

遊



日本惑星科学会誌

**Planetary
People** 2
June 2020 vol29 no

星

人

- 連載:系外惑星, あかつき,
はやぶさ2, 遊星百景
- 学位論文タイトル紹介

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) 総説：専門外の人にも分かりやすく解説した最前線の研究成果のレビュー
 - (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29巻 第2号
目次

巻頭言 渡部 潤一	63
<hr/>	
系外惑星「遠い世界の物語」その12 ～系外惑星大気中の有機物ヘイズ～ 川島 由依	64
一番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦 その42 ～超回転～ 堀之内 武	75
火の鳥「はやぶさ」未来編 その21 ～熱撮像で明らかにされた始原的小惑星の超高空隙な特徴～ 岡田 達明, 福原 哲哉, 田中 智, 坂谷 尚哉, 寫生 有理, 荒井 武彦, 他4名・1チーム	80
遊星百景その19 ～二次クレーター～ 本田 親寿	88
第12回月惑星探査データ解析実習会を終えて 出村 裕英, 嵩 由美子, 園家 俊, 松尾 祐飛, 平田 成, 本田 親寿, その他1チーム	90
2020年度日本惑星科学会秋季講演会のお知らせ 出村 裕英	95
2020年度助成事業2件公募のご案内 公益財団法人 宇宙科学振興会	96
学位論文タイトル紹介	97
JSPS Information	98

Contents

Preface	J. Watanabe	63
<hr/>		
Tales of distant exoplanet worlds (12) - Organic haze in exoplanet atmospheres -	Y. Kawashima	64
Road to the first star: Venus orbiter from Japan (42) - Superrotation-	T. Horinouchi	75
Phoenix “Hayabusa”: A tale of the future (21) - Highly porous nature of a primitive asteroid revealed by thermal imaging from Hayabusa2 -		
T. Okada, T. Fukuhara, S. Tanaka, N. Sakatani, Y. Shimaki, T. Arai, and 4 authors, 1 team		80
My favorite view in planetary sciences (19) - Secondary crater -	C. Honda	88
Report of 12th exercise for data analysis in lunar and planetary data explorations		
H. Demura, Y. Daket, T. Sonoke, Y. Matsuo, N. Hirata, C. Honda, and 1 team		90
Announcement of 2020 JSPS fall meeting	H. Demura	95
Announcement of public offering for 2020 grants	Society for Promotion of Space Science	96
Recent theses in planetary sciences		97
JSPS Information		98

巻頭言

「日本のビッグサイエンスはどこへ向かうのか」

「それにつけても金のほしさよ」 そんな言葉がつつい出てしまう、この頃である。

筆者が勤める国立天文台は日本の天文学の中枢機関(現在では大学共同利用機関)として、研究者コミュニティの要望を受け、大学では実現不可能な規模の望遠鏡を次々に実現してきた。1960年岡山天体物理観測所にはじまり、(現在は東京大学所属の)木曾観測所、野辺山宇宙電波観測所、宇宙研とともに実現させた太陽観測用科学衛星やVLBIを用いた電波望遠鏡の数々、そしてハワイのすばる望遠鏡。21世紀には欧米諸国とともにチリにアルマ望遠鏡を完成させ、共同利用に供している。建設費も相当だが運用経費も問題だ。すばる望遠鏡は建設に約400億、年間運用費は当時の考え方では一割程度とされ、30億程度はあった。しかし、連綿と減額が続き、現在は年間10億程度しか配分されず、維持のためには毎年数億円を内部努力せねばならない。さらに研究者コミュニティからは次期計画への強い要望がある。口径30m望遠鏡、TMT計画に参加することとなり、建設費用は全体で一千億を超える。当初はその四分の一程度を日本が負担する予定だったが、反対運動のために見通しが立たなくなりつつある。しかし負担金は毎年支払わねばならず、その額も半端ではない。

同じく宇宙科学や惑星科学もビッグサイエンスの側面は強い。面白いことをやるためには、小型の探査とはいえ、それなりの投資が必要である。説明責任とともに、ステークホルダーへの働きかけも重要で、国立天文台では首脳部が100弱の議員事務所を訪問し、挨拶をするのが正月の恒例行事である。科学技術立国を国是としてきた我が国ゆえ基礎科学を含めた投資には前向きにと主張するも、実際には大学等の高等教育を含めて予算は縮減する一方だ。少子化や人口減少という右肩下がりが国家において、国際協力を見据えながら、面白いビッグサイエンスをどのように実現させていくのか、研究者にも問われている。

渡部 潤一(自然科学研究機構 国立天文台)

系外惑星「遠い世界の物語」その12 ～系外惑星大気中の有機物ヘイズ～

川島 由依¹

* 2020年4月10日受領, 査読を経て2020年4月27日受理

(要旨) 近年の系外惑星の観測により, 大気透過スペクトルに分子の吸収の特徴が見られないような惑星が多数発見された。これにより, 系外惑星の大気中にエアロゾルが存在することが示唆された。本稿では, 系外惑星大気中に存在するエアロゾルの候補の一つである有機物ヘイズに着目し, 筆者らの最近の理論研究により得られた知見を紹介する。また, 今後の系外惑星観測への示唆と, 有機物ヘイズに関する現状の不定性, 最新の室内実験からの示唆についても述べる。

1. はじめに

1995年に初めての系外惑星が発見されて以来 [1], 2020年3月末現在までに4100個以上の系外惑星の発見が報告されている¹。そのうち, 短周期惑星と呼ばれる中心星の近傍を短い周期で公転する惑星については, 主にトランジット法 [2, 参照] によって, その大気組成の情報が観測的に得られるようになってきた。地球から見て系外惑星が恒星の前を横切る際, 恒星からの光を惑星が遮るため, 見かけの恒星光度がわずかに減少する。これを異なる波長の光, 多波長で観測して得られる減光率と波長の関係 (大気透過スペクトルという) には, 惑星大気中の原子や分子, エアロゾルによる吸収・散乱の情報が含まれる。従って, 観測データと理論的な大気透過スペクトルモデルとを比較することにより, 大気組成を推定することが出来る。大気組成は, 惑星の内部構造や形成過程などを解明する上で重要である。

ところが最近の観測により, 大気透過スペクトルに分子の吸収の特徴が見られないような惑星が多数発見された [例3]。これにより, エアロゾルのよう

な粒子が大気中に存在し, 分子の吸収の特徴を隠していることが示唆された。同時に, 近赤外域は分子の吸収特徴がなく平坦であるが, 可視域にはレイリー散乱の特徴 (波長が短い程減光率が大きくなる) を示すスペクトルや, 近赤外域に分子の吸収特徴を示すようなスペクトルが観測された惑星も見付かっており, 大気透過スペクトルは多様であることが明らかとなっている [4]。これらの事実から, 系外惑星大気中のエアロゾルの特徴や成因は複雑であることが示唆される。

系外惑星大気中で生成され得るエアロゾルとしては, 大きく分けて, “ヘイズ” と “雲” の二種類が考えられている。ヘイズとは, タイタン大気中の有機物ヘイズや金星大気中の硫黄ヘイズのように, 光化学的に生成されるエアロゾルである。一方, 雲とは, 地球大気中の水蒸気雲のように, 凝縮により生成されるエアロゾルである。これまでの観測では, ヘイズか雲のどちらか, またはそれらの両方が, 観測された系外惑星のスペクトルに影響を及ぼしているのかわかっていない。そもそもエアロゾルは気体分子の吸収の特徴を隠してしまうため, 大気組成を推定する

1.SRON Netherlands Institute for Space Research, y.kawashima@sron.nl

¹<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>

ためには、まずエアロゾルについて、その生成条件や振る舞いを理解することが必須である。

筆者は大学院時代、系外惑星大気中のエアロゾルの候補の1つであるヘイズ、特に有機物ヘイズに着目して研究を行った。その理由は以下の通りである。まず、現在多波長トランジット観測による大気観測が可能な惑星の大半は、中心星近傍を公転する、水素に富む大気を持つ惑星である。これは、中心星近傍を公転する惑星の方がトランジットの頻度が高く、また、地球のような小さな惑星よりかは、木星や海王星のような大きな惑星(つまり、形成時に原始惑星系円盤中の水素ガスを捕獲しやすい)の方が、トランジット中の恒星光度の減光率が大きいいため、発見されやすいためである。なお、中心星近傍に存在する惑星は、中心星からの強い輻射を受け温度が高くなるため、そもそも大気が膨張、つまり半径が大きくなりやすい。そのような、恒星から強力な紫外線照射を受ける還元的な大気環境下では、有機物ヘイズを生成する光化学反応が起きやすい²。本稿では、系外惑星大気中における有機物ヘイズについての、筆者らの最近の理論研究[6-8]により得られた知見を紹介する。また、今後の系外惑星観測への示唆と、現状の有機物ヘイズに関する不定性、最新の室内実験からの示唆についても述べる。

2. 有機物ヘイズのモデリング

有機物ヘイズの生成過程は、次の通りである。まず、恒星からの紫外線をヘイズの前駆物質となる炭化水素化合物(CH_4 等)が吸収し、光化学と熱化学反応が起こることで、ヘイズ粒子の種(モノマー)が生成される。次に、そのヘイズ粒子の種が合体成長を繰り返すことにより、最終的なヘイズ粒子が生成される。

ヘイズの存在を考慮した大気透過スペクトルモデルに関する先駆的な研究[9, 10]では、大気中にヘイズの層を仮定し、ヘイズ粒子の粒径と数密度、ヘイ

ズ層の高度と厚さをパラメータとすることで、ヘイズが透過スペクトルに及ぼす影響が調べられた。その後、より詳細なモデル化を行った研究[11]では、光化学計算を行うことにより、ヘイズの前駆物質である炭化水素化合物の混合率の高度分布、つまり大気中のどこに前駆物質が多く存在するかが求められた。そして、各高度でそれらの前駆物質の一部がヘイズになると仮定された。一方、ヘイズ粒子の粒径については、先行の研究[9, 10]と同じくパラメータとされた。これらの研究は、観測されたスペクトルと合うようなヘイズのパラメータ(粒径や数密度)の組を見付けてはいたが、大気中で起こるであろうと考えられるヘイズ粒子の合体成長を解いていなかったため、そのパラメータの値の確からしさについてはわかっていなかった。

そこで筆者らは、ヘイズ粒子の粒径と数密度の高度分布を理論的に決定することを目的として、大気中のヘイズ粒子の生成を考慮するための光化学モデルと、ヘイズ粒子の合体成長と沈降を考慮した理論モデルを新たに開発した。4節で述べるように、現状の系外惑星大気中での有機物ヘイズのモデリングにおいて、一番の不確かなパラメータとなっているのが、光化学反応によるヘイズ粒子のモノマーの生成率である。本稿で紹介する筆者らの研究では、従来の研究において有機物ヘイズの前駆物質であると考えられてきた CH_4 と C_2H_2 、HCNの光分解率の合計を基準のモノマー生成率と仮定し、計算を行った。なお、筆者らの光化学モデルでは、 C_2H_4 等のより高次の炭化水素化合物については考慮されていない。より高次の炭化水素化合物の光分解率も考慮すると、モノマー生成率は大きくなると考えられるが、4節で述べる通り、そもそもヘイズのモノマー生成率に関しては、前駆物質となる分子についても、前駆物質の光分解からモノマーに至るまでの生成効率(未知であるため、筆者らは上限値として100%を仮定している)についても、まだはっきりとわかっていない。そのため筆者らは、ヘイズの前駆物質として、 C_2H_4 などに比べて存在量の多い[例11]、 CH_4 と C_2H_2 、HCNのみを考慮するに留めた。そして、得られたヘイズ粒子の特性を基に大気透過スペクトルをモデル化した。

本稿では、GJ 1214bというミニネプチューン(地球

²系外惑星大気中で生成され得るヘイズとしては、有機物ヘイズの他にも、硫黄ヘイズが考えられている[例5]。硫黄ヘイズの素となる H_2S は、有機物ヘイズの素である CH_4 と比べるとより低温でしか存在せず、また太陽組成の元素存在度を仮定すると存在量も小さい。そのため、筆者はまず有機物ヘイズに着目した。

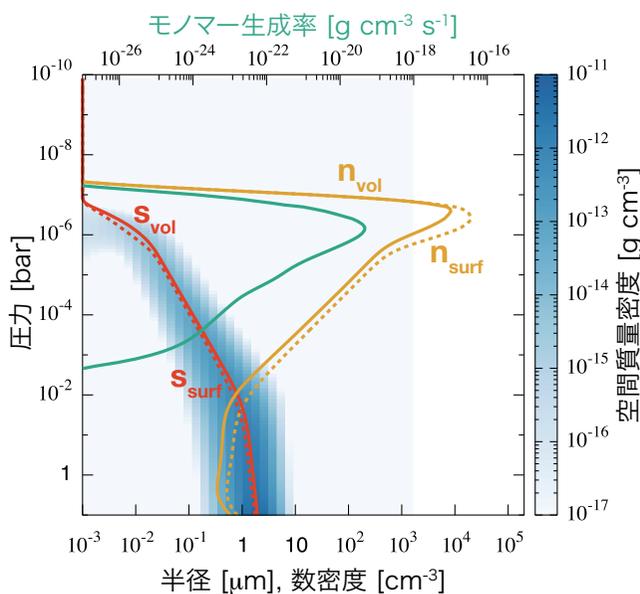


図1: ミニネプチューンGJ 1214bを想定したヘイズ粒子の分布の計算結果. 体積平均半径 s_{vol} (赤色の実線), 表面積平均半径 s_{surf} (赤色の点線), 体積平均数密度 n_{vol} (オレンジ色の実線), 表面積平均数密度 n_{surf} (オレンジ色の点線), モノマー生成率(緑色の実線), 各サイズのヘイズ粒子の空間質量密度(青色の等高線). 図はKawashima & Ikoma (2019)[8]を一部改変.

よりも大きく、海王星よりも小さな惑星)をモデルとして筆者らが行った計算の結果について、紹介する。なお、次節で金属量、渦拡散強度、C/O比の依存性について述べるが、本節ではまず、筆者らが基準値として採用した、太陽組成大気(C/O比0.5)、渦拡散係数 $10^7 \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ の場合について述べる。図1は、ヘイズ粒子の粒径と数密度分布の計算結果である。これまでの先行研究では大気中で一定だと仮定されていたヘイズ粒子の粒径は、合体成長により、大気上層から下層にかけて何桁も変化していることがわかる。大気上層(圧力 $\sim 10^{-7}$ bar以下)では、合体成長が起こるよりも短いタイムスケールで粒子が落下するため、ヘイズ粒子はあまり成長しない。合体成長が起きないため、モノマーの生成により、高度が下がる(圧力が上がる)に連れヘイズ粒子の数密度は大きくなる。ところがある高度(圧力 $\sim 10^{-7}$ bar)で、数密度の値はピークを取る。これは、これより下層では、ブラウン運動による拡散で引き起こされる合体成長が、モノマーの生成に比べて短いタイムスケールで起こるためである。下層に行くに従い、粒子の平均サイズはモノマーサイズである1nmから数 μ

mへと合体成長により大きくなり、また数密度は何桁も小さくなる。なお、圧力 10^{-2} barあたりで見られる傾向の変化は、ガス抵抗則のレジームの変化(すべり流からストークス流)によるものである。沈降速度が急に大きくなるため、粒子の成長が阻害される。また、体積平均と表面積平均の粒径と数密度の違いがわずかであることから、各高度における粒子サイズの分布は比較的狭いことがわかる。この事実は、青色の等高線で示された、各サイズの粒子の空間質量密度を見るとより明らかである。

繰り返しになるが、これまでの研究では、大気中のヘイズ粒子の粒径は高度に依らず一定であると単純化されていた。しかし、図1に示されているように、合体成長と沈降を考慮して導かれるヘイズ粒子の粒径分布の描像は、それとは非常に異なるものであることがわかった。また多くの先行研究では、ヘイズ層として、大気中の一部分にのみヘイズが存在すると仮定されていたが、ヘイズ粒子は大気中の広い範囲で存在することが示された。

図2は、図1の分布のヘイズ粒子を考慮した場合としない場合の大気透過スペクトルを示している。ま

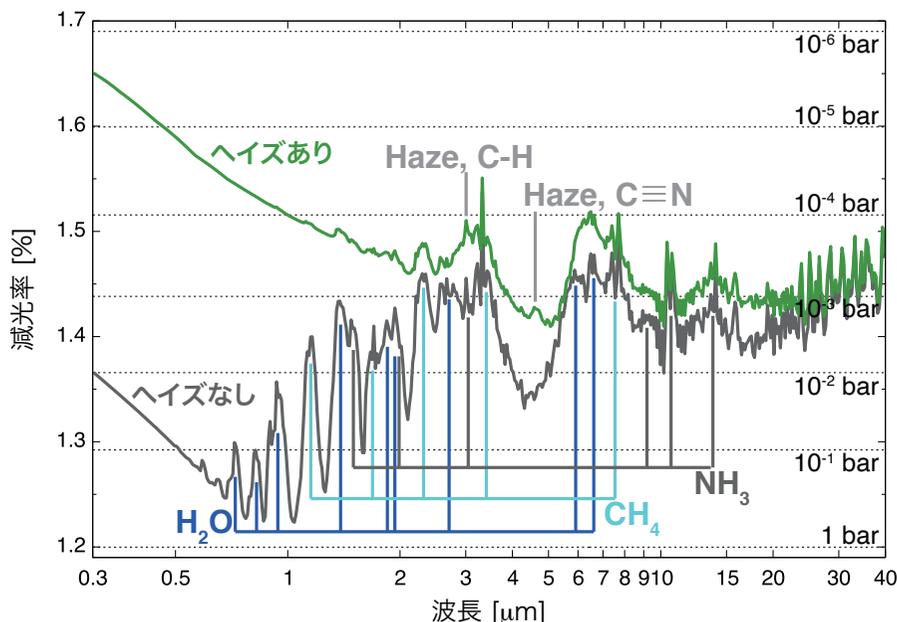


図2: GJ 1214bを想定した、ヘイズを持つ場合(緑線)と持たない場合(黒線)の大気透過スペクトルモデル. 点線は、各圧力に対応する減光率を示す. なお、波長解像度は $R=100$ に下げている(これ以降のスペクトルの図についても同様). 図はKawashima & Ikoma (2019)[8]を一部改変.

ず、ヘイズがない場合には、 H_2O や CH_4 、 NH_3 などの分子の吸収特徴がスペクトルに現れている。可視域では、レイリー散乱による、波長が短くなる程減光率が大きくなるようなスロープが現れている。一方ヘイズが存在する場合のスペクトルでは、分子の吸収の特徴が弱められている、もしくはなくなっていることがわかる。これは、大気上層(圧力 $\sim 10^{-3}$ 以下)に存在するヘイズ粒子が大気を光学的に厚くし、それよりも下層にある分子によって作られる吸収の特徴を隠しているからである。ヘイズがある場合とない場合のスペクトルとを比較すると、短波長側で、分子の吸収の特徴はより隠されている、つまりヘイズの影響を受けていることがわかる。これは、大気上層にある小さな($\leq 1\mu\text{m}$, 図1参照)ヘイズ粒子は波長が短い光程よく吸収することと、またヘイズなし大気のスペクトルを見ると分かる通り、大まかに言うと、分子による光学的厚みは短波長側でより小さいからである。また、大気中にヘイズがある場合でも、 $\sim 10^{-3}\text{bar}$ より上層にある CH_4 の吸収特徴などは見えていることがわかる。さらに、 3.0 、 4.6 、 $6.3\mu\text{m}$ には、有機物ヘイズ自身による吸収の特徴も現れている。

3. パラメータ依存性

太陽系内の惑星とは異なり、系外惑星大気には未知のパラメータが数多くある。筆者らは、その中でもヘイズの分布と大気透過スペクトルに大きな影響を及ぼす、いくつかの重要なパラメータ(紫外線強度、金属量、渦拡散強度、重力加速度、温度、C/O比)に対するヘイズとスペクトルの応答を調べた。本節では、それぞれのパラメータへの依存性について、引き続きGJ 1214bをモデルとして行った計算結果を紹介しながら述べる。

なお4節で述べるように、最近の系外惑星大気を想定した有機物ヘイズの実験[12-15]により、従来考えられて来た CH_4 などの炭化水素化合物だけでなく、 CO や CO_2 、 H_2O などの分子も、ヘイズの前駆物質として機能し得ることが示唆され始めた。しかし、ヘイズの前駆物質からヘイズのモノマーの生成までの過程についてはまだよくわかっていない。以下に述べるパラメータ依存性は、あくまで従来の仮定に則った場合のものであることを先に記しておきたい。このような実験からの示唆については4節で述べる。

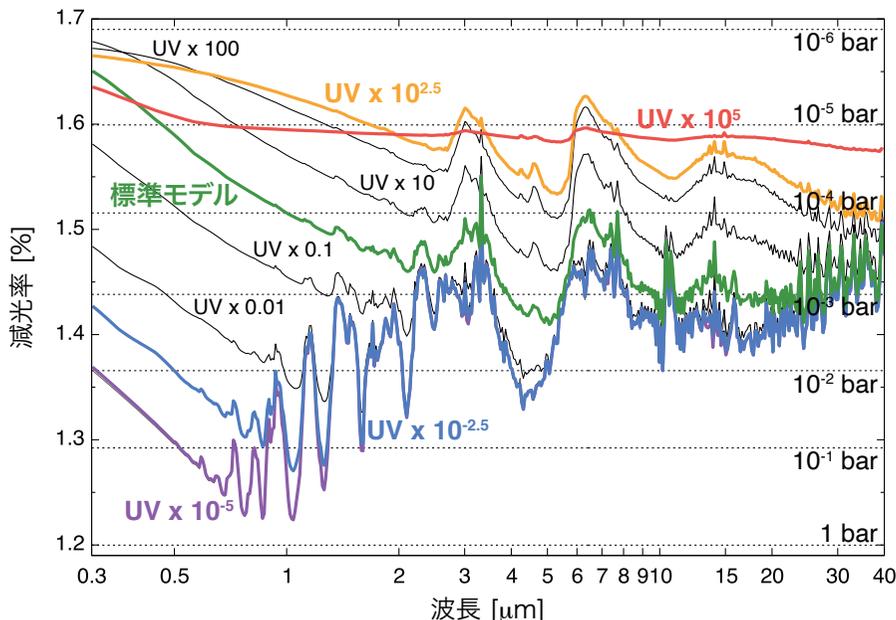


図3: GJ 1214bを想定した、ヘイズを持つ大気透過スペクトルの紫外線強度に対する依存性。標準モデルとは、GJ 1214bが受け取る中心星からの紫外線強度を想定した場合である。図はKawashima & Ikoma (2019)[8]を一部改変。

3.1 紫外線強度

図3は、紫外線強度が異なる場合の大気透過スペクトルモデルを示している。標準モデルとは、前節でも紹介した、GJ 1214bが受け取る中心星からの紫外線強度を想定した場合である。紫外線強度により、スペクトルは大きく変化していることがわかる。これは、紫外線強度が高くなるにつれ、ヘイズのモノマー生成率が大きくなるためである。標準モデルから紫外線強度を5桁上げた、紫外線強度が非常に高い場合(赤色の線)には、スペクトルは広い波長範囲で平坦であり、分子の吸収特徴は全く見られない。一方、可視域にはレイリー散乱のスロープが僅かながら見られる。前者は、高高度にある比較的大きなサイズの粒子によるものであり、後者は、それよりもさらに上層にある小さな粒子によるものである。標準モデルから紫外線強度を2.5桁上げた場合(オレンジ色の線)には、ヘイズ粒子による可視域でのレイリー散乱のスロープに加え、ヘイズ自身の吸収特徴が3.0、4.6、6.3 μm に見えている。紫外線強度を低くすると、分子の吸収特徴が徐々に現れるよう

になる。紫外線強度を標準モデルから5桁下げた場合(紫色の線)には、スペクトルはヘイズなし大気のものとはほぼ同じとなっていることがわかる。これは、ヘイズの量が十分に少なく、大気の光学的厚みに影響を及ぼさないからである。図3に示されているように、筆者らは、本稿のはじめに述べたような観測された大気透過スペクトルの多様性を、紫外線強度の違いによって再現出来ることを明らかにした。

3.2 金属量

大気中の金属量(水素とヘリウムより重い元素の量)を多くすると、ヘイズの前駆物質である CH_4 と C_2H_2 、 HCN の混合率は大きくなる。ところが筆者らは、ヘイズの前駆物質の混合率は大きくなるにも関わらず、基本的には、金属量を多くすると前駆物質の光分解率、つまりモノマー生成率は寧ろ小さくなることを発見した。これは、金属量が多くなると、ヘイズの前駆物質よりも上層にある、 H_2O や CO 、 CO_2 などの紫外線を遮蔽する他の分子の混合率も大きくなってしまいうためである。その結果、ヘイズの前駆物質が存在する高度まで届く紫外線の量が減ってし

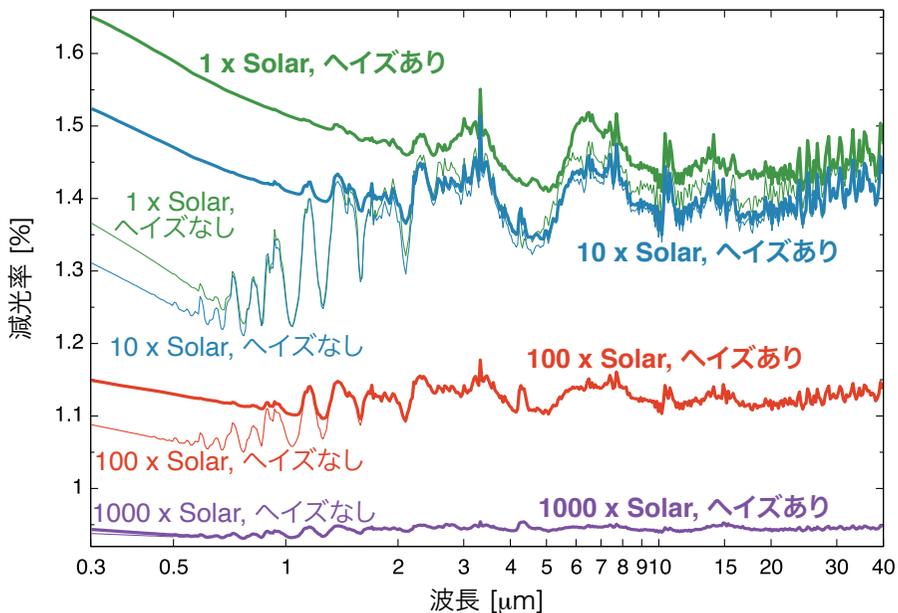


図4: GJ 1214bを想定した、ヘイズを持つ大気透過スペクトルの金属量に対する依存性. 図はKawashima & Ikoma (2019)[8]を一部改変.

まい、モノマー生成率は小さくなってしまふ。なお、100倍と1000倍の太陽組成大気の場合とでは、モノマー生成率は1000倍の太陽組成大気の場合の方が僅かに高いが、ほぼ変わらない結果となった。これは、太陽組成大気の1倍から10倍、10倍から100倍と金属量が多くなった場合とは異なり、100倍から1000倍に金属量が多くなった場合には、100倍までの太陽組成大気においては最も存在量の多い分子であった H_2 の存在量が一気に小さくなることに起因する。前駆物質にとって、紫外線を遮蔽する分子が増える効果と、 H_2 に吸収されなくなった分の光子が増える効果とが同程度であったため、100倍と1000倍の太陽組成大気の場合とでは、モノマー生成率はほぼ変わらない結果となった。

図4は、金属量が異なる場合の大気透過スペクトルモデルを示している。モノマー生成率は、金属量を多くすると基本的には小さくなることを述べたが、観測を行う際に重要となるスペクトル中の吸収特徴の大きさは、金属量に対して少し複雑な応答をする。まず、ヘイズがない場合を考えると、分子の吸収特徴の大きさは、大まかに述べて大気のスケールハイ

トに比例する。大気のスケールハイトは大気平均分子量に反比例するため、図4の細線に見られるように、金属量を上げる、つまり平均分子量が大きくなると、吸収特徴の大きさは小さくなる。次にヘイズがある場合を考える。前述したように、モノマー生成率、つまりヘイズの量は金属量を上げると少なくなるため、金属量を上げると、スケールハイトとヘイズの量は両方小さく(少なく)なる。この二つの効果の競合により、吸収特徴の大きさの金属量への依存性は単純ではないことがわかった。ヘイズが影響を及ぼしやすい短波長側では、吸収特徴の大きさは中程度の金属量である100倍の太陽組成の場合に最も大きく、一方、ヘイズの影響が少ない長波長側では、ヘイズなし大気の場合と同じように、金属量が少ない程、吸収特徴が大きくなることがわかった。

3.3 渦拡散強度

図5は、渦拡散強度が異なる場合の大気透過スペクトルモデルを示している。水色の線のように、渦拡散係数がある値よりも大きくなると、可視域のレイリー散乱のスロープの勾配が急になり、また赤外域

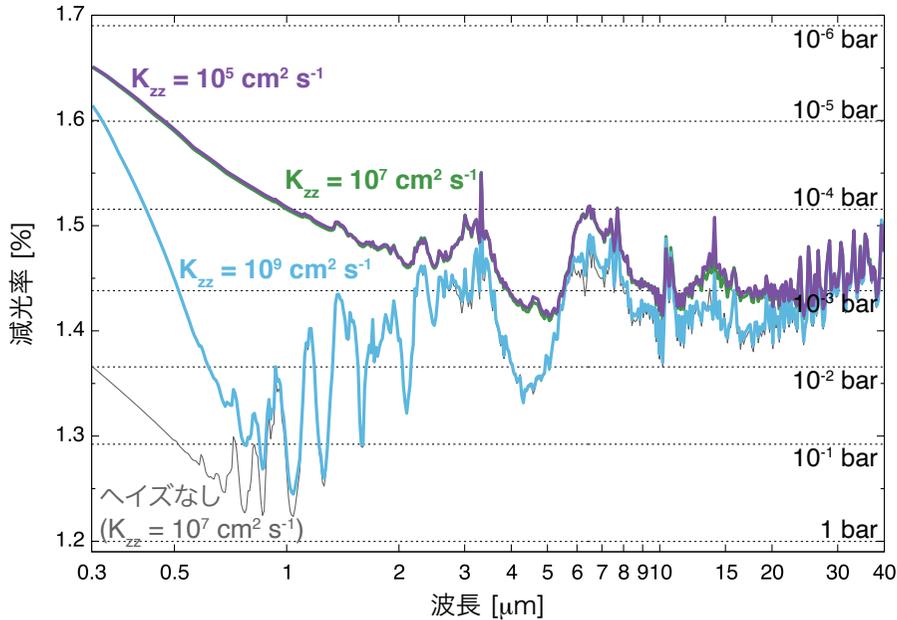


図5: GJ 1214bを想定した、ヘイズを持つ大気透過スペクトルの渦拡散強度に対する依存性. 図はKawashima & Ikoma (2019)[8]を一部改変.

の分子の吸収特徴が顕著になることがわかった. これは、渦拡散強度を大きくすると、あるところで、重力的な沈降によるヘイズ粒子の輸送よりも渦拡散による輸送の方が卓越するようになり、ヘイズ粒子が効率的に大気下層へと運ばれるようになるためである. 大野和正氏と筆者の論文[16]中で大野氏が解析的に示しているが、ヘイズ粒子の消散係数(密度)が、圧力が大きくなる(下層に行く)に従って小さくなればなる程、レイリー散乱のスロープの勾配は急になる. 渦拡散係数がある値よりも大きくなり、下層方向への輸送が効率的に行われるようになると、ヘイズ粒子の消散係数(密度)の勾配がより急になるためである. そして、大気中に存在するヘイズ粒子の量も減るため、赤外域の分子の吸収特徴も顕著になる. 一方、渦拡散係数がこの臨界となる値よりも小さい場合には、図中の緑色の線と紫色の線に示されている通り、そもそも渦拡散による輸送が効かないため、渦拡散強度が異なってもスペクトルはほぼ変わらない.

3.4 重力加速度

近年、しばしばスーパーパフとも呼ばれる、超低

密度、すなわち重力加速度が非常に小さい惑星がいくつか発見された. 大気のスケールハイトは重力加速度に反比例するため、大気中にヘイズがなければ、このような惑星のスペクトル中の吸収特徴の大きさは、非常に大きくなると期待される. 筆者らは、一番最初に発見されたスーパーパフであるKepler-51bを想定し、超低密度、すなわち重力加速度が極端に小さい場合に、ヘイズ粒子の分布とスペクトルがどのようなになるかを調べた. その結果、ヘイズ粒子の沈降速度は重力加速度に比例するため、Kepler-51bのような重力加速度が非常に小さい惑星では、ヘイズ粒子は上層で、合体成長によりかなり大きくなるまで落下せず存在出来ることがわかった. 図6は、Kepler-51bのヘイズ粒子の分布と、典型的な重力加速度を持ち、Kepler-51bとモノマー生成率や温度がほぼ同じHD 97658bのヘイズ粒子の分布を示す. HD 97658bの場合と比べると、極端に重力加速度の小さいKepler-51bの場合には、大気上層でヘイズ粒子が大きく成長していることがわかる. その結果、図7(d)に示すように、ハッブル宇宙望遠鏡で観測された[17]

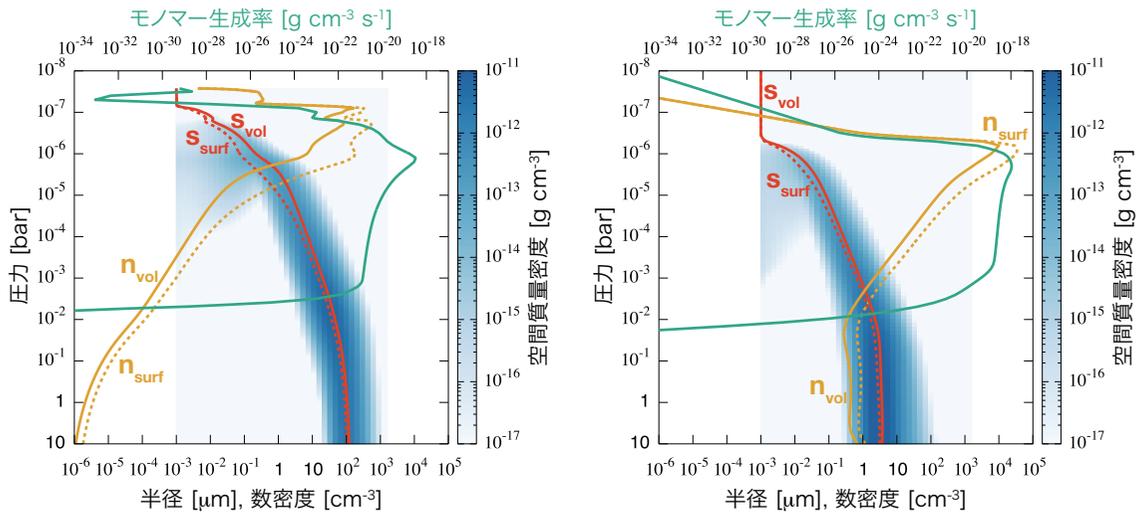


図6: 超低重力加速度(圧力 10^{-6} barで 42cm/s^2)の惑星Kepler-51b(左図)と、典型的な重力加速度(圧力 10^{-6} barで 1100cm/s^2)を持つ惑星HD 97658b(右図)を想定したヘイズ粒子の分布の計算結果. 各線の説明等については、図2を参照. 図はKawashima et al. (2019) [7]を一部改変.

ような、気体分子の吸収の特徴がほぼない、広い波長範囲で平坦なスペクトルとなることがわかった. このように、重力加速度が小さ過ぎると、ヘイズ粒子が落下しないため吸収特徴は小さくなってしまふ. しかし、逆に大ききても、大気スケールハイトは重力加速度に反比例するため小さくなってしまふ. そのため、中程度の重力加速度の際に、吸収特徴が一番大きくなると思われる.

3.5 その他

筆者らは、温度とC/O比の依存性についても調べた. まず温度については、温度が高くなるほどモノマーの生成率は小さく、そしてスペクトルの吸収特徴は大きくなることがわかった. これは温度が高くなると、炭素を含む主要な分子が CH_4 から CO へと変わるため、ヘイズの前駆物質の混合率が小さくなるためである. 筆者らが発見したこの温度依存性は、報告されている観測結果の傾向とも整合的である[22-24]. ただし、金属量など、他の惑星のパラメータがこのように見える相関を作り出している可能性もある.

一方C/O比については、C/O比を高くする程、モノマー生成率が大きく、そしてスペクトル中の分子の吸収特徴の大きさは小さくなることがわかった. これは単純に、C/O比を上げると、ヘイズ粒子の前駆物質の混合率が大きくなり、また同時に主な紫外線吸収物質である H_2O や CO などの酸素を含む分子の混合率が減るため、ヘイズ粒子の前駆物質がより紫外線を吸収出来るためである.

4. 議論

4.1 観測への示唆

今後10年の間には、James Webb宇宙望遠鏡(JWST)やARIELなどの宇宙望遠鏡の打ち上げが計画されており、系外惑星大気の解明が飛躍的に進展すると期待される. 観測時間が限られていることを考えると、大気の特徴付けを行いやすい、ヘイズに覆われている可能性の低いターゲットをまずは観測することが重要となる. 前節で述べた様々なパラメータに対するヘイズとスペクトルの依存性を考慮

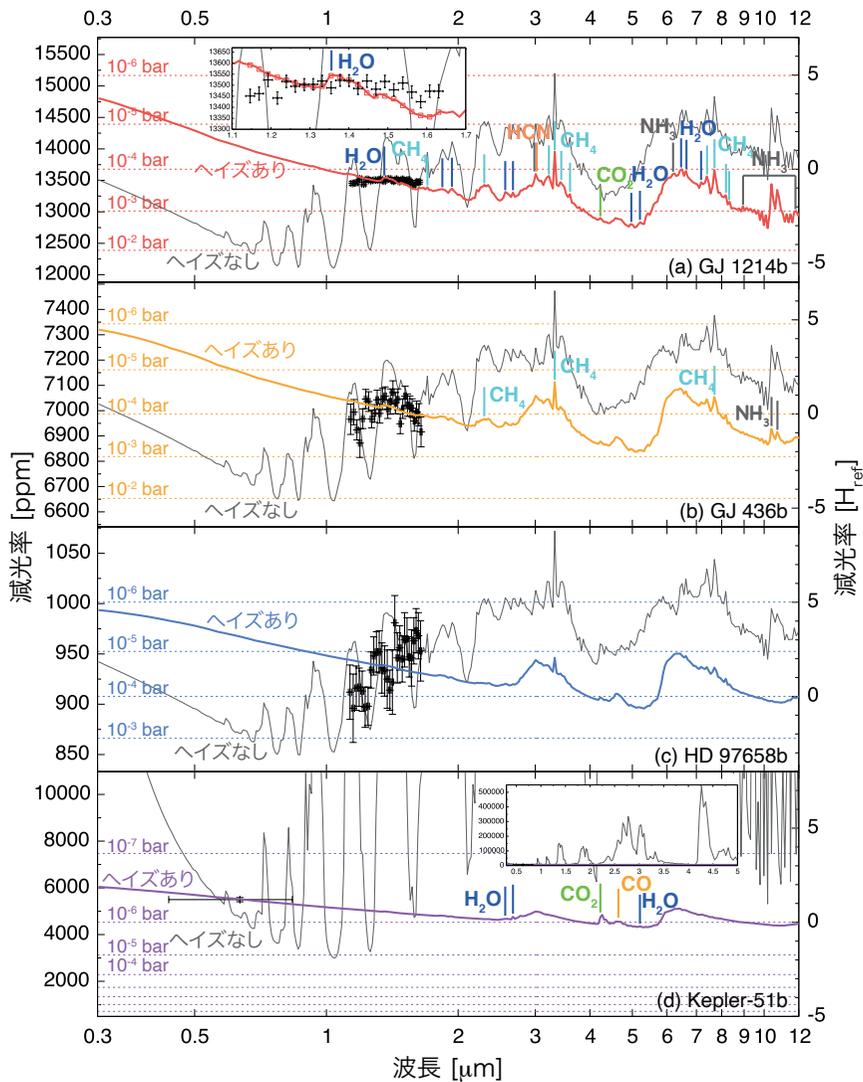


図7: (a)GJ 1214b, (b)GJ 436b, (c)HD 97658b, (d)Kepler-51bの透過スペクトルモデル。上から順に、仮定されているモノマー生成率が小さい順、つまり想定される紫外線強度が低い順に並べてある。右縦軸は、大気のスケーライト H_{ref} を単位として減光率を示している。また、JWSTで達成可能だと期待される25ppmの精度[18]を上回る分子の吸収特徴を、図中に示している。観測された透過スペクトル(a, b, c)と減光率(d)[3, 19-21]もプロットしている。図はKawashima et al. (2019)[7]を一部改変。

すると、低紫外線環境下、中程度の重力加速度、高温の惑星が、大気の特徴を調べるのに適しているといえる。

一方、系外惑星の大気中に普遍的に存在することが示唆されるヘイズを理解するための観測も非常に重要である。大気中の光化学反応を理解する鍵となる紫外線スペクトルが観測されている恒星まわりの惑星の観測、また軌道長半径の違いによる紫外線

強度の影響を調べられるような複数惑星系の観測が重要である。

図7は、大気にヘイズがある場合でも検出が可能な分子の吸収特徴を調べるために、大気観測に適した4つの惑星GJ 1214b, GJ 436b, HD 97658b, Kepler-51bについて、透過スペクトルを計算した結果である。大気組成は、太陽組成を仮定した。JWSTで達成可能だと期待される25ppmの精度

[18]を上回る分子の吸収特徴を、図中に示している。なお、図は上から順に、仮定されているモノマー生成率が小さい順、つまり想定される紫外線強度が低い順に並べている。紫外線強度が低く、減光率が大い、つまり惑星と主星の半径比が大きいGJ 1214bのような惑星³では、たとえ大気中にヘイズがある場合でも、ヘイズ層の上にある、様々な分子の吸収特徴がJWSTで検出可能であると期待される。特に、 $3.3\mu\text{m}$ の CH_4 の吸収特徴は非常に顕著である。

4.2 有機物ヘイズに関する不定性と実験からの示唆

本稿では系外惑星大気中の有機物ヘイズに関する筆者らの研究を紹介したが、有機物ヘイズに関しては、前駆物質とその前駆物質からの生成過程、即ちモノマー生成率や、光学特性など、まだ不確かな部分が非常に多い。モノマー生成率に関して、筆者らの最初の研究[6]では、初期地球のヘイズのモデリング[25]で行われているように、タイタンの大気中のモノマー生成率を基準値として用い、モデル化する惑星でのライマン α 強度でスケージングした。この仮定の方法は、実際にモノマー生成率が観測されているタイタンを基準として使っている利点がある一方、紫外線強度の一次でスケージングしてよいのか⁴、また現在の観測の主なターゲットである水素に富む大気とは異なる、窒素とメタンから成るタイタン大気を基準としてよいのか、などの不確実性が残る。その後の筆者らの研究では、本稿で紹介した通り、有機物ヘイズの前駆物質であると考えられている CH_4 と C_2H_2 、 HCN の光分解率の合計であると仮定した。有機物ヘイズの前駆物質がこれらの分子であるならば、この仮定を採用することで、モノマー生成率の上限値が導けるからである。実際には、このうちの何割かが最終的なモノマーとなるため、生成効

率のようなものを掛け合わせる必要があるが、その値はわかっていない。

最近の系外惑星大気中でのヘイズを想定した実験[13]によると、実験が行われた100、1000、10000倍の太陽組成大気の場合に関して、金属量が多い程、ヘイズの生成量が多い結果となっている。3.2節で筆者は、100倍までの太陽組成大気において、金属量が多い程、モノマー生成率は小さくなることを述べた。これは、前駆物質よりも上層に存在する紫外線遮蔽分子の影響であり、チャンバーを使った実験では取り扱われていない、1次元的な効果によるものである。金属量に依らず同じ量のプラズマが照射され、前駆物質から最終的なヘイズに至るまでの化学反応が実際に起こっている実験の結果は、筆者らが金属量に依らず100%だと単純化して仮定した、前駆物質の光分解からモノマーに至るまでの生成効率が、金属量が多い程高いことを示唆していると考えられる。筆者らの計算と実験の両方の結果がある100倍と1000倍の太陽組成大気の場合について比較すると、1000倍の太陽組成大気の方が、筆者らの計算によるモノマー生成率は僅かに大きく、また実験によるヘイズ生成量も多い結果となっている。そのため、100倍と1000倍の太陽組成大気に関しては、金属量が多い1000倍の太陽組成大気の方が、モノマー生成率は大きくなると考えられる。一方、筆者らが、他の紫外線遮蔽分子の影響により、金属量が多くなる程モノマー生成率が小さくなることを発見した100倍までの太陽組成大気に関しては、1、10倍の太陽組成大気についての実験が行われていないため、わからない。金属量が多い程ヘイズ生成量が多いという傾向が引き続き現れるのであれば、その効果の大きさによっては、筆者らが本稿で述べたものとは真逆の、金属量が多い程モノマー生成率は大きいという結果になる可能性もある。また、同じく最近の実験結果[12-15]によると、筆者らが仮定した炭化水素化合物だけでなく、 CO や CO_2 、 H_2O 、 CH_2NH 、 HCHO などの分子も前駆物質として寄与する可能性が指摘されており、さらにヘイズの生成パスは多数あることが示唆されている。系外惑星大気中のヘイズを理解するには、理論と観測だけでなく、実験も加えた三方向からのアプローチを組み合わせることが非常に重要である。

³実際のGJ 1214bは、図7に示されている通り、標準的なモデルよりも平坦なスペクトルが観測されている。そのため、分子の吸収特徴の大きさは、図中のモデルよりは小さい可能性が高い。

⁴実際、紫外線強度を変化させた場合、炭化水素化合物の光分解率は線形よりもわずかに弱い依存性を示していた。また先行研究[25]では、前駆物質から光化学反応により生成された中間物質が、さらに光化学反応によりヘイズとなる場合は紫外線強度の2乗に、熱化学反応によりヘイズとなる場合は紫外線強度の1乗に比例すると提案されている。

5. まとめ

近年の観測により、系外惑星大気中においてエアロゾルが普遍的に存在することがわかってきた。本稿では、系外惑星大気中のエアロゾル候補の1つである有機物ヘイズについて紹介した。

本稿で述べた系外惑星大気の様々なパラメータに対する依存性をまとめると、ヘイズを持つ大気のスベクトル中の吸収特徴の大きさは、紫外線強度が低く、渦拡散係数が大きく、温度が高く、C/O比が低い程、また重力加速度については中程度の際に、大きくなることがわかった。金属量については、ヘイズの影響を受けやすい短波長側では中程度の時に、ヘイズの影響を受けにくい長波長側では低い程、吸収特徴は大きくなることがわかった。

系外惑星大気に普遍的に存在することが示唆される有機物ヘイズには、モノマー生成率など、まだたくさんの不定性がある。系外惑星大気中のヘイズを想定した実験により、ヘイズの前駆物質や前駆物質からの生成パス、光学特性を解明すること、大気中の光化学反応を理解する鍵となる紫外線スペクトルが観測されている恒星まわりの惑星や、軌道長半径の違いによる紫外線強度の影響を調べられるような複数惑星系を観測し、ヘイズ生成に対する紫外線強度の影響等を調べるのが非常に重要である。理論と観測、実験を組み合わせたアプローチにより有機物ヘイズの理解が進み、数多く存在することがわかったエアロゾルに覆われた系外惑星の大気についても、その特徴付けが進むことを期待する。

謝辞

本稿は、大学院で修士・博士課程に渡りご指導頂いた生駒大洋先生と、Renyu Hu氏との共同研究の結果をまとめたものです。生駒大洋先生とRenyu Hu氏に、この場を借りて感謝致します。また、紹介した研究を行うにあたり、成田憲保氏、福井暁彦氏からは、共同研究等を通じて、観測面に関する大変有益な助言を頂きましたこと、お礼申し上げます。さらに、本文中で共同研究の内容を少し紹介させて頂きました大野和正氏にも、この場を借りて感謝致します。また重ねて成田憲保氏に、本稿の執筆機

会を頂きましたことを感謝致します。最後に、注意深く原稿を読んで下さり大変有益なご指摘とコメントを頂いた査読者に、お礼申し上げます。本稿の図は、AASから転載許可を頂き、Kawashima et al. (2019)およびKawashima & Ikoma (2019)の図を改変し掲載させて頂いたものです。

参考文献

- [1] Mayor, M. and Queloz, D., 1995, *Nature* 378, 355.
- [2] 福井 暁彦, 成田 憲保, 2014, 日本惑星科学会誌遊星人 23, 38.
- [3] Kreidberg, L. et al., 2014, *Nature* 505, 69.
- [4] Sing, D. K. et al., 2016, *Nature* 529, 59.
- [5] Zahnle, K. et al., 2016, *ApJ* 824, 137.
- [6] Kawashima, Y. and Ikoma, M., 2018, *ApJ* 853, 7.
- [7] Kawashima, Y. et al., 2019, *ApJL* 876, L5.
- [8] Kawashima, Y. and Ikoma, M., 2019, *ApJ* 877, 109.
- [9] Howe, A. R. and Burrows, A. S., 2012, *ApJ* 756, 176.
- [10] Ehrenreich, D. et al., 2014, *A&A* 570, A89.
- [11] Morley, C. V. et al., 2013, *ApJ* 775, 33.
- [12] He, C. et al., 2018, *ApJL* 856, L3.
- [13] Hörst, S. M. et al., 2018, *Nature Astronomy* 2, 303.
- [14] He, C. et al., 2018, *AJ* 156, 38.
- [15] He, C. et al., 2019, *ACS Earth and Space Chemistry* 3, 39.
- [16] Ohno, K. and Kawashima, Y., *ApJL*, in press.
- [17] Libby-Roberts, J. E. et al., 2020, *AJ* 159, 57.
- [18] Beichman, C. et al., 2014, *PASP* 126, 1134.
- [19] Knutson, H. A. et al., 2014, *Nature* 505, 66.
- [20] Knutson, H. A. et al., 2014, *ApJ* 794, 155.
- [21] Masuda, K., 2014, *ApJ* 783, 53.
- [22] Heng, K., 2016, *ApJL* 826, L16.
- [23] Stevenson, K. B., 2016, *ApJL* 817, L16.
- [24] Crossfield, I. J. M. and Kreidberg, L., 2017, *AJ* 154, 261.
- [25] Trainer, M. G. et al., 2006, *Proceedings of the National Academy of Science* 103, 18035.

一番星へ行こう! 日本の金星探査機の挑戦 その42 ～超回転～

堀之内 武¹

1. はじめに

金星探査機あかつきの最大の目標は金星大気のスーパーローテーション(超回転)の解明でした。あかつきの観測結果が出始めて以来、プロジェクトマネージャーの中村正人さんは、会う人ごとに(というのは大げさですが)「それでスーパーローテーションはわかったんですか」と聞かれ続けたようです。

超回転そのものは半世紀以上前より観測されていますが、その機構に観測から迫るのは難題です。過去の研究でまともに取り組めたと言えるものはありません。筆者自身があかつきのデータを使って超回転の研究を始めたのは2017年の秋でした。あかつきの観測が2015年の12月に始まってから既に2年近くたっていました。データが溜まるのを待っていた面もありますが、できるかどうかわからないので先延ばしにしていた面もあります。なお、中村さんにもだれにも、やってくれというプレッシャーはかけられてないことは断っておきます(居心地のいいチームです)。はじめしてみると、「これはいける」という感触がすぐ得られ、あかつきの科学ワーキングチーム会合で意気揚々と報告しました。しかし、そこからの足固めには時間がかかりました。やっとこの4月に論文を出版することができましたので[1]、この場で報告させていただきます。

大気の超回転とは、質量あたりでみた自転軸周り

の角運動量が、固体惑星のその最大値(即ち赤道地表面での値)よりも上回ることで、局所的には定義できます。それより小さな角運動量は、どこかの緯度の地表面付近からの移流で簡単に作れます。例えば地球の中緯度のジェット気流は、角運動量の観点から超回転ではないということになります。大域的には、全大気の角運動量を質量で割ったものと、赤道地表面の質量当たりの角運動量を比較します。前者のほうが大きければ、その大気はグローバルに超回転していると言えます。金星大気では前者と後者の比が10程度です。同様な比を局所的にみると、赤道の雲頂付近(高度約70 km)にあるピークでは50以上にもなります(自転の速さ1.8 m/sに対し、風速が100 m/s前後、即ち一周4-5日)。

2. 超回転を解明するって?

そもそも、観測から超回転を解明するってどういうことでしょう。超回転のメカニズムの問題は、どのように出来て(成因)、どのように維持されているかと分けることができます。成因問題は、超回転がない状態からどうできるかという問題と捉えられていますが、ない状態は観測されていませんし、ない状態が過去にあったかどうかともわからないので、仮想的な問題ともいえます。観測で直接扱いうる問題があるとすれば、それは維持問題です。

維持問題は二つにわけて考えられます。一つは、(A)4日循環と呼ばれる非常に強い超回転率を含む

1.北海道大学 地球環境科学研究院
horinout@ees.hokudai.ac.jp

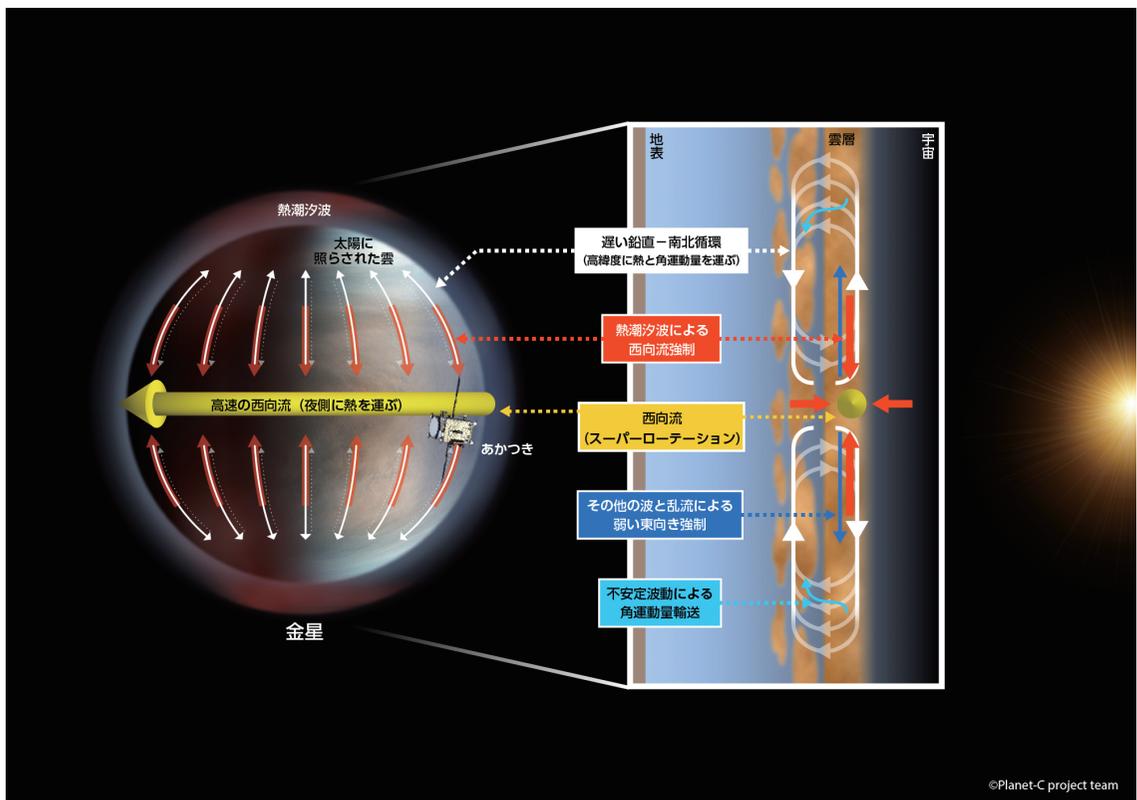


図1: あかつきの観測から提案されたスーパーローテーションの維持機構の模式図。文献1のプレスリリースより(クレジット:Planet-C project team)。金星の雲層の子午面循環(白い矢印)による移流は、角運動量を一様化するように働きます。熱潮汐波は、それを補うように、水平および鉛直に角運動量を運び(赤い矢印)、スーパーローテーションを加速するように働きます。熱潮汐波以外の波や乱流は、低緯度の雲頂付近では弱いながら潮汐とは逆に働き(青い矢印)、中高緯度では別の重要な役割を果たします(水色の矢印。不安定による擾乱が子午面循環を短絡するように角運動量を運びます)。これらの組み合わせにより、子午面循環によるゆっくりとした極向きの熱輸送と、スーパーローテーションによる速い夜側への熱輸送が両立するシステムが形成されて、太陽からの熱が効率的に分配されます。

風速構造がどのように成り立つか、もう一つは、(B)それが長期的に保てるか、です。金星の東西風は、地表付近で弱く、高度とともに増加します。つまり、上空で速くても、それに応じた摩擦が地面では働かない構造になっています。そこで、(A)観測される大気内部の角運動量の分布が如何にして保てるか、(B)惑星表面における大気と地面の間の釣り合いはどう実現されるかと、分けて問うことができるという次第です。関わる時間スケールは(A)では短いところで100日のオーダー、(B)では少なくとも万日のオーダーとなります。もちろん二つの問題は独立ではありませんが、鍵となる高度や時間スケールが異なるの

で、一旦は分解して考えるのが良いだろうというのが、筆者の考えです。観測だけでかなり取り組める可能性があるのは(A)であり、(B)については、観測は補助的な手段とならざるを得ないでしょう。従って、今回発表した論文[1]で取り組んだのは(A)です。その中の一部ですが、最も重要と考えられる点について、幸いにもあかつきの観測から強力な制約を得ることができました。上で述べた観測による制約可能性を考えると、あかつきの主目的はかなりの程度達成できたと言えるでしょう。ただし、観測には限りがあり、ベストを尽くしても不確定要素は残ることは申し添えておきます。

3. 雲を追跡する

金星の連続画像から雲の動きを調べて風速を推定することは、古くは1970年代のマリナー10号のフライバイ時の観測で実施されました[3]. その後、パイオニア・ビーナス・オービター(PVO), ビーナス・エクスプレス(VEx)の長期観測に対しても実施され、多数の論文が出版されています。PVOまでは主に紫外線で観測される雲頂の模様を追跡が行われました。VExではそれに加え、近赤外の窓波長($\sim 2\mu\text{m}$)を使って、雲の下の大気熱放射で照らされる雲の影絵の追跡も行われています。これらの研究や電波掩蔽観測より、超回転の風速分布や熱潮汐波の構造が調べられてきました。さらに近年、惑星規模のロスビー波やケルビン波と解釈される、従来は輝度で観測されてきた数日周期の波も、雲追跡風で捉えられています[4].

さて、超回転のメカニズムを調べるには、角運動量の輸送を定量する必要があります。それは、平均からのずれの掛け算の平均による二次の効果を定量することなので、精度要求が格段に上がります。2015年12月の軌道投入の8カ月ほど前に行った、雲追跡に関する内輪の研究集会において、筆者は、水平スケール1000 kmの構造を誤差 2—3 m/s 以内で捉えるという目標を提案しました。それまでの研究からすると、とんでもない数値です(それまでの研究では、誤差の見積りも自体不明確でしたが)。

金星の雲追跡では、目視によるマニュアル追跡と相互相関法などによる自動追跡が使われてきました。過去の研究では、マニュアル追跡のほうが精度がよいと考えられてきましたが、追跡に適した特徴的な模様を慎重に選択するとまばらにしかデータが得られません(すると二次効果の定量が難しくなり得ます)。あかつきプロジェクトでは、神山徹さんによって改良された(おそらくそれまでの金星研究史上最良の)自動追跡 [5]をもとにした追跡プログラムが、最初の金星到着(2010年12月)前後より整備されてきました。また、正確な雲追跡を行う前提として、画像が金星上に正確にマップされている必要がありますが、探査機本体から得られる姿勢情報はしばしば不十分です。あかつきも探査機の仕様上そうなので、こちらも神山さんの経験を踏まえて、画像に写る金

星の縁を使って補正するマッピングプログラムが、より早い時期から開発されています。両プログラムの実装を主に担ったのは、小郷原一智さんです。それを高木征弘さん、神山徹さん、樫村博基さん、佐藤尚毅さんなどが支えました(筆者の貢献は、データ形式に関する助言などに限られています)。

その傍ら、筆者は学生と共同で別の自動追跡法を開発しました [6]. それは、通常は2枚の画像を使う相互相関法を、多数の画像を同時に活用するように拡張したものです。通常的手法も含まれますから、「取り入れて損はない」です。さらに、相関曲面の先鋭度に基づく精度評価指標を開発しており、結果のスクリーニングに有効なのは明らかでした。よってそれらをあかつき用の雲追跡プログラムに組み込むことを提案しました。実装を担ってくれたのは、2015年4月に宇宙研の研究者として採用された村上真也さんです。村上さんが論文をもとに再実装して組み込む間、筆者のほうは相関曲面の複数のピークから候補を選択する「緩和ラベリング法」の改良などの手法開発とプログラム実装を行いました[7]. こうして、軌道投入後の2016年初頭に、現在あかつきで使われている雲追跡プログラムが出来上がりました。なお、村上さんは、着任以来、あかつきデータ生成パイプラインの大黒柱として、上記マッピングプログラムの改良やパイプライン運用など様々な役割を担っています。

さて、最近になって、異なる時刻の雲追跡の結果をラグランジュ的にトレースし比較することで、実際の不確定性を導く手法を確立しました[1のオンライン補遺]. その結果、紫外画像による雲頂の雲追跡では、上記の研究会で提案した当初目標が実際に達成できていることがわかりました。

4. 超回転の維持機構

本題に入ります。東西方向の運動方程式を緯度、気圧(=鉛直座標)を固定して東西に平均したものは、 $\frac{\partial M}{\partial t} = -\mathbf{v}^* \cdot \nabla M + \rho_0^{-1} \nabla \cdot \mathbf{F}$ と表せます(気象学で変形オイラー平均と呼ばれる方程式です)。ここで、 M は質量当たりの角運動量、 \mathbf{v}^* は子午面循環の速度(ストークスドリフトと呼ばれる効果を含む)、 ρ_0 は密度のようなもの(実際には気圧に比例)、 \mathbf{F} はエリアクセン-パーム(EP)フラックスと呼ばれる、渦角運

動量輸送を表す項です。定常状態では左辺がゼロなので、右辺の2項の釣り合いが成り立ちます。論文[1]ではまず、これまでの観測データ(突入プローブによる放射観測)をもとにシンプルな仮定を置いて v^* の分布を大雑把に見積もり、それに伴う南北の熱輸送が、宇宙からみた短・長波放射の差の緯度分布と概ね合うことを確認し、 $v^* \cdot \nabla M$ を見積もりました。これを、雲追跡から得られる様々な大気擾乱にともなう $\nabla \cdot \mathbf{F}$ と比較すれば、超回転がいかなるバランスのもとに成り立っているかがわかります。

ただし、当然ながら、観測からこの項の全大気中の分布が得られるわけではありません。そこでのを絞ります。それは、赤道域の雲頂付近にある M のピークが如何にして作られているかということです。短波吸収の約半分は雲層で起きますので、雲層上部には極向き、下部には赤道向きの子午面循環があります[1, 2]。それは M をラグランジュ保存的に移流するだけなので、中高緯度から戻った大気の M を増やして復活させる機構が必要になります。逆に赤道から離れる経路上で M は減少しなければなりません。それは必然的に起る順圧・傾圧不安定が担えますので、低緯度での M 再生に注目します。ギーラッシュによる理論[8]では、 $\nabla \cdot \mathbf{F}$ は渦粘性が担うと仮定されます。特に、水平の渦粘性は、自転軸周りの角速度を一様化するように働くため、移流で中高緯度に運ばれる M を低緯度に戻す働きがあるとされます(この働きによって、超回転をない状態から生成できます)。一方で、 $\nabla \cdot \mathbf{F}$ は大気の波の生成・散逸によっても生じます。そこで、渦粘性でなく、熱潮汐波による鉛直の角運動量輸送が重要であるという説もあります[9, 10]。はたして結果はどうだったでしょうか。

\mathbf{F} の水平成分は主に東西風と南北風の掛け算(東西方向の運動量の南北フラックス)からなります(もう一つ項がありますが、着目している領域では小さいと考えられます)。これを、熱潮汐波とその他の波または乱流にわけて見積もりました。すると前者は赤道向きに、後者はそれより弱く極向きに角運動量を輸送しているという結果になりました。 \mathbf{F} の鉛直成分においては、低緯度においては東西風と鉛直風の掛け算の項が卓越すると考えられますが、観測から鉛直風は直接見積もれません。そこで熱潮汐波については、観測された振幅と波長から理論式に基づい

て見積もりました。その結果、水平成分の収束と同程度の加速効果が見込まれるという結論になりました。一方、他の波や乱流については、見積もりは得られません。以上は図1のようにまとめられます。狭義のギーラッシュメカニズムにおける水平渦粘性の効果は、低緯度では角速度一様化とはむしろ逆に働いています。また、潮汐による運動量輸送は、期待されていた鉛直方向だけでなく、水平にも働いている角運動量のピークを再生する働きを担っていることが特徴的です。ただし、潮汐による角運動量輸送の見積もりは、昼面での観測からは難しく、様々な角度から検討したとは言え、今後変わってくる可能性はあると考えられます。観測だけからできることには限りましたので、今後は数値シミュレーションなどの助けを借りて研究する必要があるでしょう。

5. 超回転の役割

最後に、超回転の役割について触れておきます。それは、昼面と夜面の間の熱輸送だと考えられます。超回転以外の運び方として、太陽直下点とその反対側とを結ぶ軸(自転軸とは直交)に対して対称な「夜昼間」対流も考えられます。しかし、そのような循環は子午面循環同様、上下動を必要とし、また水平には加速減速を必要とします。超回転のような円に沿った流れは鉛直運動を必要としないので、より速くなりやすいでしょう。ただし、東西流だけでは南北に熱が輸送できません。そこで、熱潮汐波など渦角運動量輸送を起こせる運動を介して、子午面循環と東西循環を両立させられれば、広く水平に熱を行きわたらせることができます。今回あきらかになったのは、そのような熱輸送システムのあり様の一つだと言えます。

引用文献

- [1] Horinouchi, T. et al., 2020, Science 368, 405.
- [2] Schubert, G. et al., 1980, J. Geophys. Res. 85, 8007.
- [3] Limaye, S. S., and Suomi, V. E., 1981, J. Atmos. Sci. 38, 1220.
- [4] Kouyama, T. et al., 2013, J. Geophys. Res. 118,

37.

- [5] Kouyama, T. et al., 2012, Planetary and Space Science 60, 207.
- [6] Ikegawa, S. and Horinouchi, T., 2016, Icarus 271, 98.
- [7] Horinouchi, T. et al., 2017, Meas. Sci. Technol. 28, 085301.
- [8] Gierasch, P. J., 1975, J. Atmos. Sci. 32, 1038.
- [9] Fels, S. B. and Lindzen, R. S., 1974, Geophysical Fluid Dynamics 6, 149.
- [10] Takagi, M. and Matsuda, Y., 2007, J. Geophys. Res. 112, D09112.

火の鳥「はやぶさ」未来編 その21 ～熱撮像で明らかにされた 始原的小惑星の超高空隙な特徴～

岡田 達明^{1,2,*}, 福原 哲哉³, 田中 智¹, 坂谷 尚哉³, 鳶生 有理¹, 荒井 武彦⁴,
 千秋 博紀⁵, 出村 裕英⁶, 神山 徹⁷, 関口 朋彦⁸, 「はやぶさ2」TIRチーム

(要旨) 小惑星探査機「はやぶさ2」に搭載された中間赤外カメラTIRによって、C型小惑星Ryuguに対して全球の高解像度サーモグラフィ(熱撮像)が史上初めて実施された。表層温度と日変化から導出される熱慣性から、Ryuguの表面を覆う岩塊や岩片の大部分が、典型的な炭素質コンドライト隕石と比較して非常に高空隙な物質で構成されていることが分かった。この高空隙な性質は、表面重力の小さい始原的小惑星に共通であると考えられる。太陽系初期の微惑星も同様に高空隙で低強度の物質で構成されていたと考えられ、惑星形成時の力学進化過程の考察に影響を与える可能性を提起する重要な発見である。

1. はじめに

われわれの住む地球は1Gの重力下にある世界であり、石と言えば稠密で硬いものという先入観があるが、微小重力下の世界では石がどのような物理的性質をもつのかよく分かっていない。例えば炭素質コンドライトが地球大気に突入する際には、大気中で崩壊して大部分が損失してしまい、強度の高い部分だけが地上まで到達して隕石として発見される。元の天体の平均的性質は少なくとも、発見された隕石よりも脆弱であることは確実である。

C型小惑星は小惑星帯の雪線外側で最も多く存在する種類の小惑星であり、水や有機物など揮発

性成分を含む炭素質コンドライト隕石の母天体と考えられるが[1,2]、その物理的性質はほとんど分かっていない。小惑星探査機「はやぶさ2」が小惑星162173 Ryuguを訪れるまでは [3,4]、NEAR-Shoemakerがフライバイ観測した253 Mathildeが唯一の直接観測されたC型小惑星であった [5]。その半径ほどの直径をもつ複数の巨大クレータが天体を崩壊させずに形成されていることから、Mathildeは全体として非常に高空隙であり、収縮することで衝撃波を減衰させられる構造であると推察される。RyuguがMathildeのように大部分がフカフカの「新雪」が堆積したような小惑星である可能性もあれば、小惑星25143 Itokawaのような岩塊がむき出しになったラブルパイル天体 [6]、すなわち母天体が衝突破壊によってばらばらになった後で再集積して形成された「瓦礫の寄せ集め」の可能性もある。探査機で直接観測できるのは表層だけであるが、ラブルパイル天体の場合、表面には前世代の内部構造を構成する物質が岩塊として陳列された状態にあり、実質的に母天体の内部構造の探査を行うことに相当する。

1.宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

2.東京大学

3.立教大学

4.足利大学

5.千葉工業大学

6.会津大学

7.産業技術総合研究所

8.北海道教育大学

okada@planeta.sci.isas.jaxa.jp



図1: 「はやぶさ2」搭載の中間赤外カメラのセンサ部(TIR-S). (©JAXA)

「はやぶさ2」には小惑星Ryuguの現在の表層、そして母天体の内部構造についての物理的特徴を調べることを目的に中間赤外カメラ(TIR)を搭載した(図1) [7]. この装置は身体の健康チェックや非破壊検査に使用されるサーモグラフィと同じ原理のものであり、金星探査機「あかつき」搭載の中間赤外カメラLIRと同型である [8]. 本報告ではTIRによるRyuguの全球熱撮像を実施した初期成果について報告する. なお、本報告はNature誌(Online版2020年3月16日、冊子版2020年3月26日付)に掲載された論文 [9] を基に説明を補足して分かりやすく記載したものである.

2. 到着前の小惑星Ryugu

「はやぶさ2」の探査対象である小惑星Ryuguは、地上観測によってある程度の特徴が事前に判明しており[10]、スペクトル型はC型、直径は約0.85 km、自転周期は約7.63時間、反射率は約0.05、熱慣性は150~300 $\text{J K}^{-1} \text{s}^{0.5} \text{m}^2$ (以下、tiu) 程度の地球近傍小惑星である. 自転に伴う反射強度の変化が小さいことから、球形に近い形状とされていた. 「はやぶさ2」の第一の目的がC型小惑星からのサンプルリターンであるため、スペクトル型がC型で、エネルギー的に往還運用が可能な地球近傍小惑星であり、かつ着陸によるサンプルの回収が可能なように比較的自転周期が遅いことが条件であり、計画段階では唯一の探査対象であった [11].

熱慣性はバルク密度 ρ 、熱伝導率 k 、定圧比熱 c_p の

積の平方根 $\sqrt{\rho k c_p}$ で表される物理量であり、表層の物理状態、特に粒径、空隙率、ラフネスなどの特徴の指標となる. 熱慣性が小さいほど昼夜の温度差がより大きくなり、熱慣性が大きいほど昼夜の温度差がより小さく、また最高温度の到達時刻が遅延する傾向がある(図2). 自転する小惑星について朝から夕方まで(夜の領域も含めて)の温度日変化が得られれば、各地点の熱慣性が導出できる.

小惑星の直径と熱慣性の関係が過去の研究で整理されており [12], 一般に天体サイズが大きいほど熱慣性が小さい傾向があることが知られる. これは天体衝突に伴うクレータ形成時のイジェクタが、天体重力の大小によって表層に堆積しやすいかどうかの指標と考えられていた. つまり、より大きな天体ほど細粒のレゴリスが多く堆積するため空隙が多く、熱慣性が小さい. 一方で小さい天体ほどレゴリスの堆積が少ないため表面の空隙が少なく、熱慣性が大きい. 直径1 km程度の天体の熱慣性が、典型的な隕石の熱慣性よりも小さい理由はよく分かっていなかったが、微隕石の衝突や熱応力によって生じる破砕物がレゴリスとして堆積している可能性が挙げられていた.

Ryuguの場合、熱慣性150~300 tiuを説明する表層状態として、粒径数~10 mm程度の砂礫質のレ

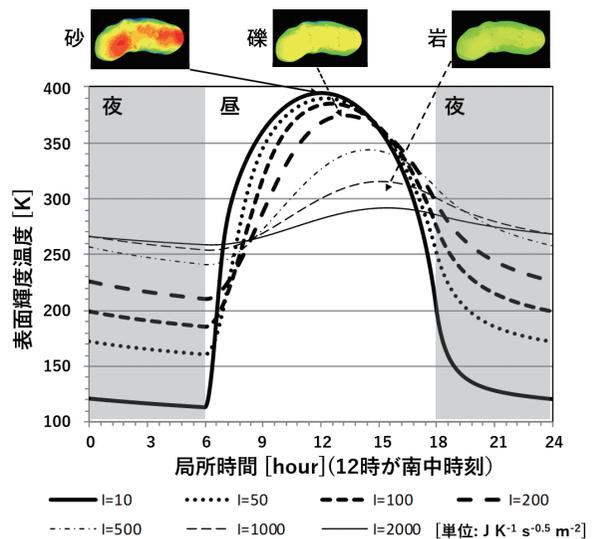


図2: 太陽距離1 au, 自転周期7.63 hrのとき、凹凸の無い熱慣性Iの表層での温度日変化.

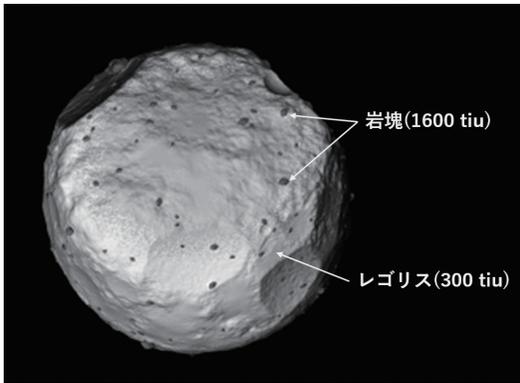


図3: 模擬小惑星Ryugoidの熱撮像の様子。岩塊(Cold Spot)とレゴリスの熱慣性が1600及び300 tiu [9]. (原画像 [9]から改編)

ゴリスに、稠密な岩石からなる岩塊が点在するような状態が想定された [10]. 「はやぶさ2」の到着前に検討されていた模擬小惑星(Ryugoidと称する)では、大部分の表面がレゴリス(熱慣性300 tiu)で、そこに稠密な岩石で構成された岩塊(1600 tiu)が点在すると仮定された [9]. そのため、「はやぶさ2」が到着直後に実施するような、小さい太陽角でRyugoidの昼側を観測すると、高熱慣性の岩塊が低熱慣性の周辺土壌に比べて低温の斑点(Cold Spot)に見えるような結果が予測されていた(図3) [9].

3. 到着!小惑星Ryugu

2014年12月3日に打ち上げられた小惑星探査機「はやぶさ2」は、1年後の地球スイングバイを経て、2018年6月27日に小惑星Ryuguから20kmの距離のホームポジションに到着した [3]. TIRによるRyuguのファーストライトは6月6日で、1画素以下の点光源として検知された [13]. 接近中も徐々に大きく明るくなるRyuguを継続的に観測し [14], ついに到着した直後の6月30日に、第1回目の1自転全球観測を実施した [9]. 太陽距離0.987au, 太陽位相角18.5°で、Ryuguの視直径は50画素分、1画素あたり約18mの空間分解能で、1自転(6°毎に1枚)の熱撮像を実施した. これが史上初めて実施された小惑星の全球高解像度熱撮像である.

実際に観測された小惑星Ryuguは、コマ型の形状で自転軸がほぼ公転軌道に垂直の逆行自転であった [4,15]. 南極付近に最大の岩塊Otohime(長

径160 m以上)があり、そのほか大小の岩塊が存在するが、小惑星Itokawaにみられたような平坦地は存在しないことが分かった [6,16].

TIRによる熱撮像観測では、表面温度が2次元的に分かる. 昼側表面の温度は300~370 Kで、形状モデルによる凹凸を考慮(面素内の微小凹凸によるみかけの輝度変化は考慮しない)した熱モデル計算 [17] によって導出される熱慣性の値は地上観測の結果と整合する値(約300 ± 100 tiu)であることが分かった [9]. 但し、到着前の予測と異なり、Otohimeなどの岩塊はCold Spotにはなっておらず、岩塊と周辺土壌では温度もその日変化の特徴も同様であった. この熱慣性の値は、通常の炭素質コンドライト隕石(> 600~1000 tiu [18]) に比べて低い. 即ちRyuguは稠密な岩塊ではなく、チョップしたら壊れるほどの高空隙な状態であれば説明できる. 一方、表層全体が約1cmサイズの砂粒で覆われている場合も同様の特徴となり得るため、より高解像度の観測による確認が必要であった.

4. 高解像度の熱撮像

2018年8月1日に「はやぶさ2」は高度5 kmまで低下して、ホームポジションよりも4倍の空間分解能でRyuguを観測する「中高度観測」を実施した [3,4]. 太陽距離1.057 au, 太陽位相角19.0°で、より高解像度で観測することによって科学的精度の向上を図るとともに、着陸地点選定のための情報収集が目的であった. TIRは中高度観測において、1画素あたり4.5 mの空間分解能で1自転分の熱撮像を実施した(図4) [9]. Otohimeなど最大級の岩塊だけでなく、直径10 m以上の多数の岩塊やその他の代表的地形が検知された. その結果、岩塊の温度はやはり周辺土壌とほぼ同じであった. 形状モデルの凹凸を考慮し、日陰や向き合う面同士の自己加熱の影響を取り入れた熱モデル計算 [17]の結果と比較すると、みかけの熱慣性は、ホームポジションと同様に300 ± 100 tiu程度でよく一致した(図5) [9]. 可視カメラONCの撮像で発見された、部分的に堆積物に覆われている岩塊について、堆積物に覆われた箇所と覆われていない箇所温度がほぼ同じであることが確認された [15]. それは岩塊と堆積物(おそらく周

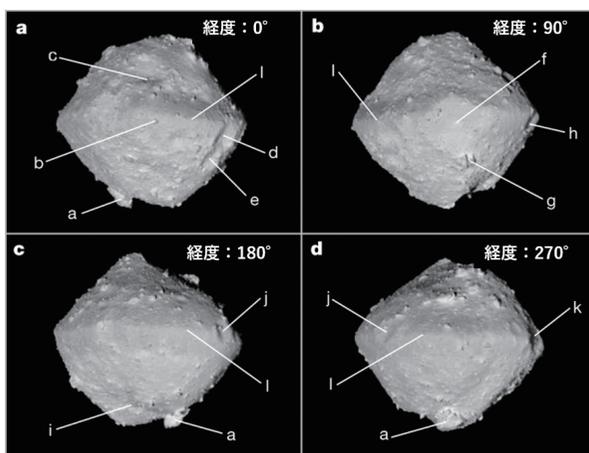


図4: 高度5 kmの中高度観測からの小惑星Ryuguの熱撮像(4方向): a) Otohime(オトヒメ岩塊), b) Catafo(カタフォ岩塊), c) Cendllion(サンドリヨクレータ), d) Momotaro(モモタロウクレータ), e) Kibidango(キビダンゴクレータ), f) Urashima(ウラシマクレータ), g) Ejima(エジマ岩塊), h) Kintaro(キンタロウクレータ), i) Tokoyo(トコヨ地溝帯), j) Brabo(ブラボークレータ), k) Kolobok(コロボッククレータ), l) Ryujin(リュウジン尾根=赤道リッジ)(原画像 [9]から改編).

辺土壤と同様のもの)の熱慣性がほぼ一致することを意味する。即ち、周辺土壤は1日(自転周期の7.63時間)に熱が浸み込む深さ(スキンドープス: $D \sim 35$ mm)よりも大きいサイズの高空隙な岩塊で覆われていることを示唆する。

Ryuguの温度日変化には大きな特徴がある。午

前から南中時、午後にかけての温度変化が、平らな表面を仮定した場合の単純熱モデルによる計算結果に比べて変化に乏しく平坦であり、かつ日没後にわずかに見える夜間領域で温度が急降下する(図6)。このような特徴は、極端に激しい凹凸のある表面に対してみられることがモデル計算では示されていたが [19]、実際の惑星探査で確認された事例は過去になかった。表層の熱慣性とラフネスを数値モデル化した計算例では、熱慣性 327 ± 127 tiu, ラフネス 0.4 ± 0.05 で近似的に表すことが可能である [20]。より詳細な計算結果と議論については後続の論文にゆだねる [21]。彗星では同様に温度日変化の乏しい例として、9P/Tempel第1彗星、103P/Heartley第2彗星のフライバイ時に観測されているが [22]、それらの表層状態は確認できていない。Ryuguでは表面凹凸を詳細に確認できる初めてのチャンスであり、より高解像度での観測が期待された。

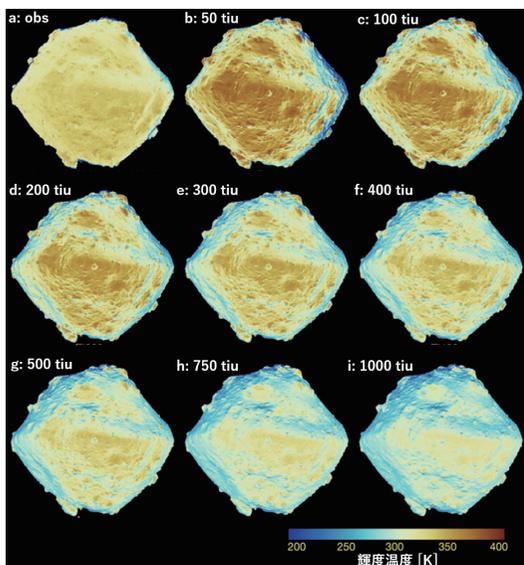


図5: 中高度観測でのTIRの熱画像(緯度0°)と数値計算(凹凸無し)の比較: a) 観測結果, b)-i) 熱慣性 50, 100, 200, 300, 400, 500, 750, 1000 tiuの場合の熱計算結果. (原画像[9]から改編)

5. 降下運用中の超高解像度観測

2018年9月以降、「はやぶさ2」は表面着陸探査用の小型ホッピングローバ(MINERVA-II)[23]や欧州協力による小型ランダ(MASCOT = Mobile Asteroid Surface SCOUT)[24]の分離運用や、サンプル回収

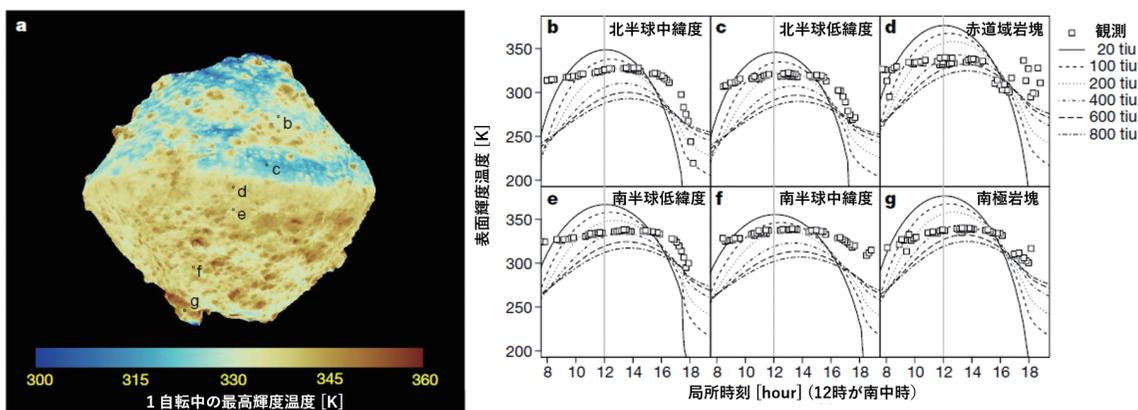


図6: 中高度観測時のTIR熱画像(緯度0°)と温度分布:a) 1自転中の最高温度, b)-g) 各点b-gでの温度日変化と同地点の熱慣性別計算結果(凹凸無し)との比較。(原画像[9]から改編)

のための2回のタッチダウン運用(TD1, TD2)とそのリハーサルのために、低高度への降下運用を開始した。TIRでは高度500m以下に到達後、ローバラング分離運用では高度60mまで、タッチダウンリハーサルでは高度20mまで熱撮像を実施した(ターゲットマーカ分離やタッチダウン時には高度10m以下まで実施)。前者の最高空間分解能は画素当たり約54mm、後者は約18mmである。一例として、太陽距離1.273 au、太陽位相角10.8°で2018年10月15日に実施されたTD1リハーサルA運用(TD1-R1-A)での熱画像を示す(図7)[9]。どの降下運用でも、表層の大部分が岩塊や長径100 mm以上の岩片で覆われていることが分かった。岩塊は土砂で覆われておらず、さざれ石のように岩石中の組織まで観察できるものが多く存在することが分かった。また、一部の岩塊はやや平坦な境界を持つものも含まれることがTIRでも確認された。

頻度は少ないものの、周囲よりも20 K以上低い、明らかに低温の岩塊が存在することが分かった(図7)[9]。到着前に存在を予測していたCold Spotに相当する。この岩塊の熱慣性を輝度温度から導出すると600~1000 tiu程度であり、典型的な炭素質コンドライト隕石の熱慣性[18]と同等であることが分かった。つまり、高空隙な岩塊の中に、普通の隕石のような岩塊がわずかに含まれている。これは同じ母天体内の深部でより高い圧密を受けた部分で形成されたかもしれない。あるいは衝突破壊をもたらした衝突天体の破片が残った外部起源の可能性も残される[25]。

TIRの結果は、MASCOT搭載カメラMasCAMによる表層撮像によって調査された結果と整合的である[26]。すなわち、大部分の岩塊の表面はカリフラワー状のデコボコで脆弱そうであり、また、ごく一部の岩塊の表面は比較的平面的であり、そしてレゴリス状の細粒土壌は見られない。また、MASCOT搭載熱放射計MARAによって、1か所のみであるがデコボコ表面の岩塊の熱慣性を1昼夜に渡って計測された結果が約282(247~375) tiuであり[27]、TIRの全球観測の結果と整合することが分かった。すなわちMASCOTが観測した岩塊はRyugu上の典型的な岩塊であり、Ryuguの表面は同様な状態が全球的に広がっているのだろう。

6. 低熱慣性の小惑星

C型小惑星Ryuguの熱慣性が約 300 ± 100 tiu程度であることが判明したが[9]、同様にNASAの小惑星探査機OSIRIS-RExによるB型小惑星101955 Bennuの観測でも同程度の低熱慣性が得られており[28]、低熱慣性は原始的小惑星で一般的な性質である可能性が高い。小惑星のサイズと熱慣性の関係において、大きな天体ほど低熱慣性である原因はレゴリスの堆積によると考えられるが、小型の小惑星が隕石よりも低熱慣性である原因は、以前に考えられていたレゴリスの堆積による影響ではなく、高空隙な岩塊が表層を覆っているためであると考えられる(図8)[9,21]。

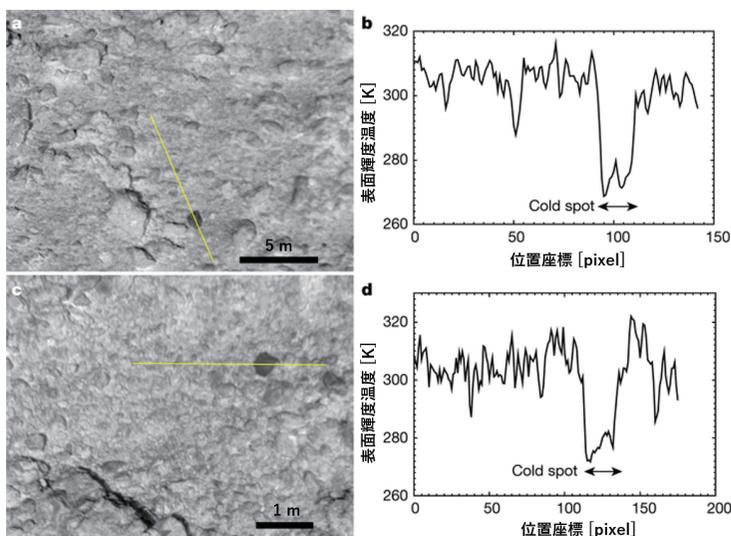


図7: 2018年10月15日のTD1リハーサル降下運用(TD1-R1-A)中の熱画像: a) 13:34:44 (UTC), 高度78.8mでの撮像, b) a)内のCold Spotを含む温度分布, c) 13:44:20 (UTC), 高度21.9mでの撮像, d) c)内のCold Spotを含む温度分布。(原画像[9]から改編)

C型小惑星で熱慣性約300 tiuの場合、熱伝導率は約 $0.1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 、空隙率は30~50%に相当する[9,27]。なお、Ryuguのバルク密度が $1190 \pm 20 \text{ kg m}^{-3}$ [4]であることを説明するには、炭素質コンドライト隕石(CI: $\sim 2420 \text{ kg m}^{-3}$ やCM: $\sim 2960 \text{ kg m}^{-3}$) [18]を仮定すると、さらに50~60%程度の空隙が必要になる。Ryuguを構成する岩塊や岩片の間の隙間(macro-porosity)は大きく見積もっても20%以下(実際はもっと小さい)が妥当であり、岩塊内部の空

隙率(micro-porosity)が50%程度はありとされる。

以上より、小惑星Ryuguの表面を覆う岩塊や岩片は、通常の隕石のバルク密度が半分になるほどの「超」高空隙で脆弱な構造であると考えられる。また、岩塊の周辺土壌は熱の浸み込み深さ(スキンプス)である約35 mmよりも大きなサイズの岩片が大部分を占めるため、熱物性的には岩塊と同様の振る舞いになると考えられる。岩塊や岩片で覆われる表層はTIRの観測波長帯(約 $10 \mu\text{m}$)に対して激しい表面凹凸のある状態であり、温度日変化が平坦な特徴を示すとされる。

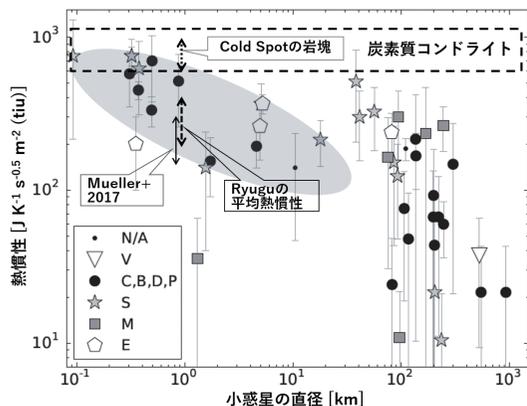


図8: 小惑星の直径と熱慣性の関係の図(原画像 [12]から改編)に到着前の予測[10]、小惑星Ryuguの平均熱慣性、Cold Spotの熱慣性と典型的な炭素質コンドライト[17]との比較。

7. 小惑星Ryuguの形成史

小惑星Ryuguの形成シナリオについて既に提案されているが[15]、TIRの観測によって以下のように制約されるだろう。1) 原始太陽系の星雲ガス中で形成された微粒子(太陽系前駆物質も含まれる)から付着によって超高空隙でフワフワの塵が形成され、徐々に成長した。2) 多少の圧密は受けるものの、高空隙な状態を保持したまま成長してゆき、微惑星が形成された [29]。3) ある程度(数10 km以上)のサイズになると内部で熱変成や水質変成がある程度は進行するとしても、Ryugu母天体ではそれらに伴う

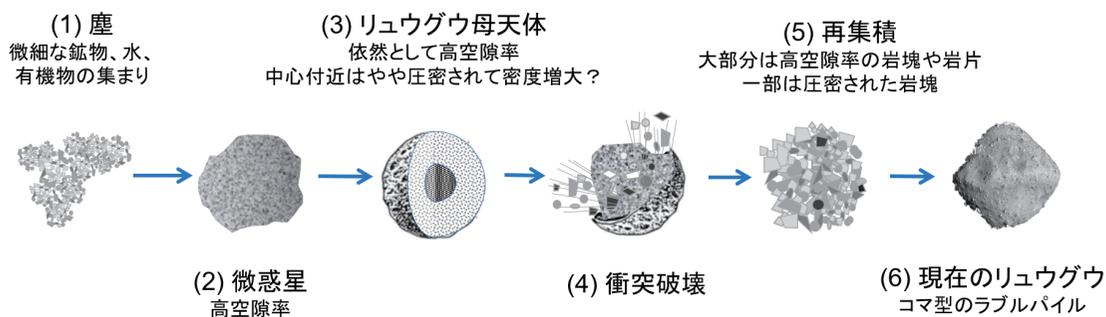


図9: 小惑星Ryuguの形成シナリオ. 大部分の岩塊が低熱慣性(高空隙率)であり, ごく一部が「普通の隕石」程度であることを説明するモデル. (原画像[9]から改編)

圧密過程は低度にしかなかった(圧密不完全で高空隙な状態のまま). 相対的に高温高压となる天体の深部では圧密がより進行し, 通常の隕石が形成された可能性はあるが, 母天体の体積の大部分では高空隙な状態が保持された. 4) 大規模な衝突破壊によって分裂し, バラバラになる. 5) 破片が再集合して, 緩く寄せ集まったラブルパイル天体が形成された. その際, 元の天体の内部構造の様々な深さにあった高空隙な物質が岩塊として表層に点在した. Cold Spotとなる「普通の隕石」的な岩塊は深部から来た岩塊の可能性はあるが, 破壊の原因となった衝突天体を起源とする可能性もある(岩塊にS型小惑星的な分光特性を示すものがあり, それらは衝突天体起源と考えられる[25]). 周辺土壌は細かい高空隙な衝突破片であるか, 岩塊がその後の隕石衝突や熱応力によって破碎し, 堆積したものである. 6) YORP効果 [30] などによる自転速度の変化等によって, 緩く寄せ集まったラブルパイルが変形・流動して現在のコマ型の形状になった [4].

このシナリオでは, 超高空隙でフワフワな塵から出発し, 地球の岩石のような稠密で硬い岩石になったことが一度もなく, 常に高空隙であり続けたという仮説で, 現在のRyuguのほぼ全球の岩塊が高空隙な状態に保持されている理由を説明している [9]. これは小惑星Ryugu(および小惑星Bennu)だけでなく, 太陽系史を通じて低重力な天体では一般的に起きる現象と捉えるのが妥当だろう. 太陽系内で現存する小惑星で低密度な天体は同様な過程で形成され, 高空隙な物質(micro-porosityが高い)で構成されていると考えられる [31]. おそらくC型小

惑星でも一般的な性質であり, 炭素質隕石が大気突入時に崩壊して固い部分のみ生き残るのはこの性質のためと考えられる. また, 高空隙率によって可視近赤外の反射率の低下とスペクトル形状の変化を生じるため, どの隕石のスペクトルともよく一致しない原因にもなるだろう.

この高空隙な特徴は, 太陽系初期の微惑星も同様に当てはまる. 高空隙に伴う衝撃減衰の効果により, 衝突時のクレータ形成や破壊の進行が低減し, その結果として天体成長のタイムスケールを変化させるなど, 惑星形成過程にも影響を与えるだろう [32]. 小惑星Ryuguは塵から稠密な固い天体に至る惑星形成過程の途中にある状態を具現するものかもしれない.

以上の議論は小惑星Ryuguの物質が炭素質隕石と同様の物質であることを前提としているが, ESAの彗星探査機Rosettaが探査した67P/Churumov-Gerasimenko彗星の塵の質量分析で判明したように [33], 有機物が半分以上を占める高炭素質物質によって低バルク密度と低熱慣性を実現している可能性は否定できない. これらの問題の解決には2020年12月に帰還予定のRyuguサンプルの分析が期待される [34].

8. まとめと今後に向けて

「はやぶさ2」搭載TIRによる, 惑星探査史上初の「熱撮像」によって, C型小惑星Ryuguを構成する物質が典型的な炭素質コンドライト隕石よりもずっと高空隙である特徴を捉えることに成功した. おそ

らくC型小惑星に一般的な性質であり、また重力の大きな原始惑星に成長する前の段階の微惑星にも共通する一般的な性質であったと考えられる。小惑星探査機「はやぶさ」で初めて人類が「ラブルパイル小惑星」を見たのと同様に、「はやぶさ2」では「高空隙な岩塊からなる小惑星」を確認した最初の例となった。この特徴は今後、惑星形成過程などに実例として応用されることになるかと期待される。

熱撮像による探査方法の有効性が実証されたことから、今後の探査計画においてスペクトル型の異なる様々な物質からなる小惑星や、直径が異なり表面重力の異なる小惑星に対して熱撮像を実施することは極めて有意義である。例えば「はやぶさ2」の帰還後に運用を延長し、別のスペクトル型や直径の小惑星を訪問することができれば、新たな知見が得られるだろう [35]。欧州の小惑星探査計画Heraは二重小惑星Didymosの探査を実施する予定であるが、Heraに熱撮像カメラの搭載が計画されており [36]、実現すれば史上初のS型小惑星の熱撮像が実現でき、太陽系科学の発展に大きく貢献できると期待される。

謝辞

小惑星探査機「はやぶさ2」の開発や運用を通じて本研究の実現に協働して頂いた全ての「はやぶさ2」プロジェクトの関係者、科学的議論に参加した「はやぶさ2」国際サイエンスチームのメンバーの多大なる協力に感謝する。本研究は日本学術振興会科学研究費(JP26287108, JP17H06459)、およびJSPS Core-to-Coreプログラム「惑星科学国際研究ネットワークの構築」の助成を受けている。

参考文献

[1] Tholen, D. J., 1989, in *Asteroids II*, 1139.
 [2] DeMeo, F. E. et al., 2015, in *Asteroids IV*, 13.
 [3] Tsuda, Y. et al., 2020, *Acta Astronaut.* 171, 42.
 [4] Watanabe, S. et al., 2019, *Science* 364, 268.
 [5] Veverka, J. et al., 1999, *Icarus* 140, 3.
 [6] Fujiwara, A. et al., 2006, *Science* 312, 1330.
 [7] Okada, T. et al., 2017, *Space Sci. Rev.* 208, 255.

[8] Fukuhara, T. et al., 2011, *Earth Planets Space* 63, 1009.
 [9] Okada, T. et al., 2020, *Nature* 579, 518.
 [10] e.g., Mueller, T. G. et al., 2017, *Astron. Astrophys.* 599, A103.
 [11] Yoshikawa, M. et al., 2014, *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan* 12, 29
 [12] Delbo, M. et al., 2015, in *Asteroids IV*, 107.
 [13] Okada, T. et al., 2018, *Planet. Space Sci.* 158, 46.
 [14] Okada, T., 2020, *Appl. Sci.* 10, 2158.
 [15] Sugita, S. et al., 2019, *Science* 364, 552.
 [16] Saito, J. et al., 2006, *Science* 312, 1341.
 [17] Takita, J. et al., 2017, *Space Sci. Rev.* 208, 287.
 [18] Flynn, G. J. et al., 2018, *Chemie der Erde* 78, 269.
 [19] Rozitis, B. and Green, S. F., 2011, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 415, 2042.
 [20] Shimaki, Y. et al., 2019, *Lunar Planet. Sci. Conf.* 50, 1724.
 [21] Shimaki, T. et al., 2020, *Icarus* 348, 113835.
 [22] Groussin, O. et al., 2013, *Icarus* 220, 580.
 [23] Yoshimitsu, T. et al., 2015, in 11th Low Cost Planetary Missions Conf. Abstract.
 [24] Ho, T.-M. et al., 2017, *Space Sci. Rev.*, 208, 339.
 [25] Tatsumi, E. et al., (in revision), *Nat. Astron.*
 [26] Jaumann, R. et al., 2019, *Science* 365, 817.
 [27] Grott, M. et al., 2019, *Nat. Astron.* 3, 971.
 [28] DellaGiustina, D. N. and Emery, J. et al., 2019, *Nat. Astron.* 3, 341.
 [29] Arakawa, S. et al., 2017, *Astron. Astrophys.* 608, L7.
 [30] Rubincam, D., 2000, *Icarus* 148, 2.
 [31] Britt, D. T. et al., 2002, in *Asteroid III*, 485.
 [32] Housen, K. R. and Holsapple, K. A., 2011, *Icarus*, 856.
 [33] Bardyn, A. et al., 2017, *Mon. Mot. R. Astron. Soc.* 469, S712.
 [34] Tachibana, S. et al., 2014., *Geochem. J.* 48, 571.
 [35] 三柘裕也ほか, 2020, 第20回宇宙科学シンポジウム, P1.39
 [36] Okada, T. et al., 2020, *Lunar Planet. Sci. Conf.* 51, 1355.

遊星百景その19 ～二次クレーター～

本田 親寿¹

遊星百景5回目以来の執筆となりますが、話はその前回から続きます。前回のコラムでは「皆さんご存じの二次クレーター」のように取り扱いましたが、二次クレーターの素性を説明していませんでした。二次クレーターは通常の天体衝突によるクレーター(区別して一次クレーターと呼ぶ)と比べると形がユニークです。形だけではなく、空間分布の様子もユニークです。その形と空間分布の様子から、その起源は天体衝突由来のクレーター形成時に放出された岩塊などによって二次的に形成されたクレーターとされています。

まずその形に注目します。一次クレーターと呼ばれる普通のクレーターは直径10km程度以下であれば一般にお椀型を示しますが、二次クレーターは違います。上方からみたリムの形状はやや複雑で、場合によっては多角形に見えることもあります。さらにリムから延びたヒゲ状地形を伴うこともあり、それが連なり杉綾模様を成すこともあります。

次はその空間分布の様子です。今述べた杉綾模様は鎖状に並んでいることが多く、その鎖状の杉綾模様のクレーター群から辿った先には杉綾模様を成すクレーターに比べてずっと大きなクレーターが存在します。この特徴から杉綾模様を成すクレーターはその先に存在する大きなクレーター形成時に放出された岩塊由来の二次クレーターだと考えられています[1]。月面だとコペルニクスクレーターやチコクレーターが有名で、かなり遠方まで杉綾模様のク

レーターが連なっています。この杉綾模様以外にも、複数のクレーターがクラスターを成して存在することがあります。このクラスタークレーターが二次クレーターだと仮定すると、どの一次クレーター由来であるのか判別が難しいです。しかし杉綾模様を成しているクレーター群と近い場所に多いことから(という私の勘です)、クラスタークレーターも杉綾模様を成しているクレーターと同じく二次クレーターだろうと思います。こうした形態の特徴からその起源が直接的に天体衝突ではない二次クレーターであると一般的に説明されますが、本当はどうなのでしょう?杉綾模様を成すクレーター群は9割方そうであると私は考えますが、クラスタークレーターについて私はよく分かりません。シューメイカー・レヴィ第9彗星のように分裂した天体の衝突でもできそうな気がします。「考える」とか「気がする」は科学的なアプローチではないので、この人は頭はそうしたことでモヤモヤしているのだなと見守って下さい。

天体表面に空間的にランダムに形成されるお椀型のクレーターと比べると、個々の形が歪で空間分布の様子も杉綾模様やクラスターを成しているようなクレーターを多くの天体で確認することができます。月面で代表的な画像を紹介します。私は学生と議論を始めるときによく利用する画像が、アポロ17号のパノラミック画像(AS17-3093)です[1]。しかし今回紹介したいのは「かぐや」のTC画像です。杉綾模様を成す鎖状のクレーターや、まとまったクラスターを成しているクレーター群がこの画像には同居しています。杉綾模様の440km先にはその起源となったコペルニクスクレーターがあります。TC画像

1. 公立大学法人会津大学コンピュータ理工学部
chonda@u-aizu.ac.jp



図1: かぐや/TC画像(TCO_MAPm04_N24E333N21E336SC.img). 画像右(東側)に [1] 論文中に登場する代表的な杉綾模様の二次クレーターがあり, その杉綾模様の北側先端付近(西寄り)にクラスタークレーターが存在します.

のプロダクトID(ファイル名)はTCO_MAPm04_N24E333N21E336SC(.img)です. この画像を用いて, クレーターの空間分布から二次クレーターを自動的に抽出する方法を学生と探ってきましたが, それに加えて二次クレーターの特徴的な形状を利用して画像から自動的に抽出する試みを思案しています.

参考文献

- [1] McEwen, A. S. and Bierhaus, E. B., 2006, Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 34, 535.

第12回月惑星探査データ解析実習会を終えて

出村 裕英¹, 嵩 由美子¹, 園家 俊¹, 松尾 祐飛¹, 平田 成¹,
 本田 親寿¹, 月惑星探査データ解析実習会世話人一同

(要旨) 第12回月惑星探査データ解析実習会の報告記事です。今回のテーマは『機械学習による領域分割』で、前回好評だった『機械学習による画像の自動分類』に続くものでした。新型コロナウイルス感染症対策として、ZoomとSlackを併用した初めての多地点オンライン実習会となったことが特筆されます。高講師から「月地質図概論と月惑星データへの機械学習の応用」、出村講師から「機械学習導入の考え方」、園家講師と松尾TAより「Deep Learningで画像識別」という題目で講義ならびに説明が行われました。受講生の内訳は7機関(宮城教育大、会津大、足利大、東京大、JAXA/ISAS、名古屋大、大阪大)16名、講師世話人を含む当日参加者数は22名で、一部の会津大生は講師と同じ講義室で参加しました。本実習会は、日本惑星科学会と神戸大CPSのご支援を頂きました。

第12回目となった月惑星探査データ解析実習会では、前回好評だった『機械学習による画像の自動分類』に続くものとして、『機械学習による領域分割』をテーマとして取り上げました。新型コロナウイルス感染症対策として、ZoomとSlackを併用した初めての多地点オンライン実習会となったことが特筆されます。

会津会場には講師とTAおよび世話人が6名と、会津大受講生が3名の合計9名がおり、大学や自宅等から接続したリモート参加者は13名をかぞえました。参加者総数22名は、盛況だった昨年の18名を上回りました(図1)。受講生の内訳は7機関16名(宮城教育大、会津大、足利大、東京大、JAXA/ISAS、名古屋大、大阪大)です。

座学の内容は、嵩講師から「月地質図概論と月惑星データへの機械学習の応用」(図2)、出村から

「機械学習導入の考え方」、園家講師と松尾TAより「Deep Learningで画像識別」(図3)という題目で初日に説明されました。

遠隔の方に対しても画面を共有することで遠隔でも実習指導がしやすかったのは利点でしたが(図4)、Zoomとそのチャット機能だけでは講師と受講生との質疑応答中に他の受講生対応することが困難でした。途中からSlackを導入して複数の質問スレッドに対応できるようになり、必要に応じて講師を口頭で呼んでZoom上その場で議論する形式に落ち着きました(図5)。走りながら試行錯誤して会期二日目までにやり方を確立できたのは、園家講師&松尾TAの息の合った貢献と、辛抱強くお付き合い頂いた受講生の皆さんの努力の賜物です。

本実習会は、日本惑星科学会と神戸大CPSのご支援を頂きました。

1.会津大学宇宙情報科学研究センター
 demura@u-aizu.ac.jp

開催日程:2020年3月8日13:20~3月11日12:30

開催場所:会津大学研究棟3階M11教室および



図1: リモートを含む当日参加者集合写真.

Zoom多地点接続

主催:月惑星探査育英会

共催:会津大学宇宙情報科学研究センター

後援:日本惑星科学会, 神戸大学大学院惑星科学研究センター(CPS)

実習会詳細および資料:

https://www.cps-jp.org/~tansaku/wiki/top/?school_mission-12

講師・TA: 嵩由美子, 出村裕英, 園家俊, 松尾祐飛 (会津大)

当日参加者: 22名 (講師・TA・世話人が6名, 受講生16名の内訳はPD1, 博士1, 修士7, 学部7)

成果発表した受講生とその内容 (発表順, 当時の所属)

- ・荒木亮太郎・川上結生・有田直哉(大阪大)『氷衛星の地形の探索』
- ・大谷育未・鈴木泰裕(会津大)『レーシングカーの

車種判別』

- ・梁晨(足利大)『機械学習によるリアルタイム映像の解析およびロボティクス機構へのフィードバックの考察』
- ・高野安見子(JAXA/ISAS)・金丸仁明(大阪大)『機械学習を用いたクレーターカウンティングから推察する火星表層の流水』
- ・池田あやめ(名古屋大)『Kaggleのデータセットを用いてsegmentation』(Kaggle Artificial Lunar Landscape Dataset)
- ・小倉暁乃丞(東京大)『Kaggleのデータセットで領域分割』
- ・三瓶美鈴(会津大)『Kaggle のデータセットを用いて, 画像分類』

参加者アンケート結果

●多地点ビデオ会議形式での感想・コメント

- ・画面共有の画像がきれいに出ていたので見易かつ



図2: 嵩講師と散開着席する会津会場の様子.

たです.

・Slackを併用することで効率よくできていたと感じます.

・あまりリモート会議の経験はなく慣れませんでした. 質問にもよくご対応いただいて助かりました. 本場にありがとうございました.

・不便だろうと予想していましたがSlackを利用したことも効率よく進めることができました.

・対面で行えるに越したことはないものの, 講師の皆さんのサポートで有意義な時間となりました. 共通する質問・複数人が困っている問題点などは, まとめて全体にレクチャーする時間をとったら良いかと思いました. オフ会だとその点は柔軟に対応しやすいと思うのですが, リモートであちこちから接続しているので, その都度講師の方に個別対応していただきました.

・形式的にはとても便利と思いますが, 実習の効率は少し下げたと感じます.

・質問をしている間Zoomを占有してしまうので少しやりづらさを感じました. また, これは私の問題ですが, ネット環境があまり良くなく, 音声途切れてしまい一文まるまる聞き取れなかったことが度々あったので新しいことを講義形式でやるには難しいと思いました.

・もともと実習の形なので特に困ることはありませんでしたが, 強いて言うなら質問事項が共有しづらいかと思いました. このやりづらいい中でたくさんフィードバックをくれた世話人やTAの方々, ありがとうございました. 誰かの質問中に質問しづらいのはビデオ会議でも実際に現地で参加していても同じだと感

じました. また, 質問事項が共有されやすいというメリットもありました.

・機械学習を学ぶという目的に関して, 実習そのものはほとんど差し支えなかったと思います. どなたかが一方的に話すような状況(講義)では, その場にいた方が集中して話が聞けるように感じました.

・Zoomがかなりツールとして優秀でした. 時々, ホストが落ちる事があったのでこれを解決する事が課題だと思われます. Slackの併用が有効でした. 受講者のレベルが一定以上でないとビデオ会議形式では難しい様に感じました.

●実習会事前資料へのコメント・要望

・とても役に立つと思いますが資料を全部一か所でまとめてから配布して欲しいです.

・詳細に書かれていてわかりやすかったです.

・事前に講義資料・データセット・関連リンクなどを共有していただいて, 大変助かりました.

・わかりやすかったです.

・プログラミング超初心者, かつ初めての機械学習を学ぶ私にとっては事前に環境を整えること, pythonのプログラムの内容を把握すること自体に時間がかかりました. 1. 個人PCで環境を整える場合の手法の詳細, 2. 機械学習でやれることとやることに対応したdata set内容の解説, 3. 実際に走らせるpythonのプログラムの中身のたまかな説明や見方など, 超初心者向けの系統的な説明書きが事前資料の中に組み込まれていると非常にありがたいです.

・何を実習として取り組むのか事前によくわから

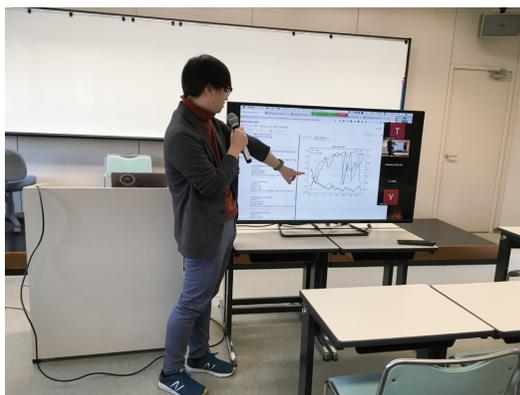


図3: 園家講師の説明とiPadカメラの動画中継.

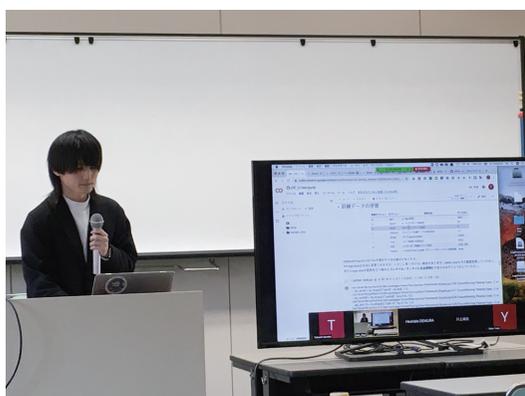


図4: 松尾TAによる画面共有での説明。

なかったので、関連するネット上の記事など載ってれば事前知識が増えたと思います。imageとannotationの二種類が必要だと知ってれば解析に使う画像を事前に用意し、より内容を広げられたのかなとも感じました。

- ・環境構築の導入の記述やスライド等ファイルがCPS, Google drive, GitHub等に分散していてとっさに探しづらかったので、別途どこかに「今回のデータ」フォルダを一か所にまとめてアップロードしていただければよいかと感じました。

- ・サンプルコードの説明がもう少しあればありがたいです。

●実習会全体の意見・感想

園家講師：昨年度から引き続き講師を務めさせていただきました。昨年度導入したDockerに加えて、今年はSlack, Zoom, Google Colaboratory, GitHub等多様なツールを導入し、より先進的な実習会になったと思います。今後もこの形態は有効でしょう。急遽リモート形式になったこともあり、実習会の事前資料が不十分だった点多かったと思いますが、参加した皆様の機械学習への足掛かりになれば幸いです。

松尾TA：資料作成やモデルの準備、実習を通して良い経験になりました。画面共有でのTAは難しかったのですが、リモートでもある程度は可能と感じました。

- ・いろんな教育機関の方々と交流ができて凄く勉強になります。そして皆様の成果を見てから自分が普段、容易に気づけない不足点も全面的に分かったの

がとても貴重なことだと思います。

- ・Zoomを使うことも実習内容も初めてのことばかりだったので、ついていくのに必死でした。研究に使えたら嬉しいなと思い参加しましたが本格的に取りかかれるのはまだ先になりそうです。たくさん質問してZoomを占有してしまいすみませんでした。ありがとうございました。

- ・「いま話題の～」程度の認識しかしていなかった機械学習を実際に体験することができて、非常に勉強になりました。限られた時間の中ではありましたが、教師データの作成から訓練・テストまでの流れをつかむことができました。実際に惑星科学の研究に活かすには、機械学習の使い所を見極める必要があるように思いました。機械学習アルゴリズムの仕組みについても今後勉強していきたいです。

- ・機械学習の足がかりとして楽しむことができました。

- ・本実習会で初めて機械学習を学ばせていただきました。プログラミング自体も超初心者の私でしたが最終日が終わる頃には、機械学習の作業工程のおおよそフレームが理解できるようになり、機械学習でどのようなことができるのかについて具体的に想像で



図5: SlackとZoomを併用した議論の様子。

きるようになりました。どういったサイエンスが機械学習を用いて可能なのかについて考えられるようになった点が本実習に参加させていただいたことによる、一番の収穫です。また、今回はコロナウイルスの影響により、リモートでの参加をさせていただきました。リモートでの参加は機械学習超初心者の私としては非常に不安でしたが、大阪大学の金丸さんがサポートしてくださり、しっかりと学ぶことができました。金丸さん、有難うございました。本実習会で学んだことを今後の研究に応用し、生かしていきたいと思います。最後に、講師の皆様、一緒に学んでくださった方々、3日間、貴重な講義とご指導をありがとうございました。

・全く触れたことのない画像による機械学習が何をしているのか、参考のプログラムを実際に動かしながら少しだけ知ることができました。自力で作り上げるのはまだまだ先になりそうですが、データセットを用意するのが大変なこと、大量の時間と容量とメモリが必要とされることを身をもって体験できました。リモートでの参加となりましたが、丁寧に解説していただけてとても勉強になりました。ありがとうございました。

・機械学習を実際に触ったのは初めてだったのでとても良い経験になりました

・機械学習と聞くと難しそうなイメージがありました。このようなイベントの場で集中して行えたことで、学習も非常に効率よく進めることができたと思います。ぜひ今後も、関連するスキルや知識も含めて自分の研究に活用していきたいです。今回はオンライン開催で皆様と顔合わせすることはかなわず残念でしたが、主催者方々の努力のおかげにより、質問しやすく活発な議論もできたと思います。私はプログラミング初心者ということもあり、講師・世話人の皆さんには初歩的な質問ばかりでしたが、真摯に対応していただきました。本当にありがとうございました。

・機械学習は初体験でしたが大まかな流れを理解することができてよかったです。探査データを用いれば今後の研究に生かせそうな内容であったため大変有意義な三日間でした。

2020年度日本惑星科学会 秋季講演会のお知らせ

2020年日本惑星科学会秋季講演会
実行委員長(会津LOC) 出村 裕英¹

2020年日本惑星科学会秋季講演会は、会津大学(福島県会津若松市)において9月23日から25日の会期で開催する予定でした。しかし、新型コロナウイルス蔓延の状況下で、例年通りの集会形式での実施は難しいと判断しています。現在、学会運営委員会や行事部会などと協議しつつ、オンライン形式での開催とすることを検討しています。また、JpGU-AGU Joint Meeting 2020がオンライン形式にて7月中旬に開催予定となったことを受けて、本秋季講演会の開催もそこからある程度期間をおいた時期に移動させることも検討しております。見通しがつき次第、メーリングリストおよび惑星科学会のウェブページにてお知らせします。いましばらくお待ちください。

1. 会津大学宇宙情報科学研究センター
demura@u-aizu.ac.jp

2020年度助成事業2件公募のご案内

公益財団法人 宇宙科学振興会¹

公益財団法人宇宙科学振興会は宇宙科学分野における学術振興を目指し、2020年度も引き続き下記の助成事業を行います。それぞれの応募要項の詳細は当財団のホームページ：<http://www.spss.or.jp>に掲載しています。それぞれの公募に対する応募申請に際してはホームページご参照の上、申請書をダウンロード・作成いただき必要な書類を添付の上、財団宛に電子メール(admin@spss.or.jp)で申請下さい。奮ってご応募いただくようご案内申し上げます。

(1)国際学会出席旅費の支援

●支援対象

宇宙理学(飛翔体を用いた観測、探査、実験に関連する理学研究)および宇宙工学(宇宙航空工学を含む)に関する独創的・先端的な研究活動を行っている若手研究者(当該年度4月2日で35歳以下)、またはシニアの研究者(当該年度4月2日で63歳以上かつ定年退職した者)で、国際研究集会で論文発表または主要な役割などが原則として確定している者。海外で開催される国際学会に限ります。

●助成金額・件数

一件あたり10～30万円程度、年間10件程度

●申し込み受付時期

応募締切り2020年8月31日：2020年10月から2021年3月の期間に開催初日が予定される国際学会の参加者対象

応募締切り2021年2月28日：2021年4月から2021年9月の期間に開催初日が予定される国際学会の参加者対象

(2)国際学会開催の支援

●支援対象

宇宙科学研究を推進している国内の学術団体(研究所、大学等)で、宇宙理学(飛翔体を用いた観測、探査、実験に関連する理学研究)及び宇宙工学(宇宙航空工学を含む)に関する国際学会、国際研究集会の国内開催を主催しようとする団体。

●助成金額・件数

一件あたり20～50万円程度、年間4件程度

●申し込み受付時期

応募締切り2020年8月31日：2020年10月から2021年3月の期間に開催初日が予定される国際学会対象
 応募締切り2021年2月28日：2021年4月から2021年9月の期間に開催初日が予定される国際学会対象

●照会先

公益財団法人宇宙科学振興会事務局
<http://www.spss.or.jp>
 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台3-1-1
 Email: admin@spss.or.jp
 Tel: 042-751-1126

1.公益財団法人宇宙科学振興会 事務局
admin@spss.or.jp

学位論文タイトル紹介

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

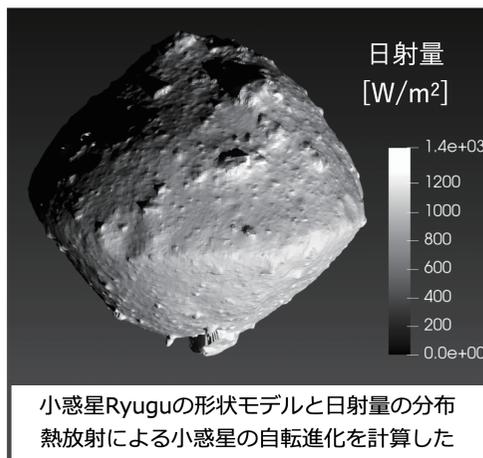
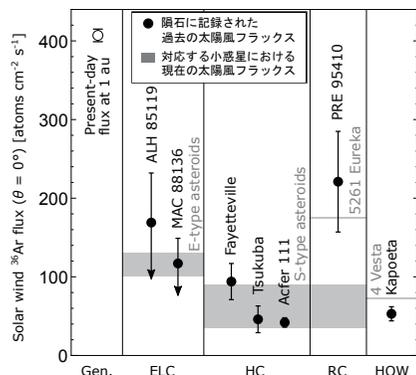
博士論文

- (1) 深井 稜汰(ふかい りょうた)
- (2) Nucleosynthetic Sr and Nd isotope heterogeneities in the early Solar System
- (3) -
- (4) 東京工業大学 理学院 地球惑星科学系
- (5) 2019年3月
- (6) 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 地球外物質研究グループ

- (1) 小長谷 智哉(おばせ ともや)
- (2) Noble gas studies in meteorites: Constraints on the origin of trapped noble gases in primitive CR chondrites and past solar wind fluxes on solar gas rich meteorite parent bodies
- (3) 始原的CRコンドライトに含まれる捕獲成分希ガスの起源への制約、及び太陽風希ガスに富む隕石の母天体位置における過去の太陽風フラックス
- (4) 東北大学大学院理学研究科地学専攻
- (5) 2020年3月
- (6) 東京大学大学院 総合文化研究科 広域科学専攻

- (1) 荒川 創太(あらかわ そうた)
- (2) Thermal History of Small Bodies in the Early Solar System
- (3) 初期太陽系における小天体の熱進化
- (4) 東京工業大学 理学院 地球惑星科学系
- (5) 2020年3月
- (6) 国立天文台 科学研究所

- (1) 金丸 仁明(かなまる まさのり)
- (2) Dynamical Evolution of Small Solar System Bodies Inferred from Interior Density Distribution and YORP-induced Spin Alteration
- (3) 内部密度分布とYORP効果による自転状態の進化から明らかにする太陽系小天体の力学進化
- (4) 大阪大学大学院・理学研究科・宇宙地球科学専攻
- (5) 2020年3月
- (6) 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 太陽系科学研究系



JSPS Information

- ◇日本惑星科学会賛助会員名簿
- ◇日本惑星科学会主催・共催・協賛・後援の研究会情報

◇日本惑星科学会賛助会員名簿

2020年5月1日までに、賛助会員として本学会にご協力下さった団体は以下の通りです。社名等を掲載し、敬意と感謝の意を表します。(五十音順)

- ・Harris Geospatial 株式会社
- ・株式会社ナックイメージテクノロジー
- ・株式会社ノビテック

◇日本惑星科学会主催・共催・協賛・後援の研究会情報

(a) 場所, (b) 主催者, (c) ウェブページ/連絡先など。
転記ミス, 原稿作成後に変更等があるかもしれません。各自でご確認ください。

2020/07

7/12-16 JpGU-AGU Joint Meeting

- (a) オンライン開催
 - (b) JpGU
 - (c) http://www.jpгу.org/meeting_2020/
-

開催時期調整中

日本惑星科学会2020年秋季講演会

- (a) オンライン開催の方針
- (b) 日本惑星科学会
- (c) https://www.wakusei.jp/meetings/fall_meeting/2020/

編集後記

コロナウィルスの流行で世の中が一気に変わってしまいました。JPGUや秋の惑星科学会はオンライン開催の方向ですし、ほとんどの高等教育機関では前期はオンライン授業になったのではないのでしょうか。私の所属する高専でもゴールデンウィーク明けからオンライン授業が本格的に開始される予定で、その準備でバタバタしています。ちなみに島根県は田舎なこともあり、3月中も小中高校は通常通り、4月も入学式の挙行・授業開始と頑張っていました。「出雲大社をはじめとする神様たちのおかげ」と皆で感謝していたのですが、4月に3日ばかり授業を行ったところでとうとう県内感染者が発生してしまい、学校は休校となってしまいました。この編集後記はゴールデンウィーク中に書いていますが、例年なら観光客があふれる松江の表通りには人の姿はありません。家では小学生の子供たちが外にいけずに腐ってお

り…。いつも通りの日常を送れることの有り難さを感じる今日この頃です。

コロナウィルス流行で社会活動が制約されていますが、著者のみなさん、編集委員のみなさん、印刷所のみなさんなど多数の方々のご尽力により、6月号を予定通りに発行できる運びとなったことを嬉しく思います。ありがとうございます。なお、毎年6月号には「学位論文紹介ページ」が掲載されますが、これは惑星科学関連分野において博士号もしくは修士号を取得された会員の論文タイトルを紹介するものです。過去3年に遡って掲載できますので、もし今回の掲載を逃してしまったという方がおられましたら来年度の6月号に是非掲載下さい。

それでは皆さんからの原稿を心よりお待ちしております。今後ともよろしく願いいたします。(杉山)

編集委員

和田 浩二 [編集長]

杉山 耕一朗 [編集幹事]

上梶 真之, 岡崎 隆司, 小川 和律, 鎌田 俊一, 木村 勇気, 黒澤 耕介, 小久保 英一郎,
坂谷 尚哉, 関口 朋彦, 瀧川 晶, 田中 秀和, 谷川 享行, 長 勇一郎, 成田 憲保,
はしもと じょーじ, 濱野 景子, 本田 親寿, 三浦 均, 諸田 智克, 山本 聡, 渡部 潤一

2020年6月25日発行

日本惑星科学会誌 遊・星・人 第29巻 第2号

定 価 一部 1,925円(税込・送料込)

編集人 和田 浩二(日本惑星科学会編集専門委員会委員長)

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

発行所 〒105-0012 東京都港区芝大門2-1-16 芝大門MF ビルB1階

株式会社イーサイド登録センター内 日本惑星科学会

e-mail : staff@wakusei.jp

TEL : 03-6435-8789 / FAX : 03-6435-8790

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

本誌に掲載された寄稿等の著作権は日本惑星科学会が所有しています。

複写される方へ

本誌に掲載された著作物を個人的な使用の目的以外で複写したい方は、著作権者から複写等の行使の依託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル 学術著作権協会

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

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

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

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で鮮明な写真を送付すること。送付された写真は原則として返却しない。カラーページは、著者の費用負担により可能。ただし、著者が希望し、かつ編集委員会が認めたものについては、印刷費用を学会が負担する。カラー印刷の希望が無い場合、電子版のみにカラー画像が掲載され、冊子体には白黒で印刷される。

9. 脚注

脚注は“1”などの記号をつける。

10. 文献の引用

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

本文中での引用は [1], [2] の形で通し番号をつけ、論文の末尾に一括してリストを載せる。

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

参考文献

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

11. 投稿原稿送付先

遊星人編集長 和田 浩二
e-mail : chiefeditor@wakusei.jp

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



The Japanese Society for Planetary Sciences

