令和8年9月25日発行　年4回発行　第35巻3号　ISSN 0918-273X

惑星人



日本惑星科学会誌

Planetary People

September 2026 vol35 no 3

●火の鳥はやぶさ その37:
次世代小天体サンプルリターン
●火星衛星探査計画MMXその15,16
●金星あかつき その67
●系外惑星 その18 ●海外研究記 その21
●iSALE講習会 ●万博体験記 ●New faces

The Japanese Society for Planetary Sciences

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．投稿条件

①以下のいずれかの条件を満たすこと．

(a) 著者のうち少なくとも一名が日本惑星科学会学会員であること．

(b) 編集委員会が依頼した原稿であること．

②上記の条件を満たしていなくても，本誌の目的に適合し，編集委員会が特に認める原稿を掲載することがある．

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き」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き」参照）

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．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．

7．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．

8．投稿料・出版費

原則として無料．

日本惑星科学会誌　遊･星･人
第35巻　第3号
目　次

巻頭言　薮田 ひかる ・・・

Contents

Preface H. Yabuta 125

Phoenix “Hayabusa”: A tale of the future (37) — Toward the Next-Generation Small-Body Sample-Return Mission —
Hiroyuki Kurokawa, Yuri Shimaki, Takanao Saiki, Naoya Sakatani, Ryota Fukai, and 18 authors 126

Fly me to another moon world: Martian Moons eXploration (MMX) (15)
-The Journey journey of IREM: Voyaging through the ocean of high-energy particles beyond the Magnetospheremagnetosphere-
M. Aida, MMX IREM Team 142

Fly me to another moon world: Martian Moons eXploration (MMX) (16)
— SHV Ultra-High-Definition Camera System —
S. Mitsuhashi, H. Obata 151

Road to the first star: Venus orbiter from Japan(67)
— Formation of huge cloud discontinuity on Venus —
T. Imamura, Y. Maejima, K. Sugiyama, T. Satoh, J. Peralta, K. McGouldrick, T. Horinouchi, K. Ikeda 157

Tales of distant exoplanet worlds (18)
—Formation of hot Jupiters: The classic puzzle of exoplanet science—
Y. Kawai 160

Letter from planetary people working abroad (21) —No apartment, accused of shoplifting, but C'est la Vie! — A researcher's survival diary in Paris—
T. Kawamura 165

Report on iSALE tutorial (beginner's course) in 2026
Y. Matsumoto 173

Expo experience: Exhibiting the Ritsumeikan University booth
H. Nagaoka, Y. Nakauchi, K. Saiki 176

New faces
K. Nakazawa, T. Yoshida, T. Kimura, T. Okamoto 181

Book review 1
T. Muto 190

Book review 2
H. Miura 192

Book review 3
Y.-Y. Hayashi 194

Announcement of public offering for Space Science Incentive Award
Society for Promotion of Space Science 196

JSPS Information 197

《目次へ

巻頭言

はやぶさ2計画における小惑星リュウグウ試料の初期分析では，国内外の地球外物質学者約400名が協力し，太陽系物質進化をはじめとする多大な成果が挙げられ，今後もサンプルリターンを継続する必要性が再認識された．惑星物質探査における国際協力関係は何より著しく発展した．この初期分析の仕組みによって，初代「はやぶさ」で得られた経験を踏まえ，分析体制も着実に改良されてきた．そして，私はまだ参画していないが，火星衛星サンプルリターンMMXでは，はやぶさ2の分析体制をさらに拡張していく準備段階にあるようである．

一方で，アカデミアは，少子化や世代交代の加速に面している．はやぶさ2やMMX以降，20年後にも同じ体制を維持できるとは限らない．技術だけでなく，サンプルリターンへのパッションや使命感をいかに次世代へつないでいくのか．

中には，“やりたい人だけでやればいい”という考え方もある．もちろん，自発的な意欲は研究の原動力である．しかし，それでは研究対象や専門性が偏り，惑星科学が本来もつ多様性を維持することは難しい．限られた機関が担うというのもちがう気がする．これは個々の研究者の意欲だけに委ねるのではなく，惑星科学コミュニティ全体で考えるべき課題ではないだろうか．

同時に，すべての研究を探査計画中心に集約することが最善とも限らない．新しい探査は，多様な基礎研究や独創的な発想によって支えられているからである．

「伝わりやすい問いを追うこと」と「本質的な問いに挑むこと」は両立できる．しかし，前者だけが研究の価値を決めるものではない．

こうしたことは，私自身が取り組んできた地球外有機物研究にも通じる．1970～1990年代は試料中から新たな有機分子を発見すること自体が大きな成果であった．2000年代以降は，それらを初期太陽系の歴史を読み解く化学指標として活用する研究が大きく発展した．次の世代では，個々の分子だけでなく，有機物を惑星炭素循環の中で捉える視点が，さらに重要になっていくのではないだろうか．

私たちは20，30年後，どのような惑星科学コミュニティを次世代へ残したいのだろうか．それぞれの研究者が，それぞれの立場から惑星科学の本質的な問いに挑み続けられるコミュニティであってほしい．それが，未来の探査を支える原動力になると信じている．

薮田 ひかる（広島大学大学院先進理工系科学研究科）

《目次へ

火の鳥「はやぶさ」未来編 その37 ～次世代小天体サンプルリターンミッションの実現に向けて～

黒川 宏之[1]，嶌生 有理[2]，佐伯 孝尚[2]，坂谷 尚哉[2]，深井 稜汰[2]，岡田 達明[2]，癸生川 陽子[3]，青木 順[4]，熊本 篤志[5]，川村 太一[6]，田中 智[2]，浦川 聖太郎[7]，巽 瑛理[8]，末次 竜[9]，千秋 博紀[10]，石崎 拓也[2]，菅原 春菜[2]，湯本 航生[2,11]，高尾 勇輝[12]，菊地 翔太[13]，森 治[2]，津田 雄一[2]，次世代小天体サンプルリターンワーキンググループ

（要旨） 次世代小天体サンプルリターン（NGSR）ミッションは，軌道間輸送機（OTV）と着陸機から成る2機構成の探査機システムにより，火星軌道以遠の小天体からのサンプルリターンを実現し，太陽系創生の解明に迫る探査計画である．NGSRは，2026年5月に開催された宇宙理工学委員会において，MMXに続く2030年代前半の戦略的中型計画として宇宙科学研究所に推薦され，プロジェクト化を目指すこととなった．一方で，ミッションを取り巻く状況の不定性を受け，ワーキンググループでは彗星・D型小惑星・E型小惑星という複数の目標天体とそれぞれに対応するミッション内容・サイエンス目標について検討を進めてきた．本稿では，そうした経緯と最新の検討状況を報告する．

1. はじめに

1.1 小天体探査の発展：理学の視点

はやぶさ，はやぶさ2，そしてMMXへと続いてきた日本の小天体探査は，太陽系の物質を地球に持ち帰り，地上の最先端分析によってその成り立ちを調べるという，サンプルリターン探査の大きな流れを作ってきた．はやぶさはS型小惑星イトカワがラブルパイル天体であること，普通コンドライト隕石と小惑星とのつながりを明らかにした[1,2]．はやぶさ2はC型小惑星リュウグウから試料を回収し，始原天体における水と有機物の存在量と形態，そして外側太陽系に由来する小天体に関する理解を大きく前進させた[3–9]．MMXは火星衛星フォボスからのサンプルリターンを目指しており，火星衛星の起源と火星圏の進化，そして太陽系における外から内への物質移動について，その「受け手」の視点から新たな理解を与えることが期待されている[10]．

では，その次に私たちはどこへ向かうべきだろうか．一つの方向は，太陽系のより遠方を起源とする天体，あるいは太陽系形成以前からの記録をよりよく保持している可能性のある天体へ向かうことである．リュウグウ試料は，始原的な太陽系物質の理解を大きく進めたが，母天体における水質変成がその記録を書き換えたこともわかっている．太陽系には，より低温の環境で形成し保存されてきた天体，さらには太陽系形成以前の星間物質や分子雲環境の情報をとどめている天体が残されている．こうした天体の物質を実験室で分析するとともに，持ち帰ることのできない揮発性物質もその場で分析できれば，太陽系物質の起源，微惑星形成過程，そして惑星系形成に至る物質進化を，これまでとは異なる角度から調べることができる．

もう一つの方向は，内側太陽系を代表する天体へ

1.東京大学
2.宇宙航空研究開発機構
3.東京科学大学
4.大阪大学
5.東北大学
6.パリ地球物理研究所
7.松江工業高等専門学校
8.カナリア天体物理学研究所
9.大島商船高等専門学校
10.千葉工業大学
11.パリ天文台
12.横浜国立大学
13.国立天文台
hirokurokawa@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

向かうことである．地球型惑星は，内側太陽系に存在した固体物質が集積し，衝突・分化・変成を経験することで形成された．しかし，惑星に取り込まれる前の内側太陽系物質がどのような組成を持ち，どのような進化を経て微惑星・原始惑星・惑星へと至ったのかは，まだ十分には分かっていない．したがって，太陽系の外から内への物質輸送がハビタブル惑星の誕生に必須であったかは未解明である．こうした変遷を経験した天体の歴史を紐解くには，その場探査と帰還試料分析を結集し，母天体の集積進化史に迫る必要がある．

1.2 小天体探査の発展：工学の視点

このような理学的な問いに対して，工学的にも次の段階が求められている．はやぶさは，小惑星へのランデブー，タッチダウン，サンプリング，地球帰還という一連の技術を実証し，世界で初めて小惑星からのサンプルリターンを実現した．はやぶさ2は，より充実した近傍運用，複数回のタッチダウン，人工クレーター形成，地下物質へのアクセス，ローバ・ランダの展開など，小天体表面での探査能力を大きく広げた．MMXでは，火星圏というより遠い重力環境での往復探査，フォボス表面への着陸とサンプリング，そしてサンプルリターンが計画されている．これらの蓄積は，日本が小天体サンプルリターンを継続的に発展させてきたことを示している．

その先にある次世代小天体サンプルリターン（Next Generation Small Body Sample Return; NGSR）では，単に「次の小天体」へ行くだけではなく，より遠方の天体，より難度の高い往復軌道，より自在性の高い小天体近傍運用，そしてその場観測・その場分析・地上試料分析を組み合わせた新しい探査の形を目指す．探査目標の選定は，理学的価値だけでなく，工学的なロードマップと一体となって考える必要がある．さらには，ミッション期間，運用リソース，さらには打上げ機会といったプログラム的条件も当然考慮される．

本稿では，こうした理学・工学の発展を踏まえ，はやぶさ・はやぶさ2・MMXの延長線上にあるNGSRが実現を目指すこと，NGSRが指し示す日本の小天体探査の方向を紹介する．まず，NGSR検討の経緯を簡単に振り返り，次に候補となるミッション案につ

表1. NGSRの目標天体の候補．軌道要素はJPL Small-Body Database にもとづく．各天体の物理量・スペクトル型は [11-20] にもとづく．

候補案	NGSR-C	NGSR-D	NGSR-E
天体名	289P/Blanpain	(162998) 2001 SK162	(4660) Nereus
スペクトル分類	D型的	T/I/Z型	Xe型
直径[km]	0.32	0.8–1.9	0.33
アルベド	-	0.03–0.16	0.55
自転周期[hr]	8.85	68	15.17
近日点距離[au]	0.96	1.01	0.95
遠日点距離[au]	5.13	2.84	2.02
公転周期 [yr]	5.33	2.68	1.8
軌道傾斜角[deg]	5.9	1.7	1.5

いて，ミッション内容と科学目的を整理する．

2. これまでの経緯

2.1 2024年度の戦略的中型探査ミッション提案まで

NGSRの出発点は，はやぶさ・はやぶさ2・MMXに続く次世代のサンプルリターンとして，どのような小天体を目標とすべきかを広く検討することであった．2020年9月から2021年10月にかけて，有志による次世代SR勉強会において，科学的意義，探査の独自性，軌道成立性，技術的発展性などの観点から，候補天体の包括的な検討が行われた．

こうした検討において，理学・工学両面における発展性が強く意識されていた．2022年頃にNGSRを具体的なミッション案として提案していく段階において，親機と子機を組み合わせた探査機構成がノミナル案として提示されていた．この構成では，深宇宙航行，通信，電力，地球帰還などを担う親機と，小天体近傍での着陸・サンプリングを担う子機を分ける．その狙いの一つは，着陸・タッチダウン時に探査機全体を失うリスクを低減することであった．小天体表面への接近や接触は，サンプルリターン探査の中でも特にリスクの高い運用である．親機を安全な距離に保持し，子機が降下とサンプリングを担う構成にすれば，仮に一回の着陸運用に失敗しても，ミッション全体を直ちに失うことを避けられる可能性がある．また，子機を用いることで，複数地点でのサンプリングや，条件の異なる表面への反復的なアクセスもノミナル目標として視野に入る．

この構成には，より遠方の小天体を目指す上での現実的な理由もある．太陽から遠ざかるほど，必要な電力を確保するための太陽電池パドルは大きくなる．大型の太陽電池パドルを備えた探査機本体が，小天体表面に接近し，着陸またはタッチダウンを行うことは，安全性の観点から難しくなる．したがって，NGSRでは，探査機本体が直接着陸するよりも，親機から分離した子機が表面運用を担う構成のほうが，工学的に自然な発展形と考えられる．

このように，NGSRでは，理学的に魅力的な目標天体を探す作業と，親機・子機構成という新しい探査機アーキテクチャをどのように活かすかという検討が並行して進められた．親機・子機構成を採用するなら，複数回を前提としたサンプリング，親機・子機を組み合わせた探査，地球帰還を必要としない前提での子機の運用といった新たな探査戦略が可能となる．そのため，目標天体や搭載機器の検討も，この探査機構成によってどのような新しい科学が可能になるか，という観点から進められた．

その後，2022年4月から12月にかけて，太陽系科学GDI[1]および日本惑星科学会の「来る10年」第二期検討会との議論を通じて，NGSRが目指すべき理学目標の整理が進められた．この過程で，太陽系のより遠方で形成・保存された天体，揮発性成分や有機物を含む始原的物質，さらには太陽系形成以前の記録にアクセスすることの重要性が改めて認識された．こうした理学的要請と工学的構想の接点として，NGSRのノミナル目標天体には，木星族彗星289P/Blanpainが設定された(表1)．彗星核から試料を持ち帰ることは，科学的にはきわめて魅力的な目標であり，はやぶさ2がC型小惑星リュウグウで拓いた始原天体サンプルリターンを，より低温・遠方の太陽系物質へ拡張するものと位置づけられた．

一方で，この案は工学的・プログラム的には大きな挑戦を伴うものであった．2023年9月から2024年3月にかけて行われた宇宙研執行部との議論では，ミッションの科学的意義とともに，産業界との関係や，ミッション期間の長期化の観点が重要な論点となった．ここで産業界との関係とは，物価高騰や非宇宙科学の宇宙産業界の急速な発展の中，探査機製造の担い手となる産業界との関係において「民間に資する宇宙科学」の観点を従来に増して明示的に追求しなければならない情勢にあった点である．NGSRワーキンググループはこの点に対する対応として，親機を様々なミッションへ活用可能な共用性の高い軌道間輸送機(Orbital Transfer Vehicle; OTV)として実現することを提案していたが，その効果や実現性について宇宙研執行部とワーキンググループの間のみならず議論の場をJAXA全体に広げて多岐にわたる検討がなされた．また，長期ミッションであることによる成果創出リスクを低減するため，クルー

[1]Groupe de Discussion Intensive の略．宇宙工学・太陽系科学・宇宙物理学の3分野で設定され，理学・工学委員会と宇宙研当該研究系，コミュニティメンバーからなる．戦略的中型ミッション立案の母体となる．2026年にVision Groupとして発展的解散．

ジング期間および小天体近傍運用期間におけるサイエンスを充実させる方策も議論された．

2.2 短期ミッションの検討

このような状況を受けて，2025年4月から2026年1月にかけて，NGSRワーキンググループでは，軌道間輸送機の共用性，経済性の観点でベストバランスとなる設計点を模索する目的で，短期ミッション案の検討を行った．この時期にも，宇宙研内部では，遠方彗星サンプルリターンが長期ミッションとなることへの懸念が継続的に議論されていた．また，宇宙研からは，当初次期中型計画の想定コストは「2020年度物価で400億円」規模という仮の目安が提示されていたが，その後も急激に進行する物価高騰と宇宙産業構造の急激な変化の中，従来のコスト想定やプロジェクトの立ち上げ方では，次期中型計画の立ち上げは難しいという見通しも示されるようになった．目標天体が遠方になればなるほど，ミッション期間・共用性・経済性の観点で不利になる．すなわち，彗星289P/Blanpainをノミナル目標とする当初案は，理工学的意義は大きいものの，そもそもの中型計画立ち上げの観点およびミッション期間の両面で，そのままでは実現に向けたハードルが高いことがより明確になった．

一方で，宇宙戦略基金においては，軌道間輸送機OTVに関する公募が発出されたことは，NGSRにとって注目すべき情勢の変化であった．民間は様々なミッションに供しうる共用性の高い宇宙機の必要性を認識するようになってきており，宇宙戦略基金はそれを後押ししている．この状況下で，宇宙科学ミッションにおいても共用性の高い宇宙機を志向することは，民間と同じ方向を向いて新たな技術開発をしていく良い入口になるであろうと考えられた．すなわち，限られたコストと期間の中で産業界に後押しされる形でNGSRを実現するためには，「共用性の高い宇宙機（＝OTV）を用いた短期ミッション」として成立する案を見いだすことが，現実的に取り得るほぼ唯一の解であると考えられるようになった．

ただし，一般論としては共用性を高めることは単純な自由度の増加とは相反する方向性である．共用性を高めるということは，ミッション固有の最適化に自己規制をかけることであり，また事業者の開発方針をより重視することでもある．そのため，NGSRには，外部で定まるOTVの境界条件を受け入れた上で，目標天体，ペイロード，運用計画を柔軟に組み替えられるシナリオ上のフレキシビリティを確保する必要性が認識されるに至った．

このような背景のもと，太陽系科学GDIからNGSRワーキンググループに対して，短期ミッション案を具体的に検討するよう要請があった．短期ミッション検討では，従来の彗星サンプルリターン案の科学的意義を踏まえつつ，より短い期間で実現可能な目標天体とミッション構成が検討された．候補天体の評価においては，理学的価値だけでなく，軌道成立性，打上げ可能時期，ミッション期間が議論された．その結果，彗星の場合と同様に外側太陽系由来物質へのアクセスという方向性を持つD型小惑星2001 SK162と，内側太陽系由来物質や地球型惑星材料への接続を持つE型小惑星4660 Nereusが，短期ミッションの目標天体の候補として選定された（表1）．

2.3 複数の可能性を内包した現在のNGSRミッション案

さらに，2026年2月には，戦略的中型計画LiteBIRDの延期を受けて，NGSRの再提案時期が早まる可能性が生じた．一方で，打上げ時期は未確定であり，コストキャップについても厳しい見通しは大きく変わらなかった．そのため，NGSRワーキンググループでは，目標天体，打上げ時期，OTVの利用可能性，コスト上限といった境界条件が完全には定まらない状況に対応する必要があった．

こうした背景から，NGSRは，彗星サンプルリターンを唯一のノミナル案として深める段階から，複数のミッション案を境界条件に応じて比較する段階へと移行した．彗星サンプルリターン案（NGSR-C）は，太陽系のより遠方で形成し始原的情報を記録する天体を目指す長期的かつ挑戦的な案である．D型小惑星案（NGSR-D）は，その科学的方向性を一部継承しつつ，外惑星系の材料物質や初期太陽系の大動乱の起源に迫る案である．E型小惑星案（NGSR-E）は，外側太陽系物質ではなく，内側太陽系物質と地球型惑星の起源に迫る案である．この3つの案は，日本の小天体探査の科学的方向性のバリエーション

も内包している．

そして，2026年5月21日に開催された宇宙理工学委員会では，NGSRが次期中型計画として推薦された．これは，NGSRが，MMXに続く日本の小天体サンプルリターンの有力な候補として位置づけられたことを意味する．ただし，この時点で目標天体やミッション構成が最終決定されたわけではない．現在のNGSRは，次期中型計画としてプリプロジェクト化を目指しつつ，OTVの仕様，コスト上限，打上げ時期といった境界条件に応じて，どのミッション案を採用するのかを詰めていく段階にある．

3. 探査機構成

本節ではNGSRの探査機構成を整理する（図1）．前述の3つのミッション案では基本的な構成を共通としつつ，それぞれの目標天体に応じた仕様の最適化を行う．また，ミッション機器は必須機器群とオプション機器群に分けて整理している．必須機器群は，小天体サンプルリターンにおいて必須または標準的と位置づけられる機器群であるのに対し，オプション機器群は，目標天体やOTV仕様，利用可能な質量・電力・通信リソースに応じて搭載可否を判断する機器群である．ただし，ここでいうオプションとは，科学的な重要度が低いという意味ではない．なお，ここで述べる構成や機器は，現時点での検討案であり，今後のミッション定義や境界条件の具体化に応じて見直される可能性がある．

3.1 バス系

NGSRの基本となるのは，深宇宙航行を担う親機，すなわち軌道間輸送機（Orbital Transfer Vehicle; OTV）と，小天体からのサンプリングを担う子機，すなわち着陸機を組み合わせた構成である（図2a）．親機は，打上げ後の深宇宙航行，目標天体へのランデブー，通信，電力供給，姿勢・軌道制御，サンプルリターンカプセルの保持，地球帰還軌道への投入など，ミッション全体を支える役割を持つ．一方，子機は，目標天体近傍で親機から分離され，小天体表面への接近，タッチダウン，サンプリングを行う．採取された試料は子機から親機へ受け渡され，親機側でサンプルリターンカプセルに収納される．この親機と子機の分離・再結合を伴う深宇宙ランデブードッキングは，NGSRの工学的な特徴の一つである．

この構成の利点は，探査機本体を直接小天体表面へ接触させずに済むことである．遠方天体を目指す場合，親機には大型の太陽電池パドル，通信系，熱制御系，推進系などが必要となる．そのような大型の探査機本体が小天体表面に接近し，着陸またはタッチダウンを行うことは，安全性や姿勢制御の観点から難しくなる．一方，子機が表面運用を担う構成であれば，親機を比較的安全な位置に保持したまま，表面への接近，試料採取，必要に応じた複数回のサンプリングを行うことができる．また，親機と子機を組み合わせることで，同時運用による内部構造探査，一体となって行うサンプリングとその場分析など，新しい小天体探査の形を検討できる．

3.2 ミッション機器

小天体サンプルリターンを実現する基本的な装置群である必須機器群には，サンプラー，サンプルリターンカプセル，光学航法カメラ，LIDAR，熱赤外カメラ，近赤外分光計または近赤外カメラが含まれる．

オプション機器群には，その場分析装置，設置型地震計，バイスタティックレーダー，小型衝突装置が含まれる．特に，その場分析装置，設置型地震計，バイスタティックレーダーはNGSRの探査機構成・サンプリング運用を活かしつつ発展的な小天体探査を実現する重要機器として検討されている．小型衝突装置については，運用リスクとのトレードオフから必須機器と位置づけていないものの，天体の機械的物性の制約や地下物質へのアクセスを実現する重要機器である．

(1) 必須機器群

サンプラーは2つのサンプリング方式およびその併用を検討している．ニューマチック方式では，高圧窒素ガスの噴射により小天体表面の試料を舞い上げ，サンプラホーンで集約する．もう1つははやぶさ2でも採用された弾丸方式のサンプリング機構である．いずれの場合もサンプリング後は帰還用のサンプルコンテナおよびその場分析装置へ分配する．

サンプルリターンカプセルは，薄殻円錐形状ヒート

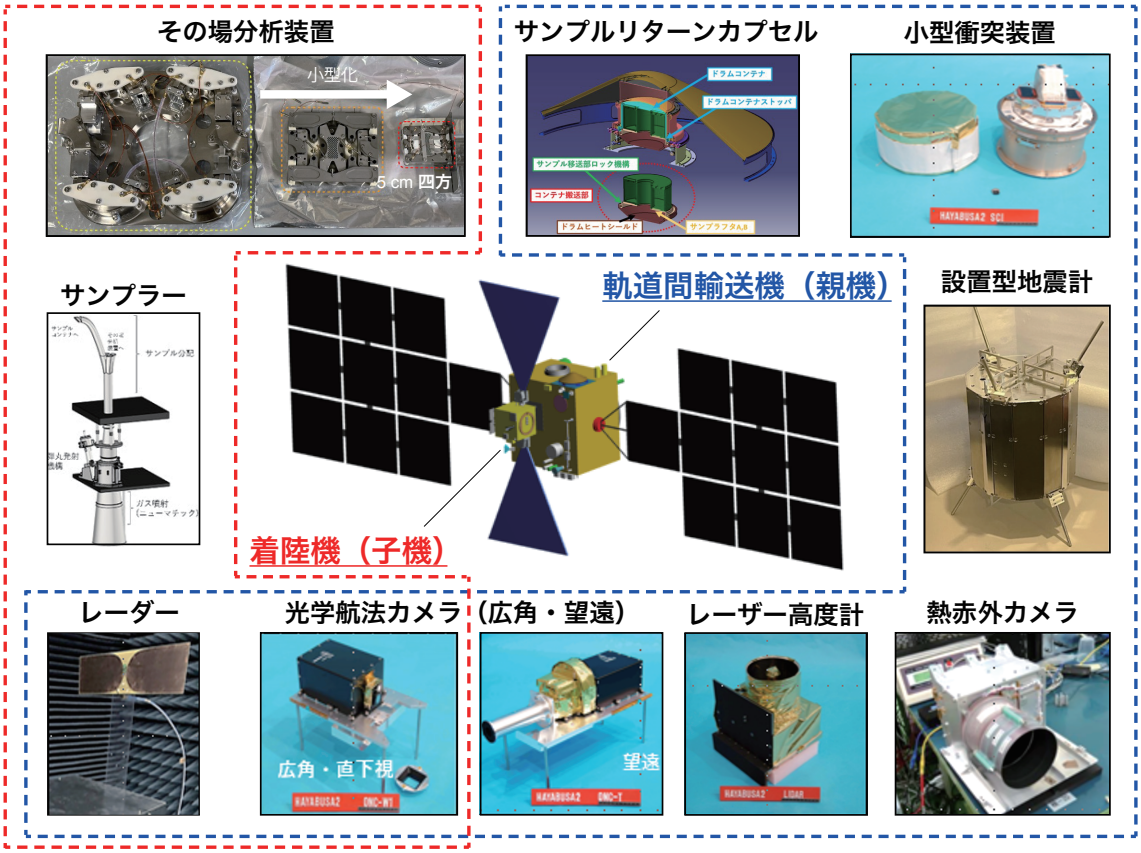


図1. 探査機とミッション機器の構成.

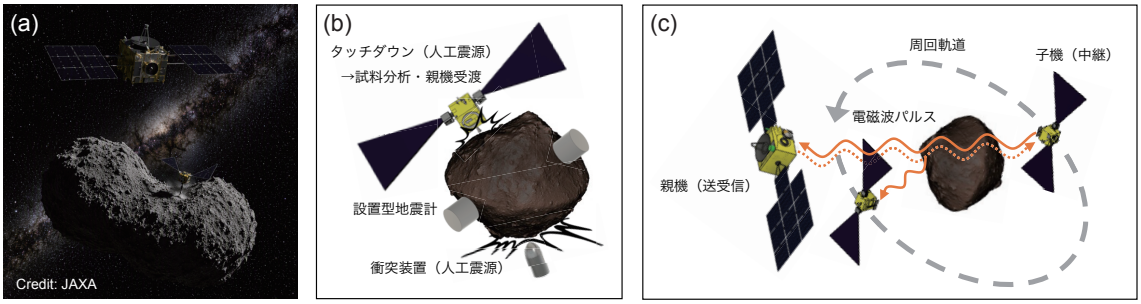


図2. (a) ミッションの概念図 (b) サンプリングおよび人工地震計測運用 (c) バイスタティックレーダー観測運用.

シールド，受動的衝撃吸収材を採用し，最大15 km/s級（彗星サンプルリターンの場合）の高速再突入に対応する．大気圏突入速度が異なる目標天体や軌道設計に応じ，最適化を実施する．

光学航法カメラは，目標天体への接近時の光学航法，天体形状・地形の把握，着陸・サンプリング地点の選定，表面状態の観測を担う基本機器である．検討案では，親機搭載カメラは望遠カメラ，広角カメラ，電源制御部から構成され，子機搭載カメラは広角カメラと電源制御部から構成される．望遠カメラにはフィルター分光機能を搭載し，表面のジオロジーのみでなく，物質科学的な観点でもサイエンス・サンプル採取地点の選定へ貢献する．また，長期クルージング中の黄道光観測を実施する予定であり，NGSRミッションの継続的なサイエンスゲインを生む．

レーザー高度計（LIDAR）は，照射したレーザが目標天体の表面で反射してくるまでの時間を正確に計測することで，親機または子機と目標天体間の距離を高精度で測定する機器である．接近・降下・タッチダウン運用や探査機軌道の改善を支える工学機器であると同時に，天体形状，地形，重力場推定，表面粗さの評価にも関わる理学機器である．かぐやLALT，はやぶさLIDAR，はやぶさ2 LIDAR，MMX LIDARのヘリテージを有するが，観測距離範囲や目標天体の反射率に応じて，レーザの出力エネルギーの調整や受光部の構成の最適化を行う．

熱赤外カメラは，目標天体表面の温度分布およびその時間変化を測定し，ターゲット小天体の熱慣性を求める．熱慣性は粒径，空隙率などの表面状態に依存するため，TIRIは物理的な情報をリモートセンシングによって得られる唯一無二の機器である．赤外カメラは日本の小天体探査において，はやぶさ2搭載のTIR，Hera搭載のTIRI，RAMSES搭載のTIRIという形で技術的な発展とともに国際的な評価を得てきた．Hera搭載機以降は赤外分光機能を備え，物質科学的な観点でも小天体科学に貢献する．NGSRでは，Hera搭載TIRIと同等のカメラをベースとし，目標天体ごとに最適化した分光フィルターを搭載する．

近赤外分光計または近赤外カメラは，目標天体表面の反射スペクトルひいては物質分布を調べるための機器候補である．天文観測による小惑星の分類においては可視・近赤外の反射スペクトルが用いられるため，帰還試料分析前に目標天体の素性を推論するために重要な役割を担う．NGSRにおいては，宇宙物理コミュニティ提供機器という文脈で検討されており，その仕様は目標天体の観測と宇宙物理的理学目標の両立を念頭に決定される．

（2）オプション機器群

その場分析装置は，採取試料や表面から放出される揮発性成分を，地球帰還前に探査機上で分析するための機器である．ガス状分子をイオン源に導入し，電子衝撃イオン化法でイオン化した後，多重周回飛行時間型質量分析計（MULTUM: Multi-turn Time of Flight Mass Spectrometer）により測定する．MULTUMは8の字型に同一軌道を複数回周回させることで，小型・軽量でありながら長い飛行時間を実現し，高い質量分解能を得ることができる．ガス状試料は，サンプリング装置で採取した物質を加熱して発生させるほか，天体表面から自然に揮発した分子をスニフモードで取り込むことも想定される．目標仕様として，質量分解能>10,000，質量範囲m/z=1–400が掲げられている．地上品として開発されたMULTUMをベースに各構成要素の小型化を実現した宇宙機搭載用MULTUM-Spaceの子機への搭載を予定している．従来の探査機搭載質量分析計を大きく上回る高い質量分解能により，これまで困難であった分子の精密な同位体比の測定や複雑な有機分子の同定を可能にする．これにより，地球へ持ち帰ることのできない揮発性分子の情報と，リターンサンプル分析から得られる分子の情報を統合し，有機物の化学的特徴をシームレスに理解することが期待される．

設置型地震計は，小天体表面に設置され，天体内部構造および機械的物性を直接探査するための理学機器である（図2b）．高感度一軸地震計を主センサとし，姿勢推定および高周波振動観測のための三軸加速度計を組み合わせた独立ユニットとして構成され，電源，通信，データ処理系を内蔵する．観測では，SCIやサンプリング，着陸機の接地・移動など探査機活動によって励起される人工地震を利用したアクティブ観測に加え，内部活動や熱応力，微小衝突などに起因する自然振動を利用したパッシブ観測

を実施する．さらに，搭載するジオフォンをアクチュエータとして駆動し，自ら人工震源を発生させる自己アクティブ観測も検討している．地震観測によって得られる弾性波速度，減衰特性，共振特性を用いることで，内部空隙率，機械的強度，粒径分布，不均質性，ブロックサイズ，層構造などを推定できる．これらの情報は，サンプル分析だけでは得ることのできない天体全体の内部構造を理解するための重要な制約条件となり，微惑星形成機構やラブルパイル・ペブルパイル形成過程の検証に直結する．

バイスタティックレーダーは，親機と子機の二機構成を活かして小天体内部を探査するための機器候補である（図2c）．親機搭載のレーダー送受信機から送信された中心周波数160 MHz，帯域幅50 MHzの電磁波パルスは小天体内部を透過した後，子機搭載のレーダー中継機で中継され，再び小天体内部を透過して親機に戻る．小天体を通過する様々な伝搬路で得られた電磁波パルスの伝搬遅延時間のデータセットにトモグラフィ解析を適用することで，小天体内部の電磁波速度の空間分布を数mの空間分解能で決定する．これらをもとに小天体の組成・空隙率の推定や，層・ブロック等の内部構造の有無によるラブルパイル・ペブルパル・一枚岩の識別，小天体形成過程の議論などに貢献することが期待される．小天体を対象としたレーダ内部探査はRosettaミッション（周回機＆着陸機）で実施例があり[21,22]，Heraミッション（単独周回機）でも実施予定だが[23,24]，複数の周回機にレーダを搭載して，内部構造の透過トモグラフィ解析が可能なデータセットの取得を目指す観測は未実施で，NGSRで実現されれば世界初となる．

小型衝突装置（SCI）は，表面下の物質を人工的に露出させるための装置である．検討案では，成形爆薬を用いて約2 kgの金属ライナーを約2 km/sで射出し，衝突によって地下物質を表面に露出させる方式が想定されている．この原理は，はやぶさ2のSCIで実証済みである．高速度衝突による表面物質の掘削・放出量は目標天体の重力，強度，空隙率，表層状態に依存するため，目標天体に合わせてライナー設計や衝突条件を最適化する．

加えて，宇宙物理コミュニティと海外機関提供機搭載という文脈から，蛍光X線検出器，赤外分光計，小型ランダー，ダストカウンターも検討されている．

以上のように，NGSRの探査機構成は，親機と子機を組み合わせた深宇宙サンプルリターンを基盤とし，サンプリング，地球帰還，光学航法，測距，熱赤外観測，近赤外観測を標準的な要素として備える．さらに，目標天体と利用可能なリソースに応じて，採取した揮発性物質のその場分析，人工衝突体を組み合わせた地震観測，親機子機が周回するバイスタティックレーダー探査といった新奇性のある小天体探査を実現する．

4. ミッションシーケンス

4.1 軌道

本節では，NGSRの3つのミッション案それぞれにおける軌道計画の例を示す．表1に示した3つの候補天体（NGSR-C：289P/Blanpain，NGSR-D：2001 SK162，NGSR-E:4660 Nereus）について，2030年代前半の打ち上げを想定した往復軌道設計を行った．この際，ロケットの打ち上げ能力はC_3＝20～25 km^2/s^2程度，往還機のΔV能力は2000 m/s以下を目安とし，近傍運用（＝小天体滞在）期間を1～2年程度確保できるよう最適化を行った．

図3および表2に，各天体について設計した往復軌道計画の一例を示す．ここで示す軌道計画は，各天体ごとの唯一解ではないことに注意されたい．同等の飛行時間やΔVで実現可能な打上げウィンドウが，各天体ごとに複数確認できている．

NGSR-Cでは，目標天体である289P/Blanpain彗星が遠日点5 au付近まで達する長楕円軌道を飛行するため，2年同期の地球スイングバイ（Earth Gravity Assist，EGA）を用いて大きな軌道変更を行う．289P/Blanpainと地球の軌道が接しているため，遠方天体であるにもかかわらず比較的小さなΔVで往復可能な点が特徴である．ただし，太陽から遠ざかるほど天体の軌道運動は遅くなるため，必然的に長い飛行期間を要する．

NGSR-Dの目標天体である2001 SK162は，289P/Blanpainと同様に地球軌道に接し，遠日点が約2.84 auという比較的長い楕円軌道を飛行する．そのため，NGSR-Cと同様に地球スイングバイ（EGA）を用いた増速が不可欠である．ただし，図3

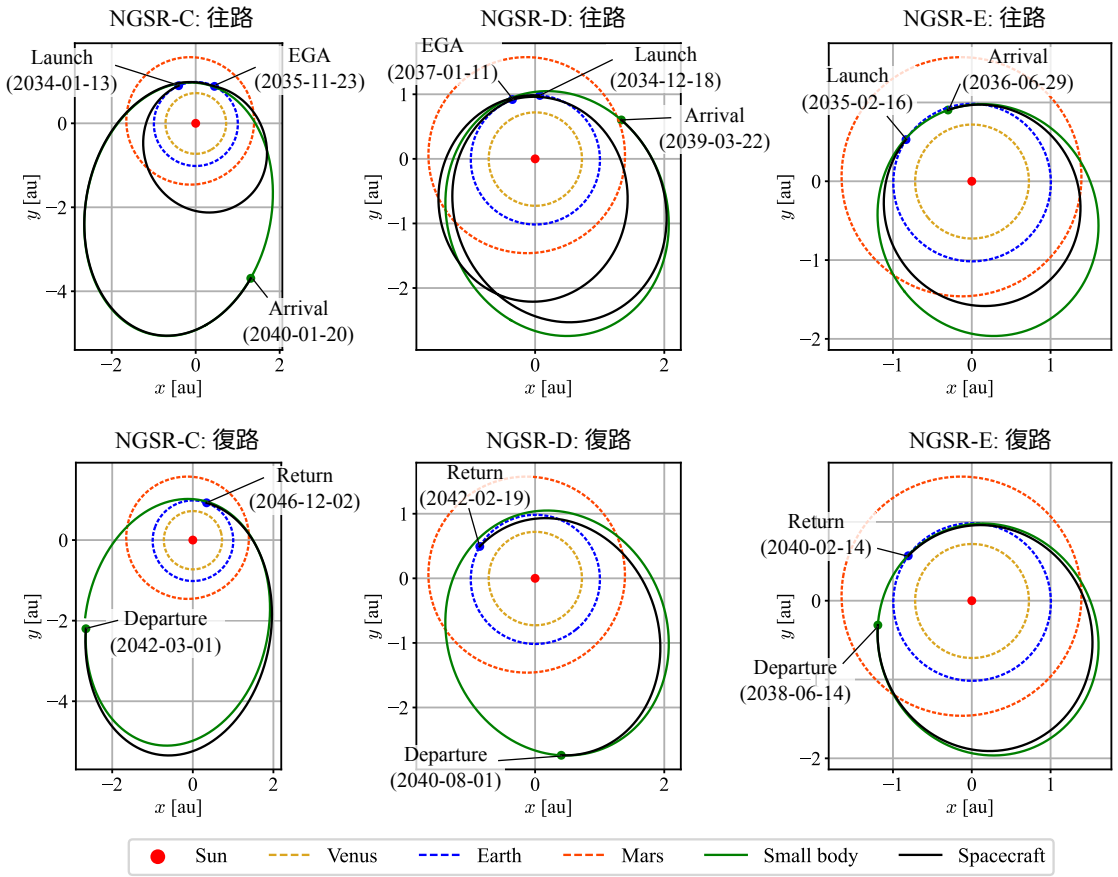


図3. NGSRの各オプションにおける軌道計画例.

表2. 各軌道計画における諸元.

ミッション	C_3	近傍運用期間	総飛行期間	総ΔV
NGSR-C	25 km^2/s^2	771日	12.88年	1571 m/s
NGSR-D	25 km^2/s^2	498日	7.17年	1600 m/s
NGSR-E	21.7 km^2/s^2	715日	4.99年	1743 m/s

および表2では2年同期のEGAを用いたシナリオを示しているが，NGSR-Cと比較して遠日点距離が小さいことから，1年または1.4年同期のEGAでも成立解が存在する．NGSR-Dの総飛行期間は打上げウィンドウに強く依存し，約6年（2036年頃）～約10年（2032年頃）と大きく変動する．

NGSR-Eの目標天体である4660 Nereusの軌道は地球軌道に接しており，かつ遠日点距離が約2.02 auという比較的小さな値である．この場合，打ち上げロケットのC_3が21.7 km^2/s^2程度見込まれれば，地球スイングバイを用いない直接遷移が可能である．およそ2年程度の滞在期間を確保しながら，往復の総飛行期間が5年を下回る解も確認されており，軌道設計（ΔVや飛行期間）の観点では好条件の天体である．

4.2 近傍運用

目標天体にランデブーした後は，天体を周回するのではなく，ホームポジション（HP）と呼ばれる目標天体上空の定点で探査機の位置を維持する．この方式は，はやぶさシリーズの運用を踏襲したものである．HPを地球と目標天体を結ぶ線上に設けることで，定常姿勢では地球方向に高利得アンテナを指向させつつ，観測機器を目標天体に向けることができる．低高度観測やタッチダウンなどの特殊運用は，基本的に全てこのHPを起点にして実施し，運用完了後，探査機は速やかにHPに復帰する．HPの高度は，天体の重力定数に応じて，推進剤消費量や軌道安全性の観点から決定する．

図4に，Blanpainをターゲットとした場合の，約2年間の彗星滞在期間におけるミッション運用のスケジュールの一例を示す．図4には，時期ごとの太陽-地球-天体間のジオメトリ変化をあわせて示している．NGSRでは，2機構成を活かした複数地点からのサンプル採取を目指している（図4の例では3回）．各タッチダウン関連運用の前に，往還機と着陸機を分離して，両機のHP維持などを独立に行う．地震計設置，レーダー観測，サンプル搬送のためのランデブードッキングなど，はやぶさ2にはなかった新規運用も含めて，多彩な近傍運用が計画されている．D型・E型小惑星をターゲットとした場合でも，同様の近傍運用を1～2年程度行う予定である．今後の詳細検討では，目標天体ごとに，各運用の技術的成立性を見極めつつ，運用計画を具体化していく．

5. サイエンス検討

本節では，3つのミッション案について，実現を目

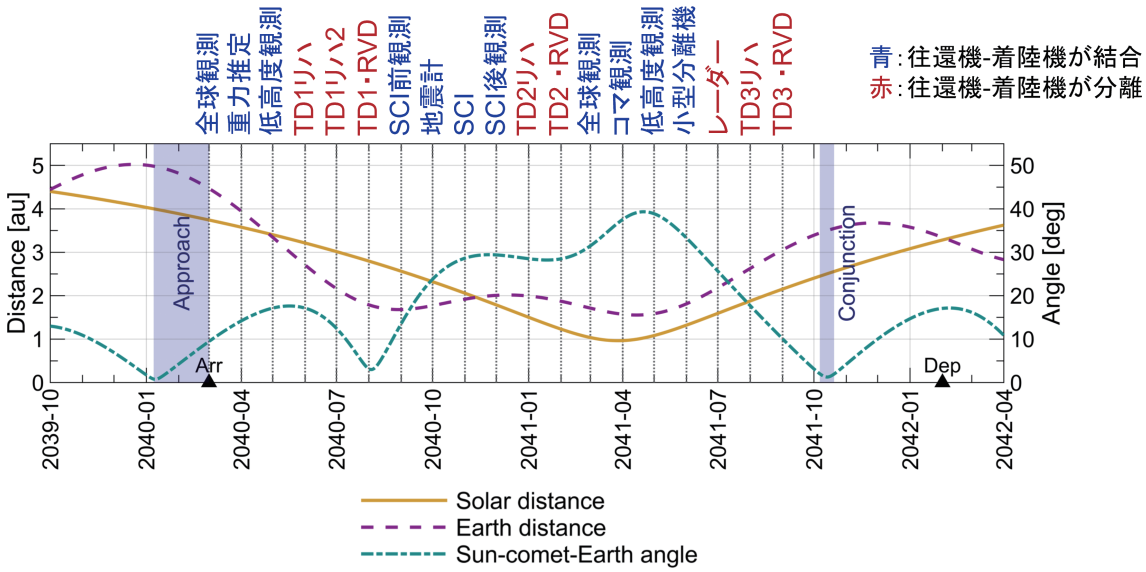


図4. Blanpainをターゲットとした場合の近傍運用のスケジュール例（TD：タッチダウン，RVD：ランデブードッキング）．

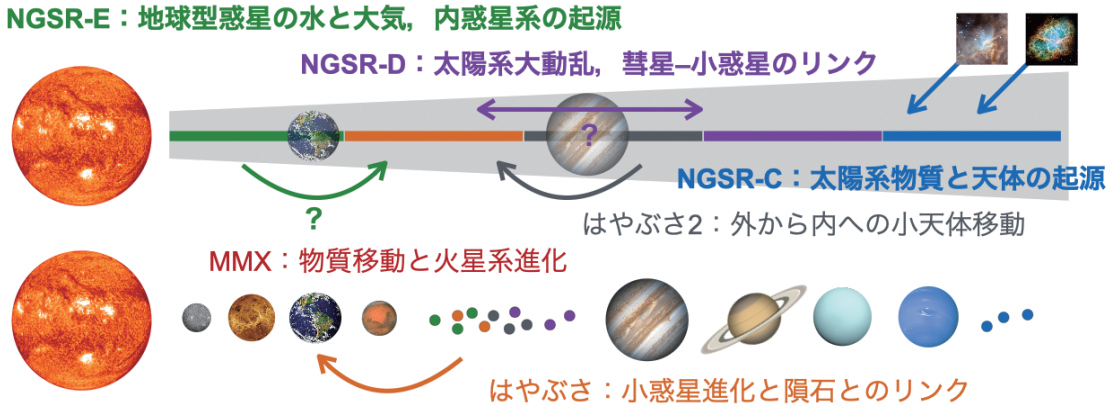


図5. NGSRの理学目的. 右上の画像は星形成領域NGC 602/N90(Credit: NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)–ESA/Hubble Collaboration; cropped)およびかに星雲(Credit: NASA, ESA and Allison Loll/Jeff Hester (Arizona State University); Acknowledgement: Davide De Martin (ESA/Hubble); cropped).

指すサイエンスをまとめる. 以下では，彗星核サンプルリターン案をNGSR-C, D型小惑星サンプルリターン案をNGSR-D，E型小惑星サンプルリターン案をNGSR-Eと呼ぶ. これら3案は，いずれも小天体サンプルリターンを通じて太陽系物質と太陽系天体の起源に迫るという大きな目的を共有する(図5). それぞれについて，サイエンス的な背景，実現を目指すサイエンス，理学機器の位置づけを述べる.

5.1 NGSR-C:彗星核サンプルリターン

NGSR-Cは，彗星289P/Blanpainを目標天体とする(表1)，NGSRの当初ノミナル案である. 289P/Blanpainは遠日点を5.13 au に持つ木星族彗星であり，ほうおう座流星群の母天体として知られる[25]. 直径は約300 m，自転周期は8.8時間と見積もられている. 彗星としての活動度は低いが，それゆえに彗星核の反射スペクトルが得られている. D型小惑星的な赤いスペクトルは，太陽系遠方起源と整合的である.

彗星は，太陽系外縁部で形成し，集積した氷，鉱物，有機物が大きく変成されることなく保存されている天体である. それゆえ，銀河系から原始太陽系に持ち込まれた物質，太陽系最初の世代の天体である微惑星の集積過程を記録している [26–28]. 隕石やC型小惑星帰還試料は，太陽系物質の起源を調べる上で不可欠な物証を与えてきたが，それらは母天体内での水質変成，熱変成などの影響を受けている. 例えば，よく「始原的天体」とされるリュウグウも，その母天体は昇温と広範な水質変成を経験したと考えられている [7]. これに対して，彗星核物質は，太陽系の起源物質をよりよく記録するものとして，銀河系における物質進化，星間物質から原始太陽系物質への接続，そして太陽系における最初の世代の天体形成を調べる上で特に重要である[26,27].

第一の科学目標は，太陽系物質の起源，すなわち銀河系物質進化を解明することである. 太陽系の原材料物質は，恒星内部，超新星，中性子星合体，AGB星，分子雲といった多様な天体環境を経て形成され，原始太陽系円盤へと持ち込まれた. その一部は，大きな同位体異常を持つプレソーラー粒子(無機物)や有機物として隕石中に見出すことができる. しかし，隕石や小惑星試料では，これらの成分は母天体過程や地球への供給過程における選択的生存の影響を受けている可能性がある. 彗星核から，熱的・水質的・機械的選択を最小限に抑えた試料を採取し，地上の高精度同位体分析，微量元素分析，地上およびその場での有機物分析に供することができれば，太陽系を構成した親星の種類と寄与率，星間物質由来の有機物の性質，先太陽系から原始太陽系へ至る物質進化を直接的に調べることができる[26,27,29].

第二の科学目標は，微惑星形成機構の解明であ

る．惑星形成理論において，マイクロメートルサイズのダストがキロメートルサイズの微惑星へ至る過程は，今なお大きな未解決問題である．ダストが直接付着成長したのか，あるいはペブル（mm-cmサイズのダスト凝集体）が集積して微惑星を形成したのかを検証するには，天体の内部構造，空隙率，層構造，構成粒子のサイズ分布が手がかりとなる[22,28,30]．リュウグウやベンヌのような小惑星は，母天体の水質変成や衝突破砕・再集積を経ており，微惑星形成時の物理情報の多くが失われている．彗星核は，より始原的な微惑星構造を保持している可能性があり，試料分析と内部構造探査を組み合わせることで，微惑星形成の物証に迫ることができる．加えて，NGSRでは低分子量の氷のその場分析をすることで，目標天体もしくはその母天体の集積した温度環境を制約する．これにより，微惑星がいつ，どこで，どのように形成したのかを制約する．

彗星核から理学的価値の高い試料を採取するためには，表面のどこから試料を得るかが本質的に重要である．彗星核表面には，ダストが堆積した比較的平滑な領域，崖や割れ目，ピット，活動によって新鮮な物質が露出した領域が共存し，水氷やCO_2氷の露出は限られた場所に現れる[31,32]．一方で，彗星核は形状の点でも扱いが難しい対象である．67Pに代表されるように，彗星核にはバイローブ形状や強い不規則形状を示すものが多い[31]．NGSRにおいては，充実したリモセン機器を用いて，全球の形状・地形・熱物性・組成分布を把握して理学的に価値の高いサンプリング地点を選定し，小型着陸機において自由度の高い複数回サンプリングを実現する．

NGSR-Cにおいて，その場分析装置は重要な役割を担う．揮発性物質を含む試料のサンプルリターンには，冷凍機搭載によるコスト増大に加えて，採取後の昇温と水との反応による試料の変成のリスクが伴う．そこで，NGSRでは，揮発性物質のその場分析を選択する．分取した試料の加熱およびスニフモード分析により，揮発性成分，低分子有機物の分子・元素・同位体組成を調べる．地上分析で得られる難揮発性物質（高分子有機物を含む）の高精度な分子・同位体情報と組み合わせることで，先太陽系からの物質進化，彗星の集積環境を理解する手がかりとなる．一方，微惑星形成機構の解明という科学目標の実現においては，設置型地震計・バイスタティックレーダーによる内部構造の解明（ラブルパイル構造とペブルパイル構造の区別）が鍵となる．

5.2 NGSR-D：D型小惑星サンプルリターン

NGSR-Dは，D型小惑星 2001 SK162を候補天体とする短期サンプルリターン案である（表1）．2001 SK162は遠日点を2.84 auに持つ．天体サイズはアルベドと縮退して不定性を持つが，直径0.87–1.9 kmと見積もられており，他の2つの候補天体（289P/Blanpain, Nereus）より大型である．対応するアルベドの見積もりは0.031–0.16である．長い自転周期が特徴であり，過去の観測結果から約68時間と見積もられている．

D型小惑星は，赤い反射スペクトルと低アルベドを特徴とする天体群である．小惑星帯外縁部以遠に多く分布し，木星トロヤ群を特徴づける天体でもあるが，その化学的性質はよくわかっていない．C型小惑星よりもさらに揮発性成分や有機物に富む可能性があり，彗星との関係が長く議論されてきた [33]．同じく赤いスペクトルを示す炭素質コンドライト隕石のTagish LakeがD型小惑星由来という説もあるが[34]，可視・近赤外スペクトルだけでは対応関係を一意に決めることは難しく，アルベドや中間赤外スペクトルを含めた比較では，Tagish Lakeに類似する小惑星は小惑星帯・木星トロヤ群の中でも限られることが指摘されている [35]．一方で，Tagish Lake隕石中の炭酸塩同位体組成からは，その母天体がCO_2氷に富む低温環境で集積した可能性も議論されており，少なくとも一部のD型小惑星が外側太陽系物質を含むという見方を支持する物質科学的証拠も得られつつある [36]．

NGSR-Dの第一の科学目標は，外惑星系の起源，特に木星の形成進化史の制約である．D型小惑星に富む木星トロヤ群天体は，軌道傾斜角が励起されていること，D/P型天体に富むこと，Kuiper belt天体やHilda群との類似性を持つことなどから，木星近傍でその場形成した天体群ではなく，原始カイパーベルトに由来する微惑星が，ガス散逸後の早期巨大惑星不安定，すなわち jumping Jupiter型の進化の中で捕獲された集団である，という見方が有力である[37]．2001 SK162の帰還試料分析から，

コンドリュールなどの円盤内で形成した火成ケイ酸塩，あるいは母天体内で形成した炭酸塩・含水鉱物などの二次鉱物の年代学的情報が得られれば，D型小惑星母天体の集積と進化の時期を制約できる．また，水氷やCO_2氷等の揮発性物質がその場分析で検出されたり，帰還試料からその痕跡が見つかった場合には，集積の温度環境から形成位置を推定できる．木星トロヤ群フライバイ探査を行うNASAのLucyミッションでは，複数のトロヤ群天体の表面組成・形状・密度・クレーター史が調べられるため，NGSR-Dの帰還試料分析とLucyのその場観測結果を相互比較するシナジーも期待できる [37,38].

第二の科学目標は，彗星と小惑星のリンクの解明である．彗星と小惑星は，その軌道や活動性により定義として区別されているが，天体の起源や物質進化的な観点からの区別は必ずしも明確ではない．小惑星帯にありながら彗星的活動を示す天体，活動を失った彗星核，D型・P型小惑星，さらには彗星的な有機物・鉱物学的特徴を示す宇宙塵・微小隕石などは，comet–asteroid continuum の重要な例と考えられる [39]. また，小惑星表面に水氷・有機物が存在し得ることも観測的に示されており，小惑星と彗星の物質的境界は単純ではない [40]. 南極微小隕石の中には，彗星的・外側太陽系的な有機物・鉱物学的特徴を示す粒子も見つかっており，D型小惑星の物質が，彗星塵，微小隕石，炭素質隕石の間にどのように位置づけられるかは重要な未解決問題である [41]. 太陽系において小惑星分布の外側領域を特徴づけるD型小惑星のその場探査と帰還試料分析を行い，過去の彗星探査で得られた知見と比較することによって，D型小惑星の材料物質と母天体での材料物質の進化過程（昇温や水質変成）を解明する．NGSR-Dにより彗星と小惑星の類似点と相違点を明確にし，太陽系物質進化の理解を大きく前進させる．

2001 SK162がどのような形状・表面状態・内部構造を持つ天体であるかは，現時点ではよくわかっていない．木星トロヤ群には，Hektorのような細長い形状あるいはバイローブ構造を持つ天体が存在する [42]. その表面状態も，彗星的な高空隙率・低強度から，岩石質小惑星的なエンドメンバーがありうる．物質分布の不均質性も未知であり，例えば極めて限定的な氷の露出がある可能性なども挙げられる．

このような形状・表面状態の不定性に対して，NGSRの親機・小型着陸機構成は有効に働き得る．2001 SK162がイレギュラー形状・不均質な表面物質分布を示した場合でも，小型着陸機による自由度の高いサンプリングによって理学的に価値の高い試料を複数点から採取することが期待できる．

NGSR-Dにおいても，その場分析装置による揮発性物質の観測は重要となる．D型小惑星は，C型小惑星よりも揮発性成分や有機物に富む可能性がある一方で，実際にどの程度の揮発性物質を保持しているか，また彗星的な物質なのか，水質変成を受けた炭素質隕石的物質なのかは未解明である．その場分析装置により，分取試料の加熱分析やスニフモード分析を行えば，水，CO_2，CO，硫黄化合物，窒素化合物，低分子有機物などの存在度・同位体組成を，天体表面で直接調べることができる．これは，D型小惑星が本当に外側太陽系の低温物質を保持しているのか，あるいはC型小惑星に近い変成済み物質なのかを判定する上で，帰還試料分析と相補的な情報を与える．

地震計・バイスタティックレーダーも不定性の大きいD型小惑星の内部構造（ペブルパイル，ラブルパイル，一枚岩）を理解する上でその搭載意義は大きい．一方で，2001 SK162は直径が1 km級である可能性があり，289P/BlanpainやNereusに比べて天体サイズが大きい．そのため，レーダー波の減衰を考慮した機器仕様・運用計画・理学目標設定が重要となる．また，68時間と遅い自転周期を考慮し，設置型地震計の仕様および運用（越夜の可否）は今後の検討課題である．

5.3 NGSR-E：E型小惑星サンプルリターン

NGSR-Eは，E型小惑星4660 Nereusを候補天体とする短期サンプルリターン案である．Nereusは遠日点距離2.03 auの地球接近小天体であり，NEARや初代はやぶさといった過去のミッションでも探査候補に挙げられてきた [19]. 直径約0.33 km，幾何アルベド0.55程度の高アルベド天体であり，スペクトル型はE型ないしXe型に分類される．レーダー観測からは，おおむね0.51×0.33×0.24 kmのやや細長い形状モデルが得られており，自転

周期は約15時間である．

E型小惑星は，高いアルベドを特徴とする小惑星群であり，還元的な内側太陽系物質を代表する．これまで，はやぶさはS型小惑星イトカワと普通コンドライトの関係を，はやぶさ2はC型小惑星リュウグウとCIコンドライトに近い始原物質の関係を明らかにしてきた．これに対して，E型小惑星は，エンスタタイト隕石，特にオーブライト（エンスタタイト・エコンドライト）との関係が議論されてきたが，その対応関係は反射スペクトルにもとづく推論に大きく依存している[43,44]．

NGSR-Eの第一の科学目標は，地球型惑星の水と大気の起源の解明である．特に「ハビタブル惑星の形成に惑星系遠方からの物質移動は必須か？」という問いに答える．近年，地球の材料物質と考えられているエンスタタイト隕石が，数海洋質量相当の水（水素）を含むという分析結果が報告されている[45]．その後，バルクや局所での分析研究が相次いでいるが，地球コンタミを除いた水量やそのホスト相については議論が分かれている[46–48]．本ミッションにおいてE型小惑星からフレッシュな試料を持ち帰ることができれば，こうした議論に決着をつけることができる．大気を形作る炭素・窒素についても同様である．さらに，実際の惑星形成過程においては，エンスタタイトコンドライト隕石のような物質が集積してただちに惑星になるのではなく，分化小天体・原始惑星段階を経たはずである．したがって，水や大気の起源を理解するためには，こうしたヒエラルカルな集積過程における揮発性元素の分配と散逸が鍵となる[49]．オーブライト母天体，すなわち分化母天体由来と考えられるE型小惑星のサンプルリターンから母天体の分化マントル（・核）だけでなく未分化な地殻由来物質が得られた場合，こうした揮発性元素の分配進化をトレースすることが可能となる．

第二の科学目標は，内惑星系の起源の解明である．具体的には，地球の材料物質から地球集積モードを制約し，E型小惑星進化の時空間的制約から内惑星系の動乱の様相を理解する．地球の材料物質の解明としてまず期待されるのはE型小惑星がエンスタタイト隕石の母天体であることが確かめられることである．これは帰還試料の難揮発性元素の同位体分析とエンスタタイト隕石との比較によって実現する．近年の多元素同位体組成にもとづく混合モデルでは，地球や火星の材料物質におけるエンスタタイト隕石様成分の重要性が示されている[50]．一方，E型小惑星がエンスタタイト隕石の母天体でなかった場合，内側太陽系を特徴づける物質の集積によって地球ができていないということから，太陽系形成論の新たな展開が期待できる．例えば，ペブル集積モデルのようなグローバルな物質移動による惑星形成が示唆される．E型小惑星進化の時空間的制約は，帰還試料分析による年代学的情報（集積・熱進化の時間情報）と，組成および残留磁化が与える空間的情報の統合によって実現する．近年，ELエンスタタイト隕石の供給源と考えられる小惑星族の力学進化と年代情報を組み合わせ，巨大惑星軌道不安定の時期を制約しようとする研究も現れている[51]．リュウグウ試料が外惑星系動乱を制約するのに対し，内惑星系動乱の有無・モード・タイミングの情報を組み合わせることで，両者のトリガーが何であったかを制約できる．

NGSR-Eにおいても，サンプルリターンは中心的な役割を担う．Nereusは3天体の中では遠日点が比較的近く，過去のレーダー観測からラフな形状モデルも作成されており，サンプリングにおける難易度は相対的に低い．しかしながら，分化母天体を起源とする可能性から，その表面物質には大きな不均質が想定される．不均質な表面物質から，適切な採取地点を選択し，確実にそこからのサンプルリターンを実現するためには，やはりNGSRの小型着陸機が活躍する．

分化天体に由来する小惑星特有の不均質性および内部構造の不定性から，レーダーおよび地震計という内部構造探査装置は重要な役割を担う．Nereusのような小型地球接近小惑星が，単一岩塊に近い天体なのか，衝突破砕後に再集積したラブルパイルなのか，あるいは内部に大きな不均質性を持つのかは，帰還試料の素性ひいては天体の起源を理解する上で重要である．一方，その場分析装置によって検出可能な量の揮発性物質が存在する確証はない．しかしながら，E型小惑星における揮発性物質の存在を制約することは，エンスタタイト隕石のような内側太陽系起源と見られる試料に見られる微量の揮発性元素がどのように母天体に持ち込まれ，

どのような変遷を辿ったかを理解するために重要であろう.

6. おわりに

本稿では，日本の小天体サンプルリターンの後継であり，MMXに続く2030年代前半の宇宙研戦略的中型計画の候補であるNGSRについて，ミッションを取り巻く状況と最新の検討結果をまとめた．ワーキンググループでは，今後もよりよいミッションとなるべく検討を重ねていくとともに，日本の惑星科学コミュニティと一体となってミッションの実現と成功を目指していきたい.

参考文献

[1] Fujiwara, A. et al., 2006, Science 312, 1330.
[2] Nakamura, T. et al., 2011, Science 333, 1113.
[3] Watanabe, S. et al., 2019, Science 364, 268.
[4] Arakawa, M. et al., 2020, Science 368, 67.
[5] Morota, T. et al., 2020, Science 368, 654.
[6] Yada, T. et al., 2022, Nat. Astron. 6, 214.
[7] Yokoyama, T. et al., 2023, Science 379, eabn7850.
[8] Nakamura, T. et al., 2023, Science 379, eabn8671.
[9] Naraoka, H. et al., 2023, Science 379, eabn9033.
[10] Kuramoto, K. et al., 2022, Earth, Planet. Space 74, 12.
[11] Kasuga, T., 2025, Astron. J. 169, 54.
[12] Barucci, M. A. et al., 2018, Mon. Not. R. Astron. Soc. 476, 4481.
[13] Mueller, M. et al., 2011, Astron. J. 141, 109.
[14] Thomas, C. A. et al., 2014, Icarus 228, 217.
[15] Ye, Q.-Z., 2011, Astron. J. 141, 32.
[16] Delbó, M. et al., 2003, Icarus 166, 116.
[17] Lazzarin, M. et al., 2004, Icarus 169, 373.
[18] Binzel, R. P. et al., 2004, Planet. Space Sci. 52, 291.
[19] Brozovic, M. et al., 2009, Icarus 201, 153.
[20] Troianskyi, V. et al., 2024, Icarus 420, 116146.
[21] Kofman, W. et al., 2007, Space Sci. Rev. 128, 413.
[22] Kofman, W. et al., 2015, Science 349, aab0639.
[23] Hérique, A. et al., 2018, Adv. Space Res. 62, 2141.
[24] Michel, P. et al., 2022, Planet. Sci. J. 3, 160.
[25] Watanabe, J. et al., 2005, Publ. Astron. Soc. Jpn. 57, L45.
[26] Rubin, M. et al., 2020, Space Sci. Rev. 216, 102.
[27] Altwegg, K. et al., 2019, Annu. Rev. Astron. Astrophys. 57, 113.
[28] Keller, H. U. and Kührt, E., 2020, Space Sci. Rev. 216, 14.
[29] Morse, A. D. and Chan, Q. H. S., 2019, ACS Earth Space Chem. 3, 1773.
[30] Blum, J. et al., 2017, Mon. Not. R. Astron. Soc. 469, S755.
[31] Sierks, H. et al., 2015, Science 347, aaa1044.
[32] Fornasier, S. et al., 2019, Astron. Astrophys. 630, A7.
[33] Emery, J. P. et al., 2015, in Asteroids IV, 203.
[34] Hiroi, T. et al., 2001, Science 293, 2234.
[35] Vernazza, P. et al., 2013, Icarus 225, 517.
[36] Fujiya, W. et al., 2019, Nat. Astron. 3, 910.
[37] Bottke, W. F. et al., 2023, Space Sci. Rev. 219, 83.
[38] Levison, H. F. et al., 2021, Planet. Sci. J. 2, 171.
[39] Hsieh, H. H., 2017, Philos. Trans. R. Soc. A 375, 20160259.
[40] Campins, H. et al., 2010, Nature 464, 1320.
[41] Yabuta, H. et al., 2017, Geochim. Cosmochim. Acta 214, 172.
[42] Rozehnal, J. et al., 2016, Mon. Not. R. Astron. Soc. 462, 2319.
[43] Clark, B. E. et al., 2004, J. Geophys. Res. 109, E02001.
[44] Keil, K., 1989, Meteoritics 24, 195.
[45] Piani, L. et al., 2020, Science 369, 1110.
[46] Thomassin, D. et al., 2023, Earth Planet. Sci. Lett. 616, 118225.
[47] Barrett, T. J. et al., 2025, Icarus 436, 116588.
[48] Gray, M. L. et al., 2026, Meteorit. Planet. Sci., doi:10.1111/maps.70192.

[49] Grewal, D. S. et al., 2021, Nat. Geosci. 14, 369.
[50] Dauphas, N. et al., 2024, Icarus 408, 115805.
[51] Avdellidou, C. et al., 2024, Science 384, 348.

《目次へ

もう一つの月世界へ: 火星衛星探査計画MMX その15 ～IREMの旅，地磁気圏を超えた高エネルギー粒子の海を臨む～

相田 真里[1], MMX IREMチーム

（要旨） 火星衛星探査計画(Martian Moons eXploration) に搭載されたIREMは，300 MeVまでの高エネルギー粒子（水素からケイ素）を観測する放射線環境モニタである．地磁気というバリアのない深宇宙は，数百MeVからGeV領域の高エネルギー粒子の海とも言える．しかし，火星や近傍の実測例は100 MeV程度の粒子がほとんどである．IREMはその数倍の高エネルギー粒子を，地球と火星衛星を往復する5年にわたって観測し続けるため，そこで得られるデータは，国際的にも貴重な観測データになり得るはずだ．本稿では，宇宙放射線の基礎知識や測定方法の基本を含めながら，IREMの仕様や地上試験について紹介する．

1. はじめに

宇宙放射線を観測する目的は，研究者によって様々であるが，JAXAでは大きく2つに分類できると考える．一つは，純粋なサイエンスとして，宇宙の成り立ちあるいは宇宙環境を知りたいという目的である．もう一つは，宇宙機の探査期間や宇宙飛行の滞在期間のうちに，どの程度の被ばくが生じるかを精度よく試算することである．今回の火星衛星探査計画(Martian Moons eXploration: MMX)に搭載される惑星空間放射線環境モニタ(Interplanetary Radiation Environment Monitor: IREM)の開発目的は，後者の背景が強く，将来の宇宙飛行士の被ばく管理にとても貴重なデータにつながると考えられる．ここで勘が鋭い人は，2000年から運用が始まった国際宇宙ステーション(ISS)で，25年以上にわたり宇宙飛行士が滞在しているのだから，今さら被ばく管理なんて・・・と思う方もいるかもしれない．アルテミス計画をはじめ，これからの国際探査では，月や火星における長期間の有人探査が本格化する予定だが，課題も多い．では，何が問題なのか？宇宙放射線の観点で言えば，宇宙飛行士のみならず宇宙機にとっても1つの境界となるのが地磁気だ．地磁気圏内の地上で生活する私たちが，宇宙放射線の影響をほとんど考えることはないだろう．夏は暑ければ薄着をし，防護服などを身に着けなくてもお風呂に入れる．多くの人が気にするのは外出時の紫外線くらいだろうか？これは地磁気そして大気が大量に降り注ぐ宇宙放射線をある程度カットしてくれているおかげだ．ISSも地磁気の恩恵をいくらか受けている．ただし，いくら地磁気圏内にいたとしても，高度が大きくなるにつれ，人体に影響するリスクは高くなる．地上の私たちが年間に浴びる放射線量は約2.1 mSvと言われている[1]．これは病院でCT検査を受けた場合，1度で浴びる放射線量に等しく，高度400 kmのISSにいる宇宙飛行士が2-3日で浴びる量に等しい．そして，月や火星など地磁気圏外での放射線量はどうだろうか？まだ未知数なところもあるが，ISSで浴びる線量の2倍以上だと言われている[2]．このように，地磁気圏外で人類が生活することがいかに大変で，常に宇宙放射線の脅威と戦わなければならないかがわかるだろう．地磁気圏内および周辺環境で起こる現象については，これまで多くの研究者たちが放射線モニタで観

1.宇宙航空研究開発機構
aida.mari@jaxa.jp

測し，論文などで報告されているので，ぜひ閲覧していただきたい．次の章では，月や火星の環境をはじめとした地磁気圏外で起こり得る放射線環境について説明する．

2. 地磁気圏外の放射線環境

前述したとおり，地磁気圏外ではいわゆるバリア的存在がないことから，様々な種類やエネルギーの強さの放射線の影響を考慮する必要がある．この章では，特に人体に影響するとされる太陽フレアと銀河宇宙線 (GCR)について述べる．宇宙環境では，地球で例えると晴れた穏やかな日もあれば，台風のような大荒れの日など様々である．このことを，「宇宙天気」と表現することもある．一般的には，太陽活動の周期に依存し，図1のように11年周期で変動する．太陽活動の極大期では，太陽の黒点が増加し，太陽フレアと呼ばれる爆発的な現象が発生する傾向にある[3]．太陽フレアが起こると，90-95%がプロトンで構成される太陽高エネルギー粒子(SEP)が発生し，宇宙飛行士の被ばくや宇宙機の損傷が懸念される．他にも，通信状態やGPSなどのインフラにも影響し，しばしばニュースで報じられることから，私たちにも馴染みのあるワードではなかろうか．宇宙天気では太陽フレアがトリガとなり磁気嵐と呼ばれる現象も起こることから，台風のような大荒れの様子を想像していただきたい．一方で，太陽活動極小期には，GCRが極大期を迎える．GCRもSEP同様，約85%の大部分がプロトンである．その他，約12%がヘリウム，電子･陽電子を除く残りの1-2%が重イオンで構成されている[4]．GCRが極大期であっても，この時期は大荒れの太陽活動極大期と比較して落ち着いた状況であるため，「平穏期」と呼ばれる．ではここで本題に戻るが，このような宇宙環境で宇宙飛行士が長期滞在を実現するには，どのような対策を講じればよいのだろうか．結論から言えば，基本は遮蔽をすることで身を守ることしかできない．ただし，遮蔽方法には放射線の種類によって工夫が必要となる．前述のとおり，SEPもGCRのほとんどがプロトンで占める．ただし，両者ではエネルギーと量の観点から全く別物という見方もできる．SEP由来のプロトンは，エネルギーが数MeV-数百MeV，速さも光速の数%-数十%である．一方，GCR由来のプロトンは，数百MeV-数GeV，速さは光速と同程度である．こ

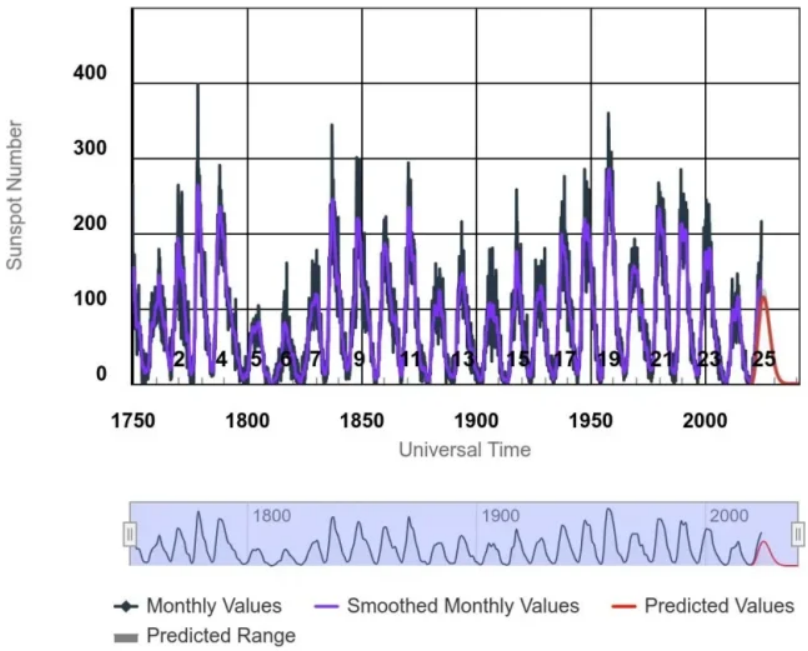


図1. 11年周期で変動する太陽活動 (Space Weather Prediction Centerより).

の場合，SEPによるプロトンは数mm-数cmの金属板などを置くことで，遮蔽可能と言われている．月の長期滞在をする場合，もし太陽フレアが発生した場合には，月面に存在する縦穴などの岩陰に避難するという計画もある[5]．一方で，GCRによるプロトンはある程度の厚みがなければ突き抜けてしまう．ただし遮蔽の厚みが大きいと，今度は二次放射線を発生させてしまうこともあり，扱いが困難となるが，ここで詳細は割愛する．両者の違いを一言で説明すると，SEPはエネルギーが低いが量は多く，GCRはその逆である．つまり，SEPは数が多い分，当たる確率も高くなるが，GCRは数が少ないが，1発でも当たると致命傷となる，そんなイメージである．では，このように遮蔽材を簡単に突き抜ける高エネルギー粒子を，どのように測定すればよいのだろうか．次の章では，測定方法の基本原理を説明する．

3. 高エネルギー粒子は止めて測るが鉄則?!

この章では，SEPやGCRをはじめとした放射線粒子の一般的な測定原理について述べる．

粒子測定をするといえども，単に観測器のセンサに入り込んだ粒子の数をカウントする方法や，粒子の種類やそのエネルギーをセットで同定する方法などがある．イメージが湧かない人のために，簡単な例を挙げる．野球選手である投手Aと投手Bがキャッチャーに向かって異なる速さでボールを投げるとする．仮にキャッチャーが目を閉じたまま，AとBが投げたボールを受ける場合，ミットに何個ボールが当たったかはわかるが，どの投手が投げたかまでは判別がつかないであろう．ミットを検出器として考えた場合，放射線のカウント数は検出できるが，どの粒子がどれくらいの速さ (エネルギー)なのかを同定することは困難である．そして，エネルギーを測定するためには，必ず粒子をキャッチしなければならない．

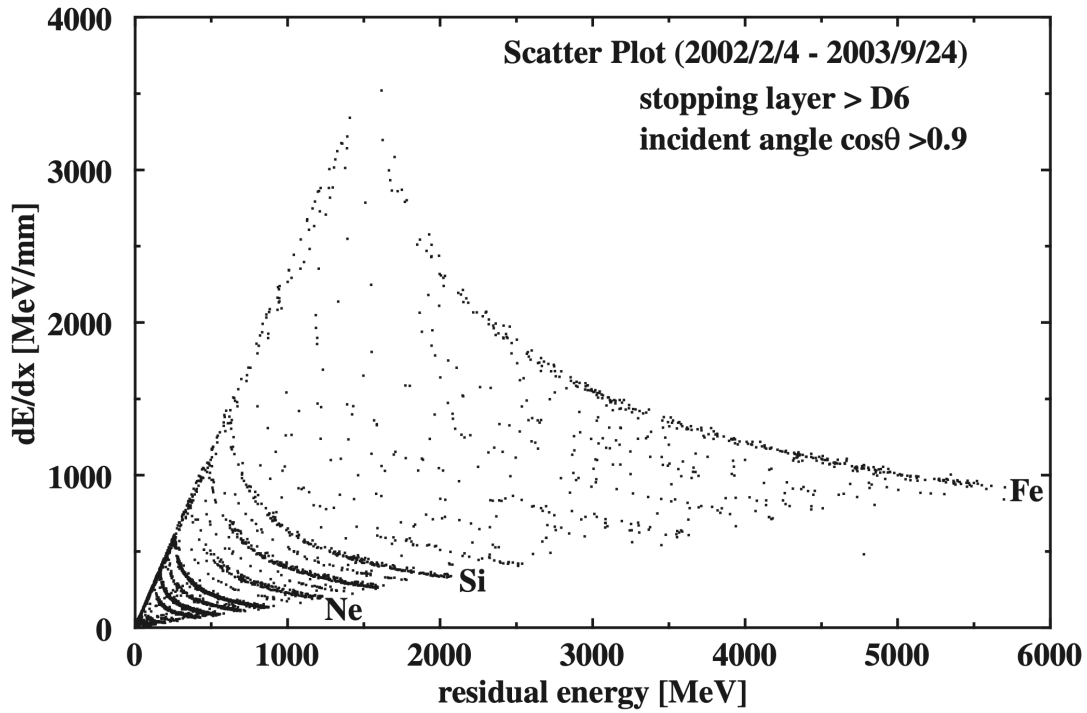


図2. ⊿E-Eプロットの概念図[7].

粒子が検出器をかすめて飛び続けてしまえば，飛んできた粒子の一部のエネルギーしかわからないことになる．そして高エネルギー粒子であれば検出器を突き抜けてしまうため，さらに測定が困難となる．高エネルギー粒子を確実に止めて検出するためには，通常は検出器の前に減速材を置くことが多い．なんとなく測定のイメージをわかっていただけただろうか．この測定原理は，⊿E-E法と呼ばれる古典的な方法に基づく[6]．2組のセンサを用いて，1枚目のセンサをすり抜けた粒子を2枚目のセンサで確実に止める．センサにはシリコン半導体が用いられ，1枚目のセンサでわずかに落としたエネルギーを⊿Eとし，2枚目のセンサで落とすエネルギーをEとする．荷電粒子が物質中を進むとき，単位あたり長さの損失エネルギーは，ベーテ・ブロッホの式という物理法則に従い，粒子の電荷の自乗と質量の積に比例し，全エネルギーに反比例する．そのため，⊿Eを縦軸に，Eを横軸にプロットすることで，反比例のカーブが描かれる．これは荷電粒子と質量の積が，粒子の種類ごとに異なることを利用するため，原理的に重なることはない(図2)．2枚目のセンサで確実に粒子を止めるためには，センサ同士の間に減速材を設置しなければならない．そのため，エネルギーが高い粒子ほど，減速材の厚みも増える．つまり宇宙で高エネルギー粒子を測定するには，必然的に観測器の質量が大きくなるということだ．このことは，多くの場面で宇宙機の質量に制限をかけられるので，機器開発者の頭を悩ませる課題の一つである．一方で，1枚目のセンサを素通りできないほどエネルギーが小さい場合には，この原理は適用されないことにも注意いただきたい．

4. IREMの開発

4.1 放射線モニタの観測例

これまでに深宇宙の放射線環境および高エネルギー粒子の測定原理について概要を説明した．この章ではIREMの開発の意義と仕様について述べる．JAXA研究開発部門の環境領域では，これまでにTEDA，SEDAなどの放射線モニタを開発してきた[8]．これらは，地球周回衛星に搭載されており，特にプロトンのエネルギーの測定レンジは数MeV-160 MeV程度である．今後，月や火星をはじめとした地磁気圏外での探査計画が加速することから，より高エネルギーな放射線モニタの開発が求められている．ここでIREMとの比較のため，海外機器の例を挙げる．火星およびその付近の観測モニタの例として，2011年にNASAが打ち上げたMSL搭載のRADがあげられ，火星表面において，100 MeV以下のプロトンを計測するとされている[9]．また2013年に打ち上げたMAVEN搭載のSEPでは，火星の上層大気を測定対象としていることもあるが，数十keV-数十MeVとされる[10]．これらの放射線モニタと比較すると，300 MeVまで観測できるIREMは，今後，国際的にも貴重な実測データの一つになると期待される．

4.2 IREMの装置構成

次に，IREMの仕様を表1に示し，IREMとセンサ断面図を図3に示す．IREMは，15 MeV/nから300 MeV/nまでのプロトンおよび重粒子を計測するが，質量に制限があることから，ΔE-E法と飛程を利用したΔE-Range法を組み合わせることで高エネルギーの放射線観測を実現した．センサ部の視野開口部には，センサ外部からの入射粒子のトリガ誤検知を避けるため，40 MeV程度の入射陽子が遮蔽できるタンタル素材のコリメータを設置した．粒子の入射方向を知るために位置検出用のSiセンサ(Position Sensitive Detector：PSD)2枚，15-300 MeVまでの損失エネルギーを計測するSiPINフォトダイオード(以下SSDと表記)17枚，減速材(Cu)6枚から構成されている．積層部分のSSDは，後段のSSDと区別するためML-SSDと表記する．ML-SSD1およびML-SSD2とML-SSD3の組み合わせは，主に低エネルギー粒子を検出するために使用され，3章で述べたΔE-E法により処理される．一方，高エネルギー粒子については，ML-SSD1とSSD1-SSD6の信号の有無でΔE-Rangeの関係から処理を行い，各粒子とエネルギーチャネルを決定する．IREM同様，放射線モニタの多くがシリコン半導体センサを検出器として採用しているが，19枚ものセンサ数を搭載した放射線モニタは非常に珍しい．過去のJAXAの放射線モニタの例としては，ISSに設置されたSEDA-APのHITが18枚のシリコン半導体検出器を有す

表1. IREMの仕様.

サイズ	筐体	270 mm × 230 mm × 140 mm以内
質量	筐体	最大 6.0 ± 0.6 kg（公差10%）
視野開口部(視野角)	–	66度（±33度）以下（四角錐）
G-factor	–	0.4 cm²sr以上（Proton、300 MeV以上）
消費電力	–	20 W以下
観測対象	太陽フレア	H: 15–300 MeV >300 MeV（カウントのみ）
	銀河宇宙線	HからSiまでの粒子 H: 15–300 MeV >300 MeV（カウントのみ）
線エネルギー付与(LET)	–	下限: 1 keV/um以上（H相当以上） 上限: 600 keV/um（O相当、目標）

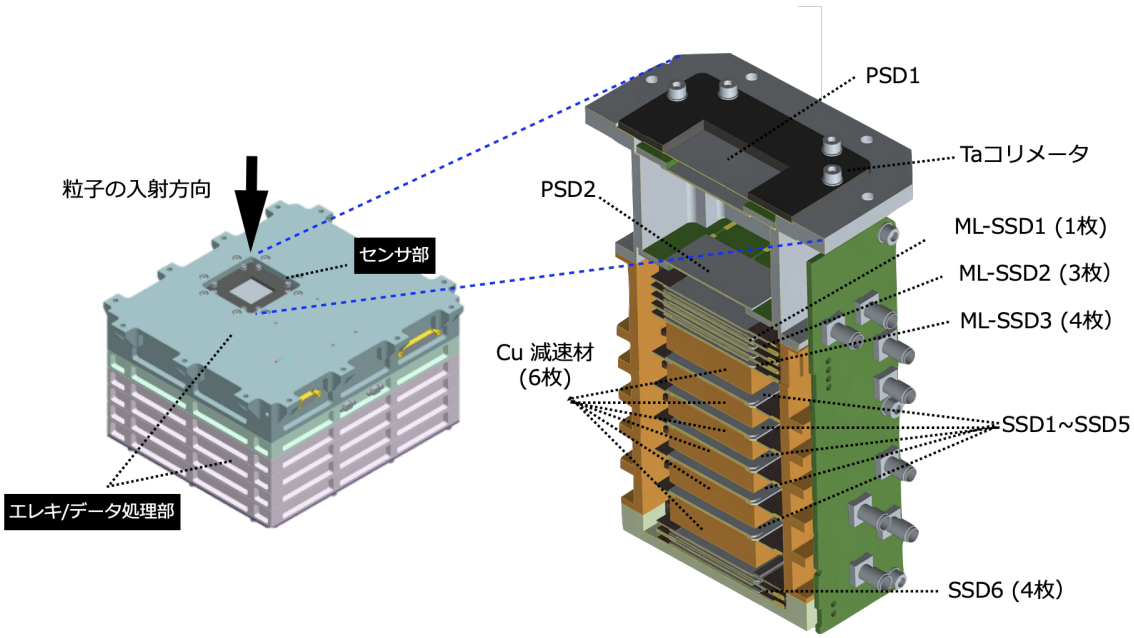


図3. IREMとセンサ断面の概念図.

るくらいだ．ただし，重粒子の測定に特化しており，ISSの軌道が地磁気圏内にあるため，最もエネルギーが高い粒子でも，約150 MeVの鉄 (Fe)が上限となる[11]．その意味でも，IREMは単体の観測器で，高エネルギーのプロトンと重粒子の両方を計測できるハイブリッド型な検出器であるため，今後の深宇宙探査の様々な場面で応用できるはずだ．

4.3 IREMの運用

IREMは図4のようにMMX衛星の復路モジュールに搭載されており，地球圏から火星衛星到着，火星離脱から地球帰還までを観測する．約5年の運用期間(クリティカル運用等を除く)において常時観測を行う．MMXの運用時期は，当初2024年打上げの予定が2年の延期により2026年に変更となったものの，太陽活動極大期の最中である．1章でも述べたとおり，この時期は太陽フレアの発生頻度が高まり，SEP等の検出が期待される．IREMは，常時観測および太陽フレア発生時の判定を行う．図5に示すように，10秒に1回のカウントデータを出力，その他の時間では各検出器の波高値等の情報が得られるリストデータを出力する．また，ミッションデータとは別に毎秒HKデータを出力する．但し，データのダウンリンクができる容量に制約があるため，火星軌道におけるクリティカル運用では，間引き運用を実施する．間引かれたデータは，地球に帰還するカプセルに格納されるハードディスク(RDR)に記録される予定である．カウントデータについては，粒子弁別及びエネルギー弁別がオンボードで行われる．HからSiまでの14核種に対して，エネルギーチャネルに弁別されて，カウント値が積算される．これをLook-up Table(LUT)と呼ぶ．このLUTは，プロトン，重粒子，またIREMセンサーで突き抜けた粒子について，あらかじめ放射線輸送シミュレーションコードGeant4を用いることで事前に作成した．

5. 地上試験

IREMは放射線モニタであるため，地上では加速器を有する大学や病院などの限られた施設で照射

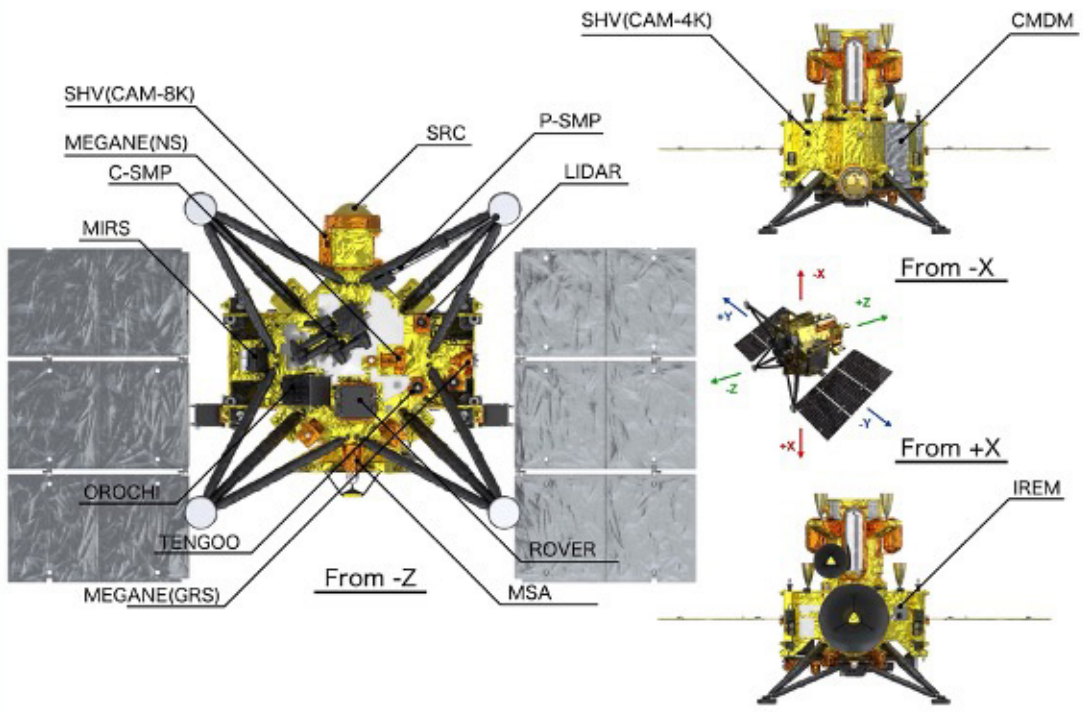


図4. MMXとIREMの搭載位置 (JAXA/ISAS).

時間	フォーマット	
n+1 秒	HKデータ	カウントデータ
n+2 秒	HKデータ	リストデータ
n+3 秒	HKデータ	リストデータ
n+4 秒	HKデータ	リストデータ
n+5 秒	HKデータ	リストデータ
n+6 秒	HKデータ	リストデータ
n+7 秒	HKデータ	リストデータ
n+8 秒	HKデータ	リストデータ
n+9秒	HKデータ	リストデータ
n+10 秒	HKデータ	リストデータ
n+11 秒	HKデータ	カウントデータ

図5. 観測データの処理.

試験が行われ，性能が評価される．またIREMの観測要求は300 MeVという高エネルギーであるため，これだけの高エネルギー粒子を出力できる施設は，国内でも数えるほど少ない．そのため，プロトンのみならず，HeからSiまでの各重粒子を照射して検証することは現実的ではない．このようにIREMのみならず，放射線モニタの性能検証には制約も大きいため，特定の粒子を照射し，その結果をシミュレーションの値と比較することで校正を行うことが一般的である．最終的には，観測対象である全ての粒子に対して，入射角度やエネルギーを変化させて計算を行う．したがって，照射試験の限られた実測値データとシミュレーションによる事前評価が重要となる．IREMの地上試験としては，東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター(Cyclotron and Radioisotope Center: CYRIC)において最大80 MeV/n程度のプロトン照射をおこなった．そして，山形大学(医学部 東日本重粒子センター)にて，最大430 MeV/n程度の炭素イオン (12C)を用いた重粒子の照射試験を行った．実測値とシミュレーション評価の一例として，667 MeVの12Cを照射した場合，ML-SSD1～3に与えたエネルギーのピーク値を図6に示す．これより，MLSSD1とMLSSD2で吸収されたエネルギーは，Geant4の結果とピークの位置も同程度であり良好な結果と言えることがわかった．

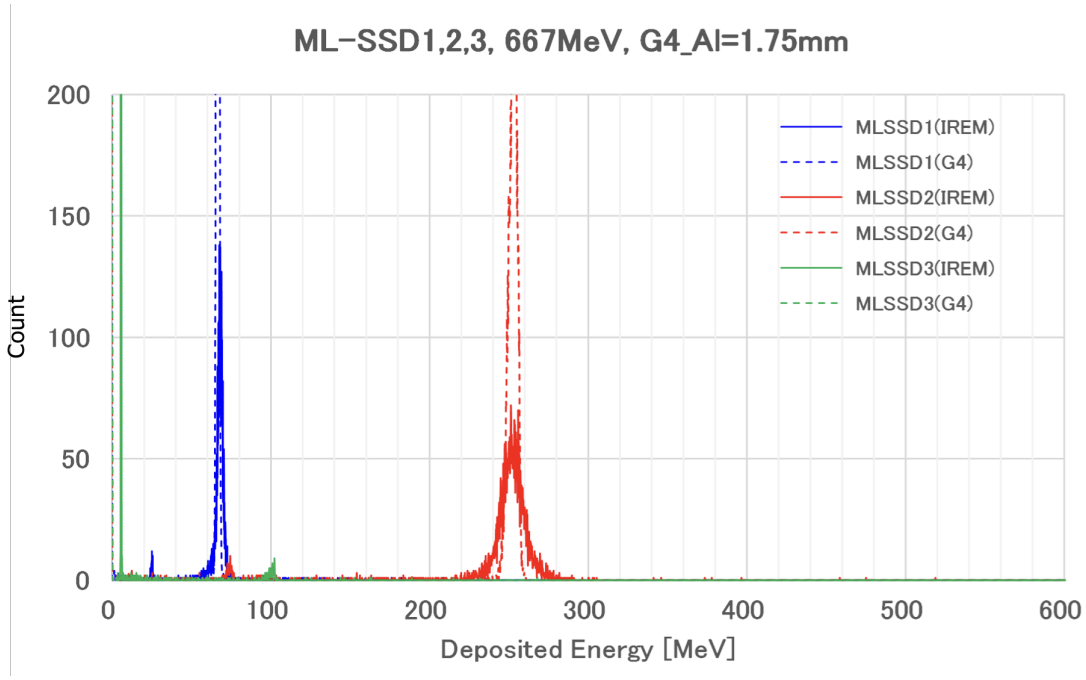


図6. 667 MeVの12Cを照射した結果.

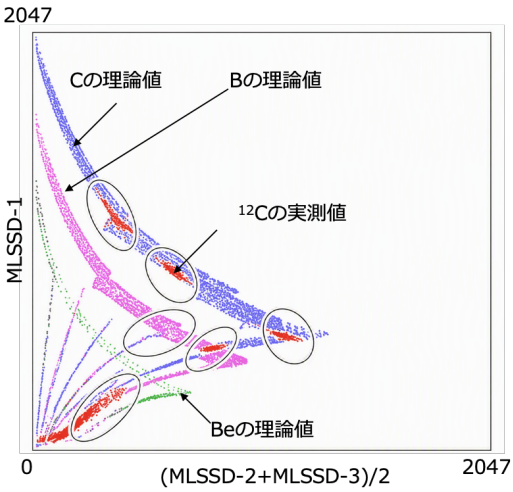


図7. 実測値とGeant4による理論値の比較(ΔE-E).

MLSSD3においては，本条件での入射エネルギーでは，到達しない範囲であるため，図6には示されていない．

次に，ΔE-E特性に関して，Geant4の結果と一部実測値を合成したものを図7に示す．横軸にML-SSD2とML-SSD3が吸収したエネルギーの合計の半値を，縦軸にはML-SSD1が吸収したエネルギーを用いて，2次元プロットしたものである．さらに，別の核種においても，同様なシミュレーション計算を行うことで，図8のように核種ごとに弁別したプロットを得ることができる．IREMの運用中に，これらのプロットを参照することで，リストデータを用いた詳細解析をする前に放射線の核種とエネルギーレベルがある程度視覚的に把握できる．このようにIREMは300 MeV程度までのエネルギースペクトルを取得し，仕様要求を満たせることがわかった．しかし人体被ばくへの影響評価を行う上では，300 MeV以上のエネルギー，目標としては数GeVレベルの情報が有用である．そのため，IREMが約5年の運用で得られた放射線の実測値をシミュレーション計算とうまく融合させることで，運用後はより高エネルギーのスペクトルを予測しようと考えている．

6. おわりに

IREMは地球から火星周辺を通過し，地球に帰還するまでの約5年間のフライトを行う．観測要求として300 MeVという高エネルギースペクトルを検出するにもかかわらず，搭載質量に制限があるため，装置構造に工夫が必要であった．過去の放射線モニタにはなかった，19枚のシリコン半導体センサと6枚の銅の減速材を組み合わせることで，高エネルギー

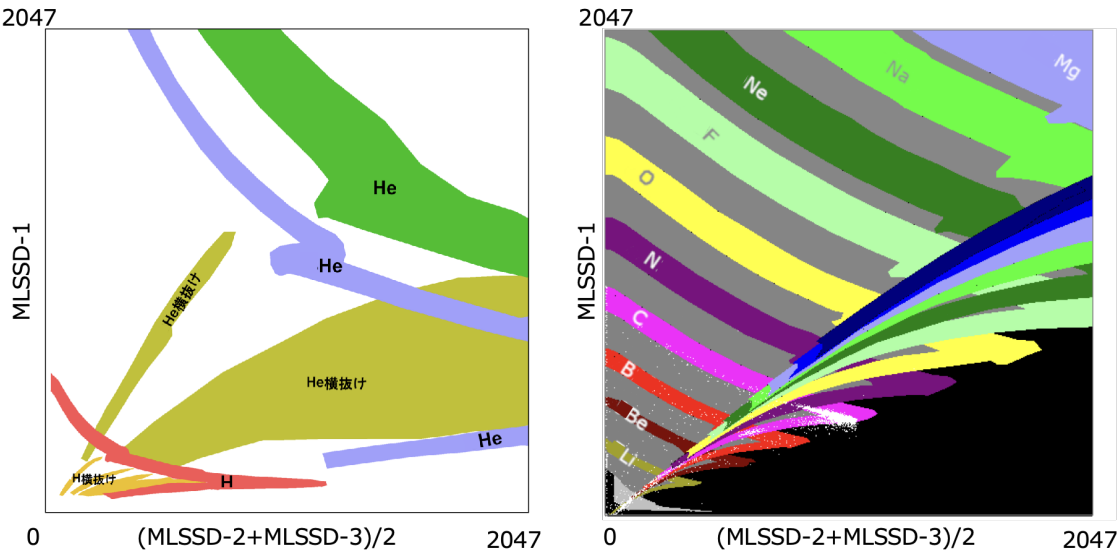


図8. Geant4によるH-Siを入射した場合の⊿E-E特性.

のプロトンとSiまでの重粒子両方の地上観測を実現した．NASAなどの海外機器が数十keV-100 MeV程度のエネルギー測定レベルであることを考慮すると，国際的にも貴重な観測データになると期待される．また，MMXは13のミッション機器が搭載されており，特に火星周辺では様々なフェーズを経てアクロバティックな運用が設定されている．5年間で得られたデータは，月や火星の有人探査における被ばく予測のために利用される予定である．一方で，IREMは復路モジュールに搭載され，長期間にわたって常時観測を行うため，別の観測機器で得られた珍しい現象や不可解なトラブルが生じたとしても，IREMのデータがサイエンスや原因究明の一助になることを信じている．

[1] 市川龍資ほか，2013, RADIOISOTOPES, 62, 927.
[2] Sato, T. et al., 2017, Radiation Protection Dosimetry, 180, 146.
[3] International Commission on Radiological Protection, 2013, Annals of the ICRP, 42.
[4] Matthiä, D. et al., 2013, Advances in Space Research, 51, 329.
[5] Haruyama, J. et al., 2009, Geophysical Research Letters, 36, L21206.
[6] Knoll, G. F., 2013, 放射線計測ハンドブック第4版（オーム社）.
[7] Matsumoto, H. et al., 2005, Japanese Journal of Applied Physics 44, 6870.
[8] Matsumoto, H. et al., 2012, IEEE Transactions on Nuclear Science, 59, 1054.
[9] Hassler, D. M. et al., 2012, Space Science Reviews 170, 503.
[10] Jakosky, B. M. et al., 2015, Space Science Reviews 195, 3.
[11] Ueno, H., et al., 2015, IEEE, 62, 2825.

著者紹介



相田 真里
2018年4月，宇宙航空研究開発機構(JAXA)に入社．東京工業大学 総合理工学研究科 創造エネルギー専攻 博士課程修了．博士(工学)．在学中に日本学術振興会 特別研究員(DC1)に採択．現職では，研究開発員として，主に月面の水資源探査用分析装置の開発やシミュレーションを用いた宇宙放射線による有人被ばく線量を計算している。プロジェクトはMMX搭載IREMの開発責任者を務めるほか，OMOTENASHIや進行中のLUPEXを経験．

《目次へ

もう一つの月世界へ: 火星衛星探査計画MMX その16 ～SHV超高精細カメラシステム～

三橋 政次[1]，小畑 ひかる[1]

（要旨） NHKは，史上初となるMMXの挑戦を超高精細映像で記録･映像化し，放送などを通じて広く伝えるため，2020年にJAXAと共同研究開発契約を締結して宇宙空間で4K，8K撮影が可能な超高精細カメラシステム（SHV）を開発しました．振動試験による機器破損など多くの技術的課題を克服し，さらにJAXAの専用シミュレータを活用して撮影計画を検討することで，火星接近時の迫力ある映像やフォボスから見える「火星の出」など，これまでにない宇宙映像の取得に挑戦しています．

1. はじめに

NHKは，これまで宇宙を舞台にした番組を数多く制作してきました．ここで，いくつかご紹介したいと思います．

ひとつめは，スペースシャトルで行われた事例です．1998年，当時NASDA所属の向井宇宙飛行士がハイビジョンカメラを使って美しい地球の撮影に成功しました(図1)．宇宙飛行士しか見る事の出来ないスペースシャトルからの特別な景色を，鮮明なハイビジョン映像で届ける事が可能になりました．

2006年には，舞台を国際宇宙ステーションに移してハイビジョンの生中継を実現しました．その後，国際宇宙ステーションからは超高感度カメラによるオーロラの生中継や4Kカメラによる美しい星々の撮影に成功しています．

次の撮影は舞台を月に移しました．地球から約38万km離れた月を周回する探査機「かぐや」にハイビジョンカメラを搭載し，宇宙空間における撮影に挑みました．2007年9月に種子島宇宙センターからH-2Aロケットで打ち上げられた「かぐや」は，無事に月に向かう軌道に乗りました．その途中で撮影した地球の画像が図2です．地球から約11万kmの距離で青く美しい地球の撮影に成功しました．図3は，月の周回中に望遠のカメラで撮影した月面から昇る地球です．50年前のアポロ計画で，当時の宇宙飛行士が見たであろう，感動的で幻想的な景色をハイビジョンの映像で届けることができました．

そして今，我々はさらに難易度の高い火星圏の撮影に挑もうとしています．火星衛星探査計画MMXの探査機に，JAXAと共に開発したスーパーハイビジョンカメラを搭載して火星や火星の衛星の撮影を計画しています．

次の章からカメラのシステムや開発の裏側を解説し，現在検討を進めている撮影計画とその想定映像をご紹介します．

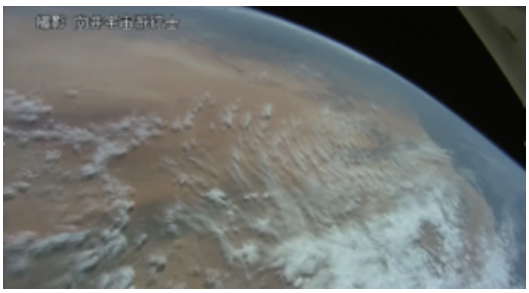


図1. 向井宇宙飛行士が撮影した地球．

1.日本放送協会
mitsuhashi.s-jo@nhk.or.jp



図2.「かぐや」がとらえた地球.



図3.「かぐや」がとらえた地球の出.

2. 探査機に搭載するカメラ

2.1 スーパーハイビジョン

探査機に搭載するNHKのカメラシステムは「SHV」という名称です. SHVは「Super Hi-Vision」の略ですが, これはスーパーハイビジョンという放送方式に由来しています.

ここでスーパーハイビジョンについてご説明します. ご家庭で広く見られているのはハイビジョンテレビですが, スーパーハイビジョンとは, その名の通りハイビジョンを超える超高精細な映像の規格です.

NHKが1995年から開発を進めてきたテレビ方式で, 2012年にUHDTV(Ultra High Definition Television)として規格化されたものです. 4Kや8Kの「K」は1000を意味しており, 4Kは横方向の画素が約4,000ピクセルで8Kは同じく約8,000ピクセルあります. 家庭のテレビはハイビジョンまたは4Kが普及していますが, 8Kはさらに高精細な映像で臨場感や没入感を感じることができます.

2.2 システムの概要

探査機には, 2式のスーパーハイビジョンカメラが搭載されています. 探査機の進行方向に取り付けられているのが, メインに使われる8Kのカメラです. Main SHV Cameraの名称が付けられ, 通称「MSC」と呼ばれています. 徐々に近づいてくる火星やフォボス降下時に直下の映像を撮影できます.

もうひとつのカメラは側面に取り付けられている4Kカメラで,「Side SHV Camera」の名称が付けられました. 通称名は「SSC」です. 側面には, このSSC以外に撮像機器がないため, 他の観測機器では捉えられない映像の取得が可能です. フォボスへの着陸時には水平線方向を撮影できます.

さらに, これらMSCとSSCを制御するための機器「SHV-E」があります. SHV-Eは2つのカメラに対して「撮影」や「画像転送」など各種制御コマンドを出力するCPUや画像データの処理や探査機のシステム通信などを担うFPGA, さらに画像データを一時的に保存するフラッシュメモリで構成されています. 2つのカメラ「MSC」と「SSC」, さらに「SHV-E」の3つを合わせた全体のシステムがSHVです. システムの概要を図4にまとめました.

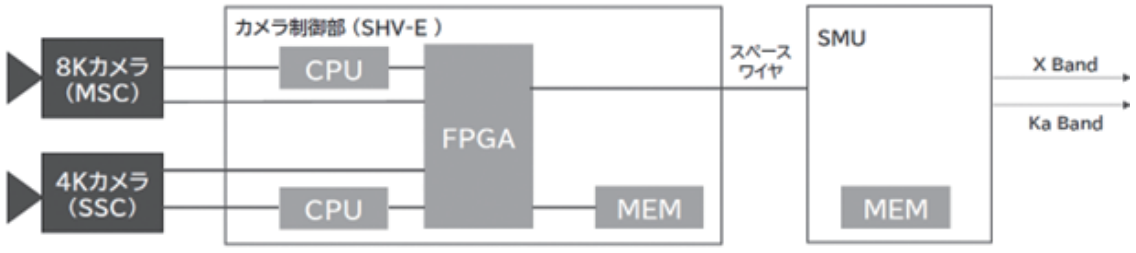


図4. SHVのシステム概要.

表1. MSCとSSCの仕様.

	MSC	SSC
画素数（H×V）	7680×4320	3840×2160
水平画角	約 65 度	
撮影間隔	最大で 10 秒に 1 枚	
保存形式	JPEG	
データサイズ	約 9MB/枚	約 4MB/枚

2.3 SHVのカメラ

MSCとSSCはどのようなカメラなのか・・・．主な仕様を表1に示します．それぞれのカメラには30 mm相当のレンズを付けていますので，広い画角の映像を撮影することができます．

撮影には最大10秒に1枚の「タイムラプス」の手法を用いています．スーパーハイビジョンのような超高精細の画像ではデータ量が膨大になり，地球に伝送するには相当な時間がかかります．宇宙空間では被写体の時間変化量が小さいことを想定し，この手法を採用しました．タイムラプスで撮影した画像をさらにJPEGでデータ圧縮してフラッシュメモリに保存します．

図5と図6はそれぞれのカメラの外観です．それでは，次の章で開発の裏側をご紹介しましょう．

3. SHV開発の裏側

3.1 開発の着手

NHKがSHVの開発に着手したのは，2017年頃のことです．最初は2，3名でスタートした技術体制ですが，メンバーの変遷を経ながら現在8名のチームとなっています．一大プロジェクトを動かすには心もとない人数に思われるかもしれませんが，この8名を中心に，各メーカーの専門家やJAXAの皆様から多大な協力を頂きながら開発を進めてきました．

メンバーの経歴は様々で，カメラ開発・研究の専門家や番組制作の技術メンバー，放送用伝送設備専門のメンバーもいて，宇宙用カメラの専門家集団とは言い難いチームです．

NHKは「放送用カメラ」に関する知見は持ち合わせていても，「宇宙用カメラ」についての知見はほぼありません．NHKでは，前述の通り「かぐや」搭載のカメラを開発した実績がありますが，今回の行き先は火星近傍であり，距離も環境も，これまでとは大きく異なるため，知見はほぼないに等しいのです．そのような状況の中で開発を進めることは，期待と同時に，大きな緊張感と常に隣り合わせでした．

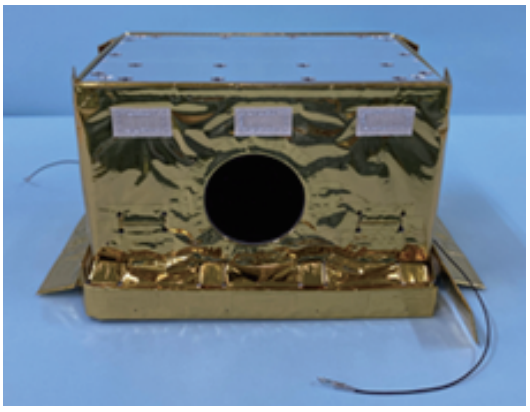


図5. MSCの外観.

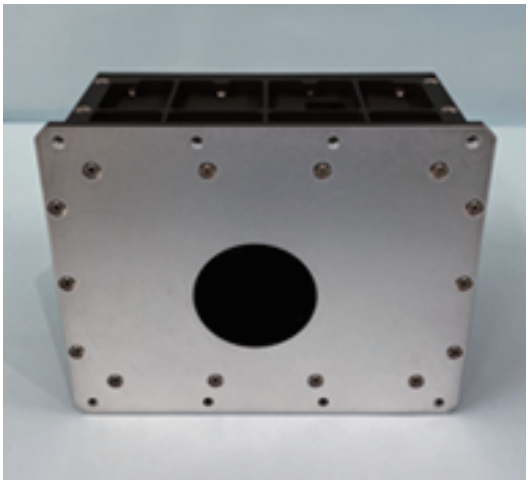


図6. SSCの外観.

3.2 環境試験

打ち上げに向けた試験や準備は最終段階を迎えていますが，振り返ると特に印象に残っているのは，数多くの環境試験です．宇宙線や真空環境，零下100℃以下から数十℃まで大きく変化する温度環境など，様々な条件下でも壊れず，機能を維持できるかどうか，類似環境を用意して試験する必要がありました．

また，探査機には，SHV以外にもさまざまな観測機器が搭載されています．私たちのカメラだけが動けばよいわけではなく，万が一にも他の機器へ悪影響を与えることは許されません．私たちの機材から部品が飛び出して何かを傷つけたり，真空の状態で気化した塗料の成分が，科学観測に悪影響を及ぼしたりすることはあってはならないので，そのようなことが起こらないことを確認するために試験が必要でした．その中からいくつかご紹介します．

3.3 レンズの試験

宇宙空間では強い紫外線に長期間さらされるため，レンズの経年劣化を検証する必要があります．そのため紫外線の照射試験を実施しました．宇宙環境を再現するための紫外線強度や照射時間の条件定義から実施して試験に臨みました．

紫外線を照射する装置はレンズ用の設備ではないため，どのような治具でレンズを固定するのか，どうすれば求めるデータが得られるかを考えるのも一苦労でした．アルミ板を積み重ねたり，当日薬局で買って用意したアルミホイルでレンズ以外の部分を覆って固定したりと，できる工夫を現場合わせで行ったのが印象に残っています．

試験結果としては，レンズ表面にわずかな変化が確認されたものの，撮像品質への影響は許容範囲内であることを確認できました．

3.4 振動試験

そして，最も冷や汗をかいたのは振動試験でした．STM（熱構造モデル）の完成後，一度目の振動試験は試験室内で手に汗握りながら観察していると，それまでの振動とは異なる音がしてきた瞬間がありました．最初は小さな違和感でしたが，時間が経つにつれ，カメラから「ガタガタガタガタ」と明らかな異音が・・・．試験後に撮影した画像を見ると，画面を大きく横切る黒い線があり，カメラは破損していました．

分解調査を経て原因となる部分を特定し，対策を講じて二度目の試験を迎えました．試験中は装置が揺れる音のみで，前回聞いたようなガタガタ音もありません．途中何度かの撮影を挟みながら試験は進行しましたが，最後の撮影で画像に薄い斑点が多数発生していることを確認し，2度目の試験も失敗．改めて分析すると，前回とは異なる破損の仕方をしていることが判明し，新たな対策を施しました．

原因調査して対策し，再試験を行う・・・．言葉で書けば簡単ですが，実際はそう簡単ではありませんでした．分解，分析に対応できる人材を集めなければなりませんし，試験のために外部の設備を借りる必要がありました．ようやく再試験の日程を確保し，対策にも手応えを感じながら臨んだ3回目の試験でようやくクリアとなりました．

3.5 開発を通じて感じたこと

様々な試験や改良を手探りの状態で5年ほど続けて来ました．地上では当たり前に動く機器でも，宇宙では当たり前ではありません．そのことを何度も実感しました．また，事務室の片隅で作業台を囲み，はんだごてと虫眼鏡片手に電気的な仕組みを検討したことや，ホワイトボードを囲んでソフトウェアの仕組みを議論したことも記憶に残っています．

SHVチームだけでなく，他のミッション機器チームやメーカーの皆さんの仕事ぶりを見ていても感じるのは，火星衛星探査のような最先端プロジェクトも，地道な作業と人の連携の積み重ねによって支えられているということです．これは宇宙開発に限らず，放送をはじめとする様々な分野に共通することではないかと思います．

4. 撮影の計画

4.1 何を撮影するか

スーパーハイビジョンという超高画質カメラを使って火星圏の撮影をするという願ってもないチャンスを与えられた我々ですが，実際に何を撮るのか・・・？これが最も大きな課題です．

火星やフォボス，ダイモスを撮影する・・・とは漠然と考えてきましたが，どのようなタイミングやアングルで撮るのかという詳細検討までは及ばず，皆目想像が出来ません．ましてや，それをシミュレーションするためのツールなどはNHKにありません．

かぐやのハイビジョンカメラでは，当時高知大学で教鞭を執られていた本田理恵先生に完璧なシミュレーションツールをご提供いただき，また月の専門家である白尾元理さんのサポートもあって，月面の様々な地形やクレーターの撮影，月の向こう側から見えてくる地球のなどの撮影にタイミングや日時を検討して無事に成功しました．

今回のMMXではそのような環境ではなく大きな壁に当たっていた時に，JAXAが開発した「MMXiSIM」というシミュレータの存在を教えていただきました．まさに我々が欲していたシミュレーションツールが存在し，これで撮影タイミングの検討が進む！・・・と救われた気がしました．

4.2 シミュレータ

筑波宇宙センターでMMXiSIMによるシミュレーションを実施し，SHVによる撮影タイミングや撮影対象の本格的な検討に入りました．本ツールは使いこなすのにハードルが高く，JAXAの皆様にご協力をいただきながらMSCとSSCで，それぞれ最適な撮影タイミングの検証をしました．

NHK側で撮りたい撮影候補をリストアップしてMMXiSIMでシミュレーションして具体的なタイミングや想定される映像を検証していきます．

MMXが火星圏に初めて踏み入れたタイミングで，火星の表面をダイナミックに撮影して皆を驚かせたい．軌道高度の違いで見られる様々なフォボスの表情を美しくとらえたい．フォボスだけでなくダイモスにも焦点を当てて，なるべく近くで撮影したい．フォボスの向こうから徐々に見えてくる「火星の出」というタイミングを見つけたい．

これらNHKの要望に応えてくれる素晴らしいツールで，このシミュレーション結果をもとにSHVの撮影計画を練り上げました．

4.3 想定画像

ここで，シミュレータを使った検証の結果をいくつかご紹介したいと思います．図7と図8はシミュレータMMXiSIMの画面で，画面の左側にある黄色のウィンドウはSSCの視野を図示しており，右側にある緑色のウィンドウはMSCの視野を示しています．まさにカメラで撮影する画面そのものをシミュレーションできます．また，それぞれ画角は映像の縦横比である16:9となっています．画面の影も忠実に再現されており，撮影する日時が決まればそれに応じた太陽の位置や角度から影の状態を忠実に再現します．さらに，背景に映る恒星や星々も正確に再現されます．

我々にとって最も大きな撮影チャンスは，MOI（Mars Orbit Insertion）と呼ばれる火星軌道への投入タイミングです．最初のMOIは探査機が火星に最接近するため，非常にダイナミックな映像を捉える貴重な撮影機会です．そのため，想定される探査機の姿勢とカメラの方向が非常に重要です．図7はシミュレーションの結果ですが，SSCで撮影できることが分かりました．シミュレーションの動画では，画面上部から徐々に火星がフレームインし，表面の細かい地形を捉えていることが分かります．

図8はQSO（擬周回軌道）期間中にどのような映像が撮影できるか検証した結果です．特にQSO-LCはフォボスから探査機の高度が最も低い期間のひとつであるため，フォボスと火星を同時に撮影する絶好のタイミングとなります．今回行ったシミュレーションでは，フォボスの地表から徐々に現れてくる火星のダイナミックな映像を捉えることができました．地上で見られる日の出のように，フォボス地表からの「火星の出」が撮影できることが分かり，我々は非常に興奮しました．

今回シミュレーションした画像は想定であり，探査機の打上げ時期や姿勢，さらに他のミッション機器による運用等で変わる可能性は十分にあります．これらの条件を十分に考慮したうえで，今回のシミュレーション結果をベースにMSCやSSCによる撮影タイミングを入念に検討して，SHV全体の撮影および運用計画に反映していきたいと思います．

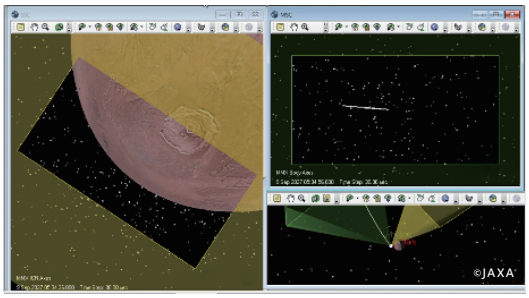


図7. 想定画像1(MOI-1).

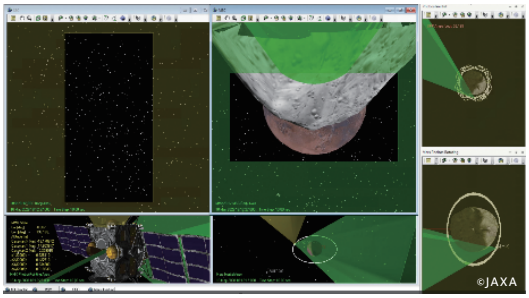


図8. 想定画像2(火星の出).

5. おわりに

この原稿を書いている今現在，種子島宇宙センターで最終的な試験を終了し外観の検査を残すのみとなっています．また，実際の運用に向けた計画の立案訓練に参加し，各種ファイルの作成やツールの運用スキルの獲得に取り組んでいます．これまで様々なトラブルや課題に直面しましたが，何とかここまでたどり着きました．

開発当初から，毎月開催される会議の場でJAXAの皆様に丁寧にアドバイスをいただいた事が大きな財産となっています．また各種ワーキングチームでもJAXAの皆様はもちろん，大学の先生や関連機関の皆様にも様々なご助言をいただきました．さらにメーカーの方々も宇宙機器の開発に不慣れな我々に辛抱強く対応いただきました．この場を借りて皆様に感謝を申し上げます．ありがとうございました．

これまで積み上げてきた経験や知見を十分に活かして，かつて見たことのない素晴らしい映像を取得できるようメンバー一丸となって進めていきたいと思います．

著者紹介

三橋 政次
1995年にNHKに入局し番組制作や撮像設備の開発，整備に従事する．月周回衛星「かぐや」のカメラ・レンズの開発など宇宙関連の業務にも多く携わる．現在は火星衛星探査計画(MMX)のSHVで撮影計画の策定などを担当する．

小畑 ひかる
2009年にNHK入局し音声を中心に関連設備の開発や整備、番組制作に従事する．2020年より火星衛星探査計画(MMX)のSHV開発チームに加わり、現在はSHVで主に撮影計画と運用を担当する．

《目次へ

一番星へ行こう!
日本の金星探査機の挑戦 その67
～長大な雲の不連続線ができるしくみ～

今村 剛[1], 前島 康光[2], 杉山 耕一朗[3], 佐藤 毅彦[4], ハビエル・ペラルタ[5],
ケヴィン・マクゴールドリック[6], 堀之内 武[7], 池田 恒平[8]

あかつきが金星に到着してほどなく，2016年，近赤外カメラIR2によって，金星の雲層下部領域において南北6000 kmにわたって伸びる鮮明な雲の境界線が発見されました(図1)[1,2]．この境界線の差し渡しは南アメリカ大陸に匹敵します．この境界線は5日間で金星を一周する速さで長期間にわたって西向きに伝播しており，境界線の後方(東側)では雲量が不連続的に増加します．この高度領域では大気はスーパーローテーションにより西向きに7日程度で一周するので，この雲塊は背景大気より速く伝播していることになります．こんな奇妙な雲はこれまでどの惑星でも見たことがありません．この雲は光学的に厚く，放射エネルギー収支や物質循環への影響も予想されますが，そのメカニズムは謎でした．

今回私たちは，この奇妙な雲がハイドロリック・ジャンプ(hydraulic jump，跳水)という，水平方向の層流が不安化して不連続的に速度を変え，局所的に強い上昇流が生じる現象で作られることを示しました[3]．この現象は身近なところでは台所の流しなどで簡単に観察できます(図2)．屋外では，山岳の風下や河川で流れの速度が変化する場所でしばしば見られますが，金星では東西方向の波長が4万kmにおよぶケルビン波という大気波動が引き金になっているものと推定されました．これは太陽系最大のハイドロリック・ジャンプと言えます．(なお，あかつきは金星で太陽系最大の山岳波も発見しています[4])

本研究では，地球気象の数値モデルCReSSを金星用に改変して，東西-鉛直方向に2次元の数値シミュレーションを行いました(図3)．ここでは，スーパーローテーションを追い越して伝播するケルビン波の座標系を採用したため，モデル内では背景風が東向き(図では右向き)となります．金星の雲の下にはケルビン波が伝播しやすい大気層があり，ここで力学的に不安定になったケルビン波が流れの速さを急激に変化させ，その変化が生じる前線に沿って上昇気流が作られます(図3a)．すると雲の下に濃集している硫酸蒸気が持ち上げられて冷却し，雲として凝結して，後方に流されていきます．前線の後方では浮力振動によって波状の構造が作られます(図3b)．シミュレーション結果によく似た，さざ波のような雲の濃淡模様がIR2によって観測されており(図3c，d)，実際にこのメカニズムが働いていることを示唆しています．硫酸の凝結過程のシミュレーションを行い，IR2で観測されたのと同じくらいの急激な雲量増加が起こりうることも確かめられました．

ひとまず解答を提出した格好ですが，これらの結果から，「金星の下層の雲は恒常的にこのメカニズムで維持されているのか？」「ケルビン波がこのプロセスで減衰するなら，背景風に運動量を渡すことによってスーパーローテーションの維持に寄与しうるか？」といった疑問が新たに浮上します．あかつきの観測は終了しましたが，手元に届けられたデータを

1.東京大学 新領域創成科学研究科
2.神戸大学 海事科学研究科
3.松江工業高等専門学校 情報工学科
4.宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
5.セビリア大学 理学部
6.コロラド大学ボルダー校 大気宇宙物理学研究所
7.北海道大学 地球環境科学研究院
8.国立環境研究所
t_imamura@edu.k.u-tokyo.ac.jp

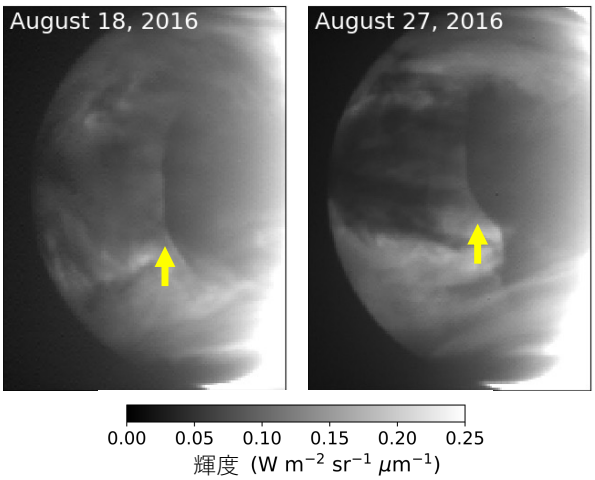


図1. 近赤外線カメラIR2によって2016年8月18日(左)と8月27日(右)に波長2.26 μmで撮影された夜側の雲([3]の図を改変). 高温の大気から発せられる赤外線を光源として上空の雲が影絵として映し出されている. 暗く見えるところほど雲が濃い. 不連続線の位置を矢印で示す.

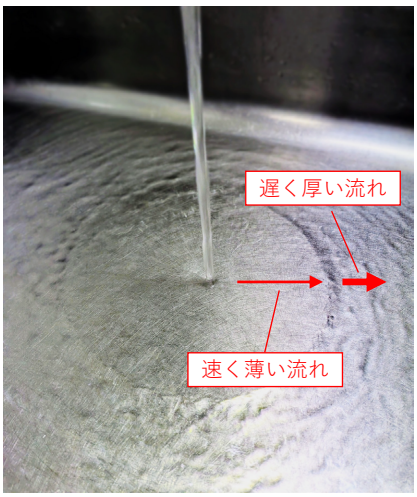


図2. 台所の流しで観察されるハイドロリック・ジャンプ (撮影: 今村剛).

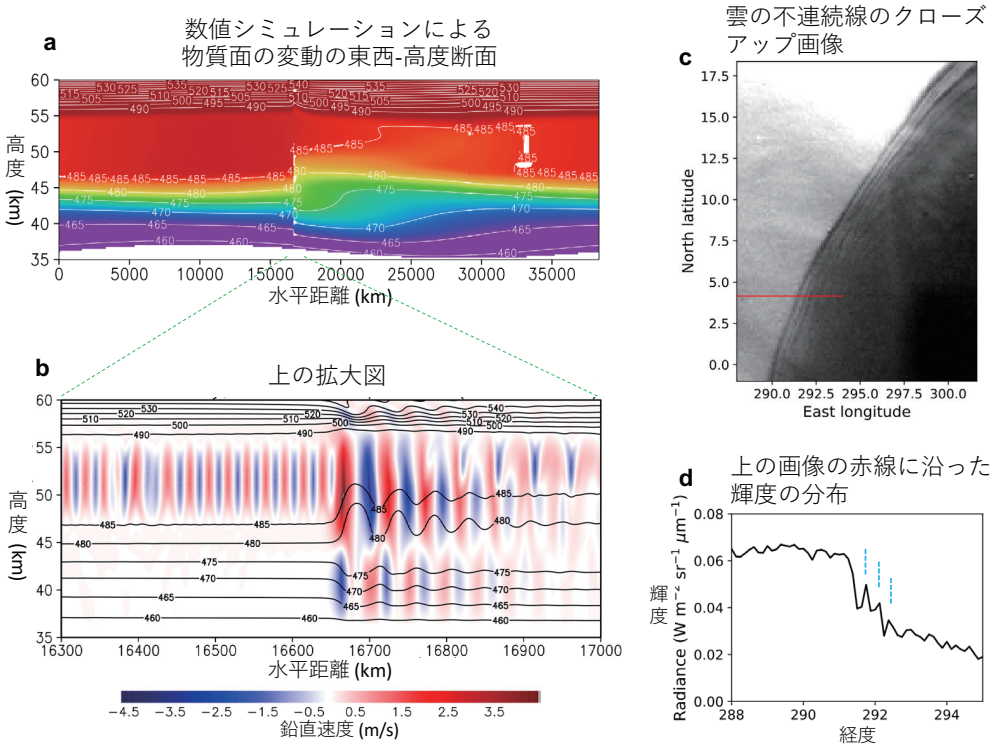


図3. 数値シミュレーションと観測の比較([3]の図を改変). (a)金星大気の数値シミュレーションでハイドロリック・ジャンプが発生したときの物質面(温位面)の東西-高度断面図. 水平距離17000 km付近で不連続的に段差が生じている. (b)上の図の不連続近傍の拡大図. 実線は物質面の変動を, 色は鉛直風の速度を表す. (c) IR2によって波長2.26 μmで撮影された不連続な雲構造のクローズアップ. 右側の暗いところで雲が濃くなっている. (d) 上の画像の赤線にそった明るさの分布. 波状構造の山の位置を青い破線で示した.

もとに，金星大気の探求が続いています.

参考文献

[1] Satoh, T. et al., 2017, Earth Planets Space 69, 154.
[2] Peralta, J. et al., 2020, Geophys. Res. Lett. 47, e2020GL087221.
[3] Imamura, T. et al., 2026, J. Geophys. Res. 131, e2026JE009672.
[4] 田口真ほか, 2016, 遊星人 25, 155.

《目次へ

系外惑星「遠い世界の物語」その18 ～系外惑星最古の謎―ホットジュピターの形成過程～

河合 優悟[1]

（要旨） 短周期巨大惑星であるホットジュピターは,木星のような外側の軌道で形成されたのち,形成場所から現在の軌道まで移動してきたと考えられる. その移動機構としては,原始惑星系円盤との相互作用による「円盤移動」と,伴星や他の惑星との重力相互作用による「高離心率移動」が有力である. これまで,主星の自転軸に対する惑星の公転軌道の傾きが高離心率移動の痕跡として広く観測されてきた一方,円盤移動を直接示す観測的証拠は限られていた. 本稿では,円盤移動の痕跡を識別する新たな手法とその移動過程への示唆について筆者が行った研究を紹介する.

1. はじめに

太陽系外惑星(以下,系外惑星)の発見は,公転周期が数日ほど,質量は木星程度のホットジュピターと呼ばれる惑星に始まる. 太陽系にこのような惑星はもちろん存在せず,その形成はいまだに多くの謎に包まれる.

この形成を考える上での一番の問題点は,原始惑星系円盤(以下,円盤)における材料不足であるといえる. 数日程度の軌道では,恒星からの輻射によりダストなどの固体物質は効率的に昇華する上,その限られた軌道半径によって,円環状の供給領域そのものも矮小化する[1]. このことから,ホットジュピターは現在存在している「その場」で形成されたのではなく,円盤のより外縁で形成されたのち,何かしらの機構を持って移動してきたと考えられている.

移動過程として有力なのは,伴星や他の惑星との重力相互作用で惑星の軌道離心率(以下,離心率)が励起された後,惑星内部での潮汐散逸によって近点付近で軌道が円形化される動的な「高離心率移動」と,円盤との相互作用によって内側へ移動する静的な「円盤移動」の二つである[2,3](図1). この二つを見分けられるような観測は,ホットジュピターの形成・移動過程を明らかにする上で大きなテーマの一つである.

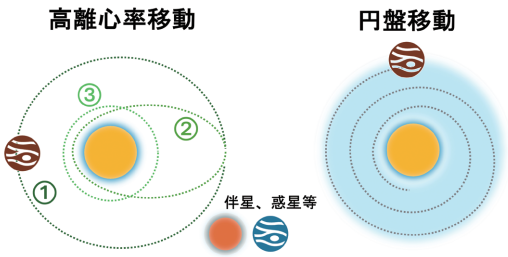


図1. 高離心率移動と円盤移動の概念図.

この鍵として長らく注目されてきた観測量に,惑星の軌道傾斜角(惑星公転軸と主星自転軸のずれ)が挙げられる. これは,円盤移動が比較的スムーズな過程であることに対し,高離心率移動では天体同士の重力相互作用によってホットジュピターの軌道が乱されると考えられてきたためである[4]. この予想は実際に的中し,現在までに数多くの(主星の自転に対して惑星の公転)軌道の傾いたホットジュピターが発見され,高離心率移動によってホットジュピターが形成されることの証左となっている[5].

1.東京大学総合文化研究科広域科学専攻広域システム科学系博士課程後期3年
yugo6581@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

一方で,軌道が傾いていないホットジュピターの存在の解釈については,より慎重な議論が必要である.これは,高離心率移動で形成されたホットジュピターであっても,その後の主星内部の潮汐散逸により軌道が主星と再整列する可能性があるためである[6].図2に示すように,ホットジュピターの軌道の傾きは主星の有効温度に強く依存することが知られている.主星の有効温度が6250 Kを下回ると軌道の傾いたホットジュピターはほとんど観測されておらず,これは潮汐散逸による再整列によるものと考えられている[7].

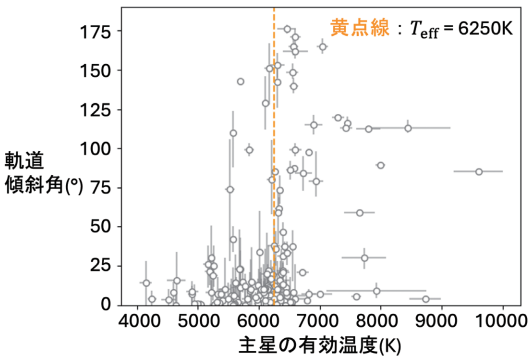


図2. 軌道傾斜角と主星の有効温度の関係.

結果的に,大きな軌道の傾きが高離心率移動の痕跡と解釈できる一方,軌道の傾いていないホットジュピターは,直ちに円盤移動を意味しないという問題につきあたる.これは軌道の傾きのみからホットジュピターの形成･移動過程(その比率など)を解き明かすことには限界があることを意味する.

そこで本稿では,軌道傾斜角が高離心率移動の証拠として有用であるならば,円盤移動の痕跡としては何が考えられるかという問いに着目した筆者の研究の成果を紹介する.

2. 手法

ホットジュピターがその場では形成されないという見地を取る場合,「円盤移動の痕跡」は,「高離心率移動と矛盾する痕跡」と同義である.この点において,軌道傾斜角を用いる場合は,軌道が傾いていないことが高離心率移動と矛盾しないことが問題であった.高離心率移動と矛盾する痕跡を検討するため,二つの移動過程の違いを再考する.

明らかな差異の一つが,移動のタイムスケールである.円盤移動では文字通り円盤が散逸する前に移動が完了するため,その過程は1000万年程度である.それに対して高離心率移動は円盤の散逸後に開始するため,例えば明らかに年齢が若いホットジュピターは,「高離心率移動と矛盾する」と考えられる.しかし,恒星の年齢を精度よく決定することは難しく,比較的高精度に年齢を決定できる星団に所属するようなホットジュピターは稀であり,サンプル数に乏しいという欠点がある.

そこで移動のタイムスケールという着眼点にもう一捻りを加えてみる.高離心率移動は円盤散逸後の(1)離心率の励起,(2)惑星の潮汐散逸による軌道の縮小と円形化の二段階に分解することができる.すると,円盤散逸直後ほど若い惑星でなくても高離心率移動と矛盾する可能性は十分にあることがわかる.

例えば第二段階の軌道の円形化について考えた場合,高離心率移動を経たホットジュピターが円軌道で観測されるためには,このタイムスケールが惑星系の年齢を下回る必要がある.逆に,円形化タイムスケールが系の年齢より長いにもかかわらず,既に円軌道を持つホットジュピターが存在する場合,その円軌道を高離心率移動で達成するには時間が不十分であり,これと矛盾する(図3).

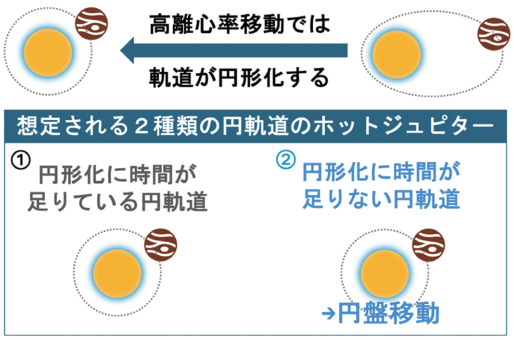


図3. 本研究で着目する「円盤移動の痕跡」.

そこで本研究の方針として,(1)円形化タイムスケールが系の年齢を上回る(2)円軌道であるという二つの条件を満たすホットジュピターを探索し,これが実際に円盤移動の痕跡として有用であるかどうかの検討をすることとした.

これにあたっての一番の課題は,円形化タイムスケールの不定性である.このタイムスケールは惑星内部における潮汐散逸効率の関数であり,ここに1-2桁の不定性がある.

潮汐散逸効率は,一軌道周期あたりに惑星系が失う軌道エネルギーの逆数として定義される. これは多くの場合定数であると仮定され,Q値(クオリティファクター)と呼ばれる[8]. ガス惑星のQ値は古くは木星とその衛星の軌道距離および離心率の関係から推定されてきた($6\times10^4<Q_J<2\times10^6$)[9]. しかし,不定性に加え,木星とは温度や圧力勾配なども異なるホットジュピターにおいてこのQ値が似た値を取るかは自明ではない.

そこでまずはホットジュピターのQ値を経験的に再導出することにした. その手法は以下のとおりである. 先述の通り,本研究で探索するのは(1)円形化タイムスケールが系の年齢を上回る(2)円軌道のホットジュピターである. 一方,軌道の傾きの観測からは,高離心率移動によって形成されたホットジュピターが少なからず存在することが示されている. したがって,円形化タイムスケールが系の年齢を上回るために高離心率移動を完遂できず,現在も楕円軌道にとどまっているホットジュピターも一定数存在すると考えられる.

このことから,ホットジュピターは,「円形化タイムスケールが系の年齢に等しくなる境界」を挟んで,円軌道の系と楕円軌道の系に最も明瞭に分かれると予想される. そこで本研究では,この関係を逆問題として捉え,現在発見されている500個以上のホットジュピターを対象に,境界の両側における離心率分布の差が最大となるような潮汐のQ値を探索した.

3. 結果

以上の解析から,ホットジュピターに典型的なQ値を統計的に導出することに成功した($Q=4.9^{+3.5}_{-2.5}\times10^5$). 見立ての通り,ホットジュピターの離心率分布には明瞭な境界が存在し,得られたQ値の不定性は1桁以下となった[10].

また,興味深いことに,この値は木星の潮汐散逸効率とも整合的である. さらにはホットジュピターのサンプルを木星質量あたりで分割して同様の解析を行なった場合も同様のQ値が得られ,これがガス惑星においては質量に大きく依存しないという示唆も得られた.

そして本題の「円盤移動の痕跡」を持つホットジュピターも約30個同定することができた. ではこの推定は本当に正しいだろうか. この手法が有用であれば,これらのホットジュピターは,円盤移動で形成された際に期待される他の特徴を持つはずである.

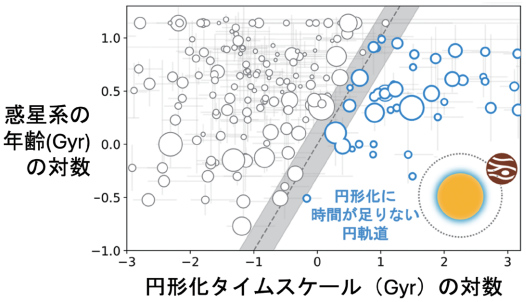


図4. 円軌道の惑星系の年齢と円形化タイムスケールの関係.点線より右に位置する惑星は円形化の時間が足りないにもかかわらず円軌道であり,円盤移動が示唆される.

まずは,ホットジュピターの観測量一番の古株である軌道の傾きを見てみる. 嬉しいことに,これまでに軌道傾斜角が計測された「円盤移動の痕跡」を持つ(高離心率移動後の再整列の懸念がない)ホットジュピターのほとんど全ての軌道が揃っている(図5). それればかりか,「円形化タイムスケールが系の年齢に等しくなる境界」は離心率のみでなく,円軌道のホットジュピターにおける軌道傾斜角も二分するようである.

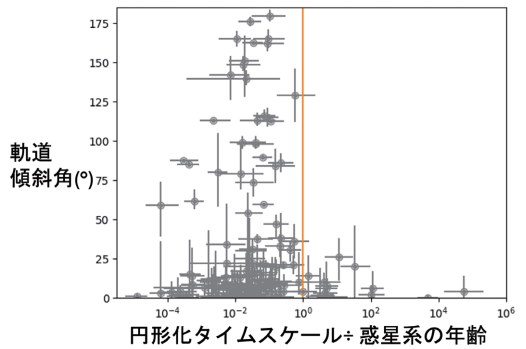


図5. 円軌道の惑星の円形化タイムスケールと軌道傾斜角の関係.横軸は同タイムスケールを惑星系の年齢で割ったもので,黄色で示した縦線でその値が1となる(軌道の円形化にかかる時間がちょうど惑星系の年齢と同じになる).図4同様,この線より右に位置する点が本研究で同定した円盤移動が示唆される惑星である.

離心率を用いた本研究の解析では軌道傾斜角の情報は用いていないため,この二つの傾向は円形化タイムスケールを用いたこの手法が,円盤移動の痕跡として正しく機能していること,またそのタイムスケールの計算に用いたQ値の導出にも妥当性があることを示している.

加えてこの結果は,円盤から形成された時点では,多くの惑星の軌道は傾いていないことも示している.冒頭では簡単のため触れなかったものの,円盤自体が主星に対して傾いた軌道で形成された場合は,惑星の軌道も傾くことが期待される.円盤がどのくらいの頻度でどの程度傾いて形成されるかは自明ではない.これは大きな軌道の傾きの解釈すら難しくする側面があったため,円盤由来の傾きが限られるという示唆は重要である.

次に,注目するのは近接する他の惑星の存在頻度である.高離心率移動においてはホットジュピターの前身である惑星は高い離心率を獲得するため,他の惑星と交差するような軌道を持つ可能性が高くなる.シミュレーションからも高離心率移動は他の惑星を排除する傾向が示されており[11],そのような惑星と共存するホットジュピターは,円盤移動で形成された可能性が高いといえる.

このことを念頭に,円形化タイムスケールと近接する他の惑星をもつホットジュピターの関係を調べた.図6に見るように,ホットジュピター全体は円形化タイムスケールが系の年齢より短い領域に集中している(比では年齢の1%ほど)ことに対し,近接惑星をもつ系は,特にそのような傾向は見せずに点在していることがわかる.むしろ7個の内4つの系は誤差の範囲内で,円盤移動の痕跡を持つ.近接惑星系において,タイムスケールの観点からも円盤移動が好んで示唆されることは,軌道傾斜角の比較と同様に本手法の有用性を示している.

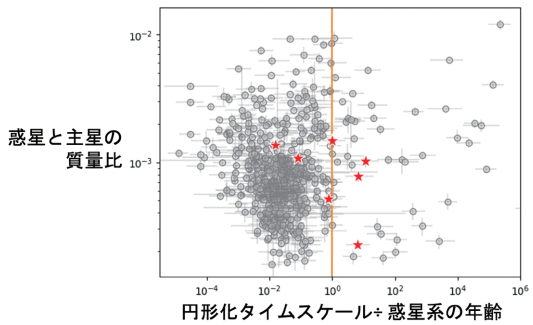


図6. 図5と同じ横軸に対して,惑星と主星の質量比を図示した図.赤い星印が近接惑星とホットジュピターをもつ惑星系を示す.

また,近接惑星を持つ系の円形化タイムスケール分布が全体と異なる傾向にあることからは,高離心率移動と円盤移動の比率を制約することができる.図4に見えるように,ホットジュピターの大半は円形化タイムスケールが系の年齢を下回り,かつ円軌道にある.このようなホットジュピターは円盤移動と高離心率移動のどちらとも矛盾しないため,いずれの過程でもその形成を説明可能であり,移動の痕跡を持たない.

仮にこれらのホットジュピターの大部分も円盤移動によって形成されていたならば,それらの周囲にも本研究で同定された円盤移動の痕跡をもつホットジュピターと同程度の頻度で近接惑星が見つかると期待される.しかし,実際には移動の痕跡を持たないホットジュピターが近接惑星を伴う例はさらに稀である.このことは,ホットジュピターの大多数が高離心率移動を経て形成された可能性を示唆する.

4. 最後に

本研究では,ホットジュピターはどのように形成されるかという系外惑星研究における最古の課題の一つに,これまで数が限られていた「円盤移動の痕跡」を探すという観点から取り組んだ.

このために,高離心率移動の前提である潮汐による軌道の円形化と,そのタイムスケールに着目した.そしてこのタイムスケールが惑星系の年齢に対して長い場合,そのホットジュピターが円軌道にあることは,円盤移動の痕跡として有用であることを多角的に示した.そして高離心率移動がホットジュピターの大多数を説明しうるという制約も与えることができた.

また,改めて推定したホットジュピターのQ値が大きな質量依存性を持たないこと,木星の値と整合的であることは,これらのガス惑星の内部構造が類似している可能性を示唆している.

最後に,軌道の傾きなどから得られる高離心率移動の痕跡に加えて,本研究で示した円盤移動の痕跡は,今後のホットジュピターの大気観測を解釈する上

でも重要な情報となる. Ariel宇宙望遠鏡などの将来計画によってC/O比をはじめとする大気組成の観測から多数のホットジュピターの円盤における形成場所の推定が期待される[12]. 形成場所と,その後の移動過程の両方を明らかにすることで,ホットジュピターの形成と進化のより包括的に理解つながるだろう.

参考文献

[1] Dawson, R. I. and Johnson, J. A., 2018, ARA&A 56, 175.
[2] Wu, Y. and Murray, N., 2003, ApJ 589, 605.
[3] Tanaka, H. et al., 2002, ApJ 565, 1257.
[4] Fabrycky, D. and Tremaine, S., 2007, ApJ 669, 1298.
[5] Knudstrup, E. et al., 2024, A&A 690, A379.
[6] Albrecht, S. et al., 2012, ApJ 757, 18.
[7] Winn, J. N. et al., 2010, ApJ 718, L145.
[8] Yoder, C. F. and Peale, S. J., 1981, Icarus 47, 1.
[9] Goldreich, P. and Soter, S., 1966, Icarus 5, 375.
[10] Kawai, Y. et al., 2025, AJ 170, 299.
[11] Mustill, A. J. et al., 2015, ApJ 808, 14.
[12] Tinetti, G. et al., 2022, EPSC 16, EPSC2022-1114.

《目次へ

遊星人の海外研究記 その21 ～家がなくても万引きに間違えられても C'est la vie ― パリで生き抜く研究サバイバル記～

川村 太一[1]

1. はじめに

はじめてフランス，そしてヨーロッパの地に足を踏み入れたのは，2009年10月のことでした．当時，博士課程の2年目だった私は，たった一人でパリのシャルル・ド・ゴール空港に降り立ちました．「これからフランスで生活するのだから，まずはフランス語を学ばなければ！」と思い立ち，あえて標識のフランス語の部分だけを見て歩いていたところ，見事に空港内で迷子になり，「『右も左もわからない』とはよく言ったもんだな……」と自嘲したのを覚えています．そんな訳のわからない意地を張っていた当時は，まさか自分がこの国でこれほど長く，多くの時間を過ごすことになるとは想像すらしていませんでした．学生として約15ヶ月，その後，ポスドクとして4年間，そして現在のパーマネント職を得てから8年以上と，気がつけば合算で13年以上の年月をこの地で過ごしてきました．言語も文化も，そして生活空間も全く異なる国での暮らし自体がすでに大冒険ですが，現在の職に就いてからは，日本とは全く異なる大学の習慣や文化，複雑な制度などに右往左往しながらも，なんとか今日まで過ごしてきました．この海外研究記では，そんな経験を通じて感じたことや学んだこと，そしてそもそも「なぜ私がフランスでこれほど長く働くことになったのか」というその経緯などについて，ご紹介したいと思います．

1.パリ地球物理研究所／パリシテ大学
kawamura@ipgp.fr

2. なんで私がフランスに？

他分野や一般の方々とお話しする際，よく「なぜフランスに？」と尋ねられます．惑星科学分野の皆様には今更言うまでもないことかもしれませんが，私が所属するフランスのInstitut de Physique du Globe de Paris（IPGP：パリ地球物理研究所）は，1世紀以上の歴史を誇る，世界有数の地球・惑星科学の総合研究機関です．地球内部構造から表層の地震・火山活動，自然災害の軽減，さらには太陽系天体の進化解明まで，広範な領域において先導的な研究を展開しています．日本の学術界とも強固な協力体制を築いており，JAXA「はやぶさ2」ミッションによる小惑星試料の分析への参画や，東京大学地震研究所との公式パートナーシップに基づく共同研究・人材交流など，日仏を繋ぐ国際的な連携を力強く推進しています．実は，地球物理学者でもある伊与原新氏の小説『磁極反転の日』のクライマックスにおいて，IPGPの研究者がとある発見をする場面が描かれています．異国の地で日本の小説を読んでいて，自らの所属先の名を目にし，個人的には思わず胸が躍ってしまいました．ご興味のある方はぜひ手に取ってみてください．

そんな中，私は宇宙惑星科学講座（L'équipe Planétologie et sciences spatiales）に所属しています．この研究室は，NASAの火星探査ミッション「InSight」に搭載された広帯域地震計（VBB）を開発した，惑星地震学および宇宙での地震探査をリードする存在です．VBBは，地球の観測用も含め，これまでに開発されたなかで「最も高性能な地震計」

とも言われており,火星での実績を経て,現在では月や火星のみならず,エンセラダスやカリストなどの氷衛星への応用も検討されています.今でこそ「惑星地震学」という言葉を耳にする機会が増えましたが,私が学生の頃は非常にマイナーな分野でした.私が研究を始めた頃でも,解析に使えるデータといえばすでに約30年前のアポロ計画のものだけで,世界的に見てもアクティブな研究者はごくわずか.その数少ない一人こそ,私の恩師であり,現在の上司でもあるPhilippe Lognonné教授でした.Lognonné教授は,かつてロシアの「Mars 96」ミッションに搭載予定だった地震計のPIを務めるなど,この分野を牽引してきた人物です.そんな教授が,当時私が学生として所属していた宇宙科学研究所(宇宙研)の研究会を訪れたこと.それが,私とフランスの“ご縁”の始まりでした.当時は月周回衛星「かぐや」が現役で活動しており,その裏で月着陸機「SELENE-2」の検討が進んでいました.そこに日仏共同開発の地震観測システムを提案するため,宇宙研で共同研究会が開催されたのです.そこで指導教員であった田中智教授が「明日の研究会で少し時間が空いたんだけど修士論文の結果を発表しないか,最悪日本語のスライドで発表だけ英語でもいいから」という無茶振りをしてきました.かなり突貫工事で仕上げたものの,その発表がきっかけとなり,博士課程の間に日仏共同博士課程(cotutelle:コチュテル)の学生として渡仏することになりました.これが私のフランス生活のスタートです.残念ながらSELENE-2プロジェクト自体は中止となってしまいましたが,その際に開発していたフランス側の広帯域地震計技術が後の「InSight」に,日本側の短周期地震計技術が後のタイタン探査ミッション「Dragonfly」にそれぞれ引き継がれ,採択されることになります.現在,その双方のミッションで仕事をさせていただけているのは,今振り返っても本当に不思議で,素晴らしい縁に恵まれたと感じています.その後,Lognonné教授や,日本での指導教官である宇宙研の田中智教授のご指導のおかげで,無事に日仏双方から学位を取得することができました.ただ,当時はまだ日本で「cotutelle」や「ダブルディグリー」という言葉がほとんど認知されていなかった時代.大学の教務窓口で制度の説明をした際,担当者の方に「ポカン」とされてしまったのは,今でも忘れられない懐かしい思い出です.

その後,無事にInSightがNASAのDiscoveryクラスのミッションとして正式採択され,今度はポスドクとして再び渡仏することになりました.ミッション採択後に初めて採用されたポスドクということもあり,プロジェクトの立ち上げ段階から深く携わる機会に恵まれました.当初の予定では,私のポスドク任期が終わる頃に打ち上げが予定されており,それに向けて運用計画の立案や火星地震検出のためのデータ解析パイプラインの開発,検証用・火星模擬データの作成など,数多くのタスクを任せていただきました.しかし,そんな順風満帆な日々に,地震計開発の思わぬトラブルが発生します.超高感度な地震計の内部は,微小な空気対流によるノイズすら防ぐため,極めて高度な真空状態に保たれています.ところが,どうやら「その真空が漏れているらしい」という試験結果が出たため,文字通り24時間体制での検証作業が始まりました.それまであまり試験に参加していなかった学生やポスドクも含めて,研究室のメンバー全体が3交代制を組み,1人8時間ずつシフトを担当してラボに泊まり込みで試験を続ける,そんな緊張感のある生活が続きました.

祈るような思いでの検証でしたが,残念ながら真空リークは確実なものとなり,予定していた打ち上げウィンドウには間に合わないことが決定的となりました.その延期の決定を告げるチームミーティングの,あの何とも言えない重苦しい空気は今でも忘れることができません.(当時, 学生としてフランスに滞在していた大阪教育大学の西川泰弘氏が,「フランス語で何を言っているかは全然わからなかったけど,『やばい』ってことだけは明確にわかりました」と語っていたのが,今となっては非常に印象的です.)実は当時,InSightの命運を巡り,「ある程度のノイズレベルの上昇を覚悟してでも,予定通りの日程で打ち上げるべきではないか」という妥協案も議論されていたそうです.しかし,現在,実際に取得された火星のデータを目にしているからこそはっきりとわかりますが,もしあの時,劣化したノイズレベルのままで妥協して打ち上げていたら,今日報告されている大部分の火星地震は検出できていなかったでしょう.最終的にプロジェクトチームは,「2年遅らせてでも最高性能の地震計を開発して火星に送る」という決断を下しまし



図1. 所属するパリシテ大学にある通称「火星オペレーションルーム」. InSightの運用中はここで多くの時間を過ごし，科学的な解析から運用方針まで日々熱い議論を交わしました. 壁にはミッションや地震計のグラフィックが数多く飾られており，打ち上げの様子や地上試験の様子を見ることができます.

た.結果としてInSightの打ち上げは延期となりましたが,今振り返れば,これこそがミッションを成功へと導いた最高の「英断」だったと言えます.とはいえ,その英断の結果として,私自身のポスドク任期中にはInSightが打ち上がらないことが確定してしまいました.こうして私は，志半ばで一度フランスを離れ，日本の国立天文台へと拠点を移すことになったのです.

その後,無事に真空リークの問題も解決し,正式に2年遅れでのInSightの打ち上げが決定しました.当時,国立天文台にいた私は,「はやぶさ2」や「MMX（火星衛星探査計画）」,さらには新しい小型探査ミッションの提案や検討に携わりながら,InSightの仕事も粘り強く続けていました.「ようやく打ち上げに至ったInSightになんとしても関わり続けたい,実際の火星地震データを自分の目で見てみたい」,そんな一心で,今後ミッションに関わるための方法を模索していた矢先のことです.恩師であるLognonné教授から,思いがけない連絡がありました.「InSightの打ち上げが決まったから,うちの研究室で正式に准教授を1名採用することになった.興味はあるか?」これまで長く関わってきたフランスという国に愛着はあったものの,さすがに「期限なしのパーマネント職」と言われると,人生の大きな決断に少し怯んでしまったのも事実です.しかし最後は,「やはり惑星地震学の最先端,そのフロンティアにいちプレイヤーとして挑戦し続けたい」という強い思いが背中を押し,覚悟を決めて公募に挑戦.幸いにも無事に採用され,現在に至ります.

こうして振り返ってみると,私のフランス生活は,偶然の素晴らしい出会いと,自身のキャリアのタイミングが「InSight」という大きなプロジェクトの節目と見事に重なったという,数々の幸運に恵まれて成り立っていると痛感します（図1）.その意味で,恩師であるLognonné教授には感謝してもしきれません.ただ一つだけ.採用面接の準備をしていた際,最初は「面接は英語で大丈夫」と仰っていたにもかかわらず,本番のわずか1週間前になって,「ごめん！やっぱ大学の規定でフランス語必須らしい！でも頑張って！」と連絡してきたあの無茶振りだけは,今でも小声で文句を言いたくなります.

3.「J'ai payé !（払った!）」から始まった語学サバイバル

海外に飛び出そうとする若手研究者にとって,一番の不安の種はやはり「語学」ではないかと思います.科学の世界の公用語は英語とはいえ,現地での日

常生活や様々な局面において現地の言葉が必要になる場面は多く,特に非英語圏に行こうとする場合は気になるところでしょう.実際,現在の私自身の日々の業務での言語比率を振り返ってみると,体感として「50%がフランス語,30%が日本語,20%が英語」といったところです.この比率は自分のキャリアステージ(学生時代,ポスドク時代,准教授)によって明確に変化してきました.学生時代はもちろんほとんど英語でしたし,ポスドク時代もInSightが大型国際ミッションだったため,公式なミーティングは基本英語,ローカルな議論や日常会話のみがフランス語という環境でした.しかし,パーマネント職である現在は,大学の業務や学生の指導なども加わり,フランス語の重要性が大きく増しています.

これを聞くと,「もしかして最初からある程度フランス語が話せたのでは?」と思われる方もいらっしゃるかもしれませんが,それは完全な誤解です.実は私が初めて渡仏した際,本当に「最低限のフランス語すら覚えていかない」という愚行を犯していました(お恥ずかしい話ですが,当時は「パリジャン」という男性名詞と「パリジェンヌ」という女性名詞の違いすらよく分かっていなかったレベルです).理由は単純で,「大学の中は英語で大丈夫だろうし,それ以外もなんだかんだ英語でなんとかなるだろう」と,完全に楽観視していたからです.

しかし,その甘い考えは渡仏してわずか数日で無残にも打ち砕かれることになります.渡仏前,研究室の秘書さんが「こちらの家探しは研究室の方でやっておくからね」と仰ってくださっていたため,私は住まいに関して何も心配せずに直接パリのラボに向かいました.ところが,そこで秘書さんから告げられたのは,「ごめん!予定していたアパートに住めなくなった!とりあえずホテルを押さえたから,しばらくそこにいて!」という衝撃的な内容でした.今となってはよく分かりますが,フランス,特にパリは常に深刻な住宅不足です.学生向けの安いアパートは非常に競争率が高く,学生同士でのルームシェアも珍しくありません.そんな事情も知らずにのんびり構えていた私は,あてが外れてホテルを転々とするサバイバル生活を余儀なくされました.「状況は遅々として進まないし,もう待っていられない!」と一念発起した私は,自分で直接,街の不動産屋に乗り込むことにしました.付け焼き刃で調べたフレーズを握りしめ,なるべくフランス語を使わずに済むよう,店先で *"Est-ce qu'il y a quelqu'un qui parle anglais ?"*(誰か英語を話せる人はいますか?)と尋ねたのですが結果は,あえなく撃沈.その後,事前に調べたメモを片手に「自分は近くの大学の学生で,家を探している」となんとか伝えようと試みたものの,全くコミュニケーションが取れず,何の成果も得られないまま肩を落としてホテルに戻ることになりました.幸いにも,その後偶然知り合った日本人の方にパリ在住者向けの情報誌などを教えていただき,そこで物件を契約することができました.結果的には秘書さんを頼るよりも早く家を見つけることができ,さらにパリの日本人コミュニティとも繋がることができたため,終わり良ければすべて良しではあったのですが,「フランスでは英語だけでは生きていけない」という現実を痛感した最初の洗礼でした.それでも,「まずは研究が最優先」という思いがあったため,当時の語学学習は“そこそこ”のペースでした.

そんな私の語学に対する態度に,真の転機が訪れたのは,渡仏から2ヶ月ほど経った頃です.ある日,いつものようにスーパーで買い物をし,会計を済ませた後に一品買い忘れに気づきました.すぐに店内に戻り,その商品だけを手に取ったのですが,再びレジの長い列に並ぶのが面倒だったため, セルフレジを利用することにしました.会計を済ませ,袋には入れずに商品をそのままポケットにねじ込んで退店しようとしたその瞬間,私の倍はあろうかという巨漢の警備員に呼び止められたのです.わけも分からず裏のオフィスに連行され,どうやら「ポケットの中身を全部出せ」と強い口調で言われているようでした.状況からして,私が万引き犯だと疑われていることは一目瞭然です.極限の緊張と焦りの中,私は素直にポケットの品物とセルフレジのレシートを同時に差し出し,自分の知っている最大限のフランス語で,「J'ai payé ! J'ai payé !」(払った!払った!)と,ただひたすら連呼しました.幸いにもレシートの内容が一致したため誤解はすぐに解け無事に解放されましたが,この時の恐怖と無力感は筆舌に尽くしがたいものでした.この日を境に,私の真剣かつ必死なフランス語学習の日々が始まったのです.

相変わらず大学の中では基本英語でしたが,通学

などの移動時間は基本フランス語のインプットに充てました.MP3プレイヤーにNHKのラジオフランス語講座の音声を取り込み,電車の中で内容を完全に理解できるようになるまで繰り返し聴き続けました.また,タイミング良くクリスマス休暇に入ったため,その休暇を丸々使ってフランス語の教科書を1冊読み切りました.その際に意識したのは,「英語と似ているルール」と「全く違うルール」を明確に分類して把握することです.幸いなことに,フランス語は英語と共通する語彙や構造も多いため,「似ている部分」を意識して活用するだけでも,短期間でかなりの会話が成り立つようになってきました.

そして,私のフランス語学習を最も力強く支えてくれたもう一つの味方が,「日本や日本語に興味を持つフランス人の存在」でした.パリには, フランス語を学びたい日本人と,日本語を学びたいフランス人が集まる言語エシャンジュ(échange linguistique:言語交換)のサークルがあり,私はそこへ積極的に参加するようにしたのです.そのサークルでは週に2回カフェに集まり,「1日はフランス語を学ぶ日,もう1日は日本語を学ぶ日」というルールで活動していました.フランス語を実践的に学ぶことはもちろんですが,「自分の母語である日本語の構造を,相手に分かりやすく教える」という経験自体が,言語の論理的理解において非常に貴重なトレーニングになりました.ある程度の意思疎通ができるようになってからは,こうしたサークルに足しげく通い,ひたすらネイティブと会話をするという実践を繰り返しました.かなり泥臭くラフな学習方法ではありましたが,この「切実な体験」と「実践の繰り返し」のおかげで,日常会話はなんとか現地で生活できるレベルへと上達していきました.

次に皆様が気になられるのは,「それでは,どのようにして研究現場で議論に使えるレベルにまで引き上げたのか」という点かと思います.結論から申し上げますと,これについては完全に「大学の研究現場で泥臭く実地経験を積んだ」というのが私の学習メソッドでした.

当然ながら研究の世界には独特の専門用語や言い回しが数多く存在し,それらは結局のところ現場でしか学べません.しかし,最低限の日常会話ができるようになると,フランス語のミーティングに参加しても「今,何のトピックについて話していて,何が問題になっているのか」という大きな流れはある程度「追える」ようになります.特に自身の専門領域やプロジェクトに関する議論であれば,すでに十分な背景知識を持っているため,単語単位で分からない箇所があっても,文脈から大まかな内容を推測して追えることが増えていくのです.

そこで私は,「ミーティング中に耳にしたけれど分からなかった単語をメモし,文脈から意味を予測しておき,後から調べて答え合わせをする」という作業を習慣にしました.この答え合わせの習慣は,現在のパーマネント職に就いてからもずっと続けています.もちろん時には,「議論の非常に重要なポイントだということは分かるけれど,細部まで正確に聞き取れなかった」という場面に直面することもあります.そうした時は体面を気にせず,「申し訳ないけれど,ここは重要ポイントだから間違いなく理解したい.英語でもう一度説明してくれないか」と頼むことも決して少なくありませんでした.

ポスドク時代,プロジェクト関連のミーティングが増えていく中でこうして着実に表現のストックを増やし,少しずつ研究の議論にもフランス語で直接対応できるようになっていきました.幸いにも,フランス語の科学・学術用語の多くは英語と語源が同じで似ているという点も,習得の大きな助けになったと感じます.こうした泥臭いインプットとアウトプットをポスドクの4年間続けた結果,二度目のフランス滞在を終えて離れる頃には,基本的にミーティングもフランス語で対応できるようになり,プレゼンテーションをフランス語で行う機会も着実に増えていました(図2).

この一連の経験を通じて強く感じたのは,「学んだ用語や表現は,辞書で調べて意味を知っただけでは決して定着せず,実際に自分で使ってみて初めて記憶に刻まれる」ということです.意味を知っただけで満足してしまうとすぐに忘れてしまうため,「せっかく調べたのだから,次のミーティングではこの表現を使ってみよう」「今回の報告では,あえてこの専門用語を使って説明してみよう」と,常に意識的にアウトプットの機会を狙うようにしていました.文法から一から真面目にコツコツ学ぶタイプではなく,完全に「現場実践型」であった自分にとって,この点を意識し続けたことは非常に重要だったと思います.

おかげさまで,現在は,講義や大学の運営業務,教

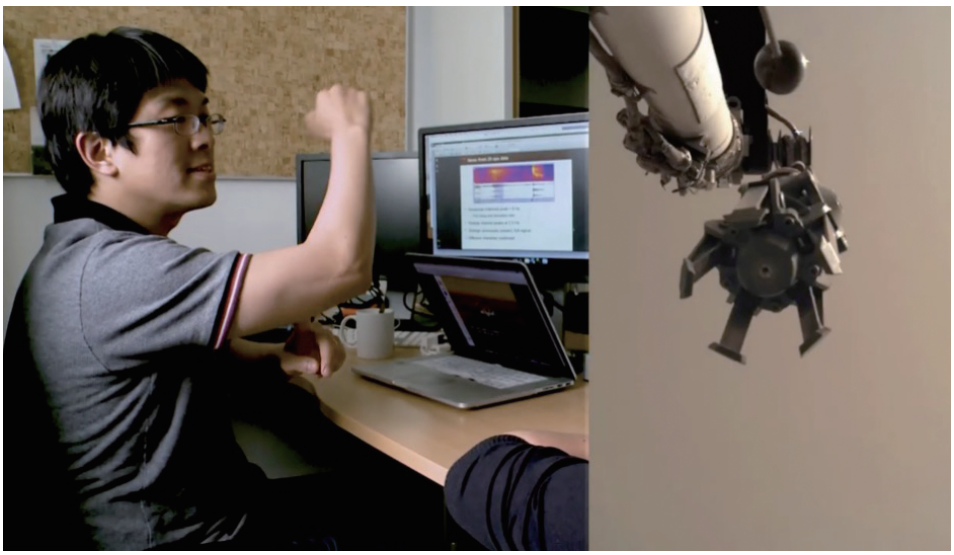


図2. 大学の広報動画にて，火星地震の検出方法を解説する様子． 画面の波形データを指し示しつつ，身振り手振りも交えてフランス語で説明中．言葉の壁を越えて熱意を伝える上で，ジェスチャーも立派なコミュニケーションツールの一つです(https://www.youtube.com/watch?v=V5CbVQic0lE&list=PLeutYo3rvk6rgtUKZ2PU4EsSo4e2VRLLy&index=5より転載．パリシテ大学の広報用の動画シリーズ，SEIS: le sismomètre de Marsの一部として公開中)．

務関係のやり取りも基本的にはすべてフランス語でこなせるようになりました．ただし，やはり今でも私自身の中では「永遠の勉強中」という感覚は拭えません．講義の直前には緊張感から重要表現を調べ直すことは欠かすことができず，何年経っても授業準備が一向に楽にならないのは，今なお尽きない悩みのタネです(以前，学期末に行われた学生による授業評価アンケートの中で，「フランス語で質問したのに通じない先生がいた」と書かれた時は，さすがに冷や汗をかいて焦りましたが……)．

余談ですが，フランス語は非常に表現力が豊かで，歴史に根ざしたユニークな慣用句が数多く存在する言語です．こうした慣用句は，単語を文字通りに解釈しようとしても全く意味が通じません．最近の研究室の同僚たちの定番のイタズラは，私との日常会話の中にわざとそうした難解な慣用句をさりげなく盛り込み，私の「ギョッとした表情」を大いに楽しんだ上で，得意げにその意味を教えてくれるというものです．

このように，私は渡仏当初の失敗に始まり，今に至るまで非常にサバイバルな姿勢で現地の言語と向き合ってきました．「必要は発明の母」とよく言いますが，科学の世界においても同様で，「そこで生き残り，研究を進めるため」という明確な必要性と実践の場さえあれば，年齢や開始時期に関わらず十分な語学を習得することは可能である，私のこの泥臭い体験談から，そんな前向きなメッセージを皆様にお伝えできれば幸いです．

4. 授業時間は「買い取る」もの？フランス大学教員のリアルな教育事情

フランスの研究職にはいくつかの種類があります．例えば，フランス国立科学研究センター(CNRS)の専任研究者や，地球宇宙科学分野特有の専任観測研究職(CNAP)などが存在し，博士号取得者のキャリアパスも多様です(そもそもフランスでは博士課程学生への給付型奨学金・雇用が厳格に義務付けられている点も日本と大きく異なります)．そうした中で，私は大学に雇用されている『Enseignant-Chercheur(EC：教職研究者)』という立場になります．例えば，CNRSに雇用されている研究者(Chargé de RechercheやDirecteur de Rechercheと呼ばれる専任研究職)とは異なり，ECは明確に「研究以外に教育の職務」が規定されています．准教授であ

れば「年間192時間」教育に従事することが職務として厳密に定義されており，それに従って担当する授業の数や時間が割り振られていきます．着任当初は，まず単純にこのように時間単位で厳密にノルマが規定されていることに驚きました．この職に決まった際，同じ研究室の専任研究者職の同僚から「ECは結構授業が多くて大変だよ」と言われていたのですが，この明快なルールを理解して初めてその意味を実感することができました．

しかし，さらにここで面白いのが，この規定された教育時間も，実は様々な手段を使って「減免」したり，他の業務で「消化」したりすることができる仕組みになっている点です．最も分かりやすい例が，学部生や修士学生のインターンシップ（Stage：研修）の受け入れです．フランスの大学では，修士の学生が日本のように特定の研究室に所属して2年間ずっと研究に専念するという形式ではなく，普段は基本的に授業を受け，年度の終わりに修士1年であれば2ヶ月程度，修士2年であれば5～6ヶ月程度の長期インターンシップを行います．日本のシステムで言えば，これらが卒業研究や修士論文に相当するものになります．例えば，このようなインターンシップの学生を研究室で受け入れて指導すると，「学生1人あたり教育時間10時間相当に換算する」といったルールが決まっており，この分だけ自身の担当授業時間を減らすことができるのです．

これ以外にも，例えば観測所の職員を兼務している場合は，「観測・運用業務に従事している」という理由で「教育時間22時間相当の減免」といったように，各種業務を授業時間の短縮に充てることが可能です．実は私が携わってきた火星探査機InSightの地震観測点は，フランスの国立観測所（SNO：Service National d'Observation）として認定されています．私はその専任職員（本職のメンバーが少なかったため，実質的な副所長業務）も兼ねていたため，この制度によって授業時間を大幅に短縮することができました．さらに興味深いのは，European Research Council（ERC）といった欧州の大型競争的資金に採択されると，なんと「そのプロジェクト予算を使って，自身の授業時間を大学から買い取る」ことまでできるのです．

実際に私の場合ですと，こうした観測所業務や大学の教務・管理業務などで約60時間分，学生インターンシップの指導で約10～20時間分を消費しているため，実際に教壇に立って講義や演習をしているのは，年間で100時間程度になっているかと思います．ただ問題は，このように非常に合理的かつ複雑なシステムになっているにもかかわらず，赴任当初にそれらをまとめた分かりやすい説明を聞く機会が全くなかった，ということです．一応，大学の公式資料には書いてあるようなのですが，その資料自体が「見つけにくい，とにかく長い，おまけに難解（しかも当然ながら全編フランス語！）」という状態だったため，結局のところ先輩教員を見様見まねで，手探りでルールを学ぶしかありませんでした．最近はすっかり制度にも慣れ，毎年担当する講義も固まってきたため，あまり授業準備やコマ数合わせで慌てることもなくなりました．しかし，時折，物理学演習や数学演習といった比較的「準備が楽で指導しやすい」とされている授業を新任の先生に譲ることになり，「来年はあの演習の担当から外れてくれ」と言われることがあります．そうすると，突如として足りなくなったノルマの教育時間を埋めるために，慌てて教務の担当者と掛け合い，新たな授業を探し回るというドタバタ劇を演じることになります．

最初はなんと複雑な仕組みだと感じたこのシステムも，慣れてしまえば数字として非常に明確に定義されており，教員間での不公平感も出にくいため，今では「実はとても合理的な素晴らしいシステムなのでは」と感じるようになってきました．とはいえ，本来の規定である「192時間」をすべて実際の講義だけで消費しようとすると，フランス式に1コマ2時間として計算しても年間96コマです．日本の大学で主流の90分コマなどに換算して考えても，1つの科目がだいたい13～14コマ程度ですので，毎年6～7科目もの異なる講義を担当する必要がある計算になります（実際に，私も様々な減免を挟みつつ，毎年4科目程度は担当しています）．日本の大学等で教育職に就かれている読者の皆様は，ご自身の現在の担当授業時間や業務バランスと比較されてみてはいかがでしょうか．日本とフランス，果たしてどちらの大学制度がより働きやすそうか，もし機会があれば，ぜひ皆様のご意見や実感も教えていただければ幸いです．

5. おわりに

少し長くなってしまいましたが,フランスで学生,ポスドク,そしてパーマネント職(教職研究者)と立場を変えながら,この異国の地で長く過ごす中で私自身が感じたこと,学んだことをご紹介させていただきました. 研究者にとって,海外へ出るというのは自身のキャリアにおける重要なステップアップの機会であると同時に,非常に心理的ハードルの高い挑戦でもあります.特にフランスのような非英語圏へ赴くことは語学の壁も大きくそびえ立っており,なかなか一歩を踏み出しにくいと感じられる方も多いことでしょう.しかし,私個人の泥臭い実体験から申し上げれば,結論は「確かに大変だけれど,思っている以上になんとかなる.むしろ,そこで学べることの方が圧倒的に多い」ということに尽きます.

単純に「外国語で発表し,議論する」という研究者に不可欠なスキルを高められることや,度胸がつくこと自体も大きな収穫です.ですがそれ以上に,そうした「追い詰められたサバイバルな環境に身を置くからこそ,いざという時の臨機応変な対応力や,困難な問題に直面した際のタフな解決力が培われる」のだと感じています.月並みな表現にはなりますが,これこそが真の意味での「本質的なコミュニケーション能力」なのだと思います.たとえ流暢な語学力がなくとも,相手の意図を自身の専門知識や文脈から補完しながら理解する.限られた語彙であっても,自分の考えを最大限に伝えようと工夫する.必要であれば,体面を気にせず適切な相手に協力を仰ぎ,相談する.「分かったつもり」をできる限り無くすために,泥臭く何度でも確認する.異国の地という困難な環境に置かれているからこそ,こうした基本的なコミュニケーションの姿勢を大切にすることが,実は研究プロジェクトを成功へと導く最短の近道なのだと思います.そして,この現場で鍛え上げられた「サバイバルな対話力」は,将来的に日本にいようが海外にいようが,研究者として活動していく上で間違いなく強力な武器になります.

そのためには,何はともあれ「その泥臭いコミュニケーションの過程そのものを面白がり,楽しむこと」が大切なのかもしれません.たとえ自分から積極的に会話の輪に入っていけなかったとしても,「今,あの人たちは何を議論しているのだろう」と聞き取りに専念してみたり,同僚が使っていた面白い専門用語や変わった慣用句をこっそりメモして集めてみたり.あるいは,「新しく覚えたこの表現を,次のミーティングの議論で使ってやろう」と今か今かと待ち構えてみたり.アプローチのやり方は本当に人それぞれ,無限にあると思います(ちなみに私は,これらをすべてやりました).もし今,語学や環境の変化への不安から,海外へ出ることを躊躇されている方がいらっしゃれば,どうか思い切ってその第一歩を踏み出していただければと思います.人間,追い詰められれば思っている以上になんとかなるものです.そして,現地で身につくその「サバイバル力」は,間違いなく今後の研究人生を支えるかけがえのない財産になるはずです.かつてシャルル・ド・ゴール空港で「右も左もわからない」まま迷子になっていた男が,右往左往しながらも一歩ずつ前進し,13年以上も働けているのですから.

著者紹介

川村 太一
パリ地球物理研究所/パリシテ大学准教授. 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. パリ地球物理研究所ポスドク研究員, 国立天文台RISE月惑星探査検討室特任研究員を経て2018年4月より現職. 専門は惑星地震学,内部構造探査.

《目次へ

「2026 年度iSALE 講習会」開催報告

松本 侑士[1]

2026年度iSALE講習会初級編を開催した．本講習会は11回目のiSALE 講習会にあたる[1]．今年度も国立天文台天文シミュレーションプロジェクト(以下CfCA)にご支援いただき，黒澤耕介氏(神戸大学)，黒﨑健二氏(防衛大学校)と筆者が講師を務めた．本稿ではiSALE講習会の開催について講師の立場から報告する．

iSALE講習会は，衝突物理学についての講義と，「iSALE」を用いた数値計算，「pySALEPlot」を用いたPythonによる解析と描画についての実習で構成される．iSALEは数値衝突計算コードの1つであるImpact-SALE(Simplified Arbitrary Lagrangian Eulerian)[2–5]の略称で，惑星科学における衝突現象の研究によく用いられている([6]など)．iSALEは，開発者に申請し認可された上で非商用利用に限ってまず2次元計算コードの使用を許諾されるものである．講習会参加者は，講師による申請書の確認後にとりまとめた申請がなされ，CfCA上での使用が許諾されている(詳細は[7]を参照)．講習会では，開発メンバによるソースコードから講師がビルドした実行ファイルを配布している．iSALEの計算に必要となるのはこの実行ファイルと入力ファイルのみである．iSALEの計算結果の解析には専用に開発されたPythonモジュールであるpySALEPlotを用いる．pySALEPlotを用いることで，データファイルから直接取得する場合に比べ，遥かに容易に解析に必要な物理量を取得できる．講習会では，iSALEの入力ファイル，ならびにpySALEPlotと他モジュール等を組み合わせた解析・描画について解説し，計算と解析・描画の一連の作業を身につけられる内容となっている．本年度のiSALE講習会では，Python3対応のpySALEPlotを導入した講習会が初めて行われた．

pySALEPlotはPython2に対応して開発されたものがこれまで講習会において使用されていた．2023年にPython3対応のpySALEPlotが開発メンバからリリースされ，講習会でも是非このpySALEPlotを導入するべきだという話になった(主張した)．これを導入するメリットは，Python2環境を管理する必要がなくなること，またPython3応のモジュールの使用が可能となることである．Python2にも存在するモジュールに関しても，性能の追加と向上やバグ修正が行われたより新しいバージョンが使用できるようになる．講師(筆者)による講習会環境への導入が試行され，その結果，Python3対応のpySALEPlotはPython3.9であれば動作することが確認された[2]．2026年7月現在のMinicondaがデフォルトでサポートするPythonは3.13である．仕方がないので，Python3.9環境を構築し，そこでpySALEPlotをビルドすることにした．講師がビルドする程度であれば少しの手間であるが，講習会では数値計算の経験のない参加者も利用できるようにする必要がある．そこで，CfCAに

1.神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻
yuji.matsumoto@people.kobe-u.ac.jp

[1]2024年度にのみiSALE講習会中級編が開催され[1]，他のiSALE講習会では初級編の内容を扱っている．

[2]Pythonのバージョンを1つずつ前に戻して構築し直す作業で，多少時間がかかった．後からGitHubのIssuesに同様の報告を発見した．



図1. 講習会最終日に撮影した集合写真. 筆者近影も含む.

おける解析サーバでの仮想環境構築の案内や他講習会等でのVirtualBoxによる仮想環境の構築から発想を得て，講習会ではMinicondaの仮想環境を用いる形式をとった．仮想環境とは，ざっくり，計算機のデフォルト環境とは別の環境を計算機上に作成することである．講習会ではpySALEPlotの動作を確認した仮想環境の設定をYAMLファイルとして配布した．初回の実習でこのYAMLファイルを読み込み仮想環境を構築することで，Python3.9自体とPython3.9で動作する講習会に必要なモジュール（numpyやmatplotlibなど）が用意される．講習会では仮想環境のPython以外を使用しないため，仮想環境をログイン時に自動で読み込むように設定したbash_profileを初回にコピーすることで，以降は受講生が何ら意識することなくpySALEPlotを使用できる設計で準備を整えた．

他諸々の準備を整え，iSALE講習会当日を迎えた．2026年6月2日から30日の毎週火曜日の離散日程で，本年もオンラインでの開催となった[3]．オンラインの形式を活かし，本年も講義を録画し受講生に限定公開した．この録画視聴により，日程に都合のつかない受講生にも参加を認めている．今年度の受講生は22 名，学部学生から教員まで幅広く分布し，受講生の半数弱が学部学生であった．講習会最終日に撮影した集合写真が図1である．受講生のうち，視聴参加のみの希望者が4割弱，一部視聴参加希望者は2割弱であった．

本年度の講習会の内容はおおよそ以下の通りである．

- 2026年6月2日(火)
  - 13:30 - 13:50 講習会の流れについての説明+自己紹介
  - 13:50 - 15:30 iSALEの概要と衝突物理学と数値流体計算の基礎1
  - 15:40 - 15:45 CfCA共同利用計算機についての解説
  - 15:45 - 16:40 CfCAへのログインと環境構築+例題紹介
- 2026年6月9日(火)
  - 13:30 - 14:40 衝突物理学と数値流体計算の基礎2
  - 14:50 - 15:15 iSALE関連ファイルとCfCA計算機の解説
  - 15:15 - 16:30 iSALE入力・出力ファイルの解説

[3]コロナ禍以前は国立天文台三鷹キャンパスにて短期集中形式であったが，コロナ禍を経てオンライン離散日程に落ち着いている[8].

- 2026年6月16日(火)
  13:30 - 14:10 衝突物理学と数値流体計算の基礎3
  14:20 - 15:20 JupyterLab を用いたpySALEPlotの解説
  15:30 - 16:30 初級課題解説
- 2026年6月23 日(火)
  13:30 - 16:30 中級課題解説
- 2026年6月30日(火)
  13:30 - 13:50 講習会のまとめ
  13:50 - 16:30 各自の計算結果の発表会
  16:30 - 16:40 CfCA 計算サーバへの申請方法の解説

これに加えて，要望に応じて補講を行った．講習会間には，離散日程であることを活かしこれまでも宿題を出していたが，本年度は実習負担が少ない初回や二回目の宿題を追加し，また宿題をSlack上に提出する形式が新たに整えられた．講義･実習はこれまでの講習会と同様の内容であり，[9, 10]などの参加報告を参照されたい．各自の計算結果の発表会では11名の受講生が発表を行った．全員がiSALE を用いた計算結果を得て，pySALEPlotを用いた解析も行えており，学部学生を含む受講生が講習会の実習内容を身につけていることが伺えた．

Python3対応のpySALEPlotについて，受講生がおおよそ問題なく環境構築し，使用できていたように思う．ただYAMLファイルからの仮想環境構築に時間が必要なこともあり，初日の環境構築の実習が予定時間を超過し，一部の解説も次週に回されてしまった[4]．次回の講習会の課題としたい．

iSALE講習会は，数値計算を普段使わない方の受講を前提としており，複数回の受講を歓迎している[1, 10]．新しくPython3対応のpySALEPlotを試してみたい方は，受講歴に関わらず，是非次回講習会の受講を検討していただきたい．

本年もGareth Collins,Kai Wünnemann,Tom Davisonの各氏には講習会におけるiSALEの使用許諾を頂いた．また講習会の開催においては，国立天文台CfCAの伊藤孝士氏，加納香織氏，波々伯部広隆氏，長谷川幸彦氏にご尽力いただいた．この場を借りて感謝申し上げる．

参考文献

[1] 山口祐香理, 2025, 遊星人 34, 147.
[2] Amsden, A. et al., 1980, Los Alamos National Laboratories Report, LA-8095:101p.
[3] Ivanov, B. A. et al., 1997, International Journal of Impact Engineering 20, 411.
[4] Collins, G. et al., 2004, MAPS 39, 217.
[5] Wünnemann, K. et al., 2006, Icarus 180, 514.
[6] Wakita, S. et al., 2017, ApJ 834, 125.
[7] 黒澤耕介, 2021, 遊星人 30, 112.
[8] 嶌生有理, 2020, 遊星人 29, 176.
[9] 豊田優佳里, 2024, 遊星人 32, 272.
[10] 松原光佑, 2025, 遊星人 35, 41.

[4]黒澤講師の解説と黒﨑講師の実習が円滑に進行したため，トータルではおおよそ予定時間に収まった．チームプレイ．

著者紹介

松本 侑士
神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻特命助教．東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了．博士（理学）．国立天文台天文シミュレーションプロジェクト，千葉工業大学などを経て，2025年8月より現職．2023年よりiSALE講習会講師．

《目次へ

万博体験記 ～ブース出展を経験して～

長岡 央[1], 仲内 悠祐[1], 佐伯 和人[1]

（要旨）本稿は立命館大学のESECブースを大阪万博に出展した一年前8月の二日間の思い出を書き記したものである.

1. はじめに

まず言わずもがなであるが1970年に開催された大阪万博は長岡と仲内は生まれる前で，資料や家族・知人の体験談でしか知らず参加自体が初めてである（佐伯は行ったが3歳）．過去を懐かしむテレビ番組でもやはり，前の大阪万博といえば，月の石，アポロが持ち帰った月の石というイメージが非常に強い．ちなみに1970年の大阪万博にやってきた月の石はアポロ12号が月の海（マグマが冷えて固まった表側に広く分布する暗い平坦な領域）から持ち帰った玄武岩である．今回のアメリカ館ではアポロ17号が持ち帰った玄武岩，中国館では世界初の月裏側の太陽系最大の衝突ベーズンである南極エイトケン盆地から持ち帰った玄武岩が展示され，これまた数時間にも及ぶ待機列が形成される人気展示となったようである.

2. 当日のタイムスケジュール

立命館大学は，JAXAの有人宇宙技術部門と合同ブースとして，西ゲートゾーンにあるEXPOメッセ（WASSE）において2日間限定ブース展示での参加となった．多くの場合，会場となる夢島には鉄道を使用する．夢洲駅から東ゲートをくぐり，今回万博のシンボルとも言える大屋根リングを横切り，西側に向かった場所にある．一般観覧者が長蛇の列を作り開場を待っているのを横目に，ブース関係者は関係者専用入場口から8時ごろに入場することができるため，朝イチで人のいない会場をスイスイと各国のパビリオンをながめながら会場となるWASSEに向かうことができる．テレビで放映されていた激混み会場とはまた異なる風景が見えて新鮮であった．会場に到着すると立命館大学の事務スタッフ，教員，学生が続々と集まり，さながら学園祭や体育祭の始まりを感じさせる適度な緊張感とワクワク感に包まれた様子でブリフィーング(表1)が開始され，各種担当の展示物の設営・設置に取り掛かった．準備しながら，外の様子を度々見に行ってみると天気は曇り気味であったが，外の外気温は刻一刻と上がっていくのが感じられ「これは今日も暑くなるぞ」と大屋根リングを見上げていた．万博に出展者として参加する機会はそうそうないこともあり，それぞれ家族にも声をかけ誘ってみたのだが，（長岡は）同日にある琵琶湖花火大会を理由に断られた．二日間経験してみて，この過酷な環境の万博会場で各国のブースを回るのは小さい息子には酷であり，妻の判断は正しかったと今

1.立命館大学　宇宙地球探査研究センター
hnagaoka@fc.ritsumei.ac.jp

表1. タイムテーブル.

	基本タイムスケジュール	立命館タイムスケジュール	
	来場者	8/8 金曜日	8/9 土曜日
8::00	待機列形成	ブース集合	
		準備・リハーサル	
9:00	開門・入場開始	搬入・設置 設置	
10:00	各パビリオン随時開催	開始．，展示解説～	
13:00		休憩	
		展示解説	
15:30		解説講演①	
17:00		解析講演②	
17:30		終了片付け	
19:00		撤収 （荷物受入れ対応で仲内は泣く泣く大学へ）	
		自由に見学	
22:00	閉門・終了		

は思う.

2. 展示

佐伯率いる理学チームは月着陸探査機SLIMに搭載されたマルチバンドカメラのエンジニアリングモデル（MBC-EM），月隕石などを展示した（図1）．小林泰三さんらの工学チームは探査ローバやロボットなどを持ち込み，設置した．MBC-EMは普段，ESECに所属する我々の拠点がある立命館大学びわこ・くさつキャンパス内のクリーンルームで保管し，我々の実験で日々活用している．今回は専用の容器に入れての初出張である．特に二日間にわたる展示のため，現場においていくこともできず，初日終了後に長岡と仲内は大きな専用輸送容器にMBCを戻し，大阪の宿泊施設まで運び，保管．次の日にまた会場に運び込み設置した．当初は二人で，電車を使って運ぶ想定だったが，あまりにも重く，WASSEから出た段階で断念（タクシーで運搬）．

ブースでは各展示の個別解説をベースとしながら，日に2回大きなモニターの前で解説する催しも行った．初日朝はもうなん度も万博に参加し，おおよそメインどころを見て回ってきた猛者のような方々が，新規展示ということで物珍しく，立ち寄ってくれたり，立命館のOB/OGの方々が見にきてくれたりとゆったりした時間の中，こちらもじっくりと解説できたもの

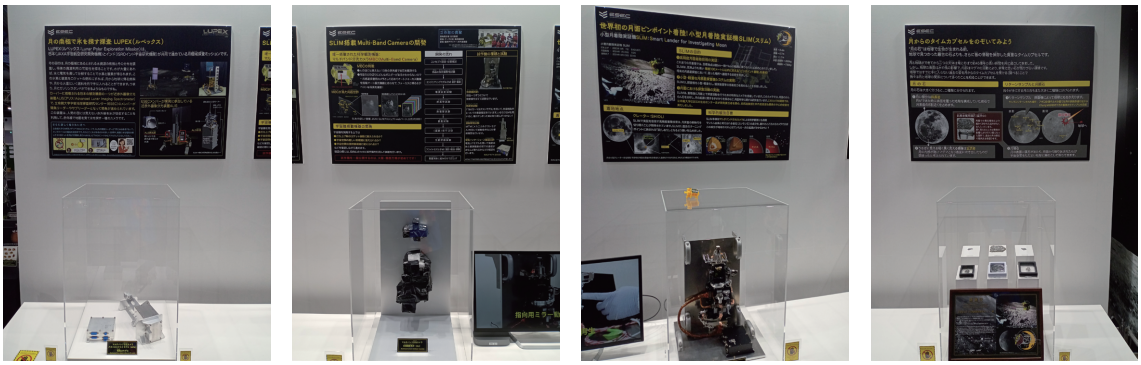


図1. 展示物の様子，順路は左図から右図へ．MBCの構造試験モデル(TTM)，MBCの周りを覆うMLI，SLIMに搭載されたマルチバンドカメラのエンジニアリングモデル(MBC-EM)を展示し，さらに月隕石を展示.



図2. ブース風景，ハッピを着て講演する佐伯和人ESECセンター長．



図3. 展示終了後の風景．左から３番目が長岡，４番目が佐伯，５番目が仲内である．

である．

しかし，だんだんと初日の午後からは状況が変わってきた．どこからか月の石を展示しているぞという，情報が拡散され，来場者が増えてきたのである．どうやらXに投稿されたらしい．結果二日目の朝からは，（アメリカ館や中国館）のように並ばずとも月の石が見える，しかも（数秒とかで流れ作業とかでなく）じっくりと見えて写真も自由ということで，来場者が激増し，月隕石の前には長蛇の列が．佐伯の解説講演も大盛況で，二日間は終わった（図2, 3）．しかし，多くの人々がイメージする月の石というのは月面から持ち帰ったリターンサンプルであるというのが実感さ

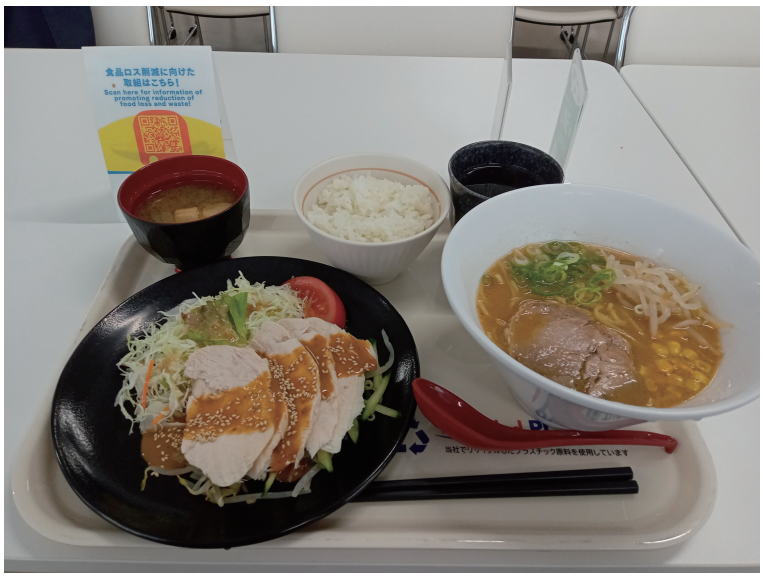


図4. バンバンジー定食+味噌ラーメンのセット@従業員食堂にて.

れた．時には月から射出されて地球に飛んできた月隕石というものは，あ～隕石ね，という反応もあり，ずっと月隕石を研究してきた長岡は「これも月の石なのに…」と思いながらも，感じ方は人それぞれだなぁと新鮮でもあった．

3. ご飯事情

私が一番心配していたor気になっていたのはご飯事情で，関西の情報番組やYouTuberなどが取材している動画を見ていると，非常に高額な食事ばかりなのではと心配であった．しかし，幸運なことにスタッフ扱いの我々はスタッフ食堂を利用することができ手頃な値段で夏場に疲れ切った中で十分な栄養を補給することができたのである(図4)．ラーメンと定食セットを食べて1500円程度でロイヤルホストなどを運営するロイヤルホールディングスが運営していた．

4. 参加者の感想とまとめ

- (長岡)二日間のブース展示の間は長蛇の列が形成される「月の石(月隕石)」の展示説明で喉がかれた，終わった時にはへとへとだった．一方で学生時代からずっと月隕石を研究してきた身としては，万博で月の石の解説ができるという素晴らしい体験は感慨深いものでもあった．二日間のブース展示を終え，夜の万博会場に繰り出してみると，各国のパビリオンが色とりどり，形もさまざまで中に入れなくとも会場を見て回るだけで非日常感を味わえ，夏真っ盛りの8月ではあるが夜は涼しく万博を楽しむことができたのは良い思い出として刻まれた．
- (仲内)万博ブース出展を前に，私は万博公園の太陽の塔(EXPO'27)を訪れた．長らく放置されていた内部が地下から上階へと見学できるように整備されている．確かに古さはみて取れるが…圧倒された．そしてあの時代に現場の熱狂と共にリアルで見てみたかったと強く感じた．この想いと共にEXPO2025に参加した．確かに学祭のようでありつつも，外国のブーススタッフの方々との交流もあり，舞台裏から見る景色は新鮮であった．さて，2日間の中で長い列を作ったコンテンツは(仲内の体感)順に月隕石，与圧ローバ走行シミュレーター，スタンプであった．目の前にMBC-EMがあるのに！！と内心ジェラシーを覚

えたが，最後まで笑顔で乗り切ったのである．

- (佐伯)ふだん一般の方に講演する際は，SLIMを知っている人の割合は3割前後．しかし，万博の来場者はなんとほとんど知らなかった！国民のランダムサンプリングに近い場合の知名度はそこまで低いのだということを実感するとともにアウトリーチ活動をもっとがんばらねばと思った．また，EXPO‘70で行列した月の石に，EXPO2025でも行列するというのは一体どういうことか！宇宙開発がほとんど進歩しなかったということか．一方，隕石研究で学位を取った身としては，EXPO’70の時には人類はまだ隕石の中に月や火星から来たものがあることを知らなかったのに，EXPO2025では火星隕石が目玉の一つとして展示されていることに，隕石学の進歩を感じてちょっぴり嬉しい気持ちにもなった．

5. 謝辞

今回の万博展示という機会がなければ，そもそも大阪万博会場に足すら運んでいなかったかもしれない．人生の中で，万博展示という非常に貴重な機会を経験できたのは幸運な機会であったと今は思う．準備から設営，二日間の展示と多くの大学教職員スタッフや学生さん，外部スタッフのみなさんのお力があったからこその貴重な経験である．この場を借りて感謝の意を述べたいと思う．また，今回ブースに足を運んでくださった多くの観覧者の皆様にもここに感謝の意を示します．

《目次へ

New faces

中澤 風音[1]

（東京大学 広域システム科学系）



皆様，こんにちは．中澤風音(なかざわかのん)と申します．2025年に東京科学大学で奥住教授のもと博士の学位を取得し(科学大一期生!)，現在は東京大学の黒川研究室で研究を続けています．専門は惑星形成で，主に原始惑星系円盤の組成に焦点を当てた研究に取り組んでいます．今回この場をお借りして，簡単な自己紹介と研究紹介をさせていただければと思います．

さて，New faceに投稿するにあたり偉大な先輩方の過去の記事を読むと，皆様まずはこの段落で天文学を志したきっかけを導入されているようです．地学オリンピックへの出場・著名な教授の講義・幼少期の天文観測などなど，具体的な背景があり感心しました．一方，周りに田んぼしかない高知の田舎で育った私はというと，子供時代はモグラの穴を水没させたり用水路のタニシの卵を駆除することに終始していましたので天文学からは程遠い生活を送っておりました．高校も，元素図鑑を読んで化学に興味があったこと2割，家からの近さ8割で高知高専の物質工学科に決めたため，まだ天文のことは頭になかったように思います．そんな中，5年間ある高専生活で徐々に天文学のトピックに触れる機会が増えていきました．高知新聞に掲載されていた須藤靖さんの記事や，毎週夜に放送されていたコズミック・フロントという番組は今でも印象に残っています．それでようやく私は，高専から天文が学べる大学へ編入しようと決めました．編入にあたっては，高専からは工学部への入学が一般的であったため，理学部を受験できる大学が限られていました．幸いなことに東京工業大学と東北大学は理学部編入が可能であることがわかり，(弛まぬ受験勉強によって)双方から合格を得ることができました．どちらの大学に進学するかという贅沢な悩みをすることになりますが，東北大学の銀河物理のシラバスにあった「毎週厳しい宿題を課す」という旨の文言に恐れをなし，最終的に東京工業大学への編入を決め，晴れて天文分野に携わることができるようになりました．

東工大で奥住研究室に所属した私の最初の研究テーマは，原始惑星系円盤とは無関係の天体衝突に関連するものでした．天体への高速度衝突はクレーターを形成するとともに多くの地下物質を放出します．放出された物質は衝突点周辺の地表を被覆する再表面化に寄与しており，月や火星のクレーター周辺に見られる光条(クレーター・レイ)はこのプロセスの直接的な証拠として観測されています．ここで，天体衝突直後にクレーター外縁から放出される物質が作る構造を”放出物カーテン”と呼びます．この放出物カーテンは拡大中になぜか非一様なメッシュ構造となるのですが，私の課題はこの構造がどのように生まれるのかを定量的に明らかにすることでした．このテーマでは非弾性衝突の効果を取り入れたN体シミュレーションに加え，黒澤耕介氏とともに宇宙研で縦型二段式ガス銃という仰々しい名前の装置を用いた衝突撮影実験を実施し，理論・実験の双方から放出物カーテンの物理にアプローチしました．結

1.東京大学 広域システム科学系
kanon-nakazawa@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

果的にメッシュ構造は，粒子のランダム速度がカーテンの膨張速度より大きいうちに起きる非弾性衝突が粒子を集めることで形成することが分かり，解析モデルの作成にも成功しました[1]. 成果発表後にはDARTによる小惑星ディモルフォスへの衝突実験が行われ，噴出物の撮影も行われたことで論文が引用されるという思いがけない波及効果もあり，私の中で大変印象に残る研究となりました.

放出物カーテンに関する研究も一段落し，修士2年の夏頃からようやく円盤進化に関する研究に着手しました. 研究室ではさまざまな学生が異なるアプローチで円盤の研究に取り組んでいたので，独自の色を出すために高専での化学のバックグラウンドを活かしたいと奥住さんに相談し，円盤・惑星の組成進化をエッセンスとした研究をすることになりました.

私の円盤研究における記念すべき最初のターゲットは木星でした. 実は木星大気には組成に関して非常に面白い特徴があり，なんとリンなどの揮発性の低い元素から，窒素やアルゴンなどの非常に揮発性の高い元素まで，どれも太陽に比べて一様に2,3倍高いアバンダンス(水素原子に対する個数比)を持っています. つまり木星には形成時にこれら元素を供給するなんらかのメカニズムが働いたということであり，このメカニズムを特定することは惑星形成位置や時刻を決定する上で大きな手がかりになります.

では，木星にこれらの元素をどうやって運ぶのでしょうか. 候補はいくつかあります. 最も単純な方法は，惑星に氷ダスト(円盤の構成要素の1つである固体微粒子)として元素を持ち込み大気に溶解させるというものです. ダストはガスに比べて水素に枯渇しているので，特定の元素をダストで持ち込むことができれば，大気中の元素アバンダンスを飛躍的に高めることができます. 確かにこの方法は揮発性の低い元素を惑星に持ち込むには有効なのですが，木星軌道の温度では既にダストから昇華し失われている窒素や希ガスを持ち込むことは困難です. そこで代替案として提案されているのが，特定の化学種の雪線(ある化学種が円盤で固体として存在できる限界軌道)で昇華したガスを惑星に降着させる方法です. もしダストが円盤を効率的に移動できる場合，雪線付近ではガスの昇華が活発に起き，特定の化学種に富んだ円盤ガスが生成されます. これにより，例えば H_2O雪線近傍では酸素に富んだガスを，N_2やAr雪線近傍では窒素やアルゴンに富んだガスを獲得することができます. しかしながら，現在の木星軌道と円盤で推定される N_2, Arなどの雪線が大きく離れているなど，この方法にもいくつかの困難がありました.

そこで提案されたのが，水氷にCO, N_2, Arといった揮発性の高い分子を閉じ込めて，木星軌道付近まで運ぶという方法です. 確かに室内実験ではいくつかの分子が非晶質水氷に効率的に捕獲されることがわかっているほか，実際に彗星でもH_2Oに高揮発性のCOが捕われていることが指摘されています. 一方でこの方法も完全ではなく，窒素分子の捕獲効率が他の分子よりも低いという問題があります.

ここまでで，ようやく私の研究内容を説明する準備ができました. 私はこの窒素の輸送に関する問題に着目し，近年彗星で検出されその豊富さが指摘されているアンモニウム塩が円盤での潜在的な窒素キャリアだったという仮説のもと，木星の窒素濃縮がアンモニウム塩による輸送で達成可能かどうかを検証しました. 結果として，アンモニウム塩が宇宙に存在する窒素のうち20%を担っている場合，木星の窒素濃縮を説明できることを明らかにし，これまで着目されていなかった塩の元素キャリアとしての重要性を示しました[2].

また，このアンモニウム塩の主要な組成はNH_4SHである可能性が指摘されています. つまり当初，窒素キャリアとして着目していたアンモニウム塩は実は硫黄のキャリアとしても重要な可能性があります. 実際，NH_4SHは最大で宇宙の硫黄キャリアの20%を占める可能性が指摘されており，これまでFeSなど低揮発性鉱物にほとんどが含まれているとされてきた硫黄輸送の描像を変える革新性があります. この観点から，私は最近，塩による窒素・硫黄輸送を組み込み，円盤内側で形成される惑星の大気組成を予測する研究を行いました. この研究では大野和正氏との協力のもと円盤進化から惑星大気化学計算，そして透過光スペクトルまでを一貫してモデリングする世界に先駆けた試みも行っています. 結果として，塩による元素輸送は大気中でのNH_3やSO_2の生成を促進することを明らかにし，これが近年ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡(JWST)で観測されたWASP-107bなどの温暖なガス惑星の組成と関

連している可能性を提示しました[3].

近年の観測装置の進展から，円盤や惑星大気を構成するさまざまな分子が見えるようになり，組成を軸とした惑星形成過程の制約はますます重要になっていくと考えています．私に化学のバックグラウンドがあったのは偶然ですが，この機会を活かしこれからもこの軸を大事にしていきたいと思っています．ところで，ここまでで紹介したような組成進化計算をするにあたり，やはり円盤の氷ダストの姿を明らかにすることが重要であると思っています．折しもJWST によって円盤の氷にアクセスできる時代が到来しており，氷のサイエンスが最近の私のトレンドです．田崎亮氏と行った私の直近の研究も円盤氷観測に関連したものです．この研究では円盤の散乱光スペクトルの理論計算をもとに天体の水氷の結晶性を予測する経験式を作成し，太陽系外縁天体やデブリ円盤，原始惑星系円盤の氷の結晶化度の推定を行いました[4]．意外にも，原始惑星系円盤の段階で氷の結晶性が高い可能性があり，円盤内の物質輸送にも影響しているかもしれません．今後，円盤氷観測に関する研究は田崎氏に加え，野津翔太氏，古家健次氏らと協力しながらさらに発展させていく予定です．また，個人的には円盤化学計算をベースとして，微惑星での組成進化についても調べたいと考えています．もしご興味を持ってくださる方がいらっしゃいましたら，ぜひ一緒に研究しましょう．長くなりましたが，今後ともよろしくお願いいたします！

[1] Nakazawa, K. et al., 2021, PSJ 2, 237.
[2] Nakazawa, K. and Okuzumi, S., 2025, PASJ 77, 3.
[3] Nakazawa, K. and Ohno, K., 2026, ApJ 999, 130.
[4] Nakazawa, K. and Tazaki, R., 2026, PASJ 78, 4.

《目次へ

吉田 有宏[1]

（ミラノ大学 物理学科）



こんにちは．吉田有宏と申します．2025年9月に総合研究大学院大学/国立天文台で博士号を取得し，現在はイタリアのミラノ大学で研究を続けています．このNew Faceでは，自己紹介がてら私のこれまでの歩みについてお話しさせていただきたいと思います．

私は，北海道の室蘭市という地方都市と田舎の間くらいの規模の街で育ちました．自然科学との初めての出会いは，小学生の頃に骨折をして入院していた時に差し入れられた雑誌(子供の科学)だったと思います．それをきっかけに，いつしか市の青少年科学館に通うようになりました．科学館は当時大変楽しいところで，一般公開されている場所とは別に小中学生の科学クラブ員が入ることのできる「工作室」という場所がありました．そこには科学館の館長が街中から拾い集めてきたガラクタ（廃棄されたコピー機，テレビ，パソコン，その他家電製品）が散らばっており，自由に分解して良いことになっていました．分解して使えそうな部品があれば，それらを用いて夏休みの自由研究や発明工夫展に出品する何かを作るのでした．そのようなところで，旋盤などの工作機械の使い方や，マイコンのプログラミング等を知りました．ある時廃棄パソコンが大量に出たときには，片っ端から違うLinuxディストリビューションを（訳もわからず）インストールする遊びなどが流行したこともありました．今考えれば人口9万人の街とは思えないほど恵まれた環境で，科学への興味が育まれたのでした．

一方，当時はどちらかというと自然科学よりもテクノロジーに関心があり，天文学や惑星科学が好きだったかと言われると，そうでもないような気がします．家の前から星空はそれなりに見えたので，双眼鏡で星団を見たり，金星の日面通過(2012年)を太陽望遠鏡を自作して観察したり，という程度のにわかファンなことはしていましたが，いわゆる天文少年と言えるほどのものではなかったように思います．本格的に自然科学への興味を抱いたのは高校生の時に参加した北海道大学の研究体験プログラムでした．主に地球科学的な内容で，自然と徐々に興味が移ってきていたのを覚えています．大学では，京都に住んでみたかったので京都大学に進学しました．大学入学時には漠然と地球科学のほかには素粒子論とかも興味あるな，という程度に思っていました．

そんな中，天文学・惑星科学に強く惹かれるようになったきっかけは2017年のふたご座流星群でした．1回生の最初に入ったサークルがすぐに壊滅するという事件があり，まだ加入することができた天文サークルにギリギリで参加して，潮岬まで見に行ったのでした．その年は比較的条件の良いふたご座流星群で，夜中まで眺めているうちに，流星の色が流星によって違う場合があることに気がつきました．その辺りのことを詳しく知るにつれ，惑星系の形成に自分が思っていたよりも遥かに多くの謎が残されているということを（ようやく）知りました．惑星系物質の起源に興味を持った私は，隕石観察実習に参加するなどして大変楽しみました．さらに同時期に，運良く，国立天文台のサマーステューデントプログラムでチリに行きアルマ望遠鏡を見学することができ，電波天文学に強い興味を得ました．その後，台湾のASIAAのプログラムをきっかけに原始星ジェットの時間変動に関する研究を行い，初めての論文[1]を書きました．その研究中に，原始星ジェットがよく検出できる一酸化ケイ素がそもそもどのように発生しているのか，というようなところから，今度はアストロケミストリーにも興味を得ました．このような背景があり，い

1.ミラノ大学 物理学科
tomohiroyoshida.astro@gmail.com

つしか，私の興味は惑星系物質の起源にアストロケミストリー的な方面から迫りたいという方向へ具体化・収束していきました．そこで，大学院では総研大/国立天文台の野村英子教授の研究室へと進学しました．（総研大は他の大学と比べて圧倒的に経済的な援助が充実していることも非常に大きな理由の一つでした．）

大学院で最初に取り組んだ研究は，原始惑星系円盤の一酸化炭素同位体組成に関するものです．太陽系の酸素同位体異常に関わるということで指導教員から提案され始めたものでした．結局，酸素同位体比を測るのは容易ではなく，一方でコントラストの小さい炭素同位体比では測定が可能であるというところに落ち着き，アルマ望遠鏡データを用いてある円盤で実際に測定することに成功しました[2, 3]．その値は円盤内で大きな炭素同位体分別があることを示唆しており，最近は系外惑星や恒星間天体でも報告例がある炭素同位体比との比較の文脈で引用されることがあるようです．

修士2年時に，その研究は予想していなかった方向に進みました．当初，同位体組成に関する別の手法を試すために，過去の観測を全て用いることで高感度のデータを作成していたのですが，そこにこれまでの考え方では説明がつかないほど幅広いウィングを持ったスペクトルを発見したのです．様々な考察をした後，円盤中心部でガス密度が非常に高くなっていることに起因する輝線の圧力広がりによるものだと結論付けました[4, 5]．これは円盤水素ガス密度の直接測定という，他の手法ではほぼ不可能である成果に繋がり，博士論文のテーマとなりました．博士課程では，副指導教員であった深川美里教授（現東北大）が参加していたアルマ望遠鏡の大規模プログラム（exoALMA）に参加し，自らの手法を別天体で得られた最新データにも応用して，空間分解された水素ガス面密度分布を初めて得ることに成功しました[6]．この研究についての詳細は遊星人記事[7]をご覧ください．他には，形成中の系外惑星の探索[8, 9]，惑星系形成領域の重力不安定性の検出[10]，より良い円盤ダスト関連の物理量の導出ツールの開発[11]などを行なっています．（興味が発散してしまう傾向があることは自覚していますが，全部面白いので仕方がないですよね…と言い訳しています．）

さて，2026年4月からは，先述の大規模プログラムexoALMA以来共同研究をしているイタリアのミラノ大学のグループでポスドク研究員をしています．ミラノ大学は欧州最大の惑星系形成の研究拠点の一つで，日々大変楽しく過ごしています．また，イタリアは食事とワインが美味しくとても良いです．お近くにお立ち寄りの際はぜひご連絡ください．

最後になりましたが，これからも惑星系形成の過程を明らかにすべく頑張っていきます．今後ともどうぞよろしくお願いいたします．

参考文献

[1] Yoshida, T. C. et al., 2021, ApJ 906, 112.
[2] Yoshida, T. C. et al., 2022, ApJ 932, 126.
[3] Yoshida, T. C. et al., 2024, ApJ 966, 63.
[4] Yoshida, T. C. et al., 2022, ApJL 937, L14.
[5] Yoshida, T. C. et al., 2025, ApJ 980, 50.
[6] Yoshida, T. C. et al., 2025, ApJL 984, L19.
[7] 吉田有宏, 2025, 遊星人 34, 3.
[8] Yoshida, T. C. et al., 2024, ApJL 971, L15.
[9] Yoshida, T. C. et al., 2026, ApJL 999, L22.
[10] Yoshida, T. C. et al., 2025, Nature Astronomy 9, 1672.
[11] Yoshida, T. C. et al., 2026, ApJ 1007, 198.

木村 真博[1]

（Space Research and Planetary Sciences, University of Bern）



はじめまして，木村真博と申します．2023年に生駒大洋先生のご指導のもとで博士号を取得し，2026年8月からはスイスのベルン大学でポスドク研究員として，惑星形成・進化の理論研究に取り組む予定です．本稿を書いている時点ではまだ着任前ですが，これまでの研究と今後やっていきたいことについて紹介させていただきます．

元々宇宙や惑星には漠然と興味がありましたが，惑星科学を研究したいと思うようになった直接のきっかけは，学部の特別演習で生駒先生のもと，惑星形成理論から系外惑星の海水量を予測する研究に取り組んだことでした．授業で学ぶだけでなく，論文を読み，実際にモデルを作って計算する中で，この分野に強く惹かれていきました．

当時は比較的単純なモデルでしたが，修士課程では，形成期に惑星が獲得する水素大気とマグマとの反応によって水が作られる過程のモデルを詳細化しました．ただし惑星が最終的にどれほどの水を持つかは，その惑星がいつ，どこで，どのように成長したかに強く依存します．そこで，水の獲得だけでなく惑星形成全体を追う必要があると考え，固体物質の集積，大気の獲得，軌道移動，惑星同士の衝突などを組み合わせて計算する「惑星種族合成モデル」の開発を始めました．そして博士課程からは，モデルを作るだけでなく，それを観測によって検証することへと研究の重点を移してきました．

いま，系外惑星の観測データは急速に増えています．これまでは新しい惑星の発見が中心でしたが，近年では大気組成など，個々の惑星の詳しい性質も分かり始めています．また，これまで発見例の少なかった，中心星から比較的遠い軌道を回る惑星も，今後さらに見つかっていくと期待されています．観測データは，量だけでなく質や種類の面でも大きく広がりつつあります．一方，惑星形成理論も発展してきましたが，不確定なパラメータや未解明の過程はまだ多く，異なる理論が並立している部分も少なくありません．惑星形成の現場を直接観測することは難しく，もちろん実験で惑星を作ることもできないため，個々の理論を直接検証するのは簡単ではありません．それでも，理論は観測によって検証される必要があります．これだけ多様なデータが集まり始めているのだから，それを十全に使って，現在の惑星形成理論が何を説明でき，何が足りないのかを具体的に調べたい．これが，私が現在の研究で大切にしていることです．

観測される系外惑星は，長い形成・進化過程を経た最終結果です．種族合成モデルを使えば，さまざまな形成条件からどのような惑星集団ができるのかを計算し，その質量・半径・軌道周期・組成などの分布を観測と比較できます．最終結果から過去の形成過程を遡り，どのような理論や条件が観測と整合するのかを統計的に調べられることが，この方法の面白さだと思っています．

そのためには，多数の惑星系を計算できる速度も必要です．特に，惑星同士の重力相互作用を直接解くN体計算には大きな計算コストがかかります．そこで博士号取得後，国立天文台で学振PDとして研究していた時期を中心に，巨大衝突や重力散乱を高速に扱う半解析的なモデルを開発しました．これを種族合成モデルに組み込むことで，大規模なパラメータ探索と観測分布との定量比較が可能になりました．現在のモデルでも観測に近い分布を作れる一方，まだ説明できない特徴もあり，モデルに不足して

1.Space Research and Planetary Sciences, University of Bern
tad.kimura624@gmail.com

いるものも少しずつ見えてきています.

また，今後の大気観測データの到来に備え，原始大気の形成や惑星内部との相互作用を詳しく調べるため，2年弱ほどオランダのフローニンゲン大学にゲスト研究員として滞在しました．研究を発展させ，ヨーロッパの研究者とのつながりを作れたことに加え，海外での研究生活そのものもよい経験になりました．私は環境が変わってもあまりストレスを感じない性格なので(これも海外生活を通じて自覚しましたが)，事務手続きや家探しなどの面倒ごとが落ち着いてからは純粋に滞在を楽しめたように思います．自然の多い環境も，田舎好きの自分には合っていました．また研究スタイルの面でも学ぶことが多かったです．私はモデル開発に慎重になりすぎ，完成度を高めようとするあまり，なかなか成果を形にできないことがあります．一方滞在先では，「まず試してみる」「新しい結果が得られたら一度まとめてから次に進む」ことが重視されていました．初めは戸惑いましたが，研究を前に進めるための大胆さやスピードの重要性を学びました．慎重さとのバランスは今も模索中ですが，自分なりの研究スタイルを考えるうえで大切な期間だったと思います.

これから所属するベルン大学では，世界的にも有名な惑星種族合成モデルが長年開発されており，学ぶことは多いと思っています．観測を使って惑星形成理論を検証し，その可能性と不足点を定量的に明らかにする研究は，重要である一方，まだ十分に確立された分野とはいえません．増え続ける観測データを理論の発展につなげるために，観測と理論を橋渡しする研究を進めていきたいと考えています．今後ともどうぞよろしくお願いいたします.

《目次へ

岡本 珠実[1]

（上海交通大学李政道研究所）



皆様はじめまして，岡本珠実と申します．昨年の3月に東京科学大学にて井田茂教授のご指導の下，博士号を取得いたしました．現在は，上海交通大学李政道研究所で，荻原正博准教授の下ポスドク研究員として勤務しております．これまで，原始惑星系円盤内における固体粒子の運動及び化学進化を数値計算で追跡し，太陽系内天体の化学組成を再現することを目指した研究を行ってきました[1-3]．本稿では主に私自身のこれまでの経歴についてお話ししたいと思います．また本稿では東京科学大について，私が学生時代慣れ親しんだ「東工大」という呼称で以降表記します．

私がこの分野に興味を持ったきっかけは，幼少期に両親から贈られた学研のポケット図鑑でした．動植物や鉱物など様々なテーマがある中で，「地球・宇宙」「星・星座」の2冊ばかり読んでいました．最初は星座に関するギリシャ神話にばかり興味があり，惑星分野に関しては（セーラームーンの影響とカタカナ言葉が格好良く見える年頃だったせいか）惑星と衛星の名前にしか興味がありませんでした．惑星分野により興味をもったのは，両親が私を横浜市にある「こども宇宙科学館」に連れて行ってくれたことがきっかけでした．この科学館では，太陽系惑星の質量や密度の違いなどの事象について，子どもでもわかりやすいように展示されており，ここで得た知識を深めるためにポケット図鑑をより読み込むようになりました．

このように幼少期から宇宙，特に惑星や太陽系に興味があったので，大学では絶対天文学を学びたいと思っておりました．そんな中，高2の夏に東大のオープンキャンパスへ行った時，系外惑星観測の展示が目に入りました．その研究内容を聞き，宇宙人がいるかどうか科学的に証明される時代が近づいていると感じてワクワクし，私も同様の研究をしたいと志すようになりました．しかし東大入試は不合格に終わり，慶應義塾大学へ進学しました．

大学では，4年後に外部へ院進して惑星分野を学ぶことを想定しながら，物理学を学びました．その中で，微分方程式を数値的に解く計算コードの実装とその結果が出ることの達成感を味わい，これなら生涯続けられると確信しました．3年生の終わりに院進先を決めるため，系外惑星や惑星形成に関してどのような研究室があるのかインターネットで検索をかけると，東工大のある研究室（あまり覚えていませんが井田研か奥住研だったと思います）のHPが表示され，「惑星形成論」という文字列に強く目を惹かれました．系外惑星について数値計算を用いて研究できる，そう思いすぐさま東工大地惑の説明会に行きました．そこで中本泰史教授から，東工大地惑は地球の形成過程を調べるために設立されたというお話を聞き，東工大に院進することを決めました．

東工大に進学しついに惑星科学の研究を始められると思ったのも束の間，新型コロナウイルスの大流行により，大学院へ顔を出すこともできずに自宅待機する日々が続きました．その中で，当時博士学生だった桑原歩氏や本間和明氏が原始惑星系円盤に関する輪講をオンライン会議で主催して下さったおかげで，少しずつ基礎知識を身につけることができました．入学して約半年後，ついに井田教授との研究を開始することができました．研究テーマは，氷がシリケートよりも付着力が高い場合における原始惑星系円盤中のシリケートダストの結晶化率についてでした[1]．1から計算コードを作成して結果を出し，それを彗星の観測結果と比較する．まだ惑星科学の知識が殆どないような段階でしたが，太陽系形成過

1.上海交通大学李政道研究所
oktm1918@gmail.com

程の微少な片鱗が見えてくるようで，研究しているという実感が湧きました．この時に開発した数値計算コードを改良し，難揮発性炭素の破壊という別の化学反応を取り入れ，地球や隕石の固体炭素量の再現も行いました[2]．しかし，どちらの研究テーマに関しても「私が化学について専門外であった」という問題がついてまわりました．そんな折，井田教授から「分からないことは専門家に聞きなさい」という助言を頂き，彗星の観測に関しては産業医科大学の大坪助教や京都産業大学の河北教授と，化学実験に関しては東京大学の橘教授や瀧川准教授，原始惑星系円盤における化学進化については国立天文台の野村教授と議論を行い，数多くの助言を頂くことができました．

博士2年に上がる頃，井田教授から「若手研究者を海外へ送る科研費が通ったからニースに行く気はないか」というお話を頂きました．当時欧州へ行ったことが全くなく（今もですが）英会話能力があまり高くなかったので，不安な気持ちでいっぱいでした．しかし，この機会を逃したら後悔するかもしれないと思い，博士2年の9月から3年の8月までニース天文台で研究することを決めました．そこではTristan Guillot教授と木星大気の希ガス濃縮についての研究を行いました．具体的には，希ガスが氷ペブルから脱着する温度より内側で太陽濃度よりも濃縮し，その希ガスリッチな円盤ガスを木星コアが集積するということで観測事実を再現しようという研究でした．しかし，希ガスが20 K周辺で脱着する場合は説明できないという結果しか出ず，帰国直前になって近年のアモルファス氷の実験研究がより高い希ガスの脱着温度を示唆していること，それを組み込めば木星大気の希ガス濃度を上げることができることがわかりました．しかし，先述の通り化学実験に対する知識が乏しかったので，近年の実験と以前の実験では何が違うのかという質問には「わかりません」としか答えられませんでした．そこで，実験研究者であるNiels Ligterink准教授とオンラインミーティングで議論する機会を設けていただき，自身の化学実験に関する知識を増やすことができました．

帰国後は，ニースでの研究成果を記した投稿論文と博士論文の執筆に注力しました．帰国直後は，これらをそれぞれどうまとめるか頭を悩ませていましたが，なんとか博士号を頂くことができ，投稿論文も昨年末に無事出版されました[3]．8月まで海外生活していたにしてはよくやった方かと思っていましたが，研究部屋の同期は博士論文を書くために渡米した上で，博士号を取得していました．上には上がいますね．

現在ですが，博士課程の間にやっていなかったことをやりたいと思い，荻原准教授と共にホットジュピターの近接スーパーアース存在確率を調べるN体計算を行っております．この記事を書いている間にふと思ったのですが，惑星分野を志した当初のきっかけであった，天体力学や系外惑星観測に関連した研究にようやく手を出した形になっていますね．

思い返せば小学生の頃，将来の職業について考える授業がありました．その時隣にいた友達が，職業リストの「天文学者」を指さし「たまちゃんはこれになるよね」と話しかけてきました．なので，幼少期の私に現在ポスドク研究員になっていると言っても，全く驚かないと思います．しかし，高校生になるまでパスポートを作ったことすら無かったので，現在中国にいると言ったら驚くかもしれません．一方で，母のアメーバブログには「娘は多分日本に留まらないだろうと高校生の頃から思っていた」と，それまで海外経験がなく英語も下手な娘のどこを見てそう感じたのか，全く見当のつかない1文が書いてありました．

これまでの経歴を見てお察しの通り，深く考えずに動くだけ動いてみて後から帳尻を合わせるような半端者であり，周りの方々に支えられてここまで研究を進めることができました．博士の指導教員である井田教授，ニースで私をホストして下さったGuillot教授，現在の受入教員である荻原准教授をはじめ，これまで関わってきた全ての皆様にこの場を借りてお礼申し上げます．これからも惑星分野の発展に貢献できるよう精進して参りますので，今後ともよろしくお願いいたします．

Reference:

[1] Okamoto, T. and Ida, S., 2022, ApJ 928, 171.
[2] Okamoto, T. and Ida, S., 2024, A&A 692, A11.
[3] Okamoto, T. et al., 2025, A&A 703, A292.

書評

系外惑星の物理

犬塚 修一郎・小林 浩　編著
田村 元秀・大西 利和・小久保 英一郎・百瀬 宗武・生駒 大洋　著
講談社　2026年1月刊行　全272頁
ISBN: 9784065407134

武藤 恭之[1]



本書は，平成30年度採択の新学術領域研究「新しい星形成理論によるパラダイムシフト」の計画研究代表者らによって著された，大学の学部後期から大学院レベルを想定した専門書である．この研究領域は，「星と惑星の形成を一連の連続的な過程として捉え，銀河系の進化環境における星・惑星形成の理解を深めること」（本書「まえがき」より引用）を目的としている．

本書はその目的に沿うように，銀河のスケールから惑星のスケールまでを概観する構成になっている．まず第0章として，全体の導入と基礎的な物理の説明がされた後，星形成・惑星形成・系外惑星の知見が，それぞれに章を構成して紹介される．読者はまず，0.1式を見て，本書が専門書の顔をした一般向け解説ではなく，当該分野の研究を志す学生に向けて書かれた専門書であることを悟るだろう．なにしろ，最初の式が輻射強度とエネルギーフラックスの関係式である．この式は，天文系の学部専門科目の講義で初期に出てくるもので，物理学科の学部生にとってすらも馴染みが薄いだろう．その後に展開される基礎物理は，衝突断面積と二体問題であり，こちらについては知っている学生も一定程度居ると思われるが，初学者にとっては少々ハードルの高い書かれ方をしている．まさに「大学の学部後期から大学院レベル」を想定した，妥協のない書き出しだといえる．

その後，第1章・2章・3章でそれぞれ，星形成・惑星形成・系外惑星に関連する様々な話題が紹介される．各章では，基礎的な物理過程の解説を交えつつ，最新の成果が紹介されている．それぞれの章に理論・観測の内容が配置され，取り上げる話題のバランスが考慮されていることがうかがえる．一方で，各章の構成や参考文献の取り上げ方はそれぞれ異なり，各テーマに関する研究の歴史と現状，さらには執筆者の個性も見え隠れする．

星形成を扱う第1章は，理論・観測の話題が混ざり合いながら大きなスケールから小さなスケールへと展開されている．参考文献は著者らの研究が中心で，自身が打ち立ててきた描像を余すことなく紹介しようという情熱を感じとれる．数100パーセク程度の分子雲スケールから，数100天文単位程度の星・惑星系のスケールまでを60ページ程度で一気に駆け抜ける構成で，1ページの説明が論文数編分に相当するような箇所もあり，読者はじっくりと味わいながら読み進めることになるだろう．

惑星形成を扱う第2章は，40年以上の歴史をもつ惑星形成の標準モデルの概説の後に，近年急速に理解が進んできた観測の話題が盛り込まれ，新旧が交錯する構成となっている．理論面で取り上げられる話題は，天体力学計算に基づいた固体の集積過程と，大気構造計算に基づいたガス集積過程が中心で，伝統的な惑星形成シナリオの中に，ペブル集積といった新たな話題がいくつか盛り込まれている．

1.工学院大学　教育推進機構
muto@cc.kogakuin.ac.jp

参考文献には日本人が中心となって著された論文が多く紹介され，日本における研究の到達点の一つを垣間見ることができる．観測に関しては，測光・分光の基礎から最近のALMAの観測までが概説され，参考文献は国内・海外の研究が同程度示されている．この章には本書の中で最も多くのページが割かれ，最も多くの参考文献が挙げられているが，それでもなお，相対的に扱いが小さい話題も多いという印象も受ける．近年の原始惑星系円盤や惑星形成の研究の進展の著しさを感じられる．

系外惑星を扱う第3章は，観測で明らかになってきたそれらの姿を概説した後に，やはり観測によって明るみになったいくつかの課題について，その理論的解釈を解説している．その文面からは，爆発的に増えてきた観測の扱いにいささか困惑している理論家の様子が目に浮かぶ．第二の地球を見つけようという掛け声のもと，新しい観測手法・装置の開発や，将来計画の提案が次々と現れる．その一方で，第2章で語られている惑星形成過程を，実際の（系外）惑星系の姿に繋げる試みは道半ばである．確立された理論がないところに，観測によって示される「宿題」が積み重なり，それでも混乱の中に喜びを見出す知の探求の最前線が，本章には淡々と描き出されている．本章で挙げられている参考文献は少ないが，それ自体が系外惑星研究の新しさを物語っているのだろう．これから分野に飛び込んでいこうとする学生にとっての活躍の場になるかもしれない．

本書で扱われている話題は，出版時点における最新研究の一部である．ページ数が限られていることの宿命として，本書で扱われていない話題も多い．例えば，銀河進化と星形成の関係，原始惑星系円盤の（電磁）流体力学，星間空間から太陽系にいたる化学的あるいは物質科学的展開など，「銀河系の進化環境における星・惑星形成の理解を深め」ていくための問題は多く残されている．

新学術領域研究の継続期間は，実際の研究のタイムスケールに比較すれば非常に短い．本書を一つのマイルストーンとしつつ，これからは，本書に書かれていない問題が重要になるかもしれない．そもそも，グローバルな銀河系とローカルな星惑星形成が互いに相互作用しながら歴史を刻んでいくのであれば，「星形成・惑星形成・系外惑星」という章立て自身が無意味になるかもしれない．本書を手に取った学生が，修士論文・博士論文で本書を書き直す日が来ることを期待したい．

《目次へ

書評

リュウグウの砂に挑む チームで小惑星のサンプルを分析

伊藤 元雄(著)
くもん出版　2025年9月刊行　全120頁
ISBN: 9784774334479

三浦 均[1]



著者の伊藤元雄さんは，同位体分析技術を武器に，アメリカや日本の研究機関で地球惑星物質の分析に携わってきた研究者です。本書では，伊藤さんが深く関わったふたつの惑星探査ミッション—「スターダスト」と「はやぶさ2」—が主に紹介されています。

第72回青少年読書感想文全国コンクールの課題図書[1]に選ばれた本書は，主に中学生を対象とした平易な文体で書かれているため，本学会誌の読者層には少しやさしすぎると感じられるかもしれません。しかし，本書で描かれているのは探査ミッションの内容だけではありません。伊藤さんが一人の研究者としてどのような道を歩んできたのかが，ご本人の視点から率直に語られています。

伊藤さんの宇宙科学者としての歩みは，大学院から始まります。大学までに学んだ分野とはまったく異なる宇宙科学の世界を選んだ伊藤さん。先生から「伊藤くんは有機化学ができないね」と言われながらも，ただひたすらに隕石と向き合う姿が描かれています。

やがて，二次イオン質量分析法(SIMS)を修得し，同位体分析の専門家として頭角を現した伊藤さんは，アメリカで研究をすることになります。しかし，渡米当初は英語がほとんど通じず，人の助けがなければ何もできない自分に悔しい思いをします。自動車を購入した際には，状態の悪い車を買わされてしまったというエピソードも紹介されています。

そうした苦労を重ねながら，伊藤さんはNASAから声をかけられ，スターダストミッションに参加します。そこでNanoSIMSという新しい分析技術を修得し，チームのメンバーと協力しながら研究成果を生み出していきます。本書を通じて一貫して描かれている，仲間と力を合わせることの大切さは，このころに培われたのでしょう。

その後，NanoSIMSを導入したJAMSTECからの招聘を受け，伊藤さんは「はやぶさ2」ミッションに参加することになります。ここで，いよいよ本書のタイトルにつながります。アメリカで身につけたNanoSIMSの技術と，スターダストミッションで培ったチーム研究の経験を活かし，リュウグウから持ち帰られた砂の分析に挑みます。

リュウグウの砂から得られた分析結果をひとつひとつ読み解いていく過程は，実際に分析を担当した研究者ならではの臨場感をもって描かれています。分析結果をどのように受け止め，チームの中でどのように議論し，科学的な結論へとつなげていったのか。ぜひ実際に本書を手に取って読んでいただきたい部分です。

本書の冒頭では，伊藤さんが大学院入試の面接会場で，試験官から「宇宙人はいると思うかね？」と尋ねられたエピソードが紹介されています。少し前ならSFの話と受け取られかねなかったこの問いに，現在の伊藤さんは科学者としての答えを返します。

1.名古屋市立大学 大学院理学研究科
miurah@nsc.nagoya-cu.ac.jp

本書は，ふたつの惑星探査ミッションを紹介する科学読み物であると同時に，一人の宇宙科学者の半生記でもあります。研究者を志す皆さんに，ぜひ勧めたい一冊です。

参考文献

[1] https://www.dokusyokansoubun.jp/books.html

著者紹介

三浦 均



名古屋市立大学 大学院理学研究科 准教授．筑波大学大学院数理物質科学研究科宇宙物理学専攻博士課程修了．博士(理学)．日本学術振興会特別研究員PD，東北大学大学院理学研究科地学専攻特任助教を経て，2013年から現職．専門は，結晶成長学と，その地球惑星物質科学への応用に関する理論的研究．日本惑星科学会，日本結晶成長学会，日本天文学会，日本鉱物科学会に所属。2021年1月より，本誌の編集長を務めている．趣味は囲碁とトランポリン．

書評

金星への帰還　夜明けを信じ続けた、金星探査機「あかつき」の再挑戦と復活

中村 正人(著)
幻冬舎メディアコンサルティング、2026年5月、170pp
ISBN 978-4-344-69905-2

林 祥介[1]

本書は金星探査機「あかつき」の始まりから終わりまでの物語である．著者は，「あかつき」に至る探査計画WGに1990年代末から参加，Planet-C計画承認(2001年5月)を受けて，JAXA化前夜の2002年にISASに着任し，2023年3月の定年退職時まで「あかつき」計画のほぼ全工程を衛星主任(旧ISAS用語)/プロジェクトマネージャ(JAXA用語)として担うことになった中村正人である．研究人生の後半を捧げることになった経緯と格闘の記録でもある．本書の主題は，筆者の言をもってすれば，「あかつき」というプロジェクトの実現に至った「伝統と情熱」をこれからの人々に語り伝えることにある．

「あかつき」は波長帯別全球撮像カメラ4台(紫外UVI，中間赤外LIR，赤外1μIR1，赤外2μIR2)と1台の雷・大気光カメラ(LAC)，そして掩蔽観測に最適化した超安定電波発信機(USO)を搭載した(世界初の?)惑星大気観測に特化した探査機であった．当初，中村は東大本郷で宇宙プラズマの撮像研究に取り組んでいて，金星探査計画WGには参加していなかったが，今村剛が金星に行って気象観測をやりたいと言ってるから手伝ってくれと協力要請したのは中村の恩師鶴田浩一郎であったと記してある．今村から伝授された目論見をもとにカメラの仕様検討に着手するや，探査機の概念設計全体を引き受ける依頼であったことに気付き嵌められたと思ったそうだが，無論，鶴田組出身者の中村が感づいてなかったはずは無かろう．中村にとっては自分の観測研究経験とは畑違いとなる探査計画の牽引役をよく引き受けたものだと思う．今村に加えて，周囲には同期の阿部豊，大気力学の松田佳久，大気構造と雲・物質科学のはしもとじょーじら理論家精鋭陣が居て科学計画の検討に密な協力を得られたことは強力な後押しになったに違いない．逆に，中村の参入なくしては，理論家(気象力学)が主であった日本の惑星気象学陣では金星気象探査実現など夢のまた夢に終わっていただろう．実際，80年代後半，日本でも惑星探査が検討されるようになったころ，西村純の下で気球観測の修行を積んだ山中大学の金星大気気球観測提案を日本気象学会の研究者陣じゃ支えられないと言下に否定したのは評者らであった(すいません)．いずれにせよ，中村のリードのもと科学目標の精緻化が進められ必要となるカメラ群の仕様が決定され，それらを元に中村自らが，開発を担える指導的研究者の探索と依頼に奔走し，結果，渡辺重十，田口真，岩上直幹，佐藤毅彦，高橋幸弘といったSGEPSSを主たる活動の場としていた人々が中核となって機器開発が開始された．宇宙天文学をはじめとしてISAS内外やメーカーの数多の腕に覚えのある人々の協力が得られたことは言うまでもない．筆者の言うところの「伝統と情熱」がなした業である．

そのような数多の苦労が結実して2010年5月21日打ち上げられた「あかつき」であるが，金星到達まで順調に進んでいた行程は同12月7日の金星周回軌道投入で暗転する．逆止弁閉塞が原因とみられる主エンジン噴射不足で金星を通過してしまったのである．プロジェクトマネージャ痛恨の「想像力の欠如」による基本的事項の見逃しであったと記されている．幸いにして5年後に金星再接近が期待できる金星軌道近傍の太陽周回軌道上に再発見され，通信は正常，観測装置群の無事も確認された．機能しなくなった

1.神戸大学理学研究科・名誉教授
shosuke@gfd-dennou.org

主エンジンに代わって姿勢制御エンジンを駆使するという離れ業で2015年12月7日に金星周回軌道に奇跡の「復活」を果たした．計画よりは若干離心率の大きな軌道となったが，所期の目標通り「ひまわり」等の地球の静止気象衛星を模した低緯度周回軌道に置かれ，5年間太陽にあぶられたカメラ群も無事起動し，以後2025年9月18日停波終了まで約10年間にわたって金星大気観測が実現した．あまたの幸運に恵まれたともいえるがその幸運をつかむことができたのは「伝統と情熱」であろうか．結果，雲追跡風ベクトル解析により雲層での擾乱角運動量輸送の観測的評価を初めて実現するなど，金星大気の特に循環構造を含む大気構造の解明を大きく進展させるデータ群を収集することに成功した．惜しむらくは，雲層以深の構造を紐解くべく期待された赤外カメラ（IR1/IR2）が1年程の短命に終わってしまったことがあるが，金星大気らしからぬ（？）渦々の存在を映し出したクリアなIR画像は感動ものであった．2010年末の軌道投入が成功していれば一足先に金星極周回軌道上にあって2014年12月まで稼働していた欧州の探査機VEX（Venus Express）との協調観測が実現できたはずであったが，代わりに2006年4月開始のVEX観測と繋ぐことで20年近くにわたる金星大気の長期現場観測が実現したことになり，10年規模の大気構造の長期変動の存在も明らかになった．

こうした企図とその成果ならびに反省の記録を残しこれを語り継ぐことは，その行いを文化の域に高め，それによって社会に位置づけ，持続可能な基盤を維持するために必須の作業であるが，わが国では（日本語空間では）これを行う余裕（人員あるいは時間）がなかなか確保できず，文化に高めるどころか専門領域での経験の伝承も不十分であるように危惧される．そうした状況下で，本書は貴重な一冊であると評することができるだろう．中村から執筆計画を聞いた時には，まずは，「遊・星・人」に大学院生〜研究者向けの連載記事をまとめてネット上に参照可能とし（絵もカラーにできるし），その上でこれを一般向けの本にまとめるのが良いのではないかと意見したことがあった．非常に時間と手間のかかる無理難題の注文ではある．中村は，おそらく自らの執筆体力的問題も考慮し，比較的急いで執筆を完了することを選択し，自費出版の道を選んだ．それが本書である．総じて図の出版用再加工があまりできなかったようで，記号・略号がわかりにくいものが少なくないが，これはおそらく費用上致し方ないだろう．「伝統と情熱」をこれからの人々に語り伝えることについては，評者のような比較的近しい人間には，折に触れ聞いていた事象の経緯を知ることでき登場人物の顔も浮かんできて興味深く読めることはまちがいない．しかし，対象読者としては広い範囲を想定しているだろうから，特に，未だ専門知識のない読者の掴みはどうかなあと思うところもある．「はじめに」の内容は「おわりに」（謝辞）に回して，代わりに，想定読者を場合分けして，たとえば，中高生ならこのあたりはわからないかもしれないけど気にするな，といったガイダンスを置いておくとか，あるいは，第一部の先頭が「失敗」で始まるのも（我々には気持ちはわかるけど）科学少年少女をとらえるには普通に金星と金星大気の謎（スーパーローテーション）から導入したほうが，とか，自分語りは意図（こういう経歴でプロになることもあるよ，といったような）をしっかり語ってからはじめた方がいいかなとか，難癖をつけたくなる部分もないわけではない．周囲のこれからの人々に薦めるときには気分や意図を補足してあげると良いかもしれない．

中村の経験は，大きなプロジェクトと言えども，まだ，知り合いの範囲内でなんとかなった時代（発展段階）・サイズの問題に対するものであったと評することもできるだろう．また，日本の科学技術力と経済力が上向きの時代に根差しており，科学主導で牽引することが社会的にも強く期待されていたことも精神的後押しに寄与していたと想像することもできるだろう．本書で記されているように，プロジェクトが日本語で推進でき，濃密な意思疎通が担保されたことも「伝統と情熱」を動員し涵養する重要な要素だったと思われる．巨大化細分化専門家が進み，日本の経済力が減衰し，国際協力による（英語化した）プロジェクト推進が当たり前になっている昨今の状況下での「これからの人々」には，「あかつき」での経験は必ずしも直接的な参考にはならないかもしれない．であるからこそなおさら「情熱」は必須であり，経験に裏打ちされた「伝統」は意識して記録し伝えていかないといけないように思う．中村の本書はそうした一つであることはまちがいない．

《目次へ

2026年度宇宙科学奨励賞公募のご案内

公益財団法人 宇宙科学振興会[1]

公益財団法人宇宙科学振興会では，宇宙科学分野で優れた研究業績を挙げ，将来の宇宙科学の発展に大きな役割を果たすことが期待される若い研究者を顕彰し，宇宙科学奨励賞を授与いたします．ここに2026年度の第19回宇宙科学奨励賞候補者のご推薦を募集いたします．推薦要綱の詳細は当財団のホームページ（https://www.spss.or.jp）に掲示しておりますが，当奨励賞の概要は以下の通りです．皆様の周りで優れた業績を挙げ将来の活躍が期待される若手研究者をご存知の際には，是非ともご推挙いただきますようお願い申し上げます．

表彰の趣旨:　宇宙理学（飛翔体を用いた観測，探査，実験に関連する理学研究）分野及び宇宙工学分野で独創的な研究を行い，宇宙科学の進展に寄与する優れた研究業績をあげた若手研究者個人を顕彰する．この賞が対象とする分野には，地球観測や宇宙環境を利用した理学研究・工学研究も含まれる．

授与機関：公益財団法人　宇宙科学振興会

候補者：上記分野で優れた業績をあげた当該年度の4月1日現在37歳以下の若手研究者個人．候補者の推薦は他薦に限る．

業績の審査：業績の審査は，推薦理由となる研究業績に関連して発表された論文に基づいて，当財団が設置する選考委員会において行う．

賞の内容:授賞は原則として毎年宇宙理学関係1名，宇宙工学関係1名とする（ただし適格者のいない場合は受賞者なしとする場合がある）．受賞者には本賞（賞状と表彰楯）および副賞（賞金30万円）が贈られる．

推薦締切日：**2026年10月31日（土）**必着．

表彰式：選考結果は2027年1月に推薦者と受賞者に通知するとともに，当財団ホームページにおいて発表する．
その後2027年3月初旬に表彰式を行い，受賞者には受賞対象となった研究に関する講演をして頂く．

なお，推薦の手続きの詳細については財団のホームページ（https://www.spss.or.jp）をご覧いただき，推薦書式をダウンロードして必要事項を記載の上，(1) 候補者の略歴，(2) 業績全般を示す論文のリスト，および (3) 推薦の対象となる論文の別刷等必要書類を添付の上，電子メールにてご提出下さい．

お問い合わせ先および推薦書送付先:
〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台3-1-1
公益財団法人宇宙科学振興会　事務局
E-mail: admin@spss.or.jp
Tel: 042-751-1126（火，木）

1.公益財団法人 宇宙科学振興会 事務局
admin@spss.or.jp

《目次へ

JSPS Information

◇日本惑星科学会第178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178回運営委員会議事録

日時:2026年5月24日 (日) 17:30 - 19:00
場所:幕張メッセ国際会議場106(現地) + オンライン(Zoom Meeting)

運営委員:
出席者 17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, 瀧川 晶, 横田 勝一郎, 生駒 大洋, 野村 英子, 藤谷 渉, 田中 智, 亀田 真吾, 佐々木 貴教, 鎌田 俊一, 田中 秀和

欠席者6名 (委任状:会長5名, 藤谷委員1名)
百瀬 宗武, 保井 みなみ, 癸生川 陽子, 野口 里奈, 坂谷 尚哉, 黒川 宏之

オブザーバー:
・金子 2026年秋季講演会組織委員
・丹 連合大会プログラム委員
・平野 2025年学会賞選考委員長
・渡邊 総務専門委員(事務局担当)

議題・報告事項:
1. 2026年秋季講演会について(金子 2026年秋季講演会組織委員)
期間:9月14日(月)−17日(木)
開催場所:朱鷺メッセ(新潟コンベンションセンター)
一般講演会を13日に実施. 講演者は臼井 寛裕会員. 総会は3日目夕方, 懇親会は3日目夜. 最優秀発表賞特別セッションは1日目に予定.
新潟県, 新潟市から補助が得られることとなった. 講演会参加費は一般会員5000円, 非会員7000円, 学生会員2000円の予定. 学部生・M1の学生は第一著者として発表しない場合は参加費を無料とする.
6/11発表・参加・支払い・予稿原稿の受付開始, 6/29発表申込・最優秀発表賞予稿原稿締切, 7/29参加申込・支払い・予稿原稿締切.

2. 日本地球惑星科学連合:プログラム委員会(丹 連合大会プログラム委員)

来年度のプログラム委員に坂田 遼弥会員(正), 渡辺 泰士会員(副)が推薦され, 承認された.
来年度の惑星科学セッションコンビーナに平井 英人会員(代表), 芝池 諭人会員, 豊田 優佳里会員, 中澤 風音会員が推薦され, 承認された.
JpGU-AGU2026での学協会セッションは惑星科学, 宇宙・惑星探査の将来計画および関連する機器開発の展望, 惑星火山学, 惑星地震学の4件であった.

3. 2025年度最優秀研究者賞について(平野 2025年学会賞選考委員長)
最優秀研究者賞について, 3月23日に応募を締め切り, 応募者は4名であった. 書類審査及び4月23日に選考委員全員で審査を行い, 荒川 創太会員, 植田 高啓会員の2名が候補として選出された. 選考過程及び講評についても説明がなされ, 承認された.

4. 第18期上期決算(横田 財務専門委員長)
決算報告書に基づいて説明がなされた. 収入は約750万円, 支出は約950万円で約200万円の赤字. 前年の赤字額よりも100万円ほど抑えられており, これは主に学会誌の印刷製本費 (ページ数) が抑えられたため.

5. 第18期下期予算執行状況(横田 財務専門委員長)
予算案通りに推移. 学会誌出版費は電子化により予算案に対して100万円の削減が見込まれ, 結果として全体の収支差額は200万円の赤字となる見込み. 会員区分, 所属の更新依頼があった.

6. 今後の年会費について(竝木 副会長)
遊星人電子化などの支出削減努力により, 2026年度は会費収入と支出はほぼ同等となる見込み. しかし今後, システム移行費用などの支出が見込まれ, 繰越金を一定額確保しておく必要もあることから, 年会費の増額を予定している. 一般会員12500円, 学生会員6000円への増額を5/25の総会で提案することとなった. 秋季講演会の総会で会費値上げ案を決議する.

7. 事務局体制の現状報告(渡邊 総務専門委員)
特に大きな変化はなし. 事務局業務手順・スケジュールを整理し提出済み.
2027年度の事務局体制移行に関連した問い合わせと要望 (学会口座住所の変更, コワーキングスペース荷物の移送, 事務局事務員の年金・保険・税金などの終了手続き, 離職票発行など) が伝えられた.

8. 新事務局体制への移行について(諸田 事務局体制検討作業部会長)
現在の調整状況について報告された. 事務局は2027年1月より株式会社共立に委託する予定. 引き継ぎは9月から12月にかけて行う. 各委員会との作業分担に関する打合せも月1〜2回の頻度で順次実施する. JpGU新システムを使用する場合の開発費及び保守管理費について, JpGU側と調整中であることが報告された. JpGU-AGU2026終了後に具体的な費用分担についてJpGU側と協議する.

9. 遊星人の発行状況報告(三浦 編集専門委員長)
つつがなく発行できている旨, 報告があった. 2026年3月号まで発行済. 6月号の製本作業中. 3月号から電子化とした. 冊子を必要とする会員のためにアマゾンで購入が可能となっている. 5/24時点での販売実績は無し.
複数の機関に保管されているバックナンバーについて, 発行から5年以上経過したものは廃棄とする. 在庫処分セールとして販売することを検討しており, スケジュール案が説明された. 6~8月に申し込みを受付, 9月の秋季講演会会場で必要部数を集約し, 配送作業を行う. 残部は廃棄.

10. 学会賞選考委員の入れ替え(藤谷 総務専門委員長)
2026年度学会賞選考員に木村 淳会員，長 勇一郎会員，嶌生 有理会員，國友 正信会員(以上，2025年度から留任)，田崎 亮会員，黒田 剛史会員，松本 徹会員，堀 安範会員(以上，2026年度に新任)の8名が推薦され，承認された.

11. 第18期上期活動報告，第18期下期活動計画(藤谷 総務専門委員長)
活動報告書・活動計画書に基づいて報告がなされ，承認された.

12. 入退会状況報告(藤谷 総務専門委員長)
2026年5月24日現在の会員数について，報告がなされた. 正会員一般:528，正会員学生:126，シニア会員:52，賛助会員: 2(昨年度から1社退会).

13. 第65回総会の議長・書記の推薦について(藤谷 総務専門委員長)
第65回総会の議長に荒木 亮太郎会員(JAXA/ISAS)，書記に小野寺 圭祐会員(岡山大学)が推薦され，承認された.

14. その他
特になし.

以上

◇賛助会員名簿

2026年9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.

---

* 2026/09

** 2026年9月24日(木)-9月26日(土) 日本流体力学会 年会2026
(a) 信州大学工学部, 長野(工学部)キャンパス
(b) 日本流体力学会
(c) 日本流体力学会 年会2026 実行委員会(E-mail: jsfm2026-ml@shinshu-u.ac.jp)

---

* 2026/11

** 2026年11月10日(火)-11月13日(金)第70回宇宙科学技術連合講演会
(a) ライトキューブ宇都宮
(b) 日本航空宇宙学会
(c) https://smartconf.jp/content/sstc70/

編集後記

遊星人編集幹事の野津翔太です．今回の遊星人，連載記事 火の鳥「はやぶさ」未来編では，MMXに続く2030年代前半の戦略的中型計画としてプロジェクト化を目指し検討が進む次世代小天体サンプルリターンミッションに関し，その経緯とミッション内容・サイエンス目標などの最新の検討状況について，黒川宏之さんにまとめて頂いています．また2026年10月20日(予定)の打ち上げに向けて準備が進む火星衛星MMXは二本立てのほか，金星あかつき，系外惑星，海外研究記と，各連載の充実した記事が掲載されていますので，ぜひご覧いただければと思います．また，今号には博士の学位を取得した会員に自己紹介して頂くNew faceの記事が4本掲載されています．New faceの記事は随時募集しておりまして，学位取得後3年以内または学位取得後，日本惑星科学会に入会してから3年以内の会員が対象です．会員に広くアピールすることができるよい機会となりますので，ぜひ投稿をご検討ください．

2026年7月下旬に，英国のExeterで5日間に渡り開催された"Discs on the Exe"という原始惑星系円盤・惑星形成分野の国際研究会に参加してきました．講演や共同研究者との研究議論を楽しんだり，ALMA，JWSTによる最新観測研究などの情報収集もできたりと，個人的に充実した時間を過ごす事ができました．また研究会の中では"Navigating Post-PhD Life"と題した研究者キャリアを考える全体企画セッションが開催されたのですが，アジア方面からの参加者が少なかったことなどもあってか，パネリストの1人として参加することになりました．様々な地域出身の6人の研究者が各地域の典型的なキャリアパスの例や自分の研究者キャリアについて，残念ながら採用されなかった公募の応募経験を踏まえたアドバイスなどやや踏み込んだ話も含めて紹介した上で，会場の若手ポスドクや大学院生の皆さんから寄せられた質問 (事前募集 & その場で挙手)に答えていくという形式でした．個人的にはこの様な場に立ち英語で答えていくのは初めての経験で，なんとか乗り切ったという感覚ではありますが，各国・地域ごとのキャリアパスの違いと共通する悩みなども色々見えてきて，有意義な経験でした．(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

2026年9月25日発行

日本惑星科学会誌　遊・星・人　第35巻　第3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.

学会誌原稿作成の手引き

日本惑星科学会編集専門委員会

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エブサイト
(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で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．

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上記送付先にご相談ください

The Japanese Society for Planetary Sciences