令和3年6月25日発行 年4回発行 第30巻2号 ISSN 0918-273X













 ●2020年度最優秀発表賞受賞論文
 ●連載:はやぶさ2,あかつき, 惑星ラボ,海外研究記
 ●学位論文タイトル紹介

The Japanese Society for Planetary Sciences

## 日本惑星科学会誌 「遊・星・人」 投稿規定

日本惑星科学会

#### 1. 投稿可能な記事

- ①学会誌に投稿できる記事内容は,
  - (a) 原著論文:惑星科学に関する研究のオリジ ナルな報告
  - (b)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ることができる.
- ③査読に付されない記事についても,編集専門委 員会が掲載の可否を決定し,必要があれば投稿 者に修正を求めることができる.
- ④掲載が決定すれば直ちにその旨投稿者に通知される。
- ⑤編集専門委員会の求める修正が完了した最終稿は、WORD、PDF、テキストファイル、いずれかのファイル形式にて、E-mailなどにより編集幹事宛に送付すること.(図表については、「学会誌原稿作成の手引」参照)
- ⑥査読に付された掲載記事については,査読を経た旨記事内に記載される(vol.24, no.3から適用).

#### 5. 校正

校正は投稿者の責任において行う,また,校正は原 則として誤植の訂正に限る.

#### 6.別刷り

論文の PDF ファイルを提供する.

#### 7. 著作権

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

#### 8. 倫理規定

学会誌に掲載される全ての記事は、「遊星人の記 事掲載にあたっての倫理規定」について原稿投稿 時に念書を提出し編集専門委員会に了承されなけ ればならない(念書は投稿原稿送り状に記載).

#### 9. 投稿料·出版費

原則として無料.

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

# 日本惑星科学会誌 遊·星·人

# 第30巻 第2号

# 目 次

巻頭言 津田 雄一	51
2020年度最優秀発表賞受賞論文 還元型原始地球大気の流体力学的散逸 吉田 辰哉, 倉本 圭	52
火の鳥「はやぶさ」未来編 その24 ~可視光で見たリュウグウ~ 巽 瑛理,杉田 精司,本田 理恵,諸田 智克,亀田 真吾,長 勇一郎,澤田 弘崇,他11名	64
一番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦 その46 ~LAC, 金星雷発光を確認か?~ 高橋 幸弘, 今井 正尭, 佐藤 光輝	• 72
惑星ラボからこんにちは! その3 ~神戸大学 実験惑星科学研究室~ 保井 みなみ	- 74
<b>遊星人の海外研究記 その6 ~ローマで変わった心と体~</b> 城野 信一	77
「天体の衝突物理の解明 (XVI)/第12回スペースガード研究会 ~プラネタリーディフェンスの現況~」参加報告 荒川 創太	80
第13回月惑星探査データ解析実習会を終えて 平田 成, 出村 裕英, 大竹 真紀子, 嵩 由芙子, 小川 佳子, 本田 親寿, 北里 宏平, 他1グループ…	· 86
2021年度日本惑星科学会秋季講演会のお知らせ 渡邊 誠一郎	· 90
<b>2021年度助成事業2件公募のご案内</b> 公益財団法人 宇宙科学振興会	92
学位論文タイトル紹介	· 93

Contents	
Preface Y. Tsuda	51
Hydrodynamic escape of a reduced proto-atmosphere on Earth T. Yoshida, K. Kuramoto	52
<ul> <li>Phoenix "Hayabusa": A tale of the future (24)</li> <li>- Ryugu in visible wavelengths –</li> <li>E. Tatsumi, S. Sugita, R. Honda, T. Morota, S. Kameda, Y. Cho, T. Sawada, and 11 authors</li> </ul>	64
Road to the first star: Venus orbiter from Japan (46) - LAC detected lightning flash in Venus? -	
Y. Takahashi, M. Imai, M. Sato	72
Hello from planetary labs! (3) - Experimental planetary science laboratory, Kobe University – M. Yasui	74
Letter from planetary people working abroad (6) - My mind and body have been changed in Rome - S. Sirono	77
Report on "16th workshop on collisional physics of planetary bodies/ 12th spaceguard workshop" S. Arakawa	80
<b>Report of 13th exercise for data analysis in lunar and planetary data explorations</b> N. Hirata, H. Demura, M. Ohtake, Y. Daket, Y. Ogawa, C. Honda, K. Kitazato, and 1 group	86
Announcement of 2021 JSPS fall meeting S. Watanabe	90
Announcement of public offering for 2021 grants Society for Promotion of Space Science	92
Recent theses in planetary sciences	93

## 巻頭言

目標を掲げてそれを完ぺきに実行する,というのは事業活動の基本である.それが成功したとき,その事業は成功事例として評価される.成功しても評価されないとしたら,それは事業計画 そのものがまずかった,となる.

しかし科学は、それが基礎科学になればなるほど、そうではあるまい. もちろん、大事業になる ほど高い期待値と、それを達成しうる計画性は重要だ. しかし本心では、人類の常識を打ち破っ てくれるような偶発的発見を期待している. 別にこの本心は、科学者の内に秘めたものとする必要 はない. 国も、国民も、子供たちでさえも、そういう科学の本質は知っているのだから. 「究極の最 先端技術による究極の基礎科学」と言えるはやぶさ2においても然りだ.

そのような事業において重要なのは、周到な計画性の中に、いかに偶発的発見を拾えるための 肥料を蒔いておくかであろう.種はどこに埋まっているかはわからないし、そもそも埋まっていな いかもしれない.しかし肥料がなければ芽吹くはずのものも芽吹かない.どこにどのような肥料を 蒔くか.そこにこそ科学者と技術者の力量が問われる.

はやぶさ2は、とても高い目標を掲げた事業であった.安定した惑星間往復航行、確実なサン プル採取など、はやぶさ初号機の残した宿題の克服が求められた.さらには、人工クレータ生成 などの新しい目標も加わった.技術的勝算の境界を狙う探査屋冥利に尽きる計画が立てられた.

そのはやぶさ2, リュウグウの険しい地形に翻弄されつつも, 第1回着陸, 人工クレータ生成な ど, 計画にあることを完ぺきにこなして, ようやく真の「科学的決断」ができる状況に持ち込めた. それが第2回着陸であった. チーム自身が「やめる」と言えばやめられる状況. 科学そのものに選 択権が委ねられた状況, ここで如何に科学的な決断ができるか. このミッションの真価はそこに あると私たちは考えていた. そして実際, 偶発的なチャンスを拾うためにずっとやってきた"肥料蒔 き"が奏功し, 人工クレータからたった20mの地点に(素晴らしく幸運にも!)着陸可能な地形を発 見できたし, 週末に発見し週明けには決断という即断即決が出来た.

大きい事業ほど、そういう即応性を備えたチーム作りは難しい. やるべきことをきちんとやると いうことに留まらないこと. 想像力の翼を思いきり伸ばして、やれるかもしれないことを組織的に 追究すること. これは口で言うほど簡単ではない. そこに必要なのは、科学をとことん嗜む文化と、 それを担う未来志向のコミュニティーだ.

はやぶさ2が見せた,苦しい中でも底抜けに陽気な探究文化は,実は日本の宇宙探査にとって の一番の収穫ではないかと思う.これを土台に,よい科学文化を育て,もっと深淵の宇宙探査に 乗り出したいものですね.

津田 雄一(宇宙航空研究開発機構·宇宙科学研究所)

52

# 2020年度最優秀発表賞受賞論文 還元型原始地球大気の流体力学的散逸

## 吉田 辰哉<sup>1,2</sup>, 倉本 圭<sup>1</sup>

2021年3月15日受領, 査読を経て2021年4月2日受理

(要旨)近年の宇宙化学的研究により、地球マントル物質の同位体組成は始原的隕石の中で最も還元的 なエンスタタイトコンドライトに酷似していることが示されている.このことは形成期の地球に、金属鉄の 還元作用によってH<sub>2</sub>やCH<sub>4</sub>に富む還元型原始大気が形成されたことを強く示唆する.これまで富水素原 始大気は流体力学的散逸によって速やかに失われたとみられてきたが、これは放射活性分子種による放 射冷却過程やXUV吸収に付随する光化学過程を著しく簡略化したモデル計算に基づいており、水素残 留期間については不確定性が大きい.そこで本研究では、これらの過程を陽に組み込んだ流体力学的 散逸モデルを原始地球大気に適用することで、大気組成に依存した大気散逸率を求め、その結果を適用 して、現表層揮発性元素の貯蔵量や同位体組成と整合的な原始大気の進化経路を推定した.CH<sub>4</sub>や赤 外活性光化学生成物(H<sub>3</sub><sup>+</sup>, CH, CH<sub>3</sub>等)の混合比が小さい場合でもそれらの放射冷却の影響は著しく、 CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>>0.01の場合,CH<sub>4</sub>はほとんど散逸せずH<sub>2</sub>のみが散逸する.散逸が抑制された結果、集積期に獲 得したH<sub>2</sub>の残留期間は>4億年にも達しうる.これは、地球上に生命が誕生したと推定される時期に重な り、初期地球において還元的大気種の温室効果によって温暖環境が保たれ、当時の大気が生命につなが る有機物の生成場として重要な役割を果たした可能性があることを示唆する.

## 1. はじめに

集積期の地球は原始太陽系星雲ガスの重力的捕 獲や微惑星の衝突脱ガスにより大気を獲得したと考 えられる. 従来,H<sub>2</sub>を主体とする星雲ガス成分は原始 地球から急速に散逸し,現在の大気はH<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>を主 体とする衝突脱ガス成分に由来すると想定されてき た[1]. しかし,地球物質と各種隕石の多種の元素に またがる同位体組成の比較から,地球材料物質の大 部分は還元的なエンスタタイトコンドライト様物質で あることが近年になって示されてきた[2]. この場合, 衝突脱ガス成分は金属鉄との化学反応によって還元 され,H<sub>2</sub>やCH<sub>4</sub>主体の還元型原始大気が形成された

北海道大学
 東北大学
 tatsuya@ep.sci.hokudai.ac.jp

#### ことが予想される[3, 4].

還元型大気は生命誕生において重要な役割を果 たした可能性がある.H<sub>2</sub>やCH<sub>4</sub>に富んだ還元的環境 では高分子有機化合物が効率的に生成されること が知られている[5].実際に、タイタン大気では炭化 水素,ニトリル、ヘイズ等の多様な有機物が光化学 的に生成されている[6].初期地球で還元型大気が 維持された場合,大気が生命誕生に繋がる主要な有 機物生成場として有効に機能したと考えられる.ま た,H<sub>2</sub>やCH<sub>4</sub>のような還元的大気種が,当時の暗い 太陽の下にある初期地球表層において,液体の水を 安定化させる温室効果気体として,重要な役割を果 たした可能性がある[7].

一方,現在の地球大気における星雲ガス成分の枯 渇が示すように,還元型原始大気は地球史の初期の 段階で奪われたはずである.特にH<sub>2</sub>に富む大気は, 流体力学的散逸によってその大部分が流出した可 能性がある. 流体力学的散逸とは, 熱された上層大 気が膨張し惑星重力を振り切って宇宙空間に流出す る現象で, 地球においては初期太陽の強力なX線お よび極端紫外線(以下XUV)放射[8]を加熱源に駆 動されていたと予想されている.

これまで星雲大気を想定した純粋な水素大気に おける流体力学的散逸による散逸率の推定が行わ れてきた[9,10].近年の研究[10]はG型星の観測か ら推定されるXUVフラックスの進化曲線を用いて 星雲大気の散逸率の推定を行い、一海洋質量中に 含まれる水素が数百万年から数千万年以内に散逸 すると主張している。

一方で,H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>主体の還元型原始地球大気を想定 したモデリング研究はこれまで行われていない.こ のような還元型原始大気は星雲大気と異なり赤外 活性分子を豊富に含み,それらの放射冷却が流体力 学的散逸に大きな影響を与える可能性がある.火星 を対象とした我々の先行研究[11]では,H<sub>2</sub>,CH<sub>4</sub>,CO とそれらの光化学生成物からなる原始火星大気に 対して,放射過程と光化学過程を考慮した流体力学 的散逸モデルを構築し,CH<sub>4</sub>やCOの放射冷却が大 気散逸を著しく抑制することを示した.火星よりも重 力が大きい地球では光分解が効率的に進み,H<sub>3</sub><sup>+</sup>や CHのような光化学生成物の放射冷却が効く可能性 がある.放射冷却により大気散逸が抑制されれば, 当然,水素残留期間は星雲大気に対する推定よりも 長期化することになる.

流体力学的散逸が激しく起こる場合,強い上昇流 に水素以外の大気成分も取り込まれて散逸し,質量 分別効果によってそれらの同位体組成が変化するは ずである[12].他方,現地球表層の炭素と窒素の同 位体組成は,地球に揮発性物質をもたらした材料物 質の生き残りと考えられる始原的隕石の同位体組成 とほぼ等しい[13].このことは地球表層の炭素と窒 素が流体力学的散逸の影響をほとんど受けていな いことを示唆している.放射冷却によって炭素種や 窒素種の流体力学的散逸が抑制されれば,地球と 始原的隕石の同位体組成の類似性について説明す ることが可能になる.

そこで,本研究では放射過程と光化学過程を陽に 組み込んだ多成分系における一次元流体力学的散 逸モデルを原始地球大気に適用し,大気組成の関数 として散逸率を求めた.また,得られた結果を適用 し,地球表層揮発性物質の現在の貯蔵量や同位体 組成と整合的な大気進化経路と還元的環境の持続 期間の推定を行った.

## 2. 流体力学的散逸モデル

数値モデルは火星向けに構築したモデル[11]を ベースに、原始地球大気に合わせて光化学過程と放 射過程を変更・拡張したものとなっている.以下に、 モデルの概要と原始地球大気計算のために施した 変更点について述べる.多成分球対称一次元系を 仮定し、下部境界組成はガス-マグマ-溶融金属鉄 間の化学平衡計算結果を参照しH<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>のみから なるとする、CH4の混合比はパラメータとする、化学 過程として, H<sub>2</sub>·CH<sub>4</sub>とそれらの光化学生成物(H, C, CH, CH<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>, H<sup>+</sup>, H<sup>+</sup><sub>2</sub>, H<sup>+</sup><sub>3</sub>, C<sup>+</sup>, CH<sup>+</sup>, CH<sup>+</sup><sub>2</sub>, CH<sup>+</sup><sub>3</sub>, CH<sup>+</sup>, CH<sup>+</sup>)の計16成分における97反応を考慮する. 各成分の質量保存則に化学反応による生成消滅を 組み込み、また運動方程式には成分間の運動量交 換を考慮する.また、エネルギー保存則には波長に 依存したXUVならびに赤外放射の放射伝達を考慮 する、XUVスペクトルと強度にはG型主系列星の観 測から推定された44.6億年前の太陽スペクトル[14] を与える. 波長積分したXUV強度は、現在の静穏 期の太陽の値の約100倍である.分子と原子による XUV吸収を考慮し、平行光線の放射伝達を解き球 殻平均することで、各成分の光分解率と併せて放射 加熱率を推定する[15]. また, CH4, CH, CH3, H3<sup>+</sup>に よる赤外輝線放射を考慮し、熱運動と流出運動に伴 うドップラー偏移を考慮した赤外放射伝達を解くこ とで放射冷却率を推定する.下部境界のH2数密度と 温度は、それぞれ均質圏界面の典型値10<sup>19</sup>m<sup>-3</sup>、当時 の太陽光度下での大気表皮温度200Kを与えた。

## 3. 計算結果

#### 3.1 大気構造とエネルギー収支

定常状態における速度,温度,数密度,加熱率・ 冷却率の分布の典型例を図1に示す.それぞれの解 において大気は動径距離の増加につれて,ほぼ速度 なしから超音速に加速されている(図1(a)).大気の エネルギー収支において重要なCH<sub>4</sub>とその光化学生 成物の分布に着目すると,CH<sub>4</sub>は下部境界の直上で急 速に分解され,それに伴いCHやCH<sub>3</sub>が生成されてい る(図1(c)).この傾向は下部境界におけるCH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>比が 図に示した例と異なる場合も同様である.CH<sub>4</sub>の分解 に寄与する主要な反応は以下の通りである(図1(f)).

 $CH_4 + hv \rightarrow CH_2 + H_2$  (1)

$$CH_4 + hv \rightarrow CH_2 + H + H$$
 (2)

 $CH_4 + H^+ \rightarrow CH_4^+ + H \quad (3)$ 

 $CH_4 + H^+ \rightarrow CH_3^+ + H_2 \quad (4)$ 

CH<sub>4</sub>は光分解のみでなくイオンとの化学反応によって も分解されている.これらの反応によるCH<sub>4</sub>の分解 は木星や土星の電離圏でも起きることが知られてい る[16].火星と比べて地球では重力が大きいために 鉛直移流が鈍化し,下層でCH<sub>4</sub>の分解が進んでいる. CH<sub>4</sub>を分解する主要なイオンはH<sup>+</sup>で,H<sup>+</sup>数密度増加 に伴いCH<sub>4</sub>数密度は低下している(図1(c)(d)).H<sup>+</sup>は 主にH<sub>2</sub>の光分解によって生成される.

 $H_2 + hv \rightarrow H^+ + H + e \quad (5)$ 

一方で, 高度が増し温度が増加するにつれて(図 1(b)), 以下のCH<sub>4</sub>の生成反応も効きCH<sub>4</sub>の分解が抑 制されている.

 $H_2 + CH_3 \rightarrow CH_4 + H \quad (6)$ 

図2は亜音速領域におけるエネルギー収支を表している.ここで、図中の加熱効率は以下のように定義 される.

$$\eta = \frac{\int_{r_0}^{r_s} (q_{\rm abs} - q_{\rm ch} - q_{\rm rad}) 4\pi r^2 dr}{\int_{r_0}^{r_s} q_{\rm abs} 4\pi r^2 dr}$$
(7)

ここで, r<sub>0</sub>, r<sub>s</sub>はそれぞれ下部境界, 遷音速点の動径 距離, q<sub>abs</sub>, q<sub>ch</sub>, q<sub>rad</sub>はそれぞれ放射吸収率, 化学反 応によるエネルギー消費率, 放射冷却率を表す. 加 熱効率は吸収されたXUVエネルギーに対する大気 の熱エネルギーに分配されたエネルギーの割合を表 す.CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>比に依らず, 化学反応によるエネルギー消 費とH<sub>3</sub><sup>+</sup>の放射冷却に, XUV吸収エネルギーの~75 %が食われている(図2). さらに,CH<sub>4</sub>の光分解によっ て生じたCHとCH<sub>3</sub>の放射冷却も大気のエネルギー 収支に大きな影響を与える. 下部境界近傍では低温 でも放射活性なCH<sub>3</sub>による放射冷却が効いている (図1(e), 図3). 高度が増し温度が上昇するにつれて CHの放射冷却も効くようになり(図1(e), 図3), CH<sub>4</sub>/ H<sub>2</sub>=0.007の時点で加熱効率は~5%となる(図2). これは僅かな放射冷却源が流出大気中に含まれた だけで大気散逸が著しく抑制されることを示してい る. なお, 輝線データの不足により今回考慮していな いCH<sub>2</sub>等の放射冷却を加味すると, 加熱効率はさら に低下する可能性がある.

#### 3.2 大気散逸率

図4は全球からの百万年あたりの散逸質量フラックスを表している. ここで,  $H_2$ とCH<sub>4</sub>の散逸分子数フラックス $F_i$ と散逸質量フラックス $F_{m,i}$ ( $i = H_2$ , CH<sub>4</sub>) は以下のように与えられる.

#### $F_{m,i} = m_i F_i = m_i 4\pi r_0^2 n_i(r_0) v_i(r_0) \quad (8)$

ここで、 $m_i$ ,  $n_i$ ,  $v_i$ はそれぞれ大気成分iの分子質量, 数密度,速度を表す.下部境界におけるCH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>比 が上昇するほど,放射冷却の影響により散逸質量フ ラックスは減少している.図4の破線はCH<sub>4</sub>がH<sub>2</sub>と 共に散逸するためのH<sub>2</sub>の散逸フラックスの下限値で ある臨界フラックスを表す.大気成分iに対する臨界 フラックス $F_{crit,i}$ はクロスオーバー質量 $m_{c,i}$ (主要大気 成分によって引き摺れることで散逸可能な副成分の分 子質量の上限値)を用いて以下のように導かれる[12].

$$m_{c,i} = m_{\rm H_2} + \frac{kT}{b_{\rm H_2,i}gX_{\rm H_2}} \frac{F_{\rm H_2}}{4\pi r_{0^2}} \qquad (9)$$

ここで、kはボルツマン定数、Tは温度、 $b_{H_2,i}$ は $H_2$ と 大気成分i間の衝突係数、gは重力加速度、 $X_{H_2}$ は $H_2$ の混合比を表す、 $b_{H_2,i}$ の値は[11]の式(5)から求めて いる、ここで、 $m_{c,i} = m_i$ とし $F_{H_2}$ について解くと、

$$F_{\text{crit},i} = \frac{4\pi r_0^2 b_{\text{H}_2,i} g X_{\text{H}_2}}{kT} (m_i - m_{\text{H}_2})$$
(10)

図4においてCH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>=0.005, 0.007のときの値を 用いて外挿すると, H<sub>2</sub>フラックスはCH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>=0.012 のときに臨界フラックスに達する. これはCH<sub>4</sub>/ H<sub>2</sub>>0.012のときにはCH<sub>4</sub>を残しH<sub>2</sub>のみが散逸する ようになることを意味している.



図1: 大気プロファイル. (a) 平均速度. 丸点は遷音速点を表し, 三角点は外圏底を表す. (b) 温度. (c) 中性成分の数密度. (d) イオンの数 密度. (e) 放射加熱率, 放射冷却率, 化学反応によるエネルギー消費率. (f) CH<sub>4</sub>を分解する反応の反応率. (c)-(f)は下部境界CH<sub>4</sub>/ H<sub>2</sub>=0.001の場合.



図2: 亜音速領域におけるエネルギー収支.「運動エネルギー」は運動エネルギーフラックスの正味発散,「エンタルピー」はエンタルピーフラック スの正味発散,「重力ポテンシャルエネルギー」は下部境界と遷音速点の重力ポテンシャルエネルギー差,「放射加熱」はXUV吸収による 加熱率,「化学反応エネルギー消費」は化学反応による正味のエネルギー消費率,「CH<sub>4</sub> 放射冷却」,「CH 放射冷却」,「CH<sub>3</sub> 放射冷却」, 「H<sub>3</sub> 放射冷却」はそれぞれCH<sub>4</sub>, CH, CH<sub>3</sub>, H<sub>3</sub>・による放射冷却率を表す.下部パネルにおける黒線は加熱効率を表す.



図3:1分子あたりの放射冷却率の温度依存性.



図4: H<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>の全球からの1 Myrあたりの大気散逸率. 右縦軸は現地球大気質量で規格化した値を表す. ここで, 1 bar = 5.3 × 10<sup>18</sup> kgで ある. 青線と赤線はそれぞれH<sub>2</sub>の散逸率, CH<sub>4</sub>の散逸率を表す. 破線はCH<sub>4</sub>がH<sub>2</sub>と共に散逸可能な場合のH<sub>2</sub>の散逸率の下限値(臨界 フラックス)を表す.



図5: (a) XUVフラックスを変化させた場合の大気散逸率. (b) XUVフラックスを変化させた場合の加熱効率. 標準設定の場合の値で規格化 している.

#### 3.3 大気散逸率のXUV強度依存性

初期太陽のXUVフラックスには大きな不確定性 がある[17]. ここでは大気散逸率のXUV強度依存 性を調べるため,XUVフラックスが標準設定の場 合の2倍と3倍の場合の計算結果を示す.図5は標 準設定の場合の値で規格化したXUVフラックスが 2倍の場合と3倍の場合の大気散逸率と加熱効率 を表す.同じ大気組成において,大気散逸率は単純 にXUVフラックスに比例して増加するわけではな く,XUVフラックスに比例して増加するわけではな く,XUVフラックスとCH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>比が大きくなるほど, XUVフラックス増加に伴う大気散逸率の増加の度 合いは小さくなっている.これはXUVフラックスが 大きいほど冷却源であるH<sup>3</sup>,CH,CH<sub>3</sub>の生成率が 増加し,さらに大気温度が上昇することで.放射冷 却率が上昇するためである.

### 4. 原始地球大気の進化

#### 4.1 原始大気の量と組成の変化

放射冷却によって加熱効率と大気散逸率が減少 することから,初期地球において水素残留期間が従 来の推定よりも長期化することが予想される.ここ では現地球表層揮発性物質の貯蔵量や同位体組成 と整合的な原始大気進化経路を推定する.下層大 気において炭素種はCH4として存在し,地表面には 原始海洋が存在すると仮定する. さらに,  $CH_4$ の散 逸終了時点で現地球表層炭素量( $CO_2$  70bar相当 [18])と同等の $CH_4$ が残留すると仮定する. XUV強 度は現在の強度の約100 倍とし,  $CH_4/H_2=0.012$ に 達し,  $H_2$ フラックスが臨界フラックスまで低下した後 は,  $CH_4$ の散逸を止める.  $CH_4/H_2>0.012$ における  $H_2$ フラックスは, 各濃度での臨界フラックスで近似 する. 簡略化のため流体力学的散逸中の大気供給 過程や他の大気散逸過程,  $CH_4$ から $CO_2$ への酸化 過程を無視する.

H<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>の量の時間変化は3章で示したそれぞれ の大気散逸率から推定することができる.大気量の 時間変化の推定方法の詳細は先行研究[11]に記述 されている.質量分別の計算には,炭素種のみでな く窒素種も同時に考慮する.原始大気中で窒素がど のような形で存在していたかは不明であるため,ここ ではN<sub>2</sub>の場合とNH<sub>3</sub>の場合の2通りを考える.さら に散逸終了時点で現在の地球大気窒素量(0.8bar) と同等のNが大気に残されると仮定する.窒素成分 やHD,<sup>13</sup>CH<sub>4</sub>等の微量大気成分の量の時間変化に ついては,それらは主要成分の運動に影響を与えな いと仮定し,H<sub>2</sub>の散逸率から導かれる以下の散逸率 [12]を仮定する.

$$F_{i} = \frac{X_{i}}{X_{\text{H}_{2}}} \frac{m_{c,i} - m_{i}}{m_{c,i} - m_{\text{H}_{2}}} F_{\text{H}_{2}}$$
(11)

ここで,X<sub>i</sub>は大気成分iの混合比である.

D/H比の変化を推定するため、大気と海洋間で 同位体交換反応が起き、平衡状態にあると仮定する [19].海洋量は現在の量で一定と仮定し、平衡係数 を求める際に必要な地表面温度は水素主体大気に おける地表面温度の推定[20]を参照する.

始原的隕石を地球に揮発性物質をもたらした材 料物質の生き残りとみなし、炭素と窒素の初期同位 体組成は始原的隕石の値の範囲に収まるという条件 を課す.現地球表層と始原的隕石の炭素・窒素同位 体比は非常に近い.地球マントルの平均的<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C比 に対する始原的隕石の<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C比は0.98から1.01で [21-23],地球大気の<sup>15</sup>N/<sup>14</sup>N比に対する始原的隕石 の<sup>15</sup>N/<sup>14</sup>N比は0.95から1.5である[22, 24, 25].現地 球海洋D/H比は炭素質コンドライトの値に近い.一 方で,初期D/H比は星雲ガス等の影響を受けるた め不確定性が大きい[26].ここではD/H比について は大気散逸による初期値からの濃集度合いを推定 する.

図6は現地球表層の炭素と窒素の貯蔵量と同位体 組成と整合的な大気進化経路で、初期大気量が最 大の場合である.この場合よりも初期H2量が大きい 場合には炭素と窒素の同位体分別が進み過ぎ、初期 同位体組成の制約条件を満たさなくなる.各大気成 分の大気質量は、以下の換算気圧を用いて表すこと にする.

$$P_i = \frac{M_i g}{4\pi R_p^2} \tag{12}$$

ここで、 $P_i \ge M_i$ はそれぞれ大気成分iの換算気圧と 大気質量を表し、 $g \ge R_p$ は地表面における重力加速 度と地球半径を表す。初期CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>比が大きいほど 初期大気量は小さい(図7).また、CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>比が大き いほど炭素と窒素の同位体分別の度合いは小さくな る(図8).炭素と窒素の初期同位体組成の制約条件 により(図6,8), CH<sub>4</sub>と窒素成分はH<sub>2</sub>と比べてほとん ど散逸しない(図6,7).この結果は放射冷却による散 逸の抑制に起因する.一方で、制約条件を満たすH<sub>2</sub> の最大量は~400barで、大質量の水素に富んだ原 始大気が形成された可能性があることを示している (図6,7).

大質量の富水素大気の形成は地球材料物質の化 学からも示唆される.第1章で述べたように,地球材 料物質の大部分がエンスタタイト様物質だった可能 性がある.この場合,金属鉄によるH<sub>2</sub>Oの還元によ り衝突脱ガス大気のH<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O比は~10となる可能性 がある[3].このH<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O比と現在の海洋量(~300 bar相当)を考慮すると,集積期には100barオーダー のH<sub>2</sub>を獲得したことが予想される.

海洋D/H比は同位体交換反応により大気D/H比 よりも上昇する(図6.8). 地球への水の主要な供給源 が炭素質コンドライト様物質の場合、全体の系にお ける初期D/H比は炭素質コンドライトと現地球海洋 の値に近くなり、海洋D/H比の上昇は現地球海洋の D/H比と一見非整合的に思われる[20]. しかし、今 回の推定はいくつかの仮定に依存していることに注 意が必要である. ここでは海洋質量は現在の値で一 定としていたが、実際には過去の海洋質量は現在よ りも大きかった可能性や、地球内部と表層間で水循 環が起きていた可能性がある.この場合,海洋D/H 比はここでの推定よりも元の供給源の値に向かって 均されることになる.また、海洋への重水素の濃集 度合いは地表面温度に大きく依存していることにも 注意が必要である. ここではH2-H2O大気モデルの 結果を参照し地表面温度を与えたが、CH<sub>4</sub>やNH<sub>3</sub>等 の他の温室効果気体の影響を考慮すると地表面温 度がさらに上昇する可能性がある. この場合も海洋 への重水素の濃集度合いは小さくなる. さらに、初 期D/H比が炭素質コンドライトの値と近いとする想 定も再検討する必要がある.もし原始惑星が星雲 ガス成分と脱ガス成分の双方からなる原始大気を 獲得した場合、初期D/H比は星雲ガス成分のD/H 比を反映し炭素質コンドライトの値よりも小さくなる [26].

図9は初期CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>比と初期H<sub>2</sub>量に対する水素散 逸タイムスケールを表す.水素散逸タイムスケールは およそ4億年に達する(図6,9).H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>大気からの水 素散逸タイムスケールは純粋なH<sub>2</sub>大気と比べて一桁 ほど長期化する(図9).さらに,ここではCH<sub>4</sub>散逸終 了後のH<sub>2</sub>フラックスは臨界フラックスと仮定してい たが,これは上限値であり,また一部の分子種によ る放射冷却を考慮できていないことから,実際には H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>大気からの水素散逸タイムスケールはさら に長期化する可能性がある.



図6:現地球表層揮発性元素の貯蔵量と同位体組成と整合的な大気進化経路のうち,初期大気量が最大の場合の大気量,同位体組成,地 表面温度の時間変化.緑線と橙線はそれぞれ大気中の窒素の形態としてN<sub>2</sub>,NH<sub>3</sub>を仮定した場合を表す.



図7: 初期CH4/H2比に対する初期大気量. 網掛け領域は初期同位体組成の制約条件を満たす領域を表す.



図8: (a)現地球表層の平均的<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C比に対する初期の<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C比. (b)現地球大気の<sup>15</sup>N/<sup>14</sup>N比に対する初期の<sup>15</sup>N/<sup>14</sup>N比. (c)初期D/H比 に対する散逸終了時のD/H比. (a)と(b)の網掛け領域は始原的隕石の値の範囲を表す.



図9:初期CH₄/H₂比と初期H₂量に対するH₂散逸タイムスケー ル、実線が大気進化経路推定から得られた値で、破線が初 期H₂量を純粋なH₂大気における散逸率で割ることで得ら れた値。



図10:XUVフラックスが標準設定の2倍の場合のH2散逸タイム スケール.

#### 4.2 仮定の不確定性が大気進化推定に 与える影響

#### (1)XUVフラックス

3.3節で述べたように、初期太陽のXUVフラック スには大きな不確定性がある.大気散逸率はXUV フラックスに依存するため、ここでは標準設定とは異 なるXUVフラックスの場合の大気進化経路を推定 する.基本的にはXUVフラックスが増加するほど大 気散逸率も増加する.従って、XUVフラックスが増 加するほど、炭素成分と窒素成分の同位体分別が進 みやすくなるため、その分初期H2量の範囲は制限さ れる.図10はXUVフラックスが標準設定の2倍の場 合のH2の散逸タイムスケールを示している.初期同 位体組成の制約条件を満たす初期H2量はXUVフ ラックスが大きいほど小さくなる.その結果、H2散逸 タイムスケールの上限値は~250Myrとなり、標準設 定の場合の約0.7倍となっている.

#### (2)地球質量に達する以前の大気散逸

ここまでは地球質量に達してから大気散逸が始ま ると暗に仮定していた.しかし,実際には原始惑星 段階で星雲ガスが晴れ,地球の元となった原始惑星 は大気散逸の影響を受けていたと予想される[27]. 我々の火星を対象にした先行研究[11]は火星サイズ の惑星における原始大気でもHとCの同位体分別が 起こり得ること,分別度合いは初期大気の量と組成 に大きく依存することを示している.加えて大気散逸 の持続期間も重要なパラメータと思われる.原始惑 星上の大気の散逸期間が短かった場合には同位体 分別はほとんど進まないことになる.現在の地球と 始原的隕石の炭素と窒素の同位体組成がほぼ等し いことは,地球の元となった原始惑星は同位体分別 を伴う大気散逸の影響をほとんど受けなかったこと を示唆している.

一方で、原始惑星の巨大衝突時に同位体分別を起 こすことなく大質量の原始大気が失われた可能性も ある.この場合、原始惑星が星雲ガス成分を含んだ 原始大気を獲得したとしても、現在の地球大気が星 雲ガスと比べて希ガスに乏しいことを説明できる可 能性がある[28].

#### (3) 揮発性物質の供給過程と他の損失過程

後期集積は揮発性物質の供給において重要な役 割を果たした可能性がある.月形成を伴う巨大衝 突イベント後,地球には現在の質量の約0.5%の物 質が集積し続けたと考えられている[29].後期集積 物質の組成は未だ不明である.地球マントル物質と 隕石のRuの同位体組成分析によると,後期集積物 質もエンスタタイト様物質だったことが示唆される [30].一方で,同様の分析を太古代の超苦鉄質岩に 拡張し後期集積物質組成を推定すると,後期集積 物質は炭素質コンドライト様物質だったことが示唆 されている[31].

集積物質の多くが炭素質コンドライト様物質の場 合、炭素質コンドライトの揮発性物質含有量を参考 に10wt%のH<sub>2</sub>O, C/H=1/5, N/C=1/30を満たす CとNを含むと仮定すると[13], 集積するH, C, Nの 量はそれぞれ ~ 3 × 10<sup>20</sup> kg (~2海洋質量), ~ 4 × 10<sup>20</sup> kg(現表層炭素量とほぼ等価), ~ 1 × 10<sup>19</sup> kg(現大気中窒素量の~2 倍)となる.集積物質がエ ンスタタイトコンドライト様物質の場合でも, CとNに ついては炭素質コンドライト様物質の場合の~0.1 倍の量が集積したと予想される[32].

後期集積に伴う揮発性物質の供給が起きると同 位体分別が均されることで初期同位体組成の制約 条件を満たしやすくなり、初期大気量やH<sub>2</sub>散逸タイ ムスケールの上限値が上昇する可能性がある。例と して、10barのCO<sub>2</sub>と等価なCが散逸終了後に集積 した場合、<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C比が~0.997倍となり、初期大気 量とH<sub>2</sub>散逸タイムスケールの上限値が~1.05倍にな る.

同位体分別の緩和と同時に,後期集積時にH<sub>2</sub>が 生成されることでもH<sub>2</sub>残留期間が長期化する可能 性がある.特に,エンスタタイト様物質が集積し地球 上のH<sub>2</sub>Oが還元される場合には大量のH<sub>2</sub>が生成さ れる.集積物質中に30wt%の金属鉄が含まれてい て全てH<sub>2</sub>Oと反応しH<sub>2</sub>が生成されると仮定すると, ~ 3 × 10<sup>20</sup> kg(~60 bar)のH<sub>2</sub>が形成され,H<sub>2</sub>残 留期間が少なくとも~75Myr長期化することにな る. 一方で, 天体衝突時に衝突侵食によって大気が散 逸する可能性がある[33]. 衝突侵食による総大気散 逸量を正確に見積もることは困難である.しかし, 地 球質量程度の惑星では衝突侵食効率は小さく, さら に本研究で想定しているような大質量の原始大気で は効率はさらに下がるため[33], 原始地球における 衝突侵食の影響は限定的と考えられる.

地球内部と表層間の揮発性物質の循環も表層揮 発性物質量と組成に影響を与える可能性がある.地 球マントル中のH<sub>2</sub>O, C, Nの量はそれぞれ海洋質量 の1-10倍 [34], 表層炭素量の数倍から数十倍 [35], 大気中の窒素量の数倍 [36]と推定されている.揮発 性物質の循環が効率的に起きていた場合, 表層と大 気中の揮発性物質の同位体分別は均されるため,後 期集積と同様に初期大気量とH<sub>2</sub>残留期間の推定値 を増加させる方向に働く.

H<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>大気は光化学反応によって刻々と変化す る可能性がある.衝突脱ガス由来のH<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>大気の 光化学的進化を推定した最近の研究[4]は,35 bar のH<sub>2</sub>と14 barのCH<sub>4</sub>からなる大気ではCH<sub>4</sub>の光分 解が効率的に起き,数千万年以内でCO,CO<sub>2</sub>,有機 物に変化することを示している.大気進化経路推定 時に大気は常にH<sub>2</sub>とCH<sub>4</sub>のみから成り,さらに地表 面付近と均質圏界面付近におけるCH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>比は等し いと仮定していたが,均質圏界面より下層でもCH<sub>4</sub> の光分解が効率的に起きる場合には,大気散逸領 域におけるCH<sub>4</sub>混合比の減少により放射冷却の影 響が弱まり,H<sub>2</sub>残留期間の推定値が短くなる可能性 がある.また,生成されたCO<sub>2</sub>や有機物の地表面へ の堆積を考慮した場合も,CやNの同位体組成およ び大気進化推定に影響を与える可能性がある.

一方で、上記の研究では無視されていた過程を考 慮することで富水素大気におけるCH<sub>4</sub>やNH<sub>3</sub>の寿 命が長期化する可能性もある.まず、主要な酸化剤 であるOHの存在度は富水素大気では小さくなる可 能性があり、それによりCH<sub>4</sub>やNH<sub>3</sub>の寿命が長期化 する可能性がある[37].また、巨大惑星大気のよう にCH<sub>4</sub>やNH<sub>3</sub>の再生成反応が効率的に起きる可能 性もある[16].初期大気におけるCH<sub>4</sub>の光化学的安 定性のさらなる検討は今後の課題である.

## 4.3 初期地球における還元的環境の 長期持続の影響

本研究から水素に富んだ還元的環境が初期地球 において長期持続した可能性があることが明らかに なった. H<sub>2</sub>やCH<sub>4</sub>は初期地球の温暖化に寄与した 可能性がある[8]. 初期の太陽の光度は現在よりも~ 30 %ほど小さかったにも関わらず[38], 初期の地質 記録は初期地球においても海洋が存在していたこと を示唆している[39]. 還元的環境が長期間持続する ことにより, 初期地球の温暖環境や海洋の存在を説 明できる可能性がある.

水素に富んだ還元的環境は~40 億年前の生命誕 生時期[40]まで持続する可能性があることから,大 気が生命誕生に繋がる有機物生成においても重要 な役割を果たした可能性がある.大気中でH<sub>2</sub>/C>1 の場合,アミノ酸や糖類の前駆物質であるシアン化 水素やアルデヒドが効率的に生成される[6].さら にタイタン大気のようにCH<sub>4</sub>の光分解に伴い多様な 高分子有機化合物が生成されていたことも予想され る.このように大気中で効率的に有機物が生成され た場合には,有機物が高濃度に溶け込んだ海洋が 形成され,そこでの化学進化が生命誕生に繋がった 可能性がある.

## 5. まとめ

本研究では放射過程と光化学過程を陽に組み込んだ流体力学的散逸モデルをH<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>から成る原始 地球大気に適用した.CH<sub>4</sub>は光分解とイオンとの化 学反応により急速に分解される.CH<sub>4</sub>混合比増加に 伴い,光化学的に生成されたH<sup>+</sup><sub>3</sub>,CH,CH<sub>3</sub>の放射 冷却によるエネルギー損失によって大気散逸率は減 少し,下部境界のCH<sub>4</sub>混合比が1%以上の場合は CH<sub>4</sub>の散逸が止まる.現地球表層揮発性元素の貯 蔵量と同位体組成と整合的な原始大気進化経路を 推定したところ,集積期に獲得したH<sub>2</sub>の残留期間 は~4億年にも達することが明らかになった.この結 果は初期地球において還元的大気種の温室効果に よって温暖環境が保たれていたこと,当時の大気が 有機物生成場として重要な役割を果たした可能性が あることを示唆する.

63

## 謝辞

本研究の遂行にあたり,指導していただいた倉本 圭教授には心より感謝申し上げます.査読者からは 有益なコメントを頂き,本稿が大きく改善されまし た.本研究は日本学術振興会の特別研究員奨励費 (19J11459)の助成を受けて行いました.

## 参考文献

- 例えば Matsui, T. and Abe, Y., 1986, Nature 319, 303.
- [2] Dauphas, N., 2017, Nature 541, 521.
- [3] Kuramoto, K. and Matsui, T., 1996, J. Geophys. Res. Planets 101, 14909.
- [4] Zahnle, K. et al., 2020, Planet. Sci. J. 1, 11.
- [5] Schlesinger, G. and Miller, S. L., 1983, J. Mol. Evol. 19, 383.
- [6] Wilson, E. H. and Atreya, S. K., 2004, J. Geophys. Res. Planets 109, E06002.
- [7] 例えば Sagan, C. and Mullen, G., 1972, Science 177, 52.
- [8] Ribas, I. et al., 2005, Astrophys. J. 622, 680.
- [9] Sekiya, M. et al., 1980, Prog. Theor. Phys. 64, 1968.
- [10] Lammer, H. et al., 2014, Mon. Not. R. Astron. Soc. 439, 3225.
- [11] Yoshida, T. and Kuramoto, K., 2020, Icarus 345, 113740.
- [12] Hunten, D. M. et al., 1987, Icarus 69, 532.
- [13] Marty, B., 2012, Earth Planet. Sci. Lett. 313, 56.
- [14] Claire, M. W. et al., 2012, Astrophys. J. 757, 95.
- [15] Tian, F. et al., 2005, Astrophys. J. 621, 1049.
- [16] Yung, Y. L. and DeMore, W. B., 1998, Photochemistry of Planetary Atmospheres (Oxford University Press).
- [17] Tu, L. et al., 2015, Astron. Astrophys. 577, L3.
- [18] Holland, H. D., 1978, The Chemistry of the Atmosphere and Oceans (John Wiley and Sons).
- [19] Genda, H. and Ikoma, M., 2008, Icarus 194, 42.
- [20] Pahlevan, K. et al., 2019, Earth Planet. Sci. Lett. 526, 115770.

- [21] Des Marais, D. J., 2001, Rev. Mineral. Geochem. 43, 555.
- [22] Kerridge, J. F., 1985, Geochim. Cosmochim. Acta 49, 1707.
- [23] Marty, B. et al., 2013, Rev. Mineral. Geochem. 75, 149.
- [24] Grady, M. M. and Wright, I. P., 2003, Space Sci. Rev. 106, 231.
- [25] Füri, E. and Marty, B., 2015, Nat. Geosci. 8, 515.
- [26] Saito, H. and Kuramoto, K., 2020, Astrophys. J. 889, 40.
- [27] Odert, P. et al., 2018, Icarus 307, 327.
- [28] Genda, H. and Abe Y., 2005, Nature 433, 842.
- [29] Walker, R. J. et al., 2015, Chem. Geol. 411, 125.
- [30] Fischer-Gödde, M. and Kleine, T., 2017, Nature 541, 525.
- [31] Fischer-Gödde, M. et al., 2020, Nature 579, 240.
- [32] Weisberg, M. K. et al., 2006, Meteorites and the early solar system II, 19.
- [33] Melosh, H. J. and Vickery, A. M., 1989, Nature 338, 487.
- [34] Genda, H., 2016, Geochem. J. 50, 27.
- [35] Hirschmann, M. M., 2018, Earth Planet. Sci. Lett. 502, 262.
- [36] Johnson, B. and Goldblatt, C., 2015, Earth-Sci. Rev. 148, 150.
- [37] Hu, R. et al., 2012, Astrophys. J. 761, 166.
- [38] Gough, D. O., 1981, Solar interior structure and luminosity variations (Springer).
- [39] Mojzsis, S. J. et al., 2001, Nature 409, 178.
- [40] Rosing, M. T., 1999, Science 283, 674.

# 火の鳥「はやぶさ」未来編 その24 ~可視光でみたリュウグウ~

巽 瑛理<sup>1,2\*</sup>, 杉田 精司<sup>2</sup>, 本田 理恵<sup>3</sup>, 諸田 智克<sup>2</sup>, 亀田 真吾<sup>4</sup>, 長 勇一郎<sup>2</sup>, 澤田 弘崇<sup>5</sup>, 横田 康弘<sup>5</sup>, 坂谷 尚哉<sup>4</sup>, 早川 雅彦<sup>5</sup>, 松岡 萌<sup>5</sup>, 山田 学<sup>6</sup>, 神山 徹<sup>7</sup>, 鈴木 秀彦<sup>8</sup>, 本田 親寿<sup>9</sup>, 吉岡 和夫<sup>2</sup>, 小川 和律<sup>5</sup>, 湯本 航生<sup>2</sup>

(要旨) ONC (Optical Navigation Camera; 光学航法カメラ) は探査機はやぶさ2の目であり, リュウグウを訪れた際には科学的にも工学的にも広報的にも幅広く活用された. ONCは広域撮像用の ONC-W1, ONC-W2, 望遠カメラ且つ7色のバンドパスフィルターをもつONC-Tで構成されている. ONC-Tは科学観測において特に重要で,フィルターを活用し小惑星表面の色の変化を記載することや 解像度の高い画像から詳細な地形の観測を目的としている. 試料採取地点の選定にも,粒径や風化作用 の推定といった核となる情報を得て貢献してきた. 本稿では,今後のサンプル分析を見据えて,主にONC チームのONC-Tを用いた分光観測における活動とその結果として得られた"仮説"を振り返りたいと思う.

## 1. はじめに

昨年末,小惑星リュウグウからのサンプルが成功 裏に地球に到着したことは記憶に新しい.黒々とし たサンプルがお披露目されてから,すでに半年が経 とうとしている.これからいよいよ詳細なサンプル 分析が始まる.小惑星リュウグウへのアプローチか ら、タッチダウンなどの低高度観測に至るまで,光 学航法カメラONCはリュウグウとのランデブーを通 して数々の観測を行ってきた.その中でONCや他の リモートセンシング機器から得られた情報からいく つかの"仮説"が立てられてきた.DawnやRosetta などリモートセンシングを主目的とした探査機と違

1.カナリア天体物理学研究所
 2.東京大学
 3.高知大学
 4.立教大学
 5.宇宙航空研究開発機構
 6.千葉工業大学
 7.産業技術研究所
 8.明治大学
 9.会津大学
 etatsumi@iac.es

い. サンプルリターンを目的としたはやぶさ2ではそ の"仮説"を検証し、成否を詳らかにすることができ る. ただし. サンプルがあれば何もかも分かるのか というとそうではない. 採取地点のリュウグウにおけ るコンテクストがわかって初めて、サンプル分析結果 を解釈できる.また、サンプル分析結果を汲んで今 後さらに画像や分光スペクトルなどのリモートセン シングデータの解釈が深まるという側面もあるだろ う. つまり、サンプル分析とリモートセンシングデー タは相互に価値を高め合うことができる. 本稿では 主にONC画像から今後のサンプル分析で解き明か されるであろう鍵となる"仮説"について紹介したい. ONCは広域撮像用のONC-W1, ONC-W2, 望遠 カメラ且つ7色のバンドパスフィルターをもつONC-T で構成されている。ONC-Tは科学観測において特 に重要で、フィルターを活用し小惑星表面の色の変 化を記載することや解像度の高い画像から詳細な 地形の観測を行うことができる. これまでのリモー トセンシング観測から我々にとってリュウグウはすで にかなり理解の進み、全く未知な天体ではなくなっ ている.地球にもたらされたサンプルの画像を見て、 ONCチームの中では「リュウグウの表面を見ている



図1: はやぶさ2リュウグウ到着前の地上観測可視光スペクトル. シグナルノイズ比 (SNR) の順で左上から並んでいる. 灰色と赤色が地上観 測スペクトル, 黒線がONC-Tにより観測された全球平均スペクトル([3]から改変).

ようだ」という感想も聞かれたほどだ.サンプル分析 から、ここで紹介する"仮説"より一歩進んだリュウグ ウ及びその母天体の理解が期待されている.

## 2. 地上観測

遡ること,はやぶさ2がリュウグウに到着する前, 世界最大級のGemini望遠鏡やVLT望遠鏡をはじ めとした多くの望遠鏡によってリュウグウの分光観 測が行われた(図1).地上で最も多く分光観測され た小惑星かもしれない.全ての観測でリュウグウの 可視反射スペクトルは広義のC型であると分類され たが,いくつかの観測では層状珪酸塩鉱物の存在を 強く示唆する0.7µmの吸収や近紫外域の吸収が報 告されていた[1,2].当時,スペクトルの違いはリュウ グウの地域性の違いを反映しているかもれしれない と期待された.実際にはリュウグウにおいて,地上観 測で報告されたほどのスペクトル変化というものは 認められず,のちにこれらはおそらく地上観測の不 確定性であったと結論づけられる.しかし,到着前 にはプロジェクト目標や機器の校正目標を左右する 重大な観測結果であり,観測結果に大きな影響力が あったことには間違いない.また,拡張ミッションを 含む今後のミッションターゲット選定に対して,小さ

26**∆**I シナリオ 1 内部加熱 ? インパクタ シナリオク 衝突加熱 小惑星族の形成 水質変成 脱水 隕石衝突 シナリオ3 軽度な水質変成 ク カタストロフィック 000 破博 軽度な水質変成 インパクタ リュウグウの リュウグウ 直接的な母天体? 直近の衝突破壊 ? 再集積と堆積

図2: 全球観測から得られたリュウグウ及び母天体の進化仮説 ([8]より改変).

な天体の分光に伴う大きな不確定性の教訓ともなる だろう.リュウグウでも望遠鏡口径や,エアマス(大気 の厚さ)などの条件が良い計測では,探査機と同等 な結果が得られているため,観測条件および複数回 の観測が非常に重要であることがわかる.

## 3. リュウグウの全球平均スペクトル

到着直後の2018年7月,リモートセンシング機器 の全球観測運用が行われた (Box-A運用).地上 観測からは,約40度の自転軸傾斜か直立か判別で きなかったため[4],観測がより複雑な傾斜のケー スで計画が準備されたが,リュウグウの自転軸が公 転面に対してほぼ直立していることが到着してすぐ に分かった[5].つまり,リュウグウに到着直後の全 球観測 (20km高度,1自転観測)でリュウグウのほ とんど全ての面を観測することができた.ONC-T は7色のバンドパスフィルターで0.40-0.95µmの波 長範囲を分光して見ることができる (ul: 0.40µm, b: 0.48µm, v: 0.55µm, Na: 0.59µm, w: 0.7µm, x: 0.86µm, p: 0.95µm) [6-8].リュウグウの幾何ア

ルベドは4.0±0.5%[3]で、全球での変化はわずか 10%程度であった、この反射率は探査された天体の 中で最も低く. 脱水された炭素質コンドライトやIDP などと同程度もしくはそれよりも暗い[3,8]. また低反 射率から炭素含有量は2 wt%以上であると推定さ れる[3]. リュウグウの全球平均スペクトルは図1でも わかる通り、観測波長域に渡って平坦な形状をして おり、ECAS分類のC/F型[3]、SMASSII分類の Cb型[8]に分類される.いずれの分類でも近紫外に 吸収がないことが特徴的である. この平坦なスペク トル形状や、全球で反射率が低く、また2.7umの吸 収が小さくほぼ一様[8.9]であることから、母天体の 多くの部分が高温である程度脱水した可能性が高 い、全球のスペクトル変化はCMやCIコンドライトの 脱水による進化傾向と同じ傾向を表しており、この 点からもリュウグウの母天体が部分的な脱水を経験 したことを示唆している[8]. 部分脱水の熱源として, ①<sup>26</sup>A1などの集積初期の放射性熱源,②衝突による 加熱、③太陽放射による加熱などが考えられる。③ はSCIクレーター内部の脱水状態が平均値と大きく 違わないことから可能性が低い[10]. ②については、



図3: (上)リュウグウのvバンド反射率マップ ([8]より改変). (下) リュウグウの0.4-0.86 µmスペクトル傾斜マップ ([8]より改変).

1回のカタストロフィック衝突で直径100km級の大き な母天体から1km以下の小さなリュウグウやベヌー が直接生まれる場合に可能であることが数値計算 で示された[11].しかし,この場合には圧縮がかな り働くという問題点がある.リュウグウの岩塊の空隙 率が高いので高度な衝突圧縮とは相容れない.さら に,個々の岩塊のスペクトルが均一であるという観 測事実[8]から,①の仮説が有力なのではないかと 思う.全球観測の結果から図2のような仮説が提示 された.いずれにせよ重要なことは、リュウグウのリ モートセンシング観測から得られたスペクトルと完全 に一致するような隕石は現状では見つかっていない ことであろう.リュウグウのサンプルは太陽系形成を 理解するためのミッシングピースかもしれない.

## 4. リュウグウの可視スペクトルの 地域差

高度20 kmからの全球観測により2m/pixの解像 度で全球の反射率マップおよびスペクトル傾斜マッ プ(0.48-0.85µm)が作成された(図3).ONC-T分 光による最初の発見は非常にかすかな濃淡とコント ラストのついた赤青の帯だった.リュウグウの全球 における傾向として,青明から赤暗というトレンドが みられた[8,12].リュウグウの色分布の面白い特徴と して,赤道域と極域が青く,中緯度域が赤いという パターンが明らかになった (図3). これはリュウグウ の自転と深く関係している. リュウグウ程度の小天体 では万有引力が小さく、自転による遠心力が重力ポ テンシャル分布に大きく影響する、つまり、 自転速度 の変化が重力ポテンシャルの変化を生じる. 現在の 自転周期P=7.63h [5]では赤道帯と極域の重力ポテ ンシャルが高く、中緯度域がポテンシャルが低いと いう分布になっている. そのため、物が赤道域及び 極域から中緯度域に移動しやすいという構造になっ ている、実際、表面のレゴリスが赤道域から流れた 地形的痕跡が発見された[8]. このことから、リュウ グウの赤道域と極域は新鮮な比較的青い物質が露 出していると考えられており、リュウグウでは青いも のは比較的新鮮であり、赤いものは宇宙風化や加熱 などの作用を受けていると考えられている. さらに, 最近では非常に微小だが.赤道帯で層状珪酸塩鉱 物の特徴である0.7umの吸収が比較的強くなってい るという報告があり、赤道帯に新鮮な物質があるこ とは強い仮説であると考えられる[13]. この理由か らサンプル採集地点はかなり初めの段階から赤道帯 近辺が選ばれている[14].

リュウグウがコマ型であるということから、リュ ウグウは過去に赤道帯が低ポテンシャルになるよ うな高速自転 (P< 3.75h) していたものと考えられ ている[5]. つまり、重力ポテンシャル分布は過去か ら現在にかけて変化してきたということである. 自 転速度の変化はYORP (Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack)効果によるものと考えら れているが、その変化率は形状とサイズに大きく依 存している. また、リュウグウには地溝(150°Eと 70°Wあたり)という東西に分断する構造があり、東 西半球でアルベドやクレーターや岩塊の数密度が異 なることが報告されている[8,15,16]. 形状モデルを 使ったFEM計算から自転速度が速い(P= 3-3.5 h) 時に東西半球の違いが形成されたと考えられている [17].

リュウグウ表面の岩塊の色を調べると、明るさと 形態にある程度相関が見られることがわかった[8]. 多くの岩塊は、暗く凹凸に富むもの(e.g. エジマ)と 明るくスムーズな表面を持つものに分類できること がわかった.一方でこれらと少し異なる、明るく凹凸 に富むもの(e.g. 通称:キツネ, [18]でC型ブライトボ ルダーと分類される)が存在することがわかった. 岩 塊も全体の色分布と同様, 青明から赤暗という連続 的な分布があることがわかっている[8,12].

クレーターにも赤いものと青いものがあることが 報告されている.このクレーター底部の赤青分布は 二峰性を持った分布になっており,ある時期に急激 に赤化が進んだことを示唆している.このことから, リュウグウが太陽に近づいて,太陽放射熱もしくは 宇宙風化を強く受けた時期があったという仮説が立 てられた[14].

## 5. ブライトボルダー

2018年10月3-4日にMASCOT運用のためのホ バリング観測(以下 MASCOTホバリング)ではや ぶさ2は高度3-4kmで赤道帯を中心とする2自転分 の観測を行った、広範囲に渡ってこの近距離での観 測を行うことは珍しく, 位相角が比較的小さく影が 少ないことも手伝い、現在でも貴重な分光のデータ セットになっている. この観測でのONC-T画像解 像度は0.3m/pixel. これ以前に行われた重力降下 観測でも明るい岩(ブライトボルダー)がところどころ にあることが指摘されていたが. MASCOTホバリ ングでも多くのブライトボルダーを確認できた. これ らの岩のうち数10cm以上の比較的大きな21個の分 光解析を行うと、突出して明るい岩と、 リュウグウの 平均から連続しているような明るさの岩を見つけるこ とができた. これらはそれぞれ. 普通コンドライトに 似た1umにかけての吸収を持つS型のブライトボル ダーと平坦なスペクトル形状を持つC型に分類する ことができた (図4). S型のものについては近赤外の 分光も行われたが輝石の特徴である2umの強い吸 収は確認されなかった. このことからS型のブライト ボルダーは普通コンドライトで構成されたS型小惑星 起源と考えられる、この発見によりリュウグウの母天 体とS型小惑星が衝突、カタストロフィック破壊から 再集積を経て現在のようなリュウグウが形成された という仮説が立てられた[18]. 特に、リュウグウのふ るさとと思われている内側小惑星帯にはS型が多く、 さらにS型とC型が混在するニーサ・ポラーナ族とい う大きく広がる小惑星族があることが知られている. この領域ではC型とS型の小惑星衝突が頻繁に起



図4: ブライトボルダーの可視スペクトル(黒)とリュウグウの平均スペクトル(灰色). M7, M8, M9, M13, M16, M20がS型のブライトボルダー([18]から改変).

こっていた可能性があり、この仮説とも整合的だ.

また、C型のブライトボルダーの可視スペクトルは リュウグウの平均的な形状から大きく異なっている ことがわかった.特に近紫外領域での吸収が平均よ りも強いという特徴がある.この可視スペクトルの変 化はCM, CIの加熱実験で観察される変化によって 説明できる.つまり、C型ブライトボルダーは母天体 内の熱変成度の違いを反映しているかもしれない. 面白いことに、小さなサイズの石ほどC型ブライトボ ルダーの割合が多いことがわかっている[19].一方 でS型の全体に対する割合は減っている.つまり、地 球にもたらされたサンプルに、このC型のブライトボ ルダーが入っている可能性は高いということを示して いる.C型のブライトボルダーから母天体内部の構造 および熱進化が明らかになるかもしれない.

## 6. 似て非なる小惑星ベヌー

B型小惑星ベヌーは探査機OSIRIS-RExのサン プル採取天体である[20]. こちらは2018年12月に小 惑星に到着し, 2021年に小惑星を離脱, 2023年に

サンプルを地球に持ち帰る予定である。 リュウグウと ベヌーはどちらも内側小惑星帯起源であると考えら れており、この2つの天体が同じ母天体かというのは 大きな関心事である. リュウグウとベヌーには大局的 な共通点と相違点がある. 共通点としては全体の低 い密度(ベヌー:1,190 ± 13 kg/m<sup>3</sup> [20], リュウグ ウ:1,190 ± 20 kg/m<sup>3</sup> [5]), そして非常に低い熱慣 性(ベヌー:350±20 tiu [20]. リュウグウ:300±100 tiu [21]). また非常に低い幾何アルベド(ベヌー: 4.4±0.2% [22], リュウグウ:4.0±0.5%[3])である. 一方で、水質変成度を示す2.7µm 吸収はリュウグウ では弱く尖った形状をしているのに対して、 ベヌーで は15%程度のやや丸みのある広がった吸収がある [23]. これらの大局的な特徴は、一つの母天体の破 壊で加熱度合いの違いを作り分けることもできると 指摘されている[11]. しかし、はやぶさ2. OSIRIS-RExでそれぞれ詳細な観測が進んでいくに従い、よ り細かい違いが明らかとなっている.

まず、ベヌーの表面にも外来物質が発見されている. ベヌーの外来物質は輝石を含む玄武岩質で1µm と2µmに強い吸収があることがわかっている[24].



図5: ベヌー (左, 画像ID:20190314T183102S215)とリュウグウ (右, 画像ID:hyb2\_onc\_20181003\_171510) のスケール, 色スケールを合わせて比較したもの. リュウグウ画像の右上に写っているのはブライトボルダーの一つ, 通称キツネボルダー. スケールバーは50 m.

このことからベヌーの外来物質は内部小惑星帯に存 在するベスタ族起源であると考えられている.つま り、リュウグウとベヌーは異なるインパクターによる 衝突を経てきているということが明らかになった.

さらに特徴的なのはベヌーの反射率の多様性で ある (図5). また,ベヌーの可視光域スペクトル傾斜 マップを見ると,リュウグウとは違い,緯度方向の赤 青の傾向が見られない [25]. ベヌーでは岩塊のそれ ぞれの色が局所的な地域性を作っている. これに加 えて,リュウグウでは岩塊の色と反射率の変化は比 較的連続的であるのに対して,ベヌーでは岩塊の色 と反射率に明らかに二分性が存在する[25]. 形態的 な違いも明らかで,リュウグウでは岩塊が埋まってい るような地形がベヌーに比べて多数存在する (図5). このような表面の反射率分布や形態の違いは,ベ ヌーとリュウグウの物質移動モードの違いを反映し ているかもしれない.

宇宙風化についても違う2つの天体は違う傾向を 示している.リュウグウの小さなクレーターが比較 的青い[14]のに対して,ベヌーのクレーターは赤い [25].この観測事実から,リュウグウでは宇宙風化 (もしくは太陽加熱)によって赤化し,ベヌーでは宇宙 風化によって青化すると考えられている.また,ベ ヌーは初期の青化から, さらに時間をかけてやや赤 化するとも言われている[25].

リュウグウとベヌーが同じ母天体由来であるか否 かは興味深い謎であり、サンプル分析から答えが出 されることが期待される.確率的には同じ母天体で ある可能性は低いと思われるが、同じ母天体だとす ると、一つの天体で異なる水質変成度の炭素質コン ドライトを作ることができるということになり、熱水・ 脱水反応について新たな知見が得られるだろう.こ れまでリュウグウとベヌーは独立に議論されてきた が、これから本格的に比較研究が進むと思われる.

## 7. さいごに

現在, はやぶさ2は次なる目的地である2001 CC21 と1998 KY26へ向けて航行中である. それぞれの 天体へ到着するのは2026年と2031年の予定であ る. 1998 KY26は自転周期約10.7分と高速回転す る天体であり, ONCによる観測運用も挑戦的なもの になると考えられる. ONCを含めたリモートセンシン グ機器は延長ミッションに向けて, この5年, 10年の 間, 科学観測はもとより機器の状態チェックを行い、 延長ミッションに向けてできる限り良い状態を保つ

71

必要がある.現在機器に大きな問題はないが,タッ チダウンの影響で光学特性に劣化が起きたことも把 握されており,気が抜けない状態である[26].それ に加えて,現在もリュウグウで取得したデータの解析 も進んでいる.今回紹介した論文は一部にすぎず, これからも新たな仮説が出てくるだろう.筆者らは ONC画像を解析し仮説を立てる立場であり,サンプ ルからどのようなことが明らかになるのか,我々の仮 説が正しかったのかどうか,楽しみでありまた同時に 固唾を呑んでサンプル分析を見守っている.

## 参考文献

- [1] Vilas, F., 2008, Astrophys. J. 135, 1101.
- [2] Perna, D. et al., 2017, Astron. Astrophys. 599, L1.
- [3] Tatsumi, E. et al., 2020, Astron. Astrophys. 639, A83.
- [4] Müller, T. et al., 2017, Astron. Astrophys. 599, A103.
- [5] Watanabe, S. et al., 2019, Science 364, 268.
- [6] Kameda, S. et al., 2017, Space Sci. Rev. 208, 17.
- [7] Tatsumi, E. et al., 2019, Icarus 325, 153.
- [8] Sugita, S. et al., 2019, Science 364, 252.
- [9] Kitazato, K. et al., 2019, Science 364, 272.
- [10] Kitazato, K. et al., 2021, Nat. Astron. 5, 246.
- [11] Michel, M. et al., 2020, Nat. Commun. 11, 2655.
- [12] Yokota, Y. et al., PSJ (査読中).
- [13] Kameda, S. et al., 2021, Icarus 360, 114348.
- [14] Morota, K. et al., 2020, Science 368, 654.
- [15] Michikami, T. et al., 2019, Icarus 331, 179.
- [16] Hirata, N. et al., 2020, Icarus 338, 113527.
- [17] Hirabayashi, M. et al., 2019, Astroph. J. Lett. 874, L10.
- [18] Tatsumi, E. et al., 2021, Nat. Astron. 5, 39.
- [19] Sugimoto, C. et al., 2021, Icarus, 114529.
- [20] Lauretta, D. et al., 2019, Nature 568, 55.
- [21] Okada, T. et al., 2020, Nature 579, 518.
- [22] DellaGiustina, D. et al., 2019, Nat. Astron. 3, 341.
- [23] Hamilton, V. et al., 2019, Nat. Astron. 3, 332.
- [24] DellaGiustina, D. et al., 2021, Nat. Astron. 5, 31.

- [25] DellaGiustina, D. et al., 2020, Science 370, eabc3660.
- [26] Kouyama, T. et al., 2021, Icarus 360, 114353.

# ー番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦 その46 ~LAC, 金星雷発光を確認か?~

## 高橋 幸弘<sup>1</sup>, 今井 正尭<sup>2</sup>, 佐藤 光輝<sup>1</sup>

(要旨) 金星に雷放電の有無に決着をつけるべく,世界初の惑星雷放電発光観測装置LACは金星周回 軌道で観測を継続してきました.観測開始から約4年になる2020年3月1日に,最初にして唯一(2021年 4月末日現在)の突発的な発光現象を記録しました.果たして雷はあったのでしょうか?

## 1. 金星の雷

2018年3月号の遊星人[1]でも紹介しましたよう に、金星の雷の有無は長年の論争になっており、か れこれ40年に渡り、コンセンサスが得られていませ ん、その最大の理由は、探査機に搭載された観測器 が、雷放電現象とそれ以外のプラズマ波動現象や、 宇宙線や装置起源のパルスノイズとを区別できる機 能を持たなかったことにあります。あかつきに搭載さ れたLACは、発光強度を32µsという高い時間分解 能で記録することで、そうしたノイズと自然の発光 現象を判別することのできる、初めての金星探査機 搭載観測装置です。2015年に投入されたあかつきの 軌道が、当初の計画よりも周期の長い楕円になった ため、観測のペースは1/20程度に落ちました、この ため、本来なら1年で達成できる観測時間を確保す るのに、20年を要すこととなりました、これまでの光 学観測としては、最も信頼性が高いと考えられてい るのが、Hansellら[2]が行った、アリゾナ大学の地 上望遠鏡に装着されたCCDカメラによる観測です が、それによれば、観測面積に観測時間を掛けた値 で100万km<sup>2</sup>あたりに1回雷放電発光が観測されて

います. 私たちは, このアリゾナ大学グループが推定 した頻度の妥当性の検証を, ひとつの目標にしてき ました. まさに, LACの観測面積×観測時間がほぼ 100万km<sup>2</sup>に達した時に, 発光現象と思われる波形 が記録されたのです. その位置は, Hansellらの報 告や, 活動が示唆される火山の位置とも異なってい ました(図1).

## 2. 記録された波形は雷発光か?

記録された波形は、それまで数100個も記録され てきた宇宙線によるパルスとは明らかに異なってい ました.数10msかけて"ゆっくりと"立ち上がり、継 続時間は数100msに及んでいました.最初に不安に なったのは、装置の故障です.この波形が記録され たのは、その観測時間(パス)の終了間際だったの で、もしや装置が壊れる瞬間の断末魔でないのかと いう考えがチームメンバーの頭をよぎりました.しか し、その後ほぼ同じ条件で10パス以上にわたりデー タを検証し、機器は正常に動作していること、また 類似のパルスが記録されていないことを確認しまし た.これで、記録された現象は、自然の発光現象で あることがほぼ確定したと考えています.次に、もし 自然の発光だとして、雷以外の可能性があるかどう かです.今回記録された波形の継続時間数100ms

北海道大学・大学院理学研究院
 京都産業大学・理学部
 vukihiro@sci.hokudai.ac.jp

73



図1: 金星面上のLACの積算観測時間のマップに, 今回観測された発光現象(Flash detection point), 火山(Ganik Chasma), Hansell らの報告した雷発光の位置を記入したもの.

は、衛星から観測される地球大気の雷放電発光の 典型的な時間である数msに比べて長めです.ただ し、地球でもそうした長さの発光は時々観測され、 放電発光として不自然ではないものです.ひとつ可 能性があるとすれば、隕石落下による火球です.

## 3. 火球の可能性

継続時間数100msというのは、光度の大きな火 球としては短めですが、あり得ない長さではありませ ん.私たちは、今回観測された発光の強度と、地球 近傍でのエネルギー毎の隕石の頻度、金星と地球で の相対的な落下隕石の頻度、隕石エネルギーと発光 エネルギーの比などを考慮し、LACの観測期間内 で、そうした明るさの火球を検出する確率を推定しま した.その結果、今回の発光時間で積分した光量を 持つ火球を観測する可能性は、0.05-4%となりまし た.幅を持っているのは、隕石エネルギーの発光エ ネルギーへの変換効率の見積もりに不確定性が大 きいからです.ただし、この値は時間積分したもので すが、発光時間の短さを考慮すると、さらに稀少な ケースである可能性が高いと言えます.

以上より、今回LACで観測された発光現象は、

火球の可能性を完全に排除することは困難なものの、 雷発光であるという可能性が高いと結論できます. 少なくとも、この40年間の金星雷に関する観測の歴史の中で、最も確実な過渡発光を捉えたことはまず、間違いがないと考えています. 現在、投稿論文のレビューコメント待ちですが、近いうちに観測波形をジャーナルでご紹介できることを願っています.

## 参考文献

- [1] 高橋幸弘ほか, 2018, 遊星人 27, 43.
- [2] Hansell, S. A. et al., 1995, Icarus 117, 345.

74

# 惑星ラボからこんにちは! その3 ~神戸大学 実験惑星科学研究室~

## 保井 みなみ<sup>1</sup>

## 1. 惑星学専攻について

私たちの専攻は、2015年4月に地球惑星科学専攻 から惑星学専攻へと名称を改めました.そして、地 球科学と惑星科学を融合した、より包括的な意味を もつ名となり、日本で唯一の専攻となりました.私た ちの専攻には、惑星科学を専門とする教育研究分野 (研究室)が4つ存在します.はじめに、その4つの研 究室について、簡単に紹介します.

- 流体地球物理学研究室:理論・数値実験・観測を 用いて、地球をその1つとする惑星大気の気象
   や気候を支配する理の解明を目指す。
- ・惑星宇宙物理学研究室:太陽系外を含めた惑星系,衛星,リング,小天体の起源と形成過程を統一的に理解するための理論研究・室内実験を行う.
- ・実験惑星科学研究室:室内実験や惑星探査を通して、原始太陽系円盤から惑星のミッシングリンクを繋ぐ鍵を探す。
- 計算惑星学研究室:理論と計算機を用いたシ ミュレーションを用いて、銀河・星団の形成進化
   や惑星の形成・進化を明らかにする。

惑星学専攻に関する詳細は、ホームページをご覧く ださい(http://www.planet.sci.kobe-u.ac.jp/ index.html). この場では、著者が所属している実 験惑星科学研究室について、詳細に紹介します.

## 2. 実験惑星科学研究室について

この研究室は名前の通り,実験を研究手法とし, 地球を始めとした惑星の起源や進化を室内実験や 惑星探査を用いて研究しています.2021年4月現在, 教員・スタッフは荒川政彦教授と著者である保井(講師),そして専攻の特命技術員である白井慶さんにも サポートしてもらっています.

#### 2.1 研究紹介

この研究室では、小惑星や衛星、太陽系外縁天体、巨大惑星のリングなどの太陽系小天体の研究を 通して、太陽系の起源や進化、天体の熱進化に関す る研究を行っています、私たちの研究の柱は以下の 3つです。

1つ目は、衝突科学です、太陽系天体の進化過程 で起こったと言われている天体の衝突合体や破壊の 現象を衝突破壊実験で再現し、太陽系小天体の起 源を探ります。また、衝突クレーターの形成過程を再 現するためのクレーター形成実験を行っています。2 つ目は、宇宙雪氷学です、氷を主な構成物質としてい る氷衛星、リング、彗星等の起源や進化過程、また、 それらの天体のテクトニクスに着目した衝突実験や 変形実験を行っています。3つ目は、惑星探査です、 一昨年の4月に「はやぶさ2」が小惑星リュウグウに 人工衝突実験を行い、クレーターを形成しました。そ の人工衝突実験の解析と関連する基礎実験を行っ ています、詳しい研究内容については、当研究室の

<sup>1.</sup>神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻 minami.yasui@pearl.kobe-u.ac.jp



図1:左上が横型二段式軽ガス銃,右上が縦型一段式軽ガス銃.下の写真は作業の様子.

ホームページ等をご覧ください.

これらの3つの柱に欠かせないのが、実験装置 です(図1). 私たちの研究室は、衝突実験やクレー ター形成実験を行うために、大小様々な衝突実験装 置(衝突銃)を備えています。宇宙空間での衝突現象 を再現するには、衝突速度が重要なキーワードの1 つです. そのため、衝突速度が100m/s程度の低速 度から数km/sの高速度まで、広い範囲の衝突速度 を再現出来る装置が揃っています。特に、1km/s~ 7km/sの高速度を出せる横型二段式軽ガス銃は、 小惑星帯の相対速度範囲をカバーしており、私たち の研究室では最も活躍している、代表的な衝突装置 です.一方、月や小惑星のレゴリス層を模擬した粉 粒体のクレーター形成実験を行うためには、横型で はなく縦型の衝突銃が必要です. 私たちの研究室に は、200m/s以下の衝突速度を出す縦型一段式軽ガ ス銃はあります.しかし、1km/s以上の高速度での クレーター形成実験は、私たちの研究室では行うこ とができません. そのため、年数回、宇宙科学研究 所の超高速度衝突実験施設に設置された縦型二段 式軽ガス銃を使用させてもらっています.

もう1つ,宇宙雪氷学の研究を行う上で重要な実 験設備が,低温室(図2)です.上に書いた横型二段 式軽ガス銃は、標的をセットする真空チャンバーが 低温室内に設置されています.低温室は-15℃に設 定しているため、氷や雪などの標的を実験前に一度 も融かすことなく、使用することが可能です.衝突銃 は日本各地の大学や研究所に設置されていますが、 低温室と一体となった衝突銃を保持しているのは私 たちの研究室だけです.そのため、非常に貴重な実 験施設といえます.また、低温室は、チャンバー以外 のスペースがある程度確保されているため、氷標的 の作成や、雪や氷を用いた変形実験、氷粒子や衝突 融解物の顕微鏡観察など、常温では難しい作業や 実験を行うことが可能です.ただし、-15℃は非常に 寒く、普段着での作業はせいぜい2~3分が限度で す.そのため、低温室での作業には、専用の防寒具 の着用が必須です.

#### 2.2 学生教育

惑星学専攻では、学部1回生から3回生までは、専 門科目の講義、演習、実習を行います、そして、学部 3回生の冬に所属する研究室が決まり、学部4回生 から各研究室で卒業研究が始まります、大学院は学 部からそのまま進学する学生もいれば、他の大学か ら入学する学生、他の研究室から移動する学生がい



図2:左上が低温室に設置された横型二段式軽ガス銃のチャンバー.他の写真は低温室内での作業の様子.

ます. どの大学でも同じ状況だと思いますが,博士 後期課程(博士課程)への進学率は非常に低いです. しかし,ここ1,2年は少しずつ,博士課程へ進学し, 研究者を目指す学生が増えてきました.

2021年4月現在、私たちの研究室には学部4回生 が4名,博士前期課程(修士)が4名,博士後期課 程(博士)が4名,所属しています.学生とは4月の頭 に個人面談を行い、興味のあることや使用したい装 置を聞いた上で, 教員と学生の話合いで各学生の研 究テーマを決めています、学生は、2.1節で書いた研 究の柱を基準にして、次の3つのグループに分かれ てそれぞれのグループの中で研究を行います.1つ目 は天体の衝突合体や破壊過程を調べる衝突破壊実 験グループ。2つ目はクレーターの形成過程を調べ るクレーターグループ.3つ目は雪や氷試料を扱い. 低温室内で実験を行う氷グループです. 研究の背景 に関する勉強や実験結果の議論等は、教員と学生 の間で行ったり、多人数のセミナーで学修します。-方で、基本的な実験装置の使い方、試料の作り方、 データの解析の仕方といった現場で行う作業につい ては、グループ内の先輩が後輩に教えて身につけて いくようにしています. そのためなのか. 私たちの研 究室の学生は非常に仲が良いです.また.現在はコ

ロナ禍のため残念ながら中止となっていますが,年 度の終わりには研究室合宿と称して,郊外のホテル や旅館に宿泊し,1年間の成果を発表する研究会を 設けています.

## 3. 最後に

私たちの研究室についてもっと詳しく知りたい方 は、実験惑星科学研究室のホームページ(https:// epsl-kobe.sakura.ne.jp/wp/)をご覧ください. 私たちの研究室は、自分の手を動かして衝突実験や 変形実験を行いたい人、惑星探査に興味のある人に 是非お勧めしたい研究室です.私たちの研究室に入 るには、大学進学に神戸大学理学部惑星学科を選 んでもよし、学部3回生から編入してもよし、大学院 から進学してもよし、と選択肢はいくつかあります. 私たちの研究室だけではなく、神戸大学理学部惑星 学科・大学院理学研究科惑星学専攻に興味のある 方は、是非、ホームページを閲覧したり、専攻の教員 に直接、メール等で問い合わせてみて下さい.私た ちはいつでも、意欲のある人を歓迎します.

# 遊星人の海外研究記 その6 ~ローマで変わった心と体~

## 城野 信一

## 1. 留学まで

麻生政権末期(2009年).若手研究者を海外に 留学させるプログラムが開始されました(組織的な 若手研究者等海外派遣プログラム). これは手を挙 げれば必ず通るというものでした.また研究室内の 雰囲気としても、10年勤務してどこも行ってないの は君だけだから行ってきたら? という雰囲気とな りました(これが最重要).授業と家庭の都合によ り、2011年の7月から半年だけ海外に行くことにしま した、妻の仕事(声楽)の関係で、行き先はイタリア と初めから決まっていました.たまたま学会で知り 合いになっていた Maria Telesa Capria 研究員 がおられるINAF-Roma(Istituto Nazionale di Astrofisica)に連絡をとり、半年受け入れてもらうこ ととなりました. 丁度, NASAのDAWNミッション が小惑星Vestaに向かっている最中であり、Telesa さんは赤外線カメラを担当しておられました.

行くと決めたところまでは問題はないのですが,こ こからが結構大変です.イタリアのビザを当然とる 必要があり,これの条件が: 1:家主の貸し出し証 明書(認可された翻訳家が翻訳した,正式な日本語 訳の添付が必要) 2:滞在期間をカバーする無制限 の医療保険 3:受け入れ教員からの招待状 4:留学 の資金が入っている本人名義の預貯金口座の通帳 とそのコピーです.また,日本には東京の大使館か 大阪の領事館しか窓口はなく,何回か出向く必要が あります.これについてはたまたま大阪に住んでいた ので助かりました.2,3,4は問題無いのですが,1が

1.名古屋大学大学院環境学研究科 sirono@eps.nagoya-u.ac.jp 大変でした. 初めは物件探しをTelesaさんに依頼し てみたのですが難しいと断られました. どうやらロー マの住宅事情は非常に悪く,賃貸の物件を見つける のは非常に大変なようでした. 最終的には妻の知り 合いを頼り,ローマ日本人学校の比較的近くに物件 を見つけることができました. この日本人学校に息子 (当時4歳)を預けることとなりました. すべての書類 を整えてビザをゲットした時は,もうそれでひと段落 した気分になりました. 領事館には,料理の修行を しに行く若者などいろいろきていて,お互いにビザ 取得の大変さに愚痴を言い合ったものです.

地図をみると、この家はローマの中心部から南西 に出た郊外にあります。一方で研究所は、中心部か らみると南東の郊外にあります。なので家からまっす ぐ東に向かえば研究所に行けるはずなのですが道 がありません(図1).一度中心部に出て南東に向か う必要があることが判明しました。公共交通機関を 使う場合も同じで、家からまずはバス(719番)にのっ て北東に向かい、ピラミデという駅で地下鉄B線に



図1: 家から研究所までのみちのり(Google mapを改変).間に 保護地があるためまっすぐには行けない.

乗ります. テルミニ駅でA線に乗り換え,終点のアナ ニーナ駅で研究所行きのバスに乗り換えてやっとた どり着きます. これは相当時間がかかりそうだったの でローマには自転車を持って行きました(図2). ロー ドレーサーという,タイヤが細い自転車です. ローマ の街を走り回ったら面白いだろうという目論見もあり ました.

せっかくなのでイタリア語の勉強もしました.といってもテキストを1冊買ってその音声を聞きながら ブツブツ言う程度ですが.英語と違って子音の重要 度が比較的低いので発音はそれほど難しくはありま せん.ローマで私が会った人たちの中で,研究者以 外で英語を解する人はいませんでした.なので日常 生活においてこの勉強は役にたちました.

## 2. 研究所にて

研究所に出ると連絡していたのは月曜日で,その 前日の日曜日に道をチェックするために研究所まで 行ってみました.大まかに頭に道を入れて出発しま す.はじめはポルトエンセ通りをひたすら北上しま す.するとピラミデ駅にでます.これがローマ旧市街 の城壁にあたります.ここから北がローマの中心部 です.城壁にそって東に向かいます.すると地下鉄の Re di Roma駅 にでます.ここも城門があったとこ ろです.ここからひたすら南東に向かいます.地下鉄 の終点からさらに走るとローマ第二大学の広いキャ ンパスにでます.このゾーンからさらに南東に向かう と,牧草地の中に研究所がありました.かなり遠い.



図2: ローマに持って行った自転車.滞在中,4470km走りました. また8回パンクしました.

迷ったためもありますが距離は30キロほど,2時間ほ どかかりました.毎日色々な道を試し,最終的には距 離は25キロ,時間は1時間ほどまで短縮できるように なりました(図1の曲線).一度だけバスと地下鉄で研 究所に行って見たところ,2時間半もかかりました.

翌日から研究所に出ました. セキュリティが厳重 で,研究所発行のIDカードが無いと中に入れませ ん. 私はパスポートを預けて入りました. ゲートのお じさんも英語は解さないので,初めて入る時はまあま あ苦労しました. 自転車に乗ってくる東洋人は他には いないので,翌日からは顔を覚えてもらい簡単に入 れるようにはなりました. しかし,帰国までにIDカー ドは発行されず,毎日パスポートを預けました. 片道 25km走るので,研究所に着いた時はまあまあ疲れ ています. 初めの頃は睡魔によく襲われました. しば らくしたら慣れ,眠くなることは無くなりました.

私は基本的に数値シミュレーションを行っている ので、研究のスタイルとしてはどこにいても同じです. ノートパソコンでプログラムを書き、サーバで走らせ て結果を吟味するのはどこにいてもできます.今回 は、氷微惑星が内部熱源によって融解したときに、 岩石成分と水との混合物の対流の可能性について考 えました.ローマに滞在している間に論文の執筆もし ました.研究所の往復でローマ中心部を通ります.コ ロッセオやサン・ピエトロ大聖堂やフォロ・ロマーノも ちょっと寄り道すればすぐです.なので景色の良いと ころを選んでベンチに座り、論文を書きました.これ はとても気分のよいものでした.

研究所では複数の人に Diego Turrini博士と話 すといいよ、と言われました. どうやら惑星形成過程 の研究をしているポスドクなようです. 向こうについ てから1月後に初めて会うことができました. Diego は一人の大学院生の面倒をみていて、ベスタの熱進 化について研究していました. 小天体の熱進化は博 士課程で勉強したことがあるので、いろいろ議論に のりました. Diego本人は、木星が形成された際に 周囲の小天体の軌道がどう乱されて衝突回数が増 加するか、というテーマで博士号をとり、そのテーマ で引き続き研究していました. ベスタの研究の関係 で、バチカン天文台(当時)のGuy Consolmagno博 士(隕石学)と話をする機会がありました. ローマ法 王と並んでとった写真を自慢してくれました. 私の滞 在はたまたまJonathan Lunine教授(宇宙化学)の 滞在と重なっており、いろいろ議論することもできま した. Maria Cristina De Sanctis研究員のセミ ナーでは、DAWNミッションの成果が発表されまし た. DAWNミッションはJPLが主体として行われて いましたが、INAFはカメラを通じて大きな存在感を 出していました.

## 3. 日常生活

食事は自炊してました.家の近所のスーパーに毎 日通い食材を買いました.おおむね日本の半額程度 でした(10年前であることに注意). 魚は高く, 日本と 同程度といったところです. あさり, しゃこ, カジキマ グロ, エイなんかをよく買いました. 肉はかなり安い です. なかでも生ハムが絶品でした. パックに入って いるものも売ってますが、その場でスライスして買う 生ハムは特に美味しいものです. これと水牛のモッ ツァレラチーズをほぼ毎日買ってました(図3左).食 事に欠かせないのはワインです. スーパーの一角が ワインで占領されており、相当な種類がありました。 もっとも安いのは2ユーロ以下で買えました。その ワインでさえも悪くありません. せっかくなので棚に 並んでいるワイン全種類飲んでみることにしました. 3ヶ月ほどで達成したとおもいます(図3右).その後 はより高級なワインにハマり、サンタンジェロ城の裏 にあるワイン屋に通うことになりました. 外食で飲ん だワインも含め、半年間の滞在で結局170本ほどのワ インを飲みました(同程度の本数のビール大瓶も飲み ました).おかげで帰国後の人間ドックでは肝臓関係 の数値がかなり悪化しました. この点ではイタリアは おすすめできません.

近所のスーパーにはバールが併設されていまし た.バールとは、小さいコンビニみたいなお店であり、 コーヒーとお酒が飲めます.買い物をしたついでに毎 日このバールに寄ってビール(大瓶で1.5ユーロ)を飲 んでました.若い女の子が二人でやっており、イタリ ア語を教えてもらったり子どもと遊んでもらったりこ の二人には大変お世話になりました.本で読んでブ ツブツつぶやくのではなく、実際に人間相手に話す と強く記憶に定着することを実感しました.彼女らだ けでなく、スーパーの店員全員にわれわれ家族は覚



図3:(左)生ハムとモッツァレラチーズ.(右)キッチンに並んだワ インの空き瓶.この組み合わせはやめられなかった.

えてもらい,よくしてもらえました.肉屋のおじさんに は、本式のカルボナーラの食材を教えてもらいました.

## 4. 帰国後

Diegoが行なっていたベスタの研究をテーマとし て、「ベスタ、惑星形成を解き明かす鍵」という研究 チームがISSI(スイス、ベルン)に発足し参加させて もらいました.そこで、Diegoが研究している、木星 形成に伴う小惑星の衝突史についていろいろ学ぶこ とができました.また、Consolmagno博士も参加し ており、DAWNがとってきたデータを元に、ベスタの 形成史に制約を与える非常に明快な議論をされてい ました.

数年前から、私は衝突によってコンドリュールが 形成するシミュレーションを行なっています.以前か ら衝突を起源にするモデルはあったのですが、水な どの揮発性物質の存在を考えるとコンドリュールの サイズと冷却速度が同時に説明できることに気づき ました.それでは衝突の起源は何か?ここでDiego の研究を思い出しました.研究会のため来日した Diegoと議論し、数値シミュレーションをやってもら い論文にしました.現在投稿中です.

このようにして,滞在期間は半年と短いものでした がその後の研究生活に大きな影響を与えました.月 並みですが,留学は行って損することはほぼありませ ん(肝臓を痛めつけた点をのぞいて).10年前の体験 記ですが,何かの参考になれば幸いです. 80





図1. 研究会の集合写真(末次氏提供). 今回はオンライン開催であったことがわかる.

## 1. はじめに

2021年3月10日(水)から12日(金)の3日間の日程 で、「天体の衝突物理の解明 (XVI)/第12回スペー スガード研究会」がオンライン開催された(口頭発表 にはZoom,ポスター発表および懇親会にはRemo が用いられた).新型コロナウイルス感染症の流行 の影響で、例年11月頃に開催されていた「天体の衝 突物理の解明」研究会が3月開催に変更になり、ま た、スペースガード研究会との共催となった.本年度 のテーマは「プラネタリーディフェンスの現況」という ことで、吉川真氏(宇宙科学研究所)、浦川聖太郎氏 (日本スペースガード協会)、大澤亮氏(東京大学)を 迎え、ご講演いただいた.3件の招待講演を含め21 件の口頭発表、および6件のポスター発表があった.

 そ表な議論が行われた(図1).本稿では,筆者の参加報告として,研究会の様子を記述する.本稿で紹介する内容は筆者の理解にとどまっており,不正確のな部分が含まれている可能性が大いにある.各講演の要旨,発表スライドは衝突研究会のホームページ

 からしていただくか,講演者に直接ご連絡いただきたい。

 ないただくか,講演者に直接ご連絡いただきたい。

 2.講演概要

1.国立天文台 科学研究部 sota.arakawa@nao.ac.jp

研究会のプログラムは以下の通りである.

講演時間が比較的長め(30分)に設定されており、講

演中に随時質問を受け付けるスタイルを採用してい ることが本研究会の特徴である。例年と異なりオン

ライン開催であったが、50名を超える参加者による

《口頭発表》 3月10日(水) **荒川 創太**(国立天文台) 「氷 | 粒子の付着特性について **笹井 遥**(神戸大学) 多孔質氷天体のクレーター形成における衝突残留 温度計測 **豊田 優佳里**(神戸大学) 土星リング粒子を模擬した多孔質氷球の低速度衝 突実験:反発係数及び付着特性に対する空隙率依 存性 野村 啓太(神戸大学) 二次標的を用いた高速度岩石エジェクタの計測 山本 裕也(神戸大学) 低強度レゴリスにおける衝突エジェクタ速度スケー ル則に対する実験的研究 池谷 蓮(神戸大学) クレーターエジェクタが高速自転小惑星の赤道リッ ジを形成している? **多田 賢弘**(東京大学) オーストラリア・アジアテクタイトイベント:インドシナ 半島東部におけるイジェクタ層の認定とその分布 木内 真人(IAXA/ISAS) 低重力下での高速度衝突クレーター形成実験 門野 敏彦(産業医科大学) 有限サイズターゲット上のクレーター形成:爆発と衝 突の対応 3月11日(木) **杉浦 圭祐**(東京工業大学ELSI) 石鉄隕石メソシデライトの形成シナリオ解明に向け たベスタ様小惑星への巨大衝突の数値計算 **黒崎健二**(名古屋大学) 巨大衝突に伴う大気散逸の数値計算と理論的考察 鈴木 宏二郎(東京大学) ガラスビーズを用いた粉体の準静的圧縮試験と衝突 シミュレーションへの応用 吉川 真(JAXA/ISAS) プラネタリーディフェンスに関する国際的な取り組み 【招待講演】

浦川 聖太郎(日本スペースガード協会) ライトカーブ観測から迫る小惑星における衝突イベ ント時期の推定【招待講演】 大澤亮(東京大学) 東京大学木曽観測所トモエゴゼンによる微小地球 接近小惑星の動画観測【招待講演】 中村 昭子(神戸大学) コンドライト模擬物の衝突圧密 塩本 純平(神戸大学) 多孔質隕石模擬物質の衝突実験:キャビティー成長 の観察

81

3月12日(金) 黒澤 耕介(千葉工業大学) 減衰衝撃波を利用した衝撃回収実験1:炭酸塩の波 状消光の発生条件 大野 遼(千葉工業大学) 減衰衝撃波を利用した衝撃回収実験2:玄武岩の衝 撃溶融脈の発生条件 島生 有理(JAXA/ISAS) 熱赤外カメラを用いた衝突残留熱計測 柳澤 正久(電気通信大学) ふたご座月面衝突閃光の低分散スペクトル

《ポスター講演》 保井 みなみ(神戸大学) ガラスビーズを用いた低速度クレーター形成実験:学 生実験のデータ統計解析 **嶌生 有理**(JAXA/ISAS) 次世代サンプルリターン候補天体の検討 石田 紗那(神戸大学) 層構造試料を用いた衝突破壊実験:デジタル画像相 関法による衝突破片速度分布の計測法の開発 **江口 裕樹**(神戸大学) 低空隙多孔質氷標的を用いた高速度衝突実験:運 動量輸送およびクレーター形成過程に関する実験的 研究 黒澤耕介(千葉工業大学) 粉体標的の衝突爆心地周辺の物質回収方法につい T **岡本尚也(**IAXA/ISAS) DESTINY+搭載カメラ光学校正計画の検討状況

#### 2.1 招待講演

プラネタリーディフェンスに関する国際的な取り組 みと、地球接近小天体の観測について3件の招待講 演があった.ご多忙のところご講演を引き受けてい ただいたことに感謝したい.

吉川氏(IAXA/ISAS)にはプラネタリーディフェ ンス(スペースガード)の歴史と最近の国際的な取 り組みについてご講演いただいた. International Asteroid Warning Network(IAWN. 地球近傍天 体の発見し軌道を確定する、各国の天文台などを中 心としたネットワーク)とSpace Mission Planning Advisory Group(SMPAG. 地球に衝突する危険 な小天体が発見されたとき、どのように対応するのか を検討する、各国の宇宙機関によって構成される組 織)が2013年に設立された経緯などを語っていただ き、とても勉強になった、また、「(なにも対策しなけ れば)ある国に衝突するはずだった天体が、回避策 を実施しそれに失敗した結果として他の国に衝突し てしまった場合、誰がどのような責任を負うのか?」と いう質問が講演後にあり、国際的な協力体制の構築 やルールの制定を平時から進めておくことが重要で あるなあ、と感じた、

浦川氏(日本スペースガード協会)には小惑星のラ イトカーブ観測についてご講演いただいた. 彗星・小 惑星遷移天体である107P/Wilson-Harrington の可視測光観測から,形状,タンブリング運動,衛星 の有無などを議論されていた. この天体は次世代サ ンプルリターン計画(詳細は嶌生氏のポスター講演を 参照されたい) における有力な候補天体のひとつで もある.小天体の回転状態によっては公開されてい る形状モデルでは計算できないことがある、という 困難について語っていただいたことが筆者の印象に 残っている. また, 高速自転する10 mサイズの地球 接近天体2012 TC₄についてもライトカーブ観測から 形状や回転状態を推定されていた. 三軸不等楕円体 の回転状態が遷移する時間スケールに関する議論 が大変興味深かった. すばる望遠鏡HSCアーカイブ データを用いた小惑星発見アプリCOIASについて も紹介されていた。

大澤氏(東京大学)には東京大学木曽観測所の可 視光広視野動画観測システムTomo-e Gozenを用 いた微小地球接近小惑星のサーベイについてご講 演いただいた. 直径100 m程度以下の微小小惑星 は暗いため地球に接近したものしか観測できない. また,地球接近小惑星は見かけの速度が大きいた め高時間分解能の観測を行う必要がある.これらの 困難について,Tomo-e Gozenは広視野動画観測 を行うことで効率的な微小地球接近天体の検出を 可能にしていることを紹介されていた.また,ライト カーブ観測による微小小惑星の自転周期の決定と, 破壊強度の推定に関する話が非常に興味深かった. YORP効果による自転加速のタイムスケール,衝突 破壊破片として初期に持つであろう自転速度などが 評価され,観測結果と比較されていた.

#### 2.2 一般口頭講演

今回のテーマである「プラネタリーディフェンス」に 限らず、天体衝突に関する幅広い興味、関心に基づ く講演が多数なされた.以下では筆者の判断でいく つかのテーマに分類し、それぞれの講演について簡 単に紹介させていただく.

#### 2.2.1 高速衝突実験

天体の衝突物理の解明は惑星系の形成と進化に おける最重要課題のひとつであろう.衝突によるク レーター形成,エジェクタ放出過程などが室内実験 や数値計算によって調べられており,今回の研究会 でも多数の発表を聞くことができた.

笹井:彗星のような多孔質氷天体の進化において、 圧縮支配域のクレーター形成と衝突残留熱を理解 することが重要である.高速衝突実験によって、多孔 質氷標的におけるクレーターサイズのスケーリング則 や、ピット中心からの距離によって最大上昇温度や その到達時刻がどう変化するのか調べた結果が報 告された.加えて、熱伝導の数値計算による実験結 果の再現から、衝突エネルギーの衝突残留熱への エネルギー分配率を推定していた.

**野村:**火星エジェクタのフォボスへの輸送量を推定す るために,二次標的を用いた高速度岩石エジェクタ のサイズ・速度・放出角度の同時測定を行った.垂直 衝突と斜め衝突のそれぞれについてエジェクタのサ イズと速度,放出角度と速度の関係が調べられてい た. エジェクタ速度別の破片サイズ分布を求め, 従来 の破片サイズモデルから得られる平均破片サイズと 比較してより大きい破片が高速で放出されているこ とが示されていた.

山本:衝突によって破壊される低強度レゴリスを標的 に用い,衝突エジェクタの速度分布・放出角度の標的 粒子の強度や弾丸と標的のサイズ比に対する依存性 を調べた.標的粒子としてcmサイズの大玉の風化凝 灰岩を用いた実験では,石英砂を用いた場合と比較 してクレーター壁における規格化エジェクタ速度が 大きいことが示されていた.

**木内**: 落下塔を用いて低重力下で高速衝突実験を行い、クレーターサイズの重力依存性を調査した. 宇 宙研の縦型二段式銃の真空チャンバー内に組立・解 体可能な落下装置を構築することで低重力下での 高速度衝突実験を可能にした. 引張強度の小さい硅 砂標的ではクレーター直径に明確な重力依存性が 見られ、重力支配域のπスケーリングが成り立つ. 一 方で、引張強度の大きいFine Glass Beadsやアル ミナを標的にした場合はクレーター直径に重力依存 性が見られず、これらのクレーター直径に重力依存 性が見られず、これらのクレーター直径が小惑星の サイズやレゴリスの粒径にどう依存するのか議論さ れていた.

門野:強度支配域におけるクレーター形成とカタスト ロフィック破壊の中間段階であるside spallation に着目し、爆薬を用いた爆発実験と弾丸を用いた衝 突実験を行い、両者の対応関係を調べた、爆発実験 では室内衝突実験よりも大きなクレーターを形成す ることが可能であり、爆発実験と衝突実験の結果を 対応させることができれば衝突破壊の標的サイズ依 存性の研究に有用である.発表においては、実験結 果から爆発条件(爆薬量と埋め込み深さ)と衝突条件 (弾丸サイズと衝突速度)の対応条件を導出していた。 中村:マトリックス模擬試料とコンドルール模擬試料 を混合してコンドライト模擬試料を作成し、衝突圧 密実験を行った.マトリックスとコンドルールの混合 物は、自己重力による静的圧縮だけではコンドライ トよりも大きな空隙率を持つことが期待されるため、 母天体上での衝突圧密や熱変成、水質変成が重要 だと考えられている.フラッシュX線透過画像の解

析から圧密領域の密度構造の推定が行われていた. **塩本:**タギシュ・レイク隕石およびCMコンドライトを 模擬した多孔質の標的を作成し,それらの衝突破壊 強度およびエジェクタの速度を調べた.エジェクタの 速度は標的側面の前方,中央,後方の3点で計測し (側面速度),衝突点からの距離を標的の等価球直 径で規格化した値で整理した.2種類のタギシュ・レ イク模擬物について,強度の大きいUTPS-TBの方 が強度の小さいWCSよりも側面速度が大きいこと が示されていた.

83

黒澤:炭素質隕石の典型的な水質変成鉱物である カルサイトについて,波状消光を示す粒子の存在が 中間衝撃圧力領域での衝撃変成指標として有用で あることを紹介した.金属コンテナを用いて大理石 試料の衝撃回収実験を行い,さらにiSALE shock physics codeを用いた数値衝突計算によって試料 中を伝播する衝撃波を評価した.回収した試料を薄 片に加工し偏光顕微鏡で観察した結果,3 GPa以上 の衝撃圧力を経験した領域で半分以上の粒子が波 状消光を示すことが明らかになった.個々の粒子が 塑性変形を始めると波状消光を示すようである.

大野: 玄武岩試料について衝撃回収実験を行い,回 収した試料を薄片に加工し岩石・鉱物学的観察、化 学組成マッピング、結晶学的分析を実施した.また, 衝突実験と同じ条件でiSALEによる数値計算を実 施し,衝撃経験圧力・温度を推定した.ユークライト 隕石の衝撃変成度について,波状消光角,マスケリ ナイト(衝撃ガラス)の存在量,ショックベインの有無 で分類するKanemaru Tableが存在するが,この 細分化されたshock stageに対して実験と数値計 算から定量的な圧力値を与えた.

**嶌生**:熱赤外カメラを用いた高速度衝突のその場観 測による熱物性変化検出手法の確立を目指し, 硅 砂・ガラスビーズへの高速度衝突の熱赤外撮像を 実施した.衝突残留熱を計測した. 硅砂ではクレー ター内に高温放出物が残らない一方, 粒径1 mm 程度のガラスビーズでは高温の衝突生成物がクレー ター崩壊により埋没し, 粒径100 μm程度のガラス ビーズでは高温衝突生成物がクレーター内に残留し た.また, クレーター内部の冷却・昇温過程が撮像で きており, 今後, 撮像された表面温度変化を熱モデ ル計算と比較する予定である. **鈴木**:油圧プレスを用い,粉体の準静的圧縮実験を 行った. 圧縮実験においては一部のガラスビーズが 破砕され,非可逆的に粉体が圧縮される様子が確 認された. 圧縮後は大きな粒子がガラス粉末中に距 離をおいて配列される構造になる.実験から,粉体 の密度・圧力の関係が,非可逆的圧縮曲線と弾性的 除荷・再圧縮線で構成される「塑性ガス」モデルで表 現できることが確認された.発表では,圧縮実験の 結果から構築した状態方程式をペネトレータの数値 シミュレーションに適用した結果も紹介されていた.

#### 2.2.2 低速衝突

原始惑星系円盤でのダスト粒子の合体成長や,惑 星のリングを構成する粒子の運動を理解するために は,低速度衝突実験によって衝突速度と反発係数の 関係を理解することが不可欠である.

荒川:原始惑星系円盤中でのダスト粒子の成長を理解する上で、様々な分子の「氷」の付着特性を理解する必要がある.そこで、水氷およびドライアイス粒子の限界付着速度について、過去の実験結果の再解釈を行った.ミクロンサイズの水氷粒子の限界付着速度がドライアイス粒子よりも1桁程度大きいことが実験的に知られているが、これが表面エネルギーの違いではなく粘性的なエネルギー散逸の強さの違いに起因することを、粘弾性を考慮した球の接触理論を用いて示した.

豊田:土星リングはcmからmサイズの水氷粒子で形成されており、熱慣性などから多孔質な氷凝集体であると推測されている.そこで、多孔質氷球の低速度衝突実験を行い、反発係数及び付着特性に対する空隙率依存性を調査した.実験によって反発係数と衝突速度の関係式が得られ、これを外挿することで土星リング粒子の空隙率を議論した.また、多孔質球の反発係数の低下は、塑性変形によるエネルギー散逸によって説明できることが示されていた.

#### 2.2.3 地質調查, 観測

実験や数値計算だけでなく, 観測や地質調査も 衝突研究を推進する重要な手法のひとつである. 今 回の研究会でもこれらの手法に基づく研究成果が 発表された. **多田:**オーストラリア・アジアテクタイトイベントは地 球上での大規模な衝突イベントの中で最も年代が新 しい(約80万年前)にもかかわらず、衝突クレーター が未発見で、衝突地点周囲に分布するはずのイジェ クタ層も見つかっていなかった.そこで、インドシナ 半島広域における野外調査を行い、イジェクタ層を 認定し、分布を調査した.テクタイトを含む角礫層 の層厚分布から、衝突地点はラオス南西部Bolaven Plateauであると推定した.

**柳澤:**月面衝突閃光の明るさから衝突エネルギーを 推定するためには,発光効率(運動エネルギーから 可視広域での発光エネルギーへの変換効率)を知 る必要がある.先行研究においては4つの流星群に ついて地球で観測された流星数と月面閃光の数を 比較することで発光効率が求められており,衝突速 度によらず0.2%程度であった.発表では,ふたご座 月面衝突の低分散スペクトル観測の結果が紹介さ れ,高温(約6000 K)・低温(ケイ酸塩の蒸発温度以 下)の2成分の黒体放射の寄与があることが示され ていた.

#### 2.2.4 数値計算

数値シミュレーションは天体衝突の研究におい て非常に強力なツールである. 今回の研究会では Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法 を用いた巨大衝突の数値計算や, 高速自転する小 惑星上でのエジェクタ堆積物の分布に関する発表が あった. 衝突実験に関する発表においてもiSALE などを用いた数値計算との比較を行っていたものが 多数あったことを付け加えておきたい.

**池谷**: コマ型小惑星の赤道リッジ形成メカニズムと して,エジェクタ堆積物の赤道域への集中的な堆積 というモデルを提唱した.小天体の自転速度をパラ メータとして,球面一様乱数を用いて複数のクレー ターの位置及び直径を与え,エジェクタ粒子の軌道 を計算することで堆積地点を求めた.Ryuguサイズ の天体について,自転周期が3時間の場合,メインベ ルト小惑星ならば衝突破壊寿命よりも短い時間で十 分な高さの赤道リッジを形成できる可能性が示され た.

杉浦:メソシデライトはベスタ(もしくは類似した直径

500 km程度の天体)を母天体とする石鉄隕石であ る.メソシデライトはコア由来の鉄・ニッケル合金と 地殻由来の火星岩質なケイ酸塩の混合物であり、マ ントルの主成分であるカンラン石はほとんど含まれ ていない.発表では、SPH法を用いた数値計算でベ スタ様小惑星への巨大衝突を再現し、衝突後の天体 質量が元の質量の半分程度になるような条件におい てコアが掘削され、表面地殻と混合可能であること が示された.また、衝突前の母天体の内部構造とし て地殻とコアが厚いモデルを考えるとより観測事実 を説明しやすくなるという結果も紹介されていた.

黒崎:惑星の大気量の違いはその形成過程や形成 後の進化過程を反映する.大気散逸の代表的なメカ ニズムとして天体衝突があり,これまでの研究でも 議論されてきたが,衝突規模が大きい領域について は十分に理解されていなかった.発表では,SPH法 を用いた巨大衝突に伴う水素へリウム大気散逸の計 算結果が示され,衝突エネルギーから大気の流出エ ネルギーへの変換効率が議論されていた.流出大気 量と流出エネルギーの相関関係は2種類の領域に分 けられ,エネルギーに比例する領域と運動量に比例 する領域からなることが明らかになった.

#### 2.3 ポスター講演

ポスター講演は6件あり,研究会2日目にRemoを 用いて実施された.今回も学生のポスター講演につ いては2分間のフラッシュトークが行われた.オンラ イン開催であったにもかかわらずポスター講演も盛 り上がり,懇親会開始直前まで各講演者のスペース で議論が続いていた.

## 3. まとめ

今回は「プラネタリーディフェンスの現況」という テーマで、第16回「天体の衝突物理の解明」研究会 が第12回スペースガード研究会との共催で実施され た.新型コロナウイルス感染症の流行で例年と同じ 時期に同じ形式で実施することはできなかったが、 それでも非常に実りある研究会であったと感じた. 世話人の皆様および参加者の皆様にお礼申し上げ たい.いずれの講演も時間配分ぎりぎりまで活発な 議論が行われており、また、筆者のような衝突実験 を専門としない人間でも気軽に質問ができる雰囲気 が形成されていた.これはこの研究会の素晴らしい 伝統である(らしい).毎回の参加報告で書かれてい ることの繰り返しになるが、少しでも衝突現象にご 興味があれば(現在は衝突研究を専門としていない 方でも)是非気軽に参加されることを勧めたい.筆者 にとって今回の参加はまだ2回目であるが、とても楽 しい研究会であると再確認した.

前回の「天体の衝突物理の解明」研究会のテーマ は「小惑星の表層進化」,前々回は「探査機はやぶさ の成果と挑戦:初号機から2号機へ」であった.はや ぶさ2のSCIとDCAM3による宇宙衝突実験が大 成功したのが2年前(2019年4月5日)であり,これか ら大量に採取されたサンプルが分析されることで小 惑星の形成・進化史がより深く議論されると期待さ れる.また,今後も世界各国で様々な天体への探査 が計画されており,多様な天体における多様な衝突 現象が研究の対象になるのだろう.今回の研究会で も,想定する天体として彗星,コンドライト母天体,ラ ブルパイル小惑星,火星などがあり,研究目的・手法 も非常に多岐にわたった.次の機会にはどのような 天体の衝突物理と出会えるのか,今から楽しみであ る.

#### 謝辞

研究会の開催にご尽力いただいた世話人の皆様 (末次竜氏、岡本尚也氏、鎌田俊一氏、黒崎健二氏、 嶌生有理氏、杉浦圭祐氏、保井みなみ氏)に感謝い たします.また,本稿執筆の機会は大島商船高等専 門学校の末次竜氏より頂きました(原稿の確認など 大変お手数をおかけしました).感謝申し上げます.

# 第13回月惑星探査データ解析実習会を終えて

平田 成<sup>1</sup>, 出村 裕英<sup>1</sup>, 大竹 真紀子<sup>1</sup>, 嵩 由芙子<sup>1</sup>, 小川 佳子<sup>1</sup>, 本田 親寿<sup>1</sup>, 北里 宏平<sup>1</sup>, 月惑星探査データ解析実習会世話人一同

(要旨) 第13回月惑星探査データ解析実習会(2021年3月24日~26日)の実施報告を行う. 今回は月の 可視・近赤外分光反射データの解析をテーマとして,山本聡氏(産業技術総合研究所地質調査総合セン ター)を講師に迎えてZoomとSlackを併用したオンライン形式で開催された.実習会に参加した受講生 は5大学・機関から9名で、3日間の会期の中で「かぐや(SELENE)」搭載の可視・近赤外分光計スペクトル プロファイラデータを用いた地質解析について、データの入手から前処理、情報の抽出や結果の解釈、論 文に掲載することを想定したスタイルの図版作成の方法までを学び、その成果を最終日に発表した.

月惑星探査データ解析実習会は、日本惑星科学 会内のボランティアベースのグループである惑星探 査育英会が主催する、惑星探査データ解析方法を 短期集中型の実習形式で学ぶ講習会です.学部、大 学院生、ポスドクを主な対象として、将来の惑星探 査を担う人材の育成と地球惑星科学教育の拡充を 目指して2009年から年1~2回のペースで開催されて います[1].

去る2021年3月24日~26日に通算第13回となる実 習会を実施しましたので、その報告をいたします、今 回は、産業技術総合研究所地質調査総合センター の山本聡さんを講師に迎えて、月の可視・近赤外分 光反射データの解析をテーマとしました、2007年 に打ち上げられた月探査機「かぐや(SELENE)」 により月全球の分光データが取得され、2009年の 運用終了から10年以上経過した今なお新しい成果 が発表されています、第13回実習会では、「かぐや (SELENE)」搭載の可視・近赤外分光計スペクトル プロファイラ(Spectral Profiler, SP)データを用い た地質解析について,データの入手から前処理,情 報の抽出や結果の解釈,論文に掲載することを想定 したスタイルの図版作成の方法まで取り扱いました. SPデータの解析は,2014年の第7回実習会[2]でも 一度題材として取り上げられていますが,その後の月 科学の新しい知見や,解析技術の発達の成果を盛り 込んで,新しい世代の学生と若手研究者向けに改め て取り上げてみることにしました.

開催時点でのCOVID-19感染状況も踏まえて,前 回の第12回実習会(2020年3月開催)[3]と同じく,今 回もZoomを使用したオンライン形式で実施するこ ととしました.前回は会津大学内に設営した会場に 世話人と会津大学生の参加者が滞在し,外部参加 者がZoomで参加する形式をとっていたものの,今 回は完全にオンライン化し,講師や受講生はもちろ ん,世話人も専任TA役の会津大学生もそれぞれの オフィス,研究室,自宅などから参加する形式にして います.また,前回実習会の開催途中で導入してそ

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



図1:参加者集合写真(Zoom画面スナップショット).

の効果が確認されたSlackワークスペースも,今回は 会期前から開設して,事前アナウンス,情報共有と会 期中の質疑応答に利用しました.

事前に11名の申し込みがあり、キャンセル者も出 ましたが最終的に神戸大学、東京大学、大阪大学、 総合研究大学院大学,宇宙科学研究所の5大学・機 関から9名の受講生が参加しました(図1).3日間の 会期は、あらかじめ用意してもらった1ページプレゼ ン資料を使って参加者の自己紹介をしてもらうとこ ろから始まりました、その後、講師の山本聡さんに よる講義に続き、配布されたSPデータ処理プログラ ムのコンパイルとテストデータによる動作確認を経た 上で、JAXAが提供しているかぐや(SELENE)デー タアーカイブシステム(https://darts.isas.jaxa.jp/ planet/pdap/selene/index.html.ja) から参加 者各自が自分で選んでダウンロードしたSPデータを 処理し、結果をグラフ化するなど、参加者が自分で 手を動かして解析の過程を体験する.課題演習を行 いました.過去の実習会では、コマンドラインでの 作業が多くなる課題で、CUI環境に慣れていない受 講生が戸惑う様子も見受けられていましたが、今回 はそのようなことはほとんどなく、全ての受講生がス ムーズに課題を進めることができていたようです.こ

の辺りは学生の持っているスキルセットの変化も感じられました.

最後に総まとめとして,各自月面の対象地域を選 んで、特徴的な地点のSPのスペクトルデータのプ ロットと、その地点の位置がわかる地図画像を組み 合わせた図版を作成する実習を行い,最終日午後に 成果発表会を行いました. 解析対象として選ばれた のは、Tycho, Copernicus, Schrödingerなどの 著名なクレーターや、南極域のShackletonクレー ター、中国の嫦娥5号(Chang'e 5)の着陸点とその 近くの火山Mons Rümkerなど、いずれも月の科学 で歴史的にも、また現在も注目されている地域ばか りでした. 図2に東京大学の西山学さんが作成した Mons Rümker領域のSPデータのプロットと観測 点を示す地図を示します. このように, 受講生の皆さ んは短期間のうちに課題を達成して、投稿論文にも 掲載可能なレベルの図版を作成することができるよ うになり、成果発表会の中では結果の科学的な解釈 まで含む質疑応答も行われました. この実習会で得 た経験を直接的、間接的に活かして、月科学、可視・ 近赤外分光反射データ解析の分野はもちろんのこ と、あらゆる惑星科学の分野で一つでも多くの、そし て少しでも良い研究成果が受講生の皆さんから出て



図2: 実習会成果物として作成されたMons Rümker領域のSPデータのプロットと観測点を示す地図(西山学(東京大学)さん作成,提供). (a) の原図はQian et al. (2018)[4]のFig. 13.

くることを期待したいと思います.

今後も月惑星探査データ解析講習会は開催予定 です.次回のテーマは未定ですが,本稿後半に掲載 した,今回の受講生の皆さんから寄せられた意見・ コメントなどを元に企画を立てたいと思いますのでど うぞご期待ください.また,テーマの提案や会場提 供のお申し出なども歓迎します.ご意見や提案は惑 星探査育英会のML(school\_mission@wakusei. jp)宛にメールいただくか,お近くの惑星探査育英会 メンバにお声がけください.

## 実施概要

- **開催日程**:2021年3月24日~26日
- 主催:月惑星探查育英会 実行委員会
- 後援:日本惑星科学会,惑星科学研究センター (CPS)
- 講師:山本 聡(産業技術総合研究所地質調査 総合センター)
- **当日参加者**:19名
  - 受講生9名(学部生2,修士課程3,博士課程3, PD1)
  - 講師1名, 専任TA2名, 世話人7名

- TA:金丸 仁明(宇宙科学研究所,参加者より), 会津大学学生(専任TA)2名
- **世話人**:平田 成, 出村 裕英, 大竹 真紀子, 嵩 由芙子, 小川 佳子, 本田 親寿, 北里 宏平(会津大)

## 実習会内容

- •参加者自己紹介
- •ハイパースペクトルリモートセンシングの基礎
- •課題演習基礎編
- •課題演習応用編
- •成果発表会

## 受講生アンケート回答

#### 実習の内容について

- データ補正の流れを丁寧に教えていただき、大変勉強になりました。ありがとうございました。
- これまで「かぐや」のデータを触ったことはありましたが、SPデータの利用方法があまり分かっておらず、研究としての利用には障壁を感じていました。しかし、本実習でデータのダウンロード方法等から学ぶことができ、これから機会があれ

第13回月惑星探査データ解析実習会を終えて/平田他

ば研究でも使用していきたいと思いました.ま た,これまでの研究ではスペクトルデータに触 れてきたわけではなかったのですが,本実習で は初心者向けの簡単な処理から非常に丁寧に 教えてくださり,良い勉強の機会になったと思い ます.この場をお借りして,講師の山本さんや平 田さん・出村さんをはじめ世話人の方々に感謝申 し上げます.ありがとうございました.

- スペクトル解析について、基本的な内容から実 践的な課題までを網羅していただいて、大変勉 強になりました。今後スペクトルデータを使って 研究をしてみたいと思いました。また、そのため に必要な基礎(の基礎)は学べたので今後の研 究活動の糧になりそうです。
- ハイパースペクトルはこれまで扱ったことがなかったが、今回の実習で知識や処理技術が身についた。
- 山本先生はじめ、みなさまが丁寧に1から説明 をしてくださったので、スペクトルについて無知 でしたが実際の論文を読むのに非常に役立っ ています。ありがとうございます。

#### オンライン形式による実施について

- COVID-19の影響もありZoomによる開催でしたが、個人的には移動の手間が無かったため参加のハードルが低かったです。もし現地開催が再開できたとしても、Zoom等での参加も引き続き可能だと嬉しいです。
- 参加者としては不便もなく、移動することもないので、負担は軽いと思いました、集まってワイワイしたいところではありますが、オンラインの方が参加へのハードルは下がって助かる面も多くありました。
- 事前に配布された資料のおかげで、オンラインであるにもかかわらずスムーズに実習を進めることができた。
- 初めての参加だったが、Zoomで気軽に参加で きたため参加登録もしやすかったです.ただ、 横の繋がりが作りにくかったのが少し寂しさは ありました.
- •実習会の方々のおかげで,特に不便な点はあり ませんでした.

#### 次回以降の実習会で取り上げて欲しい題材

- 月、火星よりも整備されていない、Cassiniや Gallileo, New Horizonsといった探査機デー タ補正などを取り上げていただけると嬉しいで す。
- 第4回実習会の内容(特にENVIを用いた解析
   手法とクレーター年代学)
- クレーターカウンティング
- ・地震, レーダーなどの内部探査

## 参考文献

- 月惑星探查育英会実習会世話人一同,2009,日本 惑星科学会誌 18,122.
- [2] 本田親寿ほか, 2017, 日本惑星科学会誌 26, 30.
- [3] 出村裕英ほか, 2020, 日本惑星科学会誌 29, 90.
- [4] Qian, Y. Q. et al., 2018, JGR Planets 123, 1407.

# 2021年度日本惑星科学会秋季講演会のお知らせ 2021年日本惑星科学会秋季講演会実行委員長(名古屋LOC) 渡邊 誠一郎<sup>1</sup>

2021年日本惑星科学会秋季講演会は対面+オンラ インのハイブリッドで開催します.以下は,2021年 5月末時点での開催案内です. 最新情報は随時, 講演会ホームページhttps://www.wakusei.ip/ meetings/fallmeeting/2021/ に掲載します.

## 1. 日程と会場

日程:2021年9月16(木)-19日(日)(19日は一般向け 講演会「はやぶさ2:探査と地上分析」) 9月17日に総会.および最優秀研究者賞受賞講演会 を予定しています. 懇親会は行わない予定です.

会場:名古屋市立大学田辺通キャンパス宮田専治記 念ホール 〒467-8603 名古屋市瑞穂区田辺通3-1

https://www.nagoya-cu.ac.jp/access/tanabe/

## 2. 発表形式について

#### ●発表資格

著者に本会の会員(発表申込み時にすでに会員資格 を得ていること)を含むこと、著者に会員を含まない 申込みは却下します.

#### ●発表形式とプログラム編成

対面+オンラインのハイブリッドで行います. 申し込

```
1.名古屋大学大学院環境学研究科
seicoro@eps.nagoya-u.ac.jp
```

みは 1:口頭発表 2:ポスター発表 3:どちらでも よい の3種類で受け付けます、筆頭著者として申し 込めるのは「口頭発表 | もしくは「どちらでもよい | か ら1件.「ポスター発表 | もしくは「どちらでもよい | か ら1件、の合計2件までとします。発表の採否、発表形 式の決定、およびプログラム編成 については、実行 委員会が決定いたします.予めご了承ください.

●□頭発表:会場で直接発表もしくはzoomにて発 表、1講演につき12分前後(質疑応答含む)を予定し ています.

●ポスター発表:Slackに電子版をアップした上で、 A:会場 もしくは B: zoomブレイクアウトルーム での発表をお願いします. 会場での用紙サイズ(A0 横841mm 縦1189mm). フラッシュトークに関して は、講演申し込み時に希望を入力ください、枠が確 保できればZoomで、できなければオンデマンドの 予定です.

#### ●最優秀発表賞セッション

本講演において第一著者として発表する博士の学位 を有していない学生会員は. 最優秀発表賞に応募で きます.予備審査を通過された応募者には,最優秀 発表賞セッションでの口頭発表(15分前後)と、選 考委員との議論を行って頂きます. これらに加えて 応募者は同一内容のポスター講演を行うことができ ます(ポスター講演は審査しません。また、このポス ターは申込件数に数えません).別途定める今年の 要領に従ってください. 詳細は本会メーリングリスト

《目次へ

2021年度日本惑星科学会秋季講演会のお知らせ/渡邊

(oml) および本会ホームページ「2021年秋季講演会のお知らせ」でお知らせいたします.

## 3. 参加および発表の申込み方法

本会ホームページの[参加/発表/予稿登録]よりお申 込みください.事前参加申込みは設定しません.こ れらの申込みは,すべて本会ホームページ上で行い ます.申込みには,(1)本会の会員番号もしくは非会 員登録番号,(2)本会ホームページに会員または非会 員としてログインするためのパスワード,の両方が必 要になります.本会への新規入会登録および非会員 登録も本会ホームページから行ってください.なお, 非会員登録には1日以上,新規入会登録には2週間 以上かかりますので,発表申込みを予定されている 非会員の方はできる限り早目に登録手続きを開始し てください.

## 4. 本秋季講演会までの主な スケジュール(予定)

2021年6月18日(金)参加申込,発表申込,支払い, 予稿原稿受付開始 2021年7月16日(金)発表申込締切,最優秀発表賞予 稿原稿の締切 2021年8月27日(金)予稿原稿締切,支払い締切

## 5. 予稿集について

講演会に先立って本会ホームページにPDFを用意 し、ダウンロードできるようにする予定です.

## 6. 参加費

正会員 4000 円, 学生会員 3000 円, 非会員 5000 円

発表をしない学部生・M1 に限り,参加費を無料とし ます.参加するためには学生会員もしくは非会員登 録が必要です.

シニア会員の参加費については、一般会員と同額と します。

本会ホームページ「2021年秋季講演会のお知らせ」か

ら支払いサイト(イベント参加WEB受付システム「イベ ントペイ」を利用)に移動し、クレジットカードもしくは コンビニ決済で参加費の支払いを行なっていただきま す. 領収書は、支払い完了時に送信されるメール記載 のURLからダウンロードできます.

## 7. 交通手段

地下鉄桜通線「瑞穂区役所」駅から徒歩15分,また は、名城線「総合リハビリセンター」駅から徒歩15分 です。市バスの場合は、金山駅から金山7番のりばよ り金山16「市大薬学部」下車、または、金山駅から金 山8番のりばより金山14「市大薬学部」下車です。市 バスは「前乗り、後降り」、料金は大人210円で先払 い、Suica等の交通系ICカードも利用できます。名 古屋駅からは地下鉄桜通線が便利です。市バスなら ば、会場の近くで下車できます。

## 8. その他

(1) 現時点では託児所を確保できるか検討中です. 状況がわかり次第ホームページでご案内します.
(2) このお知らせの内容は変更される可能性があります.ホームページで最新の情報をご確認ください.
(3) その他,名古屋LOCへのお問い合わせはaloc-ml@wakusei.jp までご連絡お願いします.

# 2021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

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,2021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)で申請くだ さい.奮ってご応募いただくようご案内申し上げます.

## (1)国際学会出席旅費の支援

#### ●支援対象

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

●助成金額・件数:一件あたり10~30万円程度,年 間10件程度

#### ●申し込み受付時期

応募締切り2021年8月31日:2021年10月から2022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2022年2月28日:2022年4月から2022年 9月の期間に開催初日が予定される国際学会の参加 者対象

## (2)国際学会開催の支援

#### ●支援対象

宇宙科学研究を推進している国内の学術団体(研究 所,大学等)で,宇宙理学(飛翔体を用いた観測,探 査,実験に関連する理学研究)及び宇宙工学(宇宙 航空工学を含む)に関する国際学会,国際研究集会 の国内開催を主催しようとする団体.リモートでの開 催も支援対象です.

●助成金額・件数:一件あたり20~50万円程度,年 間4件程度

#### ●申し込み受付時期

応募締切り2021年8月31日:2021年10月から2022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2022年2月28日:2022年4月から2022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

<sup>1.</sup>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) 大野 遼(おおの はるか)
- (2) Crustal evolution of asteroid Vesta as inferred from silica polymorphs in eucrites
- (3) ユークライト隕石中のシリカ多形から読み解く小 惑星ベスタ地殻の進化過程
- (4) 東京大学大学院 理学系研究科 地球惑星科学 専攻
- (5) 2020年3月
- (6) 千葉工業大学 惑星探査研究センター
- (1) 丹秀也(たんしゅうや)
- (2) Laboratory experiments and telescope observations toward understanding physicochemical properties of Europa's surface materials
- (3) エウロパ表面物質の物理化学特性の理解に向け た室内実験および望遠鏡観測
- (4) 東京大学大学院 理学系研究科 地球惑星科学 専攻
- (5) 2021年3月
- (6) 東京工業大学 地球生命研究所
- (1) 西川 泰弘(にしかわやすひろ)
- (2) Estimation of the amplitude of the Martian seismic hum from atmospheric global circulation models and expected observation challenges.

- (4) パリ第七大学 Sciences de la Terre et de l'Environnement (地球環境科学)
- (5) 2020年12月
- (6) 高知工科大学 システム工学群



- (1) 西谷 隆介(にしたに りゅうすけ)
- (2) The Role of Methane Hydrate on Thermal Evolutions of Icy Moons
- (3) 氷衛星熱進化におけるメタンハイドレートの役割
- (4) 大阪大学大学院 理学研究科 宇宙地球科学専 攻
- (5) 2021年3月
- (6) 会津大学 コンピュータ理工学部

93

(3) -

## 修士論文

- (1) 紅山 仁(べにやま じん)
- (2) 木曽Tomo-e Gozenを用いた高速移動天体検 出システムの開発及び即時追観測による微小地 球接近小惑星の観測的研究
- (3) -
- (4) 東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻
- (5) 2021年3月
- (6) 東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 博 士課程



# 編集後記

20年前までは、大人が小惑星のことを見聞きする 機会はごく稀だったでしょう.しかし、「はやぶさ」や 「はやぶさ2」の活躍が、人々の耳に届き、小惑星は ぐっと身近な存在になりました.一方、小さな子供に とって、小惑星はもともと身近な天体です.多くの子 供は強烈に恐竜に惹きつけられ、恐竜を絶滅させた 要因として、隕石に出会うのです.それから、繰り返 し、繰り返し、隕石はどこからきたのか、と周りの大 人に尋ね、小惑星という言葉に触れることになりま す.実際には、宇宙からきたよ、と答える大人が多く て、思ったより小惑星までたどり着いていないかもし れません、しかし、この編集後記を読んでいるみなさ まの周りの子供は、その限りではないでしょう.我が 家では、3歳の息子から、隕石はどうしてショウガクセ イタイからやってくるの?としょっちゅう聞かれます.

私は、"小学生隊"からとんでくる隕石を想像して、に やりとしています。

津田雄一博士(JAXA・宇宙研)の巻頭言で, はや ぶさ2探査計画の経験から, 偶発的なチャンスを拾 うための"肥料蒔き"の重要性が述べられています. これから始まる小惑星リュウグウの初期分析から, どのような発見がもたらされるのでしょうか. 撒かれ た肥料により, 思ってもないような小惑星の側面が 飛び出す結果になるのか, 期待せずにはいられませ ん. 本号には, 2020年度最優秀発表賞受賞論文, 学 位論文紹介が掲載されております. 惑星科学のこれ からを担う若手研究者の研究が紹介されていますの で, ぜひご一読ください.

みなさまからの次号への投稿を、心からお待ちしております.(瀧川)

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。

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

〒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

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

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.

定 価 一部 1,925円(税込·送料込)

編集人 三浦 均(日本惑星科学会編集専門委員会委員長)
 印刷所 〒224-0044 神奈川県横浜市都筑区川向町787-1 株式会社 シュービ
 発行所 〒105-0012 東京都港区芝大門2-1-16 芝大門MF ビルB1階
 株式会社イーサイド登録センター内 日本惑星科学会
 e-mail:staff@wakusei.jp
 TEL:03-6435-8789/FAX:03-6435-8790
 (連絡はできる限り電子メールをお使いいただきますようご協力お願いいたします)

加川 加久, 工宿 具之, 両崎 隆可, 小川 和律, 鎌田 後一, 不朽 男式, 羔滓 耕介, 小八保 夾一 郎, 坂谷 尚哉, 杉山 耕一朗, 関口 朋彦, 瀧 哲朗, 田中 秀和, 谷川 享行, 長 勇一郎, 成田 憲保, 野津 翔太, はしもと じょーじ, 濱野 景子, 本田 親寿, 諸田 智克, 山本 聡, 和田 浩二, 渡部 潤一 2021年6月25日発行

日本惑星科学会誌 遊・星・人 第30巻 第2号

三浦 均 [編集長] 瀧川 晶 [編集幹事] 荒川 創太, 上椙 真之, 岡崎 隆司, 小川 和律, 鎌田 俊一, 木村 勇気, 黒澤 耕介, 小久保 英一 郎, 坂谷 尚哉, 杉山 耕一朗, 関口 朋彦, 瀧 哲朗, 田中 秀和, 谷川 享行, 長 勇一郎, 成田 憲保, 野津 翔士 はしまと じょーじ 湾野 暑子 本田 親表 茎田 知古 山太 腔 和田 浩二 渡郊 潤一

編集委員

## 学会誌原稿作成の手引き

#### 日本惑星科学会編集専門委員会

#### 原稿の様式

#### ○投稿原稿:

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

#### ○最終稿:

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

投稿原稿送り状の雛型および各チェックリストは ウエブサイト

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

#### 2. タイトル

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

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

#### 3. 要旨

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

#### 4. セクション

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

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

#### 5. 述語

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

#### 6. 字体

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

7. 句読点

句読点は全角の","と"."を用いる.

#### 8. 図. 表

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

#### 図作成のガイドライン:

原則として、電子ファイルとして作成すること、解像度 は印刷時実寸で300dpi相当以上、ファイル形式は TIFF, EPS, PDF, JPEG, PNG が望ましい。 やむをえない場合に限り、写真も可とする.その際は L版サイズ以上の大きさで鮮明な写真を送付すること。 送付された写真は原則として返却しない.カラーペー ジは、著者の費用負担により可能.ただし、著者が希望 し、かつ編集委員会が認めたものについては、印刷費 用を学会が負担する.カラー印刷の希望が無い場合、 電子版のみにカラー画像が掲載され、冊子体には白黒 で印刷される.

#### 9. 脚注

脚注は"l"などの記号をつける.

#### 10. 文献の引用

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

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

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

#### 参考文献

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

[2] 惑星太郎, 1993, 天文月報 86, 186.

[3] Bohren, C. F. and Huffman, D. R., 1983, Absorption and Scattering of Light by Small Particles (New York: Wiley).

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

#### 11. 投稿原稿送付先

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

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



# The Japanese Society for Planetary Sciences

