令和3年12月25日発行 年4回発行 第30巻4号 ISSN 0918-273X







Planetary People December 2021 vol30 no





- ●2020年度最優秀研究者賞受賞記念論文
- ●磁気降着する原始惑星系円盤での スノーライン移動
- ●67P/CG彗星の2年間:ロゼッタミッション
- ●連載:はやぶさ,あかつき,惑星ラボ

The Japanese Society for Planetary Sciences

日本惑星科学会誌 「遊・星・人」 投稿規定

日本惑星科学会

1. 投稿可能な記事

- ①学会誌に投稿できる記事内容は,
 - (a) 原著論文:惑星科学に関する研究のオリジ ナルな報告
 - (b) 解説論文:専門外の人にも分かりやすく解説し た研究成果の総説や論説
 - (c) 解説記事:広く会員の関心をひく事柄についての解説
 - (d) 報告記事:学科, 研究所, 海外機関等の紹介, 国内外の研究会の報告, New Face (博士号取 得者の自己紹介), インタビュー記事
 - (e) 情報記事:各種の情報記事
 - (f) エッセイ:上記の形式にとらわれず,惑星科 学に関する話題を論じた文章
- など,広く会員の知的好奇心をみたすもの.
- ②投稿記事の長さについてはとくに制限をもうけない.ただし,標準的には上記(a)~(c)については6~8ページ(1ページ2000字とし,タイトル,300字程度の概要,図表を含めたページ数),(d)については4~6ページ,(e),(f)は1ページとする.

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定」について原稿投稿 時に念書を提出し編集専門委員会に了承されなけ ればならない(念書は投稿原稿送り状に記載).

9. 投稿料·出版費

原則として無料.

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

日本惑星科学会誌 遊·星·人 第30巻 第4号 日 次 [2020年度最優秀研究者嘗受嘗記念論文] 低質量星まわりの太陽系外惑星探査 最新の磁気流体力学の知見に基づいた新しい原始惑星系円盤モデルの温度構造: スノーラインの移動と地球型惑星形成シナリオへの示唆 森 昇志 148 67P/チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星の2年間:彗星探査ミッション・ロゼッタ 火の鳥「はやぶさ」未来編 その25 ~はやぶさ2拡張ミッション~ 一番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦 その48 ~金星の未知紫外線吸収物質を気球搭載光学望遠鏡FUJINで狙う~ 惑星ラボからこんにちは! その5 ~茨城大学 宇宙地球化学研究室·電波天文観測研究室~ 藤谷 涉, 橋爪 光, 百瀬 宗武 -------178 JSPS Information 182

表紙デザイン:BROOKS

Contents			
Preface H. Tanaka	135		
Search for extrasolar planets around low-mass stars T. Hirano	- 136		
Temperature structure of a new protoplanetary disk model based on the latest magnetohydrodynamic findings: snowline migration and its implications for terrestrial planet formation S. Mori	148		
Two years at comet 67P/Churyumov-Gerasimenko: The comet mission Rosetta M. Kobayashi, H. Krüger	158		
 Phoenix "Hayabusa": A tale of the future (25) - Hayabusa2 extended mission - Yuri Shimaki, Hayabusa2 Extended Mission Team 	169		
Road to the first star: Venus orbiter from Japan (48) - FUJIN balloon borne telescope for optical observation of planets - M. Imai, M. Taguchi	173		
Hello from planetary labs! (5) - College of Science, Ibaraki University - W. Fujiya, K. Hashizume, M. Momose	178		
Winners of JpGU 2021 outstanding student presentation award	180		
JSPS Information	182		

巻 頭 言

「惑星科学の境界」

2,3年前に東北大学で天文学専攻長を務めた.その間に大学事務より質問のメールがきた. 「東北大学の天文学専攻と地球物理学専攻の研究の境界はどこでしょうか?受験生から質問が きていますので」とのこと.惑星科学はその境界領域にあたるが,そこのどこが境界なのかを知り たいのだそうだ.「惑星科学はオーバーラップした部分であり,両専攻や地学専攻の先生や研究 者が協力して研究しているから、どこが境界かなんて決められません」と回答したが,そこをどうに か決められないでしょうかとお願いされた.仕方がないので地球物理学専攻長と話し合って、そ のときは「探査機が到達するところまでは地球物理学,それより遠くの望遠鏡で観測する領域は 天文学」という回答をした.そのとき地球物理学専攻と地学専攻との境界をどうしたのかは知ら ない.どこの専攻の間に対しても同じような質問がなされているのだろうか.

惑星科学とは何かを決めようとすると、この境界の問題がついてくる.「惑星や小天体(と周辺 物)の探査・観測,およびそれら測定事実に基づいた惑星・小天体(と周辺物)の起源・進化の研 究」が惑星科学の研究の中核なのだろうけれど、具体的にどこまでが惑星科学の範囲かと聞か れると困る.惑星科学の発展には、天文学のみならず物質科学、(生)化学、工学などの幅広い分 野の研究者が垣根なく協力し議論することが必要で、固定した境界はむしろ邪魔じゃないかと思 える.新たな発見や進展、困難が生じると、もっと広い分野の研究者の人々の知識や助けが必要 になり、惑星科学の境界は自ずと広がっていく.私が見てきたなかでは、それこそが惑星科学分 野の発展の形であり、ワクワクする瞬間であると思う.一方、現実における日々の運営上の様々な 局面で、惑星科学とは何もので、どこまでが惑星科学なのかを決める必要性がしばしば生じてい る.話は逸れるが、惑星学会をパラレルセッションで行うとなれば、その中の細かい境界を決める ことも必要になる.

惑星科学とは何か, 垣根はどこなのかなどには構わずにフラフラと自由に探究し続けるのが, 惑 星科学会の遊星人には相応しく理想形であろう. 惑星科学会にはそんな人がいて欲しい.

田中 秀和(東北大学大学院理学研究科天文学専攻)

2020年度最優秀研究者賞受賞記念論文 低質量星まわりの太陽系外惑星探査

平野 照幸

2021年9月21日受領,査読を経て2021年10月11日受理

(要旨) 天の川銀河に最も多く存在する低質量星は太陽型星に比べて系外惑星の探査が遅れており,特 に有効温度が3500Kを下回る中期-晩期M型矮星はそのまわりの惑星の分布や特徴について不明な点 が多い.本稿では,ハビタブルゾーン付近に存在する小型惑星の探査に有利なこれら低質量星に焦点を 当て,最近の系外惑星探査の現状を報告する.前半部は,近年の衛星観測(特にK2)によるトランジット サーベイと自ら展開した地上望遠鏡を用いた追観測について紹介し,これら観測によって明らかになった 低質量星まわりのトランジット惑星の特徴を概観する.後半では,晩期M型矮星を対象とした惑星探査 のための近赤外視線速度法の開拓について詳述し,最近すばる望遠鏡に搭載された近赤外分光器IRD を用いたM型矮星まわりの惑星の観測成果を述べる.

1. はじめに

太陽系外惑星(以下 系外惑星)の存在が確認され てすでに25年以上が経過し、我々の持つ「惑星系」 の概念はこの間に劇的に変化した. 最初に見つかっ た太陽型星まわりの系外惑星である「ペガスス座51 番星b|は公転周期4日あまりの巨大ガス惑星(ホット ジュピター)であったが[1], これは「系外惑星系」と して太陽系のような姿を想像していた人たちにとっ て異形とも呼べるものであった. その後観測が進 み、ペガスス座51番星bのようなホットジュピターを 持つ惑星系は観測バイアスを補正するとそれほど多 くはないことが明らかになったが(太陽型恒星の1% 未満). 2000年代の視線速度法(惑星の重力による 恒星のふらつきをスペクトル線のドップラー偏移とし てとらえる手法)によるサーベイ観測や2009年以降 の宇宙望遠鏡を用いたトランジット法(恒星の前を惑 星が通過して恒星が減光する現象から惑星を検出 する手法)を用いた探査によって、銀河系内の太陽

1.自然科学研究機構アストロバイオロジーセンター hd17156b@gmail.com 型恒星のまわりには比較的短周期(<100日)の地球 よりも少し大きいサイズの惑星(海王星サイズの惑星 の加えて「スーパーアース」と呼ばれる半径が地球の2 倍以下程度の惑星)が最も頻繁に存在することが明 らかになった.スーパーアースのような惑星は太陽系 には存在せず,逆に太陽系のように木星サイズの巨 大惑星を外側に持つような系外惑星系もそれほど多 くないことも明らかになっている[2].すなわち,太陽 系は系外惑星系も含めた一般の「惑星系」という観 点ではむしろマイノリティに属する系と言える.

ではすでに4,500個以上見つかっている系外惑星 をもって、「惑星系の全体像」の理解が進んだかと問 われるとそうとも言い切れない.まず、系外惑星の 発見には観測バイアスがつきものであるが、近年発 見件数としてほぼ9割を占めている視線速度法、ト ランジット法はいずれも短周期かつ(質量もしくは半 径が)大きい惑星に対して感度が高いため、周期十 年以上の長周期の惑星やサイズが地球以下の惑星 については正確な分布や存在頻度がよく分かってい ない.また、惑星が発見される中心星の特徴につい ても偏りがあり、これまでに見つかった惑星の約9割



図1: これまで報告されている全トランジット惑星(左)とM型星まわりのトランジット惑星(右)の周期と半径の分布. 右のパネルでは, 2015 年以前に知られていた約50個のトランジット惑星を青点で示してある. もとのデータは, NASA Exoplanet Archive(https:// exoplanetarchive.ipac.caltech.edu)から取得.

は太陽に似た星(スペクトル型でF.G.K型の恒星) のまわりで見つかっている. これは、太陽型恒星が 一般に可視光で明るく、スペクトルも吸収線を豊富 に持つことからトランジット法・視線速度法による探 杳が比較的容易であったことに起因する。一方、我々 の銀河系内にはM型矮星と呼ばれる低温度・低質量 (一般に質量は太陽の60%以下)の恒星が最も多く (60%以上)存在する事が知られている¹. 図1 にトラ ンジット法で見つかった惑星の公転周期と半径の関 係をプロットしてある. 左のパネルが全ての恒星のま わりの分布図、右のパネルがM型矮星まわりの惑星 に限定した場合のトランジット惑星の分布である.こ のように、太陽型恒星のまわりの惑星についてはあ る程度詳細な構造が明らかになっている一方で、M 型矮星まわりの惑星については主に可視光で暗いこ とから系外惑星探査が遅れている.

M型矮星まわりの系外惑星探査は、単にこれまで あまり良くわかっていなかった低温度・低質量の恒 星のまわりでの惑星形成や進化を明らかにするのみ ならず、宇宙生物学的な観点でも重要になる.低温 度かつ半径の小さいM型矮星は、全表面から放射さ れるエネルギーが太陽型恒星よりも桁違いに小さい ため、M型矮星まわりの惑星は同じ軌道長半径でも 平衡温度が低くなる.そのため、例えば地球上にあ るような生命にとって必要不可欠な液体の水が存在 する軌道領域(ハビタブルゾーン)は中心星にずっと 近い場所になり、公転周期も短くなる.上述したよう に、トランジット法、視線速度法による系外惑星探 査では短周期の惑星ほど検出が容易なため、例えば ハビタブルゾーン内の惑星に照準を当てて惑星探査 を実施しようとすると必然的にM型矮星は有望な観 測対象となる.

筆者はこうした研究背景のもと,過去5年あまり 「低質量星(M型矮星)まわりの系外惑星の発見と特 徴付け」を推進してきた.本稿ではその取り組みの中 でも,(1)M型矮星まわりのトランジット惑星探査, (2)IRDの開発と近赤外線視線速度測定による系 外惑星探査,という2つのテーマを取り上げ,低質量 星まわりの探査の現状を紹介する.本稿で扱う低質 量星の分類と性質は表1にまとめてある.

表1: M型矮星の分類. スペクトル型のサブタイプと有効温度, 質 量の関係は[3] に基づくおおよその範囲.M_o は太陽質量を 表す. なおM型矮星の半径は, 大雑把に質量に比例する事 が知られている.

名称	サブタイプ	有効温度 (K)	質量 (M _☉)
早期 M 型星	M0-M2	3500 - 4000	0.4 - 0.6
中期 M 型星	M3–M5	3000-3500	0.15 - 0.4
晩期 M 型星	M6–M9	2400 - 3000	0.08 - 0.15

¹なお,より大質量の恒星が時間進化して低温化した結果M型矮 星と同程度の有効温度(3000-4000K)を持つ場合があるが,そ れらの恒星はM型巨星と呼んで区別される、本稿で扱う「M型 星」は全て太陽よりも小さいM型矮星である。

M型矮星まわりのトランジット 惑星探査

M型矮星まわりの惑星の中でも、トランジット惑 星は特に重要な観測ターゲットである、というのも、 M型矮星は一般に半径の小さいため。同じサイズの 惑星であっても恒星の前を惑星が通過した際に減 光率が大きくなり(=トランジットがより深く)なり、相 対的に大きな観測シグナルが生み出されるためであ る. 例えば、太陽の前を地球(半径比109:1)が通過 する様子を仮に太陽系外から観測したとすると、減 光率(=トランジットの深さ)は0.01%以下となる。一 方,半径が太陽の0.2倍の中期M型星の前を地球と 同じ半径の惑星が通過すると、 トランジットの深さ は約0.2%となり、太陽型星の場合の25倍ものシグナ ルが観測される、そのためM型矮星は小型惑星を発 見する上でも有利になり。晩期M型星(=質量・半径 が小さい)ほどその傾向は顕著である. さらに、トラ ンジット惑星に対しては、後述するように惑星大気の 「光学的厚み」の波長依存性を利用することで、トラ ンジット中の分光観測により惑星大気の組成、状態 を調査することが可能である(透過光分光法). M型 矮星まわりのトランジット惑星ではトランジットが深 いことに比例して光学的厚みの波長による違いも大 きくなるため、透過光分光法による(小型)惑星大気 の探査においても極めて有利になる。

2.1 K2 ミッションとKESPRINTコンソー シアムによる探査

M型矮星を対象としたトランジット惑星探査はこ のように良いことずくめに聞こえるが,筆者が本格的 にM型矮星まわりのトランジット惑星観測を開始し た2014年当時はM型矮星まわりに見つかっていたト ランジット惑星の数はわずか40-50個程度であっ た.これは,一般にM型矮星が可視光で暗く,2000 年代に展開されていた地上トランジットサーベイで はM型矮星を主要な観測ターゲットとしていなかっ たことによるところが大きい.その当時見つかってい たM型矮星まわりのトランジット惑星のほとんどは, ケプラー宇宙望遠鏡による最初の4年間の「プライム ミッション」で検出された惑星で,非常に暗いM型矮 星のまわりで見つかったものが多かった.

転機が訪れたのは2013年のことで、この年にケ プラー望遠鏡は姿勢制御装置の故障によってプライ ムミッションを中断した. その後NASAの技術者が 中心となって、残った姿勢制御装置と観測機器の活 用が検討され、2014年に太陽からの輻射圧による 望遠鏡の不安定化をうまく制御することで黄道面に 沿った観測領域を順次モニター観測する第二次ミッ ション「K2」としてトランジット惑星探査が再開され た、ケプラー望遠鏡によるプライムミッションでは、 はくちょう座方向の同じ領域が4年間継続的に観測 されたが、K2では太陽光が鏡に入射するのを避け るために約3ヶ月に一度観測領域を切り替えるという 戦略が取られ,新たな観測領域が順次探査された. K2は2014年から2018年9月に最終的に燃料が枯渇 するまで、4年半に渡り黄道面に沿った計20 領域を 観測した(ただし一部の観測領域はお互いに重複し ており、同じ星を複数の期間観測していたものがあ る).

K2では新たな探査領域がサーベイされたため, プライムミッションに比べて測光データが取得された 「明るい」恒星(例えばV等級で13以下)の数は飛躍 的に増加した.ただし,K2はもともと想定されてい なかったミッションであったため,当初画像データの みが公開され,精密な光度曲線の作成やトランジッ ト惑星候補の検出は世界中のコミュニティに任され ることとなった.そこで筆者は,大学院時代から交 流のあった数名の研究者らと協力して,K2で見つか



図2 すばる望遠鏡可視光高分散分光器HDSで取得されたM型 矮星のスペクトルとM型矮星の理論スペクトルの相互相関 関数.相互相関関数は天体スペクトルの平均的なスペクト ル線形状を反映する.EPIC 220187552 は2つのスペクト ル線があることから分光連星であることがわかる.

るトランジット惑星候補の追観測を目的とした国際 チームを立ち上げ, K2データの解析と地上望遠鏡を 用いた惑星候補の発見確認を行う共同研究体制を 作った. 2016年以降は欧州主導の同様のK2 追観測 チームと合流し, KESPRINTと呼ばれる名称のコ ンソーシアムとなった.

一般にトランジット惑星探査では,

- 1. 恒星の測光モニター観測による惑星候補の検出,
- 高分解能撮像・分光観測・トランジット測光追観測
 等による惑星候補の偽検出の検証と中心星の特 徴付け,

3. 視線速度観測等による独立な確認,

という3つのステップを経て正式にトランジット惑星 として認定される。KESPRINTではこれらの作業 を各専門家が分担して実施し、K2で得られたデー タの解析から独自の「惑星候補」のカタログを作成し た.惑星候補の中には、一定の割合で偽検出(false positive)が含まれており、主なものでは(a) 食連星 を含む多重連星系(3重連星の中の2つの星が食連 星となっている「階層食連星 | (HEB) が最も多い). (b) 測光のアパーチャー内に対象天体(最も明るい) とは別の食連星である背景星が紛れ込んでいるケー ス(BEB), (c) 非常に浅い食(≤ 1-2%)を起こす 食連星(EB), が代表的なトランジット惑星の偽検出 である、ケプラー/K2の測光は、一般に各天体で20 ×20平方秒を超える測光アパーチャーを採用するた め、対象天体以外に近くの別の暗い星の光が紛れ込 んでしまうことがしばしば起こる. それがたまたま食 連星だったりすると上記(a), (b) のような偽検出につ ながってしまうため、各天体ごとにこうしたシナリオ を排除する丁寧な追観測が必要となる。

筆者はK2追観測チームの中で上記ステップのう ち2. と3. の部分に主に焦点を当て,惑星候補を持 つ恒星に対してすばる望遠鏡,岡山188cm望遠鏡 等を用いた追観測を実施した.トランジット惑星候 補が偽検出かどうかの検証には,高分解能撮像と 高分散分光観測が特に有効である.前者は,惑星候 補を持つターゲット天体の近く(一般に5秒角以内) にターゲットに付随する伴星や背景星がないかどう

か確認するのに用いられる.もし近くに別の星が確 認された場合、その星が食連星だったときにK2観 測で観測された食の深さを説明できるかどうかを検 討する、一方、高分散分光観測は、視線速度測定 に用いられるほか、単一のスペクトルからでも多くの 情報を取り出すことができる。例えば、観測されたス ペクトルに対して同じスペクトル型の理論スペクトル と相互相関を計算することで、恒星スペクトル線の 「平均的な形」を取り出すことができる、図2に、例 として筆者らが惑星候補を持つと同定したM型矮 星の高分解能スペクトルから取り出された相互相関 関数を示す 相互相関関数は観測された全波長域 の平均的なスペクトル線の形状を反映する. EPIC 220621087の相互相関関数は単一の吸収線形状が 見られるのに対し、EPIC 220187552 はスペクトル 中に二つの吸収線が混在している事がわかる. 筆者 はこうした惑星候補を持つ天体の追観測と各天体ご との詳細な偽検出シナリオの検討によって. これま でK2で観測された恒星のまわりで100個以上のトラ ンジット惑星の発見確認に貢献している.

2.2 M型矮星まわりの惑星の性質

KESPRINTコンソーシアムによるK2天体の観 測の中でも、筆者は特にM型矮星まわりの惑星候補 に注目して、上記追観測を主導した.上述したよう に. M型矮星まわりのトランジット惑星の数は2014 -2015年当時非常に限られており、一般的な性質も よく分かっていなかったため、多くのM型矮星が観 測されたK2をきっかけにM型矮星まわりトランジッ ト惑星探査に取り組んだ. 筆者が主導した追観測で 確認された惑星の中には、当時数例しか見つかって いなかった中期M型星まわりのミニネプチューンK2-28b(公転周期2.3日)[4], 早期M型星まわりのハビ タブルゾーン付近に存在するスーパーアースK2-155d (公転周期40.7日)[5] などが含まれている. なおK2-155系は複数惑星系で, K2-155d を含めて少なくと も3個のトランジット惑星が同じ星を公転している事 がわかっている。

2018年頃になるとKESPRINTの活動を含むトラ ンジット惑星探査によりM型矮星まわりで確認され た惑星が増えたことで、その統計的な性質を議論す ることも可能になった、特に筆者らは、M型矮星まわ



図3: 半径ごとのトランジット惑星の存在頻度(主に太陽型恒星ま わりのトランジット惑星の分布:[7]の図を改変).

りの惑星の半径について以下のような特徴を明らか にした.

1. 半径ギャップの確認

ケプラー望遠鏡によるプライムミッションによっ て、トランジット惑星の半径分布(半径ごとの存在 頻度)は地球半径の1.5-2.0倍のところに谷(「半径 ギャップ」とも呼ばれる)が存在することが報告され ている(図3;[7]).このギャップの存在は、中心星近 くの原始惑星が大気を獲得後に何らかのポストプロ セス(中心星放射による光蒸発や惑星内部熱による 剥ぎ取りが有力)によって形成された可能性が高い とされているが[8,9],半径ギャップ自体は太陽型恒 星まわりの惑星でのみ確認されていたため中心星型 依存性などは不明であった.筆者らは、K2で確認さ れた惑星を加えてM型矮星まわりのトランジット惑 星について同様に調査したところ、図4のように太陽 型星まわりの惑星と同様に半径ギャップと思われる 惑星頻度の欠乏が見られた.

2. M型矮星の金属量と惑星半径の相関

中心星大気の金属量(ここでは鉄元素の多寡)は, 惑星が形成される原始惑星系円盤内の固体物質の 量と相関があるとされ,以前から巨大惑星の存在頻 度との強い相関があることが知られていた[10].スー パーアースなどの比較的小型の惑星についても,中 心星金属量と惑星存在頻度との相関が度々議論され ているが,文献やサンプルによって解釈は異なって おりはっきりした結論は得られていない.筆者らによ



図4: M型矮星まわりのトランジット惑星の半径のヒストグラム (2018年当時;[6]の図を改変).

るK2の追観測では、M型矮星まわりの惑星候補の 発見確認を実施する中で分光観測による中心星パラ メータの推定も行っており、得られる情報の中には 金属量も含まれている.そこで、筆者らは発見した惑 星を含めたM型星の金属量とそのまわりで見つかっ ているトランジット惑星の半径の関係を調査したと ころ、早期M型星(有効温度が3500-4000KのM型 矮星)ではあまり有意な相関は見なかったが²、中期-晩期M型星(有効温度が3500K以下のM型矮星)に ついては中心星金属量と各系で見つかっている最大 のトランジット惑星の半径に図5のような相関が見ら れた.

上記1. や2. は、いずれもM型矮星まわりの惑星 の形成進化を理解する上で貴重な情報となる. 例え ば、M型矮星は同じ軌道長半径の惑星でも太陽型 星に比べて中心星から受け取るフラックスはずっと 弱い反面,全波長での(ボロメトリックな)フラックス に対してX線や紫外線(XUV)として照射されるエ ネルギーは相対的に大きいことが知られている. 半 径ギャップがM型矮星でも存在するという事実は、 半径ギャップの形成にボロメトリックなフラックス よりもむしろ惑星大気の光蒸発により強く関係する XUVによる寄与が大きい可能性を示唆している. ま た、M型矮星のまわりでは惑星形成時に存在した原 始惑星系円盤の質量も太陽型星まわりの円盤に比 べて小さい事が知られているが、太陽型星まわりの 惑星ではそれほど顕著に見られていない惑星サイズ

²ただし3地球半径を超える惑星は全て太陽を超える金属量を持つM型矮星のまわりでのみ見られた。



図5: 有効温度 T_{eff} < 3500K の中期-晩期M型矮星の金属量と そのまわりのトランジット惑星の半径. 横軸の[Fe/H]は恒 星大気中の水素に対する鉄元素の多寡を表し、太陽と同じ 数密度比を持つ場合が[Fe/H]=0として10を底とした対数 で表される(すなわち鉄元素の数密度が太陽の10倍の場合 は[Fe/H]=1.0). 複数のトランジット惑星が見つかっている 系については、系内の最大の惑星の半径をプロットしてある ([6] の図を改変).

と中心星金属量の相関が見られたことで,中期-晩 期M型矮星のまわりではスーパーアース以上の比較 的サイズの大きい惑星の形成に鉄を始めとする固体 物質の多寡が極めて大きな役割を果たしているとい う示唆が得られた.ただし,現時点ではこうした低 質量星まわりの惑星の特徴や相関について明確な 結論を得るには時期尚早という他ない.現在進行中 のTESS³ミッションを始めとするM型矮星まわりの 惑星のさらなる発見と特徴付けによって,今後ケプ ラー/K2ミッションで得られた知見の検証を行って いく必要がある.

IRDの開発と近赤外線視線速度 測定による系外惑星探査

3.1 晩期M型矮星まわりの惑星探査

ケプラープライムミッション, K2, 最近ではTESS によるトランジット惑星探査はM型矮星まわりの惑 星の存在頻度や特徴について過去10年間で多くの 事実を明らかにしたが、一方でこれらの衛星トラン ジットサーベイはM型矮星まわりの惑星探査につい て以下のような短所がある.まず,一般に望遠鏡口 径が小さく、観測は主に可視光ブロードバンドで行 われるため発見できる惑星は中期M型星(~M5)ま でで晩期M型星まわりの惑星検出感度は低い、次 に、トランジットが起こる確率は恒星半径と惑星の 軌道長半径の比 (R_*/a) にほぼ比例するため、軌道 長半径の大きくなる長周期の惑星の検出効率は低く なる.(特に晩期)M型矮星は恒星半径も小さいため トランジット法による長周期惑星の発見が難しい. さらに、K2やTESSによるサーベイでは1観測領域 あたりの観測期間が短いため(TESS は1セクターあ たり約1ヶ月間のみ). 30日を超えるような長周期の 惑星については著しく感度が悪化する.

したがって、特に晩期M型矮星(M5~)まわりの 惑星探査を実施する上では口径の小さい衛星による トランジット探査よりも口径の大きい地上望遠鏡を 用いた探査のほうが向いている場合が多く、実際に トランジット法では地上望遠鏡を用いた晩期M型矮 星のサーベイ観測によりこれまでで最も低温な恒星 まわりのトランジット惑星系であるTRAPPIST-1系 が見つかっている[11, 12]. また, 地上観測では大口 径望遠鏡による視線速度測定による系外惑星探査 も晩期M型矮星まわりで惑星を発見する上で有望で ある. 視線速度法もトランジット法と同様に短周期 かつ質量の大きい惑星に対して検出感度が高いが、 トランジット確率(~ R*/a)のような著しい観測バ イアスはないため、比較的長周期の惑星に対しても 検出感度が高いとされる.惑星の軌道運動による恒 星の視線速度変化の振幅 Kは

$$K = 212908.30 \left(\frac{M_{\star}/M_{\odot}}{P_{\rm orb}/{\rm day}}\right)^{\frac{1}{3}} \frac{q}{(1+q)^{\frac{2}{3}}} \frac{\sin i_o}{\sqrt{1-e^2}} \ ({\rm m \ s^{-1}}) \ (1)$$

と表される. ここで, M_{\star} は中心星質量, $P_{\rm orb}$ は惑星 公転周期, q は惑星と中心星の質量比 (= $M_{\rm p}/M_{\star}$), i_o は観測者の視線方向と軌道公転軸のなす角度, eは軌道離心率である. すなわち, K は $M_{\star}^{-2/3}$ にほ ぼ比例するため, 同じ質量と周期を持つ惑星であっ ても質量の小さいM型矮星の方が相対的に大きな 観測シグナルが生み出される. 1節で述べたように,

³2018年にNASAが打ち上げたトランジット系外惑星探査専用 の宇宙望遠鏡で,合計24°×96°の視野角をカバーする超高視野 観測により明るい恒星まわりのトランジット惑星探査を実施して いる.最初の3年間の観測で,2021年10月の時点ですでに4511個 の惑星候補を検出している.



図6: ハワイ大学ヒロキャンパスの実験室で安定性試験を実施し ていた当時のIRD 分光器の写真. 光学系は真空チェンバー (灰色の箱)の中に全て格納されている.

M型矮星は低温で半径も小さいことでハビタブル ゾーンやスノーラインが中心星近くに存在するため, 視線速度法による探査はこうした領域に存在する惑 星の頻度や特徴を探る上で大変有利となる.

3.2 IRD の概要

視線速度法による晩期M型矮星まわりの系外惑 星探査を行う上で、近赤外線での観測が有効であ る、これは、一般に中期-晩期M型矮星は可視光 で暗い一方,波長800nmを超える近赤外線では明 るく、高精度視線速度測定に必要なS/N比を達成 しやすいからである. 日本では2012年頃からM型 矮星を対象とした近赤外視線速度観測を実施する 計画が検討され[13],筆者も開発に参加したIRD (InfraRed Doppler instrument) と呼ばれる近 赤外高分散分光器が2017年にすばる望遠鏡に搭載 された[14]. IRDは、波長950nmから1730nm(Y; J:H バンド)の非常に広い波長域を一度でカバーす る近赤外分光器で、約70.000の高波長分解能を達 成する、図6にIRD分光器の写真を示すが、IRD は世界の他の視線速度測定専用分光器(例えば、 ESO/HARPSやCAHA3.5m/CARMENES)と 同様に検出器を含む分光器全体をチェンバーの中 に入れて高い精度で分光器の温度を制御すること で.温度変化に起因するスペクトルの変化(ドリフト) を最小化し,高精度な視線速度測定を実現するとい うコンセプトが採用されている.

ー般に系外惑星探査に必要な高確度・高精度な 視線速度測定(1-2 m s⁻¹)を実現するには,可視光・ 近赤外線を問わず,得られたスペクトルの「正確な」 波長を知ることが不可欠である.通常,高分散分光 観測(波長分解能50,000以上)ではカメラの検出器 上でのスペクトルの1ピクセルがカバーする速度分散 は1 km s⁻¹ 程度であるため,上記1-2 m s⁻¹ を達 成するには1 ピクセルの「1000分の1」程度のスペクト ル線の「ずれ」を検出する必要がある.ところが,通 常の分光器による観測では分光器内の温度変化に よって1 晩の観測中でも0.1-1 ピクセル程度のスペ クトル位置のドリフトが起こる⁴ため,正確な視線速 度の計算には天体スペクトルの波長を同時に知る波 長の「ものさし」が必要となる.

IRDはチェンバー内で分光器の温度を安定化させてはいるものの、それだけでは1-2 m s⁻¹という 視線速度精度を達成させるには不十分であるため、 天体の光と一緒に波長較正用のレーザー光源(レー ザー周波数コムと呼ばれる)を分光器内に入射させ る.レーザー周波数コムは無数の輝線が周波数空間 で等間隔に並んだスペクトルを生成するため、これ を天体の光と同時に分光器に入射させることがで きる.厳密には、レーザー周波数コムのスペクトルの 輝線を波長ごとに詳しく解析し、輝線の形や位置の 変化を追跡することで天体スペクトルの吸収線の変 化のうち装置由来の成分を補正する.これにより分 光器として理論上1 m s⁻¹以下の視線速度精度を達 成する.

3.3 近赤外視線速度測定の開拓

上述したように、IRDは広い波長域をカバーする 安定化された分光器とレーザー周波数コムにより原 理的には1 m s⁻¹ という近赤外線でのかつてない視 線速度精度を目指して製作されたが、実際に近赤外 線で視線速度を高精度に導出するには可視光での 視線速度測定にはないいくつかの課題をクリアする 必要があった.この中には、赤外線検出器(IRDは HAWAII2RGと呼ばれる検出器を採用)の特性が 可視光分光器に用いられる通常のCCDとは異なる 点や天体と波長較正用のファイバーのモーダルノイ ズが近赤外線では顕著なことなどが含まれるが、最 大の問題は可視光での視線速度測定では無視でき

⁴主に温度変化による光学素子の形状の変化,分光器内の空気 の屈折率の変化のために起こる。



図7: IRD波長域における、ハワイ島マウナケア山頂での地球大 気透過スペクトル(LBLRTM[15] による理論モデル)の例. 上のパネルは大気水分量・観測エアマスが小さく、大気吸収 が特に少ない場合の透過率で、下のパネルは標準的な観測 条件における大気の透過率をプロットしてある.

ていた地球大気由来の水,酸素等のスペクトル線が 大量に近赤外スペクトルでは入ってしまうことであっ た.

図7 に、IRDのカバーするスペクトル波長域での 地球大気の透過光スペクトル(理論モデル)を示す. IRDで視線速度を測定する波長域ほぼ全域に渡っ て地球大気の吸収線が入っているため、観測される 天体スペクトルから恒星の視線速度を測定するには どの波長帯でもこの地球大気透過光スペクトルの影 響を考慮する必要がある.さらに、地球大気の透過 光スペクトルは観測天体の天体高度(エアマス)や観 測時の大気中の水分量等によって常に変化するため (上下のパネルはその違いの一例),画一的な透過率 の補正ではなく各スペクトルごとに最適化された補 正をする必要がある.

筆者は、こうした分光器の温度不安定性によるス ペクトルのドリフトと地球大気吸収の影響をそれぞ れ考慮した上で天体スペクトルから正確な視線速度 を測定する方法論についていくつか検討した.レー ザー周波数コムから導出したスペクトルの絶対ドリ フトを各スペクトルの小区間ごとに補正する手法など 様々な手法を試したが、最終的に最も高い視線速度 精度が達成された「スペクトルの順方向モデリング」 を採用することに決めた.この手法は、天体の(地球 大気による吸収を受ける前の)本来のスペクトル(以 下、テンプレートと呼ぶ)を観測スペクトルから再構 築し、このテンプレートを用いて分光器で取得され るスペクトルを地球大気吸収等を含めてモデル化す



図8: 順方向モデリングを用いたフィットによりGJ436のある観測 スペクトル(青点)から視線速度が導出される様子. 各パネル は、上から地球大気の透過光スペクトルT(A;λ),地球大気 吸収を含まない恒星テンプレートスペクトルS(λ),観測スペ クトル(青点)と最適モデル(赤の実線),観測スペクトルと最 適モデルの残差をそれぞれ表す.

ることで天体の視線速度を精密に導出する. すなわ ち, 観測されるスペクトル $f_{obs}(\lambda)$ は

$$F_{\rm obs}(\lambda) = k(\lambda)$$

$$\times \left[S\left(\lambda \sqrt{\frac{1 + v_\star/c}{1 - v_\star/c}}\right) T\left(A; \lambda \sqrt{\frac{1 + v_{\rm tel}/c}{1 - v_{\rm tel}/c}}\right) \right] * {\rm IP}, \quad (2)$$

とモデル化され、この中に含まれる天体の視線速度 v_* を導出する[16]. ここで、 $k(\lambda)$ はスペクトルの連 続光成分を表す多項式で、* は畳み込み積分を表す 演算子である. $S(\lambda)$ は天体スペクトルのテンプレート で、観測された複数のスペクトルを使って天体由来の スペクトル線と地球大気吸収由来のスペクトル線を 分離し、さらに分光器由来のスペクトル線の広がりを 取り除くことで生成する. $T(A;\lambda)$ は理論モデルによ る地球大気透過光スペクトルで、大気の状態(エアマ ス、水分量)を表すパラメータAが含まれる(Aは天 体の視線速度 v_* と同時に最適化される). IPは分光 器由来のスペクトル線の広がり方を表す関数(点拡が り関数)で、同時に取得されるレーザー周波数コムの スペクトルから求められる⁵. 図8 に、IRDで取得さ れたスペクトルを順方向モデリングによりフィットす

⁵レーザー周波数コムスペクトルに対して「最小二乗逆畳み込み」 と呼ばれるアルゴリズムを適用することで各瞬間ごとの点拡がり 関数が導出される.



図9: IRDで取得されたM型矮星GJ436の視線速度変化(上の パネル).惑星の位相は、トランジット中心時刻(観測者、惑 星、中心星がこの順に一直線に並ぶ時間)が0となるように 定義される.下のパネルは、観測された視線速度の最適モデ ル(赤線)からの残差を表す.

る様子を示す.

順方向モデリングは、正確な地球大気のモデルス ペクトルと観測時の点拡がり関数が既知の場合最も 高精度な天体視線速度測定法となると期待される。 しかし、近赤外域の地球大気透過光スペクトルにつ いては理論モデルと観測されるスペクトルが一致し ない場合がしばしばあり、またレーザー周波数コム のスペクトルから観測時の点拡がり関数をどの程度 正確に取り出せるか定かではない. そこで筆者らは, IRDのエンジニアリング観測で取得したいくつかの M型矮星のスペクトルを実際に解析し、上記順方向 モデリングを適用することで視線速度を導出した. 図9 はその結果の一例で、周期約2.6日の海王星型 惑星を持つGI436の視線速度変化がプロットされて いる(惑星の公転周期で折り畳んである).得られた 視線速度振幅(K = 16-17 ms⁻¹)は文献値とほぼ 一致し, 上記順方向モデリング法による視線速度解 析パイプラインの性能が確認された. 達成された1ス ペクトルあたりの視線速度精度(内部誤差)はほとん どが2.0-2.5 ms⁻¹ であったが. これは近赤外線を 利用する同様の高分散分光器⁶と比較してもこれま でに達成された世界最高水準の視線速度測定精度 である.



図10: 軌道傾斜角λの定義. ロシター効果の観測により, 星の自 転軸と惑星公転軸が天球面上でなす角度を制限できる. [18] から転載.

3.4 IRDを用いたM型矮星周りの小型惑星 の特徴付け

IRDを用いた近赤外域での高精度視線速度測定 法が確立されたことで、IRDチームは2019年に晩期 M型矮星を対象とした大規模な視線速度惑星サー ベイ(すばる戦略枠観測:SSP)を開始した.最初の2 年間のサーベイで最近ようやく初期的な成果が出始 めつつあるが、そうしたサーベイ観測の紹介は本稿 では割愛し、筆者らがこれまで実施したIRDを用い た別の観測成果について簡単にご紹介したい.

IRDは近赤外の広範囲の波長域を一度にカバー するため、視線速度法による惑星の発見以外にも 様々な系外惑星のサイエンスに活用することが可能 である、例えば、トランジット中の分光観測による系 外惑星大気の探査やロシター効果を用いた系外惑 星の軌道傾斜角の測定が代表的な高分散分光観測 による系外惑星の特徴付けである. 前者は、透過光 分光法と呼ばれ、トランジット中に中心星の一部の 光が惑星大気をかすめてくる際に波長ごとに大気の 光学的厚みが異なることを利用して惑星大気の組 成や状態を制限する手法である.特にIRDの波長域 (950-1730 nm)には、ヘリウム、水、酸素、ヒドロ キシラジカル. 一酸化炭素等の原子・分子のラインが 多数存在し、いずれも惑星形成時の周辺環境や惑 星大気の時間進化(散逸)等を観測的に探る上で重 要な要素となる. IRD による観測ですでにそうした大 気組成はいくつかの系外惑星で調査されている[17]. 詳細についてはこれら参考文献を参照されたい.

トランジット中の分光観測では、恒星視線速度の 特徴的な変化(トランジット中に自転している恒星面

⁶例えば、CAHA3.5m/CARMENES NIR チャンネル、 CFHT3.6m/SPIRou、HET10m/HPF など.



図11: TRAPPIST-1 系の3つの惑星に対するロシター効果の 観測(ハワイ時間2018年8月30日).上のパネルはIRD に よる視線速度測定の結果を表し、この日は惑星e, f, b が この順番に中心星をトランジットした.下のパネルは米 国マクドナルド天文台の1m 望遠鏡で同時観測された TRAPPIST-1 の光度曲線(惑星e とf のトランジットのみ 観測).[19]の図を改変.

の一部が隠されることによる吸収線プロファイルの 変化に由来し、ロシター効果と呼ばれる[18])から恒 星の自転軸と惑星の軌道公転軸のなす角度(図10:こ こでは軌道傾斜角と呼ぶ)の制限も可能である.系 外惑星の軌道傾斜角は、本来惑星形成時の円盤と 中心星の角運動量の向きや大きさを反映すると考え られているが、惑星同士の重力散乱など、形成後の 系の軌道進化によって大きく変化することも知られ ている.実際、ロシター効果による軌道傾斜角測定 によって、多くの系外惑星系で惑星の軌道面と中心 星の赤道面が揃っていないことが確認されている.

これまでのロシター効果の観測では、そのほとん どが太陽型恒星まわりの巨大ガス惑星を対象として いる.一方、M型矮星まわりの惑星に対して軌道傾 斜角が制限された例は非常に限られており、2021年 の時点で4,5例ほどしかない.これは、M型矮星が一 般に可視光で暗い天体であるのと若い星を除いて自 転速度が小さい $(v \sin i \lesssim 1 \text{ km s}^{-1})$ 事が主な原因 となっている.M型矮星は惑星の形成現場となる原 始惑星系円盤の質量が小さくスノーラインが中心星 に近い、など太陽型恒星とは大きく異なるいくつか の特徴を持っており,惑星の形成進化の観点で観測 的に未解明の点が多い.M型星まわりの惑星の軌道 傾斜角の分布を太陽型星まわりの惑星の分布と比 較することにより異なる中心星環境の惑星の形成進 化に対する知見を深める事が可能となる.

筆者らは、IRDが近赤外で高いS/N比のスペク トルを取得できるという特性を生かして、いくつかの M型矮星まわりの惑星に対してトランジット分光観 測による軌道傾斜角の測定を試みた.これまでに、 TRAPPIST-1. けんびきょう座AU星, K2-25系な どのM型矮星まわりの惑星に対してIRDによるロシ ター効果の測定を行い.各惑星の軌道傾斜角λを 精密に制限した(いずれもλは0°と一致した).特に TRAPPIST-1 系については、7つの地球型トラン ジット惑星のうち3つ(惑星b. e. f;この内. e とf はハ ビタブルゾーン内に存在すると考えられている)が1 晩にトランジットを起こすという偶然あった機会を捉 え、3種類のトランジットを順番に観測することでこ れまで報告がなかった地球型惑星に対する軌道傾 斜角の測定を実施した(図11).結果として、「トラン ジット前半に正方向。後半に負方向 | という視線速 度変化が観測され、詳細なモデル化によって3つの 惑星の公転軸と中心星自転軸は揃っている可能性 が高いことが明らかになった($\lambda = 1^{\circ} \pm 28^{\circ}$)[19]. こ の観測によってTRAPPIST-1系では、形成時に円 盤と中心星が同じ角運動量の方向を共有していた可 能性が高いことが確認された⁷. TRAPPIST-1 は 有効温度が2500-2600Kの極めて低温度の恒星で あるため、可視光では非常に暗く、口径8 - 10m の 望遠鏡に搭載された可視光分光器でも観測は困難 である. IRDはこうした低温度の恒星まわりの惑星 を特徴付ける上で極めてユニークな装置といえる.

4. まとめと今後の展望

本稿では,低質量星(M型矮星)まわりの系外矮星 探査の現状について紹介した.筆者がM型矮星を 対象とした惑星探査を開始した2014年頃は,確認さ れていたM型矮星まわりのトランジット惑星の数は

⁷複数のトランジット惑星を持つ系の場合惑星同士はほほ同じ軌 道面を持つが、過去のロシター効果の観測からこの軌道面が必ず しも中心星の赤道面と一致しないことが明らかになっている。

40- 50個程度で、しかもそのほとんどは2013-2014 年にケプラー望遠鏡プライムミッションによって確認 された暗いM型矮星まわりの惑星であった。その後 筆者らの研究も含めたK2の成果や最近ではTESS で見つかった惑星候補の追観測によってM型矮星ま わりのトランジット惑星の数は急激に増加し、現在 ではその数は200個余りとなっている。惑星数が増 加したことにより、本稿で紹介したような惑星半径と 中心星金属量との相関など興味深い特徴が徐々に 明らかになっては来ているが、より多くのサンプルを 用いた正確な評価や惑星形成論を背景とした相関 の解釈については今後の研究に委ねたい。

トランジット法による大規模な探査に加えて、最 近では近赤外線視線速度法によるM型矮星まわり の系外惑星探査も世界的に流行している.すばる望 遠鏡にも、2017年に晩期M型矮星を対象とした視線 速度探査のための近赤外分光器IRDが搭載され、 筆者もシミュレーションや実験による性能評価や解 析パイプラインの整備においてプロジェクトに貢献 した.IRDを用いた晩期M型矮星まわりの惑星サー ベイ(SSP)は現在も進行中で、近い将来IRDによる 最初の惑星の発見が報告される予定である.この他 にも、近赤外高分散分光観測は可視光観測にはな かった「新しい目」を提供しており、トランジット惑星 の軌道や大気の特徴付けを始め、ユニークな観測成 果が今後も続々と出てくることが期待される.

最初の発見から25年余りの探査によって系外 惑星については非常に多くの事が明らかになり、系 外惑星探査は「発見から詳細な特徴付けの時代に 入った」と見る動きもある、実際、間もなく(2021年 12月)に打ち上げ予定のJames Webb宇宙望遠鏡 (IWST)やハワイ島マウナケアに建設予定の30メー トル望遠鏡(TMT)等による探査によって、2020年 代は系外惑星大気の観測で数多くのブレークスルー がもたらされることが確定的となっている.しかし本 稿で見てきたように、惑星の分布や特徴が詳細に調 査されているのは系外惑星の中でも一部の集団(主 に主系列太陽型星まわりの短周期惑星)のみであ り、低質量星や若い恒星まわりの惑星、長周期惑星 など、惑星系の全体像については未知の部分の方が 大きい. 今後は, 惑星 「発見」と軌道・大気等の 「特徴 付け」を系外惑星観測の両輪として相補的に進めて

いくことが求められる⁸.

系外惑星の詳細な特徴付けにおいては、今後「太 陽系内惑星」についての知見を活用する機会が増加 することが予想され、系内惑星・衛星の観測や探査 で培われてきた手法が系外惑星観測で応用されるこ とで新たなブレークスルーがもたらされる可能性が ある.同時に、系内天体の諸問題を考察する上で系 外惑星の統計的性質をステレオタイプとして活用す る機会も出てくるのではないかと期待される.系外 惑星の詳細な分布・特徴が明らかになるにつれて、改 めて「惑星系」としての太陽系の位置付け(普遍性や 特異性)もはっきりしてくると考えられ、2020年代は こうした惑星系の全体像の理解が進む極めて重要 な時期になるだろう.

謝辞

本研究はJSPS科研費19K14783の助成を受けた ものです.

本稿は、2020年度最優秀研究者賞受賞記念論文 として執筆しました。受賞にあたって、推薦書を執筆 して頂いた田村元秀氏, 選考委員の皆様に感謝致し ます、本稿で紹介した研究のうち、K2ミッションを 利用した低質量星まわりのトランジット惑星探査に ついては、KESPRINTコンソーシアムの研究活動 に基づくものです。KESPRINTの新旧メンバー(特 に共同で立ち上げに関わったRoberto Sanchis-Oieda 氏)と、追観測に協力して頂いた共同研究者 の皆様に御礼申し上げます.また、本稿後半で紹介 したIRD分光器の開発と観測、データ解析を一緒 に行ったIRDチームのメンバーに厚く御礼申し上げ ます. 本稿では全てを紹介しきれませんでしたが. 筆 者の研究のほとんどは共同研究者の方に支えられて います.大学院の指導教官であった須藤靖氏,研究 員時代の受け入れ教官であった佐藤文衛氏を始め. これまでお世話になった共同研究者の皆様にこの場 を借りて感謝申し上げます. 最後に. 本稿を注意深く 読み有益なコメントを返して下さった査読者の方に 御礼申し上げます.

⁸日本でもTMT による将来観測の検討に加えて、2020年代後半 の衛星観測によるトランジット系外惑星探査(ExoJASMINE) が計画されている。

参考文献

- Mayor, M. and Queloz, D., 1995, Nature 378, 355.
- [2] Rowan, D. et al., 2016, ApJ 817, 104.
- [3] Kraus, A. L. and Hillenbrand, L. A., 2007, AJ 134, 2340.
- [4] Hirano, T. et al., 2016, ApJ 820, 41.
- [5] Hirano, T. et al., 2018a, AJ 155, 124.
- [6] Hirano, T. et al., 2018b, AJ 155, 127.
- [7] Fulton, B. J. et al., 2017, AJ 154, 109.
- [8] Owen, J. E. and Wu, Y., 2013, ApJ 775, 105.
- [9] Ginzburg, S. et al., 2018, MNRAS 476, 759.
- [10] Johnson, J. A. et al., 2010, PASP 122, 905.
- [11] Gillon, M. et al., 2016, Nature 533, 221.
- [12] Gillon, M. et al., 2017, Nature 542, 456.
- [13] Tamura, M. et al., 2012, Proc. SPIE 8446, 84461T.
- [14] Kotani, T. et al., 2018, Proc. SPIE 10702, 1070211.
- [15] Clough, S. A. et al., 2005, JQSRT 91, 233.
- [16] Hirano, T. et al., 2020a, PASJ 72, 93.
- [17] Nugroho, S. K. et al., 2021, ApJL 910, L9.
- [18] 平野照幸, 2014, 遊星人 23, 133.
- [19] Hirano, T. et al., 2020b, ApJL 890, L27.

最新の磁気流体力学の知見に基づいた新しい 原始惑星系円盤モデルの温度構造:スノーライ ンの移動と地球型惑星形成シナリオへの示唆

森昇志

2021年10月11日受領,査読を経て2021年10月29日受理

(要旨)太陽系の地球型惑星は水に枯渇した惑星であるため、原始太陽系円盤の水スノーラインの内側 で形成したと考えられる.そのためスノーラインの軌道進化を知ることで、地球型惑星の形成過程を制 約できる.これまで円盤の古典的なモデルとして乱流粘性によって降着が駆動される円盤モデルが受け 入れられてきた.しかし最新の磁気流体力学の理解によれば乱流は抑制され、むしろ磁気的な円盤風に よって円盤の角運動量が引き抜かれ、層流的に降着することが分かってきた.本稿では磁場によって層 流的に降着するこの新しい円盤モデルを紹介し、著者らが構築した新しい温度モデルを紹介する.また スノーラインの軌道進化を計算することで、地球型惑星の形成シナリオに対する制約についても議論する.

1. はじめに

地球型惑星とは主に岩石から構成される惑星であ り、特に太陽系の地球型惑星はその低い含水率で 特徴付けられる。例えば地球は、その表面を海で覆 われているものの、内部に含まれていると推定され る含水量は多くても質量の1%程度である[1].その 他の太陽系地球型惑星の含水率についても、議論 の余地はあるが、せいぜい1%であることが予想され ている[2,3].それに対して太陽系の遠方由来の天 体(例えば彗星)の含水率は10%以上である[4,5]. このような地球型惑星の含水率の違いがどのように して生まれたのかを知ることで、地球型惑星の形成 過程に迫ることができる.

この含水率の違いの原因を知る上で,それらの天 体が形成した領域の温度が重要な要因である.惑星 は原始惑星系円盤の中で,固体微粒子がどうにかし てたくさん集まることで形成する.原始惑星系円盤 中のダストの成分は,スノーラインとよばれる水の昇 華・凝縮境界を境に大きく異なる.スノーラインより

1.東北大学大学院理学研究科天文学専攻 mori.s@astr.tohoku.ac.jp 外側のダストは主に氷と岩石からなる.一方,スノー ラインより内側では水は気体として存在するために, ダストの主成分は岩石となる.したがって,含水率の 低い地球型惑星はスノーライン内側で形成したのだ ろうと考えられている.

スノーラインの位置は原始惑星系円盤の温度構 造から決まるが、円盤の温度構造は円盤の力学にも 依存する.本稿では磁気流体力学に基づいた新しい 円盤モデルを紹介し、その円盤モデルにおいてどの ような温度構造になるか、またどのようにスノーライ ンが移動するかを紹介する.さらにその円盤モデル における地球型惑星の形成過程を議論する.

2. スノーラインの移動

スノーラインの位置を正しく知るためには, 原始 惑星系円盤の温度構造を正しく知る必要がある. 水 の昇華凝縮は温度に対し非常に敏感であり, 温度が おおよそ170K程度となる位置がスノーラインとなる. 円盤が光学的に薄い極限では, 中心星の光が円盤 の赤道面を照らし, 円盤の温度分布は入射するエネ ルギーと放射するエネルギーの釣合いとなる. 中心



図1: 粘性降着円盤におけるスノーラインの位置の質量降着率依 存性. 質量降着率を時間軸と読み替えればスノーラインの位 置の時間進化を示す. 点線は1auの位置を表しており, スノー ラインが1auに到達するのは~3×10^{.9} 太陽質量/年であるこ とが分かる. 計算パラメーターの中心星質量は太陽質量, 中 心星光度は太陽光度, 乱流粘性パラメーターa=0.01, オパ シティは5 cm²/gとした. [10]の図6を再現した.

星の光度を現在の太陽光度だとすると、その温度分 布は林モデルで知られる温度分布になり、スノーラ インは中心星から2.7auに位置する[6].

しかし残念ながら,惑星形成段階の温度分布はこ れよりはるかに複雑である.原始惑星系円盤は多く のダストを含み,特に地球型惑星が形成するような 円盤内側の領域では基本的に中心星からの照射に 対して光学的に厚い.中心星からの光は円盤表面に しか到達せず,加熱された円盤表面の再放射によっ て円盤赤道面が温められる.星からの光は円盤表面 に鋭角に入射するため,単位面積あたりの受け取る エネルギーはその入射角の分だけ減少する[7].その ため,光学的に厚い円盤において照射加熱で決まる 温度は,光学的に薄い円盤よりも低くなる.

一方で、そのような光学的に厚い領域では照射加 熱に加えて「降着加熱」[8]も温度構造を決定する上 で重要である.降着加熱は、円盤ガスが中心星に向 かって落下する際に、解放される重力ポテンシャル をエネルギー源として円盤を加熱する加熱機構であ る.ここで古典的なモデルである乱流的な円盤を考 える[9].乱流によって粘性が実効的に大きくなるた め、その乱流粘性によって動径方向に円盤の角運 動量輸送が起き、円盤が降着する.それと同時に円 盤降着によって解放された重力エネルギーは乱流に よって散逸し,熱へと変換される.このような乱流粘 性によっておきる降着加熱を特に粘性加熱と呼ぶ. 粘性加熱の発熱率は密度に比例することから,解放 された熱は赤道面付近に集中する.赤道面付近では 光学的に厚く輻射冷却に時間がかかるため,熱が円 盤に蓄積することで円盤を効率良く暖めることがで きる.これをブランケット効果と呼ぶ.円盤の内側領 域(典型的には≤10au)では,重力ポテンシャルが深 いためにエネルギー発生率が大きくなるだけでなく, 光学的厚みも大きいため,円盤温度は降着加熱に よって決定されると考えられている.

これらの加熱機構を考慮し円盤の温度構造を計 算すればスノーラインの位置を求めることができる. ここで重要な点は、スノーラインは円盤の温度構造 の時間進化と共に移動するということである[10]. 降着率は時間と共に減少するため,降着加熱の加熱 率も時間と共に減少する。図1に古典的な円盤モデ ルにおけるスノーラインの軌道進化を示す. 質量降 着率は円盤形成から円盤散逸するまでに減少してい くため、横軸は時間軸と読みかえることもできる、例 えば、質量降着率がおよそ3×10⁹太陽質量/年の時 が星形成後1000万年後に対応する。質量降着率が 減少すると加熱率が減少し、円盤温度が低下し、ス ノーラインが円盤内側へと移動する.今回の場合, 質量降着率が10-10太陽質量/年未満になってくると、 スノーラインの位置は照射加熱によって支配される ようになる、円盤寿命はおおよそ1000万年なので、 地球型惑星が形成する間, 1au付近の円盤温度は降 着加熱によって支配されていると考えられる.

このようにスノーラインは円盤進化と共に外側か ら内側へと大きく移動する.このことは地球型惑星 の形成過程に制約を与える.例えば地球が現在の 軌道(lau)で形成したとすると、スノーラインがlau に到達した後に形成した惑星は、現在の地球よりも はるかに多量の水を獲得してしまうだろう.つまりス ノーラインが惑星形成領域を通過する時間が分かる ことで、惑星形成時間に制約を与えることができる. より一般的には、惑星が形成後に移動する可能性を 考慮し、スノーラインの軌道進化を知ることで「地球 型惑星がいつ・どこで形成したか」を制約することが できると言える.

3. 磁気的に降着する原始惑星系円盤

前節で円盤の温度構造は乱流による降着加熱が 重要であることを述べた.しかし最新の磁気流体力 学の理解によれば,円盤が乱流状態であるかどうか は疑わしい.ここでは現状の降着機構の理解を整理 し,層流的に降着する新しい円盤モデルについて説 明する.

長らく原始惑星系円盤では、磁気回転不安定[11] と呼ばれる磁場の不安定性により生じる磁気的な 乱流によって、降着が駆動されていると考えられてき た.磁気回転不安定は、原始惑星系円盤のような作 動回転する円盤中でガスと磁場が十分相互作用する 場合に引き起こる.作動回転によって磁場が引き延 ばされると円盤回転方向の磁場が増幅する.十分磁 場が伸びると磁気リコネクションと呼ばれる「磁場の 繋ぎかえ」が生じ、それまで溜めていた磁気エネル ギーを運動エネルギーへと変換し乱流を駆動する. そのため磁気回転不安定はたとえ初期の磁場が弱 くても、磁場を増幅し激しい磁気乱流を生成する. その乱流粘性的なガスの角運動量輸送は円盤年齢 を説明しうる、原始惑星系円盤の降着機構として期 待されてきた.

しかし最近では、原始惑星系円盤の大部分の領 域で、磁気回転不安定由来の乱流は起きない、あ るいは抑制されることが指摘されている[12,13]. そ の鍵を握るのが、原始惑星系円盤の電離度である。 元々、中性子星やブラックホール周りの降着円盤の 降着機構として乱流が期待されており[9]、もっとも らしい乱流源として磁気回転不安定が提案された. 磁気回転不安定乱流は原始惑星系円盤の降着機構 としても期待され、その後粘性降着円盤モデルを仮 定した惑星形成の研究が盛んに行われた。一方でそ れと並行して. 原始惑星系円盤で磁気回転不安定 が降着機構としてどれほど重要であるかは長らく議 論されていた。原始惑星系円盤がその他の系と違う 点は、低温かつ高密度のため電離度が非常に低いと いう点である、電離度が十分低いと、磁場とガスの 間の相互作用が弱まり、磁力線とガスが独立に運動 するようになる、そのような磁場とガスが分離するこ とによって生じる効果を,非理想磁気流体力学効果

(非理想MHD効果)と呼ぶ. 非理想MHD効果には, オーム散逸,ホール効果,両極性拡散の3種類があ る. そのうちオーム散逸と両極性拡散は磁場を拡散 するため,磁気回転不安定を安定化し,磁気乱流も また抑制する. つまり原始惑星系円盤の電離度構造 が円盤構造および円盤進化を決める上で重要である.

原始惑星系円盤の電離度構造を計算し磁気回転 不安定な領域を示すと、磁気回転不安定は円盤最 内縁の高温領域か、円盤外側の低密度な領域での み発達することが分かる[14].円盤最内縁では、円 盤ガスが高温なためにアルカリ金属の熱電離が起こ り電離度が上昇する.また円盤外側では、銀河宇宙 線が円盤赤道面まで到達できるので電離度が高い. それ以外の大部分の領域では、銀河宇宙線や中心 星からのX線などは円盤赤道面まで到達しないため に、電離度がかなり低くなる.このことは解析的にも 示されていたが、最近では磁気流体力学シミュレー ションの発展などにより、数値実験的にも原始惑星 系円盤の大部分の領域で非理想MHD効果による 磁気回転不安定の抑制が確認されている[12,13].

原始惑星系円盤で乱流が発達しないとしたら、ど のようにして円盤の角運動量を抜き、円盤を散逸さ せるかが問題になってくる.現段階でもっともらしい 機構は、円盤を貫く大局的な磁場による角運動量の 抜取りである[15,16].まず円盤は、分子雲コアが重



図2:磁気円盤風が駆動する円盤降着機構の模式図.この場合, 磁力線が円盤の回転に引きずられることで,円盤表面では 動径方向に正の電流が流れる.一方で円盤上層では、遠方 に向かうにつれて磁力線の巻きつきは弱くなるため、動径方 向に負の電流が流れる.これらの電流がなすローレンツカ は、円盤表面では回転方向と逆向きに働き、円盤上層では 回転方向の方向に働く.その結果として,円盤表面では角運 動量を失ったガスが降着し、円盤上層では円盤風として角 運動量を得たガスが外側に移動する.[17]のモデルを参照. 力的に収縮することで形成する.その際,分子雲コ アにある磁場は円盤へと引きずられるため,円盤は 大局的な磁場に貫かれる.電離している円盤表面で は磁場は円盤の回転によって引きずられ,回転方向 の磁場が増幅する.磁場は円盤表面のガスの角運動 量を抜き,磁力線を介してより上層のガスに角運動 量を受け渡す.角運動量を得たガスは円盤の外側へ と移動する.この機構によって,円盤表面のガスは中 心に向かって降着する一方で,円盤からはガスが流 出する(より具体的な力学に関しては図2を参照).こ のようなガス流出過程を磁気円盤風と呼ぶ.円盤内 部の電離度が小さくとも,磁気円盤風は十分円盤降 着を駆動できうるため,原始惑星系円盤の降着機構 として期待されている.

以上の最近の理解をまとめると,特に内側領域で は磁気流体力学的な角運動量輸送によって層流的 に降着する.本稿ではそのような円盤モデルを「(層 流)磁気降着円盤モデル」と呼び,磁気乱流によって 粘性的に降着が駆動される「(乱流)粘性降着円盤モ デル」と区別することにする.次節では,この層流磁 気降着円盤モデルの温度構造について述べる.

4. 磁気降着円盤における新たな 温度モデルとスノーラインの移動

4.1 磁気流体力学シミュレーションから 明らかになった鉛直加熱分布

前節で円盤の降着機構は乱流粘性ではなく,磁 気円盤風による角運動量の引き抜きがもっともらし いということを述べた.次なる疑問は、「層流磁気降 着円盤モデルのもとで惑星形成がどのように進むの か」ということである.従来は古典的な乱流粘性降 着円盤モデルをもとに多くの惑星形成に関する理論 が構築されてきた.そのような粘性降着円盤に基づ いた理論は新たに見直す必要がある.著者らは地球 型惑星の形成過程において非常に重要な降着加熱 過程に着目し、磁気降着円盤モデルにおける温度構 造を調べた[18].本節ではその研究を紹介する.

粘性降着円盤と磁気降着円盤では,降着加熱過 程が大きく異なる.降着加熱を考慮する上で重要な ことは,どのように降着時に発生したエネルギーを

図3: Mori et al. 2019 [18]の局所磁気流体力学シミュレーショ ンの概要. x方向は動径方向, yは円盤回転方向, zは鉛直 方向. 緑色の線は磁力線, 青色の矢印はガス速度, オレンジ 色のもやは電流の強度を表す. 赤道面付近はデッドゾーン になっているが, そのすぐ上に電流層が存在する. さらに上 層では円盤風が吹く.

散逸するかという点である.磁気降着円盤では基本 的に乱流がない状態,つまり層流であるため,エネ ルギー散逸過程として乱流散逸は期待できない.そ のためエネルギー散逸は,大局的な磁場構造がつく る電流のジュール散逸によって起きる.ジュール散 逸(加熱)は,有限な抵抗中を電流が流れるとエネル ギーが散逸(発熱)するという過程である.低電離度 であるほど電気抵抗が強いため,磁場分布と電離度 分布を整合的に解くことで正しい加熱分布を得るこ とができる.

磁気降着円盤における温度構造を調べるために, Mori et al. 2019 [18]では非理想MHD効果を全 て考慮した磁気流体力学シミュレーションを行った. シミュレーションでは,円盤のある半径近傍の局所 的な領域を計算領域にとる.計算初期に鉛直磁場を 与え,ガス流と共に磁場が発展し,ある程度時間が 経つと飽和状態に到達する.図3に1auにおける代 表的な計算結果の概要を示す.赤道面付近にはデッ ドゾーンと呼ばれる,電離度が低すぎるために磁気 拡散が強い領域がある.そのすぐ上層に電流層があ り,ここでエネルギー散逸が起きる.また電流層付 近で磁場が増幅されることで,磁気圧の勾配を駆動 力とする円盤風が吹く.

より詳細な鉛直分布を調べるために、エネルギー散逸 分布とそれをもとにした温度分布を計算した.図4は(a) エネルギー散逸率分布と(b)そのときの温度分布である. ここで分かったことは、ジュール散逸は円盤表層で起き るということである. 円盤表層では光学的に薄いために 冷却が速い、そのため、ブランケット効果(光学的に厚い 領域で加熱した際に起きる)は効かず、赤道面付近で加 熱が起きる粘性降着円盤とくらべて、円盤ガスの温度は ずっと低くなる. 実際にここではおおよそ2スケールハイト より上層では光学的に薄く、光学的に薄い領域で加熱が 起きている.得られたジュール加熱率分布に基づいて降 着加熱を計算すると、その理由により、磁気降着円盤の 赤道面の温度が粘性降着円盤モデルに比べて低くなる. また加熱分布に加え、円盤風が吹くことでガス降着時に 発生したエネルギーを流出させるという効果もある. これ らの結果として、得られた赤道面温度が照射加熱で決ま る赤道面温度より低くなる。このことは、1au付近でも照

図4: 1auの局所磁気流体力学シミュレーションから得られた物 理量の鉛直分布.(a)磁気拡散によるエネルギー散逸率の 鉛直分布.高さが3スケールハイトの付近にエネルギー散逸 が集中する.単位は赤道面ガス圧と角速度の積.(b)エネル ギー散逸率分布をもとに計算した平衡温度の鉛直分布.エ ネルギー散逸率分布に基づいて計算した降着加熱による温 度(青実線),降着率を固定して乱流粘性によるエネルギー 散逸を仮定したときの降着加熱による温度(赤波線),照射 加熱のみを考慮した場合の温度(灰色点線).粘性降着円盤 モデルの赤道面温度が310Kなのに対し,磁気降着円盤モ デルの赤道面温度は90Kとなる.[18]の図を改変.

射加熱が加熱機構として重要になりうるということ を示唆している.

上層で加熱が起きる理由は、電離度の鉛直分布 にある、円盤の電離度は、中性ガスの電離と荷電粒 子の再結合の釣合いできまる. 原始惑星系円盤の電 離源は、銀河宇宙線、中心星からのX線・紫外線、短 寿命放射性核種から出る放射線などが主である. 銀 河宇宙線、X線、紫外線は円盤の外から来るが、ガ ス面密度の高い円盤の内側領域などではそれらの 電離源は円盤赤道面に到達しない。 そのため円盤赤 道面では主に短寿命放射性核種によって電離する が、円盤上層の1/10程度の電離率しかない[19]、そ のため円盤赤道面に近づくにつれて電離率は低くな る、一方で円盤赤道面に近づくほど、荷電粒子の吸 着・再結合を起こすダストが豊富に存在するため、再 結合率は高くなる、そのような事情から円盤ガスの 電離度分布は、円盤表面では電離度が高く、赤道面 に近づくにつれて電離度が下がるという分布になる. 電離度が低い領域では、上述の非理想MHD効果 が働き、磁場が拡散される、そのような領域では、電 流は維持できず(非常に短い時間で電流が拡散され る).結果としてジュール加熱は非常に弱くなる。一方 で円盤表層に近づくと磁場とガスが共に運動するこ とができるようになる.特に、磁場が拡散する時間 スケールと磁場がガス運動によって増幅する時間ス ケールが同程度になる高度で、ジュール加熱が最大 になる. その高度よりさらに上層では、電離度が高 いために磁気拡散が弱く. 磁場のエネルギー散逸も また遅い、そのため、ちょうどよく電離している高度 で加熱が集中するという加熱分布をとるのである.

4.2 層流磁気降着円盤の温度モデル

以上の磁気流体力学シミュレーションの計算から,磁気降着円盤では層流的になり,降着加熱は非常に非効率であることが分かった.図5にこの結果に基づいた,予想される円盤の温度構造の模式図を示す.円盤は高温な乱流領域と低温の層流領域の二つに分けられる.

・中心星からごく近傍の高温領域(T≥1000K)では、熱電離を起こす、熱電離したガスは磁場と十分相互作用するため、磁気回転不安定が発達でき

図5:予想される原始惑星系円盤の温度分布の模式図.中心星 近傍にある熱電離によって維持される磁気乱流領域と、全 体的に層流なデッドゾーンの2つに区別できる.[20]の図1 を改変.

る.磁気乱流が発達すると、乱流的にエネルギー 散逸が起き,熱が光学的に厚い円盤内部で解放さ れるため,降着加熱によって効率的に円盤赤道面 が温まる.

ひとたび熱電離が効かなくなると、乱流が発生しないために円盤は層流的になる。この領域では降着加熱は非常に非効率であり、中心星の照射加熱が温度を支配する可能性がある。

円盤内側領域の全体的な描像を得ることができ たが,次にスノーラインの軌道進化を定量的に明ら かにするため,円盤の温度分布をモデル化する.こ こでは[20]を紹介する.

円盤の加熱高度z_{heat}に加熱率が集中するとき,降 着加熱によって決まる赤道面温度T_{acc}は次のように 書くことができる[17]:

$$T_{\rm acc} = \left[\left(\frac{3 \,\dot{M} \Omega^2}{32 \,\pi \sigma_{\rm SB}} \right) \left(\tau_{\rm heat} + \frac{1}{\sqrt{3}} \right) \right]^{1/4} \,. \tag{1}$$

ここで \dot{M} は質量降着率, Ω はケプラー角速度, σ_{SB} は ステファンボルツマン定数, τ_{heat} は加熱高度 z_{heat} にお けるダスト放射の光学的厚み

$$\tau_{\rm heat} = \int_{z_{\rm heat}}^{\infty} \rho \kappa dz , \qquad (2)$$

κはダストのロスランド平均オパシティである. ここで は簡単のためオパシティは一定とし, 密度は静水圧 平衡が成り立つという仮定を置く. そうすると,加熱 高度さえ分かれば解析的に赤道面の温度を計算す ることができる.具体的には,

$$\tau_{\text{heat}} = \frac{\kappa \Sigma}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{z_{\text{heat}}}{\sqrt{2}H}\right)$$
 (3)

と表される. ここでΣはガス面密度, Hはガススケー ルハイト.

Mori et al. 2021[20]ではMori et al. 2019[18] で得られたシミュレーション結果に基づいて加熱高 度を経験的にモデル化した.シミュレーションの計 算結果は,磁気拡散がある程度弱まったところで電 流が集中するという傾向を示す.そのため,磁気拡 散とガス流による磁場増幅の時間スケールの比であ る,エルサッサー数が加熱高度を予言するのに使え るという予測が立つ.シミュレーション結果によれ ば,飽和状態では両極性拡散が円盤の磁気拡散を 支配する.両極性拡散のエルサッサー数は,

$$Am = \frac{v_A^2}{\eta_{AD}\Omega}$$
(4)

と書ける. ここで, υ_Aはアルフベン速度, η_{AD}は両極 性拡散の磁気拡散係数である。Am≪1のとき、両極 性拡散の磁気拡散が強く,円盤の差動回転による 磁場増幅を抑制する. したがってAm ~ 1の高度で 加熱が集中すると期待できる。アルフベン速度は磁 場に比例するが、基本的にn_{AD}は磁場の二乗に比例 するため、Amは磁場によらず電離度のみの関数と なる. 図6に、 横軸に Am_{crit}=0.3 における 柱密度(加 熱高度より上層のガス面密度)縦軸に加熱高度にお ける柱密度をとり、[18]で行った様々なパラメーター セットの計算結果をプロットした. シンボルの違いは 磁場の向き(初期に与える磁場が円盤回転軸と平行 か反平行)を表し、非理想MHD効果のホール効果 が磁場の向きに依存して磁場構造を変える. 加熱高 度は磁場の向きに依存するということが分かる.し かしここでより重要なことは、ほとんどの場合で加熱 高度の柱密度はAm_{crit}での柱密度を下回るというこ とである、したがって、加熱高度をAmeritから与える ことにより降着加熱で決まる温度の上限値を与える ことができる. このように降着加熱による温度を過 大評価した場合にも照射加熱の方が強ければ、降 着加熱はもはや重要ではないと言える.

図7に電離度構造から得られる両極性拡散のエル

図6:ある基準となるAmの高度より上層の柱密度に対する,加熱高度より上層の柱密度.破線,点破線,点線はそれぞれ,両者の比が1,0.1,0.01になるときを示す.丸のシンボルは磁場と円盤回転軸が平行な場合,三角は反平行の場合に対応する.[20]の図12を改変.

サッサー数分布Amの一例を示す. この場合, 両極 性拡散は赤道面付近では非常に低い値をとり, ガス スケールハイトの3倍程度の高度でAm ~ 1となる. 本モデルでは上記の磁気流体力学シミュレーション の結果に基づき, AmがAm_{crit}(=0.3)となる高度で 電流が流れ, 重力ポテンシャルが熱に変換されると 仮定する. 得た加熱高度をもとに式(3)および式(1)を 計算すれば, 降着加熱によって決まる赤道面温度を 得ることができる.

上記の磁気降着円盤の温度モデルを用いて,動 径方向の温度分布の時間進化を計算する.降着率 の時間進化は,降着率と星年齢を推定した円盤観測 データから得られる経験的解析式 [21]を使う.今回 用いる降着率と星年齢の関係を図8に示す.定常降 着円盤を仮定し,降着率に応じた円盤ガス面密度を 与える.また降着加熱だけでなく星からの照射加熱 も考える.照射加熱の温度分布は[7]に従う.中心星 の光度は[22]の計算結果を用いる.図9に今回用い る光度進化を示す.

ある時刻・ある半径における赤道面温度を決定す る計算の流れは以下の通りである.まず初期にある 温度を仮定し,その温度における鉛直方向の電離度 分布・エルサッサー数分布Amを計算する.Am分布 から加熱高度を予想し,その高度における光学的厚

図7: 両極性拡散のエルサッサー数Amの鉛直分布の一例. Am_{crit}=0.3 の高度に電流層が位置すると仮定する. [20]の 図4を改変.

みを式(3)から計算する.得られた光学的厚みを用い て降着加熱によって決まる赤道面温度を式(1)から 計算する.さらに照射加熱を考慮し¹,赤道面の温度 を計算する.以上の計算を,新たに得られた赤道面 温度に対して十分収束するまで繰り返し行う.最終 的な温度分布は,初期に仮定する温度分布に依存し ない.

4.3 スノーラインの移動

星形成後10万年から1000万年まで動径方向の温 度分布を計算した.図10に温度分布の一例を示す. 粘性降着円盤モデルでは1auで温度が600Kに達し ているのに対し,磁気降着円盤モデルでは170Kと なっており,温度に大きな違いがあることが分かる. また粘性降着円盤モデルでは乱流による粘性加熱 が支配的なのに対し,磁気降着円盤モデルでは照 射加熱が1au以遠の温度を決めていることが分か る.これは星形成後60万年という若い円盤の温度分 布であるが,この時刻以降も基本的にはこのような 温度構造となる.

氷の昇華温度が170Kであると仮定して,各時刻 における赤道面上のスノーラインの位置を特定し, スノーラインの位置の時間進化を計算した(図11).

¹照射加熱で決まる温度を T_{irr} ,降着加熱で決まる温度を T_{acc} とすると、両者を考慮した赤道面の温度は $(T_{irr}^4+T_{acc}^4)^{14}$ と書ける.

図8: 円盤の降着率と星年齢の経験式[18]. 影は, 降着率の観測 的な分散に由来する不定性(×10^{±0.5})を表す. [20]の図2を 改変.

図10:赤道面温度の動径方向分布の一例.時刻は磁気降着円盤 のスノーラインが1auに到達した時刻(60万年)にとった.赤 の実線が粘性降着円盤の場合,青の実線が磁気降着円 盤の場合.破線は粘性降着円盤において粘性加熱のみを 考慮した場合,点破線は磁気降着円盤において降着加熱 のみを考慮した場合,点線は照射加熱のみを考慮した場合 の温度分布.[20]の図5を改変.

ここから磁気降着円盤の場合,円盤進化の早期段 階であっても,スノーラインが1au付近に存在すると いうことが分かった.例えば,粘性降着円盤モデル のスノーラインが1auを通過するのに1000万年かか

図9:中心星の光度の時間進化 [19]. [20]の図3を改変.

図11: スノーラインの時間進化.青の実線は磁気降着円盤モデルの場合、赤の点線は粘性降着円盤モデルの場合、破線は照射加熱のみを考慮した場合.影は、降着率の観測的な分散に由来する不定性[11]を示す.矢印はスノーラインが1auを通過するときの星年齢を示しており、磁気降着円盤モデルでは60万年、粘性降着円盤モデルでは1000万年.ダストモデルにおいてダストガス比は0.01、ダスト粒子サイズは0.1 μmを仮定した.また両モデルとも粘性パラメーターaが0.01程度になるようにした.降着率の時間進化は[18]、中心星光度の時間進化は[19]を使用した.[20]の図6を改変.

るのに対し,磁気降着円盤モデルは60万年と非常に 早い段階で,円盤の内側へと移動する.また,両者 でスノーラインの移動を駆動する機構が違うことも

図12:磁気降着円盤におけるスノーラインの移動を考慮した、地球型惑星の形成シナリオ.

分かる.粘性降着円盤モデルの場合,スノーライン の進化は粘性加熱に駆動されているのに対し,磁気 降着円盤モデルの場合は中心星光度の進化によっ てスノーラインの進化が駆動されている.

磁気降着円盤モデルでは粘性降着円盤よりも早 期にスノーラインが地球型惑星の軌道に達すること が分かった.しかしまだ不定性は存在する.今回の 計算ではダスト存在度はガス質量の1%で粒子サイ ズは0.1 µmと仮定したが、ダストが成長し粒子サイ ズが大きくなることで電離度・オパシティに影響を与 える.定性的には粒子サイズが大きくなることで、電 離度は減少し加熱高度が低下する一方で、オパシ ティも減少し光学的に薄くなる高度も減少する.その ため両者の影響は打ち消し合う可能性もあるが、定 量的には電離度とオパシティの両方に整合的なダス トモデルを使って検証する必要がある.これについ ては東京工業大学の近藤克氏らと研究中であり、現 在論文投稿の準備中である.

また今回は考慮していない流体不安定による乱流 が生じ,その乱流によりエネルギー散逸する可能性 もある.詳細は省略するが磁場による不安定性以外 にも,円盤内のエントロピー勾配を駆動力にした流 体不安定性などが存在し,それらが発達すると乱流 を生み出す.したがって,それらの流体不安定が発 達するかどうか,発達するとしたら乱流強度はどのく らいであるかが重要になってくる.現段階ではいず れも結論はでていない.これらの流体不安定は最近, 勢力的に研究されており今後の発展に期待したい.

5. 地球型惑星形成シナリオ

前節で得たスノーラインが正しいと仮定した際 に、どのような地球型惑星の形成シナリオがありう るか考えてみる.ここでは地球を例に話を進める.こ こで紹介するシナリオの概要を図12に示す.

スノーラインは星形成後わずか60万年で1auに到 達する. そこでまずは地球が現在の軌道1auで形成 したと仮定する. スノーラインが1auを通過すると, それ以降1auはスノーラインの外側となるため,固体 粒子は氷を含むようになる. そのため後に地球とな る大部分の質量は,60万年までに微惑星・原始惑星 程度まで成長している必要がある.言い方を変える と,原始地球は星形成後60万年という若い原始惑 星系円盤で形成し終えていたと言える.したがって 地球型惑星の形成時間を大幅に制約することがで きる.

一方でこのシナリオには、スノーライン通過後も原 始地球の含水率を低く保たなければならないという 難題が存在する. [23]によれば、スノーラインの外側 では十分成長した氷ペブル(数センチから数メートル のサイズで、岩石だけでなく氷も多く含む)が円盤の 外側から断続的に移流してくる. そうした氷ペブルを 原始地球が捕獲してしまうことで、地球の含水率は 上昇し容易に現在の含水率を超えてしまう. 原始地 球サイズの天体が一旦水を捕獲すると、それを完璧 に取り除くのはなかなか難しい.

この問題の解決策の一つは、氷ペブルの落下を地

球軌道の外側でせきとめることである[24]. 例えば 木星が形成すると,木星は軌道付近のガスを散乱し 円盤に溝をつくる.氷ペブルは溝の外縁にせきとめ られるため,スノーラインが1auを通過した後も原始 地球は低含水率を保つことができる.この場合,若 い原始惑星系円盤で既に木星が溝を作る程成長し ていなければいけない.したがって,いつ木星が円 盤に溝をつくったのかが地球の進化過程において重 要になりうるということを意味する.

また他の解決策として、地球の形成領域が現在の 地球軌道ではなかったという可能性も考えられる. 地球が現在の地球軌道よりも太陽近傍で形成する 場合には、スノーラインが形成領域に到達する時間 を遅らせられるので、原始地球の形成時間の制約を 伸ばすことができる.しかしその場合の問題は、は たして原始地球程度の天体を~0.1auから1auまで 運ぶことができるかという点である.原始惑星天体 の外側移動機構としてはいくつか可能性[25,26]は あるがまだまだ不明な点が多く、今後の発展に期待 したい.

6. まとめ

本稿では、最近の磁気流体力学シミュレーション の結果に基づいて、大局的な磁場に降着が駆動さ れる層流的な原始惑星系円盤モデルと、その円盤モ デルの温度モデル、スノーラインの時間進化、地球 型惑星の形成シナリオの可能性を紹介した。磁気流 体力学に基づくと、降着加熱は従来のモデルよりも 非常に非効率であることが分かった.また本研究は 地球型惑星の形成過程において、電離度分布や磁 気流体力学、中心星の光度進化、円盤の流体不安 定、木星形成など様々な要因が重要であることを意 味する.今後も原始惑星系円盤の物理素過程に基 づいて円盤構造を詳細に理解していき、正しく惑星 形成過程を解明していきたい.

謝辞

本稿を執筆する機会を与えて下さった,田中秀和 氏に感謝いたします.また本稿で紹介した研究の共 同研究者である奥住聡氏,Xuening Bai氏,國友 正信氏,近藤克氏らに感謝いたします.本稿を査読 していただいた藤井悠里氏にも感謝申し上げます.

参考文献

- [1] Nomura, R. et al., 2014, Science 343, 522.
- [2] Elkins-Tanton, L. T. et al., 2007, Journal of Geophysical Research 112, E04S06.
- [3] Kurokawa, H. et al., 2014, Earth and Planetary Science Letters 394, 179.
- [4] A'Hearn, M. F. et al., 2011, Science 332, 1396.
- [5] Rotundi, A. et al., 2015, Science 347, aaa3905.
- [6] Hayashi, C., 1981, Progress of Theoretical Physics Supplement 70, 35.
- [7] Chiang, E. I. and Goldreich, P., 1997, ApJ 490, 368.
- [8] Lynden-Bell, D. and Pringle, J. E., 1974, MN-RAS 168, 603.
- [9] Shakura, N. I. and Sunyaev, R. A., 1973, A&A 24, 337.
- [10] Oka, A. et al., 2011, ApJ 738, 141.
- [11] Balbus, S. A. and Hawley, J. F., 1991, ApJ 376, 214.
- [12] Bai, X.-N. and Stone, J. M., 2013, ApJ 769, 76.
- [13] Gressel, O. et al., 2015, ApJ 801, 84.
- [14] Simon, J. B. et al., 2015, MNRAS 454, 1117.
- [15] Uchida, Y. and Shibata, K., 1985, PASJ 37, 515.
- [16] Bai, X.-N. et al., 2016, ApJ 818, 152.
- [17] Shibata, K. and Uchida, Y., 1986, PASJ 38, 631.
- [18] Mori, S. et al., 2019, ApJ 872, 98.; https://doi. org/10.3847/1538-4357/ab0022
- [19] Umebayashi, T. and Nakano, T., 2009, ApJ 690, 69.
- [20] Mori, S. et al., 2021, ApJ 916, 72.; https://doi. org/10.3847/1538-4357/ac06a9
- [21] Hartmann, L. et al., 2016, ARA&A 54, 135.
- [22] Feiden, G. A., 2016, A&A 593, A99.
- [23] Sato, T. et al., 2016, A&A 589, A15.
- [24] Morbidelli, A. et al., 2016, Icarus 267, 368.
- [25] Ogihara, M. et al., 2015, A&A 579, A65.
- [26] Guilera, O. M. et al., 2019, MNRAS 486, 5690.

67P/チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星での2年間: 彗星探査機ロゼッタ

小林 正規¹, ハラルド・クリューガー²

本記事は、「Physik in Unserer Zeit」というドイツの一般向けの雑誌に掲載された記事(Die Kometenmission Rosetta, 6/2016 (47)274-281)に、今回、著者のHarald Krüger博士が加筆・修正 したものを和訳したものである。ロゼッタは、軌道上から彗星を詳細に調査した初めての探査機である。また、ロゼッタ探査機に搭載され現地で切り離された着陸探査機「フィラエ」は、このような小さな天体に 見事な状況で着陸した.ロゼッタ・ミッションは、彗星や初期太陽系についてさまざまな新しい知見をもた らした.

1. はじめに

彗星は1億キロにも及ぶ尾を持ち、太陽系内で最も 大きな構造物の一つである、しかし、その実際の天 体である彗星核は、直径数キロメートルの非常に小 さなものである. 現在の知見では, 約45億6000万年 前、太陽系がガスとダストの星間雲から形成された ときに、彗星は惑星とほぼ同時に形成されたと考え られている、そして形成されたのはおそらく、太陽か ら遠く離れた、水(H₂O)や一酸化炭素(CO), 二酸化 炭素(CO₂)などの揮発性物質が凝縮するような寒冷 な領域だと考えられている. 彗星核の主成分は、こ れらの物質に加えて鉱物のダストや有機物が混ざっ たものだ.彗星は形成されて以来,主に太陽系の最 外縁の惑星,海王星の軌道を越えた温度の低い領 域. つまり. カイパーベルトやオールト雲にあった. そ のような場所ではほとんど変化がないため、彗星は 「太陽系初期 |から来た「使者 |だと考えられている」

彗星の核が楕円軌道で我々の太陽に近づくと,太 陽からの輻射と共にその天体の表面温度が上昇す

 図1:2015年1月31日、首の部分に指向性のガスジェットを持つ約 4kmの彗星67P(Photo: ESA/Rosetta/NAVCAM).

る. すると, 揮発性の成分が昇華し, 球形の大気で あるコマが形成される. ガスは太陽からの紫外線 によってイオン化し, 生成されたプラズマは太陽風に よってコマから離れた場所に運ばれるようになる. そ の結果, 反太陽方向に向かうイオンテイルが形成さ れ, その長さは1億キロ以上にもなる. また, ダスト 粒子は昇華したガスによって核からコマの中に放出

 ^{1.}千葉工業大学惑星探査研究センター
 2.マックスプランク太陽系研究所
 kobavashi.masanori@it-chiba.ac.jp

図2: ロゼッタとフィラエの67Pとのイメージモンタージュ(グラフィック: ESA/ATG medialab; ESA/Rosetta/NavCam).

表1: ロゼッタミッションの主要な数値.

サイズ	$2.8 \times 2.1 \times 2.0 \text{ m}^3$
太陽電池の全長	32 m
打ち上げ時の総質量	2900 kg
燃料質量	1720 kg
科学機器の質量	165 kg
フィラエ着陸機の質量	100 kg
3.4AUでの太陽電池発電力	850 W
5.3AUでの太陽電池発電力	395 W
駆動方式	24 nozzles, 10 N thrust
燃料	ヒドラジン
メーカー	EADS Astrium, Friedrichshafen ¹
打ち上げ	2004年3月2日
彗星への到着	2014年8月6日
ミッション終了日	2016年9月30日

¹ 現在のエアバス・ディフェンス・アンド・スペース社

表2:チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星(67p).

発見年		1969		
サイズ 大きい方の胴体		$4.1 \times 3.3 \times 1.8 \text{ km}^3$		
	小さい方の胴体	$2.6 \times 2.3 \times 1.8 \text{ km}^3$		
自転速度		approx. 12.4 hours		
太陽公転周期		6.45 years		
近日点距離		1.24 AU		
遠日点距離		5.68 AU		
黄道面に対する傾斜角		7°		
最近の近日点通過(2016年時点)		2015年8月13日		
現在の太陽周回軌道		1959年以降		

される. それらのダスト粒子は太陽の輻射圧を受け, 湾曲したダストテイルを形成する.

新しく作られる天体望遠鏡はさらに大きくなり,性 能は向上し続けているが,地球から彗星の核を調査 できる範囲は非常に限られている.遠くにあるときは 点状に見え,太陽の近くではコマに埋もれて核は見 えない.すなわち,宇宙探査機でしかその詳細を調 べることができないのだ.

欧州宇宙機関(ESA)の彗星探査機「ロゼッタ (Rosetta)」は(表1),世界で初めて彗星の核を周 回する軌道での運用を成功させた探査機であり,着 陸機「フィラエ(Philae)」は初めて彗星の核に着陸し た探査機である.ロゼッタ探査機は2年以上にわた り,太陽の周りを回るチュリュモフ・ゲラシメンコ彗星 (67P/Churyumov-Gerasimenko,以下,67P)に 同行し,多くの新しい知見を提供してきた.2016年9 月30日,ロゼッタ探査機は67P彗星の核に着地し, 大成功を収めたミッションは2回目の着陸ですべての 幕を閉じた.

2. ロゼッタの長い旅

ロゼッタは2004年に打ち上げられ、目標の彗星で ある67Pに到達するまでに10年間を要した. ミッショ ンのためにはまず、67Pの軌道に探査機を限りなく 近づけなければならなかった. まだ核が活動してい ない日心距離にある時にフィラエを着陸させる必要 があり、67Pに同行する軌道へ投入は太陽系外部領 域、3AU(1AUは太陽-地球間の平均距離1億4,956 万kmに相当)の位置で行われた.67Pと会合する 太陽系外部領域に送り出すために、地球と火星で 何度もスイングバイ・マヌーバ(訳注:惑星のような大 きな重力を持つ天体の重力を利用した軌道変更運 用)を行って探査機を加速させる必要があった. そ のようなロゼッタ探査機のクルーズ軌道は、それま であまり調査されていなかった小惑星シュテインス (Steins)とルテティア(Lutetia)の近くを通過するよ うに設計された」

ロゼッタ探査機システムの電気系統は太陽電池の みで駆動されているため、太陽と探査機の距離が遠 くなるにつれ,利用可能な電力は減少し続けた.そ して2012年,ロゼッタ探査機は太陽から最も離れた 遠日点(約5.7AU)に到達した.この時,ロゼッタ探査 機は巨大な惑星である木星よりも太陽から遠ざかっ ていた.電力不足のため,探査機は2年半以上にわ たりメインのコンピュータシステムなどを除いてすべ ての機器が電源オフの状態で「冬眠状態」に入った. 2014年1月にようやくロゼッタ探査機システムは再起 動し,搭載されている科学機器や着陸機フィラエを 含む探査機システムの電気系統に関わる機能を再 度確認した後,2014年5月に67Pの彗星核の探査運 用を開始した.

2014年7月初めには、遠くの恒星のような点ではな く、67P彗星の核の形状がわかる画像が初めて地球 に届いて関係者を興奮させたが、ロゼッタ探査機は さらに67P彗星に近づいていった.そして関係者を さらに驚かせたのは、67Pが予想以上に不規則な形 をしていることだった(図1).長さが約4キロメートル しかない核は、真ん中に深いくびれがあるダンベル 型の「二重結合天体」で、非常に多様な地形に富んで いた(表2).表面は非常に急勾配の斜面や山が続 き、起伏が多くて凸凹だらけだった.そのうえ、数十 メートルから数百メートルもある丸い形をした高台や 丸い穴が多数存在した.

ロゼッタ探査機は2014年8月6日にようやく67Pと ほぼ同じ軌道位置に到達し,まず高度約100kmのと ころまで近づいた.2014年10月までに,核をさらに 近い距離から調べたり,フィラエの着陸に適した場 所を見つけたりするために,軌道を徐々に10kmまで 下げた.しばしば探査機は67Pに対する軌道がピラ ミッド型や三角形になるように航行した.そのために 必要な軌道修正には,彗星の重力が弱いために,ほ とんど燃料を使わずに済んだ.彗星表面からの脱出 速度は約1.5m/sで,自転車の速度よりも小さかった のだ.

三ヶ月以内にフィラエを着陸させるのに適した場 所を見つけなければならなかったが,不規則な地形 を持つ二重結合天体の上に見つけるのは難しいこと がわかった.フィラエが転倒するのを防ぐためには, 平らな場所に降りる必要があった.また,着陸地点 の日照時間が67Pの自転周期(6.2時間)の半分以上 でなければならなかった.フィラエの運用は数カ月

¹ロゼッタの惑星間クルージング軌道の動画(www.youtube. com/watch?v=5yoYZERieuQ). 2021年11月の時点で視聴可.

図3:フィラエの着陸時に高度40mから撮影された最初の着陸 地 Agilkia(Photo: ESA/Rosetta/ Philae/ROLIS/ DLR).

間行われるように計画されていたので,着陸後も十 分な時間の日照を確保して,科学搭載機器を稼働さ せるのに十分な電力を太陽電池が供給できるにする 必要があったのだ.さらに,彗星ガスによる圧力で 着陸地点の不確定要素が大きくなるため,着陸地点 で彗星活動が活発でありすぎない場所である必要 があった.最終的に,すべての基準を考慮して,着陸 地点は結合している二つの胴体のうち小さい方の胴体 の上に選ばれた.

3. フィラエの着陸

2014年11月12日,フィラエは,高度20kmの地点 から,あらかじめ圧縮されたバネを用いた分離機構 によって,ロゼッタ探査機から放出され,67P彗星の 核に着陸した(図2).フィラエは自前の推進力を持っ ておらず,噴出する彗星ガスによってわずかに減速 されただけの自由落下で彗星表面に降りていった. フィラエの降下軌道はロゼッタ探査機の軌道と分離 操作のみで制御するしかなく,フィラエ着陸機は回 転する67P彗星核表面のターゲットエリアに,局所的 に決まっている脱出速度以下で到達するようにしな ければならなかった.さらに,着陸時にフィラエが転 倒しないよう,横方向(彗星表面に平行な方向)の速 度は可能な限り小さくする必要があった.

図4a:最終着地点アビドスでフィラエのパノラマカメラが撮影し た2枚の画像のモザイク、左上には探査機の足が見え、左 下には彗星物質に接触しているアンテナが見える、見えて いる壁は約1メートル先にある、地平線はほぼ水平で、フィ ラエは窪みの中で約90°回転している、壁は地球の硬い岩 石のように見えるが、ミネラル分を多く含み、有機物を加え た水氷である(Photo: ESA/Rosetta/Philae/CIVA).

7時間かけた自由落下の間は地球からの介入が不 可能だったが、フィラエは予定より1分弱早く、予測さ れたタッチダウンポイントからわずか約110メートル の地点に、0.95m/sの速度で彗星表面に到達した. これはロゼッタとフィラエの運用を担当したESA、 フランスの宇宙機関CNES、ドイツ航空宇宙センター (DLR)のフライトチームにとって、ほぼねらい通りの 着陸であり、大成功であった.

地表に降下する間,いくつかの機器が計測結果 を記録し,画像を撮影した.その写真には,平坦で わずかに起伏のある地形が写っていた.そこには, 10cm以下から数mの大きさの小石や岩が多く写っ

図4b:2016年9月2日, ロゼッタに搭載されたカメラでフィラエを発見した(Photo: ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team).

ていて(図3),表面の粗い部分と、大きな塊が少ない 滑らかな部分が区別できる.これは、岩石が転がっ ているのか、それとも岩石の周囲の物質が完全に浸 食されたのかは、まだ明らかになっていない.また、 いくつかの大きな塊はダストで覆われていて、それは 地球で見られる風による吹き溜まりのようである.こ れは、彗星の活動によって動かされた物質であると 考えられている.

残念なことに、フィラエは「アジルキア(Agilkia)」 と名付けられた着陸予定地点で停止しなかった.最 初の着地の後,探査機を地面にしっかりと固定する はずの機構のうち二つが故障したのだ.探査機の上 部にあるコールドガス(訳注:化学反応を利用しない スラスタ)のノズルが最初の着地の直後に点火して フィラエを地面に押し付け、同時に2本の銛が地面に 突き刺さってしっかりとグリップするはずだったが、 いずれもそうならなかった.幸いなことに、搭載装置 が収められた区画と着陸装置の間にある電気機械 式のダンパーが、意図したとおりに運動エネルギー の大部分を吸収することで、また宇宙空間に放り出 されるという最悪の事態を防ぐことができた.しか し結果的に、フィラエはそれから何度も地面に着地 しては跳ね返され、2時間後に約1200メートル離れ た場所で停止した.この時のフィラエの着陸の様子 を再現した動画がインターネット上に公開されている².

最終着陸地点である「アビドス(Abydos)」では、 フィラエは穴やくぼみのような場所に好ましくない姿 勢で着陸し、約90度傾いて横向きになってしまった (図4).搭載されたパノラマカメラで撮影された画像 には、フィラエの足と地面に触れているアンテナが 写っていて、岩壁のようなゴツゴツした壁がいくつか の方向に見えている.これらの大部分はダストや有 機物が混じった氷のように見え、非常にもろくて粒 の大きさもまちまちのようだが、その組成はわからな かった.アビドスの温度は、着陸後の数日間、夜間は -180度、日中は-140度の間で変動した.このような低 い温度では彗星の活動はほとんどなく、フィラエに 搭載されたガス分析装置で彗星ガスが測定されな かったのだ.

フィラエの外側に設置された太陽電池は, 彗星1 日あたり約1.5時間しか電力を供給できなかった.数 カ月に及ぶ測定作業を予定していたにもかかわらず, 電力供給の時間はあまりにも短すぎた. そのため, 搭

²ESAが公開しているフィラエ着陸の再現動画(www.youtube. com/watch?v=rJ2eqH3Bz4c). 2021年11月時点で視聴可.

載された機器が約56時間の測定に成功した後,フィ ラエは冬眠に入った。

その後,彗星が太陽に接近したため日射量が増 えて太陽電池の出力が上がり,フィラエは2015年4 月の初めに再起動したと推測されている.2015年5 月から7月にかけて,母船であるロゼッタ探査機を 介して短期間にわたる無線通信が繰り返されたもの の,フィラエの科学機器を再び使って計測すること はもはやできなかった.ロゼッタのミッション終了の わずか4週間前の2016年9月2日にロゼッタに搭載さ れたカメラで撮影された画像で探査機が確認される まで,フィラエの着陸地点は大まかにしか分からな かった.

4. ロゼッタがチュリュモフ・ ゲラシメンコ彗星を探査

2014年11月にフィラエを着陸させた後,ロゼッタ は67P彗星が太陽の周りを回る軌道に同行し,核の 活動が拡大していく様子を詳細に観測した.予想通 り,全表面のうち主に太陽の光を多く受ける昼側が 活動した(図5).活動がもっとも大きくなるのは通常, 彗星上での正午前後から午後の早い時間帯に相当 する場所に集中しているが,日の出から数分以内の 場所で活動が突然始まる様子も観測された.

彗星ガスの測定結果は核から放出されるガスは主 に水蒸気で構成されていることを示していて,水の 生成率の測定結果からは,核が最も活発になる近日 点でも核表面の約6%しか活動していないということ が分かった.そのように活動は表面の小さな領域に 集中しているが,局所的な日照条件や地形が重要な 役割を果たしているようだ.太陽光にさらされている 部分は,長い間日陰のままの部分よりも強く熱せら れ,侵食が早くなる.場所によっては,活動の影響 で数日から数週間で表面の構造が変化したところも あった(図6).

ロゼッタ探査機が67P彗星の核に接近した際に は、電波のドップラーシフトを利用して67P彗星の重 力場を測定することができた.その結果、平均密度 は約500kg m⁻³であることがわかり、水氷の約半分、 コルクと同程度の密度しかなく、他の彗星の核でも 見られる典型的な値であることがわかった.そのた

図5:2015年5月3日の67P彗星. 太陽からの輻射により, 彗星 核の日照側で活動が活発になっている(Photo: ESA/ Rosetta/NAVCAM).

め,67P彗星の核の主成分は水氷であると考えられ るが,表面にはほんのわずかの水氷しか露出してい ないようだ(図7).また,密度が低いのでこの彗星の 核は非常に空隙率が高いと考えられる.

また、結合している二つの丸い胴体のうち、小さい 方の胴体については内部構造も調べることができた [1]. この目的のためにロゼッタとフィラエには送信機 と受信機が搭載されていて、両者の間で電波を往復 させる観測を行った. 電波が核の内部を透過させる ことで、核の内部構造をおおよそ推測できる、具体的 には,彗星物質の誘電率や均質性. 氷とダストの比 率などを知ることができるのだ. そのような調査の 結果,興味深い結果が得られた,電気的特性は,約 10メートル以上の長さのスケールでかなり均一であ ることが分かった. 推定される空隙率(porosity)は 75%であることから、氷とダストの体積比は0.4~2.6 の範囲の値となり、67P彗星の体積の約半分だけが ダストや鉱物成分で構成されている一方、残りは空 隙であることを意味している. ダスト観測装置で測 定されたサブミリメートルの粒子のほとんどが同様 に高い空隙率を持っていることから、67P彗星の物 質はさらに小さなスケールでもとても多孔質である と言える[2].

核はかなりの部分が水氷で構成されているが、その表面は入射した太陽光の5%程度しか反射してい

図6:約2か月間の67P表面の変化(Photo: ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team).

図7:ところどころに水の氷を発見(Photo: ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team).

ない[3]. 他の彗星の核でも観測されるように,表面 は石炭のように真っ黒なのだ.表面の大部分は微細 なダストの層で覆われており,ロゼッタに搭載された 赤外分光計の測定結果が示すように,おそらく非常 に暗い有機物を含んでいるのだろう.そのせいで核 の表面が暗い色をしているといえるが,この点につい ては後述する.

フィラエが最初にタッチダウンしてから数分後に ロゼッタ探査機が撮影した写真には、フィラエがア ジルキア(Agilkia)の最初の着陸地点に残した足 跡(訳注:着陸脚が着地した跡)が写っている.これ らの足跡から、ダストの層の厚さは少なくとも10~ 20cmであることが推測される.残りの表面では, ダストの層の厚さは分かっていないが,彗星活動に よってダストが表面全体に撒き散らされるので場所 によっては何メートルもあると思われる.そしてその ようなダストは彗星活動そのものにも影響を与える. なぜならば,たとえそれが薄いダスト層であっても, 太陽光が土壌を透過して揮発性物質を昇華させる のを妨げるからだ.

フィラエの足(着陸脚)には加速度センサーが取り 付けられており,最初のタッチダウンの際にスイッチ が入れられた[4].これらの測定結果から,ダストの 下には非常に硬い層があるはずで,おそらく凍った

図8:67P上の窪みの一つの壁面に見られる, 鳥肌のような粒状の 粗い質感. 個々のスポットの大きさは約3m(Photo: ESA/ Rosetta/MPS for OSIRIS Team).

水氷でできているということがわかった. 最終着陸 地点であるアビドス(Abydos)では, 長さ30cmの棒 の地面への打ち込が試みられた[5]. 最大の衝撃力 でも棒の先は地面を貫通しなかったが, 土壌の硬さ を測定することができ, 測定値から硬い凍った氷で あることがわかった.

表面のクレーター状の穴やピット(窪み)は, 彗星の 活動に関連している可能性が高いようだ. ロゼッタ が取得した画像によると,数メートルの大きさのピッ トの壁には,研究者達が鳥肌に例えるような荒い粒 状の構造が見ることができ(図8),このように彗星 核の表層下の様子を見ることができる.これらの構 造が彗星核形成時の名残なのか,それとも活動の結 果なのか,さらには隕石や小さな小惑星の衝突によ るものなのかは,今のところ不明のままである.ある 場所では,ピットの壁からガスやダストが漏れ出る 様子が観測され,また別の場所では,ガスやダスト が空間に向かって一方向に向かって吹き出す現象, いわゆるジェットの噴き出し口となっていることが分 かった.

ピットの大部分が内部にある要因によって発生し たと考えるならば[6],次のようなことが起きると考 えられる.まずCOやCO2などの揮発性物質の昇華 により,深さ数百メートルにいたるまでの領域に小さ な空洞が形成される.これらの空洞が時間をかけて 成長すると,上の被覆層がどんどん薄くなって,つい には崩壊あるいは昇華ガスで吹き飛ばされることで オープンピットが形成されるのだ.その後,太陽光に よって露出した壁から物質が昇華し、ピットはさらに 成長し続けることになる.もしこの場所での活動が 低下すると、彗星の他の場所からの堆積物で埋めら れることもありえる.

したがって、空洞の形成には、昇華に必要な熱を 供給するための太陽光が必要となる.そのために は、太陽の光が深く浸透するような割れ目や歪みが 存在することが大前提となりそうだ.しかし、彗星の 核の内部に熱源があるとも考えられる.その熱源と して考えられているのは、約-140℃の温度で起こり 大きなエネルギーを放出するという、非晶質の水氷 が結晶質の水氷に変化による発熱過程である.しか し、彗星に非晶質の氷や放射性核種が含まれている かどうか、含まれているとしたらどのくらいの量なの かは、まだ明らかになっていない.他の熱源として考 えられるのは、彗星が形成されたときにすでに存在 していた長寿命の放射性核種で、その崩壊熱によっ ていまだに内部が加熱されるとも考えられる.

ピットができた別の原因として、隕石や小惑星が 衝突してできたクレーターではないかと考えられてい る.このような説明は、過去の彗星探査ミッションで の観測結果からすでに提唱されてきた.多孔質体を 使った実験室での衝突実験では、67P彗星で観測さ れたピットと非常によく似た衝突構造が見られた.こ れは、例えば月面にあるような見慣れた衝突クレー ターのように、固体の岩石に衝突して形成されたク レーターが典型的なお椀型をしているのとは全く異 なる.このピット構造が、活動と衝突クレーター、あ るいはその両方のいずれの形成過程によってもたら されたのか、現時点では明らかになっていない.

5. 二重結合天体

ダンベル型の67P彗星の核(訳注:湯船に浮かべ るアヒルのおもちゃに似ているとも云われた)は、二 つの独立した天体から構成されているようだ.ま た、彗星表面のいくつかの場所では、少なくとも800 メートルの深さまでたどることができる段丘として 現れた層で形成されているようだ.同様の地層は、 他ミッションによって観測されたテンベル第1彗星 (9P/Tempel 1またはTempel 1)やヴィルト第2彗 星(81P/WildまたはWild 2)でも発見されているが、 撮影された画像の解像度は十分ではなく、その起源 を調べることができなかった.

ロゼッタによって撮影された画像と、それを基に 作成した彗星核の三次元モデルによって、核表面の 局所的な重力場に対する核内部の層構造を初めて 解析することができた[7].それによると、ダンベル の両端は、重力によって結合された二つの胴体を表 しているようだ.層構造は一種のタマネギの皮のよう な構造をしていが、これが45億6000万年前に彗星 の核が形成されたときの状態を反映しているのか、 それとも後から作られたものなのかは、まだ不明だ. また、ロゼッタ探査機の観測データは二つの胴体の 組成の違いを示していて、約10%の密度の違いがあ るようだ.これらの観測事実は、それぞれの胴体の 起源が異なること示している.

いくつかの彗星では、近日点付近の活動によるア ウトガスを主な要因として、比較的短期間で自転周 期の大きな変化が観測されている。自転周期は、ロ ケットのノズルのように減速したり加速したりする ことがある。67Pの自転周期は、前回の近日点通過 (2009年)の際に約22分間短くなり、現在(2016年の時 点)は約12.4時間で自転している。しかし、今後、自転 がどのように推移するかを予測することは困難である。

67Pでは、特に二つの胴体が結合している天体の 間の「首」と呼ばれる部分に明確な断層が見られる. これは、彗星本体に強い張力がかかっていることを 示している.このような二重結合天体が異なる回転 速度でどのように振る舞うかを調べるには、彗星材 料の破壊力学的特性を考慮して、コンピュータ・シ ミュレーションを用いることができる.それによって、 もし7時間以下の自転時間で回転した場合、核は遠 心力によって首の部分で分裂してしまい[7]、切り離 された二つの小天体は、しばらくすると再び接近して 新しい二重結合天体を形成する可能性があることが わかった.

他のダンベル型の彗星核でも、そのような再構成 が行われていた可能性がある.成層化は、崩壊時に 放出された小片やダストが次第に本体に集まってく る過程の結果であるといえる.そうなると、彗星の 核はこれまで想定されていたほど不変ではないのだ ろう.これまで重要視されてこなかったこのプロセス が、彗星核やその他の小天体の形成にどの程度重要 であるのか、現在のところ不明である.

探査機や地球のレーダーで撮影された小惑星 や彗星核の高解像度画像の数が増えていることか ら、小さな天体には二重結合天体の形状がわりと多 いのではないかと考えられている.2019年にNew Horizons探査機が訪れたカイパーベルト天体 486958 Arrokothもその代表例だ.

6. 化学成分

ロゼッタに搭載されたガス質量分析計は,67P彗 星の核に含まれる多数の化学物質を測定した.他 の彗星に比べて非常に低い温度で昇華する揮発性 物質であるCOとCO₂の割合が高いことから,67P の組成は核の形成時からほとんど変化していないこ とがわかった.このことは,67Pがロゼッタミッショ ンのターゲットとして選ばれた際の重要な選択基準 だった.

水蒸気(H₂O), CO, CO₂に続いて彗星ガスの中 で4番目に多いのは酸素(O₂)で, 67Pの彗星のコマ で初めて発見された.このほか, 窒素(N₂), メタン (CH₄), エタン(C₂H₆), アルゴンなどの揮発性物質 も測定された.67P彗星核の夏半球と冬半球では, コマに含まれるそれらの物質の存在量には大きな違 いが見られた[10](図9).

測定されたいくつかの物質の組成と存在量から, 67P彗星の核は約-253℃を下回る温度で形成された と考えられる.しかしながら,そのような低温となる には純粋な凝縮物質である必要があるものの,非晶 質の氷の形で保存されるのであれば,かなり高温の 約-140℃でも可能となる.いずれにしても,彗星の核 は太陽から遠く離れた太陽系星雲の非常に冷たい 領域で形成されたことが証明された.

彗星に関連してよく議論されるのは,複雑な有機 分子を形成するための基本的な成分を彗星が地球 にもたらし,最終的に生命が誕生したのではない かということだ.ロゼッタミッション以前には,すで に多くの有機物が彗星にあると観測されていた.ロ ゼッタ探査機とフィラエ着陸機に搭載された質量分 析計によって,これまでの彗星の研究では知られて いなかった数十種類の物質が見つかった.今回見つ かった物質の中には,これまでヴィルト第2彗星でし

図9:二酸化炭素と水:ロゼッタに搭載されたガス質量分析計で測定されたCO₂とH₂Oの比(青)と彗星核上の探査機の鉛直下点の緯度(赤)の関係.測定されたCO₂/H₂O比は,彗星の緯度によって大きく変化する.今回の測定では、南半球(冬)よりも北半球(夏)の方が照度が高かった.水はCO₂よりもはるかに昇華温度が高いため、冬の季節である南半球の上空では、水はかなり少なかった([10]).

か検出されていなかった単純なアミノ酸であるグリ シンも含まれている.これらの物質の多くは、我々が 知っているような生命の基本的な成分を合成するた めの重要な分子で [11]、これらほとんどは、星間雲 の中にも存在する.しかし、星間物質からの比較的 複雑な化学物質が、太陽系形成の間ほとんど変化せ ずに彗星の核に取り込まれたのか、あるいはしばら くしてからその大部分が彗星の中でのみ形成された のかは、依然として未解決の問題のままである.

67Pの表面には様々な炭化水素が複雑に混ざって いるが,これまでに詳細な同定はできていない[3]. また,コマで測定されたダスト粒子には,始原的隕 石の一種である炭素質コンドライトに類似した有機 分子が多く含まれていた.残念ながら,これまでに 調べられたダスト粒子の中には,いずれの有機化合 物も確認できていない[12].

7. 地球上の水はどこから 来ているのだろうか?

彗星は、地球上の水のほとんどがどこから来たの かという疑問の解決にも役立つかもしれない.内太 陽系での生成条件を考えると、地球の水の量は現在 よりもはるかに少ないはずである.そのため、地球上 の水の大部分は、地球が形成された後にもたらされ

図10:地上約20mのロゼッタの最後の画像. OSIRISカメラが十 分に焦点を合わせることができなかった. 解像度は1ピクセ ルあたり2mm, 縦方向の拡大は約96mであった(Photo: ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team).

たと考えられている. 彗星の核は主に水の氷で構成 されており、初期の地球への衝突は現在よりもはる かに頻繁であったため、彗星は地球の水の起源の有 力な候補と考えられている.

地球上の水の起源を明らかにするために,重水素 (重水素)と通常の水素の関係(D/H比)について考 えてみると次のようになる.D/H比は,彗星だけでな く地球の海や他の天体でも決めることができ,オー ルト雲から来たいくつかの彗星では,D/H比の値 が,地球上で見られる値よりもはるかに高い結果と なった.一方,原始太陽系星雲では,D/H比の値は 地球よりもかなり低くなっている.ロゼッタによる測 定でも,67Pでは地球のものよりも約3倍も高い値が 得られている.このように,彗星は地球の海水の唯 一の供給源ではないようだ.

ロゼッタはすでに多くの素晴らしい結果を出して いるが、観測されたデータ全体を包括的に解釈する ことはまだほとんどできていない。多数のプロセス を詳細に理解するためには、実験室での人工彗星の 実験やコンピュータシミュレーションが大きく貢献す る.パズルのすべてのピースを組み合わせて全体像 を把握するには何年もかかるだろう.また、これらの 結果は、将来の彗星探査の準備にも利用されるだろう.

このような小さな天体の探査における次の大きな

168

ステップは,彗星の核から物質サンプルを採取して 彗星の温度で凍結させた状態で地球に輸送し,地 球の研究機関で利用可能な最高の技術で分析する ことだ.これは大きな技術的な挑戦であり,このマイ ルストーンがいつ達成されるかは未知数である.

8. まとめ

2016年9月30日に探査機が彗星に落下することで 終了したロゼッタ・ミッションは(図10)。 彗星とそ の形成に関する研究において画期的な宇宙ミッショ ンだった、その中でも特に驚いたのは、目的天体で あった67P/チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星が不規則 なダンベル型をしていたことだ、この彗星は、おそら く二つの独立した天体が重力によって結合したもの だと思われる、彗星の表面は非常に粗く、様々な過 程を経たことを示す非常に多様な地形が見られた。 彗星核は、10~100メートル以上の大きさのスケール では均質であると考えられるが、それよりも小さなス ケールでは不均質であることが、その活動の原因と 考えられる. 彗星核の活動は小さな領域に集中して おり、また、数日から数週間の間に起こる表面変化 は局所的なものだった. 彗星物質の中には多くの有 機物質が測定され,その中には生命の基本的な成分 を合成するための重要な分子とされるものも含まれ ている

参考文献

- [1] Kofman, W. et al., 2015, Science 349, aab0639-1.
- [2] Langevin, Y., 2016, Icarus 271, 76.
- [3] Capaccioni, F. et al., 2015, Science 347, aa0628-1.
- [4] Biele, J. et al., 2015, Science 349, aaa9816-1.
- [5] Spohn, T. et al., 2015, Science 349, aab0464-1.
- [6] Vincent, J.-B. et al., 2015, Nature 523, 63.
- [7] Okamoto, T. and Nakamura, A. M., 2017, Icarus 292, 234.
- [8] Franceschi, M. et al., 2020, PNAS 117, 10181.
- [9] Hirabayashi, M. et al., 2016, Nature 534, 352.
- [10] Mall, U. et al., 2016, Astrophys. J. 819, 126.
- [11] Goesmann, F. et al., 2015, Science 349, aab0689-1.
- [12] Fray, N. et al., 2016, Nature 538, 72.

日本惑星科学会誌Vol. 30, No. 4, 2021

インターネット上の参考ウェブサイト

ロゼッタが惑星間を移動する際のアニメーション. www.youtube.com/watch?v=5yoYZERieuQ

フィラエの着陸を再現する www.youtube.com/watch?v=rJ2eqH3Bz4c

ESA, DLR および MPSのウェブサイト rosetta.esa.int www.dlr.de/rosetta www.mps.mpg.de/de

ロゼッタおよびフィラエのミッション搭載機器のサイト sci.esa.int/rosetta/35061-instruments sci.esa.int/rosetta/31445-instruments

火の鳥「はやぶさ」未来編 その25 ~はやぶさ2拡張ミッション~

嶌生 有理¹, はやぶさ2拡張ミッションチーム

(要旨) 2020年12月に小惑星リュウグウの試料を地球に届けた小惑星探査機はやぶさ2は、次なる目的地 に向けて出発した.新たな目標天体は高速自転小型小惑星1998KY26であり、2031年にランデブー予定 である.巡航中は,黄道光観測や系外惑星観測,小惑星2001CC21のフライバイ観測,地球スイングバイ 時の月・地球観測などを行い,段階的に理学成果を創出する計画となっている.本稿では,はやぶさ2拡張 ミッションの概要と観測項目,期待される科学成果について紹介する.

1. はじめに

2020年12月6日,小惑星探査機はやぶさ2は小惑 星リュウグウの試料を封入したサンプルリターンカプ セル(SRC)をオーストラリアのウーメラ砂漠に帰還さ せ,次なる目的地に向けて出発した.SRCの帰還運 用および現地回収の様子は,現地回収部隊長の報 告記事を参照されたい[1].

拡張ミッションの候補天体探索は、第2回タッチダ ウン運用を完遂した2019年夏頃から実施され、SRC 帰還後のイオンエンジン運転と惑星スイングバイを 利用して到達可能な天体が探索された.地球軌道を 通過する小惑星と彗星18,002天体の中から、残燃 料での増速量1.7km/s以下でフライバイもしくはラ ンデブー探査が可能な天体を探索した結果、354天 体が発見された.これらの候補天体について、さら に運用成立性と科学的価値の観点で絞り込みが実 施され、理学側の候補天体調査チームによって候補 天体の直径、アルベド、自転速度、小惑星スペクトル 型、今後の地上観測可能性などが調査された.筆者 も調査チームに参加したのだが、ほとんどの候補天 体の推定直径は300m以下であり、アルベドやスペ クトル型などの物理情報は限定的であった(例外の 候補はイトカワとリュウグウであった). 多数の小さな 小惑星の中で,サンプルリターン機能を失ったはや ぶさ2であってもリモセン観測のみで有意な科学成 果が期待できる天体として,探査未踏天体である高 速自転小型小惑星が注目された.工学的成立性と理 学的価値を検討した結果,金星スイングバイを経由 して2030年に小惑星2001AV43にランデブーする EVEEAシナリオ(E:地球,V:金星,A:小惑星)と, 小惑星2001CC21フライバイを経由して2031年に小 惑星1998KY26にランデブーするEAEEAシナリオ が選定された.2020年9月,探査機の熱解析を含む 詳細検討の結果を受けて,太陽距離の設計前提か らの逸脱が小さいEAEEAシナリオが選択された.

2. 拡張ミッションの意義

はやぶさ2拡張ミッションは、はやぶさ2ミッション の理学意義および工学意義のもとで太陽系マルチフ ライバイによる長期航行技術を確立し、高速自転小 型小惑星へのランデブーを目指すミッションである. はやぶさ2拡張ミッションの意義は、(1)太陽系長期 航行技術の進展、(2)高速自転小型小惑星探査の実 現、(3)Planetary Defenseに資する科学と技術の

^{1.}宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 shimaki@planeta.sci.isas.jaxa.jp

ミッション意義: (1) 太陽系長期航行技術の進展、(2) 高速自転小型小惑星探査の実現、(3) Planetary Defenseに資する科学と技術の獲得

図1: はやぶさ2拡張ミッション概要 (画像クレジット: JAXA; 1998 KY26画像クレジット: Auburn University, JAXA).

獲得である(図1). 順に見ていこう.

はやぶさ2の設計寿命は7年であり、これは2014 年の打ち上げから2020年の帰還まででほぼ完了し ている. はやぶさ2拡張ミッションでは、設計寿命 後さらに10年をかけて、高速自転小型小惑星にラン デブーする. 探査機は過酷な宇宙環境で経年劣化 していくが、実運用において性能限界を知ることは 工学的に重要な知見となる.また、地球帰還までの ミッションでの工学成果を踏まえて、より自在な、よ り遠方への探査を目指す上で必要となる運用技術を 獲得する機会となる、これらは、低消費燃料での長 時間運用や探査機システムの超長期維持技術、イオ ンエンジンの運用技術の実践と長期性能取得、イオ ンエンジンと組み合わせた太陽系マルチフライバイ 航行技術などである、一方、理学としては、長期間巡 航中の黄道光や系外惑星の観測,小惑星フライバイ 観測、地球スイングバイ時の月・地球観測を行うこと で、目標天体へのランデブーに至るまでの期間も科 学成果を積み上げていく.

直径100m未満の高速自転小型小惑星は、これま でに探査されたことがない前人未到の天体である. 自転周期が約2.3時間以下である小惑星の大半は直 径100m以下であることが知られている[2].これは、 高速自転小型小惑星の赤道域では重力よりも遠心 力が卓越するため、重力で束縛されたラブルパイル 天体ではなく、一枚岩天体であるためと考えられて いる.一方、適度な内部固着力があれば、高速自転 小型小惑星がラブルパイル天体である可能性も指摘 されている[3]. 高速自転はリュウグウのコマ型形状 の形成過程[4,5]とも関連しており, はやぶさ2のリュ ウグウ探査で提起された高速自転と天体構造の関 係との比較によって, リュウグウで得られた科学的知 見をさらに深められると期待される. 工学的には, 小 惑星の赤道表面では重力よりも遠心力が卓越するた めターゲットマーカー(TM)が設置できないなど, 特 殊な力学環境へのアプローチから新たな小惑星探 査技術の獲得が期待されている.

Planetary Defenseとは、小惑星や彗星の地球 衝突問題を扱う活動であり、スペースガードとも呼ば れる. 地球との最小交差距離が0.05au以下で絶対 等級が22等以下(直径約100m以上)の天体は、地 球への衝突によって大きな被害を及ぼす可能性のあ る天体として潜在的に危険な小惑星(Potentially Hazardous Asteroid: PHA)と呼ばれる. 近年 では1908年のツングースカ大爆発(直径60-100m) や2013年のチェリャビンスク隕石(直径約20m)の 衝撃波による人的被害が報告されている. 天体の 地球衝突問題について、国連にInternational Asteroid Warning Network (IAWN)とSpace Mission Planning Advisory Group (SMPAG) が、NASAにPlanetary Defense Coordination Office (PDCO)が、ESAにNear-Earth Object Coordination Centre (NEOCC)が設置され. 本問題を多角的な方面から議論する国際会議 Planetary Defense Conferenceが2年毎に開催 されるなど、理工学を超えた分野での関心が高まっ

ている. はやぶさ2拡張ミッションでは,地球への衝 突で地域的な被害を引き起こしうる直径数10mの小 惑星の素性を解明すると同時に,こうした小天体近 傍での探査技術を磨くことで,Planetary Defense に資する技術と知見を得ることを目指している.

はやぶさ2拡張ミッションの期間は探査機の設計 寿命を超えていることから、ミッション途中で運用 継続不能となることも考えられる.そこで、上記の理 工学意義を段階的に達成するため、ミッションの各 段階で様々な観測が計画されている.

3. 長期間巡航(2021-2026年)

EAEEAシナリオでは、探査機は2020年の地球 帰還後、2027年の地球スイングバイまで金星軌道と 地球軌道の間を6周半巡航する、この期間は、イオン エンジン運転による軌道制御などの他に、理学観測 として観測機器校正データの取得と光学航法望遠 カメラONC-Tによる黄道光および系外惑星の観測 を実施する. 黄道光とは、惑星間空間に漂う0.1-100 µmのダスト(惑星間塵)による太陽光の散乱光であ り、太陽からの距離に応じた惑星間塵の密度分布を 反映する、探査機は2031年までに約0.7-1.5auまで の太陽距離を巡航する予定であるため、地球から離 れた複数地点で黄道光観測を行い、地球近傍の惑 星間塵の密度や構造を明らかにすることで. 惑星間 空間における物質の生成および輸送メカニズムに制 約を与えることを目指している。系外惑星観測では、 明るい星の観測に適した小口径のONC-Tを用いた トランジット法(惑星が主星の前を通過する際の減 光から惑星の大きさと距離を求める手法)によって、 日本の宇宙機による系外惑星の初検出を試みる.

4.小惑星2001CC21フライバイ (2026年)

小惑星2001CC21はライトカーブ観測から細長い 形状が示唆されている直径約700m, 自転周期約5 時間の地球近傍小惑星であり, 探査機が訪れたこと のないL型小惑星の可能性がある[6]. はやぶさ2は 相対速度約5km/sで小惑星2001CC21をフライバイ する. フライバイ観測の利点は, 地上観測では空間 分解できない小惑星の表面地形を知ることができる 点にある. 小惑星から比較的遠距離(>3,000km)で は、点光源としての小惑星をONC-Tの7バンド観測 と近赤外分光計NIRS3による分光観測を行い。絶 対反射率を決定する、NIRS3では、2001CC21の 地上観測で示唆されている2.0µmの吸収(CAIに 関連するFeを含むスピネル[7])および2.7umの水 和化合物の存在を検出することが期待される. 最接 近時は、探査機の姿勢制御による小惑星追尾は最 小限として、最接近距離を約100km(ONC-Tで約 70pixel. 熱赤外カメラTIRで約10pixel)とする観 測が検討されている、探査機は小惑星に対して反太 陽側を通過して低位相角での地形観測を行い,全球 形状観測や岩塊・クレーター分布観測から、表面年 代の推定などが期待される. TIRは, ONC-Tでは 撮像できない小惑星の夜面を撮像するとともに、空 間分解された熱画像から熱物性分布や自転方向推 定が期待される、レーザー高度計LIDARは、有効 動作距離が約30km以下であり観測周波数も最大 1Hzであるため、小惑星フライバイでの観測は実施し ない

5. 地球スイングバイ (2027年, 2028年)

地球スイングバイでは、巡航時には取得できない 観測機器の校正データの取得および科学観測が実 施可能である.地球スイングバイは2027年と2028 年の2回実施するが、探査機の指向方向制約のた め、2028年のみ地球・月観測の実施を予定してい る.2020年の地球スイングバイ時と同様に、ONC、 NIRS3、およびTIRによるスイングバイ後の1日毎 の地球・月観測と、LIDARによる探査機-地球間の 光リンク試験が検討されている.

6. 小惑星1998KY26ランデブー (2031年)

小惑星1998KY26はEAEEAシナリオの目標天体で, 自転周期が10.7分, 有効直径が20-40mの比較的球形状をした高速自転小型小惑星である.小惑星1998KY26はリュウグウと比較して自転周期が

172

約1/43. 直径が約1/30であり、はやぶさ2の太陽電 池パドル展開幅6mと比較するとその小ささがよくわ かる(図2). 地上望遠鏡による光学およびレーダー観 測から、小惑星1998KY26の表面は暗く、小惑星ス ペクトル型では(B. C. F. G. D. P)型の可能性があ り, 表面バルク密度は2,800kg/m³, 表面粗さは1-10 cmと推定されている[8]. 天体形状と自転周期から、 天体中心の最小固着力は約20Paであると推定され ている[3]. 小惑星1998KY26へのランデブー後は、 リュウグウ近傍観測と同様に、高度1km程度のホー ムポジションからの全球観測を基本として、降下運 用などの特殊運用も検討されている.理学観測とし ては、ONC-Tによる地形観測のほか、ONC-Tの7バ ンド観測およびNIRS3による分光観測。TIRによ る熱物性および表面構造(ラフネス)観測, LIDAR による重力計測とダスト検出. 天体軌道および熱物 性観測によるYarkovskv効果およびYORP効果 の検出等が検討されている. 探査機には1発のサン プラー弾丸と1個のTMが残されている. サンプラー 弾丸(タンタル製5g弾丸,約300m/s)が赤道表面の 岩塊に衝突すれば、放出されたイジェクタは再堆積 することなく遠心力によって飛散し、 直径数cm~数 10cm程度の強度支配クレータの観察から岩塊の強 度情報を得ることが期待される. 表面付近で化学 推進系スラスタRCSによる急上昇を行えば、リュウ グウでのタッチダウン後の上昇時のように粒子が舞 い上がり、小惑星の質量損失を観察できるかもしれ ない. 詳細な近傍運用観測は、今後はやぶさ2 拡張 ミッションチームによって議論される予定である.

7. おわりに

2021年10月現在,はやぶさ2は次の目標天体へと 向けてイオンエンジンを運転しながら航行中であり, その累積増速量は400m/sを超えた[9].一方,徐々 にではあるが,探査機の性能低下も確認されてき た.2021年4月,分離カメラDCAM3やモニタカメラ CAM-Hを司る分離カメラ制御部CAM-Cの永久故 障が確認された.また,化学推進系スラスタ噴射部 を保温するヒータでも一部故障が発生している(バッ クアップ手段により回復済み).幸いにも目標天体と のランデブーは達成可能の見込みであるが,躍動的

図2:はやぶさ2と1998 KY26 (画像クレジット: Auburn University, JAXA).

なタッチダウンの様子を撮像したCAM-Hが使用不 能となり、寂しい限りである.目標天体到達まで、探 査機が健全であることを祈念したい.

はやぶさ2拡張ミッションと並行として,はやぶさ 2ヘリテージを活かした2030年代の次世代小天体 サンプルリターン探査も検討されている.はやぶさ 初号機の基本設計を受け継いだはやぶさ2とは異な り,新たに設計する親機・子機構成の探査機システ ムのよる始原的天体探査を目指している.こちらは目 標天体到達見込みが2030年代後半のため,興味が ある若手の方は、ぜひ積極的にご参加いただきたい.

参考文献

- [1] 中澤暁ほか, 2021, 遊星人 30, 18.
- [2] Hergenrother, C. W. and Whiteley, R. J., 2011, Icarus 214, 194.
- [3] Hirabayashi, M. et al., 2021, Advances in Space Research 68, 1533.
- [4] Watanabe, S. et al., 2019, Science 364, 268.
- [5] Sugiura, K. et al., 2021, Icarus 365, 114505.
- [6] Binzel, R. P. et al., 2004, Meteor. Planet. Sci. 39, 351.
- [7] Sunshine, J. M. et al., 2008, Science 320, 514.
- [8] Ostro, S. J. et al., 1999, Science 285, 557.
- [9] https://www.hayabusa2.jaxa.jp/

一番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦 その48 ~金星の未知紫外線吸収物質を気球搭載光学望 遠鏡FUJINで狙う~

今井正尭¹,田口真²

(要旨) 金星探査機「あかつき」によって金星大気力学の研究が進んだ一方で,大気・雲化学過程や雲層 内での太陽放射加熱による鉛直温度構造は完全には解明されていません.これらを解く鍵となるのは, 雲頂高度で特徴的な模様を作る原因ともなっている未知の紫外線吸収物質です.現在我々は,地球の成 層圏から広い波長域と高い空間分解能の観測を可能とする新たなプラットフォームとして大気球望遠鏡 FUJINの開発を進めています、「あかつき」と来たる10年で予定されているNASA・ESAによる大型金星 探査を繋ぎ,未知紫外線吸収物質の同定を目指した取り組みとして、FUJINによる金星の紫外分光観測 の計画を紹介します.

1. UVIが見た金星の紫外模様

2015年12月の再軌道投入に成功以来,金星探査 機「あかつき」に搭載された紫外線カメラ (UVI) は 283 nmと365 nmという2つの観測バンドを用いて、 金星の雲頂高度 ~70 kmに見られるダイナミックな 模様を観測し続けています. この紫外波長域で見ら れる特徴的な模様は、濃硫酸の雲による太陽光散 乱と紫外線吸収物質の分布によって形作られてい て、横倒しのアルファベットYと似ていることから"Y 字模様"と呼ばれることもあります.赤道面に近い周 回軌道をもつ「あかつき」は、遠金点が昼面側に存 在する時期には約2時間毎の頻度で8日間にわたっ て連続して観測することができ、図1に示すように紫 外模様の時空間発展が克明に記録されています. 拙 著ながら[1]では、Rossby波やKelvin波といった惑 星波の消長によってこの紫外線模様が劇的に変容 する様子を調べました.また、UVI画像は雲追跡の

 京都産業大学 理学部 日本学術振興会 特別研究員 (PD)
 立教大学 理学部 教授 mstk-a.imai@frontier.hokudai.ac.jp

図1: UVIの365 nm画像の合成図. 雲頂高度における惑星波な どを反映し紫外吸収物質の空間分布が惑星スケールの模様 を形成している.

手法によって雲頂高度での風速場を知るためにも必 要不可欠なデータであり、金星大気力学の理解に活 用されています.特に金星最大の謎とも呼べるスー パーローテーション(高度70 km付近で100 m s⁻¹ と 自転速度の60倍に達する高速東西風)については、 2020年6月号の遊星人でも紹介されている通り、熱 潮汐波による赤道向きの南北運動量輸送が中低緯 度での高速風維持に重要な役割を担っていることが 示されました[2].

図2:Messenger搭載MASCSによって金星フライバイ時に取 得された紫外線スペクトル (点線)と太陽スペクトル (太線). SO₂と未知吸収物質による2つの吸収帯が存在する.

2. 紫外線吸収物質を探れ

以上のように「あかつき」の探査によって金星の大 気力学研究に大きな発展があった一方で、金星の気 象学を推し進めるには大気化学や雲に関する理解 が必要不可欠になってきています. そして我々が重 要視しているのが、スーパーローテーションと同じく 40年以上の長きにわたって謎とされてきた未知の近 紫外線物質(群)の同定です.金星の雲は濃硫酸でで きていることが知られていますが、その正味の光化 学反応は以下ように表せます.

 $SO_2 + CO_2 + H_2O \rightarrow H_2SO_4 + CO$

SO₂は紫外域にいくつかの吸収帯をもちますが, そのうちの1つが280 nm付近に存在しており, UVI は283 nmのフィルターを通して,このSO₂による紫 外線吸収を観測しています.他方,365 nmの観測バ ンドは未知吸収物質による吸収帯に相当し,SO₂分 布と一定の相関があることから,雲形成の化学に関 わる物質である可能性があります.

図2はMessengerに搭載されたMASCSという 分光器によって金星フライバイ時の約8分間に得ら れた紫外線スペクトルを示しています. SO2 吸収帯 外である320-500 nmにかけて幅の広い吸収が存 在していることが分かるかと思いますが, この吸収 帯を説明する物質が未解明なのです.

現在までにこの未知吸収物質の候補として挙げら れている多くは S_x, Cl₂, S₂O, SCl₂, S₂O₂などS (硫 黄) を含んでいます [3]. これらの物質は, 光化学モ デルなどによる検証から金星大気中に存在すること はもっともらしいものの,観測されている紫外線吸収 を説明するにはモデル推定量が2桁足りないと言わ れています.また,非硫化物としてFeCl₃が硫酸に溶 解することで吸収スペクトルをよく再現しうるという 研究もありますがいずれにしても定量的な検証が進 んでいない現状です.

金星の未知吸収物質の同定には大きく2つの意義 があります.ひとつ目は金星の雲形成に関わる化学 サイクルの理解です. 金星を代表する硫化物 SO. SO, OCSなどは大気全体を見ると非常に微量です が、その光反応速度はCO2の二倍以上速く、金星の 分厚い雲層の形成と光化学の中心を担っています. 例えば雲層下部から大気上端までをモデリングした [4]では、44の分子種を含む153の化学・光化学反応 がシミュレートされていますが、その約半数が硫黄 を含む物質です. 未知吸収物質が既存の化学モデ ルの中に含まれているのか、含まれているとして吸収 物質の存在量を定量的に説明できるのか、こうした 疑問に答え金星大気の化学サイクルを理解するには 未知吸収物質の同定が避けては通れません。ふたつ 目の意義は、金星大気の放射加熱の理解です. 全球 を高度 45-70 kmにわたって分厚い雲で覆われた 金星は、太陽放射による加熱が地表面ではなく高高 度の雲層内で起こる惑星で、高度64 kmまでで太陽 放射の50%が散乱・吸収されています、大気の太陽 放射加熱は,惑星の大気大循環を決定する最も重 要な要素ですし、当然スーパーローテーションの形 成されるメカニズムを議論する上でも基本情報とな ります. しかしながら. 320-500 nmの波長域に存 在する吸収の存在が、現実的な金星大気の太陽放 射加熱推定の障害になっています. 先行研究[5]に よると、280-500 nmの波長域の吸収だけで 8 K day⁻¹ の加熱があると言われており, 320 nmより長 波長側の未知吸収物質の影響は無視できません。近 年では、ESAのVenus Express と「あかつき」を つなぐ足掛け12年間の観測によって、金星の紫外域 のアルベドが10年スケールで最大40%程度変動し、 スーパーローテーションの風速が20 ms⁻¹も変化する 可能性が指摘されるなど未知吸収の重要性が再認 識されるようになっています [6]. このように、未知吸 収物質が同定されることによってはじめて、 金星の

図3:気球搭載望遠鏡システム FUJIN-2 コンセプト図.

化学サイクルと物質の鉛直分布の詳細理解が進み, 大気の加熱分布や時間変動によってスーパーロー テーションをはじめとする金星気象がどのように応 答し維持されているかの全貌解明につながると考え ています.

3. 未知物質を調べるには

では、これまでなぜ金星の紫外線吸収物質は未 解明のままなのでしょうか? この問いに対して、著 者は明確な答えを持っているわけではありませんが、 推測するに以下の2つの大きな問題があると感じて います.

1) 紫外吸収スペクトル観測の不足

最近の研究に、紫外分光データと化学・放射モデ ルを合わせた詳細解析によって、320-500 nm にお ける吸収スペクトルに最もフィットする (x²の小さい) 物質としてS₂O か S₂O₂ (cis-, trans-OSSO) の2 つが最有力あることを示唆するものがあります [7]. この研究で使用された紫外分光データは、図2で示 したMASCSの波長分解能~4 nmのものでしたが. 複数ある候補物質をスペクトルの特徴のみから絞り 込むには限界があります。例えば、S₂Oの室内実験 で測定されたスペクトルには, 339.0, 346.0 353.0, 360.0. そして368.0 nmに< 8%の深さをもったスパ イク状の吸収構造がありますが、こうした特徴を捉え るには波長分解能が不十分でした. Messenger以 外にも地上望遠鏡やPioneer Venusによる近紫外 分光観測が実施されていますが、分解能はMASCS 同様4 nm程度でした. また, Venus Express搭載

分光装置VIRTISのUVチャンネルは 1.9 nm分解 の観測を実施しましたが、IRチャンネルからのコンタ ミネーションが発生しているため正確な吸収スペクト ル評価が困難になっています.以上のように、紫外吸 収スペクトルの評価に有力なスペクトルデータは限 られているのが現状です.

2) 紫外吸収のもつ大きな時空間変動性

冒頭に紹介した通り、金星の近紫外領域のアルベ ドは高い時空間変動を示しています、実際、図2で示 したMASCSのスペクトルは、金星フライバイ時に 経度方向に異なる領域をスキャンした結果ですが. 大きいところでは20%も吸収量が変化しています。 金星の近紫外分光観測例が限られていることもあ り、結果として紫外スペクトルに時空間変動を踏まえ た解釈が困難になっていると感じます。一般にSO2 や未知吸収物質は雲頂から5-10 km下層の60 km 付近に多く存在しているおり、図1下段で示すように 赤道域で~4日周期をもつKelvin波などの鉛直流に よって雲頂部で濃淡が作られると考えられています. 雲頂付近へ到達した吸収物質は、その後移流の効 果や光化学による分解によって徐々に薄くなるはず です. 金星の近紫外スペクトルを評価する際には. 観 測領域の力学的情報や近傍領域とのスペクトル比較 が重要ですが、このような解析を実施するには時間・ 空間分解能を改善した新たな紫外分光観測が不可 欠と言えます.

4. FUJIN-2による金星紫外観測

惑星気象研究には長期間の継続観測データに基

図4:FUJIN-2の3段階ポインティング制御概念図.

づいた議論が不可欠です. 我々は地上望遠鏡と探 査機に次ぐ新たな観測プラットフォームとして、より 安価で継続的かつ高頻度の観測運用が可能な気球 搭載望遠鏡システム (FUJIN-2)を開発していま す (図3). 気球搭載望遠鏡は、地球大気による吸収 と大気揺らぎの影響を最小化することで、広い波長 域と高い空間分解能の観測を可能とする最も低コス トで実現性の高い手段です. 上述した金星大気科 学上の未知紫外線吸収物質同定の重要性を念頭に、 我々はこのFUIIN-2を用いた金星の紫外分光・撮像 観測を計画しています. FUIIN-2では未知の吸収物 質を同定するために、口径400 mm. 合成F12の反 射望遠鏡を搭載し,波長分解能0.4 nm,波長範囲 290-450 nm, 空間解像度9"の分光観測と, 中心 波長 365 nm, 波長幅, 10 nm, 空間解像度 0.5"の 撮像観測を実施する予定です. 波長分解能について は、S2Oスペクトルに存在するスパイク状の特徴を捉 えられるよう設定しています.地上望遠鏡観測では、 マウナケア山頂であっても340 nm付近から短波長 側の大気透過率は急激に悪化しますが、FUIIN-2 が観測する高度32 kmでは, 300 nmでも透過率 40%以上の条件で観測が可能で、未知吸収物質と SO2吸収帯の一部を同時に分光することができます. 分光観測の空間解像度は光量を確保しつつ低緯度 と中高緯度を分離するための最低限の要求で9"の 設定となっていますが、より詳細な模様と背景の大 気波動などを捉えるために0.5"程度の空間解像度 を達成し、~1000 kmのメソスケール現象を分解で きる撮像観測を同時に行います. この0.5" は400 mm 望遠鏡の回折限界と等しく、地上優良観測サイトの シーイングの半分程度でもあります.

気球搭載望遠鏡による観測を成立させる最大の ポイントは,如何に高度32 kmの高度でゴンドラと 望遠鏡を制御し,観測装置内で天体像を1点に結 像させるかです.FUJIN-2では,ゴンドラの姿勢制 御,望遠鏡経緯台による天体捕捉・追尾,二軸可動 鏡 (TTM) によるリアルタイム追尾エラー補正の三 段階のポインティング制御で目標天体を追尾します (図 4)[8].特に重要な三段階目では,望遠鏡で集光 された光の一部をハーフミラーによって位置検出用 の光電子増倍管 (PMT) に導き,PMTで検出され た天体像位置の中心からの偏差をフィードバックし てTTMをリアルタイムで制御します.

FUJIN-2は、現在2023年4月にオーストラリアの アリススプリングスでの放球実験に向けた最終調整 の段階にあります.この実験では、成層圏でのゴンド ラと望遠鏡制御を完遂し、約半日のフライト中に最 低4時間の金星観測を実現して回折限界での撮像と 紫外分光スペクトルの取得を目標にしています.新型 コロナウィルスの影響で1年の実験延期となってしま いましたが、与えられた1年の猶予を最大限生かして 実験成功に向けた試験を継続しています(図5).

5. おわりに

今年になって、NASAとESAから相次いで2030 年付近に打ち上げ予定となる大型金星探査計画 (DAVINCI+, VERITAS, EnVision)を発表され、 今後10年で金星研究が国際的に盛り上がることが 予想されています.日本としては、「あかつき」の金星 探査により根付きつつある惑星の長期継続観測の 研究土壌を生かし、今後も惑星大気科学・惑星気象

図5:北海道大学附属天文台でのFUJIN-2搭載望遠鏡試験風景.

研究を牽引するべく更なる努力が求められることに なるでしょう, 未知紫外線吸収物質に関連した観測 として、EnVisionは最大遠金点が約500 kmと非常 に低高度からVenSpec-Uという紫外分光撮像装置 によってSO₂と未知吸収物質のスペクトルを高い時 空間分解能で観測することが計画されています. ま たDAVINCI+の金星投下プローブには質量分析計 (VMS) が搭載予定であるため、その場観測によっ て紫外スペクトルで推定された紫外線吸収物質の 特定に非常に重要な計測が控えていることになりま す. FUIIN-2による金星紫外観測が成功し、またも し同時期に「あかつき」が観測を継続できていれば、 次世代の大型ミッションに先んじて紫外線吸収物質 の同定に繋がる重要な結果を得ることができ、金星 大気研究における日本の存在感をアピールできるで しょう.

さらに,我々はFUJINをシリーズ化し,広い観 測波長域と高い空間分解能を達成する惑星観測プ ラットフォームとして確立したいと考えています.極 域成層圏に浮遊させた気球搭載望遠鏡は,原理的 には惑星をまる24時間以上連続的に観測可能で,風 の条件が適する放球日を選べば,成層圏の極周回 風に乗ってほぼ等緯度を地球一周させて放球地点 まで戻すことも可能です.将来的にスーパープレッ シャー気球の技術が確立すれば,推進力を備えた ゴンドラを極渦中心まで移動させて滞留させること で,数ヶ月から1年の期間にわたって惑星を定点観 測するような運用も夢ではありません.費用面につい ても,望遠鏡衛星や惑星探査機と比較して,気球搭 載望遠鏡は2桁程度低いコストで開発・運用が可能 です.我々は気球搭載望遠鏡という新たな手段を用 いて大型ミッションと相補的かつ機動的な観測の実 現を目指していきたいと思います.

参考文献

- Imai, M. et al., 2019, J. Geophys. Res. Planets 124, 2635.
- [2] Horinouchi, T. et al., 2020, Science 368, 405.
- [3] Krasnopolsky, V. A., 2019, Spectroscopy and Photochemistry of Planetary Atmospheres and Ionospheres: Mars, Venus, Titan, Triton and Pluto (Cambridge: Cambridge University Press).
- [4] Krasnopolsky, V. A., 2012, Icarus 218, 230.
- [5] Crisp, D., 1986, Icarus 67, 484.
- [6] Lee, Y. J. et al., 2019, AJ 158, 126.
- [7] Pérez-Hoyos, S. et al., 2018, J. Geophys. Res. Planets 123, 145.
- [8] Nakano, T. et al., 2019, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan 17, 51.

惑星ラボからこんにちは! その5 ~茨城大学 宇宙地球化学研究室・電波天文 観測研究室~

藤谷 涉,橋爪光,百瀬 宗武

1. 茨城大学の歴史と惑星ラボの概要

遊星人の読者の皆さま,こんにちは!本稿では, 茨城県水戸市にあります茨城大学理学部から惑星 ラボ「宇宙地球化学研究室」・「電波天文観測研究 室」をご紹介します.

茨城大学は1947年に設置された国立大学で,江 戸時代後期(1857年)に作られた徳川御三家・水戸藩 の藩校「弘道館」が前身校にあたります.はじめ文理 学部・教育学部・工学部からなっていた茨城大学は, 現在では人文社会科学部・教育学部・理学部・工学 部・農学部からなる総合大学となっています.

茨城大学理学部(大学院は理工学研究科)では, 地球環境科学コースおよび物理学コースで惑星科学 の研究を行っています.地球環境科学コースでは橋 爪光教授と筆者・藤谷渉(准教授)が主に物質科学的 なアプローチで,物理学コースでは百瀬宗武教授と 米倉覚則教授が主に観測的なアプローチで,星や円 盤・惑星の形成過程を研究しています.二つの研究グ ループは異なるコース(学科)に属していますが,同じ フロアに研究室を構え,頻繁に議論をしたり質問を したりしています.守備範囲の異なる研究室が隣接 しているため,恒星の誕生から原始惑星系円盤・惑 星の形成へとシームレスに俯瞰できるのは,茨城大 学理学部の惑星ラボの良い点だと思います.

地球環境科学コースの宇宙地球化学研究室は, 1970年代,理学部に地球科学科固体地球化学講座 が新設されたことに端を発します.その後,理学部 が幾度か改組をする間に,池田幸雄先生,小沼直樹 先生,木村眞先生,野口高明先生が在籍され,多く

1.茨城大学 理学部 wataru.fujiya.sci@vc.ibaraki.ac.jp の研究成果を残してきました.そして,7年前に筆者 が,5年前に橋爪教授が着任して現在の体制になり ました.そのため,比較的新しい研究室ですが,分 析装置やメンバー・卒業生も徐々に増え,現在は研究 室配属された4年生が7名,博士前期過程(修士課程) の学生が6名,博士後期課程(博士課程)の学生が1 名在籍しています.

一方,物理学コースの電波天文観測研究室は, 1990年代後半に坪井昌人先生が着任されたことに より設立されました.2000年1月に百瀬教授が着任 し,その後,米倉教授も加わって,星・惑星系形成に 関する観測研究をテーマに据えています.ALMAを はじめ共同利用装置を用いた研究に加えて,国立天 文台水沢VLBI観測所茨城局を構成する32m電波 望遠鏡2基の運用・観測を実行している点に大きな 特徴があります(図1).2000年以降,6名のPDと4名 の博士後期課程学生が在籍したほか,現在も外部 資金によるPDが6名,4年生が2名,博士前期課程 の学生が5名,在籍しています.

2. 宇宙地球化学研究室で行って いる研究内容

宇宙地球化学研究室で行っている研究のキー ワードは「物質」,「分析」,そして「同位体」です.

研究に用いる物質は、地球の岩石、隕石、および 探査機により回収された月や小惑星の試料など、多 岐にわたります.そのような物質を研磨薄片や粉末 試料にし、場合により酸などの化学薬品を用いて前 処理をします.その後、試料を光学顕微鏡や電子顕 微鏡で観察し、X線回折や分光により構成鉱物の種 類や組成を分析したり、示唆熱重量分析装置により

図1:国立天文台水沢VLBI観測所茨城局の全景(手前が高萩ア ンテナ、奥が日立アンテナ).

揮発性物質の含有量を測定したりします。

そして、質量分析計で同位体比を測定します. 宇 宙地球化学研究室に設置されている安定同位体比 質量分析計(図2)では試料を段階燃焼し、発生した ガス中の窒素やアルゴンの同位体比を主に測定しま す. 地球の岩石の窒素・アルゴン同位体比は地球表 層や内部における物質循環を探る優れたトレーサー となります. また、地球外物質の窒素同位体比と放 出温度から、窒素キャリアを同定してその存在量を 推定し、試料の形成環境や母天体プロセスの程度な どを明らかにします.

また、学外(東京大学やJAMSTEC高知コア研究 所など)の研究機関に設置されている二次イオン質 量分析計を用いて、隕石の形成年代や酸素・炭素同 位体比などの局所分析を行っています、特に炭素質 コンドライトの研究では、母天体での熱変成・水質変 質過程における物質進化やその時間スケールの解明 を目指しています、また、高精度かつ高空間分解能 で鉱物の年代測定を行うための手法など、新しい分 析技術の開発も行っています。

3. 電波天文観測研究室で行って いる研究内容

電波天文学研究室では、(1) ミリ波・サブミリ波 観測による惑星系円盤の研究と、(2) 主にメタノー ルメーザーを軸とした大質量星形成領域の観測研 究を2大テーマに据えて活動しています. このうち特 に惑星科学と関連深いのは(1)です. ALMAの稼働 が本格化したここ10年で、ダスト濃集領域やリング・ ギャップ構造の存在が多くの円盤で明らかになり、 それらは岩石微惑星の形成過程や惑星形成のタイミ ングを考える上で貴重な情報を提供しています. 太

図2:安定同位体比質量分析計への試料の導入.

陽系試料を用いた実験研究や惑星形成論との関連 も深いものになってきており,宇宙地球化学研究室 との情報交換はもちろん,学外との共同研究も幅広 く行っています.

これらの研究を継続しつつ,今後は,2035年頃に 本格稼働が想定されている次世代大型電波干渉計 ngVLAに関連した科学検討にも,力を入れていき たいと考えています.ngVLAはALMAより長い波 長帯域で稼働する次世代の電波望遠鏡で,ALMA が稼働する波長帯では不透明になってしまう原始惑 星系円盤の最内域を見通した撮像を可能にします。 また、より大型の星間分子の探索能力に優れる特徴 を活かし,隕石や太陽系小天体に含まれる物質の起 源を考える上でも,決定的に重要な情報をもたらす はずです.このテーマに関しても今後,惑星科学の 様々な分野の皆さんと,将来の科学の発展を俯瞰し た議論を深めていきたいと考えています.

4. おわりに

本稿では茨城大学理学部の惑星ラボを紹介し, 我々が行っている研究の内容について説明してき ました.大学院で一緒に研究を行ってみたい方, ぜひウェブサイトの入学案内(http://www.gse. ibaraki.ac.jp/guidance/)をご覧下さい.もちろ ん,研究室の見学はいつでも歓迎です.

最後になりましたが、2022年の日本惑星科学会秋 季講演会は水戸で開催します.惑星ラボのメンバー がLOCを務めます.新型コロナウィルス感染症の状 況次第ではありますが、可能ならぜひ水戸にお越し ください!秋から冬にかけては常陸秋そば・鮟鱇など 美味しいものがたくさんあります.皆さまと水戸でお 会いできるのを楽しみにしております. 180

日本地球惑星科学連合2021年大会 学生優秀発表賞 受賞者紹介

本学会が団体会員として参加している日本地球惑星科学連合の2021年度大会(5月30日-6月6日,オンライン)において、本学会の学生会員の中から2名の方が「学生優秀発表賞」を受賞されましたので、ご紹介いたします.項目は、(1)氏名、(2)発表題目(英語)、(3)発表題目(和文)、(4)所属、(5)学年、(6)発表内容、(7) 受賞コメント、の順です.

(1) 紅山仁(べにやまじん)

(2) Highly Time-Resolved Photometric Observations of Tiny Near Earth Objects with the Tomo-e Gozen Camera

- (3) Tomo-e Gozenカメラを用いた微小地球接近小 惑星の高時間分解撮像観測
- (4) 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻
- (5) 博士1年

(6) 小惑星帯から軌道進化した天体である地球接 近小惑星(near-Earth object, NEO)は軌道 進化過程に自転状態が変化する.より強い自転 変化を経験する直径100m以下の微小NEOの 自転周期は微小天体の力学史と特性の解明に有 用な物理量である.我々は木曽シュミット望遠鏡 とTomo-e Gozenカメラを用いて51天体の微小 NEOの高時間撮像観測を実施した. 周期1分以 下のNEO11天体を含む32天体のNEOの自転周 期の推定に成功し,本観測で得た自転周期分布 を説明しうる仮説の検証を行った.本研究の結 果からはサイズ選択的にNEOの自転周期変化 を抑制するプロセスの存在が示唆される.

(7)この度栄誉ある賞を受賞できたのは、研究グ ループの酒向重行氏、大澤亮氏、瀧田怜氏をは じめ多くの共同研究者、Tomo-e Gozenチーム、 そして長野県木曽の皆様のおかげです。これから より一層身を引き締めて精進いたします。

(1) 湯本 航生(ゆもと こうき)

(2) Quantitative analysis of spectral evolution of craters, boulders, and regolith on Ryugu and Bennu

(3) -

- (4) 東京大学大学院 理学系研究科 地球惑星科学 専攻
- (5)博士1年
- (6)本研究ではC型小惑星リュウグウとベヌーの可視 スペクトルを統計解析し、宇宙風化の影響を定量・比較しました.はやぶさ2とOSIRIS-REx探 査機による観測から、クレーターや岩塊といった 地形ごとのスペクトルを評価できるデータが得ら れました.各地形のスペクトルと年代に関する指 標(例えばクレーターならその直径)の間の傾向か ら、宇宙風化の影響を特定できます.本研究はC

型小惑星全体のスペクトルを解釈するために必 要な制約条件を探査データから定量したことに 意義があります.

(7)この度は栄誉ある賞を賜り、また本誌にて紹介の機会をいただきましたこと大変光栄に思います、共同研究者の皆様及び先生方に心より感謝申し上げます、今後とも惑星科学分野の発展に貢献できるよう邁進して参ります。

JSPS Information

◇日本惑星科学会第56回総会議事録

◇日本惑星科学会第148回運営委員会議事録

◇日本惑星科学会第149回運営委員会議事録

◇日本惑星科学会第150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56回総会議事録

日時:2021年9月17日(木) 16:20-17:20 場所:オンライン開催

正会員数:620名 定足数:62名 参加人数:146名(最終参加人数) 委任状:48通(議長:45通,中村 昭子会員:1通,奥住 聡会員1通,瀧 哲朗会員1通)

1. 開会宣言

保井総務専門委員長が開会を宣言した.

2. 議長団選出

運営委員会からの推薦で議長に黒川 宏之会員,書記に金丸 仁明会員が選出された.

3. 議事

3.1. 審議事項

・第16期下期一般会計・特別会計予算案の報告(佐伯財務専門委員長) 2021年度の予算執行状況について説明がなされた。 2021年度には、学会の事務体制移行費用が盛り込まれることなどが説明された。

・日本惑星科学会会則の改訂について(保井総務専門委員長)

現行の会則には学生会員の職業に関する条件が記載されていないため、「常勤職に就いていない」を追加するこ

と(第2章第5条)が提案された.

遊星人購読を目的とした購読会員を「準会員」から「会員」に変更し、それに伴う会則の改定(第2章第5条及び第 6条)が提案された.

・大型研究計画への対応について(並木副会長)

大型研究計画への惑星科学会の対応について報告がなされた.

惑星科学会でとりまとめた方針を一次案として日本学術会議に提示する予定であるが,総会での承認が間に合わないため,運営委員会に一任してもらうことを希望する旨が説明された.

・質疑応答及び討論

質問なし.

・採択

審議事項の採決が行われ, 賛成: 193(うち出席者145名), 反対: 0, 保留: 1(うち出席者1名) により採択された.

3.2. 報告事項

・自然災害に伴う会費免除措置について(佐伯財務専門委員長)

自然災害に伴う会費免除措置(2021年12月中旬締切)について説明がなされた.

·2021年度秋季講演会開催報告(渡邊2021年秋季講演会組織委員長)

2021年度秋季講演会の実施状況について報告がなされた.

- 当初の計画では,現地とオンラインのハイブリッド開催を予定していたが,新型コロナウイルス感染拡大による 緊急事態宣言発令のため,完全オンライン開催へと変更された.
- 発表件数(口頭86件, ポスター84件, 最優秀発表選考9件, 合計179件)や参加登録者数(合計264名)についての説明と収支報告がなされた.
- 会議ツールの運用経験不足や過密な講演スケジュールなど、仮にハイブリッド開催した場合に予想される困難な 点について議論がなされた.
- 昨年度の秋季講演会は2セッションを並行して行った実績があるが、なぜ今年度はシングルセッションで行った のかという質問がなされた.ハイブリッド開催からオンライン開催への移行に伴うコストや人手を軽減するためと の回答がなされた.

ハイブリッド開催の場合は,ポスター発表はどのような形式をとる予定であったのかという質問がなされた.発 表資料を事前にSlackで共有し,現地では,ポスターボードにポスターを掲示し,各自のパソコンを用いて中継す る予定であったとの回答がなされた.

·2022年度秋季講演会開催案内(百瀬2022年秋季講演会組織委員長)

2022年度秋季講演会の開催計画と予算計画について報告がなされた.

開催期間は、2022年9月20日-22日の3日間であり、茨城県水戸市内のザ・ヒロサワ・シティ会館を予定している. 現地とオンラインのハイブリッド開催となる場合、あるいは完全オンライン開催となる場合の対応は未検討である. 秋季講演会の開催時期は、年によって9月または10月と異なり、最優秀発表賞エントリーを希望する9月卒業の博 士学生の発表機会を考えると不公平になるのではないかとの問題提起がなされた、講演会LOCの立場からの 意見としては、授業期間が始まる10月は大学の施設が会場として押さえづらくなるため、9月の方が開催しやすい との意見が出された.

・学会公式Twitterアカウントについて(奥住広報専門委員長)

惑星科学会内外に過去の遊星人記事を発信していく取り組みについて報告がなされた.

3.3 学会賞授賞式:2021年度最優秀発表賞(中島学会賞選考委員長)

2021年度最優秀発表賞について, 審査結果の発表がなされた. 11名がエントリーをし, 審査資格を満たす9名が本審査に進み, 選考は全てオンラインで行われた. 選考の結果, 紅山 仁会員が最優秀発表賞受賞者に選ばれた.

4. 議長団解任

5. 閉会宣言

保井総務専門委員長が閉会を宣言.

以上

◇日本惑星科学会第148回運営委員会議事録

日時:2021年9月16日(木)17:30-19:30 場所:オンライン(Zoom Meeting)

運営委員:

出席者22名

中村 昭子, 並木 則行, 中本 泰史, 玄田 英典, 関根 康人, 奥住 聡, 寺田 直樹, 田中 秀和, 小林 浩, 関 華奈子, 千秋 博紀, 大竹 真紀子, 佐伯 和人, 薮田 ひかる, 保井 みなみ, 荒川 政彦, 倉本 圭, 田近 英一, 中島 健介, 中村 智樹, 三浦 均, 百瀬 宗武

欠席者1名

臼井 寛裕

オブザーバー:

城野 信一(2021年秋季講演会組織委員) 北里 宏平(総務専門委員)

議題·報告事項:

2021年秋季講演会について(城野 2021年秋季講演会組織委員)

・当初はオンラインと対面のハイブリッドを予定していたが、緊急事態宣言を受けてオンラインのみに変更して開催した.

・口頭発表86件,ポスター発表84件,最優秀発表賞9件,参加登録者264名.

- ・収入86万円,支出21万円(アルバイト代15万円,会議ツール関連6万円).
- ・現地経費が減ったため60万円ほどの黒字.

・来年は会費の切り替え等を事前に考えて黒字を抑える工夫をした方がよいとの意見があった.

2. 2022年秋季講演会実施案(百瀬 2022年秋季講演会組織委員長)

・日程は2022年9月20日(火)から22日(木)の3日間.

・9月23日(祝)に一般向け講演会を予定.

- ・懇親会の実施検討はペンディング.
- ・会場はザ・ヒロサワ・シティ会館(水戸駅から徒歩15~20分).
- ・水戸市からの会議開催補助金を獲得できる見込み.

3. 第16期下期一般会計·特別会計予算案説明(佐伯 財務専門委員長)

- ・第16期上期の予算執行状況と併せて説明がなされた.
- ・2022年度の収入は2021年度と大きな変更なし.
- ・学会事務体制移行費用は臨時予算で対応する.
- ・イーサイドとの契約は今年度,1年契約で更新した.
- ・学会サーバの維持更新費用は2019年度から4年間の契約になっている.
- ・秋季講演会の保育補助費について、LOC予算ではなく学会予算から支出することの確認がなされた.

4. 自然災害に伴う会費免除措置等について(佐伯 財務専門委員長)

- ・2021年度(1~12月)に自然災害で災害救助法適用地域となった場所を対象とする.
- ・適用地域以外で同等の災害にあった場合やコロナで経済的に困っている場合も相談に応じる.

・2021年12月中旬を締め切りとして、近日中にomlで周知する予定である.

5. 日本学術会議大型研究計画について(並木 副会長)

・2021年8月2日から27日まで大型研究計画への提案の受付を行った.

・3件の応募があり、それらの提案について2021年9月1日に公開の説明会を開催した.

6. 学術会議マスタープラン2023への提案に関する取りまとめ一次案(荒川 将来計画専門委員長)

・上記の大型研究計画への提案について、作業部会でまとめられた一次案の説明がなされた.

・秋季講演会期間中に学会員向けの説明会を予定している.

7. 事務局体制移行作業の現状報告(中本 事務局体制検討部会長)

・2022年の体制について各方面との交渉を行っている.

・2022年は基本的にイーサイド、2023年1月から新業者に委託する方針である.

8. 入退会状況報告(保井 総務専門委員長)

・会員数に大きな変動はないことが報告された.

9. 第56回総会の議長・書記の推薦について(保井 総務専門委員長)

・議長に黒川 宏之会員,書記に金丸 仁明会員が推薦され,承認された.

- 10. 会員種別に関する会則及び会員種別表の改訂について(保井 総務専門委員長)
- ・学生会員について現行の会則では職業に関する規定がないため、「常勤職に就いていない」と条件を追加すべきとの提案がなされ、承認された.
- ・購読会員について現行の会則に記載がなく、遊星人を営利目的で販売しているという誤解を受ける可能性がある。
- ・購読会員を会員とする規定を会則に追加すべきとの提案がなされ、承認された.
- 11. 日本学術振興会育志賞の推薦状況について(保井 総務専門委員長)
- ・前回の運営委員会からの継続で、育志賞の推薦回数が少ないことについて問題提起がなされた.
- ・議論の結果,積極的な応募を呼びかけるようにする一方で,候補者の選出は現行のやり方を維持することとした.
- 12. 2021年度最優秀発表者選考結果について(中島 学会賞選考委員長)
- ・11名の応募があり、2名が資格を満たしておらず、9名を審査対象とした.
- ・選考委員会からの推薦に基づき、紅山 仁会員を受賞者として決定した.

13. 学生発表賞のあり方について(中島 学会賞選考委員長)

- ・学会賞選考委員会の中から、本学会の学生発表賞はSGEPSSなどのそれと比べて厳しいのではないかとの意見があった。
- ・本学会の受賞者数は1名ないしは2名であるのに対し、SGEPSSのオーロラメダルは10名弱.
- ・発表賞に限らず学生を総合的に歓迎する仕組みを考えるべきである.
- ・議論の結果,学生を歓迎する仕組みを含めた発表賞のあり方について,学会賞検討作業部会で追加検討することとなった.
- 14. 学会賞新設の検討および最優秀研究者賞評価方法の再検討に関する報告(田中 学会賞検討作業部会長)
- ・学会賞選考委員から研究業績で評価しにくい研究を対象とした賞の新設の要望があったことを受けて、検討した結果の報告と提言がなされた。
- ・最優秀研究者賞と同様な年代を対象とした新しい学会賞の創設は,賞の価値,受賞者の利益という観点から良い案とは思われない。
- ・最優秀者研究者賞でより幅広い人材を受賞できるようにするには、研究評価基準の見直しが必須の要素である が、従来選考においても論文業績のみではない。
- ・選出されにくい分野によい候補者がいる場合,3名選出とすることで当該研究者も選出することは,分野間のバランスを取る上で良い案であるかもしれない.
- ・受賞者年齢制限を40歳まで引き上げれば、長期間を要する研究を受賞しやすくするのに有効かもしれない。
- ・機器開発などに特化した賞とするとそれ以外の研究をディスカレッジする恐れがある.
- ・JpGUの宇宙惑星科学セクションで賞を新設するのも一つの手である.
- ・議論の結果,検討結果は共有するものの,賞の新設や評価方法の変更は見送ることとした。

15. 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.
- ・編集専門委員会の中から、一般の査読論文が少なくなってきているとの意見が出ている.
- ・奥住委員をゲストエディターに迎えた特集「惑星形成論の現在(仮)」を企画している.

JSPS Information

・2021年の3月号と6月号において賛助会員名簿が不掲載であったことが判明した.

・9月号から名簿の掲載を再開し, 謝罪文を併記した.

・議論の結果,追加の対応で会長名の謝罪文と無料広告掲載の案内を直接賛助会員へ送付することとした.

16. 編集専門委員の変更(辞任)について(三浦 編集専門委員長)

・渡部 潤一会員より編集専門委員の辞任申し入れがあったとの説明がなされ,渡部会員の2021年9月末での辞任 が承認された.

17. その他

・奥住委員より学会公式Twitterアカウントの運用を開始した旨,報告がなされた.

以上

◇日本惑星科学会第149回運営委員会議事録

期間:2021年10月1日(金)~10月4日(月)

議題:学会賞検討作業部会の期限延長と部会員の追加について

運営委員会委員:

出席(23名)

中村 昭子, 並木 則行, 中本 泰史, 玄田 英典, 関根 康人, 奥住 聡, 寺田 直樹, 田中 秀和, 小林 浩, 関 華奈子, 千秋 博紀, 大竹 真紀子, 佐伯 和人, 薮田 ひかる, 保井 みなみ, 荒川 政彦, 臼井 寛裕, 倉本 圭, 田近 英一, 中島 健介, 中村 智樹, 三浦 均, 百瀬 宗武

欠席(なし)

成立条件:期間内に議決返信のあった者を委員会出席とみなす. 議決方法:上記期間内に steering-ml@wakusei.jp 宛に投票.

議題:

学生賞検討部会の期限を延長し、学生発表賞等について検討する. これにあたり、部会員を追加する.

提案内容:

延長目的:学生会員を対象とする賞等に関して、学生をよりエンカレッジする観点から国内外他学会の例を参考に 検討する。

新部会員:寺田 直樹, 三浦 均

期限:2022年末まで

審議結果:議題は原案のとおり承認された(可23・否0).

以上

◇日本惑星科学会第150回運営委員会議事録

期間:2021年10月7日(木)~10月11日(月)

運営委員会委員:

出席(23名)

中村 昭子, 並木 則行, 中本 泰史, 玄田 英典, 関根 康人, 奥住 聡, 寺田 直樹, 田中 秀和, 小林 浩, 関 華奈子, 千秋 博紀, 大竹 真紀子, 佐伯 和人, 薮田 ひかる, 保井 みなみ, 荒川 政彦, 臼井 寛裕, 倉本 圭, 田近 英一, 中島 健介, 中村 智樹, 三浦 均, 百瀬 宗武

欠席(なし)

成立条件:期間内に議決返信のあった者を委員会出席とみなす. 議決方法:上記期間内に steering-ml@wakusei.jp 宛に投票.

議題:

事務局移行作業に伴う会則の変更予定について、以下の題目を討議する.

1. 添付した規約の承認を行う.

2. 次の総会で、この規約を会則に反映させた以下の変更案を承認する.

議案:

背景:

事務局移行に関連し、会費振込を受け取るゆうちょ銀行口座を新たに作りたい.

そのためには会則に事務所の所在地と会計承認・報告の方法が明記されている必要があることがわかった.

また、会則への記載は必須ではないが、設立年月日を示す文書が必要であることもわかった.

会則の変更は来年5月の総会で承認されて完了するが、その前に運営委員会で会則変更予定の承認を得て、それを 根拠として郵便局に口座開設を申請したい。

1. 規約について:

添付ファイル参照のこと(日本惑星科学会ホームページの会員ページに掲載).

赤字で会則を訂正したものを規約としている.

2. 会則変更案:

https://www.wakusei.jp/abstract/rule/rule-2021-09-17.html

の主な変更点は以下のとおりである.

所在地を大阪大学とするのは、財務委員長最寄りの郵貯窓口で手続きを行うためである.

・第1章第1条:

変更前:本会は、日本惑星科学会(The Japanese Society for Planetary Sciences)という.

変更後:本会は、日本惑星科学会という. 英語名称は、The Japanese Society for Planetary Sciencesという.

・第1章第4条:

変更前:本会の事務局は付則に定める場所におく. 変更後:本会の所在地は付則によって定める.

·第4章第14条

1項に(6)を設ける:

1.(6)本会の予算の承認,及び収支決算の報告と承認は総会において執り行う.

第6章第18条

変更前:本会則は2009年5月18日から施行する.

変更後:本会は1992年4月8日に設立し、本会則は2021年9月17日から施行する.

·付則1

変更前:本会の事務局は株式会社イーサイド内におく.

変更後:本会の所在地は,〒560-0043大阪府豊中市待兼山町1-1 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学 専攻内とする.

・付則2の削除

削除:個人または団体は別に定める年額で会誌を定期購読できる.

・付則3を2,4を3に変更

・最後の文章を追加

追加文章:

この規約の記載内容について事実と相違ないことを証明します.

兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1

神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻

中村 昭子(印)

総会日程が決まった時点での変更予定箇所:

190

・第6章第18条の会則施行日

·会則変更履歴

審議結果:

議題は原案のとおり承認された(可23・否0).

以上

◇日本惑星科学会賛助会員名簿

2021年8月4日までに, 賛助会員として本学会にご協力下さった団体は以下の通りです. 社名等を掲載し, 敬意と感 謝の意を表します. (五十音順)

·Harris Geospatial 株式会社

・株式会社ナックイメージテクノロジー

・株式会社ノビテック

◇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.

2021/11

2021年11月9日(火)-11月12日(金)第65回宇宙科学技術連合講演会

- (a) オンライン会場
- (b) 一般社団法人 日本航空宇宙学会
- (c) http://branch.jsass.or.jp/ukaren65/, 日本航空宇宙学会事務局(E-mail:spnavcom_ukaren65@ jsass.or.jp)

2022/2

2022年2月26日(土)-3月4日(金)第33回宇宙技術および科学の国際シンポジウム

- (a) 別府国際コンベンションセンター ビーコンプラザ(+オンライン)
- (b) 第33回宇宙技術および科学の国際シンポジウム組織委員会, 一般社団法人 日本航空宇宙学会
- (c) https://www.ists.or.jp, 日本航空宇宙学会内 ISTS組織委員会事務局(E-mail:secretariat@ists.or.jp)

超高速度ビデオカメラ!

最高撮影速度 1,750,000fps

フル解像度 1.280×800で

76,000fps

MX-7510

23.7×14.8mm

散弾銃の砲口離脱 影速度30,800コマ/秒 初速:307m/秒

¥像度 / フレームレート							
	TMX-7510						
解像度	Standard	Binned	解像度	Standard	Binned		
1280×800	76,000	-	1280×128	456,520	-		
1280×640	94,590	-	640×256	-	456,520		
1280×480	126,500	-	1280×96	617,640	-		
1280×448	134,610	-	640×192	-	617,640		
1280×384	156,710	-	1280×64	772,050	-		
1280×256	233,330	-	640×128	-	772,050		
640×384	-	308,820	-	-	-		
FAST OPTION							
解像度	Standard	Binned	解像度	Standard	Binned		

875.000

1280×32

640×64

https://www.nobby-tech.co.jp/

1,750,000

デモンストレーションのご依頼お待ちしております!

875,000

 1280×64

640×128

sales@nobby-tech.co.jp

高速度カメラの撮影作業、弾道計測、 各種試験の撮影計測請負いたします DIC 計測は実績のあるノビテックにお任せください。

日本総代理店・お問合せ先

本 社 〒150-0013 東京都渋谷区恵比寿1-18-18 東急不動産恵比寿ビル7階 TEL.03-3443-2633 FAX.03-3443-2660 E-mail ホームページ

商品詳細はこちら▼

1.750.000

PHANTOM

編集後記

今年の6月に、日本惑星科学会の公式twitterアカ ウント(@wakusei_jp)が開設され、広報専門委員会 から日々情報が投稿されていることをご存知でしょう か.年会などの情報や遊星人の最新記事に加えて、遊 星人の過去記事が、ランダムに一日に2件ツイートされ ています、見逃していた記事や改めて読みたくなる論 文、日本語だからこそ読みたくなる記事を見つけるきっ かけになればと思っています、さらに、これまでオンラ インでは読めなかった1992年の創刊号から2004年ま での遊星人記事が、三浦編集長のご尽力で、学会ウェ ブサイトから読めるようになりました。

国際誌へ投稿することが重視される昨今,日本語で 科学的な文章を書く機会は減少しています.最初から 英文で,というのは一見効率がいいようにも思えます. 一方で, 普段日本語を使って生活している私は, 何かを 勉強し始めるときに, 日本語の論文があると気軽に手 を出せて, 情報の入り方も早いと感じます. 研究を始め たばかりの学生さんにとっても, 遊星人は研究へのよ い窓口になりつづけるでしょう.

遊星人では、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を解説論文として募集していま す.本号では、Harald Krüger博士がドイツ語で一 般向けに書かれた記事に加筆・修正し、千葉工大の小 林博士が和訳した原稿を掲載しています.ご自身の研 究成果や、周辺研究分野の動向を、日本語で広く会員 に伝える場としても、遊星人を活用していただきたいと 思っています.投稿に迷ったら、編集幹事までお問い合 わせください.(瀧川)

編集委員 三浦均[編集長] 瀧川晶[編集幹事]

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

2021年12月25日発行

日本惑星科学会誌 遊·星·人 第30巻 第4号

定 価 一部 1,925円(税込·送料込)

- 編集人 三浦 均(日本惑星科学会編集専門委員会委員長)
- 印刷所 〒224-0044 神奈川県横浜市都筑区川向町787-1 株式会社 シュービ
- 発行所 〒105-0012 東京都港区芝大門2-1-16 芝大門MF ビルB1階
 株式会社イーサイド登録センター内 日本惑星科学会
 e-mail:staff@wakusei.jp
 TEL:03-6435-8789/FAX:03-6435-8790

(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

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,著作権者から複写等の 行使の依託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい.

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル 学術著作権協会

TEL:03-3475-5618/FAX:03-3475-5619

e-mail:kammori@msh.biglobe.ne.jp

著作物の転載・翻訳のような複写以外の許諾は、直接日本惑星科学会へご連絡下さい.

学会誌原稿作成の手引き

日本惑星科学会編集専門委員会

原稿の様式

○投稿原稿:

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

○最終稿:

原稿の掲載が決定したら, 最終原稿準備チェッ クリストを参照して必要なファイルを提出する. 原稿のファイル形式は WORD, PDF, または, テ キストファイル. 図は別ファイルにて提出. その ファイル形式は tiff, eps, pdf, pict が望ましい. jpeg, png も可.

投稿原稿送り状の雛型および各チェックリストは ウエブサイト

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

2. タイトル

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

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

3. 要旨

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

4. セクション

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

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

5. 述語

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

6. 字体

– 数字, 英字は半角とする. また() []: ;など区切り記号も半角を用いる.
 一変数は斜体, ベクトルと行列は太字, を使う.

7. 句読点

句読点は全角の","と"."を用いる.

8. 図. 表

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

図作成のガイドライン:

原則として、電子ファイルとして作成すること、解像度 は印刷時実寸で300dpi相当以上、ファイル形式は TIFF, EPS, PDF, JPEG, PNG が望ましい。 やむをえない場合に限り、写真も可とする.その際は L版サイズ以上の大きさで鮮明な写真を送付すること。 送付された写真は原則として返却しない.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"l"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。

文献リストは題名は省略し、3人以上の著者は et al. と表記する. 雑誌名などは一般に使われる略称を用い、 ページについては開始ページのみを記すこととする.

参考文献

[1] Wakusei, T. et al., 1989, Astron. Astrophys. 220, 293.

[2] 惑星太郎, 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).

 $\left[4\right]$ Hayashi, C. et al., 1985, in Protostars and Planets II, 1100.

11. 投稿原稿送付先

遊星人編集長 三浦 均 e-mail:chiefeditor@wakusei.jp

電子メールで送付できない場合は下記へ郵送 〒105-0012 東京都港区芝大門2-1-16 芝大門MFビルB1階 株式会社イーサイド 登録センター内 日本惑星科学会事務局 遊星人編集長

The Japanese Society for Planetary Sciences

