

遊



日本惑星科学会誌

**Planetary
People 1**

March 2026 vol35 no **1**

星

人

- 2024年度最優秀研究者賞受賞記念論文
- 金星あかつきその65:ラスト・デイズ
- 火星衛星MMXその13:小型ローバIDEFIX
- Cosmic Dust, 衝突研究会, iSALE講習会

日本惑星科学会誌「遊・星・人」投稿規定

日本惑星科学会

1. 投稿可能な記事

- ①学会誌に投稿できる記事内容は、
 - (a) 原著論文：惑星科学に関する研究のオリジナルな報告
 - (b) 解説論文：専門外の人にも分かりやすく解説した研究成果の総説や論説
 - (c) 解説記事：広く会員の関心をひく事柄についての解説
 - (d) 報告記事：学科、研究所、海外機関等の紹介、国内外の研究会の報告、New Face (博士号取得者の自己紹介)、インタビュー記事
 - (e) 情報記事：各種の情報記事
 - (f) エッセイ：上記の形式にとらわれず、惑星科学に関する話題を論じた文章など、広く会員の知的好奇心をみたすもの。
- ②投稿記事の長さについてはとくに制限をもうけない。ただし、標準的には上記(a)～(c)については6～8ページ(1ページ2000字とし、タイトル、300字程度の概要、図表を含めたページ数)、(d)については4～6ページ、(e)、(f)は1ページとする。
- ③上記とは別に、会員(故人)の追悼記事を、編集委員会からの依頼原稿として受け付ける。追悼記事の投稿を検討される場合は、事前に日本惑星科学会編集専門委員会委員長宛に問い合わせること。

2. 投稿資格者

日本惑星科学会会員及び編集委員会が適当と認めた者。

3. 投稿原稿及びその送付

- ①原則として、投稿原稿はワープロなどにより電子的に作成されたものであること。
また、原稿のファイル形式については「学会誌原稿作成の手引き」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1号
目次

巻頭言 伊藤 元雄 3

「2024年度最優秀研究者賞受賞記念論文」JWST時代における系外惑星大気の最新観測と理論研究

大野 和正 4

一番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦 その65 ～あかつきラスト・デイズ～

中村 正人, 山崎 敦, 今村 剛, 佐藤 毅彦 21

もう一つの月世界へ:火星衛星探査計画MMX その13

～フォボス表層に触れて理解する:MMX小型ローバIDEFIXの狙い～

宮本英昭, ステファン・ウラメック, パトリック・ミシェル 24

2025年日本惑星科学会秋季講演会開催報告

成田 憲保 30

第15回 Cosmic Dust 研究会 (The 15th meeting on Cosmic Dust) 開催報告

大村 知美 33

「天体の衝突物理の解明(XXI) ～パターン形成～」参加報告

豊田 優佳里 36

「2025年度iSALE講習会」参加報告

松原 光佑 41

JSPS Information 45

Contents

Preface	M. Ito 3
<hr/>	
Observational progress and theoretical research of exoplanetary atmospheres in the JWST Era	K. Ohno 4
<hr/>	
Road to the first star: Venus orbiter from Japan (65)	
— The last days of Akatsuki —	
	M. Nakamura, A. Yamazaki, T. Imamura, T. Satoh 21
Fly me to another moon world: Martian Moons eXploration (MMX) (13)	
— Touching the surface of Phobos; scientific rationale of the MMX rover IDEFIX —	
	H. Miyamoto, S. Ulamec, P. Michel 24
<hr/>	
Report on the Japanese Society for Planetary Science Fall Meeting 2025	
	N. Narita 30
Meeting report on “The 15th meeting on Cosmic Dust”	
	T. Omura 33
Report on the “Understanding the Physics of Astrophysical Impacts (XXI): Pattern Formation” Workshop	
	Y. M. Toyoda 36
Report on the “2025 iSALE Training Course”	
	K. Matsubara 41
<hr/>	
JSPS Information	45

巻頭言

境界を越え、物質に刻まれた記憶を読み解く

我々が対峙しているのは、単なる石ではない。それは46億年という途方もない時間を超え、人類への挑戦状として届けられた、太陽系そのものの記憶である。

二次イオン質量分析計の前に座り、ミクロンサイズの微粒子に刻まれた同位体比のわずかな揺らぎを追いかけるとき、私は常に一つの問い「この微小な物質の中から、どれほど広大な太陽系の履歴を読み取ることができるのか」に突き当たる。

私にとって宇宙化学の本質は、物質に刻まれた記録を読み解く営みに他ならない。理論モデルが描いた、美しく滑らかな原始太陽系円盤の姿は、分析技術の飛躍的進展とともに、激しい物質混合と不均質性に満ちた、はるかに動的な世界へと塗り替えられてきた。アミノ酸や水を含む有機物、含水鉱物の発見は、我々の起源を地球の外、暗黒の分子雲や初生的な微惑星へと明確に結びつけている。

しかし、分析精度が向上すればするほど、自然は新たな「謎」を突きつけてくる。同位体異常が示す多種多様なスターダストの混入、あるいは母天体内部で進行した複雑な水質変成は、既存の枠組みがいかに暫定的で、不完全なものであるかを雄弁に物語っている。

ここで強調したいのは、データの背後にある想像力の重要性である。最新鋭の装置から得られる数値は、真理への断片にすぎない。それらをつなぎ合わせ、太陽系進化のダイナミックな物語として再構築するためには、分野の垣根を越えた対話と、ときに既存のパラダイムを疑う勇気が不可欠だ。そして、その対話の舞台は、必然的に世界へと広がっている。

「はぶさ2」をはじめとするサンプルリターン時代の到来により、一個の粒子はもはや個人や一研究室のものではなく、人類共通の知の財産となった。リュウグウ試料の分析を通じて、私は世界各国の研究者とデータを突き合わせ、時に激しい議論を交わしてきた。異なる背景と専門性を持つ知性が衝突する場にこそ、数値の中に埋もれた「ノイズではない真実」が立ち現れる。

我々が現在手にしているのは、太陽系という巨大で未完成なパズルの一部にすぎない。その一部を手を、ミクロな物質解析からマクロな太陽系進化像を描き出すための知的挑戦は、今後ますます装置開発と学際的協働に支えられて進展していくだろう。

伊藤 元雄(国立研究開発法人海洋研究開発機構 高知コア研究所)

「2024年度最優秀研究者賞受賞記念論文」 JWST時代における系外惑星大気の最新観測 と理論研究

大野 和正^{1,2}

2025年12月19日受領, 査読を経て2026年1月22日受理

(要旨) 系外惑星大気研究は比較的新しい分野ながら, ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡(JWST)によって近年急速に進展しつつある. 筆者はこれまで「太陽系の惑星と大きく異なる環境の系外惑星大気中で何が起きているか?」「系外惑星はどのような化学組成を持っているか?」「大気を通じて惑星の起源に迫ることができるか?」といった問いに答えることを目標に, 固体微粒子(雲, 光化学ヘイズ)形成の微物理モデリングを始めとした系外惑星大気の理論研究に取り組んできた. 本稿では最近のJWSTによる観測成果も交えつつ, 筆者がこれまで取り組んできた理論・観測研究について紹介する.

1. はじめに

今日までに6000個(2025年12月現在, NASA Exoplanet Archiveを参照)を超える太陽系外惑星が発見されている. 太陽系の外には中心星近傍で平衡温度1000 Kを超える灼熱ガス惑星(ホットジュピター)や地球と海王星の中間サイズの惑星(サブネプチューン, スーパーアース)といった太陽系に見られない惑星が数多く存在している. これらの多様な系外惑星系の起源を明らかにすることは惑星科学における究極の目標の一つと言える.

惑星系の起源を探る手がかりとして, 近年注目を集めているのが系外惑星の大気組成である. 惑星の大気組成は惑星の材料物質, すなわち原始惑星系円盤内のガスや微惑星の組成を反映していると期待される[e.g., 1,2]. 惑星大気と惑星形成がどのように繋がっているかに関して, 筆者は過去に遊星人で「新・惑星形成論」の特集記事を書かせて頂いたのでそちらも参照していただきたい[3]. 海王星より小さい惑星に対しては, 質量と半径のみからは内部組成を一意に決定できない問題が知られているが([e.g.,

4], 3.2節も参照), 大気組成を介して惑星のバルク組成を探ることができると期待されている. このような背景のもと, 系外惑星の大気観測は20年以上に渡って精力的に行われてきた[e.g., 5]. 系外惑星大気は組成を通じて惑星の起源を探ることに加えて, 太陽系には存在しない高温・強紫外線環境下で大気物理・化学素過程がどのように応答するか理解する上でも重要な観測対象である.

2021年に打ち上げられたジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡(JWST)が科学運用を始めたことにより, 系外惑星大気分野の状況が激変した. 以前では考えられなかった広波長範囲・高精度・高波長分解能での観測が可能となり, 系外惑星大気の物理構造・化学組成に関する観測的理解が急速に進展しつつある(最近のレビューとして[6-8]を参照). 筆者は博士卒業後, ポスドクとしてカリフォルニア大学サンタクルーズ校(UCSC)に渡った際にJWSTによる系外惑星大気分野の転換点に立ち会う幸運に恵まれた. 本稿では第二章で系外惑星大気的主要な観測法とそこから得られる物理量について簡単に紹介した後, 第三章で筆者がこれまでに取り組んできた系外惑星大気の理論・観測研究に関して, JWSTによる観測結果を交えつつ紹介する. また, 第四章ではJWSTの結果を踏まえて, 惑星形成に対してどのような制約

1.国立天文台 科学研究部

2.総合研究大学院大学

ohno.k.ab.715@gmail.com

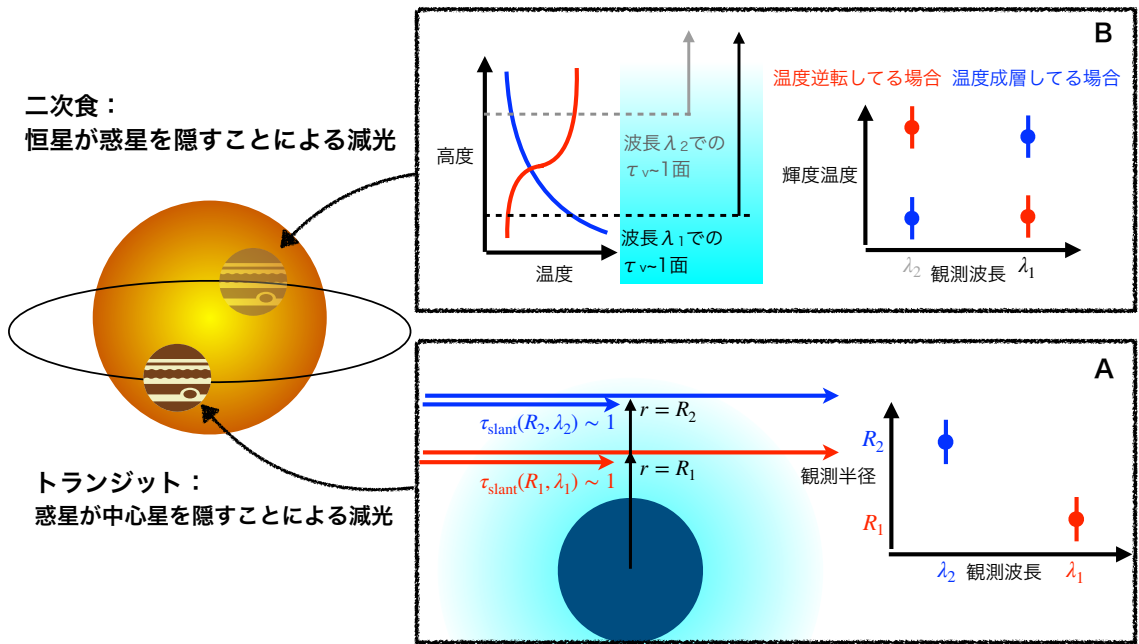


図1: 系外惑星大気の観測法の概略図. パネルAにおいて τ_{slant} は大気の視線方向の光学的厚み, パネルBにおける τ_v は鉛直方向の光学的厚みである.

が得られつつあるかを議論し, 第五章で本稿のまとめと今後の展望について述べる.

2. 系外惑星大気観測の基礎

本章では系外惑星の大気観測で得られる観測量と, そこから探れる大気の物理的・科学的性質について簡単に紹介する. トランジット分光法と系外惑星大気の雲とヘイズ¹の問題については筆者や川島由依氏による過去の遊星人記事[9,10]も参照されたい.

2.1 トランジット分光(大気透過光スペクトル)

トランジット分光とは惑星が中心星の前を横切る際の減光率を様々な波長で測り, 惑星半径の波長依存性を調べる手法である(図1のパネルAを参照). 光学的に厚い大気を纏う惑星の場合, 観測半径は大気がどの高度で視線方向に光学的に厚くなるかで決まる. そのため, 惑星半径は大気中の吸収・散乱源の

波長依存性を反映することになる. 等温大気かつ大気中で重力一定と仮定すると, 惑星のトランジット半径は以下のように見積もれる[e.g., 11].

$$R_p \approx C + H \times \ln \left(\frac{P_0 \kappa}{g} \sqrt{\frac{2\pi R_0}{H}} \right) \quad (1)$$

ここで C は定数, P_0 はある半径 $r=R_0$ における圧力, g は重力, κ は大気の不透明度(単位質量あたりの減光断面積), $H=k_B T/m_g g$ は大気のスケールハイト, T は大気温度, k_B はボルツマン定数, m_g は平均分子質量である. なお, 式(1)では簡単のため κ が鉛直一定であることを仮定している. κ 以外は波長依存性を持たないことに注意して, 観測半径を波長微分すれば以下のようにスペクトル形状を記述できる[12].

$$\frac{dR_p}{d\ln(\lambda)} = H \frac{d\ln(\kappa)}{d\ln(\lambda)} = \alpha H \quad (2)$$

最後の変形では $\kappa \propto \lambda^\alpha$ とした. 式(2)より, 透過光スペクトルの形状は κ の波長依存性を, 振幅は κ の波

¹本稿で断りのない限り, 雲は相変化によって形成される固体・液体微粒子(地球の H_2O 雲), ヘイズは光化学を介して形成される微粒子(例:タイタンの霧)を指すこととする.

長変動の大きさとスケールハイト H を反映していることが読み取れる。そのため、サイズの大きな雲粒のように波長依存性の弱い吸収・散乱源が κ を支配している場合、観測半径は波長にほぼ依存せず“平坦”なスペクトルが観測される。また、大気のスケールハイト H が小さい場合も、スペクトルの振幅が抑えられ、平坦に近いスペクトルが得られることとなる。

ここで一つ注意したいのが、式(2)は鉛直方向に一樣の不透明度を仮定している点である。光化学生成分子や雲、光化学ヘイズの存在量は一般に鉛直方向に非一様であり、式(2)でスペクトル形状の振る舞いは正しく捉えられない。筆者は川島由依氏との共同研究で、大気の不透明度が圧力の冪乗の依存性を持つ場合($\kappa \propto P^\beta \lambda^a$)、以下のようにスペクトル形状を記述できることを示した[13]。

$$\frac{dR_p}{d\ln(\lambda)} = \frac{\alpha}{1-\beta} H \quad (3)$$

式(3)から $\beta > 0$ (つまり不透明度が低圧領域ほど高い)の場合にもスペクトルの振幅が増幅することが分かる。実際、筆者や川島由依氏による光化学ヘイズを含めたスペクトル計算において、大気循環によってヘイズ存在量に強い鉛直勾配が生じる場合にはヘイズの減光によるスロープ構造が急勾配になる振る舞いが確認されている[13,14]。可視波長域において、通常の水素分子によるレイリー散乱では説明できない急勾配なスロープ構造を示す惑星が複数見つっているが[e.g., 15,16]、ここで述べた鉛直勾配の効果を反映している可能性がある。

2.2 二次食分光(放射光スペクトル)

トランジット惑星は惑星が主星の真後ろに位置することで惑星からの放射光・反射光が主星に遮られる現象(二次食)が起こる(図1のパネルBを参照)。この二次食を利用することで大気組成、さらには大気温度構造を探ることができる。大気鉛直温度・雲構造が水平方向に一樣と仮定すると、惑星からの反射光が無視できる場合には二次食による減光率(Eclipse depth)は大まかに以下のように書ける。

$$D_{\text{eclipse}}(\lambda) = \frac{B(T_{\text{ph}}, \lambda)}{B(T_{\text{eff}}, \lambda)} \left(\frac{R_p}{R_s}\right)^2 \quad (4)$$

ここで B はプランク関数、 T_{eff} は星の放射光の輝度温度、 T_{ph} は惑星放射の輝度温度であり、散乱が無視できる場合には鉛直方向の光学的厚みが ~ 1 となる場所(光球面)の温度に対応する。

放射光スペクトルの特徴として、スペクトル形状が大気温度構造に依存する点が挙げられる。特に温度勾配の符合に敏感である。大気が上層ほど低温な場合、大気分子が強く吸収を起こす波長では輝度温度が下がる。一方、温度逆転層が存在している場合、分子の吸収バンドでは輝度温度が上がるといった定性的に異なるスペクトルの振る舞いを引き起こす。また透過光スペクトルと違い、放射光スペクトルは大気のスケールハイトに直接的には依存しないため、スケールハイトの小さい場合でもスペクトルの振幅が大きくは変わらないという利点がある。実際にはスペクトル形状は温度・雲構造の水平方向の不均質性[17,18]や大気の散乱[19]にも影響を受け、これらの効果を考慮しないと説明できないJWSTの放射光スペクトルも報告されている[20]。

3. 系外惑星大気の理論研究とJWSTによる大気観測

JWSTの科学運用が始まった2022年以降、系外惑星大気に関する観測的知見が急速に蓄積しつつある。本章ではJWSTで得られつつある成果について概観しつつ、筆者が取り組んできた関連する理論研究を惑星の種類別に紹介する。

3.1 ホットジュピター

JWSTの初期科学運用(Early Release Science, ERS)プログラムによって最初に観測されたのはWASP-39 bという土星質量の高温ガス惑星(平衡温度 ~ 1100 K)である[21-25]。この惑星は膨張した半径を持つことから透過光スペクトル観測に適しており、また過去のハッブル宇宙望遠鏡(HST)や地上望遠鏡による観測から比較的晴れた大気を持つことが知られていた[26]。筆者は総勢150人以上に及ぶERSチームの一員としてJWSTによる最初の系外惑星大気スペクトルの理論解釈に取り組んだ。具体的には、様々な大気重元素量やC/O比に対して一次元放射対流平衡計算を行うことで大気

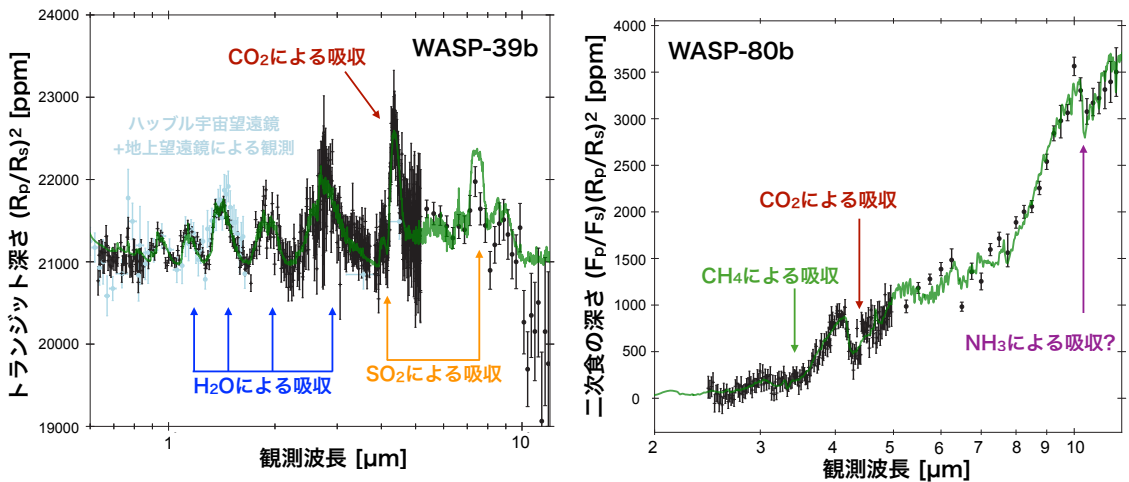


図2: JWSTによって観測されたホットジュピターWASP-39bの大気透過光スペクトル(左)とウォームジュピターWASP-80bの放射光スペクトル(右)。観測スペクトルはWASP-39bは[27,28], WASP-80bは[29]から引用。緑線はベストフィットモデルスペクトルでWASP-39bは[27]から, WASP-80bは[29]から引用した。左図において, JWST以前のハッブル宇宙望遠鏡, スピッツァー宇宙望遠鏡, 地上望遠鏡による観測[26]を比較のため空色のデータ点で示した。

温度構造と化学平衡組成構造のグリッドを作成し, 観測スペクトルをよく説明するパラメーターの組み合わせを調べた[25]。

図2にJWSTによって観測されたWASP-39 bの透過光スペクトルを示した。JWST以前の観測スペクトル[26]も併せて載せたが, 波長範囲, 分解能, 精度がいずれも劇的に向上していることが窺える。WASP-39 bのスペクトルを特徴付けるのはH₂Oによる複数バンドでの吸収と4.3 μm 付近のCO₂による強い吸収である。高温ガス惑星の大気において, CO₂はCOがOHによって酸化されることで生成するため[30,31], 強いCO₂の吸収は大気が酸素に富んでいることを示唆する[32]。また, JWST打ち上げ以前にも1-1.5 μm 帯に存在するH₂Oの吸収がHSTによって報告されていたが, 長波長側のH₂Oの吸収も同様に発見された。これらのH₂OとCO₂の発見はJWST以前の理論計算からも予言されており, 当時の理論研究がそれなりに正しかったことを意味する。

一方, 多くの人にとって予想外だったのがSO₂の発見である。水素に富んだガス惑星大気において, SO₂は熱化学平衡のもとでは微量にしか存在せず, 検出されるほど豊富なSO₂を生成するには光化学が必須となる。ERSチームでSO₂の生成経路を調べた結果, 大気循環で大気下層から巻き上げられてきたH₂Sが

H₂OとH₂の光解離で生成されたHとOHによって段階的に破壊, 酸化されることでSO₂を生成していることが分かった[33]。鍵となるのは酸化を駆動するOHの存在量で, SO₂が豊富に生成されるには大気の酸素量が太陽組成より十分高い必要がある。したがって, SO₂の存在はCO₂から示唆される酸素に富んだ大気という描像と調和的である。SO₂が当初予想外だったのは, 系外ガス惑星における硫黄大気化学の研究は当期限られていたこと[34,35], また多くの研究が太陽組成に注目した計算を行っていた背景があると筆者は考えている²。SO₂は系外惑星では初となる光化学の観測的証拠, 更には硫黄を含む化学種の系外惑星では初の発見としてERSプログラムの主要成果の筆頭と言えるだろう。

3.2 ウォームジュピター

高温系外ガス惑星は平衡温度約1000 Kより高温な惑星をホットジュピター, 低温な惑星をウォームジュピターと呼ぶ風習がある。何故このような区別をするかであるが, 温度約1000 Kを境に大気の主要な炭素

²水素リッチな大気でも金属量が高ければSO₂が観測されうること自体は実は公開光化学コードVULCAN[36]の論文で予言されているのだが, 殆どの人がその議論を認知していなかったためSO₂の特定に時間がかかった背景がある。

リザーバーがCOからCH₄に切り替わると期待されること[e.g.,37], また平衡温度1000 K以上のガス惑星は惑星熱進化モデルの予測より大きな半径を示す“異常膨張”と呼ばれる問題があるといった背景がある[e.g., 38].

JWST以前の低温惑星に対する大気観測において、理論的には豊富に存在する筈のCH₄が見つからない“メタン枯渇問題”とも呼ばれる謎があった[39-41]. 筆者が参加しているJWSTの時間保証観測(Guaranteed Time Observation, GTO)プログラムの一つであるMANATEEでは、平衡温度800 KのWASP-80bの透過光および放射光スペクトルの観測を行い、CH₄が3.2 μm付近で引き起こす強い吸収を透過光と放射光の両方で発見することに成功した[42]. 最新の放射光スペクトル[29]は図2右を参照). 別の低温惑星であるK2-18bやTOI-270dにおいてもCH₄が発見されており[43,44], 低温惑星ではCH₄がより主要な炭素リザーバーになるという理論予測が定性的には確認されたことになる. 一方、CH₄が発見された惑星において観測から推定されるCH₄存在量が化学平衡を仮定した理論予測より2桁以上低く[46], JWSTでもCH₄が検出できない低温惑星が依然存在するなど[45-47], “メタン枯渇問題”の謎が完全に解けたとは言い難い. CH₄量が低い原因として化学非平衡の効果に加えて熱進化モデルの予測より惑星内部が遥かに高温であるためという説が頻繁に引用されるが[45,46], その物理的要因は未だに議論の渦中にある.

筆者が個人的に予想外だったのは、JWSTの放射光スペクトル観測で温度逆転層が発見されていない点である. 平衡温度が1000 Kより低温な惑星では光化学ヘイズが豊富に生成されることが示唆されており[14,48,49], 光化学ヘイズがタイタンのヘイズ模擬物質(ソリン)や煤のような組成を持っている場合、ヘイズが大気上層を加熱して温度逆転層を形成すると予想されていた[48,50]. 筆者らは可視波長域の透過光スペクトルからヘイズの存在が示唆されているWASP-80b[51]とWASP-69b[52]の放射光スペクトルをJWSTで観測したが、いずれの天体も大気上層ほど低温であることを示唆するCO₂の吸収線が確認された[20,42]. 温度逆転層が存在しない理由として、ヘイズの組成が従来想定していたソリンや煤と

かけ離れている可能性が考えられる. 特にヘイズが中心星からの可視光を殆ど吸収しない場合は温度逆転層が発生しない. このような反射能の高いヘイズの存在は3.4章で紹介するGJ1214bに対しても示唆されており, “Maximally reflective haze”という吸収を一切引き起こさない架空の物質をヘイズ組成として仮定する研究も増えてきている[53,54].

系外惑星ヘイズの組成に関する謎が深まる中で筆者はある日、人工ダイヤモンドの低圧下での合成法である化学蒸気吸着(CVD)法の存在を知った. CVD法は高温(~1000 K)の水素ガスに炭素を含む分子(CH₄など)を注入し、原子水素を生成するようなエネルギー源(高温のフィラメントなど)を導入すると低圧下においてもダイヤモンドが析出するという技術である[e.g.,55,56]. 興味深いことにCVD法によるダイヤモンド合成環境は高温ガス惑星の大気に酷似している. 系外ガス惑星に予想される大気組成は経験的に知られているCVDダイヤモンド合成が可能なC/O/H比の条件[57]を満たしており, CVDダイヤモンド合成の鍵となる原子水素は中心星からの強烈な紫外線照射で効率的に形成される. このような類似性から、JWST観測で示唆されている反射能の高いヘイズはCVDダイヤモンドであるという可能性を筆者は推測するようになった.

実際に可能性を検証するため、筆者は工学分野で培われたCVDダイヤモンド成長理論[58-60]をヘイズモデルに組み込み、系外惑星大気中でCVDダイヤモンドが析出可能かを調べた[61]. この際、燃焼分野で定式化されているHydrogen-abstraction-C₂H₂-addition (HACA)メカニズムによる煤の表面成長[62,63]も同時に取り入れ、CVDダイヤモンドと煤のどちらがよりヘイズの主成分となり得るかも検証した. 計算の結果、C/O<1の大気においては常にCVDダイヤモンド生成が煤生成を凌駕することが分かった(図3左パネル, 右上パネル). これはC/O<1において煤の前駆物質であるC₂H₂よりダイヤモンドの前駆物質であるCH₃の存在量の方が常に高いこと、また大気上層では光化学由来の原子水素によって煤が効率的に破壊されることに起因する. 様々な大気金属量、C/O、惑星平衡温度のもとで計算を行った結果、大気金属量が太陽組成の100倍以下であれば平衡温度~800-1200 Kの惑星においてCVDダ

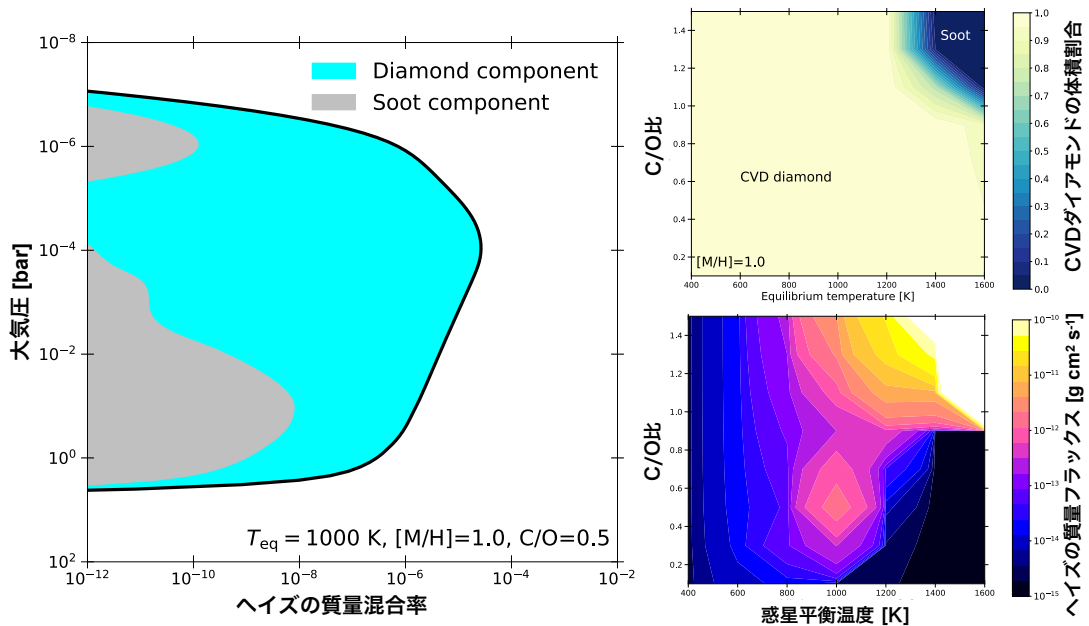


図3: CVDダイヤモンド生成と煤生成を考慮した光化学ヘイズ形成計算. 左図はCVDダイヤモンドと煤の質量混合率(大気中の質量密度に対する粒子の質量密度)の鉛直分布を, 右図は1 mbarより上層大気におけるヘイズ粒子中の平均ダイヤモンド体積割合と1 mbarにおけるヘイズの質量フラックスを惑星平衡温度, C/O比の関数としてプロットした. 大気金属量は太陽組成の10倍の場合に固定している. Ohno (2024)[61]の図を元に作成.

ダイヤモンドが効率的に生成しうることが分かった(図3右下パネルの質量フラックスも参照). この結果はWASP-80 bやWASP-69 bといったヘイズの存在が示唆されているにも関わらず温度逆転層を持たない惑星を説明する可能性がある.

3.3 スーパーパフ

ここからは低質量の惑星の話に移るが, 最初に“スーパーパフ”と呼ばれる奇妙な天体の紹介をしよう. 海王星以下の質量の惑星の中には半径が木星に匹敵するものが複数存在する(Kepler-51dなど, 図6も参照). これらは平均密度が極端に低いことからスーパーパフと呼ばれている[64]. このような低密度な惑星は, 大気が惑星総質量の30%程度以上を占める内部構造モデルを用いて説明が可能である[65]. 一方, 数地球質量程度のコアがそのような大量の大気を獲得するには低温かつダストが枯渇した円盤遠方といった特定の条件が必要と示唆されている[64]. 加えて, これらの惑星は低重力なため非常に強い大気散逸を経験することが理論的に予想され

[66], 何故スーパーパフが現在まで大量の大気を保持できているのかは大きな謎の一つである. このように, スーパーパフは低質量惑星の大気形成・進化を理解する上で重要なターゲットだと考えられている.

一方, 筆者を含む複数の研究者はスーパーパフの観測半径が実際より過大評価されている可能性を検討するようになった. 例えば, 惑星の観測半径は大気が光学的に厚くなる高度で決まるため, 大気上層が雲ないしヘイズで光学的に厚くなれば, 大気が晴れている場合より大きな半径として観測されることになる[66–68]. 筆者の博士最終年度である2019年に大気微粒子の成長を無視した先行研究[66]が現れ, 大気散逸を専門とする田中佑希氏がポストドクとして東工大に在籍していたこともあり, 散逸大気中の微粒子成長について共同研究をすることとなった[69]. 具体的には, 大気散逸を経験している大気中での微粒子衝突成長, 重力落下, 大気散逸による輸送を考慮した粒子サイズ分布進化計算を多数行い, 大気微粒子が惑星の観測半径にどの程度の影響を与えうるかを調べた. ここでは, 大気微粒子の起源

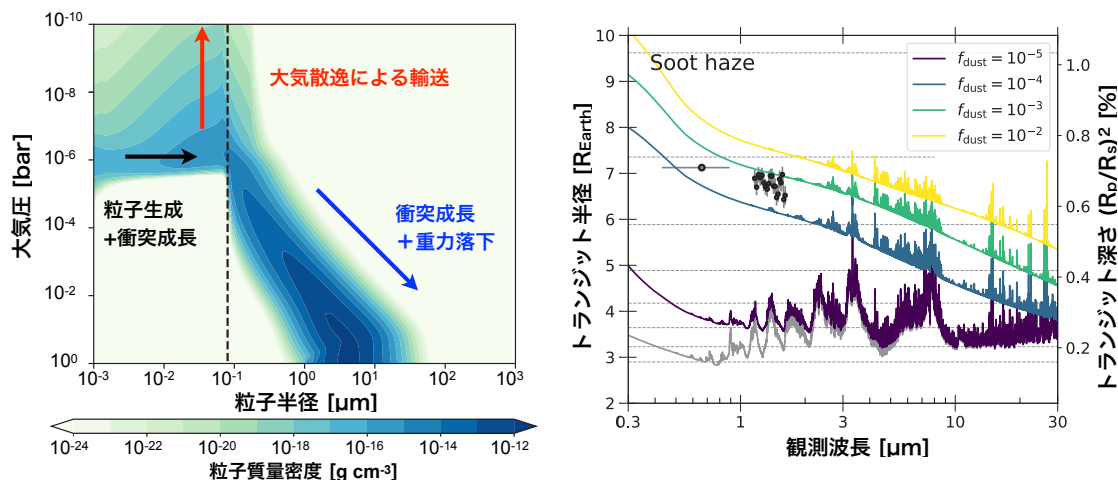


図4: (左図) 散逸する大気における大気微粒子のサイズ分布の鉛直構造. カラーバーは各粒子サイズ-鉛直グリッドにおける粒子質量密度を示している. (右図) 散逸大気の下での大気透過光スペクトル. 各色線は異なる大気微粒子生成率 f_{dust} (柱生成率と大気散逸フラックスの比) のもとのスペクトルである. データ点は計算で仮定した惑星と同程度の温度・質量を持つ Kepler-51b のハッブル宇宙望遠鏡で観測された大気透過光スペクトル. Ohno & Tanaka (2021)[69] の図を元に一部改変.

は仮定せず、微粒子の生成高度と生成率をパラメーターとすることで、どのような起源の大気微粒子が観測半径に影響するかを調べた(便宜上、以降はダストと呼称する).

ダストの多くは衝突成長を経て惑星深部に落下するが、強い大気散逸のもとでは一部のダストは大気散逸に巻き込まれる(図4左). 特に、光化学ヘイズのような大気上層で形成するダストは効率的に大気散逸に巻き込まれ³、惑星半径をファクターで増大させることを明らかにした. これは大気上層の密度が低いため、ある大気散逸率の元では常に上層の方が散逸に伴う外向き速度が速いためである. 大気透過光スペクトル計算を行った結果、大気上層のダストは大気分子の吸収をほぼ完全に隠し、波長と共に半径が大きく減少することも分かった(図4右). 分子吸収が隠されたスペクトルは、実際に Kepler-51b や c といったスーパーパフで観測されている平坦な大気スペクトルと整合的である[70].

³詳細は割愛するが、パラメーターサーベイと解析的な議論の結果、ダスト生成率がどんなに高くても上層大気中のダスト/ガス比はダスト生成領域における外向き速度と音速の比を大きく越えられないことも分かった. このことから、大気散逸中のダスト/ガス比を上げるにはダストが外向き速度の速い大気上層で形成される必要がある.

ここで一つ注意したいのが、全ての惑星がダストで観測半径が劇的に増加するわけではない点である. これは大気の圧力が半径方向に指数的に減少することに起因する. 大気微粒子による半径増加は視線方向の光学的厚みが ~ 1 となる圧力を下げる効果として作用するが、この圧力変化に対応する半径増大量は大気スケールハイトに比例する. そのため、大気スケールハイトが惑星半径より遥かに小さい場合、ダストは半径増大に殆ど寄与しない. ダストによる半径増大の度合いは大気スケールハイトと惑星半径の比にスケールするが、この無次元量はエスケープパラメーター[71]の逆数と等しく、ダストで半径増大が可能な惑星は必然的に強い大気散逸を経験する. スーパーパフが少数しか存在しないのは、このような限られた条件下でのみダストによる半径増大が起きるためと考えることができる.

スーパーパフの巨大な半径を説明する別の説として、スーパーパフが土星のような周惑星リングを持っている可能性も提案されている[72,73]. トランジット観測は惑星の影の“面積”を測っているため、影自身の形状は分からないのである. 当時、リング説はヘイズ説の対抗馬として提案されていたが、観測的に両者を区別する方法は確立していなかった. そこ

で、筆者はUCSCに渡ったのち、リングを持つ惑星を観測した場合にどのような大気スペクトルが観測されるかを受け入れ教員のJonathan Fortney氏と一緒に調べてみることにした[74]⁴。具体的には透過光スペクトルの計算の際、リングの影と重なる大気の領域にリングによる減光を追加することでリングの影響を考慮した。

図5に示した通り、光学的に厚いリングを持つ惑星は曇った惑星と類似の平坦な大気スペクトルを示すことが分かった。本結果はリングによって大気の一部が隠されること、またリングが惑星の見かけの大気スケールハイトを過大評価させることに起因する。後者は「スペクトルが平坦である」と判断する基準そのものに関係している。通常、透過光スペクトルの振幅はスケールハイトで規格化することでその大小が評価される。具体的には水素大気を仮定したスケールハイトでトランジット半径を規格化した際、分子吸収に由来する振幅が ~ 1 – 2 スケールハイト以下であれば、そのスペクトルは「平坦」あるいは「Featureless」と解釈される⁵。しかし、惑星がリングを持つ場合、トランジット半径がリングの寄与によって過大評価されるため、惑星質量とトランジット半径から算出される表面重力は実際よりも小さく評価される。その結果、規格化に用いられるスケールハイトが過大評価されることになり、大気分子の吸収による振幅が相対的に小さく解釈され、結果としてスペクトルが平坦であると誤認されることになる。

筆者の上記の研究によると、ヘイズ説とリング説は広い波長範囲で見ると大気スペクトルに大きな違いが生まれる。ヘイズで惑星が大きく見えている場合、長波長に向かうにつれて惑星半径が大きく減少する(図4右パネルも参照)。これは、大気上層には微小な粒子しか滞在できないためである。一方、リング説の場合は長波長側でも半径が波長にあまり依存

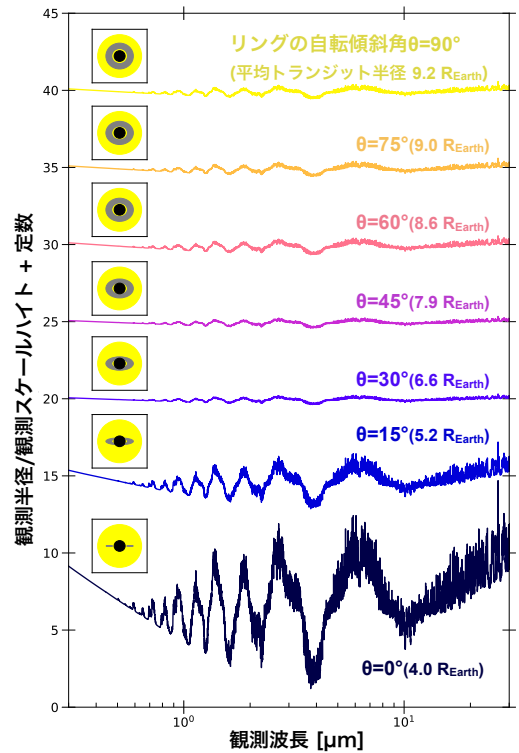


図5: 理論的に計算された周惑星リングを持つ系外惑星の大気透過光スペクトルの例。各色線は異なるリングの自転傾斜角の場合における惑星トランジット半径の波長依存性を示す。スペクトルは惑星質量とトランジット半径から計算可能な大気スケールハイトで規格化している。Ohno & Fortney (2022)[74]の図を元に改変。

しないことが期待される。これは周惑星リングが μm サイズより遥かに大きな粒子で主に構成されていると期待されるためである。そのため、JWSTなどの広波長に渡る観測で、どちらの説がより尤もらしいか、あるいは別の理由でスーパーパフが巨大な半径を持っているのか議論できるようになると期待される。実際、JWSTによる大気観測は幾つかのスーパーパフに対して行われており、Kepler-51dに対してはヘイズ説と整合的な強い半径の波長依存性も報告されている[76]。

3.4 サブネプチューン

2–4地球半径の中型惑星(サブネプチューン)は現在発見済みの系外惑星の大多数を占め、大気観測の

⁴当時コロナ禍で対面の議論ができなかったため、手計算で大部分を進められる本プロジェクトは打ってつけであった。また裏事情として、現STScIのAlam Munazza氏からリングを持つ惑星大気の透過光スペクトル計算法が必要である旨をスーパーパフHIP41378fのHSTスペクトル[75]と共に伝えられ、定式化に取り組むことにした経緯がある。

⁵図3のリングがエッジオン($\theta=0$)で観測者から見えない場合からも読み取れるが、晴れた大気の場合は ~ 5 スケールハイトの変動が期待される[e.g., 49]。

ターゲットとしても重要である。特に、サブネプチューンは惑星内部組成を平均密度から一意に決定できない内部構造縮退という問題が知られている[4]。図6に低質量惑星の質量と半径の関係を示した。例えばGJ1214bというサブネプチューンに着目すると、GJ1214bは水主体の内部構造と水素大気を纏った岩石コアの両方のモデルで質量と半径の関係が説明できることが見て取れる。すなわち、質量と半径のみでは惑星バルク組成を一意に決定できない。一方、これらのシナリオは大きく異なる組成の大気を持つことが期待される。そのため、大気観測を通じて惑星内部組成を特定しようという試みが行われてきた。

サブネプチューンは大気分子の吸収が微弱なスペクトルを示すことが多く、JWST以前は大気組成を制約できない場合が多々あった[77-79]。このような大気スペクトルは“平坦”スペクトルと呼ばれており、原因として大気上層に光学的に厚い雲あるいはヘイズの層が存在するためと解釈されている。筆者の博士論文は上述のサブネプチューンGJ1214bに注目し、大気中に雲として存在することが予想される鉍物雲(KCl)形成の微物理モデリングを行い、どのような大気組成の元で平坦スペクトルが再現可能かを調べた[81-83]。その結果、大気が最低でも太陽組成の100倍以上重元素に富んでいないと観測されている平坦スペクトルを説明できないことが分かった[83]。この結果はKClの存在量がそもそも低く、光学的に厚い雲を作るには金属量が非常に高い必要があることに主に起因している。この研究に関しては過去に遊星人記事を書かせていただいたのでこちらも参照されたい[9]。

JWST打ち上げ後、筆者はアリゾナ大学のEverett Schlawin氏らと協力して、GJ1214bに対してJWST-NIRSpecによる大気透過光スペクトル観測を実施した[84]。得られた観測スペクトルをHSTとJWST-MIRIによる過去の観測結果と合わせて図7に示す。観測の結果、微弱ながらも $4.3\ \mu\text{m}$ の CO_2 の吸収の兆候を捉えることに成功した。GJ1214bで CO_2 が見えることには大きな意味がある。GJ1214bの温度帯(大気温度が約500 K)においては、大気が水素に富む限り CH_4 が炭素の主要リザーバーとして存在することが示されている[85]。 CH_4 でなく CO_2 の吸収がより顕著に見えている事実

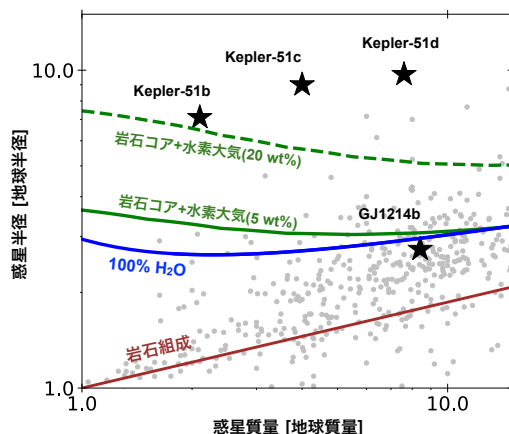


図6: 低質量惑星の質量と半径の関係。色線は様々な内部構造に対して理論的に予測される質量-半径の関係を示している。理論線は岩石コア+水素大気モデルは[64]、100% H_2O モデルは[79]、岩石組成は[80]から引用した。観測データはNASA Exoplanet Archiveを参照した。

は、GJ1214bの大気が水素に欠乏している(つまり金属量が極めて高い)ためと解釈することができる。筆者の研究を含むJWST以前の理論研究は大気が重元素に富む場合の特徴として $\sim 4.3\ \mu\text{m}$ に CO_2 フィーチャーが発現することを予言しており[14, 83, 86]、本結果はそれと整合的である。

筆者は更に様々な大気金属量、C/O比、ヘイズ生成量、渦拡散係数に対して光化学ヘイズ形成・大気光化学の理論計算を行い、JWSTの大気透過光スペクトルをよく説明する大気組成の制約を行なった[87]。KCl雲の場合と異なり、系外惑星ヘイズは具体的な形成プロセスや光学特性に大きな不定性が残る。系外惑星ヘイズの不定性に関しては川島由依氏による遊星人記事も参照されたい[10]。これらの不定要素に影響を受けない結論を得るため、筆者らは現在出版されている系外ヘイズ模擬物質の複素屈折率を可能な限り収集し[88-91]、それぞれの場合におけるパラメータ推定を行なった。また、ヘイズ生成プロセスの不定性を加味し、ヘイズの生成率を自由なパラメータとする手法と炭素含有分子の光解離率からヘイズ生成量を理論的に見積もる手法の2通りを試した。

図7にヘイズ生成率を自由パラメータとした場合と光解離率から決めた場合における中央値モデルをそれぞれ示した。計算の結果、いずれの仮定のモデ

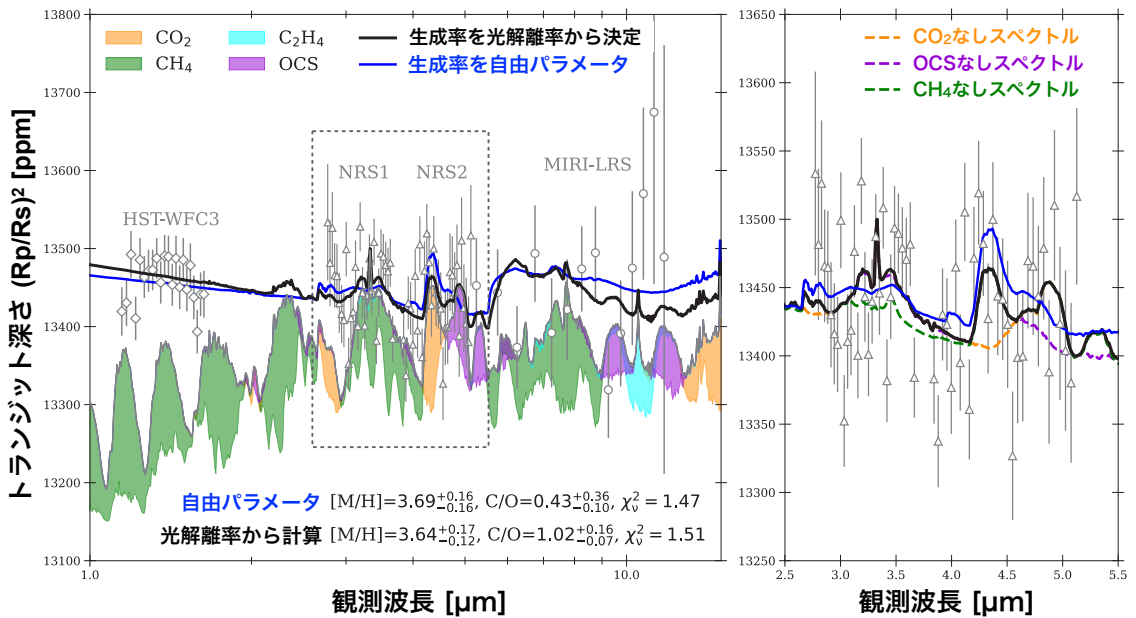


図7: サブネプチューンGJ1214bの大気透過光スペクトル。黒線はヘイズ生成率を炭素含有分子の光解離率から決めた場合の中央値モデル、青線はヘイズ生成率を自由パラメータとした場合の中央値モデル。ヘイズを除いたスペクトルを薄線で示しており、塗り潰し領域は各分子をスペクトル計算から除いた時のトランジット深さの変化を示している。各モデルで得られた大気金属量とC/O比も載せている。ここで[M/H]は太陽組成で規格化した大気金属量の常用対数をとった値である(つまり[M/H]=3は太陽組成の1000倍)。Ohno et al. (2025) [87]を元に作成。

ルにおいても、JWSTによるGJ1214bの透過光スペクトルを説明するには太陽組成の約3000倍の大気金属量が必要であることが分かった。この結果は主に2つの観測スペクトルの特徴に裏付けられている。一点目は先述したように、現状のGJ1214bの大気スペクトルではCH₄よりCO₂がより強く吸収を示している点。もう一点、観測スペクトルは全波長域においてほぼ平坦であるが、微小なヘイズ粒子と平坦スペクトルを両立するにはスケールハイトが小さい必要がある。これ以外にも、光化学ヘイズが主要な大気微粒子組成の場合、ヘイズ粒子のC=O伸縮等による強い吸収ピークが6 μm付近に現れる筈だが観測スペクトルには見られず、大気スケールハイトが小さい可能性を支持する。

大気金属量とは対照的に、モデルから推定される大気のC/O比はヘイズモデルの仮定に依存する。ヘイズの生成率を自由パラメータとした場合、観測スペクトルはC/O比が約0.5のモデルでよく説明できる。一方、ヘイズ生成率を炭素系分子の光解離率から与えた場合はC/O~1のモデルが選択される。C/O~1

のモデルが選択される理由はヘイズ生成率とCO₂/CH₄比のトレードオフにある。GJ1214bのスペクトルは全体的にフラットなため、観測スペクトルを説明する上では高いヘイズ生成率が好ましい。ヘイズ生成率はC/O比が高いほど高くなるため、スペクトルの平坦さの観点では高いC/O比のモデルほど観測をよく説明する。一方、C/O比が高いほどCH₄がより支配的な炭素リザーバーとなり、スペクトル形状に対するCO₂の寄与が弱くなる。高いヘイズ生成率とCO₂フィーチャーを両立させる上でC/O~1が最適となる。現在の観測データからC/Oが高いシナリオと低いシナリオを見分けることは難しいが、C/O~1のシナリオではCO₂以外にCH₄とOCSもスペクトル形状に影響を与えることが筆者の計算から示唆されている。そのため、追観測でCH₄、CO₂、OCSの相対的な吸収強度が高精度に測ることができれば、C/O比をよりよく制約できると筆者は期待している。

筆者らの観測に加えて、GJ1214bはJWSTによる光度曲線観測からも大気金属量が極めて高いことが示唆されている[53]⁶。これらの観測事実を統合す

ると、GJ1214bが水素に欠乏した大気を持つことは恐らく確かだろう。これは惑星のバルク組成に興味深い示唆を与える。GJ1214bの大気が水素に欠乏しているということは惑星半径を説明するためにコアが密度の低い物質(氷)を多く含んでいる必要性を示唆する。GJ1214bの最新の内部構造モデル[94]によると、大気の金属量が太陽組成の300倍以上の場合、半径を説明するには惑星質量の30%以上が氷で構成されている必要がある。GJ1214bの現在軌道は0.015 auとH₂Oが氷として存在できない中心星近傍であることから、氷に富む内部組成はGJ1214bが現在軌道より遠方で形成した後、現在の軌道まで移動してきたことを意味する。これはサブネプチューンの起源を探る有力な手がかりの一つになりうる。

GJ1214b以外にも、JWSTによって重元素に富んだ大気を持つサブネプチューンは複数報告されている。例えばGJ3470b, K2-18b, TOI-270dではCH₄やCO₂が検出されているが、これらの天体は太陽組成の~100-300倍ほどの大気金属量を持つことが示唆されている[43,44,95]。GJ3090bやGJ9827dにおいては筆者らがGJ1214bに対して求めた値に匹敵する~1000倍以上の大気金属量が報告されている[96,97]。大気分子の吸収が殆ど見えない平坦スペクトルを示すサブネプチューン/スーパーアースも依然として多く存在するが、それらの惑星も雲・ヘイズとの縮退があるものの金属量の高い大気を持っている可能性がある[98,99]。これらのサブネプチューンが何故重元素に非常に富む大気を持つのか、またこれらの重元素に富んだ大気がサブネプチューンの内部組成をどのように制約してくれるのかは興味深いトピックである。

[†]JWST-MIRIによる光度曲線観測の結果、GJ1214bは昼夜間に強い温度差を持つことが分かった[53]。大気循環計算から平均分子量が高いほど昼夜面間の熱輸送が非効率となり、昼夜間の温度差が大きくなることが示されており[92,93]、観測された昼夜間の温度差も大気金属量が太陽組成の100倍以上の大気循環モデルにより整合的である。

4. 惑星形成研究との連携に向けて

4.1 大気の窒素・硫黄

ERSプログラムによるSO₂の発見が象徴するように、JWSTによって大気の酸素や炭素以外の元素を含む分子も発見できるようになってきた。太陽系では木星大気の文脈で、大気中の窒素や硫黄、希ガスの存在量から惑星形成場所や過去の原始太陽系円盤の構造を探ろうという試みがされている(筆者の過去の遊星人記事[3]も参照)。系外惑星で同様の議論を展開することは、JWST時代に系外惑星分野が今後進む方向性の一つであろう。これを成すためには、系外惑星大気観測から大気元素比を正しく読み取る枠組みと、読み取った元素比を惑星形成・円盤進化の観点から解釈する体制を整えることが重要である。

筆者は植田高啓氏と行った木星大気と原始太陽系円盤の温度化学構造に関する共同研究[100]以降、系外惑星大気の窒素量を測れないかと興味を持つようになった。高温な系外惑星の文脈で問題となるのが、大気中の窒素は主にN₂とNH₃に分配される一方で観測可能なのはNH₃のみである点である。そこで筆者はUCSCのJonathan Fortney氏とNH₃の存在量から直接大気の窒素量を測ることが可能な惑星の条件を調べることにした[101,102]。具体的には、質量作用の法則と半解析的な大気温度構造を応用して非平衡下におけるNH₃の存在量を予測する解析モデルを構築し、大気上層で観測可能なNH₃の存在量と総窒素量の関係を様々な惑星質量、年齢、大気金属量に対して調べた。その結果、近接系外惑星の場合、殆どの惑星質量と年齢においてNH₃量は総窒素量の極一部しか反映しないことが分かった。そのため大気観測で制約可能なNH₃量は殆どの場合で総窒素量の下限值でしかない。実際の窒素量を制約するには大気化学モデルを介してNH₃量から総窒素量を類推する必要がある。現在はカリフォルニア大学ロサンゼルス校のJerry Xuan氏と共同で、褐色矮星をベンチマークとして大気の窒素量を理論的に推論する方法論の検証に取り組んでいるところである。

大気の硫黄量推定にも窒素と同様の課題が絡んでいる。現在、複数の惑星でSO₂が発見されている

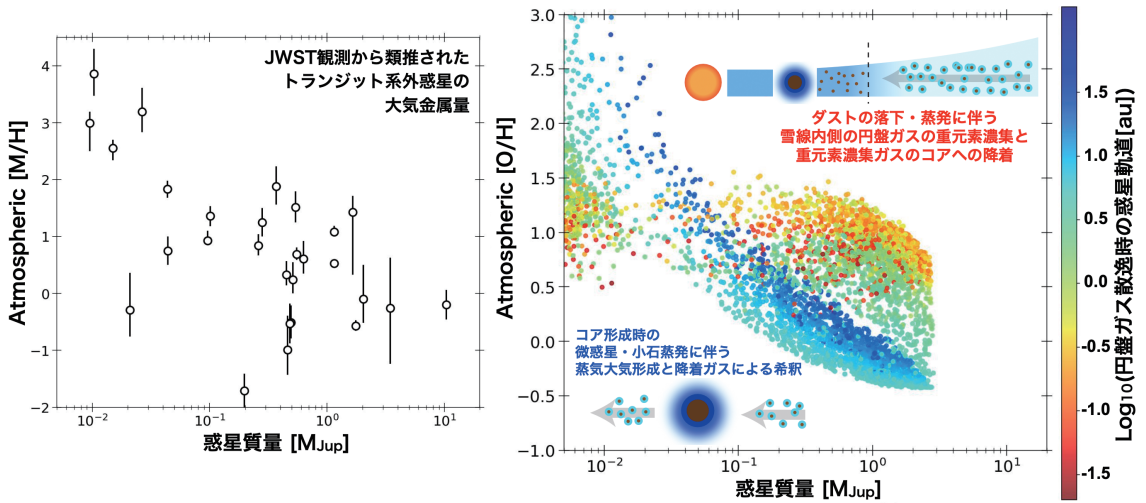


図8: (左図) 現在までにJWSTで観測されたトランジット系外惑星大気のO/H比と惑星質量の関係。(右図) 小石集積による惑星形成種族合成モデルによって計算された惑星大気O/Hと質量の関係。点の色は各惑星のシミュレーション終了時における軌道を示している。Ohno et al. (2026)[110]の図と表を元に作成。

が[24,46,95], SO₂は光化学生成物で主要な硫黄のリザーバーではない。そのためSO₂から大気の硫黄量を推定するには、窒素の場合と同様に大気化学モデルの力を借りる必要がある。しかしSO₂の生成量を計算するにはコストの高い光化学計算が必須なため、SO₂から硫黄量を逆問題的に類推するのはパラメーター数が多くなるほど加速度的に難しくなっているのが現状である。

惑星形成論の観点から大気中の窒素や硫黄が何を意味するのかを解釈する理論整備も進める必要がある。例えば、原始惑星系円盤において硫黄の90%以上は固相に存在すると考えられており[103]、大気観測で見える硫黄は微惑星などの固体が原始大気に降着したことを反映しているとこれまで解釈されてきた[104]。一方で太陽系の彗星の観測から、硫黄の一部はNH₄SHといったアンモニウム塩として存在することが近年示唆されている[e.g., 105]。近年、東京大学の中澤風音氏を主導としてNH₄SH塩を含むダストの成長・落下・蒸発を考慮した円盤組成進化計算を行い、円盤ガス中の硫黄濃度の時空間進化について調べた。その結果、NH₄SHが熱分解するH₂Oスノーライン(H₂Oが凍結する軌道)付近より内側軌道では円盤ガスが豊富に硫黄を含みうる事が分かった[106]。これは、高温系外惑星が発

見される近接軌道では円盤ガスは硫黄に富んでおり、近接軌道で形成したガス惑星は自然に硫黄に富む大気を持つ可能性を示唆する。今後は複数の硫黄の解釈の可能性を区別するために、炭素、酸素、窒素量との関係や硫黄量トレンドについて調べることが重要であろう。

4.2 大気金属量と惑星質量の関係

太陽系の巨大惑星の大気金属量は惑星質量と正相関していることが知られている。そのため、系外惑星大気にも類似のトレンドが存在するかどうか以前より議論されてきた[107]。そこで、JWSTによる大気観測で報告されている大気金属量を惑星質量の関数として図8の左パネルにまとめた。まず、全体として大半の惑星は太陽組成の~3-30倍程度の大気金属量を保持していることが読み取れる。また、分散が大ききものの質量の高い惑星ほど低い金属量を示しているようにも見える。ただし、図8に掲載した大気金属量は様々な論文が別々の手法で推定した値となっており、各天体の金属量の値を比較するときは注意が必要である。大気金属量と惑星質量の関係をより定量的に議論するには、統一した手法で各大気観測のデータを均質に再解析することが今後必要である。

惑星形成論サイドから大気組成のトレンドを解釈する体制を整えることも重要である。惑星大気中の重元素の起源として、形成時に惑星大気に降着・蒸発した小石や微惑星[e.g.,108], 更に原始惑星系円盤ガスに含まれる蒸気[e.g.,109]が考えられる。近年、筆者は生駒大洋氏、奥住聡氏、木村真博氏と協力して、ダスト成長・破壊・蒸発・落下を考慮した原始惑星系円盤進化モデルと小石集積によるガス惑星形成モデルを組み合わせて、円盤乱流強度や惑星コア形成位置をランダムに変えた種族合成計算からどのような大気金属量トレンドが予想されるかを調べた[110]。

図8の右パネルに計算された惑星質量と大気金属量(酸素量で代表)の関係を示した。計算の結果、大気金属量と惑星質量の関係は惑星がH₂Oスノーラインの内側軌道と外側軌道のどちらで大気形成を完了したかに強く依存することが分かった。H₂Oスノーラインの外側で大気形成した場合は惑星質量と大気金属量には逆相関が現れるのに対して、内側では大気金属量は質量にあまり依らずに太陽組成の~3-10倍となる。形成軌道によるトレンドの違いは大気重元素の供給源が異なることで生じる。スノーライン以遠では水蒸気が凍結しているため、コア形成時に降着した水ダストが主な重元素供給源となる。暴走ガス降着以降はガス降着率が固体の降着率を凌駕するため、質量増加と共に大気金属量が減少する。一方でスノーライン内側の場合、円盤遠方からドリフトしてきた水ダストの蒸発によって円盤ガスは高い水蒸気濃度を持つ。そのため、暴走ガス降着以降も惑星は重元素に富んだ円盤ガスを大気として獲得する。結果として大気金属量は質量にあまり依存せず全体的に高い値となる。これらの結果より、大気金属量と惑星質量の関係は近接ガス惑星の多くが木星のような遠方軌道で元々形成したのか、あるいは現在の軌道により近い場所で形成したのかを診断する鍵となりうる。

一点注意したいのが、図8に示した計算ではダストの付着力が比較的高いことを仮定している。近年の円盤観測から、原始惑星系円盤遠方ではダストが壊れやすくダストの動系方向の移動が従来の想定より遅いことが示唆されている[111,112]。このような状況でスノーライン内側の水蒸気濃集が起きるかは定

かではない。現在、東京科学大学修士課程の池田義隆氏を主導として、円盤の降着過程を見直すことでダストが壊れやすい条件下における円盤の水蒸気濃集プロセスを調べているところである。

5. まとめと今後の展望

本稿では近年のJWSTによる系外惑星大気分野の進展も踏まえつつ、筆者のこれまでの系外惑星大気分野に関わる研究を紹介してきた。JWSTによって系外惑星分野は今まさに大変革を迎えていると言えるだろう。ホットジュピターからはH₂O, CO₂, CO, CH₄といった大気中の主要な酸素・炭素リザーバーを発見できるようになり、SO₂やNH₃などの酸素や炭素以外の元素を含む分子も見えるようになってきた。これまでは大気観測が難しかったサブネプチューンに対しても、CO₂などの大気組成を制約する手がかりが得られつつある。

一方で課題も多く残っている。例えばSiO₂主成分の雲[113]や雲の東西非対称[114-116]、メタン枯渇やReflective hazeの正体など、JWSTによる新たな発見の中には物理的な説明・解釈が満足になされていないものも少なくない。観測から類推される大気組成が大気モデルの仮定に強く依存する事例も報告されており[117]、モデル依存性を軽減する方法も今後模索する必要がある。また、大気組成を精度よく決定できた場合においても、結果を惑星形成の立場から解釈する土壌は未だ発展途上である。観測データの質が劇的に向上した今、大気物理・化学モデルや大気組成を解釈する惑星形成・円盤モデルもアップデートする必要があるだろう。一方、以前では大気モデルを観測的に検証すること自体が困難だったが、様々な観測的側面からモデルを検証することが現在では可能となり、大気の理論研究に取り組む楽しみとやり甲斐が増してきたと個人的に感じている。

我々を取り巻く研究環境もJWST以前から大きく変わった。公開コードが増えたことで大気スペクトルの計算や光化学計算の敷居が下がり、学生や他分野からの新規参入が以前より容易になった。AIの発達により、情報収集やコード開発の効率も加速度的に向上している。一定水準の研究が誰でもできるよ

うになりつつある今こそ、自分がその研究に取り組み、自分で生み出せる付加価値を意識する重要性が高まっていると筆者は感じている。筆者自身、解析的な議論による数値計算結果の一般化や複数分野の融合研究を推進することで独自性のある系外惑星大気研究を行えるよう意識してきた。今後もこれまでの雲・ヘイズ研究の知見を活かし、系外惑星における雲やヘイズ微物理、多次元構造、大気温度・化学構造へのフィードバックを見直すことで、現状では物理的説明が十分なされていないJWST観測の解釈に取り組み、系外惑星大気観測の知見から系外惑星系の起源に迫るような研究に取り組んでいきたい。

謝辞

本記事は日本惑星科学会2024年度最優秀研究者賞の受賞記念論文として執筆させていただきました。まず初めに、推薦してくださった博士指導教員である東京科学大学の奥住聡氏と研究を評価してくださった選考委員会の皆様から感謝します。このような名誉ある賞を頂き大変光栄であると同時に自分のような若輩者が受け取って良いのかと恐れ多くも思っております。学会賞の名に恥じぬよう、今後もより一層研究活動に励みたいと考えております。惑星科学会の皆様、今後どうかよろしく願いいたします。

本記事は筆者の博士修了以降に東京工業大学、カリフォルニア大学サンタクルーズ校、国立天文台にて行った研究に基づいています[13,61,69,74,87,101,102,110]。ポストドクとして暖かく迎え入れてくださった受け入れ教員のJonathan Fortney氏、Xi Zhang氏、生駒大洋氏には深く感謝申し上げます。また、丁寧なレビューと多くのコメントをくださった匿名の査読者様、本記事で紹介しきれなかった研究も含めてお世話になった共同研究者の田崎亮氏、川島由依氏、田中佑希氏、植田高啓氏、野津翔太氏、中澤風音氏、池田義隆氏、木村真博氏、伊藤裕一氏、永田太郎氏、岡本珠美氏、稲井雅之氏、Xinting Yu氏、Everet Schlawin氏、Luis Welbanks氏、Taylor Bell氏、Sagnick Mukherjee氏、Adina Feinstein氏、Munazza Alam氏、Pa Chia Thao氏、Elsbeth Lee氏、

Jerry Xuan氏にはこの場をお借りして深くお礼申し上げます。最後に、本記事の執筆の機会を下された編集長の三浦均氏に感謝申し上げます。本記事はNASA Exoplanet Archiveの系外惑星データを使用しています。本記事の図はOhno (2024)[61]⁷, Ohno & Tanaka (2021)[69]⁸, Ohno & Fortney (2022)[74]⁹, Ohno et al. (2025)[87]¹⁰, Ohno et al. (2026)[110]の図を一部改変し掲載させて頂いたものです。

参考文献

- [1] Oberg, K. et al., 2011, *The Astrophysical Journal Letters* 743, 16.
- [2] Mordasini, C. et al., 2016, *The Astrophysical Journal* 832, 41.
- [3] 大野 和正, 2022, *遊星人* 31, 2.
- [4] Rogers, L. A. and Seager, S., 2010, *The Astrophysical Journal* 712, 974.
- [5] Guillot, T. et al., 2023, *Protostars and Planets VII*, 534, 947.
- [6] Kempton, E. and Knutson, H., 2024, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 90, 411.
- [7] Espinoza, N. and Perrin, M., 2025, arXiv:2505.20520.
- [8] Madhusudhan, N. et al., 2025, *PNAS* 122, e2416194122.
- [9] 大野 和正, 2020, *遊星人* 29, 3.
- [10] 川島 由依, 2020, *遊星人* 29, 2.
- [11] Heng, K. and Kitzmann, D., 2017, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 470, 2972.
- [12] Lecavelier des Etangs, A. et al., 2008, *The Astronomy & Astrophysics* 481, 83.
- [13] Ohno, K. and Kawashima, Y., 2020, *The Astrophysical Journal* 895, 47.
- [14] Kawashima, Y. and Ikoma, M., 2019, *The Astrophysical Journal* 877, 109.

⁷DOI 10.3847/1538-4357/ad8e67

⁸DOI 10.3847/1538-4357/ac1516

⁹DOI 10.3847/1538-4357/ac6029

¹⁰DOI 10.3847/2041-8213/ada02c

- [15] Pont, F. et al., 2013, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 432, 291.
- [16] Sing, D. et al., 2016, *Nature* 529, 7584.
- [17] Feng, K. et al., 2016, *The Astrophysical Journal* 829, 52.
- [18] Taylor, J. et al., 2020, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 493, 4342.
- [19] Taylor, J. et al., 2021, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 506, 1309.
- [20] Schlawin, E. et al., 2024, *The Astronomical Journal* 168, 104.
- [21] JWST Transiting Exoplanet Community Early Release Science Team et al., 2023, *Nature* 614, 649.
- [22] Ahrer, E. et al., 2023, *Nature* 614, 653.
- [23] Rustamkulov, Z. et al., 2023, *Nature* 614, 659.
- [24] Alderson, L. et al., 2023, *Nature* 614, 664.
- [25] Feinstein, A. et al., 2023, *Nature* 614, 670.
- [26] Wakeford, H. et al., 2018, *The Astronomical Journal* 155, 29.
- [27] Carter, A. and May, E. et al., 2024, *Nature Astronomy* 8, 1008.
- [28] Powell, D. et al., 2024, *Nature* 626, 979.
- [29] Wiser, L. et al., 2025, *PNAS* 122, e2416193122.
- [30] Moses, J. et al., 2011, *The Astrophysical Journal* 737, 15.
- [31] Line, M. et al., 2011, *The Astrophysical Journal* 717, 496.
- [32] Fortney, J. et al., 2010, *The Astrophysical Journal* 709, 1396.
- [33] Tsai, S. et al., 2023, *Nature* 617, 483.
- [34] Zahnle, K. et al., 2009, *The Astrophysical Journal* 701, 20.
- [35] Hobbs, R. et al., 2021, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 506, 3186.
- [36] Tsai, S. et al., 2021, *The Astrophysical Journal* 923, 264.
- [37] Fortney, J. et al., 2020, *The Astronomical Journal* 160, 288.
- [38] Fortney, J. et al., 2021, *Journal of Geophysical Research* 126, 06629.
- [39] Stevenson, K. et al., 2010, *Nature* 464, 1161.
- [40] Kreidberg, L. et al., 2018, *The Astrophysical Journal* 858, 6.
- [41] Benneke, B. et al., 2019, *Nature Astronomy* 3, 813.
- [42] Bell, T. et al., 2023, *Nature* 623, 709.
- [43] Madhusudhan, N. et al., 2023, *Nature* 956, 13.
- [44] Benneke, B. et al., 2024, arXiv2043.03325.
- [45] Crouzet, N. et al., 2025, *The Astronomy & Astrophysics* 703, 264.
- [46] Welbanks, L. et al., 2024, *Nature* 630, 836.
- [47] Mukherjee, S. et al., 2025, *The Astrophysical Journal Letters* 982, 39.
- [48] Morley, C. et al., 2015, *The Astrophysical Journal* 815, 110.
- [49] Gao, P. et al., 2020, *Nature Astronomy* 4, 951.
- [50] Lavvas, P. and Arfaux, A., 2021, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 502, 5643.
- [51] Fukui, A. et al., 2014, *The Astrophysical Journal* 790, 108.
- [52] Estrela, R. et al., 2014, *The Astronomical Journal* 2106, 10292.
- [53] Kempton, E. et al., 2023, *Nature* 620, 67.
- [54] Gao, P. et al., 2023, *The Astrophysical Journal* 951, 96.
- [55] Angus, J. and Hayman, C., 1988, *Science* 241, 913.
- [56] Butler, J. et al., 2009, *Journal of Physics: Condensed Matter* 21, 36.
- [57] Bachmann, P. et al., 1991, *Diamond & Related Materials* 1, 1.
- [58] Goodwin, D., 1993, *Journal of Applied Physics* 74, 11.
- [59] Harris, S. and Goodwin, D., 1993, *The Journal of Physical Chemistry* 97, 23.
- [60] May, P., 2007, *Journal of Applied Physics* 101, 3115.
- [61] Ohno, K., 2024, *The Astrophysical Journal* 977, 188.
- [62] Frenklach, M. and Wang, H., 1991, *Physical Review B (Condensed Matter)* 43, 2.
- [63] Appel, J. et al., 2000, *Combustion and Flame* 121, 122.

- [64] Lee, E. and Chiang, E., 2016, *The Astrophysical Journal* 817, 90.
- [64] Lopez, E. and Fortney, J., 2014, *The Astrophysical Journal* 792, 1.
- [65] Wang, L. and Dai, F., 2018, *The Astrophysical Journal* 860, 175.
- [66] Wang, L. and Dai, F., 2019, *The Astrophysical Journal* 873, 1.
- [67] Kawashima, Y. et al., 2019, *The Astrophysical Journal Letters* 876, 5.
- [68] Gao, P. and Zhang, X., 2020, *The Astrophysical Journal* 890, 93.
- [69] Ohno, K. and Tanaka, Y., 2021, *The Astrophysical Journal* 920, 124.
- [70] Libby-Roberts, J. et al., 2020, *The Astrophysical Journal* 159, 57.
- [71] Fossati, L. et al., 2017, *The Astronomy & Astrophysics* 598, 90.
- [72] Zuluaga, J. et al., 2015, *The Astrophysical Journal Letters* 803, 14.
- [73] Piro, L. and Vissapragada, S., 2019, *The Astronomical Journal* 159, 131.
- [74] Ohno, K. and Fortney, J., 2022, *The Astrophysical Journal* 930, 50.
- [75] Alam, M. et al., 2022, *The Astrophysical Journal Letters* 927, 5.
- [76] Libby-Roberts, J. et al., 2025, arXiv2505.21358.
- [77] Kreidberg, L. et al., 2014, *Nature* 505, 69.
- [78] Knutson, H. et al., 2014, *Nature* 505, 66.
- [79] Aguichine, A. et al., 2021, *The Astrophysical Journal* 914, 84.
- [80] Zeng, L. et al., 2019, *PNAS* 116, 9723.
- [81] Ohno, K. and Okuzumi, S., 2017, *The Astrophysical Journal* 835, 261.
- [82] Ohno, K. and Okuzumi, S., 2018, *The Astrophysical Journal* 859, 34.
- [83] Ohno, K. et al., 2020, *The Astrophysical Journal* 891, 131.
- [84] Schlawin, E. et al., 2024, *The Astrophysical Journal Letters* 974, 33.
- [85] Hu, R. and Seager, S., 2014, *The Astrophysical Journal* 784, 63.
- [86] Gao, P. and Benneke, B., 2018, *The Astrophysical Journal* 863, 165.
- [87] Ohno, K. et al., 2025, *The Astrophysical Journal Letters* 979, 7.
- [88] Khare, B. et al., 1984, *Icarus* 60, 127.
- [89] He, C. et al., 2024, *Nature Astronomy* 8, 182.
- [90] Corrales, L. et al., 2023, *The Astrophysical Journal Letters* 943, 26.
- [91] Jones, A. and Ysard, N., 2022, *The Astronomy & Astrophysics* 657, 128.
- [92] Kataria, T. et al., 2014, *The Astrophysical Journal* 785, 92.
- [93] Zhang, X. and Showman, A., 2017, *The Astrophysical Journal* 836, 73.
- [94] Nixon, M. et al., 2024, *The Astrophysical Journal* 970, 28.
- [95] Beatty, T. et al., 2024, *The Astrophysical Journal* 970, 10.
- [96] Piaulet-Ghorayeb, C. et al., 2024, *The Astrophysical Journal* 974, 10.
- [97] Ahrer, E. et al., 2025, *The Astrophysical Journal Letters* 985, 10.
- [98] Gordon, T. et al., 2025, arXiv2511.18196.
- [99] Mukherjee, S. et al., 2025, *The Astrophysical Journal* 982, 39.
- [100] Ohno, K. and Ueda, T., 2021, *The Astronomy & Astrophysics* 651, 2.
- [101] Ohno, K. and Fortney, J., 2023, *The Astrophysical Journal* 946, 18.
- [102] Ohno, K. and Fortney, J., 2023, *The Astrophysical Journal* 956, 125.
- [102] Fortney, J. et al., 2007, *The Astrophysical Journal* 659, 1661.
- [103] Kama, M. et al., 2019, *The Astrophysical Journal* 885, 114.
- [104] Turrini, D. et al., 2021, *The Astrophysical Journal* 909, 40.
- [105] Altwegg, K. et al., 2020, *Nature Astronomy* 4, 533.
- [106] Nakazawa, K. and Ohno, K., 2026, *The Astrophysical Journal*, in press (arXiv2602.05300).
- [107] Welbanks, L. et al., 2019, *The Astrophysical*

Journal Letters 887, 20.

[108]Shibata, S. and Helled, R., 2022, The Astrophysical Journal Letters 926, 37.

[109]Schneider, A. and Bitsch, B., 2021, The Astronomy & Astrophysics 654, 71.

[110]Ohno, K. et al., 2026, PASJ, in press (arXiv:2506.16060).

[111]Okuzumi, S. and Tazaki, R., 2019, The Astrophysical Journal 878, 132.

[112]Ueda, T. et al., 2024, Nature Astronomy 8, 1148.

[113]Grant, D. et al., 2023, The Astrophysical Journal Letters 956, 32.

[114]Murphy, M. et al., 2025, The Astrophysical Journal 170, 61.

[115]Tada, S. et al., 2025, The Astronomical Journal 169, 255.

[116]Fu, G. et al., 2025, The Astronomical Journal Letters 989, 17.

[117]Kawahara, H. et al., 2025, The Astrophysical Journal 985, 263.

著者紹介

大野 和正



国立天文台科学研究部特任助教(天文台フェロー)。東京工業大学理学院地球惑星科学系博士課程修了。博士(理学)。東京工業大学理学院地球惑星科学系にて特任

研究員,カリフォルニア大学サンタクルーズ校にて日本学術振興会海外特別研究員,国

立天文台科学研究部にて特任研究員を経て,2024年7月より現職。専門は系外惑星大気,特に雲・ヘイズの微物理モデリングと大気観測スペクトルの解釈。日本天文学会,日本惑星科学会,日本地球惑星科学連合に所属。

一番星へ行こう! 日本の金星探査機の挑戦 その65 ~あかつきラスト・デイズ~

中村 正人¹, 山崎 敦¹, 今村 剛², 佐藤 毅彦¹

(要旨) 計画の立ち上げから25年を費やしてきた「あかつき」金星探査が、2025年9月18日の停波運用をもって正式終了しました。以前に報告した通信途絶への続報とするとともに、「あかつき」の四半世紀を振り返っての雑感を共有したいと思います。

1. ついに迎えた、あかつき ラスト・デイズ

その61 [1]で報告しましたとおり、2024年4月27日以降、探査機あかつきの発信電波を受信できない(キャリア信号を検出できない)状態が続いていました。その間運用チームは、金星の内合(2025年3月)を含む一年間、通信を回復して探査機を立て直す努力を続けてきました。その努力は2025年7月一杯まで続けられましたが、残念ながら通信が回復することはありませんでした。2025年9月18日の日本時間朝、関係者が静かに見守る中、探査機が周回しているはずの金星に向かって「停波コマンド」が送られました(図1)。これによって計画の開始から25年続いてきた「あかつき」プロジェクトは正式に幕を閉じることとなったのです。

振り返れば、計画が認められてから打ち上げまでに10年、打ち上げから金星周回軌道での観測開始まで5年、その後の観測に10年間をかけた四半世紀に及ぶプロジェクトでした。その成果は10万枚以上の金星画像の取得とそれにもとづく多くの学術的成果[2]、そしてなによりも、金星に行きたいと心から思った技術者と研究者たちの作ったプロジェクトであり、さらには一般の宇宙ファンの方々にも愛されたミッ

ションであった(図2)としみじみ思います。

使命を終えた「あかつき」ですが探査機本体は、地球と通信の取れなくなった今も、金星の周りを巡り続けています。軌道の専門家による計算では、200年くらい先までは金星大気に突入することなく周回を継続するのだとか。明けの明星、宵の明星として我々が金星を見るとき、気がつくことはなくともその光の中には「あかつき」が反射する光が含まれていると思うと何か暖かいものを感じます。

2. 「あかつき」の四半世紀を振り返って

この機会に「あかつき」プロジェクトの意義についても、少し振り返ってみたいと思います。「あかつき」プロジェクトはいわゆる宇宙三機関統合によりJAXAが誕生(2003年)する前の2001年に、宇宙科学研究所の宇宙科学プロジェクトの一つとして始まりました(第24号科学衛星、コードネームPLANET-C)。この時代、宇宙科学研究所は文部科学省の大学共同利用機関として機能していました。大学共同利用とはご存知のように、一つの大学だけの予算では賄いきれないほどの大規模プロジェクトを実現するために全国の大学の研究者が研究所に来てプロジェクトに参加する仕組みです。従って大学の研究者からみれば「私たちの宇宙研」という意識がありましたし、同じ文部科学省に属する職員でもありましたから「皆で一緒につくる(実施する)」

1.宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所
2.東京大学大学院・新領域創成科学研究科
satoh@stp.isas.jaxa.jp



図1: 金星探査機「あかつき」の停波運用時の集合写真(©JAXA).



図2: 2025年度JAXA相模原キャンパス特別公開におけるゆるキャラ人気投票で優勝(YouTube配信の画面キャプチャ).

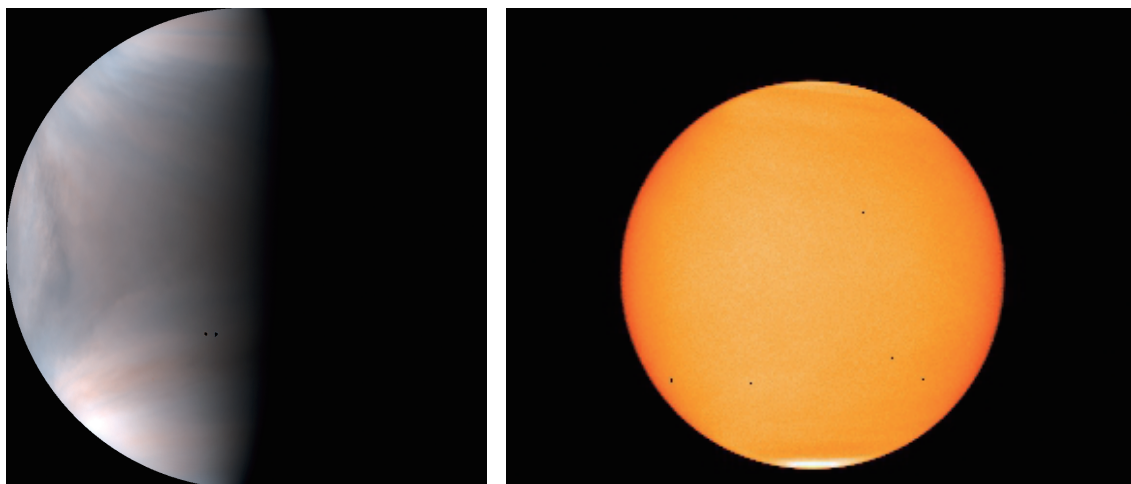


図3: 2024年3月22日に取得された金星画像:UVI画像(左:佐藤隆雄氏により283 nm画像と365 nm画像から疑似カラー合成)とLIR画像(右:田口真氏提供).

という感覚で動いていたのです。宇宙科学研究所がJAXAの下部組織となり各大学も法人化した後、いろいろな状況の変化を経験してきたわけですがそのような中を四半世紀、「あかつき」は当初の目的であった金星気象の深い理解と惑星気象学の開拓へ十分に貢献してきたとメンバーは自負していますし、それを支えてきたものに大学共同利用の良い点、具体的には連帯感があったと考えています。

それが可能であった背景のひとつに、対象が金星であったということもあるかも知れません。たとえば月へ行くミッションはその実用性(や政治性)から、トップダウンの要請が大きな要素になっている様に聞いています。国際的な状況に左右されることもあり得るでしょう。宇宙基本計画[3]には「月及び火星について科学的成果の創出及び技術面での先導的な貢献を図る」とあるわけですし、そうした対象へ行くチャンスがあるならばそれを活かすのはある意味で当然です。ただしそのとき、純粋にサイエンスのためだけに構想されたミッションよりは不自由な面があるのは仕方ありません。金星は実用性の全く無い惑星であったことが幸いして、「あかつき」では大学も研究所も含めて「研究者が成し遂げたいと思うサイエンス」へ存分に取り組むことができました。金星と月・火星では事情がかなり異なるでしょうが、やはりサイエンスドリブンの気持ちをもち続けたいものです。失敗を許容する文化も必要のように感じます。日本

ではどうしても、失敗をすると叩かれて、そして次の挑戦には「石橋を叩いて叩いて叩いて、なお渡れない」空気があります。しかし近年の宇宙開発における民間の著しい躍進ぶりを見ても、失敗から多くを学び迅速に処置を行い次々に挑戦を重ねてゆく、そのループこそが成功をつかむ鍵であると多くの人が感じていることと思います。日本では満身創痕の「はやぶさ」がイトカワ試料を届けてくれたあたりから風向きが変わり始め、2010年の金星周回軌道投入失敗のときには「必ずこれを乗り越えてくれるはず」という一般の方々の暖かいまなざしを感じることができました。5年後の再チャレンジで周回軌道投入の成功への大きな励みとなったものです。「あかつき」の四半世紀には、宇宙科学が経験してきた時代の変化も刻まれているように思えます。

本稿の最後に、UVIとLIRによる最後期の画像を紹介します(図3)。データ取得は終了しましたがその膨大なデータにもとづく金星研究は、まだまだ続きます。

参考文献

- [1] 佐藤毅彦ほか, 2025, 遊星人 34, 54.
- [2] <https://akatsuki.isas.jaxa.jp/en/papers/> (あかつき出版論文リスト, 2026年1月13日に閲覧)
- [3] <https://www8.cao.go.jp/space/plan/keikaku.html> (内閣府のウェブページ, 2026年1月13日に閲覧)

もう一つの月世界へ： 火星衛星探査計画MMX その13 ～フォボス表層に触れて理解する：MMX小型 ローバIDEFIXの狙い～

宮本 英昭¹, ステファン・ウラメック², パトリック・ミシェル³

(要旨) 火星衛星探査計画MMXでは、小型ローバIDEFIXによるその場探査が計画されている。本稿では、IDEFIXの2人の主任研究者(PI)であるステファン・ウラメック博士とパトリック・ミシェル博士との対談を通じて、MMXミッションにおいてローバ探査が果たす位置づけと役割に焦点を当て、フォボス表層に対して設定されている表層科学的・地質学的な問いと、それらに対する観測および運用戦略を、IDEFIXの設計思想や科学目標とあわせて概説する。

1. MMXミッションにおける ローバIDEFIXの位置づけ

宮本:MMXのサイエンスの全体像は既に過去の連載で共有されています[1-3など]。今回はMMX搭載小型ローバIDEFIX [4-6]に焦点を当てましょう。ちょうどMMXの会合の関係で共同主任研究者(Co-PI)であるステファン・ウラメック博士、パトリック・ミシェル博士に宇宙科学研究所に来ていただきましたので、皆で食事に行く前に自由に討論する時間を確保しました。私が聞き役として、IDEFIXについて伺ってまいります。

さて、おふたりとも、本日はありがとうございます。早速ですが、IDEFIXはMMXの中でどのように位置づけられるか、という点からはじめていただけますか？

ウラメック:こんにちは、本日はよろしくお願ひします。そうですね、最初に強調したい重要な役割は、工学的なリスク低減とリコネサンス(偵察)です。母船が



図1: 左から、宮本、ミシェル、ウラメック。2026年1月15日、JAXAで行われた会合の後に対談した。

着陸やサンプル採取を行う前に、フォボス表面が「軟らかいのか硬いのか」「どれほど沈むのか」「滑るのか」といったことを、あらかじめ調べられるという点です。母船も最終的には表面と相互作用しますが、ローバが先に情報を返すことで、着陸・採取運用の調整につながる点が重要な点です。

1. 東京大学大学院
2. ドイツ航空宇宙センター
3. CNRS/コートダジュール天文台
hm@sys.t.u-tokyo.ac.jp

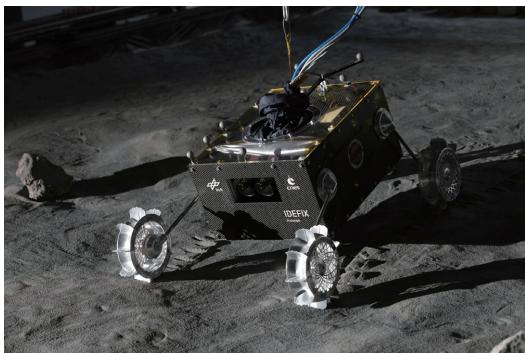


図2: IDEFIXローバの移動テストモデル(Image courtesy DLR).

ミシェル:こんにちは, お招き下さりありがとうございます。そうですね, ローバには表面に到達でき, 滞在でき, さらに移動できるという三つの強みがあります。とくに母船の遠隔観測と, 地上での試料分析の間を埋めるグラウンド・ツールズを, ローバが与えるという役割が期待されています。

さらにローバは, ただ“見る”だけでなく, 走行することで表面を擾乱します。つまり地下にある物質を露出させることができるのです。これは母船単独ではやりにくい, ユニークな活動ですね。

宮本:母船が最終的には接地して情報を得るとしても, ローバがフォボスに先に触って確かめることで, 着陸やサンプルリターンの成功確率と科学的価値が向上する, という整理ですね。

ウラメック:その通りです。ちなみにローバの車輪で得られる応答と, 母船が脚や採取で起こす相互作用は, 性質が異なります。その二つを合わせて理解することで, 表層の機械特性をより良く制約できるのです。

2. IDEFIXが立ち向かう科学的な問い

宮本:ローバで迫る科学的な問いについて, もう少し具体的に議論しましょう。まずレゴリスの物性についてですが, 何がどう重要なのでしょうか?

ミシェル:フォボス表層の進化過程を知るためには, レゴリスの特徴を理解することはとても重要です。とくに粒径分布, 締め具合(compactness), 空隙率(porosity), 凝集(cohesion)などを知ることが重要です。

ウラメック:ここでとくに重要なのが, 未擾乱の表面状態の把握です。レゴリスの粒子配列や空隙構造, 微細な締め具合, 凝集の効き方は, 外力によって変化しやすい。だからこそ, 試料分析の前に現地状態で状態を把握することが重要になるでしょう。

ミシェル:しかもローバは, 走行しながら高解像度でレゴリスを観測でき, 車輪で表面に外力を与えることができます。だから, 単なる見かけによる推定ではなく, 直接応答を見ることで物性を制約できるのです。はやぶさ2など過去のミッションで, レゴリスの機械特性が, 見た目とは大きく異なり驚いた経験があります。そこで直接応答を見るのが, とても重要と考えているのです。

ウラメック:これは工学的にも重要な価値があります。表面の強度や沈下のしやすさは, 母船の着陸・採取の前提条件です。だからこそ母船着陸より前に偵察する意義が大きいのです。

宮本:レゴリスの不均質性に関する情報も得られますね。サンプルの採取点がどの程度天体を代表するか, という点はどうか?

ミシェル:母船は最大でも2地点という限られた地域でしかサンプルの採取ができません。ローバが数十メートルの移動を試みることは, 周辺でどれくらいレゴリスに変化があるかを示せる意味で, 大きな意義があるでしょう。

フォボスには, 青色・赤色の領域がありますが, ローバが走行した際に表層を少し削ることで, 下から別の性質の物質が露出するかもしれません。つまり轍(わだち)は, フォボス表面における風化の度合いや, 表層土砂の堆積状況を知るのに役立つでしょう。こうして, 青色の領域が, はたして想定されているような比較的新鮮なものなのか, そうではないのか, 理解できるでしょう。

宮本:ローバによるその場観測は, 母船のスペクトル観測を解釈する上でも重要です。

ミシェル:その通りです。表面レゴリスの粒子形状や粒度分布が分かれば, スペクトル観測を解釈する際の確度が上がります。母船による観測と試料分析をつなぐ意味でも, ローバの近接観測は大きいと思います。

宮本:その試料分析に期待することについても, 教えてくださいませんか?

ミシェル:やはり直接採取した試料の分析は、ローバや母船では成しえない決定的な力を持っています。同位体や年代測定、衝突履歴、熱・化学変性史など、サンプル分析であれば確定的な議論ができる。ローバはそれを期待しつつ、その試料が「どんな場から来たのか」を明らかにし、試料の意味づけを強くする役割を果たすのです。

3. 微小重力下で探査するということ

宮本:ローバが降りるフォボス表面は、領域にも依存しますがおよそ地球重力の2千分の1程度という微小重力環境ですが、これはローバの運用の何を難しくするのでしょうか。

ウラムック:もっとも直感に反することは、質量や慣性そのままなのに、重量が極端に小さくなる、ということです。移動には表面と車輪の間の摩擦を使いますが、その摩擦はローバの重量があつてこそ生まれます。フォボスでは重力という前提が地球と大きく異なりますから、車輪のグリップ、滑り、沈下、すべてが地上と違う。だから走行速度も、毎秒数ミリメートルというような、ゆっくりした世界になります。

しかもローバのスケールでの微地形や岩塊分布は、現時点の画像解像度ではわかっていません。いまある画像で滑らかな見かけをしていても、実際にはローバサイズの岩塊が多い可能性すらある。もしそうなら「走る」より「その場で科学する」ことになってしまうかもしれない。それでも重要な科学ができるように準備しています。

ミシェル:科学として重要なのは、まさにその未知性です。もちろん、フルード数などのスケーリング則を用いてローバの設計や運用計画を検討してきましたが、この重力下でのレゴリスがローバのスケールでどのような振る舞いをするか、人類はまだ実地で観察したことがないのです。

過去の小天体探査でも、事前の想定と違うことが繰り返して生じてきました。たとえば色と新鮮さの関係、たとえば熱慣性への粒径の影響。到着前には確信できず、到着してデータを見て学び直してきた。フォボスも、サプライズがある前提で臨むべきです。

宮本:重要な運用イベントとしては、そうした移動や観測の前のSLUD、つまりSeparation(分離)、Landing



図3: ユーモアあふれる語り口で話すウラムック博士。

(着地)、Uprighting(起き上がり)、Deployment(展開)がありますね。

ウラムック:その通りです。小型のローバですけれども、実は運用は複雑です。この最初のシーケンスが成立して初めて観測と移動ができます。投下高度については、跳ね返りを抑える観点から、例えば100 m以下、できれば40 m程度以下といった低高度が望ましい、という考え方になります。低いほどバウンスが減り、衝撃も小さいですから。ローバの活動については、アニメーションにまとめてみました[7]ので、是非ご覧ください。

ミシェル:この映像で想定しているような地表面がどれほど現実的なのかは、ほんとうはわかりません。小惑星ベヌーヤリュウグウでも、全球的には岩塊間の凝集力(cohesion)は小さいと考えられる一方で、局所的には凝集し、ある程度強度を持つものがあり、いっけん矛盾してみえます。ローバがゆっくり走行し、その場の粒子の動き(ダイナミクス)を観察できれば、こうした問題に新しい情報が加わるわけですが、これを着陸前に想定して設計していかなければなら

ない難しさがあります。

なおローバで初めて達成される観測には、機械的な応答だけではありません。昼夜の温度変化の追跡もそうです。熱伝導や空隙率、凝集への制約になる科学的に興味深い観測ですが、現段階ではこれらを想定して設計するしかないのです。

4. どのような体制で、どう作り、どう運用するのか

宮本：フランス・ドイツに2人のPIを置くという、独特の国際協力体制でローバ開発を進めてこられたわけですが、実際にはどのような困難やメリットがあったのでしょうか。

ウラメック：難しさはありましたが、責任分担とインターフェースを明確にする、ということで着実に開発を進めてきました。構造、カメラ、熱、電力など、パッケージごとに担当を置き、定例の会合で擦り合わせる。国際協力であっても、こうしたやり方自体は、単独組織による工業プロジェクトと同様だと思います。

その一方で、国ごとの事情で運用拠点が複数置かれることになるなど、最適化されているようには見えない側面もあります。それでも関係する各国機関において最大限の可視性を確保しているとも言えます。パートナー機関の間で優れたシナジーを生み出すという利点は大きいです。

宮本：PIが2人という体制は問題になりませんでしたか？

ミシェル：私たちは、齟齬を作らないために「なんでも全部話す」ようにしています。それに私たちは、いくつものプロジェクトで長いこと共に協力してきました。このような背景による信頼関係は重要です、言いにくいことも含めて共有します。だからPI間で問題になることはなかったのです。

ウラメック：そうですね、そういう当惑がないのは、とてもやりやすいです。

宮本：日本側との調整も必要だったわけですが、難しかった点はありますか？

ミシェル：最初に強調しておきたいのは、国際協調として日本と共に働くことは、私たちにとって大変有意義であるということです。もちろん文化的な違いはあり、これが物事を複雑にすることもありますが、むしろと



図4: 常に明るくポジティブなミシェル博士。

ても良い経験をさせてもらっていると感じています。

ウラメック：その通りです。ややこしくなった部分を探すとすれば、たとえばJAXAを介して合意したと思っていたことが、日本国内側での議論を経て別の結論で返ってくるように見える、というケースがあったことなどでしょうか。このようなことは、対面で詰めて話せば原因もすぐにわかるのですが、ビデオ会議中心だと齟齬が残ることがある。言語やニュアンスも絡むので、こういう部分には丁寧さが必要ですね。

ミシェル：ちなみに、こうした齟齬は欧州内だけでも生じるのです。最終的にはIDEFIXが技術実証 (technical demonstration) でもある、という原点に立ち返り、「技術的に可能か不可能か」「推奨か非推奨か」を論理で決める。結果として、システム側の判断が強くなる局面があるのは自然なことです。

ウラメック：言語の壁と見えたところに、文化差を感じるのも面白いですよ。“May be difficult”と日本側に言うと、ほぼ不可能と言われた、というように解釈されるようですが、ドイツでは「難しいが頑張ろう」という意味での発言だったりします。こういう差は、対面であれば雑談で補正できますが、コロナ禍で対面が途切れた時期は困難がありました。

宮本：さて、ローバに与えられたIDEFIXという愛称

の由来を教えてください。

ウラメック:フランスの漫画『アステリックス』に出てくる犬の名前です。小柄ながらも行動範囲が広く、主人公たちに寄り添って動き回る存在として描かれており、「本隊(母船)を支え、現地で先行して働くローバ」というIDFIXの役割とも重なるのです。「FIX」という語が含まれているにもかかわらず動く、という点はちょっとしたジョークでもあります。

ミシェル:フランス語で*idée fixe*とは、固定観念という意味なので、これもユーモアに重なります。さらにこのアニメの英語版ではDogmatixとなっていて、dogmatic、つまり独断的という意味を掛けた言葉遊びになっていて、それもまた面白いでしょ。

宮本:あはは、とくにミシェル博士が犬好きなのを知っているの、その名前がわかる気がしていました、ウラメック博士も犬好きでしたっけ？

ウラメック:いえ実は私はネコ派なんです(笑)。

5. 日本コミュニティへのメッセージ

宮本:MMXに係る研究者や、これから参加する若手に対して、ローバPIとして何か伝えたいことはありますか？

ミシェル:IDFIXも含めてMMXミッションは、地質学・表層科学・物性工学・熱工学・リモートセンシング・データ解析・サンプル解析など幅広い分野の専門性が同じテーブルで噛み合っ初めて成果が出ます。多くの研究者がかかわるミッションですから、関係している研究者の方々には、ぜひ自分の専門を持ち込みつつ、異分野の言葉を学んで参加してほしいですね。

ウラメック:運用・制約・現場の判断まで含めて理解できる人は、次の探査を作る人です。ローバ探査は、科学としても工学としても学びが大きい。そこで得た“当たり前前の更新”が、次のミッションの基盤になります。

宮本:最後に日本の科学コミュニティへも、メッセージをお願いします。

ミシェル:日本が小天体サンプルリターン分野を開拓し築いてきたことは、本当に素晴らしいと思います。成功を単発で終わらせず火星衛星へ進むことで、技術や知見が継承され、さらに高度化していく。

その先として、トロヤ群や彗星サンプルリターンのよ

うな、より遠方の天体に進むのでしょうか。比較的近場であるS型小惑星イトカワから始まり、より遠い場所からのサンプル取得に向かっていくというロードマップに従ったビジョン、戦略性に私は敬意を持っています。これまでの積み上げは必ず基盤になります。日本は分野横断で多様な研究者が参加し、国際協調にも積極的である点も強みです。そうした流れを、ぜひ次世代へ繋いでほしいですね。

ウラメック:ヨーロッパからみた国際協力の観点でも、日本は非常に重要なパートナーです。文化の違いを乗り越えて協力するプロセス自体が、科学・工学の両面で資産になります。宇宙探査は、地上の状況が難しいときほど、「それでも協力できる」ことを示す場にもなり得る。MMXとIDFIXは、その意味でも象徴的だと思います。

宮本:お忙しい中、素晴らしいお話をありがとうございました！

次号へ続く。

参考文献

- [1] 倉本佳, 2023, 遊星人 32, 123.
- [2] 中村智樹ほか, 2023, 遊星人 33, 216.
- [3] 宮本英昭, 2023, 遊星人 32, 296.
- [4] Ulamec, S. et al., 2025, Progress in Earth and Planetary Science 12, 97.
- [5] Michel, P. et al., 2022, Earth, Planets and Space 74, 37.
- [6] Murdoch, N. et al., 2025, Progress in Earth and Planetary Science 12, 54.
- [7] <https://www.youtube.com/watch?v=-a0e8A-KOWg0>

著者紹介

宮本英昭



東京大学大学院教授。東京大学大学院理学系研究科博士課程を中退し、東京大学工学系研究科助手となる、博士(理学)。アリゾナ大学客員研究員、東京大学総合研究博物館准教授などを経て2015年より現職。MMXでは科学戦略チーム「Surface Science and Geology」のPIを務める。

ステファン・ウラメック

地球物理学の博士号を持つドイツ航空宇宙センター(DLR)の研究員。小天体および惑星表層探査における着陸機・ローバの開発および運用に長年携わり、ロゼッタ計画の着陸機フィラエではプロジェクトマネージャーを務めたほか、「はやぶさ2」に搭載された小型着陸機MASCOTでは主任研究者(パイロッドマネージャー)を務めた。MMXでは小型ローバIDEFIXのPIの一人として、科学活動の統括、設計思想の策定、および科学運用戦略の立案を主導している。

パトリック・ミシェル

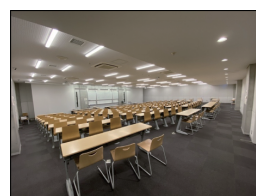
コート・ダジュール天文台に所属するフランス国立科学研究中心(CNRS)研究ディレクター。東大のグローバルフェローも務める。理論天文学・惑星科学を専門とし、小惑星および小天体の形成・進化、衝突過程、表層物理に関する研究で国際的に活躍している。小惑星探査機はやぶさ2の科学チームメンバーを務め、欧州を中心とした複数の小天体探査ミッションに深く関与。とくにHERAミッションやESA-JAXA協調によるRAMSESミッションのPI。MMXでは小型ローバIDEFIXのPIの一人として、フォボス表層に関する科学的問いの設定とローバ観測による表層物性理解を主導している。

2025年日本惑星科学会秋季講演会開催報告

成田 憲保¹ (2025年日本惑星科学会秋季講演会実行委員長)



図1: 会場の21KOMCEE外観および会場内の様子。



1. 概要

2025年9月3日(水)から5日(木)の3日間、2025年度秋季講演会が東京都目黒区の東京大学駒場Iキャンパス21KOMCEEにて開催されました。参加者は316名、講演は208件でした。講演の内訳は、最優秀発表賞選考特別セッション講演10件、最優秀研究者賞受賞記念講演1件、通常口頭講演87件、ポスター講演110件でした。一般講演会は実施しませんでした。LOCは東京大学の日本惑星科学会員である成田憲保(LOC委員長)、黒川宏之、福井暁彦、田崎亮、瀧川晶(兼SOC委員長)、および、ウェブ担当の日向輝が務めました。会場の設営・撤収および会期中の会場係(学生アルバイト)として、多くの東京大学の大学院生も講演会運営に参加しました。また、日本惑星科学会員6名でSOCを組織し、プログラム編

成をいたしました。本講演会の開催にあたっては、学会等からの補助金は受け取らず、独立会計で実施しました。

2. 開催まで

東京大学LOCによる秋季講演会は、本郷キャンパスで開催した2009年以来となる2回目でした。2023年7月に行事部会よりLOCの打診を受け、会場探しをはじめました。「口頭講演会場として250名程度を見込んだ参加者を収容可能」「口頭講演会場の近くにポスター会場も確保できる」「会期の1年程度前から予約可能」という条件のもと、学内施設を検討した結果、ほぼ唯一の解として駒場Iキャンパス21KOMCEE(図1)を選択しました。21KOMCEEはWest棟、East棟がそれぞれ2011年、2014年に完成した比較的新しい教育施設です。247名を収容可能なEast棟のK011講義室を口頭講演会場とし、

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

West棟のMMホールおよびそれらを繋ぐピロティをポスター会場としました。21KOMCEE内の他の小会議室・講義室を運営委員会や学会賞選考委員会の会場・参加者フリースペースとして使用しました。21KOMCEEから懇親会会場でもある生協食堂は隣接しており、コンパクトで移動の手間の少ない会場設定になったかと思います。他方、会場内のバリアフリー対応については情報収集・参加者への共有が遅れたことが反省点です。

LOCの活動は2025年4月から本格化し、5月末のJpGUにおける運営委員会および総会での開催案内、「遊星人」2025年第2号への案内記事掲載を経て、6月6日に秋季講演会ウェブページを公開しました。託児支援として会場周辺の託児施設をサーベイしましたが、利用の問い合わせはありませんでした。

参加申込締切(8月3日)を迎え、参加申込数(316名)が口頭講演会場の収容人数(247名)を大幅に上回るという事態が生じました。急遽の対応として、口頭講演会場の様子を放映するサテライト会場を21KOMCEE内に確保しました。当初の予定になかったこともあり、サテライト会場への中継については講演会前日まで試行錯誤をして対応することとなりました。なお、250名程度という当初の見込人数は、過去の実績をもとに行事部会と相談の上で設定されたものです。参加者の増加傾向が今後も続くのか、大学・研究機関の数が多い東京での開催であったことによる一時的なものかを注視しつつ、今後の秋季講演会の会場選びを行う必要があるようです。

3. プログラム編成

6月30日に発表申込を締め切り、最終的に208件の発表申込を受け付けました。この件数は2024年度講演会(九州大学LOC)の246件の8割程度でした。多くの発表申込に感謝申し上げます。近年に比べると口頭講演枠が逼迫する状況はやや改善しました。

プログラム編成はSOCを組織して行いました。SOCは、LOCを兼任する瀧川品会員を委員長とし、小玉貴則会員、野津翔太会員、兵頭龍樹会員、堀安範会員、諸田智克会員にご担当いただき、日本惑星科学会の広い研究分野をカバーする体制としました。「口頭・ポスター講演どちらでもよい」とされた申

込の全てと「口頭講演希望」とされた講演について、抄録を元に議論をおこない、今年度のセッションと口頭発表講演を決定しました。最終的に、最優秀発表賞選考特別セッション講演(15分)10件、最優秀研究者賞受賞記念講演(40分)1件、通常口頭講演(10分)87件、ポスター講演110件のプログラム編成となりました。ポスターは会期を通じて掲示可能とし、各日1時間のコアタイムを設けました。

4. 開催当日

会期を通して、口頭講演の各セッションで活発な質疑が行われ、ポスター講演もコアタイムを中心にたいへん盛況でした。昼休みの時間には、口頭講演会場を使って太陽系探査関連グループによる報告と議論も行われました。2日目の総会においても、惑星科学会の運営に関する活発な議論が行われました。総会では、学会賞選考委員会より、最優秀発表賞受賞者(所司歩夢会員、日向輝会員)、優秀発表賞受賞者(北出直也会員)が発表され、表彰が行われました。続いて、2024年度最優秀研究者(大野和正会員)の表彰と受賞記念講演が行われました。

会期3日目には運悪く台風が日本を横断し、東京も大雨に見舞われたものの、秋季講演会は滞りなく終わることができました。タイトなプログラムを予定通り進行してくださった座長の皆様、参加者の皆様に感謝申し上げます。また、終了後の撤収作業においては、東京大学LOC・学生アルバイトに加えて、多くの学生有志が手を貸してくれました。参加者が一体となって秋季講演会を作り上げる姿勢を体現した姿にLOC一同感激をし、ここに改めて感謝を記したいと思います。

5. 懇親会

懇親会会場は講演会場からアクセスのよい東京大学駒場生協食堂としました。事前申込制とし、124名の申込がありました。懇親会では今村剛会長に乾杯の音頭をとっていただき、会の中では2026年度LOCである野口里奈会員による2026年度秋季講演会と懇親会への期待を大いに盛り上げご挨拶いただきました。総じて、タイトな講演会プログラムを補う

交流の時間となったと感じています。

他方、懇親会においては料理が早々になくなってしまふという問題もありました。普段大学生のコンパとしても利用される生協食堂での開催であり、秋季講演会の参加者層には十分な量があると想定していたのですが、結果として読みが甘かったと反省しています。

6. 謝辞

秋季講演会を盛況のうちに実施できましたことを、各セッションの座長、講演者はじめ全ての参加者の皆様に感謝いたします。また、プログラム編成にご協力いただきましたSOCの皆様、丁寧な引継を行ってくださった前年度の九州大学LOCの皆様にも深く感謝申し上げます。そして、最後になりますが、秋季講演会の円滑な進行を色々な面でサポートして下さいました学生アルバイトの皆様、本当にありがとうございました。

第15回 Cosmic Dust研究会 (The 15th meeting on Cosmic Dust) 開催報告

大村 知美¹



図1: 参加者の集合写真(エクスカーションで訪問した法隆寺にて).

1. はじめに

2025年9月16日から9月20日にかけて、第15回 Cosmic Dust 研究会 (The 15th meeting on Cosmic Dust)が開催されました。この研究会は、2006年にシンガポールで開催された第3回 AOGS annual meeting(アジア-オセアニア地球惑星科

¹大阪産業大学
tomura@edo.osaka-sandai.ac.jp

学会年会)の1セッションとして始まり、第4回まで AOGSセッションとして開催されたのち、2012年以降は独立した国際会議として毎年夏ごろに開催されています(コロナ禍であった2020~2022年は休止)。第15回目となる今回は大阪産業大学梅田サテライトキャンパスで開催されました。例年より遅めの開催でしたので、暑さが和らぐことが期待されましたが、実際には猛烈な残暑が続きました。そのような状況において、会場が駅から地下街直結のビル内にあった

ことは幸いでした。今回のLOCメンバーは以下の13名です(50音順, 敬称略):榎本華子(東京大学), 大村知美(大阪産業大学), 大坪貴文(産業医科大学), 奥谷彩香(ウォーリック大学), 金田英宏(名古屋大学), 木村宏(千葉工業大学), 小林浩(名古屋大学), 下西隆(新潟大学), 千秋博紀(千葉工業大学), 茅原弘毅(大阪産業大学), 梨本真志(新居浜工業高等専門学校), 和田浩二(千葉工業大学), 吉田雄城(神戸大学)。本開催報告は, 世話人を代表して, 今回のLOC Chairを務めた大村が執筆します。

宇宙塵(Cosmic Dust)は, 銀河, 星間空間, 惑星系, 彗星や小惑星といった小天体等, 幅広いスケールや領域においてそれらの起源・進化に深く関係しており, 宇宙塵を扱う研究者はこれらの多岐にわたる学問分野に点在しています。本研究集会は, 異分野の宇宙塵研究者らが専門知識を共有し合うことが出来る場を提供し, 共同研究を促進するとともに, 持続的な研究者コミュニティの構築に貢献することを目的としています。また, 日本開催を継続することで, 宇宙ダスト科学のメッカとしての国際的地位を確立することも目標としています。

今回の参加者は50名(LOCとSOC含む)で, 日本国内をはじめとして14か国からの参加がありました。日本からの参加者は20名(LOCを含む)で, ほかは国外からの参加者でした。

2. 本研究会の特色

本研究会は, 参加者間のコミュニケーションを促進し, 継続的な結びつきを生み出すことを重視して, 参加方式は対面のみ, また全日程への参加を必須としています。同じ理由から, 参加者の人数も, 発表内容に基づいて50名に厳選しています。密な議論を促すため, ポスターセッション兼コーヒーブレイクを午前・午後各60分分配していることも特徴です。例年, ポスターの前で参加者が熱い議論を交わす様子が絶えず見られます(図2)。また, ポスター発表者はポスター賞の審査にエントリーするシステムになっており, 招待講演者によって受賞者が選定されます。ポスター発表者には若手研究者も多いですので, キャリアの長い招待講演者と若手研究者が直接交流しやすい仕組みになっています。また, 毎日LOC主導で



図2: ポスターセッション兼コーヒーブレイクの様子。

非公式のNight Session(夕食会)を実施しており, 二次会, 三次会…とカジュアルな交流を深める参加者も多いようです。

3. 口頭講演・ポスター講演

口頭講演セッションでは招待講演7件を含む28件の講演が行われました。また, 口頭講演セッションの間に行われたポスター講演セッションでは, 13件の発表が行われました。セッションは以下の7テーマで構成され, 多様な話題提供がなされました。

- ・SOLAR SYSTEM
- ・EVOLVED STARS & SUPERNOVAE
- ・DEBRIS DISKS
- ・STAR-FORMING REGIONS
- ・PROTOPLANETARY DISKS
- ・GALAXIES
- ・INTERSTELLAR MEDIUM

内容に関する詳細を知りたい方は, 研究会のwebページ(https://www.cps-jp.org/~dust/Welcome_XV.html)で公開されているプログラムおよび発表要旨もご参照ください。

4. エクスカーション・バンケット

会期3日目の9月18日には, エクスカーションとして法隆寺を訪問しました。また, エクスカーション後はラグナヴェール大阪へ移動し, バンケットが実施され

ました。例年、会場間の移動の際はバスをチャーターしていますが、バスが相席になることから生まれる交流もあるようです。バンケットでは参加者それぞれの要望に対応するためビュッフェ形式を採用しましたが、それでも厳格なベジタリアンにとっては選択可能な料理がかなり限られていたようです。国際的な研究集会において多様な食事制限に配慮することの難しさが改めて認識されました。

借りて感謝申し上げます。また、本会の運営にあたり様々にご尽力くださったLOC/SOCメンバーの皆様に改めて感謝申し上げます。特に、SOC Chairを兼任される木村宏さんや、大阪産業大学の茅原弘毅さんには色々とお手助けして頂きました。LOC Chairとして色々とお世話になりましたが、無事研究会を終えられたのはお二人のおかげです。重ねて感謝申し上げます。

5. おわりに

今回は2026年8月31日から9月4日にかけて、新居浜工業高等専門学校(愛媛県新居浜市)での開催を予定しています。興味を持たれた方のご参加を歓迎いたします。

謝辞

研究会の開催にあたり、井上科学振興財団、天文学振興財団、大阪産業大学学会からの支援を頂きました。また、会場準備にご協力いただいた大阪産業大学サテライトキャンパス事務局の方々にもこの場を

著者紹介

大村 知美



大阪産業大学全学教育機構准教授。神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻博士課程修了。博士(理学)。名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻研究員、大阪産業大学全学教育機構

特任講師、講師を経て、2024年4月より現職。専門は実験惑星科学。日本惑星科学会、日本物理学会に所属。

「天体の衝突物理の解明 (XXI) ～パターン形成～」参加報告

豊田 優佳里¹



図1: 研究会の集合写真.

1. はじめに

2025年11月5日(水)から11月7日(金)にかけて、第21回「天体の衝突物理の解明」が開催された。本研究会は、神戸大学 統合研究拠点 惑星科学研究センター(CPS)において現地開催され、今年度のテーマは「パターン形成」であった。

本研究会では、廣部紗也子氏(海洋研究開発機構)、桂木洋光氏(大阪大学)、道越秀吾氏(京都女子大学)を招待講演者として迎え、ご講演いただいた。

¹アストロバイオロジーセンター / 国立天文台
yukari.toyoda@nao.ac.jp

研究会には、現地では56名、オンラインでは7名の研究者および学生が参加し(図1)、招待講演3件を含む計32件の発表が行われた。

本研究会は、講演時間が質疑応答込みで招待講演60分、一般講演30分と比較的長く設定されており、講演中にも随時質疑応答が可能な形式であったため、発表内容についてじっくりと議論することができた。

本稿では、研究会の講演概要と全体の様子を簡単に紹介する。各講演内容については、あくまで筆者の理解の範囲内でまとめたものであるため、より詳細な内容については研究会webページ(<http://>

impact-res.sakura.ne.jp/impact25/) の要旨集等をご参照いただきたい。

2. 講演概要

以下に、本研究会の講演概要を示す(敬称略)。

<口頭講演>

11月5日(水)

セッション 1: アグリゲイト/コンドリユール

荒川 創太(海洋研究開発機構)

「ダストアグリゲイトは衝突によって混合するか?」

友膳 涼平(神戸大学)

「低速度衝突過程に関わるダスト集合体の機械特性の測定」

城野 信一(名古屋大学)

「複合コンドリユールの形成条件」

セッション 2: クレーター

山下 光葉(東京大学)

「クレーターサイズ頻度分布を用いた月の衝突盆地放出物厚さ分布の推定」

柿木 玲亜(神戸大学)

「クレーター形態から推測する固体天体の力学強度: 層構造標的のクレータースケーリング則の構築」

黒澤 耕介(神戸大学)

「炭素質小惑星上の微小クレータ形成過程の熱力学」

セッション 3: リング/円盤

兵頭 龍樹(ELSI/立教大学/SpaceData)

「巨大惑星リングの微隕石衝突過程: 蒸発・凝縮・電磁ダスト力学」

吉村 洋一(神戸大学)

「月形成円盤のスパイラル構造について」

11月6日(木)

セッション4: 衝突破壊

西尾 峻人(神戸大学)

「小規模破壊衝突におけるエジェクタの解析」

櫻井 哲志(神戸大学)

「小惑星上でのボルダーの衝突破壊」

道上 達広(近畿大学)

「内部クラックを持つ炭素質隕石の衝突破壊強度」

セッション5: 【招待講演】

廣部 紗也子(海洋研究開発機構)【招待講演】

「衝突および残留応力による破壊パターン形成と数値解析手法の開発」

セッション6: 【招待講演】

桂木 洋光(大阪大学)【招待講演】

「低速衝突によるパターン形成現象」

セッション7: 【招待講演】

道越 秀吾(京都女子大学)【招待講演】

「円盤におけるパターン形成」

11月7日(金)

セッション8: 氷

菊川 涼介(神戸大学)

「高速度衝突実験による内海を覆う氷衛星上の貫通クレーター形成メカニズムの解明」

豊田 優佳里(アストロバイオロジーセンター)

「氷球の低速度斜め衝突実験: 反発係数と回転に対する衝突角度依存性」

セッション9: 含水

神取 知広(神戸大学)

「含水小惑星模擬表層に対するクレーター形成実験: 加熱の影響」

豊嶋 遥名(神戸大学)

「湿った砂におけるクレーター形態: 衝突実験と数値シミュレーションの相互比較」

<ポスター講演>

黒崎 健二(防衛大学校)

「砂標的への衝突シミュレーション」

坂田 大典(東京農工大学)

「粉体層への衝突による粒子巻き上げと採集過程のシミュレーション」

北 和真(東京農工大学)

「破砕性粉体ターゲットにおける非破砕性粉体衝突時の応力伝播と内部挙動のシミュレーション」

荒川 創太(海洋研究開発機構)

「2次元凝集体の圧密数値シミュレーション: ジャミング転移における初期構造の影響」

大村 知美(大阪産業大学)

「階層構造粒子塊の圧密挙動に関する実験的研究: モデルとの比較」

長足 友哉(工学院大学)

「天体表面の固体粒子の付着力: 塑性変形や重力の影響」

山本 大晟(神戸大学)

「玄武岩標的への斜め衝突による高速度エジェクタ: 金属二次標的上のクレーター形状」

笹井 遥(名古屋工業大学)

「小惑星を模擬した氷・砂混合試料における衝突残留温度計測」

門野 敏彦(産業医科大学)

「Dimorphos下層のサイズ分布~Heraの観測結果, 予測してみた~」

愛敬 雄太(東京大学)

「高解像度画像を用いた小惑星リュウグウ岩塊表面の小クレーター解析」

池田 あやめ(産業技術総合研究所 地質調査総合センター)

「斜長石・マフィック鉱物支配の月中央丘における岩塊の大きさと形状のちがいを」

巽 瑛理(Instituto de Astrofísica de Canarias)

「Clarissa族はCI隕石の母天体か?」

荒川 真和(神戸大学)

「天体衝突時の火球からの熱線放射の影響」

黒澤 耕介(神戸大学)

「天体衝突による炭素質小惑星内部の大規模損傷」

2.1 招待講演

本研究会では、今年度のテーマである「パターン形成」に関連した3件の招待講演が行われた。

廣部氏は、衝突および残留応力によって生じる破壊パターン形成に着目し、粒子離散化有限要素法(PDS-FEM)を用いた数値解析手法について講演された。従来手法では取り扱いが困難であった動的破壊や残留応力場における破壊進展を、一貫した定式化のもとで解析可能であることが示され、衝突破壊や乾燥亀裂、熱応力による亀裂遷移など、多様な

破壊現象に対する有効性が紹介された。

桂木氏は、粉体層への低速衝突によって生じる多様なパターン形成現象について講演された。固体弾や液滴、エアージェットなどの衝突により形成されるクレーター形状や非自明な構造を例に、低速衝突におけるパターン形成の特徴が整理された。また、実験結果を異なるスケールの現象として捉えることで、新たな物理的理解が得られる可能性についても議論された。

道越氏は、銀河円盤や原始惑星系円盤、惑星環などに普遍的に見られるパターン形成について講演された。特に土星の環を対象とし、自己重力や粒子衝突、外部摂動によって生じる自己重力ウェイクや密度波、ギャップ構造などを整理し、観測・理論・数値シミュレーションの比較を通じた円盤ダイナミクス理解の重要性が示された。

これらの招待講演を通じて、衝突破壊から粉体衝突、円盤構造形成に至るまで、異なる物理過程に共通するパターン形成の理解が深められた。

2.2 一般口頭講演

一般口頭講演では、招待講演のテーマに限らず、天体の衝突現象に関する幅広い分野の発表が行われた。衝突実験、数値シミュレーション、観測・解析手法など多様なアプローチが紹介され、衝突に伴う構造形成や物性進化に関する活発な議論が行われた。

「アグリゲイト/コンドリユール」セッションでは、原始惑星系円盤におけるダスト集合体やコンドリユールの衝突過程に関する研究が報告された。荒川氏は、個別要素法を用いた数値シミュレーションにより、組成の異なるダストアグリゲイト同士の衝突に伴う破片のサイズ分布および内部混合度を評価し、衝突による効率的な機械的混合が生じにくい可能性を示した。友膳氏は、シリカダスト集合体を用いた弾性波速度測定により、縦波・横波速度から弾性定数を導出し、ヤング率が充填率、粒径、粒子形状、吸着水量および歪み速度に強く依存することを明らかにした。城野氏は、粘性液滴と固体球の衝突実験に基づき、衝突速度および粘性係数に依存した合体確率を定量化し、複合コンドリユール形成には高い数密度環境が必要であることを示した。

「クレーター」セッションでは、固体天体表層におけるクレーター形成過程と、その形態から読み取れる物性や形成メカニズムに関する研究が報告された。山下氏は、月のクレーターサイズ頻度分布を用いて、衝突クレーター形成に伴うエジェクタ堆積物の分布及び厚さを推定し、月面表層レゴリスの混合に関して議論した。柿木氏は、レゴリス層に覆われた基盤層を模擬した二層構造標的への衝突実験により、クレーター形態やピットサイズが表面層厚さおよび基盤層強度に依存することを示し、同心円型クレーターの形態から基盤層の力学強度を推定可能であることを明らかにした。黒澤氏は、炭素質小惑星リュウグウ表面に観察される微小衝突孔群に着目し、高速度衝突時の熱力学過程を検討することで、溶融物の分裂により形成された二次衝突孔群である可能性を示した。

「リング／円盤」セッションでは、巨大惑星リングや月形成円盤における衝突・重力相互作用に起因する構造形成過程に関する研究が報告された。兵頭氏は、土星リングにおける微隕石の高速度衝突過程を理論および数値計算により解析し、微隕石物質が蒸発・凝縮・帯電・電磁相互作用を経てリングから除去されることを示した。吉村氏は、高解像度重力N体シミュレーションを用いて月形成円盤に生じるスパイラル構造の時間発展と安定性を解析し、リーディングスパイラルの形成とその重力不安定性が角運動量輸送および月形成時間に与える影響について議論した。

「衝突破壊」セッションでは、小惑星衝突に伴う破壊・エジェクタ放出・標的内部構造の影響に関する研究が報告された。西尾氏は、強度・破壊および摩擦を組み込んだSPH法による球面標的衝突シミュレーションに基づき、エジェクタの速度—累積質量分布を室内実験スケールと比較して標的曲率がエジェクタ質量や高速成分に影響することを示し、新たなスケールの必要性を指摘した。櫻井氏は、高空隙率ガラス焼結体およびガラス球を用いた衝突実験により、ボルダー模擬標的の衝突破壊が周囲レゴリスの粒径や物性(インピーダンス比)に依存して変化し、特に小粒径・低インピーダンス条件で破壊が促進されることを示した。道上氏は、内部クラックを有する炭素質隕石を対象とした高速衝突実験とX線CT撮像により、破断面が衝突前のクラックに沿って

形成される傾向を示すとともに、最大破片質量比から衝突破壊強度 Q^* を見積もり、標的形状や衝突点位置、クラックの有無が Q^* 評価に重要であることを指摘した。

「氷」セッションでは、氷天体における衝突クレーター形成と、氷粒子衝突の反発・回転特性に関する研究が報告された。菊川氏は、二段式軽ガス銃を用いた氷—液体層構造標的および氷板単体標的への高速度衝突実験により、表裏スポール形成や貫通—非貫通境界が氷板厚み・衝突速度・内海模擬物質の条件に依存することを示し、氷地殻貫通の最低条件として背面まで剪断破壊が到達することが重要であると示唆した。豊田氏は、氷球と鏡面研磨した花崗岩板を用いた低速度斜め衝突実験と二次元レーザー変位計による計測に基づき、衝突速度および衝突角度の増加に伴って反発係数が低下することを示すとともに、特に低角度側ではクラックによる散逸だけでなく回転へのエネルギー変換を考慮する必要があることを指摘した。

「含水」セッションでは、含水・湿潤な天体表層における衝突クレーター形成と、温度・含水率に伴う材料特性変化がクレーター形態やスケール則に与える影響に関する研究が報告された。神取氏は、含水小惑星表層模擬物質(砂混合石膏、石膏、パイロフィライト)に対する加熱実験と二段式軽ガス銃による散弾衝突実験を行い、加熱により縦波速度や引張強度が変化すること、ならびに砂混合石膏では加熱温度の上昇に伴いクレーター直径が増加する一方でパイロフィライトでは減少するなど、加熱起因の強化／強化がクレーター形態に反映される可能性を示した。豊嶋氏は、湿った砂標的で得られた衝突実験結果をBern SPHコードにより再現・拡張し、乾燥砂および含水率12 wt.%の湿潤砂でクレータープロファイルやエジェクタ堆積構造が実験と整合することを確認するとともに、重力支配域までスケールを拡張した数値計算から、湿潤表層ではクレーターが浅くなり消去されやすい可能性を示した。

2.3 ポスター講演

研究会2日目の夕方に、現地でのポスターセッションが開催された。本研究会では、ポスターセッションに先立ち、学生によるポスター講演として3分間のフ

ラッシュトークが行われ、その後、現地参加者を中心としたポスターセッションが実施された。発表形態は現地参加のみであったが、オンライン参加者も議論に参加できるよう、Slack上にポスター資料がアップロードされた。

ポスターセッションは懇親会と連続したスケジュールで開催され、コアタイムは1時間40分と比較的限られた時間ではあったものの、各ポスターの前には多くの参加者が集まり、活発な議論が行われていた。学生によるラッシュトークは、各ポスターの内容を事前に把握する良い機会となり、その後の議論を円滑に進めるうえで有効であったように思われる。

3. おわりに

本研究会では、ダスト集合体の衝突過程から小惑星・氷衛星・惑星リング・月形成円盤に至るまで、さまざまなスケールにおける衝突現象に関する研究が報告され、衝突現象が惑星科学において果たす役割の広がりや重要性が改めて確認された。室内実験、数値シミュレーション、理論的研究、探査観測に基づく解析など、多様なアプローチによる発表を通して、分野ごとの立場や視点の違いを意識しながら議論することで、衝突現象に対する理解がより深まったように感じられた。

また、本研究会は、「衝突」という共通のキーワードを研究テーマとする研究者たちが一堂に会し、対面で集中的に議論できる場であることが大きな特徴である。講演時間内にとどまらない踏み込んだ議論が

随所で行われており、特に若手研究者や学生による発表に対しても活発な質疑応答が交わされ、研究の背景や今後の課題について深く議論できる貴重な機会となっていた。

一方で、本研究会ではSlackなどのオンラインツールも併用され、講演時間内で議論しきれなかった点について、講演後も質問や意見交換を継続できる環境が整えられていた。議論の中で挙げられた参考文献や資料を気軽に共有できる点や、各自の端末で発表資料を参照しながら議論を進める様子も見られ、対面中心の研究会においてオンラインツールが議論を補完する手段として有効に機能していたように思われる。

このように、本研究会は対面での濃密な議論を核としつつ、オンラインツールを柔軟に取り入れることで、より実りある研究交流の場を提供していた。今後も本研究会が、分野横断的な衝突現象研究に関する理解を深める場として、継続的に重要な役割を果たしていくことが期待される。

謝辞

本研究会の開催にあたり、企画・運営にご尽力いただいた世話人の皆様を中心に心より感謝いたします。また、会場の確保ならびに研究会当日の運営に多大なご協力をいただいた、神戸大学 惑星科学研究センター（CPS）所属の吉田雄城氏に深く感謝いたします。あわせて、本稿に掲載した集合写真をご提供いただいた大阪産業大学の太田知美氏に感謝いたします。

著者紹介

豊田 優佳里



アストロバイオロジーセンター アストロバイオロジー 装置開発室 特任研究員。国立天文台併任。神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻博士課程修了。博士(理学)。神戸大学大学院理学研究科

惑星学専攻 学術研究員などを経て、2025年4月より現職。

「2025年度iSALE講習会」参加報告

松原 光佑¹



図1: 講習会最終日に撮影した集合写真.

2025年9月30日から10月28日にかけて、全5回のiSALE講習会初級編が隔週で開催された。iSALEとはImpact-SALE (Simplified Arbitrary Lagrangian Eulerian)のことであり、主に惑星科学において衝突研究に用いられている計算コードの1つである[1-4]。SALEコードを基に、欧州、米国、ロシアの研究者たちによって開発が進められており、流体運動に加えて物質の弾塑性挙動を扱うことができるため、HydrocodeではなくShock physics codeと呼ばれている。iSALEについての詳細は、iSALEのホームページ[5]や今年度のiSALE講習

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

会の案内[6]を参照していただきたい。

本講習会は国立天文台シミュレーションプロジェクト (以下、CfCA)の支援のもと開催され、9名 (博士学生3名、修士学生3名、学部学生3名)が参加した。講師は黒澤耕介氏(神戸大学/千葉工業大学)、黒崎健二氏 (防衛大学校)、松本侑士氏 (神戸大学)の3名に務めていただいた。また、伊藤孝士氏 (国立天文台CfCA)、加納香織氏 (国立天文台CfCA)には機材の準備や講義動画のアップロード等の支援を行っていただいた。各回の講習では、衝突物理や数値計算の原理を座学で学ぶ講義編と、実際にiSALEを用いて計算結果を解析する実践編が並行して行われた。今回は初級編ということで、計算機

のログイン方法やiSALE配布ファイルの構造といった初歩的な部分から丁寧に解説していただいた。講習はCiscoWebExを用いてオンライン上で開催され、業務連絡や質疑応答はSlackを通じて行われた。講習の際の集合写真を図1に示す。

講習会には筆者も含め、日常的に数値計算を行っていない参加者も複数参加していたが、そのような人も無理なく理解を深められるように細やかな配慮がなされていた。講義内容への疑問や計算のエラーが生じた際はSlackの専用チャンネルに質問を投稿することで、講師陣によって迅速に回答していただいた。講習の際に疑問やトラブルが生じた際にはBreakout roomに案内され、講師の方に1対1で丁寧にフォローしていただいた。さらに、講習の録画がYouTube上で限定公開されることで、講習会の後も講義を何度も復習することができる環境も整えられていた。

本講習会では開催3週間前から終了1週間後まで国立天文台CfCAの共同利用計算機の一部を講習会専用で貸し切って使用した。講習会の進捗に拘わらず、参加者は自由にiSALEを用いて計算の実行や結果の解析を行うことができた。以下に講習会の時間割を示す。

● 2025年9月30日

13:30-15:30 講義:iSALEの概要および衝突物理学と数値流体計算の基礎1

15:30-15:40 実践:国立天文台共同計算機およびそのログイン方法についての解説

15:40-16:10 実践:講習会専用サーバー上でのiSALE実行と配布ファイルの解説

16:10-16:40 実践:iSALE開発チームによる例題の紹介

● 2025年10月7日

13:30-14:45 講義:衝突物理学と数値流体計算の基礎2

14:50-16:00 実践:iSALE入力ファイル (asteroid.inp, material.inp)の読み方の解説

16:00-16:30 実践:iSALEの計算出力についての解説

● 2025年10月14日

13:30-14:30 講義:衝突物理学と数値流体計算の基礎3

14:30-15:30 実践:iPythonを用いたpySALE-Plotの解説

15:30-16:30 実践:初級課題の解説

● 2025年10月21日

13:30-16:30 実践:中級課題の解説

● 2025年10月28日

13:30-15:30 各自の計算の実行・解析

15:30-16:15 各自の計算結果の発表

16:15-16:30 計算サーバーへの申請方法の解説

1日目は講習会の概要とiSALEの特徴の解説から始まり、天体衝突現象の解析の中核を担う衝撃物理学の基本や数値計算の原理を学んだ。数値計算では室内衝突実験では再現不可能な天体スケールでの超高速度衝突を計算することが可能である一方、支配方程式に組み込まれていない効果(熱伝導や放射による冷却など)は考慮されていないことに注意が必要であることを学んだ。また、iSALEではANEOSとTillotsonの2種類の状態方程式モデルを選択できるが、両者は相図への厳密性や計算コストなどの観点において一長一短であり、どちらを採用するのかが計算前に吟味する必要があることも強調された。その後、国立天文台のサーバーに各自でログインし、配布されたファイルの構造の解説や豊富な例題の紹介が行われた。

2日目の講義は、衝撃波のように不連続な現象を計算する際に不可欠である人工粘性の解説に始まり、弾性体・塑性体モデルや熱弱化モデル、微小空隙圧密モデルの基本について学んだ。実践編では、計算する物質や衝突条件を決定するための入力ファイルの内容について、初級課題として配布された計算を実行しながらの解説が行われた。また、計算後に出力されるファイルを解説することで、計算のログやエラーの内容を確認したり、計算時間を推定したりする方法を学んだ。

3日目は、iSALEを使った計算の注意点として、原理的に解けない物理量が存在することや、物体の境界面付近は人工粘性などの影響により非物理的な挙動を示すことなどを学んだ。実践編ではJupyterLabを使用して初級課題の計算を実行しながら、自身の望む計算を実行できるよう入力ファイルの編集を行った。その後、pySALEPlotを用いて計

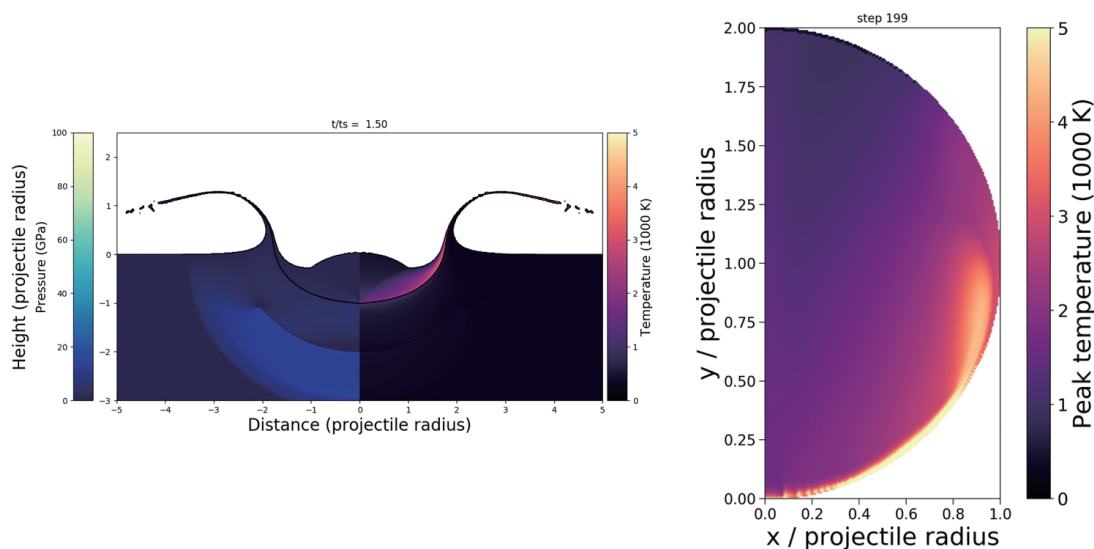


図2: 室内衝突実験を模擬し、鉄平面に対して直径 3 mm のカンラン岩球を 5 km/s で衝突させた場合の計算結果。左図は弾丸が貫入する最中の圧力と温度の分布を示す。右図は衝突を通じて弾丸のトレーサー粒子が経験した最高温度の初期位置に対するプロット。衝突の向きは下方向である。弾丸内部の最高経験温度には数千Kの不均質性があり、ターゲットと接する境界面付近が最も高温を経験することが可視化された。

算結果を描画し、カラーバーや物質境界線を編集して見やすい図に改良していった。

4日目は中級課題の計算結果を用いてトレーサー粒子が記録した情報を抽出し、衝突圧力の評価や特定のトレーサー粒子の流跡線の可視化などを行った。pythonを用いて長い描画スクリプトを編集するため、これまでの実践編よりも大幅に難しく感じたが、講師の方々の丁寧な解説と、トラブル時の手厚いサポート体制が整えられていたことにより、全員が時間内に課題をこなすことができたようである。これまでの学習内容では衝突の全体像の描画に留まっていたが、今回の講習により解析範囲を特定の領域に絞り、圧力や温度などのパラメーターを具体的に定量して評価できるようになった。

5日目は各自で計算結果をスライドにまとめ、その内容を1人あたり5分ほどで発表した。参加者の研究のバックグラウンドは実に多様であり、各々が課題や例題の計算を適切に改変して計算に取り組んだことが伺えた。筆者が行った計算の例を図2に示す。各自の発表の後には質疑応答や講師の方からのフィードバックがあり、今後の研究のために大いに参考になった。最後には国立天文台CfCA計算サーバーへ

の利用申請の方法について解説があり、今回の講習で学んだことを来年度以降の計算機利用に円滑に活かせるようになっていた。

iSALEの配布ファイルには巨大天体衝突や室内衝突実験、地滑りなど多様な状況を想定した例題が予め格納されており、計算を実行するだけで様々な現象をシミュレートすることが可能である。物質のパラメーターも火成岩や堆積岩、鉄、氷など多くの物質について用意されているため、利用者は想定している状況に近い例題を選び、そのパラメーターを調整することで、初心者でも比較的手軽に数値計算に取り組めるということが大きな利点である。3回目の講習の宿題として行った計算では、半球殻の銅を天体に 2 km/s で衝突させることで、はやぶさ2のSCIが小惑星Ryuguに対して行ったクレーター形成実験を再現できたことが印象的だった。

以上、2025年度iSALE講習会への参加報告を行った。筆者は室内衝突実験を主として研究を行っているため、普段は数値計算を行うことはない。しかしながら、2023年、2024年に続き3回目の講習会へ参加することで、数値計算の基礎知識を身につけるとともに、基本的な計算の実行・解析はできるように

なつたと自負している。当然、学会や論文で発表できるレベルの計算を行うには、さらなる習熟が必要である。今後は、室内実験で直接測定することが困難であるパラメーターを解析するための相補的なツールとしてiSALEを扱えるよう、継続的に利用して理解を深めていきたいと考えている。

最後に、本講習会の開催にあたりご尽力いただいた講師の黒澤耕介氏、黒崎健二氏、松本侑士氏に深謝いたします。また、国立天文台 CfCAの伊藤孝士氏、加納香織氏には計算のための機材を準備していただくとともに、講義の録画配信やトラブル時の対応など、細やかなサポートを頂きました。この場を借りて深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Amsden, A. et al., 1980, Los Alamos National Laboratories Report, LA-8095:101p.
- [2] Ivanov, B. A. et al., 1998, International Journal of Impact Engineering 20, 411.
- [3] Collins, G. et al., 2004, MAPS 39, 217.
- [4] Wünnemann, K. et al., 2006, Icarus 180, 514.
- [5] <https://isale-code.github.io/>
- [6] <https://www.cfca.nao.ac.jp/node/1876>

著者紹介

松原 光佑



神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻 博士後期課程 1年。日本惑星科学会、日本地球惑星科学連合に所属。

JSPS Information

- ◇日本惑星科学会第175回運営委員会議事録
- ◇日本惑星科学会第176回運営委員会議事録
- ◇日本惑星科学会第177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175回運営委員会議事録

期間:2025年10月14日(火)～10月20日(月)

議題:EPS誌の分担金の覚え書き案(分担額)について

運営委員会委員:

出席(20名)

今村 剛, 竝木 則行, 大竹 真紀子, 千秋 博紀, 黒澤 耕介, 三浦 均, 百瀬 宗武, 瀧川 晶, 保井 みなみ, 横田 勝一郎, 癸生川 陽子, 生駒 大洋, 野村 英子, 藤谷 渉, 田中 智, 亀田 真吾, 佐々木 貴教, 野口里奈, 坂谷 尚哉, 黒川 宏之

欠席(3名)

諸田 智克, 鎌田 俊一, 田中 秀和

成立条件:期間内に議決返信のあった者を委員会出席とみなす.

議決方法:上記期間内にgoogle formから回答.

議題:EPS誌の分担金の覚え書き案(分担額)について, 承認を求める.

内容:EPS 誌の発行等に関する補助金として, 日本惑星科学会の分担金額は18万円(昨年から据え置き)と設定する.

審議結果:

議案は原案のとおり承認された(可20・否0).

以上

◇日本惑星科学会第176回運営委員会議事録

期間:2025年12月4日(木)～12月10日(水)

議題:2026年度の事務局事務員との契約について

運営委員会委員:

出席(22名)

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

欠席(1名)

坂谷 尚哉

成立条件:期間内に回答のあった者を委員会出席とみなす.

議決方法:上記期間内にgoogle formから回答.

議題:

2026年度の事務局事務員との契約について, 承認を求める.

経緯:

2027年度から新事務局体制に移行する. 2026年度は2025年度の契約をベースとして, 以下のA～Cの改訂をし, 現事務局事務員と契約の締結を行いたい.

A. 給与を月額6千円増額する.

理由:物価上昇(年率3.0%:総務省統計局2025年11月21日公表の消費者物価指数(総合指数)前年同月比). なお, 今年度から追加・変更する業務については, 契約書の別紙となる「事務局運営業務一覧」(添付)に赤字で記載.

B. 労働契約期間は1年間とする.

理由:2027年度から新事務局体制に移行するため.

C. 給与とは別に月額3万6千円で特別業務「財務専門委員会補助」を2025年度に引き続き委託する. 一方, 2024年度から委託してきた特別業務「事務局情報整理」は2025年度末で終了する.

理由:財務専門委員会補助は引き続き必要だが, 事務局情報整理については2025年中に完了するため.

なお, 上記A～Cが運営委員会で承認された場合, それに沿った契約書の作成と, 契約の締結については会長に一任いただきたい.

審議結果:

議案は原案のとおり承認された(可22・否0)

以上

◇日本惑星科学会第177回運営委員会議事録

期間:2026年1月6日(火)~1月12日(月)

議題:学会誌(冊子体)バックナンバーの取り扱いについて

運営委員会委員:

出席(22名)

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

欠席(1名)

坂谷 尚哉

成立条件:期間内に回答のあった者を委員会出席とみなす.

議決方法:上記期間内にgoogle formから回答.

議題:

学会誌(冊子体)バックナンバーの取り扱いについて, 承認を求める.

経緯:

事務局移転に伴い, 現在京都のレンタルオフィスと東京科学大学に置かれている遊星人バックナンバーの移転先について検討する必要性が生じた. そのため, バックナンバーの取り扱いについて, 以下のように提案したい.

【学会誌(冊子体)の保管方針】

- ・各号1冊は, アーカイブとして学会で保管する
- ・それ以外は, 最新巻+直近5年間のみ保管し, 残りは廃棄する
- ・廃棄前に, 在庫処分セール(全巻セット)を検討する

保管場所は, 編集専門委員会で担う予定.

各号1冊のアーカイブは編集長が引き継いでいき(代替わりごとに郵送), 最新号+直近5年間のものは歴代の編集長が保管する.(時効が来たら各自の判断で廃棄してよい)

廃棄のスケジュールは, おおよそ以下の通り.

- ・2026年6月まで:在庫処分セールの内容(価格など)をまとめる
- ・2026年7月ごろ:在庫処分セール開始. 購入希望があり次第, 冊子体を発送
- ・2026年10月ごろ:在庫処分セールの購入希望受付終了
- ・2026年11月以降:冊子体を廃棄

なお, 廃棄により, 直近5年間よりも前のバックナンバーが購入できなくなるため, 現在提供している「バックナンバー

の購入サービス」を無くすことになる。

審議結果:

議案は原案のとおり承認された(可22・否0)

以上

◇賛助会員名簿

2026年3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.

* 2026/05

** 2026年5月24日(日)-5月29日(金) JpGU-AGU Joint Meeting 2026

(a) 幕張メッセ国際会議場, 国際展示場ホール7・8

(b) JpGU

(c) https://www.jpгу.org/meeting_j2026/

編集後記

遊星人編集幹事の野津翔太です。遊星人は2026年3月号(今号)より、正会員(一般・学生)の皆さまへの冊子版送付が廃止となり、電子版(PDF)のみでご覧いただく形となります。冊子版の入手を希望される場合は、新たにPOD(プリントオンデマンド)での購入が可能となります。なお、購読会員・賛助会員の皆さまへの冊子版配布は継続されます。創刊35年目にして新たな体制でスタートを切る遊星人、引き続き奮っての記事投稿、お待ちしております。

今回の遊星人、大野和正さんの最優秀研究者賞受賞記念論文では、ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡(JWST)の観測により近年急速に進展を見せる太陽系外惑星大気の理論・観測研究について、惑星形成研究との連携の視点も交え紹介されています。大野さんが理論研究をベースにJWST系外惑星大気観測研究に取り組まれた経緯は、ご本人が「遊星人の海外研究記」の記事(2024年6月号、「その14 ~コロナ禍でのアメリカ研究生生活~」)の中でも紹介されています。また系外惑星研究に関して、遊星人では2013年から「系外惑星「遠い世界の物語」」という連載記事を現在までに計17編掲載しております。大野さんの受賞記念論文と合わせてご覧頂き、近年の太陽系外惑星研究の発展をぜひ味わって頂ければと思います。

その他今回の遊星人、連載記事の「金星あかつき・ラストデイズ」では、2025年9月の停波運用を踏まえ、「あかつき」プロジェクトの四半世紀の歩みを振り返って頂いております。その他にも、2026年度の探査機打ち上げを目指し準備が進む火星衛星探査計

画MMXの対談記事、各種研究会の報告記事など、興味深いラインナップです。

ところで、私は現在所属する東京大学理学部 地球惑星物理学科・地球惑星環境学科においていくつか授業を担当しているのですが、そのうちのひとつが地球惑星環境学科3年生向けにプログラミング(Python)の基礎およびデータ解析手法を教える計算機実習の授業となります。様々なデータ解析ソフトウェアの登場のほか、公開コードの普及や生成AIの登場・普及と共に、データ解析や数値計算の参入障壁は確実に下がっていると言えます。それ自体は研究の効率化にも繋がり良い事ではあり、惑星科学分野においても大規模データ解析の手法は今や欠かせません。(試しに某AIに惑星科学分野における応用例を聞いてみると、探査機が撮影した太陽系内惑星・衛星・小惑星の画像解析や、太陽系外惑星探索などを回答してきました。)一方で注意しないと背景の原理や物理を「ブラックボックス」として理解しないまま、解析・研究が進んでしまうという側面もあります。授業では研究現場を想定した簡単なデータ解析の例について、自分で一からコードを書く経験をしてもらっていますが、そういった経験を積むことで公開コードや生成AIとうまく付き合う術を身につけてもらえれば良いな、と感じる今日この頃です。(編集幹事 野津翔太)

編集委員

三浦 均(編集長),

野津 翔太(編集幹事),

荒川 創太, 小川 和律, 鎌田 俊一, 木村 勇気, 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3月25日発行

日本惑星科学会誌 遊・星・人 第35巻 第1号

定 価 一部 1,925円(税込・送料込)

編集人 三浦 均(日本惑星科学会編集専門委員会委員長)

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

発行所 日本惑星科学会事務局

〒604-8206

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

Tel: 075-708-5984

e-mail: staff@wakusei.jp

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

本誌に掲載された寄稿等の著作権は日本惑星科学会が所有しています。

複写される方へ

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

1. 原稿の様式

○投稿原稿：

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

○最終稿：

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

投稿原稿送り状の雛型および各チェックリストはウェブサイト

(<https://www.wakusei.jp/book/pp/guide.html>) から取得できる。

2. タイトル

記事のタイトルは20字程度以内。また、タイトル、筆署名、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