

### ■ 「ISS利用成果の年間ハイライト」について

- 本報告書は、米国航空宇宙局(NASA)を中心として、ロシアのロスコスモス(Roscosmos)、欧州宇宙機関(ESA)、カナダ宇宙機関(CSA)、イタリア宇宙機関(ASI)及び宇宙航空研究開発機構(JAXA)の協力に基づき作成された、国際的なISS利用成果の報告書(図1)である。
- 本報告書では、2019年10月1日から2020年10月1日までの間に出版された321のISS科学論文のリストを掲載するとともに、その中から特に注目すべき研究成果を紹介する。
- 今年の年次ハイライトでは、植物の苗の成長や宇宙での骨粗鬆症の早期発見に関する生命科学分野の研究成果から、ボーズアインシュタイン凝縮の理解、静電浮遊法を利用した新たな物性の解明まで、幅広い分野の成果を報告する。

### ■ ISS科学研究の影響力

- 表1にアイゲンファクター(学術誌の影響力をはかる指標)が高い世界のトップ100誌に掲載されたISSでの研究成果に係る出版物数を示す。
- 2019年10月1日から2020年10月1日までの期間で、アイゲンファクターが高い上位100誌で、56報のISS関連の論文が出版された。そのうち10報の論文は、アイゲンファクターが高い上位10誌に掲載されている。



図1: ISS利用成果の年間ハイライト表紙

	Clarivate Analytics® Rank by Eigenfactor	Source (# of ISS publications)
ISS Publications in Top 100 Sources	1	PLOS ONE (3)
	3	Scientific Reports (4)
	4	Nature (1)
	5	Science (1)
	6	Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (1)
	11	Physical Review Letters (3)
	22	The Astrophysical Journal (19)
	28	Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (10)
	37	Circulation (1)
	46	Astronomy and Astrophysics (2)
	49	Science Advances (2)
	58	Frontiers in Microbiology (3)
	67	Journal of Alloys and Compounds (1)
	95	Frontiers in Plant Science (5)

表1: アイゲンファクターが高い世界のトップ100誌に掲載された、2019から2020年のISS関連の出版物

※概要版は「国際宇宙ステーション利用成果の年間ハイライト」を元に、JAXAが独自に利用成果を纏めたものである。



### ガラスにならない超高温酸化物液体が持つ特異構造を解明

- ガラスは古くから作られ続けている機能材料の一つであり、科学技術の進歩とともにその性能は大きく向上してきた。しかし、どのような物質であってもガラスになる訳ではなく、ガラスになる液体とガラスにならない液体が存在する。
- ガラスになる液体とガラスにならない液体の原子配列の違いを原子・電子レベルで明らかにできれば、ガラス化の条件が明確になり、新しいガラス材料の開発や生成方法の発見につながる。しかし、原子・電子レベルでの解明は難しく、21世紀に入った現在でも、ガラス科学における大きな謎であった。
- 研究チームは、ガラス化の条件を解明するために、ガラスにならない物質として知られる酸化エルビウム液体(超高温酸化物)に焦点を当て本試料の原子配列と電子状態を測定及び解析した。
- 構造解析を行うためには液体の密度を取得する必要があるが、酸化エルビウム液体の融点は超高温(2413°C)であるため従来の容器を用いた計測手法では、容器との反応や凝固が生じ、液体状態を維持することが困難であった。そこで、研究チームは「きぼう」に搭載された静電浮遊炉を用いて、2650°Cという超高温での密度の計測に成功した(図3)。
- 研究の結果、酸化エルビウムには結晶に似た高い周期性を持つ構造が存在することが明らかになった。これは、液体は長距離まで続く周期性を持たないという従来の定説を覆す発見である。
- 本研究結果は、ガラス化の条件を解明する上で非常に有益な情報となる。また、今後類似の研究を継続することでガラス化の条件が明らかになれば、理論に基づいたガラスの作製が可能になり、スマートフォン等の小型情報通信端末での利用が望まれている超高屈折率ガラスや超高温耐熱セラミックスのような革新的材料の開発が加速することが期待される。



図3：静電浮遊炉と微小重力環境で浮遊中の試料

地上では液体を保持するために容器が必要であるが、微小重力環境では容易に試料を浮遊させられるため容器を用いる必要が無い。  
試料を浮遊したまま溶解できるため、高純度を保ちながら物性を計測できる。

### 長期宇宙滞在飛行士の姿勢制御における帰還後再適応の解明

- 宇宙滞在中は骨格筋が委縮して弱くなり、多くの宇宙飛行士は地球帰還後に起立性低血圧になる。そこで、本研究では宇宙飛行士の足の血流と重心、骨格筋の活動電位を測定し、起立能力が地球帰還後にどのように回復するのかを調査した。
- 測定結果の結果、3~6か月の長期宇宙滞在によって足の血流が低下することが明らかになった。また、帰還から1か月後には運動を行ったことにより長期滞在前の血流値まで回復した。本研究により、地球帰還後には1か月程度のリハビリが必要であることが分かった。
- 長期宇宙滞在から地球帰還後の地上再適応の過程の解明により、計画的なリハビリテーションプログラムの構築に繋がることが期待される。

### 微小重力環境下でのアミロイド線維形成と性状評価 —神経変性疾患の発症機構解明に向けて—

- アミロイド $\beta$ と呼ばれるタンパク質が集まってできたアミロイド線維が脳内に蓄積されると、神経細胞の変性・消滅が生じ、脳が委縮してアルツハイマー病が発症することが知られている。
- 研究チームは、アミロイドの線維形成メカニズムを調査するために、微小重力下でアミロイド線維の形成実験を実施した。
- その結果、微小重力環境で培養したアミロイド $\beta$ 線維は、地上で培養したものとは異なる独特な形の線維が形成されることが分かった(図4)。これは世界発の発見である。微小中重力環境では、対流や沈殿の影響を受けないため地上とは異なる構造になったと考えられる。
- 今回明らかになった独特な形態のアミロイド線維について、その詳細な構造を明らかにしていくことで、アミロイド $\beta$ 線維の形成を抑制できる医薬品開発、さらにアルツハイマー病をはじめとする神経変性疾患の予防・治療の進展に役立つことが期待される。

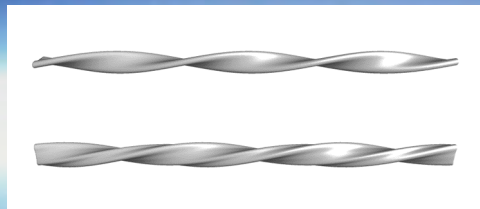


図4:ISSにおいて形成したアミロイド線維の構造。1つは地上で形成したアミロイド線維に似ており(上)、もう1つは地上ではみとめられなかった特徴的な構造(下)  
(©JAXA/NINS)

## ■ JAXAの研究成果ハイライト

### 「きぼう」船外実験装置による相対論的電子降下現象発生時の放射線量計測に成功

- ISSが夜間に高磁気緯度地域を通過する際に、数分間にわたって電子が降り注ぐ「電子の集中豪雨」とも呼ぶべき現象（Relativistic Electron Precipitation: 相対論的電子降下現象/REP現象）に遭遇することがある。REP現象の発生中は、放射線電子の数が、その地域における平常時と比べて数百倍から数千倍にも増加するため、船外活動中における宇宙飛行士の特に眼（水晶体）への被ばくによる影響が懸念される。
- 「きぼう」の船外実験装置である、宇宙環境計測ミッション装置（SEDA-AP）、高エネルギー電子・ガンマ線観測装置（CALorimetric Electron Telescope: CALET）、全天X線監視装置（MAXI）の3つの装置が連携して、相対論的電子降下現象（Relativistic Electron Precipitation)発生時の放射線量計測を実施した。
- その結果、ISS船内における静穏環境での1日の被ばく線量は約1mSvであるが、最大級のREPイベント時には、それを数倍上回る被ばく線量に達する可能性があることがわかった。
- 本研究は、船外活動を行う宇宙飛行士の水晶体への被ばくを可能な限り低く抑えるために、大規模なREPイベントの発生をあらかじめ予測できる研究活動に繋がることが期待される。

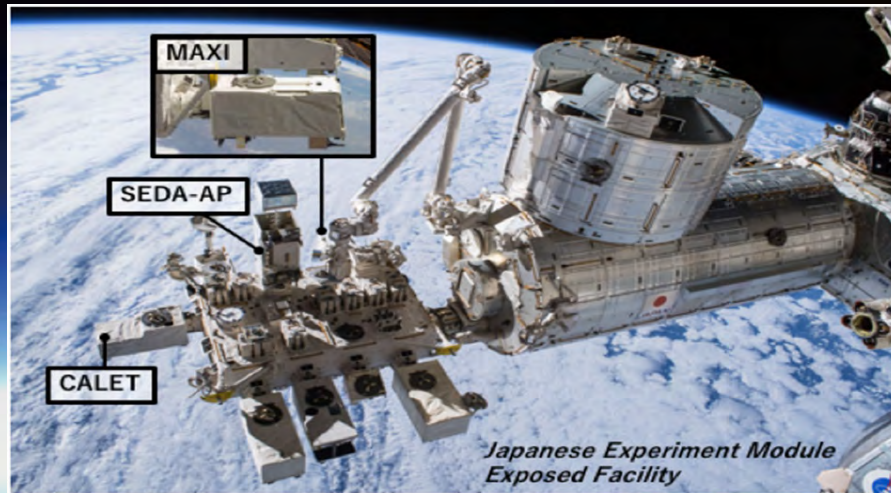


図5:「きぼう」船外の実験装置(MAXI、CALET、SEDA-AP)

## ■ 国際パートナーの研究成果ハイライト

### ボーズアインシュタイン凝縮バブルダイナミクス研究 (Bose-Einstein Condensate Bubble Dynamics)



- 1925年にアインシュタインがボーズアインシュタイン凝縮の存在を予言して以来、世界中で本現象を実証するための実験が行われてきた。1995年には、原子の気体でボーズアインシュタイン凝縮が起こることが実証され、本研究に対してノーベル物理学賞が与えられた。
- NASAはISSに搭載された実験設備(図6)で、世界で初めて微小重力環境下でのボーズ-アインシュタイン凝縮の生成に成功した。
- ボーズアインシュタイン凝縮とは、原子を超低温(絶対零度である $-273.15^{\circ}\text{C}$ よりもわずかに高い温度)まで冷却した時に、1つ1つの原子が完全に同期して1つの波(1つのガス)として振る舞う現象をいう。
- 微小重力下では弱い磁場であっても原子を操作できるため、原子の冷却を速め、ガスが拡散する前に現象を鮮明に画像におさめることが可能となる(地上の実験設備と比較して長い時間ボーズアインシュタイン凝縮の状態を持続できる)。本研究でも一定時間以上、巨視的なスケールでの量子の振る舞いを調査することができた。



図6：本実験が行われたNASAの実験装置、Cold Atom Lab  
NASA Image: ISS057E106407 - The Cold Atom Lab in the Destiny module aboard the International Space Station



図7：本研究論文が掲載されたnatureの表紙 (@nature)

## ■ 国際パートナーの研究成果ハイライト

### 探査に向けたジョイスティックによる遠隔制御のシステムの開発 (Development of a System of Supervisory Control over the Internet of the Robotic Manipulator in Russian Segment of ISS)



- ロスコスモスでは、将来の有人宇宙探査を見据え、ジョイスティックをインターネットを介してリモートで遠隔操作するための視覚制御システム（図8）における時間遅延を調査した。
- 将来の火星探査においては、火星に人を送り込んで人の手によって居住環境を整備するのではなく、宇宙からロボットを遠隔操作し居住環境を構築する方法がある。この方法の実現可能性を探るために、ISSを火星の軌道上に待機する宇宙船として、地球をロボットの作業場所(火星)とみなし、ジョイスティックからの力覚フィードバックが、微小重力においても地上と同様に有意義であるかを調査した。
- その結果、6週間後には宇宙飛行士の運動制御機能が低下し、ジョイスティックからの反力のフィードバックがかかりにくくなったことが分かった。本研究は、微小重力の環境条件に合わせてジョイスティックの設定を調整する必要があることを示唆している。



図8: コントロール実験中のロスコスモス宇宙飛行士 Oleg Novitsky。画像は、ズヴェズダサービスモジュール (issa050e075473) で撮影されたもの。

出典 :ANNUAL HIGHLIGHTS of RESULTS from the ISS

## ■ 国際パートナーの研究成果ハイライト

### 大気-宇宙相互作用モニタ (Atmosphere-Space Interactions Monitor ASIM)



- ・ ESAがISSの船外に搭載しているASIMは、雷雨や大気、気候を研究するために設計された地球観測設備であり、過渡発光現象(TLE)や地球ガンマ線フラッシュ(TGF)として知られる高高度放電を観測することができる。
- ・ 従来からTLEとTGFの生成過程には関連性があることが指摘されてきたが、その観測データは多くは無かった。ASIMは、インドネシアのスラウェシ島付近で発生した雷雲の観測に成功し、当該観測データからTLEとTGFが独立した現象なのか、関連性のある現象なのかを調査した。
- ・ 調査の結果、TLEとTGFはほぼ同時に開始することが観測でき、TLEとTGFは一定の関連性がある現象であることが分かった。本成果により電離層や放射線帯に関連する雷雨についての理解が向上した。



図9:コロンビアの船外に取り付けられたASIMの写真。©ESA/NASA



## ■ 国際パートナーの研究成果ハイライト

### 宇宙貧血の現象解明と計測手法の確立



- 宇宙飛行により「宇宙貧血」という状態に陥ることがある。微小重力環境での体液シフトにより上半身に血液が多く集まるようになると、体内のセンサーが体液の量が多いと感知し、体内の血液量を調整することで結果的に血液量が減少する。
- 研究チームは50年を超える宇宙飛行のデータを調査・分析し、体液シフトが発生した後に地球に帰還すると宇宙貧血が発生することを明らかにした。また、赤血球の喪失量が宇宙での滞在期間に比例すること、宇宙貧血からの回復には任期期間に応じて1~3か月かかることが分かった。
- また、研究チームは微小重力環境下で溶血マーカを測定するための手法を開発した。これは、溶血と血液中の一酸化炭素濃度に相関があることに着目し、一酸化炭素をマーカとして一酸化炭素濃度を10億分の1の精度で測定するものである。
- 本研究成果は、宇宙貧血の現象解明に役立ち、有人宇宙飛行の健康管理プログラムの向上に貢献することが期待される。