国際宇宙ステーション　人類への恩恵　2022

INTERNATIONAL SPACE STATION

BENEFITS for Humanity

2022

地球周縁を背景に撮影された太陽電池パネルとラジエータパネル。第52次長期滞在クルー撮影。提供：NASA

国際宇宙ステーション
人類への恩恵
2022

本書は、国際宇宙ステーション（ISS）
プログラムサイエンスフォーラムのメンバーによる共著である。
メンバーは、米国航空宇宙局（NASA）、カナダ宇宙庁（CSA）、
欧州宇宙機関（ESA）、宇宙航空研究開発機構（JAXA）、
ロシア国営宇宙公社（ROSCOSMOS）、
イタリア宇宙機関（ASI）である。

NP-2022-06-010-JSC

ISSで実施されている各国の実験は、以下のウエブサイトでご覧いただけます。

カナダ宇宙庁（CSA）https://www.asc-csa.gc.ca/

ESA（欧州宇宙機関）https://www.esa.int/

宇宙航空研究開発機構（JAXA）https://www.jaxa.jp/

米国航空宇宙局（NASA）https://www.nasa.gov/

ロシア国営宇宙公社（ROSCOSMOS）https://roscosmos.ru/

イタリア宇宙機関（ASI）https://www.asi.it/

謝辞

ISSプログラムサイエンスフォーラム制作

米国航空宇宙局
Kirt Costello, Heidi Parris, David Brady, Bryan Dansberry, Erin Winick Anthony, Melissa Gaskill, Carrie Gilder, Charles Plain, Nicole Rose, Michael Brody, Tracy Parr, Roger Weiss, Pia Sen, Cameron Dillon, Jessica Hellein, Morgan Kuligowski, Jacquelyn Emery, Lauren Prox, Erica Morrison, Ana Guzman

カナダ宇宙庁
Luchino Cohen

欧州宇宙機関
Thu Jennifer Ngo-Anh, Kirsten MacDonell

宇宙航空研究開発機構
Masaki Shirakawa, Izumi Yoshizaki, Kaoruko Sakamoto, Yuta Nakanishi, Masako Tsubomi

ロシア国営宇宙公社
Vasily Savinkov, Dmitri Samsonov, Sergei Prokopovich, Igor Sorokin

イタリア宇宙機関
Giovanni Valentini, Luca Parca, Gabriele Mascetti

編集長
David Brady

編集主幹
Bryan Dansberry Erin Winick Anthony

表紙デザイナー
Chris Getteau

編集者（技術）
Susan Breeden

グラフィックデザイナー
Cynthia Bush

編集者（動画）
Nicole Rose Michael Brody

編集者（デジタル）
Roger Weiss Ana Guzman

目　次

経済的恩恵　探査的恩恵　社会的恩恵　科学的恩恵

謝辞 …… ii

緒言 …… v

軌道上にある実験室 …… 1

なぜ国際宇宙ステーションで研究するのか？ …… 2
ユニークで貴重な研究のチャンスを提供

宇宙の片隅にある足掛かり …… 5
国際宇宙ステーションで第１次長期滞在クルーによる科学研究が開始された

前哨基地から軌道上実験室へ …… 7
運用開始から20年間で得た国際宇宙ステーションの研究成果

軌道上実験室の恩恵 …… 12
国際宇宙ステーションの恩恵がもたらす新たなつながりと可能性

これまでの成果をもとに …… 15
新たな研究を行う今後10年に焦点を当てて

星の彼方へ―国際宇宙ステーションの今後の計画 …… 18
パートナーの視点を取り入れて

新たな視点で私たちの故郷を見る …… 24

地球を見つめる比類なき眼 …… 26
農業、都市、森林、災害対応、気候科学などを軌道上から支援する

地球低軌道から私たちの惑星をみる（フォトエッセイ） …… 31
宇宙飛行士が撮影した写真で見る地球

AIの利用 …… 39
250マイル上空から地形の変化を見つける

宇宙飛行士セルゲイ・クリカレフのインタビュー …… 41
第１次長期滞在クルーが国際宇宙ステーションの進化と独自の視点を語る

微小重力下の微生物学 …… 44

国際宇宙ステーションの微生物と私たちの関係 …… 46
宇宙でのDNAシーケンシングの進歩の歴史から見た微生物研究のハイライト

微生物の力を採鉱に利用する …… 51
宇宙での資源探索を目指した微生物の利用

微小重力を利用してコロナウイルスと闘う …… 52
国際宇宙ステーションで実施されている多くのコロナウイルス研究

人類の健康への貢献 …… 54

国際宇宙ステーションは地球で暮らす人々の健康に飛躍的進歩をもたらす …… 56
がん、心血管疾患、アルツハイマー病の謎を解明する

宇宙でタンパク質を結晶化し、さまざまな病気の治療法を探る …… 61
結晶を利用することで、筋ジストロフィーからがんまで、新しい治療薬の開発が可能になるかもしれない

国際宇宙ステーションでの組織チップによる病気や創薬の研究 …… 64
宇宙での医療研究における組織チップの貢献

宇宙での超音波検査が地球の医学を変える …… 67
国際宇宙ステーション用に開発された超音波検査法は、世界各地で利用されている

宇宙技術で眼の手術を進化させる …… 69
アイトラッキング研究の地上での応用

宇宙での365日24時間 …… **70**

宇宙で実証した技術をもとに月や火星へ …… 72
深宇宙探査に向けた機器の技術実証

ヒトの研究：宇宙飛行士の生理機能 …… 77
宇宙飛行士の健康管理を探査につなげる

宇宙での暑さ対策が地上の乳幼児や患者の安全を守る …… 82
地上の新生児医療に役立つスピンオフ

スペースファーマーになりたい？ …… 84
軌道上で植物を育てる方法を学び、人が他の惑星で暮らす準備を整える

植物研究が研究者の卵を育てる …… 89
学生による植物アウトリーチ実験

宇宙で生活し働きながら学ぶ …… 91
国際宇宙ステーションでの長期滞在が深宇宙への人類の挑戦を支える

人間性を携えて …… **94**

宇宙と直接つながる …… 96
宇宙との対話を通して次世代にひらめきを与える

宇宙ステーション世代 …… 100
次世代の科学者をインスパイアするアウトリーチチャレンジ

芸術を新たな高みへ導く …… 103
世界中のアーティストたちを巻き込む

物理学における新たなフロンティア …… **104**

流体の流れに身を任せて …… 106
微小重力における流体物理学

まとめて物理学研究！ …… 109
流体物理実験が次世代の科学者らをインスパイア

中性子星研究がCTスキャンを向上させる …… 110
天体物理学研究向けに開発された技術の医療現場での新たな利用法

国と国、銀河と銀河を橋渡しする天体物理学の自動協力観測 …… 114
NASAのNICERと、JAXAのMAXIの連携（OHMAN）

暑いと思ったら寒くなる …… 116
極端な温度下で実施される物理学研究が私たちに教えてくれること

地球低軌道の経済を成長させる …… **120**

国際宇宙ステーションが宇宙ビジネスの立ち上げと成長を可能に …… 122
地球低軌道における新たな産業振興

宇宙のロボティクス産業の発展 …… 126
スピンオフで生まれた商業用ロボティクス技術が地上の人々に貢献

超小型衛星　その大きなメリット …… 128
キューブサット・プラットフォーム

落下する衛星を捉える …… 134
周回軌道衛星の捕獲、燃料補給、および修理の技術実証

軌道上でより良い未来を築く …… 136
宇宙で作ったものが、地上の生活を変える

緒言

2020年11月2日、国際宇宙ステーション（ISS）は有人宇宙活動20年目に入りました。最初の10年は建設、次の10年は初期研究からフル稼働へ、そして今、私たちは成果創出の10年を迎えています。

この20年間で国際宇宙ステーションは、宇宙の片隅にある前哨基地から非常に優れた微小重力研究室へと進化しました。そして今、その結果が形を成し、新たな恩恵が具体化する中、この20年間の研究に基づいてこれからの10年が築かれようとしています。

この軌道上実験室では、世界中の研究者が微小重力や宇宙への曝露、地球を見つめる独自の視点を利用し、国際宇宙ステーションでのみ実現可能な環境において画期的な実験を行うことができます。国際宇宙ステーションは多くの国々とのパートナーシップにより成り立っており、それぞれの国が異なる目標を掲げていますが、そのすべての国に共通する目標があります。それは、この素晴らしい実験室を使って人類をより良くする、ということです。国際宇宙ステーションでの実験開始から20年以上が経った今、これまで以上に多くの飛躍的進歩が実現しています。

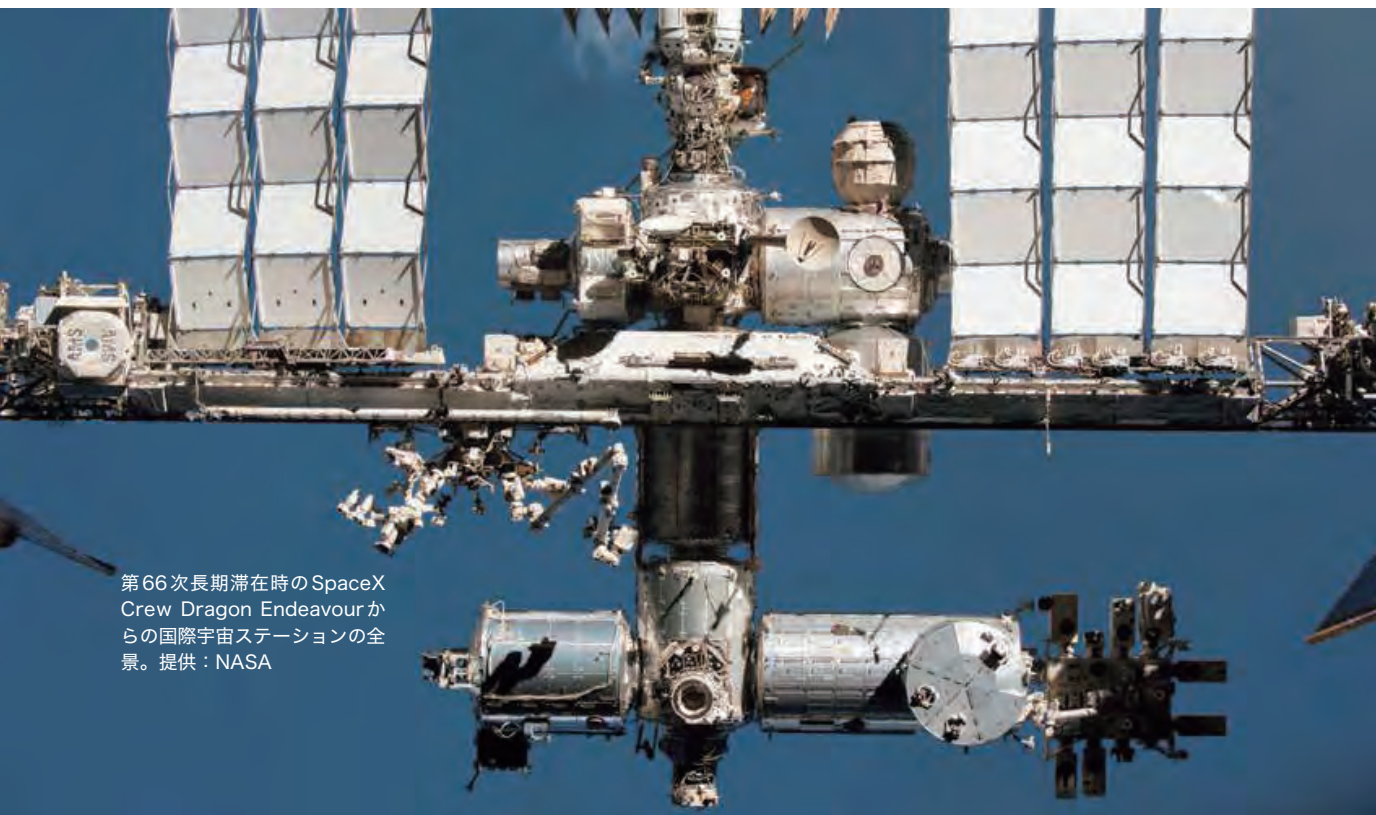
『ISS人類への恩恵2022』では、社会、科学、探査、そして経済のための、微小重力研究による恩恵の多様化を紹介しています。2022年版では、新たに誕生した科学研究分野、月や火星探査に向けた将来的な技術、命を救う発見、そしてこのような取り組みから創出される企業や雇用に焦点を当てています。

国際宇宙ステーションは、私たちの惑星に関する科学的理解を深め、人の健康を向上させ、高度技術をさらに進歩させ、そして、明日のリーダーをインスパイアし、宇宙のプラットフォームを提供します。今後何十年も先まで続くレガシーであり、大きな影響を与えます。

『ISS人類への恩恵』出版に関する詳細については、https://www.nasa.gov/stationbenefitsをご覧ください。

『ISS人類への恩恵2022』は、米国航空宇宙局（NASA）、カナダ宇宙庁（CSA）、欧州宇宙機関（ESA）、宇宙航空研究開発機構（JAXA）、ロシア国営宇宙公社（ROSCOSMOS）、イタリア宇宙機関（ASI）などで構成される国際宇宙ステーションプログラムサイエンスフォーラム（PSF）が制作したものです。

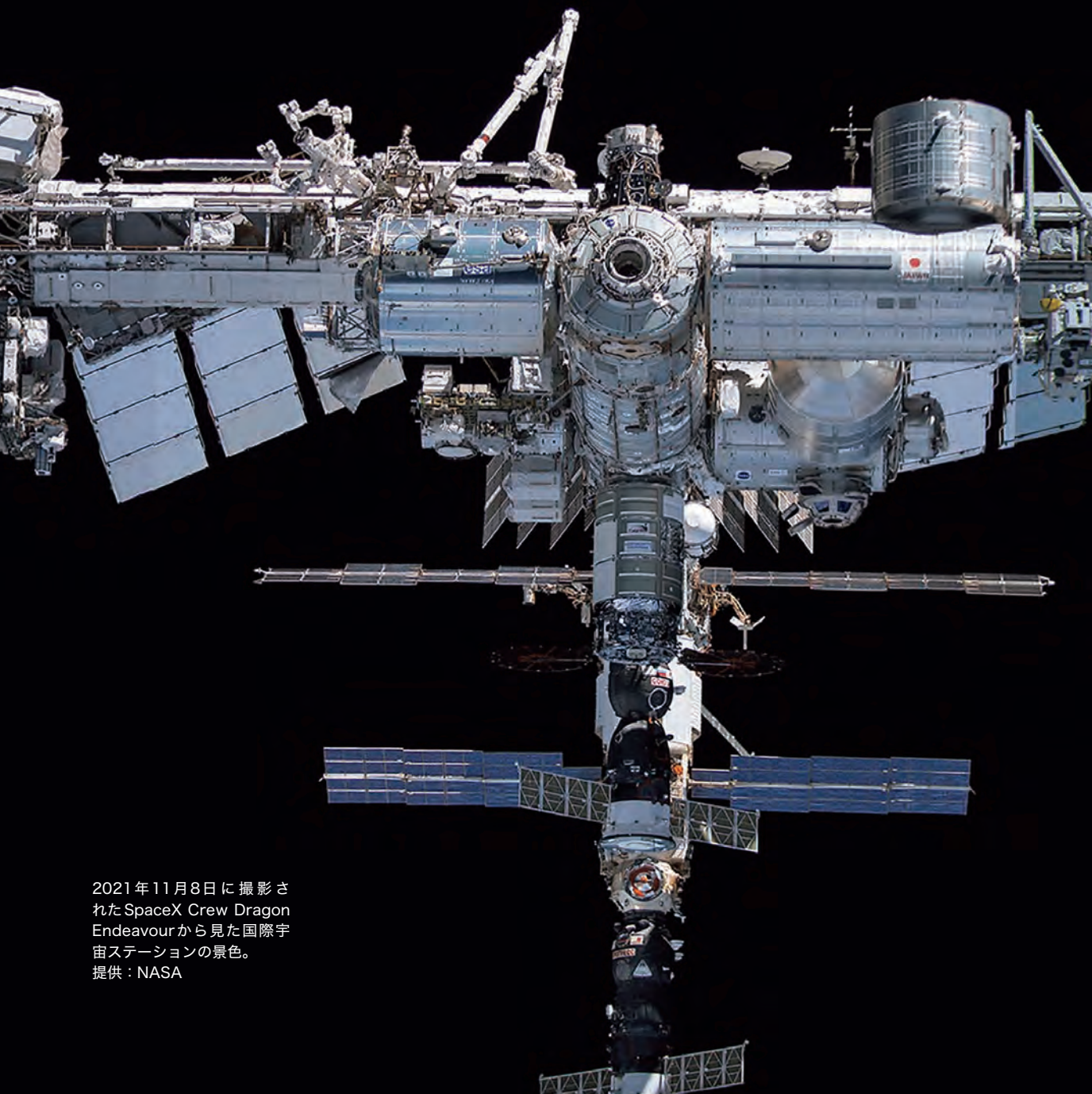
カート・コステロ博士
国際宇宙ステーション　チーフサイエンティスト



第66次長期滞在時のSpaceX Crew Dragon Endeavourからの国際宇宙ステーションの全景。提供：NASA

軌道上にある実験室

国際宇宙ステーションの紹介



2021年11月8日に撮影されたSpaceX Crew Dragon Endeavourから見た国際宇宙ステーションの景色。
提供：NASA

宇宙飛行士は素晴らしい職業だと思っていたが、なれるとは思っていなかった。全人類への恩恵を探求し、もたらすことが、いつもインスピレーションとなった。

── NASA宇宙飛行士 マーク・ヴァンデ・ハイ

なぜ国際宇宙ステーションで研究するのか？

NASA宇宙飛行士で第67次長期滞在フライトエンジニアのジェシカ・ワトキンスは、国際宇宙ステーションの7枚の窓があるキューポラの下に見える地球の景色が好きだ。提供：NASA

ユニークで貴重な研究のチャンスを提供

国際宇宙ステーションは現代の驚異です。頭上から400キロ（250マイル）上空を時速36,000キロ（17,500マイル）で豪快に天空を横切り、90分間で地球を一周します。国際宇宙ステーションにはさまざまな研究設備が揃えられていて、主要な科学分野の多くの実験がいつでも実施できるようになっています。最大8基の宇宙船を迎えることができ、11名のクルーを搭乗させることができます。それもすべて、1日に16回の贅沢な日の出と日没の景色を堪能しながらです。

しかし、軌道上実験室は何が特別なのでしょう。実験を行うため、大変な計画立案や日程調整、ハードウェアの設計や製作、そして膨大な時間と労力を費やすこの作業に従事したいと科学者らに思わせるものは何なのか。

その答えはロケーションにあります。

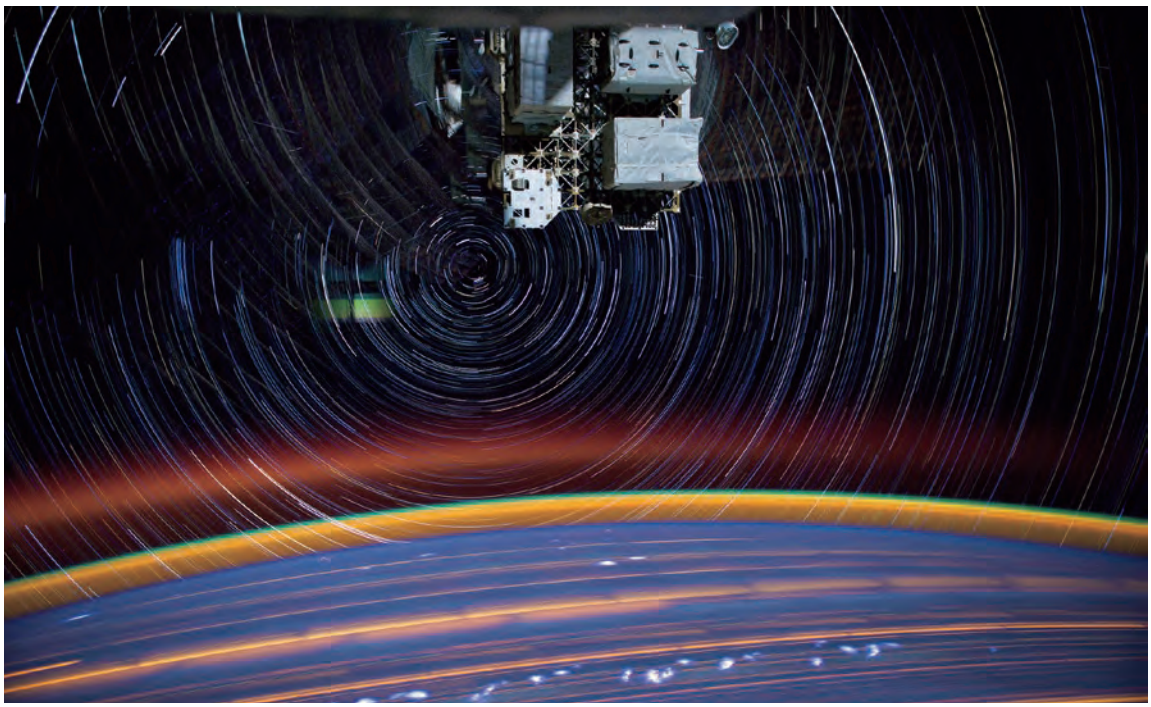
軌道上実験室には、他の場所にはない地球低軌道（LEO）という環境があります。つまり、長時間の微小重力、宇宙への曝露、そして私たちの惑星を見つめる独自の視点です。このような特徴が、他の場所ではできない革新的な実験の実施を可能にするのです。

地上では誰もが、そして万物が、地球の重力による一定の引力を経験します。この力を排除した状態で実験を行いたい科学者らは自由落下を利用します。自由落下中の物体には、ほぼゼロの重力（微小重力）しかかかりません。地上でも微小重力を作り出す方法はいくつかありますが、短時間しか持続できません。軌道上実験室は地球の周りをほぼ完璧な円を描きながら連続的に回り、常に微小重力環境が保たれます。

持続的な微小重力は、多くの分野の科学者らにとって大変革をもたらします。例えば、人間は地球の重力に翻弄されています。この力は、心拍の強さから骨密度に至るまで、人間の全身に影響を与えます。

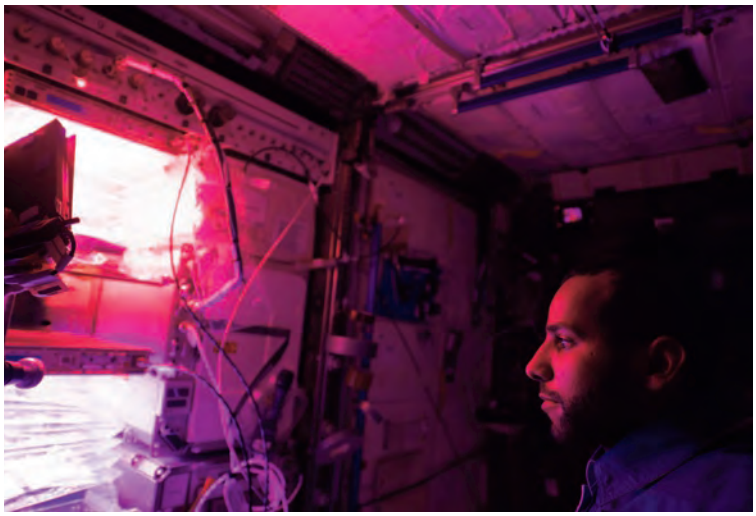
植物は、重力により根を張る方向を判断します。生物学者たちは重力を取り除いた状態で実験を行うことにより、新たなストレスに対するあらゆる生物の反応について、他では知りえない洞察を得ることができます。

重力を取り除くと、多くの物理的・化学的プロセスにも変化が現れ、沸騰、融解、液体と気体の混合、タンパク質結晶化、さらにはボーズ・アインシュタイン凝縮として知られる物質の極低温状態についても、地上ではできない方法で研究する機会が生まれます。



この円状の星の軌跡とその下にある地球の色鮮やかな光の虹は、長時間露光で撮影した18枚の画像を組み合わせて作られたものです。この画像は、天体観測と地球観測の両方に役立つ国際宇宙ステーションからの類まれな視点を示しています。提供：NASA

例えば、重力がなければ熱い空気は上昇せず、炎は球状になって動き方も変わります。微小重力では表面張力と毛管力が液体の動きを支配するので、科学者らは、地上だと重力により消し去られてしまう微小重力下での観察や測定を行うことができます。



Veggie実験の環境光の中に浮かび上がるUAE宇宙飛行士ハッザ・アル・マンスーリー。提供：Hazza Ali Almansoori

> **クルーは小型のデジタルカメラを使い、嵐や火山噴火など次々と生じる想定外の出来事のデータを収集できる。**

国際宇宙ステーションの軌道は、典型的なリモートセンシング衛星の太陽同期軌道とは異なっており、科学者はユニークな地球観測を行うことができます。高度が低くなると、機器で詳細を捉えやすくなりますが、国際宇宙ステーションは地球の陸地や人口密集地の大部分を通過します。低高度の高速飛行と高い軌道傾斜角、そしてその下の地球のゆっくりとした回転という組み合わせにより、さまざまなロケーションや大気現象、そして自然災害を、異なる角度とあらゆる照明条件で観測することが出来ます。

クルーが搭乗していることも、通常の衛星では不可能な選択肢を可能とします。クルーは小型のデジタルカメラを使って、嵐や火山噴火などのデータを集めることができるのです。また、雲量などの環境条件がデータ収集に適しているかどうかのリアルタイム評価を行うことができます。

地球の大気圏の上端という軌道上実験室のロケーションにより、科学者は材料や電子機器、さらには微生物に対する、厳しい宇宙環境への長期間の曝露による影響を研究し、そのサンプルを地球に持ち帰ってさらに分析することができます。また、国際宇宙ステーションは地球の大気や磁場により遮られてしまうことの多いデータを収集する天体物理機器に、電力、データ転送機能を与えており、機器の修理も可能です。

本書を通して、国際宇宙ステーションでの研究から恩恵を受けている幅広い科学分野や技術実証の例を発見することができるはずです。このような取り組みの効果は、すべて宇宙の片隅という他にはないロケーションのおかげなのです。

何百ものダウンリンクにより、世界各地の数万人の学生がクルーと直接やりとりし、次世代の探検家にひらめきを与えた。提供：NASA

2001年8月、接近中のスペースシャトルから見た国際宇宙ステーションとドッキングした Soyuz 宇宙船。
提供：NASA

宇宙の片隅にある足掛かり

国際宇宙ステーションで第１次長期滞在クルーによる科学研究が開始された

2000年11月2日、ロシアの宇宙飛行士ユーリ・ギジェンコとセルゲイ・クリカレフ、そしてNASAの宇宙飛行士ウィリアム・シェパードは、世界初となる真の意味での国際宇宙実験室での長期滞在を開始しました。第１次長期滞在開始時、国際宇宙ステーションは、微小重力の実験室というよりは宇宙の片隅にある前哨基地でした。アメリカの「Unity」ノードとロシアの「Zarya」モジュールと「Zvezda」モジュールで構成される国際宇宙ステーションにはおよそ1LDKの広さほどしかない200立方メートル以下の与圧空間と約3キロワットの電力しかありませんでした。

4か月のミッションで、第１次長期滞在クルーは、およそ50件の科学技術研究を行いました。その多くは、国際宇宙ステーションの重要なシステムの機能、船内の加速・振動・音響環境の記録、そして、長時間の微小重力環境下における宇宙飛行士の身体的適合の研究に関するものでした。このような研究は、国際宇宙ステーションでの研究の将来的な進歩を支える土台を築く上で有用なものとなりました。

また、クルーの健康管理の一環として、船内クルーのウイルス排出に関する最初の研究を開始しました。

この現象に関する研究は、スペースシャトル・ミッションで初めて記録され、長期の宇宙ミッションにおける健康リスクとして、クルーにおけるヘルペスウイルスの再活性化の特定につながりました。この再活性化は通常「無症状」、つまり、クルーは病気ではなく症状も現れません。

ウイルス排出など、宇宙ミッション時の免疫機能の変化は、今でも月や火星の探査活動へ向けた準備において焦点となっている一方で、この具体的な研究は、地上の我々にとっても直接的な恩恵をもたらしてくれています。この研究用に設計された唾液・尿検査用の技術は特許が取得され、単核球症やヘルペス、水疱瘡といった地上の一般的な病気の診断で一般的に用いられているウイルス迅速検出法につながっています。

第1次長期滞在クルーがZvezda サービスモジュールで新鮮なオレンジを食べる。左からロシア宇宙飛行士ユーリ・ギジェンコ、NASA宇宙飛行士ウィリアム・シェパード、ロシア宇宙飛行士セルゲイ・クリカレフ。提供：NASA

Plasma Kristall-3（PK-3）の研究は、国際宇宙ステーションで初めて実施された物理科学実験の一つでした。ドイツのマックス・プランク地球圏外物理研究所とロシア科学アカデミーの部門の一つである高エネルギー密度研究所は、プラズマ結晶の形成と挙動に関する研究を共同で行いました。プラズマ結晶は、複合（微粒子）プラズマの特定の条件下で形成されます。この条件下では、帯電した微粒子が巨視的には規則的な結晶格子に配列します。微小重力環境下では、地上では得られない大きさのプラズマ結晶を育てることができることから、国際宇宙ステーションは理想的な環境と言えます。このような共同研究は、国際宇宙ステーションができて以来ずっと続いています。

コールドプラズマは多くの素材に浸透し、均等かつ迅速に広がることができます。表面を消毒することができ、数秒で一部の薬剤耐性菌を中和することが証明されています。このように、プラズマ結晶の研究から、多くのメリットが地上に還元されます。この共同研究による国際宇宙ステーションでのプラズマ研究は、7つの系統の特許の使用許諾に貢献し、衛生、医療、浄水、悪臭管理、車の排気技術、創傷ケアや皮膚病治療関連の医療を扱う業界で活躍する3つの企業の創出につながっています。

現在開発中の製品には、ガスタンクを使わずに周辺大気からプラズマを作ることのできる小型の創傷治療装置などがあります。その機能は、病院だけでなく診療所や患者の自宅、さらには世界中の遠隔地でも用途が広がる可能性があります。

第1次長期滞在では、クルーが撮影した写真による地球観測も開始されました。類まれなプラットフォームの観点から、クルーが小型カメラを使用して、対象となるハリケーンや都市や地理的特徴を撮影しました。

これらの写真は、ロシアとアメリカの両方の宇宙プログラムにおいて、1960年代から蓄積されている画像のアーカイブに追加されました。

クルーによる撮影は国際宇宙ステーション建設以来ずっと続いています。2021年9月の時点で、400万枚近くもの地球の写真が公開されており、数年あるいは数十年にわたる環境の変化に関する研究に関心を寄せる研究者らは、これらの写真を研究に使用することができます。そのうち300万枚以上が、この20年の間に国際宇宙ステーションから撮影されたものです。

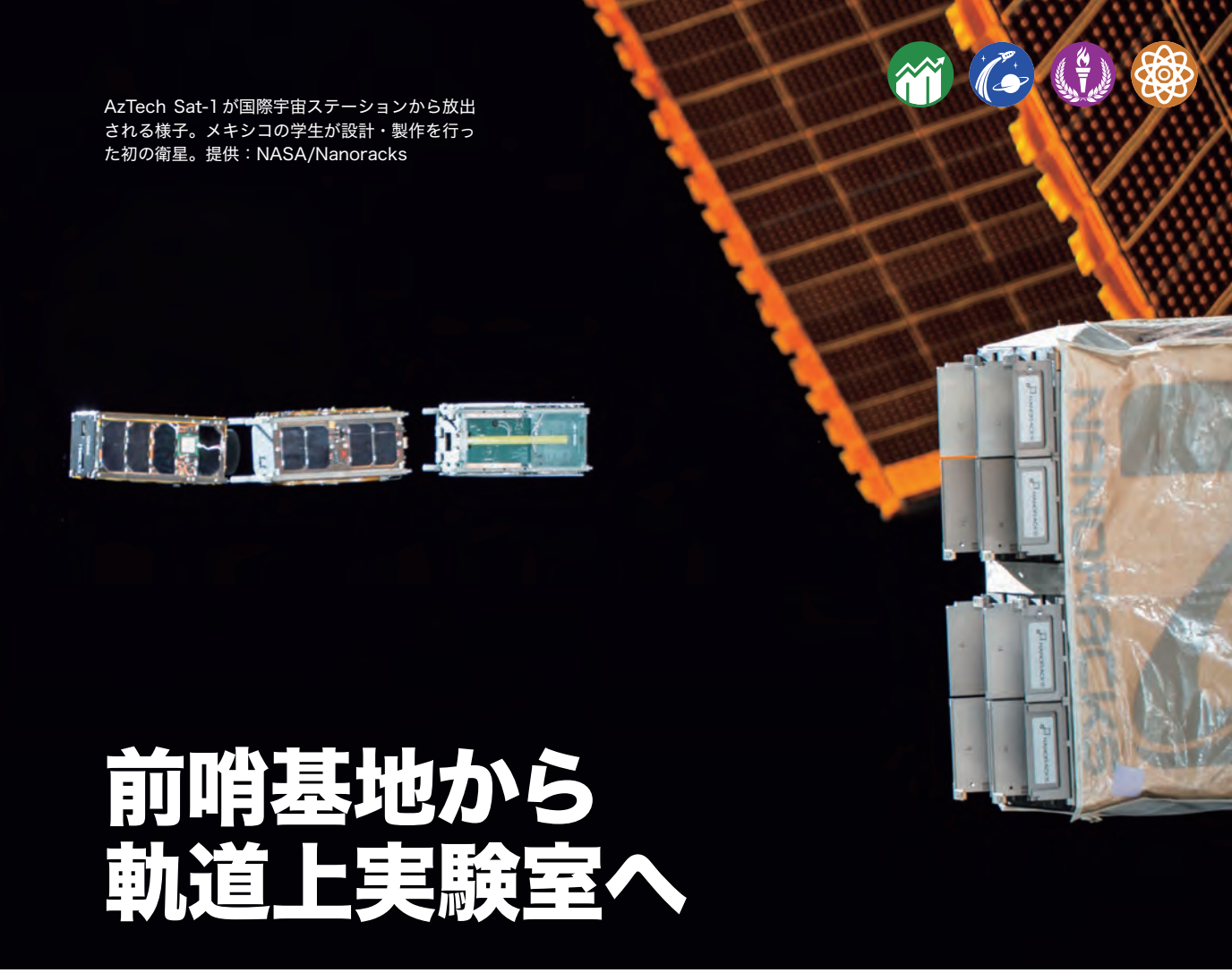
国際宇宙ステーション第12次長期滞在時の宇宙飛行士Valeri Tokarev。PK-3ハードウェアと一緒に。提供：マックス・プランク地球外物理学研究所（ドイツ）

2001年1月23日、ポポカテペトル山（メキシコ）の火山灰をクルーが撮影。
提供：NASA

初期の研究成果は偉大でしたが、とりわけ第1次長期滞在クルーの素晴らしい実績は、その後のさらなる探査の土台となりました。その後20年間で、新たなモジュールや実験装置が追加され、軌道上実験室により支えられたさまざまな研究が、新たな科学技術分野へと拡大し、同時に経済発展にも貢献してきました。

セルゲイ・クリカレフのインタビュー：

41ページ



AzTech Sat-1が国際宇宙ステーションから放出される様子。メキシコの学生が設計・製作を行った初の衛星。提供：NASA/Nanoracks

前哨基地から軌道上実験室へ

運用開始から20年間で得た国際宇宙ステーションの研究成果

最初のクルーが搭乗してから20年以上にわたり人が住み続けた国際宇宙ステーションは、軌道上の前哨基地から最新鋭の科学実験室へと進化しました。その具体的な例としては、多くの主要構成部品の設置や、内部与圧空間を5倍（900立方メートル以上）に拡大（5LDKの家に相当）したことなどが挙げられます。

拡大を続ける研究ポートフォリオに対応するため、発電力は1桁以上増加しています。

2011年、国際宇宙ステーションプログラムは、その焦点を組み立てから、研究や技術開発、教育的取り組み、商業開発などの利用優先へと正式に移行しました。科学技術活動に充てられるクルータイムは、1週間あたり最低10～20時間から最高125時間超へと増加しました。データダウンリンクの帯域幅も増加し、研究データのより速い転送が可能になり、リアルタイムでの実験の観察も可能になりました。

また、データのダウンリンクは、地上の専門家が実践的な研究を行うことで、国際宇宙ステーションに滞在するクルーへのリアルタイムサポートを可能にしました。その結果、国際宇宙ステーションで最初の1,000件の研究を行うために10年を要したのに対し、その次の1,000件はその半分の期間で行うことができました。

米国の科学実験室Destinyモジュールが設置されたのは2001年です。以来、3つの科学実験モジュールが追加されています。欧州宇宙機関（ESA）のColumbusモジュールと宇宙航空研究開発機構（JAXA）の「きぼう」日本実験棟は2008年に設置され、ロシアのNaukaモジュールは2021年に設置されました。

これらの各科学実験モジュールにより実験室の能力が高まり、モジュール内部の有人研究と国際宇宙ステーション外部に取り付けられたプラットフォームで実施される船外実験の両方ができるようになりました。JAXAの「きぼう」日本実験棟には、エアロックがあります。クルーが実験装置を船内から船外へ容易に移動させることができる小さなスライド式のエアロックは、船外研究に対応し、科学プロジェクトの実施に必要なクルーの船外活動の回数を減らすために設計されたものでした。

キューポラを設置したことにより、クルーによる地球や天体の写真撮影が大幅に増え、研究者が利用できるようにな

2001年8月、初のMISSE材料曝露装置を国際宇宙ステーションに設置している様子。国際宇宙ステーションで初めて実施された船外実験MISSE-1では、750個の材料サンプルが約18ヵ月間にわたり宇宙空間に曝露された。提供：NASA

りました。クルーはキューポラから、カナダ宇宙機関（CSA）のCanadarm2とDextreの動きを視認しつつ、遠隔操作システムの操作を行うことができます。

Canadarm2とDextreは、船外活動、メンテナンス、宇宙船の受け入れ、そして船外実験を支援しています。Canadarm2のおかげで、インパクトのあるスピンオフ技術が生まれました。その関連技術は、画像誘導式コンピュータを用いた神経外科装置neuroArmや、極めて正確で侵襲性を最小限に抑え、手術に必要なアクセス・精度・器用さを向上させたデジタル外科装置Guided Autonomous Robot（IGAR）などのツールにより、手術の方法を一変させました。

国際宇宙ステーションの船外実験では、軌道上実験室を取り巻く厳しい宇宙環境への曝露を行うことができます。国際宇宙ステーション初の船外機器Materials on ISS Experiment（MISSE）は、2001年に稼働を開始し、その後15年間で8件の実験を行いました。このような曝露実験は、宇宙探査に必要な今後の宇宙船・補給船、宇宙服、その他の構造物にとってより良い材料の開発につながります。またこれらの材料は、放射線防護や太陽電池の性能、地上でのコンクリート製造も向上させることができます。

このような試験は、アップグレードしたMISSEフライトファシリティ（MISSE-FF）を使用して現在も継続されています。

MISSE-FFは企業が所有・運用する機器ですが、これを使用することで、Canadarm2で試験用の曝露サンプルを設置することができるため、クルーが国際宇宙ステーション外部へ出る必要がありません。

国際宇宙ステーションの船外で行われる実験もまた、地球観測や天体物理研究を実施するための貴重な機会を提供してくれます。外部プラットフォームは、地球の大気や海、エコシステムのデータを観測したり、宇宙線の天体物理データを収集したり、大気により地上の機器ではほとんど隠れてしまう波長を観察したりする機器の電力やコマンド、熱制御、データ伝送を提供してくれます。

その特異な軌道により、国際宇宙ステーションは、他の衛星で収集された地球観測データを補完してくれます。また、修理や交換が不可能な長期運用衛星やロボット探査ミッションで利用する前に、機器のテストや緻密化作業を行うことができます。

本来の目的とは異なりますが、国際宇宙ステーションは超小型衛星の放出に何度も使用されています。2005年には宇宙飛行士が船外活動の際にROSCOSMOSのNanosputnikを手動で放出しました。この衛星は4ヵ月間にわたって稼働し、フライト実験のプログラムはすべて無事完了しました。JAXAの「きぼう」日本実験棟とそのエアロック、ロボットアームが追加されたことにより、その後多くの超小型衛星が国際宇宙ステーションから放出されました。2013年に米国を拠点とする企業、Nanoracksが軌道上実験室に設備を追加し、放出プロセスを自動化しました。2020年11月時点で、250基以上の超小型衛星が国際宇宙ステーションから地球低軌道へと放出されました。

国際宇宙ステーションの研究ポートフォリオが拡大する中、多くの研究で病気に焦点が当てられました。特にタンパク質結晶化を必要とするタンパク質構造研究において極めて重要な存在

地上では、熱気が上昇し炎は細長くなるが、微小重力環境下では、炎は球状になる。提供：NASA

となりました。

旧ソ連の宇宙ステーション「ミール」やスペースシャトル・ミッションで実施された実験では、地球よりも微小重力環境の方が良質なタンパク質結晶が生成されることが明らかになりました。人体には、10万種類以上ものタンパク質が含まれています。各タンパク質は、私たちの生命活動が正しく行われるために必要です。このようなタンパク質の構造研究を行うことにより、私たちの身体や病気の治療法に関するヒントを得ることができます。JAXA、ROSCOSMOS、NASA、ISS National Labが実施したタンパク質結晶生成実験は、デュシェンヌ型筋ジストロフィーから心臓疾患、がんに至るまでさまざまな病気に関する理解や治療に関連するタンパク質の構造研究に貢献してきました。

最初のクルーによって開始されたプラズマ研究は、その後20年間にわたり継続されました。微粒子プラズマまたは複合プラズマと呼ばれる物理現象を研究するために、Plasma Kristall-4（PK-4）と呼ばれる装置がステーションに設置されています。微粒子プラズマは、例えば彗星の尾や惑星環などの自然現象としてしばしば見つかります。加えて、微粒子はマイクロチップ製造やエッチング、蒸着など、産業界における各種製造プロセスに変革をもたらす可能性があります。

さらに、生物学的研究やヒトの健康に関する研究の規模が拡大し、微小重力下で植物や微生物、動物に与える影響を測定する装置が増えました。クマムシや線虫類、ショウジョウバエ、イカ、齧歯類などの多様な種を対象とした、遺伝子や細胞、システムレベルでの研究が行われています。

国際宇宙ステーションで研究を行うために180以上の装置や設備が恒久的に導入され、軌道上実験室でできる研究の範囲は着実に拡大しています。

2009年に燃焼統合ラック（CIR）が追加され、燃焼科学分野の前進につながりました。

> **国際宇宙ステーションでの実験は、地上で日常的に使用する製品にも恩恵をもたらしています。**

燃焼から重力の影響を取り除くことで炎の基本原理を研究することができ、さらには、冷炎と呼ばれる新たなタイプの燃焼の発見にもつながりました。

また、2014年と2015年にそれぞれ追加されたESAの電磁浮遊装置（EML）とJAXAの静電浮遊炉（ELF）は材料科学に貢献しています。これらの装置ではサンプルを電磁場または電場で浮かせ、強力なレーザーによってサンプルが融解する際にサンプル容器が汚染する可能性をゼロにすることができます。関連研究として、過冷却融液物や展開中の微細構造における核生成や凝固反応速度論、そして高温における液状金属合金の極めて正確な熱物理特性の測定などが挙げられます。

2020年に発表されたESA主導の研究成果で、タービンや他のエネルギー

NASAの宇宙飛行士ジェシカ・メイアが、高度コロイド実験-Temperature-4（ACE-T-4）研究のため、光学顕微鏡モジュールの設定を行う様子。ACE-T-4では、規則正しい結晶から不規則ガラスへの変化を調べ、不規則性の増加が構造的および動的性質にどのような影響を与えるかを解明します。提供：NASA

の応用で広く使用されている3つのニッケル系超合金に関する熱物理特性データ（液体表面張力、粘度、質量密度、および比熱容量）があります。科学者らはそれまで地上において、これらの特性を実験で正確に定義することができずにいました。特定の材料の特性を詳しく理解することは、製造効率と製品の質を向上させるために不可欠です。

国際宇宙ステーションでの実験は、私たちが日常的に使用する製品に恩恵をもたらしています。歯磨き粉や3Dプリンタ、医薬品、シャンプーなどは国際宇宙ステーションで何年も行われてきたコロイド研究の恩恵を受けています。液中に浮遊する小さな粒子の混合物であるコロイドは、ミルクのような天然混合物に加え、シャンプー、医薬品、サラダドレッシングといった製造品にも含まれています。

CSAの一連の血管症例研究では、動脈の血圧変化に対する反応や、宇宙飛行中にインスリン耐性が生じるかなど、宇宙飛行士の血管や心臓に対する微小重力の影響について分析しています。ESAとASIが共同で行うNutrISS研究では、微小重力における不活動による除脂肪筋肉量に対する脂肪の割合の増加を防ぐための理想的な身体組成について、詳しく研究しています。

Procter & Gambleなどの企業では、国際宇宙ステーションでの研究を活かして、成分や粒子が固まって沈殿しないよう製品を液状に保つ方法を研究しています。国際宇宙ステーションでの研究により、この企業は3つの新しい特許を取得しました。

人類の太陽系に関する理解が深まっており、国際宇宙ステーションは依然として深宇宙ミッションに役立つ可能性のある科学技術の試験場として存在し続けています。例えば、イタリア宇宙機関（Italian Space Agency：ASI）とNASAはポータブルな軌道上3Dプリンタ実験で協力していますが、この実験により国際宇宙ステーションでの材料プリントの道が拓かれました。複数のプリント装置で多くのサンプルが作られています。長期滞在の宇宙飛行士らは、日々の必要性に応じて、また、不測の事態に素早く対応できるように、実質的にはオンデマンドでスペアパーツやツール、材料を自ら作る必要があります。3Dプリントを使用して宇宙で作成することが、その答えかもしれません。

20年以上にわたり有人宇宙ステーションが軌道上にあることで長期間の宇宙生活に対する人体の反応に関する重要なデータを収集することができました。

例えば、宇宙関連神経眼症候群（SANS）は多くの宇宙飛行士に確認されています。症状は視神経が網膜に入る視神経頭の腫れや、視野を変化させる目の形状の平坦化です。国際宇宙ステーションではこのような変化を予防し、回復させ、今後のミッションや地球帰還後に向けて、宇宙飛行士の視力を維持する方法を調べるプラットフォームの役割を果たしています。

他にも多くの研究が長期間の宇宙ミッションで生じる他の課題を特定し緩和することを目的としています。

今後の探査ミッションに役立つことに加え、人間生理学に関する国際宇宙ステーションでの研究は、地上に恩恵をもたらしています。ESAの気道モニタリング研究では、国際宇宙ステーション内の埃によるクルーの気道炎症の発生率と指標を研究しました。このデータの収集方法は、地球と宇宙の両方で、生活の質の向上に役立つ迅速な非侵襲性の肺検査の開発に貢献しました。国際宇宙ステーションで科学者が実験を完了すると、関連する研究の実用性はそこから広がっていきます。国際宇宙ステーションのパートナーたちは、軌道上で行われる科学研究の効果を最大化することに努めています。JAXA主導の宇宙生命科学統合バイオバンク（Integrated Biobank for Space Life Science：ibSLS）のようなリポジトリは、宇宙と地上の研究を結びつけ、豊富な過去のデータを提供するために立ち上げられました。

NASAのGeneLabには、1995年以降の宇宙飛行で取得した実験生物学データとそれに対応する地上実験に関する数十年分のデータが含まれています。

ロシアの宇宙飛行士エレナ・セローヴァがPlasma Kristall-4装置をColumbusモジュールに設置する様子。装置の質量は、地上では100キロを超えています。提供：ROSCOSMOS/ESA

ロシアの宇宙飛行士オレグ・アルテミエブが、ロシアのオーランスーツを着て国際宇宙ステーションの科学活動と修理作業のため船外活動に参加した。提供：NASA/ROSCOSMOS

軌道上実験室の恩恵

国際宇宙ステーションの恩恵がもたらす新たなつながりと可能性

本書を通して軌道上実験室がもたらす恩恵の例を紹介していきます。その中には空気清浄装置や水濾過製品など実在するものから、クリーナー燃焼エンジンや放射線曝露量の低い医療用スキャンなど今後生じうる製品まで、実にさまざまなものが含まれます。

新たな科学知識から生まれる恩恵もあれば、宇宙で生活し研究を行うために必要な専門装置から生まれる恩恵もあります。国際宇宙ステーションから派生するさまざまな恩恵を伝えるにあたり、これらを科学、社会、探査、そして経済の４つのカテゴリに分類すると分かりやすくなります。

科学的恩恵は、国際宇宙ステーションで続々と行われる研究を通して得られる知識がもたらすものです。20年目を迎え、国際宇宙ステーションは数多くの研究設備とさまざまなツールや観測機器を有する確固たる科学実験室へと進化しています。宇宙で使用できる新たな機器や技術の試験および検証を行うためのプラットフォームの役割を果たしているのです。また、あらゆる科学分野で研究を行う科学者らの手となり足となり、またその目となることで、リアルタイムでクルーを訓練し、支援するプロセスを改善する役割を果たしてきました。さらにエンジニアたちは、自律的に、もしくはクルーの関与を最小限に抑えて実験を行うことのできるハードウェアを設計してきました。これにより、同時に対応できる研究の数と成果が、過去20年間の運用を通して飛躍的に高まりました。

この微小重力環境の実験室では常に主要な科学分野の研究が多く実施されています。船外に設置された装置は、天体物理学から気候変動まで、さまざまな研究に関連するデータを集めています。船内でも、微生物学から金属学という実に幅広い分野の実験が行われています。

収集されたデータは新たな科学研究分野を生み出し、地上では得ることのできない新たな洞察を提供してくれるだけでなく、私たちの宇宙に関する理解を深めてくれます。本書は新たな発見や科学知識に関する多数の例で埋め尽くされています。

社会的恩恵は、私たちの地上での生活をすでに向上させている医学的進歩から、グローバル社会への無形の貢献まで多岐にわたっています。新生児医療からロボット手術に至るまで、国際宇宙ステーションでの研究は、現在の医療現場で用いられている技術の創出に役立っています。これらの研究は、病気に関与するタンパク質の複雑な構造をより詳細に理解する上で役立っており、新たな治療法や多くの疾患の理解向上につながっています。

> 20年目を迎えた
> 国際宇宙ステーションは、
> 多くの研究設備と
> さまざまなツールと
> 観測装置を備えた
> 揺るぎない科学実験室へと
> 進化しています。

あまり目立たないことですが、国際宇宙ステーションでの研究により、世界100ヵ国以上を代表する研究者との科学協力が盛んになっています。また、世界の次世代の科学者やエンジニアたちが勇気づけられてきました。クルーは、アマチュアラジオやライブ映像のダウンリンク、科学実証動画などを通して、何百万人もの学生とつながってきました。教師は、軌道上で録音された読み聞かせ教材や科学授業、一般市民が科学を学ぶ機会、さらには学生が考案した実験を飛行時に行うことなどを通して教室と軌道上実験室をつなぎます。

軌道上のプラットフォームから得られる探査の恩恵は明らかです。それは、宇宙をさらに探査し、そこにより長く滞在するために必要な技術の実証と改善を行う上で理想的な試験場であるからです。新たな発電、空気・水のリサイクル、二酸化炭素の除去、通信、計算システムなどは、国際宇宙ステーションを使って検証・立証し、今後も改善され続けるであろう、探査を可能にする技術の一部に過ぎません。また研究者らは、ヒトが宇宙での作業において心理学的にどのように適応するか、または、長期的な宇宙ミッションにおいてどのように植物を育てるかといったことも研究しています。

宇宙でのヒトの継続的滞在を支援することにより、微小重力環境での長期ミッションに携わるクルーの訓練プロセスや、骨や筋肉の喪失といった物理的なマイナス影響を緩和するプロセスが開発されてきました。クルーが船外活動を実施して日常的なメンテナンスや消耗品の交換、さらには複雑なシステムの想定外の修理を行う際のサポートプロセスなどは、これまでに得られた教訓から恩恵を受けています。20年以上にわたって、改善と検証、そして再改善が繰り返されてきました。

経済的恩恵として、国際宇宙ステーションでの活動により生まれた新たな製品やサービスがあります。現在購入できる製品には、ロボティックグローブから医療機器まで幅広いものが含ま

微小重力下でハチミツガの幼虫がどの程度効果的にプラスチック廃材を消化できるかを研究する実験。アーカンソー州立大学の学生が、ハチミツガの幼虫を見せる様子。提供：アーカンソー州立大学

れています。

また、企業育成の役割も果たしており、政府の宇宙機関での運用経験を、増え続ける宇宙関連企業に移管することで現在成長中の宇宙関連経済を支援しています。この知識の移管により宇宙関連市場が急速な拡大を遂げています。新たな打ち上げ提供企業や打ち上げ能力は、国際宇宙ステーションの供給ラインをサポートするだけでなく、宇宙へアクセスするための費用削減にも貢献しています。これらのコストが下がるにつれて、低軌道にある小型衛星から新たな通信サービスや観測サービスが生まれています。

現在、企業が所有・運用する30以上の国際宇宙ステーションの装置が、研究者を支援しています。企業の装置開発者たちは、科学者が自身の研究アイデアをハードウェアに移し込み、国際宇宙ステーションへ打ち上げ、安全に運用することに貢献しています。このような企業の中には、その経験を活かして宇宙での製造技術を立証しているものもあります。データ転送機能がはるかに優れたファイバーオプティクスや、視力を回復させる人工網膜などは、近い将来、宇宙で作ることが出来るかもしれない製品の一例です。

他の企業は、ビジネスケースを構築し、低軌道における新しい商用プラットフォームの設計を進めています。このような点で特化した宇宙ステーションでは、近い将来、専門の製造施設や未来の実験室となり、さらには宇宙観光客も受け入れているかもしれません。

本書で紹介しているように、国際宇宙ステーションは、地上の人々の暮らしを向上させ、次世代の科学者やエンジニアを鼓舞し、国際協力を促して、太陽系のさらなる探査を可能にする数多くの恩恵を生み続けています。細胞生物学から宇宙論まで、各科学分野で知識が生まれています。新技術が開発・立証され通信、発電、農業、医療など幅広く応用されています。20年間にわたる運用を背景として、軌道上実験室では、今後何十年にもわたって効果が期待されるレガシーを生み出しているのです。

リング・シアード・ドロップ（RSD）装置の中で、表面張力によって液滴となっている少量のインスリン溶液の写真。RSD研究では、アルツハイマー病、パーキンソン病、プリオン、2型糖尿病などの疾患に関与するアミロイド線維と呼ばれるタンパク質凝集体の研究が行われています。提供：Joe A. Adam and Patrick M. McMackin

これまでの成果をもとに

新たな研究を行う今後10年に焦点を当てて

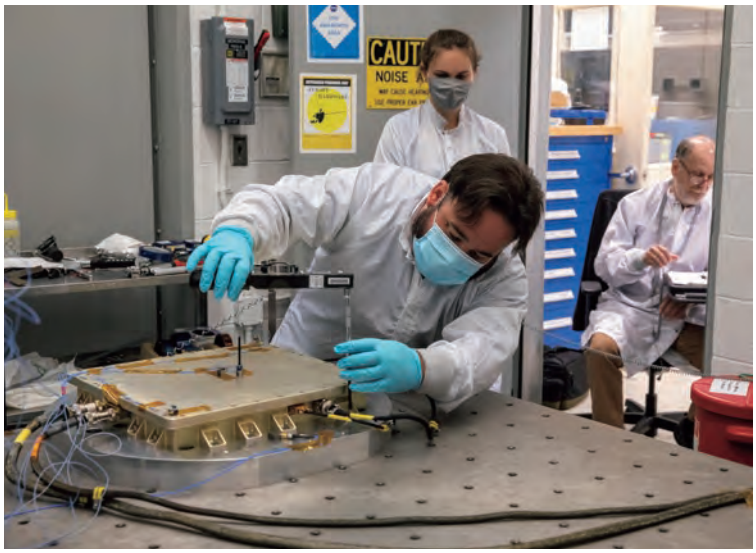
この20年間で、国際宇宙ステーションは、宇宙の片隅にある前哨基地から高度な機能を有する微小重力実験室へと進化を遂げました。現在まで実施されてきた3,300件以上の研究のおかげで、国際宇宙ステーションは研究の確固たる知識基盤と運用ノウハウを築くことができました。現在その成果がまとめられ新たな恩恵が具現化し、革新的研究や技術実証が過去の研究成果を基に築かれています。

新たな科学分野が更に生まれ続ける中で、研究者らは過去の研究から得られた経験と知識を活かして、新たな実験を提案し、今後の宇宙ミッションを支援するためのより良いシステムを設計しています。多くの場合、過去の経験に基づき新たな設備が設置され、サイエンスコミュニティから次々に届く科学的関心に対応しています。ベテランの研究者らは、自身の最初の宇宙実験や他の研究者の実験から得られた洞察を基に研究を促進します。研究者チームは、知識を総合することで新たな結果を導き出しています。

最近の研究ではリアルタイムのモニタリングと調整により、タンパク質結晶成長実験の可能性をさらに広げています。2021年2月に開始したリアルタイムタンパク質結晶成長2実験では、科学者らが国際宇宙ステーションのクルーとのリアルタイム通信を通して、微小重力環境におけるタンパク質結晶の成長をモニタリング・最適化することが出来ました。宇宙飛行士は結晶の成長について報告し、初期の観察結果に基づき、条件を変更することが出来ます。

組織チップの使用などの新たなアプローチにより、まだ探求されていない分野の研究が始まっています。組織チップは、複数の細胞型を含むヒトの臓器の小型モデルで、2018年に初めて国際宇宙ステーションへと送られました。その利用について何度か検証を行った後、その多くが2回目の飛行機会を得ることになります。この組織チップにより、標準的なプロセスと比較してはるかに迅速に、安全かつ有効な薬品やワクチンを特定できる可能性が生まれます。

地上で特定の病気の仕組みを研究している研究者らは、重力や液体と固体の容器の間の相互作用を考慮しなければなりません。このような力は、動脈や



NASA Langleyの技術者デイヴ・マクレーンがCLARREO Pathfinderのハードウェアをテストする様子。提供：NASA/David C. Bowman.

脳組織など、モデル化を試みている身体の接触部とは異なっており、成果に影響を与えかねません。

リング・シアード・ドロップ（Ring Sheared Drop）実験のチームは、医学研究に役立つ別のイノベーションを起こしました。この専用装置は、固体の容器ではなく表面張力を用いて液体を微小重力下で保持します。この装置では2つのリングの間に液体を保持し、一方を回転させながら、もう一方を静止させてずれ流動を生じさせるか、あるいは隣接する液体層間で異なる速度を生み出します。

過去の研究から、このずれ流動が、アルツハイマー病などの神経変性疾患に関係しているアミロイド線維の形成に大きく関与することが示されています。研究結果により、アミロイド線維がどのように形成、転移され、さらには身体の状態に応じた流体界面のせん断作用について科学者らの基本的理解を深めることが出来ます。

国際宇宙ステーションの地球科学研究は、CLARREO Pathfinderの立ち上げ計画に伴いアップグレードされます。このプロジェクトの研究者らは、太陽放射照度を追跡する国際宇宙ステーションの外部機器Total and Spectral Solar Irradiance Sensor（TSIS-1）を過去に設計し、立ち上げています。太陽放射照度とは太陽から地球へ流れる総エネルギーのことで、気候モデリングの重要なパラメータであり、代表的なものが宇宙ベースの観測から得られる最長の気候データです。TSIS-1では、このデータの連続性を保持できます。

TSIS-1の設計と導入から得られた知識を応用することで、CLARREOの製作は大幅に合理化されました。国際宇宙ステーションに設置されたCLARREOは、既存のセンサーによる測定と比較して5～10倍も確実性が高まり、地球や月が反射する太陽光を測定し地球の気候を検証することが出来ます。

大気波実験（AWE）では、大気光と呼ばれる地球の大気の多彩な色帯に焦点を当て、どの力の組み合わせが上層大気の宇宙気候を左右するのかを特定します。AWEは、地球の中間圏重力波の特性を特定するためだけに設計されたNASA初の専門ミッションです。

液体物理学研究は、微小重力研究の恩恵を顕著に受けており、毛細管流動実験（CFE）が初めて軌道上実験室で実施された2004年4月以降、このテーマに関する科学界の知識は宇宙実験に大きく依存しています。この研究は、一連の基本的な液体物理学研究として始まり、熱制御システムや液体燃料タンクといった宇宙探査関連の技術応用にかかわる特許へとつながっています。

このような初期の液体物理学研究が開始して以来、国際宇宙ステーションは、流体工学の性質と応用を研究するための唯一無二の場所となり、いくつもの科学発表や特許につながっています。

例えば、研究者らは、ナノ流体工学について研究し薬物輸送の新たな仕組みを生み出すためのプラットフォームとして国際宇宙ステーションを利用しています。これは、皮下に埋め込む交換可能なインプラントで、部品を交換することなく数週間あるいは数ヵ月間にわたり、あらかじめ決められた量の薬を投与することが出来ます。このインプラントの応用法の一つは、現在、臨床試験の最中であり、間もなく利用が承認される予定です。

ESAもまた流体研究を実施しており、沸騰、熱伝導、および液体流動に関する理解に大きく貢献しています。マルチスケール沸騰実験では、沸騰時に生じる泡の分析が行われています。重力がないと、沸騰はゆっくり生じ、より大きな気泡が生成されます。マルチスケール沸騰では、地上では速すぎたり小さすぎたりするこのような効果を観察・測定することで、沸騰過程の熱伝導をより完璧に理解することができます。この情報は、ノートPCなどの電子機器をより効率的に冷却する際に応用可能です。

今後ESAでは、マルチスケール沸騰実験の結果に基づき、国際宇宙ステーションに新たな設備を打ち上げる計画が立てられています。数年後に打ち上げが予定されているこの新たな熱伝導ホスト設備には、マルチスケール沸騰実験のデータを駆使して設計された一連の実験が含まれています。

ROSCOSMOSでは、初のバイオプリンタOrgan.Autの国際宇宙ステーションへの打ち上げが予定されており、将来的に移植に使用できる臓器の創出につながる新たな研究分野の取り組みが始まっています。このバイオプリンタは、電磁場を用いて宇宙で軟骨細胞を

培養する際に使用されていました。アメリカに拠点を置くRedwire Spaceのバイオファブリケーション・ファシリティ（BioFabrication Facility：BFF）は軌道上でヒトの組織をプリントする可能性について詳しい研究を行いました。Redwireでは、心臓や整形外科の組織の試験を軌道上で継続し、宇宙で血管系の製造試験を行うことを目的とした新たなプログラムの立ち上げを予定しています。

JAXAのSpace Organogenesis実験では、異なるアプローチから臓器不足の解決に取り組んでいます。研究者らはヒトの幹細胞を用いて、国際宇宙ステーションで三次元の臓器の芽（臓器原基）を育てています。臓器の芽には、完全な臓器へ発達する組織が凝縮されています。研究者らは、臓器の芽を観察し、遺伝子発現過程を分析することで、宇宙で三次元の細胞増殖技術を確立することを目指しています。

今後の低軌道経済を支えるため、商用研究施設の能力はさらに拡大しています。Bigelow拡張可能活動モジュール（BEAM）は、国際宇宙ステーション用の拡張可能な実験モジュールです。Bigelow Aerospace社によって開発され、2016年に国際宇宙ステーションに設置されました。1年間の技術実証が成功した後、国際宇宙ステーションのストレージモジュールとして運用を開始しました。

Bishop Airlockは、初の商用エアロックで、Nanoracks社によって開発され、2020年に国際宇宙ステーションへ打ち上げられました。エアロックにより国際宇宙ステーションの内部と外部の間で、大きなペイロードの移動が可能になるため、小型衛星の放出能力が向上します。

アメリカを拠点とする企業Axiomでは、近々、国際宇宙ステーションへ連結する、初の居住可能商用モジュールの打ち上げが予定されています。このプロジェクトでは、企業が宇宙で製品やサービスを提供する能力を実証し、持続可能な地球低軌道経済への移行がさらに促進されます。NASAはこの多くの顧客のうちの一つです。2022年、Axiomでは、国際宇宙ステーションへ向け、初めて全員民間人であるクルーが送り込まれ、1週間以上をかけて独自の研究が実施されました。

国際宇宙ステーションでは、新型太陽電池アレイ（iROSA）の追加設置により、運用延長へ向けて準備を進めています。国際宇宙ステーションでこれまで実証された技術を基に、iROSAは、長い絨毯を敷くような開き方をするコンパクトなアレイで構成されています。最初のアレイ1組は2021年に設置され、次の1組は2022年に打ち上げが予定されています。本来の8つの大きめの国際宇宙ステーション設置済みアレイと小さめでより効率の良い新たなアレイが合わさると、研究や他の作業用の電力が20%から30%増加します。このロールアウト・アレイは、今後のミッションに有益な技術を提供してくれます。例えば、同じデザインの太陽アレイが、月軌道プラットフォームゲートウェイの電力素子に使用される予定です。

国際宇宙ステーションの再生式生命維持システムはクルーにきれいな空気と水を提供します。このシステムが予定通りアップグレードされると、深宇宙ミッションに必要なレベルの再利用技術が宇宙船に備わることになります。新たに設計された宇宙トイレ「ユニバーサル廃棄管理システム（Universal Waste Management System：UWMS）」は、Orion船内に設置され、宇宙飛行士らを月よりも遠くへ送りこみ、戻ってくる予定のアルテミスIIのフライトテストにて検証される予定です。このトイレは快適性と利便性に関するクルーのコメントを反映したものです。国際宇宙ステーションの水再生システムを改善することで、より多くの尿が再利用できるようになります。また、現在のトイレと比べて、65%小さく40%軽くなっているため、今後の探査ミッションでは質量・容積ともに節約できるようになります。

国際宇宙ステーションの尿処理アセンブリ用にアップグレードされた蒸留システムもまた、2020年に試験が行われました。国際宇宙ステーションのこれまでのシステムでは、ベルトの劣化という多くの機械に共通する問題が生じていました。今回のアップグレードにより、従来の1,400時間と比べて、部品交換なしで4,300時間以上の寿命となることが期待されています。

国際宇宙ステーションの利用が始まって20年目を迎える中、科学者らからは新たな研究が続々と申請されています。エンジニアたちは新たな技術実証を提案し、既存のシステムをアップグレードして、信頼性の向上と質量、容積、メンテナンスの削減により、深宇宙ミッションへ向けた準備を進めています。

過去の成果に基づく実験や、毎年新たに加わる研究設備により、技術的、科学的および商業的な飛躍は今後何年も続くことが期待されます。

ESAの宇宙飛行士ルカ・パルミターノがColumbusモジュールの液体科学実験室（FSL）でマルチスケール沸騰実験容器（EC）を設置する様子。提供：NASA/ESA

星の彼方へ

2021年11月8日に撮影したSpaceX Crew Dragon Endeavourからの国際宇宙ステーションの景色。提供：NASA

国際宇宙ステーションの今後の計画

パートナーの視点を取り入れて

主要な国際パートナー機関は、運用開始から20年目を迎えた国際宇宙ステーションの2030年までの運用延長を検討しています。当初は15年間運用する予定でしたので、当初予定の倍の期間を運用することになります。本書で紹介している数多くの研究実績や、この記事で紹介したように、20年目以降の国際宇宙ステーションの活動は、多くの研究成果の発信が中心となることが予想されます。

カナダ宇宙庁（Canadian Space Agency：CSA）

カナダは、Alouette 1衛星を地球低軌道へと打ち上げた1962年に宇宙計画に参入しました。スペースシャトル用の当初のCanadarmの開発に続き、カナダ人初の宇宙飛行士が1984年に地球低軌道へと飛び立ちました。1988年にカナダは国際宇宙ステーション・プログラム（International Space Station Program）に参加しました。CSAは、Mobile Base、Canadarm2、Dextreなど複雑なロボティックシステムを通して、国際宇宙ステーションの建設と運用を支援してきました。この貢献により2000年から2019年までに行われた7つの技術実証と12の教育・文化活動を含め78件の国際宇宙ステーションの研究にカナダの科学者やエンジニアが参加しています。

国際宇宙ステーションでの研究開発は、2019年に発表された『カナダ宇宙戦略（Canadian Space Strategy）』の重要な柱となっています。宇宙科学と技術におけるこの経験を活かして、カナダは今後も国際宇宙ステーションを活かして、①健康に関する研究の実施と技術開発の支援を通じ、ヒトの宇宙探査を前進させ、社会経済的恩恵と新製品の商用化につなげること、②次世代のカナダ人が科学、技術、工学および数学（STEM）に関心を寄せ研究を追求することを奨励すること、の2点の目標を追求していきます。

これまでに、カナダの宇宙活動は、ロボットマニピュレーター、中性子線量計、ウェアブル生理学的センサー、生物医学的分析機器といった、実にさまざまな技術の開発と実証を通じて宇宙探査に恩恵をもたらしてきました。このような機器や技術は、地球低軌道の微小重力環境下で検証が行われ、今後の宇宙ミッションで利用できる機能や利用性が実証されています。カナダの研究を通して生まれた科学知識については本書で詳しく触れています。ヒトの生理機能や心理に対する宇宙環境の影響をより深く理解することにより、カナダの研究員たちは、深宇宙での今後のミッションにおけるクルーの安全向上を図ります。

カナダによる国際宇宙ステーションの利用は、今後も宇宙探査の次のステップに向けて人類を支えてくれることが期待されます。

過去の国際宇宙ステーションでの活動は、社会的恩恵を地球にもたらしてくれました。主な例としては、健康科学と医療における進歩が挙げられます。国際宇宙ステーションプログラムにカナダが参加したことにより、宇宙における数多くの健康問題への理解が深まり、関連する生物医学装置の開発推進に至りました。この新版で説明したように、宇宙ロボティクスにおける研究開発は、医療や産業製造での応用につながっています。カナダによるこのプログラムに関する活動は、今後もカナダの人々に知識、産業的応用、高い技能を持つ人員のトレーニング、新技術の開発などの社会経済的恩恵をもたらすことが期待されます。

2017年カナダ宇宙庁（CSA）の宇宙飛行士チーム。後方：ジェニ・シディギボンス。前方（左から順に）：デヴィット・サンジャック、ジョシュア・クトリク、ジェレミー・ハンセン。提供：NASA/Bill Stafford

2016年、カナダ政府はカナダによる国際宇宙ステーションへの継続的参加を支援し、唯一無二の国際実験室にカナダ人宇宙飛行士が今後も飛び立つ機会を得ました。宇宙は、科学、発見、技術発展の追求において、新世代のカナダ人を刺激する最高にエキサイティングな実験室です。宇宙が秘めた能力もまた、新興技術の発展と支援において中心的な役割を果たします。カナダは今、国際宇宙ステーションの研究と開発の恩恵を最大限に活かし、引き続き全人類のために宇宙への道を切り拓くために、2024年以降の利用について、国際宇宙ステーションの国際パートナーと共に協議しています。

欧州宇宙機関
(European Space Agency：ESA)

国際宇宙ステーションの国際協力は20周年を迎えました。国際宇宙ステーションに継続的に人間が滞在した20年間は、新たな発明や機会を数多く生み出し、記録的な運用実績を残しました。国際宇宙ステーションは現在クルータイムが増え、運用能力が高まり、インフラがアップグレードして最後となるかもしれない黄金の10年間に突入しています。この10年間の作業を通じて、国際宇宙ステーションは宇宙研究において必要不可欠な存在であり続け、また、世界トップの実験室としての役割を果たし続けることでしょう。この10年間で、人間とロボットによる月と火星の探査を可能にする最先端の研究と技術発展を実現し、人類を深宇宙へと導き、有人宇宙飛行に必要な費用を削減します。

> 国際宇宙ステーションの国際協力は20周年を迎えた。

国際パートナーが有人探査の次の章へ向けて準備を進める一方で、経験から学ぶことも重要です。しかし、経験の限界も知っておく必要があります。放射線、重力の変化、厳しい環境など、宇宙飛行における危険にさらされた生理学的・帰納的影響について多くのことを理解しなくてはなりません。深宇宙の有人探査を成功させるために、重要な医療や行動面での健康支援を行うにあたり、特有の課題を検証することが大事です。

そのため、国際宇宙ステーションの国際協力を維持し、可能であれば、国際宇宙ステーション機能をアップグレードして、国際宇宙ステーションの寿命が尽きるまで効率の良い作業と利用ができるよう徹底することが重要です。ESAでは「Columbus 2030」活動に着手しています（間もなく完了予定）。Columbus 2030活動は、軌道上のインフラを改善・拡大することで運用コストを削減しながら国際宇宙ステーションの利用を増やすことを目的としています。Columbus 2030では、European Columbusモジュールの情報技術インフラ（地上からのサポート・インフラを含む）を近代化し、より効率的な国際宇宙ステーション運用を可能にします。European Drawer Rack Mk2、European Transport Container-Replacement、Live Cell Imaging、アップグレードされたBiolab機能（3Dバイオプリントや3D細胞培養設備を含む）など、新たなインフラ要素が追加される予定です。さらに、飛行中の技術実証（ANITA02や3DMetalprintingなどの高度な生命維持システム）では今後も国際宇宙ステーションの研究を宇宙探査技術システムに応用し、月や火星、さらには深宇宙への探査ミッションを可能にしていきます。したがって、国際宇宙ステーションでは今後も科学研究と応用そして技術実証の比類なき機会を提供し、長期探査ミッションを行うための中継地点としての役割を果たし、人類を宇宙のさらに奥深く（星の彼方！）へ導いて有人宇宙飛行の費用を削減するためにも重要な機能を開発し続けます。

イタリア宇宙機関
(Italian Space Agency：ASI)

イタリア宇宙機関（ASI）の有人宇宙飛行計画は、宇宙研究を通して知識を得て、それを地上の生物医学、技術、有人宇宙飛行関連の用途へ応用するという具体的な目標があります。

この計画の主な目標は以下の通り。

- 宇宙環境での長期滞在に関連した生命プロセスや適応の仕組みを理解すること。
- 太陽系およびその先の有人探査計画を維持すること。
- 高度な技術移転プログラムを対象に、科学と工業の両方において、学際的分野の統合を進めること。

ASIはESA（E3P）とNASA（MoU ASI/NASA）との提携合意により、さまざまな宇宙プラットフォームへのアクセスを提供しています。国内の新たな取り組みや国際協力の視点が育まれます。その目的は、過去の成果をまとめて、それを基に国際的目標に貢献するイタリアの研究活動の方向を定めることです。このプログラムは専門の設備や飛行機会を提供する以下の研究分野に焦点を当てています。

- 生命科学ならびに統合生理学、微生物学、植物生物学、そして生物再生生命維持システム、放射線をはじめとするマクロ分野
- 基礎、材料、液体物理学をはじめとする物理科学
- 技術実証と商用開発

このような分野の研究は今後の有人探査のシナリオへつながり奨励されています。ASIが行う実験の大部分は生物学と生命工学、ヒトの生理学そして技術実証に焦点が当てられています。これまでのところ、ASIでは国際宇宙ステーションで73件の実験を実施し、そのうち69件がASIおよびNASAとの提携によるもので、3件がESAの貢献プログラムの枠組み、1件がROSCOSMOSとの具体的な契約により実施されました。

イタリアの宇宙飛行士ルカ・パルミターノの最後のミッションにおいて、ASIは6件の新実験を国際宇宙ステーションへ打ち上げ、そのうち4件が今なお行われています。ASIの次の実験は、2022年のサマンサ・クリストフォレッティーにアサインされており、ASIは一連の新実験を立ち上げる予定です。

新規の利用計画を策定するため、ASIは最近、新しい実験を選定しました。その大半が生物学、ヒトの生理学、そして技術実証に関するものでした。今後数年間で、これらの実験に徐々に着手予定です。

ASIはISS4Marsプロジェクト促進機関の一つです。ISS4Marsは、有人探査の次のステップを支援するために、アナログプラットフォームとして国際宇宙ステーションを利用するという国際的な提案です。国際宇宙ステーションは、宇宙環境と似た条件を作り出すことができ、火星ミッションに向けて統合された唯一の類似する場所（アナログ）です。利用戦略は、深宇宙探査に必要な技術格差やいまだ解明されていない研究上の疑問の解決が焦点になるでしょう。この計画の実現可能性を現在検討中です。

宇宙航空研究開発機構（JAXA）

JAXAは、幅広い活動においてISS「きぼう」日本実験棟を利用して、日本経済への恩恵を最大化し、科学的・技術的発見へ向けた多大な貢献の強化を進めています。「きぼう」船外実験プラットフォームは、地球や天体を観測する多くの機器や宇宙曝露実験の拠点となっていますし、エアロックとロボットアームを利用して超小型衛星の放出を行い、新興国初の衛星保有や国内外の宇宙開発利用人材の育成、民間企業の宇宙実証等に貢献しています。経済産業省（METI）が開発・運用しているHISUI（ハイパースペクトルセンサ）は、2020年より稼働しています。HISUIは、鉱石が採掘可能な状態で集まっている場所のマッピング、環境研究用の植物分布の特定や農業用の土壌状態の追跡に役立つ地球観測データを収集しています。「きぼう」内部の実験装置は、研究者に唯一無二の機会を与えます。例えば、小動物飼育装置では、さまざまな重力レベルにおける小動物の状態を研究することができます。静電浮遊炉（ELF）では、材料科学者が容器による汚染を心配することなく超高温下で材料の研究を行うことができます。

本書の多くの例から分かるように、JAXAは、大学や企業そして世界各地の公的機関による新薬設計支援、健康長寿研究、超小型衛星の放出、宇宙環境曝露などに焦点をおいています。JAXAは、2024年までに、このような目的で30%から50%の商業利用を達成することを目標としています。JAXAとユーザーサービスプロバイダ間の協力が増えることで、今後も、「きぼう」の利用者に高品質のサービスを独自に提供する新たな組織や団体の設立が進むことでしょう。このような協力関係が深まる中、運用上のノウハウは今後も継承され、地球低軌道の新たな市場は拡大されていきます。

商業面では、JAXAはペプチドリーム社やソニーコンピュータサイエンス研究所（ソニーCSL）等と提携しており、研究・技術開発のための新たな道を切り拓こうとしています。さらに、国際宇宙ステーションを使った多様なパートナーシップを促進するため、JAXAはアジア太平洋地域の国々との連携を深めています。例えばシンガポールとの契約のもと、超小型衛星放出機構（JEM Small Satellite Orbital Deployer：J-SSOD）を利用してシンガポールの衛星が放出され、超小型衛星用の新規のスラスター技術が検証されました。

JAXAでは今後も戦略的パートナーシップの促進に焦点を当て、「きぼう」日本実験棟での研究開発テストベッドを商業的に確立し、日本の創薬企業であるペプチドリーム株式会社との契約のような有効な有償契約を基盤としていく予定です。この契約では頻繁なサンプルの打ち上げ・実験が可能となり、結果として研究費用全般を削減しながら創薬を加速させることが可能になりました。JAXAではSpace BD社や三井物産エアロスペース社などを事業者として選定し、一部の実験機会を活用することにより顧客を生むためのシステムを確立しています。

JAXAの宇宙探査イノベーションハブでは、ソニーCSLと別の提携関係が結ばれています。「きぼう」船外実験プラットフォームの中型曝露実験アダプタ「i-SEEP」を用いる実験ですが、複数の衛星間、または衛星と地上の操作インターフェース間で大量データ通信システムを確立する際に重要な役割を果たすことになるでしょう。このイノベーションは、地上における将来的なより長距離の光ファイバー通信でも広く利用することができます。

最後に、国際宇宙ステーションと日本の「きぼう」日本実験棟を2030年までフルに稼働させることができれば、継続的な科学的、革新的、経済的発展について大きな成功を示せることになります。

International Space Station National Laboratory：ISSNL

クルーが滞在したまま20年目に突入する中で、国際宇宙ステーションは今、利用の時代から、これまでの成果に立脚して未来の確固たる地球低軌道

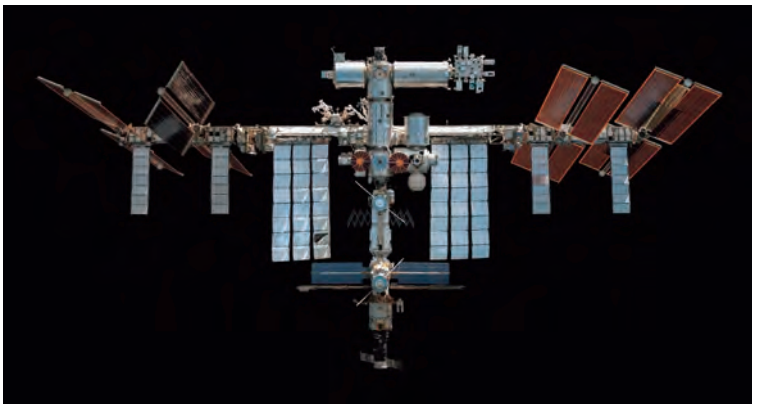
経済を確立する時代へと移り変わりつつあります。国際宇宙ステーションでの過去20年間にわたる研究と技術開発の成果は、地球低軌道で行われるそのような開発が私たちに与えてくれる唯一無二で実体を伴う恩恵を示してきました。

宇宙を拠点とした研究開発の実証と、地球低軌道での持続可能な市場促進において、ISS National Labが重要な役割を果たしています。ISS National Labは、産業ユーザーの需要増加を促進しています。実験装置の開発に関連するサービスを提供する企業や組織を支援することで、供給する側の成長を促します。最終的には民間部門による地球低軌道経済への投資を促進することにつながります。

この10年間、ISS National Labは Center for the Advancement of Science in Space社（CASIS）により管理されてきました。この間、600件以上の研究に使用される500以上のISS National Labのペイロードが国際宇宙ステーションへと打ち上げられました。このうち70%近くは、商用製品を発展させ、経済発展を促進するための、民間部門による研究開発でした。ISS National Labを利用してきたフォーチュン誌500企業には、Procter & Gamble、Merck & Co.、Adidas、Colgate-Palmolive、Target Corp.、Lockheed Martin Corp.、Hewlett Packard Enterpriseなどが含まれます。現在までに、NASA以外の外部資金として2億4千万ドル以上が、ISS National Lab主導の研究支援に投入されてきました。加えて、Boeing社との多角的協力を通して、ISS National Labではマスチャレンジ社のスペースステクノロジー賞を通じて革新的スタートアップを支援しています。

2013年に開始して以来、この賞により、ISS National Lab主導の研究開発の27件のスタートアップに対し880万ドル相当の資金が提供されてきました。

この10年間で得られた知識を通して、ISS National Labでは、経済的価値を提供し、商業製品につながる可能性が最も高い主な研究開発分野を特定してきました。ISS National Lab研究発表では現在、これらの戦略的分野に注力しています。この中に含まれる領域として、技術発展・立証、高度製造・材料における宇宙生産応用、ならびに組織エンジニアリング・バイオマニュファクチャリングなどが挙げられます。ISS National Labでは、アメリカ国立衛生研究所（National Institutes of Health：NIH）やアメリカ国立科学財団（National Science Foundation：NSF）など、他の政府機関とも多角的協力関係を結んでおり、総計で50件近くのISS National Lab主導の研究を支援するために、3500万ドル以上の資金が提供されています。この10年間では、150以上の査読付き論文がISS National Lab主導の研究開発から発表され、国際宇宙ステーションで実施される実験への信頼と高い評判がうかがえます。



2021年11月8日に撮影した国際宇宙ステーション。提供：NASA

ISS National Labは、地上ベースの概念を飛行向けの実験設備へ転換するために、研究関係者にサービスを提供する目的で、35以上の多様な団体へ資金や支援を提供しています。

B2Bの関係を円滑化するため、ISS National Labでは、オンラインポータルを用いて、実施パートナーとそのサービスを利用する研究関係者をつなげています。ISS National Labでは、研究関係者が利用できる軌道上能力を拡大するため、増加傾向にある国際宇宙ステーション上の商業設備へのアクセスを提供し、需要を創出しています。現在、18の国際宇宙ステーション設備が、10の商業サービスプロバイダ（実施パートナーのサブセット）によって所有・運用されています。

ISS National Labの利用もまた大きな投資を生んでいます。ISS National Labの契約と宇宙飛行の両方が、スタートアップ企業にとって、経済的価値を創出する主な指標となります。2014年以降、ISS National Lab主導のプロジェクトを実施してきたスタートアップ企業は、宇宙飛行後に総額11億ドル以上もの資金を集めています。このような資金は、公開株式市場やベンチャー・民間資本、そして官民からの助成金を通して募ることができます。また、ISS National Labでは現在、250近くのメンバーを有する投資者ネットワークを用意しています。このネットワークを通して、ISS National Labでは、ISS National Labエコシステムにおける資本金調達の取り組みを支援し、現在までに1,000件近くの仲介を行ってきました。

未来の労働力の科学リテラシーを向上させることもまたISS National Labの中核的なミッションです。教育のための強力なプラットフォームとして国際宇宙ステーションを利用するISS National Labは、今後の地球低軌道経済の成功を保証する上で重要な役割を果たすことになる次世代のイノベーターやリーダーたちの育成に寄与しています。ISS National Labでは、国際宇宙ステーション探査コミュニティの一環である25の教育プログラムと提携しており、2021年度だけで、380万人近くもの人々がこのようなプログ

ラムに携わっています。

この10年間で築き上げてきた強力な基盤を武器に、ISS National Labは今後もNASAや国際的パートナーと協力して、地球低軌道市場における成長と投資の加速に努めていきます。これまでに達成された成果は、未来の確固たる持続可能な地球低軌道経済の道を切り開いてきました。このなかで複数のプラットフォームと宇宙ベースのISS National Labが、私たちの国や世界にかけがえのない恩恵をもたらすような政府と企業の両方による研究開発を支援することになります。

アメリカ航空宇宙局（National Aeronautics and Space Administration：NASA）

2020年11月、NASAは、国際宇宙ステーションでの地球低軌道において米国人の継続的滞在が20周年を迎えたことを報告しました。国際宇宙ステーションでの研究や技術実証は、地球低軌道からその先の深宇宙に人を送るための礎となり、20年間にわたって24時間365日続いたミッションは、経験によってしか得られない専門知識と洞察を生み出しました。

世界で唯一の国際的な軌道上実験室として、国際宇宙ステーションは今後も有人宇宙飛行において比類なき力を発揮していくでしょう。宇宙の量子領域から空間論的性質まで、また、その間のすべてのスケールにおいて、科学研究はすべての主要な科学分野において知識を押し広げてきました。国際宇宙ステーション外部に取り付けた地球観測機器は独自のデータセットを生成し、科学者による気候や海洋モデリングの向上を支援してきました。このような知識のすべてが、米国の民間産業の競争力を強化させながら、この地球のあらゆる生命に恩恵をもたらす可能性を秘めています。

ISSプログラムを通して育まれてきた国際パートナーシップとその功績は、各国がいかに協力して複雑な課題を乗り越え、協力的に目標を達成できるかということを物語っています。実際に、これまで100ヵ国以上が軌道上実験室を使用したことがあるか、もしくは現在も使用しています。5つの宇宙関連省庁と15のISS政府間合意署名国による20年間にわたる共同作業から得られた経験は、長く持続する遺産となり、今後数十年間にわたり協力的探査の枠組みを提供してくれることでしょう。

国際宇宙ステーションは月に初めて女性飛行士と有色人飛行士を着陸させる予定のNASAのアルテミス計画への足掛かりとなっています。微小重力環境下で生活することによる生物、特にヒトへの影響に関する長期研究を実施し、人類が月で作業する技術を検証するための唯一の場所として、国際宇宙ステーションは、持続可能な滞在を月に確立する取り組みにおいて、唯一無二の役割を果たしています。私たちは、生命維持システムから放射線センサーに至るまで、国際宇宙ステーションでアルテミス計画へ向けた重要技術の検証を行っています。

地球低軌道におけるNASAの今後のビジョンは、NASAが数多くの顧客の一つとなっている商用宇宙市場の持続化です。このビジョンの達成には、地球低軌道活動のための健全な商用サプライヤー拠点の開発が不可欠です。現在、国際宇宙ステーションはすでに、企業が費用効率の向上に取り組んでいる商用貨物やクルーの移動を実現しています。10以上の商用研究設備が国際宇宙ステーションで稼働中であり、20社以上の企業が国際宇宙ステーションの研究コミュニティを支援するための実験装置開発や統合サービスを提供しています。NASAもまた商用LEO開発計画に着手しており、国際宇宙ステーションを通して現在利用可能な水準を超える民間の軌道上能力のさらなる開発に努めています。

深宇宙への有人探査ミッションへ向けて準備を進める中で、国際宇宙ステーションの実現につながった確かなパートナーシップの重要な価値を顧み、人類が月までの宇宙空間に前進する上でも、そうしたパートナーシップに立脚することが大切です。利用者が新たな微小重力応用を知り、新規市場を検証し、その成功の物語を伝え、これまでとは異なる宇宙ユーザーに対して地球低軌道への関心を広げることができるよう、現在の国際宇宙ステーションの価値と影響力を最大化する必要があります。

ロシア国営宇宙公社（ROSCOSMOS State Corporation for Space Activities：ROSCOSMOS）

ROSCOSMOSでは、ロシア連邦の宇宙計画を支援しています。ROSCOSMOSの責任には、宇宙部門における国際協力の展開や、ロシアの社会経済開発における宇宙活動の成果の利用に関する条件の策定も含まれています。

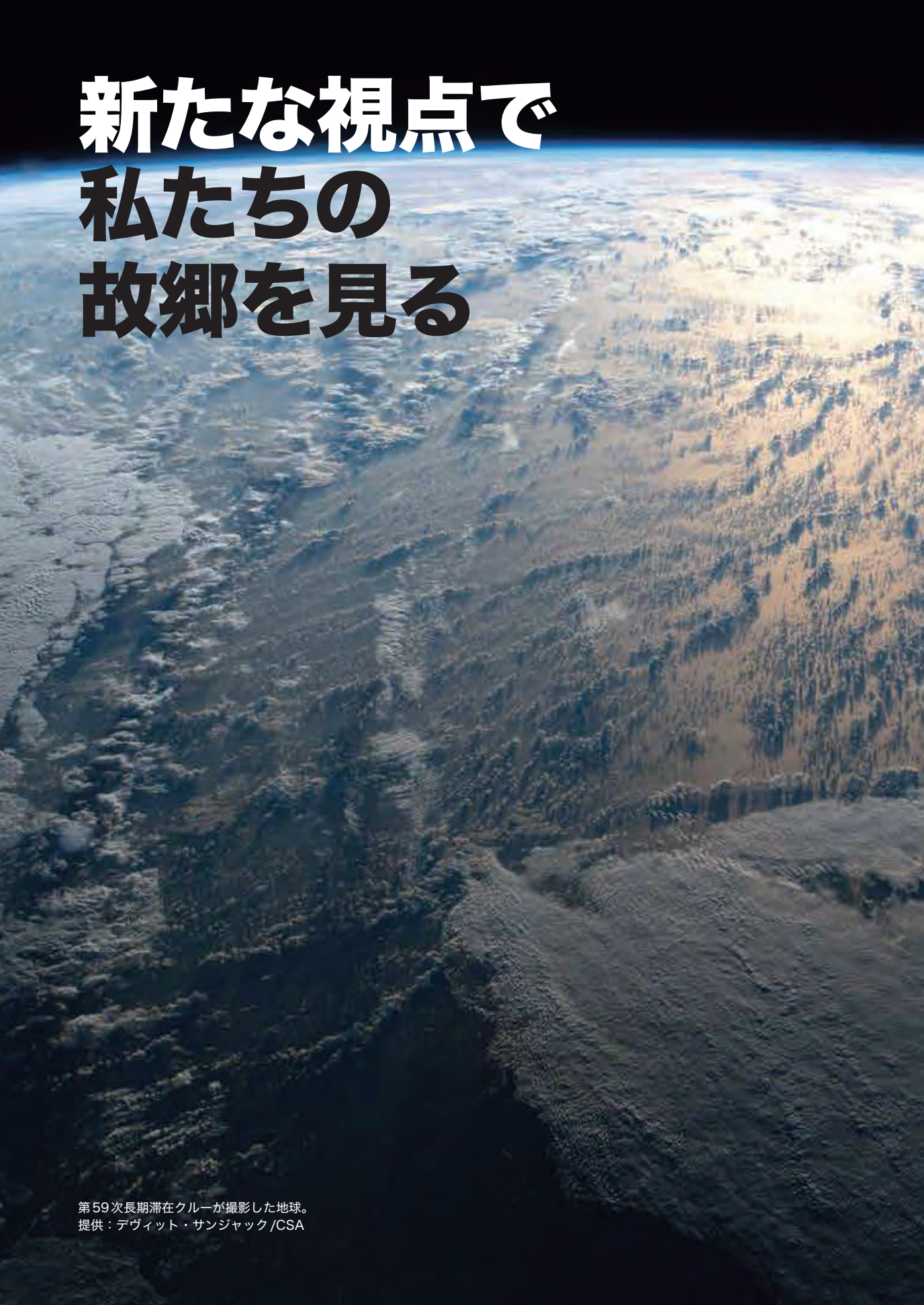
20年以上にわたり利用されてきた国際宇宙ステーションのロシア区画（ISS-RS）の活動は今もなお続いています。2021年、多目的実験室モジュールNaukaとノードモジュールPrichalというロシアの2つの新しいモジュールが打ち上げられ、無事ISS-RSに連結されました。モジュールに組み込まれていたマルチゾーン電気真空炉は、ゾーンメルティング、バルク結晶化、方向性凝固を対象とする交換可能なヒーターとプロセスを使って、半導体結晶研究に対応しています。Naukaモジュールの結合に伴い、ISS-RSで実施される研究活動の量は17%以上増加すると推定されています。

ISS-RSの利用を拡大するプロセスもまた進化を続けています。ROSCOSMOS下で結成されたある組織は、ロシア部門の商用サービスにオペレーター機能を備えており、関心のある組織が資金提供できるようになっています。

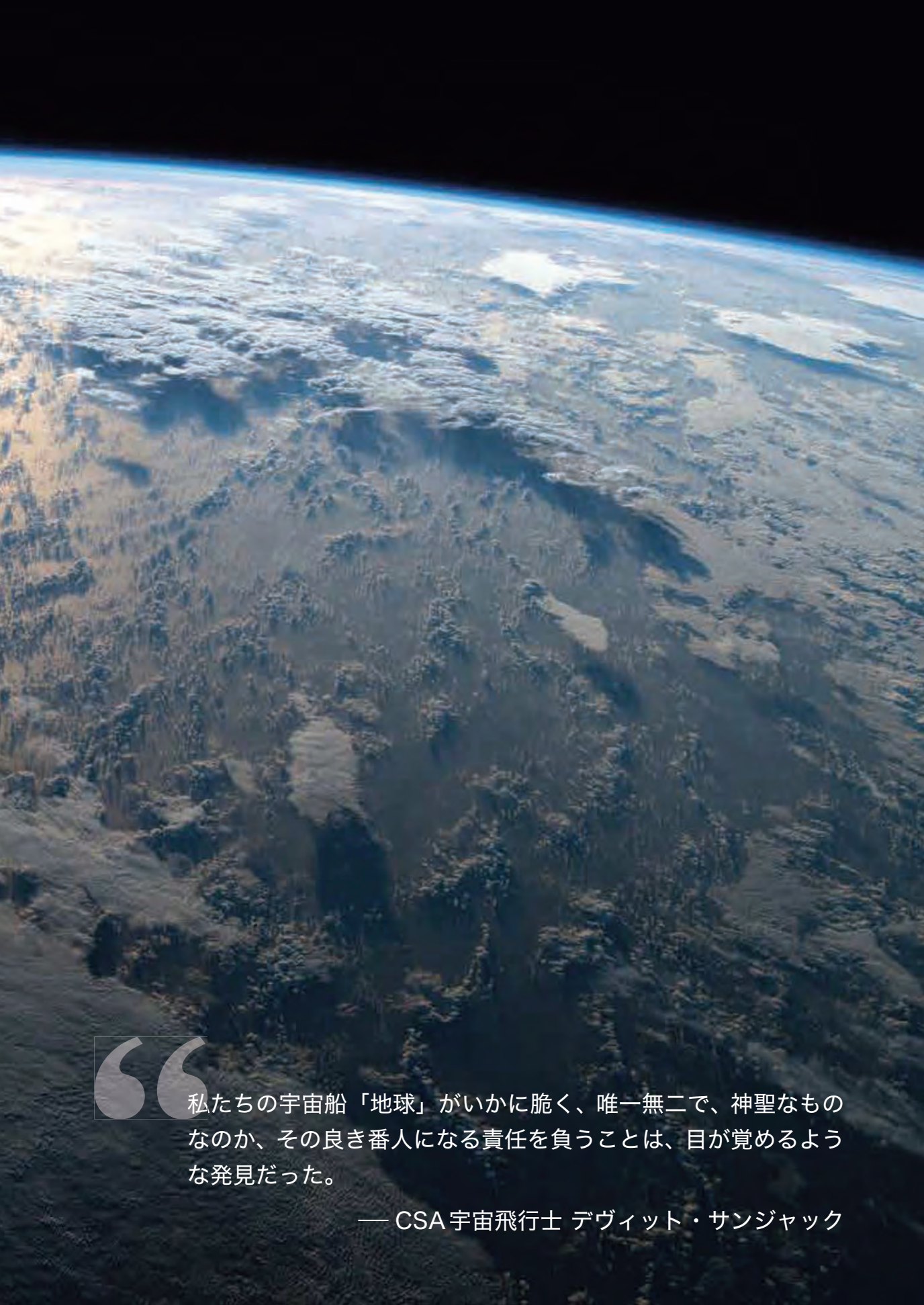
カザフスタン、アラブ首長国連邦、ハンガリーといったさまざまな国々の大学や商業団体と協力し、ROSCOSMOSは、地球低軌道が人類の生命維持、植物、材料、そして燃焼プロセスに与える影響や衛星放出に関する研究に引き続き焦点を当てていきます。

このような活動はすべて、あらゆる分野における研究数を増やし、科学や応用研究活動における有意な成果を生み出しながら、投資利益率と経済的効果を最大限に上げることを目的としています。

新たな視点で私たちの故郷を見る



第59次長期滞在クルーが撮影した地球。
提供：デヴィット・サンジャック /CSA



私たちの宇宙船「地球」がいかに脆く、唯一無二で、神聖なものなのか、その良き番人になる責任を負うことは、目が覚めるような発見だった。

— CSA宇宙飛行士 デヴィット・サンジャック

2019年8月30日、国際宇宙ステーションが大西洋上を通過する際、キューポラ内から第60次長期滞在クルーが、急速に勢力を増すハリケーン・ドリアンを交代で撮影する様子。
提供：NASA

地球を見つめる比類なき眼

農業、都市、森林、災害対応、気候科学などを軌道上から支援する

地上では、空を見上げて宇宙には何があるのだろうと思いを馳せるものです。一方で、私たちの惑星の上空402キロ先では、国際宇宙ステーションが私たちを見守っています。地球の方に向けたカメラからデータや画像が世界各地の科学者や農家、森林労働者などへ送られており、今この瞬間も人類の発展に貢献しています。

私たちの上空に位置する国際宇宙ステーションの外部には地球観測機器が複数設置されています。これには国際宇宙ステーションの日本実験モジュールの擁する数多のカメラやボックスやツールも含まれます。地球観測用超小型衛星は、国際宇宙ステーションのエアロックや一部の補給船から定期的に放出されます。国際宇宙ステーション内では、宇宙飛行士らが軌道上実験室の窓から地球の写真を撮ったり、地球の科学実験を行ったりしています。このような作業のすべてが、私たちの故郷である地球に関する洞察や今後訪れる変化の対処法をもたらします。

「物事が今後どのように変化するかを知らなければ、その変化がやって来たときに対処できない」とNASAジョンソン宇宙センター（ヒューストン）の探査科学オフィス（ESO）マネージャーウィリアム・ステファノフは述べています。

地球の気候に影響を及ぼしている要因は、長期的に追跡しなければなりません。20年以上も軌道上にあり現在も稼働し続けている国際宇宙ステーションは、このような長期的データを収集する上で最適な場所であるといえます。統合した情報から得られた特異なデータセットをもとに地球に関する意思決定を行い、場合によっては環境問題に対する解決策を生み出すこともできるかもしれません。

国際宇宙ステーションでは特有の視点から地球を見ることができ、軌道上では地球の人口の90％が視界に入ります。軌道上に位置するおかげで、宇宙飛行士らは、一日に16回も世界各地の日の出と日没を見ることができます。

「この軌道のおかげで、国際宇宙ステーションは一日のあらゆる時間に地球のあらゆる地点の上空を通過してデータを収集することができます。他のほとんどの遠隔検知装置がフリーフライヤーで収集するデータとは根本的に異なるデータです」とステファノフは述べています。

ECOSTRESS、GEDI、OCO-3、DESIS、TSIS（またはTSIS-1）、HISUIなどの宇宙ステーション外部に設置されている観測装置の場合、個別に関連データが収集されます。MUSES地球画像設備では、数多くの地球観測ツールへの商用アクセスも提供しています。これらのツールを組み合わせることで、環境研究をさらに推進させる独特の測定結果を得ることができます。

一部の国際宇宙ステーション実験は特定の応用に焦点が当てられていますが、このような地球観測装置の多くは、幅広い用途でデータを提供します。

ROSCOSMOS-イタリア宇宙機関（ASI）のUV大気研究- Mini-EUSOによる最初の6か月間のデータ分析では、多目的望遠鏡が、地球から発する大気光や紫外線の変化の測定から宇宙のごみや宇宙線の追跡まで、すべて可能であることが示されています。現在では、40以上のセッションが無事完了しています。16ヵ国から約300名の科学者を集めて宇宙線の観測を向上させる取り組みを行っている大規模なプログラムJEM-EUSOの一部の実験では、陸や海の上空の人工照明を測定し、地球の大気圏にある宇宙線放射の影響を研究して、地球近傍軌道の宇宙のごみを登録・追跡することが期待されています。Mini-EUSOではすでに、数千の微弱な隕石の到来が測定されていて、このような事象を研究し、到来方向、速度、光度に関するデータを取得できるようになっています。火災のリスクを削減する、植物のストレスを測定する、地熱エネルギー源を探索する、蚊を追跡する、あるいは、農家が効率的に水やりをするのを手伝うといった取り組みに用いられています。

「ECOSTRESSでは、気温の微細な変化を測定し植物のストレスを特定することができますが、その同じ測定を、火災や溶岩流などによって生み出される極端な熱の特定にも用いることができるのです」とECOSTRESSの主任研究者であるサイモン・フックは述べています。「科学に重点を置く極めて多くの領域で貴重とされるデータとともに、世界各地の研究者らがECOSTRESSのデータを用いて本当にワクワクするような成果を生み出しています。」

米国農務省や世界各地の無数の農家たち、そして各地の水道局が現在このようなデータを駆使し、作物に必要な水の量や、何が最も水効率が良くて何に水が足りていないかなどについて、目視できるレベルの干ばつの兆候が表れる前に判断しています。ロサンゼルス都市舗装計画（Los Angeles City pavement project）では、このデータを用いて、熱の削減目的で設置される新たな反射舗装の効果を監視しています。森林管理者は、ストレスのかかっている木々のあるエリアを間引いて火災のリスクを低減させる、あるい

2019年4月29日、フロリダ州にあるNASAのケネディ宇宙センターで行われた科学ブリーフィングで説明するOCO-3プロジェクト科学者アンマリー・エルダリング。ブリーフィングは、OCO-3を軌道へ打ち上げた国際宇宙ステーションへのSpaceXの第17回商業補給サービスミッション（CRS-17）について発表された。提供：NASA/Kennedy Space Center

は、少なくとも高リスク時にはそのようなエリアに消防隊を配備することができます。

「ECOSTRESSは小規模かつ低費用のミッションですが、さまざまな専門領域を持つ科学者が数多く集まっています」とフックは述べています。「しかし、コアチームは少人数体制ですが、素晴らしい仕事をしてくれています」とも。

ECOSTRESSのチームは、他の国際宇宙ステーションの研究機器チームと協力してさらなる利益をもたらすことを検討しています。

「OCO-3のチームは炭素サイクルにおける植物とその役割について理解したいと考えています」とOCO-3プロジェクトの科学者でNASA JPL（ジェット推進研究所、南カリフォルニア）のアンマリー・エルダリングは述べています。「国際宇宙ステーションの隣人ECOSTRESSは、植物がストレスに対してどのように反応するかを研究しています。またGEDIでは、地上にある植物性素材の量を研究しています。炭素サイクルにおける植物とその役割について検証する科学者らは、とても興奮しています。あらゆるデータを組み合わせて植物をより深く理解する方法については、非常に多くの議論が展開されています。」

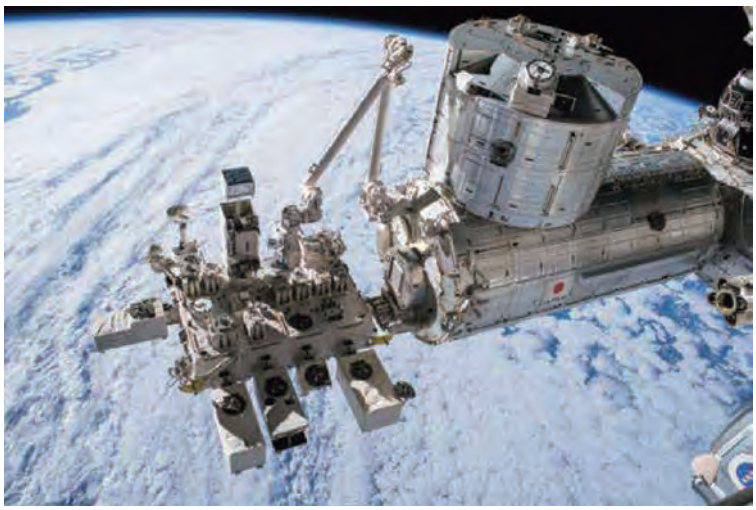
NASAのOCO-3センサーは大気を通る日光の反射を利用して、大気中の二酸化炭素の変化を測定し、百万分の一未満の規模の変化を観察しています。

「オゾン、一酸化炭素、あるいは水蒸気などのほとんどのガスは、汚染されると2倍、3倍の大気濃度になるため、検知が非常に容易です。しかし、二酸化炭素に関しては、その変化を特定することが難しくなっています」と。エルダリングは述べています。

2021年、OCO-3のデータを用いて、ロサンゼルス大都市圏において人間が二酸化炭素に及ぼす影響について、宇宙で作成された非常に正確な地図が発表されました。この種のデータは、意思決定者たちが排気削減目標を達成し、新たな規制の効果を測定する上で、最も効果のある政策を選定する際に役立ちます。

「今度は他の多くの都市についても検討しています」とエルダリングは述べています。「私たちが測定したデータと他の装置で測定した他のガスデータを見てみると、私たちは非常に詳細な排気図を作成できていることが分かります。」

また炭素の貯蔵と除去についても国際宇宙ステーションの内外で研究されています。ESA（欧州宇宙機関）光バイオリアクター研究では、培養した藻類について研究し、微細藻類が将来的に炭素ループを閉じるのに役立つかどうかを研究しており、クウェートの実験「E. coli C5」では、二酸化炭素を食物として消費するよう修正された大腸菌に対する微小重力の影響を研究しています。国際宇宙ステーションの以前の観測装置HICOが捉えた画像などは、有害な藻類ブルームを検知するためのアルゴリズム開発に役立っており、グ



日本実験棟に取り付けられた一連の地球観測用ペイロード。2018年3月、国際宇宙ステーションがニュージーランド東部の太平洋南部上空を周回した際の画像。提供：NASA

島国である日本の上空420キロを通過する際、国際宇宙ステーションから東京の夜光を撮影。提供：NASA

ローバルな炭素サイクルにおいて大きな役割を果たす可能性があります。

SAGE-IIIなどの他の装置がオゾン回復を追跡し、NASAのISS-LISやESAのASIMが稲妻を監視し、また、TSISが太陽から地球へと流れ込んでくる総エネルギーを追跡する中、国際宇宙ステーションの実験によって、実に多くの気候記録やモデルが改善されています。太陽放射照度は、宇宙ベースの観測による最長の気候データ記録の一つです。研究者らは、TSISにより、その記録の連続性を維持することができています。

「気候変動は人類最大の環境課題かもしれません」と元TSIS主任研究者でコロラド大学ボルダー校（University of Colorado Boulder）教授のピーター・ピリュースキーは述べています。

「システム内、あるいは内外を行き来するエネルギーの流れを監視することにより、気候システムの仕組みを理解し、気候が変化していることを認識し、気候変動の原因となっている仕組みを特定することで、私たちの能力を高めることができます」。

国際宇宙ステーションでは、TSISなど、地球観測実験を行うための標準機能を擁するプラットフォームを提供しています。フットボール競技場並みのサイズで多数の接続部とデータキャパシティおよび強力な電力供給能力を有する国際宇宙ステーションでは、幅広い機器を同時に設置できます。このようなリソースが利用できるため、TSISチームにとって、国際宇宙ステーションは最適でした。数度のスケジュール遅延の後、同チームは、TSISの打ち上げ前に、以前の追跡装置の故障の可能性に直面しました。

「データ記録が連続している場合、気候記録の精度は最高レベルが維持されているため、非常に切迫した状態になりつつありました」とピリュースキーは述べています。「国際宇宙ステーションのおかげで、私たちはこの記録を継続することができました。」

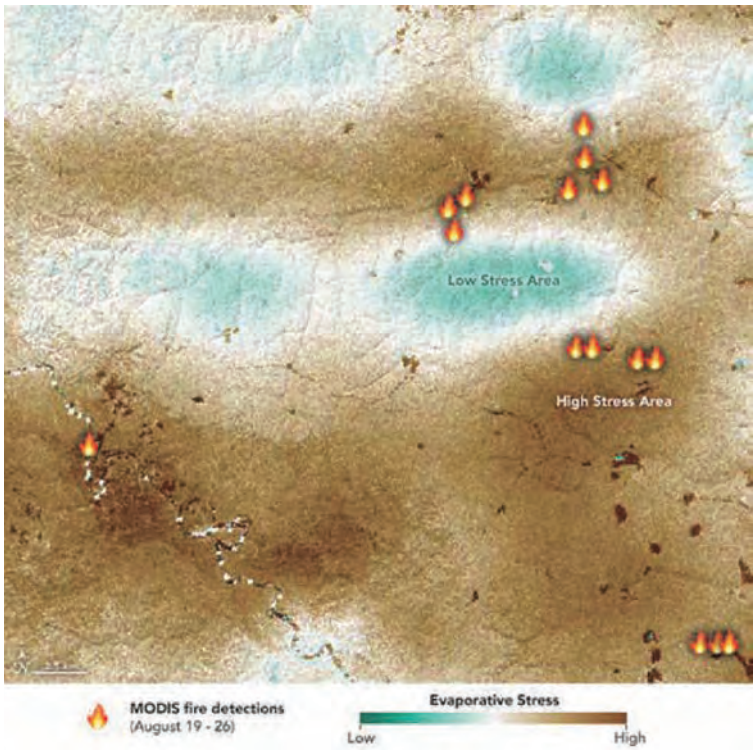
研究者らが国際宇宙ステーション用の観測装置の製造に関する基本を学ぶことで、その知識を将来の国際宇宙ステーションプロジェクトに応用することができます。ピリュースキーはすでに次の実験CLARREO Pathfinderに取り組んでいます。

「非常に高い精度を必要とする国際宇宙ステーション装置の操作から得られた教訓や価値については計り知れません」とピリュースキーは述べています。「私たちは、CLARREO Pathfinderでも同じことを行わなければなりません。ですから、TSISの機器に使用したのと同じモーターの一部を使用しています」。

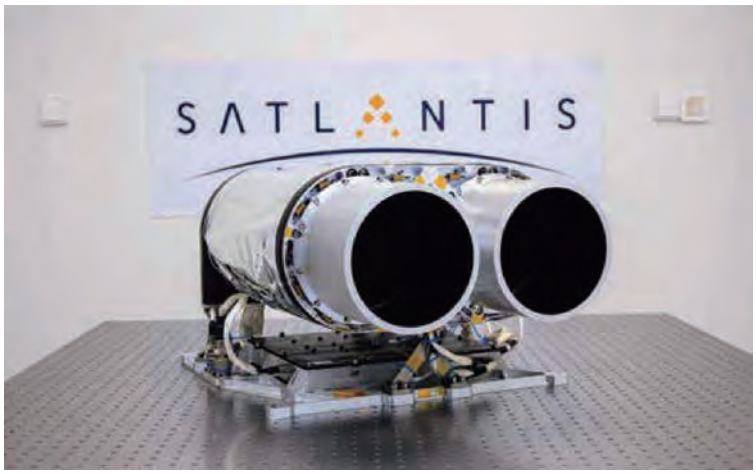
今後数年間のうちに打ち上げが予定されているCLARREOでは、既存のセンサーの5倍から10倍の正確性で地球や月により反射される太陽光を測定することで地球の気候を研究します。

また宇宙航空研究開発機構（JAXA）の船外実験プラットフォームに搭載された超小型衛星搭載用地球観測カメラ（iSIM）は、SATLANTIS社（スペイン）が開発した高解像度光学双眼鏡であり、1メートル未満の解像度で地球の画像を撮影しました。

上空から私たちの地球を観測しているのはセンサーだけではありません。人間の目でも観測する事ができます。



NASAのECOSTRESSセンサーは、2019年8月7日、ペルーのアマゾン熱帯雨林上空を通過した際に、植物のストレスレベルを測定した。この地図は、火災が水ストレスにさらされた植物（茶色）のエリアに集中していたことを示している。このパターンは、植物の健康がいかに火災の蔓延に影響するかということを指摘している。提供：NASA/JPL- Caltech/Earth Observatory



JAXA iSIM-IODフライトユニット側面の写真。iSIMは、SATLANTISが開発した新世代の超小型衛星搭載用地球観測カメラ。最先端技術を駆使したクラス最高性能と大幅な製作期間の短縮、そして手頃な価格を実現した。提供：SATLANTIS

宇宙飛行士は、国際宇宙ステーションの窓から、写真を撮ったり、気候データを手動で収集したりすることができます。宇宙飛行士は、400万枚以上の地球の画像を宇宙から（国際宇宙ステーションからは350万枚以上）撮影しており、長期間に及ぶ地球の変化に関する記録の中でも最長のものの一つとなっています。クルーによる地球観測は、現在、都市部の夜の明かりに関する研究や氷河や火山の観測に加え、火山噴火の影響を受ける大気プロセスに関する研究を支援しています。ROSCOSMOSのハリケーンビジュアル研究もまた、追加のデータソースとして画像を提供することで地球の観測をサポートしています。このような画像もまた、ハリケーンや山火事といった災害時の救済活動に役立ちます。

国際宇宙ステーションでは、超小型衛星を地球低軌道へと放出することで、気候科学の理解を深めています。靴箱程度の大きさの装置を用いて新しいタイプの気候科学を検証しています。超小型衛星は、宇宙飛行士らが国際宇宙ステーションのエアロックから放出を支援しています。

「大学やNASAの各センターが実行する小規模プロジェクトにとって、超小型衛星は素晴らしいリソースです。超小型衛星が最初の足掛かりとなるかもしれません。」とTSISとNanoRacks-MinXSSの主任研究者トム・ウッズは述べています。「国際宇宙ステーションでは、このような超小型衛星を宇宙で放出する機会も数多く提供しています。」

国際宇宙ステーションから放出された気候に関連した超小型衛星には、以下のようなものがあります。

- 学生が設計したNanoRacks-MinXSS CubeSatで、太陽X線エネルギーと地球の大気にどのような影響を及ぼすかについて理解を深める。
- JAXAがサポートしたDIWATA-1衛星で、台風や局所的な豪雨などの気象災害を観察することで、フィリピンに遠隔検知情報を提供する。
- NASAのHARP CubeSatで、雲やエアロゾルが天気、気候、空気の質にどのように影響するかについて理解を深める。

地球の気候が変化する中、国際宇宙ステーションは、今後も上空から気候を観察し、地球に住む人々の安全を保つために、かけがえのない情報を提供してくれます。

ロシアの宇宙飛行士ディミトリ・コンドラティヴ（左）とESA（欧州宇宙機関）の宇宙飛行士パオロ・ネスポリが静止カメラを使って国際宇宙ステーションのキューポラ内の窓から地球各地の地形を撮影している様子。提供：NASA

地球低軌道から私たちの惑星をみる

宇宙飛行士が撮影した写真で見る地球

「百聞は一見に如かず」という言葉は、国際宇宙ステーションにいるクルーが撮影した写真や画像に、とりわけあてはまります。約402キロの高度で90分ごとに地球を回る国際宇宙ステーションは、私たちの惑星の写真を撮るために、見晴らしの良い最適な場所を提供してくれます。国際宇宙ステーションのクルーは、350万枚以上もの地球の写真を撮影してきました。これらの写真は、1960年代から続くロシアとアメリカの宇宙開発プログラムの画像キャプチャに加えられました。ROSCOSMOS のUragan-Vizual（ハリケーン視認研究）とクルーによる地球観察研究では、宇宙飛行士が、地球表面の重要な特徴を写真で撮影しています。

NASAのクリス・キャシディ宇宙飛行士はデジタルスチルカメラの400mmレンズを使って自分と国際宇宙ステーションの約250マイル下にある地球上のターゲットを撮影している。提供：NASA

科学者による科学観察のトレーニングを終えると、クルーは、小型カメラを使って、火山噴火、都市部、水域、気象現象といった特徴を日常的に写真撮影します。

クルーが撮影した写真から集められた情報は、地球の組成や健康そして将来に関わる地球規模の研究に役立ちます。

コロンビアの洪水

巨大なオリノコ川（Orinoco River）は、コロンビアとベネズエラの国境に沿って流れています。コロンビアのオロニキア（Oroniquia）地域を流れる４本の大きな川がオリノコ川につながっています。2020年7月上中にこの地域で発生した大洪水は、1,200世帯以上もの人々に被害をもたらし推定1,600ヘクタールの作物を壊滅させました。

コロンビア水文･気象･環境学研究所（Colombia Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studie）は、NASAの地球応用科学災害プログラムに洪水の範囲と影響を特定するように依頼しました。このプログラムのツールには、国際宇宙ステーションの宇宙飛行士らが撮影した写真から構成されるクルー地球観測（CEO）が含まれています。同月下旬、NASAの宇宙飛行士クリス・カシディは、国際宇宙ステーションがコロンビア上空を通過する際に、洪水の画像を撮影することに成功しました。NASAの地球科学および遠隔検知ユニット（Earth Science and Remote Sensing Unit）（ジョンソン宇宙センター）は、その写真を現地の各地点と照合し、その後、災害プログラムよりコロンビア当局に送付しました。

「洪水地帯の迅速な遠隔分析に対応するには、この情報が必要不可欠でした」とコロンビアの災害リスク管理国立ユニット（National Unit for Disaster Risk Management）に所属する地理情報システム専門家ジョン･ナランジョは述べています。当局の関係者たちはこの画像を用いて数日かけて洪水地帯の分析を行い、全国の省庁および自治体による直接的な緊急対応が最も必要なエリアの特定に役立てました。また、このときの写真は緊急災害対応活動の支援にあたって地球観測データを提供するよう努力すると明言している国際災害チャーター（International Disaster Charter）の目的を果たす上で役立ちました。

火山観察

NASAの宇宙飛行士ジェフ・ウィリアムズは、2006年、国際宇宙ステーションの窓から外を覗いた際、思いがけないものを目にしました。それは火山噴火でした。彼は自分がアラスカ州にあるクリーブランド火山（Cleveland Volcano）の噴火を目撃した初めての人物であったことに気づいていませんでした。チュギナダック島（Chuginadak Island）の西側半分を占めるクリーブランド火山は、アラスカ本土から西南西に伸びているアリューシャン列島（Aleutian Islands）で最も活発な活火山です。その独自の視点から、彼はクリーブランド火山から火山灰が噴出していることをアラスカ火山観測所（Alaska Volcano Observatory）に最初に警告することができました。この写真は火山活動が始まってすぐに撮影されたものです。

暗闇を覗く

地球低軌道という特別な場所から、国際宇宙ステーションのクルーたちは定期的に地球表面にきらめく光源を捉えた夜間の画像を撮影します。ESA（欧州宇宙機関）の宇宙飛行士アレクサンダー・ゲルストが撮影したイベリア半島のこの写真、そしてNASAの宇宙飛行士クリスティーナ・コッホがナミビアから紅海へ向けて移動する際に撮影した合成画像は、夜間の明かりがいかに明るいものかを示しています。この種の画像は、光害の追跡や都市化に関する研究に役立ちます。

キューポラからの眺め

キューポラは7つののぞき窓が備わった研究モジュールで、地球の写真を撮影するために最適な場所です。キューポラの窓を覗いているNASAの宇宙飛行士アンドリュー・モーガンは、カリブ海のこの画像を撮影しました。この写真に写っている一番大きな陸地がキューバで、その右側にあるのがバハマです。古代と現在の海洋生物の生物学的プロセスにより形成された堆積物や石灰岩で構成された水中の丘であるバハマ堆も、青い水面の真下に映っています。このような多くの画像が、NASAのGateway to Astronaut Photographyデータベースには収められていて、科学者らが研究用に利用できるようになっています。

NASAの宇宙飛行士レランド・メルヴィンが地球の写真を撮影するため、国際宇宙ステーションのZvezdaサービスモジュールの窓から静止カメラを使用する様子。
提供：NASA

NASAの宇宙飛行士クリスティーナ・コッホが、南アメリカ沖の太平洋上空417キロを軌道上実験室が通過する際、地球のランドマークを撮影する様子。提供：NASA

NASAの宇宙飛行士アレキサンダー・ゲルストが、7つの窓が設置されている国際宇宙ステーションの「世界の窓」を覗く様子。提供：NASA

学生による宇宙写真

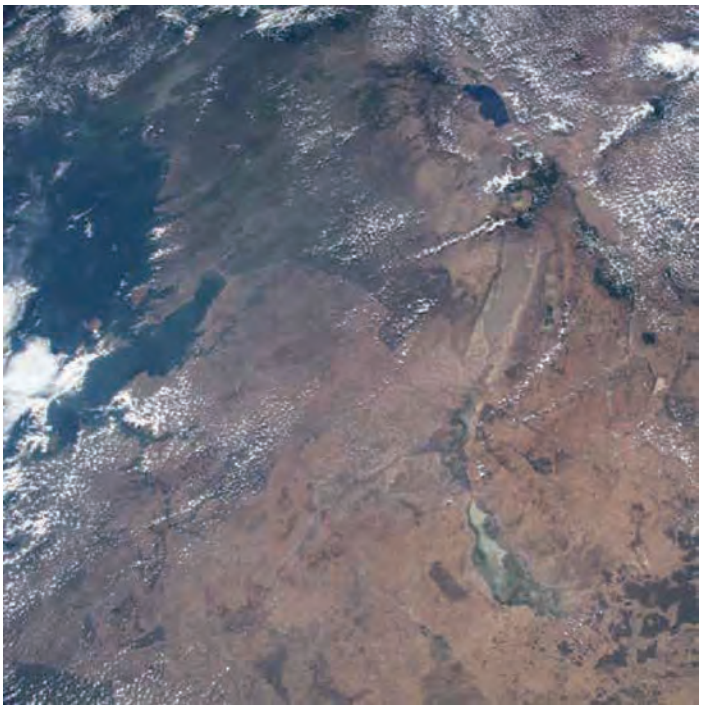
アラビア砂漠のディーラト・バレー（Deerat Valley）を捉えたこの写真から川を見つけることができるでしょうか。紅海の南西側の端付近には、この辺りの激しい乾燥条件により、頻繁に消える川がたくさん存在します。濃い色の表面は5億4000万年以上も前の太古の先カンブリア時代の岩石で、薄い色の表面は砂丘を成しているより新しい堆積物でできています。2017年、Sally Ride EarthKAMは、先カンブリア時代の岩石がむき出しになったことでケイ酸塩の砂丘の頂が浮き彫りになっているこの場面を捉えました。

Sally Ride EarthKAMは教育アウトリーチ・プログラムで、100万人以上の学生が指定されたカメラの画像を依頼することで、宇宙からの写真撮影に参加することができます。「見事に洗練されていて、とても実践的なプログラムです。学生が国際宇宙ステーションでのリアルタイムの科学に触れることができます」と米国スペース＆ロケットセンター（U.S. Space and Rocket Center）教育副部長のケイ・テイラー博士は述べています。

鳥より高いところから

AMASS研究は、NASA、カナダ宇宙庁（CSA）、およびBondar財団（Bondar Foundation）による共同の取り組みです。AMASS研究は2016年に始まり、アメリカシロヅルの渡りの場所を撮影し、そのルート沿いの住処について、主に人間の活動による変化に焦点を当てたものです。CSAの宇宙飛行士デヴィット・サンジャックが2018年に国際宇宙ステーションに加わってからその活動の幅は広がりました。拡大された内容には、追加した6種の鳥類の渡りの場所に関する研究が含まれていました。「国際宇宙ステーションから地球の写真を撮影する時は、自分がかなり高速で移動していることを意識しなくてはなりません。1時間半ほどで地球を一周しているのですから」とサンジャックは述べています。「チャンスは一度きりなので、上手く撮影するにはちょっとしたコツがいります。」

アフリカのビクトリア湖を左側、ナトロン湖（Lake Natron）を右上に捉えたこの写真は、コフラミンゴの巨大な住処を撮影しておりAMASS研究に貢献しました。

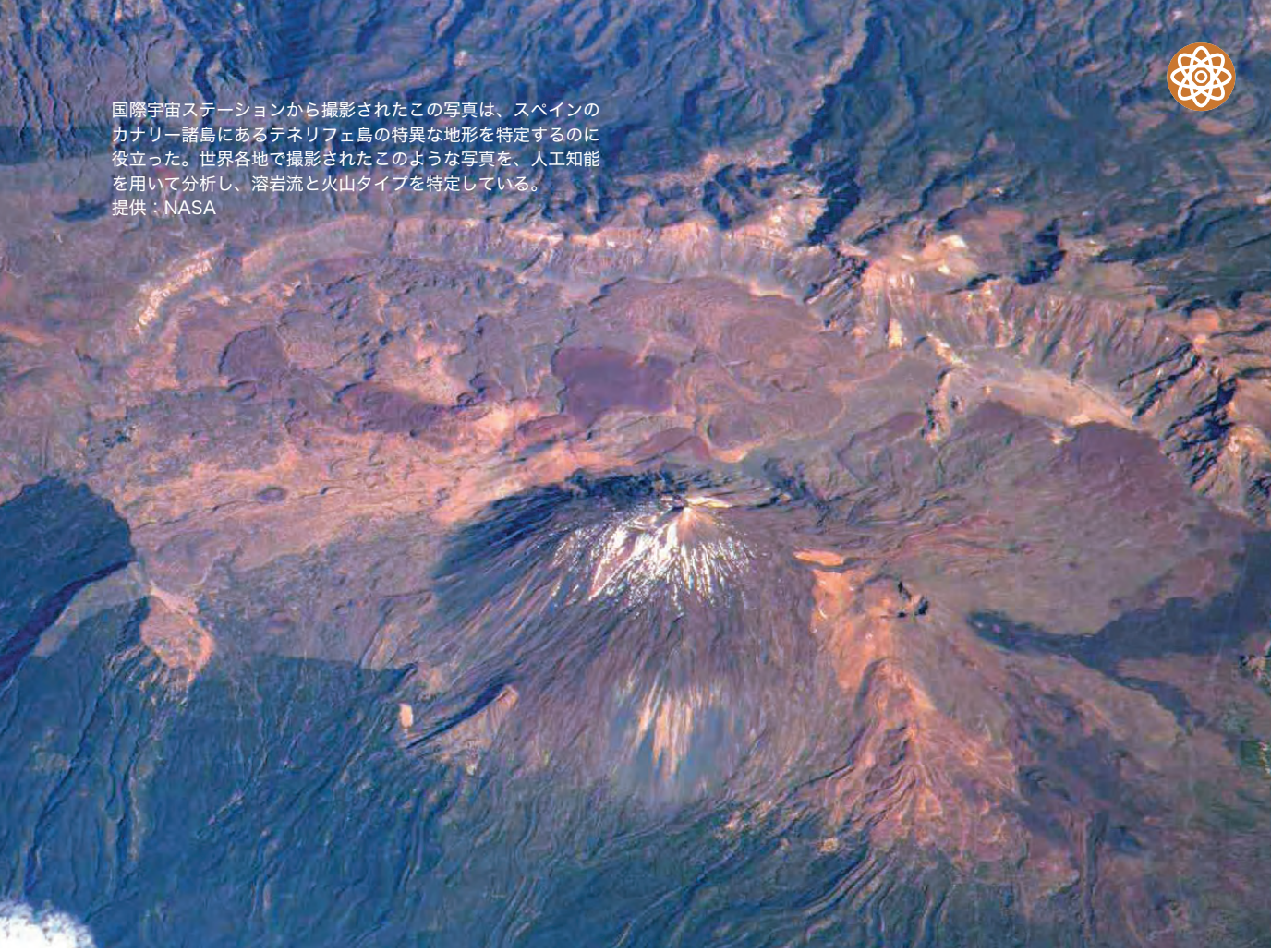


渦巻く嵐

宇宙飛行士セルゲイ・リャザンスキーは、2017年に国際宇宙ステーションが上空を通過した際、ハリケーン・イルマ（Hurricane Irma）を撮影しました。カテゴリ5の嵐へと進化を遂げたハリケーン・イルマは、これまで観測された大西洋のハリケーンの中でも最大級のものです。このような画像は、地上の災害対応支援に用いることができます。自然災害が起こっている、あるいは起こったという通知を受け取ると、地上の科学者らは、頭上を通過するクルーが被災地を確認できるかどうかを判断します。可能な場合は、クルーが画像を撮影し、それを地球へ送信します。その後、写真は、地上のハザードチームが利用できるよう参照されます。宇宙飛行士による撮影は、例えば、現場で対応する人たちに対し、煙がどこへ向かっているかを示すなど、火災時にも役立っています。

太平洋の上に見える天の川

NASAの宇宙飛行士チェル・リンドグレンが国際宇宙ステーションで2015年に撮影したこの画像では、景色が複数の光源に照らされています。銀河系にある無数の星の中でも、天の川は忍び寄るちり雲の中で際立っています。オレンジ、グリーン、そして赤色の大気光の層が、地球の湾曲部を強調しています。手前の右下では、稲妻が太平洋を覆う雲の塊を照らしています。分厚い雲が表面の大部分を覆っているこの写真では、光源が見事な光景を生み出しています。



国際宇宙ステーションから撮影されたこの写真は、スペインのカナリー諸島にあるテネリフェ島の特異な地形を特定するのに役立った。世界各地で撮影されたこのような写真を、人工知能を用いて分析し、溶岩流と火山タイプを特定している。
提供：NASA

AIの利用

250マイル上空から地形の変化を見つける

国際宇宙ステーションに搭乗しているクルーは、地球観測やハリケーン視覚研究の際に、私たちの惑星の興味深い特徴にカメラを向けて撮影します。写真撮影後に、科学的有用性を高めるため、写真加工もよく行われます。写真加工は手作業で行われてきましたが、現在では人工知能 (AI) に任せています。

NASAのジョンソン宇宙センターにある地球科学および遠隔検知ユニット (Earth Science and Remote Sensing Unit)（テキサス州ヒューストン）では、機械学習を利用して、軌道上実験室から撮影した写真を分類・特定し、科学者らが検索･利用しやすいようにしています。

Gateway to Astronaut Photography of Earthサービスには、400万枚近くもの宇宙飛行士撮影の写真が登録されています。研究者らはAIを活用して、地球の地理的特徴の写真を200万枚以上、オーロラの写真を25万枚、稲妻の写真を37000枚、そして世界各地の64の都市の写真18000枚を分類しています。

衛星から地球の画像を撮影する技術は1960年代から存在していましたが、AIを使った画像処理は最近開発されたものです。NASAの科学者らは、AIモデルのトレ―ニング後、AIを活用して、人間よりはるかに速いスピードで大量の地球の衛星写真を処理します。

「クルーによる地球観測は長期記録です。特定の時間に地球がどのように見えるかが分かります」と運用管理担当チームのデータ科学者のアレックス・ストークンは述べています。「例えば、NASAにはエジプトのトシュカ湖群 (Toshka Lakes) の写真記録が20年分あり、これを使って湖の水位変化を研究することができます。AIにより変化するエリアをさらに特定し、詳細な研究を行うことができます。」

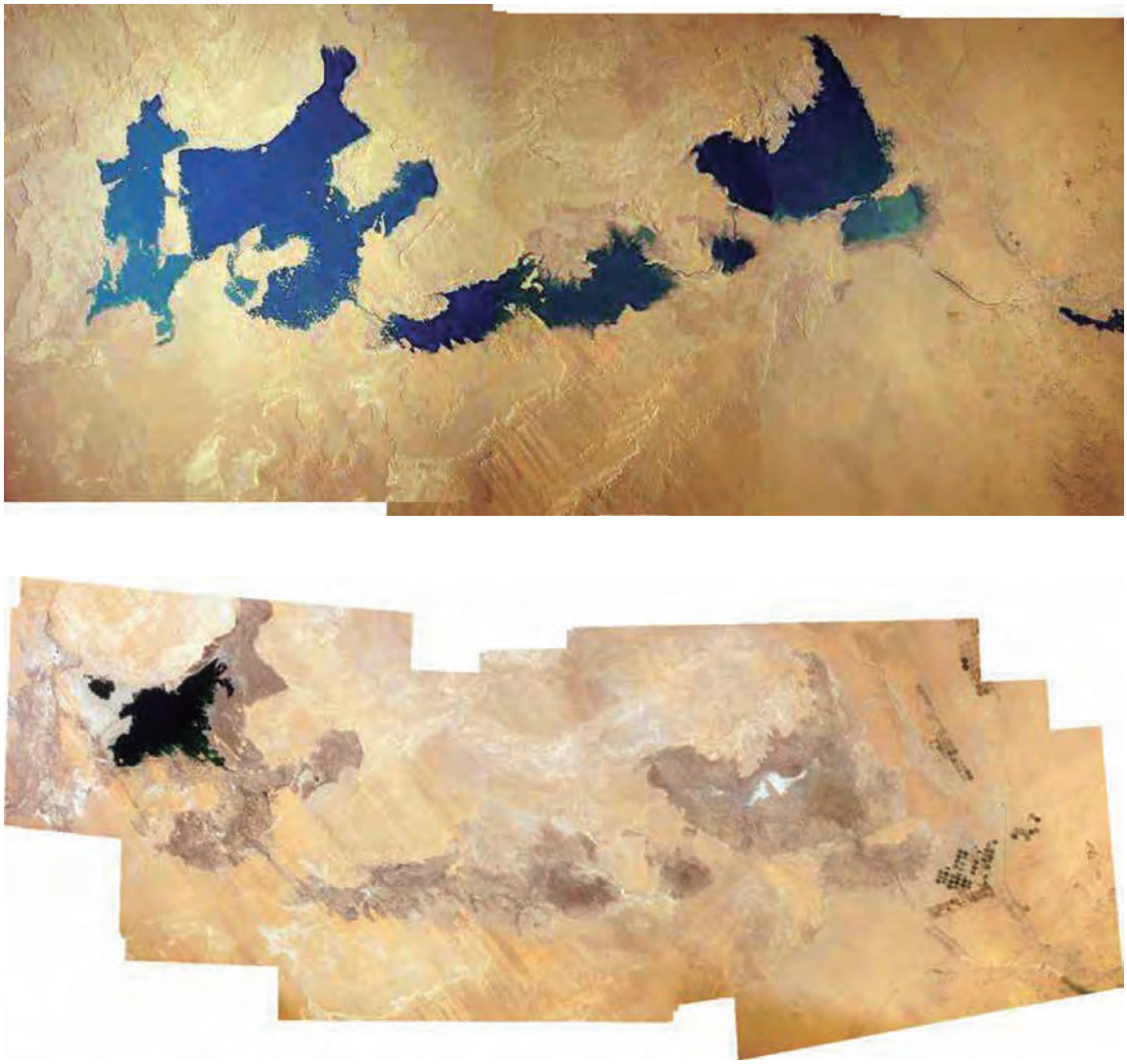
宇宙飛行士が撮影した最新画像を解析することで、地球とその景観の変化をより深く理解することができる。

科学者は、衝突クレーターなど、他の惑星の構造物と似た特徴のある地上の画像を探しています。例えば、カナリア諸島で最も大きいテネリフェ島（Tenerife Island）には、他の惑星表面に見られる特徴を彷彿させるような、3000万年以上前の層が確認できます。

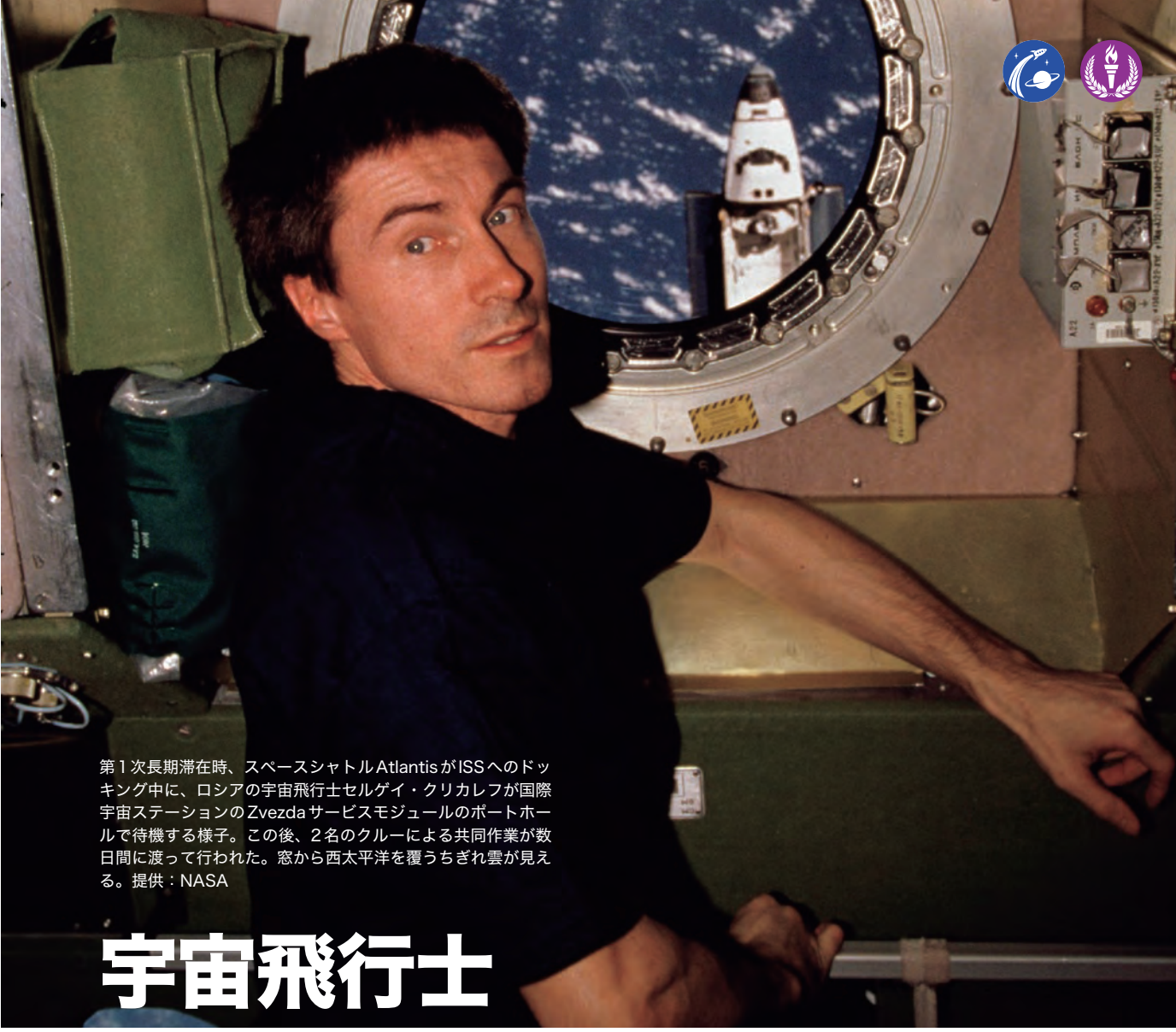
「AIを活用して山岳地帯の写真や大きな巨礫（きょれき）の写真を解析する際は、月や火星に類似した場所に焦点を当てます」とストークンは述べています。

「地上でこのようなプロセスがどのようにして起こったのかを理解できれば、今後の宇宙の方向性について、学ぶことができるかもしれません。」

宇宙飛行士が撮影した画像を分析することで、科学者が地球やその変化する地形についてより深く理解し、今後の探査ミッションを支援するためのアルゴリズムを改善・検証し、惑星科学者らの太陽系研究を後押しできます。



エジプトのトシュカ湖群の宇宙飛行士が撮影した写真から作成されたモザイク。2002年撮影の上部写真と2015年撮影の下部写真は、この近辺の水域の変化を示している。提供：NASA



第１次長期滞在時、スペースシャトルAtlantisがISSへのドッキング中に、ロシアの宇宙飛行士セルゲイ・クリカレフが国際宇宙ステーションのZvezdaサービスモジュールのポートホールで待機する様子。この後、２名のクルーによる共同作業が数日間に渡って行われた。窓から西太平洋を覆うちぎれ雲が見える。提供：NASA

宇宙飛行士セルゲイ・クリカレフのインタビュー

第１次長期滞在クルーが国際宇宙ステーションの進化と独自の視点を語る

地球の写真を何枚見ようとも、国際宇宙ステーションの窓から眼下で回転する私たちの惑星を眺めるのは格別です。その特権を得ることのできた数百人にとっては、まさに人生を変えるような出来事かもしれません。

この眺めを少しでも体験するために、ロシアの宇宙飛行士セルゲイ・クリカレフの視点を通して地球を見てみましょう。彼は、国際宇宙ステーション、宇宙ステーション「ミール」、ソユーズ宇宙船、そしてスペースシャトルで800日間以上の滞在経験を持ち、ゲンナジー・パダルカとユーリ・マレンチェンコに続いて、宇宙での最長滞在時間で３番目を記録した人物です。

第１次長期滞在クルー３名のうちの１名として、2000年11月、20年以上にわたる国際宇宙ステーションでの滞在を開始しました。クリカレフは宇宙での協力と地球を見下ろす経験を、独特の視点で話しています。

2001年2月、分厚い雲を背景に、スペースシャトルAtlantisに搭乗する宇宙飛行士の一人が35mmカメラで撮影した国際宇宙ステーション。提供：NASA

**異常な構造の雲を
見かけたら、まず写真を
撮ります。
大気中のあらゆる現象を
研究している人たちがいる
からです。
それから、見たものに
ついて科学者らと興味深い
話し合いをします。**

宇宙から初めて地球を見たときはどのような気持ちでしたか？

地平線が見えたときは驚きました。それより前に、地上からとても高い場所を国際宇宙ステーションで飛んでいるときにも平らな地平線を見ることができました。軌道上から、地球の湾曲している部分も見ることができました。次に驚いたことは、私たちを守っている大気の層が非常に薄いことを自身の目で見た時でした。

眼下に見える惑星の色はどのようなものでしたか？

誰もが明るい色が見えると言うが、科学的には、眼下を見ると青いフィルターが見える、と飛行前に科学者らと話していたのを覚えています。この青いフィルターによって、実際にはすべての色があまり異なっていないように見えるのです。同じように、私たちが空を見上げて青い空を確認するように、私たちと地球の表面との間には薄い大気の層が見えているのです。ですから、緑はそれほど緑ではなく青っぽい緑に見えます。青色がもっと青色に見えるのは、大気に青色が多く存在しているからです。非常に明るい色がみられるのは地平線上で、特に日の出と日暮れの時に多くなります。

あなたが撮影した写真は科学にどのように貢献しましたか？

実際には、科学者らは指示を与えただけではなく、どのようなものに関心があるかということについても教えてくれました。ですから、何かが見えたら、科学者から直接指導されなくても、例えば、ある川から海へと大量の水が流れていて、海に異なる色が広がっている様子は興味深いものです。実際、複数の科学者にとっても興味深いものです。淡水や海水の生き物を研究する海洋学者にとって、この水の広がり方は注目に値します。場合によっては、2種類の異なる水が混ざるときに、この現象が見えることがあります。普段は見かけないような雲を見かけたら、写真を撮ります。大気中の何らかの作用を誰かが研究しているかもしれないからです。その後、見たものについて科学者らととても興味深い話し合いを行います。

**森林火災の煙が
何百キロも離れたところ
まで届いているのを
見ることがあります。
煙は、国境を越えます。
国境に壁はないのです。
一方の国で災害が
起こると、もう一方の
国にも容易に広がります。**

初めてのフライトで、一番記憶に残っていることは何ですか？

初めての飛行の際は、下を見ても地球表面に何があるのか、あまりよくわかりませんでした。地図上なら、国境などがあるので、それをランドマークとして見ることができます。でも宇宙から見ると、国境などありません。自然の川、山、浜辺、森林といったものしかないのです。多くの場合、地上の区分けはどちらかと言うと人工的なものだということを理解するようになります。私たちは、同じ地表に生きているのです。山火事があれば、その煙は何百キロも離れたところまで流れることもあります。あらゆる国境を越えていくのです。この国境には壁が存在しません。一方の側で災害があれば、もう一方の側にも容易に広がります。洪水があれば、地域間や国と国を隔てる国境などとは関係なく広がります。私たちは一つなのだということが見えてくるのです。

こうした一体感は、どのようにして地球へ還元することができるでしょうか？

今、宇宙で協力して行っていることは、人が地上でどうやって生きていく必要があるかを見事に投影していると思います。人は大した理由もなく言い争いを始めることがあります。しかし、特に厳しい環境下であればなおさら、互いに頼り合い、助け合おうとします。それこそ私たちが宇宙で生き抜く術であり、地上の人々にとっての模範でもあるのではないかと思います。私たちはこの領域を守り、実際に私たちがどう生きていくべきか私の国やあなたの国の政治家や他の人たちに示すことができるよう、こうした模範を保つよう努めたいと思います。

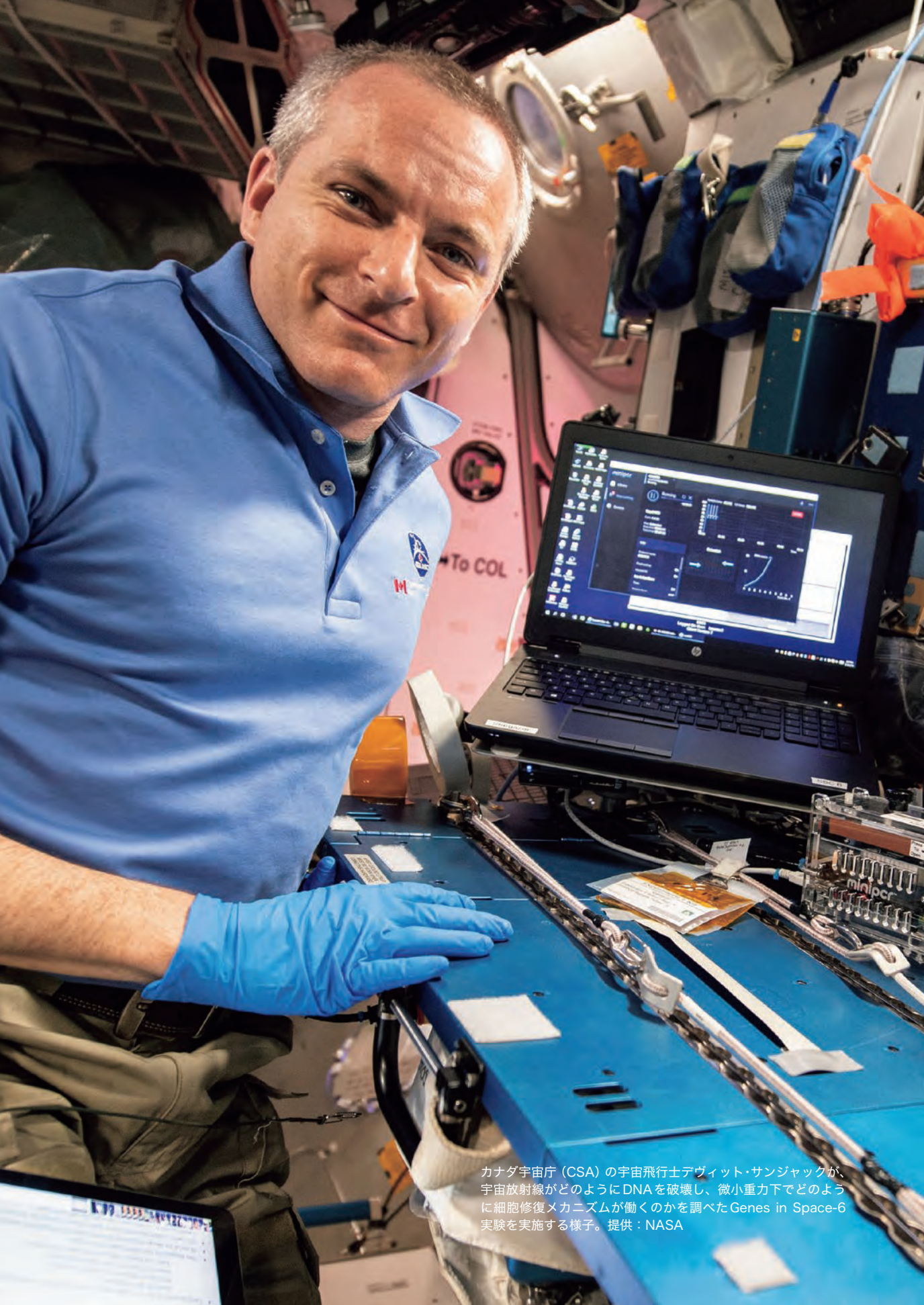
セルゲイ・クリカレフを含む国際宇宙ステーションに滞在する第11次長期滞在クルーが、ケープホーン上空約362キロを通過する際、Canadarm2を操作する様子。提供：NASA

NASAの宇宙飛行士ケイト・ルビンスが、国際宇宙ステーションの日本実験モジュール（JEM）で微生物研究を行う様子。この研究では、宇宙環境におけるヒトと微生物の関係を調べた。提供：NASA

微小重力下の微生物学

世界トップレベルで内容満載の実験室です。世界トップレベル大学のキャンパスを、国際宇宙ステーションのサイズに縮小したような場所です。

── NASA 宇宙飛行士 ケイト・ルビンス



カナダ宇宙庁（CSA）の宇宙飛行士デヴィット・サンジャックが、宇宙放射線がどのようにDNAを破壊し、微小重力下でどのように細胞修復メカニズムが働くのかを調べたGenes in Space-6実験を実施する様子。提供：NASA

国際宇宙ステーションの微生物と私たちの関係

宇宙でのDNAシーケンシングの進歩の歴史から見た微生物研究のハイライト

宇宙へと打ち上げられるものはすべて、厳しく検証、モニタリングされ、多くの場合、殺菌されています。しかし、宇宙船や宇宙船に搭載する物品の制御は完璧ではありません。顕微鏡レベルではなおさらそうなります。微生物のヒッチハイカーは、貨物やクルーに混ざって宇宙へ打ち上げられることがあります。

人間は、このような小さな生物なくして生きることはできず、その多くは良性あるいは有益である一方で、細菌のヒッチハイカーの中に、クルーを病気にさせてしまう病原菌が含まれている可能性もあります。だからこそ科学者らは、国際宇宙ステーションを用いて、長期ミッションで宇宙飛行士らの安全と健康を維持する方法を研究しているのです。この研究は地上の人間にとっても有益なものです。地上の微生物が消毒・隔離された閉鎖的な環境下でどのような挙動を示すかを理解することができます。

この研究は新たな科学研究分野の形成にもつながっています。多くの微生物は、宇宙環境下でストレスを受けますが、一部の微生物は、抗菌薬への耐性を持つ遺伝子で対応します。したがって、その環境にどのような宇宙の微生物が存在し、殺菌法が有効でなくなる場合があるのかといったことを理解することが重要です。

「国際宇宙ステーションの環境下で、ほぼリアルタイムの微生物学的診断を可能にすることが目標です」とNASAのジョンソン宇宙センター（ヒューストン）生物医学研究・環境科学部門の微生物学者サラ・ワラスは述べています。「私たちは、クルーを日々常に取り囲んでいる空気、表面、そして水の中に何があるかを研究しているのです。」

ジョンソン宇宙センターの研究員が、生体分子抽出およびシーケンシング技術（BEST）実験の一環として、微生物のDNAとRNAシーケンシングを行う様子。同じシーケンシング手順が軌道上の国際宇宙ステーションでも実施され、その結果は地上の結果と比較された。この実験は、微生物の生命における宇宙飛行環境の影響に関するさらなる洞察を与えてくれる。提供：Johnson Space Center

既知の厄介な細菌は、デオキシリボ核酸（DNA）分子に含まれている固有の生物学的設計図により特定できます。DNAは4つの塩基分子が繋がって細胞の成長や挙動についての指示をコード化しています。DNAシーケンシングのプロセスを使ってこの塩基の順序を特定することで、研究者らは細菌の特定やその挙動に関するヒントを得ることができます。

測定を続けるうちに、データから国際宇宙ステーションの微生物構成パターンが見えてくることがあります。「全数調査をしているようなものです」とNASAのAmes Research Center（カリフォルニア州シリコンバレー）宇

実験設備の横でポーズをとる生体分子シーケンサーのチーム。提供：NASA/Bill Stafford

宙生物化学部門の主任代理デヴィット・J・スミスは述べています。「集めた統計データは、これから宇宙船の微生物とどのように共存していくかを検討する上で役に立ちます。」

しかし、全数研究は複雑になる可能性があります。DNAシーケンシングに必要な機器は、従来、高価で時間を要し、操作には専門知識が必要なため、宇宙での使用は限定的でした。例えば一連のNASA微生物追跡実験と3D微生物監視研究では、宇宙飛行士らが綿棒で指定された表面を拭き取って何百ものサンプルを集め、そのサンプルをプラスチックの袋に詰めて地球に送り返して、DNAシーケンシング設備での特定が行われていました。

軌道上実験室から地球へサンプルを送るプロセスは煩雑で、最初のサンプリングから微生物の特定までに長い時間を要します。未知の微生物の特定が早ければ早いほど、クルーの対処も早くなります。

鍵となるのは、宇宙での複雑な微生物生態の研究方法を見つけることです。

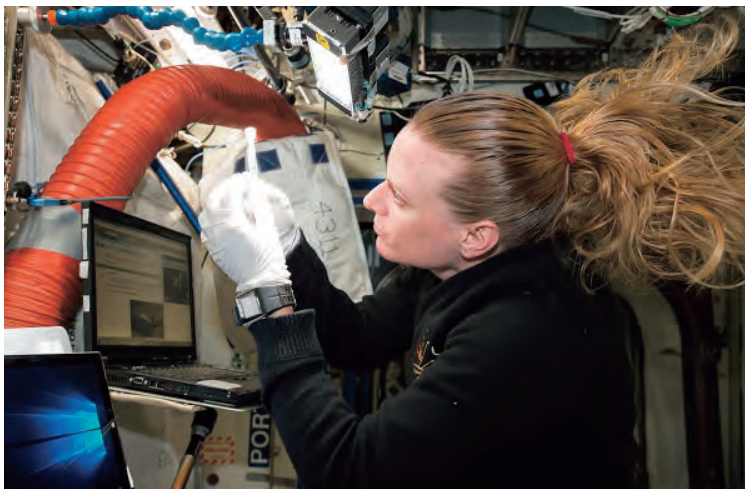
微小重力に加え、国際宇宙ステーションの閉ざされた環境下で安全に使用できる化学薬品とその数量の制限が、宇宙向けのDNA実験の設計において次の課題となります。

「私たちはあらゆる角度から分析し、最小限の分量で、最も安全な物質を使い、最良の成果を得るにはどうすればよいか検証しました」とワラスは述べています。「こんな時こそ型にはまらない方法を考え、異なる解決策を見出すのです。」

ワラスとそのチームの取り組みにより、サンプル返送問題は、微生物研究において、あっという間に解決しました。

2016年、NASAの宇宙飛行士ケイト・ルビンスは宇宙で初のDNAシーケンシングに成功し、その間、地上の研究者らも同じ実験を行い、宇宙飛行条件下における分子生物学研究の扉が開きました。彼女のチームは、携帯電話とさほど変わらない大きさのMinION（ミンイオンと発音）シーケンシング・プラットフォームを用いて、研究用に国際宇宙ステーションへ送られたサンプルの核酸塩基を読み取りました。この技術により、科学者らは国際宇宙ステーションや今後の探査ミッションで病原菌を瞬時に特定し、さらには、地球の既知の生命と同じ生化学を利用しているならば、太陽系の他の惑星で生

NASAの宇宙飛行士ジョー・アカバと、国際宇宙ステーションの空気中の微生物をモニタリングする装置Microbial Air Samplersの1つ。提供：NASA



NASAの宇宙飛行士ケイト・ルビンスが、生体分子シーケンサー実験の準備を行う様子。軌道上の宇宙船でDNAシーケンシングが可能であることを初めて実証することを目的としている。宇宙で用いられるDNAシーケンサーは、微生物を特定し、疾患を診断し、クルーの健康状態の理解に役立つ可能性があり、また、太陽系の他の場所に存在するDNAベースの生命を検知する可能性も秘めている。提供：NASA

命を特定することを可能としました。

「宇宙で初めてのシーケンシング実証は、コンセプトから飛行までの作業が1年以内で実行されたことから大がかりなものとなりました。それまで、国際宇宙ステーションへ新たな機器を送るにはもっと長い時間を要しました」とスミスは述べています。「私たちは今後の実験で地球低軌道よりも先へ進むにあたり、科学面でより素早く動くことが可能であると証明したのです。」

DNAシーケンシングの初期研究は、宇宙で他の分子生物学方法を用いるための扉を開きました。「宇宙に分子実験室を丸ごと備えることで、実際の現場でできることが飛躍的に増えます」とワラスは述べています。

できることは確かに飛躍的に増えました。宇宙飛行士らは、CRISPR（Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats）と呼ばれるゲノム編集技術を宇宙環境下で初めて使用し、DNA修復研究を可能にすることで、際宇宙ステーションの分子生物学ツールを大幅に拡充しました。多くの学生らが、Genes in Space計画を通して宇宙へ自身のDNA研究を送りました。科学者らは、MinIONも使用して、地球へサンプルを返送せずに、軌道上実験室で未知の微生物の特定を行いました。宇宙で微生物を特定することはリアルタイムでの宇宙飛行士の診断と治療に役立ちます。

NASAの宇宙飛行士リッキー・アーノルドは、国際宇宙ステーションの表面を綿棒で拭き、微生物のサンプルを採取した。その後、微小重力下でDNAシーケンシングを行えるバイオモレキュール・シーケンサー（Biomolecule Sequencer）を使って微生物のDNAを処理し、微小重力下で生存できる微生物を特定した。
提供：NASA

> **DNAシーケンシングの初期研究は、他の分子生物学的方法を宇宙で用いる扉を開いた。**

NASAの宇宙飛行士リッキー・アーノルドは、シーケンシング前に細菌を培養する必要のないスワブ法の生物分子シーケンサーをも駆使しました。この「スワブからシーケンサーまで」の直接的手法により、クルーにとって国際宇宙ステーションでの微生物特定プロセスはより速くて簡単なものになります。この手法は、現在、国際宇宙ステーションで実施されている培養ベースの微生物監視に取って代わる方法として、検討されています。

DNAシーケンシングに関する宇宙でのタイムライン

1953年2月：Francis Crick、James Watson、Rosalind FranklinがDNAを構成する二重らせん構造を発見。

1977年12月：Frederic Sangerがウイルスのゲノムを読み取る初のDNAシーケンシング法を開発。

1995年7月：ゲノムを小さな断片に裁断し、チェーン・ターミネーション法を使って個別にシーケンシングを行い、それを再度組み立てる、ショットガン配列決定法で初の細菌ゲノム全長解明（H. influenzae）。

2012年2月：Oxford Nanopore TechnologiesがMinIONで次世代のシーケンシング（NGS）を用いた初のナノポアシーケンサーを初公開。

2016年4月：NASA WetLab-2研究の一環として、NASAの宇宙飛行士Jeff WilliamsがE.coliから宇宙で初めてRNA分離を行い、微生物におけるRNA発現レベルに関するデータを収集。

2016年4月：miniPCR社が軌道上に送ったPCR装置を使ってESA（欧州宇宙機関）の宇宙飛行士Tim PeakeがDNAを初めて国際宇宙ステーションで増幅。

2016年8月：NASAの宇宙飛行士Kate Rubinが宇宙で初めてDNAのシーケンシングを実施。

2017年8月：NASAの宇宙飛行士Peggy WhitsonがminiPCRとMinIONを組み合わせ、国際宇宙ステーションから初の未知の微生物のシーケンシングと特定を実施。

2018年8月：NASAの宇宙飛行士Ricky Arnoldが、培養を必要としない「スワブ・トゥ・シーケンサー」法を用いて初めて生体分子抽出およびシーケンシング技術（BEST）を実証。このプロセスはシーケンシングの速度を速め、分析前に細菌を培養するための時間とリソースが不要となった。

2019年5月：NASAの宇宙飛行士Christina KochがヒトのDNAに対する宇宙放射線の影響を模倣するために、酵母を使って国際宇宙ステーションで初のCRISPR-Cas9遺伝子編集を実施。

2021年2月：クルーが国際宇宙ステーションの各所で3DMM実験用に800以上の微生物サンプルを採集。科学者らがDNAシーケンシングや他の分析法を使って、国際宇宙ステーション各所の細菌と細菌産物に関する初の総合的な3Dマップを作成した。

最適化された微生物学的手順は深宇宙探査の実現に役立つ一方で、自律的な分子生物学実験室の開発は、地上の人類にも恩恵を与えると期待されている。

最適化された微生物学的手順により深宇宙探査の実現が促進される一方で、自律的な分子生物学実験室の開発もまた地球の人類にとって有益となることが期待されています。このことは技術や資金のない多くの遠隔地や遠隔の病院にとって、大変有用です。

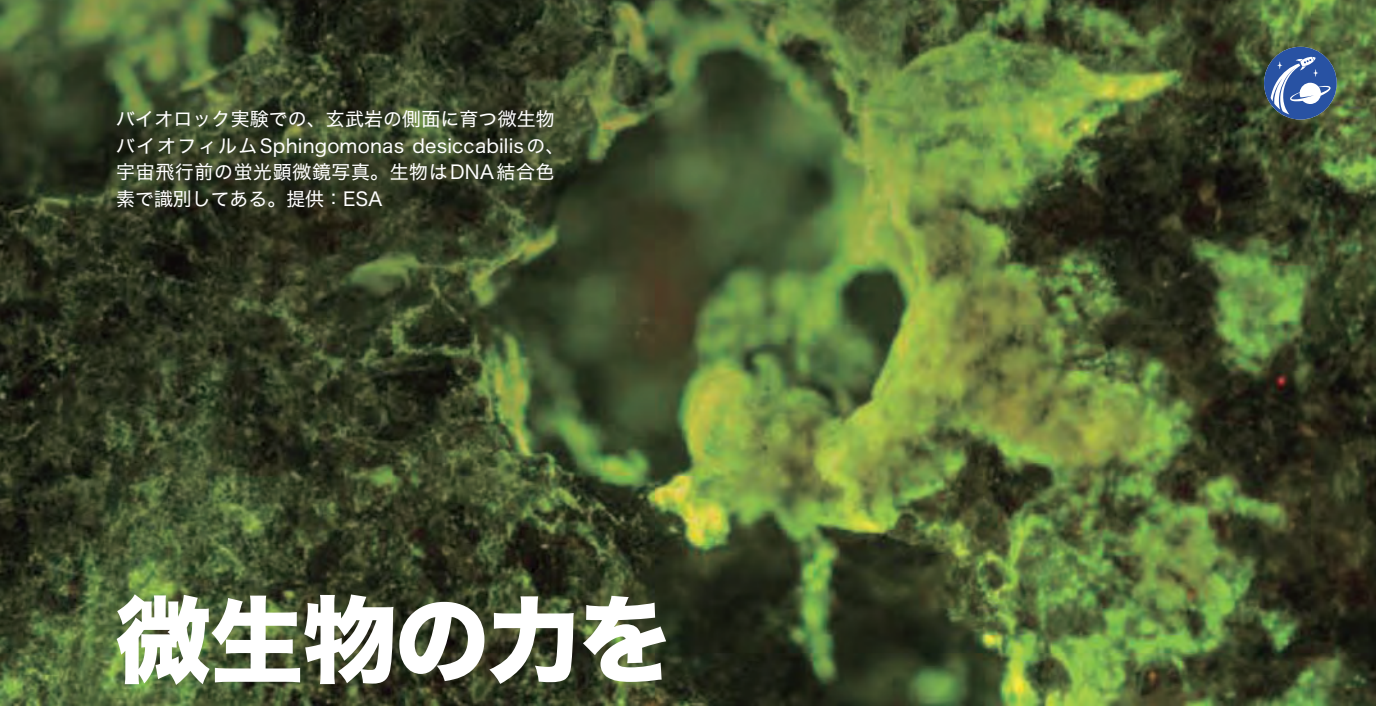
「微生物データをリアルタイムで得ることが出来れば、資源が限られた環境でも、抗菌耐性リスクを理解し対応することが出来ます。」とワラスは述べています。「私たちの活動と、このツールをさまざまな場所で導入している他の研究者による活動との間に類似点が見つかることは素晴らしいことです。海底でも、国際宇宙ステーションでも、遠隔地にある村落のテーブルでも、どこでも微生物研究を実施できるのです。」

微生物学者ではないクルーが実施でき、遺伝学の専門知識を持たない作業者がどこでも実施できるような簡単な手順が開発されれば、発展途上国や遠隔地でも病気の検査能力が向上します。

NASAのチームは、疾病対策予防センターと連携して、国際宇宙ステーション用に開発された合理的な手順を導入し、病院内の病室の清潔さの判断方法を検討しています。病院でこのような微生物追跡方法を活用することができれば、トレーニングを受けていない人でも、短時間で病室の清潔さを確認できます。病院内の清掃後も残っている可能性のある抗生物質や耐性微生物を検知できるかもしれません。

「基本的な研究や調査には驚きが隠されているものです」とスミスは述べています。「微生物を特定するための効率的なワークフローかもしれないし、宇宙だからこそ発見された有用なパターンかもしれません。宇宙飛行で何を発見できるか？人類の潜在的な利点を完全に理解するのは難しい。だからこそ、やる価値があるのです」。

3DMM（ISS環境における3次元微生物監視）研究用に採取された微生物の検体を入れたサンプル採集管を、キューポラの窓を背景に撮影。この研究では、国際宇宙ステーションの表面から綿棒で採取した細菌から、DNAを分析・シーケンシングすることで、重力や大気組成の変化など、特定のストレス状態において微生物が分子レベルでどのように反応するかという理解に役立った。提供：NASA



バイオロック実験での、玄武岩の側面に育つ微生物バイオフィルムSphingomonas desiccabilisの、宇宙飛行前の蛍光顕微鏡写真。生物はDNA結合色素で識別してある。提供：ESA

微生物の力を採鉱に利用する

宇宙での資源探索を目指した微生物の利用

つるはしやハンマーなど昔ながらの道具から現代の小型電子機器まで、文明は常に地上の金属の採掘に依存してきました。従来の採掘方法は、重機や火、人間の力に依存していましたが、科学者らは微生物の自然の力を利用するようになりました。バイオマイニングと呼ばれるこのプロセスは、こうした必要な金属をより環境に優しく費用効率の高い方法で得るための方法として用いられています。これと同じプロセスで、小惑星から有価元素を抽出することが可能になり、宇宙飛行士が月や火星へのミッションで必要な材料をバイオマイニングできるようになります。

「化学的な方法は有害な可能性があるが、バイオレメディエーションは環境に優しく、排出される毒素は少なくなります」とBiorock主任研究者でエディンバラ大学（University of Edinburgh）宇宙生物学センター（UK Centre for Astrobiology）教授のチャールズ・コッケルは述べています。「エネルギー需要が低いのです。微生物に少量の食べ物を与えておけば、後はその微生物が仕事をしてくれます。」

バイオマイニングは、地球では、酸性鉱山排水などの汚染問題に対処するために用いられている一方で、宇宙では、金属抽出の作業がより複雑になる可能性があります。なぜなら、微小重力が、対流や液体混合などの基本的な物理特性を変えてしまい、微生物が表面に付着して抽出過程に必要なバイオフィルムを形成しなくなってしまう可能性があるためです。2019年、ESA（欧州宇宙機関）が国際宇宙ステーションで行ったBiorock研究では、微生物が、月や火星上で一般的な玄武岩から元素を抽出できることが実証されています。後続のESAによる研究Bio Asteroidでは、さらに踏み込んで、実際の小惑星材料でバイオマイニングの試験が行われました。この研究では、微生物が宇宙で元素をマイニングできるというだけでなく、一部の微生物は微小重力環境の方が適しているということが示されました。コッケルによれば、このことは、小惑星から希元素を採取することも含め、宇宙におけるバイオマイニングが可能かもしれないということを示しています。次のステップとしては、より大規模なバイオマイニングを宇宙で行うことになります。

「今現在、バイオリアクターは非常に小規模です。このようなバイオリアクターをより大規模な産業用に使用した場合、小惑星表面での効果はどのようなものになるのでしょう」とCockellは述べています。「このような研究結果は、バイオマイニングの裏にある仕組みをより深く理解し、地球にとって有用な技術を開発することにつながります。」

ESAの宇宙飛行士ルカ・パルミターノが、国際宇宙ステーションのColumbusモジュールにバイオロック実験のKubikリアクターを設置する様子。バイオロック研究は、宇宙で新たな素材を取得するため、微小重力環境での液体、岩石および微生物の物理的相互作用に関する洞察を得るための一連の実験の一つ。
提供：NASA

ESA（欧州宇宙機関）の宇宙飛行士で第66次長期滞在クルーのフライトエンジニアのマティアス・マウラーが、表面接触実験で使用したTouch Arrayを見せる様子。微生物学研究では、地球でのさまざまな応用を含め将来的な有人宇宙ミッションへ向けた、抗菌表面に適した設計を研究している。提供：NASA

微小重力を利用して コロナウイルスと闘う

国際宇宙ステーションで実施されている多くのコロナウイルス研究

宇宙飛行士らは国際宇宙ステーションで隔離されており、搭乗中、感染から身を守ることができます。それでもコロナウイルスは国際宇宙ステーションでの研究活動に影響を及ぼしました。研究者らは、クルーの安全を保証しながら研究を実施し、微小重力実験室を使ってコロナウイルスと闘いました。

2020年12月に国際宇宙ステーションへ打ち上げられたある実験では、入院患者のコロナウイルス治療についてアメリカ食品医薬品局（FDA）が現在承認している抗ウイルス静注薬剤レムデシビルの有効性が検証されました。企業が所有・運用する研究設備「欧州国際商用実験キューブ」(International Commercial Experiment Cubes：ICE Cubes）を使用し、ESA（欧州宇宙機関）の研究者が、有効性の向上を目指して微小重力における同薬剤の効能を検証しました。科学者らは、同薬剤の物理的・化学的効能が、レムデシビルを水に溶けやすくするシクロデキストリンという伝達物質とどのように相互作用するかを研究しました。水溶性の薬剤は、溶液に溶かして静注することが可能で、一度投与されると患者の血流中に取り込みまれやすくなります。

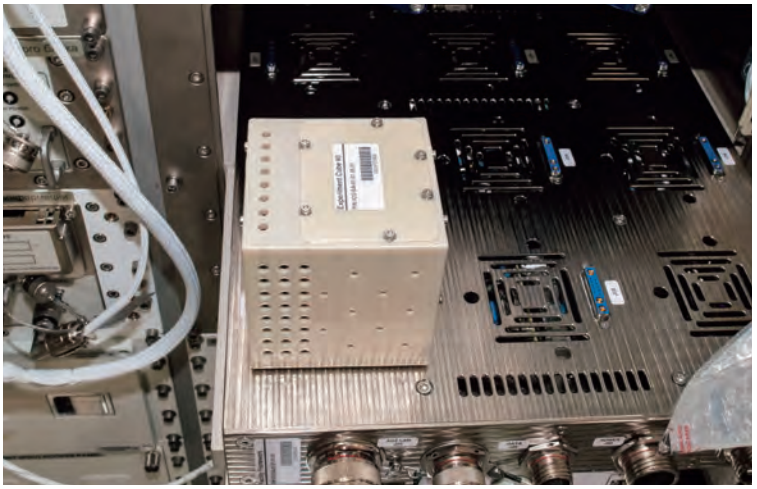
微小重力環境におけるレムデシビルとシクロデキストリンの相互作用を研究することにより、研究者らは、薬剤とシクロデキストリンの比率を改善できる可能性があります。静注バッグ中のシクロデキストリンの量を減らすことで、腎疾患の既往歴を持つコロナウイルス感染患者へのリスクも減少します。

コロナウイルスのパンデミックが始まった時、国際宇宙ステーションで実施予定だった別の実験に携わっていた科学者らは、コロナウイルスの研究に尽力するため、分析範囲を広げました。抗菌コーティングでは、特定の抗菌コーティングが、頻繁に触れられる表面の病原微生物の成長と拡大をいかに効率的に制限できるかについて研究が行われました。この研究では、トレーテーブル、座席生地、座席ベルトなど、航空機や宇宙線で頻繁に触れられる表面に使用されている複数の材料でコーティング試験が行われました。

6ヵ月という期間において、クルーは、数日おきにサンプルを確認し、微生物の増殖を促しました。実験が終わると、サンプルは地上の実験室へと送られ、分析が行われました。この研究は本来、宇宙ミッションでの使用が目的でしたが、コロナウイルスの蔓延に伴い、科学者らは、表面のウイルスの拡大防止効率もテストできるよう、研究を応用しました。

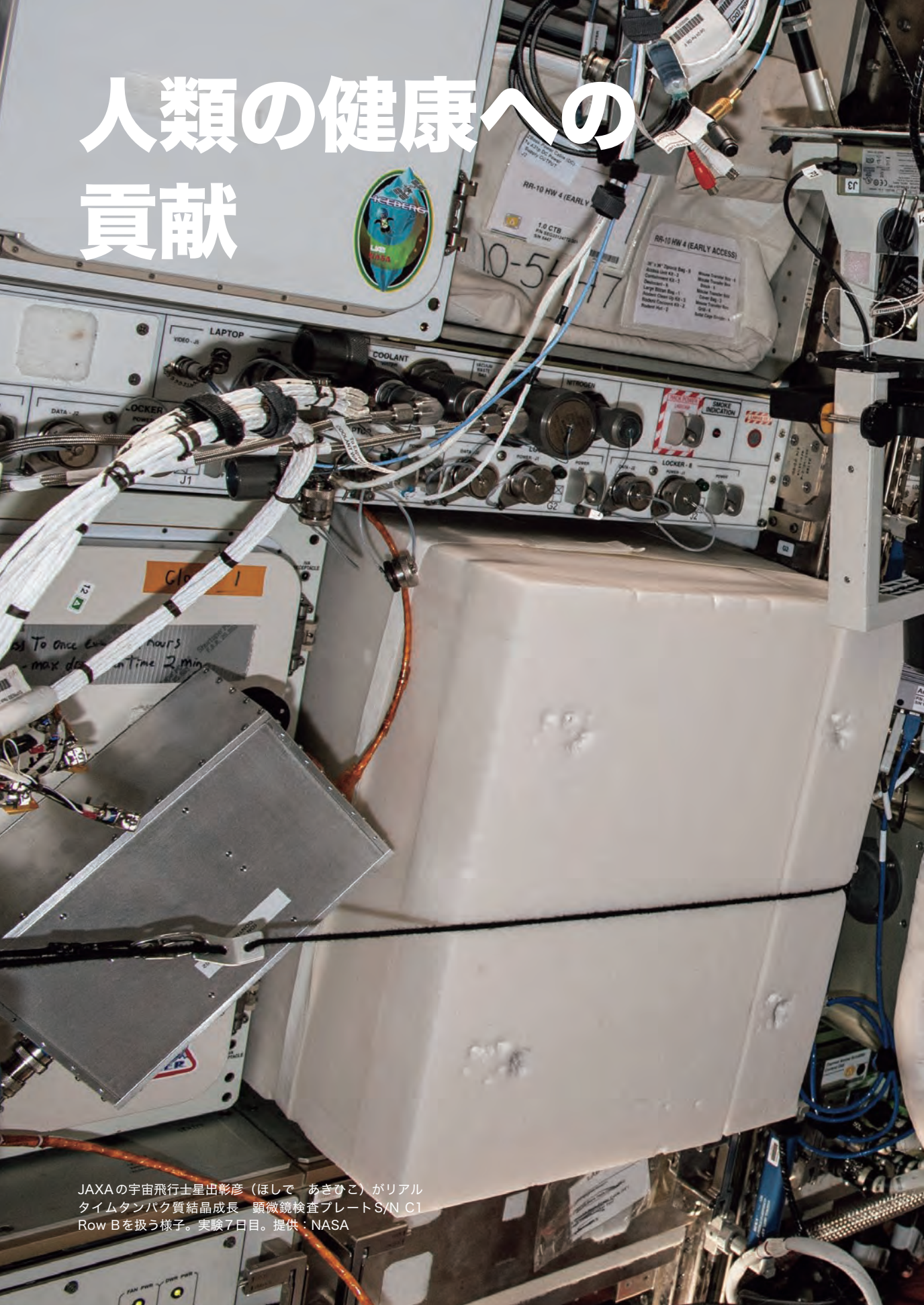
また複数の企業が、宇宙用に開発した空気の品質維持技術がコロナウイルスの蔓延防止に利用できることを実証しています。国際宇宙ステーションで汚染物質を検証した技術は、そのまま地上のエアセンサーに組み込まれ、共有空間でのウイルス蔓延リスク指標を定め、混雑を減らす、もしくは他の方法でリスクを抑える、といったアラートを発しました。

Airglossの空気品質センサーは、サーモスタットと併せて機能するもので、換気を調節したり、室内の空気を管理したり、アラートやレポートも送信する。パンデミック時、同社は、一定の空間でコロナウイルスの拡散リスクを回避できる方法を発見した。提供：Airgloss

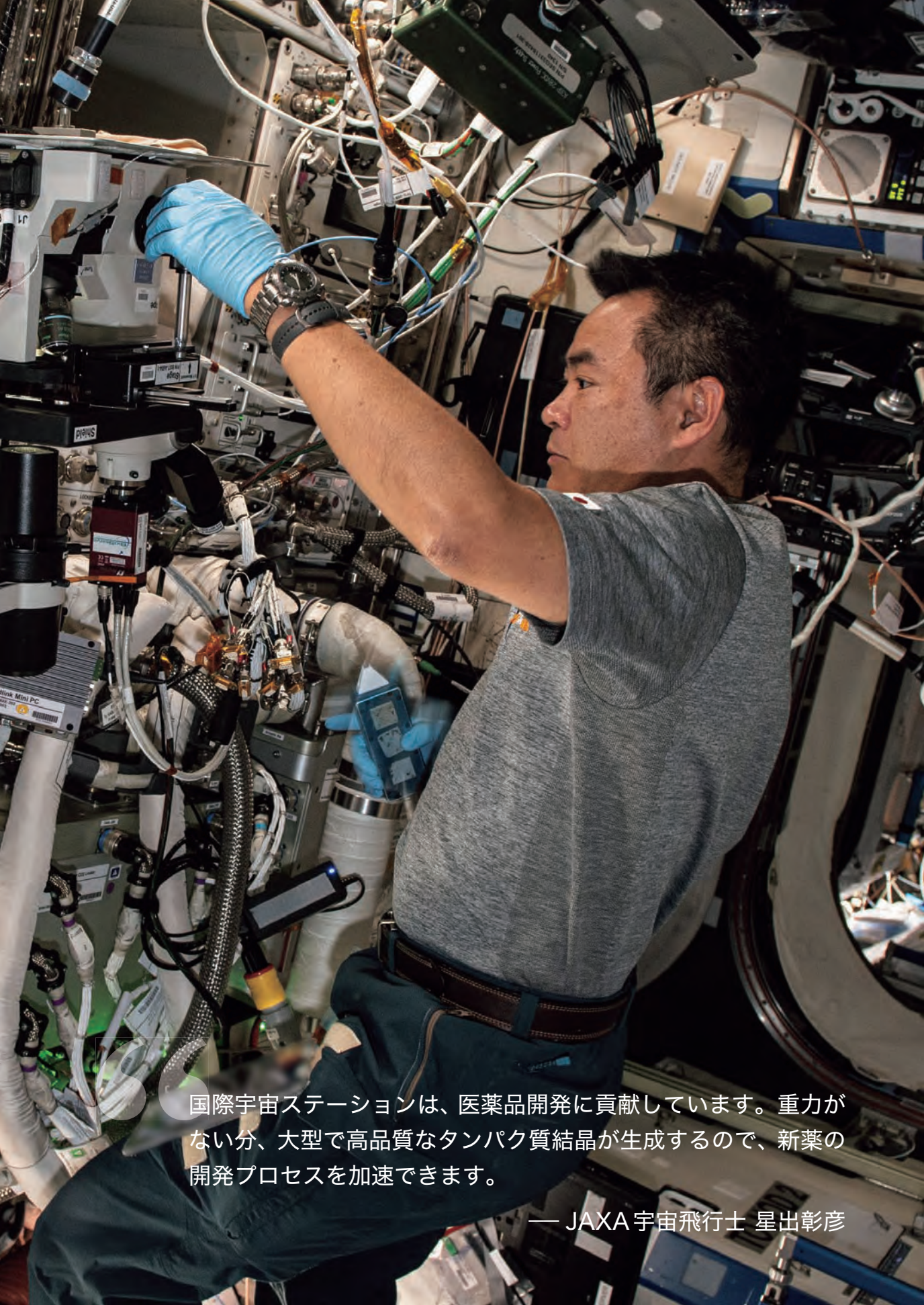


ColumbusモジュールのESA ICE Cubes装置では、抗ウイルス薬レムデシビルの比率を、腎不全などの既往歴のある患者へ安全に投与できるように、溶解度を改善する実験が行われている。提供：NASA

人類の健康への貢献



JAXAの宇宙飛行士星出彰彦（ほしで　あきひこ）がリアルタイムタンパク質結晶成長　顕微鏡検査プレートS/N C1 Row Bを扱う様子。実験7日目。提供：NASA



国際宇宙ステーションは、医薬品開発に貢献しています。重力がない分、大型で高品質なタンパク質結晶が生成するので、新薬の開発プロセスを加速できます。

— JAXA 宇宙飛行士 星出彰彦

NASAの宇宙飛行士クリスティーナ・コッホが、液体保持に固体の容器ではなく表面張力を使って微小重力下でアミロイドの形成と流れを調査する、リング・シアード・ドロップ作業を行う様子。提供：NASA

国際宇宙ステーションは地球で暮らす人々の健康に飛躍的進歩をもたらす

がん、心血管疾患、アルツハイマー病の謎を解明する

机にコップ一杯の水を置くと、重力がその液体を下に引っ張ります。コップの側面が重力を押し返すことで、水はその場にとどまります。地球に住む私たちがこのような力について考えることは滅多にありませんが、病気の謎に取り組んでいる科学者らにとって、科学サンプルに対する重力の影響や容器の力は、実験結果に影響を与え、画期的な発見を見逃してしまう可能性があります。

NASAのリング・シアード・ドロップ（Ring Sheared Drop）実験はこの試練を克服するために役立ちます。研究者らは国際宇宙ステーション用に、固体の容器ではなく表面張力を使って液体を保持する装置を開発しました。これは微小重力環境下でしかできないことです。

この研究の目的は、アミロイド線維と呼ばれるタンパク質凝集を作ることでした。これらの線維は、ニューロンを破壊すると考えられていて、脳内に塊（プラーク）を形成します。アルツハイマー病の原因と考えられているものの一つです。この研究では、表面張力の概念が働くことが確認されました。微小重力環境で容器を使わずに材料を取り扱えるので、タンパク質結晶や微生物を増やす研究や医薬品製造に関する研究など、他の実験においても有益です。

リング・シアード・ドロップはさまざまな病気の原因、進行、治療法を検証し、その生理学の基本的仕組みを研究する、国際宇宙ステーションで行われた数多くの研究の一つです。

アルツハイマー病への新たな視点

世界各地の研究者らは、国際宇宙ステーションを使って地上では複雑なヒトの健康に関する問題に対処しています。アミロイドの形成について調べる研究は、その形成とタンパク質結晶化（宇宙ですでに広く研究されているプロセス）との類似性を示す証拠を得て始まりました。

国際宇宙ステーションでの実験に向けて、リング・シアード・ドロップのハードウェアもまた、Rensselaer Polytechnic Institute（ニューヨーク）とNASAのマーシャル宇宙飛行センター（Marshall Space Flight Center）（ハンツヴィル）の研究者との協力によりパラボリックフライト（放物線飛行）で検証されました。これらの実験では、国際宇宙ステーションの金属製リングに流体を付着させるための試験と検証を行いました。また、このチームは、このような試験結果を国際宇宙ステーションでの追加研究に含めることを予定しています。地球の実験室では、重力の影響を考慮に入れるため（空気に囲まれた液体一滴ではなく）水中のシリコン一滴を使って同様の結果を得ました。しかし、このアプローチでは、微小重力環境ではおそらく存在しない不安定性がもたらされます。

「そこで、私たちは微小重力環境のシミュレーションを行い、実験室で宇宙と同じ規模のリング・シアード・ドロップを実現することに成功しました」と

ESAの宇宙飛行士アレクサンダー・ゲルストが軌道上モニタリング実験用の分析器に向かって息を吐いている様子。この研究は、月や火星、さらなる長期的ミッションでクルーの安全を守り、喘息やその他の気道炎症性疾患を持つ地上の患者の治療法の改善に役立つと考えられる。提供：NASA

Rensselaer Polytechnic Instituteの主任研究員アミール・ヒルサは述べています。「しかし、私たちが宇宙に送ったタンパク質溶液は、はるかに粘度が高いものです。ですから、宇宙での実験と一致する部分はあっても、一致しない部分もあります。当然ながら、天と地を入れ替えることはできません。微小重力に取って代わるものはないのです。」

リング・シアード・ドロップ装置は、2つのリング間に一滴の液体を保持して回転させ、もう一方を静止状態に保持してずれ流動、あるいは隣接する液体の層間で速度の差異を生み出すものです。過去の研究では、このずれ流動が、アミロイド生成の初期段階で重要な役割を果たすことが示されています。したがって、この現象を作り出すことがこの装置の重要な特徴なのです、とヒルサは説明します。他の研究者らはすでに、この方法を使って脳内のアミロイドプラークの実際の輸送について調査しており、最終的には医薬品の開発に役立つかもしれません。「私たちの研究は、プラークの除去が利益より害をもたらすかどうかということを調べることで、薬品開発に役立つ可能性があります。」

ヒルサは、脳内からアミロイドプラークを除去する薬品がすでに開発されていると述べています。「疾患がある脳内からアミロイド線維を取り除くことは幻想ではなく、医薬品研究の成果なのです」と彼は述べています。「私たちの研究は、巨大なレンガの壁の中にある一つのレンガの役割を果たしています。」

アミロイドに関する研究としては、宇宙航空研究開発機構（JAXA）の微小重力下でのアミロイド凝集・線維生成や、イタリア宇宙機関（ASI）とESA（欧州宇宙機関）との共同研究も行われました。2020年に発表されたJAXA研究チームのアミロイド凝集研究の結果では、微小重力下では線維が異なる構造を形成し、より緩慢に成長することが明らかになっており、その形成の仕組みに関する詳細な分析において、国際宇宙ステーションは理想的な環境となっています。このような分析は、アミロイド線維の形成阻止を目的とした新たな医薬品開発にも役立つかもしれません。

NASAの宇宙飛行士セリーナ・オナン・チャンセラーが、がん細胞や血管を対象としたより安全でより有効な治療の試験を行う研究「AngieXがん治療法」に取り組む様子。提供：NASA

> 宇宙飛行士の肺や気道の保護を目的とした研究が、地上でぜんそくや他の呼吸疾患がある人々に役立つ。

宇宙と地球の両方で呼吸をしやすく

宇宙飛行士の肺や気管の保護を目的とした研究は、地上でぜんそくや他の呼吸疾患を患っている人々の役に立っています。国際宇宙ステーションで実施された先のNOA-1とNOA-2実験の結果に基づくESAの気管モニタリング研究では、スウェーデンのKarolinska Instituteの研究者らが医療技術と協力し、吐き出された息の一酸化窒素について測定するための装置を開発しています。診療所や病院ではすでに、肺炎や喘息を瞬時に低費用で診断する装置として使用されており、宇宙環境下でこの技術を試験することは、地上での利用方法を向上させるための追加データの獲得につながります。

宇宙飛行士は、減圧されたエアロック内の装置へと息を吹き込み、将来の月や火星での生息条件をシミュレーションします。スウェーデンKarolinska Instituteの主任研究員であるラース・カールソンはこの実験が宇宙の減圧環境下での研究で新たな分野を開拓することを期待しています。吐き出された一酸化窒素の測定値は、気管支炎や肺炎の治療に使用される薬剤向けに最も効果的な分子を特定する際に役立つ可能性があります。

「最も嬉しいことは、実験グループがヒトの体の仕組みを研究することで、地上の患者さんたちの役に立てることです」と気管モニタリング研究に参加したESAの宇宙飛行士アレックス・ゲルストは述べています。「地上の人々の役に立つために宇宙へ行く必要がある、という良い例になっています。」

より良いがん治療へ向けて

アメリカでがんは主な死因の一つとなっており、毎年何十万人もの人々ががんにより亡くなっています。ISS National Labでは、治療への応用を目的とした肝細胞の培養、創薬や薬剤の輸送向上のためのタンパク質結晶化、より効果的で副作用の少ない治療法の研究を通して、がん研究を進めています。また、3次元細胞培養を改良し、より正確な薬剤検査ができるようにすることで、現在の創薬活動の失敗率を減

らそうとするプロジェクトもあります。

マサチューセッツ州ケンブリッジのAngiex社では、酸素と栄養を奪うことでがん細胞を殺す、腫瘍細胞の血液供給を標的とした治療が開発されています。同社のAngieXがん治療法研究では、国際宇宙ステーションの微小重力環境を利用して、血管壁に並ぶ内皮細胞を培養し、より安全で費用効率の高いがん治療法の開発に役立つ有効モデルが実現可能かどうかを研究しています。

「科学者が地上で内皮細胞を増やそうとすると年月がかかりすぎます。私たちが軌道上で行った検証の一つは、宇宙環境の方が細胞は成長しやすいかどうかということです」とNASAの宇宙飛行士セリーナ・オナン・チャンセラーは述べています。「内皮細胞は血液を供給するのに役立ち、腫瘍は大きくなるために血液の供給を必要とします。もし、腫瘍の血液供給の増加を止めることができれば、そのがんを打ち負かすことができるのです。私たちはみな家族や友人など周囲の誰かががんになった経験があり、常にがんに打ち勝つ方法はないかと考えています。その方法の一つが、このような細胞を軌道上で増殖させ、それを使って血液供給の増加を阻止できる新薬を試験することです。」

AngieXは、国際宇宙ステーションで行われている、より良いがんの治療法を探す研究の一つに過ぎません。培養した内皮細胞が宇宙飛行にどのように反応するかを調べたESAの実験「Endothelial Cells」では、宇宙でのこの種の生物医学実験に使用できる培養器具に改良を加えました。

免疫系に関する洞察

宇宙飛行士は、宇宙環境下で免疫機能が低下しています。免疫反応は地上でも加齢に伴い低下することがあります。宇宙では、加齢に伴う免疫抑制を研究する上で独特な利点があります。通常数十年かけて発症するような病態が短期間で発症するためです。この事実を利用した研究が増えてきています。ESAのLeukin-2実験では、免疫系のオンオフの切り替えに関与しているT細胞の活性化において、微小重力が重要な影響を与えることが実証されています。対照サンプルも国際宇宙ステーションに送り、遠心分離機で通常の重力をシミュレートして培養することで、打ち上げ時のストレスや放射線被曝の増加などの影響を排除しています。

「私たちは、微小重力が細胞に与える影響を具体的に確認することができました」とカリフォルニア州立大学サンフランシスコ校（University of California, San Francisco）の研究者でLeukin-2関連の論文を複数発表しているタミー・T・チャンは述べています。

「この研究により、宇宙飛行士に見られる免疫異常について、細胞自体が分子レベルで重力の有無に敏感であるという重要な情報が追加されました。」

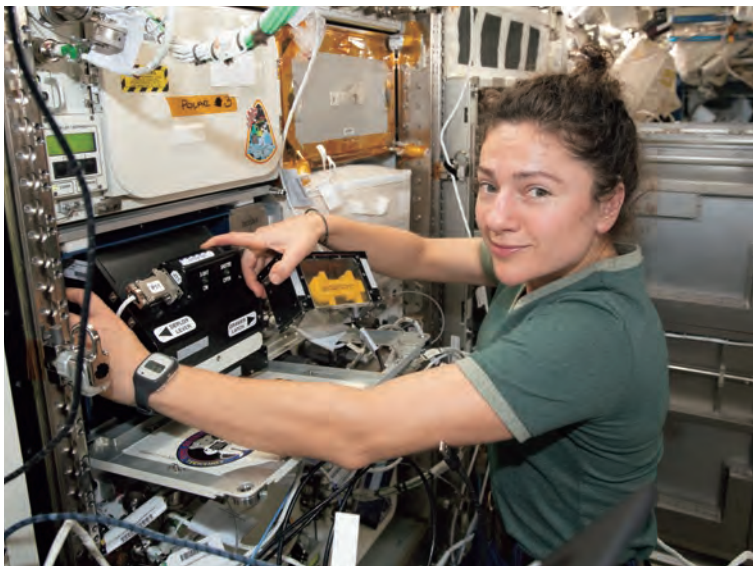
同じ仕組みが地上での免疫異常に関与している可能性があります。「研究者らは、微小重力を利用して複雑な組織の自己組成を促し、ヒトのさまざまな疾患について研究することができるかもしれません」とチャンは述べています。最終的に、この種の研究は、免疫抑制患者において免疫反応を促進したり、自己免疫疾患や炎症性疾患の治療で免疫反応を抑制したりする薬剤につながる可能性があります。

ESAのもう一つの研究「Immuno」でも、宇宙環境下でのT細胞の変化が観察されています。ストレスが免疫系にいかに影響を及ぼすかということをより深く理解できれば、地上の人々の役に立つだけでなく、長期宇宙飛行における免疫系の変化に対処する創薬も支援できるかもしれません。

筋肉と骨を守る

ISS National Lab主導の「Mighty Mice in Space」研究では、筋肉や骨の維持に関与する特定の分子シグナル伝達経路を阻害することで、微小重力下における骨や筋肉の喪失から宇宙飛行士を守り、さらには成長まで促進することが示されています。

研究結果は、この戦略により地球の人々の筋肉や骨の喪失についても防止や治療ができるかもしれないことを示唆しています。「地上で骨や筋肉の質量増加の促進に効果があることがすでに知られているこの伝達経路を阻害すれば、微小重力環境の場合と同様の効果が得られます」とジャクソンゲノム医療研究所（The Jackson Laboratory for



NASAの宇宙飛行士ジェシカ・メイアが、Mighty Mice in Space（宇宙最強マウス）について、げっ歯類の骨の画像撮影が可能な骨密度計を設置する様子。この研究では、宇宙で筋肉と骨の喪失の予防が期待される二種類のタンパク質について検証を行っている。
提供：NASA

Genomic Medicine)（コネチカット州）の主任研究員であるセ・ジン・リーは述べています。この伝達経路を対象とした多数の薬剤候補がすでに開発され、臨床治療で検証されてはいるものの、成果は一貫していないと彼は述べています。「ある治験では期待できる成果が示されましたが、副作用を回避するためにもう少し手を加える必要があります。筋力低下を治療するためのこの戦略を追求するには、まだかなりの作業が必要です。地上と宇宙の両方でかなりの効果が見られるというデータが出ており、多くの創薬活動を刺激してくれることを期待しています。」

規模によらず、ますます多くの企業や研究所、政府機関やその他の団体が、微小重力を用いて地上の人間の複雑な健康問題に取り組もうとしています。長期の微小重力研究を行うためのプラットフォームを提供することで、国際宇宙ステーションでは、地上の人々に直接恩恵をもたらすような飛躍的発見を生み出しています。重力を取り除けば、この世のものとは思えないような成果が期待できます。

地上の人々の健康改善に貢献する国際宇宙ステーションにおけるその他の研究：

プロジェクト	内容	メリット
ESA Brain-DTI	ヒトの脳がこれまで活用されていなかった神経経路を用いて宇宙に適応するという理論を検証し、宇宙飛行前後の脳の構造の変化を調べる。	飛行前後の脳上部の構造に、長期的に健康や視力に影響を及ぼしかねない顕著な差が見られることが研究結果により示されている。神経可塑性または脳の適応能力に関するより深い理解が、神経学研究の他の分野の前進につながる可能性がある。
ESA EDOS-2	EDOS研究で検証された非侵襲性の技術を用いて、宇宙飛行士が地球へ帰還後も骨量が減少し続けるかどうかや、回復の時期についても調べる。	骨量減少のモニタリングは、宇宙においてこの現象に対処するための食事や運動計画の策定に有用であり、地上での骨粗鬆症の初期検知を可能にする。使用したスキャナは既にスイスのScanco Medical社が商用化に成功している。スキャナ特有の特徴は、古代エジプトのミイラの非破壊的画像撮影など、非生物医学的研究での使用につながっている。
ESA ETD	微小重力が頭を傾けたり振ったりしながら視線を維持する能力に、どのように影響するかを調査する。この能力は前庭器官もしくはバランス感覚や方向感覚を維持する内耳および神経に依存している。	この研究では、外科医が介入することなく、眼のレーザー手術において眼の位置を追跡できる特別なヘッドセットを使用した。このヘッドセットは現在世界中でレーザー矯正手術に用いられている。
IGAR	カナダ宇宙庁 (CSA) が手術イノベーション＆インベンション (CSii) 用に開発したこの外科ロボットは、医師がプログラミングを行うと自律的に作動し、生検などといった正確性と低侵襲性が求められる作業を行う。	IGAR は、第1相臨床試験において安全性、正確性、有効性が確認され、CSii は、米国食品医薬品局 (FDA) の最終承認に向けて取り組んでいる。この技術は、前立腺がんや肝臓がんなど、さまざまながんの画像診断や治療に応用できる可能性があり、最終的には孤立環境や自然災害時の遠隔緊急手術を可能にする。
ESA MARES	宇宙飛行時の筋力低下を判断するため、宇宙飛行士が運動する際の筋肉の速度と力をモニタリングする装置。	次世代の宇宙での運動器具には多様なカウンターフォース機能が含まれるようになる可能性が高く、この技術の予備研究にはMARESが使用できる。
ESA MUSCLE BIOPSY	宇宙飛行前後でヒトの骨格筋における筋肉活動に関連する伝達分子である一酸化窒素の発現を分析する。	宇宙での筋力低下についてより深く理解することで、宇宙飛行士にとってより有効な対策を開発することに役立つ他、地上での特定の筋肉状態に関する洞察が得られる可能性がある。

治療用モノクローナル抗体のPCG研究の手順を確認するNASAのビクター・グローバー宇宙飛行士。病気の診断や治療に広く使用されているモノクローナル抗体の製剤は、保存期間が短いため費用が高く、患者に提供できる場所が限られている。
提供：NASA

宇宙でタンパク質を結晶化し、さまざまな病気の治療法を探る

結晶を利用することで、筋ジストロフィーからがんまで、新しい治療薬の開発が可能になるかもしれない

私たちの身体には数多くの種類のタンパク質が存在します。タンパク質は免疫系に不可欠であったり、病気の原因となるウイルスの一部であったり、私たちの生活のあらゆる場面で生命現象に関与しています。薬を飲むと体の中で特定のタンパク質と結合します。このプロセスによりタンパク質の機能が変化し、それがうまく機能すれば病気の症状を緩和したり、場合によっては病気を治癒します。

多くの病気において、その病気を治療する医薬品はその病気を誘発するタンパク質だけにうまく結合し、そのタンパク質の機能を制御しつつほかのタンパク質には結合しないように設計する必要があります。時として鍵と鍵穴にたとえられます。

この鍵と鍵穴がうまく合致するかどうかで、薬の効果と副作用が決まります。精密な鍵と鍵穴を実現するためには、タンパク質の構造に関する詳細な知識が必要となり、タンパク質構造を分析する最良の方法の一つがタンパク質を結晶化させ、X線で分析することです。

スペースシャトルやミール計画の際に、研究者らは、地上よりも微小重力下の方が良質なタンパク質結晶が取得できることを発見しました。20年間以上にわたり、国際宇宙ステーションは、研究目的の結晶化の場として機能し続けてきました。製薬会社や大学の研究者らは、2021年時点で、500以上ものタンパク質結晶生成（PCG）実験を行ってきており、国際宇宙ステーションで実施されてきた実験の中でも突出したカテゴリとなっています。

X線回折でタンパク質構造を特定するには、タンパク質結晶の回折パターンが必要です。結晶のX線回折データが良好であるほど、この方法でタンパク質構造を特定できる精度は高まります。

2005年以降、ロシア国営宇宙公社ROSCOSMOSのKristallizator計画（注：計画の一部をJAXAと共同実施）では、タンパク質の構造解析に適したタンパク質単結晶が作られてきました。微小重力下で結晶を成長させるとその質は大幅に向上し、分析時の三次元構造の解像度も上がります。

Kristallizator研究の成果の一つが、抗結核薬の標的の構造特定に役立つ結晶生成でした。米国CDCによれば、毎年100万人以上が結核で亡くなっています。結核菌は薬剤に対して即座に適応し耐性を持ってしまうことから治療が困難です。このROSCOSMOSの研究により、タンパク質が化学反応を起こしている間、タンパク質の中央にある化学反応を行う穴（チャネル）が、

反応中にその直径を変化させることが明らかになりました。この過程を理解することは、科学者が治療法を開発する大きな手助けになります。

各国で行われているPCG研究で、現在不治の遺伝性疾患であるデュシェンヌ型筋ジストロフィー（DMD）をはじめとするさまざまな疾患に使用できる医薬品や治療法が生まれることが期待されています。宇宙航空研究開発機構（JAXA）のDMDに関わるタンパク質の結晶構造に関する研究では、DMDの進行を抑制できる可能性のある化合物についてヒントが得られています。筑波大学元教授の裏出良博（うらでよしひろ）氏は、宇宙実験で得られたタンパク質の構造情報から、TAS-205を含む有望な化合物を複数設計しています。2015年の研究では、TAS-205を有するヒトへの使用の安全性が検証され、2017年にはヒトの患者における第2相臨床研究が終了しています。研究チームは、この薬剤によりDMDの進行が半分にまで抑えられ、多くの患者の寿命が倍に延びる可能性があると予測しています。

JAXAの研究者である山田貢（やまだみつぐ）氏は、より実際の臨床現場と類似した状況において大規模にTAS-205の有効性を調べる第3相臨床試験が2020年12月に開始され、2027年まで継続される予定であると述べています。

> **研究チームは、DMDの進行を半分まで遅らせ、多くの患者の寿命を倍に引き延ばすことができると予測している。**

JAXA PCGでは、20年以上にわたり微小重力におけるタンパク質結晶生成について技術開発を行い、多くの種類のタンパク質の正確な構造を明らかにしてきました。筋ジストロフィー治療薬候補の発見に加え、乳がんや歯周病用の薬剤候補の発見にもつながっています。詳細についてはまだ発表されていないものの、薬剤の開発は順調で、一部は前臨床試験中であると山田氏は述べています。

国際宇宙ステーションでのPCG研究は、全く新しい治療法を生み出すことに加え、保管が容易で有効期間も伸びるような製剤技術の開発につながる可能性があります。例えば、室温でも長時間安定しているような薬品は、冷蔵の必要性をなくし費用削減と流通の簡素化につながります。冷蔵保存される薬品は時間が経つと劣化し、場合によっては廃棄する必要があるほか、費用も高くなり、患者のアクセスも制限されてしまいます。国際宇宙ステーションでのISS National Lab主導のCASIS PCG 19研究では、モノクローナル抗体の安定性について検証されました。モノクローナル抗体は、微生物やヒト・動物の細胞など生きた生物から取り出した大きくて複雑な生体高分子であり、医薬品として使われています。CASIS PCG 19では、劣化につながる過程を究明し、最終的には劣化を抑制させる方法を発見できる可能性があります。

同じくISS National Lab主導のPCG-5では、製剤の別の側面に焦点が当てられ患者へのよりよい投与方法につながる可能性のあるミッションです。この研究では、黒色腫や肺がんを含む数種類のがん治療に使用されているモノクローナル抗体Keytruda®の均一な結晶生成に取り組んでいます。モノクローナル抗体は、液体の中で容易に溶けることはありません。そのため、注射ですぐに投与できるような薬にすることは難しく、病院で何時間もかけて点滴する必要があります。PCG-5では、注射によるKeytruda®の投与が可能となりうる質の良い結晶の懸濁液が作成されており、患者や介護者にとって治療がより簡便になるだけでなく、費用も大幅に削減されることになります。

PCG-5の成果に基づき、ライカートとそのチームでは、2022年に国際宇宙ステーションでPCG 20を実施しました。PCG 20では、地球よりも純度が高く均一なKeytruda®の微小結晶懸濁液を微小重力環境で作る方法の

JAXAの宇宙飛行士野口聡一（のぐち そういち）が、JAXAタンパク質結晶生成実験のサンプルを混合するため、グローブバッグで作業する様子。
提供：NASA

ROSCOSMOSの宇宙飛行士オレグ・ノヴィツキーに渡すためにタンパク質結晶生成装置（PCRF）からキャニスターを取り出すESAの宇宙飛行士トーマス・ペスケ。写真はJAXA-PCG実験運用中に撮影された。提供：NASA

理解を目指して研究を行いました。Merck Research Laboratoriesの主任研究員ポール・ライカートによれば、他の治療法と同様、この研究も現在進行中です。

ライカートは、最初はスペースシャトル、その次は国際宇宙ステーション内で、25年以上にわたりより高度な微

小重力研究に従事しています。実験では毎回、何か新しいものが発見されると述べています。「何度もやろうと思うのは、毎回何か思いがけない発見があるからです。」

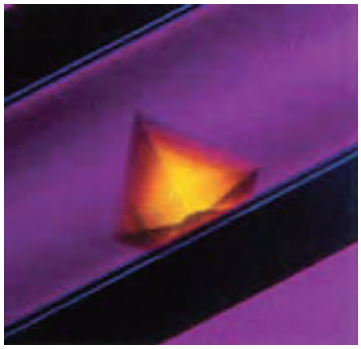
彼はこの実験と実験結果を他の研究者による研究目的の国際宇宙ステーション利用促進のために用いています。

「Merckのチームは、自分たちの研究用のほか、他分野の大勢の科学者らに微小重力研究への関心をもってもらうため、簡単な研究ハードウェアとプロセスを開発しました」とライカートは述べています。「また、研究コミュニティや一般に公開できるような実験もデザインしています。微小重力研究の機会は多いと感じており、多様な科学分野の人々が微小重力研究からどのようなメリットや学びを得られるかということを考えるよう、引き続き促していきます。」

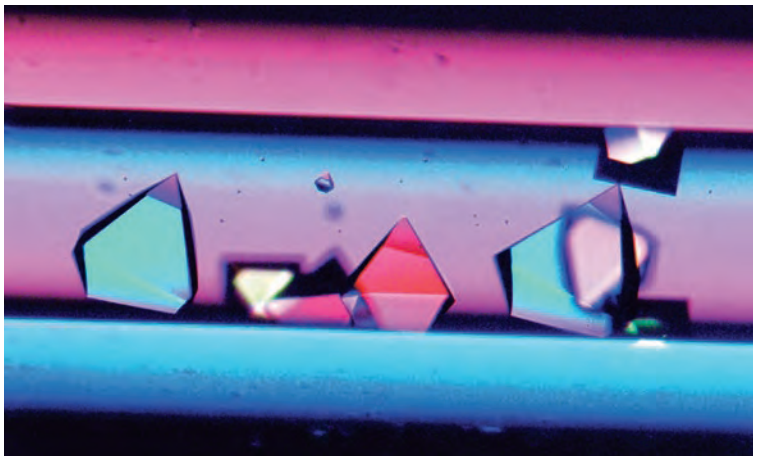
JAXAでも、PCG研究への関心向上に取り組んでいます。

「近年では、膜タンパク質結晶化技術の開発を行っており、多くの研究者向けに標準的なサービスとして提供する準備を進めています」と山田氏は述べています。「これにより宇宙での実験からさらなる成果が得られると確信しています。」

JAXAは創薬への期待を示すとともに、微小重力下での人工アルブミンの結晶化にも取り組んでいます。



E. coliチミジンホスホリラーゼの結晶構造。提供：ROSCOSMOS



国際宇宙ステーションの「きぼう」日本実験棟の微小重力下で生成されたタンパク質結晶。提供：JAXA

アルブミンは、血液中にもっとも豊富に存在するタンパク質ですが、地上で結晶化することが難しいタンパク質です。研究者らは国際宇宙ステーションを活用して、犬や猫のアルブミンを結晶化し、タンパク質の構造や精製法をより深く理解しようと努めています。この研究は、獣医学分野で応用できる可能性があります。

「ヒト血清アルブミンは、献血で得られた血液から精製され医療現場で広く使用されています」と、この研究の代表者である中央大学の小松晃之（こまつてるゆき）教授は述べています。「犬や猫のための輸血を担う赤十字社というものは存在せず、動物病院の獣医たちは治療の際に輸血をすることは非常に困難です。この研究は動物の血液不足の問題を解決できるかもしれません。」

人工アルブミンは高純度で大量に製造しなければならず、これまでは費用が原因で動物の大規模試験は実施されなかったと小松教授は述べています。

国際宇宙ステーションでの他の研究は、タンパク質結晶化分野そのものを進歩させています。LMM Biophysics-2実験チームは、国際宇宙ステーションで抗精神病薬の良質な結晶を育成する新しくてよりスピーディなプロセスを発見しました。このプロセスは、抗精神病薬の基礎となる化学的性質をより深く解明し、精神疾患治療用の薬剤を改良することにつながるかもしれません。

STS-61Cペイロードの専門家であり米国議会上院議員であるビル・ネルソン（フロリダ州）が、スペースシャトルColumbia船内で小型タンパク質結晶生成実験（HPCG）のサンプルの写真撮影の準備をする様子。提供：NASA

良質のタンパク質結晶を育成するためのプラットフォームとしての国際宇宙ステーションの利用可能性は、今後も地上の人々に新しくより優れた病気治療法をもたらす鍵となるでしょう。

NASAの宇宙飛行士ケイト・ルビンスは、宇宙飛行士と地上の人々の新たな治療法を模索する中で、心筋の老化と弱体化に関する理解を深めるためにCardinal Heart研究に取り組んでいます。
提供：NASA

国際宇宙ステーションでの組織チップによる病気や創薬の研究

宇宙での医療研究における組織チップの貢献

ヒトの臓器の機能を模倣した小型装置は、さまざまな疾患の進行を理解する上で役立ち、臨床試験用の薬品をより速く安全に生成する代替手段を提供します。

国際宇宙ステーション搭乗中に拍動するヒトの心臓細胞の小さなキャニスターは、地上で病気にかかる可能性のある心臓の細胞や組織の異常を理解する上で役立ちます。Cardinal Heart研究では、組織チップの一種であるこのような人工心臓組織（EHT）を使用し、微小重力が心臓細胞に与える影響について調べました。

組織チップは、ヒトの特定の組織や臓器の複雑な機能を模倣した生きた細胞が組み込まれた小型装置です。微小重力環境下では、細胞の構築が地上の実験施設でみられるものと異なっていて、体内にあるときにより近い動きをします。そのため、このような装置を使った研究では、国際宇宙ステーションがとりわけ適したプラットフォームとなります。組織チップは、生物学的組織を保存、維持、改善または交換するために生きた細胞と他の材料を組み合わせて使用する、組織工学の重要な装置です。

Cardinal Heartでは、微小重力が人工心臓組織（EHT）の変化の原因となっていることが確認されています。次のステップとしては、特定の薬剤が、宇宙飛行中にこのような変化した作用を阻止できるかどうかを検証し、最終的には、地上で心委縮などの疾患を抱えている人々に役立てることです、とスタンフォード心血管研究所（Stanford Cardiovascular Institute）の主任研究員であるジョセフ･ウーは述べています。

薬剤の効果の検証に組織チップを使用することで、新薬の承認において現在標準となっている、ヒトの治験の前に動物実験を行う必要がなくなるかもしれません。動物を対象とした前臨床試験で好ましい結果が得られたとしても、薬剤の約30%はヒトの臨床試験では有害であるとされ、60%程度がヒトにとって有効な効能が見られないことが判明しています。

「組織チップはより予測可能な方法で、ヒトにおける反応と有害性を踏まえた薬剤候補を検証できます」とHuman Muscle on Chipの主任研究者であるシオバン・マラニーは述べています。この研究で彼は、宇宙での筋力低下の加速を利用して地上での加齢に伴う筋力の衰えを研究することの実現可能性を検証しました。「ヒトで有効性がなかったり毒性が認められたりしたため、多くの薬剤が失敗しました。組織チップ技術は、まさに早期発見から臨床に至るまでのギャップを埋めるものといえます。組織チップは頑丈で3次元的であり超小型なので、これらの実験を多数打ち上げ、長期的かつ慢性的な影響を観察することができます。」

ESA（欧州宇宙機関）では、独自の実験ユニット（EU）を開発し、宇宙で細胞を培養しています。SPHEROIDS研究では、EUを用いて、微小重力が内皮細胞の機能に与える影響について研究しています。内皮細胞は血管の内側表面に並んでおり、血管構造や血圧の調整で重要な役割を果たします。『Biomaterials』誌で発表された研究結果では、内皮細胞はEUで3次元構造を形成し14日間の試験で良好な生存率を示しました。同研究では、自動溶媒交換と固定手順の機能性についても確認されています。EUは、薬物試験および薬理学・毒物学・放射線生物学の研究において組織チップのような役割を果たす可能性があります。

マラニーはトマト由来のステロイド（Tomatidine）が筋肉量を改善するかどうかについて検証するため、国際宇宙ステーションで追加研究を計画していま

NASAの宇宙飛行士セリーナ・オナン・チャンセラーが、微小重力下での筋肉の成長と修復について理解を深めることを目的とした実験「微小重力下におけるヒト筋細胞の培養」の準備をする様子。提供：NASA

す。「基本的に同じ組織チップのセットが宇宙に送られます。一つはステロイドの処置を受け、もう一つは処置を受けません。それにより特定の反応や毒性を確認することができます」と述べています。

外傷後骨関節炎（PTOA）の研究用に開発されたある膝関節軟骨の組織チップにより、この症状を治療するための薬剤開発が進められています。PTOAは、外傷性の関節損傷が軟骨や骨の損失に発展することで生じます。年齢にかかわらず多数の人々に発症するもので、転倒などの負傷後に免疫系が過剰反応する「サイトカインストーム」により発症すると考えられています。ISS National Lab主導のMVP Cell-01実験では、低量のデキサメタゾン（抗炎症剤となり得る）が負傷後の膝のサイトカイン値を大幅に抑えることが示されています。追加研究では、この薬剤を成長因子に組み合わせており、研究者らはこの組み合わせについて治験を提案する予定です。

「薬剤開発の闘いの半分は薬剤の発見です」とマサチューセッツ工科大学（Massachusetts Institute of Technology）生物工学部教授で主任研究員のアラン・グロジンスキーは述べています。「残りの半分は、薬剤を患部に届ける方法です。今回の場合、低量の薬剤をどうやって軟骨へ届けるかということです。このチップシステムを使えば、ナノ粒子で薬剤を体内へ届ける方法を検証することができます。

このような研究において、実際にヒトの系を使う場合は、動物を使った場合よりも多くのメリットがあります。さほど遠くない将来、この研究はPTOAの治療の最先端を行っているはずです。」

組織チップを使うことで、より速く結果が出ます。「組織チッププラットフォームを使った場合、製造に要するのは数日です」とスタンフォード大学のウー研究室のポスドク研究員ディリップ・トーマスは述べています。「その後、薬剤による治療を開始し、使用する評価基準によっては1ヵ月ですべてのデータを入手できます。」

国際宇宙ステーションでの組織チップの研究は、微小重力がヒトの身体にもたらす多くの変化が地上の加齢関連疾患に似ていますが、はるかに早く進行するという事実を上手く利用しています。研究者らは、数ヵ月間や数年間ではなく、数週間あるいは数日間で変化をモデリングすることが可能です。

「微小重力は病気のプロセスを加速させ、薬剤の新たな標的も明らかにしてくれます。地上ではできないような方法で、病気の状態を見ることができます」とNational Institutes of Health's National Center for Advancing Translational Sciences（NCATS）の科学プログラムマネージャー、ルーシー・ロウは述べています。NCATSは、このような組織チップの研究の資金源となっているTissue Chips in Space計画でISS National Labと提携しています。

NASAの宇宙飛行士アンドリュー・モーガンが、国際宇宙ステーションで心臓の前駆細胞を生成するため幹細胞を誘導し、培養するMVP Cell-03実験のため心臓細胞のサンプルを扱う様子。提供：NASA

カナダ宇宙庁（CSA）の宇宙飛行士デヴィット・サンジャックが、関節の外傷が原因で軟骨と骨が喪失する外傷後骨関節炎を予防する薬剤開発の一環として、宇宙飛行が筋骨格疾患に与える影響を研究する、MVP Cell-01のサンプルを処理する様子。提供：NASA

同計画では、微小重力がヒトの健康や病気に与える影響を理解し、その理解を地上の人々の健康改善に役立てることを目的としています。

STaARS BioScience-7では、免疫細胞の加齢を模倣するため組織チップを宇宙へ送り、微小重力下で細胞が加齢したことを確認した後、そのプロセスを研究するためのモデル形成を行います。

「私たちは老化の流れを知っています。次は私たちの身体の修復や傷の治癒という役割を担う免疫系幹細胞の老化を予防する、もしくは若返りを実現することが可能かどうかを知りたいと思っています」とカリフォルニア大学サンフランシスコ校教授で主任研究員のソンジャ・シュレプファーは述べています。若者でも免疫系が老化している場合もあります。例えば、潜伏しているウイルスが免疫系を継続的に活性化している場合などです。シュレプファーは、組織チップを冷凍せずに宇宙から持ち帰る追加実験を計画しています。

「これらの細胞が老化することはわかっているので、今後は幹細胞が通常の働きをして損傷や血管を通常の速度で修復できるように、実験室で細胞を元の状態に戻すことが可能かどうかについて研究していきます。目標は、排除可能な分子や、加齢作用によって遮断される経路を正確に理解することです」と述べています。

心臓から免疫系、筋肉、骨などまで、人間の組織の小さな代役が、大きな成果をもたらしつつあります。

第37次長期滞在クルーのフライトエンジニアの宇宙飛行士カレン・ナイバーグが、国際宇宙ステーションのDestiny実験室で、眼の健康（OH）超音波2スキャンを実施する様子。検査を手伝う宇宙飛行士クリス・キャシディが後方に見える。提供：NASA

宇宙での超音波検査が地球の医学を変える

国際宇宙ステーション用に開発された超音波検査法は、世界各地で利用されている

設備の揃った病院がある大都市に住む人々にとっては、迅速で正確な医療用画像診断技術へのアクセスが問題となることはさほどありません。しかし、近くに医療施設がない人々の場合、この技術にアクセスできるかどうかは、命に関わる一大事です。

軌道上にいる宇宙飛行士についても同じです。この問題はAdvanced Diagnostic Ultrasound in Microgravity（ADUM）研究において扱われました。宇宙飛行士らは、小型の超音波装置を用いて他のクルーの検査を行う方法を学びました。健康上の問題が発生した場合、宇宙飛行士らはこの機器を用いて、地上の医師たちの助けを借りながら、多くの怪我や病気の診断を行うことができます。

World Interactive Network Focused on Critical Ultrasound（WINFOCUS）との協力を通して、ADUM主任研究者のスコット・ダルチャブスキーは、国際宇宙ステーションの宇宙飛行士向けに開発された技術を用いて、専門家による遠隔指導および訓練により複雑な手

国際宇宙ステーションの外科医ジェームス・パッタリーニ医師とNASAの宇宙飛行士セリーナ・オナン・チャンセラーが、カザフスタンの着陸地点にある医療テントで、バタフライIQ超音波検査を行う様子。提供：NASA

WINFOCUSとヘンリー・フォード・イノベーション研究所（Henry Ford Innovation Institute）のメンバーであるルカ・ネリ医師とアルバータ・スペリアフィコがWyle Engineeringのキャサリーン・ガルシアと協力し、ADUMと遠隔超音波アプリケーションを使用してラスサリナス（ニカラグア）の地方コミュニティから来たチャモロ医師のトレーニングを手伝う様子。
提供：WINFOCUS/ Missions of Grace

術を迅速に行えるプロトコルを開発することで、地上の遠隔地でも使用できるよう応用しました。

WINFOCUSは、国際宇宙ステーションでの利用を目的に開発された遠隔医療や遠隔指導の技術を進化させ、低コストのアプリケーションを通して地上の大型医療システムでも利用できるようにしました。ADUMを用いて、WINFOCUSでは、60ヵ国以上、45,000人以上の医師および準医師に対してトレーニングを行ってきました。地方の医療関係者の実力が向上すれば、より多くの患者が質の高いタイムリーな診療を受けることができるようになり、効率的な医療システムが構築されます。

スポーツ医学でもこのようなプロセスが用いられています。最初はADUMベースの超音波と遠隔指導のトレーニングが、デトロイト・レッドウィングズ（Detroit Red Wings）、タイガーズ（Tigers）、ライオンズ（Lions）の医師以外のアスレチックトレーナーに提供されていました。このような診断能力は、オリンピック競技の舞台でも用いられるようになりました。あるアスレチックトレーナーは、遠隔指導により、脚を負傷したスキー選手のスキャンを行いました。この検査のおかげで選手は競技を続けることができ、3日後には金メダルを獲得したのです。

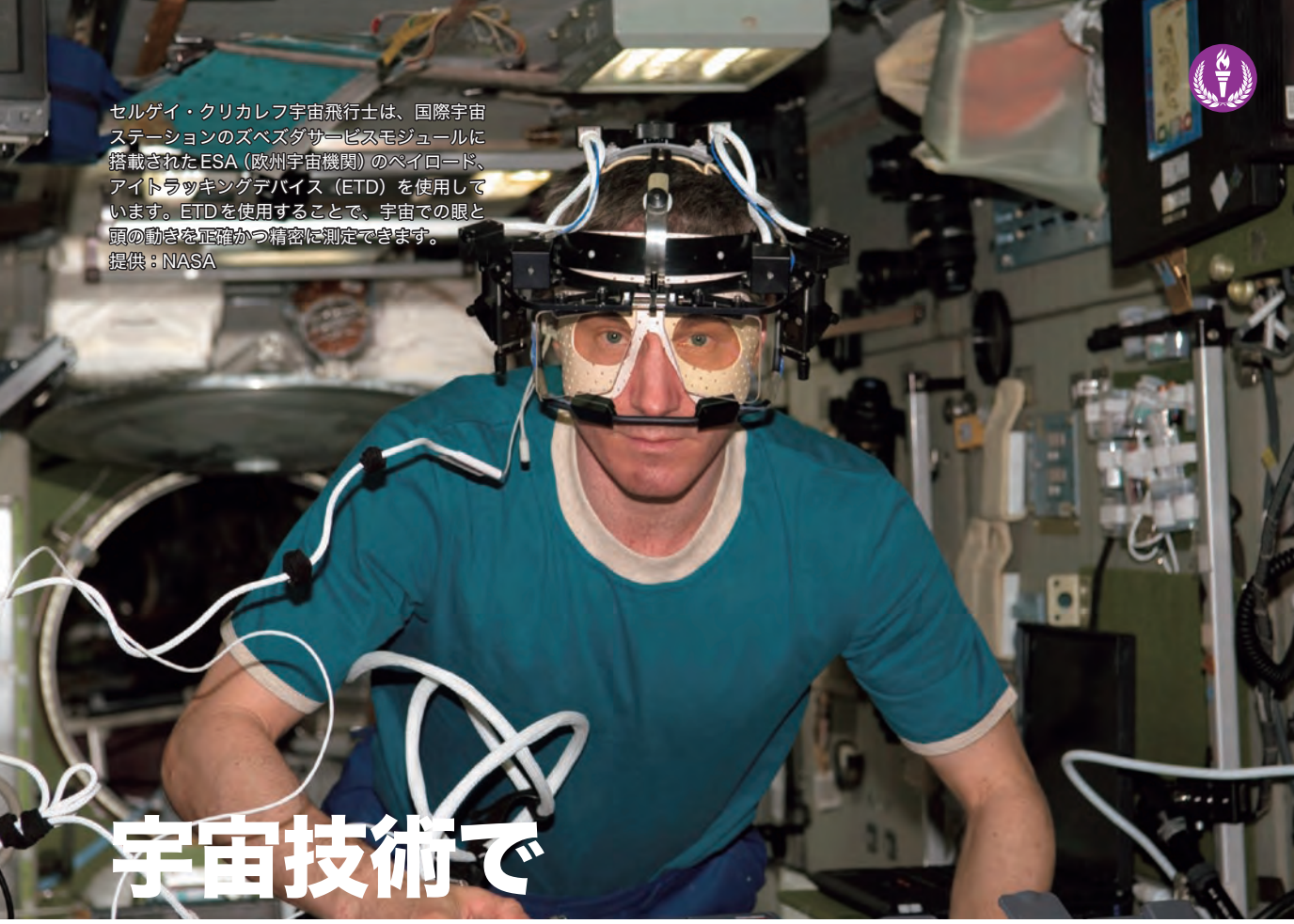
ADUMは、肺の虚脱など以前なら無理であった症状の診断において、超音波診断が有効であることが分かり、救急医療室などで利用されています。ADUMプロトコルは有効であることが証明されており、現在では医科大学の標準カリキュラムに入っています。外科医のインターンや研修医全員に超音波研修を必須としている米国外科学会では、ADUMプログラムを導入しています。

ADUMプロトコルを使用し、NASAの宇宙飛行士リロイ・チャオが宇宙飛行士サリザン・シャリポブの眼の超音波検査を実施する様子。提供：NASA

ADUMに基づきアップグレードされたButterfly IQは、現在、深宇宙探査へ向けた国際宇宙ステーションでの船内テストと、宇宙飛行士が地球に帰還した際のデータ取得のためのフィールドテストが行われています。超音波画像の画質向上は、従来、典型的なフィールドの条件では対応できないような複数のプローブやハードウェアに依存していました。これまでの超音波装置とは異なり、Butterfly IQにはすべての臓器、組織、血管で使えるユニバーサルプローブが組み込まれています。国際宇宙ステーションでの技術実証では、微小重力下で、モバイル計算装置と併せてこのポータブル超音波装置もテストしました。

このテストでは、超音波画像の取得や表示、保管に加えて、扱いやすさと画質についても、クルーの意見を取り入れました。

ADUMとButterfly IQのような新たな超音波技術の組み合わせは、深宇宙探査だけでなく、遠隔地医療の拡充に大きく役立つでしょう。



セルゲイ・クリカレフ宇宙飛行士は、国際宇宙ステーションのズベズダサービスモジュールに搭載されたESA（欧州宇宙機関）のペイロード、アイトラッキングデバイス（ETD）を使用しています。ETDを使用することで、宇宙での眼と頭の動きを正確かつ精密に測定できます。提供：NASA

宇宙技術で眼の手術を進化させる

アイトラッキング研究の地上での応用

視力を改善するためのレーザー手術は広く普及していますが、宇宙で使用するために開発された技術は現在、患者の目を追跡し、手術中にレーザーメスを正確に指示するために地球上で一般的に使用されています。

2006年、国際宇宙ステーションでEye Tracking Device実験を行うESA宇宙飛行士トーマス・ライター。提供：ESA

ヒトの眼は静止状態を保つことができるため、頭を傾けたり振ったりした場合でも一定の位置をはっきりと見ることができます。脳は内耳からの補足情報を得て、安定した視力を維持することで、この反射を可能にしています。この感覚システムの本質的な特徴は、重力を基準にしていることです。

ESA（欧州宇宙機関）のEye Tracking Device実験では、このプロセスに関する仕組み、そして宇宙では脳がどのように変化するのかについて研究しています。この実験では、通常の作業を妨げないようにするため、眼を追跡する画像処理チップが組み込まれた特別仕様のヘッドセットを使用しました。

その結果、バランスと総合的な眼の動きの制御が微小重力下では影響を受けることが示されました。一般の重力条件下ではこの2つのシステムが緊密に連携して働きますが、微小重力下では、その関係が壊れてしまいます。

エンジニアたちは、国際宇宙ステーションでのこの装置の利用と並行して、レーザー手術で外科医の作業を妨げることなく眼の位置を追跡するなど、地上で応用できる可能性を秘めていることに気づきました。Eye Tracking Deviceは、現在、世界各地の多くの矯正レーザー手術で用いられています。

宇宙での365日24時間

アルテミス計画や、月への帰還に向けて、国際宇宙ステーションに滞在することほど、最高のトレーニングはないと思います。

— NASA宇宙飛行士 カイラ・バロン

第66次長期滞在時の船外活動前のカイラ・バロン。マティアス・マウラーとマーク・ヴァンデ・ハイが後方に見える。提供：NASA

NASAの宇宙飛行士ビクター・グロバーは、国際宇宙ステーションの自由飛行ロボットAstrobeeロボットの一つ「Honey」と作業を行っています。Astrobeeは、ロボット推進の新たな方法を開発するAstroboticsを含め、さまざまな技術試験や実証を支援しています。提供：NASA

宇宙で実証した技術をもとに月や火星へ

深宇宙探査に向けた機器の技術実証

NASAの宇宙飛行士ビクター・グロバーは、2020年と2021年に、6ヵ月間にわたり国際宇宙ステーションに滞在しました。滞在中、彼は将来の月探査で重要な役割を果たす可能性のある技術実証に取り組みました。月探査を行うNASAのアルテミスチームの一員に抜擢されたグロバーはこの実証の恩恵を直接受けることができました。

「工学的な観点から実験のデザインを考えるのが好きでした」とグロバーは述べています。「何かをより効率的に行ったり、ツールを別の用途で使う機会が良くあり、毎日謎を解くべきパズルがあるようなものです。宇宙飛行士として、私たちは宇宙のさらに遠くへ行き、地上の人々の生活を向上させるための技術進歩を手伝っていることが実感できて、非常に嬉しいです。」

国際宇宙ステーションは、宇宙で新しい技術を試すための独特なプラットフォームを提供してくれます。宇宙に長期間滞在し、作業する宇宙飛行士らが得た専門知識や実地体験は、地球低軌道を超えた今後のミッションにおいても大きなメリットとなるでしょう。

グロバーが従事したアストロバティックス（Astrobatics）研究では、国際宇宙ステーションにあるAstrobeeロボットでジャンプやセルフトスといった動作を試し、ロボットの実証を行っています。

ロボティクスには、宇宙船の内外で幅広い応用が存在します。現在、このような自動化アシストロボットでは、ファンによる推進やダクトファン、無重力クライミングなどが採用されており、ロボットマニピュレーターで手すりを掴むなどの動作ができます。ジャンプ操作は簡単で、加速もでき、手すりがないエリアや障害物があるエリアなど、移動できないエリアを回避できるようになっています。

「世界中の人たちがAstrobaticsに携わっています」とグロバーは述べています。「私たち全員が『何かを学べるぞ』と思って取り組みました。Astrobeeは素晴らしいものです。モジュール式なので、さまざまなシステムやパーツを取り付けることができます。この技術とこのチームとの仕事はとても楽しいです」。

宇宙飛行士には、ロボットのアシスタントとは若干異なるニーズがあり、クルーの健康をモニタリングし長期の宇宙飛行の間、安全を保つための技術が多数検証されてきました。カナダ宇宙庁（CSA）の宇宙飛行士デヴィット・サンジャックは、装着型センサーを用いて、日常生活を妨げずに、短時間でクルーの健康状態をモニタリングできるBio-Monitorシステムを初めて検証しました。

この技術には、スマートシャツや専用のタブレットアプリケーションが搭載されています。

Bio-Monitorには、装着者の身体活動や心拍数、呼吸が記録され、定期的に血圧が測定される他、動脈壁の硬度が測定されます。研究者らはこのデータを用いて、個人の代謝や血管の健康状態を評価することができ、おそらくは心血管系の老化の初期兆候を予測できるバイオマーカーを特定・検知できることも期待されています。

「バイオ・モニター（Bio Monitor）は私たちの身体の中で起こっていることを知るためのワンストップ・サービスです」とサンジャックは述べています。「いずれ同じような技術を用いてアスリートや危険な環境下で働く労働者、あるいは地上の遠隔地にいる患者のモニタリングに使用することができるようになるでしょう。」

人間と機材の両方にとって、宇宙飛行の最大の危険は放射線です。AstroRad Vest研究では、宇宙飛行士を放射線か

カナダ宇宙庁（CSA）の宇宙飛行士デヴィット・サンジャックが、宇宙飛行士のバイタルサインを測定・記録するために設計されたウェアブル（装着型）技術Bio-Monitorの試験を行う様子。提供：CSA/NASA

ら守る目的で作られたベストをテストし、その着やすさや着心地、可動域について宇宙飛行士らの感想を集めています。AstroRad Vest研究は、NASAとイスラエル宇宙局（Israel Space Agency）、ドイツ航空宇宙センター（German Aerospace Center: DLR）とのパートナーシップMAREを補う役目を果たし、Artemis-1で宇宙飛行士らが直面すると予測される放射線環境を特定します。

宇宙での放射線検知システムの性能を評価するA-HoSSと呼ばれる研究を含め、他のさまざまな技術が放射線保護に貢献しています。国際宇宙ステーションの別の研究では、国際宇宙ステーションの特定の場所や時間における放射線測定値をリスクレベルに換算しています。

宇宙での人的リスク対処と同様に重要なのが、空気や水などの必需品の供給です。十分な水の供給法をはじめとする生命維持システムは、国際宇宙ステーションで試行錯誤が行われている宇宙旅行を実現するための重大な要素です。

ESA（欧州宇宙機関）の研究であるAquaMembraneでは、国際宇宙ステーションの現在の水分回収システムをAquaporin Inside Membrane（AIM）と呼ばれる機器と入れ替えるテストを行っています。より効率的な水再生システムにより、打ち上げ時の重量や宇宙旅行の費用を削減できる可能性があります。

NASAの宇宙飛行士ミーガン・マッカーサーとSpaceborne Computer-2。市販のコンピュータシステムが、エッジコンピューティングと人工知能の機能により宇宙でのデータ処理を大幅に高速化し、探査を促進する方法を探る。提供：NASA

UWMSユニットを用いて、国際宇宙ステーションで新しい改良されたトイレ技術を実証します。

UWMSユニットの主な設計コンセプトは、将来の月や火星などへのミッションに向けて、さまざまな宇宙船に容易に組み込むことができます。別のUWMSユニットは、宇宙飛行士が月よりも遠くへ行って戻ってくるミッション、Artemis Ⅱの飛行試験用としてOrionに搭載されます。より小型で、より快適で、より信頼性のある廃棄物処理方法によって、クルーは他の活動に集中できる時間が増えます。

Exploration ECLSS（Brine Processor System）では、尿から水分を回収する方法を検証しています。廃棄物処理と水の提供を組み合わせているのです。

現在、国際宇宙ステーションの水分回収システムの一部となっている尿処理装置では、クルーの尿やキャビン内の凝縮液から約93.5％の水分が回収されます。長期探査ミッションのクルーたちは使用する水分のうち98％近くを再利用する必要があります。現在の尿水分回収システムでは蒸留が用いられていますが、この方法では塩水が生成されます。Brine Processorはこの塩水から残りの水分を抽出し、総水分回収率を必要な98％近くまで引き上げることができます。

2018年、クルーたちはESAのLife Support Rackも設置して二酸化炭素を酸素にリサイクルする技術を検証しています。回収した二酸化炭素を水素と反応させて水を作るという、現在進行中のNASAの技術実証とは設計が若干異なっています。このようなシステムが開発される以前は、地球から送られてくる水を使って呼吸用の酸素を生成していました。したがって、この技術はより長期のミッションで必要となる持続可能な生命維持システムの開発へ向けた大きな一歩であると言えます。

前景に見える国際宇宙ステーションから見る満月。提供：NASA

ロボットの性能を検証し、人間の安全を確保できたら、今後は、次は両者ができるだけ早く効率的に仕事を行えるようにします。ISS National Labレット・パッカードは、コンピューティング機能を宇宙へ移すため高性能の商用既製システムを検証しています。

「国際宇宙ステーションで実施される多くの実験では、収集したデータを地球に送っています」とヒューレット・パッカードのSpaceborn Computer-2主任研究者マーク・フェルナンデスは述べています。「サンプルをできるだけ早く評価検討するため、宇宙であろうと、石油掘削装置や飛行機の中であろうと、データが生成・収集される場所へコンピューティング機能を移動したいのです。その場で合否判定や安全性の答えを得たいのです。」

この研究は、これまでの国際宇宙ステーションでの研究に基づいており、この種のコンピュータシステムが放射線に対する徹底した保護がなくても稼働できることは実証済みです。

「探査の目的はデータ収集ではなく洞察です。世界中の優れた頭脳を集めて単に計算を行うのではなく、洞察を得たいのです」とフェルナンデスは述べています。「この能力は、科学者がすでに行っていることと何ら変わりません。ただ、データが生成される場所にもう少し近づくだけです。秘められた可能性はかなり高く、画像や信号の処理、医療、DNA分析といったものが含まれます。」

深宇宙ミッションは、完全に遮断された生活空間の中で行うわけではありません。宇宙飛行士たちは、宇宙船や生活空間の外へ、あるいは慎重に練られた生命維持システムから出て作業しなければならないこともあります。このような作業には宇宙服が欠かせません。SERFEでは、水の蒸発を使って宇宙服から熱を取り除くという新技術の実証を行っており、汚染や摩擦が熱制御システムに与える影響を調べたり、身体活動や温度変化といったさまざまな条件下で微小重力が宇宙飛行士の体温を調節する能力に与える影響を調べたりしています。

宇宙技術の恩恵を地球へ持ち帰る

NASAの宇宙飛行士ビクター・グロバーにとって、地上の人々にどういった恩恵がもたらされるのかということは、国際宇宙ステーションで実施される研究や技術実証の最も重要な点の一つです。

「私たち宇宙飛行士は研究者や開発者に常にフィードバックをしています」と彼は述べています。「それは単なる技術ではなくて、誰かがいずれ使うことになる技術なのです。私たち人間がそれとどのように関わり合うかは貴重な学習の一環なのです。私たちが行っていることはすべて地球で応用されるのです。」

例えば、グラバーが手掛けた国際宇宙ステーションのロボットの先進モビリティにより、偵察用ドローンがこれまで到達できなかった場所に到達できるようになる可能性があります。また、宇宙で宇宙飛行士を放射線から守るために開発された技術は、地上の医療現場や災害時の初動対応、原子力産業で働く人々を守ることができます。

ROSCOSMOSのCardiovectorは微小重力環境における心血管系の適応に関する研究であり、特殊な装置を用いて宇宙飛行士の大動脈の中心圧や血流速度を測定します。この装置は数年にわたり国際宇宙ステーションで採用されており、地上での心血管関連の診察において広く応用できる可能性があります。

カナダの企業Hexoskinでは、CSAのBio-Monitor研究に使用される材料の開発を手伝っており、地球での遠隔監視技術の利用にも取り組んでいます。

「実生活に即した健康モニタリングは医療の質を向上させる上で必要不可欠であり、カナダや米国などの地理的・人口統計学的条件を考えると、遠隔モニタリングは不可欠な要素と言えます」とHexoskinの共同設立者ジャン・フランソワ・ロイは述べています。

「私たちの目標の一つは、患者ができるだけ早く病院から自宅に戻り、その後も十分なモニタリングができるようお手伝いすることです」と彼は続けます。「私たちのモデルでは、すべての患者がまるでまだ病院にいるかのように継続的に監視・監督されるようなケアの継続を可能にします。医療システムは、長期的な健康管理に適応しており、患者自身のケアへの関与を高めています。ウェアブルなモニタリング技術ならこの移行が可能になります」。

ESAのAquaMembrane研究も、地上の人々に役立つ可能性があります。地球上の淡水の不足が深刻化する中、科学者らは海水や汽水から塩分を取り除く「脱塩（海水淡水化）」というプロセスに注目しています。AquaMembraneに使用されているAIM技術は、特に、地上試験で有望視されている正浸透と呼ばれる脱塩プロセスに適しています。宇宙飛行士のために尿塩水から水を回収する技術は、地上の水へのアクセスが限られた過酷で隔離された環境にある人々に水を提供する上で役立つでしょう。

ミッション成功の最後のステップである地球への帰還は、ナビゲーションシステムとそのバックアップに依存しています。六分儀ナビゲーション（Sextant Navigation）では、将来の探査ミッションにおいて、携帯型六分儀が緊急ナビゲーションに役立つことが実証されています。グロバーと同様に、NASAの宇宙飛行士セリーナ・オナン・チャンセラーとアン・マックレイン、そしてESA宇宙飛行士アレクサンダー・ゲルストは、それぞれの専門分野を活かして国際宇宙ステーションでこのツールを使用しています。彼らは国際宇宙ステーションの移動速度を考慮し、追加の基準点を設け、機器を使う際に快適な体勢で自らを固定できる位置を見つけたり、タブレットで星図の文字版をテストしたりと、さまざまな調整を行いました。

NASAの宇宙飛行士セリーナ・オナン・チャンセラーが、Sextant Navigation研究で、国際宇宙ステーションのキューポラで六分儀を操作する様子。提供：NASA

「テストパイロットとして、私は、実際に使用する環境でシステムのテストを行うことの重要性を知っています」とグロバーは述べています。「国際宇宙ステーションへ何かを持っていき、それが問題なく使用できることを示すことで、地上でより長く使用できるものを作ることができます。この能力を持っていることが重要です。」

月を背景に、キューポラモジュールの窓から外を覗くNASAの宇宙飛行士ドン・ペティが映っている、地球の大気光の景色。提供：NASA

ROSCOSMOSの宇宙飛行士オレッグ・ノヴィツキーが、「Fluid Shifts」実験の眼の検査で眼底検査鏡を使用する様子。
提供：NASA

ヒトの研究：宇宙飛行士の生理機能

宇宙飛行士の健康管理を探査につなげる

国際宇宙ステーションでSPHERES Beacon Testerの点検を行いながら、チェックリストを読むNASAのマイケル・バラット宇宙飛行士。バラットは、軌道上で経験した視力の変化に対応するため、軌道上で少し強めのメガネをかけている。
提供：NASA

NASAの宇宙飛行士マイケル・バラットは、2009年に国際宇宙ステーションで6ヵ月間のミッションに参加しました。日が経つにつれ、バラットと同僚のカナダ宇宙庁（CSA）宇宙飛行士ロバート（ボブ）・サースクは、軌道上実験室で行われる科学研究の手順書を読むのに苦労するようになったのです。若干度が強めの眼鏡をかけることでこの問題は解決しましたが、医師である2人は、さらに深く調べることにしました。

その結果、「宇宙飛行関連神経眼症候群（SANS）」と呼ばれる症状が発見されたのです。典型的な症状としては、視神経が網膜に入る部分である視神経乳頭の腫れや、眼の形が平らになることが挙げられます。研究者らが宇宙飛行を振り返ったところ、初期の宇宙飛行にも特定のSANSの徴候がみられたことが分かりました。

これまで500人以上の人が宇宙へ行きましたが、長期間のミッションで滞在した人はごくわずかです。その点で、バラットやサースクのような宇宙飛行士のデータや、彼らの身体に起きた変化は貴重な情報です。宇宙飛行士の身体は、宇宙という特殊な環境に順応するため、さまざまな適応を行います。

「無重力になるとすぐ、すべての物が浮遊し始め、特別な感覚に襲われます。それはとても不思議な感覚で、生理学的には公園のジャングルジムでさかさまにぶら下がっているような感覚です」とNASAの宇宙飛行士で生理学者であるジェシカ・メアーは述べています。

SANSのモニタリングにより、国際宇宙ステーションのクルーの70%近くが少なくとも1つの症状を経験していることが明らかになりましたが、個人により顕著なばらつきがみられます。宇宙にいる間だけこれらを経験するクルーもいれば、地球帰還後もずっと症

カナダ宇宙庁（CSA）の宇宙飛行士ボブ・サースクが、クルー仲間のESA宇宙飛行士フランク・デ・ウィネのESA実験Neurospatを手伝う様子。この研究では、三次元飛行と視覚能力が微小重力下の長期滞在によりどのような影響を受けるかを評価するため宇宙飛行士の脳内活動が記録された。提供：CSA

状が残るクルーもいます。

現在、研究者らはより長期間のミッションに備えて、SANSやその他の神経学的影響の根本的な原因や長期的な健康影響について研究しています。NASAの流体シフト（Fluid Shifts）研究では下半身陰圧負荷システムを評価し、SANSの原因として疑われている微小重力下での頭部方向の流体移動の影響を測定しました。

「このことを熟考せずに火星への長期飛行に向かおうとしていたのだとすると考えものです」とバラットは述べています。

その他、ESA（欧州宇宙機関）のNeurospat and Circadian Rhythms研究やイタリア宇宙機関（ASI）のAcoustic Diagnostics実験などでは、宇宙飛行の他の神経学的影響についても調べられています。

Neurospatは、宇宙飛行士がバーチャル・リアリティ環境で作業をこなす際の脳波を記録し、宇宙飛行士が最初の宇宙滞在中に「スペースフォッグ」と呼ばれる全般的な認知機能低下を経験したという報告を裏付けるデータであるかどうかを確認しました。研究者らは、飛行前と比べて宇宙飛行士がより多くのエラーを起こし、飛行中および飛行後の反応が遅くなったことを報告し、これらの変化を緩和するための対策や戦略の開発に取り組むことができるようになりました。概日リズムの研究では、長期間の宇宙飛行によって宇宙飛行士の概日リズムや日常のリズムが狂うかどうかを調べ、不規則な明暗サイクル、微小重力による身体組成の変化、身体活動の低下などの要因がどのような役割を果たすかを検証しました。

音響診断では、宇宙飛行士の聴覚を観察し、騒音や国際宇宙ステーションの微小重力環境による有害作用があるかどうかを判断します。

ROSCOSMOSのAlgometry研究では、宇宙飛行士の痛みの閾値が宇宙でどのように変化するかを調べました。予備的なデータでは、宇宙飛行中に閾値が上昇する可能性があることが示唆されています。これらのデータは、痛みの発生に関する基本的な側面の理解に貢献し、宇宙や地上で痛みを緩和するための方法の最適化に役立つ可能性があります。

月や火星への今後のミッションで将来のクルーたちがどのように適応していくのかということについては、まだわからないことが数多く残っています。国際宇宙ステーションで6ヵ月間にわたり生活することの難しさは、火星で3年間ミッションを遂行することの難しさとは異なるものになるでしょう。NASAヒューマン・リサーチ・プログラム（HRP）では、クルーの健康に対する5つの主要な危険（宇宙放射線、隔離と拘束、地球からの距離、重力場、過酷な閉鎖環境）について分類し、その頭文字をとってRIDGEと呼んでいます。

「さらに先へ進む前に、まだ理解しておく必要のある最大の領域の一つは、放射線が人体に与える影響です」とメイヤーは述べています。「国際宇宙ステーションのような地球低軌道にいる時でさえも、私たちは多くの宇宙放射線を浴びています。さらに進んで月や火星に行くとなると、そのレベルはさらに高くなるでしょう。」

国際宇宙ステーションでの画期的なヒトの研究プロジェクトの1つであるNASAの双子研究（Twin Study）は、認知から体液移動、遺伝子発現まで、宇宙飛行士の健康に関する非常に多くの分野がカバーされています。

双子研究（Twin Study）では、全米から10の研究チームが集まり、宇宙飛

宇宙飛行の精神的リスクを理解する

宇宙飛行士の身体的健康に関する研究に加え、科学者らは、国際宇宙ステーションと地球低軌道を使って、宇宙での長期ミッションの心理学的・行動学的影響に関する研究も行っています。

地球から離れた場所での隔離は、月や火星へ向かうミッションのクルーを選抜する際、特殊な課題を生み出す要素です。このような制限された環境へ、より遠く、より長期にわたって移動するとなると、クルーの選抜や準備にはさらなる注意を払う必要があります。ミッションの成功には、ミッションの長さや距離に関する力学が重要であり、クルー間のコミュニケーション、モラル、理解が欠かせません。NASAのヒューマン・リサーチ・プログラム（HRP）では、国際宇宙ステーションのクルーの行動的健康の標準的な評価が、将来の探査クルーが月や火星に着陸した際のパフォーマンス能力の予測にどのように役立つかを研究しています。

クルーの行動的健康に関する研究例には、他にも以下のような領域が挙げられます。

- 言語の学習や新しい医学スキルの学習など、関連性があり意義のある活動に従事することは、うつを回避し士気を高めることが分かっています。
- HRPでは、国際宇宙ステーションで宇宙庭園の手入れをすることにより、新鮮な食料源や空気の清浄化に役立つだけでなく、行動学的な健康効果も期待できるとして、その効果を検証しています。
- CNES（フランス宇宙庁）とESA（欧州宇宙機関）の共同研究Immersive Exerciseでは、国際宇宙ステーションのエクササイズ用自転車にバーチャル・リアリティ環境を備えることにより、宇宙飛行士の運動へのモチベーションが高まり、毎日数時間に及ぶトレーニングでより良い体験ができるかどうかについて検証しています。
- 研究者らは、地上の類似物を用いて、クルーが比較的狭い空間に閉じ込められる長期間のミッションで、どの程度のプライバシーと居住空間が必要になるかを研究しています。

この国際宇宙ステーションでの研究を活用して、科学者らは今後の宇宙探査クルーが生き残るだけでなく、宇宙旅行ミッションで健康を維持できるようにすることを目標としています。しかし、これと同じ研究と体験が、地上での社会的孤立にどう対処するかということにも応用できます。例えば、チリで33人の鉱山労働者が地下に2ヵ月以上にわたり閉じ込められていた際、NASAの心理学者たちは、救助に向かったチームの一員でした。国際宇宙ステーションのような狭くて孤立した空間に、クルーの精神的健康状態を保ちながら滞在させた経験が、鉱山労働者たちが自身の孤立感に対処し、グループダイナミクスを予測し、生じるかもしれない緊張感を管理するのに役立ちました。この時の心理学者たちは、閉じ込められた鉱山労働者たちに家族と定期的に連絡を取るよう推奨し、危機のさなかから、大切な人たちが自宅へ戻った後の適応期間に至るまで、家族に対してカウンセリング支援を行いました。

ESAの宇宙飛行士トーマス・ペスケが、打ち上げ前に地上で「Immersive Exercise」実験用の機器をテストする様子。提供：ESA

NASAのEngineering and Safety Center主任エンジニア クリント・クラッグ（右）が、チリの鉱山災害時救助作業副隊長レネ・アギラー（左）と相談する様子。提供：ペナフィエル 在チリ米国大使館

行の危険に1年間にわたって曝された人にどのような影響が生じるかを観察しました。

2019年に発表された研究結果では、2015年から2016年の1年間近くを軌道上で過ごした宇宙飛行士スコット・ケリー（現在は引退）のあらゆるサンプルや測定結果が、地球に残った彼の一卵性双生児の双子の兄弟で、引退

していた宇宙飛行士のマーク・ケリーのものと比較されました。結果には次のような内容が含まれていました。

- スコットのテロメア（染色体末梢部位。通常、年齢とともに短くなる各DNA鎖の両端にある特別な部位）の伸展の関する観察結果。

- 宇宙で投与したインフルエンザワクチンに対し、スコットの身体が適切に反応したという確認。これにより、長期のミッションでワクチンが必要になった場合、免疫系が適切に反応するというNASAの確信が強まった。

- 遺伝子発現における軽微な変化を裏付けるデータ。このような変化のほとんどは、スコットが地球へ帰還してから元に戻ったが、6ヶ月経過しても小さなサブセットは残った。この研究結果は、人間の身体がいかに宇宙に適応したかという実証に役立つ。

総じて、双子研究（Twin Study）では、宇宙飛行環境によって作り出される多様な変化に対し、人間の身体がいかに適応できるかという耐久力が実証されました。

NESAの宇宙飛行士ルカ・パルミターノが、国際宇宙ステーションで聴覚検査を行う様子。音響診断実験では、飛行前後と飛行中のクルーの聴覚を検査する。提供：NASA

双子研究（Twin Study）の結果は、地球でのストレス関連の健康リスクについて、新たな治療法や予防対策の開発に活用することができるかもしれません。例えば、テロメア研究では、老化や病気の影響を緩和する取り組みを改良したり、タンパク質研究では、脳外傷に関する研究について何らかのヒントが得られたりする可能性があります。

微小重力環境もまた、血圧制御や血管構造を変えるもので、酸素を豊富に含んだ血液の、脳や身体全体への供給維持において、深刻な結果を招くおそれがあります。CSAでは、宇宙飛行士における血管の変化を研究するため、Vascular、Vascular Echo、Vascular Aging実験を主導しており、今後の長期ミッションで宇宙飛行士の健康を維持するための効果的な対策を開発されることが期待されています。

NASAの宇宙飛行士スコット・ケリー（右）は、ロシアの宇宙飛行士ミハイル・コルニエンコと地上のモスクワからのサポートのもと、下半身陰圧装置を装着して眼科測定を実施。このデータ収集は、ケリーの1年間の宇宙滞在中に、双子研究をはじめとする多くの人類に関する研究を支える重要な情報を提供した。提供：NASA

データは、動脈が分厚くなったり硬くなったりするものを含め、老化のような変化が、多くの国際宇宙ステーションクルーの体内で加速していることを示唆しています。クルーの高度超音波研究による直近の研究結果でも、動脈の壁の厚みが増加していることが示されています。

「地上では、II型糖尿病を患っている人々の動脈は厚めです。これは、グルコースが食後しばらく高い値を維持し、そのグルコースがのちに動脈内壁のタンパク質と結合し始め、それによって硬さが増すためです」とウォータールー大学（オンタリオ州）のリチャード・ヒューソン博士は述べています。

インシュリン耐性と同様の影響が、本来なら健康的で身体も引き締まってい

るクルーに見られる血管の老化の兆候の要因となっている場合があります。可能性として考えられる他の理由としては、骨量の減少に関連したカルシウム沈着や、放射線による酸化ストレスが挙げられます。どちらの影響も双子研究（Twins Study）に詳細に記録されており、血管老化（Vascular Aging）研究では、今後も評価が行われていきます。このような動脈の変化の原因となる仕組みを明らかにすることで、地上の高齢者の多い地域で老化や循環器疾患を遅らせるための洞察が得られる可能性があります。

CSAの別の研究MARROWの結果では、微小重力は、宇宙貧血として知られる、宇宙飛行士における赤血球の減少の主な要因であることが示されています。地球よりも宇宙の方が赤血球の減少率が高く、この変化が宇宙ミッションの期間中長く続いていたことが分かっています。宇宙での滞在時間が長いと、この症状もそれだけ悪化することが分かりました。赤血球の喪失は、宇宙飛行士らが地球へ帰還すると激減しました。このような研究結果は、宇宙飛行士らの健康管理や、より安全な宇宙探査を保証するための対策の強化につながります。

ROSCOSMOSの研究Cardiovectorでは、国際宇宙ステーションクルーの心臓血管を健康のもう一つの指標として、大動脈内の血圧と圧力波の広がりに焦点を当てています。データによると、微小重力環境と飛行前・飛行後の脈波の広がりが一定であることが示されました。

「私たちは地球低軌道を理解するためだけに研究しているのではない。月や火星と類似しているものとして研究しているのだ」と、HRP主任科学者スティーブン・プラッツは述べています。

ストレス要因が人間の身体にどのように影響するのかを研究し、理解することが、地球低軌道より先の領域に展開するミッションにおいて宇宙飛行士らの健康とパフォーマンスを保証するために必要です。

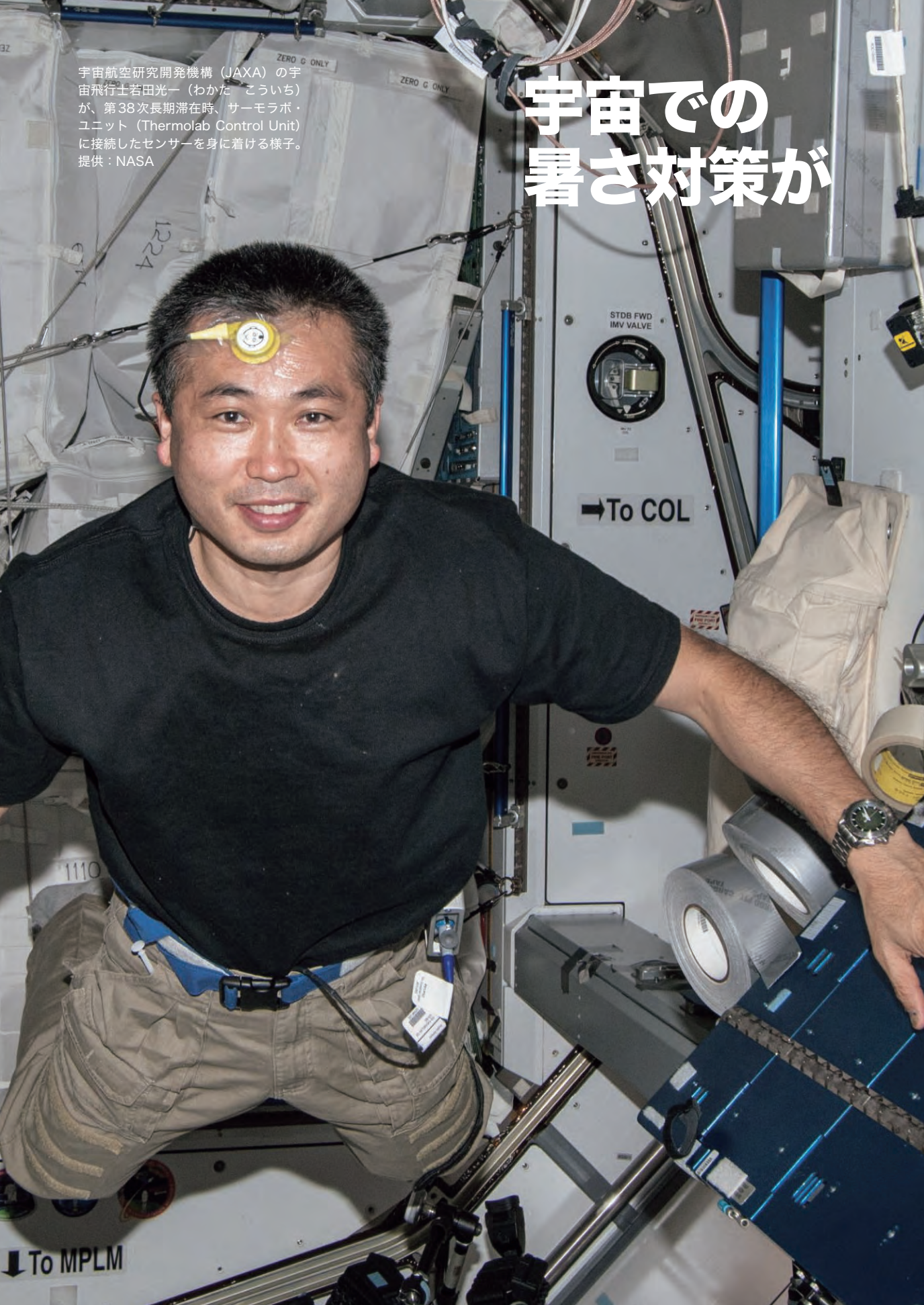
「私たちは地球低軌道を理解するためだけに研究しているのではない。月や火星と類似するものとして研究しているのだ」とHRPの主任科学者であるスティーブン・プラッツは述べています。

このような人類の研究活動とその他の多くの未来へ向けたプロジェクトはすべて、地球上および宇宙での生活向上に役立っています。有人宇宙探査における人間の要素を理解することで、新たな限界に挑戦し、これまで以上に宇宙の奥深くへの冒険を可能にするのです。

NASAのジェシカ・メアー宇宙飛行士は、CSAの血管エコー研究のために超音波検査を実施した。この検査は宇宙滞在時と地球帰還後のクルーの血管と心臓の変化を調べるものである。提供：NASA

カナダ宇宙庁（CSA）の宇宙飛行士デヴィット・サンジャックが、MARROW研究で、吐き出した呼気、空気、血液サンプルを採取する様子。提供：NASA

宇宙での暑さ対策が



宇宙航空研究開発機構（JAXA）の宇宙飛行士若田光一（わかた　こういち）が、第38次長期滞在時、サーモラボ・ユニット（Thermolab Control Unit）に接続したセンサーを身に着ける様子。
提供：NASA

地上の乳幼児や患者の安全を守る

地上の新生児医療に役立つスピンオフ

ESA（欧州宇宙機関）のサーモラボ（Thermolab）研究用に開発された体温計測技術が、地上に変化をもたらし始めています。国際宇宙ステーションでは、地上よりも運動時の深部体温上昇が速く、2009年からクルーの体温調節と循環器系の適応を調べる実験が行われています。

当初の研究目標は、無重力に対し体温パターンがどのように変動するかを調べることでした。ドイツの企業Dräger社が研究用に開発した専用のセンサーは、地上で商品化されています。この装置は、保育器や手術時の患者をモニタリングするため、多くの診療所で導入されています。

また、ケニアやブルキナファソでは、熱波が農家にどのような影響を与えるかという研究でも使用されています。地球での他の用途としては、消防士や戦闘機のパイロットなど、極端な条件下で作業に従事する人たちの疲労の兆候をモニタリングするなどの応用が考えられます。

そして、宇宙飛行士の健康状態の把握にも貢献しています。宇宙での熱除去の問題をさらに深刻にしているのが、サーモラボの研究代表者ハンス・クリスチャン・グンガが"宇宙熱"と表現した驚くべき発見です。

「最初の2ヵ月で、宇宙飛行士の体温は1度上昇して38℃になり、時にはもう少し高くなりました」とグンガは述べています。

炎症と併発すると、この体温上昇は危険な場合があります。幸運にも、国際宇宙ステーションでの研究が、今後のクルーの安全を守るためにこのような変化を理解し監視することに役立っています。

NASAの宇宙飛行士ダン・バーバンクがサーモラボのデータを取りながら、VO2maxのセッション時にVO2maxのセッションでCEVIS（防振安定化機能）付きサイクルエルゴメーター（Cycle Ergometer）を使って運動する様子。提供：NASA

国際宇宙ステーションの研究で開発された技術に基づく身体装着型の使い捨てセンサー「Tcore」は、患者の額に貼るだけで使用可能。提供：Dräger

スペースファーマーに

NASAの宇宙飛行士マイク・ホプキンスが、2021年1月14日、国際宇宙ステーションのNASA野菜生産システム（Vegetable Production System）Veggieでパクチョイを移植する様子。提供：NASA

なりたい？

軌道上で植物を育てる方法を学び、人が他の惑星で暮らす準備を整える

国際宇宙ステーションで植物の実験を行っていたNASAの宇宙飛行士マイク・ホプキンスは、一部の植物の調子が良くないことに気づきました。粘土質の培地と肥料を入れた特別な「ピロー（枕）」に植えていたカラシナの調子は良かったものの、一部のレタスの調子が悪くなっていました。「アウトレジャス」レッドロメインと「ドラゴン」レタスの種は発芽が遅く、他の植物よりかなり遅れて育っていました。収穫までに追いつくことはないでしょう。

ケネディ宇宙センターの科学者からの識見を得て、ホプキンスはNASAのBiological and Physical Sciences（BPS）が担当する野菜生産システム（Veggie）内で、初の移植を行いました。良く育っている植物のピローから余分な芽を取り除き、それを育ちが良くない2つのピローへと移植しました。

地上では、このような不安定な状態でこの移植を行うことはリスクが高く、NASAが宇宙実験で試みるようなことは決してありませんが、移植は成功しました。移植した植物は生存し、ドナーのケールやパクチョイとともに育ちました。

人類が月や火星への長期ミッションを計画する際、宇宙に滞在する数週間、数ヵ月、あるいは数年間のあいだ、クルーがどのようにして食物を確保するかということが重要なファクターになってきます。宇宙で食物を育てることができたら、どうでしょうか？

植物は、長期間保存により質や栄養価が下がってしまうような出来合いの食品を補う重要な栄養源になることができます。地上の研究者と国際宇宙ステーションのクルーたちは、さまざまな作物や機器でテストすることにより、このアイデアを検証しています。植物の移植をどのように行うかといった、予期しない驚きの発見が得られることがあります。

「この偶然の移植の成功はとても重要になってくるでしょう。今後の開発において多くの可能性を開いてくれます」と宇宙作物生産計画の科学者でVEG-03Iの科学部長を務めるマット・ロメインは述べています。植物が育つのに必要な水やりから十分な採光と空間の確保まで、宇宙環境下で植物を育てるには多くの問題が伴います。

宇宙で種を植えるという単純なことでさえ、よく知られている技術を新たに応用する必要があり、技術的な挑戦でした。ホプキンスは、口臭予防のフィルムのように水に溶けるフィルムを使い、簡単にレタスの種を植えることができました。フロリダ大学の園芸科学教授で生物工学・研究学際センター（Interdisciplinary Center for Biotechnology and Research）ディレクターであるアンナ・リサ・ポールなどの研究者は、国際宇宙ステーションの初期から、宇宙が植物に与える多くの課題を克服するために研究を続けています。

「地上で実験を行う場合、多くの実験回数と実験を行う大学院生が必要であり、予期しないことが起こることもあります。しかし、国際宇宙ステーションで実験を行う場合、その実験は1回目で成功しなければならないだけでなく、無重力環境下の宇宙飛行士がメンテナンスや収穫やデータ収集を行う必要があります」とポールは述べています。

複数の宇宙機関が、何十年にもわたり国際宇宙ステーションでの植物研究を実施してきました。宇宙航空研究開発機構（JAXA）が「きぼう」日本実験棟で実施した袋型培養槽技術による栽培（Bag Culture）実験では、レタスを使って無菌の袋型培養槽内での栽培方法の工学的実証を行っています。ROSCOSMOSのラステニア（Rasteniya）実験では、宇宙での植物の成長、発育、繁殖の様子を、国際宇宙ステーションのロシアセグメントで17回にわたり研究しました。NASAはレタスや大根などの植物の栽培に成功し、遺伝子発現から辛みまですべてを分析することで宇宙での反応を研究しています。NASAのPlant

NASAの宇宙飛行士マイケル・ホプキンスが、国際宇宙ステーションで育てているエクストラドワーフパクチョイの香りをかぐ様子。この植物は将来の月や火星へのミッションで宇宙飛行士が活動を維持するための宇宙農業を研究しているVeggie研究用に栽培されたもの。提供：NASA

ASAの宇宙飛行士ベギー・ウィットソンがAdvanced Astroculture の大豆の植物育成実験を観察している様子。提供：NASA

Habitat-04実験は、Advanced Plant Habitat（APH）で唐辛子を育てる過去の実験に基づいていました。この実験は、これまでで最長の植物実験となっており、国際宇宙ステーションで137日間の育成に成功しています。

種子の研究は、Materials International Space Station Experiment（MISSE）計画の一環として、国際宇宙ステーションの外部でも行われるようになりました。MISSE-SEED実験では、11種類の作物とモデル植物の種子を８ヵ月間、宇宙環境に晒しました。これは、長期間の宇宙曝露が種子の品質と保存に及ぼす影響を調べるために行われました。この知見は、人類がいつか火星を探査する際に役立つだけでなく、具体的な植物の環境への反応をより深く理解することにつながることから、地球上の農業にも利益をもたらすでしょう。

重力の変化や宇宙環境は、植物の育ち方や収穫量にも影響する場合があります。植物が重力を感知する仕組みの1つに、細胞内のカルシウムの変化があります。JAXAでは最近、このカルシウム値が微小重力によってどのように変化するかを測定する実験（Plant Gravity Sensing）を国際宇宙ステーションで行い、宇宙で食料となる作物の栽培方法を改善する手がかりを得ました。

一連の実験では、植物がどのように重力を感知するのかを理解するための植物細胞小器官の研究から、重力などの物理的ストレスに対する反応を制御する遺伝子の研究まで、あらゆる研究が行われました。

植物を溺れさせることなく、根に十分な水を与えることに関しても、微小重力が課題となってきます。NASAのVeggie研究など数多くの実験で、この目標を達成するためにあらゆる方法が試されてきました。ホプキンスが植物の移植を実施したVeggie設備は、６本の作物苗を収容できるシンプルで低電力の園芸室です。クルーはシリンジを使って植物のピローへ水を注入し、手作業で植物の世話と水やりを行います。白菜からケールや百日草まで、Veggieではさまざまな植物が育てられてきました。

NASAの植物水管理（Plant Water Management）研究では、植物栽培装置を次のレベルへ押し上げることを期待しています。この研究では、植物における水の輸送や摂取を制御するための受動的な手段を活用する方法を実証しています。これらの方法には、表面張力、濡れ性、およびシステム形状を利用して、流体供給メカニズムとしての重力の役割を置き換えることが含まれます。

また、国際宇宙ステーションのクルーは、ＡＤＶＡＳＣ（Ａｄｖａｎｃｅｄ Astroculture System）を用いて、これまで十分に理解されており基礎生物学の実験によく使われるモデル生物であるシロイヌナズナの２世代にわたる育成に成功しています。このシステムでは、温度、相対湿度、光、液体栄養の供給、二酸化炭素とエチレンの濃度など、植物の成長に必要な環境パラメータを正確に制御することができました。実験では、重力の変化により種子が小さくなり、二次枝や種子のさやの成長が異なることが示されました。

科学者たちは、ADVASCシステムを

地上の閉鎖空間において使用できる可能性があることを知り、このシステムを応用して地球の空気清浄に用いることにしました。もともと、スーパーの果物や野菜の保存可能期間を延ばすために使用されたこの技術は、瞬く間に、これを保管用セラーで使用しようとするワイン製造業者の関心を惹きつけました。あるワイン製造業者によれば、ADVASC由来の空気清浄システムは、保管条件を向上させ、より良いワインができるとのことです。

「宇宙で起きているこのような画期的な出来事や、それがワイナリーなどの予期しない場所で使われるようになっていることなどを考えると素晴らしいことです」とカリフォルニア州セントヘレナのSchweigerワイナリーのワインメーカーであるアンドリュー・シュワイガーは述べています。

複数の会社が、現在、SARS-SoV-2ウイルスの除去に効果的であることが示されたこの技術を空気清浄器に導入しています。このような会社では、パンデミックの際、大変多くの清浄器を生産・流通させました。

園芸には手入れが必要で、つまり、野菜を育てることにおいては、設備や植物以外のことが重要になってきます。国際宇宙ステーションに人がいることは、植物にとって大きなメリットであり、予期しない事態への対応においてはなおさらです。植物の移植を行うホプキンスから、トウガラシの花を手作業で受粉させるNASAの宇宙飛行士メーガン・マッカーサー、成長が困難になった際に国際宇宙ステーションの百日草の世話を主に行った元NASAの宇宙飛行士スコット・ケリーまで、植物が無事成長するためには、人間による世話が大変重要なのです。

宇宙飛行士が植物に恩恵を与えるだけでなく、緑もまた宇宙飛行士の行動的な健康や幸福にもプラスに働く可能性があります。多くのクルーが植物の世話は楽しくてリラックスできる活動であると報告しています。NASAの宇宙作物生産グループは、この点に関するデータを収集するために、現在、国際宇宙ステーションで野菜を栽培している宇宙飛行士に、それぞれ宇宙ガーデニングの経験についてのアンケートとっています。例えば、水菜を栽培しているクルーは、水菜の1ヵ月にわたる生育サイクルで2～3回アンケートに答えています。

左から右へ：NASA宇宙飛行士マーク・ヴァンデ・ハイ、シェーン・キンブロー、JAXA宇宙飛行士星出彰彦（ほしで・あきひこ）、NASA宇宙飛行士メーガン・マッカーサーが、国際宇宙ステーションで育てている唐辛子と一緒にポーズをとる様子。提供：NASA

「クルーたちは、自分たちで食べ物を育てることに大変な喜びを感じているようです」とケネディ宇宙センター（フロリダ州）NASA国際宇宙ステーション研究所の主任研究員であるハワード・レヴィンは述べています。

「国際宇宙ステーションでの典型的な活動から一時的に休暇を取っているような感覚で、宇宙飛行士らが自分の自由時間を使うことも珍しくありません。」

さらに宇宙飛行士らは、園芸に時間を費やすことで、新鮮な作物を食べる段階になるとワクワクすると言います。このワクワク感が、作物を食事で工夫して使用するなど宇宙飛行士らを促し、宇宙での生活の質を向上させ、意欲も刺激します。

マッカーサーは、ファヒータ牛、水で戻

NASAの宇宙飛行士ビクター・グロバーが、植物の発芽から収穫までを微小重力下で維持する将来的な手段としての水耕を研究する植物水管理（Plant Water management）実験の作業をする様子。提供：NASA

植物学者Lラシェル・スペンサー（左）と研究科学者ジェイソン・フィッシャーが、宇宙への打ち上げへ向けて重量測定を行う前に、NASAのSpace Station Processing Facilityで育てられたピーマンの茎を取り除く様子。提供：NASA

したトマトとアーティチョーク、そして国際宇宙ステーションで育った新鮮な唐辛子を使ったタコスも作りました。他の宇宙飛行士らもマッカーサーに倣い、唐辛子入りの宇宙タコスを作っており、新鮮な作物を食べることについて同様の楽しみが報告されています。

「火星への2年間のミッションの間、宇宙飛行士がスーパーマーケットに新鮮な野菜を買いに走ることはできなくても、野菜売り場と同じ匂いと感触のモジュールに浮かぶことができるのです」とホプキンスは述べています。「それはどんな宇宙飛行士にも笑顔をもたらすでしょう。」

ロシアの宇宙飛行士で第22次長期滞在クルーフライトエンジニアのマキシム・スラエフが、サービスモジュール内で、BIO-5 Rasteniya-2（Plants-2）実験の水菜を手に持っている様子。提供：NASA

人類は、宇宙環境下で少量の作物を育て始めたばかりですが、このような有機体に関する私たちの認識は、国際宇宙ステーションのおかげで大幅に高まっています。植物に関するこの知識が、宇宙旅行の限界を押し上げる上で重要なのです。

「海を渡る場合でも、太陽系を渡る場合でも、植物は私たち人間を探検家にし、ピクニックとして楽しむことの枠を超えさせてくれるものです」とポールは語ります。「植物が極端な環境や新しい環境にどのように対応するか、また、私たちがそれを地球外に持ち出したときに直面する困難の中でどのように成長するかを学ぶことが、私の原動力の1つとなっています」。

ESA（欧州宇宙機関）の宇宙飛行士アレクサンダー・ゲルストが、宇宙の種（Space Seeds）計画の一環として野花の種の入った袋の近くで浮遊する様子。種が地球へ帰還すると、12,500人以上のドイツの学生たちが、野花の種まき・観察を通して同プロジェクトに参加した。この計画は、学生たちが生物多様性を理解し、学生たちの宇宙探査や宇宙技術への関心を刺激することを目的としている。提供：ESA/DLR

植物研究が研究者の卵を育てる

学生による植物アウトリーチ実験

月や火星への将来のミッションで十分な食物を育てる際には、クルーたちの園芸の才が試されることになります。しかし、このような遠い彼方へと向かう前に、宇宙環境が植物の成長にどのような影響を与えるかということに関して、まだ知られていないことが数多くあります。このような課題に取り組んでいる科学者らは学生研究者を採用して次世代のクルーや科学者らを関与させています。

最近の宇宙の種（Space Seeds）計画ではドイツ全土から学校の学生たちを招いて、国際宇宙ステーションへ送られた野花の種を育て観察させています。ESA（欧州宇宙機関）とドイツ航空宇宙センター（DLR）の協力を通して、この計画では400人以上の小学生が集まり、12,500人以上もの小学3～4年生たちが発芽科学者になりました。

「彼らはこのことを一生忘れないでしょう」とドイツ航空宇宙センター（DLR、ボン）のプロジェクト主任研究者であるアレクサンドラ・ヘルツォークは述べています。

ESAの宇宙飛行士アレクサンダー・ゲルストもまた、種と一緒にビデオメッセージを送り、若い学生たちに多様性と惑星保全の大切さを教えています。ゲルストが種とともに地球へ帰還した際、各学校には、盲検試験用に2種類の種が送られました。1つは宇宙で曝露した種で、もう1つは地上に残った種です。どちらが国際宇宙ステーションへ送られたものか分からないまま、学生たちは両方のサンプルの観察結果を記録し、ドイツ宇宙局へ直接、ポスターやビデオや手紙などを送りました。

「ほとんどの学校で、国際宇宙ステーションへ送られた「宇宙の種」の方の成長が速く大きく育ったと報告されています。DLRの科学者らは、宇宙旅行が種に刺激を与えたのだと考えています」とヘルツォークは述べています。

この実験を再度行うことで、このような違いをさらに研究することができます。また、種子の遺伝的な差異を調べる研究は、次回の繰り返し実験時にヘルムホルツ環境研究センター（Helmholtz Centre for Environmental）で行われる予定です。

JAXAの宇宙飛行士野口聡一（のぐち　そういち）が、Tomatosphere研究用の袋をもってポーズをとっている様子。宇宙で浮遊したトマトの種を学生が育て、発芽率を測定する。このプロジェクトを通して学生は科学・技術・工学・数学（STEM）分野の道を志すようになる。提供：NASA

カナダ宇宙庁（CSA）でも、同様のTomatosphere™計画で、若い学生たちにインスピレーションを与えています。プロジェクトで何度も飛行する間に、トマトの種を育て、教室の中でその発芽率を測定している何千人もの学生たちからは、園芸や環境生物学を研究する科学者らにとって貴重な科学的データが送られてきます。

また、NASAのケネディ宇宙センター（フロリダ州）では、フェアチャイルド熱帯植物園（Fairchild Tropical Botanic Garden）と提携して、今後の宇宙探査に用いる食べられる植物の評価を行う機会が生徒たちに与えられています。「地球を越えて育つ（Growing Beyond Earth）」という名のこのプログラムでは、全米から300人以上の中高生クラスの学生を呼んで、国際宇宙ステーションのVeggie植物栽培室を模倣した専用の栽培室を使い、さまざまな種類の作物を育てています。学生たちは、複数の作物の実現可能性をテストし、NASAの生命科学者らにこのデータを提供しています。このデータは、今でも、どの植物を宇宙で育てるべきかを判断する材料として重宝されています。

ドイツの小学校3年生と4年生の学生が、宇宙の種（Space Seeds）研究のキックオフイベントで宇宙から帰還した植物の種を一緒に植える様子。参加校は2つの野花の種を受け取る。1つは国際宇宙ステーションへ送られたもので、もう1つは地上のもの。学生は、庭園で観察し記録し、観察結果をドイツ航空宇宙センター（DLR）へ報告することで、科学的思考を学ぶ。提供：experimenta gGmbH

Canadarm2ロボットアームに連結されたESA（欧州宇宙機関）の宇宙飛行士ルカ・パルミターノが、宇宙粒子検知器をアップグレードするため、3回目の宇宙遊泳時にアルファ磁気分光器（AMS：Alpha Magnetic Spectrometer）に搭載された新しい熱ポンプシステムを運ぶ様子。提供：NASA

宇宙で生活し働きながら学ぶ

国際宇宙ステーションでの長期滞在が深宇宙への人類の挑戦を支える

2019年、ESA（欧州宇宙機関）の宇宙飛行士ルカ・パルミターノは、子供なら誰でも（そしてほとんどの大人も）やってみたいと思う、宇宙から遠隔操作でローバーを運転するというミッションに挑みました。当時、パルミターノは国際宇宙ステーションに滞在しており、ANALOG-1と名付けられたこのミッションは、地上の建物内のコースを転がるロボット車両をどれだけうまく遠隔操作できるかを競うものでした。これは、月や火星、その他の惑星の上空を周回する宇宙飛行士が、同じような作業を行うときに役立ちます。

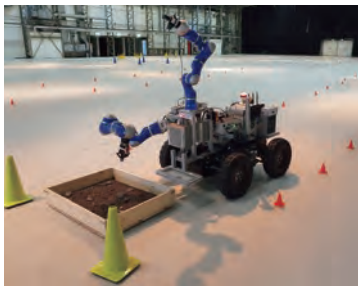
「非常に多くの宇宙機関が、惑星、特に火星探査においてこのようなシナリオを検討しています」とESAの科学者でANALOG-1実験の主任研究者であるウィリアム・キャリーは述べています。「このアプローチはこれらのミッションの科学的リターンを大幅に増やすことができるほか、火星に存在する生物やこれまでに存在した生命についての疑問に答える前に、人類が地表に降り立つことによる汚染の可能性を回避する方法を与えてくれます。」

20年以上にわたる国際宇宙ステーションでの実験により、人類が宇宙で生活し探査する能力が磨かれてきました。クルーが国際宇宙ステーションで活躍できるように、私たちは新しい技術を開発し、通信を改善し、何百回もの宇宙遊泳を行い、宇宙飛行士の健康と幸福について研究し、多くの国がミッションの運用を支援し協力する能力を高めてきました。

パルミターノの滞在の際、NASAの宇宙飛行士アンドリュー・モーガンと共に、科学的に価値がありながら故障している船外の機器、アルファ磁気分光器02（AMS-02 Alpha Magnetic Spectrometer-02）の修理も行いました。このプロジェクトでは、4年間かけて一連の宇宙遊泳を計画し、20以上の新しい高精度ツールを開発する必要がありました。このような宇宙遊泳のツールや手順の作成は、月や火星でのミッションで行う宇宙遊泳チームの育成に役立ちます。

「このようなスキルこそ、惑星へ行く準備として身に付けるべきなのです」とAMS宇宙遊泳修理プロジェクトマネージャーのタラ・ヨーキムは述べています。「我々が開発した使いやすい方法で、宇宙遊泳中にステンレススチール管を切断して新しい管を熱システムに接続するという作業を、クルーの安全を保ちながら行うことこそ、未来の宇宙遊泳者のためのプロセス作成に役立ちます。」

今日までNASAでは、国際宇宙ステーション外で200回以上の宇宙遊泳を成功させてきました。その多くの成功の鍵となったのが、カナダ宇宙庁（CSA）の象徴的なCanadarm 2でした。Canadarm 2は、17.6メートルのロボットアームで、軌道上実験室のアセンブリや、軌道上実験室の外にお



オランダの欧州宇宙研究技術センター（European Space Research and Technology Centre）付近のインターアクトローバー「ANALOG-1」は、ドイツの欧州宇宙飛行士センター（European Astronaut Center）を拠点とする代理の宇宙飛行士が管理している。コーンは、ローバーがサンプル地点に到達するためのルートを示す。提供：ESA

ける機器や宇宙飛行士の捕獲・移動に広く使用されています。パルミターノは、修理ミッションの際に、AMS-02の場所までこのロボットアームに乗って移動しました。

CSAでは、Canadarm3をNASAの次回のLunar Gatewayステーションに提供する予定です。Lunar Gatewayステーションは月の軌道を回っている前哨基地で、月面の長期滞在において重要なサポートを提供し、深宇宙探査のための準備地点として機能することになります。Canadarm3とGatewayは、NASAのアルテミス計画の重要な部分となります。

Canadarm技術は、IGARと呼ばれる画期的な医療用手術ロボットの基にもなっています。IGARは、MRIスキャナと合わせて使用することで、乳がんの腫瘍が大きくなる前に小さな病変を取り除くことができます。

Canadarm2が多くの国際宇宙ステーション活動の手足だとすれば、宇宙飛行士や地上のチームは頭脳と言えます。これらを合わせて使用することで、協力して修理を行ったり、実験を行ったり、あるいは国際宇宙ステーションでの作業が円滑に進むようにしたりできます。

協力の成功に欠かせないのは、もちろん良好なコミュニケーションです。

NASAのジョンソン宇宙センター（ヒューストン）では、国外のパートナーや国際宇宙ステーションの装置運用の統合センターとなっているマーシャル宇宙飛行センター（Marshall Space Flight Center）（アラバマ州ハンツヴィル）と緊密に連携して、研究を実施しています。

マーシャル宇宙飛行センターのエンジニアや技術者たちは、生命維持システムの開発・試験を行い、宇宙環境に関する新たな研究を実施することで、国際宇宙ステーションでの生活を持続可能なものにしています。

ジョンソンセンターとマーシャルセンターは24時間365日体制で国際宇宙ステーションや国外のパートナーと連携・調整を行うことにより、ミッションが安全に成功するように努力しています。

チームワークの重要性は、国際宇宙ステーションのクルーが船内の細菌のサンプルを採取し、そのDNAを国際宇宙ステーションでシーケンシングしていた2017年に明らかになりました。このときは、ちょうどハリケーンHarveyがヒューストンで猛威を奮っているときでした。マーシャルセンターの技術者たちは、ヒューストンの自宅に隔離状態になっている科学者らを、軌道上で実験を行っている宇宙飛行士ペギー・ウィットソンとつなぎました。

「国際宇宙ステーションでの科学活動はハリケーン・ハービーが来たからといって止まりません」とNASAの微生物学者サラ・ウォレスは述べています。「私は"なんてこと、私は宇宙からの未知なるものの最初のDNAシーケンスを見ているのね"と思いました。」

悪条件の中で協力し合いながら、科学者らは宇宙で発見された微生物を地球に送り返すことなく採取し、特定するという世界初のプロセスをウィットソンに指導したのです。

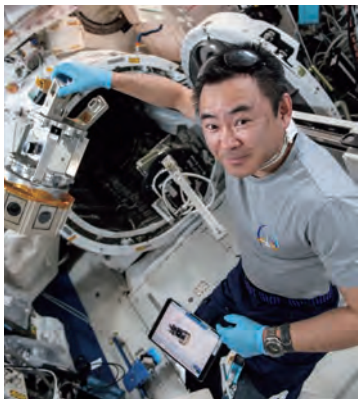
クルーのサポートを通して、私たちは、長期のミッションにおいて彼らの精神的健康とチームワークを守り強化する方法の理解に役立つ研究を行うことができました。研究者らは、孤立の影響、植物、食べ物のバラエティ、そしてクルーの精神的健康についてさらに学ぶことができました。

国際宇宙ステーションでのクルーの体験は、C-O-N-N-E-C-Tの開発にもつながっています。C-O-N-N-E-C-Tとは、クルーたちが自分のための時間を作り、心の健康を維持できるようにすることで、良い精神状態を保ち、最高のパフォーマンスを発揮できるようにするものです。

この作業は、地上と宇宙ベースの通信ネットワークシステムを使って行われ、宇宙放射線による障害やメッセージの送受信にかかる時間の遅延などへの対処するためパートナー宇宙機関の総合的な知識が活用されます。

国際宇宙ステーションに搭載されている通信システムの技術は、最近になって、地球へ送信される情報の速度が2倍になり、Gatewayでの類似の能力の下準備ができつつあります。この新

左から右:NASAの宇宙飛行士アンドリュー・モーガンとESA（欧州宇宙機関）のコマンダー、ルカ・パルミターノが、Questエアロック内で、アメリカの宇宙服と宇宙遊泳ツールの確認を行う。この二人は、アルファ磁気分光器（AMS;Alpha Magnetic Spectrometer）の熱管理システムのアップグレードを行うため、数回の宇宙遊泳を実施した。提供：NASA



宇宙航空研究開発機構（JAXA）の宇宙飛行士星出彰彦（ほしで　あきひこ）が、国際宇宙ステーションでの活動を撮影するため、「きぼう」日本実験棟で、映像バーチャル・リアリティ（VR）カメラを設置する様子。ISS Experience VRシリーズでは、地球の観客へ向けて、国際宇宙ステーションでのクルーのさまざまな活動を配信している。提供：NASA

NASAのマーシャル宇宙飛行センター（Marshal Space Flight Center）（アラバマ州ハンツヴィル）のペイロード運用統合センター（Payload Operations Integration Center）提供：NASA

たな速度により、国際宇宙ステーションでは、これまで以上に速くより多くの科学データを地球へ送信することができるようになりました。

他の宇宙船を活用することにより、国際宇宙ステーションの通信改善も行われています。宇宙航空研究開発機構（JAXA）のHTVワイヤレスLANデモンストレーション（HTV WLAN Demo）では、リアルタイムのワイヤレス動画転送が、国際宇宙ステーションと訪問中の宇宙船との間で実施されました。人間の補助が期待できないであろう今後のミッションにおいて、自律式ドッキング技術は重要となります。この実験では、国際宇宙ステーション付近の宇宙船から動画を受け取り、それを転送することで、国際宇宙ステーションにいる宇宙飛行士らに宇宙船の現在地を知らせました。ワイヤレスリンクは、約548メートルの距離で確立されました。

新しいタイプの動画も宇宙でテストされており、今後の深宇宙ミッションも撮影できる可能性があります。NASA、カナダの企業Felix & Paul Studios、TIME Studiosでは、国際宇宙ステーションにいる宇宙飛行士らが撮影した没入型映画体験Space Explorers: The ISS Experienceを開発しています。担当チームは、国際宇宙ステーションの科学と生活、そして宇宙遊泳を撮影するための専用カメラを設計しました。国際宇宙ステーションでの制作に使用されるバーチャル・リアリティ（VR）カメラ技術により、月や他の深宇宙目的地への今後のミッションで、高画質の映像を撮影・転送できるようになります。CSAは、Felix & Paul Studiosに対し、月での使用目的でこのカメラ技術のさらなる開発のために投資を行っています。

「今後、宇宙探査を記録する方法として、VRがデフォルトになるのは必然だと思います。媒体とストーリーが完璧にマッチしています」とFelix & Paul Studiosの共同設立者でクリエイティブディレクターのフェリックス・ラジュネスは述べています。「宇宙探査は、ぜひ体験したいと思うものです。そこにいたい、それを体験したい、と思うものであって、今私たちが国際宇宙ステーションで行っていることはすべて宇宙産業のための実演であり、宇宙業界で今後この媒体をどのように使用できるかということについて、エンターテイメント産業に対して行う実演なのです。」

国際宇宙ステーションでミッションを実施することで、クルーが太陽系の遠くまで行くフライトを成功させることができるようになるのです。

国際宇宙ステーションは、今まで試みられてきた中で最も野心的な国際協力です」と国際宇宙ステーション軌道飛行の20周年を記念するイベントで、NASA副長官のJジム・モーハードは述べています。

「我々が月へ行き、さらに火星へと進出する中で、科学、技術、そして人類のイノベーションが一体化してこそ、アルテミスは唯一無二の証明の機会を人類に提供してくれるのです。」

（下段から時計回りに）第65次長期滞在クルーフライトエンジニアのマーク・ヴァンデ・ハイ、ミーガン・マッカーサー、シェーン・キンブロー、トーマス・ペスケが2回の宇宙遊泳のサポートに向けて、ロボット工学訓練の一環として共同作業を行っている様子。提供：NASA

人間性を携えて

フライトエンジニアのビクター・グロバーが、白の飛行スーツを着て、キューポラモジュールの窓の前でポーズをとる様子。提供：NASA

地球での生活を向上させる技術や、その技術の使い道を、私たちは宇宙で開発しています。しかし、それよりも大事なのは、宇宙には世界中の人々をインスパイアする力があることです。自分の能力が許す限りの難題に取り組もうと思わせること。それが、有人宇宙探査が人類に最も貢献している点だと思います。

— NASA 宇宙飛行士 ビクター・グロバー

NASAのアームストロング飛行研究センターとのダウンリンク・イベントで、マイクを前に、NASAの宇宙飛行士セリーナ・オナン・チャンセラーに質問をする学生。
提供：NASA

宇宙と直接つながる

宇宙との対話を通して次世代にひらめきを与える

1983年11月28日、スペースシャトル・コロンビア号が打ち上げられ、元NASA宇宙飛行士のオーウェン・ギャリオット氏（アマチュア無線コールサインW5LFL）と彼のハム無線機が10日間、軌道上に設置されました。そのうちの7日間は、教室から世界の指導者まで、世界中のハムラジオオペレーターが、地球上のハムラジオ局を呼ぶギャリオットの声を聞いたのです。国際宇宙ステーションに搭載されたハムラジオのおかげで、会話は続いています。

国際宇宙ステーションのアマチュア無線プログラム（ARISS）は、世界各地の学生たちが、アマチュア無線の基本技術を学びながら、軌道上にいる宇宙飛行士らに直接質問をする機会を与えてくれます。このプログラムでは、現在までに、250,000人の参加者を国際宇宙ステーションと100人以上のクルーとつないできました。

ISS National Labの教育プロジェクトマネージャーのコートニー・ブラックが、フロリダ州リー郡の学生と国際宇宙ステーション滞在中のNASA宇宙飛行士セリーナ・オナン・チャンセラーとのISSアマチュア無線での交信時、学生のエミリー・ガンガーの前に立つ。提供：Andrew West/The News-Press

「国際宇宙ステーションの主な目的の1つは、地球での生活を向上させること。生物医学的観点や科学的観点だけでなく、教育的観点にも立ってのことです」とISS National Lab教育プロジェクトマネージャーのコートニー・ブラックは述べています。

ISS National Labで働くようになる前、ブラックは14年間にわたり教師の仕事をしており、教室では宇宙教育を行っていました。2018年の秋、彼女は、地区初の国際宇宙ステーションとの通信を手配し、フロリダ州リー郡の21人の学生たちが、国際宇宙ステーションにいるNASAの宇宙飛行士セリーナ・オナン・チャンセラーとライブで会話をしました。

当日まで、学生たちは何日もかけて準備をしました。すべての学生が正しいコールサインと伝え方を覚え、エネルギーと音波に関する科学の授業を受けました。

「教育者として、学生たちの成長と自信が垣間見えたことや、アマチュア無線のオペレーターたちが学生たちのために時間を費やしてくれる姿やその影響を見ることができて嬉しかったです」とブラックは述べています。

イベント当日、地域の人たちが、セリーナ・オナン・チャンセラーとともに8分間スポットライトを浴びる子どもたちを応援しに来てくれました。21人の学生全員が、宇宙と直接つながる機会を得ることができました。

「宇宙飛行士が仕事の合間を縫って学生たちのために時間を作り、みんながとても大事な存在なのだよということを伝えてくれたことは、本当に大きなことです。大変意義のあることです」とブラックは述べています。

その時の学生の1人が当時の高校3年生のエミリー・ガンガーでした。

国際宇宙ステーションと交信した当日、彼女は地元のニュース番組でこう話しています。「これが私の宇宙飛行士になるためのキャリアの第一歩となります。私はこの道を進み、これこそ私がやりたいことだ、と伝える瞬間です。さあ、スタートです。」

数年経った今も、ガンガーはそのキャリアを歩み続けています。彼女は今、フロリダ州のEmbry-Riddle航空大学（Embry-Riddle Aeronautical University）で学んでいます。

このような軌道上実験室との直接的なつながりは、世界各地の何千人もの学生にとって関心を高めるきっかけとなっています。そして、質疑応答は10以上の言語で行われました。

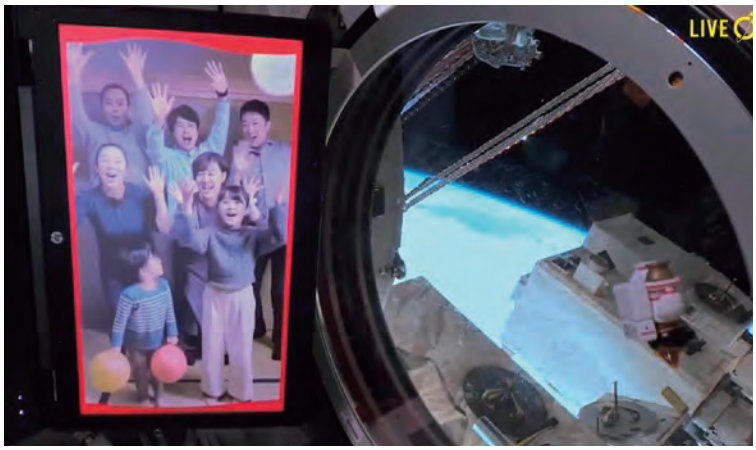
これらの成功は、NASAと連携して今回のプログラムを主導した国際的なパートナー、すなわちROSCOSMOS、カナダ宇宙庁（CSA）、宇宙航空研究開発機構（JAXA）、ESA（欧州宇宙機関）のおかげです。ARISSは、CSAと協力して、CSAの宇宙飛行士クリス・ハドフィールドとカナダの学校をつないだコミュニケーション・アンド・アウトリーチ（Communications and Outreach）2 – ARISSに取り組んでいます。

ARISSでは、ROSCOSMOSとも協力して、O Gagarine iz kosmosa（宇宙からガガーリンについて）計画にも取り組ん

でおり、人類初の宇宙飛行士ガガーリンの人生と功績に関する写真が送信されました。実験の時には2万枚以上の写真が送信されました。160回以上の通信セッションが、ロシアの学生たち、そしてフランス、エクアドル、ブラジル、日本、チュニジア、オーストラリア、インド、ギリシャといった国々のアマチュア無線オペレーターとの間で行われました。

ROSCOSMOSのShadow-Beacon研究では、教育的目的と科学的目的の両方で、アマチュア無線オペレーターの国際的なネットワークを構築しています。参加者は、無線信号の品質や、局の陰影や標高などの影響を分析し、効率的に作業を進めました。これにより、地上計測ネットワーク管理の適時性と有効性を高める新ツールを提供できました。

他のプログラムでも、宇宙飛行士と同じようにつながる機会を提供しています。ROSCOSMOSのRadioSkafプログラムでは、学生がメッセージや画像を録画し、宇宙へ送信します。スポット・ザ・ステーション（Spot the Station）がメールや電話でアラートを発することにより、家族が夜間に外に出て、頭上を通過する国際宇宙ステーションを見ることができます。ROSCOSMOSのアウトリーチ撮影プロジェクト「Velikoye Nachalo」を通じて、6,000人以上の学生が国際宇宙ステーションの動画にアクセスしました。ICE Cubes Hydra-3 Pulseは、博物館の来館者の心拍データを国際宇宙ステーションに送信し、小さなビーズが入った万華鏡を動かすというものです。



2021年元旦の「KIBOスタジオ」放送の際、地球を背景に「きぼう」日本実験棟の窓の隣に表示されるSNSで募ったみんなのKIBOメッセージ映像。提供：KIBO宇宙放送局

「私たちの仕事で最も大切なのは、次の世代にインスピレーションを与えることです」と、Telespazio Belgium SRLのISSおよび国際教育オペレーションコーディネーターのアラナ・バルトリーニは述べています。「私たちがこのプログラムでやりたいことは、学生たちが若いうちに、アクセス、興味、インスピレーションを与え、彼らが年を重ねるにつれて、より多くのチャレンジをするよう促すことです。」

「国際宇宙ステーションから送信される教育ダウンリンクは、何十万人もの学生と直接つながり、学校の教室と国際宇宙ステーションの宇宙飛行士らをライブでつないできました。JAXAの「KIBOスタジオ」は、ダウンリンクのコンセプトにイノベーションをもたらし、「きぼう」日本実験棟の端末を通じて地上と宇宙とのライブストリーミングのアクセス性を向上させています」。

「今では、スマートフォンを持っている人なら誰でも、国際宇宙ステーションとつながることができます」と「KIBOスタジオ」を開発した株式会社バスキュールのプロデューサー兼プロジェクトディレクターの南郷瑠碧子（なんごう るみこ）氏は述べています。

これまでで最大規模の「KIBOスタジオ」プロジェクトの1つでは、2021年新年の宇宙の初日の出を550万人以上にライブ配信しました。放送では、市民からの動画やJAXAの野口聡一宇宙飛行士との対談も行われました。このイベントを毎年行い、2022年の新年の放送ではさらに数百万人を対象とした放送を計画しています。

また、このプロジェクトは、コロナウイルスのロックダウン期間中、高齢者や学生、家族など、世界中の人々とのつながりを作るのにも貢献しています。

「このプロジェクトは、空を見上げる機会を提供しただけでなく、ともに同じ状況にいることを認識する機会も与えてくれました」とJAXAの新事業部でJ-SPARCのプロデューサーを務める高田真一（たかた しんいち）氏は述べています。「とても象徴的なことです。日本人だけでなく、世界中の人々

国際宇宙ステーションの未来のAVATAR Xロボットのイラスト。提供：avatarin Inc.

学生らが、国際宇宙ステーションにいる宇宙飛行士らとの中継に参加する様子。提供：NASA

のためのイベントでした。」

ライブイベントに参加できない人たちは、ISS National Lab主導のStory Time from Spaceを通してオンデマンドで国際宇宙ステーションとつながることができます。子供の物語を読む宇宙飛行士の姿が録画されていて、インターネットにアクセスすれば誰でも視聴できます。各動画は、何十万回も閲覧されています。中でも一番人気のオナン・チャンセラーが読む『If I Were an Astronaut（もしも私が宇宙飛行士なら）』はYouTubeで60万回以上も再生されています。このような動画は、いつどこからでも視聴することができ、次世代の長期滞在クルーにインスピレーションを与えています。

国際宇宙ステーションでの研究がイノベーションをもたらし続けると同時に、アウトリーチの取り組みも進んでいます。

JAXAが推進する民間企業のミッションの中に、Avatar-Xがあります。これは、JAXAとアバターイン（avatarin）社との提携プロジェクトで、民間人が地球から制御できる遠隔操作式のロボット打ち上げが計画されています。

類似のロボットはすでに地上の各施設で導入されており、日本の市民や学生が、まるで自分たちがその場にいるかのように、JAXAの各センターや水族館などの施設を遠隔で探索することができるようになっています。その次のステップがロボットを宇宙へ送ること、というわけです。

「私たちの目標の1つが、宇宙を一般の人々にとって身近な存在にすることです」とアバターイン社の主任オペレーティングオフィサーでAvatar-Xの開発者である梶谷（かじたに）ケビン氏は述べています。

2020年、国際宇宙ステーションで実施されたテストでは、東京に設置したブースに来た人なら誰でも、国際宇宙ステーションに設置されたロボットカメラの制御をリアルタイムで体験できるというイベントが開催されました。イベントの成功に基づき、同チームは現在、国際宇宙ステーションのより高度なロボットアバターシステムの打ち上げとテストへ向けて取り組んでいます。このようなプログラムは、宇宙のアウトリーチにおける次のステップである、月探査の道を切り開くことでしょう。

「将来的には、ロボットを実際に月や火星に降り立たせ、子供たちがバーチャルで歩き回ったり探査したりできるようにすることです」とアバターイン社の最高経営責任者である深堀昂（ふかぼり あきら）氏は述べています。

ARISSプログラムでも、将来的な機会が利用できるよう、将来を見越して準備を進めています。NASAのアルテミス計画の重要な構成要素であるGatewayに、アマチュア無線を設置することが計画されています。月の回ることになるこの多目的前哨基地は、人間の月面長期滞在において大きなサポートとなり、深宇宙探査における準備地点としての役割を果たすでしょう。

このような対話、読み聞かせ、動画、その他のプログラムは、人類による宇宙探査の次の段階へとすべての人類を連れて行くのです。

宇宙ステーション世代

ESA（欧州宇宙機関）の宇宙飛行士トーマス・ペスケが、視覚・赤外線カメラを装着したAstroPi Raspberry Piコンピュータの隣でポーズをとる様子。提供：NASA/ESA

次世代の科学者をインスパイアする アウトリーチチャレンジ

2000年以降に生まれた人たちは、宇宙に人がいるのが普通のこととして育ってきました。なぜなら国際宇宙ステーションが頭上をすでに回っている世界で育っているのです。宇宙がアクセス可能な存在で、世界各地の科学者らが集まって研究を行う場所であるという認識の世代、「宇宙ステーション世代」と呼ばれる世代です。この世代の多くが、すでに自分の研究を微小重力実験室で行ったことがあるというのは、もはや驚くべきことではないのかもしれません。

この状況を続けられるよう、多くの宇宙機関が、各国の学生が自身の実験を軌道上で実施できるようなミッションやプログラムを提供しています。

「国際宇宙ステーションでは、学生たちが宇宙に直に関われる独自の環境を提供しています」とISSおよび国際教育オペレーションズ・コーディネーター（Telespazio Belgium SRL for ESA：欧州宇宙機関）のアラナ・バルトリーニ氏は述べています。「彼らはシミュレーションを行っているだけではありません。本物の実験を設計して、宇宙で実施しているのです」。

European Astro Pi Challengeでは、学生たちが国際宇宙ステーションへ直接コード（プログラム）を送ります。2つのレベルの課題があり、下級生たちは湿度を測定して、宇宙飛行士らへ向けて個人的なメッセージを送ることができます。また上級生たちは、有意義な科学的価値があると思われる全ての実験を実施します。15,000人以上の学生たちが、2020年から2021年の間に、国際宇宙ステーションのAstro Pi Challengeを通してコードを実行しました。

「子どもたちは本当に想像力豊かです。『センサーが読み取った値はこれだから、温度はこれだ』というだけでは終わりません。さらに踏み込んで、批判的思考を駆使してその値がより大きな文脈で何を意味するのかということを考えます」とバルトリーニは説明します。

あるAstro Pi Challenge実験では、視覚的インジケーターを使わずに、国際宇宙ステーションのモジュールにいる宇宙飛行士らを検知できるかどうかを実験しました。

第2回「きぼう」ロボットプログラミング競技会の優勝者（左から）Settapun Laoaree、Kornpapop Sittirit、Tarit Witworrasakul　提供：Assumption College Thonburi

「学生たちは、私たちから教わらなくてもクルーを検知する方法を見つけたのです」とESAのSTEM Didacticsエキスパートであるaurora Technology B.V.のエルサ・サンチェス氏は述べています。「最初の方法は、Columbusモジュール内の湿度を測定するというものでした。Astro Piに誰かが近づくと、水蒸気が放出され、湿度が上昇するため、宇宙飛行士が近くにいるかも知れないということがわかるというわけです」。

他の宇宙機関でも、学生による宇宙でのコードチャレンジを実施しています。JAXAでは、アジア太平洋地域で暮らす学生が参加できる「きぼう」ロボットプログラミング競技会（KIBO-RPC: KIBO Robot Programming Challenge）というロボットコーディング・プロジェクトを2020年から実施しています。

「学生たちはチームを作って競技に参加することで、リーダーシップ、チームワーク、忍耐、そして創造性が育成されます」とJAXAの宮川弥生（みやがわ やよい）主任は述べています。「学生たちは、パソコンとインターネット環境以外の設備は何も要りません。世界中のどこにいようと、参加することができます。」

この競技会では、アジアの学生たちが、まずシミュレーターでコードを実行します。参加国・地域で代表チームに選抜されると、次のラウンドに進み、「きぼう」日本実験棟にあるNASAの船内ドローンロボットAstrobeeにコードが組み込まれ、制御のスピードと正確性を競います。

「Javaというプログラミング言語を今まで使ったことがなく、この競技会が初めてだったという学生もいます。2020年と2021年の優勝チームのリーダーたちは、それまでJavaを一度も習ったことがないと言っていました。それでも、一生懸命勉強してコードを作り、シミュレーションを実行してその仕組みを何度も勉強したのです。このような継続的努力を通して、試合に勝つことができたのです」と宮川氏は話します。

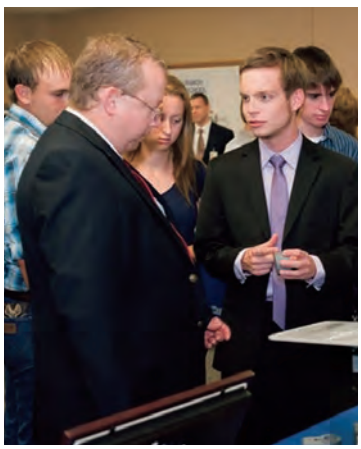
2021年の優勝チームのリーダーは、タイの学生のTarit Witworrasakulでした。高校生の彼は、大学のチームにも勝って、最終的にチームIndentation Errorを勝利へと導きました。

「このプログラムに参加したことで、STEMを勉強するという判断が正しかったのだと、一層自信を持つことができました。難しいだけでなく、楽しく、刺激的で、驚きや発見も多く、最終的な成果を見るとやりがいもありました」とWitworrasakulは述べています。

ISS船内ロボットAstrobeeを制御するためのプログラムを学生がつくるJAXAの「きぼう」ロボットプログラミング競技会で使用するAstrobeeと一緒にポーズをとるNASAの宇宙飛行士メーガン・マッカーサー。提供：NASA

NASAのHigh school students United with NASA to Create Hardware（HUNCH）プログラムでは、学生がNASA向けに、実際のハードウェアの設計・製作に参加する機会を提供しています。

HUNCHは2003年に始まり、当時、アラバマ州とテキサス州からそれぞれ1校が参加しました。現在では、40以上の州から250以上の学校が、設計とプロトタイプ作成、ソフトウェア、ハードウェア、飛行記事、動画、メディアと料理の6つの分野で参加しています。



サイプレス・ランチ（Cypress Ranch）高校（テキサス州サイプレス）の学生が、NASAのジョンソン宇宙センターで、職員にモックアップハードウェアを提示する様子。このハードウェアは、HUNCH計画の一環として、NASAトレーニングプログラム用に作られた。提供：NASA

このプログラムでは、国際宇宙ステーションの飛行用または訓練用の1,500以上のアイテムが製作されており、約2万個の飛行部品が誕生しています。この中には、NASAのDemo-2ミッションで飛行した4つのストレージロッカーや、宇宙で使える新しいテープディスペンサーが含まれています。

また、ISS National Lab主導のGenes in Spaceコンテストでは、7年生から12年生の学生らが国際宇宙ステーションにあるツールを使ってDNA分析実験を計画します。優勝に輝いた提案は、国際宇宙ステーションへと打ち上げられる研究プロジェクトとなります。

2018年の優勝を勝ち取った提案は、ミネソタ州の学生ら（アーティ・ビジャヤクマル、ミッシェル・ソン、デヴィット・リー、レベッカ・リー）によるものでした。彼らのプロジェクトでは、酵母のDNAで二重鎖切断が作られ、変異の修復が研究されました。この実験では、すべてのプロセスが国際宇宙ステーションで行われ、宇宙で初めてCRISPR-Cas9技術が使用されるなど、複数の歴史的転換点となっています。

この4人の学生らは、高校の夏休みの間に実験室ベースの研究を実施していて、参加できる科学アカデミーを探していました。

「宇宙飛行士は、がんのリスクが高いこ

ケネディ宇宙センターのNASA宇宙船アセンブリビルの外でポーズをとるGenes in Space-6のチームアーティ・ビジャヤクマル、ミッシェル・ソン、メンターのデニス・アタベイ、デヴィット・リー、レベッカ・リー。提供：Genesin Space

とを知っていたので、その理由が知りたかったのです」とビジャヤクマルは述べています。彼らは、過去の研究を調べ、その多くが、宇宙では研究されたことのなかったDNA切断修復に焦点を当てていたことに気づいたのでした。

「私たちは、そのすべてのワークフローを宇宙で行うことで、各プロセスを分離し、重力がDNA修復に影響を与えてしまうかもしれない地球へとサンプルを持ち帰ることなく、より詳細な情報を得ることにしました」と彼女は説明します。彼らは、NASAの科学者ら、航空会社Boeing、そしてバイオテック企業miniPCRと協力して、宇宙用の実験を準備しました。

ビジャヤクマルは現在、イェール大学の学生で、分子生物化学と生物物理学を学んでおり、Genes in Spaceでの体験がその動機となりました。

「それ以前にやっていたことと比べると全く違うことでした」と彼女は述べています。「宇宙生物学は地上での実験とは違い、地上では全く考慮しなくて良いことも考慮しなければなりません。国際宇宙ステーション用の実験を計画する方法を学び、プロの人たちが作業する様子を見られたことは、実際の科学そのものと同じくらい勉強になりました。」

宇宙飛行士ケイト・ルビンスが、小児がん患者の芸術作品でデザインされた宇宙服CORAGEを着用している様子。提供：NASA

芸術を新たな高みへ導く

世界中のアーティストたちを巻き込む

宇宙探査と創造性が交わる場所として、国際宇宙ステーションでは、特別な芸術的表現の場を提供しています。ビジュアルアーツから音楽まで複数の媒体によるプロジェクトで、頭上はるか彼方の場所から、多くの視聴者たちがインスピレーションを受けてきました。

患者たちのがん治療との闘いを、芸術を通して手助けするプログラム、スペーススーツ・アート・プロジェクト（Spacesuit Art Project）の一環となるプログラムでは、MDアンダーソンがんセンターの530人以上の小児がん患者、家族、サポートスタッフを招いて、キャンバスに絵を描きました。手作業で作られた作品を縫い合わせ、それぞれHOPE、COURAGE、UNITYという名前の3つの宇宙服に取り込みました。小児患者だけで作られたCOURAGE宇宙服は、国際宇宙ステーションへ打ち上げられ、がん研究者でNASAの宇宙飛行士ケイト・ルビンスが着用しました。彼女は、特別のダウンリンクを通して患者たちと会話を行い、子供のがん研究に対する関心を高めました。

MIT Media Lab Space Exploration Initiativeにおいても、世界各地のアーティストにEarthlings実験への参加が呼びかけられました。そして、国際宇宙ステーションの回転構造物に、芸術サンプルが採用されました。このプロジェクトでは、次世代のアーティスト、デザイナー、クリエイターが自身の作品を彼方の過酷な環境に送ることで、地球の人たちに刺激を与えました。

違うやり方でインスピレーションを与えたのが、ESA（欧州宇宙機関）の宇宙飛行士ルカ・パルミターノで、2019年に、彼は宇宙初のDJになっています。国際宇宙ステーションから、スペインのイビサ島にあるコンサート会場へ来ている観客へ向けて、12分間のDJセットをライブ放送しました。群衆にエネルギーを与えただけでなく、このプロジェクトは、若い観衆にESAや宇宙探査を知ってもらうこともできました。

MDアンダーソンがんセンターで行われた「宇宙飛行士とペイント」の日、NASAの宇宙飛行士ニコール・ストット（左）とリード・ワイズマン（右）とポーズをとる患者。写真非表示：NASA宇宙飛行士エレン・ベーカー。
提供：NASA/Lauren Harnett

物理学における新たなフロンティア

本当に素晴らしいと思うのは、両方の世界のいいとこ取りができることだ。最も理論的なアプリケーションから最も基本的でありふれたものまで、国際宇宙ステーションにはそのすべてがそろっていて、それが特別な理由なのだと思う。

— ESA宇宙飛行士 トーマス・ペスケ

国際宇宙ステーションに滞在中の第65次長期滞在クルー、トーマス・ペスケが撮影したオーロラ（タイムラプスの一部分）。
提供：ESA/NASA

『スタートレックヴォイジャー』の制服に身を包んだESA（欧州宇宙機関）の宇宙飛行士サマンサ・クリストフォレッティーが、国際宇宙ステーションのキューポラの窓から外を眺めながら、宇宙カップ（Space Cup）としても知られる新しいCapillary Beverage研究のエスプレッソを飲む様子。提供：NASA

流体の流れに身を任せて

微小重力における流体物理学

重力の霧は、地球で行われるすべての実験に存在していて、観察結果を見づらくし、理解を妨げています。ただし、国際宇宙ステーションへ向かうことでその霧は消えます。

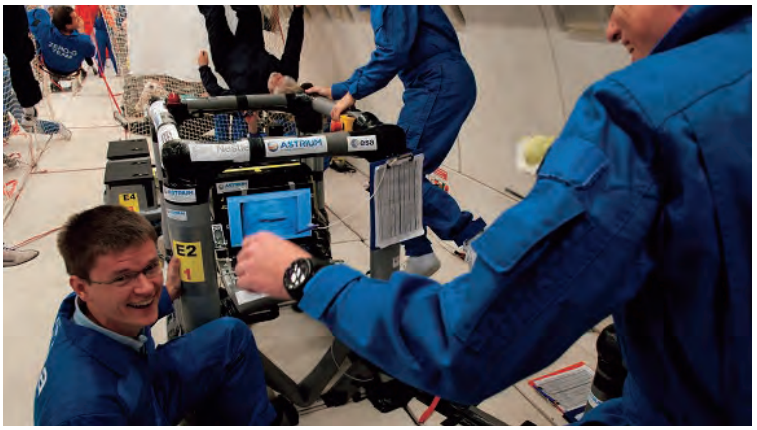
微小重力環境下では、全く新しいレンズを通して、金属の性質から原子まで、宇宙の物理学を研究することができます。国際宇宙ステーションでの研究は、地上での私たちの生活を変えることができる根源的な科学を浮き彫りにします。

「微小重力環境にいるということは、重力を取り除くことのできる環境にいるということです。ですから、地球ではあまり明らかになっていないプロセスについても、研究することができます」とESA（欧州宇宙機関）の科学者マルコ・ブライバンティは述べています。

コロイドとは、液体の中で保持される小さな粒子の混合物です。コロイドは、ミルクや濁水などの天然の混合物や、シャンプーや医薬品からサラダドレッシングといった製品にまで含まれています。コロイドの研究は、重力環境下では一部の粒子は浮かび、一部の粒子は沈むため、問題が生じます。微小重力環境下では、その問題がなくなることから、NASA、ISS National Lab、Procter & Gamble (P&G) が実施しているAdvanced Colloids Experiments (ACE) などによる研究が可能になりました。この一連の研究は、企業が毎日の生活の中で私たちが使用する製品を設計するのに役立ち、宇宙のさらに先まで探査することを可能にするような全く新しい創造物に繋がる可能性も秘めています。

タッチ式の香り放出技術が用いられている、P&GのFebreze Unstopables TOUCH Fabric Sprayの最新の設計は、このコロイド研究に基づいて材料を統合した初めての製品です。

「水のような見た目と感触の素晴らしい液体です」とP&Gの研究者マシュー・リンチは述べています。



ESA（欧州宇宙機関）の科学者セバスチャン・ヴァンサン・ボニュー（左）が、短時間の微小重力を使って国際宇宙ステーションで行う実験の準備と試験ができる放物線飛行で、泡の実験を行う様子。提供：ESA

「国際宇宙ステーションでの実験により、この設計を思い描くことができました。」

リンチは、P&Gの主要ブランドの2/3程度が、コロイド研究からメリットを受けることができ、それにより消費者向けの製品を改良することができると述べています。国際宇宙ステーションでの研究は、同社で3つの新しい特許に繋がっています。リンチは、Downyの柔軟剤など、どの家庭にでもあるような商品について、生産コストを1%削減したり、保存有効期限を若干長くしたりするだけでも、大変有益であると述べています。P&Gの製品は、地球人口の半分以上にあたる推定48億人の人々に使用されています。

「P&Gの行った宇宙実験の成功は、説得力のあるビジネスインパクト以上の意味を持っています」とリンチは述べています。「さらに重要なことに、宇宙で学ぶことは、多くの人々の役に立ちます」。

Delta Faucetなどの他の企業でも、国際宇宙ステーションの物理学研究を利用して、自社製品に役立てています。

同社のDroplet Formation実験では、ISS National Labと協力して、微小重力を使い、Delta FaucetのH2O kineticシャワーヘッドの水流と水滴の形成評価を行い、性能向上や使用感の改善、さらには水やエネルギーの節約に役立てています。

ESAでも、数々の流体実験が実施されており、沸騰、熱伝導、液体流動の理解に大きく貢献しています。FOAM実験では、泡のサイズ、転移動力学、濡れた泡のその他の特性が研究されています。重力下では、泡はすぐに壊れてしまい、地上での研究は困難を極めます。

「地球では、液体は排水されます。そのため、気泡の間をガスが通る際に生じる粗大化のような他の影響が見えにくくなってしまいます」とブライバンティは述べています。

洗浄用製品から食品や医薬品まで、個体や液体の泡はさまざまなところで利用されています。泡の基本をよりよく理解することで、このような業界における泡の制御やプロセス設計能力を向上させることができます。

「私たちは、特異な環境下で、これまでに行ったことのない新しい実験を行うことで、新しいことを学ぶことができます。新しいことを学んだら、それを地球や宇宙で新しく応用することができます」とブライバンティは説明します。

NASAの宇宙飛行士シャノン・ウォーカーが、Packed Bed Reactor実験（PBRE）のハードウェア部品を設置する様子。PBRE研究では、微小重力において、ろ過梱包材中で液体とガスがどのような挙動を示すかを研究する。この研究により、今後の宇宙探査ミッションでより少ないエネルギーで、より効率的且つ軽量の水回収生命維持システムの設計が可能になるかもしれない。提供：NASA

ESAのRUBI実験では、全く異なるタイプの気泡について分析を行っています。沸騰中に形成する気泡です。重力がないと、沸騰はスローモーションで発生し、より大きな気泡が生まれます。

RUBI実験では、科学者らが、地上では早すぎる、あるいは小さすぎる効果を観察・測定し、沸騰過程における熱伝導をよりよく理解することができます。この情報は、ラップトップなどの電子製品のより効率的な冷却に役立て、応用することができます。

「科学者らは、RUBIのすべてのデータを分析中です。それが終わったら、今度は熱伝導分野のさまざまな実験を行うための熱伝達ホスト（Heat Transfer Host）と呼ばれる新しい設備を打ち上げることを計画しています。要は、RUBIから得られた研究結果を使って、新しい実験の設計に役立てるのです」とESAの科学者セバスチャン・ヴァンサン・ボニューは述べています。

微小重力が原因で液体の挙動に生じる変化は、地上の技術を宇宙で使用する際にも課題となります。

「私たちは、地上でリアクター床（床反応器）について徹底的にテストを行ってから、同じものを打ち上げますが、宇宙では同じ性能を発揮してくれません」とNASAのグレン研究センター（オハイオ州クリーブランド）研究員で、Packed Bed Reactor Experiment（PBRE）主任研究者であるブライアン・モティルは述べています。

リアクターは、宇宙探査において大変重要な存在です。水や空気の回収と浄化、生命維持プロセスなど、地上では当たり前のことのために利用されています。微小重力下で2つの相（気相と液相、液相と固相など）からなるシステムがどのように機能するか、知識面でギャップがあるため、設計者たちは、より効率の良いシステムを作るための必要なツールを持つことができません。

そして、宇宙のさらに先へと進出する上で、リアクター効率が改善されなければなりません。

「宇宙におけるリアクターの圧力低下は、予想したものと異なっていました」とモティルは述べています。「そのため、何が起きているか、そして、システムから気泡を流し出すために必要な最低流量は何か、といった基本的な疑問に答えることに焦点を当ててきました。」

国際宇宙ステーションでは、この性能低下を理解するためのツールが提供されるため、生命維持システムの効率改善につながるかもしれません。

「この研究により、宇宙飛行士らがリソースのほとんどをリサイクルしなければならないといったような、長期の宇宙飛行が可能になります。リアクター床は、火星へ行く前に十分なテストを行っておかなければならない多くの技術の1つです」とモティルは述べています。「国際宇宙ステーションがなければ、開発してきたものを実証する場がないのです。」

これまでPBREが行ってきた圧力低下の計算は、すでに国際宇宙ステーションでの他の実験で高流量での応用に成功しています。医学的緊急事態に、微小重力環境の静脈注射で使用できるほどの質の水を作る能力をテストしたIVGEN研究では、これらの計算結果を使って実験前にシステムを水できれいにします。しかし、高流量は、リアクター床の素材を損傷する可能性があるため、研究者らは、低流量の問題点を1つずつ解決していくことに注力しています。

国際宇宙ステーションでの他の実験でも、実行可能な情報や研究結果が提供されています。ESAのSODI-DCMIX研究では、特定の液体とガスの分子の混合物がどれだけ移動・衝突するかが計算されており、地下油田の化学物質の挙動をより良く理解するのに役立つ可能性があります。細い管の中の液体を押したり引いたりする小さな力、毛細管現象に関する研究は、宇宙で使用できる特別なコップの開発や、液体の移動や貯蔵に複雑なポンプを使用するのではなく、形状や液体動力学を利用した新しい生命維持システムの試験に繋がっています。

「研究者コミュニティには、これが上手く行くこと、そして興味深い成果をもたらすことをすでに示しています」とヴァンサン・ボニューは述べています。「多くの研究成果が出ている今、国際宇宙ステーションでの研究に対する関心への高まりを実際に見て取ることができます。我々は、これまで以上に多くの扉を開いているのです。」

NASAの宇宙飛行士ケイト・ルビンズが、国際宇宙ステーションの微小重力科学グローブボックス（Microgravity Science Glovebox）内で、SODI DCMix-3の設置作業を行う様子。提供：NASA

ESA（欧州宇宙機関）の宇宙飛行士ルカ・パルミターノがNickelodeonの「Slime in Space」と超疎水性パドルを使って科学デモンストレーションを行う様子。
提供：NASA

まとめて物理学研究！

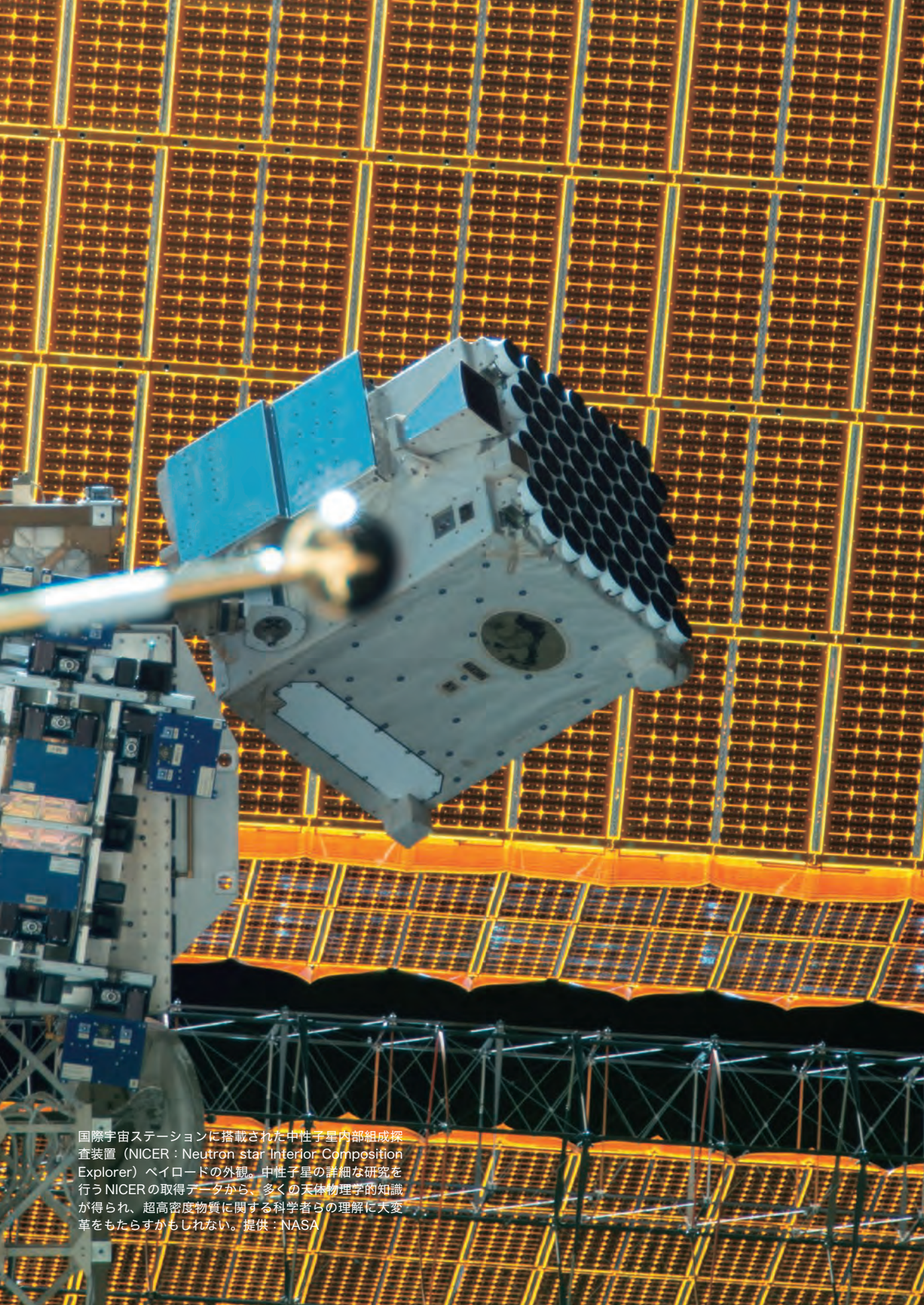
流体物理実験が次世代の科学者らをインスパイア

実験データは、低重力における液滴の生成・緩和・閉じ込めを含む作業に応用でき、宇宙での一般的な液体封入や水耕栽培に役立てることができる。

緑色のベトベトしたものが教育や科学に役立つなんて、誰が考えるでしょう！アメリカを拠点とするTVチャンネルNickelodeonでは、ISS National Labや流体研究の研究者と協力して、宇宙へスライムを送りました。このNickelodeon Slime in Space研究は、非ニュートン流体に関する研究だけでなく、アウトリーチ活動の機能も果たしました。最終的にでき上がったものを使い、視聴者は、微小重力や材料科学の原則について、楽しく学ぶことができました。この時の動画は60万回以上再生されています。

この高粘着性の液体を大量に国際宇宙ステーションへ送るというのは、流体研究者らにとって、とてもユニークな機会となりました。科学者らは、8回の実証により、スライムの流体の特性に関する観察結果を記録しました。このようなシンプルな実証により、微小重力環境における流体挙動に関する貴重なデータが得られたのです。このようなデータは、新しい宇宙技術や宇宙ベースの研究の分析やデザインに役立ちます。また、低重力における液滴の生成、緩和、閉じ込めに応用することができ、一般的な液体の封入、宇宙における水耕栽培に役立てることができます。

また、宇宙で宇宙飛行士らがスライムを扱う姿は、見ていて楽しいものです。

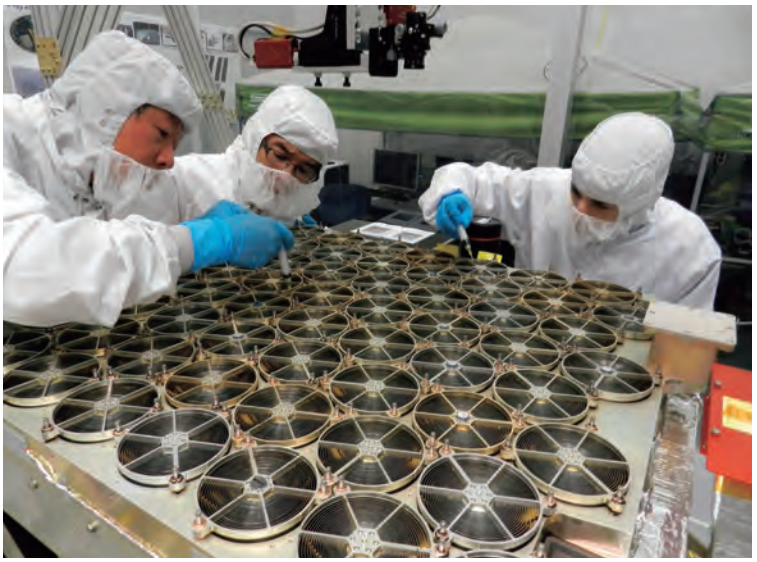


国際宇宙ステーションに搭載された中性子星内部組成探査装置（NICER：Neutron star Interior Composition Explorer）ペイロードの外観。中性子星の詳細な研究を行うNICERの取得データから、多くの天体物理学的知識が得られ、超高密度物質に関する科学者らの理解に大変革をもたらすかもしれない。提供：NASA

中性子星研究がCTスキャンを向上させる

天体物理学研究向けに開発された技術の医療現場での新たな利用法

NASAのNeutron star Interior Composition Explorer（NICER）のチームが国際宇宙ステーションへ打ち上げるその天文物理学装置を開発した際、特有の問題に直面しました。巨大な星が超新星として爆発し、中性子星を形成する際に残る白熱する燃え残りを詳しく研究するためには、新しいX線技術を作る必要がありました。宇宙でこれらの課題を克服するために開発した技術が、まさか医学の新たな進歩に繋がりうるとは、NICER科学者の誰も予想できなかったことでしょう。



NICERチームが、打ち上げ前にX線濃縮マウントにエポキシを塗布する様子。このエポキシ接着剤により、打ち上げの振動に耐えられるよう光学アセンブリを固定した。提供：NASA

2017年NICERは、宇宙航空研究開発機構（JAXA）のCALETやMAXI、NASAのAMS-2のような他の天体物理学実験の仲間入りをし、国際宇宙ステーションの船外を宇宙研究のための特別な場所として利用し始めました。

「我々は、中性子星を研究するミッションを設計しました。なぜなら、それらが本当に素晴らしい天体だからです。中性子星は、我々が宇宙で知っている中で、一番密度の高い物質です。もし中性子星をさらに絞ることができたならば、事象の地平の内側に爆縮し、ブラックホールになってしまうでしょう」とNASAのゴダード宇宙飛行センター（Goddard Space Flight Center）（メリーランド州グリーンベルト）でNICERの主任研究者を務めるキース・ジェンドローは述べています。「我々は、このような超高密度環境で物質がどのようにふるまうかを知りません。地球や太陽系で行う実験では、どれもこれを再現できないからです。」

NICERの中性子星の観測結果はすでに、多くの発見に繋がりました。2019年、NICERでは、急速に回転する中性子星パルサーの表面の熱核反応フラッシュによるX線の急上昇を検出しました。また、同年には、初のパルサー表面ホットスポット地図の作成にもつながりました。2021年、この望遠鏡を通して、中性子星の中心にある物質が、一部の物理学者たちが予測していたほど凝縮できないことがわかりました。これは、NICERの主な科学的目標でした。

世界各地の科学者らは、現在、この観測機器を使って、ブラックホールから彗星まであらゆる研究を行っています。例えば、科学者らは、NICERを使って、太陽の質量の約10倍もあるブラックホールJ1820-070を取り巻く環境を図示しました。この発見は、科学ジャーナル『Nature』の2019年1月号の表紙を飾りました。

しかし、NICERチームはこれらの多くの成果を上げる前に、地上でやっておくべきことがありました。それはこの装置が、観測したX線の時刻をどのくらい正確に付与することができるかを調べることでした。

「NICERに特有の測定能力の1つに、その時刻付け性能があります。この装置は、X線が空から到着した時刻を非常に高い精度で記録します」とジェンドローは述べています。「その性能を地上で検証するには、指示した時間にX線を生成できるX線生成器が必要です。」

従来のX線源は、オンオフの切り替え速度に問題がありました。研究者らは、ミリ秒からナノ秒へと、その時間を短縮する必要がありました。この課題を解決するため、NICERのチームは、Miniaturized High-Speed Modulated X-ray Source（MXS）を構築して特許取得しました。

これは偶然にも、マサチューセッツ総

この超小型X線源は、NICERペイロードの試験に使用されたもので、現在は、新しいCTスキャン技術の開発に利用されている。高速切り替え機能と超小型という特徴が、X線コミュニケーション、材料科学用の新X線蛍光・回折機器、低量かつ正確な線量の医療用X線など、多くの新技術を可能にしてくれる。提供：NASA/Goddard/Samantha Kilgore

合病院（Massachusetts General Hospital）の神経放射線科医ラジ・グプタ博士がコンピュータ断層撮影（CT）スキャンの改良にあたって求めていたものでした。

> Harvard Health Publishingによれば、毎年、アメリカだけで、8000万回以上のCTスキャンが実施されている。

CTスキャンとは、以前はCATスキャンとして知られていたもので、身体の画像を生成して重要な三次元情報を医師たちに提供するX線機器のことです。Harvard Health Publishingによれば、アメリカでは、毎年、8000万回以上のCTスキャンが行われています。

従来のCT機器は大きくて重く、大量の電力を消費していたため、輸送が難しく、リソースが限られている環境下ではアクセスするのが難しいものでした。

「私が育った場所では、きちんとした医療用画像生成というものはありませんでした。そして今でも、そこには、ごく限られた高度医療用画像生成機器しか普及していません。国連によれば、簡単なX線機器ですら、世界の2/3の地域では利用できないのです」とグプタは述べています。

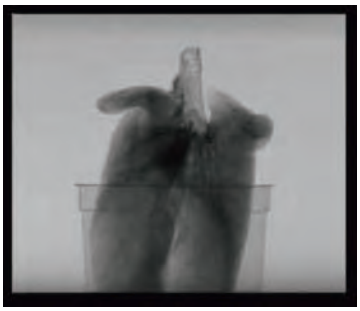
グプタは、9歳になるまでインド北西部にあるマルシサール（Malsisar）という小さな村に住んでいました。医学技術をもっとアクセス可能なものにしたいという彼の気持ちが、装置の改良に取り組む原動力となりました。偶然、彼の研究で必要とされていたものが、NICERが作ったものと似ていました。小型で軽量のX線源で、オンオフの切り替えが素早くできるものです。

MXSの発明者でもあるジェンドローの講演に参加したとき、グプタはなにか特別のものを感じました。グプタは、CTスキャンの利便性を向上させ、医療患者に与える放射線量を低減し、宇宙探査に利用できる新たな医療機器を生み出す可能性を感じたのです。彼はジェンドローに連絡を取り、コラボレーションが始まりました。

「パルサーや中性子星を見ているときは、日々の仕事に役立つような技術が見つけられるとは思ってもいませんでした」とグプタは述べています。

大きなX線装置を回転させてCTスキャンを撮るのではなく、グプタは、NICERのチームと協力して、患者の周囲に取り付けて、必要なときに起動することのできる、新しく小型で調節されたX線源の固定リングを作ることにしました。

「人の周りにたくさんのX線源があれば、医師が確認したいと思っている部分をより頻繁にオンにし、そうでない部分はオフの頻度を上げることができます」とグプタは述べています。



新しいCTスキャン技術のテストを行っているラジ・グプタ博士の研究チームから入手した豚の肺のX線画像。提供：Raj Gupta, Massachusetts General Hospital and Harvard Medical School

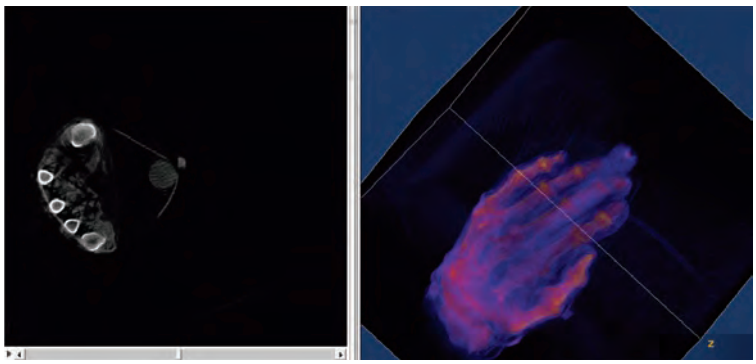
新しいCTスキャン方法をテストするための豚の肺を撮影するため、マサチューセッツ総合病院のラジ・グプタ博士の研究チームがつくった実験設備。この技術は、国際宇宙ステーションのNICERペイロード用に作成されたX線源を使って開発された。提供：Raj Gupta, Massachusetts General Hospital and Harvard Medical School

この技術により、患者が被爆する放射線の量を減らし、その放射線レベルでの画像品質を向上させることができます。

放射線曝露を制限することは、今、地上にいる患者に役立つだけでなく、火星を目指す未来の宇宙飛行士らにとっても役立つ可能性があります。

「宇宙では、そもそもの放射線が高い環境であるため、これがいっそう重要になってきます」とグプタは説明します。「現在のところ、長期ミッションは、数年とまでは行かなくとも数ヵ月間は続きます。その間、誰かが体調を崩したり怪我をしたりする可能性があります。処置できる医師が乗船している可能性もありますが、従来のCTスキャナは、宇宙環境では設置が不可能なのです。」

グプタと彼のチームはすでに、豚の肺と人間の手でテストスキャンを成功させています。初期の成果は2018年に『Nature Scientific Reports』で発表されました。次のステップとしては、フルスケールで人間のテストが行えるよう、そのサイズと電力を増加させることです。



新しいCTスキャン技術をテストする際、ラジ・グプタ博士の研究チームが撮影したヒトの手のスキャン。提供：Raj Gupta, Massachusetts General Hospital and Harvard Medical School

「消費者向けの電子機器は容易にアクセスできるようになりましたが、医療用画像生成ではまだ難しい状況です。このようなアイデアは、そういった領域における進展を実現します」とグプタは述べています。

他の分野の科学者らがもっとNICERの科学者の研究について知れば、より多くの医学的メリットが出てくると、彼は期待しています。

「X線を撮って、いわば濃縮させる方法があります。マンモグラフィで利用できるX線の焦点システムを作ったのです」とグプタは説明します。

地上でこのような進展が続く中、NICERでは今後も宇宙に注力します。

「超電導性や超流動性など、中性子星の中で物理的に生じることには、たくさんの興味深い側面が存在します。このような不思議な量子現象はすべて、SFのように感じられますが、実際に起っていることなのです」とNICERの副代表研究者（Goddard）のザベン・アルズーメニアンは述べています。

超伝導性と超流動性は、実験室で作ることができますが、ほんの少量です。中性子星は、太陽ほどの重量がある超流体の量を研究する貴重な機会を与えてくれます。

「私たちは、巨大なスケールで生じている量子現象を研究しており、それを理解することは、私たちと技術的な関連があるのです」とアルズーメニアンは述べています。

NICERが今後も中性子星を分析し、宇宙のことをより良く理解するための活動を行っていけば、地上の私たちを助ける新たな方法の発見につながるかもしれません。

「きぼう」日本実験棟の船外実験プラットフォームに取り付けられた全天X線監視装置（MAXI:Monitor All-sky X-ray Image）。STS-127/Expedition20合同作業時に撮影。提供：NASA

国と国、銀河と銀河を橋渡しする天体物理学の自動協力観測

NASAのNICERと、JAXAのMAXIの連携（OHMAN）

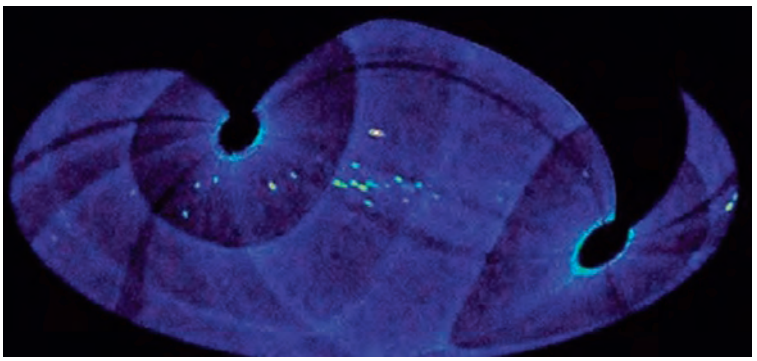
NASAのNICERと宇宙航空研究開発機構（JAXA）のMAXIにおける国際協力が始まり、宇宙の予測不能なイベントを発見し、ダイナミックな宇宙の仕組みを明らかにしていくことでしょう。MAXIは、2009年以降、国際宇宙ステーションという最適な観測地から、全天のX線源をスキャンしており、他の天文台にアラートを発して、これらの天体を追加観測できるようにしました。

「国際宇宙ステーションは、約70%の時間は、地上と通信がつながっています。MAXIが何かを感知すると、10秒後にデータが地上に届きます。地上のコンピュータを使った迅速な分析により、インターネットを通じて世界中の観測所にアラートを発することが可能です」とMAXIの共同研究者である三原建弘（みはら たてひろ）氏は述べています。

NICERのチームは、このようなアラートを受け取っているグループの1つです。国際宇宙ステーションが一周する間にMAXIが空のX線の95%を観測するのに対し、NICERは空のずっと小さな領域を、より感度の高い測定を行います。このことから、この2つの機器は完璧な組み合わせと言えます。

> MAXIが2018年3月11日のアウトバーストを捉えるまで、天文学者らはブラックホールJ1820の存在に全く気付いていなかった。

2018年3月11日にMAXIがアウトバーストを発見するまで、天文学者はブラックホールJ1820の存在を知りませんでした。アウトバーストは、円盤の不安定性によって、ガスの洪水が雪崩のように内側に、ブラックホールに向かって移動する際に生じます。円盤の不安定性の原因は解明されていません。J1820は、全く知られていないブラックホールでしたが、数日のうちにX線天文の中で最も明るい線源の一つになりました。NICERはこの劇的な変化を素早くとらえ、爆発が消えていく様子を数ヵ月にわたって追跡しました。



全天X線監視装置（MAXI）に搭載されたカメラで、国際宇宙ステーションの軌道を1周する間に撮影された初の全天X線画像。提供:Japan Aerospace Exploration Agency（JAXA）

しかし、日米間の時差が大きく、この連携は複雑なものとなっていました。OHMAN（Orbiting High-energy Monitor Alert Network）プロジェクトは、2つの観測機器間の通信を自動化することによって、この問題に挑戦しています。

「NICERとMAXIはいずれも国際宇宙ステーションにあります。であれば、わざわざ地上へ情報を送る必要はあるでしょうか？」とNASAのGoddard宇宙飛行センター（メリーランド州グリーンベルト）のNICER主任研究者であるキース・ジェンドローは述べています。「MAXIが自動分析を行ってNICERに送るべきかどうかを判断することは可能なはずです。そうすればNICERが自動的にそのX線源の追跡研究を行い、反応時間を数時間あるいは数日から数分間に短縮できるはずです。」

両方の機器に接続された国際宇宙ステーションのノートパソコンが、この2つのミッションの橋渡しをしてくれます。この通知プロセスを自動化することで、NICERとMAXIはこれまで以上に緊密に連携し、X線を使って宇宙のより多くの神秘を解き明かし、科学的理解を深め、あわよくば、それ以上の何かを成し遂げるでしょう。

「MAXIは星から来たX線を検出し、リアルタイムで、人類に初めてその到来を知らせます。我々はそれにより、星が突然輝き始め、ブラックホール連星が1ミリ秒でまたたく、新しい世界を目撃することになります」と三原氏は述べています。「その世界は、ある人にはただきれいで美しいものなのかもしれませんし、またある人には時にすごい感動を与えるものであるのかもしれません。」

Confined Combustion実験の研究者Ya-Ting Liao氏が、SpaceXの第19回商用補給機打ち上げのWhat's On Boardブリーフィングで、密閉空間における火の広がり方と挙動に関する研究を説明する様子。提供：NASA

暑いと思ったら寒くなる

極端な温度下で実施される物理学研究が私たちに教えてくれること

物理学研究には極端な条件が求められます。国際宇宙ステーションでは、宇宙で最も冷たい温度を発生させたり、高温の炎や炉を使って2,000℃以上の試料を加熱したりと、極限状態を実現しています。何かを冷たい状態に保つことで、微小重力下では特有な方法でプロセスを遅らせることが可能です。一方で、宇宙では火がどのように燃え広がるのか、その挙動を理解することは、宇宙飛行士たちの安全にとって不可欠であり、地上における燃焼や火の制御に関する知識も深めることにつながります。

暑い

燃料効率と汚染の低減

「アメリカの電気のほとんどは、燃焼によって生みだされています」とNASAのグレン研究センターのプロジェクト科学者であるデニス・ストッカーは述べています。「車の動力に関しても、燃焼がなければできません。燃焼は、私達の現代の生活において大きな存在を占めているのです。」

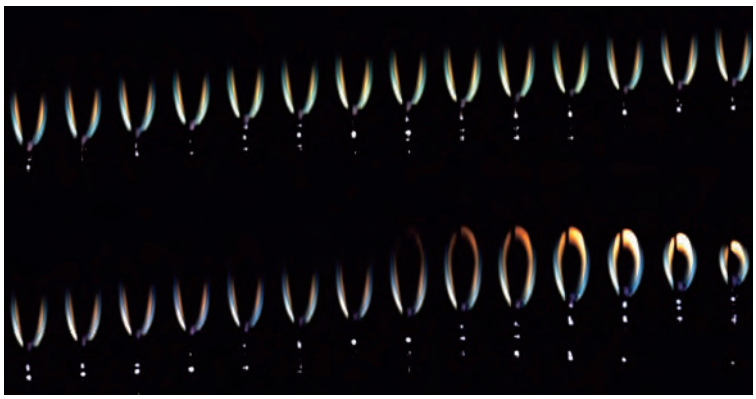
国際宇宙ステーションでは、地上での燃焼実験の妨げとなる重力の影響を排除し、燃焼研究の中核となる原理の検証を行っています。燃焼統合ラックで行われる6つの微小重力環境下での燃焼実験（ACME）は、地上での燃料効率の向上と燃焼時の汚染物質生成の抑制に役立つデータを提供することができます。

冷炎の発見

微小重力プログラムだけでなく、おそらく過去20～30年の燃焼研究の中で最大の発見の1つは、国際宇宙ステーションでのFLEX実験でした」と、グレン研究センターの科学者ダニエル・ディートリッヒは述べています。FLEX実験の研究者が、燃えている燃料の飛沫を調べて消火剤を分析したところ意外な発見がありました。すなわち、火が明らかに消えた後に低温で”燃え”続けているということです。

今では冷炎として知られているこの燃焼プロセスは、キャンプファイヤーなど私たちの体温を暖かく保ってくれる火とは異なります。典型的な炎からは、煤煙、二酸化炭素、そして水が生まれます。冷炎では、一酸化炭素とホルムアルデヒトが生成されます。

このような化学的に異なる炎の動きをさらに学ぶことで、より高効率で汚染量が少ない乗り物の開発に繋がる可能性があります。



これらの炎は、NASAの宇宙飛行士クリスティーナ・コッホが2019年のクリスマスイブに、国際宇宙ステーションでのConfined Combustion実験の一環として、研究の最初の燃焼を行った際に形成されたもの。宇宙で火がどのように広がり、どのように動くかを理解することは、将来の宇宙飛行士の安全にとって、また、地上において火災を理解し制御するために極めて重要。提供：NASA

2012年の発見以来、冷炎は地上でも生成されましたが、すぐに消えてしまいます。国際宇宙ステーションでは、冷炎は数分間燃焼することができ、科学者らは炎を研究するより良い機会を得ることができます。

「燃焼理論の観点から重要なだけではありません。実践的観点からも重要なのです」とディートリッヒは述べています。「国際宇宙ステーションで研究できる低温の化学反応は、エンジンなど実際の燃焼システムにおいても非常に重要なのです。」

閉鎖空間の炎

閉鎖燃焼（Confined Combustion）は、火災時の安全に関する規則を改善することで、安全性を向上させることに役立ちます。建物や車両などの閉鎖された空間における炎の広がりは、開放された空間における火災よりも危険度が増すおそれがあります。それは、周囲の壁から熱が放射されるためです。この実験では、微小重力環境における異なる形状の空間を通して火の動きを研究し、地球におけるこのようなエリアで火がどのような挙動を示すのかをより深く理解するのに役立ちます。

「このプロジェクトが私たちの頭上200マイルも離れたところで行われているというのはとても不思議な感覚でした」と主任研究者Ya-Ting Liaは述べています。Liaの実験室では、業界のパートナーや大学コミュニティに研究結果を配信することで、地球と宇宙における火災の安全性向上に役立てています。「私たちには、この特別な実験機会を生かして地球や宇宙での科学や生活に役立てる責任があります。」

高温の金属の挙動を理解する

地球でガラスや金属合金を作る際、原材

料はるつぼと呼ばれる容器に入れられ、加熱されます。しかし、るつぼと中の材料の間で反応が起き、不純物が生じる原因となる場合があります。JAXAの静電浮遊炉（ELF: Electrostatic Levitation Furnace）では、微小重力を利用して、このような高温の材料に対して容器を使わずに研究・処理しています。

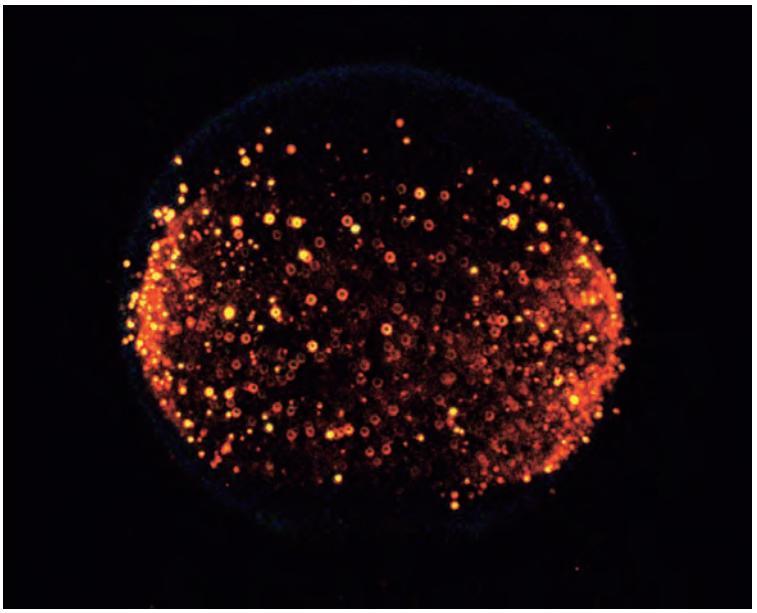
どのような材料の表面にも微小な帯電があります。ELFでは、サンプルに高電圧を負荷してから、クーロン力を使って空中浮遊させます。これは、電荷に基づいて物体の引力または反発力により形成されます。電荷の量は、材料の特徴により異なります。帯電がとても小さければ、クーロン力が重力に負けて地上ではサンプルを浮遊させることができません。ELFは、地上では空中浮遊させられないほとんどのサンプルを微小重力環境課で浮遊させることができるため、高温金属や新しいタイプの金属の特性に関する洞察を得ることができます。

「1,000℃を超える超高温の温度範囲では、正しい位置でサンプルを制御するのが非常に難しいのです。これは、一つ一つの材料に独自の特徴があるためです。その特徴は地上ではわからないので、宇宙での実験には多くの試行錯誤が伴います」とJAXAの科学者 織田裕久（おだ ひろひさ）氏は述べています。「宇宙で無事に新しいサンプルの溶融に成功すると、ELF担当者にとっては非常に喜ばしい嬉しい瞬間になります。」

ELFは、超高屈折率インデックガラスや超高熱耐性セラミックといった画期的な材料の開発を加速してくれるかもしれない、と織田氏は話します。このような材料は、航空産業やエネルギー産業において非常に有用となる可能性があります。

ロケットエンジンの挙動を予測する

ロケットエンジンには、燃焼室への噴出直後に液体推進薬を噴霧燃焼させる方法が広く用いられています。燃料と酸化剤は高速で燃焼室を移動するため、液滴と炎の相互作用を分析することは不可能です。「きぼう」日本実験棟で実施された初の燃焼実験Group



この炎は、異なる条件下で生成されるすすの量を研究するため、Combustion Integration Rack内でFlame Design研究の一環として点火された多数の炎の一つ。黄色い点が、高温の時に黄色く光るすすの塊。すすはより長時間炎の中に残るため、これらの塊は地球よりも微小重力の場合の方が大きくなる。提供：NASA

Combustionは、このような高度なロケットエンジンの開発における噴霧燃焼の予測に用いられる数値シミュレーションの改善に役立つかもしれません。

火を消す

火をつけたのは私たちではありませんが、間違いなく消す必要はあります。Burning and Suppression of Solids（BASS）研究では、微小重力で燃えるさまざまな燃料を消す方法を研究しています。十分な換気があれば、材料は、通常の重力下と同じように微小重力下でも燃焼します。しかし、宇宙での火消しにおいては、炎の形状と火消しの特徴を考慮する必要があります。こうしたことを考慮しないと、地上で行われてきたような取り組みの効果は失われてしまい、場合によっては、酸素との相互作用が増加することで悪化する可能性もあります。

BASSの研究結果は、微小重力環境における事故火災の消火戦略に役立ち、地上より優れた検知と抑制のシステムに貢献します。

大きく

Saffire実験は、国際宇宙ステーションからの切り離した後のCygnus無人貨物宇宙船で実施されています。この実験では、あらゆる機会を利用して微小重力環境下での研究を行っています。国際宇宙ステーションからの距離があるおかげで、機器を使って炎の成長、酸素消費量などを測定し、より大きな炎のテストを行うことができます。この実験では、微小重力における炎の成長をより良く理解することで、今後の宇宙ミッションを守ることができます。

それから冷たく

宇宙で一番寒いところで量子科学を進歩させる

2018年7月、NASAのCold Atom Labは、軌道上でBose-Einstein凝縮と呼ばれる新しい状態の物質を生成した初の装置となりました。Cold Atom Labでは、原子を超低温に冷却して、地上では不可能な方法でその量子特性を研究しています。

「Cold Atom Labで、我々は、極端な条件で宇宙を研究できる場合にのみ生じるような新しい物理学を模索してい

NASAの宇宙飛行士クリスティーナ・コッホが、SpaceX Dragon補給船から回収した貨物移送袋の中に入っている科学ハードウェアを取り扱う様子。このハードウェアは、深宇宙の平均温度よりもはるかに低い、絶対零度よりも100億分の1度高い原子の雲を生成するCold Atom Laboratoryの一部。提供：NASA

ます」とNASAのJet Propulsion Laboratory（JPL）（南カリフォルニア）のCold Atom Lab原子干渉計の主任科学者ジェイソン・ウィリアムズ氏は述べています。

原子を冷やすことは、Bose-Einstein凝縮を生成する唯一の方法です。原子が冷たいほど、量子の仕組みに従って、その動きは緩慢になり、より大きく波のようになっていきます。Cold Atom Lab のような超低温原子装置を用いて、理論上は完全に停止するはずの温度（絶対零度）に限りなく近い数十億分の一度に原子を冷却します。宇宙では、原子を1か所に保持するのに必要なエネルギーが少ないため、地球にある実験室よりも低い温度に達することができます。

観察時間が長く、温度が低いほど、原子やBose-Einstein凝縮の挙動に関する深い洞察を得ることができます。

Bose-Einstein凝縮は、量子物理学者にとって貴重なツールとしての役割を果たしています。Bose-Einstein凝縮のすべての原子には同じ量子アイデンティティがあるためです。つまり、個別の原子または亜原子粒子でしか通常は見られないような特性が確認できるということです。Bose-Einstein凝縮では、このような顕微鏡レベルの特徴を天文学的次元で見えるようになります。

「初めてBose-Einstein凝縮が作られたときから、物理学者たちは、宇宙での実験が量子システムの研究にいかに有利かということに気づいていました」とJPLのCold Atom Lab科学チームの一員であるデヴィット・アヴェリン氏は述べています。「この点に関して、いくつかの焦点を絞った実証は行われていましたが、Cold Atom Labの継続的な研究のおかげで今では、軌道上で毎日このような長期の実験により得られることが多いということを実証できます。」

量子科学は、日々、私たちの生活に関わっています。量子力学とは、原子や亜原子粒子の挙動に焦点を当てた物理の一分野です。シリコンにおける電子の波動性を利用した、携帯電話やコンピュータなどの数多の現代技術の多くの構成部品の基本的構成要素となっています。

最初の量子現象は100年以上前に観察されていますが、科学者らは継続して、宇宙のこの分野に関する研究を行っています。

Cold Atom Labは、4年以上にわたって実験を続けており、宇宙飛行士たちも、原子干渉計と呼ばれる新しいツールを使ってこの設備のアップグレードを手伝っています。原子干渉計は、原子を使って、重力などの力を正確に測定します。この新しい機器は予想通りの働きをし、宇宙で初めて稼働する原子干渉計になっています。

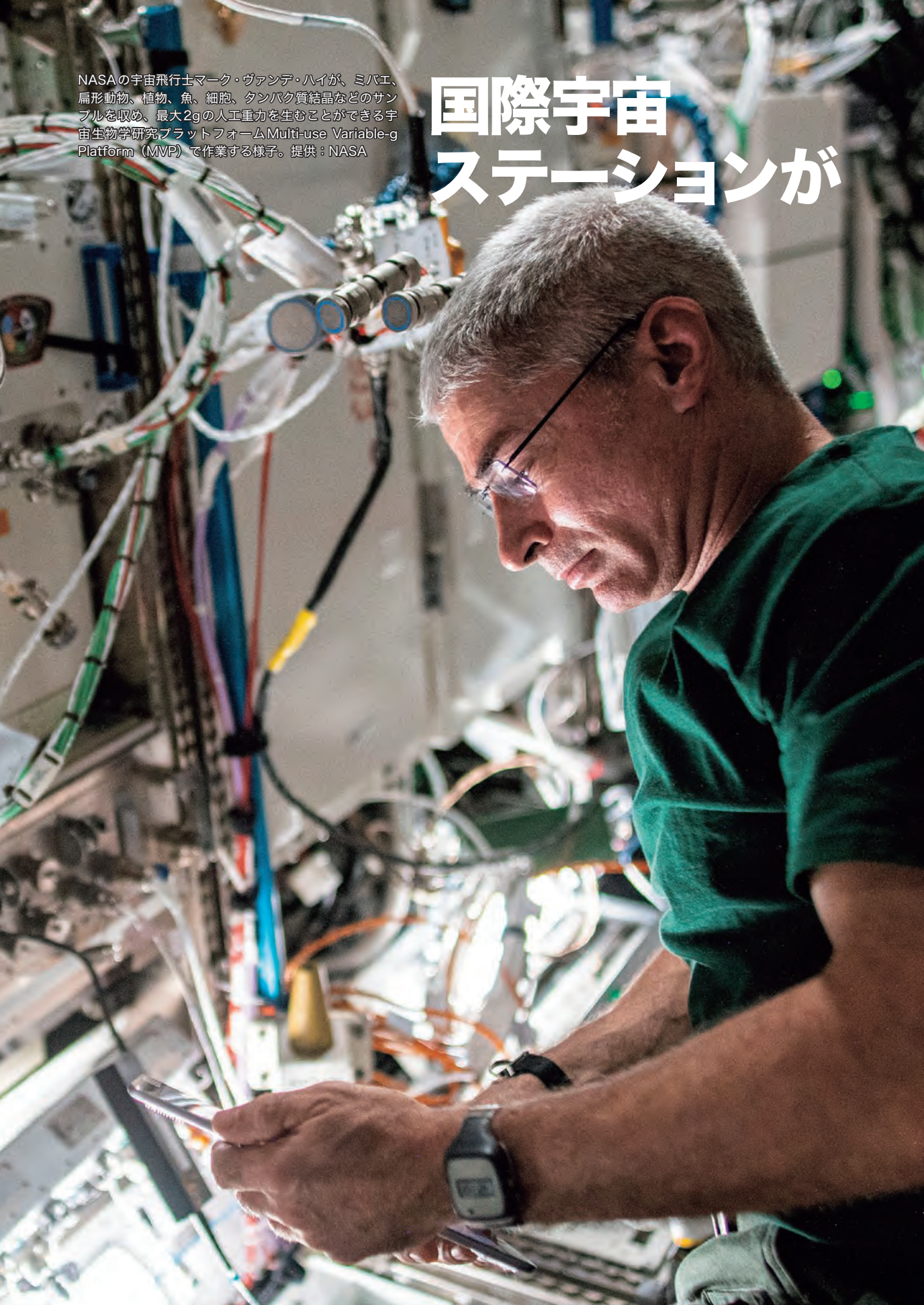
地球低軌道の

NASAのSpaceX Crew-4の宇宙飛行士らが、カリフォルニア州ホーソーンのSpaceX本部でトレーニングを受ける様子。左から右へ順に：NASA宇宙飛行士でSpaceX Crew-4ミッションスペシャリストのジェシカ・ワトキンス、NASA宇宙飛行士でSpaceX Crew-4パイロットのロバート「ボブ」ハインズ、NASA宇宙飛行士でSpaceX Crew-4コマンダーのシェル・リンドグレン、ESA（欧州宇宙機関）宇宙飛行士でCrew-4ミッションスペシャリストのサマンサ・クリストフォレッティー（イタリア）。提供：SpaceX

経済を成長させる

国際宇宙ステーション計画を始動した各国の宇宙機関だけでなく、現在ではますます多くの企業パートナーが国際宇宙ステーションに滞在していることは、我々が正しい道を進んでいる何よりの証拠だと思う。

— ESA宇宙飛行士 マティアス・マウラー



NASAの宇宙飛行士マーク・ヴァンデ・ハイが、ミバエ、扁形動物、植物、魚、細胞、タンパク質結晶などのサンプルを収め、最大2gの人工重力を生むことができる宇宙生物学研究プラットフォームMulti-use Variable-g Platform（MVP）で作業する様子。提供：NASA

国際宇宙ステーションが

宇宙ビジネスの立ち上げと成長を可能に

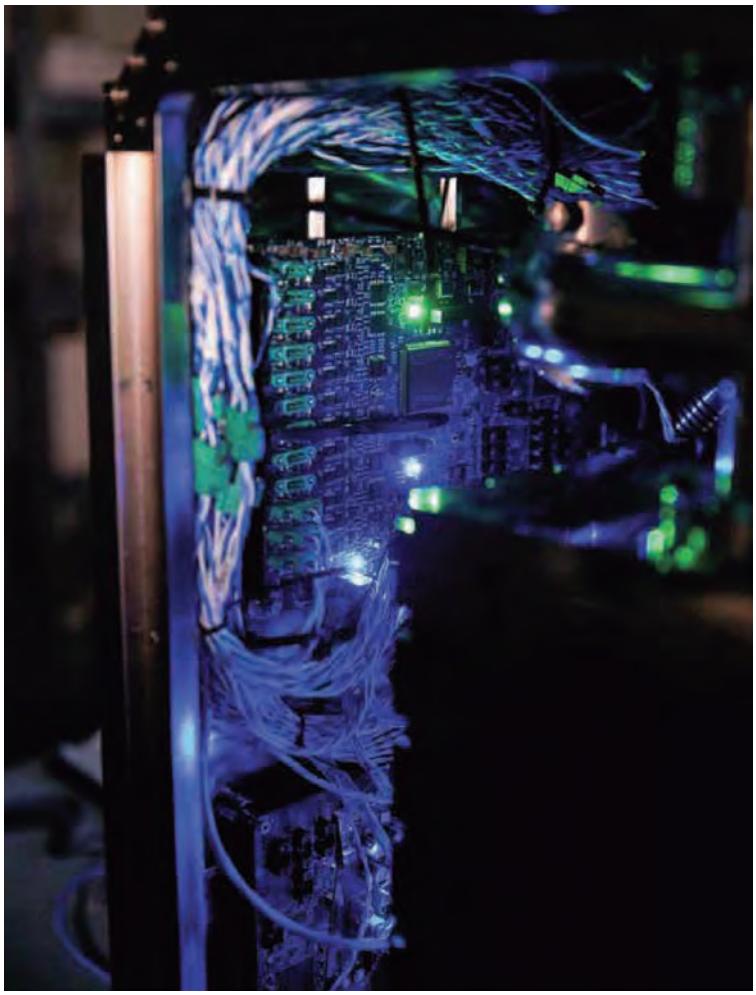
地球低軌道における新たな産業振興

国際宇宙ステーションは、中小企業や起業家、研究者らが科学技術を宇宙で試験するためのプラットフォームを提供しています。地球低軌道における研究・開発・製造能力が強化されただけでなく、そのコストも減少し続けています。これらを合わせることで、新しく改良された製品の開発が進み、新たな商用ベンチャーの促進や既存ベンチャーの成長に繋がります。

「私たちは、第2の宇宙黄金時代の扉を開き、宇宙ビジネスの成長の波が押し寄せてくるのを目撃しているところなのです」とRedwire Spaceの社長兼最高執行責任者のアンドリュー・ラッシュは述べています。「多くの点で、国際宇宙ステーションは、その扉を開く責任を負ってきました。NASAによる開発支援や新技術や宇宙の新たな利用法の実証により、全く新たな部門が進展を遂げています。つまり、宇宙での製造と商用研究開発などです。」

国際宇宙ステーションは、宇宙産業全体の成長促進を助けています。

この数年間で、Redwireは、宇宙での製造と宇宙研究に焦点を当てている企業Made in SpaceとTechshotを買収しており、その結果、この新しい経済の主要プレーヤーになりつつあります。設備としては、国際宇宙ステーションのBioFabrication Facility（BFF）やAdvanced Space Experiment Processor-2（ADSEP-2）など、完全な心臓組織全体を作るという社内の取り組みを支えるものや、さまざまな病気の研究のため、多様なレベルの人工重力を生成するMulti-use Variable-g Platform（MVP）などがあります。また同社には、独自の植物育成設備があり、国際宇宙ステーションのAdvanced Plant Habitatでの研究を管理しています。



Turbine Superalloy Castingモジュールは、地球での使用目的で、微小重力における超合金部品の製造を宇宙でテストする。提供：Redwire

Redwireが力を入れているもう一つの分野は、微小重力を使ったより良いタービン部品の製造です。Turbine Ceramic Manufacturing Module（Turbine CMM）では、ブリスクと呼ばれるタービンブレードの製造が実証されており、Turbine Superalloy Casting Module（Turbine SCM）では、微小重力環境下で耐熱性合成部品を処理する製造装置のテストを行っています。微小重力環境下で製造することで、これらの部品をより少ない質量と応力で製造することができるようになるかもしれません。

これらの部品は、地上で作られたものよりも強度が増していることが示されています。

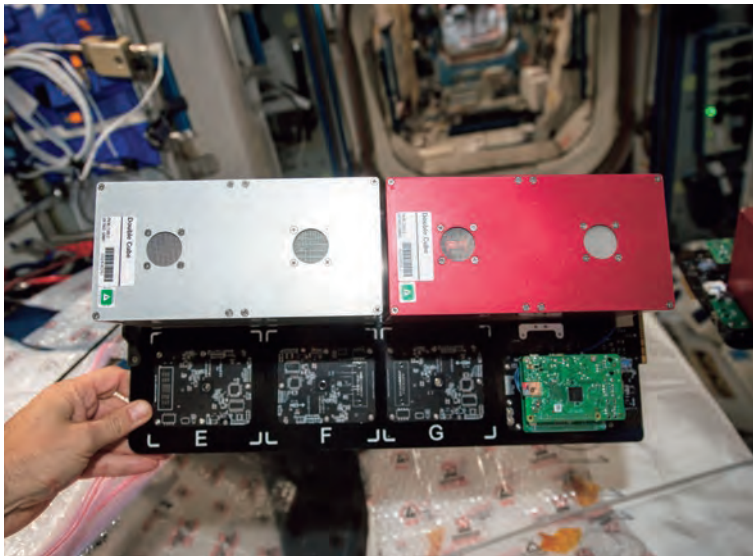
この強度の増加が、航空や発電といった産業で、タービンエンジンの性能を向上させる可能性があります。

「国際宇宙ステーションは、宇宙への迅速なアクセスと回収できるという強みがあるため、宇宙ベースの製品やサービスを開発する事業にとって大変重要な存在です」とRushは述べています。「国際宇宙ステーションの特殊な環境は、Redwireによる宇宙での製造技術・能力開発において非常に大切です。費用効率が高くアクセスしやすいので、人類の恩恵に寄与するような、多くの重要な領域に革命をもたらす技術の開発・試験・操作を迅速に行うための唯一のプラットフォームです。」

成長を続けるこの宇宙経済に投資したことで、同社では米国内外合わせて500名以上の社員と8つの施設へと拡大を図ることができました。

写真上のTranquilityモジュールのポート側に接続されていてまだCanadarm2ロボットアームに連結されているNanoracks Bishopエアロックは、国際宇宙ステーションでの官民の研究能力を上げ、大きめの衛星の放出や国際宇宙ステーション内外での貨物の出し入れを可能にする。提供：NASA

ヒューストンを拠点とするNanoracksもまた、主に宇宙技術で成り立っている企業です。植物育成、放射線曝露、材料・物理化学に関する国際宇宙ステーションでの研究に用いられる多目的プラットフォームを開発しています。同社では、2020年に、国際宇宙ステーション初の企業所有・運用のエアロックBishop Airlockを打ち上げ、大きな成長を遂げつつあります。このエアロックには、CubeSatと呼ばれる小型衛星の放出機能や、船外ペイロード搭載、小規模な船内外のペイロード支援など、さまざまな機能が搭載されています。既存の研究エアロックよりもはるかに大きいため、より多く、より大規模のペイロードを収容することが可能です。



Space Tango社のTangoLab施設に設置されたCubeLabs。この装置では3次元組織・細胞培養に使用するこれらの実験モジュールに標準的なプラットフォームとオープンアーキテクチャを提供している。提供：NASA

もう一つの商用プロバイダーSpace Tangoは、TangoLabと呼ばれる、自動化・再設定可能の研究開発（R&D）および製造プラットフォームを擁しています。

コミュニケーションズ・マネージャーのダニエル・ロザレス氏によれば、このプラットフォームは、植物や農業科学、オーガノイドの観察と成長、そして流体科学を促進するものです。

「国際宇宙ステーションは現在、微小重力の研究開発を行うための宇宙にあるプラットフォームとしては唯一のものです」とロザレスは述べています。「他の場所では不可能です。宇宙で健康・技術製品を製造するためのより良い道を探し続ける上で必要なインキュベーターです」また、SpaceTangoが企業として成長するための道筋も示してくれます。

商用の可能性があるもう一つの宇宙研究分野は、ハイテク生地の開発です。国際宇宙ステーションで行われた商用ファブリックの初めての科学的試験は、ESA（欧州宇宙機関）のSpaceTex-2研究でした。この研究では、従来のコットン生地と比べて、蒸発熱の損失が高い生地のテストが行わ

レーザー通信を通してSOLISSから送信された高解像度画像。提供：JAXA

れています。スイスの機能性生地製造業者Schoeller Textil AGが提供したファブリックは、宇宙で使用できる製品の開発の第一歩です。地球では、暖かく湿度の高い環境が、細菌、ウイルス、菌による皮膚感染や肌荒れの原因になりますが、乾燥が早いこの生地を用いることで、このような問題を削減することができます。乾燥が早い衣服は、アスリート、消防士、軍隊などの用途に役立ちます。

いくつかの企業では、独自の国際宇宙ステーションを開発する計画もあります。その最初のステップが、Axiomが開発したモジュールで、国際宇宙ステーションに接続して、その使用可能空間を2倍近くにも増やすものになっています。Axiomでは、民間投資での完全な商用飛行を通して、国際宇宙ステーションへ向けて民間宇宙飛行士ミッションの打ち上げも行っています。アウトリーチ、商用研究、あるいは承認済みの商用・マーケティング活動目的で使用されます。

「NASAや他の機関がやりたがるような、微小重力環境が必要な応用・基本研究は、これからも常に存在します」とNASAの国際宇宙ステーション事業・経済開発部のマネージャーであるマイク・リード氏は述べています。「しかし、国際宇宙ステーションは、アメリカ政府主導の地球低軌道プラットフォームとしては最後のものになるでしょう。だからこそ、世界中のAxiomsが国際宇宙ステーションにモジュールを搭載してそのパワーや推進力、そして宇宙ステーションのあらゆるインフラを利用して、各部門の構築を進められるようにしています。これができたら、Axiom部分の切り離しを検討し、国際宇宙ステーションを快く引退させることができるようになります。」

NASAでは、他の3つの企業と契約を交わし、宇宙ステーションや他の商用ステーションの開発を勧めています。その企業というのは、それぞれBlue Origin、Nanoracks、Northrop Grumman Systems Corporationです。

「このような他のプラットフォームの設置が終わったら、設備や顧客をそこへ移動させて、その広さを利用することができます」とリードは続けます。「この需要を高めるなら、設置するための置く場所が必要です。国際宇宙ステーションにある程度の拡張性を与えることはできますが、企業が利益を生めるほどではないでしょう。」

国際宇宙ステーションでは、地上の世界各地で商用コラボも進められています。ESA（欧州宇宙機関）の船外プラットフォームBartolomeoは、BoeingとAirbusが開発したもので、12のアクティブなペイロードと1つのパッシブペイロードがあります。これらには、電力管理、ペイロードコマンディング、データ管理と一時的保管、飛行環境判断機能などが備わっています。可能性のある応用としては、地球観測、ロボティクス、材料科学、天体物理学などでの利用が考えられます。

ESAの国際商用実験サービスICE Cubesは、Space Applications Services社とオランダの共同開発で、手頃なモジュール式の実験用プラットフォームを提供しています。この設備で行われた最初の研究には、植物生物学、微生物バイオマイニングに加え、人間の心拍数を使って変化させる万華鏡のような芸術作品などが含まれていました。

宇宙航空研究開発機構（JAXA）では、「きぼう」日本実験棟を民間による技術実証に活用しています。

2020年3月、JAXAは、日本の情報通信研究機構（NICT）や株式会社ソニーコンピュータサイエンス研究所（ソニーCSL）などとともに、「きぼう」日本実験棟の船外実験プラットフォームに取り付けられた光学通信システムSOLISSと地上との間で双方向レーザー通信リンクを確立することに成功しています。JAXAとソニー株式会社では、衛星間や衛星・地上間の通信用に、リアルタイムの大量データ通信システムを確立するための研究を2016年から協力して行ってきました。JAXA、NICT、ソニーCSLでは、実験結果の詳細な分析と評価を続けており、近い将来、この技術の商用化が期待されています。

国際宇宙ステーション外部の、CSAが開発したCanadarm2とDextreの写真。Canadarm2とDextreは、メンテナンス作業や修理を行うことができ、危険な宇宙遊泳の回数を削減し、宇宙飛行士らが科学的研究に割く時間を増やしてくれる。提供：NASA

宇宙のロボティクス産業の発展

スピンオフで生まれた商業用ロボティクス技術が地上の人々に貢献

国際宇宙ステーションは、ロボティクスの進歩を促進しました。カナダ宇宙庁（CSA）が資金提供したカナダの企業MDAは、2008年に、国際宇宙ステーションの外部に設置するロボット型ハードウェアCanadarm2（遠隔操作システムとしても知られる）とDextreを開発しました。Canadarm2は、メンテナンス作業、補給品や機器、宇宙飛行士の移動、他の宇宙船のキャプチャや分離などを行います。Dextreは、外部のカメラやバッテリーなどの小型機器の設置・交換や、電気系部品の交換を行います。このようなツールは、宇宙飛行士が危険な宇宙遊泳よりも科学実験により多くの時間を注ぐことを可能にしてくれます。

> Canadarm2はメンテナンスを行い、供給品や機器や宇宙飛行士を運び、他の宇宙船のキャプチャ・分離を行う。

NASAとGeneral Motor（GM）のRobo-Gloveの一連の特許に基づいている、スウェーデンの企業Bioseryo Technologiesのアイアンハンド（Ironhand）は、繰り返し作業を行う工場労働者等向けの世界初産業用ロボットグローブだ。提供：Bioservo Technologies/Niklas Lagström

Dextreの開発は、現在地上で使用されている技術の進歩に貢献しています。「掴む動作を行うことのできる指付きのロボット型の手をDextreに装着することを検討しました」とMDAの最高技術責任者のキャメロン・オワーは述べています。MDAは、このような技術について特許は取得済みであったものの、まだ応用先が見つかっていなかった、カナダのロボティクス教授クレメント・ゴセリン博士にラヴァル大学で偶然会いました。MDAと同大学は研究協力を行い、この技術を応用して国際宇宙ステーションで利用できるようにしたのです。これが、Self-Adapting Robotic Auxiliary Hand（SARAH）という特許取得につながりました。最終的にはDextreに組み込まれませんでしたが、SARAHの応用グリッパー技術は、以降、協力ロボティクスの分野で一般的に用いられるようになり、より柔軟なロボティクスワークセルを可能にしました。また、ゴセリン博士の3人の大学院生は、この技術を使って、ロボティクス会社Robotiqを立ち上げています。

もう一つの国際宇宙ステーションロボットRobonautは、産業用強化ロボットグローブの開発に繋がりました。NASAとGeneral Motors（GM）では、プロトタイプを開発して国際宇宙ステーションでテストし、宇宙飛行士らの傍らで簡単な作業を行えるようになっています。同チームは、その後、Robonautの手のような部分を再構成し、ウェアブルデバイスにして、宇宙飛行士と自動車作業員の両方が手の疲労と負傷を回避できるようにしました。元々Robo-Globeと呼ばれていたこのデバイスは、現在、Ironhandとして市販されており、スウェーデンのBioservo Technologiesが生産しています。

「工場で人の傍らで作業する協働ロボットは、誰もが納得するもので、これによりさらなる研究が促進されています」とオワーは述べています。アセンブリラインのロボティクスは、2008年にRobotiqが設立された頃にはすでに存在していましたが、ハイレベルの器用さを備えた協働ロボットやスマートシステムの開発は、まだ始まったばかりでした。「このことは、宇宙や国際宇宙ステーションにおいて問題に対処することが、地上でのイノベーション促進につながることを浮き彫りにしています。今回の場合、宇宙用ではなかったアイデアが宇宙で利用され、それがあっという間に広がりました。」

宇宙におけるロボティクスの利用は、さらなる商品の開発を促進している、と彼は説明します。

「MDAでは、宇宙のインフラ開発者やオペレーター向けに商品を開発しています。国際宇宙ステーションのロボティクス技術から生まれた一連のアーム技術とセンシングに基づいた主要な投資です」とオワーは続けます。「この5年間、軌道上のサービス提供に焦点を当てたスタートアップ企業には約6億ドルが投資されてきました。国際宇宙ステーションで可能であることが示されていなければ、このようなことは起きなかったでしょう。」

ロボティクス企業が提供している商品には、標準アーム、ハンド、カメラなどがあり、そのいずれも、20年前には存在していなかったものです、と彼は言います。MDAでは、宇宙での応用に焦点を当ててきましたが、商業サイドの活動も増加しています。

超小型衛星

「きぼう」日本実験棟のJ-SSOD（Satellite Orbital Deployer）7から放出された、日本、ガーナ、モンゴル、バングラデシュ、およびナイジェリアからの超小型衛星の写真。
提供：NASA

その大きなメリット

キューブサット・プラットフォーム

自分の手で組み立てた衛星の打ち上げを見ることは、親が子どもをついに社会へ送り出すときの感覚に似ている、とイズラエル・バウティスタは述べています。フィリピンが宇宙に送った2番目の超小型衛星が打ち上げられた瞬間は、工学部の学生にとって感動の瞬間であっただけでなく、国にとっても特別な瞬間でした。

バウティスタは、自国にとって初めての衛星を設計・製作・試験し、国際宇宙ステーションから放出し、運用するのを支援する、BIRDS-4プロジェクトに参加したことで、自身の国の科学促進に貢献しています。MAYA-2というこの衛星は、太陽電池やアンテナテストなど、多数の実証を行ってきました。

「それはワクワクすると同時に怖い感覚でした。打ち上げや放出のときに起こりうる不確実性がたくさんあるからです」とバウティスタは述べています。「自分の指紋がついた何かが宇宙にあるのだという感覚は、誇らしい気持ちになりますし、衛星の完成のために費やした時間や労力が、すべて報われた気持ちになります」。

1辺が10センチの小さな金属製のボックス。この広大な宇宙においては、さほど科学的に役立つものには思えないかもしれないものの、CubeSatには、多くの人道的、環境的、商用的なアプリケーションがあります。小さなサイズと約1.4キロという軽量のおかげで、燃料コストをかけずに、他の大きいペイロードに便乗して打ち上げられることで、打ち上げコストは大幅に抑えられます。国際宇宙ステーションからは250以上の小型衛星が放出されており、この分野の産業の成長を加速化させています。宇宙へのアクセスを向上させ、地球低軌道での研究を拡張しているのです。

このようなCubeSatのほとんどは、宇宙航空研究開発機構（JAXA）の「きぼう」日本実験棟の小型衛星放出機構（J-SSOD）、またはNanoracksの小型衛星放出機構（NRCSD）により、地球低軌道へと放出されています。打ち上げたCubeSatは、クルーが国際宇宙ステーション内で準備を行い、「きぼう」のエアロックを通して国際宇宙ステーションの外へ送り出します。そしてこの2つのシステムにより放出されるのです。このようなツールのおかげで、バウティスタのような多くの学生、国、企業が、超小型衛星を放出するための手段として利用することができるのです。

九州工業大学のクリーンルーム内にある3つのBIRDS-4飛行ユニットの飛行前の写真。提供：NASA

アメリカを拠点とする企業Planetでは、地球全体を毎日撮影するというミッションで一連のCubeSatを製造しており、そのビジネスモデルをテストするにあたって国際宇宙ステーションに協力を求めています。変化を可視化し、アクセスしやすく使えるものにすることを目標に、Planetでは、地球観測産業に革命をもたらしています。Planetの一連の小型衛星では、「Doves（ハト）」というスマートな名前が付けられた小型衛星を使って地球の鳥瞰図を提供しています。

「当社の目標は、みんなのために、すべての場所を実に頻繁に撮像することです」とPlanetの共同設立者ロビー・シングラーは言います。「すべての場所を撮像すれば、実際にどこでも撮像できるということになります。これは、多くの国や企業などにとってかなり斬新なことになるでしょう。」

最初の「Doves」は、2014年2月に国際宇宙ステーションから放出されました。このときの28機の衛星は、船外への移動用のために「きぼう」のエアロックスライドテーブルに設置され、JAXAのロボットアームの親アーム先端取付型実験アダプタに搭載されたことから、とても国際的なコラボレーションとなりました。技術とビジネスモデルの両方が成熟する中、Planetでは今、商用打ち上げプロバイダーを利用しています。

しかし、Planetのストーリーは、国際宇宙ステーションが宇宙への初期のアクセスを提供することで、新規のビジネスモデルがその価値を証明し、この市場で成功するために必要な投資資金の獲得に繋がることを実証しています。

Planetでは現在までに、450機の衛星を放出しており、現在も200機以上が軌道上にあります。毎日の撮影は、地球の写真を提供するということ以上にメリットがあります。作物の健康状態を監視し、炭素排出を追跡し、都市部の成長を観察し、最新の地図を作成するなど、

多彩な用途に活用することができます。

それと同様に、画像を提供し、農業コミュニティを助けているのが、NASAのCubeSat対 応Compact Thermal Imager（CTI）です。CTIは、NASAの2021年Invention of the Year賞の優勝作品の1つです。この機器は、赤外線検知器における最新の進歩を駆使し、地球の1500万枚以上の赤外線画像を撮影してきました。CTIは、作物の健康を監視しながら、山火事の発見にも成功しています。

「赤外線イメージングは、作物の健康状態監視や農業における収穫量改善において、重要な役割を果たします」とNASAのゴダード宇宙飛行センター（メリーランド州グリーンベルト）の戦略パートナーシップ・オフィスのシニア・テクノロジー・マネージャーであるエリック・マッギル氏は述べています。

小型衛星技術の応用によって、宇宙へのハードルが下がり、このような企業や、以前なら宇宙に焦点を当てていなかったような国が地球低軌道においてプレゼンスを発揮できるようになります。CubeSatは、各国が地球という惑星から出ていく際の第一歩となっており、国際宇宙ステーションは、これを実現するための鍵となっています。

九州工業大学（Kyutech）では、2015年から参加国における能力構築や長期かつ持続可能な宇宙機関の育成を目標に、BIRDSプログラムを実施しています。

J-SSOD#11で、Joint Global Multi Nation Birds（BIRDS-3）を放出する。提供：NASA

「このBIRDSプロジェクトは、関心のある学生なら誰でも宇宙開発能力を得ることができるような橋渡しとなります。世界へとつながる貴重な機会と経験、宇宙関連の豊富なネットワークを作ってくれます」とジンバブエ向けのBIRDS-5プロジェクトのプロジェクトマネージャーであるビクター・ムクングヌグワは言います。この国を代表する工学部の学生として、さまざまな工学系の経歴・国籍・文化を持つ他の学生らと協力することは、とてもセンセーショナルなものでした、と話します。

「各国から2、3人の学生が参加していて、この学生らがそれぞれの母国に帰ったときに、ドミノ効果のようなものが生まれることを、BIRDSの研究者たちは期待しています」とBIRDSプロジェクトで各国の学生らと協力するKyutechの助教授である前田（まえだ）ジョージ氏は言います。「学生にとって、自国の初めての衛星を作ることは、言葉で表せないほどスリリングな経験です。これを私は、毎日のように目の当たりにしています。まるで魔法のようです。」

学生らは、自分たちが学んだことを他の人たちに教えることで、宇宙コミュニティとの関与を続けることができます。バウティスタの例は、この好例です。彼のキャリア目標は今、自国のために宇宙のメリットを引き出すことに向けられています。

「私の将来は今、衛星やその最終製品の開発に向かっています」とバウティスタは言います。「自分が学んだことをより若い世代に伝え、フィリピン宇宙庁の一員になれたらいいなと思っています。」

国際宇宙ステーションから放出されたCubeSatのもう一つの重要な使い道としては、新技術のテストです。学生が作ったプロジェクトAzTechSat-1は、まさにこの新技術テストを行っています。

ESA（欧州宇宙機関）の宇宙飛行士アレクサンダー・ゲルストがPlanet Dove衛星を含む一連のNanoracks CubeSat超小型衛星放出へ向けて「きぼう」日本実験棟エアロックの減圧を行う様子。提供：NASA

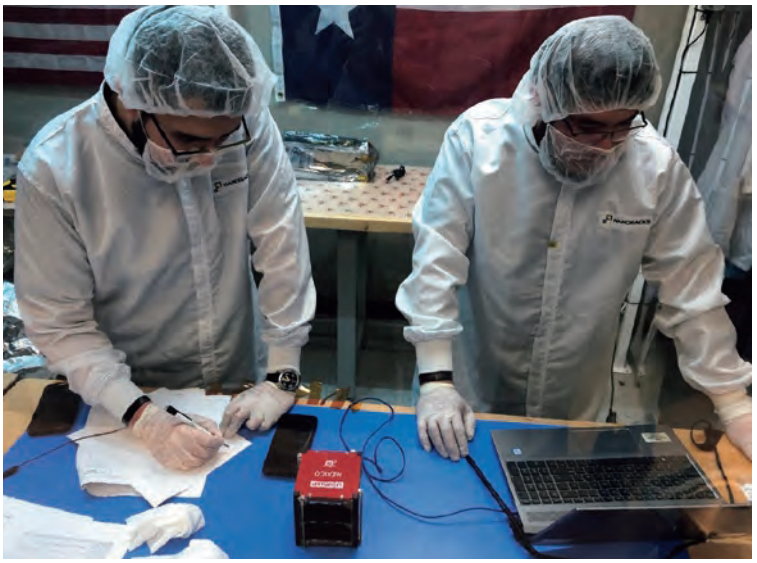
NASAとメキシコ宇宙庁のコラボレーションにより、衛星ネットワーク内での通信が実証されました。この機能により、地上局の必要性を減らし、費用を下げ、衛星アプリケーションのデータダウンロードを増加させることができるのです。AzTechSatチームのメンバーであるローザ・ゴンザレス・カンチーノは、Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla（UPAEP）の学生チームの一員として参加しました。

「私たちのCubeSatが国際宇宙ステーションへ打ち上げられた日、信号を待っていた40分間を本当に長く感じました。今は地球を周回していますが、時には信じられない気持ちです。何かのトリックなのではと思ってしまいそうです」とゴンザレス・カンチーノは述べています。

彼女は子供の頃から、宇宙が人類に与える影響について研究したいと思っていました。そして今、彼女は宇宙が自分のコミュニティを一つにするのを目の当たりにしているのです。

「打ち上げ当日は、家族全員が集まって自宅から打ち上げを見ていました。感動しました。とても興奮し、宇宙は家族の関心事ではなかったにもかかわらず、みんなが私たちをサポートしてくれました。それは、大学も同じでした。あらゆる学部のすべての学生らが、AzTechSatを応援していました」とゴンザレス・カンチーノは話します。

メキシコの学生たちがAzTechSat-1 CubeSatを手に持っている。
提供：Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla



国際宇宙ステーションへの打ち上げに向けてAzTechSat-1をNanoracks CubeSat Deployer（NRCSD）に最終的に組み込むNASAエイムス研究所（カリフォルニア州シリコンバレー）のホセ・コルテス（左）とUPAEPのジョエル・コントレラス氏（右）。提供：NASA

「これも、メキシコ文化の一部なのだと感じています。良いときも悪いときも、互いを支え合うのです。」

今後は、ゴンザレス・カンチーノのような学生らや、自社の技術を宇宙でテストしたいと考えているPlanetのような企業に向け、新たな機会が国際宇宙ステーションで生まれていくことでしょう。アメリカを拠点とする企業SEOPSとNanoracksでは、小型通信衛星の手頃なライドシェアの必要性に応えることで、このような機会を提供し、国際宇宙ステーションから衛星を放出するための新たな方法を提供しています。

SEOPSでは、自社のSlingShotシステムを使って、Northrop GrummanのCygnus宇宙船に相乗りさせ、地球軌道上で小型衛星を放出するための放出機構を製造しています。SlingShotでは、CubeSat向けのフレキシブルで手頃な放出サービスを提供しており、技術検証に必要な長期にわたる軌道上での時間を提供しています。これは商用化の成功に不可欠なものです。

Nanoracks Bishop Airlock Moduleは、宇宙へのもう一つの扉としての役割を果たしており、国際宇宙ステーション内外を行き来する、より大きなペイロードの移動に役立っています。この能力により、新たな小型衛星やCubeSatの国際宇宙ステーションからの放出の遅延の原因となっている障害が1つ減りました。

「私たちは、ますます多くの官民パートナーシップをNASAとの間で実施しており、地球低軌道におけるエコシステムを構築しているのです」とNanoracksの最高経営責任者のジェフリー・マンバーは言います。「それは、研究機会にとって重要なだけでなく、イノベーションの道を切り開いてくれるものでもあります」。

国際宇宙ステーションへ向けたSpaceXの第19回商用打ち上げミッションのWhat's One Board Briefingで、AzTechSat-1の学生研究者Rosa Gonzales Cancinoが、同実験における自身の役割を説明する様子。
提供：NASA

CubeSatが多くの国々や、新技術応用

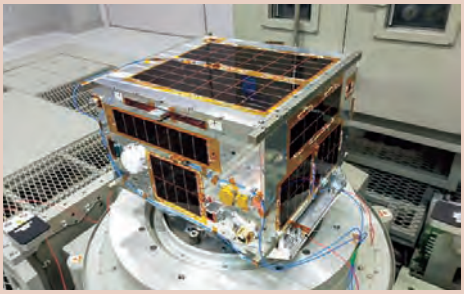
PRCuNaR2

プエルトリコが初めて放出した衛星PRCuNaR2は、微小重力における粒子の衝突の挙動を研究するものでした。粒子の衝突や埃の集合体は、原始惑星系円盤（惑星になると考えられているガスの塊）の形成において重要な役割を果たします。この研究では、この過程についての洞察が得られるかもしれません。

「多くの生徒にインスピレーションを与えるよう教師たちを刺激してくれました」と主任研究者でインターアメリカン大学プエルトリコ・バヤモンキャンパス（Inter American University of Puerto Rico–Bayamon Campus）のAmilar Rincon Charris博士は述べています。「私たちは、ここプエルトリコでこのようなプロジェクトを行い、科学の振興を続けることができるのだということを、多くの子どもたちに示すことができたと思います。このようなプロジェクトが存在するという事実が、科学には投資の価値があるということ、そして、航空宇宙や科学の分野で我々には才能があるのだということを、全国に示すことができました」。

NASAのCubeSat Launch Initiativeがサポートしたこの研究は、2021年4月から10月まで運用されました。

PRCuNaR2開発チーム：上段（左から）ヘクター・ゴンザレス、カルロス・ギブソン、ルーカス・ソト、アミルカー・リンコン、シャビエル・アルバレス、イアン･オルティス、ジーザス･マラー、下段（左から）エドワーディバン・ラバルカ、ナタリー・クルス、カルロス・ベルガラ。提供：Inter-American University of Puerto Rico



ミャンマーのMMSAT-1衛星の飛行前の様子。
提供：東北大学・北海道大学

MMSAT-1

JEM Small Satellite Orbital Deployer（J-SSOD）M2ミッションの際に放出されたミャンマーのMMSAT-1は、森林、災害エリア、天気など、地球の表面をモニタリングしています。この衛星は、高解像度の望遠鏡システム、マルチスペクトラル･カメラ、フラッシュアイ･レンズ付きカメラを使用しています。このミッションの目標は、より効率的で体系立った農業実践の導入と自然災害のモニタリング改善に役立つ情報を提供することです。

JAXAがサポートしたMMSAT-1は、2020年10月から2021年4月まで運用されました。

Swiatowid

SatRevは、軌道でのミッションを打ち上げ・運用するため、電子構成部品から衛星を開発した、ポーランド初の会社でした。その最初のプロジェクトSwiatowidは、CubeSat市場向けに、新しい小型化コンセプトと技術の実証を行いました。同プロジェクトでは、2U CubeSatが、産業クオリティのカメラセンサーの付いた望遠鏡を使って、地球の高解像度の画像を提供できるかどうかを、具体的にテストしました。研究者らは画像を解析し、飛行機や他の衛星などの他のソースから入手した画像と比較しました。小型でより安価な衛星を多く使用することで、地球画像を入手するまでの時間を短縮し、特定の地域の画像をより頻繁に提供することができます。この技術は、研究、資源探査、環境モニタリング、災害対応など、地球画像市場においてさまざまな応用法があります。

ISS National Lab主導のポーランドの衛星実証は、2019年3月から10月まで行われました。

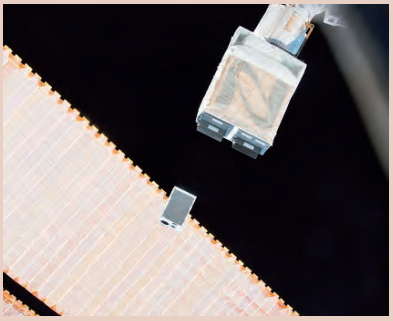
Swiatowidを含む7つのCubeSatを搭載したNanoRack CubeSat Deployer（NRCSD）-16。
提供：NASA

における宇宙利用の道を開いてくれる

ASTERIA

ASTERIAでは、6U CubeSatを使い、太陽系外惑星の検知など、天体観測用の新技術を実証しました。科学者らは、惑星が公転する恒星の光の前を通過する際の影を観測しますが、その際、暗い環境下から長時間にわたって星の観測を繰り返す必要があります。ASTERIAでは、CubeSatプラットフォームの高度なポインティング制御技術と新しい熱安定化機能を使って、このような複雑な測定を実施しました。

ASTERIAはNASAのJet Propulsion Laboratory（JPL）（南カリフォルニア）が製作したCubeSatで、宇宙での運用に初めて成功したものです。2017年に打ち上げられ、2019年12月5日の最後の通信まで、3回のミッション延長を経て運用され続けました。この間、ASTERIAは、CubeSatをより自律化させる能力をテストし、地球、彗星、ヴェスタ、天王星、対地同期軌道にある他の宇宙船、そして、太陽系外惑星を通過する星の観測を行いました。



国際宇宙ステーションのNanoracks CubeSat DeployerからASTERIA CubeSatが放出された直後の画像。提供：NASA

RainCubeをはじめとするさまざまなCubeSatを放出したNanoracks Cubesat Deployer-14（NRCSD-14）を設置するNASA宇宙飛行士セリーナ・オナン・チャンセラー。提供：NASA

RainCube

気候や天気モデルは、モデル検証と改良を行う上で、宇宙の衛星から送られてくる測定結果に依拠します。RainCubeは、レーダーとアンテナ技術を使って、地上に縦方向に落下する雨や雪などの量（降水量や降雪量）のプロファイリングを実証しました。RainCubeは、新しく小型化されたレーダー機器を開発し、CubeSatプラットフォームにおけるレーダー観測装置の実用可能性を実証しました。

これらの機器は、サイズ、質量、電力消費の面で削減が実現されており、低コストで回転率の高い、今後のミッション用のプラットフォーム提供に役立つかもしれません。この技術によって、数分規模の天気システムや現象の観察が可能になると考えられます。このような測定結果や観察結果は、気候・天気モデルや気候科学・天気予報の大幅な改善につながる可能性を秘めています。

RainCubeは、JPLが開発し、2018年に飛行しました。

Remove Debris

地球の軌道には、何万個ものデブリが散乱しています。NanoRacksのRemove Debrisでは、このデブリを削減し、衛星や他の宇宙船がデブリと衝突するリスクを低減する方法を実証しています。イギリス、スイス、フランス、ドイツ、南アフリカの研究者や開発者が、2つのCubeSatを使って実験を計画しました。1つは、シミュレーションしたデブリの位置と速度をマッピングするためのカメラ付きで、もう一つは、最大1メートルのデブリを捕捉し、軌道から逸らすためのネットあるいはハープーン（銛）付きです。

実証実験では、目的のターゲットの画像と正確な位置を作成し、ネットを使用して、デブリターゲットとして打ち上げられていたCubeSatを捕捉しました。捕捉されたターゲットは、軌道から逸れ、介入がなかった場合と比べてはるかに短い時間で大気圏再突入し燃え尽きました。研究者らは、地上から実証の際の動画分析も行い、デブリの動きや最善の除去方法について、さらに情報を集めました。

欧州委員会と他のプロジェクトパートナーが共同で出資し、イギリスのSurrey宇宙センターが主導したこのプロジェクトは、2018年に飛行を行いました。

NanoRacks-Remove Debris Satelliteの放出の様子。提供：NASA

カナダ宇宙庁（CSA）の宇宙飛行士デヴィット・サンジャックとNASAの宇宙飛行士アン・マクレーンが、PRM3の最後の設置場所となる国際宇宙ステーション船外に出すために、「きぼう」のエアロックのスライドテーブルに、PRM3を設置する様子。提供：NASA

落下する衛星を捉える

周回軌道衛星の捕獲、燃料補給、および修理の技術実証

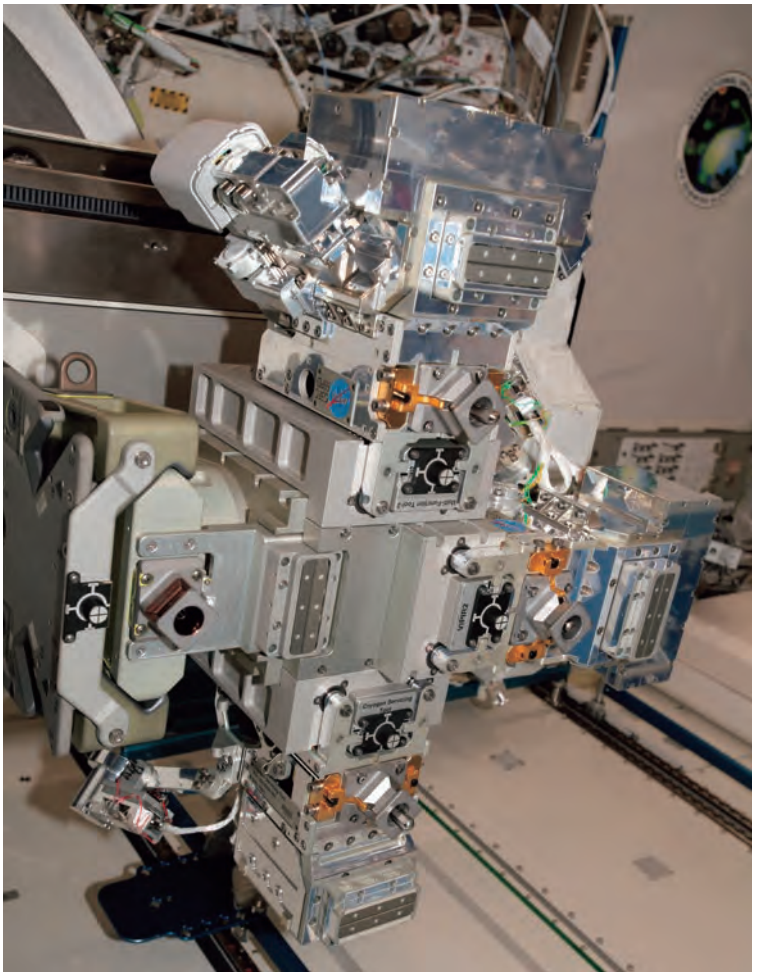
衛星の燃料タンクが空になると、軌道を維持できなくなります。冷却剤が切れると、何らかの機器が正しく機能しなくなります。その結果、データや科学情報は失われ、地上のサービスも遮断されます。交換用の衛星を打ち上げることは、非常にコストがかさみますが、地上のサービスを回復してくれるものでもあります。しかし、もはや機能しなくなった衛星は、軌道上のデブリとなり、他の宇宙船にとって危険な存在となる可能性もあります。

国際宇宙ステーションでは、軌道上の衛星の燃料補給や修復を行うために、いくつかの試験が行われています。

Robotic Refueling Mission（RRM）では、2011年から国際宇宙ステーションのアームが2本ついたロボット式ハンディマンDextre（カナダ宇宙庁（CSA）が開発）を使って、そうした試験を行っています。本来Dextreはそうした使用目的では作られていませんが、衛星の燃料補給や修復に必要な、NASAが開発したツールや手順の実施が可能をテストしました。RRM-P2は、2013年から2016年まで実施され、このようなツールや手順の改良を図り、衛星とロボットが協力できるような能力の開発を実施しました。

「本来の使用目的ではない軌道上の衛星の燃料補給を行うためには、一連の高度に機敏な動きと、ロボットと衛星間のやり取りを行うための特別なツールが求められます」とRRMの共同研究者で、NASAのGoddard Space Flight Center（メリーランド州グリーンランド）のExploration and In-space Servicesディレクターを務めるジル・マグワイヤーは述べています。「ですから、私たちは画期的なツールを作って、ロボットとペイロード間のギャップを埋められるようにするのです」。

これにより、RRM3の道が切り開かれました。RRM3は2017年に打ち上げられ、すでに、燃料や冷却剤として機能できる、宇宙で初めての低温流体の移送実証に成功しています。Zero Boil-Off Tank（ZBOT）研究では、冷却剤保管用のタンク圧を制御するための別の方法をテストするため、実験用の液体を使い、低温流体の異なる側面への取り組みが行われました。一連の実験により、宇宙における軽量かつ効率的で長期継続の低温促進薬用貯蔵タンクの開発における知見が得られました。



国際宇宙ステーション内にあるRRM3ハードウェア。この研究では、低温流体である液体メタンの微小重力における初めての移送と長期保管の実証を行っている。燃料や冷却剤として機能することができる低温流体を補給・保管する能力は、月や火星といった目的地への長期移動を可能にするかもしれない。提供：NASA

既存の衛星の寿命を伸ばすことに加え、このような研究では、より容易にメンテナンスができるよう、今後の衛星設計ガイダンスも示してくれます。

つまり、地球の人々にも重要なサービスを提供し続けているのです。

NASAの宇宙飛行士クリスティーナ・コッホが、3D生物学プリンタBioFabrication Facility（BFF）を使って臓器組織を製造できる培地のバッグを取り扱う様子。BFFは、微小重力下で、既存の患者の細胞から正常に機能する人の臓器を製造できるより大型のシステムの一部になり得る。
提供：NASA

軌道上でより良い未来を築く

宇宙で作ったものが、地上の生活を変える

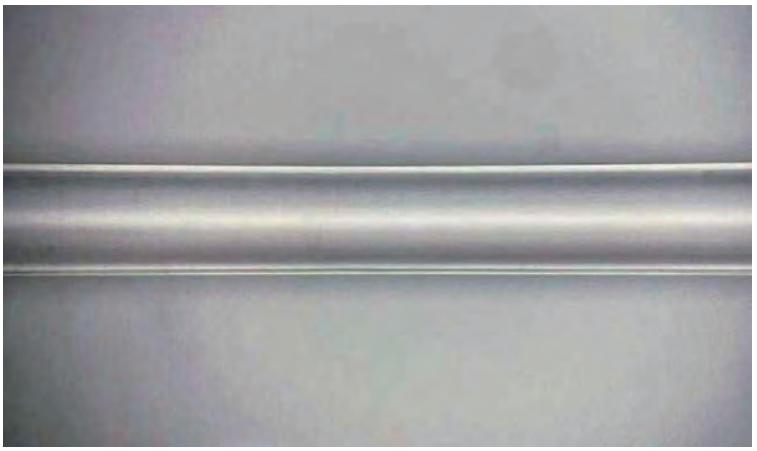
アメリカ国内では、毎日平均すると22人が、臓器提供を待ちながら亡くなっています。世界中では3000万人以上の人々が、網膜変性疾患に苦しんでいます。こうした両方の問題に対処できるかもしれない新たな製造プロセスが、今、国際宇宙ステーションで開発されています。

微小重力環境は、地球では実現できないようなバイオプリントされた臓器から高品質の材料まで、あらゆるものを作るための特別な機会を提供します。バイオテクノロジーと医療が交差する領域の研究はまるでSF映画のようです。

アメリカに拠点を置くバイオテクノロジー企業LambdaVisionでは、光で活性化されたタンパク質を使って、目の損傷した光受容体の機能に取って代わることのできる、タンパク質系の人工網膜の設計・開発を行っています。加齢による黄斑変性症や網膜色素変性症などの変性疾患が原因の盲目者の視力を回復することを目的としています。現在、いずれの疾患についても治療法は見つかっておらず、このような患者向けには、視力を回復し、生活の質を向上させるための技術を開発するという大きなニーズが存在しています。

ISS National Lab主導のタンパク質系人工網膜製造研究では、バクテリオロドプシンタンパク質を層ごとの積層過程で利用し、網膜下の空間に挿入できるような薄い膜を作る方法が研究されています。国際宇宙ステーションで作られたものは、地球で製造されたものよりも質・安定性ともに優れていると期待されています。

「微小重力環境下では、より均質で一貫している層が期待できます」とLambdaVisionの最高経営責任者兼社長で主任研究者のニコル・ワグナーは述べています。「地球では、重力の影響を大きく受ける層ごとのプロセスを使って人工網膜が作られます。微小重力環境下での製造により、溶液の沈殿を回避できるため、欠陥がより少なく、均一性がより高く、光学的透明度もより高い膜を作ることができます」。



国際宇宙ステーションで2回のFiber Optic Production実験により生成されたZBLAN光ファイバーの一部の顕微鏡画像。提供：Mercury Systems

LambdaVisionの研究者らと導入パートナーのSpace Tangoは、微小重力環境で初めて200層の膜を製造することに成功しました。この研究において大きな一歩と言えます。

多くの商用製造では、地上の重力を原因とする誤差の減少が期待されています。Made in Space Fiber Opticsでは、ジルコニウム、バリウム、ランサニウム、ナトリウム、アルミニウムを混合したZBLANと呼ばれる材料を使って、微小重力環境下でのファイバー光フィラメントの製造を研究しています。この光ファイバーガラスは、ISS National Labによれば、従来のシリカ系ファイバーよりも100倍効率的な性能を発揮します。

研究者らは、超高速ブロードバンド通信やリモートセンシングに利用されるこのような光ファイバーには、微小重力環境下で製造すると、より優れた性質が伴うのではないかと考えています。いくつかの研究では、この理論をテストし、地球低軌道では、地上で使えるこのようなファイバーの商用製造ができるかどうかをテストしています。

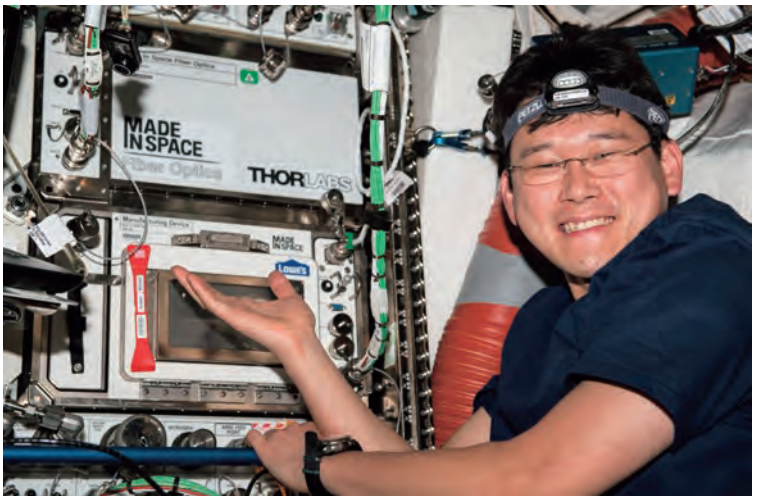
ISS Nationasl Labがサポートする Fiber Optic Production-2（FOP-2）は、初期の研究に基づいて、販売用の高品質の光ファイバーを将来的に製造するためのプロセス構築に役立てています。

また、軌道から地球へと帰還するのが、3Dプリントによる人間の細胞になる可能性もあります。いくつかの企業では、微小重力をツールとして用いることで、ヒトの臓器製造への取り組みが行われています。3Dプリントのサブカテゴリであるバイオプリントでは、可変細胞や生物学的分子を使って、組織構造のプリントを行っています。ROSCOSMOSが2018年に打ち上げ

た初のバイオプリンタは、人工臓器の製造に関する研究で、道を切り拓くのに貢献しています。ロシアの企業3D Bioprinting Solutionsの科学者らは、磁気バイオプリンタOrgan.Autで構成されている、3D MBPと呼ばれる専用の機器と一連の多機能透明キュベットを開発しています。Organ.Autの機能には、磁場を使った宇宙環境下での関節細胞の培養が含まれています。

2018年から2020年にかけて国際宇宙ステーションで実施された一連の実験では、組織構造の作成に関するこのアプローチの科学的重要性を証明し、細菌の安定したバイオフィルムを入手し、骨のミネラル成分を複合し、有機分子を結晶化するためのプロセスが研究されました。このような研究結果は、組織工学製品や次世代の医薬品など、画期的な治療法の開発の面で道筋を付けています。

宇宙飛行士らは、現在、微小重力環境下でバイオファブリケートされた組織の作成をテストするため、BioFabrication Facility（BFF）を利用しています。この設備を作り運用している、Redwireの会社Techshotでは、宇宙における営利事業のための機会に投資したいと考えています。Techshotでは、2019年にBFFを打ち上げており、以来、臓器不足の問題を解決できる能力の開発に取り組んできました。



宇宙航空研究開発機構（JAXA）の宇宙飛行士金井宣茂（かない　のりしげ）が、設置したMade in Space Fiber Optics Lockerと再設置されたAdditive Manufacturing Facility（AMF）製造装置の隣でポーズをとる様子。Made In Space Fiber Optics研究では、微小重力下で光ファイバーフィラメントを製造するメリットを実証している。提供：NASA

「最初の一歩を踏み出さなければ、解決策は一生生まれません」とTechshotの副社長リチャード・ボーリングは述べています。BFFではすでに、多層心臓構造のプリントを行っており、人間の半月板の構成部分についても、初期テストプリントをすでに行っています。

地上では、バイオプリントされた構造は、潰れてしまうか、化学的に厚みを持たせた処置が必要で、いずれの場合も、細胞が人間の臓器組織を複製することは不可能です。微小重力は、複雑な多層構造をプリントし、それを2段階のプロセスで組織にコンパイルすることを可能にします。Techshotの2つ目のハードウェアAdvanced Space Experiment Processor（ADSEP）は、このような細胞を組織へ変える準備を行います。このプロジェクトの焦点は、地上にいる人々の健康改善ですが、これら2つのハードウェア・システムは、深宇宙探査時の食料や医薬品生産の役割も果たすかもしれません。

「我々は、研究者らが新たな発見をする際に用いるツールを提供し、地上での生活をより良いものにしています」とボーリングは述べています。「人々のために食物を提供し、治療する。それ以上に人類の役に立てることはありませんよね？私にとって、宇宙産業は、土星の輪に関するものではなくて、人類についてのものなのです。地上での生活をより良いものにできるかどうか、あるいは、火星へと生活を拡張させることができるかどうか、ということなのです」。

LambdaVision Inc.の社長兼CEOのニコル・ワグナーが、ケネディ宇宙センターの報道ホールで、メディア関係者へ向けて話をする様子。
提供：NASA/Kim Shiflett

ESA（欧州宇宙機関）の宇宙飛行士マティアス・マウラーが、創傷治癒の促進用のバイオプリントされた組織パッチを試験したBioPrint First Aid研究で、飛行前トレーニングを行う様子。提供：ESA

ドイツ航空宇宙センター（DLR）の研究Bioprint FirstAidでは、探査目的のバイオプリントに焦点が当てられています。携帯可能な小型のバイオプリンタで、患者自身の皮膚組織を使って、組織形成パッチを作り、負傷部分を覆ったり、治癒過程を加速させたりします。

月や火星への今後のミッションでは、カスタマイズされたパッチをバイオプリンタで作ることで、宇宙で起こりうる負傷部位の治癒の変化に対処することができるかもしれません。ミッション前に個人の細胞を抽出することで、より迅速に負傷に対処することができるようになります。同様の3Dプリント技術でも、長期の宇宙飛行に伴う別の問題に対処することができるかもしれません。すなわち、月面より先へと進出するミッションにおいて必要となるツールなどを予測することが必要です。「荷物を詰め込みすぎる」ことを避けることが、宇宙飛行中にクルーが必要となるかもしれないツールを作ってくれるのです。

プラスチック製の、微小重力環境下で初の3Dプリンタは、2014年に国際宇宙ステーションに到着しました。Redwire Space（旧Made in Space）が開発したこの機械は、熱とプラスチックを1つのレイヤープロセスにまとめてオンデマンドで物体を製造するものでした。

3D Printing In Zero-G実験は、3Dプリンタが宇宙でも通常通り機能するということを実証することで可能性を広げました。イタリア宇宙機関（ASI）とNASAでも、国際宇宙ステーションにおけるプリントへの可能性をさらに広げた、Portable On Board Printer 3D実験を共同で行っています。現在までに、何百ものサンプルが、複数のプリント設備を使って作成されています。

一般的に、このようなプリンタは、熱せられたプラスチック、金属、あるいはその他の材料押し出して、何層も重ねることで、3Dの物体を作ります。国際宇宙ステーションで比較的低温のプラスチックを使ってこのプロセスをテストすることは、深宇宙有人ミッションや宇宙での製造における、オンデマンドのファブリケーション能力を確立する上で、大変有意義な第一歩となりました。

コマンダーのバリー・「バッチ」・ウィルモアが、積層造形または3Dプリントにより宇宙で初めて作った物体を持ち上げている。提供：Made in Space/Redwire Space

廃棄物を最小限に抑えることは、国際宇宙ステーションにおいては最重要事項であり、長期ミッションにおいても必要不可欠となります。NASAのRefabricatorという最初の3Dプリンタは、プラスチック廃棄物を高品質の3Dプリンタフィラメントへとリサイクルします。持続可能な製造、修理、リサイクルの実証を成功裏に行うことは、NASAにとって重要な取り組みです。

Redwire Regolith Print（RRP）実証では、このコンセプトを次のレベルに引き上げて、軌道上実験室で3D製造用の全く異なる種類の材料regolithの検証が行われました。月や他の惑星の表面にあるこの埃は、居住区や他の建物の建設で使える原材料となるかもしれません。regolithの使用により、今後のミッションで打ち上げなければならない材料が削減されます。

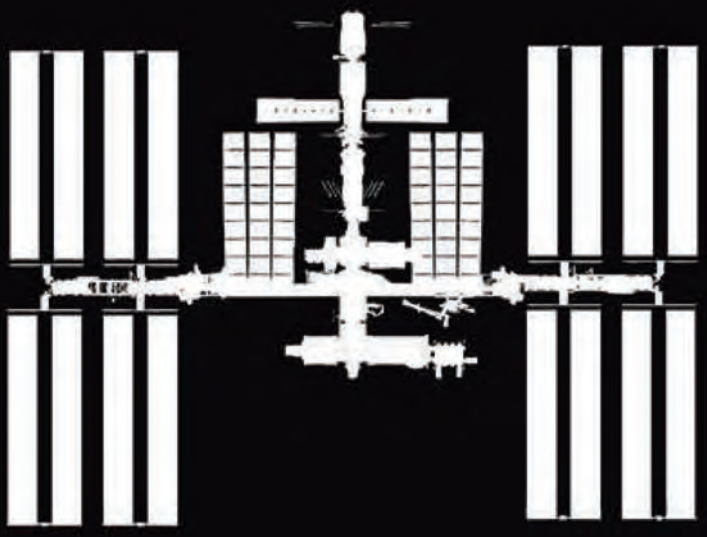
商用パートナーは、地球外での製造における未開拓領域を探索することで、長期の宇宙ミッションで使用できる、微小重力での生産能力を研究する機会を得られます。国際宇宙ステーションは、20世紀中頃にはまだフィクションのような存在だと思われていました。それが今では、宇宙での製造など、画期的なアイデアが実現しています。

ロシアの宇宙飛行士オレグ・コノネンコが、3D MBPを手に国際宇宙ステーションで浮かぶ様子。提供：ROSCOSMOS

国際宇宙ステーション 人類への恩恵 2022

2023年2月

発行者：宇宙航空研究開発機構（JAXA）
有人宇宙技術部門　きぼう利用センター
〒305-8505　茨城県つくば市千現2-1-1
https://humans-in-space.jaxa.jp/



NP-2022-06-010-JSC

リサイクル適性Ⓐ
この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。

2023.2.200