

**ISS**

International Space Station  
国際宇宙ステーション

**人類への恩恵**

**- Benefits for Humanity -**



宇宙航空研究開発機構  
<http://iss.jaxa.jp/>

# 目 次

日本語版発行に寄せて	ii
まえがき	iii
人類の健康、地球観測、教育への貢献について	v
<b>人類の健康</b>	<b>1</b>
ニューロアーム：ロボットアームの繊細な動きが、地上で行われている手術で威力を発揮	1
ビスフォスフォネートによる骨量減少予防	3
－宇宙医学の成果を高齢者の健康増進に役立てる－	
「きぼう」利用高品質タンパク質結晶生成実験	5
宇宙技術がぜんそく患者の新たな手助けに	9
宇宙飛行士の骨からわかる、塩分摂り過ぎの危険性	11
国際宇宙ステーションが、ワクチン開発に役立つ	13
宇宙や地上で使える最新型の超音波診断	16
免疫変化の早期発見で宇宙と地上で激しい痛みを伴う帯状疱疹を防ぐ	21
がん治療法の提供	24
NASA の先進技術が世界中の浄水活動を支援する	27
<b>地球観測と災害対応</b>	<b>30</b>
国際宇宙ステーションからの地球観測	30
－もはやそれは単なるハンディカメラではない	
国際宇宙ステーションの画像で島国のサンゴ礁資源管理を支援	33
国際宇宙ステーション農業カメラでノースダコタ州の洪水観測	36
水の都ヴェニス of 健全性を監視する	38
HREP-HICO による地球沿岸の比類なき画像	40
国際宇宙ステーションから東日本の津波大浸水を捉えた	43
超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (SMILES)	45
気候変動を理解する	48
国際宇宙ステーションから地球の大災害を調べる：ウラガンプログラム	52
国際宇宙ステーションから、世界の海上交通を監視	55
<b>地球規模の教育</b>	<b>59</b>
若者よ、国際宇宙ステーションに呼びかけてみよう	59
宇宙飛行士のように心身を鍛えよう	61
ヨーロッパの宇宙ロボットとの提携	63
水問題：化学の力で解決	65
宇宙連詩（世界中の人びとを言葉でつなぐ）	67
生徒達が宇宙から地球を撮影する「アースカム」プログラム	69
赤い惑星のための赤い食物	72
自宅から宇宙飛行士と話をする!	74

# 日本語版発行に寄せて

国際宇宙ステーション計画は 1984 年に米国のレーガン大統領が先進国に呼びかけてスタートし、人類の活動領域を宇宙に拡大することや、宇宙の環境を使った新しい科学や技術開発を行うことを目的に、今日まで進められてきております。この計画では、基礎的な科学研究から、産業化につながる実用的な研究、技術開発、教育や文化的価値の発展など、様々な活動がたくさん行われております。本書では、それらの中から、私たちの健康的な生活に役立つ成果、宇宙から地球を見ることで地球環境の保護・気象・災害への対応や地球全体というグローバルな活動の改善につながる活動、そして、次世代を担う若者の教育に貢献する活動という 3 つの分野において、その意義をわかりやすく提示する活動を選び、社会生活に役立つ代表的な成果として紹介しております。本書をご覧になって、国際宇宙ステーション計画の成果を身近に感じていただけたら幸いです。

本書にある個々の内容は、国際宇宙ステーション計画に参加している 5 つの宇宙機関がそれぞれの活動の中からピックアップしたものを集め、宇宙機関全体で編集したものです。原文は、国際宇宙ステーションで標準的に使われている英語でまとめられており、それを各宇宙機関が日本語をはじめ、ドイツ語、フランス語などに翻訳して Web サイト掲載や印刷物にして公開しております。

国際宇宙ステーションでは、今、この瞬間も次々に新しい活動が継続されており、今後もそれらの新しい成果を加えるなどして改訂していく予定です。

最後に、本書をまとめるにあたって、成果内容を提示してくださった日本を含む各国の科学者、技術者や宇宙機関の担当者、および、専門的な内容を日本語にわかりやすく翻訳するにあたってご尽力いただいた方々に感謝の意を表して、初めのことばとさせていただきます。

平成 25 年 4 月

(独) 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

有人宇宙ミッション本部 宇宙環境利用センター長

上垣内茂樹

## まえがき

---

国際宇宙ステーション（ISS）に宇宙飛行士が滞在を始めるとすみやかに、研究者達はISSを利用して、私たちの日常生活の様々な面における微小重力やその他の宇宙環境要素の影響に関する研究に着手しました。この類例のない宇宙の実験施設のおかげで、世界中の研究者達はその才能を活かして、他のどこでも成し得なかった革新的な実験に取り組むことができるようになりました。国際宇宙ステーション計画の参加各国・宇宙機関にとって、それぞれ独自の目的もありますが、国際宇宙ステーションで得られた知見を人類の向上に役立てるという目標は一致しています。国際宇宙ステーションから生まれる「大発見」は今後に期待するとしても、すでにいくつかは驚くほど素晴らしい成果をあげているんです！ 人類の健康、遠隔治療、教育、そして宇宙からの地球観測の分野で、人の生活にもたらす恩恵（効果）がすでに示されています。そのいくつかの例として、ワクチンの開発、災害対応や農業に役立つ国際宇宙ステーションから撮影された画像情報、そして将来の科学者、技術者や宇宙開拓者の皆さんに刺激や着想を与える教育プログラムがあります。

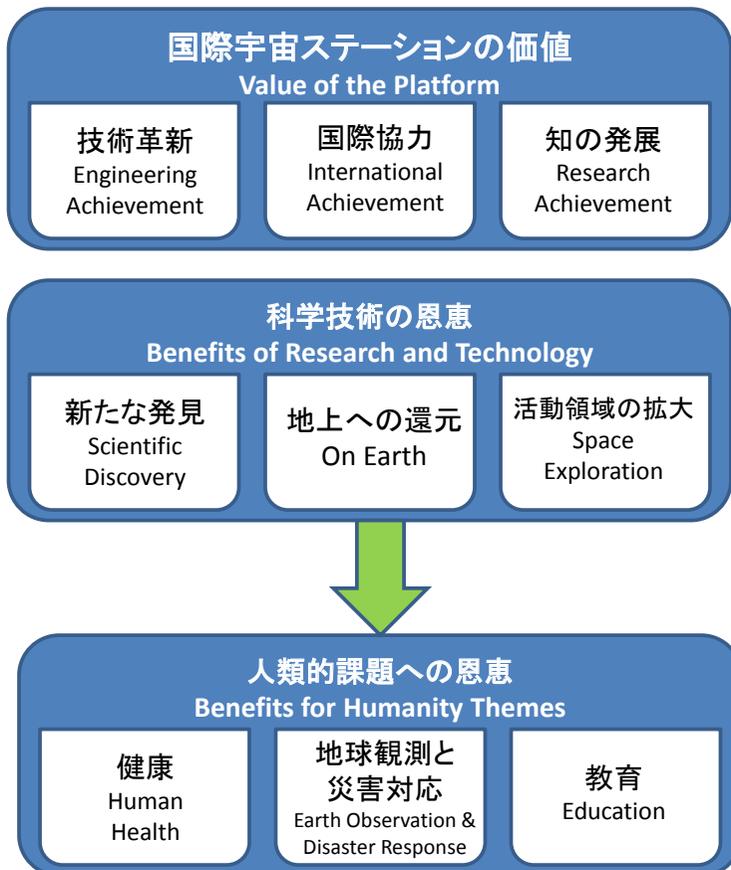
本書は、これまでに地上生活の向上に貢献し、そして、今後も貢献し続ける、国際宇宙ステーションでの科学、技術、教育上の成果をまとめたものです。

ここに述べた恩恵は、画期的な宇宙の実施設としての国際宇宙ステーションの潜在能力の代表例です。国際宇宙ステーションは、地球に関する科学的な知見を得て人々の健康を増進し、将来の科学技術者に希望を与え、啓発する場を提供します。これらの国際宇宙ステーションでの恩恵は、経済を活発にし、全人類の生活の質を向上させることで、国際宇宙ステーションがもたらす未来への財産となることでしょう。



# 人類の健康、地球観測、教育への貢献について

本書の章立ては、国際宇宙ステーション計画がもたらす意義や価値（Value）とそこから得られる科学や技術の恩恵（Benefits）をもとに、「人類的課題への貢献（Benefits for Humanity）」として人類の健康、地球観測と災害への対応、教育の3つに分けて構成しています。



## 人類の健康への貢献

国際宇宙ステーションは他に類例のない宇宙の実験施設で、宇宙と地上の両方の人々の健康に役立つ研究をしています。その建設期間中ずっと、国際宇宙ステーションは、人間の加齢、心的外傷、疾病や環境など、人の特定の健康面について、より良い理解を図る研究を支えてきました。いくつかの生物学的、人体生理学的研究は重要な成果をもたらしており、その中には、通常は重力環境で隠されている基本的な生理学的作用にかかる理解向上や、宇宙飛行士の健康管理上の必要性から開発された新しい医療技術や手順などがあります。

遠隔医療、疾病モデル、心理的なストレス反応系、栄養摂取、細胞の挙動や環境衛生の分野での進展は、宇宙ステーション固有の微小重力環境で得られた恩恵のほんの一部にすぎません。



## 地球観測と災害対応への貢献

国際宇宙ステーションは、「全地球の観測・診断拠点」です。その利点を生かし、母なる地球の環境問題を理解し解決することを目指して、参加宇宙機関と連携して国際的な地球観測を推進しています。

国際宇宙ステーションは、手動と自動化された機器で地球の生態系を観測することができるという特有の利点があります。これにより、宇宙飛行士は目で見たままをすぐ地上に説明することができます。宇宙飛行士自身の目で見たとおりにカメラでその状況を記録（撮影）し、国際宇宙ステーションの自動地球観測システムを運用・管理している地上の管制官に適切な情報を伝えることもできます。このような柔軟さは、無人衛星の観測器に比べて有利で、特に火山噴火や地震などの予期せぬ自然現象が起きた場合に役立ちます。



さらには、種々様々な地球観測装置を国際宇宙ステーションの船外施設に取り付けることができます。既に数々の装置が参加各国の研究者達から提案されました。宇宙飛行士による手動操作機器と自動化機器で相互補完しあう独特の地球観測装置群を使って、全地球の気候や環境変動および自然災害に関するデータを収集することで、国際宇宙ステーションは人

類に貢献しています。

国際宇宙ステーション計画の基盤となっている、これまでに培かれた国際協働の関係が、世界中の人々に恩恵をもたらさうデータの共同利用につながり、さらに他の地球観測活動における国際協力をも促進しています。

## 地球規模の教育への貢献

国際宇宙ステーションには、世界中の生徒や先生の想像力を引きつけることができる、独特の魅力があります。国際宇宙ステーションに人が滞在していること自体が興味をそそり、科学、技術、工学および数学の勉強に刺激を与えることを目指した多くの教育活動の拠り所となっています。アマチュア無線交信プロジェクト（ARISS）や中学生等による地球撮影プロジェクト（EarthKAM）、さらに宇宙教室プロジェクトなどでは、地球の映像を撮ったり宇宙飛行士と無線交信をすることによって、世界中の生徒や先生など一般の人々が宇宙に関わる手段を提供しています。教育活動は理科教育推進だけでなく、人間のあらゆる側面を対象としています。宇宙連詩プロジェクトがその良い例です。滞在中の宇宙飛行士により詩作がはじまり、地上の人びとがそれぞれ詩をつなげて完成させます。国際宇宙ステーションの運用が少なくとも2020年まで続くことで、こうしたプロジェクトと付随する教材が世界中のより多くの生徒達に利用可能となるでしょう。国際宇宙ステーションの継続的利用を通じて、私たちは、次の世代の科学者、技術者、作家、芸術家、政治家および開拓者の皆さんと向き合っ、刺激し、元気づけ、新しい発想を促しつつ



ます。

# 人類の健康

## ニューロアーム:ロボットアームの繊細な動きが、地上で行われている手術で威力を発揮 カナダ宇宙庁(CSA)

ページ・ニッカソンの脳から卵形の腫瘍を取り除くことに成功した繊細な動きは、世界的に有名なロボットアームの助けを借りたものでした。MRI(磁気共鳴映像装置)内で外科手術を行うことができる世界初のロボット、ニューロアーム(neuroArm)の開発に投入された技術は、MDA社が開発したスペースシャトルのロボットアーム(Remote Manipulator System: SRMS)、国際宇宙ステーションのロボットアーム(Space Station Remote Manipulator System: SSRMS)および「デクスター」(特殊目的ロボットアーム)など、国際宇宙ステーションで重量物の運搬や保守作業を行うカナダ宇宙庁(CSA)の宇宙ロボットファミリーから生まれました。

ニューロアームの開発は、難しい外科手術をどうすれば簡単に行えるか、そして不可能な外科手術をいかにして可能にするかといった外科手術のジレンマに対する解決策の研究と共に始まりました。MDA社は、カルガリー大学のガーネット・サザーランド博士が率いるチームと協力して、MRIシステムの高度な画像撮影機能と連動する高精度のロボットアームを開発しました。

外科医は、MRI内で外科手術を行う必要がありました。これはつまり、人間の手と同じくらい器用で、より正確で、震えることのないロボットを設計するということを意味します。MRI内で作業するためには、完全に非磁性材(鉄鋼を使わないなど)でできていて、MRIの磁界の影響を受けず、また逆にMRIの画像にも影響を与えないことが条件です。プロジェクトチームは、ロボットの動きをコントロールし、オペレータにロボットが触った感覚を伝える新たな方法を開発しました。この2つは、外科医がロボットを正確にコントロールし、外科手術中に何が起きているかを感じるために重要でした。

2008年のページ・ニッカソンの外科手術以来、ニューロアームはさらに多くの患者の手術に利用され、成功を収めてきました。ニューロアームの技術はその後、カナダのマニトバ州ウィニペグに本社がある民間の一般医療装



ロボットが実施する脳外科手術の最初の患者となった21歳のページ・ニッカソンは、自分の前頭部を指さしながら、「ロボットは、私の頭の中に入ってきました。ニューロアームは私の脳から腫瘍を取り除いてくれました。今後、世界中で私と同じような数多くの患者さんを助けるでしょう。」と述べました。

置メーカー、IMRIS 社が買い取りました。MDA 社と IMRIS 社は設計を進めて双腕型のシステムを商品化し、外科医が脳の詳細な 3D 画像を見ることができるようにし、さらに外科手術用の機器やハンドコントローラも製品化して、外科医が手術のときに組織を手で感じ、圧力を加えることができるようにしました。現在、サザーランド博士による第一世代のロボットを使用した臨床試験が、カルガリーのフットヒル病院で、120 名の患者グループに対し行われています。IMRIS 社は、早ければ 2012 年に規制当局にこのロボットの認可を求めることになると期待しています。

MDA 社はまた、宇宙の技術とノウハウを地上の医療問題解決に応用する仕事も続けています。同社はカナダのオンタリオ州トロントにある小児病院と提携して、小児外科に必要とされる高度な技術の設計と開発に共同で取り組んでいます。キッズアーム (KidsArm) は、洗練された遠隔操作の外科システムで、幼児や乳児に対する手術用に特別に設計されています。キッズアームは、高度なリアルタイム撮像技術と組み合わせて、外科医が静脈や動脈などの繊細な血管や腸をつなぎ合わせるために使用することを目的としています。

また、MDA 社はカナダのオンタリオ州ハミルトンにある 外科発明・革新センター (Centre for Surgical Invention and Innovation : CSII) と提携して、乳がんの早期発見と治療に使用する高度なプラットフォームの開発に取り組んでいます。画像誘導型自律ロボット (Image-Guided Autonomous Robot: IGAR) は、患部への接近方向、精度、器用さが向上しており、より正確で低侵襲性の手術手順を実現しています。

## ビスフォスフォネートによる骨量減少予防 —宇宙医学の成果を高齢者の健康増進に役立てる—

大島 博

JAXA宇宙生物医学研究室

微小重力環境における骨量減少と尿路結石の問題は、長期宇宙滞在で解決すべき最重要課題の1つに挙げられています。国際宇宙ステーションでは、宇宙飛行士は、毎日約2時間半、週に6日間の運動を行っています。骨量減少や尿路結石のリスクを完全には予防できていません。

骨は体を支えカルシウムを貯めるなど、重要な働きをしています。地上では骨の内部において常に骨吸収と骨形成によるリモデリングが行われ、丈夫で折れない強度が維持されます。しかしながら無重力環境では骨への荷重刺激がなくなるため、骨吸収の亢進と骨形成の抑制が起こり、骨量は骨粗しょう症の約10倍の速さで減少します。大腿骨頸部の骨量は1か月あたり1.5%減少するので、6か月間の宇宙滞在中で約10%減少することになり、地球帰還後の回復には3～4年かかります。カルシウムの出納（摂取量－排出量）は飛行前はゼロですが、飛行中は-250mgとなり、尿路結石のリスクも高まります。



運動する野口宇宙飛行士  
(出典：JAXA/NASA)



ビスフォスフォネート剤を手に持つ  
若田宇宙飛行士

宇宙での骨吸収を防ぐため、宇宙飛行士は週に一度ビスフォスフォネートを服用します  
(出典：JAXA/NASA)

宇宙飛行の骨量減少に対して、骨粗しょう症治療薬として10年前から地上の医療で使用され、骨量増加と骨折発生率低下のエビデンスがある薬剤（ビスフォスフォネート剤）を毎週予防薬として服用し、骨量減少と尿路結石の予防効果をJAXAとNASAの共同研究として検証しています。データの解析によれば、カルシウムやビタミンDをきちんと摂取し、骨を刺激する運動を行い、必要最小限の薬剤を摂取すれば、宇宙飛行の骨量減少や尿路結石のリスクは軽減できる可能性があることが判りました。

高齢者の骨量は、加齢や女性ホルモンの減少により年間1～2%減少し、若年成人の平均より30%減少すると骨粗しょう症になります。現在日本では1,300万人が骨粗しょう症となり、70代女性の2人に1人が該当し、年間16万人が大腿骨頸部骨折手術を受け、社会復帰に約3か月かかります。医療費は一人150万円を要し、骨折に伴う医療・介護費用は国全体で6,657億円/年にも達する状況です。

超高齢社会の中で暮らす人々の骨折を予防するためには、適度な食事・運動・薬剤活用の3つが重要です。食事は、栄養バランスの良い食事を心がけ、カルシウム（牛乳、小魚など）やビタミンD（魚やきのこ）を含む食材をしっかり食べましょう、適度な日光浴も大切です。運動は、骨への負荷を加える運動や筋力運動を毎日の生活の習慣に取り込むことが大切です。骨折リスクが高い場合、有効な薬剤を活用すれば骨折発生率が下がります。このように宇宙飛行から得られた成果を、高齢者の健康増進の啓発や子供の教育に活用することが期待されています。



「ユニティ」(第1結合部)にて、食料品を開封する国際宇宙ステーション第28次長期滞在クルー (出典: JAXA/NASA)

## 「きぼう」利用高品質タンパク質結晶生成実験

正木 美佳

JAXA 宇宙環境利用センター

広大な宇宙と私たちの体を形作るタンパク質は一見無関係にみえますが、「結晶」がこの2つをつなぐ鍵となります。タンパク質は立体的で複雑な構造をしていて、構造によってそれぞれのタンパク質の機能が決まります。この構造を研究するためにうってつけの環境が宇宙の微小重力環境です。国際宇宙ステーション計画に基づく日本の最近の研究により、今後、疾病治療に有効な医薬品が開発される可能性があります。

宇宙では、溶液を密度の違いによって上下左右に流れさせる対流や、重いものを沈下させる沈降がありません。このため、タンパク質の分子が規則正しく並び、タンパク質の構造を研究するために役立つ高品質な結晶が生成されます。今までに、宇宙という特殊な環境でさまざまな結晶が生成されてきました。

宇宙航空研究開発機構（JAXA : Japan Aerospace Exploration Agency）では、国際宇宙ステーションのロシアのサービスモジュールを利用して、2003年から計9回のタンパク質結晶生成実験を行い、宇宙で高品質なタンパク質結晶を生成する技術の開発を進めてきました。この技術に基づいて、「きぼう」日本実験棟で2009年7月から6回の計画で実験が開始されました。ロシア連邦宇宙局（Federal Space Agency of Russia）の協力のもと、セルユニット（図1）に入れたタンパク質試料がプログレス補給船に搭載されて宇宙ステーションに打ち上げられました。ドッキング後すぐに試料は「きぼう」に持ち込まれて、タンパク質結晶生成装置（PCRF）に設置され、20°Cの安定した温度条件下で約1.5～4ヶ月の期間、結晶生成が行われます（図2）。結晶生成には、液液拡散法の一つであるカウンターディフュージョン法が使用されます。この方法では、ポリエチレングリコール（PEG）や塩などの結晶化溶液と、ガラスキャピラリーの中に充填されているタンパク質溶液がゲルを通して徐々に拡散し、タンパク質溶液内の結晶化溶液が徐々に凝縮して、最終的にタンパク質結晶生成の条件を満たします（図3）。



図1 セルユニット

セルユニット内には最大144種類のタンパク質試料を搭載できます。宇宙ステーションに搭載されたタンパク質結晶生成装置（PCRF）に設置されて温度コントロールされます。（©JAXA）

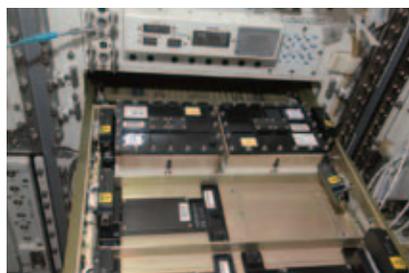


図2 タンパク質結晶生成装置

タンパク質結晶生成装置（PCRF）は、タンパク質結晶生成実験に使用される実験装置で、温度を管理して、内部に6個のセルユニットを設置できるようになっています。（©JAXA）

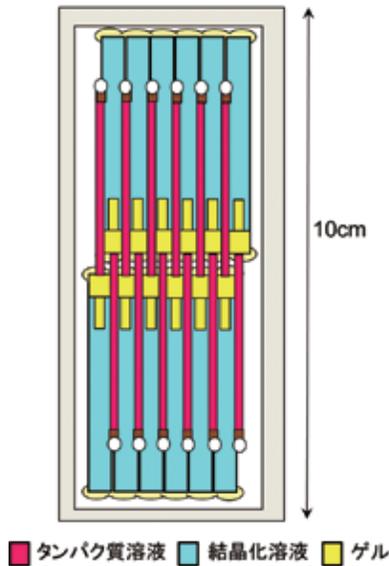


図3 JAXA 結晶生成セル (JCB)

内部に12種類のタンパク質溶液を充填できる「JCB: JAXA Crystallization Box」と呼ばれる結晶生成セルは、シンプルで経済的な結晶生成ツールです。このセルを使えば、宇宙飛行士の軌道上での操作はごくわずかで済むため、宇宙実験に適しています。(©JAXA)

タンパク質結晶生成実験の主な目的の1つは新しい医薬品の開発に貢献することです。疾病の原因となるタンパク質とそれらを抑える医薬品との関係は、「鍵」と「鍵穴」の関係に例えられます。タンパク質の構造を調べることによって鍵穴の形状がわかれば、そこにぴったりと結合する鍵、つまり治療に適合した副作用の少ない医薬品を設計することができます(図4)。JAXAでは宇宙実験を通して、難病とされている病気に対しても積極的に研究を進め、医薬品開発に貢献することを目指しています。

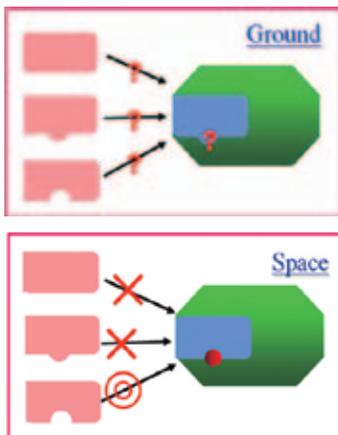


図4 宇宙実験のメリット

疾病の原因となるタンパク質の構造(鍵穴)は、地上で結晶を生成した場合には形状がはっきりしないため、鍵、つまり、治療用の薬剤候補化合物の形状を判別できません。しかし、宇宙実験によって疾病の原因となるタンパク質の構造を見つけることができ、治療に適した薬剤(鍵穴に合う鍵)を開発することができます。

(©JAXA)

宇宙で結晶生成に成功したタンパク質のひとつは、造血器型プロスタグランジン (PG) D 合成酵素 (H-PGDS) です。H-PGDS は、マスト細胞、抗原提示細胞および Th2 リンパ球で、炎症反応やアレルギーの原因となる PGD<sub>2</sub> の産生を触媒する酵素です。近年、大阪バイオサイエンス研究所 (OBI : Osaka Bioscience Institute) の研究チームが、デュシェンヌ型筋ジストロフィー (DMD : Duchenne muscular dystrophy) 患者の壊死した筋繊維に H-PGDS が増加していることを報告しました。DMD は筋萎縮を引き起こし、筋力低下の進行を早める遺伝性筋疾患で、様々な筋ジストロフィーの中で最も頻度が高く、人種に関係なく約 3500 人に 1 人の男児に発症しています。現在までに根本的な治療法がまだ見つかっていない難病のため、H-PGDS の阻害剤が筋ジストロフィーに有効な薬剤になると期待されています。

OBI の研究チームは、H-PGDS とそのプロトタイプの阻害薬の複合体の結晶化を宇宙で行うことで、活性部位の詳細な立体構造を明らかにしました。さらに、より効果的な阻害薬を開発するために微小重力環境で複数回結晶化を行い、X 線を使用した回折実験の結果、H-PGDS 阻害薬複合体の高品質な結晶において 1.0 ~ 1.5 Å の高分解能で構造データを取得することに成功し、プロトタイプよりも数百倍強力な阻害薬を発見しました (図 5)。現在は動物による有効性や毒性の評価を実施し、実用に向けて研究が進められています (図 6)。

タンパク質はヒトの体の中だけでも 10 万種類以上、自然界には約 100 億種類も存在しています。それぞれ異なった構造には、私たちの健康や地球環境に関わる重要な情報が含まれています。タンパク質の構造を解明するために、宇宙は生物医学研究の最新の間として活用され、地上で行うことがきわめて困難な実験を行っています。国際宇宙ステーションの「きぼう」日本実験棟では、高品質なタンパク質の結晶を生成するさまざまな実験によって、新たな可能性の扉を開いています。タンパク質の構造の解明は生命のメカニズムを理解するために役立ちます。

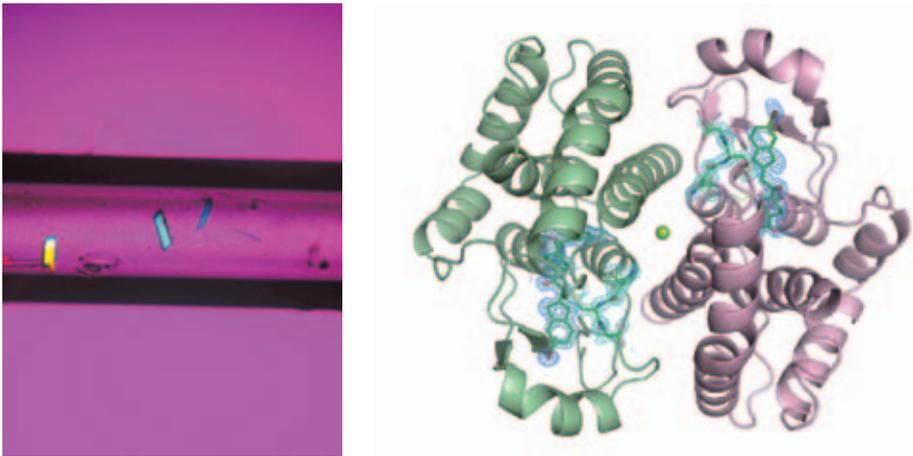


図5 H-PGDS 阻害薬複合体  
宇宙実験によって、筋ジストロフィー関連のタンパク質の詳細な構造が明らかになりました。  
(© 大阪バイオサイエンス研究所/丸和栄養食品)

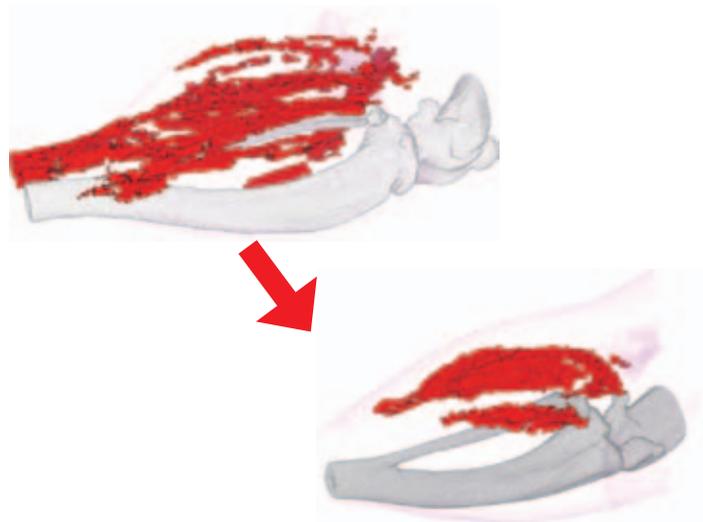


図6 筋ジストロフィーの治療のイメージ  
有効な薬剤候補化合物によって、筋ジストロフィーの進行を抑えられます。  
(© 大阪バイオサイエンス研究所)

## 宇宙技術がぜんそく患者の新たな手助けに

欧州宇宙機関 (ESA)

10才の男の子カルは、宇宙技術にとっても興味があります。国際宇宙ステーション (ISS) で宇宙飛行士も使用している小さな装置を使って、将来、彼は自分のぜんそくを抑えられるようになると期待しています。そのため、カルは私たち人間が吐き出している、「一酸化窒素」について、多くの知識をもっています。

一酸化窒素は、どこにでも存在する、良い面も悪い面もある気体分子です。一酸化窒素は、主に燃料を燃やす車の排気や工業プロセスによって生成される大気汚染物質で、オゾン層を破壊し、簡単に硝酸に変わり、酸性雨を降らせる可能性があります。

興味深いことに、炎症を起こした人や動物の組織では少量の一酸化窒素が局部的に発生しており、これをその発生源まで追跡することで、さまざまな病気が明らかになると期待されています。

ぜんそく患者は、肺の炎症によって呼気に一酸化窒素が加わります。このガスを測定することが病気の診断に役立つ場合があり、もし一酸化窒素が投薬の調整が必要なレベルだということを示せば発作を防ぐこともできそうです。

一方、一酸化窒素は国際宇宙ステーションでも興味深い分子です。無重力状態では、浮遊する塵や微粒子を宇宙飛行士が吸い込んで、気道の炎症を引き起こす場合があります。また、宇宙遊泳で生じる可能性のある減圧症にも関係しています。



2006年、一酸化窒素分析器  
(Nitric Oxide Analyzer : NOA)  
実験のため科学実験をしている  
ESA トーマス・ライター元宇宙飛行士  
(出典 : ESA)

このため、ESA では呼気に含まれる一酸化窒素を測定するために、軽くて使いやすく、精度の高い測定装置を使用しています。宇宙飛行士の気道の炎症を調べて、健康問題が生じる前に対策を施すことが目的です。

スウェーデン企業エアロクライン社 (Aerocrine AB) と ESA が開発したこの装置は宇宙探査でも、地上での日常的な使用でも役に立つことがわかりました。

呼気中一酸化窒素濃度測定装置 NIOX MINO® は、現在医療センターでカルのような患者に使用されています。この装置でぜんそくの管理レベルと投薬の効率をモニターすることで、より正確な投薬、発作の緩和、そして生活の質の向上につながります。

問合せ：

ラルス・カールソン

ラルス・グスタフソン

カロリンスカ研究所 (Karolinska Institutet)

スウェーデン スtockホルム

生理学および薬理学部門

Karolinska Institutet

Nanna Svartz vag 2

S-171 77 Stockholm, Sweden

Tel. +46 8 524 868 90

Email: Lars.Karlsson@ki.se

## 宇宙飛行士の骨からわかる、塩分摂り過ぎの危険性

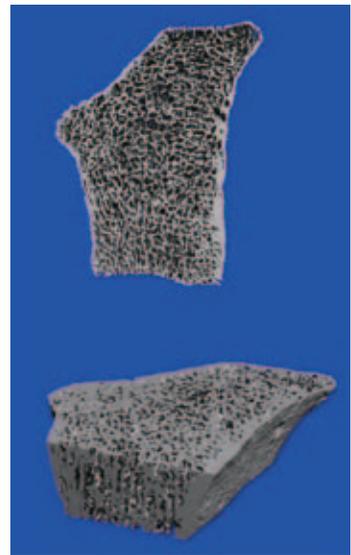
欧州宇宙機関 (ESA)

骨粗しょう症は、何百万人もの人々の生活の質を低下させ、ヨーロッパでは毎年 250 億ユーロの経費がかかる難病です。骨粗しょう症は主として高齢者に発症するため、先進諸国での平均寿命の上昇が骨粗しょう症による問題の増加につながっています。

幸いなことに、宇宙で行われた研究がこの状況を変えるかもしれません。国際宇宙ステーションに滞在すると、微小重力のため骨粗しょう症が加速されますが、宇宙飛行士の場合は適切に管理されているので、地上に戻ってから失われた骨量を取り戻すことができます。

長期宇宙飛行中に起こることを研究すれば、骨粗しょう症の過程（カルシウムの損失と骨の構造変化）についての知識が得られ、それと戦う手段の開発に役立ちます。

1990 年代以降、宇宙での長期滞在中、適切な水分を保たないと、体内にナトリウムが蓄積することが知られていました。しかし、それまでの知識ではそんなことはあり得ないと考えられていたため、「宇宙でのナトリウムの蓄積」は重要な研究課題になりました。



骨粗しょう症骨の 3 次元抹消骨用  
定量的 CT (3D pQCT) 画像  
(出典 : Scanco Medical AG)



地上でのシミュレーションと宇宙における塩分の摂取について一連の調査研究が行われ、ナトリウムは（おそらく皮膚内に）ただ蓄積されるだけでなく、人体の酸バランスと骨代謝にも影響があることがわかりました。つまり、塩分の摂取が増えると体内の酸が増加し、骨量減少が加速される可能性があります。

ESA の最近の微小重力におけるナトリウム負荷研究 (SOdium LOad in microgravity:SOLO) は、この問題に焦点を当てました。

SOLO 実験では、宇宙飛行士における塩分の蓄積とその骨代謝への影響の研究を行っており、地上の骨粗しょう症のような症状の本質を洞察する助けになり得ます。

ESA のフランク・デビュナーやパオロ・ネスポリを含めた 9 人の宇宙飛行士が 2010 年と 2011 年の長期滞在中に低塩分あるいは高塩分の食生活を行いました。その実験結果によっては、ナトリウムの摂取を減らすか、あるいは簡単なアルカリ化物質（重碳酸塩など）を使って酸の平衡失調に対抗することで、さらなる悪影響を防げることがわかるかもしれません。

この宇宙研究は、骨粗しょう症にかかりやすい地上のすべての人々に直接的な恩恵をもたらすものです。

問合せ：

ペトラ・フリングス・モイテン

ドイツ航空宇宙センター

(German Aerospace Center) (DLR)

航空宇宙医学研究所

(Institute of Aerospace Medicine)

宇宙生理学部

Linder Höhe

D-51147 Cologne, Germany

Tel: +49 2203 601- 3034

Fax: +49 2203 61159

Email: [petra.frings-meuthen@dlr.de](mailto:petra.frings-meuthen@dlr.de)

web: <http://www.dlr.de>



SOLO 実験に欠かせない要素である体質量測定（※）を国際宇宙ステーションで行う ESA フランク・デビュナー宇宙飛行士（出典：ESA）

※宇宙では「重さ」は測れないため、加速度を使って「質量」を測ります。

（参考：古川飛行士による宇宙での体重測定方法の紹介 [http://iss.jaxa.jp/library/video/111005\\_fu\\_weightcheck.html](http://iss.jaxa.jp/library/video/111005_fu_weightcheck.html)）

2011 年 12 月、国際宇宙ステーション上で食物を持つ ESA のアンドレ・カイバース宇宙飛行士（左）とロシアのオレグ・コノネンコ宇宙飛行士（右）SOLO 実験において宇宙飛行士は、ナトリウムの体への生理学的影響を調べるため、ふたつの異なる食事体系を取りました。（出典：ESA）

## 国際宇宙ステーションが、ワクチン開発に役立つ

タラ・ラットリー Ph.D.

NASA アソシエート ISS プログラムサイエンティスト

ひどい食中毒に苦しめられている最中に、「どうしてこれまで誰も食中毒の治療法や確実な予防法を発見していないのだろう」と思ったことはありませんか。ときには、あなたや知り合いが強力な細菌性ブドウ球菌に感染してしまい、その菌が医療専門家が使用するほとんど全ての抗生物質に耐性を示すこともあります。さまざまな病原菌に対するワクチンの開発は、つい 20 世紀の初めまでは想像もしえなかった方法で世界の人々の健康維持に貢献してきましたが、防御しなければならない病原菌がまだたくさんあります。今、ワクチン開発は国際宇宙ステーション (ISS) の微小重力環境のおかげで効率化されようとしています。

ダラム復員軍人援護局医療センター (Durham Veterans Affairs Medical Center) のティモシー・ハモンド博士とアリゾナ州立大学のシェリル・ニッカーソン医学博士の 2 人の研究者は、微小重力を使ってサルモネラ菌に対する治療薬やワクチンの研究を行いました。サルモネラ菌への感染は米国において最もありがちな食中毒の 1 つです。世界的にみて、サルモネラ菌による下痢は、依然として乳児死亡率の上位 3 つの原因の 1 つであり、そのワクチン開発は発展途上国の健康を劇的に改善する可能性があります。宇宙環境は、微生物の成長速度、抗生物質への耐性、宿主組織への微生物侵入、微生物の毒性 (微生物が病気を引き起こす影響力) の変化、微生物内の遺伝子の変化など、感染病に直接関連する微生物細胞の働きに大きな変化を誘発することが示されました。この一連の研究で、微小重力環境下ではサルモネラ菌の毒性が強まることがわかりました。このような微小重力によって誘発される変化を、ワクチンなどを含めた新しい治療法の開発や既存の治療法の改良、さらには病原菌の根絶を目標とする生物製剤や医薬品の開発に利用していくことを目標としています。

微小重力下でのワクチン開発研究の基礎を築いた初期の研究は、サルモネラ菌の微小重力に対する反応を理解するために NASA が資金を出し、1998 年にニッカーソン博士によって始まりました。これは、このチームが宇宙での微小重力と地上での疑似微小重力環境で成長したサルモネラ菌について行った最初のもので、後に様々な研究に発展しました。



アリゾナ州立大学バイオデザイン研究所のシェリル・ニッカーソン  
(出典 : Nick Meck)

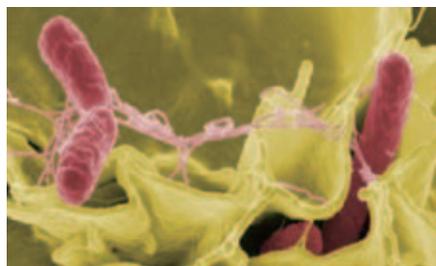


スペースシャトル「ディスカバリー号」の中央デッキで MRSA の実験を行うジョン・フィリップス 宇宙飛行士 (STS-119 ミッション) (出典：NASA)

その後、スペースシャトルで行われた実験では、メチシリン耐性黄色ブドウ球菌 (MRSA) およびその他の微生物の毒性を調べました。MRSA は、特定のβラクタム系抗生物質に対して耐性を示すブドウ球菌の一種です。このような抗生物質には、メチシリン、ペニシリン、アモキシシリンなどがあります。より深刻な、場合によっては生命を脅かす恐れのある MRSA 感染は医療現場の患者の間で最も頻繁に発生しています。MRSA は、一般の人よりも感染リスクが高い傷をおっている患者や侵襲性器具を利用する患者、免疫系の弱まった患者がいる病院では特に厄介です。

宇宙でのサルモネラ菌と MRSA 菌の研究は、米国が国際宇宙ステーションを商業的研究開発に用いることが出来ることを示す、米国立共同研究施設先導プログラム (National Lab) の一環です。この先駆的な研究のアプローチでは、一連の宇宙実験において、宇宙で毒性を増加させる有機体の構成物質を識別し、この情報を使ってワクチンなどの抗菌治療法の標的物質を特定します。菌の成長と毒性に関わる要因が見つかれば、ワクチンなどの新しい治療法の開発に役立ちます。実際に、営利企業である Astrogenetix 社の宇宙でのサルモネラ菌研究の結果、この病原菌のワクチン候補が見つかり、現在、審査および商業開発の計画段階にあります。

さらに最近では、ニッカーソン博士とロイ・カーチス III 世医学博士が率いるアリゾナ州立大学の 2 つのチームが、共同でワクチンのサンプルをスペースシャトル (STS-135) に載せて国際宇宙ステーションに打ち上げました。この研究では、肺炎、髄膜炎、菌血症などの生命を脅かす病気を引き起こす細菌である肺炎連鎖球菌に対する既存のワクチンを改良しようとしています。この菌は年間 1,000 万人以上の死亡の原因で、注射によって投与されている従来の抗肺炎球菌ワクチンに対する反応が低い新生児や高齢者にとっては特に危険な菌です。組換え体減衰サルモネラワクチン (Recombinant Attenuated Salmonella Vaccine: RASV) の名前で知られる経口ワクチンは現在臨床試験中で、アリゾナ州立大学の研究チームは、防御免疫反応を引き起こす能力を最大化してこのワクチンの抗肺炎球菌効果を高めようとしています。ニッカーソン博士は、「我々は、世界中に壊滅的な影響を与える病気を撲滅する可能性のある新しい治療法を研究開発するために、他に類例のない場として宇宙飛行を利用する機会を得ました。」と述べています。国際宇宙ステーションに送られたのは、肺炎連鎖球菌に対する防御抗原を運ぶサルモネラ菌の遺伝子組換え種でした。この研究で分かった標的分子群は、一般市民の



培養した人の細胞に侵入するサルモネラ菌の例 (出典：Rocky Mountain Laboratories, NIAID, NIH)

感染を防ぐ種や、組換え体減衰サルモネラワクチン（RASV）への移行を期待させるものです。さらに、RASV は多様な病原菌に対して生成できるので、この研究の成果は肺炎の他にも多くの病気に対するワクチンの開発に貢献します。

この宇宙を拠点とした研究は、国際宇宙ステーションが国立共同研究施設（National Laboratory）として、地球の利益のために利用できる貴重な資源であることを示しています。MRSA およびサルモネラ菌感染の治療の標的分子の発見は、微小重力環境を使用して新しい医薬品を開発する試みの例であり、組立完了が近づくにつれて国際宇宙ステーションを新薬発見の場として利用するこのような機会は増えるでしょう。これらの結果は、微小重力によって期待される将来の発見のほんの一部にすぎません。これらの研究に携わる科学者たちは、継続的な一連の実験を国際宇宙ステーションで実施することを計画しており、効率的な実験機会提供によって様々な救命ワクチンの進歩を加速させることができます。

## 宇宙や地上で使える最新型の超音波診断<sup>1</sup>

スコット・ダルチャフスキー M.D.<sup>2</sup>

ヘンリー・フォード病院

キャスリーン・ガルシア, ダグラス・ハミルトン M.D., Ph.D., シャノン・メルトン, アショット・サルグ  
シャン M.D.<sup>3</sup>

Wyle Integrated Science and Engineering

急病時には、「どこにいるか」によって痛みや苦痛の度合い、さらには生存率さえも違ってしまうことが多くあります。一般的には、大都市から遠くなるにつれ、簡単に医療を受けることが難しくなります。南極観測所などの前哨基地や国際宇宙ステーション (ISS) など、隔離された人達に医療を届けることは特に困難です。このような遠隔地での医療は通常、必要最低限の訓練を受けた医療担当者によって行われ、場合によっては電話やインターネットでしか医師と接触できません。病気や怪我を素早く診断して治療を開始できれば患者の回復は早まり、残りのミッションへの影響を軽減できます。たとえ事故が起こっても、遠隔地で正確な診断を行うことができれば、危険性があってコストもかかり、場合によっては必要ないかもしれない退避をするかどうかという決断をせず済みます。

これまでに発明された中でも、超音波画像はいろいろな症状に対して最も早く安全にできる診断方法です。多くの場合、X線、コンピュータ断層撮影 (CT)、磁気共鳴画像 (MRI) といった高価な技術によって得られる情報と同じものがこの診断で得られます。また、見ながらすぐに診断できるリアルタイム (ライブ) 画像を得ることができる唯一の方法でもあります。正しく使用すれば、超音波画像によって診断する上での疑問にすぐに答えが得られ、診断時間を短縮して医療結果を向上させることができます。

NASA のジョンソン宇宙センター (JSC) にある微小重力下での最新型超音波診断 (Advanced Diagnostic Ultrasound in Microgravity: ADUM) 研究チームは、大規模な医療センターや研究所で超音波診断の新しい使用方法を試験し、その方法を宇宙でも行えるように、医療関係者以外のオペレータに訓練やガイダンスを実施して改良しています。ADUM チームは、多くの遠隔治療プ

1 出典: 「NASA Technology Innovation Vol.15; 3, 2010; NP-2010-06-658-HQ」

2 スコット・ダルチャフスキーはヘンリー・フォード病院 (ミシガン州デトロイト) の外科部長で ADUM プロジェクトの主任研究員です。

3 キャスリーン・ガルシア, ダグラス・ハミルトン (M.D., Ph.D.), シャノン・メルトンおよびアショット・サルグシャン (M.D.) は Wyle Integrated Science and Engineering 社に勤務しており、ADUM プロジェクトの共同研究員です。Wyle 社は NASA ジョンソン宇宙センター宇宙生物学契約の主契約者で、医療手術、地上・フライト研究、宇宙用機器の開発と製造、科学・ミッションのとりまとめを実施しています。

プロジェクトやプログラムで積んだ経験に加えて、臨床医療師、科学的・技術的・教育的専門能力を持った人員で構成されています。

### 地上での試験:超音波診断の幅広い応用

超音波診断は、通常、妊娠時や腹部・血管のさまざまな状態（胆嚢疾患や凝血など）に関する情報を得るために使用されます。私たちは、その他肺の虚脱（気胸）、骨折、目や頭のけが、歯や副鼻腔の感染症などに超音波診断が使用できるか調べました。

胸にけがをした患者は、肺の虚脱（気胸）にかかる恐れがあり、これは通常、X線で診断されます。ADUM チームは胸のX線検査よりも高い精度で気胸を診断できる簡単な肺の超音波診断を開発しました。この新しい技術は、現在、世界中の多くの病院や外傷センターで標準的な手法となっています。将来、この技術を国際宇宙ステーションでの医療支援として使用するために、航空機を使った放物線飛行で微小重力を模擬した状態で、超音波診断装置の性能、宇宙飛行士の訓練方法、および、遠隔操作の手順が可能であることを実験して確認しました。

ADUM チームは、専門家でないオペレータが四肢傷害の患者に対する超音波診断をすぐに理解して実施できるよう、操作を説明したカードを作成しました。これにより、ほんの数分間訓練すれば、90%以上の精度で骨折を診断できることがわかりました。超音波診断では、筋肉、関節、腱を負傷しているかどうかを調べることもできます。超音波診断には筋肉や関節が動いている状態を簡単に見ることができるといふ重要な特徴があります。これは、超音波診断が、体の静止画像しかとれないX線などの技術に対して優れている点です。

宇宙船内に漂っているいろいろなものによって宇宙飛行士が目にはけがをする心配があります。また最近では、微小重力に長期間さらされることによる視覚への影響が懸念されています。超音波画像診断を使用して細かいごみなどが目に入っていないかを検査したり、宇宙滞在中に視力に影響を与える原因を調べることができます。目の超音波画像診断では、頭にはけがをした患者の脳の状態について重要な情報を得ることもできます。超音波画像診断を使用すれば目の裏の神経の大きさを測定することによって、患者の脳浮腫などを見つけることができます。

### 非専門家に対する迅速な操作訓練

超音波検査時は、患者の体にプローブをあてて、超音波をプローブから送受信することで動画を得ています。この技術の良し悪しは、プローブを適切な位置に置いて動かして、いい画像を取得できるかどうかにかかっており、通常、何百時間ものトレーニングが必要です。ADUMの研究者たちは診断する上で患者に適切な質問をすることができ、離れた場所にいる医者から操作者に対して十分で適切な情報と指示が与えられれば、医療従事者以外の操作者でも診断に必要な良質の情報を得られることを確認しました。

ADUM チームは、二ヶ国語（英語とロシア語）によるコンピュータベースの軌道上習熟度向上訓練（On-Board Proficiency Enhancement: OPE）を開発しました。この手法は、フライト前に短期間の実技訓練を終えるだけで目標とする超音波画像診断を実行するための、段階的なプログラムで構成されています。OPE プログラムには、機器の設置、超音波診断原理の基礎編と上級編、生体構造、遠隔ガイダンスの原理、参考画像集を含む指導内容が含まれています。正しい画像を取得するためにプローブをどこにあてるかを示す操作説明書が、すべての超音波画像診断セット用に作られました。この訓練は、2～3時間で完了することができ、また、診断の直前に行う30分の復習も含まれています。

この ADUM チームの着想は、超音波画像診断の「遠隔専門家指導」と言える方法で、仮想共同作業環境に、それぞれ離れた場所にいる専門家と現場の操作者をつなぐというものです。超音波画像診断装置のビデオ出力は衛星またはインターネット接続経由で離れた場所にいる専門家に送信され、操作者は音声による指示に従って、超音波画像診断画像を撮ります。この技術によって、超音波画像診断の品質を維持したまま訓練時間を大幅に短くすることができます。（多くの場合、数分単位まで減少）

#### 国際宇宙ステーションにおける超音波画像診断

超音波画像診断を使用して心臓と腹部の画像を取得するという新しい手法による最初の臨床試験は、NASA と国立宇宙生物学研究所（NSBRI）の資金提供によって国際宇宙ステーションで行う一連の大規模な ADUM 実験につながりました。ADUM の研究者たちは、国際宇宙ステーションに滞在する米国とロシアの宇宙飛行士について、最短の飛行前訓練、撮像直前の e-ラーニングによる復習と、「遠隔専門家指導」による超音波画像診断の重要性を強調しました。

搭乗員は最初に国際宇宙ステーション上で心臓、血管および胸部の診断品質を確認する超音波画像診断を行いました。次に他の宇宙飛行士たちは、筋骨格中心の超音波画像診断とともに、さらに、心臓、肺、血管、腹部まで範囲を広げて診断できるよう短い訓練を受けました。搭乗員は、毎月、骨の超音波画像診断を行い、長期間重力がない状態での骨の変化を調べました。ADUM チームは宇宙飛行士と共同で、国際宇宙ステーション上で歯、静脈洞、目を追加で超音波画像診断しました。最後に、直接的なビデオ機能なしで、音声ガイダンスだけを使用し、実験で開発したパターン認識によって、心臓の完全な診断を行いました。

宇宙飛行中の「頭からつま先まで」の体の変化を評価するため、国際宇宙ステーションの長期滞在搭乗員によって100時間以上の超音波画像診断試験が行われました。2009年末、ADUM チームによって開発された技術と手法は、国際宇宙ステーションクルーの医療サポートと宇宙生理学の実験や臨床宇宙医学の研究のために必要なものとして公式に認められました。

## 超音波画像診断の応用実験

ADUM の研究者たちは国際宇宙ステーション用に開発された訓練方法と遠隔指導機能を改良して、地上での医療の向上を図りました。デトロイト・レッドウィングス・ホッケーチームとデトロイト・タイガース野球チームでは、内科医ではない運動トレーナーが、負傷した運動選手を支援するために先進的な超音波画像診断技能を教え込まれました。アスレチック・スタジアムのロッカールームには携帯型超音波画像診断装置が備え付けられ、スポーツでの一般的な負傷に対処するために、アスリート専用のマニュアルが作成されました。ミシガン州デトロイトの競技場とヘンリー・フォード病院の間に遠隔超音波画像診断用の通信接続が行われ、遠隔指導機能を使用できるようになりました。

ホッケーチームと野球チームによる初期実験で、アスレチックトレーナーが複雑な筋肉・骨・関節の超音波画像診断を迅速かつ高い診断精度で実行し、運動選手のけがの臨床診断ができることがわかりました。一部の ADUM 研究員はこれを米国のオリンピック・トレーニング施設に応用し、けがの疑いのあるアスリートに何百回も臨床超音波画像診断を行って、トリノ、北京およびバンクーバーの各五輪での競技を支援しました。

ADUM チームはこの手法をエベレスト山や北極圏などの遠隔地にまで拡大しました。チームは、携帯用の超音波画像診断装置、太陽光発電、衛星電話接続および教育プログラムをインストールしたノートパソコンからなるシステムを設計しました。医療訓練を受けていない登山家がエベレスト山の標高が高いベースキャンプで、マニュアルとリモートガイダンスを使用して、肺の完全な超音波スキャンを行うことができました。新米のオペレータが、遠隔地の専門家に高品質の超音波画像を送って、高い高度のために肺に水がたまった仲間の登山者を診断してもらうこともできました。カナダの北極圏のレゾリュート湾でも同様の遠隔超音波システムが使用され、医療専門外のオペレータでもほとんどの臓器の超音波スキャンを行うことができました。

宇宙や遠隔地で使用するために開発されたこの超音波教育プログラムは医療担当者のトレーニングにも適しています。ウェイン州立大学医学部向けにトレーニングプログラムが開発され、現在、米国外科学会で未来の外科医に超音波画像診断を教えるために使用されています。

## 今後の計画

ADUM チームは、現在、専門外のオペレータが使用しても多様な条件の診断ができる、全身の簡単な超音波画像診断の教育カタログを開発しています。コンピュータ教育、超音波に基づく診断および遠隔地の専門家との通信機能を組み合わせて、高品質の医療機能を地球上の遠隔地、僻地および十分な医療サービスを受けられない地域に拡大するための統合遠隔医療装置が製作されています。

超音波画像診断のリアルタイム性と、画像を簡単に転送して遠隔地の専門家のガイダンスを受けられることができる機能によって、超音波画像診断は遠隔地での用途に特に魅力的なものとなっています。ADUM の研究者たちは、超音波画像診断が唯一の（または最初に利用できる）画像のソースであったり、現場にいる専門家が限られている非常時に、初期臨床診断を効果的に行うため、超音波画像診断利用の可能性を研究しています。彼らはマルチメディアの e-ラーニングソフトウェアを開発して、広範囲に利用しています。このソフトウェアを使えば、離れた現場のオペレータと「遠隔専門家指導」のリアルタイムの指導を最適に組合せることができます。超音波画像診断をベースにしたこれらの方法は国際宇宙ステーションやさまざまな地上での応用に用いられ、成功しています。

超音波画像診断は、多くの医療や外科処置で使用できる最も適用範囲の広い画像診断方法です。携帯できてコストがかからないこのトレーニングプログラムと遠隔超音波画像診断の組み合わせにより、この地球上、そして地球外のどこにいても、強力な診断機能を提供することができます。

ADUM チームは、今後パートナーとの協力のもと、地上だけでなくこれから計画される将来の非常に大胆な探検活動においても、人の健康に役立つ新しい知識や機能を生み出していくことでしょう。

## 免疫変化の早期発見で宇宙と地上で激しい痛みを伴う帯状疱疹を防ぐ<sup>1</sup>

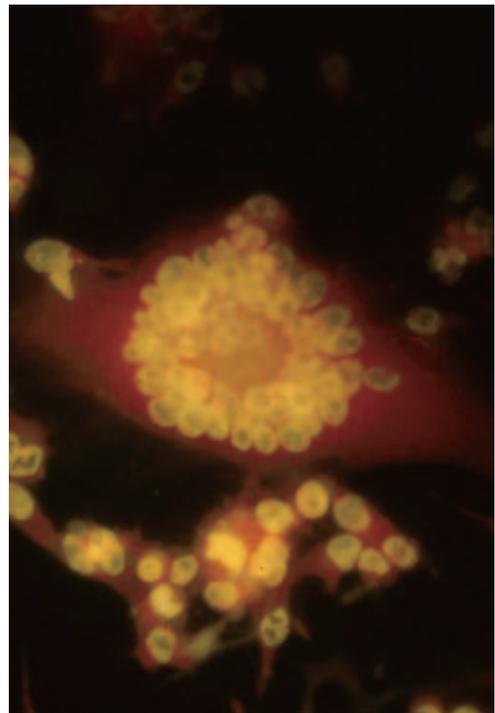
サティッシュ・メータ Ph.D. シニアサイエンティスト、エンタープライズアドバイザーサービス  
デュアン・ピアソン Ph.D. チーフマイクロバイオリジスト  
マーク・オット Ph.D. シニアマイクロバイオリジスト

NASA ジョンソン宇宙センター (JSC)

宇宙飛行に伴う生理的、感情的、精神的なストレスは免疫低下につながり、それが痛みを伴って皮膚が病変する帯状疱疹を引き起こすウイルスを活性化させることがあります。NASA は、痛みを伴う皮膚の病変が宇宙飛行士や地上の人びとに現れる前に治療を始めるべく、早期に免疫の変化を検出する技術を開発しました。この早期発見と治療によって、病気の期間が短くなり、長期的な影響を少なくします。

宇宙飛行によって人の免疫系の一部が変わります：宇宙飛行士の体内では、ウイルスなどの感染源に対する初期の防御線である先天性免疫、細胞性免疫の一部の機能が低下します。短期の宇宙飛行では宇宙飛行士の感染症の罹患率が増加したり重症化することはありませんが、探査ミッションでの長期宇宙滞在で免疫系がどのように変化するかを NASA の科学者は懸念しています。

健康な個人の免疫バイオマーカー（生体指標）を選ぶことは難しいですが、主として宇宙飛行士に対する研究に基づいて、「ヘルペスウイルス」が免疫系変化の早期発見に役立つ手段となりました。人の体内には 8 種類のヘルペスウイルスが生息しており、事実上、私たち全員がこれらのウイルスの 1 つ以上に感染しています。ヘルペスウイルスには、一般的な「発熱性水泡」（単純ヘルペスウイルス HSV）、感染性単核球増加症（エプスタインバーウイルス EBV）、水ぼうそうや帯状疱疹（水痘帯状疱疹ウイルス VZV）などがあります。免疫力が低下した人では、ヘルペスウイルスは上皮性悪性腫瘍やリンパ増殖性疾患など、数種類の



ヘルペスウイルス由来多核性巨細胞を示す VZV 感染 MeWO 細胞。培養細胞は、細胞質の中にある RNA（赤）を識別するため acrydine オレンジで染色されています。（出典：NASA）

1 出典：「NASA Technology Innovation Vol.15; 3, 2010; NP-2010-06-658-HQ」

の癌を引き起こす場合があります。

アメリカ疾病管理予防センターによれば、米国では年間 100 万例の帯状疱疹が発生し、そのうち、10 万～20 万例は特に痛みの激しい症状に発展し、時には帯状疱疹後神経痛 (Post Herpetic Neuralgia: PHN) と呼ばれる衰弱状態に陥り、この症状は数か月から数年にまでおよぶことがあります。その他 7 種類のヘルペスウイルスも、VZV (水痘帯状疱疹ウイルス) のようにさまざまな体細胞内に不活性化状態で存在し、同じように、免疫力が低下している間に再活性化して、病気を引き起こすことがあります。

免疫低下の最も一般的な原因は加齢によるものですが、慢性的なストレスも免疫の低下につながり、VZV に起因する帯状疱疹などの二次疾患のリスクが高まります。化学療法、臓器移植およびヒト免疫不全ウイルス (HIV) などの感染症も免疫低下を引き起こします。このため、ウイルスの再活性化は、臨床的に関連した免疫変化の重要な指標とみなされるようになりました。免疫が低下した人の研究で、これらの患者の唾液に排出される EBV (エプスタインバーウイルス) は健康な人の 90 倍も多いことがわかっています。

ヘルペスウイルスは、世界中の一般成人の少なくとも 95% に存在し、宇宙飛行士の体内にも存在しています。したがって、宇宙飛行士の体液中のヘルペスウイルスの発現を測定することは、大いに望まれた免疫バイオマーカーとなります。宇宙飛行に関連したさまざまなストレス要因が、宇宙飛行士にみられる免疫低下の原因だと広く信じられています。NASA のジョンソン宇宙センターの研究者達は、宇宙飛行の際に 4 種類のヘルペスウイルスが体液内で活性化して発現したことを突き止めました。細胞の免疫低下により、これらのウイルスは不活性化状態から活発な感染体になることができます。増殖ウイルスが唾液、尿または血液に出て、ポリメラーゼ連鎖反応 (PCR) 分析により、特定のウイルスごとに検出し定量化することができます。PCR 分析はウイルスの DNA を検出して、非常に感度がよく特定でき、利用者が選択的にウイルス DNA 配列を複製することを可能にします。宇宙飛行士の唾液に VZV を発見したのが、発症していない人において VZV が活性化して排出されたケースの最初の報告でした。その後、宇宙飛行士の唾液に排出された VZV は完全な形態で感染性があり、発症していない人に病気を引き起こすリスクがあることがわかりました。

PCR 技術は一般人の患者の VZV に起因する帯状疱疹の研究にも利用されました。このヒューストンにあるテキサス大学健康科学センター (University of Texas Health Science Center) の医師とジョンソン宇宙センターの科学者の経験を合わせて行われた研究において、54 名の帯状疱疹患者のいずれからも治療を開始した日に唾液中に VZV が見つかりました。抗ウイルス治療後に痛みと皮膚の病変は減り、VZV のレベルも低下しました。治療前の帯状疱疹患者群の VZV の複製の低レベル領域が、宇宙飛行士の VZV の高レベル領域に重なっており、宇宙で VZV の再活性化による帯状疱疹が発症する潜在的リスクを示唆しています。

この早期発見技術は、21 才の帯状疱疹患者の初期の診断に使われ、早期の医療処置につながり

ました。この迅速な対応のおかげで、皮膚が病変することなく、急性疾患による痛みの持続時間も短縮されました。別の NASA の研究では、宇宙飛行の PCR 技術によって、25 名の帯状疱疹患者すべてで血清と末梢血液単核細胞内の VZV 検出に利用され、ウイルス血症（血液中のウイルス）が帯状疱疹に共通で見られることを初めて示しました。しかしながら、PCR 分析には大型で複雑な装置が必要で、宇宙飛行には実際的ではありません。

宇宙飛行士でのウイルス再活性化を調査する試みでこの障害を克服するために、NASA は体液内の VZV を短時間で検出する方法を開発し、その特許は審査中です。この新技術には少量の唾液標本が必要で、これを特殊な試薬と混ぜると、VZV が存在する場合にのみ赤色になります。この技術により、皮膚の病変が出る前の早期発見が可能になります。早期発見により、抗ウイルス療法の早期管理が可能になり、神経の損傷を抑えて、病気の発症を防ぐことができます。帯状疱疹後神経痛を防ぐためには、迅速な治療が必要です。この器具は、医師の診察室または宇宙船内で使用できるように設計されており、唾液、尿、血液および髄液内の他のウイルスでも利用できるように容易に変更できます。その感度や識別能力は、抗原抗体反応によって決まります。

別の共同研究では、NASA とコロラド大学健康科学センター（デンバー）の研究者達がスペースシャトル飛行中の唾液ストレスホルモンを評価するために採取器具を開発しました。唾液標本は個別の細長い濾紙に採取し、乾燥させます。乾燥した標本は室温で 6 か月間、安定状態を保ち、地上に戻ってから検査ができます。この検査では、二つの重要なストレスおよび免疫調整ホルモンである、コルチゾールとデヒドロエピアンドロステロン（DHEA）が測定されます。濾紙は、唾液中のタンパク質やその他の検査対象分子にも使用できます。これらの濾紙の束は現在、大学や政府の研究所で遠隔地の唾液の収集用に使用されています。

これらの研究は、米国だけでも毎年百万人に達する患者の痛みや衰弱状態を防ぐ技術を一般市民にもたらすことができるという潜在的価値を示しています。

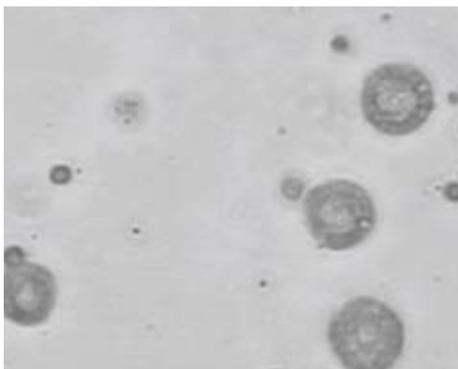
## がん治療法の提供

タラ・ラットリー Ph.D.

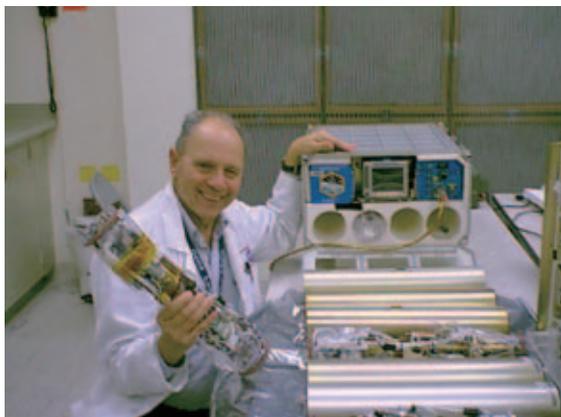
NASA アソシエート ISS プログラムサイエンティスト

人類はがん治療の向上を常に目指しており、国際宇宙ステーションはがん治療プロセスを進歩させる微小重力の実験台を提供しています。

腫瘍学者達はこのところ、さまざまなマイクロカプセル化技術を癌治療へ適用させようとしてきました。マイクロカプセル化技術は、さまざまな薬などを含む液体を充填した小さな生分解性の微細気球（マイクロバルーン）を作る技術であり、患部へ薬液を届けやすくし、固形腫瘍および耐性感染症に対する新しい医療を可能にします。言い換えれば、抗腫瘍治療剤および可視化マーカーを含むマイクロカプセルを使用することで、この治療法は腫瘍に直接作用するため、化学療法などの全身療法と比べていくつかの利点があります。マウスモデルを使った実験では、これらの特殊なマイクロカプセルをヒト前立腺腫瘍に注入して、実際に腫瘍の成長を阻んだり、凍結療法（フリージング）の後で注入して、フリージングや局所的な化学療法だけよりもはるかに腫瘍の破壊を向上させることができました。CT、X線または超音波画像診断で組織内の腫瘍の分布を監視できるようにマイクロカプセルには造影剤も含まれるため、薬剤が放出されたときに腫瘍全体が治療できます。



単細胞マイクロカプセル（出典：NASA）



国際宇宙ステーションへの補給を行うスペースシャトルミッション用に積み込み準備が完了した MEPS フライトハードウェアとモリソン博士

NASA ジョンソン宇宙センター (JSC) のデニス・モリソン博士が主導したマイクロカプセル 静電処理システム II (The Microencapsulation Electrostatic Processing System-II: MEPS-II) 実験は、2002 年に国際宇宙ステーションで実施され、複数の抗癌剤や磁気駆動微粒子の革新的なカプセル化、および遺伝子組換えした DNA のカプセル化を行うものでした。この実験システムでは、微小重力を利用して、流体力学、界面挙動、および生物学的処理方法を、重力下でマイクロカプセルを形成させる方法に変えることによって、既存のマ

イクロカプセル化技術を向上させました。

実際には、国際宇宙ステーションの MEPS-II システムは 2 つの混ざり合わない液体を、境界面で、表面張力の影響が流体せん断力より強くなるように組み合わせました。この宇宙で癌治療到達システムとして作製されたマイクロカプセルの性能が素晴らしかったので、パルスフローマイクロカプセル化システム (Pulse Flow Microencapsulation System: PFMS) の開発のきっかけとなりました。これは、宇宙で作製されたマイクロカプセルの品質を再現できる地上用のシステムです。



国際宇宙ステーションで作製された抗腫瘍薬のマイクロカプセル (出典: NASA)

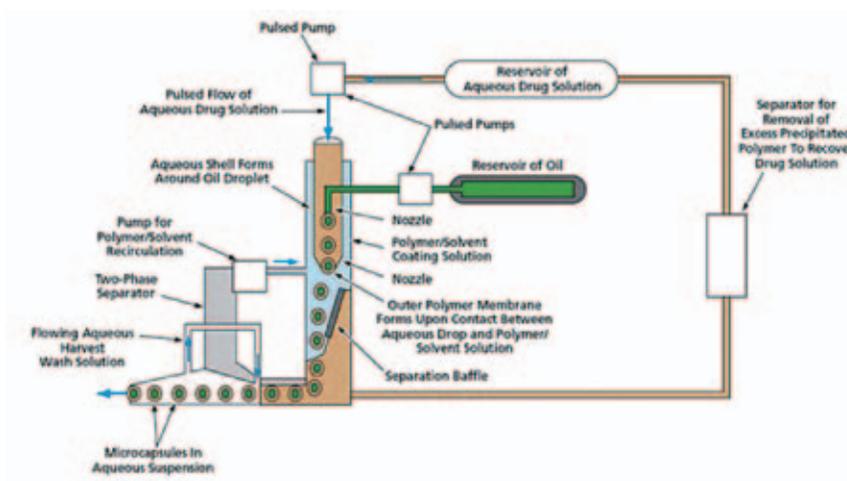
この国際宇宙ステーションでの研究の成果として MEPS-II 実験の結果により、さまざまな薬剤のマイクロカプセル、特に診断用の画像処理剤とそれを駆動放出する粒子が入った特殊カプセルの最適な形態や条件について、新しい知見を得ることができました。複数の薬剤と光力学療法 (PDT) 薬剤の複合カプセル化によって、癌組織に直接届けられるように設計されたマイクロカプセルを地上で作製するための新たな工学的方法を生み出しました。今では、深部感染組織や凝固障害の治療用および今後の遺伝子治療用の遺伝子組換え材料を届けるためのマイクロカプセルも製造されるようになりました。国際宇宙ステーションで作製され、ヒト前立腺腫瘍の成長を抑える目的のマイクロカプセルは、実験室レベルでは成功しています。モリソン博士のチームは、スペースシャトルのミッションで同様のマイクロカプセル化実験を何回か行いましたが、国際宇宙ステーションで長期の実験が可能となったことにより、2002 年に実施された 8 回のマイクロカプセル化実験では、4 回のスペースシャトルミッション (STS-77、STS-80、STS-95、STS-107) で実施された計 60 回以上の実験よりもさらに多くの進展がありました。

### 国際宇宙ステーションで研究することの利点

国際宇宙ステーションの微小重力環境は、地上でのマイクロカプセル開発方法を改善する道を拓きました。国際宇宙ステーションで継続的にマイクロカプセル化実験が実施できるおかげで、12 ~ 14 日間持続的に薬液を放出し続ける特殊なマイクロバルーンを作製する新しい地上技術が生まれました。国際宇宙ステーションでの研究は NASA がライセンスを保有する 5 つの米国特許につながり、さらに 2 つの特許が審査中です。Nu Vue Therapeutics 社は、一部の MEPS 技術と手法をライセンス使用して、抗腫瘍薬のマイクロカプセルを直接腫瘍の場所に届けるために使用される革新的な超音波画像診断増強針やカテーテルなどの新しい用途を開発している営利企業の 1 つです。さらに最新の研究では、腫瘍凍結 (冷凍分離) 用の新しい装置を使い、次にヒト前立腺や肺腫瘍内の凍結ゾーン外での異なる化学療法剤を含む多層マイクロカプセルを超音波で操作する技術を組

み合わせました。少量の薬では腫瘍成長を 5 ~ 10% しか遅らせることができませんでしたが、併用療法で週に 1 度、3 週にわたって少量のマイクロカプセル薬を注入する 28 日間の試験で腫瘍成長を 78% 抑制し、最大 30% の腫瘍退縮という結果となりました。Nu Vue Technologies 社は、現在、NASA タイプのマイクロカプセルの注入を含む組合せ療法で 2 つの米国特許を取得しています。資金が確保され次第、抗腫瘍薬のマイクロカプセルを腫瘍の場所に直接注入する臨床試験を MD アンダーソン癌センター（ヒューストン）およびメイヨー癌センター（アリゾナ州スコッツデール）で始める予定です。

このマイクロカプセル化技術の他の用途としては、損傷した組織に注入または移植するための遺伝子組換えした生細胞のマイクロカプセル化、人の組織修復の促進、石油化学企業がパイプラインの流量を監視できるようにする実時間微小粒子流分析などがあります。



パルス流マイクロカプセル化システム（出典：NASA）

## NASAの先進技術が世界中の浄水活動を支援する

アラン・ジョン, ISSプログラム・サイエンス・オフィス

NASAジョンソン宇宙センター (JSC)

国際宇宙ステーション (ISS) でも、アフリカのサハラ砂漠に近い小さな小屋からなる村落でも、飲用水は人間の生存には不可欠です。不運にも、世界中の多くの人々が清潔な水を手に入れられません。しかし、国際宇宙ステーションのために開発された技術を利用すれば、危険な場所でも高性能な水の濾過・浄化装置を利用することができるようになり、これらのコミュニティでは命を救うほどの差が生まれます。

モンタナ州ナイの非営利組織 Concern for Kids (CFK) は、1992 年からマレーシア、イラク、インドネシアのような国々に援助と災害救援を提供してきました。いろいろな支援事業がある中で、このグループは、危険な地域に水運搬システムや貯水タンクを設置する資金を調達しています。

その数年後、CFK 代表は、イラクのケンダーラにある小さなクルド人の村で深井戸が使えなくなり、飲用水を手入れできない居住者が残っていることを知りました。人口は 1,000 人からわずか 150 人にまで急速に減少していました。残された人々は、家畜によって汚染された水を含んでいる近くの小川を使わざるをえず、汚れとゴミを取り除くために繊維を使って水を濾過していました。

トッド・ハリソンは当時の CFK の重役会の会長で、ケンダーラの人々の状況に強い関心を持ちました。彼は、この悲惨な状況を改善し、衰退したコミュニティを復活させる作業に着手しました。その改善に向けた作業は、国際宇宙ステーション上で清潔な水を提供する技術を開発した NASA のエンジニアとハリソンの家族との結びつきが発端でした。

ハリソンの妹、ロビン・キャラスキー口は、NASA のマーシャル宇宙飛行センターで環境制御・生命維持システム (ECLSS) プロジェクトの技術マネージャを務めていました。彼女とエンジニアのチームは、国際宇宙ステーションで空気や水を再利用する最先端の浄水装置の開発責任者でした。

国際宇宙ステーションでは効率的に廃水を再利用することで、水の補給量を低減しています。補給は長期間の宇宙飛行では困難です。水の再利用ができなければ、国際宇宙ステーションの現在の補給能力では標準の 6 人の搭乗員を支援することはできません。キャラスキー口は、「1 年間で再利用によって節約できた水は、再利用のための機器の最初の打上げ重量と、初期に問題が生じて交換した部品の重量とを足した分を超えています。」と言います。

国際宇宙ステーションの環境制御・生命維持システムは 2 つの主要な装置から構成されています。水回収システム (WRS) と、酸素生成システム (OGS) です。WRS は、環境制御・生命維持シス



国際宇宙ステーションの環境制御・生命維持システムの水再生機器  
(出典：NASA)

テムの浄水および水の濾過を行ないます。いくつかの民間企業が、地上での水処理システムにこれらを適用しようと考え、環境制御・生命維持システムプロジェクトのこの部分に興味を持ちました。

ハリソンは、妹の仕事について熟知していたので、CFKの水濾過システムとNASAの間にある興



イラクのケンダーラでボランティアたちが浄水装置を設置し、試験を行う様子  
(出典：Concern For Kids)

味深い関係に気がきました。NASAの従来の研究と応用により、浄水・濾過用の部品である微生物の逆止弁（MCV）が使えるようになりました。元々、それらは Umpqua Research 社によってスペースシャトル計画のために開発されたもので、その後 MCV は Water Security 社に売却されま

した。MCV は、電力を使わずに単純な方法で水中の微生物繁殖をコントロールするヨウ素樹脂です。水にヨウ素を加えると、人間にとって重要な栄養の二次的な摂取にもなります。ヨウ素が食事に加わると、脳機能を適切に促進し、体のホルモン・レベル（細胞発生と成長を調整する）を維持します。ヨウ素欠乏症になった子供は発育障害や知的障害を引き起こします。

米国陸軍の民事および心理作戦コマンド（エアボーン）人員の支援によって、2,000 リットルの水タンクと真水が、クルド人の村へ持ち込まれました。作業者は、水が清潔で、ヨウ素がバクテリアとウイルス汚染を防ぐために加えられていることを確認しました。キャラスキーロは設置の苦労を思い出してこのように言いました。「CFK はいくつかの技術的な問題に遭遇したので、私たちのグループが電話でサポートしました。MCV は、輸送の間に乾燥してしまいましたが、私たちは状況を分析し、問題ないことを確認しました。さらに、その村で利用可能だったポンプは濾過システムには大き過ぎたのです。」

キャラスキーロのチームは作戦を練り直し、作業者が利用可能なポンプを使用して、システムを直ちに起動することができるよう水の流れを迂回させました。この対策により、ケンダーラの水道処理を成功させることができました。

援助団体と NASA の技術協力は、地球的なニーズの解決策に宇宙研究がいかに効果的に適用できるかを示しました。この最初の試み以降、国際宇宙ステーション関連技術の商業化によって世界中のコミュニティが援助を受け、災害から救済されています。チアパス（メキシコ）、カンパン・サラク（マレーシア）、サバナ・サン・ファン（ドミニカ共和国）、バラコット（パキスタン）、そしてヴェラ・クルーズ（メキシコ）は、この高度な濾過能力の恩恵を受けた都市の一例です。関連する他の開発品としては、尿を飲料水に変えるために浸透膜（FO 膜）を使用する個人用の装備があります。Water Security 社は、この装備を商業地上濾過システムで使用するためのライセンスを得て、世界中に展開しました。

# 地球観測と災害対応

## 国際宇宙ステーションからの地球観測

### ーもはやそれは単なるハンディカメラではない

ウィリアム・ステファノフ

Jacobs社 研究開発部 科学応用課

国際宇宙ステーション (ISS) は 2000 年の 11 月に運用を開始し、それ以来、宇宙飛行士は地球の陸地の表面、海洋、大気現象に関する 60 万枚以上の画像を撮影し、さらには搭乗員による地球観測 (Crew Earth observations: CEO) 実験の一部として、ハンディカメラ (フィルムやデジタル) で軌道上からの月の画像も撮影してきました (<http://eol.jsc.nasa.gov/>)。この大量の画像や、確実な地球観測能力にも関わらず、国際宇宙ステーションはこれまで多くの地球観測科学者から地球観測のプラットフォームとは認識されてきませんでした。しかし、過去 2 年の間に国際宇宙ステーションに新たな設備や高度なセンサーシステムが導入され、今後も導入が予定されていることにより、この認識は変わりつつあります。

それでは、地球観測に関して国際宇宙ステーションには提供できて、通常の地球観測衛星では提供できないものとは何でしょうか。

### いろいろな日照時間帯での地球観測画像の取得

従来の多くの地球観測プラットフォームと違って、国際宇宙ステーションは赤道に対して傾いた軌道を回っており、軌道は太陽の方向と同期していません。このため、国際宇宙ステーションは地球上の北緯 52 度～南緯 52 度の上空を通過し、さまざまな日照条件の下を通過することになります。地球観測衛星は、通常ランドサット 7 (<http://landsat.gsfc.nasa.gov/>) やテラ (<http://terra.nasa.gov/>) のように南極と北極の上を通る周回軌道に配置され、太陽の方向と同期した軌道



ISSACによるシャーロット湾(フロリダ州)の「ファーストライト」画像(2011年6月10日撮影)。ランドサット5のベース画像に重ねて表示。ISSACの画像は、植生を赤、都市部を灰色、水面を黒で表示するように処理されています。雲は明るい白で示されています。

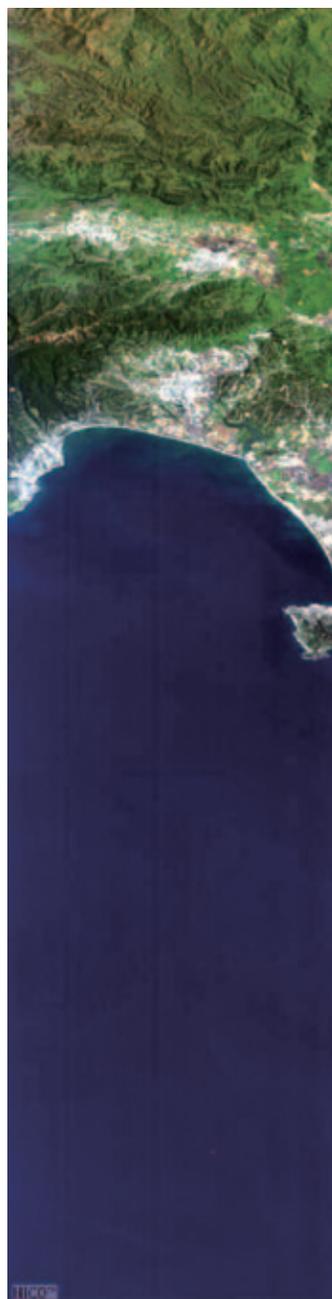
上から観測し、軌道は一日のほぼ同じ時間に地球表面の同じ場所の上空を通過するように設計されています。このような人工衛星は、おおよそ2週間に1度、同じ場所の上空を繰り返し通過します。日照条件の似た画像を収集することは、特定の場所について一様なデータを生成するには適していますが、データが収集される時間が制限されます（ほとんどの場合、現地の正午）。科学者が早朝や夕方によく起きる地表のプロセスに関心がある場合（たとえば、海岸の霧のかたまりなど）、太陽と同期する軌道の衛星からデータを収集することは難しくなります。

### 状況に応じた観測データ収集

国際宇宙ステーションが提供するもう1つのユニークな利点は、地上管制室からいちいち新しい撮影条件のプログラムをアップロードするのではなく、目の前で次々に起きる現象に応じて観測できる宇宙飛行士がいることです。これは、火山の噴火、地震、津波などの予期せぬ自然災害の画像を収集する場合に特に重要です。また宇宙飛行士は、品質に関係なくデータを収集する自動化されたセンサーと違って、雲に覆われていたり、街の明かりがあつたりといった、その時の観測条件に応じて有益なデータを収集できるかどうかを判断することができます。

宇宙飛行士が撮影した手持ちデジタルカメラによる画像とともに、国際宇宙ステーションの内部・外部に搭載された最新の自動センサーシステムや装置が、最新ですばらしい地球観測能力を発揮します。さらに、国際宇宙ステーションには、センサーに電力を供給したり、データ通信をする能力がすでに備わっているおかげで (<http://www.nasa.gov/externalflash/ISSRG/>)、新しいセンサーの開発が容易です。現在 NASA は、以下の地球観測用システムを国際宇宙ステーションに搭載し稼動しています（または 今後、国際宇宙ステーションに輸送することが予定されています）：

- ・窓を使用した観測研究用設備（Window Observational Research Facility: WORF）は、カメラやセンサーを固定するために便利な船内のカメラ固定機構を備えると共に、電源、データ通信、および排熱機能があります。WORF を使用することで、米国の実験棟「デスティニー」から地球を「まっすぐ下



HICO によるモンレー湾（カナダ）の未加工画像、2010年3月27日撮影。  
(<http://hico.coas.oregonstate.edu/gallery/gallery-scenes.shtml>)

に」見下ろす光学的に高品質な窓が、初めて常時使えるようになりました。

- ・国際宇宙ステーション農業支援カメラ（International Space Station Agricultural Camera: ISSAC）は、ノースダコタ大学の生徒と教授陣によって開発されました。ISSAC の主な目的は、米国中西部の北部地域の農業活動と関連調査に利用できるマルチスペクトルデータを収集することです。さらに ISSAC は、人々の安全な生活に貢献するために、自然災害の画像を収集することもできます。ISSAC は 20m/pixel の地上分解能で可視および近赤外線波長域（3 バンド）の情報を収集します。
- ・沿岸海域用ハイパースペクトル画像装置（Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean: HICO）は、「きぼう」の船外実験プラットフォームに取り付けられています。HICO の主なミッション目的は、水の透明度、海底の物質、深淺測量、そして湾岸地域の沿岸の植生に関するデータをおよそ 90m/pixel の地上分解能で収集することです。センサーは、可視および近赤外線波長域で 87 バンドの高品質の情報を収集します。
- ・国際宇宙ステーションの SERVIR 環境調査および可視化システム（International Space Station SERVIR Environmental Research and Visualization System: ISERV）は計画中のセンサーシステムで、シュミットカセグレン式の望遠鏡をデジタルカメラに取り付けることで、3m/pixel より高い地上分解能で可視波長の画像を収集します。このシステムは WOLF に取り付けて使うため、安定して目標を捕捉する機能を持つことが期待されています。このセンサーによって、SERVIR プログラムの目標である開発途上国への援助や災害の軽減と対応、人道支援のために地球科学データを使用することが可能になります。

現在、個々の科学チームがさまざまなセンサーシステムで収集したデータの利用を管理していますが、将来的には集中化したデータ利用管理施設が計画されています。国際宇宙ステーションに搭載された手動と自動化されたセンサーシステムは、地球を監視し、自然災害や大惨事に対処する能力の大幅な向上を約束するものです。国際宇宙ステーションの地球観測システムの統合は、国際的な衛星による地球観測システム全体への、重要で相補的な追加となり、我々の共有する地球環境への知識や現象の理解を深めることに貢献します。

## 国際宇宙ステーションの画像で島国のサンゴ礁資源管理を支援

NASA ジョンソン宇宙センター (JSC)

サンゴ礁は多くの島国や沿岸国、特に熱帯太平洋やインド洋で重要な資源です。これらの国々は、地域の漁業を支える豊富なサンゴ礁生態系に依存しています。さらに、サンゴ礁は沿岸を大きな波や高潮から守り、観光からかなりの収益をもたらします。国際宇宙ステーションから宇宙飛行士によって撮影されたサンゴ礁の写真は、サンゴ礁の地形、沿岸の開発、関連する陸上の居住環境について重要な全体像を提供します。

### 背景

近年、科学界は世界中のサンゴ礁が、地球温暖化（海面の上昇、海洋温暖化と酸性化）や地域の人間活動（沿岸開発、漁業の乱獲や大勢の観光客）などの大規模なプロセスにより脅かされていることを認識しています（危機に瀕するサンゴ礁 [<http://wri.igc.org/reefsatrisk>] およびサンゴ礁の減少マップ [<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Coral/>] を参照）。個々のサンゴ礁群の崩壊はサンゴ礁資源に依存する地域の島国や沿岸社会へ災いをもたらします。サンゴ礁群の地球規模の減少は海洋の生物多様性や漁業の支援などに重要な関わりを持ちます。

およそ 10 年前、サンゴ礁の地理的な属性を理解し資源を管理するための最初の段階として、地球のサンゴ礁の範囲を地図にまとめる作業が始まりました（ミレニアムサンゴ礁マッピング [<http://imars.usf.edu/MC/index.html>]）。これらの取り組みが始まると、科学者達は 1) 世界のサンゴ礁の正確な地図がないこと、2) サンゴ礁の詳細な地図作成は地域の資源管理者に大きな価値をもたらすこと、3) 多くのサンゴ礁群が遠隔地にあるため詳細な地図作成が困難または不可能であること、などを認識しました。

サンゴ礁のデータのほとんどは、ランドサット 7 や SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-View Sensor) を含む、既存の地球観測データ提供組織から入手したものでした。しかし、科学者と資源管理者のチームは、多くの遠隔海洋地域の詳細な画像がほとんどないことにすぐに気付きました。そこで、NASA はさまざまなセンサーによるサンゴ礁の画像の収集を複数の組織と提携して支援しました（たとえば、国連環境計画世界自然保護監視センター (United Nations Environmental Program World Conservation Monitoring Centre) や国際サンゴ礁行動ネットワーク (International Coral Reef Action Network : <http://www.icran.org/>)、国際海洋生物資源管理センター (International Center for Living Aquatic Resources Management)、および ReefBase など）。

宇宙飛行士による画像は、一部の地球観測装置によるデータよりも解像度が高く、重要な貢献をする資料であることがわかりました。それらの画像は全体的に雲がなく、従来地球観測衛星で撮影

されていなかった地域を含んでいました。宇宙飛行士は広い大洋上を通過するときに美しいサンゴ礁地域を意識的に撮影していました。観測データの主たる収集源ではありませんでしたが、宇宙飛行士による世界中の海洋遠隔地域のサンゴ礁の写真は、サンゴ礁群の地図を作成しその変化を監視するために役立つグローバルデータベースに取り込まれ、貴重なデータとなりました。この情報は、地域のサンゴ礁管理者にとってはとても重要です。

今日、国際宇宙ステーションの宇宙飛行士は地球のサンゴ礁の高解像度（5-6 m）のデジタル画像を日常的に収集しています。NOAA のリチャード・スタンプはこれらの画像を水深の評価に使っていると 2003 年の報告書に記しています。さらに他の共同作業を挙げると、2002 年に環礁のパラメータを決定する際の画像の空間規模の影響を評価したり（南フロリダ大海洋観測所のサージ・アンドレフォによる）、科学者たちは宇宙飛行士の高解像度の写真を潜水調査の計画やその他の管理活動に利用したりしています（フランスのサンゴ礁活動のジャンパスカル・クオッドの 2002 年の出版物による）。

国際宇宙ステーションからのサンゴ礁エリアの写真撮影は、サンゴ礁画像のグローバルなデータベースに貢献する手段として確立され、沿岸の地域社会によるサンゴ礁の管理を支援しています。今後は、HICO (<http://hico.coas.oregonstate.edu>) や ISERV (<http://www.servirglobal.net/en/SERVIRHome.aspx>) など、他の国際宇宙ステーション搭載センサー群もサンゴ礁地図作成活動のための貴重なデータを提供するでしょう。



グロリオソ諸島（インド洋無人島群）。これらの島々はウミガメと海鳥の巣作りに重要なため保護されています。国際宇宙ステーションから撮影されたこのデジタル画像（ISS002E6913）は、グロリオソ諸島を取り囲むサンゴ礁の詳細を表しています。

この写真は、レユニオンにある Agence pour la Recherche et la Valorisation Marines (ARVAM) とそのパートナーがサンゴ礁の詳細な実地測量地図（地形学と生態学）を作成するものとなる基本地図として利用されました。これらの地図は、締結されている国際的な手順（地球規模サンゴ礁モニタリングネットワーク [<http://www.gcrmn.org/>] およびリーフチェック [<http://www.reefcheck.org/>]) に基づく生物種の一覧表作成やサンゴ礁の健全性調査に役立ちました。これらの宇宙飛行士による写真は空間解像度が高い（約 5 m/pixel）ので、この種の詳細な実地調査を支えるために必要である詳細な情報をとらえています。

#### 参考文献

Andrefouet, S., J. A. Robinson, C. Hu, G. Feldman, B. Salvat, C. Payri, and F.E. MullerKarger. 2003. 『Influence of the spatial resolution of SeaWiFS, Landsat 7, SPOT and International Space Station data on determination of landscape parameters of Pacific Ocean atolls. Canadian Journal of Remote Sensing 29 (2) :210218.』

Robinson, J. A., G. C. Feldman, N. Kuring, B. Franz, E. Green, M. Noordeloos, and R. P. Stumpf. 2000. 『Data fusion in coral reef mapping: working at multiple scales with SeaWiFS and astronaut photography. Proceedings of the 6th International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, Vol. 2, pp. 473483. 』  
<http://eol.jsc.nasa.gov/newsletter/DataFusionInCoralReefMapping/>

Spalding, M. D., C. Ravilious, and E. P. Green. 『World Atlas of Coral Reefs.』 University of California Press, Berkeley. 424 pp.

Stumpf, R. P., K. Holderied, J. A. Robinson, G. Feldman, N. Kuring. 2003a. 『Mapping water depths in clear water from space. Coastal Zone 03』 , Baltimore, Maryland, 1317 July 2003  
<http://eol.jsc.nasa.gov/newsletter/CoastalZone/default.htm>

Bryant, D., L. Burke, J. McManus, and M. Spalding. 1998. 『Reefs at Risk: A mapbased indicator of threats to the world's coral reefs. 』 World Resources Institute, Washington, D.C.  
<http://wri.igc.org/reefsatrisk/reefrisk.html>

Andrefouet, S., J. A. Robinson. 2003. 『The use of Space Shuttle images to improve cloud detection in tropical reef environment.』 International Journal of Remote Sensing 24: 143149.

## 国際宇宙ステーション農業カメラでノースダコタ州の洪水観測

ウイリアム・ステファノフ

Jacobs社 研究開発部 科学応用課

地質学者や生態学者に、物理的に触れたり採取したりせずに、材質やその変化に関する情報を収集する地球の遠隔観測について聞いてみれば、きっと、地表や海洋や大気データを日常的に地球周回軌道から収集するランドサット衛星や ASTER（高度な衛星搭載熱放射反射計）、MODIS（中分解能画像分光放射計）、あるいは他の感知システムに言及するでしょう。1970年代初期以来、全地球遠隔観測は、極軌道を周回し太陽同期の人工衛星の守備範囲でしたが、それが国際宇宙ステーション（ISS）への新しい遠隔観測システム追加搭載により変わりつつあります。

最初の新システムの一つは、国際宇宙ステーション農業カメラ（ISSAC）です。ISSACは、ノースダコタ大学の学生と教授陣によって開発されました。主な目的は米国中西部の北部地域における農業活動と関連する研究を支援するためのデータを収集することです。今日の農業従事者は、さまざまな遠隔観測衛星からのデータを使って、気象状況や気候パターンを知り、作物の健全度を監視します。ISSACは、穀物の栽培期に米中西部州の耕作地その他の画像を収集して、農業従事者や農業研究者のための情報源になります。

CEO（搭乗員地球観測）実験のために宇宙飛行士が国際宇宙ステーションから撮影するデジタルカメラの画像とは違って、ISSACの画像はNASAのテラ衛星に搭載されたASTERセンサーで収集される多重スペクトルデータに似ています。また、ISSACは窓観測研究設備（WORF）に取り付けられて、国際宇宙ステーション搭乗員の介在なしで運用できます。

この感知システムには、電磁スペクトルのうち可視光の緑と赤、および近赤外波長に感度がある個別画像フレームを収集するフィルターを装備した2台の静止画デジタルカメラが使用されています。個々のフレームは結合されて、1つの多重スペクトル（3帯域）画像にされます。この波長の組合せにより、農業研究と監視に重要な2つの要素、植生の違いがうまく見分けられる点、植物の地域的範囲・健全性の変動をうまく検出できる点で、ISSACは特に優れています。

さらに、ISSACは、NASAの人道支援運動のために自然災害や大惨事の画像を収集することができます。ISSACは、稼動してまもなくの2011年6月24日にノースダコタ州マイノット市近郊のスーリス川の洪水画像を収集することで、この機能を証明しました。ISSACの画像はランドサット衛星と同様の波長帯で記録されるため、科学者達はISSACのデータをスーリス川渓谷の以前のランドサットデータと容易に比較でき、マイノット市内と周辺の洪水範囲を明確に示すことができました。

ISSACが稼動している現在では、国際宇宙ステーションから収集されるデータには、極軌道衛星

のセンサーから取得されるものと同様の画像が含まれています。ISSAC は 1 日の様々な時間帯に異なる反復頻度のデータを集めることで、極軌道衛星による伝統的な地球観測を更に補強します。ISSAC と他の遠隔観測装置を国際宇宙ステーションへ追加することで、WORF への船内取付、船外取付を問わず、NASA は自然 / 人為的な地球の変化と自然災害を観察・監視する能力を向上させています。

ノースダコタ州マイノット市およびスーリス川渓谷の、通常時の川の流れ（上図、ランドサットの作図データ）と洪水時（下図、ISSAC データ）の比較。両画像は、光合成の盛んな植生を赤色で強調し、市街地区は茶褐色で冠水していることを示しています。



## 水の都ヴェネシスの健全性を監視する

ウイリアム・ステファノフ

Jacobs社 研究開発部 科学応用課

イタリアのヴェネシスは、その建築、歴史、ロマンスとともに、市街地の主要な往来に使われる運河でもよく知られています。運河と橋は、ヴェネツィアの潟、つまりこの街が築かれた、117の島を含むアドリア海の湿地の上に人工的に築いたものです。この潟はヴェネシスの基盤を成すことに加えて、ラムサール条約で指定された地中海の湿地生態系の重要な部分です。

多くの沿岸域と同じく、ヴェネツィアの潟はヴェネシス市と環境的に注意が必要な湿地とともにアドリア海に沈みかかっており、ヴェネシスへの洪水のリスクを高め、湿地にも大きな被害を与えています。潟の慎重な地図作成は、人と環境への損害を軽減するためにも重要です。

2010年に国際宇宙ステーションから宇宙飛行士が撮った写真が、潟地図帳プロジェクト(<http://www.silvenezia.it/>)に取り組む環境コンサルタントの、アレッサンドロ・ムラツァーニ博士の目に留まりました。この地図帳は、気候、生態系、水文学および潟への人間の影響に関する豊富な情報を提供するインターネットの地理情報システム(GIS)です。ムラツァーニ博士は、この地図帳にとっての宇宙飛行士の高解像度写真の持つ価値を、「これらの写真は、ヴェネツィアの潟というこの類まれな自然環境の最新の風景を、我々が特に一般市民や生徒に提供するのに非常に有効です。」と解説しました。

宇宙飛行士が撮影する写真に興味を持ったことがNASAジョンソン宇宙センターの搭乗員地球観測(CEO)チームとの共同作業に発展し、ヴェネツィアの潟は宇宙飛行士が継続的に写真を撮る公式CEO対象地点となりました。CEOチームは、最新の国際宇宙ステーション軌道情報を使って、特定の地点が搭乗員から見える日時を予測します。この撮影目標予測は、適切な照明条件か、許容可能な雲の量か、および搭乗員が対応可能かでふり分けられます。これらの様々な要件に合致した地点が国際宇宙ステーションの搭乗員に撮影目標として通知されます。目標画像の取得に成功した後、画像はカタログ化されて、宇宙飛行士による地球観測画像ゲートウェイのオンラインデータベースに追加され、世界中の人々が利用できるようになります。ヴェネシスの潟のような公式の協力の場合は、新しい画像の更新通知をその計画をした研究者に送ることもできます。

国際宇宙ステーションからのデジタルカメラ画像を使用することで、観測衛星が撮影したデータの撮影時間間隔の隙間を埋めて補ったり、異なる見方と解像度で撮った画像を提供したりできます。この幅広い遂行能力は、観測拠点としての国際宇宙ステーション特有の利点であるとともに、従来型の自律方式に加えて、人が操作する遠隔観測機能を持つことの利点を特に際立たせています。

ヴェネツィアの潟の場合、人の目で予想外の出来事を観察することで、今後の世代のためにこの湿地の健全性を守るのに役立つでしょう。



宇宙飛行士が撮影した地形参照用の写真に、運河網（明るい青）を重ねた「潟の地図帳」の表示画面。基本画像は継ぎ合わせの写真（幾何的な補正により作成）です。このサイトは、現在、イタリア語のみで利用可能です。

(<http://www.silvenezia.it/webgis/map.phtml?config=baseorto>)

## HREP-HICO による地球沿岸の比類なき画像

アラン・ジョシ

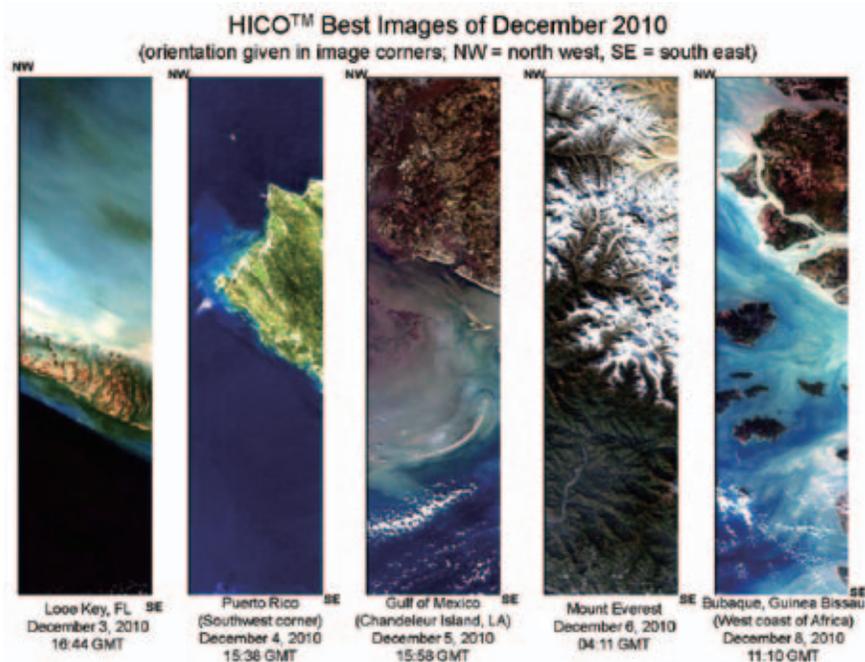
ISS プログラム・サイエンス・オフィス

NASA ジョンソン宇宙センター (JSC)

国際宇宙ステーションのように絶好の見晴らし位置で地球を回るのは、ただすばらしい眺めを楽しむだけのものではありません。地球低軌道を周回する間、国際宇宙ステーションの HREP-HICO (HICO and RAIDS Experiment Payload Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean) が沿岸地域を観察する、新しく貴重な手段を研究者に提供しています。

「きぼう」の船外実験プラットフォームに取り付けられた画像分光計を使用して、研究者は地球に関するデータを収集しています。これらは、世界中の沿岸の自然環境やその他の地域をよりよく理解するために役立ちます。

なぜ沿岸地域の環境を知ることが重要なのでしょうか。沿岸水域は、地域と世界の経済発展と自然環境維持を結ぶ重要なリンクです。沿岸地域には、世界の主要都市の多く（工業地帯、港湾、リクリエーション施設）を支え、漁業を支え、海岸線を守る重要な生態系も含まれています。



上の画像集は、HICO で 2010 年 12 月に取得された、解説付き最良画像を収集したものの。(出典：NASA)

HREP-HICO は、沿岸地域の環境特性評価および陸域の地球物理学的な特徴を捉えた地図作成に最適化な、可視から近赤外波長の分光計です。HREP-HICO の主任研究員であるワシントンDCにある海軍研究所 (Naval Research Laboratory) のマイク・コーソン博士は、「沿岸環境特性評価には、沿岸の深浅測量、水の透明度、有機・無機の溶解物質や海底の特性の地図作成が含まれる。」と解説します。

アラバマ州ハンツビルのマーシャル宇宙飛行センターにあるペイロード運用統合センター (Payload Operations and Integration Center: POIC) が、HREP-HICO の運用を管理しています。国際宇宙ステーションの船外ロボットを使った最初の設置作業と、最後の撤去を除いて、HREP-HICO からのデータの収集に搭乗員の介在は不要です。

しかし、海洋の画像を撮るのは、見た目よりも難しい作業です。沿岸海域を撮るように設計された最初の宇宙機搭載用画像分光計として、HREP-HICO は世界中の広範囲にわたる海岸線、海洋の複雑な構成、変動する気象条件、太陽の位置を把握する必要があります。このような課題への対処をおろそかにすると、水域と海底の視野が不明瞭になり、低品質で判別不能な画像となります。

HREP-HICO は、可視と近赤外波長を含む波長の範囲の反射光を記録します。このスペクトル情報は、撮影シーン内の各ピクセルごとに識別され定量化されます。こうすることで大気効果と海面反射を後で補正することができます。

また、HREP-HICO は、海事ハイパースペクトル画像分析 (Maritime Hyperspectral Imaging : MHSI) 技術の性能を検証することによって、その技術が有用であることを示しました。この技術は、画像処理性能要求と研究者が沿岸域用に調整した情報処理方式を提供します。コーソン博士は「沿岸環境の複雑な性質があるため、MHSI の情報処理では、画像取得場所に適した生物学的または物理学的情報を利用することがよくあります。」と説明しています。

このミッションには、2つの目標があります。第一の目標は、宇宙からのハイパースペクトル画像分析を使用して、沿岸海域環境特性の地図を作成できると示すことです。第2の目標は、宇宙機器を作る経費を削減し、スケジュールを短縮する手法を示すことです。設計を工夫し、できる限り市販品の機器を使って、技術者たちは従来の宇宙機器の何分の一かの経費で効率的に HREP-HICO を設計しました。

HREP-HICO による研究の結果は、深浅測量、海底形状、水の透明度、その他の水の光学特性に関する情報を提供することで、米国海洋大気庁 (National Oceanic and Atmospheric Administration : NOAA) などの海事担当機関に利益をもたらします。この技術はまた、土地被覆、植生の種類、植生のストレスと健康、穀物生産を監視することによって、農業を目的とする陸地の研究にも寄与します。また、研究者は HREP-HICO を使用して、自然災害や 2010 年のメキシコ湾の石油流出などの人為災害の環境への影響を調べることに使えます。

HREP-HICO は、2009 年 9 月 10 日に国際宇宙ステーションに打ち上げられ、「きぼう」の船外実験プラットフォームに取り付けられました。これは、船外実験プラットフォームに設置された最初の米国の実験装置です。

HREP-HICO は、2009 年 9 月 25 日に最初の画像を収集しました。コーソン博士によれば、「HICO はこれまでに世界中の沿岸環境のハイパースペクトル画像を約 4,000 枚撮影しました。この先導的なミッションを継続して、数多くの政府・大学の研究者の皆さんに画像データを提供する予定です。」とのことでした。

## 国際宇宙ステーションから東日本の津波大浸水を捉えた

ウィリアム・ステファノフ

Jacobs社 研究開発部 科学応用課

2011年3月11日に東日本の沿岸は、過去最大の地震の一つとなったマグニチュード9.0の東日本大地震の激しい揺れに襲われました。太平洋プレートと北米プレート間の断層活動が原因となった地震は、津波を引き起こし、本州東部の沿岸の多くが浸水しました。人命の悲劇的な喪失や、建物や社会基盤、農業の広範囲な荒廃とともに、津波は福島第一原子力発電所を損傷し、放射能漏れや長期におよぶ可能性のある環境生態学的危険をもたらしました。

国際宇宙ステーションの搭乗員はこの危機に対応し、津波による浸水を捉えた役立つ画像を数々取得しました。2011年3月13日に撮影されたこの画像は、仙台の北と東の日本沿岸にそった浸水状況を写しています。国際宇宙ステーションの宇宙飛行士が350キロメートル（220マイル）の高度から東松島市のこの画像を撮りました。農地や住宅地がともに泥水に没し、松島空港の十字の滑走路は水に囲まれていました。



2011年3月13日に撮影された津波による浸水後の仙台の北東部の沿岸を斜め方向に撮影した画像。太陽光の反射が、浸水が広範囲におよんでいることと、水面に油などが浮かんでいるのを示しています。  
([http://eol.jsc.nasa.gov/EarthObservatory/Tsunami\\_Japan\\_2011\\_glint.htm](http://eol.jsc.nasa.gov/EarthObservatory/Tsunami_Japan_2011_glint.htm))

大災害の冷静な傍観者などにはとてなれず、国際宇宙ステーション搭乗員たちはビデオや音声や電子メールで日本の人々に対し懸念と悔みを伝えました。

4月13日の軌道上記者会見でアレクサンダー・サマクチャイエフ宇宙飛行士は、こう述べました。「島国日本を襲った恐ろしい自然災害で世界中のすべての人々に衝撃を与えたこの悲劇に、すべてのロシア人は心を痛めています。我々は隣りあう国同士で非常に近いので、私たちの地域にもこのような悲劇が容易に起き得ますし衝撃を与え得ます。ロシア人を代表して述べさせていただきますが、私たちは監視機能を強化したいと思います。世界のどこかで二度と同じことが起きないように、世界中の科学者の助けを借りて、新しい方法で自然災害を追跡・監視する、新機能をいくつか加えることができるでしょう。」

ロン・ギャラン宇宙飛行士は、「我々の国際協力関係の強さは、良い時も悪い時も皆一緒に、お互いに助け合うということだと申し上げたい」と述べました。3月11日の地震は製油所に深刻な被害をもたらし、一部で火災が起こりました。その余波で石巻湾の海面に石油が漂っていました。画像では、太陽光による海表面の鏡のような反射が油膜を目立たせています。油は水面を平滑化し、より反射させます。この画像では、油のある部分は、無い部分に比べ薄く見える傾向があります。しかしながら、他の現象でも、特に沿岸近くでは、水を薄く見せることがあります。

この画像は、国際宇宙ステーションの地球観測と災害対応の二つの特徴を示しています。宇宙飛行士はデジタルカメラを使って、水面に映る太陽の光を、多くの衛星に搭載されている装置よりも、高い頻度で上手に撮影できます。これにより、陸上の停留水を検出し、地図化するための機能を強化でき、汚染物質に対する特定の環境や健康懸念のある場所を識別することができるかもしれません。様々な解像度で撮影されたこれらの自然色画像は、地上の災害対応者にも送信でき、画像の加工をほとんどすることなく容易に読み取れます。

国際宇宙ステーションは、地球の遠隔観測場所として、手動操作と自律型の両方の検出機能を持つ独特な存在です。人間が介在することで、大災害を含む自然の営みやその特徴を識別して撮影をすることと、他の撮像装置を補完すべく撮影者の見解を示すことの両方で有益であることがはっきり判ってきました。遠隔観測情報の有益性をさらに広げているわけです。

## 超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (Superconducting Submillimeter-wave Limb-emission Sounder: SMILES)

佐野 琢己

ISS 科学プロジェクト室 JAXA 宇宙科学研究所

超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (Superconducting Submillimeter-wave Limb-emission Sounder: SMILES) は、機械式冷凍機で冷却した超伝導ミキサの初めての軌道上実証となる、成層圏および中層圏の化学に関連した大気微量成分の高分解能測定システムです。SMILES は、装置の一部部品の故障により観測が停止されるまで、6 か月間観測データを取得しました。データの分析が進むにつれて、これらのデータは SMILES が高性能であったことを示し、データは新しい科学情報の宝庫と期待されています。

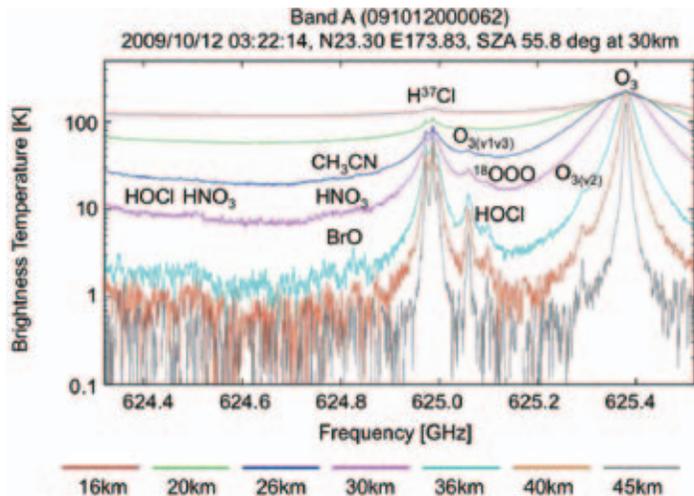
SMILES ミッションの主な科学目標は、成層圏オゾン（「オゾン層」とも呼ばれる）と関連する化学物質の広域分布や時間的変動を研究することです。ある数値による大気モデル計算では、地球のオゾンレベルは 21 世紀の半ばごろに「1980 年以前」のレベルに回復すると示唆しています。しかし、特に臭素量や無機塩素との化学反応において、オゾン量の変動に影響をもたらすかなりの不確定性があります。さらに、対流圏の温室効果ガスの増加による成層圏冷却も、オゾン層の動向に影響をもたらしています。SMILES ミッションは、これらの研究に貢献するため、オゾン破壊プロセスに関係のある化学反応の解明に重点を置いたミッションです。

SMILES は、2009 年 9 月 11 日に日本の種子島宇宙センターから、国際宇宙ステーション補給機「こうのとりのり」1 号機に搭載されて、H-II/B ロケットで打ち上げられました。9 月 25 日に国際宇宙ステーション (ISS) の「きぼう」(日本実験棟) の船外実験プラットフォームの No.3 ポートに取り付けられ、すべての軌道上初期機能確認に成功しました。SMILES による地球大気の定常観測は 10 月 12 日に開始され、2010 年 4 月 21 日に装置の構成部品が故障するまで、約 6 か月間観測を実施しました。

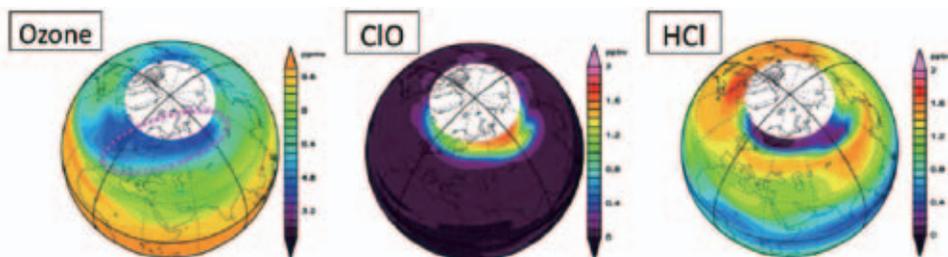
SMILES は、サブミリ波の領域（波長 0.46 ~ 0.48mm、624 ~ 650GHz の周波数に相当）から大気成分の微弱な放射を検出しました。さまざまな種類の分子から放射されるスペクトル線強度を計算し、実際に観測したサブミリ波の放射強度と比較することによって、その分子の存在量が求められます。

SMILES の観測により取得された大気成分のグローバルな分布のサンプル（スナップショット）のひとつとして、オゾン層破壊とこれに関連した北極地方周辺の塩素化合物の量の変化があります。2010 年の冬に成層圏でプラネタリー波が勢いを増し、高緯度域で成層圏の急激な温度上昇が発生しました（数日間、温度が約 40°C 上昇）。この期間中、極域のジェット気流の内部で不均一な化学

反応プロセスが発生し、極渦内で塩酸（HCl）ガスが減少しました。同時に北極の夜の領域の外側で太陽放射により塩素化合物が活性化し、一酸化塩素（ClO）の濃度が高い領域が発生しました。結果的に、この領域においてオゾン破壊が促進されました。SMILES はこのような現象を高分解能、そして様々な地域で同時に解明できます。



SMILES で観測されたスペクトルの例。異なる高度のスペクトルと比較するために、各スペクトルのベースラインは縦方向にずらしてあります。スペクトルのランダムノイズは、すべての高度でおよそ 0.4 ~ 0.6K (Kelvin) です。  
(出典：富士通 FIP)



2010 年 1 ~ 2 月にかけて、ClO の増大と HCl の減少がみられ、結果としてオゾン破壊が活発化しました。2010 年 1 月 23 日の観測例であるこの図では、高緯度域において ClO が増大していることが示されています（“ClO” の図を参照）。ClO 濃度の高い領域でオゾン破壊が促進されています（“Ozone” の図を参照）。極渦の内側（高緯度側）で HCl 濃度が低くなっていることが示されています（“HCl” の図を参照）（出典：京都大学）

SMILES の観測データから取得された輝度温度スペクトルには、オゾンと塩化水素（HCl）とからの強い輝線および次亜塩素酸（HOCl）、硫酸（HNO<sub>3</sub>）、一酸化臭素（BrO）およびオゾン同位体などからの弱い輝線が見られました。輝度温度の雑音レベルは約 0.4K で、これは他の宇宙用のリムサウンダを凌ぐ性能を持つことを示しています。

SMILES の装置開発の第一段階では、文献に基づく値が分光パラメータとして使用されていました。しかし、SMILES 装置の性能は非常に高く、研究者らは既存の分光パラメータを見直すことを迫られ、新たなパラメータを計算するため、追加の分光実験を行うことになりました。

SMILES は大気観測運用に成功し、高いスペクトル分解能で地球大気の観測を実施しました。残念ながら、6 か月間の観測で運用は終了してしまいましたが、観測データは SMILES 装置の非常に高い性能を示しました。さらに、SMILES の初期の科学的な結果は妥当で、他の宇宙機器で測定した結果との整合性が確認できました。また、6 か月の運用の間に蓄積されたデータからこれまで未解明の事実が発見されることが期待されています。SMILES 装置の本当の性能がわかるまでには、データの処理と分析のためのさらなる研究が必要になります。

## 気候変動を理解する

ジェイソン・ハットン

有人宇宙飛行運用局 ISS利用・宇宙飛行士支援部 科学応用課  
ヨーロッパ宇宙機関(ESA)／ ESTEC

多くの宇宙飛行士にとって、宇宙飛行中に最も記憶に残る経験は国際宇宙ステーション (ISS) の下方にあるはかない青い球体、地球を見ることです。地球は、光線条件の変化や季節の移り変わりにより様々な表情を見せます。砂嵐が米国の南西部を襲い、低気圧が北ヨーロッパに雨を降らせ、台風が日本を直撃し、高緯度に夜光雲がある、こうした現象をすべて、地球の周りを回る軌道から簡単に見ることができます。国際宇宙ステーションに搭載された科学装置によって日常的に地球環境の探査、測定、分析が行われ、地球の気候の長期的変化を理解するために鍵となるデータが提供されます。地球観測専用の衛星のデータを補強するために、ESA は国際宇宙ステーションを利用した気象変化に関する新たな実験の公募を開始しました。

さまざまな自然の物理的プロセスにより、短期・長期で大気、海洋、地表に変化が生じます。過去 150 年間の人間活動により、温室効果ガス濃度の増加、窒素やリンのサイクルの変化、土地利用の大きな変化（森林破壊など）など、地球の環境の多くの面で重大な変化が生じました。人に起因する変化と自然の変化との関わりを理解し、地球環境の将来の変化を予測することは重要です。同様に、この情報は人間活動に関わる持続可能な開発を支援し、一方で環境の悪化を最小限にして、気候変動に対する社会の脆弱性を抑えることができます。

ESA は他の国際機関と共に、現在、多数の地球観測衛星を運用し、それぞれの目的にあった専用の機器を使用しています。これらの活動は主に ESA の地球観測計画、地球規模の環境・安全モニタリング (GMES) プログラム (EU との共同実施)、そして ESA の気候変動対策プログラムによってサポートされています。

国際宇宙ステーションでは、広範な国際調査活動が日常的に行われています。これまで国際宇宙ステーションを利用したヨーロッパの研究では、国際宇宙ステーションがもたらす微小重力環境と宇宙への曝露環境を利用した生命科学・物理学分野に重点が置かれてきました。しかし、国際宇宙ステーションが、天体物理学、太陽エネルギー科学、基礎物理学、地球科学分野および気象変動に関連した研究のためにいろいろと利用できる機能を備えていることは明らかです。



2010年5月のSTS-132ミッションで、スペースシャトル「アトランティス号」から見た地球と国際宇宙ステーション（出典：NASA）

地球規模の気象変動の研究にあたり、国際宇宙ステーションへのリモートセンシング装置の設置についてヨーロッパや国際的な研究団体がどの程度関心があるかを評価するため、2009年10月、地球観測プログラム部の支援を受けて、ESAの有人宇宙飛行部（現在は有人宇宙飛行・運用部）が、アイデアの募集を行いました。45件のアイデアが届き、見込みのあるコンセプトが多数提案されました。これにより、気象変動の研究に国際宇宙ステーションを利用することへの関心が高いことが確認でき、興味深い分野がいくつか明らかになりました。最近公表されたテーマ募集に対する提案は専門家によって審査され、いくつかの実験候補が選ばれた後、さらに詳しく調査され、どの実験を国際宇宙ステーションで実施するかが決まります。募集の詳細は次のリンクを参照してください。（※募集は既に締切られています）

[http://www.esa.int/SPECIALS/HSF\\_Research/SEMPM17TLPG\\_0.html](http://www.esa.int/SPECIALS/HSF_Research/SEMPM17TLPG_0.html)

国際宇宙ステーションは、専用の衛星を開発しなくても機器や実験を宇宙飛行させることができます。国際宇宙ステーションは、ほとんどの地球観測衛星とは異なり、軌道傾斜角51.6度、高度350～400kmを飛行します。装置はヨーロッパの「コロンバス」（欧州実験棟）、日本の「きぼう」日本実験棟およびロシア実験棟など、国際宇宙ステーションの外側のさまざまな場所に取り付けることができます。ヨーロッパの「コロンバス」実験棟の外部実験設置施設（CEPF）には、実験棟の端に4か所の実験装置取付け場所があり、底部、天頂部および側面を見ることができます。地球科学および気象変動に関するいくつかの装置が開発中で、既に国際宇宙ステーションに設置されているものもあります。「コロンバス」のCEPFの天頂ポートには現在ESA SOLAR装置が取り付けられており、これは気象研究の重要なパラメータである太陽エネルギーの放射照度を測定します。雷に関連する高エネルギーの光線およびガンマ線事象を研究するESAのAtmosphere



2008年7月に国際宇宙ステーションから撮影された夜光雲（出典：NASA）

Space Interactions Monitor (ASIM) は2015年に「コロンバス」に設置されます。「きぼう」日本実験棟の船外実験プラットフォームでは、JAXAの超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (Superconducting Submillimeter-wave Limb-emission Sounder: SMILES) の実験装置が地球のオゾン層と関わる化学物質などの成層圏のトレースガスを測定しました。また、「きぼう」の外部に取り付けられた NASA Hyperspectral Imager for Coastal Ocean (HICO) は、沿岸海域研究用の画像分光計です。

装置を取り付けるもう1つの場所は国際宇宙ステーションの内部で、品質の高い観測窓から観測することができます。「デスティニー」（米国実験棟）には、窓を使用した観測研究用設備 (Window Observational Research Facility: WORF) があり、専用の底部の観測窓を通して観測します。一方「キューボラ」（観測窓）には、底部と側面から地球のパノラマ観測ができる7つの窓があります。デジタルカメラを使用した地球観測画像撮影は、現在、搭乗員による地球観測 (Crew Earth Observations: CEO) 実験の一部として行われています。

国際宇宙ステーションの船内用の装置は、比較的短いリードタイムで開発されて、国際宇宙ステーションに搭載される可能性があります。国際宇宙ステーション内の操作機器は、地上と同じ環境内にあり、宇宙飛行士が設定やフィルタの変更を行うなど、直接実験に携わることができるようになっていきます。



(左) 国際宇宙ステーションの「キューボラ」(観測窓)からは地球の全景が見えます  
(右) 2010年11月に国際宇宙ステーションから撮影されたナイル川デルタ地帯と東地中海の夜間画像  
(出典: NASA)

## 国際宇宙ステーションから地球の大災害を調べる:ウラガンプログラム

イゴール・ソローキン

S.P. コロリョフ・ロケット・アンド・スペース・コーポレーション・エネルギー

ウラガンプログラムは、国際宇宙ステーションのロシアモジュールで、自然災害と人災を監視したり、デジタル写真を使用して地球の天然資源の状態を調査研究しています。ウラガン（ロシア語でハリケーンを意味する）は、国際宇宙ステーションに宇宙飛行士が滞在を始めた時から開始され、重要な地球観測プログラムとして継続されています。その主な目的は、災害の事前警告と事後の影響を緩和するための地上と宇宙の間のシステムを確立することです。このプログラムは、1970年代の初めにソビエト連邦（ロシア）で宇宙ステーションのサリュートシリーズの一部として始まり、ミール宇宙ステーションに引き継がれた搭乗員による継続的な地球観測プログラムです。



ウラガンで使用される写真分光計システム（FSS）の作業を行う第15次長期滞在フョードル・ユールチキン宇宙飛行士

この数十年間に人類はさまざまな自然災害と人為災害に見舞われ、そのいくつかの災害では損害が広範囲に及びました。ウラガンプログラムでは、地震、火山噴火、洪水、森林火災、台風、配管事故、航空事故を含む自然災害と人為災害を調査しています。これらの災害に関する情報は、様々な分野の専門家、災害現象モデルを開発する政府機関と科学者など多くの人びとにとって役立ちます。国際宇宙ステーションは地球観測に便利なプラットフォームで、種々の装置、ソフトウェア、観測手法を試験するための機会を提供しています。試験された装置のいくつかは、最終的に地球観

測専用の無人衛星で使用されることとなります。

実用的なニーズと素早い対応がウラガンプログラムのモットーです。国際宇宙ステーションから撮影された画像は、自然災害、または人災の影響を調べるために、政府機関、科学者に利用されます。開始以来、このプログラムは人災である石油汚染など、いくつかの災害を写真に収めました。カスピ海地域では、国際宇宙ステーション搭乗員によって得られた画像が、石油汚染がどのように沿岸地区に影響を与えたかを示しています。画像分析を通じてカザフスタンの北東の海岸、トルクメニスタン南東およびアゼルバイジャンのアプシェロンの3つの地域が主な出所として特定されました。カザフスタンに接するカスピ海の北東海岸で石油が大きく蓄積し、大きさが数メートルから12kmまでにおよぶ水と油の湖が形成されました。周辺地域への流出や汚染を防ぐために、これらの湖の一部は土壁に囲われました。カスピ海の海水位は絶えず変動します。また、強風によって高さ3 mまでの波が引き起こされることがあります。海岸付近では洪水の可能性があり、それによって湖の堤防が崩壊し、カスピ海水域へ石油が流入する危険性が高くなっています。

カスピ海北部における石油汚染（ウラガン実験によるデータを基準に作成）。40の油田があり、油膜で覆われた表面の約10%に相当します。

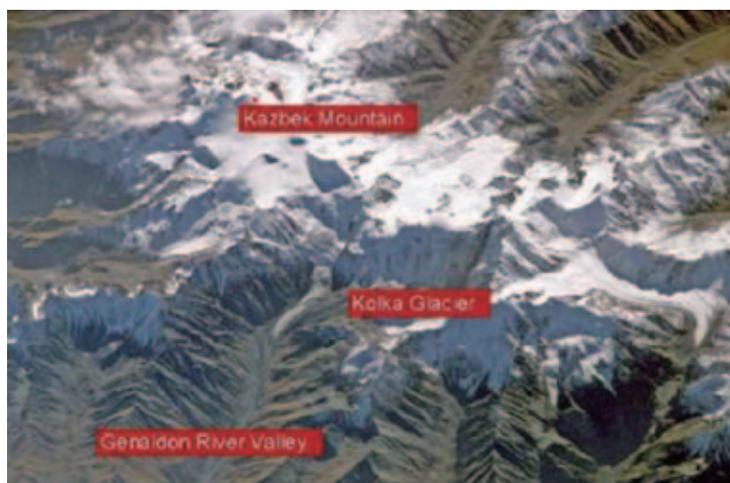


人災の他に自然災害も観察されました。2002年、搭乗員は、コーカサス山脈での氷河による災害の写真を撮影しました。9月20日、ロシアの北オセチアのゴルカと呼ばれる小さい氷河で、突然小石の混ざった大量の氷が崩壊しました。この塊は、谷を下り、広範囲を破壊し、人命を奪い、ロッキー・リッジの前の小溪谷を塞ぎました。

その1か月前の2002年8月13日に撮影された宇宙飛行士の写真は、カズベク山の北部を示しています。小さなゴルカ氷河がジェナルドン川の渓谷の上部にはっきりと見えます。氷河は石に覆われ、暗く見えます。宇宙飛行士の写真を使用することで、災害前後のジェナルドン川の上端を観察できます。氷河のほとんど全体が瞬時に氷床から離れて谷を下ったこのような出来事は珍しいことでした。事実、これは世界中の科学者にとって初めて観測した現象でした。災害後に撮影された

宇宙飛行士の写真には、氷であふれた深くぼみが写っていました。

マスメディアはこの災害について様々な異なる見解を発表しましたが、正確で詳細な宇宙からの調査だけが、災害の徹底した分析と原因の見極めを可能にしました。ロシアアカデミー地理研究所の専門家による画像分析から、初期の雪崩運動の明らかな兆候が発見されました。氷土混合物の特別な色彩と氷河構造の変化は、氷河の内層が融けていることを示しており、それによって雪崩が起こりやすくなりました。このような計画的監視は、これらの災害を事前に予測する能力向上に貢献します。



コーカサスのコルカ氷河と雪崩（ISS 第 5 次長期滞在搭乗員ワレリー・コルズンが撮影）

ウラガンプログラムで獲得された重要な成果として、他に洪水、山火事、氷河の危険、貯水池、港、冰山、その他の対象物や現象の観察があります。今後、このプログラムのさらなる進展は、壊滅的な災害現象調査の数学モデルの開発とともに、極超短波や赤外線や紫外線の帯域の観測用の追加装置の利用に役立ちます。

災害画像を撮影し続け、分析することによって、このプログラムはすべての人類に役立つものです。

代表研究者：

ミハイル・ベリアエブ

S.P. コロリョフ・ロケット・アンド・スペース・コーポレーション・エネルギー

レヴ・デジノフ

Institute of Geography ロシア科学アカデミー

## 国際宇宙ステーションから、世界の海上交通を監視

ヨーロッパ宇宙機関(ESA)

国際宇宙ステーションは地球を周回しながら眼下に見える地球の海を横切る個々の船舶を追跡しています。2010年6月以来、国際宇宙ステーションの「コロンバス」実験棟で欧州宇宙機関の実験として、数百マイル（キロメートル）の上空から世界の海上交通を監視する有効性を調べてきました。試験されている船舶検出システムは自動船舶識別装置（AIS）で、航空管制システムの海洋版です。



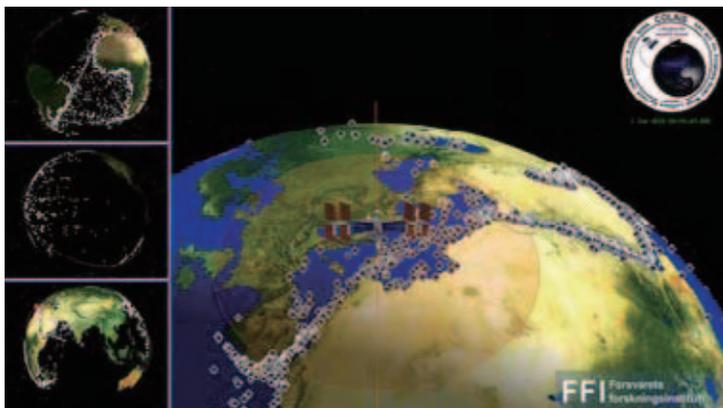
離脱したスペースシャトル「アトランティス号」から見た国際宇宙ステーション（2010年5月23日）（出典：NASA）

特定の重量を超えるすべての貨物船と客船は、クラス A の AIS トランスポンダ（応答装置）を搭載しなくてはなりません。AIS は、他の船舶や沿岸と、識別コード、位置、進路、速度、船舶要目、貨物及び航海情報を継続的に更新して送信しています。

AIS により、港湾当局と沿岸警備隊は海上交通を追跡できますが、このシステムは水平方向ではわずか 40 マイル（74 キロメートル）しか到達しない超短波帯無線信号を使っています。これは、沿岸域内と船舶同士では有効ですが、外洋では有効ではなく、ほとんど追跡されないままになってしまいます。しかし、AIS 信号は、垂直方向にはより遠くへ届くため、宇宙での受信拠点として国際宇宙ステーションは理想的な場所であり、宇宙から全世界の海上交通を追跡する機能を提供しています。

ESA の一般支援技術プログラムの軌道上実証プロジェクトとしての COLAIS 実験を宇宙飛行士が実施しました。コロンバス実験棟は、もともと AIS 信号を捕捉する超短波アンテナを装備していませんでした。超短波アンテナは、2009 年 11 月の船外活動で外部に設置され、2010 年 5 月には、

NORAIS 受信機とともに ERNO-Box 制御計算機がコロンバスの内部に設置されました。ERNO-Box は、それ自身がドイツの Astrium 社が開発した新型の宇宙用コンピュータの軌道実証でした。Astrium 社は、全体的なシステム取りまとめの責任と、ERNO-Box と、AIS アンテナの取付機構 GATOR を担当しました。アンテナは AMSAT 社によって製造されました。

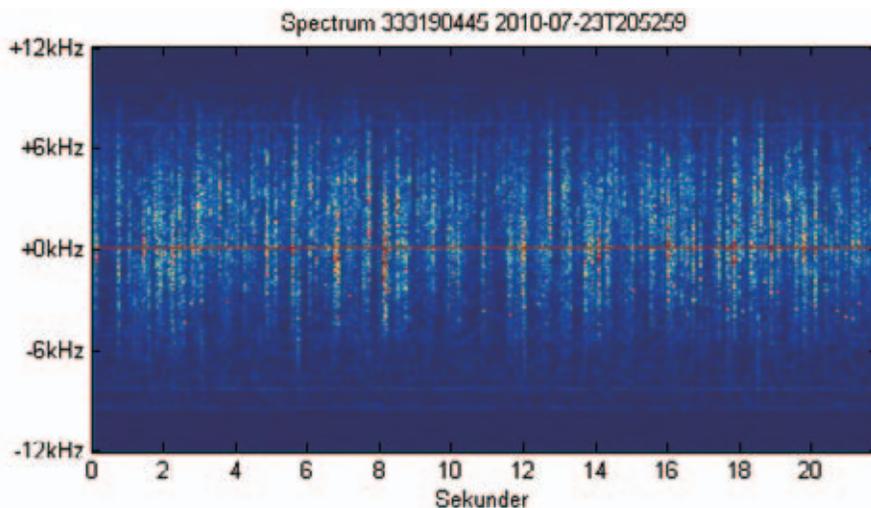


国際宇宙ステーションは、毎日地球を 15 周します。そこに搭載された NORAIS 受信機を使用する COLAIS システムの図には、地中海を通過している国際宇宙ステーションが示されています。その視野は（薄い）赤色で示され、検出された船舶は、船舶の記号で、地上の AIS 基地局は、建物マークとして表示されています。表示データは初期受信した 2010 年 6 月 3 日の 0 時から 5 時のものです。（出典：FFI）

国際宇宙ステーションから AIS 受信可能範囲はおおよそ北緯 68 度と南緯 68 度の間です。システムは、2009 年 11 月の船外活動でコロンバス実験棟の外側に取り付けられた 2 式のアンテナと、コロンバス実験棟の内部に設置されたデータ中継装置（ERNO-Box）と受信機から構成されています。ノルウェーの FFI 社によって運営されているノルウェー版受信機（NORAIS）による 2 回にわたる運用段階では、ドイツにある ESA コロンバス管制センターを経由して、ノルウェーのトロンハイムにある利用者支援運用センター（N-USOC）で計測データを受信し、大きな成功をおさめています。データは、ほぼ連続的に NORAIS によって受信され、すべての運用形態が非常にうまく機能しています。NORAIS 受信機には、信号品質の分析のために生の信号を収集してデジタル化し、地上へ送信する標本抽出モードがあり、信号品質解析が信号喪失や混信が起こる海上交通過密地域において、システムの性能向上に、非常に役立つことがわかりました。



2009 年 11 月 21 日にアトランティス号で二回目の船外活動を行うランドルフ・プレスニク宇宙飛行士と、海上船舶の超短波信号の追跡実験に使用するためにコロンバス実験棟に取り付けられて展開された AIS アンテナ（出典：NASA）



抽出データの 22 秒間にわたるスペクトル。各受信は垂線として表示されます。約 150 の受信がデータから解読されます。(出典：FFI)

このデータは、信号環境の調査と地上での新しい受信技術の性能評価に使われます。数百種のデータが収集され、次世代受信機の新しい候補であるアルゴリズムで試されました。

分析の結果は非常に良好で、条件の良い日には 22,000 を超える異なる船舶識別番号（海上移動業務識別、MMSI 番号）から、およそ 400,000 の船舶位置報告が受信されました。2011 年 10 月のまとめ報告では、82,000 を超える MMSI 番号からの船舶位置受信件数が 1 億 1000 万を超えました。

本来の技術研究項目に加えて、運用的な実験も研究に含まれました。ESA が利用者と協力して設定した SAT-AIS の要求を満たすには、ほぼ実時間のデータ転送が必須です。N-USOC の地上システム改良の後、10 日間にわたるほぼ実時間のデータは、期間中の収集データの 80 パーセントが、1 時間以内の遅延で国際宇宙ステーションの通信網を通じて配信されました。2011 年 11 月以降は、ほぼ即時のデータ配信が、通常の運用になりました。

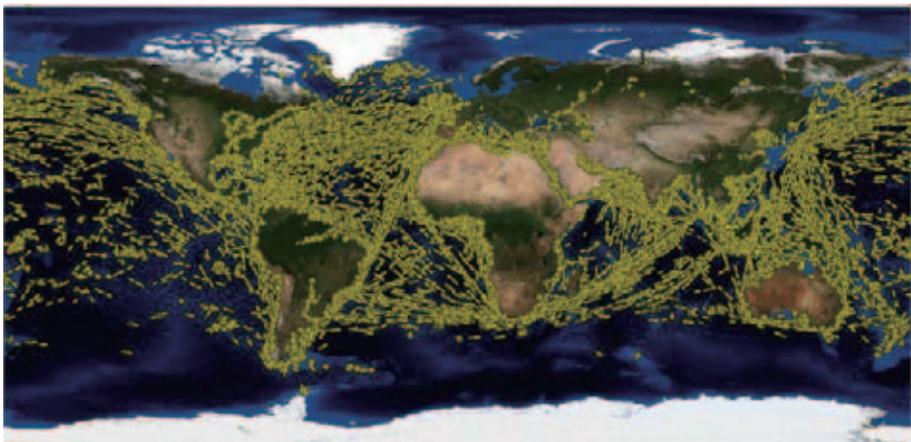
ESA との技術開発契約の一部として Kongsberg Seatex 社によって開発された信号処理の新しい手法を現在試験中です。この開発では、標本データの調査と他の ESA プロジェクトで進行中の研究からの恩恵を受けています。組込みソフトウェアは、国際宇宙ステーションの通信網を経由して NORAIS 受信機に送って検証され、2011 年 1 月に起動されました。予備試験では、高性能で追跡が必要であると ESA が識別した交通量が多い地域で、処理性能が 1.5 から 2.0 倍に増加したことを示しています。

より良い処理手法の研究は続いています。NORAIS 受信機の二回目の性能向上は 2012 年 5 月に計画されています。開発の結果は、国際宇宙ステーション上の AIS 受信機の性能向上のみならず、宇宙仕様の AIS システム全般の設計や開発にも貢献するでしょう。

観測衛星のような他の衛星データと AIS 情報を統合すれば、海事監視を著しく改善し、海上交通の安全とセキュリティを高められます。2010 年 7 月にほぼ極軌道に打上げられたノルウェーの AISat-1 衛星用に設計された装置は、北の高緯度で同様に優れたデータを提供しています。NORAIS 受信機は、156 から 163 メガヘルツまでの海事用帯域で作動するソフトウェア駆動の無線機設計です。宇宙用 AIS へ割り当てられるべく検討中の周波数に NORAIS 受信機が合わせられ、2010 年 10 月に米国沿岸警備隊に、提案された二つの周波数の国際的な実地試験に NORAIS は参加しました。

AIS で使用されている現在の二つの周波数より多くをカバーする主な理由は、宇宙用 AIS に割り当てられている海事用帯域の中の新しいチャンネルの使用を実証する可能性があるためです。また、この試験方法により、海事用超短波帯の特性を占有性や干渉の面で実際に評価することができます。このソフトウェアを使うことで、軌道上で受信機設定が最適となり、新たな信号処理手法を地上から送ることも可能になります。

船舶識別システム (VIS) は、多くの欧州の実務団体にとって利益となる可能性があります。特に法執行 (取締り、漁業規制、領海管理、海事安全と、海洋汚染調査や海難捜索救助や海賊規制を含む安全保障問題) において役立つでしょう。様々なサービス会社が既にコロンバス実験棟で継続的に収集されている VIS データの利用を求めています。



24 時間以内に NORAIS 受信機で受信した船舶の位置のレポート (2010 年 6 月 29 日)  
(出典 : FFI)

# 地球規模の教育

## 若者よ、国際宇宙ステーションに呼びかけてみよう

ジェシカ・ナイモン、カミール・アレイン  
ISSプログラム・サイエンス・オフィス  
NASA ジョンソン宇宙センター (JSC)

国際宇宙ステーションアマチュア無線プロジェクト (ARISS) の装置は最初はスペースシャトル「アトランティス号」(STS-106) で打ち上げられ、最初の搭乗員が使うために国際宇宙ステーションに持ち込まれて以来、学校との交信にいつも使われています。アマチュア無線クラブとアマチュア無線家の助けを借りて、国際宇宙ステーションの宇宙飛行士が大勢の人々と直接会話し、教師、生徒、親、地域の人々に、アマチュア無線が科学や技術や学ぶことに対する生徒達の興味をどれほど掻き立てるかを示しました。ARISS の目標は、国際宇宙ステーションで生活し、働く搭乗員と直接会話することで、生徒達に数学や科学への関心を持たせることです。

ARISS での交信時間は通常約 10 分です。その間に地上の選抜された生徒が事前に選んでおいた質問をして、国際宇宙ステーションから搭乗員が答えます。

このやり取りの準備で、生徒は電波やアマチュア無線の仕組みについて学ぶとともに、国際宇宙ステーションについて学びます。国際宇宙ステーションアマチュア無線プログラムのまとめ役であるケン・ランサム氏は、1 年に約 50 回行われるこの交流がもたらす教育的な利点についてこう指摘しています。「ARISS プログラムの目的は、地域社会に接し、学校が地元の技術専門家と交流する機会を作ること、生徒に刺激を与え、意欲をかき立てることです。宇宙プログラムを学校の玄関まで出前するようなものです。」



ARISS をうまく進めるには、国際宇宙ステーションと地上のアマチュア無線機の通信中に、国際宇宙ステーションがアマチュア無線機の上空を通過していなければなりません。天候や搭乗員の都合などの問題も無線通信のスケジュールを決めるうえで配慮なくてはなりません。上空通過の際に、質問の複雑さにもよりますが、平均で 18 の質問に答えることができます。これまでに、国際宇宙ステーションでは世界中の生徒達と、600 回以上の ARISS セッションを開催してきました。

ARISS 交信中に国際宇宙ステーションの搭乗員と話す生徒 (出典: ARISS)

ARISS での会話における宇宙飛行士からの音声は、可聴域にいる人であれば初歩的な受信機で聞けます（送信周波数は 145.800 MHz）。ランサム氏によれば、興味のある人は EchoLink 経由の配信やインターネット無線接続プロジェクト IRLP（アマチュア無線のネットワークかインターネットが使える）で聞くことができます。

宇宙の探査について考えたこともなかった生徒でも、このようなアマチュア無線イベントに参加することで宇宙に目覚め、夢を持ち、その夢を実現する道に導くことができます。

ARISS 交信への参加に興味のある米国の教育者は NASA の宇宙教室 (Teaching From Space Office) に申請書類を申し込むことができます。海外の学校の場合は、ARISS ウェブサイト経由で選考のための申込書を送信してください。申し込みの締め切りは毎年、1 月と 7 月です。

ARISS のセッションでブリュッセル（ベルギー）の  
インターナショナルスクールの生徒と話す、  
ズヴェズダ（ロシアのサービスモジュール）の  
サニータ・ウィリアムズ 宇宙飛行士  
（第 14/15 次長期滞在クルー）



## 宇宙飛行士のように心身を鍛えよう

ジェシカ・ナイモン

ISSプログラム・サイエンス・オフィス

NASA ジョンソン宇宙センター (JSC)

NASA といえば、スペースシャトルや国際宇宙ステーションを思い浮かべたり、心に惑星や銀河がまばたく光景が浮かんだりするかもしれません。けれども、NASA の「ミッション X：宇宙飛行士のように心身を鍛えよう」は、少し近いところに目を向けています。ごく近隣や世界中の学校を対象にして、ミッション X は世界 40 都市の約 3,700 人の児童が体育の授業に興味をもつように、宇宙飛行士を訓練するのと同じ手法を用いています。

国際生命科学作業グループ (ISLSWG) とヒト研究計画教育普及 (HRPEO) が考案したミッション X は 2010 年 1 月 18 日に米国の学校で始まりました。NASA ヒト研究計画は、活動、教材、双方向ウェブサイト ([www.trainlikeanastronaut.org](http://www.trainlikeanastronaut.org)) で形成される試験的なプログラムに資金を提供しました。このプログラムは米国、オランダ、イタリア、フランス、ドイツ、日本、オーストラリア、コロンビア、スペイン、および英国の 10 か国の参加者向けに 6 種類の言語で提供されています。このプログラムの目標は、子供たちに宇宙飛行士のような訓練をさせて、運動生理学と栄養学を楽しく学ばせることです。



「宇宙飛行士の“コア”を鍛える」活動に参加する Daltonbasisschool de Tjalk (レリスタット、オランダ) の児童 (提供:ESA)

このプロジェクトの NASA プログラムマネージャであるチャック・ロイドは、宇宙プログラムが児童たちをどれほど魅了し、積極的な参加のきっかけになっているかについて、次のように述べています。「ミッション X とは、“宇宙飛行士のように心身を鍛えよう”との標語で知られてきたように、ミッション X の体育授業を通して日常の身体的な活動を改善することを中心に、健康的な生き方について若者に関心を持たせ学ばせることにつきます。」

8～12才の児童が、水分補給や骨の健康、そしてバランスの取れた栄養摂取の重要性などの、身体的活動の背景にある科学的知識について学習します。「健康探検家」と名付けられた児童たちは、やり遂げられたかどうかを楽しく測りながらやる気を保ちます。たとえば、彼らは、他の学校でやっていることをブログ“Train Like An Astronaut blog”で見ることができます。「健康探検家」達はフラット・チャーリーという名前のマンガキャラクターの宇宙飛行士が月まで歩いていくのを手伝う形で、履修コースで獲得したポイントを貯めます。フラット・チャーリーは競争を始めて5週目に月に到着しました。距離にして238,857マイル(384,403キロメートル)、4億748百万歩で、まだまだ歩き続けています。

宇宙飛行士は微小重力の過酷な環境でも活動できるように、適切な栄養を摂取し、休息をとり、運動することで健康を最高の状態に維持します。そして健康を維持するためにミッション前、ミッション中、ミッション後にトレーニングをしているということを「健康探検家」達は学びます。ロイドは、このような健康重視の考え方を、より多くの人々に広めています。「体調を最高の状態に維持するには、若い人たちも勉強と遊びと睡眠の量のバランスをとるといって、賢い選択をするべきです。社会の諸問題に対処するために、次世代の労働人口と専門的指導者を確保するためにも、教育は若者や地域社会にとって非常に重要です。」

6週間続くこの課題の最初の段階では、国内の学校対抗で友好的に競ってもらいます。次の段階は、現在進行中の複数年にわたるミッションXチャレンジを通じて、より多くの児童や国に範囲を広げることです。

「宇宙飛行士の“コア”を鍛える」活動に参加する Media Sandro Pertini school (サヴォナ、イタリア) の児童 (提供:ASI)



## ヨーロッパの宇宙ロボットとの提携

ナイジェル・サベッジ Ph.D. 教育課長

有人宇宙飛行運用局

欧州宇宙機関 (ESA)

ビデオゲームや SF 映画の世界では、ロボット小型衛星部隊が ISS に搭乗し、若い学生の指示に従っています。

欧州宇宙機関 (ESA) は NASA とマサチューセッツ工科大学 (MIT) の Zero-Robotics 競技に参加しています。これは、高校生が国際宇宙ステーションで活動するロボットのプログラムを作って競う催しです。SPHERES (Synchronized Position Hold, Engage, Reorient, Experimental Satellites) は、独自の電源、推力、計算と航法機能を備えたバレーボール大の人工衛星です。

SPHERES を遠隔操作する課題挑戦は、MIT の冒険好きな教授が、スター・ウォーズシリーズから、好奇心をそそるロボット創りの着想を得て、米国で始まりました。このミニ宇宙船は、2006 年以来国際宇宙ステーション船内で自律的ランデブー・ドッキングの試験に使われています。

無重力での編隊飛行をプログラムすることがヨーロッパの学生にとっても課題です。ESA 各国からたくさんの学校が国際宇宙ステーションでリアルタイムに 3 つの SPHERES をコントロールするプログラムをそれぞれ作ります。

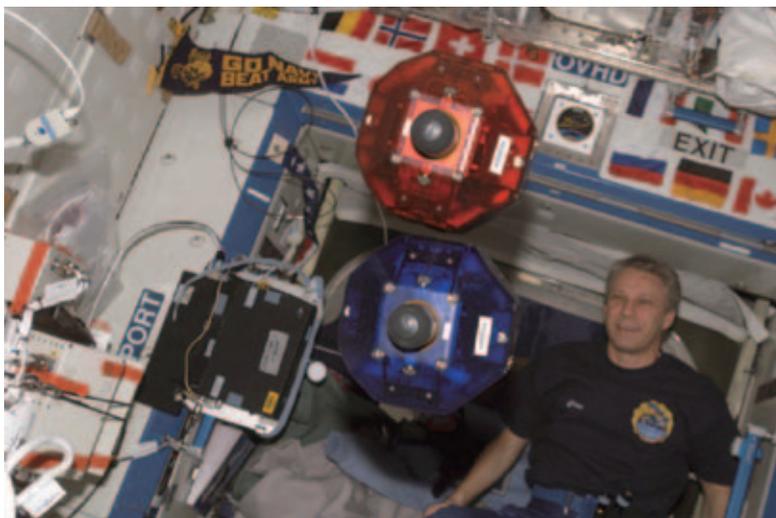
欧州の各学校には、ロボットのプログラム作成に詳しい現地の SPHERES 専門家が任命されました。ESA の後援で、いくつかの大学のスタッフが MIT で訓練を受けています。

この競技会の目的は、一連の指令を衛星に送ることだけではありません。生徒が問題解決や設計を考える過程や操作訓練、チームワークなどの重要な技術的能力に熟練するのを、各現地専門家が手伝います。彼らの成果は、人工衛星の点検修理や軌道上での宇宙船組立てにおいて重要な進歩につながるかもしれません。

米国と欧州の各チームは、予選ラウンドで疑似微小重力条件下で計算処理手順の試験をし、決勝ラウンドは大西洋の両側で行われます。

優勝者のソフトウェアは軌道の上に送られ、国際宇宙ステーションに滞在している宇宙飛行士により 3 つの無重力 SPHERES で実行されます。エキサイティングな決勝戦は、オランダにある ESA 技術センター (ESTEC) とマサチューセッツ工科大学で、実況中継されます。

これが欧州と宇宙ロボットとの提携の始まりで、国際宇宙ステーションを世界中の生徒共通の科学プラットフォームとした一連の地球規模教育プログラムの最初となります。今年、この先導的試みが成功すれば、ESA は将来の競技会に欧州全域から多くの参加者を募ることを期待しています。彼らにその力が与えられんことを。



第 14 次長期滞在のトーマス・ライター（右後方）が見守る、デスティニー米国実験棟で浮いている SPHERES の外観。（出典：NASA）

## 水問題:化学の力で解決

カミール・アレイン

ISSプログラム・サイエンス・オフィス

NASA ジョンソン宇宙センター (JSC)

安全で清潔な飲み水が手に入らないなんて想像できますか？ それが世界中の何億人もの人びとの窮状なのです。8人に1人が、人間が生きていくために基本となるこの資源を手に入れることができません。

地球上で最も豊富な物質である水 ( $H_2O$ ) は、生命体には必須です。水は地球の表面の 70 % を占めており、人体の約 70 % が水で作られています。人の健康と福祉には清潔な水は欠かせません。

地球上の辺鄙な地域の人々の生活を心配している人々と同じように、国際宇宙ステーションシステムを設計した宇宙工学者は、差し迫った必要性を感じています。つまり、この不可欠な資源を容易に手に入れる方法を開発するべく、創造的で革新的であらねばならないということです。2011年地球規模水実験 (Global Water Experiment) の目標は、学生に世界中の水に関する化学について教え、様々な異なる環境下にある人びとが清潔で安全な飲み水を作るのに如何に色々な方法を使っているかという認識を高めることです。



15歳のパシフィカ高校の生徒リタ・ノービルが、インターネット番組でNASAデジタル教育ネットワークの委員に話しかけています。(撮影：アンソニー・ブラセンシア)

国連教育科学文化機関 (UNESCO) は、国際純正・応用化学連合 (IUPAC) と提携して、2011年を世界化学年に指定しました。年間活動の一部として、世界中の学生は地域の水を採取して、地球の酸性度レベルや、水の塩分含有率、殺菌・塩分除去の方法などの各種水処理について学ぶ実験を行います。その結果は、対話方式の地球規模水情報地図の作成に使われます。

米国化学会は、「水問題：化学の力で解決 (Water: A Chemical Solution)」を後援し、米国の生徒達に、人びとが直面する水の諸問題を学ばせるだけでなく、若い人たちに化学に対する興味を促して熱意を抱かせたり、化学の創造的な未来に向けて国際協力を推進したりする機会を提供しています。

この経験を通して、学生は国際宇宙ステーションの水資源がどのように管理されているかを学び、国際宇宙ステーションの環境制御・生命維持システム (ECLSS) の背景にある基本技術について学びます。このシステムは、凝縮水、搭乗員の尿とその洗浄水を最大 23.2 ポンドまで処理して、純粋な蒸留水を生成します。この蒸留水は、搭乗員や船内から集めた他の廃水と合わせて、最後は搭乗員用の飲料水を作る水処理装置で処理されます。

国際宇宙ステーションの水処理装置には、濾過処理に使われるヨウ素化樹脂が入っています。家庭で飲む水に塩素が加えられているのと同じように、微生物の成長を抑えるためにヨウ素が水に加えられます。塩素の代わりにヨウ素が使われるのは、軌道上に運ぶのがはるかに容易で、腐食性も低いからです。このヨウ素化樹脂は、世界中の多くの国で災害時や人道支援区域で使用するために市販の水濾過法として開発されました。

宇宙の過酷な環境での有人宇宙探査のために必要な補給量を減らすには、水の再利用が非常に重要です。結果として、地球規模水実験 (Global Water Experiment) に参加する世界中の学生は、身の回りの自然界や人が生きていくために必要な最も基本的な資源について真剣に考え学びながら、国際宇宙ステーションのシステム設計の知見により恩恵を受けることになるでしょう。

国際宇宙ステーションで使われている水再生装置  
(出典：NASA/Dimitri Gerondidakis)



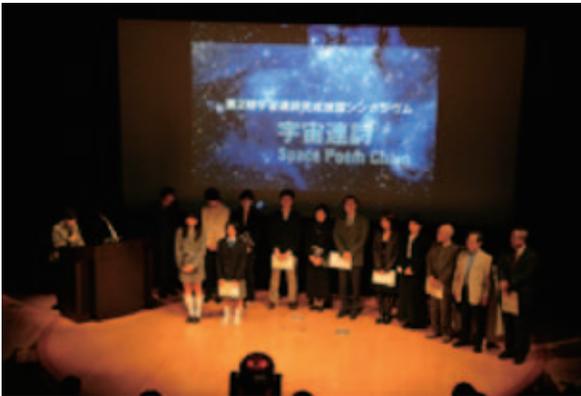
## 宇宙連詩(世界中の人びとを言葉でつなく)

小山正人

JAXA 宇宙環境利用センター

遙か古代より、宇宙は“人類の夢”であり、“いのちを考える場所”としてありました。科学の進歩により次々と未知の世界が解き明かされている現代においてもなお、宇宙は私たちの好奇心を限りなく刺激すると同時に、無限への畏怖を教える存在としてそこにあります。

宇宙連詩は、宇宙について、地球について、生命（いのち）について、国境、文化、世代、専門、役割を超えて共に考え、連詩を通して協働の場を創出していこうという試みです。



毎年、宇宙連詩が完成すると、宇宙連詩シンポジウムを開催して、参加者に宇宙連詩を披露しています。

日本の伝統的な詩の形式と現代詩の世界との融合を目指すひらかれた詩のスタイルです。連詩はリレー競争のバトンのように、ある参加者から次の参加者への言葉を紡いでいくことによって、編纂されます。

宇宙連詩は、地球や私たちの生命も含めた宇宙を考え、想像することによって、作成される連詩の一形式です。他の参加者と協力して、他の参加者のことを考えることが優れた宇宙連詩を作るために重要なことは明らかで、そうすることによって、人びとの間に絆を作ることができます。

JAXA では、毎年、約 24 編の詩から成る宇宙連詩を編纂してきました。そのうち約半分は一般の人が応募した詩から選ばれ、残りは有名な詩人から寄稿していただきました。完成した宇宙連詩は DVD に記録され、ISS に積み込まれました。さらに、宇宙連詩を一般の方に紹介するために、宇宙連詩シンポジウムが開催されました。JAXA ではまた、宇宙連詩を小学校の国語の授業に取り

宇宙航空研究開発機構（JAXA）では、宇宙にいる宇宙飛行士も含めて、人びとを言葉でつなぎ、人びとがより密接に宇宙の諸活動に関わっていると感じることができるようにするために宇宙連詩プログラムを開始しました。宇宙科学や技術に興味のない人でも宇宙連詩に参加して楽しむことができます。

連詩は、1970 年代初めに伝統的な日本の「連歌と連句」から生まれた形式で、現在では世界中で広く知られて、普及しています。連詩は、連歌・連句という日

入れる試みを行いました。生徒は授業で宇宙連詩を編纂し、著名な詩人と一緒に宇宙連詩の作り方を学び、クラス内で協力することの大切さを学びます。生徒は楽しみながら宇宙連詩を作り、「きぼう」の大きな宇宙プロジェクトに参加していることにとっても興奮していました。



JAXA 宇宙連詩 URL: <http://iss.jaxa.jp/utiliz/renshi/>

JAXA は 2006 年に宇宙連詩を始め、既に編纂された 4 つの宇宙連詩は現在、ISS の「きぼう」日本実験棟に保存されています。すべての参加者は地上から ISS を見ることができ、ISS に保存された自分の詩のことを想像します。それは、宇宙に輝く星です。2006 年に開始して以来、参加者の数は確実に増えており、ますます多くの人が宇宙連詩と宇宙の活動に興味を持っています。さらに、宇宙連詩は人々に新たな宇宙の見方を紹介します。

## 生徒達が宇宙から地球を撮影する「アースカム」プログラム

アラン・ジョシ

ISSプログラム・サイエンス・オフィス

NASA ジョンソン宇宙センター (JSC)

想像してみてください。あなたは若くて好奇心旺盛な中学生で、地球の雄大な山岳地域や海岸線、大洋、その他の地理的に印象に残るような広大な地形を詳しく調査研究しています。今、宇宙飛行士のいる絶好の場所から観察しているスリルを想像してみてください！ アースカム（地球の知識を得る中学生：EarthKAM）プログラムを利用すれば、生徒はまさにそんなことができるのです。宇宙飛行士の視点から世界を見て、撮影できるのです。

アースカムは、NASA 出資の教育普及プログラムで、カリフォルニア大学サンディエゴ校と共同で運営されています。目標は、充実して向上した教育的経験を通して、生徒に数学や科学の勉強に対する興味を喚起することです。このカメラを使って、世界中の生徒が国際宇宙ステーション特有の絶好の視点から地球を観察して撮影できます。

アースカムでは、「デスティニー」米国実験棟にある科学観測窓にある窓観測支援設備 (WORF) に取り付けられた ニコン製の D2Xs デジタルカメラを使用します。この窓の高品質な光学特性のおかげで、生徒がオンラインで送信した指令により、地球の高解像度画像を撮ることができます。生徒と先生はこの写真を補助的に使うことで、宇宙ミッションや様々な調査プロジェクトに参加することができます。この国際宇宙ステーション体験の興奮を中学校教育に結び付けることで、アースカム発案者達は、新たな探検家、科学者、エンジニアが生まれるきっかけになれば、と願っています。



上のクロアチアの写真は、2011年7月に行われた最新のアースカムセッションで撮影された写真の1つです。(出典：EarthKAM)

生徒は、アースカムでインターネット上のツールや資料を積極的に使って、宇宙船の軌道や地球の写真撮影について学びます。彼らは、先生に助けられながら目標位置を特定し、次に国際宇宙ステーションの軌道を追跡して、地図と地図帳を参照し、写真撮影をリクエストする前に天候を確認しなくてはなりません。この撮影のリクエストは別の学生のグループ、このときはカリフォルニア大学サンディエゴ校、に集まります。これらの大学生がこのプロジェクトのアースカムミッション管制センター（MOC）を運営しています。ここで彼らはリクエストをカメラ管理ファイルにまとめて、NASAのジョンソン宇宙センターの助けを借りて、国際宇宙ステーションに搭載されたコンピュータに送信します。

リクエストは最終的にデジタルカメラに送られ、カメラが希望された写真を撮影し、写真は国際宇宙ステーションのコンピュータに転送され、地上のアースカムコンピュータに届きます。この全体の中継は通常 2、3 時間で完了し、写真は参加校と一般市民の両方がオンラインで利用できるようになります。

その上、アースカムは国際宇宙ステーションの搭乗員の手間をあまりとらないので、宇宙飛行士は他のより手のかかる実験に集中できます。ジョンソン宇宙センターの貨物・運用とりまとめ部署の飛行管制官であるアニー・パワーズによれば、「搭乗員の主な役割はカメラの設置作業です。カメラを窓の上に金具で取り付け、カメラの設定を調整し、USB ケーブルをラップトップに接続し、ソフトウェアを起動します。セットアップの後に搭乗員がすることはカメラのバッテリーを定期的に交換することと、レンズの交換を通常は週の半ばにすることだけです。自動的な装置で、本当にただ写真を撮るだけです!」

当初アースカムプログラムは NASA の宇宙飛行士でありプログラムの創始者のサリー・ライドがひねり出した KidSat という名称でした。2001 年に国際宇宙ステーションに移設されるまでに、スペースシャトルで 5 回宇宙飛行しました。アースカム・カメラはその後、国際宇宙ステーションに永続的に搭載されて、年間約 4 回のミッションに使われています。最新のアースカムは 2011 年 7 月に行われました。

アースカムプログラムは、生徒を教科書の外に連れ出し、実際の生活の中で教育をもたらします。国際宇宙ステーションに最初に搭乗員が長期滞在した 2001 年 3 月から今まで、アースカムは 165,000 人以上の参加生徒達と、数知れぬオンラインのフォロワーの生活に関わりました。また、このプログラムは、これまでに 41 か国からの参加を得て、国際的に大きな存在感を示しています。「アースカムの自動化が進んだので、新しいミッションのたびに参加者が増えていくのがわかります!」とパワーズは述べます。アースカムの画像に興味のある方や参加に興味のある教師の方々は、オンラインで登録ができます。



2011年7月のセッション中の第2結合部地球側ハッチの窓に金具で取り付けられたアースカムカメラ（出典：NASA）

## 赤い惑星のための赤い食物

カナダ宇宙庁 (Canadian Space Agency)

人類を火星に送る計画を立てるときに直面する多くの課題の中でも、生命維持の問題は、最も難しい問題の 1 つです。この問題への取り組みが、カナダを含む世界トップレベルの科学者たちが行ってきた研究の中核にあるのも、驚きではありません。

これらの科学者は、長期間の任務中に生命を維持するために自己完結型生態環境システムを提供する案を調査研究しています。火星を往復する場合、片道で最短 6 か月を想定する必要があり、滞在期間も含むと、18 か月程度の計画になります。

まず考えられる選択肢の 1 つは植物を利用することで、食料、水、酸素を得て、同時に二酸化炭素と廃棄物を再利用するものです。これは誰にでもわかることですが、さらに掘り下げて検討しなくてはなりません。科学者たちは宇宙探査ミッションに最適な種の種類は何か、往復の深宇宙飛行と火星そのものの環境が種の成長能力に影響を与えるのかどうか、などの問題に取り組まなければなりません。

カナダの生徒をこれらの問題に取り組ませる試みの中で、彼らをやる気にさせる促進剤として、カナダ宇宙庁 (Canadian Space Agency: CSA) は、ゲルフ大学、カナダ農務・農産食品省、オンタリオ卓越研究拠点、Heinz Canada 社および Stokes Seeds 社と、「トマトスフィア」プロジェクトで共同事業を行ってきました。



前回の「トマトスフィア」プログラムで、カナダブリティッシュ・コロンビア州バンクーバーにあるラングレー小学校のスミス先生が担当する 3 年生のクラスでは、トマトの成長を勉強しました。生徒たちは植物を家に持ち帰り、夏の間到庭で育てました。(出典: Tomatosphere)



毎年、生徒達には宇宙または模擬宇宙環境に曝されたトマトの種子と比較対照の種子の一式が提供されます。最近では、最後の国際宇宙ステーション行きのスペースシャトル飛行で、60万粒のトマト種子が運ばれました。これらの種子は最長3年間に亘って保管された後に地球に持ち帰られ、参加する13,000以上の教室に配布されます。このプロジェクトでは種の発芽率を調べるのが基本実験ですが、小学校3年生から高校1年生までの生徒が植物学から栄養学、さらに生態系科学に至るまでの様々な事項の理解を深められるよう、教師のための補助教材が作成されています。

カナダ宇宙庁の宇宙学習プログラムマネージャのマリリン・スタインバーグは、「トマトスフィア」への参加を通じて、以下のように述べています。「教室で実験をすることで園芸の複雑さについて学び、地球外における食物生産について革新的な発想を喚起します。また、カナダの惑星探査第一世代となる準備をするために、科学技術を身につけて、この生徒達は宇宙農業者となるのです。」

今後3年間にわたって、参加者は科学者に宇宙でのトマト栽培の可能性に関するデータを提供し、一方で、科学や宇宙研究の「センス」を磨きます。

「トマトスフィア」の詳細に興味のある方は、プロジェクトのWebサイトをご覧ください。  
(<http://www.tomatosphere.org/>)

## 自宅から宇宙飛行士と話をする！

セルゲイ・アブデーエフ 副部門長

中央機械建設研究所 (TSNIIMASH)

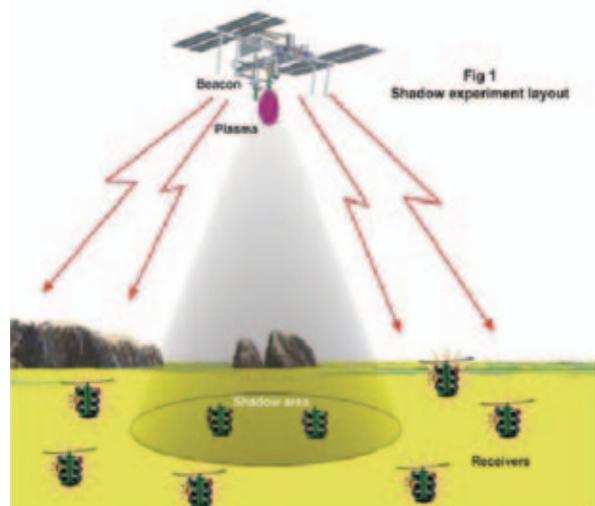
将来の科学者、技術者、エンジニア、数学者達を教育するのは、世界的な取組みで、ロシア連邦宇宙局 (Roscosmos) も、その一端を担っています。国際宇宙ステーションでの活動の主な目的の1つは、若者が科学の勉強に興味を持つような教育と普及啓発活動を実践することです。これらの活動は、最新式の高度先端技術による機器の創出にもつながり、また、宇宙計画一般、とりわけ国際宇宙ステーション計画に対する社会からの支持を増やすことにも役立ちます。国際宇宙ステーションのロシアモジュールでは、現在、教育的な要素を持つ4つの宇宙研究が行われています。「クーロン結晶」、「Shadow-Mayak」、「MAI-75」と「Great Start」は、ロシア地域の学生の想像力をかき立てるのに大いに役立ち続けています。

「クーロン結晶」プロジェクトは、微小重力における不均一磁場中での固体拡散環境の挙動を調べることが目的の研究です。軌道上の先導的研究では、クーロンクラスターの構造特性（液晶相転移、波動プロセスとその加熱機構の物理的機械的特性など）を探ります。高校や大学を含むあらゆる層の学生が地上実験を準備して実施する機会を得ました。

「Shadow-Mayak」は、アマチュア無線愛好家が国際宇宙ステーションの搭乗員と通信を出来る超短波無線発信機です。国際宇宙ステーションのロシア部分にあるこの装置は、学生が宇宙通信分野を学ぶための手段として役立っています。学生たちは世界中のアマチュア無線ネットワークを使って、送信許可の条件などについて学びます。また、軌道上送信機からの送信 / 再送信の電波強度の特性や空間分布についても学ぶことになります。

「Shadow-Mayak」と同じく、「MAI-75」もロシア部分に搭載されている通信機器群の一部を成しています。この機器のおかげで、宇宙からほぼ同時にビデオ

映像を地球に送信することができます。この配信網でロシア全土の学生やアマチュア無線家は、宇宙飛行士から直に、宇宙で生活し作業するとはどのようなものであるかを学ぶ機会ができます。宇



「Shadow-Mayak」実験のイメージ（出典：FSA）



MAI 受信・処理センターにより取得された画像  
(出典：ROSCOSMOS)

宙から撮影した地球の画像を使用することは、学習過程において効果的であり、活気を与え、やる気を起こさせることに役立ちます。

「Great Start」は、ロシアをはじめ世界の宇宙飛行士の活動の成果報告を目的としています。特別なアンケートを作成することによって一般の人々が人類初の宇宙飛行という偉大な出来事に対して意見したり、国際宇宙ステーションで行われている科学実験の成果について知ることができます。Great Start は、世界のさまざまな文化や教育、科学の分野で、ロシアと結びつき、国際協

力を促進します。その結果、ロシアの有人宇宙飛行事業の成果報告は、宇宙活動の成果を活用する様々な分野の学生や専門家など、多くの人々が参加する科学と教育ワークショップのきっかけとなるでしょう。

教育プログラムの枠組みの中で計画された実験が他にもあります。微小重力下における微細な浮遊粒子の挙動を実証する学生実験などを含む環境生態学教育や、高分子複合材料と拡散に基づく微小重力下の特定形状の構造要素を捉える学生実験などの化学教育や、無重力下の液体の拡散過程を教育目的で実証する「拡散」実験などです。これらの教育プロジェクトに、ロシアのすべての地域から数百人もの学生が関わっています。国際宇宙ステーションで行われている国際的、地域的、国家的な教育プログラムすべてと同様に、これらは科学、技術、工学および数学を学び、その道を目指すべく、次の世代を鼓舞し、動機付けをするのに役立ちます。



宇宙航空研究開発機構 (JAXA)  
<http://iss.jaxa.jp/>



米国航空宇宙局 (NASA)  
<http://www.nasa.gov/iss-science/>



カナダ宇宙庁 (CSA)  
<http://www.asc-csa.gc.ca/eng/iss/default.asp>



欧州宇宙機関 (ESA)  
<http://www.esa.int/esaHS/iss.html>



ロシア連邦宇宙局 (Roscosmos)  
<http://knts.rsa.ru>  
<http://www.energia.ru/english/index.html>

