

# 遊



日本惑星科学会誌

**Planetary  
People 3**  
September 2025 vol34 no

# 星

# 人

- 2024年度最優秀発表賞受賞論文
- 木星氷衛星JUICE,  
火星衛星MMX,  
金星あかつき
- Blenderによる科学的可視化入門
- 月惑星探査データ解析会, New faces

# 日本惑星科学会誌「遊・星・人」投稿規定

日本惑星科学会

## 1. 投稿可能な記事

- ①学会誌に投稿できる記事内容は、
  - (a) 原著論文：惑星科学に関する研究のオリジナルな報告
  - (b) 解説論文：専門外の人にも分かりやすく解説した研究成果の総説や論説
  - (c) 解説記事：広く会員の関心をひく事柄についての解説
  - (d) 報告記事：学科、研究所、海外機関等の紹介、国内外の研究会の報告、New Face (博士号取得者の自己紹介)、インタビュー記事
  - (e) 情報記事：各種の情報記事
  - (f) エッセイ：上記の形式にとらわれず、惑星科学に関する話題を論じた文章

など、広く会員の知的好奇心をみたすもの。

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

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

## 2. 投稿資格者

日本惑星科学会会員及び編集委員会が適当と認めた者。

## 3. 投稿原稿及びその送付

- ①原則として、投稿原稿はワープロなどにより電子的に作成されたものであること。  
また、原稿のファイル形式については「学会誌原稿作成の手引」に従うこと。
- ②投稿に際しては、原稿を日本惑星科学会編集専門委員会委員長宛に送付すること。(連絡先は「学会誌原稿作成の手引」参照。) 送付方法は、E-mail による送付が望ましい。但し、プリントアウトした原稿2部の郵送による送付も可とする。なお郵送された原稿は原則として返却しない。
- ③編集委員会が原稿を受領すれば、その日を受領日として、受領した旨投稿者に通知される。

## 4. 査読及びその後の取扱い

- ①投稿原稿は編集専門委員長が受領した後、原著論文や解説論文または編集専門委員会が必要と認めた記事については査読者が選定され査読に付される。
- ②査読終了後、査読者の意見を参考に編集専門委員会が掲載の可否を決定する。その際編集専門委員会は投稿者に論文の修正を求めることができる。
- ③査読に付されない記事についても、編集専門委員会が掲載の可否を決定し、必要があれば投稿者に修正を求めることができる。
- ④掲載が決定すれば直ちにその旨投稿者に通知される。
- ⑤編集専門委員会の求める修正が完了した最終稿は、WORD、PDF、テキストファイル、いずれかのファイル形式にて、E-mail などにより編集幹事宛に送付すること。(図表については、「学会誌原稿作成の手引」参照)
- ⑥査読に付された掲載記事については、査読を経た旨記事内に記載される (vol.24, no.3から適用)。

## 5. 校正

校正は投稿者の責任において行う、また、校正は原則として誤植の訂正に限る。

## 6. 別刷り

論文の PDF ファイルを提供する。

## 7. 著作権

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

## 8. 倫理規定

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

## 9. 投稿料・出版費

原則として無料。

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

---

---

日本惑星科学会誌 遊・星・人  
第34巻 第3号  
目次

---

---

巻頭言 大竹 真紀子 ..... 165

「2024年度最優秀発表賞受賞論文」

原始惑星系円盤における輝線の圧力広がり初検出とガス面密度測定手法としての応用

吉田 有宏 ..... 166

みんなでふたたび木星へ、そして氷衛星へ その12

～地球フライバイによりサブミリ波分光計SWIの観測性能を実証～

笠井 康子, 佐川 英夫, 黒田 剛史, 山田 崇貴, 関根 康人, Paul Hartogh, JUICE SWI Team .. 178

もう一つの月世界へ:火星衛星探査計画MMX その9 ～CMDMが拓く、火星圏ダスト環境への第一歩～

小林 正規 ..... 187

もう一つの月世界へ:火星衛星探査計画MMX その10 ～LIDARとその周辺～

千秋 博紀 ..... 196

一番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦 その63

～最前線の金星大気科学ワークショップ「金星大気の変動性と安定性」(中国・北京)に参加して～

狩生 宏喜, 杉浦 美優 ..... 201

Blenderによる科学的可視化入門

外田 慎太郎, 高田 智史, 松本 侑士 ..... 204

第16回月惑星探査データ解析実習会を終えて

出村 裕英, 平田 成, 本田 親寿, 大竹 真紀子, 小川 佳子, 山田 竜平, 鈴木 崇正, 他1名 ..... 212

第17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 ..... 214

New faces

松岡 亮, 折原 龍太 ..... 220

書評「地球の測り方 ～宇宙から見る「水の惑星」のすがた～」

松本 晃治 ..... 224

2025年度宇宙科学奨励賞公募のご案内

公益財団法人 宇宙科学振興会 ..... 225

JSPS Information ..... 226

---

# Contents

---

<b>Preface</b>	M. Ohtake 165
<hr/>	
<b>The first detection of line pressure broadening in protoplanetary disks and its application to gas surface density measurement</b>	T. C. Yoshida 166
<hr/>	
<b>To Jupiter again together and to icy moons (12) — SWI (Submillimetre-Wave Instrument): Demonstration of the observational performance during the Earth flyby—</b>	178
Y. Kasai, H. Sagawa, T. Kuroda, T. Yamada, Y. Sekine, P. Hartogh, JUICE SWI Team	
<hr/>	
<b>Fly me to another moon world: Martian Moons eXploration (MMX) (9) - CMDM pioneering the first steps to Mars system dust environment -</b>	M. Kobayashi 187
<hr/>	
<b>Fly me to another moon world: Martian Moons eXploration (MMX) (10) -Topics relating to LIDAR-</b>	H. Senshu 196
<hr/>	
<b>Road to the first star: Venus orbiter from Japan(63) — Attending the Venus Atmosphere Science Workshop in Beijing, China: Variability and stability of the Venus' atmosphere —</b>	201
H. Karyu, M. Sugiura	
<hr/>	
<b>Introduction to scientific visualization with Blender</b>	S. Hokada, S. Takada, Y. Matsumoto 204
<hr/>	
<b>Report of the 16th workshop for data analysis in lunar and planetary explorations</b>	212
H. Demura, N. Hirata, C. Honda, M. Ohtake, Y. Ogawa, R. Yamada, T. Suzuki, and 1 authors	
<hr/>	
<b>Report of the 17th workshop for data analysis in lunar and planetary explorations</b>	214
N. Hirata, Facilitators of the workshop for data analysis in lunar and planetary explorations	
<hr/>	
<b>New faces</b>	R. N. Matsuoka, R. Orihara 220
<hr/>	
<b>Book review</b>	K. Matsumoto 224
<hr/>	
<b>Announcement of public offering for Space Science Incentive Award</b>	225
Society for Promotion of Space Science	
<hr/>	
<b>JSPS Information</b>	226

## 巻頭言

2020年より5年間会津大学でお世話になり、今年4月より岡山大学の惑星物質研究所(三朝)に異動しました。そんな中で今回の巻頭言、さて何を書こうかと迷っていたところ、あるきっかけで自分のこれまでの研究を振り返る機会がありましたので、それらを書いてみたいと思います。振り返ると、学生時代の地球の変成岩研究から、日本初の大型月探査機「かぐや」に関わったこと、その後搭載機器の1つであるマルチバンドイメージャの開発責任者を担当したこと、その後今までの研究活動は、予測していないことの連続でした。その間、本当にたくさんの幸運と研究仲間恵まれて、研究を続けてこられたことに感謝しています。

最初に参加した月周回衛星「かぐや」では、リモートセンシング技術を学びました。昨年、世界初のピンポイント着陸に成功した「SLIM」では、月面岩石の高空間分解能の分光観測を行うことができました。月極域で水氷の有無を調査する月極域探査機LUPEX計画も進行中です。周回、着陸、ローバによる月面移動探査と、発展する日本の月惑星探査を間近で体験することができたわけですが、思い返すと私自身は、「面白そうだから」という単純な気持ちで活動してきた気がします。単純すぎたと反省する部分もありますが(失敗もあります)、これまでに得たかけがえのない経験を思うと、時には単純な決断も悪くないと思っています。

最後は今後ですが、惑星物質研究所には惑星表層環境部門が新設され、私が5人目の研究メンバーです。会津大学で始めた研究活動(LiDARによる地形データと分光観測による岩石種の同定情報を組み合わせて可視化・解析する研究、レゴリスの挙動を評価する真空チャンバの開発など)は引き続き、会津大学の皆さんと一緒に続けていきたいと思っています。一方で、新天地で新しい分野の皆さんとのコラボレーション研究にも挑戦したいと思っています。全ての始まりは「面白そうだから」。

大竹 真紀子(岡山大学惑星物質研究所)

# 「2024年度最優秀発表賞受賞論文」 原始惑星系円盤における輝線の圧力広がり の初検出とガス面密度測定手法としての応用

吉田 有宏<sup>1,2</sup>

2025年3月30日受領, 査読を経て2025年7月22日受理

(要旨) 原始惑星系円盤中のガス面密度分布を観測的に決定することは、惑星系形成過程を議論する上で極めて重要であるが、これまでは有効な手法がなかった。我々は、これまで見過ごされてきた効果である輝線の圧力広がりを用いると、ガス面密度分布が精度良く測定可能であることを見出した。さらに、アルマ望遠鏡による観測により、3つの原始惑星系円盤において圧力広がりによる輝線ウィングを初めて検出するとともに、ガス面密度を推定することに成功した。これらの円盤には惑星系形成に十分な量のガスが存在することが明らかになったほか、ガス圧力極大へのダスト集積などの重要な物理過程が実際に起きていることが示された。本稿では、提案手法を解説するとともに、これまでの観測結果を紹介する。

## 1. 導入

### 1.1 惑星形成の舞台・原始惑星系円盤におけるガス

惑星系の形成は、若い星を取り巻く原始惑星系円盤(以下、円盤)で起こる(図1)。近年のアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計(ALMA)等による高空間分解能観測により、円盤にはダストのリングやギャップなどの構造が存在することが明らかになってきた。これらの構造は惑星形成を促進するほか、構造自体が惑星によって作られる場合もあると考えられている。円盤の物理構造を観測的に調べることは、惑星形成過程を解明するための鍵である。

このような構造を形成する円盤の物質は星間物質から形成された分子雲に由来し、主に水素分子からなるガスと鉱物や氷からなるダストから構成される。惑星形成論(コア降着モデル)によれば、ダストは合体・成長を繰り返すことで地球型惑星や巨大ガス惑星のコアになり、ガスは巨大ガス惑星の気となる。この過程では、ガスが大きな役割を果たす。まず、ガ

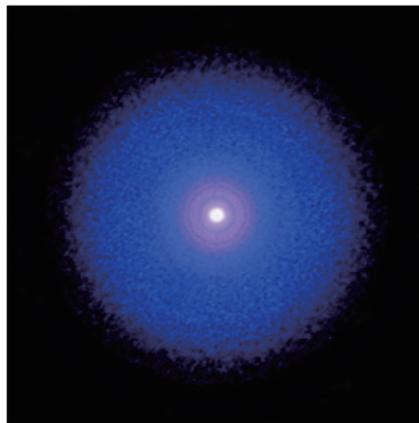


図1: TW Hya周りの原始惑星系円盤のALMA観測画像。赤色がミリ波でみた固体ダスト成分、青色がCO分子ガス成分を表す。この画像に反映されている質量は全体の1%以下に過ぎない。[1,2]を元に作成。

スは円盤のほとんどの質量を占め、そこで形成される惑星系のほとんどの質量を担う。例えば、円盤ガスが1木星質量より少ない量しか存在しなければ、そこで木星は形成し得ないだろう。さらに、ガスはダストの運動に影響を与える。例えば、ガス圧力が何らかの理由で極大値を持つ場合には、ダストはその位

1.国立天文台

2.総合研究大学院大学物理科学研究科天文科学専攻  
tomohiroyoshida.astro@gmail.com

置にトラップされ、先に述べたようなダストリング構造を形成しうる。このように、ガスの分布は円盤の構造・時間進化を記述するあらゆる理論モデルに登場する最も基本的な物理量の一つである。それにも関わらず、現実の円盤におけるガス分布の定量的な制約は非常に難しく、あまり行われてこなかった。それに伴って、例えば、これまでの理論的研究はいわゆる最小質量原始太陽系円盤[3,4]のようなガス面密度<sup>1</sup>分布を仮定して議論を進めていた。しかし、現実の円盤がそれに従っている保証は当然ない。

## 1.2 円盤ガス面密度測定の問題

ガス分布（あるいはそれを空間的に積分した、ガス質量）の測定が困難なのは、ガスのほとんど（99.99%程度）を占める水素分子が永久双極子モーメントを持たないため、円盤の典型的な環境下では観測可能な放射を出さないことに由来する。ガスは実質的に「見えない」のである。従って、これまでは以下のような間接的手法が用いられてきた。

### (1) ダストからの放射を用いるもの[5]

円盤にはダストが存在し、質量の大部分を担う中心面（赤道面）領域はミリメートル程度の波長でトレースできる。ダストの光学特性が既知であれば、その面密度が測定可能である。さらに、ダストとガスの面密度（あるいは質量）の比を例えば1/100と仮定することで、ガス面密度もわかる。このアプローチは最もよく使われているものである。しかし、そもそも惑星形成はダスト・ガス比が何桁も変化していく過程である。実際、近年の観測によりダストとガスは異なる空間分布を持ち、場所によってダスト・ガス比が変化していることがわかっている[6]。また、ダストの光学特性には不明な点が多く、そこから得られるダスト面密度にも少なくともファクター倍程度の不定性が残る[7]。

### (2) 一酸化炭素同位体の輝線放射を用いるもの[8]

円盤ガス中で、水素分子、ヘリウム原子に次いで多い分子の一つである一酸化炭素分子(CO)は、比較的よく放射を出す。メインの同位体である<sup>12</sup>C<sup>16</sup>O(以

下、単にCOと表記)は多くの場合光学的に厚い<sup>2</sup>ため、放射強度は質量に比例しないが、その希少同位体(<sup>13</sup>C<sup>18</sup>Oなど)は光学的に薄い場合が多く、質量が比較的しやすい。<sup>12</sup>C<sup>18</sup>Oの質量が求めれば、それをCO/H<sub>2</sub>比で割ることで水素分子の質量が求められる。この手法もサーベイ観測などでこれまでよく使われている[9]。最大の問題は、変換係数であるCO/H<sub>2</sub>比の不定性が非常に大きく、理論モデルおよび観測的示唆によれば円盤の化学進化に伴って10<sup>-3</sup>から10<sup>-6</sup>まで変化しうることである[10-12]。この不定性は推定される面密度にも伝播するだろう。

### (3) 重水素輝線を用いるもの[13, 14]

重水素分子(HD)は遠赤外線領域で純回転遷移放射を出す。HD/H<sub>2</sub>比は精度良く求まっており、COとは異なり円盤中ではあまり大きく変化しないと考えられている。したがって、比較的有望だと考えられる手法の一つである。実際、ハーシェル宇宙天文台によって3天体で検出が報告され、質量が推定されている[13, 15]。この手法の問題点としては、空間分解した観測が不可能であり全質量は求められても面密度の推定には向かないこと、輝線のエネルギー準位の関係で推定される質量が温度の仮定に強く依存すること、ダストによる減光が効くため、質量の大部分を担う円盤中心面には感度がないことなどが挙げられる[14]。さらに、現在は観測可能な装置が存在しないことも問題である。

### (4) 回転曲線を用いるもの[16, 17]

円盤のガスの回転速度はだまかには、各半径における中心星の重力、半径方向の圧力勾配力、円盤の自己重力によって決まっている。したがって、ガスの回転速度の半径依存性(回転曲線)を精度良く測定し、モデリングすることで円盤自己重力成分を推定し、そこから全質量を求めることができる。この手法は特に円盤質量が中心星質量の~10%以上と非常に重たい時に有効である。しかし、回転曲線は例えば巨大惑星の存在や円盤風などによっても影響を受ける[18]。

<sup>2</sup>電磁波がある物質を通過する間に吸収される程度を表す無次元量を「光学的厚さ」といい、それが1より大きい時「光学的に厚い」、1より小さい時「光学的に薄い」という。

<sup>1</sup>ガスの空間質量密度を円盤鉛直方向に積分した量。

### (5) 一酸化炭素同位体と $N_2H^+$ を用いるもの[19]

手法 (2)の問題点は $CO/H_2$ 比が大きく変化することであった。この手法では、 $CO/H_2$ と反相関する $N_2H^+$ 分子輝線を観測し化学反応モデルを用いることで $CO/H_2$ 比を補正する。この手法は比較的有望だと考えられるが、円盤の電離度の不定性に大きな影響を受けるという弱点がある。

### (6) 非局所熱力学平衡効果を用いるもの[20]

ある分子からの輝線放射強度が、低水素ガス密度領域で密度に対して変化することがある(非局所熱力学平衡効果)。円盤は一般に比較的高密度であるが、円盤上層部に存在するシアンラジカル(CN)など一部の分子ではこの効果が期待でき、上層部の水素ガス密度であれば推定することができる。円盤ガスの大部分は中心面に存在するので、この密度からは円盤面密度の下限值が与えられるだろう。

以上のような各手法の特性に伴って、現在の円盤質量の推定には非常に大きな不定性があることが知られている。実際、地球から最も近い原始惑星系円盤であるTW Hya円盤における、さまざまな全ガス質量の推定結果をまとめると、手法によって0.001太陽質量から0.1太陽質量まで2桁程度のばらつきがある[21]。既存の手法では、原始惑星系円盤が惑星系を形成するに足る質量があるか、という基本的な問いにさえも答えることができないのである。さらに、全質量に対してもこれだけばらつきがあるのであるから、ガス面密度についてはより大きな不定性が見込まれるだろう。

## 2. 輝線の圧力広がりを用いる新手法

### 2.1 円盤から観測される輝線の形状

我々は、この問題を解決すべく、輝線の圧力広がりを用いる新たな手法を提案している[2, 22, 29]。本手法の詳細を説明する前に、観測される輝線の形状が、(1)マイクロな線幅拡大、(2)マクロな線幅拡大、(3)観測装置の分解能によって決まることを解説する。

#### (1) マイクロな線幅拡大

輝線放射は量子力学的な過程で起こり、その遷移エネルギーには不確定性関係に起因する幅が存在

する。この線幅拡大はローレンツ関数に従う。その特徴的な幅は自然幅と呼ばれ、これは各輝線のアインシュタインA係数の逆数程度の値に対応することが知られている。次に、分子は熱運動をしており、放射は運動速度に応じてドップラーシフトする。これはガウス関数に従う線幅拡大効果で、その幅は熱幅と呼ばれる。円盤からの輝線放射の線幅を主に決めているのはこの効果である。さらに、比較的高密度な環境では、分子同士の衝突が起こる。例えば、円盤中のCO分子放射を考える場合、COは主に $H_2$ 分子に衝突される。このとき、衝突により、放射の位相が変わることがある。位相のランダムな変動は周波数の変化と同じであるから線幅は拡大する。この効果は圧力広がりあるいは衝突広がりと呼ばれ、ローレンツ関数に従う輝線形状を生み出す。その特徴的な線幅を圧力幅と呼ぶ。このほかに、マイクロな線幅拡大には磁場や電場の影響によるもの(ゼーマン効果やシュタルク効果による)もあるが、これらは熱幅と比較し十分小さいため、ここでは省略する。

#### (2) マクロな線幅拡大

(1)で挙げた効果に加えて、円盤の分子はマクロなスケールで運動をしている。例えば、円盤中には弱い乱流が存在すると考えられている。乱流による分子の相対速度はガウス関数に従うだろうから、この効果もガウス関数状の線幅拡大を生み出すだろう。乱流の空間スケールが十分小さければ、これはマイクロな効果として取り扱うこともできる(乱流幅)。さらに、円盤中にはガスのマクロな流れが存在する。これは例えば、ケプラー回転、ガスギャップ構造への粘性拡散、円盤風、惑星の存在などによって引き起こされるだろう。このようなマクロな流れが視線方向に異なれば、最終的な放射の輝線形状は局所的なものよりも幅広なものになる。以上に加えて、視線方向の輻射輸送を考慮すると、輝線の線中心が光学的に厚い時には、光子の自己吸収と再分配による線幅拡大が起こる。これはオパシティブロードニングとも呼ばれる効果であり、光学的に厚い極限では輝線形状は矩形関数になり、その幅は光学的厚みに依存する。

#### (3) 観測装置の分解能

以上のようにして円盤からの輝線は元々ある形状

の広がりを持つが、実際に観測される輝線形状は、観測装置の影響も受ける。輝線の元々の形状をできるだけ正確に復元するためには、まず、周波数分解能が十分高い必要がある。幸いにして、我々が用いるALMAなどの電波干渉計では、熱幅を分解できるほど高い周波数分解能が実現されている。さらに、単色の輝線に対して装置がどう振る舞うかを決定する周波数応答については、観測設定によっても異なるが、ALMAでは中心から5周波数分解能要素程度離れたところで中心の0.1%、15分解能要素離れば0.01%など、十分分解できている輝線に対してはほとんど無視できる。空間分解能も実質的な周波数分解能を制限する。例えば、低い空間分解能で空間的な速度勾配がある円盤を観測すると、一つの空間分解能要素（ビームサイズ）内に異なる速度を持つ放射が入り込んでしまい、線幅が拡大しているように見えてしまう。

以上の効果は、すべて同時に起こりうる。マイクロな乱流を含むマイクロな線幅拡大の効果は、視線上の各点で起こると考えられ、その輝線形状はガウス関数とローレンツ関数の畳み込みであるフォークト関数で記述できる。そのほかの効果は状況に応じて適切に取り扱う必要がある。

## 2.2 円盤における圧力広がり

前節の(1-3)に挙げた効果のうち、円盤ガス面密度測定の観点からは、圧力広がり特に興味深い。なぜならば、圧力幅は分子密度に依存し、高密度ほど大きくなるからである。例えばCOがH<sub>2</sub>に衝突される場合、CO輝線の圧力幅は水素分子密度で決まる。この効果を検出し、うまく用いることができれば、水素分子密度をダイレクトに測定することができるかもしれない。しかも、この効果は1.2節(6)で挙げた非局所熱力学平衡効果を用いる手法とは異なり、密度が高いほど顕著になる。すなわち、円盤の質量を担う中心面により高い感度があると予想できる。ひとたび中心面のガス密度が求めれば、ガスが鉛直方向に静水圧平衡にあることさえ考えれば、ガス面密度までも導出することができる。面密度を空間方向に積分すれば、質量も求められるだろう。

それでは、現実的な円盤では、どの程度の圧力幅が期待されるだろうか。観測しやすいCO  $J=3-2$ 分

子輝線を例に、その圧力幅をHITRANデータベース[23]にある分光学的定数を用いて見積もってみる。圧力幅は、温度 $T$ 、水素分子密度 $n_{\text{H}_2}$ に対して

$$\Gamma = 10^{-4} \left( \frac{T}{100 \text{ K}} \right)^{0.34} \left( \frac{n_{\text{H}_2}}{10^{12} \text{ cm}^{-3}} \right) \text{ km s}^{-1} \quad (1)$$

程度である。ここで温度と密度は最小質量太陽系円盤モデル[3, 4]における中心星から5 auにおける円盤中心面程度の値を用いて規格化している。この値は、自然幅よりは8桁程度大きいものの、熱幅に対しては2-3桁程度小さい。この場合、熱幅と圧力幅を考慮したフォークト関数の半値幅は熱幅に支配されるので、それを直接測定するのは難しそうである。このような事情もあるからか、これまで原始惑星系円盤や惑星形成の分野では、圧力広がり完全は無視されており、円盤観測を解釈する際には、熱幅と乱流幅だけで決まるようなガウス関数が常に用いられてきた<sup>3</sup>。

しかし、興味深いことに、円盤においても圧力広がり効果が無視できなくなる場合がある。それは、輝線中心の光学的厚みが非常に大きいときである。光学的厚み $\tau(v)$ は、線中心からの速度 $v$ の関数として、 $\tau(v) = \tau_0 \phi(v)$ と書くことができる。ここで $\tau_0$ が線中心での光学的厚み、 $\phi(v)$ は輝線形状（熱幅と圧力幅で決まるフォークト関数）である。フォークト関数は、線中心近くでは熱幅だけで決まるガウス関数で近似できるが、線中心から離れたところでは、

$$\phi(v) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{\Gamma}{\Delta v_D} \left( \frac{v}{\Delta v_D} \right)^{-2} \quad (2)$$

となる。ここで、 $\Delta v_D$ は熱幅である。すなわち、圧力幅 $\Gamma$ が熱幅 $\Delta v_D$ より3桁程度小さかったとしても、線中心での光学的厚みが $10^4$ 程度ありさえすれば、 $v = 3\Delta v_D$ での光学的厚みはおよそ1に達する。さらに、 $v = 10\Delta v_D$ の線中心から非常に離れたところでも、線中心での光学的厚みが $10^5$ あれば同程度の光学的厚みになる<sup>4</sup>。実際、円盤で特に豊富なCO分子の輝線は $10^{4-5}$ といった非常に高い光学的厚みを持つ

<sup>3</sup>一方で、密度が数桁以上高くなれば、圧力幅は熱幅程度かそれ以上になるので、惑星大気等の分野では常に考慮されている自明な現象なようである。

<sup>4</sup>これは実質的にオパシティブロードニング(2.1節)と同じ現象である。

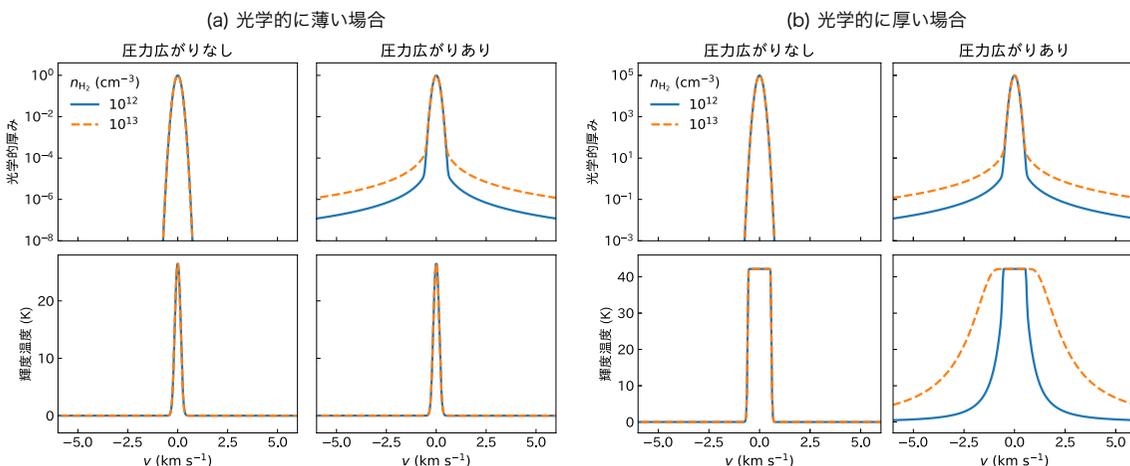


図2: (a) CO  $J=3-2$  輝線を例にして、線中心での光学的厚みが1の場合の異なる水素分子密度に対しての光学的厚み (上段) と輝度温度 (下段) のスペクトルを、圧力広がりを含んでいない場合 (左側) と考慮に入れた場合 (右側) についてプロットしている。この場合は圧力広がりの有無により光学的厚みのスペクトルにはウィング部で違いが見られるもの、実際に観測できる輝度温度のスペクトルにはほとんど違いが見られない。(b) (a) と同じものを線中心での光学的厚みが  $10^5$  の場合にプロットしている。この場合、輝線ウィングでの光学的厚みが有意な値を持つため、輝度温度スペクトルの形状が水素分子密度に依存する (右下のパネル) ことがわかる。本手法ではこの効果を用いる。

ちうる。ガス面密度を  $100 \text{ g cm}^{-2}$  とし、 $\text{CO}/\text{H}_2 = 10^{-4}$  とすると、CO 分子柱密度は  $3 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$  に達するが、 $T = 100 \text{ K}$  とした時の光学的厚みが  $10^5$  程度である。さらに、式 (1,2) から、線中心の光学的厚みが十分大きい時には、線中心から離れたウィングでの光学的厚みが水素分子密度に依存することがわかる。最終的な放射強度は光学的に薄いウィングでは光学的厚みに比例するから、観測される放射強度も水素分子密度に依存する。以上の効果は図2にまとめられている。

ちなみに、熱幅によるガウス関数的な線幅拡大のみを考えた場合には、光学的厚みが線中心からの速度に対して指数関数的に減衰する。これは圧力幅の場合の冪関数的な依存性 ( $\propto v^{-2}$ ) よりもはるかに速く、例えば、 $v = 3\Delta v_D$  では光学的厚みは線中心に比して  $\exp(-3^2) \sim 10^{-4}$  程度になってしまう。

### 2.3 ガス面密度の測定

前節では、圧力広がりウィングが水素分子密度に依存することをみた。ここでは、より具体的に、ガス面密度がどのようにして求められるかを説明する。まず、線中心での光学的厚み ( $\tau_0$ ) が CO 分子柱密度 ( $N_{\text{CO}}$ ) に比例することと、式 (1, 2) を用いると、圧力

広がりによる CO 輝線ウィングの放射強度は、線中心から十分離れた放射が光学的に薄くなる領域で、 $B(T) \tau_0 \phi(v) \propto B(T) N_{\text{CO}} n_{\text{H}_2}$  に比例する。ここで、 $B(T)$  は温度  $T$  に対するプランク関数である。さらに、CO の柱密度はガス面密度  $\Sigma_g$  と CO/ $\text{H}_2$  比  $X_{\text{CO}}$  の積に比例する。加えて、円盤は鉛直方向には静水圧平衡状態にあることを考えると、ガス面密度は中心面の密度に比例するから、結局

$$I_{\text{CO}} \propto B(T) X_{\text{CO}} n_{\text{H}_2}^2 \quad (3)$$

と書ける。ところで、光学的に薄い CO 同位体輝線を用いたこれまでのガス面密度測定法 (1,2) では、そのピーク放射強度のパラメータ依存性は

$$I_{\text{CO, iso}} \propto B(T) N_{\text{CO}} \propto B(T) X_{\text{CO}} n_{\text{H}_2} \quad (4)$$

と書ける。以上の2つの式を比較すると、CO 輝線ウィングの放射強度は CO 同位体の放射強度よりも  $n_{\text{H}_2}$  に強く依存することがわかる。これを利用することで、 $X_{\text{CO}}$  の大きな不定性を減らすことができる。すなわち、 $X_{\text{CO}}$  が3桁変化したとしても、 $n_{\text{H}_2}$  には  $\sqrt{10^3}$  しか不定性が伝播しない。さらに、2つの式の比をとると

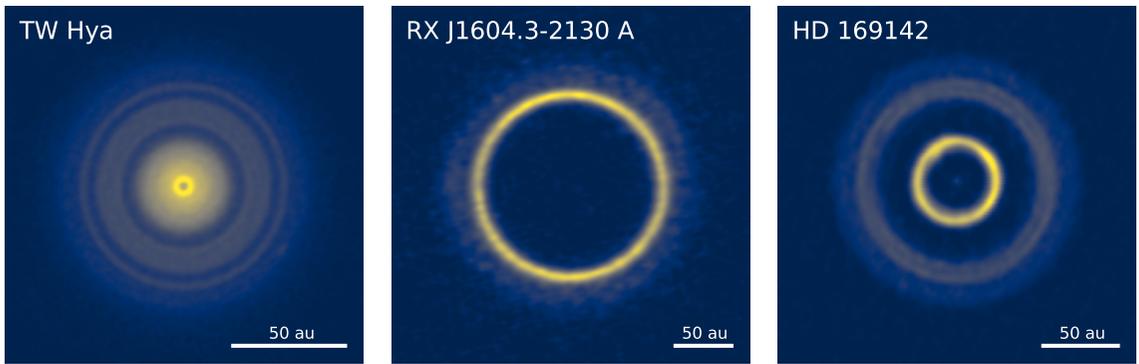


図3: 本研究で解析した3つの原始惑星系円盤 (TW Hya, J1604, HD 169142)の波長1 mmの連続波画像 [1, 24, 25]. ダストの熱放射分布を表している. 右下の線分の長さが50 auに対応する.

$$\frac{I_{\text{CO}}}{I_{\text{CO, iso}}} \propto n_{\text{H}_2} \quad (5)$$

が得られる. つまり, CO輝線の圧力広がりウィングとその同位体輝線の両方を観測することによって, H<sub>2</sub>密度がCO/H<sub>2</sub>比や温度に依存することなく求められるのである<sup>5</sup>. 水素分子密度が測定できれば, 温度を仮定・あるいは測定し鉛直方向の静水圧平衡を考えることで, ガス面密度に変換可能である. また, CO/H<sub>2</sub>比も同様に求められる.

このガス面密度測定手法では, 不定性の大きい変換係数を仮定する必要がない. また, 光学的に薄いウィングの放射を用いており, 円盤面密度の大部分を担う円盤中心面近くに感度がある. さらに, 高い空間分解能が得られる電波領域の輝線に適用可能であり, 面密度の空間分布も得ることができる. このような特長はユニークなものであり, 従来手法では不可能だったロバストなガス面密度測定を可能にする.

### 3. 観測と解析

#### 3.1 円盤における圧力広がり初検出

我々は, これまでに3つの円盤 TW Hya, RX J1604.2-2130 A (以下, J1604), HD 169142円盤

(図3)においてCO輝線の圧力広がり初めて検出することに成功している. いずれもALMA望遠鏡による観測データを用いている.

TW Hya円盤 [2]: TW Hya円盤は, 地球から最も近い (60 pc)円盤である. 中心星の年齢は 3-10 Myrと推定され, 円盤を持つ天体としては比較的歳をとっている. 一方で, 円盤中で今まさに惑星形成が進行している示唆も得られている [1, 26]. この円盤には, これまでに多数の研究と観測データが存在する. 我々は, これまでにALMAを用いて観測されたCO  $J=3-2$ 輝線のアーカイブデータをほとんど全て結合し, 全積分時間が10時間に達するほどの深いイメージキューブ<sup>6</sup>を得た. さらに, 光学的に薄いCO同位体輝線である<sup>13</sup>C<sup>18</sup>O  $J=3-2$ の検出がある[27]円盤中心部に着目し, 中心~10 au領域でのスペクトルを得た(図4).

J1604円盤 [22]: J1604円盤は, 地球から160 pcに位置する. 中心星の年齢は3-5 Myrとされ, これも比較的高年齢とされる. この円盤のダスト成分は比較的大きな (半径90 au)1つのリングからなり, リングの内側には木星質量惑星の存在が示唆されている [24]. リング周辺は分子ガスに富んでいることが知られている. 本研究では, ALMA大型プログラム exoALMA[28]で新たに取得されたCO  $J=3-2$ 輝線のデータ(積分時間6.5時間)を用いた. この円盤では, さまざまな分子の放射が最も明るくダストリング

<sup>5</sup>厳密には, 圧力幅には弱い温度依存性 (ここでは0.34乗)がある. また, 2輝線の周波数間でのプランク関数の比も残るが, これは近い周波数の遷移を選べば問題にならない. さらに, CO同位体比は仮定する必要がある(4節参照).

<sup>6</sup>電波天文学の用語で, 空間2次元, 周波数1次元のデータのこと.

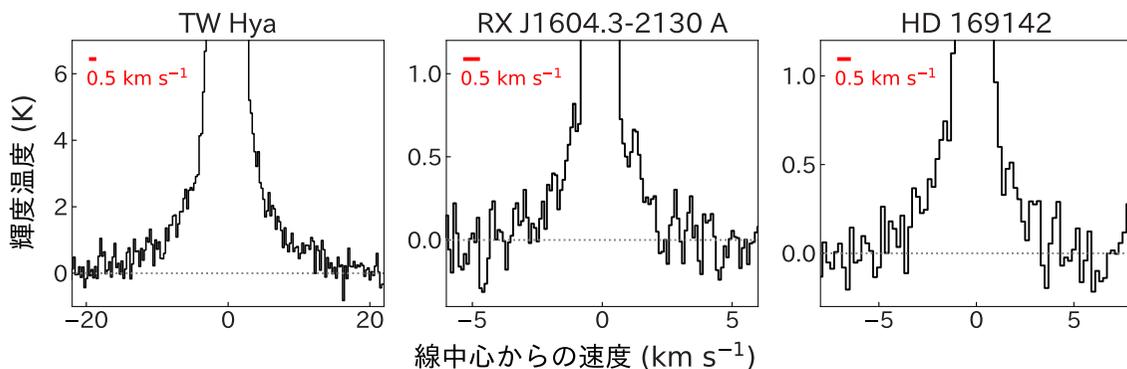


図4: 観測されたCO輝線のスペクトル. TW Hyaは円盤中心部 (~10 au)での, 他2天体は外側リング周辺 (J1604で $r \sim 80$  au, HD169142で $r \sim 60$  au)で方位角方向に平均したスペクトルのウイング部を拡大してプロットしている. 左上の線分は典型的な熱幅を表す. 熱幅よりもはるかに幅広いウイングが存在することがわかる. [2, 22]を元に作成(CC BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

付近に着目した解析を行う. 各円盤半径において, ケプラー回転を補正しつつスペクトルの方位角平均をとった半径-線中心からの速度に対する2次元スペクトルを作成した. 図4には中心星からの距離が $r = 80$  au付近にあるリングピーク付近でのスペクトルを示している.

HD 169142円盤 [29]: HD 169142円盤は, 地球から120 pcに位置する. 中心星の年齢は10 Myr程度と考えられる. ダスト円盤は複数のリングからなり, 1つ目と2つ目のリングの間に惑星と考えられる赤外線点源が検出されている [30]. この天体は他の2天体とは異なり, ハービッグ型星と呼ばれる比較的重い(2太陽質量)若い星である. 円盤内では数多くの分子の検出が報告されており, 分子ガスに富んでいると考えられる [31]. これまでにALMAを用いて観測されたCO  $J=2-1$ 輝線のアーカイブデータを結合し, 積分時間6.6時間に達する深いイメージキューブを得た. この天体では, 中心星からの距離が $r = 60$  au付近の外側リング付近に着目した解析を行った. J1604円盤と同様に, 方位角平均スペクトルを得た(図4).

いずれの観測も, 0.1-0.15秒角 (10-20 au)の空間分解能と  $0.03$ - $0.2$   $\text{km s}^{-1}$ の速度分解能を達成している. さらに, どの円盤も天球面からの傾斜角が0に近く, ケプラー回転による速度勾配が小さいため, 本来の輝線形状が得やすい(c.f. 2.1節)という利点もある.

得られたスペクトル (図4)を見ると, いずれの天体でも, 数  $\text{km s}^{-1}$ 以上に広がった輝線ウイングが存在することがわかった. 特に, TW Hyaでは,  $10 \text{ km s}^{-1}$ 程度にまで顕著な放射が検出されている. このようなウイングを熱運動や乱流によって説明するには, 非常に高い温度(数1000 K)や, 超音速乱流が必要であったりし, 円盤からのCO放射としては現実的ではない. さらに, TW Hyaでは放射が完全には空間分解できていないため, 輝線形状はケプラー回転による輝線広がりの影響を受けている. しかし, 高速度成分の放射は円盤の $\sim 5$  au程度の領域まで広がっていることがわかった. そのような領域でのケプラー回転速度は高々 $1 \text{ km s}^{-1}$ 程度であるため, ウイングはケプラー回転では説明できない. 他の2天体では, リングが空間分解できており, この影響は無視できるだろう. さらに, すべての天体で, 注目している領域におけるケプラー回転からのガスの運動のずれは高々数 $100 \text{ m s}^{-1}$ 程度であることが確認されている [2, 24, 25]. すなわち, 惑星による速度擾乱などでは幅広い線幅は説明できない. いずれの天体でも, 注目している領域では円盤中心面に光学的に厚いダスト円盤が存在する [29, 32, 33]. この場合, 円盤風のような大域的な流れが存在するとしても, 観測者から遠ざかる赤方偏移する成分は一部または全部がダスト円盤に隠されてしまい, 観測されたような線中心に対して対称的なスペクトルは実現されないだろう. さらに, 観測に用いられた周波数分解能や

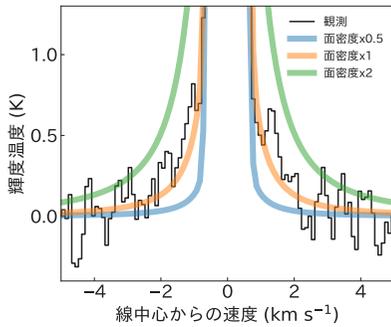


図5: J1604におけるモデルと観測データの比較の例。ベストフィットモデル (面密度×51)はウィング成分をよく説明できている。一方、ベストフィットのガス面密度を0.5, 2倍した場合にはそれぞれウィング放射を過小, 過大評価してしまう。ここから、ウィングが実際にガス面密度に感度があるということがわかる。[22]を元に改変(CC BY 4.0).

周波数応答でもこのようなウィングは説明できない。以上より、このような幅広なウィングは光学的に厚い輝線に対する圧力広がり でしか説明ができない。

### 3.2 3つの円盤におけるガス面密度の分布の制約 (1)手法

ガス面密度の分布を制約するにあたり、完全には空間分解できていないTW Hya円盤と、空間分解できている他の2天体では異なる手法をとる必要がある。

まず、TW Hyaでは、円盤中心部に対応する、電波干渉計の直接の観測量である複素ビジビリティをパラメトリックな輻射輸送モデルを用いて前進モデリングするアプローチを用いた。具体的には、まず、軸対称な円盤構造を考え、0次元の輻射輸送 (いわ

ゆる平板モデル)とケプラー回転を考慮に入れた上で、各周波数における放射マップを作成し、それを模擬観測してモデルビジビリティを得た。ここで、ガス面密度分布は、半径の冪乗で変化しつつ、ある半径以内において、ある割合だけ減少しているというパラメトリックなものをを用いた。これはダスト面密度が円盤中心部で大きく減少していることに動機付けられている (図3)。このように得られたモデルを観測データにフィットし、ガス面密度のベストフィットパラメータを探った。TW Hyaでは、<sup>13</sup>C<sup>18</sup>O輝線の観測がある[27]ため、その情報もあわせて用いてCO/H<sub>2</sub>を同時に決定する。

次に、J1604とHD 169142では、半径ごとに方位角平均したスペクトルが得られている。したがって、あるガス面密度の時に考えられるモデルスペクトルを観測スペクトルに半径ごとにフィットした。この手法の利点は、半径方向のガス分布の関数形状 (冪乗など)を仮定する必要がないことである。これらの天体では、<sup>13</sup>C<sup>18</sup>O等の光学的に薄い輝線の観測がまだ存在しないため、CO/H<sub>2</sub>比を10<sup>-4</sup>に一旦固定して議論を行なう。

### (2)結果と議論

いずれの天体に対しても、モデルは観測データによく適合した。図5では、J1604円盤を例として、ベストフィットモデルと観測データを比較している。ベストフィットモデルは観測データのウィングを良く説明している一方で、ガス面密度を変化させると観測データとは適合しなくなる。すなわち、ウィングは実際に

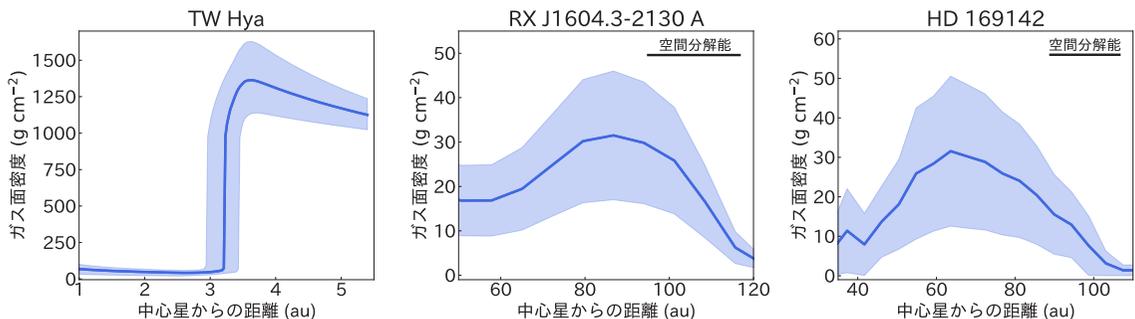


図6: 測定されたガス面密度分布。塗りつぶし領域は不定性の範囲を表す。いずれの円盤でも、ガス面密度分布は単純な冪乗則に従っていないことがわかる。特に、TW Hya円盤では、 $r = 5$  auでのガス面密度が $1000 \text{ g cm}^{-2}$ を超えていることが示された。これは最小質量太陽系円盤の8倍程度であり、ガス質量の点で惑星形成が可能であることを意味する。[2, 22]を元に作成(CC BY 4.0).

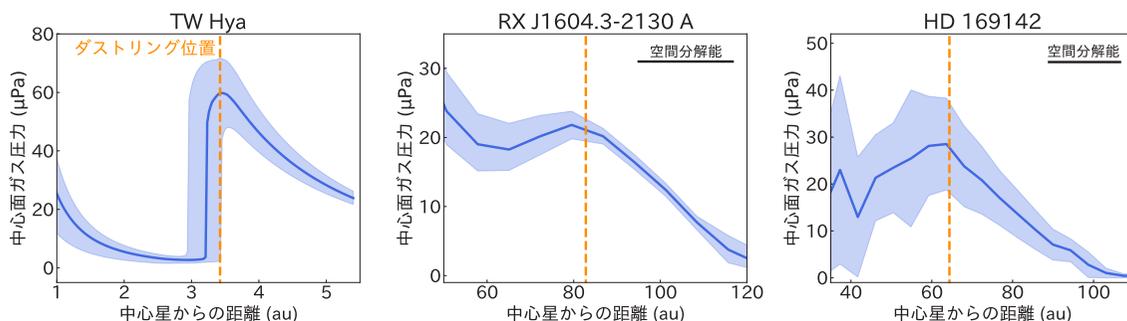


図7: 中心面ガス圧力分布とダストリングの位置. ガス圧力が極大になるところにダストリングがあることがわかる. [2, 22]を元に作成(CC BY 4.0).

ガス面密度に感度があることがわかる. TW HyaやHD 169142でも同様であった.

フィッティングの結果, TW Hya円盤では, 5 auでのガス面密度が $1000 \text{ g cm}^{-2}$ に達するなど, ガスが多量に存在することがわかった (図6). その一方,  $X_{\text{CO}}$ は $10^{-6}$ 程度であることもわかった. 残りの2天体では, 光学的に薄いCO同位体輝線の観測がないため,  $X_{\text{CO}}$ 由来の不定性が残る (2.3節). しかし,  $X_{\text{CO}}$ が $10^{-4}$ よりも小さい場合には, ガス面密度が, 自己重力不安定性で円盤分裂が起こるような閾値に達することがわかった. これらの円盤は高い軸対称性を持つことが知られているため, そのような値は非現実的である. したがって,  $10^{-4} < X_{\text{CO}} < 10^{-3}$ であると考えられ, これに対応するガス面密度分布が導かれた (図6). J1604とHD 169142のリングピーク (~84 au) 付近でのガス面密度は $18\text{--}44 \text{ g cm}^{-2}$ ,  $13\text{--}51 \text{ g cm}^{-2}$ と求められた<sup>7</sup>. 以上から見積られるリング内のガス質量は, TW Hya, J1604, HD 169142でそれぞれ7, 50-100, 22-90木星質量であった. いずれの円盤も, 比較的歳をとっているものであり, ダスト質量から見積られた典型的な円盤の散逸タイムスケール (~3 Myr [35]) を超えているが, 惑星形成に十分な質量のガスが存在することがわかる. これは, 単に円盤の初期質量が非常に重かった可能性もあるが, 円盤形成後も星間物質からの質量供給があるという最近提案されているシナリオでも説明できるかもしれない [36].  $X_{\text{CO}}$ については,

<sup>7</sup>J1604はTタウ型星周りの円盤としては温度が特異的に高い天体であり, それに起因する不定性に関しては[22]で詳しく議論している. ここで示している値にはその不定性も考慮に入れている.

TW Hyaでは星間空間での値( $10^{-4}$ )に対して大きく減少していることがわかったが, 他の2天体では星間空間での値と同程度であることが示唆された. このことは, TW Hyaが特に化学的に進化が進んだ段階にあることを意味するのかもしれない.

ガス面密度分布には半径方向に局所的な構造が存在することもわかった. このような構造は, 例えば, 埋没した惑星の存在などによって形成される. それぞれの面密度の極小値付近に惑星が存在すると仮定すると, それらの質量は, 0.03-0.3 (TW Hya), 0.1-2 (J1604), 0.1-3 (HD 169142)木星質量と見積られた. 実際, J1604では, ガスの運動から, 40-50 au付近に0.3-3木星質量の惑星が存在することが示唆されている[24]ほか, HD 169142では, 40 au付近に惑星と解釈できる赤外線点源が確認されており[30], 本研究はこれらの先行研究と整合的である.

図7には, 中心面ガス圧力分布と共にダストリングの位置を示している. ガス圧力には極大値が存在し, それがダストリングの位置と対応していることがわかる. これは, ダストがガス圧力の極大値にトラップされていることを示唆する. この現象は, ダストの半径ドリフトを抑制することで微惑星形成を促進するメカニズムとして長い間理論的に予言されてきたものであるが, 観測によって直接的に示されたのがこれが初めてである.

この場合, ダストの半径分布は, ガスの乱流強度によって特徴付けられる. すなわち, 乱流が強ければ, ダストはガスと同じ分布に近づくし, 乱流が弱ければ, ダストは強くガス圧力のピークに集積するだろ

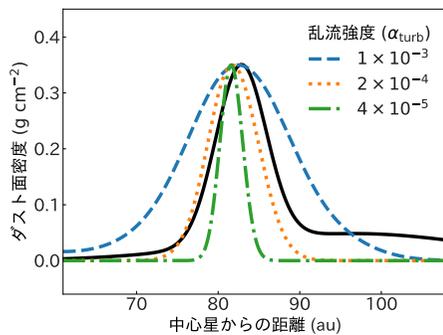


図8: J1604円盤における、観測されたダスト面密度分布(実線)と、観測されたガス面密度分布から様々な乱流強度に対して予測したダスト面密度分布。  $\alpha_{\text{turb}} = 2 \times 10^{-4}$  のときよく整合する。[22]を元に改変(CC BY 4.0)。

う[37]. J1604で制約されたガス面密度分布と、他波長ダスト連続波解析から見積もられた最大ダストサイズ( $\sim 1.4$  mm)に対して、乱流強度を変えながら、予測されるダスト面密度分布を計算したところ、乱流パラメータ  $\alpha_{\text{turb}}$  が  $2 \times 10^{-4}$  程度であるとき、観測された幅をよく再現することがわかった(図8). このような弱い乱流強度は磁気回転不安定性などで予測されるものである。円盤中心面付近での乱流強度を、ガス面密度を人為的に仮定しない形で求めることができたのは、これが初めてである。さらに、この乱流による衝突破壊によってダストサイズが制限されるとすると、ダストの衝突破壊臨界速度が  $\sim 1 \text{ms}^{-1}$  と推定できる。この値はこれまで典型的に考えられていたものよりも小さく、ダストが脆いことを意味するが、近年他の円盤で示唆されている値 [38, 39] とは整合的であり、円盤では脆いダストが一般的である可能性を暗示する。以上のような重要な物理過程の定量的な議論は、ガス面密度分布の観測的制約により初めて可能になったことは強調しておきたい。

さて、ダストのガス圧力極大へのトラップが起これば、ガス-ダスト比が 10 程度まで減少することが予想され、ストリーミング不安定性などを介してさらに効率的に微惑星形成が進むかもしれない [40]. しかし、興味深いことに、ガス-ダスト比はリングピークで約 80 (TW Hya), 70-400 (J1604), 17-104 (HD 169142) と見積られ、ダストの極端な濃集は観測されなかった。これは、リングから内側へのダストの漏れ出しがあるか、あるいはダストが観測できない微惑

星などへと既に成長していることを示唆するのかもしれない。

## 4. 手法の限界と今後の展望

本手法は、CO/H<sub>2</sub> などの変換係数に依存せず円盤中心面近くに感度があるという点でユニークなものであるが、いくつかの弱点が存在する。まず、円盤の質量はほとんどの場合外側領域に支配されているが、本手法は円盤外側の密度が低い領域には感度がない場合が多く、円盤全質量を求めるためには適していない。むしろ、本手法は、円盤内側の高密度領域のガス面密度を測定するのに適している。この特徴は円盤外側に感度がある他の手法と相補的であるほか、TW Hya 円盤で示したように、太陽系惑星の形成領域 ( $r < 30$  au) に匹敵する中心領域の物理構造を明らかにできるという点で興味深い。また、本手法では、CO 分子同位体比 (例えば、CO/<sup>13</sup>C<sup>18</sup>O) は仮定する必要がある。この値は、近傍の円盤では高々  $\sim 10$  倍しか変動しないと考えられる [41, 43] もの、必要な精度によっては注意を払う必要がある。ただし、複数の同位体種を用いることで同位体比自体を測定することも可能かもしれない [27]. さらに、本手法は、ケプラー回転による速度勾配による効果 (2.1 節) を防ぐため、円盤の傾斜角が大きい天体には適用しにくい。これは、圧力広がりケプラー回転の効果を上回るほど顕著である場合には問題ないが、そうでない場合にはより良い前進モデリング手法などを開発する必要があるだろう。

それでも、本手法が既に適用できる円盤は、本研究で扱った 3 天体以外にもいくつかある。我々は、ALMA サイクル 10, 11 において新たに 4 天体を対象としたパイロットサーベイを提案・実施している。そのうち観測が終了したある天体を暫定的に解析すると、圧力広がりによると考えられる輝線ウイングが今回示したものよりもさらに遥かに顕著に現れていた。今後、詳細に解析し、ガス面密度分布やその他の構造を決定する予定である。これが成功した暁には、さらに多くの天体を観測し、原始惑星系円盤の物理構造を包括的に理解したい。また、本稿では触れることができなかったが、圧力広がりウイングは、円盤中心面近くをトレースする光学的に薄い放射とし

ては、他の放射(e.g. CO同位体輝線)と比べて圧倒的に高い信号-雑音比を得ることができる。我々は、このことを利用し、2つのCO輝線を用いることで、TW Hya円盤において円盤中心面の温度を初めてモデル非依存な形で測定することに成功した。中心面温度の測定結果は、ダストの組成や構造の制約などに用いることができる [39]。このような、圧力広がりユニークなガストレーサーとしての応用についても研究を進めていきたい。

## 5. まとめ

我々は、これまで見逃されてきたCO輝線の圧力広がりを用いた原始惑星系円盤のガス面密度の測定手法を考案した。さらに、実際に3つの円盤 (TW Hya, J1604, HD 169142)の ALMA観測データ中に圧力広がりによる輝線ウィングを発見することに成功し、それらの天体でガス面密度をこれまでよりもロバストに制約することに成功した [2, 22, 29]。その結果、全ての天体で、惑星形成に十分な量のガスが存在することがわかった。さらに、J1604円盤で乱流強度を推定することができるなど、惑星形成の重要な物理過程への示唆を与えられた。本記事では、ページ数の都合で一部の結果、議論しか掲載できていないため、研究内容の詳細については我々の原著論文をご覧いただければと思う。

## 謝辞

本稿の査読者である大橋聡史氏には丁寧な査読と有益なコメントをいただき、感謝しております。本研究は、指導教員である野村英子氏をはじめとする41名(うち、exoALMAコラボレーションから33名)の方との共同研究です。皆様の助け無しには本研究は成り立ちませんでした。御礼申し上げます。また、学会賞選考委員の皆様にも深く感謝いたします。本研究は日本学術振興会特別研究員(DC1)奨励費(JP23KJ1008)の助成を受けて行いました。

## 参考文献

- [1] Tsukagoshi, T. et al., 2019, ApJL 878, L8.
- [2] Yoshida, T. C. et al., 2022a, ApJL 937, L14.
- [3] Weidenschilling, S. J., 1977, MNRAS 180, 57.
- [4] Hayashi, C., 1981, PThPS 70, 35.
- [5] Ansdell, M. et al., 2016, ApJ 828, 46.
- [6] Pinte, C. et al., 2016, ApJ 816, 25.
- [7] Birnstiel, T. et al., 2018, ApJL 869, L45.
- [8] Miotello, A. et al., 2014, A&A 572, A96.
- [9] Miotello, A. et al., 2017, A&A 599, A113.
- [10] Aikawa, Y. et al., 1996, ApJ 467, 684.
- [11] Krijt, S. et al., 2020, ApJ 899, 134.
- [12] Zhang, K. et al., 2020, ApJL 891, L17.
- [13] Bergin, E. A. et al., 2013, Nature 493, 644.
- [14] Trapman, L. et al., 2017, A&A 605, A69.
- [15] McClure, M. K. et al., 2016, ApJ 831, 167.
- [16] Veronesi, B. et al., 2021, ApJL 914, L27.
- [17] Andrews, S. M. et al., 2024, ApJ 970, 153.
- [18] Teague, R. et al., 2019, Nature 574, 378.
- [19] Trapman, L. et al., 2021, A&A 649, A95.
- [20] Teague, R. and Loomis, R. A., 2020, ApJ 899, 157.
- [21] Miotello, A. et al., 2023, in Protostars and Planets VII (San Francisco: Astronomical Society of the Pacific), 501.
- [22] Yoshida, T. C. et al., 2025, ApJL 984, L19.
- [23] Gordon, I. E. et al., 2022, QJST 277, 107949.
- [24] Stadler, J. et al., 2023, A&A 670, L1.
- [25] Garg, H. et al., 2022, MNRAS 517, 4.
- [26] Yoshida, T. C. et al., 2024, ApJL 971, L15.
- [27] Zhang, K. et al., 2017, Nat. Astron. 1, 0130.
- [28] Teague, R. et al., 2025, ApJL 984, L6.
- [29] 吉田有宏ほか, 2024, 日本天文学会2024年秋季年会.
- [30] Hammond, I. et al., 2023, MNRAS 522, L51.
- [31] Booth, A. S. et al., 2023, A&A 678, A146.
- [32] Ueda, T. et al., 2020, ApJ 893, 125.
- [33] Macías, E. et al., 2021, A&A 648, A33.
- [34] Andrews, S. M. et al., 2012, ApJ 744, 162.
- [35] Haisch, K. E., Jr. et al., 2001, ApJ 553, L153.
- [36] Winter, A. et al., 2024, ApJL 972, L9.

- [37] Dullemond, C. P. et al., 2018, ApJL 869, L46.
- [38] Jiang, H. et al., 2024, A&A 682, A32.
- [39] Yoshida, T. C., 2025b, ApJ 980, 50.
- [40] Youdin, A. N. and Goodman, J., 2005, ApJ 620, 459.
- [41] Yoshida, T. C., 2022b, ApJ 932, 126.
- [42] Bergin, E. A., 2024, ApJ 965, 147.
- [43] Lee, S. et al., 2024, ApJ 969, 41.

---

## 著者紹介

---

吉田 有宏



総合研究大学院大学物理科学研究科天文科学専攻5年一貫制博士課程5年。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。

# みんなでふたたび木星へ、そして氷衛星へ その12 ～地球フライバイによりサブミリ波分光計SWIの 観測性能を実証～

笠井 康子<sup>1,2</sup>, 佐川 英夫<sup>3,2</sup>, 黒田 剛史<sup>4,2</sup>, 山田 崇貴<sup>2</sup>, 関根 康人<sup>1</sup>, Paul Hartogh<sup>5</sup>,  
JUICE SWI Team

(概要) 欧州宇宙機関の木星圏探査機JUICE (Jupiter ICy moons Explorer)に搭載されている科学機器の一つに、サブミリ波分光計Submillimetre Wave Instrument (SWI)がある。深宇宙探査の歴史の中でサブミリ波(テラヘルツ波)の電磁波を用いた惑星観測はこれまでに例がなく、SWIが世界で初めての試みとなる。新たな目(波長)で探査する木星やガニメデ、エウロパ、カリストなどの氷衛星はどのような姿を見せてくれるのだろうか？ 本稿ではSWIが新たに拓くと期待される木星圏の姿(科学目標)、それを達成するためのSWIの測器詳細、そして、2024年8月にJUICEが行ったLEGA(月・地球重力アシスト)におけるSWI測器性能の実証について述べる。

## 1. はじめに

JUICE (Jupiter ICy moons Explorer)は、欧州宇宙機関が主導し、欧州各国をはじめ、日本や米国、イスラエルが参加する木星圏探査ミッションである。ミニ太陽系とも呼ばれる木星圏を詳細探査することで太陽系の起源や氷衛星における生命居住可能性に迫るべく、2023年4月14日に打ち上げられた。木星圏への到着は2031年7月の予定である。打ち上げの様子や木星までの道のりについては、本シリーズの過去記事が詳しい。

JUICE搭載の11<sup>1</sup>の観測装置の中の一つに、サブミリ波分光計SWI (Submillimetre Wave Instrument)がある[1]。SWIはサブミリ波帯(テラヘルツ波)の電磁波を、周波数分解能が $\sim 10^7$ という非常に高い性能で受信する分光計である。この高い周波数分解能によって、木星や氷衛星における様々

な分子やラジカル、そしてそれらの同位体種の検出を実現する。また、サブミリ波帯という可視光・赤外波長より長い観測波長を用いることで、氷衛星の氷表面の内側に少し潜った層からの熱放射(連続波)を観測することができる。このSWIが拓く新たな木星圏の姿はどのようなものであろうか？

JUICE連載シリーズの記事としてSWIを前回取り上げた11年前[1]は打ち上げ前であり、測器仕様など未確定な部分も存在していた。本稿では、JUICEの中でSWIが持つ科学的な役割を改めて紹介し、現在軌道上で木星を目指している装置の詳細を示す。また、深宇宙における観測性能の実証として重要なイベントであった地球フライバイ観測の結果を紹介する。

## 2. SWI (Submillimetre Wave Instrument)

### 2.1 SWIの科学目標

「巨大ガス惑星のまわりにおける生命居住可能性

1.東京科学大学  
2.情報通信研究機構  
3.京都産業大学  
4.東北大学  
5.マックスプランク太陽系研究所  
kasai.y.aa@m.titech.ac.jp

<sup>1</sup>地上局との通信を利用する電波科学測器も含めた数。

の探査」というJUICEのミッションテーマの中で、SWIは以下の科学目標に挑むことを役割として期待されている。<sup>2</sup>

- 木星上層大気的气温場や風速、大気微量成分を観測し、巨大ガス惑星の高層大気力学・化学の詳細理解を得る、
- 水衛星の希薄大気を観測し、その組成や大気の生成・消滅過程を明らかにする、
- 水衛星の水表面下からのプルーム噴出(間欠泉)の分子組成を特定することで、内部海の化学的性質に制約を与える、
- 木星大気および水衛星に存在する主要物質の同位体比や水素のオルト・パラ比を高精度で観測し、同位体の分別過程を切り口に木星系の起源や進化を議論する、
- 水衛星表層に存在する物質の熱物理的・誘電率特性を調査し、地質学的特徴との相関関係を明らかにする、

以降では、それぞれの詳細について最新の研究動向もふまえつつ、SWIによる観測が切り拓く木星大気・水衛星科学を述べる。

## (1) 木星大気科学

木星大気の研究に関する最近の特筆すべき進展は、やはり2016年からのJuno探査機による木星対流圏大気観測であろう。特にマイクロ波放射計 Microwave Radiometer (MWR)は雲層表面から深さ350 km程度までの大気構造を初めて捉え、大赤斑の鉛直構造[2]や雲生成に大きく関わるアンモニアの3次元分布[3]など様々な新しい知見をもたらした。対流圏の雲は大気重力波の生成源として、木星成層圏大気に特有の赤道準4年振動(quasi-quadrennial oscillation, QQO)との関連性が示唆されている[4]。Junoは主に木星大気の上対流圏(雲層)が観測対象であったのに対して、SWIはより高高度の成層圏の3次元温度マッピングに加えて観測スペクトルのドップラーシフトを用いた風速の直接観測を予定している。その長期的な連続観測から、QQOをもたらす木星大気の上対流圏結合過程を解明していくことが期待される。

<sup>2</sup>JUICE definition study report (Red book) <https://sci.esa.int/s/wRdzy18>

またSWIでは、木星成層圏の化学組成についての詳細観測も実施される。木星成層圏の組成はCH<sub>4</sub>の光化学反応と宇宙塵や彗星(1994年のシューメーカー・レビー第9彗星が代表的)・小惑星など外来物質の流入の影響を受けており、また強い磁場がもたらすオーロラ活動が大気放射過程において重要なC<sub>2</sub>H<sub>2</sub>やC<sub>2</sub>H<sub>6</sub>の生成に寄与している[5]。SWIによる炭化水素やH<sub>2</sub>O, CO, CS, HCNの観測、さらにこれらの同位体比(D/H, <sup>16</sup>O/<sup>18</sup>O, <sup>12</sup>C/<sup>13</sup>C, <sup>15</sup>N/<sup>14</sup>Nなど)の測定から、木星に存在する物質の起源を探り、その形成過程に迫る。

我々は木星成層圏の物理化学過程について理論検証が可能な大気放射伝達モデル[6]、大気化学モデル[7]、雲微物理モデル[8]を有しており、ガス惑星大気大循環モデル[9]とも組み合わせてSWIの観測データから科学的解釈を引き出す準備を整えている。

## (2) 水衛星科学

SWIは木星水衛星の希薄大気に関しても、前例のない高精度での観測を実現する。SWIの開発が始まろうとしていた2014年当時は、エウロパから噴出高さ200 km、カラム密度10<sup>16</sup> cm<sup>-2</sup>ものプルームの検出がハッブル宇宙望遠鏡によってなされたタイミングであった[10]。その後、他のいくつかの研究により再度検出が試みられるものの成功には至っていなかったが、2016-2017年のケック天文台での観測により、2095±658トンもの水蒸気の検出が報告された[11]。この地上観測では17回の挑戦のうち1回のみが検出事例となっており、エウロパにおけるプルーム活動の頻度や分布、エネルギー源、局所的な熱源の存在の有無の議論に大きな一石を投じている。SWIではエウロパ希薄大気中の水蒸気の検出のみならず、その時空間変動や温度異常の直接検出も目標とされており、エウロパのプルームに関する議論に決定打を与えることが期待される。

水衛星の内部海に対する研究は、上記のプルーム探索以外にも、2013年に報告されたハッブル宇宙望遠鏡によるガニメデのオーロラ検出[12]や、内部海の電気伝導度の推定[13]に加え、室内実験および熱輸送モデルによる物理的・化学的特性に関する理解が急速に進展している[14]。SWIによる希薄大気スペクトル観測の周波数帯域にはC, H, N, O, P, Sを

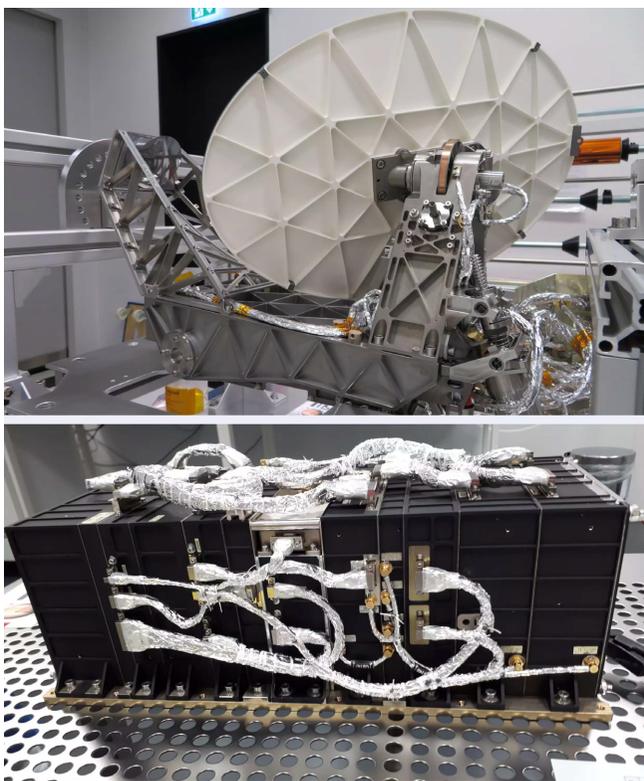


図1: 開発中のSWI画像(画像提供:MPS)。上の画像が望遠鏡・受信機ユニットであり、白塗りの背面を向けているのが口径29 cmの主鏡である。下の画像は信号処理を行う電子機器ユニットであり、JUICEの内側に取り付けられる。望遠鏡・受信機ユニットとはケーブルで接続される。

含む分子や塩化物、それらの同位体など約100種類以上にも及ぶ分子種の遷移が存在している。SWIではこれら揮発性物質の存在量の観測(あるいは上限値の制約)から、より解像度の高い内部海や地表面の化学組成推定を行い、生命居住可能性の議論に資する成果の創出を目指す。日本チーム内でも、来るべきSWIの水衛星観測に向け、放射伝達モデルの開発や分子種の観測感度検討を継続している[15]。

また、水衛星の表面物質の分布や特徴的な地形の成因を調べることも、水衛星の形成過程や進化を理解するうえで不可欠なものである。近年、ALMA望遠鏡やJames Webb宇宙望遠鏡を用いた木星衛星の表面観測が報告されているが[e.g., 16]、やはり空間分解能の面では不十分な状況である。SWIでは、サブミリ波帯という光赤外よりも長い波長帯を用いることで、水表面よりも少し内側から射出される熱放射が観測される。その熱放射輝度は、水衛星表面

の3次元(水平+深さ)温度分布のみならず、表面物質の放射率や誘電率特性にも依存する。観測される放射輝度に含まれるこれら複数のパラメータの縮退を解くにはいくつかの仮定を必要とするものの、SWIの二つの離れた周波数帯での観測データやその時間変化(現地時刻依存性)を用いることで、表層の熱慣性や不純物の含有量、水内部の不規則構造の空間スケールなどといった水表面の物理的性質の推定が期待される。

## 2.2 SWI 測器仕様

SWIは、ドイツ・マックスプランク太陽系研究所(MPS)を中心に、フランス、スイス、スウェーデン、ポーランドおよび日本の研究機関による国際協力のもとで開発された観測装置である。日本からは情報通信研究機構(NICT)が中心となって参加し、後述の装置構成のなかで主鏡・副鏡・アクチュエータの開

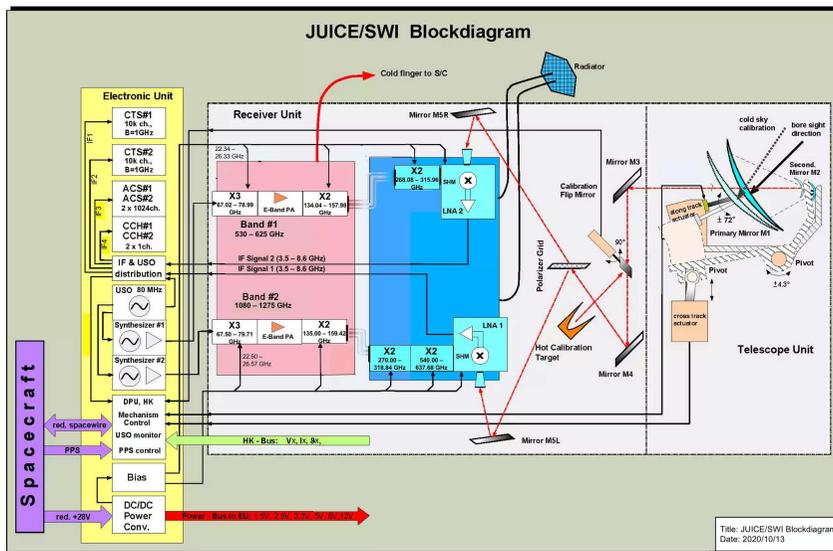


図2: SWIのブロックダイアグラム。2014年の記事[1]中の図と比較すると様々な変更点が見られる。一番大きな変更は600 GHz帯の観測周波数の範囲(図中央の薄赤色部分にBand #1として記載)であり、初期設計では601 GHzが観測周波数の上限であった。それを625 GHzまで広げることで、621 GHzに存在する水蒸気のラインを観測可能にしている。

発を担当した。これらのハードウェア開発以外にも、日本から複数名の研究者が共同研究者Co-Iとして国際SWIチームに参加しており、観測運用モードの議論やデータ解析アルゴリズムの開発といったサイエンス面での貢献を行っている。

SWIは、サブミリ/テラヘルツ波長帯のsingle dish電波望遠鏡の一種である(図1, 2)。木星や水衛星からのサブミリ波放射を望遠鏡の主鏡(アンテナ)で集光し、観測すべき特定の波長域の信号をヘテロダイン受信機で取り出す(局発振器からの基準信号と混合し、より低い周波数である中間周波数の信号に変換する)。そして、その信号を分光計にて分光スペクトルとして記録する。前述の科学目標を達成するため、SWIは波長0.52 mm付近(周波数530-625 GHz)の帯域、以下600 GHz帯と呼ぶ)および0.25 mm付近(1080-1275 GHz, 以下1200 GHz帯)の二つの波長域において観測を行う。両周波数帯には水蒸気およびその同位体の強いラインが複数存在し、また1200 GHz帯にはメタンのラインも含まれるのが特徴である。SWIが掲げている科学目標の大半は、その実現に極めて高い波長分解能の観測が必要であり、SWIがヘテロダイン受信機(波長分解能

$\lambda/\Delta\lambda \sim 10^7$ を実現)を利用するのはそのためである。

SWIでは平面ショットキーバリアダイオードを受信機として採用している。

分光計は、より広い観測波長域を一度にカバーしたいという点と、より高い波長分解能を実現したいという二つの要求から、広帯域(4 GHz)用にデジタル分光計(Auto-correlation Spectrometer, ACS)、高波長分解能(100 kHz)用にチャープ変換型分光計(Chirp Transformation Spectrometer, CTS)をそれぞれ採用した。これらは、ハーシェル宇宙望遠鏡のHIFI[17]や彗星探査機Rosetta搭載測器のMIRO[18]などで宇宙利用の実績がある。SWIはACSとCTSの二つの分光計を600 GHz帯と1200 GHz帯の受信機にそれぞれ割り当てており、合計4個の分光計を有する装置である。また、ACSには4 GHzの帯域全体を積分して受信する連続波チャンネルも設置している。

ACSおよびCTSの観測帯域はそれぞれ4 GHzと1 GHzである。600 GHz帯と1200 GHz帯に存在する様々な分子の吸収線をこの帯域幅で可能な限り受信するため、超高安定発振器の基準信号をシンセサ

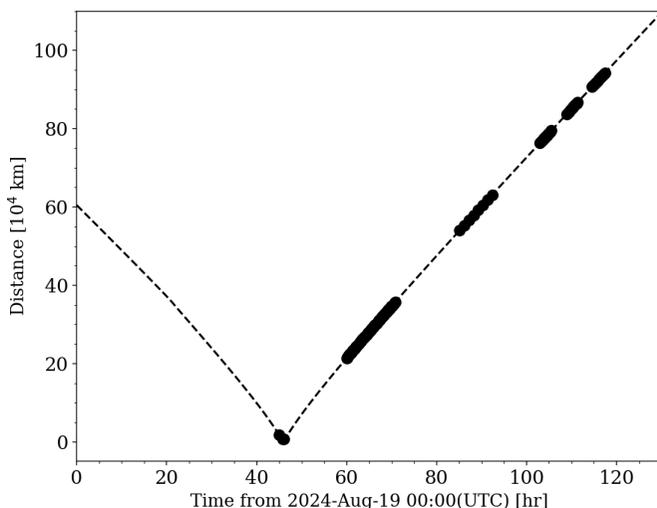


図3: LEGAにおけるJUICEと地球(地表面)との距離(破線). 黒丸はSWIが地球を観測したタイミングを示す.

イザに通し, その周波数を自由に変更した上で受信機に入力するようにしている(tunable LO方式).

SWIは単一ピクセルの検出器であり, 観測対象のサブミリ波放射の空間分布にアンテナビームパターンと呼ばれる主鏡(指向性アンテナ)の信号受信感度の方向依存性を畳み込んだ信号強度を受信する. アンテナビームパターンの広がり(狭さ)が観測の空間分解能に相当し, 大口径のアンテナほど高い空間分解能が実現される. JUICEは木星半径の $\sim 20$ 倍の距離から木星を観測することになる(木星の視直径が $100$  mradとなる)が, そこから木星大気の周縁部分を正確に観測するにはそれ相当の空間分解能の高さが必要となる. しかし, 大口径のアンテナはそれだけ重量が高み, ただでさえ総重量が他の科学測器よりも大きなSWIにとっては開発時の悩みの種であった. 許容された装置重量の範囲内で最大限の空間分解能が得られるように検討した結果, 最終的にSWIのアンテナ口径は $29$  cmとなった. このアンテナで得られる空間分解能(アンテナビームパターンの半値全幅)は,  $600$  GHz帯と $1200$  GHz帯でそれぞれ  $2.16$  mrad ( $447$  秒角)および  $1.08$  mrad ( $223$  秒角)である. また, SWIはアンテナの向きを探査機の軌道面内方向および軌道面に直交する方向の2方向に独自に駆動させることで, 木星や氷衛星サブミ

リ波放射の空間分布をマッピングする機能を持たせている. 軌道面内方向には  $\pm 72$  度, 直交方向には  $\pm 4.3$  度の範囲でアンテナの向きを変えることができる.

もう一つ, SWIでは観測装置自体の熱による雑音をなるべく抑えるため, 受信機を冷却している. ただし, 重量や消費電力の制限から, 冷凍機を用いた能動的な冷却ではなく, 放熱板を深宇宙に向けて設置するだけの受動的な冷却機構を採用している.

### 3. LEGA(月・地球重力アシスト)におけるSWI観測性能評価

#### 3.1 地球フライバイ

JUICEの昨年の一大会事が, 2024年8月の月・地球重力アシスト(Lunar Earth Gravity Assist, LEGA)であった. その軌道計画全般については本連載シリーズの過去記事でも触れられているためにここでは割愛するが, SWIもこのLEGAにおいて合計42時間の月および地球の観測運用を行った. この運用は, 将来JUICEが氷衛星をフライバイ観測する際の模擬練習の意味に加え, SWIの観測性能を実観測で評価するための重要なイベントであった. 結果は極めて満足の行くものとなったが, 本

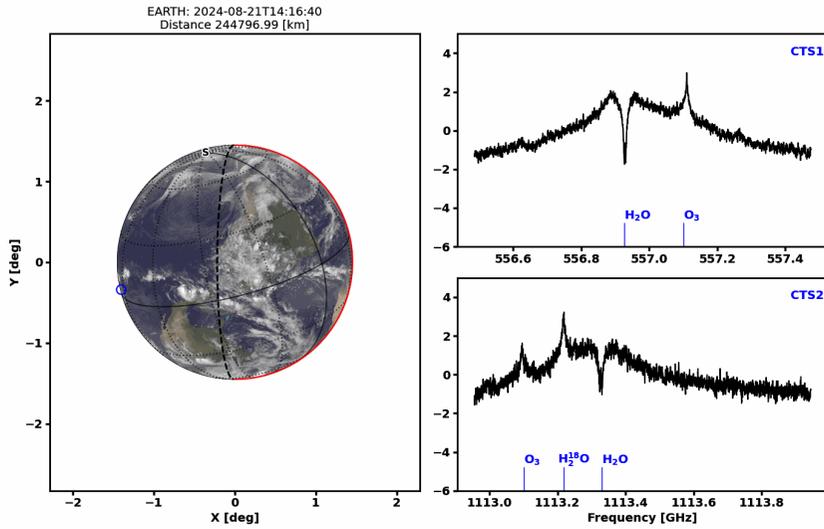


図4: 地球フライバイ時のSWI観測データ. 8月21日14:16(UTC)に地球からおおよそ24万kmの地点から観測. (図提供:MPS)

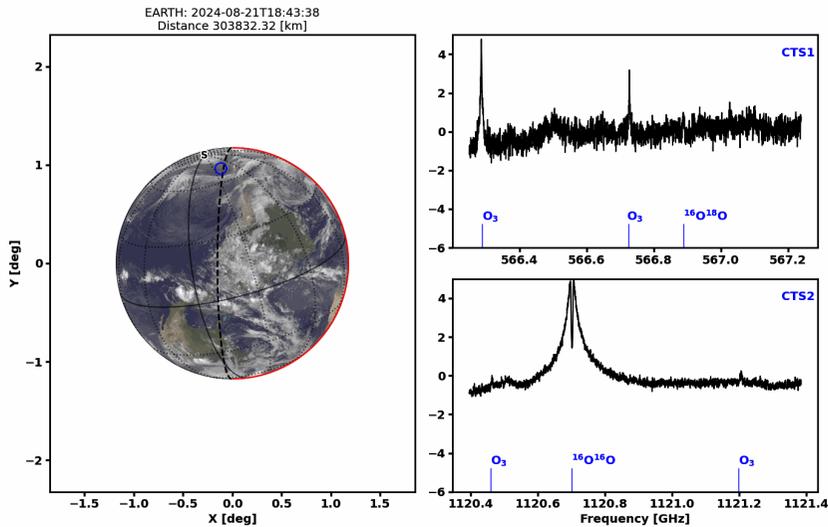


図5: 図4と同様, 但し異なるタイミング(8月21日18:43(UTC), 地球との距離およそ30万km)に異なる観測運用モードで取得した結果. (図提供:MPS)

稿では特に地球フライバイ観測の成果を紹介する.

図3は地球フライバイ時のJUICEと地球との距離の変化を示したものである. JUICEが8月20日(UTC)に地球に最接近したタイミングから23日にかけて, SWIはアンテナを地球方向に向けて観測

を実施した. 観測は, 600 GHz帯と1200 GHz帯の両観測周波数帯でACSとCTSの両分光計で行い, 地球上の一点を凝視観測する運用モードや, アンテナをJUICEの軌道面内および直交方向に細かく駆動しながら地球の二次元マップを合成する運用モー

ド、大気微量成分のラインサーベ이를目的として観測中心周波数を連続的に変化させながらデータを取得するモード、そして、地球の周縁部分(リム)にアンテナを向けて観測を行うリム観測モードなど、将来JUICEが木星圏に到着した際に実際に用いることになる様々な観測手法を一通り実施している。特に、リム観測モードでは、SWIの観測視線が地球大気を鉛直ではなく斜めに横切ることとなり、地球大気中の観測視線長を稼ぐことができる。これにより、観測視線に沿った大気分子の柱密度も大きくなり、その吸収線スペクトルの検出精度を大きく改善することができる。また、大気循環に起因する大気微量成分スペクトルのドップラーシフト(観測視線方向の風速)の検出にも適した観測手法であり、SWIの科学目標達成のために不可欠な観測運用モードの一つである。

### 3.2 結果

図4および図5にSWIが取得した地球フライバイ時の観測スペクトルを示す。各図の左側の地球画像に青丸で示しているのがSWIの観測点である。地球は右半分に太陽光があたっている状況であり、太い破線が地球の昼夜境界を示す。図4の場合は、SWIの観測点(青丸)は地球の夜側に位置している。SWIは大気の熱放射であるサブミリ波放射を観測するため、観測対象の昼夜を問わず観測が可能である。図の右側の二つのスペクトル図は、それぞれ、600 GHz帯と1200 GHz帯のCTS分光計で取得した高周波数分解能のスペクトルである。図4では、地球大気中の水蒸気 $\text{H}_2\text{O}$ のラインのみならず、水蒸気分子の酸素が $^{18}\text{O}$ になっている同位体 $\text{H}_2^{18}\text{O}$ まで明瞭に観測できていることが分かる。また、図5では、オゾン $\text{O}_3$ のラインや酸素分子 $\text{O}_2$ の同位体 $\text{O}^{18}\text{O}$ が観測されている。分子のスペクトルが輝線になっているものと吸収線になっているものがあるのは、それらのラインの光学的厚みの違いによるものである。

今回のフライバイではSWIの波長スキャンモードで観測をしており、600 GHz帯と1200 GHz帯の全域にわたってスペクトルを取得することができた(図4-5で示したのはそれらの中のとある1 GHzの帯域である)。これまで宇宙から地球をサブミリ波帯で観測した事例は、日本のJEM/SMILES[19]や米国のAura/MLS、欧州のOdin/SMRなどいくつかある

が、1200 GHz帯での観測は今回のSWIが世界初となる。初めて目にする1200 GHz帯での地球大気スペクトルにはオゾンや酸素分子のラインが多数検出されており、地球大気組成の特徴が端的に示されている。

MPSのホームページ<sup>3</sup>では、SWIのアンテナが地球上をスキャンするにつれて観測スペクトルの形状が変化していく様子がアニメーションとして公開されている。その動画ではSWIの観測視野が宇宙空間から地球に入る瞬間、つまりSWIが地球のリムを観測している瞬間に、地球大気分子のスペクトル強度が強くなっているのが確認できる。これこそがまさにリム観測の強みであり、木星大気や氷衛星の希薄大気の大気微量成分検出においてSWIがその特徴を発揮する点である。さらに、図5で示した観測データでは南極上空を横切るかたちでSWIが地球をスキャンしており、南極中心部から外れるにつれて、 $\text{O}_3$ のスペクトル強度に観測ジオメトリーの変化に起因するもの以上の変化が見えている。これは $\text{O}_3$ の存在量が場所により異なるためであり、南極上空で発生しつづけたオゾンホールの様子を捉えたものと考えている。

JUICEは、今年8月の金星フライバイ以降も、来年および2029年に地球フライバイを再度実施して木星圏に向かう。今回の地球フライバイ観測で得られた知見をもとに、次回・次々回の地球フライバイ観測では風速導出に特化した観測を試みるなど、地球大気に関する新たな科学成果の創出に挑みたい。

また、余談ではあるが、LEGAの実施中にJUICEは予期せぬガス放出による加速を受けている。その放出されたガスに含まれる水蒸気のシグナルが、月面を観測中のSWIのデータに見事に捉えられていた。他のいくつかの測器にも同ガス放出に関連すると思われるシグナルが見えており、SWIのデータと併せて、この突発事例の多角的な解析に貢献している[20]。

## 4. むすび

JUICEに搭載されたSWIは、サブミリ波帯(テラ

<sup>3</sup><https://www.mps.mpg.de/juice-a-look-at-our-blue-planet>

ヘルツ波)リモートセンシングという新たな「目」を携えた惑星探査の幕を開けるものである。地球フライバイ観測の成功により、SWIの深宇宙環境下での性能が実証され、2031年の木星圏到着に向けた準備は着実に進んでいる。到着後には、木星大気の時速・温度・化学組成の高精度な測定を通して、巨大ガス惑星の大気循環の理解が進むとともに、氷衛星における希薄大気微量成分や表面物性の観測によって、内部海の化学的性質やハビタビリティ評価に資する知見が得られると期待される。これらの成果は、太陽系の起源と進化、そして地球外における生命の在り方の議論に新たなブレイクスルーをもたらすであろう。

SWIに限らず、JUICEという前例のない大規模な外惑星探査において、日本の研究者がハードウェア開発にとどまらず、観測計画の立案やデータ解析にも主体的に関与していることは、木星圏の研究を超えて極めて大きな波及効果をもたらすと感じている。SWIプロジェクトを通じて蓄積された知見と技術は、将来、日本発のサブミリ波惑星探査の実現に向けた確かな礎となるであろう。若い研究者や大学院生の皆さんには、ぜひこの機会にJUICEやSWIの研究に加わり、現場でしか得られない唯一無二の経験を積んでほしい。そうした挑戦の積み重ねが、今後、さまざまな分野において失敗を恐れず粘り強く新たな創造に挑む機運の醸成につながることを願っている。

## 参考文献

- [1] 笠井康子ほか, 2014, 遊星人 23, 140.
- [2] Bolton, S. J. et al., 2021, *Science* 374, 968.
- [3] Li, C. et al., 2017, *Geophys. Res. Lett.* 44, 5317.
- [4] Cosentino, R. G. et al., 2017, *J. Geophys. Res. Planets* 122, 2719.
- [5] Sinclair, J. A. et al., 2018, *Icarus* 300, 305.
- [6] Kuroda, T. et al., 2014, *Icarus* 242, 149.
- [7] Nakamura, Y. et al., 2023, *Earth, Planets & Space* 75, id.140.
- [8] Karyu, H. et al., 2025, *Earth Space Sci.* 12, e2025EA004203.
- [9] Medvedev, A.S. et al., 2013, *Icarus* 225, 228.
- [10] Roth, L. et al., 2014, *Science* 343, 171.
- [11] Paganini, L. et al., 2020, *Nature Astronomy* 4, 266.
- [12] McGrath, A. M. et al., 2013, *J. Geophys. Res. Space Phys.* 118, 2043.
- [13] Saur, J. et al., 2015, *J. Geophys. Res. Space Physics* 120, 1715.
- [14] Vance, S. D. et al., 2018, *J. Geophys. Res. Planets* 123, 180.
- [15] Yamada, T. et al., 2018, *Astron. Astrophys.* 619, A181.
- [16] Bockelée-Morvan, D. et al., 2024, *Astron. Astrophys.* 681, A27.
- [17] de Graauw, Th. et al., 2010, *Astron. Astrophys.* 518, id.L6.
- [18] Gulkis, S. et al., 2007, *Space Science Reviews* 128, 561.
- [19] Kikuchi, K. et al., 2010, *J. Geophys. Res. Atmos.* 115, D23306.
- [20] Cappuccio, P. et al., 2025, *EGU General Assembly 2025*, EGU25-16492.

## 著者紹介

### 笠井 康子



東京科学大学 環境社会理工学院 融合理工学系教授, 国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT) Beyond5G研究開発推進ユニット テラヘルツ研究センター研究統括, 内閣府 科学技術・イノベーション推進事務局 上席科学技術政策フェロー, 東京工業大学理工学研究科化学専攻博士課程修了, 博士(理学), 日本学術振興会特別研究員(PD), 理化学研究所基礎科学特別研究員を経て1999年郵政省入省, 通信総合研究所CRL(NICT前身)研究官, NICT上席研究員・研究統括を経て, 2023年5月より東京工業大学環境社会理工学院融合理工学系教授, 専門分野・研究テーマは地球惑星テラヘルツ波リモートセンシング, 宇宙からの地球観測データのAI解析など, 日本地球惑星科学連合, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 日本惑星科学会, 日本気象学会, 日本大気化学会, 日本分光学会, アメリカ地球物理学連合などに所属, 委員はCommissioner of the International Radiation Commission (IRC)(2020年まで), Member of COSPAR Scientific Commission Associates Expert, Communications Networks, Content and Technology, EUROPEAN COMMISSION (2018年まで), 環境省中央環境審議会総合政策部会 環境研究・技術開発推進戦略専門委員, 日本学術会議環境学委員会・地球惑星科学委員会合同IGBP・WCRP・DIVERSITAS合同分科会IGAC小委員会委員, 環境省環境研究企画委員会委員, 日本学術会議環境学委員会・地球惑星科学委員会 COSPAR小委員会委員,

### 佐川 英夫

京都産業大学 理学部教授, 情報通信研究機構テラヘルツ研究センター協力研究員, 2007年東京大学理学系研究科博士課程修了, 博士(理学), ドイツ・マックスプランク研究所太陽系研究部門ポスドク研

究員, 情報通信研究機構電磁波計測研究所研究員を経て, 2014年より京都産業大学に着任, 2025年度からは同大学の神山天文台長も務める, 研究テーマは, 地球を含む太陽系天体の大気・表層環境を観測的手法により明らかにすること, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 日本惑星科学会, 日本天文学会に所属,

### 黒田 剛史



東北大学 大学院理学研究科 地球物理学専攻助教, 情報通信研究機構(NICT)テラヘルツ研究センター協力研究員, 2006年東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻博士課程修了, 博士(理学), ドイツ・マックスプランク太陽系研究所研究員, 日本学術振興会特別研究員(PD), 東北大学大学院理学研究科助教, NICT主任研究員を経て2019年より現職, 専門分野・研究テーマは大気循環モデリングの手法による惑星気象学, 惑星大気物理学, 日本地球惑星科学連合, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 日本惑星科学会, 日本気象学会, 日本大気化学会, アメリカ地球物理学連合, アメリカ天文学会惑星科学部に所属, 2024年より日本学術会議地球惑星科学委員会 国際連携分科会COSPAR小委員会委員,

### 山田 崇貴



国立研究開発法人 情報通信研究機構(NICT) テラヘルツ研究センター テラヘルツ連携研究室 主任研究員, 東京学芸大学 非常勤講師, 2018年東京工業大学大学院融合理工学研究科化学環境学専攻博士課程修了, 博士(理学), 専門はテラヘルツ波リモートセンシング, 日本大気化学会, 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9 ～CMDMが拓く、火星圏ダスト環境への第一歩～

小林 正規<sup>1</sup>

(要旨) 火星周辺には、黄道光ダストに代表される惑星間ダストのみならず、フォボス・ダイモスや火星自体に由来する微小粒子が存在する可能性が以前から指摘されてきました。しかし、その存在はこれまで間接的な証拠にとどまり、実態は明らかではありませんでした。日本のMMX探査機に搭載されるCMDMは、こうしたダストを初めて直接・定量的に観測し、火星圏ダスト環境の実態解明に大きく貢献することが期待されています。

## 1. はじめに

火星は長いあいだ、多くの探査機によって調べられてきました。大気、磁場、衛星、地下水、岩石……。その一方で、火星の周辺をどのような微小な固体粒子(ダスト粒子)が飛び交っているのかについて、これまであまり詳しく調べられてきませんでした。

もちろん、太陽系全体には惑星間ダストと呼ばれる細かな粒子が広く分布していて、これらは黄道光の正体でもあること、火星のまわりにも存在していることはよく知られています。しかし、火星の周辺には、そのようなよそから来たダストだけでなく、火星自身やその衛星フォボス・ダイモスに由来するダストが存在するかもしれないと考えられています。たとえば、フォボスやダイモスの表面に小さなメテオロイドが衝突してイジェクタとして舞い上がった粒子が火星を周回する軌道の上にリング状あるいはトーラス状に分布しているかもしれない、あるいは火星の砂嵐で高層大気まで巻き上げられた細かなダストが、大気圏外にまで到達しているかもしれない——1970年代以降、そのような理論的な研究が報告されています。ただし、そのような火星圏を起源とするダスト粒

子について、はっきりとした観測結果はなく、依然としてモデルの仮説の域を出ていません。これまで火星を訪れた多くの探査機は、大気や地表を調べることはあっても、ダストを直接観測する専用装置は搭載していませんでした。唯一、日本の火星探査機「のぞみ」にはMDC(Mars Dust Counter)というダストカウンターが搭載されていましたが、残念ながら探査機は火星周回軌道投入に失敗し、十分な観測はできませんでした。

近年、火星の周辺空間に火星圏由来のダストがあるらしいというヒントが、ようやく出てきています。たとえば、NASAのMAVEN探査機は、火星周回軌道で観測した電場のわずかな変化から、火星周辺でのダスト粒子の存在を示しています(Ijaz et al. (2024))。また、Juno探査機も木星へ向かう途中、火星付近で微小粒子らしき衝突を検出したと報告されています(Benn et al. (2017))。しかし、いずれもダスト観測用の装置ではなく、観測データの解釈には慎重さが求められています。

つまり、火星のまわりにどんなダストが、どれくらい、どのように分布しているのか——その実態は今もわかっていないのです。火星周辺のダスト環境を調べることは、惑星間ダストや衛星ダストの循環、さらには将来の探査機運用にとっても重要な手がかり

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

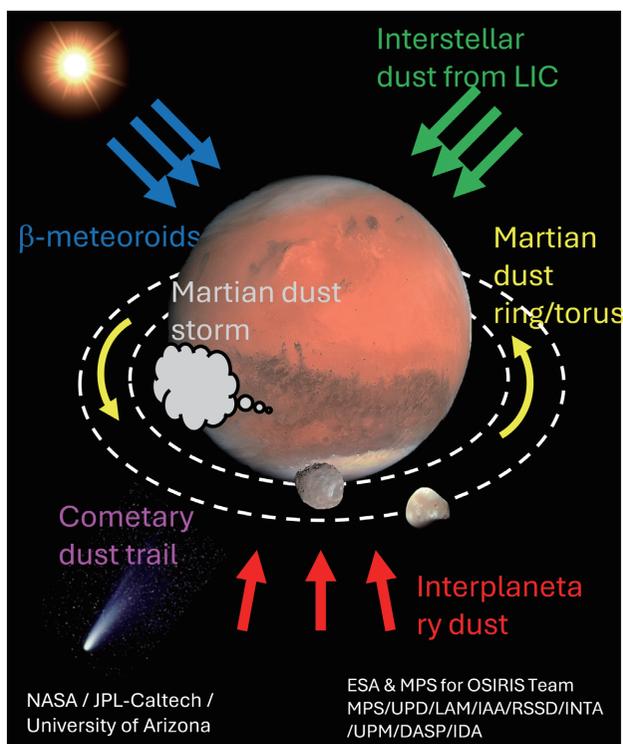


図1: 火星周辺に存在すると考えられているダスト種。

になります。

次の章では、そんな火星のまわりに存在していると考えられている、様々な種類のダストについて紹介します。

## 2. 火星周辺に存在する多様なダスト環境

火星のまわりには、その起源がはっきりしない細かな塵——ダスト粒子が漂っています。その動き方や由来にはさまざまな可能性があり、いまだ分かっていないことも多くあります。一口に「火星周辺ダスト」と言っても、それは単一の源から生じるものではなく、異なる由来や性質を持つ粒子が共存しているのです。

まず代表的なものが、太陽系全体に広がる黄道光ダスト、いわゆる惑星間ダストです。これは彗星や小惑星が生み出した微粒子がケプラー運動をしつつ、太陽光の放射圧によるポインティングーロバートソン

効果で太陽に引き寄せられ、らせんを描くように内側へ落ち込んでいくものです。火星軌道付近にも、こうした粒子は絶えず飛び交っており、「外から来たダスト」として、火星圏のバックグラウンド成分を構成しています。

一方、火星特有の環境が生み出す固有のダストも存在するかもしれません。たとえば火星では、大規模なダストストームによって微細な粒子が大気圏を越え、数千kmの高度まで到達する可能性が指摘されています。実際、NASAのMAVEN探査機が搭載するLPW(Langmuir Probe and Waves)は、そうした粒子が宇宙空間にまで達している可能性を示唆する観測結果を報告しています。

また、火星の小さな衛星フォボスとダイモスでは、小さなメテオロイド衝突によってダストが宇宙へ舞い上がっていると考えられています。放出された粒子の一部は、一時的に火星周回軌道にとどまることもあるでしょう。

このように火星周辺には、次のように多様なダスト

が存在すると考えられています。

- 太陽系外縁から飛来する星間ダスト
- 太陽光の放射圧で外向きに押し出されるβメテオロイド
- 彗星が残したダストトレイルの粒子
- 火星やフォボス・ダイモスが生み出す、ごく局所的で寿命の短いダスト

こうした多様なダストの存在を裏付ける手がかりも少しずつ得られています。たとえば、Juno探査機は太陽電池パネルに微小粒子が衝突した際の発光現象(STE)を検出しています。また、MAVEN探査機のLPWは、火星外へと拡散するダストの存在を電場変動として捉えています。

これらの火星周辺ダスト環境を、本格的かつ直接的に調べようとしているのが、MMX探査機に搭載されるCMDM(Circum-Martian Dust Monitor)です。CMDMは、こうした多様なダスト成分を火星周回軌道から直接とらえ、その頻度や性質

を統計的に明らかにしようとしています。これまで間接的な手がかりしか得られていなかった火星圏ダスト環境について、CMDMは初めて確かなデータをもたらすことが期待されています。

もっとも、これまでも火星周辺でダストの存在を示唆する観測は行われています。次にご紹介するのは、Juno探査機やMAVEN探査機が捉えた、火星近傍における興味深い観測例です。これらは、火星圏ダスト環境解明への最初の手がかりとなったものでした。

### 3. これまでに捉えられた火星周辺のダストたち

火星のまわりを漂う微小なダスト。これまでご紹介してきたように、その存在は理論的には予想されてきました。しかし、その姿を直接とらえた例は、そう多くはありません。ここでは、最近捉えられた観測結果をご紹介します。

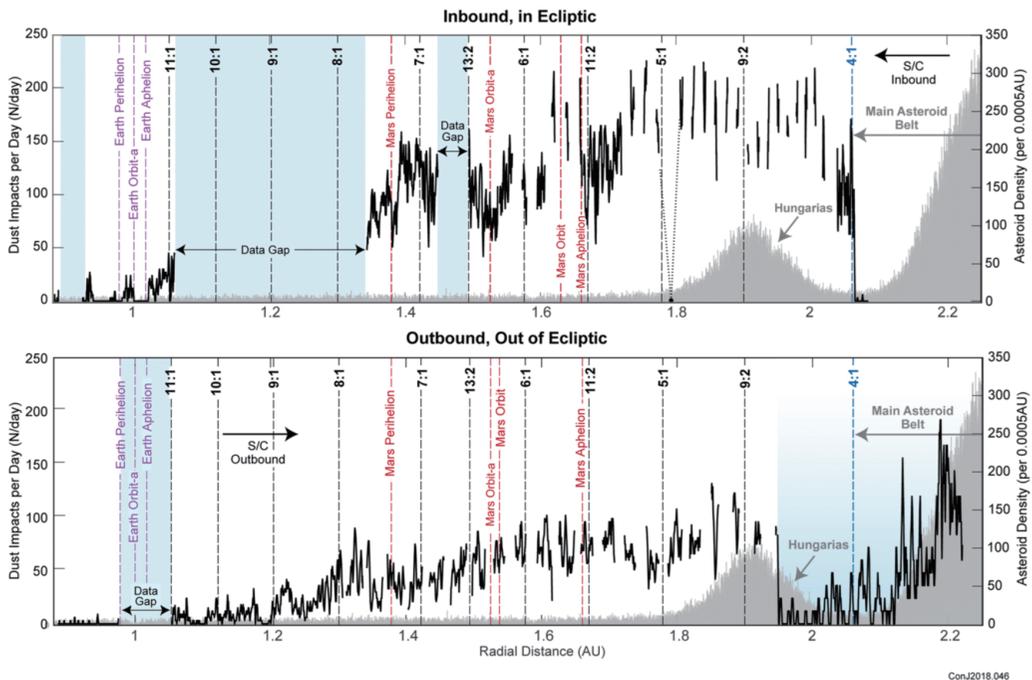


図2: Junoのスターカメラによってクルージング中に観測された1日あたりのダスト衝突イベントの個数(黒線)と小惑星密度(灰色線)を太陽からの距離の関数で示している。Junoがクルージング軌道にある期間のうち、黄道面内を地球に向かっていている時の観測データが上図、黄道面外を木星に向かっていている期間のデータが下の図に示されている。Jorgensen et al.(2021)のFigure 3を転載。

### 3.1 Juno探査機が捉えたダスト衝突の痕跡

NASAの木星探査機Junoは、木星へ向かう旅の途中、意外な観測結果を残しています。探査機の太陽電池パネルに微小なダストが衝突した際、その衝突で飛び散った微粒子(イジェクタ)を、搭載されていたスターカメラがとらえたのです。この観測データを詳しく解析した結果、火星軌道付近(およそ1.5天文単位=AU)では、ほかの軌道領域と比べてダスト衝突頻度が明らかに高いことが示されました。

近年、惑星間空間におけるダスト分布の理解は進んでいますが、Junoによるこの観測は、火星近傍のダスト環境に新たな手がかりを与えるものでした。Jorgensen et al.(2021)の研究では、Junoの太陽電池パネルに当たったダストが生み出す発光現象を、スターカメラで追跡し、1~100マイクロメートルほどの微粒子の分布を統計的に解析しました。その結果、ダストは火星の軌道傾斜角(約1.85度)に沿った軌道に多く分布していることがわかりました。図2にその様子が示されています。さらに興味深いことに、これらの粒子は木星との重力的な関係(共鳴効果)によって、軌道傾斜角がより大きく(最大±7.4度まで)拡散されていくというメカニズムもJorgensen et al.(2021)に提唱されました。こうした分布は、かつてIRAS衛星が観測した黄道光の緯度分布(±1.4度と±9.5度にピーク)とよく一致しており、火星周辺のダストが黄道光形成に関わっているという新たな視点を提供しています。これまで主に小惑星帯や彗星起源とされてきた黄道光ダストに、火星圏起源という選択肢が加わったのです。

### 3.2 Juno観測のその後——その解釈は本当に正しいのか?

しかし、このJunoの観測結果については、新たな視点からの再検討も行われています。Junoのスタートラッカー(姿勢決定用カメラ)が捉えた発光現象(STE=Star Tracker Events)は、直径10マイクロメートル以上の微小メテオロイドが太陽電池パネルに衝突した結果と考えられています。そして、Junoによって観測された微小メテオロイドの一部は、火星圏ダストの影響かもしれない——Jorgensen et al.はそのように主張しています。

これに対し、Pokorný et al.(2022)は黄道光ダス

トモデルを用い、観測されたSTEが本当にダスト衝突によるものかを検証しました。彼らは、小惑星帯や彗星といった主要な惑星間ダスト源に基づくダスト分布モデルを用い、Junoの軌道や太陽電池パネルの向きまで考慮して、理論的な衝突頻度を計算しました。

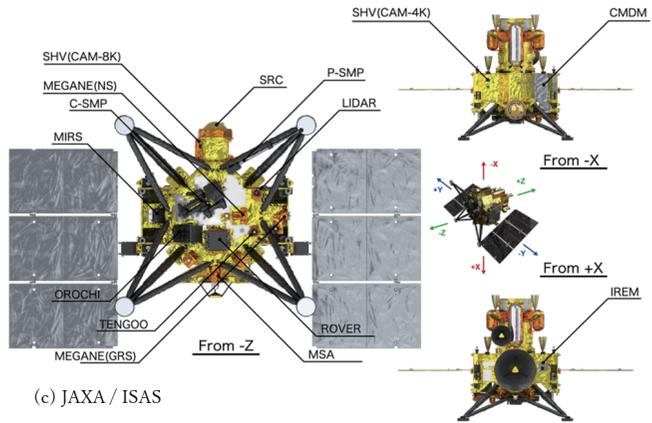
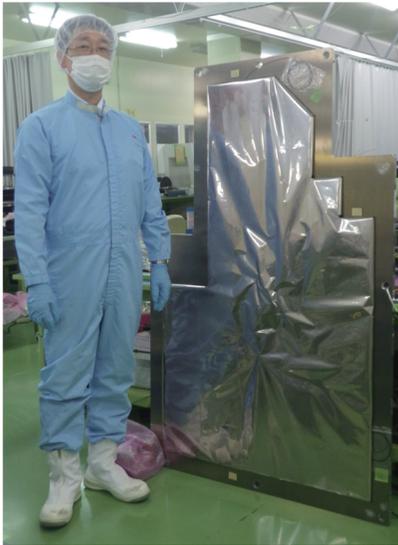
その結果、予測される衝突頻度は観測値より2~3桁も少なく、また時間変化のパターンも一致しないことが明らかとなりました。さらに、火星やその衛星から放出されたダストがJunoに届くかどうかシミュレーションで検討されましたが、観測と合致するダストフラックスは得られませんでした。

こうした結果から、著者らはJunoのSTEが必ずしも個別のダスト衝突によるとは限らず、材料劣化による微粒子の断続的放出や、別の複雑な現象の可能性もあると指摘しています。しかしながらこの研究は、火星周辺ダストの起源に関する議論に一石を投じる重要な知見となっています。

### 3.3 MAVEN探査機が捉えた電場変動——ダストの間接的な手がかり

もうひとつ、火星周辺のダスト環境をめぐる注目すべき研究報告があります。それはNASAのMAVEN探査機によるダスト粒子の観測です。MAVENには、Langmuir Probe and Waves(LPW)という電場やプラズマ波動を測る装置が搭載されています。この装置が、探査機表面に高速で衝突した微小粒子が引き起こす電場の変化を捉えることで、間接的にダスト衝突を検出できることがわかっています。

最近の研究(Ye et al.(2025))では、2014年から2022年にかけて収集された膨大なデータに、AIによる分類技術を導入し、約8万6000件にもおよぶ衝突イベントが抽出されました。解析の結果、フォボスの軌道高度(約6100km)付近では、ダストフラックスが顕著に増加していることがわかり、フォボス由来のダストリング構造が存在する可能性が示唆されています。また、2018年に発生した火星の全球ダストストームでは、地表から巻き上げられたダストが1000km以上の高さまで到達していた可能性もあり、新たに静電場による加速といった未知の輸送メカニズムまで議論されています。



(c) JAXA / ISAS

図3: CMDMのPFMセンサー(左写真)とMMX探査機上のCMDMセンサーの位置(右イラスト, 右上のFrom-Xの図)。

表1: CMDMの仕様。

Item		Value
Size	Sensor	1445mm x 885mm
	Electronics	205mm x 132mm x 65mm
Mass	Sensor	0.27 kg
	Electronics	1.30 kg
Power (CMDM-E only)	Stand-by	10.3 W (Max)
	Operation	10.9 W (Max)
Data	Mission	1,024byte/min
	HK	128byte/10sec
Temperature	Operational	S:-175~+115°C E:-20~+60°C
	Nonoperation	S:-175~+115°C E:-30~+65°C
	Storage	S:-20~+52°C E:-20~+52°C

これらの成果は、火星圏に存在するダストの供給源や分布の時間変動を理解するうえで貴重な手がかりとなっています。そして、こうした先行研究をふまえ、MMXに搭載されるCMDMが、これまで間接的にし

か捉えられなかった火星周辺ダストを、いよいよ直接・定量的にとらえる時代が来ようとしているのです。

## 4. 火星ダスト環境に挑むCMDM ——その意義と期待

これまで火星のまわりには、さまざまな起源をもつ微小なダストが存在しているかもしれない——そんな話をしてきました。しかし、それらを直接捉えた探査機は、いまだありません。そこで注目されるのが、日本のMMX探査機に搭載されるCMDM(Circum-Martian Dust Monitor)です。

CMDMは、火星圏を漂う微小粒子が探査機表面に衝突した際、その衝突で生じる電気信号を捉えるダスト観測装置です。図3にCMDMセンサーの写真とMMX探査機の搭載位置、表1に装置の仕様を示します。センサーは、ポリイミドフィルムに、4つの圧電素子が貼り付けてあるだけのとてもシンプルな構造です。探査機本体に取り付けられた有感面積が1 m<sup>2</sup>のセンサーを有していて、10μm以上の粒径のダスト粒子がセンサーフィルムに衝突したときの衝撃がフィルム中を伝わり、圧電素子で電気信号に変換されたものを検出します。前の章でJunoやMAVENのダスト観測のことについて説明しましたがダスト観測装置によるものではなく、実は、ダスト観測専

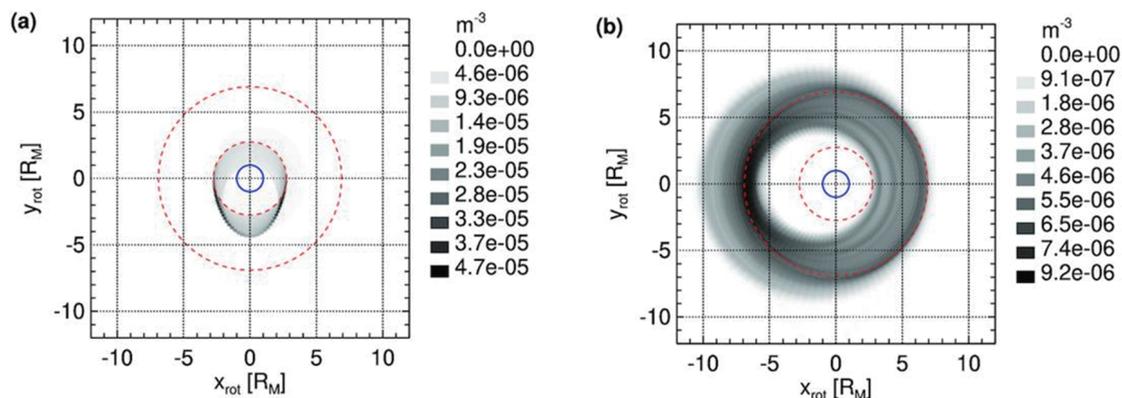


図4:Liu & Schmidt(2021)によるフォボスおよびダイモスを起源とするダスト粒子の数密度を火星の赤道面に投影して太陽に対して固定された向きに保つ座標系内で垂直方向に平均化したもの(それぞれフォボスとダイモスを左図と右図に示す).  $x_{\text{rot}}$ 軸の正方向が太陽方向を示す.(Liu & Schmidt(2021)のFigure 6を転載)

用の装置を搭載して火星圏でダスト観測をした探査機はこれまでにありません。1998年に打ち上げられた火星探査機「のぞみ」にはMDCというダスト観測装置が搭載されていましたが、残念ながら「のぞみ」は火星周回軌道に入ることができませんでした(Sasaki et al.(2007)). 今の計画では、CMDMが初めて火星圏でダスト観測専用の装置となって、火星周回軌道上でのダスト環境を「その場で」「直接的に」「定量的に」「連続的に」観測する最初の試みとなります。

では、CMDMはどんなダストを捉えるのでしょうか。予想されるいくつかの観測例を紹介します。

### ■ フォボス・ダイモスが生む火星ダストリング

フォボスやダイモスに微小メテオロイドが衝突すると、細かなダスト粒子が舞い上がります。これらは火星の重力圏内を周回し、「火星ダストリング」と呼ばれる極薄い帯状構造を形成すると考えられています。1971年にSoter (1971)が最初に提唱して以来、多くの研究者がフォボスとダイモスを起源とするダスト粒子が火星の周りにリングあるいはトーラスを形成すると予想してきました(例えば、石元(1996), Krivov & Hamilton (1997)).

最近の例ではLiu & Schmidt(2021)が、フォボス・ダイモスにメテオロイドが衝突して放出された一つ一つのイジェクタ粒子(ダスト粒子)の運動を計算する数値シミュレーションを行いました。図4にその

結果の一例を示します。シミュレーション結果によると、フォボスリングを起源とするイジェクタ粒子は $0.5 \sim 2 \mu\text{m}$ 程度の粒子が中心、ダイモスリングは $5 \sim 20 \mu\text{m}$ 程度の粒子が優勢であり、それぞれ粒子数密度は最大でも1立方メートルあたり数万分の1個レベルとされています。ただし、それらのイジェクタ粒子のうち、 $10 \mu\text{m}$ 未満のものは1年も経たずに軌道上から無くなるのに対して、 $10 \mu\text{m}$ 以上のダスト粒子はフォボス起源のもので数十年以上は軌道上に残り、準定常軌道上にあるMMXに対して約 $100 \text{ m/s}$ の相対速度で衝突してくる、これがCMDMによって観測される、という結果を得ました(Schmidt et al.(2025)). そして、CMDMは火星周回中にこれらのリングの中にあり、フォボスリングおよびダイモスリング由来のダスト粒子を最大で1日当たり200個前後の衝突を検出すると予測されています。ひょっとすると少し楽観的すぎる値かもしれませんが、CMDMによる観測は、これまでモデルでしか描かれてこなかった火星ダストリングの存在を確かめる貴重なデータとなるでしょう。

### ■ 彗星由来ダストストリームの通過観測

火星付近を流れるダストは、フォボス・ダイモス由来だけではなく、太陽系内を巡る彗星が残す微小なダストストリームが、たまたま火星軌道付近を横切ることがあります。Krüger et al.(2021)の研究では、MMXのCMDMは火星周回中に彗星114P/

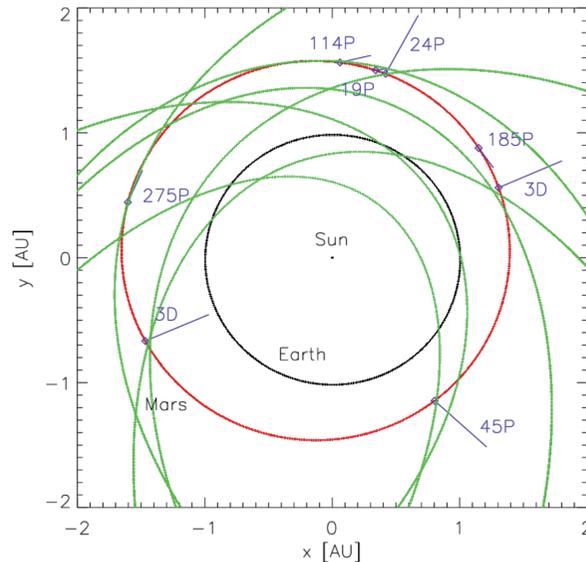


図5: Krüger et al.(2021)が行ったIMEXモデルによる火星軌道(赤い線)と交差する彗星ダストトレイルのうち、ダストの放出量が比較的大きいものの軌道(緑色の線)を黄道面上に投影して図示したもの(X-Y面は春分点が +X 方向を向いた黄道面)。火星軌道上のひし形のプロットは予測される100  $\mu\text{m}$ 以上のダストフラックスが $10^{-3} \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ で観測される位置を示していて、そこから伸びる線はMMXに対するダストトレイル粒子の速度ベクトルを示している。(Krüger et al.(2021)のFig.4を転載)

Wiseman-Skiffが残したダスト流と遭遇する可能性が示されています。このとき、粒径100  $\mu\text{m}$ 以上の比較的大きなダストが、1日あたり0.15個/ $\text{m}^2$ ほどの衝突する予測が出ています。小さな粒子を含めれば、数10個～100個程度の検出も期待できます。こうした観測は、惑星間ダストや彗星起源ダストの分布を、火星近傍で捉える貴重な手がかりになります。

実は、観測3例目の恒星間天体で彗星である3I/ATLASの予想軌道が火星の公転軌道と2025年10月初旬に交差すると予想されていて、また推定で毎秒4kgもの物質が放出されるような活動があるともいわれているため、火星軌道上に十分なダストトレイルが残る可能性があります。ただ、MMXが2026年に打ちあがって火星に到達する2027年にはダストトレイルに含まれるメテオロイド粒子は残っていないかもしれません。しかしながら、それらの粒子がフォボスおよびデイモスに衝突することで、両衛星からのイジェクタ放出量を増やし、それまでの火星リング・トーラスの粒子密度が増える可能性があります。

### ■ 黄道光ダストとの識別

火星周辺には、太陽系全体を漂う黄道光ダスト(惑星間ダスト)も存在しています。CMDMは、衝突する粒子の衝撃力だけを測定して、その速度や方向、粒径などを分離して測定することはできません。火星を周回する軌道上では、主なダスト種として惑星間ダストと(もしあれば)火星リング・トーラス粒子が混在することになります。CMDMの場合、検出したダスト粒子の到来方向は分かりませんが、図6が示すように、MMXが火星を周回する軌道上の位置によって、CMDMのセンサーが向いている方向が変化します。火星リング・トーラス粒子は、火星を周回する方向から到来することが予想されているため、CMDMのセンサーがその周回方向を向いているとき、そうでないときのフラックスの差から、火星リング・トーラス粒子の有無を調べることができると考えています。

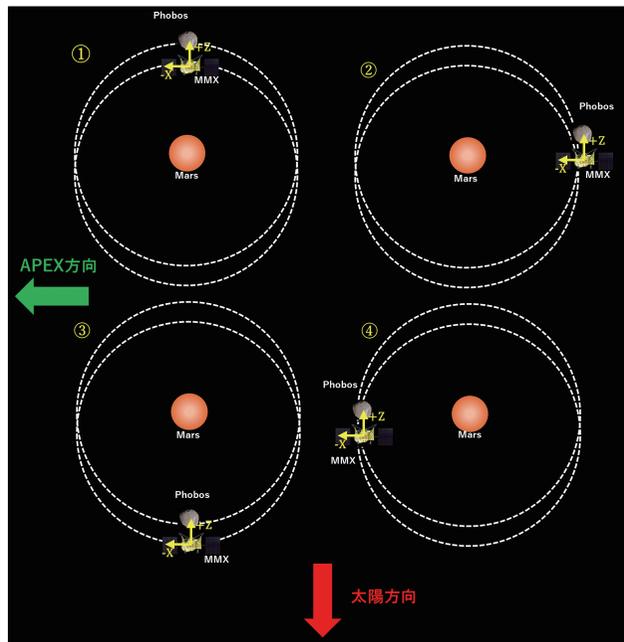


図6:MMXが、Phobosが火星を周回する軌道から少しずれた軌道(QSO)上の異なる位相位置にあることを示す図。MMXの+Z面は常にPhobosを向いていて、CMDMが取り付けられている-X面は常にAPEX方向(火星が公転運動をする方向)を向いている。上の図の①と③の位置にある場合は、-X面のCMDMのセンサーには惑星間ダストと火星を周回するリング粒子が衝突して、②と④の位置でCMDMセンサーに衝突してくるのは惑星間ダストがほとんどだと予想される。つまり、MMXが①あるいは③付近にあるときのCMDMのダスト検出数と②あるいは④付近にある場合のものとを比較することで、火星リングダストの有無を示すことができる。

## 5. おわりに

これまで火星のまわりを漂うダストは、その存在すら間接的な議論にとどまってきました。CMDMは、こうした環境を直接観測し、フォボス軌道付近に限られるものの、その分布の実データを初めて提供することになるでしょう。火星圏のダスト環境の知見は、惑星間ダスト循環、衛星表層進化、将来探査機設計といった分野に広く関わる重要な情報になるかもしれません。MMXに搭載されるCMDMの成果は、私たちが火星という惑星を取り巻くダスト環境をより深く理解する、一歩となるでしょう。

## 参考文献

- [1] Ijaz, S. et al., 2024, ApJ 970, 175.
- [2] Benn, M. et al., 2017, GRL 44, 4701.
- [3] Jorgensen, J. L. et al., 2021, JGR Planets 126,

e2020JE006509.

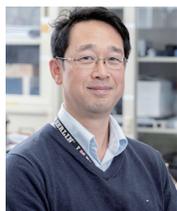
- [4] Pokorný, P. et al., 2022, PSJ 3, 14.
- [5] Ye, S. et al., 2025, Dusty Visions 2025, June 16-18, 2025, Princeton University, Princeton, NJ.
- [6] Sasaki, S. et al., 2007, ASR 393, 485.
- [7] 石元裕史, 1996, 日本惑星科学会学会誌 5, 61.
- [8] Krivov, A. V. and Hamilton, D. P., 1997, Icarus 128, 335.
- [9] Liu, X. and Schmidt, J., 2021, MNRAS 500, 2979.
- [10] Schmidt, J. et al., 2025, Dusty Visions 2025, June 16-18, 2025, Princeton University, Princeton, NJ.
- [11] Krüger, H. et al., 2021, EPS 73, 93.

---

## 著者紹介

---

### 小林 正規



小林 正規(こばやし・まさのり)は、愛媛大学理学部物理学科(1990-1994)・同大学院理学研究科(1994-1996)で物理学を専攻し、続いて早稲田大学大学院理工学研究科にて博士(理学)を取得(1996-1999)。その後、JAXA宇宙科学研究所招聘研究員(2005-2006)、日本医科大学基礎科学物理学

教室講師(2006-2009)を経て、2009年より千葉工業大学惑星探査研究センターにて研究に従事、2023年5月からは同センター副所長を務めている。惑星間ダスト観測装置の専門家であり、ベピコロンボのダストカウンター開発に主要な役割を果たし、現在はMMX搭載CMDMの開発責任者として、火星圏のダスト環境解明を牽引している。

# もう一つの月世界へ： 火星衛星探査計画MMX その10 ～LIDARとその周辺～

千秋 博紀<sup>1</sup>

(要旨) 火星衛星探査計画(MMX)探査機搭載レーザー高度計(LIDAR)は探査機の高度を計測する装置で、装置の視野内に天体が含まれている際には継続的に測距を行う。測距可能範囲は100 mから100 kmと3桁に及び、測距の精度は高度100 kmでも1 m以下の見込みである。

MMXリレー記事としてレーザー高度計に関連する話題提供の依頼を頂いた。リレー記事なので査読無しで自由に書けるという。上に書いたような機器スペックの詳細や科学目標についてはすでに査読付きの論文として発表しているのでそちらをご覧ください[1,2]。また、機器開発で直面した困難や面倒ごとは、まだ生々しいので記事にするのは憚られる。これはもう少し時間が過ぎて優しい心をもって語れるようになった頃に、機会があれば紹介したいと思う。

本記事では少し視点を変えて、私がMMX探査機搭載LIDARの開発に携わることで勉強したLIDARの基礎知識やその周辺を紹介したいと思う。このような話題は科学論文のテーマにはなりづらく、査読者によってはバツサリ削除するよう指摘されてしまう。しかし実際の機器開発ではこれらの背景知識が必要であること、またこれらの背景を元に開発を進めていることがチーム外には伝わり難く、場合によっては「開発せずに買い物で済ませば良いんじゃないの?」という心無い言葉を頂く事もあり、この場を借りていろいろ披露したい。とはいえ紙面は限られているし、私の勉強も十分ではない。微に入り細を穿つ話を並べて読者を疲れさせるのも本意ではないので、表面的な話になる事はご容赦頂きたい。

ちょうど最近、LIDAR開発の工学的側面を担当

して下さっているJAXA宇宙科学研究所の水野先生がLIDAR技術に関する教科書を出版された[3]。興味がある方は是非そちらも参照して頂きたい。

## ・名称の話

LIDARとはLight Detection And Ranging(光検知と測距)の頭文字を取ったもので、私が「はやぶさ2」にかかわり始めた頃にはLIDARとすべて大文字で表記することが一般的だったように思う。近年、自動車の障害物検知機としてその名前が広く知られるようになったが、後発の車載装置ではLiDARとiを小文字にすることが多く、今となっては小さなiが主流となっているようだ。

名前の似ている装置にレーダーがある。レーダーはRadio Detection And Ranging(電波による探知と測距)の頭文字を取ったもので、こちらの方が長い歴史を持つ。また水中探査を行うソナーはSound Navigation And Ranging(音響誘導と測距)の頭文字を取ったものである。LIDAR, レーダー, ソナー(個人的好みで、LIDARだけアルファベット表記にした。以下同じ)は、いずれも最後がAR(And Ranging)であることからわかるように、距離を測定することを目的としている。装置から放出した光、電波、音波などがターゲット表面で散乱され、かえってくるまでの時間(Time of Flight; ToF)の計測から距離を計算するのだ。このため正

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

確には、これらの装置は距離を測る装置ではなくて時間を測る装置である。レーダーやソナーの場合には返ってきた波(シグナル)の強度を測ることも重要であり、対象物や魚群のサイズの推定に用いる。

LIDARはその語感からか時々liderという誤記を見かける。実際検索してみると結構な数のサイトが(それも車載LiDARを製造・販売している会社のサイトまで)引っかかって、とても残念な気持ちになったりする。ちなみにドイツ語でleider(ライダーと発音する)は、「残念ながら」という意味の副詞(英語のunfortunatelyに相当)なのだそう。うーん、これもなんだか残念。

#### ・レーザーとは

レーダーやソナーは1910年代から1920年代に実用化されているのに比べると、LIDARの歴史は浅い。これはレーザーの原理が提案されたのが1958年、実際にレーザー光を作り出すのに成功したのが1960年と、レーザーの歴史が浅いことによる。LIDARはその名前(定義)からすると射出するのはレーザーでなくても良いのだが、実際にはレーザーなしには難しい。レーザーは広がり角を小さく抑えることができるため、高いエネルギー効率と、太陽光の散乱などによる背景雑音に負けないシグナル強度が達成できる。

レーザーという名前もまた頭文字を取って作られた言葉で、元となっているのはLight Amplification by Stimulated Emission of Radiation(誘導放出による光増幅放射)である。LightがMicrowaveになるとレーザーと呼ばれる。残念ながらLIDAR同様、書き下した字面を見てもわかる人にしかわからない、原理を説明した名前になっているのだが、現象論的に言えば波長と位相が揃った(コヒーレントな)光のことで、結果として指向性と収束性に優れている。なぜコヒーレントだと指向性と収束性が高いのかについてちゃんと説明すると長くなるのでここでは踏み込まない。上に書いたように、LIDARにとっては光束を細く絞れることが重要である。

宇宙機搭載のLIDARではNd:YAGレーザーが使われることが多い。Nd:YAGはYttrium Aluminum Garnet結晶( $Y_3Al_5O_{12}$ )にNdイオンを

ドーブして得られるレーザー結晶である。結晶をレーザー媒質とする固体レーザーは、LD(レーザーダイオード)を使う半導体レーザーに比べると大きな出力を得られ、また気体分子を使うガスレーザーに比べると装置が小型で済む。さらにNd:YAGは熱伝導率が高く経年劣化が少ないという特徴がある。

Nd:YAGレーザー光の波長は1064 nmで、赤外光のため肉眼では見ることができない。このため実験では、赤外線に反応して光るセンサーカードをかざすか、赤外線をとらえることができるカメラで撮影するなどして光路を確認する必要がある。肉眼で見ることができないにもかかわらず、レーザーが直接目に入ると失明の恐れがある。油断は禁物である。レーザーの励起に使うのは波長808 nmの光で、MMX LIDARの場合にはLDを使う。ただしLDの発振波長は温度依存性がある事が知られており、LD周辺部を適切な範囲内に温調する必要がある。

レーザー媒質は鏡で挟まれており、十分に励起された状態で一方の鏡を外すと外部にレーザーが出力される。単純にはシャッターを入れる方法や電気操作で透明になる鏡を入れる方法(アクティブQスイッチ)が考えられる。この方法は、射出タイミングは完全に調整できる一方、レーザー媒質中のエネルギー状態が保証されないため、レーザーのエネルギーにばらつきが生じる。また、はやぶさ(2ではなく小惑星イトカワを探査した初代のほう)搭載LIDARの経験によれば、アクティブQスイッチは保存温度条件が厳しい。これに対してMMX LIDARでは、鏡の一方を可飽和吸収体で構成するパッシブQスイッチを採用した。可飽和吸収体はレーザー媒質中のエネルギー密度がある値よりも高くなると急速に透明になり、光を透過させる性質がある。Nd:YAGレーザーの場合にはCr:YAGが可飽和吸収体として用いられる。この方法は、射出されるレーザーのエネルギーはほぼ一定になる一方で、レーザー媒質の励起速度のばらつきから発振時間の不定性が生じる。そこでMMX LIDARでは、送光と受光をそれぞれ検知して、シグナル間の時間差を計測している。

#### ・測距の幾何学

細く絞られたレーザーと、レーザー広がり角よりは

視野が広い望遠鏡を備えた受光部とを組み合わせると、レーザーが照らす領域(フットプリント)を全て受光望遠鏡の視野に収めることができる。つまり装置からターゲットまでの間にはエネルギー損失がない。受信エネルギーはターゲット表面からの散乱光の幾何減衰、つまり距離の2乗による減衰で求められる。ちなみに、ターゲット表面にフットプリントより小さな鏡が置かれているケースでは、鏡に投入されるエネルギーが距離の2乗で減衰するため、受信エネルギーは往復で距離の逆4乗で減衰する。探査機がターゲット表面に近づく場合には受信エネルギーが距離の4乗で増加することになるため、装置がダメージを受けないように配慮する必要がある。

### ・測距精度

最初に述べたように、LIDARはレーザー送信からシグナル受信までの時間を正確に測る事で距離を得る。つまり測距精度は時間をどれだけ正確に測れるのかで決まる。はやぶさ2搭載LIDARの場合には、300 MHzのデジタル回路でシグナル検知を行った。つまり時間の精度は3.33 nsであり、往復距離に直すと測距分解能は0.5 mである。単純には、周波数を10倍にすれば測距分解能は1/10になる。地上品(車載LiDARなど)であればそれも可能だが、宇宙機に於いては高周波のクロックを使用すると放射線の影響を強く受けること、また高周波の回路は発熱が大きくなることなどあり、単純にデジタル回路の処理速度を上げて分解能を高めるというわけにはいかない。

MMX LIDARでは、シグナル検知部分にJAXAが開発したLIDARXという集積回路を使っている。その内部ではシグナルをアナログで検知したら三角波を立ちあげ、その高さをデジタルで(クロックのタイミングで)読みだす。三角波を逆にたどる事で、早いクロックを用いなくてもシグナルのタイミングを高い精度で求めることができる(挙動の詳細については [4] を参照して頂きたい)。

### ・パルス幅

高い時間分解能が達成されるようになると、改めてシグナルとは何か? を考える必要が出てくる。射出するレーザーのパルス幅は10 ns程度あるため、パル

スのどこを測るのかによって、1 m程度かそれ以上の不定性(ジッター)が生じる。送信光についてはレーザーの波形はあまり変化しないと思えば、ある強度を閾値としてそれを超えたところでシグナルと判断(立ち上がり検知)すれば不定性を抑えることができる。しかし受信光の強度はターゲットの反射率・ターゲットまでの距離によって変化する。ターゲットが傾いている場合には、レーザーフットプリントの中で距離に分布ができるため、返ってくる光は時間方向に引き伸ばされ、波高は低くなる。立ち上がり検知の場合、受信光の波形が予測できていないと不定性が除去できないが、そもそもターゲットまでの距離や反射率、ターゲットの状態を知りたくて観測を行うので堂々巡りである。はやぶさ2搭載LIDARでは、立ち上がり検知のタイミングの他に受信エネルギーを測定し、その値を使って距離補正を行っていた。しかしターゲットの傾きによってパルスが伸びる効果はきちんと考慮されているとは言えず、結局、解析ではレーザーの入射が大局的な地形に対して鉛直に近いものを選んで利用するなどの工夫が必要である。

パルスの立ち上がりではなくてピークを検知すれば良さそうだが、話は単純ではない。レーザーのエネルギー分布には高調波が乗る事があり、また測定にはノイズが乗り得る。このためどこでエネルギー分布が平らになったのか、または上昇から下降到に転じたのかを判別するのは容易ではない。MMX LIDARが採用したLIDARXでは、シグナルを時間方向にフィルターをかけて(帯域を絞って)積分することで滑らかにして、それを微分してピークを検出するという工夫を行っている(これも挙動の詳細については[4]を参照して頂きたい)。時間波形をいったん書き出して、それを読み直して演算するのであれば難しい話ではないかもしれないが、サイズも電力も限られた宇宙機にはもちろんそんな贅沢は許されない。アナログ回路で逐次処理しなければならない。

### ・基板設計

LIDARは数nsのごく短いパルスを検出したり、数fC( $10^{-15}$ クーロン)というごく小さな電気パルスを検出したりする必要がある。このため基板設計の際には、パルス電流が流れる部分の近傍にはアンテナになってしまうような配線ができないよう気をつけ、ま

た特にノイズから守るべき場所は素子の配置や配線に気をつける。一方で宇宙機はなるべくサイズを抑える必要がある。さらに、金属の中を電流が伝わる速度は真空中の光の速度と同程度のため、測距精度が1 mよりもずっとよくなってくると、基板の中の回路長も気になり始める。余談だが、試験の際にオシロスコープの位置を変えたら測距値が変化してびっくりしたことがある。配置の都合でオシロスコープと装置を繋ぐBNCケーブルを長いものに替えたためと分かった時は、なるほど電流も有限の速度で伝わるのだと妙に感心したのを覚えている。

MMX LIDARチームには岡山大学(当時)の梅谷先生と梅谷先生の学生だった小西さんに入って頂いている(2025年現在、梅谷先生は九州大学、小西さんは崇城大学にそれぞれ移られた)。彼らはアナログ基板の設計ができる貴重な存在で、先ず彼らがテスト基板を何通りか作り、その結果を元にメーカーがLIDARの基板を作ることにした。この方式が功を奏して、LIDARは雑音が少なく感度の高い装置に仕上げる事ができた。ケーブルの違いで結果が変わったことにびっくりするようなシロートの私から見ると、魔法のような技法であった。

#### ・フィールド試験

装置が組み上がったなら試験を行う。LIDARはコマンドを受けたらレーザーを射出し、シグナルを待つ。シグナルを検知したら送光から受光までの時間を始めとする種々のデータを取りまとめて観測データとして出力する。これだけなら実験室で模擬試験をできそうに思える。しかし理想的な条件が揃った室内実験で達成できたことが、実際の条件ではうまくいかないというのも、よくある話だ。そこでMMX LIDARでは、フィールド試験を実施した。試験は北海道大樹町にある大樹航空宇宙実験場の長さ1 kmの滑走路を借り切って行った。

滑走路の一方の端にテントを立て、LIDARを設置。滑走路にライン引きで一定間隔ごとに目印を入れる。準備ができれば反射率が既知の拡散板を載せた台車を、ライン引きで付けた目印に沿って動かしてゆく。LIDARからのレーザーは直視すると失明の恐れがあるため、台車を押す係は防護用のゴーグルをかけ、念のため肌を守る厚手の服を着る。見るからに

アヤシイ。滑走路は1 kmしかないため、レーザーの出力をフィルターで調整しながら、滑走路の端から端まで1日に何度も台車を往復させる。近くを一般車が通過する際には速やかに実験を中断させるため、滑走路の隅には同じく緑色のゴーグルをかけ、ヘルメットをかぶった監視要員を配置する。

実にアナログな試験だが、こうして得られた結果を元に装置アルゴリズムが調整される。探査は実験室で行うんじゃない、現場で行うのである(ちと古いか)。

#### ・最後に

MMX LIDARチームにはLIDAR開発専門家はもちろん、基板の専門家や、紙面の都合で紹介できなかったが集積回路の専門家、他ミッションでのLIDAR運用の経験者など、背景の異なる人々が含まれている。開発や運用に関連した基礎知識や注意点、嵌りやすいポイントは文章として残すこともできるが、不測の事態が生じた際に速やかに違和感を感じ取る事ができるか、問題の本質に気付けるか、解決方法に至れるかどうかは結局、経験の差が大きい。このため背景の異なる人々が協力して、一緒に頭を悩ませられる環境が望ましいし、開発を進めていて楽しい。

とはいえ、経験を積むためには開発や運用に参加する必要がある。本記事は、まだ経験が浅い人にとってLIDARの敷居が少しでも低くなればと思いい、背景や周辺の話を書き連ねた。これをもってLIDARの原理が全て分かったつもりになってもらいたいという事ではなく、本記事をきっかけにLIDARの開発や運用に興味を持ち「いっちょ参加してみるか」と思って頂けたら幸いである。一緒に経験を積んでくれる人、大募集。

- [1] Senshu, H. et al., 2021, EPS 73, 219.
- [2] Senshu, H. et al., 2025, PEPS 12:34.
- [3] 水野貴秀ほか, 2025, これで使える3D LiDAR技術(科学情報出版).
- [4] Mizuno, T. et al., 2024, IEICE Transactions on Electronics, 2024ECP5028.

---

## 著者紹介

---

### 千秋 博紀

千葉工業大学 惑星探査研究センター 主席研究員・副所長. 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻 博士課程修了. 博士(理学). JAMSTEC, 東京工業大学, サイバー大学, 北海道大学を経て, 2009年4月より現職. 専門は惑星科学・惑星探査. 数値計算で面白いことができそうなら何でも. 日本惑星科学会情報化専門委員長.

# 一番星へ行こう! 日本の金星探査機の挑戦 その63 ~最前線の金星大気科学ワークショップ「金星大 気の変動性と安定性」(中国・北京)に参加して~

狩生 宏喜<sup>1</sup>, 杉浦 美優<sup>2</sup>

(要旨) 本稿では, 若手研究者の視点から, 中国・北京で開催された金星大気研究に関する国際ワークショップへの参加体験を振り返ります. 発表やセッションでの議論を通じて得た学びに加え, 研究者同士の対面での交流や現地での出来事などを交えながら, 感じたことを率直に綴りました. つらつらとした記録ではありますが, 最後まで読んでいただけたら幸いです.

## 1. 会議の概要

2025年6月に International Space Science Institute in Beijing(ISSI-BJ)の支援により, 北京にて金星大気研究会が行われました. 研究会には日本, 中国, 欧州, アメリカ, ロシア, インドなど様々な地域からの研究者が60人以上参加し, 若手からベテランまで幅広く集う大きな会議となりました. 研究会は5日間続き, 70個を超える口頭発表からなる, 非常に内容が濃いものでした.

研究会のタイトルは「金星大気の変動と安定性」というもので, 日本や欧州の探査機による最近の金星大気研究の進展を直球に表したものでした. 金星の大気研究は欧州宇宙機関(ESA)の探査機「Venus Express」(2006~2014年)と, JAXAの探査機「あかつき」(2015年~)による長期的なデータ蓄積により, 飛躍的な発展を遂げています. そして, これらのデータの蓄積に伴い, 数値シミュレーションによる現象の解釈も大きく進んできています. また, 将来にはESA主導の「EnVision」, アメリカ航空宇宙局(NASA)主導の「DAVINCI」, 「VERITAS」の合計3つのミッションが採択されており, 金星探査はさらに発展していくことになるでしょう. そんな金星



図1: 本ワークショップの集合写真. ベテランから若手まで, 様々な国から北京に集結した.

探査の過渡期である今, 本ワークショップではこれまでの知見を整理し, 将来探査に向けてどんな準備ができるのかを検討する議論が中心的行われました.

## 2. 世界の金星大気研究のこれまでとこれからに触れて

本ワークショップのタイトル通り, 金星の変動性と安定性についての理解が, 「Venus Express」と「あかつき」の貢献により大きく進んだことを実感させられました. 中でも, 金星大気のもっとも特徴的な循環であるスーパーローテーションに数年~十年のタイムスケールで起こる長期変動があるという発見にとても

1. 東北大学理学研究科

2. 東京大学大学院新領域創成科学研究科

hiroki.karyu.q4@dc.tohoku.ac.jp

驚かされました。そのうえ、惑星アルベドや大気の温度構造にも同様の長期変動があることも明らかになりました。これらのデータから金星大気研究は「気候変動(または振動)の理解」という新しいフェーズに入ってきているという感触を覚えました。しかし、循環やアルベド、温度変動、物質分布の間にどのような相互作用があればそのような長期変動が起こるのかよく理解されていない、などの課題もあります。この課題の解決にはさらに長期的なデータの収集が必要ですが、次の金星探査ミッションが本格的に観測を開始するまでには約10年あります。そのため、長期変動の理解のために、地上観測でどのように現在と未来をつなぐデータを集めるかということが活発に議論されました。

このワークショップでは、韓国、中国、ロシアなども本格的に金星探査の準備を進めていることも知りました。韓国主導のミッションでは地球周回の衛星を打ち上げ、紫外から可視光の波長を用いて、金星の気候理解の鍵を握る未知の紫外線吸収物質の観測を計画しています。一方、中国は金星周回機の打ち上げを目指しており、ハビタビリティの理解を軸とした探査を検討しているようです。ロシアは金星探査の先駆の実績もあることから、「Venera D」と呼ばれるとても大規模なミッションを計画しています。このミッションでは周回機に加え、プローブによる大気を降下しながらの観測と、バルーンによる大気に浮遊しながらの観測を予定しています。プローブとバルーンを用いた観測では、金星の雲の成分や粒径分布についてサンプリング観測が検討されています。私は雲の研究をしていることもあり、この探査はぜひ実現してほしいと思いました。欧州、アメリカだけでなく、数々の国が金星に向かい、金星探査の黄金時代がくると思うと期待に胸が高鳴りました。

### 3. 研究と出会いの1週間

世界各国から金星の研究者が集まり、最先端の研究について語り合う——そんな贅沢な一週間がいよいよ始まると思うと、出発前から胸が高鳴っていました。

会場では、初日からセッションの合間のコーヒープレイクの時間になると、外に用意されたコーヒーやお菓子を片手に、研究者たちが活発に交流している様

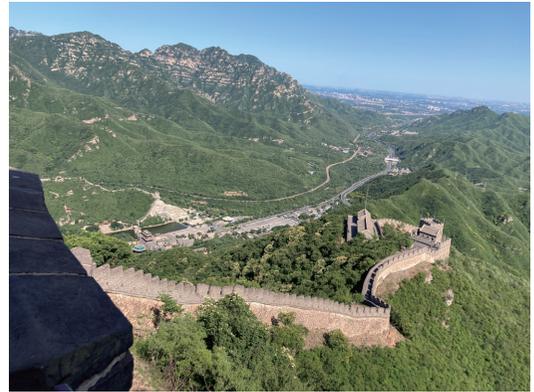


図2: Excursionで訪れた万里の頂上。中国の歴史に触れながら、様々な研究者との分野・世代を越えた交流が生まれた。

子が見られました。最初のうちは、そのエネルギーにやや圧倒されていましたが、時間が経つにつれ、「話してみたい」という気持ちが自然と湧いてきて、少しずつその時間も楽しめるようになっていきました。

2日目には自身の発表があり、極渦に関する質問を受けました。金星の両極には、極渦と呼ばれる大気の大きな渦があり、雲や温度の構造が絶えず変化しながら、少なくとも高度40-65 kmに広がっています。うまく答えられたか不安も残りましたが、それをきっかけに極渦についてもっと知りたいと思い、発表後に先生から関連する論文を紹介していただきました。空いた時間にその論文を読み進めていたところ、3日目の午前には、まさにその極渦をテーマとしたセッションがあり、偶然にも読んでいた論文の著者のお名前をプログラム中に見つけ、とても嬉しく感じました。セッション後、ホテルまでの帰り道でその方と一緒に、自身の研究についてコメントをいただいたり、連絡先を交換していただいたりしたことは、対面のワークショップならではの魅力だと実感しました。

その日の午後にはexcursionがあり、訪れたのは万里の長城でした。万里の長城の中でも比較的短いコースだったそうですが、一段一段が非常に高く、強い日差しの中、どこまでも続く階段を登り続けるのは、想像以上の厳しさでした。いつの間にか、私より二回り以上年上の先生方のはるか先にゴールされており、さらに別ルートをまわっても集合時間に間に合っていらっしゃったのには驚かされました。研究者にはタフな方が多いのだと実感し、いつかご一緒に

きるよう、私も少し体力をつけたいと思いました。途中、同じペースで登っていたインドの女性研究者と言葉を交わすようになり、苦楽をともにしたことで良い友人になれたのも、嬉しい思い出のひとつです。

翌朝は案の定、筋肉痛で足がばんばんになり、交通量の激しい交差点を競歩のように渡りながら、会場へと向かいました。この日は、自分が司会を担当するセッションがありました。今回のワークショップでは、シニア研究者と若手研究者が共同で司会を務めるという新しい試みがなされており、私にとってはこれも初めての経験でした。質問者の方へマイクをお渡しする際、筋肉痛のせいで少しもたついてしまわないかと内心ひやひやしていましたが、無事に務め終えることができました。

こうした貴重な機会に恵まれたのも、世界とのつながりを長年にわたって紡いでこられた日本の研究

者の方々のおかげであると、あらためて実感する日々でした。今回得られた経験を今後に活かし、これからも金星のように熱く研究に邁進していきたいと思っています。

## 4. むすび

今回のワークショップは、今後10年で金星探査に関する国際的なミッションが次々と実現に向かう中で、これまでの金星研究の成果を振り返り、未だ解き明かされていない数多くの謎に改めて向き合う貴重な機会となりました。金星研究がこれまで以上に盛り上がりを見せていく時代の流れの中で、その風の一端に触れたことは、私たち若手にとって大きな励みになるはずです。

---

## 著者紹介

---

### 狩生 宏喜



東北大学理学研究科博士後期課程3年。東北大学理学研究科博士前期課程修了, 修士(理学)。2023年より現職。

### 杉浦 美優



東京大学大学院新領域創成科学研究科博士後期課程1年。東京大学大学院新領域創成科学研究科博士前期課程修了, 修士(科学)。2025年より現職。

# Blenderによる科学的可視化入門

外田 慎太郎<sup>1</sup>, 高田 智史<sup>2</sup>, 松本 侑士<sup>3</sup>,

(要旨) 惑星科学を始めとした様々な分野において、離散要素法や粒子法といった粒子を用いたシミュレーションが行われている。その結果を可視化するにはParaViewやPOV-Rayなどが用いられている。特にPOV-Rayは使いこなすことができれば現実顔負けのフォトリアルな可視化を行うことができるものの、テキストベースでの可視化のため、カメラ角度設定などの操作に困難が伴う。そこで本稿ではそれに代わるツールとして3DCGソフトウェアのBlenderを紹介する。Blenderを紹介する記事や書籍などは多数存在するが、そのほとんどはゼロから対象を作成するものであり、シミュレーション結果を可視化する手法を解説するものはほとんどない。特にBlenderを使用したことがない人でもフォトリアルな可視化を行えるような手順を紹介したい。

## 1. はじめに

惑星科学において重力 $N$ 体計算などの離散要素法やSPHをはじめとした粒子法などの計算は重要である。得られた結果の可視化には、従来gnuplotやMatplotlib, POV-Ray[1]などが用いられてきた。特にPOV-Rayはテキストベースで可視化を行えるフリーのソフトウェアであり、使いこなせば現実顔負けのフォトリアルな画像を作成することができる。しかし実行にはテキストファイルによる記述を用いるため、Oosawa[2]のようなフロントエンドツールを用いなければカメラの角度などの設定操作に困難が伴う。それに対し本稿では、これらに代わる可視化ツールとしてBlender[3]を紹介したい。Blenderはオープンソースのソフトウェアであり、3DCGの製作や2Dアニメーション製作、動画編集など多種多様な作業を行うことができ、惑星科学の分野でも国

立天文台の $N$ 体学校[4]で紹介されている。実際、Blenderの操作を取り扱った書籍などは数多く出版されており、YouTubeでも「Blender」と検索すると様々な動画がヒットする。しかしそれらは自分でゼロから対象を作成することの解説がほとんどであり、科学的可視化において重要であるシミュレーション結果をフォトリアルに表現する手法を解説したものは少ない。本稿では、ともにフリーのソフトウェアであるParaView[5]とBlender[3]を併用することで、図1のようなフォトリアルな可視化を簡単に行えることを紹介していく。なお、ページの問題もあるため、離散的な粒子を用いたシミュレーション結果を可視化することのみ紹介する。ただし、3Dモデル化できる結果が手元があれば基本的にこの手法で流体などの可視化も行うことができる。

大まかな流れとしては、各自でシミュレーションを行い、(a) ParaViewで読み取り可能なファイル形式で結果を出力する、(b) ファイルをParaViewで読み込み、一度ParaView上で可視化をする、(c) それをx3d形式で出力する、(d) Blenderでx3dファイルを読み込み、それを再度可視化する、

1.東京農工大学大学院産業技術専攻  
2.東京農工大学大学院工学研究院先端機械システム部門  
3.神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻  
takada@go.tuat.ac.jp



図1: LIGGGHTS [6] のサンプルスクリプトを実行して得られた結果をParaView [5] とBlender [3] を用いて作成した可視化の例. 背景画像としてPoly Haven [7] からダウンロードした画像を使用している.

という流れである. なお, ParaViewで読み取り可能なファイル形式は数多くあるものの, ここではVTK(Visualization Toolkit) ファイル形式を仮定する. 理由としては, 例えば LAMMPS [8] や LIGGGHTS [6] を用いて粒子シミュレーションをしている研究者にとっては, dumpコマンドでVTKを指定するだけで簡単にVTKファイルを出力できるからである.

## 2. VTK ファイルの準備

今回使用したParaviewのバージョンは5.11.0, Blenderのバージョンは4.4.0である. 以下では説明のため, 下記のようなVTKファイル [9] を用いることにする. これは9つの粒子が系の中に存在している場合のファイルである. なお, 各行一番左の数字は行番号を表すためにつけたものであり, 実際のVTKファイルでは用いないことに注意が必要である.

```

1 # vtk DataFile Version 3.0
2 Data.vtk
3 ASCII
4 DATASET UNSTRUCTURED_GRID
5
6 POINTS 9 float
7 -1.0 -1.0 -1.0
8 1.0 -1.0 -1.0
9 -1.0 1.0 -1.0
10 1.0 1.0 -1.0
11 -1.0 -1.0 1.0
12 1.0 -1.0 1.0
13 -1.0 1.0 1.0

```

```

14 1.0 1.0 1.0
15 0.0 0.0 0.0
16
17 CELL_TYPES 9
18 1
19 1
20 1
21 1
22 1
23 1
24 1
25 1
26 1
27
28 POINT_DATA 9
29 SCALARS diameter float
30 LOOKUP_TABLE default
31 1.0
32 1.0
33 1.0
34 1.0
35 1.0
36 1.0
37 1.0
38 1.0
39 2.0

```

ここで簡単にファイルの中身の説明を行う.

- 第1ブロック

これはいわゆる「おまじない」である. ファイル名が「Data.vtk」であることや, 文字コードがASCIIであること, ファイルの形式が「Un-structured Grid」形式であることを示している.

- 第2ブロック

ここには粒子の座標データを記述していく. 6行目の「9」はポイント数が9点, つまり粒子が9個であることを示す. 「float」は記述する型がfloat型であることを示す. 7行目から15行目に各粒子の座標(x, y, z)を列挙している. なお, 必ずしも1粒子ごとに改行する必要はない. ここでは見やすさの観点から改行を行っている.

- 第3ブロック

17行目は9個の粒子のタイプを述べている. 18行目から26行目の「1」は各データが1点から構成されることを表している. 粒子はそれぞれ独立で重心座標1点のみで記述できるため, ここでは「1」を個数分列挙すればよい.

- 第4 ブロック

ここでは各粒子の大きさを示している。29行目でスカラー量の直径をfloat型で記述することが宣言されている。またスカラー量の場合はルックアップテーブルを指定する必要があるが、ここでは用いないので「default」とであると指定する。31行目から39行目に各粒子に対応する直径を記述している。ここで7行目から15行目に記述した粒子と同じ順番で直径を対応させる必要がある。

### 3. ParaViewによる準備

前章で準備したVTKファイルをParaViewで読み込んでいく。ファイルの読み込みはParaViewを開き、ドラッグアンドドロップを行うか、もしくは「File」→「Open」で参照するファイルを選択する。読み込んだファイルを「適用(Apply)」すると、「Layout」内に表示される。ただし粒子数やファイル形式によってはこれだけでは表示されないこともある。

ここからは可視化のために粒子メッシュを作成する。読み込んだファイルを選択した状態で、「Filter」→「Alphabetical」→「Glyph」もしくは図2内で赤くハイライトされている🔍のアイコンから Glyphを追加する。ここで図3内で赤くハイライトされている項目の「メッシュ形状」、「大きさ」、「表示数」を設定する。メッシュ形状は「Glyph Type」で選択する。矢印や立方体など様々な形状が用意されているが、今回は「Sphere」を指定する。

大きさは「Scale Array」と「Scale Factor」を指定して設定する。「Scale Array」は読み取ったファイル内で定義した係数であり、今回は第4ブロックの頭で定義した「diameter」を選択する。「Scale Factor」は「Glyph Type」の寸法と「Scale Array」の数値を結ぶ値であり、直径の場合は1、半径の

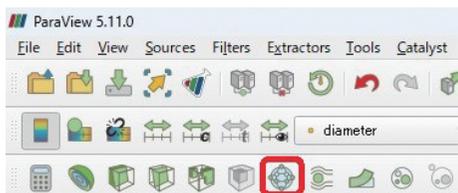


図2: 粒子のデータをGlyphで可視化する方法。アイコンが並んでいる上部から🔍を探し出し、それをクリックする。

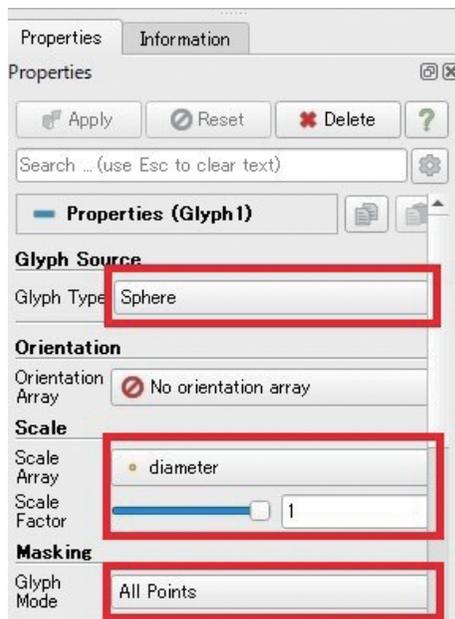


図3: Glyphで粒子の直径を反映させる方法。Sphereを選んでからScaleを「diameter」、Scale Arrayを「1」にし、その後、Maskingをすべての粒子に反映させるために「All Points」を選ぶ。

場合は2を指定する。今回は「diameter」の値であるため「Scale Factor」は1に設定する。(例えばLAMMPSなどでシミュレーション結果をVTK出力する際は半径の場合も多いので注意が必要である。)

最後の表示数は「Glyph mode」で設定する。デフォルトでは一部の粒子のみ表示する設定となっているため、これを「All Points」に変更する。

最後に「適用(Apply)」すると、「Layout」に粒子が表示される。この操作で表示されない場合、👁️👁️👁️👁️👁️👁️👁️👁️👁️👁️のアイコンからカメラ方向を設定すると、物体が中心に映るようにカメラが移動する。またカメラの基本操作は、「左クリック+マウス操作」で方向の変更、「ホイールクリック+マウス操作」で位置の変更である。上記に加えて「Glyph」の断面の表示や色分け等も可能ではあるが、本稿では省略する。

ここからは、作成した3Dモデルをx3d形式で出力する方法について説明する。事前準備として、点データの非表示、Glyph解像度の変更を行う。この段階

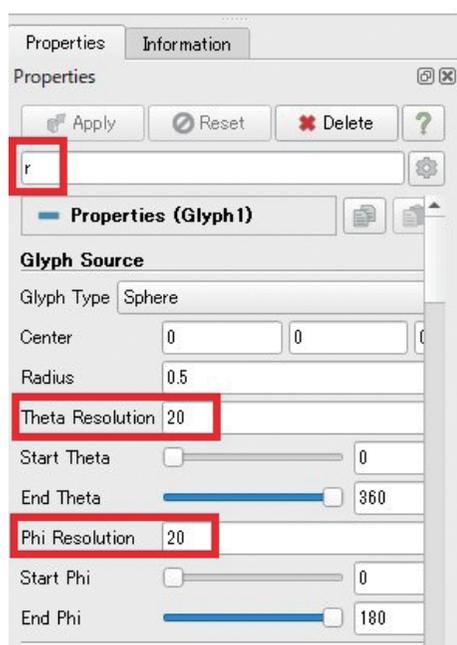


図4: Glyphの解像度を設定する画面。検索窓に「r」を入力するまでは下半分は表示されない。Glyph Sourcesが表示されたのちに「Theta Resolution」と「Phi Resolution」が表示される(赤四角で囲まれたところ)。

では左上の「Pipeline Browser」にVTKファイルとGlyphが表示されており、それぞれの左に開いた眼のアイコンが表示されている。このアイコンをクリックすることで表示/非表示を切り替えることができる。VTKファイルの点データが3Dモデルに含まないように、VTKファイルを非表示にしておく。

次にGlyphの解像度の設定を行う。「Pipeline Browser」の「Glyph」を選択し、「Properties」の「検索ボックス(Search)」に「r」と入力すると、「Theta Resolution」と「Phi Resolution」が候補に表示される。これらの値を増やすことで各Glyphの解像度を上げることができる。当然ながら解像度を高めると3Dデータが重くなってしまうため、値としては12から16程度を推奨する。実際の編集画面を図4に示す。

最後にBlenderで読み取り可能なx3d形式で出力する。「File」→「Export Scene」を選択し、「ファイル形式(Files of type)」は「X3D Files(\*.x3d)」を選択し、任意の名前で保存する。また「Export Color Legend」の画面が出るが、今回は使用しな

いのでそのまま「OK」で良い。

Paraview内で行う操作は以上である。次章でBlender側の操作を示す。

## 4. Blenderによる可視化

前章で準備したx3dファイルをBlenderで読み込み、実際に可視化を行っていく。実際に行う操作としては最低限、ファイルの読み取り、環境光の導入、カメラの位置および向きの設定、画像の出力が必要である。それに加えてマテリアルの設定やライティングの追加を行うことで質を高めることが可能であるが、本稿では割愛する。Blenderを起動後、まずは言語を日本語に設定する。以降の説明は言語設定を日本語にした前提で行う。初回起動時以外は「Edit」→「Preferences」→「Interface」→「Translation」から変更できる。またデフォルトで設置されている立方体、ライトを削除しておく、カメラは後々使うため残しておく。右上の「Collection」で右クリックのメニューから削除できる。

次にx3dファイルをインポートする。まずBlenderでx3dファイルをインポートするためのアドオンを導入する。「編集」→「プリファレンス」→「エクステンションを入手」を開く。検索欄に「x3d」と入力し、「Web3D X3D/VRML2 format」をインストールす

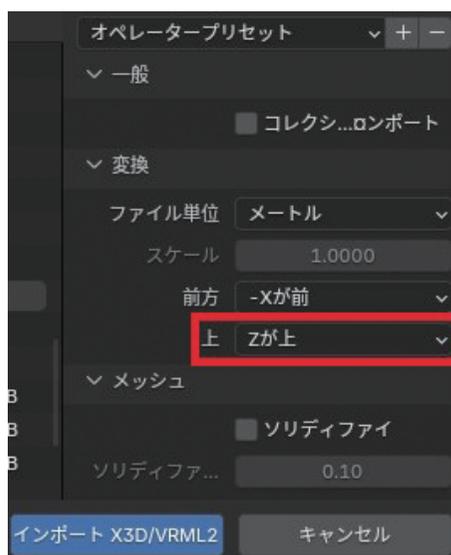


図5: Blenderでx3dファイルをインポートする際の上方向の設定。

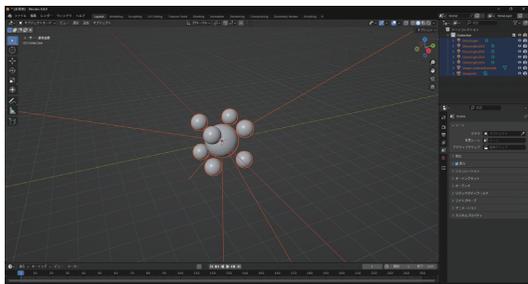


図6: オブジェクトモードにおいて粒子が描画されている状態。

る。これにより、「ファイル」→「インポート」→「X3D Extensible 3D (.x3d/.wrl)」からx3dファイルを読み込むことができる。この時、デフォルトではY軸正方向を上として読み取ってしまうため、インポートする際「変換」の「上」を「Zが上」に変更することを推奨する(図5参照)。

インポートすると図6に示すように「オブジェクト (Shape IndexedFaceSet)」と「ライト (DirectLight)」が5つ、「カメラ(Viewpoint)」が設置される。ライトと新しいカメラは不要であるため全て削除する。この際デフォルトのカメラは削除しないようにする。

次に環境光の導入を行う。これは物体を照らす明かりを設置する操作であるが、手作業で設定するには非常に労力がかかる。そこで今回は、無料で公開されている環境テクスチャを利用する。これはある空間の全方位からの光情報をまとめたテクスチャであり、適用するだけでその空間の光情報を再現することができる。具体的には「Poly Haven」というサイト[7]を利用する。この内「HDRIs」というカテゴリが環境テクスチャであるため、任意の背景を選択しEXR形式でダウンロードする。Blenderへの導入は、右側の地球儀のマークの「ワールド」タブから行う。「カラー」のすぐ右の黄色い丸アイコンをクリックし、「テクスチャ」内の「環境テクスチャ」を選択する(図7参照)。その後「開く」から先ほどダウンロードした環境テクスチャを選択することでBlender内でも適用される。適用された結果は右上の「ビューポートシェーディング」を「ソリッドモード」から「レンダープレビュー」に切り替えることで確認できる。図8右上の4つの内、左から2番目が「ソリッドモード」、4番目が「レンダープレビュー」である。視点の操作方法は「マウス

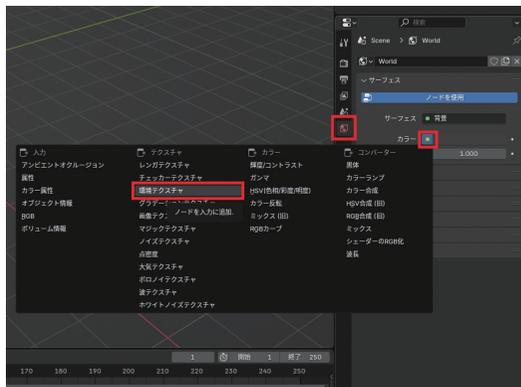


図7: 環境光の設定手順。

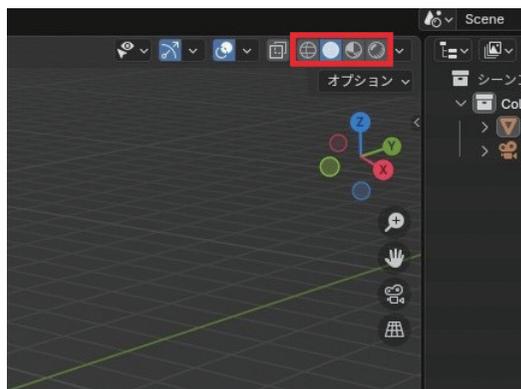


図8: レンダープレビューモードへの切り替え方法。画面右上のアイコンから選択する。

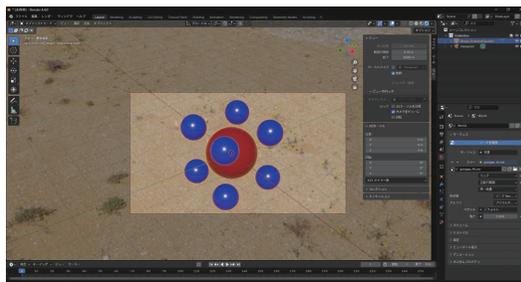


図9: レンダープレビューモードにおいて粒子が描画されている状態。明るく照らされている領域がレンダリングされる領域となっている。

ホイール押し込み+マウス操作」で視点の向きを、「マウスホイール押し込み+Shift+マウス操作」で視点の位置を、「マウスホイール回転」でズームイン・ズームアウトができる。

次にカメラ位置の設定を行う。視点を移動し最終的に出力したい向きからオブジェクトを視界に入れ



図10: 作成したい画像の解像度などの設定。

て、左上の「ビュー」→「視点を揃える」→「現在の視点にカメラを合わせる」を選択することでその画角にカメラを移動できる。この時画面中央の色が鮮やかなエリアが最終的に出力される範囲である(図9参照)。右上のサイドバーの「ビュー」→「ビューのロック」→「カメラをビューに」にチェックを入れることでそれ以降の視点移動にカメラが追従するようになるため、カメラ位置や向きを微調整はこの状態で行う。サイドバーはデフォルトでは最小化されているため、キーボード「N」キーで表示を切り替えることができる。

最後に画像の出力を行う。出力設定は右の「レ

ンダー」と「出力」タブから行う。まずは「出力」タブの設定から行う。編集する項目を図10に示しておく。今回は静止画を出力するため、「フォーマット」の縦横の解像度と「出力」→「ファイルフォーマット」のファイル形式を任意に設定する。ここでは最終的に背景を透過した画像を作成したいため、ファイルフォーマットを「PNG」に、カラーを「RGBA」に設定している。また出力するディレクトリも設定できるが、出力結果を見てから保存するかを決めるためにデフォルトの「/tmp\」のままにしておくことを推奨する。

次に「レンダー」タブの設定を行う。「出力」タブと同様に編集する項目を図11に示しておく。背景を透過した画像を作成したい場合、「フィルム」→「透過」にチェックを入れることで環境テクスチャを透過した画像を出力できる。この場合環境テクスチャによる光自体は有効となる。また最も重要な項目として「レンダーエンジン」の設定がある。これは「Eevee」、「Workbench」、「Cycles」の3種があるが、基本的に「Eevee」が「Cycles」を使用する。簡単に説明すると「Eevee」は軽量、「Cycles」は高クオリティなエンジンであり、コンピュータの性能さえ問題がなければ、手軽に高クオリティの画像を出力できる「Cycles」を推奨する。ただしデフォルトの設定では出力にかなりの時間がかかってしまうため、軽くする方法を紹介する。

以下は「Cycles」を選択した際の設定である。まずコンピュータにGPU(グラフィックボード)が搭載されている場合、「デバイス」を「GPU 演算」に変更する。この時、左上の「編集」→「プリファレンス」→「システム」→「Cyclesレンダーデバイス」で使用するGPUにチェックが入っている必要がある。「なし」が選択されていた場合は「CUDA」が「OptiX」に変更することで上記の設定が可能となる。

次にサンプリングの設定を行う。「サンプリング」→「レンダー」→「最大サンプル数」で、レンダリング時のサンプル数を設定できる。デフォルトの4096は非常に時間がかかるため100~1000程度に設定しておく。出力結果にノイズ等の問題が発生する場合にサンプル数を増やすと良い。また「ビューポート」は出力前の現段階の画面出力の設定であり、視点移動に応じてリアルタイムで再計算を行うためこちらも値を小さくしておくとい。

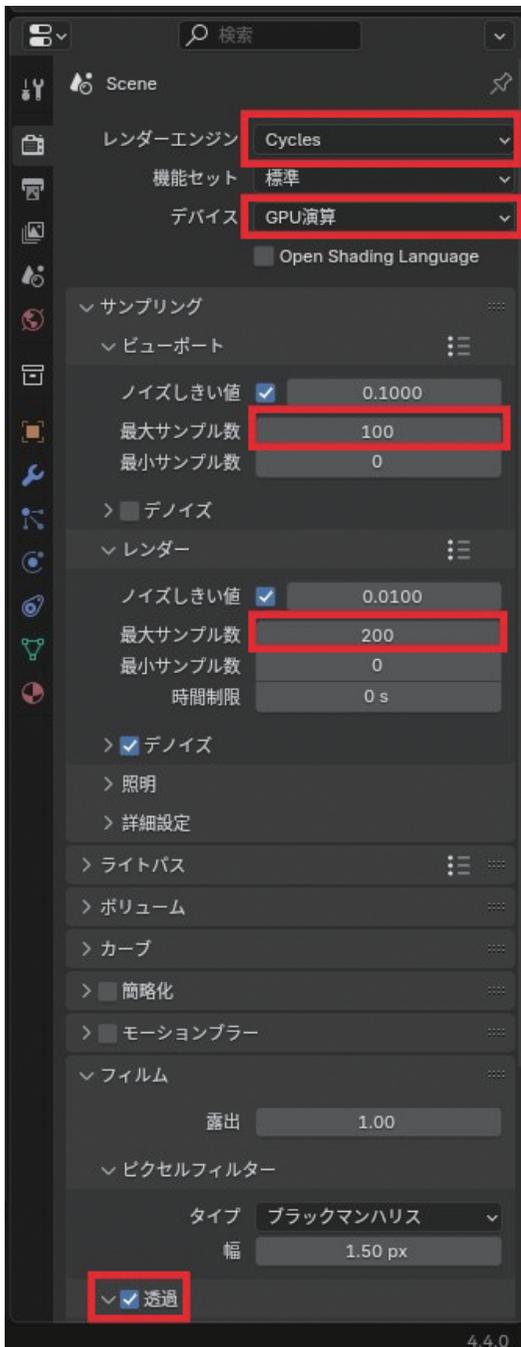


図11: レンダーエンジンの設定方法。デフォルトではEeveeが選択されていることが多いが、よりフォトリアリスティックな可視化を行うためにCyclesを選択する。またレンダリングする際の最大サンプル数の設定もここで行う。

以上で出力前の設定は完了である。最後に左上の「レンダー」→「画像をレンダリング」を選択することで

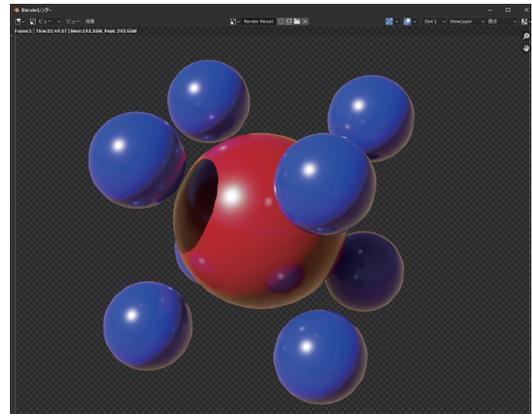


図12: レンダリングが終了したのちに出力される画像。これで問題なければこれを保存すれば終了である。

新しくウィンドウが作成され、出力が開始する。ウィンドウ上部に現在の進捗が表示されており、右の「～Remaining:～」や「～Sample～」が表示されなくなったら出力が終了である(図12 参照)。結果に問題がなければ「画像」→「名前を付けて保存」から保存して一連の流れは終了である。この際「名前を付けて保存」が選択できなければ出力途中であるため、終了したかはこちらでも確認できる。

## 5. おわりに

本稿ではBlenderを用いた科学的可視化の方法について簡単に紹介した。一度ParaViewで可視化し、x3dファイルに変換、それを再度Blenderで可視化するというステップを踏む必要があるものの、そこまで複雑ではない操作だけである程度の質が担保されたことは特筆に値するのではないかな。もちろん、筆者らもBlenderの機能をすべて使いこなせているわけではない。本稿を読んでBlenderによる可視化に興味を持っていただいた読者の方から、著者らにフィードバックを与えていただければ幸いである。なお、機会があればシミュレーション結果を動画にする方法などについても紹介したい。

## References

- [1] <https://www.povray.org/>.
- [2] <https://qcganime.web.fc2.com/OOSAWA/oosa->

wa.html.

- [3] <https://www.blender.org/>.
- [4] <https://www.cfca.nao.ac.jp/content/n%E4%B-D%93%E5%AD%A6%E6%A0%A1>.
- [5] <https://www.paraview.org/>.
- [6] Kloss, C. et al., 2012, Prog. Comput. Fluid Dyn. An Int. J. 12, 140.
- [7] <https://polyhaven.com/>.
- [8] Thompson, A. P. et al., 2022, Comp. Phys. Comm. 271, 10817.
- [9] <https://docs.vtk.org/en/latest/>.

---

## 著者紹介

---

### 外田 慎太郎

東京農工大学大学院工学府産業技術専攻在学。2024年、東京農工大学工学部機械システム工学科卒業。専門は粉体工学。日本機械学会に所属。

### 高田 智史

東京農工大学大学院工学研究院先端機械システム部門准教授。2016年、京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻博士後期課程修了。博士(理学)。京都大学大学院理学研究科特定研究員、東京大学地震研究所特任研究員、東京農工大学大学院工学研究院先端機械システム部門テニュアトラック准教授を経て、2024年3月より現職。専門は粉体物理学、材料力学。日本物理学会、日本機械学会などに所属。

### 松本 侑士

神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻特命助教。2014年、東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻博士後期課程修了。博士(理学)。国立天文台、千葉工業大学などを経て、2025年より現職。専門は惑星形成。日本惑星科学会、日本天文学会などに所属。

## 第16回惑星探査データ解析実習会を終えて

出村 裕英<sup>1</sup>, 平田 成<sup>1</sup>, 本田 親寿<sup>1</sup>, 大竹 真紀子<sup>1</sup>, 小川 佳子<sup>1</sup>, 山田 竜平<sup>1</sup>,  
鈴木 崇正<sup>1</sup>, 月惑星探査データ解析実習会世話人一同

(要旨) 2024年2月27日から3月1日までで行われた第16回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「PDS Analyst's Notebookと会津大学・月火星箱庭構想によるローバ走行トライアル体験」の二本立てでした。前半はNASA/PDS Geosciences Node Associate DirectorのThomas Stein講師を会津大学にお招きしてPDS Analyst's Notebookについて解析者側と開発者側の両方について学びました。後半は第十四回に実施した月面ローバ探査のためのSLAM体験を雛形にして福島県南相馬市のロボットテストフィールド福島においてローバ走行トライアルを体験しました。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。



図1:Stein講師が紹介したAnalysts' Notebookが生まれたきっかけとなった実験風景。

第16回惑星探査データ解析実習会は、以下の通り2025年2月27日～28日の前半2日と2月29日～3月1日の後半2日、合計四日間の日程で開催されました。ハイブリッド開催になったこともあり、全国の大学・研

究機関に所属する、学部学生から大学院生、ポストドク、シニアまで幅広い世代の参加者がありました。参加人数は2/27 12名(4機関)、2/28 12名(4機関)、2/29 31名(12機関)、3/1 25名(7機関)、全日程で延べ80名(27機関)となり、前年の過去最大の参加規模だった79名31機関を上回りました。

1.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)

前半開催日程:2024年2月27日～2月28日  
 前半開催場所:会津大学+リモート(ハイブリッド形式)  
 前半テーマ:Lecturer of PDS Analyst's Notebook

後半開催日程:2024年2月29日～3月1日  
 後半開催場所:福島ロボットテストフィールド+リモート(ハイブリッド形式)  
 後半テーマ:月火星箱庭構想によるローバ走行トライアル体験

講師・世話人:Thomas Stein(NASA/PDS Geosciences Node Associate Director), 出村 裕英, 平田 成, 本田 親寿, 大竹 真紀子, 小川 佳子, 山田 竜平, 鈴木 崇正(会津大学)

主催:日本惑星科学会惑星探査育英会, 会津大学 ARC-Space  
 後援:日本惑星科学会, 神戸大学CPS

今回の実習会の実施にあたって、前半については、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。後半については、宇宙航空科学技術推進委託費「月火星箱庭教育プログラムによる宇宙情報系人材の育成基盤構築」(代表:大竹真紀子)等の一環で行われました。関係各位に感謝の意を表します。



図2: 前半パートの集合写真.



図3: 後半パート、ローバ走行トライアルの看板.

## 著者紹介

出村 裕英



会津大学宇宙情報科学研究センター教授・センター長。惑星科学会を母体学協会とする文科省共同利用・共同研究拠点「月惑星探査アーカイブサイエンス拠点」の長。東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。博士(理学)。旧NASDA宇宙開発特別研究

員を経て、2002年11月より現職。専門は惑星科学や探査理工学と情報科学が融合した月惑星探査アーカイブデータサイエンス。惑星科学会のほか、IAU, The Meteoritical Society, 地球惑星科学連合, リモートセンシング学会, 測地学会, 情報地質学会, 東京地学協会, 情報処理学会に所属。

## 第17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) 2025年2月に行われた第17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「はやぶさ2のGISデータ解析」でした。オンサイト会場は宇宙科学研究所とし、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。神戸大学、東北大学、北海道大学、東京大学、総合研究大学院大学、高知工科大学、会津大学、国立天文台、宇宙科学研究所、産業技術総合研究所の10機関から学生からシニアまで幅広い世代の16名が参加し、三日間の日程の中で座学と実習、各自のテーマによる成果の報告を行いました。

第17回月惑星探査データ解析実習会<sup>1</sup>は、以下の通り2025年2月19日～21日の三日間の日程で開催されました。ハイブリッド開催になったこともあり、全国の大学・研究機関に所属する、学部学生から大学院生、ポスドク、シニアまで幅広い世代の参加者がありました。

開催日程:2025年2月19日～21日

開催場所:宇宙科学研究所+リモート(ハイブリッド形式)

講師・世話人:巽 瑛理, 市川 真弓, 庄司 大悟(宇宙科学研究所), 平田 成, 本田 親寿(会津大学)

参加者人数:16名(うち2名はTA兼任)(講師・世話人は含まず)

参加者所属機関:神戸大学, 東北大学, 北海道大学, 東京大学, 総合研究大学院大学, 高知工科大学, 会津大学, 国立天文台, 宇宙科学研究所, 産業技術総合研究所

テーマ:はやぶさ2のGISデータ解析

### 主な内容:

- はやぶさ2ミッション, 機器とデータ概要の説明
- はやぶさ2 GISデータの紹介
- QGISの基本的な使い方
- QGISデータ解析実習
- 地形データ解析
- スペクトルデータ解析
- AiGIS&PyAiGISの使い方
- Jupyter Notebookの紹介

主催:日本惑星科学会月惑星探査育英会, 会津大学 ARC-Space, 宇宙科学研究所

後援:日本惑星科学会, 神戸大学CPS

今回の実習会のテーマは「はやぶさ2のGISデータ解析」でした。小惑星探査機「はやぶさ2」は、2020年12月の地球への帰還とサンプルカプセルの投下ののちも、「はやぶさ2#」の名前で拡張ミッションを継続しています。この拡張ミッションの枠組みの中で、新たな小惑星への探査の実施を行うだけでなく、はやぶ

<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)

<sup>1</sup>本イベントの名称と主催団体の名称には、時と所によって表記揺らぎ(「月惑星探査」または「惑星データ」など)が存在するが、本稿では過去の遊星人記事での表記に合わせて「月惑星探査データ解析実習会」と「月惑星探査育英会」とする。

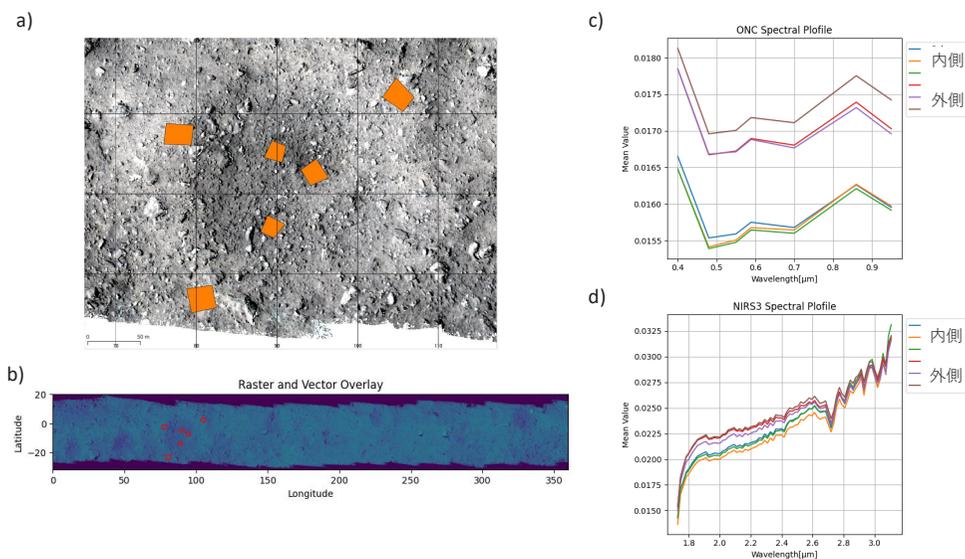


図1: 実習会参加者の解析例. RyuguのUrashimaクレーターの内側と外側にQGIS上で解析領域を設定し, ONCとNIRS3のスペクトルデータを抽出, 比較したもの(東京大学内田 雄揮さん提供).

さ2#プロジェクト国際ビジビリティ事業として, 科学成果の国際的な認知度を増強することを目指した, これまでに取得された観測データの活用促進の活動を行っています. 複数観測機器のデータを統合し地理情報システム(GIS)上で取り扱えるようにしたデータセットやGIS解析ツールの開発や, 観測データ解析の解析手法を共有するワークショップの実施などがこの事業の活動の一例です. 今回の惑星探査データ解析実習会は, この事業の活動と連携する形で, はやぶさ2のGISデータ解析を行う際に利用可能なデータの紹介と, ツールの使用方法を学ぶカリキュラムが準備されました.

実習会で紹介されたツールの1つにQGISがあります. QGISはオープンソースのGISソフトで, 全世界で幅広く利用されています. 先に触れたはやぶさ2#プロジェクト国際ビジビリティ事業の中で, QGIS上で解析可能なGIS対応データセットの開発や, 地形データやスペクトルデータの解析を容易にするQGISプラグインの開発が進められています. これらのツール・データの利用例が座学と実習の双方で紹介されました. もう一つ, 会津大学ARC-Spaceで開発中の不規則形状小天体向け三次元地理情報システム(3D-GIS)ソフトAiGISと, PythonとJupyter

Notebook環境で対話的に3D-GISによるデータ可視化と解析を可能にするPyAiGISの紹介も行われました.

毎回の実習会と同様, 参加者は座学と実習を通じてデータとツールについて学んだのち, 各自で設定したテーマで解析を行ない, その成果を最後に発表してもらいました(図1). 実習会の内容と, 参加者の興味関心が繋がって多様なテーマが生まれ, 短い時間の中で有意義な成果を挙げた参加者もあり, 活発な質疑応答も行われました.

参加者からのコメントを各自の解析テーマとともに紹介させていただきます(順不同, 敬称略).

長坂 奏汰(東海大学, 学部学生)

解析テーマ: QGISによるRyugu全球スロープマップの作成, バンド間で位置ずれのある画像からのスロープ計算

座学の内容についてのコメント: 座学では, 各観測機器の詳細を導入として分かりやすく説明していただき, その後, 実際にそのデータを用いて手を動かしながら学べた点が良かったです. また, QGIS, AiGIS, SBMTなど, 様々なツールを使用できた

のも有意義でした。自身の研究でも「はやぶさ2」のONCデータを使用していましたが、今回の講習を通じて、そのデータの処理方法や活用方法に関する理解がより深まりました。

**実習の内容についてのコメント:**テーマを決めるのに悩みましたが、自分の研究内容と結びつけて取り組むことができました。特に、これまで扱ったことなかったスペクトル解析について、配布されたサンプルコードや資料を参照することでスムーズに進めることができました。

**実習の実施形態についてのコメント:**初歩的な質問も気軽にできるような環境を整えていただき、ありがとうございました。

**次回以降の希望テーマ:**輝度校正や幾何補正などのデータ処理について。

**内田 雄揮(東京大学・ISAS, 博士課程学生)**

**解析テーマ:**Urashimaクレータの内側と外側のスペクトルの違い

**座学の内容についてのコメント:**全ての講義に関連性があったので、相乗効果で理解が深まりました。サンプルコードもありがとうございました。リュウグウについてフォーカスした内容だったので、スペクトル解析からどんな研究がされてきたか、またどんなことが分かってきたかなど、実習を見据えた事例を例示いただけると更に理解の助けになります。

**実習の内容についてのコメント:**解析のアイデアも一緒に練っていただきありがとうございました。

**実習の実施形態についてのコメント:**少人数でがつり学べて良かったです。対面で、且つ講師陣もたくさんいらっしまったので、問題をすぐに解決していただけて本当に贅沢な講習会でした。

**次回以降の希望テーマ:**惑星科学×AIみたいなものはいかがでしょうか。例えば、クレーターカウントの自動化ツールを作成するなど。

**佐藤 滯央(東京大学, 修士課程学生)**

**解析テーマ:**QGISでのリュウグウクレーターの地物ポリゴンの検出

**座学の内容についてのコメント:**丁寧に説明していただき、はやぶさ2のデータなど探査機データを用いた惑星地質学的な解析も手軽に扱えるのだなとちょっと感動できました。ただ、実質丸2日の期間に対して内容が多いかなとは思いました。QGISかAiGISどちらかとPythonのみにして、もう少し実習の幅を広げても良かったかもしれないと感じます。今回程度の扱う量でも、サンプルコードを追いかけながら説明を頂いている途中に例えば、自分で好きなファイルを読み込んで(=デフォルトのものとは書き換えて)スペクトルを出してみる、というような時間を少しだけでも設けてもらえると、もう少し自信をもって操作が習得できたかなとも考えます。ぜひご検討ください。

**実習の内容についてのコメント:**自分の課題実施に関しては、思うようにできなかったことが第一です。呑み込みまでに時間がかかったこともあり、ちょっとふがいない結果になっちゃったかなと感じています…

**実習の実施形態についてのコメント:**ハイブリッドでやったださるのとはとてもありがたいです。今回は宇宙研が現地会場だったので現地参加しましたが、遠方であればリモートでないと難しいので、ハイブリッドは今後も継続してほしいです。座席や懇親会等もご配慮いただきありがとうございました。

**次回以降の希望テーマ:**お任せします。

**庄司 大悟(ISAS, 講師)**

**解析テーマ:**QGISを用いてNIRS3データから鉱物マップを作成する。

**座学の内容についてのコメント:**AiGISを使ったことがなかったので、使い方を勉強できて有意義でした。

**実習の内容についてのコメント:**Google Colabで実装できるのはありがたいです。

**実習の実施形態についてのコメント:**私の方にQGISの機能に勉強不足な点があったので、講師として反省点です。

**次回以降の希望テーマ:**ChatGPTのような対話ツールを惑星科学でどのように活用できるか、有用な点と気をつけたい点について。

**森田 朋代(東北大学, 博士課程学生)**

**解析テーマ:**NIRS3とONCのスペクトル特徴の比較から推定するRyugu表層の物質分布

**座学の内容についてのコメント:**衛星観測の意義や、実際の解析ツールについての概要がまとめられたお話を網羅的に聞けたことが良かった。論文や学会発表を聞く際に、一つ一つの研究が、全体の目的のどこに当たるのか理解して考えることができそうだった。また、私はスペクトルの読み方やQGIS、Pythonを使った解析をしたことがあったためスムーズに進められたが、事前知識としてスペクトルからわかることなどの説明が少しあった方がわかりやすいのではないかと思った。

**実習の内容についてのコメント:**今回、AiGIS、PyAiGISに特に興味があり勉強会に参加した。実際にコードを動かしたり、どのような操作をしているかの説明があり、とてもわかりやすかった。

**実習の実施形態についてのコメント:**元々、対面での参加予定であったが、移動時のトラブルで最初はオンラインで参加することになり、会場とオンラインの併用であったことに救われた。遠方からの参加もしやすいため、今後も併用であると嬉しい。

**中嶋 瑞穂(北海道大学, 修士課程学生)**

**解析テーマ:**NIRS3とTIRが計測した放射温度の比較

**座学の内容についてのコメント:**はやぶさ2について詳しく知らなかったのので、搭載機器の基本から説明していただき勉強になりました。実習の内容についてのコメント:GISの基本的な説明があり、一般的なな

スキルを身につけることができました。

**実習の実施形態についてのコメント:**ハンズオン形式で実習を行えスキルを身につけることができました。

**櫻井 哲志(神戸大学, 修士課程学生)**

**解析テーマ:**Ryugu表面上のボルダーの可視スペクトル解析

Ryugu表面の暗いボルダーと明るいボルダーを分類するために、Ryugu表面上のボルダー(計604個)の可視スペクトルを解析しました。結果的として、今回調査したボルダーは全て似た反射率とスペクトル勾配を示し、暗いボルダーと明るいボルダーを分類することはできませんでした。

**座学の内容についてのコメント:**今回の実習会は、はやぶさ2のデータ概要の説明から始まり、QGIS、PyAiGIS、SBMTといった解析ツールの紹介へと進みました。その中で、探査によってどのようなデータが取得され、それらがどのようにアーカイブ・解析されるのかという、一連の流れを理解することができました。あまり探査データ解析ツールに触れてこなかった私にとって、新鮮で興味深い講義でした。特に解析ツールの紹介では、実際に手を動かしながら学ぶことで理解が深まり、基本的な操作方法を習得できたと感じています。また、解析が正常に実行されなかった場合も、迅速に対応していただいたおかげで、講義に問題なくついていくことができました。今回の経験を活かし、今後の研究において探査データをより有効に活用できればと思います。

**実習の内容についてのコメント:**実習では、丁寧なご指導のもと、学びの多い時間を過ごすことができました。課題設定の段階で、実習の方向性について相談し、適切なアドバイスをいただいたおかげで、実習をスムーズに進めることができました。また、実習を進めるなかで生じた解析ツールに関する質問にも親切にご対応いただき、大変助かりました。さらに、成果発表会では、それぞれに特色のある発表が行われ、非常に刺激を受けました。他の方々の視点やアプローチを知ることで、自身の視野を広げる良い機会となりました。

**実習の実施形態についてのコメント:**私は会場で実習に参加しました。実習を進める過程で生じた問題を、世話人・TAの方に直接相談できる形態は、非常に助かりました。

**次回以降の希望テーマ:**熱赤外観測とその解析。

**春日 敏測(国立天文台, PD)**

**解析テーマ:**Ryugu Profile Plot

AiGIS/PyAiGISを使用し、平田先生の協力を得て、Ryuguの断面をplotしたもの。緯度を変化させて(例えば、 $0^\circ$ ,  $\pm 40^\circ$ ,  $\pm 80^\circ$ )、距離と標高の相関を見てみる。展望として他の物理量との相関についても調べる。距離と重力加速度、または距離とジオポテンシャル高度について。現在のRyuguは自転周期7.6時間であるが、自転周期が3~4時間と短かった時代の結果にも応用できる。その時間差を見ることにより、上記の相関には"歪み"のような特徴が見えてこないか?

**座学の内容についてのコメント:**内容は初学者にも入りやすく適切でした。はやぶさ2の観測機器、データの説明(ONC/NIRS3)から解析に使用するソフトウェア(QGIS, JADE2, AiGIS/PyAiGISなど)へと繋げて、実習への基礎過程を網羅してくれました。用意いただいた資料集(pdf)にも分かりやすさを重視した工夫と深みを感じられました。ありがとうございました。

**実習の内容についてのコメント:**重厚かつ充実しているため早く感じられました。特に2日目(データ解析ユースケース, pdfは110ページ!)の市川先生の講義--Python--QGISの三刀流による高速回転に圧倒されました。ほんの少し整理してる間に話にも作業にも追いつけなくなり、後半はその華麗な突進を見送ることになりました。

**実習の実施形態についてのコメント:**最善だったと思います。現地参加もオンラインも、オンラインではやや聞き取りにくい箇所もありましたが、集音マイクの設置や小さめの会議室での開催などで比較的容

易に改善できそうです。

**次回以降の希望テーマ:**熱慣性データについて、その全球マップやラフネスのデータの使い方。過去にラフネスはHapkeの式で簡略化されてきたようですが、その差異はどれほどか、など。探査による研究が躍進し、過去の地上観測や実験などでは仮定されてきた物理量値の妥当性を見直せる機会が得られていると考えてます。

**柿木 玲亜(神戸大学, 博士課程学生)**

**解析テーマ:**SCIクレーター形成前後での表面スペクトルの変化およびリュウグウ上の複数のクレーターのスペクトル解析

**座学の内容についてのコメント:**はやぶさ2探査機のデータがどこまで解析されているか、またそれぞれのデータがどのようにして得られたかなど最先端の情報を知ることができたのは、この実習に参加した大きな収穫であったと感じた。

**実習の内容についてのコメント:**座学で習ったQGISなどの基本的な操作を応用し、実際のデータを使った解析を行うことができたので、スペクトルやプログラミングなどに不慣れな自分でも特に抵抗を感じることなく取り組むことができた。

**実習の実施形態についてのコメント:**オンラインでも開催されたので、参加可能となり大変ありがたかった。SlackやZoomのコメント機能を使って常に疑問を解決できるような大勢だったので、オンライン参加であっても特に不自由なく学ぶことができた。

**次回以降の希望テーマ:**探査データの画像処理について(クレーターカウンティングなど)。

**愛敬 雄太(東京大学, 修士課程学生)**

**解析テーマ:**GISデータを用いたボルダーペアのスペクトル解析

QGISを用いてモザイク画像からペアとなっているボルダーをマッピングし、対応する領域のスペクトルを、pythonを用いて抽出し比較した

第17回月惑星探査データ解析実習会を終えて／平田, 他

219

**座学の内容についてのコメント:**データやソフトの仕組みといった基礎的な内容から取り扱っており分かりやすかった。

**実習の内容についてのコメント:**進み具合を確認しながら進めていただいたので、置いていかれることなく実習を進められた。

**実習の実施形態についてのコメント:**オフラインの参加だったが、気軽に質問することができたので良かった。

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](mailto:meringuristschool_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)とはやぶさ2#プロジェクト国際ビジビリティ事業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。

## New faces

### 松岡 亮<sup>1</sup>

(北海道大学理学研究院地球惑星科学部門)

日本惑星科学会の皆様、はじめまして。松岡亮(まつおか りょう)と申します。2023年に北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻にて、倉本圭先生のご指導のもと学位を取得いたしました。現在は、同大学理学研究院の気象学研究室で任期付き研究員として勤務しています。もともと私は大気科学の出身ではなく、学位論文では「PhobosとDeimosの起源：一時捕獲天体のガス抵抗による捕獲」として衛星形成に関するテーマに取り組みました。現在も気象学の研究と並行して、火星衛星をはじめとする小天体の起源・進化に関する研究を継続しています。

本稿では、私がこの分野を志すに至った経緯とともに自己紹介いたします。しばしの間、お付き合いいただければ幸いです。

この分野に関する私の最も古い記憶は、幼稚園の遠足で訪れた旭川市青少年科学館(現・旭川市科学館サイバル)でのプラネタリウムに遡ります。人工のものとはいえ、満天の星空を初めて目の当たりにしたあのひとときは、私にとって宇宙を意識する原体験となりました。その後の私は、いわゆる天文少年・岩石鉱物少年・昆虫少年として自然への興味を深めていきます。小学校高学年から受講した、北大総合博物館の「バラタクソノミスト養成講座」では、鉱床学の故・松枝大治先生(当時・北海道大学理学部)、昆虫体系学の大原昌宏先生(北海道大学農学部)から直接ご指導をいただく機会に恵まれました。また、高校生のときには、「未来の科学者養成講座」で惑星電磁気学の渡部重十先生(現・北海道情報大学)のもとで学ぶ機会を得ました。これらの経験は、大学や学術の世界を意識する大きなきっかけとなりました。



北海道平取町の枕状溶岩とともに

そうして、体系的に物事を学び、さまざまな現象を結び付けて考える面白さを知る中で、各地のフィールドで出会う多様な自然環境と、どちらかという自然界を数理的に単純化してとらえようとしているように見える(宇宙)物理学の視点との間にあるギャップが、次第に、心の中に残るようになりました。大学進学後も、北大地球科学サークルGROUNDでの「ジオイ」活動や、物理学科・数学科の友人たちとの自主ゼミを通じて、このギャップに対する想いは募るばかりでした。そうしたなかで、惑星形成論を研究している倉本研究室に配属されることになりました。

倉本先生との最初のミーティングでは、「地球型惑星の起源を研究したい」と相談したところ、水星に関するテーマを提案していただきました。しかし当時の私は、生意気にも「揮発性成分に興味があるので、もう少し寒い天体がいい」と駄々をこねた記憶があります。その翌週のミーティングで新たに提案されたのが火星衛星の研究テーマでした。水星も力学的・物質科学的に計り知れない魅力をもつ天体であり、今となっては、自ら観測的研究の構想を温めるほど関心を寄せる対象となっています。しかし、当時の私にとって、火星衛星が地球型惑星の衛星でありながら炭素質小惑星に似たスペクトルを示すという点は、

1.北海道大学理学研究院地球惑星科学部門  
matryo@ep.sci.hokudai.ac.jp

地球型惑星における揮発性成分の起源を探るうえで、きわめて魅力的に思えました。以来、現在に至るまで、火星衛星の起源と進化に関する研究を継続しています。

ここで、私の博士論文の内容について簡単に紹介いたします[1]。火星衛星の起源説には、捕獲説と巨大衝突説があり、捕獲説は衛星の反射スペクトルの説明に適する一方で、軌道面が火星赤道面に沿うことを説明しにくいという難点がありました[e.g. 2]。私の研究では、星雲中で形成された原始火星の重力圏において、微惑星の低速接近が高頻度で起こり、それらが一時捕獲された後に、ガス抵抗を受けて恒久的に捕獲され、PhobosやDeimosのような低軌道傾斜角の衛星が形成されることを示しました。低軌道傾斜角となる過程には、本研究で提唱された、円制限三体問題における「絶対角運動量」が鍵となります。それはガス抵抗のような散逸源がなくても厳密には保存しないものの、ある定常値のまわりを振動し、近似的に保存量として振る舞います。絶対角運動量が火星衛星の軌道傾斜角を決めるさまは偏西風の成り立ちと似ています：空気塊が北上する際に西風成分を強めるのは、地球自転による影の角運動量があるためです。同様に、火星衛星系でも、系の太陽周回運動に起因する影の角運動量が、最終的な衛星の周火星角運動量の向き、すなわち軌道傾斜角を決めているのです。

博士課程の修了が近づいていた頃、かねてより私の「数学好き」を見抜いていた北大気象学研究室の稲津将先生から、幸運なことにポスドク先としてお声がけいただきました。当時、同研究室では自己組織化写像 (SOM) を用いた気象データの解析が進められていました。SOMは、多次元ベクトルデータからその潜在空間を描出する手法です。私はSOMによる地球惑星科学データに対する数理解釈の可能性に興味を持ち、気象分野における最初の研究として、海面更正気圧場 (いわゆる地上天気図) の再解析データを入力したSOMを用いた「気象区分」を提案しました[3, 4]。具体的には、各地の気象イベントを集計し、SOM潜在空間上にそれらの分布関数を構成することで、地域ごとの気象イベントの類似性を定量化し、地理的区分を行うという試みです。この研究は、時空間スケールとして「気候 (climate)」より

も小さな領域を占める「気象 (weather)」の地理的区分を与えた点に特徴があります。それは防災的な観点にとどまらず、地域の自然や人々の暮らし、いわば「風土」の成立過程に、数理的客観性をもって地球惑星科学的な示唆を与える可能性を秘めていると考えています。

振り返れば、自然界の不思議に惹かれて歩んできたこれまでの道のりは、さまざまな偶然や人との出会いに支えられてきました。惑星の起源や気象の数理的構造といったテーマの背後には、自然界の奥深さや美しさにふれたいという、私の根源的な関心があるように思います。この思いを胸に、今後も自分なりの視点から広く地球惑星科学に貢献していきたいと考えています。どうぞよろしく願いたします。

- [1] Matsuoka, R. N. and Kuramoto, K., in review, submitted to MNRAS.
- [2] 兵頭龍樹, 玄田英典, 2018, 遊星人 27, 216.
- [3] Matsuoka, R. N. and Inatsu, M., 2024, SOLA 20, 298.
- [4] 松岡亮, 稲津将, 2025, 天気, in press.

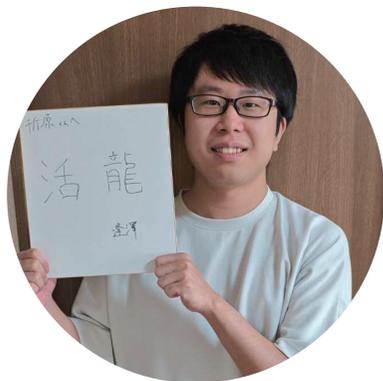
## 折原 龍太<sup>1</sup>

(東京大学大学院理学系研究科天文学専攻)

はじめまして、東京大学の折原龍太と申します。私は2025年3月に、茨城大学 大学院理工学研究科にて、百瀬宗武教授のご指導のもと博士号を取得いたしました。現在は、東京大学 大学院理学系研究科 天文学専攻にて相川祐理教授のもと、ポスドク研究員として勤務しております。これまで、原始惑星系円盤の幾何構造やダイナミクスの観測的研究を主なテーマとし、ALMA望遠鏡によるミリ波・サブミリ波観測データに加え、VLTやすばる望遠鏡で取得された可視光・赤外線画像の解析に取り組んでまいりました。本記事では、これまでの私の研究経歴や学びについてお話できればと思います。

私が自然科学そのものに強い関心を持つようになったのは、比較的遅い時期でした。きっかけは、高校生の頃に読んだ漫画『宇宙兄弟』との出会いです。物語に描かれる宇宙開発の世界に惹かれ、当時は人工衛星の開発に携わりたいと、漠然とながらも考えるようになりました。そのような思いから、日本大学の短期大学部に進学、宇宙開発に関わる工学分野を志して機械系の講義を履修し、そのまま日本大学理工学部への編入を目指していました。当時のカリキュラムでは、1年前期に全コース(機械、電気電子、情報、物理、数学)の基礎を学び、後期から専門に分かれるシステムが採用されていました。その中で受講した物理学の講義が、私の進路に大きな影響を与えました。自然界の多様な現象がいくつかの基本法則で記述される物理学の論理的な美しさに強く惹かれたのです。ちょうどその頃、日本物理学会の会誌に掲載されていた百瀬宗武教授の記事で、原始惑星系円盤と電波天文学の魅力を知り、大きな衝撃を受けました。我々の目に見えない宇宙の構造を電波観測によって明らかにするというスタイルと、惑星の作り方という研究テーマの奥深さに強く心を動かされ、茨城大学への3年次編入を決意しました。

編入後は、百瀬研究室にて本格的にALMAデー



タの解析に取り組み始めました。最初の研究テーマは、若いT Tauri型星に付随する原始惑星系円盤の解析でした [1]。この研究を通じて、観測の空間分解能や波長の違いによって浮かび上がる放射分布の変化を読み解き、それを物理的に解釈していくことの面白さを実感しました。

この研究に関連して、観測データを提供して下さった工学院大学の武藤恭之教授からは、観測画像の物理的な解釈に関して多くのご助言をいただきました。実は武藤教授とは、私が短大に在籍していた当時にすでに一度接点がありました。短大2年生のとき、国立天文台主催の第23回アルマ望遠鏡講演会に参加した際、講演をされていたのが武藤教授でした。講演終了後、私は会場を後にされる武藤教授を出待ちし、惑星形成に関する質問をさせていただきました。突然の学生の問いかけにもかかわらず、丁寧に答えてくださったことを今でもよく覚えています。そのような方と、後に実際に共同研究という形で一緒にできたことは、非常に感慨深く、私にとって特別な経験となりました。

同じ研究室に所属していた研究員の方々との議論も非常に刺激的で楽しく、自分の考えが広がり、知識が深まっていく感覚を味わうことができました。一方で、そうした方々が異動や退職により次々と研究室を離れてしまうこともあり、寂しさを感じる場面も少なくありませんでした。せつなく親睦や議論が深まってきたところで別れが訪れるのは残念でしたが、こうした出会いと別れもまた、研究の現場ならではの一面だと感じています。ちなみに、写真の中で私が持っている色紙は、私がM1の頃に上海交通大学李政道

1. 東京大学 大学院理学系研究科 天文学専攻  
r-orihara@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

研究所に異動されることになった逢澤正嵩さんからいただいたもので、茨城大学近くのラーメン店「活龍」と、私の今後の活躍を願ったダブルミーニングになっているのだと思います。今思えば、色紙を贈るべきなのは本来私の方だったのかもしれませんが……そこはご愛嬌ということで。現在、逢澤さんは助教として茨城大学に戻られており、D3の頃には共同研究もさせていただきました[2]。これからも、ぜひ一緒に研究を進めていければと思っています。

研究を進めるにつれて、原始惑星系円盤内に生じる影に強い関心を持つようになりました。具体的には、赤外線散乱光画像に現れる影の形状に着目し、それをもとに円盤の三次元的な幾何構造を逆算するという研究に取り組みました[3]。この研究を通じて、直接観測が困難な構造を間接的な観測データから読み解いていくことの面白さと奥深さに強く惹かれるようになりました。そしてこのテーマを基点として、東京科学大学の奥住聡教授および、当時奥住研究室の学生であった福原優弥さんとの共同研究にも発展し、理論と観測を組み合わせることで、科学的理解が格段に深まるということを、実体験として強く実感することができました。

この頃からモデル構築や解析手法に拘り過ぎる傾向が見え始め、寄り道も多くなり、なかなか研究が前に進まないという場面も少なくありませんでした。百瀬教授や奥住教授から「そこまでやらなくても十分では？」と指摘を受けたこともありましたが、今でもこの癖は抜けきっていないので、「拘るべきところ」と「割り切るべきところ」を見極めつつ、科学的意義を意識したアプローチを心がけるようにしていきたいと思っています。

こうした個人テーマでの研究に並行して、より大規模な共同研究にも携わる機会もありました。例えば、ALMAの大規模観測プロジェクト「exoALMA」に参加しました [4]。このプロジェクトでは、原始惑星系円盤における分子輝線を高空間・高速度分解能で観測することで、円盤中に埋もれた惑星の運動学的痕跡の検出を目指しています。私はこのプロジェクトにおいて、干渉計データのキャリブレーションやイメージング処理を担当し、また特定のターゲット天体におけるガス分布と速度構造の解析を行いました。この経験を通じて、データ処理の実

務能力に加えて、国際的なチームと協働しながら科学を前に進める姿勢も身につけることができました。

振り返れば、ここまで歩んでこられたのは、多くの方々の支えとご縁のおかげです。特に、指導教員である百瀬教授には、日々の研究相談や論文執筆時の丁寧な添削に加えて、飲み会の席では人生相談にも乗っていただくなど、研究面・精神面の両方で本当にお世話になりました。2人でよく足を運んだ居酒屋「たしなみ」では、「今日は飲みすぎないようにしましょう」と言いつつ、気がつけばいつも閉店間際まで飲み、語り合っていたことが、今でも懐かしい思い出として心に残っています。

今後も、惑星形成の理解に貢献するべく、自然科学への探究心と誠実さを胸に、柔軟な視野をもって研究に取り組んでまいります。どうぞよろしくお願ひ申し上げます。

- [1] Orihara, R. et al., 2023, PASJ 75, 424.
- [2] Aizawa, M. et al., 2025, ApJ (in press).
- [3] Orihara, R. and Momose, M., 2025, ApJ 986, 215.
- [4] Teague, R. et al., 2025, ApJL 984, L6.

書評

# 地球の測り方 ～宇宙から見る「水の惑星」のすがた～

青木陽介(著)

講談社 2025年2月刊行 全240頁

ISBN:978-4-06-538605-7

松本 晃治<sup>1</sup>



本書の人名索引には、アリストテレス、エラトステネス、ピタゴラスといった紀元前に活躍した人物の名前を見つけることができる。地球を測るという測地学の歴史の長さを物語っている。測地学は古くて新しい学問と言われるが、その新しさをもたらしたのは主に宇宙技術を用いた観測や精度を極めた地上観測である。1990年代後半からこの新しい測地学の場に身を置き、新発見に関わり、目撃してきた著者が、その成果を網羅的にかつ平易に解説したのが本書である。

測地学には基本的な3つの観測量がある。すなわち、地球の形状・重力場・回転であり、これらは測地学の3本柱と呼ばれている。本書では、それぞれについて、伝統的な観測から最新技術による観測までが解説されている。たとえば、地表の変形については、水準測量・三角測量からVLBI(超長基線電波干渉法)・SLR(衛星レーザ測距)・GNSS(全地球衛星測位システム)・SAR(合成開口レーダー)・衛星海面高度計などの宇宙測地技術まで、重力については、バネ式相対重力計から光格子時計による重力ポテンシャル観測、あるいはGRACE・GOCEという重力観測衛星まで、といった具合である。読者は、それぞれの観測の原理・精度・空間分解能等を把握することができる。

全13章にわたり、様々な時空間スケールをもった変動が扱われている。複雑な式は一切現れない。多くの模式図やたとえを用いて、初学者でも背景に存在する物理を直感的に理解できるように配慮されて

いる。また、たとえば様々な測地観測を解釈するうえで重要となる地球の内部構造については、前半に1章を割いて基礎知識を解説している。この観点で本書は入門書である。

一方で、新しい研究成果が紹介されているという意味で、研究者が読んで面白い。形状・重力場・回転それぞれの時間変化は独立ではなく、また、変動の原因も外部天体や大気・海洋・内部という地球の複数の部分に存在し、複雑に絡み合っている。このシステムとしての複雑さが研究を面白くしているのであるが、(当然ながら)まだ分からないことも多い。本書には、そのような今後の研究で解決されるべき事柄も記述されている。これは、最新の研究成果が盛り込まれていることの裏返しである。

特に、筆者が専門とする地震・火山活動にともなう地殻変動に関する章は迫力があり、多くの観測例を通して、地震時変動・余効変動・スロー地震・マグマの移動等の描像やそれらに対する測地学的観測の寄与について学ぶことができる。本書を読めば、地球における観測の応用という観点で、新しい惑星科学ミッションのアイデアが生まれるかもしれない。

1.国立天文台 RISE月惑星探査プロジェクト  
koji.matsumoto@nao.ac.jp

# 2025年度宇宙科学奨励賞公募のご案内

## 公益財団法人 宇宙科学振興会<sup>1</sup>

公益財団法人宇宙科学振興会では、宇宙科学分野で優れた研究業績を挙げ、将来の宇宙科学の発展に大きな役割を果たすことが期待される若い研究者を顕彰し、宇宙科学奨励賞を授与いたします。ここに2025年度の第18回宇宙科学奨励賞候補者のご推薦を募集いたします。推薦要綱の詳細は当財団のホームページ(<http://www.spss.or.jp>)に掲示しておりますが、当奨励賞の概要は以下の通りです。皆様の周りで優れた業績を挙げ将来の活躍が期待される若手研究者をご存知の際には、是非ともご推薦いただきますようお願い申し上げます。

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

**授与機関:** 公益財団法人 宇宙科学振興会

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

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

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

**推薦締切日:** 2025年10月31日(金)必着。

**表彰式:** 選考結果は2026年1月に推薦者と受賞者に通知するとともに、当財団ホームページにおいて発表する。その後2026年3月初旬に表彰式を行い、受賞者には受賞対象となった研究に関する講演をして頂く。

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

**お問い合わせ先および推薦書送付先:**

〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台3-1-1

公益財団法人宇宙科学振興会 事務局

E-mail: [admin@spss.or.jp](mailto:admin@spss.or.jp)

Tel: 042-751-1126(火、木)

<sup>1</sup>公益財団法人 宇宙科学振興会 事務局  
[admin@spss.or.jp](mailto:admin@spss.or.jp)

## JSPS Information

- ◇日本惑星科学会第171回運営委員会議事録
- ◇日本惑星科学会第172回運営委員会議事録
- ◇日本惑星科学会賛助会員名簿
- ◇日本惑星科学会主催・共催・協賛・後援の研究会情報

### ◇日本惑星科学会第171回運営委員会議事録

日時:2025年5月25日(日) 17:30 - 19:00

場所:幕張メッセ国際会議場101(現地) + オンライン(Teams Meeting)

#### 運営委員:

出席者 20名

今村 剛, 竝木 則行, 大竹 真紀子  
千秋 博紀, 諸田 智克, 黒澤 耕介, 三浦 均, 百瀬 宗武,  
瀧川 晶, 横田 勝一郎, 生駒 大洋, 野村 英子,  
藤谷 渉, 田中 智, 亀田 真吾, 佐々木 貴教, 鎌田 俊一, 田中 秀和,  
坂谷 尚哉, 黒川 宏之

欠席者 3名(委任状:3通)

保井 みなみ, 癸生川 陽子, 野口 里奈

#### オブザーバー:

- ・成田 2025年秋季講演会組織委員長
- ・吉田 連合大会プログラム委員
- ・渡邊 総務専門委員(事務局担当)

#### 議題・報告事項:

1. 日本地球惑星科学連合:プログラム委員会(吉田 連合大会プログラム委員)

来年度のプログラム委員に丹 秀也会員(正), 坂田 遼弥会員(副)が推薦され, 承認された.

来年度の惑星科学セッションコンビーナに小林 真輝人会員(代表), 辰馬 未沙子会員, 芝池 諭人会員, 平井 英人会員が推薦され, 承認された.

学会の主催セッションは惑星科学, 共催セッションは惑星火山学, 宇宙・惑星探査の将来計画および関連する機器

開発の展望, の2つ.

## 2. 2025年秋季講演会について(成田 2025年秋季講演会組織委員長)

期間:9月3日(水)-5日(金)

開催場所:東京大学 駒場キャンパス 21KOMCEE

9月4日に懇親会を行う。一般講演会はなし。6月12日から参加・発表申込開始, 6月30日に発表申込締切, 7月30日に参加申込・予稿原稿締切。遊星人の6月号で案内。

プログラム編成にあたってSOCを組織する。

LOCは成田 憲保会員(委員長), 黒川 宏之会員, 福井 暁彦会員, 田崎 亮会員, 瀧川 晶会員。

要望があれば, Opens-0ミッションについて情報共有の場を設けることを検討。

## 3. 事務局体制の現状について(渡邊 総務専門委員)

事務局体制の現状に関して, 学会名ゆうちょ銀行総合口座の開設, 会費請求リマインダの送付, 入会時の紹介者・指導教員の記入, 事務局業務に関わる学会システム変更時の事務局への相談, 特別業務「学会事務局の情報整理」「財務専門委員会業務補助」, 2026年度の契約について説明がなされた。

## 4. 2024年度最優秀研究者賞について(百瀬 2024年学会賞選考委員長)

最優秀研究者賞について, 3月24日に応募を締め切り, 4月11日に選考委員全員で審査を行った結果, 大野 和正会員が候補として選出され, 承認された。

また, その選考過程や講評についても説明がなされた。

応募者が2名だったことを受けて, 応募を促すようなメッセージを委員長から出す。

(1) 今年には行わなかったNewsletterへのリマインダ, (2) 成果につながりにくいが惑星科学コミュニティにとって重要な活動を評価するため, 評価推薦者とは別に「意見を聞ける方」を挙げてもらうこと, が将来の検討事項。

## 5. 第17期下期決算(横田 財務専門委員長)

決算報告書に基づいて説明がなされた。

一般会計の収入合計は7,742,148円。一般会計の支出合計は10,566,692円で2,824,544円の赤字。

支出では学会誌出版の費用が上がっている。

管理費(委託事務関連)では契約形態が変わったことにより支出が増加。管理費(事務局関連)ではサーバ基礎開発費の支出が増。

## 6. 第18期上期予算執行状況(横田 財務専門委員長)

収入はおおよそ予算案どおり。ただし, 学会誌出版費と管理費(事務局関連)は増加し, 2,600千円程度の赤字が続く見込み。

280名の会員が会費を支払い済み, 361名が未納。未納者に同報メールを流してから振込数が増加。

匿名の方より寄付金(10万円)があり, 発表賞の賞金に使われる。

200万円の赤字について, 対策は?→会費を上げるのが現実的か。

どのくらい上げる?→2,3割の値上げ。

学会誌を印刷しないようにするのはどうか?→学会誌の電子化を検討する必要あり。昨年の総会で情報の頭出しをしている。今後, 学会の財政状況を共有した上で, 電子化について会員にアンケートをとることになった。

会費の話と遊星人の話はセットですべき。紙媒体の完全廃止で会費2,000円値上げ、そのままだと4,000円値上げする必要あり。

支出は現在の事務局体制に基づいており、そのまま継続するわけではない。

会費の改訂については誰が進めるのか?→苅木副会長が原案を作成。

#### 7. 遊星人の発行状況報告(三浦 編集専門委員長)

つつがなく発行できている旨、報告があった。2025年3月号まで発行済。6月号の発行準備中。

#### 8. 事務局体制の検討状況について(諸田 事務局体制検討作業部会長)

検討状況について報告がなされた。JpGU新システムではグループ管理やML管理の機能が追加される予定であり、既存の商用システムと比較して、惑星サーバに近いものになる。しかし、ホームページは別途立ち上げる必要がある点、会員種別の設定の自由度などがどの程度あるか、などは今後確認・調整が必要である。また、新システムの開発が遅れていることもあり、利用料などの調整はまだできていない。2027年度に新体制からの移行が必須となっていることから、2025年9月の秋季講演会の総会では事務局体制の方針を示す必要がある。今後、定期的に運営委員会に調整状況について報告することとなった。

#### 9. 学会賞選考委員の入れ替え(藤谷 総務専門委員長)

2025年度学会賞選考員に平野 照幸会員(委員長)、瀧川 晶会員(監事)、高木 征弘会員(以上、2024年度から留任)、木村 淳会員、長 勇一郎会員、寫生 有理会員、國友 正信会員、藪田 ひかる会員(以上、2025年度に新任。ただし藪田会員は2025年度のみ的一年任期とする)、の8名が推薦され、承認された。

#### 10. 第17期下期活動報告、第18期上期活動計画(藤谷 総務専門委員長)

活動報告書・活動計画書に基づいて報告がなされ、承認された。

#### 11. 入退会状況報告(藤谷 総務専門委員長)

2025年5月25日現在の会員数について、報告がなされた。正会員一般:523、正会員学生:110、シニア会員:49、賛助会員:3。

賛助会員3社のうち1社は退会申請をしている。今後、会長や副会長を中心に、知り合いの会社等に宣伝して賛助会員を増やす努力をする必要がある。その際、賛助会員になったときのメリットを強調。

#### 12. 第63回総会の議長・書記の推薦について(藤谷 総務専門委員長)

第63回総会の議長に丹 秀也会員(JAMSTEC)、書記に池田 あやめ会員(産総研)が推薦され、承認された。

#### 13. その他

2026年に日韓共同のワークショップを企画中。惑星科学会との共催としたい。

以上

## ◇日本惑星科学会第172回運営委員会議事録

期間:2025年6月17日(火)～6月23日(月)

議題:JpGU-AGU 2026の惑星科学 セッションの開催形態について

### 運営委員会委員:

出席(22名)

今村 剛, 竝木 則行, 大竹 真紀子

千秋 博紀, 諸田 智克, 黒澤 耕介, 三浦 均, 百瀬 宗武,

瀧川 晶, 保井 みなみ, 横田 勝一郎, 癸生川 陽子, 生駒 大洋, 野村 英子,

藤谷 渉, 田中 智, 亀田 真吾, 佐々木 貴教, 野口里奈, 鎌田 俊一, 田中 秀和,

坂谷 尚哉, 黒川 宏之

欠席(1名)

大竹 真紀子

成立条件:期間内に議決返信のあった者を委員会出席とみなす.

議決方法:上記期間内にgoogle formから回答.

---

### 議題:

2026年のJpGU-AGU合同開催における「惑星科学」セッションを英語セッションとすることについて, 承認を求める.

\*形式的には惑星科学会は共催学協会でしかないが, これまでの経緯から学会として意見を取りまとめることとする.

\*再来年以降の方針については改めて議論するものであり, 今回の決定は影響しない.

### 審議結果:

議案は原案のとおり承認された(可17・否5)

以上

## ◇賛助会員名簿

2025年9月25日までに、賛助会員として本学会にご協力下さった団体は以下の通りです。社名等を掲載し、敬意と感謝の意を表します。(五十音順)

- ・NV5 Geospatial 株式会社
- ・株式会社ノビテック

## ◇日本惑星科学会主催・共催・協賛・後援の研究会情報

(a) 場所, (b) 主催者, (c) ウェブページ/連絡先など。

転記ミス, 原稿作成後に変更等があるかもしれません。各自でご確認ください。

---

### \* 2025/9

---

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

- (a) 大阪公立大学中百舌鳥キャンパス
- (b) 日本流体力学会
- (c) 問い合わせ先: 日本流体力学会年会2025実行委員会 ([gr-eng-jsfm2025@omu.ac.jp](mailto:gr-eng-jsfm2025@omu.ac.jp))

---

### \* 2025/11

---

#### \*\* 2025年11月25日(火)-11月28日(金)第69回宇宙科学技術連合講演会

- (a) 札幌コンベンションセンター
- (b) 日本航空宇宙学会
- (c) <https://smartconf.jp/content/sstc69/>

## 編集後記

遊星人編集幹事の野津翔太です。今回の遊星人は吉田有宏さんの2024年度最優秀発表賞受賞論文のほか、Blenderによる科学的可視化入門、連載記事も火星衛星MMX 2本立て・木星氷衛星JUICE・金星あかつきなど、充実したラインナップです。引き続き奮っての記事投稿、お待ちしております。また、今号には博士の学位を取得した会員に自己紹介して頂くNew faceの記事が2本掲載されています。New faceの記事は随時募集しております。学位取得後3年以内または 学位取得後、日本惑星科学会に入会してから3年以内の会員が対象です。会員に広くアピールすることができる機会ですので、ぜひ投稿をご検討ください。

先日(2025年7月19日)、国立科学博物館の原川紘季さんにお声がけ頂き、上野本館の天文学普及講演会にて講演(「アルマ望遠鏡で探る惑星形成 -太陽系の起源に迫る」)をさせて頂きました。この天文学普及講演会とはとにかく歴史が長く、終戦翌年の1946年1月から月1ペース(毎月第3土曜日の午後)でほぼ休みなく開催され、私の講演回が917回だったそうです。天文月報1978年4月号に掲載された「開館100年を迎えた国立科学博物館」という記事によれば(web公開されたバックナンバーで確認できます)、当初は日本天文学会との共催による講演会として発足し、1977年12月時点で372回と博物館の中で最も長命な催物である、との記述がありました。その後も現在に至るまで切れ目なく続いていて、太陽系科学

や系外惑星、惑星形成などに関連した講演も多数行われてきたそうです。この80年の間に天文学そして惑星科学分野は大きく変化・発展しましたが、その間ずっと開催され続けてきた天文学普及講演会の長い歴史にも思いを馳せつつ、今後も1000回を超えて、その時代ごとの最先端の天文学・惑星科学研究に触れる事ができる場として末長く続いていく事を願っています。

今回は久々の国立科学博物館訪問だった事もあり、講演の前に常設展示コーナーを見学させて頂いたのですが、そちらで小惑星探査機「はやぶさ」初号機の再突入カプセルの実物を久々に見ることができました。こちらのカプセル、2023年7月からは国立科学博物館・上野本館にて常設展示されているようですが、帰還直後の数年間は全国の博物館・科学館などで巡回展示されていて、2011年2月には京都大学総合博物館で特別展示されていました。博物館開館以来最多とも言われる来館人数だった事もあり多くの人手が必要とされ、当時京都大学理学部の1回生だった私もアルバイトの一人として、館内展示の説明やお客さんの誘導のお手伝いをしていました。当時は職業としての研究者への意識はまだ薄く「はやぶさ」帰還の偉業にただ感動していた学生ではありましたが、それ以前からあった惑星形成分野への興味・関心がさらに高まる事に繋がった出来事であっただけに、今回改めて再突入カプセルを見て感慨深い気持ちにもなりました。(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

2025年9月25日発行

## 日本惑星科学会誌 遊・星・人 第34巻 第3号

定 価 一部 1,925円(税込・送料込)

編集人 三浦 均(日本惑星科学会編集専門委員会委員長)

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

発行所 日本惑星科学会事務局

〒604-8206

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

Tel: 075-708-5984

e-mail: staff@wakusei.jp

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

本誌に掲載された寄稿等の著作権は日本惑星科学会が所有しています。

複写される方へ

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

## 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で

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

## 2. タイトル

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

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

## 3. 要旨

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

## 4. セクション

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

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

## 5. 述語

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

## 6. 字体

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

## 7. 句読点

句読点は全角の“,”と“.”を用いる。

## 8. 図、表

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

## 図作成のガイドライン：

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

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

## 9. 脚注

脚注は“1”などの記号をつける。

## 10. 文献の引用

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

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

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

## 参考文献

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

## 11. 投稿原稿送付先

遊星人編集長 三浦均

e-mail : [chiefeditor@wakusei.jp](mailto:chiefeditor@wakusei.jp)

電子メールで送付できない場合は下記へ郵送

日本惑星科学会事務局

〒604-8206

京都市中京区新町通三条上ル町頭町112

菊三ビル2階 201号室(StartupSide Kyoto)

Tel: 075-708-5984

e-mail: [staff@wakusei.jp](mailto:staff@wakusei.jp)



**The Japanese Society for Planetary Sciences**