

# 遊



日本惑星科学会誌

**Planetary  
People** 2  
June 2026 vol35 no

# 星

# 人

- 2024年度最優秀発表賞受賞論文
- 2025年度最優秀発表賞受賞論文
- 火星衛星MMX, 金星あかつき, 海外研究記
- 活動報告: 惑星物質固体物性, 水星研究, 月科学

# 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2号

### 目次

---

---

巻頭言 白井 寛裕	53	
「2024年度最優秀発表賞受賞論文」		
惑星移動を考慮した微惑星からの自己無撞着な大規模惑星形成 $N$ 体シミュレーション 神野 天里, 斎藤 貴之, 船渡 陽子, 牧野 淳一郎	54	
「2025年度最優秀発表賞受賞論文」		
へびつかい座分子雲の原始惑星系円盤の超解像度サーベイ: 原始惑星系円盤の進化と詳細構造の形成時期に関する考察 所司 歩夢	66	
もう一つの月世界へ:火星衛星探査計画MMX その14 ~MMXミッションのためのMEGANEによるフォボス調査~ David J. Lawrence, Patrick N. Peplowski, Morgan T. Burks, Nancy L. Chabot, 他7名		81
一番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦 その66 ~単一液滴実験から探る金星雲の化学~ 生方 颯真	86	
遊星人の海外研究記 その20 ~ミッフィーの街 オランダ・ユトレヒトでの研究生活~ 川島 由依	89	
惑星物質固体物性測定コンソーシアム ~2025年度活動報告~		
石崎 拓也, 小野寺 圭祐, 田中 智, 佐藤 雅彦, 榎戸 祐馬, 金丸 礼	95	
若手を中心とした国内水星研究コミュニティの取り組み		
平田 佳織, 鈴木 雄大	100	
月科学コミュニティの活性化に向けた取り組み ~2025年度活動報告~		
小野寺 圭祐, 大竹 真紀子, 池田 あやめ, 山下 光葉, 神田 恵太郎, 長岡 央, 荒木 亮太郎, 他3名	106	
第18回月惑星探査データ解析実習会を終えて		
平田 成, 月惑星探査データ解析実習会世話人一同	112	
2026年度日本惑星科学会秋季講演会のお知らせ		
野口 里奈	115	
学位論文タイトル紹介		
	118	
2026年度助成事業2件公募のご案内		
公益財団法人 宇宙科学振興会	119	
JSPS Information	120	

---

---

---

# Contents

---

<b>Preface</b>	T. Usui	53
<b>Unified large-scale <i>N</i>-body simulation of planet formation from planetesimals considering planetary migration</b>	T. Jinno	54
<b>ALMA 2D super-resolution imaging survey of ophiuchus Class I/Flat-spectrum/II disks: Protoplanetary disk evolution and the onset of substructure formation</b>	A. Shoshi	66
<b>Fly me to another moon world: Martian Moons eXploration (MMX) (14) — The MEGANE investigation for the MMX mission —</b>	D. J. Lawrence, P. N. Peplowski, M. T. Burks, N. L. Chabot, R. C. Espiritu, S. Fix, and 5 authors	81
<b>Road to the first star: Venus orbiter from Japan (66) — Exploring the chemistry of Venusian clouds through single-droplet experiments —</b>	S. Ubukata	86
<b>Letter from planetary people working abroad (20) – Research life in Utrecht, home of miffy –</b>	Y. Kawashima	89
<b>Astromaterial Physical-Property Measurement Consortium ~FY2025 activity report~</b>	T. Ishizaki, K. Onodera, S. Tanaka, M. Sato, Y. Enokido, R. Kanemaru	95
<b>Initiatives of the Mercury research community for early-career researchers in Japan</b>	K. Hirata, Y. Suzuki	100
<b>Activation of the Japanese lunar science community ~FY2025 activity report~</b>	K. Onodera, M. Ohtake, A. Ikeda, M. Yamashita, K. Kanda, H. Nagaoka, R. Araki, and 3 authors	106
<b>Report of the 18th workshop for data analysis in lunar and planetary explorations</b>	N. Hirata, Facilitators of the workshop for data analysis in lunar and planetary explorations	112
<b>The Japanese Society for Planetary Science Fall Meeting 2026</b>	R. Noguchi	115
<b>Recent theses in planetary sciences</b>		118
<b>Announcement of public offering for 2026 grants</b>	Society for Promotion of Space Science	119
<b>JSPS Information</b>		120

## 巻頭言

巻頭言といえば名だたる先生方が執筆されるもの、という印象を持っていたが、最近は私と同世代の執筆者も増え、自身もそうした役割を担う年齢になったのだと感じている。

私は、世代としては決して若くはないが、日本惑星科学会との関わりは新しい。大学院修了後しばらくは地質学をベースとした研究を続けており、惑星科学会を主たる活動の場としていなかったためである。

大学院卒業後、比較的長いアメリカでの研究生生活を経て研究拠点を日本に移し、その翌年、学会が石垣島で開催されると知り、多少のよこしまな気持ちも手伝って入会したのが、関わりが始まりだった。入会当時、火星に関する発表がわずか2件しかなかったことは印象に残っている。その後MMX計画が立ち上がり、現在では火星・火星衛星のセッションが設けられるまでになった一方、リュウグウ試料分析の発表が2022年以降に急減したことは、分野の盛り上がりを如実に反映しているようだ。

日本惑星科学会において、このように分野ごとの盛り上がり比較的短い時間スケールで入れ替わる背景は、多くの会員が他学会を主戦場とし、あるいは複数の学会を掛け持ちしながら活動しているという、この学会の特徴にあり、それは同時に長所でもあると私は考える。良い意味で“腰が軽く”、分野横断的な議論ができるこの環境はきわめてユニークであり、単一セッションを基本としてきた運営方針も、こうした学会の特性を生かすために、諸先輩方が長年にわたり築いてこられたのだと受け止めている。

今後、惑星科学分野には、アストロバイオロジーを始めとした新たな潮流が加わっていく。時代とともに扱うテーマは変化していくが、自由闊達で横断的に議論するというこの学会のコンセプトは、次世代へと大切に引き継いでいきたい。若い研究者が多く、さまざまなバックグラウンドを受け入れながら共に研究をドライブしていける点こそが、日本惑星科学会の最大の強みである。

「自由で、公平で、競争的で、年齢や立場を超えて尊重し合える研究環境を作る」という私自身の目標は、すでにこの学会の中で実現されつつある。その貴重な環境を、より良い形で未来へとつないでいきたいと考えている。

白井 寛裕(宇宙航空研究開発機構)

# 「2024年度最優秀発表賞受賞論文」 惑星移動を考慮した微惑星からの自己無撞着 な大規模惑星形成N体シミュレーション

神野 天里<sup>1\*</sup>, 斎藤 貴之<sup>1</sup>, 船渡 陽子<sup>2</sup>, 牧野 淳一郎<sup>1</sup>

2026年3月17日受領, 査読を経て2026年4月13日受理

**Abstract** 標準的な惑星形成理論では、微惑星が暴走成長・寡占成長を経て原始惑星となり、形成領域近傍で惑星へ成長すると考えられてきた。しかしこのシナリオだけでは氷惑星の形成時間や多様な系外惑星系の存在を自然に説明することが難しい。惑星移動はこれらの問題を解く鍵であり、なかでも微惑星の重力散乱を通じて惑星が移動する微惑星駆動型移動(Planetesimal-Driven Migration: PDM)は惑星移動の有力なメカニズムの一つである。これまでもPDMによる惑星移動は数多く研究されてきたが、先行研究では初期に惑星の存在を仮定しており、PDMによる惑星移動が惑星形成過程に及ぼす効果は十分には検証されていない。そこで我々は、スーパーコンピュータ「富岳」を用いて、初期に惑星の存在を仮定しない微惑星円盤からの高解像度惑星形成N体シミュレーションを行い、惑星形成過程におけるPDMの効果を調べた。その結果、原始惑星は暴走成長段階から、PDMによって円盤内を内外へダイナミックに移動することがわかった。また、軌道反発とPDMの効果が組み合わさることで、原始惑星群は外側へ移動する群と内側へ移動する群に二極化する傾向が見られた。以上の結果は、地球型惑星や巨大氷惑星コアの形成において移動と成長が並行して進むことの重要性を示すとともに、標準的な原始惑星系円盤モデルにおいてもアドホックな仮説を必要とせずに、多様な系外惑星系の説明に必要な惑星移動を自然に再現し得ることを示唆している。

## 1. はじめに

古典的な惑星形成理論では、惑星は無数の微惑星が衝突・合体し形成されると考えられている[12, 13, 45]。具体的には、まず微惑星の暴走成長によって原始惑星が形成される[10, 15, 27, 52]。その後、寡占成長を経て[28]、形成位置に応じて地球型惑星、あるいはガス惑星・氷惑星のコアへと成長すると考えられている(図1a)。しかし、この「その場」形成シナリオにはいくつかの問題がある。例えば太陽系では、天王星・海王星を現在の軌道近傍で形成するには、太陽系年齢を超える形成時間を要することが古くから指摘されている[31, 48]。また、1995年の系

外惑星の発見[35]以降、ホットジュピターやスーパーアースを含む多数の系外惑星が発見されており、その多様性を古典的なその場形成シナリオのみで説明することは難しい。したがって、氷惑星コアの形成や多様な系外惑星系の起源を理解する上では、惑星が成長と並行して軌道移動し得ることを考慮することが重要である。

惑星の軌道移動を引き起こすメカニズムとしては、ガス抵抗や惑星-ガス円盤間の重力相互作用によるType-I惑星移動、惑星-微惑星間の重力相互作用によって生じる微惑星駆動型移動(以下、PDM)、さらに円盤ガス散逸後に生じる巨大惑星間の重力散乱による惑星移動などが挙げられる[2, 7, 16, 21, 24, 30, 37, 49, 51]。惑星移動が起こったことを示唆する例は太陽系内にも存在する。例えば、冥王星族天体の存在は、海王星がその形成過程あるいは形

1. 神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻

2. 東京大学大学院総合文化研究科

223s415s@gsuite.kobe-u.ac.jp

成後に外向きに移動したことを示唆している[11, 33, 34]. この海王星の外向き移動の有力なメカニズムとしては, PDMや巨大惑星間の重力散乱による惑星移動(ニースモデル)が考えられている[16, 49].

我々は[21]において, 微惑星間の重力相互作用, ガス抵抗, およびType-I惑星移動を考慮した自己無撞着な $N$ 体シミュレーションを行い, PDMが原始惑星の急速な動径方向拡散メカニズムとして機能し得ることを示した. しかし, [21]では微惑星円盤中に単一の原始惑星を配置する初期条件を用いており, 複数の原始惑星が暴走成長・寡占成長を経て形成されるより現実的なシナリオ[28]への適用には限界があった. したがって, 惑星形成過程においてPDMによる惑星移動が実際に起こるのか, またそれが惑星形成にどのような影響を与えるのかは明らかになっていなかった.

そこで我々はスーパーコンピュータ「富岳」を用い, 惑星-ガス円盤間相互作用, 惑星-微惑星間重力相互作用, 微惑星間の重力相互作用, および微惑星同士の衝突合体をすべて考慮した微惑星円盤からの高解像度惑星形成 $N$ 体シミュレーションを行った. 本研究の目的は, 惑星形成過程において惑星移動がどのように生じ, それが太陽系や系外惑星系を含む多様な惑星系の形成にどのような影響を与えるかを調べることにある. そのため本研究では複数の原始惑星形成とその移動を調べるために, 先行研究[21, 37]で用いられている円盤モデルに則った最小質量円盤モデル(MMSN)[12]のダスト面密度を4倍にしたモデル( $4\times$ MMSN)を採用している. その結果, この古典的な円盤モデルでも惑星形成は「その場」では進行せず, 暴走成長の早い段階から原始惑星がPDMによって円盤内を内向き・外向き双方にダイナミックに移動することが明らかになった. この結果は, 惑星のその場形成という標準モデルの基本的な仮定と一線を画すものであり, PDMやType-I惑星移動を通じた動的な惑星移動が惑星系の形成において重要な役割を果たすことを示唆している(図1b).

我々のシミュレーションには, ガス抵抗, Type-I惑星移動, およびPDMの3つの移動メカニズムがすべて含まれているが, 本稿で主として議論するのはPDMである. ガス抵抗やType-I惑星移動について

は, その効果を記述するモデルが提案されており, その性質も先行研究でよく調べられている[2, 17, 47, 51]. これに対し, PDMは多数の微惑星との重力相互作用に起因するため解析的な取り扱いが難しく, その理解には大規模な $N$ 体シミュレーションが不可欠である. 実際, 惑星形成過程においてPDMを自己無撞着に再現するには, 多数の天体間の重力相互作用を直接計算する必要がある. 本研究はそのような計算を初めて実現したものである.

本稿では, これまでに我々が行ってきた研究[21, 22]の内容を基に, PDMによる惑星移動が惑星形成過程に与える影響を概説する. 構成は以下の通りである. 第2節でPDMによる惑星移動のメカニズムを説明し, 第3節でPDMの先行研究を簡単に紹介する. 第4節では本研究のシミュレーションモデルと数値手法を述べ, 第5節でシミュレーション結果を示す. そして第6節でまとめと今後の展望を述べる.

## 2. PDMによる惑星移動メカニズム

微惑星駆動型移動(PDM)とは, 惑星-微惑星間の重力相互作用によって惑星近傍の微惑星分布が変化し, その結果として惑星-微惑星間の角運動量輸送に非対称性が生じることで, 惑星が動径方向に移動する現象である. 惑星は周囲の微惑星を重力的に散乱し, そのたびに角運動量をやり取りするが, 内側から散乱される微惑星と外側から散乱される微惑星の寄与が釣り合わない場合, 惑星は正味のトルクを受けて円盤内向きまたは外向きに移動する.

PDMの鍵となるのは, 惑星の近接散乱領域内の微惑星が散乱されることで生じる惑星-微惑星間の角運動量交換である. ここで, 近接散乱領域は, 微惑星の軌道長半径 $a$ と惑星の軌道長半径 $a_p$ の差を惑星のヒル半径 $R_{\text{Hill}}^1$ で規格化した

$$b \equiv \frac{a - a_p}{R_{\text{Hill}}}$$

<sup>1</sup>ヒル半径は

$$R_{\text{Hill}} = \left( \frac{m_p}{3M_*} \right)^{1/3} a_p$$

で定義される. ここで $a_p$ は惑星の軌道長半径,  $m_p$ は惑星質量,  $M_*$ は中心星質量である.

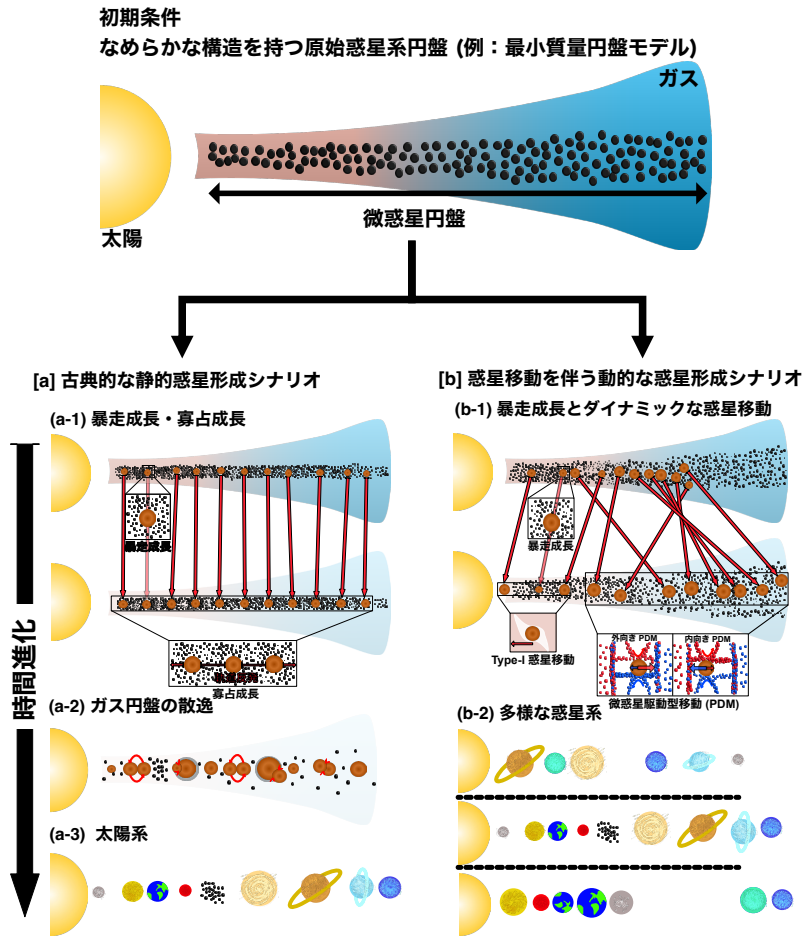


図1: 同じ原始惑星系円盤からの異なる惑星形成シナリオ。[a] 太陽系の形成を描いた古典的シナリオ[12, 13, 45]: 微惑星の暴走成長によって原始惑星が形成され、軌道反発によりその場で寡占成長する(a-1)。その後、円盤ガスの散逸に伴い軌道交差・巨大衝突・ガス集積が起こり、最終的に太陽系が形成される(a-2, a-3)。(b) 多様な惑星系の形成を描いた動的な惑星形成シナリオ(本研究): 暴走成長で形成された原始惑星が、外向き・内向きのPDMおよびType-I 惑星移動により円盤内を移動する(b-1)。最終的に、惑星移動を通じて多様な惑星系が形成される(b-2)。Jinno et al. [22] を元に改変して掲載。

を用いると、概ね  $1.3 \lesssim |b| \lesssim 3.1$  の範囲で特徴づけられる[16]。この領域では微惑星が惑星によって強く摂動され、散乱に伴う角運動量輸送の変化量が大きくなる。したがって、内側・外側いずれか一方からの近接散乱がわずかに優勢になっただけでも、惑星は動径方向の移動を開始し得る。

PDMの重要な特徴は、一度移動が始まると惑星が単調に移動し続ける点にある。惑星が動径方向に移動を始めると、惑星は散乱相手となる微惑星集団へ次々と突っ込む形になり、微惑星分布の非対称性(内側と外側の散乱効率の差)が維持されやすくな

る。この正のフィードバックにより、惑星の単調な移動が維持される(図2)。

惑星のPDMによる移動方向は、初期に惑星よりも内側に存在する微惑星と惑星よりも外側に存在する微惑星のうち、どちらとの散乱が相対的に強いかで決まる。例えば、最小質量円盤モデルのように内側ほど面密度が高い円盤では、一般に内側の微惑星との相互作用が相対的に強くなりやすい。その場合、惑星は正味に角運動量を失って内向きに移動する。ただし、内側ほど面密度が高い円盤でも局所的な微惑星分布や散乱の確率的な揺らぎによって、外

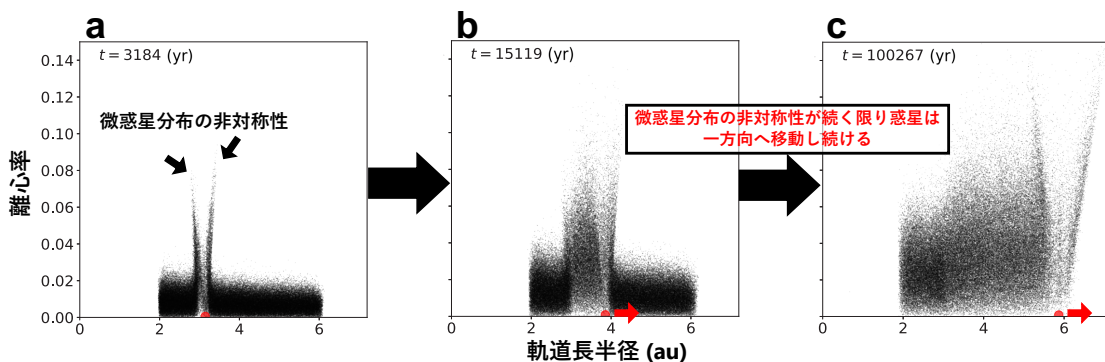


図2: PDMによる惑星移動の様子. 赤点・黒点はそれぞれ原始惑星と微惑星を示している. 原始惑星による重力散乱によって, 惑星の内側と外側で微惑星分布に非対称性が生じる(パネルa). この非対称性が維持される限り, 惑星は正味のトルクを受け続け, 一方方向へ移動し続ける(パネルb, c). Jinno et al. [21] の結果を元に作成.

向き移動が駆動される場合もあり得る.

### 3. PDMの先行研究

PDMによる惑星移動は, これまでに多くの研究で調べられてきた[7, 16, 24, 25, 30, 37]. 本節では, これら先行研究の概要を整理した上で, 先行研究に対する我々の研究の位置付けを示す.

#### 3.1 PDMによる原始海王星の外向き移動[16]

Ida et al.[16] は, PDMによる原始海王星の軌道進化をモンテカルロシミュレーションによって調べた. 同研究では微惑星-原始海王星間の重力相互作用を考慮し, 微惑星分布の非対称性により原始海王星が外向きPDMを起こし得ることを示した. さらに, この非対称性が散乱と原始海王星の移動を通じて自律的に維持されることを明らかにした. 加えて, 微惑星散乱に伴う正味の角運動量輸送を評価し, PDMによる惑星移動速度を導出した. 一方, 微惑星間の重力相互作用は無視され, またガスのない環境が仮定されているため, ガス抵抗やType-I惑星移動の効果は取り入れられていない.

#### 3.2 PDMのパラメータ依存性[24, 25]

Kirsh et al. [24, 25]は,  $N$ 体シミュレーションコードSyMBA[8]を用いてPDMによる惑星移動を調べた. 彼らの研究の特徴は, 原始惑星質量, 微惑星離心率, 馬蹄軌道内微惑星総質量, 原始惑星の

初期軌道長半径, 円盤面密度分布など, 幅広いパラメータ空間で系統的な調査を行った点にある. その結果, 微惑星の速度分散が低い「冷たい」円盤, かつ近接散乱領域内に存在する微惑星の総質量が惑星質量を上回る場合に, PDMが駆動されやすいことを明らかにした. また, 外向きPDMは内向きPDMに比べて移動速度が遅いことも示されている. これは, 円盤内側の微惑星ほど遭遇周期が短く, 面密度も高いため, 内側の微惑星との散乱が相対的に強くなることで説明される. ただし, SyMBAではガス抵抗やType-I惑星移動は考慮されておらず, 微惑星間の重力相互作用も無視されている. なお, 彼らの研究では外向きPDMについての結果が詳述されておらず, 外向きPDMの傾向は十分に整理されていない.

#### 3.3 ガス抵抗とType-I 惑星移動を考慮したPDM[7]

Capobianco et al.[7]は, これまで無視されてきたガス抵抗とType-I移動を取り入れたPDMの $N$ 体シミュレーションを行った点に特徴がある. 彼らの研究によって, ガス抵抗が微惑星の散乱を抑制し, PDMによる惑星移動に大きな影響を与えることが示された. 具体的には, 微惑星サイズが十分に大きい場合あるいは十分に小さい場合には惑星は一般に内向きに移動する一方で, 微惑星サイズが0.5 – 5 kmの範囲では外向き移動がより一般的であることを見出した. ただし, 彼らもまたSyMBAをベースと

する $N$ 体シミュレーションコードを用いているため微惑星間の重力相互作用は無視されている。さらに質量分解能の制約から、各粒子を超粒子として扱い、それに対応してガス抵抗を人工的に強めた設定を採用している。

### 3.4 複数原始惑星系でのPDM[37]

Minton & Levison[37]は、地球型惑星形成領域におけるPDMの効果を調べた。本研究の特徴は、PDMの駆動条件を詳細に整理した点にある。また、モンテカルロシミュレーションで構築した複数の原始惑星を含む微惑星円盤を初期条件として用いることで、単一惑星を仮定した先行研究に比べ、より現実的な系におけるPDMの挙動を検証した。ただし、ガスのない環境を仮定しているため、ガス抵抗やType-I惑星移動は考慮されておらず、また微惑星間の重力相互作用も無視されている。

### 3.5 微惑星間の重力相互作用を考慮したPDM[30]

Kominami et al.[30]は、スーパーコンピュータ「京」向けに最適化された $N$ 体シミュレーションコードKninjaを用いて、世界で初めて微惑星間の重力相互作用を考慮したPDMの $N$ 体シミュレーションを行った先駆的な研究である。同研究により、微惑星間の重力相互作用に伴う粘性攪拌が円盤全体を加熱し、PDMによる惑星移動を抑制し得ることが示された。ただし、同研究も多くの先行研究と同様にガスのない環境を仮定しているため、ガス抵抗やType-I惑星移動の効果は考慮されていない。また、微惑星間の重力相互作用は計算コストが高いことからシミュレーション回数は4回に限られ、PDMの詳細な傾向を系統的に調べるには至っていない。

### 3.6 先行研究との比較

これまでに紹介した先行研究には、主に二つの課題が残されていた。

第一に、微惑星間の重力相互作用の取り扱いである。Kominami et al.[30]を除くすべての先行研究では微惑星間の重力相互作用が無視されている。微惑星間の重力相互作用によって生じる粘性攪拌は微惑星の速度分散を増加させ、惑星との近接遭遇頻度

を低下させることでPDMを抑制し得る重要な効果であるにもかかわらず、その影響は十分に検証されてこなかった。一方、Kominami et al.[30]は微惑星間重力相互作用を考慮した先駆的研究であるが、計算コストの制約から少数のシミュレーションに限られ、PDMの系統的傾向を明らかにするには至っていない。

第二に、ガス円盤の効果である。Capobianco et al.[7]を除く先行研究ではガスのない環境が仮定され、ガス抵抗やType-I惑星移動は考慮されていない。ガス抵抗は微惑星の速度分散の増加を抑制し、その結果としてPDMを促進し得る一方、Type-I惑星移動は惑星に内向きのトルクを与えるため、両者はPDMの振る舞いに大きな影響を及ぼす。

これらの課題に対し、我々は[21]において、先行研究では扱われていなかった微惑星間の重力相互作用とガス円盤の効果を同時に取り入れ、PDMを自己無撞着に検証できるシミュレーションを実現した。具体的には、微惑星間の重力相互作用、最小質量円盤モデルに基づく現実的なガス抵抗、およびType-I惑星移動のすべてを考慮した自己無撞着な $N$ 体シミュレーションを合計1,770回行い、広いパラメータ空間でPDMによる惑星移動の傾向を包括的に調べた。その結果、PDMが原始惑星の急速な動径方向拡散メカニズムとして機能し得ることを示した。しかし、[21]では単一の原始惑星を微惑星円盤中に配置した初期条件を用いており、複数の原始惑星が暴走成長・寡占成長する現実的な惑星形成過程[28]でPDMがどのように作用するかは未解明であった。そこで[22]では、スーパーコンピュータ「富岳」を用いて、初期に原始惑星を配置しない微惑星円盤からの大規模自己無撞着 $N$ 体シミュレーションを行い、惑星形成過程におけるPDMの役割を調べた。次節以降では、[22]で行ったシミュレーションのモデル・手法および結果を詳述する。

## 4. シミュレーションモデルと数値手法

本節では、[22]で用いたシミュレーションモデルと数値手法の概要を述べる。詳細は[21, 22]を参照されたい。

#### 4.1 円盤モデル

本研究では円盤モデルとして、最小質量円盤モデル[12]に則ったモデルを採用する。したがって、ダスト面密度 $\Sigma_{\text{dust}}$ 、ガス面密度 $\Sigma_{\text{gas}}$ 、およびガス円盤温度 $T$ を中心星からの距離 $r$ の関数として次のように定義する:

$$\Sigma_{\text{dust}} = 10f_{\text{dust}}\eta_{\text{ice}} \left(\frac{r}{1 \text{ AU}}\right)^p \text{ g cm}^{-2}, \quad (1)$$

$$\Sigma_{\text{gas}} = 2400f_{\text{gas}} \left(\frac{r}{1 \text{ AU}}\right)^p \exp\left(-\frac{t}{1 \text{ Myr}}\right) \text{ g cm}^{-2}, \quad (2)$$

$$T = 2.8 \times 10^2 \left(\frac{r}{1 \text{ AU}}\right)^\beta \text{ K}. \quad (3)$$

ここで $f_{\text{dust}}$ 、 $f_{\text{gas}}$ はスケーリング係数、 $\eta_{\text{ice}}$ は氷の凝縮による固体量の増加を表す(雪線内側で $\eta_{\text{ice}} = 1$ 、外側で $\eta_{\text{ice}} = 4.2$ )。太陽の初期進化とガス円盤の粘性降着を考慮し、雪線は2 auとした[30, 43]。動径方向のべき指数は $p = -3/2$ 、 $\beta = -1/2$ とし[12]、ガスの散逸は時定数1 Myrの指数関数的減衰でモデル化している。本研究では、先行研究[21, 37]に従い、最小質量円盤モデルの4倍のダスト面密度を採用した。ダスト面密度を増加させることで原始惑星の成長タイムスケールが短縮され、限られた計算時間・計算資源で複数の原始惑星の形成とその移動を追跡することが可能となる。

#### 4.2 ガス抵抗・Type-I 惑星移動モデル

ガス抵抗力は[2]に基づき、以下の式で与えられる:

$$\mathbf{F}_{\text{drag}} = -\frac{1}{2m_{\text{p}}} C_{\text{D}} \pi r_{\text{p}}^2 \rho_{\text{gas}} |\Delta \mathbf{v}| \Delta \mathbf{v}. \quad (4)$$

ここで $C_{\text{D}}$ はガス抵抗係数、 $\rho_{\text{gas}}$ はガス密度、 $\Delta \mathbf{v}$ は微惑星とガスの相対速度、 $m_{\text{p}}$ と $r_{\text{p}}$ は微惑星の質量と半径である。本研究で扱う微惑星の質量範囲では $C_{\text{D}} \approx 1$ となる[2]。ガス密度 $\rho_{\text{gas}}$ は

$$\rho_{\text{gas}} = 1.4 \times 10^{-9} f_{\text{gas}} \left(\frac{r}{1 \text{ AU}}\right)^\alpha \text{ g cm}^{-3} \quad (5)$$

で与えられ、 $\alpha = -11/4$ である。ガスの円運動速度は $v_{\text{gas}} = v_{\text{K}}(1 - |\eta|)$ で与えられ[2]、ここで $v_{\text{K}}$ はケプラー速度、 $\eta$ はガス円盤の圧力勾配を特徴づける無次元量である。

本研究における微惑星初期質量は $4.9 \times 10^{-4} M_{\oplus}$ であり、微惑星の内部密度を $\rho_{\text{p}} = 2 \text{ g cm}^{-3}$ と仮定する

と、対応する微惑星半径は約700 kmとなる。これは現実的な微惑星サイズ[9, 23, 38]と比べて1-2桁大きく、微惑星間の重力相互作用による加熱が過大となる一方で、ガス抵抗による冷却は過小となる。この人工的な効果を補償するため、ガス密度の増強パラメータ $\mathcal{F}$ を導入した修正ガス抵抗を用いる[22]:

$$\mathbf{F}_{\text{drag}} = -\frac{1}{2m} C_{\text{D}} \pi r_{\text{p}}^2 \mathcal{F} f_{\text{MMSN}} \rho_{\text{dust}} |\Delta \mathbf{v}| \Delta \mathbf{v}. \quad (6)$$

ここで $\rho_{\text{dust}}$ は固体密度、 $f_{\text{MMSN}}$ は最小質量円盤モデルにおけるガス-ダスト比であり、 $\rho_{\text{dust}} = \rho_{\text{gas}}/f_{\text{g/d}} = 4\rho_{\text{gas}}/f_{\text{MMSN}}$ と表される( $f_{\text{g/d}}$ はガス-ダスト比である)。 $\mathcal{F}$ の値は最小質量円盤モデルの50-1000倍に相当する範囲で変化させた( $\mathcal{F} = 12.5-250$ )。この範囲は実効的な微惑星半径として数km-100 km程度に対応する。

また、微惑星の暴走成長によって形成される原始惑星は円盤ガスと重力的に相互作用することで密度波を励起し、軌道長半径・離心率・軌道傾斜角が減衰する[47, 50]。この軌道長半径の減衰はType-I惑星移動と呼ばれる。本研究では[17]のType-I惑星移動モデルを採用する:

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\frac{v_{\text{K}}}{2\tau_a} \mathbf{e}_\theta - \frac{v_r}{\tau_e} \mathbf{e}_r - \frac{v_\theta - v_{\text{K}}}{\tau_e} \mathbf{e}_\theta - \frac{v_z}{\tau_i} \mathbf{e}_z. \quad (7)$$

ここで $\tau_a$ 、 $\tau_e$ 、 $\tau_i$ はそれぞれ軌道長半径、離心率、軌道傾斜角の減衰タイムスケールであり、 $\mathbf{e}_r$ 、 $\mathbf{e}_\theta$ 、 $\mathbf{e}_z$ は動径・方位角・鉛直方向の単位ベクトルである。各タイムスケールの詳細な式については[21]を参照されたい。

#### 4.3 数値手法

本研究では、スーパーコンピュータ「富岳」向けに最適化されている大規模並列惑星形成*N*体シミュレーションコードGPLUM[18]を使用した。GPLUMは、大規模並列粒子法シミュレーションのための汎用高性能ライブラリFDPS[19, 39]を用いて実装されており、領域分割・粒子の再配分・データ交換などの並列化処理をFDPSが担うことで、高い並列スケラビリティを実現している。

GPLUMは計算手法にParticle-Particle Particle-Tree (P<sup>3</sup>T) 法[44]を採用している。P<sup>3</sup>T 法はハミルトニアン分割に基づくハイブリッド積分法であり、粒子間の重力相互作用をカットオフ半径によってハード

パートとソフトパートに分割する。ハードパート(近距離相互作用)の積分には4次エルミート法[32]と独立時間刻み[1, 36]を、ソフトパート(遠距離相互作用)にはFDPSが提供するBarnes-Hut ツリー法[6]を用いている。

さらに、GPLUMはカットオフ半径を粒子対ごとに設定する独立カットオフ法[18]を用いている。従来のP<sup>3</sup>T法の実装(例: PENTACLE[20])では最大質量粒子のヒル半径に基づく共通カットオフが使用されていたが、この方法では多くの粒子対でカットオフ半径が過大となり、ハミルトニアン分割の効率が低下する。独立カットオフ法はこの問題を解決し、粒子数が10<sup>5</sup>を超える大規模な微惑星円盤においても、微惑星間の重力相互作用を効率的に計算することを可能にする。

本研究では、ガス抵抗(式6)とType-I惑星移動(式7)をP<sup>3</sup>T法の積分ステップに以下のように組み込んだ:

$$G^{\Delta t/2} \mathcal{K}^{\Delta t/2} \mathcal{D}^{\Delta t} \mathcal{K}^{\Delta t/2} G^{\Delta t/2}. \quad (8)$$

ここで $\Delta t$ は時間刻み、 $\mathcal{D}$ はハードパートの時間積分演算子、 $\mathcal{K}$ はソフトパートによる速度キック演算子、 $G$ はガス抵抗およびType-I惑星移動による速度キック演算子である。 $G$ は $\mathcal{D}$ の前後に半ステップずつ適用される。また、天体同士の衝突は完全合体を仮定し、破壊の効果は無視している。

#### 4.4 初期条件

本研究では、式(1)に基づく軸対称な面密度分布に従い、2–12 auの範囲に237,520個の微惑星(初期質量 $m_p = 4.9 \times 10^{-4} M_{\oplus}$ )を配置した。ガス抵抗の増強パラメータは $\mathcal{F} = 200$ とし、これは実効的な微惑星半径約3.5 kmに相当する。微惑星の初期離心率・軌道傾斜角はガウス分布 $\langle e^2 \rangle^{1/2} = 2 \langle i^2 \rangle^{1/2} = 2R_{\text{Hill}}/a$ に従うものとした[14]。

時間刻みについては、Barnes-Hutツリー法によるソフトパートの計算に固定時間刻み $\Delta t = 2^{-4} \text{yr}/2\pi \approx 10^{-2} \text{yr}$ を用い、4次エルミート法によるハードパートには独立時間刻みを採用し、最小時間刻みを $\Delta t_{\text{min}} = 2^{-30} \text{yr}/2\pi \approx 1.5 \times 10^{-10} \text{yr}$ とした。すべての微惑星にガス抵抗と微惑星間重力相互作用を適用し、質量が $10^{-2} M_{\oplus}$ を超えた天体には

Type-I惑星移動も適用する。シミュレーション時間は2.5 Myrとした。<sup>2</sup>

## 5. 微惑星円盤からの大規模N体シミュレーション

### 5.1 原始惑星の形成と軌道進化

図3および図4に、形成された原始惑星の軌道長半径と質量の時間進化をそれぞれ示す。これらの図から、次の二つの顕著な特徴が見て取れる:

- 0.5 Myr頃および1 Myr頃に、3つの原始惑星が外向きPDMによって急速に外側へ移動する。この結果は、PDMが惑星の急速な外向き移動を駆動し得ることを示している。これらの原始惑星は最終的に微惑星円盤外縁で折り返すが、円盤がさらに遠方まで広がっていれば、外向き移動を継続し得る。
- 上述した急速な外向き移動を示さない原始惑星についても、その軌道長半径は広い範囲に分散する。大半の原始惑星は初期に2–4 au付近で暴走成長を開始するにもかかわらず、2.5 Myr時点では最大で約12 auまでその軌道が拡散する。

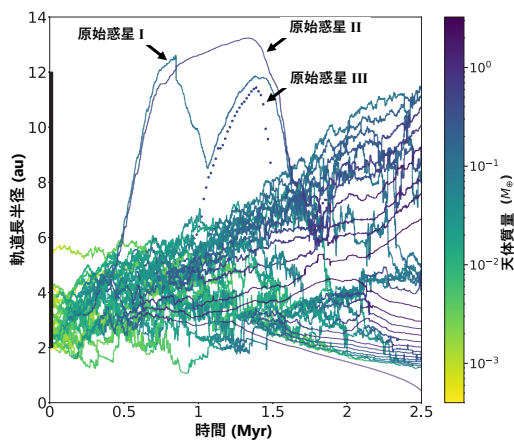


図3: 2.5 Myr時点の質量上位30天体の軌道長半径の時間進化(約1.87 Myrに他天体と衝突した天体を点線で示す)。各線の色は天体質量を表す。左側の黒ハッチ領域は初期の微惑星円盤サイズを表している。Jinno et al. [22] を元に改変して掲載。

<sup>2</sup>Jinno et al. [22] では、ガス抵抗の増強パラメータ $\mathcal{F}$ や微惑星円盤の外縁半径、質量分解能を変化させたシミュレーションも実施している。詳細は同論文を参照されたい。

以下、これらの特徴について詳しく議論する。

図3から、3つの原始惑星が急速な外向き移動を経験することが分かる。本研究で考慮しているガス抵抗およびType-I惑星移動はいずれも惑星を動径方向内向きに移動させる効果をもつため、これらの原始惑星が示す単調な外向き移動はPDMによるものと解釈できる。図中の2つの原始惑星(以下、原始惑星I, II)は0.5 Myr頃に誕生領域(2 - 4 au)から離脱して外向き移動を開始し、それぞれ0.73 Myrおよび0.83 Myrまでに円盤外縁(12 au)に到達する。円盤外縁を超えると、重力散乱に寄与する微惑星の供給が途絶えるため、原始惑星の移動速度は低下する。0.85 Myr時点で、原始惑星Iは内向きPDMおよびType-I惑星移動の効果により原始惑星IIと軌道交差を起こし、移動方向が内向きに反転する。その後、点線で示す別の原始惑星(原始惑星III)との遭遇によって移動方向が再度反転し、原始惑星Iは1.35 Myrには11.8 auまで移動する。続いて、原始惑星I, II, IIIはいずれも内向きPDMにより内向き移動を開始するが、ほどなくして円盤内側から外向きに移動してきた原始惑星群と遭遇し、移動方向は再び反転する。2.5 Myr時点で、原始惑星IおよびIIの軌道長半径はそれぞれ11 au, 9.2 auに達する。一方、原始惑星IIIは1.87 Myr頃に軌道長半径7.4 auで別の原始惑星と衝突する。

図4aは原始惑星の軌道長半径の時間進化を示している。各線に付した帯の幅は、原始惑星間の軌道反発の有効範囲 $\pm 5R_{\text{Hill}}$ [26]に対応する。この図から、初期に2 - 4 auで成長を開始した原始惑星が、2.5 Myrまでに1 - 12 auのより広い動径範囲へ拡散していくことが読み取れる。また、最大質量および第2位の原始惑星の質量はそれぞれ $3M_{\oplus}$ および $2M_{\oplus}$ に達する(図4b)。これは、ガス惑星・氷惑星コアへ成長し得る原始惑星に相当する質量である。この最大質量および第2位の原始惑星が2.1 Myr頃に軌道反発を起こし、これを契機として複数の原始惑星にPDMと軌道反発の複合効果が働く。具体的には、最大質量原始惑星より外側の原始惑星群は外向きに、第2位の原始惑星より内側の原始惑星群は内向きに押し出される。その結果、原始惑星の動径方向分布にギャップ構造(4 - 6 au)が形成される。

## 5.2 惑星形成過程の全体像

図5にシミュレーションの代表的な時刻における系の状態を示す。シミュレーション初期( $t = 0$  yr, パネルa)には、微惑星円盤は滑らかに分布している。円盤内では暴走成長により原始惑星が形成され、その一部は暴走成長の初期段階からPDMによって動径方向へ移動する(パネルb - f)。 $t = 2$  Myr(パネルg)時点で、5 au付近に位置する2つの地球質量サイズの原始惑星は、軌道反発とPDMの複合効果によって、それぞれ内向きおよび外向きの移動を開始する。その結果、両者の軌道の内側および外側に位置する隣接原始惑星は押し出され、原始惑星の動径方向分布に内外二極化構造が形成される。

図3から、すべての原始惑星は初期に2 - 6 auの範囲で暴走成長を開始し、その後PDM・軌道反発・Type-I惑星移動の複合効果によって円盤内を急速に動径方向へ拡散していくことがわかる。このような急速な拡散は、原始惑星が局所的な微惑星供給領域内の微惑星の大部分を集積した後、孤立質量で成長が停滞するという古典的理論[29]の前提と整合しない新たな惑星形成の描像を示唆する。すなわち、原始惑星は孤立質量で停滞せず、円盤内を移動しながら成長を継続する。

図4aから、シミュレーション終了時に6つの原始惑星が外向きPDMと軌道反発の複合効果により外向き移動を継続していることが読み取れる。図4bに示すように、外向きに移動する原始惑星の質量は、最大で $2M_{\oplus}$ を超え、最小でも約 $0.2M_{\oplus}$ に達する。したがって、これらの原始惑星はいずれも、氷惑星の岩石・氷コア形成に寄与し得るだけの質量を有していると考えられる。

以上の結果は、最小質量円盤モデルに基づく古典的な円盤の枠組みにおいても、標準的な惑星形成理論が想定するその場での惑星形成・成長が必ずしも成り立たないことを示唆している。むしろ、原始惑星はPDMとType-I惑星移動により円盤内を大きく動径方向に移動しながら成長し得る。したがって、惑星形成は惑星軌道近傍の局所過程としてではなく、原始惑星系円盤スケールの物質輸送と結び付いた動的過程として捉えることが重要となる。

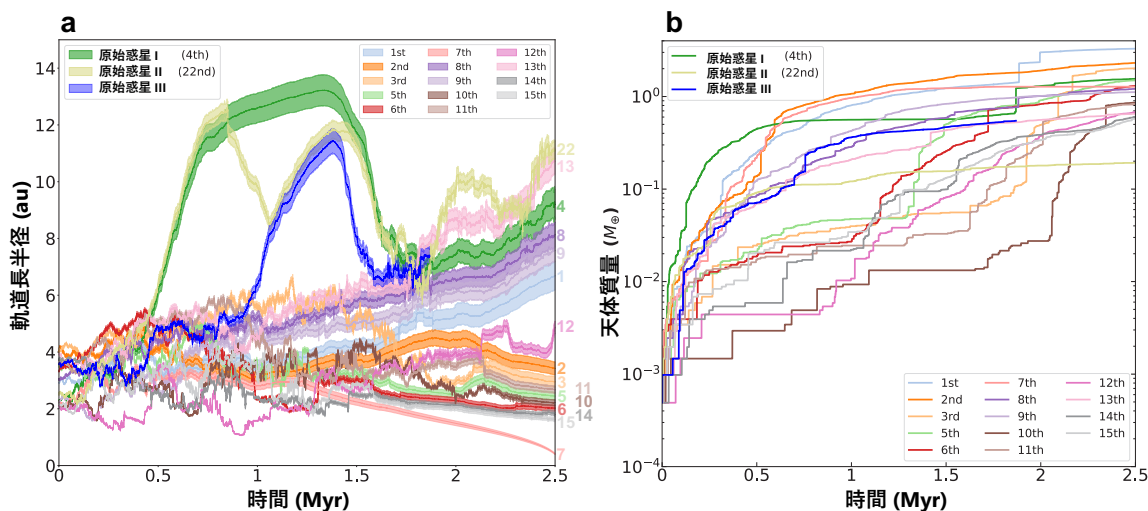


図4: 2.5 Myr時点での質量上位15天体の軌道長半径と質量の時間進化(原始惑星I(緑線), II(黄線), および約1.87 Myrに他天体と衝突した原始惑星III(青線)を含む)。(a)各線の帯幅は $a \pm 5R_{\text{III}}$ で計算した軌道反発の有効範囲を表す, パネル右側の数字は質量に基づく順位を示す。(b)各線の色はパネル(a)に示した順位に対応する, Jinno et al. [22]を元に改変して掲載。

## 6. まとめと今後の展望

本稿では, PDMによる惑星移動メカニズムとその先行研究を概説するとともに, 我々がスーパーコンピュータ「富岳」を用いて行った微惑星円盤からの大規模な惑星形成 $N$ 体シミュレーションの結果を紹介した。本研究の結果は, 原始惑星が形成領域近傍で「その場」成長とする古典的描像(図1a)に対し, 原始惑星がPDMおよびType-I惑星移動によって円盤内を大きく移動しながら成長する動的な形成シナリオ(図1b)を支持するものである。この結果は, 標準的な惑星のその場形成シナリオに再考を促すとともに, 移動と成長が並行して進む動的な形成過程を惑星形成の主要要素として考慮すべきであることを示唆する。

本研究では, 多くの先行研究[21, 29, 37]で広く用いられてきた最小質量円盤モデルに基づく滑らかな微惑星円盤を採用した。一方, 近年の原始惑星系円盤の観測から, ダスト面密度の動径方向分布は $\Sigma \propto r^{-1}$ あるいはそれより緩やかなべき乗則に従う可能性が示唆されている[4]。このような円盤では, 最小質量円盤に比べて固体物質が外側領域まで広

く分布し得るため, PDMによる外向き移動が効率的に駆動される領域も, 本研究が扱った範囲より外側へ拡張されると期待される。その結果, PDMによる外向き移動が最も効果的に駆動される領域は, 本シミュレーションがカバーした範囲よりもさらに外側に拡張されると期待される。実際, Kirsh et al.[24]は, 面密度プロファイルのべき指数が緩やかになるほど外向きPDMの発生頻度が増加することを示している。したがって, 観測に整合的な緩い面密度分布をもつ円盤では, 固体物質の外側輸送がより効率化され, 本研究で得られた以上にダイナミックな惑星移動が生じる可能性がある。また, ダスト面密度の増減はガス抵抗やType-I惑星移動に対するPDMの効果の相対的な強さにも影響を与える。したがって, この面密度依存性がPDMの定量的な振る舞いにどの程度影響するかについても今後の検討課題である。

さらに, ダスト連続波放射観測により, 原始惑星系円盤にはリング・ギャップ構造が高頻度で存在することが明らかになっている[3, 5]。これは, 固体物質分布が必ずしも滑らかではなく, 動径方向に強く構造化され得ることを示している。この場合, PDMは

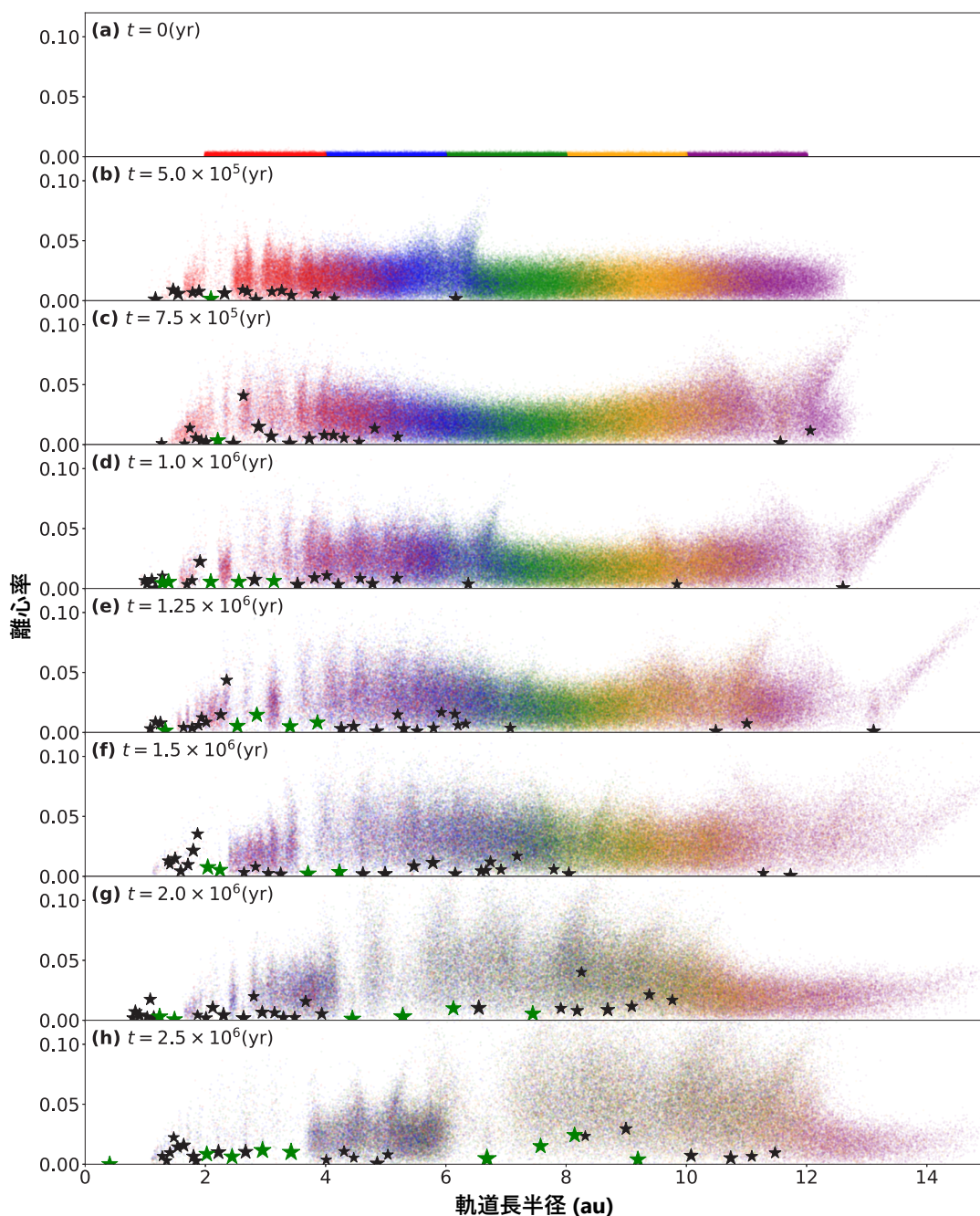


図5: 惑星形成過程のスナップショット。  $0.1 M_{\oplus} \leq M < 1 M_{\oplus}$  および  $M \geq 1 M_{\oplus}$  の天体をそれぞれ黒および緑の星印で示し、記号の大きさは天体サイズ  $M^{1/3}$  に比例させている。微惑星の色は初期の軌道長半径の範囲を表す(赤: 2-4 au, 青: 4-6 au, 緑: 6-8 au, 黄: 8-10 au, 紫: 10-12 au)。(a) 最小質量円盤モデルの4倍に相当する面密度分布に従う初期微惑星円盤 ( $t = 0$ )。 (b)  $t = 0.5$  Myrまでに、1つの原始惑星が約7 auまで外向きに移動する。(c)  $t = 0.75$  Myrまでに、2つの原始惑星が円盤外縁( $\sim 12$  au)に到達する。(d)  $t = 1$  Myrまでに、外縁へ到達した2つの原始惑星の一方は内向きに転じて10 au付近に達し、これと並行して内側円盤から新たな原始惑星が外向き移動を開始する。(e)  $t = 1.25$  Myrまでに、内向きに移動していた原始惑星が外向きに移動してきた原始惑星と遭遇し、両者は外向きに移動する。(f)  $t = 1.5$  Myrまでに、外向きに移動していた原始惑星はすべて内向きに転じる。(g)  $t = 2$  Myrまでに、内向きへ転じた原始惑星群が外向きに移動してきた原始惑星群と遭遇する。(h)  $t = 2.5$  Myrまでに、再び外向き移動が開始される。Jinno et al. [22]を元に改変して掲載。

リング内で原始惑星を拡散させるとともに、隣接リング間の物質輸送を促進し得る一方、リング内でのトラッピングが物質の大規模な再分配を抑制する可能性がある。したがって、正味の物質再分配は、PDMによる拡散とリング構造に伴うトラッピングの競合によって決まると考えられる。

加えて、近年の磁気流体力学シミュレーションに基づく円盤進化モデルから、磁気駆動型円盤風と粘性拡散の組み合わせにより、ガス面密度プロファイルが時間発展し、場合によっては円盤内側領域で面密度が外向きに増加する領域(正の動径勾配)が生じ得ることが示されている[46]。このような円盤では、内側領域のガス密度が最小質量円盤に比べて急激に低下し得るため、Type-I惑星移動の効率やガス抵抗の強さも同時に変化する[40–42]。したがって、今後は、近年の観測結果や円盤進化モデルと整合的な構造をもつ円盤へシミュレーションを拡張し、惑星移動が惑星形成過程に与える影響をさらに調べる必要がある。

円盤モデルに加えて、微惑星の衝突破壊も重要な課題である。本研究では、すべての衝突が完全合体となるモデルを採用しているため、微惑星は衝突合体によって効率よく成長する。一方、破壊過程を含めると、原始惑星の内外に微小破片が継続的に生成・供給される。これらの微小破片はガス抵抗の作用を受けやすく、速度分散が低く保たれやすい。その結果、破壊によって原始惑星の内外に散乱相手となる固体物質が蓄えられ、PDMを促進し得る。ただし、破壊を自己無撞着に組み込んだ $N$ 体シミュレーションは計算コストが非常に高く、今後の課題である。

また本研究では行っていないが、円盤ガス散逸後に相当するガスのない環境については、Type-I惑星移動やガス抵抗を除いた比較計算も有用である。本研究で用いた円盤モデルでは、Type-I惑星移動は一般に惑星に内向きのトルクを与えるため、これを除いた場合には外向きへ移動する惑星の割合が増加すると考えられる。実際、単一の原始惑星のPDMによる移動を調べた我々の先行研究[21]では、Type-I惑星移動を考慮しない場合の方が、考慮した場合に比べて、より多くの惑星が外向きPDMの傾向を示している。

## 7 謝辞

発表賞選考に携わって頂いた学会賞選考委員の方々に深く感謝致します。さらに、原稿提出に関して折に触れてご連絡・ご案内をいただいた「遊星人」編集長の三浦均氏にも深く感謝申し上げます。また、本稿の査読者である佐々木貴教氏の丁寧な査読と有益なコメントによって本稿の内容が大きく改善しました。

本研究は、文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム(「シミュレーションとAIの融合で解明する宇宙の構造と進化」: 課題番号JPMXP1020230406)および日本学術振興会特別研究員(DC2)奨励費(25KJ1814)の支援を受けて実施しました。シミュレーションには、理化学研究所計算科学研究センター(R-CCS)のスーパーコンピュータ「富岳」(Project IDs: hp240219, hp240094, hp250056)を利用しました。さらに、本研究のテスト計算は、国立天文台(NAOJ) CfCAのCrayXC50およびXD2000システムを用いて実施しました。

## References

- [1] Aarseth, S. J., 1963, MNRAS 126, 223.
- [2] Adachi, I. et al., 1976, Progress of Theoretical Physics 56, 1756.
- [3] ALMA Partnership et al., 2015, ApJL 808, L3.
- [4] Andrews, S. M. et al., 2009, ApJ 700, 1502.
- [5] Andrews, S. M. et al., 2018, ApJL 869, L41.
- [6] Barnes, J. and Hut, P., 1986, Nature 324, 446.
- [7] Capobianco, C. C. et al., 2011, Icarus 211, 819.
- [8] Duncan, M. J. et al., 1998, AJ 116, 2067.
- [9] Goldreich, P. and Ward, W. R., 1973, ApJ 183, 1051.
- [10] Greenberg, R. et al., 1978, Icarus 35, 1.
- [11] Hahn, J. M. and Malhotra, R., 1999, AJ 117, 3041.
- [12] Hayashi, C., 1981, Progress of Theoretical Physics Supplement 70, 35.
- [13] Hayashi, C. et al., 1985, In Protostars and Planets II, 1100.
- [14] Ida, S. and Makino, J., 1992, Icarus 96, 107.
- [15] Ida, S. and Makino, J., 1993, Icarus 106, 210.

- [16] Ida, S. et al., 2000, ApJ 534, 428.
- [17] Ida, S. et al., 2020, MNRAS 494, 5666.
- [18] Ishigaki, Y. et al., 2021, PASJ 73, 660.
- [19] Iwasawa, M. et al., 2016, PASJ 68, 54.
- [20] Iwasawa, M. et al., 2017, PASJ 69, 81.
- [21] Jinno, T. et al., 2024, PASJ 76, 1309.
- [22] Jinno, T. et al., 2026, PASJ 78, 764.
- [23] Johansen, A. et al., 2015, Science Advances 1, 1500109.
- [24] Kirsh, D. R. et al., 2009, Icarus 199, 197.
- [25] Kirsh, D. R., 2007, Master's thesis, Queens University, Canada.
- [26] Kokubo, E. and Ida, S., 1995, Icarus 114, 247.
- [27] Kokubo, E. and Ida, S., 1996, Icarus 123, 180.
- [28] Kokubo, E. and Ida, S., 1998, Icarus 131, 171.
- [29] Kokubo, E. and Ida, S., 2002, ApJ 581, 666.
- [30] Kominami, J. D. et al., 2016, ApJ 819, 30.
- [31] Levison, H. F. and Stewart, G. R., 2001, Icarus 153, 224.
- [32] Makino, J., 1991, ApJ 369, 200.
- [33] Malhotra, R., 1993, Nature 365, 819.
- [34] Malhotra, R., 1995, AJ 110, 420.
- [35] Mayor, M. and Queloz, D., 1995, Nature 378, 355.
- [36] McMillan, S. L. W., 1986, In The Use of Supercomputers in Stellar Dynamics, 156.
- [37] Minton, D. A. and Levison, H. F., 2014, Icarus 232, 118.
- [38] Morbidelli, A. et al., 2009, Icarus 204, 558.
- [39] Namekata, D. et al., 2018, PASJ 70, 70.
- [40] Ogihara, M. et al., 2017, A&A 608, A74.
- [41] Ogihara, M. et al., 2018, A&A 612, L5.
- [42] Ogihara, M. et al., 2018, A&A 615, A63.
- [43] Oka, A. et al., 2011, ApJ 738, 141.
- [44] Oshino, S. et al., 2011, PASJ 63, 881.
- [45] Safronov, V. S., 1972, Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem.
- [46] Suzuki, T. K. et al., 2016, A&A 596, A74.
- [47] Tanaka, H. et al., 2002, ApJ 565, 1257.
- [48] Thommes, E. W. et al., 2002, AJ 123, 2862.
- [49] Tsiganis, K. et al., 2005, Nature 435, 459.
- [50] Ward, W. R., 1986, Icarus 67, 164.
- [51] Weidenschilling, S. J., 1977, MNRAS 180, 57.
- [52] Wetherill, G. W. and Stewart, G. R., 1989, Icarus 77, 330.

---

## 著者紹介

---

### 神野 天里



神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻博士課程後期課程3年  
 専門：シミュレーション天文学 (惑星形成)  
 日本惑星科学会, 日本天文学会,  
 日本地球惑星科学連合

# 「2025年度最優秀発表賞受賞論文」 へびつかい座分子雲の原始惑星系円盤の超解像度サーベイ:原始惑星系円盤の進化と詳細構造の形成時期に関する考察

所司 歩夢<sup>1</sup>

2026年2月11日受領, 査読を経て2026年3月15日に受理

(要旨) 原始惑星系円盤の詳細構造の形成時期を決定することは、惑星形成の開始時期および環境を議論する上で極めて重要であるが、これまで明確な時期は明らかとなっていなかった。我々は、へびつかい座分子雲に位置する78個の原始惑星系円盤を観測した電波干渉計ALMAのアーカイブデータに対し、スパースモデリングを応用した超解像度画像解析法を適用した。得られた画像から15天体で新たな構造を特定するだけでなく、円盤半径分布から進化過程を予測することに成功した。さらに、統計的な解析によって星が誕生して数十万年経過した段階で詳細構造が形成されることを明らかにした。本稿では、手法の概要を示すとともに、得られた研究成果について紹介する。

## 1. 本研究の背景

### 1.1 星形成過程の分類

我々の住む太陽系を含む惑星系はいつ、どのようにして生まれたのだろうか。この根本的な問いに答えることは、生命の起源を理解するうえでも重要な課題の一つである。惑星系の形成は、中心となる星の誕生する過程と密接に関係している。

図1に示すように、星は星間空間を漂う低温の分子ガスと固体微粒子であるダストが重力収縮することによって形成される。誕生した若い星(原始星)の周囲には、分子ガスとダストからなる原始惑星系円盤(以下、円盤)が付随している。さらに、円盤の外側にはエンベロープと呼ばれる高密度分子ガスが存在する。エンベロープの一部は円盤を介して原始星へと降着し、残りは原始星から駆動するアウトフローによって放出される。時間の経過とともにエンベロープからの降着が減少し、その後、円盤も最終的に消散する。

従来の古典的な惑星形成モデルでは、円盤への質量降着がほぼ終息したClass II段階(年齢:星形成後

から数百万年程度; 分類については後の1.2節を参照)において、惑星形成が開始すると考えられている。この段階で円盤内のダスト粒子が衝突や凝集を繰り返すことで成長し、ペブルや微惑星を経て原始惑星のコアが形成される。さらに、それらのコアが円盤内に残存するガスを重力的に捕獲することで、巨大ガス惑星を形成する。したがって、惑星形成に関わる環境を理解するためには、その現場となる原始惑星系円盤の物理的性質を詳細に把握しなければならない。

### 1.2 進化段階の分類

原始惑星系円盤の物理的性質を議論するには、対象の中心星がどの進化段階にあるかを特定して比較する必要がある。進化段階の指標として、赤外線からミリ波にかけてのスペクトルエネルギー分布(SED; Spectral Energy Distribution)が広く用いられる。SEDは中心星と星周物質(エンベロープや円盤)からの放射を含み、星周物質の性質(質量、温度、幾何構造など)を反映して、そのスペクトルの形状が変化する(図1参照)。例えば、若い星形成段階では、高密度のエンベロープにより中心星からの光が遮蔽され、低温ダストの熱放射が卓越するため、SEDは長波長側

<sup>1</sup>九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻  
shoshi.ayumu.660@s.kyushu-u.ac.jp

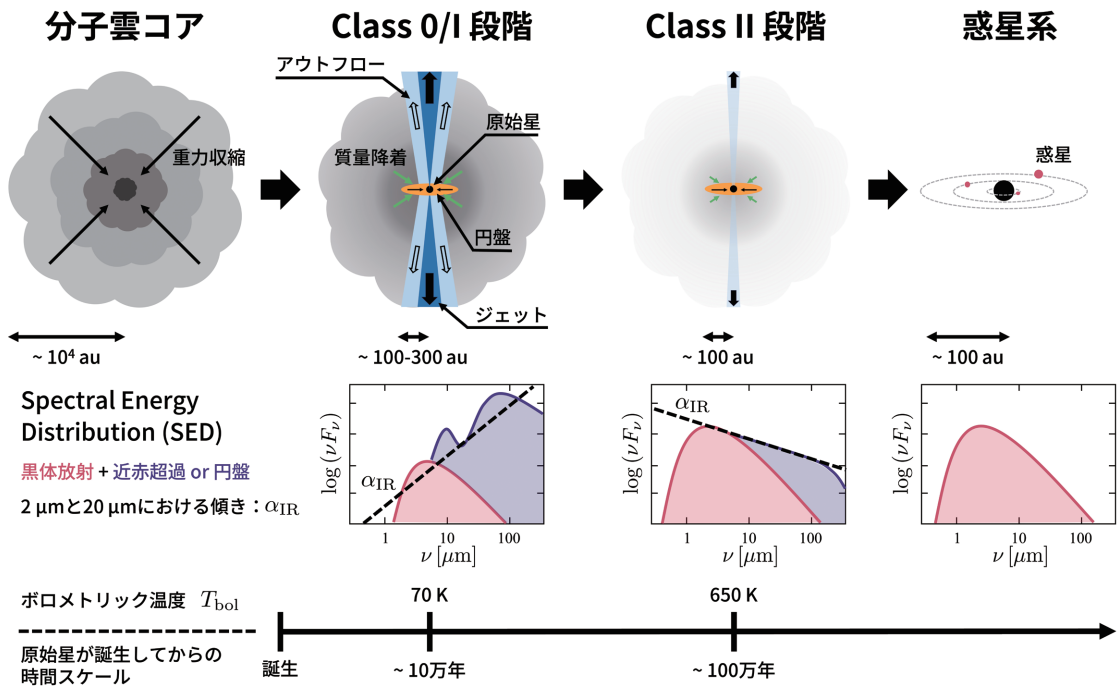


図1: 原始星の形成過程およびボロメトリック温度  $T_{bol}$  またはスペクトルの傾き  $\alpha_{IR}$  による進化過程の分類の概念図. [1] を元に作成.

(遠赤外-サブミリ波) に偏る<sup>1</sup>. 一方, 進化に伴ってエンベロープが散逸すると中心星からの光がより直接に観測され, SEDは短波長側(近赤外-中間赤外)へシフトする.

この違いを定量化する指標として, (1) SED全体から計算されるボロメトリック温度  $T_{bol}$  と, (2) 赤外領域のスペクトルの傾き  $\alpha_{IR}$  が用いられる. 以下では, それぞれの定義と分類方法を述べる.

### (1) ボロメトリック温度

ボロメトリック温度  $T_{bol}$  は, 観測されたSED全体を単一の黒体放射に置き換えたときの見かけの温度として定義される. 観測波長  $\nu$  における放射強度  $F_\nu$  を用いると,

$$T_{bol} = 1.25 \times 10^{-11} \frac{\int_0^\infty \nu F_\nu d\nu}{\int_0^\infty F_\nu d\nu} \text{ [K]} \quad (1)$$

で与えられる. これはSEDの重心(平均波長)を表し,

<sup>1</sup>熱平衡にあるダストの放射はほぼ黒体放射で近似でき, 温度  $T$  を用いると, スペクトルのピーク波長はウィーンの変位則  $\lambda \approx 2900 \times (T/1 \text{ K})^{-1} \mu\text{m}$  で与えられる.

放射エネルギーがどの波長帯に集中しているのかの指標である. 原始星が進化するにつれて, 周囲のエンベロープが晴れ上がっていくため, 短波長側の放射が観測されやすくなる. そのため,  $T_{bol}$  が低いほど長波長側に偏ったSED(より若い段階)を, 高いほど短波長側に広がった分布(より進化した段階)を示す.

$T_{bol}$  による進化段階の区分は次の通りである.

- Class 0:  $T_{bol} < 70 \text{ K}$
- Class I:  $70 \text{ K} \leq T_{bol} \leq 650 \text{ K}$
- Class II:  $650 \text{ K} < T_{bol} \leq 2800 \text{ K}$

この分類ではスペクトルの形状は全く考慮されない一方で, 幅広い進化段階のYSOを単一の指標で取り扱える利点がある. また,  $T_{bol}$  に基づく分類法は, 数値シミュレーションとの比較により整合性が確認されており, Class IとClass IIはそれぞれ原始星誕生後から約10万年, 約100万年の時期に対応するとされる[2].

### (2) スペクトルの傾き

ボロメトリック温度  $T_{bol}$  に加えて, SEDの赤外領域に

におけるスペクトルの傾きも進化段階を簡易的に分類する指標として広く用いられる。スペクトルの傾き $\alpha_{\text{IR}}$ は、

$$\alpha_{\text{IR}} = \frac{d \log(\nu F_{\nu})}{d \log(\nu)} \approx \frac{\log(\nu_1 F_{\nu_1} / \nu_2 F_{\nu_2})}{\log(\nu_1 / \nu_2)} \quad (2)$$

で定義され、異なる2波長 $\nu_1$ と $\nu_2$ における放射強度の変化率を表す。実観測では離散的な測光点しか得られないため、近赤外(2  $\mu\text{m}$ )と中間赤外(24  $\mu\text{m}$ )の強度から近似的に求めることが多い。

一般に、若い天体ほどダストエンベロープが中心星・円盤からの放射を吸収して再放射するため長波長成分が強く、SEDは長波長側に立ち上がり $\alpha_{\text{IR}}$ は大きくなる。進化が進むとエンベロープが散逸して長波長成分が弱まり、 $\alpha_{\text{IR}}$ は小さくなる。この性質に基づき、 $\alpha_{\text{IR}}$ による区分は次の通りである。

- Class 0/I:  $0.3 \leq \alpha_{\text{IR}}$
- Class Flat-spectrum:  $-0.3 \leq \alpha_{\text{IR}} < 0.3$
- Class II:  $-1.6 \leq \alpha_{\text{IR}} < -0.3$

この方法では、 $T_{\text{bol}}$ に基づく分類には現れないClass IとClass IIの中間段階としてClass Flat-spectrum(以降、Class FS)が定義される[2]。一方で、スペクトルの傾きは2つの波長における放射強度の情報しか含まない。そのため、様々な波長のデータがある天体については、それらの情報を含む $T_{\text{bol}}$ と併用して整合性を確認することが望ましい。

### 1.3 原始惑星系円盤の詳細構造

アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計(以降、ALMA)の初期運用開始(2013年)以降、原始惑星系円盤の構造が高空間分解能で詳細に観測されるようになった。特に、Class FS原始星HL Tau周囲の円盤の最長基線観測は、円盤内のリング・ギャップ構造を初めて明確に示し、大きな注目を集めた[3]。

その後、円盤に見られる特徴的な構造(リング、ギャップ、スパイラルなど; 以降、詳細構造)の統計的性質を調べるため、2つのALMA国際大規模プロジェクトが実施された。DSHARP<sup>2</sup>(Cycle 4;2016-2017年)では、20天体の明るいClass II円盤を~5 au

の分解能で観測し、詳細構造が普遍的に存在することを示した[4]。一方、eDisk<sup>3</sup> (Cycle 7;2019-2021年)では、19天体のClass 0/I円盤を対象とした観測により、Class II段階に比べて詳細構造の出現頻度が低いことが報告されている[5]。これらは、詳細構造が原始星誕生後およそ10万年から100万年の間(Class IとClass IIの中間段階)に形成される可能性を示唆する。

詳細構造の形成機構としては複数のシナリオが提案されており、その一つに形成途中の惑星と円盤の相互作用がある。ケプラー回転する円盤内に惑星が存在すると、惑星重力によって密度波が励起され、円盤の内側と外側へ伝播する。この密度波が円盤ガスと相互作用することで惑星には重力トルクが働き、反作用として角運動量が波に乗って運ばれ、波の減衰とともに周囲のガスへ受け渡される。角運動量交換は惑星質量が大きいほど強く、木星質量の巨大惑星では軌道内側のガスは内側へ、外側のガスは外側へ押し出される。その結果、惑星近傍のガス密度が低下し、惑星軌道に沿ったギャップ構造が形成される[6, 7]。

また、詳細構造がどの機構で形成された場合でも、リングやスパイラルは局所的な圧力極大としてダスト粒子の集積に寄与する。円盤中で成長したダスト粒子はガスとの速度差により内側にドリフトするが、ガス圧力が極大になる領域では、ダスト粒子が捕獲・集積されやすくなる。この固体成分の濃集は、ペブル成長や微惑星形成を促し、惑星形成を加速する可能性がある[8]。このように、原始惑星系円盤の詳細構造は惑星形成過程と密接に関係しており、構造の形成時期を明らかにすることは、惑星形成の初期条件を理解することに等しいと言える。

### 1.4 本研究の目的

惑星形成に関与している詳細構造の形成時期を特定するには、原始星誕生後およそ10-100万年に相当するClass I-Class II段階の円盤を、eDiskやDSHARPと同等の数auスケールの空間分解能で多数観測し、統計的に比較する必要がある。しかし、高分解能観測には高感度も同時に求められるため長時間の観測が必要となり、観測できる天体数は限られ

<sup>2</sup>Disk Substructures at High Angular Resolution Project

<sup>3</sup>Early Planet Formation in Embedded Disks

る。実際、eDiskやDSHARPのような大規模プロジェクトであっても、1つのプロジェクトあたりの観測天体は最大で20程度にとどまっている。さらに、新規に高分解能観測を計画した場合、データ取得から解析・論文文化までに数年を要することが多く、十分なサンプルを短期間で蓄積するのは現実的に困難である。

そこで、本研究ではALMAの公開されているデータに対して、スパースモデリングを応用した超解像度画像解析法を適用し、大規模な円盤サーベイを実施した。本手法により、従来の分解能を超えた精度で詳細構造を検出し、円盤の形態と進化段階を統一的に比較できる。得られた超解像度画像に基づき、円盤進化に伴う詳細構造の形成時期と、その形成に必要な条件を議論する。

## 2. 電波干渉計データ解析の革新

本章では、まず電波干渉計観測の原理と従来の画像復元手法であるCLEANを概説する。続いて、本研究で用いたスパースモデリングを応用した超解像度画像解析法の概要とその利点について言及する。

### 2.1 電波干渉計による観測

電波干渉計は、複数のアンテナを広範囲に配置し、各アンテナが受信した電波信号の相関(干渉)を測定することで、最大基線長<sup>4</sup>  $D_{\text{Max}}$ に相当する口径を持つ仮想的な一台の望遠鏡として機能する装置である。この観測における分解能 $\theta$ は観測波長 $\lambda$ と $D_{\text{Max}}$ に依存し、 $\theta \sim \lambda/D_{\text{Max}}$ で表される。したがって、最大基線長 $D_{\text{Max}}$ を長くするほど、単一望遠鏡では実現が難しい高分解能の観測が可能となる。

電波干渉計で直接得られる基本的な観測量は、アンテナ対ごとに観測される複素相関量(振幅と位相)であり、これをビジビリティ $V(u, v)$ と呼ぶ。ビジビリティ $V(u, v)$ は天体の輝度分布 $I(l, m)$ とフーリエ変換の関係で結ばれており、

$$V(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(l, m) e^{-2\pi i(ul+vm)} dl dm \quad (3)$$

<sup>4</sup>基線長とは2つのアンテナ間の距離。

で表される。ここで、 $(l, m)$ は天球上の角度座標、 $(u, v)$ はアンテナ間の基線ベクトルを観測波長で正規化した座標である。

理想的には、天体の輝度分布を復元するためには、 $uv$ 平面を連続的にサンプリングしたビジビリティが必要となる。しかし、実際の観測では、アンテナ数やその配置が有限であるため、 $uv$ 平面を完全に埋められず、得られるビジビリティは離散的かつ不完全である。そのため、実観測のビジビリティから式(3)に基づく逆フーリエ変換で得られた画像は真の輝度分布そのものではなく、アンテナ配置に由来する合成ビーム(Dirtyビーム)が畳み込まれたDirty画像となる。つまり、真の輝度分布を再現するためには、合成ビームの畳み込みを解く作業(デコンボリューション)が必要となる。

### 2.2 従来の画像解析手法:CLEAN

真の輝度分布を推定する最も代表的なデコンボリューション手法がCLEANである[9]。CLEANでは、真の輝度分布を多数の点源の足し合わせとして近似できると仮定し、Dirty画像から点源成分(CLEAN成分)を逐次的に取り出すことで復元を行う。具体的には、次の手順で行う。(i) Dirty画像上で最も明るい位置を特定し、その位置と強度を持つ点源( $\delta$ 関数)をCLEAN成分として蓄積する。(ii) そのCLEAN成分に対応する合成ビームを強度に応じてスケールし、Dirty画像から差し引いて残差マップを得る。(iii) 残差マップ中の最大強度がノイズレベル程度(あるいは所定の閾値)まで下がるまで、この操作を繰り返す。最後に、蓄積したCLEAN成分に合成ビームと同じ半値全幅(FWHM)を持つガウシアン(CLEANビーム)を畳み込み、残差マップに加えることで復元画像を得る。現在では、CLEAN処理を高速フーリエ変換に対応させた手法や、広がった構造に対してCLEAN成分の広がりを調整する改良版も開発されている[10, 11]。

一方で、CLEANには、本質的な制約もある。第一に、モデル画像は点源の集合として近似する前提のため、リングやスパイラルのような滑らかでかつ複雑な輝度分布を忠実に再現するには限界がある。第二に、残差マップからピークを逐次取り出す過程で、合成ビーム由来の偽ピークと実際の天体構造の判別が必要となるため、データの解析領域や閾値などのパ

ラメータに強く依存する。その結果、第三に、同じ観測データでも処理条件の違いによって得られる画像が変化しやすく、再現性や客観性に欠ける場合がある。このように、CLEANは点状あるいは比較的単純な構造の復元には有効である一方、詳細構造を持つ原始惑星系円盤のような複雑かつ滑らかな輝度分布の解析には必ずしも最適とはいえない。

### 2.3 新たな超解像度画像解析法:

#### スパースモデリング

近年、電波干渉計データからの画像復元に、統計数理学の手法であるスパースモデリングを導入する試みが注目されている。スパースモデリングとは、「本質的な情報を含む領域は限られ、多くの成分はゼロまたはごく小さい値をとる」というスパース性を仮定し、限られたデータからの信号を抽出する最適化手法である。

この考え方は電波干渉計観測と親和性が高い。電波干渉計では $uv$ 平面のサンプリングが離散的かつ不完全となるため、観測データから真の輝度分布をそのまま再現することは難しい。加えて、多くの天体は視野全体のうち明るい領域に限られ、それ以外は背景レベルに近い小さな値にとどまるため、空間的にスパースな分布とみなせる場合が多い。その結果、スパースモデリングを画像復元に応用することで、観測ビジビリティと整合的な範囲で欠損した空間周波数成分を補完しつつ、真の輝度分布を推定することが可能になる。

本手法では、観測ビジビリティ $V$ から真の輝度分布 $I (= |I_{i,j}|)^5$ を推定する最適化問題として定式化し、観測との整合性(データ忠実度)と、物理的に適切な画像の性質(正則化)を同時に満たす解を求める。具体的には、次式で表されているように、重み付き最小二乗項に2つの正則化項である $L_1$ ノルム項、Total Squared Variation (TSV)項を組み合わせたコスト関数を最小化し、モデル画像 $I_{\text{SpM}}$ を求める。

$$I_{\text{SpM}} = \underset{I}{\operatorname{argmin}} \left( \|W(V - FI)\|_2^2 + \Lambda_l \sum_i \sum_j |I_{i,j}| + \Lambda_{tsv} \sum_i \sum_j (|I_{i+1,j} - I_{i,j}|^2 + |I_{i,j+1} - I_{i,j}|^2) \right) \quad (4)$$

ここで、 $F$  は画像 $I$  から対応する $uv$ 点のモデルビジビリティを計算するフーリエ変換(サンプリングを含む)を表し、 $W$ は各ビジビリティの測定誤差に基づく重み行列<sup>6</sup>である。

第一項は、観測ビジビリティ $V$ とモデル $FI$ のずれを重み付きで評価する項であり、観測誤差を考慮した $\chi^2$ 最小化に相当する。この項を含めて最小化することで、観測をよく再現する整合的な画像が得られる。

第二項は $L_1$ ノルム項と呼ばれ、画像のスパース性(多くの画素がゼロまたは小さい)を促す。これにより放射のない領域に生じやすい低強度成分を抑えつつ、主要な放射構造を保持できる[12]。正則化パラメータ $\Lambda_l$ はこの効果の強さを調整し、 $\Lambda_l$ が大きいほど背景成分は抑制される一方、放射強度は小さくなる。

第三項はTSV項と呼ばれ、隣接画素間の強度差の二乗和であり、輝度分布の滑らかさを制御する。 $L_1$ ノルム項によって生じやすい人工的で急激な強度変化を抑え、連続的な分布をより自然に再現する[13, 14]。正則化パラメータ $\Lambda_{tsv}$ を大きくすると画像はより滑らかになるが、実効的な空間分解能は低下する。

生成されるモデルの過剰適合を避けるため、本研究では2つの正則化パラメータ $\Lambda_l$ と $\Lambda_{tsv}$ を広い範囲で走査し、10分割交差検証によって最適な組を決定する[13]。交差検証法では、ビジビリティをランダムに10分割し、そのうち1つを検証用、残りを学習用として画像を再構成する。このとき、学習用データから得たモデルが検証用データをどれだけ再現できるか(検証誤差)を評価し、検証用データを入れ替えて同様の評価を繰り返すことで、検証誤差が最小となるパラメータの組を採用する。

スパースモデリングによる画像復元では、従来のCLEANとは異なり画像生成の段階でビームの畳み込みを行わないため、得られた画像の実効的な空間分解能を別途評価する必要がある。本研究では、[15]で提案された人工点源注入法を用いた。これは、データに埋め込んだ弱い点源が、最終的な画像でどの程度の広がりを持つかを評価することで、実効的な空間分解能を推定する方法である。ただし、得られる実効的な空間分解能は、復元画像における点源応答幅を表す指標であり、CLEAN画像で用いられる合成ビームと

<sup>5</sup> $I_{i,j}$ は画素 $(i,j)$ における放射強度に対応する。

<sup>6</sup>誤差の逆数、あるいは逆分散を対角成分にもつ。

同義で取り扱えないことに注意する。

以上が、スパースモデリングを応用した画像解析法の概要および実効的空間分解能の評価手法である。CLEANがビーム平滑化を通じて不足情報を補うのに対し、本手法はレジビリティ全体との整合性を直接最適化するため、円盤内の微細構造をより高い分解能で再構成できる。本手法は、日本の研究チームによって開発された公開ソフトウェアPRIISM<sup>7</sup>に実装されており、ALMAの観測データにも容易に適用できる[16]。

PRIISMを用いた画像解析の優位性は、特定の輝度分布モデルや仮定に強く依存せず、2次元観測レジビリティと整合する2次元輝度分布を復元できる点にある。近年では、円盤の構造解析において、frank[17]等による観測レジビリティフィッティング、さらに最大エントロピー法(MEM)[18,19]など、多様な手法が用いられてきた。公開解析ツールfrankは、円盤が軸対称であることを仮定した上で、観測レジビリティを1次元化し、それに合うモデルを作成することによってダスト円盤半径や半径方向の詳細構造に制約を与えるものである。一方、MEMはPRIISMと同様に正則化に基づく画像復元法であるが、事前情報(dirty画像から得られたノイズマップなど)を用いる場合があり、その導入が復元画像にバイアスを与える可能性がある。これらの手法と比較して、PRIISMでは、仮定するモデルや事前情報を必要とせず、画像復元を行える。そのため、スパイラル構造や非対称構造、そして多重星系を含む形態を一様な基準で比較することを目的とする場合に、特に適した手法である。

### 3. 新たな解析手法を用いた円盤の超解像度サーベイ

本章では、Shoshi et al. (2025), PASJ, 77,572[20]で既に報告されている、へびつかい座分子雲の原始惑星系円盤に対するスパースモデリングを用いた画像解析の主要結果を概説する。特に、本章ではダスト円盤半径および円盤の詳細構造に関する結果を中心に取り上げる。解析手法および結果の詳細については

[20]に記載されている。

#### 3.1 へびつかい座分子雲の円盤

本研究では、原始惑星系円盤の詳細構造の形成時期を統計的に調べるため、へびつかい座分子雲に位置する円盤サンプルを解析対象とした。へびつかい座分子雲は(i) 誕生からおよそ100万年と若く、幅広い進化段階の天体が共存すること、(ii) 太陽系から約140 pcと近距離にあり、高い空間分解能で円盤構造を調べやすいこと、(iii)ALMA観測データがすでに多数蓄積されており、Class I円盤でも詳細構造が報告されていること[21, 22] という点で、詳細構造の形成と進化を議論する上で有力な領域である。

本研究では、大規模サーベイODISEA<sup>8</sup>で取得されたALMAアーカイブデータを用いた。このプロジェクトは、Spitzer宇宙望遠鏡によりへびつかい座分子雲で同定されたYSOカタログ(297天体)を母集団とし、およそ2.2  $\mu\text{m}$ から24  $\mu\text{m}$ にわたる赤外スペクトルの傾き $\alpha_{\text{IR}}$ に基づいて進化段階を分類している[23]。本稿で主に扱うサンプルは、この母集団から、2.2  $\mu\text{m}$ と24  $\mu\text{m}$ の等級差が6.75等級を超えるClass IおよびClass FS天体に加えて、2.2  $\mu\text{m}$ において10等級以上のClass II天体を含む合計147天体(Class I 28天体, Class FS 50天体, Class II 69天体)が、一様なサンプルとして定義されている[23]。また、Spitzerカタログには各波長帯で90%の検出限界が提示されており、特に中間赤外で過剰放射を示す光学的に厚い円盤集団(主にClass I/II)に対しては、カタログの不完全性による取りこぼしは限定的である[2, 23]。147天体のサンプルの中にはDSHARPプロジェクトで高空間分解能観測が行われている天体が含まれている。これらの天体の観測は1.3 mm帯で、基線長17-2468 mの配置を用いて実施され、各天体の積分時間は1分未満と短いですが、多数天体を同一条件で比較できる点が大きな利点である。本研究ではこのデータセットにスパースモデリングによる画像解析法を適用し、従来のCLEAN画像を上回る空間分解能で円盤構造の抽出を試みた。

#### 3.2 得られた超解像度画像の概要

図2および図3は、従来法CLEANとスパースモデ

<sup>7</sup>Python module for Radio Interferometry Imaging with Sparse Modeling (<https://github.com/tnakazato/priism>)

<sup>8</sup>Ophiuchus Disc Survey Employing ALMA[23]

リングを応用した新たな手法によって得られた、へびつかい座分子雲に位置する78個の原始惑星系円盤の1.3 mmダスト連続波画像をそれぞれ示している。本サンプルは70個の単一星系と8つの多重星系からなり、多重星系についてはミリ波帯でより明るい成分を主星に付随する円盤と定義し、解析対象としている。一方、本研究で解析に利用しなかった69天体は、(i) 信号対雑音比(S/N)が低くCLEAN画像上で有意な構造を検出できなかったもの(22天体)、または(ii)総放射強度が10 mJy未満でスパースモデリングにより円盤の広がりを制約するための情報が十分でないもの(42天体)が多い。そのため、本研究では単一プロジェクトの観測データを用いており、RMSノイズや最大基線長は天体間でほぼ同一であるが、取り除いたサンプルによる系統的な偏りについては注意が必要である。

CLEAN画像の空間分解能は約0.30秒角 $\times$ 0.22秒角(42 au $\times$ 31 au)である。この分解能でも、円盤半径が十分に大きい天体ではリング状構造などをある程度、空間分解できる。一方で、多くの円盤は見かけの大きさがビームサイズと同等であり、円盤の半径や構造を十分に制約できなかった。

一方、スパースモデリング画像では天体ごとに実効的な空間分解能は異なるものの(0.02秒角-0.20秒角)、CLEANに対して中央値で約3.8倍の分解能向上<sup>9</sup>が得られた。その結果、本サンプルの円盤の大部分を空間的に分解し、CLEAN画像では捉えにくかった円盤の形状や大きさをより明確にした。ただし、観測ビジビリティに基づく評価の結果、半径が10 au未満の6天体(ISO-Oph 200, ISO-Oph 137, BBRCG 58, ISO-Oph 171, 2MASS J16314457-2402129, ISO-Oph 106)では観測ビジビリティの最大基線長が半径制約に必要な空間スケールを十分にカバーしないため、半径は参考値として提示する([20]の付録2.2を参照)。また、半径15 au以下のコンパクト円盤における詳細構造判定の限界と、本研究で採用した保守的な分類方針については後続節で述べる。このように空間分解能は向上した一方で、画像復元が総放射強度を

損なっていないかも併せて検証したところ、CLEAN画像とスパースモデリング画像で得られた円盤の総放射強度の差は5-10%に収まり、本手法がフラックスを良い精度で再現することが確認された。さらに、DSHARPによる高空間分解能観測のCLEAN参照画像と比較してもリングなど主要な詳細構造は概ね再現されることから、スパースモデリングは放射強度の信頼性を保ったまま空間分解能を大幅に向上させる有効な解析手法であると言える[20]。

### 3.3 ダスト円盤半径の分布

スパースモデリングを用いた新しい超解像度画像解析法によって、78天体の円盤構造をより詳細に空間分解することに成功した。本節では、各円盤の幾何的情報(円盤面の天球面に対する傾斜角の大きさと、見かけの長軸の方向を表す方位角)を推定した上でダスト円盤半径を測定し、その分布と進化段階依存性を統計的に評価する。

まず、スパースモデリング画像に対してマルコフ連鎖モンテカルロ(MCMC)法による2次元ガウシアンフィッティングを行い、円盤の傾斜角と方位角を求めた。リング構造が明瞭な一部天体ではリングの楕円形状に対するフィッティングも行ったところ、ガウシアンフィッティングの結果と10%以内で一致することを確認した。次に、得られた幾何に基づいて画像を真円となるように投影し、成長曲線法[24]により全放射強度の95%に達する半径をダスト円盤半径として定義した。

図4上段に示すように、ダスト円盤半径は5-179 auに分布し、64%が40 au以下に集中する。中央値は27 auで、おうし座やおおかみ座など他の星形成領域で報告された値より約2倍小さい[25,26]。このようにコンパクトな円盤が多数を占める傾向は、磁気ブレーキなど磁場に起因する角運動量輸送によって円盤成長が抑制される一方で、非理想MHD効果によって円盤成長が促進されるというモデル予測と整合的である[27,28]。一方で、星形成領域における星の密度(密集環境か孤立環境か)に応じて、近接遭遇などの力学的相互作用が円盤サイズに影響している可能性もある。

図4下段は、Class I, Class FS, Class IIに分けた、円盤の大きさの累積分布関数を示す。分布は互いによく重なっており、コルモゴロフ-スミルノフ検定(KS検定)<sup>10</sup>でもすべての組み合わせで $p > 0.10$ となり、ク

<sup>9</sup>2.3節で述べたように、スパースモデリング画像における実効的な空間分解能は復元画像の点源応答幅に基づく指標であり、CLEAN画像の合成ビームと定義が異なるため、本稿では参考値として取り扱う。

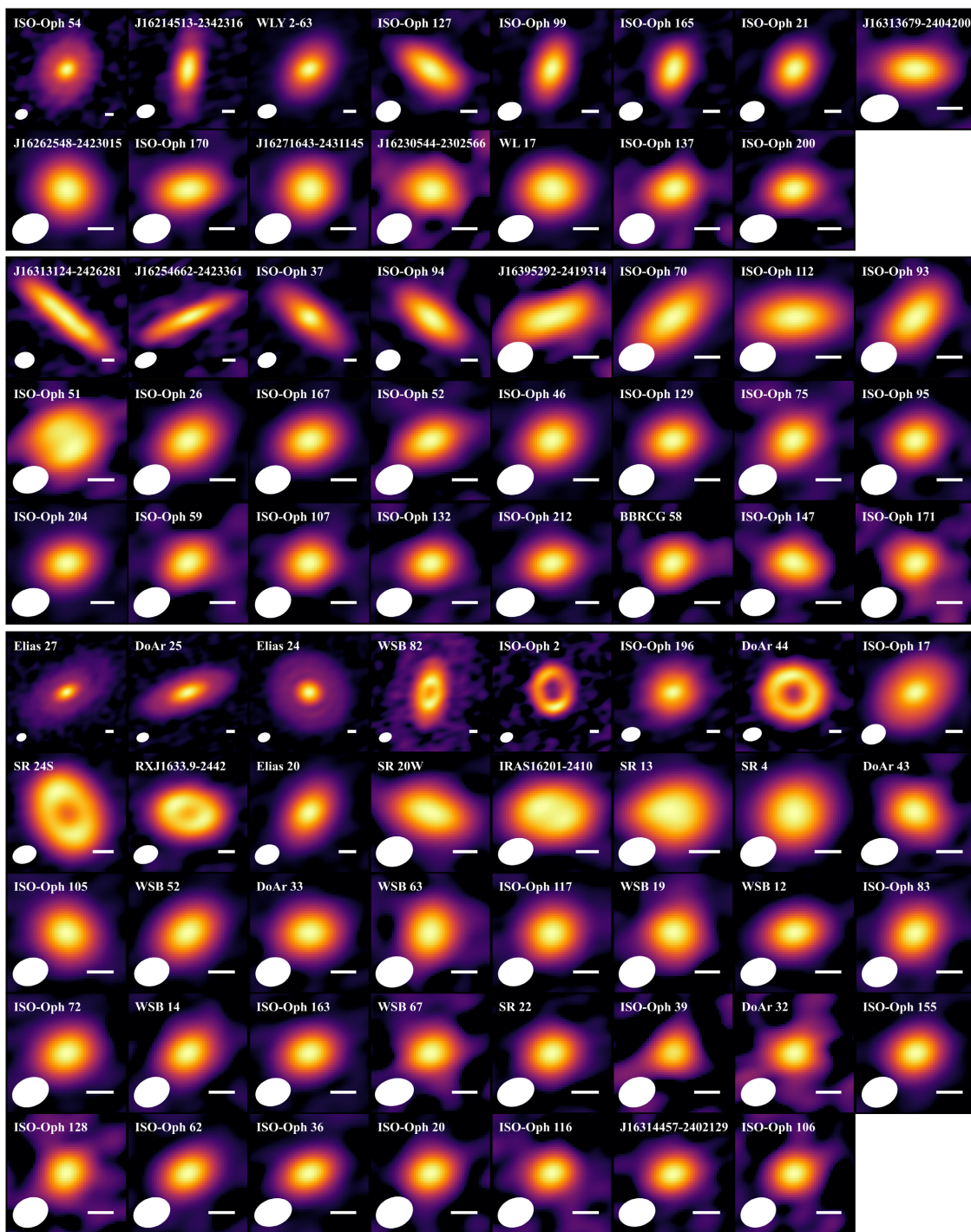


図2: 従来法CLEANで得られた、へびつかい座分子雲に位置する78個の円盤の1.3 mmダスト連続波画像ギャラリー。1, 2段目のパネルは15天体のClass I円盤, 3-5段目は24天体のClass FS円盤, 6段目以降は39天体のClass II円盤を表している。各進化段階ごとに、ダスト円盤半径が大きい天体から順に左上から右下へ並べている。各パネルの左下にはビームサイズ, 右下には30 auのスケールが示されている。

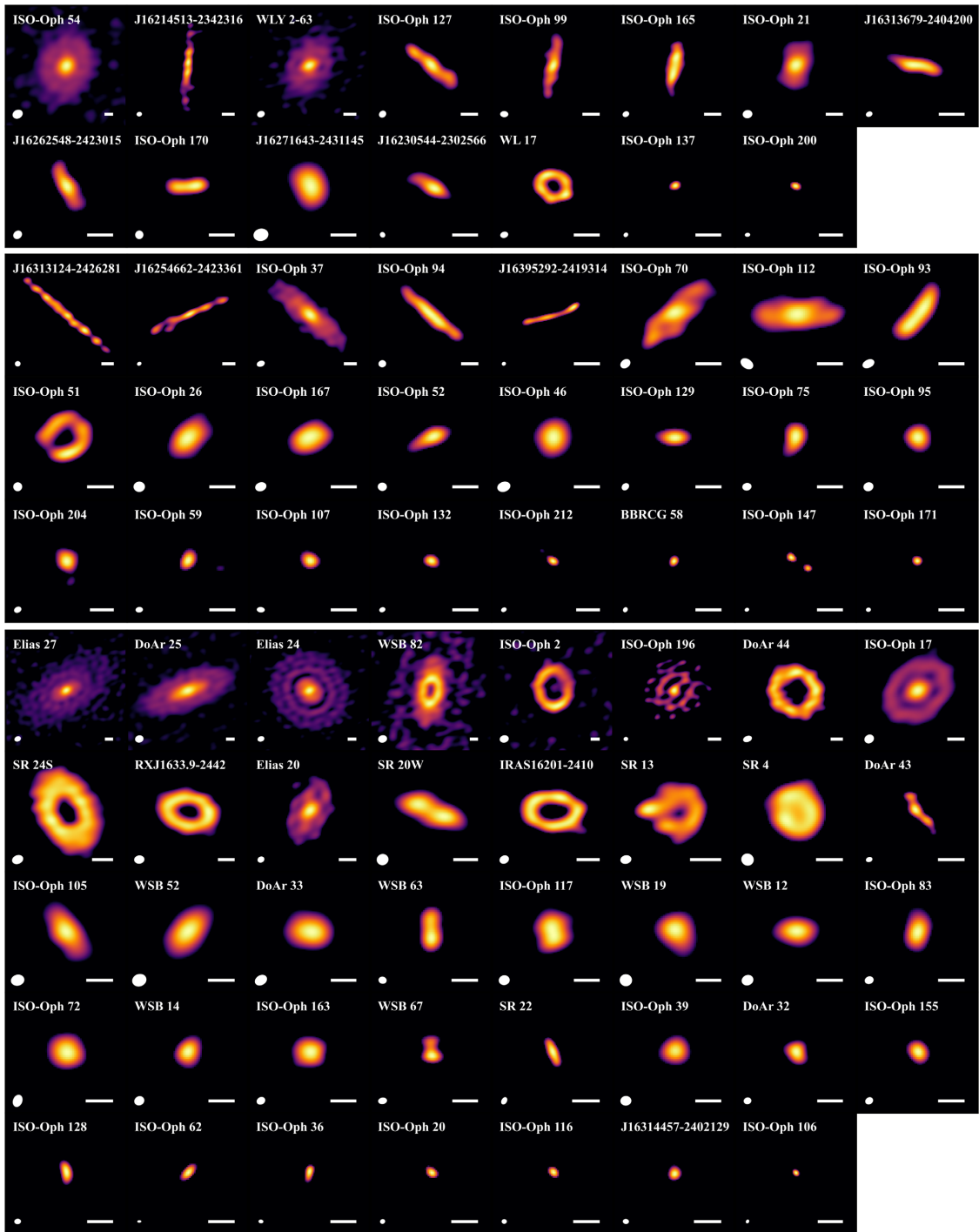


図3: スパースモデリングを使用した新たな画像解析法によって得られた1.3 mmダスト連続波画像ギャラリー。各パネルの左下には実効的な空間分解能を示している。図2と比較して、より高い分解能を達成しており、大部分の円盤構造を空間分解することに成功している。

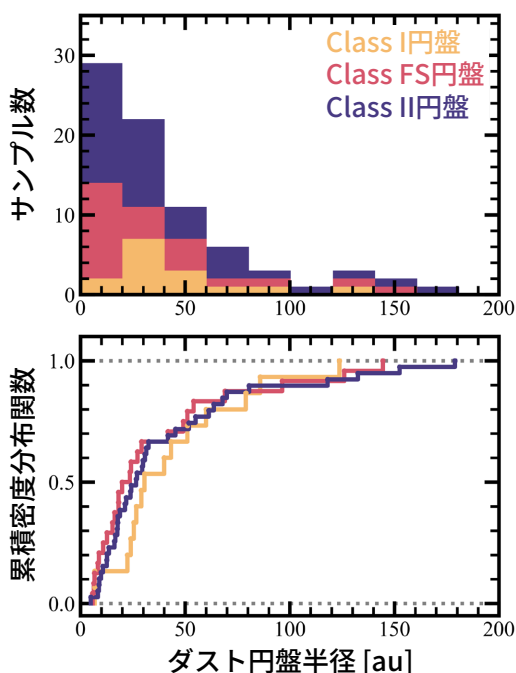


図4: ダスト円盤半径の分布を示すヒストグラム(上段) および累積分布関数(下段)。黄色、赤、紫はそれぞれClass I, Class FS, Class II段階の円盤を表す。半径が30 au未満の円盤が大多数を占め、100 auを超える円盤は全体の約10%にとどまる。また、累積分布関数は進化段階による顕著な差が見られないことを示している。

ラス間で有意な差は認められない。なお、ダスト円盤半径が参考値として扱われる6天体のコンパクト円盤(3.2節を参照)の内訳は各進化段階が2天体ずつ含まれていることに注意されたい。このような進化段階によらず分布が似ている傾向は、磁気円盤風やダストの半径方向移動を考慮した円盤進化モデルの予測と整合的である。もっとも、これらの結果はその他の理論的予測を否定するものではなく、ダストの成長を考慮した上で、ダスト連続波の観測的意味を慎重に議論する必要がある。また、本観測は1天体あたりの積分時間が1分未満と短く、特に進化初期段階ではエンベロープ起源の弱い放射を十分に捉えられていない可能性がある。したがって、本研究で測定した半径は主としてダストが卓越する領域の大きさを表し、ガス円

盤半径はこれより大きい可能性がある。以上を踏まえると、へびつかい座分子雲におけるダスト円盤半径は進化とともに大きく変化しない、あるいは減少する可能性が示唆される。

### 3.4 原始惑星系円盤の詳細構造の分類

本研究では、円盤の動径方向の明るさ分布について、詳細構造が存在するかどうかを調べた。解析にはスパースモデリング画像を用い、方位角方向に平均した放射強度プロファイルと、円盤の(見かけの)長軸方向の放射強度プロファイルを併用した。ほぼface-onな円盤<sup>11</sup>では、方位角平均によりノイズを低減できるため、弱いリングやギャップの検出に有効である。一方、ほぼedge-onな円盤では、方位角平均により異なる半径・高さの放射が混ざって局所構造が希釈される。このため、すべての天体で放射強度の両プロファイルを作成し、特に高傾斜円盤では長軸方向プロファイルも併用して構造の有無を判断した。

構造分類の定義および判定手順の詳細は[20]に記載されている。本稿では分類法を簡略化し、半径方向および方位角方向の輝度プロファイルに基づく定性的な分類として以下に示す。両プロファイルに複数の極大・極小が現れ、構造の形状が比較的軸対称なものを「リング構造」、明確な極大はないが半径方向プロファイルに変曲点が認められる場合は「ギャップ構造候補」として扱った。また、局所ピークの位置や強度が明瞭に非対称なものを「スパイラル構造」とした。これらに該当せず、中心に単一ピークのみを示すものは「特徴的な構造を持たない円盤」に分類した。

ただし、「構造を持たない円盤」に分類された天体のうち8天体では、2次元画像にわずかな歪みが見られ、非対称構造の存在が示唆される[20]。これらは長基線データの不足により構造の一部のみが再現されている可能性がある。また、半径15 au以下のコンパクト円盤では、詳細構造の判定に必要な空間スケールをカバーする最大基線長が確保できておらず、構造の有無を確定できない([20]の付録2.2を参照)。したがって、本研究では、2種類のプロファイルの両方で明瞭に確認できる構造のみを分類対象としており、「特徴

<sup>10</sup>2つの標本についてそれぞれの母集団の確率分布が一致しているかどうかを評価するノンパラメトリック検定。

<sup>11</sup>観測の視線方向に対する傾斜角がゼロに近い小さい円盤を指す。一方、傾斜角が大きく90度付近になっているものはedge-on円盤と呼ばれる。

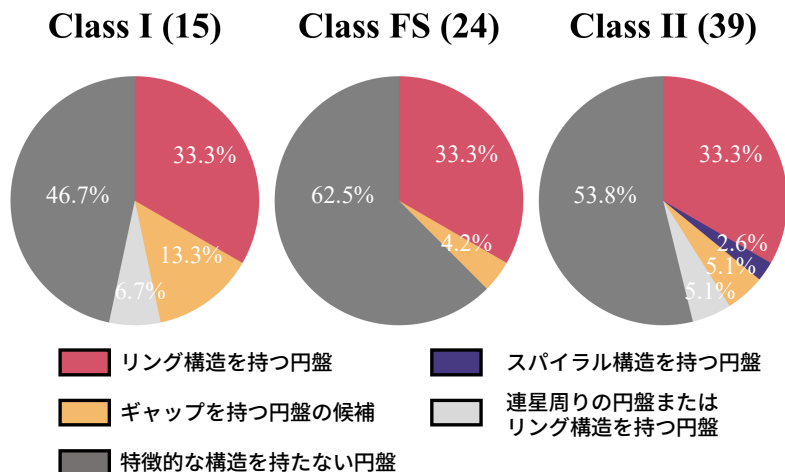


図5: 各進化段階における円盤構造の割合を示した円グラフ(進化段階の隣の数字は天体数を表している)。マーカーの色は円盤の構造分類を表しており、赤、紫、黄色、薄い灰色、濃い灰色はそれぞれ「リング構造」、「スパイラル構造」、「ギャップを持つ円盤の候補」、「リング構造を持つほぼedge-on円盤または連星周囲の円盤候補」、「特徴的な構造がない」の分類に該当している。Class I段階とClass FS段階の円盤でもClass II円盤と同等の割合で詳細構造が検出されている。[20]をもとに改変。

的な構造を持たない円盤」に未検出の詳細構造が含まれる点に注意する。

図5に、進化段階ごとの分類結果を示す。全78天体のうち、構造を持たない円盤が43天体、リング構造が26天体、スパイラル構造が1天体、ギャップ構造候補が5天体であった。加えて、リング構造を持つほぼedge-on円盤、または連星周囲の円盤の候補が3天体確認された。リング構造について、明瞭なリング構造を持つ円盤とその候補を含めた出現率は、Class I, Class FS, Class IIでそれぞれ40%, 33%, 38%と概ね同程度であった。この結果は、リング構造の形成がClass I段階の比較的早い時期から始まっている可能性を示唆する。ただし、本手法で有意に構造が検出された天体のサンプルが限られること、また構造が未分解の円盤を含めれば比率が変動しうることには注意が必要である。

候補を含む詳細構造を持つ32天体のうち、既存の高空間分解能観測(DSHARP[4], ODISEA[29]など)で構造が確認済みの天体を除くと、15天体が本研究で新たに詳細構造を持つ円盤候補として同定された。内訳はClass Iが4天体、Class FSが7天体、Class IIが4天体である。これらの多くはほぼedge-on円盤

であり、リング外縁のダストが視線方向に重なって見えることで局所的に光学的厚みが増し、半径方向プロファイルでは複数ピークとして現れると解釈される。

加えて、Class FS 円盤ISO-Oph 51 (図2, 3の上から4段目、左から1番目)と、Class II 円盤IRAS 16201-2410 (上から7段目、左から5番目)は、明瞭なリング・ギャップ構造を示す新たな円盤候補として同定された。IRAS 16201-2410は半径約30 auのギャップ構造を有し、既知の遷移円盤<sup>12</sup>の典型的な特徴と整合する。一方、ISO-Oph 51は半径約20 auのギャップ構造を持ち、南側の外縁に沿ってピークを示す非対称な放射分布を呈する。さらに、Class II円盤SR 13では、中心連星を取り囲む周連星円盤と伴星周囲の円盤の両方が検出された。これは多重星系における複数円盤共存の例であり、円盤間相互作用や星-円盤相互作用を検討することができる。

以上より、スパースモデリング画像に基づくプロフィール解析から、へびつかい座分子雲の円盤ではClass I段階からリング・ギャップ構造が一定の頻度で現れる可能性が示された。同時に、従来手法では捉えにく

<sup>12</sup>中心星周りのダストが消滅し、ギャップ構造が形成された円盤。

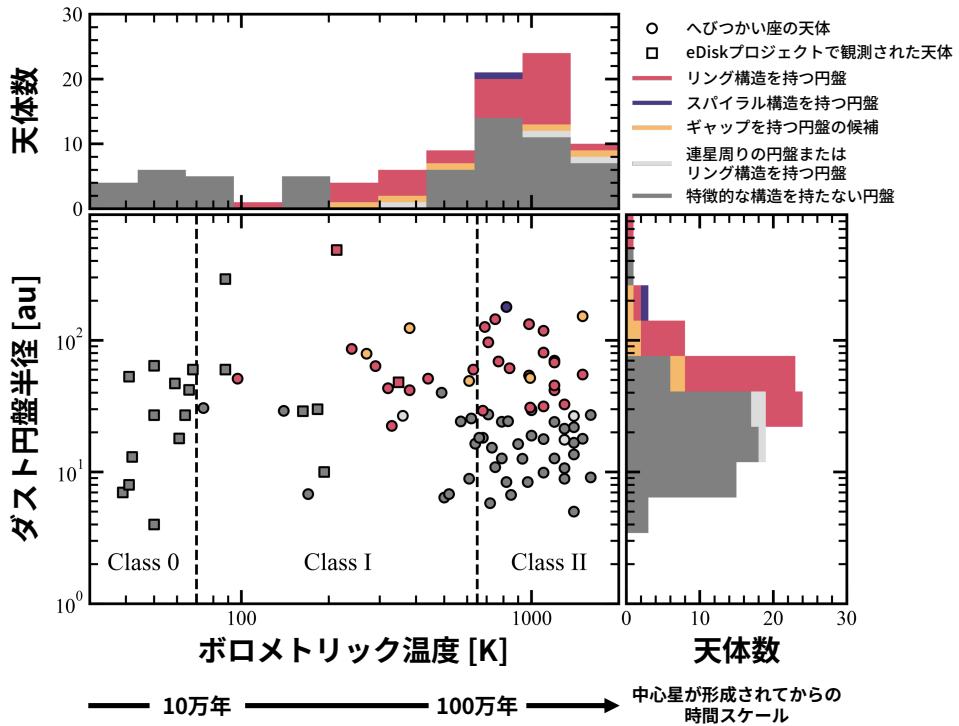


図6: 本研究で得られたへびつかい座分子雲の76天体(円) とeDisk サンプル19天体(正方形) のボロメトリック温度とダスト円盤半径の関係。マーカーの色は図5と同じ円盤の構造分類を表しており、赤、紫、黄色はそれぞれ「リング構造」、「スパイラル構造」、「ギャップを持つ円盤の候補」の分類に該当している。上部および右側のパネルは、ボロメトリック温度とダスト円盤半径の最小値から最大値までを11個のビンに分けたヒストグラムを示している。ボロメトリック温度とダスト円盤半径がある値から大きくなると、詳細構造を持つ円盤が多く分布していることが分かる。[20]をもとに改変。

かった高傾斜円盤や多重星系で、詳細構造が系統的に同定された。

### 3.5 詳細構造が形成する時期

前節の分類では、Class IおよびClass FS円盤の30-35%でリング・ギャップなどの詳細構造が確認され、質量降着段階の比較的早い時期から円盤内に顕著な構造が形成されていることが示された。一方、先行研究のeDiskプロジェクト[5]は、さらに若いClass 0/I段階の円盤を~7 auの高分解能で観測しているにもかかわらず、明瞭な詳細構造がほとんど検出されなかったことを報告している。両者のClass II円盤における検出率の差は、単純な角度分解能や感度の違いだけでは説明しきれず、観測対象の進化段階や円盤の

発達度合いの違いが関与している可能性がある。

そこで、本研究では、進化段階を連続的に表す指標としてボロメトリック温度 $T_{bol}$  (1.2節)を採用し、構造発達の指標として3.3節で測定したダスト円盤半径を用いる。本研究サンプルとeDiskサンプルを同じ基準で比較することで、詳細構造が検出されやすい条件を探る。なお、本研究のedge-on 天体については、スペクトルの傾きとボロメトリック温度に基づく分類差が本統計解析に及ぼす影響について、[20] で別途検討している。

図6は、ボロメトリック温度 $T_{bol}$ とダスト円盤半径の関係を示した散布図である。eDisk サンプルはへびつかい座分子雲を含む複数領域から選ばれた19天体で、 $T_{bol}$ と円盤半径には[28]の値を用いた。一方、本

研究サンプルの $T_{\text{bol}}$ は[30]に基づき、値が報告されていない2天体<sup>13</sup>を除く76天体について、本研究で求めたダスト円盤半径とともにプロットしている。図6から、eDiskサンプルは主に $T_{\text{bol}}$ の低い領域に分布するのに対し、へびつかい座サンプルは200 K以上の高温側に集中している。これは、eDiskがより若い降着初期段階を主に対象としているのに対し、本研究のサンプルは相対的に進化した降着後期段階以降の系を多く含むことを反映している。

さらに、詳細構造を持つ円盤(図6の赤・紫・黄色のマーカー)に注目すると、ISO-Oph 99 ( $T_{\text{bol}} = 99$  K)を除き、多くが $T_{\text{bol}} \geq 200\text{-}300$  Kかつダスト円盤半径 $\geq 30$  auの領域に分布している。本研究ではスパーモデリングによりeDiskと同程度の空間分解能を多数天体へ一様に適用できたため、このような傾向を統計的に示せた点が重要である。ただし解釈にあたっては、(i) 最大基線長の制約や半径推定の不確実性に加え、ダスト円盤半径 $\leq 15\text{-}20$  auのコンパクト円盤では詳細構造の検出が難しいこと[20]、(ii)  $T_{\text{bol}} = 100\text{-}300$  K付近のサンプルが十分でないこと、の2点に注意が必要である。したがって、現時点で示唆される $T_{\text{bol}}$ やダスト円盤半径の閾値は、今後サンプルが増えればより低い値へ更新される可能性がある。それらを考慮しても、両サンプルを合わせてみると、相対的に大きな円盤半径と高い $T_{\text{bol}}$ を持つ円盤ほど詳細構造が検出されやすいという傾向が明白である。

本研究では、詳細構造が検出され始める進化段階の目安として、ボロメトリック温度の閾値が $T_{\text{bol}} \sim 200\text{-}300$  Kであることが示唆された。この温度域は星形成後およそ20-40万年に相当する段階と考えられており[2]、星の周囲にダストや分子ガスがまだ豊富に存在する質量降着段階において、円盤内に顕著な詳細構造がすでに形成されている可能性が高い。さらに、これらの構造が惑星に起因するのであれば、惑星形成が従来の想定よりもはるかに若い段階から開始している可能性を示す手掛かりとなる。

## 4. 今後の展望

本研究によって、原始惑星系円盤の詳細構造が星

形成開始後、約20-40万年しか経過していない質量降着期に形成していることが明らかになった。今後は、以下に示す複数の観点から、円盤の詳細構造の形成と星・惑星形成プロセスをさらに深く理解する必要がある。

### 4.1 異なる星形成領域との比較

本研究はへびつかい座分子雲を対象としたが、近傍には他にも複数の星形成領域が存在し、分子雲の密度分布や星の空間的密集度合いなど環境条件が異なる。これらの領域へも同様の解析を行い、ボロメトリック温度とダスト円盤半径に基づく詳細構造の形成条件が普遍的に成り立つかを検証しなければならない。特に、星形成領域ごとに円盤サイズ分布が異なる可能性が報告されていることから、環境差を越えて同様の条件で構造が現れるかどうかは、詳細構造の形成に必要な時間スケールと円盤サイズに強い制約を与える。

### 4.2 詳細構造の形成機構の検討

詳細構造の形成機構としては、惑星-円盤相互作用に加え、光蒸発[31, 32]、重力不安定性[33, 34]、磁気回転不安定性[35]など複数の過程が提案されている。また、連星周囲の円盤では、理論研究により若い段階から非対称なリング構造を持ちうることが示唆されている[36]。本研究が示唆する「短い時間スケールでの構造形成」を説明できる機構を絞り込むため、観測で測定したギャップ幅や深さなどの量を、理論モデルの定量的予測と比較して検証する必要がある。例えば、得られた画像から測定したギャップの幅と深さを[37]で示された惑星-円盤相互作用モデルの関係式と比較することで、惑星が原因である場合の惑星質量を議論できる。

### 4.3 星への質量降着との関連性

本研究の結果から、円盤内の詳細構造は質量降着段階の早い時期から形成され得ることが示唆された。今後は、ダスト連続波で得たリング・ギャップなどの構造と、分子輝線で得られるアウトフローの力学構造、エンベロープからの供給の痕跡などを同一天体で対応付けることで、質量降着と詳細構造形成の関係を定量的に検証する必要がある。特に、Class I/FIS円

<sup>13</sup>両者の円盤では詳細構造が確認されていない。

盤に対して連続波と輝線観測を組み合わせた解析を行うことで、詳細構造が形成される物理過程と時間スケールに制約を与えられると期待される。

## 5. 結論

本研究では、へびつかい座分子雲内78天体のALMAアーカイブデータにスパースモデリングを用いた超解像解析法を適用し、CLEAN に比べて中央値で約3.8倍高い空間分解能を達成した。ダスト円盤半径は5-179 au(中央値27 au) に分布し、進化段階によらず類似した分布を示した。また、放射強度プロファイルに基づく分類により、全体の約30-40%の円盤で詳細構造が確認され、15天体で新たな詳細構造を初めて同定した。さらにeDiskサンプルとの比較から、 $T_{\text{bol}} \geq 200\text{--}300\text{ K}$ かつダスト円盤半径 $\geq 30\text{ au}$ の円盤で詳細構造が検出されやすい傾向が示唆され、星形成後約20-40万年の質量降着段階から詳細構造が形成され得ることが明らかになった。

## 謝辞

本稿の内容を改善するうえで有益なご指摘と助言を賜りました査読者に、深く感謝いたします。本研究はASIAA Summer Student Program 2023の一環として実施されたものであり、平野尚美氏および山口正行氏には、研究全般にわたり多大なるご指導を賜りました。また、本所属の指導教員である町田正博氏、ならびに共同研究者である武藤恭之氏、川邊良平氏、塚越崇氏からも多くのご助言とご支援をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。さらに、学会賞選考委員の皆様にも厚く御礼申し上げます。本稿は日本学術振興会特別研究員(DC2) 奨励費(JP25KJ1947)の助成を受けて執筆しました。

## 参考文献

- [1] 塚本裕介, 2022, 日本惑星科学会誌遊星人 31, 6.
- [2] Evans, II, N. J. et al., 2009, ApJS 181, 321.
- [3] ALMA Partnership et al., 2015, ApJL 808, L3.
- [4] Andrews, S. M. et al., 2018, ApJL 869, L41.
- [5] Ohashi, N. et al., 2023, ApJ 951, 8.
- [6] Dong, R. et al., 2015, ApJ 809, 93.
- [7] Kanagawa, K. D. et al., 2016, PASJ 68, 43.
- [8] Johansen, A. et al., 2007, Nature 448, 1022.
- [9] Högbom, J. A., 1974, A&AS 15, 417.
- [10] Clark, B. G., 1980, A&A 89, 377.
- [11] Cornwell, T. J., 2008, IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing 2, 793.
- [12] Honma, M. et al., 2014, PASJ 66, 95.
- [13] Akiyama, K. et al., 2017, AJ 153, 159.
- [14] Kuramochi, K. et al., 2018, ApJ 858, 56.
- [15] Yamaguchi, M. et al., 2021, ApJ 923, 121.
- [16] Nakazato, T. and Ikeda, S., 2020, Astrophysics Source Code Library, record ascl:2006.002.
- [17] Jennings, J. et al., 2020, MNRAS 495, 3209.
- [18] Narayan, R. and Nityananda, R., 1986, ARA&A 24, 127.
- [19] Cárcamo, M. et al., 2018, Astronomy and Computing 22, 16.
- [20] Shoshi, A. et al., 2025, PASJ 77, 572.
- [21] Sheehan, P. D. and Eisner, J. A., 2017, ApJL 840, L12.
- [22] Sheehan, P. D. and Eisner, J. A., 2018, ApJ 857, 18.
- [23] Cieza, L. A. et al., 2019, MNRAS 482, 698.
- [24] Ansdell, M. et al., 2016, ApJ 828, 46.
- [25] Hendler, N. et al., 2020, ApJ 895, 126.
- [26] Yamaguchi, M. et al., 2024, PASJ 76, 437.
- [27] Tsukamoto, Y. et al., 2020, ApJ 896, 158.
- [28] Yen, H.-W. and Lee, Y.-N., 2024, ApJL 972, L27.
- [29] Cieza, L. A. et al., 2021, MNRAS 501, 2934.
- [30] Dunham, M. M. et al., 2015, ApJS 220, 11.
- [31] Hollenbach, D. et al., 1994, ApJ 428, 654.
- [32] Hardy, A. et al., 2015, A&A 583, A66.
- [33] Youdin, A. N., 2011, ApJ 731, 99.
- [34] Takahashi, S. Z. and Inutsuka, S.-i., 2016, AJ 152, 184.
- [35] Flock, M. et al., 2015, A&A 574, A68.
- [36] Matsumoto, T. et al., 2019, ApJ 871, 36.
- [37] Zhang, S. et al., 2018, ApJL 869, L47.

---

## 著者紹介

---

所司 歩夢



九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻博士課程3年(2026年4月以降). 日本惑星科学会, 日本天文学会に所属.

# もう一つの月世界へ: 火星衛星探査計画MMX その14 ~MMXミッションのためのMEGANEによる フォボス調査~

David J. Lawrence<sup>1</sup>, Patrick N. Peplowski<sup>1</sup>, Morgan T. Burks<sup>2</sup>, Nancy L. Chabot<sup>1</sup>, Raymond C. Espiritu<sup>1</sup>, Samuel Fix<sup>1</sup>, John O. Goldsten<sup>1</sup>, 小川 和律<sup>3</sup>, 草野 広樹<sup>4</sup>, 臼井 寛裕<sup>3</sup>, Jack T. Wilson<sup>1</sup>

(要旨) MEGANEは、火星衛星探査ミッションMMXの一環として、火星の衛星フォボスの元素組成を計測するガンマ線・中性子分光計である。本稿では、MEGANEの機器構成と元素組成計測技術、科学目標、検出器性能、そして火星圏におけるMEGANEの観測運用について解説する。

## 1. はじめに

MEGANE(Mars-moon Exploration with Gamma rays and Neutrons)[1]は、JAXAが主導する火星衛星探査ミッションMMXの一環として、ガンマ線分光計(Gamma-Ray Spectrometer; GRS)と中性子分光計(Neutron Spectrometer; NS)を用いて火星衛星フォボスの元素組成を計測する機器である。アメリカのジョンズ・ホプキンス大学応用物理研究所(JHU/APL)が、ローレンス・リバモア国立研究所(LLNL)との密接な協力のもとで設計・製作を行っている。MEGANEの設計は、NASAの小惑星(16)Psyche探査ミッションPsycheで2023年10月に打ち上げられたガンマ線・中性子分光計(GRNS)[2]の設計に基づいている。さらに、MEGANEでは、質量や電力の制約、異なる探査機やミッション運用の要求、計測目的の違いに対応するために、PsycheのGRNSに対していくつかの変更が加えられている。

惑星のガンマ線・中性子分光は、通常は軌道ミッションで実施されており、月[3]、火星[4]、水星[5]など様々な天体の元素組成の計測のために用いられて

いる。ガンマ線分光法は、惑星の岩石を形成する主要元素(Fe, Si, Ti, Alなど)や放射性微量元素(K, Thなど)の定量的な組成を提供する[6]。一方、中性子分光法は、水素やその他の元素組成パラメータの高感度な計測を可能にする[e.g., 7, 8]。これらを組み合わせると、惑星の元素組成について包括的な理解を得ることが可能である。

惑星のガンマ線・中性子計測には、2つの重要な要求がある。第一に、軌道上からの計測は対象の惑星に比較的近い高度で行う必要があり、一般的には対象の惑星の半径以下の高度で観測を行う[9]。第二に、低い計数率の測定で十分な統計精度を確保するために、数日から数ヶ月にわたる「ターゲット上」での計測時間が必要となる。これらの条件は、MMXミッションにおけるMEGANEの機器設計と運用計画の策定に大きく影響している。

## 2. MEGANEの科学目標

MEGANEの主な科学目標は、1) フォボスが捕獲された小惑星なのか、それとも巨大衝突の結果なのかを解明すること、2) 火星軌道上の大気のない天体の表面過程を研究すること、3) MMXのサンプル回収をサポートし、着陸地点の選定のための情報や回収サンプルの背景情報を提供すること、の3つである。

第1の科学目標は、フォボス全球平均の元素組成を用いて、フォボスが捕獲された小惑星なのか、それ

1.ジョンズ・ホプキンス大学応用物理研究所

2.ローレンス・リバモア国立研究所

3.JAXA

4.理化学研究所

David J. Lawrence: David.J.Lawrence@jhuapl.edu

草野 広樹:hiroki.kusano@riken.jp

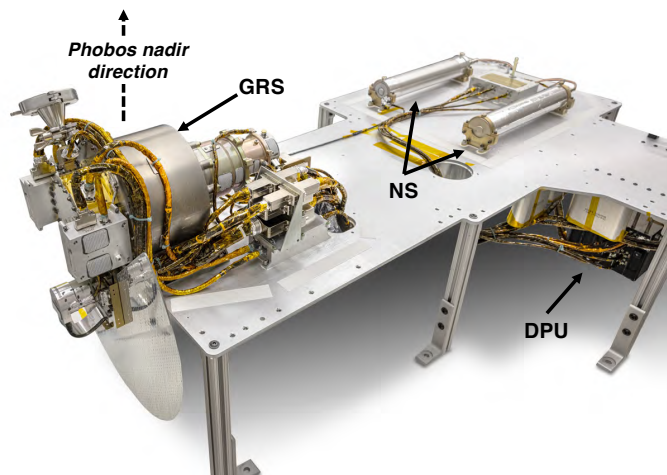


図1: MEGANE FMコンポーネント(GRS, NS, DPU)の写真. MMX探査機の探査モジュール観測機器搭載デッキのモックアップ上に設置されている. GRSとNSは、フォボス観測のため鉛直直下に視野を持つようにデッキに搭載される. DPUはデッキ裏側の探査機内部に位置する.

とも火星への大きな天体の衝突によって形成されたのかを判断することである。フォボスとデイモスのスペクトルの類似性や、始原始的な外部太陽系天体との類似性は、火星衛星が太陽系の他の場所から捕獲された天体である可能性を示唆している[10]。これが正しければ、フォボスとデイモスは炭素質コンドライトに類似した元素組成を持つと予測される。一方、衝突説は、火星の赤道面上に2つの円軌道の天体を捕獲することが困難であることから提唱されている[11]。このシナリオでは、フォボスとデイモスは火星の地殻やマントル物質と衝突体物質の混合物の元素組成を持ち、地球の月のように揮発性物質が少ない可能性がある。MEGANEは、数多くの元素(H, O, Na, Mg, Si, K, Cl, Ca, Fe, Th, U)と、中性子による元素組成パラメータ計測(中性子吸収, 原子量)を行い、フォボスがコンドライト的な組成を持つのか、それとも火星のようなエイコンドライト的な成分が多く含まれているのかを判別する。

第2の科学目標は、フォボス表面における組成の変動を利用して、火星軌道上の大気のない天体の表面過程を理解することである。フォボスの表面は、2つの異なるスペクトル領域があり、組成の多様性を示す証拠が見られる。スペクトルの「青い領域」は大きなスティックニークレータの噴出物に関連し、それ以外の表面が形成する「赤い領域」は、デイモスの全

表面も覆っている[12]。ガンマ線・中性子による元素組成の空間分布は、MMXの他の観測機器のデータとともに、フォボスのスペクトル多様性の原因となる過程をより深く理解するために活用される。

第3の科学目標は、フォボスからのサンプルリターンというMMXミッションの主要目標をサポートすることである。具体的には、サンプル採取地点の選定過程に情報を提供し、回収したサンプルの組成的背景を明らかにする。MEGANEによる元素組成分布は、様々な岩石学的物質を同定するために利用できる[e.g., 13]。これらは、より高い空間分解能を持つ反射スペクトル分布と組み合わせ、複数の観測機器間でサンプル採取地点の選定基準を策定するために用いられる。さらに、MEGANEのデータセットにより、MMXが持ち帰ったサンプルがフォボスの表面をどれだけ正確に代表しているかを理解することが可能である。

### 3. MEGANEの機器概要

MEGANEは、GRS, NS, データ処理ユニット(Data Processing Unit; DPU)の3つのハードウェアコンポーネントから構成される(図1)。GRSは、高純度ゲルマニウム(High-purity Ge; HPGe)ガンマ線検出器と、それを囲むホウ素入りプラスチック

シンチレータから構成されており、後者はアクティブなアンチコイシデンスシールド(ACS)、高速中性子検出器、銀河宇宙線モニタとして機能する。GRSは、MMXミッションに対応するためいくつかの改良が加えられているが、基本的にはPsycheのGRSと機能的に同一である。最も重要な点は、MEGANEのGRSがRicor製のK-508N回転式冷凍機を使用していることであり、Psyche GRSで使われているLockheed Martin製のパルスチューブ型冷凍機とは異なる[2]。Ricor製の冷凍機は、MESSENGER GRSに使用された冷凍機の改良版であり、主に低消費電力であることと運用の容易さからMEGANEに採用された。冷凍機使用時に発生する熱を効率的に除去するため、GRSの放熱板はPsycheとは異なる形状となっている。この設計変更は、PsycheのGRSがブームに取り付けられているのに対し、MMXではGRSが探査機のデッキに搭載されていることによるものである。

NSは、熱中性子(中性子エネルギー  $E_n < 0.4$  eV)と熱外中性子( $E_n > 0.4$  eV)をそれぞれ計測する2つの $^3\text{He}$ ガス比例計数管で構成される。1つの検出器は0.5 mmのCd層で覆われており、Cdのカットオフエネルギーである0.4 eVを超える熱外中性子の計数率を計測する。もう1つの検出器は何も覆われておらず、熱中性子と熱外中性子の両方のエネルギー範囲の中性子を計測する。両検出器の計数率の差から、熱中性子の計数率を求められる。これらの検出器とフロントエンド回路はPsyche NSと同一であるが、MMX探査機のデッキ搭載位置に合わせて再設計されている。

最後に、MEGANEは単一のDPUを用いて、GRSとNSの両方を制御している。DPUは、低電圧電源、高電圧電源、冷凍機電源、信号パルス処理、そして探査機とのデータおよびコマンドインタフェースを提供する個別の基板を備えている。

#### 4. ハードウェアの性能、探査機への引き渡し、および打ち上げに向けた最終準備

MEGANEフライトモデル(FM)のGRS、NSの性能に関しては、文献[14]で包括的に報告されてい

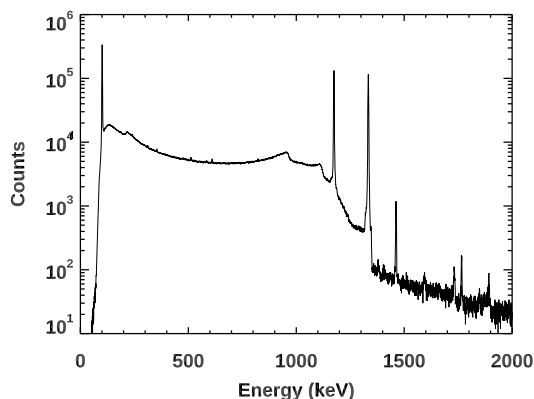


図2: GRSのHPGe検出器で計測した $^{60}\text{Co}$ 線源のガンマ線エネルギースペクトル。MMX探査機への引き渡し前に計測したものである。1333 keVでのエネルギー分解能は約2.5 keVであった。

る。GRSとNSの性能の例を、それぞれ図2と図3に示す。図2は、 $^{60}\text{Co}$ 線源を用いて実験室で測定したガンマ線スペクトルである。1333 keVのガンマ線に対するエネルギー分解能は約2.5 keVであり、これはGRS FMの試験で得られた2.2~2.6 keVと一致している[14]。図3は、実験室の中性子線源で測定した2つの $^3\text{He}$ 中性子検出器のスペクトルである。特徴的な中性子捕獲ピークが150チャンネル付近ではっきりと観測されており、各検出器で明確な中性子測定値が得られることを示している。

MEGANE FMのハードウェアは、2023年12月にJHU/APLから日本へ輸送され、2024年春にJAXAへ引き渡され、同じく2024年春に探査機製造業者である三菱電機株式会社でMMX探査機に搭載された。図4は、MMX探査機の観測機器搭載デッキの図であり、GRSとNSの位置が示されている。

MMX探査モジュールへのMEGANEの搭載後、MMX(およびMEGANE)の各部を検証するため、段階的に複雑になる一連の試験が実施された。これらの試験の最後に、MMX探査機に搭載されたMEGANEの全機能を、他のMMX搭載機器が動作している状態で検証する初期電気試験が実施された。この試験により、MEGANEのすべての機能が性能要求を満たすことを実証した。この試験には、すべてのコマンド機能の実証、全検出器の動作、および探査機からJAXAを経てジョンズ・ホプキンス大学応用物理学研究所にあるMEGANE科学運用

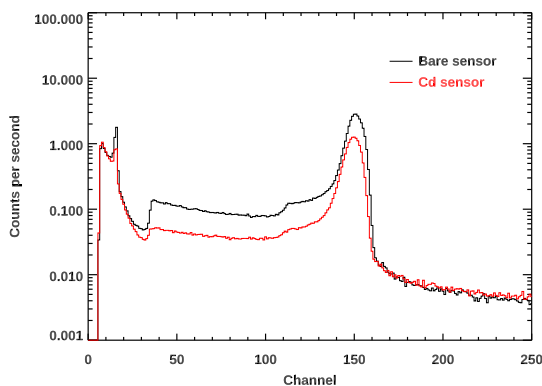


図3: NSの $^3\text{He}$ 検出器で中性子線源を用いて測定したエネルギースペクトル。特徴的な中性子捕獲ピーク(764 keV)が150チャンネル付近に見られる。

センターに至る完全なデータパイプラインの流れの検証が含まれる。この試験中、GRSのHPGe検出器において想定以上のリーク電流が観測されたため、2026年2月に、GRSに対して段階的な高温ベークアウト(最高105℃)を実施した。このベークアウトにより、上昇していたリーク電流が低減することが確認され、GRSのエネルギー分解能は2.5 keV(@ 1333 keV)となった。MEGANEの最終試験は、2026年秋の打ち上げに先立ち、種子島宇宙センターで実施される予定である。

## 5. MEGANEの予想される成果

MEGANEが主要な目的を達成するためには、フォボス半径以下の高度で、かつ探査機の鉛直直下方向がフォボス中心に対して $\pm 10^\circ$ 以内で計測を行う必要がある。現在のミッション運用計画では、MEGANEには主要な計測を行う機会が2回あり[15]、1回目は2028年のサンプリング運用前、2回目は2030年のサンプリング運用後である。最初の機会での低高度計測に利用できる時間は、2028年に発生するソーラーコンジャンクションのため約3週間に制限される。この期間では、上記のすべての元素について計測要求を満たすことはできず、2028年と2030年の両方の機会の観測が必要となる。ただし、一部の元素(具体的には、Fe, Si, O)の存在量については、2028年の観測期間中に十分な精度で計測が可能である。これらの3つの元素は、フォボスの形

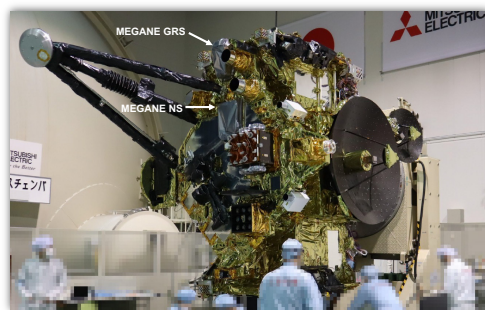


Photo courtesy JAXA/MELCO

図4: MMX探査機の観測機器搭載デッキの写真。MEGANE GRSおよびNSの搭載位置を矢印で示す。これらの検出器は、宇宙空間での探査機の熱管理のためMLIで覆われている。

成過程を解明するための重要な情報である。

図5は、フォボス形成シナリオに関連する類似物質である、様々なエイコンドライトやコンドライトのFe/Si比とFe/O比の測定結果をまとめたものである。エイコンドライトは、巨大衝突による形成過程で取り込まれる火星地殻やマントル由来の物質と一致しており、コンドライトは、捕獲による形成シナリオと一致する。図に示されている楕円は、巨大衝突シナリオと捕獲シナリオの代表的な組成に対して、予想されるMEGANEの計測誤差である。これらの誤差楕円は、低高度かつ鉛直直下指向での観測時間が10日、5日、および2.5日である場合の統計的不確かさ( $3\sigma$ )を表す。図に示すように、観測時間が2.5日であっても、2つの形成シナリオは $3\sigma$ の信頼水準で区別できる。2028年の観測機会の少なくとも10%から15%を低高度、鉛直直下指向の観測に充てることができれば、MEGANEの観測によってフォボスの形成過程を明らかにできるはずである。

## 6. まとめ

MEGANEのフライトモデルハードウェアは、MMX探査機に引き渡し・搭載され、試験で正常な動作が確認された。今後のインテグレーションおよび試験作業は、三菱電機および種子島宇宙センターの施設で実施される予定である。MEGANEの科学目標を完全に達成するためには、2028年と2030年の両方の低高度運用機会での計測が必要となるが、まず

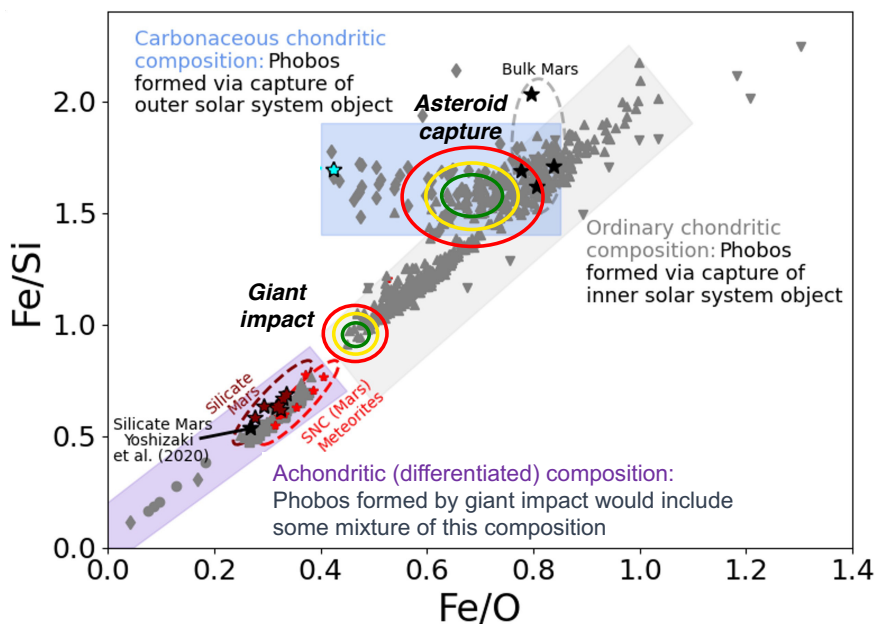


図5:様々なエイコンドライトおよびコンドライトに対するFe/Si比とFe/O比の関係(文献[1]の図3に追記). 2組の楕円は、炭素質コンドライトと火星のケイ酸塩組成を50対50で混合した場合(Giant impact), 炭素質コンドライト組成の場合(Asteroid capture), のそれぞれに対して、MEGANE GRS観測による統計的不確かさ(3σ)を示す. 各組成の3つの楕円は、探査機高度がフォボス半径以下のとき、鉛直下指向による観測時間がそれぞれ2.5日(赤), 5日(黄), 10日(緑)の場合の統計的不確かさである.

は2028年の観測機会を利用してフォボスの形成過程を解明するための重要な手がかりが得られるであろう.

## References

[1] Lawrence, D. J. et al., 2019, Earth Space Sci. 6, 2605.

[2] Lawrence, D. J. et al., 2025, Space Sci. Rev. 221, 78.

[3] Feldman, W. C. et al., 2004, J. Geophys. Res. 109, E07S06.

[4] Boynton, W. V. et al., 2004, Space Sci. Rev. 110, 37.

[5] Goldsten, J. O. et al., 2007, Space Sci. Rev. 131, 339.

[6] Prettyman, T. H. et al., 2006, J. Geophys. Res. 111, E12007.

[7] Feldman, W. C. et al., 1998, Science 281, 1496.

[8] Feldman, W. C. et al., 2000, J. Geophys. Res. 105, 20347.

[9] Peplowski, P. N., 2016, Planet. Space Sci. 134, 36.

[10] Higuchi, A. and Ida, S., 2017, Astrophys. J. 153, 155.

[11] Rosenblatt, P. et al., 2016, Nat. Geosci. 9, 581.

[12] Murchie, S. and Erard, S., 1996, Icarus 123, 63.

[13] Beck, A. W. et al., 2015, Met. Planet. Sci. 50, 1311.

[14] Peplowski, P. N. et al., 2025, Prog. Earth Planet. Sci. 12, 92.

[15] Nakamura, T. et al., 2025, EPSC-DPS Joint Meeting 2025, Helsinki, Finland, <https://doi.org/10.5194/epsc-dps2025-22>

# 一番星へ行こう！ 日本の金星探査機の挑戦 その66 ～単一液滴実験から探る金星雲の化学～

生方 颯真<sup>1</sup>

(要旨) 金星の硫酸雲は放射や大気力学に影響を及ぼすだけでなく、化学反応の場としても重要である可能性があります。こうした視点から金星大気を見たとき、代表的な問題の一つとして挙げられるのが、二酸化硫黄(SO<sub>2</sub>)の鉛直分布です。雲層の上下でSO<sub>2</sub>の濃度が大きく変わるという現象は、気相反応だけでは説明が難しく、雲粒を介した反応の関与が示唆されています。本稿では、単一液滴を用いた実験を通して、強酸性条件下におけるSO<sub>2</sub>の反応性取り込みについて検討しました。その結果を踏まえ、金星雲を「化学反応の場」として捉える視点と、今後の研究の方向性について考えます。

## 1. はじめに

金星の高度約45 kmから70 kmには、硫酸を主成分とする雲が存在し、惑星全体を覆っています。金星探査機「あかつき」は、その雲の運動や形態、大気の構造を長期にわたって観測してきました。また、紫外撮像装置を用いて二酸化硫黄(SO<sub>2</sub>)や未同定の紫外線吸収物質の観測も行われており、金星大気の化学組成を理解するための重要な手がかりが得られています。「あかつき」がもたらした化学に関する観測量を適切に解釈するためには、雲を放射・力学過程の担い手としてだけでなく、化学反応の場として捉える視点も必要になると考えます。つまり金星において、気相反応だけでなく、雲粒の表面や内部で進行する多相反応が大気や雲粒の組成に影響を及ぼしている可能性があります。

このような発想は、決して金星に特有のものではありません。地球大気化学の歴史を見てみると、当初は気相反応を中心に描かれていた化学過程が、雲粒やエアロゾルを介した多相反応を考慮することで大きく書き換えられてきました。代表例として、成層

圏におけるオゾン層破壊が挙げられます。極成層圏雲の粒子表面で進行する塩素反応の重要性が認識されたことで、南極オゾンホールは理解が進展しました。また対流圏においては、雲中でのSO<sub>2</sub>酸化による硫酸塩生成が酸性雨の原因の一つとなっています。このことは、惑星大気の化学を理解する際に、気相反応だけではなく多相反応を考慮することの重要性を示唆しています。

## 2. 金星大気のSO<sub>2</sub>

金星大気には、気相反応だけでは説明が難しく、多相反応の関与を考える必要がある現象が存在します。その一例がSO<sub>2</sub>の鉛直分布に関する問題です。これまでの観測によって、SO<sub>2</sub>の体積混合比は、高度約40 kmの雲底では100 ppmを超える一方、高度約70 kmの雲頂では100 ppb程度まで減少することが明らかになっています[1]。しかし、このSO<sub>2</sub>混合比の3桁以上の違いは、従来の光化学モデルでは説明できていません。よって雲層そのものが、SO<sub>2</sub>のシンクとして機能している可能性を考慮する必要があります。

地球大気化学の研究では、SO<sub>2</sub>は雲粒などの液相に取り込まれたのち、効率的に硫酸へと酸化されて

1. 東北大学大学院理学研究科  
ubukata.soma.q8@dc.tohoku.ac.jp

大気から取り除かれることが知られています[2]. これは反応性取り込みと呼ばれる現象です. 代表的な酸化剤として過酸化水素 ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), オゾン ( $\text{O}_3$ ), 酸素 ( $\text{O}_2$ ), および二酸化窒素 ( $\text{NO}_2$ ) が挙げられます. これまでの地球大気を想定した研究では, 液相のpHとして2-6程度の条件が一般的でした. これに対し, 金星雲ではpHが-1を下回るような強酸性環境が想定されており, そのような条件下で $\text{SO}_2$ の酸化反応がどの程度進行するのかについてはこれまで十分に調べられていませんでした.

したがって, 金星雲を模擬した条件下で,  $\text{SO}_2$ の反応性取り込みや液相における酸化の効率を実験的に検証することが重要となります. 次節では, そのために用いた単一液滴実験の手法と結果についてご紹介します. なお, 詳細については既発表の論文[3]をご覧ください.

### 3. 単一液滴実験で探る $\text{SO}_2$ の反応性取り込み

硫酸に対する $\text{SO}_2$ の反応性取り込みを測定するため, 電気力学天秤とMie散乱・Raman散乱測定系を組み合わせたセットアップを構築しました. 電気力学天秤とは, 交流電場と直流電場による力を組み合わせて, 単一液滴を非接触で捕捉する装置です(図1). 単一液滴を用いる利点は, 壁面や粒子同士の相互作用を避けながら, 液滴そのものの反応を直接見ることができる点にあります. 電気力学天秤内にはガスを連続的に導入することができ, 背景ガスとして $\text{CO}_2$ を用い, そこに $\text{SO}_2$ , 酸化剤として $\text{NO}_2$ を導入し, これらの流量を調整して任意の体積混合比を再現しました. なお, 実験は全て室温, 1気圧条件下で行いました. これは, 温度としては金星の高度約55 km, 圧力としては高度約50 kmに相当する条件です[4].

液滴の半径は, Mie散乱スペクトルから計算しました. Mie散乱は, 球形粒子の半径と屈折率に依存します. 本実験では, 硫酸の屈折率については文献値を用いて液滴の半径を導出しました[5]. 液滴半径の時間変化を追跡した結果, 液滴の成長は $\text{SO}_2$ 単独あるいは $\text{NO}_2$ 単独ではほとんど見られず, 両者が共存した場合にのみ顕著に生じました. これは, 液滴内部で $\text{SO}_2$ が酸化され, 硫酸生成に対応する体積増



図1: 電気力学天秤の外観. 中央で発光して見える部分が, 電場によって浮遊している単一液滴である.

加が起きていることを示唆しています. すなわち, 金星類似の強酸性条件下で,  $\text{NO}_2$ が存在する場合には $\text{SO}_2$ の多相反応が起こることを実験的に示すことができました.

また, 液滴の化学組成はRaman散乱スペクトルから導出することができます. 液滴内に532 nmのレーザーを照射すると, 液滴内に存在する分子の振動や回転に応じて, わずかに波長のずれた光が散乱されます. この波長のずれは分子種ごとに固有の情報を含むため, 液滴中に存在する化学種やその時間変化を追跡することができます. 図2にRaman散乱スペクトルの一例を示します.  $900\text{ cm}^{-1}$ と $1040\text{ cm}^{-1}$ は硫酸由来のシグナルで,  $2290\text{ cm}^{-1}$ は, 時間と共にシグナルが強くなっていることから, 反応生成物に由来するシグナルであることがわかります. 文献との比較から,  $2290\text{ cm}^{-1}$ のピークはニトロソニウムイオン( $\text{NO}^+$ )由来であると考えられます[6]. このように Raman 散乱を併用することで, 液滴内部で進行する化学反応そのものを追跡することができ, 反応機構や反応速度の評価へとつなげることが可能となります.

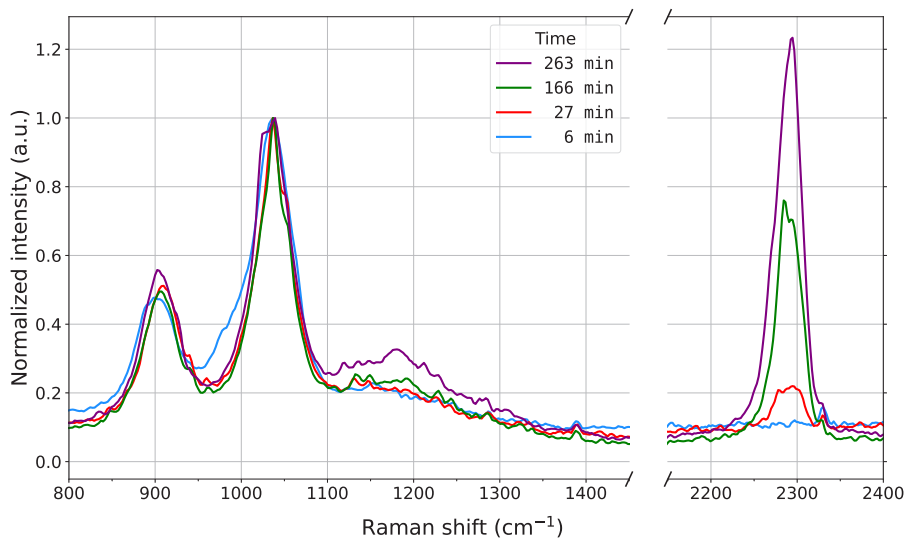


図2: 硫酸液滴におけるRaman散乱スペクトルの時間変化。背景ガスとしてCO<sub>2</sub>を用いており、そこに100 ppmのSO<sub>2</sub>と10 ppmのNO<sub>2</sub>を導入している。2290 cm<sup>-1</sup>付近のピーク強度が時間と共に増大しており、反応生成物の蓄積を示している。

## 4. おわりに

本稿では、金星大気化学を理解するうえで、多相反応も重要な過程である可能性について述べてきました。地球大気化学では、雲粒やエアロゾルを介した反応が化学種の分布や寿命を大きく左右することが知られており、同様の視点は金星のように厚い硫酸雲をもつ惑星に対しても重要であると考えられます。とくに、雲層の上下で大きく変動するSO<sub>2</sub>の濃度は、金星雲が単なる凝縮相ではなく、化学的なシンクとして機能している可能性を示唆しています。

単一液滴を用いた今回の実験は、そのような多相反応が強酸性条件下でも起こりうることを示す一例といえます。ただし、本研究で扱ったNO<sub>2</sub>によるSO<sub>2</sub>の酸化反応が、実際の金星大気中でそのまま主要な反応経路として働いていると示されたわけではありません。実際の金星雲では、利用可能な酸化剤の種類や濃度、さらには大気輸送との結合など、さまざまな要因が関与していると考えられます。今後は、「あかつき」が切り拓いてきた観測的知見に、室内実験や化学モデルを組み合わせながら、金星雲を「化学反応の場」として捉える研究を進展させていきたいと考えています。

## 参考文献

- [1] Vandaele, A.C. et al., 2017, Icarus 295, 16.
- [2] Liu, T. et al., 2021, Environ. Sci. Technol. 55, 4227.
- [3] Ubukata, S. et al., 2025, ACS Earth Space Chem. 9, 1525.
- [4] Seiff, A. et al., 1985, Adv. Space Res. 5, 3.
- [5] Palmer, K.F. and Williams, D., 1975, Appl. Opt. 14, 208.
- [6] Millen, D.J., 1950, J. Chem. Soc. 1950, 2600.

## 著者紹介



生方 颯真

東北大学大学院理学研究科博士  
後期課程1年。東北大学理学研究  
科博士前期課程修了、修士(理学)。

# 遊星人の海外研究記 その20 ～ミッフィーの街 オランダ・ユトレヒトでの研究生生活～

川島 由依<sup>1</sup>

## 1. はじめに

私は2018年10月から2020年9月まで、当時ユトレヒト（現在はライデンに移転）にあったオランダ宇宙研究所（SRON）で研究員として働いておりました。私自身、色々な国での研究・日常生活を知れることが面白く、これまでの方の海外研究記は楽しく拝読させていただいておりました。今回、寄稿のお話をいただき、（5年以上も前のことで記憶が曖昧なところもあり）当時の書類やメール、カレンダー、写真、Googleマップのタイムライン等、あらゆるものを掘り起こしながら執筆しました。本稿も、海外でのポストク先を考える博士課程の学生さんの参考や、どなたかの息抜きとして、もしお読みいただけたら幸いです。

博士課程最終年度の2017年、ポストク探しをするにあたり、海外での研究生生活を体験してみたいという思いがありました。アメリカ天文学会（American Astronomical Society; AAS）の公募ページ<sup>1</sup>を定期的にチェックして、私の専門とする系外惑星大気分野のポストク公募に何件か応募をしました。そうした中で、前述のSRONで系外惑星グループを率いるMichiel Min氏のグループのポストクに、運よく採用していただけることになりました。そのポジションは、私が博士課程修了後に手を広げてみたいと思っていた、系外惑星大気のスペクトル・リトリーバルコード開発に関わるものでした。Michiel Min氏とは事前の面識もなかったため、指導教官の生駒 大洋氏をはじめ、良い推薦状を書いてくださった方々のお陰と

大変感謝をしております。採用が決まったのは、博士課程修了月の2018年3月末でした。4月からの半年間は、東京工業大学（当時）地球生命研究所で井田茂氏・藤井友香氏に研究員として雇っていただくことが決まっていたため、その年の10月からSRONで雇っていただくことになりました。

余談ですが、この際の面接はオンラインでした。面接の案内メールに、ヨーロッパ時間10時/日本時間18時と書かれており、私はそれを鵜呑みにしてしまっていたのですが、実は面接の連絡を貰った日と面接日との間にちょうど、サマータイムの切り替わりがあったのです。そのため、実際には日本時間17時でした。面接開始の1時間半前（だと思っていた）に、面接で使用するSkype IDを連絡したところ、その20分後くらいに、後5分でコールをされるとの連絡を貰い、非常に慌てたのを覚えています。面接の練習を繰り返していたところだったのですが、お陰で緊張する間もなく面接が始まりました。結果的には幸いでしたが、大事なミーティングの時差計算は、自分でもしっかり確認をするべきだという当たり前の教訓を得ました。

## 2. オランダへの渡航準備と 現地での手続き

採用が決まってから渡航までは半年間あったこともあり、比較的余裕をもって準備ができました。ただ、海外への引越しは何かと考えることが多く、荷物の整理・配送手配や家具の売却、外務省での戸籍謄

1. 京都大学 大学院理学研究科 宇宙物理学教室  
ykawashima@kusastro.kyoto-u.ac.jp

<sup>1</sup><https://aas.org/jobregister>

本へのアポステューユ (公印)証明の取得, 厚生労働省が勧めるワクチンの予防接種, 携帯電話の解約等と, あっという間に半年間が過ぎていきました。

オランダ到着後はすぐに移民局に行き, 滞在許可証の申請をしました。通常は10日程で滞在許可証が完成するようですが, 私の場合, 三週間経っても完成の連絡が届きませんでした。そこで移民局に向き問い合わせたところ, 何等かの不具合で, システム上で申請が通っていなかったことが発覚しました。私は渡航1ヶ月半後にイギリス出張を予定していたのですが, 移民局で確認したところ, 滞在許可証の取得前にオランダを出国すると再入国ができなくなると言われ, 焦りました。結局, イギリス出張出発の十日前に滞在許可証を受け取ることができなさきを得たのですが, 遠慮せずに問い合わせる重要性を学びました (ちなみに, 滞在許可証が完成したとの連絡を受けて受け取りの予約を取ろうとしたところ, 出張の出発日までに予約が空いている日がありませんでした。そのため移民局の人に頼み込んで, なんとか予約を入れてもらいました)。

### 3. SRONでの研究生活

SRONのサイエンス部門には天体物理学と地球科学の二つがあり, 系外惑星グループは, 天体物理学部門の中にある三つのグループのうちの一つでした。系外惑星グループは発足して間もなく, 当時はグループリーダーのMichiel Min氏と同僚のポストク1人, 私の計三人しかいませんでした。そのため研究発表セミナーとしては, ユトレヒトから電車で20分程のアムステルダムにある, アムステルダム大学に週一度行き, 系外惑星・円盤グループ (Jayne Birkby氏, Jean-Michel Désert氏, Carsten Dominik氏らが所属)のものに参加をさせて貰っていました。アムステルダム大学の系外惑星・円盤グループはビジターの訪問も多く, やはり島国である日本とは異なる陸続きの国の良さを改めて実感しました。他の方も書かれていましたが [例1, 2], ビジター訪問時に議論を希望する人がスプレッドシートに書き込むというスタイルは, (私はアムステルダム大学で初めて経験したのですが)学生やポストクも気軽に議論を申し込むことができ, とても良いシステムだと思いました。定期的



図1: 研究所のメインルーム。全体ミーティングや, Borrelがここで開かれていました。

な週の用事は, アムステルダム大学の研究セミナーしかありませんでした。日本の大学では, 研究発表セミナー以外にも輪講や論文紹介ゼミ等, 複数の定期ミーティングがあることが多いかと思うのですが, (そのような環境から来た身からすると少し驚きつつも) その分, 研究に打ち込む時間をしっかりと確保できたのは良かったです。

Michiel Min氏は, 欧州宇宙機関の, 系外惑星の大気観測を専有の目的とする初の宇宙望遠鏡Arielのオランダ代表をされていたこともあり, Arielのコミュニティにも入らせて貰うことになりました。三ヶ月に一回, ヨーロッパの各国で代わる代わるArielの定期ミーティングが開かれていたこともあり, 色々な国を訪れ, (ヨーロッパを中心とした)系外惑星大気関連の知り合いを多くつくることができました。また, ヨーロッパ内の国への出張のしやすさを活かし, オックスフォード大学, UCLでの研究滞在や, プラハやアイスランド, バリで開かれた研究会など, 色々経験させていただきました。

研究所での日常生活についてですが, お昼は, 地球科学部門のポストクの人達が誘ってくれるようになり, ユトレヒト大学 (SRONはユトレヒト大学のキャンパス内にありました)の食堂で食べていました。そのメンバーでは, 誰かの家に集まってボードゲームをすることも何度もあり, 楽しく交流をさせてもらいました。また, キャンパス内には大学の植物園があったのですが, ユトレヒト大学とSRONの職員は植物園の入場パスを無料で貰うことができたため, お弁当をもって行き, 植物園で食べることもありました。研究



図2: クリスマスギフトとして研究所から配られたギフトカードとチョコレート。

所では、毎週金曜日の17時半から19時くらいまで、Borrelと呼ばれる飲み会が博士課程学生によって開催されていました。他のグループの学生・ポスドクと知り合う機会になった他、オランダ、またヨーロッパの研究・日常生活の情報を色々と得られたので、楽しかっただけでなく、とても有意義でした。

オランダ、またヨーロッパの研究機関でどの程度一般的なことかはわからないのですが、SRONは組織としての温かみを大事にしている印象を受けました。年に一度、研究所の遠足イベント（一年目は屋外の映画撮影所に行きミニ映画を撮り、二年目はボートに乗った後、ゴルフをしました）があった他、レストランでのクリスマスパーティーもありました。また、クリスマス休暇前には、研究所からのクリスマスプレゼントとして、SRONのイニシャルSの形をした大きなチョコレートとギフトカードが全員に配られました（図2）。

また勤務制度についてですが、（良く知られている話かとは思いますが）地形が平坦なオランダは自転車文化です<sup>2</sup>。家から研究所までの距離が（確か）約8 km以下の場合、自転車での通勤圏内だとみなされ、定額の自転車用通勤手当となるようでした。また、有給休暇が豊富（年間40日以上！）にあるのですが、有給休暇を返上（上限はあります）して働くことで給料に変換できるオプションがある他、三日程度の有給休暇の返上で自転車を購入できる<sup>3</sup>という選択肢もあり、オランダならではのユニークさを実感しました。

<sup>2</sup>二年間のオランダ滞在中に坂を登った経験が一度しかありません！

<sup>3</sup>その制度を利用して自転車を買ってみたのですが、その後、残念ながら盗難被害にあいました。



図3: 部屋の窓から見えた羊。

## 4. オランダでの日常生活

渡航後のオランダでの住居についてですが、研究所の人事課からの紹介で、大学のキャンパス内にある学生アパートに住まわせて貰えることになりました。このアパートは滞在期間の上限が一年と決まっていたのですが、ただでさえ慌ただしい渡航後に、ホテル住まいをしながら住居探しをしなくてよかったのは非常にありがたかったです。SRONは、ユトレヒト大学のサイエンス・パークと呼ばれる理系キャンパス内にありました<sup>4</sup>。アパートはそのキャンパス内にあったため、職場まで徒歩5分という、非常に恵まれた通勤環境でした。一方、（面積が必要な理系キャンパスにありがちですが）市街地からは5 km程離れた位置にあり、土日に閑散としたキャンパスに残り続けるのは物悲しい気持ちになりました。市街地まではバスで20分程だったのですが、出不精な私はバスに乗るのが億劫になり、特に渡航してからの最初の半年間は秋冬で寒さが大の苦手なこともあり、引きこもりがちになってしまいました。ちなみに、アパートの窓からは目の前の羊牧場？（図3）が見え、毎朝、羊を窓からほーっと眺めるのを楽しみにしていたのですが、冬の間はどこか暖かい場所に移るのか、ある日突然いなくなってしまう、とても悲しかったのを覚えています。

そこで二年目のアパートは、市街中心地に探すことにしました。運良く、ユトレヒト中央駅から10分程の運河沿いのアパートを借りられたのですが、これ

<sup>4</sup>ちなみにもう一つ、SRONはグローニンゲンにも拠点があります。



図4: ヌトレヒトの運河. アムステルダム運河と異なり、歩道よりも一段低いところにあります。中心地(左図)には、運河沿いにレストランが並んでいます。

が大大正解でした！一年目の大学のアパートと比べると家賃は二倍になったのですが、家の周りにスーパーやレストランが豊富にあり、またユトレヒト名物の運河(図4, 5)もアパートのすぐ真横を流れており散歩にも最適で、余暇がとても楽しくなりました。駅前毎週土曜日に開催される市場にも気軽に行けるようになり、オランダのスーパーでは見掛けなかった、アサリやエリンギなどの様々な食材も手に入られるようになりました。また、日本人の方が経営されている日本食レストランが家から徒歩圏内にあり、美味しい日本食を求めて定期的に通うようにもなりました。私はジェラート(特にレモン味!)が大好きなのですが、高緯度で22時頃まで明るい夏には、運河沿いにジェラート屋さんの露店ができ、夕飯後にジェラートを買って食べながら運河沿いを散歩することが日課となりました。性格に依るのだと思いますが、私のような、食べることが好きで寒さ嫌いの出不精タイプは、少し家賃が高くなっても生活が便利な場所に住むことを強くお勧めします。

アパート探しは、募集サイトを定期的のみで希望を出し、向こうから連絡が来れば内見ができるという仕組みでした。ただ、アパート探しの競争率が高いオランダでは、内見の連絡を貰えたのは30件のうち数件程度だったかと思います。日本でのアパート探しと比較し驚いたのは、まだ前の住人が住んでいる状態で内見をすることです。前の住人の引越後、すぐに次の人を入れられるので大家さんにとっては確かに効率が良いのですが、日本でのアパート探ししか知

らなかった私にとっては、とても新鮮でした。また、家具付きのアパートを借りたのですが、歴代の住人が残した小物も大量に残されている他、生きている植物があり、水をあげて育ててくださいと言われたことも、驚きました。今は自分でも植物を育てていますが、土に触ることが苦手な植物に触るのにも勇気が必要な私にとっては、小学校以来はじめての植物育成が強制的に始まりました。何の植物かもわからないまま<sup>5</sup>定期的に水をあげていたところ、半年後くらいに突然大きな花が咲き、とても驚いたのを覚えています。

言語について、オランダの公用語はオランダ語ですが、英語に最も近い言語の1つであることもあり、英語が通じないことは全くありません。そういう意味では、非英語圏のヨーロッパの国の中では生活がしやすく、ポストク先としてお勧めかと思います。私はユトレヒト大学のオランダ語講座を最初のうちだけ受講していたのですが、日常でオランダ語がわからず困ることもほぼなかったため、オランダ語より先に英語を磨く方が有益だと思い、(今思うと、せつくなので続けても良かったと思うのですが)辞めてしまいました。その代わり、研究所の職員研修の枠組みで、語学学校の英語講座の費用を負担して貰えることがわかり、非常にありがたく活用させていただきました。

<sup>5</sup>今、Google画像検索(初めて使いました)で試しに当時の写真を入力してみたところ、アマリスであったことが6年越しにわかりました。Google画像検索は便利ですね。



図5: 家の目の前にボート乗り場があったので、試しに一度、乗ってみたときの写真。日本のようにライフジャケットが配られる訳ではなかったので、危険を感じました。一度、モーターボートとぶつかりそうになってしまい、帆先を向こうの人に変えて貰い、なんとか事故を回避できました。

海外滞在の前に健康診断<sup>6</sup>を受けた方が良いというのは良く聞く話かと思いますが、特に歯科治療は済ませておいた方が安心かと思います。私の場合、渡航前には痛みを感じたことがなかった親知らずが突然痛みだしました。街の歯医者に行き、抜歯治療が可能な総合病院の予約を取って貰ったのですが、結局、その予約日より先にひどい痛みが生じてしまい、最終的には総合病院の休日診療に電話をして緊急で抜いて貰いました。大変でした。

なお、オランダで過ごして、日本の配達制度の便利さを実感しました。オランダでは配達時に不在の場合、近所の配送センターに届けられるか、近所の家に配達されるケースが多かったです(配達的时间指定ができる業者もあるのですが、できない業者が大半でした)。特に前者の場合、自分で配送センターまで出向き受け取らないといけないのですが、遠い時に



図6: 突如咲いた、アパートに備え付けられていたアマリリス (だとわかった)。

は5 km程、離れていたりします。そのため重いものを購入した場合、一人暮らし、かつ車も運転できない私のような人にとっては、受け取りの難易度が高すぎると思いました。また、ミニ冷凍庫を購入したときは、一度の配達時に不在だっただけで購入がキャンセルされ、出荷されたベルギーの倉庫に戻ってしまい、落胆しました。結局、その冷凍庫を再度購入し直しました。二度目の配達のはたまたま受け取れ、最終的には冷凍庫をゲットできたのですが、気楽に構えることが大事だという理解を得ました。

## 5. さいごに

海外生活は、準備や手続き等がとても大変でしたが、研究・生活面の双方で新たな文化を知ることができ、とても刺激になりました。もし、海外での研究生活を悩まれている方がいましたら、ぜひ挑戦してみてくださいと思います。きっと、かけがえのない経験になるかと思えます。もし、オランダでの研究・日常生活について

<sup>6</sup>日本のような職場での健康診断は、オランダにはないようです。

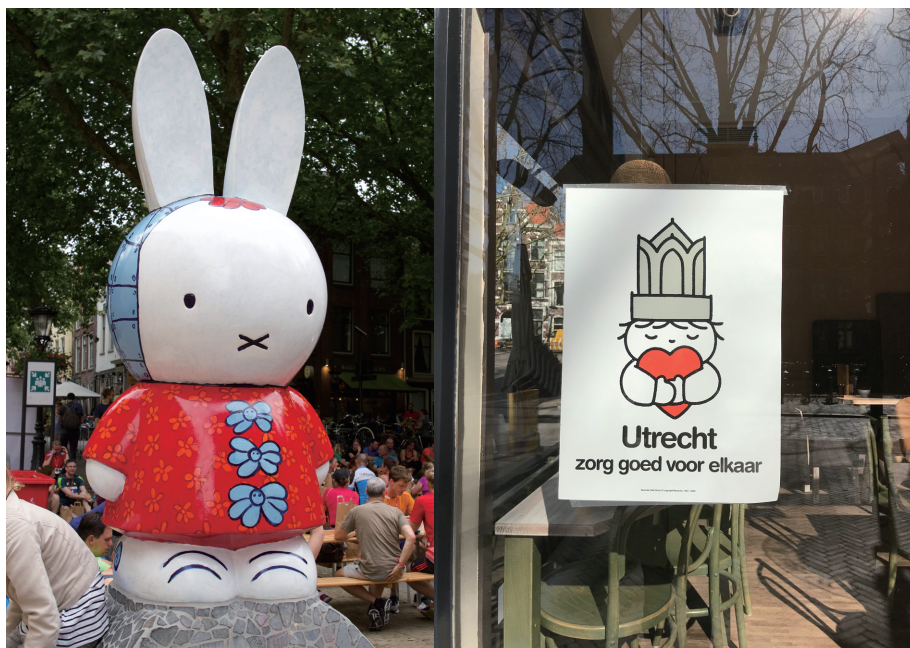


図7: タイトルにも含めましたが、ユトレヒトはミッフィー (ちなみにオランダ語では、ナインチェNijntjeといいます)の作者ディック・ブルーナさんの出身地でもあり、街中のあちこちにミッフィーの像やモチーフがありました (左図)、またコロナ禍には、ミッフィーに出て来るキャラクターのポスターが街のいたるところに貼られました (右図)。

て聞きたい方がいらっしゃいましたら、(少し前の話にはなってしまいますが)お気軽にご連絡ください。

なお、滞在の最後の半年間は、残念ながらコロナ禍と重なってしまい、そのまま2020年8月中旬に日本に帰国するまで在宅勤務となりました。私は2020年の3月から、アムステルダム自由大学の修士課程学生を半年間、インターン<sup>7</sup>として受け入れていたのですが、初めての研究指導でありながら、最初の二週間しか対面での指導ができなかったことはとても大変でした。

最後に、二年間、SRONで研究員として雇っていただいたMichiel Min氏、ならびに大学院の指導教員の生駒大洋氏をはじめ、これまで、また現在の研究生活でお世話になっているすべての皆様に、この場をお借りして感謝申し上げます。また、本稿の執筆の機会をくださいました黒澤耕介氏にも感謝いたします。

<sup>7</sup>(どの程度一般的なことかわからないのですが、)二年間の修士課程中に半年程度のインターンを三回程度行い、そのうちの1つを修士論文として提出することがあるようです。そのため、私もその学生さんの修士論文審査に審査員の一人として加わりました。

[1] 大野和正, 2024, 遊星人 33, 196.

[2] 青山雄彦, 2025, 遊星人 34, 135.

## 著者紹介

川島 由依

京都大学 大学院理学研究科 宇宙物理学教室 助教  
 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学 専攻 博士課程修了。東京工業大学 地球生命研究所 研究員, SRON Netherlands Institute for Space Research 研究員, 理化学研究所 基礎科学特別研究員, 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 特任助教, 東北大学 学際科学フロンティア研究所 助教を経て, 2024年10月より現職。専門は系外惑星科学 (特に大気)。日本惑星科学会, 日本天文学会, 日本地球惑星科学連合に所属。

# 惑星物質固体物性測定コンソーシアム ～2025年度活動報告～

石崎 拓也<sup>1</sup>, 小野寺 圭祐<sup>2</sup>, 田中 智<sup>1</sup>, 佐藤 雅彦<sup>3</sup>, 榎戸 祐馬<sup>1</sup>, 金丸 礼<sup>1</sup>

(要旨) リュウグウの初期分析で得られたリターンサンプルの固体物性測定の見解を基に、将来のサンプルリターンミッションに向けて測定体制の整備と測定技術の改良・開発を行う「惑星物質固体物性測定コンソーシアム」を2025年に発足した。本稿では、2025年度に実施したキックオフワークショップなどの活動状況について紹介する。



図1: 日本地球惑星科学連合大会2025でのキックオフ会議の様子。

## 1. 提案概要

地球外物質の固体物性はその物質が天体上で経験した熱作用や衝突現象などの熱・機械的な物質の反応・進化過程を支配するパラメータであり、天体の形成過程や進化環境を推定するのに不可欠である。

そして固体物性は物質の元素存在度や鉱物組成から、空隙率やクラック分布などの機械的特性に至るまで様々な要因に依存して値が変化するため、類似試料からの類推は危険であり、ひとつの現物試料について体系的に分析することが重要となる。はやぶさ2ミッションでは小惑星リュウグウからのリターンサンプルについて、日本国内の大学・研究機関により固体物性の体系的な分析が行われた。これは地球外物質の固体物性に関する大規模な体系的分析として初の試みであり、小惑星リュウグウの形成過程を議論する

1. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

2. 岡山大学惑星物質研究所

3. 東京理科大学

Ishizaki.takuya@jaxa.jp



図2: ワークショップの様子。

ための根拠となる極めて重要な成果が得られた。

さらに将来のリターンサンプルの固体物性分析を効果的に行うための重要な経験も得られた。リターンサンプルの固体物性には集合体の値ではなく、一次情報として一粒子の値が求められるが、リターンサンプルは隕石試料と比較してサイズが小さいため、微小試料を分析できる方法である必要がある。また量が限られ貴重であるため、試料の科学的価値を棄損しないよう加工や汚染を伴わない条件で分析することが求められる。しかし隕石の分析を前提としたこれまでの分析法は非破壊・非汚染の条件に適合しないものも多く、リュウグウ試料の分析ではやむを得ず破壊・汚染を伴う分析方法が用いられた項目もあった。そしてそれにより分析量が限られたため、複数のサンプルについて同様の分析を行う統計的分析は叶わなかった。このような知見から、MMXをはじめとした将来のリターンサンプルミッションに向けて、リュウグウ試料の初期分析で明らかになった、微小試料を非破壊・非汚染で分析するための課題を各分析項目で検討し改善に向けた技術開発を行うためのコンソーシアムを創成した。以下では2025年度の活動について概観するとともに、2026年度以降の活

動方針についての展望を紹介する。

## 2. JpGU2025でのキックオフ会議

2025年5月20日に地球惑星科学コミュニティに向けてコンソーシアム創設の宣言並びに意見交換の場としてキックオフ会議をJpGU2025にて実施した(図1)。直前の開催アナウンスにも関わらず現地・オンライン併せて30名を超える研究者・学生に参加いただいた。当日は発起人よりコンソーシアム設立の経緯(固体物性の科学的意義や現状の課題)・過去のサンプル測定結果のレビュー(リュウグウ試料・アポロレゴリス試料)を行い、その後コミュニティメンバーとの意見交換を行った。「JAXAキュレーションとの関係性が不明瞭」「最終的なアウトプットのイメージが不明確」などコンソーシアムの未熟な方針設定に起因するコメントがある一方で、測定すべきパラメータの具体的な要望(浸透率・衝撃圧縮に関するデータなど)やリモートセンシング観測の解釈補助としての役割への期待など、活動を後押しするような意見も出た。キックオフ会議後、佐藤雅彦(東京理科大)・榎戸祐馬(JAXA宇宙研)・金丸礼(JAXA宇宙研)がコ

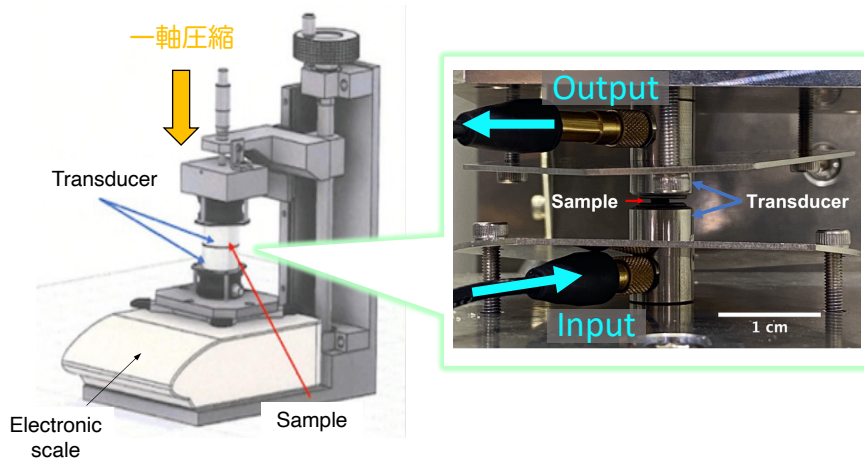


図3: (左) 弾性波速度測定システムの概略. ロードセル式電子秤の上に平板試料を挟む形で一对のトランスデューサを配置し, 上方からの一軸圧縮下にて弾性波速度の測定を行う. (右) トランスデューサ部の拡大図.

アメンバーとして参加し, 6人体制で当コンソーシアムの運営・地球惑星科学コミュニティへの宣伝・隕石試料を用いた試験測定・外部資金獲得の準備等を実施してきている. 今後も定期的なコンソーシアム活動の報告及びコミュニティとの意見交換の場としてJpGUでのミーティングは継続する予定である.

### 3. 第一回惑星物質固体物性測定 コンソーシアムワークショップの開催

2025年9月2日に東京理科大学神楽坂キャンパスにて, 将来のサンプルリターンミッションに向けた固体物性分析の体系的な枠組みを整備することを目的として, 第一回惑星物質固体物性測定コンソーシアムワークショップを開催した(図2). 現地・オンラインあわせて22名が参加し, 幅広い専門分野の参加者による活発な議論が行われた. 本ワークショップ第一部ではリュウグウ試料等のこれまでの帰還試料の固体物性測定経験者から測定で得られた教訓が共有された. また第二部では将来のサンプルリターンミッションに向けて, 固体物性の適用先である太陽系の形成・進化シミュレーションを専門とする研究者から, シミュレーションの場で必要とされる固体物性値やその条件が提案された. さらに第三部では第一部と第二部の内容を踏まえた総合討論を実施した. 第

四部に行われた東京理科大・佐藤研究室の磁気物性測定装置の見学も盛況であった.

ワークショップを通して, リュウグウの初期分析では測定できなかった物性値のリクエストや固体物性コミュニティの継続・拡大方法など多岐にわたる議論が行われる中で, 将来のリターンサンプルの固体物性を体系的に理解するにあたっての課題として, 試料で測定した物性値をどのようにして天体の物理現象に適用するかというスケールアップにあることが挙げられた. そこで, 「サンプルスケールから天体スケールへの固体物性のスケールアップの理論体系の構築」を今後の活動で解決すべき課題として共有し, これをコンソーシアムの最終的な科学目標とすることを決定した.

今後も定期的にワークショップを開催し, 引き続き議論を進めていくことを計画している.

### 4. サンプル加工実験

力学強度の低い始原物質の機械物性測定における課題の一つに試料成形が挙げられる. 例えば, リュウグウ試料やイヴナ隕石試料の弾性波速度測定[1]ではパルス透過法[2]を採用し, 図3に示すように二つのトランスデューサの間に試料を挟む形で測定を実施した. この測定においては, 岩石試料の平

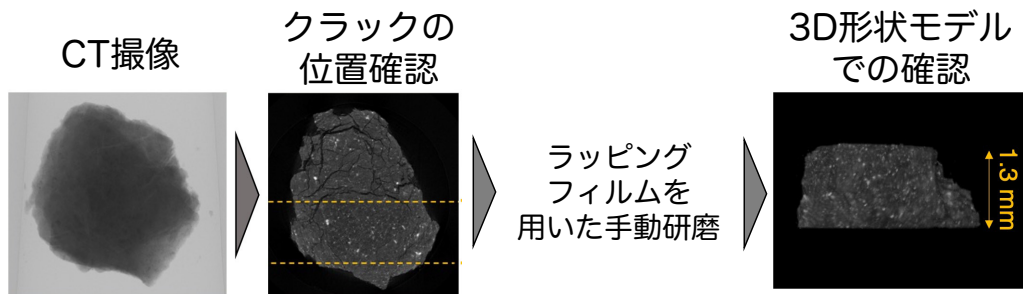


図4: 試料の形状加工プロセス(イヴナ隕石の例).

板加工が必須であり、図4に示すようにX線CT撮像による3次元形状モデルの作成・クラック位置の特定・ラッピングフィルムを用いたマニュアルでのドライ研磨を行い、最終的に1 mm厚程度の平板試料を作成した。この手法の問題点として、加工の成功率が三割程度と低いこと、また加工の精度が個人の技量に依存し、再現性を担保できないことが挙げられる。

以上のような現状の課題解決に向けて、我々は力学強度の低い物質をより機械的かつ成功率の高い集束イオンビーム(FIB)での加工アプローチを試みた。本手法はイオンを電界で加速・集束して試料に照射することで生じるスパッタリング現象(照射イオンが対象試料を構成する原子を弾き出す現象)を利用することで試料の切削加工を行う。加工精度はビーム径に依存するが、例えば弾性波速度測定に必要な平面度(< 数 $\mu\text{m}$ )と比べると2-3桁精度の高い加工が可能で、我々の求める精度での試料作成が達成できると期待される。

実験は2025年7月23日~24日にJAXA宇宙科学研究所地球外物質研究グループにて実施した。加工にはFIB-SEM複合装置NX2000を使用し、対象はリュウグウ試料よりも力学強度の低いタギッシュレイク隕石を使用した。図5に加工の様子を示す。2025年7月23日は10時~18時、翌は10時~17時の計15時間程度FIBによる加工を行った結果、 $60 \times 450 \mu\text{m}$ の領域を約0.3 mm深さまで切削することができた。切断面の精度は予想通り、弾性波速度の測定に

は十分な平面度を有していたもののmmスケールでサンプルの2面(異方性を測定するとすると6面)を加工するには長時間の稼働が必要となる。当然ながらタギッシュレイク隕石より力学強度の高い試料ではさらに時間を要すると予想される。

FIBによる加工では、作業中に試料が破損するリスクは低く、その加工精度は我々の要求を十分に満たすものであるが、加工時間の長さが大きな課題として挙げられる。次年度はよりビーム出力の高いプラズマFIBを用いて加工時間の短縮化を試みる。

## 5. まとめと将来展望

これまでのリターンサンプルの固体物性分析で得られた知見を集約し、将来のサンプルリターンミッションに向けて測定体制の構築と測定技術の改良・開発を行うための惑星物質固体物性測定コンソーシアムを発足させ、2025年度はJpGU2025でのキックオフやワークショップを開催した。また固体物性測定のための基礎技術として、力学強度の低いサンプルを精密に加工する方法の開発にも着手した。

今後も継続して、固体物性を体系的に測定するための体制と技術・環境の整備を進めるとともに、2026年度はリファレンス試料を用いて測定の実証を行いながら、試料への破壊と汚染レベルに応じた効率的な測定フローの構築に取り組む計画である。また2025年度のワークショップで実施したような、測

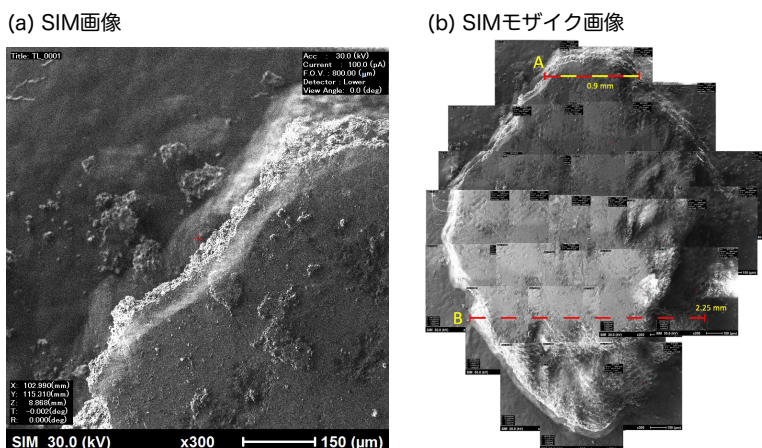


図5: Scanning Ion Microscope (SIM) 画像. (a)  $0.8 \times 0.8$  mmの単一画像. 画像右下半分にタギッシュレイク隕石が写っている. (b) 試料全体のモザイク画像. 加工試験ではA断面の切削を試みた.

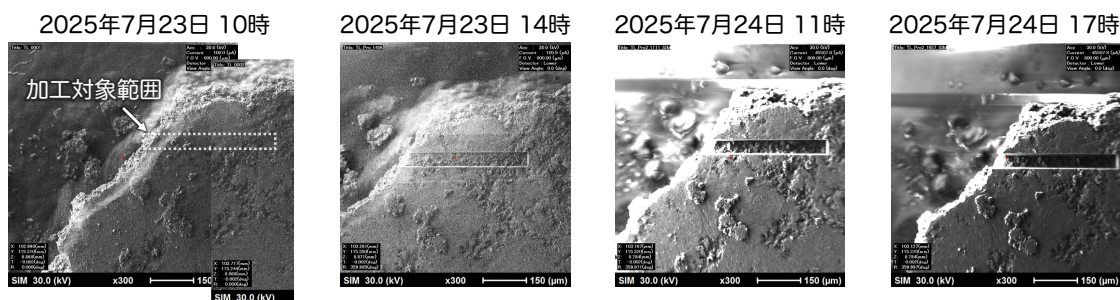


図6: FIBを用いた切削加工の様子. 左2枚のSIM画像は2025年7月23日, 右2枚は2025年7月24日の加工作業中に撮像したもの.

定した固体物性が利用される先の科学的成果の検討も引き続き推進し, 2026年度は地球型惑星内部ダイナミクスの分野にも取り組むことを計画している. そこでは固体物性のスカラー値だけでなく異方性も重要な情報となることから(例えば, [3]), 物性の異方性を測定する技術も検証する.

## 6. 謝辞

実験にはJAXA宇宙科学研究所地球外物質研究グループのFIB-SEM複合装置NX2000を使用させていただいた. また, サンプル加工実験で使用したタギッシュレイク隕石は中村昭子教授(神戸大学)より提供いただいた. ここに感謝の意を示したい.

## 7. 引用文献

- [1] Onodera, K. et al., 2025, J. Geophys. Res. Planets 130, e2025JE008944.
- [2] Birch, F., 1960, J. Geophys. Res. 65, 559.
- [3] Morishige, Y., 2025, Tectonophysics 911, 230822.

# 若手を中心とした国内水星研究コミュニティの取り組み

平田 佳織<sup>1</sup>, 鈴木 雄大<sup>2,3</sup>

(概要) 水星探査機BepiColomboの軌道投入を2026年末に控え、水星サイエンスの大きな進展が期待されている。水星が惑星科学の最前線となる今後、国際コミュニティにおける日本の存在感向上は重要である。複数機器のデータを用いた統合的理解が重要となる一方、過去に水星探査例の無い日本では水星研究の専門家が少なく、新規参入のハードルが高いという課題がある。そこで我々は、国内の水星研究者を増やし、若手が専門の垣根を越えて議論できる場を提供するため、2024年度・2025年度にオンラインセミナー「水星勉強会」を、2025年に対面開催のワークショップ「水星研究会2025」を開催した。本記事ではこれらの取り組みについて報告する。

## 1. はじめに

2018年に打ち上げられた水星探査機BepiColomboは、8年の惑星間航行を経て、来る2026年末に水星周回軌道に投入され本格的な観測を開始する。日本と欧州が提供した2機の探査機はそれぞれ水星の周辺環境と表層を調査予定であり、新たな観測データの取得に伴う水星サイエンスの大きな進展が期待される。観測装置のターゲットは内部-表層-外気圏-磁気圏-宇宙空間環境と多岐にわたっており、これらの系がシームレスに接続される水星科学においては、複数機器間の協調観測や統合的なデータ解析・解釈が重要視される。探査機到着を目前に控えた今日、「これまで何がわかってきたのか」「何がまだわかっていないか」を専門分野に限らず広く整理して理解することが必要となる。

BepiColomboミッションが現在進行形で展開され、水星が惑星科学のフロンティアとなる今後しばらくの間、国際的な水星コミュニティにおいて日本のプ

レゼンスを高めることは、惑星科学全体における日本のプレゼンスを高めることに直結する。しかし、これまでに人類が水星に到達したNASA主導の水星探査機Mariner 10号とMESSENGERには日本人研究者が直接関与していなかったこともあり、日本国内にはBepiColomboで取得されるデータ解析を担う水星研究者は現在でも少ない。また、このような周囲に水星専門家が少ない状況から、新たに水星研究へ参入するに至るまでに大きなハードルが存在している。

そこで我々は、日本国内における水星研究のプレーヤーを増やすことを目指し、水星サイエンスの理解を深める場づくりに取り組んできた。特に、水星研究経験の浅い若手研究者が気軽に参加でき、専門分野の垣根を超えて継続的に議論できる環境の企画・運営に注力している。本記事では、2024年度・2025年度に開催したオンラインセミナー「水星勉強会」と、2025年9月に開催したワークショップ「水星研究会2025」に関して報告する。

## 2. オンラインセミナー『水星勉強会』

### 2.1 2024年度の開催趣旨・概要・実績

初年度となる2024年度は、2010年台に行われた

1. レスター大学

2. 宇宙航空研究開発機構

3. ボストン大学

kh455@leicester.ac.uk

表1: 水星勉強会2024 開催実績.

回	日時	発表者	輪読内容
1	5/8(水)	鈴木 雄大 (宇宙研) & 平田 佳織 (東京大学)	1. The MESSENGER Mission: Science and Implementation Overview 20. Future Missions: Mercury after MESSENGER
2	5/17(金)	平田 佳織 (東京大学) & 于 賢洋 (東京大学)	2. The Chemical Composition of Mercury
3	5/24(金)	西山 学 (DLR) & 于 賢洋 (東京大学)	3. Mercury's Crust and Lithosphere: Surface and Mechanics
4	6/24(月)	松岡 亮 (北海道大学)	4. Mercury's Internal Structure
5	7/1(月)	八木 優人 (京都大学)	5. Mercury's Internal Magnetic Field
6	7/12(金)	鈴木 雄大 (宇宙研)	14. Observations of Mercury's Exosphere: Composition and Structure
7	7/17(水)	鈴木 雄大 (宇宙研)	15. Understanding Mercury's Exosphere: Models Derived from MESSENGER Observations
8	7/29(月)	庄崎 弘基 (東京科学大学)	6. The Geologic History of Mercury
9	8/19(月)	平田 佳織 (東京大学)	7. The Geochemical and Mineralogical Diversity of Mercury
10	9/2(月)	田畑 陽久 (宇宙研)	8. Spectral Reflectance Constraints on the Composition and Evolution of Mercury's Surface
11	9/18(水)	野間 光葉 (東京大学)	9. Impact Cratering of Mercury
12	10/1(火)	小川 琢郎 (東京大学)	16. Structure and Configuration of Mercury's Magnetosphere
13	10/10(木)	木下 岳 (東京大学)	17. Mercury's Dynamic Magnetosphere
14	10/16(水)	西山 学 (DLR)	10. The Tectonic Character of Mercury
15	11/11(月)	豊川 広晴 (総研大)	12. Mercury's Hollows
16	11/20(水)	荒木 亮太郎 (大阪大学)	13. Mercury's Polar Deposits
17	12/16(月)	千葉 翔太 (名古屋大学)	17. Mercury's Dynamic Magnetosphere
18	12/27(金)	鈴木 雄大 (宇宙研) & 平田 佳織 (東京大学)	19. Mercury's Global Evolution
19	1/31(金)	近藤 克 (東京科学大学)	18. The Elusive Origin of Mercury
20	2/12(水)	白井 寛裕 (宇宙研)	11. The Volcanic Character of Mercury

表2: 水星勉強会2025 開催実績.

回	日時	発表者	紹介論文	発表タイトル
1	5/21(水)	鈴木 雄大 (宇宙研)	Leblanc et al. (2023)	水星外気圏-表面相互作用に対する表面温度の影響
2	6/2(月)	加藤 正久 (京都大学)	Kalski et al. (2025)	水星カロリス盆地北側の地殻磁場領域のソース深さ推定
3	6/16(月)	西山 学 (DLR)	Klimczak et al. (2025)	水星のテクトニクス地形の全球パターンとその起源
4	7/2(水)	毛利 智紀 (京都大学)	Aizawa et al. (2023)	水星へ振り込む電子の直接観測
5	7/11(金)	庄崎 弘基 (東京科学大学)	Rodriguez et al. (2023)	水星の地質進化と揮発性物質の起源
6	7/16(水)	鍵谷 将人 (東北大学)	Lierle et al. (2022)	水星のK大気の空間分布と温度
7	7/23(水)	田畑 陽久 (宇宙研)	Caminiti et al. (2024)	水星宇宙風化の特徴と今後の課題
8	7/29(火)	池田 あやめ (産総研)	Wright et al. (2020)	Calorisのknob形状は揮発性物質由来か?
9	8/6(水)	山下 光葉 (東京大学)	Lennox et al. (2025)	水星南極域の葉状放出物形成メカニズムの推定
10	8/22(木)	木下 岳 (東京大学)	Lavorenti et al. (2023)	水星の宇宙風化と外気圏形成起源の理解に向けた、太陽風降下領域の地理的分布に関する研究
11	8/26(火)	小川 琢郎 (東京大学)	Shi et al. (2025)	3次元シミュレーションを利用したFACを中心とした電流構造の研究
12	9/26(金)	荒木 亮太郎 (宇宙研)	Beuthe et al. (2020)	地殻組成を反映した水星地殻厚推定の研究
13	10/3(金)	高橋 一綺 (北海道大学)	Xu et al. (2024)	水星コアマントル境界におけるダイヤモンド層の存在可能性について
14	10/24(金)	平田 佳織 (東京大学)	Fischer & Parman (2025)	水星のバルク組成と初期サイズ
15	11/5(水)	八木 優人 (京都大学)	Wardinski et al. (2021)	水星磁場の非対称性：コア内部構造解明への新たな手がかり
16	11/10(月)	豊川 広晴 (東京大学)	De Toffoli et al. (2024)	水星のhollowの分布と地形の関係
17	12/4(木)	千葉 翔太 (名古屋大学)	Chen et al. (2023)	太陽風による圧縮に対する水星磁気圏の特異な応答: 地球との比較を添えて
18	12/22(月)	高原 璃乃 (東京大学)	Ozaki et al. (2023)	水星磁気圏のWhistler Mode 波動 - 地球磁気圏との比較とみお到着後の観測 -
19	1/5(月)	古賀 亮一 (名古屋市立大学)	Leon-Dasi et al. (2023)	深層学習を用いた水星の火山噴出の解析
20	1/19(月)	高島 尚子 (東北大学)	Millilo et al. (2023)	水星外圏大気のNa発光の季節変動・短時間変動

水星探査機MESSENGER (NASA) による科学成果を整理し、BepiColombo以前の水星科学の到達点を広く理解することを目的とし、教科書“*Mercury: The view after MESSENGER.*”<sup>[1]</sup>の輪読を行った。2024年5月から2025年2月にかけて、20回にわたってオンライン開催した(表1)。参加登録者数は43名で、内訳は学生25名、PD7名、教職員11名であっ

た。

## 2.2 2025年度の開催趣旨・概要・実績

2025年度は、前年度に身につけた知識をベースに、最新の水星研究の動向を整理することを目的として、2020年台に出版された水星に関連する論文の紹介を行った。2025年5月から2026年1月にかけて、計20

回にわたって計20本以上の論文をレビューした(表2)。参加登録者数は46名で、内訳は学生21名、PD9名、教職員16名であった。

### 2.3 総括・今後の展望

参加者の大半が水星以外の研究を行ってきた研究者であるという構成を踏まえ、勉強会の成果を最大化できる発表担当者および日程を設定した。発表担当者に、比較的小さい負担かつ高い理解度で教科書の内容を紹介してもらうために、2024年度勉強会では輪読を行う教科書の各章で対象とされる研究分野について、水星に限らず他天体で研究経験のある発表者を割り当てるように心がけた。2025年は、最新論文を紹介してもらった。事前に世話人で紹介推奨論文リストを作成し、発表担当者の論文選択の参考にしてもらった一方で、リストに含まれていない論文の中から自分の興味のある論文を見つけて紹介した発表者も多数いた。2025年度の勉強会を進めていく過程で、新たに出版された論文や参加者が興味深いと見つけた論文は適宜リストに追加され、また、勉強会で紹介された論文は後述するアーカイブ資料と紐付けて容易に参照できるように整理した。

発表日程を決定する際には、聴講参加者の専門分野が偏るのを避けるため、類似した内容の発表を連続で行うのではなく、できるだけ異なる領域を扱う発表を交互に配置した。また、本勉強会では固定の開催曜日・時刻を設けず、1-2か月ごとに参加者間で日程調整を行った。このときに、発表担当者だけでなく、特に議論を活発化させると期待される聴講者の出欠登録状況も鑑みて最適な日時を選択した。

本勉強会ではアーカイブとして発表資料や録画、議事録を保存し、参加者に共有している。最新論文のレビュー発表の際に、2024年度の勉強会の資料を引用して背景知識を確認するなど、アーカイブ資料が活用される機会が多く見られ、水星研究を理解して新たな研究に繋げるためにアクセスしやすい参考資料を蓄積することができている。

若手研究者を中心にこれまで直接的に水星研究に関わってこなかった方にも積極的に参加してもらうことができた。また、対象分野が偏らないよう発表担当者や日程を設定し、多岐にわたる専門分野の方に参加してもらえた。こういった参加者の構成から、発



図1: 水星研究会2025 現地参加者18名の集合写真(2025年9月16日)。

表を聞きながら生じた素朴な疑問を共有しやすい雰囲気定着した。専門分野が異なる研究者だからこそ生まれる新しい視点からの議論も活発に行われ、後述するワークショップでの議論のタネとなるようなアイデアも多数見られた。

オンラインセミナー形式の勉強会は2026年度以降も継続的に開催することを考えている。具体的な内容としては、2025年度に引き続き新着論文の紹介、BepiColombo探査機に搭載される観測機器に関するレビュー、世界初の水星探査機Mariner10号の装置や科学成果の再訪、参加者自身の水星や関連する研究の紹介などを、ミッションの進行に合わせて適切なタイミングで行いたいと考えている。

## 3. ワークショップ『水星研究会2025 – 他天体の知を水星へ、水星の知を他天体へ –』

これまでに実施してきたオンラインセミナー等で蓄積した知見を基盤とし、新たな共同研究を具体的に立案することを主目的として、2025年9月16日から18日にかけて北海道大学にてワークショップ『水星研究会2025 – 他天体の知を水星へ、水星の知を他天体へ –』を開催した(図1)。

### 3.1 開催趣旨

本研究会では、現在水星を主たる研究対象としていない研究者にも積極的な参加を呼びかけ、水星研究者の専門的な知見と、他天体を専門とする研究

表3: 水星研究会2025 プログラム.

1日目：9/16(火)	
13:00	開場 (ポスター掲示など)
14:00 - 14:15	集合・挨拶・概要説明
14:15 - 14:45	レビュー講演 #1「BepiColomboミッション」 村上 豪 (宇宙研)
14:45 - 16:15	レビュー講演 #2「水星の表層」 平田 佳織 (東京大学) & 西山 学 (DLR)
16:15 - 16:45	コーヒー休憩
16:45 - 18:15	レビュー講演 #3「水星の外気圏」 鈴木 雄大 (宇宙研)
18:15 - 18:30	議論内容のまとめ・解散
19:30 -	懇親会
2日目：9/17(水)	
9:00 - 9:15	集合・1日目の振り返り
9:15 - 10:45	レビュー講演 #4「水星の内部」 鎌田 俊一 (北海道大学) & 高橋 一綺 (北海道大学)
10:45 - 11:00	コーヒー休憩
11:00 - 12:30	レビュー講演 #5「水星の磁気圏」 小川 琢郎 (東京大学) ほか
12:30 - 13:30	お昼休憩
13:30 - 14:00	全体議論内容のまとめ
14:00 - 15:30	グループ議論・作業
15:30 - 16:00	コーヒー休憩
16:00 - 17:30	グループ議論・作業
17:30 - 18:00	進捗共有・まとめ・解散
3日目：9/18(木)	
9:00 - 9:10	集合・2日目までの振り返り
9:10 - 10:15	グループ議論・作業
10:15 - 10:45	コーヒー休憩
10:45 - 11:30	グループ議論・作業
11:30 - 12:00	進捗・今後の方針の共有・まとめ
12:00 - 12:30	諸連絡・解散

者の自由な発想の融合を目指した。プログラムはレビュー講演やポスター発表に加え、講演中に盛り上がった話題を中心に少人数の班に分かれて深く議論する時間を十分にとり、その場で直ちに共同研究構想を開始できる実践的な場とした。さらに、生み出されたアイデアを単なる議論に留めず、BepiColombo探査機の実際の観測提案への昇華・還元も目標に据えた。

### 3.2 概要・実績

本研究会の開催概要、ならびに実施実績は以下の通りである。

- 日時:2025年9月16日(火)–18日(木)
- 場所:北海道大学 理学部8号館 コスモスタジオ
- 共催:日本惑星科学会
- 主な内容(プログラムの詳細は表3を参照):

- ① 水星に関連した比較惑星学的な共同研究の立案・議論
- ② レビュー講演(BepiColombo概観, 内部, 表層, 外気圏, 磁気圏の計5講演)
- ③ ポスター発表(10件, コアタイムは設けず, 期間中常時掲示)
- 参加者統計
- 参加者数:19名(うちオンライン参加1名, 水星勉強会非参加者2名)
- 身分:学生 10名(修士課程2名, 博士課程8名), PD 4名, 教職員 5名
- 所属:JAXA宇宙研(4名), 東京大学(4名), 北海道大学(3名), 京都大学(3名), 神戸大学(2名), 産総研(1名), 名古屋大学 ISEE(1名), ドイツ航空宇宙センター(1名)

### 3.3 レビュー講演・全体議論

まず、5件のレビュー講演を行った。後のグループ議論に向けたインプットおよび準備という位置付けのため、ミッション概要以外の講演では30分の発表に続いて倍の60分の議論時間という大胆な時間配分を設定した。結果として、活発な質疑応答・議論が続き、長くたった議論時間も短く感じられた。各講演の概要は以下の通りである。

- #1 BepiColomboミッション (村上)  
BepiColomboミッションの概要や科学目的, 搭載観測装置の紹介に加え, これまでの日本国内における若手研究グループの試みの紹介と現在の若手コミュニティへの期待や要望について講演した。探査機搭載装置の詳細な観測能力や運用計画の検討状況等に関して活発な質疑応答が行われ, BepiColomboを用いた研究提案や観測計画立案にあたり基本情報の確認やブレインストーミングとして有意義なセッションとなった。
- #2 水星の表層 (平田・西山)  
水星表面特性(スペクトル, 地形, 残留磁化)や地質進化に関わる多様なプロセス(テクトニクス, 火成活動, クレータリング, 地形緩和, 宇宙風化, 揮発性物質の挙動)を各論的にレビューし, 現在の理解と未解決課題を整理した。また, これま

での研究で解明されてきた水星の地質進化史と結びつけながら、現在利用可能な表層観測データおよびデータプロダクトについて概説した。

#### - #3 水星の外気圏 (鈴木)

水星の希薄大気(外気圏)について、基礎的な物理過程およびこれまでの観測結果を概観し、未解決課題を整理した。特に、温度変化に伴う表層揮発性物質の輸送、太陽風との相互作用による外気圏生成、外気圏量変動への磁気圏構造の応答など、表層・磁気圏等の系と外気圏との関係に関する研究例を重点的に取り上げた。あわせて、近年の研究動向および主要な研究手法についても概説した。

#### - #4 水星の内部 (鎌田・高橋)

学際的共同研究の立案を見据え、まず惑星内部研究の大局的な目的・モチベーションを共有した。続いて現在の水星内部研究の到達点と問題点を紹介し、最新の水星内部モデルとして、測地学モデル<sup>[2]</sup>と化学組成モデル<sup>[3]</sup>を詳細にレビューした。

#### - #5 水星の磁気圏 (小川・木下・千葉)

粒子の運動、波動現象、電流系といった惑星磁気圏を構成する主要な物理要素を紹介し、水星磁気圏に固有な特性を整理した。あわせて、惑星表面や外気圏など、磁気圏の形成・変動に影響を与える境界条件に関する研究例も取り上げた。さらに、Mariner 10号およびMESSENGERの観測結果を踏まえた上で、BepiColombo搭載観測装置の特性および観測上の制約についても整理した。

### 3.4 グループ議論

2日目の午後および3日目の午前は、3-6名ずつのグループに分かれて詳細な議論を行った(図2)。まず、レビュー講演の質疑応答・議論の際に特に盛り上がった話題をリスト化し、参加者が重点的に議論したいテーマを募り決定した。3日目の朝には再度議論したいテーマを募ってグループ分けを行い、2日目と異なるテーマについて議論した。

議論のテーマには、例えば「宇宙風化」「残留磁化と衝突溶融物」「沿磁力線電流の閉じ方」「CME発生時の外気圏・磁気圏の応答」など、水星の中でも特に



図2: グループ議論の様子。

ホットかつ多角的な視点が必須の魅力的なテーマが並んだ。進行方法は班ごとに多様であったが、関連論文のサーチや案出し・議論に加え、早速その場でMESSENGER探査機のデータに触れて初期解析を行いながら議論する班も複数あった。さらには、その後実際に研究へと派生したテーマも複数生まれた<sup>[4ほか]</sup>。継続議論を促すプラットフォームの構築を検討しており、他のテーマについても将来的な実現が期待される。

グループ議論の後には、各議論内容の簡単な報告および全体議論の時間を設け、BepiColomboのさらに後の将来ミッションについてもアイデアを出しあった。探査機軌道や搭載機器、着陸探査の場合の着陸地点(地質区分)の候補など、様々な立場から探査機に求められる性能等についての案出しを行った。

### 3.5 総括

軌道投入後の本格観測が始まる前に、一旦ミッションの枠組みを意識しすぎることなく、腰を据えてじっくりかつざっくりばらんに研究テーマを話し合える機会は非常に貴重であった。私たちの「やりたい」という純粋な気持ちだけから手探り状態で立ち上げた研究会ではあったが、結果として大きな収穫が得られたと感じている。

本研究会では、レビュー講演よりも全体議論の時間を意識的に長くとった。その甲斐もあり、全体議論の段階から多角的な視点が交わり、実際の研究に昇華し得る魅力的なテーマ案が次々と生まれる活況を呈した。また、1年以上にわたりオンラインセミナーを

共にしてきたメンバーが中心ではあったが、事前の資料や録画の共有が功を奏し、今回初めてコミュニティに参加した方々も円滑に議論の輪に加わることができた。

終始参加者の発言が絶えず、集中的な議論の場を創出できたことは最大の成果であったが、同時に、今後同様の取り組みを企画する際の参考となる実践的な知見も得られた。今回、自由闊達な交流を促すため、ポスター発表については敢えてコアタイムを設定せずに休憩時間等を利用するという挑戦的な試みを行った。しかし実際には、本編の講演・議論が白熱した結果、ポスターの前で語り合う時間が圧迫されてしまうという“嬉しい誤算”が生じた。このように議論の熱量が高い場においては、朝などにポスター専用のコアタイムを明示的に設ける、あるいは本編の議論を適度なタイミングで区切ってグループ議論へ誘導するなど、進行にメリハリを持たせることが、多角的な議論をさらに引き出す鍵になると考えられる。

最も重要なのは、ここで可視化された熱量をいかに今後の活動へ繋げていくかである。我々運営側も手探りであったため、コミュニティの維持・拡大やリサーチグループ化といった具体的な発展的構想については、まだ準備が不足していたことは否めない。しかし、本研究会で目の当たりにした参加者の圧倒的な熱意とポテンシャルは、水星コミュニティの明るい未来を確信させるものであった。この熱を冷ますことなく、次なるステップに向けて参加者全員でこのコミュニティを力強く育てていきたい。

## 4. まとめ

BepiColombo探査機の水星周回軌道投入をついに年末に控え、世界的に水星研究が加速している。本稿では、これに向けた国内コミュニティの形成・拡大を目指し、2年間にわたり実施してきたオンラインセミナー、および北海道大学で開催した対面研究会の試みについて紹介した。

一連の活動には延べ50名以上の研究者・学生が参加し、日常的な勉強と多角的な議論の場を創出することができた。しかし真に重要なのは、これらを一過性のもので終わらせず、BepiColomboの水星周回観測データを駆使して斬新な科学的成果を継続

的に生み出していくことである。今後は、本研究会で芽生えた共同研究の種を育み、コミュニティをさらに発展させるための強固なプラットフォーム構築を目指す。具体的には、通年でのオンラインセミナーと年1～2回の研究会開催を定着させていく。さらに長期的には、BepiColomboミッションにおける共同研究の枠組みにとどまらず、新たなリサーチグループの結成や水星将来ミッションの提案なども見据え、精力的に活動を展開していく所存である。

## 5. 謝辞

水星研究会2025にご参加くださった皆様に感謝申し上げます。特に、村上豪さん、鎌田俊一さん、小川琢郎さん、木下岳さん、高橋一綺さん、千葉翔太さん、西山学さんには、SOC/LOCとして世話人と共に事前準備や当日の話題提供を通じて研究会をより有意義にしてくださいましたことを心より感謝申し上げます。また、本研究会の開催にあたり、日本惑星科学会より共催ならびに参加者への旅費援助を賜りましたことを、ここに深く御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] Solomon, S. C. et al., 2018, Mercury: The view after MESSENGER (Cambridge: Cambridge University Press).
- [2] Genova, A. et al., 2019, Geophys. Res. Lett. 46, 3625.
- [3] McDonough, W. F. and Yoshizaki, T., 2021, Prog. Earth Planet. Sci. 8, 39.
- [4] 木下岳 ほか, 2026, 研究集會『宇宙プラズマ・恒星放射が惑星超高層大気・衛星表層環境に及ぼす影響』。

# 月科学コミュニティの活性化に向けた取り組み ～2025年度活動報告～

小野寺 圭祐<sup>1</sup>, 大竹 真紀子<sup>1</sup>, 池田 あやめ<sup>2</sup>, 山下 光葉<sup>3</sup>, 神田 恵太郎<sup>4</sup>,  
長岡 央<sup>5</sup>, 荒木 亮太郎<sup>6</sup>, 仲内 悠祐<sup>5</sup>, 西谷 隆介<sup>6</sup>, 諸田 智克<sup>3</sup>

(要旨) 本稿では、我々が2025年度に実施した「月科学コミュニティの活性化」を目的とした活動について報告する。前半は月科学コミュニティメーリングリスト(Moon-next)の運用状況の報告、後半は2025年12月に岡山大学惑星物質研究所にて開催した第17回月地殻研究会について報告する。

## 1. はじめに

我々は、国内月科学コミュニティの縦横のつながりを強化すべく、2022年度よりメーリングリストおよび研究会の運営を行ってきている。特にこの2年ほどは若手研究者や学生の声が通りやすい組織整備を意識し、コアメンバーに学生を積極的に取り込み、様々な年代層が共にコミュニティを運営している。以下では、2025年度の活動について報告する。

## 2. メーリングリストMoon-nextの運用状況

Moon-nextに関しては、前回の報告より11名の新規メンバーを追加し、計77名となった(2025年4月10日時点)。本メーリングリストでは、月科学に関する研究会やセミナー等の案内、新着論文の共有、公募案内などを行なっている。メーリングリストに参加を希望する場合は、管理者(moonnextcore@gmail.com)まで問い合わせ願う。

1.岡山大学惑星物質研究所

2.産業技術総合研究所

3.東京大学

4.東北大学

5.立命館大学宇宙地球探査研究センター

6.宇宙航空研究開発機構

konodera@okayama-u.ac.jp

## 3. 第17回月地殻研究会の開催報告

### 3.1 趣旨

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

### 3.2 テーマ

今回のテーマは「高圧実験とサンプル分析から探る月の内部構造」と設定し、以下の2名に招待講演を依頼した。研究会の趣旨に則り、研究者間の密な議論を促すため、各講演者には二時間の発表時間を配分した。

招待講演者(敬称略)：

・芳野 極 (岡山大学惑星物質研究所)

・長岡 央 (立命館大学宇宙地球探査研究センター)

### 3.3 開催情報

日時:2025年12月10日(水)～12日(金)

会場:岡山大学惑星物質研究所

表1: タイムテーブル.

1日目 (12/10)	2日目 (12/11)	3日目 (12/12)
	招待講演Ⅰ 長岡さん 9:00~11:00	総合討論Ⅱ・まとめ 9:00~10:30 話題提供:宮崎さん
	惑星研ラボツアー 11:00~12:20	移動 & 昼休み
	昼休み&写真撮影	
開会の挨拶/趣旨説明 14:00~14:15	招待講演Ⅱ 芳野さん 13:30~15:30	フィールドトリップ 鳥取砂丘/ルナテラス
若手講演 14:30~17:10	総合討論Ⅰ 15:40~17:30	
移動	移動	
懇親会Ⅰ	懇親会Ⅱ	

表2: 若手講演一覧.

発表者(所属)	タイトル
高木 彪(岡山大)	月のコア-マントル境界におけるilmeniteとFe-Sメルト間の濡れ性の評価
藤田 盛之介(大阪大)	嫦娥5号試料:Pyroxene組成に基づく温度圧力条件の推定
井上 義洋(愛媛大)	鉄含有量の異なる直方輝石の高圧高温下弾性波速度測定
篠原 直生(総研大)	月地下空洞内における水分子残存の温度条件
日向 輝(東京大)	その場K-Ar年代計測装置による月隕石の測定
山下 光葉(東京大)	Crisium盆地リングの組成解析による初期火成活動史の復元
神田 恵太朗(東北大)	嫦娥4号搭載地中レーダー観測から示唆される月表層進化

開催形式:ハイブリッド

参加人数:29人(うち学生8人)

タイムテーブル:

研究会のタイムテーブルを表1に示す。初日は例年通り若手講演セッションを設け、(おそらく)過去最多である学生七名の発表を行った(表2)。2日目には、二件の招待講演のほかに高圧実験施設とリュウグウサンプルなどの試料の無機分析を行う実験室の見学を行った。2日目の午後と3日目の午前に総合ディスカッションを実施し、全体を通しての追加質問や世話人・参加者から提供した話題(リモートセンシングデータの扱い方の注意点・バルク組成計算

に使用される熱力学シミュレーションソフトの紹介・JLPEDAの取り組み紹介)について議論した。また、今後の研究会の方針や運営体制について議論した。3日目の午後はフィールドトリップとして鳥取砂丘・ルナテラスへ移動し、鳥取大学小玉芳敬さんに砂丘地形形成メカニズムの解明研究ならびに砂丘地形保全の現状についての講演を聞いたのち、小玉さん解説のもと現地見学を行った。研究会・フィールドトリップおよび懇親会の様子を図1~4に示す。

### 3.4 招待講演内容の概要

招待講演I:芳野 極(岡山大学惑星物質研究所)

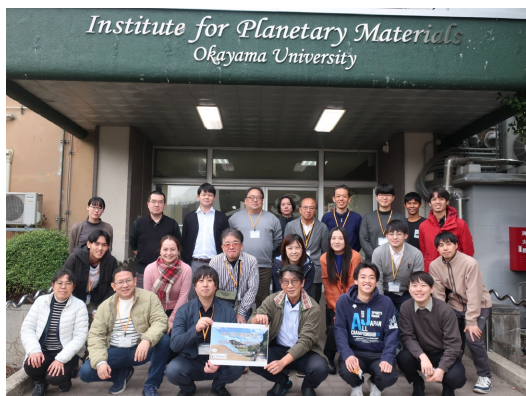


図1: 集合写真(岡山大学惑星物質研究所にて).

芳野さんには「高圧実験による月内部の研究」というタイトルで実験的研究から「如何に月の内部進化や物性情報を引き出すか」という観点から講演いただいた。最初に高圧実験を行うモチベーションとして以下の四点について概観いただいた：(1)現在の惑星内部構造の制約(観測との対比/構成物質の特定/水の量など), (2)惑星内部ダイナミクスの制約(冷却過程/マントル対流/コアのダイナモ運動), (3)惑星内部進化の制約(マグマオーシャンでの分化/成層構造の形成), (4)地球化学的制約(コア-マントルの元素分配/同位体分別).

発表の前半では、講演者自身の高圧実験研究のハイライトを紹介いただいた。詳細は割愛するが、内容としてはオリビン多結晶体中の熔融鉄合金の連結度を電気伝導度測定により評価し、微惑星における核形成モデルを提案したYoshino et al.(2003) [2]や地球アセノスフェアの電気伝導度異常の説明を目的とした含水オリビンの電気伝導度測定を行ったYoshino et al.(2006)[3]などが挙げられる。

発表中盤では、月の内部構造推定のレビュー[4-6など]を行った後、月内部構造における諸問題(例えば、月マグマオーシャンの深さ・月深部の部分熔融層の有無・金属核のサイズと組成・月の磁場生成)について網羅的に紹介いただき、参加者も交えて議論を行った。特にコアマントル境界直上の低速度層(LVZ)については、近年の成果[7-9]を引用しながら、LVZの候補物質の物性測定結果について紹介され、アポロ月震データの解析から得られた弾性波速度構造との比較結果について説明いただいた。



図2: 研究会の様子。

Kono et al.(2023)[9]によるとLVZの弾性波速度は4.3-5.0 vol.%の液体Fe-Sを含むオリビンで説明が可能であるようだ。

発表終盤では、様々な月の内部進化モデル[10-15]を紹介しつつ、モデル計算の問題点や未だ解決に至っていない点について解説いただいた。また、月サンプルの古磁気強度[16]やサイズの小さい月でのダイナモ維持機構に関する仮説[17]について紹介いただいた。現コミュニティメンバーには高圧実験の専門家が少なかったことから普段とは異なる視点からの話を聞くことができ、参加者にとっても良い刺激になったと感じた。

#### 招待講演II:長岡 央(立命館大学宇宙地球探査研究センター)

長岡さんには「月のサンプル分析から探る内部構造」というタイトルで月隕石やリターンサンプルの化学的分析・研究について講演いただいた。月内部の化学的な内部構造に関わるテーマとして「月のマグマオーシャンとアポロ斜長岩60025問題」、「内部のマグマ進化・KREEPの後期火山活動への寄与」について講演いただいた。

発表の前半では、月隕石・リターンサンプルの研究の入門的な総説でもあるKorotev (2005)[18]などを挙げ、月を構成する主要な鉱物と月の分化形成モデルである月マグマオーシャン(LMO)から出来上がるマントル・地殻・KREEP層という垂直方向の層構造との関係性、月探査機ClementineやLunar Prospectorの全球観測の結果から初めて提唱され



図3: フィールドトリップの様子(上段:鳥取砂丘, 下段:ルナテラス)。



図4: 懇親会の様子。

た月平面方向の化学的な地質区分[19]とが、どのように対応しているかについて、基本的なところから紹介いただいた。また、講演者がこれまでに月サンプル分析時に用いてきた化学分析手法(中性子・ガンマ線・X線を用いたもの)についても原理的なところから紹介がなされた。

発表の後半では「月のマグマオーシャンとアポロ斜長岩60025問題」について、月の地殻形成のタイムスケールはLMOを模した数値シミュレーションと表側から回収されたアポロ斜長岩との間で約二億年程度の幅があること、そのためLMOとの対比として連続的な火成活動(シリアルマグマティズム)による地殻形成のモデル[20,21]について紹介いただいた。アポロ斜長岩60025は43.6億年[22]という若い地殻形成の年代としてよく引用されるが、60025自体が不均質なポリミクト角礫岩であることが問題提起されている[23]。また、月隕石の起源深度は浅く地殻表面に限られるため、地殻深部に起源を持ち、かつ表面での度重なる大小様々なインパクトによる角礫化を免れたサンプルを、より始原的な裏側の斜長岩地殻から回収し、オリジナルな固化年代と組成を決定することがLMOの有無を検証する上で重要であることが議論された [24,25]。「内部のマグマ進化、KREEPの後期火山活動への寄与」では、中国のサンプルリターン計画である嫦娥により持ち帰られた成果のレビューの中で、若い玄武岩活動にはKREEPの寄与が乏しいことが述べられ[26,27]、LMO後の月内部でのKREEPの所在について内部の熱進化モデルとサンプル分析、両面からのアプ

ローチが必要であることが強調された。

### 3.5 参加者の感想

- 大変有意義な会でした。ありがとうございます。
- 今回は学生が多く、学会時と異なりそれぞれの研究内容をじっくり聞くことができたので大変有意義でした。また、招待講演や総合討論で時間をとっていただいたため、自分の疑問点を解消することができました。研究施設の見学では、詳細に機器の解説をしていただき、その施設の充実度に圧倒されました。特に高压高温実験の施設を直接見たのは初めてだったので、イメージをつけることができました。また、鳥取砂丘でのフィールドワークも大変楽しかったです。
- 月探査の最近の話を聞いて有意義でした。特に物質科学は普段あまり勉強していないのでためになりました。ただ、皆さん業務に追われてあまり余裕がないのか、もう少し「夢を追いかける」ような話があっても良かったかなと感じました。
- 普段なかなか聞くことができない貴重な話を聞いて大変勉強になりました。また、自分の研究発表に関してもいろいろと質問をいただき、個別に議論もできたので参加して良かったです。
- ラボツアーとフィールドトリップもあったのがよかった。
- 初めての参加でしたが非常に楽しかったです。普段自分が所属している分野とは少し離れていて新しく知る月の一面が多く、非常に学びになりました。来年度もぜひ参加したいです!

- サンプル分析や高圧実験の理解が深まり、また大変貴重な分析装置や実験装置の見学もできて、とても有意義な研究会でした。
- この歳になっても学べる場で助かります。不得意な分野の知識をアップデートできて勉強になりました。
- The meeting was very informative and helped me learn more about the Japanese lunar research community.
- 去年に引き続き、とても充実した参加になりました。普段の学会ではなかなか聞けない、一分野の丁寧なイントロ、レビューを学べるのがとてもありがたいです。
- ラボツアー、フィールドトリップと盛りだくさんでかつしっかり議論もできて楽しい三日間でした。幹事関係者の皆さんお疲れ様でした。
- 様々な分野の発表を聞いてよかったです。また、ラボツアーで普段見られない現場を見られたことやフィールドトリップで砂丘地形の解説を聞いたのがとてもよかったです。
- 今回は例年よりも若手が多数参加されており、コミュニティが拡充してきたのが感じられた。一方で、少し若手に講演のレベルを合わせたこともあり、イントロが多く、議論の時間が減ってしまったように感じる。研究会の趣旨として「密な議論」を掲げているので次回はもう少しディスカッションに時間を費やしてほしい。今回はラボツアーやフィールドトリップなど複数のイベントがあり、参加者にとって色々な刺激を受けられる良い機会だったと思う。
- 勉強になりました。月についてどこがわかっていないのかに気づき、自分の研究の立ち位置が分かった気がします。

## 4. まとめと将来展望

今年度も昨年に引き続き国内月科学コミュニティの活性化に向けた活動を実施した。特筆すべき点として、月地殻研究会の参加者が29名と前年度の18名を多く上回り、学生の発表数も7件と過去最高となった。運営面についても体制の約半数が学生およびポスドクとなっており、形式的には若手を中心に据えた

コミュニティ運営が実施できるようになってきたと言える。次回以降は彼ら自身が思考し、企画・運営をより自立的に行えるよう体制の成熟化にも注力していきたい。

## 5. 謝辞

月地殻研究会の参加者には心より感謝申し上げたい。特に招待講演を快諾してくれた岡山大学惑星物質研究所の芳野極さん・立命館大学宇宙地球探査研究センターの長岡央さんには、研究会の趣旨に沿った形で話題を提供いただき、有意義なディスカッションの契機を与えてくれたことに深く感謝する。また岡山大学惑星物質研究所の関係者の方々には、研究会の会場やゲストハウスを提供いただいた。研究会最終日には鳥取大学の小玉芳敬教授に鳥取砂丘およびルナテラスを案内いただいた。ここに感謝の意を示したい。

## 6. 参考文献

- [1] 小野寺圭祐ほか, 2023, 遊星人 32, 153.
- [2] Yoshino, T. et al., 2003, Nature 422, 154.
- [3] Yoshino, T. et al., 2006, Nature 443, 973.
- [4] Weber, R.C. et al., 2011, Science 331, 309.
- [5] Matsumoto, K. et al., 2015, GRL 42, 7351.
- [6] Khan, A. et al., 2014, GRL 119, 2197.
- [7] Briaud, A. et al., 2023, Nature 617, 743.
- [8] Pommier, A. et al., 2024, EPSL 628, 118570.
- [9] Kono, Y. et al., 2023, EPSL 618, 118287.
- [10] Tonks, W.B. and Melosh, H.J., 1990, Proc. The Origin of the Earth, 93-94.
- [11] Prissel, T.C. and Gross, J., 2020, EPSL 551, 116531.
- [12] Johnson, T.E. et al., 2021, EPSL 556, 116721.
- [13] Zhang, H. et al., 2024, Nat. Comm. 15, 8328.
- [13] Elard, S.M. et al., 2011, Geochim. Cosmochim. Acta. 75(11), 3024.
- [14] Lin, Y. et al., 2017, Nat. Geosci. 10, 14.
- [15] Kraettli, G. et al., 2022, JGR: Planets 127, e2022JE007187.
- [16] Weiss, B.P. and Tikoo, S. M., 2014, Science 346,

6214.

- [17] Scheinberg, A. et al., 2018, *Earth Planet. Sci. Lett.* 492, 144.
- [18] Korotev, R.L., 2005, *Chem. Der Erde* 65, 297.
- [19] Jolliff, B.L. et al., 2000, *J. Geophys. Res.* 105, 4197e4216.
- [20] Elkins-Tanton, L.T. et al., 2011, *Earth Planet. Sci. Lett.* 304, 326.
- [21] Gross, J. et al., 2014, *Earth Planet. Sci. Lett.* 388, 318.
- [22] Borg, L.E. et al., 2011, *Nature* 477, 70.
- [23] Torcivia, M.A. and Neal, C.R., 2022, *JGR Planets* 127, e2020JE006799.
- [24] Nagaoka, H. et al., 2021, *Icarus* 370, 114690.
- [25] Nagaoka, H. et al., 2023, *Icarus* 392, 115370.
- [26] Che, X. et al., 2021, *Science* 374, 887.
- [27] Tian H.-C. et al., 2021, *Nature* 600, 59.

## 第18回月惑星探査データ解析実習会を終えて

平田 成<sup>1</sup>, 月惑星探査データ解析実習会世話人一同

(要旨) 2026年3月に行われた第18回月惑星探査データ解析実習会の内容を報告します。今回のテーマはJAXA月惑星探査データ解析グループ(JLPEDA)が開発した月WebGISのJAXA Virtual Planet (VP)でした。オンサイト会場は会津大学とし、オンラインによる参加者も交えてのハイブリッド形式で開催されました。東京大学、新潟大学、東京理科大学、会津大学、立命館大学、東北大学の6機関から幅広い世代の6名(講師、世話人も含めると10名)が参加し、二日間の日程で座学と実習を行いました。

第18回月惑星探査データ解析実習会は、以下の通り2026年3月5日～6日の二日間の日程で開催されました。受講生と講師、世話人を含めて全国の大学・研究機関に所属する、幅広い世代の参加者がありました。

**開催日程:**2026年3月5日～6日

**開催場所:**会津大学+リモート(ハイブリッド形式)

**講師・世話人:**荒木亮太郎、逸見良道、佐藤広幸(JAXA月惑星探査データ解析グループ(JLPEDA))、本田親寿(会津大学宇宙情報科学研究センター(ARC-Space))

**参加者人数:**6名(講師、世話人も含めると10名)

**参加者所属機関:**東京大学、新潟大学、東京理科大学、会津大学、立命館大学、東北大学(以上受講生)、JAXA(講師)

**テーマ:**JAXA Virtual Planet

**主な内容:**

- かぐやのミッションとデータ概要
- Virtual Planetの使い方・実装データの解説
- 月の分光観測の解説
- 月版QuickMapを利用したクレーター解析
- Virtual Planetを使った解析演習: 班分けと

**テーマ設定**

- 解析結果の報告会
- 全体討論とまとめ

**主催:**日本惑星科学会月惑星探査育英会、会津大学 ARC-Space、JAXA月惑星探査データ解析グループ(JLPEDA)

**支援:**日本惑星科学会、神戸大学CPS

今回の実習会のテーマはJAXA Virtual Planet (VP)でした。VPは、JAXA月惑星探査データ解析グループ(JLPEDA)が開発した、月探査機かぐやによって観測されたデータをWebブラウザ経由で閲覧し、地理情報システム(GIS)で解析できるWebGISシステムです<sup>1</sup>。閲覧機能に限定したBasic版と、解析を伴う研究に特化したAdvanced版が提供されています。

実習会では、最初に月科学の基礎知識について、また日本の月周回探査機「かぐや(Kaguya/SELENE)」とその搭載機器、取得データについての説明を行った上で、VPで閲覧可能なデータレイヤーの種類や、VP上で実施できる各種の解析機能の紹介が行われました。また、米国Applied Coherent Technology (ACT)社による月周回

<sup>1</sup>会津大学コンピュータ理工学部・宇宙情報科学研究センター (ARC-Space)  
naru@u-aizu.ac.jp

<sup>1</sup><https://vp.darts.isas.jaxa.jp>

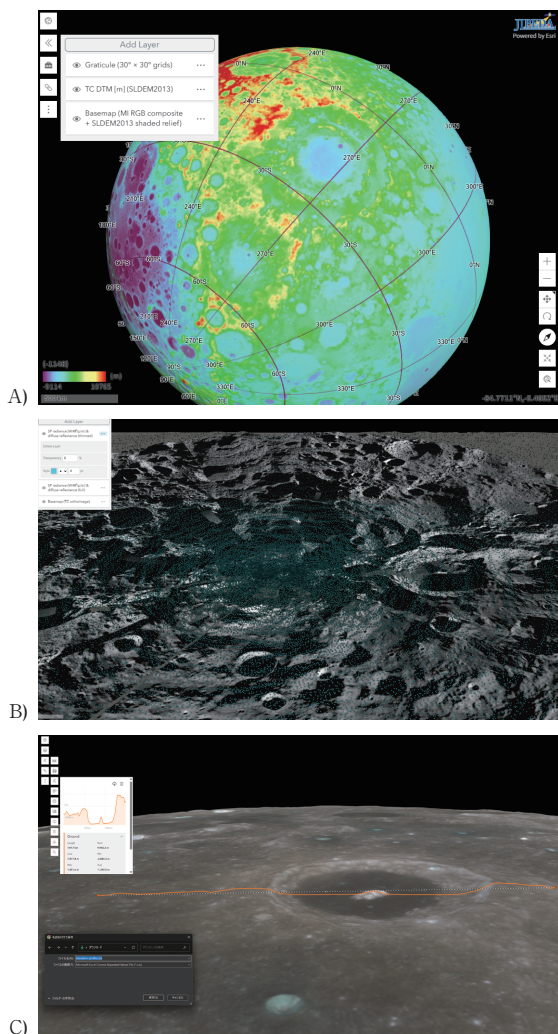


図1: VPの表示・解析例。A) 「かぐや」地形カメラ(TC)DEMをベースマップとした3D表示。B) 月極域における「かぐや」スペクトルプロファイル(SP)。観測点分布。C) 地形断面図取得例(JAXA宇宙科学研究所逸見良道さん(講師)提供)。

探査機LROのデータを閲覧可能なWebGISである Lunar QuickMap<sup>2</sup>上でのクレーターマッピングと、その結果を取り込んでクレーターのサイズ頻度分布を求めるPythonスクリプトについても紹介されました。座学と実演のパートと、紹介された機能を受講生が自ら手を動かして確認する実習のパートを取り混ぜて進め(図2)、過去に開催された実習会より短い日程の中でも盛り沢山な内容が扱われた有意義な

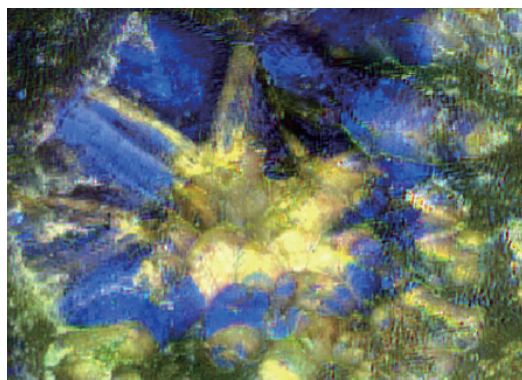


図2: VPを用いて受講生が作成したJacksonクレーター中央丘の擬似カラー合成図の例(東京大学山下光葉さん提供)。

会になりました。

参加者(受講生, 講師含む)からのコメントを紹介させていただきます(順不同, 敬称略, 固有名詞の表記等は本稿内での表記に揃えています)。

#### 山下光葉(東京大学, 博士課程学生)

VPを用いてデータを取得し, QGISで展開して解析する手法を学びました。実習会のみで用いるのではなく, 今後の研究においても使えるように, 細かい作業部分まで教えていただける機会でした。QuickMap・DS9を用いたクレーターカウントでは, 二次クレーターをいかに除去するかという部分で, 年代計測における誤差に直結することを改めて実感するよい機会となりました。

#### 深澤こはる(東京理科大学, 修士課程学生)

今回月惑星育英会に初めて参加してみて, 非常に勉強になりました。自身は月の研究を専門としていませんが, 月のクレーター解析がブラウザ上で視覚的に見え, データを簡単に取得できるVPは画期的で非常に楽しかったです。今後, 月のクレーターの数密度分布の解析などを自分でやってみたり, 鉱物マップの作成をしたいです。月の理解を自分の手によって深めていく第一歩となりました。ありがとうございました。

#### 逸見良道(JAXA宇宙科学研究所, 研究開発員(講師))

<sup>2</sup><https://quickmap.lroc.im-ldi.com>

講義・座学では、探査データ解析に必要な基礎事項や考え方が丁寧に整理されており、参加者にとって実習に入る前の理解を深める良い導入になっていたと感じました。講義内容と実習内容のつながりも意識されており、単なる知識提供にとどまらず、実際に手を動かす意義が伝わる構成だったと思います。実習では、実際のデータやツールを用いて手を動かしながら学べる点が非常に良かったと思います。特に、Python実行環境の整備やデータ可視化、WebGISの活用を通じて、解析の実務的な流れを参加者に体験してもらえたのは有意義でした。

一方で、2日目の最後はやや時間が足りず、全体のまとめや報告まで十分に到達できなかった点は少し残念でした。Pythonスクリプト実行環境の整備などに時間を要したことが背景にあったと思いますが、その分、実際の解析では環境構築が重要であることや、WebGISの利便性は参加者にしっかり伝わったのではないかと感じています。

今後も日本惑星科学会惑星探査育英会では同様の実習会の開催を予定しています。新しいテーマの提案も歓迎ですので、お近くの惑星探査育英会までお声がけいただくか、メーリングリストschool\_mission@wakusei.jpまでご連絡ください。

今回の実習会の実施にあたって、会津大学ARC-Space(文科省共同利用・共同研究拠点：共同利用・共同研究システム形成事業～特色ある共同利用・共同研究拠点支援プログラム～(月惑星探査アーカイブサイエンス拠点)機能強化支援(JPMXP0723830458)助成対象)の支援を受けました。また、日本惑星科学会からの助成が参加者の旅費支援の原資となりました。ここに感謝の意を表します。

---

## 著者紹介

---

### 平田 成

会津大学コンピュータ理工学部・宇宙情報科学研究センター(ARC-Space)上級准教授。筑波大学大学院博士課程地球科学研究科地質学専攻修了。博士(理学)。宇宙開発事業団特別研究員、宇宙科学研究所惑星研究系研究員、神戸大学理学COE研究員

を経て、2009年4月より会津大学勤務。専門は月惑星探査アーカイブサイエンス、小天体形状モデル、衝突現象など。日本惑星科学会のほか、日本地球惑星科学連合、American Geophysical Unionなどに所属。

# 2026年度日本惑星科学会秋季講演会のお知らせ

野口 里奈<sup>1</sup> (2026年日本惑星科学会秋季講演会組織委員長)

2026年日本惑星科学会秋季講演会についてお知らせいたします。以下は2026年4月時点での開催案内です。最新情報は講演会ウェブサイト <https://www.wakusei.jp/meetings/fallmeeting/2026/> に随時掲載予定です。

## 1. 日程と会場

日程:2026年9月14日(月)-17日(木)

会場:朱鷺メッセ 国際会議室(〒950-0078 新潟県新潟市中央区万代島6-1)

本講演会はオンサイト形式で開催いたします。オンライン配信は実施しません。9月16日に総会および最優秀研究者賞受賞講演を予定しています。同日夕方に懇親会の開催を予定しています。なお、一般向け講演会は9月13日に新潟県立自然科学館での開催を予定しております。

## 2. 発表形式

### ●発表資格

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

### ●発表形式とプログラム編成

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

●口頭発表:1講演につき12分前後(質疑応答含む)を予定しています。

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

### ●最優秀発表賞セッション

本講演会において第一著者として発表する博士学位を有していない学生会員は、最優秀発表賞に応募できます。予

<sup>1</sup>新潟大学自然科学系

r-noguchi@env.sc.niigata-u.ac.jp

備審査を通過された応募者には、最優秀発表賞セッションでの口頭発表(15分前後)と、選考委員との議論を行って頂きます。別途定める今年の応募要領に従ってご応募ください。詳細は本会メーリングリスト(om1)および本会ホームページ「2026年秋季講演会のお知らせ」でお知らせいたします。

---

### 3. 参加および発表の申し込み方法

本会ウェブサイトの[参加/発表/予稿登録]よりお申込みください。これらの申込みは、すべて本会ウェブサイト上で行います。申込みには、(1)本会の会員番号もしくは非会員登録番号、(2)本会ウェブサイトへ会員または非会員としてログインするためのパスワード、の両方が必要になります。本会への新規入会登録および非会員登録も本会ホームページから行ってください。なお、非会員登録には1日以上、新規入会登録には2週間以上かかりますので、発表申し込みを予定されている非会員の方はできる限り早目に登録手続きを開始してください。[参加/発表/予稿登録]申込とは別に、参加費支払い手続きを行っていただきます(項目6.参照)。参加費の支払いなしに講演会には参加できませんので、ご注意ください。当日の申し込み・支払いに関する現地対応は原則行いませんのでご注意ください。本講演会は新潟県・市の補助を受けて実施しております。補助金に係る実績報告のため、参加者の氏名、所属機関・部署名および所属都道府県を新潟県・市へ報告する必要があります。取得した個人情報、講演会の運営および補助事業に関する報告業務のためにのみ利用し、法令に基づく場合を除き、これら以外の目的で第三者へ提供することはありません。参加申込みをもって、上記内容に同意いただいたものとみなします。

---

### 4. 今後のスケジュール

2026年6月11日(木):参加申込,発表申込,支払い,予稿原稿受付開始.

2026年6月29日(月):発表申込締切,最優秀発表賞予稿原稿の締切.

2026年7月29日(水):参加申込締切,予稿原稿締切,支払い締切.

---

### 5. 予稿集

講演会に先立って、予稿集を本会ウェブサイトにおいてPDF形式で公開します。

---

### 6. 参加費

一般会員 5000円,学生会員 2000円,非会員 7000円

講演者として発表される方の参加申込・支払いは必須です。学部生・M1は発表申込者でないこと、いずれの発表の講演者でもないことを条件として参加費を無料とします。ただし、参加するためには学生会員もしくは非会員登録が必要で、かつ項目4.にある参加申込締切も同様に適用されます。シニア会員の参加費については、一般会員と同額とします。本会ウェブサイト「2026年秋季講演会のお知らせ」から支払いサイト(イベント参加WEB受付システム「イベントペイ」)を利用し、クレジットカードもしくはコンビニ決済で参加費の支払いを行っていただきます。領収書は、支払い完了時に送信されるメール記載のURLからダウンロードできます。領収書の宛名間違いに十分ご注意ください。なお、今年度はイベントペイ利用に係る手数料は支払い者負担といたしますのでご了承ください。

---

## 7. 懇親会

一般会員・非会員 7000円, 学生会員 5000円

懇親会は9月16日夕方にホテル日航新潟 展望室で開催する予定です。お誘い合わせの上、ぜひご参加ください。先着150名となります。

---

## 8. 交通手段

朱鷺メッセへのアクセスマップ:<https://www.tokimesse.com/visitor/access/>

---

## 9. その他

- (1) 託児を必要とされる方に会場近くの託児所を紹介いたします。秋季講演会参加のために託児施設を利用される方には託児費の補助があります。詳しくは [aloc@wakusei.jp](mailto:aloc@wakusei.jp) までお問い合わせ下さい。
- (2) 会場での通信は各自でモバイルルーター等をご用意下さい。
- (3) 会場内での飲食は基本的に可能です。生じたゴミは各自でお持ち帰りください。
- (4) 会場付近は指定喫煙場所を除いて禁煙です。
- (5) このお知らせの内容は変更される可能性があります。本会ウェブサイトで最新の情報をご確認ください。
- (6) その他、LOCへのお問い合わせは [aloc@wakusei.jp](mailto:aloc@wakusei.jp)までご連絡ください。

## 学位論文タイトル紹介

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

※毎年6月号に、過去3年まで遡って掲載可。投稿方法等はomlにて案内いたします。

### 博士論文

- |  |  |
|--|--|
| (1) 石崎 梨理 (いしざき りり)  | (1) 沖山 太心 (おきやま たいしん)  |
| (2) Tracing the spatial and temporal evolution of dust chemistry in a viscously evolving protoplanetary disk | (2) Study on the effects of magnetic field structures on Martian diffuse aurorae |
| (3) 粘性進化する原始惑星系円盤におけるダストの化学進化の追跡   | (3) 磁場構造が火星ディフューズオーロラに及ぼす影響に関する研究  |
| (4) 東京大学 理学系研究科 地球惑星科学専攻   | (4) 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻  |
| (5) 2026年3月  | (5) 2026年3月  |
| (6) 東京大学 理学系研究科 地球惑星科学専攻 (学振PD)  | (6) 東北大学 大学院理学研究科  |

# 2026年度助成事業2件公募のご案内

## 公益財団法人 宇宙科学振興会<sup>1</sup>

公益財団法人宇宙科学振興会は宇宙科学分野における学術振興を目指し、2026年度も引き続き下記の助成事業を行います。それぞれの応募要項の詳細は当財団のホームページ:<https://www.spss.or.jp> に掲載しています。それぞれの公募に対する応募申請に際してはホームページご参照の上、申請書をダウンロード・作成いただき必要な書類を添付の上、財団宛に電子メール(admin@spss.or.jp)で申請下さい。奮ってご応募いただくようご案内申し上げます。

### (1)国際学会出席旅費の支援

#### ●支援対象

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)および宇宙工学(宇宙航空工学を含む)に関する独創的・先端的な研究活動を行っている若手研究者(当該年度4月2日で35歳以下)、またはシニアの研究者(当該年度4月2日で63歳以上かつ定年退職した者)で、国際研究集会で論文発表または主要な役割などが原則として確定している者。海外で開催される国際学会に限ります。リモートでの参加の場合でも参加費(上限5万円)については支援します。

●助成金額・件数:一件あたり10~30万円程度、年間10件程度

#### ●申し込み受付時期

応募締切り2026年8月31日:2026年10月から2027年3月の期間に開催初日が予定される国際学会の参加者対象

応募締切り2027年2月28日:2027年4月から2027年9月の期間に開催初日が予定される国際学会の参加者対象

### (2)国際学会開催の支援

#### ●支援対象

宇宙科学研究を推進している国内の学術団体(研究所、大学等)で、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)及び宇宙工学(宇宙航空工学を含む)に関する国際学会、国際研究集会の国内開催を主催しようとする団体。リモートでの開催も支援対象です。

●助成金額・件数:一件あたり20~50万円程度、年間3~4件程度

#### ●申し込み受付時期

応募締切り2026年8月31日:2026年10月から2027年3月の期間に開催初日が予定される国際学会対象

応募締切り2027年2月28日:2027年4月から2027年9月の期間に開催初日が予定される国際学会対象

#### ●照会先

公益財団法人宇宙科学振興会事務局 <https://www.spss.or.jp>

〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台3-1-1

Email: 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

## JSPS Information

◇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

### ◇賛助会員名簿

2026年6月25日までに、賛助会員として本学会にご協力下さった団体は以下の通りです。社名等を掲載し、敬意と感謝の意を表します。(五十音順)

- ・NV5 Geospatial 株式会社
- ・株式会社ノビテック

### ◇日本惑星科学会主催・共催・協賛・後援の研究会情報

(a) 場所, (b) 主催者, (c) ウェブページ/連絡先など。

転記ミス, 原稿作成後に変更等があるかもしれません。各自でご確認ください。

---

\* 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)

## 編集後記

遊星人編集幹事の野津翔太です。今年も年に1度のアルマ望遠鏡 観測提案書の申請を終え、少し落ち着いた気持ちでこちらの編集後記を書いています。(遊星人2025年6月号 編集後記参照)

今回の遊星人、神野天里さん、所司歩夢さんの最優秀発表賞受賞論文では、スーパーコンピュータ「富岳」を用いた惑星形成の高解像度 $N$ 体シミュレーション研究と、アルマ望遠鏡を用いた惑星形成が起きる原始惑星系円盤の高解像度観測研究について、それぞれの研究の鍵となる惑星移動過程やスパースモデリングを応用した超解像度画像解析法の説明も交え、詳しく紹介されています。そして、惑星物質固体物性測定コンソーシアム・国内水星研究コミュニティ・月科学コミュニティなど、日本惑星科学会会員が主体となった各分野の活動報告記事も掲載されています。遊星人ではこのような活動報告や国内外での研究会報告の記事なども随時募集しておりますので、引き続き奮っての投稿をお待ちしております。

また、節目の20本目の「遊星人の海外研究記」では、川島由依さんにオランダ・ユトレヒトでの研究生生活についてご紹介頂いております。私も川島さんと同

時期にオランダ・ライデンでポストドク研究員をしていた事もあり、ほぼ英語のみで生活できてしまいオランダ語が身に付かない事や、坂が全然なく自転車が活躍の生活である事など、個人的にも共感できるエピソードが多数掲載されていました。自分が書いた記事で恐縮ですが、ライデンでの生活について紹介した海外研究記の記事が遊星人2021年3月号に掲載されていますので、よろしければ併せてご覧いただき、オランダでの研究生生活・日常生活の興味深い側面に触れて頂ければ幸いです。因みにコロナ禍を経て1年ほど前に研究会のためライデンを再訪する機会があったのですが、駅に降り立ち感慨に耽る間も無く、毎日のように買い物をしていた馴染みのスーパーマーケットが入った駅前のビルが取り壊され跡形もなくなっているのを発見し、時の流れを感じ少し無常感を覚えたのも記憶に残っています。ただそのままライデンの街中に足を踏み入れ、変わらない運河沿いの街並みを目にし、定期的に通っていたパンネック (オランダ風パンケーキ) のお店を再訪いつものメニューを注文する頃には、懐かしさと安心感を覚えることができました。(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6月25日発行

## 日本惑星科学会誌 遊・星・人 第35巻 第2号

定 価 一部 1,925円(税込・送料込)

編集人 三浦 均(日本惑星科学会編集専門委員会委員長)

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

発行所 日本惑星科学会事務局

〒604-8206

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

Tel: 075-708-5984

e-mail: staff@wakusei.jp

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

本誌に掲載された寄稿等の著作権は日本惑星科学会が所有しています。

複写される方へ

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

## 1. 原稿の様式

### ○投稿原稿：

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

### ○最終稿：

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

投稿原稿送り状の雛型および各チェックリストはウェブサイト

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

## 2. タイトル

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

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

## 3. 要旨

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

## 4. セクション

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

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

## 5. 述語

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

## 6. 字体

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

## 7. 句読点

句読点は全角の“,”と“.”を用いる。

## 8. 図・表

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

### 図作成のガイドライン：

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

やむをえない場合に限り、写真も可とする。その際はL版サイズ以上の大きさ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](mailto: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**