

遊



日本惑星科学会誌

**Planetary
People** 2

June 2025 vol34 no

星

人

- 火の鳥「はやぶさ」未来編
その34, 35
- 一番星へ行こう!
金星あかつき その62
- もう一つの月世界へ:
火星MMX その8
- 海外研究記, New face

日本惑星科学会誌「遊・星・人」投稿規定

日本惑星科学会

1. 投稿可能な記事

①学会誌に投稿できる記事内容は、

- (a) 原著論文：惑星科学に関する研究のオリジナルな報告
- (b) 解説論文：専門外の人にも分かりやすく解説した研究成果の総説や論説
- (c) 解説記事：広く会員の関心をひく事柄についての解説
- (d) 報告記事：学科、研究所、海外機関等の紹介、国内外の研究会の報告、New Face (博士号取得者の自己紹介)、インタビュー記事
- (e) 情報記事：各種の情報記事
- (f) エッセイ：上記の形式にとらわれず、惑星科学に関する話題を論じた文章

など、広く会員の知的好奇心をみたすもの。

②投稿記事の長さについてはとくに制限をもうけない。ただし、標準的には上記 (a) ～ (c) については6～8ページ (1ページ2000字とし、タイトル、300字程度の概要、図表を含めたページ数)、(d) については4～6ページ、(e)、(f) は1ページとする。

③上記とは別に、会員 (故人) の追悼記事を、編集委員会からの依頼原稿として受け付ける。追悼記事の投稿を検討される場合は、事前に日本惑星科学会編集専門委員会委員長宛に問い合わせること。

2. 投稿資格者

日本惑星科学会会員及び編集委員会が適当と認めた者。

3. 投稿原稿及びその送付

①原則として、投稿原稿はワープロなどにより電子的に作成されたものであること。

また、原稿のファイル形式については「学会誌原稿作成の手引」に従うこと。

②投稿に際しては、原稿を日本惑星科学会編集専門委員会委員長宛に送付すること。(連絡先は「学会誌原稿作成の手引」参照。) 送付方法は、E-mail による送付が望ましい。但し、プリントアウトした原稿2部の郵送による送付も可とする。なお郵送された原稿は原則として返却しない。

③編集委員会が原稿を受領すれば、その日を受領日として、受領した旨投稿者に通知される。

4. 査読及びその後の取扱い

①投稿原稿は編集専門委員長が受領した後、原著論文や解説論文または編集専門委員会が必要と認めた記事については査読者が選定され査読に付される。

②査読終了後、査読者の意見を参考に編集専門委員会が掲載の可否を決定する。その際編集専門委員会は投稿者に論文の修正を求めることができる。

③査読に付されない記事についても、編集専門委員会が掲載の可否を決定し、必要があれば投稿者に修正を求めることができる。

④掲載が決定すれば直ちにその旨投稿者に通知される。

⑤編集専門委員会の求める修正が完了した最終稿は、WORD、PDF、テキストファイル、いずれかのファイル形式にて、E-mail などにより編集幹事宛に送付すること。(図表については、「学会誌原稿作成の手引」参照)

⑥査読に付された掲載記事については、査読を経た旨記事内に記載される (vol.24, no.3から適用)。

5. 校正

校正は投稿者の責任において行う、また、校正は原則として誤植の訂正に限る。

6. 別刷り

論文の PDF ファイルを提供する。

7. 著作権

投稿された記事の著作権は、会誌に掲載された時点で、著者から日本惑星科学会に移転されるものとする。

8. 倫理規定

学会誌に掲載される全ての記事は、「遊星人の記事掲載にあたっての倫理規程」について原稿投稿時に念書を提出し編集専門委員会に了承されなければならない(念書は投稿原稿送り状に記載)。規定を満たしていないことが発覚した場合には、投稿原稿の取り下げ等、各項に記載された処置がとられる。

9. 投稿料・出版費

原則として無料。

ただし、カラーページの印刷を希望する場合は、著者が印刷費を負担する。なお、著者が希望し、かつ編集委員会が認めたものについては、印刷費用を学会が負担する。カラー印刷の希望が無い場合、カラーの図は白黒印刷される。電子版は費用負担無しでカラーの図を掲載する。

日本惑星科学会誌 遊・星・人

第34巻 第2号

目 次

巻頭言 寺田 直樹	99
-----------------	----

火の鳥「はやぶさ」未来編 その34 ～リュウグウから学ぶ：フェーズ2キュレーション高知の挑戦と試み～

伊藤 元雄, 富岡 尚敬, 上相 真之, 上杉 健太朗, 山口 亮, 今榮 直也, 大東 琢治, 他10名	100
---	-----

火の鳥「はやぶさ」未来編 その35 ～惑星物質研究所のリュウグウ試料高次キュレーション～

小林 桂	115
------------	-----

一番星へ行こう! 日本の金星探査機の挑戦 その62 ～金星の雲層に現れる巨大な渦の正体に迫る～

今井 正堯, 高木 征弘, 安藤 紘基, 佐川 英夫	122
----------------------------------	-----

もう一つの月世界へ: 火星衛星探査計画MMX その8 ～着陸するならどこが良い?～

和田 浩二	128
-------------	-----

遊星人の海外研究記 その18 ～想像よりは暮らしやすかった中国～

青山 雄彦	135
-------------	-----

月科学コミュニティの活性化に向けた取り組み ～2024年度活動報告～

小野寺 圭祐, 松本 晃治, 山下 光葉, 于 賢洋, 西山 学, 長岡 央, 仲内 悠祐, 西谷 隆介, 他3名	141
---	-----

「2024年度iSALE講習会」参加報告記事

山口 祐香理	147
--------------	-----

2025年度日本惑星科学会秋季講演会のお知らせ

成田 憲保	150
-------------	-----

New face

野田 夏実	152
-------------	-----

学位論文タイトル紹介

学位論文タイトル紹介	155
------------------	-----

JSPS Information	157
------------------------	-----

Contents

Preface	N. Terada	99
Phoenix “Hayabusa”: A tale of the future (34) — Exploring asteroid Ryugu: Lessons learned, challenges, and the awakening of Phase 2 Curation Kochi —		
M. Ito, N. Tomioka, M. Uesugi, K. Uesugi, A. Yamaguchi, N. Imae, T. Ohigashi, and 10 authors		100
Phoenix “Hayabusa” : A tale of the future (35) — The phase 2 curation of Ryugu samples at the Institute for Planetary Materials, Okayama University		
	K. Kobayashi	115
Road to the first star: Venus orbiter from Japan (62) –Unraveling the mystery of giant vortices in Venus’s cloud layer–		
	M. Imai, M. Takagi, H. Ando, H. Sagawa	122
Fly me to another moon world: Martian Moons eXploration (MMX) (8) –Where on Phobos should we land? –		
	K. Wada	128
Letter from planetary people working abroad (18) –Life in China is easier than I thought–		
	Y. Aoyama	135
Activation of the Japanese Lunar Science Community ~FY2024 activity report~		
K. Onodera, K. Matsumoto, M. Yamashita, K. U. G. Nishiyama, H. Nagaoka, and 5 authors		141
Report on participation in the 2024 iSALE workshop		
	Y. Yamaguchi	147
The Japanese Society for Planetary Science Fall Meeting 2025		
	N. Narita	150
New face		
	N. Noda	152
Recent theses in planetary sciences		155
JSPS Information		157

巻 頭 言

「生命生存可能環境の解明」「太陽系の成り立ちの解明」など、学会や各分野の将来構想には、壮大な目標が掲げられています。これらの課題を真に解き明かすには、長い年月と膨大な研究の積み重ねが必要でしょう。しかし、近年の小天体探査、月・地球型惑星探査、氷衛星探査、系外惑星探査などによる革新的な発見や快挙の報に触れるにつれ、すぐさま全容の解明までは難しくても、その核心に迫る幾つかの重要な手がかりの発見が、近い将来に達成される可能性が高まりつつあると感じます。

私は長年にわたり火星の研究に取り組んできました。近年の火星探査の活況をみると、近いうち火星で「生命」と呼ばれる存在やその痕跡が発見され、生命生存可能環境の理解が大きく進展することも、もはや夢物語ではないと思います。日本では、火星衛星探査計画MMX (Martian Moons eXploration) が打ち上げを来年に控え、その後続の探査計画として、3段階の火星本星探査プログラムが精力的に検討されています。生命を育みうる水や物質の分布と循環を段階的に理解し、3段階目の本格着陸探査では、火星に現存する生命の検出を目指すという、野心的な計画が構想されています。地球外生命をその場で検出するという、世紀の瞬間に立ち会える日も、そう遠くはないのかもしれません。火星や巨大惑星の衛星のみならず、我々の現時点の想定を超えた太陽系内外の天体においても、生命の存在を示す決定的な証拠が近々発見されるかもしれません。そしてそのような発見を機に、日本惑星科学会からノーベル賞受賞者が誕生することも十分にあり得ると、私は密かに期待しています。

寺田 直樹(東北大学)

火の鳥「はやぶさ」未来編 その34 ～リュウグウから学ぶ：フェーズ2キュレーション 高知の挑戦と試み～

伊藤 元雄¹, 富岡 尚敬¹, 上梶 真之², 上杉 健太郎², 山口 亮³, 今栄 直也³, 大東 琢治⁴, 白井 直樹⁵, 中藤 亜衣子³, 与賀田 佳澄⁶, 矢田 達⁶, 安部 正真⁶, Ming-Chang Liu⁷, Richard Greenwood⁸, 湯澤 勇人⁹, 木村 眞³, フェーズ2キュレーション高知チーム

(要旨) リュウグウ試料の分析・研究により、多様な有機物や水、特定の揮発性元素の存在が確認され、太陽系最初期の物質の化学進化の過程、とりわけ有機物や水の起源に関する理解が大きく進展した。一連の研究成果は、チーム内の機器と達成すべき科学目標を中心に研究者同士が有機的に連携することで、極少量の試料からでさえ、多くの科学的知見を得られることを示した。また、試料が地球由来の汚染を受けていない状態で初期記載から実際の分析まで実施できたことは、Ph2KとASRGで培った惑星物質のキュレーション技術全般がもたらした大きな成果である。今後、得られた知見を活かし、惑星物質キュレーションのさらなる高度化を図るとともに、戦略的かつ持続的な惑星物質の分析基盤の構築と人材育成を含む国際的な研究ネットワークの拡充が期待される。

1. はやぶさ2試料分析に至るまで

反射スペクトルがC型に分類される小惑星は、過去の熱的影響をほとんど受けておらず、有機物と水に富んでいると考えられてきました [1]。そのため、このような始原的小惑星からの試料採取が、多くの惑星物質研究者から強く望まれていました。リュウグウは有機物と水に富む小惑星であること、そして比較的地球に近い領域に存在、つまり地球近傍軌道を持っている点から「はやぶさ2」ミッションの対象に選ばれました。

「はやぶさ2」のサンプルカプセルは、2020年12月6日にオーストラリア・ウーメラ砂漠へ帰還し、12月9日にJAXA宇宙科学研究所のキュレーション施設へ搬送されました。12月14日からの開封作業では、予想を上回る量の黒色粒子が確認され、その総量は約5.4 gに達しました。粒子の多くはミリメートルサイズでしたが、1 cmを超えるものも含まれていました [2-4]。

2021年6月からの最初の1年間は、国内の研究者が主導する8チームがリュウグウ試料の「初期分析」を担当しました [5]。ここでは、化学組成、鉱物学(粗粒・細粒)、揮発性物質、有機物(可溶性・不溶性)をそれぞれ対象とする6つのチームが分析を進めました。さらに「フェーズ2キュレーション」では、JAXAのキュレーション活動を拡張しつつ、科学成果の創出も目指して、岡山大学惑星物質研究所(フェーズ2キュレーション三朝)、並びに海洋研究開発機構高知コア研究所(フェーズ2キュレーション高知、Ph2K)を中心とするチームが組織されました。Ph2Kでは、国立極地研究所、高輝度光科学研究センター、分子科学研究所、オープン大学、カルフォルニア大学ロサンゼルス校、名古屋大学、東京都立大学、大阪大学など国内外の研究者が連携しました。これらの8

1. 国立研究開発法人海洋研究開発機構 高知コア研究所
2. 公益財団法人高輝度光科学研究センター 散乱・イメージング推進室
3. 大学共同利用機関法人情報・システム研究機構 国立極地研究所
4. 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所
5. 神奈川大学 理学部 化学科
6. 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
7. ローレンス・リバモア国立研究所
8. オープン大学
9. 自然科学研究機構分子科学研究所極端紫外光研究施設(UVSOR)
motoo@jamstec.go.jp

チームによる成果は、2022年夏頃から2023年初頭にかけてScience誌とNature Astronomy誌に特集を組まれ、また日本学士院紀要から報告されました [6-13]。そして、2025年3月現在、約200本の論文が報告されています。

いうまでもなく、リュウグウの粒子は惑星科学にとって極めて重要な試料であり、これまで隕石研究のみでは確証が得られなかった知見の深化に大きく貢献しました。その成功の背景には、はやぶさ2探査機の運用、サンプリング機構の工学的設計、そしてキュレーション活動の円滑な遂行があったことを我々は忘れてはいけません。本稿では、Ph2Kの活動を振り返りつつ、小惑星リュウグウの科学的意義と今後の惑星物質キュレーション活動について紹介します。

2. 惑星物質キュレーション： Lessons learnedから始まる！

地球惑星科学におけるキュレーションは、地質学的試料の収集・管理・保管を科学的視点で体系化し、物質科学的データに基づく分類を通じて普遍的価値を持たせるプロセスです。さらに、それらの分類情報を国内外の研究コミュニティと共有し、研究目的に応じた試料を配布することが求められます。

日本国内では、地質学的試料を取り扱う代表的なキュレーション組織として、隕石の収集と分類を長く続けている国立極地研究所の南極隕石ラボラトリー、極地の氷床や氷河からの掘削コアを収集する国立極地研究所のアイスコア研究センター、海底掘削コアの拠点である高知コアセンター（JAMSTECと高知大学の共同運営）、そして2010年以来、小惑星（イトカワとリュウグウ）からの帰還試料を扱うJAXA地球外物質研究グループ（ASRG）がよく知られています。それ以外にも、産総研地質調査総合センター、国立科学博物館、そして全国の地質標本館や博物館などがあります。国外に目を向けると、南極隕石と月の石のコレクションを保有するNASAジョンソンスペースセンター、またスミソニアン博物館、米国、英国、フランス、オーストラリア、ドイツ、ベルギーなどの自然史博物館、英国オープン大学など大学内の標本館があります。これらの組織が日々行っているキュレーション作業が、地球惑星物質の科学

的価値を担保しています。

ASRGでは、はやぶさ2試料のキュレーションを第一段階（フェーズ1キュレーション）、第二段階（フェーズ2キュレーション）と区別しています。安部ら（2020）に詳しく記載されているように、フェーズ1キュレーションでは、すべての試料に対する初期記載が、実体顕微鏡、秤量、顕微赤外分光装置、パリ・サクレ大学宇宙天体物理学研究所（Institut d'Astrophysique Spatiale）との共同作業であるMicrOmegaを用いた近赤外分光観察などの非破壊分析に限定されました [5]。この分析の主目的は、次に行われる初期分析やフェーズ2キュレーション、そして国際公募研究での配分に資する試料データのカタログを構築することでした。

2014年12月のはやぶさ2探査機の打ち上げを受け、ASRGは国内の惑星物質の研究者を集め、試料のハンドリング、国内外の研究機関に配分するためのキュレーション設備の仕様に関する委員会（2015年6月～、のべ40名）を9回にわたり行いました。委員会では、帰還試料をJAXA相模原キャンパスで受け入れるための設備の仕様検討、およびオーストラリアでの帰還カプセルの回収～クリーンチャンバーへのサンプルコンテナへの導入～サンプルコンテナの分解～試料の取り出し、そして初期記載・分別・保管と配分に至る一連のキュレーション作業の確認を行いました。その議論をキュレーション設備に反映させ、2016年度までに設置することがゴールでした。リュウグウ試料の帰還予定が2020年12月であったため、キュレーション施設・設備の仕様決定から完成までを1年半という短期間で行っても、その性能確認とリハーサルに2年を費やすとギリギリのスケジュールでした。当時は、帰還試料の全量は設計上の最低期待値で100 mg、ベストケースシナリオで1 gと見積もられていました [1]。2020年にコンテナを開けたところ、センチメートルサイズの粒子を含む総重量5.4 gの試料を確認したことは [2, 4]、ASRGメンバーのみならず、本委員会に参加した研究者にとって大きな驚きでした。

ここで少しPh2Kの成り立ちについて振り返ります。2015年3月に、ASRGを核とし海洋研究開発機構・高知コア研究所、国立極地研究所、自然科学研究機構分子科学研究所UVSOR、高輝度光科学研

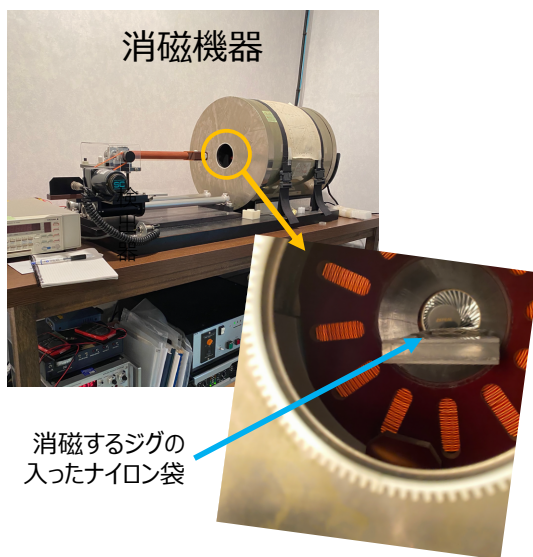
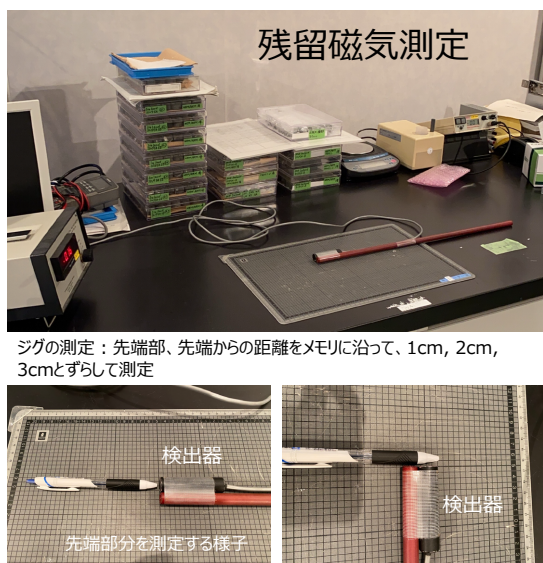


図1: (a)はやぶさ2試料のハンドリング用ジグの残留磁気測定と消磁@高知コアセンター。

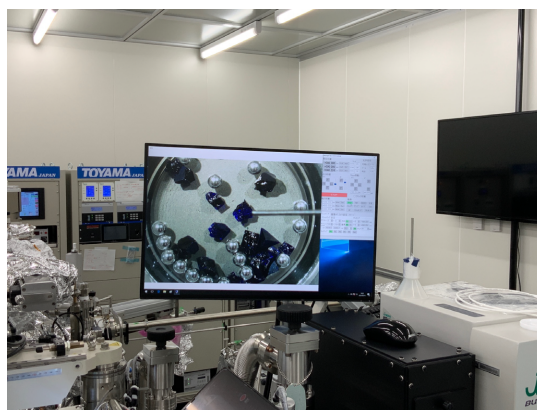
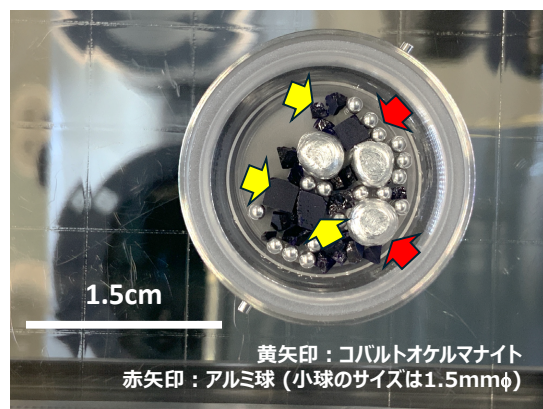


図1: (b)左: ハンドリングのリハーサルに用いたテスト試料(コバルトオケルマナイト, $\text{Ca}_2\text{CoSi}_2\text{O}_7$)，右: クリーンチャンバー内で真空ピンセットとテスト試料を用いたリハーサル。

究センター/SPring-8と「小惑星探査機はやぶさ2試料受入準備にかかる連携協定」を締結しました。この協定がPh2Kの大元であり、「はやぶさ2」により獲得される新しい地球外物質の分析を見据え、機関が連携して分析・研究基盤を構築することが求められました。そして、この連携協定を結んだ機関ごと「キュレーション設備の仕様に関する委員会」にメンバーとして参加、その活動の中で「はやぶさ2試料の輸送検討チーム」、そして高知コア研究所が中心となりPh2Kという組織となりました。

Ph2Kのメンバーは、地球外物質試料分析・技術

に精通し、また大型機器の管理研究者や放射光施設のビームライン研究者から構成されました。Ph2Kのタスクは、リュウグウ試料を分析し、そこから科学的成果を創出することだけではありません。リュウグウ試料が到着する前に、ASRGと共同で以下の準備作業を行いました。各分析機器に専用の試料ホルダーやジグ、大気非曝露搬送機構を開発し、分析機器間での共有も可能にしました。また、ホルダーなどの汚染を高感度分析により評価しました。さらに、試料ハンドリングツールの残留磁力の評価と消磁(図1(a))、地球由来の汚染を防ぎながらの試料



図2: はやぶさ2 試料の輸送容器(FFTC, 個別試料容器)。

の取り扱い手法，ハンドリングのリハーサルに用いられるテスト試料の提供 (図1 (b)，コバルトオケルマナイト， $\text{Ca}_2\text{CoSi}_2\text{O}_7$ ，これは人工的に作った結晶であるため，天然に存在せず，万が一クリーンチャンバー内に落ちたとしても容易に識別可能なため選ばれました)，ミリメートルサイズ試料分割手法の開発 (チゼルとハンマーによるチップング)，試料容器や保管ケースの製作，国内外に安全に輸送するための専用容器の開発，そしてリュウグウ試料のデータベース (Ryugu Sample Database System, RS-DBS) 作成支援なども行いました [14-21]。

3. すべては試料を研究者に届けるために: Mission Impossible?

惑星物質試料は，我々の手元に届くまでに様々な過程を経ます。隕石の場合，大気圏通過時の加熱，

長期間にわたる地球大気や水が関与する化学反応，そして人為的な汚染などによる影響があります。一方，リュウグウの粒子は地球外物質として「最も地球由来の汚染のない試料」といえます。この試料には小惑星由来のガスや揮発性成分が含まれ，鉱物と有機物が微細な組織として複雑に共存することも予想されました。これらの情報から太陽系46億年にわたる過去を遡り，低温の分子雲であった最初期，高温期に起きたと考えられる化学反応，そして熱と水により複雑な過程を経る小惑星上での進化の痕跡を読み取ることが必要です。

JAXAキュレーション施設のクリーンチャンバーから取り出した試料に対して，各研究機関，各装置への搬送時の汚染を最小化するために，FFTC (Facility to Facility Transfer Container) と呼ばれる試料輸送容器と個別試料容器を製作しました [16]。これらはJAXAキュレーション施設の「小

カメラレンズ用の肩掛けかばん

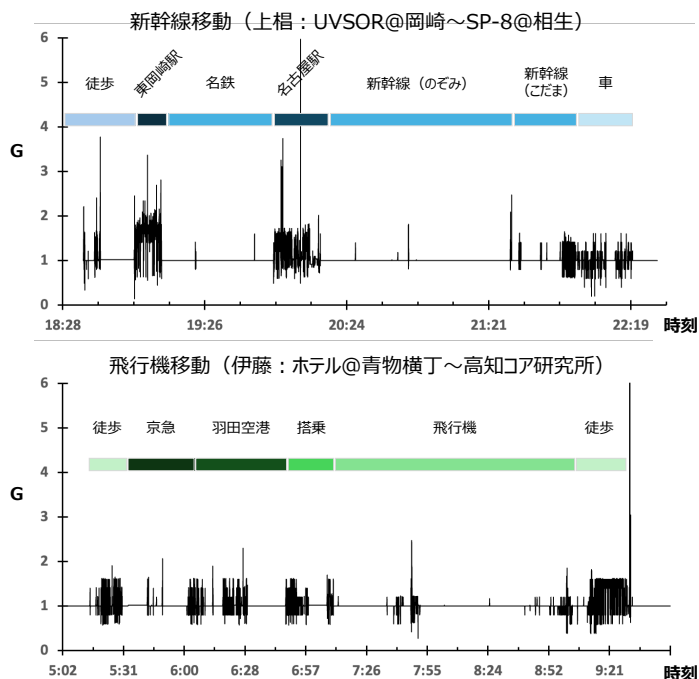


図3: ハンドキャリアによる試料運搬時の振動テスト.

惑星リュウグウ」専用クリーンチャンバー内で定常的に使用されるため、以下の点を重視しました (図2).

- (a) 簡便に洗浄できること
- (b) リュウグウ試料と容易に識別するため、クリーンチャンバー、および内部で使用するジグなどと同じ材料を使用すること
- (c) クリーンチャンバーの分厚いバイトンコートブチルグローブ越しに簡便かつ安全に取り扱えること
- (d) 窒素ガス充填をした状態で、長期間の密閉が可能なこと

さらに、世界中の研究者がグローブボックス内で使用することを考慮し、グローブ越しに容易に操作できる個別容器の開閉ジグを開発しました。この製作は、SPRing-8の上杉・上相らを中心に、金属加工を専門とする佐藤精機株式会社、あるいは北海道大学・グローバルファシリティセンター所属の技術員らとの共同で行いました。個別試料容器 (カプセルバック) は市販部材を流用することで、コスト削減と大幅な開発期間の短縮を実現しました。

当初、個別試料容器は数mm程度の大きさの試料を安全に格納できることを基準として進められました。しかし、コンテナ内には黒く数えきれないほどの砂状、数ミリメートルサイズの粒子だけではなく、センチメートルサイズのものも確認されました。つまり、想定100 mgはおろかベストケースの1 gさえも凌駕する大量の試料の獲得が実現していたのです。すぐに、センチメートルサイズの試料に対応する大容量の個別試料容器の設計と準備、規定サイズの個別試料容器の大量購入に奔走しました。実際の試料を扱い始めると、他にも想定外の課題が多く発生したため、現場での調整と改良を幾度となく行ったことも印象深い思い出です。

貴重なリュウグウ試料の輸送容器の準備は整いましたが、誰がどのように持ち運ぶのか、また輸送経路や宅配便の可否についても検討を行いました。まず、人が手持ちで運ぶ方法として、超小型温度振動記録計を入れたカメラ用の肩掛けカバンを使用し、神奈川県にあるJAXA宇宙科学研究所から高知県にあるJASMSTEC高知コア研究所、および兵庫県

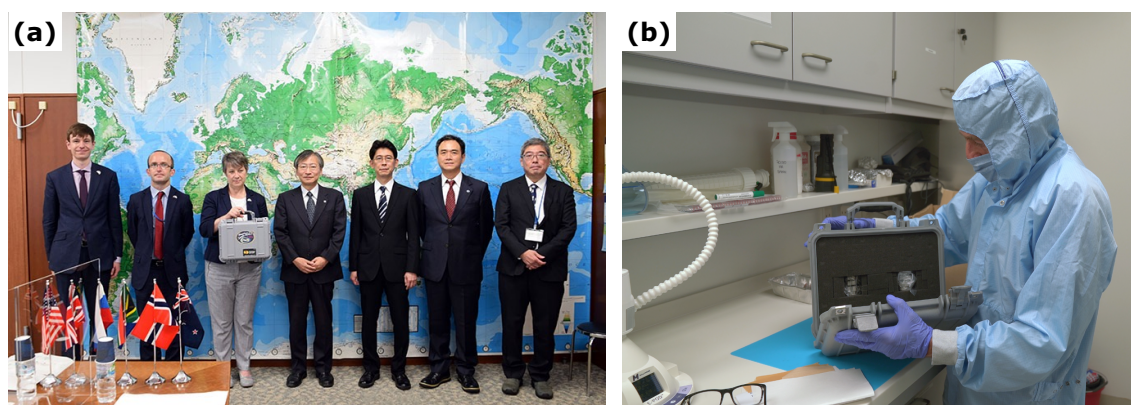


図4: (a) 2021年7月7日に小惑星リュウグウの試料を英国に輸送するための引渡しを極地研究所で行いました。

(b) 同年7月21日に英国オープン大学にてグリーンウッド博士がリュウグウの試料を確認しました。

にあるSPRing-8までの経路での試料にかかる加速度変化をそれぞれ確認しました。その結果、飛行機や電車内よりも、人の往来が激しい時間帯の駅構内で通行人を避けながら歩行する際の振動が最も大きいことが判明しました(図3)。この結果を踏まえ、人の少ない時間帯での移動を考慮し、輸送ルートと時間帯を慎重に検討しました。2021年6月の初回輸送時(50 mg)には、安全性を担保するため宅配便の使用は見送りましたが、2022年3月の試料配分時(50 mg)には、あえて宅配便を利用しました。結果として、宅配便を使用しても試料と個別容器への振動の影響は見られず、少なくとも国内輸送には問題がないことを確認できました。

試料は適切なタイミングで、米国のカリフォルニア大学ロサンゼルス校(UCLA)および英国のオープン大学にも輸送する必要がありました。しかし、2021～2022年は新型コロナウイルス感染症の世界的流行により、国外出張の前後二週間の隔離期間が義務付けられ、現地へ直接持ち運ぶことが困難な状況でした。対策を練るために、オープン大学のグリーンウッド博士と協議する中で、過去にチェリャビンスク隕石を分析した際、ロシアの英国大使館が輸送の支援を行った事例を伺いました。そこで、無理を承知で駐日英国大使館の科学・イノベーション担当参事に支援を打診したところ、すぐに快諾が得られました。早速、輸送計画を周到に準備し、極地研究所にて英国副大使一行に試料を託すことができました(図

4)。輸送には英国の外交行囊制度である「Queen's Messenger」が活用され、試料は2週間後にオープン大学へ無事到着しました。これにより、直ちに分析を開始することができました。

一方、米国へは、サンフランシスコ日本領事館の科学参事官の支援のもと、外務省、文部科学省、在日米国大使館、在日NASAアタッシュ、および全日本空輸など多くの方々の協力を得て、試料を無事にUCLAへ輸送できました。本輸送で得られた技術的・ロジスティックスの知見はASRGと共有され、ヒューストンのNASAへの試料輸送にも活かされました。

4. 得意な技術と研究をさらに伸ばす

リュウグウ試料の引き渡しから1年以内に研究成果を生み出すためには、適切なチーム編成、情報共有、分析戦略の構築が不可欠でした。世界で初めての含水・含有機物小惑星の試料をJAXAから預かり、その科学的価値に見合った研究成果を創出するためには、高い専門性と効果的なチームワークが求められます。Ph2Kでは、各メンバーの専門分野が重なり合うような構成をとり、分析法開発とサイエンスのバランスを意識したチーム体制を整えました。

チーム内では、情報共有を徹底し、新たなデータや考察が得られるたびに分析結果を再評価しました。JAXAからの情報も全員がリアルタイムで共有

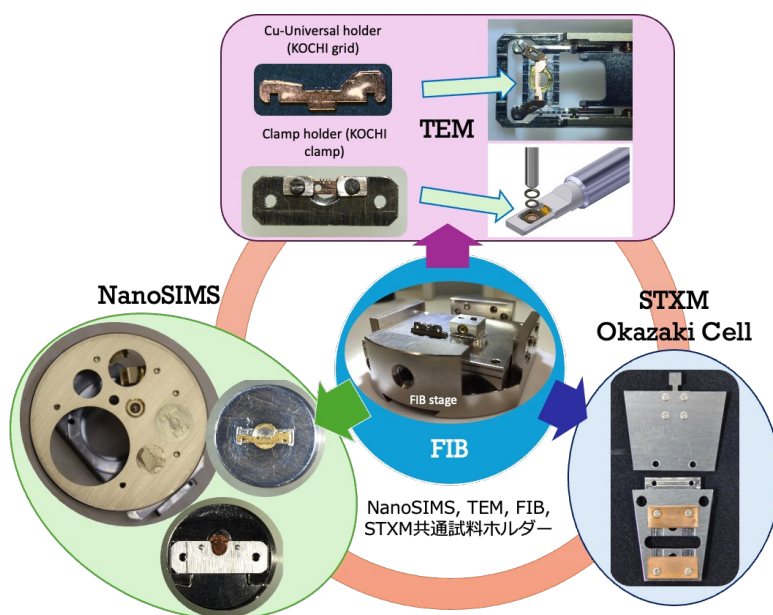


図5: (a) FIB-TEM-STXM-NanoSIMSでシームレスに分析するための共通試料ホルダー、LIGAプロセスで制作した純銅製のFIBグリッド (KOCHI Grid)と市販TEM, FIB Gridを使用可能なクランプホルダー(KOCHI Clamp).

することで、迅速な意思決定と研究の効率化を実現しました。何を決定する時もトップダウン方式ではなく、メンバー間でフラットかつ慎重に議論を重ねました。そのために、最初の1年間は毎週金曜日の午後1時半から最低2時間のウェブ会議を開催しました。この会議には、英国オープン大学のグリーンウッド博士と米国UCLA (当時) のリウ博士からも積極的に参加し、時差を超えて活発な議論を行いました。それでも時間がたりず、昼夜問わず個別の打ち合わせに加え、メンバー相互の専門分野への理解を深めるために、日曜夜に1時間程度の勉強会を継続的に実施しました。どの会議も自由闊達な雰囲気、誰もが率直に意見を交わしました。議論が白熱する場面もありましたが、その過程で多角的な視点が取り入れられ、リアルタイムでの分析データの再解釈・活用に繋がりました。最終的には学術的インパクトの高い研究成果につながったと考えています。当然ながら、はじめからこの体制が整っていたわけではなく、分析手法と技術を共同で検討し、4年にわたって実践を重ねることで、チームとしての完成度を徐々に高めていきました。

Ph2Kの「チームの完成度を高めること」とは、各研究者が得意とする分析手法をシームレスに組み合わせ、限られた試料量と時間で最大限の研究成果を得ることと同義です。この目的のために、我々は最適な分析機器の選定と手順の確立、および関連するジグなどの研究開発を行いました。具体的には、試料全体の特性を把握するためのバルク分析と、微細組織・軽元素同位体・炭素化学種の可視化を行うサブミクロンスケール分析を組み合わせた分析スキームの検討です [16-20]。南極宇宙塵や炭素質コンドライト隕石をリュウグウの模擬試料として得られた分析データを、既存の地球外物質と比較し、さらに無水・含水鉱物と有機物の共存関係を解明することで、小惑星リュウグウの起源とその形成過程を明らかにすることを目指しました。特に、本番の前に分析やハンドリングのための模擬物質として多様な南極産の隕石や微隕石を十分に使える環境はとても重要でした。リュウグウ試料と同じスキームで隕石や微隕石を分析し、データの取得をはじめとするシステムの改善を継続的に行える環境を作れたのは、サイエンスの構築だけではなくチームとしての力量を上げた要因



図5: (b) FIB-STXM-NanoSIMS-TEMのリンケージ分析.

だと考えています。

Ph2Kでは、リュウグウ粒子分析のための様々な技術の独自開発を行いました。(1) X線CT分析時の試料ドリフトを最小限に抑えるためのカーボンナノチューブテープの開発 [17, 18], (2) 半年以上かけて開発したドライ鏡面研磨法 [22], そして (3) 集束イオンビーム装置 (FIB: Focused Ion Beam apparatus), 超高空間分解能走査型二次イオン質量分析装置 (NanoSIMS), 走査型透過X線顕微鏡 (STXM: Scanning Transmission X-ray Microscopy) と透過電子顕微鏡 (TEM: Transmission Electron Microscopy) 間で同じ試料をシームレスに分析するための共通試料ホルダー群の設計などです。(3)では、LIGAプロセスで制作した純銅製の大型FIBグリッド、市販のTEM、FIBグリッドを格納可能なクランプホルダー、STXM専用Okazaki Cellなどを新たに開発しました (図5a, b) [17, 20]。また、各分析拠点にはグローブボックス (露点 -80°C 以下、酸素濃度 0.1 ppm 以下) を完備、高知コア研究所のNanoSIMS, UVSORのSTXM, SPring-8のX線CTには、それぞれ大気非曝露搬送機構を各自で開発し、リュウグウ試料分析に挑みました。

5. リュウグウの起源を追って：チームで達成すること

2021年6月中旬に8個(1~4 mm), 合計50 mg程度のリュウグウ粒子が、Ph2Kに配分されました。そして、大型放射光施設SPring-8のBL20XUにてX線CT撮影などを行い、各粒子の内部組織と鉱物の組み合わせから、粒子ごとの分析・研究の方向性を決定しました (図6)。そして、国内外研究機関にリュウグウ粒子を地球大気に触れぬよう輸送し、各研究者の最も得意とする分析を行いました (図7)。

我々の分析で得られたリュウグウ粒子の元素組成と鉱物組織などは、他チームの成果と整合的で、「リュウグウは、太陽系の平均化学組成を持つCIコンドライトと同等であり、我々が手に入れることのできる太陽系の原材料に最も近い物質」という確証が得られました [6-9, 22]。粒子ごとに多少の違いはありましたが、水が関与して形成したと考えられる鉱物 (サポナイトやサーペンティンなどの含水ケイ酸塩鉱物、ドロマイトに代表される炭酸塩鉱物、フランボイダルマグネタイトなど) も多く見られました [6-9, 22, 23]。このことから、リュウグウには過去に氷が存在し、その氷が溶けてできた水と、もともと含まれていた鉱物が反応した結果、現在のリュウグウ粒子を構成する鉱物が作られたと考えられます。

STXMとTEMによる分析を組み合わせることで、脂肪族炭化水素に富む有機物は、粗粒の含水ケ

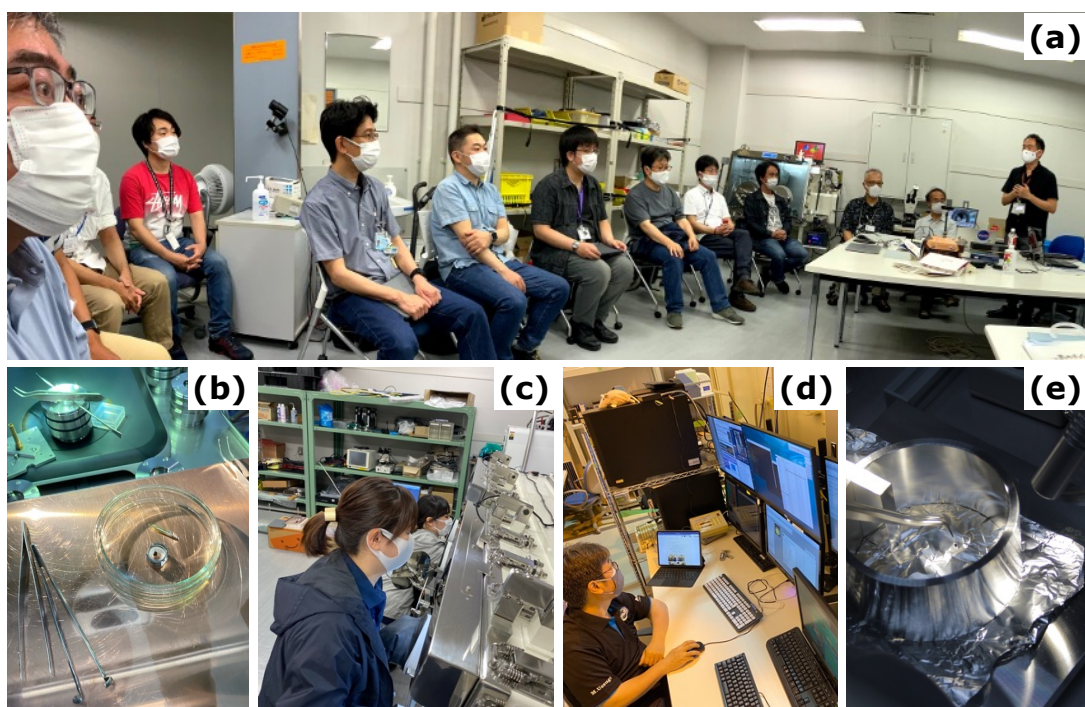


図6: (a) 2021年6月21日にSPring-8で分析の開始。 (b) リュウグウ試料を個別容器から取り出す直前。 (c) リュウグウ試料をハンドリングする中藤氏と与賀田氏。 (d) BL20でリュウグウ試料のCT撮像をする上相氏。 (e) グローブボックス内でリュウグウ試料を再分割し、回収する様子。

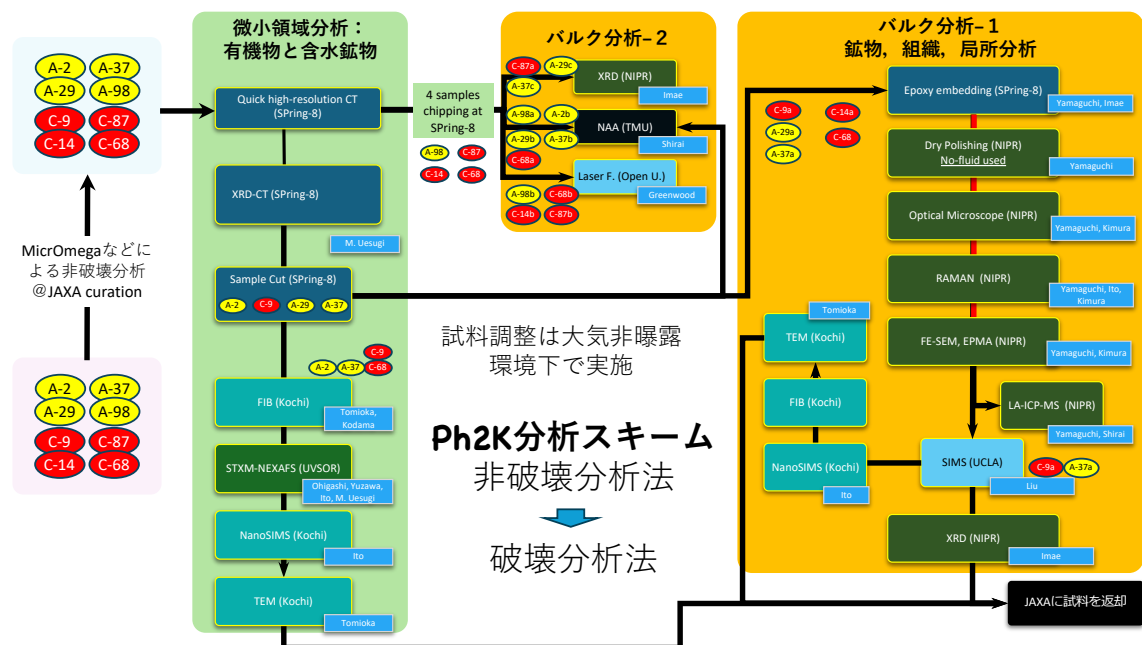


図7: Ph2Kによるリュウグウ試料の分析の流れ(A-2, C-9などはリュウグウ試料のJAXA-ID番号, 黄色=チャンパーA粒子, 赤色=チャンパーC粒子。

イ酸塩鉱物と複雑に入り混じった組織を持つことが明らかになりました [6]. この組織は、粗粒の層状ケイ酸塩鉱物が特定の有機物に形成の場を与えたことを示す証拠と考えられます。また、脂肪族炭化水素に富む有機物の分解温度に関する研究報告 [24] に基づき、リュウグウは30度以下の温度しか経験していない可能性があることがわかりました。一方、そこにはどのような種類の有機物が含まれるのか?という新しい疑問に、今回の我々の分析スキームでは答えることはできないため、今後新たな高感度・高解像度を両立した分析手法の開発が必要で

す。NanoSIMSにより同じ試料を分析したところ、水素と窒素は地球と比べると重い同位体 (D , ^{15}N 成分) に富むことがわかりました [6]. この結果は、一部の宇宙塵と良い一致を示すばかりではなく、彗星などの太陽系外縁部天体の同位体比に近い傾向を示しています [25, 26]. つまり、リュウグウ粒子は熱の影響をあまり受けておらず、形成当時の物質科学的情報を保っていることを示唆しています。これらの粒子を構成する物質の少なくとも一部は、太陽系の外縁部で形成後、現在の位置まで移動したと考えられます。

地球の有機物や水がどこから来たかについては、現在も大きな議論が続いています。リュウグウ粒子に含まれる粗粒の含水ケイ酸塩鉱物は、有機物や水の供給源の候補のひとつです。粗粒の含水ケイ酸塩鉱物は熱に強く、その中に含まれる有機物に変質を受けずに地球へ運ばれた可能性があります。しかし、リュウグウ粒子の水素同位体比は地球のものより重い成分に富む一方、小惑星イトカワの粒子には、太陽風由来の軽い水素同位体組成を持つケイ酸塩鉱物が確認されています [27]. また、リュウグウにも地球と同じ水素同位体比をもつ試料もあるとの報告もあります [28]. こうした異なる水素同位体組成を持つ物質が混じり合うことで、地球の水が形成されたと考えるのが妥当です。Ph2Kでは「太陽系の外側で形成された微粒子には、水と有機物がたくさん含まれていた。これらの粒子が集合して始原的な小惑星リュウグウとなった。リュウグウはその後太陽系の内側までやってきて、太古の地球に水と有機物をもたらした供給源の一つとなった」という結論を得ました。この結論は、小惑星リュウグウだけではなく、小惑星ベヌス、隕石などのさらなる研究を組み合わせ

ることで、より詳しく検証できると考えています。

そのほかのPh2Kの研究成果として、リュウグウの前駆天体とその地質プロセスの解明 [22, 29]、これまでの報告よりも古い水質変質年代 (太陽系形成後500万年程度から180万年程度) [30]、衝突による炭素質小惑星からの放出物が従来の想定より少ない可能性 [23]、新たな始原的希ガス成分 (これまでよりも1桁高いキセノン濃度) の発見 [31]、リンとアンモニウムイオンを含むアモルファス物質の発見と生命の前駆物質としての可能性 [32] などが挙げられます。また、1年半以上に渡る大気曝露実験を行い、リュウグウ粒子は短期間でさえ大気の影響を受け、表面にカルシウム硫酸塩鉱物 (ジブサム) が形成されることを報告しました [33]. これは、地球風化の定量的な理解につながり、惑星物質のキュレーション作業を考える上で非常に重要な知見です。

Ph2K以外のチームがこれまでに報告した特筆すべき研究成果には、約20,000種類の有機分子が含まれており、その中には少なくとも20種類のアミノ酸が含まれること [7, 12, 13]、流体包有物の確認 [9]、揮発性物質に富むこと [11] や太陽系の元素組成と最も近いとCIコンドライトと主要組成、および酸素同位体比の良い一致 [7, 8]、プレソーラー粒子の存在度 [34, 35]、ナトリウム炭酸塩や岩塩など塩の結晶の発見 [36] などがあります。

6. 2025: A Space Odyssey

リュウグウ試料の帰還後1年目は、国内研究者が率いる8チームによりリュウグウ試料の分析が一斉に開始され、成果の発表は2025年現在でも続いています [例えば37-44]. 詳しくは各論文を参照してもらうとして、リュウグウ粒子は、もともと惑星科学の試料として重要であることは分かっていたが (そうであると確信していた!), キュレーション技術によって第一級以上の科学的価値を持つことになりました。OSIRIS-RExが持ち帰った小惑星ベヌスの粒子も同様の価値があり、その成果が報告されつつあります [45-47].

現在、様々な天体に対する多くのサンプルリターンミッションが実施、あるいは計画されています。中国の月探査嫦娥5号ミッションでは、Oceanus



図8: (a) オープン大学でのシンポジウム集合写真. (b) 高知で行ったシンポジウム集合写真. (c) オープン大学でのシンポジウム, 英国内の惑星科学研究者らが40名ほど参加. (d) 英国ダイヤモンド放射光施設視察. (e) オープン大学のグレイティ教授, フランキー教授らとの懇親会.

Procellarum地域からの試料が回収され, その分析により, 月の火山活動が約20億年前まで続いていたことが明らかになりました [48]. 続く嫦娥6号ミッションでは, 月の裏側からの試料の回収に成功し, 研究が進められています [49]. NASAやESAも新たな月面サンプリリターンミッションを計画しています. このような探査ミッションを通じて月天然資源を利用する技術の開発が進めば, いずれ人類の月面定住は夢ではなくなるのではないのでしょうか.

火星とその衛星に関してはどうでしょう. JAXAのMMX (Martian Moons eXploration) ミッションでは火星衛星フォボスから, そしてNASAとESAは共同で火星からのサンプリリターン (岩石や大気の試料) を進めています. 火星探査の大きな目的の一つは, 過去または現在の生命の痕跡を探ることです. もし見つかった場合には, 現在の惑星物質キュレーションのあり方や施設そのものの高度化を考えなければなりません. つまり, 長い目で見て地球の生命や有機物に影響を与えないための惑星検疫・保護の方法, そしてバイオセーフティを十分に考慮したキュレーション施設の必要性も先んじて議論する必

要があります [50-52]. ここでの議論は, 将来の有人火星探査計画にも有益です.

「はやぶさ」, 「STARDUST」, 「はやぶさ2」, 「OSIRIS-REx」などのミッションから得られたLessons Learnedは, 次世代のサンプリリターンミッションに関する提案だけにとどまりません. ここから得られた重要な知見の一つは, たとえ極めて少量の試料であっても, 適切なキュレーション, 分析チームの密接な連携と機器・研究環境の高度化により膨大な科学的情報が得られることです. さらに「適切にキュレーションされ, 汚染のない状態」で保存された過去の帰還試料を, その時代の先端技術・機器を用いて再分析することが可能です. このように, キュレーションと最先端分析を有機的に結びつけることで, 天体の起源や形成史, さらに初期太陽系における物質循環のプロセスの理解が飛躍的に進捗すると期待できます [53].

太陽系や惑星に関する知見をさらに広げるために, 彗星や氷衛星, 金星などを対象にした野心的なサンプリリターンミッションが提案されれば, 世界の惑星科学コミュニティは大いに活気づくことでしょ

う。もちろん、技術的・経済的な観点から、こうしたミッションは非常に難易度が高いですが、その科学的価値は計り知れませんが、近い将来、世界の宇宙機関が協力する国際プロジェクトとして実施されることを、心から願ってやみません。

次世代の惑星物質科学研究者の育成についても考えなければならない時期にきています。Ph2Kでは、JSPS-Royal Society日英二国間交流事業を獲得し、オープン大学、あるいは、高知コア研究所主催の研究會を相互の国で行ったり（図8）、日英若手研究者の短期滞在をサポートしたり、さまざまな形で相互交流を深化させています。この取り組みで得られた日英若手研究者らの関係が、火星衛星探査（MMX）や深宇宙探査機DESTINY⁺ミッションへの英国若手研究者らの参加や、南極隕石を用いた共同研究などに発展しています。このような国内外の新しい交流の輪が広がるための活動は、我々のような中堅からシニアの研究者らは、決して疎かにすべきでなく、どれだけでも投資をしても良いと考えています。

惑星物質科学に携わる研究者らは、太陽系内の物質分析だけを考えているわけではありません。宇宙空間に打ち上げられた宇宙望遠鏡や観測衛星（例えば、米国のハッブル、ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡や日本のあかり、ひので）や地上に建設された巨大電波望遠鏡（すばる望遠鏡、アルマ大型電波干渉計など）を用い、より遠くの星や空間を観測する研究も盛んに行われています。これらは、宇宙初期の星の形成、生命の構成要素となるような複雑な有機分子の観測も可能なため、宇宙空間における有機分子の形成と多様性が明らかになりつつあります。今後、天体観測と惑星物質分析という異なる科学的情報、また空間・時間スケールの大きく異なる視点を結びつけることで、生命に関わる有機物だけではなく、地球の形成、太陽系、ひいては宇宙そのものの理解につながるでしょう。

謝辞

はやぶさ2ミッションにおいて、設計、運用、キュレーションならびにアドミニストレーションにご尽力賜りました関係各位、なかでもプロジェクトマネージャーの津田雄一教授（JAXA）、プロジェクトサイ

エンティストの渡邊誠一郎教授（名古屋大学）に深く感謝の意を表します。また、橘教授（東京大学）率いる初期分析チーム（北海道大学・塚本教授、東北大学・中村教授、九州大学／京都大学・野口教授、九州大学・奈良岡教授と岡崎准教授、広島大学・藪田教授）、岡山大学惑星物質研究所（中村教授、小林教授ほか）の方々とともに、リュウグウ試料の分析・研究を同時期に行うことができたことは、チームメンバー全員の研究人生の中で最もやりがいがあり、輝かしいプロジェクトとなりました。

リュウグウ試料の国外輸送に際し、多くの関係諸機関の方々のご理解とご支援を賜り、Ph2Kの研究プロジェクトを無事に遂行することができました。私たちの多種多様なアイデアを具体化し、実用化へとつなげることができたのは、兵庫県の佐藤精機株式会社、北海道大学グローバルファシリティセンター（佐々木隆太副センター長）とそこに所属される技術員（女池竜二氏、武井将志氏、佐々木康隆氏、楠崎真央氏）の皆様の多大なるご支援のおかげです。また国立研究開発法人海洋研究開発機構高知コア研究所の小笠原真由氏、および国立極地研究所南極隕石ラボラトリーの小嶋智子氏（現JAXA宇宙科学研究所ASRG）の多方面にわたるご支援も欠かせませんでした。ここに厚く御礼を申し上げます。

常に励ましてくださった恩師の方々、厳しくサイエンスで戦いながらも理解しあいこれまで歩んできた国内外の研究仲間と友人、そして陰ながら支えてくれた家族に、心より感謝申し上げます。最後に、フェーズ2キュレーション高知の活動に関わったメンバー全員を謝辞にかえて記します（表1）。

参考文献

- [1] 橘省吾ほか、2014、地球化学 48、265.
- [2] Yada, T. et al., 2021, Nat. Astron. 6, 214.
- [3] Pilorget, C. et al., 2021, Nat. Astron. 6, 221.
- [4] Tachibana, S. et al., 2022, Science 375, 1011.
- [5] 安部正真ほか、2020、日本惑星科学会誌 29, 28.
- [6] Ito, M. et al., 2022, Nat. Astron. 6, 1163.
- [7] Nakamura, E. et al., 2022, Proc. Jpn. Acad. B 98, 227.
- [8] Yokoyama, T. et al., 2022, Science 379,

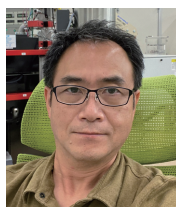
- eabn7850.
- [9] Nakamura, T. et al., 2022, *Science* 379, eabn8671.
- [10] Noguchi, T. et al., 2022, *Nat. Astron.* 7, 170.
- [11] Okazaki, R. et al., 2022, *Science* 379, eabo0431.
- [12] Naraoka, H. et al., 2023, *Science* 379, eabn9033.
- [13] Yabuta, H. et al., 2023, *Science* 379, eabn9057.
- [14] Morioka, M. and Nagasawa, H., 1991, *Geochim. Cosmochim. Acta* 55, 751.
- [15] Nakato, A. et al., 2023, *Earth Planets Space* 75, 45.
- [16] 伊藤元雄, 2017, *ぶんせき* 9, 403.
- [17] Ito, M. et al., 2020, *Earth Planets Space* 72, 133.
- [18] Uesugi, M. et al., 2020, *Rev. Sci. Instrum.* 91, 035107.
- [19] Shirai, N. et al., 2020, *Meteor. Planet. Sci.* 55, 1665.
- [20] Kodama, Y. et al., 2020, *J. Mineral. Petrol. Sci.* 115, 407.
- [21] Nishimura, M. et al., 2023, *Earth Planets Space* 75, 131.
- [22] Yamaguchi, A. et al., 2023, *Nat. Astron.* 7, 398.
- [23] Tomioka, N. et al., 2023, *Nat. Astron.* 7, 669.
- [24] Kebukawa, Y. et al., 2010, *Meteorit. Planet. Sci.* 45, 99.
- [25] Floss, C. et al., 2006, *Geochim. Cosmochim. Acta* 70, 2371.
- [26] Alexander, C.M.O.'D., 2017, *Phil. Trans. R. Soc. A* 375, 20150384.
- [27] Daly, L. et al., 2021, *Nat. Astron.* 5, 1275.
- [28] Piani, L. et al., 2023, *ApJL* 946, L43.
- [29] Liu, M-C. et al., 2022, *Nat. Astron.* 6, 1172.
- [30] McCain, K. A. et al., 2023, *Nat. Astron.* 7, 309.
- [31] Verchovsky, A. B. et al., 2024, *Nat. Commun.* 15, 8075.
- [32] Pilorget, C. et al., 2024, *Nat. Astron.* 8, 1529.
- [33] Imae, N. et al., 2024, *Meteor. Planet. Sci.* 59, 1705.
- [34] Barosch, J. et al., 2022, *ApJL* 935, L3.
- [35] Nguyen, A.N. et al., 2023, *Sci. Adv.* 9, eadh1003.
- [36] Matsumoto, T. et al., 2024, *Nat. Astron.* 8, 1536.
- [37] Kebukawa, Y. et al., 2023, *Meteor. Planet. Sci.* 59, 1845.
- [38] Oba, Y. et al., 2023, *Nat. Commun.* 14, 1292.
- [39] Quirico, E. et al., 2023, *Meteor. Planet. Sci.* 59, 1907.
- [40] Changela, H. G. et al., 2024, *Nat. Commun.* 15, 6165.
- [41] De Gregorio, B. et al., 2024, *Nat. Commun.* 15, 7488.
- [42] Nittler, L. et al., 2024, *EPSL* 637, 118719.
- [43] Takano, Y. et al., 2024, *Nat. Commun.* 15, 5708.
- [44] Yoshimura, T. et al., 2024, *Nat. Commun.* 15, 6809.
- [45] Lauretta, D.S. et al., 2024, *Meteor. Planet. Sci.* 59, 2453.
- [46] McCoy, T. J. et al., 2025, *Nature* 637, 1072.
- [47] Glavin, D. P. et al., 2025, *Nat. Astron.* 9, 199.
- [48] Che, X. et al., 2021, *Science* 374, 887.
- [49] Cui, Z. et al., 2024, *Science* 386, 1395.
- [50] 矢田達ほか, 2022, *日本惑星科学会誌* 31, 153.
- [51] Yada, T. et al., 2023, *Earth Planets Space* 75, 170.
- [52] COSPAR Policy on Planetary Protection. *Space Research Today*, 2024.
- [53] Grady, M. et al., 2025, *Nat. Astron.* 9, 487.

表 1: フェーズ2キュレーション高知メンバーリスト(2021年6月～2024年3月)。

Name	Affiliations
Motoo Ito	Kochi Inst. Core Sample Research, JAMSTEC
Naotaka Tomioka	Kochi Inst. Core Sample Research, JAMSTEC
Masayuki Uesugi	Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPRing-8)
Kentaro Uesugi	Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPRing-8)
Akira Yamaguchi	National Institute of Polar Research (NIPR)
Naoya Imae	National Institute of Polar Research (NIPR)
Takuji Ohigashi	UVSOR Synchrotron Facility, Institute for Molecular Science/ Photon Factory, Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization
Yuzuru Karouji	Space Exploration Center, JAXA / Osaka University
Naoki Shirai	Tokyo Metropolitan University / Kanagawa University
Yu Kodama	Marine Works Japan Ltd. / Toyo Corp.
Hayato Yuzawa	UVSOR Synchrotron Facility, Institute for Molecular Science
Kaori Hirahara	Osaka University
Ikuya Sakurai	Synchrotron Radiation Center, Nagoya University
Ikuo Okada	Synchrotron Radiation Center, Nagoya University
Makoto Kimura	National Institute of Polar Research (NIPR)
Ming-Chang Liu	University of California Los Angeles / Lawrence Livermore National Laboratory, USA
Richard Greenwood	Open University, UK
Akira Tsuchiyama	Ritsumeikan University
Aiko Nakato	Institute of Space and Astronautical Science, JAXA / NIPR
Kasumi Yogata	Institute of Space and Astronautical Science, JAXA
Toru Yada	Institute of Space and Astronautical Science, JAXA
Masanao Abe	Institute of Space and Astronautical Science, JAXA
Masahiro Yasutake	Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPRing-8)
Kaitlyn McCain	University of California Los Angeles / Lawrence Livermore National Laboratory, USA
Nozomi Matsuda	University of California Los Angeles, USA
Kevin D. McKeegan	University of California Los Angeles, USA
Ross Findlay	Open University, UK
James A. Malley	Open University, UK
Ian A. Franchi	Open University, UK
Monica Grady	Open University, UK
Alexander (Sasha) Verchovsky	Open University, UK
Feergus Abernethy	Open University, UK
Xuchao Zhao	Open University, UK
Martin Suttle	Open University, UK
Cedric Pilorget	Institut d'Astrophysique Spatiale, Université Paris-Saclay, CNRS, France
Jean-Pierre Bibring	Institut d'Astrophysique Spatiale, Université Paris-Saclay, CNRS, France
Damien Loizeau	Institut d'Astrophysique Spatiale, Université Paris-Saclay, CNRS, France
John Carter	Institut d'Astrophysique Spatiale, Université Paris-Saclay, CNRS, France
Lucie Riu	Institut d'Astrophysique Spatiale, Université Paris-Saclay, CNRS, France
Tania Le Pivert-Jolivet	Institut d'Astrophysique Spatiale, Université Paris-Saclay, CNRS, France
Akihisa Takeuchi	Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPRing-8)
Shun Sekimoto	Kyoto University
Keishi Okazaki	Kochi Inst. Core Sample Research JAMSTEC / Hiroshima University

著者紹介

伊藤 元雄



国立研究開発法人海洋研究開発機構高知コア研究所・上席研究員。学習院大学理学部化学科博士課程修了。博士(理学)。2001年からアリゾナ大学地球科学科JSPS海外PD, 2006年からNASA Johnson Space Center ARESとLPIでの研究員を経て, 2011年より現職。専門は惑星物質科学と二次イオン質量分析法。日本地球化学会, 日本惑星科学会, 日本分析化学会, 研究・イノベーション学会, Meteoritical Societyに所属。NASA Small Bodies Assessment GroupのCommitteeを務める。

富岡 尚敬



国立研究開発法人海洋研究開発機構高知コア研究所・上席研究員。北海道大学大学院理学研究科博士課程後期修了。博士(理学)。日本学術振興会・特別研究員PD, 神戸大学理学部・助教, 岡山大学地球物質科学研究センター・准教授, 海洋研究開発機構高知コア研究所・主任研究員を経て2024年10月より現職。専門は惑星物質科学, 高圧鉱物学。日本鉱物科学会, 日本高圧力学会, アメリカ地球物理連合, 国際隕石学会, アメリカ鉱物学会に所属。日本鉱物科学会理事, アメリカ鉱物学会フェロー等を務める。

山口 亮

国立極地研究所准教授, 南極隕石キュレーター。東京大学大学院理学系研究科鉱物学専攻博士課程を卒業後, 米国ハワイ大学博士研究員, 科学技術特別研究員(旧無機材質研究所)を経て, 1999年より現職。博士(理学)。国際隕石学会フェロー。Meteoritics & Planetary Scienceのアソシエイトエディターを務める。

中藤 亜衣子

国立極地研究所南極隕石ラボラトリー・学術支援技術専門員。東北大学大学院理学研究科博士課程修了。博士(理学)。2012年からニューメキシコ大学地球惑星科学科でPD, 2014年からJAXA/ISASでプロジェクト研究員, 2016年から京都大学で研究員, 2018年からJAXA/ISASで研究開発員を経て, 2023年より現職。専門は惑星物質科学。日本惑星科学会, Meteoritical Societyに所属。

火の鳥「はやぶさ」未来編 その35 ～惑星物質研究所のリユグウ試料高次キュレーション～

小林 桂¹

(要旨) 「はやぶさ2ミッション」によってもたらされたリユグウ試料のキュレーションプロセスに、岡山大学惑星物質研究所(IPM)は、「はやぶさ」初号機の帰還試料の初期分析を担当した経験をもとに高次キュレーション施設として参画した。IPMの地球惑星物質総合解析システム(CASTEM)は、微量なリユグウ試料の多角的な無機・有機分析を可能にし、貴重な科学的成果をもたらした。本稿では、IPMにおける高次キュレーションの活動内容、分析プロトコル、得られた知見、および将来のサンプルリターンを見据えた高次キュレーション施設の展望と課題について述べる。

1. はじめに

小惑星探査ミッション「はやぶさ2」は、C型小惑星リユグウから採取された貴重なサンプルを地球へ持ち帰るという偉業を達成し、太陽系形成初期の物質科学、そして地球外生命の起源の解明に重要な一歩を刻んだ。このミッションによって地球に届けられた試料は、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所(JAXA/ISAS)において綿密なキュレーションプロセスを経たのち、その科学的価値を最大限に引き出すため、国内外の研究者によって解析が進められてきた。なお、キュレーションは、試料の初期記載から詳細な特性評価、将来の研究利用を目的とした長期保管に至るまで、多岐にわたるプロセスを含んでいる。

今回ははやぶさ2ミッションに関連する話題を示す機会をいただいたこともあり、「はやぶさ2」が持ち帰ったリユグウ試料の高次キュレーションにおいて重要な役割を担った岡山大学惑星物質研究所(IPM)の活動について、その基盤部分について紹介をしたい。さらに、これらの活動が今後の惑星科学研究、特に将来のサンプルリターンミッションにどのように貢献しうるか、高次キュレーション実施を通じて感じ

た点を述べることとする。

2. 高次キュレーション施設の選定の経緯と役割

高次キュレーション(Phase2 キュレーション)は、宇宙科学研究所におけるキュレーションの一環として行われた。IPMは、小惑星探査機「はやぶさ」初号機の初期分析にも参画し、その経験と実績を基に、「はやぶさ2」ミッションにおける高次キュレーションを担当する施設として、海洋研究開発機構高知コア研究所とともに2015年に選定された[1]。その際、試料の初期記載・分析を担当する初期分析チームと高次キュレーションチームの2つが定義されることになり、その両者の役割を再度確認したい。まず、初期分析チームは、「はやぶさ2」ミッションによって持ち帰られた試料の初期分析を担う。試料が地球に帰還する前に分析フローを徹底的に議論し、試料が帰還した後、短期間に科学的成果を出すことを目標とする。これに対し、高次キュレーション施設は、初期分析とは異なり、試料の帰還後に、個々の試料または試料のグループに対して、初期記載で得られたデータや帰還試料全体の特徴を踏まえた上で、試料から最大の科学的成果が得られるよう、科学テーマと目標を設

1.岡山大学惑星物質研究所
katsura@pheasant.misasa.okayama-u.ac.jp

定し、それに向けた分析フローを検討し実施することとなった。その際、JAXAキュレーション施設との共同研究を通し、キュレーションとその他の研究施設の人材交流、技術情報交換などを行い、将来のサンプルリターンへ向けた人材育成を実施することも目的の一つであった。

3. 高次キュレーションを支えた研究基盤

IPMでは、世界的にもユニークな「地球惑星物質総合解析システム」(Comprehensive Analytical System for Terrestrial and Extra-terrestrial Materials: CASTEM)を研究活動の基盤として運用している。このシステムは、様々な機能を持つ分析機器群とラボから構成されている。代表的な構成機器として、主にバルク分析を行う表面電離型質量分析計(TIMs)、誘導結合プラズマ質量分析計(ICP-MS)、安定同位体質量分析計、希ガス同位体質量分析計、高質量分解能有機質量分析計、in-situ分析を行う高空間分解能二次イオン質量分析計(HR-SIMS)、透過電子顕微鏡、走査電子顕微鏡、分光測定機器などがCASTEMの中で運用されている。またこれら機器群を連携し運用するための基盤システムとして、独自に開発を行った二次元ステージ座標共有システムや、取得データ管理データベースを活用している。また、CASTEMを遠隔地からも利用できるように、リモート運用環境の整備も進んでいる。

CASTEMの構築は、IPMにおける高次キュレーションの代表を務めた中村栄三教授が1987年にIPMの前身である岡山大学地球内部研究センターに着任したことで始まった。この解析システムは当初より、宇宙から地球へと帰還した貴重な試料をはじめ、地球上の様々な物質をターゲットとし、その組成、構造、そして起源と進化の過程を解明することを目的として整備が進められてきた。CASTEMの創設から発展にかけての時期は、日本の経済的な発展が著しい時期にもかかわらず、関連科学コミュニティからの関心が低く、国際的なサンプルリターン計画が進む中で日本のプレゼンスがまだ十分に発揮できていない状況であった。その中でもCASTEMは、将来地球外試料の多角的な解析が日本において必

ず必要になることを想定し、それを実現するシステムとして、中村教授の主導のもと多くの研究者によって発展を遂げた。現在では、共同利用・共同研究拠点であるIPMのミッションとして、国内外の研究者との共同研究に活用し、地球惑星物質科学分析分野の発展に国際的にも貢献することができている。

そのCASTEMにおいて大きな転換点となったのは、高次キュレーション施設としての活動が始まった直後、2016年10月21日にIPMから約4kmの地点を震央とする鳥取県中部地震(M6.6)による機器類およびラボの被災であった。震災によって大型分析機器のうち9台が損傷した結果、CASTEMの深刻な機能不全が生じることとなり、探査機「はやぶさ2」の帰還に向けたスケジュールの中での復旧がなるのか不安な日々であったことを思い出す。しかし、幸いにも、大学・文部科学省等の様々な支援を得て、高次キュレーションに必要な不可欠な基盤環境を2018年末までに整えることができた。加えて、この時、復旧事業の一環として有機物質解析環境(有機実験用クリーンルーム、高質量分解能有機質量分析計ほか)を整備することができたことは、高次キュレーション実施に向けて極めて重要な出来事であった。これまでCASTEMは主に岩石・鉱物・隕石などの無機物質の総合解析を行うことを目的として整備を行ってきた。しかしながら、「はやぶさ2」帰還試料はC型小惑星リュウグウの表面由来であり、それらには水や有機物が含まれていることが予想されていた(実際にそうであった)。それら水や有機物は、地球の海や生命の材料物質となった可能性もあり、太陽系前駆物質から現在に至る有機物進化の場としての小惑星の理解にとって、それらの解析は欠かすことができない要素である。加えて、それら水や有機物は単独に存在しているわけではなく、無機物質である鉱物と共存していることが本質であり、その両者の共進化の過程を理解することによって太陽系物質進化の新しい描像に迫れるのではないかと期待を高次キュレーションチームとして抱いていた。そのため、IPMで蓄積されてきた無機物に関する総合解析に、同じ解析哲学を反映させた有機物解析を統合することで、CASTEMを発展させたことは必然であったのかもしれない。実際、2018年には無機実験用クリーンルームと連携する形で有機物質の抽出を行う有機

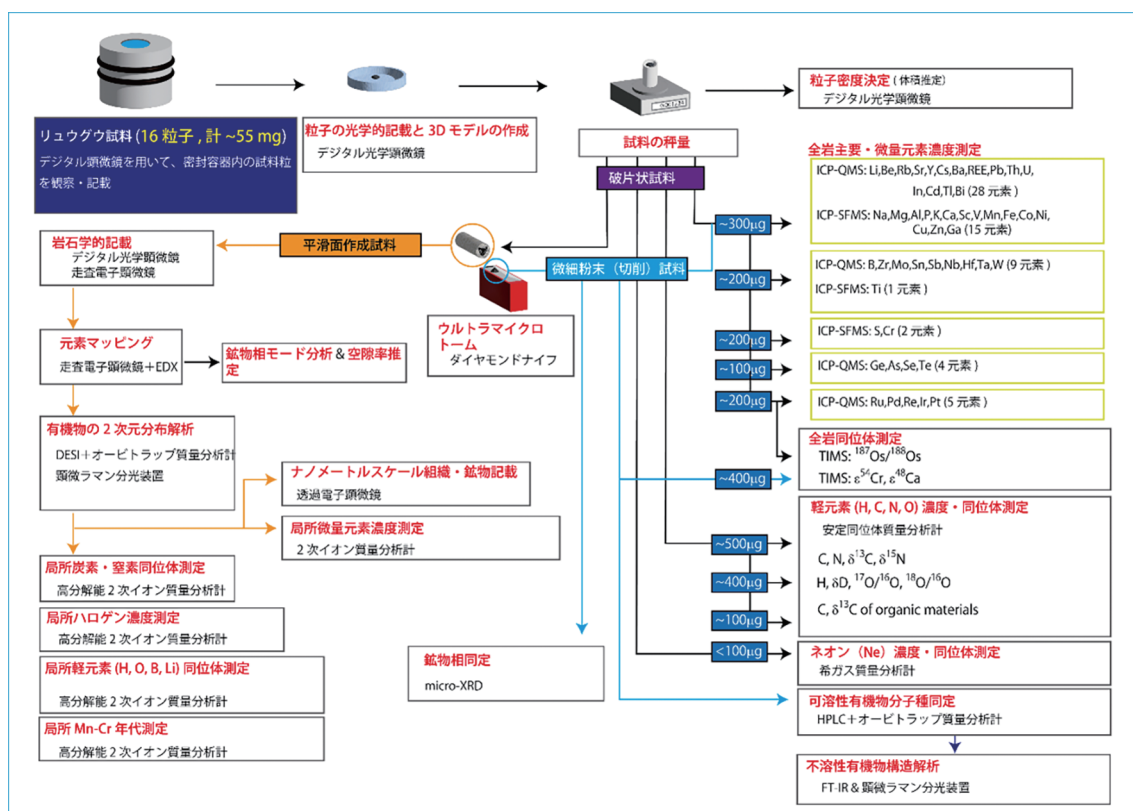


図1: 帰還粒子分析プロトコル。粒子は1粒子ごとに基礎的記載を行ったのちに、インジウムを用いて固定し、端面よりウルトラマイクロトームによって切削を行う。切削試料は適宜回収し、70元素の濃度分析、炭素、窒素、酸素濃度および同位体分析などに加えて、可溶性・不溶性有機物解析に用いている。切削によって作成された平滑面を用いて電子線局所分析、分光による分析、有機物分布解析、局所同位体解析などが行われた。(文献[2]補図1を改変)

実験用クリーンルーム(ISO3~4:立ち上げ時測定)を設置し、高速流体クロマトグラフィー(HPLC)システムを備えた高質量分解能有機質量分析計を稼働させることができた。そして、隕石試料など、帰還試料の模擬物質を用いた予備実験を2019年初頭より開始することによって、順調な高次キュレーション解析へとつながることができたのだが、今思えばまさに綱渡りのような状況であったともいえる。

4. 解析試料と総合解析プロトコル

高次キュレーションと初期分析の位置づけについては前述したが、多数の研究者が結集しチームを構成し専門的な視点から解析を行う初期分析チームに対して、IPMの高次キュレーションは、小惑星リュウグウの表面物質の俯瞰的な有機・無機物質科学的情

報を導き出すことを主眼においた。そして、初期分析および高次キュレーションに続く国際公募研究の基礎情報の蓄積ということも強く意識した。そのため、JAXAキュレーションと議論を行い、IPM高次キュレーションに割り当てられた試料量100mgの内訳として、TD1試料7粒子、TD2試料9粒子(総量55mg)と、粒子の個数に重きをおいた解析を行うこととした。すなわち、これら16粒の帰還試料に対し、粒子ごとに同じ解析プロトコルを適用することで、小惑星リュウグウ試料の物質科学的多様性に関する情報を得ることを解析ストラテジーとした。実際に各粒子に適用した解析手法に関しては文献[4]とその補足資料を参照していただきたいが、ここでは解析の全体像の説明のため、分析フロー(図1)を示すこととした。分析フローは、粒子全体の記載を行ったのち、bulk分析とin-situ分析の2つのフローに分岐する。この



図2: 模擬試料を用いたウルトラマイクローム試料調製の様子. 手前の金属治具上に蓄積した切削片を回収し, bulk分析用に用いた.

際, 最大の課題はそれぞれの解析に用いる試料量をどうやって確保するか, にあった. 結果としてbulk分析に用いた試料量(図1参照)は $100\mu\text{g}$ レベルで実施したわけだが, ルーチンとして mg レベルの極微量試料の分析を行っている我々にとっても非常にハードルの高い分析であった. また, 1mg にも満たない粒子もある中で, いかに試料のロスを低減し, bulk分析用に試料を分割することは, 高次キュレーションプロセスにおいて非常に大きな技術的課題となった. 「はやぶさ」初号機による小惑星イトカワ帰還試料の初期分析においては, 集束イオンビーム試料加工装置(FIB)を用いた試料分割によってin-situ分析用試料調製を行ったが[2], 加工に伴う鉱物相転移や有機物へのダメージ, そしてbulk分析に影響を与える試料汚染が懸念されリュウグウ試料への適用は難しいと判断した. 最終的には, 透過電子顕微鏡用薄膜試料作製のためのウルトラマイクロームを用いて試料粒子を削剥する手法にたどり着き, 問題を克服することができた. これによりin-situ分析用の平滑面を持った粒子を調製すると同時に, 切削片を回収しbulk分析用試料に用いることが可能となった. この手法が開発されたことは, けっして派手では

ないが高次キュレーションにおける重要な技術発展要素であったといえる(図2).

高次キュレーションの一つのミッションとして, 限られた時間の中で, 各粒子の多角的解析をもとにした粒子のカタログ化を, このような一連の分析として「一つ屋根の下」(under one roof)で行うことは, 非常に大きなメリットがある. 最近, 高次キュレーションや初期分析と直接関係するものではないが, 「はやぶさ2」帰還粒子の解析中のバクテリアによる試料汚染が報告されており[3], おそらく複数の研究機関での試料のハンドリングが行われたことが原因ではないかと推察される. むろん, 研究者は試料の汚染を避けるべく最大限努力を払ったに違いないが, やはり適用する手法が異なる中で, 試料取り扱いの共通認識を醸成することは難しいことである. 高い専門性を持った解析を実施するため, 試料の移転が必要なことは十分理解できる. しかし, IPM高次キュレーションで用いたアプローチのように, 参画研究者全員が分析フローを熟知している環境で様々な分析を行うことができたならば, リュウグウ試料の科学的価値を損なわないよう, 細心の注意を払って取り扱うことがよりたやすかったのではないか. 加え

て、“under one roof”研究環境では、解析を進め
る中で互いにフィードバックを行うことがたやすいた
め、データの再確認や解析上の問題点の洗い出しを
的確に行うことができたことも重要な点である。この
ことは、今後の初期分析・キュレーションにおいて検
討する価値があるように思う。

リュウグウ試料は、始原的な物質を地球環境にな
るべく暴露されない状態で、人類の手にもたらされ
たという特徴がある。特に「有機物」の惑星である地
球からの汚染を評価しうる形で無機物質・有機物質
科学の両面からの解析ができたことは、惑星物質科
学を大きく発展させた。IPM高次キュレーションに
おいても、その解析アプローチを実現するために、
CASTEMの整備を行ったことはすでに述べた。分
析科学の観点から言えば、そもそも無機分析と有機
分析は、その手法や注意すべき点において正反対と
いってもいい関係にある。幸い、リュウグウ試料の解
析というミッションの中で、その両者の分析哲学を融
合させた総合的な有機・無機解析の確立を指向し、
解析技術の発展に努めたことは、さらなるリュウグウ
試料の解析や、将来のサンプルリターンミッションで
得られた試料の解析にとっても非常に大きな経験と
なった。その結果、生命の起源の探求や有機材料開
発に関する研究にも応用が広がっていることを付記
したい。

IPM高次キュレーションによって得られた科学的
成果は文献[4]を参照いただきたいが、結果として、
当初高次キュレーションに求められた科学的成果を
決められた期日において出すことができたのではない
かと考えている。とりわけ、16粒の分析粒子全てか
ら、粒子密度や鉱物のモードといった記載情報、70
種の元素種に関する濃度情報、軽元素同位体情報
を得たことで、今後のリュウグウ試料の物質の不均
質性、すなわち始原的太陽系物質の多様性に関する
研究の端緒を拓くことができたのではないかと考え
ている。また、23種のアミノ酸を含む多様な有機分
子が無機的な情報と紐づいて検出され、太陽系誕
生から数100万年という非常に短い時間間隙におい
て、太陽系縁辺部の氷天体中での有機・無機物質共
進化場の推定も行うことができた。そして、そのよう
な極低温環境である太陽系外縁部から、現在のリュ
ウグウ軌道への移動という46億年間にわたる太陽系

の歴史のどこかで起った、物質移動ダイナミクスに関
する新しい見方を提示できたことは非常に大きな成
果であった。

5. 課題と展望

高次キュレーション施設の定常性

IPMは、全国共同利用・共同研究拠点として、国
内外の研究者にその設備と所属研究者の経験を活
かした研究機会を提供することがミッションとして掲
げ活動している。すなわち、高次キュレーションに活
用したCASTEMも、通常は共同利用研究設備とし
て利用されている。本稿では「はやぶさ2」高次キュ
レーションとして、そして将来の太陽系物質科学の
展開を想定した設備整備を、被災復旧というかたち
で行うことができたことを紹介したが、これはまさに
偶発的なものであった。現実的には「はやぶさ」,「は
やぶさ2」という我が国のサンプルリターンミッシ
ョンのタイムフレームの中で、たまたま人的・物的整備
を行うことができたというのが正確であるかもしれな
い。しかし今後、人類の地球外進出が加速的に進
み、それに伴って物質科学研究のフィールドも拡大
するなかで、偶発的な整備に頼ることは当然不可能
である。そして国際共同ミッションの推進に伴い、帰
還試料を我々人類が手にする機会はより頻繁に訪れ
るなかで、それら試料の保管、記載を担当するキュ
レーション施設の活動はますます重要になる。その
際に、リュウグウ試料の高次キュレーションで行われ
たような、総合的な解析を行う組織なり施設をどの
ように位置づけ、その有効性を精査したのち、計画
的に発展させていくことをコミュニティとして検討す
る必要があるのではないか。近年の解析機器の進歩
やAIを用いたデータ解析技術の発展は目覚ましい
ものがある。日本、そして世界の社会情勢の変化に
も関連して、それらの速度にやみくもに追従するこ
とが必ずしも正解でないことを踏まえつつも、総合力
としての最適解を求めて努力しなければならないだろ
う。そしてその根底にあるのは、人的資産の育成で
ある。このことは高次キュレーションのミッションの
一つとして掲げられていたが、IPMの活動において
は必ずしもそれが達成できたとはいえない。今後、特
定のミッションに依存する形だけではなく、より普遍

的な研究活動を推進する環境において、多角的な視野を持った研究者を、幅広い世代にわたって育成していく必要がある。

解析チーム間の連携

高次キュレーションと初期分析は、互いに独立した役割を担いつつも、互いに連携することで、「はやぶさ2」帰還試料から得られる科学的成果を最大化することが求められていた。結果として得られた科学的アウトプットは、高次キュレーションと初期分析チーム共、非常に科学的価値が高いもので、その観点からリュウグウ試料解析の最初のステップは良く機能したと言える。しかし、試料解析にあたっての具体的なコミュニケーションは必ずしも十分ではなかったことは課題の一つだろう。研究者としての先見性や先占権の確立の重要性は揺らぐものではないが、より緊密な情報交換によって高次キュレーション、初期分析が成功する確率がより高まるように思う。

このようなコミュニケーションを活性化するためには、「平時」、すなわちサンプルリターンミッションの谷間となるタイミングでの連携サイエンスプロジェクトを積極的に実施することが一つの方策となるのではないか。特に、地球外試料のキュレーション技術の向上や哲学の共有を、JAXA/ISASキュレーションと高次キュレーションの間で継続的に行うことは、次のサンプルリターンミッションにとって非常に重要である。日本の帰還試料キュレーション体制は、いうまでもなく米国など諸外国と比較して、質は十分に高い競争力を持つが、人的資産や体制規模に関する整備を今後さらに充実を図るため、継続的な基礎研究を協力して進める必要があるだろう。地球外探査の活性化に伴うキュレーションや初期分析のやり方の変化を踏まえた連携強化について今後議論され、より良い形で発展していくのではないかと期待している。

6. まとめ

小惑星探査機「はやぶさ2」によってもたらされたリュウグウ試料の高次キュレーションに参画したことは、単に試料を分析するだけでなく、IPMとして惑星科学の未来を切り拓く上で重要な意味があった。本稿中で“under one roof”での総合解析の特

徴について概略と利点を述べたが、逆にそういった形態の組織を維持発展することの難しさも向き合わなければならない。IPMには「はやぶさ」「はやぶさ2」と二世代にわたって初期分析・キュレーションに係わった経験を活かし、火星衛星からの帰還試料、月・火星からの帰還試料といった近い将来人類の手にもたらされるだろう地球外試料の特性を思い描きながら、広く地球惑星物質の総合解析を行う拠点であることが、共同利用・共同研究施設として求められる。そのIPMでは「はやぶさ2」プロジェクトの高次キュレーション活動が現在も継続されており、当初掲げた太陽系環境における有機・無機物質の共進化と小惑星形成・進化に関する物質科学的研究を進展させている。それについては、一連の研究成果[5-11]を参照されたい。また将来に向けて、キュレーション施設を始めとしたJAXA/ISASとの人材育成に向けた取組に向けた具体的議論も進みつつある。

本稿中にも述べたが、地上での解析が重要な役割を果たすサンプルリターンミッションの頻度は今後さらに増すことは確実であり、キュレーションのあり方もそれに伴って変化していく。そして大型ミッション推進に不可欠な国際連携の枠組みの中で、例えば国内外の研究者がCASTEM(もちろんリモート環境も含め)を活用し、より広い意味での“under one roof”研究環境を提供できるIPMが将来の地球外天体探査ミッションに貢献することができることを願っている。サンプルリターンの時代を迎え、地球から見上げる太陽系物質科学から、太陽系全体を俯瞰する物質科学へのパラダイムシフトが急速に進んでいる。我々にとって「はやぶさ2」プロジェクトにおける高次キュレーションは、それを強く意識づける活動であり、将来に向けた重要な転換点となったことは間違いない。

謝辞

まず本稿をしたための機会をいただいたこと、「はやぶさ2」プロジェクトサイエンティストの渡邊誠一郎先生(名古屋大)、三浦均先生(名古屋大)に感謝を申し上げたい。そしてもちろん、IPM高次キュレーションチームとして、共にミッションに携わったメンバー、とりわけ代表としてミッションを主導した中村

栄三教授に心より敬意を表したい。また、同じく志をもって高次キュレーションに携わったJAMSTEC 高知コア研究所および初期分析チームの研究者の皆さん、そして試料の一次キュレーションを実施した白井寛裕先生、安部正真先生をはじめとしたJAXA キュレーション施設の皆さんには様々な面でご迷惑をおかけするとともに、そのご協力に感謝したい。そしてもちろん、世界で初めてC型小惑星からの試料を我々の手元に届けてくださった、津田雄一先生を始めとする「はやぶさ2」プロジェクトの全てのメンバーに、大いに感謝を申し上げたい。ありがとうございました。

参考文献

- [1] 安部正真ほか, 2020, 遊星人 29, 28.
- [2] Nakamura, E. et al., 2012, PNAS 109, 4031.
- [3] Genge, M. et al., 2025, Meteorit. Planet. Sci. 60, 64.
- [4] Nakamura, E. et al., 2022, Proc. Japan Acad., Ser. B 98, 227.
- [5] Miura, H. et al., 2022, ApJL 925, L15.
- [6] Potiszil, C. et al., 2023a, Nature Communications 14, 1482.
- [7] Ota, T. et al., 2023, Universe 9, 923.
- [8] Potiszil, C. et al., 2023b, Life 13, 1443.
- [9] Tanaka, R. et al., 2024, ApJL 965, 52.
- [10] Potiszil, C. et al., 2024, Nature Astronomy 8, 1617.
- [11] Potiszil, C. et al., 2025, Earth Planet. Sci. Lett. 653, 119205.

著者紹介

小林 桂

岡山大学惑星物質研究所教授, 東京大学大学院理学系研究科地質学専攻博士課程単位取得退学, 博士(学術). 岡山大学固体地球研究センター助手, 同地球物質科学研究センター准教授を経て, 2015年10月より現職. 専門は火山岩岩石学, 同位体地球惑星化学.

一番星へ行こう！ 日本の金星探査機の挑戦 その62 ～金星の雲層に現れる巨大な渦の正体に迫る～

今井 正亮¹, 高木 征弘², 安藤 紘基², 佐川 英夫²

(要旨) 金星探査機「あかつき」に搭載された2 μ mカメラIR2によって、分厚い雲層内部の濃淡が熱赤外線シルエットとして可視化されています。多数の特徴的な雲構造が存在する中で、今回我々が着目したのは、緯度20°付近に中心を持つ数千kmスケールの巨大な渦構造です。金星大気大循環モデルAFES-Venus GCMを用いた数値モデリングによって、観測された渦と定性的によく似た現象の再現に成功しました。本稿では、GCMの結果から渦の形成に関わる力学不安定や、雲の濃淡コントラストを生み出すメカニズム、そして渦の背後にある雲層高度における大気の時空間変動について考察した内容を紹介いたします。なお、本研究の詳細につきましては、Icarus誌にて出版されました論文 [1] を併せてご確認ください。

1.「あかつき」IR2が捉えた特徴的な渦

金星は全球が厚い硫酸雲に覆われており、紫外線および可視光による観測で見ることができると言われる世界は昼面側の雲頂高度 約65～70 kmの雲だけです。しかし、金星の夜面側を近赤外線領域で観測すると、主に下層(約45～50 km)と中層(約50～56 km)の雲層内部の構造が雲の光学的厚さの違いから捉えられます。これは、雲の下にある高温な地表および大気からの赤外放射が、下層および中層の雲によって吸収されるため、このような雲コントラストの時・空間変動は、大気中で起こる雲の化学・微物理、そして大気力学を反映したものと考えられます。これまで金星の夜面の中・下層雲及びその高度の大気は、地上望遠鏡、Galileo探査機のNIMS、Venus Express探査機のVIRTISなどの赤外観測を通じて研究されてきました。しかし、金星雲層内部で起こる諸現象の包括的な理解のためには今もってなお観測が不足しています。

日本の金星探査機「あかつき」は、2015年12月の

金星周回軌道への再投入以降、赤道近傍の軌道から複数波長によるグローバルな撮像観測を行い、さまざまな時空間スケールでの雲構造の研究が新たに可能となりました。搭載されている2 μ mカメラ(IR2)は、1.735, 2.02, 2.26, 2.32 μ mの波長帯で観測を行うことができ、CO₂吸収が強い2.02 μ m帯は雲頂高度の計測に、CO₂の“窓領域”に対応しているその他の波長帯は、より深い大気の観測に利用されています。CO₂の“窓領域”を用いた金星の夜面画像には、多様なスケールの雲構造やその顕著な時間変動が捉えられていますが、本研究では、そのなかでも図1に示すような北緯20°・東経18°付近に暗い“目”を持つ水平方向2000 km規模の渦構造に注目しました。この暗い部分は、地表からの赤外放射が厚い雲によって遮られている領域で、北緯20～30°にわたって白く伸びる(雲が薄い)帯状の領域が渦に巻き込まれることで、明瞭な渦状のコントラストを形成していると考えられます。

先行研究 [2] では、この構造は「キノコ型」のメソスケール渦とされていましたが、本研究ではより大規模な総観スケールの渦構造の中心部としてこの雲構造を再解釈します。また、比較的南北対称な構造が多い金星には珍しく、南半球に類似する顕著な渦構

1. 東京大学 大学院理学系研究科 天文学教育研究センター

2. 京都産業大学 理学部

mstk-a.imai@ioa.s.u-tokyo.ac.jp

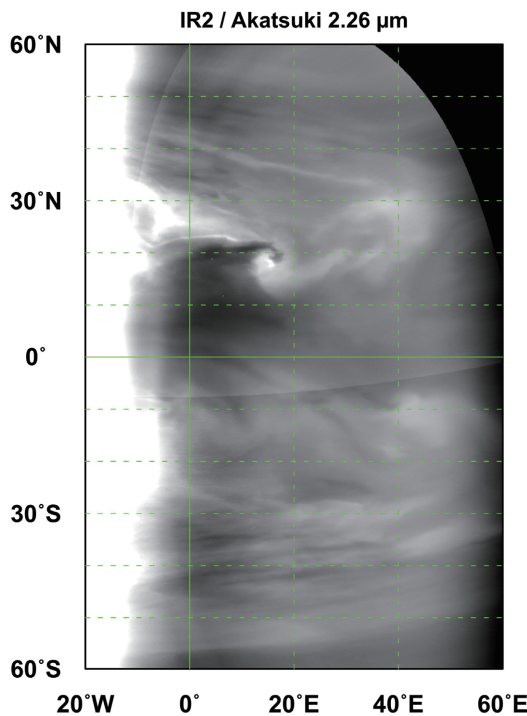


図1: 2016年5月7日04時03分33秒 (UTC) に金星探査機「あかつき」搭載IR2の2.26 μ mフィルターで取得された金星夜面北半球に写る渦状の雲構造。スーパーローテーションは東風として(右から左に)吹いている。

造が見られない点は特筆すべき特徴です。赤道を超えて北半球の渦と接続するような斜めの雲構造が存在している点からは、赤道をまたぐ大気の流れが示唆されます。このような渦構造は、大気中の流体力学的不安定によって形成されている可能性があります。IR2画像にはこの構造の形成や消滅を追跡できるような継続的なデータは存在しておらず、渦の寿命など時間発展に関する情報は限られていました。

そこで本研究では、金星大気大循環モデル (AFES-Venus GCM) によるシミュレーション結果を調べIR2によって観測されたものと類似する特徴を示す渦について、その構造および形成過程の詳細を数値的に解析しました。使用したGCMは、放射による加熱・冷却過程を単純化し、雲物理や化学過程を含まない力学モデルではありますが、スーパーローテーションに代表される金星の大気大循環のみならず、“cold collar”と呼ばれる極域の大気構造であったり、下層から中層雲に見られる縞状の雲構

造、Rossby-Kelvin不安定性によって励起される惑星波、さらに上層大気の熱潮汐波など、金星大気における諸現象を現実的に再現することに成功しています。

本稿では、モデルの詳細については既発表の文献 [1]および関連研究に譲ることとし、紙面の都合および本現象の全体像を読者が把握しやすくするため、まず本現象に関する概要を整理した後に、個別の考察をモデル結果との比較を交えながら展開します。

2. 渦形成の全体像

はじめに、AFES-Venus GCMの解析によって明らかになった渦の形成に関する一連のプロセスについて、図2を用いて概説します。本現象の鍵となるのは、南北両半球において総観規模の渦 (Vortex) と中緯度ジェット (Jet) が約30日で交互に現れる準周期的な変動です。異なる半球において、成長中の渦と減衰中の渦が共存し、それらが結びつくことによって、赤道を越える南北方向の角運動量 (AM) の輸送が生じます。その結果、減衰中の渦が存在する半球では中緯度ジェットが強化され、この強化された中緯度ジェットが順圧不安定を引き起こし、新たな渦を形成する、というのが基本的なメカニズムです。

図2では、南北両半球における渦および中緯度ジェットの準周期的な変動を6つのPhaseに分けて整理し、このうち1周期の前半分に当たる4つのPhaseを模式的に示しています。なお、模式図の最初と最後に示されている Phase 1と1' は南北が入れ替わっているだけで基本構造は同一です。また、以降の議論では、モデルで用いている座標系 (地球型) に従い、自転とスーパーローテーションが実際とは逆向きの西→東 (図中では左→右) である点に留意してください。Phase 1では、南 (北) 半球の中緯度ジェットが強化されつつあり、同時に北 (南) 半球の渦が成長中 (減衰中) の状態にあります。この状態は、例えば後述するGCMの結果 (図4) の28日目付近に対応します。北半球の成長中の渦は、減衰中の南半球の渦の東に位置し、両者の結びつきが南東方向への赤道越えの水平風を生じさせています。この風によって角運動量が北半球から南半球へと輸送され、南半球の中緯度ジェットを強化する一方、北半

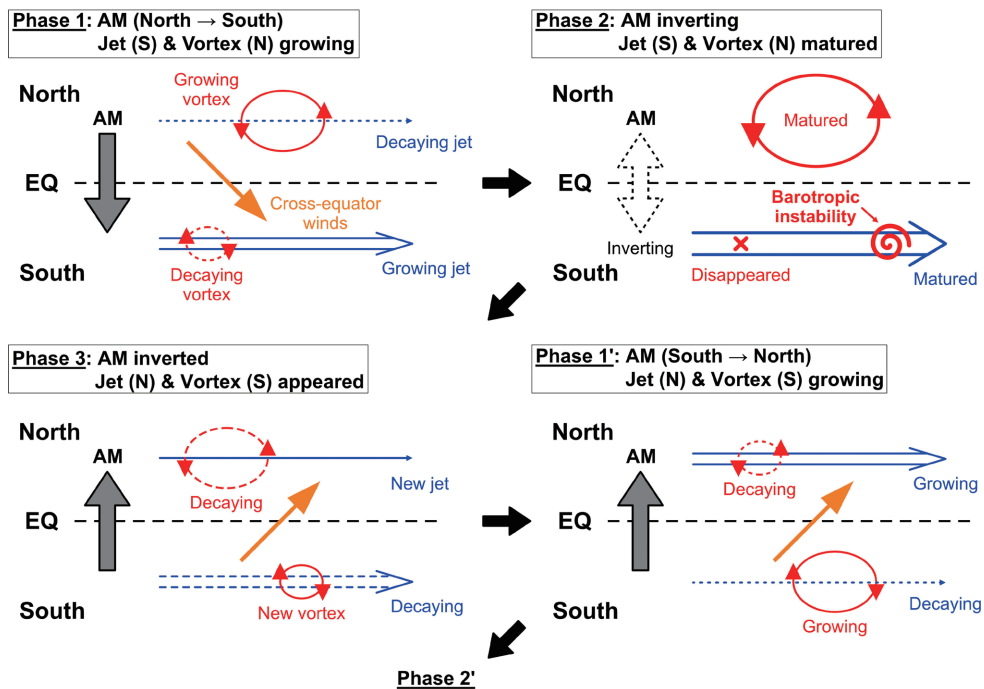


図2: 北半球および南半球における渦と中緯度ジェットの準周期的な変動を示す模式図。赤い円は渦、青い矢印は中緯度ジェット、オレンジの矢印は赤道を越える水平風を示す。灰色の矢印は角運動量 (AM) の輸送方向を表しており、時間と共に Phase 1, 2, 3, そして1'... の順に進行する。

球側のジェットは減衰していきます。続くPhase 2では、南 (北) 半球の中緯度ジェットと北 (南) 半球の渦がそれぞれ成熟 (消滅) した状態、すなわち一連の変動におけるターニングポイントに達しており、このPhase 2以降では角運動量の輸送方向が反転します。このとき、南半球では成熟した中緯度ジェットによって緯度30°付近で東西風の南北シアーが増大し、順圧不安定が発生します。Phase 3では、Phase 2で発生した順圧不安定によって南半球に新たな渦が出現し、成長していきます。この新しい渦は北半球の既存の渦よりも東側に位置しており、今度はこれらの渦が結びつくことで、角運動量が南半球から北半球へと輸送され、北 (南) 半球の中緯度ジェットの強化 (弱化) が生じます。そしてPhase 3に続くPhase 1'では、Phase 1と同様の構造が南北を入れ替える形で再び現れ、以後も準周期的に変動が繰り返されることになります。

3. 渦とジェットの準周期変動と南北運動量輸送

前章で概説した南北両半球で交互に現れる渦構造と中緯度ジェットの関係について、GCMの出力結果を用いた詳細な検討を行いました。図3には、北半球の渦が成熟する時期 (Phase 2) およびその前後5日間 (Phase 1および3) における渦の配置が示されています。これにより、渦は南半球側で北半球の渦に対して西側から東側へと移動していることが確認され、また両半球の渦が赤道を挟んで接続されることで、南北方向の赤道越えの風が形成されている様子が分かりました。さらに、図4にて東西風 (a)、ポテンシャル渦度 (PV) の極大値 (b)、および南北運動量フラックス (c) の時間変化を示します。東西風速分布からは、緯度30°付近において、北半球・南半球で交互に中緯度ジェットが発達していることが分かります。また、PVの極大値が北緯・南緯20°-30°付近で30日周期で変動しており、これが渦の形成に対応してい

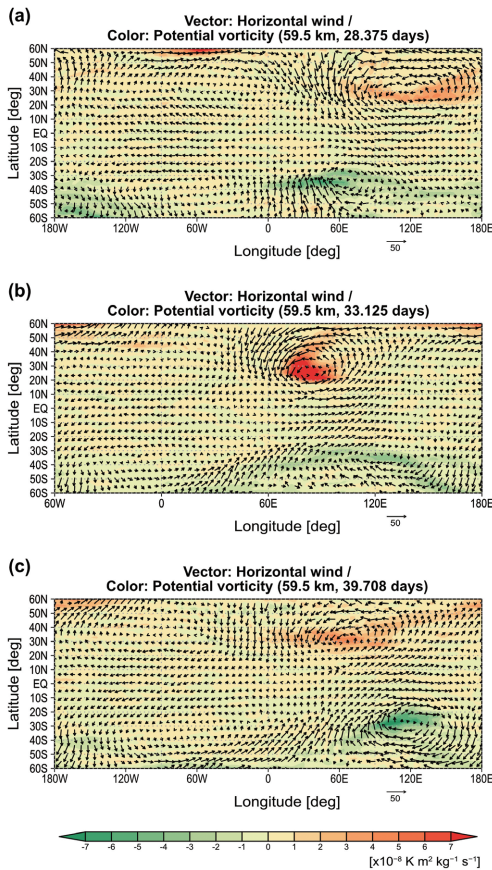


図3: 59.5 km高度におけるポテンシャル渦度 (PV) および水平風のスナップショット。(a) 北半球で渦が成熟する約5日前, (b) 成熟時, (c) 約5日後。

ることが読み取れます。例えば、29～35日目には北緯25°-30°でPVがピークを示し、この時期に南半球の中緯度ジェットが強化され、北半球のジェットは弱化していることが確認できます。

加えて、南北運動量フラックス $(\overline{u'v'} \cos \phi)$ により、渦の形成と中緯度ジェットの強弱に関係する運動量の南北輸送が明瞭に示されました。ここで、 $(\overline{\quad})$ は東西平均を、 u' および v' はそれぞれ東西風および南北風の東西平均からの偏差を、 ϕ は緯度を表しています。特に、南北60°にわたる広い緯度帯で運動量が一方に輸送されており、これが対向する半球のジェット形成を駆動していることを示唆しています。これらの結果は、渦と中緯度ジェットの時間変動が密接に連動しており、準周期的な大気構造の振動の一端を担っていることが分かります。

4. 順圧不安定による渦形成

本研究では、金星の中層雲高度 (GCM内で約60 km) に準周期的に出現する総観規模の渦が、中緯度ジェットの南北シアーに起因する順圧不安定によって発生している可能性について検証を行いました。GCMで得られた南北風のシアー構造に基づく線形安定性解析により、渦の成長時間および東西スケールを定量的に評価しました (詳細は原論文のSection 4.3参照)。解析の結果、最も成長しやすいモード (most preferred mode) の成長時間 (e-folding time) は約4.3日と見積もられました。これは、モデル内で渦が成長する10-15日の期間で初期振幅が7-20倍まで成長する計算となり、実際にモデル内の渦周囲の最大風速が > 20 m/sになることと良く一致します。また、この成長モードで見積もられる東西スケールは約9300 kmと計算され、これはGCMやIR2観測で得られた渦のスケール (約5500 km) のおよそ2倍です。観測されている渦はいずれも低気圧性の渦であり、線形安定性解析で得られたスケールが低気圧と高気圧の合わさった1波長分のスケールであると考え、こちらも整合的な値となっています。

順圧不安定の他に、傾圧不安定も渦形成メカニズムの候補として考えられますが、GCMの結果では、渦周辺では南北方向の熱輸送がほとんど見られなかったことから、本現象で見られる総観規模の渦は主に順圧不安定に由来すると結論づけられました。

5. 渦が作る雲構造

金星の2 μ m帯における観測画像では、赤道付近に暗い (雲が厚い) 領域、低緯度から中緯度にかけて明るい (雲が薄い) 帯状構造が頻繁に見られます [3]。また、先行研究 [4] では、IR2で観測された渦列 (vortex street) は、こうした明るい帯の南北方向の移流によって可視化された現象であると解釈されており、本研究の結果もこの解釈とよく一致します。

一方、GCMで再現された成熟期の渦構造には、観測雲構造の新たな理解につながる示唆が含まれていました。図5に示されるように、渦の東側には極方向かつ上向きの風、西側には赤道方向かつ下向き

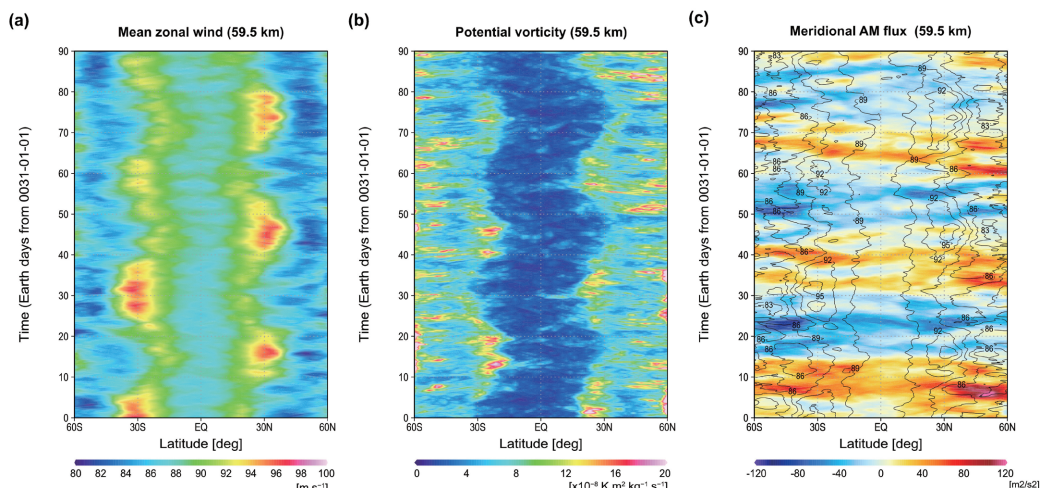


図4: 高度59.5 kmにおける (a) 東西平均東西風, (b) 各緯度におけるPV (ポテンシャル渦度) の絶対値の最大値, (c) 南北運動量フラックスの時間変化。

の風が存在しており, IR2観測における暗い (雲が厚い)・明るい (雲が薄い) 領域の東西コントラストと対応しており, すなわち, 上昇流によって雲粒が形成・増加し, 下降流によって蒸発・減少することで雲の濃淡が形成されている可能性が考えられます。そこで, 渦に伴う鉛直風による断熱膨張・温度低下の効果を考慮して雲の光学的厚さ変化を定量的に見積もりました (詳細は原論文 Appendix A 参照)。具体的には以下の2ケースを想定して評価を行いました。

- Case 1: 渦が高度55–65 kmに存在し, H_2SO_4 の質量分率が85% (モル濃度51%)
- Case 2: 渦がより低い高度50–60 kmに存在し, H_2SO_4 の質量分率が100% (モル濃度100%)

その結果, 最大30 mm/sの上昇流により空気塊が鉛直に移動し (約1.6 km), 断熱的に最大14 K程度の温度低下が引き起こされると見積もられました。この温度変化から飽和蒸気圧の変化を通じて雲の質量増加を算出し, 粒径や硫酸密度, Mie散乱消散係数に基づいて光学的厚さ変化 $\Delta\tau$ を求めた結果, Case 1では $\Delta\tau \leq 0.01$ とIR2で観測された雲コントラスト ($\Delta\tau \sim 10$) を説明するには不十分でした。一方, Case 2では $\Delta\tau \sim 6$ (mode 2粒子のみと仮定) まで達し, さらに下降流による雲の蒸発効果を加味すると観測されるコントラストを十分に説明し得ることが示されました。Case 2はGCM内で得られた渦の存在高度を5 km下方に仮定したものです。

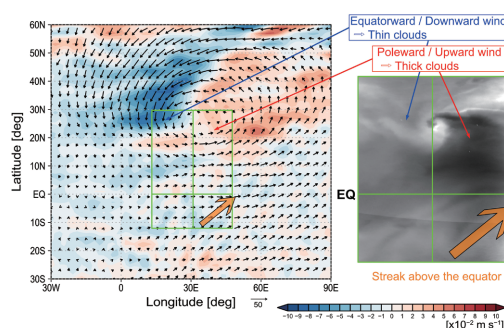


図5: (左) GCMで再現された渦構造。カラーマップは鉛直風を表す。(右) IR2/あかつきが観測した渦状の雲構造。観測された画像の経度方向を反転させることで, GCMと同じ座標系になるよう調整済み。

が, モデル内の大気安定度プロファイル等を現実の金星大気との比較に照らせば, 非現実的な想定ではありません。

以上のことから, 渦に伴う鉛直風が雲の形成・蒸発に大きく寄与していることがあり, 南北移流とともに, 鉛直風の効果が渦状雲構造の形成に本質的な役割を果たしていることが示唆されました。なお, 前述した通り渦は順圧不安定によって生成されますが, 渦周囲の鉛直流に関しては等温位面上の断熱運動によって説明が可能です。渦の中心からみて東西の南北・鉛直方向の風とポテンシャル温位の分布を調べたところ, 高度50–65 kmでは, 等温位面 (断熱面) が低緯度ほど低くなっており, 緯度20°–50°の間

ではその傾斜が急になっています。これは、東西平均された東西風が温度風バランスにあるため、渦の中心付近である北緯約30°・高度59.5 km付近では、南北風がほぼ等温位面に沿って吹いており、赤道方向(極方向)への風がその傾斜面を下降(上昇)することで、渦の西側(東側)に下降流(上昇流)を作っていると考えられます。

6. まとめと今後

金星探査機「あかつき」に搭載されたIR2が捉えた金星夜面に見られる特徴的な渦状の雲構造は、総観規模の低気圧性渦に対応すると考えられます。本研究では、AFES-Venus GCMを用いてこの渦を再現し、その構造と時間変化および成因を詳細に解析しました。モデル中で渦は高度約60 kmに出現し、東側で上昇流、西側で下降流を伴っており、IR2観測画像との比較から、このような鉛直風がそれぞれ雲の厚い(暗い)・薄い(明るい)領域に対応しており、スパイラル状の雲構造は鉛直風と南北風による移流の両方によって形成・強調されていることが示唆されました。

さらに、この渦は中緯度ジェットと密接に関連しており、北半球と南半球の間で約30日周期で交互に出現することが明らかになりました。この準周期的な変動は、南北半球に存在する成長中の渦と減衰中の渦が赤道を越えて結びつくことで南北角運動量輸送を作り、減衰中の渦が存在する半球の中緯度ジェットを強化し、その結果、順圧不安定によって新たな渦が生成されるという一連のプロセスによって説明

されます。

以上の成果は、金星の雲層中で発達する大規模な渦構造の背景にある力学メカニズムの全体像を初めて示したものといます。しかしながら、現時点では渦の発生位置(特に南北半球間の東西方向のズレ)を決定づける理論的な枠組みや、スーパーローテーションや惑星規模の波動との関係性についての理解は十分ではなく、今後のさらなる理論的・数値的な探究が必要とされます。また、この変動現象がどの程度長期的に安定して継続するのかや、中緯度ジェットや渦の寿命、そして渦周辺のエアロゾルや雲粒子の分布といった点について観測的に明らかにしていくことも重要な研究課題です。こうした課題に取り組むには、1か月規模の連続観測を含む詳細なデータの蓄積と、雲化学やエアロゾル物理も考慮したモデルの発展が鍵を握ります。著者としては、今後も地上望遠鏡による分光観測などを活用し、「あかつき」観測以降の継続的なデータ取得と、数値シミュレーションとの統合的な比較を通じて、金星大気の力学構造に対する理解を一層深めていく所存です。

参考文献

- [1] Imai, M. et al., 2025, Icarus 433, 116523.
- [2] Limaye, S.S. et al., 2018, Earth Planets Space 70, 24.
- [3] Peralta, J. et al., 2019, Icarus 333, 177.
- [4] Horinouchi, T. et al., 2023, Geophys. Res. Lett. 50, e2022GL101633.

著者紹介

今井 正亮



東京大学大学院理学系研究科天文学教育研究センター特任助教。北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻博士課程修了。博士(理学)。産業技術総合研究所特別研究員、京都産業大学日本学術振興

会特別研究員(PD)を経て、2023年4月より現職。専門は惑星気象学。地上望遠鏡や金星探査機「あかつき」観測データを用いた観測の研究を主軸とし、現在は東京大学の6.5 m赤外望遠鏡をチリに建設するTAO計画に従事。

もう一つの月世界へ： 火星衛星探査計画MMX その8 ～着陸するならどこが良い？～

和田 浩二¹, MMX LSSワーキングチーム

(要旨) 火星衛星探査計画Martian Moons eXploration (MMX)は火星衛星の一つであるPhobosの表面に着陸、試料採取して地球に持ち帰るサンプルリターン計画です。したがって、どこに着陸すべきかを検討すること、すなわち着陸地点選定(Landing Site Selection: LSS)が重要であり、LSSワーキングチームが結成され打ち上げ前から活動しています。本稿ではその活動をかいつまんで紹介します。

1. 「はやぶさ2」との違い

LSS—皆さんにとって耳慣れた言葉でしょうか？火星衛星探査計画MMXのLSSワーキングチーム主査を務めている筆者でも時々LLSとかSSLとかタイポしてしまいがちですが、Landing Site Selectionの略称で、着陸地点選定を意味しています。他天体への着陸ミッション(はやぶさシリーズで行ったタッチダウンを含む)では欠かせない活動で、探査機が安全に着陸でき、かつ科学的調査や試料採取にとって有意義な場所を探すという使命があります。

日本は、「はやぶさ2」で小惑星Ryuguへのタッチダウン(サンプラーホーンを1秒程度小惑星表面に「タッチ」して試料採取を行うやいなや即座に離陸する運用)に成功しています[1]。そのタッチダウンを実行する前には当然綿密なLSS活動を行っています[2]。MMXにおいてPhobos表面からの試料採取を行うことが決定してからは、「はやぶさ2」で実施されたLSSの方法や経験を大いに参考にしてしています。ただし、MMXのLSSは「はやぶさ2」のLSSとは様々な点で違いがあります。

最も大きな違いは、「はやぶさ2」の目標天体が初めて探査される小惑星Ryuguであったのに対し、MMXの目標天体はこれまで様々な火星周回衛星によってある程度探査されたPhobosである、という点です。目標天体表面について訪問する前から解像度の良いデータがあるということはLSSにとって大きな利点で、到着前からLSSを進めることができます。Ryuguは地上観測でおおよその大きさや表面組成が推定されていたため、LSSについての備えがまったくできなかったわけではありませんが、それでも行ってみたら岩石だらけで着陸場所を見つけるのにかなり苦労しました[3]。そのような「はやぶさ2」での苦労を思えば、MMXのLSSは一見容易だと思われるがちです。実際、Ryuguの約20倍の大きさがあるPhobosは、重力が比較的大きいため表面が岩だらけではなく細かい粒径のレゴリスに覆われているのではないかと期待されますし、そもそも表面積も大きくなりますので、着陸できそうな場所なんて選び放題では？ところが...

2. 到着前LSS

1. 千葉工業大学惑星探査研究センター
wada@perc.it-chiba.ac.jp

MMX探査機の火星圏到着前に、既存のデータを

表1: MMX探査機の着陸候補領域に適用される安全条件(2025年4月現在).

ID	項目	制約	理由
1	火星重力も考慮した重力方向に対する傾斜角 (Dynamic slope)	$< 10^\circ$ (基線長 20m)	・着陸時・滞在中安定姿勢確保
2	peak-to-peak の高低差	< 30 cm (基線長 4m)	・着陸安全の確保
3	地心緯度	$\pm 30^\circ$ 以内	・軌道上からの観測制約
4	局所傾斜角 (赤道面に対する地面法線方向のなす角度)	$\pm 30^\circ$ 以内. ただし夏半球に限って $\pm 40^\circ$ まで許容.	・軌道上からの観測制約 (形状モデル作成, 分光観測の観点からは低傾斜角ほど望ましい) ・着陸運用時における電力等探査機システム制約
5	日照	『その場所に日が当たるようになってから 55 分後』もしくは『可視開始』の遅いほうからの日照・可視両立継続時間が Phase-3 では 134 分以上, Phase-4 では 150 分以上.	・電力確保
6	地球可視		・通信確保
7	表面最高温度	< 330 K	・システム・機器機能維持
8	降下中の周囲の地形による影	着陸目標地点と周辺領域が周囲地形によって降下運用の妨げとなるほどの影で覆われないこと	・地形照合航法のため
9	クレータ分布	降下運用に利用するクレータが着陸目標地点周辺に想定以上に十分あること	・クレータベース地形照合航法のため
10	レゴリス層粒径	着陸・試料採取に適した粒径分布であること	・着陸安全の確保 ・十分な量の試料を採取するため
11	着陸候補地域内の着陸安全領域の数	複数が望ましい	・降下運用時の障害物検知によって着陸目標地点の近隣に着陸する可能性に配慮 ・ローバ着陸目標点と母船着陸目標点を同一着陸候補地域内で選定可能とするため
12	着陸運用時の地上局通信	降下開始から着陸滞在終了まで国内同一地上局で通信がとれること	・通信確保
13	経度	火星による日陰期間中に着陸リハーサル運用または着陸本番運用を実施する場合は, 反火星側で経度 $180^\circ \pm 30^\circ$ 以内	・着陸運用制約のため

用いてPhobos表面の着陸候補地域の目星をつけるという作業を我々は「0次LSS」または「到着前LSS (Pre-arrival LSS)」と呼んでいます. 既存のデータとしては, VikingやMars Expressといった火星周回機がPhobosを観測して得られた画像やスペクトルデータなど, 利用できるものが沢山あります. ただし, 解像度が良いとは言っても最新のPhobos形状モデルの解像度は18 m程度にすぎません[4]. MMX探査機の着陸領域として最終的には20 m四方の領域を選定する必要があるのですが, その領域

内の高低差が30 cm以下(基線長4 m)に収まっていること, といったLSSに対する安全条件(本稿執筆時点での条件は表1参照)をすべて満たす領域を, Pre-arrival LSSの段階で確信をもって選出することは困難です. MMXのLSSでも「はやぶさ2」と同様, 現地での高解像観測が欠かせないのです. Pre-arrival LSSで挙げた候補地域にダメ出しされる可能性もあり, 油断大敵です.

そうは言っても既存データで着陸候補地域に目星をつける(優先順位をつけて選定しておく)ことは,

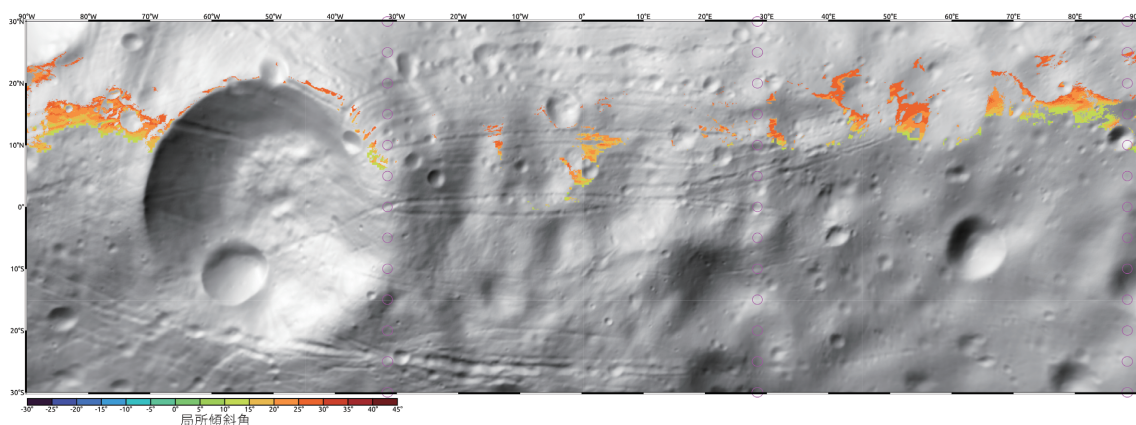


図1: 2024年打上想定(着陸想定日:2027年6月13日)で検討したPre-arrival LSSの結果例その1. Phobosの火星側半球(地心緯度 $\pm 30^\circ$ 以内、経度 $\pm 90^\circ$ 以内)における着陸可能地域を陰影起伏図上で色づけて示す(局所傾斜角に応じて着色). ピンクの円は直径約300 mのスケールを示す. ここでは、着陸安全条件のうち局所傾斜角の上限を 30° とした. 西側にはPhobos最大のクレータであるStickneyクレータが見える.

現地到着後の観測運用計画を検討するうえで非常に有益です. 解像度の問題はひとまず現地観測に託すとして、既存データを用いてLSS安全条件として考慮できるものをもとにPhobos表面を探索することになります.

まず、局所表面の「傾斜」が重要です. Phobosは火星を周回しており、火星重力の影響は無視できません(Ryuguとは違う点の一つ). 火星重力や自転による遠心力も考慮した局所重力方向に対する傾斜を「Dynamic slope」と呼び、これが10度以下という制約がかかります(表1). 「はやぶさ2」のようなタッチダウン方式であれば、重力に対する傾斜が多少ついていようと問題はないのですが、着陸滞在するMMXでは、Dynamic slopeが10度を超えると探査機が転倒しかねません¹. 傾斜に対するこのような条件を課すと、それだけでも着陸可能領域はかなり狭まってしまう. 例えば、Phobos最大のクレータであるStickneyクレータの東側は科学的に非常に興味深い地域が広がっていますが(いわゆる「青領域」が多く分布)、その大部分においてDynamic slopeが10度を超え候補地域からはじかれてしまいます(図1).

¹MMXでは、要求される採取試料量が多い(表面から2 cm以深まで含む10 g以上)ことと、Phobosの重力がRyuguに比べて大きいということから、その着陸・試料採取は、はやぶさシリーズで採用されたタッチダウン方式ではなく、着陸滞在によるコアリング方式となりました.

さらに追い打ちをかけるのが、「日照・地球可視両立継続時間」制約(正確な表現は表1参照)です. MMXでは、Phobos表面に着陸・静定後、筒を打ち込んで引き抜くコアリング方式で試料を採取します. その運用を慎重かつ確実にを行うためには、着陸滞在時間をできるだけ長くとれることが求められます(とはいえ限度があり、Phobosの4時間に満たない日中に着陸から離陸まで終えなくてはなりません). その滞在可能時間は何によって決まるのか? まず、電力確保のために着陸滞在中は常に日が当たっている必要があります. また、着陸滞在および試料採取運用中は、探査機にとって安全上のリスクが大きいことに加え、採取する場所を地球から指定する必要もあります. その運用監視と決断のために地球との通信(地球可視)が常に確保されていることが求められます. つまり、滞在中は、日照と地球可視どちらも継続している必要があります. 両者の時間帯が一致していれば、Phobosの日中を丸々使えることになるのですが、太陽・地球・Phobosの位置関係によって日照時間帯と地球可視時間帯にはずれが生じます. Phobos表面上のとある地点では日が昇っても地球はまだ昇ってこない(非可視)だとか、地球は見えているけど日が沈んでしまう、ということがあります. Phobos滞在中、日照と地球可視のどちらも継続している時間(ANDがとれる時間)は各単独継続時間より短くなり、さらに季節依存があります. 日照可視両立継続時間に対する制約を厳しくすればするほ

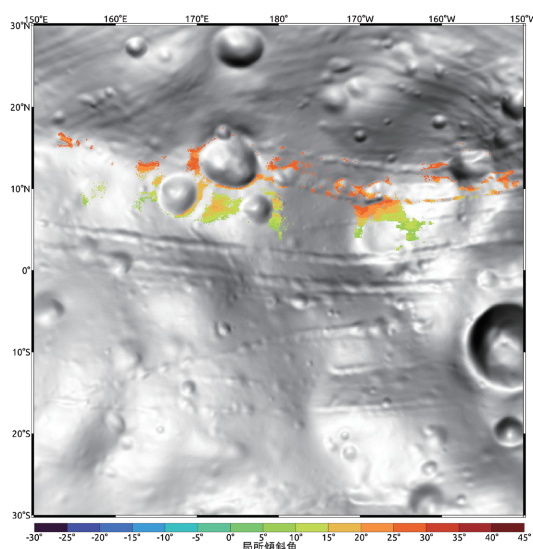


図2: 2024年打上想定(着陸想定日:2027年4月19日)で検討した Pre-arrival LSSの結果例その2. Phobosの反火星側(地心緯度 $\pm 30^\circ$ 以内、経度 $180^\circ \pm 30^\circ$ 以内)における着陸可能地域を陰影起伏図上で色づけて示す(局所傾斜角に応じて着色). ここでは、着陸安全条件のうち局所傾斜角の上限を 30° とし、ローバのLSS条件も含めている.

ど(すなわち長時間必要とするほど)、それを満たす Phobos上の地域は少なくなってしまいます.

間の悪いことに、Phobos着陸運用が予定されている時期(後述)は、この制約によって日を追うごとに着陸候補地域がどんどん少なくなってしまうことが明らかになっています. なにぶんPhobosに着陸することは世界初の試みですので、最初から着陸が首尾よく成功するとは限らず何度かトライセざるを得ないかもしれないこと考慮すると、着陸地点としては、できるだけ遅い時期でも成立する場所を選択する必要があります. このことは、日照可視両立継続時間の制約のために選択範囲がより狭くなることを意味します.

着陸候補地域をどれだけ確保できるかは、着陸滞在そして試料採取の運用をどう詰めて短時間で収められるか、にかかっているのです(その検討作業は着陸運用検討ワーキングチームにて行われています). 表1に示されている日照地球可視両立継続時間に対する制約は、このようなせめぎあいの果てに合意されたものになっています.

そのほかにも、様々な制約があります. MMXでは仏独共同開発のローバ(名称「IDEX」)を着陸リハーサル時に降ろすことになっています[5]. このことは、MMXのLSSでは、探査機のLSSのみならずローバのLSS(ローバが安全に着陸しその後運用できる場所を選定すること)も考慮する必要があることを意味します. 探査機とローバはどちらも安全に着陸することを要求しているため、両者のLSS条件はほぼ同じではありますが、違う点もあります. そのような制約をすべて課すとPhobos上で着陸・試料採取できる地域は思ったほどにはないことが判明しました(図1,2). こんなに狭いものなのか!

ここまでではもっぱら安全に着陸できる場所を追いかけてきましたが、もちろん科学的価値の高いところを選択する必要があります. 基本的には「安全第一」で、安全着陸可能な地域に絞ってそのうえで科学評価を行います. MMXのミッション要求に掲げられている「火星衛星の起源を明らかにすること」がまずもって重要であり、火星衛星の起源(どのようにして形成したのか)と進化(形成後どのように進化したのか)の理解につながる試料が採取できる場所を高く評価することになります. 起源を記録している物質はPhobosの形成時にPhobosを形成していた岩石でありPrimary rockと呼んでいます、それが分布している場所に着陸できれば良いことになります.

ただし、そもそもPhobos上でPrimary rockが何なのか、どこにどのように分布しているのか、十分な科学評価を下せるほどの信頼できる既存のデータが乏しいのが現状です. Phobosの表面はスペクトルの傾きのわずかな違いから「青領域」と「赤領域」にわけられることが知られており、なんとなく「青領域」にPrimary rockが分布しているのではないかと考えられていますが、確たる根拠はありません(Phobos最大のクレータであるStickneyクレータの東側が「青い」のは複数の探査機のデータが示すところであり、その分布自体は確からしいですが). 一方で、Phobosを代表する試料こそ重要だと考えれば、「青」のみならずPhobos表面の大部分を占める「赤」もそれなりに価値があるはず(ついでに言えばDeimosの表面も「赤」です).

さらに、宇宙風化を受けていないという意味で新鮮な試料に価値がありそうだとすれば、なるべく深

い場所にあった物質を掘り起こしたであろう大きなクレータの堆積物は狙い目かもしれません。この観点でもStickneyクレータの周囲は魅力的な地域と考えられます。なお、Stickneyクレータの「底」や「内壁」も魅力的ですが、これは残念ながら日照可視両立継続時間制約やDynamic slope制約を満たすことが困難なため却下されています。

Pre-arrival LSSにおいて科学評価を下し優先順位をつけることは容易ではありません。やはり、現地にいった観測することで得られるスペクトルデータや元素組成データなどをもとに科学評価を行うことが重要となります。

3. 運用計画からの制約

現地到着後のLSSのみならずPre-arrival LSSを行う上でも考慮しなくてはならないのは、着陸運用を実施する時期は当然として、その前の着陸候補地点を選定するための観測と選定過程です。

ご存じ(?)のようにMMXの打ち上げ時期は当初計画の2024年から2026年に変更されました[6]。2024年打上版で計画を練っていた段階では、まずPre-arrival LSSで候補として50地域ほど目星をつけておき、高高度軌道(QSO-H)観測、中高度軌道(QSO-M)観測、低軌道(QSO-LA, LC)観測でそれぞれ30地域、20地域、10地域…と絞り込んで、最終的に2回実施する着陸の目標領域を選ぶ、ということになっていました。数多くの地域を観測する必要があることから、この計画でも成立性はギリギリでしたが、絶好の観測時期(火星やPhobosによる日陰(蝕)や掩蔽などがない時期)と太陽会合の時期(地球と探査機の間に太陽が位置し運用できない)がずれていたこともあって、まだ比較的余裕がある計画が立てられていました[5]。ところが、打ち上げ年が変更されたことにより、絶好の観測時期と太陽会合の時期が重なることとなり、観測スケジュールが非常に厳しいものになりました。さらに、最も高度が低く、ゆえに最高解像度の観測ができる軌道であるQSO-LC滞在時間が大幅に減少することとなり、LSS活動が非常に厳しい状況に置かれてしまいました²。そのような状況になんとか対応すべく、ミッションオペレーションワーキングチーム

(MOWT)を中心に検討を重ねており、例えば、各観測軌道において観測する着陸候補地域数を約半減させて運用と解析の負荷を減らす、といった工夫を講じることとなりました。それでもスケジュールが非常にタイトであることには変わりはありませんが、

MMXは火星圏に約3年ものあいだ滞在し、そのほとんどをPhobos観測と着陸運用に費やします³。着陸運用は火星やPhobosによる蝕や掩蔽を避けて実施する必要がありますが、3年もあれば比較的自由にその時期を選べるのではないかとと思われるかもしれません。しかしながら、現実はその逆で、MOWTで検討を進めていくと、そんな都合のよい時期はごく限られていることが明らかとなりました[5]。その貴重な時期は火星圏滞在期間中のおよそ真ん中にあり、それを含む期間をPhase-3と呼んでいるのですが、これがちょうど日照地球可視両立継続時間制約が厳しくなる時期に当たります。あちらが立てばこちらが立たず…

Phobosは火星に対して常に同じ面を向けています(潮汐固定)。そのため、火星側と反火星側で着陸可能時期制約が異なります。反火星側の昼間は火星に邪魔されることなく地球から見えるため、蝕の時期を気にせず着陸時期を選べますが、着陸降下運用の観点から経度制約が生じます($180^{\circ} \pm 30^{\circ}$ 以内)。一方で、火星側は蝕の時期に着陸できませんが、経度にはほとんど制約がかかりません。このことを考慮して、Phase-3で2回の着陸を試みる計画を立てていますが、1回目は着陸運用を少しでも早く実施して余裕を持つために火星日陰があっても可能な反火星側に着陸し、2回目は火星側に着陸しよう、という作戦がノミナルになりつつあります。なお、先ほどから頻出しているStickneyクレータの東側地域は火星側になります(図1)。

さて、すんなり計画通りに事が進めば良いのですが、さまざまな不具合が生じることを想定しておかなければなりません。例えば、Phase-3で着陸できなかったらどうするのか?この場合、次のPhase-4

²QSO-LC滞在時間が短くなることは、搭載機器の一つであるガンマ線中性子分光計(MEGANE)の観測によってPhobosの元素組成を明らかにするうえでも著しく不利になります。

³もう一つの衛星であるDeimosについては、フライバイ観測として火星圏滞在期間の最初と最後の時期に実施予定。

で着陸することが検討されています。実はPhase-4も一見したところ蝕や掩蔽および太陽会合がない着陸に適した時期が比較的長くあります(これは打ち上げ延期によって生じた「けがの功名」)。ところが、Phase-4では太陽とPhobos(火星)の距離が近くPhobos表面温度が高くなり、LSSに課された温度条件を逸脱する可能性があることが判明しました。なかなか安心させてくれません。それでも何とか工夫して、Phase-4着陸はバックアップ計画として検討が継続されています。

4. LSS訓練

これまでつらつらと述べてきた通り、MMXのLSSは候補地域は限られているわ、観測選定スケジュールも非常にタイトだわ、で思いのほか厳しい状況に置かれています。それに対処するためには、観測データがダウンリンクされるやいなやデータ処理を迅速にこなし必要となる各種プロダクト(全球規模の形状モデルやローカル地形モデル、スペクトルマップ、…)を素早く作成する必要があります。それらプロダクトは各機器チームや科学戦略チーム(Science Strategy Team: SST)が作成を担うわけですが、相互に共有・受け渡していく必要があります。そのため、プロダクトの作成と共有連携について十分な準備をして“本番”に臨む必要があります。そのための対策が「LSS訓練」です。

LSS訓練は「はやぶさ2」でも実施され、大いに役立ちました[7]。MMXでも「はやぶさ2」LSS訓練を参考にして取り組んでいます。まず、各チームにおいて「出題側(LSS Data Producing チーム:LSSDP)」と「回答側(LSS Analysis and Assessment チーム:LSSAA)」に分かれます。LSSDPは、Phobosの起源・形成史をはじめ形状、クレータ・ボルダ分布、地質、元素組成などを検討し、もっともらしい模擬Phobosモデルを作成します。これに基づいて、LSSAAがリクエストした観測計画にのっとって、模擬観測データを作成し、LSSAAに提供します。LSSAAではその提供された観測データを実際のデータ処理手順に則って各種プロダクトを作成し、候補地域・領域を選定します。LSSDPが作成する模擬データはいわば“神”データ

で、LSSAAがLSSDPの用意した“神”Phobosを再現し、最終的に着陸候補地点を選定できるか?の真剣勝負です。LSSAAは当然のことながらLSSDPの作業や“神”データを参照することは禁じられています(そうでないと訓練の価値が薄れてしまいます)。答え合わせは訓練の最後に突き合わされ、フローの確認と課題の洗い出しを行い、本番にフィードバックされることになります。

LSSDPは科学的背景を踏まえて模擬Phobosを考案するという楽しみがありますし、LSSAAはあたかも現実であるかのようなPhobosを解析しその姿が立ち上がる様を見られるという楽しみがあります(あるはずですが、きっと)。LSS訓練は様々なチーム・人員が長期間(一年以上かけて実施していきます)にわたってかかわる大規模なイベントですが、そのような楽しみをもって乗り越えられると期待しています。

5. LSSはまだまだ続く

本稿執筆時点では2026年打上版のLSS検討が進行中です。ここまでMMXのLSSがいかに大変かということを述べてきましたが、必要不可欠な活動であり、裏を返せば非常にやりがいのある活動です。Phobosへの着陸と試料採取が成功したあかつきには、その背後にあるLSS活動に想いを馳せていただけますと幸いです。その時にむけて今後またゆめぬ努力を続けて参ります。

次号へ続く。

参考文献

- [1] Tachibana, S. et al., 2022, Science 375, 1011.
- [2] Kikuchi, S. et al., 2020, Space Sci. Rev. 216, 116.
- [3] 菊地翔太ほか, 2019, 遊星人 28, 143.
- [4] Ernst, C. M. et al., 2023, Earth, Planets and Space 75, 103.
- [5] 中村智樹ほか, 2023, 遊星人 32, 216.
- [6] 倉本圭, 2024, 遊星人 33, 465.
- [7] 石原吉明ほか, 2017, 遊星人 26, 139.

著者紹介

和田 浩二



千葉工業大学惑星探査研究センター主席研究員。東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻博士課程修了。博士(理学)。北海道大学低温科学研究所博士研究員などを経て、2009年千葉工業

大学惑星探査研究センターに上席研究員として着任。2016年より現職。専門は惑星科学とくに天体衝突現象。惑星探査では「はやぶさ2」衝突装置および分離カメラなどに参画。MMXではサイエンスボード幹事およびLSSワーキングチーム主査を務める。

遊星人の海外研究記 その18 ～想像よりは暮らしやすかった中国～

青山 雄彦¹

1.はじめに

私は博士の学位を2019年に取得した後、程なくして中国北京の清華大学 (Tsinghua University) でポスドクをはじめました。その後2022年に同じくポスドクとして北京大学 (Peking University) に異動し、2024年からは中国広東省の中山大学 (Sun Yat-sen University¹) で助教をしています。気づくともう6年近く中国で研究していることになります。

私は清華大学のポスドクに採用されるまで、中国には一度も行ったことがありませんでした。オファーをくれたXuening Baiも含め中国に知り合いはいませんでしたし、積極的な海外志向もありませんでした。そんな私が中国でこれほど長い時間を過ごし、今や教員なのだから、わからないものです。

上述の通り、ポスドク就任前の自分にとって中国は『未知』そのものでした。なんなら正直、印象は少し悪い寄りでした。色々経験した今中国が『良い場所』かと問われると、良い点も悪い点も思いつくので返答に困ります。ただ少なくとも、私が渡航前に思っていた環境とは違いましたし、渡航前の想像よりはすごしやすい場所でした。

中国では新設された (される) 天文学科も多く、研究者の数も、教員やポスドクのポストの数も、今まさに増え続けています。皆さんにとって中国で研究するという選択肢がアリかナシか、私には分かりませんが少なくとも存在する選択肢を知らないのは勿

体無いのかなと思い、中国での研究環境を少しでも知るきっかけになればと考え、この記事を書くことにしました。中国を選択肢に入れるかどうか、この記事が皆さんの判断の一助になれば幸いです。

2. なんで中国に行ったの？

私が清華大学のポスドク公募に応募したのは、博士最終年である2019年1月だったと記憶しています。それ以前にもAAS Job Registerでポスドク公募を確認はしていたのですが、応募するには至りませんでした。「そんなことよりD論書かなきゃ!」というのが本音でした。新年すぐに博士論文を提出した後、出せそうな公募に、締切が近い順に4・5件応募しました。その後、博士論文発表会を終えた2月、オンライン面接を経てオファーをくれたのが清華大学のXuening Baiでした。この時オンライン面接を控えた公募は他にもあったのですが、面接予定日はオファーへの返答期限の後でした。今思えばXuening Baiなら頼めば返答期限を伸ばしてくれたでしょうし、指導教員の生駒先生にも「お願いすれば?」とアドバイスをもらいました。しかし当時、まだ博士論文の訂正作業中だった私は、この簡単な交渉すらしたくありませんでした。「とりあえずポストを確定させて心配を一つ減らしたい!」と思った私は、清華大学のオファーを受けることに決めました。研究面で

¹中国語と英語で音が全く違いますが、両方孫文のペンネーム。日本では孫文、中国では孫中山、欧米では孫逸仙として知られている。



図1: 10日ほど滞在した激安宿の部屋とトイレ。左写真の扉の影にあるのが右写真のトイレ兼シャワー室。右写真のトイレの右上に写っているパイプがシャワーパイプ。トイレとシャワールームを一緒にするという、まさに異文化の洗礼でした。

魅力的なオファーでしたし、「中国のことはよく知らないけど、まあ何とかなるだろう」と思っていました。

3. 中国って実際どうなの？

失礼な話ですが、中国に行く前の私は中国のことを漠然と『先進国と発展途上国の中間』みたいに思っていました。しかしオファーをもらった後、中国へ初上陸した私が見た北京は、イメージと違って良くも悪くも普通でした。もちろん文化的な違いは感じますが、それは欧米の都市でも同じことです。「面白い土産話はできそうにないな」とちょっとガッカリする部分もありましたが、冷静に考えると生活する街におもしろさなんて要りません。外面だけ見て「これなら普通に生活していけそうだな」などと思った私は、この時完全に油断していました。

そもそも不幸の始まりは、宿代をケチったことでした。清華大学では大学がキャンパス内に持っているアパートを借りる予定だったのですが、この物件は着任手続きが終わらなければ入居できません。そこで着任手続きが終わるまで10日ほど、適当な部屋を借りることになりました。中国といえど物価が安いイメージだったのですが、しかし予想に反して宿泊費が安くありません。良さそうなホテルは1泊1万円以上しますし、そこそこのホテルでも7千円ほど。卒業したばかりの当時の私には10泊もすると痛い出費です。そこでAirbnbを使ってもっと安い宿を探すと……ありました。1泊3千円弱の宿が大学のすぐそばに。個



図2: 清華大学のキャンパス内にあるポストク向けアパート。1LDKで家具付き、何よりトイレとシャワーが別室!

人でやっている寮のような物件で、おそらくお金がない学生が大学を訪問するときに使うのでしょう。お金がないほぼ学生の私は、この物件に滞在することに決めました。

部屋に案内されると、ベッド2個分ほどしかない狭い部屋（図1左）。しかし値段相応と言うべきでしょう。何の問題ありません。しかもトイレとシャワーが個室にあるそうです、素晴らしい。案内されるがまま部屋の一角を見ると……そこにはトイレ兼シャワールームがありました（図1右）。汚いトイレと清潔であるべきシャワールームを合体させるという、許容し難い組み合わせ。これが激安宿の洗礼か……。しかし翌日、オフィスで同室になった中国人ポストクにこれを愚痴ると、「ああ、まあちょっと古いとそういう部屋もあるよね」と予想より弱いリアクションです。もう少し詳しく聞いてみると、「体を洗った水でトイレが掃除されて効率的でしょ？排水を共有するとスペース的にも建築的にも効率的だし」とのこと。なるほど、合理的です。理解はできますが、私の人生で出

会った中でもとびきり嫌な合理性です。

後の経験も踏まえて考えると、おそらく日本と中国では『清潔』の概念がかなり違います。この件以外だと、(かなりインパクトは落ちますが) 食事中にもカルチャーギャップを感じるがあります。中国人は料理に含まれる非可食部²を取り除くとき、机に直置きします。スープや油が机やテーブルクロスを汚してなんとなく嫌な気分になりますが、この『嫌な感じ』は中国人には共感してもらえません。しかし清潔さは求めているようで、入店時にテーブルが汚れていると必ず清掃を要求します。どうやら中国での清潔さとは「清掃されて綺麗になっていること」であり、「汚さないこと」ではないようです。逆にいうと中国人は清掃をきちんとすれば清潔になったと感じるのでしょう。そう思ってトイレ+シャワー室問題を考えると、つまり「綺麗に掃除されたトイレは汚くないから、そこでシャワーを浴びても良い」ということなのでしょう。なるほど納得ですね。共感ではきかぬますが。

以上のような経験があったので、清華大学が貸してくれるキャンパス内のアパートにも、正直期待していませんでした。値段が月3万円程度と安かったのもあって、値段相応の物件を想像していたのですが……まさかの想定外。広くて綺麗な、そして何よりトイレとシャワーが別室という、大変素晴らしいアパートでした(図2)。私はコロナの期間、中国から動けなかったので主に自室で過ごしていましたが、この快適な部屋のおかげで不満なく過ごすことができました。もし部屋の質が悪かったらコロナ期に日本へ逃げ帰り、解雇されていたことでしょう³。ちなみに北京大学に移った後は大学のアパートが条件に合わず、自分で北京市内のアパートを借りたのですが、部屋の質が下がった上にトイレ・シャワーが同室(仕切りは有り)になったのに家賃は月15万円でした⁴。その

時初めて実感しましたが、北京の家賃相場は東京と比べてもかなり高額です。他の物価は大概日本と同等以下なのですが、こうしてみると、やはり清華大学時代は非常に恵まれていました。

激安物件でのカルチャーショックで出足は挫かれましたが、慣れてみれば中国もそれほど暮らしにくくはありません。上述のように住居選びには注意が必要ですが、きちんと確認して、少なくともコストをかければ何とかなります。他には中国では英語は基本通じませんが⁵、オンライン通販で食事も含めてなんでも買えるので⁶、案外言語が通じなくても何とかなります。またレストランでもQRコードを読み込んでアプリで注文するのが主なので、後はうんうん言うておけば中国語を話さなくても大丈夫です⁷。大気汚染の影響は、特に北京では目視できるレベルで酷い日もありますが、研究者は大体部屋にこもっているので良い空気清浄機を買えば(おそらく)大丈夫です。また治安は正直、日本より良いかもしれませんが⁸、反日感情を気にする人もいるかもしれませんが、特定のイベント・集会に近づかなければ、日常でそういった極端な人に会えることはまずありません。というわけで最後は駆け足になりましたが、私は「中国、行く前に思っていたよりは暮らしやすいな」と思っています。

4. 中国の大学ってどうなの？

中国と日本の大学の違いを考えたとき、やはり一番はその大きさです。清華大学の北京キャンパスは特に大きい方ですが、その面積は東大本郷キャンパスの約8倍もあります⁹。これは、大学のキャンパスが学生の生活区域を含んでいるためです。中国の大学生は基本的にキャンパス内の寮に住み、キャンパ

²魚や動物の骨、調味料で食べないスライスなど。ちなみに私は渡航後すぐ、スープに入っていた親指大の鶏肉に骨が隠れていることに気付かず全力で噛んで歯が1本折れました。中国で肉を食べるときは常に骨が中に隠れていることを想定しましょう。

³コロナ期間中、海外に帰省して中国に戻って来ない(来れない)研究者が大量にいたため、「中国国外に半年以上連続して滞在した者は自動的に解雇になる」という制度が作られました。

⁴間取りは1K。1部屋が大きいタイプでしたが清華大学のアパートに比べて床面積は減っています。月10万円を切る物件は図1のようなトイレ+シャワーの古い物件がほとんどでした。

⁵上海だとそこそこ通じるのかもしれませんが^[1]、少なくとも北京では通じません。

⁶中国版UberEatsのようなものがあるのですが、宅配費は大抵100円以下。最悪毎食これでも生きていけます。

⁷中国語の「うん」は一般的な相槌です。目上の人にも使えます。

⁸街中に監視カメラがあるので、場所と角度によってはスリや置き引きですら捕まります。「中国の犯罪者は国内で犯罪ができないから海外でやる」というジョークもあるとかないとか。

⁹ちなみに北京大学のキャンパスは清華大学の隣にあるのに面積は半分程度しかありません。北京大学の学生はよくこの差について文句を言っていますが、それでも十分広いと思います。

ス内で生活します¹⁰。つまり学生が利用するためのスーパー、雑貨屋、床屋や映画館まで、さまざまな施設がキャンパス内に含まれているのです。生活に必要なものは娯楽も含めてある程度キャンパス内で揃うので、キャンパス内だけで生活を完結することができます。しかも学食を筆頭にキャンパス内の生活費は外に比べてかなり安くなっている¹¹ので、ポストク・教員を含め、理由がなければ学外に出る必要がありません。私は趣味のボウリング¹²で毎週末外出していましたが、1ヶ月以上キャンパスから出なかった日本人も知っています。

逆に研究・学生指導のやり方は日本と大差ないと思います。毎週学生セミナーと来客のコロキウムがあって、これにチーム毎のミーティングが加わります。セミナーやミーティングは全て英語で行われますが、これは外国人の私がいるというバイアスもあるので、一概に「中国の方が国際的だ」とは言えません。実際中国人しかいないグループミーティングは中国語でやっているようですし、大学の授業も基本的に中国語です。ところで日本と違うなと思った制度もあるのですが、どうやらそのうちいくつかは中国式というよりアメリカ式だったようです。例えば中国では来客があるたびにオンラインのExcelシートが回ってきて、個別に議論するスロットを先着順で予約して行きます。これは中国式なのかと思っていたのですが、このシリーズの過去記事を読んでいてアメリカ式だったことに気づきました [2]。最近ではアメリカ帰りの中国人研究者が多いので、彼らが慣れ親しんだ方法で運営しているからでしょう。

また、中国の学生の英語レベルや外国人への対応も日本と似ていると思います。もしかしたら「中国人は英語が上手い」というイメージを持っている人もいかもしれませんが、これは「海外に進出した中国人」というバイアスがかかっています。基本的に学生は英語で会話をしながら、話しかければ頑張って会話してくれるという感じで、学生時代の自分を見る

ようです。ただ、清華大学・北京大学の学部生には大学院から海外進出する予定の学生も多く、彼らの英語はかなり流暢です。人によっては中国内の国際学校で小中高と英語で教育を受けてきた、みたいな人もいます。なので中国では学部生と大学院生で英語力の逆転現象が起きており、英語のセミナーでいつも質問する学生を大学院生だと思っていたら学部生だった、みたいなことが結構あります。そうはいつても学部生とポストクが接する機会はあまり多くないので、残念ながらやはり、外国人ポストクに話しかけてくる学生はあまりいません。自分が学生だった時は「下手な英語で話しかけて相手の時間を奪うのも申し訳ないし」などと思って話しかけづらかったのですが、逆の立場を経験した今では反省しています。もしこの記事を見ている学生さんで似たようなことを思っている人がいたら、いくら下手な英語でも全く気にならないので、積極的に留学生や外国人研究者に話しかけてみてください。英語の練習になりますし、相手も嬉しいと思います。

最後にちょっと面白い違いとして、中国の大学には『マニュアル』のようなものがないそうです。学務や予算運用の手續きに関連して「手順をまとめた書類やToDoリストのようなものがないのか」と聞いたところ、「学部創設時のものはあるが古くて使えない。つまり実質ない」との返答をいただきました¹³。「何故ないのか」「不便だから作れないのか」と聞くと、「ルールが頻繁に変わるから頻繁に更新しなければならずコストが悪い。毎回担当事務に確認してくれ」とのことでした。毎回確認される方が非効率な気がするのですが、これも文化の違いなのかもしれません。

5. 中国のポストってどうなの？

はじめに書いたように、中国では天文台・望遠鏡の新設に伴って天文学科が新設されており、教員・ポストクの数も増加傾向にあります。少なくとも公募の数は他地域に比べて多いでしょう。求職中の方の参

¹⁰地元民にも寮の部屋はほぼ無料で支給されます。ただし家が近い人は家から通って、寮の部屋は荷物置き場にしているそうです。

¹¹学外のレストランの値段は実は日本と大差ないのですが、学食では1食200円程で食べられます。今の私の最寄り学食は1食300円程なのですが、学生は高いと文句を言っています。

¹²完全に余談ですが、北京にはNBF (Nihon Bowlers Federation) 唯一の海外支部があり、毎週リーグ戦をやっています。

¹³北京大学のKIAA (Kavli Institute for Astronomy and Astrophysics) は例外で、英語のマニュアルが存在し、定期的に更新されています。事務の人も全員英語で対応してくれますし、情報メールのほとんどは英訳付きで回ってきます。上海のTDLI (Tsung-Dao Lee Institute) も例外側かもしれません [1]。

考になるかもしれないので、ここで私が経験した中国での公募・待遇などについて、情報を共有したいと思います。

求職中で海外のポジションの情報を調べている人の中には、「公募が多いっていうけど、中国の公募そんなに見ないぞ」と思っている人もいるかもしれません。これはまさしくその通りで、いきなり最重要な注意事項なのですが、なぜか中国の大学は公募を宣伝しません。清華大学・北京大学などの一部大学はAAS Job Registerなどに公募を載せていますが、これらはむしろ例外です。「公募は大学のホームページに公示されるだけ。後は教員が口頭で宣伝。」これが中国のスタンダードです。人によっては、国際会議の発表中に中国人が自大学の公募を宣伝しているのを見たことがあるでしょう。これが中国では一般的な、公募の宣伝方法だそうです。別に出来レースというわけではなく誰でも応募可能で、外国人の応募も歓迎しているようですが、何故か組織としての宣伝はせず、口コミ頼りなのです。なのでもし中国でのポストに興味があるなら、中国人の知り合いに「今ポスト探してるんだよね」と言うっておくことが大切です。そうするとその人が、中国人コミュニティで仕入れた公募情報を教えてくれるはずです。私自身、清華大学と北京大学のポstdok職はAAS Job Registerで見つけて応募したものでしたが、今の中山大学での助教職は「就活中です!」と宣伝した結果教えてもらったという経緯があります。選択肢が増えて損はないと思うので、中国でポジションに着いても良いと思っている方は積極的に宣伝すると良いと思います。

次にポstdokについて。待遇面ですが、いわゆる科研費ポstdokの給与は日本の学振PDより少し安いと思います。ただし大学ごとにフェローシップが存在し、これらの給与は学振PDと同程度以上となっています。明言はされていませんが外国人はフェローの選考においてかなり有利だと思われ、私も含め知り合いの外国人は大抵採用されています。ただ注意が必要なのは、「その大学への所属が確定した人間しか応募できない場合がある」という点です。つまり、「フェローが取れたら行くけど科研費ポstdokなら行かない」ができない場合があるので、オファーの条件交渉で詳細を確認してください。最初から直接フェローに応募する場合は大丈夫です¹⁴。ちなみにこれ

は宣伝ですが、中山大学には年収50万円¹⁵以上という、欧米からの応募を狙った高給フェローシップが存在します。興味がある方からの連絡をお待ちしています。

教員の待遇は大学によってかなり違うようなので、ここでは私が把握する限りの助教の制度と採用手順について共有したいと思います。中国では最近まで助教授というのは一般的ではなく、基本的に教員といえば教授と准教授(中国語では副教授)のことだったようです。両方パーマナentなので、教員=パーマナentでした。ただ最近になって欧米とシステムを合わせようという動きがあって、テニユアトラック助教が新設されつつあります。幸か不幸か私は中山大学物理与天文学院(与は&のような意味)でのテニユアトラック助教第一世代であり、数少ない有期雇用教員ということになります。契約は6年で、3年目にテニユア審査、ダメなら6年目に再審査となります。ただしまだ「とりあえずテニユアトラック助教始めてみました」みたいな状況で、大学の制度上助教は存在しません。そのため書類上の私の身分は副教授となっており、場合によって職称を使い分ける必要があるややこしい状況です¹⁶。

助教公募の選考方法は、書類選考を通過した経験が1度しかないのでサンプルは少ないですが、書類選考と3度のオンライン面接(学科レベル、学部レベル、大学レベル。2度目の面接は模擬授業を含む)でした。また自分の選考経験ではないですが、北京大学のKIAAにポstdokでいた時は、教員公募のショートリストが所属する学生・ポstdokに公開され、公開セミナー、学生・ポstdokの有志による面接を経てクローズドの面接に続くようでした。これもアメリカ式っぽいですが、出資母体のKavli財団がアメリカ系なのでその影響でしょう。以上2件についてしかわかりませんが、参考になれば幸いです。

最後に中国でのポstdokの扱いについて、最近面

¹⁴ちなみに私は北京大学にKIAAフェローとして着任し、その後大学のBoyaフェローを取って昇給しました。同じ組織でも複数のフェローが存在する場合があります。

¹⁵為替の影響もあるので、日本円でいくらになるかは各自調べてください。助教の私の給料より高いとだけ言っておきます。

¹⁶カジュアルな場合には助教、科研費の応募や公式書類への署名では副教授ですが、フォーマル度合いがわからない書類ではどっちを書けばいいのか困ります。

白いことに気づいたので紹介させてください。テニュアトラック助教の制度が確立されていないという話をしましたが、ポストクの扱いも確立されていないというか、変な形で確立されたというべきでしょうか。実は中国のポストクは形式上、博士課程の上のレベルの学生扱いらしいのです。「助教をとりあえず准教授の枠に入れる」みたいに、「教員じゃないポストクはとりあえず学生の枠に入れる」ということでしょうか。なのであくまで形式上ですが、ポストク修了論文も¹⁷、ポストクディフェンスの公聴会も¹⁸、ポストク修了証書もあります¹⁹。文化の違いというか、辻褃合わせの結果生まれた制度が残っているんだと思いますが、「制度なんか整える前にとりあえずやろう」という行動力はすごいと思います。

6. おわりに

海外で研究というとやはりアメリカやヨーロッパのイメージが強いかと思います。海外でポストを探す

¹⁷出版論文に中国語のアブストをつけるだけです。

¹⁸最後のセミナー発表をこれにあてます。一応参加教員の人数が5人必要なので、足りない場合は知り合いに頼んでてもらいます。

¹⁹紙はありません。欲しければ電子的にダウンロードできるのですが、知らされていませんでした。一応中国国内では学位扱いのため、教員採用の際に提出を要求されました。この時初めてポストクの真実に気づき、笑いました。

際、中国は候補にも入れていない人の方が多いのではないのでしょうか。正直惑星・天文は中国ではまだまだ発展途上の分野で、研究の広がり求めて海外へ行く場合は、欧米の方が良いことが多いでしょう。ただ最近では欧米で学位を取った中国人研究者が多く中国に戻っており、研究者の数も質も急激に伸びています。また発展途上ということは、ポジションを取るチャンスともいえます。どの国へ行くのか、あるいは日本で研究を続けるのか、各人で状況が違うので、何が最善かは人によるかと思います。なので「中国が良いよ」などと気軽に言う気はありませんが、「中国という選択肢もあるよ」と伝えられればと思ってこの記事を書きました。この記事を通じて皆さんの進路の選択肢が増えれば幸いです。

参考文献

- [1] 萩原正博, 2025, 遊星人 34, 67.
- [2] 門屋辰太郎, 2020, 遊星人 29, 38.

著者紹介

青山 雄彦



中山大学助教。東京大学理学部地球惑星科学専攻博士課程修了。博士(理学)。東京大学、清華大学、北京大学での研究員を経て2024年より現職。専門はガス惑星の形成。日本惑星科学会・日本天文学会所属。

月科学コミュニティの活性化に向けた取り組み ～2024 年度活動報告～

小野寺 圭祐¹, 松本 晃治², 山下 光葉³, 于 賢洋³, 西山 学⁴, 長岡 央⁵,
仲内 悠祐⁵, 西谷 隆介⁶, 荒木 亮太郎⁷, 大竹 真紀子^{8*}, 諸田 智克³

(要旨) 本稿では, 我々が 2024 年度に実施した「月科学コミュニティの活性化」を目的とした活動に関して報告を行う。前半は, 月科学コミュニティメーリングリスト(Moon-next)の運用状況および情報共有の場の整備状況について報告する。後半では, 2025 年 3 月に奥州宇宙遊学館にて開催した第 16 回月地殻研究会について紹介する。

1. はじめに

我々は, 月科学コミュニティの縦横のつながりを強化すべく, 2022 年より二つの取り組みを開始した[1]。一つ目はコミュニティメンバーが新着論文・最新の研究成果・公募などの情報共有が行える場の整備, 二つ目は月科学に特化した研究会の開催である。以下ではそれぞれの取り組みに関して, 2024 年度の実施報告をする。

2. 月科学に関する情報共有 スペースの整備状況

2.1 メーリングリスト Moon-next の運用状況

Moon-next に関しては, 前回の報告より 8 名の新規メンバーを追加し, 計 66 名となった(2025 年 3 月 31 日現在)。本メーリングリストでは, 月科学に関する研究会やセミナー等の案内, 新着論文の共有, 公募案

内などを行なっている。メーリングリストに参加を希望する場合は, 管理者(moonnext@gmail.com)まで問い合わせ願う。

2.2 論文情報共有スペースの運用状況

新着論文リスト(2023 年以降に出版)は, 2025 年 3 月 31 日時点で 132 件に達している。特定のメンバーからの書き込みが多く, まだまだ分野の偏りが見られるものの, データベースとして拡大が見られるのは吉報である。今年度は本コミュニティのメンバーの論文(例えば[2-5])もいくつか出版されており, 今後も最新の成果をコミュニティ内で共有・議論できる場を提供していきたい。

2.3 惑星科学会の月科学研究会の Wiki ページの リニューアル

昨年の報告にて, 課題として提示した惑星科学会ホームページの月科学研究会の Wiki ページのリニューアルについては未だ実際の作業に臨めていない。月科学コミュニティ内での議論内容や近年の月科学の動向などを学会全体にフィードバックする場としての活用を想定しているため今後数年以内に該当ページの整備を行いたい。

¹岡山大学惑星物質研究所

²国立天文台

³東京大学

⁴ドイツ航空宇宙センター

⁵立命館大学

⁶宇宙航空研究開発機構

⁷大阪大学

⁸会津大学, *現在は岡山大学惑星物質研究所
konodera@okayama-u.ac.jp

表1: 研究会タイムテーブル.

(a) 企画時のタイムテーブル

1日目 (3/26)	2日目 (3/27)	3日目 (3/28)
	招待講演II (山本聡さん) 9:30~12:00	総合ディスカッション 9:30~12:00
	お昼休憩 & 写真撮影 12:00~13:20	お昼休憩 12:00~13:00
開会の挨拶/趣旨説明 14:00~14:20	SLIM初期成果紹介(宮崎理紗さん) (13:20~14:20)	まとめ&次回に向けて 13:00~14:30
招待講演I (池田あやめさん) 14:20~16:50	LUPEX紹介(井上博夏さん) (14:30~15:30)	
	若手講演 (25分×3名) 15:35~16:50	

(b) 修正後のタイムテーブル

1日目 (3/26)	2日目 (3/27)	3日目 (3/28)
キャンセル	招待講演I (山本聡さん) 9:30~12:00	招待講演II (池田あやめさん) 9:30~12:00
	お昼休憩 & 写真撮影 12:00~13:20	お昼休憩 12:00~13:00
	SLIM初期成果紹介(宮崎理紗さん) (13:20~14:20)	総合ディスカッション 13:00~14:30
	LUPEX紹介(井上博夏さん) (14:30~15:30)	
	若手講演 (25分×3名) 15:35~16:50	

3. 第 16 回月地殻研究会の開催報告

3.1 趣旨

月地殻研究会は、月科学者間の交流・密な議論を通じて、「他分野への理解・自身の分野との関連性の明確化・新しい研究テーマの発掘」を主目的としている。研究会での議論を通じて、「そもそも月について何がわかっていて何がわかっていないのか?」、「新しい情報を得るためにはどのような観測が必要か?」、「現在検討されているミッションでどこまで迫れるのか?」等を研究者間で共有し、今後のコミュニティの活性化・月科学の進展につなげていくことを目指している[1].

3.2 テーマ

今回のテーマは「スペクトルデータおよび画像データから探る月の表層進化」と設定し、以下の二名に招待講演を依頼した。研究会の趣旨に則り、研究者

間の密な議論を促すため、各講演者には二時間半の発表時間を配分した。

招待講演者(敬称略):

- 山本聡 (産業技術総合研究所)
- 池田あやめ(産業技術総合研究所)

3.3 開催情報

日時:2025年3月26日(水)～ 3月28日(金)

会場:奥州宇宙遊学館

開催形態:ハイブリッド

参加人数:18人(うち学生4人)

タイムテーブル:

研究会のタイムテーブルを表1に示す。当初は1日目に招待講演の一つを予定していた(表1a)ものの、強風による東北新幹線運休のため、多くの現地参加者が会場に辿り着けず、初日のプログラムをキャンセルすることとなった(表1b)。2日目には、招待講演セッションの他にSLIMの初期科学成果や将来月極域

表2: 若手講演一覧.

発表者(所属)	タイトル
神田恵太郎(東北大)	嫦娥4号地中レーダー観測による月地下の岩石サイズ-頻度分布調査
山下光葉(東大)	月の衝突盆地放出物の分布と表層物質の関係
于賢洋(東大)	火成活動とマントル対流による月の内部進化のモデリング

探査機プロジェクトLUPEXの紹介時間を設けた。また、例年通り若手講演セッションも設け、学生三名の発表を行った(表2)。3日目には、初日に実施することができなかった招待講演を午前中に行い、午後から総合ディスカッションを実施し、全体を通しての追加質問・世話人から提供した話題(嫦娥の月サンプル分析の動向と結果の解釈)に対する議論・今後の研究会の方針や運営体制について議論した。研究会および懇親会の様子を図1～図3に示す。

3.4 招待講演内容の概要

招待講演 I: 山本聡(産業技術総合研究所)

山本さんには「月マントル物質: リモートセンシングデータからの理解」というタイトルで分光観測による鉱物同定手法の解説や月マントル物質に関連した研究のレビューをしていただいた。発表の前半では、「分光学ってなんやねん」という山本さんらしき全開の語りで幕が上がり、反射分光リモートセンシング観測で得られるスペクトル吸収形状の物理的な解釈や宇宙風化に伴うスペクトル形状の変化について丁寧に解説いただいた。それに続いて、月科学におけるマントルの重要性をレビューいただき、月面上のどこでマントル物質に関する情報が得られるかについて、地球のフィールドの例や過去の研究例を提示しながら紹介いただいた。キーワードとして、巨大衝突盆地とカンラン石に富むサイトが挙げられた。

発表の中盤では、かぐや以前と以後に分けて月マントル物質研究の歴史を概説いただき、前述の二つの領域における過去の議論をレビューいただいた。地球の上部マントル成分がカンラン石に富むことから、1980年代には地上望遠鏡を用いた月面のカンラン石露頭の探索が行われ、Copernicus craterとAristarchus craterで発見された(例えば[6])。当時はクレータの空間スケールから推定される掘削深さが10 km程度と浅かったため、マントルの露出ではなく、カンラン石に富んだ下部地殻(トロクトラ



図1. 集合写真(奥州宇宙遊学館にて)。

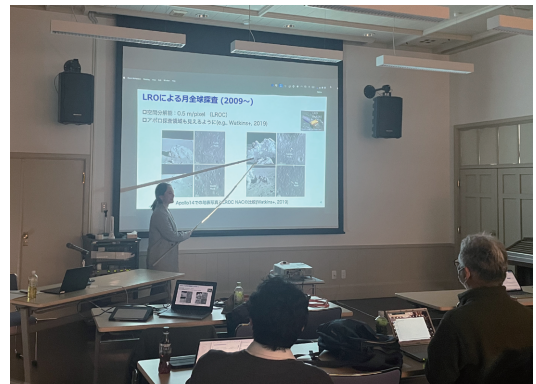


図2. 研究会の様子。



図3. 懇親会の様子。

イトなど)の貫入岩体を見ていると解釈されていた[7]。1990年代に入るとクレメンタイン探査機搭載のマルチスペクトルセンサーによるカンラン石に富むサイトの探索が行われた。前述の二つのクレータよりも空間スケールの大きい南極エイトケン(SPA)盆地であれば大規模なカンラン石の露出が見えると期待されていたが、実際の観測からはそのような結果は得られなかった。最終的には、Tompkins & Pieters (1999)[8]やPieters et al. (2001)[9]によりカンラン石に富むサイトとして6つの地点(クレータの中央丘やSPA盆地内の丘)が提示された。2000年代に入り、日本の月周回衛星かぐや搭載のスペクトルプロファイラ(SP)による高波長分解能のスペクトルデータを用いた全球的なカンラン石の探索が行われた。その結果、MoscovienceやCrisumなどの盆地の周辺に分布することが示された[10]。一方、Matsunaga et al. (2008)[11]は、先行研究[8,9]で提示された6つの地点の調査を行い、Theophilus craterを除く5つの地点のスペクトルは輝石と斜長石の混合による「カンラン石似のスペクトル」であることを示した。Yamamoto et al. (2010)[10]で示されたカンラン石の分布は後にGRAILの重力場観測で推定された地殻厚マップ[12]や衝突シミュレーションの結果[13]と比較がなされ、かぐやで観測されたカンラン石がマントル由来である可能性が支持されることとなった。

発表の後半では、「カンラン石/低カルシウム輝石(LCP)サイトの全球マッピング」や「斜長岩とカンラン石岩体の共存サイトの解釈」、「カンラン石とLCPの分布に基づくマントル構造の推定」(Yamamoto et al., 2022[14], 2023[15])について紹介いただいた。以下では、特に斜長岩とカンラン石岩体の共存サイトに関して概説する。Yamamoto et al. (2022)[14]ではかぐや搭載のMultiband Imager(MI)データを用いて特定の鉱物に対する吸収マップを作成した(鉱物ごとに特定の波長バンドでの吸収深さに基づいて作成)。更にDigital Elevation Model(DEM)と組み合わせることで、吸収マップを三次元化し観察を行った。その結果、いくつかの巨大クレータや衝突盆地(例えば、Theophilus crater, Schrödinger basinなど)の壁面や中央丘斜面でカンラン石に富む岩体と斜長岩の共存が確認され

た。カンラン石のみが確認されるサイトと斜長岩との共存サイトを比較したところ、露出パターンや空間スケールなどに違いが見られず、地質的観測だけではその成因の説明が困難であった。月科学コミュニティでは、「地殻と上部マントルの機械的混合」「衝突溶融による分化晶出」「下部地殻(トロクトライト/ノーライト)からの貫入岩体」の三つの観点から議論されているが、未だ合意には至っていない。ただし、Yamamoto et al. (2010)[10]の反射スペクトルのモデル計算結果に基づくスペクトルの吸収形状に加えて絶対反射率も観測データの解釈では重要な制約になることを提唱しており、斜長石成分を多く含むトロクトライトでは観測されたスペクトルを説明するのは困難であることが提案されている。

招待講演 II: 池田あやめ(産業技術総合研究所)

池田さんには「月周回衛星画像から探る表層進化過程」というタイトルで、「ボルダー」をキーワードに月の表層物質の劣化プロセスや物質移動に関して講演いただいた。発表の前半では、アポロ計画や近年の月周回衛星により取得された画像を示しながら、月面で観測されるボルダーやボルダー崩れに伴って生成されるトレイルを紹介いただいた。特に後者については、トレイルの特徴(幅など)からレゴリスの物性を推定する研究[16]を提示いただき、物質移動に伴い副次的に形成される地形的特徴の利用可能性について解説していただいた。

発表の後半では、ボルダー崩れの誘因について過去の文献(例えば[17-22])を引用しながら月震・天体衝突・熱疲労の三つの要因について議論された。以下、要点を記載する。アポロ月震データの解析から月浅部では比較的マグニチュードの大きいイベント(浅発月震)が発生していることが知られており[23]、斜面に配置されたボルダーが月震によって不安定な状態となり、ボルダー崩れが発生する可能性がKumar et al. (2016, 2019)[17,18]により示されている。ただし、彼らの加速度推定法では、地動をかなり過剰に見積っており、課題を多く残した上での推定結果であるとの見解を述べられた。Bickel et al.(2021)[20]では、グローバルスケールでテクトニックな地形とボルダー崩れの分布を比較し、両者には明瞭な相関が見られないことを示している。彼らの研究によ

れば、ボルダーの供給源は天体衝突により基盤岩が破碎されることで生成され、新しい地形では熱疲労による破碎作用で、古い地形では更なる天体衝突によりボルダー崩れが発生するのではと推察している。Ikeda et al. (2022)[21]では、先行研究[17,18]で解析対象となったクレータ斜面のボルダー崩れに関して、天体衝突による加速度の定量評価や斜度、風化度、小クレータ分布との詳細比較を行い、天体衝突でもボルダー崩れが発生することを示した。この結果は、ボルダー崩れがテクトニックな地形以外でも観測されていることを説明できるものであり、Bickel et al. (2021)[20]の主張とも調和的である。一方、熱疲労の影響評価に関しては実験的・理論的研究(例えば[22])は存在するものの、実際に観測されているボルダーの空間スケール(10 mオーダー)に適応できるかどうかについては未だ疑問が残る点であり、他二つの要因と比較すると更なる研究が求められている分野であるとのことである。

3.5 参加者の感想

- 時差の都合上、全ての発表は拝見できなかったのですが、かぐやの頃の話から将来探査に渡るまで大変勉強になりました。ありがとうございました。
- 非常に楽しかった。
- Great!
- ピュアにサイエンスの話ができるこの会は貴重だなとあらためて思いました。
- 反射スペクトルの解釈やマントル物質推定の歴史、ボルダー生成過程と月震との関連性など色々な話を一度に聴講でき、非常にためになった。今後も続けていてもらいたい。
- 私にとっては初めての参加で、初めてお会いする方も多くいましたが、対面参加者の人数が10人程度であつたおかげで親睦を深めやすかったように感じました。また、招待講演のお二方は研究分野の背景レビューも含めて発表してくださり、非常に勉強になりました。
- 今回も大変勉強になり、聞きながらいろいろ自身の宿題もできました。今回は特にイレギュラー対応大変だったかと思いますが、ロジ周りありがとうございました。

- 月のスペクトル解析手法の原理やボルダー進化の基礎を学ぶことができ、またその研究状況を詳細に知ることができました。月表層の高解像度データの取得により、解析できる幅が拡大していることを実感できました。
- 今回は強風のため物理的の参加ができませんでした。リモートとの違いを実感しました。
- 学会発表を聞くだけでは分からない反射スペクトルの基礎を学ぶことができ、大変有益でした。自身はしばらく月の研究ができていませんが、議論を通してやはり月は面白いと再認識しました。来年以降も可能な限り参加したいです。

3.6 今後の研究会へのリクエストなど

- 会としての目標やゴールを決めたほうが議論に力が入ると思う。
- もし発表者の方がOKを出していただけるのであれば、講演のZoom録画をお願いしたいです。聞き逃した発表を追えるようにしていただけると嬉しいです。
- 発表時間だけでなくしっかり議論、質疑時間がある方がよいですね。
- モデリング屋さんは、月の歴史についてかなり単純化した描像を描いていますが、これに対して、最近のリモートセンシングや月試料分析により描かれた月の総合的な描像がどうなっているか、是非伺いたいと思います。

4. まとめと将来展望

国内月科学コミュニティの活性化を目的として、情報共有の場の整備および研究会の運営を行なった。前者については、昨年度に引き続きMoon-nextメーリングリストの登録者数ならびに新着論文数の増加が見られ、徐々にではあるがコミュニティが拡大してきていると考える。後者に関しては、第16回月地殻研究会を開催した。今年度は某ミッションの審査会準備などに伴い、昨年度(23名)よりは少なく、18名の参加ではあつたものの、各講演セッションでは活発な議論が行われ、研究会の理念に沿った形で運営ができたのではないと思う。特に毎年新規参入者が加わっていることは吉報であり、今後も他分野の

研究者や学生の参入をエンカレッジしていきたい。

我々の活動は月科学者間の交流に加え、学生・ポストドクの育成にも注力している。今年度は運営メンバーに新たに四名のポストドク及び学生を加えたことで、若手メンバーが当事者意識を持ってコミュニティ運営に関わったのではないかと考える。今後もコミュニティメンバーが研究者として成長できる環境の整備、若手メンバーの声が通りやすい雰囲気作りに努めていきたい。

5. 謝辞

月地殻研究会の参加者には心より感謝申し上げます。特に招待講演を快諾してくれた産業技術総合研究所の山本聡さん・池田あやめさんには、研究会の趣旨に沿った形で話題を提供いただき、有意義なディスカッションの契機を与えてくれたことに深く感謝する。また、奥州宇宙遊学館・国立天文台水沢の関係者の方々には、研究会の会場やゲストハウスを提供いただいた。ここに感謝の意を示したい。

6. 引用文献

- [1] 小野寺ほか, 2023, 遊星人 32, 2, 153.
- [2] Onodera, K., 2024, *Journal of Geophysical Research: Planets* 129, e2023JE008153.
- [3] Ohtake, M. et al., 2024, *The Astrophysical Journal* 963, 124.
- [4] Nishiyama, G. et al., 2024, *Journal of Geophysical Research: Planets* 129, e2023JE008034.
- [5] Yamamoto, S. et al., 2025, *Journal of Geophysical Research: Planets* 130, e2024JE008663.
- [6] Pieters, C. M., 1982, *Science* 215(4528), 59.
- [7] Pieters, C. M. and Wilhelms, D. E., 1985, *Journal of Geophysical Research* 90(S02), C415.
- [8] Tompkins, S. and Pieters, C. M., 1999, *Meteoritics & Planetary Sciences* 34(1), 25.
- [9] Pieters, C. M. et al., 2001, *Journal of Geophysical Research* 106, 28001.
- [10] Yamamoto, S. et al., 2010, *Nature Geoscience* 3, 8, 533.
- [11] Matsunaga, T. et al., 2008, *Geophysical Research Letters* 35(23), L23201.
- [12] Wieczorek, M. A. et al., 2013, *Science* 339, 671.
- [13] Milijković, K. et al., 2015, *Earth and Planetary Science Letters* 409, 243.
- [14] Yamamoto, S. et al., 2022, *Journal of Geophysical Research: Planets* 127, e2021JE007077.
- [15] Yamamoto, S. et al., 2023, *Journal of Geophysical Research: Planets* 128, e2023JE007817.
- [16] Hovland, H. J. and Mitchell, J. K., 1973, *The Moon* 6 (1-2), 164.
- [17] Kumar, P. S. et al., 2016, *Journal of Geophysical Research: Planets* 121(2), 147.
- [18] Kumar, P. S. et al., 2019, *Geophysical Research Letters* 46(14), 7972.
- [19] Bickel, V. T. et al., 2020, *Nature Communications* 11, 2862.
- [20] Bickel, V. T. et al., 2021, *Journal of Geophysical Research: Planets* 126(10), e2021JE006824.
- [21] Ikeda, A. et al., 2022, *Journal of Geophysical Research: Planets* 127, e2021JE007176.
- [22] Molaro, J. L. et al., 2017, *Icarus* 294, 247.
- [23] Nakamura, Y. et al., 1979, *Proceedings of the Lunar and Planetary Science Conference X*, 2299.

「2024年度iSALE講習会」参加報告書

山口 祐香理¹

2025年1月7日から28日にかけて、週1回・全4回の離散日程でiSALE講習会中級編がオンライン形式で開催された。iSALEとは、Impact-SALE (Simplified Arbitrary Lagrangian Eulerian) の略で、惑星科学における衝突現象の研究に広く用いられている数値衝突計算コードの一つである[1-4]。本講習会は、国立天文台シミュレーションプロジェクト(以下、CfCA)の支援のもと開催され、PD以上3名、博士学生5名、修士学生3名の計11名が参加した。講師は、黒澤 耕介氏(神戸大学)、黒崎 健二氏(神戸大学)、松本 侑士氏(国立天文台CfCA)の3名にご担当いただいた。また、伊藤 孝士氏(国立天文台 CfCA)、加納 香織氏(国立天文台 CfCA)

には、計算機材の準備や講義動画の共有等のご支援をいただいた。講習会では、講師による衝突物理学および数値流体計算に関する講義に加え、CfCAの共同利用計算機を用いたiSALEの実行およびpySALEPlotによる解析といった演習が行われた。中級編として開催された今回は、基本操作の習得を前提に、より実践的な内容に重点が置かれ、参加者各自の研究テーマに基づく計算に取り組む時間も多く確保された。必要に応じて講習日翌日には補講も実施され、個別の課題にも柔軟に対応する手厚い体制が整えられていた。最終日には成果発表会が行われ、各参加者が取り組んだ計算とその結果を報告した。講習会の時間割を以下に示す。

■ 2025年1月7日(火)

13:30 - 13:45 講習会の流れについての説明
13:45 - 14:50 講義(状態方程式と衝撃加熱について)
15:00 - 15:30 課題1(衝撃加熱に着目した解析)

■ 2025年1月14日(火)

13:30 - 14:40 講義(衝突放出過程について)
14:40 - 14:50 講義(CfCAの共同利用計算機について)
15:00 - 15:30 課題1の続き
15:30 - 16:30 課題2(衝突放出物の解析)

■ 2025年1月21日(火)

13:30 - 14:30 課題1, 2
14:30 - 16:30 各自の計算・解析

■ 2025年1月28日(火)

13:30 - 15:30 各自の計算・解析・発表準備
15:30 - 16:30 成果発表会

¹神戸大学大学院理学研究科
y_yamaguchi@stu.kobe-u.ac.jp

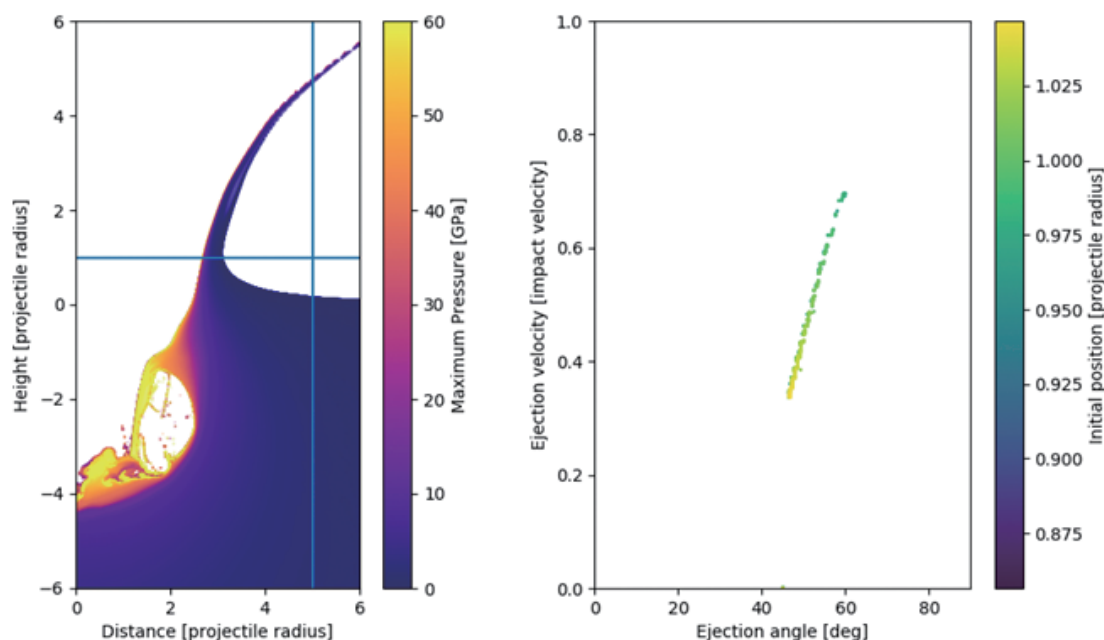


図1: 直径3 mmのアルミニウム弾丸の玄武岩への7 km/s衝突の計算例。弾丸と標的の状態方程式には、それぞれアルミニウムのTillotson EOS、玄武岩のANEOSを用いた。左図は、10弾丸貫入時間経過後の圧力分布を可視化したものである。右図は、左図の青線で区切られた右上の領域に存在するエジェクタ(トレーサー粒子)の放出速度と角度の関係を示したものである。ここで、放出角度は図の縦軸とエジェクタ軌道(位置から算出)のなす角度として算出している。また、カラーバーを用いてエジェクタの水平方向の初期位置を可視化している。人工粘性の影響が大きい表面下5セル分にあるトレーサー粒子を除外しているため、高速度なエジェクタが少ない。

iSALEは主に惑星科学において衝突研究に用いられている計算コードの一つで、SALEコード(Simplified Arbitrary Lagrangian Eulerian)を基に、欧州、米国、ロシアの研究者たちによって開発が進められている。流体運動に加えて物質の弾塑性体挙動を扱うことができるため、HydrocodeではなくShock physics codeと呼ばれている。iSALEに関する詳細はiSALEのホームページ¹や、iSALE講習会初級編のテキスト²を参照していただきたい。

本講習会では、講習会の3週間前から講習会終了1週間後(12/18-2/4)まで国立天文台CfCAの共同利用計算機を一部講習会専用に貸し切って使用した。あらかじめiSALE実行環境が整備されたこの計算機に、参加者は各自リモートログインすることで、iSALEの実行および計算結果の解析を自由に行うことができた。中級編として開催された今回は、

過去の初級編講習会で扱われた内容(リモートログイン、基本的な計算の流れ等)を事前に復習しておく必要があった。その分、講習会ではiSALEを研究に役立てるための応用を意識したより実践的な演習が中心となった。本講習会は過去数年間と同様に離散日程でのオンライン開催であり、講義に関する連絡はSlack上で、講義及び補講はCisco WebEx上で行われた。さらに、前回と同様に講義の録画が限定公開されたことで、講義にリアルタイムで参加できない場合も、録画視聴によって柔軟に学習を進めることができた。また、講義や計算、解析に関する質問は、Slackを通じて講習会開始前から随時行うことができ、講師陣による迅速な対応が行われた。

1日目は、講習の概要説明に続き、状態方程式と衝撃加熱に関する講義から始まった。iSALEで選択できるTillotson EOSやANEOSといった状態方程式の解説に加えて、自作の状態方程式の導入事例も紹介された。また、衝突後の標的物質の温度とエ

¹<https://isale-code.github.io>

²<https://www.cfca.nao.ac.jp/node/1683>

ントロピーの計算方法に関する講義の後、iSALE開発チームが提供する例題ファイルを用いた計算を実行し、JupyterLab上でpySALEPlotによる衝撃加熱に着目した解析を行った。具体的には、温度場やトレーサー粒子の経験した熱力学経路(経験温度と圧力)を可視化・解析し、加熱された物質の分布や割合を定量的に評価した。

2日目は、衝突物放出過程(衝突噴射過程(Impact jetting)、衝突剥離(Impact spallation)、衝突掘削(Normal excavation))の詳細な解説、衝突放出物の熱力学、強度支配領域での衝突掘削に関する講義が行われた。また、高速度放出物の解析における注意点として、放出物の量が空間解像度や数値解法に依存することや、自由表面から5-10セル程度は人工粘性の影響により衝撃圧力が信用できないことを学んだ。さらに、国立天文台CfCA共同利用計算機に関する解説の後、1日目の続きと衝突放出物の放出速度・角度分布に関する解析に取り組んだ。

3日目は、これまでの課題の継続に加え、4日目の発表を念頭に置いた各自の計算と解析を進めた。随時質問が可能であり、必要に応じてBreakout Roomを活用した個別指導も行われ、手厚い支援体制が整えられていた。

4日目は、各自が取り組んだ計算と解析の最終確認のち成果発表が行われた。参加者は、室内衝突実験の模擬、天体で観測された地形や現象の再現など、自由度が高く、初級編からステップアップした発表が多数見られた。講師陣からは、iSALEの適用範囲や数値的な留意点に基づく的確なフィードバックが与えられ、非常に実りのある時間となった。

図1に筆者が作成した計算結果の一例を示す。

以上、2024年度iSALE講習会への参加報告を行った。筆者は、2022、2023年度の初級編講習会に続いて3度目のiSALE講習会参加であった。普段は室内衝突実験を行っているため数値計算には不慣れで未だにコードをすらすら打つこともままならないが、初回参加時と比較するとiSALEに対する理解は着実に深まり、苦手意識も薄れつつある。こうした成長は、講師陣による丁寧かつ確かな指導、充実した教材と支援体制によるものであると感じている。また、Slackによる連絡・質疑対応・資料共有、Cisco WebExでの講義・補講、さらに録画視聴の併用により、時間・場所の制約を受けず柔軟に学習できる環境も有用であった。

最後に、本講習会の開催にあたりご尽力いただいた講師の黒澤 耕介氏、黒崎 健二氏、松本 侑士氏に心より御礼申し上げます。また、国立天文台 CfCAの伊藤 孝士氏、加納 香織氏には、機材準備や録画配信など細やかなご配慮をいただきました。この場を借りて深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Amsden, A. et al., 1980, Los Alamos National Laboratories Report, LA-8095:101p.
- [2] Ivanov, B. A. et al., 1998, International Journal of Impact Engineering 20, 411.
- [3] Collins, G. et al., 2004, MAPS 39, 217.
- [4] Wünnemann, K. et al., 2006, Icarus 180, 514.

著者紹介

山口 祐香理



神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻 博士後期課程2年。日本惑星科学会、日本地球惑星科学連合に所属。

2025年度日本惑星科学会秋季講演会のお知らせ

成田 憲保¹ (2025年日本惑星科学会秋季講演会実行委員長)

2025年日本惑星科学会秋季講演会についてお知らせいたします。以下は2025年5月時点での開催案内です。最新情報は講演会ウェブサイト [https:// www.wakusei.jp/meetings/fallmeeting/2025/](https://www.wakusei.jp/meetings/fallmeeting/2025/) に随時掲載予定です。

1. 日程と会場

日程: 2025年9月3日(水)–5日(金)

会場: 東京大学 駒場Iキャンパス 21KOMCEE (〒153-8902 東京都目黒区駒場3-8-1)

本講演会はオンサイト形式で開催いたします。オンライン配信は実施しません。9月4日に総会および最優秀研究者賞受賞講演を予定しています。同日夕方に懇親会の開催を予定しています。なお、一般向け講演会の開催はありません。

2. 発表形式

●発表資格

著者に本会の会員(発表申し込み時にすでに会員資格を得ていること)を含むこと。著者に会員を含まない申し込みは受け付けません。

●発表形式とプログラム編成

発表申し込みは、1:口頭発表、2:ポスター発表、3:どちらでもよい、の3種類で受け付けます。筆頭著者として申し込めるのは「口頭発表」もしくは「どちらでもよい」から1件、「ポスター発表」もしくは「どちらでもよい」から1件の合計2件までとします。発表の採否およびプログラム編成については、抄録にもとづき、実行委員会が決定いたします。発表形式については申し込み時のご希望を最大限尊重しますが、口頭発表希望が多数であった場合、一部をポスター発表とする可能性があります。予めご了承ください。

●口頭発表: 1講演につき12分前後(質疑応答含む)を予定しています。

●ポスター発表: コアタイムを設けます。用紙サイズはA0(横841 mm 縦1189 mm)です。

●最優秀発表賞セッション

本講演会において第一著者として発表する博士学位を有していない学生会員は、最優秀発表賞に応募できます。予備審査を通過された応募者には、最優秀発表賞セッションでの口頭発表(15分前後)と、選考委員との議論を行って頂きます。別途定める今年の応募要領に従ってご応募ください。詳細は本会メーリングリスト(oml)および本会ホームページ「2025年秋季講演会のお知らせ」でお知らせいたします。

3. 参加および発表の申し込み方法

本会ウェブサイトの[参加/発表/予稿登録]よりお申込みください。これらの申込みは、すべて本会ウェブサイト上で

¹ 東京大学大学院総合文化研究科
narita@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

行います。申込みには、(1)本会の会員番号もしくは非会員登録番号、(2)本会ウェブサイトにて会員または非会員としてログインするためのパスワード、の両方が必要になります。本会への新規入会登録および非会員登録も本会ホームページから行ってください。なお、非会員登録には1日以上、新規入会登録には2週間以上かかりますので、発表申し込みを予定されている非会員の方はできる限り早目に登録手続きを開始してください。[参加/発表/予稿登録]申込とは別に、参加費支払い手続きを行っていただきます(項目6.参照)。参加費の支払いなしに講演会には参加できませんので、ご注意ください。

4. 今後のスケジュール

2025年6月12日(木): 参加申込, 発表申込, 支払い, 予稿原稿受付開始.

2025年6月30日(月): 発表申込締切, 最優秀発表賞予稿原稿の締切.

2025年7月30日(水): 参加申込締切, 予稿原稿締切, 支払い締切.

5. 予稿集

講演会に先立って、予稿集を本会ウェブサイトにおいてPDF形式で公開します。

6. 参加費

一般会員 6000円, 学生会員 3000円, 非会員 8000円

学部生・M1の学生の方は、発表をしない場合に限り参加費を無料とします。ただし、参加するためには学生会員もしくは非会員登録が必要で、かつ項目4.にある参加申込締切も同様に適用されます。シニア会員の参加費については、一般会員と同額とします。本会ウェブサイト「2025年秋季講演会のお知らせ」から支払いサイト(イベント参加WEB受付システム「イベントペイ」を利用)に移動し、クレジットカードもしくはコンビニ決済で参加費の支払いを行なっていただきます。領収書は、支払い完了時に送信されるメール記載のURLからダウンロードできます。

7. 懇親会

一般会員・非会員 5000円, 学生会員 3500円

懇親会は9月4日夕方に東京大学駒場生協食堂で開催する予定です。

8. 交通手段

駒場キャンパスへのアクセスマップ: https://www.u-tokyo.ac.jp/ja/about/campus-guide/map02_02.html

キャンパス内マップ: https://www.u-tokyo.ac.jp/campusmap/cam02_01_15_j.html

9. その他

(1) 託児を必要とされる方に会場近くの託児所を紹介いたします。秋季講演会参加のために託児施設を利用される方には託児費の補助があります。詳しくは aloc@wakusei.jp までお問い合わせ下さい。

(2) 会場では eduroam の使用が可能ですが、高速な接続が必要な方は各自でモバイルルーター等をご用意下さい。

(3) 会場内での飲食は原則、認められていません。また生じたゴミは各自でお持ち帰りください。

(4) キャンパス内は指定喫煙場所を除いて禁煙です。

(5) このお知らせの内容は変更される可能性があります。本会ウェブサイトで最新の情報をご確認ください。

(6) その他、LOCへのお問い合わせは aloc@wakusei.jp までご連絡ください。

New face

野田 夏実¹

(東京科学大学 未来社会創成研究院 地球生命研究所)

皆さま、ご無沙汰しております、あるいは初めまして。野田夏実(のだ なつみ)と申します。2022年3月に博士号を取得し、現在は東京科学大学(旧東京工業大学)地球生命研究所にて博士研究員として研究を続けています。寄稿しようと思いつきながらもつい先延ばしするうちに気づけば丸3年が経ってしまいましたが、先日ようやく博士論文の内容が国際誌掲載に至ったこともあり[1]、一区切りとして筆を執ることにいたしました。

この分野で博士号を取得するに至った経緯を振り返ると、このコーナーで良く見られる「幼い頃から宇宙や天体に夢中だった」といった、私にとって身近な例を挙げるならば高校時代から想像以上に長く深い付き合いとなった同期[2]のようなタイプでは、私は全くありませんでした。大学進学を控えた頃、何を学びどんな研究をしたいかを考える中で¹、「生命とは何か」という漠然とした問いに惹かれている自分に気づいたのが始まりです。高校時代の私は生物学に力を入れていたため、周囲からは当然のように生命科学系の学科へ進むものと思われており、自分でもそう思っていました。しかし、読み込んでいた生物学の教科書[3,4]には、生命の精巧な仕組みの説明が並びつつも、当然ながら生命が存在する前提の記述しか展開されていません。「こんなに上手い仕組み、どうやってできたの?!」と思っても、その成り立ちについては、少なくとも当時の私には触れられていないに等しく映り、そこに物足りなさを抱くにつれ、「せっかく大学で研究するなら理学と真ん中が良い。生命の条件を考えたい。」という想いが募って



いきました。そうした問いに正面から挑める分野として出会ったのが、惑星科学です。気づきのきっかけは、NASAの探査車Curiosityの火星着陸成功のニュースでした。「地球外生命体を探す」「生命の起源を宇宙から迫る」といった目標が最前線の科学として真剣に取り組まれていることに、その愛称の通り好奇心をそそられました。空想や哲学でしか扱えないとも思えたテーマが、現実の惑星探査と結びついた仮説検証の対象になっている事実を目の当たりにした時、「生命を育みうる環境条件は何か」という問いを自然科学として扱える場所があることに心躍らせたのを鮮明に覚えています。

そこで東京大学理科II類から理学部地球惑星物理学科に進学し、続いて同大学院理学系研究科地球惑星科学専攻に進みました。進学時の志望通り関根康人教授の指導のもと、水-岩石反応実験を主軸

¹また別の切り口として、研究者を意識したのって……とも記憶を辿ってみました。何がきっかけか「うちの娘に一般的な会社員は向かないぞうだ」と早々に勤づいた母による、お皿にあげたゼリーを選び損ねるなり「それが危ない薬品だったら大惨事だった!」といった今思えば突拍子もない叱られ方の数々を真に受けて育った結果、人間を目指す前段階としてまず研究者を目指さないとならない様な意識が気づけば醸成されていた気がします。ただ、記憶違いがあっても構わないと、先日この話を母に打ち明けたら、そんなつもりはなかった、どうしていつも有り得ない思い込みを、と呆れ顔を返されました。叱られ方そのものは事実だったようです。

1. 東京科学大学 未来社会創成研究院 地球生命研究所
natsumi@elsi.jp

にCuriosity探査車が取得した鉱物化学データと照らし合わせながら初期火星の水環境や化学反応を復元する研究に取り組みました。ちょうどタイミング良く、関根教授が代表を務めた新学術領域研究「水惑星学の創成」が私の大学院生時代を通じて展開されており、その枠組みの中で地下水循環の数値シミュレーションや放射光X線を用いた分子地球化学分析の手法を身につける機会にも恵まれました。それ以上に、生命が代謝に必要な化学エネルギーを得られるかという観点から惑星における酸化還元非平衡の存否に注目する「水惑星学」の主眼は、液体の水の存否のみを「ハビタブル」な惑星環境の定義に用いるのはどこか不十分に感じていた私にとって、それを一歩踏み越える戦略として目から鱗なものでした。現に、私の取り組んだ研究テーマは、マンガンの沈殿過程を模擬した実験で酸化的な表層環境を提案したり[5,6]、模擬地殻や合成粘土鉱物を用いた熱水実験で地下水や溶存ガスとの化学反応を再現し、二価鉄や水素分子といった還元剤の挙動や供給可能性を定量的に論じたりと[1,7]、非常に「水惑星学」に関連深いものでした。無酸素条件での分析実験が、思いがけずはやぶさ2帰還サンプルの分析リハーサルに協力する機会に繋がったのも印象に残っています[8]。実験室スケールで何を明らかにできるのかの課題設定や論理展開に頭を悩ませていた時期も長くありましたが、初期火星研究を通じて「生命を育みうる環境条件」という問いに手を動かして挑む経験を存分に積むことができたと感じます。ただ、博士課程も終盤にさしかかり、実験装置のご機嫌を必死に保ちながら深夜までデータを揃えつつ、「この道は自分が辿り着きたい問いに本当に向かっているのだろうか?」と改めてその先の進路を考えた頃には、「生命とは何か」に迫るには、まだ遠い地点にいるような感覚を抱いていました。知識が深まったからこそ、良くも悪くも「限界」が見えるようになったとも言えるかもしれません。

この志向を込めた申請書が運良く学振特別研究員PDに採択され、博士号取得を機に研究分野を惑星科学から大きく移しました。地球生命研究所(ELSI)にて合成生物学・生物物理学を専門とする松浦友亮教授のもとで研究をするようになり、現在に至ります。時期が前後しますが、実は私の修士課程

の途中で関根教授の異動に伴い実験拠点はELSIに移っていましたが、田近英一教授に受け入れ教員として大変お世話になり、博士課程まで東京大学に学籍を残す形となりました。ELSIの国際的・学際的な環境は貴重な成長機会となり、「ここ以上に私の興味にマッチした研究拠点は無い」と学振PDとしての在籍先に希望した理由にも繋がります。ただ、移った当初は全く異分野の英語セミナーなどに戸惑いを感じることも多く、また当時のELSIは研究への専念を尊重して敢えて学生を積極的には受け入れない体制だったため若干の孤立感を覚える場面もあり、学務上の拠点が東大地惑の慣れた環境にあったことは安心感に繋がりました。結果的に両者の良い所を活かしながら研究生活を送ることができ、特殊な状況のために尽力してくださった関連教員の皆様には感謝の気持ちでいっぱいです。ちなみに現在のELSIは、大学院コースが創設4年目を迎え、学生が多数を占める活気あふれる研究所へと変貌しています。片や気づけば少数派の博士研究員となった現在の私ですが、温度変化サイクルに伴って凍結と融解を繰り返す非平衡環境が、原始生体分子の集合や相互作用を促す可能性に注目した研究を進めています。凍結・融解の変化が十分遅ければ、氷晶と共存する液相(共融相)に塩や高分子が濃縮されることが期待され、実際に長鎖DNAの相補的塩基配列を介した連結反応が低温条件にもかかわらず促進されることを示しました[9]。生体分子の合成経路として語られる“化学進化”より後・NASAの生命の定義にも用いられる“ダーウィン進化”より前に相当するプロセスが、どのような周辺環境と材料分子との相互作用で進むのかに迫りたいというのがモチベーションです。その意図で、自己と外界を隔てる区画、形質をコードする遺伝情報、といったダーウィン進化に必要であろう機能が、どこでどのように構築され得たのかを探るため、リン脂質膜やDNA断片をモデル分子に用いた実験に取り組んでいます。凍結融解環境は、もともと氷衛星から着想を受けてプロジェクトが始動した背景に加え、季節変化・昼夜変化・潮汐といった天体運動を駆動力にサイクルが繰り返され得るポテンシャルの面でも、惑星科学と非常に相性の良いターゲットと見据えています。しばらくは合成生物学の技術や知見を身につけ、生物物理学の分野で認め

られる成果に完成させることに重点を置きつつ、ゆくゆくは惑星科学と結びついた議論へ展開し原点回歸することを目指しています。

こうした次第で、博士号取得以降は惑星科学会関連イベントへの参加機会を逃しておりましたが、実は2022年の太陽系天体若手研究会では招待講演の機会をいただきました[10]。既に惑星科学からは軸足を移していたうえに、博士号取得後わずか半年と経歴も成果も一般的には不相応だっただろうにもかかわらずお声がけいただいた、その意向に応えるべく「分野を離れた私なりの立場から見えてきたこと」として講演中に伝えた内容を、本稿の締めくくりを兼ねて再掲したいと思います。それは、「惑星科学は『 $n=1$ 』という再現性の限られた事象に、いかに向き合うかが問われる学術分野なのでは」という気づきです。生命科学の研究では、繰り返し実験や統計的な処理が可能なが絶対的な大前提とされるのに対し、惑星科学は、そうした前提では必ずしも扱いきれない問いに、向き合い方そのものを試行錯誤しながら答えを探ってきた学問であり、そこに面白さがあるように若輩者ながら感じています。だからこそ、生命の起源やその普遍性といった一見捉えどころの無い壮大な問いにも、早くから真剣に取り組めたのではないのでしょうか。これは、かつて「生命とは何か」に迫りたいと志した私が、生命科学ではなく惑星科学を研究生生活の入り口に選んだ経緯とも重なります。近年では、生命の起源や普遍性といった話題が、生命科学や物理学の研究対象としても大々的に据えられる場面が急速に広がっているように、あくまで個人的な視点ですが感じます。私自身、この3年間は合成生物学の手法を活かした実験から「生命を育みうる環境条件」へのアプローチを試みている中で、人工細胞研究などのコミュニティに関わる機会が圧倒的に多いですが、根底には惑星科学で育まれた研究思想があると感じます。これからも、そうした問いを共有できる場として、惑星科学会のコミュニティとも関わり続けていけたらと思っています。改めて、今後ともどうぞよろしくお願いいたします。²

参考文献

- [1] Noda, N. et al., 2025, JGR Planets 130, 1.
- [2] 奥谷彩香, 2022, 遊星人 31, 4.
- [3] Campbell, N. A. and Reece, J. B., 2010, キャンベル生物学, 小林興監訳 (丸善出版).
- [4] Alberts, B. et al., 2011, Essential細胞生物学 原書第3版, 中村桂子・松原謙一監訳 (南江堂).
- [5] 野田夏実ほか, 2018, 遊星人 27, 3.
- [6] Noda, N. et al., 2019, JGR Planets 124, 5.
- [7] Noda, N. et al., 2022, Icarus 386, 115149.
- [8] Noda, N. et al., 2021, Minerals 11, 1244.
- [9] Noda, N. et al., 2024, ChemSystemsChem 6, 4.
- [10] 豊川広晴ほか, 2023, 遊星人 32, 1.

²本稿の執筆にあたっては、構成立案や表現検討において生成AI(ChatGPT, GPT-4 Turbo; OpenAI)を多分に活用しました。生成内容から著者による大幅な加筆修正を経て投稿に至っており、その内容の全責任は著者が負うものの、自力のみで書き上げようと奮闘していた段階の惨状からは全く想像つかない出来栄です。当初の原稿では注釈1の様な蛇足にも程があるエピソードが取り留めなく展開され、3000字近くを費やしてもなお修士課程の途中までしか辿り着きませんでした。ちょうど、本誌の火星特集号掲載に向けて人生で初めて準備した論文原稿(後の参考文献[5])を意気揚々と指導教員に見せたところ、「野田さんさあ……、日本語書いたことある?」と言われ、あまりの衝撃に硬直していた頃です。念のため補足しますが、著者は東京生まれ東京育ち、母語は日本語です。もしもタイムマシンがあったら、あの時の私の所へ迷わず飛んでいき、「7年経っても相変わらず日本語は上手に書けないままだけど、書けなくてもある程度はどうかなる未来がもうすぐやってくるよ」と激励を送りたいです。テクノロジーの発展に感嘆しつつ、そうは言っても書かなければ仕事を始められず成果にも認められないこの業界に身を置いている以上、自身の成長していなさには当然情けなく不甲斐なく感じます。全力で精進しなければと改めて感じている所です。

学位論文タイトル紹介

惑星科学関連分野にて博士号および修士号を近年取得された会員の研究内容を学会員に広く知ってもらう目的で、論文タイトルを掲載いたします。項目は、(1)氏名、(2)論文タイトル(現題名)、(3)論文タイトル(和訳名)、(4)論文提出時の所属、(5)学位取得年・月、(6)次の所属、の順です。希望者は、論文の結果を最もよく表す図を1枚掲載できます。この記事に関するお問い合わせは編集長(chiefeditor@wakusei.jp)までお願いいたします。
※毎年6月号に、過去3年まで遡って掲載可。投稿方法等はomlにて案内いたします(2月頃)。

博士論文

- (1) 土井 聖明(どい きよあき)

(2) Constraining Physical Properties of Protoplanetary Disks from Spatial Distributions of Dust Millimeter Continuum Observations

(3) ダストからのミリ波連続波放射の空間分布に基づく原始惑星系円盤の物理状態の推定

(4) 総合研究大学院大学 物理科学研究科 天文学専攻

(5) 2024年9月

(6) Max Planck Institute for Astronomy, Planet and Star Formation Department
- (1) 鈴木 雄大(すずき ゆうだい)

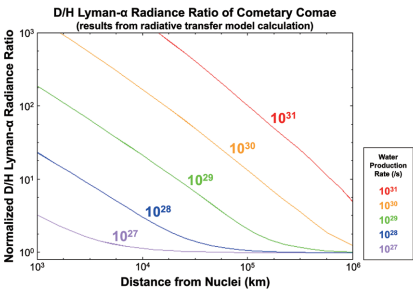
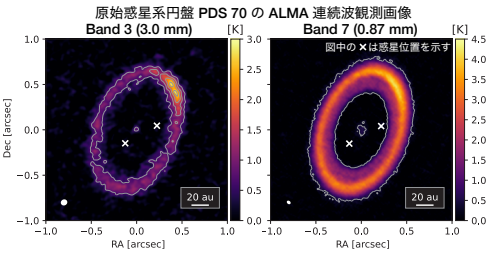
(2) Development of methods for estimating surface composition from observing surface-bounded exospheres

(3) 表面境界外気圏の観測による天体表面組成の推定手法の開発

(4) 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻

(5) 2023年3月

(6) JAXA宇宙科学研究所・ボストン大学



- (1) 平田 佳織(ひらた かおり)
- (2) Igneous and surface processes producing Mercury's crustal diversity: Constraints from geomorphology, spectroscopy, and geochemistry of volcanic crusts
- (3) 水星地殻の多様性を作り出す火成・表層プロセス: 火山性地殻の地形・スペクトル・元素組成からの制約
- (4) 東京大学大学院 理学系研究科 地球惑星科学専攻
- (5) 2025年3月
- (6) ジョーンズ・ホプキンス大学応用物理研究所 (JHUAPL), 東京大学大学院理学系研究科

修士論文

- (1) 山下 光葉(やました みつは)
- (2) Global Distribution of Ejecta Thickness from Impact Basins on the Moon
- (3) 月の巨大衝突盆地放出物の全球分布
- (4) 東京大学大学院 理学系研究科 地球惑星科学専攻
- (5) 2025年3月
- (6) 東京大学大学院 理学系研究科 地球惑星科学専攻 博士課程

JSPS Information

- ◇日本惑星科学会第169回運営委員会議事録
- ◇日本惑星科学会第170回運営委員会議事録
- ◇日本惑星科学会賛助会員名簿
- ◇日本惑星科学会主催・共催・協賛・後援の研究会情報

◇日本惑星科学会第169回運営委員会議事録

期間:2025年1月21日(火)～1月27日(月)

議題:第18期専門委員会及び部会委員の承認

運営委員会委員:

出席(20名)

今村 剛, 竝木 則行,

千秋 博紀, 諸田 智克, 黒澤 耕介, 三浦 均, 百瀬 宗武, 瀧川 晶, 保井 みなみ, 横田 勝一郎, 癸生川 陽子,
生駒 大洋, 野村 英子, 藤谷 渉, 亀田 真吾, 佐々木 貴教, 野口里奈, 鎌田 俊一, 坂谷 尚哉, 黒川 宏之

欠席(3名)

大竹 真紀子, 田中 智, 田中 秀和

成立条件:期間内に議決返信のあった者を委員会出席とみなす.

議決方法:上記期間内にgoogle formから回答.

議題. 各専門委員会委員の承認をお願いしたい.

(◎の各専門委員会委員長, ○の部会長, グループ長については第168回運営委員会にて承認済)

1)総務専門委員会

◎藤谷 渉

保井 みなみ, 諸田 智克, 奥住 聡, 武藤 恭之, 國友 正信, 野口 里奈, 末次 竜, 松岡 萌, 渡邊 誠一郎(事務局担当)

行事部会

○百瀬 宗武

黒川 宏之, 玄田 英典, 中島 健介, 野口 里奈

2) 広報専門委員会

◎黒澤 耕介

奥住 聡, 臼井 寛裕, 鎌田 俊一, 黒川 宏之, 瀧川 晶, 檜村 博基, 佐藤 雅彦, 巽 瑛理

3) 財務専門委員会

◎横田 勝一郎

癸生川 陽子, 佐伯 和人

4) 編集専門委員会

◎三浦 均

野津 翔太(編集幹事), 荒川 創太, 小川 和律, 鎌田 俊一, 木村 勇気, 黒澤 耕介, 癸生川 陽子, 小久保 英一郎, 小玉 貴則, 関口 朋彦, 瀧川 晶, 瀧 哲朗, 田中 秀和, 谷川 享行, 長 勇一郎, 成田 憲保, はしもと じょーじ, 濱 野 景子, 樋口 有理可, 本田 親寿, 諸田 智克, 山本 聡, 和田 浩二

5) 欧文誌専門委員会

◎癸生川 陽子

中嶋 大輔

6) 将来計画専門委員会

◎瀧川 晶

藤谷 渉, 百瀬 宗武, 黒澤 耕介, 横田 勝一郎, 田中 智, 千秋 博紀

事務局体制検討作業部会長

○諸田 智克

佐伯 和人, 佐々木 貴教, 平田 成, 千秋 博紀, 瀧川 晶

7) 惑星探査専門委員会長

◎田中 智

竝木 則行, 関根 康人, 渡邊 誠一郎, 長 勇一郎, 坂谷 尚哉

8) 情報化専門委員会

◎千秋 博紀

平田 成, 伊藤 孝士, 大竹 和生, 石岡 圭一, 荒川 政彦, 小川 和律, 石原 吉明, 納田 明達, 黒澤 耕介, 林 祥介

9) 対外協力・連携専門委員会

◎亀田 真吾

生駒 大洋, 鎌田 俊一, 倉本 圭, 中村 智樹, 村上 豪, 吉田 辰哉(連合大会プログラム委員・正), 丹 秀也(同・副), 小川 佳子(男女共同参画・ダイバーシティ推進委員)

審議結果:

議案は原案のとおり承認された(可20・否0)

以上

◇日本惑星科学会第170回運営委員会議事録

期間:2025年3月5日(水)～3月11日(火)

議題:学会賞選考委員の退任希望とその補充

運営委員会委員:

出席(23名)

今村 剛, 竝木 則行, 大竹 真紀子

千秋 博紀, 諸田 智克, 黒澤 耕介, 三浦 均, 百瀬 宗武, 瀧川 晶, 保井 みなみ, 横田 勝一郎, 癸生川 陽子, 生駒 大洋, 野村 英子, 藤谷 渉, 田中 智, 亀田 真吾, 佐々木 貴教, 野口里奈, 鎌田 俊一, 田中 秀和, 坂谷 尚哉, 黒川 宏之

欠席(0名)

成立条件:期間内に議決返信のあった者を委員会出席とみなす.

議決方法:上記期間内にgoogle formから回答.

議題. 学会賞選考委員の退任希望とその補充について, 承認を求める.

経緯:

学会賞選考委員のうち, 平井隆之委員から, 一身上の都合により選考委員を辞任したいという連絡があった. 平井委員から2月中旬に連絡があつて以降, 平井委員の残任期間について後任を補充ができないか調査を試みた. 賞選考委員は現状9名だが, 今年で退任の委員が5名で, 平井委員はこの中に含まれておらず(任期が1年以上ある), 現在募集中の最優秀研究者賞でも探査機器関係に造詣が深い委員がいることが望ましい. そこで, 候補者1名を選びその方に打診をしたが, ここ1年間でご担当されている探査機機器開発が佳境を迎える点を理由に, お断りされた. そのため, 最優秀研究者賞の選考を前に時間が限られていることや, 通常より1名多いこともあり, 平井委員の後任は当面選ばず, 5月の委員交代時にまとめて対応するということにしたい. 最優秀研究者賞の選考の際に必要な場合は, 委員外の会員で適切な方に, ご意見を求めることで対応する.

審議結果:

議案は原案のとおり承認された(可23・否0)

以上

◇賛助会員名簿

2025年6月25日までに、賛助会員として本学会にご協力下さった団体は以下の通りです。社名等を掲載し、敬意と感謝の意を表します。(五十音順)

- ・NV5 Geospatial 株式会社
- ・株式会社ノビテック

◇日本惑星科学会主催・共催・協賛・後援の研究会情報

(a) 場所, (b) 主催者, (c) ウェブページ/連絡先など。

転記ミス, 原稿作成後に変更等があるかもしれません。各自でご確認ください。

* 2025/9

** 2025年9月17日(水)-9月19日(金)日本流体力学会 年会2025

(a) 大阪公立大学中百舌鳥キャンパス

(b) 日本流体力学会

(c) 問い合わせ先: 日本流体力学会年会2025実行委員会 (gr-eng-jsfm2025@omu.ac.jp)

編集後記

遊星人編集幹事の野津翔太です。今回の遊星人も、連載：火の鳥「はやぶさ」未来編からリュウグウ粒子のキュレーションに関する記事2本立てのほか、金星あかつき・火星MMX・海外研究記など、充実したラインナップです。引き続き奮っての記事投稿、お待ちしております。

毎年4月は日本においては新年度・新学期の始まりという事で、多くの皆さまにとって忙しい時期・新たな挑戦の時期かと思います。そして私を含め研究活動の一環でアルマ望遠鏡(アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計)を用いた観測を行う研究者にとっては、年に1度のプロポーザル(観測提案書)申請の時期でもあります。(今年Cycle 12の提出締切は4月24日協定世界時15:00でした) アルマ望遠鏡は南米チリ北部・標高5000mのアタカマ砂漠に建設されたパラボラアンテナ66台からなる電波干渉計で、欧州・北米・東アジア(日本・韓国・台湾)と建設地のチリを合わせた22の国と地域が連携して運用している巨大電波望遠鏡になります。そのため日本国内にとどまらず世界各地の研究者がこの4月同様の慌ただしい状況に置かれることもあり、分野全体の一大行事となっています。

国内外の共同研究者と議論しつつ、先行研究や自分達のこれまでの解析データ・理論計算などをもとに観測目的・計画を練り上げ、それを限られたスペースの科学説明書(regular proposalの場合、A4で

4ページ)と別途作成する技術説明書に落とし込む一連の作業。そして科学的背景を踏まえた壮大な“夢”を、限られた観測時間・設定の中で現実的に実現可能な観測目的・計画に落とし込む必要性。大変な作業であると同時に、近年の競争倍率の高まりもあって(昨年のCycle 11では1700本を超える観測申請書が提出され、倍率は観測時間ベースで7.4倍)、残念ながら採択されなかった悲しみを感じることも多いです。ですが、観測提案書が採択された際の喜びや、観測データが届いた後の解析・議論・論文化の楽しさを踏まえると、今年も頑張ろうという気持ちになります。この編集後記を執筆している時点(2025年5月2日)で今年の提案書提出はすでに終了、数ヶ月後の審査結果発表を待ちつつ、次に向けたデータ解析・議論を進める時期となります。

なお、アルマ望遠鏡を用いた観測研究について詳しく知りたい方は、2019年9月号・12月号掲載の特集「ALMAで迫る惑星科学」の記事をはじめとして、遊星人にも多数の関連記事が掲載されておりますので、ぜひ一度ご覧ください。また時を同じくして、アルマ望遠鏡計画にもつながる数多くの科学面・技術面の成果を長年上げてきた国立天文台 野辺山宇宙電波観測所が舞台の一つとなった某探偵アニメ映画も公開されています。長年のファンかつ電波天文学に関わる身として、感慨深い今日この頃です。(編集幹事 野津翔太)

編集委員

三浦 均(編集長),

野津 翔太(編集幹事),

荒川 創太, 小川 和律, 鎌田 俊一, 木村 勇氣, 黒澤 耕介, 癸生川 陽子, 小久保 英一郎, 小玉 貴則, 関口 朋彦, 瀧川 晶, 瀧 哲朗, 田中 秀和, 谷川 享行, 長 勇一郎, 成田 憲保, はしもと じょーじ, 濱野 景子, 樋口 有理可, 本田 親寿, 諸田 智克, 山本 聡, 和田 浩二

2025年6月25日発行

日本惑星科学会誌 遊・星・人 第34巻 第2号

定 価 一部 1,925円(税込・送料込)

編集人 三浦 均(日本惑星科学会編集専門委員会委員長)

印刷所 〒224-0044 神奈川県横浜市都筑区川向町787-1 株式会社 シュービ

発行所 日本惑星科学会事務局

〒604-8206

京都市中京区新町通三条上ル町頭町112 菊三ビル2階 201号室(StartupSide Kyoto)

Tel: 075-708-5984

e-mail: staff@wakusei.jp

(連絡はできる限り電子メールをお使いいただきますようご協力お願いいたします)

本誌に掲載された寄稿等の著作権は日本惑星科学会が所有しています。

複写される方へ

日本惑星科学会では、複写に係る著作権を一般社団法人学術著作権協会に委託しています。本誌に掲載された著作物を個人的な使用の目的以外で複写したい方は、(社)学術著作権協会(<https://www.jaacc.org/>)が提供している複製利用許諾システムを通じて申請して下さい。なお、著作物の転載・翻訳のような複写以外の許諾は、日本惑星科学会に直接ご連絡下さい。

1. 原稿の様式

○投稿原稿：

受領可能なファイルの形式は、MS WORD, PDF, またはテキストファイルである。原稿投稿時チェックリストを参照して作成すること。また、所定の投稿原稿送り状も提出すること。

○最終稿：

原稿の掲載が決定したら、最終原稿準備チェックリストを参照して必要なファイルを提出する。テキストデータ (WORD, TEX, テキストファイルなど) に加え、原稿をPDF化したファイルも提出すること。図は別ファイルにて提出。そのファイル形式は tiff, eps, pdf, pict が望ましい。jpeg, png も可。

投稿原稿送り状の雛型および各チェックリストはウェブサイト

(<https://www.wakusei.jp/book/pp/guide.html>)

から取得できる。

2. タイトル

記事のタイトルは20字程度以内。また、タイトル、筆者名、及び所属を和文・英文両者で付す。

(注：著者人数に対する制限はなく、紙面本文タイトルにおいて著者全員の氏名が原則掲載されるが、著者が多数である場合、各号の目次においては紙面の都合上一部著者名を省略することがある。)

3. 要旨

研究報告の記事や解説記事については、(原稿タイトルと著者名の後に) 300字程度の要旨をつける。

4. セクション

セクションは1,2,..., サブセクションは1.1,1.2,..., 細区分は(1),(2)...., の記号を頭にして、左寄せ、行末改行とする。

- ・文中での区分けは(a), (b), (c)を用いる。
- ・これら記号はすべて半角文字を用いる。
- ・セクションタイトルは簡潔にすること。

5. 述語

専門用語はなるべく避けるか、十分な説明をつける。特に、対応する日本語がある場合、英語・英略語は使わない。

6. 字体

- 数字、英字は半角とする。また () [] ; : など区切り記号も半角を用いる。
- 変数は斜体、ベクトルと行列は太字、を使う。

7. 句読点

句読点は全角の“,”と“.”を用いる。

8. 図、表

文中での図表の引用は“図1”、“図2”の形をとる。最終稿に図表の刷り上がり時の位置や大きさを指定のこと。他の文献から図表を転載する場合は、著者及び発行者より転載許可を得ること。また、出典を明記すること。

図作成のガイドライン：

原則として、電子ファイルとして作成すること。解像度は印刷時実寸で300dpi相当以上。ファイル形式は TIFF, EPS, PDF, JPEG, PNG が望ましい。

やむをえない場合に限り、写真も可とする。その際は L版サイズ以上の大きさと鮮明な写真を送付すること。送付された写真は原則として返却しない。カラーページは、著者の費用負担により可能。ただし、著者が希望し、かつ編集委員会が認めたものについては、印刷費用を学会が負担する。カラー印刷の希望が無い場合、電子版のみにカラー画像が掲載され、冊子体には白黒で印刷される。

9. 脚注

脚注は“1”などの記号をつける。

10. 文献の引用

引用文献は重要なものに限る。目安として20項目程度とする。ただし編集部が必要と認めた場合についてはこの限りではない。

本文中での引用は[1],[2]の形で通し番号をつけ、論文の末尾に一括してリストを載せる。[1,2,3]のように3つ以上の連番を引用する場合は、[1-3]のように、最初と最後の番号をハイフンで繋げる。

文献リストは以下の形式に従う。題名は省略する。3人以上の著者は、英文なら“et al.”、和文なら「ほか」と表記する。「et al.」「ほか」のあとには半角カンマを入れる。雑誌名などは一般に使われる略称を用いる。雑誌名の後のカンマは不要。ページについては開始ページのみを記す。書籍の場合は出版社をカッコ書きで明記。各文献の最後にピリオドをつける。

参考文献

- [1] Wakusei, T. et al., 1989, ApJ 220, 293.
- [2] 惑星太郎ほか, 1993, 天文月報 86, 186.
- [3] Bohren, C. F. and Huffman, D. R., 1983, Absorption and Scattering of Light by Small Particles (New York: Wiley).
- [4] Hayashi, C. et al., 1985, in Protostars and Planets II (Tucson: University of Arizona Press), 1100.

11. 投稿原稿送付先

遊星人編集長 三浦 均

e-mail : chiefeditor@wakusei.jp

電子メールで送付できない場合は下記へ郵送

日本惑星科学会事務局

〒604-8206

京都市中京区新町通三条上ル町頭町112

菊三ビル2階 201号室(StartupSide Kyoto)

Tel: 075-708-5984

e-mail: staff@wakusei.jp



The Japanese Society for Planetary Sciences