

2022 年度
「きぼう」利用テーマ・船内科学研究に係る
科学成果評価結果
報告書

宇宙航空研究開発機構
有人宇宙技術部門
きぼう利用センター

1. 概要

本資料は、2022年度(2022年7月から2023年3月)に実施した、「きぼう」船内を利用した科学研究テーマの科学成果評価の結果および評価への入力となった対象テーマの成果報告書等を取り纏めたものである。

2. 評価対象

評価対象となったテーマを表1に示す。

これらのテーマは、2015年度～2020年度の間に軌道上実験を実施した4件の科学研究テーマである。

3. 評価の目的、評価指標

「きぼう」で行われた研究成果の達成状況とその意義、分野学術や社会への貢献、波及効果に対する評価を通じて、各々の研究成果のアピールポイントを効果的に情報発信すること、また、きぼう利用に関する改善点、利用の方向性等へ提言を得て、今後の利用計画設定に資することを目的として評価が行われた。この目的に照らし、表2に示す各評価項目に基づき、書類審査、面接審査(成果報告会)が実施され、評価結果は、最終的に、以下の4段階の総合評価指標および提言として取り纏められた。

S: 目標を高度に達成し、特筆すべき成果を上げた(エクストラサクセス相当)。

A: 目標を十分に達成した(フルサクセス相当)。

B: 目標を一部達成した(ミニマムサクセス相当)。

C: 成果として不足・不十分であり、目標を達成していない。

※2017年度までの基準(以下)と異なる。

S: 目標を高度に達成し、特筆すべき成果を上げた。

A: 目標を十分に達成した(エクストラサクセス相当以上)。

B: 目標を達成した(フルサクセス相当)。

C: 目標達成に不足・不十分な点があり、引き続き解析・検討を要す。

4. 評価体制

評価は、生命医科学分野あるいは物質・物理科学分野のきぼう利用テーマ選考評価委員会(以下、「選考評価委員会」)により実施された。また、分野専門家3名のピアレビューアをテーマ毎に設定し、書類審査を併せて行い、選考評価委員会は、これを参考として審査を行った。

ここで、選考評価委員会は、きぼう利用において、応募されたテーマ等の選考、設定された利用テーマ等の評価を行うために設置された JAXA 有人宇宙技術部門長の諮問委員会であり、物質・物理科学分野及び生命医科学分野の2分野が設定されている。今回、評価に当たった選考評価委員会の構成員リストを表3に示す。

5. 評価プロセス

研究成果報告の提出から成果評価の公表までの評価プロセスを図4に示す。

6. 科学成果評価に係る文書

本資料に含めるテーマ毎の研究成果報告書、科学成果評価結果等を、表5に示す。

表1 評価対象テーマ（所属は報告書提出当時）

テーマ名	研究代表者 (評価時)	実験時期(※)	成果評価 (委員会)	分野
重力刺激による脊髄背側血管への血管ゲート形成と分子発現の解析 (Gravity Gateway Reflex)	北海道大学 教授 村上正晃	2019 年 5 月 ～6 月	2022 年 7 月 6 日	生命医科学
微小重力を用いた多成分会合コロイド系の相挙動の研究(Colloidal Clusters)	名古屋市立大学 教授 山中淳平	2020 年 7 月	2023 年 3 月 17 日	物質物理科学

※ 医学実験の地上でのベースデータコレクションは含む。その他実験の地上対照実験は含まない。人対象研究については年単位の記載としている。

(注) 2022 年度に成果評価を実施した、宇宙医学分野の2テーマについては、公開時期は別途調整中。

表2 評価項目

科学的・技術的成果	(1) 研究目標の意義および達成度 <ul style="list-style-type: none"> 研究目標の意義は高いか(ミッション選定/準備段階移行以降に修正された場合)。また、時間経過により減じていないか。 研究目標は達成されたか。サクセスクライテリアに照らした達成度のレベル。
	(2) 実施体制 <ul style="list-style-type: none"> 研究チームおよび JAXA の体制は適切であったか。
	(3) 科学的、技術的成果 <ul style="list-style-type: none"> 得られた成果は、国際的なレベルに照らして、高いか。 設定された目標を越える成果があったか。
	(4) 活用、波及効果 <ul style="list-style-type: none"> 関連科学分野・技術領域への波及効果があったか、また、期待されるか。 科学的、技術的に活用が見込めるか、成果活用の意義・重要性は高いか。
	(5) きぼう利用の必然性 <ul style="list-style-type: none"> きぼうで行う必然性があったか。
総合評価・提言	(6) 総合評価 <ul style="list-style-type: none"> 成果インパクト、応用・波及効果などのポテンシャル、他、アピールポイント。 今後の宇宙実験に向けての課題、改善すべき点。 当該科学分野・領域におけるきぼう利用の発展性、継続の意義。

表3 きぼう利用テーマ選考評価委員会 構成員
(評価時)

物質・物理科学分野

委員長	長井 寿 物質・材料研究機構 名誉研究員
委員	石川 正道 同志社大学高等研究教育院 客員教授
	江刺 正喜 株式会社メムス・コア CTO
	柴田 浩幸 東北大学 多元物質科学研究所 教授
	西岡 牧人 筑波大学システム情報系 教授

生命医科学分野

委員長	山口 朗 東京歯科大学口腔科学研究センター 客員教授
委員	牛田 多加志 東京大学大学院工学系研究科 名誉教授
	緒方 徹 東京大学大学院医学研究科 外科学専攻 感覚・運動機能医学講座 リハビリテーション医学分野 教授
	武田 伸一 国立精神・神経医療研究センター 神経研究所 産学連携顧問／ 名誉所長
	田村 宏治 東北大学大学院生命科学研究科 教授
	中村 幸夫 理化学研究所バイオリソース研究センター 細胞材料開発室 室 長
	本間 研一 北海道大学 医学部 名誉教授
	諸橋 憲一郎 九州大学大学院医学研究院 主幹教授

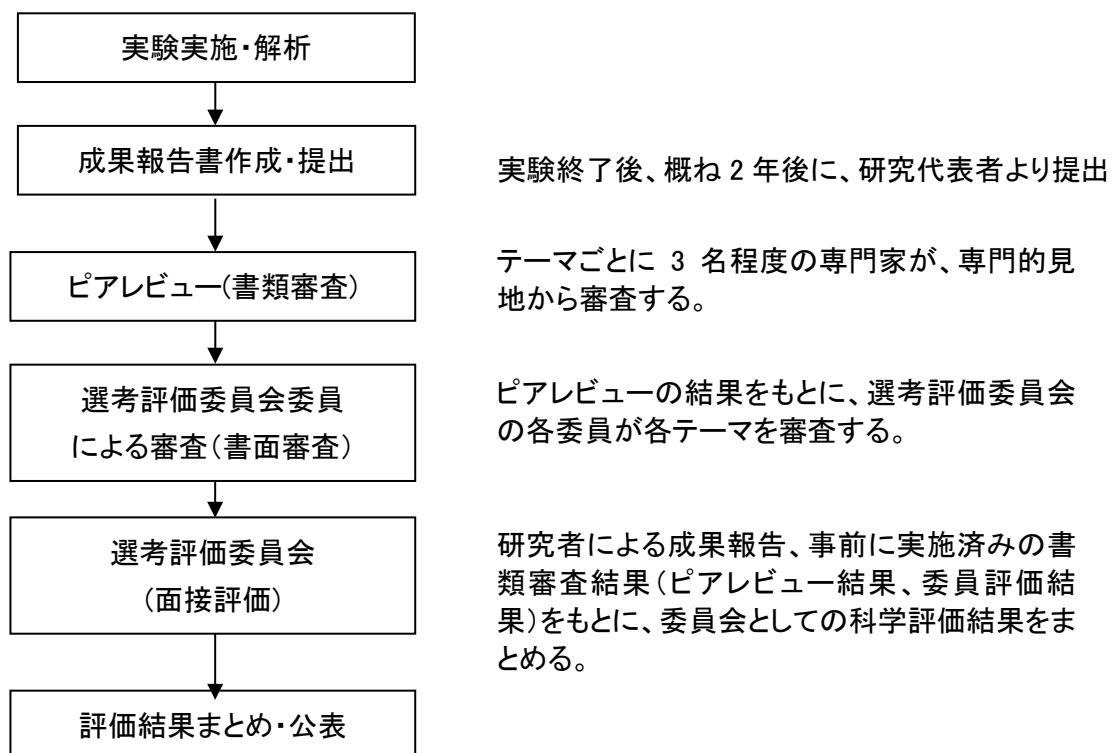


図4 科学成果評価プロセス

表5 添付文書の構成

テーマ名	研究成果 報告書	評価結果	研究成果 概要書(日)	研究成果 概要書(英)
重力刺激による脊髄背側血管への 血管ゲート形成と分子発現の解析 (Gravity Gateway Reflex)	(※)	別紙 1-2	別紙 1-3	別紙 1-4
微小重力を用いた多成分会合コロイ ド系の相挙動の研究(Colloidal Clusters)	(※)	別紙 4-2	別紙 4-3	別紙 4-4

(※) 論文公表後に公開

(注) 2022 年度に成果評価を実施した、宇宙医学分野の2テーマについては、公開時期は別途調
整中。

以上

2022年度 ISS・きぼう利用ミッション科学成果評価結果

重力刺激による脊髄背側血管への血管ゲート形成と分子発現の解析 (Gravity gateway reflex)

代表研究者: 村上正晃(北海道大学)

総合評価

A: 目標を十分に達成した(フルサクセス相当)

本研究の目的は、重力刺激による脊髄背側血管への血管ゲート形成と分子発現を解析することである。ISSにおける微小重力下でのマウスの長期飼育という、他に得られない環境を活用し、また、JAXAとの連携の下、周到に準備された実験計画により、重力刺激の喪失で血管ゲート形成が観られないことを実証し、世界をリードする成果を得たと評価する。骨、筋肉における変化の分子メカニズムの解明、さらに、多発性硬化症等の免疫システムが関与している疾患の治療法や予防法の開発を含め、今後の研究の深化、進展に期待する。

一方、本研究により得られた主要な成果が未公表であり、分野コミュニティの評価を得るためにも、早期に論文として纏め、公表を行うことを強く推奨する。

2022年7月

きぼう利用テーマ選考評価委員会(生命医科学分野)

ISS・きぼう利用ミッション

「重力刺激による脊髄背側血管への血管ゲート形成と分子発現の解析

(Gravity gateway reflex)」

研究成果概要書

代表研究者:村上 正晃(北海道大学)

2022 年 4 月

1. 諸言

我々はマウスモデルを用いて、重力刺激を介するヒラメ筋からの感覚神経刺激が近傍の交感神経を活性化し、第 5 腰髄(L5)の背側血管付近でノルアドレナリンを分泌して血管内皮細胞から免疫細胞の遊走因子ケモカインを発現させることによって、血液脳関門に免疫細胞の侵入口(血管ゲート)を形成し、自己免疫疾患を誘導することを証明してこの現象を「重力ゲートウェイ反射」と命名した(Arima et al, Cell 2012)。その後、痛み、人為的な電気刺激、ストレス、光、微小炎症の5つのゲートウェイ反射を見出し、論文発表してきた(Arima et al, eLife 2015、Arima et al, eLife 2017, Stofkova et al, Sci Rep 2019、Hasebe et al, JEM 2022 など)。これらの知見は、神経刺激の導入部位、種類に応じて血管ゲートの形成される位置が規定され、自己反応性 CD4+ T 細胞が一定数以上存在すれば病態が引き起こされることを示している。さらに、血管ゲートを開放するための機構として IL-6 アンプ(血管内皮細胞など非免疫細胞での NFkB と STAT3 同時活性化にて誘導される過剰な NFkB 活性化)を同定した(Ogura et al, Immunity 2008, Murakami et al, Immunity 2019, Murakami et al, JEM 2011 等)。本研究では、中枢神経系抗原と網膜抗原を認識する2種類の自己反応性 CD4+ T 細胞を静脈内に投与したマウスを微小重力状態の宇宙にて飼育した場合に L5 や網膜の血管ゲートの形成がどうなるのか、他の部位に移動するのかを調べることを目的とした。

2. 実験結果および成果**(1) 自己反応性 CD4+ T細胞ラインの作製**

今回の宇宙実験では、ロケットの突然の打上遅延などに対しても、より柔軟に対応できるようにするために、自己反応性 CD4+ T細胞ラインを事前に作製、大量に凍結ストックし、それをケネディ宇宙センターに輸送して用いる計画とし、フィージビリティスタディ期間中に自己反応性 CD4+ T細胞ラインを確立した。ミエリンペプチド(MOG)またはフォト受容体ペプチド(IRBP)を認識する CD4+ T細胞ラインの確立に成功し論文発表した(Tanaka et al. 2017)。

(2) MHU-4 ミッション概要

ミエリンペプチドとフォト受容体ペプチドに対する自己反応性 CD4+ T細胞ラインを移入したマウスをケネディ宇宙センターにて調製した。馴化飼育を終えた C57BL/6J マウス 12 匹に 2 種類の自己反応性 CD4+ T細胞を打上 3 日前に移入し、最終的に 6 匹のマウスをフライト群として選

抜き、打上げ/回収支援装置(TCU)に搭載した。2019年5月4日に、これらのC57BL6マウス6匹は、ケネディ宇宙センターから打ち上げられ、国際宇宙ステーションにて飼育を開始し、約31日間飼育(国際宇宙ステーションの飼育ケージ(HCU)内での飼育期間は約27日間)された。軌道上飼育終了後、マウスは帰還用のTCUに搭載され、6月3日に地球に全頭無事に帰還した。地上帰還後に体重を測定すると1匹が2割ほど減少していた。このため当該マウスは免疫系の解析からは除外し、残りの5匹にて実施した。地上対照実験は、TCU/HCU飼育装置の地上モデルを利用して、飼育環境など宇宙実験の実験条件を模擬し、宇宙実験と同様にミエリンペプチドとフォト受容体ペプチドをそれぞれ認識する2種類の自己反応性CD4⁺T細胞を移入したC57BL6マウス6匹を用いて、2019年10月20日打上模擬、11月19日帰還模擬として筑波宇宙センターにて実施した。

(3)MHU-4 ミッションの結果と成果

微小重力環境で飼育されたマウスと地上対照マウスを用いて、様々な実験を実施し、ISS・きぼう利用ミッション「重力刺激による脊髄背側血管への血管ゲート形成と分子発現の解析(Gravity gateway reflex)」により、以下の6項目の成果が得られた。

- a. 宇宙実験のために中枢神経系抗原であるミエリンオリゴデンドロサイト糖タンパクと網膜神経細胞のフォト受容体タンパクに対する2つの自己反応性CD4⁺T細胞ラインの作製を行って論文発表した(Tanaka et al, Bio Protoc. 2017)。
- b. MHU-4 ミッションで自己反応性CD4⁺T細胞を移入した3匹のマウスを国際宇宙ステーションに送って、1ヶ月ほど滞在させ、当該マウスを生存回収した。
- c. 重力ゲートウェイ反射の解析では、微小重力状態では地上で認められるL5ゲートが消失しており、「重力によって、免疫恒常性が制御される」という重力ゲートウェイ反射仮説が実証でき、中枢神経系に対する重力の新たな影響を証明した。
- d. 光ゲートウェイ反射の発見の論文は、本研究開発の地上対照実験から発表され(Stofkova et al, Sci Rep 2019)、微小重力環境で飼育したマウスの解析では、微小重力状態では地上で認められる光ゲートウェイ反射で示した網膜ゲートが増強し、「重力によって、免疫恒常性が制御される」という仮説が中枢神経系以外でも実証でき、重力の新たな影響を証明した。
- e. 下肢筋肉、骨解析では、微小重力状態の自己反応性T細胞存在でヒラメ筋の重量、筋肉種の変容、下肢骨の骨量、骨ミネラル量の減少が抑制され、「重力によって、免疫恒常性が制御される」との仮説が中枢神経系以外でも実証でき、重力の新たな影響を証明した。
- f. 関連英語学術論文は、フェイズビリティの段階での2報を含めて13報発表されている。宇宙実験自体の成果である3報の論文は準備中である。

Summary report of the ISS-Kibo utilization mission:

“Characterization of blood vessel gateway formation and molecule expression at dorsal vessels of spinal cords by gravity stimulation”

(Gravity gateway reflex)

Principal Investigator, Masaaki Murakami (Hokkaido University)

April 2022

1. Introduction

Using mouse models, we have demonstrated that gravity-mediated sensory nerve stimulation from the soleus muscle induces sensory-sympathetic crosstalk. This crosstalk leads to the secretion of noradrenaline around the dorsal vessels of the fifth lumbar spinal cord (L5) and induces the expression of immune-cell chemotactic factors, such as chemokines, from vascular endothelial cells, leading to a gateway for autoreactive CD4+ T cells at the blood-brain barrier (Arima et al, Cell 2012). This phenomenon was named the "gravity gateway reflex" and shown to induce tissue-specific autoimmune diseases. Since then, we have found and published five other gateway reflexes: pain, artificial electrical stimulation, stress, light, and microinflammation (Arima et al, eLife 2015, Stofkova et al, Sci Rep 2019 etc.). These studies showed that the location of the gate is defined by the site and type of nerve stimulation and that the presence of autoreactive CD4 T cells in the blood is sufficient to trigger the pathology. Furthermore, we identified the IL-6 amplifier (IL-6 amp) as a mechanism for opening the gate. The IL-6 amp describes enhanced NFκB activation after the simultaneous activation of NFκB and STAT3 in nonimmune cells (Ogura et al, Immunity 2008, Murakami et al, Immunity 2019, Murakami et al, Cell Reports 2013). In this study, we aimed to determine the effects of gate formation in the L5 and retina when mice were kept in a microgravity condition in the presence of autoreactive CD4T cells that recognize central nervous system (CNS) and retinal antigens and administered intravenously.

2. Experimental Results and Outcomes

(1) Preparation of self-reactive CD4+ T cell lines

In this space experiment, in order to respond more flexibly to sudden launch delays of the rockets, etc., the autoreactive CD4+ T cell lines will be prepared in advance, frozen in large quantities, and transported to the Kennedy Space Center for use. The establishment of autoreactive CD4+ T cell lines was examined during the feasibility study. CD4+ T cells were isolated from mice immunized with myelin peptide (MOG) or photoreceptor peptide (IRBP), and T cell lines were established by periodic antigen stimulation in vitro. By devising antigen stimulation methods and culture media, we succeeded in establishing CD4+ T cell lines against these self-antigens and published a paper in 2017.

(2) MHU-4 Mission Summary

To investigate the effects of microgravity on the gateway reflex, mice transferred with autoreactive CD4+ T cell lines against a myelin peptide and a photo-receptor peptide were

prepared and cultured at the Kennedy Space Center. Twelve C57BL/6J mice that had completed acclimation and rearing were transferred with 1×10^7 cells of each of the two types of autoreactive CD4+ T cells 3 days prior to launch. Six mice were then selected as the final flight group and loaded into the launch/retrieval support unit (TCU) on May 4, 2019, and started rearing on the International Space Station, where they were kept for approximately 31 days.

The ground control experiment was conducted using the ground model of the TCU/HCU breeding apparatus to simulate the experimental conditions of the space experiment, such as the breeding environment, etc. Six C57BL6 mice were used for the launch simulation on October 20, 2019, and then returned on November 19, 2019, to the Tsukuba Space Center. After completion of the on-orbit breeding, the mice were loaded into the TCU for return, and all mice returned safely to earth on June 3, 2019. After returning to earth, the weight of one mouse was found to have decreased by about 20%. Therefore, this mouse was excluded from the immune system analysis, and the remaining five mice were used.

(3) Results and achievements of the MHU-4 mission

Various experiments were conducted on earth using mice bred in a microgravity environment and ground control mice. The ISS/Kibo utilization mission produced the following six results.

- a. Two autoreactive CD4+ T cell lines against MOG, a CNS antigen, and IRBP in retinal neurons were generated for space experiments and published in a paper in 2017 (Tanaka et al, Bio Protoc. 2017).
- b. Three mice transferred with autoreactive CD4+ T cells on the MHU-4 mission were sent to the International Space Station, where they stayed for about one month and were recovered alive.
- c. Analysis of the gravity gateway reflex showed that the L5 gate, which is observed on the ground, disappeared under microgravity conditions, demonstrating the gravity gateway reflex hypothesis that "immune homeostasis in the CNS is controlled by gravity" and proving a new effect of gravity on the CNS.
- d. The paper that first reported the light gateway reflex used ground-based control experiments in 2019 (Stofkova et al, Sci Rep 2019), but the analysis of mice bred in microgravity showed that the retinal gate for the light gateway reflex is enhanced in microgravity conditions. Thus, the hypothesis that "gravity regulates immune homeostasis in the retina" was proven to be true outside the CNS, proving a new effect of gravity.
- e. An analysis of changes in lower limb muscles and bone showed that the presence of autoreactive CD4+ T cells in microgravity suppressed changes in soleus muscle weight, muscle type alteration, bone mass and bone mineral content, demonstrating that the hypothesis "gravity regulates immune homeostasis in muscles" is also true outside of the CNS and proving a new effect of gravity.
- f. Thirteen scientific papers in English have been published from this mission, with three more in preparation about the results of the space experiments.

2022年度 ISS・きぼう利用ミッション科学成果評価結果

微小重力を用いた多成分会合コロイド系の相挙動の研究 (Colloidal Clusters)

代表研究者; 山中淳平(名古屋市立大学)

総合評価

A: 目標を十分に達成した(フルサクセス相当)

高屈折率のチタニアクラスターを実現できる可能性を提示し、完全フォトニックバンドギャップ材料として、チタニア粒子の有効性を提示したことは世界初であり、微小重力実験ならではの研究成果である。この実験で作られた単一クラスターで光学特性が得られたことで、基礎科学および工学応用両面で重要な成果を得た。

試料の準備や実験条件等のさらなる検討を進め、本研究で得られた知見・実験技術を発展させ、まだ実現されていないチタニア粒子の高次集積体の作製を目指して、研究を継続することを期待する。

2023年3月

きぼう利用テーマ選考評価委員会(物質・物理科学分野)

きぼう利用テーマ

「微小重力を用いた多成分会合コロイド系の相挙動の研究(Colloidal Clusters)」

概要書

研究代表者; 山中淳平(名古屋市立大学) 2023年1月

近年、屈折率が周期的に変化する人工物質である「フォトニック結晶」の研究が盛んである。あらゆる方向からの光に対して光伝搬が禁止されるとき、物質は「完全フォトニックバンドギャップ」(完全PBG)を持つと表現される。すでに、誘電体のダイヤモンド格子構造で、完全PBGが生じることが理論的に示されている。

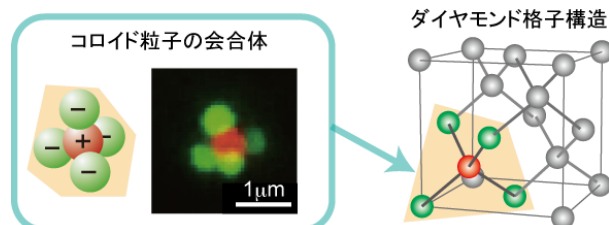


図1 コロイド粒子の四面体クラスターとダイヤモンド格子構造。

フォトニック結晶の構築に向けて、コロイド粒子の自己集合を用いた手法が盛んに検討されている。図1に示すように、反対荷電の2成分コロイドを用いて正四面体型のクラスターを作成し、これを最小要素として積み上げれば、ダイヤモンド構造が得られる。我々はこれまでに、このようなコロイドクラスターの構築を検討してきた。しかし、電荷数と会合数の関係といった、生成条件に関する基本的な情報が、未だ明らかではない。また、完全PBGを得るためには、ダイヤモンド格子を構成する粒子が、媒体のおよそ2倍以上の屈折率 n_r を持つ必要がある。例えばチタニア(TiO_2)の屈折率は2.72で、水との屈折率比は2.04となるため、この条件を満たす。しかしチタニアの比重は3~4と大きく、地上で静置した場合、数mm/hr以上の速さで沈降し、容器底に沈殿・凝集するためデータ取得が著しく困難である。

本研究では、微小重力環境において沈降を抑制し、正負に荷電したコロイド微粒子を混合した後ゲル化させて固定し、地上に帰還させて分析した。正と負に帯電させたチタニア粒子を用いて会合体(クラスター)を微小重力環境下で形成し、以下を達成することを目的とした。

- (1)クラスターの構造と会合数分布を調べることで、平衡状態図(相図)を得る。
- (2)さらにクラスターの大きさが小さいため測定が困難であるが、チタニア四面体クラスターの光学特性の測定を試みる。(1)をフルサクセス、(2)をエクストラサクセスと設定した。加えて、地上では沈殿・凝集により得られないチタニア四面体クラスターを得ることをミニマムサクセスとした。エクストラサクセスでは、チタニア四面体クラスターの光学特性を評価することにより、将来の光デバイス開発の基礎となるデータのまとめを行い、グラフ化することを目指した。

宇宙実験は2020年7月に、国際宇宙ステーション(ISS)の日本実験棟「きぼう」で行なわれた。直径約 $1\mu\text{m}$ の正荷電粒子と負荷電粒子をISSの微小重力環境下で混合し、クラスターを形成させた。コロイド粒子として、水とほぼ同じ比重(=1.05)のポリスチレン(PS)粒子と、高屈折率・高比重(=約3)のチタニア粒子を用いた。PS粒子系は、宇宙実験が正しく実施されたことを確認するための標準サンプルと想定した。

試料は2021年に地上に帰還し、3月より解析を開始した。全ての宇宙試料が、予定通りゲルで固定化されたことを確認した。図2(a)は、帰還後に試料バッグから取り出したチタニ

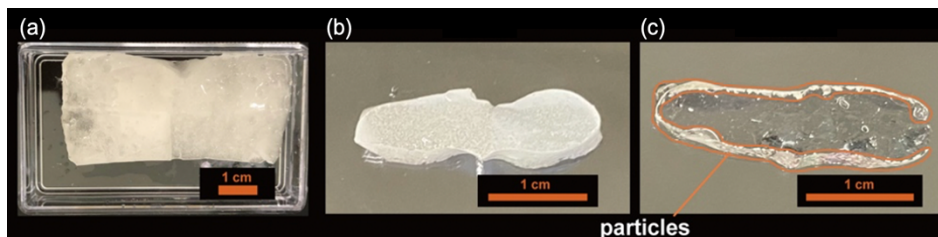


図2 (a) 試料バッグから取り出したゲル固定化チタニアコロイド試料。(b) 宇宙および(c)地上対照試料の断面。

ア試料(TiO₂ # 23)の外観である。試料を外科手術用メスで切断し、その断面を観察した。図2(b),(c)は、宇宙実験試料と、地上対照試料(クリノスタットによる擬似微小重力下でゲル化)の断面の比較である。地上試料では試料の中心部は透明であるが、宇宙試料には上澄みは観察されず、微小重力の効果が確認された。

PS 粒子の比重は媒体(ゲル化剤水溶液)と同程度である。このため、宇宙実験前には、PS 粒子系の結果は地上対照実験の結果と大差ないと予想していた。しかし、宇宙試料の方が地上対照より平均会合数が 50%程度大きく、また、4 面体型クラスターの構造対称性が優れていることが示された。図3(a)には PS 粒子の会合体の顕微鏡写真を示す。また図3(b) には、平均会合数 $\langle m \rangle$ の塩濃度依存性を示す。モンテカルロシミュレーションによる計算結果も併せて示した。

図4には、チタニア粒子系の結果を示す。(a)は会合数 $m = 1$ から $m = 4$ までのクラスターの顕微鏡画像で、それぞれ左は赤色蛍光のみを検出した画像、右は白色光源を用いた画像である。画像中、負荷電粒子に“n”を付している。また、(b)および(c)には、 m の分布に対する $[\text{NaCl}]$ および電荷数 Z の影響を示す。このように、地上では得られないチタニア系の会合の関する知見が得られ、本宇宙実験のミニマムサクセスおよびフルサクセスが達成できた。

また、宇宙実験で得たチタニア粒子四面体の光学特性を調査した。単一粒子に比べて特に 450~500 nm 近辺でのクラスターによる光増強効果が見られた。これは現段階では光閉じ込めというよりは球レンズによる集光、反射の寄与が大きいと考えているが、実験前には想定していなかった結果である。今後この効果を活用すれば、非常に小型の光増幅器の開発につながる可能性がある。また、可視域で反射スペクトルを測定し、ダイヤモンド格子のフォトニックバンドを計算すると、3.2 μm に完全フォトニックバンドを持つ物質が得られると計算された。

このように、チタニアクラスターの光学特性を評価し、将来活用できる可能性のある結果を得たことから、エクストラサクセスを達成できたと考える。本実験で得られた成果を、今後の地上での材料開発に活用する予定である。

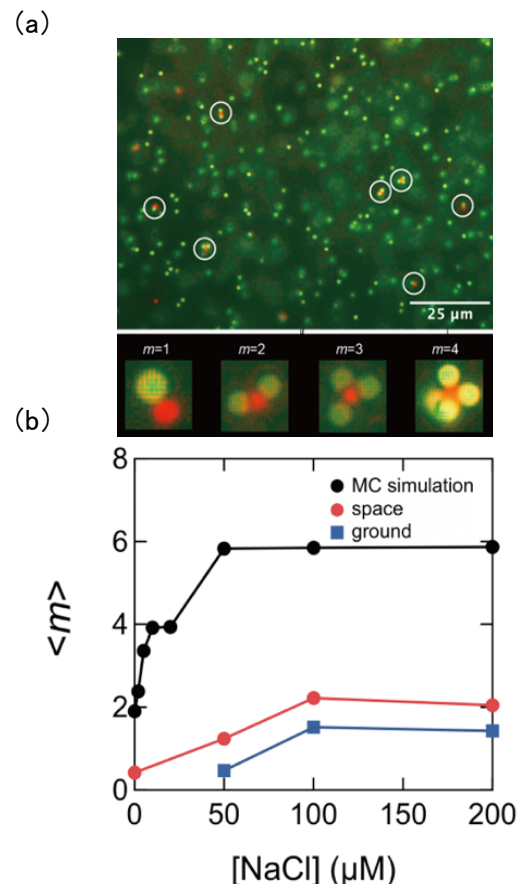


図3 (a)宇宙実験で得た PS 粒子の会合体の写真と (b)平均会合数 $\langle m \rangle$ の塩濃度依存性。

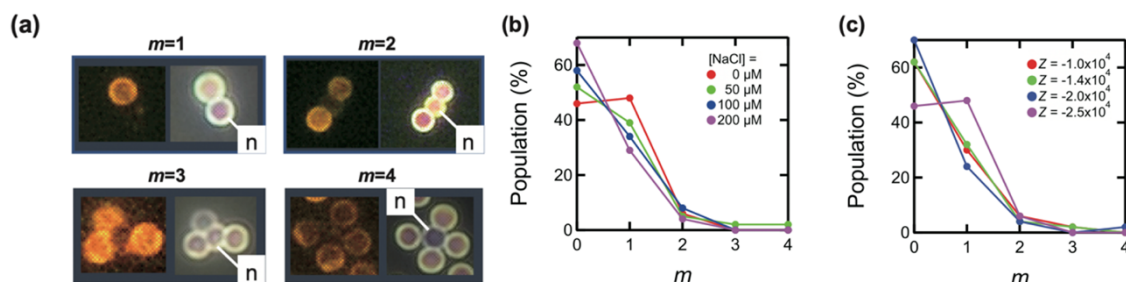


図4 (a)会合数 $m = 1 \sim 4$ のチタニア粒子クラスターの光学顕微鏡像。左は赤色蛍光画像、右は白色光源を用いた画像。(b)、(c) m の分布に対する $[\text{NaCl}]$ および粒子電荷数 Z の影響。

Summary report of the ISS-Kibo utilization mission
“Studies on phase behavior of multicomponent colloidal clusters under microgravity (Colloidal Clusters)”

Principal Investigator; Junpei Yamanaka (Nagoya City University)

Jan., 2023

In recent years, much attention has been attracted to "photonic crystals," artificial materials whose refractive index changes periodically. When light propagation is prohibited for light from all directions, the material has a "perfect photonic band gap" (perfect PBG). A perfect PBG occurs when a dielectric material forms a diamond-lattice-type periodic structure.

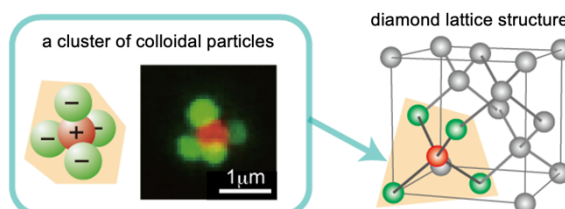


Fig. 1 Tetrahedral clusters and diamond lattice structure of colloidal particles.

The construction of photonic crystals using the self-assembly of colloidal particles has been actively investigated. As shown in **Fig. 1**, diamond structures can be obtained by creating tetrahedral-type clusters with oppositely charged two-component colloids and stacking them as the structural unit. We have previously investigated the formation of the colloidal clusters. However, basic information on the clustering conditions, including the relationship between the charge number and the association numbers, is not yet clear. In addition, to obtain perfect PBGs, the particle particles constituting the diamond lattice must have a refractive index n_r approximately twice that of the medium. For example, the refractive index of titania (TiO_2) is 2.72, which gives a refractive index ratio of 2.04 to water and satisfies the criteria. However, the specific gravity of titania is approximately 3~4, and when left on the ground, titania sediments at a rate of several mm/hr or faster, settling and agglomerating at the bottom of the container, making data acquisition extremely difficult.

In this study, positively and negatively charged colloidal particles were mixed to form clusters in a microgravity environment where particle precipitation is negligible. We fixed the sample in polymer gel and returned to the ground for analysis. The aims of the study is as follows: (1) To obtain an equilibrium state diagram (phase diagram) by examining the structure of the clusters and the distribution of the association number of titania particles. (2) To measure the optical properties of titania tetrahedral clusters, although it is difficult to do so due to the small size of the clusters. We set (1) as Full Success and (2) as Extra Success. In addition, we set Minimum Success to obtain titania tetrahedral clusters, which cannot be obtained on the ground due to precipitation. In the Extra Success, the optical properties of the titania tetrahedral clusters will be evaluated, and the data will be compiled and graphed as a basis for the development of future optical devices.

The space experiment was conducted in July 2020 on the Japanese Experiment Module "Kibo" of the International Space Station (ISS). Positively and negatively charged particles with a diameter of approximately 1 μm were mixed in the microgravity environment of the ISS to form clusters. The polystyrene (PS) particles were also used, assuming as a standard sample to confirm that the space experiment was performed correctly.

Samples were returned to the ground in 2021 and analysis began in March. All space samples were confirmed to have been immobilized in the gel as planned. **Fig. 2(a)** shows the appearance of a titania sample (TiO_2 # 23) removed from the sample bag after

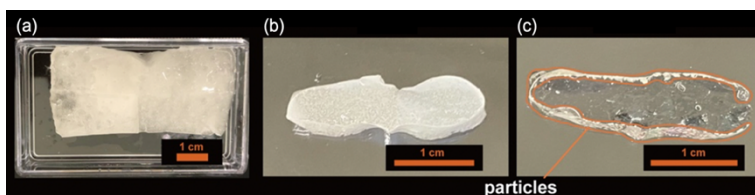


Fig. 2 (a) An overview of the gel-immobilized titania colloid sample. Cross sections of (b) space sample and (c) ground sample.

the return. The samples were cut with a surgical scalpel, and their cross-sections were observed. **Fig.2(b)** and (c) compare the cross sections of the space experimental sample and the ground control sample (gelled under quasi-microgravity with a clinostat). In the ground sample, the particles settled significantly, and the center of the sample was transparent, while no supernatant was observed in the space sample, confirming the effect of microgravity.

The specific gravity of the PS particles is about 1.05, which is comparable to that of the medium. Therefore, before the space experiment, we expected that the results of the PS particle system would not differ significantly from those of the ground control experiment. However, the space sample showed an average number of aggregates about 50% larger than the ground control, and also showed better structural symmetry of the tetrahedral clusters. **Fig.3(a)** and (b) show a photograph of the PS particle aggregates and the dependence of the mean association number $\langle m \rangle$ on salinity.

The results for the titania particle system are shown in **Fig.4**. **Fig.4(a)** is a magnified image for clusters having the association number m from 1 to 4, with only red fluorescence detected on the left, and with a white light source on the right. (Negatively charged particles are indicated with an "n"). **Fig.4(b)** and **Fig.4(c)** show the $[\text{NaCl}]$ -dependence and charge number Z -dependence of the m distribution. Thus, we obtained knowledge on the association of titania systems that could not be obtained on the ground and achieved Minimum and Full success in this space experiment.

The optical properties of the titania particle tetrahedrons from the space experiment were also investigated. Light-enhancing effects due to clusters compared to single particles were observed, especially in the vicinity of 450-500 nm. At this stage, we believe that this is largely due to the contribution of light focusing and reflection by the spherical lens rather than light confinement, but this is a result that we had not anticipated before the experiment. If this effect is utilized in the future, it could lead to the development of very compact optical amplifiers. In addition, by measuring the reflection spectrum in the visible region and calculating the photonic bands of the diamond lattice, it was calculated that a material with a perfect photonic band at 3.2 μm could be obtained.

Thus, we believe that we have achieved Extra success because we have evaluated the optical properties and obtained results that may be useful for developing optical materials. We hope that the results obtained from this experiment will be useful to design colloidal photonic crystals.

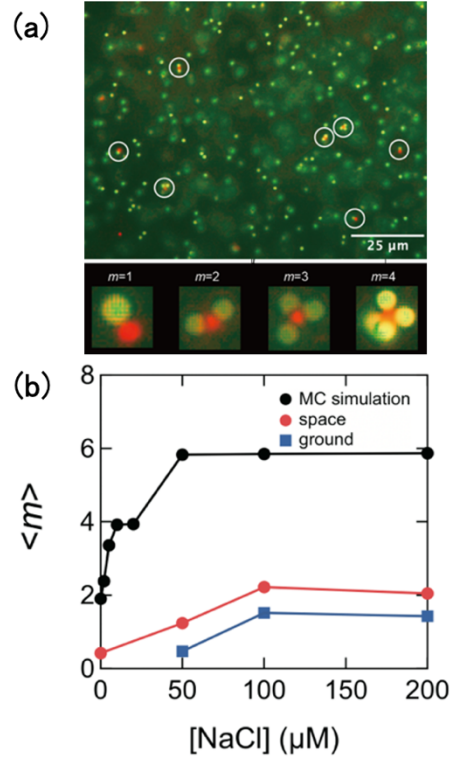


Fig. 3 (a) Photographs of clusters of PS particles obtained in the space experiment and (b) dependence of the average number of aggregates $\langle m \rangle$ on salinity.

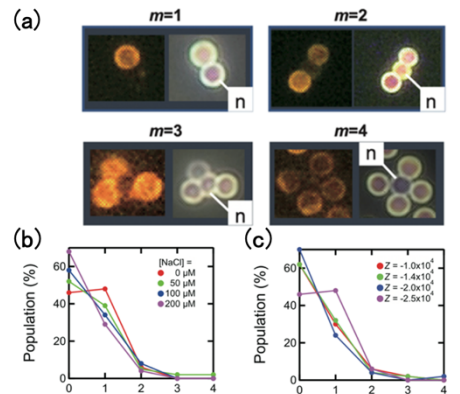


Fig. 4 (a) Magnified images of titania-based clusters from the association number $m=1$ to $m=4$ (left: red fluorescence detected, right: image with a white light source). and distribution of m . (b) $[\text{NaCl}]$ -dependence and (c) the particles charge number(Z)-dependence.