧血への対策や着陸後のモニタリングの指針をもたらすものである。

Trudel G, Shafer J, Laneville O, Ramsay T. Characterizing the effect of exposure to microgravity on anemia: more space is worse. American Journal of Hematology. 2019 December 2; 95(3): 267-273. DOI: 10.1002/ajh.25699. -- Shahin, N., Louati, H. & Trudel, G. Measuring Human Hemolysis Clinically and in Extreme Environments Using Endogenous Carbon Monoxide Elimination. Ann Biomed Eng 48, 1540–1550 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10439-020-02473-5>



これまでの研究では、通常時のナトリウム摂取量であっても、微小重力下ではナトリウム保持ホルモンが活性化し、正のナトリウムバランスを引き起こすことが示唆されている。微小重力環境下での平均的または高ナトリウム食は、宇宙空間での骨吸収を悪化させる可能性がある。

微小重力は、人体の体液調節に関与するメカニズムである浸透圧的に非活性なナトリウムの貯蔵に影響を与える可能性がある。この反応により、宇宙飛行中に塩分や体液が滞留する可能性がある。ESA の微小重力

下でのナトリウム負荷
(SODium LOading in
Microgravity、SOLO) の
研究では、宇宙飛行士の
中心血液量と宇宙および
地上での食事に含まれる
ナトリウム摂取量との関
係を調べた。宇宙飛行士
は 5 日間、減塩食グルー
プと高ナトリウム食
グループのいずれか



図10. 国際宇宙ステーションの Columbus 実験室で、NASA の宇宙飛行士 Dan Burbank (エクスペディション30 のコマンダー) は、微小重力下でのナトリウム負荷 (Sodium Loading in Microgravity、SOLO) 実験 (iss030e117431) の高塩食プロトコルのためのデータを入力している。

に割り当てられた。水分やその他の栄養素は、どちらの食事グループでも同じであった。調査の最終日に、宇宙飛行士から血液サンプルを採取し、血液サンプルに含まれる、ナトリウム、クレアチン、中間領域プロアトリア性ナトリウム利尿ペプチド、N 末端 Pro-B 型ナトリウム利尿ペプチド、アルドステロンを分析した。

その結果、食事の種類にかかわらず、宇宙飛行士は宇宙ではより多くのナトリウムを保持し、地球ではナトリウムをより多く排出する傾向があった。宇宙では胸水量が減少し、アルドステロンの調節は宇宙と地上でほぼ同じであった。

これらの結果は、圧力/容積の恒常性を促進するナトリウムの変化に関連する心房性ナトリウム利尿ペプチド濃度が、宇宙空間ではより低いレベルに調節されることを示唆している。研究者らは、その効果が一時的なものか恒久的なものかを判断するために、血液量調節におけるナトリウムの役割をさらに調べることを推奨している。

この研究の探究的なフェーズであり、宇宙飛行士の健康に欠かせない体液調節と恒常性における新しい研究への発展が期待される。

Frings-Meuthen P, Luchitskaya ES, Jordan J, Tank J, Lichthagen R, Smith SM, Heer MA. Natriuretic peptide resetting in astronauts. Circulation. 2020 May 12; 141(19): 1593-1595. DOI: [10.1161/CIRCULATIONAHA.119.044203](https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.119.044203).



宇宙滞在中は骨格筋が萎縮して弱くなる。多くの宇宙飛行士は地球帰還直後に起立性低血圧になってしまう。JAXA の**長期宇宙滞在飛行士の姿勢制御における帰還後再適応の解明 (Synergy)** 研究では、宇宙飛行士の足の血流と重心、骨格筋の活動電位を測定し、起立能力が地球帰還後にどのように回復するかを調べた。

研究グループは、レーザー血流計を用いて宇宙滞前後の宇宙飛行士の血流を調べた。近赤外光レーザー血流計を用いることで、生体を傷つけずに皮膚表面に近い毛細血管や微小血管の血流を測定できた。また、光の波長を利用して血流を測定するため、時間の経過に伴う皮膚の血流変化を測定できた。宇宙飛行士の右ふくらはぎに血流測定装置を取り付け、同じ場所で5回跳んで血流を測定した。

長期宇宙滞在した宇宙飛行士に対して行った帰還1日後と7日後の測定結果から、3～6か月の長期宇宙滞在によって、足の血流が低下することが分かった。しかし、地球帰還1か月後には、運動を行ったことで、長期宇宙滞在前の血流値まで回復した。地球帰還後の運動により、筋肉量とポンプ作用が高まり、足の血流が良くなったためと考えられる。

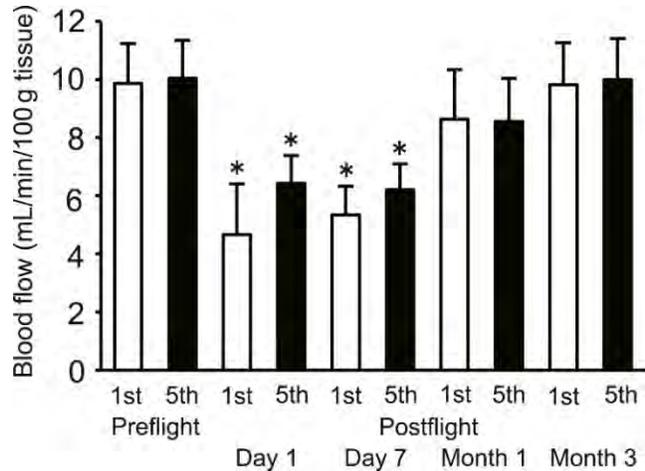


図11. 長期宇宙滞在前と長期宇宙滞在後の測定開始1日目、7日目、1か月目、3か月目の宇宙飛行士の右足の血流測定結果を、同一場所で跳んだ最初のステップと5回目のステップに分けて描いた棒グラフ。(画像提供: Ishihara, A. *Acta Astronautica*, 2020.)

この研究結果から、血流を高めるためには、地球帰還後1ヶ月程度のリハビリテーションが必要であることが分かった。今後、研究グループは、ケガ、病気、加齢、無重力などにより低下した血流を回復させるために、高気圧酸素治療装置の導入を検討している。長期宇宙滞在から帰還後の地上再適応の過程が解明されれば、計画的なリハビリテーションプログラム構築が期待できる。

Ishihara A, Terada M, Hagio S, Higashibata A, Yamada S, Furukawa S, Mukai C, Ishioka N. Blood flow in astronauts on Earth after long space stay. *Acta Astronautica*. 2020 May 16; epub: 16 pp. DOI: [10.1016/j.actastro.2020.05.017](https://doi.org/10.1016/j.actastro.2020.05.017).



カルシウム損失を生じさせる微小重力に関連した代謝変化は、宇宙飛行中の骨密度低下をもたらす可能性がある。ASIの**微小重力による骨粗鬆症の治療のためのナノ粒子ベースの対策 (Nanoparticles-based countermeasures for Treatment of Microgravity-induced Osteoporosis)** (ナノ粒子と骨粗鬆症) では、骨量減少対策におけるナノ粒子の役割を調査した。本研究の成果は、宇宙飛行士の健康を守るとともに、地球上で骨粗鬆症などの骨疾患を持つ人の健康を守ることにもつながることが期待されている。

本研究では、カルシウム (nCa-HAP) とストロンチウム (nSr-HAP) の懸濁液を含む新しいナノ粒子薬剤が、ヒトの骨髄幹細胞の分化に及ぼす影響を3つの重力条件: 地球重力、ランダムポ

ジショニングマシンを用いた模擬重力、ISSの微小重力、の条件でヒト骨髄幹細胞の分化に及ぼす影響を調べた。

ヒト骨髄間葉系幹細胞 (hBM-MSC) のサンプルを単離し、その特性を評価するために表現型解析を行った。hBM-MSCs は、骨形成を誘導するための培地維持性低グルコース骨形成培地で、5%CO₂ を添加した加湿インキュベーターにより 37°C で培養された。実験は 28 日以内で行われ、培地は 3 日ごとに交換した。免疫蛍光色素により、細胞死、細胞構造の変化および骨の細胞外マトリックスの沈着を識別した。

その結果、新たな骨の再生に対する効果が認められた。重力条件ごとに、ストロンチウム含有ナノ粒子は、幹細胞の骨芽細胞への分化を促進し、微小重力によって誘発される骨粗鬆症を打ち消し、あるいはナノ粒子の沈着を改善した (図 12)。

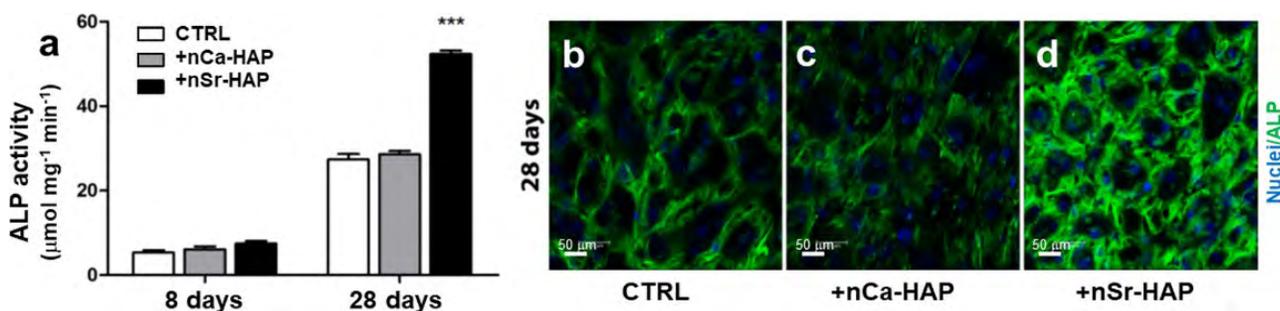


図 12. 重力条件下でのアルカリ性ホスファターゼ (ALP) 活性およびタンパク質の免疫局在に与えるナノ粒子の影響。パネル a) 無処理、骨形成培地中で 8 日間および 28 日間カルシウムまたはストロンチウム処理した細胞の ALP 特異的活性を測定した。パネル b) ~d) は、骨原性培地で 28 日間培養した b) 未処理細胞、c) カルシウム処理細胞または d) ストロンチウム処理細胞の ALP 免疫染色の代表的な画像。(画像提供: Cristofaro, F. Scientific Reports, 2019 年)

研究者らは、骨のリモデリングを促進するための薬の伝達は、医薬品または食品サプリメントを通して実施できると考えている。

Cristofaro F, Pani G, Pascucci B, Mariani A, Balsamo M, Donati A, Mascetti G, Rizzo AM, Visai L, Rea G. The NATO project: nanoparticle based countermeasures for microgravity-induced osteoporosis. Scientific Reports. 2019 November 20; 9(1): 1-15. DOI: [10.1038/s41598-019-53481-y](https://doi.org/10.1038/s41598-019-53481-y).



ロスコスモスの **Early Detection of Osteoporosis in Space (EDOS)** 研究は、高解像度の3次元末梢骨定量コンピュータ断層撮影 (3DpQCT) 技術を用いて骨量の減少を調べ、骨のバイオメカニクスに関する情報を提供することで、骨の機能障害や骨の微細な構造変化を早期に発見することを目的としている。目標は、微小重力環境下でのミッション後の骨組織の正確な測定のために、

3DpQCT の実行可能性と実現可能性を実証することである。

新たな研究として、宇宙飛行前後の詳細な腰部の骨ミネラル分析を実施して、腰部の骨密度を推定した。

その結果、腰椎の投影面積の飛行前と飛行後の値には有意な差はないことが明らかになった。この成果は、解剖学的な変化がなかったことを示している。よく知られている、腰椎部位の高さの増加は本調査では観察されなかった。

詳細な分析によって、腰椎は骨ミネラル

含有量変化の負のパターンによって特徴づけられることを示した。さらにミネラル含有量を初めて調べた結果、腰部の上部領域で観察されたミネラル化の減少は、地球の重力下で腰部領域に機能的に大きな負荷がかかったことに起因することが示されている。研究者らは、これは、負荷のかからない椎骨が悪化する可能性が高い、地球上での骨粗鬆症の発症態様とは正反対であると指摘している。

微小重力環境下における宇宙飛行士は、地球上の骨粗鬆症と同様の骨量減少を示すことから、本研究は骨粗鬆症の早期発見を可能にする医療機器の開発に貢献することが期待される。初期診断技術の改善は、地球上において骨粗鬆症の影響と闘う将来的な治療法の概念化への貢献が期待される。

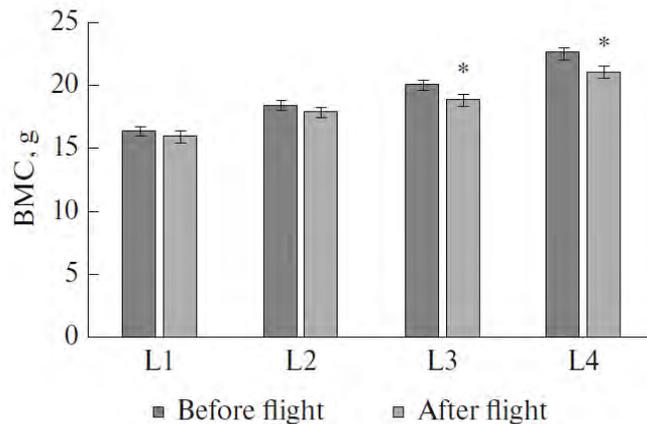
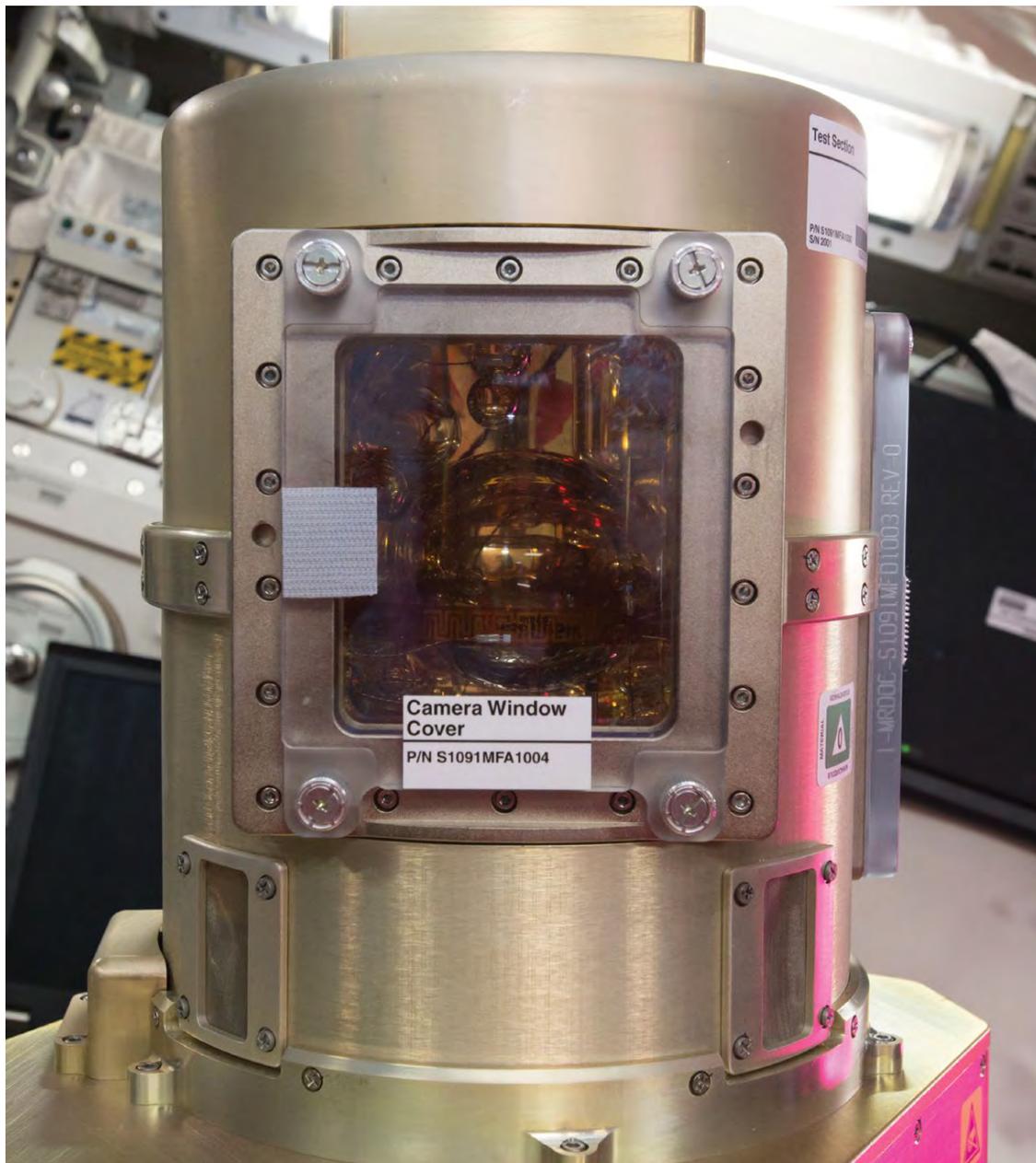


図13. 飛行前と飛行後の腰椎の様々な場所の骨ミネラル含有量。画像提供：Gordienko, KV 2019 年

Gordienko KV, Novikov V, Servuli E, Nosovsky AM, Vasilieva GY. Detailed Analysis of the Central Osteodensitometry Data from Cosmonauts Participating in the Mir and ISS Programs. *Human Physiology*. 2019 December 1; 45(7): 764-767. DOI: [10.1134/S0362119719070065](https://doi.org/10.1134/S0362119719070065).



Zero Boil-Off Tank (ゼロボイルオフタンク、ZBOT) 実験用 Vacuum Jacket Camera Window Cover (真空ジャケットカメラウィンドウカバー) 装置の外観。ZBOT では、揮発性液体のタンク圧力を制御するために、実験流体を使用して能動的な熱除去と強制ジェット混合をテストする。調査結果は、バイオテクノロジー、医療、工業、および地球上の他の多くのアプリケーションで不可欠な長期極低温液体貯蔵のためのタンク設計に使用されるモデルを改善する。(ISS051E028301)

出版物のハイライト :

物理科学

重力の存在は、物質の振る舞いを扱う物理学の理解および基本的な数学モデルの開発に大きな影響を与える。ISS は、科学者が対流や沈降などの重力に関連した過程を複雑化することなく、重力がない状態で長期的な物理的影響を研究できる唯一の実験室である。このユニークな微小重力環境では、これまでとは異なる物理的特性でシステムを支配することができ、また、科学者たちは物理科学のさまざまな研究にこれらの特性を活用できる。



ESA の EML バッチ 1 -THERMOLAB 実験では、凝固プロセスを改善するために工業用合金の熱物性値を測定している。最近では、ISS に搭載された電磁浮遊炉 (Electro-Magnetic Levitator、EML) で実施された一連の研究について報告している。特にこの研究は、タービンやその他のエネルギー用途で広く使用される 3 種類の

市販の高温合金 (ニッケル基超合金) について得られた結果が述べている。これらの結果には、地球上では取得できない高精度な熱物性データ (液面張力、粘度、質量密度、比熱容量) が含まれており、製造効率や製品品質の向上には欠かせないものである。

実験の結果、3種類の超合金の安定液相では、表面張力は低くて粘

度は高く、全体の密度は重元素の量に支配されていた (図 14)。また、持ち帰った試料では酸化物形成の兆候は見られず、無容器処理の方が比熱容量の精度が高いことがわかった。

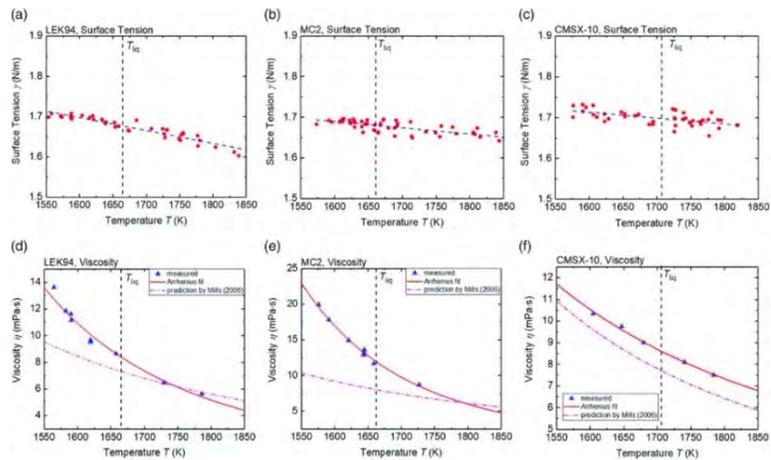


図 14. パネル a-c は、温度に対する LEK94、MC2 および CMSX-10 の表面張力を示す。パネル d-f は、温度に対する LEK94、MC2 および CMSX-10 の粘度を示す。(画像提供: Mohr, M. Advanced Engineering

本研究は、ISS の EML 装置での長年の努力、溶融物の特性を高精度で測定する実験技術の開発、および産業用合金へのこれらの実験技術の適用が 1 つになることで実現した成果である。本論文は、科学的にも工学的にも意義あるもので、これらのトピックの参考文献となることが期待されている。

Mohr M., Wunderlich R., Dong Y., Furrer D., Fecht H.-J.; "Thermophysical properties of advanced Ni-based superalloys in the liquid state measured on board the International Space Station (国際宇宙ステーションで測定した液体状態での先進的 Ni 基超合金の熱物性)"; *Advanced Engineering Materials* 22/4 (2020):1901228 [DOI 10.1002/adem.201901228](https://doi.org/10.1002/adem.201901228)



JAXA の**静電浮遊炉 (Electrostatic Levitation Furnace : ELF)** は、無容器処理技術を用いて物質を浮遊・溶融・凝固させる材料実験装置である。研究グループはこの装置を利用して、サンプルを高温で浮遊溶融させて、熱物性値の測定や過冷却状態からの凝固実験を行っている。ELF では浮遊したサンプルに半導体レーザーを 4 方向から照射し、サンプルを 2000℃以上に加熱することができる。さらに、地上では難しい、高精度かつ広い温度領域での熱物性値 (密度、表面張力、粘性) を測定することができる。ELF を利用することで、新材料の創出などの研究にも適用できる。ELF は、ISS の他の浮遊炉が扱うことができない酸化物や絶縁体もサンプルにすることができる。

新たな ELF 実験により、高エネルギー X 線を用いて酸化エルビウム(Er_2O_3)液体の原子配列と電子状態や、ガラスにならない超高温酸化物液体が持つ特異構造が明らかとなった。また、四面体クラスターの形成と非常に鋭いピークが明

示された。また、四面体クラスターの形成と非常に鋭いピークが明

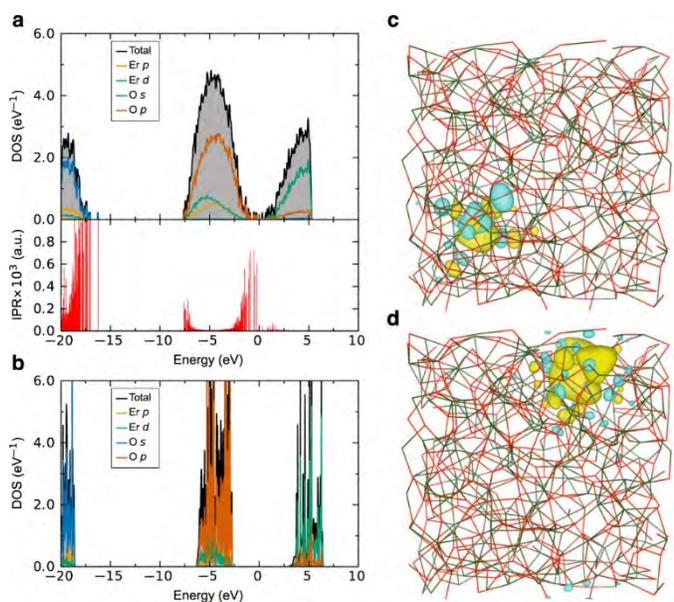


図 15. a) 原子レベルの分解能で測定された l-Er₂O₃ の密度と固有ベクトル尖度 (Inverse Participation Ratio: IPR)。b) 測定された参考試料 c-Er₂O₃ の密度。c) 最高占有分子軌道の可視化モデル。d) 最低空軌道の可視化モデル。Er と O の原子をそれぞれ緑色と赤色で示す。黄色と水色は波動関数の符号に対応している。(画像提供 : Koyama, C. *NPG Asia Materials*, 2020)

らかとなった。四面体クラスターは正八面体で規則的に配置されており、外部からの力に対する耐性が高い。

注目すべき点は、この四面体クラスターはほぼ直線的に交っており、これは他の酸化物液体では見られない。また、測定された粘度から、酸化エルビウム(Er_2O_3)液体は非常に不安定であることが分かった。

研究グループが見つけた非常に鋭いピークは、秩序周期的構造を持つ四面体クラスターの特異性を表している。液体酸化エルビウム(Er_2O_3)液体の構造を理解することで、化学事故防止や新材料開発につながることを期待される。

Koyama C, Tahara S, Kohara S, Onodera Y, Smabraton DR, Selbach SM, Akola J, Ishikawa T, Masuno A, Mizuno A, Okada JT, Watanabe Y, Nakata Y, Ohara K, Tamaru H, Oda H, Obayashi I, Hiraoka Y, Sakata O. Very sharp diffraction peak in nonglass-forming liquid with the formation of distorted tetraclusters. NPG Asia Materials. 2020 June 2; 12(1): 1-11. DOI: [10.1038/s41427-020-0220-0](https://doi.org/10.1038/s41427-020-0220-0).



NASA の Cold Atom Lab - Bose-Einstein Condensate Bubble Dynamics (コールドアトムラボ-ボース-アインシュタイン凝縮バブルダイナミクス) 研究は、ボース-アインシュタイン凝縮 (BEC) として知られる量子ガスを生成し、泡状に保ち、超低温状態の物質を調べることにより、量子力学に関する疑問に答えるものである。泡状の量子ガスの挙動を理解することで、次世代の量子センサーや量子シミュレーターの性能向上に資する。超低温の研究は、ボース-アインシュタイン凝縮の

最初の観測以来、過去 20 年間で飛躍的に発展してきた最前線の研究分野である。新しい閉じ込め構造の量子ガスを調べることで、BEC 物理学の新しい領域の探索が可能になり、超低温システムの性質が解明される。

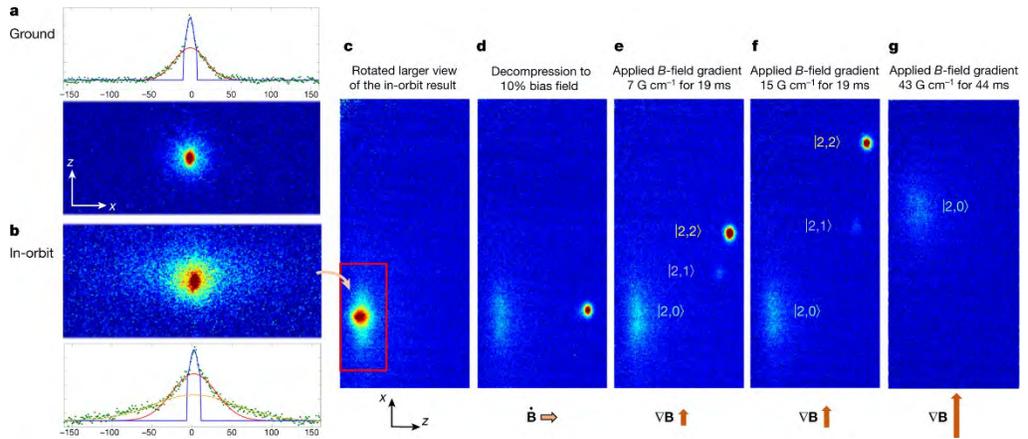


図 16. 着色された吸収画像は、地上の CAL で生成された BEC を示す。(画像提供: Aveline DC, Nature, 2020 年).

今回の研究では、原子ガスを冷却し捕獲することで、ボース-アインシュタイン凝縮 (BEC) を形成させ、それにより、微小重力下で長期にわたり巨視的スケールでの量子の振る舞いを調査できるようにした。微小重力下では弱い磁場で原子を操作できるため、冷却を速め、また、拡散する前に BEC の鮮明な画像を取得することができた。科学者たちは、第 5 の物質状態を微小重力下で初めて観測し、アインシュタインの相対性理論に対する前例のない洞察をもたらした。

微小重力下での BEC の研究は、重力波、宇宙探査機の航法、月や他の惑星での地表鉱物の探査などの研究に新たな可能性をもたらす。

宇宙で BEC という新たな物質状態を研究できることで、超低温原子物理学の分野で研究を行うための施設としての宇宙ステーションの必要性が高まった。地球上での日常生活への応用として、量子コンピュータの開発がある。さらに ISS では定期的に BEC を生成できるため、ユニークなトラップトポロジー、原子レーザー源、少数系、原子波干渉計のための画期的な技術などの研究推進に繋がることが期待される。

Aveline DC, Williams JR, Elliott ER, Dutenhoffer CA, Kellogg JR, Kohel JM, Lay NE, Oudrhiri K, Shotwell RF, Yu N, Thompson RJ. Observation of Bose–Einstein condensates in an Earth-orbiting research lab. Nature. 2020 June 11; 582(7811): 193-197. DOI: [10.1038/s41586-020-2346-1](https://doi.org/10.1038/s41586-020-2346-1).



NASA の宇宙飛行士 Serena Auñón-Chancellor が、多目的可変G プラットフォーム (Multi-use Variable-g Platform、MVP) 実験装置へセメント固化の微小重力研究 (Microgravity Investigation of Cement Solidification、MICS) モジュールを挿入する作業を行っている (ISS057E106261)。

出版物のハイライト：

技術開発・実証

将来の探査 - 月や火星の有人探査 - には、多くの技術的課題がある。ISS での研究で、将来の探査ミッションに必要とされる様々な技術、システム、材料を試験できる。一部の技術開発研究は成功を収め、試験用ハードウェアは運用状態に移行している。その他にも、新しい技術開発につながる成果がある。



NASA の**生体分子シーケンサー**の研究では、科学者が宇宙でリアルタイムに DNA 配列を解読できる恒久的な分子生物学的機能が評価されている。この新たなリソースにより、微生物の遺伝子発現を迅速に調べることができ、クルーの自立的な意思決定や問題解決に資することが可能となる。

今回の研究では、ISS に搭載される装置でのエンドツーエンド試験として、サンプルからシーケンサー（アミノ酸配列分析）までの全てのプロセスについて開発とテストが行われた（図 17）。ISS に搭載されたユニットで得られたブドウ球菌などの同定は、地上で決定されたものと種のレベルまで一致し

た。これは、完全に地球外で微生物を同定した初の試みであり、この検証されたプロセスは、飛行中の微生物の同定、乗組員の感染症診断、さらには世界中の研究者の研究プラットフォームとして利用できる可能性がある。

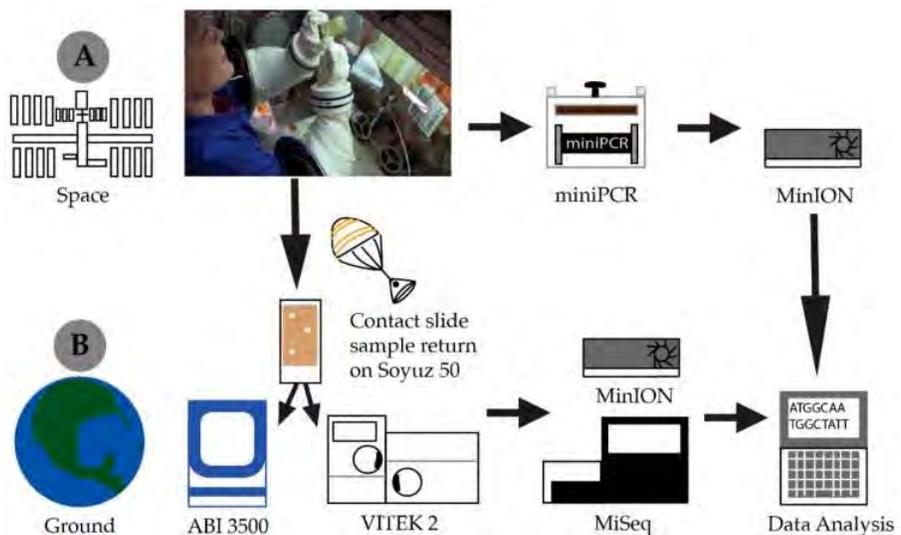


図 17. 国際宇宙ステーションで培養された細菌コロニーの初の軌道上でのアミノ酸配列分析のサンプルライブラリ調整と in-situ でのアミノ酸配列分析のワークフロー。（画像提供：Burton, A. Genes, 2020 年。）

このシーケンサーは、微生物の同定、病気の診断、リアルタイムのゲノムデータ収集ができ、ISSでの科学研究を大幅に向上させ、加速できる。またこの技術により、宇宙飛行士は将来の火星ミッションにおいて、DNAやDNAに似た分子に基づいた生命体の検査や同定を行えるようになる。

Burton AS, Stahl SE, John KK, Jain M, Juul S, Turner DJ, Harrington ED, Stoddart D, Paten B, Akeson M, Castro-Wallace SL. Off Earth Identification of Bacterial Populations Using 16S rDNA Nanopore Sequencing. *Genes*. 2020 January 9; 76(11): 76. DOI: [10.3390/genes11010076](https://doi.org/10.3390/genes11010076).



ロシアのコモスの微小重力下における単分散液滴流の流体力学と熱伝達の研究

(Kaplya-2) 研究では、単分散液滴流の主要パラメータを検証することにより、微小重力下および高真空下における液滴発生器の動作を試験し検証した。さらに、密閉油圧サイクルでの連続運転を確認した。

本研究では、宇宙船から低保有熱を除去するために使用されるラジエータ冷却器の設計について、包括的な解析を行った。一連の計算と実験の結果として、液滴放射冷却器(DRC)のユニットは製作され、地上条件で試験されてきた。新しく開発されたユニットは、地上試験で実施された運用プロセスである密閉サイクルで試験された。地上試験の結論は、液滴放射冷却器(DRC)が、排熱率と重量サイズ特性に関して下記が確認され、熱交換器の既存のすべての設計を大幅に上回っていることを示している。

- 液滴発生器内の圧力が定常領域に達したとき、単列発生器および多列発生器の出口における並列噴射流が作動媒体による安定した液滴流を生成する。
- 受動的な液滴収集器の運転能力。
- 作動媒体の完全な収集を保証する、能動的な液滴収集



図18. ロシアの宇宙飛行士 Oleg Kotov (オレグ・コトフ) (第38次隊長)が、国際宇宙ステーションのラスベット小型研究モジュール1(MRM1)にカプリア2実験のための粒子冷却器/発生器モジュールを設置している (ISS038E029764)。

器を製作する基本的な可能性。

この研究で得られた科学的・技術的結果は、宇宙空間で使用される発電設備用の液滴冷却放熱装置の設計・開発のために、液滴冷却放熱装置のワークフローの妥当性を検証するものである。冷却材と放熱面との熱抵抗が最小で、隕石による破壊に対する保護機能があり、質量が小さいことから、これらの放熱装置は宇宙船での利用に有益であると考えられる。

Konyukhov GV, Bukharov AV, Konyukhov VG. On the problem of rejection of low-potential heat from high-power space systems. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2020 February 27; 93: 16-27. DOI: 10.1007/s10891-020-02086-8.



ロシア宇宙の **Development of a System of Supervisory Control over the Internet of the Robotic Manipulator in Russian Segment of ISS (国際宇宙ステーションのロシアセグメントにおけるロボットマニピュレータのインターネット上での監視制御システムの開発) (Kontur)**では、ジョイスティックをインターネットを介して遠隔操作するための視覚制御システムで現れる時間的遅延を調査している。

将来の火星探査においては、火星に人間を送り込んで居住環境を整備するのではなく、宇宙からロボットを遠隔操作して居住環境を構築する方法がある。この方法の実現可能性を探る本研究では、ISS を火星の軌道以上に待機する船、地球を遠隔操作ロボットの設置場所とみなして、ジョイスティックからの力覚フィードバックが、微小重力環境下でも地上と同様に有意義であるかどうかを調査した。ロボットを湾曲した構造に沿って移動させる時にロボットの迅速な照準運動を必要とする自由運動タスクと、表面の接触を最小



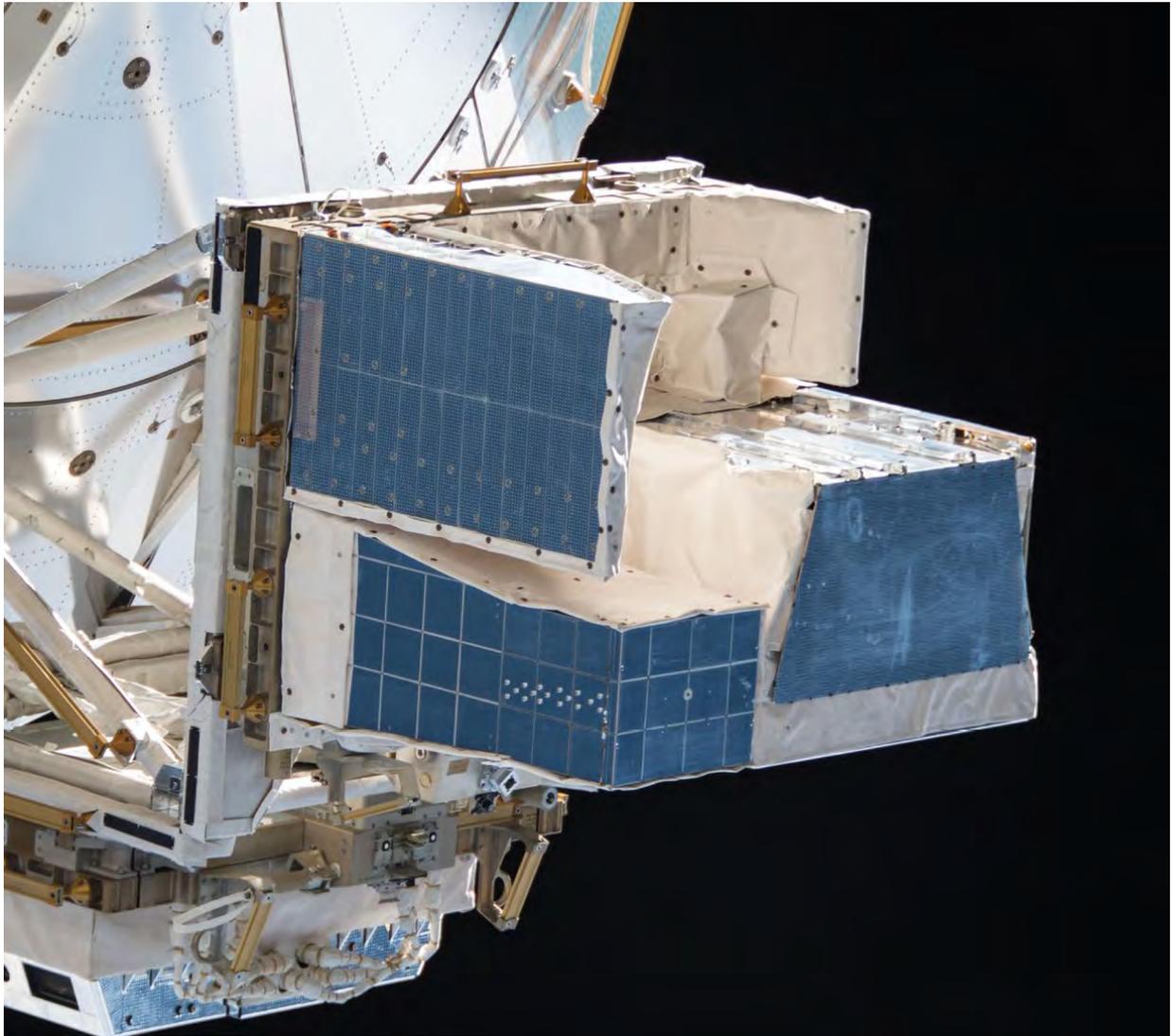
図19. コントゥール-2 実験中のロシア宇宙飛行士 Oleg Novitsky。画像は、ズヴェズダサービスモジュール (issa050e075473) で撮影されたもの。

限に抑える接触タスクの2つのタスクを用いて、無重力状態での操作をサポートするために、タッチアンドモーション技術を宇宙の環境条件の変化に合わせて調整する必要があるかどうかを調べた。

その結果、微小重力が6週間後に運動制御へ影響を及ぼしたことを示した。無重力状態では補完することが難しい、人体や手足への大きな反動を回避するため、速度から正確さへと運動制御戦略を変更した。またタッチアンドモーション技術を利用すると、微小重力下でのパフォーマンスが低下した。今後の研究では、特定のパラメータが宇宙飛行中のパフォーマンスをどのように阻害しまた促進するかを調査することが考えられる。

本研究の結果は、宇宙からの遠隔操作ミッションでは力覚フィードバックが不可欠であることを強調している。研究者らは、より大きなサンプルやより広範なタスクを用いて、さまざまなミッションフェーズで、宇宙からの遠隔操作を継続的に調査することを推奨している。

Weber B, Balachandran R, Riecke C, Stulp F, Stelzer M. Teleoperating robots from the International Space Station: Microgravity effects on performance with force feedback. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2019, Macau, China; 2019 November 4. 8138-8144. [Webpage](#)



コロバス欧州実験棟に設置された外部実験設置設備の外観。大気宇宙相互作用モニタと高解像度地球観測装置が見える。写真は地上制御の外部高解像度カメラ3で撮影したもの (iss057e080463)。

出版物のハイライト：

地球宇宙科学

低軌道上の宇宙ステーションの高度及び軌道は、地球科学や宇宙科学のデータを収集する上で、ユニークな視点を提供する。約 400km の平均高度から、ISS が撮影した画像にある氷河、田畑、都市、サンゴ礁などの詳細は、他の衛星などのデータと組み合わせることで、包括的な情報を提供できる。現在、多くの人工衛星が宇宙を周回している中、国際宇宙ステーションは地球や宇宙のユニークな姿を提供し続けている。



ESA の大気-宇宙相互作用モニタ (Atmosphere-Space Interactions Monitor、ASIM) は、激しい雷雨、大気、気候を研究するために設計された地球観測施設である。ASIM は、国際宇宙ステーションのコロンバスモジュールに搭載された船外の実験装置で、過渡発光現象 (TLE) や地上ガンマ線フラッシュ (TGF) などの高高度放電を観測することができる。

本研究では、研究者らは ASIM の 3 つの光度計で得られたデータを用いて、TLE と TGF が独立した現象であるか、何らかの関連性がある現象であるかを調査した。

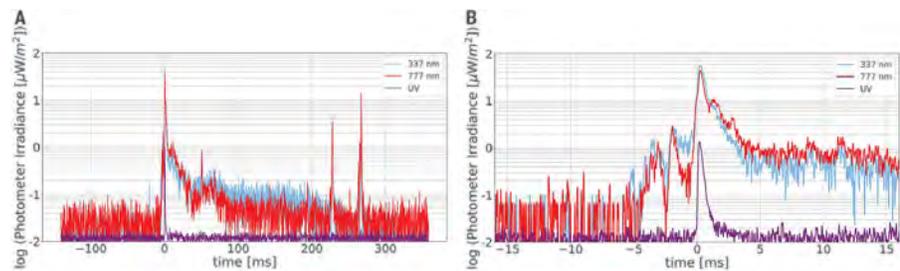


図 20. 雷放電の分析。(画像提供：Neubert, T. Science, 2019 年.)

ASIM により、雷放電の初期段階で生成される TGF を確認した。この TGF は、インドネシアのスラウェシ島付近で観測された。光学測定と X 線測定に用いられた複数のパラメータから、対流雲が TGF に関連した雷の発生源であることが確認された。TLE (すなわち elve) も検出されたが、電磁パルスの移動時間に対応する遅延があった。TLE の光パルスは明るく、活動前から発生している。この遅延はセンサー感度の制限に起因することを示唆している。光パルスは TGF とほぼ同時に開始される。

これらの観測は、TGF の様々な光・紫外線・x 線・ガンマ線帯を用いた発光の時間的シーケンスを示し、TLE と TGF が関連していることを示している。

ASIM の調査により、電離層や放射線帯に関連した雷雨や、地球大気に影響を与える流星分布についての知識が向上した。

Neubert T, Ostgaard N, Reglero V, Chanrion O, Heumesser M, Dimitriadou K, Christiansen F, Budtz-Jorgensen C, Kuvvetli I, Rasmussen IL, Mezentsev A, Marisaldi M, Ullaland K, Genov G, Yang S, Kochkin P, Navarro-Gonzalez J, Connell PH, Eyles CJ. A terrestrial gamma-ray flash and ionospheric ultraviolet emissions powered by lightning. Science. 2019 December 10; epub: 8 pp. DOI: [10.1126/science.aax3872](https://doi.org/10.1126/science.aax3872).



国際宇宙ステーション (ISS) の「きぼう」日本実験棟船外実験プラットフォームに搭載された JAXA の船外実験装置である、**宇宙環境計測ミッション装置 (SEDA-AP)**、**高エネルギー電子・ガンマ線観測装置 (CALorimetric Electron Telescope: CALET)**、**全天 X 線監視装置 (MAXI)** は、3 つの装置が連携して、相対論的電子降下現象 (Relativistic Electron Precipitation: 以下、REP 現象) 発生時の放射線量を測定した。REP 現象発生時の放射線量を測定することで、将来の放射線量が宇宙飛行士の健康に重大なリスクをもたらすかどうかを判断できるようになる。

50 年以上にわたり、研究グループは REP 現象のメカニズムを解明してきた。REP は、宇宙天気予報や地球の大気に影響を及ぼすことが分かっており、中間圏で起こった異常をきっかけに原子がイオン化して生じた現象である。REP 現象発生中は、夜間に高磁気緯度地域を通過する ISS で船外活動中の宇宙飛行士への被ばく

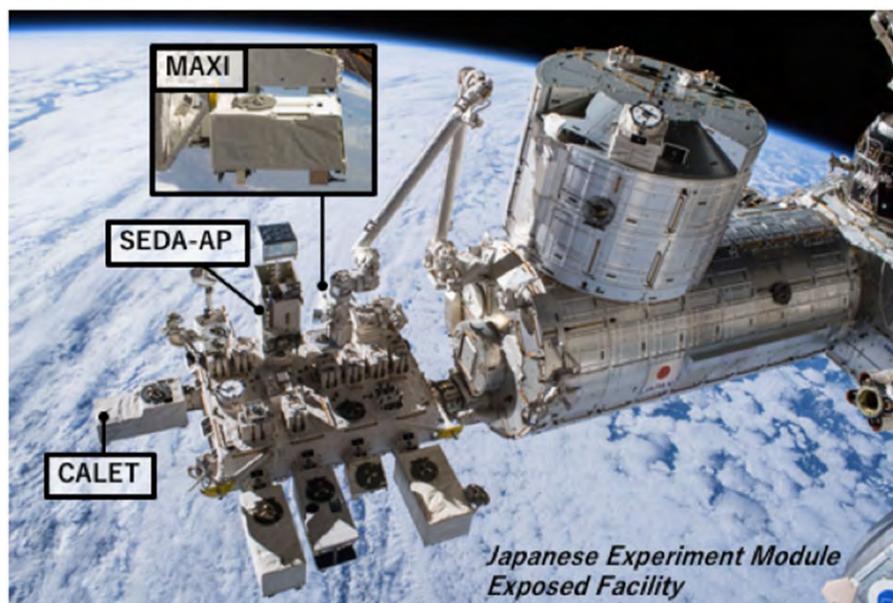


図 21. 「きぼう」日本実験棟船外実験プラットフォームに搭載された SEDA-AP、CALET、MAXI

が懸念されている。そこで、研究グループは3つの観測装置の同時観測データを用いて、放射線量データの取得に成功した。

3つの観測装置を用いて同時観測した約2年半の間に、762イベントのREP現象が観測され、最大のREPイベントでは約3mSvに達することが分かった。ISS船内における静穏環境で1日に受ける放射線量は約1mSvであるが、それを超える34イベントのREP現象も観測された。次に、船外活動中にREP現象が発生したと仮定して、宇宙飛行士のヘルメットを突き抜けて目の水晶体に与える放射線量を計算した。研究グループは、多くの放射線電子が目の水晶体に大きな影響を与えることを発見した。しかし、目の水晶体への放射線量は制限値よりも低いことが分かった。

研究データから、1回のREPイベントで受ける放射線量は低く、宇宙飛行士の健康に影響を与える可能性は低いが、複数の放射線被ばくが積み重なると健康に影響を与える可能性が高まる。この研究は、ISSの実験装置の観測データを組み合わせることで、本来の研究分野を超えた新たなデータ活用の可能性を示すものとなった。

Ueno H, Nakahira S, Kataoka R, Asaoka Y, Torii S, Ozawa S, Matsumoto H, Bruno A, de Nolfo G, Collazuol G, Ricciarini SB. Radiation dose during relativistic electron precipitation events at the International Space Station. *Space Weather*. 2020 July; 18(7): 7 pp. DOI: [10.1029/2019SW002280](https://doi.org/10.1029/2019SW002280).



NASAの天体物理学の研究を可能にするアークセカンド宇宙望遠鏡

(Arcsecond Space Telescope Enabling Research in Astrophysics、ASTERIA)は、

太陽系外の惑星の検出や星の明るさの経時変化など、天体物理学的観測や複雑を測定するた

め、新たな技術獲得のために設計されたものであり、ISSから放出される6基の小型衛星である。

この研究の目的は、秒角レベルの照準誤差や焦点



図22. 国際宇宙ステーション (ISS) からの展開後のアステリア衛星の様子。天体物理学の研究を可能にするアークセカンド宇宙望遠鏡 (Arcsecond Space Telescope Enabling Research in Astrophysics、ASTERIA) は、太陽系外の惑星の検出など、天文学観測のための新技術を試験するために国際宇宙ステーション (ISS) から配備された6ユニット (6U) のCubeSatである (ISS053E470644)。

面温度制御などの最先端技術を用いて精密測光を可能にすることである。宇宙空間での測光は、宇宙物理学の強力なツールである。既存の大型宇宙望遠鏡では時間をわずかにしか変動できないため、小型衛星プラットフォームが論理的な代替手段となる。

ASTERIA は、55 Cancri（かに座 55 番星）と呼ばれる太陽系外惑星系の日和見観測と測光データに使用された。研究者らは、データを調整し、信頼性の高い結果を得るために、高度な数学計算を用いたルーチンワークフローを実装した。解析の結果、太陽のような恒星を周回する、よく知られたトランジット・スーパーアースである太陽系外惑星 55 Cancri e の存在を明らかにした。

トランジットの結果は、ASTERIA のデータでは信号化されることが示されたが、惑星の軌道やトランジットについての予備知識がなければ、独立した検出と言えるほどの有意なレベルではなかった。しかし、ASTERIA はサブ秒角ポインティングと受動冷却と能動加熱を用いた熱制御の能力を実証した。

これは、小型衛星によって太陽系外惑星のトランジットが検出された初めての例である。

55Cancri e の識別に成功したことは、適応可能な科学モデルを念頭に設計された安価な宇宙機が画期的な結果をもたらすことを証明している。

Ueno H, Nakahira S, Kataoka R, Asaoka Y, Torii S, Ozawa S, Knapp M, Seager S, Demory B, Krishnamurthy A, Smith MW, Pong CM, Bailey VP, Donner A, Di Pasquale P, Campuzano B, Smith C, Luu J, Babuscia A, Bocchino, Jr. RL, Loveland J, Colley C, Gedenk T, Kulkarni T, Hughes K, White M, Krajewski J, Fesq L. Demonstrating high-precision photometry with a CubeSat: ASTERIA observations of 55 Cancri e. The Astrophysical Journal. 2020 June; 160(1): 23. DOI: [10.3847/1538-3881/ab8bcc](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab8bcc).



NASA の中性子星内部組成探査機（Neutron star Interior Composition Explorer、NICER）は、質量の大きな恒星が爆発した後の明るい星の残骸である中性子星を解析し、その性質や挙動について新たな知見を得ることを目的としている。この研究には、x 線タイミングとナビゲーション技術のためのステーションエクスプローラ（Station Explorer for X-ray Timing and Navigation

Technology、SEXTANT）も含まれ、太陽系全体およびそれを越えた自律航行を可能にするため、ミリ秒パルサー電波を検出する GPS 様機能の実証を目的としている。

最近の研究では、ブラックホール X 線連星 MAXI J1535-571 の静止状態とフレアアップの周期性を理解するために、NICER のデータを解析した。低質量 X 線連星は、ほとんどの時間を穏やかで静かな状態で過ごすが、時々爆発を

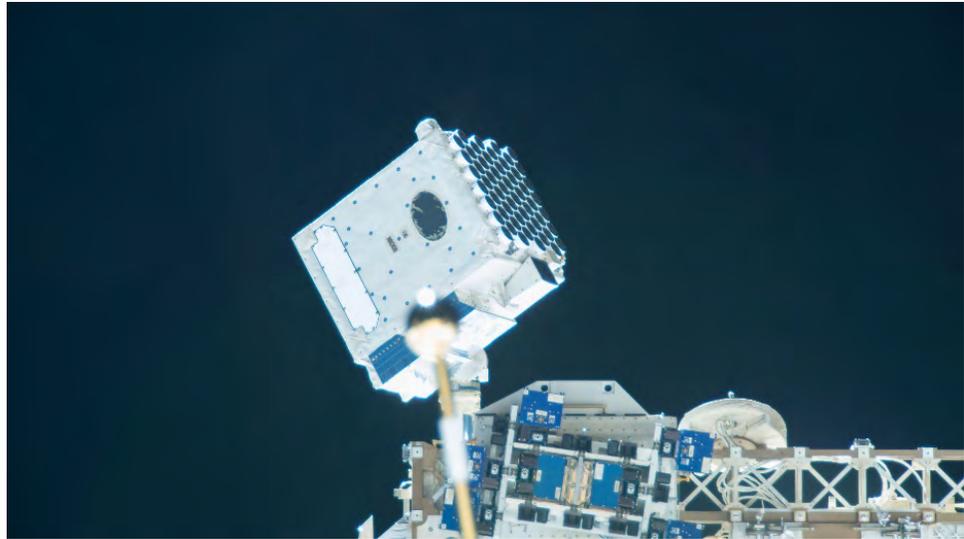


図 23.53 トラスに搭載された宇宙ステーション (ExPRESS) ロジスティクスキャリア-2 (ELC-2) へ実験の処理を促進するために設置された中性子星内部組成探査装置 (NICER) の外観。(ISS057E055436)

起こすことがある。これまでのところ、この再フレアについての説明はない。再フレアの明るさは非常に弱いため、非常に感度の高い装置でなければ必要な情報を得ることはできない。NICER データの処理には、エネルギースペクトルの計算、光度曲線と強度の計算、タイミング解析がある。結果的に、連星の明るさは約 106 日間ゆっくりと低下し、その後わずかに上昇することがわかった。4 回のフレアシーケンスが観察され、フレアは約 31~32 日ごとに発生した。研究者らは、再フレアは分析のハードエリアとソフトエリアの間で変動しており、ヒステリシスを示していることに気付いた。さらに、研究者たちは、温度が光度曲線と相関していることを確認した。

結論として、再フレアは状態遷移を起こし、最初のフレアのピークではソフトな状態に達し、谷の間にはハードな状態に戻ることが発見された。これらの状態遷移は、ブラックホールおよび中性子星の両方のアクレタを持つ他の LMXB のヒステリシスに似たヒステリシスループを示している。これらの結果は、X 線の輝度が 2 桁違う場合でも、同じ物理過程がアウトバーストや再フレアを駆動していることを示唆している。

Cuneo VA, Alabarta K, Zhang L, Altamirano D, Mendez M, Padilla MA, Remillard RA, Homan J, Steiner JF, Combi JA, Munoz-Darias T, Gendreau KC, Arzoumanian Z, Stevens AL, Loewenstein M, Tombesi F, Bult PM, Fabian AC, Buisson DJ, Neilsen J, Basak A. A NICER look at the state transitions of the black hole candidate MAXI J1535-571 during its reflares. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2020 June 9; epub: 12 pp. DOI: [10.1093/mnras/staa1606](https://doi.org/10.1093/mnras/staa1606).

謝辞

この出版物の作成に携わったチームメンバーに感謝の意を表します。図書館学の科学者である Nekisha Michelle Perkins には、ISS の研究成果を追跡可能にするすべての受領刊行物データの収集、アーカイブ、管理していただきました。またテーマに関する専門家の Diana García と Al Cofrin には、タイムリーな配布のために研究成果の内容を簡略化して提供していただき、編集者の Carrie Gilder には、本書の草稿を推敲していただきました。最後に、情報を修正し、追加の内容を提供するために、このプロジェクトの科学者、研究者、主任研究者との調整に関わっていただいたすべての国際パートナーの方々に、特に感謝の意を表します。

詳細情報

アメリカ航空宇宙局

<https://www.nasa.gov/stationresults>

カナダ宇宙機関

<http://www.asc-csa.gc.ca/eng/iss/default.asp>

欧州宇宙機関

https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Columbus

日本宇宙航空研究開発機構

<http://iss.jaxa.jp/en/>

<http://iss.jaxa.jp/en/iss>

State Space Corporation Roscosmos (ステート・スペース・コーポレーション・ロスコスモス、Roscosmos)

<http://tsniimash.ru/science/scientific-experiments-onboard-the-is-rs/cnts/informational-resources/center-informational-resources/>

<http://en.roscosmos.ru/>

