

遊



日本惑星科学会誌

**Planetary
People** **4**

December 2022 vol31 no

星

人

- 2021年度最優秀発表賞受賞論文
- はやぶさ2試料の化学的初期分析からわかってきたこと
- 一番星へ行こう! , 海外研究記, 惑星ラボ, 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。

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られることができる。
- 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られることができる。
- 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31巻 第4号

目次

巻頭言 野村 英子	271
<hr/>	
「2021年度最優秀発表賞受賞論文」 木曾105 cmシュミット望遠鏡トモエゴゼンを用いた地球接近小天体の観測的研究 紅山 仁, 酒向 重行, 大澤 亮, 瀧田 怜, 小林 尚人, 奥村 真一郎, 浦川 聖太郎, 他3名	272
<hr/>	
火の鳥「はやぶさ」未来編 その28 ～はやぶさ2試料の化学的初期分析からわかってきたこと～ 坂本 尚義, 橋 省吾, 渡邊 誠一郎, はやぶさ2初期分析チーム	286
一番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦 その52 ～光線を追え! IR2検出器点広がり関数PSFの物理モデリング～ 佐藤 毅彦, IR2チーム	298
系外惑星「遠い世界の物語」その15 ～IRD-SSPによるM型矮星Ross 508 を周回するスーパーアースの検出～ 原川 紘季, IRD-SSPチーム	303
遊星人の海外研究記 その9 ～悠々自適な研究生活 at マックス・プランク化学研究所～ 藤谷 渉	309
惑星ラボからこんにちは!その7 ～東京工業大学・地球惑星科学系～ 奥住 聡, 佐藤 文衛, 中本 泰史	316
<hr/>	
「惑星科学フロンティアセミナー 2022」参加報告 茂木 遥平	319
活動報告 学校教育の現場から ～火星の物理的風化に挑む中学校科学部実験～ 小森 信男	322
日本地球惑星科学連合2022年大会 学生優秀発表賞 受賞者紹介	327
New Faces 奥谷 彩香, 宮崎 慶統	330
JSPS Information	334

Contents

Preface	H. Nomura 271
<hr/>	
Observational study of near-Earth objects with Tomo-e Gozen	
J. Beniyama, S. Sako, R. Ohsawa, S. Takita, N. Kobayashi, S. Okumura, and 4 authors	272
<hr/>	
Phoenix “Hayabusa” : A tale of the future (28)	
- What has been learned from the initial chemical analysis of Hayabusa2 samples -	
H. Yurimoto, S. Tachibana, S. Watanabe, Hayabusa2 initial analysis team	286
Road to the first star: Venus orbiter from Japan (52)	
- Chase the light! Physically modeling the point-spread function of the IR2 sensor -	
T. Satoh, IR2 team	298
Tales of distant exoplanet worlds (15)	
- Detection of a Super-Earth around the M dwarf Ross 508 -	
H. Harakawa, IRD-SSP Team	303
Letter from planetary people working abroad (9)	
- Leisurely life at Max Planck Institute for Chemistry, Mainz -	
W. Fujiya	309
Hello from planetary labs! (7)	
- Planet and Exoplanet Groups at Tokyo Institute of Technology -	
S. Okuzumi, B. Sato, T. Nakamoto	316
<hr/>	
Event report of “Planetary Science Frontier Seminar”	
Y. Moteki	319
The activity report from the field of school education -Challenges to physical weathering on Mars at a junior high school science club experiment-	
N. Komori	322
Winners of JpGU 2022 Outstanding Student Presentation Award	327
New Faces	
A. Okuya, Y. Miyazaki	330
JSPS Information	334

巻頭言

系外惑星の発見やALMAなどの大型望遠鏡による原始惑星系円盤の詳細観測を経て、惑星科学と天文学の関係は、最近より密になっているように思います。私はこれまで、天文学的アプローチで、原始惑星系円盤内の惑星系形成や物質進化に関する研究をしてきました。惑星科学会に所属したのは、ポスドク以降でしたが、今回、巻頭言を依頼され、過去の遊星人を眺めていたところ、第1巻(1992年)に野辺山ミリ波干渉計による原始惑星系円盤の観測画像を見つけました。当時の観測では、原始惑星系円盤はほぼ点源でしたが、最近のすばる望遠鏡やALMAを用いた詳細観測により、円盤内の惑星形成を示唆するリング・ギャップ・スパイラル構造や、周惑星円盤の候補天体まで次々に発見されるようになりました。原始惑星系円盤が検出すらされていない時代に築かれた惑星形成論が、ようやく観測的に実証できるようになったのです。その一方で、最新の観測により新たに生じた謎を解明するための新しい惑星形成論も提唱されています。今から数十年後には、周惑星円盤内の詳細構造が明らかになり、衛星形成論が観測的に検証できる日が来るのかもしれませんが。

星惑星形成領域から惑星系への物質進化の観点では、ESAによるロゼッタ彗星探査ミッションが、惑星科学と天文学の結びつきを強めたように思います。星惑星形成領域における星間化学と、チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星で発見された分子をリンクする研究が、ヨーロッパを中心に盛んに行われました。ALMAによる、星惑星形成領域における複雑な有機分子の新たな発見も、それらの研究を後押ししました。日本では今、はやぶさ2の回収サンプル分析により、ワクワクする成果が続々と出ています。これらの結果と星間化学をリンクすることで、惑星系の物質起源に関する研究の新展開が期待されます。

天文学の分野でも、ALMAやJWST、それに続く次世代望遠鏡により、系外惑星研究も含め、今後も新発見が続くと期待されます。惑星科学と天文学の新規ミッションが互いに相乗効果をおよぼして、惑星形成や物質起源の謎を解明していけると良いと思います。

野村 英子(国立天文台)

「2021年度最優秀発表賞受賞論文」 木曾105 cmシュミット望遠鏡トモエゴゼン を用いた地球接近小天体の観測的研究

紅山仁^{1,2}, 酒向重行¹, 大澤亮³, 瀧田怜¹, 小林尚人¹, 奥村真一郎⁴,
浦川聖太郎⁴, 吉川真⁵, 臼井文彦^{5,6}, 吉田二美^{7,8}

2022年6月17日受領, 査読を経て2022年10月6日受理

(要旨) ここ数年, 世界の大規模サーベイ観測により年間およそ3,000個の地球接近小天体(near-Earth object, 以下NEO)が発見されている。地球に接近する軌道を持つNEOはプラネタリーディフェンス, 探査機によるその場探査, 微小小惑星の観測可能性など多くの観点から重要な天体である。天球上のみかけ移動速度が大きいNEOは観測画像上で星像が伸び検出感度が低下する。また天体によっては地球接近時の数時間から数日の間の非常に限られた期間しか観測することができない。したがって直径100 m以下の微小小惑星の自転周期やスペクトル型などの物理量の推定はほとんど行われていない。微小小惑星の物理量の推定を行うためには小惑星を自ら発見し即座に追跡観測することが望ましい。我々は2019年に木曾観測所105 cm シュミット望遠鏡に搭載された広視野高速カメラTomo-e Gozen (トモエゴゼン)を用いて地球接近小天体の観測的研究を進めてきた。本稿では我々トモエゴゼンNEOチームが進めているトモエゴゼンを用いたNEO探索および微小NEOの高時間分解撮像観測について紹介する。

1. はじめに

地球の水や生命の起源に関する仮説の中で小惑星による物質輸送は有力な説の一つである[1]。小惑星は太陽系初期に衝突合体・破壊過程を経て形成された微惑星の生き残りだが、惑星に比べて熱的進化の度合いが小さいので、その内部に太陽系始原物質を保存している可能性が高い。小惑星表面の詳細観測や物質分析を通じて惑星形成期の情報を読み解くため、小惑星探査機による小惑星のその場探査およびサンプルリターンが実施されてきた。太

陽系小天体の中で近日点距離が1.3 au未満で定義される地球接近小天体(near-Earth object, 以下NEO)は地球から比較的アクセスしやすく、日本のはやぶさ、はやぶさ2プロジェクトの探査先小惑星Itokawa, RyuguもNEOである[2]。2024年に打ち上げが予定されている日本のDESTINY+がフライバイ探査するPhaethonもNEOに分類されている[3]。NEOの中には地球に衝突する天体も存在する。人類をその被害から守るプラネタリーディフェンスの観点からもNEOは重要な研究対象である[4]。

近年, Catalina Sky Survey, Pan-STARRS, ATLAS[5-7]などNEO発見を目的の一つとする多数の地上サーベイ観測が行われており, 2022年6月1日現在のNEO発見数は29,237天体¹にのぼる。発見数に比べて数は少ないが, 発見したNEOの自転状態や組成を推定する観測も行われている[8]。

NEOの多くは火星-木星間にある小惑星帯の小

1. 東京大学大学院理学系研究科付属天文学教育研究センター
2. 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻
3. 国立天文台
4. 日本スペースガード協会
5. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
6. 神戸大学大学院理学研究科惑星科学研究センター
7. 産業医科大学
8. 千葉工業大学惑星探査研究センター
beniyama@ioa.s.u-tokyo.ac.jp

¹Center for Near Earth Object Studies(https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/site_all.html)2022-06-17 にアクセスした。

惑星が軌道進化した天体であると考えられている[9, 10]. 小惑星帯内で衝突破壊過程を経て生成した小惑星は、太陽輻射に起因する非重力的な力学機構(Yarkovsky効果)により軌道要素が徐々に変化する[11,12]. その後巨大惑星との軌道共鳴に入った小惑星の一部は数百万年程度の時間をかけてNEOへと軌道進化する. この軌道進化過程では、小惑星表面での太陽輻射の反射、再放射の非等方性に起因するトルクによって小惑星の自転状態が変化する(YORP効果). 小惑星表面に垂直な方向の熱伝導に起因するYORP効果はNYORP効果と呼ばれ、2000年以降精力的に研究されてきた. 近年では天体表面に並行な方向の熱伝導に起因するTangential YORP (TYORP) 効果が提唱、研究されている[13]. 小惑星の慣性モーメントと表面積に依存するYORP効果による自転速度変化は天体直径の2乗のサイズ依存性を持ち、直径が小さい小惑星ほど自転状態が変化しやすい. YORP効果は天体サイズ以外にも形状、熱物性(熱慣性)、質量密度、自転軸の向きなど多くの物理量に依存して作用する. YORP自転加速の末に、天体を構成する物質に働く遠心力が自己重力よりも大きくなった場合、小惑星形状の変形や分裂が起こる. ゆえにYORP効果が強く働く直径が小さい小惑星の自転周期分布は、微小小惑星の力学史および物理的性質を反映していると考えられる.

小天体の光度曲線観測結果がまとめられているThe Asteroid Lightcurve Database (LCDB, [14]) 2021年6月版では5,060天体の自転周期が精度よく求められている. これらの天体直径と自転周期の関係(直径-自転周期関係)を図1に示す. 直径200 m 以上の小惑星は自転周期約2時間で分布が頭打ちになっており、この明瞭な構造はスピンバリアとよばれる. スピンバリアは直径200 m 以上の小惑星のほとんどが岩塊が集積したラブルパイルであることを示唆する[15]. 同様に微小小惑星(本稿では直径100 m 以下を微小と定義する)の直径-自転周期関係からは微小小惑星の力学史が制約できると考えられるが、観測時の課題が多くあり、自転周期が求まった微小小惑星は少ない.

現存の地上観測装置を用いて微小小惑星の自転周期を推定するためには、地球に接近時に見かけ明るくなった微小NEOを観測する必要がある. ハワ

イマウナケアにある有効口径8.2 m のすばる望遠鏡を用いても、直径100 m 以下の微小メインベルト小惑星を観測することは難しい. 地球接近時に明るくなった微小NEOであれば自転周期推定が容易かというところでもなく、観測好機が短い(数時間-数日)、高速自転している(周期1分以下)、天球上移動速度が大きい(毎秒数秒角)といった多くの課題がある. それゆえ自転周期が推定された微小小惑星は少ない.

図1には平均絶対等級(太陽、小惑星、地球がなす角が0度かつ地球と小惑星、太陽と小惑星の距離が1天文単位という仮想的な状況での小惑星のVバンド等級) $H \sim 24$ (直径約50 m) の300天体超の小さいNEOを観測している米国のサーベイ観測Mission Accessible Near-Earth Objects Survey (MANOS) の観測結果が含まれる[16, 17]. MANOSは世界の大中口径望遠鏡を用いてNEOの自転状態および組成の推定を行ってきた. MANOSは数多くの微小NEOの自転周期推定に成功したが、その観測戦略は高速自転の検出に特化しておらず、1から300秒の長時間露光観測によって小惑星の高速自転を見逃している可能性がある. 高速自転領域まで信頼できる直径-自転周期関係を得るためには、微小小惑星の系統的な高時間分解観測が求められる.

以上の背景のもと、我々は広視野高速カメラトモエゴゼンを用いてNEOの観測的研究を進めてきた.

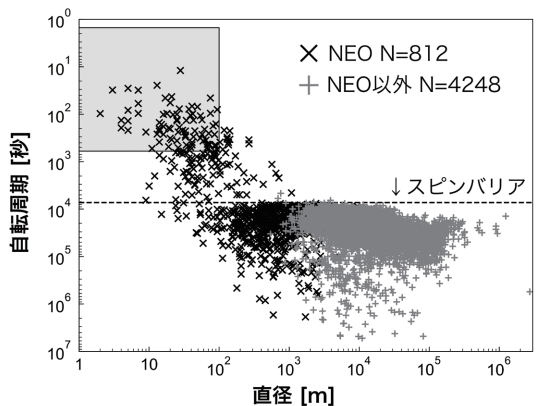


図1: LCDB に登録されている天体の直径-自転周期関係. NEO をバツ印, NEO 以外を十字で示した. 周期2 時間程度の破線は典型的な質量密度 2.67 g cm^{-3} を仮定したときのスピンバリアを示す[18]. 左上の四角内は本研究で着目する微小かつ高速自転領域. 著者らの論文[19] を元に作成.

本稿では関連する2つの話題を紹介する。2章では観測装置トモエゴゼンおよびトモエゴゼンを用いたNEO探索についてまとめる。3章ではトモエゴゼンを用いた微小NEOの高時間分解観測結果を紹介し、約二年間の観測で得た微小小惑星の自転周期分布について議論する。本稿を通じて、高時間分解観測により明らかにされる微小小惑星の新たな一面をお伝えできれば幸いである。

2. トモエゴゼンによるNEO探索

2.1 木曾広視野高速カメラトモエゴゼン

トモエゴゼンは長野県木曾郡に位置する東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター木曾観測所の口径105 cmシュミット望遠鏡用に開発された、世界初の可視光広視野動画カメラである。木曾観測所は1974年の開所以来全国の天文学者の観測研究に利用され、特にシュミット望遠鏡の特徴である広視野を利用した観測装置が開発されてきた(図2上)。2014年には現在の完全自動観測の礎となるキューシステムを用いた自動観測が実施され、さらに同年よりシュミットの直径9度の全視野を覆う広視野高速カメラトモエゴゼンの開発が始まった(図2下, [20])。シュミット望遠鏡の強みである広視野に加えCMOSセンサを用いた高時間分解観測がトモエゴゼンの最大の特徴である。トモエゴゼンの焦点面は84枚のCMOSイメージセンサーで覆われており、有効視野約20平方度の広い空の範囲を高い時間分解能で観測できる。光学フィルタは搭載しておらず可視域の幅広い波長の光を捉えることができる。1秒積分での10- σ 限界等級は17.7等級である²。

広視野望遠鏡を用いて夜空を掃天観測する観測計画は世界中にいくつか存在するが、それらの典型的な露出(積分)時間は30秒以上であり、秒スケールの変動現象を検出することはできない[5-7]。一方トモエゴゼンは毎晩1秒に2枚のフレームレートで1視野に対して18枚(9秒間)の高時間分解観測を行い、高度30度以上の領域を約2時間かけて掃天観測する。高時間分解観測が故に毎晩生成されるデータ

量も膨大となり、晴れた日に取得される観測データは約10TBにも達する。1秒に2枚のフレームレートで連続観測を行うトモエゴゼンの「動画観測」は観測対象を選ばず、秒スケールの変動現象全てがサイエンスターゲットとなる。観測開始から数年ですでに増光直後の超新星爆発の観測[21]、流星観測[22]、太陽系外縁天体による恒星の掩蔽観測[23]、矮新星の多波長同時観測[24]など幅広い分野の研究成果が報告されている。

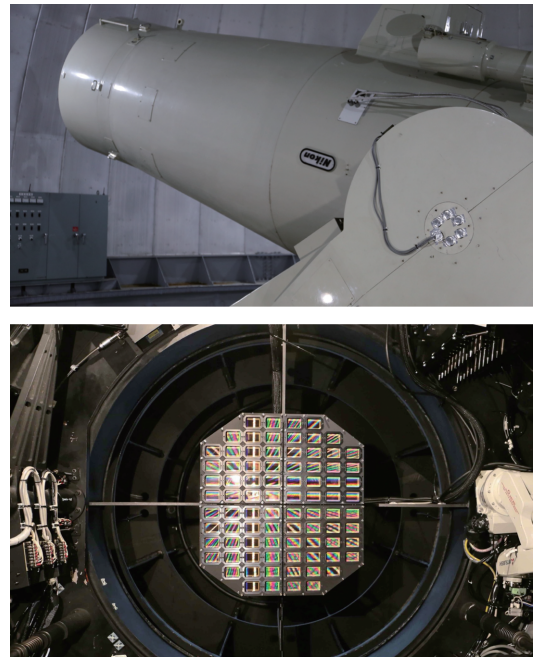


図2: (上) 木曾観測所口径105 cm シュミット望遠鏡。(下)シュミット望遠鏡の焦点面に搭載されたトモエゴゼンカメラ。84枚のCMOS センサーがシュミットの直径9度の視野を覆う。

2.2 サーベイビッグデータからの小惑星探し

トモエゴゼンNEOチームはトモエゴゼンが毎晩生成するサーベイ観測ビッグデータからNEOを発見する試みを続けてきた。近年NEOを多く発見している米国のPan-STARRSやCatalina Sky Surveyは時間間隔を空けて取得した比較的長い露出(積分)時間の複数枚の画像中から移動天体を探索している。空の同じ領域を観測した時刻の異なる2枚の画像があるとき、恒星などの非移動天体は理想的にはどの画像上でも同じ位置で検出される。一方NEOなどの移動天体は時間が経つと文字通り画像上を移

²Tomoe-e Gozen プロジェクト(<https://tomoe.mtk.ioa.s.utokyo.ac.jp/ja/>)2022-07-27 にアクセスした。

動する。2枚の画像の引き算を行うと、非移動天体が存在する領域は同じ値の差し引きでシグナルはゼロに近い値をとるが、移動天体が存在する領域は値が相殺されず正負のシグナルが現れる(図3, 1)。

このように、複数枚の画像から移動天体を検出できるか否かは、画像の観測時間間隔と天体の移動速度に依存する。地球から遠い位置に存在する見かけの移動速度が小さい天体の移動を検出するには長い時間間隔の観測が必要となる。一方、地球近傍を通過するために見かけ上は高速に移動する天体を検出するには短い時間間隔で画像を取得する必要がある。1枚の画像の典型的な露光時間が30秒以上の従来のサーベイ観測データでは、数秒間で観測視野を移動する天体を捉えることは難しい。微小な天体は地球近傍を通過して見かけ上明るい時期でなければ検出できないため、高速移動天体は微小小惑星の唯一の観測機会を提供するといえる。我々はトモエゴゼンの高速サーベイ観測データを用いることで、これまで発見はおろか探索されてこなかった高速移動小惑星を検出できると考えた。

トモエゴゼンサーベイ観測データからの移動天体探索手順を図3に示す。トモエゴゼンのサーベイ観測は一つの領域に対して0.5秒積分の画像18枚からなるフレームセットを取得する。我々NEOチームが開発したパイプラインではこの中からまず移動天体検出を行う。最初に18枚の画像全てで天体検出を行い天体のリストを作成する。それをもとに非移動天体が存在する領域を表すマスクを作成し、マスク外の検出を移動天体と判定する。移動天体検出システムの詳細の一部は出版済み論文[25]を参照されたい。トモエゴゼンが生成する毎晩10TBの膨大なサーベイデータからは多数の高速移動天体を検出される。同時に、天候状況の変化や望遠鏡トラッキング時の星像のずれに起因する誤検出が大量に検出されてしまう。その数は一晩で約100万天体となり、目視で確認して移動天体か否かを判断することは難しい。

そこで我々は天体検出時の情報(天体の星像の形状、移動速度、18フレーム中の動画内検出数など)を用いて、検出天体が移動天体か否かを判断する機械学習モデルを開発した。アルゴリズムは結果の解釈が容易なランダムフォレストを採用した。我々のモデルは天体検出時の情報からその天体が移動天体

か否かを0から1のスコアで表現する。

毎晩のサーベイ観測データに天体検出、機械学習による移動天体抽出を適用する。そして移動天体らしい天体が存在すれば軌道決定のための追跡観測を行えばよい。機械学習のスコアが0.7以上の天体が移動天体であるとすると、毎晩の移動天体は数千件程度になる(図3, 2)。この中で既知の人工天体としてカタログ化されている天体、カタログ化されていなくとも人工天体の可能性が高いと考えられる移動速度が大きい超高速移動天体(速度が毎秒5秒角よりも早い天体)は追跡対象から除外する(図3, 3)。こうして抽出される約100天体を目視で確認、吟味し、未知の移動天体候補と判断した天体に対して軌道精度を高めるための追跡観測を実施する(図3, 4)。一晩に30分以上の時間間隔を空けて合計3回以上の観測点を取得できた天体に対して地球周回軌道で軌道決定を行う。地球周回軌道での軌道離心率が1以上の天体は地球を周回する軌道になく、太陽周回軌道の小天体であろうから、小惑星候補天体としてIAU小惑星センタへ報告する。なお現在の判断条件では、一時的に地球重力に束縛された状態にある地球周回軌道の小天体が存在しても人工天体と判断されるので、結果的に小天体を見逃す可能性がある。トモエゴゼンを用いたさらなる追跡観測や世界中の小惑星観測家による追跡観測の後に軌道精度が高まった小惑星には、IAU小惑星センタより小惑星としての仮符号が付与される³。

我々は開発したパイプラインを用いることで、2019年から2022年6月1日までの期間に合計42個の微小NEOを発見した。我々が発見したNEOはPan-STARRSやCatalina Sky Surveyの深い画像で検出されるNEOに比べて格段に明るい(ほとんどがV等級17等以下)。通常暗く検出される微小NEOを明るく検出できたため、追跡観測をすることで知られざる微小天体の物理量(自転周期やスペクトル型)推定することができる。ただし多くの天体は地球最接近時の最も明るい時期に発見できた天体で、発見後数時間や数日で数等級暗くなる。微小NEOの物理量の推定を行うためには発見直後の追跡観測が求められる。

³本稿ではIAU小惑星センタより仮符号が付与されることを小惑星の発見と定義する。

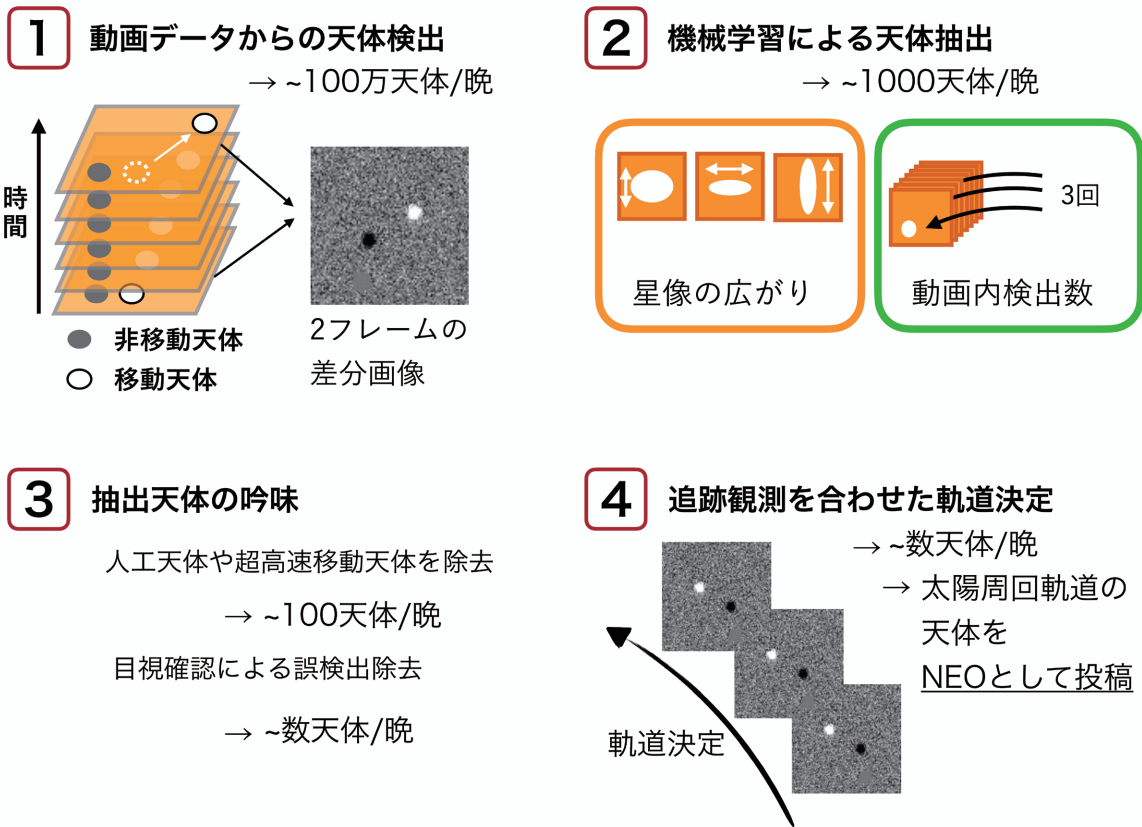


図3: トモエゴゼン NEO パイプラインで行われている移動天体探索手順。

3. トモエゴゼンによる微小NEOの高時間分解観測

本章では著者らの論文[19]の主題であるトモエゴゼンのサーベイ観測で発見した小惑星を含む微小NEO60天体の即時追跡観測について紹介する。高時間分解観測で得た高時間分解光度曲線の解析から多数の高速自転小惑星を発見した。さらに微小NEOの自転周期分布の理論的解釈を行い、我々の観測で得た自転周期分布が近年提唱されたTYORP効果で説明できることを示した。本章の解析や議論の詳細については引用元を参照されたい。

3.1 観測と解析

可視光等級 $V \leq 17$ 等, 絶対等級 $H \geq 22.5$ (直径約100 m 以下) を条件として, 60個の微小NEO

の光度曲線を取得した。観測天体のうち23天体はトモエゴゼンを用いて我々自身が発見したNEOである。他37天体はCatalina Sky Survey やPan-STARRSなど他のサーベイ観測で発見された小惑星である。観測対象の多くは発見後間もない天体でありその自転周期は報告されていない。

観測天体の典型的な天球上移動速度は毎秒1–10秒角と非常に速く、ほとんどが地球から月–地球間距離の数倍の極めて地球近傍を通過する天体である。典型的な観測可能時間が短いため発見後数時間から数日で観測を実施した。

LCDBで精度良く自転周期が求まった天体⁴で絶対等級 $H \geq 22.5$ の天体の平均自転周期は約9分である。これをもとに各天体の典型的な観測時間は

⁴クオリティコードが3 または3-である測定値を採用した。

20分間とした。観測天体の平均絶対等級は $H \sim 26$ で、可視光での幾何アルベドを0.2と仮定した換算直径は約20 mである。図4より、米国のMANOSと比較して地球に接近する微小なNEOの観測に成功したことがわかる。観測期間は2018年5月–2021年10月で、観測装置は小惑星探索と同様に木曾トモエゴゼンを用いた。観測にはトモエゴゼンの1枚のセンサー(視野0.24平方度, 39.7分角× 22.4分角)を用いた。恒星追尾観測を行い、高速移動する天体はその都度再ポインティングして観測した。観測天体は2 fps(積分時間は0.5秒)でほぼ点源として観測される。

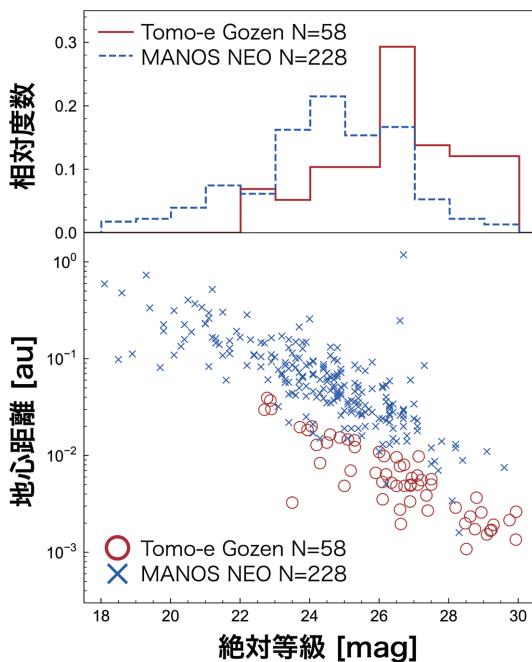


図4: 本研究とMANOSの観測天体の比較。(上) 絶対等級分布。本研究, MANOSをそれぞれ実践, 破線で示した。(下) 絶対等級と観測時地心距離の関係。本研究, MANOSをそれぞれ丸, バツ印で示した。本研究観測天体のうち仮符号を取っていない2天体は含まない。

取得したデータのバイアス引き, ダーク引き, フラット補正を行った後, SExtractor [26] ベースのpythonパッケージsep⁵を用いてNEOと視野内の参照星の開口測光を行った。測光半径は本観測での典型的シーイング3–5秒角の2–3倍に設定した。

相対測光にはトモエゴゼンに近い波長感度特性をもつGaiaによるGaia DR2カタログを用いた[27]。GaiaのG等級が $10 \leq G \leq 15$ を満たす天体を参照星として採用し, 相対測光で求めたNEOのG等級を日心距離, 地心距離を用いて換算等級に変換した。さらに太陽位相角補正, 光差補正を行い最終的な光度曲線を取得した。

本観測では高速移動するNEOを恒星追尾観測した。天体が視野内を一定距離移動するたびに視野を変更すると視野移動中の観測データ点が欠如し完全な連続観測とはならない。このような不等サンプリングデータから小惑星の自転周期を推定するためLomb-Scargle法を用いた[28–30]。小惑星の自転に伴う周期的な光度変動はLomb-Scargleピリオドグラムのピークとなって現れる。自転周期と等級振幅の不定性はモンテカルロ法により評価した。

本研究の観測天体には非主軸回転天体(タンブラー)候補が存在した。単一周りで自転する天体と異なりタンブラーは複雑な自転状態にある。複数の周期が組み合わさったタンブラーのピリオドグラムは多数のピークをもつ。本研究ではピリオドグラムをみてタンブラーか否かの判断を行った。タンブラーの詳細解析は今後の課題である。

3.2 観測結果

観測した60天体のうち32天体(以下Tomo-e NEO)の自転周期推定に成功した。すでに自転周期が報告されている天体は32天体中11天体であった。18天体は本観測の範囲では自転周期が求められなかった。これらは形状が自転軸周りに対称, 自転周期が観測時間よりも長い, 自転周期が露光時間よりも短い, または自転軸が視線方向に平行であると考えられる。残り10天体は非主軸回転天体候補である。

例として高速自転小惑星2021CGの光度曲線と周期解析結果を図5–7に示す。1秒に2枚のフレームレートでの高時間分解観測により高速自転に伴う光度変動を捉えることに成功し, 2021CGの自転周期は 15.296 ± 0.002 秒と求まった。

Tomo-e NEOとLCDBに登録されているNEO(以下LCDB NEO)の直径–自転周期関係を図8に示す。Tomo-e NEOは直径3–100 m, 自転周期3–420秒の微小高速自転領域に位置する。Tomo-e NEOに

⁵<https://sep.readthedocs.io/en/v0.4.x/>

は周期60秒以下の高速自転小惑星が13天体含まれる。さまざまな露光時間での観測が含まれる先行研究の自転周期分布は高速観測を行った本観測に比べて高速自転小惑星を見落としている可能性がある。両分布が等しいという仮説を検定するためコルモゴロフ-スミルノフ検定を実施した。Tomo-e NEOに合わせて絶対等級22.5以上、自転周期420秒以下を条件とし、さらに自転周期が精度良く求められている(クオリティコードが3または3-) LCDB NEOを検定対象とした。検定量とp値はそれぞれ0.330, 0.013と求まり、Tomo-e NEOとLCDB NEOの自転周期分布が等しいという帰無仮説は有意水準1.3%で棄却された。この結果は露光時間が長い従来観測で高速自転小惑星の自転周期を正しく推定できなかったことを示唆する。

3.3 高速自転小惑星の欠如

図8の直径-自転周期関係においてTomo-e NEOの分布には周期約10秒の頭打ちがみられる。もし本研究で観測した天体の中に自転周期が1.5秒よりも長い天体が含まれていた場合、1秒間に2枚のフレームレートの高時間分解観測を行った本研究で見逃さずに周期を推定できることを確認している。よって本観測では2020 HS₇を除いて自転周期10秒以下の天体が存在しなかった。直径-自転周期関係の頭打ちを議論するためには、観測で期待される小惑星の自転周期分布を知る必要がある。我々はYORP効果による自転加速を考慮したモデル計算を実施した。

地球近傍で観測される微小NEOの起源はメインベルト内の衝突で生じた破片であると考えられる。衝突破壊過程で生成した小惑星はYarkovsky効果によって軌道長半径が変化する。その一部はメインベルト内の巨大惑星との共鳴位置に入り、数百万年の時間をかけてNEOへと軌道進化する[9, 10]。以上の過程を踏まえ、現在観測されるNEOの典型的な年齢は10 Myr程度であると考えられる。

この軌道発展の間にYORP効果によって小惑星の自転周期が変化する。ゆえに現在のNEOの自転周期分布はNEO生成からの経過時間(NEO年齢)を反映していると考えられる。YORP効果により自転が減速する小惑星はYORP効果により自転が加速する小惑星と同程度の割合で存在すると考えられる。

しかし自転減速が起きた小惑星は短い時間でタンブリング状態に発展し、その後の進化を正確に予測することは難しい。我々が注目しているのは自転周期分布の頭打ち(最短自転周期)である。よって以下では自転加速のみを考えて、YORP効果による自転加速を受けた微小小惑星の自転周期がどの程度まで加速されるかを計算する。

まず、より大きな小惑星の衝突破壊破片である微小小惑星の初期自転周期分布は実験室実験によるmmサイズの衝突破壊破片の自転周期を外挿した次式に沿うと仮定する[31]。

$$P_{\text{init}} = 10 \left(\frac{D}{1 \text{ m}} \right) \text{ s}. \quad (1)$$

さらにYORP効果による自転加速の強さは地球接近小天体(101955)BennuのYORP加速度をスケールリングした次式で与える[32, 33]:

$$\frac{d\omega}{dt} = 8.5 \cdot 10^{-18} \cdot \left(\frac{a_{\text{Bennu}}^2 \sqrt{1 - e_{\text{Bennu}}^2}}{a_{\text{ast}}^2 \sqrt{1 - e_{\text{ast}}^2}} \right) \left(\frac{D_{\text{Bennu}}}{D} \right)^2 \text{ rad s}^{-2}, \quad (2)$$

ただし ω は小惑星の角速度、 D_{Bennu} はBennuの直径、 a_{Bennu} 、 a_{ast} はそれぞれBennuと小惑星の軌道長半径、 e_{Bennu} 、 e_{ast} はそれぞれBennuと小惑星の軌道離心率である。 D_{Bennu} は482 m、 e_{Bennu} は1.126 au、 e_{Bennu} は0.204とした⁶。またNEOの多くは内側メインベルトから軌道進化した天体であることから $a_{\text{ast}} = 2 \text{ au}$ 、 $e_{\text{ast}} = 0$ に固定した。2022年7月までに発見されているNEAの離心率の中央値は約0.45、平均値は約0.44である。NEAの離心率が0.45の場合の自転加速の強さは、離心率0の場合に比べて $\sqrt{1 - e_{\text{ast}}^2}^{-1} = \sqrt{1 - 0.45^2}^{-1} \sim 1.1$ 倍で、本稿の議論は変わらない。

YORP効果による小惑星の自転速度は複雑に変動するはずだが、ここでは第一近似として簡単のために線形な加速を考える。時刻 t での角速度 ω は以下のように表される:

⁶NASA JPL Small-Body Database(https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html/)2021-12-20 にアクセスした。

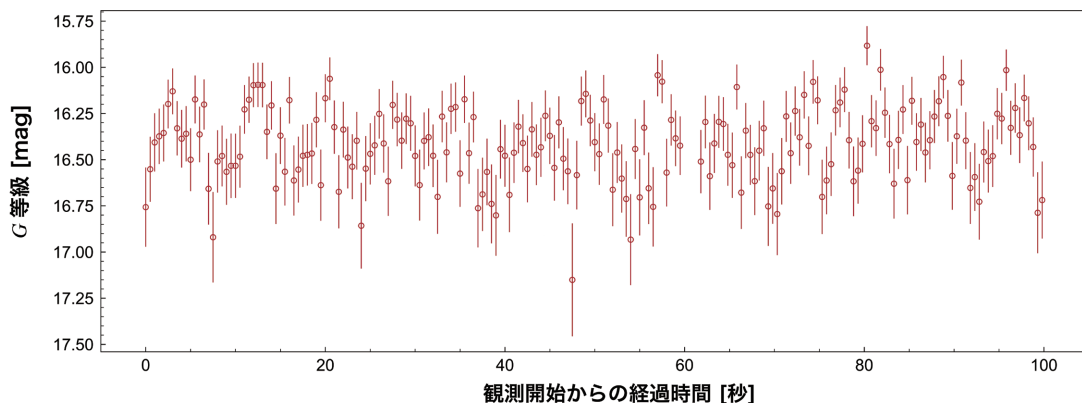


図5: 2021CG の光度曲線. 全20分間のうち最初の100秒間を图示した. 誤差棒は1- σ の不定性を表す. 著者らの論文[19]を元に作成.

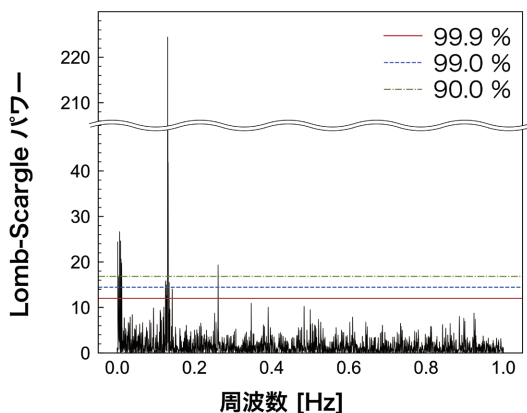


図6: 2021CG のLomb-Scargle ピリオドグラム. 実線, 破線, 点線はそれぞれ90, 99, 99.9%の信頼度を表すパワーである. 著者らの論文[19]を元に作成.

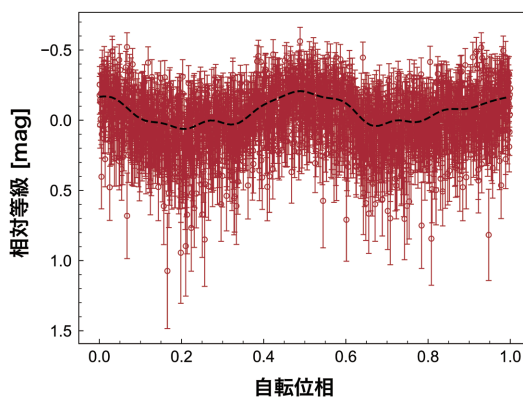


図7: 2021CG の折り返し光度曲線. 周期15.296秒で折り返した. 丸は観測データ, 破線はモデル曲線を表す. 著者らの論文[19]を元に作成.

$$\omega = \left. \frac{d\omega}{dt} \right|_{t=0} t + \omega_0, \quad (3)$$

ただし ω_0 は小惑星の初期自転速度である.

式(3) を t について解けばNEO年齢 τ_{YORP} が計算できる:

$$\tau_{\text{YORP}} = 3.7 \cdot 10^3 \left(\frac{a_{\text{ast}}^2 \sqrt{1 - e_{\text{ast}}^2}}{a_{\text{Bennu}}^2 \sqrt{1 - e_{\text{Bennu}}^2}} \right) \cdot \left(\frac{D}{D_{\text{Bennu}}} \right)^2 \left(\frac{1}{P} - \frac{1}{10D} \right) \text{Myr}. \quad (4)$$

図10左に $\tau_{\text{YORP}} = 1, 10, 100 \text{ Myr}$ の等時線を示す. 等時線から直径10 m 以下のNEOのNEO年齢がNEOの典型的な力学的タイムスケール(10 Myr)程度であれば, それらの現在の自転周期は10秒よりも短いと期待される. しかし本節の冒頭で述べた通り, 本観測で見つかった自転周期10秒以下の高速自転小惑星は2020 HS₇のみであった. YORP自転加速を考慮したモデルでは観測結果にみられる周期10秒付近の頭打ちを説明することができず, 他のメカニズムによる解釈が求められる.

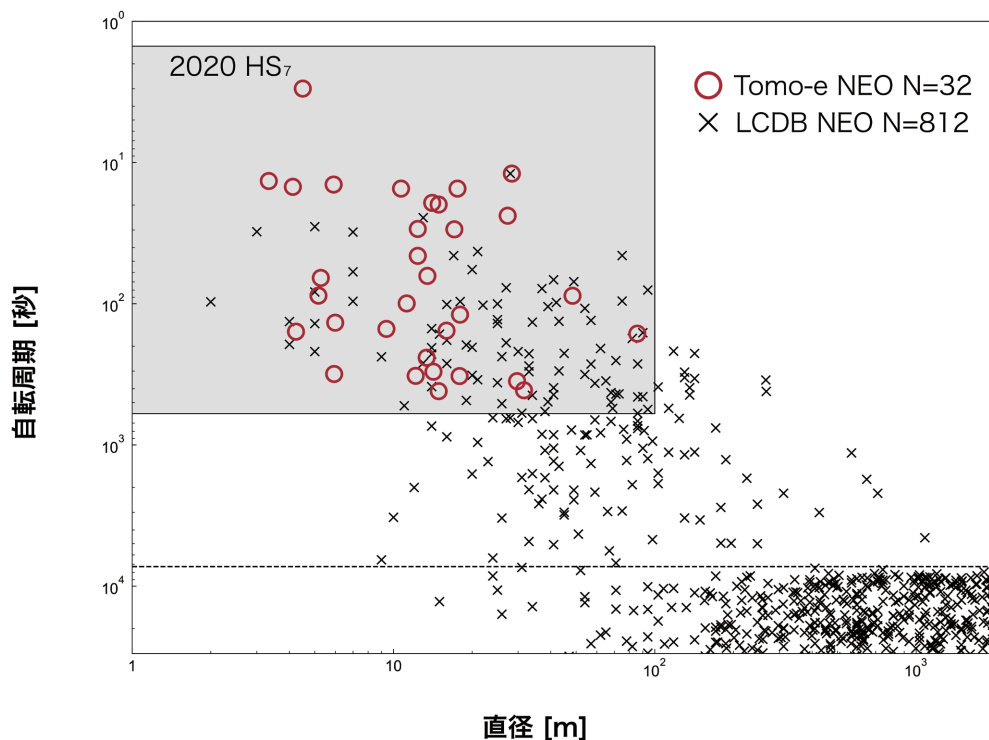


図8: 本観測天体を含む直径-自転周期関係. Tomo-e NEO, LCDB NEO をそれぞれ円とバツで表した. 左上の四角内は本研究で着目する微小かつ高速自転領域. 周期2 時間程度の破線は典型的な質量密度 2.67 g cm^{-3} を仮定したときのスピンバリアを示す[18]. 著者の論文[19] を元に作成.

3.4 Tangential-YORP効果による 自転周期分布の説明

前節の計算では小惑星表面に沿う熱伝導に起因するYORP効果(TYORP)を無視して小惑星表面に垂直な熱伝導に起因するYORP効果(NYORP)のみを考慮に入れていた. TYORPはNYORPと同様, 小惑星の自転周期と熱物性に依存して自転状態を変化させる. またTYORPはNYORPと異なり多くの場合自転加速を引き起こすことがわかっている[35].

本節ではNYORPとTYORP両方を考慮し, YORP自転加速の強さを以下で表現する:

$$\frac{d\omega}{dt} = 8.5 \cdot 10^{-18} \left(\frac{a_{\text{Bennu}}^2 \sqrt{1 - e_{\text{Bennu}}^2}}{a_{\text{ast}}^2 \sqrt{1 - e_{\text{ast}}^2}} \right) \cdot \left(\frac{D_{\text{Bennu}}}{D} \right)^2 (\gamma + (1 - \gamma)\eta(\theta)) \text{ rad s}^{-2}, \quad (5)$$

ただし γ は全YORPにおけるNYORPの寄与(γ)とTYORPの寄与($1 - \gamma$)を表す定数, $\eta(\theta)$ はTYORPの効率, θ は熱伝導に関係する二つのスケールである熱伝導長さ L_{cond} と表皮厚さ(skin depth) L_{wave} の比で表されるサーマルパラメタである.

まず太陽直下点温度(熱慣性0を仮定した際の平衡温度) T_{ss} を定義する. 天体表面でのエネルギーバランスから:

$$\varepsilon \sigma T_{\text{ss}}^4 = (1 - A)\Phi, \quad (6)$$

ただし ε と A はそれぞれ小惑星表面の放射率とボン

トアルベド、 Φ は太陽エネルギーフラックス、 σ はシュテファン-ボルツマン定数である。次に天体の内部に熱が伝わることで天体の表面温度が ΔT 変化するスケール x は次式を満たす：

$$(1 - A)\Phi = \lambda \frac{\Delta T}{x}, \quad (7)$$

ただし λ は小惑星の熱伝導度である。熱伝導長さは表面温度が $T = 0$ から $T = T_{ss}$ に変化する時 ($\Delta T = T_{ss} - 0 = T_{ss}$) のスケールで定義される：

$$L_{cond} = \lambda \frac{T_{ss}}{(1 - A)\Phi} = \frac{\lambda}{((1 - A)^3 \Phi^3 \varepsilon \sigma)^{1/4}}. \quad (8)$$

L_{cond} は天体に流入する太陽エネルギーフラックス $(1 - A)\Phi$ が太陽直下点温度 T_{ss} に相当する温度差を生じる長さのスケールを表す。

表皮厚さは以下で定義される：

$$L_{wave} = \left(\frac{\lambda}{C\rho\omega} \right)^{1/2}, \quad (9)$$

ただし C は小惑星の熱容量、 ρ は小惑星の質量密度である。 L_{wave} は熱源の時間変動(ここでは小惑星の自転)を考えた際に熱がどの深さまで浸透するかを表す。

以上から、 θ は次のように記述できる：

$$\theta(\omega) = \frac{L_{cond}}{L_{wave}} = \frac{(C\rho\lambda\omega)^{1/2}}{((1 - A)^3 \Phi^3 \varepsilon \sigma)^{1/4}}. \quad (10)$$

θ は小惑星の表面温度状況の特徴付けるパラメータで、天体の物性値、太陽からの距離、自転周期の関数である。TYORP は $\theta \sim 1$ の条件下で強く働くことが数値計算で示されている[35]。この事実は次のように理解できる。先行研究[13]と同じく太陽方向に垂直な自転軸を持つ球形の小惑星の表面に構造物が2つ(午前側にあるAと午後側にあるB) 存在する状況を考える(図9)。天体は東側から太陽が昇り西側に沈む向きに自転しているとす。また構造物AとBはともに赤道上交つ球形の天体の中心に対して対称となる位置にあるとする。 $\theta \sim 1$ というのは天体の自転サイクルの中で構造物中を熱がちょうど良いタイムスケールで伝導することに対応する。この場合には構造物Aの東側が与えるトルクと構造物Bの

西側が与えるトルクの差(正味のトルク)を自転周期で平均した値が常に正となる。つまり自転加速をもたらすTYORPトルクが発生する。 θ が十分大きいという状況は天体の自転が速い場合と言い換えられる。天体の自転が速いと表面は等温に近づくため天体表面方向の温度差はなく、TYORP効果によるトルクは発生しない。また θ が小さい状況は天体の自転が遅い場合と言い換えられる。天体の自転が遅いと表面は熱平衡状態となり太陽からの距離に依存して温度が決まる。よって $\theta \sim 1$ の場合と異なり構造物Aの東側と構造物Bの西側の温度が等しくなるため、TYORP効果によるトルクは発生しない。

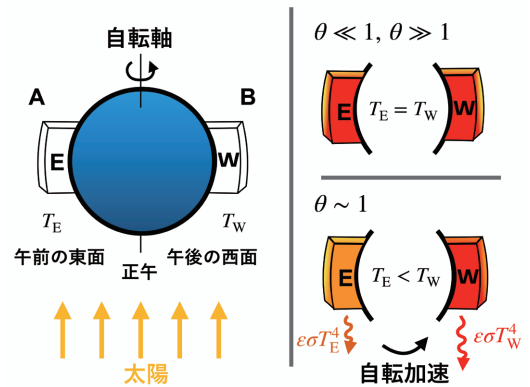


図9: TYORP 効果の概念図。先行研究[13] を元に作成。

以上から、天体の自転周期がある条件を満たす場合にTYORP効果が効率的に作用することがわかる。これをもとにTYORP 効率を以下の通り記述する：

$$\eta(\theta) = \begin{cases} 1 & \theta_{min} < \theta < \theta_{max}, \\ 0 & \text{それ以外}, \end{cases} \quad (11)$$

ただし θ_{min} と θ_{max} はTYORP効率が働く条件を表すパラメータである。TYORPを考慮した際にYORP加速により加速可能な臨界自転周期を図10 (a) に示す。TYORPを考慮した際のNEO年齢 τ_{YORP} が10 Myr (NEO の典型的な力学的タイムスケール) の当時線を臨界自転周期として描画した。TYORP がNYORPと同等かそれよりも強く作用すると仮定して $\gamma = 0.1, 0.5$ の二種類で計算を行った[35]。先行研究[36, 37]でいくつかの微小小惑星の表面が微小粒子で覆われていることが示唆されて

いることから、小惑星の物性値は天体表面がレゴリスで覆われていると仮定し $\lambda = 0.0015 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $C = 680 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\rho = 1500 \text{ kg m}^{-3}$ を採用した。また NEO の典型値として $\varepsilon = 0.7$, $a_{\text{ast}} = 2.0 \text{ au}$ を採用した。NEO の典型的な幾何アルベドと位相積分から $A = 0.084$ とした。

2022年4月現在、YORP効果による自転加速が報告された天体は10天体である ([38] とその引用を参照)。これら10天体の θ の値は0.26-1.3と計算されることから暫定的に $\theta_{\text{min}} = 0.1$, $\theta_{\text{max}} = 5$ とした。TYORP効果を考慮することで直径-自転周期分布関係における平坦な分布を説明することができる。しかし観測された直径10m、自転周期10秒での頭打ちを説明することはできない。では観測で得られた周期10秒の頭打ちを説明するためには小惑星がどのような条件を満たせば良いかを考える。図10中の平坦な分布の位置は θ_{max} の値に依存し、図10 (b) に示す通り、仮に $\theta_{\text{max}} = 30$ の場合には周期約10秒の平坦な分布をTYORP効果で説明できる。式(10)より $\theta \propto (C\lambda)^{1/2} \Phi^{-3/4} \propto (C\lambda)^{1/2} (r^{-2})^{-3/4} \propto (C\lambda)^{1/2} r^{3/2}$ である。TYORPが効果的に働く範囲を表す最大値である θ_{max} の値が大きいくということは、広いパラメタ範囲(日心距離、熱物性など)の小惑星がYORP加速を経験することに対応する。つまり、日心距離 r , C や λ を固定した時に θ が30という大きな値をもつ小惑星に対してTYORPが効果的であるということは、 θ を固定した時に日心距離、 C や λ が小さい小惑星に対してもTYORPが効果的であると言い換えられる。我々が観測したTomo-e NEOの多くの近日点距離は2 au よりも小さく、観測時に地球近傍に存在した(日心距離 $r \sim 1 \text{ au}$)。Tomo-e NEOのような直径100 m以下の微小天体の C や λ の分布はわかっておらず、大きな小惑星とは異なる可能性が考えられる。Tomo-e NEOの日心距離が1 au でかつ C または λ が一桁小さい場合、 θ はファクター $10^{1/2} \cdot 2^{3/2} \sim 9$ 倍過大評価されていたことになる。すなわち、観測で得られた直径-自転周期関係上の周期10秒の頭打ちはTYORP効果を反映しているかもしれない。

4. まとめと今後

本稿では我々がトモエゴゼンを用いて行っている地球接近小天体(NEO)探索と微小NEOの即時追跡観測について紹介した。微小NEOの自転周期はその力学史や物理特性を反映した物理量である。現存の地上観測装置を用いて微小小惑星を観測するためには、地球に接近時に見かけ上明るくなったNEOを観測する必要があるが、微小NEOは観測好機が短い(数時間-数日)、高速自転している(周期1分以下)、天球上移動速度が大きい(毎秒数秒角)など多くの観測の困難性からその物理量(自転周期やスペクトル型)の推定例は限られている。我々は東京大学木曾観測所105 cm シュミット望遠鏡と広視野高速カメラトモエゴゼンを用いることで従来観測が困難であった直径100 m以下の微小小惑星の探索を行い、42天体の微小NEO発見に成功した。さらに自ら発見したNEOを含む60天体の光度曲線を取得し、周期60秒以下の高速自転小惑星13天体を含む32天体の自転周期推定に成功した。

本観測で得た微小小惑星の直径-自転周期分布では自転周期10秒付近の頭打ちが見られた。YORP効果を考慮した自転進化シミュレーションに基づくと、直径10 m以下の小惑星は周期10秒以下で自転していることが期待される。この観測と理論の不整合、すなわち直径-自転周期分布上の微小高速自転小惑星の頭打ち、は小惑星表面に沿う熱伝導に起因するTangential-YORP効果によって説明できることを示した。小惑星の自転進化過程において、Tangential-YORP効果の寄与は無視できないものであるかもしれない。

本稿で紹介したNEO探索と即時追跡観測による自転周期推定はトモエゴゼンNEOグループの活動の一部で、他にも複雑な自転状態にあるNEO 2012 TC₄の形状推定[39]、複数日の即時追跡観測による微小小惑星の形状推定などトモエゴゼンによるNEO研究は枚挙に暇がない。今後は世界でトモエゴゼンにしかできない微小NEOの自転周期推定を継続しつつその他の研究も発展させ、微小小惑星の起源と性質を明らかにすることを目指す。

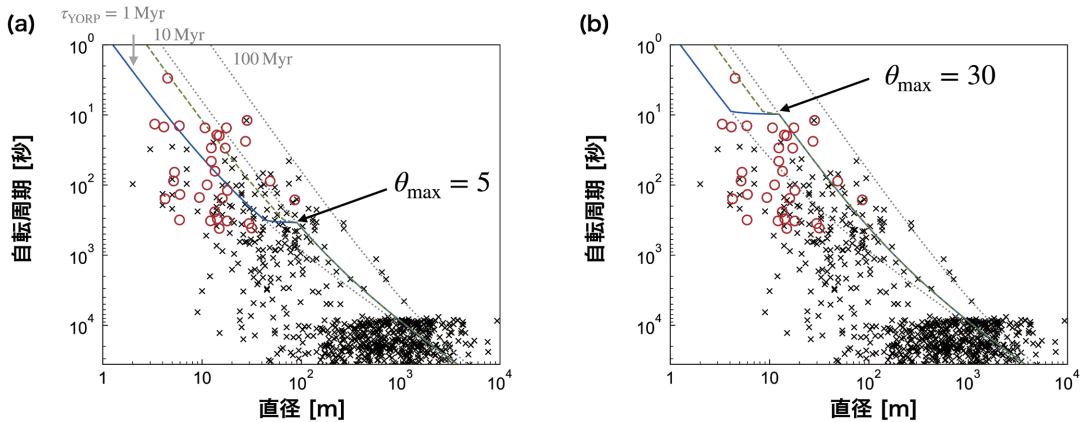


図10: NEOの直径-自転周期関係とNYORP 効果のみを考慮した際のNEO年齢が1, 10, 100 Myr の等時線(点線). 実線, 破線はそれぞれ $\theta_{\max} = 0.1, 0.5$ の場合のNYORP とTYORPを考慮した際のNEO年齢が10 Myr の等時線を表す. パネル(a), (b) はそれぞれ $\theta_{\max} = 5, 30$ の場合を表している. 著者らの論文[19] を元に作成.

謝辞

本研究はトモゴゼンの所在地である木曾の方々を含め多くの関係者に支えられながら行われました. 中でもトモゴゼンを用いた小惑星探査の礎を築いた小島悠人氏には大変お世話になりました. この場を借りて感謝申し上げます. 発表賞審査員, 年会で議論していただいた方々にも感謝しております. 本稿の執筆には三浦均編集長に提供していただいた谷川享行会員作成のL^AT_EXテンプレートを使用しました. 両氏に御礼申し上げます. 最後になりますが匿名の査読者には本稿の改善に繋がる多くのコメントを頂きました. 厚く御礼申し上げます. 本研究は科学研究費助成事業(課題番号: 21H04491, 20H04617, 18H05223, 18H01272, 18H01261, 18K13599, 17H06363, 16H06341, 16H02158, 26247074, 25103502), 光・赤外線天文学大学間連携事業, 公益財団法人岩垂奨学会, 岩井久雄記念東京奨学育英基金, JST 次世代研究者挑戦的研究プログラムJPMJSP2108, UTEC東京大学奨学金の支援を受けました. This work has made use of data from the European Space Agency (ESA) mission Gaia (<https://www.cosmos.esa.int/gaia>), processed by the Gaia Data Processing and Analysis Consortium (DPAC, <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/>

[dpac/consortium](https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/)). Funding for the DPAC has been provided by national institutions, in particular the institutions participating in the Gaia Multilateral Agreement.

参考文献

- [1] Meech, K. and Raymond, S. N., 2020, in Planetary Astrobiology (University of Arizona Press), 325.
- [2] Yoshikawa, M. et al., 2015, in Asteroids IV (University of Arizona Press), 397.
- [3] Arai, T. et al., 2018, 49th Annual Lunar and Planetary Science Conference, 2570.
- [4] Harris, A. W. et al., 2015, in Asteroids IV (University of Arizona Press), 835.
- [5] Chambers, J. et al., 2021, Astrophys. J. Letters 923, L8.
- [6] Drake, A. J. et al., 2009, Astrophys. J. 696, 870.
- [7] Tonry, J. L. et al., 2018, PASP 130, 064505.
- [8] 浦川聖太郎, 2017, 天文月報 110, 97.
- [9] Bottke, W. F. et al., 2002, Icarus 156, 399.
- [10] Granvik, M. et al., 2018, Icarus 312, 181.
- [11] Farinella, P. et al., 1998, Icarus 132, 378.
- [12] Bottke, W. F. et al., 2006, Annual Review of

- Earth and Planetary Sciences 34, 157.
- [13] Golubov, O. and Krugly, Y. N., 2012, *Astrophys. J. Letters* 752, L11.
- [14] Warner, B. D. et al., 2009, *Icarus* 202, 134.
- [15] Pravec, P. and Harris, A. W., 2000, *Icarus* 148, 12.
- [16] Thirouin, A. et al., 2016, *Astron. J.* 152, 163.
- [17] Thirouin, A. et al., 2018, *Astrophys. J. Supplement Series* 239, 4.
- [18] Yeomans, D. K. et al., 2000, *Science* 289, 2085.
- [19] Beniyama, J. et al., 2022, *PASJ* 74, 877.
- [20] Sako, S. et al., 2018, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, 107020J.
- [21] Jiang, J. et al., 2021, *Astrophys. J. Letters* 923, L8.
- [22] Ohsawa, R. et al., 2020, *P&SS* 194, 105011.
- [23] Arimatsu, K. et al., 2019, *Astron. J.* 158, 236.
- [24] Nishino, Y. et al., 2022, *PASJ* 74, L17.
- [25] Ohsawa, R., 2021, *J. Space Sci. Informatics Japan* 11, 1.
- [26] Bertin, E. and Arnouts, S., 1996, *Astron. Astrophys. Supplement* 117, 393.
- [27] Gaia Collaboration et al., 2018, *A&A* 616, A1.
- [28] Lomb, N. R., 1976, *Astrophysics and Space Science* 39, 447.
- [29] Scargle, J. D., 1982, *Astrophys. J.* 263, 835.
- [30] VanderPlas, J. T., 2018, *Astrophys. J. Supplement Series* 236, 16.
- [31] Kadono, T. et al., 2009, *Icarus* 200, 694.
- [32] Rossi, A. et al., 2009, *Icarus* 202, 95.
- [33] Hergenrother, C. W. et al., 2019, *Nature Communications* 10, 1291.
- [34] Lowry, S. C. et al., 2007, *Science* 316, 272.
- [35] Golubov, O. et al., 2014, *Astrophys. J.* 794, 22.
- [36] Mommert, M. et al., 2014, *Astrophys. J. Letters* 789, L22.
- [37] Fenucci, M. et al., 2021, *Astron. Astrophys.* 647, A61.
- [38] Ďurech, J. et al., 2022, *Astron. Astrophys.* 657, A5.
- [39] Urakawa, S. et al., 2019, *Astron. J.* 157, 155.

著者紹介

紅山 仁



東京大学大学院理学系研究科天文学専攻博士課程2年。同修士課程修了。修士(理学)。専門は観測天文学(太陽系小天体)。日本惑星科学会, 日本天文学会, 日本地球惑星科学連合, 日本航空宇宙学会に所属。DESTINY⁺に参加。

酒向 重行

東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター・准教授。

大澤 亮

国立天文台 JASMINE プロジェクト助教。東京大学大学院理学系研究科天文学専攻博士課程を修了。東京大学大学院理学系研究科天文学教育研究センター研究員・特任助教を経て2022年8月より現職。専門は星周ダスト, 地球接近小惑星, 観測装置開発, データサイエンスなど。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。

瀧田 怜

東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター・特任助教。

小林 尚人

東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター・准教授, 木曾観測所所長。

奥村 真一郎

日本スペースガード協会理事長。東京大学大学院理学系研究科天文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, 国立天文台岡山天体物理観測所COE研究員, 宇宙航空研究開発機構招聘研究員などを経て, 2005年6月より日本スペースガード協会所属, 2021年6月より現職。専門は大質量

星形成, 地球接近小惑星, 観測機器など。日本惑星科学会, 日本地球惑星科学連合, 日本天文学会, 日本天文教育普及研究会, 国際天文学連合に所属。

浦川 聖太郎

神戸大学大学院自然科学研究科構造科学専攻博士課程修了。博士(理学)。専門は太陽系小天体の観測的研究。日本惑星科学会, 日本地球惑星科学連合, 日本天文学会, 国際天文学連合, アメリカ天文学会に所属。はやぶさ2, DESTINY⁺に参加。

吉川 真

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所・准教授。東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。博士(理学)。専門は, 天体力学, 惑星探査。日本天文学会, 日本惑星科学会, 日本航空宇宙学会, 日本地球惑星科学連合, 国際天文学連合に所属。

臼井 文彦

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 宇宙科学プログラム室・主任研究開発員。

吉田 二美

神戸大学大学院自然科学研究科構造科学専攻博士課程修了。博士(理学)。台湾国立中央大学天文研究所ポスドク, 国立天文台ハワイ観測所研究員, 国立天文台国際連携室専門研究職員, 千葉工業大学惑星探査研究センター研究員(嘱託)などを経て, 2020年7月より現職。専門は太陽系小天体の観測的研究。日本惑星科学会, 日本地球惑星科学連合, 日本天文学会, 国際天文学連合に所属。はやぶさ, はやぶさ2, DESTINY⁺, New Horizons Kuiper Belt Extended Missionなどに参加。

火の鳥「はやぶさ」未来編 その28 ～はやぶさ2試料の化学的初期分析から わかってきたこと～

塚本 尚義¹, 橘 省吾², 渡邊 誠一郎³, はやぶさ2初期分析チーム

(抄録) 化学的初期分析では、「はやぶさ2」が持ち帰った小惑星リュウグウ試料の化学組成と同位体組成を測定した。リュウグウは炭素質隕石、特にCIコンドライトと呼ばれるイヴナ型炭素質隕石から主に構成されていることが判明した。その主な構成鉱物は、リュウグウの母天体中で水溶液から析出した二次鉱物である。母天体中の水溶液は、リュウグウに元々あった一次鉱物を変質させ、太陽系が誕生してから約500万年後に、この二次鉱物を沈積させた。その時の温度は、約40℃で圧力は0.06気圧以上であった。その後、今日まで、持ち帰ったリュウグウ試料は100℃以上に加熱されていないと思われる。これらの結果から、リュウグウ試料は、これまで見つかった隕石を含め、人類が手に入れている天然試料のどれよりも、太陽系元素存在度を保ち化学組成的に分化をしていないという意味で、最も原始的な特徴を持っているのだと結論した。今後、リュウグウ試料は、新しい太陽系の標準試料として国際的に活用されていくと思われる。

1. 初期分析開始5年前～

小論では、文献[1]を舞台裏から紹介していこう。文責は筆頭著者にあり、第2・第3著者には、筆頭著者の思い違いや勇み足をプロジェクト側から客観視していただいている。

2016年11月、これは、小惑星リュウグウに向かう軌道に乗ったはやぶさ2に搭載している光学航法望遠カメラ(ONC-T)がリュウグウの点像の撮影に成功(2018年2月)するずっと前のことである。はやぶさ2プロジェクトは、順調に飛行中の探査機がリュウグウへの到達することを確信し、リュウグウ回収試料初期分析チームのサブチームリーダーの国際公募に踏み切った。筆頭著者は初期分析サブチーム(化学)、以後化学チームと略す、のリーダーとして応募した。申請書は、自己推薦文(2ページ)、チームメン

バーと要求試料の分析プラン(4ページ)、CV(2ページ)、主要業績(2ページ)からなっていた。この時、要求試料重量を110 mgと設定した。ご存知の通り、はやぶさ2の成功クライテリアは100 mgであったので、それを超えていた。しかしながら、リュウグウ試料の平均化学組成を決定するという初期分析の化学成果達成のためには1g以上の試料の準備が必要であることは、隕石分析の歴史から推定されることであり、はやぶさの構想段階からずっと関わってきた一人としては、はやぶさ2のグラムをこえる試料採取量は楽観的すぎない期待であった [2]。申請前に横山哲也博士(東工大)と永島一秀博士(ハワイ大)を平均分析と局所分析のリーダーとしてチームに参画していただくことの承諾を得た。平均分析はリュウグウの平均化学組成を求めるためであり、局所分析はリュウグウの成因を求めるためである。要求試料量110 mgは、彼らがまとめた緻密な分析計画と上記の曖昧さを持つリターンサンプル量とをバランスさせた化学チームリーダーの個人的な判断であった。

2018年6月、はやぶさ2はリュウグウに到達し、科

1.北海道大学

2.東京大学

3.名古屋大学

yuri@ep.sci.hokudai.ac.jp

学観測を開始した。無事採択されていた我々の化学チームは、プロジェクトの命により7月からチーム編成を開始した。我がチームのチームメンバー候補者は、まず、隕石の化学分析の各種目の金メダリストであることである。ご存知のように元素の化学的性質は元素ごとに異なる。したがって、元素分析・同位体分析の方法は元素ごとに異なるため、隕石の化学分析にはオリンピックの陸上競技のように多様な分析種目があるとたどることができ、陸上競技のすべての種目で金メダルがとれるオールラウンダーがないように、隕石の化学分析においてもオールラウンダーを筆頭者は知らない。そのため、各分析種目の金メダリストに協力してもらうことは必須である。次に、次世代の金メダリストにも参画してもらうこと。これは、日本の惑星探査を発展させ続けるために重要なことである。また、直近の未来では、初期分析終了後ははやぶさ2国際AO成功のための布石になる。最後に、分析結果のクロスチェックができることである。初期分析は、正しい結果でなければならないので、内部のピアレビューは大切である。筆頭著者個人的には、普段は論文結果を討論して意見が合うとは限らない研究仲間と、分析した後の危なっかしいデータを前にして、その妥当性から始まる内輪の関係の素直な意見を戦わせ、分析を正確化し、意見を統合させていくことが楽しかった。色々と意外な個性がわかるものである。公表される前に専門家間で内容をよく知っているという経験もはやぶさ2ならではの特別な機会である。はやぶさの時は試料量が極めて限られていたため、こんな経験はあまりできなかった。なお、候補者に参画をお願いするにあたり以下のことに承諾していただくことにした。

平均分析は横山哲也さんの、局所分析は永島一秀さんのリーダーシップの下で進めること。それぞれの分析は、初期分析期間の前半6ヶ月間は、東工大と北大の実験室でおこない、後半6ヶ月間は、それぞれのメンバーの実験室でおこなえること。前半6ヶ月の実験は日本に来て一緒にやってほしいこと。オンラインでも実験参加できるように考えていること。文献[1]に著者として列挙している50名を超える金メダリストたちに手紙を出し、中にはほとんど初対面の方もいたが、全ての方達(本当に、断られた方は一人もいない)から即座に快諾のお返事をいただいた。この

メンバーのはやぶさ2試料に対する意欲と関心の高さから、化学チームの初期分析は成功するとの確信をこのとき持った。

2. 蛍光X線分析

現在の隕石バルク試料の元素・同位体分析は、誘導結合プラズマ質量分析ICP-MSを使う分析方法が主流である。この時使用する試料形態は、隕石を水溶液化したものである。水溶液化するためにはフッ酸で酸処理が必要であり、この処理でケイ素が散逸する(ケイ素を分析できる水溶液化法もあるが、そこまでできるだけの試料量は期待できなかったし、事実そうであった。)。また、水素と酸素も分析できない。ICP-MSによる元素分析が微量元素分析として位置付けられている所以である。この不利益を回避するため、はやぶさ2初期分析では、試料を化学的に変化させず、物理的にも減量させない非破壊分析の一種である蛍光X線分析を東工大における試料の水溶液化前に実施することを企画した。また変な話だが、試料を正しく水溶液化するためには、試料の化学組成が既知であることが必要である。

蛍光X線分析は、現在、一般的な元素分析の一つであるが、少し困ったことに隕石学分野では主流ではない。この理由は、隕石の全岩化学組成分析による研究は確立されている分野だと思われていて、全岩分析に興味を持つ研究者が少ないからである[3]。筆頭著者は、チームメンバー決定時の2018年6月に、隕石学者ではないが、蛍光X線分析の世界的権威であり、考古学や法医学分野で有名な中井泉博士(東京理科大)と最適な分析計画を相談し、企業とのコラボを提案いただいた。中井博士は、早速、国内外の蛍光X線分析機器製造会社にコンタクトを取り、各社のラボで模擬リユウグウ試料を粉末状態のまま非破壊分析していただき、その分析結果を評価した。その結果、2019年6月にリガクとHORIBAの2社のメンバーを加えた。

ここで、今回用いた蛍光X線分析の特徴を記しておこう。通常、岩石の蛍光X線分析による定量分析法では、ガラスビード法という試料調整を行うことが多い。これは、岩石粉末試料を四ほう化リチウム $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ のような融剤に溶かし、ガラス化する調整

法である。この方法は、試料を均質化し、特性X線発生マトリックス効果を低減し、検量線法が可能である等のメリットがあり定量性が高い。しかしながら、試料を融剤に溶かすため、非破壊分析という特徴を台無しにし、融剤の影響のため酸素の分析ができず、炭素分析も難しい。また検量線法を用いるためには、試料の化学組成がある程度予想できていることが必要である。

化学チームの初期分析では、割り当て試料量から可能な限り多くの元素の濃度と同位体組成を求めることを目的としているため、非破壊分析が可能な蛍光X線分析では、粉末状のリユウグウ試料をそのまま使用することにした。また、定量補正法として、化学組成が未知試料にも適用可能なファンダメンタルパラメーター法[4]を適用することにした。普通、この分析条件では元素濃度の定量精度が検量線法を用いたガラスビード法に劣る。そのため、蛍光X線分析チームは、この時から約2年先のリユウグウ試料分析の本番にむけ、それぞれの会社の分析ラボ内に専用の蛍光X線分析装置を設置したクリーンルームを新設し、粉末状態のリユウグウ試料においても、ガラスビード法を適用した場合と同等以上の確度・精度・感度で定量分析が達成できるように、装置の改良・調整と定量補正法の最適化について、開発にとりかかった。

汚染コントロールのため、JAXAから受け取ったリユウグウ試料容器の開封を東工大@東京のクリーンルームに制限した。蛍光X線分析は、リガク@大阪・HORIBA@京都・放射光施設スプリング8@兵庫で実施される。そのため、これら3機関の装置で共用でき、東京・京都・大阪・兵庫間を無汚染で移動できる専用試料セルを開発した[5]。東工大で専用試料セル内に充填された試料は、この3機関での分析が完了し、再び東工大でセルから取り出される時まで、一切セル外部から触れられないことがない。実際、試料装填前後において、リユウグウ試料の化学組成の有意な変化を検出できなかった。

3. 初期分析開始2年前～

2019年7月、札幌において国際隕石学会が開催された。これに合わせ、初期分析チームのキックオフ

ミーティングが招集され、引き続き、化学チームの初会合がひらかれた。ここでのメンバーたちの主な興味は、リユウグウはどんな隕石と似ているのか、回収量はどれくらいなのか、いつから分析が始まるのかというものであった。リモートセンシングの結果では、リユウグウ表面はほぼ均一な物質でできており、イブナ型隕石(CIコンドライト)が熱を受けた物質(CYコンドライト)か、枯渇した彗星核物質の可能性が高いというものであった[6]。この会合の3日後、はやぶさ2の2回目のタッチダウンがあり、その模様は隕石学会会場に生中継され、大いに盛り上がった。しかし、この会合が、最初で最後の化学チームの対面会合であったことは全くの想定外であった。この翌年に発生した新型コロナウイルスの世界的パンデミックのため、東工大と北大にメンバーが集結して実験を行うという当初計画が実行できなかった。その代わり、坂本直哉博士(北大)が数十個のカメラを設置したオンライン遠隔実験室を構築し、リアルタイムで遠隔参加する実験を可能にした。

2021年1月、はやぶさ2用クリーンチャンバーCC4-2室のガラス窓越しにリユウグウ試料を肉眼鑑定した筆頭著者は、地球に到達前に予想されていたことと異なり、リユウグウ試料がCIコンドライトに一番似ていると判断し、化学チームメンバーにCIコンドライトを想定した分析体制を整えるように伝えた。初期分析は、平均分析、局所分析、酸素同位体平均分析が並行して進められる企画であった。

4. 平均分析開始

リユウグウバルク試料の同位体分析をするためには、試料を溶液化し、目的の各元素をカラムにより化学分離しなければいけない。このために要する時間が数ヶ月かかるため、最初の1ヶ月で蛍光X線分析による非破壊を行い、その後、試料を溶液化し、元素の化学分離を実施する計画を立てた。本節から7節までの日程比較は図1を参照されたい。

筆頭著者は、2021年6月2日、リユウグウのバルク分析用第一弾試料を宇宙研で安部正真博士から受け取り、東工大の横山博士のクリーンラボに運んだ。6月9日、蛍光X線分析チームは東工大に集合し、JAXA移送容器からリユウグウ試料を取り出

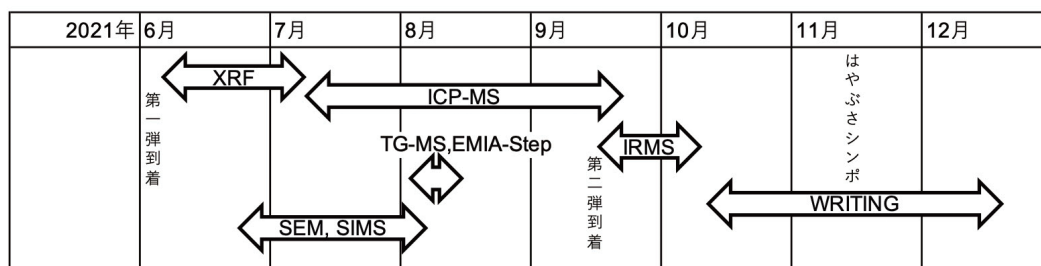


図1: 初期分析化学チームの第一弾論文[1]にかかった研究日程. XRF: 蛍光X線分析, ICP-MS: 誘導結合プラズマ質量分析, TG-MS: 質量分析を加えた熱重量分析, EMIA-Step: 熱分解・燃焼炭素分析, IRMS: 平均酸素同位体比分析, SEM, SIMS: 走査電子顕微鏡と2次イオン質量分析を使った局所分析, WRITING: 文献[1]の執筆期間.

し、蛍光X線分析用専用セルに試料を充填。京都のHORIBA分析ラボに移送した。6月10日～22日、HORIBA分析ラボで蛍光X線分析によるデータ取得、6月23日、同試料を移送し、大阪のリガク分析ラボで蛍光X線分析によるデータ取得した。再び試料はHORIBA分析ラボに移送され、6月24日～7月1日、蛍光X線分析によるデータを取得した。7月2日、同試料はスプリング8に移送され、7月3日～6日、ビームラインBL37XUとBL08Wにおいて蛍光X線分析のデータを取得し、当初計画通りデータ取得が1ヶ月間で終了した。その後、試料は東工大クリーンラボに移送され、7月8日から、平均分析チームによる同位体分析のための試料の湿式化学(水溶液化)が開始された。この1ヶ月間に収集された大量の蛍光X線分析データは、論文作成までの期間をかけて正確な定量分析値を求めるため、ファンダメンタルパラメータ法を用いた補正計算のリファインメントが続けられることになる。

リュウグウの化学組成の最初の暫定値が6月18日に17元素について得られていた。この値は、リュウグウ試料が予想通りCIコンドライトであることを示しており、化学チームメンバー全員にこのことが速報された。この結果を知ったラッセル博士(英国自然史博物館)は、分析結果を保証する標準隕石が必要であることに気づき、CIコンドライトのタイプであるイヴナ隕石を自然史博物館のコレクションから手配し、7月1日に146 mgのイヴナ隕石塊が北大に到着した。我々のリュウグウ試料の分析のほとんどは、同条件でイヴナ隕石を同時に分析している。そして、

リュウグウの分析値の正確さを確認するために、イヴナ隕石の分析結果がこれまでの研究により発表された分析結果と対比されている。地球化学において新試料を研究するときは、結果の信頼性を担保するために、このようにクロスチェックをしながら研究を進めることが常套である。論文の分析値をそのまま信用することは危険で、その信頼性を吟味して引用しなければいけないことを注意しておこう。

今回の蛍光X線分析の特徴の一つは、酸素の濃度分析を行ったことである。実は、隕石中で最大濃度を持つ元素は酸素であるにもかかわらず、隕石の化学組成で最も不正確な分析値は酸素濃度である。例えば、最近のレビュー論文[7]にまとめられた隕石の酸素濃度は、100%からの差分として与えられていて、実測値ではない。蛍光X線分析から求められた酸素の分析値は、全ての金属元素を酸化させても余剰があった。これは今回未測定の水素が存在することを示唆しており、リュウグウが化学的にCIコンドライト的であることと整合的である。後述の水素分析法により求めた水素濃度から計算した水分の酸素量と上記の酸素余剰量がピッタリとH₂Oに整合したことを付しておこう。

CIコンドライトの全水素量は燃焼分析により分析される。しかしCIコンドライトの水素には無機水素(水分)と有機水素の両方がある。無機水素の分析値には熱重量分析による試料の質量減量がよく適用されるが、この場合も無機水素と有機水素の分離ができていないわけではない[8]。これでは、今までの隕石中の水分の分析値は何だったのかと言われそうだ

が、全くその通り、できていなかった可能性があると言わざるを得ない。(分析化学者の名誉のため付け加えると、地球上の岩石の場合、熱重量分析で正確な水分測定ができる。その理由は、有機物の含有量が少ないからである。)そのため、今回は、無機水素と有機水素を分離し定量するため、質量分析を加えた特別な熱重量分析TG-MSを水素分析に適用した。また、この時、無機炭素と有機炭素のそれぞれの定量も重要なので、特別な熱分解・燃焼炭素分析法の一つであるEMIA-Stepも導入した。筆者の知る限り、地球外物質中の水素と炭素の無機成分・有機成分をそれぞれ直接決定したのは今回が初めてである。(実は、この2つの分析を行うことは当初想定していなかった。我々のミッションは初期分析であるので、新しい分析法は必要なかったからである。しかし、蛍光X線分析の結果を見て、直感的に必要性を感じ、急遽設計企画した。)この分析は、8月4日・5日の2日間にリガク東京ラボとHORIBA京都ラボでおこなわれた。これらの分析結果は、地球上のCIコンドライトは大気汚染しているという隕石学者が潜在的に恐れていた衝撃の事実を白日のもとにさらすことになった。そして、はやぶさ2からのリュウグウ探査結果の間違った解釈を修正するきっかけを与えた。

9月になると、平均分析チームのリュウグウの化学処理も進行し、9月25日にICP-MSによる微量元素の分析に成功した。この結果もリュウグウはCIコンドライトに似ていた。この後、同位体分析のために元素分離の化学処理が進められた。

5. 局所分析開始

局所分析用のリュウグウ粒子は初期分析石チームを経由して化学チームにやってきた。2021年6月21日のことである。早速、局所分析チームは、22日～27日に局所分析用の研磨片を作成した。6月28日に局所分析チームリーダーの永島一秀博士がハワイ大から北大に到着し、局所分析が本格的に開始した。29日は走査電子顕微鏡観察から始まった。この日はメンバーが世界中からオンライン遠隔実験室に集まり、リアルタイムの遠隔実験で盛り上がった。岩石鉱物組織においてもリュウグウ試料はCIコンドライトに似

ていることをこの最初の観察によりメンバー間で共有できた。

この後、走査電子顕微鏡法による研磨片全体のサブミクロン分解能の電子顕微鏡像と元素組成マップの取得、岩石組織鑑定、構成鉱物鑑定、詳細分析候補鉱物の化学組成定量分析が行われた。以上の準備が整った後、二次イオン質量分析法SIMSによる分析箇所を選定、酸素同位体分析、 ^{53}Mn - ^{53}Cr 分析が次々に行われた。その後、再び電子顕微鏡法によりSIMS分析箇所付近において、SIMS前に実施されていた一連の電子顕微鏡分析による精密化とSIMS分析箇所の観察が実施された。これが局所分析の1サイクル分の手順であり、納得できるデータに収斂するまでこのサイクルが繰り返された。

イヅナ隕石についても研磨片が作成され、リュウグウ試料の時と同じ手順で分析が実施され対比実験がなされた。これら一連の分析のデータ取得を開始から約1ヶ月後の8月7日に完了し、永島さんはハワイ大に帰り、データ解析を続けた。データ解析はオンラインでメンバーと緊密に繋がっていた。以上の全ての結果は、リュウグウはCIコンドライトに似ていた。

6. 平均酸素同位体比分析

リュウグウ試料の平均的な酸素同位体組成を決定する分析は、筆頭著者がヤング博士(UCLA)の実験室に試料を持参し、一緒に分析を楽しむ計画にしていた。そのため、新型コロナ禍の状況を見守っていたが、一向に収まる気配がなかったため、持参を諦め、9月8日に航空便で試料を出荷した。米国税関で少し手間取ったが、9月20日に無事にヤング博士に届いた。ヤング博士は、CIコンドライトの一つであるオルゲイユ隕石と対比させながらリュウグウ試料の分析を始め、10月10日にデータ取得を終了した。この酸素同位体分析の結果も、リュウグウはCIコンドライトに似ていた。

7. 化学チームの第一弾論文

以上のように、2021年8月に、化学チーム内でリュウグウはCIコンドライトに似ていることが共通確信となり、10月には酸素同位体分析によりこのことが

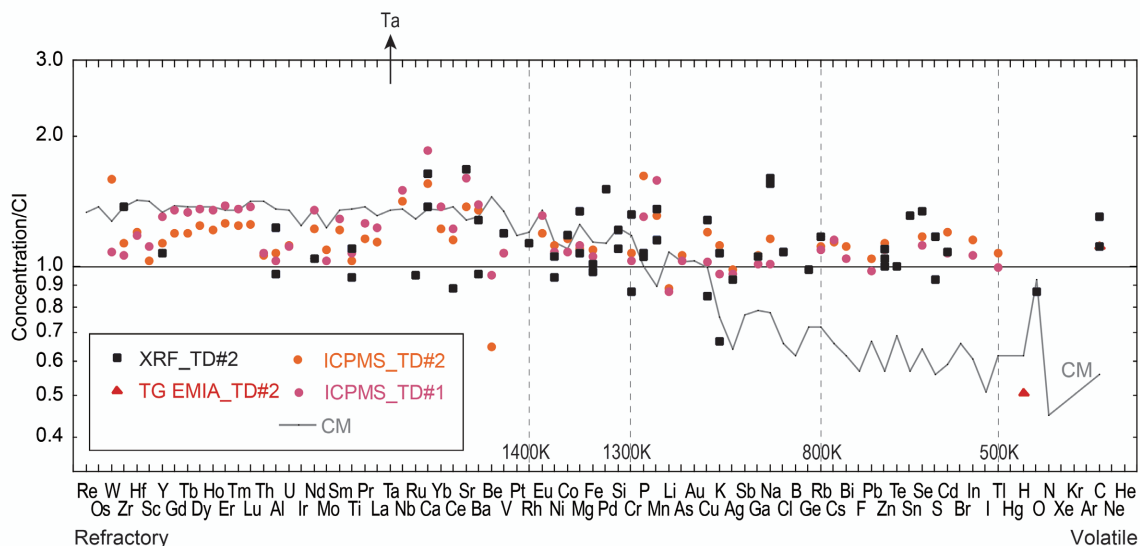


図2: リュウグウ試料の元素存在度。CIコンドライトの分析値で規格化している。横軸は平行凝縮温度の順に元素を並べている。プロットが $y=1$ より上で水平に並んでいることに注意。(文献[1]より)

さらに強固となった。化学チームにはPhase 2 高知チームのメンバー数名も参画しているので、彼らもまたこの事実と議論をよく知り共有していた。

はやぶさ2が採取した三番目に大きな粒子の一部が、9月13日に到着した。この粒子は、水質変質がやや軽微な部分が少しあることを除けば、基本的に以前の試料と同じ特徴を持っていた。そのため、化学チームの第一弾論文[1]は、10月までに取得した吟味が十分な分析データにより仕上げ、10月以降の初期分析結果は、第二弾以降の論文にまとめることを化学チームで同意した。この時書き上げられていたドラフトは、その後約2ヶ月かけ、金メダリストメンバーたちで何度も推敲された。投稿直前の11月30日に、バック博士(ゲッテンゲン大学)から新規の酸素同位体分析結果が、横山博士からCr・飯塚毅博士(東大)からTiの同位体分析結果が届いたので、それらを加えた。そして、この第一弾論文は12月20日にScience誌に投稿された。少し残念なことは、この投稿版の芸術的文章のいくつかは、出版にあたりScience誌編集者により芸術性を削がれたことである。

論文[1]の内容は、11月16日のはやぶさシンポジウム2021で発表した内容と基本的に等しい。はやぶさシンポジウムでは、リュウグウは、気体成分元素を除

く元素の存在度が太陽系元素存在度と等しい物質から、つまり、CIコンドライトと同質の物質からできていることを論じた。CIコンドライトは元素の太陽系存在度や宇宙存在度を決定している物質であるので、惑星科学者・天文学者には特別の思い入れがある隕石である。しかもリュウグウはどのCIコンドライトよりも新鮮であることも報告した。つまり、リュウグウはCIコンドライトを超える人類が今まで手にしていなかった太陽系の標準物質の可能性が大きいのである。そして、このことを証明するために、1g以上のリュウグウ試料を平均化した試料の分析値が必要であることを提唱した。この化学チームの提案がJAXA主導で今後実現されることを切望する。

8. 文献[1]の肝所

以上に記した分析の裏側とその結果・成果を論理的に再構成し、まとめたものが、文献[1]である。論文タイトルである「リュウグウはイヴナ型隕石に似ている」という意味の重大さを概説しよう。

8.1 元素存在度パターン

我々は、リュウグウの66元素(H, Li, Be, C, O,

表1. リュウグウ試料とイヴナ隕石の水素・炭素濃度（文献[1]より抜粋）

Sample	Ref.	Method	Mass loss		H ₂ O /wt.%		Total H ₂ O /wt.%	Inorganic H /wt.%	Total H /wt.%	CO ₂ /wt.%	Inorganic C /wt.%	Organic C /wt.%	Total C /wt.%
			/wt.%		interlayer	structural							
Ryugu	[1]	TG-MS, EMIA-Step	15.38		0.30	6.54	6.84	0.76	0.94	5.69	1.55	3.08	4.63
Ivuna	[1]	TG-MS, EMIA-Step	22.37		6.58	6.15	12.73	1.41	1.59	1.25	0.34	2.97	3.31
Ivuna	[9]	Combustion	n.a.		n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1.52	n.a.	n.a.	n.a.	3.50

n.a.: not analyzed.

Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Te, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Tl, Pb, Bi, Th, U) について濃度を決定した。これらの分析元素は難揮発性元素から500K以下の揮発性元素までまんべんなく揃っている(図2)。横軸に元素の揮発性を取り、縦軸に試料の元素濃度をCIコンドライトの元素濃度で規格化した値を取るグラフにおいて、CIコンドライト以外の隕石では元素の揮発性が大きくなるとプロットした点が段々と下側シフトしていく[3]。図2では、CIコンドライトの次に揮発性元素を多量に含むCMコンドライトの線を例示しているが、揮発性が大きい元素が下側に向かいプロットされていくことが明らかである。一方、リュウグウ試料のプロットは、下側に向かう傾向が見られず、全体的に水平である。これが、リュウグウがCIコンドライトに似ていると分類する最大の根拠である。なお、鉱物組み合わせ、各鉱物の化学組成、岩石組織においても、リュウグウはCIコンドライトに似ている。もちろん、酸素同位体組成と測定済みの金属元素同位体組成についても同じくCIコンドライトに似ている。

では、なぜリュウグウのプロットがほぼ一様に $y=1$ より上方にあるのだろうか。それは、リュウグウはCIコンドライトより水分量が少ないためである。しかし、CIコンドライトの水分量について今までよくわかっていなかったようである。なぜなら、最近の研究においても、隕石の水分量は熱重量分析による質量減少量に適切な補正をして求めており、直接水分を分析していたわけではなかった[8]。例えば、文献[8]

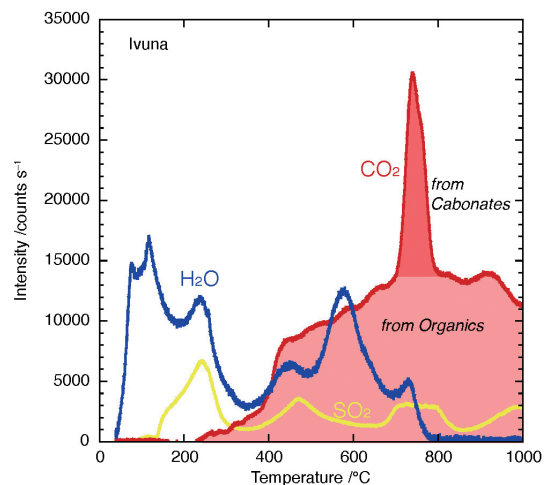


図3: 質量分析を加えた熱重量分析によるイヴナ隕石からの放出ガス。縦軸は質量分析計の信号強度。このグラフに書かれているガス以外のガス種の信号は小さい。H₂O曲線がふたつ山になっていることに注意。（文献[1]より）

では、イヴナ隕石の熱重量分析による質量減少量は28.7 wt.%であり、それを適当に補正して、水分量は18.7 wt.%とした。別の適当な補正を使えば、水分量は10.8 wt.%であった。今回、多分初めて、イヴナ隕石の水分量が正確に求められた。それは、質量分析を加えた熱重量分析TG-MSを初めて隕石に適用したからである。

8.2 水分

TG-MS中にイヴナ隕石から放出される気体成分を図3に示す。これらの曲線の下側の面積を合計したものが質量減少量に相当する。水分以外に多量のSO₂、CO₂ガスが発生していることがわかる。これは質量減少量には水分の他に余分な成分も加わっ

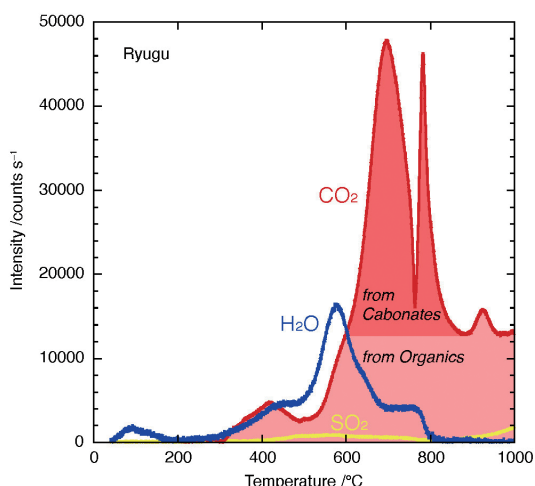


図4: 質量分析を加えた熱重量分析によるリュウグウ試料からの放出ガス。縦軸は質量分析計の信号強度。このグラフに書かれているガス以外のガス種の信号は小さい。図3でふたつ山だったH₂O曲線の一つの山がなくなりかかっていることに注意。(文献[1]より)

ていることを示している。我々は、試料より発生した水分量だけを定量し、イブナ隕石には水分が12.7 wt%含まれていることを決定した(表1)。また、水分の発生曲線は大きく二つのピークを持つ。このピークは水分の発生源が二つあることを示す。200°C付近のピークは層状ケイ酸塩鉱物の結晶構造の層間に入っていた分子状H₂O(層間水)が放出されたものである。一方、600°C付近のピークは層状ケイ酸塩鉱物が分解され結晶構造中のOH基(構造水)が放出されたものである。全水分の層間水、構造水の内訳は、ともに約6 wt%である(表1)。(イブナ隕石の層状ケイ酸塩は、蛇紋石(Mg,Fe)₃Si₂O₅(OH)₄とサポナイト Ca_{0.25}(Mg,Fe)₃((Si,Al)₄O₁₀)(OH)₂n(H₂O))の二つの鉱物からなるが、この化学式のH₂OとOHがそれぞれ層間水と構造水にあたる。)

熱重量分析中においてリュウグウ試料から発生する気体成分がイブナ隕石の時と異なる点は、SO₂の発生が少ないことである(図4)。これは、リュウグウには観察されない硫酸塩鉱物がイブナ隕石には存在することに対応している。また、図4の水分曲線は二つ山だが、層間水のピークは極端に小さく(0.3 wt%)、構造水のピークが優勢(6.5 wt%)である。ここで、構造水の量がリュウグウ試料とイブナ隕石

でほぼ等しいことに注意しよう。つまり、イブナ隕石の層状ケイ酸塩鉱物から層間水を抜き出してしまうとリュウグウの層状ケイ酸塩鉱物になることを意味している。

層状ケイ酸塩鉱物の層間水は、乾燥すると脱水し、吸湿すると層間に潜り込み復活する可逆の性質を持っている。そのため、逆にリュウグウの層状ケイ酸塩鉱物に大気中から水分が吸着し、層間に潜り込むと、イブナ隕石の層状ケイ酸塩鉱物ができる。一方、リュウグウ試料にはピロータイトFe_{1-x}Sが普遍的に存在する。ピロータイトFe_{1-x}Sは吸湿すると、硫酸鉄の水和物に変化する。これがイブナ隕石の硫酸鉄の由来である。しかしながら、この水和物を脱水してもピロータイトには戻らないので、この反応は可逆ではない。リュウグウ試料に硫酸鉄は見つからないので、リュウグウ母天体では硫酸塩鉱物は形成されなかったといえる。リュウグウ試料はCIコンドライトによく似ているので、イブナ隕石もリュウグウ母天体と同様の母天体の破片であると考えられる。したがって、イブナ隕石も元々は硫酸鉄を持っておらず、地球落下から現在までの間に大気中の水分を吸着した結果、硫酸鉄ができた可能性が極めて大きい。このような大気汚染は、イブナ隕石中の他の元素の濃度や有機物にも影響を与えているかもしれない。

8.3 炭素

我々は、有機物への大気汚染の影響を評価するため、リュウグウとイブナ隕石の両試料について、有機炭素と無機炭素を分離して分析できる熱分解・燃焼分析EMIA-Stepを適用した。もしイブナ隕石の有機物炭素の量がリュウグウのものより増えていれば、イブナ隕石は地球の有機物により大きく汚染されている可能性がある。TG-MSと蛍光X線分析の結果から無機物内の炭素の担体は、炭酸塩鉱物であることがわかっている。TG-MSの結果から、800°C以下では全炭酸塩と有機物の一部が熱分解することがわかっている。従来の研究から1000°Cでは、全有機物が燃焼することがわかっている。EMIA-Stepでは、試料が1000°Cまで加熱される間に放出される炭素を含む気体分子をリアルタイムに計測し、その信号値から炭素量を定量し、時系列の放出炭素量(放出炭素スペクトル)を測定した。図5, 6の青

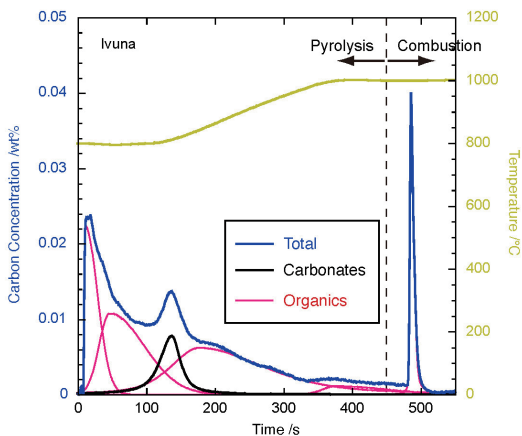


図5: 熱分解・燃焼分析EMIA-Stepによるイヴナ隕石の炭素定量分析の結果。有機物から発生する炭素に複数のピークがあり、炭酸塩から発生する炭素が単一のピークであることに注意。(文献[1]より)

色の曲線がそれである。青色の放出炭素スペクトルはいくつかのピークの合成として表現できる。それぞれのピークがよく似た種類の物質からの炭素放出に対応し、ここでは、ピンク色が有機物由来、黒色が炭酸塩化合物由来の炭素に対応している。複雑なあるいは複数の有機物が試料中存在しているとき、それぞれの分子構造により複数の炭素放出時期が期待されるが、事実それに対応していると思われる複数のピンクのピークが存在している。

今回のイブナ隕石試料に含まれる全炭素量は3.3wt%であったが、それは先行研究による測定値3.5wt%と一致した(表1)。有機炭素と無機炭素の内訳は、それぞれ、3.0wt%と0.3wt%である。約90%の炭素が有機物としてイブナ隕石中に含まれていることがわかる。一方、リュウグウ試料中の有機炭素は3.1wt%である。両者の有機炭素量が等しいことから、イブナ隕石に地球有機物の汚染による顕著な増加はなく、イブナ隕石中の炭素は元々の宇宙起源のもので占められていることがわかる。しかし、イブナ隕石とリュウグウ試料との間で有機物の放出炭素スペクトル(ピンク色)に違いが見られる。比較すると、イブナ隕石では500s付近のピークが小さくなり、低温側側の複数のピークが増加している。これは、イブナ隕石では大気水蒸気の吸着により、元々の有機物が酸化され、その構造が変化してしまったから

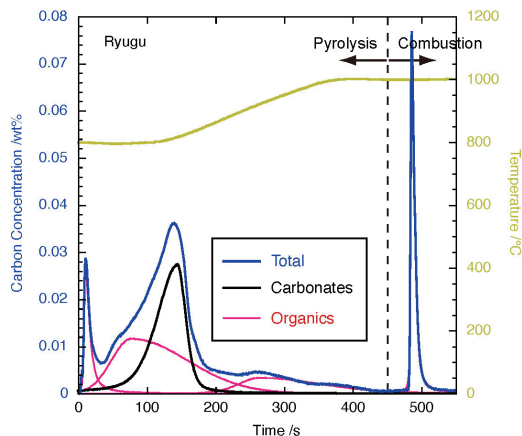


図6: 熱分解・燃焼分析EMIA-Stepによるリュウグウ試料の炭素定量分析の結果。図6と比較して、炭酸塩のピーク位置はほとんど変化がないが、有機物のピーク位置が変化していることに注意。(文献[1]より)

かもしれない。今後、リュウグウとCIコンドライトとの間の有機物構造の違いを研究し、大気汚染のCIコンドライトに与える影響を考える必要がある。

8.4 始原性

以上のリュウグウとCIコンドライトとの化学的性質の同等性と不同性から推察されるリュウグウとCIコンドライトの起源と進化を見てみよう。局所分析の結果が、事件の年代と温度圧力条件を与える。

太陽系誕生初期に、原始太陽系円盤中で、チリと氷が集積し、母天体を作った。チリのH, C, O, N, 希ガスを除く元素の平均組成は太陽系元素存在度に等しかった。この母天体は当時存在していた短寿命核種 ^{26}Al による加熱により内部では氷が融け、チリと化学反応を起こした。その結果、チリのほとんどは、蛇紋石($\text{Mg,Fe}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)とサポナイト $\text{Ca}_{0.25}(\text{Mg,Fe})_3((\text{Si,Al})_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2\cdot n(\text{H}_2\text{O})$)の層状ケイ酸塩鉱物に変化した。また、水溶液から、ドロマイト $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 、プロイネル石($\text{Mg,Fe})\text{CO}_3$ 、ピロータイト Fe_{1-x}S 、マグネタイト Fe_3O_4 が晶出した。この一連の現象を水質変成作用と呼ぶ。水質変成作用が起こった年代はドロマイト中に残っている単寿命核種 ^{53}Mn の娘核種 ^{53}Cr を分析することにより太陽系が誕生してから約500万年後と決定された。その時の水温は、化学平衡にあったと思われるドロマ

イト・マグネタイト間の酸素同位体分別から、約40℃と推定される。水の存在から推定される圧力の下限は0.06気圧である。この時、リュウグウの層状ケイ酸塩鉱物は、現在のイブナ隕石中のそれと同量程度あるいはそれ以上の量の水分を含んでいたと考えられる。なぜなら、液体の水と共存していたからである。

その後、母天体は破壊され、現在の小惑星リュウグウが形成された。小惑星リュウグウはラブルパイル天体であるので構成物質は真空の惑星空間にさらされている。そのため、層状ケイ酸塩の層間水のほとんどが宇宙空間に蒸発散逸してしまった。しかし、リュウグウ試料は、小惑星リュウグウ上で、100℃以上に加熱されていない。なぜなら、試料中に少し層間水が残っているからである。一方、層状ケイ酸塩鉱物中の構造水は、鉱物形成時のまま残っている。

地球落下前のCIコンドライトは、リュウグウ試料と同等であった可能性が高い。しかし、地球落下後、多分主に博物館内で、大気汚染を受けた。その結果、現在のCIコンドライトに含まれている水分の約半分は大気中の水蒸気吸着による大気汚染の結果であろうと考えられる。もしそうならば、CIコンドライトを構成する物質は、有機物を含め、宇宙にいた時の状態と大きく変化しているかもしれない。また、大気汚染を受けて濃度が変化した元素もあるかもしれない。これまで信じられていたCIコンドライトの始原性を再評価するためにリュウグウとCIコンドライトとの対比研究は、今後の重要な観点である。

以上の結果より、リュウグウ試料はCIコンドライトによく似ていることがわかった。CIコンドライトは地球に存在する約7万個の隕石の中で9個(内4個は南極隕石)しかない。CIコンドライトは、揮発性が高い元素(H, C, O, N, 希ガス)を除いて太陽系の平均元素存在度を持つと信じられているので、元素組成に関する太陽系の標準として位置付けられている。CIコンドライトに似る宇宙物質の中で、リュウグウは地球汚染がなく、宇宙における状態を最もよく保持している。したがって、リュウグウ試料は、我々人類が手にしているどの天然試料よりも化学的に太陽系の平均組成に近いという意味の始原性をもつ試料と言える。

今、最も修正しなければいけない結果は、図2における各元素のプロットのばらつきについて考察する

ことである。このばらつきは、各分析に用いることができた試料量(最大で30mg)が少なかったための試料間の不均一性のためと考えられる。もしそうならば、リュウグウ試料1g以上を使い、それを平均化したリュウグウ試料を用いて、全元素について組成と同位体比のデータベースの作成を国際協働で推進するプロジェクトを実施してほしい。これにより、リュウグウ試料は、新しい太陽系の標準試料として確立され、人類が太陽系小天体の科学探査を必要としなくなるまで、人類の科学財産として活用され、惑星科学の発展に貢献し続けるであろう。

9. あとがき

以上が化学チームのプロジェクト企画であり、その成果である文献[1]を読み解くためのヒントである。文献[1]の著者順序は大変意味を持っており、2016年の応募時から決めていた。どうしてその順序にしていたのかは、小論文と文献[1]を読んで対比していただくと理解いただけると思います。

今後化学チームでは、2021年11月以降に成果となった論文が出てくる予定である。現在まで、プレソーラー粒子[10]、Ca同位体[11]とFe同位体[12]の論文が出版済みである。Cu, Zn同位体[13]の論文が受理された。ただいま、酸素同位体の平均組成[14]とリュウグウに集積した一次鉱物の酸素同位体組成の論文[15]がそれぞれ査読中と印刷中である。今後も続々と新しい研究成果が出ていくので、期待していただきたい。ところで、はやぶさ2がCIコンドライトに当たったのは偶然だったのか、必然だったのか?これからいくつ小惑星探査をすれば、この答えがだせるのだろうか?この答えが出せたら、そろそろ小惑星探査の店仕舞いの頃かもね。

謝辞

リュウグウ試料を無事持ち帰り、キュレーションしていただいたプロジェクトメンバー、メーカー担当者、キュレーションメンバーに感謝します。はやぶさ2を応援くださっている皆様にも感謝します。編集長の三浦均さんと編集幹事の瀧川晶さんには色々とお話をいただきありがとうございました。

参考文献

- [1] Yokoyama, T. et al., 2022, *Science* 10.1126/science.abn7850.
- [2] 坂本尚義 (インタビュー), 2017, *ISASニュース* No. 435, 8.
- [3] 坂本尚義, 2022, *地学雑誌* 131, 163.
- [4] 片岡由行ほか, 2020, *分析化学* 69, 363.
- [5] HORIBAホームページ. https://www.horiba.com/hayabusa2/role_03.html
- [6] 巽 瑛理ほか, 2021, *日本惑星科学会誌* 30, 64.
- [7] Lodders, K., 2021, *Space Science Reviews* 217, 44.
- [8] King, A. et al., 2015, *Earth, Planets and Space* 67, 198.
- [9] Alexander, C. M. 'OD. et al., 2012, *Science* 337, 721.
- [10] Barosch, J. et al., 2022, *Astrophys. J. Lett.* 935, L3.
- [11] Moynier, F. et al., 2022, *Geochemical Perspectives Letters* 24, 1.
- [12] Hopp, T. et al., 2022, *Science Advances* 8, eadd8141.
- [13] Paquet, M. et al., *Nature Astronomy*, accepted.
- [14] Tang, H. et al., *Science Advances*, in review.
- [15] Kawasaki, N. et al., *Science Advances*, accepted.

著者紹介

塚本 尚義

北海道大学大学院理学研究院教授. 筑波大学卒業. 熱力学に従っていたように見える物質中の酸素原子が熱力学に従っていなかったように見えるという不思議な宇宙現象の研究を行っている. 「はやぶさ2」ではキュレーション体制の整備と初期分析(化学)の取りまとめを担当.

橘 省吾

東京大学理学系研究科教授. 大阪大学卒業. 太陽系惑星の化学的多様性の起源の理解をめざした物質科学研究をおこなっている. 「はやぶさ2」ではサンプル開発や初期分析全体のとりまとめを担当.

渡邊 誠一郎

名古屋大学大学院環境学研究科教授. 東京大学卒業. 原始惑星系円盤の進化とダストから微惑星の形成過程について研究している. 「はやぶさ2」ではプロジェクトサイエンティストとしてサイエンスの取りまとめを担当.

一番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦 その52 ～光線を追え!IR2検出器点広がり関数PSFの 物理モデリング～

佐藤 毅彦^{1, 2}, IR2チーム

(要旨) あかつきIR2検出器に宿命的な点広がり関数PSFを, 検出器の構造と其中で起きる物理過程とに立ち返ったモデリングにより再現を試みたところ, 多重リングという重要な特徴を再現することができた. 一方, 十字状パターンは再現できず, これは幾何光学的ではなく波動光学的に起きている現象と考えられる. このPSFシミュレーションは, 検出器を加工した場合の性能向上を見積もるツールとしての活用も可能である.

1. IR2検出器点広がり関数PSFのおさらい

シリーズ「その45」[1]で述べたように, IR2夜面データは「昼面からのコンタミ」に悩まされています[2]. IR2の検出素子(白金シリコンPtSi)は厚み400 μm のシリコン基板に微細加工で形成されたものです. シリコンは赤外線領域では透明度が高く, その屈折率は波長2 μm において約3.4です. そのため検出素子面でいったん光が散乱されるとたやすく全反射状態, つまりシリコン基板から光が脱出できず多重反射を繰り返すモードに入ります. この効果により, 強い点光源からの光が大きく広がってゆく, つまり裾野が広い点広がり関数PSFを生じるということが, IR2検出器の「宿命」ともいえる問題点です.

画像の後処理によりそれを軽減する手法も研究され, 画像同士の引き算を上手に行うことにより「その45」で紹介したような測光研究の成果が得られています[3]. この方法では, 広がった光を引き算によりキャンセルしているだけで, PSFそのものを正確に知る必要はありません. それは簡便でよいのですが, やはりPSFをきちんと知りたいという要求(画像

のデコンボリューションをしたいなど)もあります. 波長2.02 μm の昼面画像は画素飽和の問題も少なく, 数学関数で近似したPSF([2]を改良したバージョン2)を用いたデコンボリューションが良い結果を与えています[4]. しかし夜面画像では大きく飽和した三日月状の昼面が共存し, そこから広がった光を精度よく取り除くため, なかなか満足のゆくPSFを得ることができずにいました.

考えてみれば, IR2検出器の構造はよく分かっています(何しろ, ミッションチームと三菱電機とで時間をかけ議論をして作ったのですから). 基板内で起きている物理プロセスを丹念に追えばPSFの物理モデルを構築できるのではないかと?という発想から, この作業に着手したわけです.

2. 多重反射のモデリング

モデリングの根幹となる考え方は, 二つ(AとB)に分けることができます. シリコン基板の下面に検出素子などの部品が形成されていて, 上面は基板とレンズ側外界との境界面(平面)であるとしします.

2.1 点光源を出発点とした素過程(過程A)

A1. 下面のどこか一点からあらゆる天頂角・方位角へと広がる光線を追跡します. 上面への入射角が

1.宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所

2.総合研究大学院大学・物理科学研究系・宇宙科学専攻
satoh@stp.isas.jaxa.jp

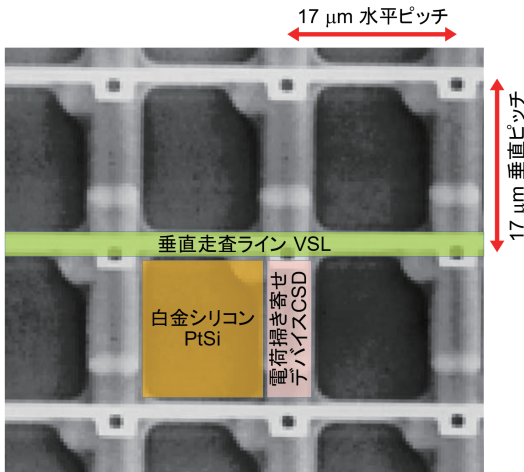


図1: IR2検出器素子面の電子顕微鏡写真. PtSi, CSD, VSLの各要素が見える.

全反射の臨界角より大きければ, 100パーセント鏡面反射され下面へ戻ります. 臨界角以下の場合, 外へ出る光と, 基板内へ戻る光とに分かれます.

A2. 下面には白金シリコン検出素子(PtSi, 開口率 APR), 電荷掃き寄せデバイス(CSD), 垂直掃引ライン(VSL)が $17 \mu\text{m}$ ピッチで, 1040×1040 画素分形成されています(図1). これら要素は, それぞれに仮定された反射率で鏡面反射するものと考え, ひたすら反射光をトレースしてゆきます(面積平均した反射率は R_{ave}). PtSi部分を経由する場合には, 量子効率(QE)相当分の光が光電子に変換され蓄積されます。「どこか一点」を始点とした光により各PtSi素子に蓄積される光電子マップを, Mirror Reflectionの意味で**MRR**

と呼ぶことにします.

A3. 下面に達した光は, 鏡面反射される, あるいは光電子に変換される以外に, 各場所で散乱されて二次的な光源になります(図2). つまり, A1で考えた「どこか一点」からの光は検出器全面に無数の光源を生み落とす結果となります。「どこか一点」を始点とした, この新たな光源分布を Diffuse Sourceの意味で**DFS**と呼ぶことにします.

さて実際に点光源(恒星のような)からやってきて, IR2レンズを経由し検出器に結ばれる像は(ニコンにより高い性能を達成していても), A1で考えたような「理想的な点像」にはもちろんなりません. その像を True Optical PSFの意味で**TOP**と呼びましょう. すると, A1~A2の過程を経て, PtSi素子に蓄積される光電子マップは

$$TOP * MRR \rightarrow IMG_1 \quad (1)$$

で得られます(アスタリスクは二つの二次元マップの畳み込みです).

また, 次のステップで考慮しなければならない新たな光源分布は

$$TOP * DFS \rightarrow DFS_1 \quad (2)$$

の畳み込みで得られます.

2.2 素過程の繰り返しによるPSF再現 (過程B)

ここまでで, 「鏡面反射パターン**MRR**」と「新たな光源分布**DFS**」という二つの素過程を得ました. 次に, 子が孫を産み, 孫がひ孫を産む, そうした繰り返

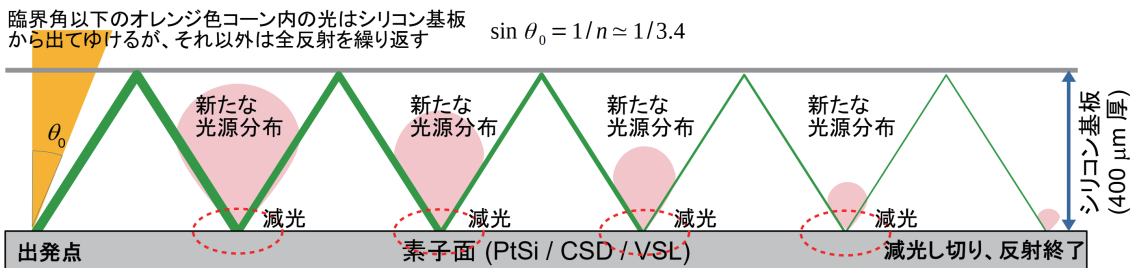


図2: 一点からスタートする多重反射の模式図. 下面で反射するたび, そこに新たな光源を生んでゆく.

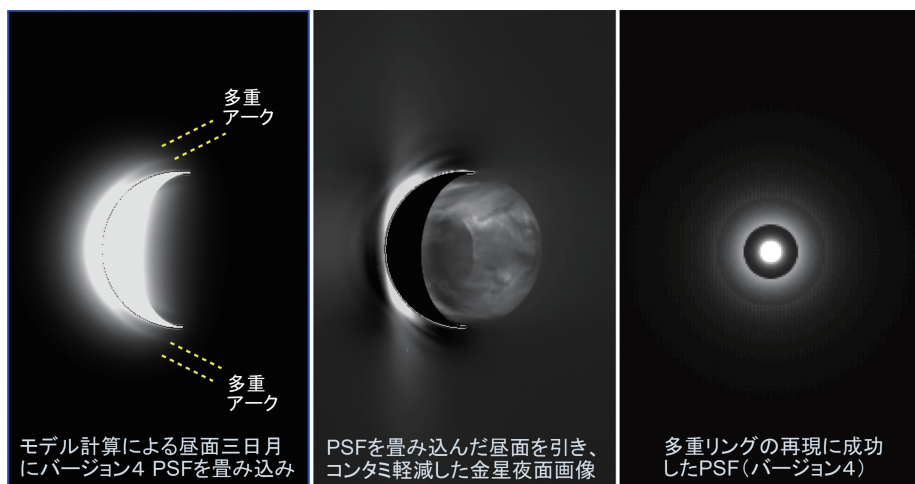


図3: シミュレーションで得たPSF(右), それをモデル昼面に適用したものの(左), 夜面画像から引き去りコンタミ軽減したもの(中央).

返しを定式化してやればよいことになります。

上記した第一ステップで得られた DFS_1 が次のステップの光源分布ですから,

$$DFS_1 * MRR \rightarrow IMG_2 \quad (3)$$

$$DFS_1 * DFS \rightarrow DFS_2 \quad (4)$$

のように, やはり畳み込みによって検出器に蓄積される光電子マップ IMG_2 と, さらに次のステップの光源分布 DFS_2 が得られます。一般化すれば,

$$DFS_i * MRR \rightarrow IMG_{i+1} \quad (5)$$

$$DFS_i * DFS \rightarrow DFS_{i+1} \quad (6)$$

ですね。シリコン基板下面の反射率は1未満なので, いずれ光は十分に微弱になり, 多重反射はストップします。そのためのステップ数を N とすれば,

$$IMG_{ACC} = \sum_{i=1}^N IMG_i \quad (7)$$

で光電子をすべて積算できます。これに光学系で生じる TOP を加えた

$$IMG_{ALL} = \frac{QE \times APR}{R_{ave}} \times TOP + IMG_{ACC} \quad (8)$$

がトータルのPSFとなります(全体を規格化します)。

3. 何かを得られ, しかし何か足りない…

こうして得られたPSFを図3のいちばん右側に示します。中心部分は光学系で生じる TOP であり, そのまわりに広がる多重リングが式(7)で得られるものです。多重リングを再現できたというのは大きな収穫で, これをモデル計算の昼面に適用すると図3左のように三日月が多重アーチとなり, 実際の画像と定性的によく似てきます。そしてこれを夜面画像から引くことで, コンタミをかなり軽減することができました(図3の中央)。

残念ながらこのシミュレーションでは再現できない特徴のあることも, 同時に分かりました。それはPSFの「十字状パターン」です。これを手がける前は, 「素子が格子状に並んでいるのだから, 縦方向または横方向へのガイドのように働くことで, 十字の方向に反射しやすい。それが十字状パターンの原因であろう」と考えていました[2]。しかし予想に反して, 実際のシミュレーションでそのような結果を得ることはできませんでした。いまでは十字パターンは幾何光学的にはなく, 素子面が回折格子として働き波動光学的に生じている, と考えています。これを現在の

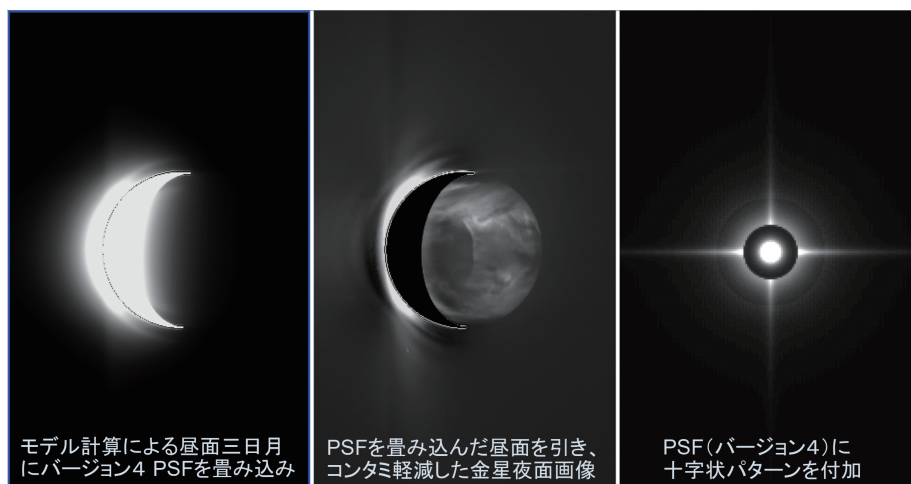


図4: 図3と同様だが、人為的に十字状パターンを加えたPSFによるもの。

計算コードに組み込むことは容易ではないので、十字パターンは再び数学関数近似で導入することとしました。図4はこうして得られたPSF(右)、モデル昼面に適用したもの(左)、夜面からコンタミを軽減したもの(中央)を示しています。中央の画像を図3のそれと見比べると背景の宇宙空間の平坦度が向上している、つまりより適切に光を引き去っていることが分かると思います。

4. 副産物も!

検出器の基本構造に立ち返りそこで起きている物理過程をきちんと定式化してゆくと、それらしいPSFが得られるというのはなかなか新鮮な驚きでした。このことは、たとえばシリコン基板をどのくらいまで削り込む(薄化する)とどのような性能向上が見込めるか、などを見積もることのできるツールを手にしたことを意味します。実は世界的に見て、大フォーマットの2 μm 帯検出器は入手が非常に難しい(環境規制でHgCdTeが作りにくくなったため)状況となっています。一方、われわれの手元にはまだまだPtSiチップが多数残っており、それを加工してスーパーPtSi検出器を世界へ供給する、というのも夢ではないかも知れません!

参考文献

- [1] 佐藤毅彦ほか, 2021, 遊星人 30, 14.
- [2] Satoh, T. et al., 2017, Earth Planets Space 69, 154.
- [3] Satoh, T. et al., 2021, Icarus 355, 114134.
- [4] Sato, T. M. et al., 2020, Icarus 345, 113682.

著者紹介

佐藤 毅彦



宇宙航空研究開発機構宇宙科学
研究所教授、総合研究大学院大
学物理科学研究科教授、北海道
大学大学院理学院客員教授、東
京理科大学大学院理学研究科博
士課程修了、博士(理学)、ハワイ

大学天文学研究所客員研究員、NASAゴダード宇
宙飛行センター研究員、東京理科大学計算科学フロ
ンティア研究センター講師、熊本大学教育学部准教
授を経て、2006年12月より現職。専門は惑星大気科
学。日本天文学会、日本惑星科学会、地球電磁気惑
星圏学会、アメリカ天文学会、アジア大洋州地球科
学会などに所属。アジア大洋州地球科学会事務総
長補佐を務める。

系外惑星「遠い世界の物語」その15 ～IRD-SSPによるM型矮星Ross 508 を 周回するスーパーアースの検出～

原川 紘季¹, IRD-SSPチーム

(概要) M型星における系外惑星探索は、太陽型星と比較して大規模にサーベイが行われておらず、スペクトル型が中期から晩期M型星では、惑星個々の特徴・分布や統計的な性質についてまだよくわかっていない。すばる望遠鏡戦略枠観測IRD-SSPは晩期M型星をメインターゲットに設定したドップラー法による系統的かつユニークな系外惑星探索プロジェクトで、すばる望遠鏡とIRD (InfraRed Doppler instrument) を駆使して2019年からサーベイを推進してきた。本稿ではIRD-SSPで検出した最初の系外惑星となるスーパーアースRoss 508 bについて報告する。

1. はじめに

これまでに5000個を超える数の系外惑星が検出されている。系外惑星の検出手法としてドップラー法(惑星の重力による恒星のわずかな周期的ふらつきの視線方向の速度変化を星スペクトルのドップラー遷移として捉える手法)とトランジット法(惑星が恒星の光球面の手前を横切る際に恒星が一時的に減光する現象を捉える手法)が主なものとして挙げられ、それぞれおよそ1000, 4000個(2022年10月現在)の系外惑星が検出されている。現在わかっている系外惑星のおよそ90%は太陽型星と呼ばれるF, G, およびK型星周りで報告されているが、これはスペースからの高精度トランジット法の成功と太陽型星が可視光で最も明るく、かつ視線速度精密測定に必要なスペクトル中の吸収線の数が多く存在するため、比較的高い効率で探索が進行できた結果と言える。これに対してM型矮星と呼ばれる有効温度が3500K以下の主系列星については天の川銀河で最も多いタイプの恒星であるにもかかわらず系外惑

星の検出数は300弱にとどまる。これはM型矮星が太陽型星と比べて非常に暗く、さらにその放射量のピークは近赤外の波長域に存在するため、CCDの感度特性も相まって効率的な探索が行われてこなかったという背景がある。したがって、現在でもM型矮星(以降はM型星も同義とする)周りで惑星の分布や頻度はよくわかっていない。最近になり、本稿で紹介するすばるIRDに加え、近赤外線の高分散分光器(CARMENES¹, HPF², SPIRou³など)が稼働を開始してからはM型矮星をメインターゲットに掲げたサーベイが複数立ち上がり、それぞれ精力的なサーベイを展開している。現在では複数の地球型惑星の発見報告がM型星周りでなされ、Teegarden's Star 系[1]などのハビタブルゾーン(HZ; 中心星からの入射光量がちょうどよく、液体の水が存在できる軌道の範囲)内に存在すると考えられるものも見つかってきている。

¹スペインのCalar Alto観測所 3.5 m 望遠鏡に搭載。可視と赤外の2チャンネルを搭載するが、可視光のデータが主に惑星探索で利用されている。

²米国マクドナルド観測所のHobby-Eberly 10 m 望遠鏡に搭載。

³ハワイ マウナケア山頂のCanada-France-Hawaii 3.6 m 望遠鏡に搭載。

1.すばる望遠鏡
harakawa@naoj.org

そのような中、日本でもすばる望遠鏡とIRDを駆使して8メートル超級の望遠鏡としては世界に先んじて晩期M型星周りの惑星探索を展開してきた。本稿ではすばる戦略観測プログラムIRD-SSPのサーベイから検出されたスーパーアースRoss 508 bについて報告する。なお、本稿はHarakawa et al. (2022)[2]を元に執筆している。必要な折、参照されたい。また、図については特に出典が明記されていない限り、[2]に使用した図の変更である。

2. 観測および解析

2.1 IRD-SSP

IRD-SSPはすばる望遠鏡とIRD (InfraRed Doppler instrument) を駆使して晩期M型星を主なターゲットに設定して系統的に系外惑星探索を行うすばる望遠鏡の戦略観測プログラムである。先行して稼働していたCARMENESなどが早期から中期M型星を主要ターゲットとしていることに対して、IRD-SSPではすばる望遠鏡の大口径とレーザー周波数コムを利用した近赤外波長帯域での精密な波長較正を強みとして、これまでほぼ未開拓の晩期M型星をメインターゲットに据えている点がユニークである。サーベイは2019年に開始され、2022年10月現在も継続中である。5年間で合計175夜の観測を行い、将来の惑星の特徴付けの研究に適した地球型惑星の発見と、地球型惑星から巨大惑星の分布を晩期M型星において統計的な制限を与えることを目標としている。

IRDは惑星をドップラー法で検出することを主眼に開発された近赤外線高分散分光器で、波長範囲は0.97から1.75 μm までをカバーし、分解能は $R \sim 70000$ である。検出器は近赤外線の感度が高いHawaii2-RG(H2RG)を2つ導入して近赤外波長域に感度を最適化することで、晩期M型星のように近赤外に放射エネルギーのピークがある低温度の星で効率的にドップラーサーベイが可能である[3]。

2.2 恒星パラメータ推定

Ross 508はKoizumi et al. (2021)[4]によりスペクトルサブタイプの推定が、またIshikawa et al.

(2022)[5]により組成解析が行われており、それぞれM4.5および金属量⁴ $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.20 \pm 0.20$ と得られているため、中期から晩期型にかかるM型星であることが報告されている。金属量も誤差の範囲で太陽組成と同じであると言える。固有運動、年周視差(すなわち距離)、および基本的な測光値は位置天文観測衛星Gaia、地上赤外線全天サーベイの2MASSおよび全天赤外線観測衛星WISEにより測定されているので、これらのデータからスペクトルエネルギー分布の解析を行い有効温度 (T_{eff}) と光度 (L_*) の推定を行った。半径 (R_*) や質量 (M_*) および表面重力 ($\log g$) については測光値と先に求めた有効温度、および金属量から経験則を適用することで推定することができる[6, 7]。導出された各パラメータの値は表1にまとめた。

表1: Ross 508の基本的な物理量。

スペクトル型	M4.5
$[\text{Fe}/\text{H}]$	-0.20 ± 0.20
T_{eff} (K)	3071_{-22}^{+34}
L_* (L_{\odot})	$3.589_{-0.071}^{+0.067} \times 10^{-3}$
R_* (R_{\odot})	0.2113 ± 0.0063
M_* (M_{\odot})	0.1774 ± 0.0045
$\log g$ (cgs)	5.039 ± 0.027

2.3 データ解析および軌道推定

取得された全103個のデータについてIRDに最適化された解析パイプラインを用いて、2次元の画像データとして記録された分光器データからスペクトルの抽出(一次元化)を行った[8]。同時に取得されたレーザー周波数コムと星スペクトルそれぞれについて標準的なエシエル分光器データ解析手順に従った。

視線速度精密測定には、安定した装置温度状態と精密な波長校正のための参照光源が必要となる。IRDでは参照光源としてレーザー周波数コム(以降、コム)を搭載しており、露光中に星スペクトルとコムを同時に並べて照射できるようになっている。これに

⁴慣例的に鉄と水素の存在比を太陽と対数スケールで比較した量を指す。

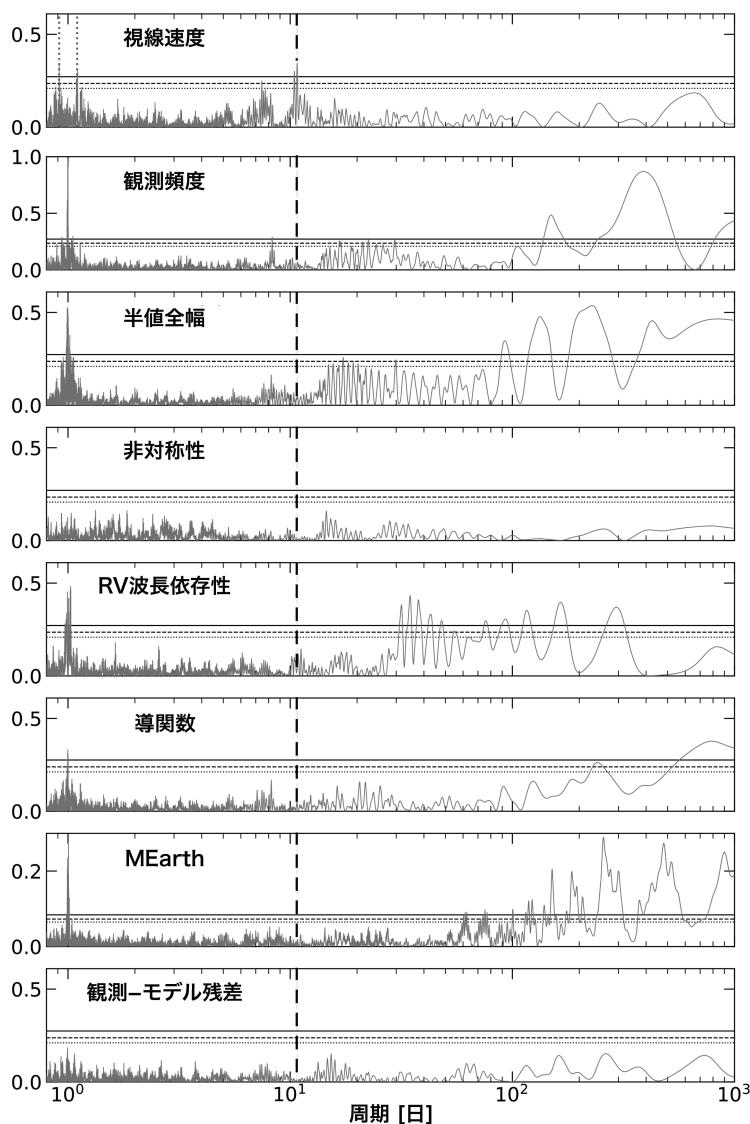


図1: 視線速度および各種解析の周期解析結果。縦向き破線・図最上段の点線はそれぞれ10.7日周期と推定されたエイリアシング周期の位置を示す。横向き破線・破線・実線はそれぞれFAP (False Alarm Probability) と呼ばれる測定誤差による偽検出可能性のうち、5%、1%、0.1%に相当する値をあらわしている。

よって露光中の装置由来のスペクトル吸収線輪郭の変形 (Instrumental Profile; IP) をコムスペクトルから高精度に推定することができ、解析されたIPを星スペクトルにも適用することでドップラーシフトが精密に測定できるようになる[9]。

導出された視線速度 (Radial Velocity; RV) の時系列データについて周期解析を行った結果を図1に示す。10.7日付近の周期にもっとも強いシグナルが

認められた⁵。検出された周期についてマルコフ連鎖モンテカルロ法による軌道推定を行い、ベイズ情報量基準による比較の結果、今回得られたRV変動が

⁵周期解析の結果では他にもいくつかの有意と見られる周期が認められた。しかしこれらはすべて観測の頻度に起因するエイリアシング (折り返し雑音) の可能性が高く、また後述の推定された軌道モデルと観測RVの残差に有意な周期性が何もなく、10.7日周期だけが物理的に有効な周期であると結論した。

表2: Ross 508 b の主な軌道パラメータ.

K_b (m/s)	$3.92^{+0.60}_{-0.58}$
P (日)	$10.77^{+0.01}_{-0.01}$
e	$0.33^{+0.13}_{-0.15}$
σ_{jitt} (m/s)	$1.76^{+0.46}_{-0.48}$
$M_b \sin i$ (M_{\oplus})	$4.00^{+0.53}_{-0.55}$
a_b (au)	$0.05366^{+0.00056}_{-0.00049}$

ら表2にまとめられる軌道パラメータが尤もらしいことが分かった. なお, K_b は振幅, P は軌道周期, e は軌道離心率, σ_{jitt} は恒星の活動と装置それぞれに由来するノイズを合算した量, $M_b \sin i$ はドップラー法で推定される惑星の最小質量(恒星運動の視線方向の速度成分のみから質量を推定するため, 軌道傾斜角*i*だけ不定性が残る), a_b は惑星の軌道長半径を表す. また, RVと惑星軌道のベストフィットモデルを図2に示す. 本稿では詳細は割愛しているが, 2021年8, 9月に取得されたRV測定値に 8 m s^{-1} 程度の系統的ずれ(オフセット)が含まれている可能性が示唆された. 原因はよくわかっていないが, 恒星のフレアなどの突発的な現象, あるいは観測施設の電気工事の影響でこの時期のコム発生装置の温度制御を直前まで変則的にせざるを得なかったことも影響していた可能性がある. そのため, この時期に取得されたデータについてオフセットのパラメータを与えた場合とそうでない場合, またそれに関連してRV長期トレンドの有無でモデルを分けて全4通りのモデルを比較しており, 長期RVトレンドの有無や離心率について検討している. 結果としてオフセットを含み, かつ長期トレンドは含まれないモデルが尤もらしいことがわかった.

2.4 恒星活動

太陽の表面には彩層活動による黒点や白斑が観測されるように, 恒星表面の明るさは一様ではなく, 部分的に恒星の活動領域が暗く, もしくは明るくなると考えられる. 恒星は自転しているので, こういった部分的な明るさの変化は分光学的には恒星の自転速度による吸収線の広がり, 非対称かつ自転周期に対応して変動することを意味する. したがって周期的なRV変動の原因は恒星の重力による実際の恒星の運動だけでなく, こうした恒星活動による

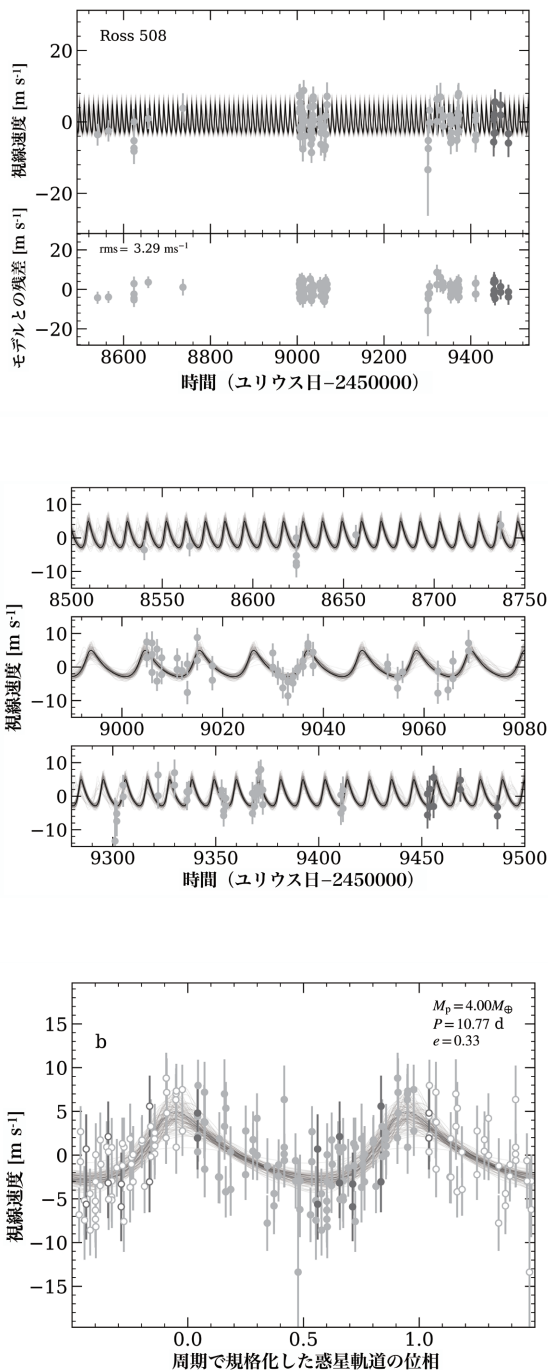


図2: Ross 508のRVとベストフィットモデル. 濃い実線がベストフィットモデルを示す. 薄い実線は事後分布からランダムに抽出した100通りのパラメータを反映している. 丸点は観測されたRVを表し, 特に濃い丸点は軌道推定の際にオフセットを与えた点. 下段図の白抜き丸点はRVを軌道位相で繰り返したものの.

吸収線の広がりを示す形状(線輪郭)の周期的変動による擬似変動の可能性がある。一方でドップラー遷移による変動は線輪郭の変形が起こらないため、ドップラー法での惑星探索では線輪郭とRVの時間変動について周期性や相関を調査して恒星活動による変動と区別をすることが不可欠である。我々はMEarthというM型星に特化したトランジット惑星サーベイによる測光データに加えて、線輪郭の形状について半値全幅・非対称性・波長依存性・導関数の計4種類の指標で測定を行った。さらに、それぞれについて周期解析を行った結果、10.7日付近にはRV変動以外の周期性が認められないことを確認した(図1)。ここまでの検証から、我々が得られたRV周期変動は恒星の活動やエイリアシングによる擬似的なものではなく、実際のドップラー遷移によるものである可能性が最も高いことが確かめられたことになる⁶。

2. Ross 508 b

検出された惑星Ross 508 bの主な特徴としては最小質量約 $4.00M_{\oplus}$ のスーパーアースで、軌道長半径およそ0.054 au であること、軌道離心率は誤差が大きく、実効的な制限が付けられていないものの、 $e \sim 0.33$ と高めである可能性があることなどが挙げられる。惑星の他に遠方に他の天体がいることを示唆するような有意な長期RV変動は確認できなかった。高精度位置天文衛星のデータGaia Early Data Release 3によれば、Ross 508 は別の未確認の天体から加速を受けている可能性が高いことがわかった。ただし現時点ではRVの長期トレンドは確認できていない。したがって、今後の継続的な観測でRVオフセットの影響を抑えつつ離心率をより高精度に決定すると同時に、伴天体についても存在に制限をつけることで、系全体の描像や形成シナリオを明らかにすることができるだろう。

Ross 508は太陽よりも低い有効温度のためにHZ

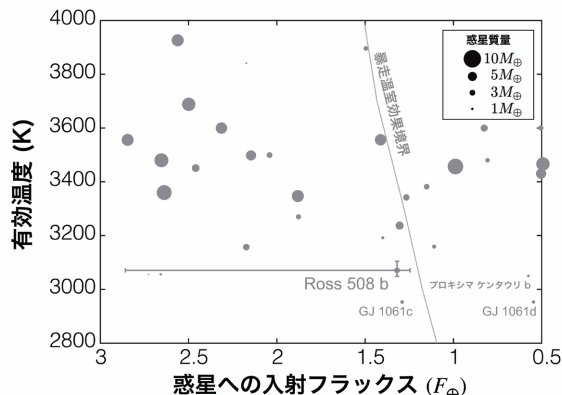


図3: これまでにM型星で見つかった地球型惑星の中心星有効温度とHZ内側境界の位置関係。

が中心星に近い位置に存在する。Ross 508 bの軌道で受ける平均的な入射光量は、離心率の不定性の影響が大きいもの、おおむね地球が太陽から受け取る量の1.3倍程度と推定された(図3)。この日射量から、Ross 508 bの軌道は平均的にはHZの内側境界とされる暴走温室効果が起こる境界よりも内側に位置すると考えられる。ただし、ベストフィットの離心率(0.33)では、軌道の遠日点周辺がHZ内に掛かっているという状況にあるため、将来的な30メートルクラスの望遠鏡による惑星の表層環境や生命探索のターゲットとして重要なターゲットとなると期待される。

3. まとめ

我々はIRD-SSPから最初の系外惑星としてRoss 508 b を報告した。近赤外波長域のみを使用したドップラー法によるスーパーアース検出としては事実上初の例となる。IRDが近赤外ドップラー法として最高レベルの精度を達成しつつ、単独での惑星検出が可能であることが示されたと言える。これまでCARMENESなどからM型星周りのスーパーアース検出の報告があったが、いずれもCAEMENESの可視光チャンネルやHARPSデータなどを合わせた高精度なフォローアップによる寄与が大きいものであった。

本報告により、IRD-SSPが可視光では観測が困難である晩期M型星の惑星について包括的に探索

⁶ここで調査した線輪郭解析は可視光での惑星検出に際しては多くの前例があるものの、近赤外波長域で同様の解析を行った前例がなかったため、最も慎重に検討を重ねた点である。今後これらの解析についてもIRD-SSPとして成果を発表する機会があると期待される。続報を待たたい。

を進められるというアドバンテージを持つことが明らかになったと言える。今後もIRD-SSPによる惑星探索を精力的に展開し、新たな惑星の発見はもとより、近赤外波長域での恒星活動の指標について得られた知見などを報告する計画である。

参考文献

- [1] Zechmeister M. et al., 2019, A&A 627, A49.
- [2] Harakawa H. et al., 2022, PASJ 74, 904.
- [3] Kotani T. et al., 2018, in Proc. SPIE 10702, 1070211.
- [4] Koizumi Y. et al., 2021, PASJ 73, 154.
- [5] Ishikawa H. T. et al., 2022, AJ 163, 72.
- [6] Mann A. et al., 2015, ApJ 804, 64.
- [7] Mann A. et al., 2019, ApJ 871, 63.
- [8] Kuzuhara M. et al., 2018, in Proc. SPIE 10702, 1070211.
- [9] Hirano T. et al., 2020, PASJ 72, 93.

著者紹介

原川 紘季

すばる望遠鏡 RCUH職員。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TMT推進室プロジェクト研究員、アストロバイオロジーセンター特任研究員を経て2018年12月より現職。専門は系外惑星探索。

遊星人の海外研究記 その9 ～悠々自適な研究生生活 at マックス・プランク 化学研究所～

藤谷 渉¹

1. はじめに

いま考えると多くのご縁や幸運があり、渡独することになったのだと思う。私は博士2年のときに2ヶ月、博士号取得後ポスドクとして3年、ドイツ西部の街マインツのマックス・プランク化学研究所(Max-Planck-Institut für Chemie: MPIC)に滞在し、受け入れ研究者のPeter Hoppeのもとで研究をする機会を得た。私の研究内容は修士のころから一貫して、二次イオン質量分析計(SIMS)による隕石の同位体分析である。まず、マインツに滞在することになった経緯からお話しよう。

私が東大大学院の博士1年だった2009年6月、東工大-東大を拠点とするグローバルCOEプログラム「地球から地球たちへ」が採択され、そこでリサーチアシスタント(RA)として博士課程の学生が何人か雇用された。私もその一人である。そのG-COEでは、海外の研究機関にインターンシップとして訪問し、2ヶ月ほど研究できる機会をRAに提供していた。海外のラボで武者修行をしてみたいと強く思っていた私はすぐに応募し、そして採択された(後述するように、SIMSはラボごとに独自のノウハウがある)。

訪問先より前にやりたい研究テーマが決まっていた。話は前後するが、私の修士課程での研究テーマは、隕石中のクロムの同位体異常を担うキャリア(つまり、プレソーラー粒子)をNanoSIMSで探索する、というものだった。今でこそ隕石中の様々な元素の同位体比にcarbonaceous chondrite (CC)とnon

carbonaceous chondrite (NC)の二分性が確認され、特にクロム-54の同位体異常はよく知られているが、当時はまだそれほど研究が進展していなかった。結局、修士課程の研究ではそのキャリアの特定には至らなかったのだが、修士課程修了の直後くらいに、恒星内の核合成に関する理論・実験・分析の分野横断型の研究会が国立天文台で開かれ、私は自分の研究成果について話した。ちょうどその研究会で、天文台の梶野さんが、超新星爆発におけるリチウム・ホウ素の核合成からニュートリノ振動を解明する、という内容の講演をしておられた。さらに、梶野さんは超新星起源のプレソーラーSiC粒子(SiC X grain)が使えるかもしれない、と述べておられ、私はそれに強く興味を惹かれた。その直後に梶野さんに話しかけ、梶野さんも私の話に興味を示してくださっていたので、是非一緒に研究しましょう、ということになった。

しかし、隕石中のプレソーラーSiC粒子(典型的には μm サイズ)は「干し草の中の針」に例えられ、ほとんどすべての干し草: ケイ酸塩鉱物を強い酸で処理してようやくSiCが単離できる。甘利さんによる(酸に溶けない)プレソーラー粒子単離の「レシピ」は有名だが、化学実験に不慣れな人にはなかなか難しい(私だけかもしれないが)。そのため、自力でSiCを単離するのを諦め、すでに単離された純粋なプレソーラーSiC粒子を研究に使いたいと思うようになった。そして、2009年夏の隕石学会@ナンシーでプレソーラー粒子研究の大家であるHoppeに相談することにした。そこでマインツ行きを考え始めたのだが、それには少しわけがある。まず、東北大の中嶋大輔さ

1.茨城大学 理学部

wataru.fujiya.sci@vc.ibaraki.ac.jp

んがMPICのUlrich Ott (専門は希ガス分析)のもとでポストドクをした経験があり、情報を得ることができたこと、そして、私事だが、妻(当時はまだ結婚前)がドイツ文学を研究していること、である。結局、中嶋さんに仲介してもらって、MPICでSiC X grainのリチウム・ホウ素同位体分析をやりたい旨をHoppeに伝え、分析装置(NanoSIMS)にマシンチャージが発生しないことやマシンタイムの状況などを確認し、これなら行けそうだ、ということになった。

2. 博士課程在学時のマインツ滞在

前置きが長くなったが、いろいろなご縁に恵まれてマインツに2ヶ月滞在することになった。渡独は2010年の3月下旬だった。ライン川とメイン川の合流点に位置するマインツは、フランクフルト国際空港からのアクセスに至便であり、S-Bahn (近距離鉄道)に乗って30分もかからない。ローマ帝国の遺跡が残り、10世紀末から11世紀はじめに建設されたDom(大聖堂)のある美しい街だ。大きな荷物を引きずってMPICに着き、まずHoppeと会うと、すぐに寝泊まりをするゲストハウスに案内された。ゲストハウスは最大3人まで滞在することができ、はじめは1人で贅沢に空間を使っていたが、やがてOttのポストドクのJulia Cartwrightが来て賑やかになった。MPIC内に与えられたオフィスはHoppeのポストドクの女性と共有だった。私が最初にその部屋に入ったとき彼女は不在だったが、床にベビーベッドが置かれていて驚いた。彼女が出勤するときはだいたい赤ちゃんを連れてきており、育児に対する社会の考え方が随分違うと思った。

この2ヶ月の滞りで2週間分のNanoSIMSのマシンタイムをいただいた。まず、最初の1週間で、あらかじめ単離されたプレソーラーSiC粒子から炭素とケイ素の同位体比に基づいてX grainを探し、次の一週間で、発見したX grainのリチウム・ホウ素の同位体比を測定した。ここで印象的だったのが、SiCをNanoSIMSの同位体イメージングで分析する手順が完全に自動化されており、1週間で1,000個の粒子を測定できる仕組みになっていた(X grainは全プレソーラーSiC粒子の1%程度であるため、10個程度のX grainを発見できる)ことと、技術職員のサ



図1: マックス・プランク化学研究所の建物。

ポート体制が非常に充実していることだった。

この滞りで私が気を付けていたのは、とにかくHoppeとコミュニケーションを十分に取ってたくさん話すこと、であった。Hoppeは私の拙い英語にも根気よく付き合ってくれて、普段はとても温和だった。得られたデータはマシンタイム以外の残りの時間で解析し、Hoppeと議論を重ねた。データ解析では、同位体イメージの膨大な量のデータから本質的なことを抽出するHoppeの手腕に驚いた。

3. ポストドク時代

私は博士3年のときに学振DC2に採用された。博士号を取得したときにDCの採用期間が残っている場合は自動的に学振PDに資格変更されるため、就活に悩まず、心にゆとりを持って博士論文の執筆に取り組むことができた。そして、2ヶ月のマインツ滞りが心地よかったので、もう少しこの地で研究してみたいと思い、Hoppeと再びコンタクトを取って、学振PDの1年間はマインツで研究したい旨を伝えた。以前の滞りで少しは信頼できる人物と思っていただけののだろうか、まったく問題なくポストドクの受け入れは決定した。その後、博士号を無事に取得し、3月に結婚、そのまま妻とともに4月に再び渡独した。

再びマインツに来てまず驚いたことは、MPICの建物が新しくなっていたことだった(図1)。もともとMPICはJohannes Gutenberg-Universität Mainz (活版印刷の発明で有名なGutenbergはマインツの出身である)のキャンパス内にあったが、そ

の中で別の場所に移ったのである。現在の住所は Hahn-Meitner-Weg 1 (通りの名前、Wegは通りという意味)。お気づきの方もいると思うが、Otto HahnとLise Meitnerは原子核分裂を発見した人物であり、ノーベル化学賞を受賞したHahnはMPICの前身であるKaiser-Wilhelm-Institut für Chemieの所長でもあった。新しい建物は近代的で、オフィスと実験室が近くで快適になった。私が以前に滞在したゲストハウスは取り壊しになっており、MPICの新しい建物の近くには学生寮らしきものができていた。なお、新しいサッカースタジアムもすぐ近くにできていて、試合の日には多くのサポーターがMPIC最寄りのバス停を利用していった。ちなみに、ちょうど私がポストドクだった時期に岡崎慎司さんが1. FSV Mainz 05でプレーしていて、所員にその話題をよく振られた。多くのドイツ人はサッカーと天気の話が好きなのである。残念ながら私はあまりサッカーに興味がなく、スタジアムに足を運んだことは一度もなかった。少し後悔しないでもないが、サポーターのマナーが結構悪く、ビール瓶の割れたガラスが試合後には周囲に散乱しており、応援に行くのがちょっと怖かったのも事実だ。

MPICは84あるマックス・プランク研究所の1つであり、それらはマックス・プランク協会(Max-Planck-Gesellschaft)の傘下にある。MPICの新しい建物から歩いて2, 3分のところにはマックス・プランクポリマー研究所(Max-Planck-Institut für Polymerforschung)があり、私の同僚は集束イオンビーム装置(FIB)を使うためによく訪れていた。現在MPICにはAtmospheric Chemistry, Climate Geochemistry, Multiphase Chemistry, Particle Chemistryの4つの部門のもと、およそ150名のスタッフ、100名のポストドクや学生が在籍している。外国人も多く、ドイツ語を勉強する教室も開かれていた。Cosmochemistryの部門は2005年に閉鎖してしまい、残念ながら宇宙化学分野の研究室はそれ以前よりいくぶん縮小してしまったと言えるだろう。現在のMPICは「化学」と言っても大気化学の色合いが濃く、Paul Crutzenがオゾンホールの研究でノーベル化学賞を受賞したことに象徴されている。一般人がイメージする「化学」はむしろポリマー研究所のほうが近い。Crutzenは昨年お

亡くなりになってしまったが、私がポストドクのときはまだお元気であり、研究所のパーティーなどにも顔を出していた。HoppeグループはParticle Chemistryに属しており、その名のとおりに微小粒子を扱う研究室として、プレソラー粒子だけでなく、エアロゾルなどの分析も行っている。

今回は長期滞在の予定なので、ゲストハウスではなくアパートに住むことになった。マインツもご多分に漏れず、アパート探しは非常に大変らしい。なぜ「らしい」とかという、以前に2ヶ月滞在したときに知り合ったHoppeのポストドクが私と入れ替わりで異動することになり、彼の紹介で彼が住んでいたアパート(家賃は600ユーロ)に入居することができたため、そのあたりの事情を知らないまま新生活が始まったからだ。実際、マンスリーの物件に住んで長い間アパートを探している人もいた。私の物件も私が去ったあとすぐに次の借り手が見つかった。マインツに着いた日は、まず日本から持ってきたスーツケース5つを駅の近くのホテルへ預け、その後すぐにHoppeに付き添ってもらってそのアパートで入居の契約をした。そのため、マインツに着いた初日は本当に疲労困憊で、ホテルに帰ると泥のようにベッドで眠ってしまった。

翌朝はゆっくり寝ているつもりだったが、朝、ホテルの電話が鳴って叩き起こされた。電話に出るとなんとHoppe。なんでも、Hoppeの奥さんが今からIKEAに行くのに付き合っただけからそこで家具を揃えろ、と。すぐに準備してHoppeの奥さんの車でIKEAに行き、家具や食器などを一揃い買った。その次の日には、Hoppeの学生だった人のベッドとマットレスをその人のアパートから我が家に運んだ。さらに次の日にHoppeのオフィスに行ったときには、お前のマシンタイムは来週だから準備せよ、と言われた。そんなこんなで大変だったが、ここでもいろいろな人の協力のおかげでなんとか新生活がスタートしたわけである。

生活のインフラでは何と言ってもインターネットが重要だが、ドイツ語が話せないとその契約はなかなか大変だと思う。私の場合は妻がドイツ語を話せるのでなんとかあったが、1人では難しいと思った。あと、ドイツ語が話せないが大変だと思った場面は、滞在許可証を取得するため市庁舎に行ったときと、口座を開設するために銀行に行ったときだ。しかし、

どちらもMPICのInternational Officeの職員が付き添ってくれたので全く問題なかった。

ポストドクの期間には、重い炭素同位体(^{13}C)に富むプレソーラーSiC粒子(AB grain)の研究のほか、件の、隕石からプレソーラーSiC粒子を抽出するのをやってもらえないか、とHoppeに頼まれ、MPICの技官さんに手伝ってもらいながらMurchison隕石の酸処理を行った。受け取った隕石は60gくらいあり、高額だろうなと思いながら隕石をハンマーで割った。その後、塩酸やフッ酸などの薬品を使って処理をするのだが、経験のある技官さんの指導のもと、なるほど、このようにやるのか、と思いながら実験をしていた。ちなみに、これらの薬品を使用する前にはドイツ語で書かれた誓約書にサインさせられた。薬品の管理や事故が起こったときの対処が書いてあるのだ、とHoppeに言われたが、何が書いてあるのかさっぱりわからないのでちょっと怖かった。

私のもう一つの研究テーマは、渡独する前に申請書を書いてアクセプトされたイトカワ粒子の公募研究: ホウ素、リチウム、および希ガス同位体比による太陽風および宇宙線照射の研究であった。イトカワ試料の分析ではSIMSの技官さんが大変よくサポートしてくれた。が、一方、私が危険な操作をしないか見張っているの、彼が帰宅したのを見計らって、夕方から私の好きなように装置の設定を変更し、分析を続けたこともあった。この技官さんはとてつもない凄腕で、Hoppeも全幅の信頼を寄せており、私が装置の修理やメンテナンスを手伝うようなことはほとんどなかった。

私がMPICで働き始めて1年後にOttが定年で退職し、MPIC内でパーティーが開かれた(図2)。そのため、イトカワ粒子の希ガス分析は他研究機関で行うことになった。ハイデルベルクなども候補だったが、結局、スイスのETHに行き、Matthias Meierに手伝ってもらって分析することにした。そのときETHのRainer Wielerら著名な研究者と交流することができ、有意義だった。その次の年にはWielerも定年退職で、ETHで退職記念研究会とパーティーが開かれた。イトカワ粒子を分析した縁で私も招待され、Hoppe、OttとともにETHに行った。パーティーにはWielerの元学生をはじめとしてヨーロッパにいる研究者が数多く来ていた。

NanoSIMSのマシントイムの決定はHoppeに委



図2:(上)定年退職のパーティーでスピーチをするOtt(左から3人目)とHoppe(同2人目)。(下)Ottへのプレゼント。フランチのついたボトルが粋である。

ねられており、2、3ヶ月後のスケジュールまで完全に決まっていた。基本的に1、2ヶ月に1週間のマシントイムが回ってきた。Hoppeは誰も装置を使っていない状態を極端に嫌っており、常に誰かが装置に触っているようにスケジュールリングしていた。また、月に1回グループミーティングがあり、そこで研究の進捗を報告したり、実験装置の状態を確認したり、エクスカーションの相談をしたりしていた。エクスカーションではハイデルベルクやモーゼル川周辺などに出か



図3: クリスマスマーケットの様子。

けたが、皆、歩くのが大好きで、なかなかハードなものであった。グループミーティングには毎回持ち回りで手作りのお菓子を持っていくことになっており、私の番のときには緊張しながら朝早くからアップルパイを焼き、持っていった。

Hoppeグループでは毎週水曜日夕方に定例のセミナーがあり、大抵は外部からゲストを招いてトークをしてもらい、その後に皆で近所のレストランで食事をした。話者で印象に残っているのは前述のMeierのほか、Evelyn Füri, Marco Pignatariなどで、大変刺激を受けた。Pignatariは恒星内核合成の専門家で、セミナーに来てくれたのをきっかけに、私がプレソーラーSiC粒子(AB grain)の研究をしていた際にAGB星内での中性子捕獲反応の計算をもらった。

渡独して1年間は学振PDだったわけだが、その年の途中で、もう少しポストドクとして滞在させてほしい、とHoppeにお願いに行った。このときも、たぶん大丈夫だと思う、とだけ言われて、まったく問題なく次の年からMPICに雇用されたポストドクとなった。お給料の具体的な額は申し上げられないが、2年間で結構お金が貯まった。その2年間はMPICから旅費のサポートをしてもらって国内外の学会に出かけた。ドイツ国内の学会で印象に残っているのは、ネルトリンゲン(隕石衝突のクレーターにある街)でのPaneth Kolloquiumである。技官さんと秘書さんの協力もあって、ポストドクの間、何不自由なく研究のみに打ち込ませていただけたのは本当に有難かった(文字通り、これは今ではあり得ないことである)。



図4: カーニバルでのパレードの様子。背後には大聖堂。

こうした悠々自適な研究生生活は、帰国して茨城大学の助教に着任するまで計3年間続いた。

4. マインツでの日常生活

研究以外の時間はなるべく現地の生活を楽しむように心がけた。朝市に出かけて新鮮な、あるいはめずらしい野菜を買ってみたり、コンサートに出かけたり、クリスマスシーズンにはクリスマスマーケット(図3)に行きGlühwein(ホットワイン)を飲み、もみの木を買ってクリスマスツリーを飾ったりした。ドイツでは車を運転しなかったので、もみの木を担いでバスで運んで他の乗客から変な顔をされてしまった。その他、印象深かったのはカーニバルである。マインツのカーニバルはケルンやデュッセルドルフなどと並んでドイツ有数の大規模なものであり、Rosenmontag(薔薇の月曜日)には、政治家に対する批判・皮肉をこめた車両や仮装した人々のパレードが町を練り歩き、最高潮になる(図4)。研究所内のイベントもたくさんあった。日本の大学のような一般公開や、夏にはバーベキュー、冬にはクリスマスパーティーがあり、フットサル大会もしょっちゅうやっていた。

ドイツのアパートには基本的にエアコンはなく、夏の暑い日はかなり辛かったが、冬はお湯が中を循環している温水暖房によって室温が快適に保たれていた。マインツのあたりは水が硬く、キッチンにはすぐにカルキが付着するのでクエン酸でしょっちゅう溶かしていた。白い服をそのまま洗濯して干すと灰色が

かってくるし、最悪の場合、洗濯機が壊れることもある。なお、洗濯機に入れて水を軟水化する薬品(カルゴン)が広く使われている。

洋服は、一時帰国した際にできる限り日本から持っていくようにしていた。一度、ユニクロの下着などを日本から大量に送ってもらったことがあったが、商業用と思われて税関に引っかかり、かなり高額 of 税金を支払ったこともあった。送るときは、必ずパッケージから出して梱包することが重要である。

食べ物については、はじめはソーセージとビールでここは天国かと思ったが、2ヶ月を過ぎたころからだんだん辛くなってきた。次第に大学キャンパス内のMensa(食堂)が地獄に思え(さすがに言い過ぎか、でもあまり美味しくない)、日本食が恋しくなってきた。結局、家電量販店でいい加減な炊飯器を購入し、お米を炊いて食べる生活になった。うどんや餃子の皮を粉から作ったこともある(麵棒のかわりにビール瓶を使って!)。マインツの旧市街には美味しいレストランがあり、特にステーキハウスとビール醸造所併設ビアレストランによく行っていた。秘書さんがとても親切な人で、よいレストランやカフェをたくさん教えてくれた。日本食では、韓国出身の板前さんがいた寿司屋に足しげく通っていた(残念ながら今は閉店してしまっている)。ドイツの食材で絶品なのは春に出回るSpargel(ホワイトアスパラガス)である。これを立てた状態で調理するための縦に長い鍋が売られており、私も購入して今でも大切に保管している。

マインツ以外の都市にも、国内外を問わず、可能な限り旅行していた。ライン川下りは日本から親戚や友人が来るたびに案内しているので、3、4回は行ったと思う。日本でも有名なオクトーバーフェストにも行った。夏と冬には2、3週間の休暇を取る所員がほとんどで、Hoppeや技官さんもどこかに出かけてしまうので、その間はトラブルが起こらないかヒヤヒヤしながらNanoSIMSで分析していた。

一番好きな都市はどこだったか、と聞かれることがたまにあるが、そのときはバーデン=バーデンと答えている。「入浴する」という意味の「baden」が2つ連なった名前のこの都市は、文字通り保養・観光都市であり、温泉に入ったりカジノに行ったりできる。高校・大学とオーケストラをやっていた私にとっては、

音楽祭があるのも魅力だ。ベルリン・フィルを聴きに行った際に、コンサートマスターの榎本大進さんをホールの外で偶然お見かけしたので、少しお話しして一緒に写真を撮ってもらったのはちょっとした自慢である。

5. おわりに

寄稿を依頼されたときは短い文章を書くつもりであった。が、それでも長々とマインツでの経験について駄文を書き連ねたのは、日本では得づらい体験をたくさんしたことが私の肥やしになっていると考えているためである。環境をがらりと変えることは研究だけでなく心身の健康にも有意義である。また、何度も述べたように、縁や運も重要である。私はほとんど何の苦労もなくMPICのポストドクになったので、ポストドク探しをしている方の多くには当てはまらないかもしれない。しかし、それも学生だったころからの下準備があつてのことだと思っている。このような私の体験が、これから海外に行つて研究してみようと思っている読者の参考になれば幸いである。

著者紹介

藤谷 渉



茨城大学 理学部 准教授. 東京
大学大学院 理学系研究科 地
球惑星科学専攻 博士課程修
了. 博士(理学). 日本学術振興
会特別研究員PD, マックス・プ
ランク化学研究所ポストドクトラ

ルフェロー, 茨城大学 理学部 助教を経て, 2020年
4月より現職. 専門は宇宙化学, 特に二次イオン質
量分析計を用いた始原的隕石(コンドライト)の同位
体分析. 日本惑星科学会, 日本地球化学会, The
Meteoritical Society, Geochemical Societyなど
に所属. 日本惑星科学会 総務専門委員および行
事部会委員を務める.

惑星ラボからこんにちは! その7 ～東京工業大学・地球惑星科学系～

奥住 聡¹, 佐藤 文衛¹, 中本 泰史¹

1. 東工大地惑について

こんにちは! 東京工業大学理学院地球惑星科学系¹(以下, 東工大地惑)です。私たちは, 地球と惑星系の起源と進化を明らかにすることを目指しています。東工大地惑の大学院教育・研究指導には, 21名の教員が携わっています。このうち, 地惑を所属上の本拠地とする教員は15名(教授5, 准教授5, 助教5)で, その他は地球生命研究所(ELSI)と火山流体研究センターを本拠地とする教員です。東工大地惑は他大学の地球惑星科学専攻と比べて決して大きいとは言えませんが, それでも地質学・岩石学・生物地球化学・地震学・火山学・高圧地球科学・宇宙化学・天文学・惑星科学などといったさまざまな分野で活躍する「尖った」研究者が集まっていると自負しています。東工大地惑に所属する学生の概数は, 学士課程(2年生以上)が約130名, 修士課程が約40名, 博士後期課程が約20名です。大学院には毎年, 他大学の学生も複数名進学しています。

2022年10月現在, 東工大地惑を本拠地とする教員のうち, 惑星科学を専門とする教員は奥住聡(准教授), 佐藤文衛(教授), 中本泰史(教授)の3名です。教授と准教授が独立に研究室を運営しているため, 惑星科学関連の研究室の数は3つということになります。これらの教員に加え, ELSIに所属する3名の教授(井田茂, 玄田英典, 関根康人)が地惑の惑星科学の教育・研究指導を共同で担当しています。ELSIの詳細については後日, ELSI所属の教員から本誌で紹介していただけるそうですので, そちらの記事を

お楽しみに。本記事では, 東工大地惑を本拠地とする研究室・院生の活動を中心に紹介していきます。

2. 研究紹介

この節では, 奥住・佐藤・中本の各研究室の研究内容と, 最近の研究室間の共同研究について紹介します。より詳しく知りたい方は, 各研究室のウェブサイト(脚注2-4)を参照ください。

奥住研究室²

主に理論的手法を用いて, 惑星形成に関する理論研究を行っています。最近では, 惑星や小天体の組成がどのようなプロセスで決まるかに特に興味があり, 惑星形成の場である原始惑星系円盤の密度・温度構造の理論計算や, 円盤の中での固体の合体成長・輸送の数値シミュレーションを行っています。系外惑星・原始惑星系円盤の最新天文観測データや, 隕石の分析データとの比較に基づく惑星形成モデルの検証にも力を入れています。2022年10月末現在のスタッフは2名(奥住と学振PDの辰馬未沙子さん)で, さらに2023年1月には星形成論を専門とする田中圭さんが助教として加わる予定です。2022年度の学生数は博士課程が3名, 修士課程が7名(留学生1名含む), 学士課程が3名となっています。

佐藤研究室³

系外惑星の観測的研究を行っています。国内外の

¹公式ウェブサイト<https://educ.titech.ac.jp/eps/>

²<https://www.okuzumilab.net/>

³<http://www.geo.titech.ac.jp/lab/sato/>

望遠鏡(例えば岡山188cm望遠鏡, せいめい3.8m望遠鏡, すばる8.2m望遠鏡など)を用いて様々な恒星の周りに存在する系外惑星を発見し, その惑星の大気などを調べ, 惑星の形成と進化を観測面から明らかにすることを目指しています。また, 惑星をもつ恒星の化学組成や活動性を調べる研究, 観測装置・解析手法の高精度化の研究など, 系外惑星に関連する分野の研究も行っています。2022年10月現在の研究室メンバーは, 恒星フレアの研究を専門とする学振PDの野津湧太さん(コロラド在住)と, 博士課程3名(うち留学生2名), 修士課程3名, 学士課程2名の学生と研究生1名(留学生)です。学生達の研究テーマ, スタイルも様々で, 自分で望遠鏡を使って観測データをとる人, 宇宙望遠鏡のアーカイブデータを利用する人, 観測よりデータ解析が好きな人, 天体より装置に興味がある人, などなど, それぞれの興味の方向性に合わせて研究しています。

中本研究室⁴

星・惑星系形成過程の解明を目指し, 理論的な研究をしています。各種構造の形成や進化のメカニズムをモデルを作って理解しようというわけですが, それらは一般に複雑な現象ですので, 大なり小なり数値シミュレーション・数値計算を行います。ほとんどの場合, プログラムは問題に合わせ, 各自がゼロからプログラミングします。ここ最近の具体的な研究テーマには, 次のようなものがあります: 分子雲コアの重力収縮, 原始惑星系円盤の形成と進化, 原始惑星系円盤内でのダストの進化, 微惑星形成, 隕石構成要素(コンドリュールやCAIなど)の形成, など。2022年度は, 山本大貴さんが学振PDとして10月まで所属していましたが, 11月から九州大学に助教として異動されました。学生は, 博士課程1名, 修士課程5名(留学生2名), 学士課程3名です。

研究室間の共同研究

以上3研究室の間はもちろんのこと, 東工大地惑やELSIの関連研究室との共同研究も活発に行われています。2022年度には, 地惑・ELSIの惑星形成理論と宇宙地球化学の教員・学生有志が合同の定期勉

強会を立ち上げ, 太陽系物質の起源に関する融合研究に向けて月1,2回のペースで議論を行っています。この勉強会をきっかけとした共同研究プロジェクトも早速立ち上がり, 学会発表につながる研究成果が得られてきています。他にも, 系外惑星の理論と観測に携わる教員と院生がチームを組んで, 次世代宇宙望遠鏡のサイエンス提案に取り組んだ実績があります。

こうした「正式な共同研究」の他にも, 日常的に顔を合わせ言葉を交わす中で気軽に情報交換・意見交換・議論ができるということも, 大きなメリットです。廊下ですれ違った時とか, 誰々の部屋に押しかけて行って, 「○○って何?」と気軽に聞けるのは, なかなかよい環境だと思います。

3. 大学院の教育と学生生活

地球惑星科学系の大学院生は, 地球惑星科学コースとELSIコースのいずれかに所属します。ELSIコースの紹介は後日の別記事に譲ることにし, ここでは地球惑星科学コースへの進学に興味のある学生の皆さんを念頭に, 本コースについて紹介します。

専門科目の講義では, さまざまな専門をもつ院生が受講することをふまえ, 最先端の内容を取り扱いつつも基礎的・概論的な内容もできるだけ盛り込むようにしています。大学院での講義は全て原則英語です。英語力は研究に限らず, 専門的なキャリアを歩む上で大きな力となりますので, 大学院を志望する学部生の皆さんはぜひ今のうちに英語力を磨いてください。大学院生は専門科目に加え, キャリア科目, 文系教養科目も受講します。

これらの講義とは別に, 学生はいくつかのセミナーに参加します。地惑およびELSIの惑星系4研究室(奥住・佐藤・中本・井田)が合同で行う「惑星系セミナー」では, 大学院生に自分の研究を1人1時間程度で紹介してもらっています。院生が他の研究室の教員や院生と議論をする非常に良い機会となっており, 議論が研究室間の共同研究に発展することもあります。博士課程の院生は英語で発表することで, 国際会議・研究会での発表スキルを磨きます。これに加えて, 新着の論文を紹介するランチセミナー(図1)も研

⁴<http://www.geo.titech.ac.jp/lab/nakamoto/index-j.html>



図1: 研究室合同セミナーの様子。大学院生が新着論文を紹介している。

研究室合同で実施しています。さらに、大学院生が学外の研究者を招待して話を聞く「地惑セミナー」が院生自身によって運営されています。教科書や論文を読む自主的な勉強会も常に多数開かれています。

最後に、博士課程院生向けの経済的サポートについて紹介したいと思います。今や経済支援体制は研究環境の重要な要素の1つですので、あえてここで紹介する次第です。東工大では2021年度より、博士課程学生対象の独自の支援プログラム⁵が発足しました。このプログラムに採用された院生には、日本学術振興会特別研究員と同様、研究奨励費(生活費相当)と研究費が給付されます。新しいプログラムのため、採択率はまだまだ流動的ですが、すでに私たちの研究室の複数の博士課程院生がこれに採択されている事実は強調したいと思います。残念ながら支援プログラムに採用されなかった博士課程院生にも、学費の75%以上を給付支援する奨学金制度⁶があります。

⁵殻を破るぞ! 越境型理工系博士人材育成(<https://tokyotech-crossborder.gakumu.titech.ac.jp/>), 高度人材育成博士フェローシップ(<https://www.fellowship.gakumu.titech.ac.jp/>)

⁶東京工業大学つばめ博士学生奨学金 (<https://www.titech.ac.jp/student-support/students/tuition/tsubamescholarship>)

「惑星科学フロンティアセミナー2022」参加報告

茂木 遥平¹

1. はじめに

2022年9月26日から29日の四日間にかけて「惑星科学フロンティアセミナー2022(HP: <https://www.wakusei.jp/meetings/fs/2022/2022-09-26/index.html>)」が北海道の剣淵温泉レークサイド桜岡にて開催された。惑星科学フロンティアセミナーは2006年からほぼ毎年(2020年及び2021年は新型コロナウイルス感染症の影響にて非開催)開催されている合宿形式で惑星科学に関するテーマについて講義をしていただき、じっくりと議論を行うセミナーである。今回のフロンティアセミナーはコロナ禍が始まって以来初めての記念すべき回である。今回の講師は渡部潤一氏(国立天文台)¹で、参加者は講師を含め20名であった。今回の講演テーマは「小天体を地上から追いかけて30年—研究者として、広報マンとして—」というものであり、研究に関することからアウトリーチに関すること、大学院生として考えるべきことなど広い範囲の内容が取り上げられた。惑星科学フロンティアセミナー2022のスケジュールは右記の通りである。

剣淵町は北海道の中でも北の方にあるため、移動に一日かかってしまう²。そのため、全四日の日程のうち二日間は実質移動日となる。以降では簡単に惑星科学フロンティアセミナー2022の様子をお伝えする。

表1: 惑星科学フロンティアセミナー2022 スケジュール.

9月26日	
14:30-	なよろ市立天文台きたすばる見学 (希望者のみ)
18:30-20:00	夕食
9月27日	
午前	はじめに/宇宙観の変遷
午後	太陽系小天体/流星とは何か
9月28日	
午前	Meteor “Hurricanes”について/ はやぶさ観測隊について
午後	広報普及活動に携わって/知の最 前線に立つものとして-生き方と使 命-大学院生の皆さんへ
9月29日	
07:30-08:30	朝食

2. フロンティアセミナー講義概要

2.1 9月26日(1日目)

初日は剣淵温泉レークサイド桜岡にて現地集合であったが、希望者は剣淵よりさらに北にある名寄市のなよろ市立天文台きたすばるの見学を行った。天文台見学ではまず台長の村上恭彦氏による説明が

¹渡部潤一氏がフロンティアセミナーの講師を行うことはコロナ禍前より予定されており、筆者は個人的にとっても楽しみにしていたのだがコロナ禍により延期になってしまいとても悲しんでいた。そのため今回、渡部氏によるフロンティアセミナーが無事開講され、非常にうれしく思う。

²剣淵町は北緯44.1度であり、国立天文台三鷹キャンパスの北緯35.7度とは緯度にして8.4度、おおよそ1000kmも離れている。

1. 北海道大学理学院宇宙物理学専攻
ymoteki@ep.sci.hokudai.ac.jp



図1: フロンティアセミナー集合写真(最下段中央右が渡部潤一氏).

あり、その後1.6 mピリカ望遠鏡³を含めた様々な望遠鏡の見学を行った。

その後、天文台見学組もレークサイド桜岡に移動し夕食⁴を取り初日は終了となった。

2.2 9月27日(2日目)

二日目はまず講師による自己紹介から始まった。昔は講師と同じ読みの小説家⁵と検索エンジンに間違えられたという話から始まり、その話が終わった後に「講演での“つかみ”は大事」とつながったときにはなるほどと納得したものであった。その後に講師の経歴を話していただいた後は「宇宙観の変遷」というテーマで講義が始まった。人類の思う太陽系像が地動説から天動説へと変遷したことは有名なことであるが、その変遷が古代から近代までどのように起こっていったのかを具体的に話していただいた。午後になると今度は近代の太陽系像の変化について話が移った。望遠鏡の発展により太陽系の範囲はどんどん広がってゆき、冥王星までの惑星⁶が見つかったときには太陽系は39天文単位まで広がっていた。そして渡部潤一氏自身の仕事として冥王星を惑星でなくした時の話をしていただいた。惑星の定義⁷を定

³ピリカ(pirka)とは、アイヌ語で美しい、良いを意味する。アイヌ語では本来ピリカのりは小文字カタカナで表記する。

⁴夕食は豚の生姜焼きであった。

⁵渡辺淳一氏、失楽園等で有名。寡聞にして筆者は知らなかった。

⁶発見当時。

⁷太陽の周りを公転すること、球形であること、軌道付近に他に同サイズの天体がないこと、が現在の惑星の定義である。

めたときのもろもろの話を当事者である講師から直接聞いたことはとても興味深いことであった。そして太陽系の外側へと飛び出した宇宙像の変遷の話をしていただき午前の講義は終了した。

午後は太陽系小天体についての話であった。太陽系小天体は化学的、物理的に46億年前の情報を保持している天体であるため、太陽系史を知るうえで非常に重要な天体である。太陽系小天体の一つである彗星の話から始まり、古記録や史跡の話を含めた彗星研究史の話を伺うことができた。そして近代的な科学観測の話へとつづり、彗星の種類や起源の話をしていただいた。つづいて小惑星の話へとつづり、太陽系内の小惑星分布の話や過去の小惑星同士の衝突史の証拠が南極のアイスコアに記録として残っているといった興味深い話をしていただいた。

そのあとに講師の専門分野である流星の話へと話題はうつり、こちらも古記録などを交えた流星研究史の話をしていただいた。流星研究史の一大出来事としてダストトレイル理論について紹介いただき、流星群の起源であるダストトレイルの概念について詳しくうかがうことができた。筆者も個人的に気になっている話であったので、非常に楽しく聞くことができた。そしてほうおう座流星群という幻の流星群⁸をダストトレイル理論を元に出現予報し、彗星の活動史の解明にもつながるような貴重な観測をした話をしていただいた。その後、流星クラスターの話へとつづり、二日目は終了した⁹。

2.3 9月28日(3日目)

三日目は主に講師のこれまでの研究成果や、研究の広報についての話を伺った。最初はMeteor“Hurricanes”という現象に関する話であった。講師がラジオに出演した際の視聴者の方からのFaxをきっかけに1933年に函館で観測された非常に多くの流星が短時間に流れた現象の原因について迫るという研究であった。つづいて73P/Schwassmann-Wachmann という核が分裂した彗星を起源としたヘルクレス座 τ 流星群の観測の話のあとはやぶさの地球再突入時の発光をもとに流星の発光効率を推定するという話を伺った。この話

⁸第一次南極越冬隊の中村純二氏らのみが観測した流星群で世界中で唯一宗谷のいるインド洋沖でしか観測されなかった。

⁹夕食はハンバーグであった。

ではサチって¹⁰しまった動画観測データでもゴースト像を利用することでデータを利用することができる可能性があるというものでとても驚かされた¹¹。午後になると講師のこれまでの広報活動についての話を国立天文台の組織としての側面と渡部潤一氏という研究者個人としての側面からの話をそれぞれ伺った。

そして最後の講義が研究者の卵としての大学院生に向けた講義であった。研究論文や申請書類の書き方、指導教官との付き合い方、そして知の最前線に立つものとしての心構えなど様々なことを教わることができる非常に興味深い内容であった¹²。

3. 最後に

惑星科学フロンティアセミナー2022 では惑星科学の様々な知識に加え、普段の大学の講義では聞くことのできないような講師のこれまでの様々な研究についての深いところまで突っ込んだ話を聞くことができた。

また、コロナ禍前のような宴会をすることはできな

くなくなってしまったが夕食後に講師の方を囲んで歓談をしたり、有志で持ち込んだ機材で天体観測をするなど様々な人たちと交流を持つことができた。

今回の講義の内容は記録されており、今後パスワード付きで講義動画及び資料が公開される予定である。なお、録画及び編集作業はmosir¹³プロジェクト (HP: <https://www.cps-jp.org/~mosir/pub/>) が担当した。

最後に、新型コロナウイルスに負けずにフロンティアセミナーを開催して下さったフロンティアセミナー実行委員会に感謝を申し上げるとともに今後も続けていっていただけるとありがたいと思います。

¹⁰サチるとは、観測素子が測定できる上限以上の入力がかかってしまいデータが使い物にならなくなってしまう状態を表す。要するに白飛びのことである。

¹¹惑星科学の話ではないので注釈に書くが、そのほかにもはやぶさの知名度が上昇し、映画が作られるほどのはやぶさブームが起きたことも話されていた。

¹²夕食はとりもつ鍋であった。

¹³モシリ(mosir)とは、アイヌ語で大地、世界を意味する。アイヌ語では本来モシリのりは小文字カタカナで表記する。

著者紹介

茂木 遥平



北海道大学理学院宇宙理学専攻
修士2年

活動報告 学校教育の現場から ～火星の物理的風化に挑む中学校科学部実験～

小森 信男^{1, 2}

1. はじめに

筆者は、中学校科学部において、火星の環境を模した岩石の風化実験を、生徒とともに行ってきました[1]。そして現在は、この活動として、硫酸水溶液に浸した玄武岩に紫外線を照射し、玄武岩や水溶液の化学的な変質を調べる研究[2]と、紫外線を照射しながら硫酸の湿潤乾燥の繰り返しを玄武岩に与え、物理的な風化を調べる研究を行っています。今回は、この物理的な風化を調べる研究について報告します。

過去の火星表層には32億年程前から40億年程前に、温暖で酸性の水があった時期があったと推定されています[3]。そしてこの時期における玄武岩への硫酸の影響を実験的に推定した研究としては、例えばToscaらの研究があります[4]。この研究では、合成した玄武岩を硫酸性水溶液に浸し乾燥させると、微細な、鉄酸化物(主に水酸化物)、硫酸塩および玄武岩質ガラス等が生成されることを確認しています。このように硫酸による玄武岩の変質を調べた研究は、いくつかあります。また火星の岩石の物理的風化に関する研究は、塩類風化や凍結破碎、熱破碎によるものがいくつか行われています[5]。しかし紫外線による玄武岩の劣化を調べた研究や、硫酸による玄武岩の物理的な風化を調べた研究は、私が調べた限りではないようです。

この科学部研究では、この時期に火星表層の玄武岩は、紫外線を浴びながら硫酸の湿潤乾燥の繰り返

返しを受けたという想定に基づいて、実験を行ないました。過去に玄武岩が硫酸の湿潤乾燥の繰り返しを受けた頻度等、不明な点がある想定に基づいた実験ですが、誰も行ったことがなく、火星についての新しい知見が得られるかもしれないという筆者の考えに、筆者はもちろん生徒たちもやる気を感じたはずでした。この研究を担当した主な生徒はBさんです。Bさんは、火星に興味がありテーマは思いつきませんが、火星に関する研究を行いたいという動機で科学部に入部しました。そして、筆者の「この実験は過去の火星の物理的な風化を推定するための一つの手段となるかもしれません。やってみませんか。」という提案に興味を持ち、行うことになりました。根拠が足りないため専門家が行わない研究を実行可能な点に、中学校科学部の特色や価値の一つがあると思っています。

2. 方法

この実験の方法は筆者が考え、必要な器具も筆者が準備しました。この実験で使用した紫外線照射灯は、20 W殺菌灯2本です。この殺菌灯の下に、岩石試料と硫酸の入ったシャーレを置きます。殺菌灯は波長254 nmをピークとする紫外線Cを照射します。紫外線照射灯によって岩石試料表面に照射される紫外線照度は実測値が約10 W/m²であり、40億年程前の火星表面に照射される紫外線照度の総量に近いと考えます[6]。この紫外線照射灯との対照実験として、熱を発生する発熱装置を使用しました。この装置は、電熱線を組み込んだセラミックス製の発熱体を使用して熱を発生し、紫外線を照射した場合と

1.東京学芸大学大学院 連合学校教育学研究所自然系教育講座
2.大田区立蒲田中学校

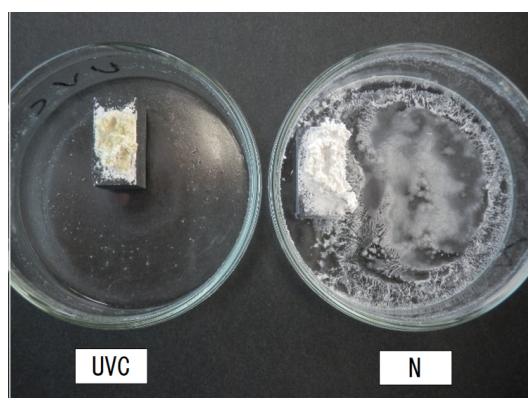


図1: 1回目の実験 1サイクル終了後の試料の状態。1サイクル終了後、UVC試料表面にやや褐色を帯びた白色に近い硫酸塩が生じている。シャーレの表面には粒径0.2 mm程の硫酸塩が散在している。硫酸塩の中心には粒径0.1 mm程の岩石の破片と思われる微粒子が確認できるものが多い。Nでは、試料表面やシャーレの表面一面に、白色の硫酸塩が生じている。

の試料表面の温度差を ± 2 ℃以内に保ちながら、試料を乾燥させることができます。

火星グセフクレーターにおいて分析された岩石の化学的性質は、pH 0～1の酸性水溶液による鉱物の溶解によって説明できることが示されているため[7]、この実験ではpH 1の硫酸水溶液を用いました。使用した玄武岩は、入手しやすい兵庫県玄武洞産の玄武岩を用いました。この玄武岩は業者に依頼し1 cm×1 cm×2 cmの直方体に整形した後、超音波洗浄したものです。なお火星地殻組成は、探査機のデータを基に玄武岩組成が支配的であると推定されています[8]。

以上のような条件の下、Bさんが週3回の部活動において、2つのシャーレに入れた玄武岩試料に、硫酸水溶液を試料上面が完全に浸るまで加えました。そして、それらの玄武岩試料を紫外線照射灯と発熱装置で乾燥させました。紫外線照射灯で乾燥させる試料をUVCと呼び、発熱装置で乾燥させる試料をNと呼ぶことにしました。シャーレに入れた硫酸水溶液が蒸発し試料が乾燥する日数は、夏で3日程、冬では5日程です。そして、この湿潤乾燥の過程を1サイクルと呼ぶことにしました。Bさんはこのサイクルを繰り返し、1サイクル毎に観察と写真撮影を行い観察記録ノートに気づいたことを記録しました。そして再現性を確かめるため、同じ実験を3回行いました。1回

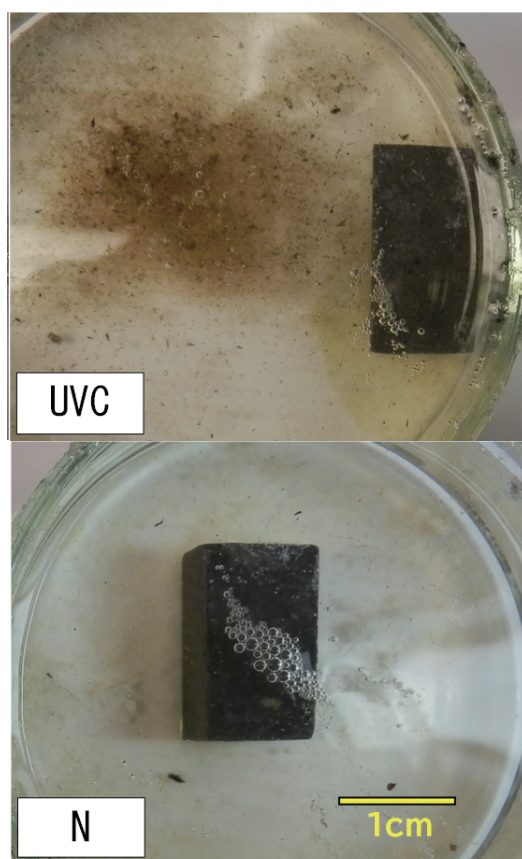


図2: 2回目の実験 9サイクルの試料 精製水を加え硫酸塩を溶かした状態。UVCでは、粒径0.1 mm程かそれ以下の微細な破片が、明らかに増えている。Nはあまり増えていない。Nでは0.1 mm程～数mmの破片が散在している。

目は6月後半～7月後半に5サイクル、2回目は8月末～11月末に9サイクル、3回目は12月前半～5月前半に22サイクルまで行い、再現性があるかどうかを調べました。

3. 結果

以上のような3回の実験の結果、共通して認められた現象は次の3点です。

(1) 硫酸塩の色の違い

3回の実験とも、1サイクルでは玄武岩表面に生じる硫酸塩の色が、UVCではやや褐色を帯びた白色に近い色ですが、Nでは白色でした(図1)。またシャーレ全体に広がる硫酸塩の色は10サイクル程度まで

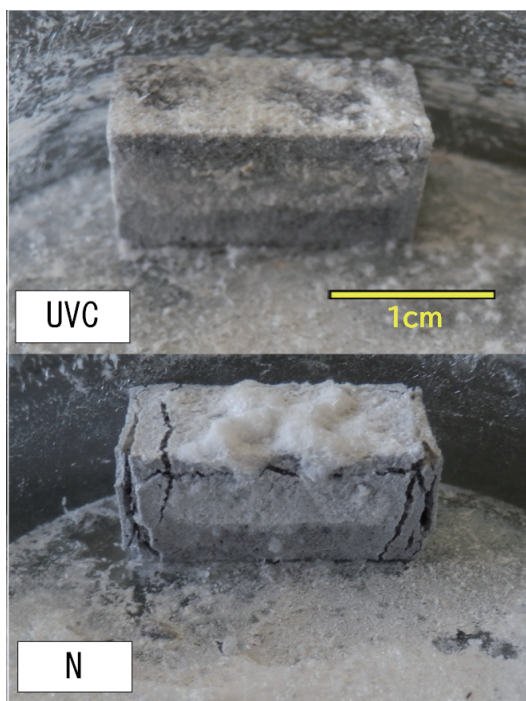


図3: 22サイクル終了後、精製水を加え硫酸塩を溶かした後、その水をできるだけ取り除き、室内に放置し乾燥させた状態。Nでは、1 cm×1 cmの2つの側面にほぼ平行に、明瞭なクラックが生じている。同様に2 cm×1 cmの面にも平行に生じている。シャーレ一面に粒径0.1 mm程～数mmの破片が散在している。UVCでも、写真では確認できないが、1 cm×1 cmの右側面に平行に、長さ0.4 cm程、幅0.2 mm程のクラックが生じている。またシャーレ一面に粒径0.1 mm程かそれ以下の微破片が、まばらに散在している。Nの方がUVCよりも、生じるクラックの程度が大きい。

UVCは濃い灰色、Nは2サイクル以降は薄い褐色を帯びる傾向がありました。

(2) 微粉末の発生

3回の実験に共通した特徴は、UVCでは目で見極められる限界付近の粒径0.1mm程の微破片が、Nよりも多く発生するという事です。そしてNでは粒径0.1mm程以上の破片の割合が多いということです。2回目の実験で9サイクルの試料から生じる破片の状態を図2に示します。この微破片の発生は、3回の実験を比較すると気温が低い程、同じサイクルでは発生数は少なくなる傾向があるように思われます。

(3) クラックの発生

3回の実験ともサイクル数は異なりますが、試料の

1 cm×1 cmの面または2 cm×1 cmの面にほぼ平行にクラックが入りました。このクラックの程度はNの方が大きいことがわかりました(図3)。このクラックは、精製水で硫酸塩をできるだけ取り除き乾燥させた後、はっきりと認められました。クラックは、破壊の様相が硫酸ナトリウム等による塩類風化の様相[9]と類似していることから、硫酸塩による塩類風化によって生じると考えられます。NとUVCでは、生じた硫酸塩は異なることが色の違いから推定されます。そして生じる硫酸塩の違いから、NとUVCでは、塩類風化の程度が異なると考えられます。このクラックの発生も、気温が低くなるほど、発生までのサイクル数が多くなる傾向があるように思われます。

以上のように今回の実験では、紫外線による粒径0.1 mm程の微破片の発生を促進する作用と、硫酸によって生じた硫酸塩による塩類風化と考えられる玄武岩の破碎が認められました。

4. 考察

過去の火星グセフクレーターやメリディアニ平原では、硫酸水溶液が存在していたと推定されています[7]。このとき、玄武岩が硫酸水溶液による湿潤乾燥の繰り返しを受けたと仮定すれば、この科学部実験結果から、硫酸水溶液が干上がる過程で、火星上の玄武岩が、紫外線と硫酸によって表面が劣化し微細な破片が発生した可能性はあると思います。同様に硫酸の湿潤乾燥の繰り返しによる塩類風化により、玄武岩が細粒化した可能性も考えられると思います。しかしこのような推定は、過去の火星において玄武岩が湿潤乾燥の繰り返しを受けたという前提条件が必要です。この前提条件は、成り立つかどうか現在のところわかっていません。したがって以上のような科学部実験によって得られた推定は、今のところ根拠の乏しいものと言わざるを得ません。

一方過去の火星では火山活動が活発な時期があったようです[10]。地球上では火山活動に伴い、硫酸を含んだ低pHの蒸気が噴出することがあります[11]。火山周辺の噴気孔付近では、硫酸水溶液の湿潤乾燥による繰り返しを受け、塩類風化が生じる可能性はあると思います。まず地球上の噴気孔付近の塩類風化に着目した調査の必要性を感じます。ま



図4: 大田区生徒理科研究発表会における、BさんA君の発表の様子。
なおA君は、主に玄武岩や水溶液の化学的な変質を調べる研究を担当している。

た過去の火星表層において、硫酸水溶液に浸った玄武岩が乾燥した過程は確実にあったはずですが、今回の科学部研究結果から、湿潤乾燥を繰り返さなくても、条件によっては1回の湿潤乾燥で、紫外線と硫酸によって玄武岩が劣化し風化する可能性が考えられます。そこで今後は、玄武岩の1回の湿潤乾燥による変化を調べていく興味と必要性を感じています。

5. 科学部研究の特徴

筆者の指導する科学部研究に参加する生徒は、Bさんのように自分でテーマは思いつきませんが、科学や天文、宇宙、火星等に関する研究をやりたいと思う生徒が多いです。そして科学部研究はやり方次第で、このような生徒の興味や意欲を喚起し、理科で育成すべき資質・能力を育てることができると考えています。

この科学部研究では教師がテーマや実験法を提示し、生徒は実験を行いながら考察します。教師が目的や実験法を提示するという点を除いては、自由研究の指導と同じです。つまり結果の処理やまとめ、考察、発表等は、生徒の主体性を重視しながら生徒と話し合い、指導援助し研究を深めていきます。教師の熱意と発想が生徒の興味や意欲を高めるともいえます。中学校には専門家のような設備はありませんが、専門家の研究の隙間を埋める研究そして中学校でも可能な実験を行い、惑星科学に僅かでも貢献できる成果を出すことを目標の一つとしています。

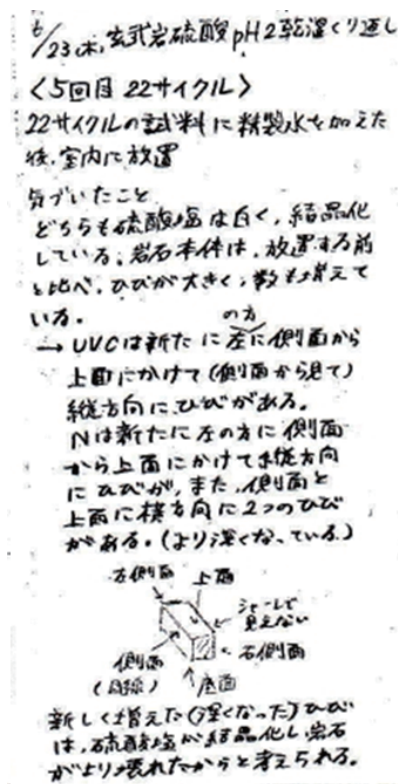


図5: 22サイクル終了後のBさんの観察及び考察内容。Bさんの観察記録ノートより抜粋。

6. まとめ

硫酸に浸した玄武岩に湿潤乾燥の繰り返しを与えると、紫外線を照射した方が、照射しない場合よりも粒径0.1 mm程の微細な岩石の破片が生じやすくなること、逆に照射しない方が硫酸塩による塩類風化と考えられる作用によって、生じるクラックの程度が大きくなり、生じる破片は粒径0.1mm程～数mmのものが発生しやすいことがわかりました。

中学校科学部において可能な実験と肉眼観察のみで得られた結果ですが、過去の火星表層での物理的風化を探る上でのヒントは得られたと思います。Bさんは湿潤乾燥22サイクルを与えた試料の観察と考察(図5)の後、観察記録ノートに「塩類風化の影響が顕著に出ていて、とても面白いと思った。また予想では、紫外線を当てているUVCの方が岩石が壊れると思ったが、Nの方が壊れていて、なぜだろう、と考

察するのが楽しかった。予想では紫外線の影響しか考えていなかったが、実験の結果から硫酸塩の種類も関係しているかもしれないとわかり、色々な見方があると学んだ。」という感想を書いています。今後の科学部研究の方向性を、生徒たちと話し合いながら決めていくつもりです。

謝辞

この研究を進めるにあたり、常に多くのご指導をいただいております東京学芸大学教授の藤本光一郎先生に、深く感謝申し上げます。また、この研究を熱心に進めているBさんはじめ大田区立蒲田中学校科学探求部の皆さんに、感謝の意を表します。

参考文献

[1] 小森信男, 2020, 学校教育学研究論集 42, 63.
 [2] 小森信男, 2022, エッセイ: 中学校科学部での模擬火星環境岩石変質実験, 遊星人 31, 174.

[3] 関根康人, 地質学雑誌 118, 650.
 [4] Tosca, N. J. et al., 2004, Journal of Geophysical Research Planets 109, E05003 1.
 [5] 佐藤昌人ほか, 2016, 地学雑誌 125, 133.
 [6] Cockell, C., 2002, in Astrobiology: The Quest for the Conditions of Life (G. Horneck, C. Baumstark-Khan, Eds), Springer Nature, 219.
 [7] Hurowitz, J. A. et al., 2006, Journal of Geophysical Research 111, E02S19 1.
 [8] 白井寛裕, 2011, 地球化学 45, 159.
 [9] 山田剛, 松倉公憲, 2000, 筑波大学陸域環境研究センター報告 1, 27.
 [10] Gaillard, F. et al., 2013, Space Science Reviews 174, 251.
 [11] Hynek, B. M. et al., 2013, Journal of Geophysical Research Planets 118, 2083.

著者紹介

小森 信男

東京学芸大学大学院 連合学校教育学研究科自然系教育講座

大田区立蒲田中学校

私立中学高等学校教諭を7年間、東京都公立中学校教諭を31年間勤め、2022年3月退職。退職後も指導員として科学部指導を継続中。日本惑星科学会、日本地球惑星科学連合、日本地学教育学会等に所属。

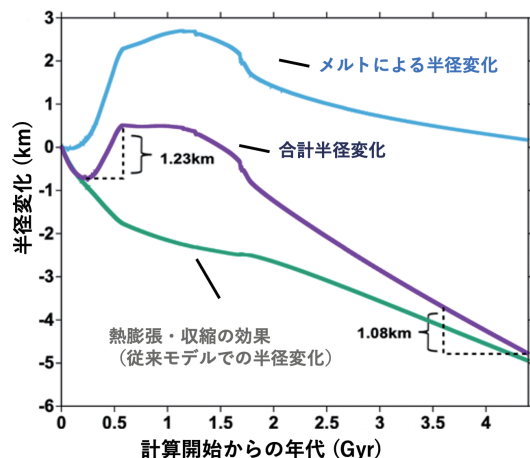
日本地球惑星科学連合2022年大会 学生優秀発表賞 受賞者紹介

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2022年度大会(5月29日-6月3日, 幕張メッセ)において, 本学会の学生会員の中から5名の方が「学生優秀発表賞」を受賞されました。そのうち掲載希望のあった4名についてご紹介いたします。項目は, (1)氏名, (2)所属, (3)学年, (4)発表題目(英語), (5)発表題目(和文), (6)発表内容, (7)受賞コメント, の順です。

- (1) 于賢洋(うけんよう)
- (2) 東京大学大学院 総合文化研究科 広域科学専攻
- (3) 博士1年
- (4) Evolution of the lunar interior caused by migrating magma
- (5) マグマの移動による月の内部進化
- (6) 月内部の進化において, 半径膨張/収縮や火山活動史といった観測事実はこれまで数値計算での説明が困難であった。本研究では, 1次元マントル球対称モデルを用いて, これらが月深部にて生成されたマグマの移動(およびそれに伴う放射性元素や物質の輸送)によって説明することができることを示した。このモデルを用いて, 月の形成直後の状態を月の進化から制約できる可能性が考えられる。
- (7) この度栄誉ある賞を頂いたのは指導教員である小



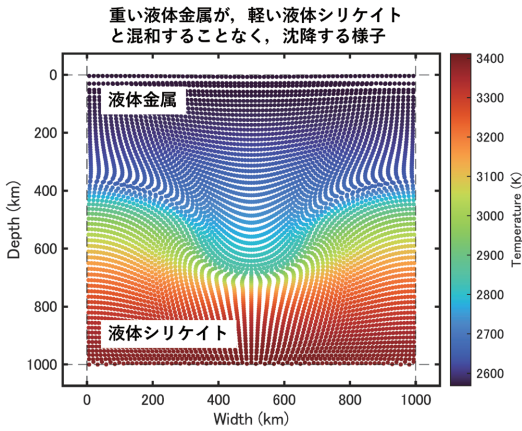
河正基先生はもちろん, 愛媛大学の亀山真典先生, JAMSTECの柳澤孝寿先生, 宮腰剛広先生のご指導, ご鞭撻あってこそです。感謝申し上げますと共に, 今後も精進していきます。



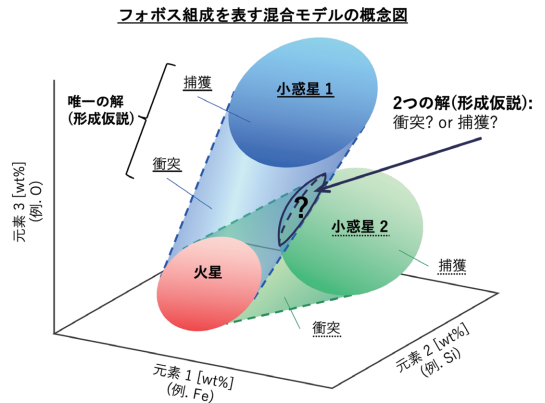
- (1) 菖蒲迫 健介(しょうぶざこけんすけ)
- (2) 九州大学大学院 理学府 地球惑星科学専攻
- (3) 修士2年
- (4) Improving the DISPH method for simulating planetary core formation
- (5) 惑星コア形成を目指したDISPH法の改良
- (6) 本研究では惑星コア形成を扱うためにDISPH法(Density Independent Smoothed Particle Hydrodynamics)の改良を試みた。具体的には惑星内部を記述する熱力学量の時間発展式を新たに導出し, SSPH法(Standard SPH)で用いられる境界処理法をDISPH法に応用したことである。これらの改良点を加えたDISPH法を用いて二次元レイリー・テラー不安定の問題を解いた。計算には, 液体シリケートマグマオーシャンと液体金属の物性を用いた今後は固相を含めた複雑な系に対する計算も行ってゆきたい。
- (7) この度, 栄誉ある賞を賜ることができたのは吉田茂生先生をはじめ, 共同研究者の川田佳史さん, 中島涼輔さんらのおかげです。感謝申し上げます。また,



本誌にて紹介の機会を頂き大変ありがとうございました。今後は惑星科学の発展の一助となれるようさらに精進致します。



(7) この度は荣誉ある賞を頂戴したことを光栄に思います。指導教員である白井寛裕先生をはじめとする共同研究者の皆様や研究グループの先生方に心より感謝申し上げます。これまで以上に研究を楽しみつつ精進していく所存ですので、今後ともどうぞよろしくお願ひいたします。



- (1) 平田佳織 (ひらた かおり)
- (2) 東京大学大学院 理学系研究科 地球惑星科学専攻
- (3) 博士1年



- (4) Constraints on the origin of Phobos by the multivariate analysis of MMX MEGANE data using a compositional database of astromaterials
- (5) 宇宙物質の組成データベースを用いたMEGANE/MMXデータの多変量解析によるフォボスの起源の制約
- (6) 火星衛星の形成仮説(小惑星捕獲説と巨大衝突)はこれまでに決定されていない。本研究では、MMX探査機搭載のガンマ線中性子線分光計MEGANEにより取得される火星衛星フォボスのバルク元素組成データから形成仮説を決定する解析手法として、フォボスのバルク元素組成を、2つの端成分(火星物質組成と小天体物質組成)の線形混合として表現するモデルを構築し、MEGANEデータからその混合率を推定する逆行列計算を提案した。端成分組成の多様性やMEGANEの観測誤差を考慮した場合、70%以上の組成領域で形成仮説が一意に決定できることが定量的に示された。

- (1) 湯本 航生 (ゆもと こうき)
- (2) 東京大学大学院 理学系研究科 地球惑星科学専攻
- (3) 博士2年
- (4) Specular photometry of opaque minerals in Ryugu returned samples



- (5) -
- (6) 小惑星リュウグウの帰還試料132粒子について、可視域の多色分光画像の記載を行った。粒子スケールでの反射率や色は、リモートセンシング観測と比較して多様であることが分かった。特に粒子内部の反射率の多様性には、リモートセンシングでは解像されなかったマイクロな形状が作る鏡面反射が寄与している。帰還試料の画像に普遍的にみられる無数の輝点は不透明鉱物等による鏡面反射であることが示唆された。
- (7) サンプルリターンを実現してくださったはやぶさ2ミッションの皆さまに感謝申し上げます。今後も惑星探査ミッションに貢献できるよう邁進してまいります。

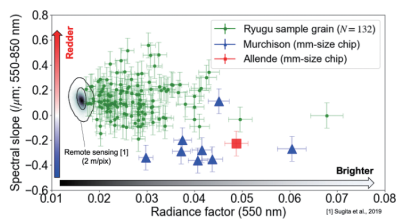


図1: 測定した全132粒子の反射率(横軸)とスペクトル傾斜(縦軸)

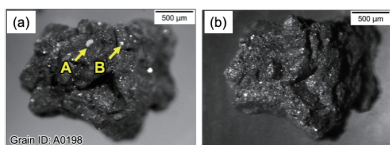


図2: A0198粒子について、a) 全方位から拡散照明を当てた画像. b) 左側のみから平行光を当てた画像. 粒子内の高反射率部 (e.g., AやB)は測光条件に強く依存していることが分かる。

New faces

奥谷 彩香¹ (国立天文台 科学研究部)

皆様こんにちは、奥谷彩香(おくや あやか)と申します。2022年3月に東京工業大学 地球惑星科学系にて井田茂教授のご指導のもと博士号を取得し、4月より国立天文台にて生駒大洋教授のもと日本学術振興会特別研究員として研究をしています。

私は、系外に遍在するとされる固体惑星の性質・起源の解明を目指して、多角的な理論研究・観測予想に取り組んできました[1-3]。博士課程では観測から固体惑星のバルク組成を制約する新たな方法論を構築すべく、次世代赤外望遠鏡を用いた「解体惑星」の組成推定法の提案[2]や白色矮星大気の高元素汚染を解釈する降着円盤モデルの構築[3]を行いました。現在は後者をさらに発展させ、ダスト・ガス円盤の放射観測から降着天体についてのより多くの情報を引き出すべく研究を進めています。白色矮星の研究に関する記事は今後投稿する予定ですので、本記事では現在に至るまでの個人的な経緯をお話し自己紹介したいと思います。

私が宇宙に興味を持ったのは両親が宇宙図鑑[4]を贈ってくれた7歳の誕生日まで遡りますが、実は長い間、その興味は惑星科学には向いていませんでした。宇宙137億年の歴史を解説するその図鑑の中で私を最も強烈に惹きつけたのは、光さえも飲み込んでしまう暗黒の天体、ブラックホールです。幼い私はその説明に怯えながらも、なぜそのような天体が生まれ、宇宙に存在しているのか・そして吸い込まれたものたちはどこへ行ってしまうのか、疑問を抱き続けました。やがて一般向けに書かれた科学雑誌ニュートンを読み漁り、ブラックホールの心臓ともいべき特異点に挑むには、量子論と相対性理論を融合させた量子重力理論が必要で、その最有力候補である



超弦理論では我々の知覚する4次元時空に6つの余剰次元を加えた10次元で世界が構成されているらしいということを知ります。このあまりにも想像を超えた話に、私は絶対にこれに取り組み、私たちが住むこの世界・宇宙の真理を解き明かさねばならないと固く決意しました。そこで、慶應義塾大学の物理学科に進学し、学部4年生では素粒子現象論・宇宙論の研究室の門戸を叩きました。しかし、ここで私は初めての挫折を味わうことになります。量子重力を記述する数学は私にとってはあまりにも難しく、卒業研究の課題として渡された、宇宙創成時の特異点を回避する無境界条件のもと宇宙の波動関数を導出する論文[5]を自分一人で読み進めることはほぼ不可能でした。当時の指導教員と非常に優秀な同期たちに助けられてようやく行間を埋められるという状況に、研究者として自分が新たな数式の一行をこの分野に生み出すことは限りなく不可能なのではないかと悟りました。

ですが、私はこの世界を知りたいことを諦めるつもりは毛頭ありませんでした。それならば違う分野で、と目を向けたのが惑星でした。大学二年時に自主受講したDavid Spergel 教授の“Imaging Other

1. ayaka.okuya@nao.ac.jp

Earths”というオンライン講義で初めて太陽系外惑星の存在を知りました。その授業では、自身が既に知っている物理を駆使して太陽系内の惑星たちの特徴が説明されると同時に、その予想が未知の系外惑星までに適用されうることが強く印象に残っていました。そして奇しくも、例の科学図鑑には幼い私を怯えさせたページがもう一つありました。それは、太陽系・火星のページです。そのページには鮮明な火星表面の地形や極冠の画像・火星隕石の写真と共に不気味な火星人の想像図が載せられており、前者の具体性と相まって、火星に生命がいるのだと幼い私に思い込ませるには十分の迫力がありました。約15年の時を経てそのページと再会したとき、(火星人のイラストは論外として)、こんな身近な太陽系内にもまだ見ぬ世界があったのだとひとり静かに感動したことを覚えています。そこからはほぼ手探り状態で他大学の研究室を訪問し、惑星形成関連の研究者が多く在籍し地球生命研究所も有する東工大に進学することを決めました。

大学院に入ってすぐは右も左も分からない状況でしたが、授業やゼミはどれも新鮮で楽しさしかありませんでした。時間はもはや虚数になる[5]ことはなく、物理量は具体的な単位と共に現れます。ノートに導いた式はすぐに現実世界と結び付けられ、手を伸ばせばそこに触れられる宇宙があることに興奮しました。そして修士論文では、私がこの分野に移動して最もやりたかったことであるハビタビリティという観点から、連星中の一つの星に潮汐固定されている惑星の温度分布にもう一方の星が与える影響について研究を行いました。このテーマは井田先生と当時ELSI にいらっしやった藤井友香氏と一緒に取り組んだもので、テーマ設定からスタートしほぼ未経験だった計算コードの作成・バグ取りまで助けていただき、人生1本目の論文としてなんとか無事形にすることができました[1]。

学部から修士までの思い切り(?)とは一転、博士課程の初めではハビタビリティの研究を続けるか悩む日々が続きました。そんな中、偶然見学していた卒業研究のテーマ出し会で奥住聡准教授が提案されたテーマの一つ「解体惑星の分光観測」が、私の今後の研究に大きく影響を与えることとなりました。これは、蒸発(解体)している惑星が放出するダストの尾

を分光観測することで鉱物組成を制約し、惑星本体の組成に迫ろうとするものです。かつて追いかけた遠い宇宙で起こっているであろう崩壊現象から、物質組成という身近な情報が得られる可能性にひたすらわくわくする気持ちが抑えきれず、このテーマに取り組みたい旨をすぐに連絡しました。この選択は直感的なものでしたが、おかげで終始楽しい気持ちのまま研究を突き進めることができました[2]。のみならず、奥住先生・平野昭幸氏・大野和正氏のご指導のもと、ダストの光学特性や観測スペクトルの予測計算といった新たな知識・スキルも身につけることができ、その後の自分の研究の幅が大きく広がったと感じています。加えて次世代赤外線宇宙望遠鏡SPICAのサイエンス検討会にも参加させていただき、(残念ながらSPICAの打上げは中止となってしまいましたが)、観測と理論が連携し続けていく重要さも学びました。

解体惑星の研究で系外惑星の内部組成を制約することの重要性を認識した私は、次の研究テーマとして白色矮星の重元素汚染に目を向けることに決めました。白色矮星大気中に検出される重元素は、かつて星回りに存在した惑星が壊れて降り積もっているのだと考えられています。実は、解体惑星以上に宇宙らしい白色矮星の話に修士頃から興味を持っていたのですが、膨大な切り口に対して独自の研究方針が見出せず約2年間手をつけられずにいたのです。こうして研究方針が決まり、原始惑星系円盤で同じ物理過程を扱う計算コードを当時開発していた兵頭龍樹氏の助けもあり、そこからはとんとん拍子に重元素観測を解釈する円盤モデルの構築を開始させることになりました。しかしながら、白色矮星周りの高温・高圧・固体成分に富んだ極限的な状態にある円盤の進化をモデル化することは容易でなく、納得のいく円盤モデルが完成したのは博士課程修了後でした[3]。仮定をもとに計算結果を予測しては裏切られ、予測しては裏切られを繰り返し、全計算において先行研究・観測ともある程度整合する結果を導いたときは喜びを通り越して安堵しました。同時に、そのような過程さえ心から楽しんで議論に付き合ってくださった井田先生からは、研究者としての真髄を学ばせてもらったように思います。

2022年10月にはDimitri Veras 氏のホストの下、

世界最大の白色矮星グループがあるWarwick 大学でこの結果をセミナー発表する機会に恵まれました。セミナー後、理論家・観測家の両方から多くの質問および共同研究のお声がけもいただけたことは、自身に取り組んできた研究に対する確かな自信となりました。また、滞在中の濃密な議論の中で次の研究につながるネタも見つけられ、今後は解体惑星で得られた知見も応用しつつ円盤モデルを発展させていきたいと考えています。一方で、白色矮星の重元素観測から得られた情報を惑星形成・進化や宇宙化学、地球科学とどのように繋げていくかは世界的にも現状混沌としているため、ぜひ惑星科学会の皆様のご協力をいただいて具体的な架け橋を確立し、惑星科学という学問領域の一分野として今後成長させていきたいと考えています。

惑星科学分野への参入以来、自分の興味を具体的な研究として実現するところへ漕ぎ着けるまで、指

導教員であった井田先生を初め、共同研究者の方々には大変お世話になりました。この場を借りて、深く感謝申し上げます。そして自分の興味が独り善がりなものにならぬよう視野を広く持って、惑星科学全体の発展に貢献できるように精進して参りますので、今後ともどうぞよろしく願いいたします。

- [1] Okuya, A. et al., 2019, ApJ 880, 107.
- [2] Okuya, A. et al., 2020, ApJ 901, 171.
- [3] Okuya, A. et al., 2022, MNRAS, in press (arXiv: 2211.16797).
- [4] 渡部潤一ほか, 2001, 21 世紀子ども百科 宇宙館, (株式会社 小学館).
- [5] Hartle, J. B. and Hawking, S. W., 1983, Phys. Rev. D28, 2960.

宮崎 慶統² (カリフォルニア工科大学)

こんにちは、カリフォルニア工科大学でポスドク研究員をしております、宮崎慶統(みやざきよしのり)と申します。2020年12月にイェール大学地球惑星科学科にて是永淳教授の下で学位を取得し、現在はDavid Stevenson教授のご指導の下、地球型惑星の進化について研究を続けております。本記事では研究内容も含めて、私の簡単な自己紹介をさせていただきます。

私が地球惑星科学の分野に進むきっかけとなったのは、高校時代に国際地学オリンピック大会の国内予選に参加したことでした。正直に言うと、大会の代表選抜の問題は地質や古生物に関連する出題が多く、あまり興味が沸きませんでした。大会に関わる過程で、幸運にも様々な分野の先生からお話を伺う機会がありました。その中でも、東京大学地球惑星科学専攻所属の橘省吾助教(当時)から伺った惑星形成の面白さに特に心を惹かれ、それがきっかけで

2. ymiya@caltech.edu



地球惑星物理学科に進学することにしました。

惑星形成に惹かれて進学したはずでしたが、学部4年次に阿部豊教授の元でマグマオーシャンの対流安定性についての研究を行ってから次第に惑星内部に興味に移り、大学院・ポスドク時代は主に惑星内部のダイナミクスの研究を行ってきました。

惑星内部を研究するにあたり重要なことは、マント

ル物質の化学的性質を正しく考慮することだと考えています。例えば、マグマオーシャンの固化プロセスは、レオロジーが液体的から固体的に変わる温度を境に冷却速度が大きく遅くなるのですが、その温度は溶融温度によって決定されています。また、マグマオーシャンが固体的になってからの進化は、固化的になる瞬間にどのような温度・密度構造になっているかに大きく依存しており、固化時の構造もマンツルの化学的性質で規定されています [1,2]。更に、マンツルは常に分化プロセスにさらされており、組成がダイナミクスに変化するの、組成変化によって溶融温度がどう変化するかを考慮することも重要になってきます。

このような観点から、マンツルの物性、そして化学分化の効果をきちんと考慮したダイナミクスモデルを構築することを目標に、私は研究してきました。例えば、マグマオーシャンにこの手法を応用したところ、マグマオーシャンが固化したときに生じる重力不安定が以前指摘されていたより短い、10 km以下の短波長になることが分かりました。この場合、初期地球のマンツルは小規模な不均一性を持っていたこととなります。一方、長波長であるとする、全球規模のオーバーターンが生じ、マンツルは層状に分化した化学構造を持つこととなります。45億年のマンツル対流の中でマンツルが均一化せず、現在の構造と整合的でないという問題がありました。

化学を考慮したアプローチは他の分野でも重要になると思い、冥王代のマンツルダイナミクス [3]や、初心に戻って原始惑星系円盤内側の組成構造の進化 [4]にも応用してきました。最近ではこれまでやってきた内容が論文となり、新たな問題に取り組む楽しさを感じています。JpGUや日本惑星科学の秋季講演会にも参加させて頂き、様々な分野の方々と議論する機会を頂いたことを大変感謝しております。

とはいえ、学会での初めての口頭発表が博士課程4年目とかなり遅かったため、自分の研究が科学の世界で通用するのか不安を感じた時期も長く続きました。論文を書く過程では、指導教官の是永先生から内容についても英語についても何度もダメ出しされ、論文執筆が全然進まない頃には違う道を考えてこともありました。マグマオーシャンの内容を初めてアメリカの地球物理連合大会で発表した際に、そ

の分野の大御所の先生に興味を持って聞いていただき、それが自信となり、さらに研究を続けたいというモチベーションに繋がりました。Caltechの先生方にもこの研究の方向性に関心をもって頂き、現在はポスドクフェローとして自由に研究をさせてもらっています。現在はイオの内部構造にも同じようなアプローチで挑み、イオには現在もマグマオーシャンがあるのではないかと論文を提出しました [5]。

この場を借りて、学部・大学院時代の指導教官である故阿部先生・是永先生には改めて深く感謝申し上げます。学部時代は何分勉強不足でしたが、阿部先生には中身の薄い成果報告に何度も付き合ってください、その後も思いつきのよう留学したいと言った私を送り出して下さいました。また、英語で文章を書く能力が低いま留学したため、初めての論文は30回以上突き返されつつも、細かくご指導くださった是永先生には頭が上がりません。また、本記事の執筆を勧めて下さいました黒澤先生・小玉さんにも感謝申し上げます。今後ともどうぞよろしくお願い致します。

参考文献

- [1] Miyazaki, Y. and Korenaga, J., 2019a, JGR Solid Earth 124, 3382.
- [2] Miyazaki, Y. and Korenaga, J., 2019b, JGR Solid Earth 124, 3399.
- [3] Miyazaki, Y. and Korenaga, J., 2022, Nature 603, 86.
- [4] Miyazaki, Y. and Korenaga, J., 2021, Icarus 361, 114368.
- [5] Miyazaki, Y. and Stevenson, D. J., 2022, Planetary Sci. J., 3, 256.

JSPS Information

- ◇日本惑星科学会第58回総会議事録
- ◇日本惑星科学会第154回運営委員会議事録
- ◇日本惑星科学会賛助会員名簿

◇日本惑星科学会第58回総会議事録

日時:2022年9月21日(水) 16:30-17:30

場所:ザ・ヒロサワシティ会館 本館1階 小ホール
(〒310-0851 茨城県水戸市千波町東久保 697番地)
+オンライン(Zoom Meeting)

正会員数:619名

定足数:62名

参加人数:144名(現地:103名, オンライン:41名)

委任状:75通(議長:71通, 中村 昭子会員:2通, 佐々木 晶会員:1通, 保井 みなみ会員: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菊地 紘会員, 書記に西谷 隆介会員が選出された。

3. 議事

3.1. 審議事項

- ・第17期上期一般会計・特別会計予算案報告(佐伯財務専門委員長)
- ・2022年度予算執行状況について説明がなされた。本年3月まででイーサイドへの事務委託契約が終了し、現在は木田氏へ事務委託が行われているとの報告がなされた。2023年度も引き続き木田氏への事務委託を継続するとの報告がなされた。
- ・自然災害に伴う会費免除措置について説明がなされた。

・その他

・会則変更の提案(保井総務専門委員長)

昨年実施された購読会員に関する会則変更が不十分であったため、不足部分を補う会則変更の提案がなされた。具体的には、購読会員の権利及び入会方法(第2章第7条及び第8条)についての変更が提案された。

・質疑応答及び討論

・一般講演会の会計を学会から出すのは良いのか質問がなされ、佐伯財務専門委員から支出額に関しては問題ない、枠組みについては今後検討するとの回答がなされた。

・木田氏への事務委託を今後どうするかについて質問がなされ、中本事務局体制検討作業部会部会長から検討しなければならないとの回答がなされた。

・採択

審議事項の採決が行われ、賛成: 218(うち出席者143)、反対: 0、保留:0により採択された。

3.2. 報告事項

・2022年度秋季講演会開催報告(百瀬2022年秋季講演会組織委員長)

・2022年度秋季講演会の実施状況について報告がなされた。

・総会開催時点で参加者が264名、来場者が170名、発表が195件であったと報告がなされた。

・初のハイブリッド開催であったことについて報告がなされた。

・ハイブリッド開催を中継方式でつつがなく進行できたのは会場設備、サポートスタッフが整っていたためであったと報告がなされた。

・2023年度秋季講演会開催案内(藪田2023年秋季講演会組織委員長)

・2022年度秋季講演会の開催計画について報告がなされた。

・開催期間は2023年10月11日(水)-13日(金)であり、広島市内で対面開催を予定していると報告がなされた。

・2023年10月14日(土)には、東広島芸術文化ホールくららにて、一般講演会が開催される予定であると報告がなされた。

・第17期役員選挙について(保井選挙管理委員長)

2022年12月の任期終了に伴い、新役員選挙が行われると報告がなされた。

・その他

・最優秀研究者賞の受賞資格変更について(中村会長)

受賞資格が「当該年度4月1日において、博士号取得から8年以内の者(ただし、博士号取得後に研究を中断していた場合は考慮される)」に変更されたと報告がなされた。

・来る10年の月惑星探査検討会について中間報告(竝木惑星探査専門委員)

今後中型提案の探査内容を特に強化していく予定であるとの報告がなされた。

・日本学術会議「学術の中長期研究戦略」の公募について(竝木会員)

学会からの提案はマスタープランと大きく変わらない予定であり、現在、学会内で申請されている提案で調整し

ていく予定であることが報告された。

・質疑応答及び討論

- ・大型小型提案の区分について質問がなされ、竝木会員から説明がなされた。
- ・来る10年の個別の提案に対し、推すべきなのか、推すのであればどうサポートするのかをもっと議論すべきだとの意見があった。それを受け、惑星科学会として大きなビジョンを議論する場を設けるべきだとの提案もなされた。

3.3. 学会賞授賞式

・2021年度最優秀研究者賞(中村会長)

兵頭龍樹会員、巽瑛理会員に対して、表彰状及び副賞が贈呈された。

・2022年度最優秀発表賞・優秀発表賞(寺田学会賞選考委員長)

- ・最優秀発表賞に準じる賞として、優秀発表賞が新設されたことが報告された。
- ・優秀発表賞は若干名が受賞し、賞状が授与されるものであると説明があった。
- ・2022年度最優秀発表賞・優秀発表賞の選考経過が報告された。本年度は13名の応募があり、10名が本審査に進んだとの報告がなされた。
- ・最優秀発表賞を桑原歩会員が、優秀発表賞を于賢洋会員・庄崎弘基会員が受賞したと発表された。

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154回運営委員会議事録

日時:2022年9月20日(火)18:30-20:30

場所:ハイブリッド開催(ザ・ヒロサワ・シティ会館+Zoom Meeting)

運営委員:

出席者20名

中村 昭子, 竝木 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, 藪田 ひかる, 保井 みなみ, 荒川 政彦, 白井 寛裕, 倉本 圭, 田近 英一, 中島 健介, 中村 智樹, 三浦 均, 百瀬 宗武

欠席者0名

オブザーバー:

北里 宏平(総務専門委員)

藤谷 渉(総務専門委員)

議題・報告事項:

1. 2022年秋季講演会報告(百瀬 2022年秋季講演会組織委員長)

- ・参加者数は264名。現地参加者が多数。
- ・会計はほぼ収支ゼロとなった。
- ・Square(クレジット決済サービス)で領収書が発行されず、LOCから該当希望者に領収書を発行することとした。
- ・Squareを利用したのはイベントペイのクレジット決済が情報流出により停止されたため。

2. 2023年秋季講演会実施案(藪田 2023年秋季講演会組織委員長)

- ・日程は2023年10月11日(水)から13日(金)の3日間を予定している。
- ・会場は広島市内で二ヶ所候補を選定し、うち一ヶ所は仮予約済み。
- ・14日(土)午後に東広島市にて一般市民講演会を開催予定。
- ・対面開催に重きを置き、ハイブリッドにも柔軟に対応する。

3. 今後の秋季講演会の開催形態に関して(玄田 行事部会長)

- ・秋季講演会の口頭発表時間が年々短くなってきており、対策を講じるべきとの提案がなされた。
- ・対策案として、口頭発表のセレクションの導入、パラレルセッションの導入、開催日を増やすことが挙げられた。
- ・協議の結果、会員向けアンケート調査を行い、次回の運営委員会で方針を決定することとした。

4. 最優秀研究者賞受賞資格の緩和について(奥住 運営委員)

- ・民間就職や浪人期間の扱い方について再検討した最優秀研究者賞内規の変更案が提示された。
- ・研究を中断していた期間(出産、育児、介護等の理由により)がある学会員に対して最優秀研究者賞の資格条件を緩和することを内規に明記する。
- ・具体的には、年齢・学位取得後年数条件を「当該年度4/1に博士号取得から8年以内」に一本化したうえで、「博士号取得後に研究を中断していた期間(出産、育児、介護等の理由により)」の条件緩和を追加する。
- ・議決の結果、賛成多数で提案は承認された。

5. 第17期上期一般会計・特別会計予算案説明(佐伯 財務専門委員長)

- ・会費支払い済み会員数504名、未納会員数114名。
- ・今年も匿名の方から10万円の寄付金をいただいた。
- ・各委員会からの要望をもとに2023年度予算案を作成した。
- ・遊星人編集の原稿おこし代10万円は4年以上使用実績がなく当面使用予定もないので、編集委員会の同意を得たうえで、予算計上しないこととした。
- ・イーサイドの撤退に伴う対応として、業務委託費は個人委託費に移行。個別作業の事務委託費は不要となり、代わりにレンタルオフィス代・レンタルサーバー代が追加。
- ・補充契約として学会サーバーの維持更新費用が必要であり、30万円を計上した。契約の手続きは情報化専門委員会が引き取る。

・2023年度秋季講演会LOCから一般講演会用に13万円の支出要望があり、承認された。

6. 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)

・例年通り学会員にアナウンスする。

7. 日本学術会議「学術の中長期研究戦略」の公募への対応について(荒川 将来構想検討作業部会長)

・これまでのマスタープランから変更点はあるが、大型計画の推進という意味では変わらないので、昨年から行ってきた学会の選考過程を尊重して最終決定を行う。再公募は行わない。

・現在の提案3件はヒアリングを経て学会が推薦するに相応しい提案であることが確認されているため、3件全てを学会から推薦する提案とする。

・令和4年10月21日までに意向表明・情報提供が求められている。

・関連学会・機関との調整は各提案の代表者と学会執行部(会長・副会長)で行う。

8. 事務運営体制について(中本 事務局体制検討部会長)

・現在、2024年度以降の体制について検討している。

9. 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。

10. 第58回総会の議長・書記の推薦について(保井 総務専門委員長)

・議長に菊地 紘会員，書記に西谷 隆介会員が推薦され，承認された。

11. 第17期役員選挙について(保井 総務専門委員長)

・第17期役員選挙管理委員に保井 みなみ会員(委員長)，諸田 智克会員，奥住 聡会員，谷川 享行会員，小林 浩会員，北里 宏平会員，藤谷 渉会員，武藤 恭之会員，國友 正信会員が推薦され，承認された。

・選挙日程，被選挙人から除外する正会員について説明がなされた。

12. 2022年度最優秀発表者・優秀発表者選考結果について(寺田 2022年学会賞選考委員長)

・選考委員一名が9月20日の選考会に参加できなくなったため，代理として道上 達広会員の追加委嘱が提案され，承認された。

・今年度から最優秀発表賞に準じる賞として，優秀発表賞が設置された。

・選考委員会からの推薦に基づき，最優秀発表賞に桑原 歩会員，優秀発表賞に于 賢洋会員と庄崎 弘基会員を受賞者として決定した。

13. 学会賞検討作業部会について(田中 学会賞検討作業部会長)

・優秀発表賞の英語名称について学会賞検討作業部会で検討することとなった。

14. 遊星人の発行状況報告(三浦 編集専門委員長)

・例年通りつつがなく発行できている。

・写真付き著者紹介が今年度9月号から導入された。

15. その他

- ・保井委員より購読会員が準会員から会員に変更になったことに伴い、会則に変更を加える必要がある旨、提案がなされた
- ・提案は承認された。翌日の総会で説明を行い、承認を得ることとした。

以上

◇日本惑星科学会賛助会員名簿

2022年10月27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

編集後記

遊星人の編集幹事を始めた2021年からの二年間、我が家では、Eテレとの友好関係を築いてきた。定番はおさるのジョージやスポンジボブ、繰り返し見続けたヒックとドラゴン、ジブリやミニオンズが加わり、テレビアニメを録画した外付けハードディスクは宝箱となった。ひと月前、この大切なハードディスクが異音をたてて壊れた。ヒックとドラゴンが見られなくなったことに取り乱し、大粒の涙を流す息子に、仕方なくAmazon Prime Videoを解禁した。すると、我が家にサトシとピカチュウが侵入してきた。ポケモンだ。しかし、これまでと何が違う。キャラクターもストーリーも耳に入っていない。ジョージだったら観たいのに。サトシ、きみは違う。

編集幹事として、いつもわたしは真面目であろうとしていた。しかし、誤字や余計なスペースを探して論文を読んでいると、つい

中身に気を取られる。参考文献のフォーマットは全部正しいように目に映る。だが沢山間違っている。余計な半角スペースも、ポケモンのタイプも技も、目や耳に入っているはずなのに、どこかへ飛んでいってしまう。

次号からは、新編集幹事の関口 朋彦さんと、ザルな編集幹事を丁寧にサポートして下さった三浦編集長が新たなタッグを組む。新聞の校正を仕事にしている友人は、日常生活のあらゆる活字をうっかり頭で校正してしまうと言っていた。前編集幹事の杉山さんも自然と目に入ると言っていた。そう考えると、ポケモンに興味を持たない私は、問題なく気楽な読者へ戻れるような気がする。このどこか牧歌的な雑誌、遊星人が二年前より好きになったのは、編集幹事になった収穫である。

スパーキングギガボルト!(瀧川)

編集委員

三浦 均 [編集長]

瀧川 晶 [編集幹事]

荒川 創太, 上相 真之, 岡崎 隆司, 小川 和律, 鎌田 俊一, 木村 勇氣, 黒澤 耕介, 小久保 英一郎, 坂谷 尚哉, 杉山 耕一郎, 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

2022年12月25日発行

日本惑星科学会誌 遊・星・人 第31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 日本惑星科学会事務局
 〒140-0014 東京都品川区大井1-6-3 アゴラ大井町3階
 Tel: 03-6410-7041
 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

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。

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。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さと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

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

〒140-0014

東京都品川区大井1-6-3 アゴラ大井町3階

Tel: 03-6410-7041

e-mail: staff@wakusei.jp



The Japanese Society for Planetary Sciences