

INTERNATIONAL SPACE STATION

国際宇宙ステーション

BENEFITS FOR HUMANITY

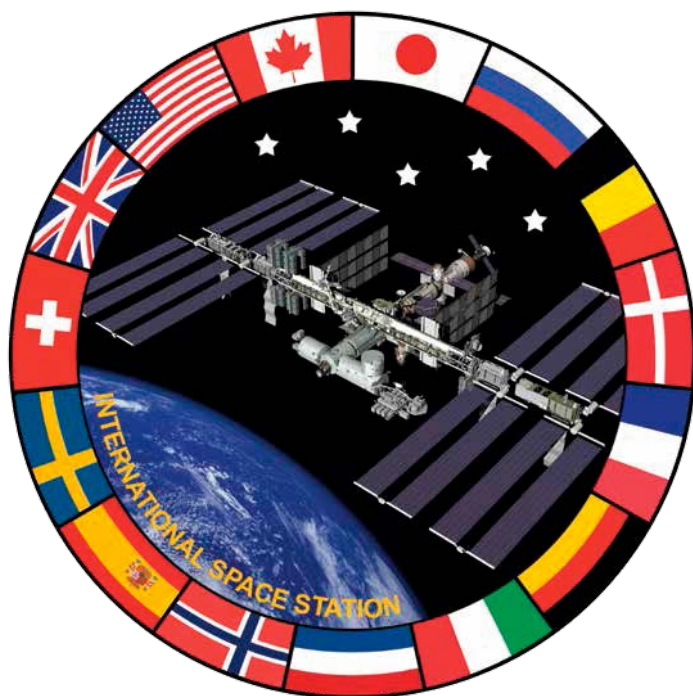
人類への恩恵



第2版

2ND EDITION

国際宇宙ステーション 人類への恩恵 第2版



本書は、国際宇宙ステーション (ISS) プログラム科学フォーラムのメンバーによる共著である。メンバーは、米国航空宇宙局 (NASA)、カナダ宇宙庁 (CSA)、欧州宇宙機関 (ESA)、日本宇宙航空研究開発機構 (JAXA)、ロシア連邦宇宙局 (Roscosmos)、イタリア宇宙機関 (ASI)。



謝辞

ISS プログラム科学フォーラム

米国航空宇宙局

Julie Robinson, Pete Hasbrook, Amelia Rai, Tara Ruttley,
Camille Alleyne, Cynthia Evans, William Stefanov, Michael Read,
Kirt Costello, David Hornyak, Tracy Thumm, Susan Anderson,
Joshua Byerly, Joshua Buck

カナダ宇宙庁

Nicole Buckley, Luchino Cohen, Ruth Ann Chicoine,
Christine Giguère

欧州宇宙機関

Martin Zell, Eric Istasse, Jason Hatton, Jennifer Ngo-Anh,
Nigel Savage, Jon Weems

日本宇宙航空研究開発機構

Shigeki Kamigaichi, Kazuyuki Tasaki, Sayaka Umemura,
Koki Oikawa, Hideyuki Watanabe, Nobuyoshi Fujimoto,
Masato Koyama, Yayoi Miyagawa, Tatsuya Aiba,
Shiho Ogawa, Toshitami Ikeda

ロシア連邦宇宙局

Georgy Karabadzhak, Elena Lavrenko, Igor Sorokin,
Natalya Zhukova, Nataliya Biryukova, Mark Belakovskiy,
Anna Kussmaul

イタリア宇宙機関

Salvatore Pignataro, Jean Sabbagh, Germana Galoforo

編集長

Julie Robinson, NASA

編集主幹

Amelia Rai, NASA

編集者

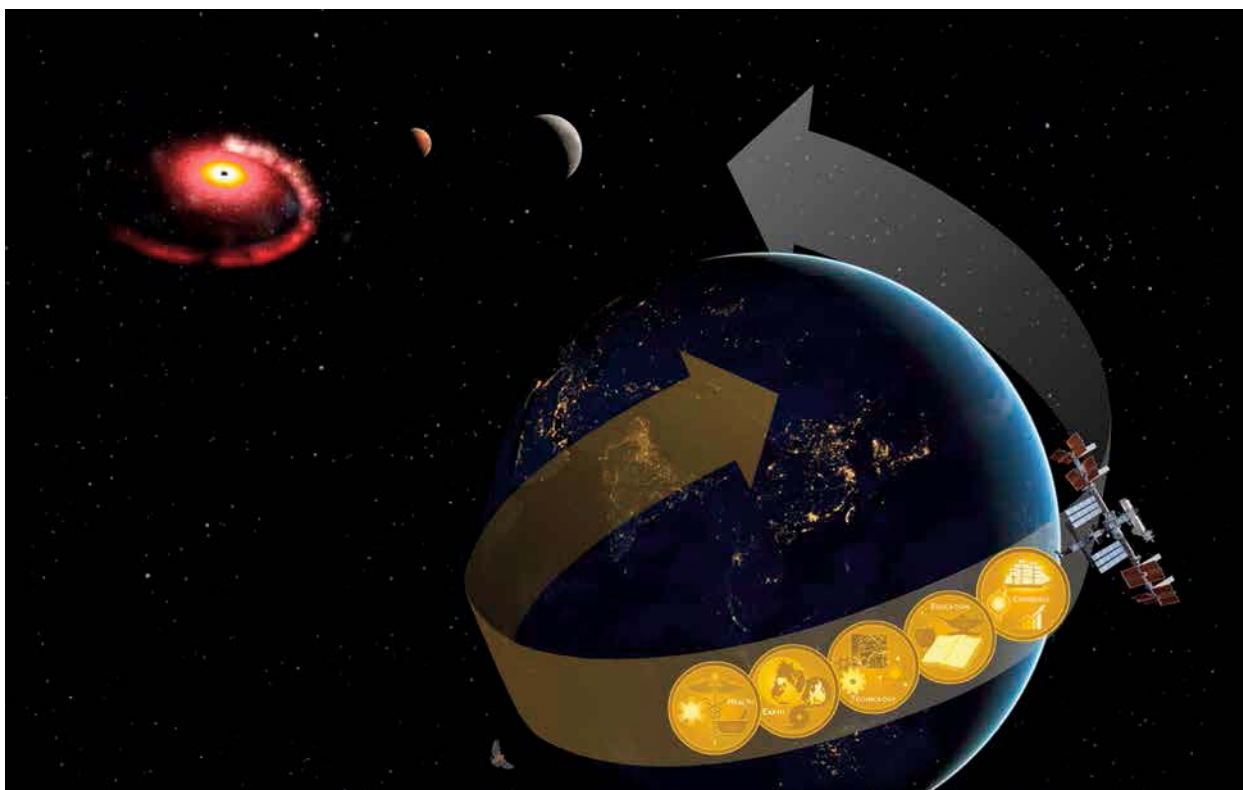
Camille Alleyne, Kirt Costello, David Hornyak,
Michael Read, Tara Ruttley, William Stefanov; NASA

編集者（技術）

Neesha Hosein, DB Consulting Group, Inc.

グラフィックデザイナー

Cynthia Bush, DB Consulting Group, Inc.



人類の
健康



地球観測と
災害対応



革新技術



地球規模の
教育



宇宙の
経済開発

表紙の挿絵について

『国際宇宙ステーション 人類への恩恵 第2版』の表紙の挿絵には幾つかのテーマが組み込まれています。中心となるテーマは「暗闇に光をもたらす」です。夜の地球の景観と共に、今まさに新しい夜明けを迎えようとしている国際宇宙ステーション（International Space Station; ISS）の搭乗員と地球の人々を表現しています。また、この地球の画像に選ばれた地域には、軌道上で実施している最先端の研究の成果を最も多く享受することになるであろう、世界でも特に開発が遅れている地域も含まれています。

双先端の矢印は、宇宙ステーションの地球低軌道を形式化して表示したものと解釈できますが、これは後述の2つのテーマを視覚的に強調したもののでもあります。ステーションから発せられる双先端の矢印は、ステーションから後ろ方向には地球へ向かって進み、前方向には地球を超えて、月、火星、そしてさらに遠くの目的地に向かっていきます。これは、地球生命に貢献すること、そして宇宙の地球低軌道を超えて人類活動を拡大するための技術基盤を築くことという宇宙ステーション研究の二大指標を強調するものとなっています。

矢印の色が銀から金に変化していますが、これは第3のテーマ、「銀を投資して金を得る」を意味したものです。このテーマは宇宙ステーションへの国際的投資によって得られる多彩な知識の恩恵に敬意を表するものです。これはまた、別の種類の「金」、すなわち本書の主題でもある「地球生命を豊かにすること」を称えたものでもあります。これら人類に対する恩恵の中でも特に重要な、強調すべき分野が、「人類の健康」「地球観測と災害対応」「革新技術」「地球規模の教育」「宇宙の経済開発」の5つです。

最後のテーマは最も難解なテーマでもあります。本書をコーディネートしたのはNASA（米国航空宇宙局）ですが、表紙にはNASAのロゴが使用されていません。ここに記録された恩恵の数々は特定の国の努力の結果や、どこかの国が他の国よりも優れていることによる結果ではなく、いまだかつてなかった規模の国際協力と共同作業の結果として得られたものである、という事実を重要視しているからです。人類への恩恵には、人類自身が獲得したものと、ひとりでもたらされたものがあります。それらからは数えきれない成果が約束されますが、国際交易の場で取り上げられるような目に見える成果だけでなく、おそらく最も大切なことである、より深い異文化間理解と寛容、つまり、人類の将来にとっての基盤そのものももたらされるのです。

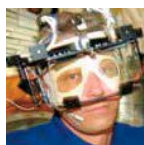
本書のハイライト



ロボットアームの繊細な動きが治療に貢献

核磁気共鳴画像法（MRI）内での手術を世界で初めて実現したロボット技術によって、困難な手術が容易に、不可能とされている手術が可能になります。

3 ページ



宇宙ハードウェアで眼科手術がより安全に

視線追跡装置により、レーザー視力矯正手術の際に執刀医を邪魔することなく眼球位置を追跡することが可能になります。

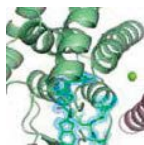
7 ページ



ISS の超音波が地上に届く

小型超音波装置、遠隔医療、そして遠隔ガイダンス技術によって、僻地での医療がより身近なものになります。

8 ページ



JEM で行われている高品質タンパク質結晶生成実験

タンパク質結晶の生成実験は、医療の発展に貢献しています。宇宙航空研究開発機構（JAXA）は、宇宙での実験を通し、難病研究において確かな進歩を遂げています。

24 ページ



宇宙ステーションからの地球のリモートセンシング

ISS は、搭乗員操作および自動化された地球観測装置を組み合わせた類を見ない方法により、世界の気候変動、環境変化、および自然災害に関するデータを収集し、人類に貢献しています。

51 ページ



高度な ISS の技術が世界中の浄水の取り組みをサポート

高度な水のろ過および浄水システムによって、汚染の強い地域でもきれいな飲料水が入手可能になります。

65 ページ



「トマトスフィア（Tomatosphere™）」：生徒の科学を通した、発見の種まき

推定 300 万人の生徒が参加し、受賞歴もあるこの教育プロジェクトは、宇宙での食物栽培に関する研究者の疑問に対し、生徒たちに科学、農業、および栄養学について教えることを通して答えていきます。

92 ページ



自宅から宇宙飛行士と話をする

現在ステーションのロシア実験棟では、次世代の科学者、科学技術者、エンジニアおよび数学者を鼓舞するような、教育的要素をもつ 4 つの宇宙研究が行われています。

102 ページ



地球低軌道の商業化

ナノラックス（NanoRacks）やアースキャスト（UrtheCast）といった、先進的で活気ある企業は、宇宙空間という独特な環境の定常的な利用が十分に可能となったことで、ついに ISS がビジネスのための活動を開始したと考えています。

110 ページ



宇宙のマウスが筋肉や骨量減少について教えてくれる

アムジェンなどのバイオテクノロジーや製薬の企業は、宇宙飛行を活用した薬品研究を実施し、米国食品医薬品局（FDA）認可のために重要な臨床前研究を行っています。

127 ページ

目次

謝辞	ii
表紙の挿絵について	iii
本書のハイライト	iv
要約	ix
はじめに	x
人類の健康	1
医療技術	3
ロボットアームの繊細な動きが治療に貢献	3
宇宙ロボットが乳がんの診断と治療を同時に行う	5
宇宙ハードウェアで眼科手術がより安全に	7
過酷環境下での作業に活かされるセンサー技術	7
ISS の超音波が地上に届く	8
宇宙技術がぜんそく患者をサポートする	10
冷たいプラズマを使って傷を治す	10
骨量減少予防	13
骨粗しょう症の治療薬を服用して宇宙飛行時の骨量減少を予防します：	
宇宙飛行士の経験が高齢者の健康維持に役立ちます	13
最新のスキャニング技術で骨粗しょう症を早期に発見する	14
栄養バランスの取れた食事と運動が宇宙飛行士の骨を守る	15
宇宙飛行士の骨から分かる、塩分摂り過ぎの危険性	16
免疫防御システム	19
免疫変化の早期発見により、宇宙と地上で激しい痛みを伴う帯状疱疹を防ぐ	19
宇宙での免疫実験がすべての人を救う	20
免疫力を高める分子標的治療	22
新たな治療方法の開発	24
JEM で行われている高品質タンパク質結晶生成実験	24
宇宙ステーションでの発見ががん治療を進歩させる	26
微小重力環境が様々な治療に役立つ	27

食糧と環境	29
宇宙での真菌実験を微生物学に役立てる	29
ISS での植物栽培を地球の植物栽培に活かす	30
ISS のロシア実験棟で行われている植物栽培実験	32
心臓の健康と生体リズム	35
健康管理に役立つ宇宙心臓学	35
宇宙と地球上での生体リズム	36
宇宙で使用されている革新的な装置が地球上での安らかな眠りを促進します	37
バランス感覚や運動能力の改善	40
微小重力をシミュレートし、地上での平衡感覚を改善する新技術	40
宇宙における神経前庭系の健康状態を評価するための新しい方法が、地上の人にも役立ちます	41
宇宙研究が、薬に頼らない治療と、浮遊感、眩暈、平衡感覚異常の防止に役立ちます	43
微小重力運動のメカニズムを地上で応用	44
運動障害のリハビリに用いられる宇宙技術	46
地球観測と災害対応	49
地球環境観測	51
宇宙ステーションからの地球のリモートセンシング	51
沿岸海洋センシングがミッションを延長	53
目視と測器の併用による宇宙からの科学的海洋観測	54
災害対応	57
宇宙ステーションのカメラがとらえる地球の災害シーン	57
鮮明な HD 画像が災害対応をサポート	59
革新技术	63
液体と浄水	65
高度な ISS の技術が世界中の浄水の取り組みをサポート	65
流体の動きの不思議を探る：マランゴニ対流の性質を理解することで地上の生活をより豊かに	66
宇宙ステーションに触発された mWater アプリが健康的な水源を特定する	68
宇宙で試験済みの液体流動コンセプトが感染症診断を進歩させる	69
材料	71
ナノ繊維で半導体を改良	71
ナノの世界の InSPACE 重大ニュース	72

衛星	74
JEM から小型衛星を放出	74
時間と位置を正確に示す	76
宇宙ステーション技術が衛星サービスの新時代を促進	77
輸送技術	79
宇宙ステーションでの冷炎研究が、よりクリーンな地球環境を実現するかもしれない	79
ロボット工学	81
ロボノートの持つ可能性が宇宙、医療、工業への複合的応用に光を当てる	81
地球規模の教育	85
ISS が次世代の生徒たちに良い刺激を与える	87
探究学習	89
科学を学ぶ生徒たちが宇宙研究から予期せぬ結果を得る	89
スペースドロイドと欧州の連携	90
NASA は生徒たちの工学面の成功を直感している	91
「トマトスフィア (Tomatosphere™)」: 生徒の科学を通した、発見の種まき	92
生徒たちがサリー・ライド「アースカム」で宇宙から地球を撮影	94
Try Zero G: アジアで次世代の情熱を燃え上がらせる	95
インスピレーション	97
アジアの生徒たちが宇宙ミッションで宇宙飛行士と共に働く	97
ISS で実施される「シャドウ・ビーコン」宇宙実験の教育的恩恵	98
宇宙飛行士の技術で生徒が健康に	99
ISS との通話で若者を感化する	101
自宅から宇宙飛行士と話をする	102
教育における「MAI-75」実験の主な結果と進展の可能性	103
宇宙の経済開発	107
商業サービスプロバイダー	109
宇宙での水製造: 解決への渴望	109
地球低軌道の商業化	110
ISS への貨物輸送サービスの革新的な官民連携: パート 1	111
ISS への貨物輸送サービスの革新的な官民連携: パート 2	113
ISS から地球観測をするための精密指向プラットフォーム	114

先駆者：地球観測	116
キューブサット群が変化する地球を撮影する	117
視野を広げ、好奇心を育てよう	118
ミッション・クリティカル：扁形動物実験は着水後の時間との競争	120
宇宙の経済開発を目指した JAXA の取り組み	121
商業目的の研究	125
宇宙におけるコロイド：消費者製品と科学との交差点	125
宇宙のマウスが筋肉や骨量減少について教えてくれる	127
微小重力環境下のタンパク質結晶	128
筋萎縮：地上の生命を助ける ISS のマウス	129
 アーカイブストーリーとビデオへのリンク	132
セクション別執筆者および研究代表者	133

要約

ISS は、世界中の研究者たちが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を可能にする、類例のない実験施設です。ISS 計画に参加している国々や宇宙機関にはそれぞれ独自の目的もありますが、ISS で得られた知見を人間社会の向上に役立てるという目標は一致しています。ISS から生まれる「大発見」は今後に期待するとしても、すでにいくつかの驚くべき素晴らしい成果をあげています。

人類の健康、革新技術、教育、そして宇宙からの地球観測の分野で、地球上の人々に恩恵がすでにもたらされています。人々の命が救われ、ISS から撮影された画像情報は災害救助に役立ち、新素材によって製品が改良され、教育プログラムは将来の科学者、技術者や宇宙の開拓者に良い刺激や着想を与えています。第2版に書かれた恩恵（効果）の中には、この分野を拡大しているものもあります。また新たな価値が生み出されている場合もあります。

第1版の発行以来、ISS に、これまでとはまったく違った形で参加する新たな利用者也現れました。商業資金で実験を行う製薬企業から、特別な研究機会や、宇宙へ物資およびクルー輸送等のサービスを提供する民間企業などで、彼らは地球低軌道において商業市場を開拓しています。そして、ISS が様々な分野の研究の場となり得たように、新たなビジネスを創出する場にもなり得ることを実証しつつあります。

本書は、これまでも、そして今後も、地球上の生命に影響を与え続ける、ISS での研究によって得た科学技術および教育の成果をまとめたものです。ここに述べるすべての恩恵は、他に類を見ない宇宙実験施設としての ISS の潜在能力を示す一例にすぎません。ISS は今後も、地球に関する科学的知識を拡大させるとともに、人々の健康を増進し、先端技術を開発し、将来の科学技術者に希望を与え、啓発する場を提供し続けることで、これまで以上の成果を挙げ、経済の活性化と全人類の生活の質の向上に貢献することでしょう。



はじめに

『国際宇宙ステーション 人類への恩恵』の第2版へようこそ。ISSは1998年以来、比類のない実験施設として83の国と地域から2,400名以上の研究者が、その微小重力という環境を活かして1,700以上の実験を行ってきました(2014年9月時点)。そして実験は今後も続いています。

2000年11月2日よりISSにおける宇宙飛行士の滞在は続いています。それ以前から、その環境を活用した実験が行われていました。2011年にISSが完成した後は、継続的な科学実験、技術開発、宇宙探査、商業利用、教育の場として十二分に活用することが主要テーマとなっています。

また、ISSは、自身が完成するまでの10年間に、国際社会に有形無形の恩恵を与えてきました。例えば、ISSに搭載されている装置は、世界の様々な国々で製造されており、その過程で地上テストを経ています。それにより、私たちは宇宙での建造や、宇宙環境が人や宇宙機システムにどのような影響を与えるのかについて多くを学ぶことができました。また、文化の違いを超えたクルーの共同作業が国際的なパートナーシップへとつながることで、今後の国際協力はさらに活発化し、推進されていくことになります。ISS計画に参加している宇宙機関にはそれぞれ独自の目的もありますが、ISSで得られた知見を人間社会の向上に役立てるという目標は一致しています。

ISS の価値



技術革新



国際協力



知の発展

2012年に発行された第1版は、ISSでの実験がもたらした科学技術と教育分野における成果が地球上の生命に与える影響を、事例ごとに取りまとめています。主に「人類の健康」「地球観測と災害対応」「地球規模の教育」の分野に与えた多くの恩恵が取り上げられています。

本書はそれら恩恵の最新情報に加えて、第1版発行時には見られなかった新たな恩恵も取り上げます。また、「宇宙の経済開発」と「革新技術」という新たな章を2つ加えました。

「宇宙の経済開発」ではISSを利用した新たなビジネスを創出するための官民パートナーシップの事例を取り上げます。例えば、ISSへの輸送や実験機会およびサービスの提供が挙げられます。従来の官民パートナーシップでは、政府と契約を交わし、公的資金によって装置を開発し、その装置を政府に納めるという形ですが、今後は企業

科学技術の 恩恵



自らの資金で開発した製品を政府機関が購入するという形式へと変化していくことになります。また、ISSにおいて自社の研究開発費で実験を行う民間企業や、ISS 利用者に直接実験サービスを販売する民間企業の事例も挙げられています。「宇宙の経済開発」の章では ISS を新たなビジネス創出のテストベッドとして利用する事例を挙げ、成功を収めているパートナーシップについて説明します。

もう一つの新たな章である「革新技术」では、継続的な科学実験を通じて地球に恩恵を還元できると思われる有望な技術実証と物理科学分野を取り上げます。例えば、太陽同期軌道で運用されている高価な衛星の寿命を延長するために地上のロボット技術を使った燃料補給技術、火炎の燃え広がり時の挙動を調べる宇宙実験から獲得した燃料燃焼の新たな知見を活用した地上でのエンジン燃焼効率の向上、また ISS で得られたデータを使ったナノ構造材料やスマート材料の開発、などの事例が挙げられています。

本書はまた、人類の健康、気候変動と災害対応、教育分野での実験結果の恩恵が、科学、技術、工学、数学 (STEM) 教育で世界各国の生徒のイマジネーションをかきたてる事例も挙げています。ISS で得られた知識を人類の健康に利用することで医療技術を発展させ、人の生理機能の理解がより深まっています。

ISS という唯一無二の宇宙実験室は、宇宙空間をビジネスチャンスのもとへと変貌させ、生み出された技術や製品が地球での私たちの生活を向上させてくれるだけでなく、今後の宇宙探査への足がかりとなる実験結果を与えてくれます。地球を周回しながら、宇宙空間で健康を維持するための基礎となる、重要な技術や方法を与えてくれる ISS。本書を読み、その素晴らしさを知るにつれて、誇りに思わずにはいられなくなるはずです。

人類的課題への恩恵



手術室で SYMBIS 外科手術システムの使用準備をする医療チーム

出典：カルガリー大学



人類の健康

国際宇宙ステーション（International Space Station; ISS）は他に類例のない宇宙実験施設で、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。その研究成果によって、加齢、心的外傷、疾病や環境要因など、人の健康についての理解が進んでいます。宇宙飛行士の健康管理のために行われたいくつかの生物学的、生理学的研究は、地球上でも、骨量減少の防止方法、細菌運動に関する新たな知見や革新的な創傷治療手法などを生み出し、重要な成果をもたらしています。さらに、遠隔医療技術、遺伝子操作による発病原因研究、心理的ストレスへの対応、栄養学や細胞行動分野の研究での進歩も ISS による恩恵の一例です。このような恩恵が軌道上から地球に施されます。



医療技術

核磁気共鳴画像法（Magnetic Resonance Imaging; MRI）内で外科手術を行うことができる世界初のロボット技術は、これまでになかった外科治療を可能にしていますが、ここにも ISS の実験成果が活かされています。この技術によって、難しい脳腫瘍の外科手術が容易になり、不可能とされている外科手術が可能になりつつあります。ISS のために設計されたロボット技術を医療に用いることで、患部への接近力、精度、器用さが向上しており、きわめて正確で侵襲性の少ない手術が可能になります。まもなく乳がんの早期診断や早期治療への適用に向けて、臨床試験が行われる予定です。また小児外科治療への活用も検討されています。よくあるレーザー視力回復手術では ISS で開発された新たな技術が使用されており、患者さんが目を動かしても追跡装置で正確にレーザーメスを当てることができます。また ISS での体温調節研究も手術中のモニタリング用センサー技術に応用されています。

僻地や発展途上地域など医療施設が近くにない場所であっても、離れた場所にいる専門家からの的確な指示と訓練を受けて超音波診断装置を使えば迅速に複雑な処置を行えます。このような遠隔医療や遠隔指示手法によって僻地であっても患者はタイムリーな診断を受けられ、効率的な医療システムとなります。

ISS では軽量で使い勝手のよい装置で宇宙飛行士の呼気に含まれる一酸化窒素を測定することで気道の炎症を調べて、健康の維持に努めています。現在この装置を使用している医療センターでは、ぜんそくの管理レベルと投薬の効果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げています。

プラズマは多くの物質に浸透し、均一かつ迅速に広がる電荷を帯びた粒子に電離した状態の気体です。プラズマの研究は、慢性的な傷の殺菌、滅菌、がん細胞の不活性化の強化、そして植物の成長促進に応用できることが分かっています。

ロボットアームの繊細な動きが治療に貢献

ページ・ニッカソンの脳から卵形の腫瘍を見事に取り除いた繊細な動きは、世界的に有名なロボットアームの手を借りたものでした。MRI 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、マクドナルド・デトワイラー・アソシエイツ社（MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd.; MDA）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）、ISS 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、ISS 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容易に行えるか、不可能とされている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連携して、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

ロボットの専門家や外科医は難しい手術を容易に、不可能とされている手術を可能にすることを追いかけています。



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、私の頭のここに入ってきました。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の命を助けてくれるでしょう」と述べました。

出典：カルガリー大学

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。

ページ・ニッカソンに行った2008年の脳外科手術以来、他の方法では手術が不可能な35名の患者に、ニューロアームを使った初期臨床試験が行われています。2010年、医療機器メーカーであるIMRIS社（カナダ・マニトバ州ウィニペグ市）は次世代プラットフォームの開発と「SYMBIS外科手術システム」として販売することを目的として、ニューロアームのライセンスを取得しました。

IMRIS社はニューロアームを基に低侵襲の脳腫瘍切除手術システムを商品化しようとしています。SYMBISを使えば、外科医は脳の詳細な3D画像を見ながら手術ができます。さらに外科手術用の装置やハンドコントローラも、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ています。SYMBISは2015年3月よりサザーランド博士の研究施設で校正試験や検証試験を受けていますが、SYMBISを使えばMRIのボア内の患者のMR画像をリアルタイムで見ながら、顕微鏡手術や定位生検が行えるようになると期待されています。SYMBISは小型になっても、触覚の伝達性や触れてはいけない部位への安全性は向上し、人の動作を縮小して伝えるモーションスケールや、手の細かな震えをシャットダウンするフィルター機能なども高性能になっています。現在、米国食品医薬品局（Food and Drug Administration; FDA）による審査を受けており、認可が下りれば世界中の医療センターで導入可能となり、臨床試験を通じてその有効性が認められるようになるでしょう。

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、幼児や乳児の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、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。



手術室でSYMBIS外科手術システムの使用準備をする医療チーム

出典：カルガリー大学

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 MRI 内での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みました。画像誘導型自律ロボット（Image-Guided Autonomous Robot; IGAR）は、患部への接近力、精度、器用さが向上しており、より正確で侵襲性の少ない手術手順を実現しています。IGAR はカナダのオンタリオ州ハミルトンとケベック州ケベック市で、第二段階の試験を受けています。

より詳しい内容は以下のサイトをご覧ください。



neuroArm: <http://tinyurl.com/neuroArm>

KidsArm: <http://tinyurl.com/KidsArm>

IGAR: <http://tinyurl.com/CSA-IGAR>

宇宙ロボットが乳がんの診断と治療を同時に行う

ISS 用に設計された高度な機能を持ったロボット技術を使った乳がん手術が増えるかもしれません。

ISS の技術により、ロボットの接近力、精度、器用さが向上し、きわめて正確で侵襲性の少ない手術が可能になります。

カナダの CSII と提携した研究者チームは革新的な医療ロボット技術を開発し、製品化することで多くの人が質の高い医療を受けられるように努めています。特に乳がんの早期診断と治療に使用する最先端のプラットフォームの臨床試験がまもなく行われます。

主役は医療スタッフとロボットです。ロボットと言っても単なるロボットではありません。CSA との契約で MDA 社が ISS のために設計したロボット技術が使われます。

研究者たちはスペースシャトルや ISS で重量物の運搬や保守作業を行うカナダアーム、カナダアーム 2



IGAR を開発した CSII の CEO 兼科学局長であるメヘラン・アンヴァリ博士と IGAR マニピュレーター

出典：ハミルトン・スペクテータ社

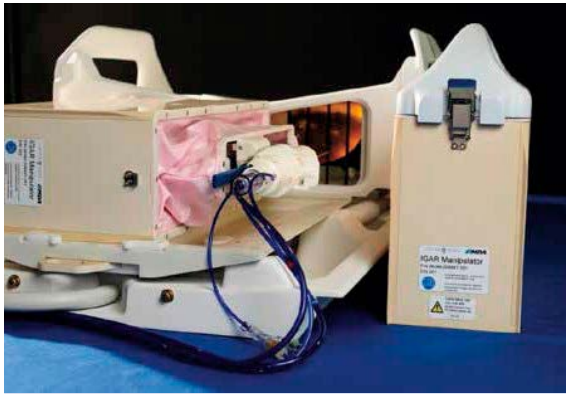
やデクスターなどの CSA の宇宙ロボットファミリーを基に、IGAR を開発しました。

IGAR は乳がんに対して患部への接近力、精度、器用さが向上しており、きわめて正確で侵襲性の少ない手術手順が可能になると考えられています。

CSII の CEO 兼科学局長のメヘラン・アンヴァリ博士は、IGAR はこれまでのロボット手術の概念をさらに進歩させ、医師がプログラミングした通りに自動で行動させることができると語ります。

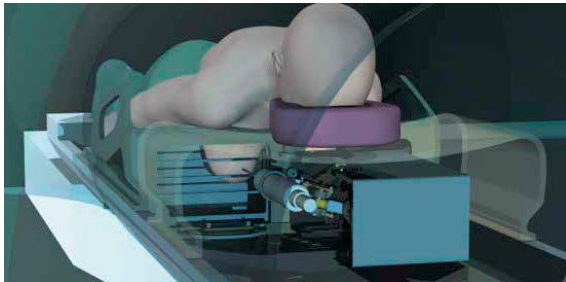
IGAR は MRI スキャナーと一緒に使用します。MRI スキャナーは高感度で乳房内部の病変を検知できるため、早期発見によって乳がんへの進行を防止できます。放射線技師は特別仕様のソフトウェアを使って潜在的なターゲットにタグをつけ、IGAR に進路を教えます。その後患部に放射線が正確に当たっているかをソフトウェアを使って確認します。IGAR には特別なツールインタフェースがついており、ニードルアブレーションと言われるニードルを使って病変組織を採取したり穿刺生検器具や病変組織を除去できる器具を取り付けることができます。

アンヴァリ博士は、IGAR によって標的病変に対する生検器具やアブレーション器具の位置決め誤差を 1mm 以内に抑えることができるため、とても正確かつ確な組織採取や治療ができ、このため患者に与



患者のベッドに取り付けられる IGAR と乳房生検プラットフォーム

出典：CSII、MDA 社



IGAR による生検イメージ図

出典：CSII、MDA 社

える痛みは少なく、また MRI 内にいる時間を短縮できるためコスト削減にもつながると述べます。さらに博士は、ロボットを使うことで、年間の処置回数に関係なく、等しく高水準の治療が可能になるだろうし、そうなれば大多数の患者の治療は手術室ではなく放射線治療室で行われるようになるだろうとも述べています。すなわち、最新のがん治療が放射線技師によって MRI という磁気環境の中で行われるということです。そしてロボットを患者が横たわるベッドに備え付けることで、ロボットは MRI にスムーズに出入りすることができます。このため MRI 内にいる患者の苦痛を和らげることができるだけでなく、現場での処置時間を短縮することができます。

カナダ・ケベック州ケベック市の聖サクラメント病院（Saint-Sacrament Hospital）で共同臨床研究者かつ乳腺放射線技師であるナタリー・デュシェーヌ博士は MRI による乳房生検を長年教えており、第一回目

の臨床試験を実施することになっています。彼女によると、オペレーターの技量に左右される手順には多くの段階があり、この段階を正確に踏まないと病変を適切に採取できない可能性があると言います。博士は、IGAR なら検査時間を短縮し、的確な病変採取を保証し、検査時の患者の負担を軽減できると考えています。デュシェーヌ博士とそのチームは、オペレーターの技量にあまり左右されない IGAR は、医者、患者、病変による差が少ないため、病変の採取が向上すると言ってます。

IGAR は処置において「人の手」を必要とする多くの部分を不要にできるため、使い手の技量に左右されず、また必要な訓練時間が少なくて済みます。すなわち、放射線技師の経験が少なくても標準的なプロセスを実施できるのです。患者が MRI 内に入れば放射線技師はプログラムを遠隔操作するだけです。そして医師は患者が苦痛を感じていないかを確認するだけなので、複雑なことは何もないのです。

アンヴァリ博士は、この技術は遠隔ロボットファミリーから生まれており、このような医療行為に対する人々の考え方を変えるかもしれないと言います。また高度な専門的訓練を受けた医師はその訓練がまさに目的とする医療行為に集中することができると言っています。アンヴァリ博士は、このようなロボット技術が医療現場での作業の流れを合理化し、高度な技能を持った放射線技師が遠隔操作によってより多くの人々の処置に当たることができるようになれば、医療システムをより効率化することができるだろうと考えています。

このロボット技術の利用は生検だけにとどまりません。デュシェーヌ博士は、術前の MRI で偶然見つかることが多い小さな腫瘍も IGAR によって低侵襲切除や治療が可能になると言っています。

しこりのみを取り除く乳房温存手術である、乳腺腫瘍摘出術を希望する患者さんが増えています。超音波 X 線検査やマンモグラフィでは見えない腫瘍を MRI で見つけることができる場合があります。このため研究者は IGAR を使って病変部位近くに米粒より小さい放射性シードを挿入する技術を開発中です。そうすると、手術時に医師はこのシードの位置を検出器で特定し、病変をより正確に切除できるようになります。また、患者への負担や再手術の必要性も大きく軽減されることでしょう。

カナダのロボットアームはISSを訪れる補給船をキャプチャするだけでなく、人の命も救っています。このようなISSのために開発された技術の恩恵が地上にもたらされることによって、がん治療が飛躍的に向上する日がいつか来るでしょう。

IGARについての詳細は以下の動画を見てください。



<http://tinyurl.com/CSA-IGAR>

宇宙ハードウェアで 眼科手術がより安全に

今やレーザー視力回復手術は一般的な手術となっていますが、宇宙用に開発された技術を使用して患者さんの眼球の動きを追尾しながら正確にレーザーを照射しています。

ある一点を見ながら首を左右に回しても、その一点はぶれることなくはっきりと見えます。このように視角が確保できるのは脳が内耳からの情報を受け取り、

ISS用に開発した装置を使えば、眼科医は眼球を追尾しながらスムーズにレーザー視力回復手術を行えます。



2006年、ISSで眼球追尾装置実験をするトーマス・ライター元ESA飛行士

出典：ESA

頭の動きと反対方向に眼を動かすよう命令を出し、この命令を受けて眼球は頭の動きに合わせて反射的に動くからです。そして内耳には重力を感じる作用もあります。

眼球追尾装置実験は、このプロセスに関わるメカニズムと宇宙空間では人間の視点がどのように変わるのかを実験しました。実験では宇宙飛行士の作業を邪魔することなく眼球を追尾できる高性能の画像処理チップが付いた特製ヘッドセットを使用しました。その結果、私たちが眼球の動きを制御する器官とバランスを取る器官は微小重力によって影響を受けることが分かりました。これら2つの感覚システムは重力環境では密接に作用し合っていますが、微小重力環境では関係性が薄れるのです。

地球に帰還した宇宙飛行士が重力環境に慣れるには数日から数週間かかります。このことは感覚運動機能と空間知覚が重力を基準としていることが分かります。

研究者は眼球追尾装置がISSでの実験だけでなく、地球でも利用できると考えました。レーザー視力回復手術中に作業を邪魔せず眼球を追尾することはとても重要です。眼球追尾装置はそれを可能にする装置として世界中のレーザー視力回復手術に使用されつつあります。欧米の多くの研究機関では民生用のレーザー装置の研究が行われています。

過酷環境下での作業に活かされる センサー技術

欧州宇宙機関（European Space Agency; ESA）／ドイツ航空宇宙センター（Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt; DLR）が行ったThermolab実験（2009年～2012年）では新たなセンサー技術によって宇宙飛行士の体温調節機能がより分かってきました。これらのセンサー技術は地球上での消火活動から熱けいれん、熱疲労などの熱中症の発見まで様々

ISSによって発展したセンサー技術は現在、手術時および集中治療室で体温調節をモニターするのに使われています。



Thermolab/EKE/VO2Max (2012 年 8 月) 実験で小型肺機能システム (Portable Pulmonary Function System) を付けて CEVIS 自転車に乗るウニータ・ウィリアムズ NASA 宇宙飛行士

出典：NASA

な分野に利用できるでしょう。実際、このセンサーは病院での手術時や ICU に導入されています。

私たちの生活において体温調節は極めて重要な役割を果たしています。真冬の間でも、真夏のビーチでも、生命の維持に不可欠な臓器の温度は常に 37°C (98.6°F) に保たれています。しかし、体や心が疲れているときには体温が変化しますし、低体温症や熱射病など体温の異常な低下や上昇が起こる場合もあります。

微小重力環境では心臓血管系の機能が変化し、対流がないため体温が下がりづらく、体液は自然と上半身に移動します。これらのことが体温調節に大きな影響を与えます。

Thermolab 実験では微小重力環境での運動中の体温の上昇と低下を調べ、体温調節や心臓血管系の変化を観察しました。深部体温の測定で、テストも兼ねて使われたこの新たなセンサーは、今後宇宙だけでなく地上での新たな応用が期待されています。このセンサーは、病院や手術での深部体温の測定に使用

されていたものを Charité 細胞生物学・神経生物学研究所 (ベルリン) と Draegerwerk 社 (リューベック) が DLR との契約で開発したもので、皮膚温度と皮下温度を測り、最新のアルゴリズムで深部体温を算出します。

ISS で運動すると地上よりも深部体温の上昇が早く、これはおそらく体液移動と対流がないため体表面から熱を逃しづらいからではないかと考えられています。また運動後に深部体温まで下がるのに時間がかかります。NASA の最大酸素摂取量 (VO2Max) 測定実験時の心臓血管系と深部体温の測定結果を基に疲労度合いを調べることができます。

これはミッションを成功させるためにはとても重要です。このような非侵襲的なダブルセンサーは船外活動時の疲労の兆候を早期に発見するのにとても役立ちます。地上では消防士、パイロット、炭鉱作業員、製鋼所作業員、戦闘中の兵士、ダイバー、登山家、北極／南極探検家、沿岸海洋漁業者など極限状況で働くすべての人がこの新たな測定技術の恩恵を受けることができるでしょう。

ISS の超音波が地上に届く

緊急事態では、いち早く効果的な治療を受けられれば助かる可能性が大きくなります。怪我や病気で苦しむ人にとっては医用画像技術による迅速で正確な診断が適切な治療への第一歩となります。大都市に住む人々は十分に設備が整った病院に救急搬送されればそのような処置が受けられますが、近くにそのような病院がない地方に住む人にとっては生死に関わる問題となります。

地上から約 240 マイル上空の ISS に滞在する宇宙飛行士にとっても、このような問題は無縁ではありません。そこで最新型超音波診断 (Advanced Diagnostic Ultrasound in Microgravity; ADUM) 装置を使って解決しました。ISS の宇宙飛行士は、船内

ISS で行われているのと同じように、僻地でも小型の超音波装置や遠隔医療、遠隔ガイダンスを使って十分な医療サービスを提供できます。

で小型の超音波装置を使って仲間同士で診断ができるように訓練を受けています。仲間の飛行士の健康に問題が起きた場合には、地上の医者からのアドバイスを受けながら、この装置を使って怪我や病気を診断します。ADUM 装置は 2011 年に搭載され、現在はより小型の最新走査装置 Ultrasound2 が搭載されています。

コンピュータ断層撮影 (CT)、MRI や簡単な X 線検査が受けられない僻地に住んでいる人々にも ISS と同じ手法で医療サービスが提供されつつあります。ADUM の研究代表者 (Principal Investigator; PI) である Scott Dulchavsky 博士は World Interactive Network Focused on Critical Ultrasound (WINFOCUS) と共同で、離れていても複雑な手順を迅速に行える専門家によるガイダンスや訓練方法を作成し、ISS の宇宙飛行士用に開発した当初の手法を、地上でなかなか最新医療を受けられない人々に応用しています。

WINFOCUS は、十分な医療サービスを受けられない僻地の人々に超音波診断装置を使った診断を提供するための国際組織です。WINFOCUS は共同で開発したガイダンス方法で 68 カ国、20,000 人以上の医師や医師資格者を訓練してきました。例えば、2011 年からはニカラグアの僻地で、2012 年からはブラジルミナスジェライス州保健大臣 (Secretary of Health of the State of Minas Gerais) と共同で州内の医療プロジェクトを行いました。

WINFOCUS はまた、ISS 用に開発した遠隔医療や遠隔ガイダンスをさらに発展させ、地球上で統合化された医療サービスを低いコストで提供しています。これにより地方にいても多くの患者さんが早期に質の高い診断をタイムリーに受けることができ、効率的な医療システムとなっています。

ADUM の恩恵は、緊急治療室でも感じることができます。肺の虚脱などこれまでの訓練では対象とされていなかった病態の診断にも、超音波が効果的であることが実証され、現在では標準的な医療措置として組み入れられています。さらに ADUM の手順は医学部のカリキュラムの一つとなっています。米国外科学会 (American College of Surgeons) はすべてのインターンや研修医に ADUM プログラムを使った超音波訓練を求めています。ADUM の研究成果、そして WINFOCUS とのパートナーシップは、ISS の

研究成果を最も直接的な形で地上に還元し、これまで十分な医療サービスを受けることができなかった僻地の人々も、健康的な毎日が送れるようになっています。



ISSのコロンバス実験棟でUltrasound2を使って診断する、トム・マーシュバーン宇宙飛行士 (NASA) とクリス・ハードフィールド宇宙飛行士 (CSA)

提供：NASA



WINFOCUS とヘンリーフォードイノベーション研究所 (Henry Ford Innovation Institute) のメンバーであるルカ・ネリ博士とアルベルト・スプレアフィコが、ワイリーエンジニアリング (Wyle Engineering) 社のキャスリーン・ガルシアと一緒に、ADUM と遠隔超音波アプリケーションを使って、ニカラグア・ラスサリナスのチャモロ博士にそれらの使い方の訓練を行っています。

出典：WINFOCUS/Missions of Grac

宇宙技術がぜんそく患者をサポートする

10歳の少年カルは、宇宙技術にとっても興味があります。将来、ISSで宇宙飛行士も使用している小さな装置を使って、彼自身のぜんそくを抑えられるようになるでしょう。そのため、彼は私たち人間が吐き出している「一酸化窒素」について、実に豊富な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、酸性雨となることもあります。

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、様々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

軽くて使いやすい装置でぜんそくの管理レベル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。

素が増加します。この呼気を測定することが病気の診断に役立つ場合があります、もし一酸化窒素の量が投薬による調整が必要なレベルだと分かれば発作を防ぐこともできるでしょう。一方、一酸化窒素はISSでも興味深い分子です。微小重力状態では、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。

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。

スウェーデン企業であるエアロクライン社とESAが開発したこの装置は宇宙探査においても、地上での日常生活においても役に立つことが分かりました。

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。

冷たいプラズマを使って傷を治す

液体、固体、気体に次ぐ物質の第4の状態であるプラズマが傷口の殺菌、滅菌処理、傷病治癒の促進、そしてがん細胞の死滅など人々の健康に役立つことが、ISSでの実験によって分かりました。微小重力環境は、物質のユニークな状態であるプラズマの研究には理想的な環境です。

ロシアとドイツの共同事業である微粒子プラズマ実験 (Plasma Kristall Experiment: PK-3Plus) により、クーロン結晶と呼ばれる変わったタイプの物質に関する新たな知見が得られました。

プラズマは電荷を帯びた粒子に電離した状態の気体で、ほとんどの物体を通り抜け、均一にさっと広



2006年、一酸化窒素分析器 (Nitric Oxide Analyzer; NOA) の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

プラズマ研究は、慢性的な傷の殺菌、滅菌、がん細胞の不活性化の強化、植物の成長促進に応用できることが分かっています。

がります。表面の殺菌だけでなく、メシチリン耐性黄色ブドウ球菌などの薬物耐性菌も一瞬で滅菌できます。臨床試験が行われた3,500以上の事例で、慢性的な傷をプラズマで殺菌すると傷の治りが早くなったことが報告されています。他にも癌の化学療法とプラズマ照射を並行して行くと、化学療法の場合と比べて癌の不活性化が500%高くなることが実証されています。また、プラズマは植物の生育にも役立ちます。

マックスプランク地球外物理学研究所（ドイツ、ガルヒン）のグレゴル・モーフィル所長は、PK-3の研究者たちによって宇宙実験で技術的な挑戦をしたことが医療へのスピノフにつながった、と述べています。ISSでの実験がなければチームメンバーはプラズマ医療に参加することもなかったでしょう。

PK-3 ラボでは、プラズマと固体微粒子が混在したコンプレックスプラズマ（ダストプラズマとも言われます）の研究が行われました。これら固体微粒子はプラズマの振る舞いを大きく変化させ、微粒子そ



実験中のクーロン結晶を横から写したもの。高周波電極（底部）上のアルゴンプラズマに浮遊するちり粒子。写真の水平電場は2cm

出典：マックスプランク地球外物理学研究所



第30次長期滞在搭乗員として、ISSのボイスミニリサーチモジュール2で微粒子プラズマ実験を行う、ロシアのオレグ・コトフ宇宙飛行士

出典：RKK エネルギア

のものが結晶構造になる場合もあります。人工衛星の周辺や地球の大気上層部で見られるコンプレックスプラズマをPK-3ラボで再現できます。コンプレックスプラズマの実験はやりやすいだけでなく、微粒子を一つひとつ観察することが可能なため、これまでにない物理データが得られます。地球上では重力がプラズマ中における微粒子の振る舞いや結晶の形成に影響を与えますが、ISSではこのような問題はありません。

PK-3Plusでの実験では、微粒子であるミクロンサイズのアルゴンやネオンのガスを用いてコンプレックスプラズマを発生させました。電離によって生じた荷電粒子を含む気体であるプラズマを発生させ、微粒子をその中に投入し、レーザーを照射しながら、カメラでその粒子の動きとクーロン結晶プロセスを撮影しました。粒子の大きさやガスの種類を変えて実験した結果、興味深い新たな現象がたくさん観察できました。例えば、PK-3Plusの高解像度カメラで物質が液体から固体へと変わる瞬間を観察したり、コンプレックスプラズマの微粒子の動きと高周波との関係を観察することができました。

ダストプラズマは基礎科学の研究対象ですが、宇宙や地球で実際に使用されています。例えば、ICチップはプラズマ処理技術で作られていますし、ICチップの汚染防止には微粒子の除去がとても重要です。気体とコンプレックスプラズマの相互作用をより知ること

は、プラズマ処理技術の向上には欠かせません。この相互作用をより理解できるようになれば、特定成分を含んだ粉末を生成できるようになり、農業、衛生、製薬などの分野に役立てることができます。プラズマは病気や怪我に苦しむ人々の治療にも役立つ可能性を秘めています。

ISSでは6年にわたり、PK-3Plusを使って20の実験を行いました。それぞれの実験期間は約5日間です。PK-3Plusの実験やその一世代前のPKE-Nefedovを使った実験は、70以上の論文、また100以上のプレゼンテーションが科学会議で発表されています。

これまでのPK研究は宇宙で完結すると思われませんが、特にプラズマ医療研究は新たな利用を生み出し続けており、2014年11月にISSに託された新しいハードウェアによるPK-4研究とともに、さらに増えていくでしょう。

骨量減少予防

高齢者に見られる骨量の減少という問題には、宇宙にいる宇宙飛行士も悩まされます。ISSで現在行われている実験によって、骨粗しょう症の治療薬であるビスフォスフォネートの服用、骨や筋肉に負荷を与える運動、そして栄養バランスが良く塩分控えめの食事により、骨量減少や尿路結石のリスクを軽減できることが分かりました。骨粗しょう症のリスクが高い高齢者の健康増進のために、骨粗しょう症をより早期に発見できるメディカルスキャンニング装置や、より効果的な予防策を開発中です。

骨粗しょう症の治療薬を服用して
宇宙飛行時の骨量減少を予防します：
宇宙飛行士の経験が
高齢者の健康維持に役立ちます

長期宇宙滞在における骨量減少と尿路結石の問題は、解決すべき最重要課題の一つです。ISSでは、宇宙飛行士は、毎日約2時間半、週に6日間（週15時間）の運動を行っていますが、骨量減少や尿路結石のリスクを完全には排除できていません。

宇宙実験によって、ビスフォスフォネートや運動が骨量減少や尿路結石のリスクを軽減できることが分かりました。

骨は体を支え、カルシウムを貯蔵する構造として重要な役割を果たします。骨吸収と骨形成のバランスを取りながら骨改造を行うことにより、破壊抵抗を維持します。微小重力環境下では、負荷刺激が少ないため、骨吸収が増え、骨形成は変化なし、または減少する可能性があり、骨粗しょう症の約10倍の速度で骨量の減少が進みます。大腿骨近位部の骨量減少は1カ月あたり1.0～1.5%、すなわち宇宙に6カ月滞在すると約6～10%に及び、地球に戻った後の回復には少なくとも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1日当たりの排出量が約250mg多くなるため、尿路結石のリスクが高まります。

宇宙飛行の骨量減少に対して、骨粗しょう症治療



運動する野口 JAXA 宇宙飛行士

出典：JAXA/NASA

薬として10年前から地上で使用され、骨量増加と骨折発生率低下のエビデンスがある薬剤がビスフォスフォネート剤です。地上で90日間ベッドに寝たままの被験者にビスフォスフォネート剤を投薬した結果、骨量の減少を効果的に防止できることが分かりました。このような実験結果を基に、宇宙研究大学連合（Universities Space Research Association）のアドリアン・ルブラン博士と徳島大学の松本俊夫博士をPIとする宇宙飛行中の骨量防止研究を、JAXAとNASAは協力して行っています。



ISS内で食事を楽しむ宇宙飛行士

出典：JAXA/NASA

JAXA と NASA の宇宙飛行士に予防薬としてビスフォスフォネート剤を週に一度、宇宙ステーションで服用させて行う研究は現在も続いています。これまでのデータから骨を刺激する運動を行い、ビスフォスフォネート剤などの骨吸収阻害薬を服用すれば、宇宙飛行中の骨量減少や尿路結石のリスクを大きく軽減できることが分かりました。

骨量の減少は寝たきりの高齢者にも見られます。高齢者の骨量は、加齢や女性ホルモンの減少によって年間1～2%減少します。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歳以上の女性の2人に1人が該当します。年間16万人が大腿骨頸部骨折手術を受け、社会復帰には約3カ月かかります。医療費は一人当たり150万円を要し、骨折に伴う年間の医療・介護費用は国全体で665億7,000万円にも達する状況です。

高齢者の骨折を予防するためには、栄養・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と食べることが必要です。ビタミンDの生成には適度な日光浴も大切です。運動は、骨や筋肉に負荷を与える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には、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。

最新のスキャン技術で 骨粗しょう症を早期に発見する

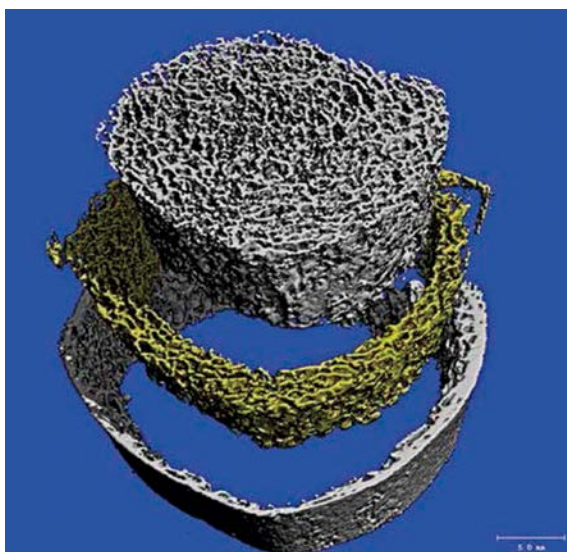
ESA の、宇宙における骨粗しょう症の早期発見

(Early Detection of Osteoporosis in Space: EDOS) 実験は、骨構造を3次元的に測定する末梢骨定量CT (3DpQCT) を使って長期宇宙滞在飛行士に見られる骨量を調べます。そのデータを基に地球に帰還した飛行士の骨の減少量やカルシウム動態を詳細に調べます。生体工学研究所（スイス、チューリッヒ）と Scanco Medical 社は ESA の微小重力応用プログラム (MAP) で高性能な 3D メディカルスキャナーを開発しました。これにより骨構造の高画質 3D 画像と骨バイオマーカーを使った地上実験が行えるようになりました。

ESA の後押しを受けて開発され EDOS 宇宙実験で使われた 3DpQCT スキャナーは現在商業販売されており、骨粗しょう症に苦しむ患者さんたちの骨構造を非侵襲的に調べることに役立てられています。

EDOS プロジェクトではこのようなメディカルスキャナーの有用性を調査し続けており、骨粗しょう症の早期発見につながる、これまでにない手法の開発が

骨粗しょう症の早期発見と、より効果的な治療方法の開発は宇宙飛行士だけでなく、骨粗しょう症に苦しむ患者さんを救います。



橈骨遠位端 Xtreme CT 画像

出典：Scanco Medical

期待されています。患者さんの病態を早期かつ正確に診断することは、より効果的な骨粗しょう症予防対策の開発につながります。国際骨粗鬆症財団の発表によれば、2006 年時点で世界中の 890 万人（推定）が骨粗しょうによる骨折に苦しんでいます。EDOS プロジェクトは 2015 年春よりロシアとの共同プロジェクト EDOS-2 として開始されています。

栄養バランスの取れた食事と運動が宇宙飛行士の骨を守る

栄養バランスの取れた食事と適度な運動によって ISS に搭乗している宇宙飛行士の骨量変化を抑えられることが分かりました。このことは地球低軌道以遠に向かう未来の宇宙探検家が直面する問題の一つを解く鍵となりそうです。

2012 年 9 月発行の骨・ミネラル研究ジャーナル (Journal of Bone and Mineral Research) に掲載された研究結果は、新たな「ウェイトリフティングマシン」を使った宇宙飛行士の骨格と特定の骨の骨密度に焦点を当てています。ISS ではウェイトトレーニングで「重さ」を与えることはできないので、筋肉に負荷を与える装置を使って地上のウェイトトレーニングと同様の効果を得ています。2008 年に搭載された強化型エクササイズ装置 (Advanced Resistive Exercise Device; ARED) は、これまでの装置の 2 倍にあたる最大 600 ポンドの負荷を与えることができます。

ARED に交換する前のエクササイズ装置 (2006 年～2008 年) を使っていた時の測定結果と ARED で測定結果を研究者が比べると、ARED を使った宇宙飛行士は帰還後も引き締まった筋肉で体重増加量も少なく、骨密度も維持されていることが分かりました。この時の宇宙飛行士は運動だけでなく、骨の健康維持のためカルシウムの吸収に働くビタミン D も十分に摂取していることが分かりました。

51 年の有人宇宙飛行の歴史の中で、食事と運動による宇宙飛行士の骨の健康維持は大きく進歩しました。



ISSでの研究は、骨粗しょう症にかかりやすい人々には低塩分の食生活と重炭酸塩の摂取がよいことを教えてくれます。

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。ISSは、重力の影響が少ない環境であるため、滞在中に骨粗しょう症が加速しますが、宇宙飛行士の場合は骨量が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、病気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。

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はなく、人体の酸バランスと骨代謝にも影響があることが分かりました。つまり、塩分の摂取が増えると体内の酸が増加して、骨量減少が加速される可能性があります。

ESAによる最近の、重力の影響が少ない環境におけるナトリウム負荷（SODium LOad in microgravity; SOLO）研究は、この問題に焦点を当てました。



2011年12月、ISSでの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）といくつかの食品。SOLO実験において宇宙飛行士たちは、ナトリウムの体への生理学的影響を調べるため、2つの異なる食事体系を取りました。

出典：ESA

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（重炭酸塩など）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分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。



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知見する助けになり得ます。

出典：Istockphoto/S.Kaulitzki



SOLO 実験に欠かせない要素である体質量測定を ISS で行う ESA フランク・デビュナー宇宙飛行士

出典：ESA



骨粗しょう症骨の 3DpQCT 画像

出典：Scanco Medical AG

免疫防御システム

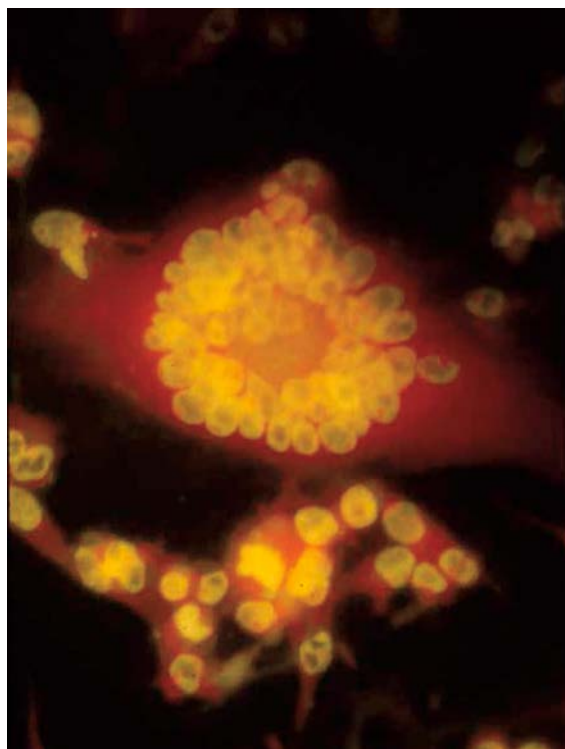
人の体内には8種類のヘルペスウイルスが生息しており、事実上、私たち全員がこれらのウイルスの1つ以上に感染しています。宇宙飛行に伴うストレスによって4種類のヘルペスウイルスが体液内で活性化して発現します。医師の診察室または宇宙船内で使用できるように設計された装置（特許出願中）によって、水痘帯状疱疹ウイルス（VZV）を早期に発見することができます。これにより痛みを伴う帯状疱疹が出る前に治療することができます。ISSでの宇宙実験によって生まれながらに持っている自然免疫がT細胞を活性化させ、応答させることが特定できたため、今後の地球上での免疫抑制治療の進歩につながっていくでしょう。宇宙に滞在する飛行士の免疫系がどのように変化するかを知ることは免疫低下を防止する方法を考え出すだけでなく、自己免疫疾患患者や臓器移植患者の免疫反応を抑制する薬剤の開発にも有効な情報となります。

免疫変化の早期発見により、 宇宙と地上で激しい痛みを伴う 帯状疱疹を防ぐ^{*1}

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、この病変が宇宙飛行士や地上の人びとの皮膚に現れる前に治療を始められるよう、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。

宇宙実験によって水痘ウイルスの早期発見が可能になり、帯状疱疹の痛みに苦しめられずに済みます。

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。



ヘルペスウイルス由来の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

健康な人の免疫力低下の原因を特定することは難しいですが、主に宇宙飛行士の研究から、ヘルペス

* 1 出典：「NASA Technology Innovation, Vol15; 3, 2010; NP-2010-06-658-HQ」

ウイルスが免疫系の変化を早期に検出できる貴重なツールとなっています。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、数種類の癌を引き起こす場合があります。

米国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、この症状は数カ月から数年にまで及ぶことがあります。その他7種類のヘルペスウイルスも、VZVのように様々な体細胞内に不活性状態で存在し、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は健康な人の90倍も多いことが分かっています。

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とても重要です。宇宙飛行に関連した様々なストレス要因が、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たちは、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状態から活発な感染体になれるのです。ポリメラーゼ連鎖反応(PCR)分析で、唾液、尿または血液中に放出された増殖ウイルスを、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。宇宙飛行士の唾液にVZVが発見されたことは、発症していない人においてVZVが再活性化して排出された、すなわち感染していない人にも病気を引き起こすリスクとなることが分かったケースの最初の報告でした。

このため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分かりました。しかしながら、PCR分析には大型で複雑な装置が必要で、宇宙飛行には実用的ではありません。

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。用いられる器具は、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)の研究者たち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カ月間、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、2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において僻地の人々の唾液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100万人が患っている痛みや衰弱状態を予防する医療技術が一般の人々にもたらされる潜在的な価値を示しています。

宇宙での免疫実験がすべての人を救う

病気になると、免疫システムが病気と闘う指令を出

ISS での宇宙実験によって生まれながらに持っている自然免疫が T 細胞を活性化させ、応答させることが特定できたため、今後の治療の進歩につながっていくでしょう。

します。その司令官となるのが白血球の一種である T 細胞で、免疫細胞という戦士たちに外敵と戦うよう指令を出します。ISS での微小重力実験によって免疫細胞の反応を引き起こすものが分かりつつあり、地球上での治療に役立てられています。

有人宇宙飛行が開始されて間もない頃から、科学者たちは宇宙飛行士の免疫システムが地上のように働かないことに気づいていました。例えば、アポロ計画では 29 名の宇宙飛行士のうち 15 名が、飛行中または飛行直後にウイルスなどの感染源に対する免疫力が低下していました。40 年を経て、飛行開始から 60 時間は免疫系の活動が抑制されていることが分かりました。

NASA 元宇宙飛行士で、カリフォルニア大学サンフランシスコ校細胞研究所所長のミリー・ヒューズ・フルフォード博士を中心とする研究によって、ある自然免疫が T 細胞の活性化または不活性化に関わっていることを突き止めることができました。これは重力



ISS の第 30 次長期滞在搭乗員としてコロンバス実験棟の Kubin 装置を使って作業をする、アンドレ・カイパース ESA フライトエンジニア

出典：NASA

が T 細胞の活性化に関わっていることを実証した初の研究結果でした。

免疫システムが外敵とちゃんと戦い健康を保てるかどうかは、T 細胞が免疫システムに与える「指令」にかかっているのです。しかし指令が正確に伝わらなければ、反応が遅れたり、「戦死」してしまうことさえあります。免疫システムが十分に機能できていない状態は、指令を的確に出せない司令官の軍隊のようなものであり、戦いに勝利する確率が小さくなります。

研究結果によって、T 細胞内の特定の遺伝子が微小重力環境では細胞の反応を弱め、このため宇宙飛行中の飛行士は様々な感染源に対する防御力が弱まるということが分かりました。例えば、細胞が傷ついた時に、治癒への第一歩として防御反応である炎症が起きづらくなります。細胞間ではサイトカインというタンパク質の受け渡しによって情報を伝達しますが、このサイトカインがほとんど生産されなくなります。そうすると、治癒のために細胞を分裂、増殖させる（有糸分裂誘発）ことさえも難しくなるのです。

例えば、地球上で免疫が抑制されたために発症する疾病として HIV によるエイズやリウマチ性関節炎があります。また、加齢も免疫システムの機能不全の原因となるため、高齢者が肺炎などの感染症を撃退するのは難しくなります。細胞レベルでの免疫システムの働きを知ることは、防御反応に着目した治療の開発に大いに役立っています。これは、戦いの最中に白旗を掲げる時を模索するのではなく、紛争勃発前に話し合いで解決するようなものです。医者が特定の免疫反応を制御できれば、患者を治せる確率は高まるのです。重力のない宇宙環境で行った免疫実験のデータは、地球上である種の免疫疾患で苦しむ人々を救う一つの手立てとなり得るのです。

ヒューズ・フルフォード博士は、先端宇宙科学センター (Center for Advancement of Science in Space) <http://www.iss-casis.org/> と国立衛生研究所から資金援助を得て ISS でさらなる免疫実験を行いました。ISS への補給フライト SpaceX-3 に搭載して宇宙飛行期間中の T 細胞の活性化と免疫機構の変化を調べる米国の実験 (T-Cell Activation in Aging) の関連装置を打ち上げました。T 細胞のスイッチオン／オフに関連する遺伝子を見つければ、免疫機能をより高める治療をすることができます。実験データの解

析が現在行われており、免疫抑制治療へとつながる新たな創薬ターゲットを発見できる可能性を秘めています。

免疫力を高める分子標的治療

微小重力空間での細胞生物学実験によって、免疫システムの様々な応答変化が明らかになりつつあります。宇宙空間で免疫システムがどのように変化するのが分かれば、変化を引き起こす原因に的を絞った予防策を開発できるだけでなく、地球上でのターゲット療法にも有益な情報を与えることができます。例えば、ある病気に罹っている患者に、よりの確な治療ができより早く回復させることのできる薬剤の開発や、自己免疫疾患や臓器移植患者などの治療で、過剰に発現している特定の標的を狙い撃ちにしてその機能を抑える治療方法の開発にも役立てることができます。

Kubik インキュベータを体温と同じ温度にし、微小重力実験区（ゼロ G）と遠心器による軌道上 1G 対照

ISS での実験は、自己免疫疾患や臓器移植患者の治療で、過剰に発現している特定の標的を狙い撃ちにしてその機能を抑える薬剤や治療方法の開発に役立ちます。

実験区に生体試料を置き、免疫システムがどのように変化するかを調べる宇宙実験では、多くのことが判明しました。例えば、微小重力環境下では細胞骨格の障害によって単核白血球の機能が低下することが分かりました。これは、免疫反応に関わる重要なメカニズムであるプロテインキナーゼ C といわれる酵素グループや Rel/NF- κ B シグナル伝達経路に支障をきたしているためです。

最近では ESA が 2008 年から 2011 年にアポトーシスと呼ばれるプログラムされた細胞死と T 細胞との関係を探る ROle of Apoptosis in Lymphocyte



2006 年、ESA の免疫実験をしているトーマス・ライター ESA 宇宙飛行士

出典：ESA

Depression (ROALD) 実験を行いました。初期の実験結果により、ヒト細胞の寿命に関わる 5-リポキシゲナーゼ (5-LOX) と言われる酵素が微小重力環境下では地上よりも活性化することが分かりました。これが免疫システムの弱体化の原因ではないかと考えられています。5-LOX は薬でブロックできることが分かっています。このような発見が人々の健康の向上に役立つ日も近いでしょう。現在、地球上で病に苦しむ人々を救うための最適な標的治療の模索が続けられています。

新たな治療方法の開発

ヒトの体の中にそれぞれ独特で複雑な構造を持つタンパク質の研究は、医療の発展へとつながります。タンパク質結晶の生成に障害となる重力や対流がない微小重力環境は、実験には最適です。3,500 人の男児のうち 1 人が発症するというデュシェンヌ型筋ジストロフィー（DMD）の患者の筋肉繊維に発現したタンパク質を、宇宙で結晶化することができました。これにより、現在の阻害薬よりも数百倍効果がある新たな阻害薬の誕生となったのです。

マイクロカプセル化技術は、高濃度抗腫瘍薬の組み合わせ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）を作る技術です。特別な針を使って、このマイクロバルーンをがん患者の腫瘍場所に投与します。溶液の密度の違いによって液体が混ざり合うことがない微小重力環境下で作られたマイクロカプセルは、地球上でこのようなマイクロカプセルを作る装置の開発へとつながり、今後はマイクロカプセルを使った抗がん治療に貢献することが期待されています。近い将来、がん患者への臨床試験が行えるよう開発が続けられています。

地上で微小重力を模擬して行われている研究は、進行の遅い神経障害の早期診断、薬剤があまり効かない浮腫の防止、術後のリハビリ、スポーツ医学や未熟児のリハビリなど、様々な臨床への応用を視野に入れて行われています。

JEM で行われている 高品質タンパク質結晶生成実験

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。それぞれのタンパク質は独特で複雑な構造を持ち、それに基づき働きが決まります。それぞれ異なった構造には、私たちの健康に関する情報や環境問題に貢献できる重要な情報が含まれています。このためタンパク質の構造を解明できれば、その働きを理解することができます。しかし、地上は重力の影響があるためタンパク質結晶を生成する最適な環境とは言えず、高品質な結晶を作ることが難しく、その構造を解析することが困難となっています。

重力の影響が少ない環境では、溶液を密度の違いに

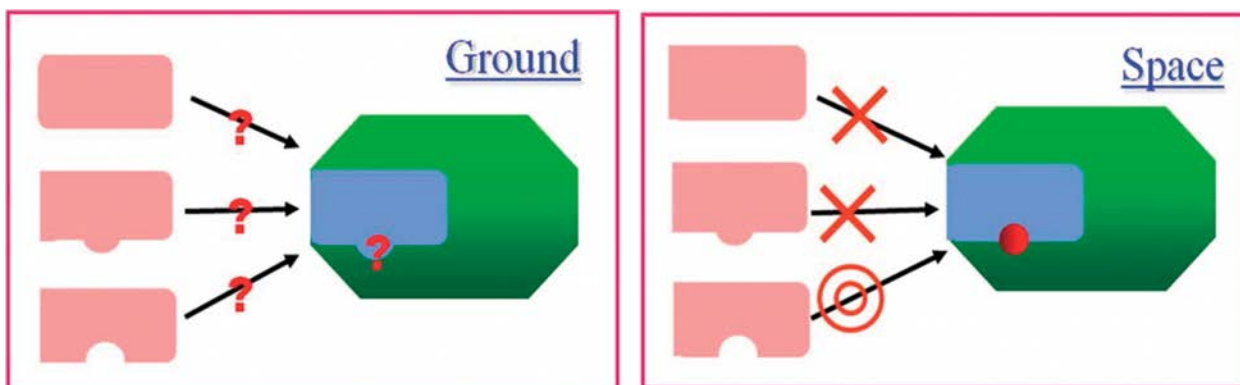
よって上下左右に流れる対流や、重いものを沈下させる沈降がありません。このため、タンパク質の分子が規則正しく並び、タンパク質の構造研究に最適な高品質な結晶が生成されます。すなわちタンパク質の構造研究に最適な環境が、宇宙の微小重力環境です。今までに、宇宙という特殊な環境で様々な結晶が生成されてきました。

JAXA（宇宙航空研究開発機構）では、ISS のロシアのズヴェズダ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（Japanese Experiment Module; JEM）で 2009 年 7 月から 2013 年 5 月までの間に計 6 回の計画で高品質タンパク質結晶生成実験（JAXA PCG）を行いました。

JAXA PCG の第 2 期実験シリーズとして半年に 1 度の頻度で定期的に計 6 回の宇宙実験を実施する予定で、第 2 期実験シリーズの第 1 回目が 2014 年 3 月に開始されました。

ロシア連邦宇宙局（Roscosmos）の協力のもと、タン

微小重力下では、独特で複雑なタンパク質の結晶構造が最適生成されるため、医療の発展につながります。



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ことが多く、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、宇宙実験によってより詳細な構造を明らかにすることで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。

出典：JAXA

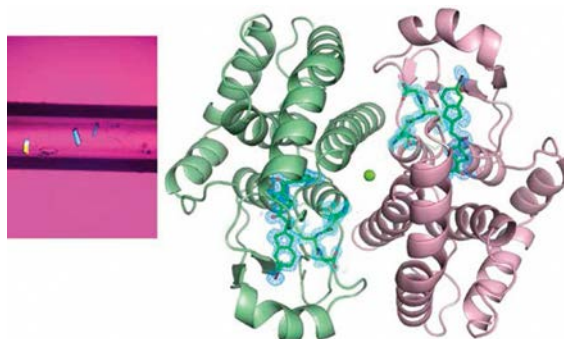
タンパク質試料がプログレス補給船もしくはソユーズ宇宙船に搭載されて宇宙ステーションに打ち上げられます。ドッキング後すぐに試料は JEM に持ち込まれ、タンパク質結晶生成装置（PCRf）に設置され、20℃の安定した温度条件下で約 1.5 カ月程度の間結晶生成が行われます。結晶生成には液拡散法の一つであるカウンターディフュージョン法が使用されます。この方法では、ポリエチレングリコール（PEG）や塩などの結晶化溶液と、ガラスキャピラリーの中に充填されているタンパク質溶液がゲルを通してゆっくりと相互に拡散し、タンパク質溶液内の結晶化溶液濃度が徐々に上昇していきます。最終的に結晶化溶液の濃度がタンパク質結晶生成の条件を満たすと、容器の中でタンパク質が結晶化します。

タンパク質結晶生成実験の主な目的の一つは、新たな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分かれば、そこにぴったりと入る鍵、つまり治療に適した副作用の少ない医薬品を設計することができます。JAXA では宇宙実験を通して、共同研究者とともに難病と言われている病気に対しても積極的に研究を進め、医薬品の開発に貢献することを目指しています。

宇宙で結晶生成に成功したタンパク質の一つは、造血管型プロスタグランジン（PG）D 合成酵素

（H-PGDS）です。H-PGDS は病気治療の鍵となる可能性を秘めています。大阪バイオサイエンス研究所（OBI）の研究チームが、DMD 患者のある種の筋繊維に 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 3,500 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



H-PGDS 阻害薬複合体

宇宙実験によって明らかになった筋ジストロフィー関連のタンパク質の詳細構造

提供：OBI／つくば大学／丸和栄養食品／JAXA

の阻害薬（薬の種となる化学物質）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、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。この特別な実験はタンパク質の構造を理解することで、より良い薬の設計に寄与できる事例です。現在、さらなる研究が進行中です。

宇宙ステーションでの発見が がん治療を進歩させる

がんを宣告された人にとって、手術以外の治療方法として抗がん剤治療などがあります。しかし抗がん剤治療によって体内のがん細胞を撲滅させるには、吐き気、免疫力の低下、髪の毛が抜け落ちる、さらには機能不全などの副作用に耐えなければいけません。患者さんのがん細胞を標的とした治療を行えるのであれば、抗がん剤や放射線の強度を下げることも可能になります。宇宙実験によってこのような画期的な治療が可能になる日も近いかもしれません。

ISSの微小重力環境を利用した実験は、がん治療をさらに進歩させる可能性を秘めています。ISS内で研究されているマイクロカプセル化技術とは、高濃度抗腫瘍薬の組み合わせ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）を作る技術です。特別な針を使ってこのマイクロバルーン、つまりマイクロカプセルをがん患者の腫瘍場所に投与することができれば、がん治療に革命をもたらします。

NASA ジョンソン宇宙センターのデニス・モリソン博士は、マイクロカプセル静電処理システム

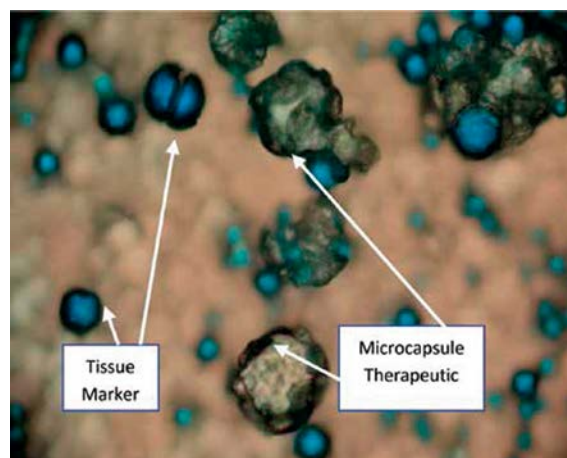
微小重力環境下で作られたマイクロカプセルは、地球上でこのようなマイクロカプセルを作る装置の開発へとつながり、マイクロカプセルによる抗がん治療に貢献することが期待されています。

II（Microencapsulation Electrostatic Processing System-II: MEPS-II）を使ってISSでマイクロカプセル化実験を行いました。地上では密度の違う液体は混ざることなく層を形成するため、マイクロカプセルを作ることはできません。しかし宇宙では微小重力によって地上では混ざることのない水と油という2つの液体を混ぜることができるため、外面が半透過性の薄い膜で覆われ、中に液体が充填した小さな円形のマイクロカプセルを作ることができるのです。

宇宙では、表面張力の影響で液体は球形になります。液体分子は隣同士で同じ力が引き合って縮まり、表面積の小さい球形になります。MEPS-II実験でも液体の表面張力を利用しています。このため液体同士がばらばらにならず、一つの球形を作ることができたのです。地球に持って帰った試料を研究した結果、地球上でも同じマイクロカプセルを作り出すことのできる装置の開発方法が分かりました。

現在、MEPS-IIは米国の食品医薬品局（FDA）のグッド・マニュファクチャリング・プラクティスに則った商業製造が行われており、MEPS技術や方法を使ってマイクロカプセルをより有効に使える新たな方策の開発はすでに始まっています。ISSでの研究はマイクロカプセルに関わる13の特許につながり、さらに2つの特許が審査中です。

地上の実験では、MEPS-II技術で作った抗がん剤



医師が超音波画像診断やCTを見ながらマイクロカプセルを腫瘍部位に直接投薬できるように、オイルに可視化マーカを含めます。半透過の皮膚表面から薬剤はゆっくりと時間をかけて放出されます。

出典：NuVue Therapeutics 社



ISS でがん治療のためのマイクロカプセルを生成する
MEPS フライトハードウェアとモリソン博士

出典：NASA

入りのマイクロカプセルを、ヒトの前立腺がんと動物の肺がんにご直接投与しました。その後、マイクロカプセルを投与した動物に、がん細胞を凍らせて死滅させるという凍結療法も行いました。がん細胞にマイクロカプセルを直接投与した結果、がん細胞の成長を抑えることができることが分かりました。また凍結療法とマイクロカプセルの併用は、凍結療法または局所化学療法のための治療よりも、がん細胞を死滅させる確率が大きいことが分かりました。

モリソン博士のこれまでの地上でのマイクロカプセルの実験は、主に前立腺がんと肺がんを中心として行われてきましたが、現在は FDA からの承認取得を目指して、乳がんをターゲットとした開発を NuVue Therapeutics 社と共同で進めています。がん治療の一つの選択肢としてマイクロカプセルの利用が FDA から認められるには数年かかると思いますが、マイクロカプセル技術を使った薬剤投与に役立つ装置の前臨床試験が、2015 年に行われる予定となっています。

FDA から承認が得られた後は MD アンダーソンがんセンター（ヒューストン）とメイヨーがんセンター（アリゾナ州、スコッツデール）で、ヒトの腫瘍部位に直接抗がん剤を含めたマイクロカプセルを投与する臨床試験が計画されています。動物実験とヒトの前立腺がん、肺がん治療への適用研究で成功を収めているため、モリソン博士は近いうちにマイクロカプセルを使用した乳がん治療を開始できると考えています。

このような技術は、ISS での微小重力環境があった

からこそ生み出されたものです。微小重力が新たながん治療技術の発見をサポートできるように、マイクロカプセルが乳がんや深部のがん治療の有効な手立てとなる日が来るかもしれません。

微小重力環境が様々な治療に役立つ

微小重力が人体に与える影響の地上実験では微小重力を模擬できる技術を開発し、宇宙飛行が人に与えるマイナス要因への対策の適正が判断されてきました。現在 ISS の宇宙飛行士に採られている対策も、この模擬微小重力実験結果を基に講じられています。

模擬微小重力状態を利用した実験は 様々な医療分野に役立ちます。

ロシア生物医学問題研究所 (Institute of Biomedical Problems; IBMP) の研究員たちは、中に常温水を満たし、上部をポリマーで覆ったバスタブによって、地上で微小重力状態を模擬することに成功しました (実用新案 #44505、発明特許 #2441713)。このバスタブには濾過システムや温度制御機能が付いており、被験者は薄手の耐水服を着用してバスタブ内に入るため、ほとんど宙に浮いた状態となります。このようにして重力のない状態を再現して実験した結果、人に現れる変化を観察することができました。

このシステムは、微小重力による生理的変化の観察にも使うことができます。特に微小重力環境に置かれると、一時的に感覚統合障害を発症し、様々な感覚からの情報が中枢神経で処理できなくなり、無意識に行っていた機能を調節できなくなることが分かりました。模擬微小重力状態では、浮腫などある種の心臓血管状態にはプラスの影響をもたらす体液分布の変化など、多くの生理的変化を観察できます。

模擬微小重力状態では薬物を使わずに筋肉の弛緩、免疫力増加、浮腫の除去、血圧正常化を行うことができるため、進行の遅い神経障害の早期診断や、薬剤があまり効かない全身浮腫の治療に役立てることができます。さらに、神経心理学、外傷学、整形外科 (術後のリハビリ)、スポーツ医学、臨床神経生理

学や応用精神心理学などにおけるリハビリにも効果を発揮するかもしれません。

模擬微小重力状態は、この世に生まれて重力の影響に晒される未熟児には、特に効果があります。出産前後にある神経系統がダメージを受け、痙攣・ひきつけ、筋緊張の異常や頭血腫の症状が見られる新生児を模擬微小重力状態に置くのも治療法の一つです。また、免疫システムの障害、ホルモンバランスの悪さ、筋肉疾患、怪我の治療や心臓血管の健康維持にも役立ちます。

ISSのような微小重力を地上で模擬した状態は多くの様々な利用方法が考えられ、今後の研究によってさらに用途は広がっていくでしょう。



模擬微小重力状態（プロトタイプ）

出典：IBMP



病院で使用されている新たな微小重力模擬装置

出典：エアロスペース・メディカルセンター&テクノロジー

食糧と環境

微生物学は、有人宇宙飛行だけではなく、地球上のすべての人々にとっても、極めて重要な学問分野です。私たちの日常生活において、細菌、古細菌、真菌、藻類などの微生物は有害にも有益にも働きます。微生物は食品の腐敗、廃棄物や汚水の処理、栄養塩循環、汚染制御や増大する温室効果ガスに役立つことが分かっており、その研究はバイオテクノロジーの様々な分野に広範囲な効果をもたらしています。

植物と重力の関係を研究した結果、果物、野菜、花の腐敗をもたらすエチレングスを除去する装置が開発されました。そして、その技術を使って空中の細菌、カビ、真菌、ウイルス、臭気などを除去する空気制御機が生まれました。エチレン除去装置は食品保存装置として大型スーパーマーケットや高機能冷蔵庫、そしてインド、サウジアラビア、クウェートなどの国々の僻地に食料品を運搬するトラックに使用されています。ヘルスケア産業もこの技術を病院、手術室、新生児病棟、待合室に導入し、入院患者の健康維持に努めています。

宇宙の温室と地上の実験林を使った植物栽培実験によって、宇宙と地上での人工培地の水の浸透度合いの予測が向上しました。

宇宙での真菌実験を微生物学に役立てる

微生物学は、有人宇宙飛行だけではなく、地球上のすべての人々にとっても、極めて重要な学問分野です。このミクロの世界が、私たちの日常生活に有害にも有益にも働く、細菌、古細菌、真菌、藻類などの微生物を包含していることから、その研究はバイオテクノロジーの様々な分野に広範囲な効果をもたらしています。

微生物は、有害にも有益にも影響を与えますが、それらの多くのプロセスには、真菌の様々な種が関わっています。

ISS での微生物学研究によって、微生物が食品の腐敗、廃棄物や汚水の処理、汚染制御にどのような働きをするかが分かります。

- 微生物は食物を腐敗させますが、廃棄物や汚水の処理、栄養塩の循環をサポートする働きをします。
- 汚染を制御しますが、温室効果ガスを増加させます。

- 病原体となる一方で、抗生物質、浄化剤、殺虫剤に使うことができます。
- 二次材料や建物を汚染する一方で、バイオ燃料や肥料、そして鉱山産業では金属の回収に使用されています。

ある微生物を知ることは他の微生物を知ることになり、その発見は様々な分野に活かされます。

宇宙の微小重力環境と宇宙放射線が真菌の成長にどのような影響を与えるかを調べた Growth and



ESA の真菌宇宙実験の様子（5日目）

出典：CFS-A 科学チーム

Survival of Coloured Fungi in Space-A (CFS-A) 実験によって、生理機能や生存能力が変化することが分かり、常に真菌を持つ宇宙飛行士だけでなく、宇宙船内のシステムや装置に及ぼす影響も解明されつつあります。また、悪い微生物への対応策を考える上でとても有効な情報となったり、宇宙環境が微生物に与える影響を判明したり、そして将来的にはバイオテクノロジー分野への還元が期待されています。

CFS-A 宇宙実験では有機・無機物質を劣化汚染し、宇宙船内に浮遊していると思われる *Ulocladium chartarum* を中心として実験を行いました。他にも *Aspergillus niger*（果物や野菜を汚染するクロカビである一方、クエン酸生成菌でもあります）や *Cladosporium herbarum*（空中に浮遊するカビの中で最も多いのがこの菌で、枯れた植物、あらゆる種類の繊維、ゴム、紙、食品に発生します）、そして *Basipetospora halophile*（高濃度の塩環境で成長する好塩菌です）も使って実験が行われました。



ISS のザーリャロシア実験棟で、運動着を乾かす装置のパネルに繁殖したカビ

出典：NASA

CFS-A 宇宙実験ではまず液体培地中で *Ulocladium chartarum* の菌糸体が増殖することを確認しました。そして、増殖した菌糸体は培養源の表面に胞子形成の微小コロニーを形成することが観察されました。その結果、宇宙船内は *Ulocladium chartarum* やその他の真菌種が増殖に「適した」環境であり、気づかぬうちに表面内部に及んでいるため、宇宙飛行士の健康を害する原因となるだけでなく、船内部品が汚染される可能性があることが分かりました。宇宙船や船内システムの維持を宇宙飛行士に任せなければならず、かつ18カ月以上も食べ物を保存しておかなければならない地球低軌道以遠の長期宇宙ミッションの実現に、この実験結果はとても重要な情報となるでしょう。さらに、船内の排水のリサイクルや植物を利用した生命維持システムの開発にとっても、有益な情報になると考えられます。宇宙環境で真菌種の一生を観察することで、地球上でもこれらの菌類をより有効に使えるようになります。

ISSでの植物栽培を 地球の植物栽培に活かす

地球低軌道以遠の宇宙飛行を将来計画する上で、植物の成長と重力との関係は知っておかなければなりません。長期宇宙飛行中に宇宙飛行士の健康を維持するには軽量かつ高カロリーな食べ物が必要ですが、その保存方法が問題となります。

ウィスコンシン大学マディソン校内にあるウィスコンシンスペース・オートメーション & ロボティクスセンター（Wisconsin Center for Space Automation and Robotics）の Weijia Zhou 博士を中心とした研究員たちは、植物成長のための環境パラメータを自動で調整できる Advanced Astroculture™ (ADVASC) と言われるフライトハードウェアを開発しISSで宇宙実験を行いました。

その結果、微小重力を利用すれば狭い空間や過酷

エチレン除去装置は食品保存装置として、大型スーパーマーケットや僻地に食料品を運搬するトラックに使用されています。

な温度状態、そして病虫害に強い植物を生育できることが分かりました。これまで数回にわたって、シロイヌナズナ（多くの宇宙ミッションで生育実験されている、成長速度が早いアブラナ科の植物）とダイズ植物体を種子から発芽させ、そしてまた次の世代の種子を ADVASC で採取しました。種子から種子へと数世代にわたって使い続けることは宇宙空間では難しいことですが、地球低軌道以遠の有人飛行を実現させるためには絶対に必要なことです。

ユニークな植物栽培チャンバーである ADVASC は、国家安全保障やがん治療薬、生徒の学習ツールとしても役立っています。ADVASC には内部で発生するエチレングスを除去する画期的な装置が装備されているため、植物が長生きします。植物から自然発生する無臭無色のエチレングスによって、果物は腐りやすく、花は枯れやすくなります。宇宙船や地上の温室など閉鎖された生育環境では、炭化水素であるエチレングスはすぐに充満し、植物の成長速度を早め腐らせてしまうので、宇宙だけでなく地球

上でも作物の保存にはエチレングスの除去が欠かせません。このため食料品店や花屋さんは商品の鮮度に関わるエチレングスを除去しなければならないのです。

エチレン除去装置は薄い二酸化チタン製のチューブから空気を吸い出します。チューブの内側に紫外線を当て、植物の成長に欠かせない水と二酸化炭素に分解します。

生鮮食品の鮮度を保つ装置を販売している KES サイエンス & テクノロジー社（ジョージア州ケネソー市）は、ウィスコンシン大学が NASA の資金援助を得て宇宙用に開発したエチレン除去技術のライセンスを取得しました。その後 KES 社はその技術を使った家庭用製品を販売するためアキダホールディングス（フロリダ州ジャクソンビル）とパートナー契約を交わし、現在は AiroCide という名前の家庭用空気清浄機としてアキダ社が販売しています。アキダ社によれば、空中の細菌、カビ、真菌、マイコトキシン、ウイルス、エチレングスのような揮発性有機化合物



ISS の第 5 次長期滞在搭乗員として ADVASC でダイズ植物体の生育実験をする、ペギー・ウィットソン NASA 宇宙飛行士
出典：NASA

や臭気を完全に除去できるのは AiroCide だけで、さらにフィルターも不要であり、またある種の空気清浄により発生するオゾンなどの有害物質も発生しません。

ホールフーズ社のようなスーパーマーケット、デルモンテ社などが運営する配送施設、そして食品処理工場、ワイナリー、蒸留酒製造所、レストラン、大型生花店などは、AiroCide を食品の保存に活用しています。リース・フロラル社では、生花の一時保管場所に AiroCide を設置したところ、運転後 24 時間以内には空中に浮遊するカビが 92% 減となり、細菌は 58% 減になったと報告しています。AiroCide をウォークインクーラーに設置すれば、貯蔵や運搬中の鮮度を保持することができるため、食の安全が高まります。また、生花輸送時にはボトリチス菌の発生が抑えられるので、花の腐敗や廃棄を回避できます。

AiroCide の技術は家庭用の高性能冷蔵庫にも使用されています。冷蔵庫内の空気を 20 分ごとに循環させ、野菜を枯れさせるエチレングスの発生、臭気、ウイルス、細菌の繁殖を抑えることで鮮度を保ち、食品の廃棄を抑えます。

AiroCide はインドやバーレーン、クウェート、カタール、オマーン、サウジアラビア、アラブ首長国連邦などの湾岸諸国でも使用されています。このような国々では農村から都市まで食料品の長距離運搬を余儀なくされるため、冷凍トラックに AiroCide を装備することで鮮度を保持し、腐食を防止できるのです。

ヘルスケアの面では免疫力が低下した人にとってはインフルエンザや結核など病原菌が蔓延し、感染しやすい診察室、手術室、新生児病棟、待合室に AiroCide が導入されています。手術室では AiroCide を天井に装備し、メシチリン耐性黄色ブドウ球菌、バンコマイシン耐性腸球菌などの有害細菌や青カビ、黒カビなどの真菌を空中から除去し、手術室内にいるすべての人を感染から守ります。AiroCide は空中の病原菌を一掃するだけでなく、高性能フィルターの負担を減らし、空気のスムーズな流れを実現します。このように空気清浄機と同じ性質を持つため、新生児病棟にも使用されています。

AiroCide は日々の生活の中で使われています。例えば、ホテルではカビ、白カビ、病原菌や悪臭対策に

使用されています。またオフィスでは、空中を浮遊する微生物によって社員が病気になるれば生産性が低下するため、使用されています。さらに家庭では、カビや真菌の繁殖を抑えたり、ペットのふけやイエダニなどのアレルゲンを除去するのに役立っています。

ISS のロシア実験棟で行われている 植物栽培実験

ISS で行われている生物学実験の目的の一つとして、船内の宇宙飛行士の生命を確実かつ効率的に維持する食糧供給源となる生命維持システムを作り上げることがあります。

長期にわたる惑星探査や惑星基地では、宇宙に滞在している人の呼気や排尿など生命活動で生じる副産物を、物理化学プロセスや生物学的プロセスによって食料、水、酸素に再生する循環再生型の生命維持システムや食料生産能力が必須となってきます。将来的には船内に温室が設置されて、葉物野菜やハーブなどが主に育てられることになるでしょう。しかし、このような計画を実現するためには、宇宙飛行船の中でも地上と同様に植物が育ち続けることが必要です。このため、ロシアは自国の実験棟にラード温室を設置して、2002 年～2011 年の間に 17 回の植物栽培実験を行いました。

ISS に搭載したラード温室では、遺伝子操作したエンドウを種子から種子へと三世代以上にわたって栽培し、宇宙植物実験では初めて、四世代連続して同じ遺伝子を持つ種子を収穫することに成功しました。

ラード温室でエンドウ豆が発芽して次に種子を作るまでの様子は、地上実験で観察された様子とほぼ同じでした。それら植物を遺伝子レベルで比較し、染色体の構造上の変化を解析した結果、四世代間に遺伝的性質の違いは見られませんでした。これにより、宇宙という固有の環境で育てられても、植物の遺伝子発現には影響がないことを実証することができました。

ISS での植物栽培実験によって、宇宙と地上での人工培地の水の浸透度合いの予測が向上しました。

今後の長期宇宙探査を見据えて葉物野菜である水菜の栽培実験を行いました。その結果、ISS内の空気がひどく汚染されている状態でも水菜の生命力は落ちることはありませんでした。しかし遺伝子の発現に変化が見られました。

コムギの宇宙栽培実験も行われ、発芽から次の種子を作るまでの90日間は地上実験と変わらないことが分かりました。地球に帰還した後「宇宙世代」の種子を地上に蒔き育てましたが、成長した植物は地上実験のそれと全く変わりはありませんでした。

ISSに搭載された植物栽培実験装置には、自動で植物を育てることができる最先端技術とソフトウェアが組み込まれており、これらの技術は地上での植物栽培に大きく貢献することが期待されます。ISSの生活の場となる居住区で宇宙飛行士が植物を育てることで得られる精神的、心理的恩恵も調査されています。このようなデータは、地球とはまったく異なる生活環境で生命を維持していくために有望な植物栽培方法を

を知る手がかりとなります。

科学者たちは植物と土壌との関係も調べました。植物は根から水分や養分を吸収したり、呼吸したりして成長しますが、宇宙での成長プロセスは地上とは異なります。地上では重力と表面張力のバランスによって根は土から水を吸い上げ、また土の間の隙間にある空気を吸い上げて呼吸しています。宇宙では土の代わりに小さな孔が無数にあいた人工培地を使います。微小重力環境下では、固体表面に次々と液体の分子が付着し、固体表面を上ろうとする毛細管現象を利用します。隙間に液体が入っていくと、表面張力によって隙間にあった液体に引っ張られて押し上がっていきます。

植物に水をやりすぎると人工培地の表面や隙間は水でいっぱいになり、空気が移動できないため根は呼吸することができなくなります。しかし濡れが適度であれば、根が隙間から水を吸い上げても、表面張力によって水が引っ張られて吸い上げられ、隙間が水で



第5次長期滞在搭乗員として、ラステニア2研究の一環である水菜の栽培実験をする、ロシアのワレリー G. コルズンコマンダー

出典：NASA



第 22 次長期滞在搭乗員として、第 20 次長期滞在中にロシアのサービスモジュールに設置された植物栽培実験装置で育てた水菜を手にする、ロシアのマキシム・スライエフ宇宙飛行士

出典：NASA

いっぱいになってしまうことはなく、根は呼吸することができます。ラーダ温室実験では人工培地の重要性に着目して、人工培地の孔の大きさや素材、構造などを変えて実験を行い、最も効果的な組み合わせを見つけました。

様々な人工培地を使った宇宙実験によって、宇宙と地上での人工培地の水の浸透度合いの予測が向上しました。このため、宇宙での植物栽培だけでなく、地上での温室などの大型植物生産施設での植物栽培に適した培地が分かりました。このような宇宙実験によって分かった水と酸素の動きは科学誌に掲載され、一般の人々も独自の培地組み合わせ手法を漏らすことなく、宇宙における実験結果を知ることができます。ラーダ温室で使われた植物の根を観察するセンサー技術は、最新の実験林観察施設で土壌特性の観察に使用されています。

編集注記：

ISS に搭載されたラーダ温室を使った植物栽培実験には、ロシアだけでなく他国からも多くの人々が関わっています。中でも特に G. E. ビンガム氏（米国ユタ州立大学のスペースダイナミクス研究室）、S. A. ゴスチンスキー氏（M.V. ロモノソフ・モスクワ国立総合大学）そして杉本氏（岡山大学資源植物科学研究所）にご協力いただきました。

心臓の健康と生体リズム

宇宙飛行が心血管システムに与える影響に関する研究を進めることにより、特殊な装置が開発されました。これは地上で使用でき、健康状態のわずかな変化を早期に検出できるものです。これらの技術は現在、自動車の運転手や民間航空機パイロットの健康診査に使用され、危険度評価や事故防止に役立てられています。宇宙飛行士に装着した24時間心電図の解析により、宇宙環境が生体リズムと心臓自律神経の働きに与える影響が解明され、地上生活においてバランスの取れた生体リズムを維持することの推奨につながりました。「規則正しい睡眠の維持」が推奨事項の一つです。ポケットに入る微小な装置を用いて宇宙飛行士の睡眠パターンを調査する研究では、情報を記録し、それを地上に送り、睡眠の質を分析します。この装置の地球モデルは、枕やマットレスの下に設置され、心臓と呼吸に関連する動きを記録します。

健康管理に役立つ 宇宙心臓学

心血管システムは宇宙飛行士が長期の微小重力状態に身体適応するために極めて重要な役割を担っています。宇宙飛行が心血管システムに与える影響を研究するために、2002年からは科学実験「プラス(Puls)」が、2007年から2012年には「ニューモカード(Pneumocard)」が、ISSで定期的に行われ、宇宙心臓学に関する膨大な情報が得られました。その結果、新しい技術が生まれ、身体の機能的限界の評価、ストレスが調節系に与える程度の特特定、疾病発現リスクの評価に利用されています。これら新技術は、ISSにおける心臓学研究のさらなる発展基盤となると同時に、地上のヘルスケア現場で使用できるハード・ソフト複合装置、Ecosan-2007等、類まれな装置の開発基盤にもなっています。

健康状態の早期変化を発見する目的の装置が地上では現在、自動車の運転手と民間航空機パイロットの健康診査に使用されています。

Ecosan-2007は健康状態の最も初期の変化を発見するための多目的装置です。この装置は宇宙医学から

生まれた前疾病診断(prenosological diagnosis: 発病以前に身体の変化を調べること)の原理に基づいて作られています。この装置は現在、自動車の運転手、民間航空機パイロット、そして様々なストレス要因を抱えた被験者の健康診査に使用されています。

105人のバス運転手の健康状態の初期変化を発見するためにEcosan-2007を使用した研究では、被験者の30%が疾病に識別される発病前状態にあり、自動車事故を起こすリスクが非常に高いことが示されました。

民間航空機パイロットに対してEcosan-2007を使用した研究では、長期にわたる、業務関連の慢性的ス



ISSでニューモカードの実験を行うアンドレ・ポリセンコ氏

出典：Roscosmos



Ecosan-2007 装置を使用した実験

出典：IBMP

トレスが疾病のリスクを高めるという結果が示され、特に 50 歳を超えたパイロットに関しては、フライト適性に関する専門的評価時に考慮が必要であることが明らかになりました。

Ecosan-2007 装置はまた、地上での、火星へのフライトシミュレーションの 520 日間実験でも使用されました。この実験では、惑星間宇宙船の与圧模型の中で、「マーティアン（Martian）」の搭乗員の健康診査が毎月 1 回行われ、同時に地球上の 12 の地域におけるボランティア被験者で構成される対照群の検査も行われました。

Ecosan-2007 装置を用いた医学環境研究の長期的遠隔医療は、将来のシステム、個人向け前疾病モニタリングのひな型となることでしょう。そしてそのシステムの基盤にあるのは、宇宙心臓学の方法論なのです。

Ecosan-2007 を用いて地上で行った研究の結果は、地上では臨床の手段となり、宇宙では心臓学関連技術のさらなる発展への基盤ともなりました。宇宙ステーション向けに新たに 2 つの装置が開発され、どちらも 2014 年から実用化されています。その一つはカーディオベクトル（Cadiovektor）という装置で、ニューモカードの進化系となるものです。心筋のエネルギーを正確に測定し、右心室、左心室の動きを診断します。もう一つはコスモカード（Cosmocard）という装置で、Ecosan-2007 で心電図の分散マッピングに使用した方法をさらに発展させたものになります。これにより、宇宙飛行中の様々な段階における心筋のエネルギー代謝特性について非侵襲的研究が可能となることでしょう。将来的には、これらの装置

がヘルスケアの現場でも使用されることが見込まれます。

宇宙と地球上での 生体リズム

人間は朝に目覚めて、夜には眠ります。生体時計がこの規則的な日々のリズムを作り出しています。脳内時計と同様に、私たちの身体のすべての細胞内にも時計が存在します。脳内の時計を「親時計」、細胞内の時計を「末梢時計」と呼びます。この「親時計」と「末梢時計」は自律神経、特に交感神経系を通して互いに交信し、生体バイオリズムを正確に調節しています。

宇宙船の発射や地球への帰還中、効率を最大にするために、深夜や早朝にドッキングや目的地への着陸を行うのは珍しいことではありません。そのような場合、宇宙飛行士は海外旅行での時差の影響と同じような体験をしています。さらに、人は様々な生体スペクトル（90 秒、8 時間、7 日等）も持っており、それらを分析するために「クロノミクス（Chronomics）」と

**ISS の研究により、地上でバランスの
取れた生体リズムを維持することが
推奨されるようになりました。**



宇宙での睡眠—搭乗員は通常寝袋に入って睡眠をとります。

出典：JAXA/NASA



ISSから見た日の出。宇宙ステーションは90分で地球を一周するので、45分に一度日の出、日の入りを見ます。

出典：NASA

いう学問が生まれました。クロノミクスとは「ゲノム科学 (genomics)」や「プロテオミクス」と同様、新たな科学分野を定義する言葉です。クロノミクスの使用なしでは判別できない、時系列そのものの中に隠された兆候を見つけ出すことができます。

クロノム (Chronomes) は (1) 多周波リズム (2) カオスのエレメント (3) エンドポイントとしてのカオスとリズムのトレンド (4) ノイズ (あるいは時点では確定していない変数) で構成される時間構造です。クロノミクスでは生体と近くの環境との相互作用、そして生体と遠くの環境との相互作用という複雑な関係を解き明かすことができます。ISSは90分で地球の周りを1周し、搭乗する宇宙飛行士は45分に1度、日の出と日没を見ます。重力の影響が少ない環境と45分毎の昼夜サイクルによって生じる極度の日照不足が人類の健康に与える影響は十分には解明されていません。

微小重力と強度の日照不足状態の宇宙環境における生活では生体リズムが不規則になり、不眠症になるリスクが高まる可能性があります。宇宙環境が生体リズムと心臓自律神経の働きに与える影響を明らかにするため、長期間宇宙飛行を行う飛行士に装着した24時間心電図の解析が行われました。24時間心電図を記録するため、小型で軽量のホルターモニターを使用し、飛行前 (1回)、飛行中 (3回)、飛行後 (1回) の記録を取りました。

軌道上で記録された心電図データはJEMから筑波宇宙センターに伝送され、時間変域および周波変域の解析が行われました。その結果、宇宙飛行士の生体リズムはISS到着直後には乱れが認められたものの、長

期滞在開始から5カ月後までには回復していることが分かりました。また、飛行前、飛行後の記録を比較したところ、飛行士の生体リズムはうまく調節されていることも分かりました。

このことから、宇宙飛行士は宇宙船のドッキング後には、長期飛行中の時差の影響を受けるものの、ISSでの規則正しい日々の搭乗スケジュールのおかげで、生体リズムを正常に調整できるものと推察されます。

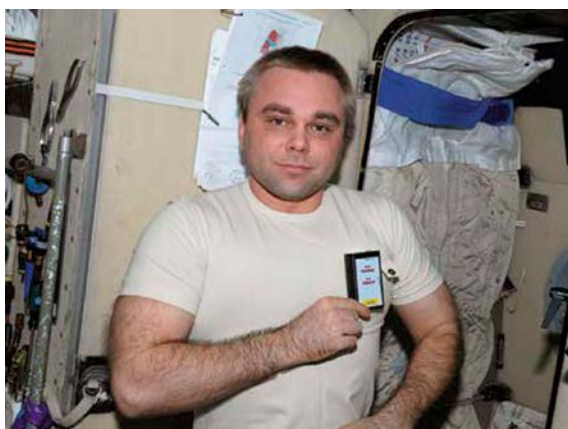
人間は生体リズムを容易に損なわせてしまう環境の中で生活しています。インターネットやスマートフォンといった通信技術、飛行機等の運輸技術の進化によって、国境や時差が曖昧になってきています。生体リズムの乱れが、高血圧、肥満、骨粗しょう症、不眠症、うつ病、若年での老化現象、がん等、病気の一因になるということが報告されています。

生体リズムを正常に保つための三大要素は、朝の日照、夜に分泌されるメラトニン、バランスの取れた食生活 (特に朝食) です。最も重要なのは、午前中に明るい陽射しを浴び、夜は完全な暗闇の中で眠ることです。宇宙飛行士が長期の宇宙飛行中に生体リズムを正常に保つために行っている生活の方法は、地球に住む私たちにとっても参考となります。正常な生体リズムを保つために、特に次の6つを推奨します。(1) 日々の生活を規則正しくすること、(2) 睡眠と食事の時間を規則正しくすること、(3) 朝、コーヒーか緑茶を飲むこと、(4) 日中も夜間も適切な温度を維持すること、(5) 運動をしたり、散歩をした後に着替えをするなど、末梢時計の働きをサポートする活動を行うこと、(6) 時々時刻を確認すること。

宇宙で使用されている 革新的な装置が地球上での 安らかな眠りを促進します

宇宙探索初期の頃から、微小重力での夜の睡眠研究には大きな関心が寄せられてきました。宇宙飛行士

枕やマットレスの下に設置された小型装置が、心臓と呼吸に関連した動きを記録します。



搭乗員は就寝前にソノカード装置をセットします。

出典：Roscosmos

に必須である高い心理機能と良い身体状態を維持するには、質の良い正常な睡眠が基本であるのは確かです。しかし、一般の睡眠研究に使用される臨床方法（睡眠ポリグラフィー）では多くのセンサーの使用が必要となり、正常な眠りを妨げ、時間がかかり、宇宙飛行研究としてはあまりにも複雑です。

従ってこれまでは、長期的微小重力状態での宇宙飛行士の睡眠状態に関するデータは極めて限られていました。

2007年、ISSのロシア棟で新たな装置、ソノカード（Sonocard）が開発されました。トランプ一組分ほどの大きさの小型装置で、睡眠研究が可能となったのです。飛行士は就寝前、Tシャツの左胸のポケットに装置を入れます。するとセンサーが心臓の動きに関連する胸壁の微細な振動を感知します。夜間に記録された情報は、起床時に地上に送られ分析されます。

ソノカードは身体に触れずに身体信号を記録することができ、使用時に電極や特別なセンサーを体に装着する必要がありません。その代わりに、センサーや加速度計がキャッチした振動のすべてを記録することで、データを取得します。加えて心拍数、呼吸数、動作、心臓のリズムに関する変数も得られます。この方法は身体の基礎的な状態を評価するために医学・生理学の様々な分野で実用化されています。航空医学はこの方法を応用している先駆けの分野の一つです。宇宙飛行士の飛行中の機能状態を評価するために、今日までにこの方法の使用に関する多くの

経験が蓄積されてきました。就寝中に得られたデータを解析する際、就寝後1時間と起床前1時間の交感神経と副交感神経の切り替えの一連の流れが明らかになりました。これにより、身体は睡眠中、どの程度休息できているのか、前日に消耗した機能が睡眠によってどの程度回復できるのか、評価することが可能になります。

ソノカードを利用した実験は2週間に一度、宇宙ステーションに滞在するロシア人宇宙飛行士全員に対して行われています。過去5年で、微小重力状態睡眠に関する大量の情報が得られました。通常の飛行プログラムでは科学実験を行う際、作業量や心的ストレスといった影響因子が常に存在します。ソノカードの利用で、こうした因子の影響を受けない実験結果について初めて議論できるようになったのです。飛行中の質の良い睡眠に関する指数として、この実験に参加した22人すべての全飛行中の睡眠の質の平均は77.4%であることが示されました。

宇宙ステーション用に開発されたソノカードによる非接触の睡眠研究方法は、地上でも実用化されています。地上モデルは、皿型のセンサーで、枕やマットレスの下に設置され、心臓と呼吸に関連する人体の動きを記録します。夜間に記録された信号はコンピューターにダウンロードされ、宇宙研究で既に立証されている方法を用いて解析されます。

カーディオソーン-3（Cardioson-3）という新型のハード・ソフト両用装置に関する地上での一連の実験が行われました。これには火星への飛行を模した520日間もの長期にわたる実験が含まれています。宇宙飛行士の睡眠中の心身機能状態研究という貴重な経験は、さ



カーディオソーン-3 システムーソノカード宇宙装置の地上版

出典：IBMP

らなる発展として2つの方向に向かっていきます。一つは、宇宙での睡眠を評価するためのより効果的な新しい装置を開発し、搭乗員全員が睡眠の調節を医学的にできるようにすること、もう一つは、地上の公衆衛生の現場で睡眠の質を調整することができる同様の装置を開発することです。

バランス感覚や運動能力の改善

微小重力状態における運動障害を改善するために開発された新技術が、脳性麻痺、脳卒中、脊髄損傷、平衡障害、および加齢により運動能力が低下した患者の治療に役立てられています。飛行前と飛行後の宇宙飛行士の眼球運動反応を研究することで、浮遊感、眩暈、平衡感覚の異常を訴える患者に対してより早く、より安価で診断、治療ができるようになります。患者や宇宙飛行士が浮遊感、眩暈、平衡感覚異常を抑える能力を獲得するための訓練として、コンピューター処理された非薬理的手法が特許を得て用いられており、好ましくない知覚や感覚運動性の反応に関する予防、改善に役立っています。

ISSに滞在する宇宙飛行士の身体運動に関する情報を集めたハードウェア/ソフトウェアシステムは運動イメージプロトコルの開発につながり、ローマの病院の研究施設では、大人の脳卒中患者や小児脳性麻痺患者の治療に使用されています。また、ISSでの別の身体運動研究は、重力の負荷がかからないことで生じるマイナス面を補う宇宙飛行服の開発につながりました。ロシアでは脳性麻痺の小児に対し、総合的で薬に頼らない治療としてこの服が臨床応用されています。またこの服は脳卒中や脳の外傷に対する治療としても臨床使用されています。

微小重力をシミュレートし、 地上での平衡感覚を改善する新技術

ISS等、宇宙飛行の機会創出によって、地球ベースの微小重力モデルの開発が促進され、重力が取り除かれることによって起こる変化に関する研究がスタートしました。ISS建設から10年以上が経ち、ロシア生物医学問題研究所（IBMP）によって、大量のデータ、情報、事実が編纂されました。これにより、重力関連の事象の発現や現象を説明する段階から、身体の様々なシステムの中で重力メカニズムが果たす役割や、重力が作用する部位に関する理論を確立する段階への移行が可能となりました。

新しい知識の開発における進化の一例は、直立姿勢を維持するために重要な役割を担う両足の踵にある感覚組織、ヴァターパッチーニ少球（Vater-Paccini corpuscles）の発見です。

この受容体が発見されたのは19世紀のことです

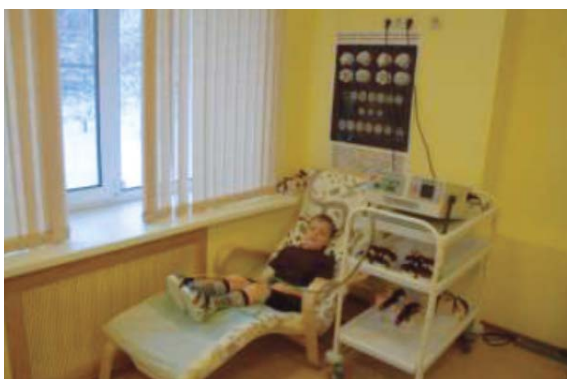
運動障害改善用装置は、脳性麻痺、脳卒中、脊髄損傷、平衡障害、および加齢により運動能力が低下した患者の治療に使用されています。

が、引力の受容体としての役割が明らかになったのはごく最近のことです。宇宙飛行士が長期の宇宙飛行中に平衡感覚を正常に保つことを目的に地上で開発さ



負荷軽減補正器

出典：IBMP



小児に使用する負荷軽減補正器

出典：航空宇宙医療技術センター

れたシミュレーション研究が功を奏した結果です。これにより、中枢神経機能障害、外傷、平衡障害、および、加齢による運動能力の低下の改善に役立つ新たな技術が開発されました。

IBMP における地上ベースの研究では、踵の上に体重が乗ることと、体重が乗った後に脳と脊髄の動きに関連して運動が安定していくプロセスとの間には特定の安定性パターンがあることが明らかになりました。ここで得られた知識により、足の裏に装着する「人工的な」支持用の刺激を用いることで、感覚運動障害の発症を防ぐことができるかもしれないということが分かりました。この研究結果は「負荷軽減補正器 (support unloading compensator)」という新たな技術の開発につながりました。これは人間の自然歩行時における支持区域を刺激する装置です。

この装置は、姿勢維持のための受容体や足が歩行中に受ける身体パラメータを刺激することができる、という点で特徴的です。ここで言う身体パラメータとは、圧力の大きさ、時間的特性、衝撃の持続時間、踵の刺激と中足骨支え帯との間隔、右足と左足との刺激の間隔を指します。

しかし、筋緊張障害と運動の調整障害は微小重力以外の問題にも関連しています。中枢神経疾患 (CNS)、様々な種類の脳の外傷、加齢に伴う長期的負荷の軽減、特定の職業における特殊な環境等も、調節障害の発生に関与していることがあります。

これらのデータに基づいて、IBMP の科学者は民間企業と共同で運動障害矯正装置を開発しようとしています。微小重力状況に対応するために開発した方法

を、脳性麻痺、脳卒中、脳や脊髄の外傷等、重度の運動障害患者の治療やリハビリの現場で実用化させる狙いです。

2005 年から 2011 年の間に航空宇宙医療センター (the Center for Aerospace Medicine) は負荷軽減補正器の臨床版であるコルビット (Korvit) を開発し、すべての稟議書とライセンスを取得しました。

現在この技術は脳卒中の急性期に使用されており、従来の治療方法よりも運動障害の程度の軽減、運動機能の早期回復に優れた結果を出しています。

特に興味深いのは、脳卒中の発症後 1 時間以内にコルビットを使用した場合、不全麻痺による四肢筋痙攣の発現を防止できるということに関するデータです。

小児の腓骨骨折の外科手術後、早期回復段階で支持刺激治療を用いた場合、手術後 72 時間で、浮腫の軽減が 17 ~ 20% に認められ、足首関節の可動域の増大が 45% に認められました。

このような治療を受けなかった小児には 6 日から 8 日にわたって浮腫が生じ、そのために損傷した手足の動きが妨げられ、回復が遅れます。

脳性麻痺患者の総合リハビリにコルビットを使用すると、特に直立状態での伸筋力と屈筋力のバランスの回復が最大限になり、立ったり歩いたりする機能が正常になり、あらゆる動きを調合する能力が高まります。

宇宙における神経前庭系の健康状態を評価するための新しい方法が、地上の人にも役立ちます

重力変化にどのように対応するか、というのは、人類の宇宙探索開始以来、医学が直面してきた最も重大な問題の一つです。微小重力状態に到達直後（最初の 3 日から 7 日間）と地球への帰還直後（着地からの 3 日から 5 日間）は、全搭乗員が様々な好ましくない症状や感覚障害（方位が分からなくなる、浮遊感、眩暈、目に見える物体に焦点を合わせたりそれを目で追ったりできなくなる等）を呈します。それらは不快感があり、宇宙酔いを伴うこともあります。

微小重力状態では、内耳に装着した前庭装置から得られる情報と、他の感覚システムから得られる情報とは調整されません。その結果、正常な感覚連鎖が断たれ、脳は飛行開始直後に入ってくる信号を正確に理解することができず、宇宙酔いを起こしてしまうので

眼球運動反応の研究が、浮遊感、眩暈、平衡感覚異常に対する、より迅速でより安価な治療法の開発につながります。

す。これは搭乗員の仕事能力の質の低下、特に視覚的追跡力の正確さの低下につながります。ドッキングの失敗、構造組立における失敗、軌道上での様々な手動操作の失敗は、宇宙空間の動体を目で追う機能に不具合が生じていることが原因であるとも大いに考えられます。

サリュート 6、サリュート 7、ミールでの、搭乗員の宇宙飛行前、飛行中、飛行後の一連の科学実験で蓄積されたデータの解析により、IBMP はオクロスティム CM パーチャルアンドセンソモーター (OculoStim-CM, Virtual and Sensomotor) というコンピューター

システムを使用した手法を開発し、前庭機能、感覚器官間の相互作用、空間定位、ビジュアルトラッキングの状態に関して正確な評価を可能にしました (ロシア連邦特許 2307575 号 10/10/2007, Kornilova L. N. et al.)。

この方法の基礎となっているのは、眼球運動反応の評価です。これはビジュアルトラッキング実験で、周辺視覚を混乱させる目的で、スクリーン上の汚れのない (黒色) 部位に映した指標 (刺激) と、背景に視覚障害を引き起こすもの (混乱部位として縦横に移動する楕円が現れます) を追加したものの両方を使用しています。

眼球運動システムは、神経システムの異なる階層に位置する複雑な神経刺激伝達のメカニズムによって制御されています。特殊な検査バッテリーの使用によって、様々な形で生じる眼球運動の混乱の評価が可能となり、そこに眼球運動の機序に関する既知の知識を考え合わせることで、障害の原因を発見することが



ISS でバーチャルを用いた宇宙実験 (2013)

出典 : Roscosmos



オクロスティムハードウェア / ソフトウェアシステムの
応用に関する臨床実験

出典：IBMP

できます。

この方法は2013年のバーチャル実験、および2015年のスレズニア（追跡）実験において、ISSの搭乗員の飛行前、飛行後の臨床および生理機能検査に使用されました。また、2001年のセンサリーアダプション（Sensory Adaptation）実験、および2009年のゲイズスパイン（Gaze-Spine）実験の期間中に地球に帰還した宇宙飛行士もこの研究の対象となりました。

宇宙飛行用に開発されたこの手法とハード / ソフトシステムは、コンピューター化方式の有効性を実証するものとなり、前庭とそれに関連する感覚系（主に視覚系）の状態の診断、そして地上での静的および動的空間定位の評価にこのハード、ソフトシステムが使用できることを明らかにしました。

このシステムは微小重力状態（イマージョン、ベッドレスト）のシミュレーション実験、一流スポーツ選手の検査（体操競技、フィギュアスケート、スピードスケート、標的射撃等高い身体能力が要求される競技）、眩暈や平衡感覚異常を訴える患者の診断、薬剤（ベタヒスチン剤：Betaver と Bataserk）の効果の評価において特に有用です。このオクロスティム CM システムは、浮遊感、眩暈、平衡感覚異常を訴える200人の患者を対象とした臨床試験の認可を得ました。この臨床試験には I.M. スケノブモスクワ州立第一医大、頭痛と栄養障害治療を専門とするアレクサンダーバインクリニックアカデミー、耳鼻咽喉科学連邦科学臨床センターの各神経疾患部門の専門家が参加してい

ます。このような臨床応用により、前庭障害の型を特定するための診断基準を創設することが可能となり、初診での眩暈と平衡感覚異常の鑑別診断が従来の検査方法と比較して、より迅速でより安価に行えるようになります。

宇宙研究が、薬に頼らない治療と、 浮遊感、眩暈、平衡感覚異常の 防止に役立ちます

宇宙飛行の開始により、ISSのような微小重力環境では宇宙酔いが起こり、搭乗員には眩暈や不安定感、目で物の動きを追うことができなくなる等の感覚異常が生じることが分かりました。そのようなことが起こると搭乗員の健康に悪影響が生じたり、飛行中の作業能力が低下することも考えられます。

患者が浮遊感、眩暈、平衡感覚異常を抑えることのできる訓練方法が宇宙研究から特許技術として生まれました。

現在、宇宙酔いの標準治療は投薬療法です。しかし、投薬には任務を遂行する上でいくつもの不都合な副作用が生じる可能性があります。従って、宇宙酔いの防止および治療のための薬に頼らない方法を開発する必要性があるのは明白でした。

登山家、アスリート、曲芸師、バレエダンサー等、極限状態を体験する職業の人たちは、強い加速が掛かった時に好ましくない前庭反応を抑える「固視反射」という能力を持っていることがよく知られています。しかし、一般の前庭障害患者に対して同じ手法で治療しようとしてもうまくいきませんでした。上記の職業の人たちは前庭が特殊な状況に曝される機会が一般の人とは異なるからです。そこで、生物医学研究所の前庭生理学研究室の専門家たちは「好ましくない知覚と感覚運動性の反応に関する予防と矯正のためのコンピューター化方式」を開発し、特許を取得しました（ロシア連邦特許2301622号06/27/2007, Kornilova L. N. et al.）。この方式が革新的なのは、疾病の種類（前庭障害の型）に応じて患者を訓練する独自の方法



視覚手段を用いた訓練（前庭生理学研究室:Laboratory of Vestibular Physiology, 2013）

出典：IBMP

を採用し、最も効果的な手段（視覚訓練、前庭訓練、その両方）を選んでバイオフィードバック療法を行っている点です。

訓練では、各患者の浮遊感、眩暈、平衡感覚異常の本質と各自の疾病（前庭障害の型）に応じて一連のトレーニングセッションが行われ、この新しい方式で目と頭の動きを記録するコンピューターを用いたバイオフィードバック療法で独自の固視反射能力を養います。

訓練は好ましくない反応（浮遊感、眩暈、平衡感覚異常）が消失、あるいは有意に減少するまで続けられます。訓練の効果は臨床神経学的フォローアップ検査で評価されます。これには前庭機能とビジュアルトラッキング機能の状態を総合的に判定するコンピューターが使用されます（ロシア連邦特許 2307575 号 10/10/07, Kornilova L. N. et al.）。患者が想像上の標的に視線を固定している間に視覚と前庭に刺激を与え、（完全に、あるいは部分的に）好ましくない反応を試験的に誘発し、これをどれだけ抑えることができるかが訓練の成功の指標となります。

浮遊感、眩暈、平衡感覚異常の治療と予防のための非薬理的コンピューター方式は I.M. スケノブモスクワ州立第一医大、頭痛と栄養障害治療を専門とするアレクサンダーベインクリニクアカデミー、耳鼻咽喉科学連邦科学臨床センターの各神経疾患部門の専門家と協力して臨床試験が行われています。

この臨床試験の結果により、患者は実在の標的、お

よび想像上の標的に対して視線を合わせて固定し、浮遊感、眩暈、眼震、平衡感覚異常を（完全に、あるいは部分的に）抑制できることが実証されました。訓練の成果の度合いは、障害の種類（前庭障害の型）だけではなく、選択する訓練の種類によっても変わることでも示されました。末梢前庭障害の患者には、視覚訓練が、中心前庭障害には前庭方式が、心因性前庭障害には混合方式が適しています。

アンケート調査の分析の結果、心因性前庭障害の被験者全員、末梢前庭障害被験者の 91%、中心前庭障害被験者の 80% が「日常生活でふらつきが上手く抑えられている」、また「日常生活への適応に改善が見られる」と回答しました。

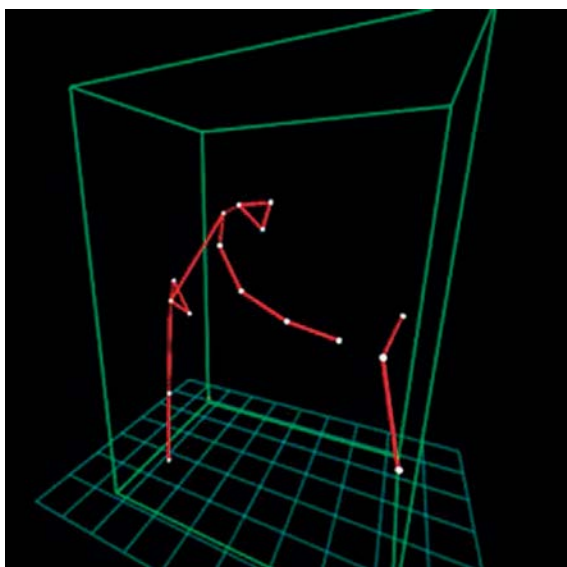
非薬理的コンピューター方式が有効であることから、この方式が ISS 搭乗員の飛行前訓練、そして宇宙飛行中の宇宙酔いの症状抑制の両方に使用される可能性が高まってきました。飛行中の好ましくない反応の抑制に固視反射を用いる方法は、2013 年より搭乗員に使用されています。

微小重力運動のメカニズムを地上で応用

地球の重力から離れると、初めのうちは宇宙飛行士の感覚運動の協調が弱まります。微小重力下で宇宙飛行士がどのように動きを覚え、対象物と関わっていくのかを理解すると、ミッションの安全性を高めることができます。また、脳損傷や病気をもつ人々は、宇宙飛行士が経験する協調の困難さの多くを経験するため、地球にいる人間にも恩恵があります。

カイザーイタリア社がイタリア宇宙機関（ASI）のために開発したエリート S2（The ELaboratore Immagini TElevisive-Space2; ELITE-S2）は、ISS の宇宙飛行士の体の動きに関する情報を、極めて正確に収集するハードウェアおよびソフトウェアのシステムです。エリート S2 を用いて、軌道伝達媒体におけ

ローマの病院の研究環境で用いられている運動イメージプロトコルは、成人脳卒中患者と子供の脳性麻痺の治療に使用されています。



ISS での実験において、エリート S2 に記録された、手足と体の動き

出典：ASI

る運動実験（MOVE）および微小重力状態での重力に影響された物体運動イメージ実験（IMAGINE）という2つの研究が行われてきました。MOVE では腕の長さより離れて置かれた固定対象物に立ったまま手を伸ばし触ります。この動作は、地上では、胴体の姿勢や足の筋肉を調整しない限り、バランスが不安定になる典型的なものです。地上のほとんどの健康な人はしっかりとした動きをしますが、パーキンソン病などの患者にはそれができません。興味深いことに、宇宙飛行士は飛行の初めの頃、地上では典型的な動作でも宇宙では必要とされない姿勢の調整を行います。彼らは飛行が進むにつれ、被験者間のばらつきはあるものの、筋肉の不必要な活性化を減らすことを学んでいます。

IMAGINE では、移動物体と交流する能力をテストしました。人間は幼少期から、世界がどのように機能しているか暗黙の知識を持ち、それによって環境に適切に反応することができます。特に、動いている物体への重力効果を正確に感知することで、落下物を瞬時に捕まえることができます。しかし、脳卒中などにより脳障害を抱えた患者にはその能力が欠如しています。エリート S2 の前世代を使用した以前の実験では、スペースシャトルの2週間の飛行中、宇宙飛行士の運動反応は重力加速度に機敏に同調していました

(http://science1.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/18mar_playingcatch/)。

この研究では、天井から「下向きに」投げられたボールを捕るよう指示された宇宙飛行士は、実際には存在していない重力効果を予測して、手足の筋肉を早く収縮させました。その後 IMAGINE 研究において、宇宙飛行士は、想像上のボールを天井方向に投げ、それが手に戻ってくる時に捕るよう指示されました。ボールの動きは単に想像上のものでしたが、被験者はボールを投げる際に伴う実際の腕の動きを、とてもリアルに表現しました。

別ブロックの試験では、地上の重力の影響を受けている（1g）際のボールの動きと、重力の影響を受けていない（0g）際のボールの動きをイメージするよう飛行士は指示されました。さらに、試験ごとに投げる時の運動量を変化させるよう指示されました。驚くべきことに、宇宙飛行士たち（新しい飛行士も含む）は、ミッションに行く前でも、地上でそれなりに 0g 状態を再現できることが分かりました。もちろん宇宙滞在ミッションを経た後は、そのパフォーマンスは向上しました。それゆえ、2週間宇宙に滞在した後でさえ地上の重力を予想する能力を維持し、重力に合わせて自動反応させる運動制御システムと、まるでニュートンの法則を一般的な暗黙知として生まれながらに持っているかのように、地上の 0g 状態での運動をイメージできる認知システムとの間には、著しい乖離があります。

この研究結果は、宇宙飛行士の健康を保つための情報になるだけでなく、脳損傷を受けた人々をサポートできる新しいリハビリ計画につながるものです。実際に、精神的イメージは障害のある患者の感覚運動の協調をリハビリするための強力なツールとなっています。これらの運動イメージプロトコルは、現在、ローマにあるサンタルチア基金神経運動リハビリテーション病院の研究環境で用いられています。

特に、イメージトレーニングは、成人の脳卒中患者や脳性麻痺の子供に用いられています。トレーニングプロトコルには、医師または医療従事スタッフの監督下でのコンピュータディスプレイのプレゼンテーションが含まれます。心的イメージのトレーニングは通常、従来型の理学療法と組み合わせて数週間行われます。運動能力の改善には主として2つの要因が挙げら

れます。1つ目は、動作がほとんど可能ではないあるいは不可能な時でも、精神的訓練により運動プログラムが活発に保たれること、そして2つ目は、そのことにより体への負担を増やすことなく訓練の長さを延ばすことができる、ということです。現在行われているこの調査には、病気のどの段階で精神的訓練を行うと最も効果的かという見極め、そしてイメージトレーニングが与える長期的効果の判断など、未解決の問題も残されています。

運動障害のリハビリに用いられる 宇宙技術

人類最初の宇宙飛行から50年以上が経過しました。飛行の長さが飛躍的に増加し、軌道上活動量が増えるにつれ、宇宙で健康的な骨や筋肉を保つ必要性はより重要になってきました。骨や筋肉を健康に保つには、地球の重力のあるところで日常活動を行うことに依存しています。

宇宙では、搭乗員の時間や機体のサイズなどの要因を含む制約ゆえに、体操など骨や筋肉を維持するための地球ベースの従来型の方法では困難です。

これらの困難を乗り越えるため、IBMPの専門家と、その商業パートナーであるZvezda社が、地球の重力がかかった状態で体が通常経験する荷重の欠乏を補うために、身長に見合う荷重を加える軸荷重（体軸方向の荷重）ペンギンスーツを開発しました。宇宙でのスーツの最初のテストは1971年にサリュート1ステーションに乗り込んで行われました。今では、ISSでロシアの健康維持対策システムにおける正規の構成要素として、ペンギンスーツは積極的に使用されています。

1990年代初めから、IBMP イネッサ・コズロフスカヤ博士とそのチームは、この軸荷重スーツを臨床リハビリ訓練に取り入れました。ペンギンスーツの臨床版であるアデリー（Adeli）は、クセニヤ・セミョーノワ

博士の指導の下、ロシア科学アカデミー小児研究所で開発され、脳性麻痺の子供たちの総合的治療に使用されています。この治療方法は、筋肉の感覚情報の流れを矯正して身体機能の結びつきを回復させることに重点を置くことで、負荷のかかった組織の健康を改善します。これにより、重い運動障害を持つ脳性麻痺の子供を含め、歩行パターンの修正やバランスの安定化を比較的短期間のうちに実現できます。アデリースーツは1992年に認可され、それ以来開発が続けられてきました。これは、脳性麻痺の子供のリハビリをするロシアの診療所で、最も広く使用されている方法の一つです。

脳卒中や脳損傷の運動リハビリを受けている患者のために、新たな方法も開発されてきました。これらの病気の最も頻繁に見られる後遺症である運動機能の麻痺や不全麻痺化は、通常それらの患者の運動や



小児科のリハビリで使用するアデリー（Adeli）治療用スーツ

出典：航空宇宙医療技術センター、ロシア

治療用スーツは、ロシアで脳性麻痺の子供および脳卒中や脳損傷のある患者に対する、薬を使わない総合的治療に使用されています。



患者のリハビリに使用されるリージェントスーツ

出典：航空宇宙医療技術センター、ロシア

社会活動を著しく制限し、身体の機能を低下させリハビリを妨げるものとなります。

これらの患者のリハビリの複雑性および重要性を考え、ペンギンスーツの臨床強化版「リージェントスーツ」(Regent suit)が開発されました。リージェントスーツを身に着けた時の複合効果は、骨格構造への軸荷重の増加および運動中の筋肉の負荷抵抗に基づいており、病的姿勢の進行抑制や垂直姿勢および歩行制御に重要な、神経系への感覚情報の増加をもたらします。リージェントスーツは、脳卒中や脳損傷後に運動障害を負った患者のリハビリ初期段階で使用するのが効果的です。

中枢神経系に限定的な損傷を受け運動障害を負った患者のリハビリにおけるリージェントスーツの有効性の臨床研究は、セルゲイ・シュワルコフ博士の指導の下、ロシア連邦生物医学局(FMBA)第83病院にて、およびヴィクトル・シュクロフスキー博士の指導の下、言語病理学神経リハビリテーションセンター

にて、何百人もの脳卒中および脳損傷患者も参加し、急性試験および慢性試験の形で実施されました。脳卒中後の片側不全麻痺患者にスーツを使用する有効性の評価が、リュドミラ・チェルニコワ博士の指導の下、神経学科学センターで行われました。

これらの研究は、スーツの使用により下腿筋肉の不全麻痺や痙性の著しい軽減、下肢末端部の感覚の改善、および全体的に運動機能の改善が見られることを示しています。同時に、高度な精神機能への積極的な影響、つまり発話特徴の改善、表現語彙の増加、および対象物の認識能力の改善が見られました。

リージェントスーツの使用は、運動障害の治療としては総合的な、薬に頼らないアプローチです。この方法は、自然な歩行機能と密接に関係しており、姿勢や空間定位に関わるすべての筋肉を活性化させ、かつ大変安全なものです。これは治療期間の短縮を可能にし、入院患者および通院患者にも使用でき、各患者特有の神経系の欠損や身体機能などに基づいたリハビリプログラム作成のために、広範囲に調整することができます。

今日では、リージェントスーツはロシア国内外43の医療機関で使用されており、アデリースーツやリージェントスーツの使用に関連した多数の観察および臨床研究結果が出ています。

編集者注：

米国やイスラエルを中心とした小規模研究においては、アデリースーツセラピーによる改善と従来型の理学療法による改善とを区別することができませんでした。そのため、このセラピーは北米ではまだ適用されていません。

ロシア・カムチャッカ半島、クリュチェフスカヤ火山からの噴煙の高度斜位像。この画像が撮られた2013年11月16日、国際宇宙ステーションは、対地位置南西1,500km以上の地点に位置していました。

出典：NASA



地球観測と 災害対応

国際宇宙ステーション（ISS）は、「地球全体の観測・診断拠点」です。ここでは、私たちの故郷であるこの惑星で起きている環境問題を理解して解決することを目的とする、国際的な地球観測を推進しています。多種多様な地球観測装置は、宇宙ステーションの船外曝露設備やデスティニー実験棟内にある窓観測研究設備（Window Observational Research Facility; WORF）に取り付けることができます。搭乗員も、リアルタイムの地球観測や、手で持って操作できるデジタルカメラを使用した「空飛ぶ」データ収集において、他に類を見ない能力を発揮します。また宇宙飛行士は、宇宙ステーションの自動地球観測システムのプログラミングを行う地上のスタッフに情報提供することもあります。現在複数の装置を使い、ISSからのデータ収集を行っています。それに加えて、いくつかの装置では、パートナー国、NASA、学術機関、企業などの研究者による開発、あるいは提案に基づくリモートセンシングシステムを用いてデータ収集のミッションを完了しました。ISSにとっての基礎である、現行の国際パートナーシップは、地球観測活動において世界中の人々に利益をもたらすデータ共有と国際協調を可能にしています。宇宙ステーションは、搭乗員操作および自動地球観測装置を独自に組み合わせた、地球の気象、環境変化、および自然災害に関するデータ収集によって、人類に貢献しています。



地球環境観測

宇宙ステーションでは、他には類を見ない素晴らしい観測地点から、手動装置および自動装置を使用した、地球のエコシステムや大気の観測が可能です。宇宙ステーションのサイズ、パワー、データ転送能力によって、地球の地表や沿岸海洋の研究のための光学マルチスペクトルおよびハイパースペクトル画像システム、さらには海面風や大気エアロゾル移動パターンの調査に有効なライダーなど、多種多様な高精度のセンサーシステムが利用できます。宇宙飛行士が手持ちで操作できるデジタルカメラには、地球表面の詳細な画像や大気の完全なパノラマビューなどを撮ることのできる追加的な撮影能力が備わっています。特に火山爆発や地震など、想定外の自然事象が生じた際に、このような柔軟性は無人宇宙機のセンサーに勝っているといえます。

宇宙ステーションからの 地球のリモートセンシング

新たな設備や高精度の内部・外部リモートセンシングシステムの設置により、ISS は、地球のリモートセンシングのための洗練されたプラットフォームへと変わりました。また、搭乗員がいるという点でも唯一のプラットフォームであり、特に災害対応活動のためにデータを収集する際に、リモートセンシングの独自の機会や有利性を持っています。では、地球のリモートセンシングに関し、宇宙ステーションではできて、人工衛星にできないものは何でしょうか。

宇宙ステーションによって、地球観測
や自然災害に対応する能力は著しく
改善しています。

多様な日照条件での画像

通常、地球観測プラットフォームは、極軌道のうちの太陽同期軌道や太陽同期準回帰軌道、つまり地表の同地点の上空を一日のほぼ同じ時間に通過するように設計された軌道に乗せられます。

一方、ISS は、従来型の地球観測プラットフォームの多くとは異なり、太陽非同期の低傾斜角軌道で地球を周回しています。

これは、ISS が北緯 52 度から南緯 52 度の間で太陽の位置とは関係なく上空を通過するので、同じ観測地点の時刻（地方時）、つまりその地点の日照条件が観

測の度に異なるということです。

応答データ収集

宇宙ステーション特有の利点はもう一つ、搭乗員がいることです。時々刻々に変化する出来事にリアルタイムで対応できるので、地上管制局からのデータ収集プログラムは必要なくなります。

これは、火山噴火、地震、津波など、想定外の自然災害の画像収集にとって特に重要です。また搭乗員は、雲量や日照といった観測条件を考慮に入れた上で有効データが収集できるか判断でき、この点において品質に関係なく自動的にデータを収集するロボットセンサーと対照的です。



搭乗員による地球観測にて、2013 年 10 月 23 日、現地の日没直後にハンドヘルドカメラで撮影された、オーストラリア・シドニー近郊の森林火災。オレンジ色の火と灰色の煙が付近の町に迫っている。

出典：NASA

このことは、ISSが「国際災害チャーター」(International Charter, “Space and Major Disasters”)あるいはInternational Disaster Charter; IDC)として知られている枠組み (<http://www.disasterscharter.org/home>) を支持し、災害に対応していることからよく分かります。

ISSは、2012年4月、災害リモートセンシングに有効なプラットフォームとして、他の多くの地球観測衛星と同様に、これに加わりました。2015年5月現在、NASAが管理するISSのセンサーシステムは、130のIDC発令に対応し、宇宙飛行士または地上コマンド(あるいはその両方)によって34の災害データを収集しました。

以下に挙げるNASAの地球観測装置は、現在宇宙ステーションに搭載、運用中です。国際パートナーのセンサーシステムおよびプログラムについては、本誌の他の記事に説明があります。



ISERVパスファインダーによるカンボジアの洪水画像
2013年11月1日撮影

出典：NASA

- 窓観測研究設備 (Window Observational Research Facility; WORF) <<http://worf.msfc.nasa.gov/>> は、高度に安定した内部設置プラットフォームで、カメラやセンサーに電力、コマンド、データおよび冷却結合を供給しつつ、安定を保つことができます。
- ISS 海洋風モニタリング装置 (ISS-RapidSCAT) <<http://www.jpl.nasa.gov/missions/iss-rapidscat/>> は、海面風速および風向を測定し、ハリケーンのモニタリングを含め、気象予測に使用される重要な測定をしています。そのセンサーは「コロンバス」実験棟の外部観測装置に搭載され、海洋面からのマイクロ波に反射したエコーの強さを測定します。同じ海面の多数の眺望からレーダー帰還信号を取得し、それらによって風速および風向を推定することができます。
- 雲エアロゾル輸送システム (Cloud-Aerosol Transport System; CATS) <<http://cats.gsfc.nasa.gov/>> は、大気エアロゾルと雲を測定するライダーセンサーです。雲とエアロゾルは太陽エネルギーの多くの部分を宇宙に反射しますが、地球の大気との複雑な相互作用は十分には理解されていません。科学者はCATSからのデータにより、雲やエアロゾルの役割および地球規模のエネルギー量や気候に与える影響について評価できるようになります。
- 高精細度地球観測カメラ (High-Definition Earth Viewing; HDEV) <<http://eol.jsc.nasa.gov/HDEV>> は、「コロンバス」の船外設備に搭載された商業用高精細度カメラ (4台) です。地球の画像を撮影する際のカメラの品質、および地球低軌道での過酷な熱や放射性環境に耐え作動するかハードウェア能力の評価をしています。
- ISS SERVIR 環境調査および可視化システム (ISS SERVIR Environmental Research and Visualization System; ISERV) <http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/867.html> は、約3メートルの地上分解能で可視波長画像を収集するセンサーシステムで、2015年初めにミッションを完了しました。
- 搭乗員による地球観測 (Crew Earth Observations; CEO) <<http://eol.jsc.nasa.gov>> には、搭乗員がハンドヘルドカメラで撮影した地球の映像が含まれます。搭乗員が直接操作するセンサーと自律して作動す

るセンサーの両方のシステムの能力を組み合わせることによって、宇宙ステーションが持つ地球観測や自然災害への対応能力は著しく改善しています。宇宙ステーションの、人工衛星を主体とした国際的な地球観測システム（Global Earth Observation System of Systems; GEOSS）への統合は、観測の頻度や質の向上に貢献し、私たちに地球環境の新たな知識と知見をもたらしてくれるでしょう。

沿岸海洋センシングがミッションを延長

ISS の見晴らしの利く地点から地球をスキャンングするというのは、単に素晴らしい眺めを楽しめる以上の意味があります。ISS 上で地球低軌道をゆっくり進む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）によって、研究者は沿岸部を見るための新しく貴重な方法を手に入れたのです。

沿岸水は、地域および世界の経済開発と環境持続可能性を結び付けるために重要であり、宇宙ステーションの HICO は、それらを観測するために設計された初めての宇宙用測器です。

元々 HICO は 1 年間の実証プログラムということで、2009 年 9 月 23 日、海軍研究事務所（Office of Naval Research; ONR）の支援を受けて ISS に取り付けられ、2014 年 9 月 14 日までデータ収集を行いました。HICO は計画されていたミッションをはるかに超えて、世界中の沿岸環境についての新しい知見を与えてくれました。

研究者たちは、宇宙ステーション船外の「きぼう」日本実験棟曝露部（Japanese Experiment Module Exposed Facility; JEM-EF）に取り付けられた HICO を使用して、地球に関するデータを収集しました。これらは世界中の沿岸環境や他の地域をより深く理解するのに役立ちます。

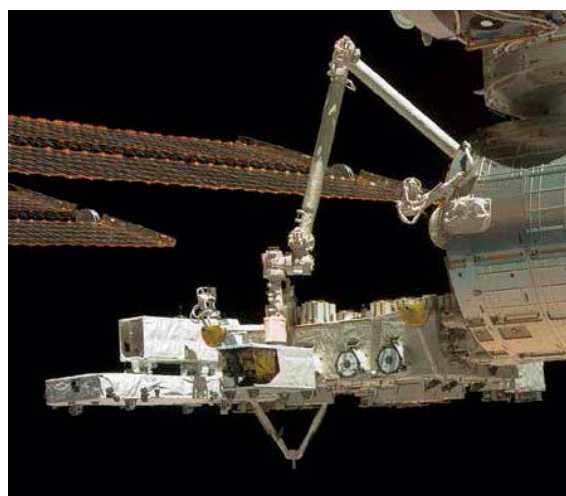
HICO は、沿岸海洋や大きな湖の環境特性解析用に最適化された初の宇宙機搭載用ハイパースペクトル画像装置です。HICO のアーカイブ画像データは、沿

岸海洋地域の地図作製に利用されている他、世界中の沿岸地域の新たな科学データ群を提供しています。HICO の実験用センサーは他の海色センサーの 10 倍のスペクトルと空間分解能を示しました。

これはなぜ重要なのでしょう？ 沿岸水は、地域および世界の経済開発と環境持続可能性を結び付けるために重要です。沿岸地帯は世界中の多くの大都市（そしてそれらの産業地帯、港、レクリエーション施設）を支えており、また重要なエコシステムとして漁業を支え、海岸線を守っています。同様に、大きな湖や貯水池もそれらと同じ恩恵の多くを提供し、何百万人もの人々の給水源となっています。

ONR は、革新的な海軍のプロトタイプとして、HICO の開発および最初の 3 年間のオペレーションのスポンサーとなりました。HICO プロトタイプには 2 つの目的がありました。1 つ目は宇宙の観測装置設置にかかるコストおよびスケジュールを大幅に削減する方法を実証することです。米国海軍研究試験所（Naval Research Laboratory; NRL）のエンジニアは、革新的な設計と可能な範囲での民生部品の使用により、従来型の宇宙装置に比べほんのわずかなコストで、HICO を 18 カ月で効果的に製造しました。2 つ目の目標は、ハイパースペクトル画像装置を使用して、宇宙から沿岸環境特有の貴重な画像を撮る能力を実証することです。

これらの目的を達成し、NASA によるセンサーオペ



JEM-EF に取り付けられた HICO、2009 年 9 月 23 日

出典：NASA



HICO の画像からスペクトル解析で得られたエリー湖西側におけるアオコの大量発生の様子、2011 年 9 月 3 日

出典：NASA、NRL、OSU

レーションへの資金提供によって、ミッションは延長されました。HICO のデータは、NRL、オレゴン州立大学 (Oregon State University; OSU)、および沿岸環境を研究する世界各地の 50 以上の機関の科学者が利用しました。米国政府機関、商業および非学術機関の研究者による装置へのアクセスも、宇宙科学振興センター (<http://www.iss-casis.org>) への申し込みにより、可能とされました。研究範囲には、オーストラリア、ニューカレドニアおよびパラオのサンゴ礁の特性から、北米およびヨーロッパの湖や貯水池の水質評価、NASA や欧州が提案するハイパースペクトル装置のアルゴリズム開発が含まれます。

HICO の調査結果は、深浅測量、海底タイプ、水の透明さ、およびその他水の光学特性についての情報を通し、米国海洋大気庁 (National Oceanic and Atmospheric Administration; NOAA) など、海洋の任務を負う機関に益をもたらしています。米国環境保護庁の科学者は HICO データ (http://www.nasa.gov/mission_pages/sta-tion/research/news/epa_coastal.html) を利用して、一般の人々がモバイル装置から水の状態をチェックできる水質モニターツールを開発しました。

HICO から得られる豊富なハイパースペクトル情報によって、例えば、2011 年 9 月に何百万人分もの水源を脅かしたエリー湖西の巨大なミクロシスチンのブルーム (ページ上の画像) など、具体的に素性を特定するスペクトル技術の利用が可能になりました。

HICO は海軍研究事務所の財政援助により 3 年以

上にわたり稼働し、2013 年には NASA が HICO の能力を地球観測ミッションへ活用するためにオペレーションの財政援助を引き受けました。これにより、幅広い研究団体が HICO データにアクセスできるようになりました。現在、すべての HICO データは NASA の Ocean Color ウェブサイト (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>) から入手できます。

目視と測器の併用による 宇宙からの科学的海洋観測

サリュート、ミールなど、過去に使用された宇宙ステーションや現行の ISS に滞在した宇宙飛行士により行われている海洋学研究の特徴は、目視と測器の併用による宇宙からの科学的海洋観測を広く応用させることにあります。この観測方法の基礎は、海洋表面近く、およびその上の大気の層の調査に際して、現象を視覚的に探索、検知し、特定することにあります。この方法は、シンプルでありながら、海洋の自然環境状態を、可視スペクトルのデータで入手できる最も有益な方法の一つです。

この手法で入手した海洋に関する情報の信頼性と科学的価値は、特別な記録装置 (例えばデジタルフォト、デジタルビデオカメラなど) と、搭乗員の視覚分析能力を向上させる特別な軌道上装置を観測時に使用することにより、著しく向上します。このように目視と測器を併用する観測手法は VIO (Visual and Instrumental Observation) メソッドと呼ばれ、海洋

VIO メソッドによる宇宙からの海洋観測は、世界中の海洋生物資源研究に関連する問題を解決するための、実用的な応用の範囲を広げています。

のリモートセンシング分野のみならず、知識活動および実際の活動においても、情報を可視電磁波スペクトル内でデータベース化する際に利用されています。

サリュート、ミールおよびISSに長期滞在し、海洋学実験を長年にわたり実施してきたロシアの搭乗員の経験により、宇宙からVIOメソッドを用いて世界中の海洋の持つ潜在的な実情報を評価できるようになりました。また、海洋学に関する問題の解決に向けて、飛行試験を実施した手法のさらなる発展や、海洋リモートセンシングを可能とする装置と手順の開発も可能にしました。これらの手順や方法は、現在ISSで行われているいくつかの宇宙実験（例：“Diatomea” “Seiner” など）と関連があり、宇宙飛行士参加型の海洋学実験を通して頻繁にフィードバックが掛けられています。

VIOメソッドを用いたタスクに従事するロシアの搭乗研究者にとって、調査および観測の主な対象は、植物プランクトン（図1）の大量発生に伴う海面の大規模な色対比の形成です。周回経路に沿った海洋面を観察する宇宙ステーションの搭乗員の視野には、常に多様な雲が形成されます。加えて、海洋上方の雲場には、以下に挙げるものが見られます：様々な発達段階を見せる熱帯サイクロンの雲指標（図2）、リニアメント（図3）、激しい大気対流の下、海洋面上方で強力な垂直発達をするジェット気流、積雲の特定（図4）、および海運業、航空業、海産業などが必要とする海上気象のその他注目すべき現象。

VIOメソッドにより観察される水理気象のうち、特に興味深い現象は、島地域の大気中障害を通過した気団に特徴的な現象である、対流圏雲の形成です（カルマン渦列、ヘルムホルツ重力横波など）。

実験により、宇宙からの画像を通じた、海洋上方の陸源ダストや砂流（図13）、霧、火山灰雲など、大気中の光学活性活動、および激しい雷雨の兆候がある地域の特定および記録能力も実証されています。該当する海洋研究の水物質地域では、VIOメソッドにより局

地的な水循環の特性（図1）、氷山（図6）、表面攪拌構造（図7、8）、疎水域（図5）および水の色や透明度（図1、9、10）に関する記録データの入手が確実になります。そのようなデータ解釈の結果は、一般的海洋水循環の最も重要な要素の説明、およびハイドロオブティクスの課題に取り組むために用いられます。

今日まで、VIOメソッドによる宇宙からの海洋観測によって相当の情報が収集され、環境モニタリングの様々な目的に応じて分類されてきました。外洋エコシステムへの応用として最も認知されているものは、サンゴ礁の形成と状態の多様性を特徴づける観測結果と海洋のカラー写真（図11、12）、異なるサイズの植物性プランクトンフィールドの形態と、それらが生息する環境の水力学詳述（図1）です。

VIOメソッドの最も重要な側面は、リアルタイムで海洋大気システムの環境状態を評価し、界面活性剤膜（図14）、オイルや石油製品の流出（図16）、表面流出によるクリーンな海洋水の汚染（図15）、および海洋鉱区の海底から採掘されるマンガン団塊のリンス物質などの、海洋環境の異常プロセスおよび現象を特定する能力です。

現在、VIOメソッドによる宇宙からの海洋観測は、世界中の海洋生物資源研究に関連する問題を解決するための、実用的な応用の範囲を広げています。この研究分野への注目の高まりの理由には、問題の関連性、比較的安価な商業用カメラを使用した研究実施能力、そしてロシアの宇宙ステーション搭乗員によってテストされ特許を受けた、世界の海洋水を宇宙から探索および特定する、高度に生産的なアルゴリズムの存在が挙げられます。



1. 植物性プランクトン
フィールド



2. 台風のクラウドキャノピー



3. 雲の無いリニアメント



4. 雲の激しい垂直発達



5. 氷のカバーの状態



6. 大西洋の氷山



7. 内部波の発達



8. 島の陰にある無風状態
エリア



9. 海底のレリーフ



10. バミューダの海底



11. 環礁の海底



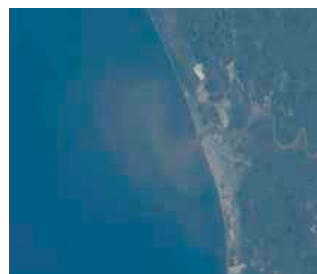
12. 環礁の水上部



13. ダスト / 砂嵐



14. 界面活性剤膜による汚染



15. 河川流出汚染



16. 石油流出

災害対応

軌道センサーシステムにより得られたリモートセンシングデータは、自然災害による被害の規模を特定するための不可欠なツールとなっており、地上での対応や人道救援活動をサポートするために、リアルタイムに近いマッピングサポートを行っています。

ISS は、災害対応画像を得るための独特な地球のリモートセンシングプラットフォームです。自動リモートセンシングプラットフォームとは異なり、搭乗員がおり、内部・外部に取り付けられたスチールおよびビデオ撮影システムが備わっている他、傾斜した地球低軌道により地球の居住表面 95% 以上の変化する景色や明暗（昼夜）を映し出すことができます。そのため、より高位の極軌道にある自動センサーシステムを効果的に補完し、災害対応に必要なとされる画像収集に貢献します。

宇宙ステーションのカメラがとらえる 地球の災害シーン

地球低軌道には何百もの宇宙機や人工衛星がありますが、地球を、眼下に広がる大きく青いビー玉のように眺められる場所は ISS の他にはありません。ISS は 90 分毎に地球を一周し、軌道から見える地球の居住エリア 90% 以上を観察することのできる独特なプラットフォームです。科学者たちは ISS のカメラによって、その壮観な眺めを災害観測や人道救援要請への対応のために活用しています。

ISERV カメラにより、ISS から世界中の国々をサポートすることが可能となり、そこから送られる唯一無二の観測情報を十分に利用することで、ISS の国際的な資産価値を高めています。

このシステムは、プロトタイプで、ISERV パスファインダーと呼ばれています。ISERV は、NASA と米国国際開発庁（United States Agency for International Development; USAID）の共同プロジェクト SERVIR (http://www.nasa.gov/mission_pages/servir/index.html) および潜在的に NASA の応用化学コミュニティをサポートするために NASA によって開発されました。



2013 年 6 月 11 日にキャノンシティ東北部ロイヤルゴージ（Royal Gorge）およびコロラド州中央アーカンソー川沿いで出火した山火事。火事はヤマヨモギや松で覆われた地形をのみ込みながら、消防士が鎮火させるまで 5 日間で 3,218 エーカーを焼け焦がしました。ISERV で撮影されたこの画像は、アーカンソー川が焼け跡を流れる様子を示しています。

出典：NASA



カナダ・アルバータ南部の多くを破壊し、カルガリーや周辺の町の住民 10 万人が避難を強いられた 2013 年 6 月の洪水。6 月 22 日からの数日間、渦巻く濁水に吞まれ 3 名が死亡した他、何百万ドルもの損害をもたらしました。この画像は、カルガリー市内を写した洪水前・洪水後のものです。2008 年 9 月 13 日にジオアイ（GeoEye）イコノス（IKONOS）商用衛星センサーで撮られた左側の画像では、ボウ川、エルボー川の正常な流れを示しています。2013 年 6 月 22 日に撮られた右側の ISERV 画像から、2 つの川の氾濫水によりカルガリー市内が水浸しになっていることが分かります。カナダ当局は、災害評価および洪水マッピングアルゴリズムを改善するためにこの画像を利用しました。

出典：左、Digital Globe；右、NASA

「servir」とは、スペイン語で「奉仕する」という意味です。SERVIR プロジェクトは、発展途上国の環境問題政策決定者に衛星データやツールを提供し、ケニア・ナイロビ、ネパール・カトマンズ、パナマ・パナマシティにある地域「ハブ」を通して稼働しています。これらの SERVIR ハブは ISERV システムに彼らの国の地表面の様子を撮影させ、環境問題や災害に対処することができます。アラバマ州ハンツビルにある NASA のマーシャル宇宙飛行センターに置かれた SERVIR コーディネーション・オフィスでは、ISERV オペレーションを制御しています。

2 年間のミッションのために 2013 年 1 月に取り付けられたカメラで、私たちの惑星の表面を「デスティニー」実験棟の地球側の窓から観測し、特定の地域

を撮影するコマンドが与えられると、宇宙ステーションが次にそれらの地域を通過する際に撮影します。ISERV の対象は洪水、地滑り、森林火災、その他の災害の危険があるか既に被害に遭ったところです。画像は状況のモニター、被害程度の評価、および避難や災害救助活動の指示のために用いられました。ISERV は災害監視や事前予測など、高分解能の「調査」活動によく適応しました。

ISERV は 2013 年 2 月 16 日に最初の光をとらえて以来、重大な災害の写真を含め、世界中の地域の無数の画像を撮影しました。2 つの例として ISERV は、2016 年 6 月 11 日から 16 日にかけて焼け跡を残したコロラド州ロイヤルゴージの山火事および 2013 年 6 月 22 日から 24 日にかけてカルガリーで洪水によって破

壊された街の姿をとらえました。

ISERV のカメラは2014年12月に最初のミッションを完了しましたが、必要に応じ自然災害の画像をとらえることができるよう、システムはISS内に残されました。ISERV のカメラにより、宇宙ステーションから世界中の国々をサポートすることが可能となり、そこから送られる唯一無二の観測情報を十分に利用することで、ISSの国際的な資産価値をより一層高めています。

編集者注：

公共利用のための地理座標参照データ付き画像は、以下のウェブサイト入手可能です：

<http://ghrc.nsstc.nasa.gov/pub/>

SERVIR チームは、ユーザーが ISERV 画像を探しダウンロードできるオンラインマップ／ツールを提供しています (<http://www.servirglobal.net/mapresources/iserv/>)

鮮明な HD 画像が災害対応をサポート

ISS の様々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 IDC (<http://www.disasterscharter.org/home>) 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）<http://www.jaxa.jp/article/special/sentinel_asia/index_e.html> などを通して地球観測や災害対応に貢献してきました。JEM は、船内の手持ちカメラと船外に取り付けられたカメラの両方を活用して、非常に鮮明な高精細度（High-Definition; HD）画像を提供しています。これらの鮮明な画像は災害支援に有益です。



イタリアの夜景

出典：JAXA/NASA

宇宙航空研究開発機構（JAXA）は、超高感度ハイビジョンカメラシステム（Super Sensitive High-Definition Television; SS-HDTV）および船外実験プラットフォーム用民生品ハイビジョンカメラシステム（Commercial Off-The-Shelf High-Definition Television Camera System-Exposed Facility; COTS HDTV-EF）から得られたデータを提供しています。船外実験用プラットフォーム（曝露部）は JEM に取り付けられ、船外に曝露された多目的構造体です。この船外のプラットフォームは、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、多岐にわたる研究に利用されています。

SS-HDTV は、オーロラ、大気光、流星群などの現象を含む、地球の夜景を撮影するために開発されました。このカメラは、JEM やキューポラ観測用モジュールを含む、ISS 船内で操作されています。美しい夜の画像は、自然災害後の電力回復状況や町の再生、災害によって被害を受けた住民が通常の生活に戻っているかを確認するために活用されています。

ISS は災害対応、教育、広報目的のため、地表、海洋、雲などの画像を撮影しています。

センチネル・アジアは、アジア太平洋地域における自然災害を監視するために国際協力を推進するこ

様々な ISS のセンサーシステムから集められたデータは、国際協力の枠組みを通して地球観測や災害対応に貢献してきました。



夜景、オーロラ、大気光

出典：JAXA/NASA



オーストラリア クイーンズランドの山火事

出典：JAXA/NASA



ハリケーン「サンディ」

出典：JAXA/NASA

とを目的としています。アジア防災センター（Asian Disaster Reduction Center; ADRC）の2013年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全世界の44.6%にのぼります。また、全体に占める死亡者の84.6%、被災者の87.1%、経済的損失の49.0%はアジアでの災害によるものです。このような状況の下、地球観測技術の価値と影響力をはっきりと示すために、アジア・太平洋地域宇宙機関会議（Asia-Pacific Regional Space Agency Forum; APRSAF）は、2005年にセンチネル・アジアを提言しました。

センチネル・アジアは、地球観測衛星やその他の

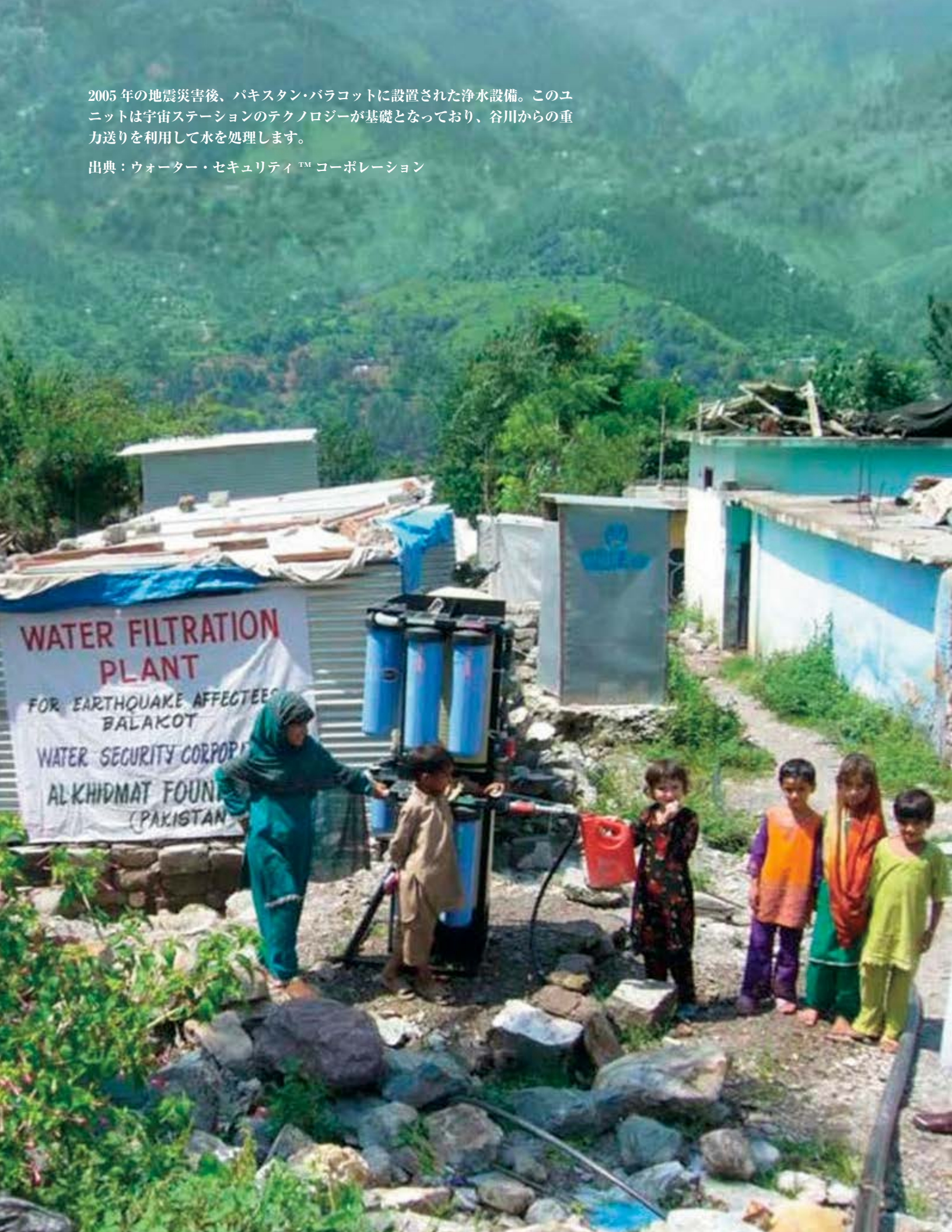
宇宙技術を用いて災害関連の情報を収集し、インターネット上で共有しています。その目的は、台風、洪水、地震、津波、火山爆発、山火事などの自然災害による被害を軽減し防ぐことです。

現在センチネル・アジアは、15の国際機関と25カ国からの83の参加機関がメンバーとなり、そのシステムの活用は着実に拡大しています。JAXAは、アジアで唯一のISS参加パートナーとして引き続き災害対応を支援し、JEMとHDカメラによって、アジア、そして全世界に貢献できることを願っています。



2005年の地震災害後、パキスタン・バラコットに設置された浄水設備。このユニットは宇宙ステーションのテクノロジーが基礎となっており、谷川からの重力送りを利用して水を処理します。

出典：ウォーター・セキュリティ™ コーポレーション



革新技术

宇宙では、重力などの外的影響を制御することで、物理過程をより深く理解できます。宇宙システム用に設計された革新技术は、他の宇宙機システムで使用する前に国際宇宙ステーション（ISS）でテストされます。新技术が宇宙でどのように作動するか研究していると、予想外の発見をすることができます。また、簡素化された物理のシステムは、新たな産業技術や新材料へ結びつくような物理過程のモデル改善に直接役立てることもできます。

ISS は、宇宙用輸送機と協調しながら無重力下で長時間の実験ができるなど、他のどの研究所でも得がたい独自の環境を提供しています。さらに、ISS には宇宙飛行士が滞在しているため、実験の操作や観察を行うことができ、新しい発見をもたらします。

ISS 研究ポートフォリオには、これらの機会を駆使した多くの技術開発研究が含まれています。熱処理、ナノ構造、液体その他の物性を調査する実験が行われており、これらの技術開発や、材料分野でのイノベーションのために活かされています。加えて、宇宙ステーションのインフラで実施されている高度な研究開発により、次世代の宇宙システムの一層の能力向上、および将来のミッションに対するリスク低減が実現するでしょう。ISS で行われている新材料、技術、工学研究の進歩は、経済発展や生活の質の向上へと発展していきます。



液体と浄水

宇宙の真空中であれ、地表の比較的快適な場所であれ、清潔な水を手に入れることは生命体にとって不可欠です。宇宙の微小重力環境で、コンパクトで信頼のおけるシステムを使用した、水などの液体の移動や処理への挑戦は、地上で水源を浄化する手法の進歩につながりました。ISS で水質を確保するために開発された試験方法は、地上での水モニタリングでの進歩につながります。

宇宙で液体がどのように移動するかという基礎的な流体力学の研究はまた、医療診断装置の進歩につながります。

高度な ISS の技術が 世界中の浄水の取り組みをサポート

ISS という隔離空間でも、サハラ以南の小さな村にある小屋でも、飲料水は生命の維持に必須です。残念なことに、世界中の多くの人々は清潔な水を入手することができません。宇宙ステーション用に開発された技術を活用すれば、危険な地域でも、高性能な水の濾過・浄水システムへのアクセスが可能となり、コミュニティの命を救うほどの変化をもたらします。

宇宙ステーション用に開発された技術を活用すれば、危険な地域でも、高性能な水の濾過・浄水システムへのアクセスが可能となり、コミュニティの命を救うほどの変化をもたらします。

2006 年に、NASA の技術を使用した多くの地上浄水システムの一台目が、イラク北部に設置されました。そのシステムは、ネバダ州リノにある水の安全保障を手掛ける WSC (Water Security Corporation) が開発したもので、非営利組織である CFK (Concern for Kids) によって設置されました。CFK の代表者は、イラク・ケンダーラにあるクルド人の小さな村で深層水の井戸が不足しており、住民が飲料水を手に入れないことを知りました。人口は 1,000 人から僅か 150 人にまで急速に減少しました。そこに残っている人々は、家畜によって汚染された水を含む近くの小川の水を使用することを余儀なくされ、布で汚れやゴミを取り除いていました。

当時 CFK の重役会の会長を務めていたトッド・ハリソンは、ケンダーラの住民に深く同情しました。彼は、衰退したコミュニティを元気にするため、嘆かわしい状態の改善に着手しました。この取り組みは、宇宙ステーション搭載の浄水提供技術の開発者である 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・ゲイテンズは、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 (Environmental Control and Life Support System; ECLSS) プロジェクトの技術マネージャーを務めていました。彼女とエンジニアチームは、ISS で空気や水を再利用する最先端の浄化装置の開発責任者でした。



水分補給ステーションに立つ女の子

出典：Sinergia Systemas

宇宙ステーションでは、効率的に排水を再利用することで、水の補給量を減らしています。それは、長期間の宇宙滞在には必須です。水の再利用能力なしに、標準6名の搭乗員を支援することは、ステーションの現在の補給能力ではできないことでしょう。

ISSのECLSSは、2つの主要な装置で構成されています。それは、水回収システム(Water Recovery System; WRS)と酸素生成システム(Oxygen Generation System; OGS)です。WRSは、ECLSSで水の精製および濾過を担っています。ウォーター・セキュリティ・コーポレーション(WSC)はECLSSプロジェクトのこの部分に注目し、地上での水処理システムに応用するため技術ライセンスを得ました。

ハリソンは、妹の仕事をよく知っていたため、WSCの水濾過システムとNASAの間に興味深い関連性があることに気付きました。NASAの従来の研究の応用により、浄水・濾過用の主要部品である微生物の逆止弁(Microbial Check Valve; MCV)が使えるようになりました。

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摂取にもなります。食事に加えると、脳機能を適切に促進し、細胞の発達と成長を整えるホルモンレベルを維持します。ヨウ素欠乏地域で生まれた子供は、神経障害や知能発育不全になる危険性があります。

米国陸軍の民事および心理作戦部隊の(空輸)要員の支援により、2,000リットルの水タンクと真水が、イラクのクルド人の村へ運ばれました。作業者は、水が清潔で、バクテリアとウイルス感染を防ぐためにヨウ素が加えられていることを確認しました。CFKがいくつかの技術的な問題に直面した時は、ゲイテンズと彼女のチームは電話で次善策を打ち出すサポートをし、ケンダーラの水道処理を成功させました。

援助団体とNASAの技術協力は、地球規模の問題への解決策に、宇宙研究がいかに効果的に応用できるかを示しています。この最初の試み以来、ステーションに関連した技術の商業化により、世界中のコミュニティへの援助や災害救助が行われています。WSCは、他の団体と共同で、NASAの水処理技術を世界中で展開しました。

その応用には、インドでのホーム浄水器、メキシコ、中米および南米の僻地の村での処理システム、パキス



チアバスで学校に設置されたシステム

出典：Sinergia Systemas

タンでのボトル飲用水充填ステーション、さらには、自然災害、難民キャンプ、緊急事態および僻地での初期対応装置として設計されたサバイバルバッグまでもが含まれます。

流体の動きの不思議を探る： マランゴニ対流の性質を理解することで 地上の生活をより豊かに

私たちは流体の中で生活しています。地球は「水の惑星」として知られており、生命を維持できるのも、水が存在してこそです。どろどろに溶けた溶岩は冷えて島を形成し、血液は私たちの血管を通して体を巡り、建造物や車両の素材となる鉄の製造プロセスでは溶融金属を固めて作るなど、人類は歴史を通して、身の回りにごく当たり前に存在する流体を上手く利用し

地球の重力による浮力対流があるためにその全貌が隠されてしまうマランゴニ対流について、ISS での微小重力は対流の観測を行う絶好の場を提供しています。

てきました。微量の血液から健康状態を確認し、薬を体内に送り届け、私たちの健康を保つマイクロ流体システムから、広大な宇宙へ私たちを駆り立てるロケットの燃料タンクまで、流体の関与する機器で、液体運動の基本原則を理解することは重要です。これらの運動基本原則の一つであるマランゴニ対流は、微小重力の中でははっきりと表れますが、地球の強い重力の中では浮力対流の陰に隠れてしまいます。ISS は、この原則を詳細に研究する絶好の機会を提供しています。

マランゴニ対流は、液体／気体の界面での温度差によって生じる表面張力の違いに起因する流れで、微小重力条件で形成される液柱で観測するのが最適です。

微小重力下でこのマランゴニ対流の様子を知るために、端面をディスクで支えた液柱の片側を、もう一方よりも高い温度に熱してマランゴニ対流を発生させます。ISS の実験ではシリコーン（シリコン）オイルを使い、微小重力下でどのような流れが起こり、熱がどのように伝達されるかを、科学者たちが、詳細に観察します。

表面張力は、液体の表面で互いに引っ張りあうよ



表面張力により水面に浮くコイン

出典：JAXA

うな力です。そのため、表面を可能な限り小さな面積になるようにする性質を持っています。左下の画像では、コインが液体の表面に浮かんでいるのが見えます。表面張力は重いコインが沈むのを防ぐ力として作用しています。一般的に、表面張力は温度の低下に伴って強まります。

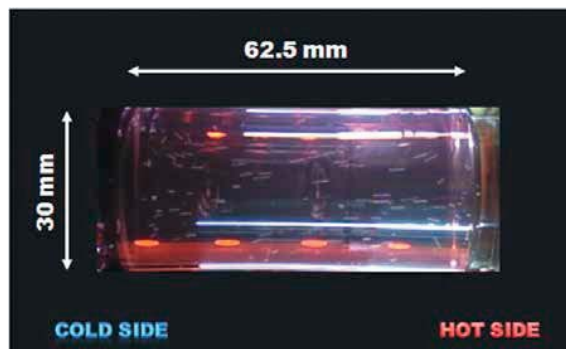
表面張力の差により、表面が力の強い方に引っ張られ、流動を起こす現象がマランゴニ対流です。表面に沿って温度差があると、表面は低温度領域に向かって引ばれます。例えばワイングラスにワインの涙が生じるように、メニスカス（液体表面）における液体濃度の差異によっても、表面張力の差異は生じます。

そのような現象は、しばしば日常生活の中で観察されます。例えば、鍋の中で熱せられた油は、中央から温度の低い端に移動します。水に浮いている油は、界面活性剤（例：洗剤）が油に落とされると、表面張力



「水の惑星」として知られている地球

出典：JAXA / 日本放送協会



ISS「きぼう」日本実験棟で形成した液柱（直径：30 ミリ、長さ：62.5 ミリ）

出典：JAXA / 横浜国立大学 / 東京理科大学



ワインの涙の写真。液滴がグラスと液体との境目付近に形成され、ワインの中に絶え間なく滴り落ちています。

出典：東京理科大学 河村 洋 教授

のアンバランスにより瞬時に移動します。洗剤によって中央部分の表面張力が低くなり、端の表面張力が高くなるので、均等を保とうとする表面張力により、中央部分の水と油は全方向に引き出されるのです。これらの現象は、マランゴニ効果によるものです。

マランゴニ実験では、層流から乱流（カオス流）に至るまでの対流の移り変わりの過程をしっかりと観測します。宇宙ステーションにある微小重力環境でのみ可能な、長く大型の液柱の実験により、振動流の発生状態が解明されました。これにより、今まで不確かだった振動流の発生条件を、正確に予測することができるようになりました。液柱に発生するマランゴニ対流の知識は、半導体およびレアメタル業界において、非常に純度の高い結晶の生産技術の改良に役立つものと期待されています。振動流などの流れの乱れは、結晶成長の際に高品質化を妨げる原因になるためです。

非常に複雑なマランゴニ対流の性質を根本から理解することは、多くの製造プロセスの高度化、生物学的過程および医療診断装置の開発にとって基礎的な知見となり得ます。例えば、超小型化学分析システム（Micro Total Analysis Systems; μ TAS）によって、微量の血液や DNA をサンプリングするだけで、現場での医療診断が可能になると期待されています。この診断技術では、液体操作は界面の毛細管現象に支配されます。マランゴニ現象の基本を深く理解することにより、 μ TAS など微小流体における熱毛細管現象を活用した機器の実用化が可能になるでしょう。

宇宙ステーションに触発された mWater アプリが健康的な水源を特定する

地面や蛇口から出てきた透明できらめく水が、汚染物質でいっぱいならどうでしょうか。どうすれば分かるのでしょうか。あなたがアフリカの僻地やニューヨークシティの高層ビルに住んでいるにせよ、宇宙の軌道上実験室に搭乗しているにせよ、生きるためには信頼できる飲料水が必要です。飲料水の清潔さを、携帯電話の mWater アプリでチェックすることができるようになりました。

この便利なツールは、ISS の技術も一部使用されており、ほとんどのスマートフォンで無料ダウンロードできる他、ウェブブラウザ版も使用できます。政府、医療従事者、そして一般の人々も mWater を活用して水質検査結果を記録し共有することができます。mWater の評価版リリースの最初の年には、1,000 以上のユーザーがダウンロードし、何千かの水源をマッピングしました。

mWater の共同創設者であり、かつて NASA の空気・水モニタリングの主任技術者を務めていたジョン・フェイゲリーは、宇宙ステーションでの仕事に触発されて mWater を思いつきました。彼とそのチームは、宇宙ステーションで、インキュベータなど高コストの実験装置を必要とせずに飲用水源の汚染度を検査できる、効率が良く、可搬型で、かつ常温環境で可能な試験技術を開発したのです。その成果が、搭乗員の健康管理システムおよび環境衛生管理システム（Crew Health Care System Environmental Health System; CHecs EHS）を構成する一連の環境モニタリングシステムの一部として ISS に設置された微生物水分析キット（Microbial Water Analysis Kit; MWAK）なのですが、それがフェイゲリーのイマジネーションを刺激し、100 ミリリットル（3.38 オンス）の水サンプルから大腸菌を検出するという、mWater で採用している水質検査手法のベースになったのです。

宇宙ステーションで実証された技術
から開発された mWater アプリで、
今いる場所の水塊の清潔度をチェック
できます。



世界中の mWater ユーザーがアップロードしたデータ
を人々が見つけることのできる、世界の水源マップのスクリーンショット

出典：mWater

NASA の得た重要なイノベーションの一つは、これらの検査が常温でも有効なことを実証したことです。従来型の検査法では、摂氏 37 度（華氏 98.6 度）にする必要があったところ、様々な研究により、摂氏約 25 度（華氏 77 度）程度でも結果が得られることが示されました。これは、発展途上国にとって非常に重要です。なぜなら、インキュベータは高価で、安定した電力を必要とし、すぐ壊れることもあるからです。安全な水の入手が困難な国々の多くは熱帯にあるため、この検査であれば室温で誰もがいつでも行うことができます。

フェイゲリーはエルサルバドルで国境なきエンジニア団とボランティア活動をする中で、水源を検査するために、重い検査機材や高価な装置を用いることは非現実的であると気づきました。可搬型で、安価、効果的であること。これは宇宙ステーションに載せるために必要な技術目標であり、また、世界の僻地や、資源の少ない地域でも必要とされているものです。mWater で採用している水質検査キットは低価格で、ユーザーが払う金額は 5 ドルです。

彼の航空宇宙科学の経験と博愛主義的情熱が相まって、フェイゲリーは共同設立者であるアニー・フェイゲリー、クレイトン・グラスウィックと共に、後の mWater となるものに着手しました。2011 年の（世界銀行による）ウォーター・ハッカソン（Water Hackathon）アプリ開発コンテスト <<http://water.worldbank.org/node/84165>> を経て mWater アプリが開発され、国際連合人間居住計画（国連ハビタッ

ト）をスポンサーとする実地検査を通して強化されました。そのアプリによって、水質結果の記録、水源のマッピング、近くの安全な水を探すことが簡単にできるようになっています。

その検査方法やアプリは、両方とも使いやすさを念頭に置いて設計されています。ユーザーは水を検査し、常温で培養し、写真を撮ってバクテリアを数え、最終的に世界規模の水データベースにアップロードします。使いやすさ、それがフェイゲリーの設計における重要な目標でした。

NASA で搭乗員の手順を書いたフェイゲリーの経験も、アプリ設計に影響を与えました。このアプリはタスク指向で、手順に従う以上のことはほとんど求めない設計となっています。フェイゲリーと彼の mWater チームは将来的に、各水検査のタイプごとにチェックリストを作ることでより使い易くし、実地検査に必要なトレーニングをさらに減らせるようにするつもりです。

検査結果は、クラウドを基本とする世界規模の水データベースにアップロードされ、携帯電話の GPS で水源の正確な位置を特定することができます。それぞれの水源には、アップデートのために国際水源マップを訪問する人が参照できるよう、固有の数値識別子が割り振られます。ユーザーは、コミュニティの衛生管理に用いるオープンソースの共有方法と同じように、新たな水源の追加や、検査結果のインプットまたはアップデートができます。

宇宙で試験済みの液体流動コンセプトが 感染症診断を進歩させる

現場で感染症を診断できる低消費電力の医療装置が、電力の限られた世界中の僻地で間もなく稼働するかもしれません。必要な電力が少なくて済み、また現場で診断することで、病気の特定後、速やかに治療を開始することができるようになります。

HIV/エイズや結核などの病気の特定がすぐにできるこの装置には、毛細管流動についての理解を深めることが不可欠です。その深い理解は、ISS で実施された研究の結果によるものです。毛細管実験は、米国オレゴン州のポートランド州立大学のマーク・ワイスローゲル博士が、オハイオ州クリーブランドのグレン研究センターの研究者たちの協力の下、宇宙ステーション

毛細管流動を理解することで、数多くの応用において、液体を扱うシステムの設計、動作に変化が起こるかもしれません。

で実施する一連の流体物理実験です。

毛細管流動とは、液体が重力その他の外力の助けなしに流れる能力のことで、ウィッキングとしても知られています。この能力は、それらの外力に逆行することさえあります。水の入ったグラスにストローを入れると、ストロー内の水は飲み始める前までに数ミリ程度上昇します。または、ペーパータオルがどのように液体を引き込む、つまり吸い上げるか考えてみてください。

重力のない所では、毛細管流動はもっと劇的に発揮されます。例えば、ストローを使って水を飲み始める前に、水はストロー内を上昇し完全にいっぱいになります。

毛細管実験 (Capillary Flow Experiment; CFE) は、毛細管現象が流体流動にどのように作用するかについて、私たちの理解を促進する基礎物理研究となりました。その原則は、燃料タンクから医療装置の冷却システムまで、液体を扱う多くのシステムに応用できます。

CFE で研究した医療装置に、体液や血液の形で細胞試料を置きます。酵素により試料を破裂させることで、DNA または RNA が残ります。その後、水滴上に捕らえられた感染性ウイルスを特定する装置で処理されます。毛細管流動は細胞試料の流れを装置内で管理し誘導するために用いられます。

イリノイ州エバンストンのノースウェスト大学のデービッド・ケルソー博士は、シンプルで安価な装置を開発しました。博士とそのチームは、装置を動かすために、バッテリーやモーターなどエネルギーを消費するものを使用していましたが、実験室で装置が思ったように動かず、ワイスローゲル博士に相談しました。ケルソー博士は、重力が装置を通して液体を引き込むと自分たちは考えていると説明しましたが、ワイスローゲル博士は重力の影響が少ない環境でのそれまでの研究により、毛細管活動がこれを行うと理解していました。その装置は、毛細管流動の原則を活用すると、かなり少ないエネルギーで使用できる信頼性の

あるツールとなり、資源の限られた地域で医療専門家に提供できるようになります。この装置は、2014 年後半に実地検査予定です。

CFE 研究の主な中心は、重力がほとんどない宇宙での流体管理ですが、毛細管流動の基本的原則は地球でも活用できます。CFE の最も直接的な応用は、宇宙機に搭載している生命維持装置の設計増強です。加えて、ワイスローゲル博士は、宇宙ステーションの類を見ない研究結果を地上で応用することは、商業的に実行可能であると考えています。

微小重力環境の中での研究は、地球での私たちの生活に影響を与える研究に貢献しています。医療装置の場合と同様に、毛細管流動を理解することで、数多くの応用において、液体を扱うシステムの設計、動作に変化が起こるかもしれません。



ISS での CFE-2ICF の実験で 3 つの容器がセットされた様子。これは容器内で液体がどのようなふるまいをするかを調べるもの。

出典：NASA

材料

ISS では、他にはない環境で新材料をテストすることが可能です。微小重力環境では、堆積や浮力による対流が生じないため、物質が長期間にわたってどのように変化し成長するのかを観察することができます。さらに、物質を微小重力環境ならではの独特な方法で操作することも可能になります。このような環境で実験することで、材料プロセスが地上でどのような効果をもたらすかについて、より深い理解が得られ、強度や性能を進化させた新しい材料を作り出す技術の獲得が期待されます。

ナノ繊維で半導体を改良

ナノテクノロジーには、原子および分子レベルの物質が含まれ、遠隔通信、コンピューター関連から保険医療に至るまで、非常に広範囲な応用が期待できます。しかし、ナノ構造を有する材料、特に自己組織化による規則パターンを有する材料は、その制御が難しいとされています。ISS での実験により、一つの分子程度の厚さ（ナノスケール）の構造へと自らを変化させる物質の新たな形成過程が明らかになりました。この研究は、高速で高性能のコンピューターや情報記憶システム開発への道を開くものです。

**ナノスケールの自己組織化に関する
ISS での実験結果は、コンピューター
や工業プロセスで用いる化学触媒など、
複数の分野に応用されます。**

2次元ナノテンプレート（2D Nano Template）実験では、自己組織化により非常に密なパターンを形成できる物質を使い、とても薄い層を作ります。このパターンは、イオンビームのテンプレートとして用いることができ、他の物質の表面へ同じパターンを描くことができます。

実験では、アミノ酸から作られる小さな生体分子であるペプチドと、小さな分子の繰り返しから作られるポリマーと呼ばれる大きな分子が使用されました。タンパク質はペプチドでできており、DNA はポリマーの一例です。固体と液体等の界面で分子を凝集させると、分子はナノ繊維を形成し、一つの分子程度の

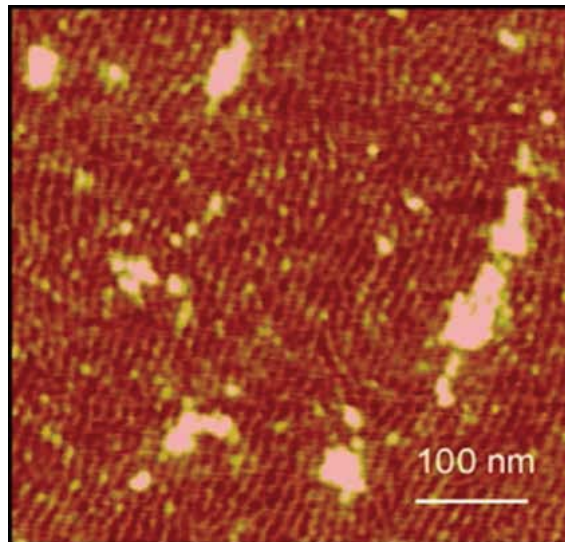
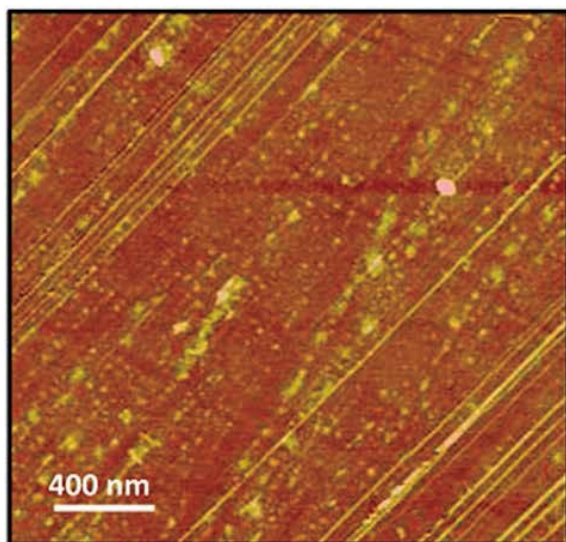
厚さに規則正しく配列します。この超薄表面は、コンピューターチップの基礎となる超小型半導体のマスキング層として使用できます。

研究者たちは、ペプチドを結合させ自己組織化過程を開始させるシンプルな方法を開発しました。微小重力環境はこの過程に他にはない影響を与えました。なぜなら、それが地球の重力によって邪魔され、分子の一部が不ぞろいに凝集することがないからです。

試料が地球に戻されてから、研究者たちは、原子スケールでの画像を見ることが可能な原子間力顕微鏡（Atomic Force Microscope; AFM）と呼ばれる特別な顕微鏡を用いて、それらを観察しました。その画像によって、ISS で作られたナノ繊維が、地球で作られた試料に比べ大きく改善していることが分かりました。また、宇宙で作られた試料は、余分な分子や粒子の凝集がないため、画一的なパターンを形成していました。

その後の地上研究で、半導体の加工表面に画一的なパターンをつけるために、これまでになく均一な2次元ナノ繊維層がテンプレートとして用いられました。研究者たちは宇宙実験同様、炭化ケイ素の基盤を使ってこれをテストしました。2次元ナノパターンを持つテンプレートでそれを覆うと、イオンビームがそのパターンに従い、炭化ケイ素の基盤の上に画一的なパターンを残しました。これは、10 ナノメートル未満の間隔を持つ、驚くほど密なパターンを作る、全く新しい製造工程です。

このような小さなスケールのパターンをもつ物質はコンピューター、工業プロセスの化学触媒、撥水物質に至るまで、複数の分野に応用することができます。宇宙ステーションの研究により、最先端のナノテクノロジーはかつてないほど進展しています。



宇宙実験で得られた長繊維の原子間力顕微鏡の画像（左）と地上実験で得られたナノ繊維の配列（右）

出典：JAXA／名古屋工業大学

ナノの世界の InSPACE 重大ニュース

ISS で研究されている微小要素のテクノロジーは、ブレーキ系装置やロボット工学から耐震性の橋や建物に至るまで、すべてのものに大きく関係しています。

磁性流体（あるいは MR 流体）の基本的データを収集するための実験として、コロイド溶液中の常磁性体の集合体の構造研究（Investigating the Structure of Paramagnetic Aggregates from Colloidal Emulsions; InSPACE）が行われています。磁性流体は機能性流体の一つで、磁場により自己集合化する性質を持ちます。

磁場は磁性流体の粘性を変化させ、ナノスケールレベル、つまり 100 ナノメートル（1m の 10 億分の 1）で配列を変えることができます。この小さな距離は分子や原子のサイズです。

磁場にさらされると、磁性流体はすぐさま固体に近い状態に遷移します。磁場が取り除かれると、磁性流体は液体状態に戻ります。このプロセスによって、ロボットの動作から、強力なブレーキやクラッチ機構に至るまで、様々な機械装置に利用可能な粘弾性が生まれます。磁性流体が示す自己組織化プロセスは、多くの新しいナノ材料やナノテクノロジーの設計・製造に大きな影響を及ぼすかもしれません。

InSPACE-3 で実施された一連のコロイド自己組織

化実験では、ナノ材料開発のために磁場・電場を使用してナノスケールでコロイド配列を作製し、観察しました。その研究の研究代表者（Principal Investigator; PI）は、デラウェア大学のエリック・M・ファースト博士です。博士の研究の目的は、規則正しく配列した自己組織化に関わる基礎科学を理解し、小さなコロイドまたはナノ粒子で構成される物質の新しい製造方法を確立することです。

コロイドは溶液に浮遊する小さな粒子です。それらは工業プロセス、さらにはローション、薬剤、洗剤といった家庭用品に大きな関わりがあります。

先に行われた InSPACE では円形粒子で構成される磁性流体を使用したのに対し、InSPACE-3 では楕円形の粒子に注目しました。これらの楕円形粒子は、先行実験とは異なる独特な方法で組織化し、円柱に似た構造を形成すると予測されました。InSPACE-3 の粒子は、小さなナノサイズの酸化鉄粒子を埋め込んだポリスチレン材料でできています。

宇宙の磁性流体研究は、多くの新ナノ材料やナノテクノロジーの設計・製造に大きな影響を及ぼすかもしれません。

酸化鉄を含む流体が攪拌されると、茶色がかったさび色になります。宇宙飛行士は、プロジェクトチームの指示の下、このさび色の混合物で一連の実験を行いました。

宇宙飛行士は0.66ヘルツから最高20ヘルツの低周波数のパルスによる磁場をかけ、おおよそ毎秒1回から最高20回まで、スイッチを入れたり切ったりし、研究者たちは低エネルギー状態での構造の形成を観察しました。一般的に、磁性流体の応用においては定常的な磁場が適用され、粒子はゲルのような構造になっています。粒子はあまりよくまとまらないため、特定の形にはならず、雲や熱したガラスのように、ほとんどどんな形状にもなることができます。

パルス磁場では、磁場のオン・オフ動作により粒子の集合、解散、集合、解散、を強制的に繰り返させます。このパルス磁場では、粒子はより固まった整然とした構造に組織されます。研究者たちはこのようにして、長い時間をかけて円柱の成長を観察することができます。

宇宙ステーションの微小重力環境は、磁場のオン・オフを用いる自己組織化を理解するために非常に重要です。重力の影響が少ない環境ではコロイド混合物の動作が遅くなるため、それらがどのように作用するのか、そして地上で小さな粒子を制御するにはどうすればよいのかを、研究者たちが理解することができます。このような実験は、ナノ粒子が重力ですぐに沈降してしまう地上では行うことができません。

まず、通常では流体内の粒子は長く細い鎖を形成します。ここに磁場がかかると、粒子内の双極子がこの特異な鎖を、その磁場のかけられたフィールドと並行状態にします。その鎖は互いに完全に並行し、時間をかけて結合します。磁場がオン・オフで切り替えられると、これらの鎖の「束」が円柱のようになります。

その円柱はパルスをかけた磁場にさらされるにつれ、直径が増していきます。この自己組織化による「束」の形成は、2009年に終了したInSPACE-2までは観察されていませんでした。

InSPACEが開始されてから、それまで見たことのない現象が明らかになってきました。研究はInSPACE-2および3へと継続し、磁場がコロイド自己組織化の段階遷移に与える影響を、さらに観察してきました。これらの流体が磁気パルスに反応してどのように自らを「束」ねて固体のような状態になるのか

を一層理解できるようになったことで、研究者たちは相分離への知見を得ています。これらの小さな構成要素から、地球で使用できる新ナノ材料が発見されるようになるかもしれません。

InSPACE-2および3の産物である新しい製造モデルを、新しいブレーキシステム、シートサスペンション、ストレス変換器、ロボット工学、惑星探査機、飛行機着陸装置、振動ダンピングシステムなど、能動的な機械システムに活用できるかもしれません。それはまた、熱障壁、環境発電、カラーディスプレイのための新しいナノ材料の設計にも有望なものです。

微小要素に対する一連のInSPACEで得られる基礎科学の知見は、これらのシステムを前進させ、私たちが乗り、運転し、飛び、生活する方法を大きく改善する可能性を持っています。



InSPACEにおける、自己組織化のサイエンスビデオ画像(円柱形成)。黒い線が形成された円柱。緑の背景は、ビデオカメラの実証に使われた緑色LEDのもの。

出典：NASA

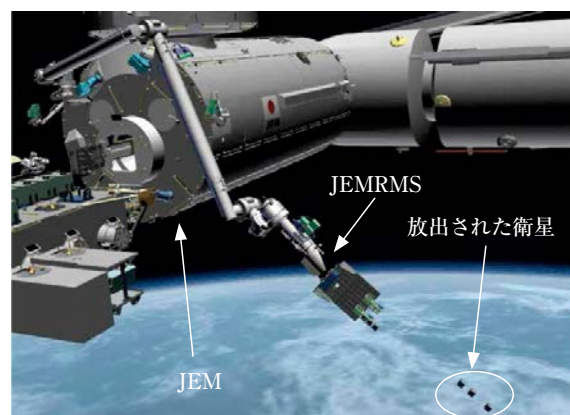
衛星

ISS は、「きぼう」日本実験棟（Japanese Experiment Module; JEM）のロボットアームと協調して動くエアロックを通して、地球低軌道にアクセスすることのできる類を見ないプラットフォームを提供しています。この小さなエアロックのおかげで、キューブサットのような小型衛星を、与圧カーゴコンテナという比較的緩やかな環境に収納した状態で ISS に運んでから、地球低軌道に放出することができるようになります。これは、小型衛星を活用しようとする者にとってコスト削減の恩恵が大きくなります。特に開発側にとって打ち上げテストの回数や冗長性要求の削減につながるからです。コストが下がれば、小規模事業者にとっては自らの技術を設計し宇宙で実証しようという、より大きな経済的インセンティブが得られます。

JEM から小型衛星を放出

従来型の衛星は、複雑なシステムと、多くの場合には専用の打ち上げロケットのサポートがないと、軌道に打ち上げることができません。しかし、新型の小型衛星は、ISS のサポートにより、宇宙に新技術を打ち上げる手法を変化させています。一辺 50 センチ未満で大抵は一辺 10 センチ（4 インチ）程度の立方体の小型衛星であるキューブサットには、新たな別の放出方法があります。ロボットアームを使用して宇宙ステーションから軌道に投入できるものがあるのです。そういった衛星は、柔らかな素材のバッグに納めて、例えば日本の宇宙ステーション補給機「こうのとり」（H-II Transfer Vehicle; HTV）のような貨物船を使ってステーションに運ばれます。その後タイミングを見計らって、衛星はステーションのキャビンから取り出され、JEM 用ロボットマニピュレータシステム（JEM Robotic Manipulator System; JEMRMS）がその衛星を、狙った軌道に向けて放出します。小型衛星を放出するシステムであるこの JEM 小型衛星放出機構（JEM Small Satellite Orbital Deployer; J-SSOD）は、宇宙航空研究開発機構（JAXA）によって開発されました。

小型衛星の開発者たちは、新たなユーザーの宇宙へのアクセスを可能にする宇宙ステーションの放出機構の利用を増やしています。



JEMRMS によって軌道に投入される衛星

出典：JAXA

以前は、あるクラスの小型衛星はピギーバック衛星として打ち上げられていました。ロケットが主衛星の他に余剰重量を打ち上げられる場合、ピギーバック衛星はロケット内に、搭載スペースを与えられ、主衛星の展開に成功した後、軌道に放出されます。ロケットに載せたピギーバックと比較して、宇宙ステーションからロボットアームで衛星を打ち上げる利点の一つは、主衛星の打ち上げタイミングに影響を受けず、小型衛星の放出に最適のタイミングを選択できる点です。また、ロケットに小型衛星を相乗りさせられる空間は限られていますが、宇宙ステーションは小型衛星をより手軽に打ち上げられる貨物補給フライトの定期便を持っているという利点もあります。

どんな衛星でも、打ち上げ時や宇宙での苛酷な環境に耐えうることを立証するために、宇宙環境試験に



ソフトサイドバッグに詰められた衛星

出典：JAXA



ISS の搭乗員が、衛星を JEM エアロック・テーブルに取り付ける

出典：JAXA

合格しなければなりません。中でも、打ち上げ中に受ける振動をシミュレートする振動試験では、衛星が厳しいレベルの揺動にさらされます。ピギーバック衛星は、主衛星と同じエリアに搭載されるため、この試験に合格する必要があります。これに対し、宇宙ステーションから放出される衛星は、ソフトバッグに入れた上、梱包材で緩衝させて貨物宇宙船によって運搬されます。宇宙ステーションへの打ち上げ中にそれらが受ける振動レベルは、ピギーバック衛星の振動より小さいものです。

振動条件の緩和は、小型衛星の開発者にとって、状

況を一変させ得ます。なぜなら、大学生のような開発者たちは、振動試験の合格に必要な航空宇宙規格の高価な電気部品にはとても手が出ないからです。

キューブサットを宇宙ステーションから放出する別の利点は、宇宙に打ち上げられた後、宇宙ステーションに搭乗している宇宙飛行士がハードウェアの品質検査を行い、宇宙に放出する前に小型衛星が破損していないかを確認できる点です。姿勢制御装置を搭載しない衛星の開発の難しさの一つに、打ち上げ時の振動が衛星に影響したかどうかの確認ができないことがあります。宇宙ステーションからの放出では、衛星の放出前に、衛星システムを点検し介入する機会が残されます。これにより、設計者は従来の宇宙規格に沿った電気部品を選択する必要がなくなり、全体的な開発コストを削減し、宇宙環境に適した新しい技術開発の促進につながります。

小型衛星は、JEMRMS を使って軌道に放出されるまでに、HTV などの宇宙ステーション物資補給宇宙船の貨物運搬用バッグに格納されて宇宙ステーションに届けられます。衛星は放出まで、宇宙ステーションのキャビン内の貨物運搬用バッグに保管されます。衛星の最終点検後、搭乗員は小型衛星を J-SSOD に



JEMRMS により軌道に放出された小型衛星の一つである FITSAT

出典：福岡工業大学

取り付け、JEM のエアロック・テーブルに設置します。そして、エアロックが閉じられた後、エアロック・テーブルは宇宙ステーションのキャビンから滑り出すように展開します。JEMRMS はエアロック・テーブルに接近し、衛星放出機をしっかりとつかみます。そして、JEMRMS は放出機に取付けた衛星を軌道投入用の所定位置に移動させます。JEMRMS は衛星の軌道に狙いを定めて指定された姿勢をとります。最後に、地上オペレーターが衛星を切り離すよう放出機にコマンドを送ります。

要約すると、JEM を活用したこの新しい衛星放出方法には、小型衛星をより頻繁に地球低軌道に展開する機会をもたらし、振動試験のハードルを下げ、使用前の最終点検を可能にする、という利点があります。

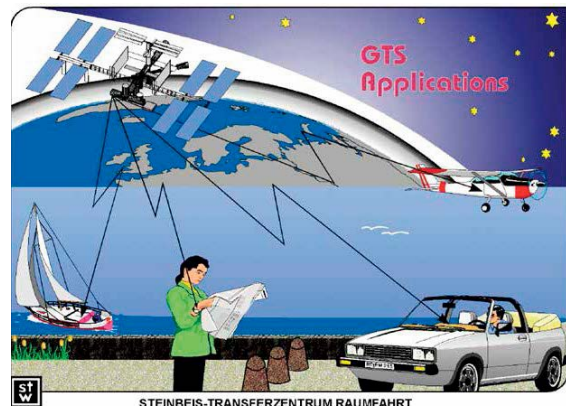
この結果、小型衛星開発の潜在的な活用者に宇宙ステーションの放出機構を利用できる機会が増加し、大学、企業、その他今までなかったタイプのユーザーが宇宙へアクセスしやすくなってきています。

時間と位置を正確に示す

ISS で搭載実験した技術による恩恵のおかげで、携帯電話の紛失、約束に遅れるなどということは過去のものになるかもしれません。グローバル伝送サービス 2 (Global Transmission Service 2; GTS-2) 実験により、無線送信を使用して地上の掛け時計や腕時計を同期し、最終的には、宇宙から直接盗難車を探したり、紛失したクレジットカードを無効化したりすることができると実証されました。

現在、ステーションのアンテナは、グリニッジ標準時としても知られる協定世界時 (UTC) を送信しています。これらの送信は世界のほぼ全域を網羅し、一日に数回、特定の位置で受信することができます。その信号は、小さな腕時計でも受信できるほど強力で、異なる時間帯の正確な現地時間を、サマータイムさえも考慮に入れて伝達することができます。地上の各受信

グローバル伝送サービス技術は、盗難車の電力を断ち使用不能とすることによって、盗難防止機能を果たします。



ISS からの GTS 信号を受け取る可能性を秘めた受信機の図

出典：シュタインバイス宇宙伝達センター

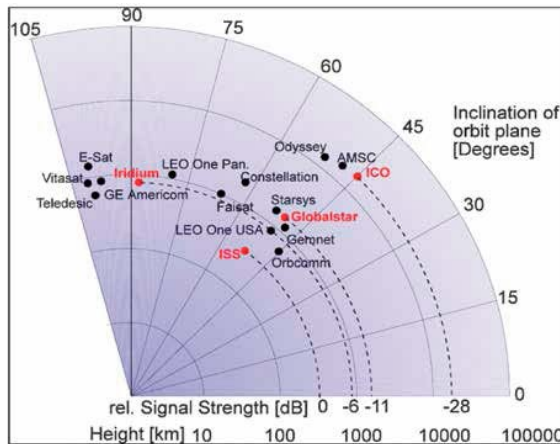
機に与えられた特有のコードで、データの信ぴょう性を検証し、安全な送信を保証しています。掛け時計や腕時計は、通常一日一度もしくは装置の電力が入った時に起動する受信機を通し、これらの信号と自動的に同期します。

GTS は、電話や自動車あるいは車の鍵などの電子機器に埋め込まれた受信チップにシャットダウンさせる信号を伝送することにより、盗難防止機能を果たすことができます。本物の鍵を持っている人でも、信号で鍵が使用不能になっているため、車を盗むことができません。それにより、時として暴力に発展することもある、ドライバーからの車の鍵の盗難は減るかもしれません。

このシステムはまた、出荷用のコンテナやトラックあるいはトレーラなどのより大きな移動体についても、その正確な位置を特定することにより、盗難を防止できるかもしれません。

時計の正確な設定と盗難防止に加えて、システム応用として他には、呼び出しサービス、自動車リコール、様々な装置の遠隔制御、コンテナ追跡や運行管理サービス、ターゲットを絞ったメッセージの中継なども考えられます。

このシステムの地上受信機は、信号の伝達によって宇宙ステーションの位置を正確に特定することができます。その反対にこの能力は、ステーションから受信機の位置を特定することもできます。将来的にはこの能力によって、軌道上の宇宙機が地上の車両をナビ



軌道の高度と移動体無線衛星群の傾斜角度および ISS からの信号と比較したそれらの相対的信号強度

出典：ESA

ゲートできるようになるかもしれません。

宇宙ステーションをこれらのグローバル伝達の手段として活用することには、他の衛星の使用に勝るいくつかの利点があります。ステーションの低軌道のおかげで、地球のほとんどの居住地域である北緯 70 度から南緯 70 度の間の各ポイントで、信号を毎日 5 回から 7 回受信することができます。また、伝達は非常に小さなエネルギーで行われます。最後に、ステーションは有人のため、宇宙飛行士が必要に応じて装置の交換・メンテナンスを行うことができます。

GTS 実験はフォルティス・スイス・ウォッチ社、ドイツ航空宇宙センター（Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt; DLR）および欧州宇宙機関（European Space Agency; ESA）によってサポートされています。シュタインバイス宇宙伝達センターでは、実験管理、開発、運用を手掛けています。そのアンテナユニットは、1998 年 12 月にロシアサービスモジュールに搭載され、2000 年夏に宇宙に打ち上げられ、2002 年から運用開始され、ステーションに搭乗した実験の中で最も古いものとなりました。現在、GTS の統合、打ち上げおよび運用は、ロシア連邦宇宙局（Roscosmos）と ESA の共同科学調査実験により、2020 年まで宇宙ステーションに搭乗するプログラムを通して、ロシア応用数学研究所が実施しています。

宇宙ステーション技術が 衛星サービスの新時代を促進

これはロボットによる燃料補給ミッション（Robotic Refueling Mission; RRM）と呼ばれていますが、NASA の RRM は宇宙ロボットが衛星に、その名以上のことができるようにするために作られました。燃料補給に成功した後、RRM は、宇宙ロボットが本来計画していたミッションではない、軌道に存在する旧型宇宙機の装置内に寒剤（冷却剤の一つ）を補給できることを、実証します。

宇宙ステーションを、技術研究開発のためのテストベッドとして、遠隔補給とロボット技術に活用しています。

宇宙ステーションへの運搬と取り付け

宇宙ステーションに届けられた新しいハードウェアにより、RRM は新たな運用のために備えることができます。新しいタスクボードと、従来は宇宙ステーション外部にハードウェアを輸送するために設計された装置である RRM 軌道上移送実験装置（RRM On-Orbit Transfer Cage; ROTC）が、さらなる能力を生み出すために RRM モジュールに追加されます。

宇宙飛行士は、ROTC を日本のエアロック内のスライディング・テーブルに取り付け、ROTC にタスクボードを設置し、カナダのロボット「デクスター」に回収後に新しいハードウェアを取り付けるための簡単なプラットフォームを与えます。

2 つ目のタスクボードと、（無脊椎動物のように形態を変化させて目視による検査を可能とする）VIPIR（Visual Inspection Pose-able Invertebrate Robot）と呼ばれる新たな装置もまた RRM モジュールに追加されます。メリーランド州グリーンベルトにある NASA ゴダード宇宙飛行センター（Goddard Space Flight Center; GSFC）の衛星サービス能力室（Satellite Servicing Capabilities Office; SSCO）で開発されたこの内視鏡型の（ボアスコープ）検査ツールは、衛星内部の修理作業を行うための「目」となっています。こ



RRM（中央、プラットフォーム上）で、ISSのカナダアーム2とカナダの「デクスター」ロボット（右）を使用して衛星サービスタスクを実証します。

出典：NASA

の両方のアイテムが日本のエアロック、ROTC、そして「デクスター」によってRRMに輸送され取り付けられます。

双腕型ロボットアーム「デクスター」、追加のRRMタスクボードとRRMツールのサポートにより、RRMチームは寒剤補給への中間段階となる作業に掛かることができます。新しいハードウェアでバルブを組み込み、VIPIRの援助で暗所に目を凝らしながら圧力シールを作る一連のタスクによって、RRMと「デクスター」は実際の寒剤交換の手前まで作業します。

RRM フェーズ II 運用は2014年の開始が計画されました。ワイヤーのカットやキャップの取り外しなど、この軌道上能力を実証する初期活動は、従来のRRMツールとアクティビティボードのサポートを借り2012年に完了しました。

宇宙での能力とフリートの柔軟性を拡大させる

非常に繊細なカメラワークを実現するために、地上および宇宙では低温流体が使用されています。しかし時間と共に、極端に冷たいこの物質は漏れ出し、カメラがうまく作動しなくなります。SSCOのプロジェクト担当補佐であるベンジャミン・リードによると、ロボットでこれらの予備を補充することにより、宇宙機の装置の寿命が計画より長くなり、最終的には衛星の機能を長持ちさせることができます。

政府と商業部門の両者は、フリート運用のオプショ

ン拡大に重点的に取り組んでいると、リードは説明しています。運用者は、高年齢化した観測衛星や宇宙機を引退させたり新しく高価なものを打ち上げたりする代わりに、寒剤を運ぶ将来の宇宙タンカーの活用によってそれらの寿命を延ばすことも選択できます。RRMによる実証は、最終的にその能力を可能にする重要なステップです。

サービス可能な未来への準備

2011年に最後のスペースシャトルのミッションにより宇宙ステーションに打ち上げられてから、RRMは軌道上のロボット衛星サービス活動を着実に実施してきました。RRMは宇宙ステーションを、カナダ宇宙庁との共同協力による技術研究開発のためのテストベッドとして活用しています。

NASAは、遠隔操作できるロボット力学によって、静止軌道上に展開している何百もの衛星の寿命を延ばすことを実証するために、RRMを開発しました。地球上空約22,000マイルを移動する高価な資産であるGEO宇宙機は、気象通報、携帯電話通信、テレビ放送、政府通信、航空交通管理など重要なサービスを提供しています。サービス能力は、将来、政府や商用フリート運用のオプションを大幅に拡大することができます。衛星所有者はそれらのサービスを利用することで、宇宙機の交換や打ち上げコストを節約することもできるかもしれません。

NASAは新しいロボットサービスの最先端能力試験を継続しています。SSCOチームはRRMと連携して、自律的ランデブー、キャプチャーシステム、燃料移送システム、衛星サービスオペレーションを統合し同期させる特別なアルゴリズムといった不可欠な技術を構築する一方、概念的なサービスミッションを研究してきました。

輸送技術

燃焼科学は ISS において最も長く実施されている研究分野の一つです。シンプルな、そしてより複雑な燃料が、宇宙でどのように燃焼するのか理解するための長期的な活動が行われています。重力の影響が少ない環境においてこのプロセスを理解することにより、重力や浮力に誘起された乱流対流のためにモデル化が大変困難な地上の燃焼モデルに磨きをかけることができます。ISS における近年の実験では、「冷炎」として知られる現象が軌道上の燃焼容器の中で観察され、どうすれば低温燃焼をより効率的な燃料利用や将来の新しいエンジン設計に応用できるかが示されました。

宇宙ステーションでの冷炎研究が、よりクリーンな地球環境を実現するかもしれない

次のガスステーションに早くたどり着きたいと焦りつつ、燃料ゲージに目をやると、燃料残量警告灯が点灯している、そのようなことは将来あまり起こらなくなるかもしれません。燃料に環境にやさしいものを選択するのは容易ですが、ISS での液滴燃焼研究のおかげで、将来、走行可能距離が延び、地球汚染を軽減することが現実になるかもしれません。

ISS の微小重力環境で実施された FLEX は、炎や燃料についての新たな知見をもたらしました。

オハイオ州クリーブランドにある NASA のグレン研究センター (Glenn Research Center; GRC) と共同研究を実施している研究者たちは、一連の炎消滅実験 (Flame Extinguishing Experiment; FLEX および FLEX2) を通じて、燃料がどのように燃焼するかについての新しい知見を得ました。

PI で 50 年以上燃焼の研究に携わってきたカリフォルニア大学サンディエゴ校のフォーマン・ウィリアムスと、副代表 (Co-PI) であるケース・ウエスタン・リザーブ大学のヴェッダ・ナヤガムの主導により、FLEX の成果として、これまで見られなかった 2 段階の燃焼過程が明らかになりました。ヘプタンの燃料液滴は火が消えたように見えても、実際には、目に見える炎な

しに燃え続けていたのです。この知見により、燃焼時における火炎の挙動をより正確に予測できるようになるため、大気汚染の低減とエンジンの燃費向上に貢献できます。

火炎について何十年も研究を積み重ね、十分な理解の下に理論モデルや数値シミュレーションが構築されてきましたが、重力の影響が少ない環境での FLEX 火炎研究は、このような予想外の結果を出しました。ヘプタン燃料の大きな液滴 (約 3 ミリ) が、燃焼と消炎に関して 2 つのモードを持つのを科学者たちが目にしたのは、これが初めてのことでした。1 度目は可視の炎として、もう 1 度は可視の炎を伴わず火炎は 2 度消えました。初期の燃焼は通常の熱い炎を伴いましたが、2 段階目の蒸発は冷炎として知られる化学的な熱放出によって維持されていました。

冷炎は摂氏約 600 度で燃焼します。これがどれほど冷たいかを理解するには、一般的なろうそくが摂氏約 1,400 度で燃焼し、約 2.5 倍も熱いことを考えると良いでしょう。

炎が消えた後も特定の条件下でヘプタン液滴の燃焼が持続する現象は、この研究が計画された時は予測されていませんでした。

この結果は、FLEX のために ISS に設置された燃焼実験ラック (Combustion Integrated Rack; CIR) 内のマルチ・ユーザー液滴燃焼装置 (Multi-user Droplet Combustion Apparatus; MDCA) を使用して得られたものです。より最近の FLEX 実験では、正オクタンおよびデカン燃料で同様の二段燃焼現象が確認されています。

CIR 内でのヘプタン液滴の燃焼中、第一段階は、やがて消える可視の炎が見られました。一度可視の炎

が見えなくなると、ヘプタン液滴は可視の炎なしに急速な準定常蒸発を続けました。この状態は第二段階消炎と呼ばれる点で突然終わりました。この時点では、より小さな液滴が残され、通常の時間依存の蒸発を経るか、時として、消炎の際に形成された雲の中で蒸気が凝縮する過程でわずかに大きくなりました。

この新しい知見は、燃焼学会のジャーナルである Combustion and Flame で発表されオンラインで入手可能です。この新たな発見は、科学者やエンジニアが数値解析モデルを増強し、火炎、燃料および燃焼の挙動をより正確に予測するのに役立ちます。また、これは宇宙や地上における多くの長期的な関わりを持っています。これらの研究結果は、汚染を減らし内燃機関の燃焼効率を増加させる新技術の開発をサポートします。冷炎燃焼は、バーナーで使う燃料を、排出物を減らしより良く制御しながら部分的に酸化させるためにも活用することができます。

予混合圧縮着火(Homogeneous Charge Compression Ignition: HCCI) エンジン、ディーゼル着火と火花着火を混合させたもので、固定であれ輸送用であれ、どんなディーゼルエンジンにも使用できます。これら2つの技術を融合させることにより、エンジンは微粒子や窒素酸化物の放出を減らしつつ、ディーゼル燃焼の高効率を維持することができます。研究者によると、これにより、汚染物質の生成源として知られているディーゼル燃料の噴霧を燃焼させる必要性を除去することができます。

ISSの微小重力環境で実施された FLEX は、炎や燃料についての新たな知見をもたらしました。ろうそく、キャンプファイヤー、またはその他の燃料源であれ、その燃焼過程には解明を待つまだ多くの秘密が隠されているかもしれません。微小重力研究は、それらの秘密を明らかにするツールとなるかもしれません。



ISSでの消火実験検査中の、燃焼するヘプタン

出典：NASA

ロボット工学

有人宇宙飛行ミッションを拡大する鍵は、必要なタスクをより効率的に実施するために搭乗員と共に作業するロボットの能力です。これらのタスクには単調または危険なものが含まれ、科学実験に集中すべき宇宙飛行士の作業時間を逼迫するものです。ISS は、長期にわたってロボットシステムの性能と信頼性を実証しながら、実際の宇宙環境下で、これらの運用コンセプトおよび手順を、開発、試験できる優れたプラットフォームです。宇宙ロボット工学に求められる精度および信頼性要求は、官民両用の技術と地上で活用される高度なロボット工学能力をもたらしました。

ロボノートの持つ可能性が宇宙、医療、工業への複合的応用に光を当てる

科学者やエンジニアたちが最初の宇宙用人型ロボットであるロボノートの開発を始めた時は、宇宙用のロボット能力の実現を目指していましたが、その設計は、重力の影響が少ない環境での使用に限定されませんでした。むしろ、多くの付属品や能力と合わせて、地球で助けを必要としている人々にロボットの手を差し伸べることにしました。

ロボノート用に開発されたグローブ、歩行、遠隔治療用技術が、地球での活用に応用されています。

最初のロボノートは、NASA と米国国防高等研究計画局の共同の取り組みとして生まれました。それは船外活動、つまり宇宙遊泳中に必要な高度な手の動きなど、宇宙ミッション用に作られましたが、それ以来 NASA は外部組織とのパートナーシップをうまく構築しながら、ロボット技術を宇宙や地上での応用に拡大する意義深い専門知識を得てきました。

ロボノートの最新版であるロボノート 2 (R2) は航空宇宙契約 (Space Act Agreement) を介して、NASA とゼネラルモーターズによって共同開発されました。R2 はより速く、より機敏に動けるロボットで、微小重力環境で人間用のツールを用いて ISS の活動を支援し、宇宙飛行士と協調して安全に仕事をするために作られました。R2 は宇宙ステーションに搭載

されていますが、ロボノートや R2 用に開発された技術は地上に応用されています。その中の 3 つの例をご紹介します。

ロボ・グローブ技術

ロボットのグローブ、つまりロボ・グローブは、NASA と GM が、宇宙飛行士が宇宙において必要とするものと工場作業者が地上で使えるものとの間に重複する部分があることに気付いてから、把持支援装置として開発されたものです。ロボ・グローブは人間の腱を補強することにより宇宙飛行士や工場作業者が把持作業をしやすくし、反復運動損傷のリスクを軽減する可能性があります。

宇宙飛行士は宇宙遊泳中に加圧宇宙服グローブを装着するため、ツールをつかんだりスクリューを締めたりする際により大きな力をかけなければならず、疲労が生じます。ロボ・グローブは、ちょうどパワーステアリングが車を進ませるのと同様に、宇宙飛行士がグローブでつかむサポートをして、EVA 任務実行中に必要とされる労力を削減することができます。

GM では組み立てラインの作業者は、勤務中ずっとツールを繰り返すつかむ作業を行います。これらの仕事は、何度も大きな力をかけたり、長時間力をかけたりしなければならないため、すぐに疲労を感じます。ロボ・グローブによって必要な力が軽減されると、工場作業者が不快感を少なく作業をするためのサポートになるかもしれません。これは疲労や反復運動損傷の軽減に役立つことでしょう。

NASA と GM は、特許権のあるロボ・グローブを作る供給業者を探しています。GM はグローブ技術を、将来の高度な自動車安全システムや生産工場への応



ロボ・グローブはNASAとゼネラルモーターズの継続的パートナーシップを通して作られました。人間がものをつかむ時に感じる疲労やストレスを軽減するために、R2技術が使われています。

出典：NASA

用に活用する計画です。NASAは地上の研究所で技術を実験し、作業用宇宙服グローブを将来的に搭乗員が使用できるよう技術を組み入れています。

ロボ・グローブは医療分野からも関心を集めています。例えば、リハビリ中の患者はこの装置を使って、ものをつかむ技能を回復させることができるかもしれません。他の応用の可能性として、開閉できるよう適合させたグローブで脳損傷患者の回復を助けることができます。NASAのエンジニアは、手を一部切除した人々のためにグローブを適合させる方法も探っています。将来的に医療センターや研究施設とのパートナーシップによって、ロボ・グローブの技術を、宇宙探査やGMの工場作業での使用以外に、医療分野で拡大させることができるかもしれません。

ロボティック・エクソスケルトン

NASAとフロリダ人間・機械認識研究所は、オーシャニアリング・スペース・システム・オブ・ヒューストン（Oceanering Space Systems of Houston）のエンジニアのサポートを得て、共同でX1と呼ばれるロボティック・エクソスケルトンを開発しました。R2からもたらされたX1技術は、いつの日か宇宙飛行士がより健康的に宇宙に滞在し、身体障害を抱える地上の人々を助けるという付加的な恩恵をもたらすかもしれません。

現在、研究開発段階にあるX1は、57ポンド（約25.8キロ）のロボット装置で、人間の脚の関節の動きを補助または抑制するために体に装着することができます。ハーネスを、背中から肩越しに脚装着すると、動作を10度に抑制します。また、腰と膝に装着した4個のモーター式の関節を、6個の受動関節により、脚の横方向の動き、回転して向きを変える動きや、屈曲動作をサポートします。

フロリダ人間・機械認識研究所の経験を下半身不随患者用のエクソスケルトン開発に採用するため、NASAとIHMCはR2アーム技術を簡素化しました。彼らは、車いす使用者がエクソスケルトンを使用して外に出られるくらい、それをスリムにしました。X1装置は、下半身不随患者やその他リハビリ環境にいる患者に対し、様々な地形で介助付き歩行ができるほどの十分な力を与える可能性を有しています。

IHMCやNASAによるX1技術の応用に加え、ヒューストン大学の研究者たちはエクソスケルトンを脳信号によって制御できるような応用に取り組んでいます。このタイプのエクソスケルトンは、人の頭に取り付けた装置で脳が送り出す信号を読み、それを脚に送ることで脚を動かせるようになります。

遠隔治療応用

ヒューストン・メソジスト・リサーチ・インスティテュートとNASAは共同で、R2に使用された技術の一部の、宇宙と地上での応用に取り組んでいます。研究チームは、遠隔操作経路によって、R2に医療用マネキンに対し超音波スキャンや注射器を使用させるなどの試験を実施し、R2の遠隔医療への活用を目指しています。

R2の遠隔操作による制御は、R2の細やかな操作性を利用し、かつ視覚装置を通して作業をモニターする



宇宙飛行士と下半身不随患者の可動性と力を改善する X1 ロボティック・エクソスケルトン (Robotic Exoskeleton) を実演する、NASA プロジェクト・エンジニアのシェリー・リー

出典：NASA

これらのビデオでさらに多くのことを学ぶことができます：



ロボ・グローブ技術：

<http://tinyurl.com/nasa-robo-glove>

エクソスケルトン技術応用：

<http://tinyurl.com/nasa-exoskeleton-tech>

ロボノートの遠隔治療イニシアチブ：

<http://tinyurl.com/robonaut-telemedicine>

ことにより、正確かつ効率的に実行されました。この R2 の能力を発揮できれば、将来的には医師が宇宙もしくは地上の僻地にいる人々に対し、遠隔から複雑な医療行為ができるようになるでしょう。

NASA の宇宙技術プログラムは、革新的なパートナーシップを通して、ロボット利用技術の開発、試験、応用を進めています。数多くの最新の研究で実証されているように、彼らは R2 技術によって、すべてのパートナーがより良いものを作りができるよう、資源活用の新しい協調関係の構築を目指しています。ISS をこれらのロボット利用のような将来の技術のためのテストベッドとして活用することは、将来の宇宙探査にとって不可欠であり、人類の健康への貢献につながるものでもあるのです。



国際宇宙ステーションと宇宙探査の未来に感銘を受ける生徒

出典：NASA

地球規模 の教育



国際宇宙ステーション（ISS）は、世界中の生徒や教師双方の想像力を引き付ける唯一無二の能力を有しています。人間がステーションに搭乗していることにより、科学、技術、工学、数学（STEM）へ子供たちの関心を引き寄せ、学習意欲をかきたてることを目的とした、数多くの教育活動の基礎を提供しています。数あるプロジェクトの中でも、ISS アマチュア無線プロジェクト（ARISS）、中学生による地球の知の獲得（EarthKAM）、同期的に位置の保持・連動・修正を行う実験衛星（SPHERES）Zero Robotics コンテストなどのプロジェクトでは、生徒が搭乗員の映像を入手し無線連絡をすることで、世界中の生徒、教師、一般の人々が宇宙にアクセスできるようにしてきました。このようなプロジェクトやそれに付随する教材が、世界中の生徒に配布されています。宇宙ステーションの継続的な活用を通し、私たちは次世代の科学者、エンジニア、作家、芸術家、政治家、そして探検家たちの意欲をかきたて、また良い刺激を与えています。



ISS が次世代の生徒たちに 良い刺激を与える

1960 年代に月へのミッションの担当をしていた革新者たちに刺激され、自家製の宇宙ヘルメットや地球低軌道の少し手前までおもちゃの戦士を送り出す缶ロケットが出現しました。しかし、ISS は、次世代が今のミッションを見て学び、参加することさえできる機会というもっと直接的なアプローチを可能としています。

ISS は生徒たちが受け身の学習から脱却するための実践的教育機会を提供します。

10 年以上にわたり宇宙ステーションは、生徒たちに

受け身の学習からの脱却を促し、双方向性の参加者として彼らが加わる実践的教育機会を提供してきました。NASA は 2012 年に、これらの活動をまとめ一般に公開するために、「次世代に良い刺激を与える：国際宇宙ステーション教育機会と成果 2000 年から 2012 年 (*Inspiring the Next Generation: International Space Station Education Opportunities and Accomplishments, 2000-2012*)」を発行しました。

2000 年から 2012 年にかけて、4,200 万人以上の生徒、280 万人の教師、そして 44 カ国、2 万 5,000 の学校が宇宙ステーションからの教育活動に関与しました。

この発行物は国際協力の下、現在、生徒向けに提供されている機会の詳細と、既に完了したものについての概略を記したものです。包括的な記録には、以下の宇宙ステーションのパートナーすべてによる教育プロジェクトが含まれます：NASA、カナダ宇宙庁、欧州宇宙機関 (European Space Agency; ESA)、宇宙航空研究開発機構、ロシア連邦宇宙局。競争力のあ



ISS 教育活動に携わる ISS チーフ・サイエンティストのジュリー・ロビンソン

出典：サリー・ライド「アースカム」

る生徒のための機会として、科学過程の深さを解明する本物の研究を活用しています。例えば、SPHERES Zero Robotics チャレンジは、宇宙ステーションに搭載した仮想障害物経路でロボットを誘導するためのソフトウェアプログラミング技能開発に焦点を当てています。また、「Try Zero-G」や「YouTube スペースラボ」など、生徒の実験を軌道上で行うコンテストも開かれ、2012年に宇宙ステーションで実施されています。探求型の学習アプローチでは、生徒やそのコミュニティが参加でき、ステーション上で行われている研究から得られる増大な知識に貢献することができます。

これらのタイプの活動には調査型学習アプローチが含まれます。生徒は科学の本質を理解し、科学的概念、法則、および理論についての掘り下げた知識を得て、科学や数学への関心、考え方、そして「思考習慣」を伸ばしていきます。

その他のステーションとの交流の機会には、生徒がアマチュア無線を通してステーションの宇宙飛行士と接触できる ISS アマチュア無線プロジェクト (ARISS) が含まれます。NASA 教育室を通して行われる飛行中の教育的ダウンリンクセッションも、生徒と搭乗員の通信を可能にし、コミュニティは生中継映像放送によって、彼らと話をしている宇宙飛行士を見ることができます。

ナノラックス社と連携して実施される生徒宇宙飛行実験プログラム (SSEP) など、ビジネスチャンスも増えています。このプログラムにより、小・中学生は、自分たちの研究を提案し宇宙ステーションに打ち上げる機会を得ています。

教育文書はハードコピーの他、International Space Station Research and Technology のウェブサイト <http://www.nasa.gov/iss-science> からダウンロードすることもできます。



実験室で実験の予備的検討を実施する、カリフォルニア州ウェストヒルズのシャミナード・カレッジ・プレップ・スクールの生徒

出典：生徒宇宙飛行実験プログラム

探究学習

ISS 最初の実験棟が軌道に打ち上げられてから、生徒たちは科学・工学プロジェクトに関与し参加するという、他に類を見ない機会を得ています。これらのプロジェクトの多くは、探究学習、つまり生徒が疑問、仮説に基づく実験、補強証拠の入手、解決策や説明手段の見極めができる、科学教育のアプローチをサポートしています。この学習へのアプローチは、生徒を科学および技術分野のキャリアへと突き動かす上で最も効果的なものとして定評があります。

科学を学ぶ生徒たちが 宇宙研究から予想せぬ結果を得る

YouTube は、NG 集やかわいい子猫、ミュージックビデオを見つけられる絶好の場です。今では微小重力研究の大きなアイデアを投稿する場にもなっています。これらのアイデアのうち2つが、実際に ISS へと飛び出しました。「YouTube スペースラボ」コンテストは、そのような機会を提供し、3名の生徒の研究が軌道上の実験室で行われました。

**「YouTube スペースラボ」コンテスト
は何千人もの生徒の意欲をかきたて、
14歳から15歳の3名の生徒の微小重力
研究のアイデアがISSに向け飛び
たちました。**

当時高校生だったミシガン州トロイのドロシー・チェンとサラ・マー、エジプト・アレクサンドリアのアムル・モハメドにとって、空はもはや彼らの研究の限界ではありません。チェン、マー、モハメドは、YouTube スペースラボの地球規模のコンテストの勝者として研究調査をしました。コンテストでは14歳から18歳の生徒が、2分間のビデオをYouTubeに投稿し、宇宙ステーションで宇宙飛行士が実施する物理や生物の研究を提案します。彼らの研究は世界中からの2,000以上のエントリーの中から選ばれました。

勝利を取めたこの2つの研究は、重力の影響が少ない環境における枯草菌 (*B.subtilis*) の抗真菌特性について、そして、ハエトリグモ (*Salticus scenicus* : ゼ



2013 年 ISS 研究・開発コンファレンスで、宇宙における枯草菌の抗真菌特性について研究成果を発表する、YouTube スペースラボ優勝者、ドロシー・チェン

出典：CASIS

ブラジャンピングスパイダー) とセアカハエトリグモ (*Phiddipus johnsoni* : レッドバック・ジャンピングスパイダー) それぞれの捕食行動に注目しました。

彼らが得た研究結果によると、微小重力は軌道上の実験室で行われる調査研究において、したたかに働くということが分かりました。

チェンとマーは、農産物の抗真菌として一般的に使用されている自然発生細菌である枯草菌 (*B.subtilis*) が、重力の影響が少ない環境で成長すると、地上で培養された時に比べ、抗真菌特性が増加するという仮説を立てました。

彼らの実験では、添加物により成長や抗真菌力に影響があるかを見るために、枯草菌栄養源にリン酸塩と硝酸塩を加えました。

リン酸塩と硝酸塩はバクテリアの成長を助長する栄養素として働く可能性があります。宇宙ステーションの船内実験の結果によると、地上で発生したバクテリアに比べ、重力の影響が少ない環境ではバクテリアの発生量は極小でした。重力の影響が少ない環境は、リン酸塩や硝酸塩が枯草菌の成長に作用する度合いには関係しないことが分かりました。

現在カリフォルニアの大学生であるモハメドは、軌道上にいる宇宙飛行士、スニータ・ウィリアムズと話している中で、ハエトリグモの研究が進んでいることを見て興奮しました。

スペースドロイドと欧州の連携

ビデオゲームで遊んだり、SF映画を観たりする時間の合間を縫って、ISS に搭載され、地上からの指示に従って動く小型衛星ロボット部隊の実現を目指している学生のグループがあります。

高校生たちは、ISS のドロイドのプログラムに競って挑戦する中で、重要な工学的スキルを習得します。

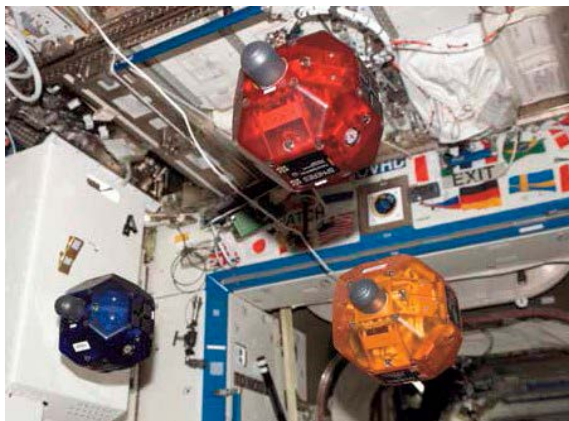
ESA は NASA、米国国防高等研究計画局 (DARPA)、そしてマサチューセッツ工科大学 (MIT) による Zero

Robotics コンテスト (http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/690.html) に参加しています。コンテストは、高校生にとって、自分がプログラムしたドロイドを宇宙ステーションで作動することができるまたとない機会になります。SPHERES (Synchronized Position Hold, Engage, Reorient, Experimental Satellites) は、独自に電力、推力、計算能力と航法機能を備えた、バレーボールサイズの衛星です。

SPHERES をリモートコントロールする挑戦は、米国において MIT の冒険心ある教授がスターウォーズの物語に刺激されてこの興味深いロボットを創ったことから始まりました。小型宇宙機は 2006 年から宇宙ステーション内部で自律ランデブーとドッキング操作を試験するために使用されてきました。

欧州の生徒たちがプログラムの課題に設定していることは、微小重力における編隊飛行です。ESA 参加国の多くの学校の生徒たちが、3 つの SPHERES を宇宙ステーションでリアルタイムにコントロールするための編隊プログラムを作成します。ドロイドのコーディング要求に詳しい地元の SPHERES の専門家が欧州の各学校に派遣されます。ESA がスポンサーとなり、何人かの大学スタッフが MIT で訓練を受けています。

このコンテストは、衛星にコマンドを入力することだけを目的とするわけではありません。地元の専門家が生徒たちに、問題解決、デザイン思考プロセス、運



宇宙ステーションの3つのSPHERESは設備と見なされています。2つはZero Roboticsのために使用されています。

出典：NASA



SPHERES Zero Robotics に参加する生徒たち

出典：ESA

用訓練、チームワークなど、重要な工学的スキルの習得をサポートしています。

この結果、軌道上での衛星利用や機体組立に関わる大きな改革につながるかもしれません。

米国と欧州のチームは、チームで作ったアルゴリズムを微小重力を模擬した環境で実装し、各地域で予選を行います。決勝は大西洋をまたいでの対決となります。

勝者のソフトウェアは宇宙ステーションにアップロードされ、微小重力下にある3つの SPHERES に実装されます。そして搭乗している宇宙飛行士によって実行されます。決勝戦はオランダにある ESA 技術センター、欧州宇宙技術研究センターおよび MIT でストリーミング中継されます。

スペースドroidsと欧州の連携はかつてないほど強力になっています。このコンテストは、欧州と米国の何百人もの高校生を対象に、ソフトウェアのコーディングによりドroidsを操作する機会を提供して

きました。第1回目のコンテストの成功によって、宇宙ステーションが生徒たちにとって、共通の科学実験プラットフォームになることが確立されました。彼らはロボット時代に向け乗り出しました。フォースと共にあらんことを！

NASA は生徒たちの工学面の成功を直感している

現在、社会に出ていく若い科学、技術、工学、数学の専門家たちの一部は、恐らく HUNCH (High school students United with NASA to Create Hardware: ハードウェア創造にむけたNASAと高校生との連携) プログラムによって各分野に進むことを決めたことでしょう。HUNCH は、ISS での利用や、NASA の宇宙飛行士や管制官の訓練での利用を目的とした、費用効果の高いハードウェアやソフト製品を作るための、NASA と高校生、中学生との間で行われる全国的教



ISS の第 26 次長期滞在 (Expedition26) 中に、HUNCH プログラムで生徒が作成した空き缶プレス機を観察する、ESA のパオロ・ネスポリ宇宙飛行士

出典：NASA

生徒たちは ISS で使用する費用効果の高いハードウェアやソフト製品を作ることにより、キャリアをスタートさせ、宇宙飛行プログラムのコストを削減します。

育プログラムです。

開始されて 11 年の間に、HUNCH は広く知られるようになり、24 州の 77 校 1,750 名の生徒が参加してきました。受講者は科学、技術、工学、数学 (STEM) 面のスキルを磨く実践的な機会が得られます。

HUNCH に参加する生徒たちは、3D ソフトウェア、設計、フォトタイピング、溶接、基本構造、批判的思考法、問題解決スキルなどを活用・応用することを学びます。NASA はこれらの制作過程において、材料や装置を提供し、メンタリング、検査管理もします。生徒たちは NASA のためにこれらを作りあげる間に、研究者としての自信や関心も築いていくのです。

これまで HUNCH の参加者は、宇宙ステーションに搭載する 1 段式ロッカー、カーゴ輸送バッグ、教育ビデオ、実験などに取り組みました。いくつかの際立つプロジェクトには、使い捨て折り畳み式のグローブボックス、宇宙ステーションの搭乗員宿泊室用オーガナイザー、人間生理学研究用設備を提供する欧州生理



HUNCH プログラムの一環である NASA 訓練プログラムで、ハードウェアの実物大模型をジョンソン宇宙センターのスタッフに見せる、サイプレス・ランチ高校（テキサス州サイプレス）の生徒たち

出典：NASA

モジュール (PMR) ラックトレーナーなどが挙げられます。

2003 年の HUNCH 開始以来、NASA 用の何百ものアイテムが生まれてきました。

HUNCH プログラムで学んだスキルの最高潮として、テキサス州のサイプレス・ウッド高校の 2 名の生徒、ロバート・リップハムとアリー・デルコウスキーが選ばれ、フロリダ州オーランドで開催される技術生徒協会 (TSA) 全国大会に出席し、NASA の微小重力研究グローブボックス (MSG) トレーナーを構築する中で得たスキルを発表しました。

HUNCH は宇宙科学促進センター (Center for the Advancement of Science in Space; CASIS) と共同で、工学教育への取り組みを紹介する資金を生徒に提供しています。

リップハムとデルコウスキーが改良したデザインにより、搭乗員のミッション準備に使用される宇宙用ハードウェアの実物大模型である MSG トレーナーが効率化され、NASA は費用を抑えることができました。これらのアイテムの構想が HUNCH に寄せられた時、4 つの MSG 高性能トレーナーの費用は 100 万ドルと見積もられました。HUNCH は 5 つの MSG トレーナーを 25 万ドル未満で NASA に提供しました。

毎年、HUNCH プログラムに参加する生徒や教師たちすべての表彰式が行われています。参加者数は年々増加し、同時に生徒たちの作品の質、量、多様性も拡大しています。表彰式は生徒の作品を評価すると共に、生徒と NASA が一体となった取り組みの教育的恩恵を認識する機会でもあります。これはしばしば、生徒の自分に対する自信や STEM キャリアへの進出希望などに関する姿勢の変化によって測られます。

HUNCH は、NASA のコスト削減やリソースの効率化を実現しつつ、次世代の科学者や探検家に良い刺激を与える革新的ソリューションです。どの学校も HUNCH のウェブサイトから参加申し込みすることができます。<http://www.nasahunch.com/>

「トマトスフィア (Tomatosphere™)」： 生徒の科学を通した、発見の種まき

月の拠点。火星の足跡。小惑星への訪問。世界中の宇宙旅行者が ISS の先を思い描き、さらにはるか遠くでの人類のミッションを想像するとともに、科学者た

ちは、母星からより遠くへと人間を送り出す多くの挑戦にすでに取り組み始めています。ISS へのミッションは、3 カ月、6 カ月、時として 12 カ月もの間、人間の身体が重力の影響が少ない環境にどのように適応するかに関して、私たちの理解に大きな貢献をしてきました。しかし、太陽系より遠い所へ歩みを進めるには、より長い遠征が必要となります。例えば、火星への有人ミッションという、片道 6 カ月に加えて、約 18 カ月の惑星での滞在を意味します。

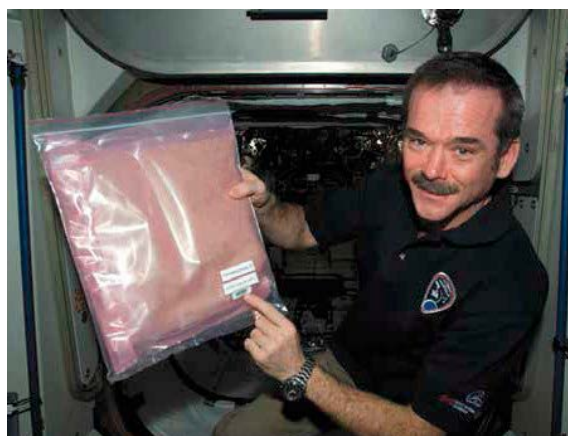
受賞プロジェクトである「トマトスフィア」教育プロジェクトにより、生徒たちが科学、宇宙探査、農業、栄養について学ぶことができます。

長期ミッションに携わるであろう将来の宇宙飛行士は、安全や健康維持のために自給自足をする必要があるでしょう。2～3 年分の食料を輸送することは高



トマトスフィア実験の一環として、トマトの苗を測る小学 3 年生

出典：トマトスフィア (Tomatosphere™)



トマトスフィアに使用される 60 万粒のトマトの種子とポーズをとる ISS 前コマンダー、カナダ人宇宙飛行士のクリス・ハドフィールド。種子はステーションに搭乗し地球を 9 カ月間回った後、ハドフィールドと共に 2013 年 5 月に地球に帰還しました。これらの種子は、カナダと米国の 16,000 の教室で育てられ、プロジェクト最大参加数となります。

出典：CSA、NASA

くつき実用的ではないため、宇宙飛行士は目的地に向かう途中で自分たちの食料を生育しなければなりません。宇宙農業という未来的に聞こえるかもしれませんが、宇宙探査機の閉鎖環境において、植物は生命維持システムに多大な貢献をします。植物は食料、水、酸素を提供するだけではなく、二酸化炭素や廃棄物をリサイクルします。

しかし、宇宙の放射線に満ちた環境でいったいどのように植物を効果的に育てられるのでしょうか。宇宙のミッションに最適な植物は何でしょうか。どのようなタイプの種子が長旅に耐え発芽するのでしょうか。次世代の宇宙飛行士、科学者、エンジニアたちを募ってこの問題の解決をしてもらうのはどうでしょうか。

受賞プロジェクトである「トマトスフィア (Tomatosphere™)」教育プロジェクトは、2001 年以来、まさにそれを行ってきました。推定 300 万人のカナダ、米国の生徒たちが、科学、宇宙探査、農業、栄養について学ぶとともに、研究者たちがデータを収集し、これらの質問の答えを考えてきました。「トマトスフィア」では生徒たちに、宇宙や模擬宇宙環境に曝された種子一式と、比較対象の種子一式、合計 2 セットのトマトの種子が配られます。

どちらがどちらのセットか知らされることなく、生

徒たちは教室で種子を育てトマトの苗、発芽率、成長パターン、種子の強さなど様々な情報を測定します。この方法は「盲検研究」として知られており、生徒にとってプロジェクトの謎を本物の科学に変えるものです。それぞれのクラスは結果をプロジェクトのウェブサイトで報告し、園芸や環境生物学を研究する科学者たちと共有します。

このプロジェクトの基礎実験研究は種子の発芽率を調べるのですが、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、さらには生態系科学に至るまで様々なトピックについての理解を深められるよう、補助教材が教師のために作成されています。

「トマトスフィア」の実践学習アプローチを通し、生徒たちは科学や宇宙研究がどのようなものか「味見」をすることができます。自分たちで育てた「スペーストマト」を自宅に持ち帰るというご褒美に加え、今「トマトスフィア」に参加している生徒たちは、将来の宇宙探索に個人的な貢献をしているということが分かります。そしてもしかすると、宇宙飛行士が火星の表面で新鮮でジューシーなトマトにかぶりつきながら、彼らに感謝する日が来るかもしれません。

「トマトスフィア」は、ハインツ・カナダ、ハインツシード、ストークス・シード社、ゲルフ大学、レッツ・トーク・サイエンス (Let's Talk Science)、ファースト・ザ・シード財団 (First the Seed Foundation: FTSF) およびカナダ宇宙庁 (CSA) の支援を受けています。

生徒たちがサリー・ライド「アースカム」で宇宙から地球を撮影

サリー・ライド「アースカム」(中学生による地球の知の獲得: EarthKAM) は NASA による教育普及プログラムで、生徒、教師、一般の人々が研究者となって、宇宙特有の視点から地球について学ぶことに焦点を合わせています。サリー・ライド「アースカム」

中学生たちはステーションの軌道を追跡して、地図帳を参照し、天候を確認してから画像のリクエストを行います。



2013 年春のミッションで撮影されたバハマの画像

出典: サリー・ライド「アースカム」

ミッションでは、世界中の中学生が地球の特定の地点を指示できます。サリー・ライド「アースカム」による画像コレクション全体は、画像検索アーカイブで入手できます。この画像コレクションと付属する学習ガイド、またアーカイブは、生徒たちに地球・宇宙科学、地理、社会学、数学、通信、美術へ興味を持たせる絶好のリソースです。年間4つのミッションが行われます。

サリー・ライド「アースカム」は、「デスティニー」米国実験棟の科学観測窓にある窓観測研究設備 (Window Observational Research Facility; WORF) に取り付けられたニコン製 D2Xs デジタルカメラを使用します。この窓の高性能な光学特性のおかげで、生徒がオンラインプログラムで送信した指令により、地球の高解像度写真を撮ることができます。生徒と教師は、これら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。サリー・ライド「アースカム」の発案者たちは、この宇宙ステーション体験の興奮と中学校教育との結び付きにより、新たな探検者、科学者、エンジニアが生まれるきっかけになることを願っています。

生徒たちは、インターネット上のツールや資料を積極的に活用しながら、サリー・ライド「アースカム」で宇宙機の軌道や地球の写真撮影について学びます。教師の助けを借りながら、目標位置を特定し、次にステーションの軌道を追跡して、地図帳を参照し、画像撮影をリクエストする前に天候を確認します。これら



サリー・ライド「アースカム」に参加する、カナダ・アルバータ州グッド・シェパード・スクールの2人の生徒
出典：NASA

の撮影リクエストは他の生徒グループ、この時は、サンディエゴのカリフォルニア大学に集められました。これらの大学生たちが、このプロジェクトのサリー・ライド「アースカム」ミッション管制センターを運営しています。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、NASA ジョンソン宇宙センターの助けを借りながら、宇宙センター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、希望の画像を撮影後、宇宙ステーションのコンピュータに転送され、地上のサリー・ライド「アースカム」コンピュータに届けられます。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。

サリー・ライド「アースカム」は1995年に始められ、元々はKidSatと呼ばれていました。KidSatカメラは、その実行可能性を試験するためにスペースシャトル飛行を3度（STS - 76、81、86）経験した後、ISSに移され、ISS アースカムと改名されました。2013年に再度改名された際は、米国初の女性宇宙飛行士でこのプログラムの創始者であり、2012年7月23日に亡くなった故サリー・K・ライド博士に敬意を表し、サリー・ライド「アースカム」と名付けられました。

2001年3月の宇宙ステーションへの最初の飛行以来今日まで、サリー・ライド「アースカム」は30万人近くの参加生徒、そして無数のオンラインフォロワーの生活に関わってきました。このプログラムは、現在のところ74カ国のユーザーを持ち国際的な存在感を

放っています。サリー・ライド「アースカム」で興味を抱いたビューアーや参加に関心のある教師は、オンライン <https://earthkam.ucsd.edu/> にて登録することができます。

Try Zero G：アジアで次世代の情熱を燃え上がらせる

12歳のリリー・ソーントン、この日初めて海外へ出発するため、オーストラリアの空港で日本行きの飛行機を母親と座って待っていました。全く異なる環境へ行くことや、一旦飛行機に搭乗してしまうと直面する言語の壁のことを考えると、このような年若い少女は緊張してしまうかもしれませんが、リリーの胸中は、大方の12歳の女の子があまり抱かないもので占めていました。リリーは彼女の微小重力実験がISSでTry Zero Gravity (Try Zero G) プログラムを通して実施されるのを見に行くところなのです。

「Try Zero G」は、子供たちや教師たちがISSやその教育実験プログラムについて学ぶことを目的としています。2009年にJAXAが、「きぼう」日本実験棟

アジア各国の生徒たちが、ISSで自分たちの微小重力実験を実施してもらえるよう競い合っています。



JAXA 筑波宇宙センターにて。
オーストラリアの12歳、リリー・ソーントン
出典：JAXA

(Japanese Experiment Module; JEM) を使用して国内で微小重力実験プログラム「Try Zero G」をスタートさせました。それは全く新しい革新的な教育プログラムで、日本で一般市民がISSの実験に参加できる機会をもたらします。このプログラムは一般市民の関心を高める点で成功を収めてきました。2009年には、実施テーマとして合計1,597のアイデアが寄せられました。このうち、16個が選ばれ、国内の「Try Zero G」アイデアが日本人宇宙飛行士によって実施され、その後も続けられました。

ISSで行われている教育活動が人間に恩恵をもたらすとの信念の下、JAXAは「Try Zero G」プログラムをアジアの国々にも紹介し、2011年からアジア・太平洋地域宇宙機関会議 (Asia-Pacific Regional Space Agency Forum; APRSAF) の枠組みの下で実施されるようになりました。アジアの国々での最初の「Try Zero G」は2010年第17回APRSAFにて発表され、3カ国から10のアイデアが提出されました。5個のアイデアはJAXAの古川聡宇宙飛行士によって2011年9月22日に実施されました。「Try Zero G」続編は、最初の「Try Zero G」終了直後に、シンガポールで開催された第18回APRSAFにて発表されました。応募数は増加し、JAXAは4カ国から127の応募を受け付けました。8個のアイデアはJAXAの星出彰彦宇宙飛行士によって2012年11月15日に実施されました。

リリーのアイデアである「Weight Station (ステーションを計量する)」は、重力の影響が少ない環境下での、ばねばかりの動きを観察します。リリーのアイデアがISS実験に選ばれたことは、彼女の住む小さな町やオーストラリア・ビクトリアにある学校で大きなニュースになりました。JAXAの施設にダウンリンクされるのを見ることができると聞き、リリーは自分の実験が実施されるのを自分の目で見てみたいと思いました。日本へ行って夢をかなえられるよう、彼女の学校や町全体が彼女の旅行費用をまかなうために募金活動を行いました。

2012年11月27日に、リリーと母親であるエリーズ・ソートンは旅行で来日し、JAXAの筑波宇宙センターを訪れることができました。彼女たちは宇宙センターを見学し、リリーの実験が星出彰彦宇宙飛行士によって実施される様子のダウンリンクビデオを見ました。見学の中で、筑波宇宙センターの運用管制室のフライトディレクターと話をする機会がありま

した。フライトディレクターは、ISSや微小重力について話してくれました。リリーと母親は細心の注意を払って耳を傾け、質問をしながらISSや微小重力状態についての理解を深めました。リリーにとって、その見学は楽しく興味深いものでした。エリーズによると、リリーの夢は宇宙ロボット工学のエンジニアになることだそうです。私たちは、リリーがその夢を追いつつ、努力が実を結ぶことを願っています。

インスピレーション

教育活動の実施は宇宙ステーション建設の理由ではありませんが、宇宙飛行士が滞在している ISS は世界中の生徒や教師を感化しています。中継のダウンリンクまたは無線を使用しての会話で搭乗員とリアルタイムでつながれる機会は、宇宙探査や化学、技術、工学分野への応用について、生徒の想像力を燃え立たせています。

アジアの生徒たちが宇宙ミッションで 宇宙飛行士と共に働く

タイの Mahidol Wittayanusorn 高校に通うメタウィ・チョムトーンは唐辛子の種を植えその成長を観察しています。一方、インドネシアのバンドン工科大学ではレオニータ・スワンジャジャがトマトの種を小学生に配っています。これらは宇宙を旅した種子で、アジア太平洋地域の多くの生徒や児童が熱心にこの「宇宙種子」を植え、育てています。アジアの種子 (Space Seeds for Asian Future; SSAF) <<http://iss.jaxa.jp/en/kuoa/ssaf/>> はアジア太平洋地域の宇宙機関や科学教育機関との共同プログラムです。

宇宙飛行士との連携を通し、生徒たちは宇宙の苗と地上で育つ苗の違いを比較します。

SSAF は、宇宙へ種子を送り出し地上へ持ち帰る以上のことをします。それには宇宙飛行士と地上の生徒たちの連携が求められます。2013 年 9 月に、宇宙飛行士カレン・ナイバーク博士は ISS の JEM の保管ラックから箱を取り出しました。その箱には、水やりの後、7 日間暗所で育てられた小豆の種子が入れています。

それと並行して地上では、生徒は自分たちのプランターボックスを準備し、種を植え始めました。

彼らは宇宙の苗と地上で育つ苗の違いを見るために、植物の成長を観察しました。カレンは、ボックス内の苗をビデオカメラで見せました。その後、苗をいくらか取り出し、その茎の強さを調べました。その工程のビデオ映像は、JAXA 筑波宇宙センターにダウンリンクされました。地上スタッフは、まるで彼女の傍

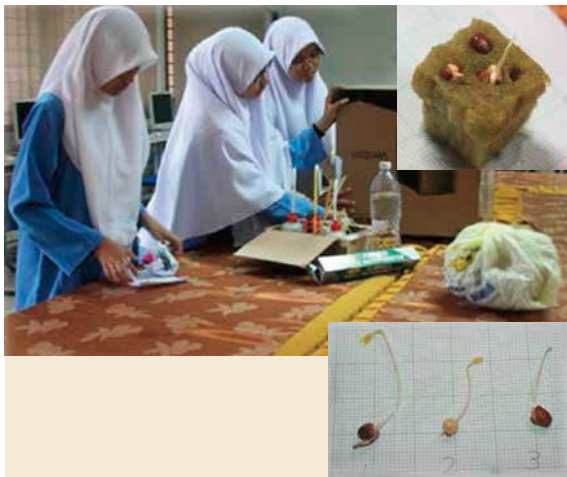


筑波宇宙センターで「アジアの種子 (SSAF) 2013」実験プログラムを地上スタッフとしてモニターする、大阪市立大学の生徒たち。実験プロトコルの開発やプラント材料の準備において重要な役割を果たしました。

出典：JAXA

にいるかのように適宜宇宙の苗を観察しました。ダウンリンクされたこれらのビデオ映像は「アジアの種子 (SSAF) 2013」プログラムに参加している組織に配信され、生徒たちにビデオを見せるためのタイムラインが設定され、生徒たちは宇宙飛行士と連携している気持ちになりました。

マレーシアでは、マレーシア国立宇宙局が「アジアの種子 (SSAF) 2013」の科学研究における生徒のスキル開発をサポートするためのコンテストを開催しました。それぞれ 5 名で構成される、25 の小学校と 54 の中学校の合計 79 チームがこのコンテストに参加しました。他の国では、オーストラリア、インドネシア、日本、ニュージーランド、フィリピン、ベトナムを含む、様々な年齢グループの生徒や児童がこの実験を通して科学手法を学びました。これらの若者たちは宇宙技術のみならず、科学、技術以外の分野の将来の発展に大きな役割を果たしています。



実験の準備をするマレーシアの生徒

出典：マレーシア・クリム、ロイヤル・マレーシアン・ボリス、マラ・ジュニア理科カレッジ

結果からは、宇宙の苗は地上で育つ苗とかなり異なることが分かりました。生徒たちは、小さな種子が様々な重力条件に順応できることを目にしながら、その素晴らしい能力を理解しました。もっと複雑な科学には、より厳格な実験条件の管理が必要ですが、「アジアの種子 (SSAF) 2013」の観察は新たな研究プロジェクトを開発する科学者たちに多くのヒントを与えました。

ISS で実施される「シャドウ・ビーコン」 宇宙実験の教育的恩恵

科学や教育の発展に対する一般の関心を高めるために宇宙飛行を活用することは、世界中の宇宙機関の常識となっています。特に、国際宇宙ステーションのロシアセグメント (ISS RS) の「シャドウ・ビーコン (Shadow-beacon; SE)」シリーズは 2011 年から科学的、教育的目的で行われてきました。

軌道上に搭載したラジオビーコンは 145 メガヘルツ域の VHF サウンディング信号を送り、地上の参加者たちは信号が現れた時を記録し、信号がなくなるまでタイムマークで追います。この情報は地理的位置データと共に地上の情報保管センターに送られます。それぞれの動作シーケンスにかかる時間は 20 分で、その間 ISS は計測された範囲の大陸を通過していきます。

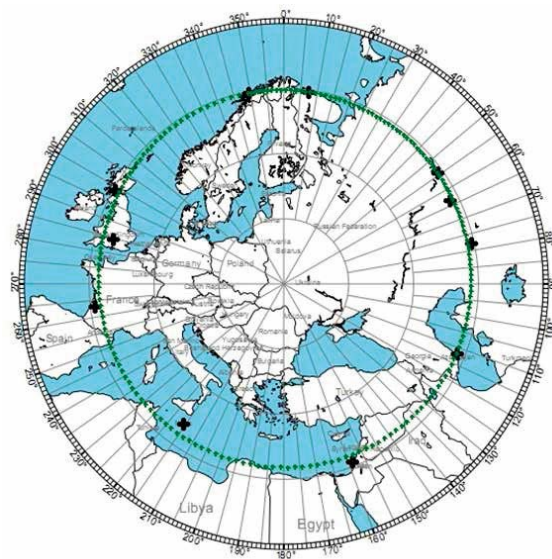
そのデータによって ISS は瞬時に互いの位置を知

ISS は生徒たちが科学、技術、工学、
数学 (STEM) への関心を高め、参
加を促す機会を提供しています。

ることができ、それぞれの受信者はステーションの電波到達範囲、例えば、地球表面の「照らされている」範囲、のような実験限界を定義づけることができます。地上に多くの受信者を持つ「シャドウ・ビーコン」は人工衛星の飛ぶ宇宙での電波探測「マルチビーム」法をシミュレートしています。その基本的な特性は、入手した ISS フットプリントの実験境界と計測境界の比較によって評価されます。

「シャドウ・ビーコン」は、人工プラズマで起こる無線波拡散を利用する将来の「シャドウ (Shadow)」実験のための開発途上の方法です。

この無線探測法の応用の可能性としては、火星探査に使用が計画されている透視電気スラスタのプラズマプルームによる、無線通信への妨害の観察が挙げられます。無線探測法は非常にシンプルのため、「シャドウ・ビーコン」を一般のオペレーター (無線アマチュ



ISS の実験的地表面フットプリントの輪郭を方位図法で示した典型的な構築結果。欧州計測分野 27.11.11. カレントモーメント 05.02.23 UTC。測定位置：緯度 50.45、経度 26.54

出典：FGUP TsNIIMash



搭載されているアマチュア無線装置「スプートニク」

出典：FGUP TsNIIMash

ア) が実行でき、教育プログラムの参加も可能になります。そのため、「シャドウ・ビーコン」の目標や目的は本質的に科学的、教育的なものです。

軌道上の「スプートニク」ハードウェアを使用した2011～2013年の「シャドウ・ビーコン」セッションで得られた観察では、地表でISSフットプリントの実験的計測輪郭を構築するための特別なソフトウェアの試験や開発に、70名の地上オペレーターが関わりました。2011年11月期の「シャドウ・ビーコン」セッションでは生徒向け実験室カリキュラムがテストされ、生徒たちは課外活動として「シャドウ・ビーコン」手順を実演しました。

この実験の策定と条件、セッションスケジュール、登録、指導、実施の進展に関する情報、訓練資料については、以下のウェブサイトをご覧ください。

<http://knts.tsniimash.ru/shadow/en/Default.aspx>.

これまでのところ、「シャドウ・ビーコン」ウェブサイトは160にのぼる個人およびクラブアマチュア無線局からの参加申し込みを受け付けました。これには、「シャドウ・ビーコン」手順を学習の場で活用することに関心を持つ教育機関も含まれます。教育目的の手法を改善し、その社会的意義を強化するために、開発者たちは、生徒たちがデータの記録や分析、アマチュア



2011年11月期「シャドウ・ビーコン」で軌道からの探測信号を記録する、モスクワの家族と子供のための社会的支援センター「Pechatniki」の生徒たち

出典：FGUP TsNIIMash

無線オペレーターへの結果記録の準備と送信に直接関わることのできる授業を開いています。これらのオペレーターは、実験への登録参加者で、近くの学校で宇宙に関する授業を開く際に招待され、教育のサポートをします。

「シャドウ・ビーコン」などのプログラムを通して、ISSの教育実験室を軌道の高さまで拡大させることで、教育過程への生徒たちの関心を高め、参加を促す機会を提供しています。

宇宙飛行士の技術で生徒が健康に

あなたがNASAのことを考えるとき、恐らくスペースシャトルやISSを思い描くことでしょう。もしかしたら、惑星や銀河系の映像が心の目に浮かぶかもしれませんが。NASAのミッションX:「宇宙飛行士のように訓練する」は、身近なところに注目しています。地域や世界中の学校と協調して、ミッションXは宇宙飛行士の訓練に使われるのと同じスキルを適用することで、世界中140の市に住む15,000人以上の生徒に、宇宙探査の興奮だけでなく、もっと健康的な生活スタイルを奨励しています。

8歳から12歳の生徒が、水分補給、骨の健康、バランスの取れた栄養や身体の健康の大切さについて学びます。

NASA の人体研究プログラム (Human Research Program: HRP) が主導する TLA プロジェクトには、体育活動や対話型ウェブサイト上 (www.trainlikeanastronaut.org) の教育モジュールが含まれています。活動やモジュールは、米国、オーストリア、ベルギー、コロンビア、チェコ共和国、デンマーク、フランス、ドイツ、インドネシア、アイルランド、イタリア、日本、カザフスタン、オランダ、ノルウェー、ポルトガル、プエルトリコ、ロシア、スペイン、スウェーデン、スイス、そして英国の計 22 カ国の参加者のために 15 言語で用意されています。この参加国数は増えており、宇宙飛行士のような訓練を通して運動生理学や栄養学の学習を子供たちにとって楽しいものにさせる、という TLA プログラムの目標に一段と近づいています。

このプログラムを担当する NASA のプログラム管理者チャック・ロイドは、宇宙プログラムがいかに生徒たちの興味を誘い、積極的な参加を促しているかコメントしてくれました。ミッション X の身体的活動で日々の全体的な身体的活動を改善することに焦点を当て、若者が健康的な生活スタイルを送るよう感化、教育することがミッション X の目的です。

8 歳から 12 歳の生徒たちが、水分補給、骨の健康、バランスの取れた栄養の大切さなど、活動の裏にある科学を学びます。それらの活動は、特別に必要な性のある個人に合わせた改良もされています。参加者は「フィット・エクスプローラー (fit explorers)」として知られ、自分の成果を楽しく測ることができる方法



「月に向かって飛ぼう (Jump for the Moon)」活動に参加する日本の小学校 3 年生と 4 年生

出典：JAXA



ミッション X 2013 のキックオフを祝う、ニューヨーク州ジェームズタウンのリソースセンター (TRC) の参加者

出典：TRC

を用いてやる気を保っています。例えば、Train Like An Astronaut のブログで、他校の様子を見ることができます。フィット・エクスプローラーはプログラム中に積算した活動ポイントを記録し、オンライン動画の宇宙飛行士アストロ・チャーリーが月に行くことをサポートすることができます。アストロ・チャーリーは毎年 238,857 マイル (384,403km) つまり 4 億 7,800 万歩に及ぶ距離を月まで旅し、これからも月を目指しています。

フィット・エクスプローラーは、宇宙飛行士がミッションの前、期間中、終了後も訓練をし、良質な栄養、休息、身体的活動を通して、厳しい微小重力環境でも最高の身体的健康を維持していることを学びます。ロイドは、そのような健康中心の考え方を、宇宙に飛び立つつもりのない人々にもつなげています。最高のパフォーマンスを発揮するために必要な勉強、遊び、睡眠のバランスを取るために、若者が賢い選択をできるようになった時、このプログラムは成功したといえます。社会の厳しさに立ち向かう準備ができている未来の労働力や技術面のリーダーシップを確保するために、教育は若者にとってもコミュニティにとっても必須です。

ミッション X は 2011 年に始められました。このチャレンジは 1 月から 3 月にかけて実施され、世界中の参加者が活動を完了しアストロ・チャーリーが月に着できるよう、チームになってサポートします。毎年ミッション X は参加する子供や大人、国、言語の数が

増え続けています。

2014年のチャレンジでは参加者は、常日頃から健康やフィットネスを改善するための生涯にわたる旅と一緒に挑戦することを勧めている、NASAの宇宙飛行士マイク・ホプキンスとともに活動することができました。ISSでのミッション準備において、彼の宇宙飛行訓練を紹介するために、いくつかのビデオや製品が生まれました。ステーション内では、彼は参加者とつながり、宇宙での経験を話しました。地球に帰還後、彼がどのようにミッション前のレベルまで体力や調子を取り戻したかについても知ることができます。是非、フェイスブック <http://www.facebook.com/trainastronaut> や ツイッター <https://twitter.com/trainastronaut> で TLA をフォローしてみてください。

ISS との通話で若者を感化する

ISS アマチュア無線プロジェクト (ARISS) の装置は、当初スペースシャトル「アトランティス号」(STS-106) で打ち上げられ、ISS の最初の搭乗員が使用するために持ち込まれて以来、教育組織との交信に定期的に使用されています。

ARISS の全体的な目標は、ステーションで生活し働く搭乗員と直接会話することにより、生徒たちに科学、技術、工学、数学 (STEM) への関心を持たせることです。

ARISS での交信時間は通常 10 分間です。その間に、ステーションの搭乗員が生徒たちからの質問に回答し、観客である生徒や一般市民がその様子を見ることができます。

ARISS の交信は包括的な教育活動の一環として行われています。これらの交流の準備の中で、生徒たちは宇宙ステーションや宇宙ステーションが船内で行う研究について学びます。生徒たちは、宇宙での生活についてや、電波やアマチュア無線の仕組みについても学びます。ARISS プログラムの目的は、地域社会と

生徒たちは、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によって科学、技術、工学、数学に関心を持ちます。

つながり、かつ学校が地域の技術専門家と接する機会を作ること、生徒たちに良い刺激を与え、意欲をかき立てることです。それはまた、宇宙プログラムを学校の玄関まで届けてくれるようなものです。

ARISS をうまく進めるには ISS と地上のアマチュア無線機の通信中に、ISS 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、宇宙ステーションを訪問する宇宙機のスケジュールなどの問題も、無線通信のスケジュールを決めるうえで配慮しなくてはなりません。質問の複雑さにもよりますが、上空通過の際には平均で 18 の質問に答えることができます。

これまでに ISS では世界中の生徒たちと 800 回以上の ARISS セッションを開催してきました。

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 145.8MHz)。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インターネットが使えれば) で聞くことができます。

宇宙への探査について考えたことが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を示唆することができます。

ARISS 交信への参加に興味のある米国の教育者は NASA の宇宙教室に連絡して申請書類を取り寄せる



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、ロシアのサービスモジュールのサニータ・ウイリアムズ宇宙飛行士 (第 14/15 次長期クルー)

出典: NASA



ARISS 交信中に ISS の搭乗員と話す生徒

出典：ARISS

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。申込の締切は毎年、1月と7月です。

自宅から宇宙飛行士と話をする

次世代の科学者、技術者、エンジニア、数学者たちを教育することは世界的な取り組みであり、ロシア連邦宇宙局もその一端を担っています。ISSでの活動の主な目的の一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装置の創出にもつながり、また、宇宙計画一般、とりわけISS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。ISS RSでは、現在、教育的要素を持つ4つの

次世代の科学者、技術者、エンジニア、数学者たちは、地球規模の通信により、その一步を踏み出します。

宇宙研究が行われています。「クーロン結晶」「シャドウ・ビーコン」「MAI-75」「Great Start」は、ロシア中の生徒の想像力を引き付ける上で、大きな効果があることを実証し続けています。

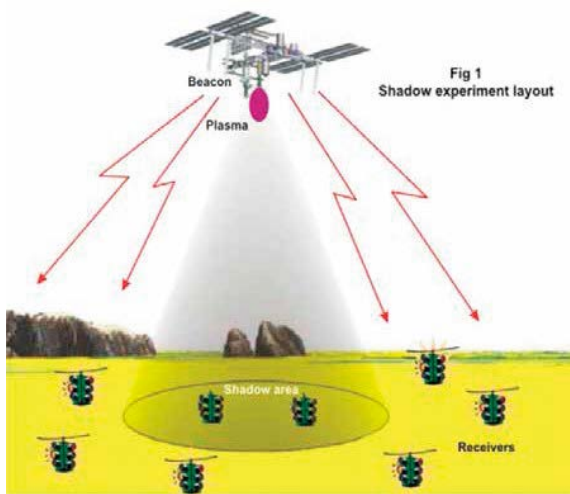
「クーロン結晶」プロジェクトは、重力の影響が少ない環境における不均一磁場中での固体拡散環境の挙動を調べることが目的の研究です。軌道上の先導的研究では、クーロンクラスターの構造特性（液晶相転移、波動プロセスとその加熱機構の物理的機会的特性など）を探ります。高校や大学を含むあらゆる層の生徒が地上実験を準備して実施する機会を得ました。

「シャドウ・ビーコン」は、アマチュア無線愛好家がISSの搭乗員と通信できる超短波無線発信機です。ISS RSにあるこの装置は、生徒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。生徒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。

「シャドウ・ビーコン」と同じく、「MAI-75」もRSに搭載されている通信装置群の一部を成しています。この装置のおかげで、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。このネットワーク配信でロシア全土の生徒やアマチュア無線オペレータは、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ことができます。宇宙から撮影した地球の画像を使用することは、学習の場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に活動の成果を知らしめることを目的とした研究です。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発の宇宙飛行という偉大な出来事に対して意見したり、ISS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、世界の様々な文化や教育、科学の分野で、ロシアとの結びつき、国際協力を促進します。その結果として、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生徒や専門官など、多くの人々が参加する科学と教育ワークショップが開催される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は他にもあります。微小重力下における微細な浮遊粒子



シャドウ・ビーコン実験のイメージ

出典：Roscosmos

の挙動を実証する生徒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での特定形状の構造要素を捉える生徒実験などの化学教育や、微小重力下で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百万もの生徒が関わっています。ISSで行われている国際的、地域的、国家的な教育プログラムのすべてと同様に、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、動機付けするのに役立ちます。

教育における「MAI-75」実験の 主な結果と進展の可能性

「MAI-75」実験は、モスクワ航空研究所（MAI）の革新的な遠隔通信衛星システムの設計・運用のコンセプトの開発と運用をするもので、ロシアの教育機関のモバイル通信およびインターネットのユーザーコミュニティ内の幅広いユーザーに対する、宇宙からのビデオ情報のリアルタイムの送信をサポートしています。

「MAI-75」宇宙実験（「宇宙船および現代的個人通信技術」Spacecraft and Modern Personal Communication Technologies）は、2005年からISS RSで行われています。



MAI 受信・処理センターで撮影された画像

出典：Roscosmos

「MAI-75」実験は、ISS RS 内でノート型コンピューターを使用して行われ、写真やビデオを保管し準備した後、アマチュア無線通信システムを介して地球へ送信されます。その主部品は、144-146/430-440 メガヘルツ帯の「スプートニク」アマチュア無線システムの船内のケンウッド TM D700 トランシーバーです。

この実験は、アマチュア無線の周波数で作動する通信チャンネルを使用することで、ロシアのみならず地球全体にわたって実験参加者数を大幅に拡大させました。実験結果はワークステーションで得ることができます。必要なものと言えば、VHF アマチュア無線周波数で動くトランシーバー装置のみです。

この実験中、ISS RS と MAI 受信・処理センターの間で、9 分から 15 分間の通信セッションが合計 120 行われ、14 から 94 キロバイトの範囲のビデオ映像が 240 以上受信されました。

前処理の後、入手された映像は特別なウェブサイトに掲載され、教育プログラムの参加者や一般ユーザーにより閲覧、再評価、処理が行われます。

MAI 受信・処理センターの他にも、以下の機関が映像受信処理に携わりました。在モスクワ高等教育機関受信センター（M.V. ロモノーソフ・モスクワ国立総合大学、N.E. バウマン・モスクワ工科大学）、クラスノヤルスク（シベリア州立航空大学）、クルスク（クルスク工科大学）、ロシア・ディフェンススポーツ技術機構航空宇宙技術研究所の受信センター（カルーガ）、ガガーリン宇宙飛行士訓練センター（スター・

生徒たちは管理・リーダーシップスキルを学ぶとともに、科学・工学の実際の応用に没頭することができました。

シティ)、S.P. コロリョフ・ロケット&スペース・コーポレーション・エネルギー (RSC Energia) (コロリョフ)、およびロシア、西欧、中米、東南アジアのアマチュア無線受信ステーション。受信されたビデオ映像の一部は、以下のサイトに掲載されています。

<http://www.issfanclub.com/image/tid/54>

「MAI-75」実験セッションの地上での準備では、MAIの教師と生徒がRSC Energiaと連邦国営単一企業 (FGUP) TsNIIMash の専門家と連携し、軌道上手順と宇宙飛行士訓練の開発・試験、地上の全地球規模の試験サイトと宇宙で使用するソフトウェア・ハードウェアパッケージの開発、地上で使用する遠隔ユーザーターミナル間の手順と試験の開発および検証を行いました。

「MAI-75」実験第一段階の結果として、生徒たちは宇宙ステーションの輸送機に特有の管理・リーダーシップスキルを学ぶとともに、科学・工学の実際の応用に没頭することができました。

このような宇宙実験により、中等・高等教育システムは自然科学の教育法の効果性を高め、宇宙プログラム実施への一般市民の関心を促進することができます。現代の情報・通信技術、特にインターネット、およびモバイル (セルラー) 通信オペレーターの能力により、教育プログラムの参加者は、ISS に採用されている多目的ビデオ装置に直接触れられる機会を得られます。プログラムの参加者は、ウェブ・インターフェイスや特別なサイトを活用し、ウェブ上に掲載されて

いるカメラ作動スケジュールや ISS サブサテライト・ポイント・ムーブメントデータに基づき、ISS RS に搭載されているデジタルカメラをコントロールすることができます。



ロシアの M. V. チューリン宇宙飛行士と MAI との通信セッション

出典：MAI (ロシア国立研究大学)



「MAI-75」実験セッションにて、ISS RS からデータを受信するセンター

出典：MAI



SE「MAI-75」セッションにて、ISS RS から、アマチュア無線通信チャンネルで撮られた画像サンプル

出典：MAI



国際宇宙ステーション：
宇宙商業化を促進させる



宇宙の 経済開発

国際宇宙ステーション（ISS）は、研究分野や技術開発における広範囲に及ぶ新領域のための実験環境として、その価値が実証された一方で、新たな取引関係を試すための理想的な機会も提供しています。これにより、政府資金で受託業者が物品やサービスを提供する枠組みから、民間に流通する物品やサービスを、政府が顧客として購入するアプローチに移行する機会ができます。

地球低軌道で、より民需指向のマーケットを推進することへの関心は、いくつかの目標設定から来ています。第一に、過去には成しえなかった全く新しいマーケット形成を刺激できることです。第二は、それによって宇宙飛行における新しいステークホルダーが生まれ、大きなビジネスチャンスとなるということです。第三に、将来の宇宙飛行のみならず、多くの関連産業界のために、強い産業力を確保できるということです。最後に、最も重要であろうことは、経済開発の土台となる、発想、処理手順、実践のあるべき姿の相互の最適化を図ることができるという点です。

宇宙ステーションでの研究に研究開発資金の一部を費やす民間会社から、軌道上実験室の利用者に類のないサービスを販売する商業サービスプロバイダーへ、地球低軌道の新しい経済圏の幕開けです。



商業サービスプロバイダー

微小重力研究の先駆けである、実験室としての宇宙ステーションの発展は、数が増加しつつある新しい商業サービスプロバイダーにかかっています。多くの企業が、政府が資金を提供して受託業者が物品やサービスを提供する従来型モデルに従うのではなく、市場形成という地球低軌道開発の新たな段階に入りつつあります。このモデルでは、民間企業が能力を開発し、それを政府のユーザに提供するとともに、研究プラットフォームとして ISS を利用する可能性のある新ユーザにも幅広く売り込みます。宇宙ステーションは重要で新しい（または更新された）能力を得るとともに、サービスプロバイダーはそのサービスを提供する新しい市場を得ることになります。

宇宙での水製造：解決への渴望

ISS での水製造機能の開発と維持は、衛生管理や装置の機能維持はもちろん、搭乗員の生命を保つために不可欠ですが、それには少々の課題が伴います。以前は、ステーションの必要量の約半分は再生水でまかなわれ、残りは貨物輸送機によって補充されていました。これは理想的ではないし、水の自己生成策を再考すべき、むしろより大きな理由があります。

長年、ステーションの生命維持設備は、水の電気分解で酸素を再生することで、搭乗員を生かしてきました。生成した水素は廃ガスとされ、船外に排出されていました。そして、搭乗員が吐き出す二酸化炭素もまた、船外に排出されていました。これで 2 つの大事な消耗品が失われていることを NASA は分かっていたましたが、ステーションの基本機能に、より効果的な設備を取りこむ資金がありませんでした。NASA は、もともとノーベル賞受賞者のフランスの化学者ポール・サバティエが 1900 年代初頭に開発した、ニッケル触媒を使用し水素と二酸化炭素を高い温度と圧力で反応させ、水とメタンを発生させるプロセスを考えました。サバティエプロセスは、長年、高性能の軍事・民間応用に使用されている確立された水製造技術です

サバティエ装置は非政府機関が出資・開発しただけではなく、純粋に商業ベースで運用されており、NASA が生成された水を宇宙ステーションで使うために買い取っています。

が、その宇宙ステーションへの応用は、その実施における取引構造ゆえに、類を見ないものです。

NASA は、増強したサバティエシステムによって水補給必要量を年間何千ポンドも削減でき、酸素と水再生サイクルを循環方式にできると判断しました。これは宇宙ステーションの運用において、重要でしかも直ちに効果の出る経費削減を意味し、地球からすべての水を輸送するのではなく、自給自足の目標をより高め、地球低軌道やそれ以遠での人間の生存期間を延長する道を広げることができる、現地での水の製造方法をもたらしました。

2008 年 4 月に、NASA はハミルトン・サンドストランド社と、宇宙ステーション搭載で現行生命維持システムと接続する水製造サービスを提供する契約を交わしました。同社は相当な期間に亘って ISS に、宇



酸素生成システム（OGS）ラックに取り付ける直前のサバティエ・アッセンブリと NASA の第 25 次長期滞在チームの司令官、ダグラス・ウィーロック宇宙飛行士

出典：NASA

宙服や電力制御装置など、いくつかのシステムを提供してきましたが、この合意で現行業務を拡大して、サバティエ処理装置が開発されました。その結果、小型冷蔵庫程の大きさの550ポンドあるステンレス製の立方体が、スペースシャトル「ディスカバリー」で2010年4月7日に到着し、同年10月までには稼働可能となりました。

このシステムには、気体を取り込み、加圧・濃縮し、水とメタンガスに転換させる6つの部品が含まれています。この製造以外では、反応しやすい水素と二酸化炭素を封じ込める設計になっています。水は水回収システム（Water Recovery System; WRS）によって処理されます。メタンは船外に排出され、水はステーションの水システムに供給され、前処理して飲料、個人の衛生、科学実験に使用されます。

ISSでのサバティエの実施は、技術的価値の面と同様に、画期的な提携関係において意義深いものです。サバティエ装置は非政府機関の出資で開発しただけではなく、純粋に商業ベースで運用されており、NASAが生成された水を宇宙ステーションで使うために買い取っています。NASAとエアロスペース・システムズ社(United Technologies Corporation; UTC)との協力が、宇宙ステーションの供給プロセスに著しい恩恵をもたらしました。それは、従来のコストプラス方式契約に代わり、NASAによる監督を最小限に抑えて、軌道上装置の開発をするという発想です。

新しいビジネスモデルが生まれたわけです。UTC社がサバティエシステムの開発・運用に出資をし、NASAが打ち上げて、ステーションのラックスペースを割り当てることに両者は合意しました。大事なことは、この合意では、NASAの標準要求の7割以上が適用を除外されました。残った要求の検証はできる限り融通を効かせ、具体的な検証基準は、必須なものに限定して設定されました。

もし設備が動かない場合は、NASAはUTC社に支払う必要はなく、設備が作動している（現時点では数年間経過した）なら、NASAは製造水量の分を支払います。NASAは開発期間中にいくつかの段階ごとに支払ったものの、もし軌道上での立ち上げで作動しない場合には100%返金の対象でした。これは、NASAがUTC社の意欲を保つことに適い、UTC社が開発段階で必要とするキャッシュフローに適いました。

ISSは探査のテストベッドですが、調達方式の選択

肢のテストベッドにも成りうることを示しています。

商業プロバイダーは、政府が許容しさえすれば、サバティエ設備を安価に提供できると確信していました。この経験は、ISSの他の革新的装置開発の先駆者となっています。

地球低軌道の商業化

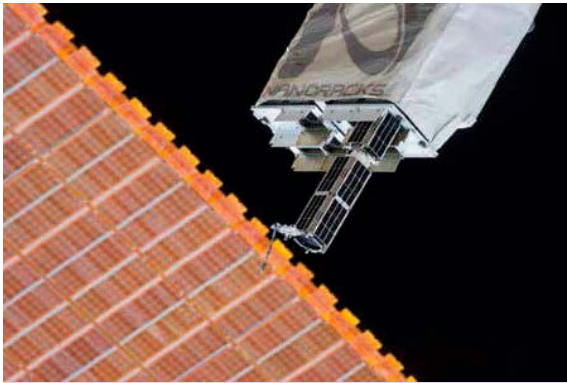
長い間、ISSとその地球低軌道環境を活用するには、専門家でなければならず、そのことが大きな障壁となっていました。幸いにも、胸躍る新しい商業化への道筋が、大変革を起こして宇宙を身近にし、宇宙が他の商業活動の場と同じようになりつつあります。

2009年にナノラックス社は、ISS輸送や軌道上リソースを得られる独自の宇宙行為契約のもとで事業を始めました。ナノラックス社はステーション用の特定の研究装置に自己投資しました。究極の「プラグ＆プレイ」方式を採用し、キューブラブ、キューブサット規格内の小型実験装置がプラットフォームまたはラックにつながれ、宇宙ステーションの電力やデータ伝送のインターフェースが提供されます。（キューブサットは、通常ちょうど1リットルもしくは10cm（4インチ）立方で、質量は1.33キロ（2.9ポンド）以下の超小型衛星です。キューブラブはISS船内と同等サイズの小型研究環境です。）

その見返りとして、このビジネスモデルでは、ナノラックス社は、ISSの商業ユーザーである有償顧客に対しては研究手段を提供するという「米国国立研究施設ミッション」を履行している限り、他の機関と取り引きすることができます。政府による直接の資金援助なしに、ステーションで何ができ、何をすべきかを、市場が初めて示してみせた故に、これは特別なことです。過去3年間の事業で、ナノラックス社は200を超す実験装置をステーションへ送り込み、文字通り宇宙の新市場を立ち上げています。

ナノラックス社の別の新市場に、ステーションから

胸躍る新しい商業化への道筋が、大変革を起こして宇宙を身近にし、宇宙が他の商業活動の場と同じようになりつつあります。



2014年2月14日、NRCSDから放出される、プラネット・ラブズ社の「ダブ (DOVE)」衛星

出典：NASA

の小型衛星の放出が挙げられますが、誰も即座の成功を予想していませんでした。ナノラックス社は、「きぼう」日本実験棟 (Japanese Experiment Module; JEM) エアロックを使用する機会を見だし、NASAにこのように尋ねました。「弊社が自前でもっと効率的で安い衛星放出機構を開発したら、使うことができますか?」。この質問は、市場を開発するための資金を求めるものではなく、その許可を求めるものでした。ナノラックス社は、小型化や電子工学技術に取り組んでいる米国西海岸の潜在顧客が、小型衛星の製作をしたいが、法外に高いロシアや米国の打ち上げ

以外の手段を持っていないことに気づきました。その後、それらの企業や、米国政府の研究所や機関はナノラックス・キューブサット放出機構 (NanoRacks CubeSat Deployer; NRCSD) に非常に良い反応を示しました。当初は時折放出することが計画されていましたが、今では宇宙ステーションからの放出を企業が順番に待っています。

ナノラックス社は軌道上運用に、標準化の効用と、商業化による効率性と、進歩した部品小型化を適用しました。同社は顧客満足度に焦点を合わせ、非専門家が実験のために宇宙環境を利用することを可能にしました。

民間部門の参加は、政府との連携を進める上で新しいモデルを提供します。米国の納税者が宇宙の米国国立研究所の基盤施設を提供する一方で、そのモデルを通じて、民間部門は市場を開拓し、資金を確保し、装置を製作します。その利点には、5年以上にわたる、経費の透明性、低い実施経費、宇宙へのアクセス提供 (微小重力や地球低軌道の利点)、市場展開の速さ (数年が数カ月)、国際協力や新発想創出、および幅広い利用可能性が挙げられます。

ISS への貨物輸送サービスの革新的な官民連携：パート 1

NASA は 2006 年 1 月に、商業軌道輸送サービス (Commercial Orbital Transportation Services; COTS) プログラムが、民間企業による ISS への搭乗員や貨物の輸送を調整すべく指定されたことを発表しました。その意図は、民間企業による革新を促して、ISS 向けの貨物輸送飛行を 2013 年 9 月までに設計、製造、打ち上げ、運航することでした。当初 COTS プログラムに選ばれた企業は、スペース・エクスプロレーション・テクノロジーズ (スペース X) 社とロケットプレーン・キスラー社でした。しかし、プログラム実証要求を最終的に完了した企業と宇宙機は、スペース X 社のドラゴンとオービタル ATK 社 (2017 年現在) のシグナスでした。COTS は拘束する契約は含みませんが、宇宙行為契約の活用による、事前に規定された開発と資金調達の各段階を成功裏に終えることが求められました。COTS とは異なるプログラムである商業補給サービス (Commercial Resupply Services; CRS) と呼ばれるプログラムが、COTS プログラムが



2015年10月に「こうのとりのり」5号機 (HTV-5) でISSに放出される予定の、ナノラックス社の船外プラットフォーム

出典：NASA

COTS プログラムは、官民連携の最も傑出した例の一つで、NASA に対する信頼が大きく飛躍したと伝えられています。

始まってから約2年後に開始されました。最初のプログラムで輸送機が開発され、2 番目のプログラムは、ステーションへの実際の貨物の輸送、およびステーションからの貨物の地上回収あるいは廃棄を行うものです。COTS プログラムは資金提供付き宇宙行為契約を含み、進捗度に応じて NASA から支払いがなされます。CRS は固定価格契約で、供給者の2社は貨物輸送の失敗に対する賠償責任を負います。

NASA が民間企業に門戸を開くという決断の内側を見ると、説得力があります。

ステーションへの物資補給と廃棄は、最初に必要な機能－正確な軌道への投入、他の宇宙機とのランデブー・ドッキングで、その次に民間による搭乗員の輸送が続きます。

現在、宇宙ステーションの貨物補給事業は進行中で、COTS 投資の前例を見ない効率性が、2 機の新しい無人貨物輸送機につながったのは明らかです。これは、官民連携の最も傑出した例の一つで、NASA に対する信頼が大きく飛躍したと伝えられています。

スペース X 社の業績には、2008 年 9 月 28 日に軌道に到達した、民間資金による最初の液体燃料ロケット（ファルコン 1）、2010 年 12 月 9 日に民間資金による最初の打ち上げ、軌道周回、回収が行われた宇宙機「ドラゴン」、および 2012 年 5 月 25 日にステーションに打ち上げられた、最初の民間宇宙機（ドラゴン）が挙げられます。2015 年 2 月現在、スペース X 社は ISS に向けた貨物輸送を 6 回果たしました。

創業者のイーロン・マスクは早期に事業展望に焦点を当て、企業のサプライチェーンをその企業が所有する業態である、垂直統合型ビジネスモデルを採用しました。品質と経費を管理するために、スペース X 社は「ファルコン」ロケットや「ドラゴン」宇宙機にも使われるロケットエンジンを含め、部品を大半を自社で設計、試験し、組み立てます。この生産様式は航空宇宙産業では稀ですが、スペース X 社はこれにより従来のロケット開発や飛行組立作業の時間を大

く減らすことができました。与圧貨物輸送能力に加えて、ドラゴン機にはステーションの船外用の非与圧貨物の輸送（および、寿命を迎えたあるいは任務完了した貨物の廃棄）ができる「トランク」があります。最も重要であろうことは、貨物や実験サンプルを与圧空間で地上に持ち帰れることです。回収能力の復活は、NASA がシャトルの退役以来でできなかったもので、与圧貨物を回収する他の手段としては、ロシアのソユーズ機で搭乗員が地球に帰還する際に僅かな量を持ち帰ることのみでした。

2013 年の個人・商業宇宙飛行国際シンポジウム（International Symposium for Personal and Commercial Spaceflight; ISPCS）会議における基調講演の中で、スペース X 社最高執行役員のグウィン・ショットウェル氏は、宇宙に関する世間の認識の著しい変化について述べました。彼女は、NASA との提携を通じたビジネス機会の急増と起業家組織の復活が、



ISS に向かう「ドラゴン」補給船を搭載したスペース X 社のファルコン 9 の打ち上げ

出典：NASA



2014年10月25日、ISSに接近するスペースX社の「ドラゴン」カプセル

出典：NASA

技術・工学系の仕事の増加を含め、新たな認識と興奮を駆り立ててきたと語りました。

ISS への貨物輸送サービスの革新的な官民連携：パート 2

COTS の話の重要な部分は、有人滞在の宇宙ステーションが、商業ベンチャーの使用に適した継続的な市場を示唆しているという点です。当初はステーションへの貨物輸送という死活的な理由がありました。COTS と CRS プログラムは補給ミッションについての新たな考え方を可能にし、もはや経費やリスクを政府に頼らず、民間企業が革新的な解決法を提案する機会が開かれました。この新しい補給サービス契約は、NASA の宇宙輸送サービス調達方法の重大な変革を示しています。

オービタル ATK 社は、33 年にわたり宇宙の商業利用に関わってきました。オービタル ATK 社は、世界中の衛星運用業者に人工衛星を商業的に販売しています。そのビジネスモデルは、ロケット開発や射場での組み立てを含むまでに進展しました。

長年にわたって NASA と多数のプロジェクトで提携してきて、COTS と CRS プログラムでオービタル ATK 社は、その宇宙機やロケットのこれまでの経験を活用して、NASA の最高の有人宇宙飛行事業である ISS 計画への積極的な参加を可能にしました。加えて、そのことは、新たな取り組みを支援するためのさらに多くの研究開発にオービタル ATK 社が投資をすることを促しました。

新しい補給サービス契約は、NASA の宇宙輸送サービス調達方法の重大な変革を示しています。

一般に想像される通り、ロケットや衛星事業における民間企業の金融面のリスクは、他の輸送手段より大きいものです。失敗の可能性が常に伴います。2014 年 10 月にオービタル 3 号機が打ち上げ直後に全損したのがよい例です。ISS 向けの貨物の損失により、関係者全員が計画を練り直し、不幸な出来事から立ち直るために協調して取り組む必要性が生まれました。上場企業のオービタル ATK 社は、社内にコスト管理体制を敷いてきました。帳簿は証券取引委員会や株主が閲覧でき、会社の財務には透明性が求められます。リスクの管理をサポートするために保険会社が組み込まれています。別の課題は、顧客の要求は変化しやすく、柔軟性が望まれる一方で、変更には経費がかかるということです。スペースシャトルなどの過去のシステム



シグナス貨物船を搭載し ISS に向けて打ち上げられるオービタル ATK 社の「アントレス」ロケット

出典：NASA



2014年7月16日、ISSに停泊するところのオービタル
ATK社シグナス機

出典：NASA

では原価加算契約を用いていました。もしNASAが変更を求めれば、契約先は追加請求書をまとめて提出します。現在の固定価格契約の下では、変更要求は潜在的な範囲増加がすべての当事者によって再検討され、追加経費の評価がされます。すべての関係者の協調により、「もし～ならば」シナリオと呼ばれる、既定範囲に入るものや入らないもので、多くの経費を伴わない代替案を自由に出し合い協議することができます。競争によって、当事者は一層コスト意識が高まります。NASA ミッションの様々な面での商業化は、大変前向きな波及効果が出つつあります。

有人宇宙飛行に参加し、貴重なパートナーシップを進展させている新しい企業群は、地域の経済に弾みをつけてきました。多くの外国のサプライヤーはそれぞれの宇宙機関と密接につながっており、さらなる国際協力と継続性を可能にします。そして大小の米国航空宇宙産業は、いまやこれらの事業に参加して貢献する力を持っています。

スペースX社とオービタル ATK社が納税者にとってより低いコストで補給サービスを遂行する方法を先導していることで、NASAは宇宙ステーションの他の業務や探査の目標に注意を向けることができます。

ISSから地球観測をするための 精密指向プラットフォーム

2014年5月に、ドイツ航空宇宙センター(Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt; DLR)と米国企業のテレダイン・ブラウン・エンジニアリング社

(Teledyne Brown Engineering, Inc; TBE)は、ISSにDLR地球検知画像分光計(DLR Earth Sensing Imaging Spectrometer; DESIS)を搭載して運用することに合意したと発表しました。4機のDLR製観測カメラシステムの中の1機は、TBE社が開発している地球観測のためのマルチ・ユーザ・システム(Multiple User System for Earth Sensing; MUSES)に取り付けられます。

DESIは地表面、海洋、大気の変化を検出でき、生態学、農業、都市土地利用など多岐にわたる分野の、より深い理解に貢献します。このプロジェクトは地球観測の新しい可能性を開くことを目的としており、民間企業との連携でISS用に開発される初めての装置の一つです。MUSES開発による宇宙ステーションの商業利用を促進するため、NASAが協力協定先にTBE社を採択してからちょうど2年後に、同社から新しい宇宙ベースの商業デジタル画像事業が立ち上がりました。

MUSESは、高画質デジタルカメラやマルチスペクトル・ハイパースペクトル装置などの地球観測装置を搭載し、精密指向制御、慣性安定化等を可能にするために設計されたプラットフォームです。

この新しいプラットフォームは約1メートル角の大きさで、画質に大きく関わる宇宙ステーションの揺れや振動を排除して、慣性空間に安定させるために設計され、ジャイロ、恒星追跡装置(宇宙で正確な姿勢を確保するための小型開口光学製品)、ステップモーター(位置決定のための遠隔型、携帯型装置に使用される)が装備されています。MUSESは地球指向の装置を4機まで搭載できます。宇宙ステーション商業化のモデルは、企業が自社の資源を提供し、NASAが開発費の分担、打ち上げと軌道上のインフラを提供するという枠組みに変化しています。TBE社は、MUSES上の装置を稼働して、取得データを商業的に販売できるように、米国海洋大気庁(National Oceanic and Atmospheric Administration; NOAA)の商業画像/観測ライセンスを取得しました。同社は、宇宙ステー

私たちは、現在の宇宙ステーションがもはや使えなくなるときに、地球低軌道での商業事業を持続させるのに十分な勢いをつけなければなりません。

ションを、何年にもわたり数百マイル上空で科学、経済、教育、商業、生活の質向上に貢献し続けている不動産の一つになぞらえています。

最初の搭載装置はDLRのDESIHハイパースペクトル装置であり、地表面からの太陽光反射率のわずかな変化（可視～近赤外帯域）を検出する能力を持っています。画像分光計は、植物種を見分けるための反射率帯域のごくわずかな変化や、森林が干ばつや害虫により何かしらのストレスを受けているかどうかを見分けることができます。表面反射率の細かな変化は、市販のデジタルカメラで撮影した写真からは得られない、膨大な情報を与えてくれます。

地球の遠隔観測は、農業、石油・ガス資源、生物多様性、鉱物研究、あるいは世界遺産、沿岸地域、水生生態系、交通機関の変化の検知および監視への関心から、長きにわたって続いてきました。DLRとTBE社の商業事業は、特異な測定ツールを導入しており、それは既にある多くの市場が応用することでより強化されていくものです。データ自体とデータの活用は同様な関係で、例えば、もし農家がいつ、どこで、どのようにトウモロコシに水やりすべきかを知りたい場合にも、スペクトル情報蓄積の裏にあるすべての技術を知る必要はまったくないわけです。

TBE社はどうビジネスをするかに関して、より商業的に考える意欲がありました。TBE社は、宇宙ステーションにプラットフォームを設置し、既存インフラを活用して商業事業を始めるアイデアでNASAの公募に応募しました。NASAとTBE社は、ISSから

価値を早く引き出す方法は、データを地上に下ろすことだと認識しました。

TBE社はパイプラインの一端にデータがあって、その利用で利用者が利益を得ることが分かっています。そして、漁業や農業などの産業における応用に、他の方法では入手できないデータを提供することで、将来、他の計測器によるビジネスモデルを試そうとしています。

宇宙ステーションの先を見通すことは、NASAやTBE社などの企業にとって重要なことです。いま発生期にある地球低軌道での商業市場を持続させるために、参加者は宇宙ステーションがもはや存在しなくなる時を認識し、受け入れ、そのための計画を立てておかねばなりません。私たちは、現存の資産を使って商業市場を開発するだけではなく、商業経済全体を丸ごと、現在の宇宙ステーションから、地球低軌道あるいはそれ以遠に予見、構築され、使えるようになるであろう他のインフラへ、円滑に移さなければならないのです。言い換えれば、私たちは、現在の宇宙ステーションがもはや思うままに使えるプラットフォームでなくなっても、地球低軌道での商業事業を推し進めるのに十分な勢いをつけねばなりません。これは難しいことかもしれません。しかしながら、私たちの国が確立してきた拠り所、すなわち「辛抱強く続けるための、貢献するための、新しい可能性を切り開くための、そして、この世界をより良い場所にするための挑戦」にまさに活力を吹き込むもののなのです。



ISS上のMUSES設備は、地球観測のための最新の指向プラットフォームを提供します。

出典：TBE社



MUSESのプラットフォームはアラバマ州ハンツビルでTBE社の研究室で最終試験を受けています。

出典：TBE社

先駆者：地球観測

2014年にナノラックス社はカナダの上場会社のアースキャスト社と契約を交わし、地球観測（EO）センサー2台を、宇宙ステーションの米国側に設置することで合意しました。同社は既にロシア側に2台設置しています。アースキャスト社のすべてのビジネスモデルはISSに関わっています。さらに、この提携でアースキャスト社は、宇宙ステーション利用で現在のところ単独で最大の民間投資の一つを行っています。

この新企業の誕生は、カナダの航空宇宙企業最大手のマクドナルド・デトワイラー・アソシエイツ社（MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd; MDA）が地球観測センサーをロシアセグメント（RS）に設置する道を探っていた、4年前に始まりました。結局、MDA社はそのプロジェクトが自社の企業ミッションに合わない判断し、それ以上は続行しませんでした。しかし、何人かの役員が、独立してこの可能性を実現する機会ととらえ、新会社をアースキャストと命名しました。彼らはISSに搭載する2台のカメラを開発・運用して、世界中に画像を売り込む実験を展開しました。

両カメラは2013年11月に打ち上げられ、ロシアの宇宙飛行士による2度の船外作業で2014年1月に取り付けられました。2台のカメラの設置で、アースキャスト社は6,800万ドルを民間から集め、最終的にトロント証券取引所に新規株式を公開しました。

2台のカメラが設置されたのとはほぼ同時期に、アースキャスト社は積極的に米国の提携先を探し、最終的にナノラックス社と組んでステーションへのアクセスを追求しました。それは自然にかみ合い、次世代センサー一式の開発と2016年遅く、もしくは2017年の早い時期に打ち上げ準備を整えると2014年6月に発表しました。

アースキャスト社／ナノラックス社の提携により、Lightweight UrtheCast NanoRacks Alcove (LUNA)

アースキャスト社は全ビジネスモデルがISSに関わる企業で、ステーション利用のために最大の民間投資をしています。

と呼ばれる独自の小型実験棟をステーションの米国側に設置することが計画されています。提案されたプロジェクトには以下の3つの要素が含まれています。

1. 超高解像度、デュアルモード、マルチスペクトラルカメラで、静止画像と高解像度ビデオを切り替えられる。軌道上での最高解像度の地球観測装置の一つとなる、処理後の分解能40センチの達成を開発者は望んでいます。
2. 合成開口レーダー（SAR）センサーで、エネルギーパルスを地球に送ることで、夜間や雲にさえぎられずに見えるようになります。データセットは直感的に見ることができず扱いが非常に難しいですが、データセットを統合することで最終的に影の無い画像が作られます。
3. 2つのセンサーは専用Xバンド・ダウンリンクと組み合わせて、インターネットのクラウド技術を通して分配し、グーグルアースやネットフリックスと類似の能力を可能にします。

ステーションは大変能力のある撮影プラットフォームです。それは地球低軌道上にあるため、非常に高い解像度の装置は素晴らしい画像を提供でき、飛行軌道は地上の居住地域の約95パーセントをカバーし、撮影地を定期的に再訪する能力もあります。

アースキャスト社とナノラックス社とNASAの間の提携は、既存のインフラと投資のおかげで、装置を低コストで軌道に設置することを可能にしています。これらの企業は、活気のある顧客群が現れない限り、



ISS RSに搭載されているアースキャスト社のカメラ

出典：ロシア連邦宇宙局



2014年7月3日、アースキャスト社の Theia（中解像度）カメラでとらえた、イタリア・ローマとその周辺の画像

出典：アースキャスト社

宇宙探査の夢は政治的にも経済的にも達成困難なままだろうと考えています。彼らは、ステーションに搭載された最新の地球観測センサーからのデータは、その需要を刺激することができる明らかな解決策だと信じています。

キューブサット群が変化する地球を撮影する

2014年7月23日午前10時50分頃、カリフォルニア州の高速道パトロール隊は、パームスプリングの西、リバーサイド郡で山火事が急速に広がっているとの一報を受けました。火の手はあっという間に広がり、一部の住人は避難を余儀なくされました。15分以内に、トースター大の人工衛星「ダブ（Dove）」が火事の規模、焼けた経路、風向、火事の正確な位置を示す画像を撮影しました。火事は一日以内に完全に封じ込められました。その衛星は、誰からの要請もなく撮影し、毎秒、10キロメートル・15キロメートル（約6マイル・9マイル）の画角で地球を撮影するという、ISSによって可能になった通常手順の作業を行っていました。

政府や商業用のより大きな衛星は、国の機関や企業に地球の詳細な画像を提供し、それらの一部は一般市民が閲覧し自分の近所を探すこともできます。これらの人工衛星は高価で数も少なく、空間解像度が低いものか、顧客の依頼に基づいて特定の地域に焦点を当

てて撮影するかのどちらかです。極めて重要な点として、これらの衛星は数カ月間にわたり同地域の画像を繰り返し撮影することはないでしょう。これでは、国際紛争、環境悪化、急成長する森林火災など、急速な変化を観察することは困難です。

プラネット・ラブズ社という小型衛星の新興企業は、宇宙ステーションを超小型カメラ船団の発射台として使用します。11ポンド（5キロ）のキューブサット、つまり「ダブ」の一群は継続的に地球全体の写真を撮影して、90分毎に地上局へ送信します。これらは、都市の成長からカリフォルニアで発生したような夏の野火に至るまで、前例のない地球の姿を映し出します。

異なるタイプのキューブサットが宇宙ステーションから頻繁に放出され、いろいろなタスクをこなしていますが、特に地球の撮像、船舶交通の記録、メッセージの送信などの新しい手法を提供しています。この一群全体ではプラネット・ラブズ社が、単独の大き

プラネット・ラブズ社は、変化する海岸線を調査する政府から、森林火災と戦う消防士まで、誰でも「ダブ」の画像を検索し容易に入手できるようにすることを目指しています。



ISS から配備された直後の 2 機のプラネット・ラブズ社「ダブ」キューブサット

出典：NASA

な衛星では不可能な、地球規模のデータを収集することを可能にしています。同社は、地球規模の継ぎ合わせ画像を毎日撮ることを目標として、2009 年にシリコンバレーで起業されました。これにはキューブサットの大きな船団が必要で、それらを宇宙に送り込むためにはステーションが鍵となります。

地上 230 マイル (370 キロメートル) の高所から、それぞれの「ダブ」は 10～16 フィート (3～5 メートル) の解像度の画像を毎秒撮ります。カメラの視域における各ピクセルが幅 3 メートルの対象物に相当するということです。その解像度は、森林内の個々の木を見分けるには十分ですが、道路を歩いている人を見分けるには不十分です。プラネット・ラブズ社は 2014 年 1 月以来、ナノラックス社が開発したキューブサット放出機構を使って 71 機の「ダブ」を放出してきました。キューブサットはとても小さく比較的安価なことが一因ともなり、運用期間はほんの数カ月ですが、それらの軌道高度は低いいため、最終的には地球に向けて落下し、大気圏で燃え尽きるよう設計されています。「ダブ」はプラネット・ラブズ社がサンフランシスコの本社で絶えず試験、強化しており、より新しいモデルに継続的に交換されています。これまで、プラネット・ラブズ社は 100 機以上の「ダブ」を製造してきました。同社はベンチャーキャピタルや民間投資家により資金提供を受けています。

プラネット・ラブズ社は、最終的には、自分の家を

見たがる観客たちから、変化する海岸線を調査する政府、森林の片隅で炎と戦う消防士まで、見たいと思う人が誰でも「ダブ」の画像を検索し容易に入手できるようにすることを目指しています。

視野を広げ、好奇心を育てよう

ケンタッキー・サイエンス&テクノロジー社(Kentucky Science and Technology Corporation; KSTC)、およびその子会社であるケンタッキー・スペース社 (非営利企業) とスペース・タンゴ社 (営利企業) の 2 社は、科学、技術、起業、破壊的革新の多様なイニシアチブを計画し実行するとの評判を築きつつあります。その中心にあるのは、小型で高価値の衛星と応用、および、宇宙ステーション用の今までにない宇宙プラットフォームと実験です。

ケンタッキー・スペース社は、大学生を宇宙プロジェクトに参加させる手段として設立されました。同社は大学と産官共同組織の連合体で、革新的な宇宙ミッションを現実的な予算と目的の範囲で計画し先導することを目指しています。このプログラムは、世界中の組織や宇宙機関との連携や、超高層気球、サブオービタル、軌道周回、ISS 利用などのミッションを含む飛行機会の範囲にわたっています。トウイマン・クレメンツはほんの数年前までケンタッキー・スペース社に所属する学生でしたが、今ではスペース・タンゴ社の若き最高経営責任者です。



「ダブ」キューブサットから見た、アリゾナ州ピナル郡の灌漑された畑

出典：プラネット・ラブズ社

**宇宙は常にイノベーションの最前線
にあって、企業が現状改革に挑戦す
る後押しをします。**

レキシントンに拠点を置くスペース・タンゴ社は、地上での応用のための問題解決方法を見つけて企画し、商業化するために宇宙を活用しようと努めています。これは、微小重力特有の環境を利用しようとしている研究コミュニティの人々に、装置やソフトウェアを提供するプラットフォームによって達成されます。主として起業家向け宇宙市場に焦点を当てるスペース・タンゴ社の能力と経験には、キューブサット級や他の超小型衛星とその構成装置、衛星地上運用、宇宙プラットフォームの設計・試験、新技術の開発とステーション向けの実験が含まれます。同社は高度に協調的な事業戦略を標榜しており、いくつもの企業、大学、組織と密接に連携しています。

クレメンツ氏がタンゴラブと呼ぶ、一般研究プラットフォーム / 多目的実験設備は、2015年にISSに設置されます。それは医療分野、物質科学、および環境計測に適した様々な搭載装置を受け入れます。研究者は、宇宙特有の環境にある彼らの実験と、インターネットのデータ通信を介して、コンピューターからやりとりします。

キューブラブはステーションにおいて再利用可能かつ手頃な経費でできる実験の必要性から生じました。独特な設計をもつ研究モジュールは、実績のあるキューブサットの形状要素をもとに、ケンタッキー・スペース社によって開発されました。標準化されたプラットフォームと実験棟の公開アーキテクチャーの提供は、開発期間を短縮し、研究開発経費を下げます。その目標は、新しい薬剤や、治療法や、医療手順をより早く市場に出すことにつなげることです。

タンゴラブ研究プラットフォームは洗練された芸術作品です。開発は容易でなく、3Dプリンターの助けを借りつつも、関係者すべての協働経験と創造力が必要でした。しかしその基本的前提は単純で、標準化された装置の使用が、宇宙ステーション利用経費を劇的に削減するということです。

2011年5月に、ケンタッキー・スペース社は胸躍らせるような新しい取り組みを立ち上げました。宇宙

の微小重力環境での医療課題解決法の研究と探索です。一流の科学者、技術者、起業家から成る分野横断のチームであるエクソメディスン研究会（Exomedicine Institute）が、この新しい可能性に溢れた有望な研究分野を推し進めるために組織されました。

地上のすべての生物は数十億年の進化の中で、その形状や機能を地球の重力に適応させてきました。上下非対称、構造強度、運動力要素の大きさ、感覚系など、その特性は遺伝子の中にコード化されています。

重力はすべての生物系に分子レベルで影響を及ぼしているため、重力の影響が変わったり、除去された場合、生物系に何が起こるのでしょうか？ 地上で重力を取り除くことはできませんが、宇宙で生物医学実験を行うことで、地球上での、ある種の制約をなくせます。

微小重力において、細胞、分子、タンパク質結晶、微生物は地上と異なった挙動をします。したがって、重力の影響が少ない環境には、エネルギー研究や新材料の開発だけでなく、人体組織再生、医薬品開発、がんや他の生命を脅かす慢性的症状の治療など、多岐にわたる分野において革新的な変化をもたらす発見ができる可能性があります。

ケンタッキー・スペース社とスペース・タンゴ社、エクソメディスン研究会の取り組みは、研究開発への学際的アプローチを反映しており、多様な参加者による“新宇宙”時代の到来を示しています。

参入障壁を低くすることで、人々が地球低軌道で実験したり、そのための物づくりができるようになります。



「キャニスター内での生物学実験」装置内への取り付け準備中の扁形動物

出典：スペース・タンゴ社

す。これら3社は、世間一般の人が、打ち上げにあたりNASAと何をするのかについてほとんど知らないことを念頭に置いており、フルサービスの考えに基づき、実験計画立案、搭載装置設計や組み立て、地上設備、打ち上げ成功に必要な試験サービス一式を支援するための技術的専門知識を提供します。

宇宙に行くことで、人々は既存の考えに囚われない自由な発想を得ます。宇宙は常にイノベーションの最前線にあって、企業が現状改革に挑戦するのを本当に後押しします。

2000年にキメルは、また別の組織をつくりました。異なる分野を横断的にみる、イノベーション、発見、創造的考察を中心とした国際イベント「アイデア・フェスティバル (IdeaFestival)」です。アイデア・フェスティバルは毎年4日間にわたり開催されるイベントで、将来に影響を与えて方向づけるものに対する熱烈的な好奇心によって結ばれた、世界的な思想家や特別な革新者たちの折衷的なネットワークの集会です。参加者たちは、世界に変化をもたらす、興味深い新しいアイデアや、より良い連帯感や、広がった人脈や、持続的な刺激を得て会場を後にします。

このような機会が、新しいアイデアを他人に伝え、学生の実験者を通じて、民間の起業家精神を高める展望で、新宇宙活動に拍車をかけます。

アイデア・フェスティバルのマントラが言うように、「視野を広げ、好奇心を保とう。新しいアイデアは予期せぬ時に生まれるのだから」。

ミッション・クリティカル： 扁形動物実験は着水後の時間との競争

宇宙に向かうロケットの発射前のカウントダウンは誰もがよく知っていますが、カプセルが地球に戻った時に始まるカウントダウンは何でしょうか。

ISSで行われた、非常に繊細な生物医学実験には、その生物試料の生存が脅かされる可能性があります。これらの実験の成否はしばしば、着水地点から、科学者が大切なデータを分析する研究室までの迅速な輸送にかかっています。着水から分析までの時間は特に重要です。

2014年に扁形動物プラナリア（身体の部位の自己再生機能で知られている）48匹を載せたカプセルがステーションからカリフォルニア海岸沖の太平洋上

に着水した時の事例があります。

その扁形動物は、独立した非営利組織の宇宙関連受託業者であるケンタッキー・スペース社とその関連の営利企業スペース・タンゴ社、宇宙科学促進センター (Center for the Advancement of Science in Space; CASIS)、NASA、タフツ大学再生・発生生物学センター (Tufts Center for Regenerative and Developmental Biology; TCRDB) の間の共同事業の一部として、1カ月前に宇宙ステーションに運ばれていました。この実験によって、がん治療や脊髄損傷治療や、胎芽の発生異常を正す能力を含む、地球規模の健康管理にいつの日か影響を与え得る、扁形動物の再生能力に関する理解増進など、人類に大きな恩恵をもたらすことにつながるかもしれません。

この研究の成否に不可欠な2つの要因は、時間と温度です。扁形動物は、カリフォルニア州ロングビーチから、分析が行われるボストンのタフツ大学まで、輸送中は温度を摂氏12度に維持して迅速に輸送されなければなりません。

どちらの環境要素の取り扱いを誤っても、扁形動物は死んでしまい、実験は失敗に終わります。

フェデックス社による革新的物流が、研究を進めるために宇宙ステーションと強力な地上チームをつなぐことを可能にしました。



ISSへの打ち上げ前に準備される扁形動物の試料

出典：スペース・タンゴ社



「センスアウェア (SenseAware)」環境モニタリングのついた、フェデックス社の環境制御輸送容器が、宇宙ステーションから地上に帰還したスペース・タンゴ社の扁形動物実験を研究室に輸送した。

出典：フェデックス

フェデックス社 (FedEx) はこの挑戦に立ち上がりました。ケンタッキー・スペース社の代理としてスペース・タンゴ社が、扁形動物実験の最適な輸送方法を企画すべく、宇宙産業のロジスティック専門で、FedEx® スペースソリューションの陰の実力者であるフェデックス宇宙デスクチームと連携しました。カプセルが着水した時に、カウントダウンが始まります。容器は直ちに回収され、扁形動物の積荷は特注設計の温度管理容器に入れられて、フェデックス・エクスプレスでボストンへ発送されました。積荷はその行程中フェデックス手配のセンスアウェア (SenseAware) で監視され、ケンタッキー・スペース社、スペース・タンゴ社、タフツ大学の関係者が位置情報の追跡のみならず、容器内の温度が摂氏 12 度を逸脱していないことも絶えず確認できるようになっていました。

積荷の扁形動物試料はボストンに時間通りに無事到着し、タフツ大の科学者にほぼ即座に近い形で届きました。ミッション達成です。

扁形動物の再生能力に及ぼす、微小重力環境の影響についての研究は継続しています。フェデックス社による革新的物流が、宇宙ステーションと強力な地上チームをつなぐことを可能にし、これらのすべての関係者が、この大事な分野の研究を前進させる重要な役割を担いました。

宇宙の経済開発を目指した JAXA の取り組み

JAXA は「きぼう」日本実験棟 (JEM) や、宇宙ステーション補給機「こうのとり」 (H-II Transfer Vehicle; HTV) によって宇宙の経済開発に取り組んできました。宇宙の経済開発には、日本企業の技術の進歩、スピンオフの拡大、さらには商業部門に「きぼう」利用の扉を開くことが含まれます。

ISS のための航行および通信サービス

ISS 計画の歴史を通して、多くの日本の産業が従来の有人宇宙飛行のやり方に挑戦し、より高度な有人宇宙技術を獲得してきました。

いくつかの日本企業は、獲得した国際競争力のある技術とノウハウをもとに、有人宇宙技術システムを世界中の商業市場に売り込んできました。

宇宙ステーション利用を増やす未知の可能性は多くあります。JAXA は既に「きぼう」日本実験棟上での商業プロジェクトをいくつも見だし、成し遂げてきました。

その一例は、近傍通信装置 (Proximity Link System; PLS) です。三菱電機は、「きぼう」日本実験棟に取り付けられている近傍通信システム (Proximity Communication System; PROX) と通信できるように、PLS を設計・製造しました。PLS は、ナビゲーション情報と通信回線を宇宙機に提供し、安全に、ステーションに近づいたり離脱したりすることを可能にします。三菱電機はもともと、「こうのとり」をステーションにランデブードッキングさせるために PROX と PLS を設計・製造しました。それ以来この新技術は、米国オービタル ATK 社の「シグナス」宇宙船にも採用され、「シグナス」がステーションに安全に到着できるようになりました。

商業的利用のイニシアチブ

JAXA は、「きぼう」利用の有人宇宙技術と経験に基づいて、3つの核となるイニシアチブに沿って、

「きぼう」を商業的に研究利用することに取り組んできました。

イニシアチブは、①新しい潜在商業市場に向けた宇宙ステーション利用促進、②商業顧客に宇宙ステーションの新たな利用機会を創出、③「きぼう」日本実験棟の能力増強、の3つです。

潜在的商業市場への普及促進

JAXA は地上に応用できる有望な研究分野を探り、タンパク質結晶生成実験による創薬、地球観測、新材料の生成という分野の潜在的利点に注目しました。

地球観測に関して、日本宇宙フォーラムは「「きぼう」ハイビジョン・アースビュー」教育プログラムとして、地球の高画質動画をインターネットで配信しています。

宇宙で新材料を生み出す可能性は、企業の関心を引きつけてきました。一例として、新しい光学材料であるコロイド結晶が挙げられます。

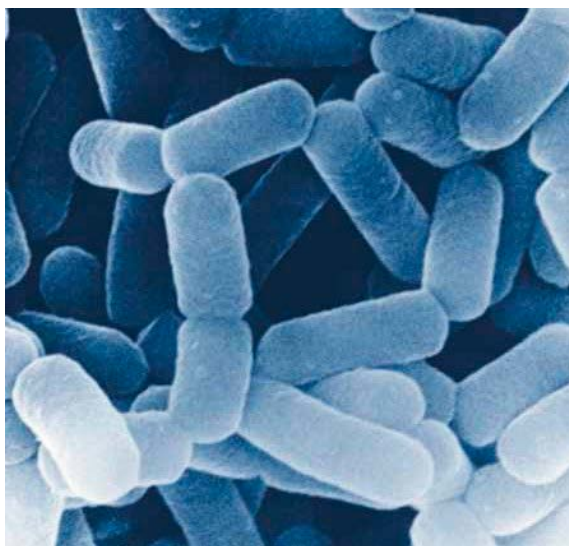
宇宙で作られる大型高品質のコロイド結晶はフォトリソグラフィ材料への応用が期待されています。この実験は浜松ホトニクス、富士ケミカル、大学との共同研究として実施されました。

微小重力環境での高性能ナノ材料の作製（ナノスケルトン）研究は、微小重力環境での結晶生成における油浮選、沈殿、および対流への、重力影響を解

明することを目的としました。ナノスケルトン研究で得られたデータは、ナノスケルトン合成のためのコンピュータ化学シミュレーションに加えられ、そのシミュレーションは地上での合成に向けた適正なパラメーターの予測に使われます。資生堂といくつかの大学がこのプロジェクトに参加しました。

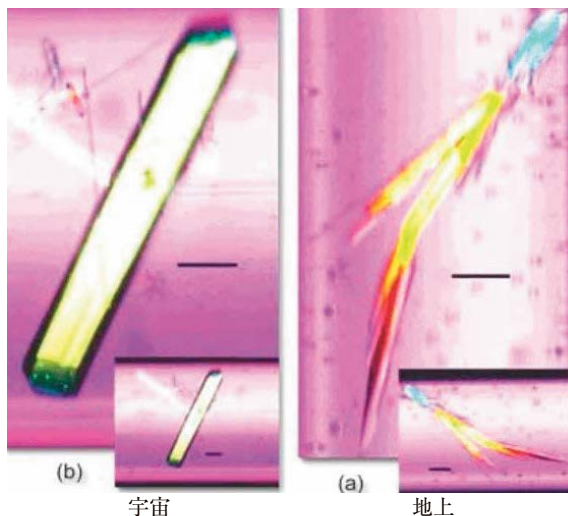
JAXA による戦略的プロモーションによって、これまでになかったタイプのユーザーを含め、商業顧客の数が増加してきました。その一例は、「きぼう」日本実験棟でのタンパク質結晶生成実験により恩恵を受ける製薬会社です。

また、飲料会社である（株）ヤクルト本社と JAXA との共同研究として行われる、免疫機能へのプロバイオティクスの影響を調べる宇宙実験の例もあります。宇宙飛行士は宇宙での長期滞在により免疫機能への影響を受け、身体的なリスクを負うことがあります。プロバイオティクスの一つ、乳酸菌のラクトバチルス・カゼイ・シロタ株は、腸内細菌叢を改善し免疫機能を保つなど健康へ益があることが、地上では示されています。「きぼう」日本実験棟でのある研究では、プロバイオティクスの摂取が宇宙ステーションでの人間の免疫系に与える影響が健康に良い効果があるかについて調査されました。この研究により、機能性宇宙食や地上での乳酸菌の長期保存技術の開発へつながるかもしれません。



ラクトバチルス・カゼイ・シロタ株

出典：（株）ヤクルト本社



創薬のためのタンパク質結晶生成実験

出典：JAXA

商業顧客に新たな利用機会

2013年にJAXAは、それまでの活動から得た知見を基に、利用者により使いやすいサービスと、実験応募を促進して宇宙実験実施までに必要な期間を短縮するためのシステムを提供する、新たな商業利用制度を開始しました。

宇宙分野に、従来とは異なるまったく新しいタイプの利用者に参加を勧めるJAXAの取り組みは続きます。

商業ユーザーが既に使える主要なサービスの一つがJEM小型衛星放出機構（JEM Small Satellite Orbital Deployer; J-SSOD）で、地球観測やリモートセンシング、能力構築などを目的とした超小型衛星を放出します。J-SSODは、JEM、エアロック、ロボットアームという既存設備を組み合わせることで、新しいビジネスを生み出している優れた例です。この画期的な発想が広がってきています。実際のところ、エアロックを使用した超小型衛星の放出の価値が評価されると、NASAを顧客に持つある米国企業はこの機会を利用するために、自社の放出機構を開発しました。

ブラジルの超小型衛星 AESP-14 が 2015 年 2 月に、筑波宇宙センターからの指令により、「きぼう」日本実験棟から成功裏に放出されました。AESP-14 はブラジル航空技術大学（Instituto Tecnológico de Aeronáutica; ITA）がブラジル宇宙機関（Agência Espacial Brasileira; AEB）とブラジル国立宇宙研究所（Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais; INPE）の協力を得て開発し、有人宇宙システム株式会社（Japan Manned Space Systems Corporation; JAMSS）が「きぼう」日本実験棟からの放出機会を確保しました。これが J-SSOD の商業利用の始まりとなりました。

中性子回折のための大型単結晶を得る結晶化技術や、商業ユーザーの需要に合わせた拡張温度範囲など、様々な新しい宇宙実験技術が開発されています。タンパク質結晶生成プロジェクトは、的を絞った直接勧誘を通じて、研究開発指向の製薬会社の関心を集めてきました。インタープロテイン社や、中外製薬、アークレイ社が、JAXA のタンパク質結晶生成実験に参加しました。

インタープロテイン社は効果的な医薬品設計のために、タンパク質と低分子化合物からなる高品質の共結晶構造の取得に乗り出しました。

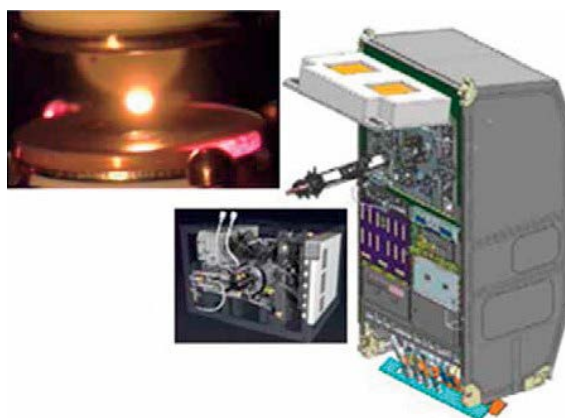
中外製薬は、医薬品候補の構造と機能の関係性を理解し、革新的な新薬を創造するのを促進すべく、微小

重力下で生成される高品質結晶によるタンパク質の精密な三次元構造の解明を目指しました。

アークレイ社と東京農工大学は、バイオセンシング技術の開発に不可欠な、タンパク質構造の分析を主導する JAXA の実験に参加し、糖尿病の治療と診断に役立つ革新的な検査システムへの応用を目指しています。

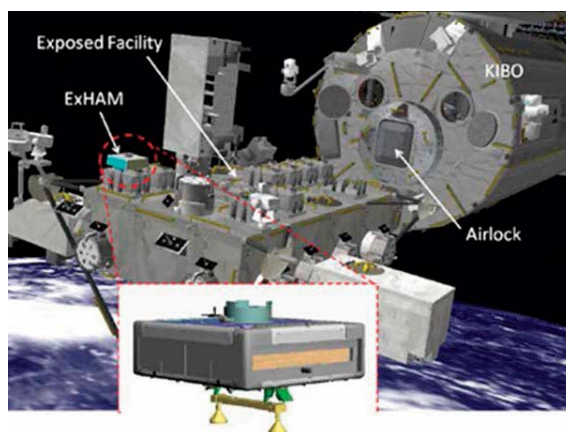
「きぼう」日本実験棟の能力増強

JAXA は、既存の装置の改良に加え、マウス研究のための設備（小動物飼育装置（Mouse Habitat Unit; MHU））や新材料生成研究と高温熱物性データ取得のための静電浮遊路（Electrostatic Levitation Furnace;



新材料生成および高温熱物性データの取得のための ELF

出典：JAXA



JEM 曝露部に取り付けられた ExHAM

出典：JAXA

ELF) などを含む、新規設備の設置を継続しています。

宇宙ステーションは将来の探査や衛星技術実証、軌道間輸送機技術開発のためのテストベッドにもなっています。JAXA は、技術実証のための簡単な船外実験機会を提供しています。例えば、簡易曝露実験装置 (Exposed Experiment Handrail Attachment Mechanism; ExHAM) は材料をステーション外の宇宙環境に曝露したり、宇宙塵の採取を可能にします。

株式会社潤工社は、宇宙環境における耐熱性、耐放射線性の PEEK 電線材料を宇宙環境に曝すために、ExHAM を使用しています。取得されたデータは、宇宙機に使用される同社の電線の商品化のために評価されます。

宇宙ステーション利用を増やす未知の可能性はまだ多くありそうです。JAXA は既に「きぼう」日本実験棟上での商業プロジェクトをいくつも見だし、それを成功させてきており、これからも商業利用を手助けする革新的な方法を見だし続けていくことでしょう。これは日本に恩恵をもたらすだけでなく、すべての人類のためになります。

商業目的の研究

微小重力特有の環境は、商業的に成り立つ、多様な研究に機会を提供しています。骨量減少や筋萎縮などの地上の問題の理解を助けるためにモデル生物（例えばマウスや扁形動物）を使用したり、より均一でより長い保存寿命の製品を開発するためにコロイドによる材料研究をする、モノクローナル抗体の成長を助けるために宇宙ステーションでより大きなタンパク質結晶を成長させる、地球観測衛星群の発射台に宇宙ステーションを使うなどは、実業界の多様な研究関係者と、彼らがどのように ISS に関わっているかを示す、ほんのいくつかの例にすぎません。これら進行中の商業研究活動の概要は、研究開発のために宇宙ステーションを利用することの影響度や関心度を示しています。

宇宙におけるコロイド： 消費者製品と科学との交差点

P&G 社の話には、消費者と材料科学者の 2 つのタイプの人間が出てきます。

消費者は生活を向上させるための製品を使いたいと思うものです。それらの製品は、長い保存寿命であれ、使い易さであれ、広告通りの性能であれ、宣伝した約束を果たさなければなりません。シャンプーや液体石鹸などの製品の場合、購入者はボトル内物質に、見てすぐ分かる物理的な分離（沈殿）を見たいとは思いません。なぜなら、それは何か具合の悪いことを示しているかもしれないからです。

材料科学者あるいは物理学者にしてみると、新たに有望で効用のある製法を見つけたいとか、商品を創りたいとかを望んでいます。彼らが知りたいのは、特定の有効成分や安定剤が製法に追加された時にどのような挙動をするかということです。彼らは、保存寿命を延ばしたり性能を高めたり、最適な調合を絶えず探し求めています。時には、非常に特別な条件下で取り組むことも必要とされます。P&G 社の材料科学者が、自社の研究をより高いレベル、つまり ISS の軌道上の研究室で行うことにしたのも、そのような理由からでした。NASA との取り組みで、P&G 社はコロイド研究として微小重力環境下で気相と液相がどのように分離して、どのように混ざるかを調べる研究に資金を出しました。

地上では重力が、重い成分を沈ませ、軽い成分を浮かせるため、この研究を複雑にします。この動きはごく短時間に生じるため、何が起き、なぜそうなるのか

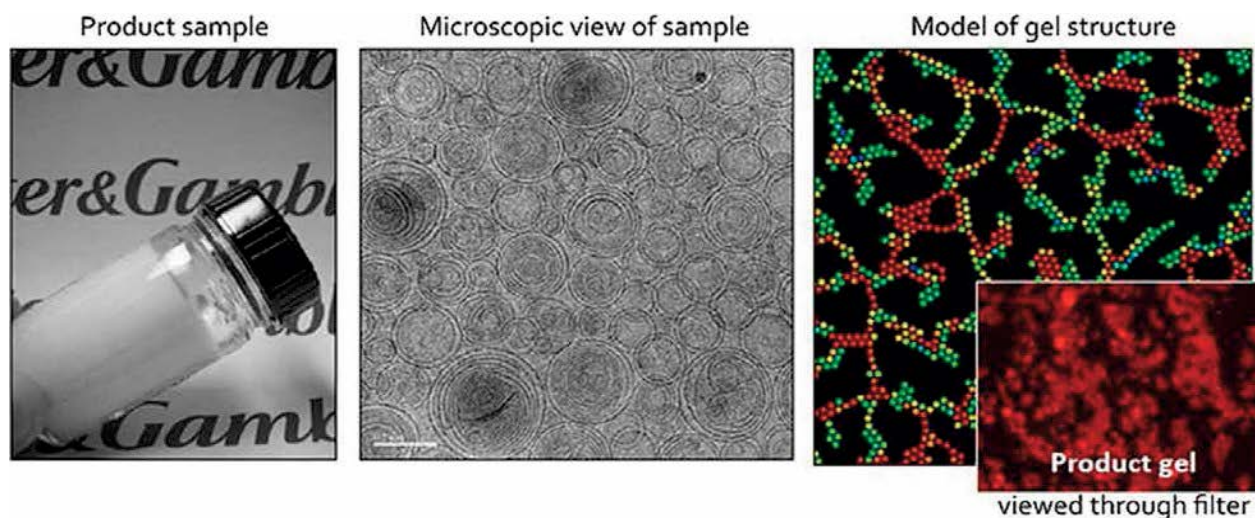
液体製品を形成する極微粒子の研究に微小重力環境を使うことは、究極的には、私たちが毎日使う健康、美容、家庭用品の改良につながっていくでしょう。

を理解することが困難です。しかし宇宙ではこれらの重力の影響をなくせるため、コロイドの自然な動きが現れます。軌道上の試料の老化過程はより遅くむらなく起きて、研究がしやすくなります。

宇宙ステーション上での一連のコロイド研究は、2013 年 10 月から 2014 年 3 月にかけて、先進コロイド実験（ACE: Advanced Colloids Experiment）として知られる科学プラットフォームを使用して、P&G 社とケース・ウェスタン・リザーブ大学との共同で行われました。

この研究は、保存寿命を長くする安定剤をどのように最適にするかを研究者が理解するのを助けるように計画されたものですが、その結果は開発、製造および輸送の経費の削減も意図されたものです。より優れた安定剤は、より良い品質と、低減された経費と、少ないプラスチック包装で潰れにくく最後まで安定した、より環境にやさしく、より濃縮した製品という結果になります。そのような改良された工程では、瓶から出た最初の一滴は、最後の一滴と同じ品質になります。

P&G 社がステーションでの研究に関心を向けたのは、同社の最大ブランドの約 3 分の 2 が、繊維柔軟剤、消臭剤、洗剤等のソフトマター系で、この研究が



ACE で研究中の事象と同様に、微小重力環境下での製品見本ゲルの上の顕微鏡画像は、断面積が多くの粒子からなる脆いストランドで占められています。上のゲル構造モデルは、重力で隠されている特徴を明らかにしています。

出典：NASA

役立つものであるという事実からでした。研究者たちは、液体分離の本質を一層理解することで、より良い安定剤と製法の開発に取り組むことができます。

ACE-M-1 は、液体、ゲル、クリーム内での微細粒子の挙動を調査しました。ACE-M-2 は、宇宙ステーションで現在運用中で、相分離に取り組んでおり、どのように相分離に影響を与えるかの研究が続けられています。この研究では、臨界点近傍もしくは液相気相間にはっきりとした境界がなくなる点での、コロイドが豊富に含まれたモデル液体とコロイドが少ないモデル気体の挙動を調べています。以前の実験では何週間にもわたり大規模の挙動を観察したのに対し、ACE-M-2 は短時間に微細規模の事象を記録します。同一物質の液体と気体は通常は異なる密度なので、重力の影響下では異なる動きをしてしまうため、ISS の微小重力環境がこれらの実験に理想的となります。

ACE-M-3 実験には、保存液内に浮遊する小さな粒子からの複雑な 3 次元構造の設計と組み立てが含まれます。これらのいわゆる自己組織化コロイド構造は、高度な光学材料の設計に不可欠です。

これらの微小重力環境下での研究は、凝縮材料科学の根幹的な課題である、粒子形状と、結晶対称性と構造の関係に対する識見を齎します。

P&G 社がこの実験に参加した理由の一つは、地上では重力で隠されているコロイドの相分離の動力学

を理解することへの関心です。

微小重力環境下で形成し成長する小さな塊は、地上で見られる単純な上下相の代わりに、この過程の動態の記録を可能にします。このデータが使えると得られる科学的知見は、より安く製造でき、より長い保存寿命の、より効果的で進歩した製品製法につながります。年間約 40 億ドルを売り上げるダウニー (Downy) のような製品では、わずか 1% の生産経費削減や、保



前回のミッションにて、ISS 上の光顕的観察モジュール顕微鏡を操作する、欧州宇宙機関 (ESA) のパオロ・ネスポリ宇宙飛行士

出典：NASA

存寿命がわずかに長くなるだけで、大きな投資回収がもたらされます。P&G 社は今年、1,000 万ドルを製品寿命問題の研究に費やすことにしています。

この成果は、柔軟剤よりはるかに大きい影響があります。

ACE 研究の他分野への応用の可能性が、広がり続けています。例えば、高度なコロイド製法は、もしかすると、使用時に適正に混合しないと効果がなく、危険でさえある液体医薬品などの改善につながるかもしれません。

より良い製法で消費者は、いつも完璧な製品を期待できます。

ACE 試料を通して、粒子の物理的プロセスに関するより良い理解を得ることができます。例えば、商品の品質、製造、寿命に大きく影響するかもしれません。これらのタイプの液体製品を形成する、コロイドとして知られる極微粒子の研究を微小重力環境下で行うことにより、一層の知見を得ることができます。これは究極的には、人々が日々使う製品を改良する研究の取り組みを助けることになるかもしれません。

宇宙のマウスが 筋肉や骨量減少について教えてくれる

骨の破損、増強、そして減少は、私たちの身体に大きな影響を及ぼします。微小重力環境では通常の体重がかかる活動ができないので、宇宙では骨量減少が加速的に起こります。

ISS の搭乗員は栄養摂取や特別な運動処方によって、これらの懸念を部分的には緩和できます。宇宙飛行で骨量減少が加速するという点は、研究者に骨を制御する仕組みを細胞レベルで特定する機会を与えてくれます。ほとんどの人々は宇宙での生活を体験することありませんが、ステーションで骨と筋肉の減少を研究することの利点は、それが地上の人々の生命に影響

ステーションが完成した今、マウス研究はスペースシャトルでできたよりも長い期間の実験ができ、それによってデータ取得と新発見の可能性が増えました。

響を与える可能性があることです。

骨粗しょう症による骨量減少は、年配者にとって大きな懸念です。しかし、怪我とか、病気とか、食欲不振や摂食障害による栄養失調とかで動けないと、他が健康な人でも骨折に至ってしまうことがあります。しばらくの間、研究者はこの現象を理解しようとして、スペースシャトルミッションから宇宙ステーションへ移行した、商業生物医学実験モジュール (CBTM) を用いた一連の実験でマウスに注目してきました。

CBTM 研究は、カリフォルニア州に拠点を置くバイオ医薬品会社のアムジェン社 (Amgen) にバイオサーブの大学院生 2 人が就職したことで始まりました。その学生たちはアムジェン社の興味を引いて、開発中だった 3 つの製薬を重力の影響が少ない環境下で試験することになりました。2 つは骨量減少、1 つは筋萎縮のためのものです。アムジェン社は 3 つの研



居住空間、食物、水、通気、照明を提供する自給自足式生息環境である、NASA のマウス研究装置内の様子。室内の空気は装置によって交換され、動物の排泄物を収集フィルターへ吸い上げるためにケージ内にわずかな陰圧を生じさせます。

出典：NASA

究へ十分な資金提供をしたのみならず、かなりの現物資源を提供しました。

骨の再構成、つまり骨の自然な破壊と再生は健康な骨ではバランスよく起こるので、形成として知られる再生の速度は、再吸収として知られる分解と吸収の速度と同じです。この分解と再生のサイクルにより、骨格の強度を維持し骨折などの怪我を修復することができますので、私たちは、正常な動きを続けることができます。この自然な過程のバランスが崩れると、骨と健康が損なわれます。

最初の研究は2001年に始まり、オステオプロテグリン（OPG）を使用し、2011年にはスクレロステチン抗体処方を飛行させました。OPGとスクレロステチン抗体は骨量減少を緩和する薬に用いられており、体内で自然発生する分子を基にしています。2007年の飛行では、筋萎縮治療の前臨床治療のミオスタチンを研究しました。それらの飛行の時期にアマジェン社と前臨床開発段階にあった、これら3つの治療術は、骨格強度維持に有望な影響が認められました。

治療法を研究室から薬品棚に移すのには、これらの研究の進捗と同様に時間がかかり、宇宙ステーションの建設期間と同じく10年に及びました。この期間に、分析に使えるツールの増強を含む、微小重力研究を実施する方法が進歩しました。

ステーションが完成した今、この研究は制限のあったスペースシャトルよりも長い期間の実験ができ、それによってデータ取得と新発見の可能性が増えました。

微小重力環境下のタンパク質結晶

製薬会社は、関節炎からがんに至るまで、疾患と闘うための多種多様な方法を開発してきましたが、体の免疫系はそこに最新の武器を示唆してくれました。新世代の医薬品は特定の攻撃者を標的にして、免疫細胞が働くように活性化します。モノクローナル抗体（MAB）と呼ばれるこれらの薬剤は、病気の原因物質と結びつくように設計されたタンパク質です。モノクローナル抗体は細胞中あるいはその表面のほとんどどんな対象物に対しても作製でき、従来の治療法に比べてより際立った特性を持ち、副作用もより抑えることができます。それらにはいくつかのタイプの炎症やがんを使用される、よく売れている医薬品も含まれます。

しかし、MABの効果を上げるには、大量に投薬す

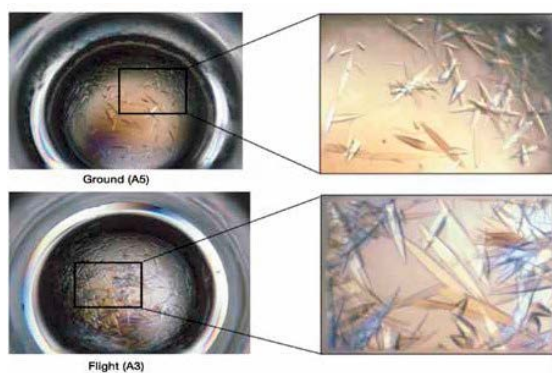
主な目標は、生物学に基づく新たな医薬品の開発で、病気と闘う医者により粘り強い対抗手段を持たせることです。

る必要があります、それが患者に投与するのを難しくしかねません。MAB治療を受けている患者は、単純に錠剤を飲むのではなく、注射または点滴による注入が必要となります。いまISSで行われている研究がそれを変えつつあります。メルク研究所はMABを微小重力環境下で結晶化させることにより、患者に効率的に投与できる、高密度で高品質の調合薬の開発に取り組んでいます。

宇宙は、結晶形成に重力や対流力が介在せず、複雑な三次元タンパク質の研究にとって優れた環境であり、それにより、より大型でより完全無欠な結晶の生成ができます。大型結晶で、地上の科学者はエックス線結晶解析装置にかけて、タンパク質がどのような構造になっているかを判定することができます。タンパク質構造決定は、研究者が新薬を設計するのに役立ちます。

宇宙ステーションでの最初の実験では、地上で成長したものと比べて大きな結晶が生み出され、それは前途有望と言えました。メルク社は10回のシャトル飛行で宇宙タンパク質結晶化実験を続けました。

これらの以前の調査結果に基づき、メルク社の化学研究フェローのポール・ライカート氏は、地上で不



地上で成長したタンパク質結晶（上）と重力の影響が少ない環境下で成長したもの（下）との違い

出典：メルク

純物がなく作製できる、5ミクロンの結晶の様な懸濁液を成長させようと考えました。また彼は、温度勾配が結晶形成の開始、つまり核生成にどのように影響するかを研究する計画も立てました。ライカート氏は2014年4月に2つの異なるMAB実験をスペースX-3貨物輸送機に乗せ、追加の実験を2015年4月に予定されているスペースX-6輸送機で打ち上げることを計画しています。

これら高密度のタンパク質結晶によって、幅広い病気の治療のために患者がMABを摂取する方法が改善されます。MABは大量に投与しなければならないため、通常は病院で点滴によって投与され、患者は全量の投与が終わるまで数時間も待たなければなりません。その代わりに微小重力環境下で作られた高密度結晶化タンパク質の懸濁液は、医院で簡単な注射によって投与することが可能です。ライカート氏の話では、その液体は見た目が牛乳で、白く見える結晶化MABの濃縮液で不透明です。

高密度のMAB混合物は、輸送や保管にも効率的です。現在、MAB治療薬の異なる成分は別々のところで製造されており、海外または米国内の様々な場所へ送られ、患者に投与される医薬品が作られています。

ライカート氏はこの研究が、宇宙での先端研究を望む他の科学者の興味を引き付けることを願っています。しかし、主な目標は、生物学に基づく新たな医薬品の開発で、病気と闘う医者により粘り強い対抗手段を持たせることです。

筋萎縮：地上の生命を助けるISSのマウス

筋肉は使われていないと萎縮したり衰弱したりします。微小重力環境下では、定期的に運動をしている人でも筋萎縮が起こります。実際のところ、通常の重力がかかっていなければ、宇宙飛行士が軌道に到着した数日内には筋肉の萎縮が始まります。地上でも病気や怪我によって動きが不自由になることで、進行は遅いものの、筋萎縮を経験する人もいます。年を取るにつれて筋力が衰えるため、結局は筋萎縮の影響はすべての人に及びます。

科学者たちは何がきっかけで筋力低下が起こるのか未だに確信が持てません。萎縮は、異なる細胞信号プロセスから、タンパク質の除去やアミノ酸の喪失まで、身体の多くの経路に起因します。もし、科学者が

総合的な目標は、科学者と製薬会社が、リスクにさらされている患者を助けることができるように、ISSを使い筋萎縮についてより多くを学ぶことです。

これらの経路がどのように筋肉量を調節しているかを理解できれば、病気に効く新しい治療法を開発できるかもしれません。しかしまずは、萎縮そのものの、より良い全体像が必要で、マウスの研究がその助けとなります。ノバルティス生物医学研究所（NIBR）の研究者たちは、マウスの遺伝的活性変化の観察によって、筋肉量への微小重力の影響をより多く学びたいと考えています。

ノバルティスのチームは、「ISS国立研究所」を運営するCASISの呼びかけに応じました。ノバルティス社のサミュエル・カデナ氏と同僚たちは数年間にわたって、萎縮について研究しており、宇宙ステーションを使うことは自分たちの研究を前進させるためにまたとない機会だと考えています。

カデナ氏と研究パートナーたちは、筋力低下を食い止めるように遺伝子を組み換えられたマウスを研究しています。ノックアウトマウスと呼ばれるこれらの



両方のアクセスドアを開放した状態の、NASAのマウス居住モジュール

出典：NASA

動物は、MuRF-1 (Muscle Ring Finger-1) と呼ばれるタンパク質を作れるようにする特定の遺伝子が欠落しています。それはあるタンパク質に退化とラベル付けすることで、筋力低下を早めるものです。宇宙飛行を含む、いくつかの筋萎縮の状況において、このタンパク質の発現は増加します。

MuRF-1 ノックアウトマウス 10 匹の一群が、スペース X-4 に載せられ 2014 年 9 月 23 日に宇宙ステーションに到着しました。地上群は NASA のケネディ宇宙センターに留まりました。それぞれの群には遺伝子が組み替えられていない対照群の 10 匹のマウスが帯同されました。宇宙に 3 週間滞在した動物は研究のために安楽死のうえ地球に回収されました。研究者は MuRF-1 モデルを実証に役立てようと、初期のデータを分析しているところですが、ノックアウトマウス群の筋萎縮が対照マウス群より少ないだろうと考えています。

総合的な目標は、科学者と製薬会社が、リスクにさらされている患者を助けることができるように、筋萎縮についてより多くを学ぶことです。軌道上研究室での研究活動を可能にしているパートナーシップは、探査を推進しつつ地上の人々に恩恵をもたらす答えを追求しながら、宇宙における科学の領域を押し広げ続けています。

アーカイブストーリーと ビデオへのリンク



http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/benefits/index.html

セクション別執筆者および研究代表者

人類の健康

Robotic arms lend a healing touch

Author: CSA

PI: Dr. Garnette Sutherland, University of Calgary

Robots from space lead to one-stop breast cancer diagnosis treatment

Author: Jessica Eagan, NASA

PI: Dr. Mehran Anvari, Scientific Director & CEO, Centre for Surgical Invention & Innovation (CSii), Hamilton, Canada.

Improved eye surgery with space hardware

Author: ESA

PI: A. Clarke, Charité Universitätsmedizin, Berlin, Germany

Sensor technologies for high-pressure jobs and operations

Author: ESA

PI: Hans-Christian Gunga, Charité Universitätsmedizin, Berlin, Germany

Bringing space station ultrasound to the ends of the Earth

Author: Mark Wolverton, NASA

PI: Scott Dulchavsky, M.D., Henry Ford Hospital, Detroit, Michigan

Are you asthmatic? Your new helper comes from space

Author: ESA

PI: Lars Karlsson and Lars Gustafsson, Karolinska Institutet, Dept of Physiology and Pharmacology, Stockholm, Sweden

Cold plasmas assist in wound healing

Author: NASA

PI: Dr. Hubertus M. Thomas, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Germany; Prof. V.E. Fortov, Institute for High Energy Densities (IHED, RAS), Russia

Preventing bone loss in spaceflight with prophylactic use of bisphosphonate: Health promotion of the elderly by space medicine technologies

Author: Hiroshi Ohshima, JAXA

PI: Adrian Leblanc, United Space Research Association, and Toshio Matsumoto, Tokushima University

Improved scanning technologies and insights into osteoporosis

Author: ESA

PI: Christian Alexandre, M.D., University of St. Etienne, France

Good diet, proper exercise help protect astronauts' bones

Author: Bill Jeffs, NASA

PI: Scott Smith and Jean Sibonga, NASA

Add salt? Astronauts' bones say please don't

Author: ESA

PI: Petra Frings-Meuthen, German Aerospace Center (DLR)

Early detection of immune changes prevents painful shingles in astronauts and in Earth-bound patients

Authors: Satish K. Mehta, Duane L. Pierson, and C. Mark Ott, NASA

PI: Satish K. Mehta, Duane L. Pierson, and C. Mark Ott, NASA

Station immunology insights for Earth and space

Author: Jessica Nimon, NASA

PI: Millie Hughes-Fulford, Director of the Laboratory of Cell Growth at the University of California, San Francisco

Targeted treatments to improve immune response

Author: ESA

PI: M. Maccarrone, N. Battista, University of Teramo, Teramo, Italy

High-quality protein crystal growth experiment aboard Kibo

Authors: Mitsugu Yamada and Kazunori Ohta, JAXA

PI: Over 80 Principal investigators conducted JAXA protein crystal growth experiments on the ISS.

Cancer-targeted treatments from space station discoveries

Author: Laura Niles, NASA

PI: Dennis Morrison, NASA's Johnson Space Center and NuVue Therapeutics, Inc.

Using weightlessness to treat multiple ailments

Authors: I. B. Kozlovskaya and Ye. S. Tomilovskaya, Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences (IBMP RAS), Moscow, Russia
PI: Ye. S. Tomilovskaya

Microbiology applications from fungal research in space

Author: ESA

PI: D. Hasegan, G. Mogildea, Romanian Institutes of Space Science and Biology, Bucharest, Romania; E. Chatzitheodoridis, National Technical University of Athens, Greece

Plant growth on ISS has global impacts on Earth

Author: Tara Ruttle, NASA

PI: Weijia Zhou, Ph.D., of the Wisconsin Center for Space Automation and Robotics, University of Wisconsin-Madison

Experiments with higher plants on the Russian Segment of the International Space Station

Authors: V. N. Sychev, M. A. Levinskikh, I. G. Podolsky, Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences (IBMP RAS), Moscow, Russia; G. E. Bingham (Utah State University, Space Dynamics Laboratory, Logan, Utah, USA)

PI: V. N. Sychev, M. A. Levinskikh, I. G. Podolsky, G. E. Bingham

Colleagues from many Russian and non-Russian organizations participated in carrying out work according to the Rasteniya program in the Lada greenhouse on the ISS RS. The contributions of S. A. Gostimsky (M. V. Lomonosov Moscow State University), and M. Sugimoto (Okayama University, Institute of Bioresources, Okayama, Japan) should be especially noted.

Space cardiology for the benefit of health care

Authors: R. M. Baevsky, Ye.Yu. Bersenev, I.I. Funtova, Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences (IBMP RAS), Moscow, Russia

PI: R. M. Baevsky, Ye.Yu. Bersenev, I.I. Funtova

Biological rhythms in space and on Earth

Authors: Naomune Yamamoto, JAXA and Kuniaki Otsuka, Tokyo Women's Medical University

PI: Chiaki Mukai, JAXA

Innovative space-based device promotes restful sleep on Earth

Authors: R. M. Baevsky, Ye. S. Luchitskaya, I. I. Funtova, Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences (IBMP RAS), Moscow, Russia

PI: R. M. Baevsky, Ye. S. Luchitskaya, I. I. Funtova

New technology simulates microgravity and improves balance on Earth

Authors: I.B. Kozlovskaya, I.V. Sayenko, Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences (IBMP RAS), Moscow, Russia

PI: I.B. Kozlovskaya

New ways to assess neurovestibular system health in space also benefits those on Earth

Authors: L. N. Kornilova, I. A. Naumov, G. A. Ekimovskiy, Yu. I. Smirnov, Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences (IBMP RAS), Moscow, Russia

PI: L. N. Kornilova, I. A. Naumov, Yu. I. Smirnov

Space research leads to non-pharmacological treatment and prevention of vertigo, dizziness and equilibrium disturbances

Authors: L. N. Kornilova, I. A. Naumov, G. A. Ekimovskiy, Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences (IBMP RAS), Moscow, Russia

PI: L. N. Kornilova, I. A. Naumov, G. A. Ekimovskiy

Capturing the secrets of weightless movements for Earth applications

Authors: Salvatore Pignataro, Gabriele Mascetti, Italian Space Agency

PI: Francesco Lacquaniti, Center of Space Biomedicine, University of Rome Tor Vergata; Giancarlo Ferrigno, Department of Electronics, Information and Bioengineering

Space technologies in the rehabilitation of movement disorders

Authors: I.V. Sayenko, I.B. Kozlovskaya, Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences (IBMP RAS), Moscow, Russia

PI: I.V. Sayenko

地球観測と災害対応

Earth remote sensing from the space station

Author: ISS Program Earth Observations Working Group

Coastal ocean sensing extended mission

Author: Curtiss Davis, College of Earth, Ocean, and Atmospheric Sciences, Oregon State University

PI: Mary E. Kappus, US Naval Research Laboratory; Michael R. Corson, US Naval Research Laboratory

Visual and instrumental scientific observation of the ocean from space

Authors: A. N. Yevguschenko, State Organization "Gagarin Research&Test Cosmonaut Training Center"; B. V. Konovalov, P. P. Shirshov Institute of Oceanography of the Russian Academy of Sciences

Space station camera captures Earthly disaster scenes

Authors: Dauna Coulter and Jaganathan Ranganathan, SERVIR Team, NASA's Marshall Space Flight Center

PI: Burgess Howell, NASA

Clear high-definition images aid disaster response

Authors: Hideaki Shinohara and Sayaka Umemura, JAXA

PI: Chikara Harada, JAXA

革新技術

Advanced ISS technology supports water purification efforts worldwide

Author: Arun Joshi, NASA

PI: Donald L. Carter, Robyn Gatens

Exploring the wonders of fluid motion: Improving life on Earth through understanding the nature of Marangoni convection

Author: Satoshi Matsumoto, JAXA

PI: Hiroshi Kawamura, Tokyo University of Science,
Koichi Nishino, Yokohama National University, Shinichi
Yoda, JAXA, Yasuhiro Kamotani, Case Western Reserve
University, Satoshi Matsumoto, JAXA

Space station-inspired mWater app identifies healthy water sources

Author: Jessica Nimon, NASA

PI: John and Annie Feighery, mWater

Space-tested fluid flow concept advances infectious disease diagnoses

Author: Mike Giannone, NASA Glenn Research Center

PI: Mark Weislogel, NASA

Improving semiconductors with nanofibers

Author: Masato Katsuta, JAXA

PI: Takatoshi Kinoshita, Graduate School of Engineering,
Nagoya Institute of Technology

InSPACE's big news in the nano world

Author: Mike Giannone, NASA

PI: Eric M. Furst, University of Delaware

Deploying small satellites from ISS

Author: Hitoshi Morimoto, JAXA

PI: Yusuke Matsumura, JAXA

Pinpointing time and location

Author: ESA

PI: Felix Huber, Steinbeis Transferzentrum Raumfahrt,
Gaufelden - Stuttgart, Germany

Space station technology demonstration could boost a new era of satellite-servicing

Author: Adreinne Alessandro, NASA

PI: Frank J. Cepollina, Benjami B. Reed

Cool flame research aboard space station may lead to a cleaner environment on Earth

Author: Mike Giannone, NASA

PI: Folman Williams, Daniel L. Dietrich

Robonaut's potential shines in multiple space, medical and industrial applications

Author: Laura Niles

PI: Myron A. Diftler

地球規模の教育

Inspiring the next generation of students with the International Space Station

Author: Jessica Nimon, NASA

PI: NASA, CSA, ESA, JAXA, Roscosmos

Student scientists receive unexpected results from research in space

Author: Jessica Nimon, NASA

PI: Zahaan Bharmal

Europe's alliance with space droids

Author: ESA

PI: ESA

NASA has HUNCH about student success in engineering

Author: Laura Niles

Tomatosphere™: Sowing the seeds of discovery through student science

Author: CSA

PI: Michael Dixon, University of Guelph

Students photograph Earth from space via Sally Ride EarthKAM program

Author: Arun Joshi, NASA

PI: Sally Ride, Karen Flammer

Try zero G2: Igniting the passion of the next generation in Asia

Author: Yayoi Miyagawa, JAXA

PI: JAXA

Asian students work with astronauts in space missions

Author: Muneo Takaoki, JAXA

PI: Kibo-ABC (Asian Beneficial Collaboration through
Kibo Utilization) Initiative

Educational benefits of the space experiment "Shadow-beacon" on ISS

Author: V.A. Strashinskiy, Central Research Institute for
Machine Building (FGUP TsNIIMash)

PI: V.A. Strashinskiy, (FGUP TsNIIMash)

Students get fit the astronaut way

Author: Jessica Nimon, NASA

PI: Charles Lloyd, NASA

Inspiring youth with a call to the International Space Station

Authors: Jessica Nimon and Camille Alleyne, NASA

PI: Frank Bauer

Calling cosmonauts from home

Author: S.V.Avdeev, FGUP TsNIIMash

PI: Space experiment "Coulomb Crystal" – V.Ye.Fortov,
Joint Institute for High Temperatures of the Russian
Academy of Sciences

Space experiment "Shadow-Beacon" – O.M.Alifanov,
Moscow Aviation Institute (National Research
University); V.A.Strashinskiy, FGUP TsNIIMash

Space experiment "MAI-75" - O.M.Alifanov,
V.K.Odelevskiy; Moscow Aviation Institute (National
Research University)

Space experiment “Great Start” – M.Yu.Belyaev, OAO “Rocket and Space Corporation “Energia” after S.P. Korolev”

MAI-75 experiment, main results and prospects for development in education

Authors: O. M. Alifanov, S. O. Firsyuk, V. K. Odelevsky (Moscow Aviation Institute (National Research University)); N. S. Biryukova (Central Research Institute for Machine Building (FGUP TsNIIIMash)); S. N. Samburov, A. I. Spirin (OAO Rocket and Space Corporation Energia after S.P. Korolev (RSC-Energia))
PI: O. M. Alifanov, V. K. Odelevsky, Moscow Aviation Institute (National Research University)

宇宙の経済発展

Water production in space: Thirsting for a solution

Authors: Kathy Watkins-Richardson, Melissa Gaskill
Company name: UTC Aerospace Systems

Commercialization of low-Earth Orbit (LEO)

Authors: Kathy Watkins-Richardson, Melissa Gaskill
Company name: NanoRacks, LLC

Innovative public-private partnerships for ISS cargo services: Part 1

Authors: Kathy Watkins-Richardson, Melissa Gaskill
Company name: SpaceX

Innovative public-private partnerships for ISS cargo services: Part 2

Authors: Kathy Watkins-Richardson, Melissa Gaskill
Company name: Orbital Sciences Corporation

Precision pointing platform for Earth observations from the ISS

Authors: Kathy Watkins-Richardson, Melissa Gaskill
Company name: Teledyne Brown Engineering, Inc.

The Groundbreaker: Earth observation

Authors: Kathy Watkins-Richardson, Melissa Gaskill
Company name: UrtheCast

A flock of CubeSats photographs our changing planet

Authors: Rebecca Boyle and Melissa Gaskill
Company name: Planet Labs

Stretch your horizons, Stay Curious™

Authors: Kathy Watkins-Richardson, Melissa Gaskill
Company name: Kentucky Space/Space Tango, Inc.

Mission critical: Flatworm experiment races the clock after splashdown

Author: Craig Simon, President and CEO
Company name: FedEx SupplyChain

Economic development of space in JAXA

Authors: Sayaka Umemura and Kazuyuki Tasaki, JAXA
Company and organization names: Mitsubishi Electric (MELCO)/Orbital Sciences Corporation, Japan Space Forum, Hamamatsu Photonics K.K., Fuji Chemical Co., Ltd., Shiseido Co., Ltd., Yakult Honsha Co., Ltd., Japan Manned Space Systems Corporation (JAMSS)/Technological Institute of Aeronautics (ITA)/Brazilian Space Agency (AEB)/Brazilian National Institute for Space Research (INPE), Interprotein Corporation, Chugai Pharmaceutical Co., Ltd., ARKRAY, and Junkosha Inc.

Colloids in space: Where consumer products and science intersect

Authors: Kathy Watkins-Richardson, Melissa Gaskill
PI: David A. Weitz, Harvard University; Matthew Lynch, Proctor and Gamble

Space mice teach us about muscle and bone loss

Authors: Rebecca Boyle, Kathy Watkins-Richardson and Melissa Gaskill
PI: H. Q. Han, Amgen Research

Protein crystals in microgravity

Authors: Rebecca Boyle and Melissa Gaskill
PI: Paul Reichert, Merck Research Laboratories

Muscle atrophy: Mice on the ISS helping life on Earth

Authors: Rebecca Boyle, Kathy Watkins-Richardson and Melissa Gaskill
PI: Samuel Cadena, Novartis Institutes for Biomedical Research

国際宇宙ステーション 人類への恩恵 第2版（日本語版）

2017年2月

発行：宇宙航空研究開発機構（JAXA）
〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1
<http://www.jaxa.jp/>



National Aeronautics and Space Administration
<http://www.nasa.gov/stationbenefits/>



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



European Space Agency
http://www.esa.int/ISS_Benefits



Japan Aerospace Exploration Agency
<http://iss.jaxa.jp/en/>
<http://iss.jaxa.jp/kiboresults/benefits/>
<http://iss.jaxa.jp/en/iss/benefits/>



РОСКОСМОС

Roscosmos – Russian Federal Space Agency
<http://knts.tsniimash.ru>
<http://knts.tsniimash.ru/en/site/Default.aspx>

