Kibo

国際宇宙ステーション・
「きぼう」日本実験棟

「きぼう」利用成果レポート 2014

― 宇宙で得られた成果 ―

Kibo 「きぼう」 利用成果レポート2014 ― 宇宙で得られた成果 ―

2008 年に国際宇宙ステーションに取り付けられた日本実験棟「きぼう」では、毎日様々な実験が行われています。

このレポートでは、2014 年までに得られた実験の成果を紹介します。

はじめに …… 1

―「きぼう」での実験とは―

国際宇宙ステーション（ISS） …… 2

「きぼう」日本実験棟 …… 4

船内実験室 …… 8

船外実験プラットフォーム …… 10

様々な利用分野 …… 14

どのように役立つの？ …… 18

「きぼう」利用成果レポート 2014 …… 23

―それぞれの実験の成果―

実験一覧 …… 24

生命科学 …… 29

宇宙医学・技術開発 …… 67

応用利用 …… 111

物質・物理科学 …… 123

船外利用 …… 141

アジア利用、人文・社会科学 …… 171

資料編 …… 207

―もっと詳しく知りたい方へ―

基本情報 …… 208

関連 HP 一覧 …… 248

国際宇宙ステ

国際宇宙ステーション（International Space Station:ISS）とは

日本、米国、カナダ、欧州各国、ロシアの計 15 ヶ国が協力し、地上から約 400km 上空の宇宙空間に、各国の技術力を集結して建設した有人宇宙施設です。

ISS はサッカー場程の大きさで、1 周約 90 分というスピードで地球の周りを回っています。

無重力、高真空、放射線環境など宇宙ならではの特殊な環境下で、宇宙飛行士が様々な実験や研究を長期間にわたって行い、科学・技術をより一層進歩させ、地上での生活や産業に役立てます。

ーションISS

宇宙ならではの特殊な環境

1. **無重力**
   地上の 100 万分の 1 ～ 1 万分の 1 程度の重力（正確には「無重力」ではなく、ほんのわずかな重力という意味で「微小重力」環境と呼ばれます）

2. **高真空（10^{-5} パスカル）**
   地上の 100 億分の 1 の真空圧力

3. **複合宇宙放射線**
   銀河宇宙線、太陽粒子線、バン・アレン帯の粒子線や二次粒子線などから成る複雑な放射線環境

4. **広い視野**
   約 90 分で地球を 1 周し、広い視野を持つため、地球や宇宙の観測に有効

5. **豊富な太陽エネルギー（$1.4kw/m^2$）**
   地上に比べ雲や大気の影響を受けにくく、ISS では全電力（最大 110kW）を太陽電池で発電

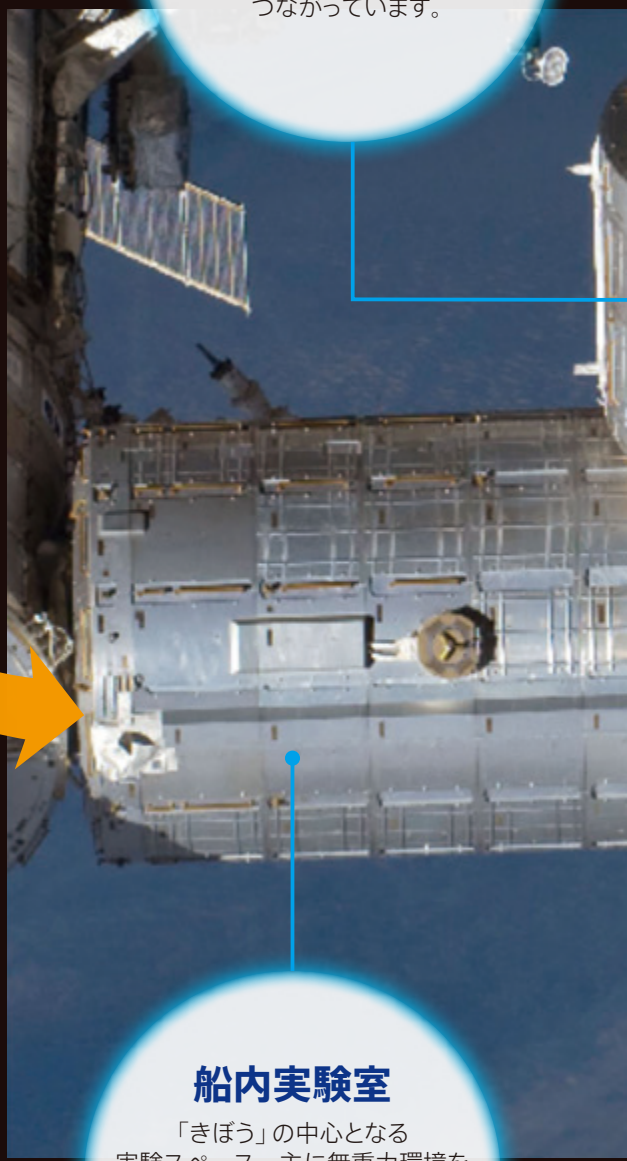
6. **閉鎖環境での居住**
   心身の変化、環境予防対策（微生物等）

宇宙の実験室「きぼう」日本実験棟

「こうのとり」（HTV）
種子島から H2B ロケットで打ち上げられ、
ISS に物資を運ぶ日本の輸送機

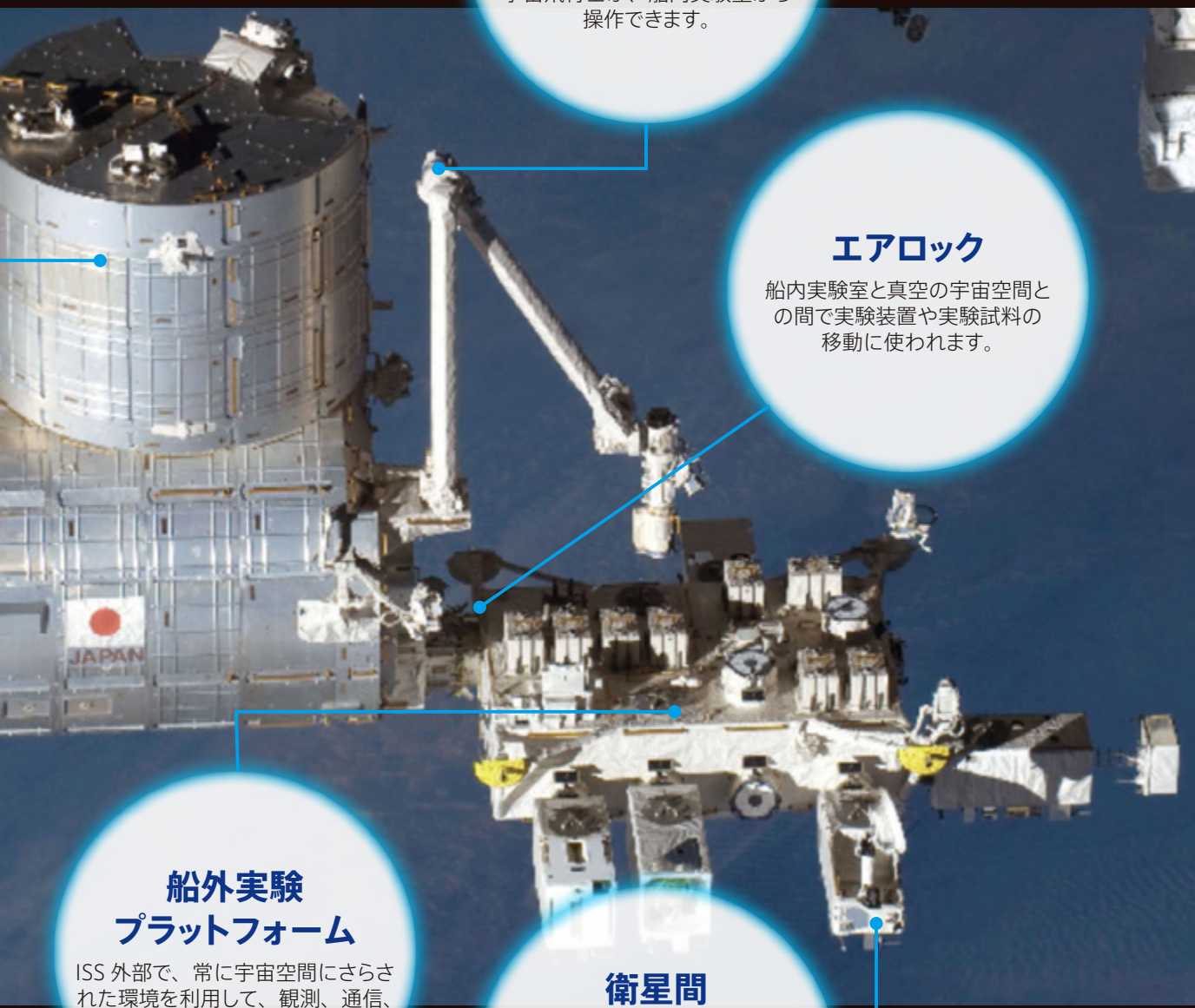
船内保管室

実験装置や実験試料、消耗品などを保管する倉庫の役割をもつスペースです。船内実験室とつながっています。



船内実験室

「きぼう」の中心となる実験スペース。主に無重力環境を利用して材料実験や生命科学実験などを行います。地上と同じ 1 気圧で、宇宙飛行士は普段着で生活できます。
（→ p.8 参照）



ロボットアーム

船外実験で、実験装置の交換など人間の代わりに作業を行う「腕」となる部分です。6 個の関節を持ち、宇宙飛行士が、船内実験室から操作できます。

エアロック

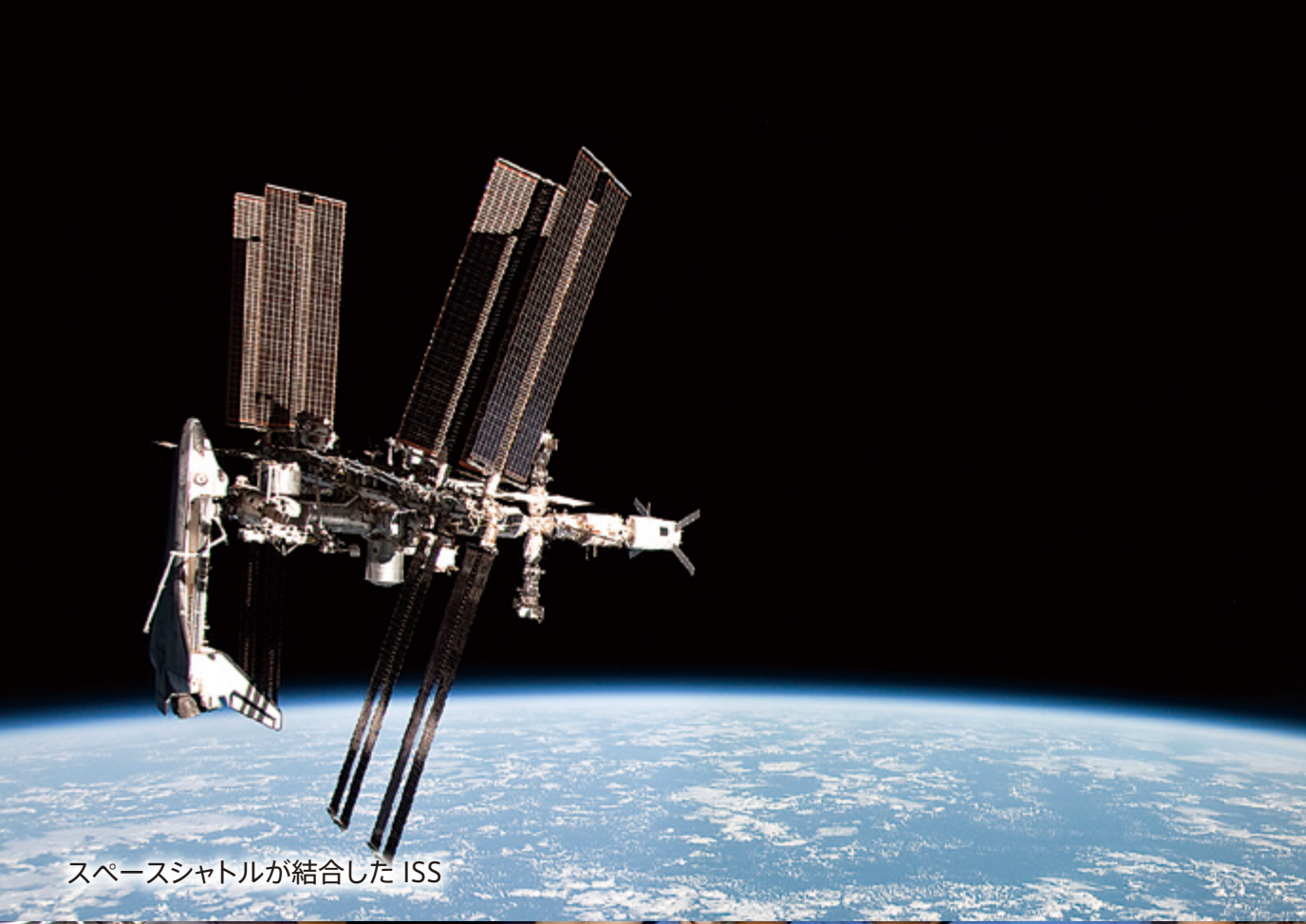
船内実験室と真空の宇宙空間との間で実験装置や実験試料の移動に使われます。

船外実験プラットフォーム

ISS 外部で、常に宇宙空間にさらされた環境を利用して、観測、通信、材料実験などを行います。
(→ p.10 参照)

衛星間通信システム

データ中継衛星を経由して筑波宇宙センターとの間で、「きぼう」での実験データや画像、音声などの通信を行います。

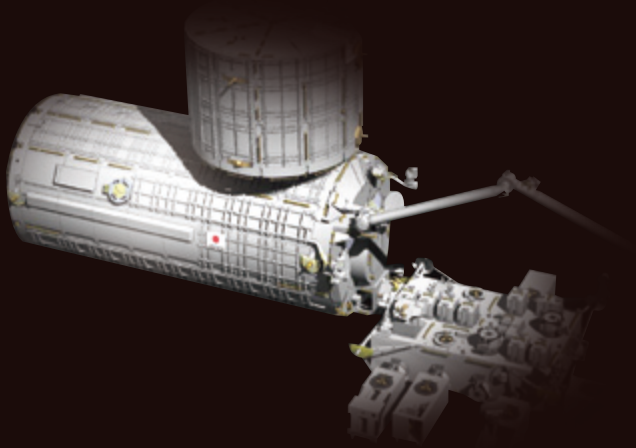


スペースシャトルが結合した ISS

宇宙飛行士「きぼう」に大集合

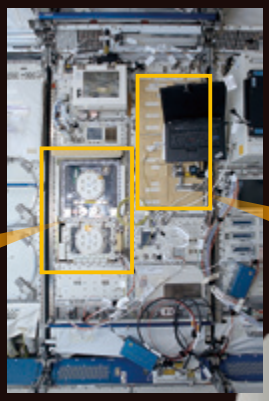
「きぼう」と「こうのとり」

船内実験室

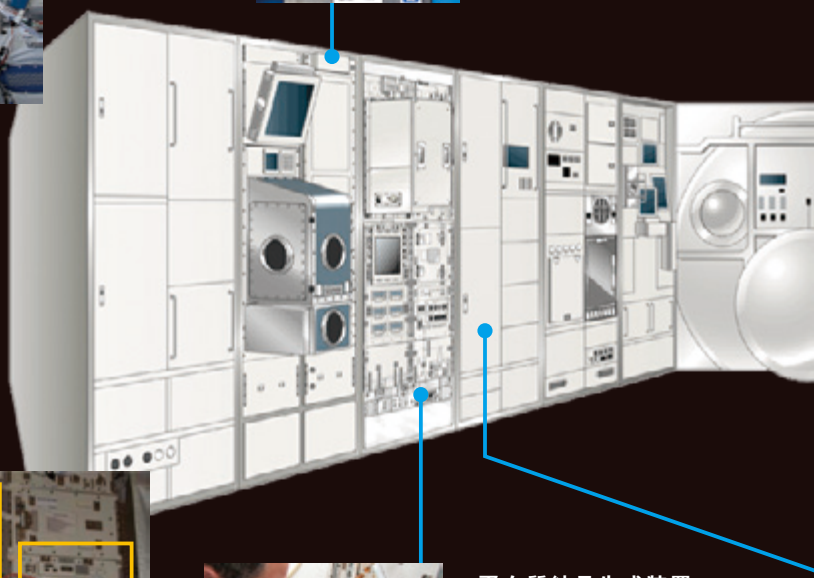


細胞実験ラック 稼働中

クリーンベンチ（CB）
顕微鏡観察が可能

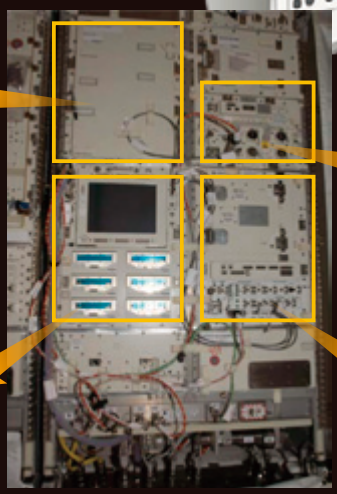


細胞培養装置（CBEF）
細胞や微生物、小型植物などを培養
▸▸▸p.14



流体実験ラック 稼働中

流体物理実験装置（FPEF）
赤外線や超音波で流れの現象を観測する
▸▸▸p.124 MEIS



蛋白質結晶生成装置（PCRF）
タンパク質の結晶作りの条件を整える
▸▸▸p.112 PCG

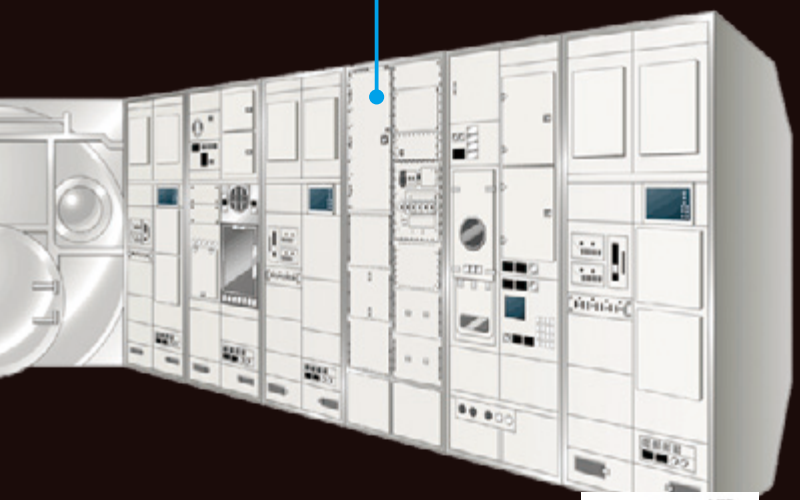
画像取得処理装置（IPU）
実験画像の処理装置

溶液結晶化観察装置（SCOF）
結晶成長の様子を調べる
▸▸▸p.128 Ice Crystal, p.131 Facet

「きぼう」の中で、宇宙飛行士が普段着で滞在し、主に無重力環境を利用した実験を行うのが船内実験室です。内部は実験装置のほか、「きぼう」の空調や電力などをコントロールする機器など、さまざまな機能を備えた「ラック」に囲まれています。日本の実験ラックは、現在４つ設置されています。

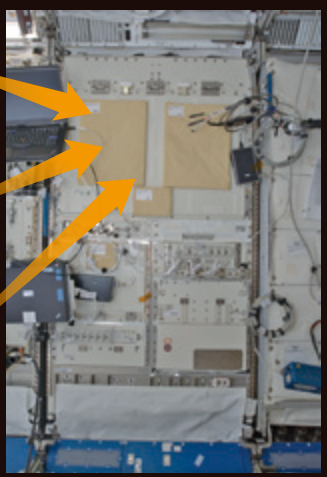
温度勾配炉ラック 稼働中

温度勾配炉（GHF）
様々な温度プロファイルで、半導体の結晶成長などを行う真空加熱炉

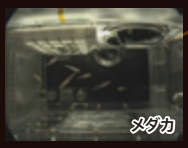


多目的実験ラック（MSPR）

様々な実験装置を入れる実験空間と実験に必要な電力、通信、ガス等を提供する。



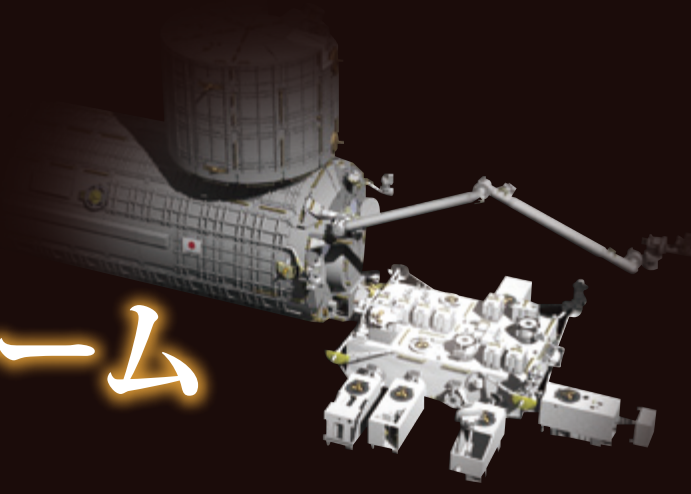
稼働中
燃焼実験チャンバ
燃焼実験を行う



稼働中
水棲生物実験装置
小型魚類を飼育する

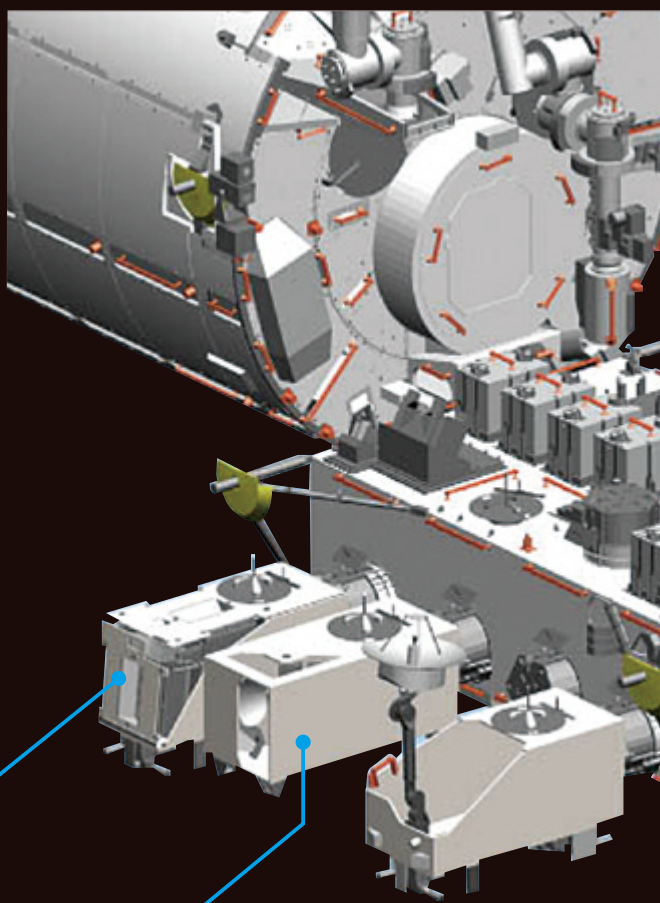
開発中
静電浮遊炉
セラミクスなどの材料を浮かして溶かす

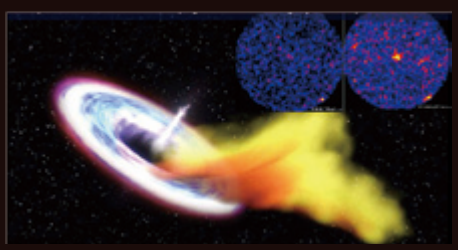
船外実験プラットフォーム



船外実験プラットフォームは、無重力、高真空などの宇宙環境を利用して、天体観測、地球観測、通信、ロボット実験および材料実験などを実施することができる、多目的実験スペースです。

船外実験装置を取り付ける場所（ポート）が全部で 10 箇所あり、実験装置を交換することで、色々な実験を行うことができます。





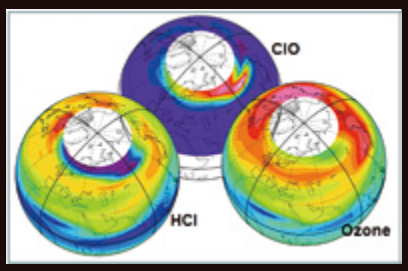
ブラックホールが星を飲み込む様子
「Nature」(Vol. 476, 421–424 (25August 2011))

全天 X 線監視（MAXI）

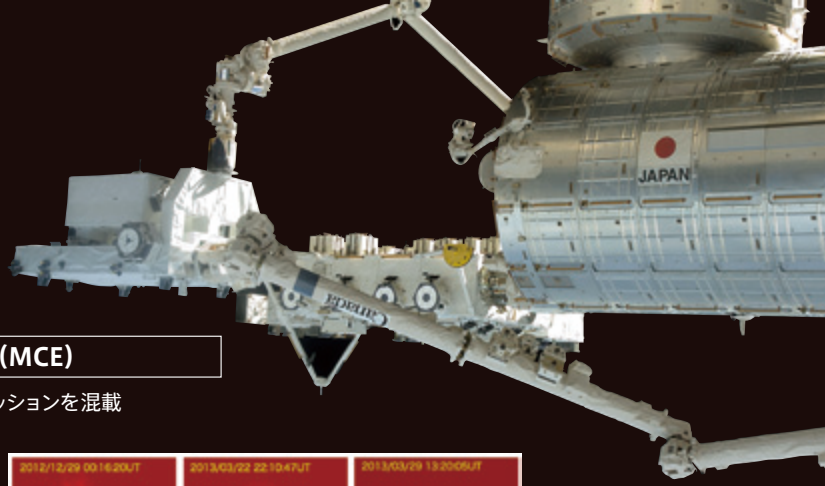
世界最大の高視野 X 線カメラによって銀河系内外のブラックホールなどの活動天体を観測
▸▸▸ p.150

超伝導サブミリ波リム放射サウンダ（SMILES）

オゾン層を破壊する微量気体やオゾン層が発する短い電波（サブミリ波）を観測
▸▸▸ p.146

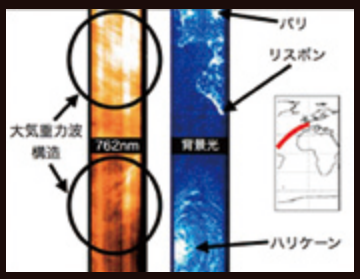


オゾン・一酸化塩素・塩化水素の分布 （© JAXA/NiCT）

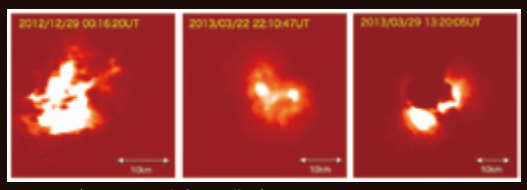


ポート共有実験装置（MCE）

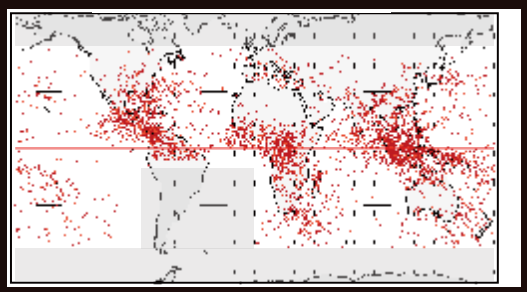
ロボット実験、地球観測など、５つのミッションを混載
▸▸▸ p.155



IMAP　（© 京都大学 /JAXA）

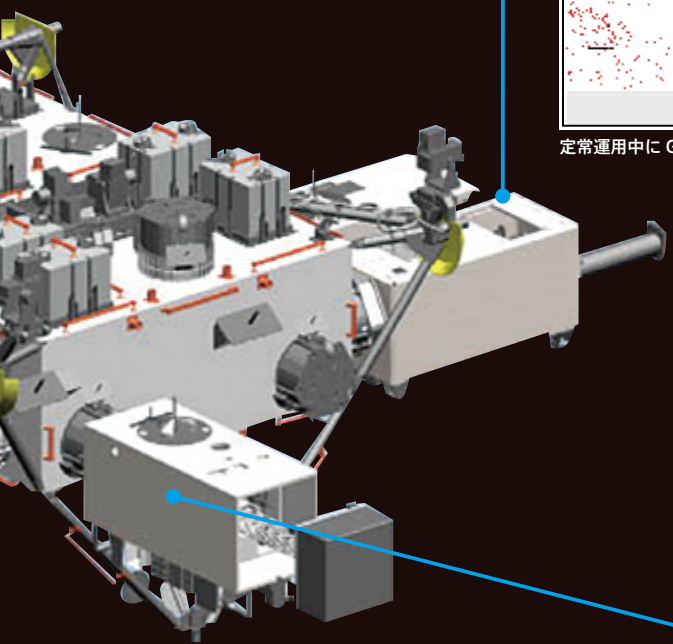


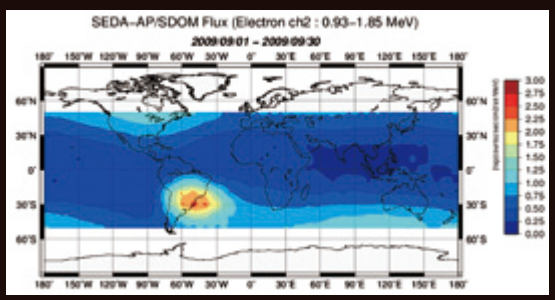
GLIMS がとらえた雷発光の画像データ



定常運用中に GLIMS が検出した雷イベントの全球分布

GLIMS（© GLIMS ミッションチーム /JAXA）



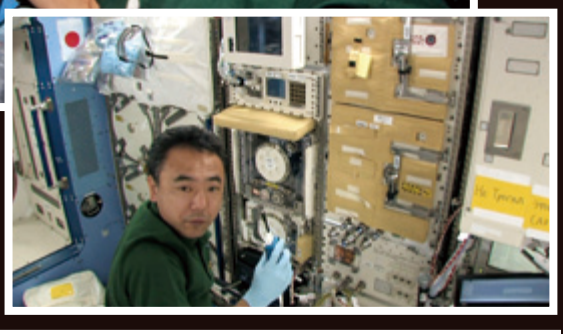


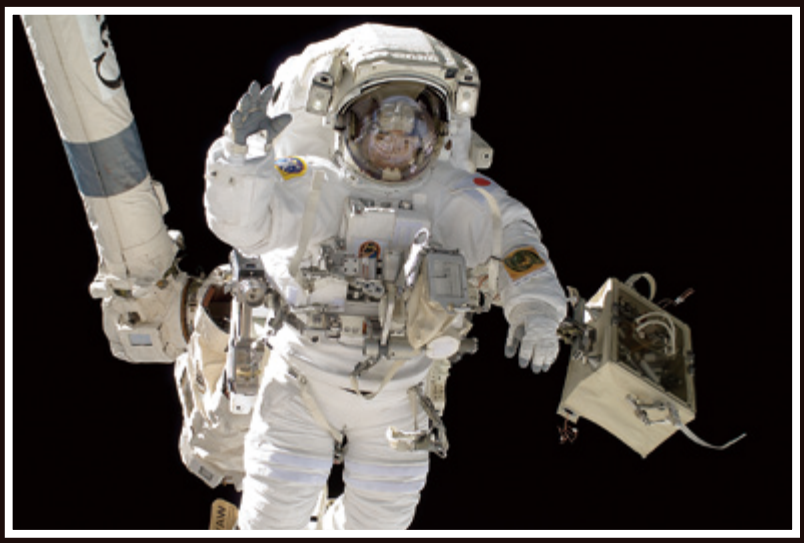
放射線帯の計測

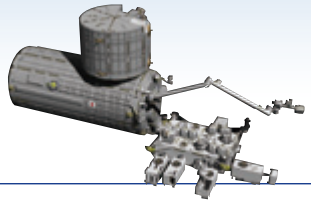
宇宙環境計測ミッション（SEDA-AP）

ISS の周回軌道における宇宙環境（中性子、プラズマ、原子状酸素、ダスト等）の計測
▸▸▸ p.144

ロボットアームを使った超小型衛星放出などの実験もできます
▸▸▸ p.153 J-SSOD







様々な利用分野

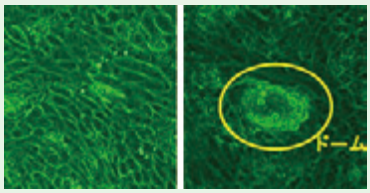
生命科学分野

重力と放射線は生物にどう影響するのか？

重力は生物に大きな影響を与えていますが、地上では重力をなくすことはできません。また、大気と磁場にさえぎられ地表に届きにくい宇宙放射線は、生物にどのような影響を与えるのでしょうか。ISS を利用することで、それらの影響を調べることができます。

宇宙環境が生物に与える影響を調べるため、ゲノムが解読され様々な利点を持ち、モデル生物として広く研究に用いられている線虫、メダカ、シロイヌナズナなどの生物、細胞、植物が用いられます。

生物の発生・成長・世代交代などに重力や宇宙放射線が与える影響を調べ、生命の基本的な現象を司る遺伝子やタンパク質の働きを探り、生命現象の理解を深めます。



p.39 Dome Gene (© 東京大学 /JAXA)

p.64 Medaka Osteoclast
(© 東京工業大学)

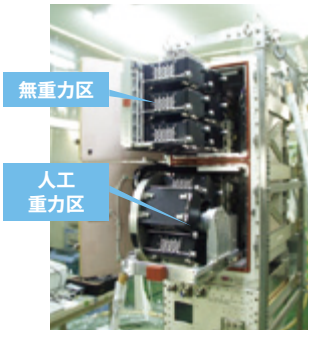
p.58 Space Seed
(© 富山大学 /JAXA)

生命科学実験でよく使われる装置

▶▶ 細胞培養装置

無重力の培養室（無重力区）と遠心機によって重力を負荷した状態を作る回転テーブルがついた培養室（人工重力区）があります。これまでの宇宙実験では、宇宙に持って行った生物に変化が見られても、打ち上げ振動などによる影響もあるため、無重力による影響と区別しにくいという欠点がありました。きぼうでは細胞培養装置を用いて重力のみが異なる「対照実験」を行うことにより、重力の影響を明確に調べることが可能になりました。さらに生物実験ユニットを接続して使うことにより、様々な種類の生物を用いた生命科学実験が可能になりました。

宇宙用実験装置の開発を通じて、小型化、自動化装置の技術が得られ、細胞培養カセットや自動細胞培養装置の事業化にもつながり、地上での医療技術の進展に役立っています。



細胞培養装置

▶▶ 冷凍・冷蔵庫

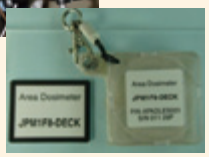
-95℃、+2℃に設定することができ、実験試料を冷凍・冷蔵保管できます

冷凍・冷蔵庫

宇宙医学・技術開発

宇宙飛行士の健康を守り、地上の医学につなげる

p.70 Holter ECG



p.86 PADLES とは?

宇宙医学の分野では、無重力や宇宙放射線、閉鎖環境が心身に与える影響を調べ、宇宙滞在中に宇宙飛行士に現れるさまざまな症状への対策を確立するための研究を行っています。

技術開発の分野では、宇宙と地球との往還機の中や宇宙で快適に過ごすため、宇宙飛行士の活動や宇宙環境を計測し制御するための技術開発などを行っています。

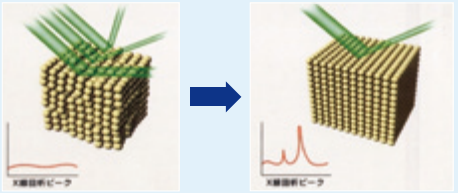
重力のない宇宙環境では、体を支える必要がないため、骨や筋肉が地球の何倍ものスピードで衰えていきます。宇宙飛行士の健康管理や健康維持のために開発された技術や蓄積された知見は、宇宙での生活だけでなく、地上で暮らす人々のためにも役立ちます。

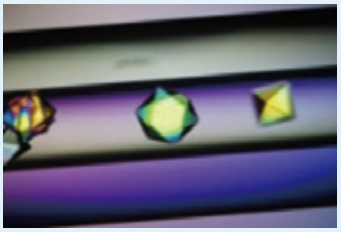
応用利用

宇宙で得た成果を地上の製品開発へ

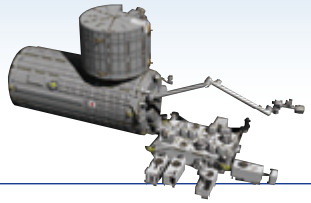
宇宙実験で得られた成果を地上の製品開発等に応用し、地上生活の改善に貢献することを目指し、タンパク質の高品質な結晶生成や、ナノ材料の創成などについて、産業界、研究機関と連携して宇宙を利用した研究開発を実施しています。この分野では、研究成果の地上での応用に主眼を置いています。たとえば、無重力下でタンパク質の結晶を生成すると、地上で生成したものよりも高品質な結晶が得られます。その結晶を地上で詳細に解析することで、タンパク質の構造が解明され、そのタンパク質を原因とする病気の治療法や、新たな医薬品の開発につながることが期待されます。

沈降や対流がないため、歪みが少ない
高品質な結晶ができる





p.112 PCG



様々な利用分野

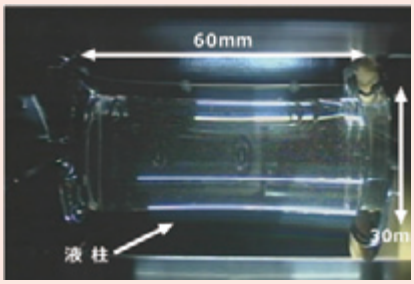
物質・物理科学

地上では隠されている物理現象の謎を解く

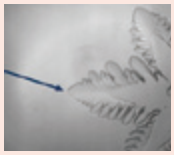
ISS の無重力環境では、密度の違いにより発生する対流や沈降（下記「無重力の特徴」参照）が起こらず、物質や熱の動きが地上と大きく異なります。そのため、地上であれば重力により隠されてしまう現象を無重力下で明らかにし、単純化して観測することで、物事の本質にせまることができます。

物質・物理科学分野では、この特殊な環境を利用して、結晶の分子レベルでの成長過程観察、物質の流れの観察、材料創製プロセスに関連する基礎データの取得などの宇宙実験を行い、現象の根本的なメカニズムを解明するための基礎的な研究を行っています。

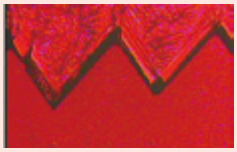
これらの研究では、コンピュータ、携帯電話、通信機器などに使われる半導体や光学素子などの機能を更に高めるような製造プロセスの開発につながる成果が期待されます。



p.124 MEIS（©JAXA/YNU/TUS）



p.128 Ice Crystal
（© JAXA/ 北海道大学）



p.131 Facet

無重力の特徴

▶▶「沈降」が無い

地上では重いものは沈み、軽いものは浮かびます。無重力環境では水と油のように比重の違うものでも均一に分散し、より高機能な材料作製の可能性を秘めています。

▶▶「対流」が起こらない

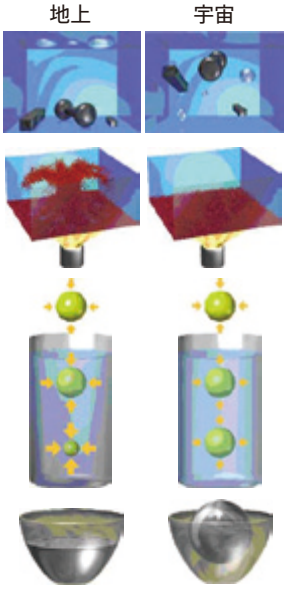
地上では熱せられた液体や気体は比重が軽くなり対流が発生しますが、無重力環境では比重差による対流は発生しません。そのため、対流に邪魔されず材料作製ができ、地上ではできないような高品質な材料の製造が期待されます。

▶▶「静水圧」が無い

地上では液体の深いところほどその液体の重さにより静水圧（静止している水中ではたらく圧力）が高くなりますが、無重力環境では液体中の静水圧はほとんど発生しません。非常に柔らかい材料では特に有効です。

▶▶「容器無し」で浮遊できる

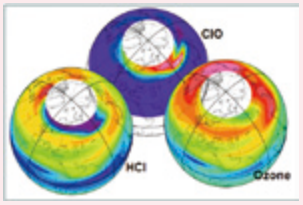
地上では液体を溜めておくために容器が必要ですが、無重力環境では空間に浮遊させることができます。そのため容器からの汚染のない無容器状態で物質の性質を測定したり、化学反応現象を解明したり、これまでにない機能を持つ材料を開発することができます。



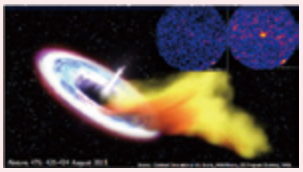
船外利用

宇宙空間でしかできない研究を行う

ISS が飛行している軌道からは、地球の表面の約 85% を観測することができます。また、地上からは大気にさえぎられて観測が困難な X 線（エックス線）天体やγ線（ガンマ線）天体の観測も可能です。この良好な視野を活かし、「きぼう」船外実験プラットフォームに観測装置を取り付け、地球観測や天体観測を行っています。また、「きぼう」のエアロックとロボットアームを利用した超小型衛星放出や、将来の宇宙活動に必要なロボット、通信、エネルギーなどの技術実証も行っています。



p.146 SMILES （© JAXA/NiCT）



「Nature」(Vol. 476, 421–424 (25August 2011))

p.150 MAXI

アジア利用、人文・社会科学

宇宙が魅せるインスピレーション

宇宙環境利用分野への興味の醸成や青少年たちの科学技術への関心を高めるため、人材育成・教育ミッションを実施しています。

アジア利用については、「きぼう」の本格的な利用を目指し、各国での経験を蓄積しているところです。

p.174 SSAF

p.195 発光する墨流し水球絵画 - Ⅱ

（© JAXA/ 逢坂卓郎）

また、宇宙環境を利用し、これまで人類が経験したことのない驚きや感動を芸術表現を通じて共有できる芸術活動を行っています。

成果占有利用（有償利用）

自由な宇宙の使いみち

「きぼう」を有償にて利用し、利用者が成果を占有できる制度です。「きぼう」での科学研究や技術開発へのニーズに応えることが可能です。テーマは随時募集しています。

どのように役立つの？

1. 環境・エネルギー問題解決や新産業創出等に貢献する革新的な材料をつくる

環境にやさしい技術や限られた資源を有効に活用する技術に向けて、革新的な機能を持つ材料やその開発手法を見出すことは、地球規模の環境・エネルギー問題の解決につながると同時に、これからの日本の技術力の源となって新しい産業を生み出す可能性もあります。

対流や沈降が起こらない無重力環境を使い、地上で製作するよりも高品質な結晶や新機能を持つ材料素材を生成して、持ち帰った材料の分析や生成過程のリアルタイム観察を通じて、材料生成の条件などを詳しく知る実験を行ってきました。得た知見を、高効率の光触媒や太陽電池、環境汚染などの原因となる有害物質の除去、より効率的でハイパワーな次世代半導体開発手法へつなげています。

● 結晶の品質に影響するマランゴニ対流の仕組みを調べる ➡ p.124

● コンピュータの高性能化や半導体の製造コスト削減 ➡ p.118

2. 健康長寿を支える

心身ともに健やかで長生きすることは誰しもが望んでいることです。４人に１人が高齢者となる日本では、独り暮らしのお年寄りの健康管理・安心安全な生活維持などが超高齢社会の喫緊の課題となっています。

無重力環境の ISS では、体を支える骨や筋肉が弱くなるなど、健康な宇宙飛行士にも、高齢者が抱えている加齢に伴う問題と同じことが急速に起こります。そのため、ISS では、骨や筋肉が衰えるメカニズム解明などの研究が活発に行われ、予防対策を行ってリスクを減らす宇宙医学研究の取組みや、宇宙でつくられるタンパク質の高品質な結晶を用いた医薬品開発、また、宇宙飛行士の健康を守る遠隔診断技術（モニタリング）など、我々の生活に役立つ知識や技術が蓄積されています。

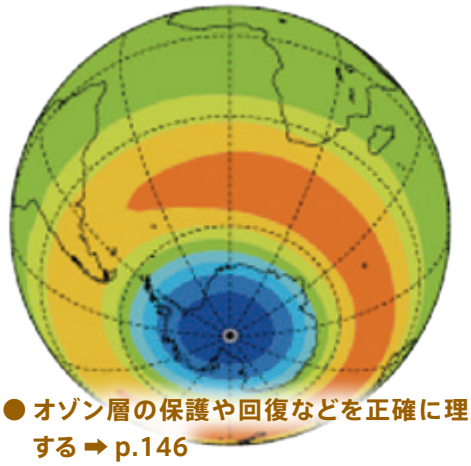
● 薬剤投与で、骨の問題を解決 ➡ p.68

● 医薬品などの開発につながる高品質なタンパク質の結晶をつくる ➡ p.112

3. 地球環境の変動を捉える

地球温暖化やオゾン層破壊などの地球環境の変動を捉えることは地球環境問題の解決には不可欠であり、そのためには地球全体を宇宙から観測することが有効です。例えば、地球を取り巻くオゾン層は生物を守る役割を果たしていますが、オゾン層の保護やその回復に重要とされる地球の大気組成変化を把握するために、ISS が役立っています。

また、衛星放送や衛星通信、GPS 衛星を利用したカーナビゲーションシステムなどを安定的に運用するために、地球を取り巻く電磁波などの宇宙環境や超高層大気を ISS から観測しデータを蓄積しています。



- オゾン層の保護や回復などを正確に理解する ➡ p.146
- 衛星放送や衛星通信、GPS 衛星を利用したカーナビゲーションシステムを運用 ➡ p.144

4. 未来を支える青少年を育てる、地球人をつくる

日本、そしてアジアの青少年が宇宙に触れるきっかけをつくり、科学技術を支える人材を育成します。また、ISS の中でも日本のユニークな活動として、無重力を利用した芸術などの文化的活動の取組みも行っています。ISS は科学技術関係者だけのものではなく、日本の芸術文化の発信、さらには宇宙の利用によって「地球人」としての新たな価値を創造する機会を提供します。

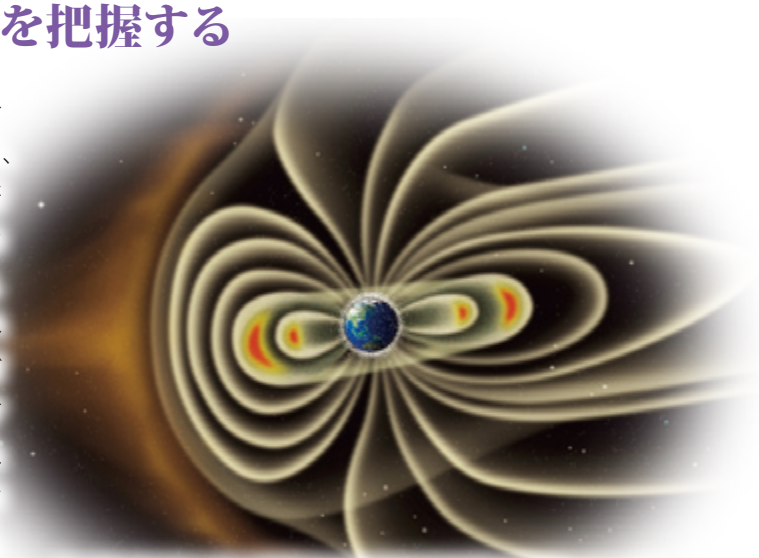
- 低コストで開発可能な超小型衛星の多様な打上げ機会を提供 ➡ p.153
- 地球上で作り上げてきたライフスタイルや世界観を見直す ➡ p.178

どのように役立つの？

5. 放射線の影響を把握する

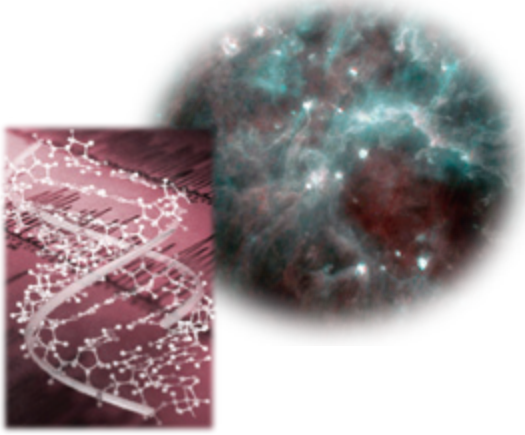
宇宙放射線の計測技術や宇宙飛行士の被ばく管理に関する基礎的な知見は、原子力施設、放射線を用いた医療・研究施設など、放射線の管理が必要となる分野への利用・応用が期待できます。

また、細胞レベルから生物個体レベル、そしてヒトに対して宇宙放射線がどのように影響し、そして修復しようとするのか、様々な視点から把握することは重要です。ISS での低線量被ばくによる生物への影響の研究などを通じて、生物への放射線の影響メカニズムの解明やリスク評価に貢献できます。



● がん治療などに貢献する放射線防護法の開発 ➡ p.46
● 宇宙放射線の被ばく管理に関する研究 ➡ p.88

6. 生命と宇宙の進化の謎にせまる

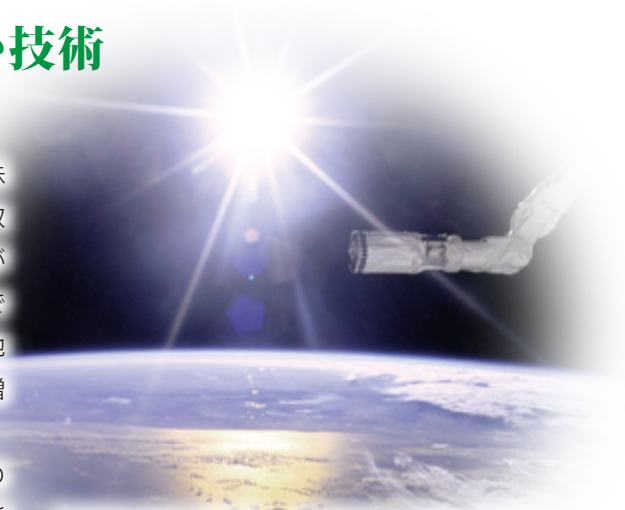


● X 線天文学の分野で数々の世界的な新発見 ➡ p.150
● 無重力と宇宙放射線の細胞への影響を解析 ➡ p.39

生命は太古の昔、地球を取り巻く放射線環境と重力の下で生まれ、進化してきました。広い宇宙の中で非常に特殊な空間である地球で生まれ育ってきた生命がこの地球を離れたときに、どのような変化が現れるでしょうか。地上では調べられない無重力の影響や宇宙放射線の影響の研究から、生命の本質に迫る成果が生まれています。

また、宇宙の進化は、遠い宇宙で起こっている星々の爆発や誕生などを観測することや、太陽系誕生の歴史の中で生まれて地球周辺に飛来してくる隕石を調べることなどにより、その歴史の謎に迫ることができます。天体の爆発などで生じる X 線を全天にわたって観測することによって数々の世界的発見や、既知の隕石と異なる新種の地球外物質の回収など、ISS でしか得られない科学的な知見を生み出し、世界的に高い評価を得ています。

7. 未来につながる新しい技術

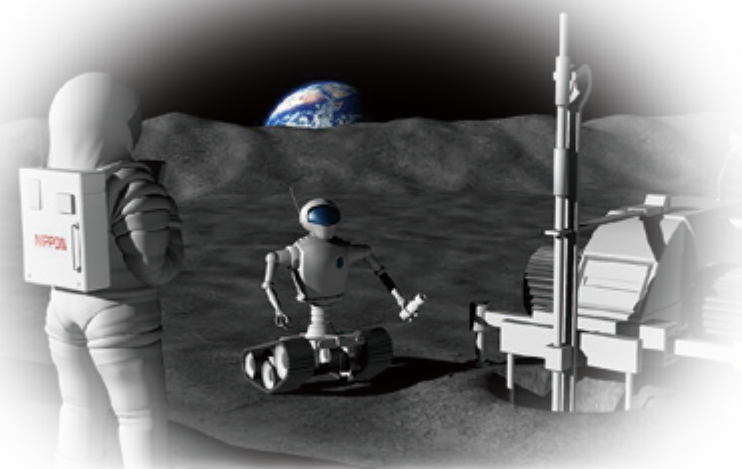


これまで宇宙開発は限られた国だけが取り組む特殊な分野でしたが、今では人工衛星や有人宇宙活動に取り組む国がどんどん増えており、近い将来、多くの国があたりまえのように宇宙活動を行う時代がやってくるでしょう。ISS の活動を通じて、日本の優れた民生技術（地上）が宇宙で使われ、ISS の標準ツールとなる事例も増えています。

将来に向けた新しい宇宙機の設計に必要なデータの取得、新しい宇宙材料、宇宙でも使える映像技術や新しいロボット技術など、未来の暮らしを豊かにするための様々な技術を開発しています。

- **耐熱素材の開発、大気圏突入時の破壊事象の観測 ➡ p.104**
- **宇宙での船外・船内活動の支援ロボットの開発 ➡ p.164**

8. 人類の宇宙への活動領域の拡大に貢献する



人類が宇宙での活動を持続、発展させるには、閉鎖的な環境で、長期間にわたって健康に生活し、活動するための技術が重要です。

そのために、ISS をテストベッドとして、長期宇宙滞在における人体への影響を複合的に理解し、将来宇宙で食糧を確保するのに役立つ研究などの基盤的な技術・知見を蓄積しています。

- **筋肉の衰えや老化などの現象への無重力の影響を解析 ➡ p.30**
- **宇宙で植物が育つことを証明 ➡ p.58**

星出飛行士が船外活動中に撮影

「きぼう」利用成果レポート2014

― それぞれの実験の成果 ―

実験一覧…… 24

生命科学 …… 29

宇宙医学・技術開発 …… 67

応用利用 …… 111

物質・物理科学 …… 123

船外利用 …… 141

アジア利用、人文・社会科学 …… 171

実 験 一 覧

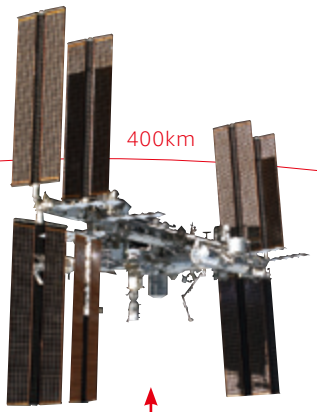
タイトル	本編ページ	付録ページ	どのように役立つの？（p.18 ～ 21） 革新的材料	健康長寿	地球環境	地球人育成	放射線	生命と宇宙	新技術	活動拡大
生命科学										
小さな線虫を使った実験で、筋肉の衰えや老化の現象の謎が分かる 第 1 回線虫国際共同実験 (ICE-1st)	30	208		●						●
筋肉が衰えるメカニズムを最先端の手法でねらい打ち 線虫 *C. elegans* の宇宙環境における RNA 干渉とタンパク質リン酸化 (CERISE)	32	208		●						●
宇宙で筋肉が衰える「新規メカニズム」とは ユビキチンリガーゼ Cbl-b を介した筋萎縮の新規メカニズム (Myo Lab)	34	209		●						●
目からウロコの実験が骨の重力応答の仕組みを解明する 宇宙空間における骨代謝制御：キンギョの培養ウロコを骨のモデルとした解析 (Fish Scales)	36	209		●						●
カエルの細胞は宇宙でも「ドーム」を作るのか 両生類培養細胞による細胞分化と形態形成の調節 (Dome Gene)	39	210		●				●		●
特殊な環境に生きる微生物のヒミツを探る **—「きぼう」と宇宙飛行士を守る —** 国際宇宙ステーション内における微生物動態に関する研究 (Microbe)	41	210		●						●
細胞の生死を制御する司令塔、「ミトコンドリア」は宇宙でどう働くか？ 宇宙放射線および微小重力環境の哺乳類細胞に対する影響に関する研究 (Neuro Rad)	44	211		●						●
がん化を防ぐ遺伝子「*p53*」の宇宙での働きを探る 哺乳動物培養細胞における宇宙環境曝露後の *p53* 調節遺伝子群の遺伝子発現 (Rad Gene)	46	211		●			●			●
低線量放射線が遺伝子を傷つけた「証拠」を、高感度に検出 ヒト培養細胞における TK 変異体の LOH パターン変化の検出 (LOH)	49	212					●			●
カイコの卵は宇宙放射線の番人になるか ?! カイコ生体反応による長期宇宙放射線被曝総合的評価 (Rad Silk)	52	213					●			●
植物細胞壁の「鉄筋コンクリート構造」の強度は宇宙でどう変わる？ 微小重力環境下におけるシロイヌナズナの支持組織形成に関わる遺伝子群の逆遺伝学的解析 (Cell Wall)	54	213						●		●
細胞壁というドームを支える、細胞内部の役者たち 植物の抗重力反応における微小管－原形質膜－細胞壁連絡の役割 (Resist Wall)	56	213						●		●
種から種へ。身近なペンペン草 (シロイヌナズナ) の一生を宇宙で。 微小重力環境における高等植物の生活環 (Space Seed)	58	214						●		●
根を曲がらせる「影の物質」を宇宙で探る 微小重力下における根の水分屈性とオーキシン制御遺伝子の発現 (Hydro Tropi)	60	214						●		●
イネの細胞壁は宇宙でどう変化するか 重力によるイネ芽生え細胞壁のフェルラ酸形成の制御機構 (Ferulate)	62	215						●		●
宇宙で骨が減るメカニズムの解明に挑む メダカにおける微小重力が破骨細胞に与える影響と重力感知機構の解析 (Medaka Osteoclast)	64	216		●				●		●

タイトル	本編ページ	付録ページ	どのように役立つの？ (p.18 ～ 21) 革新的材料	健康長寿	地球環境	地球人育成	放射線	生命と宇宙	新技術	活動拡大
宇宙医学・技術開発										
薬剤投与で、骨の問題を解決 ビスフォスフォネート剤を用いた骨量減少・尿路結石予防対策に関する研究	68	217		●						●
心電図と高精細画像（HDTV）カメラは「きぼう」での医学診断に使えるか 簡易型生体機能モニター装置の軌道上検証実験（Holter ECG）	70	217		●						●
宇宙で生体リズムはどう変化するか **～ 24 時間の連続心電図記録の周波数解析～** 長期宇宙飛行時における心臓自律神経活動に関する研究 （Biological Rhythms）	72	217		●						●
宇宙での健康診断 宇宙医学実験支援システムの検証（Onboard Diagnostic Kit）	74	218		●						●
髪の毛から宇宙での体の変化を調べる 長期宇宙滞在宇宙飛行士の毛髪分析による医学生物学的影響に関する研究（Hair）	76	218		●						●
起立性低血圧の原因－重力との関係を探る 前庭－血圧反射の可塑性とその対策（V-C Reflex）	78	218		●						●
無重力ではカビも空中を漂っている？ **微生物による健康への影響を調べる** 国際宇宙ステーションに滞在する宇宙飛行士の身体真菌叢評価（Myco）	80	218		●						●
筋骨格系の最適トレーニングシステムを目指して 国際宇宙ステーションに長期滞在する宇宙飛行士の筋骨格系廃用性萎縮へのハイブリッド訓練法の効果（Hybrid Training）	82	219		●						●
中性子のヒトへの影響を知る ボナーボール型中性子計測装置（BBND）	84	219					●			●
PADLES とは？	86									
「きぼう」船内の宇宙放射線環境の定点計測（Area PADLES）	88	220					●			●
宇宙飛行士を守る有人宇宙技術個人被ばく線量計（Crew PADLES） （宇宙飛行士用の受動積算型宇宙放射線線量計）	90	220					●			●
宇宙放射線計測技術（PADLES）を用いた国際共同実験（その１） Dosimetric PADLES / マトリョーシカ実験	92	221					●			●
宇宙放射線計測技術（PADLES）を用いた国際共同実験（その２） Dosimetric PADLES / アルトクリス実験	96	222					●			●
国際宇宙ステーションでのハイビジョン撮影開始と宇宙放射線の影響調査 ロシアサービスモジュールにおける高精細画像カメラ実験（HDTV in SM）	98	222					●		●	
ISS の高精細ビデオカメラと通信衛星の間を取り持つデータ処理システム 高精細ビデオ（HDTV）画像伝送処理システム	100	223							●	
宇宙用超高感度ハイビジョンカメラによる撮影 **～地球と宇宙が織り成す美しい映像～** 超高感度ハイビジョンカメラシステム（SS-HDTV）	102	223							●	
「こうのとり」宇宙船（HTV）が大気圏に突入して燃え尽きる様子を記録する球体 i-Ball による宇宙機再突入データ取得	104	224	●						●	
世界初、アイソン彗星を宇宙から 4K 動画撮影 超高感度 4K カメラシステム	108	224			●				●	

実 験 一 覧

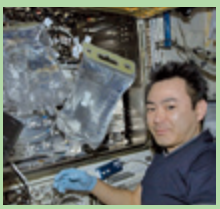
タイトル	本編ページ	付録ページ	どのように役立つの？ (p.18 ～ 21) 革新的材料	健康長寿	地球環境	地球人育成	放射線	生命と宇宙	新技術	活動拡大
応用利用										
医薬品などの開発につながる高品質なタンパク質の結晶を宇宙でつくる 高品質タンパク質結晶生成実験 (GCF, NGCF / PCG)	112	225	●	●						
宇宙でナノレベルの骨格を持つ新しい機能性材料を作成する 微小重力環境でのナノスケルトン作製 (Nanoskeleton)	116	225	●							
宇宙でナノレベルの凹凸を作る 微小重力環境を利用した 2 次元ナノテンプレートの作製 (2DNT)	118	226	●							
光を操る結晶をつくる 3 次元フォトニック結晶生成実験 (3DPC)	120	226	●							
物質・物理科学										
宇宙で明らかになる流れの世界 マランゴニ対流におけるカオス・乱流とその遷移過程 (MEIS)	124	228	●							
結晶は生きている 氷結晶成長におけるパターン形成 (Ice Crystal)	128	228	●	●						
平らに成長する結晶 ファセット的セル状結晶成長機構の研究 (Facet)	131	229	●							
省エネ CPU 用半導体材料の製造実験 微小重力下における TLZ 法による均一組成シリコンゲルマニウム (SiGe) 結晶育成の研究 (Hicari)	133	229	●							
結晶が成長する過程をリアルタイムで追う 微小重力における溶液からのタンパク質結晶の成長機構と完全性に関するその場観察による研究 (NanoStep)	136	230	●	●						
氷の結晶をコントロールするタンパク質の秘密とは 生体高分子の関与する氷結晶成長－自励振動成長機構の解明－ (Ice Crystal 2)	139	230	●	●						
船外利用										
材料を宇宙の厳しい環境に曝すとどうなるか、そして宇宙にどのような微小粒子が存在するかを調べる ロシアサービスモジュール利用微小粒子捕獲実験および材料曝露実験 (MPAC&SEED 実験)	142	231						●	●	
宇宙ステーションの気象台 **～宇宙環境の計測とその部品・材料に及ぼす影響に関する研究～** 宇宙環境計測ミッション装置 (SEDA-AP)	144	231			●		●		●	
地球の大気を宇宙から診る 超伝導サブミリ波リム放射サウンダ (SMILES)	146	232			●				●	
宇宙を探る　全天にわたる X 線天体の長期・短期変動の研究 全天 X 線監視装置 (MAXI)	150	232				●		●		
「きぼう」から飛べ！ 超小型衛星を放出 小型衛星放出技術実証ミッション (J-SSOD)	153	233				●			●	
ポート共有装置 (MCE)	155									
宇宙と地球の境界で何が起きているのか？ 地球超高層大気撮像観測 (ISS-IMAP)	156	233			●					
自然の驚異、雷の全体像を明らかにする スプライト及び雷放電の高速測光撮像センサ (JEM-GLIMS)	158	234			●					

タイトル	本編ページ	付録ページ	どのように役立つの？ (p.18 ～ 21) 革新的材料	健康長寿	地球環境	地球人育成	放射線	生命と宇宙	新技術	活動拡大
巨大な構造物を軽く・安く造る技術 宇宙インフレータブル構造の宇宙実証 (SIMPLE)	161	235							●	
縦横無尽に動く「空間移動ロボット」が宇宙開発の未来を支える EVA 支援ロボットの実証実験 (REX-J)	164	236							●	
日本発。宇宙空間でも通用する地上の優れた技術 船外用民生品高精細ビデオカメラシステム (COTS HDTV-EF)	167	236							●	
アジア利用、人文・社会科学										
宇宙ふしぎ実験および教材開発 (Try ZERO-G)	172	238				●				
種から始まるアジアの「きぼう」利用 Asian Seed 2010	174	238				●				
宇宙連詩	176	239				●				
宇宙を旅した種子を育てよう! JAXA Seeds in Space	178	239				●				
文化・人文社会科学利用パイロットミッション	180									
宇宙モデリング	182	239				●				
ISS 宇宙飛行士の 'moon' score	183	240				●				
水の球を用いた造形実験	184	240				●				
墨流し水球絵画	185	240				●				
光るニューロン	186	241				●				
宇宙でのファッショナブルライフ	187	241				●				
飛天プロジェクト	188	241				●				
Spiral Top	189	242				●				
宇宙庭	190	242				●				
手に取る宇宙 **～ Message in a Bottle ～**	191	243				●				
Spiral Top-II	192	243				●				
宇宙で抹茶を点てる	194	243				●				
発光する墨流し水球絵画 -II "生命、光、海"	195	244				●				
「赤色」でつなぐ宇宙と伝統文化	197	245				●				
宇宙楽器	199	245				●				
宇宙でのびやかに暮らそうプロジェクト	201	246				●				
お地球見	202	246				●				
宙音	204	247				●				



日本が開発した「きぼう」

無重力環境下の実験で未来を拓く



生命科学

無重力や宇宙放射線にさらされる環境における生物の反応を解き明かし、生命現象の理解を深めます。

29

宇宙医学・技術開発

宇宙飛行士の健康管理、様々な症状への対策の研究や、宇宙活動に役立つ技術開発を行っています。

67

応用利用

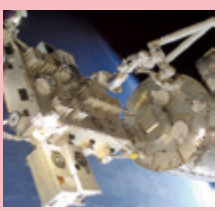
宇宙実験で得られた成果を地上の製品開発に応用し、国民生活の向上に貢献するための研究開発を行っています。

111

物質・物理科学

地上では重力に隠されている物理現象のメカニズムを解明し、新材料の創製などの産業技術の基礎となる物理現象の理解を深めます。

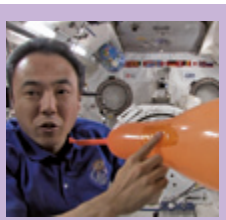
123



船外利用

無重力、高真空などの特徴を持つ宇宙空間でしかできない、地球観測や天体観測、技術実証を行っています。

141



アジア利用、人文・社会科学

宇宙環境利用への興味・関心を高める人材育成ミッションや、驚きや感動を共有する芸術ミッションを実施しています。

171

生命科学

小さな線虫を使った実験で、筋肉の衰えや老化の現象の謎が分かる
第１回線虫国際共同実験（ICE-1st）…… 30

筋肉が衰えるメカニズムを最先端の手法でねらい打ち
線虫*C. elegans*の宇宙環境におけるRNA干渉とタンパク質リン酸化（CERISE）…… 32

宇宙で筋肉が衰える「新規メカニズム」とは
ユビキチンリガーゼCbl-bを介した筋萎縮の新規メカニズム（Myo Lab）…… 34

目からウロコの実験が骨の重力応答の仕組みを解明する
宇宙空間における骨代謝制御：キンギョの培養ウロコを骨のモデルとした解析（Fish Scales）…… 36

カエルの細胞は宇宙でも「ドーム」を作るのか
両生類培養細胞による細胞分化と形態形成の調節（Dome Gene）…… 39

特殊な環境に生きる微生物のヒミツを探る　―「きぼう」と宇宙飛行士を守る―
国際宇宙ステーション内における微生物動態に関する研究（Microbe）…… 41

細胞の生死を制御する司令塔、「ミトコンドリア」は宇宙でどう働くか？
宇宙放射線および微小重力環境の哺乳類細胞に対する影響に関する研究（Neuro Rad）…… 44

がん化を防ぐ遺伝子「*p53*」の宇宙での働きを探る
哺乳動物培養細胞における宇宙環境曝露後の*p53*調節遺伝子群の
遺伝子発現（Rad Gene）…… 46

低線量放射線が遺伝子を傷つけた「証拠」を、高感度に検出
ヒト培養細胞におけるTK変異体のLOHパターン変化の検出（LOH）…… 49

カイコの卵は宇宙放射線の番人になるか？!
カイコ生体反応による長期宇宙放射線被曝総合的評価（Rad Silk）…… 52

植物細胞壁の「鉄筋コンクリート構造」の強度は宇宙でどう変わる？
微小重力環境下におけるシロイヌナズナの支持組織形成に関わる
遺伝子群の逆遺伝学的解析（Cell Wall）…… 54

細胞壁というドームを支える、細胞内部の役者たち
植物の抗重力反応における微小管－原形質膜－細胞壁連絡の役割（Resist Wall）…… 56

種から種へ。身近なペンペン草（シロイヌナズナ）の一生を宇宙で。
微小重力環境における高等植物の生活環（Space Seed）…… 58

根を曲がらせる「影の物質」を宇宙で探る
微小重力下における根の水分屈性とオーキシン制御遺伝子の発現（Hydro Tropi）…… 60

イネの細胞壁は宇宙でどう変化するか
重力によるイネ芽生え細胞壁のフェルラ酸形成の制御機構（Ferulate）…… 62

宇宙で骨が減るメカニズムの解明に挑む
メダカにおける微小重力が破骨細胞に与える影響と
重力感知機構の解析（Medaka Osteoclast）…… 64

小さな線虫を使った実験で、筋肉の衰えや老化の現象の謎が分かる

第 1 回線虫国際共同実験（ICE-1st）

代表研究者：石岡 憲昭（JAXA）

目的

線虫（図 1）は重力がない環境において生物がどのように環境に適応・機能するかを、細胞レベルから個体レベルまで研究することができる、優れたモデル生物です。これまでの宇宙実験において、線虫が宇宙環境で生殖・産卵し、正常に発生することは知られていましたが、その基本的なプロセスにおいて、地球上の環境とどのような点が異なるのかは、詳しく調べていませんでした。この宇宙実験では、生体内の基本プロセスに対する宇宙環境の影響を総合的に理解するために、ISS 参加国の研究者が集まりました。日本は特に発生（受精卵からの成長過程）、筋萎縮、老化の各プロセスへの影響について詳しく調べました。

概要

線虫は通常では大腸菌を餌として成長しますが、この宇宙実験では実験をより簡単にするために、人工的に合成した栄養素を含む培地を使用して生育させました。線虫は、ロシアのソユーズ宇宙船で打ち上げられ、ISS に到着後約 10 日間培養しました。培養終了後、線虫のサンプルは凍結あるいは化学薬品によって固定処理され、ソユーズ宇宙船で地上に回収しました（図 2）。帰還した線虫から、RNA やタンパク質などを抽出し、宇宙における遺伝子の働く量やタンパク質の現れ方が地上で生育した場合とどのように異なるかを詳細に比較しました。また、顕微鏡での観察によって、地上で観察されるようなアポトーシス（計画的な細胞死）が正常に起こるかどうか、また、老化の進み方はどのように異なるかを調べました。

成果

老化を抑える方法の解明につながる発見

凍結された宇宙飛行後の線虫から RNA を抽出し、宇宙における遺伝子の働き方と地上での働き方を分析比較しました。興味深いことに、線虫の筋肉を構成しているミオシンや筋肉線維の収縮に重要な役割を果たすトロポニンなどのタンパク質を合成するための情報を持つ遺伝子の働く量が、宇宙飛行をした線虫では地上で育った線虫と比べて大きく減少していることがわかりました。宇宙飛行士が宇宙に滞在したときに、筋肉が弱くなることは良く知られていますが、線虫においても宇宙飛行でタンパク質の構成が変化することによって筋肉が弱く（脆く）なる可能性があることが示されました。

また、生物が成長する過程では、ウィルスに侵されたり、老化して不要となった細胞が自ら計画的に死んでしまうアポトーシスという現象が見られます。宇宙環境でもこの現象が正常に見られるかどう

かを調べてみたところ、宇宙飛行をした線虫においてもアポトーシスが正常に進んでいることが確認できました。

さらに、線虫の老化の指標となるタンパク質であるポリグルタミン凝集体を調べたところ、宇宙では老化が遅くなる可能性があることがわかりました（図 3）。これに基づいて宇宙飛行した線虫で働く量が減っている遺伝子を見つけ出して、地上においてそれらの遺伝子を働かなくさせたところ、線虫の寿命が通常よりも長くなることが示されました。

このように、筋肉の萎縮や老化現象など、高齢化社会の問題に対する解決策のヒントがこの実験の解析結果の中に含まれていると考えられます。

図 1　線虫（*Caenorhabditis elegans*）
大きさは大人の線虫で 1mm 程度。

図 2　宇宙飛行した線虫が入った容器

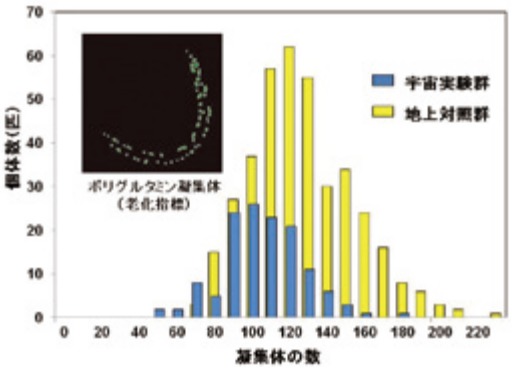


図 3　宇宙飛行した線虫の老化指標

今後への波及

地上への還元

筋肉の萎縮や老化などの生命現象に対して無重力環境が与える影響を分子レベルで解析することにより、ヒトが高齢化することによって問題となる筋肉の衰えや老化の諸症状への対応策のヒントが見つかると考えられます。

宇宙活動への貢献

無重力での筋萎縮のメカニズムを正確に知ることによって、宇宙飛行士の長期宇宙滞在や将来実現するであろう宇宙旅行で起こり得る筋肉の衰えを未然に防ぐ対策を考えることができます。

筋肉が衰えるメカニズムを最先端の手法でねらい打ち

線虫 *C. elegans* の宇宙環境における RNA 干渉とタンパク質リン酸化（CERISE）

代表研究者：東谷 篤志（東北大学大学院）

目的

2 本鎖 RNA を細胞に入れて、標的となる遺伝子の働きを抑える RNA 干渉（RNAi）（図 1）が、宇宙でも地上と同じように使えるかどうかを、モデル生物の 1 つである線虫（*C. elegans*）を用いて明らかにすることが第一の目的です。この RNAi が宇宙でも有効ならば、培養細胞などを用いた宇宙実験での利用はもとより、将来的には、宇宙に滞在した人が遺伝子に関わる病気にかかった際にそれを治療する有効な手段にもなると考えています。

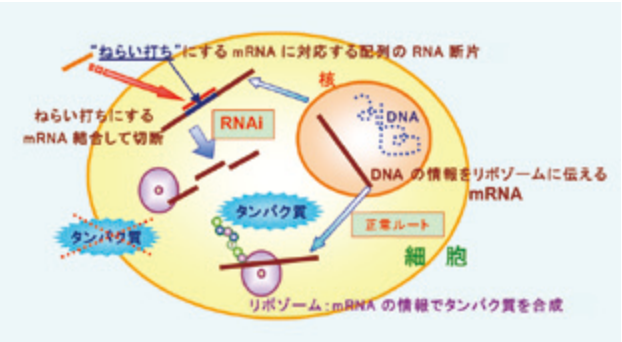


図 1　RNA 干渉（RNAi）の概要図

概要

宇宙で線虫を育てるために、線虫の幼虫と餌となる大腸菌をふたつに仕切った培養バッグにそれぞれ入れ、スペースシャトルで打ち上げます。ISS に到着したのち、「きぼう」に運びバッグの仕切りを外すことで実験を開始します。餌となる大腸菌内に、線虫の特定遺伝子を標的とした 2 本鎖 RNA を合成し、それを食べさせることで線虫における RNAi 効果を調べます。線虫は大腸菌を食べ始めてから 4 日後には大人になって卵を産みはじめます。これら宇宙滞在の第一世代（幼虫として打ち上げられてから成虫になるまで宇宙で育ったもの）、さらに 4 日間餌を食べさせた第二、第三世代（受精から初期発生を経て成虫になるまでの全期間、宇宙で育ったもの）を、それぞれ凍結後、シャトルで地上に持ち帰り、遺伝子の働く量やタンパク質の現れ方の変化を解析します。

成果

筋肉の衰えを抑えるヒントを得た　宇宙の無重力下における RNAi の効果

宇宙から持ち帰ったサンプルを東北大学、JAXA と、英国ノッティンガム大学とで共同で解析しました。

その結果、3 つの全く異なる遺伝子（線虫に遺伝子組換えした緑色蛍光タンパク質 GFP、細胞増殖に必須のタンパク質、筋肉を構成するα - アクチンを分解する分解酵素）のそれぞれに対して、宇宙の無重力下においても地上と同様に RNAi が有効に使えることが確認できました（図 2 から 4）。

将来的には、この RNAi 技術を、宇宙飛行士の無重力下における筋肉の衰え（萎縮）を抑える対策のひとつとして利用する応用展開が期待されます。

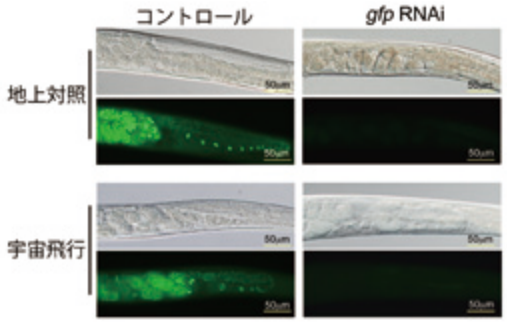


図 2　*GFP* 遺伝子の RNAi 効果

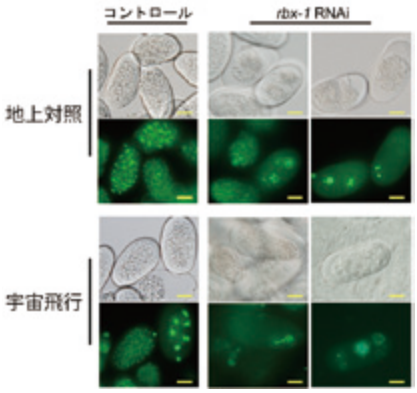


図 3　*rbx-1* 遺伝子の RNAi 効果

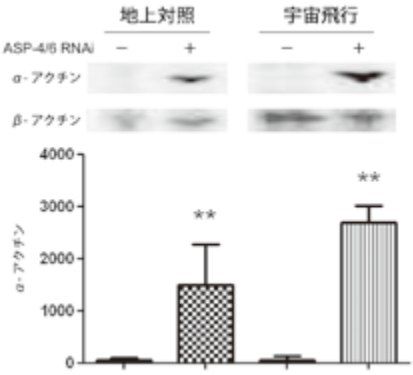


図 4　α - アクチンの 分解酵素遺伝子 *asp-4* と *asp-6* の RNAi 効果

GFP が導入された遺伝子組換え線虫を用いて、*GFP* 遺伝子ならびに細胞増殖に必須のタンパク質を構成する *rbx-1* 遺伝子に対する RNAi をそれぞれ行ったところ、GFP RNAi では線虫内の GFP 蛍光シグナルが抑制され（図 2）、*rbx-1* の RNAi では初期胚の細胞核の異常な断片化が生じました（図 3）。さらに野生型線虫に対して、筋肉を構成するα - アクチンの 分解酵素である遺伝子 *asp-4* と *asp-6* の RNAi を行ったところ、α - アクチンの分解が抑えられることを明らかにしました（図 4）。

今後への波及

地上への還元

この研究成果は、寝たきりなどにおける筋肉の衰え（萎縮）の原因を分子レベルで明らかにすることにつながり、これらの対策を通して高齢社会でも人々が健康に過ごすための応用につながると期待されます。

宇宙活動への貢献

今後、宇宙環境で様々な生物の遺伝子の仕組みを調べるのに、RNAi 法が十分に活用できることを世界に先駆けて示せました。将来的には、宇宙飛行士の長期宇宙滞在にともなう骨粗しょう症や筋萎縮をはじめとする諸問題に対する遺伝子治療としても、RNAi の活用が期待されます。

宇宙で筋肉が衰える「新規メカニズム」とは

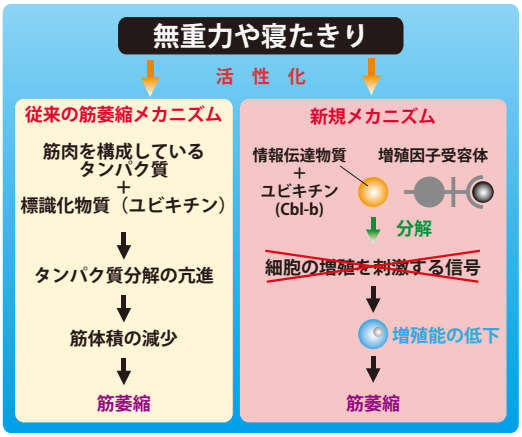
ユビキチンリガーゼ Cbl-b を介した筋萎縮の新規メカニズム（Myo Lab）

代表研究者：二川　健（徳島大学大学院）

目的

宇宙飛行士の筋肉がなぜ衰えるのかを調べるために、1998 年スペースシャトルで飛行したラットを調べたところ、筋肉が萎縮しており、筋肉中の Cbl-b（シーブルビー）というタンパク質の量が地上の約 10 倍に増えていることが分かりました。Cbl-b は分解されようとするタンパク質に目印となる「ユビキチン」という物質をつける（ユビキチン化）働きを持つ酵素で、ユビキチンをつけられたタンパク質は分解されてしまいます。つまり、無重力環境での筋肉の萎縮は、Cbl-b の量が増加することによって引き起こされることが分かったのです。

しかし、なぜ無重力では Cbl-b の量が増加してしまうのか、詳しいメカニズムについてはよくわかっていません。そこで、筋肉を萎縮させるユビキチン化を促進する Cbl-b がどのように無重力の影響を受けているかを調べるとともに、外から筋肉を増やそうとする信号が入ってきても、その信号を伝えるタンパク質のいずれかが Cbl-b によってユビキチン化されて分解されてしまい、筋肉を増やそうとする信号が伝わらず、結果的に筋肉が萎縮してしまうのではないかという仮説を調べました。



概要

筋肉を増やす信号を入力するために成長因子を加えたラットの筋細胞と、その比較として成長因子を加えない細胞を用意し、ISS 内の無重力環境で数週間培養し、冷凍して地上に回収しました。地上に回収した後、遺伝子とタンパク質の両方を調べました。特に Cbl-b の量や、成長因子を伝える経路に関係した複数のタンパク質の量を調べて、Cbl-b によるユビキチン化によって筋肉が分解される過程あるいは程度が、無重力環境では地上とどのように違うのかを明らかにしました。また、Cbl-b がなぜ無重力環境で増大するのか仕組みを解析し、筋細胞が無重力ストレスに対しどのように応答しているのかについても解析しました。

成果

これまでとは違う筋萎縮のメカニズムを確認、酸化ストレスは筋萎縮にも影響!?

1G の環境では、成長因子を加えた細胞と加えない細胞では筋肉の萎縮の程度に違いがみられ、成長因子を加えた細胞では萎縮が抑えられていました。一方、無重力環境では成長因子の有無にかかわず萎縮が進行しており、Cbl-b の量が多くなっていました。つまり、無重力環境では Cbl-b が増えることで、成長因子によって萎縮を抑える経路に関係するタンパク質がユビキチン化され分解されることにより、筋肉の萎縮が進むことがわかりました。

また、無重力環境では細胞内部の酸化ストレス（活性酸素が細胞の機能低下や老化を引き起こす作用）が増大することがわかってきており、その影響で Cbl-b の量が調節されている可能性が示されました。地上での模擬無重力実験でも細胞内部のエネルギーを生産する器官（ミトコンドリア）の挙動が変化することがわかってきており、無重力が酸化ストレスを発生させる可能性が示されました。

このように、筋肉の萎縮ではユビキチンリガーゼ（分解するタンパク質に「ユビキチン」を付ける酵素）のひとつである Cbl-b が重要な働きをしており、その働く量の調節には無重力環境での筋細胞内部に発生する酸化ストレスが大きく関与する可能性があるとわかりました。

今後への波及

地上への還元

Cbl-b の働きを抑える薬剤や栄養素の特許を取得し、その一部は寝たきり患者を対象に臨床実験を行っています。Cbl-b や筋細胞が無重力を感知する際に関与する分子の働きを抑える薬剤・食材は、無重力や寝たきりによる筋萎縮の治療剤、予防食になり得ます。また、骨格筋が無重力を感知する生物学的な「センサー」の発見にも通じるもので、生物学的に非常に意義のある研究成果です。

宇宙活動への貢献

長期間無重力環境で活動する宇宙飛行士の筋肉の保持・増進に有用な薬剤や食材の開発につながります。

目からウロコの実験が骨の重力応答の仕組みを解明する

宇宙空間における骨代謝制御：キンギョの培養ウロコを骨のモデルとした解析（Fish Scales）

代表研究者：鈴木 信雄（金沢大学 環日本海域環境研究センター）

目的

無重力環境にいると、ヒトの体に様々な変化が見られます。骨のカルシウムが尿に出るため腎臓や尿路での結石のリスクが高まることが知られ、カルシウムが不足すれば骨粗しょう症にもなりやすくなります。そこで無重力下での骨の挙動の研究や薬の開発が求められています。

骨の挙動を研究するためには骨を作る骨芽細胞と骨を壊す破骨細胞を併せて解析することが必要です（図 1）。キンギョのウロコには骨芽細胞と破骨細胞が共存するのでヒトの骨と同じような構造です。そのウロコを骨モデルとして用いることで、骨の細胞に重力がどのような影響を与えているか、その仕組みを解明することを目的としました。また、新しく開発した骨粗しょう症の薬の効果も調べました。

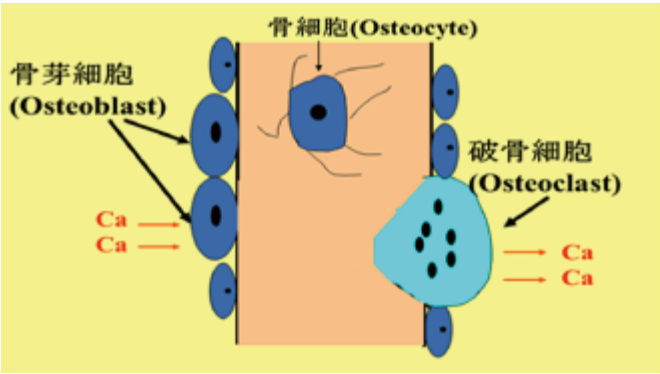


図 1　ヒトの骨には骨を作る細胞（骨芽細胞）と骨を壊す細胞（破骨細胞）があり、これらの働きがコントロールされることによって骨は生まれ変わっています。

概要

骨には、骨を作る骨芽細胞と骨を壊す破骨細胞があり、常に骨を作り替えています。このバランスが崩れると、骨粗しょう症などの骨の病気になることが知られています。正常な状態の骨では、骨芽細胞を通して骨に取り込まれるカルシウム量と、破骨細胞を通して骨から放出されるカルシウム量のバランスがとれています。しかし、宇宙のような無重力環境下では、このバランスが崩れ、骨から放出されるカルシウム量が増えて、骨粗しょう症などの骨の異常が起きると考えられています（図 2）。しかし宇宙空間で骨が弱くなる詳しいメカニズムはよくわかっていません。そこで、骨芽細胞と破骨細胞の無重力下での変化と、新しく開発された骨粗しょう症の治療薬の効果を、キンギョのウロコを培養して調べました。この実験は、「きぼう」の細胞培養装置（CBEF）を使って行われました。

図 2　骨芽細胞と破骨細胞のバランスが崩れることにより、宇宙空間で骨密度低下が進行すると考えられています。

成果

宇宙で効いた「骨の病気に対する特効薬」

キンギョのウロコは破骨細胞と骨芽細胞が共存する優れた骨のモデルです。扱いも簡単で、一匹のキンギョから約 100 枚も採れるので一度に様々な条件で実験できるなどの多数の利点があります。さらに低温で 1 週間程度なら活性を保ったまま保存もできるため、輸送条件が厳しい宇宙実験にも適しています。

宇宙実験の結果、無重力下では、ウロコの骨芽細胞と破骨細胞の活性に変化が生じ、重力があるところと比較してバランスが崩れることが確かめられました。また、骨粗しょう症の治療薬として開発した新規インドール化合物（ベンジルートリブロモメラトニン）の作用をウロコの実験で解析した結果、宇宙でも破骨細胞の活動量を下げ、骨芽細胞の活動量を上げることを見出しました。これは骨芽細胞と破骨細胞のバランスが崩れた状態を正常に戻す可能性を示しています。

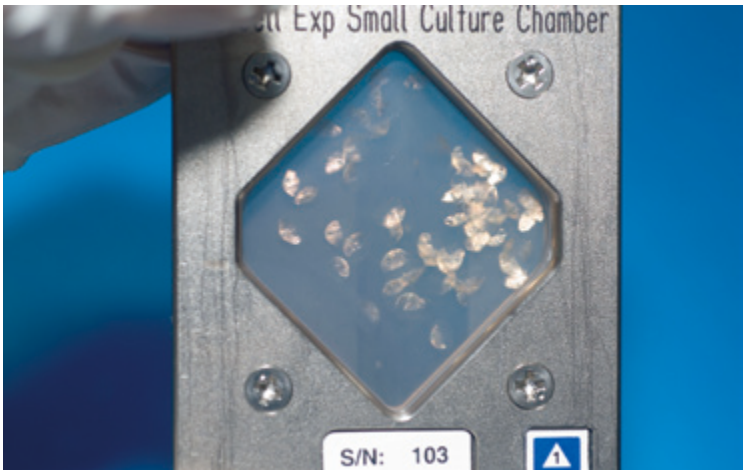


図 3　「きぼう」で撮影したキンギョのウロコ入りの容器。

図 4　「きぼう」での実験の様子。野口飛行士が実験操作を担当しました。

今後への波及

地上への還元

骨密度低下の原因究明、骨の重力に対する応答のメカニズム解明に貢献し、骨粗しょう症等のメカニズムの解明につながる可能性があります。新規インドール化合物は、骨密度低下の防止及び骨粗しょう等の骨の病気の治療薬として有望であることが確かめられました。この化合物の治療薬化を目指して研究者と企業が連携し、地上で動物実験がすすめられ、治療薬開発につながる興味深い成果が得られています。

若田宇宙飛行士が服用したビスフォスフォネートは破骨細胞の働きを抑える薬剤であり、骨粗しょう症の治療に効果を上げています (p.68 参照)。しかし、これまでに骨芽細胞の働きを上昇させる薬剤は開発されていないので、この化合物が有望視されています。今後、骨粗しょう症等による大腿骨骨折の治療薬としての可能性も模索します。

宇宙活動への貢献

宇宙空間で進行する骨密度低下の原因究明に貢献できる可能性があります。さらに、新規インドール化合物は、宇宙空間における骨密度低下の防止及び骨粗しょう症等の骨の病気の治療薬として有望です。

ウロコは構造がシンプルで、骨芽細胞と破骨細胞を併せ持ち、かつ、ほ乳類の細胞よりも重力の変化に敏感に反応する優れた骨のモデルです。これまで重力に対する骨の応答を調べる研究は、構造が複雑な骨そのものを用いていたためなかなか進みませんでしたが、ウロコを用いた宇宙実験が研究の発展に貢献できると期待されます。

カエルの細胞は宇宙でも「ドーム」を作るのか

両生類培養細胞による細胞分化と形態形成の調節（Dome Gene）

代表研究者：浅島　誠（(独)産業技術総合研究所）

目的

・細胞の種類によって異なる細胞分化および形態形成（組織や器官などの特徴的な形が作られること）が、無重力下でどのように変化するのかを解析します。
・重力下では働かない未知の遺伝子が無重力下で働く可能性を調べます。
・宇宙放射線がある環境での細胞分化、遺伝子の働きを解析します。

概要

重力が形態形成に及ぼす影響について、アフリカツメガエルの細胞を使って遺伝子レベルで検討します。アフリカツメガエルは、生物の形作りを明らかにする上での研究対象として、世界中の研究者に用いられている生物です。地上で形態形成を起こす（ドーム状の構造を作る）腎臓由来の A6 細胞、及び形態形成を起こさない（フラットな単層構造となる）肝臓由来の A8 細胞の 2 種の細胞を無重力下で培養し、形態形成を観察し、その時の遺伝子の働きの変化を比較解析します。なお無重力下では未知の遺伝子が働く可能性があると考えられるため、上記の解析の他に宇宙環境でのみ働く遺伝子の探索もあわせて行います。

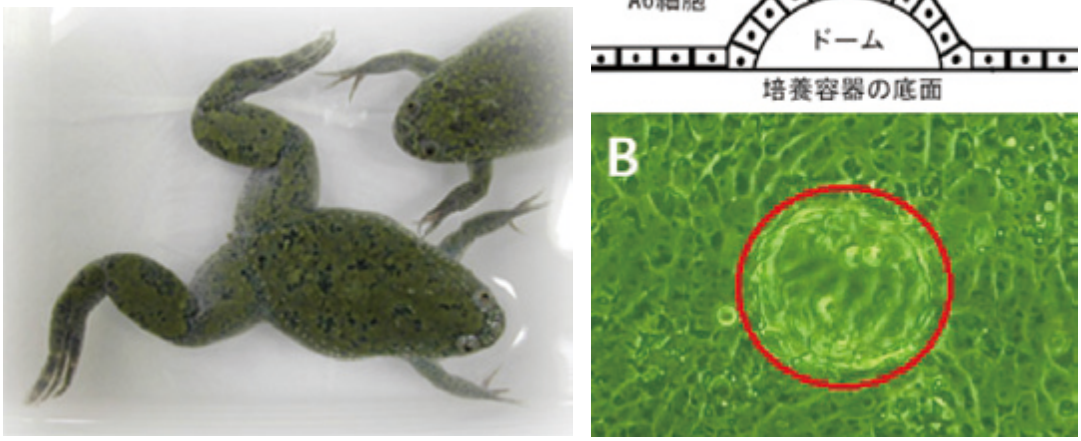


図 1（左）アフリカツメガエル、（右）A6 細胞のドーム構造

成果

宇宙環境は細胞を変える

「無重力」、「宇宙放射線」、「閉鎖空間」は宇宙環境の 3 大特徴です。これまで様々な宇宙実験によって、これらの特徴が生物に与える影響が解析されてきましたが、細胞の形態及びその遺伝子の働きに対する影響はあまり解析されていませんでした。この宇宙実験ではツメガエル腎臓・肝臓由来の培養細胞を閉鎖空間である ISS 内で培養し、それらの形態の変化及び遺伝子の働きを解析することによって、無重力と宇宙放射線の影響を解析し、以下を明らかにしました。

・無重力が細胞の形態変化や遺伝子の働きに与える影響は僅かながら存在する。
・宇宙放射線による影響は無重力と比べて大きく、特に代謝関連・ストレスへの反応関連・発生関連・ガン化等に影響する。遺伝子の中で初期発生（受精卵が細胞分裂し次第に各器官が形成されていく初期段階）には重要であるものの大人になってからはガン化に関与する数種類が増えており、宇宙放射線とガン化の影響が示唆される。
・無重力と宇宙放射線は生物体に対して相乗効果を示す。
・打ち上げ時の影響により、血管新生、免疫反応系の遺伝子の働きが上昇した。
・臓器ごとの宇宙環境に対する応答性には大きな違いがある。

今後への波及

地上への還元

宇宙という特異な環境で実験を行うことにより、細胞が持つ新たな遺伝子の働きが発見されました。この知見により、細胞が持つ有用な性質を引き出すための方法論の確立と、生命の形づくりへの重力の影響のメカニズムの解明が期待されます。

宇宙活動への貢献

宇宙環境の特徴である「無重力」や「宇宙放射線」が、我々脊椎動物に相乗的に影響を及ぼすことを、遺伝子の働きの観点から理解することが出来ました。我々が宇宙環境において健康に生きてゆくために対処すべきこと、回避すべきことに関する情報は、宇宙に於いてのみ得られるため、ISS 等における宇宙実験が重要であることは明らかです。

特殊な環境に生きる微生物のヒミツを探る　ー「きぼう」と宇宙飛行士を守るー

国際宇宙ステーション内における微生物動態に関する研究（Microbe）

代表研究者：槇村 浩一（帝京大学大学院）　那須 正夫（大阪大学大学院）

目的

これまでに ISS の内部からは多種多様な微生物が見つかっていますが、その種類は地球上の微生物全体と比較して、とても偏っていることがわかっています。そこで、ヒトや機器にどんな影響を及ぼすのかを考える上でも、完全に閉鎖されており、かつ無重力という ISS ならではの特殊な環境において、どのような微生物が住んでいるかなど、その生態を調べます。微生物は宇宙飛行士の感染など健康に対するリスクや、電子機器や配線等の腐食や劣化などトラブルの原因にもなりえるため、「きぼう」と宇宙飛行士を守るためにも、基礎的な微生物の調査と対策が必要不可欠です。

そのために代表研究者らが独自に開発した微生物の採取法、保存法、解析法を用い、「きぼう」船内において時々刻々と形成される真菌、細菌等の環境微生物の量や種類の変化を測定するとともに、関連する因子を追跡評価します。

概要

この実験では、「きぼう」船内に生育する真菌、細菌などの微生物の状態や分布を高精度にモニターし、真菌、細菌などの微生物の管理に重要な基盤的データを蓄積します。Microbe は、これまでに 3 回の実験が行われました。

1 回目と 2 回目の実験では真菌培養シート、綿棒による拭取り法（スワブ法）、サンプリングシートで微生物を採取し、また細胞培養装置内部からも微生物を採取しました。3 回目の実験ではさらに、埃や空気中の浮遊物の採取、パーティクルカウンターでの計測及び細胞培養装置の加湿器の廃水からの試料採取を追加して実施しました。採取した試料は冷蔵、冷凍状態で回収し、微生物学的解析、分子生物学的解析に用いました。

サンプリングシート

細胞培養装置加湿器廃棄水

アガー（培地）チューブ

微生物検出シート（MDS）

図 1　3 回目の実験における回収品の例

成果

微生物の時間的な変化が判明！　地上でも使える高精度採取法を開発

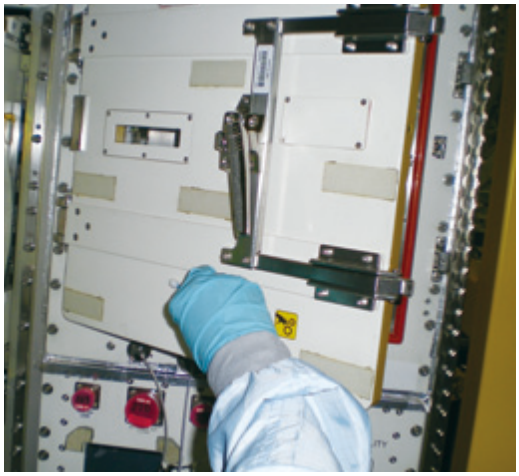
a）真菌分野

2009 年 9 月に行われた 1 回目の実験で採取したサンプルには見られなかった真菌を 2012 年 8 月に行われた 3 回目の実験では生きたまま回収し、地上で培養することができました。「きぼう」船内で徐々に微生物による汚染が進行していることを示しています。3 回目の実験で取得した綿棒を用いた拭き取りサンプルの分子生物学的解析結果を 1 回目の実験で得た結果と比較することで、「きぼう」船内の真菌の状態や分布の時間的変化が明らかとなります。

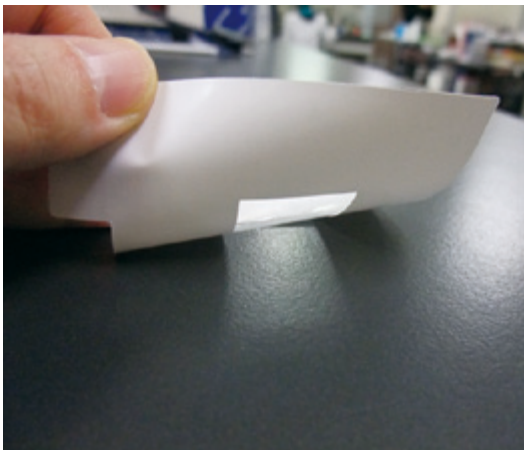
b）細菌分野

1 回目と 2 回目の実験について、いずれも測定ができる限界またはそれ以下という微かな量であったため、正確な評価は困難ですが、綿棒による拭き取り（スワブ）法の結果の比較では後に行われた 2 回目の実験の方が細菌数が少ない傾向が見られました。これには清掃の影響も考えられるため、清掃直後ではなく清掃前に試料採取を行うよう、スケジュールを考える必要性があります。

この実験で開発されたサンプリングシートを使用した微生物採取法は簡便で精度が高く、その精度の良さから日本の薬事法にサンプリング供試体の例として記載されており、今後国際的な評価を得ることが期待されています。



スワブ（綿棒）



サンプリングシート

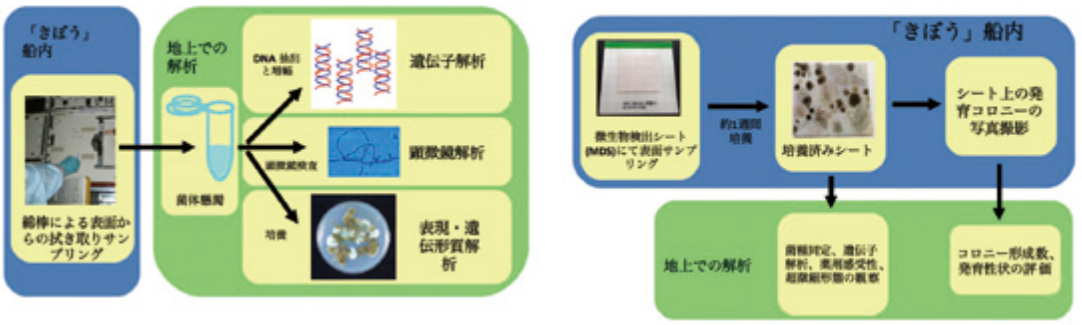


図 2　綿棒およびサンプリングシートによる採取と微生物検出シート（培養法）による微生物の採取

今後への波及

地上への還元

微生物採取の標準的な手法を確立することで、感染・アレルギー等の管理を要する医学的分野、微生物管理を必要とする医薬品製造や食品製造分野などの幅広い分野での微生物モニタリングへの応用が可能となります。

宇宙活動への貢献

「きぼう」船内の微生物環境をモニタリングすることで、宇宙環境などの極限環境下に設置される居住システムでの、衛生微生物学的な安全・安心の保証実現、並びに微生物災害の防止につながります。これらの成果を宇宙開発を計画している各国機関と論議することにより、さらに安全な長期宇宙滞在・宇宙居住が可能となり、ISS の安全な運用や月面基地建設・火星探査などの宇宙研究の推進に役立てる事が可能となります。

細胞の生死を制御する司令塔、「ミトコンドリア」は宇宙でどう働くか？

宇宙放射線および微小重力環境の哺乳類細胞に対する影響に関する研究（Neuro Rad）

代表研究者：馬嶋 秀行（鹿児島大学大学院）

目的

宇宙でヒトが生活するには宇宙放射線と無重力の影響が大変重要な問題となります。宇宙放射線の影響についてはこれまでにも様々な実験が行われてきましたが、人体にどのような影響を与えるのか、遺伝子レベルの細かいところまではまだわかっていません。本研究は ISS の「きぼう」日本実験棟で、ヒトの神経芽細胞腫由来の細胞（SK-N-SH 細胞）を培養し、宇宙放射線によってどのような影響がもたらされるのかを調べることを目的としています。

概要

放射線は遺伝子に直接的に影響を及ぼすだけではなく、細胞内に活性酸素を発生させます。この活性酸素による酸化ストレスは、細胞の機能低下や老化を引き起こすと考えられています。そこで、活性酸素や老化・細胞死に関連する細胞内小器官「ミトコンドリア」に注目し、宇宙環境（無重力および宇宙放射線）の影響を調べました。

成果

宇宙放射線によるミトコンドリアの活性化と細胞への影響を確認

この実験では、きぼう内に設置されている細胞培養装置の無重力環境区と、遠心加速器を使って地上と同じ重力を与えられる 1G 重力区で 14 日間及び 28 日間細胞を培養した後、化学処理、あるいはきぼう内の冷凍庫で凍結させて地上に持ち帰りました。細胞が放射線に被ばくすると、細胞 DNA に変化（DNA 切断、突然変異）がおきる事が知られています。また、細胞の中にあるミトコンドリアから活性酸素が出て、それによる酸化ストレスでアポトーシス（計画的な細胞死）をひきおこします。このことは、本実験の代表研究者が世界で初めて報告した現象です。図 1 に放射線による細胞からの活性酸素の発生とアポトーシスの要因になるミトコンドリアの活性化を示します。

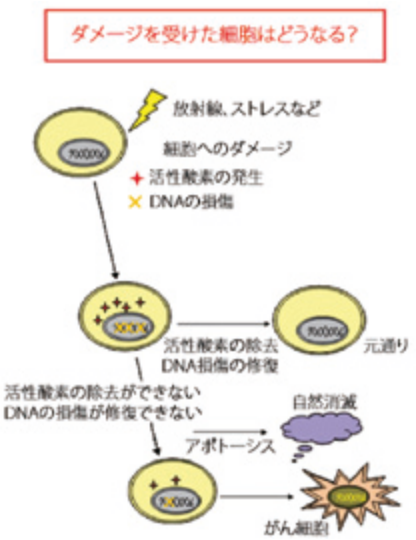


図 1　宇宙放射線によるミトコンドリアの活性化

ISS 軌道上の宇宙放射線線量を測定したところ、1 日あたり約 0.48mSv（ミリシーベルト）（0.20 mGy ）という値が得られ、14 日間でおよそ 6.7 mSv（2.7 mGy ）、28 日間で 13.4 mSv（5.5 mGy ）の被ばくという結果になりました。

ISS から戻って来た凍結細胞を解凍して再び培養したところ、細胞の状態は良好でした（図 2）。地上で同様の凍結・解凍を行う条件で対照実験を行った細胞と比較して、ISS から戻ってきた（宇宙放射線にさらされた）細胞では、ミトコンドリアから生じた活性酸素の発生が多いことがわかりました（図 3）。

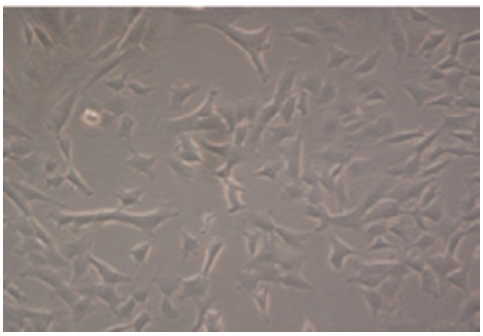


図 2　宇宙から戻って来た細胞

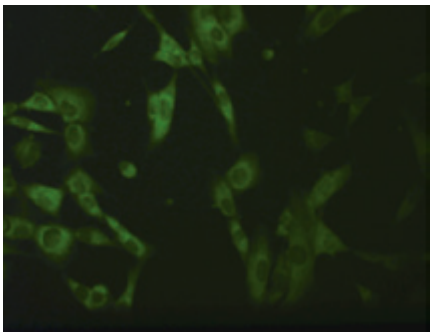


図 3　活性酸素発生（緑色の部分）

細胞は、活性酸素が細胞の中で発生してもそれを消去する酵素をいくつか持っています。その酵素についてもいくつか調べたところ、ミトコンドリアに存在し、活性酸素を消去する酵素がたくさんつくられているのがわかりました。しかし、無重力区と 1G 重力区の間に違いは見られませんでしたので、重力のある / なしはミトコンドリアの活性化には影響しないことがわかりました。また、宇宙で 14 日間培養した群と 28 日間培養した細胞の間に明確な違いは認められませんでした。

これらの結果から、宇宙環境、なかでも宇宙放射線はミトコンドリアを活性化させ、酸化ストレスにより細胞に影響を与えることが明らかになりました。

今後への波及

地上への還元

この研究により、宇宙環境は酸化ストレスを細胞にあたえ、生活習慣病に似た状態をおこすことがわかりました。研究成果は、ミトコンドリアに起因する酸化ストレスへの対策（抗酸化剤等）につながり、人々が健康に過ごすための応用につながることが考えられます。

宇宙活動への貢献

ヒトが宇宙で長期滞在を行うにあたり、宇宙放射線の影響とリスクを知っておくことは必要不可欠なことといえます。宇宙にてミトコンドリアに起因する酸化ストレスが引き起こされるのであれば、ビタミン C、E、ポリフェノール等の抗酸化剤が有効に働くことが考えられます。

がん化を防ぐ遺伝子「*p53*」の宇宙での働きを探る

哺乳動物培養細胞における宇宙環境曝露後の *p53* 調節遺伝子群の遺伝子発現（Rad Gene）

代表研究者：大西 武雄（奈良県立医科大学）

目的

放射線が人体に与える影響の一つに、DNA が損傷を受けた後、修復がうまくいかずに起こる「がん化」があります。がん患者のがん細胞を調べると *p53* という遺伝子が正常でないことが多く、*p53* はがん抑制遺伝子の一つとして、がん研究の鍵となっています。

遺伝子 DNA に傷がつくと、*p53* とその関連タンパク質が DNA 損傷を感知し、修復可能なら修復を進め、修復が困難なら細胞を計画的に死に至らしめて取り除き（アポトーシス）、最終的に DNA 上に損傷が残らないようにします。この実験では *p53* 遺伝子の働きを調節する遺伝子の現れ方が宇宙放射線と無重力によって影響を受けるかどうかを調べます。また、ヒトが長期間、安全に宇宙に滞在する方法の確立につなげることもこの実験の目的の一つです。

図 1　がん抑制遺伝子産物 *p53* のはたらき

概要

ヒトリンパ球細胞由来の、*p53* が正常な細胞（正常型）と正常でない細胞（変異型）を用い、ISS の「きぼう」日本実験棟に設置された細胞培養装置で育てました。正常型と変異型を比較することで、宇宙での *p53* の働きがわかります。また、細胞培養装置には無重力状態の区画と、回転することで約 1G の人工重力を発生させる装置を持つ区画があり、その両方を使って同じように実験を行うことで、宇宙放射線と無重力による生物影響を分けて調べることができます。

成果

1　宇宙放射線による DNA の損傷を見る

これまでヒトの生きた細胞では宇宙放射線によって生じる遺伝子の傷を見ることができませんでした。私達は、重粒子線（重い粒子の放射線）によるヒト培養細胞の DNA 二本鎖切断（DSB）の可視化に地上で成功していました（図 2*e*）。X 線は散乱状（*d*）の点となりますが、重粒子線は連続的な飛跡のような点を残します（*e*）。地上対照実験ではほとんど点は観察されませんでした（*b*）が、宇宙実験をした

細胞では飛跡状の点が観察されました（*a* と *c*）。世界で初めて、ヒトの生きた細胞で宇宙放射線が起こした DNA 二本鎖切断を可視化できました。なお、DNA 二本鎖切断の生成頻度から計算した 133 日間の宇宙飛行での宇宙放射線による被ばく線量は約 94.5mSv（ミリシーベルト）、つまり、1 日あたり約 0.7mSv でした。

2 無重力が宇宙放射線による遺伝子の働きに相乗的に影響

宇宙飛行させたラットの筋肉・皮膚に P53 タンパク質が蓄積されることがこれまでに分かっていました。今回、宇宙で培養された細胞を地上に回収した後、宇宙の無重力環境で培養した細胞、人工重力下で培養した細胞、そして地上で培養した細胞をそれぞれ比較し、*p53* 遺伝子に関係していて、かつ環境の違いで現れ方の差が大きい遺伝子を調べました（図 3）。その結果、宇宙放射線による効果に、無重力環境による効果が相乗的に加わって働く量が増えた遺伝子が実に 209 もあることがわかりました。

3 *p53* 依存的に宇宙空間で増減したタンパク質

宇宙空間で 9 日間培養されたタンパク質の合成された量を測定し、*p53* の有無に影響を受けて、宇宙放射線、無重力、宇宙環境によって増加あるいは減少するタンパク質を明らかにしました。これは世界で初めての報告です。

4 細胞は宇宙放射線に適応する

あらかじめ少ない線量の放射線を被ばくしていると次にくる大きな線量の急激な放射線による影響が軽減されるという放射線適応応答が地上では知られています。凍結状態で宇宙飛行させた細胞を帰還後に培養し、さらに X 線を急照射したところ、宇宙放射線の被ばくによって、急照射された放射線の影響が抑えられることがわかりました（図 4）。このことから、

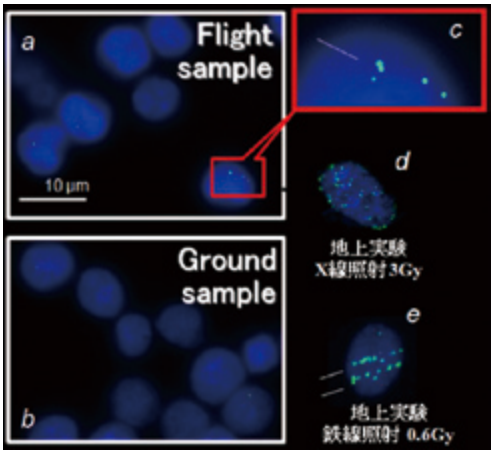


図 2　DSB の可視化。*a*, 宇宙飛行試料；*b*, 地上試料；*c*, 赤枠の拡大図；*d*, X 線照射；*e*, 鉄線照射。

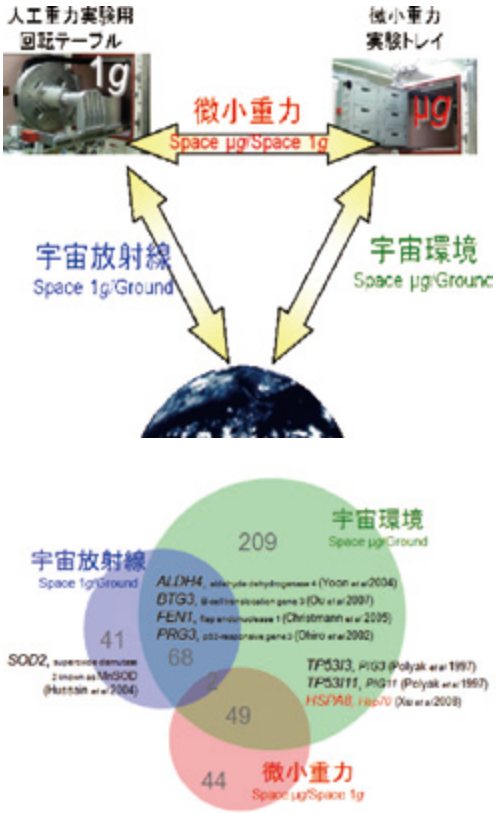


図 3　宇宙空間で培養された細胞で *p53* 依存的に発現誘導された遺伝子群。図中の数は誘導された遺伝子数を、英語名は最近報告された遺伝子名を示す。

ISS 船内での被ばく量は、地上で放射線適応応答が見られた低線量の範囲であったことを細胞で生物学的に証明しました。

これらの実験により、宇宙放射線環境を生物細胞を用いて測定する技術を確立するとともに、宇宙環境における *p53* がん抑制遺伝子の働きを明らかにしました。

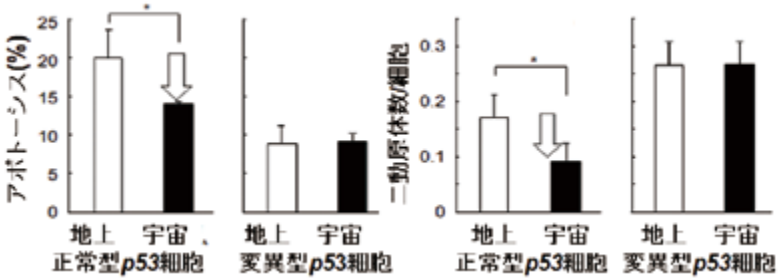


図 4　放射線適応応答：　地上回収後 2Gy の X 線を照射し、培養後にその放射線影響を測定した。矢印は宇宙飛行すれば抑制されることを表す。* は顕著差を示す。

今後への波及

地上への還元

被ばくの可視化による生物学的宇宙放射線被ばく線量の測定や *p53* がん抑制遺伝子の働き方を明らかにしたことにより低線量放射線影響研究や地上における放射線防護法の開発に役立ちます。また、重粒子線に関する成果は、がん治療の基礎および応用研究に貢献します。重粒子線を用いた先進的がん放射線治療が、がん細胞の *p53* 遺伝子型にかかわらず高い治療成果が期待できることを、我々が世界に先んじて明らかにしました。

宇宙活動への貢献

p53 がん抑制遺伝子がコントロールする遺伝子群の数や種類が明らかとなり、宇宙滞在中の放射線被ばく線量を生物学的に測定できました。これらの成果は、長期間の宇宙滞在での放射線防護方法の検討に役立ちます。また、今回の宇宙実験のアイディア・手法はこれからの宇宙実験に貢献します。

Pick Up

知ってなるほど！豆知識

宇宙は放射線がいっぱい飛んでいる！

宇宙飛行士は宇宙放射線を受けて生活しています。地上ではバンアレン帯と呼ばれる磁気の帯が宇宙放射線を捕まえてくれて地上まで達する放射線の量は少なくなりますが、地上から約 400km の宇宙ステーション程度の高度では、銀河からもエネルギーが高い粒子が飛んできます。そのため、宇宙放射線の影響を調べる実験がとても重要です。

低線量放射線が遺伝子を傷つけた「証拠」を、高感度に検出

ヒト培養細胞における TK 変異体の LOH パターン変化の検出（LOH）

代表研究者：谷田貝 文夫（理化学研究所）

目的

宇宙放射線がヒト細胞内の染色体 DNA に傷を与えた時の影響について、低線量の被ばくによる影響でも検知可能な感度の高い検出方法で明らかにします。さらに、これらの DNA の傷がどのように修復されるか、そして突然変異の誘発が無重力環境でどのような影響を受けるのかについても追求します。宇宙という特殊な放射線環境の影響を調べることで、人類が将来、宇宙環境を積極的に利用する上でも有用な知見を得ることが目的です。

概要

細胞を打ち上げ前から凍結し、宇宙でも凍結を維持すれば、打上げ時の振動や無重力の影響は受けずに、宇宙放射線の影響だけを確認することができます。ヒトリンパ球の細胞（TK6）を凍らせた状態で打ち上げ、きぼう実験棟内で約 4 か月半凍結保存しました。なお、一部の細胞は、宇宙で解凍し、遠心力で作り出した人工重力（1G）環境あるいは無重力環境下で 8 日間培養しました。その後、全ての細胞を凍結状態で地上に持ち帰りました。

この実験では、遺伝子に放射線が直接傷を付けた「証拠」を「ヘテロ性の喪失（LOH）」として高感度に検出できるように、ある仕掛けをしています。ヘテロとは「異なった」という意味のギリシャ語でその反意語は「同じ」という意味の「ホモ」です。

ヒトの細胞には染色体が 23 対あり、それぞれの染色体の上に遺伝子が配列されています。この実験では、ある一対の染色体上に存在する遺伝子の片方に変異を入れて、残る一方は正常のままにしておきます。異常と正常の組み合わせですから、「ヘテロ」の状態です。この状態で宇宙に持っていきます。

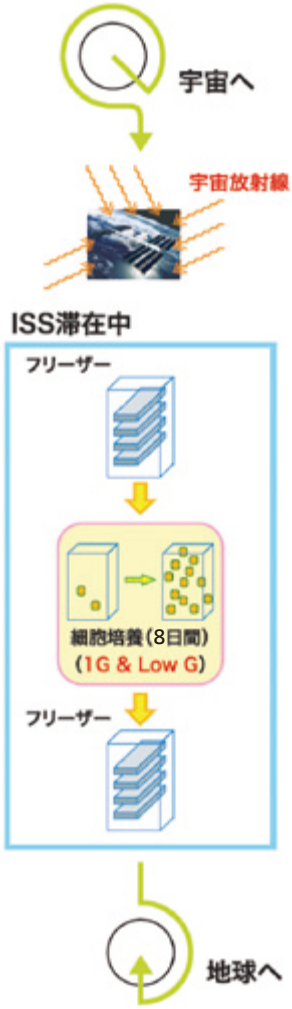


図 1　LOH 宇宙実験の概要

もし宇宙放射線に当たって正常な染色体の方に傷がつくと、どちらも異常な状態、つまりヘテロ性が失われた「LOH」になる可能性があります（図 2）。持ち帰ったサンプルに特殊な薬剤を加えて培養することにより、「ヘテロ」の状態を維持したもの、つまり染色体に何も変化がなかったものはすべて死んでしまい、変化のあったどちらも異常な状態の「LOH」だけを生きたまま検出することができます（図 3）。

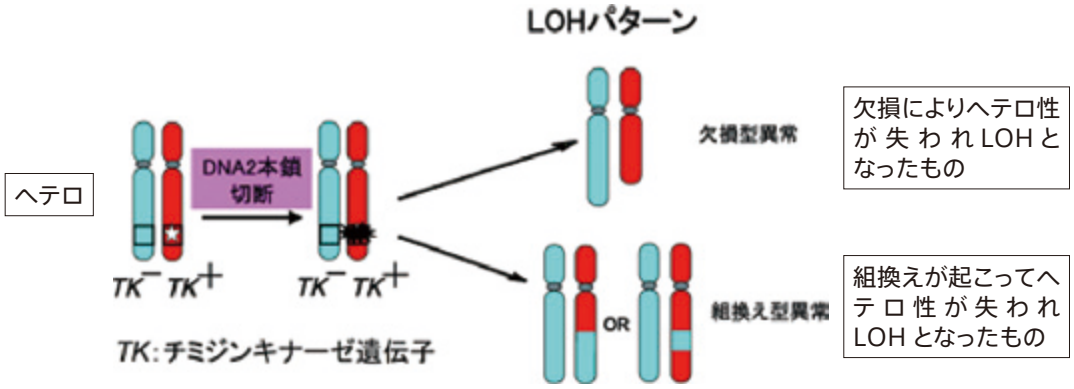


図 2　ヘテロ性の喪失（LOH）のしくみ
（染色体の片方に変異の入ったヘテロ状態の細胞を打ち上げ、放射線でもう一方にも傷が付き「LOH」の状態へ変化すると検出できます）

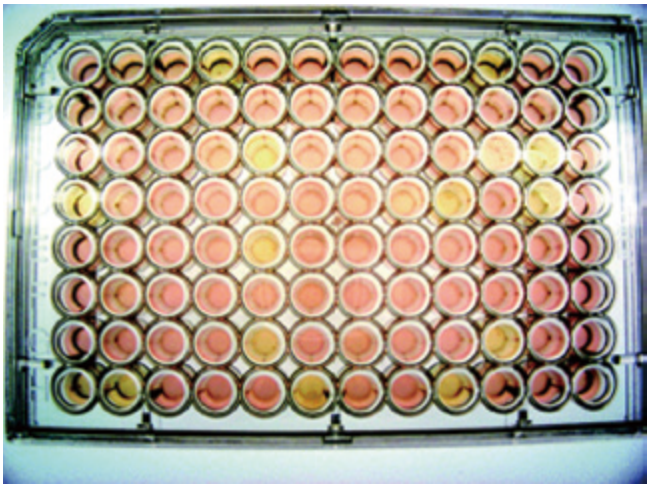


図 3　培養液の色の変化による LOH の検出。ヘテロ性がなくなって「LOH」になったものが育つと培養液が赤色から黄色に変わります。このような色の変化でヘテロの中から「LOH」を見つけ出します。

成果

1 低線量被ばくの遺伝子への影響

宇宙飛行して、低線量（50mSv 程度）の被ばくを受けた細胞は地上の細胞に比べ、宇宙放射線によって突然変異が起こる可能性が高くなることがわかりました。また、この実験手法では、宇宙滞在中の細胞への宇宙放射線による被ばくが蓄積されて（総被ばく線量として）影響を受けると推測できました。

2 低線量被ばくにより、細胞レベルで高線量被ばくへの抵抗力獲得の可能性

宇宙飛行して地上に回収した細胞と、宇宙飛行しないで地上で保管していた細胞の両方に、宇宙で被ばくした線量の数十倍の高線量の X 線を短時間照射し、LOH 解析法で調べた結果、宇宙飛行した細胞は飛行していない細胞に比べて突然変異が起こる確率が半分程度に低下しました。これらのことから、50mSv 程度の低線量の宇宙放射線被ばくでは、細胞が適応応答（低線量の被ばくによって放射線への抵抗力がつくこと）を獲得する可能性が示されました。

3 放射線影響に対する重力の影響

宇宙飛行した細胞のうち、無重力下で培養した細胞は、人工重力（1G）下で培養した細胞の 55% 程度まで生存率が低下し、さらに突然変異が起こる確率が 60% に低下しました。これらの結果は、地上では放射線により突然変異を起こしても生き延びる細胞が無重力では死んでしまうことを示しています。

今後への波及

地上への還元

凍らせた細胞を利用することにより、低線量の放射線被ばくの生物影響を高感度で推定する宇宙実験手法を確立しました。この手法は低線量被ばくした細胞に対して様々な刺激による影響を測定でき、生物への影響を推測するのに適した方法として、地上でも利用されます。

宇宙活動への貢献

宇宙飛行士はもとより、私たち人間が宇宙で生活するようになった時の宇宙放射線の健康への影響を推測できるだけでなく、生物が放射線に対してどう反応するかを解明して、そこから放射線防護や放射線障害の予防につなげていく上で重要なデータが得られました。

Pick Up

知ってなるほど！豆知識

宇宙での細胞実験は人類のために！

宇宙で細胞がどんな影響を受けるか、ということは大切な課題です。人類が地球上とは異なる環境で長く生存していくことができるかを予想するのに、大切な基礎研究になります。そして人類という種を長く維持できるのかどうか、という大きなテーマにもつながります。そんな大きなテーマに、凍らせた細胞を使って挑む、宇宙実験のアイデアから科学の進歩が導かれそうです。

カイコの卵は宇宙放射線の番人になるか?!

カイコ生体反応による長期宇宙放射線被曝総合的評価（Rad Silk）

代表研究者：古澤 壽治（財団法人衣笠会 繊維研究所、京都工芸繊維大学）

目的

宇宙環境下（宇宙放射線と無重力）では生物はどのような反応をするのでしょうか？

これを調べるため、遺伝的に詳しく調べられているカイコの卵を休眠状態（冬眠のような状態）で宇宙に持って行き 1）無重力で胚（卵の中の赤ちゃん）の発生（各器官が形成されていく過程）が正常に進むか、宇宙放射線によって 2）突然変異が起こるか、3）遺伝子の働きに影響がでるか、これら 3 点について検討しました。

1997 年にカイコの卵の宇宙実験を行ったところ、地上のカイコ卵に比べて奇形が 2 倍も発生しました。また地上で宇宙放射線を模擬した放射線をあてる実験を行ったところ、発生の初期段階に放射線をあてると突然変異の確率が高いことがわかりました。人間は卵から孵化するわけではないものの、遺伝子からタンパク質をつくる基本的なメカニズムは同じであり、胚の発生中に働く遺伝子に対する宇宙放射線の影響を調べます。

概要

休眠（冬眠のような状態）から醒めた卵（図 1）を ISS 内の冷蔵庫に入れて 91 日間滞在させ（図 2）、宇宙放射線によって突然変異が起こるか、遺伝子の働きに影響がでるかについて調べました。また、一部の卵は ISS 内で無重力の状態と遠心力を利用した人工重力の状態を作り、その両方の環境で胚を 6 日間発育させ、ISS 内の無重力の状態でも胚は正常に発育するかについて調べました。

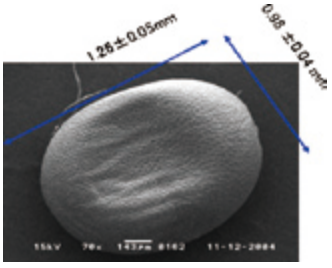


図 1　蚕卵 1 粒（1.3x1mm）の写真

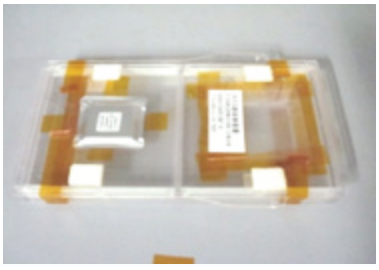


図 2　卵収納容器に約 2,000 粒を貼り付け、ISS に 91 日間搭載

成果

1　無重力では胚（卵の中の赤ちゃん）の発生は正常に進まない

地上で発育させた卵では、胚のほとんどは正常に発育しました。ISS 内の地球と同じ人工重力条件下（1G）では約 50% が正常に発育しましたが、無重力下では発生の段階の一つ（反転）で異常がみられ、

ほとんど正常に発育しませんでした。このことから、無重力が胚運動に影響を与え、孵化率を低下させることが分かりました。このことは、重力が無いと胚が順調に発育することができないことを示し、さらに地球上での重力が生物にとって重要な意味を持っていることを示します。

2 宇宙放射線によって第 2 世代以降に突然変異が起きる

黒い縞模様の品種（P^S/p）と白い品種（$+^p/+^p$）のヘテロ接合体（2 つの遺伝子が異なるタイプの卵；$P^S/+^p$）を 91 日間、ISS に搭載しました（被ばくした放射線量は約 20mGy）。この卵に放射線が当たると黒い色素を形成する遺伝子（P^S）の断片化が生じ、幼虫期の皮膚に白斑（突然変異）を生じます（詳しい仕組みはコラム参照）。第 1 世代の幼虫には突然変異は検出されませんでしたが、第 1 世代の子孫である第 2 世代、第 3 世代では突然変異が検出されました。これは、ISS に打ち上げた卵（第 1 世代）の胚には既に生殖細胞が存在しているので、この生殖細胞に宇宙放射線が当たり、そのために子孫のカイコにこの突然変異が生じたためだと推察しました。

3 宇宙放射線が胚の発生に遺伝子レベルで影響を与える

卵 1 粒からの RNA 抽出法を確立し、胚発生期の遺伝子の働きについて調べたところ、上記の放射線量はがん抑制遺伝子である「*p53* 遺伝子」（Rad Gene p.46 参照）の働きには影響を与えませんでしたが、ある種の熱ショックタンパク質遺伝子（熱などのストレスによって働きが増えて細胞を保護するタンパク質）の働きを大きく抑制しました。

今後への波及

地上と宇宙活動への貢献

各卵の被ばく量と突然変異発生との関連を明確にし、これを基にカイコ卵を用いた放射線の線量計を開発することができます。

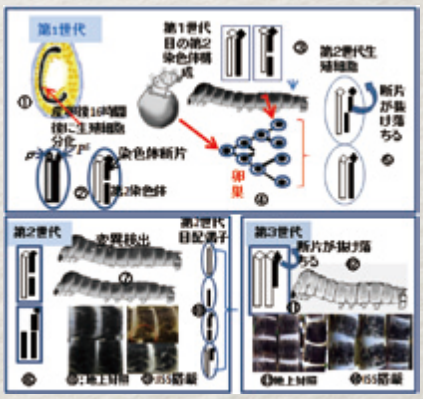
様々な生物への放射線の影響評価やリスク評価に貢献できます。

Pick Up

知 っ て な る ほ ど ！ 豆 知 識

黒いカイコに白斑、次世代で、何故？

黒い色素を作る遺伝子（P^S）は第 2 染色体の先端にあり、放射線を受けると P^S 遺伝子の近くで切断され（②）、この切断遺伝子が発育中の細胞や卵巣から抜ける（④と⑤）と皮膚に白い斑点（白斑）が生じます。この品種を ISS に 91 日間搭載し、地上に帰還させた後、ふ化した幼虫を人工飼料で飼育しました。その結果、第 1 世代では突然変異は検出できませんでした（③）が、第 2 世代（⑦と⑨）、第 3 世代（⑫と⑭）では白斑をもつ黒い蚕幼虫が検出されました（⑧と⑬は地上対照、⑨と⑭は ISS 搭載、写真は幼虫の皮膚の一部です）



植物細胞壁の「鉄筋コンクリート構造」の強度は宇宙でどう変わる？

微小重力環境下におけるシロイヌナズナの支持組織形成に関わる遺伝子群の逆遺伝学的解析（Cell Wall）

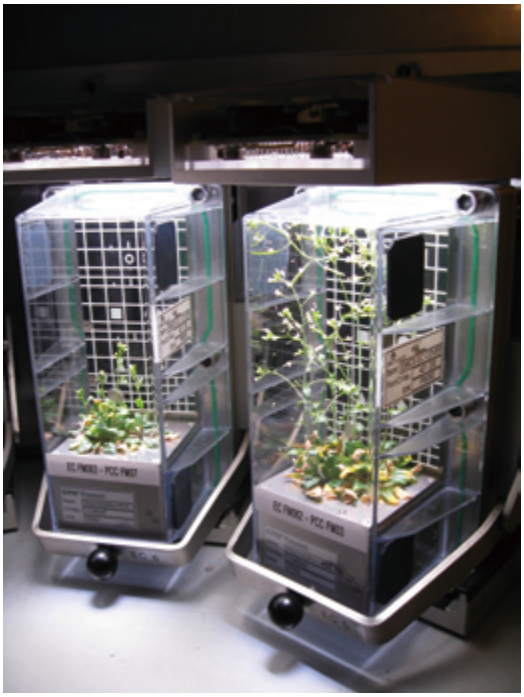
代表研究者：西谷 和彦（東北大学大学院）

目的

シロイヌナズナ（アラビドプシス）を宇宙で栽培し、細胞壁をつくる約 10 種類の遺伝子の働きを調べます。無重力環境の ISS での栽培では、植物は細胞壁で重さを支える必要がないので、細胞壁の強度を低くして材料を節約するように遺伝子は働くと想像できます。一体どういうしくみで、重力に応じて細胞壁の作り方を調節しているのでしょうか？それを調べるのがこの実験の目的です。それが分かると、植物が進化の過程で水中から陸上に進出して、重さを支えながら大型化した仕組みが分かると考えています。

概要

シロイヌナズナの乾燥種子を実験器具にまいて、乾燥状態で、2008 年 3 月に打ち上げました。宇宙飛行士が 2 個の培養装置をヨーロッパ実験棟内の実験装置にセットし、給水を試みましたが、実験装置の不具合から給水が正常に行われませんでした。その後の復旧作業の結果、2 個の実験器具への給水が実現でき種子は発芽しましたが、換気の不良などから 1 個の実験器具内の植物は枯れてしまいました。残りの 1 個の実験器具についてもロゼッタ葉（地面に放射状に広がるような葉）が開いた時期に再度給水ができなくなったので、給水後 30 日目にクルーが植物体を収穫して、遺伝子保存処理または化学固定処理を行った後、凍結して回収しました。当初の目的、細胞壁の観察対象であった花茎（ロゼッタ葉から長く伸びて花をつける茎）が成長する前に、実験は終了せざるを得ませんでした。



地上予備実験として宇宙実験用の培養装置（Plant Cultivation Chamber）を用いて生育中のシロイヌナズナ（ノルウェイの ESA 実験室）

成果

実験装置の故障の対処法を学び、再実験へ

回収した試料は、当初予定していた状態ではないため、解析方法を全面的に変更することにし、必要な予備実験を実施しました。今回の宇宙実験では、植物栽培装置の給水システムが正常に動かず、実験計画の大幅変更を余儀なくされ、所期の目的は達成できませんでしたが、トラブルの原因究明も進んでいるので、故障箇所の修理を待って再実験を目指す予定です。

今後への波及

地上への還元

細胞壁の強さを調節する仕組みがわかってくれば、将来、植物の茎の強さや高さを人工的に変える場合にも有効な情報が提供できるでしょう。また植物がどのように水中から陸上に進出してきたかという進化過程の解明にもつながります。

宇宙活動への貢献

植物が重力に打ち勝って成長する仕組みと分子メカニズムの解明に貢献し、将来、軌道上や地球に比べ重力の小さい惑星で植物の生育や生産を行う際に必要な基礎データとして活用できます。

Pick Up

知ってなるほど！豆知識

宇宙で植物はどうなるの？

JAXA は ISS 完成以前から、スペースシャトルを使っての植物実験を実施してきました。特に 1998 年、向井千秋宇宙飛行士が 2 回目に搭乗したスペースシャトル ディスカバリー号（STS-95）では、日本の 4 つの植物実験が実施されました。この時はモデル生物として知られているシロイヌナズナをはじめとしてイネ、トウモロコシ、エンドウ、キュウリの芽生えと根を使いました。7 日間の実験で、重力がなくなると植物のかたち、成長方向、細胞壁などが変化することが発見されました。

これらの実験結果をもとに、2008 年に国際宇宙ステーションのヨーロッパの植物栽培装置を使った日本の実験 2 テーマ（Cell Wall p.54, Resist Wall p.56）が実施されました。このシロイヌナズナを使った実験は残念ながら給水装置の動作不良でうまくいきませんでしたが、さらなる植物実験として統合され、2009 年、ISS「きぼう」日本実験棟の中で栽培実験が実施されました（Space Seed p.58）。そして 2010 から 2011 年にかけては 3 つの植物実験テーマ（Ferulate p.62、Hydro Tropi p.60、CsPINs）が実施されました。

地上では植物は根を下の方向に、茎を上の方向に伸ばします。つまり重力に応答することが明らかですが、重力以外にも成長に影響する条件があります。光、水分、接触刺激などです。また植物には細胞壁があり、動物でいう骨のように自分の体を支えています。植物に重力をかけると細胞壁が丈夫になり、反対に無重力で育てると柔らかく、伸びやすくなることが分かりました。植物も、重力に対抗するために細胞壁の構造を整えて体を支えているのです。

細胞壁というドームを支える、細胞内部の役者たち

植物の抗重力反応における微小管－原形質膜－細胞壁連絡の役割（Resist Wall）

代表研究者：保尊 隆享（大阪市立大学大学院）

目的

植物は、「細胞壁」と細胞壁の内側にある「細胞膜」、さらにその内側に張りめぐらされているタンパク質で作られた管「微小管」（ドーム状の野球場やプールで大きな膜を支えているフレームにあたる）が相互に関係し合って重力に抵抗する構造をつくる役割を担っていると考えられています。この仮説を確かめるために、微小管や細胞膜が正常でなく、成長にも異常を示す突然変異体を宇宙で生育させます。これらの成長の様子を観察するとともに、関連する遺伝子が働く量の変化を解析することにより、細胞壁 - 細胞膜 - 微小管の一連の構造が重力に抵抗する際にどのような役割を果たしているか調べます。

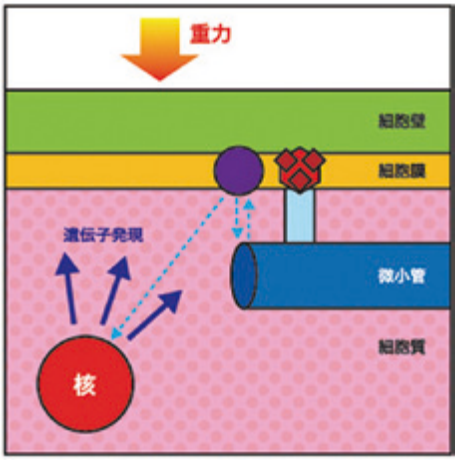


図 1　植物の細胞壁と重力
微小管に重力が加わったことを感知すると、核から様々な遺伝子が働く（発現する）ように指示が出て、結果的に細胞壁が強くなるように働く。
紫の丸はメカノレセプターで、外部からの器械的刺激（重力など）を感じ取って微小管や核に情報を伝える入口となる。
赤の六角形は膜ステロールで微小管を支えるアンカーとなる。
水色の部分は微小管関連タンパク質を示す。

概要

シロイヌナズナの種子を地上でまいて打ち上げ、ヨーロッパ実験棟のコロンバスモジュール内にある植物用栽培装置を利用して栽培します。種子には正常な野生型と、2 種類の突然変異体（微小管の構造がねじれているもの及び細胞膜の発達が悪いもの）を用います（図 2）。宇宙で自動的に給水を始め、約 40 日間生育させて茎の長さが 10 センチになったら、宇宙飛行士がハサミで切って収穫し、薬剤で保存し凍結して持ち帰ります。この実験では、宇宙の無重力の条件と、宇宙で回転によって作る人工重力の条件、及び地上で普通に栽培する条件の 3 種類でシロイヌナズナの生育を比較します。また、地上に回収した茎を引っ張ってその強度を物理的に解析するとともに、どの部分でどんな遺伝子が働くかを調べます。

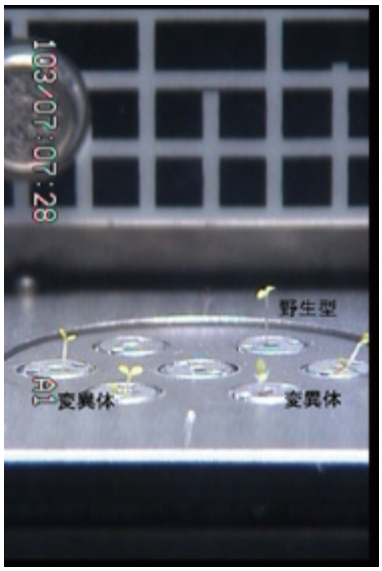


図 2　宇宙で生育した野生型シロイヌナズナ芽ばえ（奥）と突然変異体（手前）

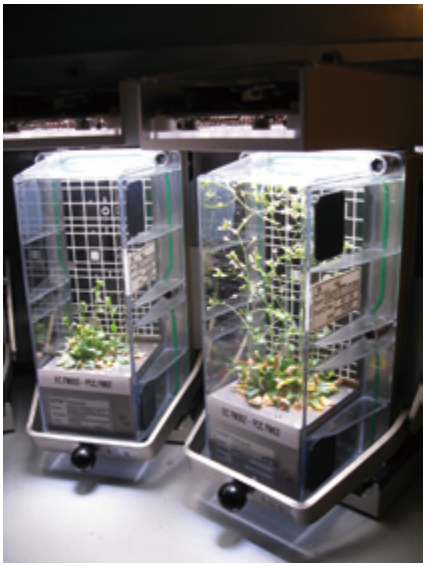


図 3　地上予備実験として宇宙実験用の栽培装置を用いて生育中のシロイヌナズナ
（ノルウェイの ESA 実験室）

成果

微小管に異常があって地上ではうまく育たない植物も宇宙なら正常に育つ

ヨーロッパ実験棟のコロンバスモジュール内にある植物用栽培装置を利用して植物実験を行いましたが、植物用栽培装置に不具合があり、一部の試料のみ回収しました。

生育画像及び回収試料の分析により、微小管の構造がねじれているため重力に抵抗する能力が低く地上では大きく育たない変異体も、宇宙の無重力下では、芽ばえ段階までは正常な細胞壁をつくり、正常に生育できることが示されました。また、ヨーロッパ宇宙機関と協力し、植物用栽培装置の不具合原因を明らかにしました。

今後への波及

地上への還元

細胞壁の強さを調節する仕組みがわかってくれば、将来、植物の茎の強さや高さを人工的に変える場合にも有効な情報を提供できるでしょう。また植物がどのように水中から陸上に進出してきたかという進化過程の解明にもつながります。

宇宙活動への貢献

植物が重力に打ち勝って成長する仕組みと分子メカニズムの解明に貢献し、将来、軌道上や地球に比べ重力の小さい惑星で植物の生育や生産を行う際に必要な基礎データとして活用できます。

種から種へ。身近なペンペン草（シロイヌナズナ）の一生を宇宙で。

微小重力環境における高等植物の生活環（Space Seed）

代表研究者：神阪 盛一郎（富山大学大学院）

目的

地球上の植物は重力の影響が比較的小さい水中で進化してきましたが、今から約 4 億年前に初めて陸上に進出しました。1G の重力がある環境に適応し、進化してきた現在の陸上植物が、はたして重力のない宇宙で正常なライフサイクル（生活環）、すなわち種子から発芽して、茎・葉が成長し、花が咲き、実が成ることによって次の世代（種子）を作ることができるのでしょうか。陸上植物でゲノムの解読が初めて行われたシロイヌナズナを使って、植物のライフサイクルにおける重力の影響を解明することが、この実験の目的です。

概要

小さなスペースで種子から種子への長期栽培が可能なハイテク植物工場、植物実験ユニット（図 1）を開発し、2009 年 9 月から 11 月にかけて「きぼう」の細胞培養装置を使って宇宙実験を行いました。無重力環境と人工重力（1G）環境を比較できるよう栽培し、シロイヌナズナのライフサイクルと植物を支える細胞壁への影響を調べました。

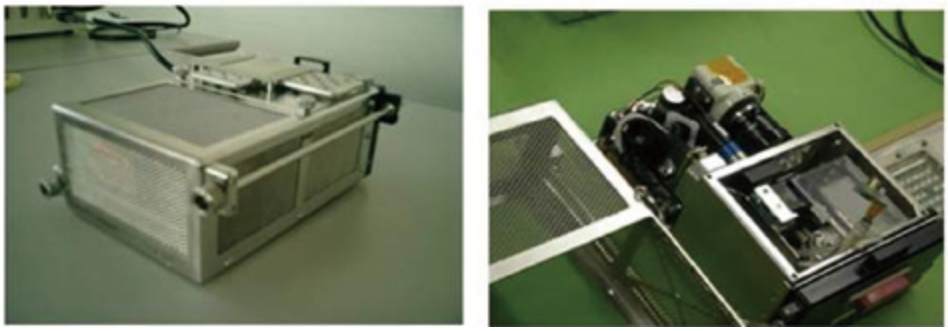


図 1　植物実験ユニット　（左、外観；右、内部構造）
大きさは幅 24 cm、高さ 11 cm、奥行き 17 cm の直方体。内部に、植物栽培容器（5 cm 立方）、観察用 CCD カメラ、LED 照明、換気ポンプ、給水ポンプ、給水用バッグ、赤外線水分センサーが設置されているハイテク植物工場です。

成果

宇宙でも植物はきちんと育つ！

①乾燥状態で打ち上げられた種子は水をあげ始めてから 3 日後に発芽し、葉が開き、茎が伸びて開花、そして実が形成されました（図 2A、2B）。また、宇宙で受粉が起こることも確認されました。人

工重力（1G）下で育てたものに比べると、無重力下では茎の成長速度が早く、葉の老化が遅いことが初めて明らかになりました。重力のような機械的ストレスは、植物の成熟に関わるエチレンの合成を促進します。従って、機械的ストレスが小さい無重力環境ではエチレンの合成が抑制されて、その結果、葉の老化が抑制されたと考えられます。

図 2A　無重力下での栽培結果（28 日目）

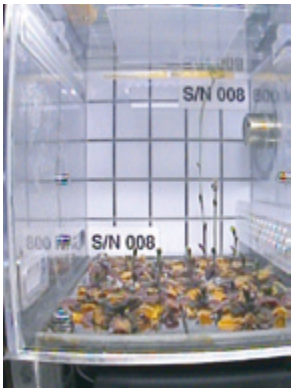


図 2B　人工重力下での栽培結果（28 日目）

②無重力下と、人工重力下でシロイヌナズナを 32 日間栽培し、どのような遺伝子が働いているかを測定しました。その結果、茎を支えるために重要な細胞壁に関わる遺伝子としてこれまで注目されていた 16 の遺伝子の内、1 つの遺伝子の働きが無重力下で減少し、4 つの遺伝子の働きが高まることが分かりました。

③地上あるいは軌道上の人工重力の環境と比べて、無重力環境下では、微小管変異体の茎が現われる時期が早く、それ以降の成長速度や成長量も大きいことが分かりました。また、このような茎の成長促進は、細胞壁が伸びやすくなったことが原因だと分かりました。

これらの結果より、重力に抵抗する際に微小管が細胞壁と協調して重要な役割を果たしていることが初めて明らかになりました。

今後への波及

地上への還元

開発した植物実験ユニットは、全自動で植物が必要とする環境を制御することが出来る小型の植物工場です。開発されたシステムは、地上における、より生産効率が高く大型の植物工場設計の基礎となり得ます。

宇宙活動への貢献

ISS で高等植物のライフサイクルを正常に完結させられたことは、将来人類が長期間宇宙に滞在する上で、食料生産（宇宙農業）と環境維持の両方に植物が貢献できることを示すものです。

今後の展望

「無重力環境ではエチレンの合成が抑制されるために葉の老化が遅れる」という仮説を証明するために、きぼうから地上に回収された葉や突然変異体を用いて、エチレン関連遺伝子の働きに対する重力の影響やそのメカニズムを解析する予定です。さらに、植物が重力に抵抗して正常な成長を維持する時の微小管の機能のしくみを理解するための宇宙実験（Resist Tubule）が、2012 年 10 月にきぼうで行われました。

根を曲がらせる「影の物質」を宇宙で探る

微小重力下における根の水分屈性とオーキシン制御遺伝子の発現（Hydro Tropi）

代表研究者：高橋 秀幸（東北大学大学院）

目的

植物の根は、水分の多い方に伸びる特性（水分屈性）を示します。しかし、根は重力のある方向に伸びる特性（重力屈性）も示すため、重力が常に存在する地球上では、水分屈性を重力屈性から完全に切り離して調べることはできません。また、水分屈性と重力屈性には、オーキシン（※）が重要な働きをすると考えられています。そこでこの宇宙実験では、無重力下で、①根が水分のある方向に曲がっていくかどうか、②水分屈性が起こっている時にオーキシンの分布に偏りが生じるか、③無重力下で水分屈性により根の伸びる方向をコントロールできるか、を検証します。

※オーキシン：植物ホルモンのひとつで植物の成長を促す作用を持つ。ただし、根では高濃度になると、成長を抑える働きをする。

概要

キュウリの乾燥種子をスポンジに取り付けて、温度記録計とともに容器にセットし、水・食塩水を封入した注射器、化学固定キットとともにISSに打ち上げました。「きぼう」日本実験棟で、キュウリの種子に給水して容器を細胞培養装置に取り付けることで実験を開始しました。培養装置には無重力状態と、回転することで約1Gの人工重力状態を発生させる装置があります。1Gで真っ暗な環境で培養して発芽させた後、水の勾配を作るために食塩水を注入し（図1参照）、さらに人工重力下および無重力下で生育させ、芽生えを化学固定して冷蔵保管しました。実験中に芽生えの写真を撮影するとともに、化学固定した試料を地上に回収して、根の伸び方と曲がり方、そしてオーキシン誘導性遺伝子（*CsIAA1*）の働く量を解析しました。

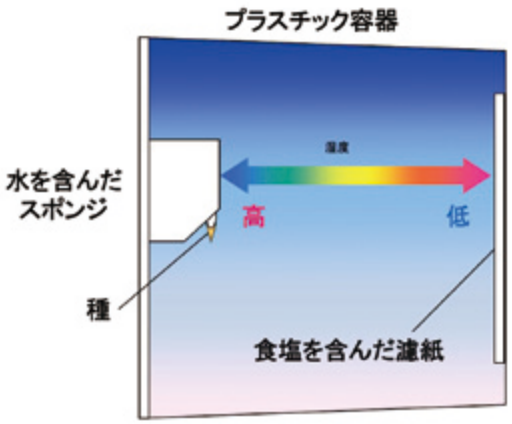


図1　種と反対側に貼り付けたろ紙に食塩水を注入すると、周りの水分をどんどん吸収するため、容器内の水（湿度）の勾配が大きくなります。

成果

地球では見られない生命現象が明らかに

水分屈性の様子を人工重力区と無重力区で比較することに成功しました。また、回収されたサンプルを用いて、オーキシン誘導性遺伝子（*CsIAA1*）の働きを解析することができました。解析は終了し、論文を準備中です。

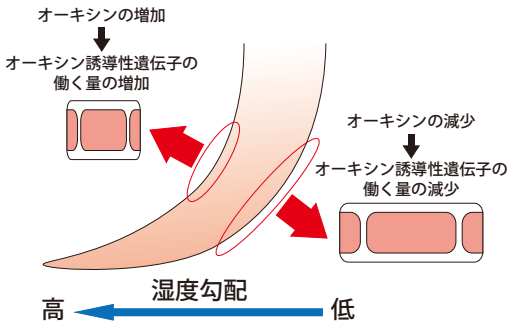


図２　オーキシンの働きと根の曲がり方（根の両側でオーキシンの働く量が異なり、伸び方に違いがでることにより根が曲がります。この図では湿度勾配刺激（水分屈性）を示していますが、重力の刺激（重力屈性）でも同様です。）

今後への波及

地上への還元

今回の宇宙実験では、陸上植物が水獲得戦略として進化させた根の水分屈性のメカニズム解析、そして水分屈性と重力屈性のメカニズムを比較し、根が様々な環境に統合的に対応する仕組みを理解する糸口になりました。得られた知見は、乾燥地での農業や植物工場での効率的な植物生産技術の開発に役立てることができます。

宇宙活動への貢献

人類の長期的な宇宙活動を支える生命維持システムにおいて、植物育成は重要な要素であり、宇宙環境における効率的な植物生産技術の確立は、緊急の課題です。この実験は、根の水応答能力を利用して宇宙で姿勢・成長をコントロールできることを示し、地球上では重力に隠されて見えにくい生命現象を明らかにしました。

イネの細胞壁は宇宙でどう変化するか

重力によるイネ芽生え細胞壁のフェルラ酸形成の制御機構（Ferulate）

代表研究者：若林 和幸（大阪市立大学大学院）

目的

海から陸に進出する過程で、生物は 1G の重力に対してその体を支えなければならなくなりました。動物は骨や筋肉を発達させましたが、植物ではこの骨や筋肉にあたるものが「細胞壁」です。イネの細胞壁では、鉄骨のように走るセルロースを、β - グルカンやアラビノキシランという物質がつなぐ役割をしています。さらにポリフェノールの一種である「フェルラ酸」という物質が 2 つ結合してできる「ジフェルラ酸」が細胞壁内を橋渡しするような働きをすることで、細胞壁構造が安定に維持されます。

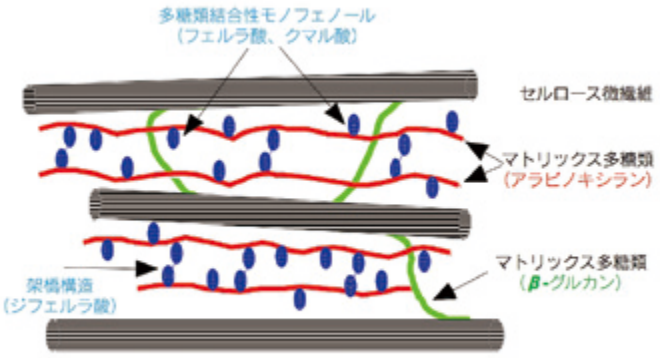


図 1　イネ科植物の細胞壁の模式図

本実験では、ISS の「きぼう」でイネを育て、イネ科植物に特徴的な「フェルラ酸」による細胞壁内の橋わたし構造の形成に対する重力の影響を明らかにすることを目的としました。

概要

地上で培地に植えたイネの種子を低温保存した状態で打ち上げた後、ISS の「きぼう」日本実験棟に設置された細胞培養装置に移し、温度を上げて発芽させ、生育実験を開始しました。実験装置には無重力状態と、回転することで約 1G の人工重力を発生させる装置があり、重力の影響だけを調べるために両方で同じように実験を行いました。実験終了後、植物サンプルは容器ごと凍結保存され、凍結した状態で地上に回収しました。この凍結サンプルを用いて、芽生えの成長、細胞壁の力学的性質、細胞壁の化学組成、細胞壁のフェルラ酸・ジフェルラ酸形成に関わる酵素の活性や現れ方について解析を行いました。

図 2　実験の様子
人工重力を発生させる回転ローターにイネの種子の入った容器を取り付けているところ

成果

細胞壁が「緩む」タイミングとそのメカニズムを解明

生育開始後 4 日目から 5 日目にかけて芽生えは急速に成長してほぼ 2 倍の長さになりましたが、人工重力条件と無重力条件では成長に差は見られませんでした。

細胞壁の力学的性質を調べた結果、無重力条件で育てたイネの細胞壁は、人工重力条件のものに比べて強度が下がり「緩んだ」状態であることが示されました。

細胞壁の構成成分は、各成分ともに 4 日目から 5 日目にかけて大幅に増加しました。4 日目には、各成分とも人工重力条件と無重力条件の間で差は見られませんでした。5 日目は、フェルラ酸は人工重力条件と無重力条件で差はありませんでしたが、ジフェルラ酸は無重力条件で低下していました。次に、酵素の活性を調べた結果、細胞壁中においてフェルラ酸の結合に関わる酵素（細胞壁ペルオキシダーゼ）の活性が、無重力条件で低下していることが示されました。

以上の結果から、無重力条件では、細胞壁ペルオキシダーゼの活性が低下してフェルラ酸の結合が減ることでジフェルラ酸を介した細胞壁内橋渡し構造の形成が抑制され、これが細胞壁を「緩んだ状態」として強度を低下させた一因になっていると考えられます。

このように、植物が生きていくのに必須の構造体である細胞壁が作られるメカニズムを解明するための重要な知見が得られました。

今後への波及

地上への還元

本実験で得られた結果は、効率的に細胞壁の改変を行い風に倒れにくい丈夫な品種を作出するなどの品種改良研究にも役立つことが期待されます。

宇宙活動への貢献

本実験の成果は、人類にとって欠かせない食糧資源であるイネ科植物を、宇宙空間や他の惑星上などの地球とは異なる重力環境下で効率的に育てるための基礎的知見として利用できます。

Pick Up

知ってなるほど！豆知識

宇宙で成功！コンパクトサイズ植物工場

SpaceSeed（p.58）の実験では、シロイヌナズナに種子を実らせることに関して宇宙で重力のありなしを比較する実験ができました。照明装置や観察のカメラなどを装備した植物実験ユニットと宇宙用の培養装器があってこその成果です。生育環境を整えてやれば、宇宙でも植物を栽培することができそうだという手がかりをつかむことができました。

宇宙で骨が減るメカニズムの解明に挑む

メダカにおける微小重力が破骨細胞に与える影響と重力感知機構の解析（Medaka Osteoclast）

代表研究者：工藤 明（東京工業大学大学院）

目的

地上での生活では破骨細胞による骨吸収と骨芽細胞による骨形成のバランスが一定に保たれていますが、宇宙飛行士が宇宙で長期間生活すると、骨量が著しく減少することが知られています。微小重力環境では、骨吸収が骨形成より大きくなり、骨が減ると考えられていますが、そのメカニズムはまだ解明されていません。蛍光タンパク質（特定の組織を可視化するマーカー）で破骨細胞と骨芽細胞の両方を識別できる遺伝子改変メダカ（トランスジェニックメダカ）を用い、活性化されることが想定される破骨細胞を中心に、骨芽細胞との相互作用も含め、宇宙における骨代謝を２種類の実験を通して解析します。

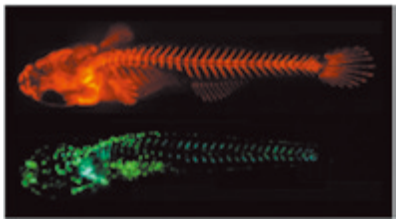


図１　遺伝子改変メダカ
骨に局在している骨芽細胞（赤；上）と、破骨細胞（緑；下）の様子をメダカが生きた状態で観察できます。

概要

宇宙実験は、宇宙に長期間滞在した場合の変化を組織解析や遺伝子発現解析で調べる２ヶ月間の長期飼育実験と、宇宙で短期間に起こる変化を蛍光顕微鏡を用いて直接観察する１週間の短期観察実験からなります。

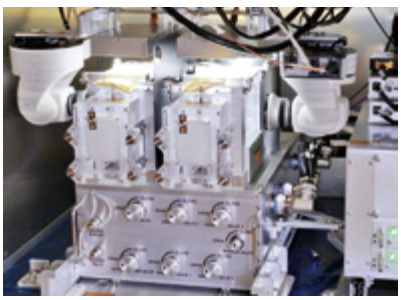
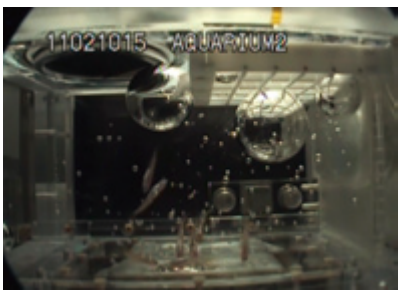


図２　水棲生物実験装置（AQH）
水槽を２つ（各８匹程度）搭載し、自動で観察、給餌、環境維持が可能です。



長期飼育実験は、宇宙へ打上げたメダカを「きぼう」の水棲生物実験装置（AQH：Aquatic Habitat）で飼育し、継時的に水槽からメダカを取り出し、組織化学固定や遺伝子保存処理を行います。化学固定試料および遺伝子保存処理試料はすべて地上に回収し、歯と骨の周囲にある組織と細胞について組織解析と遺伝子発現解析を行います。

短期観察実験は、破骨細胞あるいは骨芽細胞で特異的に蛍光を発する遺伝子改変メダカの稚魚を打上げ、「きぼう」の蛍光顕微鏡で、宇宙での破骨細胞と骨芽細胞の動きを生きたままリアルタイムで観察します。

図３　ISS 滞在８日目のメダカ
水槽下部の給餌機構に付着した気泡が餌の邪魔になっており、餌を食べようとするメダカによって、細かい気泡になって周囲に分散される無重力状態ならではの映像です。
メダカの各種映像は、以下に掲載しています。
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/second/medakaosteoclast/report.html

成果

歯を支える骨：咽頭歯骨の微小重力による骨量減少を確認

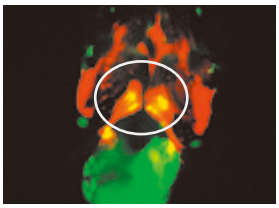


図４「きぼう」で撮影されたメダカ頭部の蛍光顕微鏡画像
のどにある歯を支える骨（枠内）で、破骨細胞と骨芽細胞の働きが活発になっています。

メダカののどの奥には数百本の咽頭歯があり、再生を繰り返しています。この歯を支える骨が咽頭歯骨で歯の再生に伴って骨のリモデリングを行っています。このリモデリングには破骨細胞と骨芽細胞が関与しており、今回の実験ではトランスジェニックメダカを用いて両細胞を蛍光で可視化しています。微小重力下、２か月の長期飼育実験では咽頭歯骨の骨量が減少していました。破骨細胞を蛍光観察すると、破骨細胞の体積が増大し、それに伴って破骨の活性化マーカーである TRAP（酒石酸耐性酸性ホスファターゼ）の活性も上昇していました。さらに、短期の観察実験により骨芽細胞と破骨細胞の蛍光の光は、微小重力にさらされた直後に共に増大していました。このことは、咽頭歯部は重力の影響を受けやすい組織であり、骨芽細胞も破骨細胞も直接的に重力の影響を受けている可能性を示唆しています。実際に重力は、歯や骨のような密度が高い組織に影響を及ぼすことが物理式で知られており、歯が数百本ある咽頭歯部は重力の影響を観察するのに優れた組織モデルであることがわかりました。咽頭歯部に着目することで、微小重力下での破骨細胞の活性化、また微小重力下での破骨細胞と骨芽細胞の動態を観察できました。さらに骨代謝に関連する遺伝子発現の変動から、これらのメカニズムを解析中です。

今後への波及

地上への還元

骨は、外側の皮質骨と呼ばれる硬くて緻密な部分と、内側の海綿骨と呼ばれる細い骨が蜂の巣のように組み合わさった部分からなりたっています。マウスやラットを用いた骨代謝異常モデルやヒトの骨粗鬆症による主な骨量減少は海綿骨に見られるのに対し、宇宙では、海綿骨のみならず皮質骨も減少しているという特徴があります。宇宙においてメダカを用いて破骨細胞の状態を解析することで、これまでに見えていない骨吸収の新しい機構が明らかになる可能性があります。この成果は、皮質骨の骨量低下が見られる老人性骨粗鬆症の新たな治療法開発へのきっかけとなることが期待されます。

宇宙活動への貢献

水中に浮いているメダカでも咽頭歯部では微小重力による骨量の減少が観察され、宇宙での実験に優れた動物モデルであることが証明されました。さらに、遺伝子発現の解析によって微小重力に特異的に応答して高発現する遺伝子群が観察され、今後の詳細な検討による新たな重力応答のメカニズム解明が期待されます。今回初めてメダカの長期飼育に成功し、その技術的基盤が確立でき、その結果得られた成果を元にして今後の更なる継続的な研究により、宇宙飛行士の宇宙での長期滞在時の骨量減少に対し、効果的な対処方法の開発に貢献します。

宇宙医学・技術開発

宇宙医学

薬剤投与で、骨の問題を解決
ビスフォスフォネート剤を用いた骨量減少・尿路結石予防対策に関する研究 …… 68

心電図と高精細画像（HDTV）カメラは「きぼう」での医学診断に使えるか
簡易型生体機能モニター装置の軌道上検証実験（Holter ECG） …… 70

宇宙で生体リズムはどう変化するか ～ 24時間の連続心電図記録の周波数解析～
長期宇宙飛行時における心臓自律神経活動に関する研究（Biological Rhythms） …… 72

宇宙での健康診断
宇宙医学実験支援システムの検証（Onboard Diagnostic Kit） …… 74

髪の毛から宇宙での体の変化を調べる
長期宇宙滞在宇宙飛行士の毛髪分析による医学生物学的影響に関する研究（Hair） …… 76

起立性低血圧の原因－重力との関係を探る
前庭－血圧反射の可塑性とその対策（V-C Reflex） …… 78

無重力ではカビも空中を漂っている？　微生物による健康への影響を調べる
国際宇宙ステーションに滞在する宇宙飛行士の身体真菌叢評価（Myco） …… 80

筋骨格系の最適トレーニングシステムを目指して
国際宇宙ステーションに長期滞在する宇宙飛行士の
筋骨格系廃用性萎縮へのハイブリッド訓練法の効果（Hybrid Training） …… 82

技術開発

中性子のヒトへの影響を知る
ボナーボール型中性子計測装置（BBND） …… 84

PADLES（パドレス）とは？ …… 86

「きぼう」船内の宇宙放射線環境の定点計測（Area PADLES） …… 88

宇宙飛行士を守る有人宇宙技術個人被ばく線量計（Crew PADLES）
（宇宙飛行士用の受動積算型宇宙放射線線量計） …… 90

宇宙放射線計測技術（PADLES）を用いた国際共同実験（その１）
Dosimetric PADLES / マトリョーシカ実験 …… 92

宇宙放射線計測技術（PADLES）を用いた国際共同実験（その２）
Dosimetric PADLES / アルトクリス実験 …… 96

国際宇宙ステーションでのハイビジョン撮影開始と宇宙放射線の影響調査
ロシアサービスモジュールにおける高精細画像カメラ実験（HDTV in SM） …… 98

ISSの高精細ビデオカメラと通信衛星の間を取り持つデータ処理システム
高精細ビデオ（HDTV）画像伝送処理システム …… 100

宇宙用超高感度ハイビジョンカメラによる撮影～地球と宇宙が織り成す美しい映像～
超高感度ハイビジョンカメラシステム（SS-HDTV） …… 102

「こうのとり」宇宙船（HTV）が大気圏に突入して燃え尽きる様子を記録する球体
i-Ballによる宇宙機再突入データ取得 …… 104

世界初、アイソン彗星を宇宙から4K動画撮影
超高感度4Kカメラシステム …… 108

薬剤投与で、骨の問題を解決

ビスフォスフォネート剤を用いた骨量減少・尿路結石予防対策に関する研究

代表研究者：松本 俊夫（徳島大学，JAXA），Adrain LeBlanc (USRA)

目的

無重力の宇宙飛行では、地上で起こる骨粗しょう症の約 10 倍の速さで骨量が減り、骨折や尿路結石（骨から溶け出したカルシウムなどが尿の通り道で結晶化して詰まる病気）のリスクが高まります（p.36 Fish Scales）。骨粗しょう症の治療薬として使われるビスフォスフォネート剤を予防的に用いて、長期宇宙飛行の骨量減少と尿路結石のリスクを軽減させる効果があるかどうかを確かめることが、この研究の目的です。

概要

宇宙飛行士は、骨粗しょう症治療薬であるビスフォスフォネートを、ISS 滞在中、毎週飲み薬として服用するか、または飛行前に静脈注射を 1 回行うか、いずれかの方法を選択できます。これまでこの研究に参加した宇宙飛行士は全て飲み薬の服用を選んでいます。

軌道上での運動と栄養摂取は、この研究に参加しない飛行士と同じ内容です。飛行前後に骨密度、骨代謝マーカー、および尿路結石検査（尿分析と超音波検査）を行い、ビスフォスフォネートを服用していない飛行士の記録と比較して、骨量減少と尿路結石のリスクの予防効果を調べます。

図 1　ISS 内で経口薬を手に取る若田宇宙飛行士

成果

ビスフォスフォネートは骨粗しょう症の予防に効果あり

薬剤を服用しない宇宙飛行士は、無重力環境下では骨の吸収（骨が減っていくこと）が進み、骨の形成（骨が作られること）は増えないため、骨粗しょう症患者の 10 倍の速さで骨量は減少し、カルシウム成分は骨から血中そして尿の中に溶け出しました。

これに対して、ビスフォスフォネートを服用した宇宙飛行士では、骨の吸収が抑えられて骨量と強度は維持され、さらに尿中のカルシウム排泄も抑えられました。この結果により、ビスフォスフォネートが宇宙飛行による骨量減少と尿路結石のリスクを減らすことが確認できました。

宇宙飛行士の骨量減少対策には、栄養、運動、および薬剤の 3 つが重要です。適切な栄養、効果的な運動、および薬剤を予防的に活用すれば、宇宙飛行士の骨量減少は予防できることがわかりました。

今後への波及

地上への還元

骨量減少は、宇宙飛行士と高齢者に共通する医学的課題です。宇宙医学の取り組み（予防対策を行って、リスクを減らす）を参考にして、骨粗しょう症予防のための検診と治療の重要性を伝えていくことで、健康長寿と医療費削減が期待できます。

宇宙活動への貢献

予防的にビスフォスフォネートを活用すれば、長期宇宙飛行に伴う骨量減少、骨強度低下、尿路結石などの医学的リスクを減らすことができます。これにより、将来の月・火星などの有人宇宙探査に必要な健康管理技術に貢献することができます。

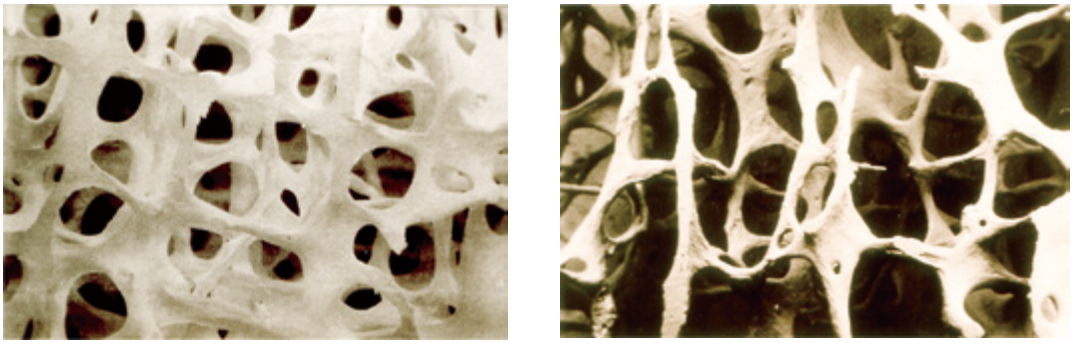


図 2　骨の微細構造（正常と骨粗しょう症）
左：正常な骨、右：骨粗しょう症
(NIH Consensus Development Panel on Osteoporosis. JAMA 2001)

心電図と高精細画像（HDTV）カメラは「きぼう」での医学診断に使えるか

簡易型生体機能モニター装置の軌道上検証実験（Holter ECG）

代表研究者：向井 千秋（JAXA）

目的

ISS での長期滞在や ISS より遠い宇宙へ人が行く場合、病気になっても救助隊をすぐに派遣し治療することは困難です。飛行前に病気を予防することが大事であるとともに、飛行中は遠隔地にいる宇宙飛行士の健康状態を地上の医師と飛行士自身が把握し、必要であれば地上の医師から適切な指示をする遠隔医療技術が重要となります。

本実験は、遠隔医療実験の 1 つとして、①心電図を測定するための簡易型生体機能モニター装置（ホルター心電計）の操作性や使い易さと、②皮膚表面を遠隔診断する機器としての高精細画像（HDTV）カメラの有用性をそれぞれ評価するために行った軌道上検証実験です。

概要

心電図の測定は、生体リズムの変化を把握するため 24 時間の連続記録が可能な携帯型のホルター心電計を使用し、無重力環境における操作性や動作性を検証しました。心電図データは地上へ送信され、宇宙で取得した心電図データが、地上と同じように循環機能や自律神経機能の評価に使えるかどうか検証しました。

皮膚表面を遠隔診断するためのカメラは、軌道上の科学実験で既に使われている高解像度画像撮影が可能な HDTV カメラ（p.98 HDTV in SM）を使用しました。ホルター心電計の電極を装着する直前・直後と、取外し直後に胸部を撮影し、電極装着時の装着部位の確認と電極取外し後の皮膚の変化を診断しました。

また、心電図データと HDTV カメラの画像データは、軌道上でそれぞれメモリーカードやデジタルビデオテープに記録され、地上に回収されました。これらのデータと軌道上から送信したデータを比較することで、送信データの品質や信頼性の確認も行いました。

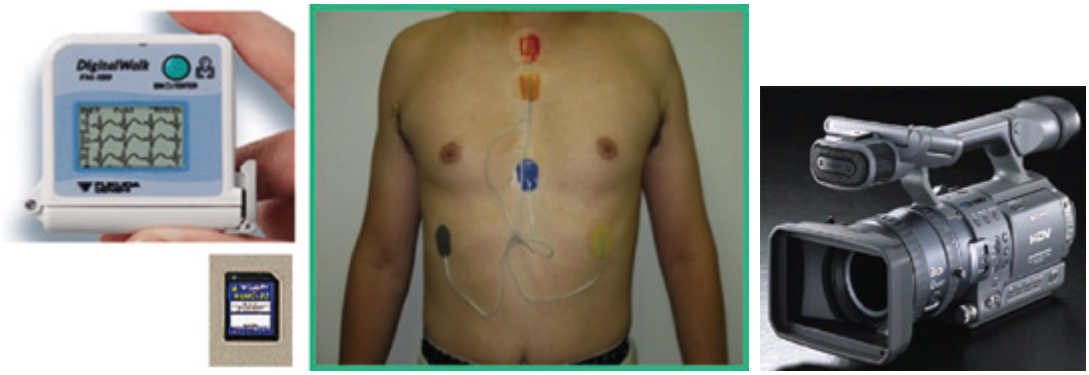


図 1　左：ホルター心電計と記録用メモリーカード　中：心電計の電極装着状態　右：HDTV カメラ

成果

HDTV カメラは宇宙での健康診断に役立つ!

2008-2009 年にかけて実験を行った結果、軌道上におけるホルター心電計の操作性や動作性は良好で、地上への送信データにも欠損等はありませんでした。このことから、ホルター心電計は軌道上での循環機能や自律神経機能の評価に適用可能と評価されました。

また、HDTV カメラの画像データは、解像度や色の再現性などが良好であり、皮膚科診断に適用可能と評価されました。

以上の結果から、ホルター心電計による心電図測定、及び HDTV カメラによる遠隔診断画像撮影は、ISS 長期滞在宇宙飛行士の宇宙医学研究や健康管理運用に役立つ手法であることが確認できました。

なお、ISS より遠くへの長期宇宙飛行においては、データを送る距離が長くなるため送信データの精度を確保するための検討が必要ですが、今回の成果を活かすことができます。

今後への波及

地上への還元

超高齢社会の日本では、独居老人の健康管理と医療費高騰が問題となります。自ら簡単に医学データを取得し、遠隔医療の専門家がデータを評価して健康管理支援するシステムが確立できれば、病気の重症化防止と医療費の削減に役立つ可能性があります。

宇宙活動への貢献

今後の ISS 長期滞在宇宙飛行士の宇宙医学研究データ取得に利用し、ISS そしてさらに遠くへの長期宇宙飛行に必要な遠隔医療技術を充実させることに貢献できます。

本実験を踏まえて、ホルター心電計は Biological Rhythms 実験 (p.72)、宇宙医学実験支援システム (p.74) でも使われるようになりました。

宇宙で生体リズムはどう変化するか ~ 24時間の連続心電図記録の周波数解析~

長期宇宙飛行時における心臓自律神経活動に関する研究（Biological Rhythms）

代表研究者：向井 千秋（JAXA）

目的

生体リズムには約 24 時間周期で変動するサーカディアンリズム（概日リズム）と呼ばれる周期があります。近年サーカディアンリズムの変動が様々な病気に関連することが報告されています。サーカディアンリズムは、光刺激や食事などの外からの刺激により影響を受けることが知られていますが、ISS での長期生活がサーカディアンリズムに与える影響は明らかではありません。そこで、長期にわたって宇宙に滞在する飛行士の 24 時間心電図記録を行い、心臓自律神経活動とサーカディアンリズムに与える影響を明らかにします。

概要

無重力環境であり日中に太陽光のような高照度光がない ISS 船内では、不眠を含む生体リズムの変調が起こるリスクが高まります。ISS 長期滞在宇宙飛行士を対象に、飛行前、滞在開始約 30 日後、滞在開始約 75 日後、滞在開始約 150 日後（帰還 1 か月前）、および帰還約 1 か月後に、小型軽量ホルター心電計を用いて、24 時間心電図を計測しました。軌道上で測定した心電データは、「きぼう」から筑波宇宙センターに送信しました。取得した 24 時間心電図データの解析を行い、宇宙飛行が心臓自律神経活動に及ぼす影響を調べました。

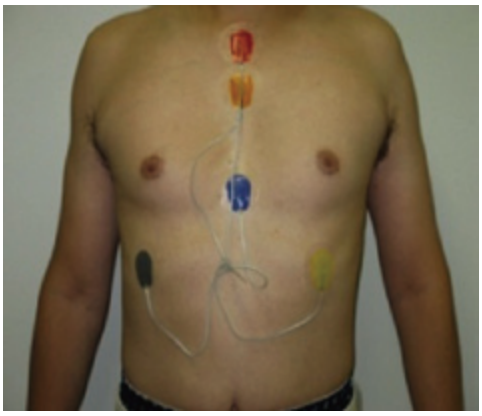


図 1　ホルター心電計（小型、軽量で耐水性能を持ち、24 時間心電図計測可能）と電極

成果

宇宙でも生体リズムを維持することができる

2008 年から実験を行い、24 時間の心電図データを得た結果、以下のことが分かりました。

①心臓自律神経活動を解析すると、一般に激しく活動しているときに活性化する交感神経の活動は、帰還後は飛行前、飛行中に比べて上昇する傾向がありました。無重力の長期宇宙滞在から、地球環境に帰還すると再び重力環境の活動に適応しようとして心臓の交感神経活動が高まる傾向が示唆されました。

②一方、リラックスしているときに活性化する副交感神経の活動は、飛行前に比べて飛行開始直後および飛行開始 2 ヶ月目まで低下し、飛行後半の約 150 日目には改善することが観察されました。飛行開始直後は、無重力環境で体液が頭の方に移動するため、心臓への血流が減り、心臓迷走神経活動に関係する副交感神経の活動が低下します。その後、宇宙環境に適応して、宇宙滞在後半では回復することが示唆されました。

③心臓自律神経活動のサーカディアンリズムの周期は、宇宙飛行の後半に約 24 時間となり、飛行前と飛行後に 24 時間からずれる傾向が示されました。日中の高照度光がなく無重力環境である ISS では、生体リズムが乱れると想定していましたが、フライト直後にサーカディアンリズムは一旦乱れるものの宇宙滞在後半ではむしろ規則正しくなっており、心臓自律神経の宇宙環境への再適応や船内での規則的な生活がサーカディアンリズムの維持に有用であると考えられました。

以上より、現在の ISS 長期宇宙滞在の生活において、心臓自律神経活動のサーカディアンリズムは、打ち上げ直後は一過性の影響を受けるものの、長期的には規則正しく保たれることが確認されました。

今後への波及

地上への還元

長期宇宙滞在中の心臓自律神経活動に対する影響が明らかになることで、生体リズムを正常化する知見が得られ、地上の長時間労働者、シフトワーク従事者の労働衛生管理等に役立つ可能性があります。

宇宙活動への貢献

長期宇宙滞在中の生体リズムへの影響に関する重要な科学的知見を得られ、宇宙飛行士の健康管理技術の向上に役立てることが可能になります。また、本研究の成果を踏まえ、24 時間を超えるリズムの計測や、1 日の中での変動の検討のため、48 時間の心電図記録と 96 時間の活動量記録を行って心臓自律神経の活動と、睡眠 / 覚醒リズムを総合的に評価する実験研究に発展しています。さらなる軌道上の健康管理技術（遠隔医療技術）の向上が期待されます。

宇宙での健康診断

宇宙医学実験支援システムの検証（Onboard Diagnostic Kit）

代表研究者：吉村 善範（JAXA）、山田 深（JAXA）

目的

宇宙医学実験支援システムは、心電計、脳波計、電子聴診器など様々な医学機器から取得したデータを「きぼう」内で簡易解析するとともにまとめて管理し、その解析情報を軌道上と地上とで確認できるシステムです。これまでの ISS の医学研究では、各機器で取得したデータなどをそれぞれ個別に地上で解析して結果を確認する方法がほとんどでした。軌道上で宇宙飛行士が自らデータを確認できる機能やデータを管理する機能を持つシステムは他の宇宙機関にも無く、データをまとめて管理することで異なる医学機器同士のデータの比較が容易になり、宇宙医学研究の発展にもつながります。

概要

電子聴診器（心音）、パルスオキシメータ（血中酸素飽和度）、ホルター心電計（心電図）、簡易脳波計（脳波）、USB カメラ（目、唇、舌の画像）、血圧計（血圧）、体温計（体温）、筋力測定器（筋力）を ISS に打上げ、宇宙飛行士の医学的データを軌道上で測り、データを専用ノートパソコンに取り込んで解析し、解析結果を電子カルテに記録しました（図 1）。軌道上の電子カルテの内容（データ）を地上に送信し、地上においてもデータを確認しました。加えて、きぼう内の宇宙飛行士の心音を電子聴診器を通じて地上にそのまま送信し、地上の聴診器で受信して医師が同時に聴診を行う「リアルタイム聴診実験」を行いました。

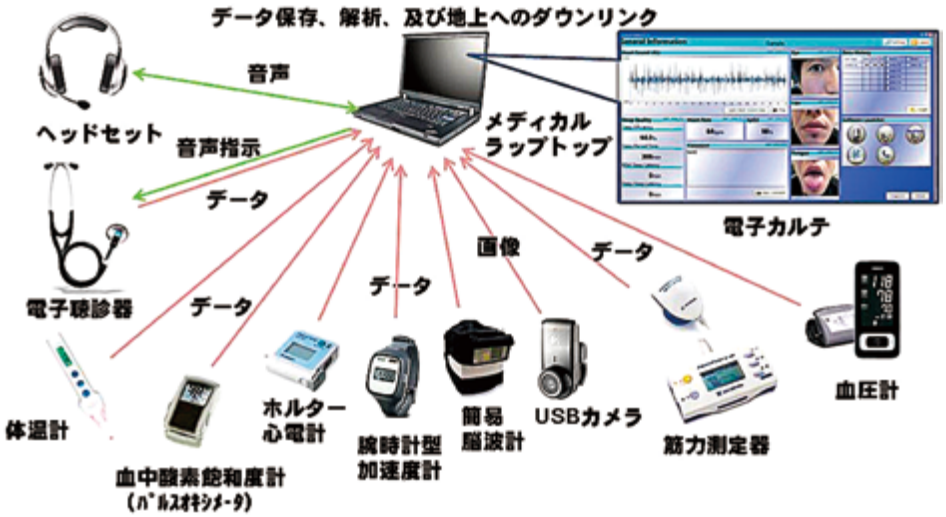


図 1　遠隔診断システム

成果

軌道上での電子カルテを実現

【古川宇宙飛行士滞在時】

滞在中 3 回にわたり、電子聴診器、パルスオキシメータ、脳波計などの各種医学機器で取得した医学データをノートパソコンに取り込み、医師でもある古川飛行士が操作のしやすさ、見やすさなどシステムの評価を行いました。リアルタイム問診では、古川飛行士と地上の医師とが電子カルテを同時に見ながら、医師の視点から意見交換を行いました。一連の検証実験を通じて、飛行中の健康状態の自己把握や医学データ管理への活用の目処が立った一方で、いくつかの改善提案が出され、ソフトウェアシステムの修正を行うとともに追加の機器（血圧計、体温計、筋力測定器）も ISS に搭載することにしました。

図 2　宇宙医学実験支援システムのリアルタイム問診実験の様子（左モニタは電子カルテ。右モニタは USB カメラからのリアルタイム映像）

【星出宇宙飛行士滞在時】

滞在中 3 回（簡易機器は 5 回）にわたり、各種医学機器で取得した医学データをシステムに取り込み、医学の専門家ではない一般の宇宙飛行士の視点からシステムの評価を行い、より分かりやすくするために電子カルテの画面や操作の手順を修正しました。また、古川飛行士の際には実施できなかった電子聴診器を用いたリアルタイム聴診実験を行い、ISS で測定した心音が非常にクリアに地上で聞こえることが初めて確認できました。

今後への波及

地上への還元

宇宙ステーションにいても医学情報を地上と共有しての健康診断が可能であることが確かめられました。このシステムは遠く離れた場所から医師による診察ができるシステムであり、例えば過疎が進んだ集落もしくは離島など、医師のいない場所での健康診断などにも役立つものと考えられます。

宇宙活動への貢献

軌道上で宇宙飛行士が自らの健康を把握できる、電子カルテ機能の第 1 段階を検証できました。電子カルテのような機能は軌道上には他になく、長期滞在する宇宙飛行士に対しても継続的に活用することによって、日本独自のプレゼンスが発揮できるものと期待されます。

また、ISS よりも遠い場所にまで人類の活動範囲を拡げるためには、遠隔医療の充実は不可欠です。今回の研究で得られた成果は、将来の月や火星などへの有人探査における宇宙飛行士の健康管理にも役に立つものと期待されます。

髪の毛から宇宙での体の変化を調べる

長期宇宙滞在宇宙飛行士の毛髪分析による医学生物学的影響に関する研究（Hair）

代表研究者：向井 千秋（JAXA）

目的

ISS に滞在する宇宙飛行士から採取した毛髪を分析することで、長期間宇宙滞在の影響を調べ、ISS 長期滞在や今後の有人宇宙活動のために役立つ基礎的な医学データの取得を目指しています。

毛髪は健康状態を反映しつつのびていくため、体の変化をテープレコーダーのように記録しています。そのためこれを分析すると、数か月にわたる体の変化がわかります。

概要

宇宙飛行前、飛行中、飛行後のそれぞれの時期に、長期間滞在している宇宙飛行士から毛髪を提供してもらいます。軌道上で採取された毛髪は冷凍保存され、地上に回収されて解析が行われます。毛髪は毛根（皮膚に隠れている部分）と毛幹（頭皮から出ている部分）に分けることができますが、毛根部分には細胞が存在しているので、そこから遺伝子を抽出し、宇宙での体の変化を分子生物学的に評価します。また、毛幹に含まれている微量元素の量を調べ、地上で生えていた部分と宇宙で新たに生えた部分で違いがあるかを検討します。骨の代謝の状態や、様々なストレスに対する身体の変化を、毛髪を調べることで評価できれば、宇宙飛行士の健康管理に役立てることができます。また、人の毛髪だけでなく、軌道上で飼育されたマウスの毛髪の解析も合わせて実施しています。

図 1　軌道上で毛髪を採取される古川飛行士

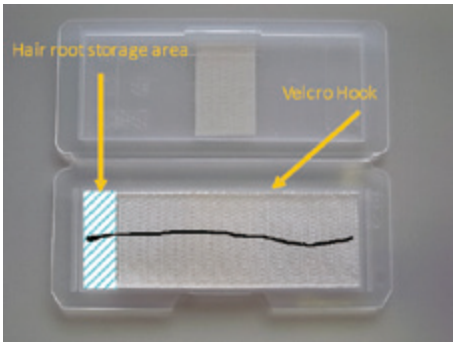


図 2　採取した毛髪は図のようなケースに収納して冷凍保管します

成果

遺伝子の働きに変化、さらなる解析を実施中

2012 年までに、10 名の宇宙飛行士からサンプルを採取し、現在はサンプルの回収と解析作業を進めています。凍結保存してある毛髪から毛根部分を切断して遺伝子の働きに関する情報を抽出し、解析を行います。網羅的な解析の結果から、これまでにいくつかの遺伝子の働きに宇宙滞在に伴う変化が認められています。今後は遺伝子の働きと身体の変化との対応を検討するとともに、被験者全体の傾向を把握できるように解析を進めていく予定です。また、毛髪を含むマウスの皮膚の解析からも、宇宙での飼育による遺伝子の変動を検出することができました。これらの毛根の解析と合わせ、毛幹に含まれる微量元素の解析もすすめています。電子線マイクロアナライザという機器を使用し、毛髪の横断面に含まれるカルシウムや塩素などの量を調べています。取り扱う対象がまさしく微量であるため、解析方法の妥当性の検証を含めた作業を実施中です。

今後への波及

地上への還元

毛髪における遺伝子の働きの変化および微量元素の変化を指標とした健康管理の手法は、地上の医療にも応用できる可能性を秘めています。また、宇宙飛行に伴う遺伝子の変化を調べることは、加齢に伴って生じる筋肉や骨の衰えのメカニズム解明にもつながると考えています。

宇宙活動への貢献

毛髪の変化を詳細に解析することは、宇宙環境で起こる様々な生物学的な障害のメカニズムを明らかにするだけでなく、さらにはその対処法を見出し、宇宙飛行士の健康管理技術を向上させるために役立つことでしょう。

起立性低血圧の原因－重力との関係を探る

前庭－血圧反射の可塑性とその対策（V-C Reflex）

代表研究者：森田 啓之（岐阜大学大学院）

目的

耳の奥にある耳石前庭器官は、頭の傾きや重力を感知します。この前庭系を介した血圧調節反射である「前庭－血圧反射」は、私たちが立ち上がる時の血圧の調節に重要な役割を果たしています。ところが、前庭の働きは外部の環境により影響を受けることが知られており、地上とは異なる重力環境である宇宙では、この血圧調節の能力が変化する可能性があります。この様な状態で地上に帰還すると、立ち上がる時の血圧調節がうまくいかず、立っていると低血圧で頭がふらふらする起立性低血圧を起こす可能性があります。宇宙飛行士の約 40% は宇宙からの帰還後に起立性低血圧を起こします。

本研究の目的は、長期宇宙滞在により前庭－血圧反射の調節力が低下するかどうかを確かめることです。

概要

今回の研究は全て地上で行います。宇宙滞在 3 ヶ月前から 1 ヶ月前、帰還 3 日後以内、約 2 週間後、約 2 ヶ月後に起立試験を行い、その時に働く前庭－血圧反射の大きさを測り、宇宙滞在によりどのように変化するか、また、帰還後どのような経過をたどり回復するのかを調べます。

起立試験には、傾きをつけられるベッドを使います。宇宙飛行士の血圧を連続的に測定しながら、ベッド上で安静を保ちます（角度 0°）。血圧が安定したら、ベッドを 60°まで起こし、この状態を 2 分間保った後、0°に戻します（図 1）。また、体の表面から前庭系を電気刺激することで、重力情報が入力されず起き上がった時の前庭－血圧反射を遮断する GVS（galvanic vestibular stimulation）という方法を行いながら試験を行います（図 2, 3）。GVS がない時の起立時の血圧応答と GVS がある時の起立時の血圧応答の差が前庭－血圧反射の大きさに相当します。

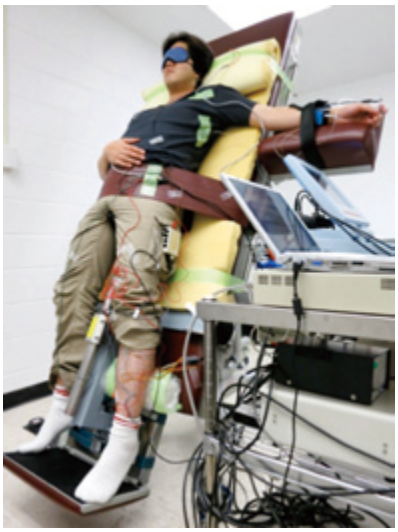


図 1　実験の様子

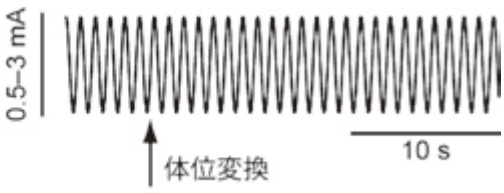


図 2　耳の後ろに置いた 1 対の刺激電極を用いて、体表上から前庭を電気刺激することにより、重力変化に基づいた前庭への入力が遮断されます。

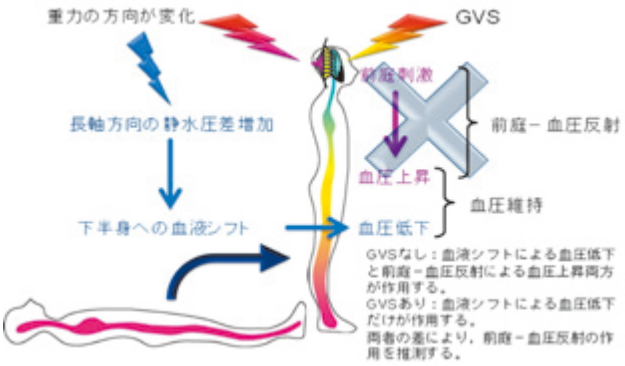


図 3　GVS により姿勢変化による前庭系入力を遮断して、前庭－血圧反射による血圧調節をブロックし、前庭－血圧反射の作用を推測する仕組み。

成果（中間報告）

長期宇宙滞在により前庭－血圧反射は働かなくなる

これまでに 4 名のデータ取得が完了しています。これまでの結果から、GVS なしの血圧応答と GVS あり（重力情報が入力されない状態）の血圧応答の差、すなわち前庭－血圧応答の大きさは、宇宙滞在前には 12–13 mmHg 程度でしたが、帰還 1 日後および 2 週間後には差がなく、2 ヶ月後には飛行前と同程度に回復してくることが分かりました。すなわち、4 ヶ月から 6 ヶ月の宇宙長期滞在により、前庭－血圧反射が全く働かなくなりますが、約 2 ヶ月かけて徐々に回復してくることが分かりました。

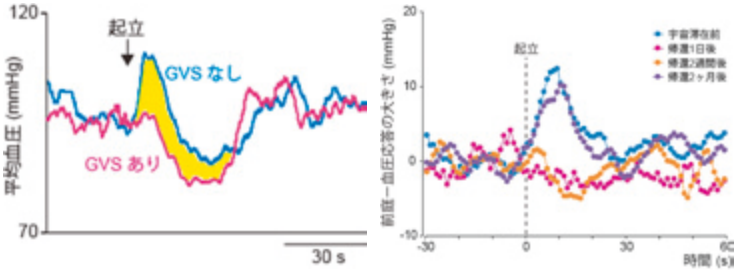


図 4　左：宇宙滞在前の起立時の血圧応答。GVS なしと GVS ありの血圧応答の差（黄色の部分）が前庭－血圧反射の大きさを表す。右：宇宙滞在による前庭－血圧応答の抑制とその回復過程（4 名の平均値）。

今後への波及

地上への還元

起立性低血圧は、宇宙飛行士と高齢者に共通する医学的課題です。無重力環境下では、体の動きに伴う前庭への情報入力がほぼゼロになります。活動が低下している高齢者でも、体の動きに伴う前庭への情報入力が減少します。両者に共通する前庭への入力減少が、前庭系の機能を低下させる可能性があります。宇宙医学での取り組みを参考にして、高齢者の QOL（Quality of Life）改善が期待できます。

宇宙活動への貢献

これまでの結果において、長期宇宙滞在により前庭系の機能が低下することが分かりました。何らかの方法により、無重力環境下でも前庭系を刺激することが出来れば、前庭系の機能を維持出来る可能性があります。この方法が開発されれば、帰還後の宇宙飛行士を悩ます起立性低血圧およびふらつきを予防できるはずです。

無重力ではカビも空中を漂っている？　微生物による健康への影響を調べる

国際宇宙ステーションに滞在する宇宙飛行士の身体真菌叢評価（Myco）

代表研究者：向井 千秋（JAXA）

目的

宇宙船内環境における微生物汚染は、長期宇宙滞在に伴う宇宙飛行士の健康に影響を与える可能性があります。この研究では、ISS で活動する宇宙飛行士の上気道（のどや鼻など）粘膜、および皮膚の経時的な菌叢（※）の変化を解析し、宇宙船内の環境管理および宇宙飛行士の健康管理のためのデータを蓄積します。

※菌叢（きんそう）：ある空間に存在する菌（細菌・真菌）の種類、量、割合、分布など、菌全体の構成。

概要

宇宙飛行士の粘膜および皮膚からサンプルを採取し、飛行前、飛行中、飛行後における真菌叢の変化を比較します。上気道サンプルは真菌を培養して遺伝子を詳しく調べます。また、皮膚サンプルは、培養せずに微生物の DNA を直接抽出し、定量的な評価を行います。皮膚微生物叢の解析対象としては、特にマラセチア（※）という真菌に注目しています。

※マラセチア：ヒトや動物の皮膚に常在する菌。皮脂の多い部位に定着しやすく、様々な皮膚疾患の原因となる。

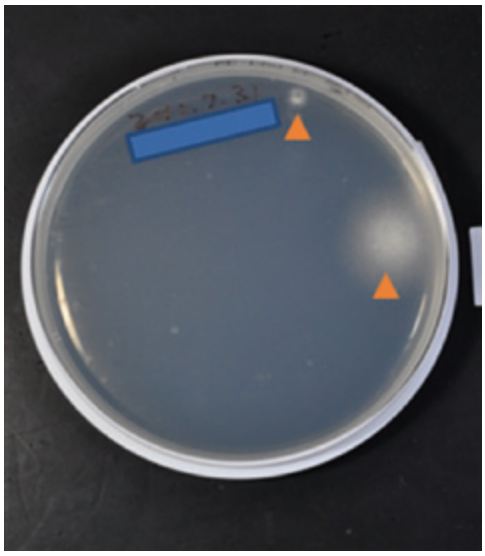


図 1　サンプルから培養された真菌集落

図 2　マラセチアの電子顕微鏡写真
（提供：明治薬科大学　杉田 隆 先生）

成果

宇宙で採取したサンプルから菌の培養に成功

スペースシャトルの宇宙飛行士 10 名、および ISS 長期滞在の宇宙飛行士 10 名からのサンプル採取が終了し、現在解析作業が進行中です。一部のサンプルは軌道上から冷蔵回収して、培養検査を実施しました。軌道上で採取したサンプルから生きた菌を培養することで、軌道上における菌の性質や状態を解析でき、科学上・運用上有用な情報が得られます。今後は培養検査に引き続き、詳細な遺伝子検査を実施していきます。

皮膚については、マラセチアの中でも様々な菌種があるため、構成菌種の比率変化も解析していく予定です。今後は統計学的な検証を含め、データの解析を進めていきます。

今後への波及

地上への還元

閉鎖空間をはじめとしたストレスのかかる生活環境や、衛生管理そのものに問題がある状況において、微生物が人体におよぼす影響を評価するために貴重なデータを得ることができます。

宇宙活動への貢献

宇宙飛行士が吸い込んでしまったり、あるいは体の表面に付着しているような菌叢の変化を解析することで、長期宇宙滞在中に微生物によって健康が損なわれないようにするための予防技術を開発したり、宇宙船内環境そのものを含めた効果的な除菌法を開発したりするためのデータを集めることができます。

筋骨格系の最適トレーニングシステムを目指して

国際宇宙ステーションに長期滞在する宇宙飛行士の筋骨格系廃用性萎縮へのハイブリッド訓練法の効果 (Hybrid Training)

代表研究者：志波 直人 (久留米大学医学部)

目的

筋肉や骨は負荷が加わらないと廃用性萎縮 (小さく変化して働かなくなること) を起こします。宇宙に長期間滞在する宇宙飛行士の大きな問題のひとつは、微小重力による筋肉や骨の廃用性萎縮です。宇宙飛行士の筋肉や骨に効率よく負荷を与え、維持するための小型で簡易なトレーニング装置が「ハイブリッドトレーニングシステム　Hybrid Training System: HTS」です。 例えば、肘を伸ばす運動を行う際に、同時に肘を曲げるための反対側の筋肉に電気刺激を加え収縮させて伸ばす運動の抵抗にする、という原理の装置で、曲げる運動ではこの逆となります。(図 1)。10 回の屈伸運動をすると、曲げる筋肉と伸ばす筋肉は電気刺激による収縮と自身の意思による収縮を交互に 10 回ずつ繰り返すため、それぞれ合計 20 回収縮します。骨には、これら収縮する筋肉の合計の負荷が 20 回加わることになり、効率よく筋肉や骨に負荷を与えることができます。

HTS の ISS での最初の検証実験として、宇宙飛行士の片側上腕の筋肉の萎縮を防ぐ効果を確認し、宇宙での機能や操作のしやすさを検証しました。

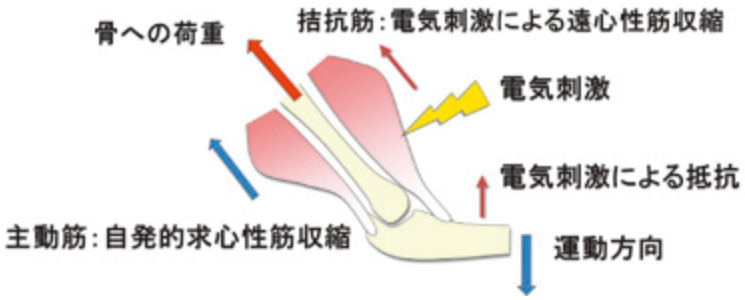


図 1　HTS の原理。屈曲はこの逆。主動筋：自身の意思で収縮する筋肉。拮抗筋：主動筋に対抗する筋肉。求心性筋収縮：関節の運動方向と同じ筋肉の収縮。遠心性筋収縮：関節の運動方向と逆の筋肉の収縮で、筋肉は収縮しつつ引き伸ばされる。

概要

ISS に長期滞在する宇宙飛行士一名を被験者として、HTS を非利き腕のみに装着しました (図 2)。2 秒ごとの両肘交互屈伸運動 10 回を 1 分間の休みを挟んで 10 回、合計 100 回、1 回あたり 15 分 40 秒のトレーニングを、週 3 回 4 週間、計 12 回行いました。地上評価として打ち上げ前と帰還後に、筋力、筋容量、骨密度・筋量を計測しました。軌道上評価として ISS 内で、トレーニング前後に飛行士が一人で実施可能な徒手式筋力測定装置による筋力測定、計測テープによる上腕の周囲径を計測し、HTS を装着した非利き腕と、非装着の利き腕の比較を行いました (図 3)。

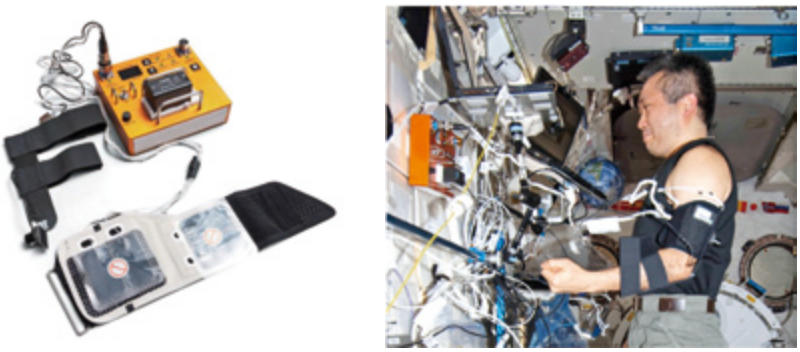


図２　ISS 上の HTS 装置と実験をする宇宙飛行士。（NASA/JAXA より引用）

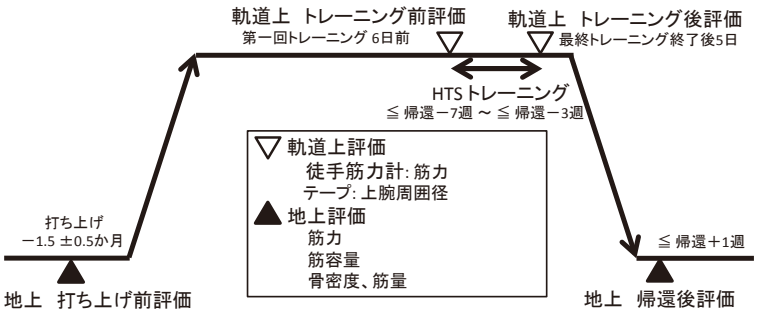


図３　実験スケジュール。地上評価は、打ち上げ前の 1 .5 か月± 0.5 か月、帰還後 1 週間以内に実施し、軌道上 ISS 内評価は、トレーニング開始 6 日前、トレーニング終了後 5 日後に実施した。トレーニングは帰還後地上評価の 4 週以内に完了するよう ISS 滞在期間終盤に実施した。

成果

実験の結果、装置の不具合や宇宙飛行士への有害事象の発生は無く、予定した 12 回のトレーニングを予定通りに完了し、HTS は微小重力環境でも問題なく使用できることが明らかとなりました。また、筋肉や骨の廃用性萎縮予防効果の可能性を示唆するデータが取得でき、詳細については学術誌での発表を準備中です。

今後への波及

地上への還元

医療器具として、寝たきり状態の患者さんへの応用や、介護器具として、高齢者への応用の他、健康維持・改善のための装置としての普及を目指した実用化の準備を実施しています。一人でも多くの方たちに、宇宙実験の成果を還元することが、この研究の大きな目的です。

宇宙活動への貢献

今回の検証に基づき、宇宙でも下肢での検証を実施して、宇宙での実用化を目指します。長期的には、地球軌道を超えた月や火星への有人探査で、小型宇宙船上でも使用できる装置の可能性を追求します。

中性子のヒトへの影響を知る

ボナーボール型中性子計測装置（BBND）

代表研究者：松本 晴久（JAXA）

目的

ISS 内で初めて、宇宙放射線環境のうち中性子線の計測を行いました。宇宙放射線が人間に及ぼす影響に関する国際共同プロジェクトの一環として、国際パートナー間で取得データを共有するとともに、ISS での有人活動のために必要となる宇宙放射線被ばく管理技術の向上を目的としました。

概要

ボナーボール型中性子計測装置（BBND）は、1998 年にスペースシャトルに搭載した中性子モニタ装置を改良したものです（ボナーは、ボール型中性子検出器考案者の名前）。計測データは、約 1 週間に 1 度の頻度でまとめて地上に送信されました。本装置は、約 8 か月間の長期にわたる ISS 内の中性子（※）エネルギースペクトル（分布）を計測しました。

※中性子とは：中性子とは素粒子のひとつ。電荷をもたないため、物質中での透過力が強く、低エネルギーでも人体内部の器官（骨髄等）に到達する。銀河や太陽から飛来する荷電粒子（陽子や重粒子など、電荷をもつ粒子）が ISS の船壁等と反応して、船内に中性子が発生する。宇宙飛行士の全放射線被ばく量の 5 ～ 30％をしめると言われている。

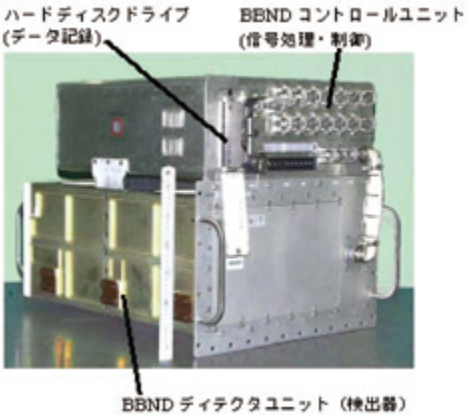


図 1　中性子計測装置 (BBND)

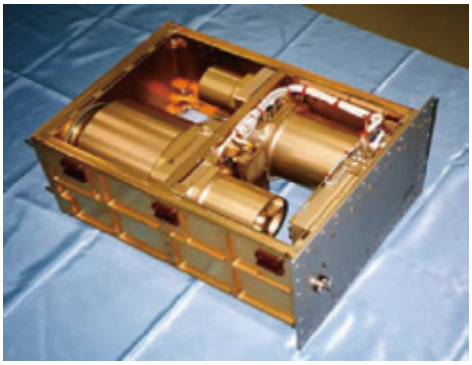


図 2　BBND ディテクタユニット
（検出器：STS-89 飛行品）

図 3　ISS の米国実験棟内に設置された BBND

成果

ISS で初めて中性子による被ばく量と太陽フレアの影響が判明

BBND は、ISS に搭載された日本として初めての装置です。2001 年 3 月米国実験棟に搭載され、11 月の計測終了まで NASA と共同で、太陽活動が活発な極大期に相当する約 8 か月の船内中性子環境計測を実施しました。等価線量当量（各組織や臓器の局所的な被ばく線量）の平均を年に換算すると 34mSv/ 年となりました。これは、地上において自然環境から受ける等価線量当量の約 14 倍に相当します。

また、実験期間中には多くの太陽フレアが発生し、2001 年 11 月に発生した太陽フレアとそれに伴う地球磁気の乱れが、ISS 内部の放射線環境にも影響を与えました。太陽フレアによって大量の太陽放射線が放出され、さらに地球を放射線から守っている地磁気が乱れたことから、この太陽フレアの影響によって等価線量当量が、0.19mSv 増加したことが分かりました。これは、地上で自然環境から受ける等価線量当量の約 1 ヶ月分に相当します。しかし、BBND の約 8 か月の実験期間中の全等価線量当量に対するこの太陽フレアの影響は 1% 以下でした。

また、計測環境を模擬したシミュレーションを行い、実測値との比較を行うことにより宇宙放射線被ばく管理技術が向上しました。

今後への波及

地上や宇宙活動への貢献

宇宙環境計測や、宇宙医学分野及びライフサイエンス分野の研究、そして ISS での有人宇宙活動に必要となる宇宙放射線被ばく管理技術向上のための基礎データが得られました。またこのデータは、予測計算モデルの検証や ISS の運用方法の検討などに利用できます。なお、BBND で開発した技術は、この後きぼうの曝露実験装置 SEDA-AP (p.144) の中性子モニタへとつながりました。

また、この実験で開発された技術は、飛行機内での被ばく計測にも利用できます。

PADLESとは？

概要

PADLES（パドレス：Passive Dosimeter for Lifescience Experiments in Space）は、宇宙放射線環境を測定するのに優れた2種類の線量計素子（固体飛跡検出器 CR-39、熱蛍光線量計 TLD－MSO）を組み合わせた受動型線量計と、その解析を自動高速で行うシステムです。高エネルギー加速器研究機構、放射線医学総合研究所、早稲田大学の協力を得て、JAXA が開発しました。

ISS に搭載した PADLES は、地上に回収後 JAXA で線量解析・データ提供を行っています。

日本が開発した、2種類の線量計を組み合わせて高精度に宇宙放射線を検出する手法は、米露欧等 ISS 参加国の宇宙放射線の線量計測や被ばく管理の手法に採用されています。

図1　(上) 各種 PADLES 線量計、
(下) 線量計の素子

PADLES 線量計は、実験の用途に応じてケースが異なりますが、内部の素子は同じものを使っており（図1）、下記の実験に使われています（図2）。

❶ **Area PADLES：「きぼう」船内の定点放射線環境モニタリング** …… p.88
❷ **Bio PADLES：生命科学実験で使用される生物試料の被ばく線量計測**
❸ **Crew PADLES：日本人宇宙飛行士の個人被ばく線量計測** …… p.90
❹ **Dosimetric PADLES：ISS 参加国と共同で実施する国際協力線量計測実験** …… p.102, 96

図2　様々な使用法

●用語解説

番号	用　語	説　明
1	吸収線量	放射線が物質を通過する時に、単位質量（kg）の物質に吸収された放射線のエネルギー（J：ジュール）の量（Gy：グレイ）。
2	LET （Linear Energy Transfer）	線エネルギー付与。放射線の飛跡に沿って、単位長さあたりに放射線が失うエネルギーの量。
3	線量当量	放射線の種類によって人体への影響の度合いは違う。その違いを示す係数を吸収線量にかけて評価した実用量（Sv：シーベルト）。
4	熱蛍光線量計	放射線が当たると、その放射線のエネルギーを蓄えることができ、熱が加わると蓄えられたエネルギーを光として放出する性質を持つ結晶体。熱蛍光を測定することで、吸収した放射線の量がわかる。
5	固体飛跡検出器	宇宙放射線の荷電粒子（電子や陽子などの電化を持つ粒子）が通過すると、その飛跡を記録するプラスチック。水酸化ナトリウム溶液等で処理することで、通過した粒子の飛跡が可視化できる。

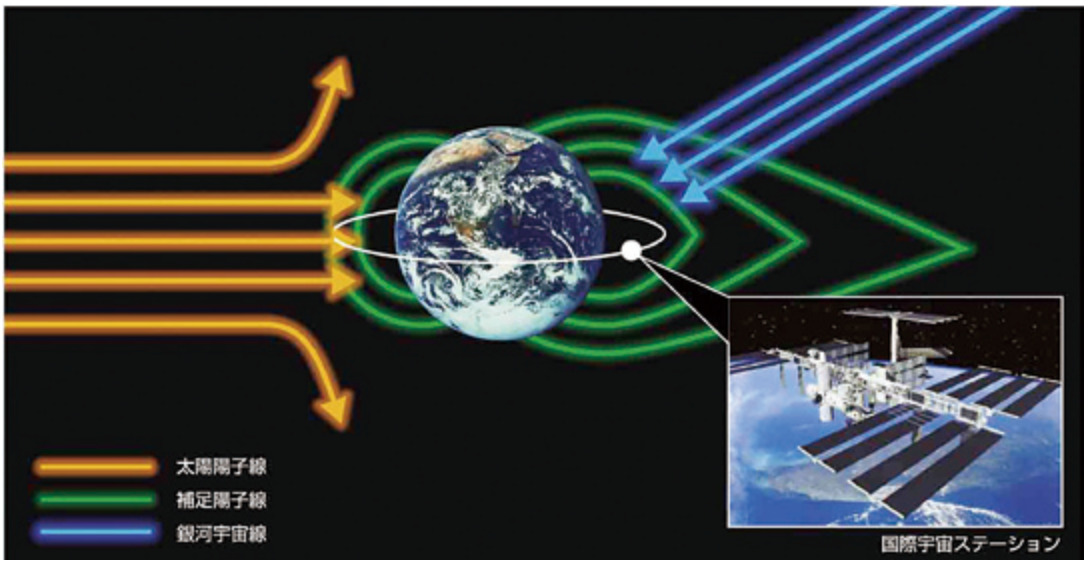


図３　ISS が受ける宇宙放射線
（「ライフサイエンス宇宙実験のための受動積算型宇宙放射線計測技術」パンフレットより）

「きぼう」船内の宇宙放射線環境の定点計測 (Area PADLES)

代表研究者：永松 愛子 (JAXA)

目的

太陽活動や周囲の遮へい条件によって変化する「きぼう」船内の宇宙放射線環境を把握するために、Area PADLES 線量計を「きぼう」船内の定点に設置し、「きぼう」運用期間中の継続的な船内宇宙放射線環境を計測しています。計測データは、「きぼう」船内で行う宇宙実験の計画立案や宇宙飛行士の長期滞在におけるリスク評価に利用します。

概要

Area PADLES 線量計は、「きぼう」船内の 17 ヶ所に設置され (図 1)、約半年ごとに回収・交換設置されます。本実験は、2008 年 6 月の「船内実験室」の取り付けと同時に開始され、現在も継続して実施されています。

スペースシャトルの退役後は、ロシアの宇宙機関と JAXA との宇宙放射線に関する研究協力の一環として、Area PADLES 線量計はソユーズ宇宙船による打上・回収が行われています (図 2、図 3)。

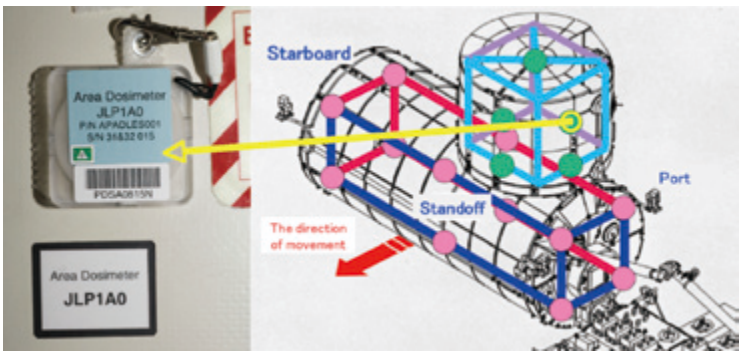


図 1　Area PADLES 線量計の設置位置 (船内実験室に 12 カ所、その上の船内保管室に 5 カ所)。

図 2　ISS 第 28/29 次長期滞在 (2011 年 6 月 -11 月) で古川宇宙飛行士が取付を実施した Area PADLES 線量計

図 3　ロシアとの研究協力により、ソユーズ宇宙船で地上へ回収するために、ロシアのゲナディ・パダルカ宇宙飛行士へ線量計を引き渡す星出宇宙飛行士 (2012 年 9 月)

成果

ISS が飛行する高度約 400km の低周回軌道において、最も重要な宇宙放射線被ばくの原因は、太陽系の外から飛来する銀河宇宙線、地球磁場に捕捉された陽子線、太陽活動によって生じる太陽粒子線です。11 年周期の太陽活動の変化、太陽フレアの発生、ISS の壁や内部の搭載ラックなどの遮へい効果やこれらを通過することによって発生する二次放射線や中性子の影響も受け、船内の宇宙放射線環境は複雑な挙動を示します。そのため ISS 各国のモジュール船内では、宇宙飛行士のリスク評価の一環として、線量計を用いた継続的な宇宙放射線による被ばく線量計測を行っており、計測結果について情報を交換しています。「きぼう」では、Area PADLES として宇宙線のモニタリングを行っております。

同時期に測定した 17 か所の線量計の「きぼう」船内の設置場所の違いによって、吸収線量で 1.5 倍、線量当量で 1.9 倍の線量の違いが見られました。今後、太陽活動の変化に伴う線量の変動を、継続的に計測していく予定です。

2009 ～ 2010 年には、PADLES 線量計が 6 面に設置された立方体形状の EXP PADLES 線量計（図 4）を船内保管室天頂部に搭載し、低周回軌道で飛行する ISS「きぼう」船内で、どの方向から宇宙放射線が入射しやすいか調べる実験を行いました。地球と垂直に設置された線量計と、地球の表面に平行に設置された線量計の計測結果を比較すると、垂直設置の線量計の高 LET（人体に与えるエネルギーが大きい）領域のフラックス（単位時間・面積あたりに入射する重粒子の個数）が約 2 倍以上高くなることがわかりました。

高 LET 放射線に対して感受性の高い機器やデバイスの船内の長期保管や、生物試料の放射線影響を評価をする場合には、ISS 船内の設置場所や入射面を考慮する必要があります。

図 4　きぼう船内の宇宙放射線の入射方向依存性を見るために船内保管室の天頂に設置された Exp PADLES 線量計

今後への波及

宇宙活動への貢献

「きぼう」の遮へい環境を組み込んだ構造モデルと連結した「宇宙放射線シミュレーションモデル」を構築し、「Area PADLES」の実測データと計算結果の比較により、モデルの精度を向上させています。継続的な軌道上環境データの蓄積は、モデル構築のための基準となり、次世代の宇宙船の遮蔽設計や材料選定など、放射線防護技術に直結します。

宇宙飛行士を守る有人宇宙技術個人被ばく線量計(Crew PADLES)

(宇宙飛行士用の受動積算型宇宙放射線線量計)

代表研究者：永松 愛子 (JAXA)

目的

宇宙飛行士が生涯を通してどのくらいの期間宇宙に滞在できるかは、設定した放射線防護のための被ばく線量の制限値 (閾値) に対し線量計による実測結果から得られる線量との比較によって決定されます。そのため、高精度な被ばく線量の把握が必要です。ISS に搭乗する宇宙飛行士の宇宙放射線に対する被ばく線量評価を行うために、JAXA 宇宙飛行士は船内・船外活動を通したフライト期間中、JAXA が開発した個人被ばく線量計 Crew PADLES を常時携帯しています (図 1)。

概要

Crew PADLES は、ISS 搭乗宇宙飛行士の被ばく管理を行うための個人被ばく線量計として使われており、PADLES 線量計測素子が封入されたポリカーボネート製のケースにストラップが付いたもので、軌道上で宇宙飛行士が携帯しやすい形状になっています。宇宙放射線による被ばく線量を計測するための宇宙版フィルムバッジです。

2008 年の「きぼう」日本実験棟を打上げた土井・星出宇宙飛行士ミッション時と、ソユーズ宇宙船によるマレーシア人宇宙飛行士と韓国人宇宙飛行士の ISS 搭乗時に個人被ばく線量計の軌道上実証試験が実施されました。若田宇宙飛行士の ISS 第 18/19/20 次 長期滞在 (2009 年) からは、医学運用認定機器となり、日本の有人宇宙飛行を支える有人技術のひとつとなっています。(表 -1)

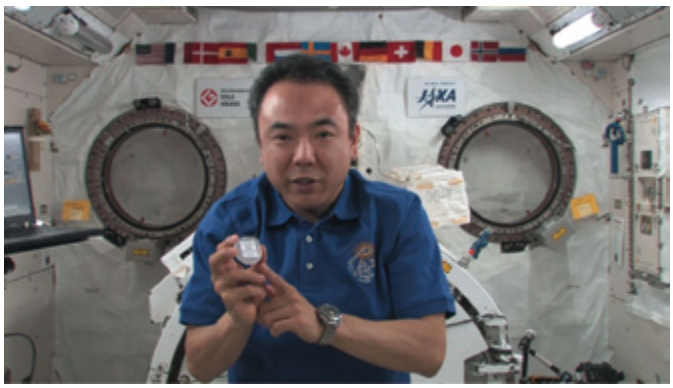


図 1　ISS 第 28/29 次長期滞在 (2011 年 6 月 -11 月) で古川宇宙飛行士が携帯した Crew PADLES 線量計

表 -1　Crew PADLES で個人被ばく線量計測を実施した宇宙飛行士

搭載時期	機体/インクリメント	クルー名	国
2007年10月	15S/14S ソユーズ	シェイク・ムザファ・シュコア	マレーシア
2008年3月	1JA/STS-123	土井 隆雄	日本
2008年4月	16S/15S ソユーズ	イ・ソヨン	韓国
2008年6月	1J/STS-124	星出 彰彦	日本
2009年3-7月	ISS 第18/19/20次 長期滞在	若田 光一	
2009年12月 -2010年6月	ISS第22/23次 長期滞在	野口 聡一	
2010年4月	19A/ STS-131	山崎 直子	
2011年6-11月	ISS第28/29次 長期滞在	古川 聡	
2012年7-11月	ISS第32/33次長期滞在	星出 彰彦	

成果

2012 年 12 月現在までに、アジア人宇宙飛行士の延べ 9 名の個人被ばく線量計測を行い、飛行中の素子の感度測定、吸収線量、線量当量、LET 分布の測定を行いました。Crew PADLES で実測した線量結果から、実効線量当量（全身）と組織等価線量（皮膚、骨髄、水晶体、精巣）の計算上の評価を行い、軌道上滞在中の正確な被ばく線量の把握とリスク評価を行います。

2007 年 10 月には、ソユーズ宇宙船で宇宙飛行に参加したマレーシア初の宇宙飛行士の Crew PADLES による個人被ばく線量計測を行いました。本協力は、マレーシア宇宙庁と JAXA の共同研究として実施されました。同様に、2008 年には、「きぼう」組立ミッションを行った土井宇宙飛行士と星出宇宙飛行士、そして韓国人宇宙飛行士の個人被ばく線量計測を行いました。4 例の軌道上実証実験を元に、運用手順、リスク評価方法を確立し、2009 年から全 JAXA 宇宙飛行士用線量計として、ISS 長期滞在クルーの飛行中の被ばく線量計測を行っています。

今後への波及

地上への還元

広いエネルギー領域にわたり多くの種類を含む宇宙放射線の計測技術開発や実測結果に基づいた被ばく管理に関する知見は、素粒子実験などに使われる加速器施設をはじめ、原子力施設、医療・研究施設等、放射線の管理が必要となる分野への利用・応用が期待できます。

宇宙活動への貢献

被ばく線量計測手法は、地球の磁気圏で守られている地球近傍の ISS のみならず、地球の磁気圏外での有人惑星探査における被ばく管理においても適用される技術です。地磁気圏外は宇宙放射線による被ばくがますます大きくなるため、高精度な線量計測に基づいたリスク評価やその評価に基づいたフライト計画の立案がより重要となります。ISS 運用中のデータの蓄積により、宇宙放射線に対する被ばく管理技術の向上・発展が期待できます。

宇宙放射線計測技術(PADLES)を用いた国際共同実験(その1)

Dosimetric PADLES / マトリョーシカ実験

代表研究者：永松 愛子 (JAXA) / Günther Reitz (DLR: German Aerospace Center)

目的

マトリョーシカ宇宙実験は、宇宙飛行士の船外・船内活動時の被ばく線量を評価するための、9 カ国 16 機関による国際協同宇宙実験です。能動型・受動型の線量計を埋め込んだ人体模擬ファントム (人体模型、図 1) を ISS のロシアモジュールや「きぼう」日本実験棟船内に長期間設置して、人体内の宇宙放射線被ばく影響を正確に評価することを目的としています。JAXA は、PADLES を用いた宇宙放射線計測を実施しました。

概要

JAXA PADLES 線量計は、熱蛍光線量計 TLD 7 本と固体飛跡検出器 CR-39 4 枚を封入し、吸収線量と線量当量を算出する線量計です。2 種類の線量計を組み合わせ宇宙放射線を構成する様々な種類の陽子・重荷電粒子による被ばく線量を高精度に検出することができます。

マトリョーシカ実験は、マトリョーシカ 1 (ロシアのズヴェズダ船外 / 船内)、2A (ピアース)、2B (ズヴェズダ船内)、2B_KIBO (きぼう船内) の 4 回のシリーズ実験で構成されています (表 -1 参照)。マトリョーシカ 1 (図 2)、2A、2B 実験では、人体ファントム頭部に 1 カ所、マトリョーシカ 2B_KIBO (図 3、4) 実験では、体表面 (前面、背面)、頭部、眼球、肺、胃、腎臓、腸に位置する人体表面と深部に線量計を設置し、人体では実測することができない臓器での被ばく線量を実測しました。

表 1　マトリョーシカシリーズ実験のスケジュール

プロジェクト名	シリーズ	ISS モジュール	搭載期間	搭載日数
MATROSHKA 人体ファントム実験	船外ばく露 / 船内実験 Phase 1	ズヴェズダ	2004.1.29 ― 2005.10.11	621
	船内実験　Phase 2A	ピアース	2005.12.22 ― 2006.12.23	366
	船内実験　Phase 2B	ズヴェズダ	2007.10.10 ― 2008.11.30	417
	船内実験　Phase 2B_KIBO	きぼう	2010. 04.29 ― 2011. 3.16	322

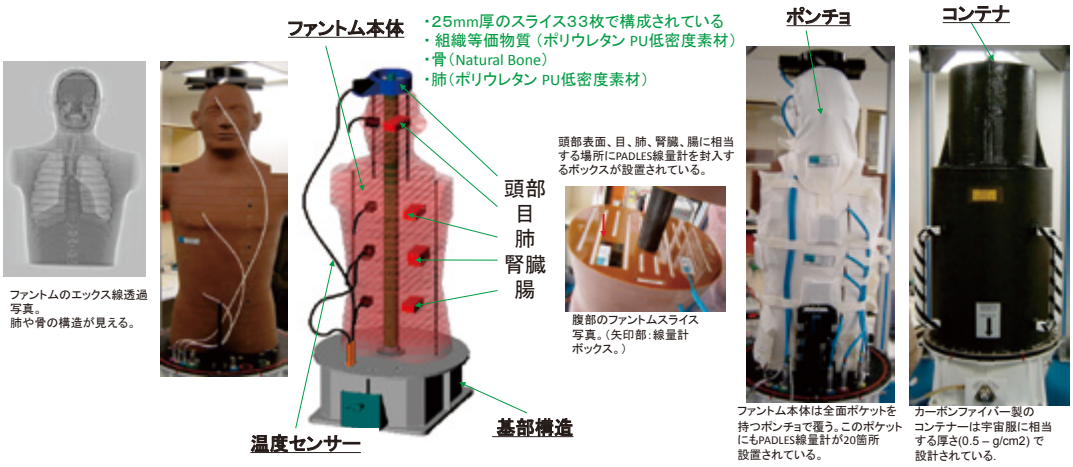


図 1　マトリョーシカファントムの構造

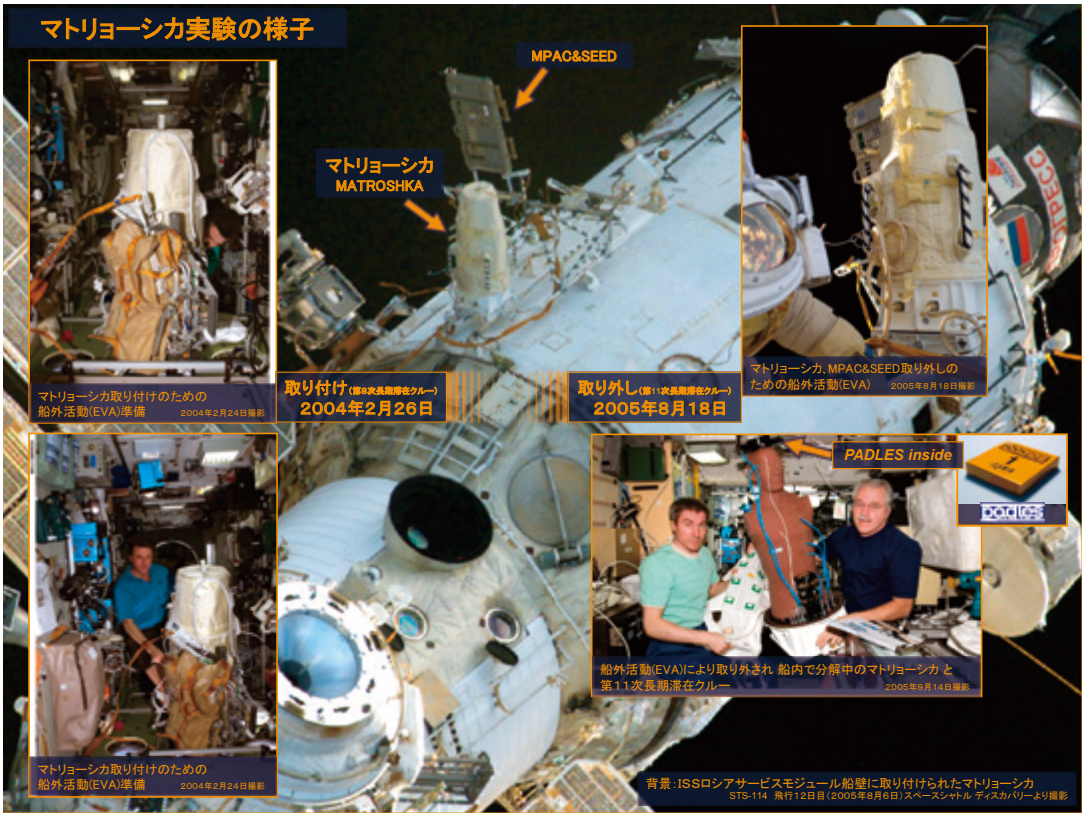


図 2　MATROSHKA 1 船外曝露実験の様子（2004 年 1 月 -2005 年 10 月）

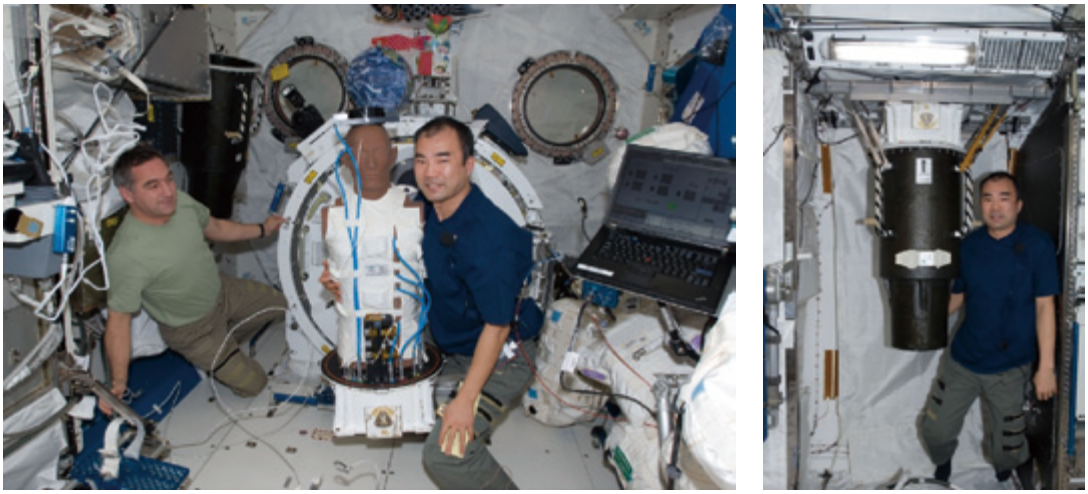


図 3　MATROSHKA 2B_KIBO「きぼう」船内実験
（左）人体ファントムを設置する準備を行う野口宇宙飛行士、（右）「きぼう」船内ラックに設置した人体ファントム
（2010 年 4 月 29 日 -2011 年 3 月 17 日）

図 4　マトリョーシカ 2B_KIBO 実験において、人体ファントム中に設置した PADLES 線量計の場所

成果

マトリョーシカ 1（ロシアのズヴェズダ船外 / 船内）、2A（ピアース）、2B（ズヴェズダ船内）実験は、2008 年の「きぼう」日本実験棟の打上げ前の、ISS における PADLES 線量計の軌道上検証を目的として実施されました。また、マトリョーシカ 2B_KIBO は、JAXA/ 欧州宇宙機関（ESA）/ ロシア宇宙庁（ROSCOSMOS）の共同運用による「きぼう」利用実験の一環として実施されました。

ロシアモジュールで実施した宇宙放射線計測実験では、船外の吸収線量が船内より約 4 倍高いということや、ISS 船壁によってどんなエネルギーをもつ重粒子が遮蔽されるのかといった遮蔽・防護のための知見が得られました。

「きぼう」船内での宇宙放射線環境についても、詳細な解析を進めています。「きぼう」日本実験棟の構造や与圧壁の厚さの詳細情報や、「きぼう」船内実験室 17 ヶ所に設置されている放射線環境モニタリング実験（Area PADLES）の測定結果を組み合わせて、以下を行っています。

・実測できない人体深部の被ばく線量やリスク評価の計算精度を向上させる研究
・次世代有人活動（地磁気圏外での有人ミッション）において、事前に被ばく線量予測をする宇宙放射線シミュレーションコードの開発のための基礎データとしての利用。

これらの研究開発には、国内の研究機関では、高エネルギー加速器研究機構、日本原子力研究機構、放射線医学総合研究所との研究協力が進んでいます。

今後への波及

宇宙活動への貢献

宇宙飛行士の軌道上の滞在期間の決定は、設定した防護のための被ばく線量の制限値に対して、線量計測の結果から算定する等価線量との比較によって決定されます。そのため、高精度な線量計測手法や算定・評価手法の確立が必要です。月・惑星探査では、ISS 軌道よりも被ばく線量がはるかに高いことが予想され、宇宙飛行士の搭乗計画はより宇宙放射線計測のデータに依存することになります。マトリョーシカ実験の結果は、次世代の有人宇宙計画立案のための基礎データとなります。

2008 年 9 月から搭載されている生物試料用の被ばく線量計（Bio PADLES）の計測結果、国際協力実験を含む実験概要・線量計測結果は、以下の JAXA 公開データベースに掲載され、今後の宇宙実験計画、リスク評価、宇宙環境利用に関する教育・普及活動に役立てられています。

http://iss.jaxa.jp/kiboexp/spacerad/

宇宙放射線計測技術(PADLES)を用いた国際共同実験(その2)

Dosimetric PADLES / アルトクリス実験

代表研究者：永松 愛子 (JAXA) / Marco Casolino (Universita` di Roma Tor Vergata)

目的

アルトクリスプロジェクトは、ISS の宇宙飛行士の個室で使われている遮へい材 (ポリエチレン) の宇宙放射線に対する遮へい効果を研究する、イタリア核物理研究所 (INFN) と JAXA との国際協同実験です。JAXA が開発した線量計 PADLES を用いた宇宙船内において、生物や人体への放射線の影響をできる限り減少させる適切な遮へい材とその厚さを検討するための基礎データを得ました。

概要

ISS のズヴェズダ (ロシアのサービスモジュール) とピアース (ロシアのドッキング室) において、宇宙飛行士の個室で使用されているものと同じ厚さのポリエチレンブロックに取り付けた線量計とポリエチレンブロックで遮へいしていない線量計を用いて、宇宙放射線による被ばく線量の計測を行いました (図 1)。

2005 年 12 月から 2007 年 10 月までズヴェズダとピアースにて、4 回の搭載実験を実施しました。この実験で使用した PADLES 線量計には、個人被ばく線量をより正確に評価するための生体等価物質 (NAN-JAERI*) を封入し、宇宙飛行士の個人被ばく線量計への適用評価もあわせて行いました (図 2)。

* 日本原子力研究開発機構 津田氏提供。

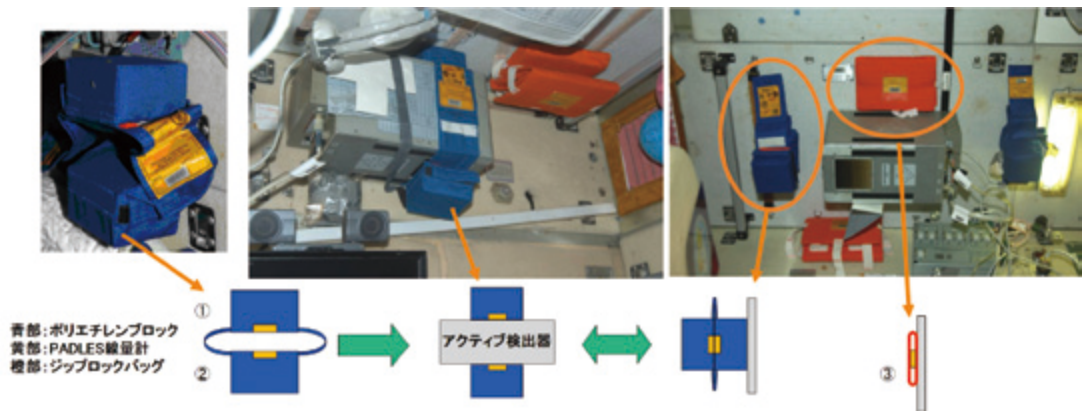


図 1　ISS ロシアモジュール船内での実験の様子
①ポリエチレンブロック上部【遮へいあり】、② ポリエチレンブロック下部【遮へいあり】、③ 船壁【遮へいなし】

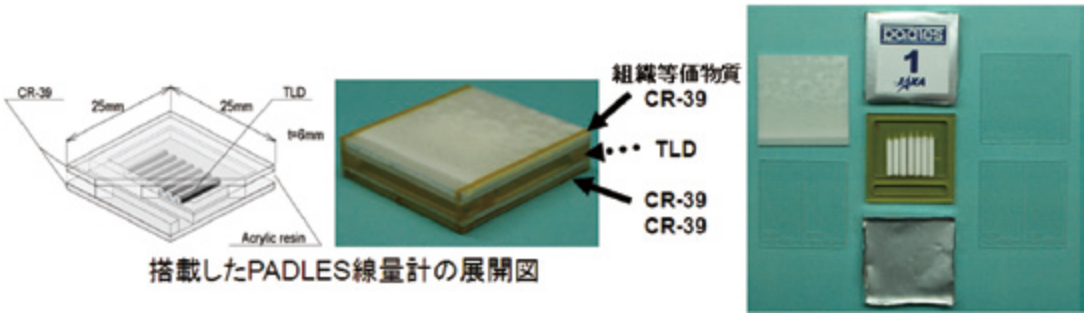


図 2　PADLES 線量計

成果

本国際協同研究は、2008 年の「きぼう」日本実験棟の打上げ前の、ISS における PADLES 線量計の軌道上検証を目的として実施され、以下の 3 つの成果が得られました。

①開発中の PADLES 線量計の測定原理検証

本フライト実験機会を用いて、線量当量算出のために必要な LET の計測技術の確立と、様々な宇宙放射線が混ざった状態において被ばく線量を算出する手法を確立しました。

②宇宙飛行士の個人被ばく線量計測のための適用評価

PADLES 線量計の一部に、人体組成を再現した生体等価物質を封入し、線量計素子のみと、生体等価物質を組み合わせた線量計との比較を行ったところ、生体組織等価物質の有無による線量結果の差異はなく、線量計素子のみで十分適用できることが確認できました。

③宇宙飛行士の個室における遮へい材の効果

遮へい材がある場合は、無い状態に比べ、吸収線量が約 6% 低減されていました。また、高 LET（人体に与えるエネルギーが大きい）領域の宇宙放射線のフラックス（単位時間・面積あたりに入射する重粒子の個数）は、15% ～ 24% 低減していることもわかりました。

今後への波及

地上への還元

広いエネルギー領域にわたり多くの種類を含む宇宙放射線の計測技術開発や実測結果に基づいた被ばく管理に関する知見は、素粒子実験などに使われる加速器施設をはじめ、原子力施設、医療・研究施設等、放射線の管理が必要となる分野への利用・応用が期待できます。

宇宙活動への貢献

地球は地磁気によって宇宙放射線から守られていますが、将来の地球磁気圏外での有人宇宙探査に向けた宇宙放射線防護対策のために、効果的・効率的な遮へい材料の選定、将来の宇宙船設計のための基礎検討が必須です。本実験の結果は、次世代有人探査での宇宙放射線防護体系の構築のための基礎データとなります。

国際宇宙ステーションでのハイビジョン撮影開始と宇宙放射線の影響調査

ロシアサービスモジュールにおける高精細画像カメラ実験（HDTV in SM）

代表研究者：村上 敬司（JAXA）

目的

高精細画像カメラ（HDTV）を ISS のロシア　サービスモジュール（SM）に搭載して撮影を行います。

また撮像素子（CCD, CMOS）をサンプルとして搭載し、宇宙放射線による HDTV カメラの CCD 撮像素子と他の撮像素子サンプルへの損傷の影響を評価します。

概要

ISS 船内で放射線環境の計測器と、HDTV カメラ、撮像素子サンプル（CCD、CMOS）、PADLES 線量計（p.86）を ISS に保管した後（写真参照）、地上に回収し、宇宙放射線と撮像素子に発生した損傷（白傷）の関係を把握します。また、ISS 飛行後の CCD と、地上で放射線照射試験をした後の CCD も比較します。HDTV カメラは撮影も実施して、映像取得を行います。

図 1　実験開始時の ISS

図 2　HDTV カメラ
HDCAM HDW-700A（提供：SONY）

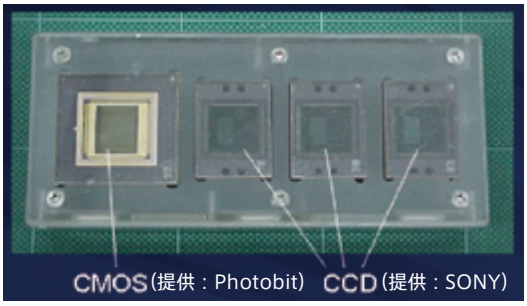


図 3　サンプルホルダー

成果

HDTV カメラは宇宙でも使える

① ISS の稼働開始と共に高精細映像の撮影を開始しました。

②放射線量が増えると、それに比例して白傷の数は増えることが判りました。

③ CCD に当たった重粒子の数と全ての白傷の数は合わず、重粒子は白傷発生の主な原因ではないこ

とが判りました。

④ ISS 船内に保管する日数が増えるとそれに比例して白傷の数は増加します。しかし、カメラを放射線の影響があまりない地上に回収して、室温程度の温度でしばらく保管すると、宇宙の放射線の影響で劣化した CCD 素子の損傷が復旧し、白傷が減少していくことが判りました。

⑤ CMOS 撮像素子は、地上の保管品と ISS 船内保管後に地上に回収した品とでは撮影した画像の明るさを比較した結果差異が無く、放射線に強いことが判りました。

⑥放射線が様々な方向から等しく降り注ぐ宇宙実験では、放射線が一方からとなる地上実験の倍の白傷が発生することが判りました。

ロシアサービスモジュール「ズヴェズダ」内にて撮影

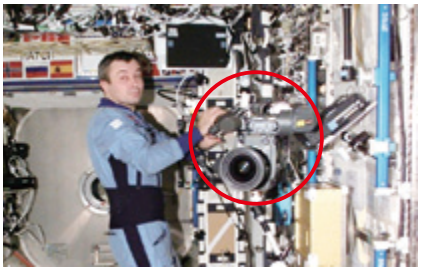


図 4　HDTV カメラ撮影風景

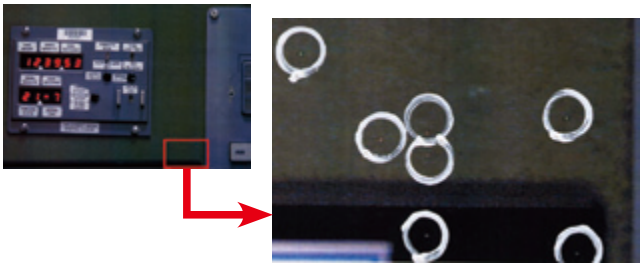


図 5　HDTV 映像の白傷例 (2001 年 10 月 21 日撮影)

今後への波及

宇宙活動への貢献

①数か月間であれば CCD 撮像素子の HDTV カメラが使用できることがわかり、CCD 撮像素子の損傷傾向から時期を推定して新品の CCD カメラとの交換を行うという運用のスタイルを確立しました。

2007 年以降、現在 (2013 年 2 月) にいたるまで、マルチプロトコルコンバータ MPC (p.98 高精細ビデオ (HDTV) 画像伝送処理システム参照) と、交換打上を継続している CCD HDTV カメラ (Canon　XH G1) を組合せて、宇宙からの生中継を常時実施しています。

② CMOS 撮像素子が放射線に強いという結果から、CMOS カメラによって傷のない良好な画像撮影運用を長期間実施できる見込みが得られました。2011 年以降、CMOS HDTV カメラを打ち上げて ISS 船内の撮影、船外の地球観測撮影 (p.167 HDTV-EF 参照) に貢献しています。

ISSの高精細ビデオカメラと通信衛星の間を取り持つデータ処理システム

高精細ビデオ（HDTV）画像伝送処理システム

代表研究者：村上 敬司（JAXA）

目的

高精細ビデオ（HDTV）画像信号をISSの通信方式である光信号データに変換し、衛星回線へ伝送して地上で見ることを可能にする伝送装置システムを開発しました。

概要

JAXAが開発したのは、画像伝送処理システム装置「マルチプロトコルコンバータ（MPC）」です。小型軽量なMPCは高精細（解像度が高い）ビデオカメラからの映像信号を受信してISSの高速系通信形式である光信号データに変換して衛星通信装置へ転送します。地上に転送された映像データは市販のコンバータによりHDTVモニタに表示ができるように変換されてリアルタイムで視聴できます。

また地上に転送された映像データは市販されている再生ソフトや編集ソフトを用いてパソコンで簡単に再生視聴や編集利用ができます。

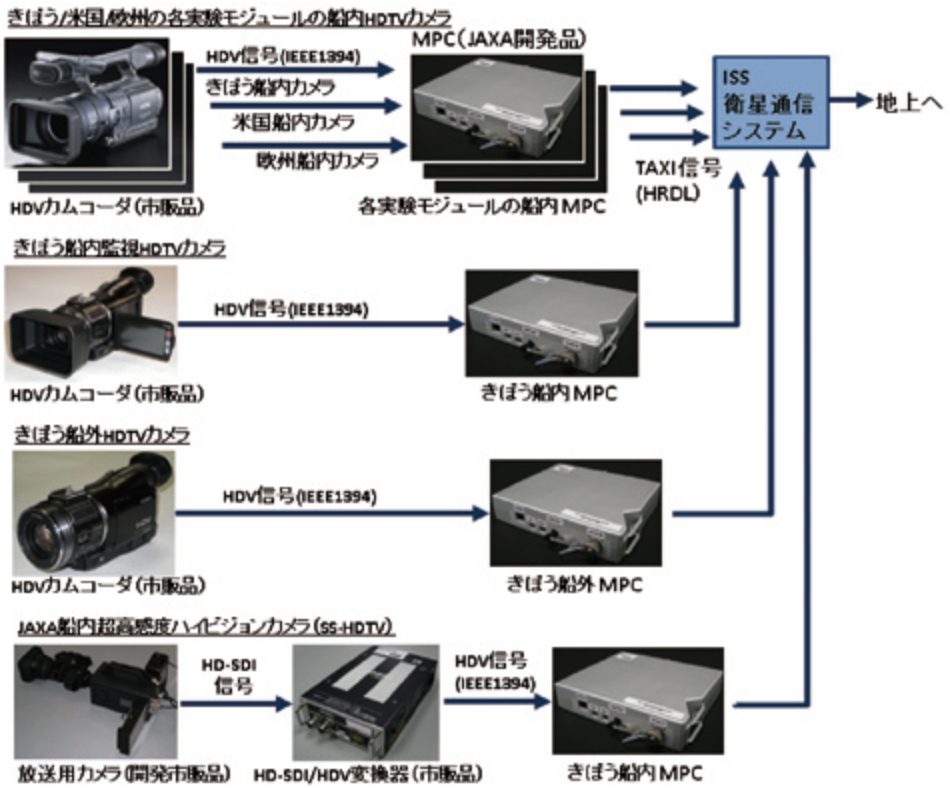


図1　ISSのMPC使用構成

成果

国際的に様々な高精細映像を地上に届ける中継ぎとして活躍

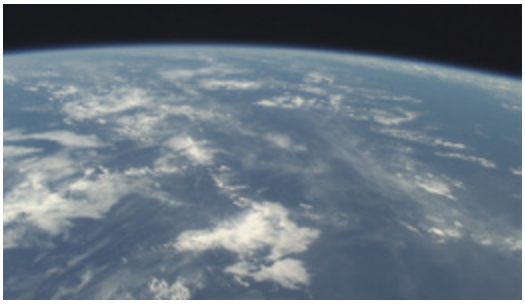
2007 年 10 月、NASA の協力のもと MPC による ISS 最初の高精細ビデオ (HDTV) 映像の地上伝送に成功しました。

それ以降、MPC は NASA にも高く評価され、ISS の正式なシステム機器として組み込まれ、「きぼう」のみならず、米国や欧州の実験モジュールで HDTV 映像の地上転送に活用されています。

さらに、ISS からの HDTV 映像伝送だけでなく、ハッブル宇宙望遠鏡の修理ミッション (2009 年スペースシャトルで実施) でも使われ、修理風景の高精細映像を地上に伝送するのに役立ちました。以降、NASA は JAXA から提供を受けた MPC をスペースシャトルのシステム機器としても活用しました。

2007 年 11 月以降、テレビ放送でご覧いただいている各国首脳と宇宙飛行士たちの生中継、ISS 船内で撮影された映像 (CM なども含む)、ISS から撮影したスペースシャトル等の宇宙船、スペースシャトルから撮影した ISS の映像や、科学展／映像展でご覧いただいている ISS からの地球観測映像、宇宙飛行士による宇宙芸術映像等の HDTV 映像は、全て MPC を通して地上に伝送されたものです。

若田飛行士　きぼう船内レポート
(きぼう船内 HDTV カメラで撮影)



青い地球 (きぼう船外 HDTV カメラで撮影)

写真 2　MPC で地上へ転送された HDTV 画像 (HDTV 映像からのキャプチャ写真)

今後への波及

地上への還元

引き続き ISS の活動や地球観測の HDTV 映像を地上へ伝送することで、一般の学生 / 研究者への科学利用、一般の方々への科学啓蒙に貢献します。

宇宙活動への貢献

引き続き ISS の宇宙飛行士船内実験活動や修理作業の HDTV 映像を地上へ伝送することで、宇宙飛行士の活動を支援します。

宇宙用超高感度ハイビジョンカメラによる撮影～地球と宇宙が織り成す美しい映像～

超高感度ハイビジョンカメラシステム（SS-HDTV）

代表研究者：田附 英樹（日本放送協会）

目的

従来のハイビジョンカメラでは感度が足りないため撮影できず、これまで宇宙飛行士が肉眼でしか見ることのできなかった様々な光景を動画撮影する目的で、ISS 内に設置できる宇宙用超高感度ハイビジョンカメラシステム（SS-HDTV）を NHK と共同開発しました。このシステムで撮影した地球の映像や宇宙空間での現象をテレビ番組放送・インターネット番組配信、科学館での映像展示等によって広く一般に届けます。

概要

SS-HDTV のカメラには、通常の CCD カメラの数百倍の感度を持ち、近赤外線に対する感度もある「EM-CCD 撮像素子」を採用して、超高感度カラー撮影を実現しました。NHK ／ JAXA 共同でカメラ本体や撮影時の窓ガラス反射映り込みを防ぐ専用暗幕等の機材開発を行い、ロシアのプログレス補給船で 2011 年 4 月に ISS へ打ち上げました。その後、約半年間（2011 年 7 月～ 11 月）にわたり、古川宇宙飛行士が中心となって地球の姿を撮影しました。オーロラ・大気光・流星・雷雲上に発生するスプライト光等の撮影対象に応じて様々なレンズやフィルターを組合せて撮影します。

撮影映像は SS-HDTV から HDTV 画像伝送処理システム MPC（p.100）を通じて地上に伝送すると共に、レコーダの記録メディア（SD カード）を地上に持ち帰りました。地上へ伝送された撮影映像と SD カードで持ち帰られた撮影映像を NHK が編集してテレビ番組 / インターネット番組で放送 / 配信、また科学館でも上映展示しました。

図 1　SS-HDTV カメラ外観

成果

感動の映像撮影に成功

①夜光雲、雷、スプライト、オーロラ、大気光、流星、黄道光、夜景、日の入り、月の入り 等の撮影

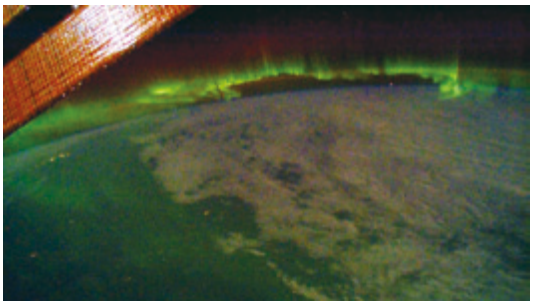
に成功しました。

②撮影した映像を使用したテレビ番組放送、インターネット番組配信、科学館・映像ギャラリーの上映展示により国民の皆様へ成果映像を届けることができました。

大勢の視聴者／観客から「感動」「科学に啓蒙された」「宇宙観・地球観が啓発された」といった好意的な反響をいただきました。

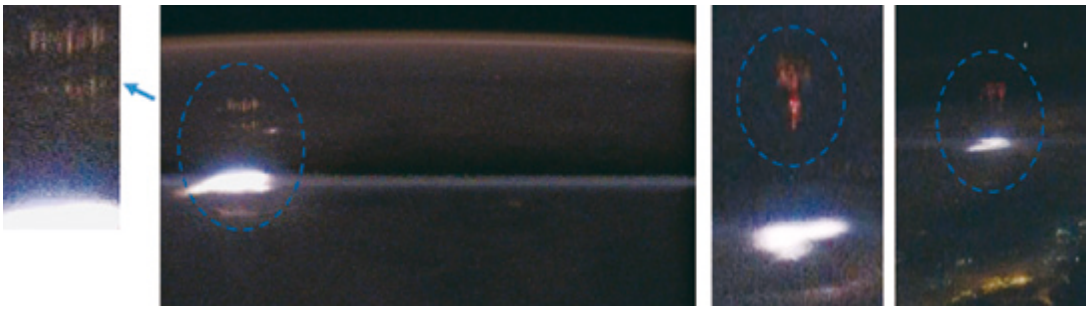
古川飛行士　ISS の地球観測用窓（キューポラ）からの地球撮影ミッションの様子

図 2　SS-HDTV 撮影風景



オーロラ

黄道光（画面中央の地球の縁の上に淡くかすかに見える光）



雷雲上に発生したスプライト

図 3　SS-HDTV カメラが捉えた現象映像　©NHK/JAXA

今後への波及

地上への還元

本研究で取得された映像が引き続き公開・利用されていくことで、地球現象の解析・発見、科学活動・教育の啓蒙、宇宙観・地球観の啓発に貢献していくことが期待できます。

宇宙活動への貢献

SS-HDTV システムは引き続き宇宙からの地球観測撮影に貢献できます。また本研究の機材開発・利用過程の経験を活かして次世代の新型超高感度ハイビジョンカメラの開発・利用をよりスムーズに実施することが出来るようになります。

「こうのとり」宇宙船（HTV）が大気圏に突入して燃え尽きる様子を記録する球体

i-Ball および国際宇宙ステーションからの光学観測による宇宙機再突入データ取得

代表研究者：佐藤 直樹（JAXA）

目的

i-Ball は宇宙船などが宇宙から戻ってきて大気圏へ再突入する時の各種データ（位置、速度、加速度、温度、画像データなど）の取得を目的とした装置であり、「こうのとり」3 号機が再突入時の熱で燃え尽きるときのデータを取得しました。取得したデータは、「こうのとり」が燃え尽きずに破片が落下すると予想されるエリアの精度を高めて落下予想域を縮小するために使用したり、将来の再突入機の研究開発に役立てます。

概要

i-Ball は（株）IHI エアロスペースが開発し、「こうのとり」3 号機で打ち上げられました。軌道上でいったん ISS 内部に保管され、「こうのとり」が ISS から離れる前に「こうのとり」の船内（宇宙飛行士が入れる 1 気圧の区画）に再搭載されました。星出宇宙飛行士が起動操作を行った後、「こうのとり」3 号機は ISS から離脱し、大気圏に再突入しました。i-Ball は搭載しているタイマーと大気圏再突入時の加速度を検知することでデータ取得を開始し、パラシュートで海に着水した後、通信衛星経由で再突入データを送信しました。また、「こうのとり」4 号機では i-Ball に加えて国際宇宙ステーションからデジタルカメラやビデオカメラを使って「こうのとり」が再突入する様子を撮影しました。

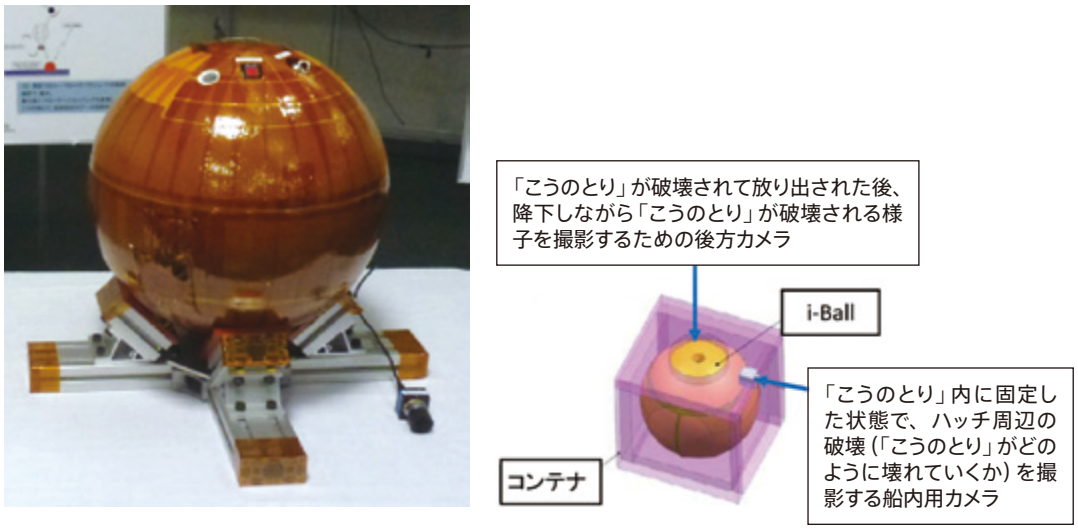


図 1　i-Ball の写真とカメラの設置位置

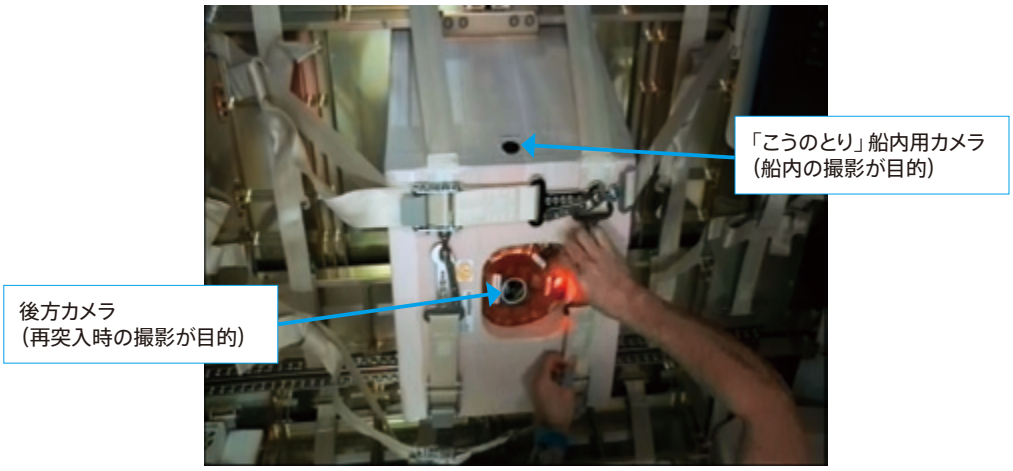


図 2　星出宇宙飛行士による i-Ball 起動の様子
赤く光っているのは電源スイッチ。i-Ball は、後方カメラと、船内カメラの 2 台のカメラを搭載。

成果

「こうのとり」破壊のタイミングをキャッチ

「こうのとり」3 号機の再突入時に、加速度、位置、温度、画像などのデータの取得に成功しました。また、「こうのとり」4 号機でも加速度、位置データの取得および国際宇宙ステーションからの「こうのとり」撮影に成功しました。

取得した画像から「こうのとり」船内（ハッチ周辺など）の破壊のタイミングが推定できました（ハッチとは、宇宙機や ISS のドアのこと）。加えて国際宇宙ステーションからの撮影により「こうのとり」が二つに分割する様子やその後小さな破片に分解していく様子がわかりました。また、取得した再突入データから「こうのとり」3 号機および 4 号機が破壊される高度を推定しました。再突入軌道経路の差異による破壊高度への影響を評価するために「こうのとり」5 号機でも継続してデータ取得することを計画中です。

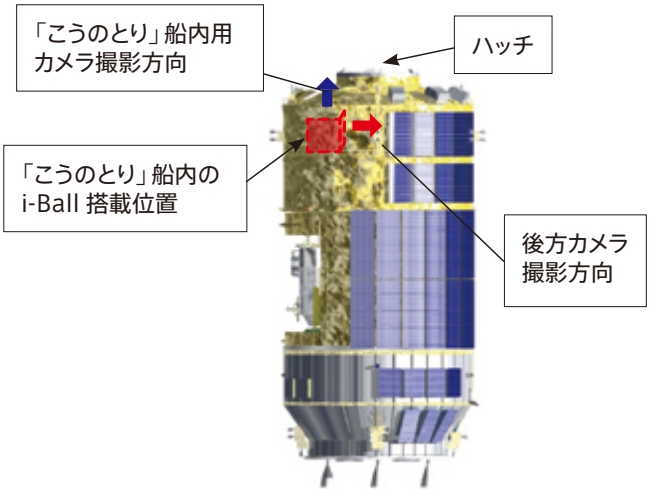


図 3　i-Ball と「こうのとり」の位置関係
i-Ball は「こうのとり」船内に図 2 に示すように設置されます。
船内の位置は図の通りです。

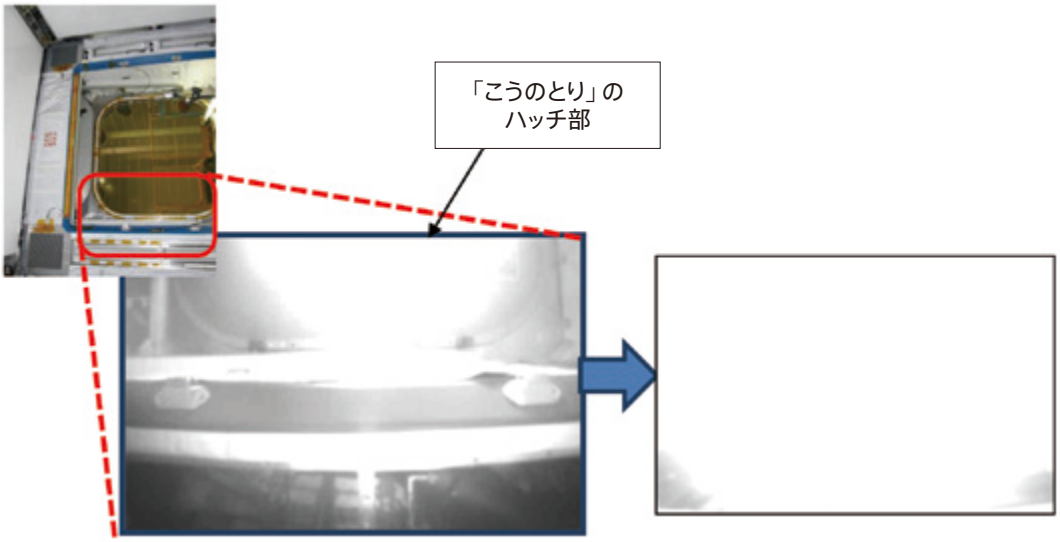


図 4　i-Ball 船内用カメラで撮影された破壊の様子（「こうのとり」3 号機）
中央の図は i-Ball により取得された「こうのとり」船内の画像。左上の図は地上で船内を撮影したもので、両者に共通する部品が見えます。右下の図は i-Ball により中央の図よりも後に撮影された画像（位置は同じ）で、白く見えるのは全体に光が入ってきているためであり、ハッチが破壊されたものと考えられます。

図 5　再突入時に撮影された i-Ball 後方カメラの画像（「こうのとり」3 号機）
画像中央で光っているのは「こうのとり」3 号機の破片が燃えている様子と推測されます。

図 6　国際宇宙ステーションから撮影された再突入中の「こうのとり」の様子（「こうのとり」4 号機）
画像右側で光っているのが「こうのとり」4 号機が二つに分割した前後の様子と推測されます。

今後への波及

地上への還元

i-Ball が再突入時に燃えないように開発された耐熱素材の地上への応用や、地上でも「こうのとり」のように破壊されるものの中から破壊事象の観測を行うといった応用が考えられます。

宇宙活動への貢献

「こうのとり」再突入時に、燃え尽きずに破片が落下すると予想されるエリアの精度を高めることで、予想範囲を縮小して安全性を向上させます。また、得られた耐熱素材の温度データなどは将来の再突入機の研究開発に利用します。

Pick Up

知 っ て な る ほ ど ！ 豆 知 識

「こうのとり」（HTV）概要

「こうのとり」宇宙ステーション補給機（HTV）は、国際宇宙ステーション（ISS）に、食料や衣類、実験装置などの補給物資を運ぶための輸送手段として、日本が開発した初の宇宙船です。最大 6 トンの物資を ISS に運ぶことができます。物資の補給を終えた後は ISS の不用品を積み込み、大気圏へ再突入させ燃やして廃棄します。

推進モジュール

4基の球形の推進剤タンクに、最大2.4トン(通常2トン)の推進剤を搭載します。推進剤タンクから4基のメインエンジン（2基x2系統）及び28基の小型スラスタ（14基x2系統）に推進剤が供給され、軌道変更や姿勢制御のために使われます。

補給キャリア与圧部

ISS船内用の補給物資（実験装置、物資輸送用のバッグ、飲料水、衣料など）を搭載します。補給物資をISS船内に移した後は、ISSの不用品などを搭載します。内部は1気圧に保たれ、温度もコントロールされます。またISS結合中はファンによりISSとの間の空気を循環させます。

補給キャリア非与圧部

側面に大きな開口部があり、ISS船外用の補給物資（実験装置や交換機器など）を「曝露パレット」に搭載して運びます。

電気モジュール

航法(注1)、誘導(注2)、制御、通信、電力などの電子機器を搭載し、自律的に、あるいは地上からのコマンド（指令）に従って「こうのとり」をコントロールします。いわば「こうのとり」の頭脳といえます。また「こうのとり」各部への電力供給も行います。

共通結合機構

ISSとの結合部でクルーがハッチから「こうのとり」船内（与圧部内）に乗り込みます。ハッチ1.27m×1.27mの四角形で、大型の実験装置も出し入れすることができます。

曝露パレット

船外物資（最大1.5トン）を搭載して運ぶための荷台です。物資をISSに移す際には、補給キャリア非与圧部から取り外されて、「きぼう」日本実験棟の船外実験プラットフォームに置かれます。物資を移した後、再び補給キャリア非与圧部に収納され、「こうのとり」とともに大気圏に再突入します。

（注1）目的地に辿り着くため、自分が飛行している位置、速度、姿勢などを正しく測定、決定する機能。GPS（Global Positioning System：全地球測位システム）はその代表例。
（注2）様々な外乱（スラスタの推力誤差、加速度センサの誤差、姿勢決定誤差、GPS測位誤差等）により生じる飛行経路誤差を修正し、目標軌道に所定の精度で投入する機能。

■米国の民間宇宙船に、日本の PROX（ 近傍通信システム ）が活躍

民間宇宙船（シグナス）が ISS に接近する際、無線通信により ISS の位置、速度、時刻などの情報を受けとったり、逆にシグナスの飛行情報を ISS 側へ送ったりする役目を果たすのが「近傍接近システム」です。

近傍接近システムを搭載したシグナスは「きぼう」日本実験棟に搭載されている PROX（近傍通信システム）を利用しますが、これは「こうのとり」の開発を通じて獲得した技術です。

世界初、アイソン彗星を宇宙から4K動画撮影

超高感度 4K カメラシステム

代表研究者：伊藤　剛（JAXA）

目的

巨大彗星になることが期待されたアイソン彗星を宇宙から撮影する目的で、超高感度 4K カメラシステムを NHK と共同開発しました。4K カメラシステムはアイソン彗星以外の天体現象や地球の高精細映像取得にも使用されます。

概要

市販されている 4K カメラとその周辺機器を宇宙搭載化することにより、超高感度 4K カメラシステムの開発を行いました。打ち上げたカメラは、現行ハイビジョンの 4 倍の画素数を有する高解像度カメラで、さらに従来機の 8 倍を超える超高感度化をはじめ、彗星撮影のために特別な改造を行いました。

超高感度 4K カメラは、宇宙ステーション補給機「こうのとり」4 号機により 2013 年 8 月に ISS へ打ち上げられました。撮影したハイビジョン映像はリアルタイムで地上に伝送され、より高解像度な 4 K映像はレコーダの記録メディアに録画し地上に持ち帰ります。

図 1　搭載した民生品の超高感度 4K カメラ

成果

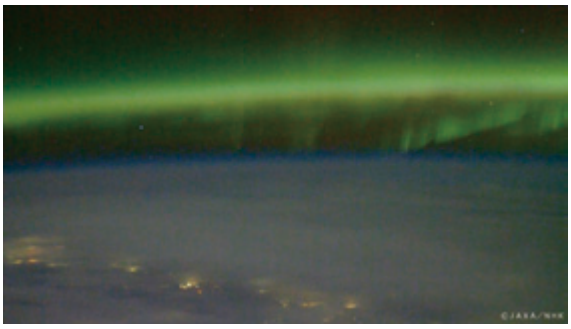
ISS に滞在中の若田宇宙飛行士が、世界初となる宇宙からの 4K 動画撮影に挑み、アイソン彗星の撮影に成功しました。また、超高感度 4K カメラにより、従来よりも高精細な地球の夜景やオーロラ、流星の映像を取得することができました。

若田宇宙飛行士のコメントを交えた宇宙からの生中継をはじめ、4 Kカメラにより撮影した映像を使用したテレビ番組放送や映像展示により、多くの人々に宇宙飛行士が軌道上で見る生の光景に近い宇宙の映像を届けることができました。

図 2　超高感度 4K カメラと若田宇宙飛行士

アイソン彗星

日本の夜景（関東地方）



オーロラ

図 3　超高感度 4K カメラが捉えた映像　©JAXA/NHK

今後への波及

地上への還元

撮影した映像が引き続き公開・利用されることで、宇宙の自然現象に関する解析・発見、宇宙教育活動に貢献していくことが期待されます。

宇宙活動への貢献

超高感度 4K カメラシステムは今後も、宇宙からの地球撮影や天体現象の映像取得に貢献します。また、4K カメラの開発や軌道上運用により得た知見は、次世代のカメラシステム開発に活用されます。

応用利用

医薬品などの開発につながる高品質なタンパク質の結晶を宇宙でつくる
高品質タンパク質結晶生成実験（GCF, NGCF / PCG） …… 112

宇宙でナノレベルの骨格を持つ新しい機能性材料を作成する
微小重力環境でのナノスケルトン作製（Nanoskeleton） …… 116

宇宙でナノレベルの凹凸を作る
微小重力環境を利用した２次元ナノテンプレートの作製（2DNT） …… 118

光を操る結晶をつくる
３次元フォトニック結晶生成実験（3DPC） …… 120

医薬品などの開発につながる高品質なタンパク質の結晶を宇宙でつくる

高品質タンパク質結晶生成実験（GCF, NGCF / PCG）

代表実施機関：JAXA

目的

タンパク質は酵素やホルモン、筋肉を構成する成分であり、生命活動の源です。ヒトの体のなかだけでも 10 万種類以上、自然界では約 100 億種類も存在し、それぞれ異なる形（立体構造）をしています。その構造によってそれぞれのタンパク質の機能が決まります。たとえば病気の原因となるタンパク質の構造がわかれば、そこに結合する薬を設計し、治療や症状の軽減につなげることができます。構造を知るための手段の一つとして、タンパク質の結晶に X 線を当て、反射される X 線を解析する方法があります。しかし、そのために必要な高品質な結晶を得ることはなかなか難しいのが現状です。それを解決する手段が宇宙の無重力環境を利用することです。宇宙では、濃度の違いで水溶液が上下左右に流れる「対流」や、重いものが沈む「沈降」がないため、タンパク質分子がきれいに並んだ結晶をつくることができます。宇宙環境を利用して、新しい医薬品の開発、廃棄物の分解、エネルギー生産につながるようなタンパク質の構造を解明することを目指しています。

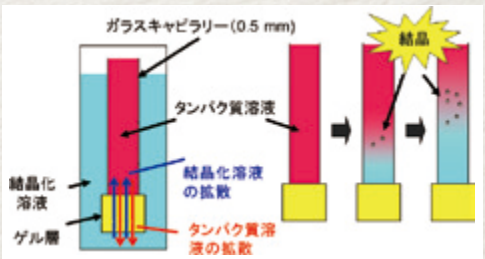
概要

JAXA では 2003 年以来、ロシアのサービスモジュールを利用して 9 回のタンパク質結晶生成実験（GCF, NGCF）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。この技術に基づき、「きぼう」日本実験棟で 2009 年から 6 回の実験（PCG 第一期）が実施され、さらに 2014 年から 6 回の実験（PCG 第二期）を開始しています。タンパク質の結晶化には、液液拡散法の 1 つであるカウンターディフュージョン法（コラム参照）に基づき、欧州宇宙機関とグラナダ大学が開発した結晶生成容器（GCB）、さらに JAXA 独自で改良した結晶生成容器（JCB）を使用しています（図 1）。当初は GCB が使用されていましたが、今はより多くのタンパク質を搭載できる JCB を使用して実

Pick Up

知ってなるほど！豆知識

タンパク質結晶生成の原理　カウンターディフュージョン法とは？



タンパク質溶液と結晶化溶液がゲル層を介してお互いに拡散（液液拡散）をすることで、時間とともにガラスキャピラリーの中で様々なタンパク質濃度と結晶化溶液濃度の勾配を形成します。そのため、一本のガラスキャピラリーで、幅広い条件を一度にスキャンすることができます。

験を行っています。JCB は高品質タンパク質結晶生成用セルユニット（図 2）に搭載され、ロシア連邦宇宙局の協力により、プログレス補給船またはソユーズ宇宙船 によって ISS に打ち上げられています。ドッキング後すぐにセルユニットは「きぼう」に運ばれて、タンパク質結晶生成装置（PCRF）（図 3）に設置され、20℃の安定した温度条件下で約 1.5 ～ 4 ヶ月間結晶生成が行われます。実験終了後はソユーズ宇宙船によって地上に帰還し、世界最高性能の大型放射光施設である SPring-8 などを利用して、タンパク質の構造解析が行われます。

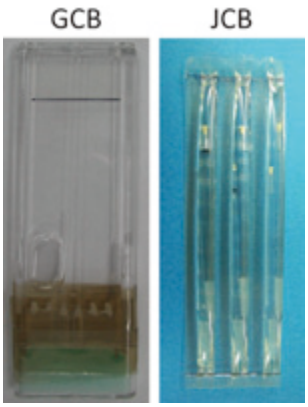


図 1　タンパク質結晶生成容器
左が欧州宇宙機関とグラナダ大学が開発した結晶生成容器 GCB（Granada Crystallization Box）で 6 つのキャピラリーで 1 種類の結晶化条件のタンパク質試料を搭載できます。右は JAXA が改良した結晶生成容器 JCB（JAXA Crystallization Box）で、1 つの JCB で 6 種類の試料を搭載可能です。

図 2　セルユニット
JCB または GCB を収容するための機器であり、「きぼう」での実験で使用しています。一つのセルユニットで最大 144 種類までのタンパク質試料を収容可能です。

図 3　タンパク質結晶生成装置
宇宙環境を利用してタンパク質結晶を生成するための装置です。「きぼう」が完成する前は NASA やロシアの装置を使用していましたが、「きぼう」では JAXA の装置（PCRF）を使用しています。温度を 0 ～ 35℃で制御可能で、セルユニットを最大 6 個搭載することができます。

成果

多くのタンパク質で地上より高品質の結晶生成に成功

ロシアのサービスモジュールの利用から、2014 年までに 17 回の実験が実施され、のべ 500 種類以上のタンパク質が打ち上げられました。技術開発を重ねた結果、タンパク質試料について最適な条件設定がされた場合は、70% 程度の確率で構造解析のパラメータとなる分解能（精密さ）とモザイシティ（正確さ）が向上した結晶が得られることがわかってきました。

主な成果をいくつか紹介します。

①デュシェンヌ型筋ジストロフィーの進行に関与するタンパク質

裏出良博（筑波大学　教授（元大阪バイオサイエンス研究所　研究部長））

筋ジストロフィーは筋萎縮と筋力低下が進行していく遺伝性筋疾患で、未だ根本的な治療方法が確立していない難病です。宇宙実験で得られた結晶から、この病気に関連するタンパク質と、薬の開発に重要な化合物との結合状態を詳細に確認できました（図 4）。大阪バイオサイエンス研究所では、宇宙実験の結果を用いて、製薬企業との協力により筋ジストロフィーに有効な薬物候補化合物を開発し、動物による有効性や毒性の評価を実施しています。

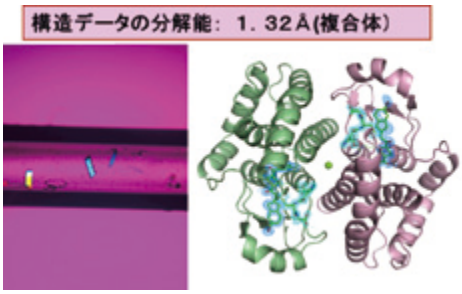


図 4　筋ジストロフィーの進行に関与するタンパク質
© 大阪バイオサイエンス研究所 / 丸和栄養食品

②合成繊維分解酵素

樋口芳樹（兵庫県立大学　教授）

合成繊維やプラスチックなどの人工合成物は自然に分解しないため、廃棄物などによる環境影響が大きな問題となっています。そのため、人工合成物の一つであるナイロンオリゴマーを分解する酵素の構造と機能を研究し、新しい酵素の開発を目指しています。宇宙実験により、この酵素の水素原子を含む詳細な構造が明らかになり、酵素触媒メカニズムの理解が格段に深まりました（図 5）。現在、兵庫県立大学では、酵素としてさらなる高性能化を図り、目的の反応に適した新たな酵素の開発を目指しています。

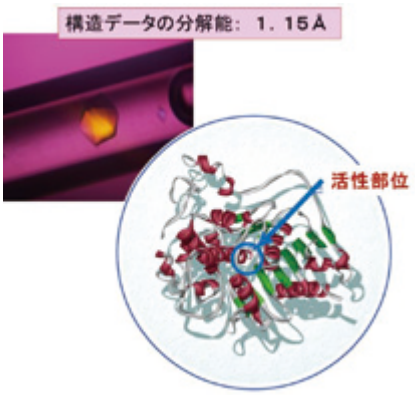


図 5　合成繊維分解酵素　© 兵庫県立大学

③セルロース分解酵素

伊中浩治（丸和栄養食品株式会社　取締役）

環境問題を解決するため、大気中の CO_2 を増加させない資源として、トウモロコシなどの穀物を原料とするバイオエネルギーが注目を集めています。しかし、この方法は食糧となる穀物を燃料用に栽培するため、発展途上国が食糧不足になるといった別の問題が起こっています。そこで、食用ではない木や草の細胞壁や繊維の主成分であるセルロース分解によるエネルギーの生産を目指しています。宇宙実験では 0.93Å（オングストローム：100 億分の 1 メートル）の分解能を取得し、構造を詳細に解明することに成功しました（図 6）。

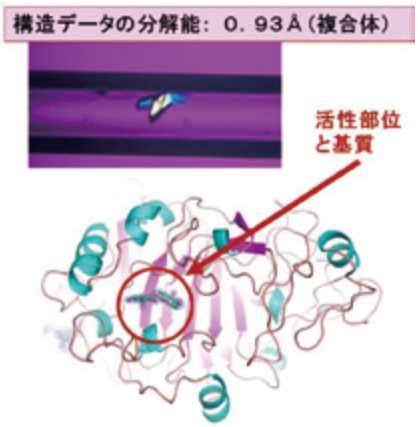


図 6　セルロース分解酵素　© 丸和栄養食品

④多剤耐性菌・歯周病菌の生育に重要なペプチド分解酵素

阪本泰光（岩手医科大学　助教）

様々な抗生物質が効かない多剤耐性菌は、院内感染症の原因のひとつであり、その治療は困難です。多剤耐性菌に対しては、これまでの抗生物質とは異なるメカニズムの薬が必要となります。宇宙実験により多剤耐性菌・歯周病菌に対する新たな抗菌薬のターゲットとなる可能性のある酵素の立体構造を決定し、この酵素の触媒メカニズムの理解に大きく貢献しました。今後、今回の成果を基に多剤耐性菌等の病原性細菌に効果のある新規抗菌薬の開発を目指す予定です。

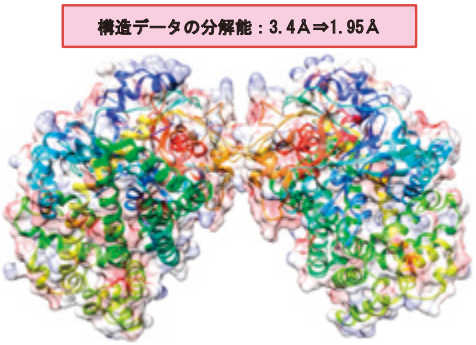


図 7　ペプチド分解酵素の全体構造
© 岩手医科大学 / 昭和大学 / 長岡技術科学大学

今後への波及

地上への還元

タンパク質構造に基づく研究開発は、生命現象の解明を目指すライフサイエンスや、エネルギー・環境課題解決の鍵となる酵素の開発、及び疾病治療のための新薬の開発などを目指して、世界中の様々な研究機関や企業が取り組んでいる重要な分野です。

宇宙実験で得られたタンパク質の高品質な結晶によって精密な構造解析が可能になり、新しい医薬品、環境にやさしい廃棄物の処理方法、新しいバイオエネルギーの開発などにつながります。

宇宙でナノレベルの骨格を持つ新しい機能性材料を作成する

微小重力環境でのナノスケルトン作製（Nanoskeleton）

代表研究者：阿部 正彦（東京理科大学）

目的

ナノサイズの穴をもつことで表面積を大きくし、骨格部分そのものが高い機能性を発揮する「ナノスケルトン」という新素材（図 1）を、無重力環境で作製します。ナノスケルトンは、穴の中に様々な材料物質を取り込むことが可能で、例えば色素を取り込んで色素増感太陽電池の電極に応用したり、触媒を取り込んで有害物質の除去に応用することができます（コラム参照）。対流のない宇宙でナノスケルトンを作成することで、地上における製造プロセスの設計に必要な、正確な実験データを取得します。

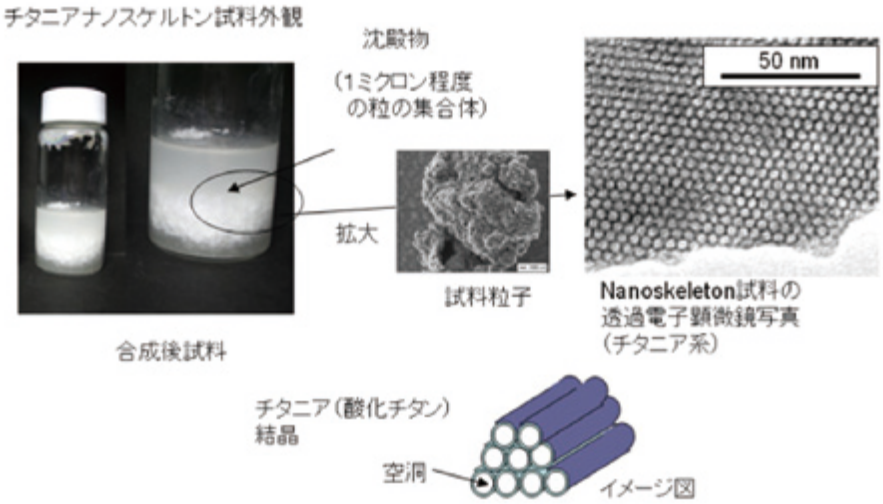


図 1　ナノスケルトン（白い粉末状の素材です）

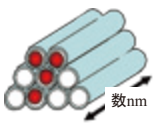
Pick Up

知ってなるほど！豆知識

ナノスケルトンとは

①ナノレベルの多孔質
②骨格（孔壁）が高い機能性を有する新素材
孔に機能性物質が入る。孔のサイズを拡げると、より大きな機能性物質を取込み可能

従来は孔径
3〜4nm　⇒　細孔：7〜15nm が目標



- 色素を取込むと…高機能色素増感太陽電池（エネルギー分野）
- 触媒を取込むと…様々な有害物質を取込んで分解する機能性触媒（環境分野）
- その他、医療分野では、細孔を利用したドラッグデリバリ（体内に取り込んだ薬を患部に届ける）での活用、宇宙開発分野では、宇宙船内空気からの有害物質除去などに応用の可能性がある

概要

第 1 回、第 2 回の実験共に、材料となる 2 種類の液体を打上げ、軌道上でそれらを混合することで化学反応を起こし、無重力環境下でナノスケルトンを作製しました。地上では水と油は上下に分離してしまいますが、無重力環境では対流や沈降の影響が無いため、材料の一部に使用している油が分離せず、均一によく混ざった状態を保てます。宇宙では、地上とは異なる特性（穴の大口径化、骨格構造の結晶品質の向上など）を持ったナノスケルトンの生成が期待されました。様々な条件を変えてナノスケルトンの作製実験を行い、持ち帰ったナノスケルトンは地上で解析を実施しました。

図 2　実験試料の外観
軌道上で 2 つの液体を混合するまではクリップ（黒い部分）により液体を分離しておきます。
液体をうまく混合するために撹拌子（白い球状のもの）を液体の中に入れています。

成果

ナノスケルトン作製をコントロールする手掛かりを得た

一部の試料で、無重力環境下で穴が拡大するとともに、穴の向きがよく揃うようになるという結果が得られました。このように向きのそろった細かい穴を持つ試料は地上ではまだ得られておらず、地上での再現を試みています。また、2 回の宇宙実験を通じて、ナノスケルトンの穴のサイズを地上でもコントロールする手法の手掛かりを得ることが出来ました。

ナノスケルトンの骨格構造の結晶の品質や、ナノスケルトンの粉末の固まり具合などについては、予測とは異なり重力の有無は影響していないことが確認され、結晶化のプロセスに関する貴重な結果を得ることが出来ました。

今後への波及

地上への還元

宇宙実験で得られた成果を、地上でのナノスケルトン作製に反映し、高効率の光触媒、太陽電池、水中の有害物質除去剤、日焼け止めなどへの応用を検討中です。

宇宙活動への貢献

日本の宇宙実験では珍しい化学反応を用いた実験により、様々な知見が得られました。特性の良いナノスケルトンを作成することが出来れば、宇宙船内の空気から有害物質を除去する材料としても利用できる可能性があります。

宇宙でナノレベルの凹凸を作る

微小重力環境を利用した 2 次元ナノテンプレートの作製（2DNT）

代表研究者：木下 隆利（名古屋工業大学）

目的

宇宙の無重力を利用して、板状のプレートの上に、アミノ酸がつながってできたペプチドと呼ばれる物質を並べて、ナノメートルレベル（1 ナノメートルは 10 億分の 1 メートル）の凹凸の型（ナノテンプレート）をつくる実験です（図 1）。例えば 1 メートルを地球の大きさとすると 1 ナノメートルはピンポン玉サイズ、それほど小さなレベルの凹凸です。地上では重力の影響により、ペプチドの並びに乱れが生じやすくなります。無重力環境で、ペプチドがプレート表面で均一に並び、また予期せぬ付着物を抑えられるという予想から、広い面積にわたって均一で欠陥の少ないペプチドの凹凸パターンを取得することが目的です。そのようにして得られたナノテンプレートを地上に持ち帰り、それを炭化ケイ素のプレートの表面にスタンプのように転写することで、電子材料である炭化ケイ素（SiC）基盤ができると期待されます。

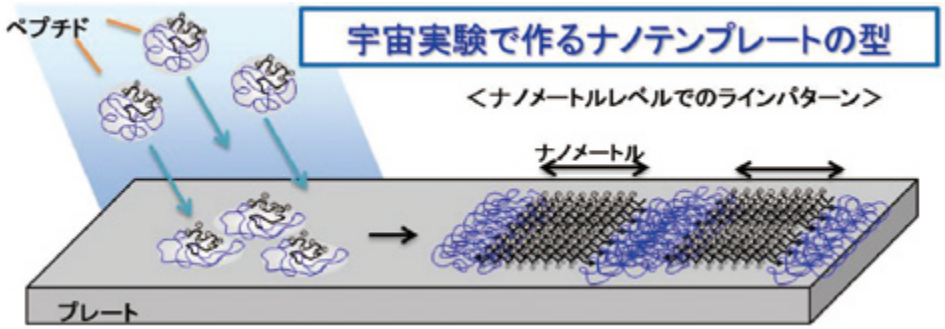


図 1　無重力で行ったペプチドの配列化実験の模式図

概要

ペプチドの入った実験容器の打上後、実験開始まで容器は軌道上の冷蔵庫に保管されます。実験開始時には冷蔵庫から試料を取り出し、基板となるプレートとペプチド溶液を分けているクリップを取外すことで、自動的にプレート上にペプチドが並び始めます。一定の期間無重力環境で保管し、ペプチドパターンが成長した頃を狙って、地上に回収します。ペプチド溶液の濃度や成長期間、プレートの表面等を様々に変えた条件で実験を実施し、試料は 2 回にわけて回収しました。

図 2　実験容器の写真

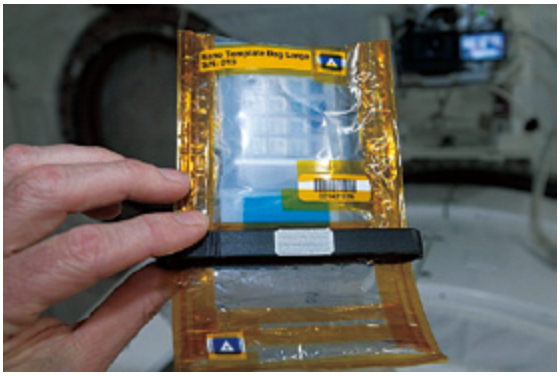


図 3　実験開始直後の写真（軌道上で撮影）
黒い箇所がプレートとペプチド溶液を実験開始まで分けておくクリップです。
プレート側に液を流し込んだ後、再度クリップを付けます。並んでいる小さな四角が基板（プレート）です。

成果

ナノテンプレート実用化に向けてメカニズムの理解が進む

地上に持ち帰ったペプチドパターンを分析したところ、予測したほどパターンは均一になっていませんでした。つまりペプチド組織を作る分子の動きと繊維成長の仕方は、事前の予測と異なり、重力の影響を受けず、パターンの均一化には別のメカニズムが働いていることが分かりました。一方、付着物に対しては対流や重力による沈降が抑えられ、無重力の効果を確認することが出来ました。これは事前予測に沿うものであり、ペプチドの凝集物が重力によって基板表面に付着する現象が、無重力下で抑えられたことが原因だと考えられ、この実験系の理論に関する重要な知見となりました。引き続き、地上実験との比較を実施していきます。

今後への波及

地上への還元

宇宙実験で採用した「プレート上にペプチドパターンを作成する手法」は、世界初の簡便な方法であり、特許を取得しています。また地上での予備実験で作成した試料では、レーザ加工の技術では到達されていない 5 ナノメートル幅の凹凸を作成することができました。この実験を通じて得られた知見などを基に、省エネ、小型の次世代の高性能半導体として期待される窒化ガリウム（GaN）半導体の実用化に向けて、2013 年には「窒化物半導体マルチビジネス創成センター」が設立され、コンピュータの高性能化や半導体の製造コスト削減などを目指しています。

宇宙活動への貢献

プレート上にペプチドが自動的に並ぶ、自己組織化という宇宙で初めての試みにより、本実験では様々な知見が得られました。これらを基に今後、無重力環境を利用した自己組織化を伴う素材作製の分野が大きく広がる可能性があります。

光を操る結晶をつくる

3 次元フォトニック結晶生成実験（3DPC）

代表研究者：伊藤 研策（富山大学大学院）、山中 淳平（名古屋市立大学大学院）
瀧口 義浩（浜松ホトニクス㈱）

目的

直径が 100 ナノメートル（1 万分の 1 ミリメートル）程度の大きさの微粒子が透明な液体の中で立体的に規則正しく並んだ 3 次元フォトニック結晶（コラム参照）を光産業に応用するためには、屈折率の高い材料で作った微粒子を用いる必要があります。しかし、屈折率が高い材料は一般に比重が大きく、地上では重力によって微粒子が少しずつ沈んでしまい、結晶が歪むため均一な大型の結晶を作ることが困難です。ISS の無重力を利用すれば、微粒子が沈まないので、高屈折率の微粒子を用いた光制御の効率が良い大型（センチメートルサイズ）の結晶を作れる可能性があります。産業応用につながるフォトニック結晶の作製に係る知見を蓄積し、結晶生成技術を確立することがこの実験の目的です。

概要

コロイド微粒子を使ってフォトニック結晶を作るためには、微粒子表面の電荷の反発によって規則的に微粒子を並ばせ、さらにこれを固めて地上に持ち帰ることが必要です。そこで、まず地上で実験容器（セル）の中に結晶の材料となるコロイド微粒子、微粒子表面の電荷を制御するための試薬、そして、でき

Pick Up

知ってなるほど！豆知識

フォトニック結晶とは

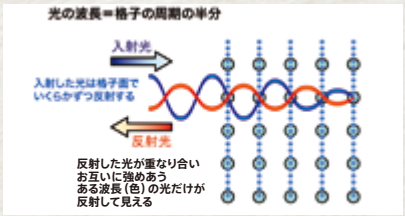


図 1　フォトニック結晶の性質

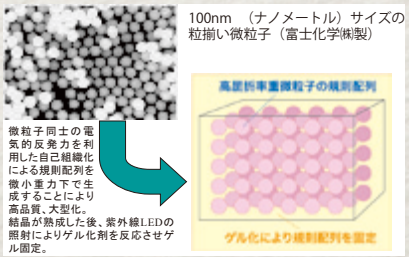


図 2　微粒子が並んだ 3 次元フォトニック結晶

ダイヤモンドや水晶などのように、原子や分子が規則正しく並んだものを結晶と呼んでいます。ダイヤモンドでは炭素原子が、水晶ではシリコンと酸素の原子が交互に、規則正しく並んでいます。一方、原子の大きさの約千倍、直径 100 ナノメートル程度の大きさの微粒子（コロイド微粒子と呼ばれる）が、光の波長（数 100 ナノメートル）と同じくらいの周期で規則的に並んでいる構造（コロイド結晶）では、その周期（微粒子間の距離に相当）で決まるある波長（色）の光が反射されて中を進むことができなくなったり（図 1）、その中を通る光の速度が遅くなったりする性質があります。これをうまく使えば、光の流れを操ることができるようになるため、このような物質をフォトニック結晶と呼びます（「フォトニック」とは、「光の」といった意味）（図 2）。光を操るフォトニック結晶は、大量の情報処理を可能にする光情報技術や、強力なレーザ光を制御する技術などに応用できると期待されています。

た結晶を固めるためのゲル材料（紫外線に反応して寒天のように固まる材料）を水などの媒体と混ぜて、蓋をします。そのまま実験装置に組み込んで打上げ、ISS 内に静かに置きます。実験容器の中で、水の中に不規則に分布している微粒子が電気的に反発しあって等間隔に並び、コロイド結晶を作ります。しかし、このままでは軽く振っただけで、並んだ微粒子は再び不規則になってしまいます。そこで、十分に結晶化が進んだところで実験容器に紫外線を照射し、ゲルの材料を反応させて結晶を固定します。そして固まった結晶を装置ごと地上に持ち帰って分析します。

実験セルの中で自動的に良い結晶ができるようにするために、中に入れる水や試薬に入っている不純物の除去手順や、結晶化に必要な電荷を制御するための試薬の量、結晶が一方向に、しかもちょうど良い速さで成長するのに必要なセルの構造の工夫など、様々な条件の中から最も良い条件を探ります。

この実験は、きぼうが完成する前（2005-2008 年）にロシアのモジュールで行われました。

成果

宇宙では初めてとなるフォトニック結晶の生成に成功、産業応用へ一歩踏み出す

結晶を一方向に成長させる手法は、地上におけるシリコンなどの半導体結晶の製造などでも用いられており、結晶を高品質に大型化するために必要な技術です。コロイド微粒子を用いたフォトニック結晶の作製においても必要な技術であり、この実験で、宇宙でコロイド結晶を一方向に成長させ、ゲルで固定して地上へ回収する技術を世界で初めて実証しました（図 3）。

これにより、宇宙でできた結晶がフォトニック結晶としてどのような特性を持っているかなど、地上で詳細に評価することが可能となりました。地上と比較して結晶の均一性が向上すること（図 4）や、それまで地上では実現困難だった直径 200 ナノメートルのシリカ微粒子を使ったミリメートルサイズの結晶を作ることにも世界で初めて成功しました（図 5）。

この実験では、無重力がフォトニック結晶の作製に有効に働くことが確かめられた一方、課題も見つかりました。結晶成長の速さを制御するための実験セル構造がうまく働かないなどの理由で、目標としたセンチメートルサイズの均一結晶はまだ得られておりません。結晶のもととなる微粒子の作製プロセスの難しさや、今回採用した結晶成長法では重力の効果に隠れて地上では観測できなかった重力以外の要因による結晶の不均一性が残ることも確認できました。現在は、これらの課題を克服する新たな結晶成長法などを確立し、「きぼう」での次の実験機会に向けて、実験提案の検討や地上での確認試験を行っています。

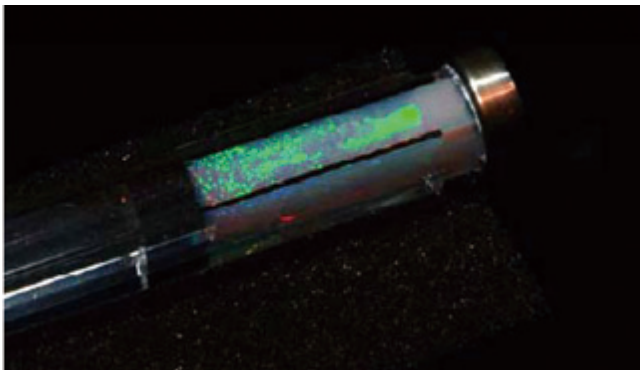


図 3　宇宙でつくったフォトニック結晶。
結晶の一方向成長、ゲルでの固定化の技術を確立

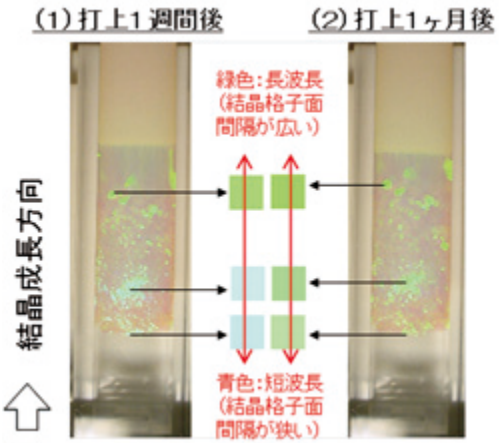


図 4　生成した結晶を無重力に静置することで均一化が進むことを確認

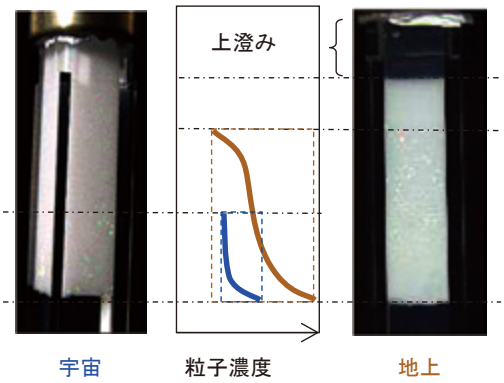


図 5　地上では重力で沈んでしまう 200 ナノメートルの微粒子を使い宇宙で初めて均一な領域をもつ結晶の生成に成功

今後への波及

地上への還元

この実験で目指しているのは、微粒子の規則的な配列をやわらかい樹脂（ゲル）で固めたフォトニック結晶の作製です。こうしたフォトニック結晶は、圧縮することによって微粒子間の距離を自由に変えることができるため、一つの素子でさまざまな波長の光を制御できるようになります。

この実験に関連して蓄積された多くの特許を含む知見は、ミリメートルサイズのフォトニック結晶を使ったハンディタイプの超小型分光器（どの波長の光がどれだけ出ているかを計測する機器）の開発（大学・企業で試作中）や、粒揃いのシリカ微粒子の製造販売（企業で事業化済み）などの産業応用につながっています。また、コロイド微粒子を使った新たな結晶化方法の開発に発展し、関連するいくつかのベンチャー企業が立ち上がるなど、フォトニック結晶の新しい応用への道が切り拓かれています。

目標とするセンチメートルサイズの高品質結晶が実現できれば、電子部品などの超微細加工や医療などにも使える高輝度レーザ装置の大幅な小型化などに貢献できると期待されます。

物質・物理科学

宇宙で明らかになる流れの世界
マランゴニ対流におけるカオス・乱流とその遷移過程（MEIS） …… 124

結晶は生きている
氷結晶成長におけるパターン形成（Ice Crystal） …… 130

平らに成長する結晶
ファセット的セル状結晶成長機構の研究（Facet） …… 131

省エネCPU用半導体材料の製造実験
微小重力下におけるTLZ法による均一組成シリコンゲルマニウム（SiGe）
結晶育成の研究（Hicari） …… 133

結晶が成長する過程をリアルタイムで追う
微小重力における溶液からのタンパク質結晶の成長機構と完全性に関する
その場観察による研究（NanoStep） …… 136

氷の結晶をコントロールするタンパク質の秘密とは
生体高分子の関与する氷結晶成長－自励振動成長機構の解明－（Ice Crystal 2） …… 139

宇宙で明らかになる流れの世界

マランゴニ対流におけるカオス・乱流とその遷移過程（MEIS）

研究代表者：河村　洋（諏訪東京理科大学）、西野 耕一（横浜国立大学）

目的

マランゴニ対流とは、液体の表面に働く表面張力の差から生じる流れのことです（コラム参照）。マランゴニ対流は、半導体材料であるシリコン結晶を地上で作るときなどに発生し、結晶の品質に影響を与えています。そのため、マランゴニ対流について詳しく知ることは、流体の性質についての知識を深めるだけでなく、地上における材料製造などにも重要な意味を持っています。

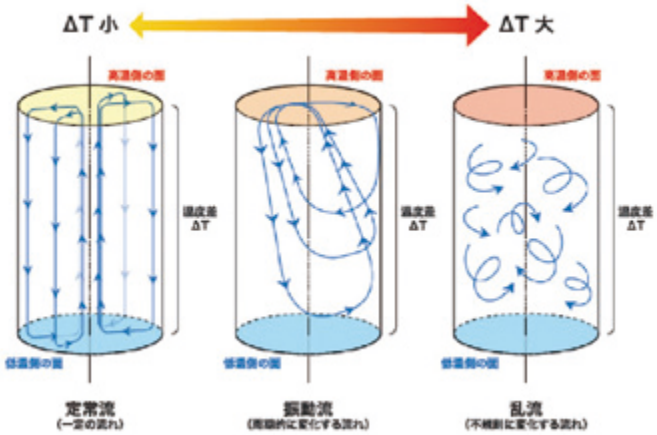


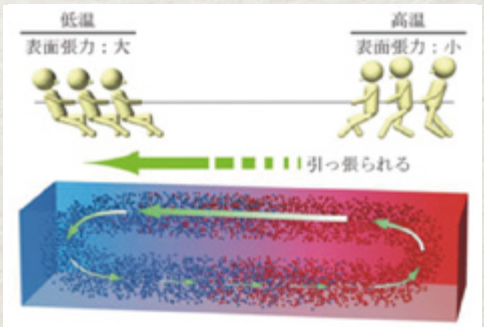
図 1　温度差が変化したときのマランゴニ対流の遷り変わり

無重力の宇宙では、重力による熱対流（浮力による対流）が起きないため、マランゴニ対流の様子を詳しく観察することができます。マランゴニ対流について、流れと温度を観測し、そこに潜む規則を明らかにすることを目的に、以下の課題について実験を行っています。

Pick Up

知ってなるほど！豆知識

表面張力とマランゴニ対流



マランゴニ対流の発生原理

表面張力は、ハスの葉やワックスをかけた車のボディ表面で水が玉状になるように、水などの液体の表面に働く「表面積をできるだけ小さくしようとする力」です。この表面張力は温度や濃度によって変わります。温度が高くなると表面張力は小さくなり、表面張力の小さい方から大きい方へ向かって流れが発生します。この現象は、熱したフライパンの上の油でも見られ、油が動くのも表面の温度分布により流れが発生することが一因です。そして表面の動きが液体内部に伝わり、対流が発生します。この現象は 19 世紀のイタリアの物理学者マランゴニが詳しく研究したため、「マランゴニ対流」と呼ばれています。

① どのような条件で定常流（整然とした静かな流れ）から振動流（脈を打つような流れ）、そしてカオス・乱流（不規則で乱れた流れ）などへと変わるのか？（図 1）

② そこに統一的な法則はあるか？

③ 振動流やカオス・乱流などはどのような振る舞いをするのか？

④ 液体内に入れた粒子がマランゴニ対流によってリング状に集合する「粒子集合現象（PAS）」がどのような条件で発生するか？（図 8 参照）

概要

2 つのディスクの間に直径 30mm（または 50mm）の大型のシリコーンオイルの液柱を作ります（図 3）。重力のない宇宙だからこそ、容器なしで大きな液体だけの柱を作ることができ、マランゴニ対流の観察ができます。地上で作る液柱は、直径 5mm、高さ 3mm 程度が限界です。片方のディスクを加熱し他方を冷却することで、液柱の両端の間に温度差を生じ、マランゴニ対流を発生させます。そのときの流れの様子や温度変化を様々な観測機器で調べます。流れの様子が直接見えるようにするため、液柱には極々小さな粒子（トレーサ）を混ぜ、その粒子の動きから流れを把握します。液柱の端から 3 台の CCD カメラで撮影し、画像解析により 3 次元的な流れのパターンを調べます。側面に配置した CCD カメラでは、液柱の形や流れの様子を知ることができます。表面の温度分布は赤外線サーモグラフィで画像として捉えることができます。実験装置は、地上からの遠隔操作で動かすことができるため、宇宙飛行士の就寝時間中の、振動が少なく静かな時間帯に実験を行います。

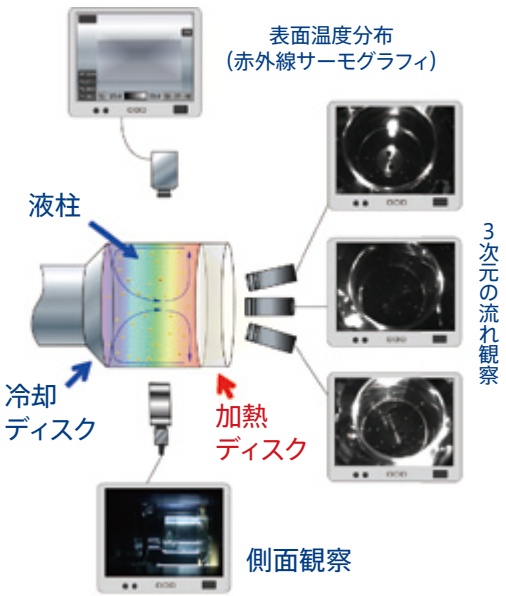


図 2　マランゴニ対流の観察方法

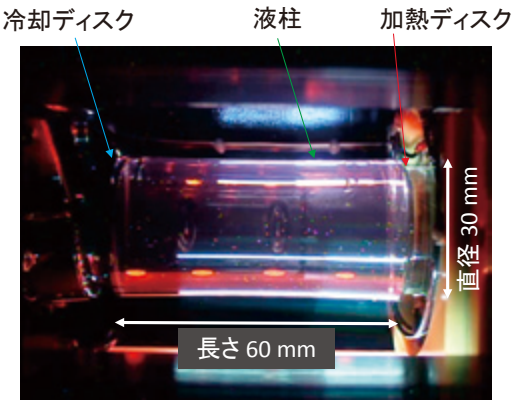


図 3　「きぼう」内で形成した液柱（長さ 60mm の液柱は地上では実現不可能です）

成果

精密な繰り返し実験により 20 年に及ぶマランゴニ対流の遷り変わりの謎に終止符!

地上では液体自身の重さにより液柱が崩れてしまうため、数ミリ程度の直径・長さの小さな液柱しか作れませんが、宇宙実験では地上よりはるかに大きな液柱を形成し、流れや温度分布を詳しく観察できました。大きな液柱では、実験条件の範囲を大幅に拡げることが出来るため、地上実験では観測されていなかった流れのパターンや温度の伝播現象が現れ、マランゴニ対流が持つ性質の全体像や、理想的なマランゴニ対流が詳細に観測できました。

これまでの成果により、マランゴニ対流研究分野において日本のチームは世界のトップランナーとなりました。2008 年から始まった本実験はまだ途中段階で、体系的な理解を目指し 2016 年頃まで宇宙実験を行う予定です。これまでに以下のような成果が得られています。

1 振動流に変化(遷移)する条件の理解

定常流から振動流への遷移の条件(臨界マランゴニ数:図 4)は、理論的には液柱の直径には依存しないはずですが、過去の小型ロケット実験やスペースシャトル実験では液柱の直径とともに大きくなるという矛盾した結果が得られていました。今回の「きぼう」実験では、地上では実現できない液柱サイズと幅広い条件での繰り返し実験によって、信頼性の高いデータが得られ、振動流遷移の条件が理論と一致している(つまり液柱直径に依存しない)ことを実験的に初めて明らかにしました。(図 5)

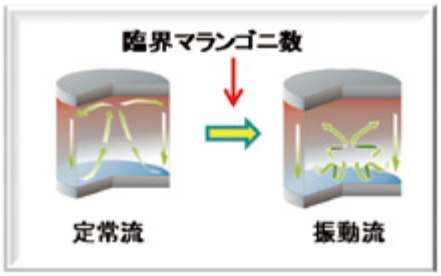


図 4　臨界マランゴニ数
流れが強くなり、臨界マランゴニ数を超えると振動流へと遷移する

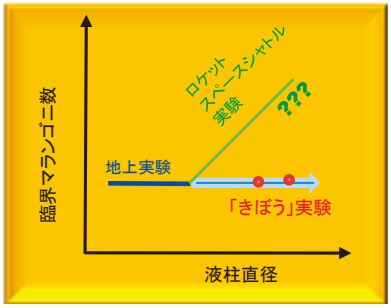


図 5　「きぼう」実験では液柱直径依存性が見られず、理論と一致することを確認

2 これまで知られていなかった振動流の渦構造を発見

液柱が長くなると渦構造の振動流が現れるなど、振動流へ遷移する条件が大きく異なり、より小さい温度差で振動流に遷移することを明らかにしました。

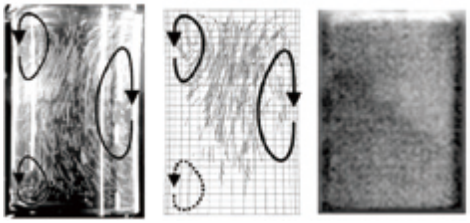


図 6　発見された渦構造および温度分布との対応

3 温度が波状になって液柱表面を伝わる様子（温度波）について貴重な実験データを取得

長い液柱において、液柱表面を伝わる温度波が、高温側から低温側に伝播するのか、あるいはその逆なのかという未解決の問題がありましたが、床屋のバーバースタンドの縞模様のように、温度波が回りながら高温側から低温側に伝播することを初めて実験的に明らかにしました。

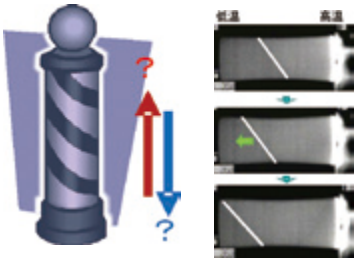


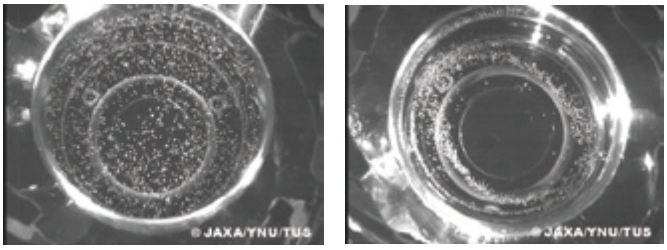
図 7　温度の縞模様は高温から低温へ進むという理論が裏付けられた!!

4 カオス・乱流の観測

液柱マランゴニ対流の、乱雑さが発達したカオス・乱流によって発生する複雑な表面温度パターンなどを様々な条件で観測し、それらの特性を明らかにしました。長い液柱では、表面温度変動パターンが長さ方向で大きく違っており、浮力対流でのカオス・乱流の様相とだいぶ異なった様相を示しています。

5 粒子集合現象（PAS：Particle Accumulation Structure）の観測

大きな液柱では発生しにくいPASの観測に成功しました。PASがどのような条件で発生するかはまだわかっていませんが、宇宙では地上に比べて小さい温度差で発生することが分かりました。今後さらにデータを蓄積し、メカニズムを明らかにすることが期待されます。



(1) 通常の粒子分散状態（粒子はバラバラに分布）　(2) 粒子集合現象の発生（粒子がリング状に集まっている）

図 8　粒子集合現象（PAS）

今後への波及

地上への還元

融けた液体から結晶を作る際に、マランゴニ対流は結晶の品質に影響します。宇宙実験で得られた知識は、半導体、酸化物結晶等の高品質な結晶を得るための技術の向上に貢献します。また、DNA 分析や医療診断などでは、極微量の液体を扱うため表面張力が大きく関わりますが、その技術の向上にも寄与します。

宇宙活動への貢献

マランゴニ宇宙実験で得られた知見は、高性能な熱交換機やヒートパイプといった高効率かつ小型の熱制御システムの開発に貢献すると期待されます。

また、液体から結晶生成を行う宇宙実験などでは、マランゴニ対流を制御することでより高度な実験が可能となります。

結晶は生きている

氷結晶成長におけるパターン形成（Ice Crystal）

代表研究者：古川 義純（北海道大学　低温科学研究所）

目的

対流のない無重力下で氷の結晶を成長させ、形の観察と結晶周りの温度分布計測により、結晶の形が形成される仕組みを解明します。氷は身近で生活に不可欠ですが、結晶成長の最初の段階についてはわからない点が多く、また成長するときに、方向によって形の異なる樹枝状に（樹木の枝のように）広がるなど特徴的な成長を行うことから、研究対象として極めて重要です。氷の結晶のでき方を詳しく知ることは、冷凍食品の品質保持や、臓器移植のための臓器の保存など、色々な場面で役立ちます。

概要

「きぼう」に設置されている結晶観察用の装置（SCOF）に氷結晶の専用機器を装着し、さまざまな温度で結晶を作って観察し、結晶成長速度や樹枝状結晶の先端部分の曲率（丸み）の計測を行いました。温度条件を変えて計 134 回もの実験を繰り返し詳細に行うことができ、科学実験に必須な、信頼性（再現性）の高い実験結果を得ることができました。

［参考：宇宙における氷の結晶成長実験は、1998 年に NASDA（現 JAXA）のロケットにより世界で初めて実施されました。］

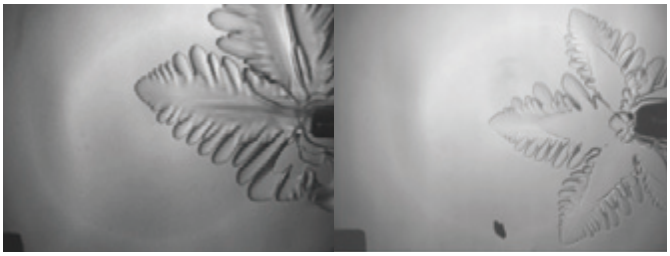


図 1　無重力下で得られた氷結晶の画像（画像は横 6.4mm、縦 4.8mm）
左：地上の氷結晶。右：宇宙で観察された、形の対称的な氷結晶
【参考】宇宙で氷の結晶が成長する様子の動画は以下で公開 http://iss.jaxa.jp/library/video/ice_crystal_081202.html

成果

宇宙ならではの精密計測により、新たな事実が明らかに！

対流の影響がない宇宙で精密な実験を行うことができました。成果は大きく分けて 3 つあります。

①結晶の異なる方向への成長速度を初めて同時計測すると共に、過冷却の大きさが結晶成長にどのように影響するかを明らかに

氷結晶は、図 2 の a 軸と c 軸の方向に成長します。その両方向への成長速度を初めて同時に計測できました。地上実験では、a 軸方向の成長速度と過冷却の大きさとの関係は、ある温度（臨界過冷却度）付近で理論からはずれますが、それは重力による熱対流が原因と考えられてきました。しか

し、無重力にもかかわらず、今回の宇宙実験でも同じように理論とのずれが計測されました（図 3）。今回初めて実現できた a 軸と c 軸の成長速度の同時計測により、a 軸方向の成長速度の変化が、c 軸（図 2 の平らな底面）の成長の仕方と関連があるという、新しい結晶成長理論が生まれました。この新しい理論は、著名な学術誌「フィジカルケミストリー B」に掲載され、また、学術誌「ネイチャーケミストリー」でも紹介されました。

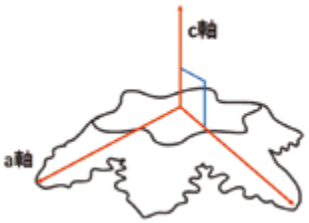


図 2　氷結晶の成長軸

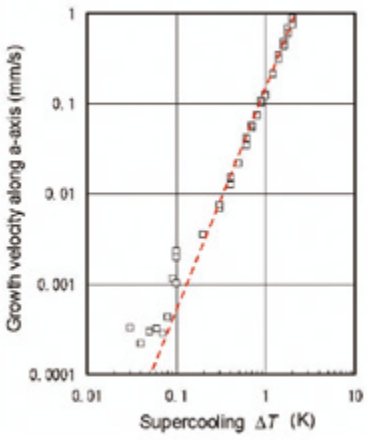


図 3　過冷却度（温度）と a 軸の成長速度との関係

②超低過冷却度（融点にきわめて近い温度）での結晶の側面は丸みを帯びた形であることを初めて実証。コンピュータシミュレーションにより成長のメカニズムを解明

超低過冷却度では、氷結晶は円盤状になります（図 4）。これまで円盤状の成長について対流の影響のない精密なデータは得られていませんでしたが、今回の宇宙実験で、円盤半径・厚みなどの経時変化を詳しく調べることができました。その結果、従来の地上実験で考えられていたのとは異なる結晶形態で結晶が成長することがわかり、コンピュータシミュレーションの結果とあわせて、新しい円盤成長のメカニズムを解明しました。この結果は著名な学術誌「フィジカルレビュー E」に掲載されました。

図 4　円盤結晶を横から見た写真（左）、氷の結晶成長過程（右）
（画像は横 1.6mm、縦 1.2mm）

③宇宙のほうが地上より氷の成長が遅いことを確認

樹枝状結晶について、樹枝先端の成長速度と樹枝先端の丸みを計測し、地上データと比較しました。その結果、宇宙のほうが地上より氷の成長速度が小さいことが明らかになりました。宇宙では対流がないために、結晶が成長する際に放出される凝固熱が逃げにくく、成長が遅くなるためです。樹枝先端の丸みについても、詳細な解析と考察を行いました。

今後への波及

地上への還元

精度の高い実験データが得られたことにより、結晶成長メカニズム研究に大きく寄与しました。

氷点下の環境でも凍らずに暮らす生物（タラ、カレイ、ニシンなど）は不凍タンパク質と呼ばれるタンパク質を持っており、生体内でできる氷結晶の成長を食い止めることができます。また不凍タンパク質は、大根や人参などの冬野菜にも含まれています。過冷却水から氷が結晶成長するメカニズムを調べることは、これらの生物の生体反応を理解することにつながります。氷の結晶成長の知識は、臓器移植のための生きた臓器の保存や冷凍食品の品質保持など、わたしたちの将来の生活にも役立ちます。

宇宙活動への貢献

氷は惑星空間から地球圏に至るまで最も普遍的に存在する結晶ですが、その氷が成長するときに、形がなぜ変化していくのかさえ、私たちはまだはっきりとは知らないのです。この実験は基礎的ではありますが、その成果は結晶成長学や物理学の範囲にとどまらず、広く惑星科学、地球科学、環境科学などにも密接に関係しているといえます。

平らに成長する結晶

ファセット的セル状結晶成長機構の研究（Facet）

代表研究者：稲富 裕光（JAXA）

目的

きれいな六角柱になっている水晶を見ると、平らな面が組み合わさった結晶であることがわかります。塩や水晶の結晶も平らな面からできています。この平らな面をファセットといいます。ファセットの表面では分子や原子が面状に並んでいます。何種類かの原子でできている化合物半導体や酸化物結晶など、電子機器材料や光学部品に多く使われている材料には、結晶が平らな面状に成長、すなわちファセット成長するものがあります。これは樹木の枝のように成長する雪や氷の結晶とは対照的です（図 1）。

結晶成長の過程は非常に複雑で、とくにファセット成長については、仕組みがよくわかっていません。新しいファセットが形成されるときに、結晶に欠陥が入ったり、不純物を取り込んだりすることが知られていますので、ファセットができるときの温度・濃度等の形成過程を詳しく調べることで、品質のよい半導体や超伝導材料をつくることを目指します。また、こうした研究は新しい機能を持った材料を創り出すことにも発展します。

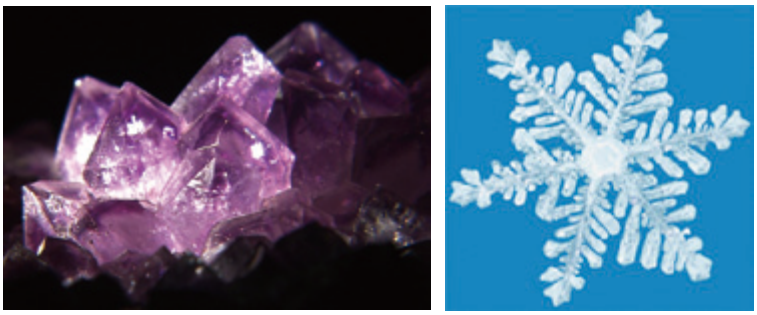


図 1　左：水晶（ファセット状結晶）、右：雪（樹枝状結晶）
（樹枝状結晶については、p.128 Ice Crystal を参照）

概要

地上では、重力の影響で、水や空気が上下に流れる浮力対流が生じ、結晶が成長するときに成長環境を乱してしまいます。

そこで、重力がなく浮力対流が生じない宇宙で、ファセット成長の様子を詳しく観察し、その過程を明らかにします。この実験ではファセット面を持つ結晶として代表的なザロール／t- ブタノール混合物を用います。この試料は透明なため、観察に適しています。結晶にある方向から熱を加えて一部を融かし、平らな界面（固体と液体の境界面）を作ります。その後、徐々に冷却していくことで平らな界面から“のこぎり歯”状のファセット面が成長していく様子を、顕微鏡および干渉計を用いて観察します。実験画像から、結晶の固液界面の近くの温度・濃度を算出し、結晶成長の仕組みを明らかにします。

宇宙実験では、試料の濃度や温度条件などを変更し、複数回の実験を行いました。

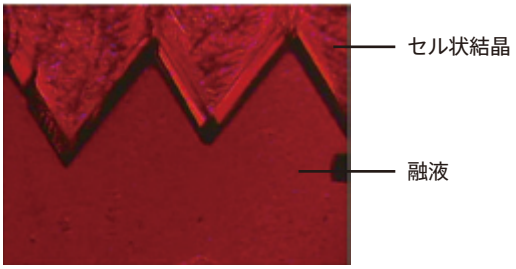


図 2　無重力環境下で得られたザロール結晶の画像
（画像は横 3.2mm、縦 2.4mm）

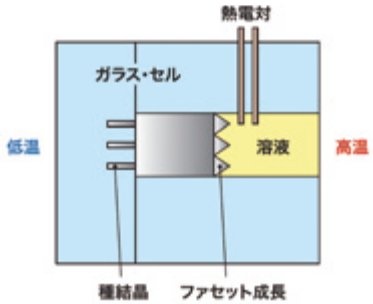


図 3　結晶成長実験に使うガラス容器の断面図

成果

精密なデータからファセットが成長する条件が明らかに！

地上では対流の影響で、結晶のごく近くの融液（融けて液体となっている部分）の温度・濃度を正確に調べることが困難ですが、宇宙実験では重力がないため、温度・濃度分布を極めて精密なレベルで同時に求めることに初めて成功し、結晶のごく近くで温度・濃度が急激に変化していることを明らかにしました。このデータから、結晶と融液との境界における融点と実際の温度との差（カイネティックス過冷度という）が最大の条件で、新たなファセットができることを明らかにしました。つまり、「カイネティックス過冷度」が大きいほど結晶は成長しやすいと言えます。これまでの研究では、刻々と変化する結晶界面の詳細な形やその周辺の温度・濃度を正確に求めることができなかったために、大まかな形の変化の様子しか観察できていませんでした。

また、ザロールとブタノールのように、2 種類の成分が混じった系（金属材料では合金と呼ばれています）において、「カイネティックス過冷度」と結晶の成長速度との関係を初めて求めることができました。

今後への波及

地上への還元

どのようなきっかけでファセットができるのかを明らかにすれば、非常に品質の良い結晶をつくることができ、半導体などの最先端材料の量産化や性能アップにつながります。 身近な例でいうと、太陽電池パネルで用いられる多結晶シリコンという材料を効率良く製造することができ、クリーンエネルギーの普及に貢献すると期待されています。 また、超伝導材料の性能アップへの貢献が考えられます。

今回の高精度な実験データ取得により、高品質材料の創製技術と結晶成長理論の更なる発展をもたらしました。また、今回の測定手法が材料プロセス中の温度・濃度分布を高精度で同時に測定するのに有効なツールと成り得ることを実証しました。

省エネCPU用半導体材料の製造実験

微小重力下における TLZ 法による均一組成シリコンゲルマニウム（SiGe）結晶育成の研究（Hicari）

代表研究者：木下 恭一（JAXA）

目的

シリコンは私達の生活になくてはならない半導体（電気を通しやすい「導体」と電気を通さない「絶縁体」との中間の性質を持つ物質）です。シリコン上に作られる半導体素子の小型化により、メモリーの容量は飛躍的に向上し、コンピュータの小型化・高速化が達成されてきました。しかし、半導体素子の更なる小型化は限界に近づきつつあります。

この状況を打開するのために多くの研究者により提案されているのが、シリコン（Si）とゲルマニウム（Ge）を半々に混ぜた半導体 $Si_{0.5}Ge_{0.5}$ を作ることです。

$Si_{0.5}Ge_{0.5}$ 基板の上に素子を作ると、素子の中の電子の動きをより活発にすることができ、これまでのシリコン上に作る素子に比べ処理の高速化が期待されます。しかし、SiGe 結晶は融けた時の組成と固まって結晶になった時の組成が異なるため、均一組成で高品質な大きなバルク結晶製造が大変難しく、このような素子はまだ実現していません。

一方、微小重力環境では熱対流が抑制されるため、複数の素材を混ぜ合わせた高品質な素材が得られると期待され、いくつかの実験が試みられてきました。しかし、単純に熱対流を抑制しても、狙った組成の結晶は生成できないことが分かり、結晶成長方法そのものを見直す必要があることが明らかとなりました。JAXA は、毛利宇宙飛行士がスペースシャトルに搭乗した「ふわっと 92」（1992 年）での実験結果を踏まえ、2 つの素材を混ぜ合わせた結晶、いわゆる混晶の組成均一性を飛躍的に向上させる TLZ 法（Traveling Liquidus Zone Method）を考案し、この方法により、世界で初めて均一組成の SiGe 結晶を地上で作ることに成功しました。ただし、地上では対流が発生し液体中の濃度分布を乱すため、TLZ 法でも大口径・均一組成の結晶成長が不可能でした。

そこで、微小重力下の対流が発生しない環境で、TLZ 法の有効性を $Si_{0.5}Ge_{0.5}$ 結晶成長を通して確認することが本実験の目的です。

得られる結果を地上での大口径かつ高品質な半導体結晶製造に役立てます。

概要

SiGe の結晶育成には、「きぼう」に搭載されている温度勾配炉（Gradient Heating Furnace: GHF）を利用します。

TLZ 法では、融点の低い Ge を、Si 種結晶と Si 原料の間にはさんで試料全体に温度分布を付け、Ge 中に Si が飽和濃度まで溶け込んだ融液帯（Liquidus Zone）を形成します。飽和濃度は温度に依存して決まるため、温度勾配によって濃度勾配がコントロールできるというのが他の結晶成長方法にはない TLZ 法の特長です。この Si-Ge 融液帯を移動させ、Si 種結晶上に狙いの組成の SiGe 結晶を成長させます（図 1）。

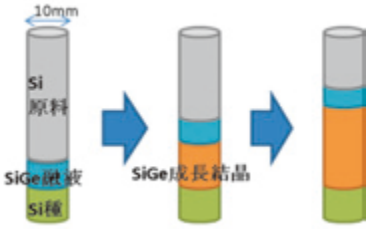


図 1　飽和溶融帯法 (TLZ) での Si 原料、Si 種、SiGe 溶融帯配置概念図

高品質 (均一組成) の結晶を作るには、成長界面 (結晶と融液帯の境界) での温度を常に一定にする必要があります。「温度勾配」と「加熱室の移動速度」を精緻に制御し、結晶成長速度と加熱室移動速度を合わせます。4 回の宇宙実験のうち、第 1 回目の実験で ISS に搭載されている装置と地上の装置との条件の違いを補正し、第 2 ～ 4 回目の実験条件を最適化します。

成果

「きぼう」での組成均一な結晶生成により、初めて地上と宇宙の違いが明らかに

図 2 は、平成 25 年 2 月から 3 月にかけて実施された第 1 回実験の $Si_{0.5}Ge_{0.5}$ 結晶の写真です。

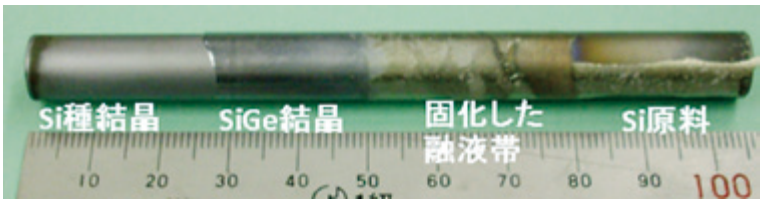


図 2　ISS で実施した第 1 回 Hicari 実験で得られた SiGe 結晶

結晶中には、割れや欠け、大きなすきま等は見当たらず、また、融液と容器が完全に接触しており、微小重力では顕著に表れる“組成の乱れを発生させるマランゴニ対流”が抑制されていた事がわかります。宇宙で育成した結晶の成長距離は、想定よりも長くなっていました。解析の結果、対流が抑制された宇宙環境では、熱の撹拌効果が減少するため Si-Ge 融液中の温度勾配が 1 割程度大きくなり、その分成長速度が速くなって成長距離が伸びた事が分かりました。$Si_{0.5}Ge_{0.5}$ を目指した結晶組成は、$Si_{0.515}Ge_{0.485}$ となり、組成が 1.5% Si リッチ側にずれていました。これら、地上と宇宙の熱環境の違いを明確にできました。

宇宙環境で生成した結晶には大きな特徴があります。地上では原料 Si からも SiGe が成長し、種 Si から成長した SiGe と競合するため、その単結晶成長距離が制約されます。しかし図 2 の結晶を詳細に分析したところ、原料 Si と融液帯の境界付近では、Si と SiGe 融液が明確に分離しており、対流環境を制御する事で結晶を長くできる事が確認されました。これらの 1 回目組成分布解析から、2 回目の実験条件を設定し、平成 25 年 7 月に 2 回目の実験を実施しました。2 回目及び 3 回目の結晶組成解析結果から、地上での組成均一な結晶生成法にとって重要なデータが得られました。4 回目の実験は 2014 年 7 月に実施され、2015 年 1 月から分析が開始される予定です。

今後への波及

地上への還元

対流制御と TLZ 法を組み合わせることにより大口径の高品質単結晶が得られれば、地上装置に磁

場をかけるなどして対流の影響を抑えることによる TLZ 法の地上への応用が可能となります。 均一組成かつ大口径の $Si_{0.5}Ge_{0.5}$ が製造できるようになれば、$Si_{0.5}Ge_{0.5}$ を基板とする、高速低消費電力トランジスタ（図 3）の実現に道が開け、現在のコンピュータに比べると、処理能力は数倍、消費電力は 1/7 という高性能コンピュータが可能になります。 高性能化だけでなく地球環境にやさしい電子素子が実現できる点も注目されます。

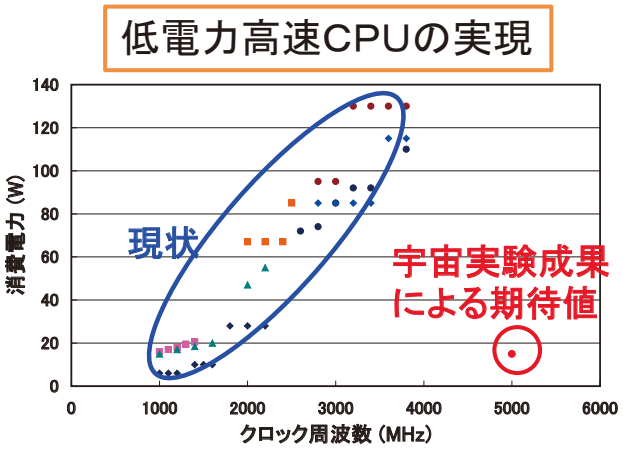


図 3　省エネ SiGe デバイスの性能見積もり

さらに、TLZ 法を様々な結晶育成に応用することで、光通信機器の低電力化・低価格化なども期待されており（コラム参照）、半導体産業や光通信技術へ貢献します。

Pick Up

知 っ て な る ほ ど ！ 豆 知 識

TLZ 法の活用：低消費電力光通信ネットワークの実現に貢献

TLZ 法の開発を通して、JAXA と（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）は、企業と共同で、世界で初めて 30mm 角の InGaAs 単結晶を作製しました（図 4）。

さらに、この結晶を使ってレーザーを作り、世界で初めて温度調節器なしで光ファイバー通信で用いる光の波長 1.3 μ m を使って、20km 離れた遠隔地へ毎秒 10^{10} 回の点滅信号をエラーなしで送る通信実験に成功しました。

この InGaAs 半導体レーザーは、従来型の InP 上の半導体レーザーに比べ、温度が上昇しても出力の低下が少ない（図 5）ため、冷却が不要となり、将来的には光通信都市間ネットワークの消費電力を低減できる可能性を持っています。

図 4　30mm 角の InGaAs 単結晶

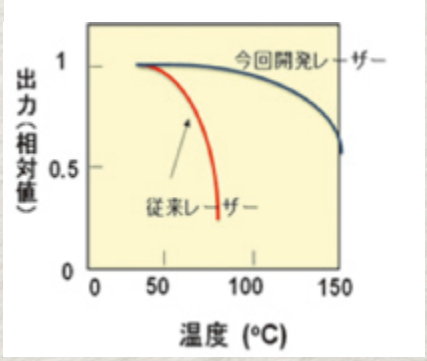


図 5　温度と出力の関係

結晶が成長する過程をリアルタイムで追う

微小重力における溶液からのタンパク質結晶の成長機構と完全性に関するその場観察による研究（NanoStep）

代表研究者：塚本 勝男（東北大学）

目的

結晶成長の謎に挑戦

1990 年代以降、数多くのタンパク質結晶が宇宙で作られてきました。宇宙では対流がなく、高品質な結晶ができると考えられたからです。実際に宇宙で作った結晶を地上に回収し X 線で結晶の構造解析を行うと、地上で作った結晶では分からなかった、タンパク質分子の詳しい構造まで読み取ることができる例も多く、新薬の開発に役立つと期待されています（p.112 PCG 参照）。

宇宙でなぜ結晶が高品質になるかを明らかにすれば、宇宙まで行かなくても、地上でも高品質な結晶を作ることができるかもしれません。そのためには、宇宙でのタンパク質結晶成長と結晶品質に関する基礎研究が必要ですが、これまで詳細に検討された事例はほとんどありませんでした。

これにチャレンジしたのが今回の研究です。これまでは、結晶を宇宙で作り地上へ回収してから結晶の品質を調べていましたが、これでは靴底から足裏を掻くようなもので、もっと直接的に結晶の成長する姿をリアルタイムで調べることを目指しました。これまでの宇宙実験装置は、様々な制約のために簡単な観察しかできませんでしたが、今回開発した、レーザー干渉の原理を使った“その場”観察装置では地上の最良の観察装置と同等の精度で、結晶の成長速度や表面の成長模様のわずかな変化を詳しく捉えることができます。そのため、今回の実験で初めて、地上と同じ実験精度でタンパク質結晶の成長メカニズムを研究することができるようになりました。その結果、これまでに分からなかった結晶の予想外の挙動が明らかになり、結晶の品質との関連が明らかになってきました。また、地上と同じレベルの研究ができるようになった結果、宇宙実験にはプラスの面とマイナスの面があることも分かってきました。

概要

新しい観察技術も確立

「きぼう」内に設置されている溶液結晶化観察装置（SCOF）を用いて実験を実施しました。SCOF に搭載されたマッハツエンダ型干渉計では、タンパク質結晶近傍の濃度分布を結晶の横から測定することができます。さらに本実験専用に準備した機器の中にも、もう一つの小さな干渉計を取り付けました。これが先述した新たに開発したマイケルソン型干渉計です。この干渉計を使い、結晶の正面から結晶表面を観察すると、結晶厚み方向のわずかな成長速度（毎秒 1mm の 100 万の 1 程度の速度）を連続測定することができます。試料部は 3 つあり、それぞれタンパク質や不純物の濃度の異なる溶液が充填されています。1 つの試料部ごとに、35 日の時間をかけて、実験を行いました。まず最初の 1 週間では温度を上げ、種結晶以外のすべての微結晶を溶解させます。続く 2 週目では過飽和にし、種結晶の上にさらに結晶を成長させ、平滑な表面を作りました。結晶の変化を図 1 に示します。その後は、

温度を変化させることで過飽和度を変え、マイケルソン型干渉計を用いた結晶成長速度の計測、表面の成長パターンの観察、マッハツエンダ型干渉計を用いた結晶表面の溶液濃度の計測を行いました。

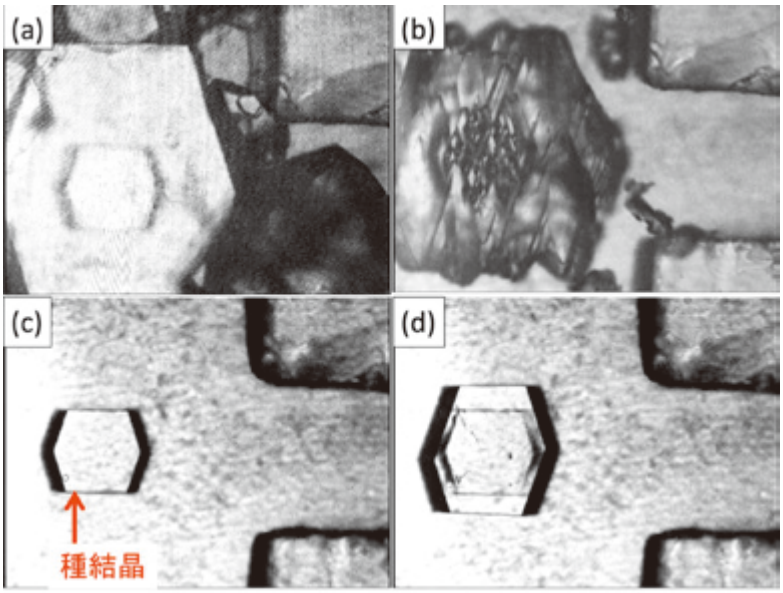


図 1　(a) 実験開始直後の様子。実験開始まで温度制御されていないので、種結晶が多数の微結晶に埋もれている。(b) 温度を上げて余分な微結晶を溶解。(c) 種結晶と高さの基準となるガラス板 (右上下) のみになった画像。基準のガラス面と結晶面との高さの差の時間変化を測定することで成長速度を測る。 (d) 種結晶周りに大きく成長し平滑な表面になった結晶。画像サイズはすべて 0.96mm × 1.28mm。

成果

宇宙での結晶成長の謎に迫る

宇宙で得られた結晶近傍の濃度分布と結晶表面の干渉縞画像を図 2 に示します。干渉縞を観察すると、シャボン玉の膜厚がかわると色が変化するのと同じ原理で、溶液の濃度や結晶表面のナノレベルの凹凸を調べることができます。また、白黒の干渉縞が時間とともに移動するため、結晶の成長速度をナノメートルオーダーで計算することができるのです。

詳しい結果については、科学論文にまとめているところで、まだ記載できませんが、宇宙で結晶をつくると、どのような点で地上と違うのかについての詳細なデータが得られています。結晶の成長速度、結晶面の平滑性、結晶表面の成長パターン、不純物の影響など、これまでの予想と異なる大変興味深い結果が含まれています。

塚本勝男教授は、本実験の成功も含めて世界的に評価され、国際結晶成長学連合より結晶成長の顕著な研究に与えられる Frank 賞を日本人として初めて授与されました。

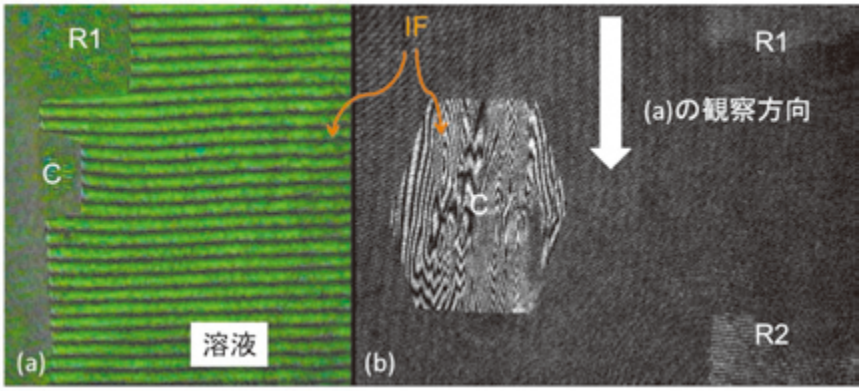


図 2　(a) 結晶の横からみた干渉縞 (IF) が曲がっているのは成長のために濃度が減少しているため。C: 結晶、R1: 基準となるガラス板　(b) 結晶の正面からみた干渉縞。結晶表面の凹凸が干渉縞 (IF) で可視化されている。高さの変わらないガラスの基準面 (R1,R2) と結晶面の高さの差を求めて正確な成長速度とする。

今後への波及

地上への還元

本実験は、タンパク質結晶成長メカニズムを無対流で調べる高精度実験です。これに匹敵する精度の地上の実験結果と比べることで、宇宙で結晶を作った場合のプラス面とマイナス面を明らかにすることができます。これにより、地上でのタンパク質結晶育成に対する指針を得ることができます。これはタンパク質結晶にとどまらず、無機／有機結晶の成長における結晶の高品質化へも寄与します。

氷の結晶をコントロールするタンパク質の秘密とは

生体高分子の関与する氷結晶成長－自励振動成長機構の解明－（Ice Crystal 2）

代表研究者：古川 義純（北海道大学　低温科学研究所）

目的

私たち地球上の生物すべてに必要な水。極地では気温が氷点下になるために氷となってしまいますが、そんな過酷な環境下に生息する魚や昆虫といった変温動物は、体温が氷点下になっても凍りつくことがありません。それは彼らが持つ特殊なタンパク質（不凍（糖）タンパク質）が体の中にできた小さな氷の結晶と結合して大きくならないように制御し、体全体が凍りつくのを防ぐ重要な機能を持っているからです。

従って、不凍（糖）タンパク質を混ぜた水を冷やし氷にすると、この機能は氷の結晶成長速度が揺らぐという現象として観察されます。成長する氷の様子を詳しく調べることで、特殊な役割を果たす不凍（糖）タンパク質による氷結晶の成長抑制効果についてより深く理解することができます。

この実験は結晶成長・氷科学の本質的な理解につながる重要な意味を持っています。身近でありながら不明な部分の多い氷について、その界面での分子レベルの構造や結晶成長の過程を調べることで、氷と生体高分子との相互作用を明らかにすることができます。また、生体高分子によって制御される新しい結晶成長のしくみの発見や、それにともなう新しい材料開発法の発展も見込まれています。こうした実験は地上でも行われていますが、結晶がつくられる過程でどうしても重力によって発生する熱対流や自重の影響を受け、結果の解釈が困難になってしまいます。「きぼう」の微小重力下ならこうした作用はほとんどないので、結晶の成長や解析には最適なプラットホームといえるでしょう。

概要

実験には水に微量の不凍糖タンパク質を溶かしこんだ水溶液が使われます。この水溶液を冷やして氷の結晶を成長させ、複数の温度条件で、氷結晶表面の成長速度や成長の様子を観察します。

宇宙飛行士に、専用機器を溶液結晶化観察装置（SCOF）に取り付けてもらい、結晶表面の成長速度計測には反射型干渉顕微鏡を、成長パターンの観察には透過位相差顕微鏡を、そして結晶の向きの確認には結晶方位確認用カメラを用います。地上から機器の運転や制御を行い、多方面からの観察によって、不凍糖タンパク質が氷結晶の成長にどのように影響を及ぼすかを調べました。

成果

氷表面の反射光を捉えた干渉縞観察に成功

氷の平らな表面（ベーサル面）の小さな成長速度を計測するには、ベーサル面からの反射光を用いた干渉計を利用することが最適です。ところが、氷結晶ベーサル面の反射率はガラスの 500 分の 1

しかありません。極めて緻密で革新的な干渉計を開発することで、ベーサル面の反射光を捉えた干渉縞観察に成功し、ナノ・メートルの精度で成長速度を計測することに成功しました（図 1）。

生体高分子が誘発する結晶の自発的振動成長の発見

本実験では、国際宇宙ステーションの「きぼう」の微小重力環境下で、不凍糖タンパク質を含む水溶液を融点以下にまで冷却し（その融点からの冷却の度合いを過冷却度と言います）、成長する氷結晶を詳細に観察し、ベーサル面表面の成長パターンを透過位相差顕微鏡で観察する（図 2）だけでなくそのベーサル面成長速度を、ナノ・メートルの精度で計測しました。その結果、一定であると思われていた結晶成長速度が、実は 5 ～ 10 倍程度大きくなったり小さくなったりと、周期的に変動する現象を捉えることに成功しました（図 3）。この現象は、不凍糖タンパク質が氷の結晶成長面に直接作用していることを世界で初めて実測したことになります。本研究は、不凍糖タンパク質のような生体マクロ分子に支配される新しい結晶成長機構の解明として画期的成果であり、生体内での結晶生成を制御する分子レベルでのしくみの解明に直結するだけでなく、生体に倣う新しい高品質結晶材料の創生に役立ちます。

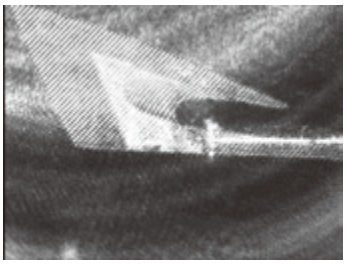


図 1　氷結晶ベーサル面の干渉縞画像。この縞の動きを解析し、成長速度を算出する。
視野：1.6mm X 2.1mm

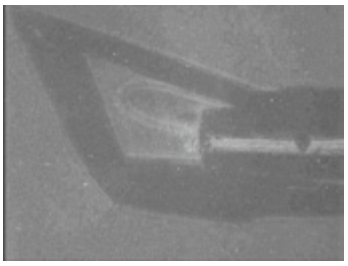


図 2　図 1 と同じ時刻の位相差顕微鏡画像。
視野：1.6mm X 2.1mm

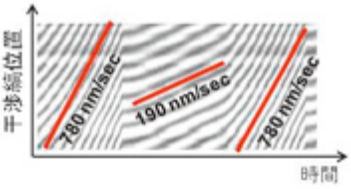


図 3　任意の定点での干渉縞の位置の時間変化
図の傾きが成長速度に相当

今後への波及

地上への還元、宇宙活動への貢献

この実験の結果、不凍（糖）タンパク質による氷の結晶成長抑制効果が明らかになれば、不凍（糖）タンパク質を持つ魚や昆虫が、どのようにして低温から身を守っているのかなど、その生体反応をより深く理解することができます。

また、生活に密着した分野でもその成果は革新的医療食品技術の推進として活かされます。冷凍食品、とくに生ものの冷凍は、凍結解凍を繰り返すと細胞が破壊されておいしくなくなります。不凍（糖）タンパク質を利用することで、細胞の破壊が抑えられれば、おいしい冷凍食品の開発につながります。

そして臓器移植分野でも、損傷しないように、臓器をできるだけ低温で凍らせずに保存する技術の開発に大きく寄与すると考えています。

船外利用

材料を宇宙の厳しい環境に曝すとどうなるか、そして宇宙にどのような微小粒子が存在するかを調べる
ロシアサービスモジュール利用微小粒子捕獲実験および材料曝露実験（MPAC&SEED実験）…… 142

宇宙ステーションの気象台　～宇宙環境の計測とその部品・材料に及ぼす影響に関する研究～
宇宙環境計測ミッション装置（SEDA-AP）…… 144

地球の大気を宇宙から診る
超伝導サブミリ波リム放射サウンダ（SMILES）…… 146

宇宙を探る　全天にわたるX線天体の長期・短期変動の研究
全天X線監視装置（MAXI）…… 150

「きぼう」から飛べ！ 超小型衛星を放出
小型衛星放出技術実証ミッション（J-SSOD）…… 153

ポート共有実験装置（MCE）…… 155

宇宙と地球の境界で何が起きているのか？
地球超高層大気撮像観測（ISS-IMAP）…… 156

自然の驚異、雷の全体像を明らかにする
スプライト及び雷放電の高速測光撮像センサ（JEM-GLIMS）…… 158

巨大な構造物を軽く・安く造る技術
宇宙インフレータブル構造の宇宙実証（SIMPLE）…… 161

縦横無尽に動く「空間移動ロボット」が宇宙開発の未来を支える
EVA支援ロボットの実証実験（REX-J）…… 164

日本発。宇宙空間でも通用する地上の優れた技術
船外用民生品高精細ビデオカメラシステム（COTS HDTV-EF）…… 167

材料を宇宙の厳しい環境に曝(さら)すとどうなるか、そして宇宙にどのような微小粒子が存在するかを調べる

ロシアサービスモジュール利用微小粒子捕獲実験および材料曝露実験（MPAC&SEED 実験）

代表研究者：木本 雄吾（JAXA）

目的

宇宙環境は概して「厳しい」環境（高エネルギー宇宙放射線、真空、原子状酸素、紫外線、温度、ダスト等）です。微小粒子捕獲実験（MPAC）は宇宙デブリ、微小隕石等の宇宙空間に存在する微小粒子を捕獲し、その起源や分布量を把握する実験です。材料曝露実験（SEED）は宇宙用部品・材料を直接宇宙環境にさらし、その耐久性、劣化状況、劣化のメカニズムを評価・解明するための実験です。

概要

ロシアのサービスモジュール「ズヴェズダ」外壁にトレイ 3 式を船外活動により取り付け（図 1、2）、それぞれ約 1 年から 4 年にわたり宇宙環境にさらした後、3 回に分けて地上に回収しました（図 3）。そして捕獲された微小粒子および材料の分析を行っています。

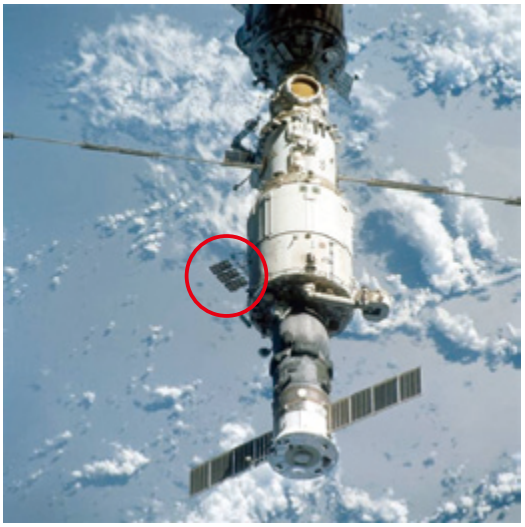


図 1　ズヴェズダに設置された MPAC&SEED
（2002 年 4 月撮影）

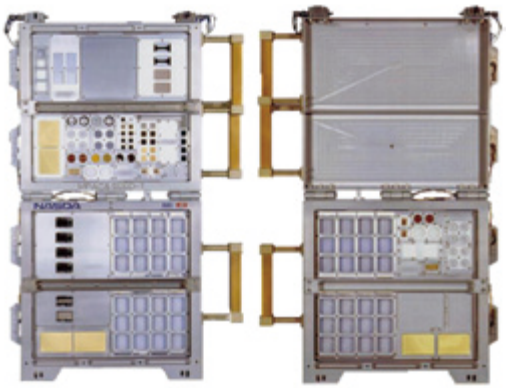


図 2　MPAC & SEED（トレイ 1 式の裏・表面）
（左：表（RAM）面、右：裏（WAKE）面）

図 3　MPAC&SEED（トレイのひとつ）を回収した後の状態

船外利用

成果

宇宙環境による劣化試験を ISS で実施、そして初めて新種の地球外物質回収!

宇宙への曝露を始めてから、約 1 年、2 年および 4 年経過後にそれぞれ実験試料を回収することで、最長 4 年間にわたる微小粒子の捕獲数変化、曝露材料の経年変化に関するデータを世界で初めて評価できました。また予想以上に ISS 自体が周りに影響を与えており（コンタミネーション）、特に原子状酸素、紫外線の影響がこれまで過小評価されていた可能性があることがわかりました。

更に MPAC では、これまでにない鉱物学的特徴を持つ新種の地球外物質（Hoshi と命名）を回収しました（図 4）。Hoshi は惑星間塵（成層圏を飛行する特殊な飛行機で回収される地球外微粒子で、彗星と小惑星起源の塵があるとされる）や微隕石（主に南極の氷あるいは雪を融解濾過して回収される地球外微粒子で、多くは小惑星塵と考えられている）と成因的な関係があり、かつ、今までに発見されていない組織と鉱物組成を持っており、このような微小粒子を発見したのは、世界初です。

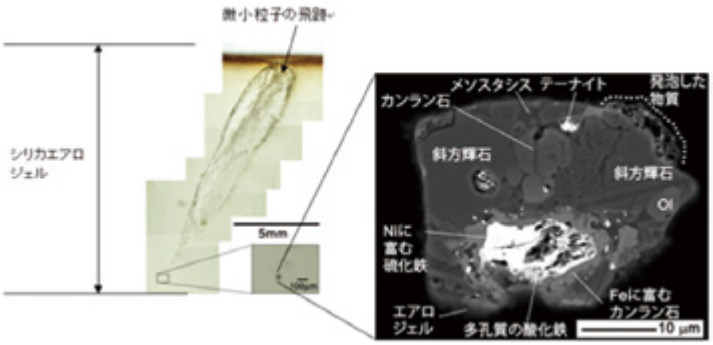


図 4　微粒子捕獲に用いられたシリカエアロジェル内の光学顕微鏡写真（断面図）と捕獲された「Hoshi」断面の電子顕微鏡像
（出典：Earth and Planetary Science Letters 309 (2011) 198-206)
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/news/120830_mpac_seed.html

今後への波及

地上への還元

Hoshi の発見は、まだ我々が手にしたことのない鉱物学的特徴を持つ始原的な地球外物質が存在していることを示しており、太陽系誕生の初期の時代に何が起きたかを解明するための新たな手掛かりとなることが期待されます。SEED 実験の成果からは、新規の優れた材料開発が期待されます。

宇宙活動への貢献

MPAC 実験において、微小粒子の存在量、大きさ、組成、衝突エネルギーなどについて評価し、安全な宇宙活動に支障をきたす恐れのある微小粒子環境の把握が期待されます。

SEED 実験においては、宇宙用材料（熱制御材料、固体潤滑剤など）の宇宙放射線、原子状酸素などからの宇宙における劣化実データが得られました。今後の新規宇宙用材料の開発、地上評価技術の向上などが期待されます。

MPAC & SEED は、きぼう船外実験プラットフォームに取り付けられている宇宙環境計測ミッション装置（SEDA-AP）にも搭載されました。

宇宙ステーションの気象台　~宇宙環境の計測とその部品・材料に及ぼす影響に関する研究~

宇宙環境計測ミッション装置（SEDA-AP）

代表研究者：古賀 清一（JAXA）

目的

衛星放送や衛星通信、カーナビゲーションシステムなど、宇宙は私たちの生活とは切り離せないものになっています。しかし、安全に宇宙で活動し、また宇宙を利用するためには、宇宙の環境についてもっと知る必要があります。SEDA-AP は ISS の「きぼう」日本実験棟に搭載され、ISS が周回する高度約 400km の宇宙環境を計測しています。

概要

2009 年 7 月のスペースシャトルで ISS に運ばれた SEDA-AP は、8 種類の計測機器を搭載し（図 1）、中性子や重イオン、プラズマ、高エネルギー電子・陽子、原子状酸素、スペースデブリなどを計測しています。また、電子部品や材料を宇宙空間に直接さらし、宇宙環境の影響を調べています。

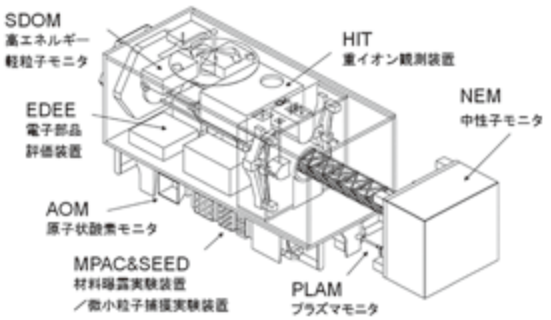


図 1　SEDA-AP に搭載された 8 つの機器

成果

高度 400km の貴重な宇宙環境データを 3 年間にわたって取得

人工衛星や ISS が活躍する宇宙空間には、宇宙機や宇宙飛行士にとって危険な宇宙放射線（太陽から来る放射線、遠い銀河からやってくる銀河宇宙線、地球の磁場に補足されたバンアレン帯の放射線粒子）、プラズマ、原子状酸素、中性大気、スペースデブリ等があります（図 2）。

これらの宇宙環境が原因となる宇宙機障害は全体の 20 － 25％と言われており（図 3）、宇宙飛行士が、危険な放射線の被害に遭わないよう、そして人工衛星が故障を起こさないように、宇宙放射線環境を宇宙環境モニター装置で常に監視しています。

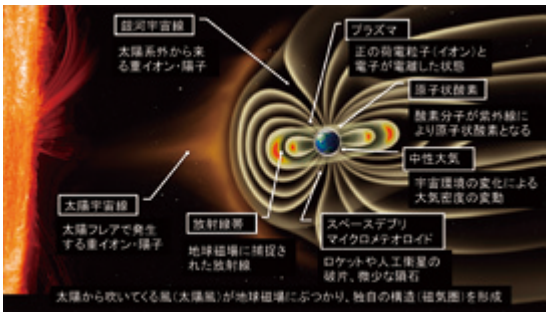


図 2　SEDA-AP が計測する宇宙環境

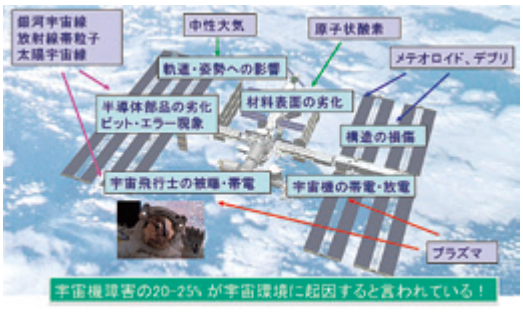


図 3　宇宙機に影響を与える原因

船外利用

①放射線帯の計測による国際モデル（ISO）への貢献

通常の地球観測衛星などよりも低い高度 400km の貴重な宇宙環境データを、3 年間にわたって取得し蓄積することができました。エネルギーの高い放射線粒子（電子）の SEDA-AP 計測結果（左）と AE8 モデル（右）を図 4 に示します。

これまで標準放射線帯モデルとして使われてきた AE8 モデルが作成されたのは、約 30 年前であり、SAA（South Atlantic Anomaly）と呼ばれる放射線が多い領域が地球磁場の変動で西に移動しているのが判ります。また、ISS が周回している高度 400km のデータはその時代には無く、データが抜けています。

SEDA-AP のデータを活用して作成した放射線モデルは、衛星を設計する際の放射線環境や太陽フレア発生時の放射線量の予測に役立てられており、モデルを ISO（国際標準化機構）の規格として提案しています。

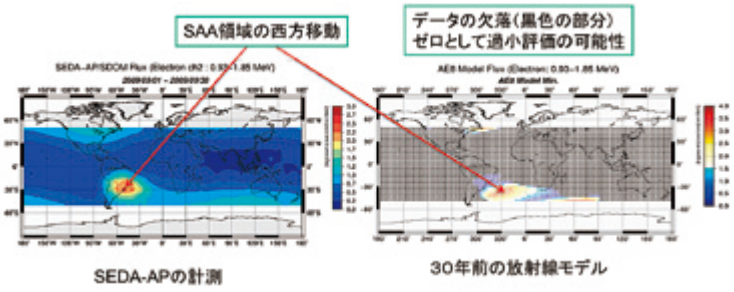


図 4　放射線帯の計測　（左）SEDA-AP の計測、（右）AE8 モデル

また、得られた宇宙環境データは、ISS に滞在する宇宙飛行士の被ばく管理や、放射線により引き起こされる部品の不具合解明などに活用されています。

②未だ明かされていない太陽フレアの発生メカニズムに迫った！（日本がリードする中性子計測）

ISS 内で、中性子のエネルギースペクトルをリアルタイムで計測しているのは、日本だけです。この日本独自の計測で、太陽フレアから生じる中性子に関し、中性子の増加を引き起こしたと考えられる現象の候補を 5 例見つけました。これらのデータは太陽フレア発生のメカニズムに新たな考え方を提起するもので、メカニズム解明につながります。また、銀河宇宙線が地球大気と衝突して生じる中性子等についても新たな知見を得ています。

③米国との宇宙環境データ交換

巨大構造物である ISS が磁場中を飛行すると、誘導起電力やプラズマの影響で電位差が生じます。異なる位置で計測を行っている米国のデータと SEDA-AP のデータの両方を用いてこれらの電位差を評価するため、ボーイングおよび NASA とのデータ交換の協定を締結しました。

また、米国の曝露部で帯電実験（プラズマが影響する）を実施中の実験機器へ、プラズマデータ提供も行っています。米国のプラズマ・電位計測装置は宇宙機が接近した時などの特定のタイミングのみの計測ですが、SEDA-AP は常時計測しているという利点があります。

電位差や帯電は宇宙機の故障に大きく関わる原因であり、日本だけが持つデータを提供することで国際的に貢献しています。

太陽の活動は 11 年周期で変動しており、今回の太陽活動期は 2013 年にピークを迎えると考えられています。引き続き大きな太陽フレアと ISS 周りの宇宙環境への影響を調べていきます。

また、SEDA-AP の実験装置のひとつである微小粒子捕獲実験装置 / 材料曝露実験装置（MPAC&SEED）は、2010 年 4 月に取り外され、地上で分析中です。先行実験では新たな地球外物質が見つかっており、データの分析結果が期待されています。

今後への波及

地上への還元

宇宙環境を計測することにより、衛星放送や衛星通信、カーナビゲーションシステムを安全に運用することができ、これらを使用している地上ユーザへの貢献ができます。

宇宙活動への貢献

ISS に滞在する宇宙飛行士の被ばく管理や、放射線により引き起こされる部品の不具合解明などに宇宙環境データが活用されています。地上へ回収された MPAC&SEED の解析からは、宇宙用材料に適した素材のデータが得られています。

地球の大気を宇宙から診る

超伝導サブミリ波リム放射サウンダ（SMILES）

代表研究者：塩谷 雅人（京都大学 生存圏研究所）

目的

地球を取り巻くオゾン層は太陽光に含まれる危険な紫外線の多くを吸収し、「地球の宇宙服」として、私たちを含む生物を守る役割を果たしています。しかし、人類の活動で作り出されたフロン等の気体が原因で、このオゾン層が破壊されています。オゾン層の破壊を考える際は、大気中のオゾンに加え、大気にわずかに含まれる化学物質（大気微量成分）も調べなければなりません。多くの大気微量成分の中には、オゾンを大量に破壊する反応のカギになるものがあるからです。これら大気中のオゾンと大気微量成分の濃度を定期的に測り、その変化をとらえることが SMILES の目的です。

概要

オゾンや大気微量成分の濃度を測るために電波の中で特に短い波長（0.1 ～ 1mm）のサブミリ波を使います。大気中に存在するオゾンをはじめとする多くの分子が、この波長帯で分子固有のサブミリ波を出すことがわかっているので、それを詳しく分析します。

サブミリ波をさえぎるものがない高度約 400km を飛行する ISS から、地球大気の分子が放射する微弱なサブミリ波帯の電磁波（624-650 GHz）を広域（北緯 65 度 - 南緯 38 度）にわたって観測します。地球大気の縁方向（大気を透かして見る方向）にアンテナを向けて、上下にスキャンを行い（図 1）、さまざまな高度の大気から微量分子の分布を精度よく観測します（図 2）。観測の高度分解能は約 3km です。高精度な観測は、超伝導ミクサという半導体技術を使い、装置を絶対温度 4K（マイナス 269℃）まで冷却することで可能となります。これらの技術を宇宙空間で実用化することは、世界初の試みです。

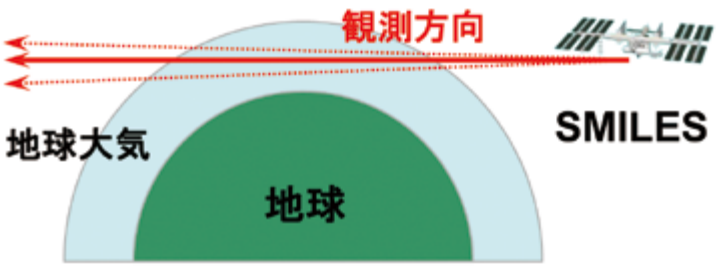


図 1　SMILES の観測イメージ（概念図）
※判りやすくするため、地球大気の層を地球自身に比べて誇張してある。実際は、地球半径（約 6,400km）に比べて大気（約 100km）はごく薄い層に過ぎない。

船外利用

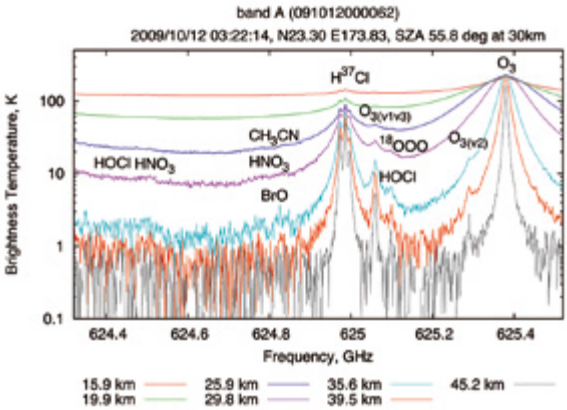


図 2　軌道上で測定したサブミリ波スペクトルの例
アンテナの角度に対応した高度から放射された電磁波を観測している

成果

オゾン層の動きが分かった

SMILES は 2009 年 9 月に ISS に運ばれ、軌道上で動作を確認した後、2009 年 10 月から地球大気の連続的な観測を開始しました。2010 年 4 月に装置内部のサブミリ波発振器が故障するまでの約 6 ヶ月間の大気観測データを取得し、オゾンや塩素化合物・臭素化合物などのグローバルな分布を求めました。

観測事例として、2009 年秋季～ 2010 年春季に赤道付近の成層圏オゾンが特異な分布をしていることを捉えました（図 3）。また、2010 年 1 月には、北半球でも南半球オゾンホールと同様の塩素化合物によるメカニズムでオゾン破壊が引き起こされていることを、明らかにしています（図 4）。

SMILES のデータは、これまで長年にわたって行われてきた地上観測や人工衛星からの観測データと比べても精度の高いものとなっています。また、地球大気の微量成分分布を計算する複数の数値シミュレーションの計算結果ともほぼ一致しています。例えば、これまで明らかでなかった、成層圏オゾンの日周変動（一日の中での、時間帯による変化）について、一日周期でオゾンの量が増減する様子を初めて明確に観測し、なおかつ数値シミュレーションでも同様の変動が再現されました（図 5）。SMILES 観測とシミュレーションとは独立に行われたものですので、それらが一致するということは、地球大気中のオゾンの日周変動現象を両者とも正しく示したものであるということができます。

2010 年 4 月のサブミリ波発振器の故障以降、軌道上からの地球大気観測は実施できていませんが、装置を極低温まで冷却するために開発された小型・長寿命の機械式冷凍機の技術実証を 2014 年 3 月まで継続して実施し、温度変化に伴う特性データなどを取得しました。

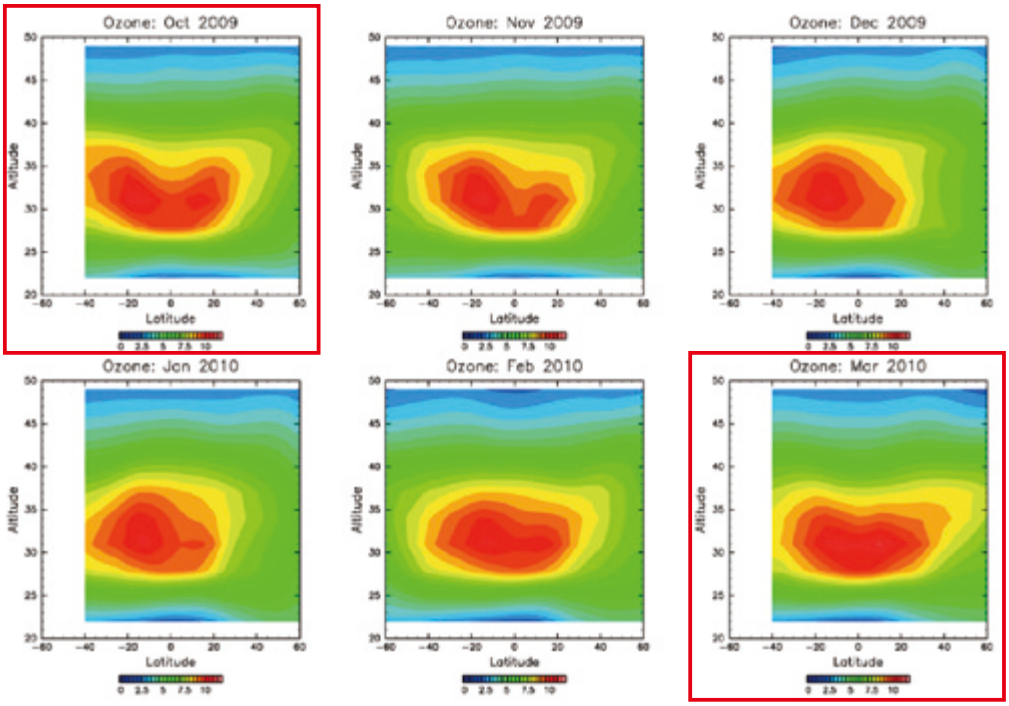


図 3　2009 年 10 月から 2010 年 3 月までの成層圏におけるオゾンの分布
オゾンの多い領域（赤色）が、秋季と春季には同心円状でなく「ウサギの耳」（赤い四角で囲った部分）のような変形した分布になっているように見える

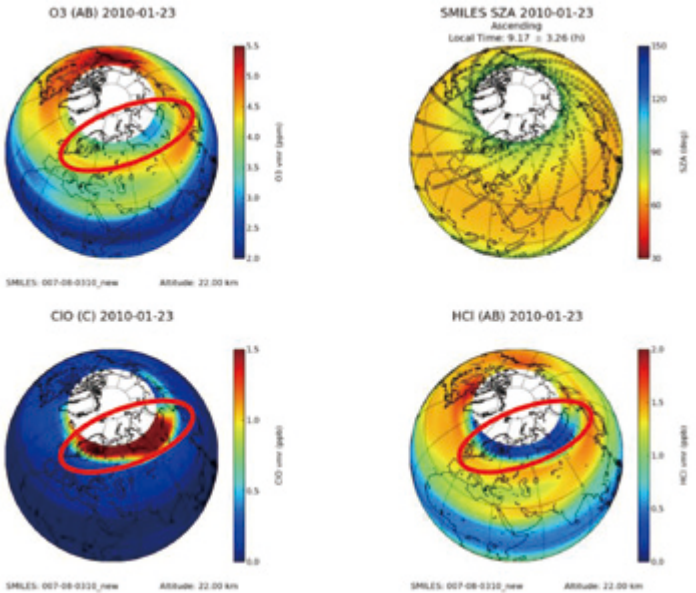


図 4　2010 年 1 月 23 日の、オゾン（左上）・一酸化塩素（左下）・塩化水素（右下）の分布
右上は観測地点での昼夜の差を示す。北極付近でオゾンが減少し（左上：青色、オゾンを破壊する一酸化塩素が増加（左下：赤色）・化学的に安定な塩化水素が減少（右下：青色）していることが判る。（赤丸で囲まれた部分）

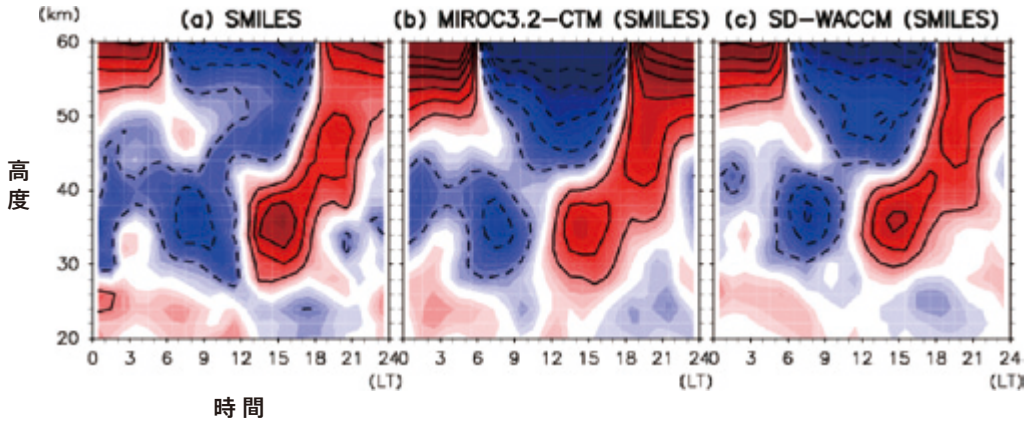


図 5　SMILES 観測で捉えた高度方向のオゾン分布の日周変動と同時期を再現したシミュレーション結果。平均的なオゾン量と比べて、高度や時刻によって増加したり（赤色）減少したり（青色）する変動の様子が、SMILES 観測でもモデル計算でも捉えられている。
（左）SMILES 観測データ、（中央）モデル計算（日本・国立環境研究所）、（右）モデル計算（米国・大気研究センター）

今後への波及

地上への還元

オゾン濃度が減少すると、地上に降り注ぐ有害な紫外線が増加し、皮膚がんや白内障、免疫機能の低下を起こす人が増えると言われていますが、オゾンの破壊メカニズムの理解は十分ではありません。SMILES は、オゾンやオゾン破壊に関連する大気微量成分（塩素や臭素系の物質）のグローバルな分布を高い精度で導き出したほか、これまで不明な点が多かった成層圏微量成分の日変化を捉えることができました。これらの知見は、オゾン層の保護や回復などに向けた、地球大気環境のより正確な理解に貢献します。

SMILES の日変化のデータは、2014 年 WMO（世界気象機関）の UNEP（国連環境計画）「オゾン層破壊アセスメントレポート」の検討に活かされています。

宇宙活動への貢献

軌道上で取得した冷凍機のデータや故障の原因調査の結果は、将来の宇宙機向け冷凍機開発における信頼性向上や長寿命化に生かされます。

なお、絶対温度 4K まで冷やせる宇宙用極低温冷凍機は、JAXA と ESA（欧州宇宙機関）のみが保有する技術であり、JAXA の次期 X 線天文衛星 ASTRO-H への搭載に備えた技術データが得られました。

宇宙からサブミリ波帯（640GHz）で観測するための開発を行い、実際の観測ができたことから、この新たな観測周波数帯の開拓につながりました。また、世界で初めて超伝導検出器と極低温冷却技術を用いた地球大気の観測を行い、宇宙での実証を行いました。

宇宙を探る　全天にわたるX線天体の長期・短期変動の研究

全天 X 線監視装置（MAXI）

代表研究者：松岡　勝（理化学研究所、JAXA）

目的

ブラックホールや高密度星周辺の高温ガス、星の磁場や爆発で加速し熱せられた高温ガスなどから発せられるX線を観測し、これらの天体と天体が周辺に与える影響を研究します。空の全ての方向を短時間で繰り返し観測し続けるという「全天モニター」の特徴を生かし、（普通の天文衛星では見逃しがちな）ブラックホール新星の出現の瞬間や、限られた期間のみX線で明るく輝く天体、宇宙物理学上貴重だが稀な天体現象、各天体の長期間変化を観測します。

概要

2009 年 7 月に ISS に運ばれた MAXI は、宇宙のあらゆる方向から飛んで来るX線を ISS のきぼう船外に搭載した巨大なX線デジタルカメラで観測します。一般的なX線天文衛星は一度に見渡せる空の角度が縦横約 0.5 度（空にのぼった満月の見た目の大きさと同じ程度）が普通で、研究者が興味のある方向に望遠鏡とカメラを向けます。一方、MAXI は ISS に固定されたカメラで、研究者が好みの方向へ向けることはできませんが、縦 1.5 度、横 160 度という大きな視野をもち、ISS が約 90 分かけて地球のまわりを一周するとともに、自動的に全天（地球からみた宇宙のあらゆる方向）を撮影します。天体が 1 つも見えていない場所もわけへだてなく監視しているので、新天体が出現したときも見逃しません。また、既に知られている天体は全て、自動的に、長期にわたり繰り返し観測します。

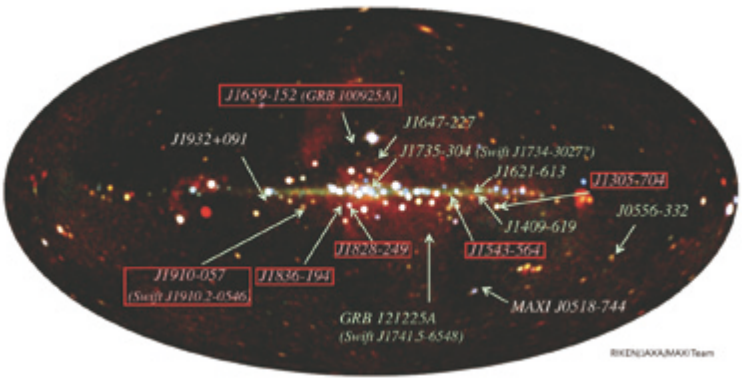


図 1　MAXI で取得した 4.6 年分のデータから作成した全天の X 線画像上に、MAXI が発見した 14 個の新天体を示した。天体名を四角枠で囲った 6 個はブラックホール候補天体。矢印の位置は大体の位置を示し、必ずしも矢印にある明るい天体が新天体ではなく、また本画像上では肉眼で確認できないものもある。

成果

数々の世界的な新発見

①ブラックホール候補天体の発見と観測：MAXI は 2014 年までに計 6 個のブラックホール候補天体を含む X 線新星を計 14 個発見しています。MAXI が打ちあがる前は X 線新星の発見は年 1 個程

度だったのに対し、MAXI だけで年 2 ～ 3 個というのは世界最短・最速ペースです。MAXI で発見したブラックホール候補天体の 1 つ目 MAXI J1659 − 152 は、日本にとっては実に 19 年ぶりの銀河系内ブラックホール候補天体の発見でした。MAXI 打ち上げ後、世界で発見されたブラックホール候補天体のうち約半分を MAXI が発見しています。MAXI のデータを使って、ブラックホール候補天体の質量などを求めています。

②X 線連星パルサーの観測：MAXI はこれまでＸ線連星パルサー（強い X 線を規則的に放射している天体）について 30 回以上の増光（X 線が強くなること）を確認しています。GX304-1 については 30 年ぶりに MAXI が増光をとらえ、引き続き同じ GX304-1 からの約 10 倍規模の増光もとらえました。後者の増光の情報を MAXI から受けて、日本の X 線天文衛星「すざく」がより精密な観測を行い、非常に強い磁場が存在する証拠を発見しました。別の天体 MAXI J1409 − 619 については、MAXI の発見を受けて米国の Swift 衛星が精密観測を実施し、Ｘ線強度の規則的な変動（パルス）を見つけました。

③星の X 線増光：星（進化の初期段階の星を含む）のＸ線増光をこれまでに 22 個の天体から 70 回検出しました。あらゆる空の方向をわけへだてなく観測する MAXI によって、いろいろな種類の星から、大小さまざまな増光を観測することに成功しました。これらの観測により、連星ではない孤立した進化初期段階の星が非常に大きな増光を起こしうることを観測によって明らかにしました。

④活動銀河核の観測と、巨大ブラックホールが星を飲みこむ瞬間の観測：活動銀河核の一種であるブレーザー Mkn421 から宇宙ジェット起源のＸ線増光 (過去最高強度) を検出し、その放射メカニズムを詳細に調べました。MAXI と米国の Swift 衛星は、他の銀河から単発のジェット起源と解釈できる放射を検出し、これを「巨大ブラックホールが星を飲み込む瞬間を捉えた世界初の観測」として発表しました（2011 年 8 月に科学誌 Nature に掲載）。

図 2　巨大ブラックホールが星を飲み込む様子を示したイメージ図
(NASA/ Goddard Space Flight Center/Swift)

⑤ MAXI 天体カタログ：MAXI の初期の観測データを用いて天体目録を作成し発表しました。明るい天体の顔ぶれが 30 年前につくられたＸ線天体の目録と比べて大きく変わっていることを明らかにしました。また、近傍にある活動銀河のＸ線明るさ分布を高い精度で決定しました。

⑥極超新星爆発の痕跡を発見：白鳥座方向に” 極” 超新星爆発の痕跡を見つけました。この爆発は、通常の超新星爆発の 100 倍も大きなもので、その規模から” 極” 超新星だと推定しました。我々の住む天の川銀河では、極超新星もその痕跡もこれまでみつかっておらず、天の川銀河内での世界初の発見です。

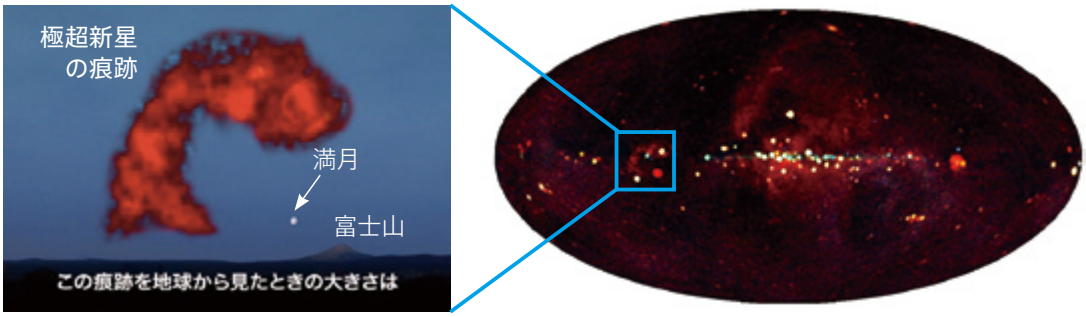


図３　右図：MAXI の X 線 CCD カメラ（MAXI/SSC）で取得した 2.5 年分のデータから作成した全天の X 線画像。図 1 を撮影したカメラ（MAXI/GSC）ではとらえることのできない低い X 線にも感度があるため、図 3 のみに写っている天体（とくに大きく広がった天体）がある。そのうちの 1 つ、四角枠で囲った広がった天体が極超新星の痕跡であることを、MAXI の観測は明らかにした。
左図：この極超新星の痕跡を地表から見たときの大きさを示した。差し渡しは満月の約 40 倍。
（注：実際には、地球の大気に邪魔され宇宙からの X 線を地表から観測することは出来ない。）

⑦新生爆発初めの火の玉から放たれた X 線閃光を発見：新星爆発開始直後に生じた火の玉の X 線観測に世界で初めて成功しました。この閃光は非常に重い白色矮星で起こった新生爆発の初期に星全体を包み込んだ「火の玉」からの放射であり、理論予測はされていましたが観測は世界初です。これまでの予測を超えた明るさだったため、新星と白色矮星の理論に大きな影響を与えました。

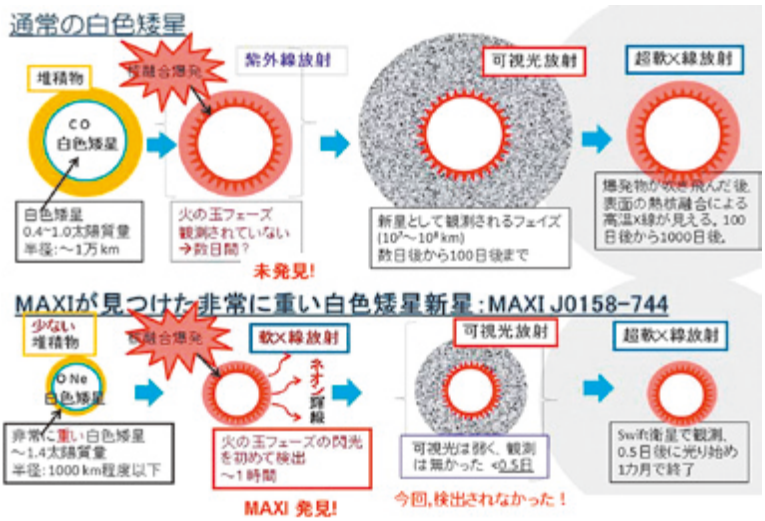


図４　通常の新星爆発と MAXI が火の玉閃光を捉えた新星爆発の比較

今後への波及

地上への還元

X 線天文学の分野で数々の世界的な新発見を行っています。世界的にも評価され、X 線天体の研究で活躍しています。

観測で得られた実際の画像はプラネタリウムのソフト作成へ利用されています。

また、アメリカの大学生向け教科書「21st Century Astronomy」（第 4 版、2013 年 2 月）に掲載されています。今後、日本の高校生向け教科書へも掲載される予定です。

宇宙活動への貢献

MAXI 用に開発した CCD カメラ素子が、はやぶさでも活躍しました。

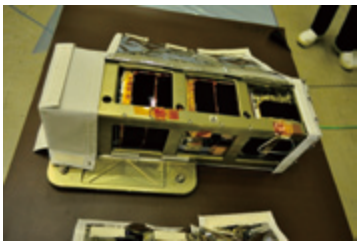
「きぼう」から飛べ！ 超小型衛星を放出

小型衛星放出技術実証ミッション（J-SSOD）

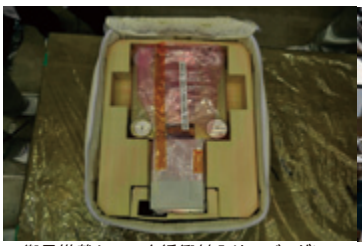
代表研究者：和田　勝（JAXA）

目的

エアロックとロボットアームを併せ持つ「きぼう」の特徴をいかし、緩衝材に包んだ状態で船内の荷物として打ち上げられた超小型衛星を船外に放出します（図１）。ISS からの衛星放出の特徴として、ロケットでの直接打上げに比べ、振動などの打上げ環境がマイルドなため、構造重量を減らし、ミッションにより多くのリソースを割くことが可能なこと、より先端的なミッション機器を搭載できる可能性が高いことが挙げられます。その他、ISS へは数ヶ月程度ごとに打上げが実施されており、非常に多くの搭載機会を高頻度に提供することができます。また、必要に応じて、打上げ後に「きぼう」船内で衛星の健全性などを宇宙飛行士が確認することができるため成功の確実性が増すといったメリットがあり、超小型衛星の新たな打上げ機会を提供します。

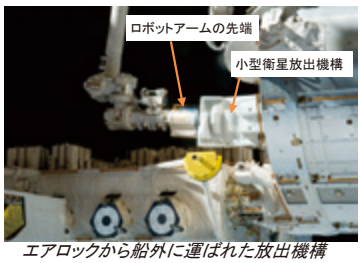


超小型衛星を放出機構の衛星搭載ケースに収納

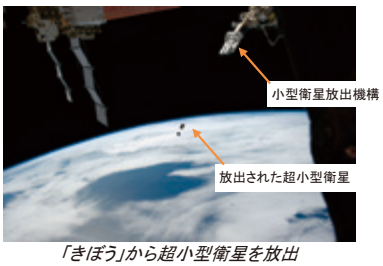


衛星搭載ケースを緩衝材入りのバッグに梱包し、こうのとり3号機の船内貨物として打ち上げ

放出機構を星出宇宙飛行士がエアロックテーブルに取り付け



エアロックから船外に運ばれた放出機構を「きぼう」ロボットアームでつかみ、放出位置へ移動



「きぼう」から超小型衛星を放出

超小型衛星の例（FITSAT-1）

図１　「きぼう」からの小型衛星放出実証ミッション概要

概要

このミッションでは、宇宙ステーション補給機「こうのとり」3 号機（HTV3）で小型衛星放出機構と 5 機の超小型衛星（JAXA 公募衛星 3 機、NASA 公募衛星 2 機）を船内貨物として ISS へ輸送しました。星出宇宙飛行士が「きぼう」船内で開梱し、これらをエアロックへ取付けた後に、衛星を搭載した放出

機構はエアロックを通して船外に運ばれました。「きぼう」のロボットアームで放出機構を取り出し、放出位置へ移動した後、2012 年 10 月に 2 回に分けて衛星放出を実施しました。

成果

ISS 船外からの衛星放出に成功!

予定通り、5 つの超小型衛星を ISS から放出することに成功しました。ロボットアームを使った衛星放出ミッションは ISS 初の試みでしたが、安全審査等を含む一連のプロセスを確立することができました。これにより、小型衛星放出機構の技術実証は完了し、新たな衛星打上げ機会として利用者を募っています。

「こうのとり」4 号機 (HTV4) では、東京大学、ベトナム国家衛星センター及び IHI エアロスペース (株) が共同開発した超小型衛星を含む、計 4 機の衛星を若田宇宙飛行士が放出しました。

図 2　東京大学、ベトナム国家衛星センター及び IHI エアロスペース社の衛星

今後への波及

地上への還元

低コストで開発可能な超小型衛星は教育及び技術実証の機会として期待されており、多くのユーザがいます。様々なメリットがある ISS からの放出技術が確立されたことで、超小型衛星の多様な打上げ機会を提供します。

宇宙活動への貢献

「きぼう」のエアロックとロボットアームを活用することで、ISS で「きぼう」だけが、宇宙飛行士の船外活動なしで、船内と船外の間で機器を出し入れする機能を持っています。この特徴を活かして、新たな実験や技術実証を行うミッションを創生します。

また、日本がロボットアームによる衛星放出を世界で初めて実証したことを受け、米国も追随して「きぼう」から超小型衛星放出を行うなど、日本の技術から、新たな宇宙利用の形が世界に広がっています。

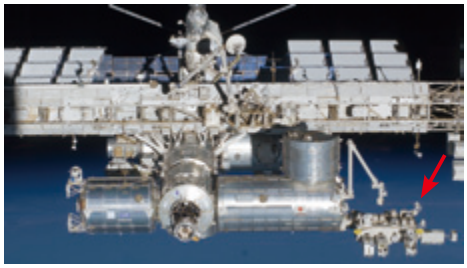
ポート共有実験装置（MCE）

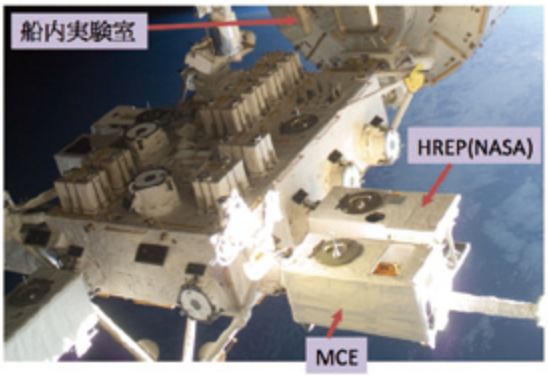
目的

ポート共有実験装置（MCE）は、比較的小型の 5 つのミッションをひとつの実験装置にまとめて載せ、きぼうの船外実験プラットフォームの 1 つのポート（実験装置を取り付けるための設置場所）を共有して実験・観測を行う実験装置です。船外実験プラットフォームには、「ポート」が 10 箇所ありますが、このひとつを共同で利用することで有効利用を図ります。

MCE は、2012 年 7 月に「こうのとり」3 号機で ISS に運ばれて設置されました。MCE には以下の 5 つの実験装置が搭載されています。

❶地球超高層大気撮像観測（ISS-IMAP）……p.156
❷スプライト及び雷放電の高速測光撮像センサ（JEM-GLIMS）……p.158
❸宇宙インフレータブル構造の宇宙実証（SIMPLE）……p.161
❹ EVA 支援ロボットの実証実験（REX-J）……p.164
❺船外用民生品高精細ビデオカメラシステム（COTS HDTV-EF）……p.167





上の写真は左の写真の矢印の方向から、きぼうのロボットアームを使って撮影したもの

図 1　きぼう船外プラットフォーム上の MCE の取り付け位置

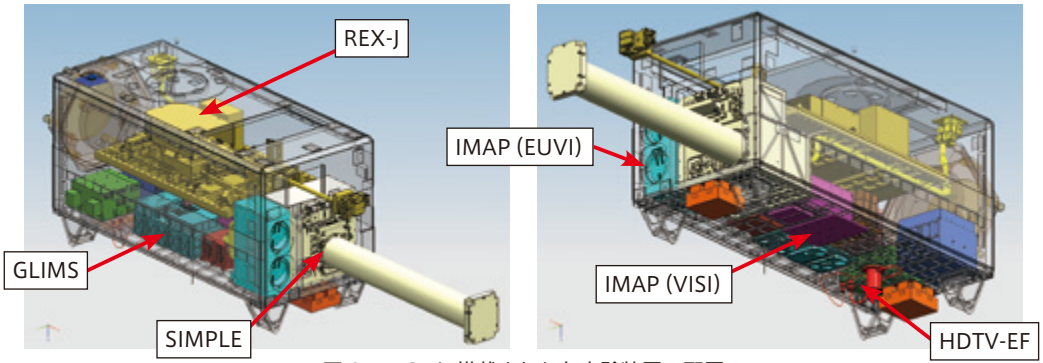


図 2　MCE に搭載された各実験装置の配置

宇宙と地球の境界で何が起きているのか？

地球超高層大気撮像観測（ISS-IMAP）

代表研究者：齊藤 昭則（京都大学）

目的

地球を取り巻く大気圏から宇宙空間へ移り変わっていく高度 80km 以上は超高層大気と呼ばれる領域で、地球大気と宇宙空間プラズマが混ざり合い、上・下両側からの影響を複雑に受けています。ここはカーナビや携帯電話に使われている GPS（全地球測位システム）衛星や、通信放送衛星、気象衛星などの静止衛星から地上に送られる電波が通過する領域で、ここで大きな乱れが発生する時には衛星からの電波が届かず使用できなくなることがあります（図 1）。ISS-IMAP ミッションは、可視、近赤外、極端紫外の波長域でプラズマや大気の乱れを光学観測し、地球大気と宇宙空間の境界領域での乱れ発生のメカニズムを解明することを目的としています。

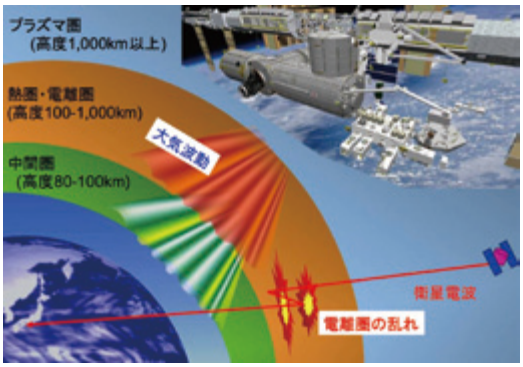


図 1　地球超高層大気と電離圏の乱れ発生領域

概要

ISS-IMAP ミッションは、可視・近赤外域の分光撮像装置（VISI）と極端紫外域の撮像装置（EUVI）の二つの超高感度カメラとミッションデータ処理装置（MDP）で、地球大気と宇宙空間のはざまからの目には見えない微弱な光（大気光とイオン共鳴散乱光）を撮影して、発生している超高層大気の乱れを観測します。VISI はスリットカメラで、ISS から眼下を見下ろすように下部に取り付けられています（図 2）。EUVI は、地球の縁とその上空を見るように ISS の進行と反対方向に向けて取り付けられています。また、A-IMAP ミッションとして、VISI の観測時刻・場所に合わせた地平線方向の大気光の分布の撮影が宇宙飛行士によって行われました。

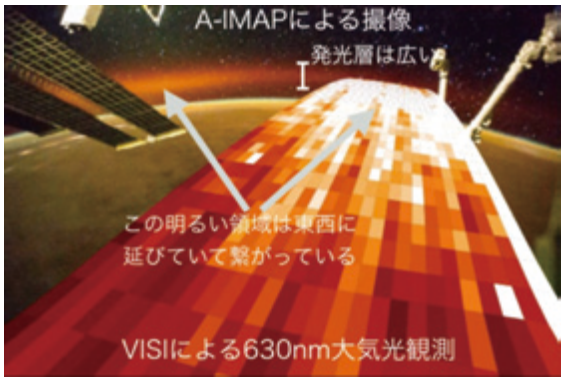


図 2　（左上）可視・近赤外分光撮像装置（VISI）と（左下）極端紫外光撮像装置（EUVI）。（右）A-IMAP と VISI 観測による大気光の同時観測。画像解析から波長 630nm（赤色）大気光の発光位置を推定し、同じ大気光分布の水平構造（VISI）と垂直構造（A-IMAP）を捉えていることが判明した。

船外利用

成果

竜巻が超高層大気に起こす波動を捉えた！

2013 年 6 月 1 日に北アメリカ上空で VISI は酸素分子からの大気光（波長 762nm）の同心円状の構造を観測しました（図 3 左）。この構造は、高度 95km に現れていて、中心から円の外側に向けて 1,000km 以上にわたってほぼ減衰せずに同心円状の波が伝播していることが分かりました。図 3 右は、この構造の主な波面（赤い円）と、対流圏（地上からの高度 10km くらいまで）の雲の頂上の温度を重ね合わせたものです。雲の頂上の温度が低いほど、雲が高い高度まで伸びて、雲が活発に成長していることを示します。図中の青い星印は、大気光同心円構造の中心を表しています。この中心付近に温度の低い活発な雲が分布していることがわかります。この活発な雲は、数時間前に地上で強い竜巻を起こして、大規模に発達したものでした。この雲が大気を揺さぶり、その大気の波が、上空に伝わり、地球大気と宇宙空間のはざまである高度 100km 付近の薄い大気を揺さぶり、大気光の同心円状構造として VISI に観測されたと考えられます。大気光観測を通じて地球の超高層大気と下層大気（対流圏など）との結びつきを明らかにした結果です。

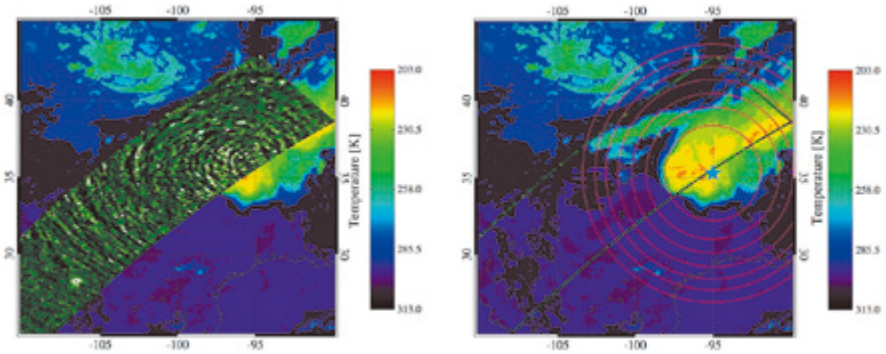


図 3　VISI の波長 762nm 大気光観測（左）と雲頂上の温度（右。データ :NCEP/NCAR）。（Akiya et al., GRL, 2014）

今後への波及

地上への還元

これまで捉えることが出来なかった中緯度・低緯度地域での超高層大気の激しい変動の様子が広い範囲で観測できます。突発的に起こる地球大気と宇宙空間のはざまのプラズマや大気の乱れ発生の仕組みを明らかにすることで、人工衛星からの電波の散乱を予測し、地上でデータ補正できるようになると期待されています。

宇宙活動への貢献

プラズマや大気の乱れ発生の仕組みを明らかにすることで、「地上への還元」とは逆方向の通信の人工衛星への電波の不達を防ぐための未来の予報システムの開発につながることが期待されています。

自然の驚異、雷の全体像を明らかにする

スプライト及び雷放電の高速測光撮像センサ（JEM-GLIMS）

代表研究者：牛尾 知雄（大阪大学）

目的

夏の風物詩とも言われる雷放電は、雷雲内に蓄えられた電気が放電する現象です。この雷放電に伴って雷雲上空で発生する高高度放電発光現象（スプライト、エルブス、ブルージェット：図 1 参照）及び雷放電を、「きぼう」の船外プラットフォームから観測します。得られるデータからスプライトの水平空間分布と時間的な発達過程を明らかにし、発生条件とメカニズムを解明することが最終的な目的です。また、高高度放電発光現象の全地球的な分布を特定することも目的としています。

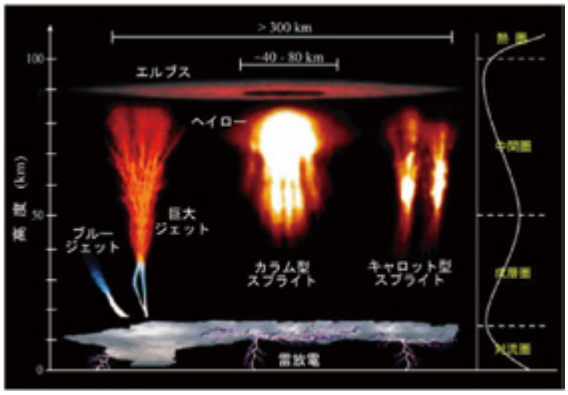


図 1　GLIMS が撮影を狙う高高度放電発光現象

概要

JEM-GLIMS は、高空間分解能をもつ CMOS カメラ（LSI）、高時間分解能をもつ測光器（フォトメタ：PH）、VLF 帯・VHF 帯電波受信器（VLFR、VITF）によって、雷放電とスプライトを世界に先駆けて真上から継続的に観測します。この真上観測によって、地上観測データからだけでは良く分からなかった雷放電とスプライトの水平方向の空間分布と時間的な発達過程を、詳細に調べることができます。さらに宇宙空間から真上観測することによって、地球大気による吸収・散乱の影響をほとんど受けることが無いため、発光強度を精度高く求めることができます。観測は、ISS が日陰飛行中に自動的に実施され、雷発光が発生したときのみのデータを保存する設計（イベントトリガ方式）になっています。データはテレメトリ回線によって自動的に地上に送信されます。

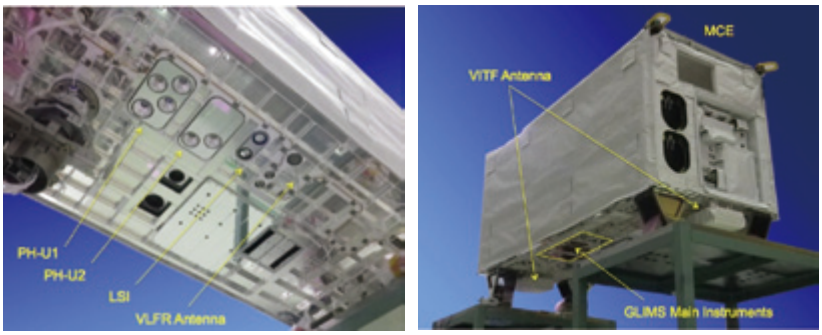


図 2（左）きぼう船外のポート共有実験装置（MCE）の底面部に取付いている GLIMS 機器。
（右）MCE 底面両端に取付いている VHF 干渉計アンテナ部。

船外利用

成果

スプライトの真上観測に多数成功−世界最先端のデータの取得を継続中

JEM-GLIMS は 2012 年 12 月から定常観測を開始し、現在まで順調に雷発光の観測データ取得を継続しています。2014 年 11 月末までに約 5050 例の雷発光の検出に成功しており、そのうち約 500 例が雷放電に伴ってその上空で生じる高高度放電発光現象を伴っていることを初めて突き止めました。

図 3 は、2014 年 6 月 10 日に西アフリカ上空で観測された雷放電発光とスプライト発光です。広帯域カメラ (LSI-1) と狭帯域カメラ (LSI-2) の画像データを演算処理すると、スプライト発光を選択的に抽出することができます。この例では、スプライト発光が雷発光の最大点から約 10 km 程ずれて発生したことが分かります。このように強烈な雷発光から微弱なスプライト発光を検出する手法を GLIMS ミッションチームが初めて開発し、数年後に打上げが予定される欧州の雷放電・スプライト真上観測ミッション (ASIM, TARANIS) は、我々の成果を参照することになるでしょう。

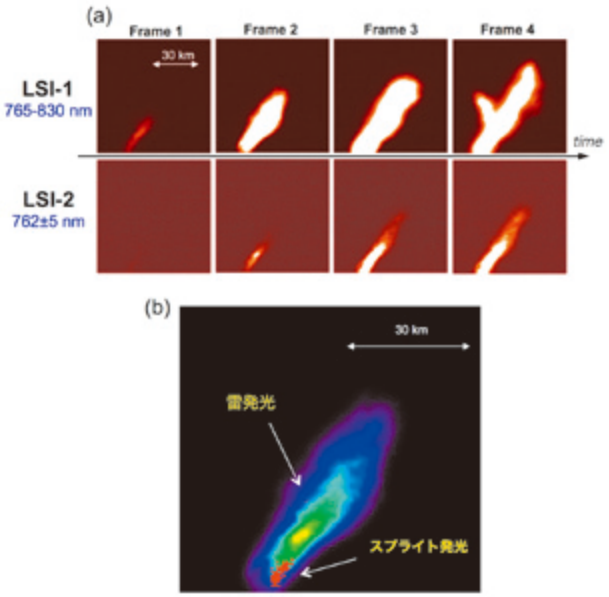


図 3　2014 年 6 月 10 日に西アフリカ上空で観測された雷放電発光とスプライト発光。
(a) 33ms の時間間隔で広帯域カメラ (LSI-1) により観測された発光と、狭帯域カメラ (LSI-2) により観測された発光。
(b) (a) の Frame 2 の LSI-1、LSI-2 画像データを演算処理するとスプライト発光を抽出することができる。

図 4 は、2014 年 10 月 4 日に北米フロリダ半島東部の大西洋上で観測された VLF 帯の雷放電ホイッスラーの例です。雷の最大放電電流値が大きい雷ほどこのような波動を放射しますが、GLIMS で常にこのような波動が観測されるわけではありません。高度 100 km 以上に存在する電子密度の濃い領域を電離圏と呼びますが、この電離圏がある条件を満たす場合にのみ、このような波動が ISS の GLIMS で観測されることになります。GLIMS の観測データからどういう条件で電波が電離圏を透過してきたのか、電離圏でどのような擾乱が発生していたのかを調べることができます。

図 5 は、2013 年 8 月 15 日にブラジル上空で観測された雷放電によって放射された VHF 波動の波形データです。2 式の VHF アンテナで同時観測された波形データから波動の放射源位置を推定することができます。宇宙空間から雷放電放射 VHF 波動の放射源を特定したのは GLIMS が世界で初めてです。

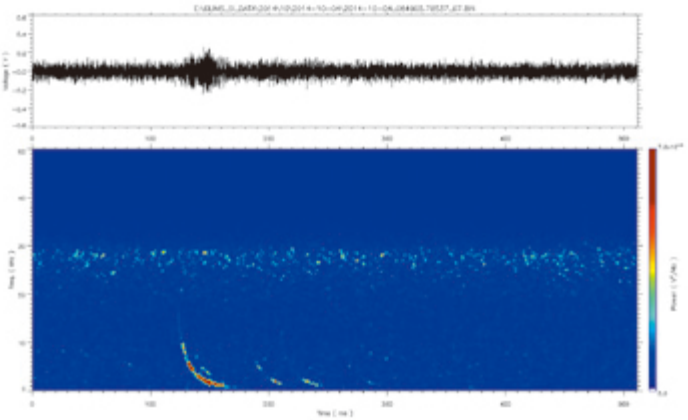


図 4　2014 年 10 月 4 日に北米フロリダ半島東部の大西洋上で観測された雷放電ホイッスラー。(上) GLIMS の VLFR によって観測された雷放電ホイッスラーの波形データ。(下) 波形データのダイナミックスペクトル。雷放電は複数回にわたってホイッスラーを放射したことが分かる。

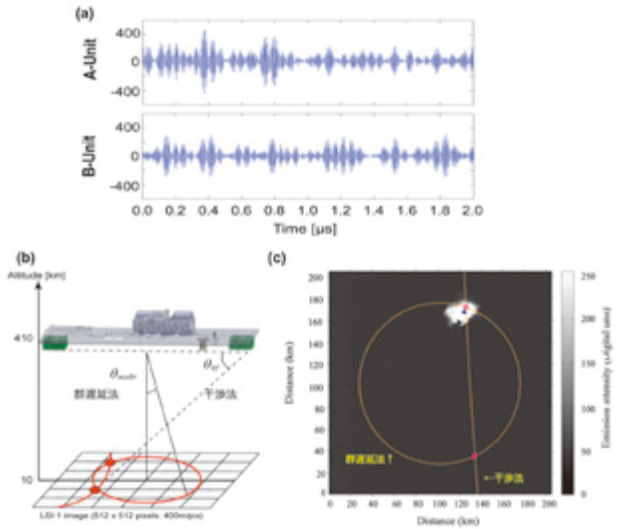


図 5　2013 年 8 月 15 日にブラジル上空で観測された雷放電放射 VHF 波動。(a) VITF A 系と B 系で観測された VHF 波動。(b) 干渉法と群遅延法を併用して波動の放射源を推定する手法を世界で初めて確立した。(c) GLIMS のカメラ画像上に描画した VHF 波動の放射源位置。

今後への波及

地上への還元

①これまでわかっていなかった雷の全体像 (高高度発光現象等)、発生メカニズム・条件などが明らかになります。

②雷放電と高高度放電発光現象のメカニズムや全地球上での発生頻度が明らかになると、さらに、それらの現象が窒素酸化物やオゾンの生成・破壊という地球大気組成の変化に、どのように影響を及ぼしているのかが明らかになると期待されます。

③雷放電・高高度放電発光現象の全体像を明らかにし、宇宙からリアルタイムに監視することによって、地球の気候変動や局所災害発生の予測に役立てることができます。

宇宙活動への貢献

2015 年以降に宇宙からの雷・スプライト観測を行う予定のフランスの TARANIS ミッションおよび、ESA の ASIM ミッションに対し、JEM-GLIMS で得られた科学的・技術的知見を還元する予定です。

巨大な構造物を軽く・安く造る技術

宇宙インフレータブル構造の宇宙実証（SIMPLE）

代表研究者：青木 隆平（東京大学 大学院工学系研究科）

目的

袋状の膜材に気体を入れて膨らませ、その気体の圧力で構造を支えて使うインフレータブル構造物は、軽くて、収納性が良く、簡単に展開して使えるため、今後の宇宙開発に必要不可欠な基礎技術として注目されています。SIMPLE は宇宙インフレータブル構造を実際に宇宙空間で展開させるなどにより、実用性を確かめることを目的としています。

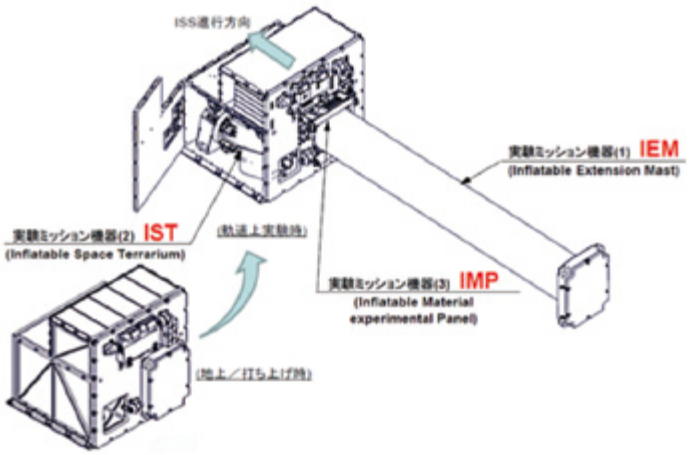
概要

以下の実験を行い、今後の活用のための基礎データを集めます。

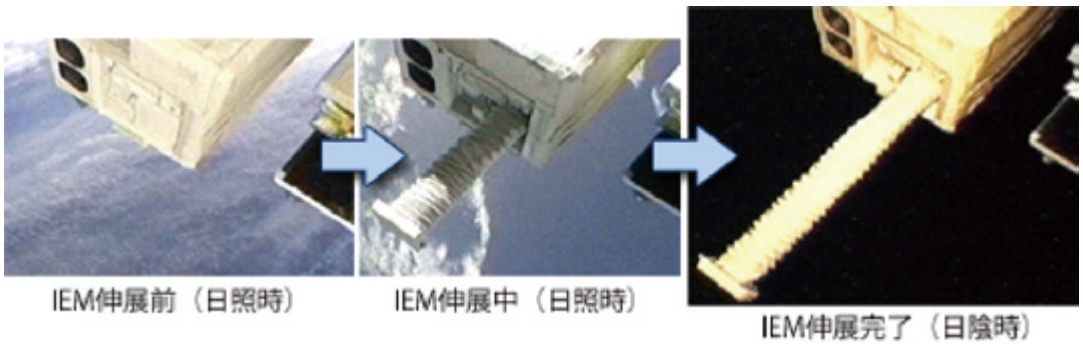
①構造特性を調べるインフレータブル伸展マスト（IEM）の展開実験

②内部を 1 気圧に保ち植物などの栽培飼育環境にもなるインフレータブル・スペース・テラリウム（IST）実験

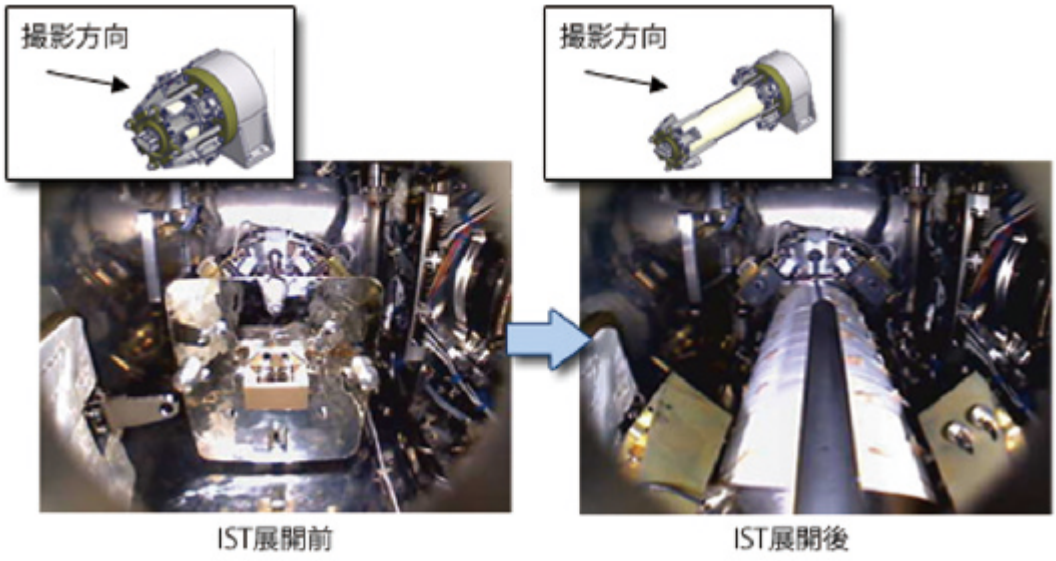
③インフレータブル材料実験パネル（IMP）を用いた形状記憶ポリマや紫外線硬化樹脂などの材料実験



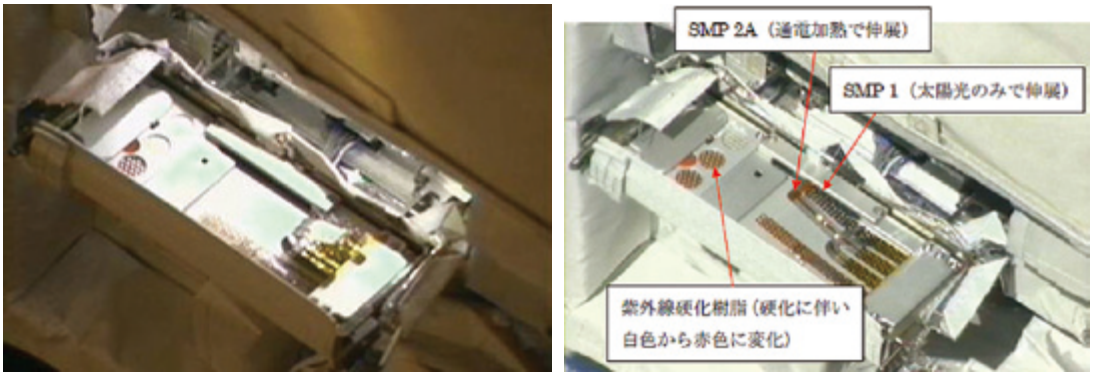
SIMPLE の 3 つの機器の搭載位置



①伸展マスト（IEM）の展開（軌道上）



②スペーステラリウム（IST）の展開（軌道上）



③材料実験パネル（IMP）の展開と試料実験（軌道上）

成果

宇宙空間でインフレータブル構造物や形状記憶ポリマの伸展に成功、データ継続取得中

①世界で初めて剛性（曲げやねじりなどの力に対し変形しにくい性質）の高い直線状のインフレータブル構造物である伸展マスト（IEM）の伸展に成功、固有振動数（質量や構造的な剛性で決まる固有の数値）など軌道上データを継続取得しています。

IEM の固有振動数は地上での予測値を維持しており、剛性は変化していません（図 1）。つまり、この構造の軌道上劣化は伸展後 7 ヶ月以上が経過しても認められませんでした。今後、さらに長期間宇宙空間にさらされたときの変化を調べていきます。

②空気で 1 気圧に保たれたテラリウムの展開に成功。
③宇宙にさらされた環境で、世界で初めて形状記憶ポリマの伸展（形状回復）に成功。また、紫外線硬化樹脂の硬化も確認。

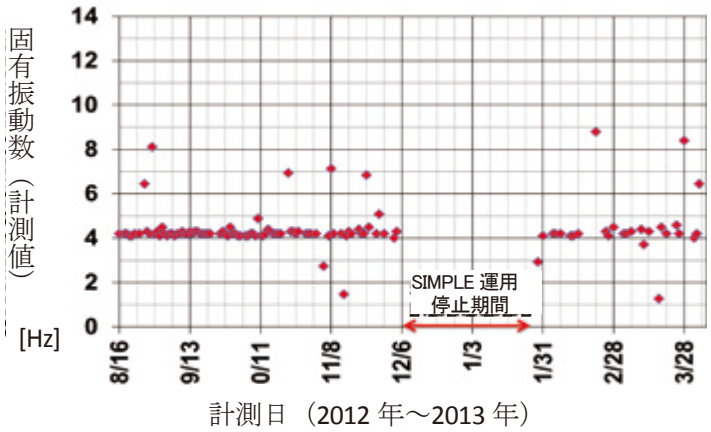


図 1　伸展マスト（IEM）の固有振動数値計測結果（軌道上 7 ヶ月間）

今後への波及

地上への還元

材料実験などの成果は、ドーム型球場などの地上のインフレータブル構造に応用出来ると考えられます。

宇宙活動への貢献

インフレータブル構造を使えば、宇宙空間や月・惑星での建物・構造物を簡単に、早く、安く、製造出来るようになると期待されています。

将来は、大型の宇宙発電衛星や月面タワーへの応用が期待できます。また、中を密閉した空間として使えるので、地球大気と同じような気体を入れておけば動植物を育てる設備としても役に立ちます。

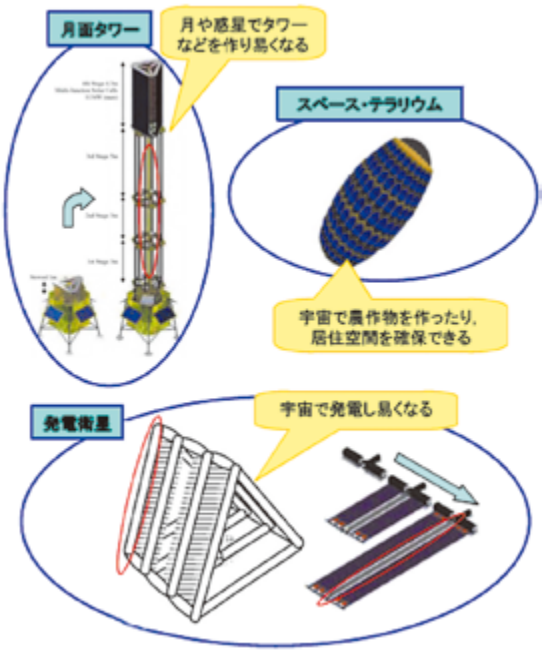


図 2　今後への波及

縦横無尽に動く「空間移動ロボット」が宇宙開発の未来を支える

EVA 支援ロボットの実証実験（REX-J）

代表研究者：小田 光茂（JAXA）

目的

宇宙飛行士が行う船外活動（EVA）をより安全に、より低コストで行うために、危険作業や単純な長時間作業などを宇宙飛行士に代わって行う「有人宇宙活動支援ロボット（有人支援ロボット）」の実現を目指し、同ロボットを実現する上で必要不可欠な「空間移動技術」の要素技術の実証実験を行います。REX-J は、伸展式ロボットアームとテザー（ひも）を利用して移動するロボットの基礎的なデータを取得します。

概要

伸展式ロボットアームにより、ロボット本体に内蔵するテザー先端のフックをつかみ、引き出してハンドレール（宇宙飛行士の船外活動用に設置されている手すり）に取り付け、テザーの長さを制御することにより、ロボットを空間移動させます。なお、運用は全て地上からの遠隔操作で行われます。

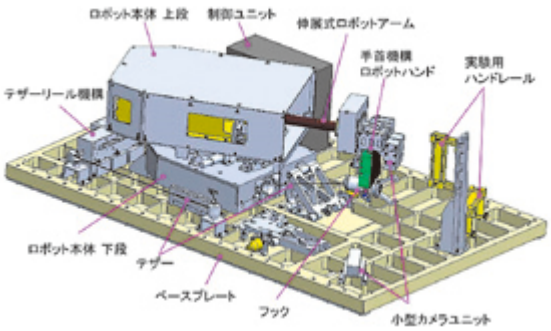


図 1　実験装置の構成

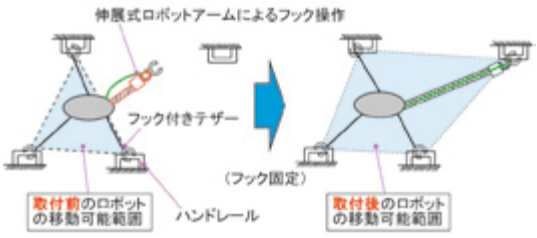


図 2　テザーによるロボットの移動原理

成果

有人支援ロボットの実現へと繋がる世界初のロボット技術を獲得

①宇宙における伸縮自在のロボットアーム技術（図 3）

軽量で伸び縮み可能なロボットアームを開発し、宇宙での動作を世界で初めて実証しました。この実証により、宇宙における伸縮自在のロボットアームに必要な以下の技術を獲得しました。

・軽量で高い伸縮比を持つロボットアーム技術
・伸展式ロボットアーム先端部の位置決め制御技術

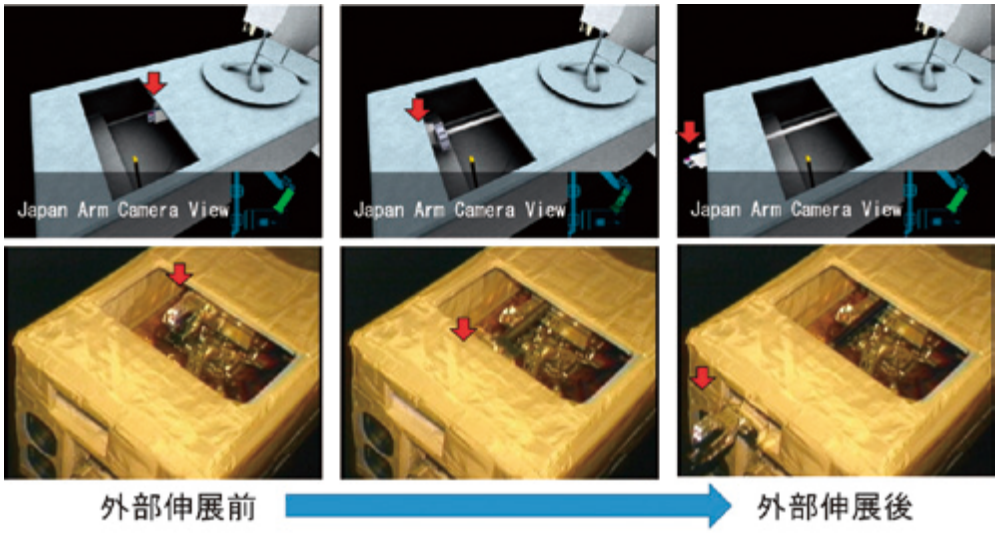


図 3　伸展式ロボットアームの実験イメージ CG と実際のカメラ映像
本実験では、アームを約 1m 伸ばし実験装置の外部に手先のカメラとハンドを出すことで、伸展式ロボットアームの正確な位置決め制御技術を実証しました。

②宇宙におけるテザーを用いた空間移動技術

取付け／取外し可能なテザーを用いて移動する方式のロボットを開発し、宇宙での動作を世界で初めて実証しました。この実証により、以下のテザーを用いたロボットの空間移動に必要な技術を獲得しました。

・テザーの付け外しによる移動領域設定技術（図４）

・ロボット本体の安定した移動制御技術（図５）

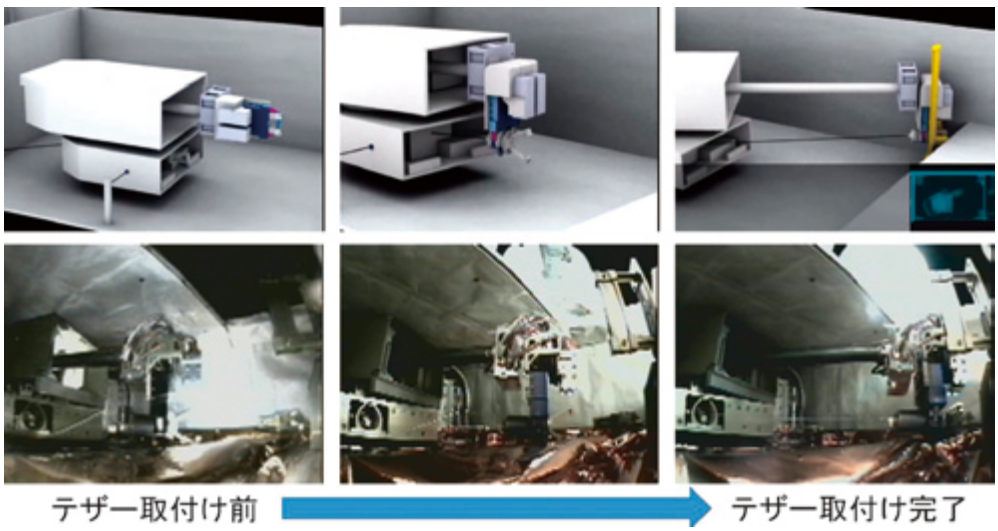


図 4　ハンドレールへのテザー取付けの実験イメージ CG と実際のカメラ映像
本実験では、テザーをハンドレールに取付け／取外しをすることで、テザーの付け外しによるロボットの移動領域設定技術を実証しました。

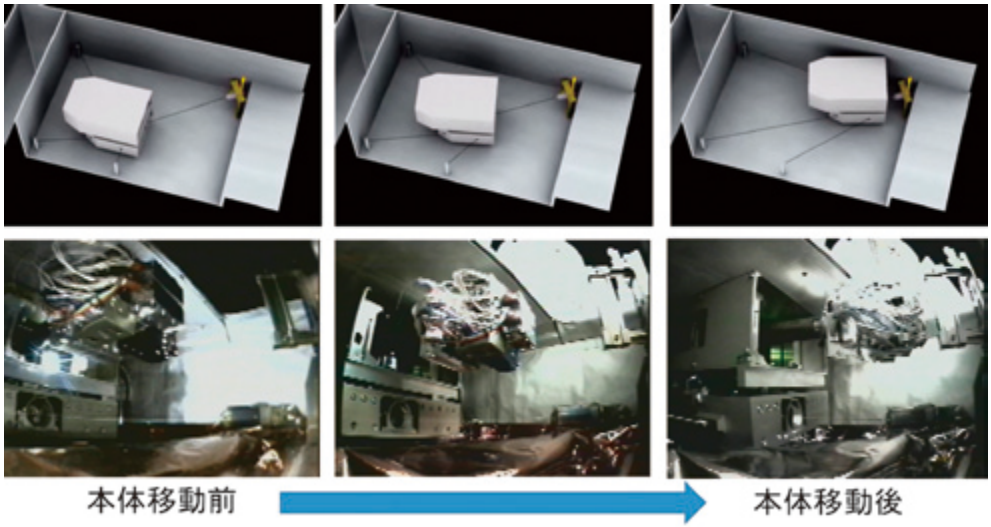


図 5　テザー制御によるロボット本体移動の実験イメージ CG と実際のカメラ映像
本実験では、３本のテザーの長さを制御してロボット本体を移動させることで、ロボット本体の安定した移動制御技術を実証しました。

本ミッションには、東京工業大学 JAXA 連携講座の学生が参加しました。

今後への波及

地上への還元

本実験で取得した真空中での機構特性等を地上の真空環境などの極限環境作業ロボットの開発に活用します。

宇宙活動への貢献

本実験で取得した伸展式ロボットアームやテザー移動技術に関する特性データや知見を、宇宙活動を支援・代行するロボットの開発に活用します。

日本発。宇宙空間でも通用する地上の優れた技術

船外用民生品高精細ビデオカメラシステム（COTS HDTV-EF）

代表研究者：原田　力（JAXA）

目的

一般に販売されている（民生品）高精細ビデオカメラを「きぼう」の船外に搭載し、宇宙空間に曝された環境でも長期間使用できるかを調べます。動画データの画質などを検証するほか、地表や雲の様子などの地球観測を行うとともに、取得した画像は教育分野や広報活動に利用します。

通常、放射線が強く真空である特殊な宇宙空間で使われるのは宇宙用に特注された機器ですが、民生品カメラが宇宙空間で有効に使えることが確かめられれば、同程度の性能・品質の市販民生品機器を ISS や人工衛星に使える可能性が開かれます。

概要

宇宙空間は放射線が強いので、放射線に耐性がある撮像素子「CMOS センサ」を持つ 2 台の民生品カメラを搭載し、起動 / 撮影カメラの切り替え / レンズズーム動作 / 停止を地上からリモートコントロールします（図 1、図 2）。

高度 400km の ISS から直下の地球表面（画面内範囲 200km × 350km）を 3 日に 1 回程度、2 台のカメラで 30 分～ 60 分ずつ撮影します（図 3）。撮像画質の確認と地球観測映像の取得を兼ねて、日照地域の海・島・大地・雲を撮影します。

また撮影用の CMOS センサの素子を傷付ける宇宙放射線の影響を調べるために日陰地域で真っ暗な夜を撮影します。撮像素子が宇宙放射線で傷付くと暗い画像上に輝点となって現れます。

カメラの撮像画質と宇宙放射線の影響および稼働寿命の評価のため 1 年間以上にわたって撮影を行います。

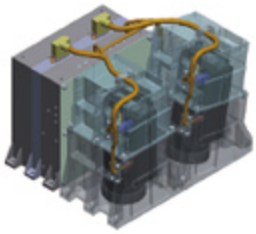


図 1　装置のイメージ図

カメラ全長　23cm

図 2　搭載した民生品カメラ

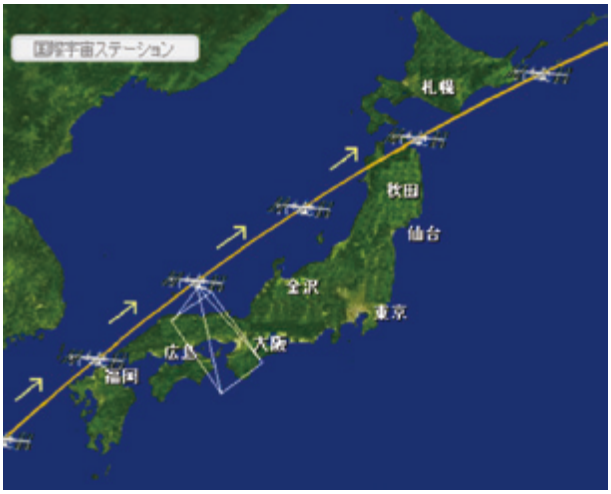


図 3　撮影軌道例

成果

船外からのクリアな映像を撮影

①宇宙空間（真空環境）で民生品カメラが使用可能なことが実証できました。

②美しい地球の高精細な観測映像が撮影できました。

ISS 船内から撮影する場合は、窓ガラスの汚れ・傷・船内情景の反射が映像に映り込んでしまいます。この船外カメラを用いた宇宙空間からの直接撮影により、明瞭な地球の姿が撮影できるようになりました。

③宇宙飛行士の手を煩わすことがないので、24 時間いつでも地上からの遠隔操作のみで地球の撮影ができます。（但し、映像を地上に伝えるためには衛星回線の通じる軌道域である必要があります。）

④宇宙放射線による CMOS 撮像素子の損傷頻度と程度のデータが取れ続けています。CMOS カメラは旧来の CCD 撮像素子に比べ損傷頻度は 1 ～ 2 桁少なく撮像素子が損傷し難いことが判りました。また損傷しても明るい日照地球表面観測撮影では画像上に傷は現れません。夜景のような暗い日陰撮影の時のみ増感度により傷が現れます。

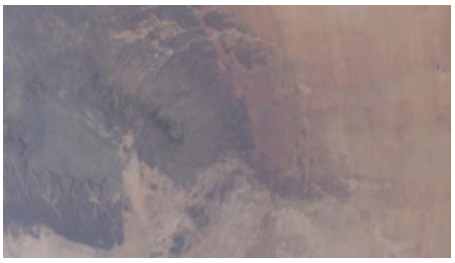
現在、地上の民生品カメラの撮像素子の多くは CMOS 撮像素子です。現行の民生品 CMOS ビデオカメラであれば宇宙空間で数か月にわたって美しい画像が撮影可能であることが期待できるようになりました。

⑤国際的な自然災害対応を支援しています。「自然または人為的災害時における宇宙設備の調和された利用を達成するための協力に関する憲章（国際災害チャーター）」の枠組みや、アジア・太平洋地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「センチネルアジア」を通じて、災害対応のために映像提供を開始しました。

⑥文部科学省の委託研究「きぼうハイビジョン・アースビュー教育システム」の WEB サイトを介してこの船外カメラで撮影した美しい地表・海洋の観測映像のリアルタイム配信および動画アーカイブ配信を科学館・学校へ向けて開始しました。

巨大な低気圧の渦を纏った青い地球

アムール川の洪水（自然災害観測）



アフリカ　火山

日本　（冬の東北　津軽海峡）

図４　撮影映像（ビデオ映像からのキャプチャ写真）

今後への波及

地上への還元

①撮影した数々の美しい地球の映像は科学博物館・プラネタリウム等の施設で上映し、科学教育へ貢献することができます。

②異常気象等、地球環境の変化と広域災害の状況を観測して状況分析に貢献することができます。

宇宙活動への貢献

①民生品を宇宙で使う可能性を広げました。

②民生品の宇宙打上げプロセス（機種選定、耐久試験等）を確立しました。

アジア利用、人文・社会科学

宇宙ふしぎ実験および教材開発（Try ZERO-G） …… 172

種から始まるアジアの「きぼう」利用
Space Seeds for Asian Future 2013 …… 174

宇宙連詩 …… 176

宇宙を旅した種子を育てよう!
JAXA Seeds in Space …… 178

文化・人文社会科学利用パイロットミッション …… 180

- 宇宙モデリング …… 182
- ISS宇宙飛行士の 'moon' score …… 183
- 水の球を用いた造形実験 …… 184
- 墨流し水球絵画 …… 185
- 光るニューロン …… 186
- 宇宙でのファッショナブルライフ …… 187
- 飛天プロジェクト …… 188
- Spiral Top …… 189
- 宇宙庭 …… 190
- 手に取る宇宙～ Message in a Bottle ～ …… 191
- Spiral Top-II …… 193
- 宇宙で抹茶を点てる …… 194
- 発光する墨流し水球絵画-II “生命、光、海” …… 195
- 「赤色」でつなぐ宇宙と伝統文化 …… 197
- 宇宙楽器 …… 199
- 宇宙でのびやかに暮らそうプロジェクト …… 201
- お地球見 …… 202
- 宙音 …… 204

宇宙ふしぎ実験および教材開発（Try ZERO-G）

実施機関：JAXA

目的

「きぼう」を、誰もが利用できるものとして身近に感じてもらうため、無重力などの宇宙環境を活かした宇宙飛行士の活動のアイデアを募集しています。実験などの結果を教育現場や一般に広く公開し、無重力などの宇宙環境への興味や、「きぼう」を含めた宇宙開発利用への関心を高めます。

概要

集まったアイデアをもとに、宇宙飛行士が軌道上にある道具を使って簡単な物理実験や運動を行います。自ら提案した、または、誰でも関心を持つような事柄について、重力のある地上と無重力の宇宙での現象や動きの違いを実際に見てもらうことで、一般の人々に「きぼう」利用に参加してもらいます。

成果

代表的な実験内容と結果を図 1 に示します。これらについて、取得した映像を JAXA ホームページに公開するとともに、学校支援事業の一環として教員研修等で配付し、教育現場での教材として普及を図っています。

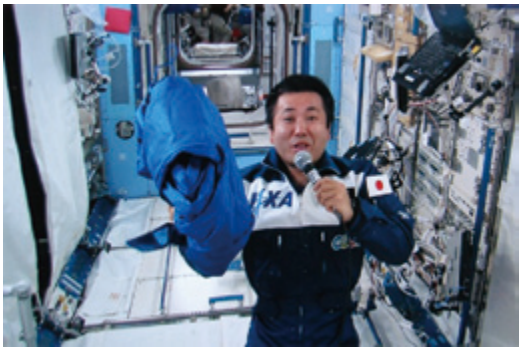
今後への波及

地上への還元

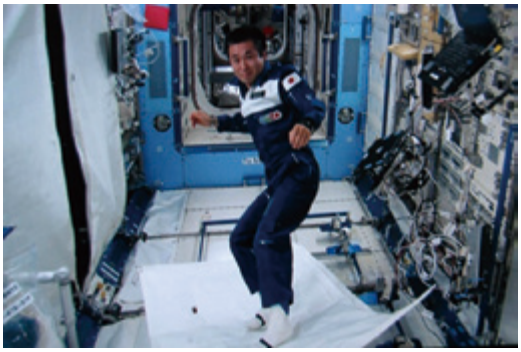
青少年に対して、宇宙環境に対する興味や、「きぼう」への関心を喚起し、科学技術を支える人材を育成するとともに、長期的視点からは、理系離れを抑制するのに寄与します。

宇宙活動への貢献

将来の宇宙開発利用を支える人材育成に貢献します。

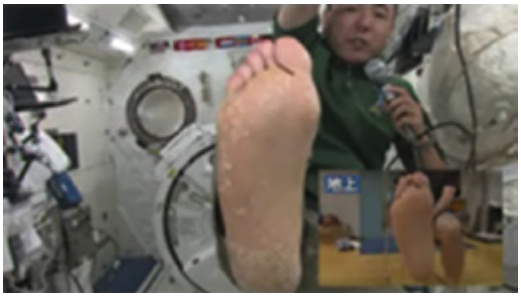


若田宇宙飛行士長期滞在時
「衣類をたたむ」:
無重力環境では、衣類自体の弾力性があるため、地上と異なりうまくたためませんでした。

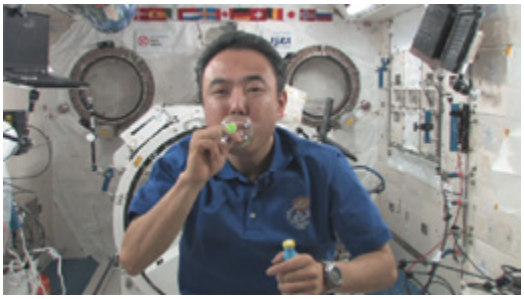


若田宇宙飛行士長期滞在時
「魔法のじゅうたん」:
無重力環境でのみ可能な、アラジンと魔法のランプのようなイメージを具現化しました。

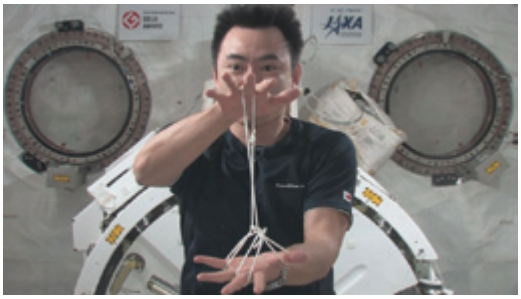
野口宇宙飛行士長期滞在時
「作用反作用」:
空中に停止させた水バッグ（約 45L）を引き寄せると、バッグが野口飛行士に引き寄せられるだけでなく、野口飛行士もバッグに引き寄せられて動きます。



古川宇宙飛行士長期滞在時
「足底の皮膚」:
足底の外観の様子と、指先で足底を押した際の変化を報告してもらいました。宇宙では足の裏を使って移動しないので、足裏が柔らかくなり、皮がむけました。



古川宇宙飛行士長期滞在時
「シャボン玉」:
地上と異なり、水が下に移動する様子が見られず、シャボンが均等に膨らんでいることが見て取れました。



星出宇宙飛行士長期滞在時
「あやとり」:
無重力環境では、ひもが浮いたままなので指をひっかけにくかったのですが、テンションをかけることにより行うことができました。

図 1　代表的な実験の写真

種から始まるアジアの「きぼう」利用

Space Seeds for Asian Future 2013

代表実施機関：JAXA

目的

「きぼう」利用に対するアジア諸国の関心の高まりに応え、アジア太平洋地域の宇宙機関が宇宙実験実施に関る経験を蓄積することと、アジアの若い世代への科学教育の向上を図ることを目的としています。地球の植物が重力のない宇宙でどのように育つのかを各国の生徒たちが宇宙飛行士と協力して調べることを通じて、地球の生き物がもつ素晴らしい能力と可能性について学びます。

概要

アジア太平洋地域から ISS の「きぼう」日本実験棟船内実験室に送られた花や野菜の種を地上に回収し、各国の生徒が育てて観察する実験を、2010 年から 2012 年にかけて、インドネシア、マレーシア、タイ、ベトナムの宇宙機関と JAXA が協力して実施しました。

また 2013 年には、宇宙で実際に種を育てる様子を見ながら、地上の生徒が自分たちでも同じように観察し、宇宙と地上の違いを見つけ、どうしてそのようになるのかを考える実験を行いました。お菓子やお赤飯などに日本ではおなじみのアズキが種の代表に選ばれました。アズキはロックウールという苗床に一定の向きで埋め込まれて、「こうのとり 4 号機」で「きぼう」に届けられました。宇宙では NASA のカレン・ナイバーグ宇宙飛行士が種に水をやって実験を開始、重力への応答を調べるため、光を遮って育てました。その様子はオーストラリア、インドネシア、マレーシア、ニュージーランド、フィリピン、タイ、ベトナム等アジア太平洋地域の国々にも配信されました。

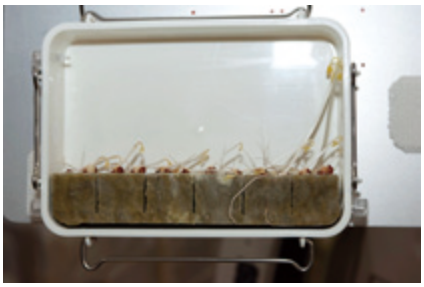


図 1　宇宙のアズキ芽生え

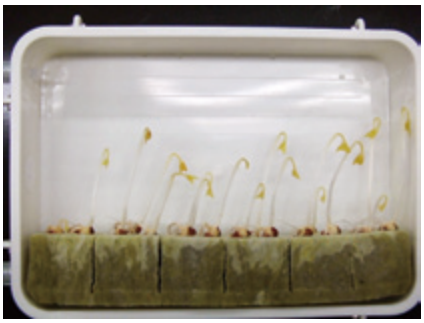


図 2　地上のアズキ芽生え

図 3　宇宙からの映像を地上で観察

成果

宇宙での実験に合わせて、各国の生徒たちが、アズキの発芽観察実験に取り組みました。地上では根は下に、茎は上に伸びましたが、上も下もない宇宙では種の植えられた向きの通りに伸びたことが、宇宙から送られてきた映像で確かめられました。この結果からは、単に教育的効果だけでなく、植物生理学の新しい研究のヒントにもなる情報が得られました。カレン・ナイバーグ宇宙飛行士が「きぼう」に備えられたビデオカメラの前にアズキの芽生えを差し出すと、地上のモニター上には、あたかもそれが目の前にあるように映し出され、地上の人々も実際に宇宙で観察している気分になりました。

各国の生徒たちから数多くのレポートが届けられました。

マレーシアでの実験の様子 (ANGKASA)

アズキの芽生えを熱心に調べるベトナムの子供たち (VAST/STI)

実験するインドネシアの学生 (LAPAN)

タイ学生のレポート　(NSTDA)

今後への波及

地上への還元

アジア太平洋地域の多くの子供たちにとって、宇宙で種から芽が出る様子を宇宙飛行士と協力して調べたことは素晴らしい体験になりました。植物の研究と宇宙開発とが決して無縁でないことを実感した子供たちの何人かは、これを励みとして、農業研究やその他さまざまな分野で活躍し、将来の地域の発展に貢献する人材に育つものと期待されます。

宇宙活動への貢献

アジア太平洋地域の宇宙機関が準備段階から参加することにより、植物研究者や宇宙技術者等と調整して綿密な実験計画を作り上げ実行に移す役割を担う、宇宙環境利用に不可欠な人材が育つきっかけとなりました。また、科学的に興味深い現象も観察され、それを元にさらに発展させた実験計画が進められており、アジア太平洋地域が今後の ISS 利用者として発展することが期待されます。

宇宙連詩

実施機関：JAXA

目的

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

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

JAXAは、宇宙にいる宇宙飛行士も含めて、人びとを言葉でつなぎ、人びとがより密接に宇宙の諸活動に関わっていると感じることができるようにするために宇宙連詩プログラムを実施しました。

概要

「連詩」は、大岡信氏、谷川俊太郎氏などの詩人たちが、日本伝統文化の連歌・連句を発展させて生まれた形式で、世界中に広められてきました。連詩はリレー競争のバトンのように、ある参加者から次の参加者への言葉を紡いでいくことによって、編纂されます。

その大岡信氏を監修役に、谷川俊太郎氏を寄稿役にお招きし、インターネットによる一般公募を基本に、詩人・文化人による寄稿を組み合わせながら、2006年度から毎年1詩づつ、約24編の詩からなる宇宙連詩を4回にわたり編纂しました。

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

成果

世界中の人びとを言葉でつなぐ

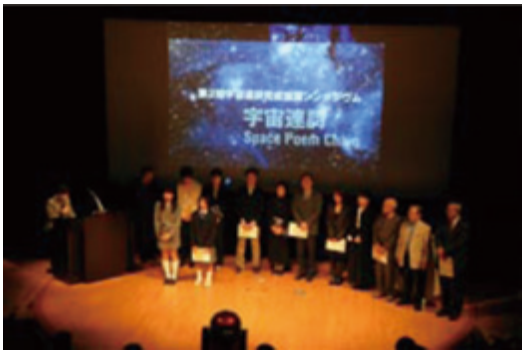
これまでに、小学校2年生から98歳のお年寄りまで、国籍、専門、役割を超えて延べ3000名以上の応募や寄稿をいただきました。この宇宙や地球で生まれ、生きていることの不思議さ、素晴らしさ、可能性などが、等身大の言葉で紡がれています。

完成した宇宙連詩はDVDに記録され、ISSに積み込まれています。すべての参加者は地上からISSを見ることができ、ISSに保存された自分の詩のことを想像します。

宇宙連詩を通して多くの人びとが宇宙の活動に興味を持ち、さらに、宇宙連詩は人々に新たな宇宙の見方を紹介します。

また、宇宙連詩の発展・普及のため、日本プラネタリウム協議会、地域のプラネタリウム、(独) 国際協力機構 (JICA)、学校 (小学校、高等学校での国語授業) 等の機関と連携して、地域ならでは、学校ならではの宇宙連詩の編纂も進めてきました。

これまでの連詩は宇宙連詩ホームページ (http://iss.jaxa.jp/utiliz/renshi/) に掲載されています。



宇宙連詩シンポジウム

宇宙を旅した種子を育てよう!

JAXA Seeds in Space

実施機関：JAXA

目的

青少年が実験・観察を通して、「宇宙と生命」に関連する多様な研究分野や科学的な考え方などを学び、宇宙環境の利用や有人宇宙開発への理解を深められることを目的としました。「きぼう」での最初の教育プログラムとして、魅力あるものとするために、参加者に宇宙をリアルに実感してもらえる内容としました。

参加者は、チームとして年齢に応じた科学的アプローチを自ら体験、理解し、その過程の中で、有人宇宙開発、宇宙放射線、地球環境、植物の品種改良、生態系保護、命あるものの育て方などについて学びます。

概要

宇宙飛行による影響の有無を調べるため、「きぼう」に搭載し回収した種子と地上に保管した対照実験用の種子などを子供たちに配布し、2 世代にわたって栽培してもらい、相違の有無を観察します。種子は、「きぼう」モジュールの最初の打上げ（2008 年 3 月）の際に一緒に打ち上げ、「きぼう」船内に約 9 ヶ月間保管した後、回収しました。植物は、変異が見た目で分かりやすく、参加者になじみのあるものとし、アサガオ（品種ムラサキ）、ミヤコグサ（品種ミヤコジマ）、ヒマワリ（品種ロシア、大輪一重咲黄色）を選びました。

なお、変異が生じる確率は、9 ヶ月程度の宇宙放射線の被ばく量では、きわめて小さいと推測されるため、配布する種子の中には、比較実験用に、変異の出現が最大限見込まれる種子（地上で人為的に重粒子線を当てたもの）も含め、また教材では変異の仕組みなども丁寧に解説しました。

2010 年に保育園から高校までを対象に第 1 回目を実施し、2011 年の第 2 回目以降は、家族参加枠も設けて参加しやすくしました。2013 年現在、第 4 回目を実施中です。なお、東日本大震災の復興支援として、被災地に宇宙を飛行したアサガオとヒマワリの種子を送付し、仮設住宅の緑のカーテンなどにも利用していただきました。

本教育プログラムの特徴

・より正確に、より深く科学を学べるように、第 2 世代まで栽培し、観察のみで変異体の発生を確認できる実験としました。

・宇宙を飛行させた種子以外にも、比較用の種子として、地上保管の種子と、重粒子線を人為的に当てた種子（品種改良のために照射するのと同程度の量の放射線を当てたもの）を配布しました。これによって、植物の遺伝的安定性（放射線耐性の強さ、変異しにくさ）を実感することができます。

成果

宇宙を旅した種子を地上で育てる！そこから学んだ多くのこと

第 3 回実験までの参加者は、幼稚園（保育所）（14 施設）から園児 620 名、小学校（113 校）から児童 6750 名、中学校（69 校）から生徒 3130 名、高校（105 校）から生徒 3850 名、ならびに教員総数 301 名でした。また第 2 回実験以降の家族枠から参加した児童生徒数は 189 名でした。

参加者の活動は、各学校のホームページや JAXA の掲示板（https://edu.jaxa.jp/community/asagao/list）で発信されると共に、全国の新聞等に取り上げられました。

［ 参加者の声 ］

- 小学生「いろいろな変化をみんなで見つけ、コンピューターでまとめたり、楽しくいい思い出になりました。仲間との絆も深まった気がする。」
- 小学校教諭「アサガオという身近な素材が宇宙と結びつくきっかけとなっており大変有用。子どもは興味津々で、目をキラキラさせながらとてもよい学びとなった。子供の家族への波及効果もあった。観察力、推論する力、そして学びへの意欲。そうしたものを高める「材」が教室にあったことで、子どもへの教育もより効果的に行え、クラスが一つにまとまる時間が持てた。」
- 保育所所長「新聞に掲載され、地域の方や小学生がアサガオを見に来られた。保育所のように低年齢の子どもには、生態をきっちりと比べることはできないが、植物を栽培し、花が咲いたらうれしい、命があっていつかは枯れることを知ったことは意義があった。宇宙を旅したということで、スペースシャトルやお星様や太陽に興味を持って、夢を持つことができたのも大きな成果でした。」

本教育プログラムの詳細は、以下のホームページに掲載しています。

・アサガオとミヤコグサ　http://edu.jaxa.jp/seeds/

・ヒマワリ　http://edu.jaxa.jp/himawari/

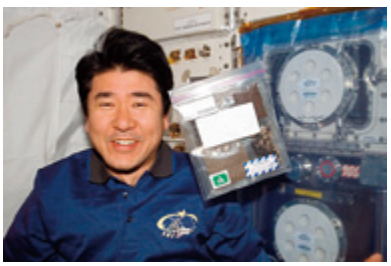


図 1「きぼう」にて土井宇宙飛行士と種子

図 2「きぼう」に打ち上げた種子

図 3　実験に取り組む子供たちの様子

文化・人文社会科学利用パイロットミッション

概要

「地球は青かった」「そこには国境はなかった」

宇宙に飛び出した人類はこれまでにさまざまな言葉を残し、地球や宇宙に対する新たな視点を得ています。

私たちの心を大きく動かす宇宙。この環境を科学実験の場として利用するだけでなく、芸術表現などを通じて驚きや感動を発見することを目的とした実験が、文化・人文社会科学利用パイロットミッションです。

このミッションでは、「きぼう」を利用し、「地球人育成」「人類未来の開拓」「宇宙利用による新たな価値の創出」を目指して、未来を見据えた芸術表現を宇宙で試みてきました。「重力」という大きな制約から解き放たれた時、芸術はどのような変貌を遂げるのでしょうか。人類の新しい芸術史がここから始まるかもしれません。

	宇宙モデリング	代表提案者：米林 雄一（東京藝術大学）
	ISS 宇宙飛行士の 'moon' score	代表提案者：野村 仁（京都市立芸術大学）
	水の球を用いた造形実験	代表提案者：藤原 隆男（京都市立芸術大学）
	墨流し水球絵画	代表提案者：逢坂 卓郎（筑波大学）
	光るニューロン	代表提案者：野村 仁（京都市立芸術大学）
	宇宙でのファッショナブルライフ	代表提案者：宮永 美知代（東京藝術大学）
	飛天プロジェクト	代表提案者：石黒 節子（お茶の水女子大学）
	Spiral Top	代表提案者：逢坂 卓郎（筑波大学）
	宇宙庭	代表提案者：松井 紫朗（京都市立芸術大学）

	手に取る宇宙 ～ Message in a Bottle ～ 代表提案者：松井 紫朗（京都市立芸術大学）
	Spiral Top- II 代表提案者：逢坂 卓郎（筑波大学）
	宇宙で抹茶を点てる 代表提案者：河口 洋一郎（東京大学）
	発光する墨流し水球絵画 - II “生命、光、海” 代表提案者：逢坂 卓郎（筑波大学）
	「赤色」でつなぐ宇宙と伝統文化 代表提案者：村山 裕三（同志社大学）
	宇宙楽器 代表提案者：小野 綾子（東北大学）
	宇宙でのびやかに暮らそうプロジェクト 代表提案者：西出 和彦（東京大学）
	お地球見 代表提案者：安藤 孝浩（東京芸術大学）
	宙音 代表提案者：福嶋 敬恭（京都市立芸術大学）

今後への波及

- 宇宙という、これまで活動しえなかった場での新たな芸術活動は、新しい価値観の創造につながります。無重力という環境では、水平線や地平線など、人間が物や世界を把握する基準がなくなり、地球上で作り上げてきたライフスタイルや世界観を見直すきっかけとなると期待されます。宇宙芸術は人文社会科学と自然科学が融合された新たな総合科学として存在感を示すことでしょう。
- 無重力と地球外からの視点が人類の知見と感覚の拡大へつながるよう、芸術のコミュニケーション力と発信力を用いて、展覧会や出版、シンポジウム、更に教育活動による普及を展開します。自然の理（ことわり）や物理の法則を美しく伝えるとともに、宇宙飛行士の体験をアートを通して地上の人たちが感じ取ることで、宇宙や科学への興味・好奇心をかき立てます。
- ISS での芸術活動は日本しか実施していないため、その独自性は宇宙開発の中でも日本の存在をひときわ示しており、国際的にも高い関心を集めております。

宇宙モデリング

代表提案者：米林 雄一（東京藝術大学）

目的

宇宙での紙粘土を用いた造形を通じて、宇宙からの視点による地球観と、地球からの宇宙観を比較し、また組み合わせることにより、人間についてのイメージが広がるとともに創造の領域も広がることを目指します。

概要

【「きぼう」での実施】

宇宙飛行士が紙粘土（約 200g）の手びねりにより、2 体の「ひとがた」を制作し、地上に回収しました。

・1 体目：無重力下での進化をイメージさせる手足の細長い「ひとがた」

・2 体目：無重力空間における制作者の自由な発想の「ひとがた」

【地上の活動】

子どもたちが未来の人間を想像しながら手びねりによる「ひとがた」を制作します。

NASA 宇宙飛行士が、きぼうの中で制作した 2 体の「ひとがた」

成果

無重力の特徴を表す「ひとがた」の完成

- 「きぼう」船内での実験実施から約 8 カ月後に地上に 2 体の「ひとがた」が帰還しました。
- 1 体目は船内を遊泳する姿でのびのびとした流れる人の形で、2 体目は踏ん張って立っている姿で手足に付加装飾がついた、ユーモラスな男性の様な姿でした。
- 地上の重力下において発生する、垂れ下がるような変化が全くなく、自由でソフトな形が作られました。また、宇宙では支える手の力で変形することがなく、制作が続けられることがわかりました。可塑性の粘土が、無重力空間で自由に形をとどめ、新しい造形の可能性を見出しました。
- 宇宙飛行士の活動をビデオで見た後、同じ粘土で「ひとがた」に取り組むワークショップを、東京都や愛媛県などで実施し、好評を博しました。作品と交流する子どもたちは、創作に没頭したときの感覚を、宇宙飛行士と時空を超えて共有しました。

ISS宇宙飛行士の 'moon' score

代表提案者：野村　仁（京都市立芸術大学）

目的

地球は、月という衛星を持っています。月見の行事などでも経験するように、夜空を見上げ優しい月を眺めると、安らぎを感じる人も多いでしょう。地球から約 400km 上空の ISS からは、条件が整うと青い大気層と共に月を捉えることができます。宇宙飛行士は、月と大気層を見ることで、地球のそばにいることを実感しているのではないでしょうか。今後、人類は月や火星でも活動しようと計画しています。火星に到着したとき、そこに慣れ親しんだ月ではなく、2 つの衛星をみるのでしょうか。その時私たちは、古代より親しんできた月の存在の大きさに驚くかもしれません。そんな月をテーマとして音楽を制作します。

概要

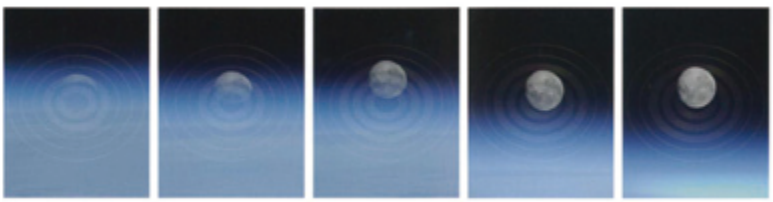
【「きぼう」での実施】

「きぼう」の窓から見える「月」の写真をデジタルカメラで撮影し、データを地上に送信します。

【地上の活動】

きぼうでの実施とほぼ同時期に、地上から月を撮影します。

宇宙で撮影した月の写真と地上から撮影した月の写真による音楽を制作します。



採譜された月の写真　　© 野村 仁 / JAXA

成果

「月の調べ」を採譜し、再現

- 地球からは撮影することの出来ない、大気層を含んだ月や ISS の構造物を含む 7 種類の異なる月齢の月の写真を取得できました。
- 軌道上で撮影した月の写真に五重楕円をひき、素晴らしい解像度で写しとどめられたクレーターや月の海を音符に見立て、クレーターにマリンバ、海にチェンバロの音色を割り当て、さらにフルート（月の位置）やチェロ（大気層）も加えて演奏された「音楽」、写真、譜面の展示を実施しました。

水の球を用いた造形実験

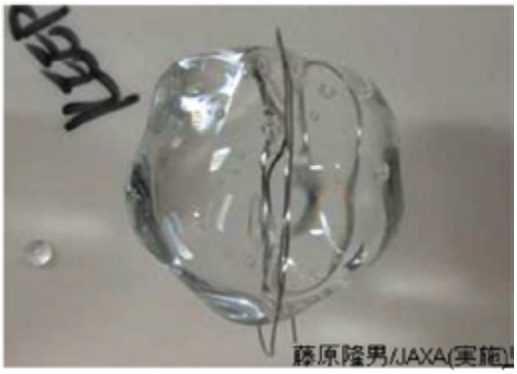
代表提案者：藤原 隆男（京都市立芸術大学）

目的

広く造形に関わる人々に、表面張力の面白さやその造形へ応用の可能性を認識させ、地上での液体を用いた造形を活性化させることを目的としています。また、無重力の可能性を見せることで、芸術にかかわる人々に、無重力環境についての想像を喚起することが期待できます。実験映像を公開するとともに、映像を編集して作品化することで、一般の人々に「無重力」の直感的理解を促し、造形に関わる人々に「表面張力」の可能性を示します。

概要

水を用いて直径約 8cm の水球を針金上につくり、宇宙飛行士の手により 2 本の針金を水球表面に差し込み振動させます。振動の共鳴により四角形や五角形など形をかえた水球の様子をビデオカメラで撮影します。



共鳴によって、五角形を形成して振動する水球の様子

成果

水球の興味深い映像を取得

- 直径 8cm の大きな水球を使うことができたことは画期的なことであり、水球が大きくなった結果、人の手で共鳴させることができました。
- 振動数が低い時は水球が共鳴して期待通りに変形し、その様子をビデオ映像として取得することができました。
- 大きな水球がゆったりと振動する様子はそれだけでも印象的ですが、それがさらに五角形などに変形する様は、一般の人だけでなく、芸術家や科学者にとっても十分興味深いものでした。

墨流し水球絵画

代表提案者：逢坂 卓郎（筑波大学）

目的

“無重量下に於ける水球墨流し絵画の制作” によって生命圏としての地球「ガイア」の象徴的なオブジェとして作品を制作し、一般の人に直感的な「水の惑星 = 地球」の理解を促すことを目的とします。また、墨流し（水面に水よりも比重の軽い墨汁や絵の具を垂らし、水面に 浮かぶ墨汁や絵の具の模様を紙に染め取る絵画技法）は古くから国を越えて親しまれて来たため、多くの人々が共有できる美意識を喚起させることを目指します。

概要

水を地表から遊離させ、浮遊させ、生命と地球というテーマを背景とした 2 種類の実験から成っており、流体から絵画性と彫刻性を引き出す新たな芸術的作業です。

【1 回目の実験】

界面活性剤を含んだ直径 8cm の水球に、墨と化粧品の金色のラメパウダーを注入後、綿棒を使った拡散行為を行います。

【2 回目の実験】

直径 6 ～ 7cm 程度の水球に、赤、黄、緑の色彩と海面活性剤を注入してマーブリングパターンを生じさせます。

水球を使った墨流しの様子
（左が 1 回目、右が 2 回目の実験）
© 逢坂 卓郎 / JAXA

成果

【1 回目の実験】

- 墨はボリュームのある黒い帯となり、ラメパウダーについても温水による溶解が完璧ではなかったため、ゲル状の帯となりました。
- 宇宙飛行士による綿棒を使った拡散行為によりパターンは消えました。

【2 回目の実験】

- 水球表面に墨が広がる現象が確認できました。
- 時間経過とともに、地上実験と同様のマーブル模様が現れ、さらに界面活性剤により、墨の中へ侵入する現象が多重化し、美しい立体的な模様が制作されました。

【その他】

- パターンを吸い取って帰還した和紙は、2 枚とも想像を超える出来でした。
- 和紙に吸い取ってパターンを写すことで、作品をもう一つの段階に移行できました

光るニューロン

代表提案者：野村　仁（京都市立芸術大学）

目的

太陽や遠い宇宙から運ばれてくる、さまざまな宇宙放射線。その宇宙放射線から地球上の生命を守っているのは、大気です。静かに、まるで母親のように地球を抱く大気の存在は、地球大気圏外である宇宙で生きることの難しさを意味しています。

しかし、人類は大気圏外にある ISS での長期滞在を可能にし、宇宙空間に人類が存在することの困難を英知と努力によって克服してきました。人類の持続的発展のためには、地球をさらに深く理解するとともに、果敢に挑戦しようとする姿勢が不可欠です。その想いを、宇宙で取得した映像をまじえて表現します。

概要

【「きぼう」での実験】

宇宙放射線の影響を受けて CCD に白キズのついた高精細ビデオカメラを使用した「きぼう」内の映像や「きぼう」窓外の光景を撮影します。

【地上の活動】

軌道上から回収したビデオカメラを用いて、地上での自然風景や生命の姿を表現できるような映像を取得します。

ISS の高精細ビデオカメラで撮影された日本列島の夜景（参考映像）
無数の白い点は宇宙放射線の影響で CCD についた白傷
©JAXA/NASA

成果

宇宙と地上の映像を通して「生き方」を見せる

- ISS 内部及び窓外の光景と地上の自然風景や生命の姿を取得し、テーマに基づき動画編集を行い DVD を作成中です。
- このテーマを太古から現代までの人間の「生き方」の問題としてまとめ上げた作品を制作しています。

宇宙でのファッショナブルライフ

代表提案者：宮永 美知代（東京藝術大学）

目的

重力から解放された宇宙ステーション内で、しぐさの変化がもたらすであろう衣服や装身具のファッション性の変容に着目し、長期宇宙滞在時代にふさわしいデザインを検討します。

概要

無重力状態で得られる新たなしぐさと、それに伴う楽しさの感情の変化を調べることを目的に、地上では不可能な生物（鳥や魚）の動き等を再現します。合わせて、その重要性が著しく変化する下肢を 1 つに固定して同作業を行い、下肢のもつ意味を考察し、非固定、固定による両動作の比較から、楽しさの感情と衣服デザインへの可能性を調べます。また、地上では一般的な衣服に関するアンケートを宇宙飛行士に対しておこないます。

バネ式の体重計を使う若田宇宙飛行士
緑色の骨格のトレースは宮永先生によるもの
© 宮永 美知代 / JAXA

宇宙飛行士のための服
© NAOKI TAKIZAWA

成果

ゼロ G における人類の進化を紐解いた

- 必ずしも 1 対の下肢である必要は見られませんでした。
- 下肢は鳥、魚の動きにおいて、推進力のバランサーとして機能していることが明らかとなりました。
- 実施のタイミングは宇宙ステーション滞在約 2 週間後でしたが、この時点で無重力への身体のみごとな適応が見られました。
- 総じて、地上において身体の半分の長さや量を占める下肢は、無重力では不要となるという仮説に裏付けが与えられました。
- 得られた結果は未来の服のデザインや、未来の身体のイメージの具体化につながります。また、今後宇宙飛行士のための機能的で快適な素材開発や服・スリッパなどの機能的なデザインを探ります。

飛天プロジェクト

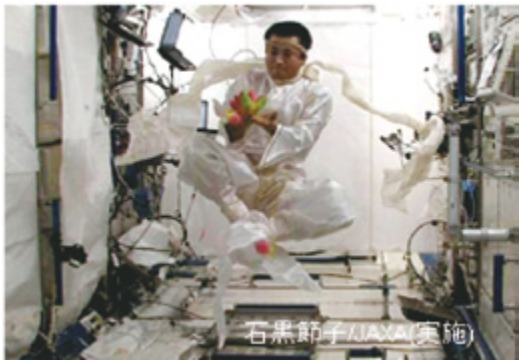
代表提案者：石黒 節子（お茶の水女子大学）

目的

宇宙時代の幕開けにあたり、はるかな時の流れを経て今日まで伝えられた「飛天」の美的な原理をふまえた舞踊という形で、ISS（天）から地球上の人々の幸せを祈り、人類の祝祭の場とすることを目的とします。

概要

本実験では、帝釈天をイメージしてメイクを施して衣装に着替えた飛行士が、「きぼう」の中で3つの動き「飛行」、「回転」、「座禅」を行ない、その模様を映像に記録します。



「きぼう」で飛天プロジェクトを実施中の若田宇宙飛行士

成果

- 「飛行」の動きから、飛天のかたちをとる際に上体を反らせた姿勢は、段取りの無い移動の時に自然なかたちであらわれることが観測されました。
- 「座禅」の動きから、空中で座禅姿勢をとり、軸を変化させていく過程で、地上では見られない微妙な舞踊空間を創出できました。
- 「回転」の動きでは、地上のように軸を固定して行うことは難しく、体軸があらゆる方向に変化してしまうことがわかりました。また、地上では良く訓練されたダンサーのみが可能であるのに比べ、無重力では、熟練していない人でもあらゆる方向に、あらゆる姿勢で回ることが可能であるということがわかりました。
- 無重力では地上のような垂直状の姿勢より、点で示される重心を活かした曲線的な姿勢や移動、回転運動、および二等辺三角形の形が推奨されることがわかりました。
- 今後飛天をモチーフとした、舞踊作品制作などが期待されます。

Spiral Top

代表提案者：逢坂 卓郎（筑波大学）

目的

運動現象の一つに螺旋（らせん）があります。本作品は回転する小さな光オブジェであり、無重力環境と視覚効果により空中に光の螺旋文様を生む事を目的とします。

概要

オブジェ 4 本の腕と設置するウエイトの関係から生まれる反転運動は、重力から解放された環境では日常的な力学現象です。それを非日常的な光跡として提示し、改めて螺旋運動のあり様を明示します。本実験では LED が点灯する 4 本のアームをもつ独楽（こま）の回転と並進運動により、多重螺旋の光跡を発生させ、その記録映像を通して宇宙飛行士と地球上の人々が新たな視覚体験を共有します。

Spiral Top（螺旋独楽）の運動によってできた LED 光源の軌跡

成果

無重力空間を舞う鮮やかな光跡のアート

- ウエイトの個数と位置を変える事により、本体の回転中に様々な運動パターンが現れ、そこに一定の規則性が認められました。
- 回転軸が 180 度の反転運動を行いますが、その角度に達した際に安定状態に入ろうとする様子が観察されました。
- スパイラルトップの残像は運動状況をトレースしたドロウイングであり、色彩や点滅の変化により 3 次元的な光の線描絵画が創出できました。

宇宙庭

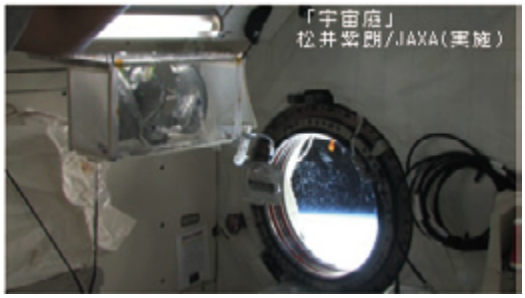
代表提案者：松井 紫朗（京都市立芸術大学）

目的

「きぼう」において無重力環境だからこそ可能な、浮遊する三次元的な「宇宙庭」の作庭を通し、宇宙独特の新しい自然観の創出を試みます。また、この過程を地上の庭と比較することにより、人類と自然の関係、地球のかけがえのなさを浮き彫りにします。

概要

植物の種子を入れた 4 つの栽培キットに 10 日に 1 回程度給水し、宇宙で宇宙飛行士が 2ヶ月間栽培します。植物が成長した 4 つの栽培キットをつなげるなどして庭に見立て（作庭）、ビデオカメラでその様子を撮影します。作庭時に、文化背景の異なる宇宙飛行士が自然観に対する考え方や庭に関する文化の違いについて議論します。



植物の栽培を実施している様子

宇宙庭の鑑賞会を実施している宇宙飛行士
今回の主力であった野生種のオニタビラコが発芽せず、葉がユニット表面に張り付く様な状況は実現できませんでした。

成果

無重力空間での造庭と鑑賞の体験

●浮遊する植物の生えたユニット 3 つを、それを育てた日本人宇宙飛行士がある程度組立てて、「きぼう」を訪問するアメリカ人宇宙飛行士 2 人を出迎えました。そして、4 つ目のユニットをその訪問客に手渡し、接続してもらうことで庭が完成するという作法を経て、鑑賞会は実施されました。 このようにして造られた庭を前にして 3 人の宇宙飛行士が互いに印象や感想を語らいあいました。

手に取る宇宙～ Message in a Bottle ～

代表提案者：松井 紫朗（京都市立芸術大学）

目的

地球を見下ろしながら ISS の外に出て活動を行う宇宙飛行士が、メッセージの入ったガラスのボトルに軌道上の宇宙を詰め地球に持ち帰ることにより、新しい、ユニークなコミュニケーション・インターフェースを創造します。

地上の人々が、この遠く地球を離れた場所から持ち帰られたボトルを直接手にすることにより、この「地球世界」の外側で行われている宇宙飛行士と人類の活動について、人類と宇宙との関係について、そして、未来の人類に向けられたメッセージを、触覚を通して感じ取ります。

概要

専用の気密ボトルを打ち上げ、宇宙飛行士が、ボトルを船外に持ち出すと共に宇宙空間を取り込みます。宇宙空間を取り込んだボトルとミッションの際に記録された宇宙飛行士の映像は地球に回収された後、公共の場において公開されます。

展示場では、鑑賞者がひとりひとり、その「宇宙が入ったボトル」を実際に手にとり、その時に抱いた思いや感想を、設えられたゲストブックに記していきます。宇宙から届けられたボトルとこれを手にとった人々の思いが、未来の人類へのメッセージとして伝えられます。

図 1　ISS 船外で宇宙の取り込み作業を行っている宇宙飛行士（2011 年 3 月）

© 松井紫郎 /JAXA

図 2　宇宙を詰め込むボトルが入ったボトルカバー（船外活動に使用したもの）

成果

宇宙で、計画された映像を取得しました。今後、宇宙を詰め込んだガラスのボトルを地上に持ち帰る予定です。地上の人々が、地上にいながらにして宇宙を自分の手に取れるという、非日常的な体験を通して、これまでにはない新しい感覚を感じとることができます。

Spiral Top-II

代表提案者：逢坂 卓郎（筑波大学）

目的

地上では見ることのできない無重力環境ならではの現象に触れることにより、新しい価値観、美意識などの創出を目指すとともに、オーロラという地球の営みを想起させるライトアート（光の芸術）を目指します。

概要

Spiral Top（螺旋独楽（こま）の意）は、LED による点光源と線光源をアームにもつコマを無重力環境で回転と並進運動させることにより、点と線と面によるオーロラのような光跡を発生させるライトアートです。本体は、Spiral Top (p.189) をベースとし、ウエイトをヘッドとシャフトにも着脱できるようにしたことで、より複雑な運動パターンが可能となりました。また、高速回転を可能とする機器を追加しました。

成果

線と面による光の多様な構成

ビデオとカメラで、はっきりとした光の線と光の帯が撮影できました。

1) 回転させることで、点と線の 2 種類の光源と、その点滅プログラムによって円錐斜面にカラフルな光の帯と線が浮き上がった。（図 1、4）
2) ほとんど回転させずにまっすぐ進めると、オーロラのような光の帯が現れた。（図 2）
3) ひねりを加えると、光の線と帯によりスパイラル状の光跡が現れた。その様は糸と布による織物のようであった。（図 3）
4) 高速回転させながらまっすぐ進めると、光跡は空間に白く輝く円筒状のものとなった。（図 5）

この実験の目的の一つは重力の呪縛から解放されようと考察と試みを繰り返してきた近代彫刻への実験的提案であり、同時に抽象絵画の巨匠であるフォンタナとカンディンスキーへのオマージュでもありました。実験 1 と 2 で写真に記録された際立った光跡は、いずれも線と面による光の多様な構成でした。

また、高速回転と並進から得られた、光る円筒の写真（図 5）は、その存在感の強さから光が物質であると意識できるような予想外の印象を持ちました。

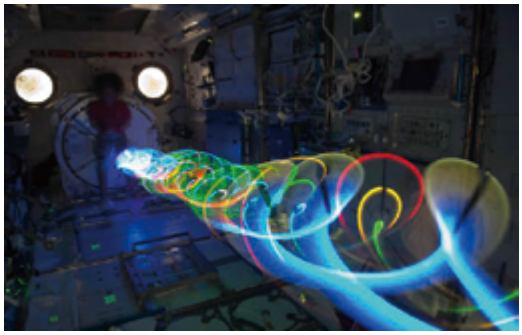


図 1

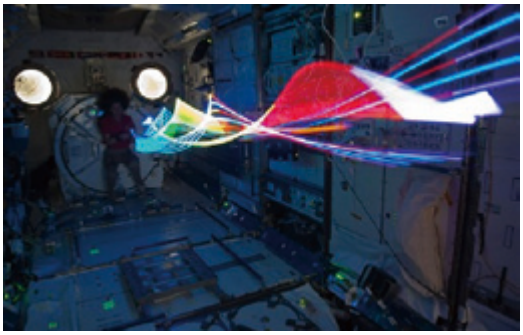


図 2

図 3

図 4

図 5

「きぼう」日本実験棟での Spiral Top- II 実施の様子

© 逢坂 卓郎 / JAXA

宇宙で抹茶を点てる

代表提案者：河口 洋一郎（東京大学）

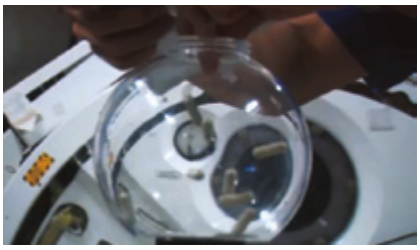
目的

「無重力下で抹茶をたてるとどうなるか？」ということを可視化し挙動を観察する科学的側面を持つとともに、無重力下で抹茶を点てる手法を構築することにより、宇宙における日本の伝統文化の継承や精神性の啓発を目指します。

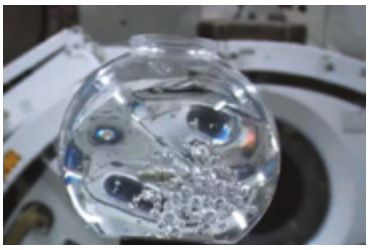
概要

無重力でも水や粉がこぼれない特殊な器を使い、軌道上で抹茶を点て、無重力下での抹茶の泡の挙動の映像を取得し、宇宙空間での抹茶を点てる一連の作法の変容を見ました。

取得映像データは、帰還後に流体シミュレーション研究に利用すると同時に、研究成果としての一般公開や、お茶をたてる動作に伴う宇宙空間での物質の動きに連動した映像上映など、新しい文化芸術として展開します。



抹茶入りカプセルの投入



泡と屈折

茶筅（ちゃせん）でかき混ぜる

図 1　軌道上での「宇宙で抹茶を点てる」実施の様子　　© 河口 洋一郎 / JAXA

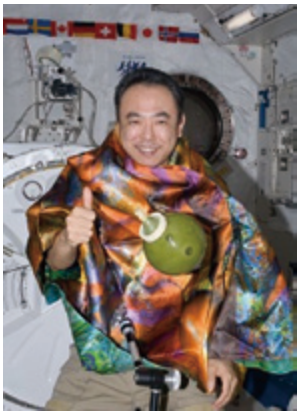


図 2　「きぼう」で古川宇宙飛行士が点てた抹茶
© 河口 洋一郎 / JAXA

成果

無重力下での水と泡の様相が確認できました。水はねっとりと容器壁面にまとわりつき、泡はその水の内部に、大きな泡も小さな泡も同時に存在し、消えることなくそのまま残り続けることが確認できました。その泡は、地上と異なり、1 個 1 個に存在感があり、金属的な非常に硬い印象がありました。泡はさらに球面的レンズ効果を見せ、掻き回しても弾けずに、撹拌をやめるとその動きもぴたりと止まりました。得られた映像は、流体シミュレーション研究の一助となります。日本ならではの茶の湯文化ならびに世界観というものを、宇宙から世界に発信することができました。また、茶筅（ちゃせん）器や容器の改良、芸術的な道具として価値を高めて発展させることができました。

発光する墨流し水球絵画-II “生命、光、海”

代表提案者：逢坂 卓郎（筑波大学）

目的

地球 46 億年の歴史において、生命は水中から陸上にあがり、ついにはその地球から飛び出し、宇宙に向かっています。その進化の過程を地球生命発生の根源である海水と自然界にある発光物質を使い、墨流しによって表現するとともに、生命と水の惑星「地球」の神秘性と美を表現します。

概要

古くから国境を越えて親しまれてきた墨流し（Marbling）技法を用いて、海水で作った水球に生命と水の惑星「地球」をテーマとした 2 種類の水球絵画を制作します。

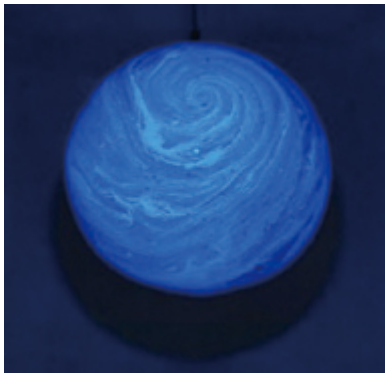


図 1
「きぼう」日本実験棟での墨流し水球絵画 - II 実施の様子

図 2
© 逢坂 卓郎 / JAXA

成果

生命と天体の誕生を表すような水球絵画の完成

生理食塩水で作った水球に海ほたるの発光物質を注入した時、水流の中に青く光る無数の点が放出され、それが水流の中に広がっていく様を撮影しました。それは生命の種が海水中に発光しながら広がっていくような造形となりました。

そこへ、更に蛍光塗料を注入し、紫外線を照射して現れた模様は幻想的でした（図 1）。塗料と食塩水が水球の北極点と言える頂点を中心に、まるで木星表面のような模様の渦を作り、ゆっくりと回転しました。表面張力の違う 2 種類の液体に発光物が加わり、混ざり合って安定する過程で見せた繊細な渦模様です。この模様は木星や土星のような巨大なガス惑星に見られるものと非常に似ています。無

重力の中で流体やガス状の物質が混入する過程が目に見える形で現れたと言えます。

2 番目の実験は、予め撹拌した海水の球へ 3 種類の蛍光顔料を流し、流体自身が、流れのままにドローウィングを描いて行くというものです（図 2）。紫外線による発光は異なる色の光を重ねて新たな色をつくる加法混合を生み、顔料を重ねれば重ねるほど白色に輝き出します。米国のドナルド・ペティット宇宙飛行士が支援という形で参加しましたが、積極的に意見を述べ、JAXA の人文・社会科学利用ミッションに於ける芸術実験を賞賛していた事が印象に残りました。宇宙に於ける芸術の試みは科学者の視点を共有することが可能であると言えます。

今回の実験では、天体や宇宙自体の誕生する様を見ているような水球絵画を得ることができました。このアートにより、以下が期待されます。

・宇宙飛行士が宇宙から地球を見ているという体験をアートを通して地上の人が感じ取れること。
・未知数である無重力という環境に人間がおかれた場合に、水平線や地平線など、人間が物や世界を把握する基準がなくなり、地球上で作り上げてきたライフスタイルや世界観を見直すきっかけになること。

また、流体力学の可視化というような解釈も可能であり、そのような意味で、この記録映像は高い教育効果があります。

「赤色」でつなぐ宇宙と伝統文化

代表提案者：村山 裕三（同志社大学）

目的

日本の基調をなす赤色を用いて、日本の四季の一部を無機質な無重力環境で表すとともに、地上において、日本の伝統文化に新たな展開軸（創造源）を見出します。

概要

無重力環境にて、赤色の四季風景の中でも象徴的な春の桜吹雪を表現し、日本的な文化空間を作り出します。

「きぼう」船内に、伝統的な風景物である「かや（蚊帳）」の代替とする「撮影ブース」を利用して、桜吹雪（を模した絹）を再現し、3D カメラで撮影します。 撮影ブースは、桜吹雪の散逸を防止し、回収を容易にするために用います。

図 1 「赤色」で使用した 12 色の花びら

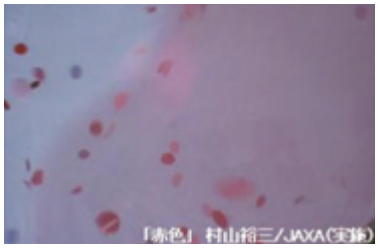


図 2 「きぼう」日本実験棟での「赤色」実施の様子

図 3 「赤色」の軌道上での実施の様子から生まれた着物の図案

成果

地上では起こりえない桜の動きによる新たな自然観の創造

地上で観察できる天然の花吹雪は、上から下へ、あるいは風の流れに沿い斜め下方向へ、ほとんどの花びらが統率され規則正しく飛ぶことが多いです。それゆえに伝統工芸の世界にも画の決まりやスタイルが存在しています。今回、本実験で得られたおよそ 1000 枚の絹の花びらが無重力下で自由に運動する様を記録した 3D 動画は、これまでの伝統的な画の決まりや美しいとされる常識を見事に打ち砕いてしまいました。

例えば、今回取得された映像の中で、画面の下から上に進む花びらと、上から下に進む花びらが画面中央で激しく正面衝突し、勢い良く弾け飛び、観察者の眼前に飛び込んでくる様や、また回転せず進行方向に平行な姿勢のまま、まるでサーフボードのように空間を滑るように直線運動する花びらの姿は地上の現象では考えられません。またそれぞれ別の意思をもつ生物のように感じられたことが不思議です。総じて、これらの現象をただ動画で観察するだけではなく、3D 映像で疑似体験できる事も含め、科学技術の上に成り立ったまったく新たな自然観を狙い通り、あるいはそれ以上に得ることができました。

また、取得された映像に写った花びら以外の部分である「空気」の存在を強く感じることができた事は意外でした。この余白部分にモティーフ自体と同程度の存在を感じることができるのも、余白を大切にし、意味を与える我々日本人ならではの感性であり、本実験を「きぼう」日本実験棟で実施した事に意味を感じます。無機質な ISS 内に、桜吹雪という日本独特の文化を持ち込んだことにより、宇宙を使った文化活動に新たな座標軸を与えました。

今後、世界的に有名な音楽家であるツトム・ヤマシタのステージ・コスチュームを製作、発表することにより、宇宙に散る桜をテーマにした新たな伝統産業のデザインを世界に向けてアピールします。

宇宙楽器

代表提案者：小野 綾子（東北大学）

目的

宇宙では、地上での演奏とは異なる物理現象による独特の音や演奏方法が期待されるとともに、新たな宇宙楽器が生まれる可能性があります。また、将来の宇宙滞在における余暇の楽しみ、もしくはコミュニケーションツールに発展することにも期待が持てます。

概要

誰でも簡単に演奏することができる（マラカスやハンドベルのような）手に持って振るタイプの金属楽器を用いて、無重力下での質量の差によって生じる物体の動きの違いや素材による音の違いを活かし、宇宙の船内環境ならではの音や演奏方法を探ります。

図 1　ボールチェーンで繋がれた重力下（机上）のエリプソイドベル（左）とフラクタルベル（右）
© 小野綾子 / 根岸 創 / JAXA

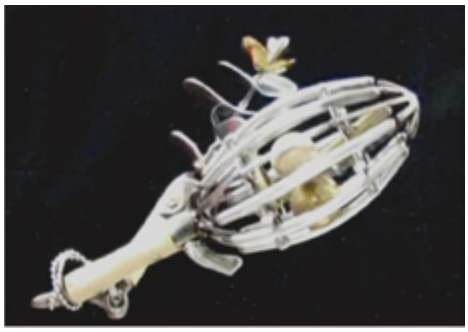


図 2　無重力下の楽器
© 小野綾子 / 根岸 創 / JAXA

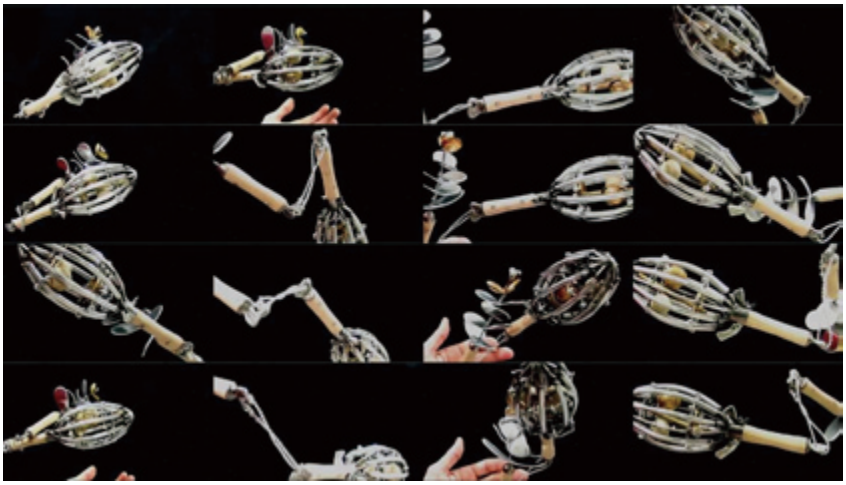


図 3　演奏中の様子（© 小野綾子 / 根岸 創 / JAXA, 写真コラージュ：Irene Lia Schlacht）

成果

①聴覚や視覚で感じ取れる地上と宇宙の違いを確認し、記録することが出来ました。聴覚的な特徴としては、内容物や振動板の浮遊を確認しながら繊細に操作することで、地上で行う時より金属同士のぶつかり合う音が綺麗に鳴り、かつ残響音が持続することを確認しました。視覚的な特徴としては、フラクタルベルは重力下ではあまり美しいとは言えないつぶれた形ですが、無重力では生き生きとした植物のように軸に対して均衡のとれた美しい形態に変化し（図 4）、操作した際にも無重力ならではの複雑な動きを観察できました。

図 4　植物のように生き生きとして見える微小重力下のフラクタルベル（© 小野綾子 / 根岸 創 / JAXA）

②宇宙楽器が、宇宙飛行士の精神の安定や余暇の楽しみ等の助けとなり得るか推し量ることも本テーマ意義のひとつですが、音楽ファイルとの共演は演奏者のインスピレーションを掻き立てるのか、この実験を行った宇宙飛行士は手順書の範囲を大きく超えて繰り返し演奏し、また実験後に今回の実験に対する好意的な感想を述べました。演奏においては緩急によって音の強弱をつけ、扱うごとに演奏技術を上達させました。この結果は、宇宙楽器は充分に精神の安定や余暇の楽しみ等の助けと成り得る可能性を示しています。

視覚・聴覚および自然の木の香りや触感で楽しませることで、癒しの効果や精神の安定の補助となることが期待されます。狭い閉鎖空間での単調な長期滞在において刺激や話のきっかけとなり、コミュニケーションの活性化につながります。またそこから、さらに新しいアイデアに富んだ宇宙楽器が生まれる可能性があります。

宇宙でのびやかに暮らそうプロジェクト

代表提案者：西出 和彦（東京大学）

目的

無重力下の限られた空間を、のびやかに住みこなすため、宇宙と地上の空間感覚・所作の相違について明らかにし、将来の快適な宇宙生活の居住設計や生活の質の向上、地上での新たな空間デザインの設計につなげることを目的としました。そのために、地上で蓄積した研究手法を応用して、実際に宇宙の室内空間において人間が空間を体験し評価しました。

概要

無重力環境でのくつろぎや会話などを通し、無重力での人間と空間の関係を探りました。より自然なくつろぎや会話を短時間に引き出すため、ボール遊びを採用しました。ボール遊びの行動を記録した映像から、人々の位置、距離、向き、会話の有無、会話の質などを数値化し解析しました。さらに、空間の容積感・印象評価をあわせて、室内環境の使い方を総合的に検討し分析しました。宇宙と地上にて同様の実験をおこない、宇宙でのデータは2名のケーススタディーとして、地上でのデータは約30名の統計処理を行ったデータとして扱いました。

図1　宇宙ならではの場面
写真：西出和彦 / JAXA（実施）

成果

宇宙と地上で異なる空間感覚

「空間の容積の大きさをどう感じるか」について、地上ではほぼ正確に評価されたのに対して、宇宙では保管室が大きく（実験室が小さく）評価されました。空間の印象については、宇宙では飛行士2人共、実験室、保管室ともに「spacious（ゆったりしている）」「not oppressive（圧迫感がない）」「calming（落ち着きがある）」「comfortable（心地よさがある）」と評価しました。一方、地上では、実験室が「のびのびしている」「ゆったりしている」「圧迫感がない」「心地よさがない」と評価され、保管室が「のびのびしていない」「ゆったりしていない」「圧迫感がある」「落ち着きがある」と評価されました。分析の結果、宇宙では、大きな実験室と小さな保管室をより近い質の空間として捉えていると考えられました。

人と人のコミュニケーションにおいて、同じボール投げという作業を通じた比較から、宇宙では地上よりも近い距離となり、互いの体の軸をそろえて顔を向き合わせることが重要であり、共同作業に関する会話を多くする傾向がみられました。したがって、宇宙では地上よりも、コミュニケーションをより注意深くおこなう必要があると考えられました。

引続き関連データを蓄積して研究することで、深く幅広い視点から、地上・宇宙での新たな空間デザインの設計につなげることが期待されます。

お地球見

代表提案者：安藤 孝浩（東京芸術大学）

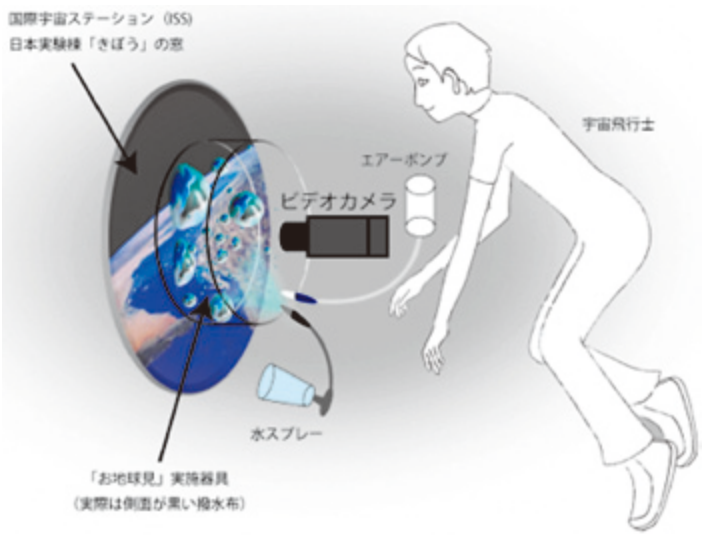
目的

宇宙飛行士は宇宙ステーションの窓から見える地球の姿に魅了され感動し、地球に対し様々な思いを抱いて来ました。「お地球見」は直に地球を眺めるのではなく、微小重力下での水に映る地球を眺め喜びや感動を得ます。これは日本のお月見文化の「水月」のエッセンスを取り入れたものです。水に揺らぐ姿を眺めるなどして、古来日本人は様々な観点から月見を楽しんできました。宇宙から見る地球の見方に工夫を凝らすことで、より人間的な感性を刺激して宇宙生活を豊かなものにします。

概要

「きぼう」日本実験棟の窓の手前に透明な容器を設置し、その中に霧吹きで水をスプレーする。宇宙飛行士は霧から凝集して水球になる様子をビデオカメラで撮影する。（図１参照）

容器内の水には背後に見える地球が映り込む。水は微小重力下において水球になるので、レンズ効果により地球は反転して像を結ぶ。霧から凝集し、やがて大小様々な水滴、水球になり幾つもの映り込んだ地球が容器内に現れる。また容器内に手動式のエアーポンプで風をおこして、水に動きを与える。揺れる水に映り込んだ地球の姿を撮影。



※図における各々の比率は正確ではない

図１　実施概要図

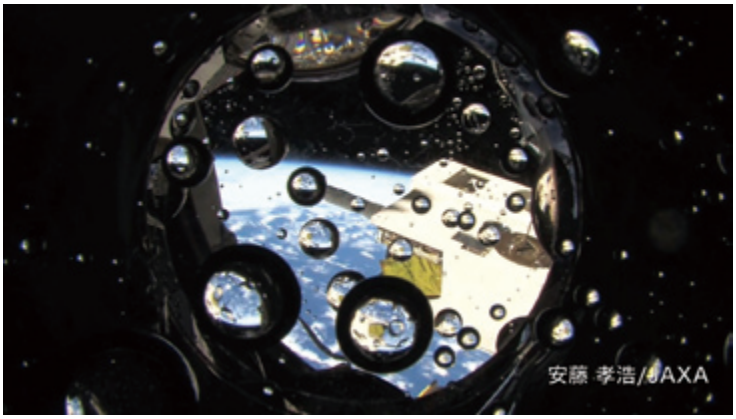


図２　取得された実際の映像

成果

水の彫刻に映るいくつもの地球、感性への刺激

●ミッション前半は容器の地球側の円形窓が撮影範囲内にすべて収まる様にワイド（広角）で撮影しました。この時に撮影された映像には微小重力下でスプレーから噴霧される水が霧から徐々に凝集し水球に成長して行く様子が映っています。その過程において大小様々な水球に映る地球の姿は、例えるならば万華鏡のように幾つものミニ地球を見ることが出来ました。

●ミッション中盤では容器の地球側の円形窓にズームして窓に付着した水滴に映る地球の姿を拡大し撮影しました。この時に実施パイロットであるクリス・ハドフィールド氏（カナダ）は２つの水滴に映る２つの地球を自発的に１つの水滴に合体させて、１つの地球にするという映像を撮影しました。この事は水に映る地球を単に観測するに留まらない人間的な感性を伺う事が出来ました。平安期のお月見には酒杯に映る月を飲むということが万葉集で詠われています。身近な場所に自然を取り込み自然との一体感を味わう感覚とクリス氏の行為は類似しています。

●ミッション後半は再びワイド（広角）で撮影し、容器を激しく叩く等して溜まった水に動きを与え、さらにエアーポンプの送風により多様に水を歪ませました。この水の姿はアメーバの様で、複数の水球が合体したり、あるいは激しく分裂したりといった動きが見て取れました。この動きに連動して地球の姿もまた激しく変容し、もはや丸い地球の姿は原形をとどめず、青い地球の色がグニャグニャと伸縮していました。微小重力下における水の振る舞いは宇宙ならではの水の彫刻とでも言えます。地上では重力により叶わぬ立体的な造形が、多様に観察出来ました。

●お地球見は青い地球と生命の源である水が織り成す、潤いの芸術です。人々は感性を刺激されて生命的な記憶を呼び起し、感動や驚きを得ます。生命を育む地球の青き大気と生命が発祥した水の輝きを見ることは私達の心に潤沢な栄養を与えてくれます。

●また、今後の宇宙開発は火星探査などを考えても船内など密閉された空間での滞在は長期化すると考えられます。クルーの心の問題を考えた時、より人間的な営みを追求する必要に迫られますが、本研究を含めた宇宙芸術で得られた実績と経験が貢献出来ます。

宙音

代表提案者：福嶋 敬恭（京都市立芸術大学）

目的

「心の原点とは」、「人間本来の感性とは」、如何なるものか。そのチャレンジのトリガーとなるものとして創作されたのが「宙音」（図 1）です。「宙音」を通して宇宙の自然、地球の自然をひとつの音（声）に集約して取り出し、現在失いつつある「聴くこと」の感受性の源泉を探り、聴覚を通して人間の感性の純粋な姿を引き出します。宇宙飛行士自身が「宙音」を用いて音を作り出し、宇宙と心のシンクロナイズを試みました。地上との聞こえ方、感じ方の違いを解析し、人間の感性の原初の姿をあらためて問い直し、その姿を浮き彫りにすることにより、新しい形の芸術表現、及び、より深化したかたちの人間による宇宙文化の創造へと繋げます。

図 1　宙音
© 福嶋敬恭

概要

「きぼう」日本実験棟の微小重力空間の中で、発音する立体作品「宙音」（Sound Emitting Object）を用いて、宇宙飛行士自身が音を作り出します。その音を「きぼう」日本実験棟内に浮遊させた 3D マイク（図 2）と宇宙飛行士の耳に設置したバイノーラルマイクを使って録音しました。微小重力下に於いてライブで音を作り出し、浮遊し続ける音と宙音（オブジェ）と共に浮遊する宇宙飛行士自身の実施中の様子も映像記録しました。「宙音」から発せられた音が宇宙ではどの様に聞こえ、どの様に感じるものであったのかを取得した各種データ（本ミッションと関わった宇宙飛行士からのアンケート、コメント）をもとに解析します。

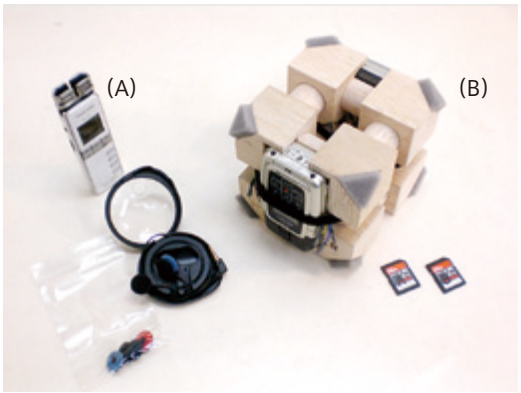


図 2　(A) バイノーラル録音システム
(B) 3D マイク（浮遊型録音機）
© 福嶋敬恭 / 今西啓介

図 3　軌道上実施の様子（「きぼう」実験棟内）
© 福嶋敬恭 /JAXA

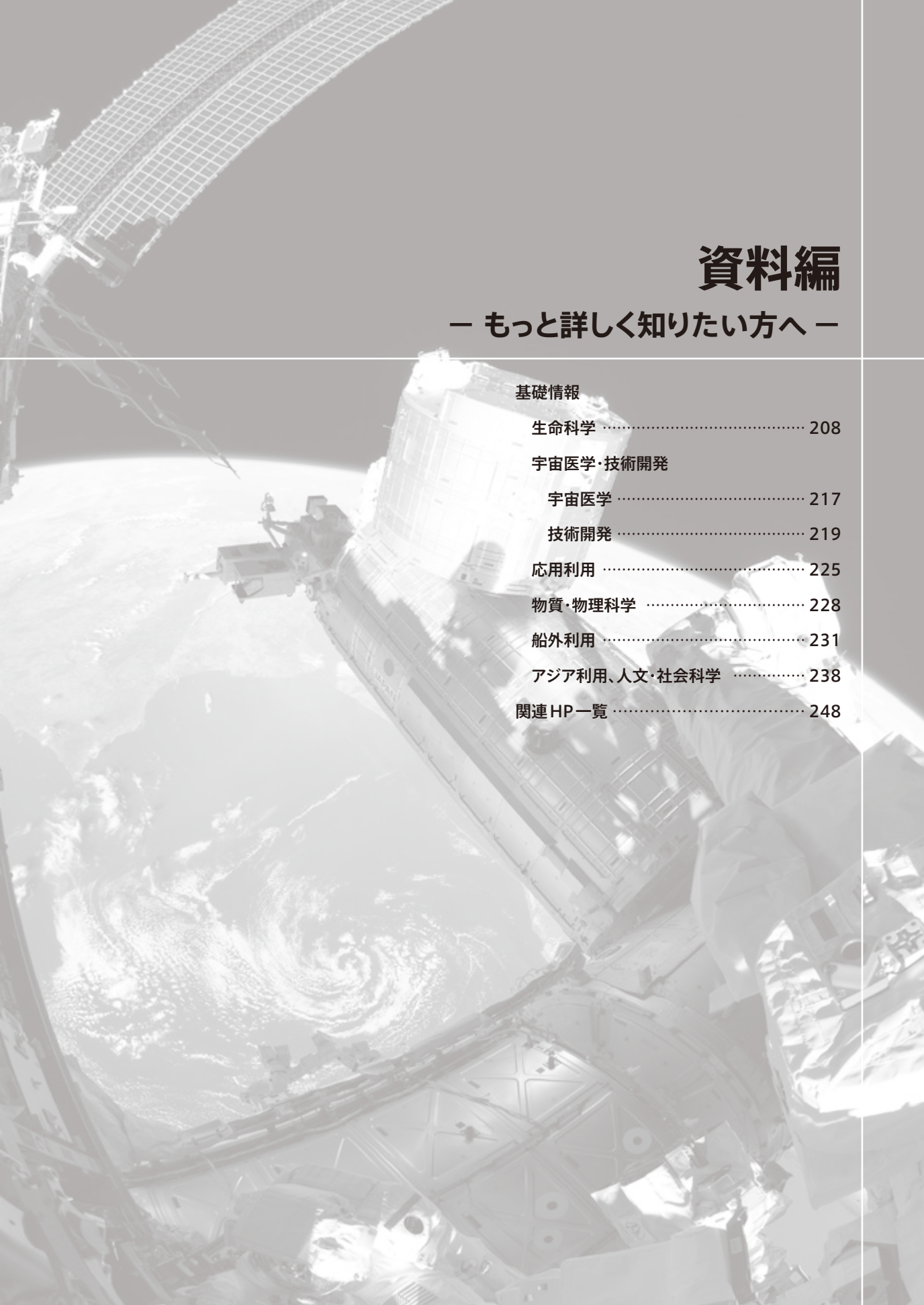
成果

実施結果並びに得られた結果

●「宙音」プロジェクト -「宇宙」というリアリティーあふれる現場での実施が、直に宇宙飛行士自身の感性を奥深くゆさぶり、心に刻まれ、心に作用し、宇宙と全ての心が一体となりシンクロナイズがスムーズに行われた事は、実施後のアンケートによる回答の内容がよく示しています。アンケートの回答による「宙音」の大方の印象は、「快適・リラックス・ピースフル・未来を想起する・地球の自然や過去の記憶・宇宙の声」等の言葉で語られており、あらゆるものが人工的な環境である ISS の内部では大変重要な意味を持っています。この貴重な意見は、将来の長期間・長距離にわたる宇宙活動で人の精神面を支える上で、大きく期待できるものです。

●本プロジェクトは、オブジェ「宙音」を使って発音させる一連の操作の中で自分自身の手を通して自然発生的に生まれてくる音に精神を集中させ、これによってゆさぶられ湧き上がってくる感性と心（精神）との対話を軸に、より純粋に自己に向かい合い、自分の本来の姿を見出す事に繋げる事に最大の意味を持っていますが、微小重力環境では地上に比べて発音をコントロールする事が多少難しくなり、上手く大きな音を作り出す行為に終始集中してしまい、音を作り出すという操作方法だけが重点になってしまったと考えられます。このため、「宙音」プロジェクトの本来の目的から少しずれた印象に見受けられました。結果として、１名の飛行士の回答は、他のすべての飛行士のアンケートの回答と少し異なった印象でした。

●アンケートの中で、「将来の宇宙進出への展開に於いて、又、極限の環境下で、人の感性に直接働きかける「宙音」が有意義なものであり、将来展望への可能性を持ちうるか」という質問に我々は特に注目しました。回答者のほぼ全員が意義あるものとして捉えています。この結果は、今後、実施されるであろう、長期にわたる有人宇宙飛行（惑星間宇宙飛行）に於ける“心”のサポートについての研究を行うきっかけとしたいと思います。



資料編

― もっと詳しく知りたい方へ ―

基礎情報

生命科学 …… 208

宇宙医学・技術開発

宇宙医学 …… 217

技術開発 …… 219

応用利用 …… 225

物質・物理科学 …… 228

船外利用 …… 231

アジア利用、人文・社会科学 …… 238

関連HP一覧 …… 248

生命科学

p.30 小さな線虫を使った実験で、筋肉の衰えや老化の現象の謎が分かる
第 1 回線虫国際共同実験 (ICE-1st)

代表研究者：石岡 憲昭 (JAXA 宇宙科学研究所 教授)

共同研究者：香川 弘昭 (岡山大学)、東谷 篤志 (東北大学)、Nathaniel Szewczyk (ノッティンガム大学)、本田 修二 (東京都健康長寿医療センター研究所)、東端 晃 (JAXA)

実施時期：2004 年 4 月～ 5 月

解析状況：解析終了
ICE-1st に関わる解析は終了し、その成果については国際線虫学会をはじめとする様々な学会や、専門学術誌などで発表されています。

主な出版物

[1] Higashitani A, Higashibata A, Sasagawa Y, Sugimoto T, Miyazawa Y, Szewcyk NJ, Viso M, Gasset G, Eche B, Fukui K, Shimazu T, Fujimoto N, Kuriyama K, Ishioka N. Checkpoint and physiological apoptosis in germ cells proceeds normally in spaceflown Caenorhabditis elegans. Apoptosis. 2005 Oct;10(5):949-54.

[2] Higashibata A, Szewczyk NJ, Conley CA, Imamizo-Sato M, Higashitani A, Ishioka N.Decreased expression of myogenic transcription factors and myosin heavy chains in Caenorhabditis elegans muscles developed during spaceflight. J Exp Biol. 2006 Aug;209(Pt 16):3209-18. Erratum in: J Exp Biol. 2006 Sep;209(Pt 18):3695.

[3] Higashibata A, Higashitani A, Adachi R, Kagawa H, Honda S, Honda Y, Higashitani N, Sasagawa Y, Miyazawa Y, Szewczyk NJ, Conley CA, Fujimoto N, Fukui K, Shimazu T, Kuriyama K, Ishioka N. Biochemical and Molecular Biological Analyses of space-flown nematodes in Japan, the First International Caenorhabditis elegans Experiment (ICE-First). Microgravity Sci Technol. 2007 Sep;19(5-6):159-163.

[4] Adachi R, Takaya R, Higashibata A, Ishioka N, Kagawa H. Spaceflight results in increase of thick filament but not thin filament proteins in the paramyosin mutant of Caenorhabditis elegans. Adv Space Res. 2008;41(5):816-823.

[5] Honda Y, Higashibata A, Matsunaga Y, Yonezawa Y, Kawano T, Higashitani A, Kuriyama K, Shimazu T, Tanaka M, Szewczyk NJ, Ishioka N, Honda S. Genes down-regulated in spaceflight are involved in the control of longevity in Caenorhabditis elegans. Sci Rep. 2012;2:487. doi: 10.1038/srep00487. Epub 2012 Jul 5.

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/utiliz/experiment/celegans/

p.32 筋肉が衰えるメカニズムを最先端の手法でねらい打ち
線虫 *C. elegans* の宇宙環境における RNA 干渉とタンパク質リン酸化 (CERISE)

代表研究者：東谷 篤志 (東北大学大学院生命科学研究科 生態システム生命科学専攻 教授)

共同研究者：東端　晃 (JAXA)

実施時期：2009 年 11 月

解析状況：実施中
網羅的な遺伝子発現、タンパク質発現、線虫の運動性などについて詳細な解析を実施中です。これらの解析から、宇宙の無重力が線虫の特に筋に及ぼす影響を明らかにする予定です。

主な出版物

[1] Higashitani A, Hashizume T, Sugimoto T, Mori C, Nemoto K, Etheridge T, Higashitani N, Takanami T, Suzuki H, Fukui K, Yamazaki T, Ishioka N, Szewczyk N, Higashibata A. C. elegans RNAi space experiment (CERISE) in Japanese Experiment Module KIBO. Biological Sciences in Space. 2009; 23(4): 183-187.

[2] Etheridge T, Nemoto K, Hashizume T, Mori C, Sugimoto T, Suzuki H, Fukui K, Yamazaki T, Higashibata A, Szewczyk NJ, Higashitani A. The effectiveness of RNAi in Caenorhabditis elegans is maintained during spaceflight. PLoS One. 2011; 6(6): e20459.
[3] Etheridge T, Nemoto K, Hashizume T, Mori C, Sugimoto T, Suzuki H, Fukui K, Yamazaki T, Higashibata A, Szewczyk NJ, Higashitani A. The next phase of life-sciences spaceflight research: harnessing the power of functional genomics. Communicative & Integrative Biology 2011; 4:6, 1-2.

ホームページ http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/first/cerise/

p.34 宇宙で筋肉が衰える「新規メカニズム」とは
ユビキチンリガーゼ Cbl-b を介した筋萎縮の新規メカニズム（Myo Lab）

代表研究者：二川　健（徳島大学大学院ヘルスバイオサイエンス研究部・生体栄養学　教授）

共同研究者：近藤 茂忠・平坂 勝也・真板 綾子（徳島大学）、東端　晃（JAXA 主任開発員）

実施時期：2010 年 4 月～ 5 月

解析状況：実施中
筋萎縮に酸化ストレスが重要な働きをしていることは以前より報告されています。今回の実験により、その酸化ストレスの筋萎縮におけるターゲット分子を世界で最初に見出しました。さらに、この酸化ストレスの発生源を明らかにしつつあります。

2012 年以降の出版物

[1] Soy glycinin contains a functional inhibitory sequence against muscle atrophy-associated ubiquitin ligase Cbl-b. Abe T, Kohno S, Yama T, Ochi A, Suto T, Hirasaka K, Ohno A, Teshima-Kondo S, Okumura Y, Oarada M, Choi I, Nakao R, Mukai R, Terao J, Nikawa T. Int J Endocinol (in press)
[2] An intracellular fragment of osteoactivin formed by ectodomain shedding translocated to the nucleoplasm and bound to RNA binding proteins.
Utsunomiya K, Owaki K, Okumura Y, Yano M, Oto T, Suzuki E, Tamura S, Abe T, Kohno S, Ohno A, Hirasaka K, Teshima-Kondoh S, Nikawa T.Biosci Biotechnol Biochem. 2012 Dec 7. [Epub ahead of print]
[3] Prevention of disuse muscle atrophy by dietary ingestion of 8-prenylnaringenin in denervated mice. Mukai R, Horikawa H, Fujikura Y, Kawamura T, Nemoto H, Nikawa T, Terao J. PLoS One. 2012;7(9): e45048.
[4] The potential of GPNMB as novel neuroprotective factor in amyotrophic lateral sclerosis. Tanaka H, Shimazawa M, Kimura M, Takata M, Tsuruma K, Yamada M, Takahashi H, Hozumi I, Niwa J, Iguchi Y, Nikawa T, Sobue G, Inuzuka T, Hara H. Sci Rep. 2012;2:573. Epub 2012 Aug
[5] Unloading stress disturbs muscle regeneration through perturbed recruitment and function of macrophages.
Kohno S, Yamashita Y, Abe T, Hirasaka K, Oarada M, Ohno A, Teshima-Kondo S, Higashibata A, Choi I, Mills EM, Okumura Y, Terao J, Nikawa T. J Appl Physiol. 2012 May;112(10):1773-82.

特許取得：2 件
①登録番号：特許第 5113346 号　登録日：平成 24 年 10 月 19 日　出願日：平成 18 年 5 月 25 日
発明の名称：ユビキチンリガーゼ阻害剤（Cblin の発見）
②登録番号：特許第 4963044 号　登録日：平成 24 年 4 月 6 日　出願日：平成 18 年 7 月 5 日
発明の名称：ユビキチンリガーゼ阻害剤（大豆蛋白質のユビキチンリガーゼ阻害効果の発見）

ホームページ http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/first/myolab/

p.36 目からウロコの実験が骨の重力応答の仕組みを解明する
宇宙空間における骨代謝制御：キンギョの培養ウロコを骨のモデルとした解析（Fish Scales）

代表研究者：鈴木 信雄（金沢大学環日本海域環境研究センター 准教授）

共同研究者：大学関係者：東京医科歯科大学　服部 淳彦　教授　他 15 名
JAXA 関係者：宇宙環境利用センター　矢野 幸子、谷垣 文章、白川 正輝

実施時期：2010 年 5 月

解 析 状 況：実施中
宇宙実験で得られた結果を確認するため、3 次元クリノスタットを用いた地上実験を行い、詳細な遺伝子発現調節を調べています。

主 な 出 版 物

[1] Kakikawa, M., et al.: Determination of calcium sensing receptor in the scales of goldfish and induction of its mRNA expression by acceleration loading. Biol. Sci. Space, 26, 26-31 (2012)
[2] Suzuki, N. and Sakamoto, T., Preface: Comparative and general aspects of calcium homeostasis and its hormonal regulations. In "Evolution of calcium homeostasis and its hormonal regulation in vertebrates". Suzuki, N. and Sakamoto, T., eds. Virtual special issues in Zoological Science (2012)
[3] Thamamongood, T. A., Furuya, R., Fukuba, S., et al.: Expression of osteoblastic and osteoclastic genes during spontaneous regeneration and autotransplantation of goldfish scale: A new tool to study intramembranous bone regeneration. Bone, 50, 1240-1249 (2012)
[4] Yano, S., et al.: Excellent thermal control ability of cell biology experiment facility (CBEF) on ground basis experiments and board experiments in kibo of the international space station. Biol. Sci. Space, 26, 12-20 (2012)
[5] Suzuki, N., Danks, J.A., Maruyama, Y., et al,: Parathyroid hormone 1 (1-34) acts on the scales and involves calcium metabolism in goldfish. Bone, 48, 1186-1193 (2011)

今後の成果発表予定：論文公表予定。

ホームページ http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/second/fishscales/

p.39 カエルの細胞は宇宙でも「ドーム」を作るのか
両生類培養細胞による細胞分化と形態形成の調節（Dome Gene）

代 表 研 究 者：浅島 誠（(独) 産業技術総合研究所 幹細胞工学研究センター長・フェロー）

共 同 研 究 者：伊藤 弓弦（(独) 産業技術総合研究所）、矢野 幸子・谷垣 文章・白川 正輝 (JAXA)、嶋津　徹・鈴木 ひろみ (日本宇宙フォーラム)、笠原 春夫 (有人宇宙システム)

実 施 時 期：2009 年 3 月

解 析 状 況：実施中
現在、ヒトとの配列比較により、ツメガエル未知の遺伝子に関して機能を同定中。その上で、宇宙環境において細胞が示すシグナルネットワークを解析中。

主 な 出 版 物

[1] Kitamoto J, Fukui A, Asashima M. Temporal regulation of global gene expression and cellular morphology in Xenopus kidney cells in response to clinorotation. Adv Space Res. 2005;35(9):1654-1661.
[2] Ikuzawa M, Akiduki S, Asashima, M. Gene expression profile of Xenopus A6 cells cultured under random positioning machine shows downregulation of ion transporter genes and inhibition of dome formation. Advances in Space Research, 2007;40(11):1694-1702.
[3] Ikuzawa, M, Asashima, M. Global Expression of Simulated Microgravity-ResponsiveGenes in Xenopus Liver Cells. Zoological Science, 2008;25(8):828-837.

今後の成果発表予定：論文公表予定。

ホームページ http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/first/domegene/

p.41 特殊な環境に生きる微生物のヒミツを探る　―「きぼう」と宇宙飛行士を守る―
国際宇宙ステーション内における微生物動態に関する研究（Microbe）

代 表 研 究 者：槇村 浩一（帝京大学大学院医学研究科　教授）、那須 正夫（大阪大学大学院薬学研究科　教授）

共 同 研 究 者：佐藤 一朗（帝京大学）、月井 雄二（法政大学）、杉田　隆（明治薬科大学）、高鳥 浩介（日本獣医生命科学大学）、辨野 義己（理研）、山口 進康・馬場 貴志（大阪大学）、谷 佳津治（大阪大谷大学）、山崎　丘（帝京大学／JAXA）、泉 龍太郎（日本原子力研究開発機構）
（実 験 支 援） 白川 正輝・谷垣 文章・高橋 雄一・飛田 將光 (JAXA 宇宙環境利用センター)、嶋津　徹・栗山 可奈（日本宇宙フォーラム）、笠原 春夫・長田 郁子（有人宇宙システム）

実 施 時 期：2009 年～ 2012 年

解 析 状 況：実施中
Microbe-1/2 については解析が終わっており論文投稿も進んでいます。Microbe-3 は解析中であり、その結果を加えて Microbe-1/2/3 と約 3 年半にわたって経時的に実施した Microbe 実験をまとめる予定です。

主 な 出 版 物

[1] Microbe-I: fungal biota analyses of the Japanese experimental module KIBO of the International Space Station before launch and after being in orbit for about 460 days.
Satoh K, Nishiyama Y, Yamazaki T, Sugita T, Tsukii Y, Takatori K, Benno Y, Makimura K.
Microbiol Immunol. 2011 Dec;55(12):823-9
[2]Bacterial Monitoring with Adhesive Sheet in the International Space Station- "Kibo" , the Japanese Experiment Module. Ichijo T, Hieda H, Ishihara R, Yamaguchi N, Nasu M. Microbes Environ. Vol. 28, No. 2, 264–268, 2013

今後の成果発表予定：2014 年 12 月頃を目指して、論文を公表予定。

ホームページ http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/second/microbe/

p.44

細胞の生死を制御する司令塔、「ミトコンドリア」は宇宙でどう働くか？
宇宙放射線および微小重力環境の哺乳類細胞に対する影響に関する研究（Neuro Rad）

代 表 研 究 者：馬嶋 秀行（鹿児島大学大学院医歯学総合研究科 腫瘍学講座・鹿児島大学 宇宙環境医学講座 教授）

共 同 研 究 者：犬童 寛子（鹿児島大学）、石岡 憲昭（JAXA）、矢野 幸子・谷垣 文章・白川 正輝（JAXA 宇宙環境利用センター）、嶋津　徹・鈴木 ひろみ（日本宇宙フォーラム）、桝田 大輔（有人宇宙システム）

実 施 時 期：2010 年 4 月～ 5 月（STS-131 で運搬し、STS-132 で回収）

解 析 状 況：実施中
得られたサンプルについて、遺伝子発現、酸化ストレス発現などについて詳細な解析を実施中です。

主 な 出 版 物

[1] Indo HP, Davidson M, Yen H-C, Suenaga S, Tomita K, Nishii T, Higuchi M, Koga Y, Ozawa T, Majima HJ: Evidence of ROS generation by mitochondria in cells with impaired electron transport chain and mitochondrial DNA damage. Mitochondrion 7:106-118, 2007.

[2] Majima HJ, Indo HP, Tomita K, Iwashita Y, Suzuki H, Masuda D., Shimazu T, Tanigaki F, Umemura S, Yano S, Fukui K, Higashibata A, Yamazaki TQ, Kameyama M, Suenaga S, Sato T, Yen H-C, Gusev O, Okuda T, Matsui H, Ozawa T & Ishioka N: Bio-assessment of risk in long-term manned space exploration — cell death factors in space radiation and/or microgravity: a review -. Bio. Sci Space 23:43-53, 2009.

[3] Majima HJ, Indo HP, Suenaga S, Kaneko T, Matsui H, Yen H-C, Ozawa T: Mitochondria as Source of Free Radicals. Naito Y, Suematsu M, Yoshikawa T (eds): Free Radical Biology in Digestive Diseases, Front Gastrointest Res. Basel, Karger, vol 29, pp12-22, 2011.

[4] Majima HJ, Indo HP, Suenaga, S, Matsui H, Yen H-C and Ozawa T: Mitochondria as Possible Pharmaceutical Targets for the Effects of Vitamin E and its Homologues in Oxidative Stress-Related Diseases. Curr Pharm Des 17:2190-2195, 2011.

[5] Indo HP, Inanami O, Koumura T, Suenaga S, Yen H-C, Kakinuma S, Matsumoto K, Nakanishi I, St Clair W, St Clair DK, Matsui H, Cornette R, Gusev O, Okuda T, Nakagawa Y, Ozawa T & Majima HJ: Roles of mitochondria-generated reactive oxygen species on X-ray-induced apoptosis in a human hepatocellular carcinoma cell line, HLE. Free Radical Research 46:1029-1043, 2012.

[6] Indo HP, Nakanishi I, Ohkubo K, Yen H-C, Nyui M, Manda S, Matsumoto K, Fukuhara K, Anzai K, Ikota N, Matsui H, MinamiyamaY, Nakajima A, Ichikawa H, Fukuzumi S, Ozawa T, Mukai C and Majima HJ: Comparison of in vivo and in vitro antioxidative parameters for eleven food factors. RSC Advances. 3(14): 4535-4538, 2013, DOI:10.1039/C3RA22686G

今後の成果発表予定：論文公表予定。

ホームページ http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/first/neurorad/

p.46

がん化を防ぐ遺伝子「*p53*」の宇宙での働きを探る
哺乳動物培養細胞における宇宙環境曝露後の *p53* 調節遺伝子群の遺伝子発現（Rad Gene）

代 表 研 究 者：大西 武雄（奈良県立医科大学）

共同研究者：高橋 昭久・Xiaoming Su（奈良県立医科大学）、永松 愛子・大森 克徳・石岡 憲昭（JAXA）、嶋津　徹・鈴木 ひろみ（日本宇宙フォーラム）

実施時期：2008 年 11 月 15 日スペースシャトル STS-126 で打ち上げられ、11 月 22 日にサンプルを ISS の -80℃の冷凍庫に移動・保管しました。2009 年 2 月 20 日から 9 日間「きぼう」で 37℃の CO_2 インキュベーターで細胞培養が順調に行われ、2009 年 3 月 29 日にサンプルを地上に回収しました。

解析状況：完了

主な出版物：いずれも査読付きの国際雑誌に原著として刊行しました。

[1] Ohnishi T, Takahashi A, Nagamatsu A, Omori K, Suzuki H, Shimazu T, Ishioka N: Detection of space radiation-induced double strand breaks as a track in cell nucleus. Biochem. Biophys. Res. Commun., 390: 485-488, 2009.

[2] Takahashi A, Suzuki H, Omori K, Seki M, Hashizume T, Shimazu T, Ishioka N, Ohnishi T: The expression of p53-regulated genes in human cultured lymphoblastoid TSCE5 and WTK1 cell lines during spaceflight. Int. J. Radiat. Biol., 86: 669-681, 2010.

[3] Takahashi A, Su X, Suzuki H, Omori K, Seki M, Hashizume T, Shimazu T, Ishioka N, Iwasaki T, Ohnishi T: p53-Dependent adaptive responses in human cells exposed to space radiations. Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys., 78: 1171-1176, 2010.

[4] Takahashi A, Suzuki H, Omori K, Seki M, Hashizume T, Shimazu T, Ishioka N, Ohnishi T: Expression of p53-regulated genes in human cultured lymphoblastoid TSCE5 and WTK1 cell lines after spaceflight in a frozen state. Adv. Space Res., 47: 1062-1070, 2011.

[5] Takahashi A, Suzuki H, Omori K, Seki M, Hashizume T, Shimazu T, Ishioka N, Ohnishi T: Expression of p53-regulated proteins in human cultured lymphoblastoid TSCE5 and WTK1 cell lines after spaceflight in a frozen state. J. Radiat. Res., 53: 168-175, 2012.

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/first/radgene/

p.49

低線量放射線が遺伝子を傷つけた「証拠」を、高感度に検出
ヒト培養細胞における TK 変異体の LOH パターン変化の検出（LOH）

代表研究者：谷田貝 文夫（理化学研究所）

共同研究者：大西 武雄・高橋 昭久（奈良県立医科大学）、本間 正充（国立医薬品食品衛生研究所）、鈴木ひろみ・嶋津　徹（日本宇宙フォーラム）、大森 克徳・石岡 憲昭（JAXA）

実施時期：2008 年 11 月～ 2009 年 3 月（フライト期間）、STS-126 で打上げ

解析状況：完了

主な出版物

[1] Yatagai, F., Honma, M., Ukai, A., Omori, K., Suzuki, H., Shimazu, T., Ohnishi, T., Dohmae, N., and Ishioka, N. (2012) Preliminary results of space experiment: Implications for the effects of space radiation and microgravity on survival and mutation induction in human cells. Adv. Space. Res. 49,479-486. [原著論文]

[2] Yatagai, F., Honma, M., Takahashi, A., Omori, K., Suzuki, H., Shimazu, T., Seki, M., Hashizume, Ukai, A., Sugasawa, K., Abe, T., Dohmae, N., Enomoto, S., Ohnishi, T., Gordon, A., and Ishioka, N. (2011) Frozen human cells can record radiation damage accumulated during space flight: mutation induction and radioadaptation. Radiat. Environ. Biophys. 50, 124-134. [原著論文]

[3] 谷田貝文夫、本間 正充 、石岡 憲昭（2010）、宇宙放射線の生物影響検出 ISS 実験と今後の展開 , 生物工学 , 88, 280-284. [総説]

[4] 谷田貝文夫、本間 正充、石岡 憲昭（2009）、宇宙環境は遺伝子にどのような影響を与えるのか、Medical Bio, July, 54-59. [総説]

[5] Yatagai, F., Takahash, A., Honma, M., Suzuki, H., Omori, K., Seki, M., Hashizume, T., Shimazu, T., Enomoto, S., Ohnishi, T., and Ishioka, N. (2009) LOH Analyses for Biological Effects of Space Radiation: Human Cell Culture in "Kibo" of International Space. Biol. Sci.. Space, 23, 11-16. [総説]

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/first/loh/

p.52 カイコの卵は宇宙放射線の番人になるか ?!
カイコ生体反応による長期宇宙放射線被曝総合的評価（Rad Silk）

代表研究者：古澤 壽治（財団法人衣笠会 繊維研究所、京都工芸繊維大学 名誉教授）

共同研究者：一田 昌利・長岡 純治・杉村 順夫（京都工芸繊維大学）、藤井　博（九州大学大学院）、野島 久美恵（放射線医学総合研究所）、鈴木 ひろみ・嶋津　徹（日本宇宙フォーラム）、長岡 俊治（藤田保健衛生大学）、大森 克徳・永松 愛子・石岡 憲昭（JAXA）

実施時期：2009 年 8 月～ 2009 年 12 月

解析状況：帰還卵を保存し、環境応答遺伝子発現の促進・抑制について解析中

主な出版物

[1] Furusawa, T. et al. (2009): Introduction of the proposed space experiments aboard the ISS using the silkworm, Bombyx mori. Biological Sciences in Space 23(2), 61-69.

[2] Furusawa, T. et al. (2009): Targeted heavy － ion microbeam irradiation of the embryo but not yolk in the diapause-terminated egg of the silkworm, Bombyx mori, induces the somatic mutation. J. Radiat. Res., 50, 371˜375.

[3] 古澤 壽治ら (2009): 微小重力下でのカイコの胚発育 . 衣笠繊研報 13、21-30.

[4] 古澤 壽治・藤井　博 編著 (2014): 蚕の生体反応を通して宇宙環境を探る - 宇宙放射線と微小重力が生体に及ぼす影響 - . 繊維科学フォーカス 第 2 巻：蚕サイエンスの進展

今後の成果発表予定

[1] Furusawa, T. et al. (審査中) : Chromosome aberrations in Bombyx mori silkworm eggs induced by low dose space radiation. Biological Sciences in Space.

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/first/radsilk/

p.54 植物細胞壁の「鉄筋コンクリート構造」の強度は宇宙でどう変わる？
微小重力環境下におけるシロイヌナズナの支持組織形成に関わる遺伝子群の逆遺伝学的解析（Cell Wall）

代表研究者：西谷 和彦（東北大学大学院 教授）

共同研究者：横山 隆亮（東北大学）

実施時期：2008 年 3 月～ 5 月

解析状況：終了
宇宙で発芽・生育できた一部の芽生えの画像を用いて、生育状況を解析するとともに、回収試料を用いて遺伝子解析を実施しました。

主な出版物

[1] Mechanical load induces upregulation of transcripts for a set of genes implicated in secondary wall formation in the supporting tissue of Arabidopsis thaliana.
Koizumi K, Yokoyama R, Nishitani K.J Plant Res. 2009 Nov;122(6):651-9.

[2] Yokoyama R, Koizumi K, Nishitani K, “Cell wall-related genes involved in supporting tissue formation and transcriptional regulation in Arabidopsis thaliana” , Biol. Sci.Space, 23(3), 121-129, 2009.

[3] Koizumi K, Yokoyama R, Nishitani K, Takeoka H, Kamada M, Omori K, Ishioka N, Shimazu T, “Reverse genetic approach to exploring genes responsible for cell-wall dynamics in supporting tissues of Arabidopsis thaliana under microgravity conditions” , Biol. Sci.Space, 21(3), 48-55, 2007.

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/utiliz/issexpjp/cw/top.html

p.56 細胞壁というドームを支える、細胞内部の役者たち
植物の抗重力反応における微小管－原形質膜－細胞壁連絡の役割（Resist Wall）

代表研究者：保尊 隆享（大阪市立大学大学院 教授）

共同研究者：若林 和幸・曽我 康一（大阪市立大学）、 橋本　隆（奈良先端大）、園部誠司（兵庫県立大）、村中 俊哉（大阪大学）

実施時期：2008 年 3 月～ 5 月

解析状況：終了
宇宙で発芽・生育できた一部の芽ばえの画像を用いて、生育状況を解析するとともに、回収試料の細胞形態並びに細胞壁物性を解析しました。

主な出版物
[1] Biol. Sci. Space 2009 23(2): 71-76. Pub 2009 Jul 1.
Growth and cell wall properties in hypocotyls of Arabidopsis tua6 mutant under microgravity conditions in space. Hoson T, Matsumoto S, Soga K, Wakabayashi K, Hashimoto T, Sonobe S, Muranaka T, Kamisaka S, Kamada M, Omori K, Ishioka N and Shimazu T.

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/utiliz/issexpjp/rw/top.html

p.58 種から種へ。身近なペンペン草（シロイヌナズナ）の一生を宇宙で。
微小重力環境における高等植物の生活環（Space Seed）

代表研究者：神阪 盛一郎（富山大学大学院理工学研究部・大阪市立大学名誉教授）

共同研究者：唐原 一郎・山田 恭司（富山大学大学院理工学研究部）、笠原 宏一（東海大学生物理工学部）、後藤 伸治（宮城教育大学教育学部）、曽我 康一・保尊 隆享・若林 和幸（大阪市立大学大学院理学研究科）、田坂 昌生（奈良先端科学大学院大学）、西内　巧（金沢大学学際科学実験センター）、西谷 和彦（東北大学大学院生命科学研究科）、橋本　隆（奈良先端科学大学院大学）、山田 晃弘（東京大学名誉教授）、横山 隆亮（東北大学大学院生命科学研究科）、矢野 幸子・谷垣 文章・白川 正輝（JAXA 宇宙環境利用センター）、嶋津　徹・鈴木 ひろみ（日本宇宙フォーラム）、笠原 春夫・桝田 大輔（有人宇宙システム）

実施時期：2009 年 9 月～ 11 月

解析状況：実施中
得られた植物体や種子の微細構造の観察、細胞壁の物理化学的性質、遺伝子発現などについて詳細な解析を実施中です。

主な出版物
[1] Yano S, Kasahara H, Masuda D, Tanigaki F, Shimazu T, Suzuki H, Karahara I, Soga K, Hoson T, Tayama I, Tsuchiya Y and Kamisaka S (2013) Improvements in and actual performance of the Plant Experiment Unit onboard Kibo, the Japanese Experiment Module on the International Space Station. Adv. Space Res. 51: 780-788.
[2] 神阪 盛一郎、唐原 一郎、笠原 宏一、山田 晃弘、矢野 幸子、谷垣 文章、笠原 春夫、桝田 大輔、嶋津　徹、福井 啓二、西谷 和彦、保尊 隆享（2010）「国際宇宙ステーションでの Space Seed 実験」生物工学 88: 288-291.

今後の成果発表予定：論文公表予定。

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/first/spaceseed/

p.60 根を曲がらせる「影の物質」を宇宙で探る
微小重力下における根の水分屈性とオーキシン制御遺伝子の発現（Hydro Tropi）

代表研究者：高橋 秀幸（東北大学大学院生命科学研究科 生態システム生命科学専攻 環境遺伝生態学講座・宇宙環境適応生態分野 教授）

共同研究者：藤井 伸治・渡邊 千秋・岡本 美貴（東北大学）、宮沢　豊（山形大学）、東端　晃・石岡 憲昭（JAXA）、嶋津　徹・伏島 康男（JSF）、笠原 春夫・渡邊 郁子（JAMSS）、鎌田 源司（AES）、山崎　丘（帝京大学）

実施時期：2010 年 5 月 15 日打ち上げ（STS-132）、2010 年 10 月 18-23 日 軌道上実験（Run1, 2, 3）、2011 年 3 月 10 日地上回収（STS-133）、5 月 17 日仙台着（東日本大震災のため、それまで筑波宇宙センターにて保管）

解析状況：ほぼ終了
観察 - 測定型供試体（V-ME）内の写真から根の伸長・屈曲を計測する方法を検討中。

主な出版物

[1] Moriwaki, T., Miyazawa, Y., Kobayashi, A. & Takahashi, H. : Molecular mechanisms of hydrotropism in seedling roots of Arabidopsis thaliana (Brassicaceae). American Journal of Botany 100 (1), 25-34 (2013)

[2] Miyazawa, Y., Moriwaki, T., Uchida, M., Kobayashi, A., Fujii, N. & Takahashi, H. : Overexprresion of MIZU-KUSSEI1 enhances root hydrotropic response by retaining cell viability under hydrostimulated condition in Arabidopsis thaliana. Plant and Cell Physiology 53 (11), 1926-1933 (2012)

[3] Nakayama, M., Kaneko, Y., Miyazawa, Y., Fujii, N., Higashitani, N., Wada, S., Ishida, H., Yoshimoto, K., Shirasu, K., Yamada, K., Nishimura, M. & Takahashi, H. : A possible involvement of autophagy in amyloplast degradation in columella cells during hydrotropic response of Arabidopsis roots. Planta 236, 999-1012 (2012)

[4] Moriwaki, T., Miyazawa, Y., Fujii, N. & Takahashi, H. : Light and abscisic acid signalling are integrated by MIZ1 gene expression and regulate hydrotropic response in roots of Arabidopsis thaliana. Plant, Cell and Environment 35, 1359-1368 (2012)

[5] Yamazaki, T., Miyazawa, Y., Kobayashi, K., Moriwaki, T., Fujii, N. & Takahashi, H. : MIZ1, an essential protein for root hydrotropism, is associated with the cytoplasmic face of the endoplasmic reticulum membrane in Arabidopsis root cells. FEBS Letters 586, 398-402 (2012)

[6] Watanabe, C., Fujii, N., Yanai, K., Hotta, T., Kim, D-H., Kamada, M., Sasagawa-Saito, Y., Nishimura, T., Koshiba, T., Miyazawa, Y., Kim, K-M. & Takahashi, H. : Gravistimulation changes the accumulation pattern of the CsPIN1 auxin efflux facilitator in the endodermis of the transition zone in cucumber seedlings. Plant Physiology 158, 239-251 (2012)

ホームページ http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/first/hydrotropi/

イネの細胞壁は宇宙でどう変化するか

p.62

重力によるイネ芽生え細胞壁のフェルラ酸形成の制御機構（Ferulate）

代表研究者：若林 和幸（大阪市立大学大学院理学研究科 准教授）

共同研究者：曽我 康一・保尊 隆享（大阪市大）、小竹 敬久（埼玉大）、山崎　丘・東端　晃・石岡 憲昭（JAXA）、嶋津　徹・福井 啓二（日本宇宙フォーラム）、長田 郁子・笠原 春夫（有人宇宙システム）、鎌田 源司（エイ・イー・エス）

実施時期：2010 年 5 月～ 6 月

解析状況：予定していた項解析目の大半は終了。
得られたイネ芽生えシュートの成長、シュート細胞壁の力学的性質、シュート細胞壁の化学組成、シュート細胞壁のフェノール成分形成に関わる酵素類の活性については解析を終了しました。現在、フェノール成分形成に関わる酵素遺伝子の発現についての解析を継続中です。

主な出版物

[1] Wakabayashi K, Soga K, Kamisaka S, Hoson T (2005) Increase in the level of arabinoxylan-hydroxycinnamate network in cell walls of wheat coleoptiles grown under continuous hypergravity conditions. Physiol. Plant. 125: 127-134

[2] Wakabayashi K, Soga K, Kamisaka S, Hoson T (2005) Changes in levels of cell wall constituents in wheat seedlings grown under continuous hypergravity conditions. Adv. Space Res. 36: 1292-1297

[3] Wakabayashi K, Nakano S, Soga K, Hoson T (2009) Cell wall-bound peroxidase activity and lignin formation in azuki bean epicotyls grown under hypergravity conditions. J. Plant Physiol. 166: 947-954

[4] Wakabayashi K, Soga K, Hoson T (2009) Modification of cell wall architecture in gramineous plants under altered gravity conditions. Biol. Sci. Space 23: 137-142

[5] Wakabayashi K, Soga K, Hoson T (2011) Cell wall oxalate oxidase modifies the ferulate metabolism in cell walls of wheat shoots. J. Plant Physiol. 168: 1997-2000

[6] Wakabayashi K, Soga K, Hoson T (2012) Phenylalanine ammonia-lyase and cell wall peroxidase are cooperatively involved in the extensive formation of ferulate network in cell walls of developing rice shoots. J. Plant Physiol. 169: 262-267

今後の成果発表予定：論文を公表予定。

ホームページ http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/first/ferulate/

p.64

宇宙で骨が減るメカニズムの解明に挑む
メダカにおける微小重力が破骨細胞に与える影響と重力感知機構の解析（Medaka Osteoclast）

代表研究者：工藤　明（東京工業大学大学院 生命理工学研究科 教授）

共同研究者：高野 吉郎（東京医科歯科大学大学院 医歯学総合研究科 教授）、茶谷 昌宏（東京工業大学大学院 生命理工学研究科 助教）、谷垣 文章・白川 正輝（JAXA）、鈴木 ひろみ・内田 智子（日本宇宙フォーラム）

実施時期：長期飼育実験（2012 年 10 月～ 2012 年 12 月）、短期観察実験（2014 年 2 月）

解析状況：実施中。組織解析、遺伝子発現解析、行動解析、顕微鏡画像解析を実施中。

学会発表

[1] 茶谷ら、国際宇宙ステーション内メダカ飼育実験による、微小重力における骨代謝の解析、日本骨代謝学会学術集会　口演　2014 年 7 月 24 日　大阪国際会議場

[2] Chatani, M. et al. Rearing medaka fish in International Space Station (ISS) for bone metabolism study Annual Meeting of The American Society for Bone and Mineral Research, Sep 15, 2014 Houston, USA

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/second/medakaosteoclast/index.html

宇宙医学

薬剤投与で、骨の問題を解決
p.68
ビスフォスフォネート剤を用いた骨量減少・尿路結石予防対策に関する研究

代表研究者：松本 俊夫 (徳島大学、JAXA)、Adrain LeBlanc (USRA)

共同研究者：中村 利孝 (産業医科大学、JAXA)、郡 健二郎 (名古屋市立大学、JAXA)、大島　博 (JAXA)、Jean Sibonga・Linda Shackelford (NASA)、Scott M. Smith (NASA)、Jay Shapiro (Kennedy Krieger Institute)、Tom Lang (UCSF)、Elisabeth Spector・Harlan Evans (Wyle)

実施時期：2008 年 10 月～

解析状況：薬剤投与群の解析は終了しました。新たな対象群 (薬剤非投与群) の医学データを取得中です。

主な出版物

[1] A LeBlanc, T Matsumoto, J Jones, J Shapiro, T Lang, L Shackelford, SM Smith, H Evans, E Spector, R Ploutz-Snyder, J Sibonga, J Keyak , T Nakamura, K Kohri, H Ohshima: Bisphosphonates as a Supplement to Exercise to Protect Bone during Long-Duration Spaceflight. Osteoporosis International Osteoporosis Int 24:2105-14, 2013

[2] Hiroshi Ohshima, Preventing Bone Loss in Space Flight with Prophylactic Use of Bisphosphonate: Health Promotion of the Elderly by Space Medicine Technologies. in Benefits of ISS Research, NASA HP (http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/benefits/bone_loss.html)

[3] 大島　博、松本俊夫 : 宇宙飛行・長期臥床と骨代謝. Clinical Calcium 22: 1803-1812、2012

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/iss/jaxa_exp/wakata/experiment/#01

心電図と高精細画像 (HDTV) カメラは「きぼう」での医学診断に使えるか
p.70
簡易型生体機能モニター装置の軌道上検証実験 (Holter ECG)

代表研究者：向井 千秋 (JAXA)

共同研究者：大島　博・田山 一郎・石田　暁・水野　康 (JAXA)、坂田 信裕・斎田 俊明 (信州大学)

実施時期：2008 ～ 2009 年。軌道上において 24 時間心電図データと皮膚画像データの取得を 2009 年に実施。

解析状況：完了

主な出版物

[1] Satoru Ishida, Hiroshi Ohshima, Ichiroh Tayama, Shoichi Tachibana, Chiaki Mukai: Check out of the On-orbit Digital Holter ECG and HDTV Camera Monitoring for Telemedicine. ISTS Web Paper Archives (27th International Symposium on Space Technology and Science, 2009 年 6 月) http://archive.ists.or.jp/upload_pdf/2009-p-01.pdf

[2] 坂田信裕、石田　暁、大島　博 : 国際宇宙ステーション滞在宇宙飛行士に対する高画質ビデオカメラを用いた皮膚遠隔診断. 宇宙航空環境医学 50: 15-22、2013

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/iss/jaxa_exp/wakata/experiment/#02

宇宙で生体リズムはどう変化するか　～ 24 時間の連続心電図記録の周波数解析～
p.72
長期宇宙飛行時における心臓自律神経活動に関する研究 (Biological Rhythms)

代表研究者：向井 千秋 (JAXA)

共同研究者：大塚 邦明・山本 直宗・石川 元直・久保　豊 (東京女子医大)、大島　博・水野　康・山田　深・石田　暁・相羽 達弥 (JAXA)

実 施 時 期：2008 年～ 2012 年

解 析 状 況：完了

今後の成果発表予定

[1] Naomune Yamamoto, Kuniaki Otsuka, Yutaka Kubo, Mitsutoshi Hayashi,Koh Mizuno, Hiroshi Ohshima, and Chiaki Mukai: Effects of long-termmicrogravity exposure in space on circadian rhythms of heart ratevariability, Chronobiology International, Early Online, 1–14, 2014

ホームページ http://iss.jaxa.jp/iss/jaxa_exp/noguchi/experiment/#08

宇宙での健康診断
p.74

宇宙医学実験支援システムの検証（Onboard Diagnostic Kit）

代 表 研 究 者：吉村 善範（JAXA 宇宙環境利用センター）、山田　深（JAXA 宇宙医学生物学研究室）

共 同 研 究 者：上垣内 茂樹・田崎 一行・白川 正輝・松本 邦裕・正木 美佳・西川 和香・大熊 隼人・大島　博・石田　暁・相羽 達弥・佐藤　勝・小川 志保・池田 俊民・後藤 雅享（JAXA）

実 施 時 期：2011 年 7 月～ 10 月、2012 年 7 月～ 11 月

解 析 状 況：実施中

ホームページ http://iss.jaxa.jp/iss/jaxa_exp/hoshide/exp/#igaku02

髪の毛から宇宙での体の変化を調べる
p.76

長期宇宙滞在宇宙飛行士の毛髪分析による医学生物学的影響に関する研究（Hair）

代 表 研 究 者：向井 千秋（JAXA）

共 同 研 究 者：山田　深・石田　暁・相羽 達弥・大島　博・東端　晃・石岡 憲昭（JAXA）、馬嶋 秀行（鹿児島大学）

実 施 時 期：2009 年～ 2012 年

解 析 状 況：実施中

主 な 出 版 物

[1] Terada et al., Biomedical analysis of rat body hair after hindlimb suspension for 14 days, Acta Astronautica 73, 23-29, 2012.

今後の成果発表予定：2014 年頃、成果発表予定

ホームページ http://iss.jaxa.jp/iss/jaxa_exp/noguchi/experiment/#09

起立性低血圧の原因－重力との関係を探る
p.78

前庭－血圧反射の可塑性とその対策（V-C Reflex）

代 表 研 究 者：森田 啓之（岐阜大学大学院医学系研究科 教授）

共 同 研 究 者：山本 義春（東京大学大学院教育学研究科 教授）
安部　力（岐阜大学大学院医学系研究科 准教授）
田中 邦彦（岐阜医療科学大学 教授）

実 施 時 期：2012 年～

無重力ではカビも空中を漂っている？微生物による健康への影響を調べる
p.80

国際宇宙ステーションに滞在する宇宙飛行士の身体真菌叢評価（Myco）

代 表 研 究 者：向井 千秋（JAXA）

共同研究者：山田　深・相羽 達弥・大島　博・東端　晃・石岡 憲昭 (JAXA)、山崎　丘・槇村 浩一 (帝京大学)、
杉田　隆 (明治薬科大学)

実施時期：2009 年 9 月～

解析状況：実施中

主な出版物

[1] 宇宙環境における微生物に関する研究
山崎　丘、杉田　丘、槇村 浩一
日本マイクログラビティ応用学会誌　Vol. 26 No. 4 2009 (290-295)

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/iss/jaxa_exp/noguchi/experiment/#12

筋骨格系の最適トレーニングシステムを目指して
p.82
国際宇宙ステーションに長期滞在する宇宙飛行士の筋骨格系廃用性萎縮へのハイブリッド訓練法の効果 (Hybrid Training)

代表研究者：志波 直人 (久留米大学医学部 教授)

共同研究者：田川 善彦 (九州工業大学工学部 教授)、松瀬 博夫 (久留米大学医学部 講師)、吉光 一浩 (久留米大学医学部 助教)、成田 新 (久留米大学病院 理学療法士)、大本 将之 (久留米大学医学部 医師)、稲田 智久 (九州工業大学工学部 技術専門職員)、高野 吉朗 (国際医療福祉大学 福岡保健医療学部 准教授)、大島 博・山田 深 (JAXA)

実施時期：2013 年～ 2014 年

解析状況：終了、論文投稿準備中

今後の成果発表予定：2015 年度 成果発表予定

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/lifeintao2009/hybrid_training/

技術開発

中性子のヒトへの影響を知る
p.84
ボナーボール型中性子計測装置 (BBND)

代表研究者：松本 晴久 (JAXA)

共同研究者：古賀 清一・越石 英樹 (JAXA)

実施時期：2001 年 3 月 14 日～ 11 月 15 日　STS-102/5A.1 で運搬し、STS-108/UF-1 で回収

解析状況：完了

主な出版物

[1] 越石英樹、松本晴久、古賀清一、五家建夫、国際宇宙ステーション、国際宇宙ステーション内部の低エネルギー中性子環境評価、信学技報、SANE2003-79、(2003-11)、pp.11-14.2003.

[2] T. Sato, K. Niita, H. Iwase, H. Nakashima,Y. Yamaguchi,Lembit Sihver, Applicability of particle and heavy ion transport code PHITS to the shielding design of spacecrafts, Radiation Measurements 41 (2006) 1142 － 1146

[3] H. Koshiishi, H. Matsumoto, A. Chishiki, T. Goka, and T. Omodaka, Evaluation of neutron radiation environment inside the International Space Station based on the Bonner Ball Neutron Detector experiment, Radiation Measurements, 42, 9, October 2007, pp. 1510 － 1520

[4] H. Koshiishi, H. Matsumoto, K. Terasawa, K. Koga, T. Goka, Neutron Dosimetry Inside The International Space Station, Space Exploration Res., edt. J.H.Denis and P.D.Aldridge, NOVA Publisher, 2010

[5] K. Yajima, H. Yasuda, M. Takada, T. Sato, T. Goka, H. Mastumoto and T. Nakamura, Measurements of Cosmic-Ray Neutron Energy Spectra from Thermal to 15 MeV with Bonner Ball Neutron Detector in Aircraft, J. of Nucl. Sci. Technol., 47,1,pp.31-39 (2010)

ホームページ http://iss.jaxa.jp/kiboexp/others/iss/bbnd.html

p.88 「きぼう」船内の宇宙放射線環境の定点計測（Area PADLES）

代表研究者：永松 愛子 (JAXA)

共同研究者：①研究チーム (日本)
村上 敬司・俵　裕子 (JAXA)、北城 圭一・島田 健・熊谷 秀則 (AES)

②研究チーム (ロシア)
Vladislav M. Petrov, Vyacheslav A. Shurshakov, Igor V. Nikolaev, Raisa Tolochek

③運用チーム
永松 愛子・布施 哲人 (JAXA)、水野 哲朗・阿比留 雄二・志村 譲二 (JAMSS)

実施時期：2008 年 6 月から継続実施中。

解析状況：継続中

主な出版物

[1] H. Tawara, M. Masukawa, A. Nagamatsu, K. Kitajo, H. Kumagai, N. Yasuda, "Measurement of a Linear Energy Transfer Distribution with Antioxidant Doped CR-39 Correcting for the Dip Angle Dependence of Track Formation Sensitivity" , Jpn. J. Appl. Phys. 47,7324-7327 (2008).

[2] H. Tawara, M. Masukawa, A. Nagamatsu, K. Kitajo, H. Kumagai, N. Yasuda, "Characteristics of Mg2SiO4:Tb (TLD-MSO) relevant for space radiation dosimetry" , Radiation Measurements 46, 709-716 (2011).

[3] A. Nagamatsu, "Space Radiation Dosimetery onboard the International Space Station 'Kibo' and the Application of Future Human Space Missions beyond LEO" , RIST NEWS No.53, p24-33 (2012).

[4] A. Nagamatsu, K. Murakami, K. Kitajo, K. Shimada, H. Kumagai, H. Tawara,, "Area Radiation Monitoring on ISS Increments 17 to 22 Using PADLES in the Japanese Experiment Module Kibo" , Radiation Measurements 59, 84-93 (2013).

[5] Nagamatsu A, Tawara H, Kitajo K, Shimada K, Yasuda N, Fading and ageing effects of CR-39 PNTDs during ISS space experiments evaluated using reference sample pre-exposed C/Fe heavy ions, 26ICNTS, Physics Procedia(2015) to be printed.

[6] 永松 愛子 , 有人惑星探査と宇宙放射線～宇宙放射線研究が開く次世代有人ミッションに向けて～、ISOTOPE NEWS Oct 14, No.726, P7-12

今後の成果発表予定：① PADELS 測定結果における「きぼう」船内の宇宙放射線環境評価 (2014 年以降)
② Area PADLES と PHITS シミュレーションモデルとの比較解析評価【日本原子力研究開発機構との共同研究】(2014 年以降)

ホームページ http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/pm/padles/

p.90 宇宙飛行士を守る有人宇宙技術個人被ばく線量計（Crew PADLES）
（宇宙飛行士用の受動積算型宇宙放射線線量計）

代表研究者：永松 愛子 (JAXA)

共同研究者：村上 敬司・俵　裕子・高沖 宗夫・梅村 さや香・田中 哲夫・村井　正・石田　暁・田山 一郎・小池　右・矢部 志津・阿部 貴宏・遠藤 祐希子・相部 洋一・佐藤　勝・松村 智英美・金子 祐樹・向井 千秋 (JAXA)

実施時期：2007 年 10 月から継続実施中。

解析状況：実施中 (アジア人宇宙飛行士の搭乗スケジュールに合わせて、搭載・帰還後解析を実施。)

主な出版物

[1] A. Nagamatsu, M. Masukawa, S. Kamigaichi, H. Kumagai, M. Masaki, N. Yasuda, H. Yasuda, E. Benton, T. Hayashi, H. Tawara, "Development of the space radiation dosimetry system 'PADLES' ", Radiation Detectors and Their Uses, 2006-7,26-36 (2006)

[2] 村井正、永松愛子、矢部志津、俵裕子、熊谷秀則、宮澤義典、北城圭一、小平聡、安田仲宏： 宇宙放射線個人被ばく線量計測における CR-39 感度の酸素分圧影響評価 Ambient Oxygen Pressure Effect to CR-39 Sensitivity for Astronauts Radiation Dosimetry （課題番号 17P-205)、2005 年度放射線医学総合研究所重粒子線がん治療装置等共同利用報告書 (2006)

[3] 俵裕子、永松 愛子、"有人宇宙飛行における受動型線量計による被ばく線量測定" , 放射線 5, No.3, P217-241 (2008)

[4] Y. Shizu, A. Nagamatsu, Y. Koike, S. Ishida, I. Tayama, K. Murakami, S. Araki, H. Tawara, S. achibana, T. Tanaka, K. Yanagawa: Utilization and verification flight experiments of Crew ADLES, Oral presentation, JAXA Crew Passive Dosimeter、第 26 回宇宙技術および科学の国際シンポジウム ISTS) プロシーディング 2008-p-06 (2008) / Y. Endo, S. Yabe, Y. Koike, S. Tachibana, M. Akioka, T. Nagatsuma, S. Takagi, S. Iwai, A. Nagamatsu, K. Murakami: Radiation Exposure Management for JAXA's Astronauts、第 27 回 宇宙技術および科学の国際シンポジウム (ISTS) プロシーディング 2009-p-12p (2009)

[5] 永松 愛子、村上 敬司、俵 裕子、向井 千秋、"国際宇宙ステーション「きぼう」から月面有人探査まで - 宇宙放射線に関する技術開発と基盤研究について -" 、マイクログラビティ応用学会 Vol26, No.4, p296-302 (2009)

ホームページ http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/pm/padles/

p.92

宇宙放射線計測技術 (PADLES) を用いた国際共同実験 (その 1)
Dosimetric PADLES / マトリョーシカ実験

代表研究者：永松 愛子 (JAXA) / Günther Reitz (DLR: German Aerospace Center)

共同研究者：①研究チーム (日 本)：村上 敬司・荒木 秀二・俵 裕子 (JAXA)、北城 圭一・島田 健・熊谷 秀則 (AES)
②研究チーム (ドイツ)：Thomas Berger (DLR: German Aerospace Center)

実施時期：2004 年 1 月から 2011 年 3 月まで、4 回のシリーズ実験として実施。ESA (欧州宇宙機関) /DLR (ドイツ宇宙機関) が実施する MATORSHKA シリーズの宇宙実験は終了 (表 -1 参照)。STS-135 (2011 年 7 月) にてマトリョーシカファントムを地上に回収し、次の宇宙実験機会に向け、ロシア (ROSCOSMOS/IBMP) がファントムを改修中。

解析状況：マトリョーシカ 1、2A、2B、2B_KIBO 宇宙実験は終了。マトリョーシカ 1、2A、2B は解析終了。2B_KIBO については、参加研究機関が、回収した線量計データの詳細解析中。

主な出版物

[1] A. Nagamatsu, K. Murakami , S. Araki, H. Kumagai, K. Kitajo, H. Tawara, "Space radiation dosimetry in low Earth orbit by a passive and integrating dosimeter — 'PADLES' " , Proc. 22nd Workshop on Radiation Detectors and Their Uses, Tsukuba, 20097, 2008-14, p. 167-177 (2008)

[2] 永松 愛子、俵 裕子、熊谷 秀則、北城 圭一 : ISS における線量計測定、2008 年宇宙利用科学委員会 研究班 WG「月面における人類の活動に向けた線量計測」第 1 回会合報告書 p6-13、(2008.12 刊)

[3] M. Hajek, T. Berger, P. Bilski, G. Reitz, Y. A. Akatov, A. Nagamatsu, E. J. Semones, N. Yasuda, E. G. Yukihara, "THE MATROSHKA EXPERIMENT: DEPTH DOSE DISTRIBUTION DERIVED FROM TLD MEASUREMENTS", 2008, 59th International Astronautical Congress 2008, Paper ID: 2449.

[4] G.Reitz, T. Berger, P. Bilski, R. Facius, M. Hajek, V. Petrov, M. Puchalska, D. Zhou, J. Bossler, Y.Akatov, V.Shurshakov, P. Olko, M. Ptaszkiewicz, R. Bergmann, M. Fugger, N. Vana, R. Beaujean, S. Burmeister, D. Bartlett, L. Hager, J. Pa ´ lfalvi, J. Szabo ´ , D.O' Sullivan, H. Kitamura, Y.Uchihori, N. Yasuda, A. Nagamatsu, H. Tawara, E. R. Benton, R. Gaza, S. McKeever, G. Sawakuchi, E. Yukihara, F. Cucinotta, E. Semones, N. Zapp, J. Miller, J. Dettmann, "Astronaut's organ dose as inferred from measurements using a human phantom outside the ISS" , Radiat. Res., 171, 225-235(2009).

[5] A. Nagamatsu, K. Murakami, K. Kitajo, K. Shimada, H. Tawara, "Estimation of Organ Doses using PADLES in the Phase 2B_KIBO experiments of the MATROSHKA project", 17th Workshop on Radiation Monitoring for the International Space Station, Proc. p25-27(2012).

今後の成果発表予定：①マトリョーシカ船内・船外ばく露実験における詳細解析結果 (2013 年投稿中)
②マトリョーシカ -2B「きぼう」船内実験の成果 (2013 年投稿中)
③マトリョーシカ -2B「きぼう」人体ファントム実験と PHTIS シミュレーション比較解析評価【日本原子力研究開発機構との共同研究】(2014 年以降)

ホームページ http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/pm/padles/matryoshka/

p.96 宇宙放射線計測技術（PADLES）を用いた国際共同実験（その 2）
Dosimetric PADLES / アルトクリス実験

代表研究者：永松 愛子 (JAXA) / Marco Casolino (Universita` di Roma Tor Vergata)

共同研究者：①研究チーム (日本)
村上 敬司・荒木 秀二・俵　裕子 (JAXA)、津田 修一 (JAEA、日本原子力研究開発機構)、
北城 圭一・熊谷 秀則 (AES)
②研究チーム (イタリア)
P. Picozza(Universita` di Roma Tor Vergata & INFN), L. Narici (Universita` di Roma Tor Vergata & INFN)

実施時期：2005 年 12 月から 2007 年 10 月まで、4 回のシリーズ宇宙実験を実施。

解析状況：ALTCRISS シリーズ実験 (Phase1-4) を計画通り終了。

主な出版物

[1] M. Casolino, F. Altamura, M. Minori, P. Picozza, C. Fuglesang, A. Galper, A. Popov, V. Benghin,V. M. Petrov, A. Nagamatsu, T. Berger, G. Reitz, M. Durante, M. Pugliese, V. Roca, F. Cucinotta, E. Semones, M. Shavers, V. Guarnieri, C. Lobascio, "The ALTCRISS project on board the International Space Station" , Advances in Space Research 40, 1746-1753 (2007).

[2] M. Casolino et.al., "The ALTCRISS project" , ESA International Space Station Science Summary Report, Report No. 2007-6: 16-29 July 2007, UC-ISS-SSR-0001.

[3] A. Nagamatsu, K. Murakami , S. Araki, H. Kumagai, K. Kitajo, H. Tawara, "Space radiation dosimetry in low Earth orbit by a passive and integrating dosimeter — 'PADLES'" , Proc. 22nd Workshop on Radiation Detectors and Their Uses, Tsukuba, 20097, 2008-14, p. 167-177 (2008)

[4] 永松 愛子、俵　裕子、熊谷 秀則、北城 圭一 : ISS における線量計測定、2008 年宇宙利用科学委員会 研究班 WG「月面における人類の活動に向けた線量計測」第 1 回会合報告書 p6-13、(2008.12 刊)

[5] O. Larsson, V. V. Benghin, T. Berger, M. Casolino, L. Di Fino, C. Fuglesang, M. Larosa, B. Lund-Jensen, A. Nagamatsu, L. Narici, I.V. Nikolaev, P. Picozza, G, Reitz, C. De Santis and V. Zaconte, 'Measurements of heavy-ion anisotropy and dose rates in the Russian section of the International Space Station with the Sileye-3/Alteino detector', J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 42 025002 doi:10.1088/0954-3899/42/2/025002

[6] A. Nagamatsu, H. Tawara, K. Kitajo, K. Shimada, N. Yasuda., 'Fading and aging effects of CR-39 PNTDs during ISS space experiments evaluated using reference sample pre-exposed C/Fe heavy ions', Physics Procedia (2015) to be printed

p.98 国際宇宙ステーションでのハイビジョン撮影開始と宇宙放射線の影響調査
ロシアサービスモジュールにおける高精細画像カメラ実験（HDTV in SM）

代表研究者：村上 敬司 (JAXA)

共同研究者：日本放送協会、日揮株式会社

実施時期：2001 年 8 月～ 2006 年 7 月

解析状況：完了

主な発表実績

[1] 吉川 淳一、村上 敬司、永松 愛子、山崎 順一、三橋 政次、横田 明俊、"国際宇宙ステーションを利用した HDTV カメラの放射線影響実験" , 映像情報メディア学会誌 31, 43 (IST2007) , 78-85 (2008)

[2] A. Nagamatsu, K. Murakami, A. Yokota, J. Yamazaki, M. Yamauchi, H.Kumagai, H. Tawara, "Radiation damage to HDTV camera CCDs onboard thel nternational Space Station" , Radiation Measurements 46, 205-212 (2011).

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/kiboexp/pm/pdf/hdtv.pdf

p.100

ISS の高精細ビデオカメラと通信衛星の間を取り持つデータ処理システム
高精細ビデオ（HDTV）画像伝送処理システム

代表研究者：村上 敬司（JAXA）

共同研究者：伊藤　剛（JAXA）

実施時期：評価試験運用　2007 年 10 月～ 2008 年 7 月
定常運用　2008 年　8 月～現在（2013 年 2 月時点）

主な映像公開実績

2007 年 11 月以降の ISS で撮影されてテレビ放送や科学館 / 博物館上映、JAXA/NASA のデジタルビデオアーカイブで公開された HDTV 画像は全て MPC を通して地上に伝送されたものです。
（一部のテレビ放送やインターネットによるデジタルビデオアーカイブサービスではハイビジョンではないスタンダードサイズに変換して利用されました。）

今後の映像公開予定：今後も引き続き ISS 船内の活動が HDTV 画像で撮影され、テレビ放送・インターネット配信・科学館・映像展で公開されます。

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/pm/hdtv/

p.102

宇宙用超高感度ハイビジョンカメラによる撮影～地球と宇宙が織り成す美しい映像～
超高感度ハイビジョンカメラシステム（SS-HDTV）

代表研究者：田附 英樹（日本放送協会）

共同研究者：村上 敬司（JAXA）

実施時期：2011 年 7 月～ 2012 年 6 月。

主な映像公開実績

[1] テレビ放送
NHK コズミックフロント　宇宙は驚異に満ちている　©NHK
・宇宙の渚　File1.　謎の光 “スプライト”（2012 年 2 月 28 日）
・宇宙の渚　File2.　46 億年の旅人　流星（2012 年 3 月 6 日）
・宇宙の渚　File3.　オーロラ　天と地の攻防（2012 年 3 月 13 日）
NHK スペシャル「宇宙の渚」テレビ放送　©NHK
・生中継「宇宙の渚」（2011 年 9 月 18 日）※ 1
・第 1 集　謎の閃光　スプライト（2012 年 4 月 22 日）
・第 2 集　天空の女神 オーロラ（2012 年 5 月 20 日）
・第 3 集　46 億年の旅人　流星（2012 年 6 月 17 日）
※ 1：ISS に長期滞在中の古川聡宇宙飛行士がカメラマン兼リポーターを務め、NHK、JAXA、NASA の共同で、テレビ史上初めて、ISS から「宇宙から見るオーロラ」「雷のまばゆい閃光」「地球の夜景」「宇宙の日の出」「宇宙から見る月の入り」のハイビジョン映像を全世界へ生中継しました。

[2] インターネット番組配信
・NHK オンデマンドによるコズミックフロント /NHK スペシャルの「見逃し番組」「特選シリーズ」配信

[3] 科学館・映像ギャラリー上映展示
・日本科学未来館　NHK スペシャル「宇宙の渚」　空と宇宙は連続しているか？
（2012 年 4 月 25 日～ 5 月 28 日）　©NHK/ 日本科学未来館
展示内容：宇宙飛行士の地上訓練用 SS-HDTV 実機、横 15m の巨大スクリーンで 2 時間に編集された SS-HDTV で撮影した宇宙の渚映像の上映。
・コニカミノルタプラザギャラリー「宇宙から見たオーロラ展 2013」
展示内容：SS-HDTV で撮影されたオーロラ、流星、スプライト映像の上映。
（2013 年 1 月 7 日～ 1 月 31 日）　©KONICA MINOLTA

[4] 出版物

・NHK スペシャル　宇宙の渚　ブルーレイ BOX　（取扱：㈱ NHK エンタープライズ）

・NHK スペシャル　宇宙の渚　DVD BOX　（取扱：㈱ NHK エンタープライズ）

・ブルーレイ　宇宙の渚 映像集 ～宇宙から眺める地球一周の旅～
（取扱：㈱ NHK エンタープライズ）　SS-HDTV で撮影された 88 分の厳選映像集

・書　　籍　NHK スペシャル 宇宙の渚 上空 400km の世界　（発行：NHK 出版）

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/kiboresults/utilization/ss-hdtv/index.html

p.104

「こうのとり」宇宙船（HTV）が大気圏に突入して燃え尽きる様子を記録する球体 i-Ball による宇宙機再突入データ取得

代表研究者：佐藤 直樹（JAXA）

共同研究者：和田 恵一・前田 真紀・鈴木 裕介・葛西　徹・川嶋 一誠・山本 紘史（JAXA）、
牧野　隆・森崎 浩武・杉村 文隆・守屋 朝子・岸野 義宏（IHI エアロスペース）

実施時期：2012 年 9 月、2013 年 9 月

宇宙実験状況：完了

解析状況：完了

主な出版物：N/A

p.108

世界初、アイソン彗星を宇宙から 4K 動画撮影 超高感度 4K カメラシステム

代表研究者：伊藤　剛（JAXA）

実施時期：2013 年 8 月～ 2013 年 12 月

主な映像公開

① NHK スペシャル「宇宙生中継 彗星爆発 太陽系の謎」（2013 年 12 月 4 日）

②コズミック　フロント～発見！驚異の大宇宙～「若田飛行士が見た " 宇宙絶景 "」（2014 年 10 月 16 日）

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/topics/2013/11/131126_4k.html

応用利用

p.112 医薬品などの開発につながる高品質なタンパク質の結晶を宇宙でつくる
高品質タンパク質結晶生成実験（GCF, NGCF / PCG）

代表研究者：JAXA

共同研究者：各研究機関利用者

実施時期：ＧＣＦ第1回実験：2003年 2月～ 5月
ＧＣＦ第2回実験：2003年 8月～10月
ＧＣＦ第3回実験：2004年 1月～ 4月
ＧＣＦ第4回実験：2004年 8月～10月
ＧＣＦ第5回実験：2005年 2月～ 4月
ＧＣＦ第6回実験：2005年12月～2006年4月
NGCF第1回実験：2007年 1月～ 4月
NGCF第2回実験：2007年 8月～10月
NGCF第3回実験：2008年 2月～ 4月
ＰＣＧ第1期第1回実験：2009年 7月～10月
ＰＣＧ第1期第2回実験：2010年 2月～ 6月
ＰＣＧ第1期第3回実験：2010年 9月～11月
ＰＣＧ第1期第4回実験：2011年 6月～ 9月
ＰＣＧ第1期第5回実験：2012年 1月～ 4月
ＰＣＧ第1期第6回実験：2013年 3月～ 5月
ＰＣＧ第2期第1回実験：2014年 3月～ 5月
ＰＣＧ第2期第2回実験：2014年 9月～11月

※ PCG 第 2 期第 3 回実験：2015 年 8 ～ 9 月に実施予定。

主な出版物

[1] Y. Sakamoto et al., Sci. Rep. (2014) 4, 4977.
[2] K. Takeshita et al., Nat. Struct. Mol. Biol. (2014) 21, 352-357
[3] S. Yoshikawa et al., Oncogene (2013) 32, 27-38
[4] Vladimir Timofeev, et al. Acta Cryst. (2012). D68, 1660-1670.
[5] Hiroaki Nakano, et al. Acta Cryst. (2012). F68, 757-759.
[6] Hiroaki Tanaka, et al. Defect and Diffusion Forum, 323-325, 549-554 (2012)
[7] Koji Inaka, et al. Defect and Diffusion Forum, 323-325, 565-569 (2012)
[8] Inaka, K. et al. Cryst. Growth Des. 2011, 11, 2107-2111
[9] Tanaka, H. et al. J. Synchrotron Rad., 18, 88-91 (2011).
[10] Yamanaka, M. et al. J. Synchrotron Rad., 18, 84-87 (2011).
[11] Kuranova, I.P. et al. Kristallografiya. 2011. T. 56. №. 5. S. 941
[12] Takahashi, S. et al. Acta Cryst., F66, p. 846 (2010).
[13] Kosuke Oda, et al. J BIOL. CHEM. VOL. 285, NO. 2, pp. 1446-1456, January 8, 2010
[14] Akifumi Higashiura, et al. Acta Cryst. (2010). D66, 698-708 (Ground experiment)
[15] Tanaka, H. et al. J. Jpn. Soc., Microgravity Appl. Vol.25(2), p. 101 (2008).

ホームページ http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/first/protein/

p.116 宇宙でナノレベルの骨格を持つ新しい機能性材料を作成する
微小重力環境でのナノスケルトン作製（Nanoskeleton）

代表研究者：阿部 正彦（東京理科大学）

共同研究者：酒井 秀樹・遠藤 健司・土屋 好司（東京理科大学）、酒井 俊郎（信州大学）、福井　寛（福井技術士事務所）、大森 健司・羽生 直人（資生堂）、坂本 一民（千葉科学大学）、宮本　明・高羽 洋充・古山 通久・遠藤　明・畠山　望・坪井 秀行・鈴木　愛（東北大学）

実施時期：【第1回実験】2010年3月 2日～2010年3月12日
【第2回実験】2011年3月29日～2011年4月 8日

解析状況：実施中　地上実験と併せ、引き続きナノスケルトン素材の応用を検討中。

主な出版物

[1] Preparation of Highly Crystalline TiO2 Nanostructuresby Acid-assisted Hydrothermal Treatment of Hexagonal-structured NanocrystallineTitania/cetyltrimethyammonium Bromide NanoskeletonShuxi Dai, Yanqiang Wu, Toshio Sakai, Zuliang Du, Hideki Sakai, Masahiko AbeNanoscale Research Letters 5(11)1829-18352010

[2] Pore-size expansion of hexagonal-structured nanocrystalline titania/CTAB Nanoskeleton using cosolvent organic moleculesToshio Sakai, Hanae Yano, Hirobumi Shibata, Takeshi Endo, Kazutami Sakamoto, Hiroshi Fukui, Naokiyo Koshikawa, Hideki Sakai, Masahiko AbeColloids and Surfaces A: Physicochem Eng. Aspects 37　129-392010

[3] Preparation and photocatalytic activity under visiblelight irradiation of mesostructured titania particles modified with phthalocyanine in the poresHirobumi Shibata, Shin-ichi Ohshika, Satoshi Watanabe, Keishi Nishio, Hideki Sakai, Masahiko Abe, Kazuaki Hashimoto, Mutsuyoshi MatsumotoJournal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry　217 136-140 20112010

[4] Multiscale Simulation of Dye-Sensitized Solar Cells Considering Schottky Barrier Effect at PhotoelectrodeMari Onodera, Ryo Nagumo, Ryuji Miura, Ai Suzuki, Hideyuki Tsuboi, Nozomu Hatakeyama, Akira Endou, Hiromitsu Takaba, Momoji Kubo, Akira MiyamotoJapanese Journal of the Applied Physics, 50, 04DP062011

[5] Pore-Size Expansion of Hexagonal-Structured Nanocrystalline Titania/CTAB Nanoskeleton Using Cosolvent Organic MoleculesToshio Sakai, Hanae Yano, Hirobumi Shibata, Takeshi Endo, Kazutami Sakamoto, Hiroshi Fukui, Naokiyo Koshikawa, Hideki Sakai, Masahiko AbeColloids Surf. A, 371(1-3), 29-392010

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/first/nanoskeleton/

p.118 宇宙でナノレベルの凹凸を作る
微小重力環境を利用した 2 次元ナノテンプレートの作製（2DNT）

代表研究者：木下 隆利（名古屋工業大学）

共同研究者：江龍　修（名古屋工業大学）、田中 正剛（名古屋工業大学）

実施時期：【Kit1】2011年 6月14日～2011年7月18日
【Kit2】2011年12月13日～2012年4月25日

解析状況：実施中　地上での実験を追加しながら、製品化を目指して検討を実施中。

主な出版物

[1] 空気 / 水界面における両親媒性ポリペプチドー PEG ジブロックコポリマー分子膜構造に与える pH の影響安孫子宗平、田中正剛、木下隆利高分子論文集 2009 年

[2] Morphology control of calcium phosphate by mineralization on the b-sheet peptide templateTakayuki Nonoyama, Masayoshi Tanaka, Takatoshi Kinoshita, Fukue Nagata, Kimiyasu Sato, and Katsuya KatoChem. Commun.2010 年

[3] Self-assembled Gels of Amphiphilic Sequential Peptide in Water and Organic SolventsRong Cai, Ying Zhao, Kempei Ogura, Masayoshi Tanaka, Takatoshi Kinoshita, Qing CaiChem Lett2011 年

[4] Ordered Nanopattern Arrangement of Gold Nanoparticles on　β -Sheet Peptide Templates through Nucleobase PairingTakayuki Nonoyama, Masayoshi Tanaka, Yoshihito Inai, Masahiro Higuchi, and Takatoshi KinoshitaACS Nano2011 年

[5] Two-dimensional self-assembly of amphiphilic peptide at the solid/water interface toward a facile method to align metal nano-particlesMasayoshi Tanaka, Souhei Abiko, Takahiro Himeiwa, Montaro Nakamura, Naokiyo Koshikawa, and Takatoshi KinoshitaChem Lett2012 年

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/first/2dnanotemplate/

p.120 光を操る結晶をつくる
3 次元フォトニック結晶生成実験（3DPC）

代表研究者：伊藤 研策（富山大学大学院 理工学研究部 准教授）、山中 淳平（名古屋市立大学大学院 薬学研究科 准教授）、瀧口 義浩（浜松ホトニクス㈱ 中央研究所 主任部員）（肩書きはすべて当時のもの）

共同研究者：澤田　勉（物質・材料研究機構）、岡本　茂（名古屋工業大学）、内田 文生（富士化学㈱）、大木 芳正（JAXA）

実 施 時 期：① 2005 年 12 月～ 2006 年 4 月、② 2007 年 12 月～ 2008 年 3 月

解 析 状 況：解析終了

主な出版物

[1] N. Wakabayashi, J. Yamanaka, M. Murai, K. Ito, T. Sawada, and M. Yonese, Three-Dimensional Centimeter-Sized Colloidal Silica Crystals Formed by Addition of Base, Langmuir, 2006, 22 (18), pp 7936-7941

[2] M. Murai, H. Yamada, J. Yamanaka, S. Onda, M. Yonese, K. Ito, T. Sawada, F. Uchida, and Y. Ohki, Unidirectional Crystallization of Charged Colloidal Silica Due to the Diffusion of a Base, Langmuir, 2007, 23 (14), pp 7510-7517

[3] H. Yamada, T. Sawada, J. Yamanaka, M. Yonese, and F. Uchida, Structural Characterizations of Charged Colloidal Silica Crystals Formed by Base Diffusion, Chem. Lett., Vol. 37 (2008) No. 2 P 172-173

[4] Y. Takiguchi, Industrial application of three-dimensional colloidal photonic crystals made in space, J. Physics, Conference Series 109, (2008) 012004

[5] Y. Ohki, T. Ikeda, A. Itoh, J. Yamanaka, K. Ito, Y. Watanabe, E. Yoda, T. Sawada, and Y. Takiguchi, Space Experiment on 3-Dimensioal Photonic Crystal Growth and Its Apparatus, Trans.JSASS Space Tech.Japan vol7No.ists26, pp. Th_21-Th26, 2009

[6] M. Murai, T. Okuzono, M. Yamamoto, A. Toyotama, and J. Yamanaka, "Gravitational compression dynamics of charged colloidal crystals." , J. Colloid Interf. Sci., 370, 39-45(2012).

ホームページ http://iss.jaxa.jp/kiboexp/others/iss/3dpc/

物質・物理科学

宇宙で明らかになる流れの世界
p.124
マランゴニ対流におけるカオス・乱流とその遷移過程（MEIS）

代表研究者：河村　洋（諏訪東京理科大学）、西野 耕一（横浜国立大学）

共同研究者：上野 一郎（東京理科大学）、大西　充・桜井 誠人（JAXA）、川路 正裕（University of Toronto）

実施時期：2008 年 8 月～ 2013 年 2 月。5 回の実験シリーズに分けて実施

解析状況：実施中

主な出版物

[1] F. Sato, I. Ueno, H. Kawamura, K. Nishino, S. Matsumoto, M. Ohnishi and M. Sakurai, "Hydrothermal Wave Instability in a High-Aspect-Ratio Liquid Bridge of Pr > 200" , Microgravity Sci. Technol., Vol. 25, pp.43-58 (2013).

[2] H. Kawamura, K. Nishino, S. Matsumoto, and I. Ueno, "Report on Microgravity Experiments of Marangoni Convection Aboard International Space Station, Transactions of ASME," J. Heat Transfer, Vol. 134, pp.031005-1 - 031005-13 (2012).

[3] T. Yano, K. Nishino, H. Kawamura, I. Ueno, S. Matsumoto, M. Ohnishi, and M. Sakurai," 3-D PTV measurement of Marangoni convection in liquid bridge in space experiment," Exp. Fluids, Vol.53, pp.9-20 (2012).

[4] T. Yano, K. Nishino, H. Kawamura, I. Ueno, S. Matsumoto, M. Ohnishi, and M. Sakurai, " Space experiment on the instability of Marangoni convection in large liquid bridge - MEIS-4: Effect of Prandtl number -," J. Phys., Vol. 327, No. 012029, pp.1-7 (2011).

[5] T. Yano, K. Nishino, H. Kawamura, I. Ueno, S. Matsumoto, M. Ohnishi, and others," 3-D Flow Measurement of Oscillatory Thermocapillary Convection in Liquid Bridge in MEIS," Japan Society of Microgravity Application, Vol. 28, pp.126-132 (2011).

[6] Ed: T Ishikawa, Marangoni Experiment in Space, Int. J. Microgravity Sci. Appl., Vol.31, Supplement (2014)

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/first/marangoni/

結晶は生きている
p.128
氷結晶成長におけるパターン形成（Ice Crystal）

代表研究者：古川 義純（北海道大学　低温科学研究所）

共同研究者：横山 悦郎（学習院大学）

実施時期：2008 年 12 月～ 2009 年 2 月

解析状況：円盤成長モデルの検討、2 次技解析等を実施中。

主な出版物

[1] Etsuro Yokoyama, Izumi Yoshizaki, Taro Shimaoka, Takehiko Sone, Tatsuo Kiyota, and Yoshinori Furukawa "Measurements of growth rates of an ice crystal from supercooled heavy water under microgravity conditions — basal face growth rate and tip velocity of dendrite" , The Journal of Physical Chemistry B (2011) Vol.115, p8739-8745

[2] Satoshi Adachi, Izumi Yoshizaki, Takehiko Ishikawa, Etsuro Yokoyama, Yoshinori Furukawa, Taro Shimaoka, "Stable Growth Mechanisms of Ice Disk Crystals in Heavy Water" , Physical Review E, 84 (2011) 051605.

[3] Izumi Yoshizaki, Takehiko Ishikawa, Satoshi Adachi, Etsuro Yokoyama and Yoshinori Furukawa, "Precise measurements of dendrite growth of ice crystal in microgravity" , Microgravity Science and Technology, 24 (2012) 245 — 253.

[4] 古川 義純、横山 悦郎、吉崎　泉、島岡 太郎、曽根 武彦、友部 俊之 : ISS「きぼう」における氷の結晶成長とパターン形成実験、日本結晶成長学会誌、39 (2)、61-67. (2012)

[5] Etsuro Yokoyama, Robert F. Sekerka and Yoshinori Furukawa "Growth of ice disk: Dependence of critical thickness for ice disk instability on supercooling of water" The Journal of Physical Chemistry, B (2009) Vol.113, p4733-4738.

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/first/ice_crystal/

平らに成長する結晶
p.131
ファセット的セル状結晶成長機構の研究 (Facet)

代表研究者：稲富 裕光 (JAXA)

実施時期：2009 年 4 月～ 2009 年 6 月、2010 年 9 月～ 2010 年 10 月

解析状況：実施中

主な出版物

[1] Yuko Inatomi, Izumi Yoshizaki, Kaoruho Sakata, Taro Shimaoka, Takehiko Sone, Toshiyuki Tomobe, Satoshi Adachi, Shinichi Yoda and Yoshinori Yoshimura, "Investigation on Mechanism of Faceted Cellular Array Growth in International Space Station" , Defect and Diffusion Forum Vols. 323-325 (2012) pp. 533-537.

[2] Jincheng Wang and Yuko Inatomi: "Three-dimensional Phase Field Modeling of the Faceted Cellular Growth" , ISIJ International 50 (2010) pp. 1901 — 1907.

[3] 稲富 裕光 : "「きぼう」におけるファセット的セル状結晶成長実験"、平成 23 年度宇宙環境利用の展望、(財) 資源探査用観測システム・宇宙環境利用研究開発機構、(2011) pp. 51-55.

[4] 稲富 裕光、芦田 幹大、阪田 薫穂、Jincheng Wang、奥谷　猛 : "微小重力環境を利用したファセット的セル状結晶成長その場観察実験"、日本結晶成長学会誌 39 巻　(2012) pp. 11-16.

[5] 稲富 裕光、芦田 幹大、阪田 薫穂、Jincheng Wang、奥谷　猛 : "「きぼう」でのファセット的セル状結晶成長実験"、日本電子材料技術協会会報 43 巻　(2012) pp. 14-19.

[6] Yuko Inatomi, Motohiro Ashida, Kaoruho Sakata, and Takeshi Okutani: "Simultaneous measurement of temperature and concentration during faceted cellular array growth under microgravity" , World Journal of Engineering (in press).

[7] Veerabagu Natarajan, Mukannan Arivanandhan, Yuko Inatomi, Yasuhiro Hayakawa: "In-situ observation of faceted growth of benzophenone single crystals from melt" , Materials Chemistry and Physics 144 (2014) pp. 402–408.

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/first/facet/

省エネ CPU 用半導体材料の製造実験
p.133
微小重力下における TLZ 法による均一組成シリコンゲルマニウム (SiGe) 結晶育成の研究 (Hicari)

代表研究者：木下 恭一 (JAXA 主幹研究員)

共同研究者：塚田 隆夫 (東北大学教授)、稲富 裕光 (JAXA 准教授)

実施時期：2013 年 2 月～ 2014 年 7 月

宇宙実験状況：終了

解析状況：実施中。3 回目の実験試料解析中。4 回目の実験試料は 2014 年 12 月末につくばに到着予定。

主な出版物

[1] K. Kinoshita, et al.: Growth of a $Si_{0.50}Ge_{0.50}$ crystal by the traveling liquidus-zone (TLZ) method in microgravity. Journal of Crystal Growth, 388 (2014) pp.12–16.

[2] K. Abe, et al.:Numerical simulations of SiGe crystal growth by the traveling liquidus-zone method in a microgravity environment. Journal of Crystal Growth, 402 (2014) pp.71–77.

[3] K. Kinoshita, et al.: SiGe crystal growth aboard the international space station. Journal of Crystal Growth, in press.

今後の成果発表予定：2015 年度中にプロジェクト評価予定

結晶が成長する過程をリアルタイムで追う
p.136 **微小重力における溶液からのタンパク質結晶の成長機構と完全性に関するその場観察による研究（NanoStep）**

代表研究者：塚本 勝男（東北大学　教授）

共同研究者：吉崎　泉（JAXA）、鈴木 良尚（徳島大）、橘　勝（横浜市立大）他

実施時期：2012 年 8 月～ 12 月

宇宙実験状況：完了

解析状況：実施中

主な出版物

[1] I. Yoshizaki, K. Tsukamoto, T. Yamazaki, K. Murayama, K. Oshi, S. Fukuyama, T. Shimaoka, Y. Suzuki, M. Tachibana "Growth Rate Measurements of Lysozyme Crystals under Microgravity Conditions by Laser Interferometry" Review of Scientific Instruments 84, 103707 (2013)

[2] W. Pan, J. Xu, K. Tsukamoto, M. Koizumi, T. Yamazaki, R. Zhou, A. Li, Y. Fu, "Crystal Growth of Hen Egg-White Lysozyme (HEWL) under Various Gravity Conditions" , J. Crystal Growth 377, 43–50 (2013)

[3] 塚本 勝男　「タンパク質結晶の "その場" 観察」タンパク質結晶の最前線、シーエムシー出版 137-148 (2013)

[4] 吉崎　泉、塚本 勝男「宇宙でのタンパク質結晶表面その場観察実験」宇宙航空研究開発機構　特別資料 JAXA-SP-13-012 (2013)

[5] 塚本 勝男「微小重力でのタンパク質結晶成長速度」マイクログラビティ応用学会誌 29 (3) 106-110 (2012)

[6] K. Tsukamoto, G. Sazaki, K. Kojima, I. Yoshizaki, "Growth rate of protein crystals using FOTON-M3 satellite" , Space Util. Res. 24, 6–7 (2008)

今後の成果発表予定：2015 年中に論文報告予定。

そ　の　他：塚本勝男教授は、本実験の成功も含めて世界的に評価され、国際結晶成長学連合より日本人として初めて Frank 賞を 2013 年に授与された。

氷の結晶をコントロールするタンパク質の秘密とは
p.139 **生体高分子の関与する氷結晶成長－自励振動成長機構の解明－（Ice Crystal 2）**

代表研究者：古川 義純（北海道大学　低温科学研究所）

共同研究者：佐崎　元、長嶋　剣、中坪 俊一、村田 憲一郎、麻川 明俊（北海道大学　低温科学研究所）、灘　浩樹（産業技術総合研究所）、小川 直久（北海道工業大学）

実施時期：2013 年 8 月～ 2014 年 6 月

解析状況：実施中（画像解析および二段階可逆吸着モデルの検討中）

主な成果発表

[1] ISS-KIBO で実施されている Ice Crystal 2 実験の概要、古川 義純、佐崎　元、長嶋　剣、麻川 明俊、Dmitry Vorontsov、中坪 俊一（北大）、吉崎　泉、田丸 晴香（JAXA ）、島岡 太郎（JSF）、曽根 武彦（JAMSS）、JASMAC-27、November 27, 2013

[2] 氷結晶成長実験（Ice Crystal 2）供試体開発と実験運用、田丸 晴香、吉崎　泉（JAXA）、島岡 太郎（JSF）、曽根 武彦（JAMSS）、古川 義純、中坪 俊一（北海道大学）、真木 孝雄、赤羽 隆之（オリンパス（株））、友部 俊之（（株）ＩＨＩエアロスペース）、JASMAC-27、November 27, 2013

[3] Oscillatory Growth of Ice Crystal in the Solution of Antifreeze Glycoprotein, Y. Furukawa, G. Sazaki, K. Nagashima, H. Asakawa, E. Yokoyama, S. Zepeda & Y. Nishimura, PCI-2014 Conference at Hanover March 16-20, 2014

[4] Self-Oscillatory Growth of Ice Crystal-Microgravity Experiments in Kibo of ISS-, Y. Furukawa, 23rd-AACGE, June 8, 2014

[5] Oscillatory Growth of Ice Crystal in the Solution of Antifreeze Glycoprotein、Y. Furukawa, S. Zepeda, K. Nagashima, H. Asakawa, G. Sazaki (ILTS, Hokkaido Univ.) I. Yoshizaki, H. Tamaru (JAXA) T. Shimaoka (JSF) T. Sone (JAMSS)、IBP-2, Sapporo、August 4-7, 2014

主な出版物

[1] D. A. Vorontsov, G. Sazaki, S.-H Hyon , K. Matsumura, Y. Furukawa : Antifreeze Effect of Carboxylated ε -Poly-L-lysine on the Growth Kinetics of Ice Crystals, J. Phys. Chem., B118, 10240-10249(2014).

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/second/ice_crystal2/
http://iss.jaxa.jp/en/kiboexp/theme/second/pm/furukawa_e.pdf

船外利用

p.142 材料を宇宙の厳しい環境に曝すとどうなるか、そして宇宙にどのような微小粒子が存在するかを調べる
ロシアサービスモジュール利用微小粒子捕獲実験および材料曝露実験（MPAC&SEED 実験）

代表研究者：木本 雄吾（JAXA）

共同研究者：中村　孝（北海道大学）、足立 幸志（東北大学）、荒川 陽司（富士重工業）、小田原 修（東京工業大学）、土佐 正弘（物質・材料研究機構）、秋山 正雄（IHI エアロスペース）

実施時期：2001 年 10 月～ 2005 年 8 月（宇宙曝露期間）

解析状況：実施中
MPAC の解析を継続中

主な出版物

[1] Proceedings of International Symposium on “SM/MPAC&SEED Experiment” JAXA-SP-08-015E (2009)

[2] T. Noguchi, T. Nakamura, T. Ushikubo, N.T. Kita, J.W. Valley, R. Yamanaka, Y. Kimoto, Y. Kitazawa,” A chondrule captured by space exposed aerogel on the international space station” , Earth and planetary science letters, Vol. 309 (2011), pp.198-206

[3] Y. Kimoto, K. Yano, J. Ishizawa, E. Miyazaki, I. Yamagata, “Passive Space-Environment-Effect Measurement on the International Space Station” , J. Spacecraft Rockets Vol. 46, No. 1, January-February (2009) pp.22-27

[4] H. Shimamura, T. Nakamura, “Investigation of Degradation Mechanisms in Mechanical Properties of Polyimide Films Exposed to a Low Earth Orbit,” Polymer Degradation and Stability 95 (2010) pp.21-33

[5] D. L. Edwards, A. P. Tighe, M. V. Eesbeek, Y. Kimoto, K. K.. de Groh “Theme Article - Overview of the Natural Space Environment and ESA, JAXA, and NASA Materials Flight Experiments” , MRS Bulletin Materials Issues in the Space Environment　Volume 35, No. 1(2010)

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/kiboexp/others/iss/mpacseed/

p.144 宇宙ステーションの気象台 ～宇宙環境の計測とその部品・材料に及ぼす影響に関する研究～
宇宙環境計測ミッション装置（SEDA-AP）

代表研究者：古賀 清一（JAXA）

共同研究者：松本 晴久・木本 雄吾・山田 理子（JAXA）、村木　綏（名古屋大学）

実施時期：2009 年 7 月～（継続中）

解析状況：実施中
太陽活動がピーク（極大期）をむかえる 2013 年へむけて解析を継続中

主な出版物

[1] Obara, T., K Koga, et. al.,　“SPACE ENVIRONMENT DATAACQUITITION WITH KIBO EXPOSED　FACILITY ON THE INTERNATIONAL SPACE　STATION (ISS)” , Data Science Journal , Vol.8, 74-84, 2010

[2] Koga, K., T. Goka, H. Matsumoto, T. Obara, Y. Muraki, and T. Yamamoto, ” Measurement of High-Energy Neutrons at ISS by SEDA-AP” , Astrophys. Space Sci. Trans., 8, 1–6, 2011

[3] Y. Muraki, K. Koga, T. Goka, H. Matsumoto, T. Obara, O. Okudaira, S. Shibata, and T. Yamamoto, “Measurement by FIB on the ISS: two emissions of Solar Neutrons detected?” , Advances in Astronomy, AstronomyVolume 2012 (2012), 14 pages.

[4] Yugo Kimoto, Junichiro Ishizawa, Hiroyuki Shimamura, “Passive Space Environment Effect Measurement on JEM/MPAC&SEED” , Protection of Materials and Structures from the Space Environment (Astrophysics and Space Science Proceedings 32), pp.73-82, 2013

[5] Eiji Miyazaki, Yugo Kimoto, Rikio Yokota, “Flight Experiment Results of the Polysiloxane-Block-Polyimide "BSF-30" on JEM/MPAC&SEED on the ISS” , Protection of Materials and Structures from the Space Environment (Astrophysics and Space Science Proceedings 32), pp.295-302, 2013

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/ef/seda_ap/

地球の大気を宇宙から診る
p.146 **超伝導サブミリ波リム放射サウンダ（SMILES）**

代表研究者：塩谷 雅人（京都大学 生存圏研究所）

共同研究者：高柳 昌弘・鈴木　睦・西堀 俊幸・佐野 琢己・佐藤 亮太（JAXA）、高橋 千賀子（富士通エフ・アイ・ピー）、尾関 博之（東邦大学）、水越 和夫（エイ・イー・エス）、長濱 智生（名古屋大学）、菊池 健一・落合　啓・入交 芳久・笠井 康子・村山 泰啓・増子 治信（NICT）、小池　真（東京大学）、真鍋 武嗣（大阪府立大学）、瀬田 益道（筑波大学）、稲谷 順司（国立天文台）

実施時期：2009 年 9 月～ 2010 年 4 月（大気観測）、～ 2013 年 3 月（冷凍機特性の測定）

解析状況：実施中
データ処理は観測終了後も改良を重ねながら引き続き実施しており、協力研究者向けの限定配布を 5 回行なったあと、2012 年 3 月よりウェブサイト上で一般に公開しています。
http://darts.isas.jaxa.jp/iss/smiles/

主な出版物

[1] Ken-Ichi Kikuchi, Toshiyuki Nishibori, Satoshi Ochiai, Hiroyuki Ozeki, Yoshihisa Irimajiri, Yasuko Kasai, Makoto Koike, Takeshi Manabe, Kazuo Mizukoshi, Yasuhiro Murayama, Tomoo Nagahama, Takuki Sano, Ryota Sato, Masumichi Seta, Chikako Takahashi, Masahiro Takayanagi, Harunobu Masuko, Junji Inatani, Makoto Suzuki, and Masato Shiotani. 2010. "Overview and Early Results of the Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder (SMILES)" J. GeoPhys. Res. 115 (D23) (December 7): D23306. DOI: 10.1029/2010JD014379.

[2] Koji Imai, Makoto Suzuki, and Chikako Takahashi. 2010. "Evaluation of Voigt Algorithms for the ISS/JEM/SMILES L2 Data Processing System" Advances in Space Research 45: 669-675.

[3] Chikako Takahashi, Makoto Suzuki, Chihiro Mitsuda, Satoshi Ochiai, Naohiro Manago, Hiroo Hayashi, Yoshitaka Iwata, Koji Imai, Takuki Sano, Masahiro Takayanagi, and Masato Shiotani, 2011. "Capability for Ozone High-Precision Retrieval on JEM/SMILES Observation" Advances in Space Research 48 (6): 1076-1085. DOI:10.1016/j.asr.2011.04.038.

[4] S.Mizobuchi, K.Kikuchi, S.Ochiai, T.Nishibori, T.Sano, K.Tamaki, H.Ozeki (2012), In-orbit Measurement of the AOS (Acousto-Optical Spectrometer) Response Using Frequency Comb Signals, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 5(3), 977-983, DOI:10.1109/JSTARS.2012.2196413.

[5] M.Suzuki, C.Mitsuda, K.Kikuchi, T.Nishibori, S.Ochiai, H.Ozeki, T.Sano, S.Mizobuchi, C.Takahashi, N.Manago, K.Imai, Y.Naito, H.Hayashi, E.Nishimoto, M.Shiotani (2012), Overview of the Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder (SMILES) and Sensitivity to Chlorine Monoxide, ClO, IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, Volume 132, Issue 8, pp. 609-615, DOI: 10.1541/ieejfms.132.609

[6] 参考：超伝導サブミリ波リム放射サウンダ「SMILES」 ～ 4K 級機械式極低温冷凍機、不具合から得た知見と今後の運用～ 第 23 回「きぼう」利用勉強会 平成 24 年 3 月 9 日
http://iss.jaxa.jp/kibo/library/press/data/120308riyou_study.pdf

[7] Sakazaki, T., Fujiwara, M., Mitsuda, C., Imai, K., Manago, N., Naito, Y., Nakamura, T., Akiyoshi, H., Kinnison, D., Sano, T., Suzuki, M., and Shiotani, M., 2013, Diurnal ozone variations in the stratosphere revealed in observations from the Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder (SMILES) on board the International Space Station (ISS), J. Geophys. Res. Atmos., 118, pp. 2991-3006, doi:10.1002/jgrd.50220.

[8] Pawson, S., and W. Steinbrecht (Lead Authors), A.J. Charlton-Perez, M. Fujiwara, A.Yu. Karpechko, I. Petropavlovskikh, J. Urban, and M. Weber, Update on global ozone: Past, present, and future, Chapter 2 in Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014, Global Ozone Research and Monitoring Project ? Report No. 55, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 2014.

今後の成果発表予定：2013 年度中に査読付き論文の形で成果発表を継続する予定。

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/ef/smiles/

宇宙を探る　全天にわたる X 線天体の長期・短期変動の研究
p.150 **全天 X 線監視装置（MAXI）**

代表研究者：松岡　勝（理化学研究所、JAXA）

共同研究者：宇宙航空研究開発機構（JAXA）
理化学研究所 MAXI チーム
大阪大学　理学研究科 常深研究室
東京工業大学 大学院 理工学研究科 基礎物理学専攻 河合研究室
青山学院大学理工学部物理数理学科 吉田研究室
日本大学　理工学部物理学科 根來研究室
日本大学松戸歯学部物理学教室 中島研究室
京都大学大学院理学研究科宇宙物理学教室　上田研究室
宮崎大学工学部材料物理工学科　宇宙物理学研究室　山内研究室
中央大学　理工学部物理学教室　坪井研究室

実施時期：2009 年 10 月定常運用開始～継続中（2015 年 3 月までの実験継続を JAXA が了承済み）

解析状況：実施中（得られたデータを逐次解析中）

主な出版物（2013 年 9 月以前のものは省略）

[1] Morihana, K. et al. 2013, Publ. Astron. Soc. Japan 65, L10.
[2] Shidatsu, M. et al. 2013, Astrophysical Journal 779, 26.
[3] Maselli, A. et al. 2014, Science 343, 48.
[4] Nakajima, M. et al. 2014, Publ. Astron. Soc. Japan 66, 9.
[5] Yamamoto, T. et al. 2014, Publ. Astron. Soc. Japan 66, 59.
[6] Asai, K. et al. 2014, Publ. Astron. Soc. Japan 66, 79.
[7] Hori, T. et al. 2014, Astrophysical Journal 790, 20.
[8] Evans, P.A. et al 2014, MNRAS 444, 250.
[9] Nakahira, S. et al. 2014, Publ. Astron. Soc. Japan 66, 84.
[10] Serino, M. et al. 2014, Publ. Astron. Soc. Japan 66, 87.
[11] Isobe, N. et al. 2014, Astrophysical Journal 798, 27.
[12] Yoshikawa, A. 2014, Publ. Astron. Soc. Japan in press.

今後の成果発表予定：随時

MAXI サイエンスニュース（JAXA ホームページ） http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/ef/maxi/news.html

「きぼう」から飛べ！ 超小型衛星を放出
p.153
小型衛星放出技術実証ミッション（J-SSOD）

代表研究者：和田　勝（JAXA）

共同研究者：松村 祐介（JAXA）

実施時期：2012 年 10 月 4 日～ 10 月 5 日、2013 年 11 月 19 日～ 20 日

宇宙実験状況：実施中（放出ミッションとしては完了。衛星の実験運用中）

解析状況：完了

主な出版物

[1] K.Suzuki, et al, Introduction of the Small Satellite Deployment Opportunity from JEM, 2nd Nano-Satellite Symposium, 2011

宇宙と地球の境界で何が起きているのか？
p.156
地球超高層大気撮像観測（ISS-IMAP）

代表研究者：齊藤 昭則（京都大学）

共同研究者：山崎　敦・阿部 琢美・鈴木　睦 (ISAS/JAXA)、坂野井 健 (東北大学)、吉川 一朗 (東京大学)、
大塚 雄一 (名古屋大学)、田口　真 (立教大学)、菊池 雅行・中村 卓司・江尻　省 (極地研)、
山本　衛 (京都大学)、河野 英昭・Huixin Liu (九州大学)、石井　守・津川 卓也・久保田 実 (NICT)、
坂野井 和代 (駒沢大学)、藤原　均 (成蹊大学)

実施時期：2012 年 8 月 11 日～継続中
IMAP は、ポート共有実験装置 (MCE) に組み込まれて HTV3 で ISS に運ばれました。

解析状況：観測を継続し、データ解析中

主な出版物

[1] Akiya, Y., A. Saito, T. Sakanoi, Y. Hozumi, A. Yamazaki, Y. Otsuka, M. Nishioka, and T. Tsugawa, First space-borne observation of the entire concentric airglow structure caused by tropospheric disturbance, Geophysical Research Letters, DOI: 10.1002/2014GL061403, 2014.

[2] Sakanoi, T., Y. Akiya, A. Yamazaki, Y. Otsuka, A. Saito and I. Yoshikawa, Imaging Observation of the Earth's Mesosphere, Thermosphere and Ionosphere by VISI of ISS-IMAP on the International Space Station, IEEJ Trans. FM, Vol. 131, No. 12, pp.983-988, 2011.

[3] Yoshikawa, I., T. Homma, K. Sakai, G. Murakami, K. Yoshioka, A. Yamazaki, T. Sakanoi and A. Saito, Imaging Observation of the Earth's Plasmasphere and Ionosphere by EUVI of ISS-IMAP on the International Space Station, IEEJ Trans. FM, Vol. 131, No. 12, pp.1006-1010, 2011.

成果発表：2012 年 12 月 21 日に初期成果を発表
「地球超高層大気撮像観測ミッション (ISS-IMAP)」の初観測データ取得について (2012 年 12 月 21 日 JAXA)
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/news/121221_iss_imap.html

今後の成果発表予定：日本地球惑星科学連合 (2015 年 5 月 24-28 日)、IUGG General Assembly 2015 (2015 年 6 月 22-7 月 2 日) など

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/second/ef/imap_public.pdf
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/ef/mce/

p.158

自然の驚異、雷の全体像を明らかにする
スプライト及び雷放電の高速測光撮像センサ (JEM-GLIMS)

代表研究者：牛尾 知雄 (大阪大学・工学系研究科)

共同研究者：佐藤 光輝・高橋 幸弘・渡部 重十 (北海道大学)、坂本 祐二・吉田 和哉・土屋 史紀 (東北大学)、
足立　透 (早稲田大学)、芳原 容英 (電通大学)、菊池 雅行 (極地研)、鈴木　睦・山崎　敦・阿部 琢美 (ISAS/JAXA)、山下 幸三 (サレジオ高専)、大矢 浩代・中田 裕之 (千葉大学)、王道洪 (岐阜大学)、
平木 康隆 (核融合研)、森本 健志 (近畿大学)、河崎 善一郎 (大阪大学)、石田 良平 (大阪府大学)、
Umran Inan、Ivan Linscott、Jeff Chang (スタンフォード大学)

実施時期：2012 年 9 月 15 日～継続中
GLIMS はポート共有実験装置 (MCE) に組み込まれて HTV3 で ISS に運ばれました。

解析状況：実施中
テレメトリデータを解析し、雷・スプライトイベントの検出を継続しています。

主な出版物

[1] Ushio, T., M. Sato, T. Morimoto, M. Suzuki, H. Kikuchi, A. Yamazaki, Y. Takahashi, Y. Hobara, U. Inan, I. Linscott, Y. Sakamoto, R. Ishida, M. Kikuchi, K. Yoshida, and Z. Kawasaki, The Global Lightning and Sprite Measurement (GLIMS) Mission of the International Space Station - Concept and Overview -, IEEJ Trans. FM, 131 (12), pp. 971-976, 2011.

[2] Sato, M., Y. Takahashi, M. Kikuchi, M. Suzuki, A. Yamazaki, and T. Ushio,Lightning and Sprite Imager (LSI) onboard JEM-GLIMS, IEEJ Trans. FM, 131 (12), pp. 994-999, 2011.

[3] Sato, M., Y. Takahashi, M. Suzuki, A. Yamazaki, and T. Ushio, Six-Channel Spectrophotometers (PH) Onboard JEM-GLIMS, IEEJ Trans. FM, 131 (12), pp.1000-10005, 2011.

[4] Morimoto, T., H. Kikuchi, M. Sato, M. Suzuki, A. Yamazaki, and T. Ushio, VHF Lightning Observations on JEM-GLIMS Mission - Gradual Approach to Realize Space-borne VHF Broadband Digital Interferometer -, IEEJ Trans. FM, 131 (12), pp. 977-982, 2011.

[5] Kikuchi, M., M. Sato, A. Yamazaki, M. Suzuki, and T. Ushio, Development of Science Data Handling Unit (SHU) for Global Lightning and Sprite Measurements (GLIMS) onboard Japanese Experiment Module (JEM) of ISS, IEEJ Trans. FM, 131 (12), pp. 989-993, 2011.

成 果 発 表：2012 年 12 月 21 日に初期成果を発表
「スプライト及び雷放電の高速測光撮像センサ (JEM-GLIMS)」の初観測データ取得について (2012 年 12 月 21 日 JAXA)　http://iss.jaxa.jp/kiboexp/news/121221_jem_glims.html

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/second/ef/glims_public.pdf
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/ef/mce/

p.161

巨大な構造物を軽く・安く造る技術
宇宙インフレータブル構造の宇宙実証 (SIMPLE)

代 表 研 究 者：青木 隆平 (東京大学)

共 同 研 究 者：SIMPLE 共同研究開発チーム (以下に詳細)
樋口　健 (室蘭工業大学)、古谷　寛 (東京工業大学)、宮崎 康行 (日本大学)、岸本 直子 (摂南大学)、
石村 康生 (ISAS/JAXA)、角田 博明 (東海大学)、泉田　啓 (京都大学)、石澤 淳一郎 (JAXA)、
サカセ・アドテック株式会社、株式会社ウェルリサーチ

実 施 時 期：2012 年 8 月 15 日～ 2014 年 8 月 14 日 (予定)
SIMPLE は、ポート共有実験装置 (MCE) に組み込まれて HTV3 で ISS に運ばれました。

宇宙実験状況：実施中

解 析 状 況：実施中　SIMPLE のテレメトリ及び画像の解析を SIMPLE 共同研究開発チームにて実施中。

主 な 出 版 物

[1] On-Orbit Verification of Space Inflatable Structures Takahira Aoki, Hiroshi Furuya, Kosei Ishimura, Yasuyuki Miyazaki, Kei Senda, Hiroaki Tsunoda, Ken Higuchi, Junichiro Ishizawa, Naoko Kishimoto, Ryoji Sakai, Kazuki Watanabe ISTS 2006-c-07, CD-Proc. of The 26th International Symposium on Space Technology and Science, Hamamatsu, pp.1-6 Jun. 2-6, 2008.

[2] Verification of Practical Use of an Inflatable Structure in Space," Ken HIGUCHI, Yoshihiro OGI, Kazuki WATANABE, and Akihito WATANABE Trans. JSASS Space Tech. Japan, Vol.7, No.ists26, pp.Tc7-Tc112009.

[3] Effects of Cross-Sectional Deformation on Mechanical Properties of Inflatable Tubes, Hiroshi Furuya, YuYasuike, AIAA-2010-2752, DVD-Proc, 51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Orlando, pp.1-10, April 2010.

[4] SIMPLE 膜構造宇宙実験の概要　Overview of SIMPLE On-Orbit Experiments of Membrane Structures 東大 青木 隆平、室蘭工大 樋口　健、JAXA/ 総研本部 石澤 淳一郎、日大 宮崎 康行、東工大 古谷　寛、JAXA/ 宇宙研 石村 康生、東海大 角田 博明、京大 岸本 直子、泉田　啓、サカセアドテック㈱ 酒井 良次、渡邊 秋人、川端 信義、堀　利行、伊藤 裕明、㈱ウェルリサーチ 渡辺 和樹、及川　祐、倉富　剛 宇宙構造・材料シンポジウム H22.10 月

[5] インフレータブルスペーステラリウムの開発と軌道上展開について 岸本 直子 (摂南大)、青木 隆平 (東京大学)、及川　祐、中野 充彦、渡邊 和樹 (ウェルリサーチ)、SIMPLE 共同研究開発チーム第 56 回宇科連 宇宙科学技術連合講演会 2012.11.20

[6]「きぼう」曝露部を用いた形状記憶ポリマ複合材の宇宙実証実験 (SIMPLE/IMP) 石澤 淳一郎、横澤　裕、木本 雄吾、田村 高志 (JAXA)、渡邊 秋人、堀　利行、伊藤 裕明 (サカセ・アドテック)、SIMPLE 共同研究開発チーム第 56 回宇科連 宇宙科学技術連合講演会 2012.11.20

[7]Progress Report of SIMPLE Space Experiment Project on ISS Japan Experiment Module 青木 隆平 (東京大学)、樋口　健 (室蘭工大)、渡辺 和樹 (㈱ウェルリサーチ)、SIMPLE 共同研究開発チーム第 29 回 ISTS (29th International Symposium on Space Technology and Science.) 2013.04.16

[8]Initial Operation and Deployment Experiment of Inflatable Extension Mast in SIMPLE on JEM Exposure Platform in ISS 樋口　健 (室蘭工業大学)、宮崎 康行 (日本大学)、石村 康生 (JAXA 宇宙科学研究所)、古谷　寛 (東京工業大学)、角田 博明 (東海大学) 、泉田　啓 (京都大学)、渡邊 秋人、川端 信義 (サカセ・アドテック (株))、倉冨　剛 ((株) ウェルリサーチ)、SIMPLE 共同研究開発チーム第 29 回 ISTS (29th International Symposium on Space Technology and Science.) 2013.04.16

[9]Data Processing of Space Inflatable Membranes Pioneering Long-term Experiments (SIMPLE) 古谷　寛 (東京工業大学)、石村 康生、梶川 隆史、吉田 長治 (JAXA)、SIMPLE 共同研究開発チーム第 29 回 ISTS (29th International Symposium on Space Technology and Science.) 2013.04.16

[10]Thermal-blanket Effect Observed in Pressurized Inflatable Terrarium on the ISS 岸本 直子 (摂南大学)、及川　祐、中野 充彦、渡辺 和樹 ((株) ウェルリサーチ)、青木 隆平 (東京大学)、SIMPLE 共同研究開発チーム第 29 回 ISTS (29th International Symposium on Space Technology and Science.) 2013.04.16

[11]SIMPLE 宇宙実験に供されたインフレータブル伸展マストの開発試験 樋口　健 (室蘭工大)、青木 隆平 (東大)、宮崎 康行 (日大)、渡邊 秋人、川端 信義、堀　利行、伊藤 裕明 (サカセ・アドテック) 第 57 回宇科連 宇宙科学技術連合講演会 2013.10.11

今後の成果発表予定：2015 年頃、成果発表予定

縦横無尽に動く「空間移動ロボット」が宇宙開発の未来を支える
p.164 **EVA 支援ロボットの実証実験（REX-J）**

代表研究者：小田 光茂（JAXA）

実施時期：2012 年 8 月～ 2013 年 5 月
REX-J は、ポート共有実験装置（MCE）に組み込まれて HTV3 で ISS に運ばれました。

宇宙実験状況：定常運用完了

解析状況：実施中　軌道上環境での機器の動作特性や振動特性に関するデータ解析を進めています。

主な出版物

[1] Oda, Mitsushige, et al. "Proposal of a Tethered Space Walking Robot-REX-J: Robot Experiment on JEM." Transactions of Space Technology Japan 7 (2009).

[2] Ueno, Taihei, and Mitsushige Oda. "Robotic hand developed for both space missions on the International Space Station and commercial applications on the ground." Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2009.

[3] Oda, Mitsushige, et al. "Development of a Tether Based Space Walking Robot to Be Tested on ISS/KIBO." Transactions of the Japanese Society for Artificial Intelligence, Aerospace Technology Japan 8 (2011).

[4] REX-J におけるテザーを用いた宇宙ロボットの移動実験　山隅 允裕、○中西 洋喜、小田 光茂（東工大）、西田 信一郎、加藤 裕基、渡邊 恵佑、上田 敦史（JAXA）、吉井 正広、鈴木 悟史（AES）第 57 回宇宙科学技術連合講演会（2013）

[5] EVA 支援ロボット実証実験 REX-J の軌道上実験に基づく伸展アームの振動特性評価：小林 明誉、平野 大地、永岡 健司、安孫子 聡子、吉田 和哉（東北大）、上田 敦史（JAXA）、中西 洋喜（東工大）、鈴木 悟史（AES）、渡邊 恵佑、加藤 裕基（JAXA）、吉井 正広（AES）、小田 光茂（東工大）、西田 信一郎（JAXA）第 57 回宇宙科学技術連合講演会（2013）

[6] REX-J における軌道上自律画像誘導に向けた画像取得に関する基礎実験：益子 裕尭、天野　萌、鵜山 尚大、鳴海 智博、木村 真一（東理大）、吉井 正広、鈴木 悟史（AES）、加藤 裕基、渡邊 恵佑、上田 敦史、西田 信一郎（JAXA）、中西 洋喜、小田 光茂（東工大）第 57 回宇宙科学技術連合講演会（2013）

[7] REX-J における軌道上自律画像誘導に向けた 3 次元形状再 構成に関する基礎実験：天野　萌、益子 裕尭、鵜山 尚大、鳴海 智博、木村 真一（東理大）、吉井 正広、鈴木 悟史（AES）、加藤 裕基、渡邊 恵佑、上田 敦史、西田 信一郎（JAXA）、中西 洋喜、小田 光茂（東工大）第 57 回宇宙科学技術連合講演会（2013）

[8] REX-J ロボット位置・姿勢の計測のための画像処理方法：鈴木 悟史（AES）、山隅 允裕（東工大）、上田 敦史（JAXA）、中西 洋喜（東工大）、渡邊 恵佑（JAXA）、吉井 正広（AES）、加藤 裕基（JAXA）、小田 光茂（東工大）、西田 信一郎（JAXA）　第 57 回宇宙科学技術連合講演会（2013）

[9] EVA 支援ロボット実証実験（REX-J）の総括：小田 光茂（東工大）、西田 信一郎（JAXA）第 57 回宇宙科学技術連合講演会（2013）

特許取得　・発明の名称：移動ロボット　・発明者：小田 光茂、澤田 弘崇　・公開番号：特開 2008 － 260436
・公開日：2008 年 10 月 30 日　・出願日：2007 年　4 月 12 日

今後の成果発表予定：2014 年頃、成果発表予定。

ホームページ　http://robotics.jaxa.jp/rexj/rexj.html
http://robotics.jaxa.jp/rexj/rexj_topics.html

日本発。宇宙空間でも通用する地上の優れた技術
p.167 **曝露部用民生品高精細ビデオカメラシステム（COTS HDTV-EF）**

代表研究者：原田　力（JAXA）

実施時期：2012 年 8 月～継続中
COTS HDTV-EF は、ポート共有実験装置（MCE）に組み込まれて HTV3 で ISS に運ばれました。

宇宙実験状況：実施中

解析状況：①日陰撮影を継続し、2 年を超えた宇宙空間での宇宙放射線による CMOS 撮像素子の損傷頻度と程度の解析を実施中です。
②地球観測撮影を継続し、2 年を超えた宇宙空間での CMOS 素子の撮像画質の劣化有無の解析を実施中です。

主な映像公開実績

①平成 24 年度 JAXA 筑波宇宙センター　秋特別公開　上映
②スタークルーズ・プラネタリウム (森アーツセンターギャラリー) 上映
③平成 24 年度 JAXA 宇宙航空技術研究発表会　上映
④日本宇宙フォーラム　きぼうハイビジョン・アースビュー　映像インターネット配信

今後の成果映像・技術評価発表予定：随時　科学／宇宙関連会議／イベント／科学館にて映像上映予定

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/second/ef/cots_hdtv-ef.pdf

アジア利用、人文・社会科学

p.172 宇宙ふしぎ実験および教材開発（Try ZERO-G）

実施時期：2009年7月、2009年12月～2010年6月、2011年6月～11月、2012年7月～11月、2013年1月、2013年11月～2014年5月（予定）

解析状況：実施した実験についてはすべて完了。

主な出版物

宇宙飛行士の若田さんと学ぶ　おもしろ宇宙実験（2010年8月 日経ナショナルジオグラフィック社）

Articles on ISS Humanitarian Benefit (published by NASA)

JAXA 宇宙教育センター教材 DVD

今後の成果発表予定：今後、予定されている実験結果は、引き続き、JAXAホームページで公開していきます。

JAXAホームページでの公開情報

- おもしろ宇宙実験（若田宇宙飛行士）
http://iss.jaxa.jp/iss/jaxa_exp/wakata/omoshiro/

- おもしろ宇宙実験（野口宇宙飛行士）
http://iss.jaxa.jp/library/video/ng_education_video_100306.html
http://iss.jaxa.jp/library/video/ng_education_video_100502.html

- 宇宙ふしぎ実験（古川宇宙飛行士）
http://iss.jaxa.jp/iss/jaxa_exp/furukawa/exp2/fushigi/

- 宇宙医学にチャレンジ（古川宇宙飛行士）
http://iss.jaxa.jp/iss/jaxa_exp/furukawa/exp2/igaku/

p.174 種から始まるアジアの「きぼう」利用 Space Seeds for Asian Future 2013 (SSAF2013)

共同研究者：Naomi, Mathers (ANU, Australia) Thomas Djamaluddin (LAPAN, Indonesia) Fenny Dwivany, Riskita Esyanti (ITB, Indonesia), Mohd Helmy Hashim, Mhd Fairos Asi l lam(ANGKASA, Malaysia) Mohammed Selamat Madom(MARDI, Malaysia), Mark Mackay (KiwiSpace, New Zealand), Sawat Tantiphanwasi(NSTDA, Thailand) Nguyen Vu Giang, (VAST/STI, Vietnam) 高沖 宗夫、矢野 幸子(JAXA) 曽我 康一(Osaka City University)

実施時期：2013年8月30日～2013年9月6日（UTC）

宇宙実験状況：完了

解析状況：完了

主な出版物

[1] Takaoki, M., Yano, S., Mathers, N., Dwivany, F., Exyanti, R., Djamaluddin, T., Asillam, M.F., Kamarudin, F., Madom, M.S., Tantiphanwadi, S., Giang, N.V., and Kibo-ABC, Space Seeds for Asian Future, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan vol.12, No. ists29, pp. Tp_1-Tp_5, 2014.

[2] Soga, K., Biology Club, Kurita, A., Yano, S., Ichikawa, T., Kamada, M., and Takaoki, M., Growth and Morphogenesis of Azuki Bean Seedlings in Space during SSAF2013 Program.. Biol. Sci. Space 28:p.6-11, 2014

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/en/kuoa/ssaf

p.176

宇宙連詩

代表提案者：田淵 光彦（JAXA）

実施時期：第 1 期：2006 年度、第 2 期：2007 年度、第 3 期：2008 年度、第 4 期：2010 年度

宇宙実験状況：完了

公開された成果

宇宙連詩完成披露シンポジウムを各期の完成時に実施した。

2007 年 3 月：第 1 期宇宙連詩完成披露シンポジウム（日本橋プラネタリウム）

2008 年 3 月：第 2 期宇宙連詩完成披露シンポジウム（日本技術未来館）

2009 年 5 月：第 3 期宇宙連詩完成披露シンポジウム（プラネタリウム "満天"）

2011 年 8 月：第 4 期宇宙連詩完成披露シンポジウム（日経セミナールーム）

p.178

宇宙を旅した種子を育てよう！
JAXA Seeds in Space

代表提案者：中野　完、谷垣 文章（JAXA）

教育プログラム専門委員

アサガオ・ミヤコグサ：青木 俊夫（日本大学）、明石　良・橋口 正嗣（宮崎大学）、阿部 知子・林　依子（理化学研究所）、
市田 裕之（明治大学）、小野 道之（筑波大学）、仁田坂 英二（九州大学）、林　誠（農業生物資源研究所）

ヒマワリ：井上 栄一（茨城大学）、白須　賢（理化学研究所）

実施時期：2008 年　種子の打上げと回収
2010 年～　第 1 回参加者募集および実施
2011 年～　第 2 回参加者募集および実施
2012 年～　第 3 回参加者募集および実施
2013 年～　第 4 回参加者募集および実施

宇宙実験状況：完了

主な出版物

中学校教育フォーラム　2011 年秋号　寄稿「宇宙開発機関に期待される教育プログラム」 JAXA 宇宙教育センター　中野　完

公開された成果

・参加者の取り組みに関する全国の新聞報道　多数

・参加者の作成した実験報告ホームページ　多数

・JAXA ホームページ　http://edu.jaxa.jp/seeds/　および　http://edu.jaxa.jp/himawari/

・参加者の実験報告 JAXA 掲示板：https://edu.jaxa.jp/community/asagao/list

p.182

宇宙モデリング

代表提案者：米林 雄一（東京藝術大学　名誉教授）

共同提案者：尾関 祥恵・松尾 尚子・田淵 光彦・小山 正人（JAXA）

実施時期：2008 年 8 月

解析状況：完了

公開された成果

●「台東区児童教育プロジェクト」において子供参加型ワークショップを実施。（2007 年 11 月、東京）
●「ひとがたワークショップ」（2008 年 12 月、ミウラート美術館（松山））
● 2011 年 9 月、米林雄一展・ワークショップ（小布施ミュージアム・中島千波館
● 2012 年 10 月、六本木アートカレッジで講演。

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/first/epo_spacemodeling.pdf

p.183 ISS 宇宙飛行士の 'moon' score

代表提案者：野村　仁（京都市立芸術大学　教授）

共同提案者：尾関 祥恵・山中 理代・田淵 光彦・小山 正人（JAXA）

実施時期：2008 年 8 月～ 2010 年 6 月

解析状況：完了

公開された成果
2009 年 5 ～ 7 月、個展@国立新美術館にて作品の一部を展示。
2010 年 2 ～ 3 月、「Cyber Arts Japan」@東京都現代美術館にて作品の一部を展示。
2010 年 12 月、退任記念展@大阪にて作品の一部を展示。
2013 年 9 月～ 10 月、個展にて 'moon' score: ISS Commander-Listening to it on Mars, now を展示

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/first/epo_moon.pdf

p.184 水の球を用いた造形実験

代表提案者：藤原 隆男（京都市立芸術大学　教授）

共同提案者：尾関 祥恵・松尾 尚子・田淵 光彦・小山 正人（JAXA）

実施時期：2008 年 9 月

解析状況：完了

公開された成果
編集した映像を京都市立芸術大学ホームページで公開中
http://aas.kcua.ac.jp/epo/water/index.html

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/first/epo_aquasphere.pdf

p.185 墨流し水球絵画

代表提案者：逢坂 卓郎（筑波大学 教授）

共同提案者：尾関 祥恵・松尾 尚子・田淵 光彦・小山 正人（JAXA）

実施時期：2008 年 9 月

解析状況：完了

主な出版物
[1]「無重力環境に於ける芸術の可能性」、環境芸術学会誌 No09 pp57-64、2010.
[2]「ISS-JEM "きぼう" の人文社会科学利用パイロットミッションに於ける芸術実験〈墨流し水球絵画〉と〈Spiral Top〉」、日本マイクログラビティー応用学会誌　Vol.27, No.2, pp77-85, 2010.

公開された成果
- 2011 年 9 月、メディアアートの祭典「アルス・エレクトロニカ」（オーストリア・リンツ）で映像と作品の展示およびレクチャーを実施。
- 2011 年 10 月、『第 62 回 IAC 国際宇宙会議』（ケープタウン）" Art Experiment by the Water and Light on the ISS-JEM 'KIBO' "

● 2012 年 10 月、六本木アートカレッジで講演
● 2012 年 12 月～ 2013 年 1 月、逢坂卓郎退官記念展 “Fullness of Emptiness” 筑波大学大学会館アートギャラリー、芸術学系棟ギャラリー
● 2014 年 8 月、静岡市クリエーター支援センターで講演

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/first/epo_inkball.pdf

p.186 光るニューロン

代表提案者：野村　仁（京都市立芸術大学　教授）

共同提案者：尾関 祥恵・松尾 尚子・田淵 光彦・小山 正人（JAXA）

実施時期：2008 年 9 月

解析状況：完了

今後の成果発表予定：野村仁個展に出品予定　グループ展に出品予定

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/first/neuron.pdf

p.187 宇宙でのファッショナブルライフ

代表提案者：宮永 美知代（東京藝術大学　助教）

共同提案者：尾関 祥恵・山中 理代・田淵 光彦・小山 正人（JAXA）

実施時期：2009 年 4 月

解析状況：完了

今後の成果発表予定
● 展覧会またはファッションショーなどの形式で、本研究から得た成果を公開する。現在、資金を調達中。
●『ヴィーナスはなぜ美しいのか?』（仮題）朝日新聞社刊への記載。一章「宇宙のヴィーナス」としてに、人体美の変化の可能性について、本実験研究から得た成果を記載する。
● 美術解剖学会での発表と『美術解剖学雑誌』への論文投稿を行う。

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/utiliz/pdf/epo_pamphlet.pdf

p.188 飛天プロジェクト

代表提案者：石黒 節子（お茶の水女子大学　名誉教授）

共同提案者：尾関 祥恵・山中 理代・田淵 光彦・小山 正人（JAXA）

実施時期：2009 年 8 月

解析状況：完了

主な出版物
2009 年 12 月、舞踊学 32 号に「飛天プロジェクト - 国際宇宙ステーションでのダンス - 」掲載

公開された成果
●2009年10月：慶應義塾150周年公開講座-天からの文（ふみ）を読み解いてみよう-「世界天文年に因んで」にて講演。
●2010年　1月：「飛天-ファイナル」@新国立劇場小ホールにてシンポジウムおよびダンスパフォーマンスの開催。
●2010年　2～3月：東京都現代美術館にて映像展示およびパフォーマンスを実施。
●2010年　5月：韓国舞踊史学会@漢陽大学（韓国）にて映像公開。
●2011年　2月：政府派遣により「飛天」講演。（ローマ）
●2012年　2月：文部省特別経費による　A=WILL 国際シンポジウム「未来を創造する大学」にて、「飛天」の映像公開と講演。（お茶の水女子大学）

【論文】
●『舞踊学 32 号』「飛天プロジェクト - 国際宇宙ステーションでのダンス -」（2009 年 12 月）
● Self Portrait Challenge "Defining gravity" Italy（2011 年 6 月）
● Elizabeth Mckenzie ed. MY POSTWAR LIFE Chicago Quarterly Books（2012 年 2 月）
● 2012 年 2 月に開催された A-Wil 国際シンポジウムの「飛天プロジェクト」が ellipse –お茶の水学術事業会会報に掲載。（2012 年 6 月）
●同　文部科学省報告書に掲載。（2012 年 8 月）

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/utiliz/pdf/epo_pamphlet.pdf

p.189 Spiral Top

代表提案者：逢坂 卓郎（筑波大学　教授）

共同提案者：尾関 祥恵・松尾 尚子・田淵 光彦・小山 正人（JAXA）

実施時期：2009 年 4 月

解析状況：完了

主な出版物
[1]「無重力環境に於ける芸術の可能性」、環境芸術学会誌 No09 pp57-64、2010.
[2]「ISS-JEM “きぼう” の人文社会科学利用パイロットミッションに於ける芸術実験〈墨流し水球絵画〉と〈Spiral Top〉」、日本マイクログラビティー応用学会誌　Vol.27, No.2, pp77-85, 2010.

公開された成果
● 2011 年 9 月、メディアアートの祭典「アルス・エレクトロニカ」（オーストリア・リンツ）で映像と作品の展示およびレクチャーを実施。
● 2011 年 10 月、『第 62 回 IAC 国際宇宙会議』（ケープタウン）” Art Experiment by the Water and Light on the ISS-JEM ‘KIBO’ ”
● 2012 年 10 月、六本木アートカレッジで講演
● 2012 年 12 月～ 2013 年 1 月、逢坂卓郎退官記念展 “Fullness of Emptiness” 筑波大学大学会館アートギャラリー、芸術学系棟ギャラリー
● 2014 年 8 月、静岡市クリエーター支援センターで講演

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/utiliz/pdf/epo_pamphlet.pdf

p.190 宇宙庭

代表提案者：松井 紫朗（京都市立芸術大学 教授）

共同提案者：尾関 祥恵・田淵 光彦・小山 正人（JAXA）

実施時期：2009 年 12 月～ 2010 年 3 月

解析状況：完了

公開された成果
● 2010 年 5 月、個展「Hundreds of Gardens」@アートコートギャラリー（大阪）にて展示。
● 2010 年 6 月、展覧会「生存のエシックス」展@京都国立近代美術館（京都）にて観賞会の状景を放映、研究紹介、アーカイブ展示。
● 2013 年 10 月、多摩六都科学館で講演。
● 2014 年 8 月、札幌宮の森美術館および旭川市科学館プラネタリウムで講演

ホームページ http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/first/epo_spacegarden.pdf
http://iss.jaxa.jp/utiliz/spaceculture/report/aas/AAS2001-2003/garden/garden_index.html

p.191 手に取る宇宙 ～ Message in a Bottle ～

代表提案者：松井 紫朗 教授（京都市立芸術大学）

実施時期：2010 年 9 月～ 2011 年 3 月／再実施：2012 年 9 月～（実施中）。2010 年 9 月 14 日の船内活動で付随する作業を、そして 2011 年 3 月 1 日の STS-133 の船外活動（EVA#1）でボトルへの宇宙の取り込みをそれぞれ実施し、STS-133 でボトルを地球に回収しました。しかし、ボトルの破損が確認されたことから、再度宇宙を取り込んだボトルの製作に挑戦することとなりました。
2012 年 10 月 4 日に、『きぼう』エアロックを使って ISS 船外にボトルを搬出し、宇宙の取り込みを行った後、『きぼう』エアロック内で保管され、2013 年 1 月 25 日に船内へ回収されました。このボトルはドラゴン宇宙船運用 2 号機で回収されました。

解析状況：実施中

公開された成果
- 2013 年 10 月、多摩六都科学館で講演。
- 2014 年 8 月、札幌宮の森美術館および旭川市科学館プラネタリウムで講演

ホームページ http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/first/epo_mib.pdf

p.192 Spiral Top- II

代表提案者：逢坂 卓郎（筑波大学）

共同提案者：尾関 祥恵・山中 理代・田淵 光彦・小山 正人（JAXA）

実施時期：2011 年 5 月

解析状況：完了

主な出版物

[1]「無重力環境に於ける芸術の可能性」、環境芸術学会誌 No09 pp57-64、2010.
[2]「ISS-JEM "きぼう" の人文社会科学利用パイロットミッションに於ける芸術実験〈墨流し水球絵画〉と〈Spiral Top〉」、日本マイクログラビティー応用学会誌　Vol.27, No.2, pp77-85, 2010.

公開された成果
- 2011 年 9 月、メディアアートの祭典「アルス・エレクトロニカ」（オーストリア・リンツ）で映像と作品の展示およびレクチャーを実施。
- 2011 年 10 月、『第 62 回 IAC 国際宇宙会議』（ケープタウン）" Art Experiment by the Water and Light on the ISS-JEM 'KIBO' "
- 2012 年 10 月、六本木アートカレッジで講演
- 2012 年 12 月～ 2013 年 1 月、逢坂卓郎退官記念展 "Fullness of Emptiness" 筑波大学大学会館アートギャラリー、芸術学系棟ギャラリー
- 2014 年 8 月、静岡市クリエーター支援センターで講演

ホームページ http://iss.jaxa.jp/kiboexp/field/epo/pilot/second/#spiraltop

p.194 宇宙で抹茶を点てる

代表提案者：河口 洋一郎（東京大学）

共同提案者：堀　聖司・米倉 将吾（東京大学）、尾関 祥恵・山中 理代・田淵 光彦・小山 正人（宇宙航空研究開発機構）

実施時期：2011 年 9 月

解析状況：完了

主な出版物

[1] Y. Kawaguchi, The observation of Japanese powdered green tea ceremony in zero gravity -as the social and cultural experiment at International Space Station, in Proc. of ASIAGRAPH in Tokyo 2011, Miraikan, Odaiba, Tokyo, Japan, October 20th-22nd, 2011.

[2] Hiroki Sato and Yoichiro Kawaguchi, The Motion of Fluid in Zero Gravity, in Proc. of ADADA in Taipei 2012, Asia University, Taipei, Taiwan, December 6th-7th, 2012.

公開された成果

【講演】

●2011年10月：「宇宙抹茶実験」、DIGITAL CONTENTS EXPO 2011（東京お台場未来館）
●2011年11月：CREST研究成果発表「超高精細映像と生命的立体造形が反応する新伝統芸能空間の創出技術」、第5回領域シンポジウム（東京秋葉原アキバホール）
●2011年11月：“Asia⇔Space”（From Asia to Space, and From Space to Asia), 南台湾国際動態藝術大展（台北）
●2012年 1月：河口 洋一郎、米林 雄一（彫刻家、東京藝術大学名誉教授）、対談「宇宙造形の未来」、情報文化学会／芸術情報研究会・日本映像学会デジタルメディア研究会（報告会）（東京大学本郷キャンパス工学部）
●2012年 2月：デジタルコンテンツクリエーションシンポジウム「生命造形の宇宙へ」、情報処理学会放送コンピューティング（BCC）研究グループ（秋葉原デジタルハリウッド大学院秋葉原メインキャンパス）
●2012年 3月：河口 洋一郎、木村 重信（染・清流館館長）、原　久子（大阪電気通信大学総合情報学部教授）、鼎談「河口洋一郎の宇宙 サイエンス or アート」（京都染・清流館）
●2012年 3月：河口 洋一郎、和田 秀樹氏（評論家、精神科医）、須藤　修氏（社会情報学、東京大学教授）、鼎談「アジアの文化知」、ASIAGRAPH 2012 Forum in Tokyo, VR学会（東京大学本郷キャンパス工学部）
●2012年 3月：“Wisdom of Asia”（インド）
●2012年 4月：“Asia⇔Space”（珠海、中国）
●2012年 6月：“CGと進化生命の宇宙”、第八回中国長春国際アニメマンガゲームフェア（吉林省、中国）
●2012年 6月：「生命造形の宇宙へ」（女子美術大学）
●2012年 8月：「宇宙造形の未来」、種子島宇宙芸術祭推進協議会「宇宙芸術ビッグトークイベント」（種子島旧町立図書館）
●2012年 8月：“The world of Yoichiro Kawaguchi”（ハワイ大学、ヒロ）
●2012年10月：六本木アートカレッジ
●2012年11月：「生命造形の宇宙へ」、京都賞（京都）
●2012年12月：Hiroki Sato and Yoichiro Kawaguchi, The Motion of Fluid in Zero Gravity, ADADA in Taipei 2012（アジア大学、台北）

【展示】

●2014年6月-8月：「ミッション［宇宙×芸術］ ―コスモロジーを超えて」展、宇宙抹茶実験の映像および実験器具の展示（東京都現代美術館）

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/kiboexp/field/epo/pilot/second/#spacematcha

p.195

発光する墨流し水球絵画 -II “生命、光、海”

代表提案者：逢坂 卓郎（筑波大学）

共同提案者：尾関 祥恵・山中 理代・田淵 光彦・小山 正人（JAXA）

実施時期：2011 年 9 月

解析状況：完了

主な出版物

[1]「無重力環境に於ける芸術の可能性」、環境芸術学会誌 No09 pp57-64、2010.

[2]「ISS-JEM “きぼう” の人文社会科学利用パイロットミッションに於ける芸術実験〈墨流し水球絵画〉と〈Spiral Top〉」、日本マイクログラビティー応用学会誌　Vol.27, No.2, pp77-85, 2010.

公開された成果

● 2011 年 9 月、メディアアートの祭典「アルス・エレクトロニカ」（オーストリア・リンツ）で映像と作品の展示およびレクチャーを実施。
● 2011 年 10 月、『第 62 回 IAC 国際宇宙会議』（ケープタウン）” Art Experiment by the Water and Light on the ISS-JEM ‘KIBO’ ”
● 2012 年 10 月、六本木アートカレッジで講演
● 2012 年 12 月～ 2013 年 1 月、逢坂卓郎退官記念展 “Fullness of Emptiness” 筑波大学大学会館アートギャラリー、芸術学系棟ギャラリー
● 2014 年 8 月、静岡市クリエーター支援センターで講演

ホームページ　http://iss.jaxa.jp/kiboexp/field/epo/pilot/second/#inkball2

p.197 「赤色」でつなぐ宇宙と伝統文化

代表提案者：村山 裕三（同志社大学）

共同提案者：渡邉 倫久（株式会社プーゼフルール）、川邊 祐之亮（有限会社ジャパンスタイルシステム）、
山中 理代・田淵 光彦・小山 正人（JAXA）

実施時期：2012 年 2 月

解析状況：完了

主な出版物

[1] 村山 裕三『伝統産業から文化ビジネスへ：「伝統産業グローバル革新塾」の 5 年間』（マリア書房、2012 年）

公開された成果

【講演等】

- 2013 年 6 月：国際シンポジウム「グローバル社会と京都ーグローバル社会における京都の独創性」（同志社大学・東京財団共催）
- 2014 年 5 月：宇宙的な音を奏でる世界的な音楽家のツトム・ヤマシタ氏と、宇宙への共感を共有することで当プロジェクトとのコラボレーションが実現し、世界初の「音による染ー S・CORE」を開発した。（大徳寺で開催された「音禅法要」で披露）また、S・CORE のデザインを活用して、ツトム・ヤマシタ氏の CD 製作を行った。
- 2014 年 11月：六本木アートカレッジで講演

ホームページ http://iss.jaxa.jp/kiboexp/field/epo/pilot/second/#spacesakura

p.199 宇宙楽器

代表提案者：小野 綾子（東北大学）

共同提案者：根岸　創（女子美術大学）
尾関 祥恵、山中 理代、田淵 光彦、小山 正人（宇宙航空研究開発機構）

実施時期：2012 年 2 月

解析状況：完了

主な出版物

[1]2012 年 10 月：国際宇宙会議論文 “Innovative Musical Instruments Designed For Microgravity: Cosmical Seeds” Symposium E5. 23rd SYMPOSIUM ON SPACE ACTIVITY AND SOCIETY. Session 4. Space as an Artistic Medium. Paper ID Nr.: IAC-12, E5, 4, 5, x14096

[2]2013 年 6 月：リーフレット “Space Musical Instruments” Ayako Ono & So Negishi. Rice Public Art Pop-Up Gallery, アメリカ, ヒューストン

主な成果物

①楽器彫刻作品
・『宇宙楽器 -Cosmical Seeds』のオリジナル作品：2013 年の時点では ISS「きぼう」内に保管されています。
・『宇宙楽器 -Cosmical Seeds』のバックアップ品：展示用、及び提案者共有の資料として保管しています。

①映像
・『宇宙楽器 -Cosmical Seeds』の軌道上映像（オリジナル、編集済）

公開された成果

●2012年 5月：宇宙サミットと映像とポスターとの展示（ライス大学、テキサス）
●2012年 6月：ESAのアート&サイエンス・チームの一員としてESAライフサイエンス会議に展示（アバディーン、イギリス）
●2012年 6月～7月：ライス大学のギャラリーで映像展示（テキサス）
●2012年12月：ESAのアート&サイエンス・チームによるスペースアート関連の映像展示 “Space-Related Art Showcase” に参加（ESA／ESTEC、オランダ）

【講演】
●2013年3月：高校への出前授業（ヒューストン）
●2013年4月：NSBRI（National Space Biomedical Research Institute）で紹介（ヒューストン）
●2013年5月：第4回国際スペースアート・ワークショップ（カリフォルニア）

p.201 宇宙でのびやかに暮らそうプロジェクト

代表提案者：西出 和彦（東京大学）

共同提案者：関戸 洋子、大崎 淳史、仲谷 剛史、後藤　匠、栗原 理沙（東京大学ほか）
山中 理代、田淵 光彦、小山 正人（宇宙航空研究開発機構）

実施時期：2012 年 10 月

宇宙実験状況：完了

解析状況：完了

主な出版物

ISS 日本実験棟モックアップにおける伏臥位での空間把握特性 -- 宇宙建築の居室規模計画に関する基礎研究、人間・環境学会誌、第 29 号、pp.21-30、2012

「ISS 国際宇宙ステーション「きぼう」日本実験棟での空間感覚に関する試論」日本建築学会計画系論文集、2014 年 6 月

公開された成果
2013 年 5 月、「宇宙での空間感覚に関する試論」人間・環境学会　第 20 回大会　ポスターセッション

今後の成果発表予定：2014 年秋ごろ　公開研究会等にて成果発表予定

p.202 お地球見

代表提案者：安藤 孝浩（東京芸術大学）

共同提案者：山中 理代、田淵 光彦、小山 正人（宇宙航空研究開発機構）

実施時期：2013 年 2 月

宇宙実験状況：完了

解析状況：完了

公開された成果
◎六本木アートカレッジにおいて「お地球見」成果報告
場　所：六本木ヒルズ　森タワー 49 階　アカデミーヒルズ
日　時：2013 年 11 月 24 日（日）
登壇者：安藤 孝浩（現代美術作家）　高柳 雄一（多摩六都科学館館長）　山口 孝夫（JAXA）

◎文京区立第九中学校において「お地球見」成果報告
場　所：文京区立第九中学校
日　時：2014 年 1 月 18 日（土）
進　行：高橋 美由紀（文京区立第九中学）
コメンテイター：髙柳 雄一（多摩六都科学館館長）　安藤 孝浩（現代美術作家）

【講演等】
● 2013 年 5 月：「お地球見」を主とした宇宙アートに関するワークショップ（東京）
● 2014 年 1 月：文京区立第 9 中学校にて講演会（東京）
● 2014 年 9 月：多摩六都科学館で講演
【展示】
● 2013 年 11 月：PHOTON FAIR 2013、映像および打上げ品（レプリカ）の展示（浜松）
● 2014 年 6 月- 8 月：「ミッション［宇宙×芸術］―コスモロジーを超えて」展、映像の展示（東京都現代美術館）

p.204

宙音

代表提案者：福嶋 敬恭（京都市立芸術大学）

共同提案者：今西 啓介（京都市立芸術大学）
山中 理代、田淵 光彦、小山 正人（宇宙航空研究開発機構）

実施時期：2012 年 4 月

宇宙実験状況：完了

解析状況：実施中　搭載品（生 DATA）返却まで待機中。（ダウンリンク DATA の 3 D 空間再生は、すでに行っている。）

今後の成果発表予定：本ミッションの内容に基づく作品制作、展覧会を企画中。軌道上での実施の映像と音声の録音をもとに、これらを活用しつつ、アンケートによる回答を参考にして、視覚、聴覚を中心にした空間（場）を創り出す。（8 チャネルの音響空間と映像を立体空間として提示。）現在検討中。新しい形の「場」の設定を目指す。発表予定は、搭載品返却等の関係上未定。

関連 HP 一覧

＜宇宙ステーション・きぼう　広報・情報センター＞
http://iss.jaxa.jp/

＜各分野の説明＞
科学利用
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/field/scientific/
- 物質・物理科学
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/field/scientific/#materials
- 生命科学
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/field/scientific/#life

宇宙医学・技術開発
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/field/medical/
http://iss.jaxa.jp/med/index.html

応用利用
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/field/applied/

船外利用
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/field/efuse/

アジア利用、人文・社会科学
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/field/epo/

成果占有利用（有償利用）
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/field/business/

＜実験装置の説明＞
●船内実験装置
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/pm/

流体物理実験装置（FPEF）
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/pm/fpef/

溶液結晶化観察装置（SCOF）
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/pm/scof/

蛋白質結晶生成装置（PCRF）
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/pm/pcrf/

画像取得処理装置（IPU）
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/pm/ipu/

温度勾配炉（GHF）
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/pm/ghf/

細胞培養装置（CBEF）
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/pm/cbef/

クリーンベンチ（CB）
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/pm/cb/

多目的実験ラック（MSPR）
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/pm/mspr/

燃焼実験チャンバー（CCE）
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/pm/mspr/chamber/

水棲生物実験装置（AQH）
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/pm/mspr/aqh/

静電浮遊炉（ELF）
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/pm/elf

●船外実験装置
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/ef/#ef

宇宙環境計測ミッション装置（SEDA-AP）
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/ef/seda_ap/

全天 X 線監視装置（MAXI）
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/ef/maxi/

超伝導サブミリ波リム放射サウンダ（SMILES）
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/ef/smiles/

ポート共有実験装置（MCE）
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/ef/mce/

小型衛星放出機構（J-SSOD）
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/ef/jssod/

＜ Pick Up ＞
SPACE@NAVI-Kibo
http://iss.jaxa.jp/library/video/spacenavi/

「きぼう」での実験　紹介ページ
http://iss.jaxa.jp/kiboexp/

これまでに得られた成果
http://iss.jaxa.jp/kiboresults/

イベント情報　シンポジウムなどの紹介ページ
http://iss.jaxa.jp/event/

「きぼう」を見よう
http://kibo.tksc.jaxa.jp/

宇宙航空研究開発機構
http://iss.jaxa.jp/