国際宇宙ステーション

人類への恩恵 第3版（日本語ダイジェスト版）

INTERNATIONAL SPACE STATION

BENEFITS FOR HUMANITY

3RD EDITION

国際宇宙ステーション
人類への恩恵 第3版
（日本語ダイジェスト版）

国際宇宙ステーションからのおくりもの

わたしたちが暮らす地球からわずか400キロメートル上空に、宇宙で唯一、
人類が生命を営む場所があります。国際宇宙ステーション（ISS）です。
そこでは、主に日本、アメリカ、カナダ、欧州、ロシア、イタリアの人々が
さまざまな活動をしています。

「国際宇宙ステーション 人類への恩恵 第3版（日本語ダイジェスト版）」では、
ISSパートナー機関によるBenefits for Humanity 3rd Edition（英語版、全221ページ）に
収録された研究成果の中から、宇宙航空研究開発機構（JAXA）が
中心になって進めている研究を主にご紹介します。

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

ISSの科学技術からの恩恵

Benefits for Humanity 3rd Editionとは

ISSパートナー機関によるプログラムサイエンスフォーラムが、3年に1度発行するISS研究成果を取りまとめた冊子です。2012年の第1版の発行から、2015年に第2版、そして今回2018年に第3版が制作されました。Benefits for Humanityの英語版は、米国航空宇宙局（NASA）のウェブサイトで公開されています。 http://www.nasa.gov/stationbenefits

ISSプログラムサイエンスフォーラムは、ISSでの研究成果の最大化を目的として、ステークホルダーや一般の人々への広報活動のほか、実験施設の戦略的な利用を計画・実践するために、科学実験や技術実証に関する情報データを収集・管理・提供するワーキンググループです。宇宙航空研究開発機構（JAXA）、カナダ宇宙庁（CSA）、欧州宇宙機関（ESA）、米国航空宇宙局（NASA）、ロシア国営宇宙公社（ROSCOSMOS）、およびイタリア宇宙機関（ASI）のISSパートナー機関のメンバーで構成されています。

目次

はじめに 5

国際宇宙ステーションの経済的な価値 7

国際宇宙ステーションの科学的な価値 21

宇宙ビジネスの経済発展 29
治療のカギは宇宙にあり（高品質タンパク質結晶生成実験）..... 30
小さな衛星から大きな成果へ（成長する小型衛星市場の実現）..... 31

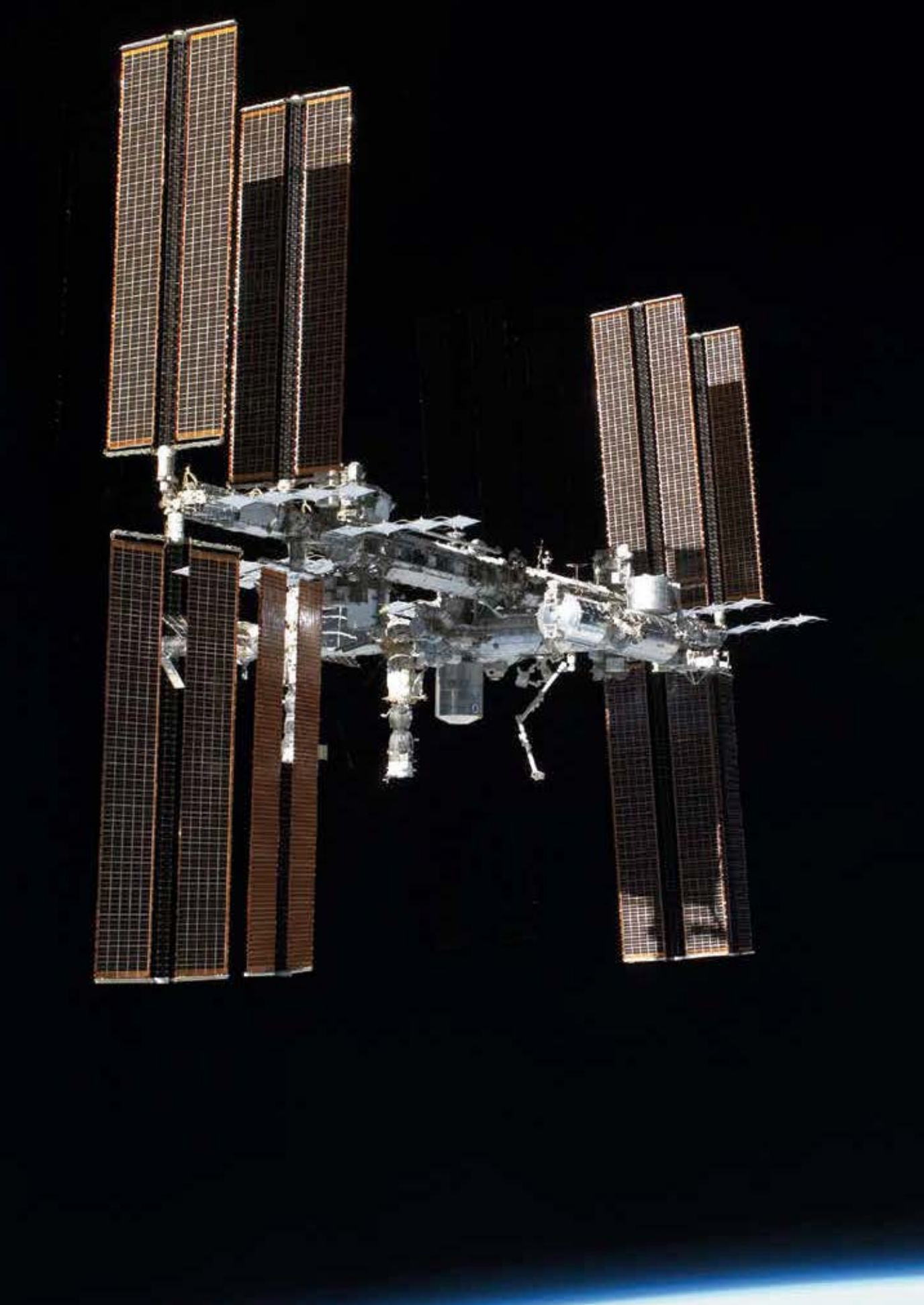
イノベーション 35
宙に浮く物質を解明する（静電浮遊炉での物性データ取得）..... 36

人々の健康 39
マウスから学ぶ、ヒトの加齢様変化と健康長寿のヒケツ（マウス飼育実験）..... 40
人類最大の感染症「歯周病」に迫る（高品質タンパク質結晶生成実験）..... 41

地球観測と災害対応サポート 45
宇宙からの気象パトロール（高画質HD画像で災害対応）..... 46

地球規模の教育活動 49
子供たちによる宇宙帰り種子の変異捜査 50
アジアの学生が挑戦する物理実験、アジアン・トライ・ゼロG 52

おわりに 55



はじめに

2011年に国際宇宙ステーション（ISS）が完成してから現在に至るまで、地球低軌道上で宇宙実験にかかわる研究者は3,600人以上、実験数も2,500を上回りました。研究の対象も、科学分野から、技術開発、宇宙探査、商業活動、教育活動など、多岐にわたります。

そのような背景の中、世界中のISSパートナー宇宙機関によるプログラムサイエンスフォーラムはそれらの研究成果を取りまとめて、2012年から3年に1度、International Space Station Benefits for Humanity（邦題「国際宇宙ステーション 人類への恩恵」）を発行しています。今回は第3版の発行にあたり、昨今の宇宙開発ビジネスの発展や人々の宇宙への関心の高まりを受けて、新しく経済面と科学面から捉えたISS科学研究や技術開発の価値について評価する取り組みを加えました。

一般に、科学技術の分野では基礎研究や開発が人々の生活に役立つようになるまで、その道のりはとても長く、新しい発見や知識が製品やシステムとして実用化されるまで、十年以上の歳月を費やす例も決して少なくありません。そのような状況の中で、これまでに宇宙で生まれ、地球で育てられた製品やサービスについて、「国際宇宙ステーションの経済的な価値」でご紹介します。

また、「国際宇宙ステーションの科学的な価値」では、科学的な見地からISSの存在価値をテーマにして、その研究成果を評価しています。なぜ宇宙空間で実験や研究を行うのでしょうか？それは、地上と異なる環境、つまり宇宙で重力影響を受けにくい環境が科学実験や研究に大いにメリットがあるからです。微小重力環境で行われた実験や研究の成果発表は、1998年以降から現在に至るまで世界中で2,100以上に及び、長年さまざまな手法で評価を重ねてきました。「国際宇宙ステーションの科学的な価値」では、それらの評価をもとにISS研究の影響力を科学的に論じています。

宇宙から地球の自然環境を見守る地球観測や災害対策システム、人々の健康に役立つ知識の発見や新薬創製のテクノロジー、未来の科学技術者を育てる軌道上の研究開発プラットフォームなど、地球での生活をより豊かに、そしてより便利にするためにISSの研究成果はあらゆる分野で生かされています。

「国際宇宙ステーション 人類への恩恵 第3版（日本語ダイジェスト版）」では、主に宇宙航空研究開発機構（JAXA）が中心になって進めている研究について、その成果をご紹介しています。

人類への恩恵。それは、国際宇宙ステーションからのおくりものなのです。

地球の外縁上に見える太陽電池パネルと熱制御系放熱板。
第52次クルーがロシアの船外活動中に撮影
©NASA

国際宇宙ステーションの経済的な価値

理論の成熟化や応用の可能性、有益な製品化など、国際宇宙ステーション（ISS）の研究活動で得られた新しい知見や可能性からあらゆる成果が生まれています。ハイレベルな確証試験をクリアしたものや持続可能な市場の要求から創出されたものまで、商業活動や社会的な利益を生み出しています。このような変化は徐々に現れはじめ、ISS活動から製品やサービスが市場に参入し、さらに地上での生活に役立てられるようになりました。この章では、数十年にわたって研究評価や開発プログラムの分野で経験をもつ国際的なサービス企業、ナヴィガント・コンサルティング社の協力で実施した調査をもとに、地球低軌道上にある研究施設ならではの研究成果の中から、初期に経済的利益を生み出すようになった研究について検証します。発展し続ける宇宙を取り巻く経済活動を促進し、民間セクターの宇宙に対する関心を高めるためにISSが担う役割についても触れます。

「国際宇宙ステーション 人類への恩恵 第3版（日本語ダイジェスト版）」では、Benefits for Humanity 3rd Edition（英語版）から、ISSの経済的な価値や地球低軌道を取り巻く宇宙ビジネスの発展、そして、ISSパートナー宇宙機関の今後の展望についてご紹介します。

ISSを取り巻く宇宙ビジネスの現状

過去十年間、宇宙ビジネスは世界中を巻き込み、著しい成長を遂げてきました。2006年、評価額1,760億USドル（約19兆円）だった宇宙ビジネスは、推定3,450億USドル（約37.5兆円）の利益を創出しています。民間セクターでの宇宙への関心の高まりは、ベンチャー企業の投資額からもうかがわれます。2000年から2014年の間に、宇宙開発のスタートアップ企業に総額11億USドル（約1,200億円）が投じられました。また、2015年には1年間だけで18億USドル（約2,000億円）の投資額となり、2017年には120を超える投資家が、民間宇宙ビジネスに39億USドル（約4,200億円）を投資しました。

例えば、地球低軌道から地球観測をするために2010年に設立されたプラネット社は、簡易に大量の小型衛星を打ち上げる手段として国際宇宙ステーション（ISS）からの小型衛星放出機構の利用から始め、現在は新宇宙ビジネスの小型打ち上げロケットの利用へと移行し、従業員数470人以上、保有する衛星は175基を超え、10億USドル（約1,100億円）以上の価値を生み出す企業に成長しました。プラネット社のような民間企業が日々新しいサービスを提供し、商業用打ち上げロケット市場などの他分野でもイノベーションを引き起こしています。

商業用打ち上げロケット市場は新たな宇宙ビジネス発展をけん引しています。スタートアップ企業の参入により、かつて少数派の大企業や合弁会社が主流だった市場に新たな可能性が生まれました。スペースX社は、2002年の資本金は1億USドル（約110億円）でしたが、2018年には資産価値270億USドル（約3兆円）を超え、米国民間企業の中で価値あるテクノロジー企業の第4位を獲得しました。また、オービタル･サイエンシズ社は、2009年の年間売上高1億9,700万USドル（約215億円）から、2013年には13億7,000万USドル（約1,500億円）まで成長を遂げました。2015年、同社とアライアント・テックシステムズ社（ATK）との合併で誕生したオービタルATK社は、2018年に78億USドル（約8,500億円）でノースロップ・グラマン社に買収されました。

現在、宇宙ビジネスにおいて民間セクターの活動は過去に類を見ないほど活発化しています。新規参入企業は増加し、宇宙に対する人々の関心も高まっています。

科学研究や技術実証から、経済的な価値へ

ISSで実施されるさまざまな活動を経済面で評価する場合、その活動の現状を的確に捉えて、商業化に至るまでのプロセスを総合的に評価する必要があります。既に社会的影響力を確立して経済的効果を生み出しているか、また発展途中にある場合は、今後の展望や将来性の有無が評価では

重視されます。

今回の経済評価では、まず評価対象の候補を抽出した後、市場の動向、技術の成熟度、競争力、マネジメント能力などの項目に関する調査データを根拠として、包括的な価値が評価されました。このようなアプローチを経て、候補として抽出された40事例のうち25件について経済的な価値を評価することができました。残りの15件は、イノベーションとして将来性は期待できるものの評価には時期尚早であったため、十分な情報が収集できませんでした。それらの研究ついては、今後の動向が大いに期待されます。

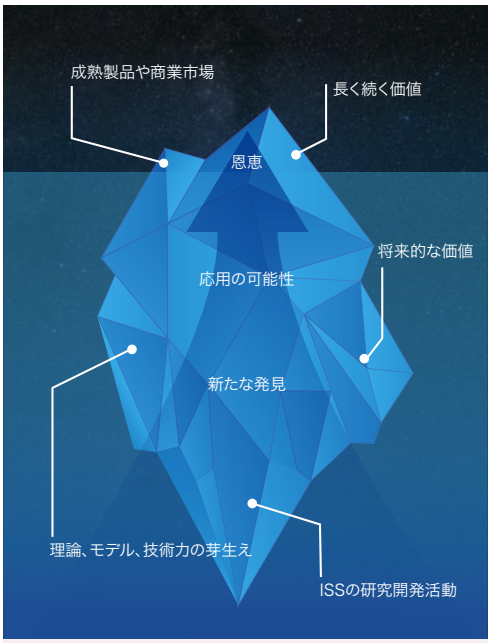


図1　研究活動から生まれた価値　©MAPI/NASA

図1は、評価結果についてISSの科学・技術の成果全体を水中に浮かぶ“巨大な氷塊”にたとえて示した図です。水面上には、成熟製品や商業市場、そして長く続く価値などすでに経済面で社会に貢献しているものが示されています。一方、水面下には将来的かつ潜在的な可能性や新たな発見が期待できる科学研究や技術実証を示しています。

社会に役立つISSの科学技術

ISSのこれまでの活動から派生した商業目的の製品やサービスの例として、植物栽培実験用に開発された**空気ろ過システム**、ISSから放出された衛星から撮影した**地球表面画像**、ISS船内からの**地球観測データと気象モニタリングサービス**、タンパク質結晶生成から派生した**新薬の開発**、ISSロボットアームから開発された**手術用ロボット**などがあります。

また、新しい市場の発展という点においては、宇宙へのアクセスを担う**輸送機や輸送サービスの提供**、**研究・施設の有償利用サービス**、**小型衛星の放出事業**、等が挙げられます。そのほか、科学実験の研究ミッションに加えて、ISS自体の運用や実験を実施するためや、クルーの安全な生活を維持するためのテクノロジーやエンジニアリングからも経済的な価値を創出しています。

将来性と潜在性が期待されるISSの科学技術

一方、将来的な経済価値が予測できる科学技術も多くあります。例えば、宇宙での消火剤の特性を調べる**消炎研究（FLEX）**で発見された低温で起きる燃焼形式（冷炎）のメカニズムは新しい知識として、低燃費・低排ガス放出を実現する液体燃料エンジンの開発において今後期待が寄せられています。これは、地球温暖化の一因とされる二酸化炭素排出量を低減するために世界規模で有益な技術となりえます。また、**ナノ流体工学**を応用した新薬の開発分野では、流体がナノレベルの微小な流路をどのように流れるかに着目しながら、抗HIV薬や筋萎縮症治療薬の研究が続けられています。

そのほか、Benefits for Humanity 3rd Edition（英語版）では、ISSパートナー宇宙機関に関連するISSの経済的な価値や地球低軌道を取り巻く宇宙ビジネスの発展、そして、各パートナーの今後の展望について、詳しくご紹介しています。
https://www.nasa.gov/stationbenefits

2018年9月10日、ISSから撮影したハリケーン・フローレンス　©NASA

軌道上での消炎研究（FLEX）で燃焼するヘプタンの粒子　©NASA

タンパク質結晶生成実験からの経済効果

宇宙航空研究開発機構（JAXA）が取り組むタンパク質結晶生成実験もまた、近い将来に利益を生み出すことが期待される研究領域の１つです。

ISSから恩恵をもたらす研究分野の一つに、タンパク質結晶生成（PCG）実験があります。ISSの微小重力環境では、地上よりも大きく、高品質なタンパク質結晶を生成できます。ISSで得られたタンパク質結晶を地球に回収した後、X線結晶構造解析によりタンパク質の詳細な構造を明らかにすることができます。高品質なタンパク質結晶を生成するために複数のフライトが必要な場合でも、**ISSでのPCG実験は製薬会社の研究コスト削減を実現できます。宇宙実験の結果として、薬剤候補の効能をより正確に予測し、病気に関与する重要なタンパク質の構造をより正確にモデル化できるようになります。**

次ページからのISSパートナーの今後の展望でも触れられていますが、JAXAは民間企業の創薬研究を支援する有償利用実験に力を入れています。ISS米国国立研究所も相当数のPCG実験を提供しています。イーライリリー・アンド・カンパニー社（米国）、メルク社（ドイツ）、ペプチドリーム社（日本）など、多くの製薬企業がISSでPCG実験を実施しています。PCGは、人類に恩恵をもたらす潜在的な価値だけでなく、同時に経済的にも高い価値を生み出すISSの研究活動です。

JAXAのPCG実験では、デュシェンヌ型筋ジストロフィー（DMD）の研究者にとって関心のあるタンパク質の結晶生成実験が行われています。DMDは進行性の筋変性を引き起こし、多くの患者は思春期までに歩けなくなる重篤な症状を伴う病気です。2002年に、DMD患者の壊死性筋線維で発現するタンパク質（H-PGDS）が特定され、H-PGDS の特異的阻害剤の開発が加速化しました。研究者たちはISSを利用して、タンパク質とその阻害剤の複合体の高品質結晶を生成し、その結晶構造を高分解能で明らかにしました。ISSでのJAXA PCG実験で得られた成果は、やがて新しい薬剤候補の設計につながり、より有効性の高い阻害剤（TAS-205）が創り出されました。その後の試験によると、TAS-205は筋ジストロフィーモデルマウスやイヌに発症する筋肉壊死の拡大を減少または遅延させることが判明しました。2015年に、大鵬薬品工業は、TAS-205のヒトでの安全性を確認し、さらに、2017年にはDMD患者33名を被験者として205の24週間の第Ⅱ相試験を完了しました。

国際宇宙ステーションパートナーの今後の展望

現在、ISSはその歴史の中で重要な局面を迎えています。将来を見据えたISSの研究活動と商業化について、ISSパートナー各々の今後の展望をご紹介します。

宇宙航空研究開発機構（JAXA）

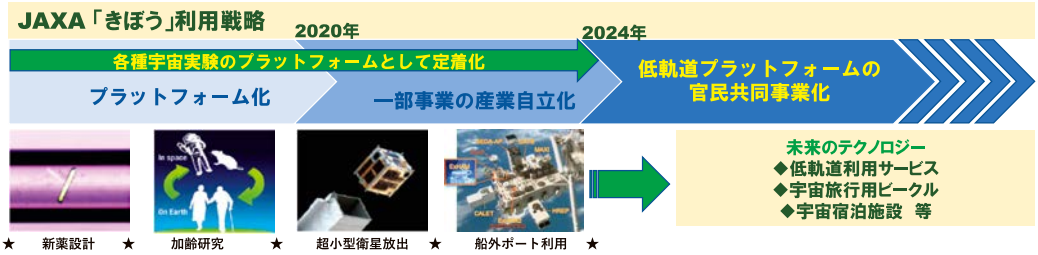
JAXAは、ISS「きぼう」日本実験棟の利用において多様性を促進しながら国内経済全体にわたって「きぼう」からの恩恵を最大化するとともに、科学技術分野においても新たな発見を目指して多大なる貢献を生み出す努力をしています。**JAXAは、世界中の研究機関、民間企業、官公庁を巻き込んで、新薬設計支援、加齢研究支援、超小型衛星放出、そして船外ポート利用の４つのプラットフォームを柱として、「きぼう」利用に重点を置いています。**2024年までに、これらのプラットフォームにおいて30～50%の商業利用サービス定常化を目標としています。JAXAと利用サービスプロバイダーとのコラボレーションを強化し、新しい組織や団体の各々が「きぼう」の高品質な利用サービスをエンドユーザーに提供できるようにすることが見込まれます。このようなパートナーシップの深まりとともに、運用上の専門知識が引き継がれ、やがて新しい市場が形成されることが期待されます。

現在、JAXAは商業利用分野において国内創薬会社のペプチドリームやソニーコンピュータサイエンス研究所（ソニー CSL）等の企業と提携して、研究や技術開発のために新たな活路を提供しています。さらに、ISSを利用するパートナーシップの多様性を重視し、アジアや太平洋の国々に対して「きぼう」の利用を呼びかけました。例えば、シンガポールとの合意により、「きぼう」の小型衛星放出機構（J-SSOD）を使用してシンガポールの衛星が無事にJ-SSODから放出されました。

JAXAは、「きぼう」の研究開発テストベッドの商業利用を確立するために、戦略的パートナーシップの促進を重視しています。前述のペプチドリームとの新しい有償契約はその一例です。この契約により、契約期間中のタンパク質サンプル数は5から30に増えました。JAXAはまた、ペプチドリームや他のユーザーの求めに応じて、サンプルの打ち上げ回数を年に2回から4回に倍増しました。これにより、研究全般にわたって経費を削減できるばかりでなく、新薬開発が加速されます。さらに、同社は他企業との共同研究活動において「きぼう」の利用を拡大することができるようになりました。このことは、2013年以降「きぼう」実験プログラムに参加する製薬企業はもちろん、潜在的な商業ユーザーにとっても非常に魅力的な取り組みです。

また、JAXA宇宙探査イノベーションハブのプログラムでは、ソニーCSLとのパートナーシップが実を結びました。このパートナーシップでは、「きぼう」の船外に設置されている中型曝露実験アダプター（i-SEEP）において、複数の衛星間、または衛星と地上運用インターフェースとの大量データ通信システムを確立するために重要な役割を果たすことが期待されます。このイノベーションは将来の長距離光ファイバー通信にも非常に有益です。

ISSと「きぼう」利用を継続的に拡大することにより、現在から2024年以降へも科学、イノベーション、経済の発展に繋げていくことが期待されます。



2024年までのJAXAきぼう利用戦略　©JAXA

カナダ宇宙庁（CSA）

カナダ人にとって、宇宙に関する大胆かつ高い目標を持つことは、イノベーションや経済成長を強く推し進める機動力になるだけでなく、人々をつなぎ、活力の源になります。カナダ人の宇宙での取り組みは、広大な国土に住むすべての人々が一つになるというビジョンを掲げて、それを成し遂げようとする強い意志のもとにスタートしました。このビジョンを達成するために、1962年に人工衛星アルエット1号（Alouette 1）を打ち上げ、カナダは世界で3番目の衛星打ち上げ国になりました。その10年後に放出した通信衛星アーニクA（Anik A）は世界初の静止軌道による国内通信衛星システムです。このような経験から、宇宙への持続的な努力と投資がいかにカナダ国内で私たちの日常生活に大きな発展もたらしてくれるかを理解することができました。

人類初の宇宙滞在を目の当たりにして、カナダ人の想像力、探査への欲求、そして独創性は大いに刺激を受けました。スペースシャトル専用のカナダアームの開発は、人々の心を魅了し、自国の技術発展を誇りに変化を引き起こすプロジェクトとなりました。その後、カナダアームの開発に続き、カナダ人宇宙飛行士がスペースシャトルで宇宙飛行し、微小重力下で科学実験を行うことがで

きました。この出来事で、カナダの青少年たちは勇気づけられました。大胆な夢に向かって限界の壁を乗り越え、科学、技術、工学、数学（STEM）を学び、宇宙に挑戦しようという若者たちに希望を与えました。

このような経緯から、カナダは1988年にISSプログラムに参加しました。この大事業とカナダのこれまでの経験や文化、そして価値観とが融合したのです。それは、カナダの宇宙探査への根源的な願望が世界規模で拡げられることを意味し、人々が団結して励まし合い、全国民に恩恵をもたらす科学技術力の活性化を目的とするものです。ISSプログラムでは、カナダ最先端の宇宙ロボット技術を活用したモバイルベース、カナダアーム2や、デクスターから構成されるモバイルサービスシステムは、ISSにおいてカナダを代表する貢献です。この複雑なシステムは、ISS上でモジュールごとに組み立てられました。現在も、カナダはISS上で不可欠なロボティックスの維持管理と運用を続け、ISS上での画期的な研究によって科学の進歩に貢献しています。その点において、戦略的にヒトの研究に重点を置いて深宇宙での長期滞在を目指すとともに、国民への恩恵を最大限にすることも目標にしています。

ISSプログラムは国際協力のサクセス ストーリーです。カナダにとって、宇宙探査への投資が生み出す収益は計り知れないものがあります。従来の経済評価では、長期的に、複数セクターが関わる活動やバリューチェーンに拡がる利益を完全に数値化して評価することはできません。しかし、輸出収入、宇宙分野での雇用数、訓練を受けた優秀な人材の数などの従来の経済指標からも、宇宙探査の専門知識や技術の移転によって経済が成長し、ステークホルダーたちがビジネスチャンスを求めて宇宙ビジネスの各分野で新しい市場を開拓して、カナダ人にとって質の高い雇用と富を生み出

船外プラットフォーム（写真中央）で、ロボットによる燃料補給ミッション（RRM）の技術実証　©NASA

手術用ロボットアーム“ニューロアーム”を手術室で準備する医療チーム　©カルガリー大学

すようになっていることが読み取れます。さらに、カナダがISSプログラムに参加することで、カナダの青少年たちが科学、技術、工学、数学を意欲的に学ぶ環境が整備されます。その結果、科学文化とリテラシーが強化され、質の高い職種の雇用を増やし、最終的に経済発展につながります。そして、CSAがISSプログラムに参加する意義は、地上の暮らしをよりよくすることです。ISSの利用を通じて達成される科学的な発見や技術開発と同じように、人々の健康に関する知識を深め、私たちが地上で直面する課題を解決するために、ISSプログラムへの参加は役立てられています。

2016年に、カナダは2024年末までISSプログラムのパートナーとして参加を継続する意思を表明しました。近々、CSAはカナダ政府に対して、2024年以降も有人探査に関与すること、そして、深宇宙の探査と人類のための宇宙開拓を目的とした国際的な取り組みにおいてキープレーヤーになるべく野心を持って未来志向のイニシアチブに参加することを提案する予定です。

欧州宇宙機関（ESA）

地球低軌道（LEO）は、科学技術の研究においてユニークな環境です。そのため、LEOはヨーロッパでは最も関心が集まる探査のための拠点であり続けています。欧州宇宙機関（ESA）のスペース4.0戦略（Space 4.0 strategy）は、LEO活動の移行を目指した取り組みです。具体的には、ISSを政府主管の研究所として運用することから、力強くLEO経済を活性化させて、ESA、他機関、民間セクターに対する付加価値サービスを提供することを目指しています。

そのため、ISS運用の継続と並行して、ESAは常時パートナーを公募することによって商業パートナーシップの構築を強化しています。このパートナーシップは、ISSのユーザーコミュニティの多様化を推し進めながら、ヨーロッパ地域の科学コミュニティに役立つ機能やサービスを補助的にISSが提供することを目的としています。このような最初の商業パートナーシップから生まれたアイス・キューブス（ICE Cubes）は、ESAのコロンバス実験棟内で研究を行うヨーロッパ初の商業施設です。2018年5月から始まったこのサービスでは、ISSへの迅速かつ簡易なアクセスを有償で提供するほか、ユーザーが実験に直接関わることもできるようになりました。2019年には、次の商業パートナーシップとして、汎用性の高いバルトロメオ（Bartolomeo）の有償パッケージサービスが開始される予定で、ISS船外ペイロードの末端に至るまで切れ間のないアクセスを価格競争に対応した低価格で提供します。このサービスでは、地球のクリアな眺望を確保した画像や、高速データ供給による地上からの直接的な実験管理、さらにサンプルの検索機能を提供します。

商業パートナーシップは、民間セクターに宇宙探査への参加を促し、革新的で活力のあるISSへ

欧州宇宙機関（ESA）の科学実験施設コロンバス内にある生理学実験用モジュールラックに設置された実験装置アイス・キューブス　©NASA

のアプローチを提供します。このようなサービスは、宇宙および非宇宙産業基盤の競争力を強化し、研究開発を刺激し、ESAの宇宙探査ミッションに斬新なソリューションを吹き込みます。宇宙での有償研究と利用をさらに拡大するために、ESAは欧州探査包括プログラム（European Exploration Envelope Programme）とESAビジネス利用プログラム（ESA Business Applications Programme）と併せて、産業主導の研究提案を募集しています。その選考プロセスでは、潜在的な市場価値が評価されます。研究プロジェクトは、選考されると段階的に実施され、最終段階で新しい商業サービスや製品がうまく導入できるかを実証します。

また、ESAは技術革新と商業利用を支援するために宇宙探査マスターズ（Space Exploration Masters）を組織しています。このコンペティションは、毎年、宇宙分野と宇宙以外の分野の架け橋として、世界レベルの強力なパートナーと共に開催されています。また、ISSの商業利用と将来の探査活動におけるスタートアップ企業の参入を促進するために、さまざまな挑戦に取り組んでいます。Benefits for Humanity 3rd Edition（英語版）では、宇宙探査を目的として、革新的かつ継続的な応用、エネルギー供給、生命維持システム、生物学的機能、植物の発芽プロセス、資源利用、物質利用プロセス、検知や測定などに刺激を与えるアイデアについて各種ストーリーを掲載しています。

イタリア宇宙庁（ASI）

経済的観点から見ると、現在、地球低軌道（LEO）の市場は過渡期にあります。民間セクターへの新企業の参入が示唆するように、市場の可能性を認識したイノベーションは続いています。イタリア宇宙庁（ASI）は、それに付随する利益を得ながら、同時に、技術移転を促進する役割も担っています。**イタリアは、ISSの建設に続き、その後のISSの開発と利用においても重要な役割を果たしています。**同時に、あらゆる分野での豊富な経験や、専門知識および知見を獲得しました。その分野は、生物学、バイオ テクノロジー、ヒトの研究、物理科学、技術の開発と実証など多岐にわたり、社会全体に利益を生み出すものばかりです。ISS搭乗中にコーヒーを抽出できる多機能装置ISSプレッソ（ISSpresso）は、微小重力での毛細管流動の基本的な観察から生み出されました。このペイロードは、100%民間の努力によって宇宙への関

心が高められた官民連携事業の成功例です。

《参考》 ドラゴン補給船運用6号機でISSに運ばれた「ISSプレッソ（ISSPresso）」で抽出したコーヒーを飲むサマンサ・クリストフォレッティ宇宙飛行士　©JAXA/NASA

技術移転は、知識の経済的評価を伴うものです。ASIは、ISSで得た知識の普及により技術移転を展開します。このような技術移転による知識の利用や、それに続くパートナーシップの創出は、研究機関、主題専門家、および産業間の相乗効果を高めていきます。その一例として、2015年に、ASIはヒュパティア・コンソーシアム（Hypatia Consortium）との協力において包括協定を締結しました。その協定により、欧州連合で経済成長と雇用を支えるために重要視している技術分野（Key Enabling Technologies）の研究を目的として、ASI本部に研究所が設立されました。 のちに、このパートナーシップはアマルディ財団へと発展し、国家レベルで取り組む技術分野の専門知識を重視して、イタリアにおける技術移転の基準になることが期待されます。そして、最終的には、宇宙分野の枠を超えたビジネスでのイノベーションを推し進めることによって、研究機関と民間企業の連携を通じて、経済発展とイタリアの競争力獲得に貢献することを目指しています。さらに、LEOよりもはるか遠くの目的地へのアクセスに必要な知識を得るために、ユニークなプラットフォームとしてのISSの利用方法について、今後もASIの構想は続きます。ASIは、イタリア国内での宇宙研究に関する科学技術の今後を見通して、有人探査を目的としたISSの役割を強調しています。そのために、提案される研究がLEOを超えた有人探査に役立つかどうかに重点を置き、研究の機会を提供しています。

ROSCOSMOS

国営宇宙公社ロスコスモス（ROSCOSMOS）

国営宇宙公社ロスコスモスはエンドユーザーに重点を置き、ISSのロシアセグメント（ISS RS）の転換を図ろうとしています。そのために、**関係省庁や民間企業にISS RSの利用サービスを提供する運営組織を設立する計画です**。2025年までの目標としては、ユーザーから資金を募り応用研究を増やすことを挙げています。これにより、ISS RSでの研究における実施上の問題は全体の45%まで解決できます。ロスコスモスと運営組織との協力体制を拡大して新たな組織やグループを受け入れることにより、ISS RSで目標とするエンドユーザーによる研究への投資を促進することが狙いです。これらすべての対策を追い風として、あらゆる研究分野でISS RS事業の拡大を推し進めながら、影響力や経済効果の最大化、そして科学研究や応用研究において価値のある成果を実現します。

ロシアで開発中の3D磁気バイオプリンタ
©3Dバイオプリンティング・ソリューションズ社

現在、ロスコスモスは民間企業との連携による付加的な技術開発に力を入れ、ISSでしか実現できないような生物医学実験に必要な新しい研究基盤を開発中です。特に、商業協力の一環として、現在のISS RS科学機器に加えて、開発中の3次元(3-D) バイオプリンティングを設置する予定です。3Dバイオプリンティングの導入により、実験の国際化と、研究機関や実用化を目指すこの機器に関心を持つ民間企業の増加が期待されます。カザフスタン、アラブ首長国連邦、スロベニアなど、諸外国の学術団体や営利団体の協力を得て、ロスコスモスは人命救助、植物、材料、および燃焼プロセス等に関する地球低軌道の役割を追求するとともに、衛星の軌道放出事業にも継続的に取り組む予定です。

アメリカ航空宇宙局

2017年11月2日、アメリカ航空宇宙局（NASA）の米国人クルーがISSの地球低軌道（LEO）に17年にわたり滞在し続けるという偉業を達成しました。今日、米国の人口のおよそ4分の1は、米国人が宇宙で暮らし働き続けてきた時代しか知りません。

ISSは、有人宇宙飛行の分野で他に類を見ないほどの可能性を秘めています。それは、工学、物理科学、生物学、地球、そして宇宙の知識を豊かにする可能性です。これらの知識は、地球上の生活に恩恵を与え、国内の民間産業の競争力を高めています。ISSで実証された研究や技術もまた、LEOを越えた深宇宙で人類の滞在を拡大するための基礎になるものです。

ISSプログラムとその成果によって培われた多国間のパートナーシップは、関係各国の宇宙分野における専門知識の証です。さまざまな課題を克服して共通の目標を達成するために、多国間でどのように協力し合うべきかを示す一つの例です。ISS政府間協定（多国間）に加盟する15か国で構成される5つの宇宙機関の努力の結果、これまでにISSを利用した国と地域は100以上におよび、現在もなお利用されています。

将来を見据えたLEOに対する米国のビジョンとしては、商業宇宙市場の持続性を目指すと共に、NASA自らも顧客となって宇宙ビジネスを利用することをイメージしています。このビジョンを達成するためには、LEO活動のために健全なサプライヤー基盤を開発することが不可欠です。今日、ISSでは商業的な貨物輸送およびクルー輸送はすでに可能で、業界ではさらなる費用対効果に取り組み、ISS上で十数種類の研究施設が商業利用されています。研究・エンジニアリング・ミッションを統合したサービスに関するREMIS契約（The Research, Engineering, Mission and Integration Services）のように、従来NASAが提供していたペイロード調整関連のサービスを、さまざまな商業プロバイダーから購入するシステムへと移行しています。また、NASAは商用LEO開発プログラムを開始し、軌道上において商業活動のポテンシャルを現状以上に高める取り組みをしています。

NASAは今後も商業による相互作用を促進しながら商業的な調達を増やしていく戦略を活用し、地上と同レベルの実験設備を備えた軌道上実験室で、地上にはないユニークな能力を提供し、ISSの商業利用を拡大していく見通しです。今日では、標準的な実験処理技術を実装する定量ポリメラーゼ連鎖反応（qPCR）などのNASA最先端リアルタイム機能によって、宇宙にいるクルーが自らも研究パートナーとして地上の研究者とリアルタイムで言葉を交わしながら実験ができるようになりました。ハードウェアやデータ機能に関しては、積層造形、バイオファブリケーション、細胞培養、マルチマテリアル3Dプリンティング、金属鋳造、コンピューター制御フライス加工、細胞工学などの拡張機能の追加も計画されています。

深宇宙への有人探査ミッションに備えて、これまでISSの実現に貢献したパートナーシップの重要性を再認識すること、そして、人類が地球と月の間に拡がるシスルナ（Cislunar）空間に進出する過程でパートナーとの関係性をいかに構築すべきかを熟考することが求められています。新たな微小重力利用を求めて従来のユーザーが新市場に挑戦することに加え、新規ユーザーが成功事例をきっかけにLEOへの関心を高めることを目標として、今日あるISSの価値と影響力を最大化することが期待されます。

2018年7月2日、スペースX社ドラゴン15宇宙輸送船がISSのカナダアーム2に捉えられる様子　©NASA

「きぼう」日本実験棟内にある宇宙仕様のスーパー冷凍庫（MELFI）の
電子装置を修理するペギー・ウィットソン宇宙飛行士
©NASA

国際宇宙ステーションの科学的な価値

国際宇宙ステーション（ISS）の構造モジュールが打ち上げられてから、ISSでは学際的な研究や技術実証が行われてきました。宇宙環境でのDNA増幅から地球の気候に関する太陽活動の理解に至るまで、着実に科学成果を残しています。本章で取り上げる科学的な成果は、地上からISSの研究や技術実証に携わる5,000人以上の科学者たちの功績であり、ひいては地球低軌道上の研究施設がかつて例を見ないほどグローバルな影響力をもっているという証でもあります。

「国際宇宙ステーション 人類への恩恵 第3版（日本語ダイジェスト版）」では、Benefits for Humanity 3rd Edition（英語版）から、科学的な価値を評価する手法やその評価結果、また、JAXAが中心になって進めている科学研究についてご紹介します。

国際宇宙ステーションの科学的な価値

国際宇宙ステーション（ISS）は研究施設として、地球低軌道における微小重力というユニークな環境条件下にあること、複数領域にわたる横断的で国際色豊かな研究活動が行われていること、そして研究開発への投資目的がさまざまであることから、その科学的影響力を評価することは非常に困難なことです。そのために、ISS計画では研究活動の影響を複数の手法で評価する試みがなされています。

文献から見るISSの研究成果

1998年から2018年5月までの時点で、ISS計画ではジャーナル、議事録、学会資料や報告書などで2,135に及ぶ文献が確認されています。ISSで得られた科学成果を評価する方法の1つとして、ISSパートナーすべての論文を対象に、その引用と掲載ジャーナルの重要性を指標とするアイゲンファクターを用いて評価を採用しています。アイゲンファクターはClarivate Analytics社の文献検索データベース（Web of Science）を使用したアルゴリズムをベースにするものです。ISS初の研究成果が発表されて以来、アイゲンファクターの評価では、ISS研究から135文献が100位内のジャーナルに掲載されました。 さらに、Clarivate Analytics社によると、そのうち85文献が上位10位内のジャーナルに掲載されているとの発表です。

2018年5月までのデータをもとに、ISS科学研究から上位5位までの引用文献は、次の5つの研究に関するものです。

アルファ磁気分光器（AMS-02）を使用した研究では、何十億もの宇宙線事象を収集・分析し、そのうち900万個を電子または陽電子（反物質）と同定しました。その結果から、宇宙線と反物質の起源の解明や、銀河系の形成に対する理解を深めるデータが取得されました。（Aguilar-Benitez M, et al., Physical Review Letters, 2013.引用回数 489回）。

骨量減少が発生しやすい骨格部位（Subregional Bone）の研究では、宇宙滞在時に骨量減少が最も起こりやすい部位を骨盤、股関節、下肢であると特定しました。この結果は、今後、地球低軌道（LEO）よりも遠く離れた宇宙探査時において、骨量減少の予防対策や探査活動において重視すべき課題です。

（Lang TF, et al., Journal of Bone and Mineral Research, 2004.引用回数 381回）

微生物（Microbe）の研究では、Hfq（RNAシャペロン）と呼ばれるタンパク質がサルモネラ遺伝子発現の主要な転写後調節因子として作用することを示唆しました。（Sittka A, et al.,

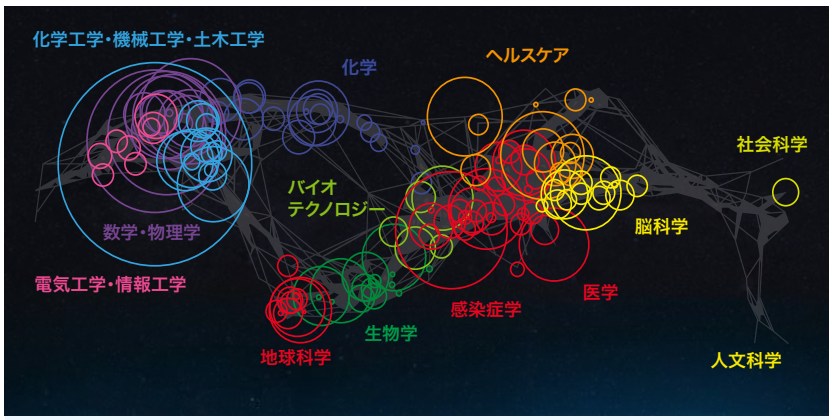
Molecular Microbiology, 2007. 引用回数 232回）

アストロワクチン（Astrovaktsina）の研究から、Yersinia属菌V抗原の局在化は、転移の過程およびペストに対する主要な防御抗原としての有効性において、極めて重要な役割を果たすことが示されました。（Mueller CA, et al., Science, 2005. 引用回数 231）

全天X線画像モニター（MAXI）の研究では、米国のガンマ線バースト衛星スウィフトと連携して、巨大なブラックホールが39億光年離れた銀河の中心に位置する星を飲み込んだ瞬間を観察しました。この観察により、従来の理論が立証され、現在ある宇宙の様子だけでなく宇宙の成り立ちを理解することに貢献しました。（Burrows DN, et al., Nature, 2011. 引用回数228回）

学際豊かな科学への影響

ISSの研究分野を示すサイエンスマップは、さまざまな科学分野の研究から得られた知識の広がりを色の違いで識別して視覚化したものです。ISSサイエンスマップは、カリフォルニア大学サンディエゴ校のサイエンスマップ（UCSDサイエンスマップ）として広く利用されているもので、トムソン・ロイター社の文献検索データベース（Web of Science and Scopus）に収集された25,000冊以上のジャーナル記事や引用から抽出した学問分類システムやレイアウトアルゴリズムをベースにしています。UCSDサイエンスマップの標準的枠組みとアルゴリズムを用いて視覚化したISSサイエンスマップでは異分野の色の重なりから、研究の多様性を理解することができます。そこで最も重要な点は、ISSの研究分野は、UCSDサイエンスマップで分類する13種類のうち、人文科学を除く12もの分野に影響を与えているということです。宇宙に関連した研究からそうでないものまで、ISSではさまざまな科学分野の研究が行われています。



ISSサイエンスマップ。UCSDサイエンスマップと学問分類システムはクリエイティブ・コモンズ表示―継承3.0非移植（CC BY-NC-SA 3.0）のライセンスの下で配布されています　©NASA

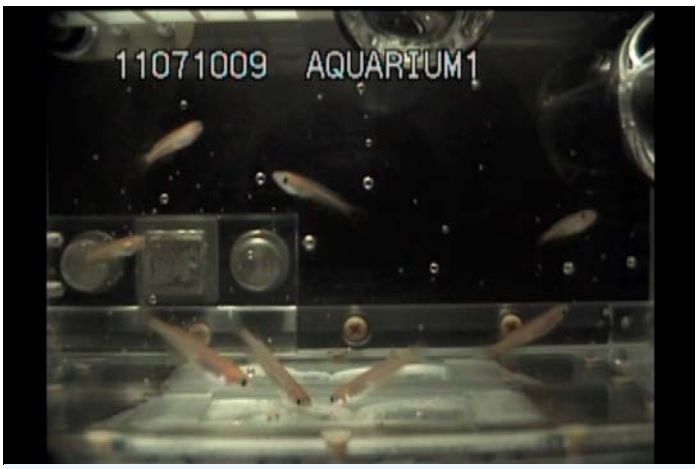
科学成果のハイライト

ISSでの科学研究は、生理学、生物医学、放射線、植物生物学、物理科学、宇宙の解明、そして地球の観測など、さまざまな分野での高度な科学知識の結晶です。ISS研究成果を掲載する2,135文献の中から選ばれて、Benefits for Humanity 3rd Edition（英語版）に掲載されたJAXAの科学研究を中心にご紹介します。

動物の研究

《水棲生物実験装置を利用したメダカの飼育実験》

ISSの「きぼう」日本実験棟に設置された水棲生物実験装置でメダカを飼育する研究では、上咽頭骨と歯の部位において骨密度が約24%減少し、地上メダカと比べると破骨細胞（骨を破壊する細胞）の量が増加したことが明らかになりました。遺伝子変動は脳、眼、肝臓、腸で発現し、さらに腸が最も微小重力の影響を受けやすいこともわかりました。また、遺伝子分析では、ミトコンドリアの機能に関与する可能性がある2つの遺伝子に著しい活性化が認められ、破骨細胞の活性化がミトコンドリアの微小重力への反応に関与することが示されました。この結果から、宇宙飛行中に免疫とストレス反応に共通の調節因子が現れる可能性が高いこと、そして、それが宇宙で生じる骨密度や臓器組織の変化の背景に隠されたメカニズムの理解に役立つことを示唆しています（Chatani, et al, 2015および2016; Murata et al., 2015）。



「きぼう」日本実験棟でメダカを飼育する水棲生物実験装置のビデオスクリーンショット　©JAXA

《小動物飼育装置を利用したマウスの飼育実験》

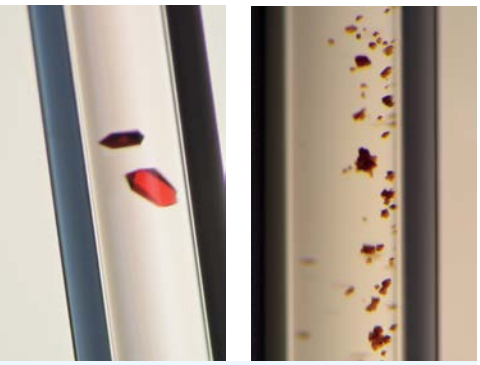
宇宙ステーションでのマウスを用いた研究も多く行われています。JAXAのマウス飼育実験では、マウスを宇宙ステーションで飼育する間、遠心機により人工的に1Gがかけられました。この場合、筋骨の質量は維持できましたが、地上対照群に対し行動や感覚運動障害の減弱が見られました(Shiba et al., 2017)。これらの結果は、長期有人探査ミッションに向けた重力の研究に関し新たな研究課題を与えます。

■この実験で得られた成果の一部は、40ページから詳しく紹介しています。

生物学・生物医学

《高品質タンパク質結晶生成実験》

タンパク質結晶生成実験でも、新しい技術により、多くの成果が出ています。微小重力環境では対流や沈降が抑制されるため、結晶核の周囲に形成された拡散層が維持されます。タンパク質結晶は対流のない安定した環境でゆっくりと成長することができ、複数の結晶がクラスター状になることも少なくなります。また、流れに乗って不純物が結晶に運ばれてくる確率も低いので、高品質のタンパク質結晶が得られる可能性が高くなります。微小重力効果を高めるために、あらかじめ不純物をできるだけ取り除いたり、試料の均質性を上げたりしておくことはもちろん、タンパク質分子の拡散を制御するために、結晶化溶液の粘性を工夫するなどの技術開発が行われています。こうした取り組みにより、疾患に関連するタンパク質や産業用酵素の高品質な結晶を宇宙で生成し、地上での研究開発に役立てています。(Sakamoto et al., 2015; Itoh et al., 2016; Kinoshita et al., 2017)。



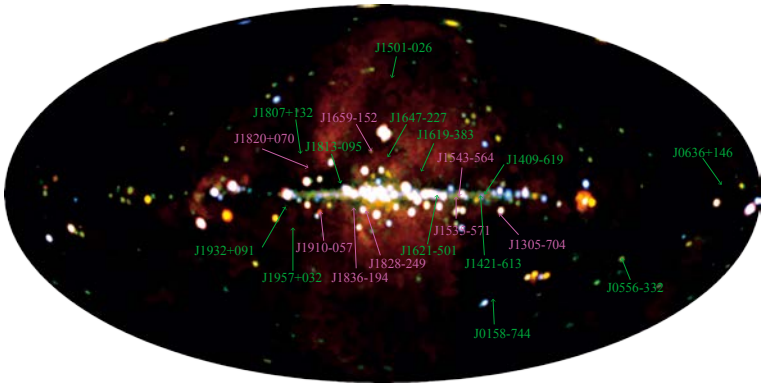
宇宙ステーション(左)と地球上(右)で生成したヘモグロビンのタンパク質結晶　©JAXA

宇宙の解明と地球観測

《全天X線監視装置(MAXI)を利用した宇宙観測》

現在、地球周回軌道上で宇宙を観測している衛星は数多くありますが、ISSも宇宙研究のための強力な測器を積んで電力供給やデータ交換を行うことでこれに貢献しています。ISSからの全天X線

画像からは、8つの新しいブラックホール候補が発見されました。また、二成分X線パルサー、恒星フレア、活動銀河核、巨大なブラックホールによる星の崩壊や超新星の残骸など、宇宙における過渡現象の観測に貢献しています。
(Burrows et al., 2011; Kimura et. al.,2013; Kimura et al., 2016; Maselli et al., 2014)



MAXIのX線カメラで発見された8つのブラックホール候補と10個以上の新星を含む全天画像
©JAXA/RIKEN/MAXIチーム

MAXI（全天X線監視装置）

国際宇宙ステーションに搭載された世界最大の広視野X線カメラ、MAXI（マキシィ）は、高感度カメラで銀河系よりはるか遠くの宇宙空間でダイナミックに活動する天体や銀河の分布を観測するために使用されています。MAXIは、天体で1000個を超えるX線天体の様子を、1日から数か月にわたって90分に1回の間隔でX線強度の変化を監視することができます。
X線新星やγ線バーストなどの突発的な天体は、発見と同時にインターネットを通じて世界に速報され、世界中の望遠鏡で即座に詳しい観測が可能となります。この結果、これまでは観測が難しかった現象発生の早い段階で、MAXIから連絡を受け取った世界中の天文学者により、詳細な観測が行われるようになりました。

MAXIによる世界的な新発見の数々

1. ブラックホール候補天体の発見と観測
2. X線連星パルサーの観測
3. 星のX線増光
4. 活動銀河核の観測と、巨大ブラックホールが星を飲みこむ瞬間の観測
5. MAXI天体カタログ
6. 極超新星爆発の痕跡を発見
7. 新生爆発初めの火の玉から放たれたX線閃光を発見

JAXAのISS科学研究ハイライト

Benefits for Humanity 3rd Editionに掲載されたJAXAの科学研究論文の一覧です。

Chatani, Masahiro, et al. “Acute transcriptional upregulation specific to osteoblasts/osteoclasts in medaka fish immediately after exposure to microgravity.” *Scientific Reports,* 6 (2016): 39545.
Investigation: Medaka Osteoclast.

Chatani, Masahiro, et al. “Microgravity promotes osteoclast activity in medaka fish reared at the international space station.” *Scientific Reports,* 5 (2015): 14172.
Investigation: Medaka Osteoclast.

Murata, Yasuhiko, et al. “Histological and transcriptomic analysis of adult Japanese medaka sampled onboard the International Space Station.” *PLOS ONE,* 10.10 (2015): e0138799.
Investigation: Medaka Osteoclast.

Shiba, Dai, et al. “Development of new experimental platform ‘MARS’—Multiple Artificial-gravity Research System—to elucidate the impacts of micro/partial gravity on mice.” *Scientific Reports,* 7.1 (2017): 10837.
Investigation: Mouse Epigenetics.

Itoh, T., et al. “Crystal Structure of Chitinase ChiW from Paenibacillus sp. str. FPU-7 Reveals a Novel Type of Bacterial Cell-Surface-Expressed Multi-Modular Enzyme Machinery.” *PLOS ONE,* 11.12 (2016): e0167310.
Investigation: JAXA PCG.

Kinoshita, T., et al. “High-resolution structure discloses the potential for allosteric regulation of mitogenactivated protein kinase kinase 7.” *Biochemical and Biophysical Research Communications,* 493.1 (2017): 313-317.
Investigation: JAXA PCG.

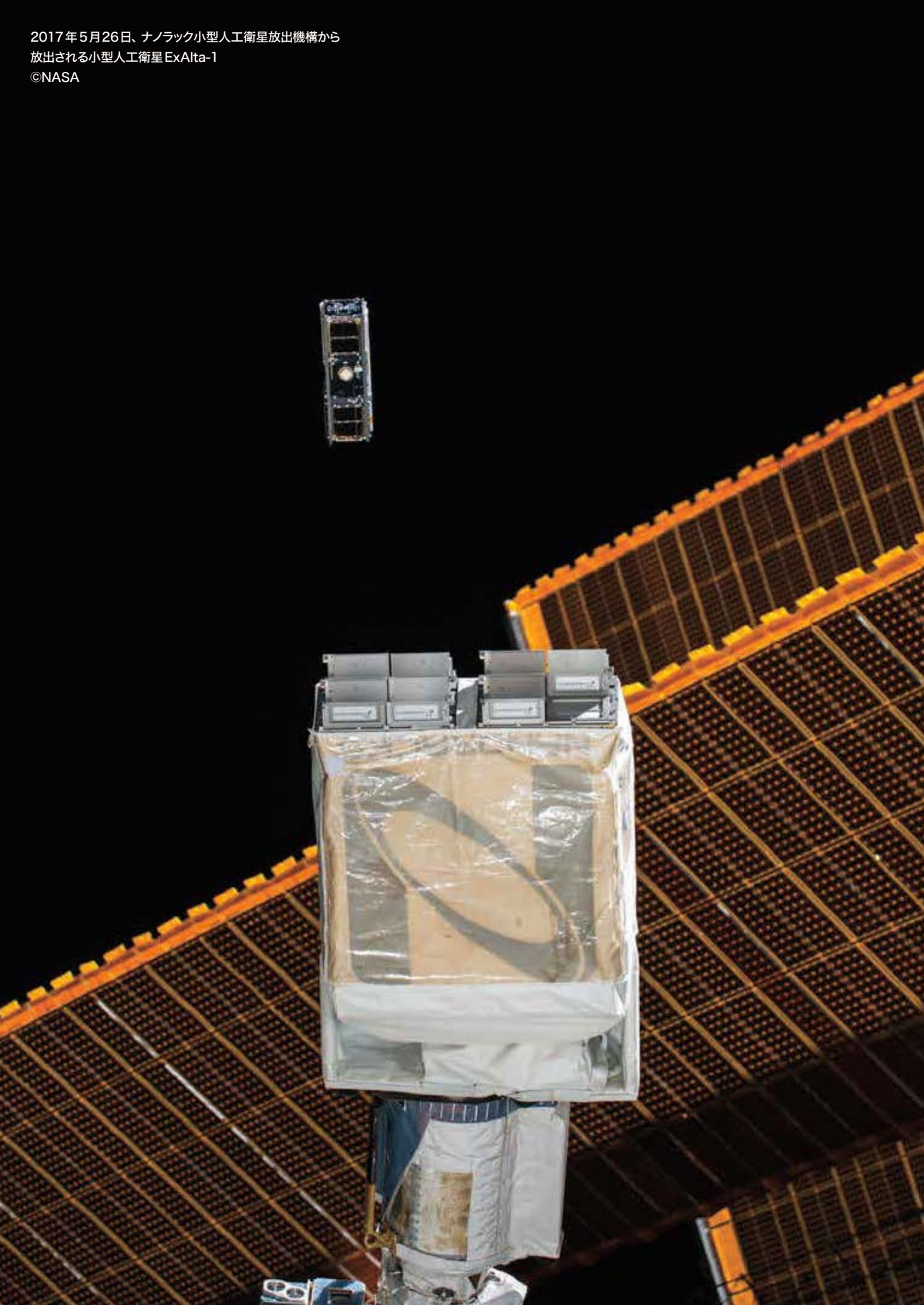
Sakamoto, Y., et al. “Structural and mutational analyses of dipeptidyl peptidase 11 from Porphyromonas gingivalis reveal the molecular basis for strict substrate specificity.” *Scientific Reports,* 9.5 (2015): 11151.
Investigation: JAXA PCG.

Kimura, Mariko, et al. “Repetitive patterns in rapid optical variations in the nearby black-hole binary
V404 Cygni.” *Nature,* 529.7584 (2016): 54.
Investigation: MAXI.

Kimura, Masashi, et al. “Is the Cygnus Superbubble a Hypernova Remnant?”. *Publications of the Astronomical Society of Japan,* 65 14 (2013).
Investigation: MAXI.

■ISSパートナーによる研究成果は、米国航空宇宙局（NASA）のウェブサイトで最新情報が公開されています。http://www.nasa.gov/stationresults

2017年5月26日、ナノラック小型人工衛星放出機構から
放出される小型人工衛星ExAlta-1
©NASA



宇宙ビジネスの経済発展

国際宇宙ステーション（ISS）は、幅広い研究や技術開発の各分野の理解範囲を拡げるプラットフォームとして、その価値を存分に発揮しています。同時に、新しいビジネスやビジネスモデルのテストベッドとして産業を支援する役割も担っています。そのような役割によって、政府資金を使ってコントラクターから物品やサービスを調達する枠組みから、政府が商業活動の一顧客となって調達戦略の民生移転を推進します。

地球低軌道の商業化市場を推進するために、いくつかの目標を掲げています。まず、過去に例を見ないようなまったく新しい市場において影響力を保持すること、次に、宇宙飛行分野で新たなステークホルダーを獲得してビジネスチャンスを創出すること、そして、最終的かつ恐らく最も重要な目標は、経済発展の土台として、アイデア、プロセス、そしてベスト・プラクティスのすべてが融合して実を結ぶことです。

「宇宙ビジネスの経済発展」では、研究開発のために自社資金を投じて研究を行う民間企業から、ISSユーザーにユニークな商業利用サービスを提供するサービスプロバイダー、そして地球低軌道での新興経済市場の発展まで、成長し続ける宇宙ビジネスでのISSの経済面での役割を紹介します。

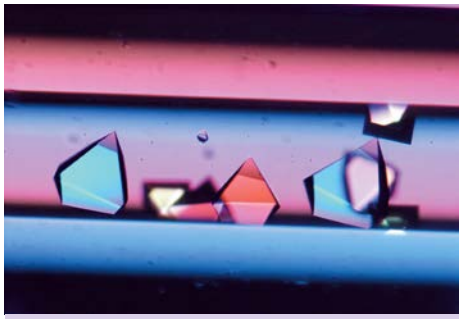
治療のカギは宇宙にあり
（高品質タンパク質結晶生成実験）

病気を引き起こす「タンパク質」とその病気を抑える「治療薬」の関係は､「カギ穴」と「カギ」の関係に似ています。「カギ穴」の形状が分かれば、それに合った「カギ」を作ることができます。同じように、タンパク質の構造が特定できれば、病気に対する有効性が高く、副作用が少ない治療薬を作ることが可能になります。**地球上のさまざまな病気を引き起こすタンパク質の構造を明らかにするために、研究者たちは国際宇宙ステーション（ISS）でタンパク質の結晶生成実験に取り組んでいます。**

例えば、ISSの「きぼう」日本実験棟で行われている高品質タンパク質結晶生成（PCG）実験は、その一つです。さまざまな種類の特殊環状ペプチドを低価格で容易に量産し、効率的に医薬品候補化合物を創出する技術を保有する創薬企業ペプチドリーム社とJAXAは、戦略的なパートナーシップ契約を締結しています。

このパートナーシップ契約では、創薬業界をリードするペプチドリーム社と、試料の性状を徹底的に調べ、結晶化条件を最適化するなど宇宙実験を技術的に支えるJAXAが、それぞれの強みを最大限に生かしています。

これまでにヒト上皮増殖因子受容体2（HER2）と、これを標的とする特殊環状ペプチドとの共結晶を宇宙で生成しました。HER2はがん細胞を増殖させるタンパク質で、乳がん患者のおよそ5人に1人の体内で過剰発生します。特殊環状ペプチドは、従来のペプチド医薬品と異なり、構造的にヒトの体内で安定性を持続することができるので、新しい阻害薬として無限の可能性が期待されています。また、宇宙実験では地上よりもはるかに高い分解能で結晶構造を明らかにすることができます。解析結果から、標的タンパク質と阻害剤の化合物とが新奇な様式で結合していることが明らかになりました。このような発見はペプチドリーム社の創薬開発に役立てられています。



ISSの「きぼう」日本実験棟の微小重力環境で生成されたタンパク質結晶　©JAXA

ペプチドリーム社リード・パトリック代表取締役社長は、「創薬のどの段階においても、高分解能な結晶構造解析は研究を大いに加速します。タンパク質と薬剤候補との結合を明らかにする情報は非常に貴重です」と話しています。また、同

社の舛屋圭一副社長は、「JAXAのPCG実験により、薬剤候補から治験薬への最適化を大いに加速することが期待されます」とコメントしています。

従来、JAXAは国営宇宙公社ロスコスモスと共同で年2回の20℃実験を行ってきましたが、最近では、SpaceX社のドラゴン宇宙船等による輸送手段を追加し、年間4回～5回の実験を実施できるようになりました。また、20℃に加えて4℃の実験も提供可能です。これについて、JAXAきぼう利用センターきぼう利用企画グループ　白川正輝グループ長は、次のように述べています。「4℃実験の実現により、不安定な水溶性タンパク質や膜タンパク質などの結晶化も可能になりました」。

日本はもちろん世界中の人々のための創薬の支援を目指すPCG実験において、ISSと「きぼう」日本実験棟は重要な役割を果たしています。

■JAXAの高品質タンパク質結晶生成実験については、以下のウェブサイトで情報を公開しています。
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/first/protein/index.html

小さな衛星から大きな成果へ
（成長する小型衛星市場）

キューブサット（CubeSat）として知られる規格の小型衛星は、2012年にISSの「きぼう」日本実験棟から初めて放出されました。キューブサットは、カリフォルニア州立理工大学とスタンフォード大学によって開発され、規格化された小型衛星で、**2017年に打ち上げられた小型衛星の87%を占めるほど、小型衛星市場に広く普及しています。**キューブサットの標準規格は10立方センチメートルほどのサイズで、単位はユニットまたは「U」で表します。例えば、1U、2U、3U、6Uと呼び、通常、1Uあたりの重量は1.33 kg未満です。

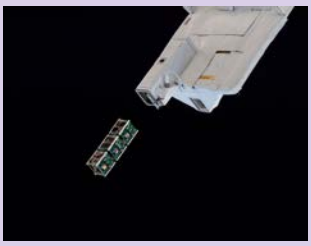
キューブサットの規格化の歴史は比較的浅く、最初にキューブサットが打ち上げられたのは2003年のことでした。キューブサットの打ち上げは2012年の1年間でわずか23基でしたが、ISSの組み立てが2011年に完了してからは大幅に増加しました。2012～2017年の間にISSから放出されたキューブサットは、実に200基を超えました。同じ期間に世界中では725基以上のキューブサット宇宙に放出され、1年あたり66%以上増加しました。

ISS初のキューブサット放出には、JAXAの小型衛星放出機構（J-SSOD）が使用されました。「きぼう」には、エアロックシステムやロボットアームなどのユニークな設備があります。それらを有効活用してJAXAが開発した J-SSODにより、2012年10月にISSから初めてキューブサットが軌道上に放出されました。J-SSODは、エアロック開閉サイクル1回あたり6ユニットまでのキューブサットを放出することができます。「きぼう」のエアロック開閉は、年間10サイクルが計画されており、キューブサットの放出のほかにも多くの船外機器の設置に使用されています。

2012年以降、世界中の多くの国のキューブサットを始めとする小型衛星が「きぼう」から放出されました。これまで放出されたキューブサットの多くは各国初の衛星として、その国の学生やエンジニアが自ら設計や組み立てに参加して作られたものです。2015年にスタートしたKiboCUBEプログラムは、ISSと「きぼう」を世界の国々に利用してもらうために国連宇宙部とJAXAとが連携協力したプログラムで、国連に加盟する発展途上国の教育機関や研究機関がキューブサットを開発・製作して、「きぼう」から放出する機会を提供することが目的です。KiboCUBEプログラム初の放出衛星は、ケニア共和国のキューブサットでした。その後、2018年9月から2021年3月までに期間が延長され、次の参加国にモーリシャス共和国が選出されました。

キューブサットのミッションが地球にさまざまな恩恵をもたらすなか、現在、ISSは新しいキューブサット技術のテストベッドとしての役割を果たすようになっています。

例えば、アナリティカル・スペース社による2018 年のラディックス・ミッションは、レーザーで地上へのデータ伝送を行うことにより、送信するデータ量を大幅に増加させました。これにより、リアルタイムでの気象観測、作物監視、全球気候モニタリングなどの機能向上が実現し、科学研



「きぼう」日本実験棟から放出されたBIRDS-2（九州工業大学によるキューブサット・プロジェクト）の様子。「きぼう」のエアロック・スライド・テーブル上で放出を待つブータン、マレーシア、フィリピンのキューブサット（左）、小型衛星放出機構（J-SSOD）から同時に放出された直後の3基のキューブサット（中央）、放出後に分離したキューブサット3基（右） ©NASA

究の大幅な向上が期待できます。

タイヴェック・ナノサテライト・システムズ社がNASAのジェット推進研究所と共同開発した2018年のレインキューブ（RainCube）は、降雨レーダーを搭載する世界初のキューブサットになります。レインキューブは、衛星搭載型の超小型降雨レーダーや超小型の展開型アンテナの技術実証を行うと同時に、降水量や積雪量などの鉛直分布の情報を提供し、気象レーダー技術を低価格かつ迅速に利用できるプラットフォームを実現する計画です。レインキューブ・ミッションにより、今後の地球科学ミッションにおける気象や気候モデルの向上が期待されます。

その他、2017年後半に実施された統合型ソーラーアレイと反射型アレイアンテナ（ISARA）のミッションでは、エアロスペース・コーポレーションとNASAジェット推進研究所の開発によって、メッセージの送受信が可能なフレキシブルソーラーパネルが実現しました。

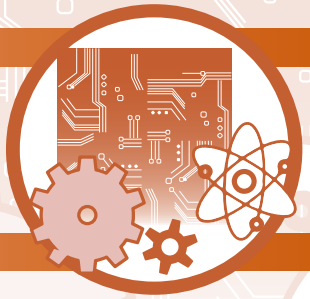
データ伝送速度や効率の向上を目的とした技術実証だけでなく、地球観測などによる科学研究がキューブサットを利用することにより可能になりました。そこから、新発見や商業化への応用の多種多様な恩恵と機会が生まれています。

かつて小型衛星を開発するのは研究機関や大学が中心でした。現在、民間セクターが開発する小型衛星は全体の51%を占め、すべての衛星の67%が商用サービスの提供を目的として開発されています。さらに、2012年から2017年までに製造された商用小型衛星のうちの90%は、米国に拠点を置く企業で製造されました。ISSのさまざまなプログラムやイニシアチブとともに、キューブサットを始めとする小型衛星をISSから放出するミッションによって、新たなプラットフォームが既存の市場を再活性化する起爆剤となりました。そのような意味で考えると、イノベーションを先導し、実験の場を提供するというISSに課されたミッションを首尾よく達成できたといえます。

■JAXAの小型衛星放出機構（J-SSOD）については、以下のウェブサイトで情報を公開しています。
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/ef/jssod/

VRラボで船外活動のトレーニングを行う
第58次クルーのデイビッド・サンジャック
©NASA

イノベーション



宇宙では、重力などの外的影響を制御できるのでさまざまなプロセスが理解しやすくなります。宇宙システムの技術イノベーションの場合、まず国際宇宙ステーション（ISS）で試験を実施してから、その他の宇宙飛行システムで採用されます。宇宙で新技術を試みる調査の最中に、想定外の発見をすることも少なくありません。物理システムを簡易化して使用する際に、物理プロセスのモデルを改良した結果、新しい製造技術や材料を導き出される場合もあります。

他の実験室では実現できない無重量環境において、さらに長期的に他の宇宙システムと連携した実験できるということは、ISSが持てる唯一無二の能力です。そして、実験現場でISSクルーが観察し、自ら実験に関わり、発見のプロセスに立ち会う経験から、また新たな発見が生まれます。

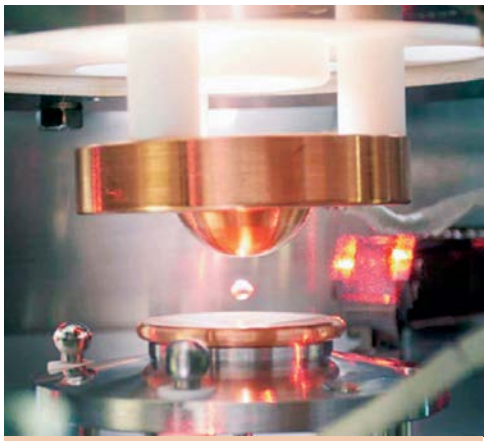
ISS研究のポートフォリオは、あらゆるエンジニアリングやテクノロジーの結集であり、どの研究もこのようなISSならではの特長を生かして計画が立てられています。熱処理、ナノ構造、流体やその他の物理的特性を研究する数々の実験から、これらの技術発展と新たなイノベーション創出を目指しています。さらに、ISSのインフラを支える高度なエンジニアリング活動は、次世代の宇宙システムの性能を高め、将来の宇宙探査ミッションのリスクを軽減するための技術実証でもあります。ISSで生まれた新材料、技術や工学の研究活動は発展し続け、経済発展を生み、地上に住む人々の生活の質を高めるために役立っています。

宙に浮く物質を解明する
（静電浮遊炉での物性データ取得）

地球上では液体を保持するために容器が必要です。2,000℃以上の高温に適した容器はないため、地球上で融点の高い材料を溶かすのは困難です。容器材料が高温では液体と反応し、不純物として混ざり込んでしまうからです。

微小重力環境では、液体は簡単に宙に浮き、容器は必要ありません。容器を使わずに材料を取り扱う方法は、「無容器処理技術」と呼ばれています。この方法により、材料が溶融した状態でその性質を詳細に調べることができます。これは地球上では難しいことです。静電浮遊法は、無容器処理技術の1つであり、帯電した試料と電極との間に発生するクーロン力という力を使用し、試料を浮遊させ、その位置をカメラ画像から高速でフィードバックさせることにより制御します。

宇宙航空研究開発機構（JAXA）では、この技術を地上で20年以上かけて開発してきました。2015年に、JAXAは国際宇宙ステーション（ISS）「きぼう」に設置する静電浮遊炉（ELF）の開発を完了しました。ELFは、物質科学のための設備として、微小重力環境を利用し、非常に高い融点を有する材料を浮いた状態で溶かし、その特性を測定することができます。さらに、無容器処理技術により、大過冷却状態を実現し、新たな材料の生成につながるこれまでと異なる結晶構造および相の形成が可能になります。ISSの実験で対象となる主な試料は、酸化物です。酸化物は帯電しにくいため、地上の静電浮遊炉を使って浮かせることは困難です。



地上静電浮遊装置。帯電試料と電極間クーロン力を使用した試料の位置制御　©JAXA

ISSに搭載した6つの電極の中央に浮遊する溶融アルミナ（中央）　©JAXA

高温で溶融する物質の熱物性を測定する技術は、「きぼう」上の静電浮遊炉のための予備研究として実施した地上実験を通じて確立しました。この間、融点の高い多くの金属の熱物性が初めて明らかになりました。またチタン酸バリウム（$BaTiO_3$）を浮遊させて溶かし、過冷却で凝固させました。その結果、誘電率が高く、温度変化の影響を受けない高性能材料の発見に成功しました。

2018年には、「きぼう」でELFの初期検証が完了しました。初期検証期間中には溶融アルミナの密度測定が実施され、ついにELFを用いた実験が始まりました。ISSに設置されたELFでは、2000℃以上の高温溶融物の熱物性（密度、表面張力および粘性）を測定できます（Tamaru, H. et. al., 2018）。

融点の高い材料の熱物性データは、液体状態の研究や数値シミュレーションの向上に役立ちます。こうしたデータは、発電システム、航空機、および次世代ジェットエンジン用の効率のよいタービンの製作に利用されるコンピュータベースの鋳造技術の精度を大幅に向上させます。さらに、沈降のせいで地上では得られないコア・シェル形状（同心球状の二重形状）の液滴を作り出すことによって、混じりあわない溶融物の間に生じる界面張力を明らかにし、鉄鋼生産プロセスの品質向上に貢献します。

ELFを用いて「きぼう」上で取得される熱物性データにより、材料科学の基礎データの質は劇的に向上します。また、無容器処理技術を用いた過冷却凝固により、材料の未知の特性を見出すことも期待されます。

■静電浮遊炉（ELF）の利用実験については、以下のウェブサイトで情報を公開しています。
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/news/180928_elf_start.html

宇宙仕様から改良され、小児リハビリテーションで利用されている
アデリ治療用装具（Adeli treatment suit）
©ロシア宇宙航空医療センター

人々の健康

国際宇宙ステーション（ISS）は、宇宙や地球においてヒトの体に与える影響を研究できるユニークな研究施設です。軌道上では、ヒトの健康に関する老化現象、外傷、疾患、環境影響などあらゆる分野の理解に役立つ研究を行うことが可能です。宇宙飛行士の健康をサポートする必要性から、生物学やヒトの生理学に関する研究が進められ、それによって地球上の私たちにも恩恵をもたらす重要な成果が生み出されています。骨量減少を軽減する新しい方法や、細菌の挙動の識別、外傷治癒技術のイノベーションがその成果です。遠隔通信医療、疾患モデル、心的ストレス反応システム、栄養補給、細胞行動における研究の進歩は、ISSから地上に持ち帰られて私たちの健康のために役に立っている応用研究のほんの一例です。

マウスから学ぶ、ヒトの加齢様変化と健康長寿のヒケツ（マウス飼育実験）

国際宇宙ステーション（ISS）の微小重力環境下では、宇宙飛行士を対象とした研究と共に、ほ乳動物に対する長期実験が行われています。ISSでの動物実験は、地上で高齢者が患う骨粗しょう症の予防や健康、バランス機能の維持を目的とした医療技術の開発に新たな視点をもたらす可能性を秘めています。

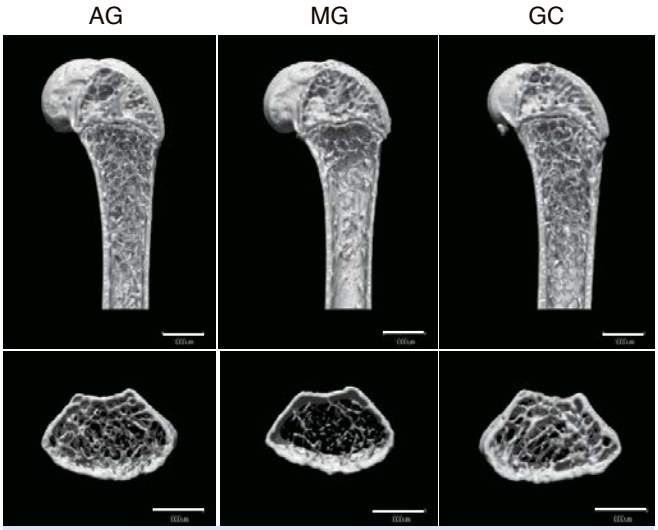
宇宙でのマウス飼育研究を通して、マウスとヒトの生理学的変化が非常に似通っていることがわかっています。また、宇宙ではこのような変化が加速されます。例えば、宇宙滞在中に運動量が不足すると、宇宙飛行士の骨密度は地上の骨粗しょう症患者の約10倍の速さで減少してしまいます。また、地上で寝たきり患者の2日分、あるいは高齢者の6ヶ月分に相当するふくらはぎの筋量がわずか1日で減少します。

宇宙航空研究開発機構（JAXA）の小動物飼育ミッションの1つであるマウスのエピゲノム変化に関する研究ミッションでは、宇宙で1ヶ月飼育した雄マウスについて、各器官における遺伝子発現パターンやその子孫のDNAの変化を研究することが主目的です。この研究では、地球低軌道上にある遠心機で発生させた人工重力環境において、マウス筋・骨量の健康維持に与える影響について報告しています。35日間、地球の重力に相当する人工重力環境（人工1G）で飼育されたマウスにおいて、ヒラメ筋や腓腹筋の重量および骨量の減少はわずかでした。この結果は人工重力を付加しない微小重力環境で飼育されたマウスの場合と大きく異なるものです。これらの結果は、今後、長期宇宙飛行において飛行士の健康を維持する手段として人工重力環境の有効性を検討したり、その重力に関連する生理学的変化を理解したりするために役立つ発見だと言えます。

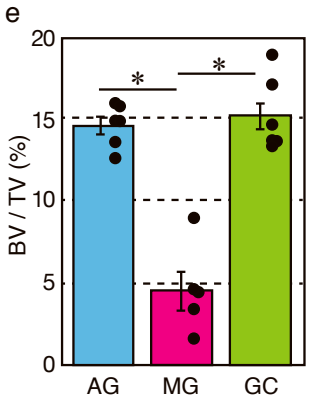
最近、運動機能に関連する骨や筋肉、その他の臓器の衰弱を含むロコモティブ シンドローム（運動器症候群）が医療の研究分野として関心を集めています。JAXAによる「きぼう」日本実験棟での小動物飼育ミッションは、このような加齢性疾患の早期診断における兆候の特定や、予防薬候補や治療薬の有効性および安全性を調査する前臨床試験の実施に役立てることが可能です。宇宙では、このような老化に似た現象が地球上よりも10～30倍に加速して進行し、遺伝子改変や部分的に麻痺させるなど不自然でない状態で、環境が全身に与える影響を観察できます。宇宙で長期間飼育したマウスが地球に帰還した後、老化現象に類似する症状から回復する様子を観察することも可能です。このような条件を地上で再現することは困難なため、加齢の症状と類似した、骨量、筋力、免疫抑制などへの影響を調べるために宇宙実験は生かされています。

ISSでのマウス利用研究は、加齢に伴う体の変化の研究を加速するプラットフォームを形成します。今後数年間、JAXAの小動物飼育ミッションは、病気の早期発見に役立つ科学技術と結びつくバイオインフォマティクス（生命情報科学）の開発と検証を目指し、ひいては予防薬や治療薬の創出に繋げていきます。

■JAXAの小動物（マウス）飼育実験については、以下のウェブサイトで公開しています。
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/news/170908_mars.htmll



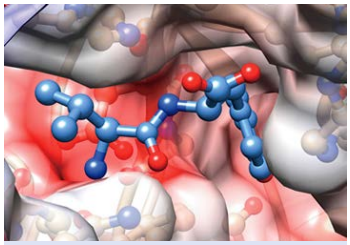
大腿骨の近位領域の代表的な垂直（上部）および水平（下部）断面のマイクロCT写真。スケール バー = 1 mm. AG: 人工重力、MG: 微小重力、および GC: 地上対照群。画像提供:Shiba et al, Scientific Reports, 2017



AG、MGおよびGCマウスの大腿骨の計算された海綿骨体積/組織体積（BV / TV、%）。
画像提供:Shiba et al, Scientific Reports, 2017

人類最大の感染症「歯周病」に迫る
（高品質タンパク質結晶生成実験）

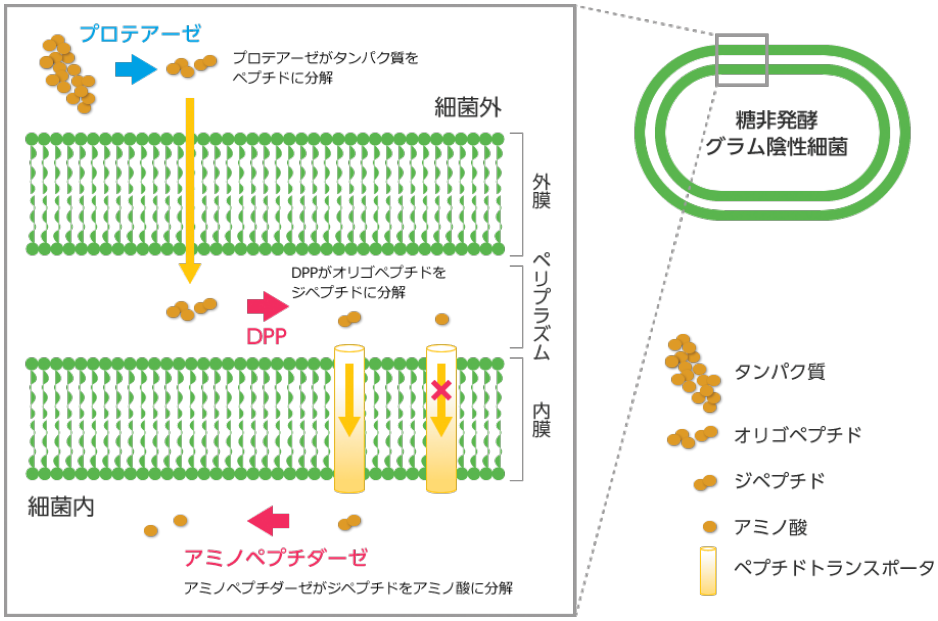
ヒトの体内には10万種類以上のタンパク質があり、その1つ1つの構造が私たちの健康に関わっています。2003年から約15年間にわたり実施されている、JAXAの高品質タンパク質結晶生成（PCG）実験などを通して、結晶成長を阻害する対流や沈殿が発生しない微小重力環境は、結晶成長にとって理想的だということが実証されました。微小重力環境下では、タンパク質分子は規則正しく並び、高品質な結晶が生成されやすく、構造解析に適した結晶が得られます。ISSで得られた高品質タンパク質結晶を用いて、疾患を引き起こすタンパク質の構造を詳細に解明し、新しい薬剤や有効な治療法の開発に役立てられています。



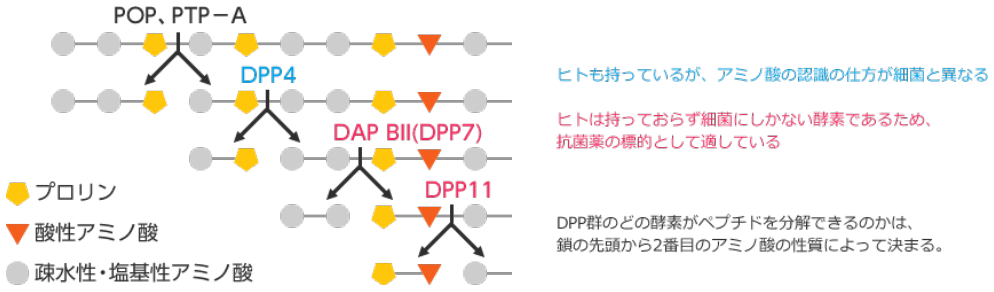
DAP BIIにペプチドが結合した様子
©岩手医科大学

JAXAのPCG実験では、「きぼう」日本実験棟内のタンパク質結晶生成装置にタンパク質サンプルを静置し、1～2ヶ月間、安定した温度（20℃）で結晶成長させます。結晶化には、「ゲル チューブ法」と呼ばれる方法が用いられます。細いガラス管の中にタンパク質溶液を入れ、片側を封止し、もう片側にはアガロースゲルを詰めたチューブ（ゲルチューブ）を接続します。このゲルチューブを接続したガラス管を結晶化剤の入った容器に漬けますと、結晶化剤がゲルを介して徐々にガラス管の中に拡散して入っていき、ガラス管の中にタンパク質と結晶化剤の濃度勾配が形成されます。この勾配は徐々に変化していきますので、1～2ヶ月の結晶化期間の間に、ちょうどよい濃度のところで、結晶が勝手にできてくれるということになります。従来からの20℃実験に加えて、4℃実験も開始されました。4℃での結晶化により、不安定な水溶性タンパク質や膜タンパク質など、需要が多い候補薬の結晶化が可能になります。

ISSでの高品質タンパク質結晶生成実験により、抗菌剤開発のためのジペプチジルペプチダーゼ7（DPP7）の結晶構造が解明されました。岩手医科大学の阪本泰光博士は、新たに構造が明らかに



糖非発酵グラム陰性細菌のペプチド取り込み機構　©岩手医科大学



DPP群とその基質特異性　©岩手医科大学

なった酵素について、次のように説明しています。「研究の過程で、DAP BII（DPP7）と名付けられたこの酵素が、ペプチドやタンパク質を栄養にして生きる『糖非発酵グラム陰性菌』という菌の増殖や生育に重要であることが分かってきたんです。糖非発酵グラム陰性菌には、歯周病や院内感染の病原菌なども含まれています。ちなみに、人類最大の感染症は歯周病です。研究を始めた頃は、ちょっと変わった面白い酵素として捉えていたのですが、そういった病原菌の生育に必須であるDAP BII（DPP7）やその類縁の酵素（DPP群）の働きを抑えてやれば抗菌薬になるのではないかと思い、抗菌薬開発も目指すことになりました」。

「DPPにはいくつかの種類があって、それぞれが個別に働いています。例えば、DAP BII（DPP7）は疎水性または塩基性のアミノ酸を認識して切断します。一方、DPP11というのは酸性のアミノ酸を認識します。これらの酵素は人間にはなくて、微生物しか持っていません。つまり、これらの酵素の働きを抑える薬を作ることができれば、人間にとっては無害で、菌の増殖だけを抑えてくれるということです。ペプチドや化合物の結合様式を詳細に比較できるようになれば、微生物のDPPにだけ効いて、ヒトのDPPに悪影響を与えない薬が作れるようになるのではないかと思っています」。

DPP7の発見後も、抗菌薬の標的分子となるDPP群の研究は続いています。これらタンパク質の構造解析から、糖非発酵グラム陰性細菌の特異的阻害剤設計に役立つ情報が見つかるかもしれません。今後、抗菌薬の実用化を目指すと同時に、糖非発酵グラム陰性細菌のペプチド取り込みの全機構を解明し、科学に貢献することが期待されます。

■JAXA高品質タンパク質結晶生成実験の研究者インタビュー（全文）は以下のウェブサイトで公開しています。http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/first/protein/interview/interview02.html#main

第52次クルーがISSから撮影した南極の
夜空に流れる赤緑色のオーロラ
©NASA

地球観測と災害対応サポート

国際宇宙ステーション（ISS）は「地球観測と気象診断の拠点」です。私たちが暮らす地球の環境問題の理解や解決を目的として、国際的な地球の観測活動に役立てられています。多彩な地球観測ペイロードの数々は、米国実験棟デスティニー内の観測用ラック以外にも、ISS船外の曝露施設に装着することが可能です。ISS上でのクルーの存在もまたユニークな可能性を与えてくれます。リアルタイムで地球を観測することや、携帯デジタルビデオカメラを使用してその場でデータ収集することも、あるいは、宇宙飛行士が地上スタッフに向けて、ISS自動地球観測システムのプログラムに入力することも可能になりました。現在も継続的にISSからデータ収集を行っている装置もある一方で、既にデータ取集が完了したミッションや、ISSパートナー、学術機関、民間企業によって開発中のリモートセンシングシステムもあります。ISSの基盤である国際パートナーシップは、すでにデータ共有を通して世界中の人々の役に立ち、その他の地球観測活動においても国際的なコラボレーションを推進する役目を果たしています。クルーの活動や自動化された地球観測ペイロードをとおして、世界の気象、環境変化、自然災害に関するデータを収集することにより、ISSは人類に貢献しています。

宇宙から気象パトロール
（高画質HD画像が災害対応）

国際宇宙ステーション（ISS）のさまざまなセンサーシステムから集められたデータは、国際協力の枠組み、例えば国際災害チャータやセンチネル･アジア（アジア太平洋域の自然災害の監視を目的とした国際協力プロジェクト）などを通して地球観測や災害対応に貢献してきました。ISSの「きぼう」日本実験棟には、船内にハンディーカメラ、船外に固定カメラが設置されており、その両方を活用して非常に鮮明な高精細度画像（HD画像）を提供しています。これらのHD画像は災害支援に役立てられています。

宇宙航空研究開発機構（JAXA）は、船内の超高感度ハイビジョンカメラシステム（SS-HDTV）や「きぼう」の船外実験用プラットフォームに取り付けられた次世代ハイビジョンカメラシステム（HDTV-EF2）を利用して、ハイビジョンデータを提供しています。「きぼう」の船外実験用プラットフォームは、宇宙に曝露された環境を多目的に提供する設備として、通信、宇宙科学、エンジニアリング、技術実証、材料加工、地球観測など、多岐にわたる分野の研究に利用されています。

SS-HDTVは、オーロラ、大気光、流星群の現象など、地球の夜間の現象を捉えるために開発され、宇宙飛行士により、「きぼう」や「キューポラ」と呼ばれる船外観測用モジュールを含むISS船内から撮影されています。美しい夜の画像は、自然災害後の電力回復、都市の再生、被災住民の日常生活への復帰などの状況を確認するために活用されています。**災害対応のほか、教育、広報活動などさまざまな目的のためにも、宇宙ステーションから地表、海洋、雲などの画像を撮影しています。**

HDTV-EF2は、現在、民生用高精細カメラの長期宇宙環境での利用に関する検証作業を実施していますが、地表を撮影した4K映像は、被災状況を把握するためにセンチネル・アジアにも提供されています。センチネル･アジアは、アジア太平洋地域の自然災害の監視を国際協力の下で推進することを目的としています。アジア防災センターの2013年版自然災害データブックによると、自然災害の発生はアジアだけで世界全体の44.6%に上ります。また、アジアで発生した災害による死亡者は世界全体の84%、被災者は87.1%、経済損失は49.0%だったと報告されました。センチネル･アジアは、このような状況を背景として、地球観測技術の価値と影響力を明らかにするため、アジア・太平洋地域宇宙機関会議（APRSAF）にて、2005年に提唱されました。

センチネル・アジアは、地球観測衛星やその他の宇宙技術を用いて災害関連情報を収集し、それらの情報をインターネット上で共有しています。その目的は、台風、洪水、地震、津波、火山噴火、

山火事などの自然災害による被害を軽減し予防することです。JAXAは、アジアで唯一のISS参加パートナーとして、「きぼう」やHDカメラシステムを利用し、センチネル・アジアを通じて今後も災害対応を支援しながら、アジアや世界中の国々に貢献することを願っています。

■国際災害チャータやセンチネル・アジアの活動については、以下のウェブサイトで公開しています。
国際災害チャータ：　http://www.disasterscharter.org/home
センチネル・アジア：http://global.jaxa.jp/article/special/sentinel_asia/index_e.html

オーストラリアのクイーンズランドで発生した山火事
©JAXA/NASA

大西洋にて発生したハリケーン「イルマ」
©JAXA

イタリアの夜景　©JAXA/NASA

オーロラと大気光の夜景　©JAXA/NASA

東京の夜景　©JAXA

アルゼンチン、ブエノスアイレスの夜景　©JAXA

2009年4月29日から5月1日開催、
学生シンポジウム「NASAエクスプローラ・スクール　2009」にて
©NASA

地球規模の教育活動

国際宇宙ステーション（ISS）は、世界中の学生や教師の想像力を釘付けにするユニークな魅力を持っています。ISSにはクルーが滞在しているので、子供たちの興味をかき立て、科学、技術、工学、数学への学習意欲を引き出すことを目的として、多種多様な教育活動の基盤となるのです。アマチュア無線を使って世界の子供たちがISS上の宇宙飛行士と直接対話する「ISSアマチュア無線」（Amateur Radio on International Space Station）、アジア・パシフィック地域の学生から提案された物理実験をISS「きぼう」日本実験棟で宇宙飛行士が行う「アジアン・トライ・ゼロG」（Asian Try Zero-G）、ISS船内で編隊飛行実験衛星SPHERESのプログラミングを使用して世界中の学生たちが競い合う「ゼロ・ロボティックス」（Zero Robotics competition）などのプロジェクトにおいて参加した学生が取得した画像や軌道上のクルーとの交信を通して、世界中の学生、教師、一般の人々が宇宙をより身近に感じています。また、このようなISS教育活動やその教育資料などの情報は広く公開されています。ISSを利用した教育活動はこれからも続きます。そして、科学者、エンジニア、作家、芸術家、政治家、探検家など次の世代を担う人々を励まし、刺激を与える存在であり続けます。

子供たちによる宇宙帰り種子の変異捜査

宇宙航空研究開発機構（JAXA）は、児童・生徒が科学的価値のある実験に主体的に参加することを通して「科学的なものの見方・考え方」を学べるように、宇宙帰りの種子などから変異体を探す科学・教育プログラムを2010年以来毎年行っています。**2017年までに、幼稚園児から高校生、さらに現場統括の教諭も合わせて18,000人以上が参加しました。**

サンプルとして、国際宇宙ステーション（ISS）の「きぼう」日本実験棟内に約9か月間保管し、そののち回収した種子（宇宙フライト群）、地上に同期間保管した種子（負の対照群）、重粒子線変異の発生率を最大化するために理化学研究所サイクロトロン加速器により炭素イオンビームを照射した種子（正の対照群）の3種類を提供しました。アサガオのような遺伝子組成が2倍体でかつ自家受粉する特徴を有する植物で、その純系品種（遺伝的組成が均一な研究用系統）であるムラサキをM0世代サンプルとして用い、これを交雑させないように次の世代（M2世代）まで育てれば、その表現型（姿・形のような特徴）の比較から、栽培・観察と言う手法のみで特別な学識・機器の

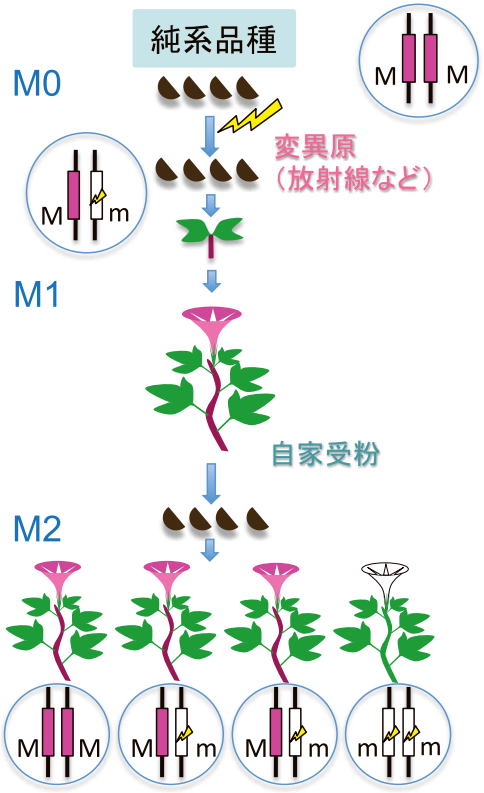
A: M2世代アサガオの変異体（色素欠損）　B: M2世代アサガオの野生型（元のムラサキ）　©仁田坂 英二/JAXA

助けなしに、児童・生徒たちでも変異体を探索することができます。

2018年6月までに2つの変異体が見つかりました。1つは白花・白種子（アントシアニン色素欠損体）で、JAXAの共同研究者らは、その変異を明らかにし、かつ原因を推定するために遺伝子解析を行いました。その結果、得られた変異体は宇宙放射線による影響ではない可能性が指摘されました。

しかし、児童・生徒、教諭方参加者一人一人が、本物の科学研究と宇宙飛行した実物に触れ、ワクワクしながら実験に参加されたことが重要で、そして確かに遺伝子変異体が見つかったのです！

■「JAXA宇宙種子実験」の活動については、以下のウェブサイトで公開しています。
http://edu.jaxa.jp/seeds/



アサガオの純系品種から変異体（劣性ホモ接合体）を検出・分離する方法　©仁田坂 英二

アジアの学生が挑戦する物理実験、アジアン・トライ・ゼロG 2018

アジア各国からJAXA筑波宇宙センターに集まった学生たちは、「アジアン・トライ・ゼロG 2018」プログラムの参加者361名の代表として、緊張した面持ちで記者会見に臨んでいました。彼らの提案した実験が、約1時間前に「きぼう」日本実験棟で金井宇宙飛行士により実施され、その実験について記者からの質問に答えていたのです。

「アジアン・トライ・ゼロG」プログラムは、学生や教師がISSと宇宙実験について学ぶことを目的とした教育プログラムで、JAXAが2009年より始めました。それは革新的なプログラムで、日本の一般市民にISSでの実験に参加できる機会をもたらし、ISSへの興味・関心を喚起しました。2009年は、1597件の実験アイデアが提案され、そこから選定された16件の実験が日本人宇宙飛行士により「きぼう」で実施され、その後もプログラムは継続されました。

JAXAは、ISSでの教育活動が人類に恩恵をもたらすとの理念のもと、参加対象をアジア・太平洋地域の国々に広げ、2011年以降、「アジアン・トライ・ゼロG」のプログラム名で、アジア・太平洋地域宇宙機関会議（APRSAF）の枠組みの下で実施しています。「アジアン・トライ・ゼロG」は、2011年は古川聡宇宙飛行士、2012年は星出彰彦宇宙飛行士、2014年は若田光一宇宙飛行士、2015年は油井亀美也飛行士、2016年は大西卓哉宇宙飛行士、2018年は金井宣茂宇宙飛行

アジアン・トライ・ゼロG 2018記者会見にて　©JAXA

士により実施されました。これまでに参加した国は、オーストラリア、バングラディシュ、インドネシア、日本、マレーシア、ニュージーランド、パキスタン、フィリピン、シンガポール、タイ、ベトナムの11ヶ国にのぼります。JAXAは、「アジアン・トライ・ゼロG」をきっかけとして、アジア・太平洋地域の国々が「きぼう」をさまざまに利用し、その価値を共有することを目指しています。

2018年2月13日に、アジア各国の学生は興奮を抑えきれない様子で、JAXA筑波宇宙センターで「アジアン・トライ・ゼロG 2018」の実験に参加しました。「きぼう」の金井宇宙飛行士からの問いかけに、科学者の卵である彼らが答え、7か国の8種類全ての実験が成功裏に実施されました。参加者は次のように感想を述べました。

「宇宙実験はどれも素晴らしく、宇宙では思いもよらないことが起こりました。無重量での色々な実験について学べて良かったです。物理学や宇宙物理学などの分野にも応用できると思います。筑波宇宙センターでの見学と体験はとてもおもしろく、宇宙に携わる人達のすばらしい仕事についても知ることができました。また、自分と同じように宇宙に関心を持っているアジアの仲間たちと共に多くを学び、とても刺激を受けました！」

■「アジアン・トライ・ゼロG 2018」の活動については、以下のウェブサイトで公開しています。
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/kuoa/news/kiboabc_tzg_1807_en.html

筑波宇宙センターで宇宙実験に参加するアジアの学生　©JAXA

おわりに

国際宇宙ステーション（ISS）は、世界中の研究者たちが自らの才能を注ぎ込み、他では得られない微小重力環境を利用した革新的な実験に取り組んでいるユニークな科学研究のプラットフォームです。ISSパートナーはそれぞれ個別の研究目標を持ちつつも、ISSで得られた知見を人類のために生かすという共通の目標も持って研究に取り組んでいます。

ISSでの研究活動は、将来を見据えた宇宙探査へのステップとしての役割を担うとともに、人命救助、宇宙ステーションからの撮影画像による災害救助サポート、新素材による製品性能の向上、そして未来の科学技術者や宇宙探査者にインスピレーションを与える教育プログラムなど、地球で暮らす人々の生活を豊かにする発見をもたらす役割も果たしています。さまざまな研究の中で、最終的に最も価値のある発見は何なのか、そのような評価は未知数ですが、その中からすでに人々の暮らしに役立つ発見が地上で生かされています。

今後も、ISSは潜在的な可能性を拡大させながら、科学研究や技術実証から創出した価値を実績として、経済活動に活気を与えていくことでしょう。そして、人々の生活を豊かにするために、ISSの研究活動はこれからも続きます。

International Space Station
Leading Discovery, Improving Life on Earth

国際宇宙ステーション 人類への恩恵　第３版
（日本語ダイジェスト版）

2019年４月

発行：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
http://iss.jaxa.jp/index.html

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。