

遊



日本惑星科学会誌

Planetary
People **4**

December 2023 vol32 no

星

人

- 太陽系小天体探査の現状と今後：
理学・工学双方から考える
- 連載：探査機・火星衛星MMX /
木星氷衛星JUICE / 金星あかつき
- 海外研究記 その12
～西と東のはざままで過ごす～
- 日本地球惑星科学連合2023年大会
学生優秀発表賞受賞者紹介

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。

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られることができる。
- 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られることができる。
- 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定」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)。

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32巻 第4号
目次

巻頭言 伊藤 洋一 287

太陽系小天体探査の現状と今後の展開:理学・工学双方の課題から考える

深井 稜汰, 菊地 翔太, 久保 勇貴, 坂谷 尚哉, 寫生 有理, 木村 駿太, 尾崎 直哉, 村上 豪 288

もう一つの月世界へ:火星衛星探査計画MMX その3 ~火星衛星は小惑星とは違う?~

宮本 英昭 296

みんなでふたたび木星へ,そして氷衛星へ その8

~JUICE搭載ガニメデレーザ高度計GALA:打ち上げ・軌道上初期チェックの報告~

塩谷 圭吾, 小林 正規, 荒木 博志, 木村 淳, 野田 寛大, 竝木 則行, 押上 祥子, 他5名 302

一番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦 その56

~硫酸雲の材料物質,二酸化硫黄の高度分布に電波で迫る~

野口 克行, 尾沼 日奈子, 安藤 紘基, 今村 剛 313

遊星人の海外研究記 その12 ~西と東のはざままで過ごす~

松本 徹 316

New Faces

西川 泰弘, 小林 真輝人 320

日本地球惑星科学連合2023年大会 学生優秀発表賞 受賞者紹介 324

JSPS Information 327

Contents

Preface Y. Itoh 287

**Current status and future perspective on the Solar System small body exploration:
Review from scientific and engineering scopes**
R. Fukai, S. Kikuchi, Y. Kubo, N. Sakatani, Y. Shimaki, S. Kimura, N. Ozaki, G. Murakami 288

**Fly me to another moon world: Martian Moons eXploration (MMX) (3)
- Are Martian moons different from asteroids? -**
H. Miyamoto 296

**To Jupiter again together and to icy moons (8) - The Ganymede Laser Altimeter
(GALA) onboard JUICE: A report on the launch and the initial check on orbit -**
K. Enya, M. Kobayashi, H. Araki, J. Kimura, H. Noda, N. Namiki, S. Oshigami, and 5 authors 302

**Road to the first star: Venus orbiter from Japan (56)
- Probing the vertical distribution of sulfur dioxide by radio occultation -**
K. Noguchi, H. Onuma, H. Ando, T. Imamura 313

**Letter from planetary people working abroad (12)
- Living between West and East Germany-**
T. Matsumoto 316

New Faces Y. Nishikawa, M. Kobayashi 320

Winners of JpGU 2023 Outstanding Student Presentation Award 324

JSPS Information 327

巻頭言

学部2年生向けに「天文学」という講義を行っている。兵庫県立大学は大きな大学ではないので、ひとりで惑星も恒星も銀河も話さなければならない。初回の授業では「夜空に見える星の大半は恒星だけれど、惑星や、時には彗星、流星も見ることができる」ということ言う。「恒星は自ら輝く天体で、惑星は(少なくとも可視光では)恒星の光を反射して見える天体だ」。こんな話をしていると一部の学生は「なんて当たり前のことを言っているんだ」という表情をする。

3回目の授業では黒体放射の話をする。「放射が最も強い波長は物体の温度によって変わる。なので青い恒星は温度が高く、赤い恒星は温度が低いんだね」。こういう説明をすると、授業の最後に書いてもらう「今日の授業で分からなかったこと」の紙に「火星が赤く見えるのは温度が低いからですか?」と書く学生が、毎年必ずいる。おいおい、それじゃあ青く見える海王星は温度が高いとでも思うのかね?

自分が話したことの何分の一しか学生には理解してもらえない。しかし、自分は授業が下手だと思っただけで大学に勤めるのがしんどくなるので、こう考えることにした。「自分だって学生の時には授業をろくに聞いていなかったじゃあないか」。たしかに、舛添さんの授業で記憶に残っていることは、赤いバラの自分の本を宣伝していたことだけだ。もしくは「一生懸命聞いても、量子力学IIはさっぱり理解できなかったじゃあないか」。たしかに、井戸型ポテンシャル以降は意味も分からず記号をノートに写していただけだった。

つまり、多くの人にとって、恒星と惑星の違いはあやふやなのだろう。日本惑星科学会と日本天文学会の二つがあることは知らないし、遊星人と天文月報があることも知らない。宇宙を研究している人は夜空に見える星のことを全て知っている、と考えているのだろう。私は以前は地球惑星科学科にいたし、現在は天文台に勤めている。惑星科学と天文学のかけはしのような役割を果たしていければ、と思う。

伊藤 洋一(兵庫県立大学 自然・環境科学研究所 天文科学センター)

太陽系小天体探査の現状と今後の展開: 理学・工学双方の課題から考える

深井 稜汰¹, 菊地 翔太², 久保 勇貴¹, 坂谷 尚哉¹, 鳶生 有理¹, 木村 駿太¹, 尾崎 直哉¹,
村上 豪¹

2023年7月12日受領, 査読を経て2023年8月7日受理

(要旨) 今後の日本の太陽系科学探査では, 最重要の科学的課題を適切な技術によって効率的に解決することが求められる。2022年度は, ISAS惑星探査ワークショップ2022・第24回惑星圏シンポジウムの二度にわたり将来の太陽系小天体探査を見据えたスプリンターミーティングが行われ, 現状の科学的課題・技術的課題について議論がなされた。当課題を解決する糸口として, 試料の貴重性に基づき探査天体・探査方法を選定したサンプルリターンミッションや, 多数の小天体の形成過程を大局的に理解するためのフライバイミッションの推進が提案された。

1. はじめに

小天体探査は, はやぶさ・はやぶさ2をはじめとするサンプルリターンミッションの成功などに基づき, 太陽系科学探査において重要な位置を占めている。現在は各国が将来の小天体探査ミッションを提案している中, ISAS/JAXA (Institute of Space and Astronautical Science/Japan Aerospace Exploration Agency) を中心としたミッション立案には, 欧米に対して予算規模が少ない等の困難も抱えている。日本独自の探査を提案するには, 理学・工学双方の課題をもとに新たな観点を生み出す必要がある。

2022年9月に開催されたISAS惑星探査ワークショップ(PEWS: Planetary Exploration WorkShop), 2023年2月に東北大学で開催された惑星圏シンポジウム (SPS: Symposium on Planetary Sciences) において, 小天体探査を議論するスプリンターミーティングがそれぞれ1時間超に渡って行われた。各ミーティングにはリモート参加・対面参加により50名以上が議論に参加し, 科学的課題を発端として小天

体探査の新たな種を育て, 様々な形で解決し多様な学問分野へと発展させる試みがなされた。2021年度の本スプリンターミーティングの議論では, 「小天体の組成・形状・起源等は非常に多様のため, それぞれの探査で異なる科学目標を達成し得るものである」ことが再認識されており, 2022年度はその議論を引き継ぐ形で進められた。

本稿は次なる小天体探査を提案する機会のために, 理学・工学双方の情報の基盤を作ることを目的とする。そのために, 小天体探査で解決し得る科学的課題と, 現状の技術的課題を2022年度スプリンターミーティングの議論に基づき整理した。加えて理学・工学双方の課題を踏まえ, 現時点での小天体探査の展望を議論した。本稿は「惑星科学/太陽系科学研究領域の目標・戦略・工程表(RFI: Request for Information)」や, ISASが掲げる「宇宙科学・探査ロードマップ」とは趣旨が異なる。あくまでスプリンターミーティングの限られた時間の中で小天体探査の動機を対等に俯瞰したものであり, 今後の道のりを規定するものではなく, また全ての可能性を網羅した議論ではないことに注意したい。

1.宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

2.国立天文台

fukai.ryohta@jaxa.jp

2. 科学的課題

小天体探査で解決すべき科学的課題は、以下の通りである。惑星科学における課題は、1) 地球または地球型惑星への揮発性物質の輸送と起源の解明、2) 太陽系天体の形成過程の解明、3) 太陽系天体の進化過程の解明の三点である。天文学においては「太陽系の起源物質の解明」、生物学においては「地球生命の材料の起源の理解」、防災科学(プラネタリーディフェンス)においては「地球へ飛来し得る天体の特性の理解」がそれぞれ挙げられる。表1には、各課題を解決し得る探査天体ターゲットと、対応する「鍵となる情報」、その課題を解決しつつある現行の探査方法、サンプルリターンミッションに関してはアナログ試料となり得る試料名を挙げている。理学コミュニティは上記の科学課題の解決可能性が高いミッション、更には複数の課題を解決出来るミッションを推進すべきである。

小天体探査の方法は、「フライバイ」「ランデブー(着陸含む)」の二通りに大別される¹⁾。一機の探査機によって「複数回の」フライバイやランデブーを行うことや、フライバイ・ランデブーに伴って「サンプルリターン」を組み合わせることも可能である。小天体探査以外にも関連した科学的成果を挙げる方法は多数存在し、探査との協力を検討することは限られた小天体探査のリソースを使う上で重要な観点となる。望遠鏡による地上観測やX線・紫外線・赤外線観測衛星等によっても小天体の研究における大きな成果が挙げられている[1]。サンプルバイアス、地球上の汚染、起源が不明という問題はあ一方、隕石学は多数の試料を用いた分析が可能である。また実験的な研究によって小天体環境や衝突過程を再現することも一つの解決方法である。

2.1 惑星科学

2.1.1 地球への揮発性物質の輸送と起源の解明

C型小惑星は、後期集積による地表への供給等を通して、地球型惑星に揮発性物質をもたらした天体の一つと考えられている[2]。C型小惑星は炭素質コンドライトの起源と考えられていた一方で、小惑

星帯におけるC型小惑星の存在度に対して地球上に飛来する量は非常に少ない。特にCI (Ivuna-type) コンドライトは、これまでに9個しか発見されていない。これは地球の大気圏でCIコンドライトの母隕石が消失することによるサンプリングバイアスであると考えられる。こうした意味で、C型小惑星のサンプルリターンには大きな価値がある。C型小惑星探査は既にはやぶさ2によって達成され[3, 4]、OSIRIS-REx・MMXによるサンプルリターンや、DESTINY⁺によるフライバイ探査によって今後より議論は発展する見込みがある。

同様に、地球型惑星への揮発性物質の起源として重要視されるのが彗星物質である[5]。地球上ではInterplanetary Dust Particles (IDPs) という μm オーダーの塵や、南極で発見された超炭素質の微隕石が回収されており、彗星とのリンクがうたわれている。一方で、多くのサンプル分析に対して十分な試料量がなく、またサンプリングバイアスが存在する可能性がある。NASAのStardustミッションでは最大50 μm 程度の粒子が回収された[6]。粒子の分析により難揮発性物質の存在、芳香族有機物の存在等が示されているものの[7]、その多様性や不均質性についてはサンプリング時の衝突による変成等の影響等を含むため、議論は困難である。現在、NASAによる彗星サンプルリターンミッション(CAESAR) が計画されている。

彗星からのリターンサンプルは科学的価値が高い一方で、探査における技術的ハードルが高い。その穴を埋めるのは、質量分析計などを用いたその場分析である。彗星表面物質のその場分析は次世代小天体サンプルリターン計画[8]、表面から放出されるガスによって生じるコマヤイオンのフライバイ中の観測はComet Interceptorでそれぞれ計画されている。水素同位体比(D/H比)の観測はESAのRosettaミッションにより67P/CG彗星で行われ、地球のD/H比よりも3-4倍高いことを示しており、地球の水の起源の議論に対して重要な情報を与えた[9]。67P/CG彗星よりも更に始原的であると思われる長周期彗星に対してもComet Interceptor搭載Hydrogen Imagerによって同様の情報が得られることが期待される[10]。

¹⁾バリエーションとしては相乗り、ロケット規模などが考えられるが、本稿ではより詳しい解説は省略した。

表1: 科学的課題と小天体探査方法の関連.

分野	科学的課題	ターゲット	アナログ	鍵となる情報	探査方法
惑星科学	地球への揮発性物質の輸送	C型小惑星	CC	同位体 (揮発性物質)	SR (HY2, O-REx, MMX) フライバイ (DESTINY+)
		彗星	IDP	同位体 (揮発性物質)	SR (CAESAR) ランデブー (Rosetta)
	太陽系天体の形成	木星トロヤ群	不明	同位体 (揮発性物質)	SR (-) フライバイ (Lucy)
		E型小惑星	EC	同位体 (金属元素) 化学組成	SR (-) フライバイ (-)
		彗星	-	物理特性・形状	ランデブー (Rosetta)
		D型小惑星	-		フライバイ (Comet Interceptor)
太陽系天体の進化	M型小惑星	鉄隕石	磁気物性	SR (-) ランデブー (Psyche)	
天文学	太陽系の起源	C型小惑星	CI	元素存在度	SR (HY2, CAESAR)
		彗星	IDP	同位体 (先太陽系粒子)	
生物学	生命材料の起源	C型小惑星	CC	生体分子	ランデブー (Rosetta)
		彗星			SR (HY2, CAESAR)
防災科学	地球に飛来する天体の特性理解	NEA	-	物理特性	ランデブー (Hera ほか) フライバイ (DART ほか)

CC: Carbonaceous Chondrites, EC: Enstatite Chondrites, IDP: Interplanetary Dust Particles, SR: Sample Return, NEA: Near Earth Asteroids, HY2: Hayabusa2, O-REx: OSIRIS-REx

2.1.2 太陽系天体の形成過程の解明

木星トロヤ群の形成や木星形成の解明において、木星トロヤ群小惑星探査は重要視すべきである。D型小惑星のアナログ物質として炭素質コンドライトの一つであるTagish Lake隕石が知られているが[11]、木星トロヤ群のD型小惑星の近赤外反射スペクトルとは不一致であることに注意したい[12]。木星トロヤ群の形成過程を知る上で特に重要なのは、揮発性物質や有機物の同位体比である。天体表面上にある程度豊富に存在し、分光でも特定が可能な化合物、同位体等がターゲットであれば、フライバイ探査やランデブー探査によるその場計測が有効となる。これまでに、木星トロヤ群小惑星探査計画OKEANOSの提案や、2021年10月のマルチフライバイ探査機Lucy打ち上げがあった。

E型小惑星は地球型惑星と類似した同位体組成を持つことが期待され、地球型惑星の形成過程・起源を知る上で重要視されている[13]。E型と類似するスペクトルを持つエンスタタイトコンドライト、オーブライイト隕石等の持つ金属元素の同位体組成、含水量、有機物存在度等が、地球汚染やサンプリングバイアスの影響を受けているかどうか今後のポイン

トとなる。

彗星は一般に微惑星の生き残りと考えられており、彗星の物理特性を理解することは微惑星の物理特性、如いては微惑星の形成・進化課程に迫るものである。例えば、彗星がペブルパイル天体かどうかという問いやそのペブルサイズは、原始惑星系円盤内での彗星(微惑星)形成環境の制約に繋がる[8]。形状モデルを用いた形態学から彗星の構成物質を制約する手法[14]も、フライバイ探査において有効な手段である。

2.1.3 太陽系天体の進化過程の解明

分化した微惑星のコア部分に相当すると考えられる一部のM型小惑星への探査も重要視されている。M型小惑星の磁気物性等、鉄隕石では既に失われている情報が存在する可能性がある。NASAが開発中のPsycheミッションのようなランデブー探査や、将来のサンプルリターンが期待される。

2.2 天文学

銀河系の物質進化過程においていかに太陽系が誕生したかを探るかが、近年重要視されている[15]。太陽系の平均元素存在度は、銀河系の化学進化を

考える上で欠かせないアンカーとなっている。太陽光球とCIコンドライトの元素存在度がよい一致を示すことがこれまで知られていた。リュウグウ粒子はCIコンドライトに化学的・鉱物学的特性がよく似ている上、地球上での汚染の影響がきわめて小さい。従ってリュウグウ粒子を分析することで、太陽系の平均元素存在度を最も高精度・高確度に求めることが出来ると考えられる[3]。

隕石学から、水質変成・熱変成等の影響が少ない始原的な天体には、先太陽系の天体から飛来したダスト(プレソーラー粒子)が含まれていることが予測されている[16]。各粒子はnm-数 μ mで、含有量も数100 ppm程度であるため、分析には1-10 g程度の多量の試料が必要となる。探査天体としては、小天体上での変成が小さいと考えられる彗星が第一に挙げられる。

2.3 生物学

これまでの小天体探査において、生物学・また生物学と強く関連する惑星科学の科学的課題は重視されてきた。特に地球の生命材料の起源を明らかにする根拠として、初期地球に集積した可能性のあるC型小惑星に含まれる有機物の存在量や多様性は注目を集めている。近年、炭素質隕石から複数種の核酸塩基が検出された[17]が、はやぶさ2ミッションにおいても帰還粒子の分析によってRNAの構成塩基のひとつであるウラシルの検出が報告された[18]。小天体から検出される生体分子は、基本的には非生物的に合成されたものと考えられる。生命の構成要素が検出可能な濃度まで非生物的に作られ、かつ保存性があるということは、地球生命の誕生時に地球外由来の材料が活用されていた可能性を示唆する。

今後の探査においても、特にCAESARミッションのような彗星サンプルリターンにより母天体上の変成を回避した種々の有機物の分析が可能となる点に期待が集まっている。ESAのRosettaミッションでは、67P/CG彗星から探査機搭載の質量分析器によってグリシンが検出された[19]。一方で、太陽系探査が今後より狭義の生物学に迫るためには、生命活動の痕跡や証拠をより直接的に検出することが期待される。PEWS 2022・SPS 2023の火星スプリン

ターでは、蛍光顕微鏡を用いた生体分子や生命活動の検出を目指す生命探査、外惑星スプリンターでは水衛星ブリュームの補集および分析といった野心的なアイデアが議論され始めている。これらの探査の実現ハードルは低くはないものの、小天体探査と科学的・技術的なフィードバックが行われ、互いに進捗し合うことが期待される。

2.4 防災科学

防災科学においては、2013年にロシア・チェリャビンスク州で衝撃波による人的被害をもたらしたチェリャビンスク隕石を契機として、小天体の地球衝突に対応する活動であるプラネタリーディフェンスが国際的に重要視されるようになった。近年は国連、NASA、ESAに専門の部署が設置され、探査機衝突による小惑星の軌道変更技術実証としてDART(NASA)とHera(ESA)の両ミッションから構成されるAIDA計画が実施されている。DARTミッションでは、2022年9月に二重小惑星ディディモスの衛星ディモルフォスに衝突し、地上および宇宙望遠鏡による事前・事後観測による衛星の公転周期変化から、探査機衝突による小惑星の軌道変更を実証した[20]。Heraミッションでは、2027年に二重小惑星ディディモスにランデブーし、DART衝突クレータの詳細観測を行う予定である。更に、はやぶさ2拡張ミッション(小惑星2001 CC21へのフライバイ探査、小型高速自転小惑星1998 KY26へのランデブー探査)[21]、OSIRIS-RExの延長ミッション(小惑星アポフィスへのランデブー探査)などが計画されている。プラネタリーディフェンスにおいては、衝突頻度が大きく都市壊滅級の被害をもたらしうる直径100 m級の小惑星の物理特性(質量・密度・強度)・化学組成を知ることが重要だが、こうした小惑星は地球から見ると暗く、観測可能な接近時には高速移動するため望遠鏡観測が難しく、今後の統計的な議論が必要とされている²。

²地球軌道における準衛星も探査候補の1つという意見がPEWS 2022において挙げられた。その後中でも安定した軌道をもつ地球の準衛星、2023 FW13が発見されている。

3. 技術的課題

3.1 軌道間輸送機

近年、深宇宙輸送のコスト削減および設計共通化を狙った深宇宙軌道間輸送機(OTV: Orbit Transfer Vehicle)の検討が国内で本格化されている[22]. 深宇宙OTVシステムは、サンプルリターンや遠方天体をターゲットとする推進コストの高いミッションの実現性を高める上で、今後の小天体探査におけるキー技術と位置付けられる。巡航を担う輸送機と、目標天体近傍でミッションを行う探査機とに機能を分配する形態が基本となるため、小天体近傍でのより高度な運用に注力した設計が可能となる。加えて、マルチサンプリングを行う上では、採取済みのサンプルを輸送機側に搬送しておくことで、以降の近傍運用での探査機喪失によるサンプル全損を防ぐことができる[23]. このような探査形態においては、二機間のランデブー・ドッキングやサンプル搬送が技術課題となる[24].

3.2 分離子機

未知天体をターゲットとするケースの多い小天体探査では、物性の不確定な天体表面での滞在探査を行う上で、親機からのローバーやランダーの分離が有力な解となる。最近の例では、はやぶさ2のMINERVA-II1/II2とMASCOTが挙げられる[25, 26]. 小天体の微小重力環境では比較的低リソースで様々な運用をこなすため、日本が得意とする超小型衛星との親和性も高い。はやぶさ2の分離カメラ(DCAM3)のように、親機にリスクを及ぼすことなく挑戦的な観測を行うことも可能である[27]. 将来的には、複数機間の協調探査や自在な表面移動・軌道制御など[28], より高度な機能への発展性を有する。また、小惑星表面にタッチダウンしてサンプル採取を行う子機は、推進剤重量の軽量化と親機の着陸リスク低減が期待できる点で有望である。例えば、固体推進剤を利用した簡素なサンプル採取子機であるタッチアンドゴー(TAG)サンプリングブロープのシステムが現在検討されている[29]. ただし、子機自体が小型であっても、親機とのハード・ソフト面でのインターフェースは不可欠であり、システ

ム全体の設計コストが低いとは限らない点に注意を要する。

3.3 相対航法

小惑星表面に接近する運用を行う場合、往復伝搬遅延下での探査機安全性を担保するためには、自律的な対地(小惑星相対)航法が必要となる。とりわけ、サンプルリターンなど着陸を伴うミッションでは、精密な対地航法が要求される。対地航法には自然地形をトラッキングするものと、人工的なマーカーを利用するものとに大別される。前者の例がOSIRIS-RExのNatural Feature Trackingであり[30], 国内でもSLIMの月着陸でクレータを用いた画像照合航法が実証される予定である[31]. 後者の例としては、はやぶさ・はやぶさ2のターゲットマーカーが挙げられる。はやぶさ2は、事前投下したターゲットマーカーを自律的に追跡することで、誤差60 cmという高精度の着陸に成功した[32]. 近年の小天体探査で、「降りたい地点にピンポイントで降りる」技術が確立しつつあり、改良型のターゲットマーカーなど更なる性能向上が検討されている[33]. このような対地航法の要素技術は、上述の探査機間ランデブーにおける相対航法にも応用可能である。その他、オブザーバ機がターゲット機からのビーコンを受けて軌道推定を行う相対電波航法も検討されている[34]. この航法では、中程度の距離・中程度のリアルタイム性を期待でき、カメラやレーザー距離計による近距離航法と、レンジ・レンジレート計測やVLBIなどの長距離航法との中間の空間・時間領域において有効であると思われる。

3.4 地下探査

サンプルリターンにおいて宇宙風化の影響を受けていない試料の取得を目指す場合、小天体の地下物質へのアクセスは最重要課題である。その一つの手段として、はやぶさ2ミッションでは、衝突装置(SCI: Small Carry-on Impactor)を用いた衝突クレータリングにより地下物質を露出させる技術を実証した[35]. 地下物質を直接採取する手法として、MMXミッションでは深さ2 cm以上を掘削可能なコアラーを採用している[36]. OKEANOSミッションでは、伸展式のニューマチック(空気式)サンプラーにより

最大深さ1 mの物質を採取するシステムを提案していた[37]. 未知天体の地下物質を直接採取する場合, 対象天体の機械的特性に関する不定性を考慮したシステム設計を要する. 間接的に小天体内部の全球的な物理特性を推定する手法として, 旧来の重力場に基づく測地学的アプローチに加えて, レーダーや地震波による探査システムの活用が国内で議論されている[38].

3.5 遠方探査

はやぶさ・はやぶさ2によるランデブー探査は地球近傍小惑星が対象であった. 今後, 日本の小天体探査で彗星やメインベルト以遠の小惑星をカバーするにあたって, より遠方を探査する技術の成熟が課題となる. 太陽距離・地球距離の大きい領域での探査機運用は, 電源系・通信系・熱系・推進系などあらゆるバスシステムでの対応を要する. OKEANOSでは, これらの課題を踏まえたミッション提案がなされた[39]. とりわけ, 高比推力の電気推進と大面積の薄膜太陽電池という基本構成は, 国内で遠方小天体の探査を実現するための一つの有力解と言える. スプリンターミーティングでは議論が及ばなかったが, 木星以遠での自在な探査を実現するためには, 熱源あるいは熱源からの熱電変換による発電技術としてのラジオアイソトープの取り扱い技術が必要となる. 特に米国の外惑星探査で238プルトニウムを熱源としたラジオアイソトープ電池(RTG)の多くの活用例がある反面, 国内の深宇宙探査での使用実績は未だない[40]. 日本としては, これら既存の枠組みに捕らわれることなく, 日本のミッション成立性にもっとも適した熱源および発電技術の検討が必要な時期にきていると考えられる[41]. 先述の深宇宙OTV構想(3.1章)では, 巡航ステージの化学推進モジュール共通化によって輸送コストを削減することで, 遠方天体へのアクセス性を高めることが期待されている[22]. 遠方天体からサンプルリターンする場合, ミッションの長期化は不可避である. したがって, 質量分析器を用いたその場分析などによって, 段階的に成果創出するための方策が重要となる[42].

3.6 フライバイ探査

ランデブー探査はエネルギーコストが大きいのに

対して, フライバイ探査であれば, 小型ミッションでの実施も十分可能である. その例が, 2024年に打ち上げられ, 小惑星フェイトンを探査する予定のDESTINY⁺である[43, 44]. また近年, 小天体フライバイサイクラー軌道を用いて, 低燃費・高頻度に複数の小天体をフライバイする探査構想が提案されている[45]. さらに, 小天体フライバイサイクラー軌道に約10機の宇宙機を配置することで, 小天体マルチフライバイと小天体(恒星間天体等の太陽系外から飛来する天体を含む)即応型フライバイを同時に実現することも可能である[46]. 小天体は大多数の素性が未知であるため, フライバイ時に近接観測を行うだけでも, 科学的に重要な情報を得うる. 一方で, ランデブー探査と比して, フライバイ探査で得られる情報は, 時間的・空間的に大きく限定される. ゆえに, ランデブー探査計画との相乗効果を含めて, コストに見合う科学目標の見極めが肝要である. ダスト捕集ないしダストのその場解析技術は, フライバイで得られる科学情報の最大化に有効な技術だが, ダストとの相対速度が高速であるため, 利用可能な技術には制約がある. 一回きりのフライバイで理想的な観測ジオメトリ(相対位置・速度)を実現するためには, 後述の通り, 地上観測による小天体の軌道決定精度の向上が課題となる[47]. また, マルチ型即応型のフライバイ探査では太陽-地球-小惑星間の位置関係が様々な状況に対応した観測が必要であり, 太陽電池・アンテナ・観測機器などの幾何学関係を自在に変更できる可変構造宇宙機も有効な技術となり得る[48].

3.7 地上観測

ミッション設計を行う上で, 目標天体の軌道要素およびサイズ・形状・自転周期・自転軸方向などの物理特性は重要な情報となる. 小天体探査において, これらの情報が既知であることは必須とは限らないが, サイズの小さい小天体に関しては発見そのものが困難となる. 地球に接近する恐れのある小惑星を事前に発見する観点でも, 国内での地上観測が継続的に行われている[49]. 2021年にJAXA内でプラネタリーディフェンス検討チームが発足しており[50], 小惑星の地上観測における体制強化が期待される. 加えて, 近年では, 小天体による恒星食を複数地点で同時観測することで, 天体の形状や軌道を

制約する枠組みが構築されつつある。その一例が、DESTINY⁺ミッションに向けた小惑星フェートンの地上観測である[51, 52]³。このような地上観測との密な連携は、今後の小天体探査においてより一層重要となるであろう。

4. まとめと今後の展開

2022年度の小天体スプリンターミーティングでは小天体探査により解決し得る科学的課題、現状の技術的課題を列挙し、オリジナリティある日本の将来小天体探査を見据え議論を深めた。現時点の結論として、以下の見解が得られた。小天体サンプルリターンにおいては、帰還試料の貴重性がミッションを決める要になる。宇宙風化等の影響を受けない始原的な物質は更にその科学価値を高めるため、地下探査は極めて重要な技術である。探査ターゲットは彗星などの遠方天体が候補となり得るため、軌道間輸送機などによってミッションの実現性を高めることが必要であろう。一方で、多数の小天体の形成過程を大局的に理解したい場合は、フライバイ探査が強力な探査方法となる。ダスト補集による物質分析・彗星ガスの分析・小天体の形態学等が特に惑星科学の諸問題を解決する手掛かりとなる。フライバイ探査において理想的な観測ジオメトリを達成するために、地上観測との連携が不可欠である。

2022年度からは、ISASにおいて次なる彗星探査を目指す次世代小天体サンプルリターン計画のワーキンググループが本スプリンターミーティングの議論を軸として発足した。前述の通り、彗星探査によって解決し得る科学的課題は多様である。一方で、現状掲げられている様々な科学的課題に対し、探査の規模の枠組みに囚われず、あらゆる手段をもって解決を試みる事が重要である。例として、海外ミッションとの連携、プラズマ物理学等の宇宙物理学との連携が重要となる。また、隕石学、地上観測、衛星観測で解決し得る部分を探ることで、それぞれの研究分野を発展させながら課題解決に至ることが出来る。2023年度からの活動においては、関連分野との連携

を強め、より体系的に小天体探査の将来展望を設計することを目指す。

謝辞

PEWS 2022, SPS 2023で本スプリンターミーティングにご参加頂き、誠にありがとうございました。菅原春菜さん、鈴木志野さんには小天体スプリンターの運営でご支援頂きました。また招待講演を快く引き受けて頂いた荒井朋子さん、巽瑛理さん、兵頭龍樹さん、津田雄一さん、平林正稔さん、鈴木雄大さん、辰馬美沙子さん、森治さん、吉川健人さんには深く感謝致します。皆様のトークのおかげで、スプリンターミーティングでの議論の種を作ることが出来ました。同様に、Contributed talkとしてご講演頂いた皆様にも感謝致します。次年度以降も(主催者側も含む)皆様の積極的な参加をお待ちしております。最後に、編集長の三浦均さんをはじめとする編集委員の皆様、丁寧に査読をして頂いた渡邊誠一郎さん、本稿にご助言を頂いた曾根理嗣さん、SPS 2023を主催して頂いた笠羽康正さんに深く感謝申し上げます。

参考文献

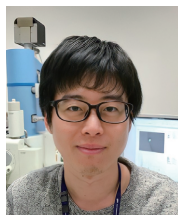
- [1] Usui, F. et al., 2019, Publ. Astron. Soc. Japan 71, 1.
- [2] Fischer-Gödde, M. et al., 2020, Nature 579, 240.
- [3] 塚本尚義ほか, 2022, 遊星人 31, 286.
- [4] 矢田達ほか, 2022, 遊星人 31, 165.
- [5] Hartogh, P. et al., 2011, Nature 478, 218.
- [6] Brownlee, D. et al., 2006, Science 314, 1711.
- [7] Sandford, S. A. et al., 2006, Science 314, 1720.
- [8] 黒川宏之ほか, 2023, 惑星圏シンポジウム.
- [9] Altwegg, K. et al., 2015, Science 347, 1261952.
- [10] 鈴木雄大ほか, 2023, 惑星圏シンポジウム.
- [11] 藤谷渉, 2016, 遊星人 25, 90.
- [12] Vernazza, P. et al., 2013, Icarus 225, 517.
- [13] Hyodo, R. et al., 2017, Arizona-JAXA workshop.
- [14] 辰馬美沙子ほか, 2023, 惑星圏シンポジウム.
- [15] Tsujimoto, T., 2021, Astrophys. J. Lett. 920, 32.
- [16] Zinner, E., 2014, Treatise on Geochem. 2nd edition, 181.

³SPS 2023直後の2023年3月には、はやぶさ2拡張ミッションのフライバイターゲットである2001 CC21 の掩蔽観測にも成功している。

- [17] Oba, Y. et al., 2022, Nature comm. 13, 2008.
- [18] Oba, Y. et al., 2023, Nature comm. 14, 1292.
- [19] Altwegg, K. et al., 2016, Science Advances 2, 5.
- [20] Thomas, C.A. et al., 2023, Nature 616, 448.
- [21] 寫生有理ほか, 2021, 遊星人 30, 169.
- [22] 津田雄一ほか, 2023, 宇宙科学シンポジウム.
- [23] 佐伯孝尚ほか, 2023, 宇宙科学シンポジウム.
- [24] Takao, Y. et al., 2021, Acta Astronaut. 179, 172.
- [25] 吉光徹雄ほか, 2020, 日本ロボット学会誌 38, 8.
- [26] Ho, T. et al., 2021, Planet. Space Sci., 200, 105200.
- [27] Sawada, H. et al., 2017, Space Sci. Rev. 208, 143.
- [28] Nagaoka, K. et al., 2022, Robotica 40, 2.
- [29] 大木春仁ほか, 2022, 宇宙科学技術連合講演会.
- [30] Norman, C.D. et al., 2022, Planet. Sci. J. 3, 101.
- [31] 植田聡史ほか, 2018, 航空宇宙技術 17, 45.
- [32] Kikuchi, S. et al., 2021, Icarus 358, 114220.
- [33] Kusumoto, T. et al., 2023, International Symposium on Space Tech. and Science.
- [34] 藤田雅大ほか, 2022, 宇宙科学技術連合講演会.
- [35] Arakawa, M. et al., 2020, Science 368, 6486.
- [36] Kawakatsu, Y. et al., 2023, Acta Astronaut. 202, 175.
- [37] Matsumoto, J. et al., 2018, JSASS Aerosp. Tech. Japan 16, 7.
- [38] 寫生有理ほか, 2023, 宇宙科学シンポジウム.
- [39] Mori, O. et al., 2020, Astrodynamics 4, 233.
- [40] 星野健ほか, 2009, 日本原子力学会誌 51, 3.
- [41] 曾根理嗣ほか, 2022, ISAS Planetary Exploration Workshop.
- [42] Okada, T. et al., 2018, Planet. Space Sci. 161, 99.
- [43] Arai, T. et al., 2018, Lunar and Planetary Sci. Conference.
- [44] Ozaki, N. et al., 2022, Acta Astronaut. 196, 42.
- [45] Ozaki, N. et al., 2022, J. Guid. Control Dyn. 45, 8.
- [46] Ozaki, N. et al., 2023, Planetary Defense Conference.
- [47] 三柘裕也ほか, 2023, 日本航空宇宙学会誌 71, 2.
- [48] Kubo, Y. et al., 2022, 73rd International Astronaut. Congress.
- [49] 奥村真一郎ほか, 2022, JAXA プラネタリーディフェンス・シンポジウム.
- [50] 吉川真ほか, 2022, JAXA プラネタリーディフェンス・シンポジウム.
- [51] Lazzarin, M. et al., 2019, Planet. Space Sci. 165, 115.
- [52] Yoshida, F. et al., 2023, Publ. Astron. Soc. Japan 75, 153.

著者紹介

深井 稜汰



宇宙航空研究開発機構 太陽系科学研究系 特任助教。地球外物質研究グループ、火星衛星探査計画 (MMX) プロジェクトチームをそれぞれ併任。2022年3月より現職。JAXAでのOSIRIS-REx

キュレーション活動のリードサイエンティストを務める。その他に、はやぶさ2・MMX・次世代小天体サンプルリターンでのキュレーション活動検討のリード、質量分析計を活用したキュレーション作業環境評価法の開発などを務めている。

もう一つの月世界へ：火星衛星探査計画MMX その3 ～火星衛星は小惑星とは違う?～

宮本 英昭¹

(要旨) 火星衛星は小惑星と似ているように見えるが、実際には火星圏の独特の環境において、小惑星とは異なった表層進化過程をたどった可能性がある。本稿ではそうした状況を踏まえ、MMXではどのように表層科学的・地質学的な探査戦略を考えているのか、概説する。

2014年頃、東京ドームに設置されていた宇宙ミュージアムTeNQを拠点として、著者らは数年前から続けていた火星探査計画MELOSの検討を行っていた。これは火星着陸機と周回機による複合探査を目指すという野心的なプロジェクトであったが、途中から規模のスケールダウンを余儀なくされたので、競争の激しい火星科学の中で、日本の立ち位置に関するさまざまな議論が行われた。ちょうどその頃、文部科学省の新学術領域研究にデータ駆動科学に関する領域が設定されており、その枠組みの中で杉田精司(東京大学教授)や栗谷豪(北海道大学教授、当時准教授)と共に「スパースモデリングが拓く太陽系博物学：はやブサ後の小惑星探査戦略の創出(著者が代表)」という計画研究の実施を認めていただいた。これは観測データと物質科学を高次元データで結び付けることにより、はやぶさ2以降の探査戦略を生み出そうとするもので、それまで探査と関連がなかったデータ科学者や隕石学者らを含む多くの研究者が関わり、多角的で充実した、とても楽しい議論をする場となった。その一環として菊地紘(JAXA、当時大学院生)と著者は、火星探査と小惑星探査の側面を併せ持つ火星衛星に狙いを定めた研究を行って見たのだが、結果的にPhobosサンプルリター

ン計画のアイデアを得た。これを惑星科学会におけるメールベースの議論に投稿したことが、MMX立ち上げの、ごく小さなきっかけのひとつであったかもしれない。その後2015年に入ってからJAXA宇宙研や惑星科学会関係者らの依頼を受けて、亀田真吾(立教大学教授、当時准教授)と共に科学ミッションとしてのドラフトをまとめた。その際に議論に付き合っていた国内外の多くの研究者の方々と共に、今もMMX計画を進めさせていただいていることは、思い返しても非常にありがたく、かつ誇らしく感じている。

火星衛星は地球近傍における「最後の未到達な有名天体」である。といってもごく近傍での探査が実施されていないという意味であって、1969年のマリナー7による観測の後、約10個の探査機が既に観測を行っている。そのため可視・近赤外の分光/イメージング観測、紫外分光観測、電波観測、プラズマ・磁場測定、熱赤外分光計測が実施されているのだが、観測の空間・波長分解能は十分ではなかった。その結果、ある程度わかったが解明には至っていない、という言葉ばちら見せの状態になっていて、かえって興味を掻き立てられる状況にある。たとえば火星衛星の起源が「小惑星の捕獲か巨大衝突説に絞られた」といわれると理解が進んだように聞こえるのだが、考えてもみれば両説は大きく異なるものであって、それでも既存の観測事実をほぼ満たしてしまう

¹東京大学大学院
hm@sys.t.u-tokyo.ac.jp



図1: Phobosは火星表面のごく近くを周回する(Image credit: ESA/DLR/FU Berlin/G. Neukum).

あたりが、この「チラ見せ」状態を象徴しているように思えてくる。

どちらの説が正しくても、火星圏への小天体の移動が関連しており、火星衛星の探査は小天体の形成と進化、移動、さらに内惑星への揮発性物質の供給という太陽系科学の非常に重要な鍵を握ることになる(連載の倉本, 中村の記事[1,2]およびそれらの引用を参照されたい)。さらに火星衛星は、今後の人類の太陽系進出において重要な戦略的位置づけを持つ、という点も指摘しておきたい。Phobosは火星の上空約6000 kmをほぼ真円状の軌道で周回しており、「火星人の人工衛星ではないか」などというオカルト説が飛び出すほど火星へのアクセスが良い(図1)。またDeimosも、地球往復に必要なデルタVが小さいことや、表面状態が柔らかい(細粒かつ高空隙のレ

ゴリスで覆われている)と想像されていることから、「最も着陸しやすい地球外天体」と言われている。そのため火星衛星は、火星への前線基地として、または地球外資源獲得の意味で、今後ますます注目されるだろう。すると地球の月と同様に、今後も繰り返し宇宙機が着陸するに違いなく、その際に必要となる天体表層の基礎情報の多くはMMXによってもたらされるだろう。

火星衛星の特徴をひとこと言うならば、Phobosは軽い小惑星Erosであり、Deimosは未知なPhobosである。もちろんS型小惑星であるErosと、P型やD型と似たスペクトルを持つPhobosを比べるのは乱暴なのだが、火星衛星の直径と密度の関係は、他の既知のS型小惑星と比べると少し軽い程度であり、C型小惑星の傾向と比べると少し重い。またErosと似た大地形の特徴がPhobosにあることから、今のところPhobosに最も類似した天体はErosのように思える。DeimosはPhobosとスペクトルや密度の意味で類似しているが、過去に獲得されている情報量が相対的に少なく、より未知である。

天体の大きさや重さは、小天体の起源や進化を考える上で本質的に重要である。感覚的な言い方をすれば、地球で見つけた世界最大の隕石(ホバ隕石, 小型車ほどの岩)を100万個ほど集めると小惑星Itokawaになり、これを100万個程度集めると小惑星Ida, さらにこれを100万個集めると月程度の重さになる。なんとなく隕石が集まってラブルパイル天体のItokawaができるのは予想がつくような気もするが、Itokawa→Idaや、Ida→月を直感的に捉えるのは難しく、火星衛星の探査はこの理解にも役立ちそうだ。図2にPhobosの大きさをItokawaやRyuguと共に示したが、PhobosはRyugu, Itokawaと比べるとはるかに大きく、表面重力はItokawaやRyuguの50-100倍程度となる。そのためPhobos着陸は、これまでのはやぶさシリーズによる小惑星タッチダウンと根本的に異なる形になるため、MMXは「はやぶさ3」とは呼べなくなった。

Phobosには多数のクレーターが存在し(図1)、最大のスティックニークレーター(直径9 km以上)の存在が際立っている(図2)。さらに無数のボルダーが表面に存在し、グループと呼ばれる溝構造が存在することも知られている。Deimosもこれと類似してお

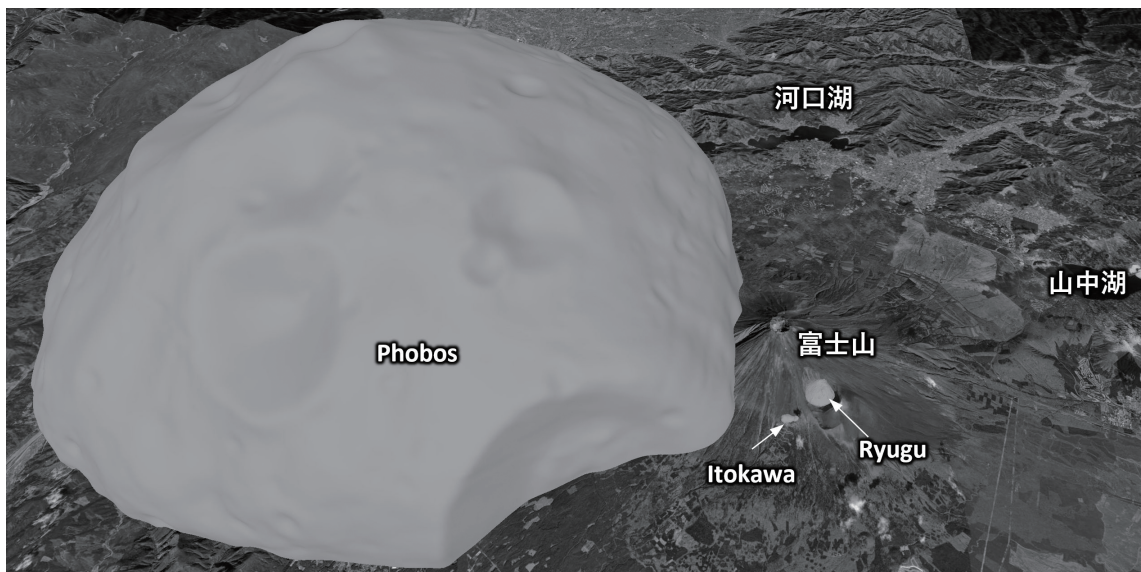


図2: PhobosとItokawa, Ryuguを富士山の横に大きさを揃えて並べてみた。

り、クレーターもPhobosと同程度の数密度でランダムに存在する。またそれぞれのサイズ頻度分布は、過去に探査された小惑星と類似しているのだが、後述する理由で2次クレーターとの区別がつかない問題があるため、クレーター年代があまりあてにならない。Deimos最大のクレーターは、ヴォルテールクレーター(直径3 km)であるとする考え方と、南側の直径10km程度のくぼみとする考え方があるが、このあたりもデータの欠如で決定できていない。なお全体的には、Deimosの表面はPhobosよりもかなり滑らかであるように見える。火星のロッシュ限界周辺に存在するPhobosよりも、Deimosに粉体が多く堆積するように見える点は、軌道進化に原因があるとする考え方がある。ただしそもそも、火星衛星の表土の進化がよくわかっていないので、こうした見かけの滑らかさの議論の前に、整理しておくべき事項が沢山ありそうだ。

岩石天体の表面は、一般にレゴリスと呼ばれる岩石の破砕物で覆われており、これは火星衛星も同様であろう。内部探査のための特別な手法を用いなければ、ほぼ全てのリモートセンシング観測はこのレゴリスに関する情報しか得られないため、ここから如何に天体に関する重要な情報を導けるかが、固体天

体のリモートセンシング観測の本質となる。火星衛星は惑星のような大きな天体と異なり、形成後に熱進化や水質変性の影響を受けたことが無いとはいっても、表層レゴリスの進化は未解明である。まず微小メテオロイドの衝突に長期間晒されることで、月でみられるように表土の破碎と鉛直攪拌を繰り返し、ローカルに円熟し圧密したレゴリスが形成されることが想像できる。ところがRyugu等で見られたように、低い自己重力下では、衝突破碎・移動・再堆積による広範囲かつ比較的深深度までの攪拌や細粒分の散逸も考えうる。これに加えて、火星に近いが故の他の要素もありうる。土星の強い影響下にある衛星アトラスでは、粒径の揃った粒子が低圧密状態で表面に堆積することが知られているのだが、これと同様に(火星衛星本体の重力と比較すると)強大な火星重力に影響される火星衛星は、自分自身を起源とした粒子や火星起源の粒子の(再)堆積効果が卓越しているはずだ、という考え方もある。

Phobosには若干であるがスペクトルに差がある領域があり、赤いユニットと青いユニットと呼ばれて区別して議論されている。ただし単純に青い領域が内部の新鮮な物質であるとする見方は、地質学的には否定されている。Phobosにある最大のボルダーは

100 m程度あり、豊富に存在するボルダーの頻度を月から外挿したボルダー生存年代を考えると、比較的若いクレーターから放出されたと考えられることも可能である。ただしボルダーの分布はPhobosの複雑形状とその重力やそれに応じた表土の移動と合わせて考えないと解釈が困難で、これは赤・青ユニットの複雑な重なり方の解明やグループの壁面状態の解析などにおいても同様である。これらは単に解像度の高い画像を用いた高解像度形状モデルを形成すれば解決するものではなく、Phobosの自転や火星の潮汐力の効果も含めた動的重力を考慮し、かつその軌道変遷による変化も含めて議論しないと、誤った結論に達する可能性があるところがややこしい。

こうした状況を丁寧に積み上げていくと、火星衛星の進化は火星圏の独特の事情が複雑に絡み合う複合的な原因に支配されていることが見えてくる。そのため火星衛星探査には、ItokawaやRyuguとは異なった探査戦略が必要となる。MMXプロジェクトでは、表面環境・地質学に関する科学戦略チーム(PIが筆者、Sub-PIがコートダジュール天文台のPatrick Michelで、70人以上のメンバで構成される国際チーム)を形成し、火星圏の中の火星衛星が、形成後にどのように進化したのかを解明しようとしている[3]。以下でこのチームのこれまでの検討と、今後の計画について紹介する。

Phobosのレゴリスが、実際にはどのように進化してきたのか。これを理解するには、レゴリスの化学組成だけでなく、広範囲における表面物質の粒径分布や粒子形状、機械的特性とそれらの地域的な分散を調べる必要がある。着陸時やローバ移動に応じた表面レゴリスのPhobosの低重力下における挙動から、こうした点についての何らかの知見が得られそうであるが、これを迅速に得るためには慎重な準備が必要である。また着陸安全性の確保のためにも、表面構成物の機械的特性を想定しておくことが重要であった。こうした理由から私たちのチームでは、観測事実を正確に模擬した模擬土壌(シミュラント)を開発して[3]、光学観測のための実験室内での実験や、その挙動をとらえるための動的な実験、さらに数値モデルによる解析、落下塔における低重力環境での実験などを組み合わせた検討を実施している。

Phobosの表面積は小惑星Itokawaの約4000倍、Ryuguの約600倍も大きい。MMXの観測装置は、さまざまな形でHayabusa2と比べて機能も種類も向上しているため、Ryuguと同じデータ処理を想定しているとデータ解析が破綻してしまう。そこで富士山を仮想Phobosと見立ててドローン観測や地上観測、衛星によるリモートセンシングなどを組み合わせて、こうした大きな物体をボルダー単位で地質学的検討を実施し、そのためのツール開発やノウハウ獲得を行っている。また対象となる火星衛星は不規則形状を持つので、観測状況が正確に抑えられていたとしても、実際にその観測領域がどの場所に対応しているのか正確に知ることが難しい。そこで画像解析と3次元立体再構成技術を組み合わせたソフトウェア群の準備も行っている。さらに無数のボルダーについて、異なる画像による計測の重複や、目視による恣意性という問題点が指摘されている。そのため機械学習による客観的かつ迅速なボルダー自動認知の手法を開発した。

Phobos上での風化を理解するために、プラズマやダスト環境、さらにさらに火星圏の環境を観測的に制約することも予定している。その解析のため宇宙風化に関する室内実験を実施し、この結果を利用した数値モデリングを進める予定である。荷電粒子や高エネルギー粒子等による岩石の変性・移動に関する検討の他にも、熱疲労や土壌と揮発性物質の相互作用、ダスト検出の検討、プラズマと表面との相互作用など、多くの分野にまたがる検討をあらかじめ実施しておくことを予定している。

これまでに科学的重要度の高い項目の整理も行ってきたが、筆者は特に内部構造を知ることが重要な目的となると考えている。まずはごく浅部というか、衛星にとっては最外部に、ダスト層が存在するの可否かを知ることが重要である。

MARSISやアレシボレーダーでPhobosの電波観測が実施されているのだが、その結果から火星衛星の表面は非常に低い密度の物質で覆われていると解釈されている。つまり、ふわふわとしたダスト層が10 cmかそれ以上の厚さで表面に存在している、という可能性が指摘されている。そのような構造を持つ天体は、これまでに見つかったことはないのだけれども、Phobos表面のストリークという筋状の構

造の存在は、ダスト層が存在していて崩壊したとするとうまく説明できてしまうため、現状ではその存在を否定しきれない。もしそのような層が存在するのであれば、着陸機やローバの太陽電池パネルの汚損が問題となるだけでなく、離着陸時のダスト巻き上げによる探査機への甚大な影響が懸念される。また、ローバのタイヤが十分なトラクションを確保できず、モビリティが著しく損なわれてしまうかもしれない。つまりこうしたダスト層の存在は、MMX計画のみならず今後の全ての着陸計画にとって最大の懸念事項とも言える。その存否について、高解像度画像からレピテーションの有無も含めて検討することはできるが、ローバ投下時や着陸(リハーサル)時により明瞭に判断できるはずであり、この観測はMMXによる表面科学探査の重要なターゲットとなる。

レゴリス層の構造についても、早いうちに理解を進めておきたい。Phobosには多くのクレーターが存在するが、深度方向の地盤強度の差が反映される(と信じられている)同心円状のクレーターに地域差が存在しないことから、レゴリス層の厚さも地域差が無いのかもしれない。しかしこれはスティックニークレーターなど大きなクレーター周辺の堆積物が不均質であるようにも見えることと矛盾する。また、スティックニーの見かけ形成年代がボルダークの生存年代と大きく矛盾することも含めて考えると、Phobos表面では、一般的な地形的緩和と異なるタイプの地形緩和があるのかもしれない。これはたとえば軌道変化に応じた重力の変化(と、それに伴う土砂移動)の影響があるのかもしれないし、Phobosから放出されたイジェクタが火星の強大な重力の影響を受けて再堆積する効果が卓越するのかもしれない。後者の場合、表層物質は幾度となく衝突加熱・変性を経験した物質で構成されている可能性もあるため、こうした物質をPhobosの基盤物質と認識してしまうと、実際の進化史と大幅に異なる描像を得てしまう可能性もあるので、中村智樹(東北大学教授)らのリードする火星衛星起源の科学戦略チームと検討していきたい。また表面にみられるクレーターの多くが2次クレーターであって、直接求められるクレーター年代が表面年代とは全く異なっている可能性もある。さらにDeimos由来の物質や火星由来物質、火星重力で捕獲された火星圏以外から来た物質も表面土

砂に混合されているはずで、たとえ混合の割合がわずかであっても、分布や量比はサンプル解析においても影響があるはずだ。

深部に何らかの物質境界が存在するかどうかは、観測による制約が難しいが重要な問題である。彗星核のような天体の捕獲説を想定すれば、内部数十m以深に氷を含むコアが存在していても不思議ではないことは、過去にも指摘されている。また強制秤動の振幅の観測結果は、内部が多少高密度であっても矛盾しないことを示している。表面が乾燥していても、実際には内部に氷が存在するという例は、メインベルトの小惑星や枯渇彗星などで立て続けに報告がされているし、リモートセンシングでは表面が乾燥していると考えられていたRyuguが、実際には豊富に氷を含むことがサンプル解析でわかっている。そのため松本晃治(天文台准教授)の率いる測地学・科学戦略チームと協力して、深部内部構造の観点からも解析を進めたい。過去の探査機が、Phobos内部の揮発性成分の流出を捉えたとも見える観測結果を報告していることもあり、こうした内部コアの存在の可否は興味深い研究対象となる。Phobos内部にも氷層が存在するのであれば、火星探査における前進基地の構築に有利ではないかという考え方もあるため、過去に打ち上げられつつも失敗した探査計画(Mars 96やPhobos-Grunt)では地震計や地中レーダー探査装置を搭載していた。私たちの2015年頃の初期検討においても、地震計や重力偏差計、高エネルギー粒子ミュオンを用いたトモグラフィー装置(ミュオグラフィ)、レーダーサウンダ、地中レーダーなど、内部探査に関連するものを真っ先に検討していた。これらは諸般の事情により実現しなかったが、この頃の検討はその後の小天体探査に引き継がれているため、いつか火星衛星の探査に利用されるかもしれない。

人類は将来、必ず火星に活動領域を広げるだろう。その際にPhobosやDeimosを火星への玄関口として利用する可能性があるため、海外で火星有人飛行に関連するグループも興味を持ってMMXの動きを見ている。Deimosへのアクセスの容易さに目を付け、Deimosを宇宙資源の観点から探査・利用を行うという民間企業も海外に設立されており、筆者も共に検討を進めている。MMXによって火星衛星が

詳しく調査されることは、科学だけでなく将来の産業界へも重要な貢献となると筆者は確信している。

なお本稿でも、読みやすさを優先して個々の記事について引用文献を付していない。詳しくは、参考文献に示した論文を辿っていただきたい。

次号へ続く。

参考文献

- [1] 倉本圭, 2023, 遊星人 32, 123.
- [2] 中村智樹ほか, 2023, 遊星人 33, 216.
- [3] Miyaomto, H. et al., 2021, Earth, Planets and Space 73, 214.

著者紹介

宮本 英昭



東京大学大学院教授。東京大学大学院理学系研究科博士課程を中退し、東京大学工学系研究科助手となる。博士(理学)。アリゾナ大学客員研究員、東京大学総合研究博物館准教授などを

経て2015年より現職。MMXでは科学戦略チーム「Surface Science and Geology」のPIを務める。

みんなでふたたび木星へ、そして氷衛星へ その8 ～JUICE搭載ガニメデレーザ高度計GALA: 打ち上げ・軌道上初期チェックの報告～

塩谷 圭吾^{1,2}, 小林 正規³, 荒木 博志^{4,2}, 木村 淳⁵, 野田 寛大^{4,2}, 竝木 則行^{4,2},
押上 祥子¹, 東原 和行¹, 齋藤 義文¹, リンゲナウバー カイ⁶,
スターク アレクサンダー⁶, フスマン ハウケ⁶, GALAチーム

(要旨) ガニメデレーザ高度計GALAを搭載したJUICEの打ち上げが成功しました。南米仏領のギアナ宇宙センターより、アリアン5ロケットにて、2023年4月14日のことでした。

GALAは軌道上から氷天体表面を測距する科学観測機器です。GALAはその機能によって、氷衛星の鉛直方向の地形情報を取得し、また特にガニメデに対しては潮汐応答を測定することで、地下海等の内部構造の調査に臨みます。GALAは氷天体に適用される初めてのレーザ高度計です。また、レーザ高度計で潮汐変形等を直接測定して内部海の存否に迫る試みもGALAが世界初です。GALAの開発では、日本チームはGALAの中心部とも言える3つ(も)のハードウェアモジュールを開発しました。待望のGALAの軌道上初期チェックの結果は非常に良好で、安堵しました。本稿では打ち上げとGALAの軌道上初期チェック、および期待される実性能等について簡潔に報告します。

1. JUICE打ち上げ成功

1.1 打ち上げ: 仏領ギアナ宇宙センターにて

ガニメデレーザ高度計GALA* [1-3]を搭載した木星氷衛星探査機JUICE** [4-7]の打ち上げが成功しました(図1, 図2)。南米仏領にあるギアナ宇宙センターより、フライト番号VA260が与えられたアリアン5ロケットにて、当初の打ち上げ予定より1日遅れた2023年4月14日のことでした。

この打ち上げのため、我々(著者)のうち塩谷、小林、東原、齋藤が現地に出張しました。打ち上げの時を塩谷、小林、東原は射場から13 kmの距離にあるイビスビューポートで迎えました。宇宙研を代表しての出張という面もあった齋藤は、射場から距離5.1

kmのトーカンビューサイトにて、別行動でした。

前日、打ち上げができなかったのは天候条件のためでした。雨季のため、打ち上げが行われた当日の天候も見た目には前日と同様の曇天だったので、再度の延期になるかと心配されました。しかし打上げ延期のアナウンスはありません。射場付近を警戒するフランス空軍のヘリコプターが、2機編成で我々の上空を通過して行くことから、打ち上げが迫っていることを実感します。フランス語のカウントダウンが進行するにつれ、さらに緊張感が高まります。

そして点火、リフトオフ。時刻は現地時間午前9時14分。上昇を開始したロケットは、すぐに低層の雲に入って視認できなくなりました。大幅に遅れて来る音響。これほどの時間差の音響遅れを視覚聴覚ではっきり体感するのは稀なことで、音響が届いた時、本当に打ち上げがなされたことと、そのスケールを実感しました。打ち上げの約3分後にノーズフェアリング開、28分後に探査機分離のアナウンス。沸き起こる

1.宇宙航空研究開発機構
2.総合研究大学院大学
3.千葉工業大学
4.国立天文台
5.大阪大学
6.ドイツ航空宇宙センター
enya.keigo@jaxa.jp

* GAnymede Laser Altimeter
** JUupiter ICy moons Explorer

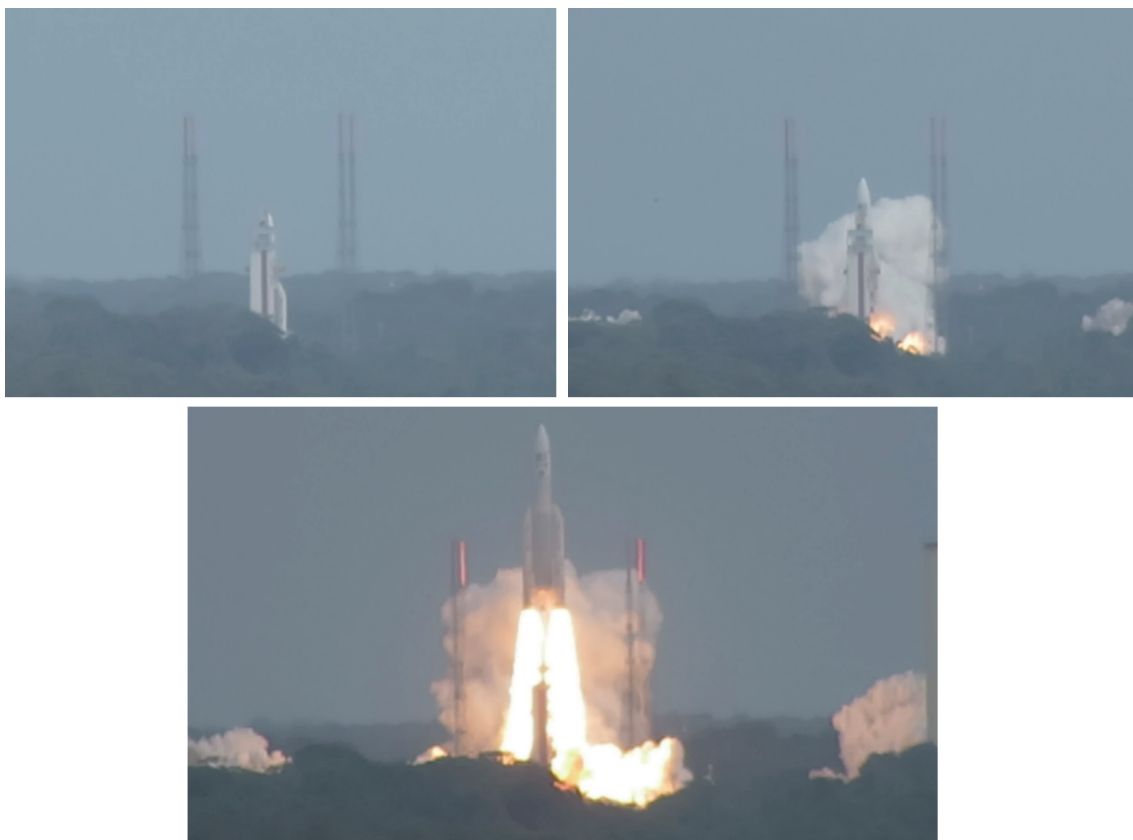


図1: JUICE打ち上げ(小林正規撮影の動画より)。2023年4月14日, ギアナ宇宙センターより, アリアン5ロケットにて。画像の時系列は左上, 右上, 下の順。射場より13 kmの距離にあるイビスビューポートより撮影。

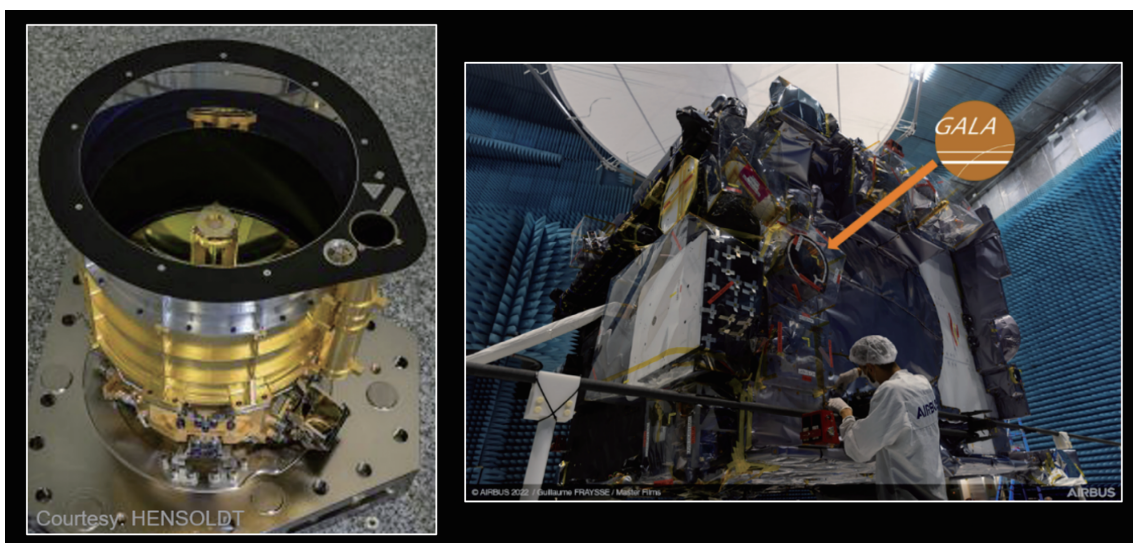


図2: (左) GALA光学系フライトモデル(クレジット: HENSOLDT)。 (右) GALAを搭載して試験中のJUICE(クレジット: AIRBUS)。

歓声。そして探査機は正常に軌道投入され、JUICEの打ち上げは成功しました。

1.2 JUICEの今後

JUICEは今後、多くのスイングバイを経た後、木星系に向かいます。具体的には2024年に月・地球スイングバイ、2025年に金星スイングバイ、2026年に2回目の地球スイングバイ、さらに2029年に最後の地球スイングバイを行います。木星軌道投入は2031年、そしてカリストとエウロパのフライバイ観測を行い、最終目的地であるガニメデ軌道に投入されるのは2034年の予定です。打ち上げ後の燃料の残量が良好なことから、ガニメデ周回高度500 kmでのノミナル観測に加えて、高度200 kmでの30日間の観測追加が現実になりつつあるのは朗報です。

2. GALAの概略

本節ではGALA及び日本チームの寄与(図3)について簡潔に述べます。GALA全体に関する詳細(装置・サイエンス・プロジェクト推進を含む)については、過去の遊星人記事および論文に記しましたので、それらをご参照ください[1-3]。

2.1 科学目標

GALAはJUICEに搭載された科学観測機器のひとつです。その科学目標として、我々は以下を掲げています[1-3,8-10]。

- (i) 地形情報にもとづく氷テクニクスの理解
- (ii) 潮汐応答の測定を通じた内部構造の理解
- (iii) 表面の小規模粗度と反射率の理解

潮汐応答の測定では、より具体的にはガニメデの表面変位や経度秤動の大きさ、およびそれらの位相ずれの測定を行います(図4)。そして内部海の存否や状態の制約を含む内部構造の理解に迫ります。

2.2 GALAの機能

GALAは軌道上から氷天体表面を測距するためのレーザ高度計です。測距は、GALA自身がレーザパルスを出して、天体表面で反射されて返ってきた

パルス(リターンパルス)を受信し、その往復にかかった時間を計測することで行います。GALAは単素子のレーザ高度計ですので、1ショットのレーザパルスによって測距できるのはパルスに照射された1領域(スポット)のみです。GALAはJUICEが軌道上を移動することによって測距スキャンを行います。レーザパルスの波長は1064.5 nm、照射頻度はノミナル30 Hz(そのほか 50 Hz モード有り)です。天体表面上での照射スポットサイズの設計値は50 m、ノミナルスポット間隔は50 mです(軌道高度500 km、照射頻度30 Hzを想定した場合)。

他方、GALAの中では、射出用に生成したレーザパルスのごく一部(スタートパルス)を、リターンパルスと共通のAvalanche PhotoDiode (APD)検出器およびそれ以降の信号処理系によって検出します。スタートパルスとリターンパルスの検出器および信号処理系を共通にすることは、両者の時間差を高精度で検出することに寄与しています。また、リターンパルスの時間的広がりや強度から、レーザ照射地点の表面粗さや反射率を推定することができます。

2.3 観測天体

GALAの科学観測の対象となる天体はカリスト、エウロパ、そしてガニメデです。これらのうちカリストとエウロパに対してはフライバイ観測のみ可能で、全球的な観測はできません。特にエウロパで予定されている2回のフライバイは、エウロパが同一の軌道位相にあるタイミングで行われるため、潮汐応答の検出ができません。

他方、ガニメデに対しては、周回軌道(ノミナル高度500 kmの極軌道)に入って繰り返しスキャン観測を行うことができます。そのためガニメデにおいては、前述の科学目標の全てに挑むことができます。

2.4 国際協力

GALAの開発はドイツ、日本、スイス、そしてスペインの4か国による国際協力によって遂行しました。PIであるドイツチームの拠点はドイツ航空宇宙センター(DLR)です。日本チームはGALAの中心部とも言える、以下の3つのハードウェアモジュールを開発しました(図3)。

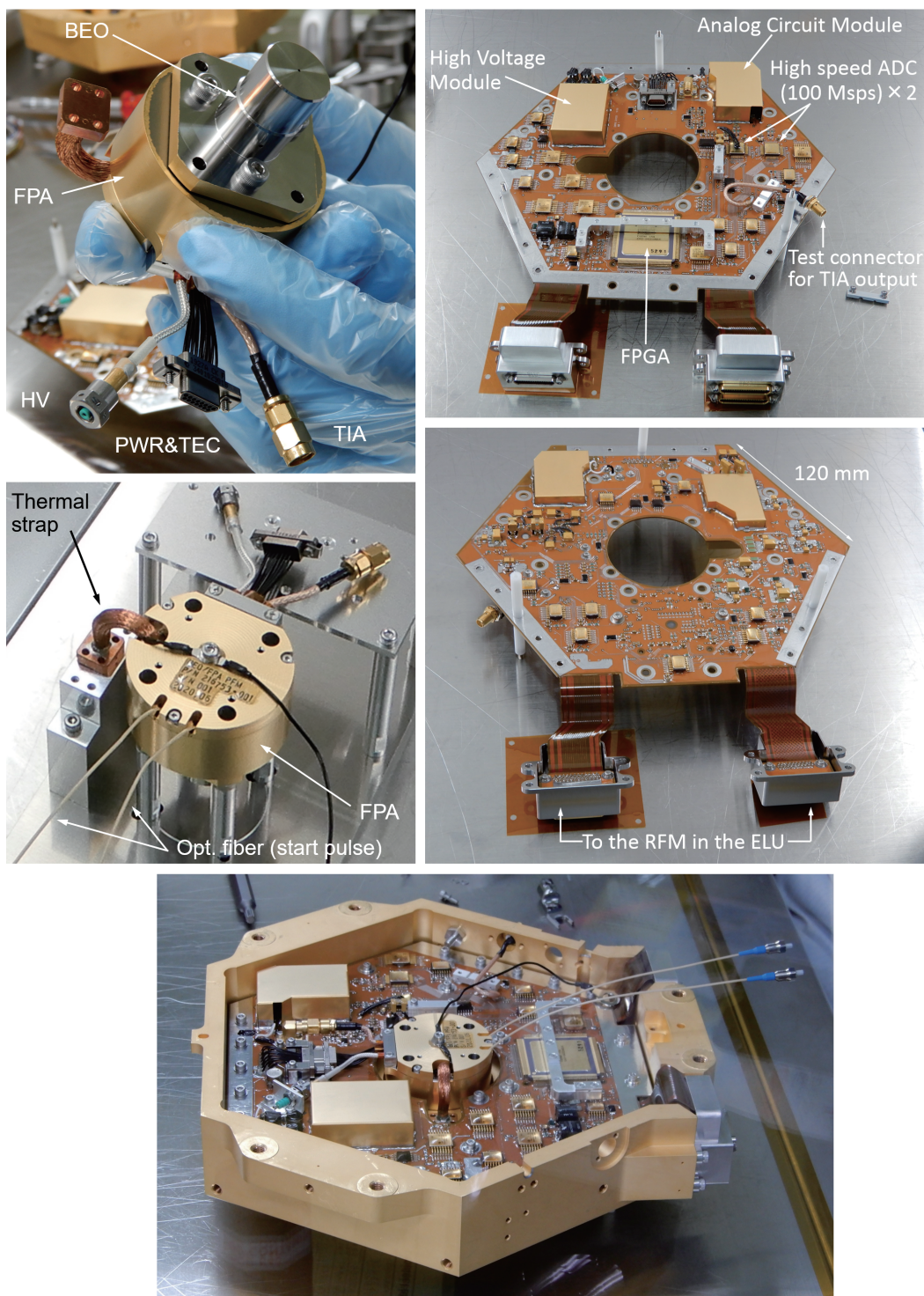


図3: GALA日本チームが開発したハードウェア(フライトモデル)[2]. 左上段および左中段: BEOとFPAを組み合わせた状態で、リターンパルス入射側およびその反対側から見た図. 右上段および右中段: AEMの両面. 下段: BEO, FPA, 及びAEMを組み合わせ、統合試験用の構造体にインストールした状態.

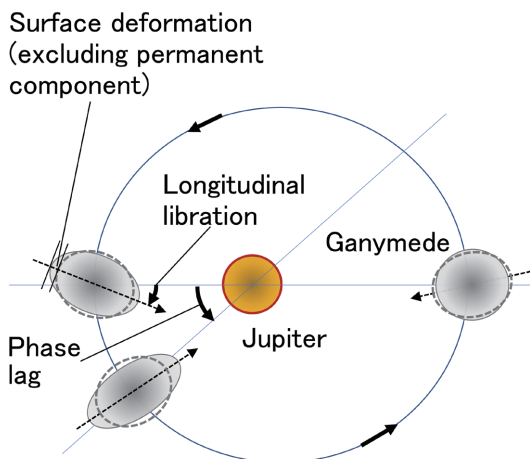


図4: 潮汐によるガニメデの表面変位(surface deformation), 位相ずれ(phase lag), および経度秤動(longitudinal libration)の概念図. GALAの実性能は, 厚さ数km以上の内部海が存在する典型的なケースと内部が完全な固体のケースを識別可能と考えられる[表面変位は永久変形(permanent component)を除いたもの. 模式図であり天体・軌道のサイズ比は現実と異なっており, 物理量は強調して描いてある]. Enya et al. (2022)の図5を改変[2,3].

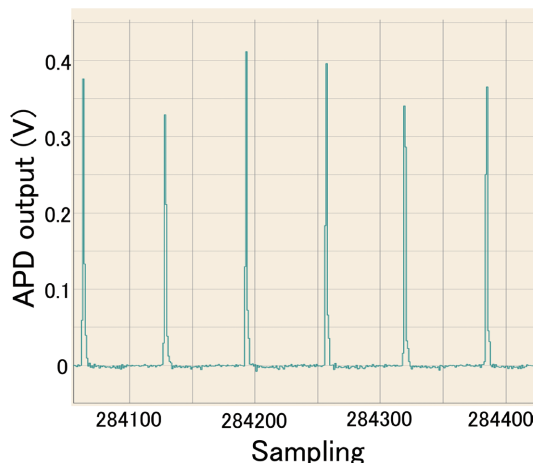


図5: 軌道上初期チェックにおけるend-to-end試験で取得に成功したデータ(スタートパルス使用). 2023年5月15日に取得. 横軸はサンプリング, 縦軸はAPD検出器の出力. このデータはパルス周波数30 Hzについてのものだが, 50 Hzの試験も同様に成功している(図にプロットされているのはパルスの前後のサンプリングのみである).

- ・Backend Optics (BEO): 後置光学系
- ・Focal Plane Assembly (FPA): 検出器モジュール
- ・Analogue Electronics Module (AEM): アナログエレクトロニクスモジュール

これらのハードウェアの他に, 日本チームではGALA全体の性能をシミュレートするソフトウェア(パフォーマンスモデル)を, ドイツチームと独立に開発しました[11].

3. 軌道上初期チェック

待望のGALAの電源初投入および軌道上初期チェックは, 2023年5月15日に行われました. 日本チーム関係者の数名リモートで参加しました. 初期チェックは時差の関係で日本時間の深夜まで及びました. 結果について結論を先に書きますと, 予定された確認項目の全てが適正でした. つまりパーフェクトと言ってよい, 非常に良好な結果でした. 大いに安堵しました. 以下では, 初期チェックの内訳について簡

単に記します. (データ公開に関する制約もあるため, ここでは一部を紹介するに留めます).

3.1 House Keeping (HK) データ

HKデータとは, 各部の温度など機器の状態を表すものです. GALAの軌道上初期チェックでは, 全てのHKデータが適正值であることが確認できました.

3.2 機能・性能

前述のスタートパルス経路を用いて, レーザパルス発生装置から始まってFPAへの導入光路, APD検出器, AEMおよびそれ以降の信号処理系, さらに地上へのダウンリングまでを通した試験を行いました(end-to-end試験). レーザパルス発生装置は冗長系になっているので, それら(主系・サブ系)のそれぞれについて試験しました. その結果, 主系・サブ系のいずれにおいても, 試験した end-to-endの全過程の機能が正常に動作していることを確認できました. 図5はend-to-end試験で取得することに成功したパルスです. そして主要な特性として, 以下が定量的に確認されました.

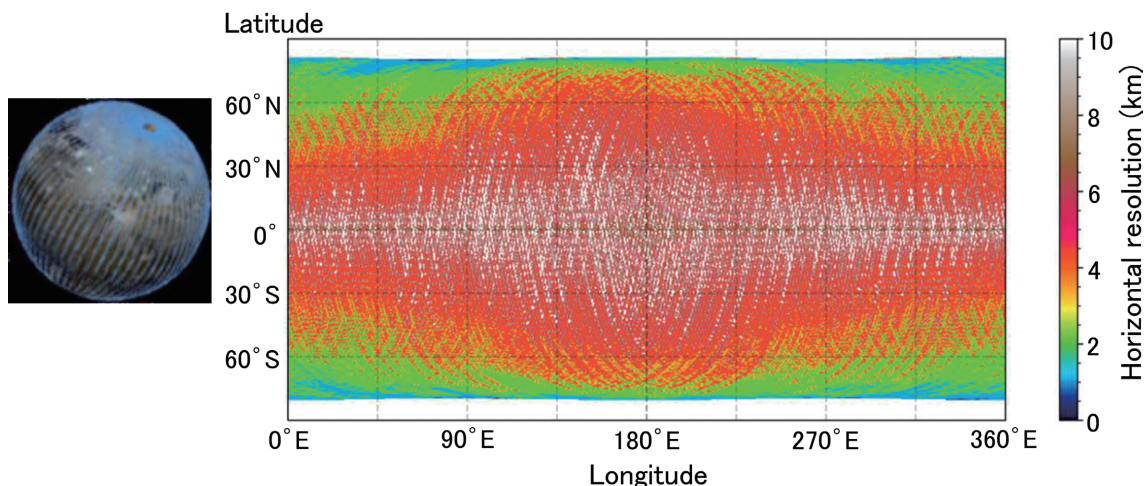


図6: ガニメデに対する観測スキャン。左図は模式図で、全てのスキャンは描かれていない。右図は観測期間を通じたスキャン間隔。横軸は経度、縦軸は緯度を表す。観測スキャンは赤道域で粗で、高緯度になるにつれ密になって行くが、両極付近には全くスキャンされない領域ができる。極域を除いたスキャン間隔は10 km より密、南北緯度60度以上のスキャン間隔は5 km より密である。

- ・レーザ強度: 適正
- ・パルス幅: 適正
- ・パルス周波数: 適正
- ・検出器ノイズ: 適正(要求値の約1/3を達成)

ただし今回の軌道上初期チェックでは、レーザを射出し天体で反射させて受信する試験(リターンパルス試験)は行っていません。これは反射体となる天体が無いためで、予定通りです。スタートパルス系とリターンパルス系の多くは共通ですので、リターンパルス系のかなりの部分は試験が済んでいます。とはいえ、リターンパルス試験が残された重要課題であることは間違いありません。我々は2024年8月に予定されている月イングパイの機会に、リターンパルス試験を行うことをESAと調整・準備中です。

4 期待される実性能

この節では、軌道上初期チェックおよび打ち上げ前の地上実験の結果から期待される、ガニメデにおけるGALAの実性能について述べます。本来、複雑な込み入った話題ですので、ここではかいつまんで記述します。

4.1 スキャン観測の密度

前述のように、GALAはJUICE探査機の移動とともに、天体表面の1地点にレーザパルスを照射して測距することを繰り返します。その際の1ショットのレーザパルスに照射される領域(スポット)の直径と間隔について、期待される実性能は以下です(ノミナル軌道高度 500 km, 測距頻度30 Hz を想定した場合)。

- ・照射スポット直径 = 49 ± 3.4 m
- ・照射スポット間隔 = 50.2 ± 4.5 m

これらの値は、GALAの地上実験の結果およびJUICE探査機の軌道を想定して導出したものです。いずれも設計値は50 m でしたので、これらの値は設計と良く整合しています。

図6は、探査機がガニメデを周回して観測スキャンを繰り返すことによるスキャンの密度を表したものです。観測スキャンは赤道域で粗で、高緯度になるにつれ密になって行きます。ただし両極付近には全くスキャンされない領域ができます。ノミナル観測期間の継続的スキャンによって、最終的には極域を除いたスキャン間隔は10 kmより密になり、南北

緯度60度以上でのスキャン間隔は5 kmより密になります。

4.2 測距の精度と地形情報の取得

GALAによる測距の精度はリターンパルスの強度や波形に依存し、それらは天体の表面状態や軌道高度などの多くのパラメータに依存します。そのため、ここではGALAチーム内で「ノミナル測定条件」としている典型的な例を示します。具体的には表面アルベド45.6%、表面傾斜 8° (照射スポットサイズ50 mでの表面粗さ1.7 mに相当)、軌道高度500 kmであり、またGALAの機器パラメータは観測期間終了時に期待されるものを想定します。

この条件で期待される往復パルスの時間差計測の精度を、GALAと天体表面の照射スポットの間の距離に換算した値(レンジングの精度)は以下です。

・レンジング精度: 0.25 m

これは期待されるGALAの実性能を簡潔に表す数値のひとつで、優良な値と言えます。

ただし、得られたレンジングのデータを地形の絶対高度に換算する際には、JUICE探査機の位置と姿勢の情報の誤差が寄与します。探査機の姿勢が寄与するのは、GALAおよびその光軸方向が探査機に固定されているためです。機器パラメータのみならず、天体表面の状態、さらに探査機に起因する誤差が影響することが、測距の精度についての議論を複雑にしている要因です。

GALAは要求仕様を満たす実性能をもって、小天体に対する初のレーザ測距を行い、木星氷衛星の定量的な地形情報を初めて取得します。従来は撮像データによる地形の陰影や画像の立体視を用いて地形高度を推定していましたが、こうした手法を適用できる領域は極めて限られる上に不定性が大きいという問題がありました。GALAが得る測距データはこれらを根本的に解決します。例えば衝突クレータの深さから氷の物理特性を推測し、またエウロパのカオス(局所崩壊地形)やガニメデのグループ(正断層群地形)といった特徴的な地形の情報を得ることで、氷殻内部の高密度(限局的な液体)領域の有無や、氷殻の弾性厚さ(リソスフェア厚さ)、熱流量の推定な

どへ繋がるものと期待されます。

4.3 内部海検出の可否

GALAは地形情報の取得のみならず、全球形状の継続的なモニタリングを通して衛星の潮汐応答(特に潮汐変形)の測定を行い、内部海の存否に関する制約づけを目指します(図4)。しかし潮汐変形の変位と内部海の有無との関係は複雑で、海があれば変位が大きくなるというような単純なものではありません。潮汐変位は、内部海(氷殻)の厚さや氷殻の粘性率、剛性率などに依存し、一般には海が厚いほど、また氷殻の粘性率や剛性率が小さいほど、変位が大きくなります[8-10]。逆に、海が無くても氷の粘性率がかなり小さい場合には、氷が液体のように振る舞うことで変位が大きくなる可能性もあります。

ここで、ガニメデの潮汐変形に関するモデル計算の結果を用いて、典型的な物性や構造を仮定した場合に予想される結果を紹介します[9,10]。内部海が数km以上の厚さをもって存在し、氷の融点粘性率が 10^{13} Pa·s以上、剛性率が1-5 GPaである場合、ガニメデ表面の潮汐変位は約5-8 m (peak-to-peak) となります。一方、内部海が存在しない場合に期待される表面変位は3 m以下と推定されます。我々は確認されたGALAの実性能に基づき、両者の違いは識別可能だと結論しています。また、氷の融点粘性率が 10^{13} Pa·s未満の場合は氷が液体のように振る舞うため、海が存在しない場合でも海がある場合と同程度の変位が生じ得ます。しかしこうした場合でも、潮汐変形の位相ずれ(図4)を測定することで、確認されたGALAの実性能によって海の有無を識別できると考えています。潮汐変位だけではなく位相ずれ等を求めることが必要かつ有効であることは、日本発の観点です[9,10]。

GALAのデータから潮汐変位および位相ずれを求める際には、GALAの機器パラメータと探査機由来の誤差を考慮した上で、長期間の全球的観測による大量のデータを集約し、測距スキャンの交点を利用して精度を高める解析(クロスオーバー解析)を行います。上記の検出可否のシミュレーションにおいても、そのようなデータの集約・解析を想定しています。

4.4 GALAのデータ・誤差・解析の特徴

GALAの測距では、レーザパルス1ショットあたり、根本的にはレンジングの結果、つまりパルス往復の所要時間という一つの値が得られるに過ぎません。この値は単体では基本的に科学的情報をもたらしません。このことは、1ショットの撮像でも相応の情報が読み取れるカメラ等の観測機器とは対照的です。

GALAにおける測定誤差の扱いは、GALA以外の要因も大きく寄与するため複雑です。具体的には前述のように、測距の精度はガニメデ表面の状態に依存し、また探査機の位置・姿勢も考慮する必要があります。

さらに研究対象とする様々な科学目的にも依存します。例えば連続する測距によるスキヤンの比較的狭い区間を用いて、天体表面上の起伏が分かれば良いという狙いの場合、探査機由来の誤差の影響は小さくなります。逆に広域・長期間のデータを必要とする科学目的においては、探査機由来の誤差の影響は強く、また複雑になります。探査機由来の誤差の影響は、地形の相対的な起伏が分かればよいのか、絶対高度が必要な科学目的かによっても全く異なるものになります。

以上のことから、GALAでは特に、科学的に応じて多かれ少なかれデータを集約して、誤差について入念に評価して扱うことが不可欠です。このような課題はこれから先にあるハードルです。ただし幸いなことに、GALAの軌道上初期チェックでは要求通りの実性能が確認されています。状況は予定通りであり、特に問題が発生している訳ではありません。大きなハードルは、やり甲斐のある研究課題でもあるのです。

GALAの科学目的のうち潮汐変形や位相ずれの導出には、特に長期間にわたる観測による多くのデータを集約した上、クロスオーバー解析を適用する必要があります。探査機が十分な回数ガニメデを周回し、ガニメデ全球の形状と重力場を測定することが必要なため、潮汐変位が十分な精度をもって測定されるのは、JUICEがガニメデの周回軌道へ投入されてからしばらく経過した後になります。

5. 将来に向けて

5.1 所感: 打ち上げを終えて

GALAの提案から11年、打ち上げまでの道のりは長いものでした。その思いもあったためか、今回の仏領ギアナ宇宙センターへの出張は、普段の海外出張とは趣が異なっていました。移動はパリで1泊した後、オルリー空港からギアナに向かいます。大陸間便ですが国内便です。オルリー空港では、長年、苦楽を共にしたドイツチームと合流。他にもJUICE関係者が多くいます。ヨーロッパ中から、また日本から集結した関係者が、同じ方向を向いて出発します。言葉にしなくても、同じことを思っていると感じました。— JUICE打ち上げの成功。

現地ではギアナ宇宙センターの存在感は大きく、カイエンヌ空港には関連する展示や多くのポスター、旗などが掲げられていました。最先端の宇宙センターも周りは熱帯南米の密林で、ロケットとのコントラストが美しく、新鮮でした。

打ち上げの当日、ドイツチームと祝った夕食は、雨季が始まった熱帯の夜の空気の中、近年で最も気持ちが良い美味しいものでした。そして、これからの軌道上試験やクルージング期間の活動、そしてガニメデでの科学観測を、眼前にある現実の課題として、あらためて身に染みて感じました。

GALAの開発は、これまで経験した他のプロジェクトと比較しても大変なものでした。その理由のひとつに、日本が機能の全く異なる3つ(も)のハードウェアモジュールの開発を引き受け、それらのうち2つのモジュールについては、フライトモデルまで宇宙研が設計責任を負って実際に開発したことが挙げられます。またコロナ禍の影響も、日本が関与するJUICE機器のなかでGALAが最も強く受けたと思います[7]。GALAの開発・プロジェクト推進から得た教訓は多岐に渡りますので、別の機会にあらためて述べたいと思います。

5.2 軌道上リターンパルス試験

幸いにしてGALAの軌道上初期チェックの結果はパーフェクトと言ってよい、良好なものでした。スタートパルスを用いたend-to-end試験にも成功して



図7: 2023年3月1—3日にドイツ航空宇宙センター(ベルリン)で開催された、打ち上げ前の最後のGALAチームミーティングにて。

います。ただし第3節に記したように、天体表面での反射を経たレーザーパルスを用いた試験は、まだできていません(その理由は天体が無いことなので予定通りであり、問題が生じている訳ではありません)。スタートパルス系とリターンパルス系の多くは共通ですので、リターンパルス系のかなりの部分は試験が済んでいます。とは言え、リターンパルス試験が残された重要課題であることは間違いありません。

そのため2024年8月に予定されている月スイングバイの機会に試験を行うことが、近未来のGALAの運用における重要な課題となります。

5.3 データ解析システムの構築と科学検討: 細く長く

その先はクルージング期間が長く続きます。クルージング期間中には運用のほか、ドイツチーム等と共

同でデータ解析システムを構築します。また科学検討を継続して、実際のデータが得られた段階で直ちに観測結果と比較して、最善の考察ができるようにしておくことも必要です。科学検討にはGALA単体の科学課題およびGALAと他の機器を組み合わせで行う統合サイエンスが含まれます。

これらの課題はいずれも、最終的な科学成果を導出し、それを最大化するためには必要不可欠な過程です。前述のように、特にGALAでは科学目的に応じて誤差を取り扱い、データを集約して解析できるよう、事前にシステムを構築して準備しておくことが重要です。これらの課題はハードウェアの開発や探査機の打ち上げ、軌道上チェック等に比べると、細く長く行うものだという特徴があります。

これらの課題は大きなハードルですが、状況は予定通りであり問題ははありません。大きなハードルは、

やり甲斐のある研究課題でもあります。

5.4 国際関係: 協力と、競争と、友好と

国際協力は国際競争でもあります。クルージング期間中の課題に日本チームが継続的にしっかり寄与して初めて、重要な科学成果が日本にもたらされるのだと思います。クルージング期間の我々の活動には、ミッション全体の成果を導出し最大化すること、日本の成果を最大化することという、2通りの意義があるのです。

また、ミッション全体の科学成果のためにも、日本に成果をもたらすためにも、欧州側と良い関係を構築・維持することも重要です。もちろん本来の仕事をちゃんとやっていることが前提ですが、その上で、国際的に仲良くすることも仕事のうちと考えています。幸いなことに、GALAにおける日本チームと欧州チームとの関係は良好です(図7)。

5.5 長期的なチームの維持・発展

日本チームとその活力を長年にわたって維持しなければいけません。この種のことは成り行きにまかせると衰弱しがちですので、意識的に務めて行きます。若手の新メンバーの参加は特に歓迎したいところです。

5.6 そして氷衛星の科学観測へ

今後しばらくは日本と欧州を行き来しながら上記の課題をこなし、時々シンポジウムを行う、といった活動が続く見通しです。その先は、いよいよJUICEが木星圏に到達し、カリスト・エウロパのフライバイ観測、そしてガニメデ周回軌道に入っの科学観測を行うこととなります。楽しみです。

このようなGALAに興味を持たれた方や参加してみたいと思われた方は、まずはお気軽に我々にコンタクトして頂ければ幸いです。

参考文献

- [1] Hussmann, H. et al., 2019, CEAS Space J. 11, 381.
- [2] 塩谷圭吾ほか, 2020, 遊星人 29, 153.
- [3] Enya, K. et al., 2022, Adv. Space Res. 69, 2283.
- [4] Grasset, O. et al., 2013, Planet. Space Sci. 78, 1.
- [5] 木村淳ほか, 2013, 遊星人 22, 146.
- [6] 関根康人ほか, 2023, 遊星人 32, 128.
- [7] 齋藤義文ほか, 2023, 遊星人 32, 222.
- [8] Steinbrügge, G. et al., 2015, Planet. Space Sci. 117, 184.
- [9] Kamata, S. et al., 2016, J. Geophys. Res. 121, 1362.
- [10] Kimura, J. et al., 2019, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan 17, 234.
- [11] Araki, H. et al., 2019, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan 17, 150.

著者紹介

塩谷 圭吾



宇宙科学研究所 准教授. GALA Japanプロジェクトマネージャー. 宇宙用機器開発およびプロジェクト推進により新しい科学研究を目指す. 太陽系探査と系外惑星科学の両分野で活動する. 主な科学目標は氷衛星の地下海, 宇宙における生命関連環境・物質および宇宙生命そのものの探究.

小林 正規

荒木 博志

木村 淳



大阪大学大学院理学研究科助教. 東京大学大学院理学系研究科博士課程修了. 博士(理学). 東京大学地震研究所研究員, 宇宙航空研究開発機構招聘研究員, 北海道大学博士研究員, 東京工業大学地球生命研究所研究員を経て, 2016年10月より現職. 専門は惑星物理学, 惑星進化学. 日本惑星科学会, 日本天文学会, 生命の起原および進化学会などに所属.

野田 寛大

自然科学研究機構国立天文台助教. 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). オーストリア科学院宇宙科学研究所PDを経て2003年より現職. 専門は惑星測地学など.

竝木 則行



自然科学研究機構国立天文台 教授/RISE月惑星探査プロジェクト長. 総合研究大学院大学 天文科学コース 教授. Massachusetts Institute of Technology, Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Geophysics専攻, Ph.D.取得. 九州大学理学部地球惑星科学科 助手, 同 助教, 千葉工業大学 惑星探査研究センター副所長を経て2014年4月より現職. 専門は惑星科学. 日本惑星科学会に所属. 日本惑星科学会会長を務める.

押上 祥子

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所月惑星探査データ解析グループ研究開発員. 九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻博士後期課程修了. 博士(理学). 名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻研究員, 国立天文台RISE月惑星探査検討室研究員, 工学院大学学習支援センター講師, 国立天文台天文シミュレーションプロジェクト研究支援員などを経て2019年5月より現職. 専門はリモートセンシングデータ解析, 惑星地質学. 日本惑星科学会, 日本地球惑星科学連合, 日本リモートセンシング学会に所属.

東原 和行

齋藤 義文

リンゲナウバー カイ

スターク アレクサンダー

フスマン ハウケ

一番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦 その56 ~硫酸雲の材料物質, 二酸化硫黄の高度分布に 電波で迫る~

野口 克行¹, 尾沼 日奈子², 安藤 紘基³, 今村 剛⁴

(要旨) 金星を覆う硫酸雲は, 二酸化硫黄(SO₂)と水蒸気から作られる. 雲層より上の高度域と比較して, 雲層及びその下の高度域におけるSO₂濃度の時空間分布の観測例は非常に限られている. あかつきの電波掩蔽観測を利用して, 我々は硫酸蒸気に加えて当初は予定していなかったSO₂の高度分布も得ようと試みている.

金星には高度45-70 kmにおいて主に硫酸からなる雲が存在し, 惑星全体を覆っています. この雲は, 金星大気の大気熱収支や大気運動だけでなく, 様々な化学変化を介して大気微量成分の時空間分布に大きな影響を与えています. 雲の主成分である硫酸は, 昼側の雲頂付近において二酸化硫黄(SO₂)から光化学的に生成されると考えられています. つまり, 雲層よりも上ではSO₂が光分解されるために, 雲層付近の高度域ではその混合比が大きく変化します. 雲層よりも下では数十ppmv程度であるのに対して, 雲層よりも上では10-100 ppbv程度まで減少します. 硫酸の生成が維持されるためには, 雲層下部からSO₂を上方に輸送することが必要です. 硫酸とともにSO₂の高度分布を観測的に明らかにすることは, 硫酸の生成速度や生成場所を知る手掛かりとなると言え, 最終的には金星の雲物理や大気運動をよりよく理解することにつながります. そして, 金星大気中の硫酸蒸気・SO₂濃度の測定に力を発揮するのが, あかつきでも行われている電波掩蔽観測です.

電波掩蔽観測とは, 図1に示すように地上局から

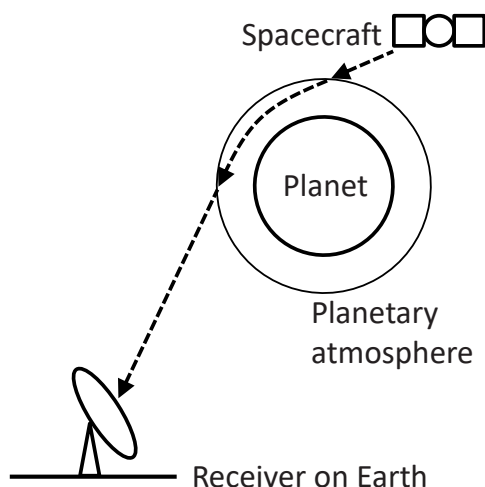


図1: 電波掩蔽観測の概略図.

見て探査機が惑星の背後に隠れる, または背後から出てくる時に探査機から電波を射出し, 惑星大気を通過してきた電波の受信周波数や受信強度の時間変化を利用して, 気温や微量物質濃度の高度分布を導出する手法です(例えば[1,2]). 本研究では, 日本の金星探査機あかつきの電波を用いて, 金星大気を通過して生じる受信電波強度の減衰量から, 大気組成混合比を導出します[3]. 減衰に寄与する組成としては, まずは金星大気の主成分である二酸化

1.奈良女子大学研究院自然科学系
2.ウェザーニューズ
3.京都産業大学理学部
4.東京大学大学院新領域創成科学研究科
nogu@ics.nara-wu.ac.jp

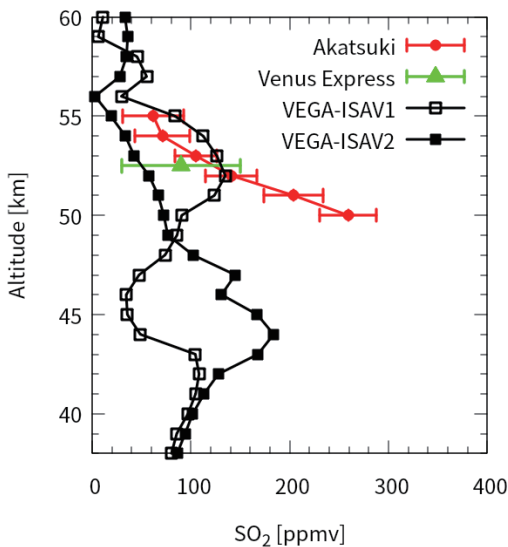


図2: あかつき電波掩蔽観測(2016年3月から2020年4月まで、計28回)によって得られたSO₂混合比の平均(赤い丸)。エラーバーは、標準誤差を表す。緑色の三角形はVenus Express電波掩蔽観測によって得られた高度51–54 kmでの平均値[4]、黒色の四角形は、VEGAプローブ搭載ISA V1・2によって得られた2本の高度分布[5]を示す。

炭素や、窒素が挙げられます。二酸化炭素や窒素の混合比は他の微量物質に比べて十分大きく金星大気中でほぼ不変であるとみなせるので、これらの寄与分を経験式に則って最初に除去します。そして、残りの減衰は硫酸蒸気とSO₂に帰せられるのですが、Venus Expressによる電波掩蔽観測では硫酸の飽和蒸気圧が極めて低くて無視できる高度50 km以上の平均的なSO₂混合比が求められました[4]。我々はこの手法を拡張し、雲層内の全高度で硫酸濃度が飽和蒸気圧になると仮定してSO₂の高度分布を求めたのです。この手法でSO₂の混合比が得られると期待される高度域は、広くはありません。高度50 kmよりも下では、高温のために硫酸が飽和しないのでSO₂混合比を導出できません。また、高度55 kmよりも上では、下層に比べて大気が薄くなるので、電波減衰の絶対量が低下してノイズが相対的に多くなります。そのため、本手法で制約できるSO₂濃度の高度領域は、雲層下部に相当する高度50–55 km付近ということになります。2020年までに得られているデータを解析した結果を図2に示します。観測期間を通して平均をすると、SO₂混合比は高高度ほど減少

するという結果が得られました。この結果は、過去のプローブ観測結果やVenus Expressによる電波掩蔽観測の結果と比べても整合的です。

今後もあかつきによる電波掩蔽観測によってデータが得られる限り、観測数を蓄積してより精密な観測結果を取得したいと考えています。先にも述べたように、SO₂の高度分布は上層での光化学分解と下方からの輸送のバランスで決まるはずですが、あかつきの観測で得られた硫酸蒸気やSO₂の混合比分布と光化学を考慮した数値モデルの結果を比較することにより、金星雲物理や光化学の理解を深化させたいと思います。

参考文献

- [1] Fjeldbo, G. and Eshleman, V. R., 1969, *Radio Sci.* 4, 879.
- [2] Jenkins, J. M. and Steffes, P. G., 1986, *Icarus* 90, 129.
- [3] Imamura, T. et al., 2017, *Earth Planets Space* 69, 137.
- [4] Oschlisniok, J. et al., 2021, *Icarus* 362, 114405.
- [5] Bertaux, J. L. et al., 1996, *J. Geophys. Res.* 101, 12709.

著者紹介

野口 克行

奈良女子大学大学院自然科学系准教授。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)。JAXA宇宙航空プロジェクト研究員, 奈良女子大学助手・助教を経て, 2023年より現職。

尾沼 日奈子

奈良女子大学大学院人間文化総合科学研究科博士前期課程修了, 修士(理学)。2023年より現職。

安藤 紘基

京都産業大学理学部准教授。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)。JAXA宇宙航空プロジェクト研究員, 学術振興会特別研究員(PD), 京都産業大学助教を経て, 2023年より現職。

今村 剛

東京大学大学院新領域創成科学研究科教授。東京大学大学院理学系研究科地球惑星物理学専攻博士課程修了, 博士(理学)。JAXA宇宙科学研究所勤務を経て, 2016年より現職。

遊星人の海外研究記 その12 ～西と東のはざままで過ごす～

松本 徹¹

1. はじめに

私は2017年12月-2018年3月までと2019年8月-2020年3月の2回にわたり、ドイツのイエナ大学に滞在した。私は地球外物質の鉱物学的な観察を専門にしている、イエナ大学の岩石・鉱物学グループで過ごした。イエナ市はヨーロッパ観光でも足を運ぶことがほぼないと思うので、この機会にドイツで経験したあれこれについて紹介したい。

最初のドイツ滞在のきっかけは、東京大学の杉田精司教授、広島大学の藪田ひかる教授にJSPS Core-to-core programを利用した海外短期滞在の枠組みを紹介いただいたことだ。2回目の滞在は、日本学術振興会特別研究員(PD)として九州大学に所属していた時で、採用期間の半分は海外で研究活動ができるという制度を利用した。

最初の渡独時、私は宇宙科学研究所にプロジェクト研究員として所属していた。探査機はやぶさが持ち帰ったイトカワの砂の観察を続けていた。その研究の中で、鉱物の微細な構造をもっと良く調べたいと思っており、せっかくの機会なので、海外の分析技術を専門家に学びたいと考えた。とくに、透過型電子顕微鏡(TEM)という、電子線を使って原子スケールでの結晶の構造を観察できる手法に興味があった。イエナ大のFalko Langenhorst教授らのグループはイトカワ粒子の衝撃変成構造を調べた論文を発表していて、そのTEM画像がとても精細で

あったことが印象に残っていた。TEMは高額の装置だが共用設備でなく自身のラボで運用しているようで、自分で扱えるようにさせてもらえるだけのマシンタイムも十分ありそうだった。そこでメールで連絡をとることにした。Langenhorst教授と全く面識がなかったのだが、滞在を快諾いただき、受け入れの手続きや大学との調整など様々な手配を行っていただいた。

2. 研究生活

イエナはドイツの地図上で真ん中辺りに位置する、人口10万人程度の小規模な町である。かつては東ドイツに属していた。19世紀からガラスやレンズ製品、顕微鏡の開発が盛んであり、光学機器メーカーとして有名なカール・ツァイスの本社が町外れに置かれている(図1)。世界最初のプラネタリウムはこの町で同社が発明した。イエナ大学(Friedrich-Schiller-Universität Jena)はゲーテが蒐集した鉱物標本を展示した博物館もあり、古くから鉱物・岩石学の研究が行われている。しかし、滞在先となった鉱物学研究室は校内にはなかった。大学の建物は古過ぎるので、電子顕微鏡や分析機器の設置に必要となる高圧電源を供給する設備がないらしい。そのため、町で一番高層の建物のひとつであるツァイス本社の6階を間借りする形で、岩石学と鉱物学の2つのグループが運営されていた。イエナに滞在中は大学の身分証ではなく、ツァイスの社員証を発行してもらい、ガラス張りの会議室や撮影厳禁!と書かれていた生産開発ラインを横目で見ながら研究生活を送ってい

¹ 京都大学白眉センター
matsumoto.toru.2z@kyoto-u.ac.jp



図1: イエナの風景. (左上)イエナの街並み. (右上)クリスマスシーズンのモール. (左下)Zeiss本社. (右下)チューリンゲン州の肉料理. マッシュポテトと、団子状じゃがいものクロースが見える.

た。ラボには、微小試料の加工で使われる集束イオンビーム装置や透過型電子顕微鏡、X線回折装置など、物質科学の最先端の研究を行うに十分な装置群があったほか、ソフトウェア担当と研究試料作成のそれぞれの技官さんもあり、日本の大学の研究室に比べて潤沢な予算規模で運営されているようだった。分析装置はかなり自由に使うことができ、些細なことも技官さんに尋ねることができたので、研究環境は大変よかった。学部から博士課程の学生や何人かのポストクも在籍しており、賑やかな雰囲気だった。ラボの皆さんは、ドイツ語が話せない上に拙い私の英語を辛抱強く聞いてくれた。

イエナには、研究対象としていたイトカワの粒子やお借りしたアポロ月粒子を持って行った。試料を分析するためにTEMを詳しく教えて頂き大変お世話になったのが、Langenhorst教授を含めラボのスタッフであるDennis HarriesさんとKillian Pollokさんだ。彼らは、超高圧物質に対する電子顕微鏡をはじめとする研究で知られるバイロイト大から独立してイエナに研究室を構えたいらしい。ドイツで

活躍するTEM研究者を辿ると、ほとんどが同じ研究室の出自だと知って、まさにマイスターの世界だなと思った。

イエナの日々は私の日本での生活と比べてとても規則正しかった。朝8時頃に研究室に集まって仕事にとりかかり、昼には技官さんを含め研究室の皆で食堂(Mensa)へ向かう。会社の社食ということもあつてか、カフェテリア方式の食事はメニューも豊富で美味しかった。ドイツはジャガイモが主食のようで必ずお皿に乗っている。丸ごと茹でたもの、茹でたり焼いてスライスしたもの、棒状、丸く餅状にしたもの、マッシュしたもの等、あらゆる形態と加熱方法のジャガイモを目撃した。食後は食堂の脇に設えられたカフェでコーヒーを飲んで歓談する。午後は18時頃には皆仕事を終えていた。Zeiss社の社員は17時ごろから帰路につく様子だった。日本での研究生生活に比べると一日の活動時間が短いようにも思われるが、限られた時間の中で集中して作業する習慣が身に付くので、全体的な研究の生産性には差がつかないように感じた。残念なことに、時間を有効に使うこの感

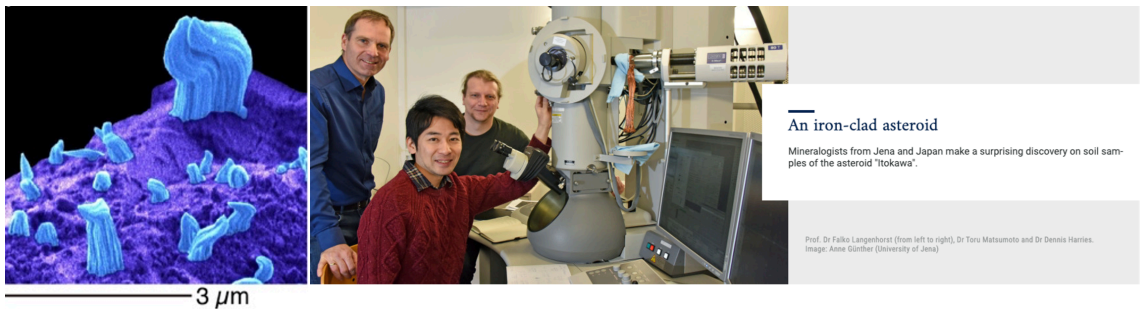


図2: イエナ大学HPで紹介された研究。左がイトカワ粒子で見つかったひげ結晶。右の写真は、左からFalko Langenhorst教授、筆者、Dennis Harriesさん、そして分析に用いた透過型電子顕微鏡。

覚は日本に帰ってから全く消えてしまった。不思議である。研究室では皆でクリスマスマーケットのホットワインを飲みに行ったり、ボーリング大会やホームパーティなどのイベントもあった。

ドイツで何を分析していたかという、私は渡独前にイトカワ粒子に含まれる硫化鉄(FeS: 鉄と硫黄の化合物)の表面の多くに、奇妙なひげ状の形をした鉄の結晶が成長していることを見つけていた(図2)。この詳細をイエナで調べることにした。TEMでイトカワ粒子を観察したところ、硫化鉄の表面からひげ状に伸びているのは金属鉄であることがわかった。その根本である硫化鉄のごく表面の100 nm深さまでは、結晶構造の周期性が乱れて別の秩序状態に変化していた。こうした最表面だけで起きる変化は、太陽風や微小隕石の衝突である宇宙風化で引き起こされたと推測することができた。宇宙風化によって、硫黄原子が選択的に硫化鉄から失われて、金属鉄が成長したのである。宇宙空間でひげ状に伸びる金属は材料学的にも新しい構造だった。また、イトカワのようなS型小惑星の表面はNASAの探査機による観測から硫黄のみが欠乏していることが知られていたが、その仕組みは長い間未解明だった。イトカワ粒子のひげ状結晶は、宇宙風化によって硫黄組成が変化することを示す証拠であるかもしれないと結論した。この分析にあたり、Dennisは学生の頃から地球上や隕石中の硫化鉄を網羅的に観察していて、電子線ビームでの微妙な試料ダメージの影響など、私では判断できない職人的な知恵を色々教えてくれた。イトカワ粒子の分析を通じてTEMの操作に慣れると、深夜まで一人でツァイス社に残って観察を続け

たこともあった。夜遅くになると大きな建物の中で自分一人の気配しか感じなかったので、まるで不審者になったかのように感じた。分析で疲れ果ててしまった後によく眺めたイエナの夜景が思い出深い。

イトカワの硫化鉄の分析成果はネイチャー・コミュニケーションズに受理された。日本のはやぶさプロジェクトの研究に対してイエナ大学がとても大きな関心を寄せてくださり、大学専属のカメラマンが研究室にやってきて記念撮影をしたり、取材を受けたりした。そしてなんと大学のウェブのトップページに写真付きで研究を紹介してもらった(!)(図2)。短期で滞在している研究者の成果を大きく扱っていただけるなんて、とても懐の深い大学であった。おかげさまで、論文の受理に至るまでに5人の査読者からさんざんこき下ろされてきた辛みも消えた。

3. イエナでの日常

滞在中はツァイス社の近くにある留学生用のゲストハウスに宿泊していた。町は低い山々に囲まれており、週末はゲストハウスの裏手から山に登って森の中を散策した。町が一望できる丘に通じる道がお気に入りだった。イエナの町は中央の広場を中心に古い街並みが広がっていて、商店や近代的なモールも中心にある。ゲストハウスから町の中央に徒歩で買い物に向かう生活を送っていたが、ある時、趣味で子供たちにサイクリングを教えているという小学校の先生を紹介してもらい、自転車を格安で譲っていただけだ。自転車を購入してからは格段に行動範囲が広がった。ラボの方にサイクリングにも連れて行っても

らい楽しみが増えた。

食事は簡単な自炊が中心だった。スーパーでは寿司が並んでいたの、お米を欲した時は助かった。生魚でなくて海苔やアボガド、照り焼きチキンの巻き寿司であったがおいしかった。イエナで予想外だったのは、住んでいる人々の人種が多様であったことだ。大学町であることも関係しているのか、色々な国を故郷にもつ人々が来ているようだった。そのためトルコやギリシャなど地中海料理やベトナム・中華などアジア料理屋があり、食事で困ることはあまりなかった。イエナ市が属するチューリンゲン州のソーセージやビールも堪能した。秋に差し掛かるころ、ドイツの伝統的な料理店を知っているから週末に昼食へ行かないかと技官さんに誘われた。町の中にあるかと思いきや、当日は3時間近くも森の中を歩いて、やっと辿りついた先に小さな木造の小屋があった。そこが目的の店で、鹿やカモ肉、うさぎ肉料理など日本で馴染みのない肉料理が出てきた。臭みもなく、とても空腹だったのでががつ食べてしまった。肉料理のお供はやはりジャガイモで、この地方で馴染み深いクロスと呼ばれる巨大なジャガイモ団子だった(図1)。帰路は森の中で日が暮れてしまって、私の前を歩く技官さんを見失ったらこの深い森から永遠に抜け出せないのではと思った。木々の合間からイエナの街明かりが見えた時は本当に安堵した。

かつてドイツは民主主義の西ドイツと社会主義の東ドイツに分かれていた。ラボの年配の方の一人は旧東ドイツ出身で、歴史に翻弄された自身の半生についてよく語っていた。ある時期はウラン鉱山で働いていたが、冷戦後の核軍縮の影響で鉱山が閉鎖になったことや、またある時期は解放されたベルリ

ンの壁を切り崩す仕事をしていたことなどを教えてくれた。色んな話を聞いても、私が生きてきた日常とかけ離れ過ぎていて、彼の人生を簡単には想像できなかった。イエナ市の周囲の山々にはかつて軍事基地があったようだ。その一角には、西側に向けてミサイルが配備されていたと教えてくれた。それは私がいつも呑気に散策していた丘だった(!)。旧東ドイツの町に住んだことで、ドイツの困難な過去や昔の世界情勢を実感できたのは貴重な体験だった。

4. 帰国

2020年春先に新型コロナの感染が瞬く間に世界で広がった。ドイツの行政機関の対応は刻々と変わり、3月には食堂が突然閉鎖されて、その一週間後には大学の活動が無期限で停止されることになった。この状況ではどうにも研究を続けることができなくなったため、帰国するに至った。私の渡独生活は突然終わりを告げたのだが、ドイツでは今まで知らなかった技術や日本とは違う分析上の作法を沢山学ぶことができた。こうした経験は2021年から始まったリュウグウ試料の分析への備えにもつながったので、未知の世界に飛び込んでみてとてもよかったと思う。

コロナの流行やリュウグウの初期分析が落ち着いたころ、Dennisが私の現所属先の京都大を訪ねてきた。彼は現在ヨーロッパ宇宙機関の関連グループに所属していてJAXA本部に用務があったらしいのだが、わざわざ関西に足を運んでくれた。海外研究者と交流し合うきっかけにもなるので、機会を見つけて海外研究することをおすすめしたい。

著者紹介

松本 徹

京都大学白眉センター 特定助教.大阪大学 大学院理学研究科 宇宙地球科学専攻 博士課程修了. 博士(理学).JAXA宇宙航空プロジェクト研究員,日本

学術振興会特別研究員PDなどを経て2021年10月より現職. 日本惑星科学会, 日本鉱物科学会, 日本顕微鏡学会などに所属.

New faces

西川 泰弘¹ (高知工科大学 システム工学群 電子・光系)

2020年12月にパリ大学の地球環境宇宙物理学専攻(Sciences de la terre et de l'Environnement et Physique de l'univers, Paris)で博士号を取得し、現在は高知工科大学の宇宙地球探査システム山本研究室でポスドク助教を務める西川泰弘(にしかわ やすひろ)です。専門は惑星地震、インフラサウンド、津波、ペネトレータです。分野に節操なさそうに見えるかもしれませんが、長周期の波の研究に取り組んでいます。学位取得後、高知工科大学にきてもう三年目で、2023年の12月がNew face 投稿の最後のチャンスということで、寄稿させていただきます。

自然科学や研究者に初めて興味を持ったのは小学生の頃で、テレビでたまたまやっていたツイスターという映画を見たのがきっかけです。その映画は名前の通り竜巻の映画で、竜巻研究者が主役の映画でした。巨大竜巻の被害を防ぎ、発生や進路の予報を行うために、命懸けで竜巻のデータを取りに行く主人公たちに、幼いながらも心踊らされました。映画から始まった自然の研究がしたいという思いですが、成長するにつれて徐々に薄れていき、中学高校では器械体操と囲碁に全ての力を注いだため、物理の波のテストで0点を取る始末でした。いま波の研究をしているのが信じられません。東京大学理科二類に入学した後もあまり熱心に勉強していたわけではなく、器械体操を続けつつSASUKEに出たり、週三でディズニーランドのパレードにダンサーで出たりとよくわからない生活を送っていました。それでも自然研究者への思いはうっすらと残っていたようで、なんとなく漠然と海みたいな大きなものを研究したいと思っていました。

転機となったのは大学の二年生の時に受けた惑星科学の授業でした。その授業はオムニバス形式の授



業で、先生方が週替わりで自分の研究の紹介をするもので、そこで比較惑星学というものを知り、感銘を受けたのを覚えています。こうして自然科学への興味が再燃し、かつ比較惑星学にあてられた自分は惑星科学の道を進むことになりました。進学先を地球惑星物理学科に決め、そろそろ修士の進学先をどうするかというタイミングでJAXAの火星探査ミッションMELOS(Mars Exploration of Life-Organism Search)のお手伝いをする事となります。MELOSはオービターとランダーの2機からなる火星総合探査の計画で、着陸機に地震計を搭載することが検討されていました。惑星地震学との出会いです。惑星探査に関わりたいと思っていた自分にはうってつけで、修士は東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻の地震研究所栗田研究室に進学し、火星地震計に取り付ける風よけの開発を行いました。栗田研究室では4名の同期を含め、たくさんの仲間や副指導教員の新谷昌人教授に支えられ、流体シミュレーションと風導試験を組み合わせて広帯域火星地震計にとりつける風よけの開発に成功しました[1]。

博士課程はそのまま東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻に進学しましたが、次の研究をどうするか迷っていました。火星の研究をやりたいけど何

1. nishikawa.yasuhiro@kochi-tech.ac.jp

をすればわからないその迷い具合はなかなかのもので、火星のソーラーパネル、砂粒子の飛散、風力発電などの迷走を行っていました。二度目の転機となったのはそんな迷走中に参加した国際惑星科学のサマースクールでした。サマースクールで色々な国の学生と交流を深めていたところ、IPGP(パリ地球物理研究所)の Philippe Lognonné 教授に声をかけていただきました。曰く「火星の地震に興味があるのならフランスに来て博士の研究として火星地震探査(InSight mission)を手伝わないか? 奨学金の審査が通れば給料も出せる」と。自身の惑星探査へのモチベーションの行き先を見失っており、かつバイトしながら大学に通っていた自分にとってまさしく渡りに船でした。CNES(フランス国立宇宙センター)の奨学金にも受かり、博士二年の秋からパリ大学の地球物理研究所で研究することになりました。パリ大学での生活言語は英語とフランス語が8対2くらいで、英語すらおぼつかないのに議論がヒートアップすると突然フランス語に変わったりとなかなか苦戦させられました。しゃべれないと文字通り生きていけない環境でしたので必死に会話を理解したり理解したふりをしたりしていました。当時ポスドクで同じくIPGPにきていらっしやうった川村太一氏には研究でも私生活でも大変お世話になりました。そんななかで InSight 計画の会議に参加しつつ自分の研究も進めていくというのはとても大変でかつ充実した日々でした。博士課程で取り組んだテーマは「全球気候モデルを用いた常時火星自由振動の計算」[2]で、プレートテクトニクスが存在しない火星で地震の震源候補の一つでした。残念ながら探査機に搭載される地震計ではこの常時火星自由振動は計測が難しいという結論になりましたが、自分のパソコン上で火星地震の波形が出た時は非常に興奮したのを覚えています。こうしてパリ大学での生活を楽しんでいる間にちょっとした出来事が起きました。打ち上げの直前に InSight の地震計パッキングに不具合が見つかったのです。あの日のことはよく覚えていて、大学につくなり関係者が全員集まられてミーティングを行い、不完全なまま火星に送るか、打ち上げを2年延期してもらうように NASA に頼むかの議論を行いました。それは InSight 計画で最も重苦しいミーティングでした。議論の結果、打ち上げを2年延期してもらうようお願いすることとなりましたが、これは

苦渋の決断でした。なぜなら決定権は NASA 側にあり、場合によっては地震計の開発から IPGP が外されて NASA に引き継がれたり、そもそも InSight 計画が丸ごとキャンセルになる可能性もあったからです。幸い打ち上げは2年延期で引き続き IPGP が地震計の開発を行うことになりましたが、返事を待っている間は生きた心地がしませんでした。そんなわけで計画に2年余裕ができ、自分の博士号取得も急がずゆっくりやればいやと余裕を持って研究を続けていた時、人生最大のミスをおかしてしまいました。ただらだと博士論文を書いている間に東京大学側の指導教員である栗田教授が退官なされたのです。それ自体は特に問題ではなく、自分も「パリ大学で博士号を取るからいいや」と考えていましたが、日本の指導教員の退官がパリ大の身分に影響したのです。自分は当時、パリ大学には Co-Thesis というシステムで在籍しており、これは「二人の指導教員で一人の学生に博士号を取らせる」という制度でした。この制度は片方の指導教員がいなくなった時点でもうパリ大には在籍できないという規定があり、自分だけでなく関係者全員がこの細かい規定まで理解しておらず、滞り延長のための書類をもらいに行ったときに告げられてとても驚きました。Philippe も栗田教授も川村太一氏もなにかないかと色々手を尽くしてくれたのですがなんともならず、InSight の打ち上げ前に博士号も取れないままというぐちゃぐちゃな状態でドミノ倒しの様に日本に帰ることになりました。日本に帰った後は働きつつもたまに入ってくる InSight の打ち上げや火星で撮った写真、地震のデータなどを死んだ魚の目で見っていました。企画から参加していた計画の一番盛り上がる瞬間を蚊帳の外から見ることしかできず、悔しい思いをしていました。このまま終わるかと思われた惑星科学の道ですが、ミラクルが起きます。川村太一氏がパリ大学で任期なしの職位を得られたのです。これも自分の博士号とは全然関係ないような話に思えますが、その時にパリ大学にお伺いを立ててみたのです。その内容は「Co-Thesis のシステムは二人の指導教員で一人の学生を指導して博士号を取らせる仕組みで、自分はその最中に片方の指導教員が退官してしまったためほとんど終わっていた博士号の取得を中断しました。しかし当時ポスドクと一緒に研究し、指導をもらっていた川村太一さんがこの度正式にパリ大学の教員になった

ので、これでPhilippeと太一の二人の教官の指導ということでCo-Thesisの条件を満たしているのではないか?」というもので、いま見てもヤケクソすぎる謎理論ですし、ほぼほぼ屁理屈です。ダメ元で送ってみたこのメールですが、意外なことにパリ大から許可がおりたので、働きながら博士論文を書き、オンラインで博士論文審査会を行い、2020年12月に無事博士号を取得することができました。人生何が起きるか分かりません、川村太一様です。博士号を取得した後はアカデミックに戻るかこのまま仕事を続けるか悩みましたが、死んだ魚の目をしていた頃を思い出すと泣きそうになるので惑星科学を続けることにしました。現在は2021年の夏から高知工科大学で山本真行教授の宇宙地球探査システム教室でポストドク助教に就き、惑星科学を続けています。惑星地震学以外にもベネトレータ(投下貫入型観測装置)とインフラサウンドに興

味があり、JAXAの田中智教授と一緒にベネトレータの開発をして第64次南極地域観測隊に選ばれて南極大陸でベネトレータを投下してきたり、火星探査に使えないかの検討を行ったり、HAYABUSA2の帰還カプセルの観測を行ったインフラサウンドセンサー[3]を持ってアメリカのネバダまで行ってOSIRIS-RExの観測に行ったり[4]と、色々なことに挑戦させてもらっています。

一度は諦めた身ではありますが今後の惑星科学の発展に貢献できるよう、尽力していきたいと思っていますので、みなさまどうぞよろしくお願ひします。

[1] Nishikawa, Y. et al., 2014, PSS 104, 288.

[2] Nishikawa, Y. et al., 2019, SSR 215, 1.

[3] Nishikawa, Y. et al., 2022, PASJ 74, 308.

[4] Witze, A., 2023, Nature 623, 230.

小林 真輝人² (東京大学)

惑星科学会の皆様、こんにちは。小林真輝人(こばやし まきと)と申します。2023年3月に東京大学大学院理学系研究科・地球惑星科学専攻で博士号を取得し、現在は同大学院工学系研究科で特任研究員として研究を進めています。このたび、遊星人にNew Face記事を執筆させていただく機会をいただけることとなり、せっかくの機会ですのでこれまでの経歴や研究内容を含めて自己紹介させていただければと思います。

私が惑星科学分野に興味を持ったのは比較的遅く、遡ること中学3年生の頃でした。出身中学では授業の一環で“卒業論文”を執筆する機会があり、“何かの第一線でご活躍されている方へインタビューをし、その内容を含めて執筆する”というのが要件でした。当時は特に何かに対して強い興味があるわけではなかったのですが、その頃偶然参加したセミナーをきっかけに、阪本成一氏(現・国立天文台教授)に人類の火星表層利用についてお話を伺いました。その際に、打ち上げ直前の金星探査機・あかつきを見せていた



き、漠然と太陽系探査に関わりたいという夢を抱いたのが研究者を志すきっかけとなりました。その後、現在もお世話になっている宮本英昭氏らの著書「惑星地質学(東京大学出版)」を書店で偶然手に取り、固体天体の表層環境への興味が深まりました。同書を大学受験で上京した際にキャリアケースに入れ、受験終了後のホテルで拝読していたことを今でもよく覚えています。今思えば、このような巡り合わせが重なり、現在の研究生活に繋がっていることを思うと不思議なものです。

さて、前置きが長くなってしまいましたが、私の研究内容について経歴とともにお話させていただければ

2. mkobayashi@seed.um.u-tokyo.ac.jp

と思います。東京大学入学後、後期課程で理学部・地球惑星環境学科に進学しました。4年次での研究室配属に先立って、地球惑星科学専攻・河合研志氏やイタリア・ダヌンツィオ大学の小松吾郎氏らのご指導のもと、火星にも見られる地質構造の1つ、泥火山の研究を始める機会を得ました。泥火山とは、地下の泥が地表や海底に噴出して形成される、泥の池(マッドポッド)や小丘(グリフォン)などの地形の総称です。この地形は、地下の泥の噴出源での微生物活動により生じるメタンガスが1つの駆動力となり得ることから、地質学的観点のみならず、アストロバイオロジー的観点からも注目されています。研究においては、高温(100°C程度)の泥が噴出する秋田県・後生掛温泉の泥火山をフィールドとし、地質学や岩石学に基づきその成因を探りました[1]。一般的な泥火山と比べて泥の供給源となる母岩層の深さが浅いこと、駆動力の原因として鉱物からの脱水が寄与している可能性を発見し、同内容で卒業論文を執筆しました。3年次には、大学の留学プログラムを利用してダヌンツィオ大学に2ヶ月ほど留学する機会をいただき、小松氏のもとでリモートセンシングデータに基づく火星泥火山の形態分類や、地球泥火山の鉱物学的特徴に基づく分類なども進めました。当時右も左もわからない一学部生を受け入れていただき、両氏に地質学に関する基礎を身につけさせていただいただけでなく、研究の第一歩を踏み出させていただけただけでなく、研究の第一歩を踏み出させていただけただけでなく、大変感謝しております。

その後、修士課程からは宮本英昭氏のご指導のもと、電磁波を用いた地下探査手法の開発及びデータ解析に重要となる電気特性(誘電率)について研究を進めています。地球の地質学では、露頭の観察が基本となります。しかし、表層がレゴリスやダストで覆われる地球以外の固体天体においては露頭の観察は容易ではありません。このような状況で、どのように露頭観察と同様に情報を取得し、層序や地質構造を知ることができるかを考えた際に行き着いた一つの答えが電磁波探査でした。特に博士課程までは、主に地中レーダー(GPR)に焦点を当て、地下浅部の探査手法及び解析手法を開発してきました。

GPRはUHF-SHF帯の電磁波をアクティブに照射し、物質の境界面で反射した電磁波を検出することで地下情報を得る物理探査手法です。GPRから得られるデータから、地下の物質境界面の存在を定性的に

捉えることは比較的容易ですが、詳細な地質学的議論に重要となる地層の厚さや組成などの情報を得るには物質の誘電率が不可欠です。そこで、LUPEXなどでGPRの運用が予定されている月面の誘電率について、実験的制約を進めてきました。具体的には、月面に存在するような岩石や鉱物を収集し、シミュラント(模擬物質)として模擬月環境下で誘電率を測定しました。その結果、物質ごとに異なる温度依存性を持つことがわかりました[2]。特に、水氷の誘電率は温度依存性がほとんどないことを考慮すると、これまで金属鉱物の濃集との区別が難しかった水氷の濃集領域を、異なる温度下での電磁波探査の実施により特定できる可能性もわかってきました。この手法を電磁波探査により得られたデータに適用することで、月・火星での氷の存在や分布などの解明に繋げていきたいと考えております。また、並行して、通常のGPRでは正確な推定が困難な誘電率を計測できる機構をもつGPRの開発や、最近では簡素なコンポーネントで構成された数百g程度の誘電率計測計の開発も進めています。

博士課程後半からはより高周波数帯(テラヘルツ帯など)を用いた地下の誘電率計測やそこから得られる地下情報についても検討を進めています。こちらはパッシブ観測により全球的な観測を行うことで、地下浅部の物質や物理特性に関する情報が得られると期待しています。このような知見をもとに、電磁波探査で得られたデータを観測機器や手法ごとに断片的に解析するだけでなく、相補的に活用することで、月だけでなく、火星や小惑星の地下構造や地下物質情報を取得し、地質学や岩石学と結びつけて、固体天体表層進化の解明に役立てたいと考えております。

最後になりましたが、惑星科学会の皆様には様々な場面において大変お世話になりました。スペースの都合上、この場ではお一人お一人に感謝の意をお伝えできませんが、惑星科学分野の発展に貢献することで恩返しできるよう、今後とも研究に励んでまいりたいと思います。未熟な自分ではございますが、今後とも何卒よろしく願いいたします。

参考文献

- [1] Komatsu, G. et al., 2019, *Geomorphology* 329, 32.
- [2] Kobayashi, M. et al., 2023, *EPS* 75 (1), 1.

日本地球惑星科学連合2023年大会 学生優秀発表賞 受賞者紹介

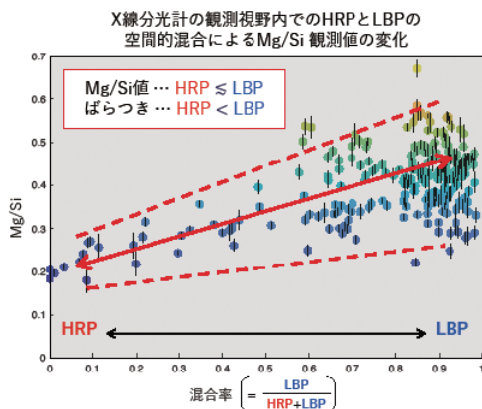
本学会が団体会員として参加している日本地球惑星科学連合の2023年度大会(5月21日-5月26日、幕張メッセ)において、本学会の学生会員の中から5名の方が「学生優秀発表賞」を受賞されましたので、ご紹介いたします。項目は、(1)氏名、(2)所属、(3)学年、(4)発表題目(英語)、(5)発表題目(和文)、(6)発表内容、(7)受賞コメント、の順です。

- (1) 平田 佳織 (ひらた かおり)
- (2) 東京大学大学院 理学系研究科 地球惑星科学専攻
- (3) 博士課程2年
- (4) Determination of chemical composition units on Mercury by the multivariate analysis using major element composition measured by MESSENGER XRS
- (5) MESSENGER X線分光計による主成分元素比データの多変量解析を用いた水星表面化学組成ユニットの同定
- (6) MESSENGER探査機により取得された水星表面元素組成データはスペクトルや地質データよりも空間解像度が低く、その不均質分布は詳細に解明されていない。本研究では、元素組成とスペクトル区分の関係性を解明するために、低空間解像度を表現する混合モデルを構築し、カロリス盆地周辺でのス



ペクトル区分に対応するMg/Siを推定した。盆地内部の高反射率平原(HRP)は一律に小さいMg/Si値(~0.2)を示したのに対し、外部の低反射率平原(LBP)はMg/Siに大きなばらつき(~0.2-0.5)を示し、LBP内の異なる地質区分の地面が異なる元素組成をもつ可能性が示唆された。

- (7) この度の受賞を大変光栄に存じます。指導教員の臼井寛裕先生や議論して下さった研究グループの皆様にご感謝申し上げます。BepiColomboミッションでの本格的な水星観測に向けてより一層精進して参ります。今後ともどうぞよろしくお願ひ致します。

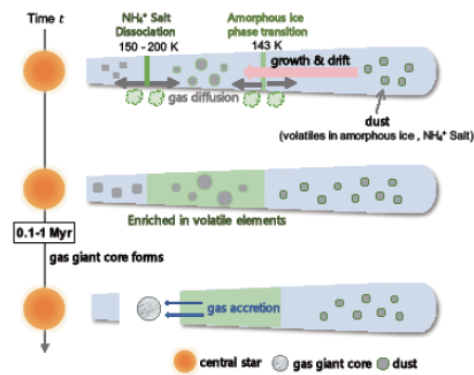


- (1) 中澤 風音 (なかざわ かのん)
- (2) 東京工業大学 地球惑星科学系 地球惑星科学専攻
- (3) 博士2年
- (4) Hyper-volatile Element Transport to the Inner Region of Protoplanetary Disks and Jupiter Formation
- (5) 原始惑星系円盤内側領域への揮発性元素輸送と木星形成
- (6) 木星は大気中の揮発性元素(N, C, O, S, 希ガス...)組成が太陽に対し一律に2.4倍濃縮されているという顕著な特性を持つ。木星組成を説明する形成機構を明らかにするため、本研究では、揮発性物質を捕獲した非晶質氷と半揮発性のアンモニウム塩という2種のキャリアを導入し円盤および惑星大気の組成進化を計算した。その結果、円盤内側($r < 5$ au)



で揮発性物質の蒸気が放出され、木星軌道近傍で形成した惑星に木星と同等かそれ以上の揮発性元素がもたらされることが分かった。

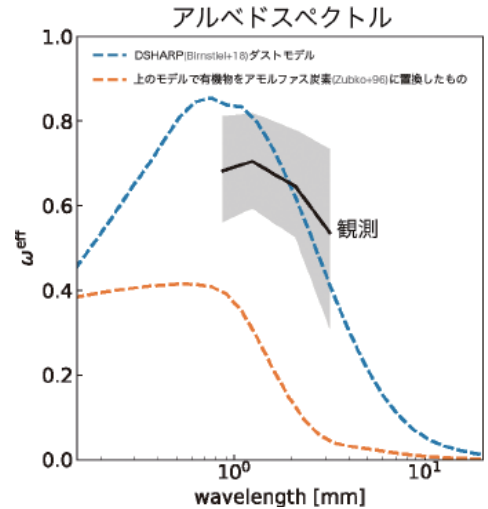
- (7) JpGU 2023 の学生優秀発表賞を頂き、光栄に思います。本研究は近年彗星で観測された新たな物質，“塩”を手がかりに木星形成史を探るものです。今後観測/理論、また物理/化学の横断的な研究により太陽系形成の解明に挑戦したいと思います。



- (1) 吉田 有宏 (よしだ ともしろ)
 (2) 総合研究大学院大学 物理科学研究科 天文科学専攻
 (3) 博士1年
 (4) Observational constraints on the dust albedo in a protoplanetary disk
 (5) 原始惑星系円盤におけるダストアルベドの観測的制約
 (6) 原始惑星系円盤中のダスト粒子の光学特性を観測的に制限することは、ダスト粒子の集積・合体により進行する惑星形成過程を議論する上で非常に重要である。本研究では、新たに開発した、分子輝線放射を用いる手法を用いて、TW Hya円盤中のダストのミリ波帯におけるアルベドが0.8程度と高いことを明らかにした。高いアルベドは、よく用いられているDSHARPダストモデルにおいて、炭素がアモルファスとして含まれるものが観測と整合的でないことを示唆する。
 (7) この度は榮譽ある賞をいただけて大変光栄に思い



ます。共同研究者の野村英子氏、塚越崇氏、古家健次氏、土井聖明氏には心より感謝申し上げます。さらに精進していく所存ですので、今後ともよろしく願います。



- (1) 吉田 雄城 (よしだ ゆうき)
 (2) 東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻
 (3) 博士3年
 (4) Simulating dust monomer collisions: expansion of the JKR theory
 (5) 分子動力学シミュレーションで探るダストモノマー間相互作用: JKR理論の拡張
 (6) ダスト成長シミュレーションを行うには、正確なダストモノマー間相互作用が必要となる。本研究は、分子運動まで遡ってモノマー間相互作用を明らかにするため、モノマー衝突の分子動力学シミュレーションを行った。その結果、熱化による衝突エネルギー散逸が確認され、衝突速度が大きいほど散逸が強くなることを示した。そこで我々は新たな散逸力を導入することによって、衝突エネルギー散逸を再現するモデルの構築に成功した。
 (7) この度の榮譽ある賞を受賞できたのは指導教員の小久保英一郎先生、共同研究者の田中秀和先生のおかげです。また、JAMSTECの荒川創太さんは



よく議論して下さい, 本研究を進める上で非常に参考になりました. 感謝を申し上げます.

(1) 根岸 昌平 (ねぎし しょうへい)

(2) 名古屋大学大学院 環境学研究科 地球環境科学専攻

(3) 博士後期課程1年

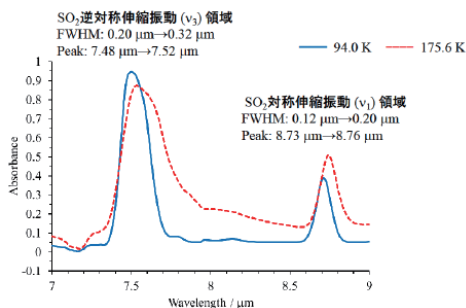
(4) Mid-infrared imaging spectroscopy of solid SO₂ simulating the environment of Jupiter's moon Io



(5) 木星衛星イオ環境を模擬した二酸化硫黄固体の中間赤外線イメージング分光

(6) 木星衛星イオの低温低圧な環境を再現可能なクライオスタットを開発し, 実験室でイオ表面に存在する二酸化硫黄固体を堆積してその中間赤外線分光撮像を行った. 二酸化硫黄固体の透過吸収スペクトルは, 振動子強度が小さい対称伸縮振動領域のバンド強度がガスときよりも増強し, 二酸化硫黄分子が凝縮相中で起こす分子間相互作用に起因していると示唆した. また, 昇温によってバンド幅の増加やピークシフトが起き, イオ表面の温暖な地域では二酸化硫黄固体のアモルファスへの相転移や格子欠陥が起り得ることを示した.

(7) 指導教員の平原靖大先生をはじめ多くの方々のご指導ご鞭撻を賜り, この度は名誉ある賞を受賞するに至りました. 感謝を申し上げるとともに, 今後は自身の化学のバックグラウンドを活かし, 物質科学的なアプローチで惑星科学の発展の一翼を担えるよう邁進してまいります.



JSPS Information

- ◇日本惑星科学会第160回運営委員会議事録
- ◇日本惑星科学会第161回運営委員会議事録
- ◇日本惑星科学会第162回運営委員会議事録
- ◇日本惑星科学会第60回総会議事録
- ◇日本惑星科学会賛助会員名簿

◇日本惑星科学会第160回運営委員会議事録

期間:2023年8月9日(水)～8月17日(木)

議題:事務局体制検討作業部会の再編成について

運営委員会委員:

出席(23名)

竝木 則行, 今村 剛, 中村 昭子, 玄田 英典, 保井 みなみ, 奥住 聡, 関根 康人, 大竹 真紀子, 千秋 博紀, 小林 浩, 田中 秀和, 諸田 智克, 瀧川 晶, 白井 寛裕, 三浦 均, 横田 勝一郎, 中本 泰史, 亀田 真吾, 関 華奈子, 村上 豪, 百瀬 宗武, 野村 英子, 癸生川 陽子

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 steering@wakusei.jp 宛に投票

議題:

事務局体制移行について検討を再開するため, 将来計画専門委員会のもとに設置した, 「事務局体制検討作業部会」を再編成したく, その提案について承認を求める。

目的:

事務局の業務移転がほぼ完了し, 事務局の移行検討作業を再開する見通しがついた。そこで, 現作業部会を新たに編成して, 新作業部会の下で検討を行う。
なお, 現作業部会は, 本提案が承認され次第, 解散とする。
新作業部会の課題は以下の4点である。

- ・現在の委託から新事務局への移行によって生じる可能性のある課題の抽出
- ・新事務局の移転先(現在, 委託している木田氏への委託継続も含め)の提案

- ・ 移行に必要な手続きを勘案した適切な移行時期の提案
- ・ 移行時に引き継ぐ項目(学会サーバーコンテンツ含む)の整理

部会の構成:

諸田 智克(部会長), 小林 浩, 佐伯 和人, 佐々木 貴教, 平田 成, 千秋 博紀

期限:

この作業部会の活動は, 次期事務局体制について方針を出すまでとする.
運営委員会に方針案を説明した後に解散する.

審議結果:

議案は原案のとおり承認された(可23・否0).

以上

◇日本惑星科学会第161回運営委員会議事録

期間:2023年9月14日(木)~9月20日(水)

議題:

- ・ 本会事務局との契約及び保険料について
- ・ 事務局内規の制定について
- ・ 学会サーバシステム更新作業に伴う作業費の追加支払について

運営委員会委員:

出席(23名)

竝木 則行, 今村 剛, 中村 昭子, 玄田 英典, 保井 みなみ, 奥住 聡, 関根 康人, 大竹 真紀子, 千秋 博紀,
小林 浩, 田中 秀和, 諸田 智克, 瀧川 晶, 臼井 寛裕, 三浦 均, 横田 勝一郎, 中本 泰史, 亀田 真吾, 関 華奈子,
村上 豪, 百瀬 宗武, 野村 英子, 癸生川 陽子

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 steering@wakusei.jp 宛に投票

議題 1:

本会事務局の今年度の契約と事務員の社会保険契約に伴う保険料の支払い増分について, 承認を求める.

内容:

本会事務局の事務員の今年度の契約について, 詳細な契約内容が決定したため, その承認を求めたい.
契約書は添付ファイルのとおりである(議事録では省略する).

契約日は諸手続の関係上, 契約期間前日の2023年3月31日付けに遡って承認願いたい.

なお、事務員の氏名・住所・最寄りバス停については個人情報保護の観点から黒塗りとしている。

また、事務員の社会保険の契約に伴い、保険料事業主負担分の支払いの増分が必要になったため、学会の予算からの支払いをお願いしたく、承認を求めたい。

なお、支払見込額は月額27,189円、支払い開始は本年10月を見込んでいる。

社会保険手続きに関しては、事務員側の準備が5月末には整っていたにも関わらず、学会側の対応が著しく遅れてしまった。

本来であれば7月支払い開始となっていたはずであるため、3ヶ月分(7~9月)の相当額を事務員に補填するものとしてほしい。

審議結果:

議案は原案のとおり承認された(可23・否0)。

議題2:

事務局内規の制定と、事務局と直接、契約や相談等を行うための事務局担当者を総務専門委員会に配置することについて、承認を求めらる。

内容:

本会事務局事務員の社会保険契約に伴い、会則に事務局所在地の記載の必要性が緊急で生じた。

会則変更は総会での承認が必要であるため、今回は事務局内規の制定を行い、その承認を求めらる。

なお、内規案については以下に記載の通りである。

内規の制定については会則上、総会での審議・承認は必要ではないが、

事務局の内規が制定された旨は会則に追加し、10月の総会にて審議を諮る予定である。

また、事務局とのやり取りを今後も円滑に行うための事務局担当者を総務専門委員会に配置したく、その承認も求めらる。

なお、その旨も内規に記載し、内規が承認・施行され次第、事務局担当者として渡邊誠一郎会員が就任する予定である。

本人からは内諾を得ている。また、総務専門委員会への新規委員として、内規施行と同時に追加する。

内規案:

日本惑星科学会事務局内規

(目的)

第1条 本会の事務を処理するため、事務局をおく。

(事務局担当)

第2条 事務局との契約、業務の依頼等の連絡、相談、対応のため、総務専門委員会内に担当者をおくことができる。

(所在地)

第3条 本会の事務局は、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(Ogyaa's御池内)、におく。

(改訂)

第4条 この規定の変更は運営委員会の議決を要する。

2023年9月20日成立, 即日施行

審議結果:

議案は原案のとおり承認された(可23・否0).

議題3:

クレジットカード支払いシステム変更に伴う作業費の追加支払について, 承認を求める.

内容:

昨年から今年にかけての事務局体制に伴い, クレジットカード支払いのシステム変更が行われた.

そのシステム更新作業費の支払いを行う.

今回は突発的な作業を行い, カード会社の選定や決済テストの調整等に半年間の時間が費やされた.

従来 of 支払状況等を鑑み, 30万円程度の支払いが適切であると考えられる.

上記予定支払い額を作業従事者に確認して, 双方了承の金額を支払う.

審議結果:

議案は原案のとおり承認された(可23・否0).

以上

◇日本惑星科学会第162回運営委員会議事録

日時:2023年10月11日(水) 18:30 - 20:30

場所:アステールプラザ(美術工芸室)+オンライン

運営委員:

出席(19名)

竝木 則行, 今村 剛, 中村 昭子, 玄田 英典, 保井 みなみ, 奥住 聡, 関根 康人, 大竹 真紀子, 千秋 博紀, 小林 浩, 田中 秀和, 諸田 智克, 三浦 均, 横田 勝一郎, 関 華奈子, 野村 英子, 亀田 真吾, 百瀬 宗武, 癸生川 陽子

欠席(4名)

瀧川 晶, 臼井 寛裕, 中本 泰史, 村上 豪(委任状:4通)

オブザーバー:

藪田 ひかる(2023年秋季講演会組織委員長)

中島 健介(2024年秋季講演会組織委員)

渡邊 誠一郎(総務専門委員)

佐伯 和人(財務専門委員)

黒川 宏之(2023年学会賞選考委員長)

藤谷 渉(総務専門委員)

議題・報告事項:

1. 事務局移行の準備状況について(竝木 会長)

- ・ 「事務局体制検討作業部会の活動報告書」に沿って、事務局移転について経緯の説明がなされた。

1-1. 現在の事務局体制及び来年の契約について(渡邊 総務専門委員)

- ・ 「現在の事務局体制及び来年の契約について」という資料に基づいて説明がなされた。
- ・ しばらくは渡邊総務専門委員が事務局とのつなぎ役になる。
- ・ 契約に関する改訂の提案(先方の了解を得ている)が本運営委員会において承認された。

1-2. 事務局内規の制定及び会則変更について(保井 総務専門委員長)

- ・ 事務局員の社会保険の手続き上、会則または内規に事務局の所在地を記載する必要がある。
- ・ 事務局内規の制定とそれについての文言を付則に追加することとする。
- ・ 会則へ「会則の制定日、施工日」を追加する。
- ・ 以上の提案は本運営委員会において承認され、総会で審議される。

1-3. 今後の事務局運営体制について(諸田 事務局体制検討部会長)

- ・ 今後の事務局運営体制や財務関連・惑星サーバについて、他学会(惑星科学会、火山学会、地球化学会、SGEPSS)と比較しながら、現状と移行による問題の説明がなされた。
- ・ 現在の運営体制は惑星サーバーに最適化されており、事務局委託業者に現状と同様な機能・作業をお願いすると委託費100万円/年程度の増額が見込まれる。
- ・ サーバー機能、作業項目をシェイプアップする必要がある、運営委員会・各専門委員会で継続すべき・削減可能な機能・項目を検討していく。
- ・ 新体制は諸田智克会員、小林 浩会員、佐伯 和人会員、佐々木 貴教会員、千秋 博紀会員、平田 成会員。
- ・ スケジュールに関して、2023年内に部会・運営委員会で大まかな方針を決めるとの提案がなされた。
- ・ 学会誌の紙媒体での継続について議論すべきとの意見があった。
- ・ 予算管理を外注にしてほしいとの意見があり、外注すると70-80万円/年程度の経費がかかるとの説明がなされた。
- ・ 以上のことは本運営委員会において承認された。

2. 2023年秋季講演会報告(藪田 2023年秋季講演会組織委員長)

- ・ 参加登録者数は267名、予稿投稿数は200件であった。
- ・ 口頭発表数の調整をするため、SOCを試行的に設け、口頭希望の約35件の発表をポスターに移動した。
- ・ 講演会経費について、収入は1,341,728円、支出は1,414,440円であった。(10月11日現在。懇親会収支を除く)
- ・ 前財務委員長より、これまで懇親会費の余剰は毎年のLOCで引き継いできたが、その内容について記録する必要があるとの指摘があった。また、財務委員長より、懇親会費の余剰は今後学会(財務委員会)に吸収してはどうかとの提案があった。

3. 2024年秋季講演会実施案(中島 2024年秋季講演会組織委員)

- ・ 会期は9月24-26日、会場は九州大学 医学部 百年講堂。
- ・ 組織委員長は奈良岡浩会員。

- ・ 懇親会・一般講演会を開催するかは検討中。
 - ・ 講演会経費は1,260,000円の予定。
 - ・ 上記実施案は本運営委員会において承認された。
4. 財務委員会報告(横田 財務専門委員長)
- 4-1. 第17期下期一般会計・特別会計予算案
- ・ 予算案の説明がなされ、本運営委員会において承認された。
 - ・ 会費のクレジット決済代行用の口座を現委員長の個人口座に切り替える旨、報告がなされた。
- 4-2. 第16期下期一般会計決算報告書の修正について
- ・ 佐伯前財務専門委員長より、「2022年度決算の要確認事項について」という資料に基づいて報告がなされた。
 - ・ 会費収入の間違ひは、学生会員区分が間違ひて正会員一般になっていたのが原因。
 - ・ 購読料についても修正の報告がなされた。
 - ・ 以上は本運営委員会において承認された、総会で審議される。
- 4-3. 学会予算を扱う口座数の削減案について
- ・ 佐伯前財務専門委員長より、「財務関連業務シェイプアップ案」という資料に基づいて報告がなされた。
 - ・ 「決算報告における特別会計分離の廃止」と「管理する口座の削減」について提案がなされた。
 - ・ 特別会計は余剰金を運用するための役割もある、との意見があった。
 - ・ 以上は本運営委員会において承認され、総会で審議される。
- 4-4. 自然災害に伴う会費免除措置等について
- ・ 本運営委員会において審議されず、メール審議することとした。
5. 遊星人の発行状況報告(三浦 編集専門委員長)
- ・ つつがなく発行されている旨、報告がなされた。
6. 入退会状況報告(保井 総務専門委員長)
- ・ 現在の会員数について報告がなされた。
7. 第60回総会の議長及び書記の推薦について(保井 総務専門委員長)
- ・ 議長に石山 謙会員、書記に横田 康弘会員が推薦され、本運営委員会において承認された。
8. 2023年度最優秀発表賞・優秀発表賞選考結果について(黒川 学会賞選考委員長)
- ・ 発表賞には19名エントリーがあり、予稿の内容でセレクションを行った結果、10名が審査対象となった。
 - ・ 口頭発表と個別審査があり、最優秀発表賞に湯本航生会員、優秀発表賞に吉田 雄城会員と土井 聖明会員が推薦された。
 - ・ 上記は本運営委員会において承認された。
9. その他
- ・ 研究倫理・ハラスメントに関する学会指針を検討していく。

- ・ 委員長交代の準備をそろそろ始める。
- ・ 学会サーバの運用方針については、今期の運営委員会が責任を持つべき。
- ・ フットサル大会の開催についてomlで周知したい旨の提案があり、学会員の交流を図るためであればよいとの判断がなされた。

以上

◇日本惑星科学会第60回総会議事録

日時:2023年10月12日(木) 16:05-17:35

場所:広島市文化交流会館 3階 大会議室「銀河」
(〒730-0812 広島県広島市中区加古町3-3)

正会員数:628名

定足数:63名

参加人数:141名

委任状:102通(議長:99通, 保井 みなみ会員:2通, 中村 昭子会員:1通)

1. 開会宣言

保井総務専門委員長が開会を宣言。

2. 議長団選出

運営委員会からの推薦で議長に石山 謙会員, 書記に横田 康弘会員が選出された。

3. 議事

3.1. 審議事項

・第17期下期一般会計・特別会計予算案報告(佐伯財務専門委員)

2023年度予算執行状況について説明がなされた。

収入は例年通りとの報告がなされた。支出については、遊星人のページ増による増加と、秋季講演会費用が想定より20万円多くなることの報告がなされた。また、事務作業マニュアル化のため引継ぎ費用が計上されて一時的に赤字となるが、繰り越し金が900万円あり引継ぎ期間内は問題ないとの説明がなされた。

・第16期下期一般会計決算報告書の修正について(佐伯財務専門委員)

第16期下期(2022年度)一般会計の決算報告書において5,000円の端数が生じた問題の調査結果報告がなされた。調査の結果、新入会員の会員区分(学生会員と正会員一般)について手続き間違いが判明したと説明がなされた。

また、滞納分と購読料の付け間違いを修正した件と、今後は備考欄等に個人名は記載しない旨の報告がなされた。

これらの修正に伴うデータベース差し換えについて採決をとるとの説明がなされた。

・財務事務作業のシェイプアップについて(佐伯財務専門委員)

イーサイド撤退に伴い2023年度から事務作業が3倍になっており大学教員に担当できる量でなくなっているとの説

明がなされた。対策の方針として (1)一般会計への一本化, (2)管理する通帳(口座)の削減について説明がなされ、ひとつの口座で一般会計を管理する案の提案がなされた。

また、早期に業務委託法人への口座管理委託をお願いしたいとの説明がなされた。

・事務局内規制定に伴う会則の変更について(保井総務専門委員長)

4月から事務局業務を個人に依頼する体制になり社会保険・労働保険の契約が必要であり、体制変更に伴って事務局内規を作成したことの報告がなされた。

会則への内規と会則制定日・施行日の附記について採決を行うことの説明がなされた。

・質疑応答及び討論

財務事務作業シェイプアップの案に対して、今後もし大きな寄付があったとき特別会計が必要ではないかとの質問がなされた。佐伯財務専門委員から、統一といっても口座を消すわけではなく復帰は可能と説明がなされた。

・採択1

財務関係に関する審議事項の採決が行われ、賛成: 143, 反対: 0, 保留: 0により採択された。

・採択2

会則変更に関する審議事項の採決が行われ、賛成: 148, 反対: 0, 保留: 0により採択された。

3.2. 報告事項

・自然災害に伴う会費免除措置について(佐伯財務専門委員)

自然災害に伴う会費免除措置について説明がなされ、最近申し込みが少ないが気軽にご連絡いただきたいとの告知がなされた。

・2023年度秋季講演会開催報告(藪田2023年秋季講演会組織委員長)

2023年度秋季講演会の実施状況について報告がなされた。

参加申し込み267名、予稿200件であったと報告がなされた。

財政については物価高騰によりやや赤字になったとの報告がなされた

今回の運営にはLOC3名と学生11名に加えて試みとしてSOC(プログラム担当)を設けており、口頭発表の時間確保のためSOCにより申し込み約35件についてポスターへ回っていただいたとの報告がなされた。

申し送り事項として、今後発表時間を確保しつつ発表形式の希望を満たせる方法を考えていただけるとありがたいとの説明がなされた。

・2024年度秋季講演会開催案内(中島2024年秋季講演会組織委員)

2024年度秋季講演会の開催計画について報告がなされた。

開催期間としては2024年9月24日(火) -26(木)であり、福岡市内の九州大学医学部 百年講堂で対面開催を予定していると報告がなされた。

会場に関しては、費用の安い伊都キャンパスを用いる場合には、福岡中心部から遠い、ホテルもごく少数、交通障害の頻度が高いといった問題があり、確実性のため百年講堂を使用したいとの説明がなされた。また、感染症対策のため、参加者数×2程度の会場を確保したい旨の説明がなされた。これらの理由から百年講堂を使うために学会からの補助をお願いしたい、との説明がなされた。

・追加報告:事務局移行の準備状況について(竝木会長)

中本会員に検討いただいていた事務局移行については、事務員1名を雇用してサーバーを用意している状況であるが、今後5年10年後このままでは難しいとの説明がなされた。

諸田会員が今後の体制について検討を行っており、具体的案が決まったら総会で報告し、その半年後に決定したいとの説明がなされた。

-質疑

「半年後」とは具体的案を報告した総会の次の総会という理解でよいかとの質問がなされ、竝木会長からその通りとの回答がなされた。

3.3. 学会賞受賞式

・2022年度最優秀研究者賞(竝木会長)

野津翔太会員に対して、表彰状及び副賞が贈呈された。

・2023年度最優秀発表賞・優秀発表賞

-審査結果発表および講評(黒川学会賞選考委員長)

2023年度最優秀発表賞・優秀発表賞の選考経過が報告された。本年度は19名の応募があり2003年の設立以来最多であったとの報告がなされた。10名が本審査に進み、本審査は口頭発表と個別質疑で行ったとの報告がなされた。

最優秀発表賞を湯本航生会員が、優秀発表賞を吉田 雄城会員と土井 聖明会員が受賞したと発表された。

全体の講評として、本審査の発表はどれも優れていたが、スライドの見やすさや速度を見直すとよりよい発表になるという意見もあったことと、この賞が学生の皆さんのモチベーションになれば嬉しいとの説明がなされた。

-表彰状贈呈(竝木会長)

吉田 雄城会員と土井 聖明会員に対して、表彰状が贈呈された。

湯本航生会員に対して、表彰状及び副賞が贈呈された。

4. 議長団解任

5. 閉会宣言

保井総務専門委員長が閉会を宣言。

以上

◇日本惑星科学会賛助会員名簿

2023年12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)

・Harris Geospatial 株式会社

・株式会社ナックイメージテクノロジー

・株式会社ノビテック

編集後記

大学教員の皆さんはレポートの採点どうされているでしょうか。私も一度はchatG○○で課題文を入れてみるようにしています。試しに「日本惑星科学会の編集後記を200字程度で書いてください『時節ネタ』とすると…//皆さん、こんにちは。今号の日本惑星科学会の論文集をお届けいたします。本号では、我々のメンバーから寄せられた多彩な研究が掲載されており、惑星科学の最新の展望をお伝えできることを嬉しく思います。まず、今年火星の探査が活発で、新たな発見が相次いでいます。その中で、私たちのメンバーが火星の地質学に関する興奮を分かち合っております。また、地球外生命探索に関する研究も進行中で、宇宙における生命の可能性について考察しています。一方で、地球の気候変動に関する議論は重要性を増しており、我々の使命の一つは地球環境への理解を深め、

解決策を模索することです。気候科学への貢献を続けていきます。日本惑星科学会は、常に新たな挑戦に立ち向かい、知識の向上に取り組んでいます。皆様の研究や情熱が、未来の宇宙探査や地球の未来に寄与することを願っております。最後に、論文の執筆や審査に携わった皆様に感謝申し上げます。次号もより多くの刺激的な研究を期待しております。どうぞ、今号をお楽しみいただき、宇宙の謎に一步近づく手助けとなりますようお願いいたします。-ここまで//スゴいんですね! 晩秋の時節ネタ: クルミを集めるキャンパスのエゾリス、雪虫の大発生、住宅街のキタキツネの話を途中まで書いていたところですが、本号の入稿編集締め切りがHera探査機搭載の熱赤外装置TIRIの地上校正試験(@M電気)の日程と重なってしまい、つい… すみません、エゾリス話は1年後にまた。(関口)

編集委員

三浦 均 [編集長]

関口 朋彦 [編集幹事]

荒川 創太, 上根 真之, 岡崎 隆司, 小川 和律, 鎌田 俊一, 木村 勇氣, 黒澤 耕介, 小久保 英一郎, 坂谷 尚哉, 杉山 耕一朗, 瀧 哲朗, 瀧川 晶, 田中 秀和, 谷川 享行, 長 勇一郎, 成田 憲保, 野津 翔太, はしもと じょーじ, 濱野 景子, 本田 親寿, 諸田 智克, 山本 聡, 和田 浩二

2023年12月25日発行

日本惑星科学会誌 遊・星・人 第32巻 第4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(Ogyaa's御池内)

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。原稿のファイル形式は WORD, PDF, または、テキストファイル。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で

(<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(Ogyaa's御池内)

Tel: 075-708-5984

e-mail: staff@wakusei.jp



The Japanese Society for Planetary Sciences

