

遊



日本惑星科学会誌

Planetary
People **3**
September 2023 vol32 no

星

人

- 2022年度最優秀発表賞受賞論文:
円盤ダスト面密度と惑星形成への影響
- フロンティアセミナー・テキスト:
宇宙での生命の起源 第3回
- 火星衛星探査MMX その2 /
木星氷衛星探査JUICE その7
- 火の鳥はやぶさ未来編 その30 /
金星探査機の挑戦 その55

日本惑星科学会誌「遊・星・人」投稿規定

日本惑星科学会

1. 投稿可能な記事

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

2. 投稿資格者

日本惑星科学会会員及び編集委員会が適当と認めた者。

3. 投稿原稿及びその送付

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

4. 査読及びその後の取扱い

- ①投稿原稿は編集専門委員長が受領した後、原著論文や解説論文または編集専門委員会が必要と認めた記事については査読者が選定され査読に付される。

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

5. 校正

校正は投稿者の責任において行う、また、校正は原則として誤植の訂正に限る。

6. 別刷り

論文の PDF ファイルを提供する。

7. 著作権

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

8. 倫理規定

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

9. 投稿料・出版費

原則として無料。

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

日本惑星科学会誌 遊・星・人
第32巻 第3号
目次

巻頭言 三河内 岳	175
<hr/>	
「2022年度最優秀発表賞受賞論文」 小質量惑星が駆動するガス流れ場:円盤ダスト面密度と惑星形成への影響 桑原 歩, 黒川 宏之, 谷川 享行, 奥住 聡, 井田 茂	176
<hr/>	
「フロンティアセミナー・テキスト」 宇宙での生命の起源, 進化, 伝播および探査 第3回 大気圏および宇宙における生命実験と探査 山岸 明彦	186
<hr/>	
もう一つの月世界へ:火星衛星探査計画MMX その2 ~火星の月の攻略法~ 中村 智樹, 竹尾 洋介, 池田 人	216
みんなでふたたび木星へ, そして氷衛星へ その7 ~木星系氷衛星探査機JUICE, 日本からの参加の経緯と現状~ 齋藤 義文, 関根 康人, JUICE-Japanチーム	222
火の鳥「はやぶさ」未来編 その30 ~ Ryugu「石」分析チームによる科学成果~ 中村 智樹, 天野 香菜, 松岡 萌, 黒澤 耕介, 二宮 和彦, 大澤 崇人, 木村 勇氣, 他3名	226
一番星へ行こう! 日本の金星探査機の挑戦 その55 ~GCMで再現された金星大気中の波と赤道ジェットの準周期的変動~ 高木 征弘, 安藤 紘基, 今井 正堯, 杉本 憲彦, 松田 佳久	236
<hr/>	
新連載「みつめる, みつもる」その0 連載開始記念企画「惑星科学研究における見積もり」座談会 瀧 哲朗, 田中 秀和, 黒澤 耕介, 三浦 均	244
惑星ラボからこんにちは! その9 ~東京大学大学院総合文化研究科~ 黒川 宏之, 小宮 剛, 鈴木 建, 成田 憲保, 諏訪 雄大, 鹿山 雅裕, 澤木 佑介, 他5名	260
遊星人の海外研究記 その11 ~メトロの客は, プレソーラー粒子と私だけ~ 瀧川 晶	264
第15回月惑星探査データ解析実習会を終えて 出村 裕英, 月惑星探査データ解析実習会世話人一同	269
「2023年度iSALE講習会」参加報告書 豊田 優佳里	272
2023年度 宇宙科学奨励賞公募のご案内 公益財団法人 宇宙科学振興会	276
JSPS Information	277

Contents

Preface	T. Mikouchi	175
<hr/>		
Gas flow induced by low-mass planets: Its influence on the dust surface density and planet formation	A. Kuwahara, H. Kurokawa, T. Tanigawa, S. Okuzumi, S. Ida	176
Origin, evolution, distribution and exploration of life in space. Part 3. Experiments and search for life in atmosphere and space.	A. Yamagishi	186
<hr/>		
Fly me to another moon world: Martian Moons eXploration (MMX) (2) - Mars Moon Strategy -	T. Nakamura Y. Takeo, H. Ikeda	216
To Jupiter again together and to icy moons (7) - JUPITER ICy moons Explorer JUICE: history of Japan's participation and current status -	Y. Saito, Y. Sekine, JUICE-Japan team	222
Phoenix "Hayabusa": A tale of the future (30) - Scientific results from the Ryugu "Stone" analysis team -	T. Nakamura, K. Amano, M. Matsuoka, K. Kurosawa, K. Ninomiya, T. Osawa, and 4 authors	226
Road to the first star: Venus orbiter from Japan (55) - Quasi-periodic variations of waves and equatorial jet in the Venusian atmosphere reproduced in a GCM -	M. Takagi, H. Ando, M. Imai, N. Sugimoto, Y. Matsuda	236
<hr/>		
New Serials "Mitsumeru, Mitsumoru" (0), Special event to launch the serials: "Estimation in Planetary Science Research" roundtable discussion	T. Taki, H. Tanaka, K. Kurosawa, H. Miura	244
Hello from planetary labs! (9) - Graduate School of Arts and Sciences, University of Tokyo -	H. Kurokawa, T. Komiya, T. K. Suzuki, N. Narita, Y. Suwa, M. Kayama, and 6 authors	260
Letter from planetary people working abroad (11) - The only passengers on the Metro are presolar grains and myself -	A. Takigawa	264
Report of 15th exercise for data analysis in Lunar and planetary data explorations	H. Demura	269
Participation report in the iSALE short course in 2023	Y. M. Toyoda	272
Announcement of public offering for Space Science Incentive Award	Society for Promotion of Space Science	276
JSPS Information		277

巻頭言

「探査」と言うと、遊星人の読者の皆さんは9割以上の方々が「惑星探査」と連想するだろう。私の場合「惑星探査」もあるが、「隕石探査」もあり、およそ半々の感覚だ。しかし、これまで、その場・その時の状況でその割合は少しずつ異なって来た。直近は、小惑星リュウグウ試料の分析にどっぷりのために惑星探査の方が優勢である。逆にその前の10年ほどは隕石探査の方が優勢であった。2012-2013年に第54次南極地域観測隊(夏隊)として南極セル・ローンダーネ山地でのあすか隕石の採集から始まり、2019年に韓国隊に同行した南極エレファント・モレーンでの隕石採集があったからだ。ただし、リュウグウ試料の初期分析は試料帰還の前からももちろん準備が始まっていたし、およそ10年前の南極隕石探査の際は、ほぼ同時並行で小惑星イトカワ試料の分析があった。場面場面では、惑星探査も大きなウェイトを占めていたのである。さらに、その前の2006年以降しばらくはNASA スターダスト探査によるWild 2彗星塵の分析があったので惑星探査が優勢だったが、2000年頃はアメリカ・テキサス州／ニューメキシコ州の砂漠地域での隕石探査に凝っていた時期で、隕石探査の方が…と言うような状態である。つまり、両者は入り混じっているのである。私個人としてはこの状況を楽しませてもらっているし、長い目で見て両者がおおよそ半々ののが理想的な状況では無いかと考えている。

惑星探査も隕石探査も、惑星科学を推し進める上では非常に重要な役割を担っていることは言うまでも無い。特に物質科学的な側面の惑星科学では、隕石探査の重要性は非常に高いのは明らかだが、昨今はやや軽視されている気がする。これまでに、特に南極での隕石探査により回収された南極隕石から多くの新しい知見が得られてきたこと、そして、それは将来の隕石探査でも期待できることは留意しておくべきだろう。そのような知見がサンプルリターンも含めた惑星探査の基礎となって来たのだから。

要は、惑星科学、特に惑星物質科学をより健全に発展させて行くためには、惑星探査と隕石探査の2つの「探査」を両輪として、バランスよく研究の推進を行うことが肝要に感じる。

三河内 岳(東京大学 総合研究博物館)

「2022年度最優秀発表賞受賞論文」 小質量惑星が駆動するガス流れ場： 円盤ダスト面密度と惑星形成への影響

桑原 歩^{1,2,3}, 黒川 宏之^{4,3}, 谷川 享行⁵, 奥住 聡², 井田 茂³

2023年3月27日受領, 査読を経て2023年7月28日受理

(要旨) 近年の観測から、多くの原始惑星系円盤においてダストの空間分布にリング・ギャップ構造が見つかっている。ダストのリング・ギャップ構造の惑星による起源として、従来研究の多くは海王星質量以上の惑星(≥ 15地球質量)によるガスギャップ形成の影響を議論してきた。本研究は、~ 1-20地球質量程度の小質量惑星に着目する。円盤内に埋もれた小質量惑星は、自身の重力によって周囲のガスの流れを乱す。円盤内に存在する小さなダストはガスの流れの影響を強く受ける。本稿では、小質量惑星が駆動するガス流れ場がダストの動力学に及ぼす影響に関する我々の研究について解説し、ガス流れ場によるダストのリング・ギャップ構造形成シナリオを新たに提案する。そして、本稿が提案するシナリオの観測的検証に向けた議論を行い、ガス流れ場が惑星成長率に及ぼす影響と系外惑星の質量・軌道半径分布への示唆についても議論する。

1. ダストの空間分布に見られる リング・ギャップ構造

惑星はガスとダストから成る原始惑星系円盤(以下、円盤)内で形成される。近年、円盤内で進行する惑星形成過程の謎に迫る手がかりが得られてきている。代表的な例が、Atacama Large Millimeter/submillimeter Array(ALMA)を用いた観測である。ALMAは電波帯で観測を行う望遠鏡であり、円盤の姿を高空間分解能で捉えることができる。ALMAを用いたダストの熱放射の観測から、円盤内の特定の位置においてダストが濃集または枯渇した領域が存在していることが明らかになった。ダストの空間分布に見られるこうした特徴は普遍的に存在することが示唆されており[1]、その構造は大まかに

にリング・ギャップ構造、三日月型構造、スパイラル構造の3つに分類される。本稿では、このうち特にリング・ギャップ構造に着目する。

軸対称のリング・ギャップ構造は現状最も頻繁に見つかっている円盤構造である。ダストの空間分布に構造が見つかっている天体の内、約8割がリング・ギャップ構造を有する[2]。リング・ギャップ構造は円盤内の~ 10-100 auの幅広い半径で見つかっており、リング及びギャップの幅は~ 数-数十au程度と様々である。分解能の限界のため円盤内側領域(≤ 10 au)の詳細を観測的に明らかにすることは難しいが、将来観測によって中心星に近い領域の調査が進み、リング・ギャップ構造の発見数も増える見込みがある[3]。

リング・ギャップ構造は一体どのようにして形成されるのか。鍵を握るのは円盤内におけるダストの運動である。まず、ダストは中心星重力と遠心力が釣り合った運動、すなわちケプラー角速度 Ω_K で中心星周りを回転しようとする。一方、円盤ガスには中心星重力と遠心力に加えて圧力勾配力が働くため、ケプラー回転とは異なる回転角速度 $\Omega = \Omega_K(1 - \eta)$ で

1.コペンハーゲン大学GLOBE Institute

2.東京工業大学理学院地球惑星科学系

3.東京工業大学地球生命研究所(ELSI)

4.東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻広域システム科学系

5.一関工業高等専門学校

ayumu.kuwahara@sund.ku.dk

中心星周りを回転する。ここで、 η は円盤ガスの圧力勾配に比例する無次元量である。圧力分布が滑らかであるような典型的な円盤モデルでは通常 $\eta > 0$ となり、円盤ガスはケプラー回転よりも遅く回転する。その結果、ダストはガスからの向かい風を受け、 η に比例した速度で中心星方向に移動する。これをダストの動径移動と呼ぶ。

リング・ギャップ構造を形成するには、何らかの機構によってダストの移動速度を変化させ、ダストをせき止めたり渋滞を引き起こさせる必要がある。これまでに数多くの機構が提案されている。例えば、デッドゾーンと呼ばれる円盤乱流強度が低い領域の縁におけるダスト濃集や[4]、円盤内において氷が昇華する場所であるスノーライン付近における氷ダストの凝縮や焼結[5]、円盤内で生じる様々な不安定性—永年重力不安定性[6]や熱波不安定[7]—、磁気駆動円盤風の影響[8]などが提案されている。

そして、リング・ギャップ構造の形成機構として惑星の影響も考えられている。従来研究の多くは惑星重力によって円盤ガスにギャップが形成される効果に着目する。本稿ではこの機構をガスギャップ機構と呼ぶことにする。円盤と惑星の相互作用の結果、惑星軌道周辺にガス面密度が低下した領域であるガスギャップが形成される。ガス面密度の変化に応じてガスの圧力分布、ひいては η が変化する。ガスギャップの外縁では η の符号が切り替わる。ダストは η に比例した速度で動径方向に移動するため、 η に生じた変化がダストの渋滞やせき止めを引き起こしリング・ギャップ構造が形成される。

リング・ギャップ構造が多く見つかった $\geq 10\text{au}$ 領域では、典型的には惑星質量が海王星質量以上($\geq 15 M_{\oplus}$)になるとガスギャップ形成が生じる[9]。ここで M_{\oplus} は地球質量である。ガスギャップ形成に伴い、 $\geq \text{mm}$ サイズの大きなダストの空間分布にリング・ギャップ構造が形成される。ただし、ガスギャップ形成基準は惑星質量の他、惑星の軌道長半径や円盤ガスの乱流粘性等にも依存する(後述:5.1小節)。円盤内側領域($\leq 10\text{au}$)を考える場合や乱流粘性が小さい場合は、海王星質量以下の惑星でもリング・ギャップ構造形成が可能である[10]。

ガスギャップ機構にはいくつかの課題がある。この機構の特徴として円盤ガスとダストの空間分布に

相関が現れることが期待されるが¹、高空間分解能で複数の円盤のガス及びダストの分布を観測した結果、ガスギャップとダストギャップの位置は必ずしも一致しないことが分かった[11, 12]。観測されたダストギャップが惑星によって形成されたかと仮定し、その幅から惑星質量を推定する試みがなされている。推定された惑星質量は地球質量程度から超木星質量まで幅広い値を取るが、その内約7割が $\sim 0.1\text{--}10$ 木星質量の範囲に分布する[2]²。こうした大質量惑星の存在は惑星へのガス降着に伴う水素原子の輝線(H α 放射)の検出によっても確かめられると期待される一方、現状惑星由来のものと思われるH α 放射の検出は数例しか報告されていない[13]。中心星から離れた遠方の領域($> 10\text{au}$)では惑星の検出が困難なため、惑星の存在頻度は観測的に未だ明らかになっていない。しかし、惑星分布生成モデルと呼ばれる理論モデルの結果や、中心星に近い領域($< 10\text{au}$)で観測的に推定されている惑星の存在頻度を遠方領域に外挿する試みによると、 $> 10\text{au}$ 領域における > 0.1 木星質量惑星の推定存在頻度は10%を下回ることが予想される[14]。ダストのリング・ギャップ構造は普遍的に存在すると考えられているが、その大半をガスギャップ機構で説明することは難しい。

ここでは、本稿の第一著者が筆頭著者を務める参考文献[15]の内容に基づき、ガスギャップ形成を伴わない小質量惑星によるダストのリング・ギャップ構造形成シナリオについて解説する。なお、本稿では暴走的ガス捕獲に至っていない $\leq 20 M_{\oplus}$ の惑星を小質量惑星と呼ぶことにする³。小質量惑星はその重力によって周囲にガスの複雑な3次元流れ場を形成する[17, 18](3節)。このガス流れ場が $\leq \text{mm}\text{--}\text{cm}$ サイズの小さなダストの動径移動速度を変化させ、ダストの面密度分布に影響を及ぼす(4-5節)。更に

¹ただし、観測的に検出するのが困難な浅いガスギャップでもダストのリング・ギャップ構造形成が可能であるという報告には注意する必要がある(5.1小節)。

²<http://ppvii.org/chapter/12/>で公開されているデータを使用。ただし、ダストギャップ幅から推定される惑星質量には最大で一桁程度の不定性があることに注意する必要がある。この不定性は、主に乱流粘性などの円盤パラメータに起因する。

³ただし、暴走ガス捕獲が生じる惑星質量は惑星へのダスト集積率や惑星大気中のダスト不透明度に依存する[16]。

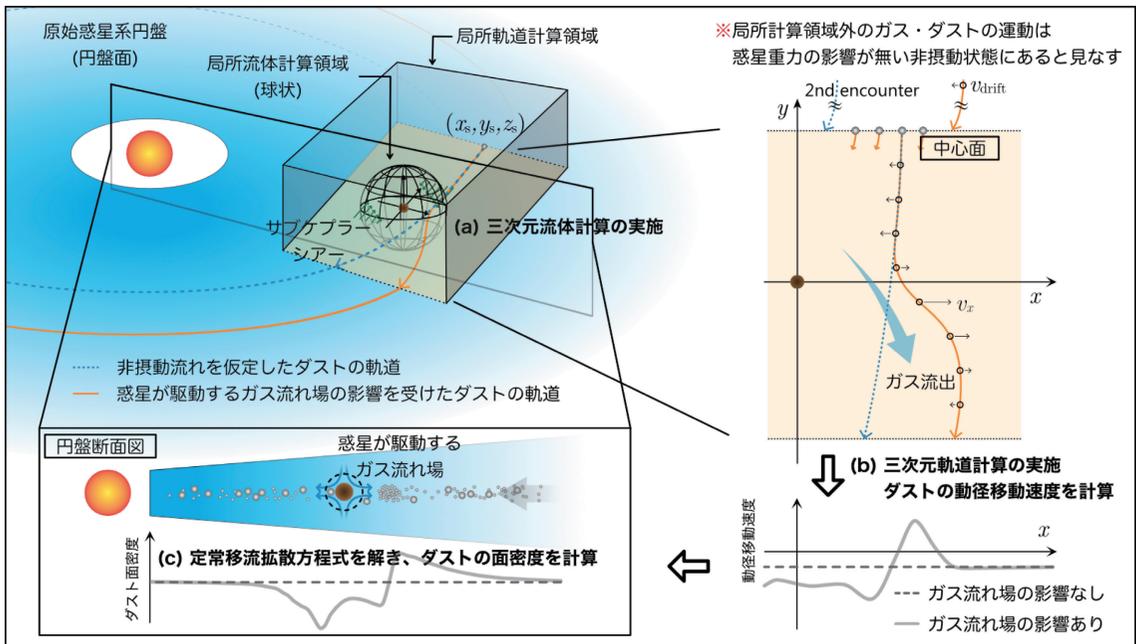


図1: モデル及び手法の概念図. (a) 円軌道に固定された惑星を中心とした局所共回転座標系を用いて3次元流体計算を実施(論文I [19]). 外側境界条件としてサブケプラーシアー流を与える. (b) 流体計算結果を元に, 局所共回転座標系においてガス流れ場の影響を受けたダストの軌道を計算する(図中の橙線; 論文II [20]). 各軌道上のダストの位置と速度 v_x をサンプリングし, 円盤動径方向(x 軸方向)のダストの平均的な速度を計算する. (c) 得られたダストの速度を移流拡散方程式に組み込み, ダスト面密度を計算する. 右上に示された拡大図中の v_{drift} は非摂動状態におけるダストの動径移動速度(定常ドリフト速度)を表す. Kuwahara et al. [15]を元に改変して掲載.

本稿では参考文献[15]の内容に加え, 実際の円盤観測例にも言及しつつ, 円盤観測及び惑星系形成過程への示唆を議論する(6-7節).

なお, 惑星周りのガス流れ場の性質, 及びガス流れ場がダストの運動に及ぼす影響については, 本稿の第一著者の別の論文『原始惑星が駆動するガス流: その3次元形態と性質について』(以降, 論文I [19])及び『原始惑星が駆動するガス流: ペブル集積への影響』(以降, 論文II [20])も合わせて参照されたい.

2. 計算モデルと手法の概要

本稿における状況設定を概観しつつ, 計算モデルと手法の概要を簡潔にまとめる(図1). 本稿では円軌道に固定された一つの惑星が円盤内に埋もれている状況を考える. 円盤ガスとダストの自己重力は無視する. (a) 暴走ガス捕獲が生じていない小質量惑星を想定し, 惑星周りの円盤ガスの3次元的な流れを計算する. 円盤ガスの乱流粘性等よっては海王星質

量以下の惑星でもガスギャップ形成が生じることもあるが(1節), 本研究では惑星によるガスギャップ形成は考えない. (b) 次に, 流体計算結果を元にガス流れ場がダストの動力学に及ぼす影響を調べ, ダストの動径方向の速度を見積もる. (c) 得られたダストの動径移動速度を円盤動径方向1次元の移流拡散方程式に組み込み, ダスト面密度を計算する.

3. 惑星が駆動するガス流れ場の概要

円盤内に埋もれた小質量惑星は周囲に複雑なガス流れ場を形成する(図2a及び3a). 本稿において重要となる点を以下に列挙する. (a) 円盤ガスが惑星重力圏に流入し, 円盤中心面を通過して円盤動径方向(惑星軌道の内外)に流出する. (b) 円盤ガスはケプラー回転よりも遅く回転しているので, 中心星周りをケプラー回転する惑星は円盤ガスからの向かい風を受ける(1節). このとき, 惑星が円盤ガスから受ける向かい風の寄与が強まるほど惑星軌道の外側(内側)

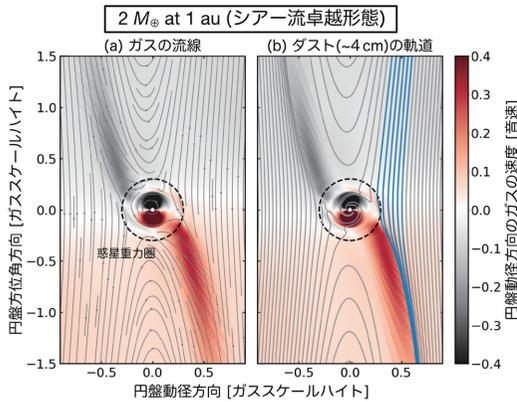


図2: (a) 円盤中心面におけるガスの流れ線(シアースト卓越形態). カラーカウンターは円盤動径方向のガスの速度を表す. 周囲の流れに比べて色が際立っている部分が惑星重力圏からのガス流出を表す. (b) ガス流れ場の影響を受けたダストの軌道. 青で強調した実線はガス流出によって軌道半径が大きく変化するダストの軌道を表す. Kuwahara et al. [15] を元に改変して掲載.

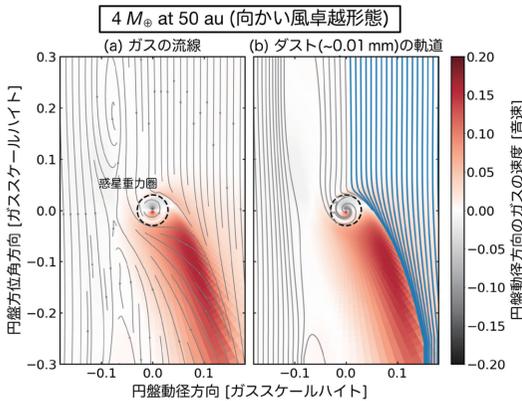


図3: 図2と同様. ただし向かい風卓越形態の流れ場を表す.

に向かって生じるガス流出は強まる(弱まる). 本稿では, 論文 I の定義に基づき, ガス流れ場を「シアースト卓越形態(向かい風が弱いとき; 図2a)」と「向かい風卓越形態(向かい風が強いとき; 図3a)」の2つに分類する. なお, 実際の流体計算では惑星が円盤ガスから受ける向かい風のマッハ数をパラメータとしている. 典型的な粘性降着円盤モデル[e.g., 21]を仮定すると向かい風のマッハ数は円盤外側ほど大きくなる. 詳細は参考文献[15]を参照されたい.

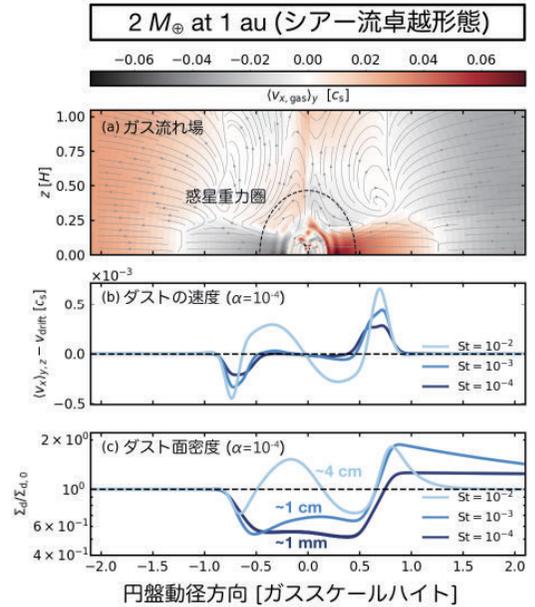


図4: (a) シアースト卓越形態のガス流れ場. カラーカウンターは局所流体計算領域内で y 方向に平均化されたガスの x 方向の速度を表す. (b) ガス流れ場の影響を受けたダストの速度. ただし定常ドリフト速度との差をプロットした. 色の違いはガス抵抗の強さを表すストークス数の違いに対応する. ストークス数が小さいほど強いガス抵抗を受ける. 典型的な粘性降着円盤モデル[21]を仮定し, 1 au において各ストークス数に対応するダストサイズを併記した. (c) ガス流れ場の影響を受けたダスト面密度の定常解. なお, パネルb,c では $\alpha = 10^{-4}$ とした. Kuwahara et al. [15] を元に改変して掲載.

4. ガス流れ場がダスト面密度に及ぼす影響

円盤内に存在する <mm-cm サイズの小さなダストは, 惑星と会合する際にガス流れ場の影響を受けて軌道半径が大きく変化する[22, 23]. すなわち, ガス流れ場がダストの動径移動速度を変化させ, ダストの空間分布に構造を形成する可能性がある(1節). これを調べるために, 筆者らはまずガス流れ場の影響を考慮したダストの軌道力学計算を行った(図2b及び3b). 次に, 軌道計算結果からダストの動径移動速度を求めた. 得られたダストの動径移動速度を定常状態を仮定した移流拡散方程式に代入し, ダスト面密度を計算した. 本稿ではガスの乱流によってダストの拡散が生じると考え, ダストの拡散度合いは乱流の強度を表す無次元パラメータ $a = 10^{-5}-10^{-3}$

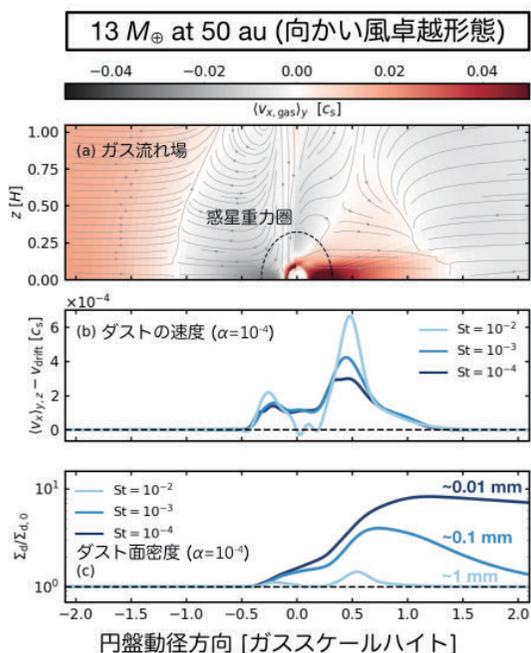


図5: 図4と同様。ただし向かい風卓越形態のガス流れ場とその影響を表す。また、 $\alpha = 10^{-4}$ とした。(c)では50 auにおいて各ストークス数に対応するダストサイズを併記した。

で記述する。 α が大きいほど拡散度合いが強いことを意味する。

続く4.1小節及び4.2小節では、定常移流拡散方程式を解いて得られた結果のうち、代表的な二つの結果を紹介する。なお、流体計算及び軌道計算は局所座標系で行うが、局所計算領域外のガス・ダストの運動は惑星重力の影響が無い非摂動状態にあると仮定し、ダスト面密度を計算する際は局所計算領域外も含めた円盤一周に渡るダストの運動を考慮している(図1)。詳細は参考文献[15]を参照されたい。

4.1 シアー流卓越形態のとき

惑星が円盤ガスから受ける向かい風の寄与が小さいとき、すなわち、惑星が駆動するガス流れ場がシアー流卓越形態であるときの一連の結果を図4に示した。図4aは1 auにおいて $2 M_{\oplus}$ の惑星が駆動するガス流れ場を表し、カラーコンターは円盤半径方向のガスの速度を表す。中心星方向に向かって移動するダストが惑星軌道付近に達した際、惑星軌道の内外に向かって生じるガス流出の影響を受けて移動

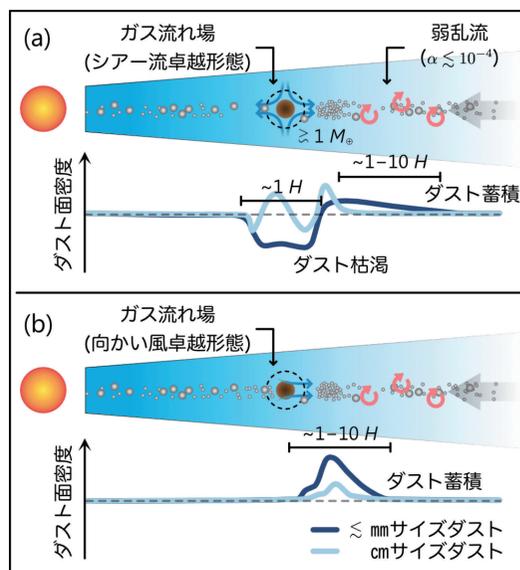


図6: ガス流れ場機構によるリング・ギャップ構造形成シナリオのため。ガス流れ場が(a) シアー流卓越形態、及び(b) 向かい風卓越形態にあるときの結果をそれぞれ示した。Kuwahara et al.[15]を元に改変して掲載。

速度が変化する(図4b)。ガス流出と重なる位置に二つの特徴的なピークが現れている。ガス流出の影響を受け、ダストの中心星方向への移動は惑星軌道の外側で妨げられる一方、惑星軌道の内側では促進される。

ガス流出による惑星軌道外側でのダストせき止め、及び惑星軌道内側でのダスト掃き出しによって、惑星軌道付近でダスト面密度が大きく減少し、ダストギャップが形成される(図4c)。面密度の減少度合いはダストがガスから受ける抵抗の強さに依存する。ここで、ガス抵抗の強さを表す指標としてストークス数 St と呼ばれる無次元量がある。これはダストの運動がガスの流れに馴染むまでにかかる時間をケプラー時間で割った量で定義され、ストークス数が小さいほど強いガス抵抗を受けることを意味する。ストークス数が小さいほどより深いギャップが形成される。ダストギャップの幅はガス流出が支配的に生じる領域の幅と対応し、 $\sim 1H$ 程度である。ここで、 H は円盤の典型的な厚みを表すガススケールハイトである。

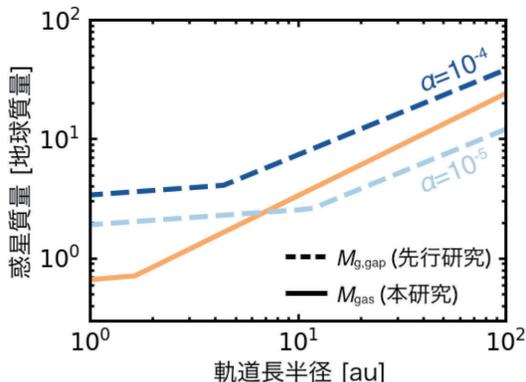


図7: ガス流れ場機構によるリング・ギャップ構造形成が可能な惑星質量の下限値(M_{gas} ; 実線) と、ガスギャップ形成が生じる惑星質量($M_{\text{g, gap}}$ [9]; 破線)。なお、 $M_{\text{g, gap}}$ は $\Sigma_{\text{min}} = 0.5 \Sigma_0$ となる際の惑星質量を表す[9]。線の色の違いは乱流強度の違いを表す。

4.2 向かい風卓越形態のとき

次に、惑星が円盤ガスから受ける向かい風の寄与が大きいつき、すなわち惑星が駆動するガス流れ場が向かい風卓越形態であるときの結果を見る。図5は $13 M_{\oplus}$ の惑星が 50 au に存在する場合に対応する。流れ場がシア一流卓越形態にあるときと異なる点として、円盤中心面付近におけるガス流出は惑星軌道外側でのみ支配的に生じていることが挙げられる(図5a)。そのため、ガス流れ場の影響を受けたダストの速度は正のピークのみを持つ(図5b)。

惑星軌道外側に向かって生じるガス流出によるダストせき止めのみが機能することで惑星軌道外側のダスト面密度が大きく増加し、ダストリングが形成される(図5c)。ダストのストークス数が小さいほどダスト面密度の増加具合は大きくなり、またダストリングの幅も大きくなる。惑星軌道外側でのダストの蓄積具合はダストの移流及び拡散フラックスの釣り合いによって決まるため、形成されるダストリングの幅は乱流強度 α に強く依存するが、典型的には $\sim 1\text{--}10 H$ 程度である[15]。

5. ガス流れ場機構によるダストのリング・ギャップ構造形成

筆者らは図4及び5に示すような計算を幅広いパラメータに対して行った[15]。その結果得られた小質

量惑星周りのガス流れ場によるダストリング・ギャップ形成条件は以下の通りである: (a) 惑星質量が $\geq 1 M_{\oplus}$ であること、かつ (b) ダストサイズが $\leq 1 \text{ cm}$ であること、かつ (c) 円盤ガスの乱流強度を表す無次元パラメータが $\alpha \leq 10^{-4}$ であること。なお、惑星質量及びダストサイズについては実際の数値計算で使用した無次元量を換算した値を記載した。詳細は参考文献[15]を参照されたい。以降、本稿ではこれをガス流れ場機構と呼ぶことにする。図6に上述の条件(a)–(c)をまとめた。

5.1 先行研究との比較

従来研究が提案する機構と我々が新たに提案するガス流れ場機構との間には、想定する惑星質量やダストサイズという点で違いがある。まずは惑星質量という観点から比較を行う。図7にガスギャップ形成が生じる惑星質量 $M_{\text{g, gap}}$ 、及びガス流れ場によるダストリング・ギャップ構造形成が可能な惑星質量 M_{gas} をそれぞれプロットした。ここで、 $M_{\text{g, gap}}$ は金川[9]で与えられる式を用い、ガスギャップ底の面密度 Σ_{min} がギャップ縁のガス面密度 Σ_0 の半分の値になるときの惑星質量として見積もった。現状ダストのリング・ギャップ構造は $\geq 10 \text{ au}$ 領域で多く見つかっているため、典型例として 10 au を考えると、 $\alpha = 10^{-4}$ のとき $M_{\text{g, gap}} \approx 7 M_{\oplus}$ となる。一方、 $M_{\text{gas}} \approx 3 M_{\oplus}$ である(図7)。我々が提案するガス流れ場機構では、ガスギャップ機構が要求する質量よりも軽い惑星によるリング・ギャップ構造形成が可能であり、ガスギャップ機構の課題を解決できる見込みがある(1節)。

ただし、ダストのリング・ギャップ構造形成が可能な惑星質量の見積もりについては、先行研究間でもばらつきがあることに注意する必要がある。ガスギャップ機構について考えると、 α が十分小さい場合 ($\alpha < 10^{-4}$) は本研究が提案するガス流れ場機構よりも軽い惑星によるリング・ギャップ構造形成が可能になる(図7)。また、惑星によるダストの重力散乱を考慮したリング・ギャップ構造形成機構も提案されている[24]。これを重力散乱機構と呼ぶことにする。重力散乱機構はガスギャップを必要とせず、円盤ガスの圧力勾配を無視した場合は地球質量程度の惑星であってもリング・ギャップ構造形成が可能になる[24]。ダストギャップの幅が惑星重力圏の大きさでス

ケールされると仮定し、様々な天体の観測から得られた情報に基づいて惑星質量の推定を行った研究は、最小で $\sim 1 M_{\oplus}$ 程度の惑星によるダストギャップ形成の可能性を議論する[25].

次に想定するダストについての比較を行う。ガス流れ場機構はガス抵抗を受けやすい、すなわちストークス数が小さいダスト($St \leq 10^{-2}$; $\leq \text{mm-cm}$)に対して有効に機能し、またストークス数が小さいほど形成されるダストリング・ギャップの幅や深さが顕著になる。一方、ガスギャップ機構や重力散乱機構は全く対照的な傾向を示す。ストークス数が小さいダストは重力散乱の効果を受けにくく、かつ中心星方向への円盤ガス降着によって運ばれガスギャップを通過するため、従来研究が提案する機構ではストークス数が小さいダストの分布にリング・ギャップ構造は形成されない。

6. 原始惑星系円盤観測への示唆

本節では、理論的・観測的研究に基づく制約を踏まえ、ガス流れ場機構が要求する条件の妥当性について考える。また、ガス流れ場機構を観測的に検証するために必要な情報や個別天体への言及も行う。

6.1 乱流強度

ガス流れ場機構は $\alpha \leq 10^{-4}$ の弱乱流条件を要求する。円盤内における乱流の強さや起源は目下議論が続いている。古くから円盤乱流の起源として考えられてきた機構の一つは磁気回転不安定性(MRI)である[26]。一方、MRIはオーム散逸や両極性拡散といった非理想効果によって安定化させられ、 $\geq 0.1 \text{ au}$ の領域はMRI不活性となり、乱流強度は $\alpha \leq 10^{-4}$ という低い値を取る可能性がある。流体力学的不安定性による乱流駆動機構も提案されている。例えば鉛直シア不安定性(VSI)が盛んに研究されている[27]。VSIはリング・ギャップ構造が多く見つかっているような円盤の外側領域($\geq 10 \text{ au}$)で生じると考えられており、 $\alpha \sim 10^{-4}$ 程度の乱流を駆動する[28].

円盤乱流の強さは観測的にも制約される。例えばHL TauやOph 163131周りに存在する多重リング構造を持つ円盤では、ダストが円盤中心面に沈殿し

ていることが観測的に示唆されており、推定される乱流強度は弱い($\alpha \leq 10^{-5}$ – 10^{-4})[29, 30]。また、同じく多重リング構造が確認されているHD 163296周りに存在する円盤では、COのガス輝線観測から非熱的なガスの運動が直接検出されており、その輝線の広がりから乱流強度が $\alpha \leq 10^{-3}$ であると見積もられている[31]。理論や観測は実際の円盤が弱乱流状態にあることを示唆しており、ガス流れ場機構の妥当性が見込まれる。

6.2 ダストサイズ

ガス流れ場機構では $\leq 1 \text{ cm}$ の小さなダストの空間分布に構造が形成される。氷マントルに覆われたダストを想定した最新のダスト成長モデルは、 ~ 0.1 – 10 mm サイズダストの存在を理論的に支持する[32]。また、例えばHL Tau周りの円盤の偏光観測及びミリ波放射のスペクトルエネルギー分布から、ダストサイズは ~ 0.1 – 1 mm 程度であると見積もられている[33, 34]。こうした理論的・観測的制約は、隕石中に含まれるコンドルールの前駆体が始原的ダストだとした場合、コンドルールサイズが ~ 0.1 – 1 mm であるという物質科学的な示唆とも整合的である[35].

いずれの場合も、円盤内には $\leq \text{mm-cm}$ サイズのダストが豊富に存在している可能性を示唆しており、ガス流れ場機構が要求する条件を満たす。

6.3 観測的検証に向けて

ガス流れ場機構を観測的に検証するためには、以下の2つの条件が共に満たされる必要がある: (a)小さなダスト($\leq 1 \text{ cm}$)の空間分布にのみ構造が見られること、かつ(b)円盤内のガスとダストの空間分布に相関が見られないこと。こうした情報を得るには、特定の天体に対し異なる波長を用いてダストの熱放射や散乱光を観測し、異なるサイズのダストの空間分布を明らかにすること、かつ分子輝線観測からガスの空間分布を明らかにすることが必要になる。

これらの条件は、先行研究で提案されているリング・ギャップ構造形成シナリオとの差別化を行う際にも重要になる。条件(a)については5節で既に述べた。条件(b)について、我々が提案するガス流れ場機構ではダストの空間分布にのみ顕著な構造が現

れる。一方、ガスギャップ機構の場合、ガスとダストの空間分布には相関が現れるはずである。多くの遷移円盤では、円盤内側領域に存在するキャビティ(ダストが枯渇した領域)の縁においてガスの輝線とダストからの熱放射の間に相関が見られており、キャビティ中に超木星質量惑星が存在する可能性が議論されている[36]。また、円盤内に大質量の惑星(≧木星質量)が存在している場合、円盤の表層付近でガスの運動学的特徴が現れる可能性がある。大質量惑星は大規模な子午線面のガスの流れを駆動する[37]。HD 163296周りに存在する円盤では、 ^{12}C Oの観測によって円盤中心面から $\sim 2\text{--}4H$ の高さにおいて音速の $\sim 10\%$ 程度の大きさの鉛直方向のガスの流れが検出されており、 ~ 2 木星質量の惑星の存在が議論されている[38]。

本稿で我々が注目する小質量惑星($\leq 20 M_{\oplus}$)もまた子午線面のガスの流れを駆動する[18]。しかし、その規模は大質量惑星が駆動するガスの流れに比べて小さく、典型的には惑星重力圏スケールで生じる($< H$)。そのため、小質量惑星が存在していたとしても、円盤上層のガスを追跡する ^{12}C Oの観測からガスの運動学的特徴が検出されることはないだろう。一方、分子輝線の放射面の高さは分子種や同位体によって異なる。円盤観測で広く用いられているCO同位体の場合、放射面の高さは ^{12}C O、 ^{13}C O、 C^{18}O 、 C^{17}O の順に円盤中心面に近づく。また、CO以外の分子もトレーサーとして用いる事ができ、例えば C_2H の放射面の高さはCO同位体の放射面よりも更に円盤中心面に近い[39]。異なる分子種、同位体を用いてガスの運動学的特徴を検出する試みも既に行われている[40]。円盤中心面に近い領域でのみガスの運動学的特徴が検出された場合、それは小質量惑星の存在を示唆するものかもしれない。更に、次世代超大型干渉電波望遠鏡群(next-generation Very Large Array, ngVLA)や現状のALMAの空間解像度を数倍向上させることを見込んだ将来計画「ALMA2」によって、円盤内に埋もれた小質量惑星の大気を直接検出できる可能性も議論されている[41]。こうした観測と本研究が提案するシナリオを組み合わせることで、近い将来まだ見ぬ形成途中の惑星の存在を明らかにできる可能性がある。

6.4 個別天体への言及

本小節では、筆者らが行ったパラメータサーベイの結果[15]に基づき、実際の天体で観測されているダストのリング・ギャップ構造を説明し得るパラメータについての議論を行う。ここではHD 100546周りに存在する円盤を取り上げる。この天体では、ダストの熱放射の観測により中心星から約26 au離れた場所において21 au($\sim 10 H$)程度の幅を持つダストリングが見つかっている[42]。更に、ダストリングに沿うようにガスの非軸対称な速度変動(ケプラー回転からのずれ)が検出されており、スーパーアース質量程度の惑星の存在と、惑星周りのガス流れ場の影響が議論されている[42]。

ダストの熱放射は光学的に薄いとみなし、ダストリング中の不透明度及び温度が一定であると仮定すると、観測的に得られる放射強度はダスト面密度のみに比例する。筆者らが以前に行ったパラメータサーベイの結果と照らし合わせると、 $\sim 7.5 M_{\oplus}$ の惑星が存在していた場合、かつ円盤の乱流強度が $a \sim 10^{-4}$ 程度であれば、この天体で見つかっているダストリングの幅をガス流れ場機構によって説明できる見込みがあることが新たに分かった。ただし、観測されているガスの速度変動も説明できるかどうかについてはさらなる検証が必要である。また、この天体の < 20 auの領域はダストに枯渇しており、その特徴をガス流れ場機構のみで説明することは出来ない。円盤内側のダスト枯渇を説明するためには光蒸発や急速なダスト成長の影響も考慮する必要があるかもしれない[42]。今後は模擬観測シミュレーションを実施しより定量的な比較を行う必要がある。

7. 惑星系形成への示唆

惑星は円盤内において $\sim\text{mm}\text{--}\text{cm}$ サイズのダスト(ペブル)を集積して成長すると考えられている[43, 44]。惑星周りのガス流れ場によって生じたダスト面密度変化に伴い惑星の成長率も変化する。本稿の第一著者は論文Ⅱ [20]において、惑星が駆動するガス流れ場の影響により、ダスト集積率が従来に見積もりに比べて $\sim 1\text{--}2$ 桁変動する可能性があることを過去に議論した(ガス流出障壁)。ただし、論文

II [20] ではダスト面密度は一様であると仮定していた。

我々の結果によると、惑星が円盤ガスから受ける向かい風の寄与が小さい円盤内側ではダストギャップが形成されやすく、向かい風の寄与が大きい円盤外側ではダストリングが形成されやすい。この特徴はガス流れ場の形態変化に関連する。軌道長半径の増加に伴い、惑星が円盤ガスから受ける向かい風の寄与は強まる[15]。そのため、円盤外側では惑星が駆動するガス流れ場は向かい風卓越形態になりやすく、ダストリングのみが形成されやすくなる。

円盤内側領域ではダストギャップが形成されやすいため、惑星の成長率はガス流出障壁のみを考慮した場合に比べて更に1桁以上低下する見込みがある。一方、円盤外側の領域ではダストリングが形成されやすいため、惑星軌道付近のダスト面密度が局所的に増加することで、円盤内側よりも効率的な惑星成長が期待できるだろう。こうした特徴は、中心星近傍の領域では巨大ガス惑星よりも小質量惑星の方がより多く見つかっているという現在の系外惑星の質量-軌道半径分布の傾向を説明する手がかりになるかもしれない。今後はダスト成長や惑星の軌道移動などを取り入れたより現実的なモデルを構築し、ガス流れ場が惑星系形成過程に及ぼす影響を調べる必要がある。

8. まとめと今後の展望

本稿では、筆者らが行ってきた研究に基づき、原始惑星系円盤内に埋もれた小質量惑星($\leq 20 M_{\oplus}$)が駆動するガス流れ場がダストの動力学に及ぼす影響について解説した。惑星周りのガス流れ場がダストの動径移動速度を変化させ、ダストのリング・ギャップ構造を形成する。

本研究結果から、 $\leq \text{cm}$ サイズダストの空間分布にリング・ギャップ構造が見られ、かつガスとダストの空間分布が一致しない円盤内には $\sim 1\text{--}20 M_{\oplus}$ 程度の小質量惑星が存在している可能性が示唆される。また、ガス流れ場によってダスト面密度が変化することで、惑星の成長率も大きく変化する。惑星が駆動するガス流れ場が惑星形成における素過程に及ぼす影響を考慮することで、惑星系の多様性の理解

につながる可能性がある。

現状、リング・ギャップ構造は中心星から離れた遠方の領域($\geq 10 \text{ au}$)で多く見つかっている。本研究結果は $\geq 10 \text{ au}$ の領域に未発見の長周期小質量惑星が多数存在する可能性を提示する。このことは、円盤ガスとダストの空間分布に相関が見られない点や、惑星由来のH α 放射の検出例が僅かであることと整合的かもしれない(1節)。将来観測によって長周期惑星の発見数が増える見込みがあり[45]、リング・ギャップ構造の形成機構についても制約が得られるだろう。

今後は円盤の模擬観測シミュレーションを行い、実際の観測結果との比較を行うことでより定量的に本研究が提案するガス流れ場機構の検証を行う予定である。また、惑星周りのガス流れ場がダストの動力学に及ぼす影響を定式化することも検討している。それにより、円盤ダストの観測から得られた結果を元に、円盤内に存在し得る惑星の質量や円盤ガスの乱流強度を推定するためのツールの構築が可能になるだろう。将来的には、小質量惑星が駆動するガス流れ場という現象が円盤内に埋もれたまだ見ぬ成長途中の惑星の存在を間接的に証明するための手がかりとなり得るかもしれない。

9. 謝辞

発表賞選考に携わって頂いた学会賞選考委員の方々に深く感謝致します。本稿の査読者である田中秀和さんには非常に丁寧な査読をしていただき、原稿の内容が大きく改善しました。本研究はJSPS科研費20J20681, 20K04051, 9921K13976, 21H04514の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Andrews, S. M. et al., 2018, ApJ 869, L41.
- [2] Bae, J. et al., 2022, in Protostars and Planets VII, arXiv e-prints, arXiv:2210.13314.
- [3] Ricci, L. et al., 2018, ApJ 853, 110.
- [4] Flock, M. et al. 2015, A&A 574, A68.
- [5] 奥住聡, 2019, 遊星人 28, 285.
- [6] 冨永遼佑ほか, 2019, 遊星人 28, 172.

「2022年度最優秀発表賞受賞論文」小質量惑星が駆動するガス流れ場:円盤ダスト面密度と惑星形成への影響／桑原, 他 185

- [7] Ueda, T. et al., 2021, ApJ 914, L38.
[8] Suriano, S. S. et al., 2017, MNRAS 468,3850.
[9] 金川和弘, 2022, 天文月報 115, 113.
[10] Zhu, Z. et al., 2014, ApJ 785, 122.
[11] Zhang, K. et al., 2021, ApJS 257, 5.
[12] Jiang, H. et al., 2022, ApJ 924, L31.
[13] 青山雄彦, 2020, 天文月報 113, 469.
[14] Fernandes, R. B. et al., 2019, ApJ 874, 81.
[15] Kuwahara, A. et al., 2022, A&A 665, A122.
[16] Ikoma, M. et al., 2000, ApJ 537, 1013.
[17] Ormel, C. W. et al., 2015, MNRAS 447, 3512.
[18] Fung, J. et al., 2015, ApJ 811, 101.
[19] 桑原歩, 2022, 遊星人 31, 188.
[20] 桑原歩, 2022, 遊星人 31, 203.
[21] Ida, S. et al., 2016, A&A 591, A72.
[22] Kuwahara, A. and Kurokawa, H., 2020a, A&A 633, A81.
[23] Kuwahara, A. and Kurokawa, H., 2020b, A&A 643, A21.
[24] Muto, T. and Inutsuka, S.-i., 2009, ApJ 695, 1132.
[25] Wang, S. et al., 2021, ApJ 923, 165.
[26] Balbus, S. A. and Hawley, J. F., 1991, ApJ 376, 214.
[27] Urpin, V. and Brandenburg, A., 1998, MNRAS 294, 399.
[28] Malygin, M. G. et al., 2017, A&A 605, A30.
[29] ALMA Partnership et al., 2015, ApJL 808, L3.
[30] Villenave, M. et al., 2022, ApJ 930, 11.
[31] Flaherty, K. M. et al., 2015, ApJ 813, 99.
[32] Okuzumi, S. and Tazaki, R., 2019, ApJ 878, 132.
[33] Kataoka, A. et al., 2016, ApJ 820, 54.
[34] Carrasco-González, C. et al. 2019, ApJ 883, 71.
[35] Dodd, R. T., 1976, EPSL 30, 281.
[36] van der Marel, N. et al., 2016, A&A 585, A58.
[37] Morbidelli, A. et al., 2014, Icarus 232, 266.
[38] Teague, R. et al., 2019, Nature 574, 378.
[39] Law, C. J. et al., 2021, ApJS 257, 4.
[40] Yu, H. et al., 2021, ApJ 920, L33.
[41] Zhu, Z. et al., 2022, MNRAS 518, 5808.
[42] Casassus, S. et al., 2022, ApJ 933, L4.
[43] Ormel, C. W. and Klahr, H. H., 2010, A&A 520, A43.
[44] Lambrechts, M. and Johansen, A., 2012, A&A 544, A32.
[45] Penny, M. et al., 2019, ApJS 241, 3.

著者紹介

桑原 歩



東京工業大学理学院地球惑星科学系博士課程修了博士(理学)。コペンハーゲン大学GLOBE Institute 研究員。日本学術振興会特別研究員 (DC1)を経て2023年4月より現職。

黒川 宏之

東京大学大学院総合文化研究科 広域科学専攻広域システム科学系准教授。

谷川 享行

一関工業高等専門学校教授。

奥住 聡

東京工業大学理学院地球惑星科学系准教授。

井田 茂

東京工業大学地球生命研究所(ELSI)教授。

「フロンティアセミナー・テキスト」

宇宙での生命の起源, 進化, 伝播および探査 第3回 大気圏および宇宙における生命実験と探査

山岸明彦¹

2023年6月7日受領, 査読を経て2023年7月20日受理

(要旨) 1930年代から大気圏での微生物採集実験が行われて, 胞子を形成する*Bacillus*属とカビ, 紫外線耐性菌が採集されている. 100年以上前にパンスペルミア仮説が提唱された. パンスペルミア仮説と, 宇宙由来の有機化合物が地球に飛来した可能性の検討を, 地球低軌道での微生物・有機化合物実験(たんぼぼ計画)で行った. 紫外線耐性菌*Deinococcus radiodurans*の細胞塊(0.5 mm厚)は紫外線が当たる宇宙空間で3年間生存した. この紫外線耐性菌の生存率の年変化から, 紫外線があたる環境で2~8年間, 紫外線があたらない環境では48年間この紫外線耐性菌が生存可能であると推定された. シアノバクテリアの3年間の宇宙生存と, 有機化合物の宇宙環境での安定性, 超高速衝突痕が分析された. 火星探査の結果から, 火星表面に生命増殖環境がある可能性がでてきている. 生命探査では, 高解像度の顕微撮像と, 擬陽性を許容しつつも検出漏れのない方法による探査が重要である. また見つかった生物の候補微粒子が, 非生物か地球生物か地球外生物かを, アミノ酸種とDNAの分析で識別するフローチャートが提案されている. 惑星保護に関してもふれる.

1. はじめに

本稿は, 2019年2月18日~19日北海道大学で開催された惑星科学フロンティアセミナー2018「生命の起源: 地球上の生き物はどこでどのように誕生したか」の聴講ノートを元に, 加筆修正した. 聴講ノートを作成した, 千葉 紗登子氏, オン 碧氏に感謝する.

本稿は, 三回に分けて連載された. 第一回は地球に残されている生命の痕跡と, 地球化学や宇宙科学から明らかになりつつある有機化合物の起源を解説した[1]. 第二回は生命科学からわかる生命の起源と進化について解説した. 特にRNAワールドや遺伝子からわかる生命の進化, ダーウィン進化や生命の定義, 地球外生命に想定しうる性質等に関して解説した[2]. 第三回は地球大気圏での微生物採集, 地球低軌道での微生物・有機化合物実験, 火星での生命探査について解説する.

1. 東京薬科大学, 生命科学部, 応用生命科学科
yamagish@toyaku.ac.jp

本稿の記載分野は極めて広いが, 周辺分野に関しては概略記載で済まし, 関連する総説を紹介するようにした. ただし, 重要な文献に関しては書誌情報をのせた.

2. 地球大気圏の微生物

今日, 太陽系の惑星や氷衛星, 太陽系外の惑星に生命がいるかどうか大きな研究課題となっている. 地球から宇宙への接続点という意味で, 大気圏での微生物調査が1930年代から行われてきた(表1)[3]. 本節では地球大気圏での微生物採集実験に関して解説する.

2.1 大気圏微生物採集実験

地球上の微生物は大気圏のどのくらいの高さまでいるのか. それを調べるために, 大気圏での微生物採取実験が行われた. その実験は古くは1930年代から今世紀にいたるまで, 航空機, 大気球, ロケット

表1:大気圏における微生物採集実験結果[3].

References	Mission	Sampling method	Altitude (km)	Microbial collection (cultivated bacteria and fungi)	Total colony number	Sampled air volume ^{ATP} (m ³)	Sampled air volume ^{STP} (m ³)	Density ^{ATP} (microorganisms per m ³)	Density ^{STP} (microorganisms per m ³)
Rogers and Meier, 1936	Balloon	Sterile cylindrical sampling device descending by parachute	11-21	<i>Bacillus</i> sp., <i>Macrosporium</i> sp., <i>Rhizopus</i> sp., <i>Penicillium</i> sp. and <i>Aspergillus</i> sp.	10	66	8.45	0.152	1.18
Soffen, 1963	Balloon	Drawing air through filter papers by a motor blower	38-41	<i>Penicillium</i> sp.	14	56.6	0.182	0.247	76.92
Greene et al., 1964; Bruch, 1967	Balloon	Drawing large volumes of air by a fan through polyurethan foam filter	3-9 9-18 18-27	(Predominant isolates) Micrococci and spore-forming rods. <i>Aspergillus</i> sp., <i>Alternaria</i> sp., <i>Penicillium</i> sp. and <i>Cladosporium</i> sp.	847 678 304	2095 8014 14611	1070 1522 665	0.404 0.085 0.021	0.79 0.45 0.46
Fulton, 1966	Aircraft	Air pass through gelatin foam filter in sampling probe in front of bombardier's compartment	0.69 1.6 3.1	(Predominant isolates) Bacilli, Micrococci, <i>Aspergillus</i> sp., <i>Alternaria</i> sp. and <i>Hormodendron</i> sp.	not given not given not given	not given not given not given	not given not given not given	128* 48* 26*	144* 59* 37*
Imshenetyuk et al., 1975	Rocket	Sterile medium exposed on the forepart of the rocket during ascent	48-77	<i>Mycobacterium</i> sp., <i>Micrococcus</i> sp., <i>Circinella</i> sp., <i>Aspergillus</i> sp., <i>Papulaspora</i> sp. and <i>Penicillium</i> sp.	31	unknown	unknown	unknown	unknown
Yang et al., 2008a	Aircraft	Drawing air through membrane filters by pumps	0.8-12	<i>Deinococcus</i> sp., <i>Streptomyces</i> sp., <i>Bacillus</i> sp. and <i>Paenibacillus</i> sp., and unidentified fungi	8	5.51	2.69	1.45	2.97
Wainwright et al., 2003	Balloon	Cryosampler comprised of sterile cylindrical probes	41	<i>Bacillus</i> sp., <i>Staphylococcus</i> sp., <i>Engyotontium</i> sp.	7	6.69	0.017	1.05	406.98
Griffin, 2003 2004	Aircraft	Sterile impactor plates exposed on the underside of aircraft	20	<i>Bacillus</i> sp., <i>Penicillium</i> sp., <i>Micrococcaceae</i> and <i>Microbacteriaceae</i> , <i>Staphylococcus</i> and <i>Brevibacterium</i>	592	unknown	unknown	unknown	unknown
Yang et al., 2008b	Balloon	Drawing air through membrane filters by pumps	12-35	<i>Bacillus</i> sp., <i>Paenabacillus</i> sp.	4	9	0.35	0.44	11.45

Note. a: Approximate mean density values. ATP: ambient temperature and pressure. STP: standard temperature and pressure (0 °C and 1 atm).

トを用いて, 高度は最高77 kmまでで実施された[3] (表1). 捕集方法は様々であるが, 大別すると二通りである. 一つは吸引ポンプを用いて大気を吸い込んで, 大気中微粒子をフィルターでろ過して捕集する方法. もう一つは高速で衝突する微粒子を捕集板に衝突させて捕集する, インパクトと呼ばれる方法である[3]. 何れの方法でも, 試料を固体培地で培養して, 微生物はコロニーとして検出された. 培養法による微生物検出では, その時に用いた培地で増殖する微生物のみが検出される. したがって実際の微生物密度は, 培養法で得られた微生物密度よりも高い可能性がある.

Yangらによって成層圏最下部で行われた航空機を用いた微生物採集によって, 5株の微生物が採取された. それらの微生物のうちの2株は, *Deinococcus*属の新種である事がわかった. *Deinococcus*属には*Deinococcus radiodurans*という種が含まれている.*D. radiodurans*は放射線や紫外線に対する大変強い耐性を持つことで有名な種である. なお, *D.* は*Deinococcus*の略で, 学名の属名部分は初出の後は略記する. *Deinococcus*属の新種2株を, それぞれ*D. aeri*usおよび*D. aetherius*と命名した. これらの株は, これまで紫外線耐性が強いことで知られている*D.*

*radiodurans*と同程度, あるいは, より強い紫外線耐性をもつことが示された[4](図1).

大気圏で採取された微生物の多くは, 胞子を形成することのできる細菌*Bacillus*属と真菌類(カビの仲間)であった(表1). 一方, 以前に行われた採集実験では, 胞子を形成しない*Micrococcus*属の細菌が何回か採集されている. Yangらは*Deinococcus*属を採集しているが, *Deinococcus*属は古くは*Micrococcus*属に分類されていた.*Deinococcus*属は胞子を形成しないが, 高い乾燥, 放射線, 紫外線耐性をもっている. したがって, かつて採集された*Micrococcus*属の株は, *Deinococcus*属であった可能性がある[4].

なおここで細菌と古細菌は核を持たない原核生物である. 一方, 真菌はカビの仲間とキノコの仲間を含み, 核をもつ真核生物で, 分類学上は原核生物と大きく異なる[2]. 微生物は, 細菌と古細菌それに真菌(キノコの仲間を除く)をまとめて呼ぶ場合に用いられる. 微生物には単細胞真核藻類や単細胞原生生物も含まれるが, これらは本稿には登場しない.

Yangらによって大気球を用いた微生物採集実験も行われた[5]. 採集された微生物の遺伝子を解析したところ, 同種あるいは近縁の微生物がアメリカやインドの上空でも採集されていることが明らかに

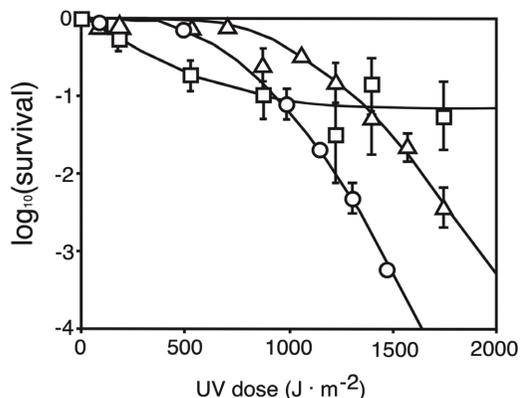


図1: 航空機で採集された種を含む*Deinococcus*属に属する種の紫外線耐性[4]. ○: *D. radiodurans*, □: *D. aetherius*, △: *D. aerius*.

なった。遠く離れた場所で、同種あるいは近縁の微生物が採集されたことから、これらの微生物が大気圏で選択的に生存しているか、あるいは大気圏を移動している可能性がある[5]。

これらの微生物採集実験では、異なった採集装置、採集方法、培養方法が用いられているので、互いに比較するのは無理も大きい。しかし、あえてその微生物密度を採集高度あるいは採集高度範囲に対して図示すると、図2のようになる。微生物密度は大局的には高度に依存して低下している[3]。

大気圏の下部、対流圏では微粒子が対流によって移動している。一方、地上の微粒子がどのように成層圏以上に到達するかという機構は明らかではない。提案されている機構として、大きな火山噴火、隕石衝突がある。また人工的な微粒子移動媒体として、航空機やロケット、大気球などに付着して移動した可能性がある。さらに、近年、成層圏・中間圏・下部熱圏など大気圏上空での放電現象が多数観測されている。それらは、エルプスやブルージェット、スプライトなどと呼ばれている放電現象である。粒子が電荷を帯びていた場合、放電現象をおこしている電場によって加速されて粒子が移動する可能性も考えられる[6]。

2.2 大気圏微生物採集実験のまとめ

1930年代より航空機、大気球、ロケットを用いて、大気をフィルター濾過する方法とインパクターによる微生物採集実験が行われてきた。これらの実験に

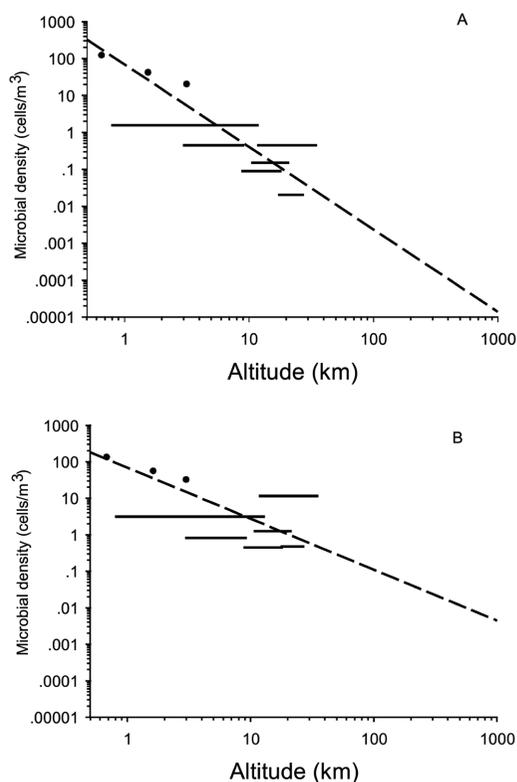


図2: 大気圏での微生物密度の高度依存性[3]. A. 気体量を現場体積で図示した場合. B. 気体量を標準状態 (0 °C 1気圧) で図示した場合. 採集高度に範囲がある場合は高度範囲を示す線で図示している。

よって高度77 kmまでの大気から、孢子形成微生物や紫外線耐性菌が捕集されてきた。微生物密度は高度が上がるにつれて低下する傾向が見られた。上空へ微生物を含む微粒子が上昇する機構として、隕石衝突、火山の大規模噴火があるが、航空機や大気球、ロケット等により人工的に移動する可能性もある。さらに最近発見された大気圏上空でのエルプスやブルージェット、スプライトなどと呼ばれている放電現象で、電荷を帯びた粒子が加速される可能性もある。

3. 地球低軌道での微生物・有機化合物実験

3.1 背景と概略

前節で解説したように、高度数十kmまでの大気圏中での、微生物採集実験結果が報告されている。

さらに高い高度まで微生物が到達する可能性はないだろうか。古くは二十世紀初頭アレニウス(Svante August Arrhenius)によって、パンスペルミアという仮説が提唱された[7]。パンは「汎」と同義であまねくという意味、スペルミアは胞子を意味しており、パンスペルミアは惑星間空間にあまねく胞子が存在しているという意味である。アレニウスは胞子が太陽風によって惑星間を移動する可能性を提案した。

パンスペルミア説が生命の起源に対する答えを与えない、という批判は妥当である。パンスペルミア説は、どこかの惑星で誕生した生命が惑星間を移動可能なのではないかと、という仮説として理解すべきである。ただし、もしどこかで誕生した生命が惑星間を移動可能であるならば、生命の起源や進化に関して、それを考慮して検討する必要がある。例えばもしパンスペルミアが可能であれば、火星で誕生した生物が地球に移動して地球生物の祖先になったのかもしれない。あるいは仮に火星生物が発見されたとして、それらは地球から移動した生物の子孫かもしれない。

惑星間での微生物の移動を考える上では、惑星からの生物の離脱と移動、移動する間の微生物の生存、微生物が次の惑星へ着陸して増殖する過程が、それぞれ別々に検討されている[6]。これまで、欧州のグループを中心に、惑星間を移動する際に微生物が生存可能かということを試す実験が、主に地球低軌道(国際宇宙ステーションが周回する400 km上空)で行われてきた[8]。微生物の宇宙空間での生存は、真空、電離放射線、紫外線、温度等の環境因子により影響を受けることが予想される。これらの個々の環境因子の影響は地上での実験によって調べることができるが[9]、その環境因子の正確な模擬は困難であり、またこれらの環境因子が総合的に作用している可能性もある。そこで、これらの環境因子の総合的影響を調べる為に宇宙での曝露実験が行われている[8]。

これまでに実施された宇宙環境での微生物曝露実験に関しては、Cottin ら(2017) [8]が1965年以降の実験をまとめている。1965年以降、多数の微生物宇宙環境曝露実験が行われているが、表2には2008年以降の実験を抜粋した。欧州およびロシアのグループは、主に国際宇宙ステーションの船外で曝

露実験を行ってきた。これらの宇宙環境曝露実験では極めて広範な生物種の曝露が行なわれ、生物生存や細胞に与える宇宙環境の影響が検討されてきた。

その結果、微生物は紫外線が当たる環境では死滅するが、紫外線から遮蔽されると長期間生存可能であるという実験結果が得られた。そこから、微生物が岩石中で紫外線から保護されて移動したのではないかという、リソパンスペルミア説が提唱された[8]。リソは岩を意味している。一方我々は、微生物が塊、バイオフィーム(微生物が固相表面に形成する細胞の集合体)、で存在すれば、紫外線が当たる環境でも長期間生存できるのではないかと考え、マサパンスペルミア説を提案した。マサは塊を意味している[9]。

3.2 たんぼぼ計画の科学目標

たんぼぼ計画では、生命の惑星間移動仮説である「パンスペルミア仮説」の検証と化学進化の検証を行った[6,10]。化学進化とは、生命の起源以前における有機化合物合成と蓄積に関する研究分野である。生命が誕生する前に宇宙由来の有機化合物が地表に蓄積した可能性がある。しかし、地球に到達する隕石の量はそれほど多くなく、どのような方法で、宇宙由来有機化合物が地表に到着したかは不明である。一方、現在でも1 mm以下の微小隕石は年間数万トン地上に到達している。微小隕石中にもアミノ酸等の有機化合物が含まれている可能性があり、それを確認するのが、たんぼぼ計画のもう一つの目標である[10]。その他、宇宙開発利用の発展に繋がる先端的技術開発も含めて、以下の6つの項目を宇宙実験の目標とした[10]。それらは、1)大気圏外での微生物密度上限の推定、2)微生物の大気圏外生存実験、3)有機化合物の変性実験、4)微小隕石の採集とその分析、5)高性能エアロゲルの実証、6)微小デブリフラックス量の評価、である。

これらの課題を達成するために、「有機物・微生物の宇宙曝露と宇宙塵・微生物の捕集(たんぼぼ)」通称たんぼぼ計画が国際宇宙ステーション日本実験棟・船外曝露部で実施された[11]。たんぼぼ計画では2種類の実験装置が用いられた。一つは曝露パネルで(図3)、曝露パネルを構成する曝露ユニットの試料板に微生物あるいは有機化合物試料を充填して、宇宙環境に曝露した。もう一つは、捕集パネルで(図

表2: 2008年以降に実施された生物宇宙曝露実験. Cottinら (2017) [8] からの抜粋に追加記載.

Year	Facility	Mission	Test organism	Duration of exposure	Space parameters studied	Phenomena studied
2008-2009	ISS-Columbus-EuTeF	EXPOSE-E	<i>B. subtilis</i> 168 spores, <i>B. pumilus</i> spores, <i>Halococcus dombrowskii</i> , <i>Anabaena cylindrica</i> , Antarctic cryptoendolithic communities, <i>Cryomyces antarcticus</i> , <i>Cryomyces minteri</i> , <i>Rhizocarpon geographicum</i> , <i>Xanthoria elegans</i>	1.5 yr	Space vacuum, solar UV (> 110 nm), simulated Martian atmosphere and UV climate (> 200 nm)	Survival, protection, DNA photoproducts, gene activation
2009-2011	ISS-Zvezda-URM-D	EXPOSE-R	<i>Bacteriophage T7</i> , <i>B. subtilis</i> 168 spores, <i>B. pumilus</i> , <i>B. licheniformis</i> , <i>Halorubrum chaoviatoris</i> , <i>Chroococcidiopsis</i> , <i>Synechococcus</i> (Nägeli), <i>Penicillium italicum</i> , <i>Penicillium expansum</i> , <i>Trichoderma koningii</i> , <i>A. sydowii</i> , <i>A. versicolor</i> , <i>Geomyces pannorum</i> , <i>Trichoderma koningii</i> , <i>B. subtilis</i> 168, <i>B. subtilis</i> WN1087 (radiation-sensitized mutant)	2 yr	Space vacuum, solar UV (> 110, > 200 nm)	Survival, protection, DNA photoproducts, gene activation
2010-2011	O'REOS Nanosat 650 km	SESLO		6 mon	Trapped radiation (inner Van Allen belt) + GCR (high-inclination LEO)	Survival; metabolic & population, growth rates in space
2014-2016	ISS-Zvezda-URM-D	EXPOSE-R2	<i>Chroococcidiopsis</i> sp. 029; <i>Chroococcidiopsis</i> sp. 064; <i>Chroococcidiopsis</i> sp. 057; <i>Gloeocapsa</i> OU 20; <i>Cryomyces antarcticus</i> CCFEE 515; <i>Sphaerocystis</i> sp. CCCryo 101-99; <i>Nostoc</i> sp. CCryo 231-06; <i>Circinaria gyrosa</i> ; <i>Buelia frigida</i> ; <i>Grimmia sessifera</i> De Not.; <i>Marchantia polymorpha</i> L.; <i>D. geothermalis</i> ; <i>D. radiodurans</i> ; <i>B. horneckiae</i> ; <i>B. pumilus</i> ; <i>B. licheniformis</i> ; <i>Halomonas muralis</i> ; <i>Halococcus morrhuae</i> ; <i>A. versicolor</i> ; <i>A. sydowii</i> ; <i>Penicillium expansum</i> ; <i>Methanosarcina soligelidi</i> SMA-21; Kombucha consisting of <i>Gluconacetobacter xylinus</i> , <i>Gluconobacter oxydans</i> , <i>B. subtilis</i> , <i>Zygosaccharomyces bailii</i> , <i>Dekkera bruxellensis</i> ; <i>Ulocladium botrytis</i> ; <i>Misuna</i> ; <i>Zingiberia biebersteiniana</i> ; <i>Brachypodium distachyon</i> ; <i>Hordeum vulgare</i> ; <i>Polypedilum vanderplanki</i> larvae; <i>Thripos cancriformis</i> eggs; Biofilm formed from <i>D. radiodurans</i> , <i>Leptothrix</i> sp., <i>Pseudomonas</i> sp., <i>Hyphomonas</i> sp., <i>Tetrasphaera</i> sp.; <i>Pedomicrobium</i> sp. Pigments: chlorophyll a, β -carotin, tetrahydroxylin; naringin; quercetin; melanin; parietin; cellulose; chitin	1.5 yr	Space vacuum, solar UV (> 110 nm), simulated Martian atmosphere and UV climate (> 200 nm)	Survival, resistance by biofilm formation, protection by Martian regolith, DNA photoproducts, gene activation
2015-2018	ExHAM, ISS-Kibo	Tanpopo	<i>D. radiodurans</i> R1, <i>D. aerius</i> , <i>D. aetherius</i> , <i>D. radiodurans</i> KH311, <i>D. radiodurans</i> UVS78, <i>D. radiodurans</i> rec30, <i>Nostoc</i> sp. HK-01, <i>Schizosaccharomyces pombe</i> JY3.	1, 2, 3 yr	Space vacuum, solar UV (> 110 nm or 170 nm), cosmic radiation, temperature changes	Survival, DNA damages, chemical analysis
2019-2021	ExHAM, ISS-Kibo	Tanpopo-2	<i>Nostoc</i> sp. HK-01	14 mon	Space vacuum, solar UV (> 110 nm, 170 nm, w/o UVC), cosmic radiation, temperature changes	Survival, DNA damages, transcript analysis, chemical analysis
2020-2022	ExHAM, ISS-Kibo	Tanpopo-3	<i>D. radiodurans</i> , <i>Nostoc</i> sp. HK-01, <i>Physomitrella patens</i> , <i>Cerasus</i> sp., <i>Oryza sativa</i>	14 mon	Space vacuum, solar UV (> 110 nm, 170 nm), cosmic radiation, temperature changes	Survival, DNA damages, transcript analysis, chemical analysis
2022-2023	ExHAM, ISS-Kibo	Tanpopo-4	<i>Nostoc</i> sp. HK-01, <i>Physomitrella patens</i> , <i>Metallosphaera sedula</i>	9 mon	Space vacuum, solar UV (> 110 nm, w/o UVC), cosmic radiation, temperature changes	Survival, DNA damages, transcript analysis, chemical analysis
2023-2023	ExHAM, ISS-Kibo	Tanpopo-5	<i>D. radiodurans</i> , <i>Physomitrella patens</i>	2 mon	Space vacuum, solar UV (> 110 nm, w/o UVC), cosmic radiation, temperature changes	Survival, DNA damages, transcript analysis, chemical analysis

Abbreviations of genera: A.: *Aspergillus*, B.: *Bacillus*, D.: *Deinococcus*.

4) エアロゲルという超低密度のアモルファス・シリカゲルを、前面に開放部をもうけたアルミケースに収納した。エアロゲルは、中心部を0.01 g/cm³という超低密度のエアロゲルとして、それを0.03 g/cm³の比較的強度の高いエアロゲルで取り囲んだ構造のものを開発した[11]。捕集パネルを宇宙曝露することで、高速衝突微粒子の捕集が行われた。

たんぼぼ計画に使用した実験装置は、2015年4月14日、米国のスペースX社のロケットで打ち上げられた。同年の5月26日から、国際宇宙ステーション「きぼう」日本実験棟・船外曝露部で実験装置の宇宙空間曝露が開始された[11]。2016年以降3年間、宇宙曝露した曝露パネルと捕集パネルが毎年地上に持ち帰られ、2018年にすべての実験装置が帰還した(図5)。地上に帰還した曝露微生物とエアロゲルはそれぞれ、分析担当者に配分され分析されつつある。

3.3 地球低軌道の環境

地球低軌道の環境因子を表3にまとめた[12,13]。紫外線量は、曝露ユニットをアラニン紫外線量計として用いて測定した。紫外線量は窓材によつ

て少し異なるが、114~177 (MJ/m²/year)であった。ISSは約90分で地球を周回しており、その太陽β角(ISS地球周回軌道面の太陽方向との角度)も-75度~75度の間で周期的に変動する。さらに曝露パネルがISS船体の陰になる場合もある。そこで、微生物試料が宇宙曝露中に受けた紫外線量を、太陽からの距離が地球と同程度の惑星間空間に微生物塊がある場合の紫外線量に換算すると、1年間に受ける紫外線量は惑星間空間で受ける紫外線量41~58日分に相当した[12]。放射線量は232 ± 5 mGy/yearで、地上の値に比べれば200倍以上であった。しかし、実験に用いた放射線耐性菌*D. radiodurans*のD₁₀値(生存率が10%になる放射線量)は6.7 kGy(Yang et al. 2010)なので、この放射線耐性菌の生存への放射線による影響はない。温度に関しても、一般に低温は微生物の生存にほとんど影響しない。高温も35℃では*D. radiodurans*の生存に影響しない[13]。

3.4 微生物の宇宙空間曝露実験結果

微生物試料として、放射性耐性菌*D. radiodurans*,

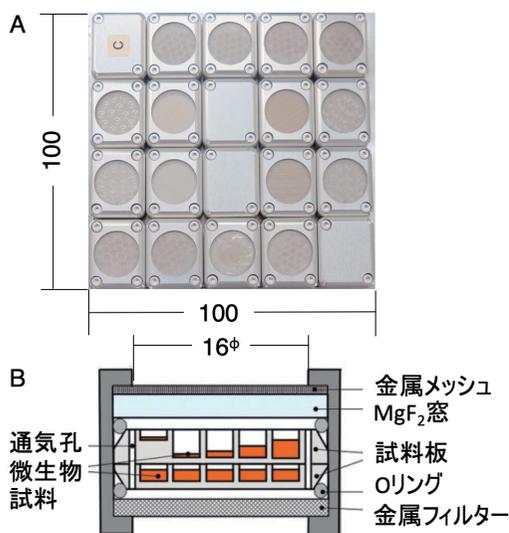


図3: 曝露パネル(A)と曝露パネルを構成する曝露ユニットの断面(B) [11]. 曝露パネル(100 mm × 100 mm × 20 mm)は曝露ユニット20個で構成されている。それぞれの曝露ユニットの断面をBに示した。金属メッシュ下の窓材の下に試料板が置かれた。試料板にあけた穴には微生物試料あるいは有機化合物試料を充填した。試料板は2枚あり、下の試料板には紫外線があたらない暗所対照標品を入れた。試料は裏側の金属フィルター、通気口を通して外部の真空と連絡している。曝露パネル(A)の窓のないユニットには放射線測定素子を入れた。

シアロバクテリア、酵母が宇宙空間曝露に使用された [10]. *D. radiodurans* を3年間曝露した後の生存率を図6に図示した [13]. *D. radiodurans* の 0.5 mm 以上の厚さがある細胞塊を地上保管した場合には、3年後に10%前後の生存率が得られた。それと比較して、宇宙空間で紫外線照射された場合には、細胞塊の厚みが0.1 mm以下で顕著に生存率が低下したが、0.5 mm以上の厚さがある場合には、地上対照と同程度の生存率を示した。*D. radiodurans* の0.5 mm厚以上の細胞塊は紫外線照射下3年間の宇宙空間曝露に耐えることがわかった。

厚さ0.5 mmの*D. radiodurans*細胞塊の3年間の生存率変化を図7に図示した [13]. ISSの室内保管室に保管した標品は顕著な生存率の低下を示したが、これは表3に見られるようにISS室内の湿度が要因とおもわれる [13]. 地上対照標品はデシケーターに保存したのに対し、ISS保管標品は密閉プラスチック袋に乾燥剤とともに保管した。ISS保管室

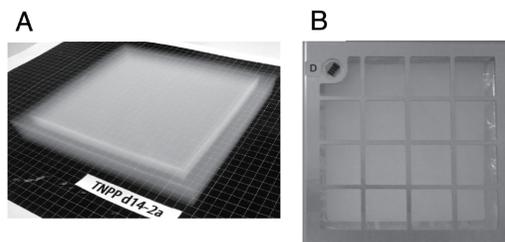


図4: エアロゲル(A:写真提供、千葉大学田端誠)とエアロゲルを収めた捕集パネル(B:100 mm × 100 mm × 20 mm) [11]. エアロゲルは内側が0.01 g/cm³でその周りを0.03 g/cm³のエアロゲルで取り囲んで補強した。

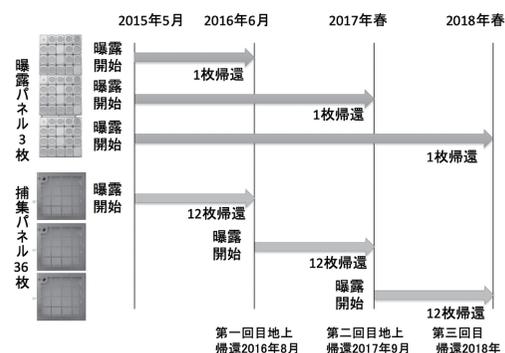


図5: たんぼぼ計画実験装置の運用 [11]. 曝露パネル3枚と捕集パネル36枚が同時に打ち上げられ、国際宇宙ステーション(ISS)予圧部保管庫に保管された。曝露パネル3枚はISS曝露部の同じ場所で曝露が開始された。その内の1枚は1年間宇宙曝露した後に取り外され地上に帰還した。残りの2枚はそれぞれ、2年後、3年後に取り外され地上に帰還した。捕集パネルの内の12枚が曝露され、1年後に取り外されて地上に帰還した。次の12枚が1年間曝露されたのち地上に帰還した。最後の12枚が1年間曝露されたのち地上に帰還した。実際の運用は、他の計画との関連で、多少変更された。

での長期保存中に乾燥剤の機能が失われた可能性が高い。湿度が高い場合には、微生物は酸素の影響を受けてその生存率は低下する。

それ以外の条件に試料を置いた場合、すなわち宇宙空間暗所に置いた場合、宇宙空間明所に置いた場合、地上保管した場合、生存率の低下速度は相互に似た値を示した。それぞれの、細胞塊の実験開始時の細胞数と、生存率の低下速度から、細胞数が1以下になる時間、すなわち生存時間を推定した [13] (表4)。ただし、地球を周回する間にISSは太陽からの陰になる。またISS船体によって曝露パネルが

表3. たんぼぼ宇宙曝露実験3年間の環境因子[12, 13].

Experimental place	Wavelength range (nm) /window type	UV fluence ^{*a} (MJ/m ² /year)	Ionizing radiation (mGy/year) ^{*b}	Temperature range (°C) ^{*c}	Pressure range (Pa) ^{*d}	Humidity (%)
Space						
Upper plate ^{*e}	110–400/ MgF ₂	124 – 177	232 ± 5	29 ± 5 ~ -42 ± 5	10 ⁻⁴ ~ 10 ⁻⁷	–
Upper plate ^{*e}	170–400/ SiO ₂	114 – 163	232 ± 5	29 ± 5 ~ -42 ± 5	10 ⁻⁴ ~ 10 ⁻⁷	–
Dark control in space						
Lower plate ^{*f}		–	232 ± 5	29 ± 5 ~ -42 ± 5	10 ⁻⁴ ~ 10 ⁻⁷	–
ISS pressurized area		–	83 ± 1	19~25	10 ⁵	45~55
Ground control ^{*g}		–	1	20	10 ⁵	5~15

*a: UV fluence was calculated using the data from the alanine UV dosimeter [12].

*b: Ionizing radiation was measured with the dosimeters [12].

*c: Maximum and minimum temperatures were measured as in the reference [12].

*d: Outside pressure estimated in Rabbow et al. (2015) [12].

*e: Sample plates were set on the upper side of the exposure unit; the plates were irradiated with solar UV.

*f: Sample plates were set under the upper plates; UV was completely blocked by the upper plates.

*g: The ground control was stored in a desiccator in an incubator at Tokyo University of Pharmacy and Life Sciences.

太陽からの陰になる場合もある。微粒子が惑星間空間にある場合に比べると、曝露パネルの紫外線照射量は41~58日/年と推定された[12]。これを補正すると、*D. radiodurans*の細胞塊は、惑星間空間の紫外線があたる環境で2~8年間、紫外線があたらない環境では48年間生存できると推定された[13](表4)。

火星と地球の間を移動するのにかかる時間は軌道によって変わる、ランダムに地球を飛び出した場合には、平均すると火星に衝突するまでに数千万年かかる。しかし、丁度良い時期に丁度良い方向に地球を飛び出した物体は1年前後で火星に到着する。逆の方向の移動も同様である。したがって、火星と地球の間を最短距離で移動した微生物は、宇宙空間で移動中に生存できると推定された[13]。

3.5 シアノバクテリアの宇宙空間曝露実験結果

シアノバクテリアは独立栄養光合成生物である。したがって、仮に惑星間移動ができて、増殖可能な場所に着地できた場合に、シアノバクテリアは独立で増殖可能である。また、例えば火星でテラフォーミングを行うために、独立栄養光合成生物を土壌改良に利用できるかもしれない[14]。

シアノバクテリアの中にはアキネートと呼ばれる環境耐性細胞を形成する種がある。そこで、シアノバク

テリアにアキネートを形成させて、そのバイオフィルムを乾燥させた試料を宇宙空間に曝露した。シアノバクテリアの乾燥バイオフィルムの宇宙空間曝露実験は*D. radiodurans*と同様の方法で実施された。その結果、暗所に置かれたシアノバクテリアの乾燥バイオフィルムは3年間宇宙空間曝露後に30%前後の生存率があった。また、宇宙空間明所に置かれたシアノバクテリアも、ある程度のバイオフィルムの厚さがある場合に、3年間生存できることが明らかとなった[14]。

3.6 有機化合物の宇宙空間曝露実験結果

有機化合物は隕石や微小隕石中に含まれている可能性がある。しかし微小隕石中では、惑星間を移動する間に有機化合物が変成してしまう可能性がある。そこでその可能性を確かめるため、アミノ酸グリシン、アミノ酸の前駆体化合物ヒダントイン(加水分解によってグリシンを生じる)、隕石中複雑有機化合物の模擬物質(CAW:一酸化炭素とアンモニア、水の存在下で放射線を照射して得られた複雑有機化合物)の宇宙空間曝露実験が行われた[15]。

曝露実験には、微生物と同様の装置が用いられた。曝露実験の結果、ISS船内に置いた場合には、これらの有機化合物は3年間でほとんど変成しなかった(図8)。一方、宇宙空間で暗所に置いた場合に

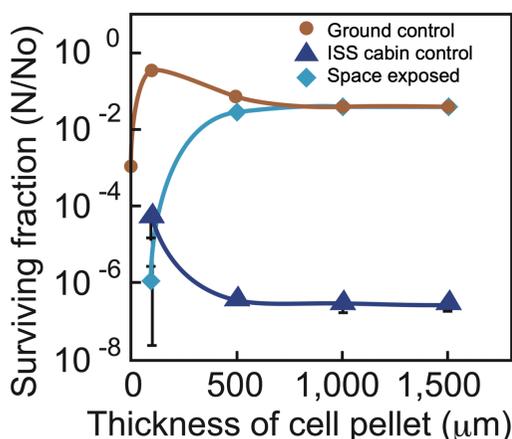


図6: たんぼぼ計画で放射線耐性菌 *D. radiodurans* を厚さの異なる細胞塊として, 3年間置いた後の生存率[13]. 地上対照 (Ground control)は, 試料を実験室デシケーター中に保管した. 船内対照 (ISS cabin control)は, 乾燥剤とともに密閉プラスチック袋に収納しISS保管庫に保管した. 宇宙曝露標品は SiO₂の窓材の下で宇宙真空下に置かれた. 生存率は, 試料調製直後の生存細胞数との比較.

は, グリシンとヒダントインはそれぞれ90%あるいは数%にまで減少した. また宇宙空間で紫外線があたる環境に置いた場合, グリシンとヒダントインは1%以下に減少した. しかし, 複雑有機化合物CAWは, 暗所で90%, 紫外線のあたる環境でも10%程度残存した[15]. 隕石中および微小隕石中で, アミノ酸は複雑有機化合物に類似の分子形態で存在していると推定されている. アミノ酸が複雑有機化合物の状態である事が, 宇宙空間を移動する際にアミノ酸が保存されることに寄与するかもしれない[15].

これまで地球周回低軌道で行われた宇宙化学実験を表5にまとめた. これまでの実験では曝露期間は1回だけなので, 変成の時間変化を追うことができなかった. グリシンでは, 紫外線が当たる環境で2年目以降に変成が加速する傾向が見えている.

3.7 捕集パネル・アルミニウム枠の衝突痕解析

帰還した捕集パネルのアルミニウム枠に, 高速衝突粒子による衝突痕が検出された. この衝突痕の解析が行われた[10]. ISS進行方向面および宇宙面に曝露した捕集パネルの, アルミニウム枠にできた直径50 μm以上の衝突痕の数と直径, 深さを計測した. 衝突痕の直径と深さから, 衝突エネルギーを割

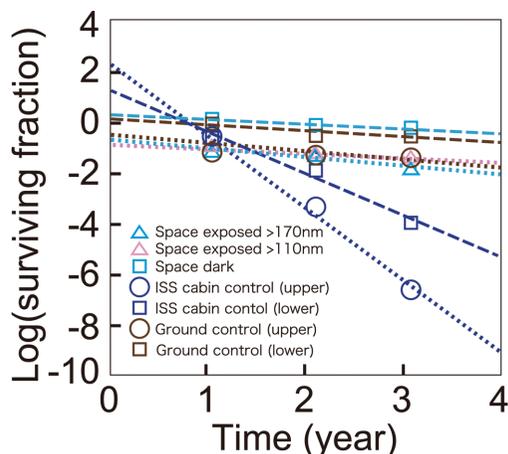


図7: たんぼぼ計画で宇宙曝露した放射線耐性菌 *D. radiodurans* 0.5 mm細胞塊の生存率の時間経過[13]. 宇宙曝露標品は, SiO₂あるいはMgF₂の窓材の下で(窓材によってそれぞれ波長170nm以上あるいは110nm以上の紫外線を透過する)あるいは暗所で宇宙真空下に置かれた(Space dark). 船内対照 (ISS cabin control)は, 乾燥剤とともに密閉プラスチック袋に収納しISS保管庫に保管した. 地上対照 (Ground control)は, 試料を実験室デシケーター中に保管した. 生存率は, 試料調製直後の生存細胞数との比較.

り出し, その頻度を図示した(図9). これまでに行われた類似の解析から得られている微粒子のエネルギー分布モデルと比較すると, ISS進行方向面と宇宙面の両方で, 頻度分布が誤差の範囲でエネルギー分布モデルと一致した. このエネルギーの範囲での微小デブリ密度の変動はあまりないことが明らかとなった[10].

3.8 捕集パネル・エアロゲルの衝突痕解析

帰還した捕集パネルから, 36枚のエアロゲルを取り出し, 透明プラスチック製の容器に移し替えた. エアロゲル表面を目視で確認したところ, 何枚かのエアロゲルに部分的に割れている場所が認められた. しかし, それらを含めてすべてのエアロゲルが, 高速衝突微粒子の解析に十分な健全さで帰還した[10].

個々のエアロゲルの正面全面を顕微鏡で撮像し, 0.1 mm以上の傷や粒子を識別した. 次いで, これらの傷や粒子の顕微鏡撮像を複数の焦点深度で行い, 疑似立体画像を取得した. この疑似立体画像を精査することで, 300カ所以上の超高速衝突痕を検出した[10]. それらの衝突痕に粒子が有るか無い

表4.D. *radiodurans*の細胞塊が宇宙空間で生存できる時間[13].

曝露条件	厚さ(μm)	生存時間*(年)	惑星間空間での生存時間**(年)
MgF ₂	500	35.6 ± 0.5	4.3 – 6.1
	1000	43.4 ± 0.2	5.2 – 7.5
	1500	45.3 ± 0.5	5.5 – 7.8
SiO ₂	500	14.8 ± 0.5	1.8 – 2.6
	1000	24.6 ± 0.7	3.0 – 4.2
	1500	30.8 ± 0.7	3.7 – 5.3
Dark	1000	48.1 ± 0.1	48.1 ± 0.1

Note.

*:細胞塊の細胞数と, 死亡率の低下速度から, 細胞数が1以下になる時間.

**:曝露実験で微生物が照射される紫外線量は, 惑星空間に比べると遮蔽の関係で41~58 日/年に相当する. これを補正した値が一番右の欄に記載してある.

表5. 地球周回低軌道で行われた宇宙化学実験. Cottinら (2017) [8]に補足.

Experiment	Support	Launch/return	Exposure	Interest for
ERA	EURECA	1992–1993	12 mon	Interstellar medium, comets
DUST 1	Biopan 1 (FOTON capsule)	Jun 14–Jul 2 1994	12 d	Meteorites
DUST 2	Biopan 2 (FOTON capsule)	Oct 8–Oct 23 1997	10 d	Meteorites
PERSEUS	MIR space station	Apr 16–Jul 23 1999	97 d	Meteorites
Exobiology				
ORGANICS	Biopan 5 (FOTON capsule)	May 31 2005–Jun 16 2005	15.8 d	Interstellar medium
UVolution	Biopan 6 (FOTON capsule)	Sep 14 2007–Sep 26 2007	12 d	Comets, Titan, Mars
ESS	EXPOSE-E on the ISS	Feb 2008–Aug 2009	18 mon	Comets, Titan, Mars, meteorites
AMINO	EXPOSE-R on the ISS	Mar 2009–Mar 2011	24 mon	Comets, Titan, meteorites
ORGANIC	EXPOSE-R on the ISS	Mar 2009–Mar 2011	24 mon	Interstellar medium
PSS	EXPOSE-R2 on the ISS	Oct 2014–Feb 2016	16 mon	Comets, Titan, Mars, meteorites, interstellar medium, biochips
Tanpopo (sub-theme 3)	ExHAM-1&2, Kibo on the ISS	Apr 15 2015–2016, 2017, 2018	1, 2, 3 yr	Micrometeoroids, interstellar medium
Tanpopo-2	ExHAM-1, Kibo on the ISS	Jul 2019–Jan 2021	14 mon	Micrometeoroids interstellar medium
Tanpopo-4	ExBAS-1, Kibo on the ISS	Feb 2022–Jan 2023	9 mon	Micrometeoroids interstellar medium
Tanpopo-5	ExBAS-1, Kibo on the ISS	Mar 2023–Jul 2023	2 mon	Micrometeoroids interstellar medium

か, 粒子の大きさの計測をおこなった. 衝突痕のシンクロトロン放射X線を用いた三次元立体構造解析を行った. 粒子は切り出して, 鉱物, 有機化合物, 微生物の分析を行っている.

3.9 地球低軌道での微生物・有機化合物実験(たんぼぼ計画)のまとめ

国際宇宙ステーションでの微生物と有機化合物の曝露実験(たんぼぼ計画)が行われた. 1) 大気圏外での微生物密度上限の推定に関しては, 解析を現在継続中である. 2) 微生物の大気圏外生存実

験に関して, 放射線耐性菌 *D. radiodurans* の細胞塊(厚さ0.5 mm以上)は3年間生存した. 3年間の生存率を外挿することから, 太陽紫外線のあたる環境で2~8年間, あたらない環境では48年間, *D. radiodurans* の細胞塊(厚さ0.5 mm以上)が宇宙空間で生存できると推定された. シアノバクテリアのバイオフィルムが宇宙空間で3年間生存した. 欧州のグループがこれまでに実施した微生物の宇宙空間曝露実験では, 紫外線があたらない環境でのみ微生物が生存し, リソパンスペルミア仮説が提唱されてきた. たんぼぼ計画では紫外線が当たる環境でも微

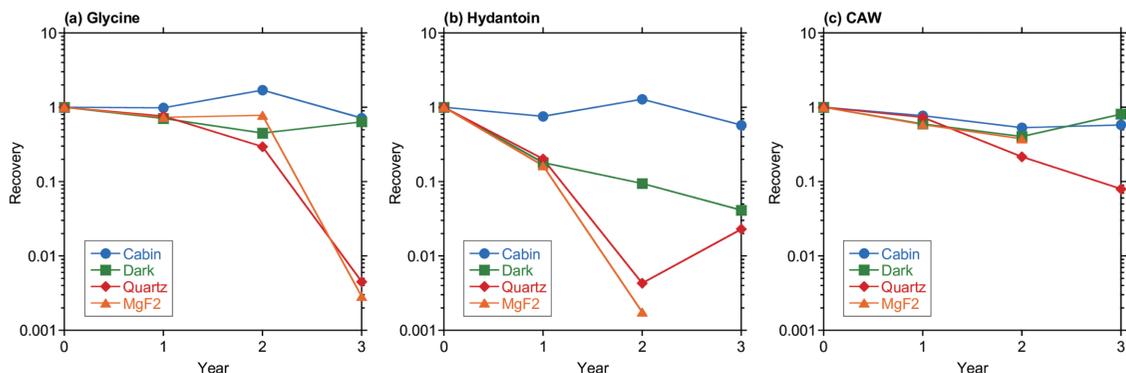


図8: たんぼ計画で宇宙曝露した有機化合物試料残存率の3年間の変化。ISS船内に保管した標品(●), 宇宙暗所(■), 石英窓(◆), MgF₂窓(▲)で宇宙曝露した標品の残存率[15]。CAWは一酸化炭素とアンモニア、水の存在下で放射線を照射して得られた複雑有機化合物。

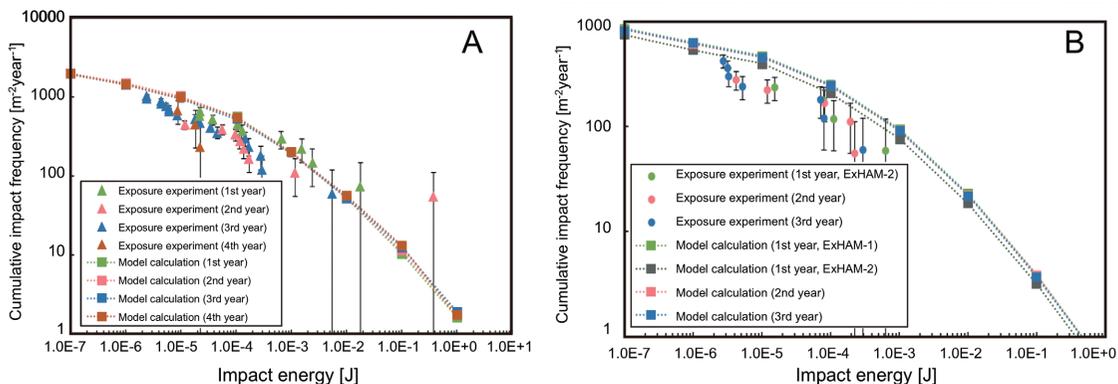


図9: たんぼ計画の捕集パネルアルミニウム枠にできた衝突痕の測定から得られた、衝突粒子頻度の衝突エネルギー依存性[10]。A: 進行方向面。B: 宇宙面。これまでにに行われた類似の実験から得られている微粒子速度分布モデルからの推定値を■と点線で、たんぼ計画の捕集パネルの解析から得られた微粒子エネルギー分布を▲, Bは●で示す。

生物細胞塊が数年間生存できることが明らかになった。この結果はマサパンスベルミア仮説を支持している。3) 有機化合物の変性実験に関して、宇宙空間での有機化合物曝露実験では、アミノ酸やその前駆体に比べて、複雑有機化合物の宇宙環境耐性が高いことが確認された。複雑有機化合物の宇宙環境耐性が、宇宙空間でのアミノ酸の長期安定性に寄与している可能性がある。4) 微小隕石の採集とその分析に関して、エアロゲルの分析から、0.1 mm以上の超高速衝突痕が300カ所以上見つかった。これらの衝突痕とそこに含まれる粒子の分析が行われている。5) 新たに開発した超低密度エアロゲルを用いて、超高速衝突微粒子の捕集が宇宙で実証され

た。6) 微小デブリフラックス量に関して、捕集パネルのアルミニウム枠に形成された高速衝突微粒子の頻度解析が行われた。以前行われた実験から得られているモデルと比べて、宇宙空間微粒子頻度の変動は少ないと推定された。

4. 火星での生命探査

4.1 火星に関するあらたな認識

火星は太陽系で最も地球に似た惑星である。一方で、火星の平均表面温度は- 50℃ ~ - 60℃、表層大気圧は地球の0.6 ~ 0.8%と低く、火星での生

命の増殖は困難と考えられてきた。しかし、極限環境微生物学の研究結果と火星探査による火星に関する知識の増加から、その認識は大きく変わってきている[16,17]。

火星探査によって、火星の情報は増えている[16-18]。過去の火星に液体の水と海があった証拠が複数見つかっている。火星表面には、水が流れた跡だと思われる地形や岩石、水の存在で形成される粘土鉱物などが見つかっている。初期火星には大気も海洋も存在した可能性があり[19]、地磁気も火山活動もあった。したがって、初期火星は当時の地球と似た環境だった[16, 20, 21]。

現在の火星表面にも地球の極限環境生物であれば生存可能な場所があると考えられるようになってきている[17, 18, 20]。火星の地下に、大量の水があることが周回衛星等の地下探査から明らかにされている。また、周回機からのレーダー探査によって、火星南極域地下に液体の水の存在を示唆する反射が報告された[22]。

なお火星の環境に関して、COSPAR(Committee on Space Research, 宇宙空間研究委員会)の惑星保護方針(Planetary Protection Policy)に関わる検討委員会MEPAG (Mars Exploration Program Analysis Group)が広範な情報をまとめている[17]。また米国ではCoPP(Committee on Planetary Protection:米国アカデミーの惑星保護委員会)が2020年に設立され、火星の環境に関して報告した[18]。本節ではこれらの報告も参考にしている。なお、惑星保護に関しては本章の最後に解説する。

(1) 現在の火星表面環境

表6は火星表面の環境因子と地球生物の増殖限界および生存限界をまとめたものである[17, 18, 20]。火星の平均表面温度は低温(−50℃ ~ −60℃)であるが、高温時には地球生物が充分増殖可能な温度となる。火星大気圧で増殖可能な微生物が地球で発見されている[17, 20]。土壌pHも中性の場所がある。Viking 探査機着陸地点のレゴリスはpH 7.2 ± 0.1 [24]、Phenix 探査機着陸地点のレゴリスはpH7.7 ± 0.3 [25]、Gale Crater内Yellowknife Bay 泥岩のpHは中性付近とそれぞれ推定されている[26]。放射線は地球微生物に充分耐えられる強度

である。レゴリス中の過塩素酸の存在が知られているが、地球生物で過塩素酸耐性および、過塩素酸を呼吸基質として利用する生物が知られている[17]。紫外線強度は大変つよく、直接浴びると生存できる地球微生物はいないが、紫外線は厚さ1 mm以下のレゴリスで充分遮蔽される[17, 18]。したがって、火星表面の個々の環境因子をとって見た場合には、地球微生物が増殖可能な環境がある [17, 18]。

(2) 化学合成菌のエネルギー源

NASAの探査車MSL(Mars Science Laboratory; 通称Curiosity)は、ゲール・クレーター内を移動しながら様々な分析を続けている。火星レゴリスを加熱すると、水蒸気の他に、二酸化硫黄や硫化水素が放出されることから、レゴリス中の硫化鉱物の存在が示唆されている[27]。Curiosityは大気中のメタン濃度を測定した。探査初期の測定結果は大気中にメタンがほとんど含まれないという結果であったが、探査期間のうちのある期間にメタンが10 ppb近く検出された[28]。この結果から、近くにメタンが噴出する場所があることが推定されている。

こうした、硫化鉱物やメタンは化学合成菌のエネルギー源となりうる化学物質である[17, 21, 23]。生物はその増殖と細胞の維持にエネルギー源を必要とする。好気性従属栄養生物は有機化合物を摂取して、酸素との反応でエネルギーを得ている。化学合成菌は、有機化合物に頼らず、無機化合物や小さい有機分子(メタンなど)の反応でエネルギーを入手できる細菌および古細菌である[1]。なお、細菌と古細菌の両方を意味する場合には菌と呼んでいる。

表7は火星表面あるいは大気中で検出されている分子種あるいは火星表面付近での存在可能性がある分子種の中で、化学合成菌がエネルギー源として利用可能な分子の組み合わせである。水素は、大気中には検出されていないが、メタンが発生する際に水素が関与している可能性がある。還元型の分子、メタンや二価鉄、無機イオウ等は、様々な酸化物質(電子受容体)との組み合わせで、種々の化学合成菌のエネルギー源となり得る[17, 21, 23]。すなわち、火星表面に様々な化学合成菌のエネルギー源となりうる化合物の組み合わせが見つかっている。

表6. 地球生物の増殖・生存限界と火星の表面環境[17, 18, 23].

注*: 報告された3カ所のpH推定値の範囲. 本文参照.

環境因子	地球生物増殖・生存限界	火星表面環境
表面温度	-18°C ~ 122°C (増殖) -33°C ~ 122°C (代謝) -196°C ~ 122°C (生存)	-130°C ~ 20°C
大気圧	700 Pa ~ (増殖) 上限は不明	600 ~ 800 Pa (6/1000 ~ 8/1000 気圧)
水活量	a = 0.6 ~ 1.0 (増殖) a = 0.0 ~ 1.0 (生存)	氷/液体? 0.0 ~ 1.0
pH	-0.06 ~ 12.5 (増殖)	7 ~ 8*
紫外線	2,000 J m ⁻² (生存)	20 J m ⁻² s ⁻¹
放射線	5,000 Gy (生存)	0.225 mGy day ⁻¹
酸化還元状態	不明	強酸化的 (過塩素酸塩)

表7. 火星表面で増殖可能な化学合成菌[17, 21, 23].

電子供与体	電子受容体	化学合成菌
(H ₂)	CO ₂	メタン菌
(H ₂)	ClO ₄ ⁻ , NO ₃ ⁻ , Fe(OH) ₃ , SO ₄ ²⁻ , etc	水素酸化菌
CH ₄	NO ₃ ⁻ , MnO ₂ , Fe(OH) ₃ , SO ₄ ²⁻ , etc	メタン酸化菌
Fe(II)-sulfides	NO ₃ ⁻ , MnO ₂ , etc	鉄酸化菌
S ⁰	ClO ₄ ⁻ , NO ₃ ⁻ , MnO ₂ , etc	硫黄酸化菌

(3) 火星の有機化合物

Curiosityは火星ゲール・クレーター中の各所で表面試料を採集して, 加熱で発生するガスの分析を行った. カンバーランドという場所で採集した堆積岩の試料から, クロロベンゼンが検出された[29]. 加熱により堆積岩粉末中の過塩素酸が有機化合物と反応してクロロベンゼンが放出されたものと推定される. 有機化合物が, 宇宙より飛来したものなのか, 生命と関連するものなのか, 有機化合物の由来は不明であるが, いずれにせよ火星泥岩中に有機化合物が存在したと推定されている[29].

4.2 生命探査手法について

(1) 火星での生物関連成分の検出と方法

Enyaらは, 生命探査の対象となる生物の性質や分子とその分析方法をまとめた[30]. それらは, 培養による増殖の検出, 細胞形態を観察する方法, 有機化合物一般の検出, タンパク質, アミノ酸, 核酸, DNA, ATP(アデノシン三リン酸:生体内でのエネルギー移動を媒介する分子), 酵素反応等の検出であ

る(表8).

表8に取り上げた性質や成分は, いずれも地球生物が必ず持っている性質や成分である. また, これらのうちのいくつかは生物特有で, 生物以外が持つ可能性はない. たとえば, タンパク質と酵素はアミノ酸重合体が立体構造を形成したものであるが[1], これはダーウィン進化の結果として誕生した. したがって, 生物以外がタンパク質あるいは酵素を持つ可能性はない[2]. また, DNAが非生物的に存在する例や非生物的な合成は報告されていない[2]. したがってタンパク質やDNAが検出された場合には, それが生物である可能性が高い[30].

一方, これらの成分は地球生物では普遍的であるが, 地球外生物が核酸やDNA, タンパク質を用いるという保証はないので, これらを指標にすると生物を見落とす(偽陰性)可能性がある[30]. また, 培養を行う場合や, 酵素活性を検出する場合, 培養条件や測定条件が適切でなければ検出されないため, 偽陰性の可能性がある[30]. 反対に, 有機化合物, アミノ酸, 触媒活性などは非生物的にも存在するの

表8. 探査の対象となる生物の性質や成分とその特徴. Enya et al. [30]を参考に作製.

注

*:+++ 必ず持っている. ++ 高い確率で持っている. + 持っている可能性がある.

***: DL分析とは、分子の鏡像異性体を分析すること. ここではアミノ酸のD体とL体を分析する.

探査対象となる性質や成分	地球外生物が持っている蓋然性*	主な問題点	擬陽性、偽陰性の理由	その性質を持っていた場合に地球生物と判別する方法
増殖能	+++	偽陰性	未知の微生物の培養は地球生物でも困難	成分の詳細分析
細胞形状	+++	偽陰性 偽陽性	形状では判定できない場合もある	成分の詳細分析
有機化合物	++	偽陽性	隕石有機化合物との識別が必要	成分の詳細分析
タンパク質	++	偽陰性	持たない可能性あり	アミノ酸種分析, DL分析**
アミノ酸	++	偽陽性	隕石アミノ酸との識別が必要	アミノ酸種分析, DL分析**
核酸	+	偽陰性	持たない可能性あり	核酸種分析, 配列解析
DNA	+	偽陰性	持たない可能性あり	核酸種分析, 配列解析
酵素	++	偽陰性	持たない可能性あり	アミノ酸種分析, DL分析**
触媒	+++	偽陽性	無機触媒と識別必要	アミノ酸種分析, DL分析**

で、偽陽性(生物であると誤認する)の可能性がある[30]. さらに、細胞形状だけで生物と判定するのは難しい. 細胞形状だけで判定しようとすると、偽陽性(緩い基準で判定した場合)と偽陰性(不定形の細胞等、一般的でない形状の細胞の場合)の両方の可能性がある. すなわち一つの成分や性質の検出だけを探査対象とすると、生物を見落とす可能性と、非生物を生物であると誤認する可能性の少なくともいずれか、項目によっては両方の可能性がある(表8).

こうした検討を元に、Enyaら[30]は、1) こうした生体成分や生物の性質を用いた探査の内の、どの一つも単独では地球外生物を検出できないこと、2) こうした様々な生体成分や性質を測定する方法のなかで、すべての点で優れているものは無いこと、3) これらの内のどの一つの方法も単独で地球外生物であることを判定できないこと、を指摘した. そして生命探査では、一度に地球外生物の判定を目指すのではなく、第一段階では多少の擬陽性(非生物を検出すること)を容認しても、地球外生物の見落としができる限り少ない方法で探査すべきであるという提案を

行った[30].

(2) 蛍光顕微鏡とその他の顕微鏡

Enyaらは、これまでの火星探査で用いられたアストロバイオロジー関連の探査装置をまとめた[31]. 火星で生命探査を目指す海外の研究者達は、これまで質量分析装置を主に用いている. 海外の研究者は、主に有機化合物および過去の生命の痕跡の探査に主眼を置いている[31].

我々は、第(1)項で提案した第一段階の生物細胞の探査では形態を知ることが必須であり、成分の情報とともに顕微画像情報を得ることが重要であることを主張している[20, 30, 31]. 成分検出だけでは単なる有機物との識別は困難で、形状だけは無機物との識別が難しいが、両者を同時に行うことで、有機物でできた粒子を広範に検出できるからである. しかも、地球の原核生物(細菌と古細菌)のほぼすべての細胞は直径1 μm 以下の球状か、棒状(桿菌)であることから、地球微生物を参考にすれば、生命探査においてはそれを判定できる画像解像度が必

要である [20, 30, 31].

画像解像度をもつ顕微鏡としては可視顕微鏡、蛍光顕微鏡、ラマン顕微鏡、赤外顕微鏡、紫外蛍光顕微鏡、深紫外蛍光顕微鏡、電子顕微鏡、原子間力顕微鏡等がある [30, 31]. 電子顕微鏡と原子間力顕微鏡は画像解像度が最も高いが、抗体染色等の特殊な技術を用いない限り成分分析ができない。可視顕微鏡は、染色により成分分析が可能であるが、撮像感度が蛍光顕微鏡におとる。ラマン顕微鏡、赤外顕微鏡、紫外蛍光顕微鏡、深紫外蛍光顕微鏡は、ある程度の成分分析ができるが、画像解像度の高いラマン顕微鏡や赤外顕微鏡は大型で宇宙機には向かない。小型ラマン顕微鏡と深紫外蛍光顕微鏡の宇宙機が開発されているが地球微生物細胞(1 μm)を判別する解像度はもたない[30, 31]. 地球微生物細胞を判別する解像度をもち、成分の情報も得られる蛍光顕微鏡(LDM: Life signature Detection Microscope) 宇宙機の開発がすすんでいる[20, 30, 31]. 表9にはLDMのBBM (Bread Board Model: 設計の実現性を確認するため、宇宙用の部品ではなく、地上の一般用部品や材料を使用して製作した装置)の諸元を載せた。顕微鏡は、特にその振動耐性が気になるが、通常顕微鏡が3軸で観察位置を制御するのに対して、1軸で観察位置を制御することで振動耐性を持ち得る設計としたBBMでの自動染色と自動撮像に成功している[31].

日本の研究グループが開発をすすめている蛍光顕微鏡LDM(表9)は単に粒子の形状を観察するのではなく、粒子の成分の情報も得られるという長所をもっている[20, 30, 31]. すなわち蛍光顕微鏡は生物学一般で汎用されていて、様々な染色特性をもつ5000種を超える色素が蛍光顕微鏡用に開発されている[32]. それらの色素は、それぞれの色素ごとに異なった特異性で様々な成分を検出できる。染色可能な対象としては、有機化合物一般、タンパク質、核酸、DNA、膜成分などがある[31]. さらに微生物の死細胞を赤に、生細胞を緑に染色して両方を検出でき、細胞の生死を色によって判定できる色素の組み合わせもある[20, 31]. 酵素活性によって発色する蛍光基質を用いることで、酵素反応を検出することもできる。しかも、蛍光顕微鏡の特性として、こうした成分や活性をもつ粒子の画像を得ることができる(図

表9. LDM-BBMの諸元[31].

視野	1.12 mm x 0.894 mm
画像解像度	1 μm (目標)
励起光源	Laser diode, λ = 488 nm
明視野光源	LED + Koehler optics, λ = 472, 525, 632 nm
検出器	CMOS. 1280 x 1024 pixels, 8 bit
試料容器数	20
質量	合計5.7 kg 蛍光顕微鏡: 1.8 kg 試料ローター: 1.6 kg 電気系: 2.3 kg
電力	30 W
外寸	160 mm x 120 mm x 240 H mm
温度範囲	-30 ~ +30°C (動作時) -40 ~ +70°C (非動作時)
大気圧	700 Pa

10). こうした利点があるので、地球での様々な環境での水中や土壤中での環境微生物探査では、ほとんど例外なく蛍光顕微鏡が利用されている [31]. (2.1節で解説した大気中微生物の場合には微生物細胞の生存率は低いと推定されるので、培養による生細胞の検出が行われている.)

(3) 生物細胞候補を地球生物と識別する手法

Enyaら[31]は、何らかの生命の徴候をもつ試料が得られたときに、次の段階でそれが何なのかを判別するフローチャートを提案している。生命の徴候が、生物なのか否か、地球生物とどのような関係にあるかを、アミノ酸種、アミノ酸の鏡像異性、DNAの解析で判定することができる。

例えば、得られた試料のアミノ酸分析を行って(図11)、アミノ酸が無ければ生物でないか地球外生物である[31]. アミノ酸が無い場合には、その対象が地球外生物なのか非生物なのかを判定するためには、広範囲有機化合物分析を行う必要がある。

アミノ酸が有った場合、その種類を分析することで、地球外生物か、隕石由来アミノ酸か、地球生物のアミノ酸かという識別が可能である。地球上の生物はすべて20種類の標準アミノ酸を用いている[2]. 地球生物が過去に火星から移動した生物であるか、あるいは火星生物が地球から移動した生物である場合には、火星生物も同じ20種の標準アミノ酸を使っている可能性が高い。また、地球生物がなぜ20種の標準アミノ酸を使っているかという理由は現在不明であるが[2], その理由があるのであれば、火星生

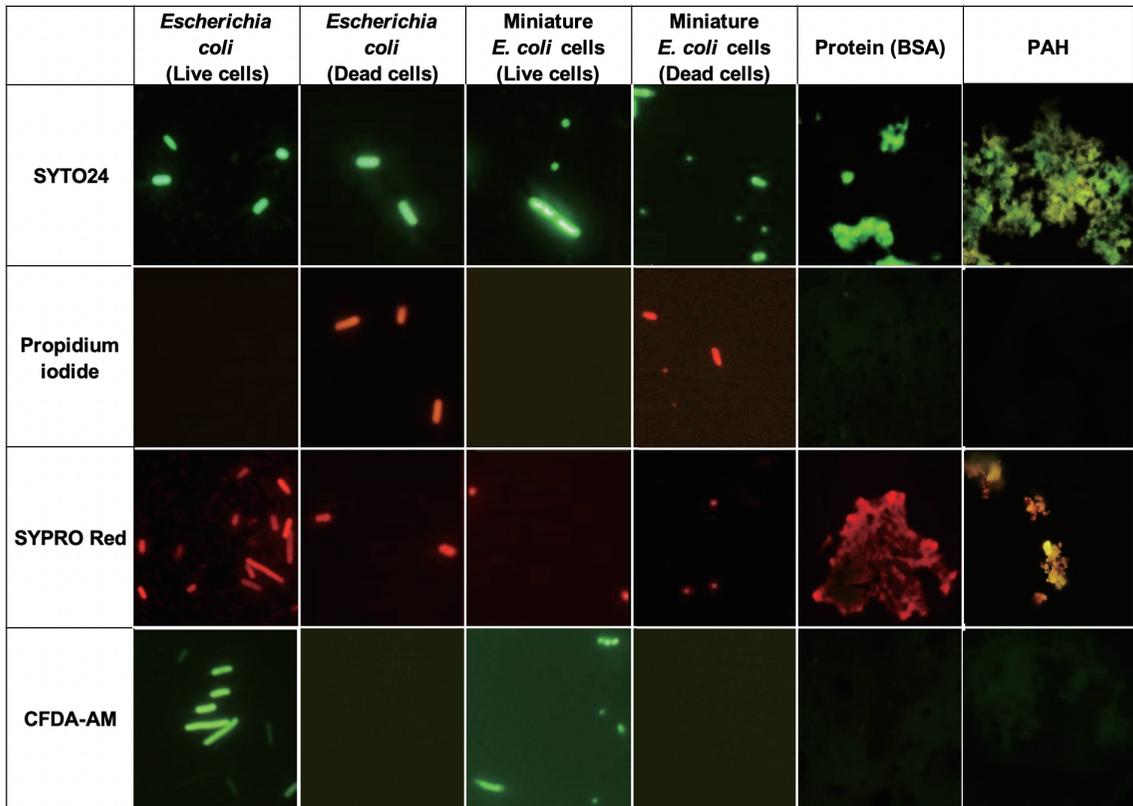


図10: 生物実験用蛍光顕微鏡で撮像した種々の微生物細胞と有機化合物の顕微撮像写真[31]. 左から大腸菌生細胞, 死細胞, ミニセル(大腸菌変異株で小さい細胞中にはDNAが含まれない)の生細胞と死細胞, タンパク質(BSA), プロテノイド, 多環芳香族炭化水素(PAH). 各行はそれぞれ別の蛍光色素で染色している.

物が地球生物とは独立に誕生した生物であっても地球生物と同じ20種の標準アミノ酸を使っている可能性もある. こうした場合, つまり対象が20種類の標準アミノ酸を用いていたら, それを地球型生物と呼ぶことにする.

隕石は地球型生物が用いているアミノ酸に限らず多種のアミノ酸種を含んでいるので, 容易に地球型生物と区別ができる[1]. もし, 試料が限定的な種数のアミノ酸だけをもっていて, かつそれが地球型生物の20種の標準アミノ酸とは異なっていた場合には, 地球外生物と判定できる(図11)[31].

同様の判定は, アミノ酸の鏡像異性体の分析で行うこともできる(図12)[31]. 地球型生物であれば, L型アミノ酸だけ(特殊な非タンパク質アミノ酸は例外的にD型の場合があるが)を持っている. DL両方の混合物であれば, 隕石由来か地球型生物の化石で

あると判定できる.(隕石由来か, 地球型生物の化石かという判定は, 上記アミノ酸種の分析で可能である.) D型アミノ酸だけで構成されていれば, 地球外生物であると判定できる(図12).

アミノ酸種の分析によって地球型生物であると判定された場合には, 生物が火星と地球間を移動した可能性を考慮する必要がある. さらに, 独立に誕生した生物であっても地球型生物の20種のアミノ酸を使う可能性もある. これらの可能性はDNAを分析することで判別することができる(図13)[31]. 例えば, DNAを持たない場合や, DNAを持っていても塩基が地球生物と同じACGT(アデニン, シトシン, グアニン, チミン)でない時, PCR(試験管内遺伝子増幅)で増幅しない場合や, 塩基配列が解析できない(地球生物配列と相同な配列部分がない)場合, 配列が読めたとしても系統樹が作製できない場合には技術

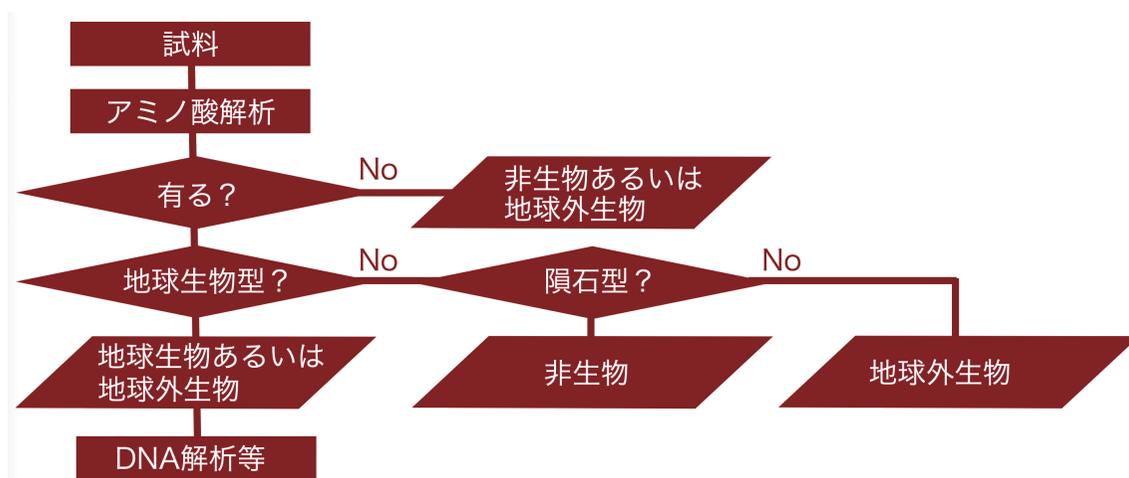


図11: 地球外試料のアミノ酸分析フローチャート[31]. 得られた試料のアミノ酸分析を行って, アミノ酸が無ければ生物でないか, 地球外生物である. アミノ酸があった場合, その種類を分析することで, 地球型生物か, 隕石等の非生物由来か, 地球外生物かの区別がつく. 地球型生物は20種のアミノ酸を含んでいる. 多種のアミノ酸種を含む場合, 隕石等の非生物と判定される. 地球型生物と同じ20種のアミノ酸ではなく, また隕石特有のアミノ酸種でもない場合, 地球外生物と判別される. 地球生物型アミノ酸組成の場合には, その後DNA分析等の解析で地球生物か地球外生物かの判定を行う.

的な問題の可能性は残るものの, 地球生物とは独立に誕生した生物である可能性が高い. つまり, 地球生物と同じ20種の標準アミノ酸を使っていたとしても, DNAを分析することで地球生物とは独立に誕生した生物であるかどうかを判定できる[31](図13).

地球生物の配列とともに系統樹が作製できた場合には, その生物が系統樹上のどこに位置するかで, その生物がどのような生物かが判定できる[31]. もし生命誕生直後に地球生物と分かれた生物種であれば, その生物の配列は地球生物系統樹の根元に付くはずである. あるいは, ごく最近(探査装置に付いていた場合も含む)地球から移動した生物の場合には, 地球生物系統樹の枝の端で地球の既知の生物種と枝分かれするはずである. つまり, その生物の持つ配列が系統樹上のどの位置につくかで, その生物と地球生物との系統関係が判定できる[31].

このように, アミノ酸種とDNAの詳細分析によって, 地球生物, 地球生物と過去に分岐した生物, 地球生物とは独立に誕生した生物, 非生物を判別することができる[31]. 裏返せば, 表8の中の一成分の検出だけではこれらの判別は困難である[31]. したがって, Enyらは二段階の生命探査を提案している. その一段階目では, 広く有機化合物を含む粒子

を見落としなく検出する. 二段階目ではアミノ酸種とDNAの詳細な分析を行い, どのような有機化合物であるかの判別を行う. 二段階目の分析はその場で行うか, 火星有人基地で行うか, 試料を地球へ持ち帰って行う等の可能性がある[31].

例えば, 既に有機化合物の存在が確認されているゲール・クレーターのカンバーランド泥岩掘削試料が地球に帰還した場合には, 蛍光顕微鏡や赤外顕微鏡, ラマン顕微鏡等で有機化合物の形状を確認し, 有機化合物を含む粒子が見つかった場合には, アミノ酸種分析やDNA分析によってその有機化合物の正体を明らかにできるはずである.

これらの検討結果は, 氷天体や金星など, 火星以外の太陽系天体における生命探査においても参考になる.

4.3 生命探査の意義と戦略

(1) 生命探査の意義

ここで, あらためて火星あるいは他の太陽系天体で生命を探査する意義はどこにあるのだろうか. それは, もし地球外生命が発見されたとき, 人類史上の非常に大きな発見になることである. 太陽の周りを地球が回っていることを発見したコペルニクスの

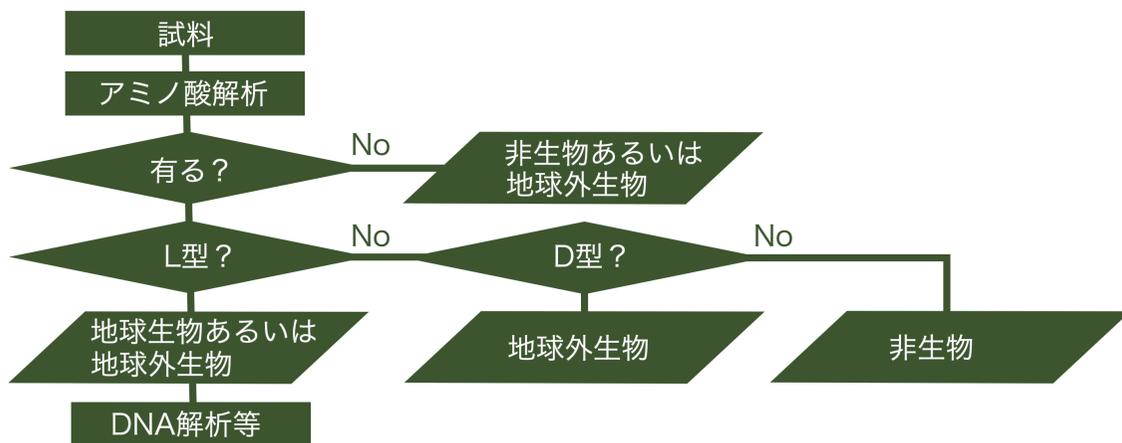


図12: 地球外試料のアミノ酸DL分析フローチャート[31]. 得られた試料のアミノ酸DL分析を行って、アミノ酸が無ければ生物でないか、地球外生物である。アミノ酸があった場合、そのDL分析をおこなうことで、地球外生物か、隕石等の非生物由来か、地球型生物かの区別がつく。D型アミノ酸の場合、地球外生物と判別される。DLの混合したラセミ体の場合には、非生物か生物の痕跡の可能性が高い。L型アミノ酸の場合にはDNA分析等の解析で地球生物か地球外生物かの判定を行う。

発見、生物がどのように進化するかを示したダーウィンの「種の起源」に匹敵する発見といえるかもしれない。

また今後、火星での有人探査が計画されている事を考えると、火星表面に火星特有の生物がいるかどうかを確認することは、火星特有の生物がいるかどうかに関わらず、惑星保護の観点から重要である[18]。すなわち有人探査では宇宙飛行士の滞在と活動によって地球由来微生物が火星環境に広がる可能性がある。したがって、探査地付近で火星固有の生物が存在する可能性を確かめておく必要がある[18]。

系外惑星に生命が見つかることを期待する天文学者は多い。地上および軌道上の様々な波長域の望遠鏡を用いて、太陽系外生命の徴候を探す計画が進行している[33]。生命の発見をそう遠くない将来に想定する天文学者も少なくない。しかし、仮に太陽系外に生命が発見されたとしてもその試料を地球に持ち帰ることは当分できない。

一方、もし太陽系内に地球外生物が発見されたならば、その場観測によって詳細な分析を行うことが可能である。さらに試料を地球に持ちかえることによって、高度な分析手法が利用可能になる。

それらの分析によって、生命に関するいくつもの根源的問いに関する情報も得られる。例えば、地球

外生物は細胞から構成されているのか。細胞の大きさはどれくらいか。生物を構成する元素は地球生物と同じなのか。水を溶媒として用いているのか。炭素を主成分として用いているのか。アミノ酸を用いているのか。核酸を用いているのか。脂質膜を用いているのか。これらを用いている場合に、アミノ酸、核酸、脂質、糖の種類は地球生物と同じか。これらの分子の光学異性は同じか。やがて地球外生物の遺伝学も始まるかもしれない。これらの分析結果によって、生物形成要素の一般性と多様性、偶然性と必然性の研究がすすむ。その生物と地球生物との比較から、両者で同じ点はどこでそれはなぜなのか、両者で異なっているのはなぜなのか、という理由に迫ることが可能になる。すなわち、地球生物に限定されない一般生物学とも言うべき生命科学が始まる。

(2) どのような生命を想定するか

とは言っても、生命を探索しようとするならば、探索対象天体にありうる生物の特徴をある程度想定する必要がある。そうしなければ、探索された対象が生物であるかどうかを判別することも困難である。

この点に関して、本連載第2回目に検討した、宇宙にありうる生命の形が参考になる[2]。すなわち、上述の元素、分子、アミノ酸の種類、核酸の種類などは、いくつかの環境因子によって影響を受ける可能

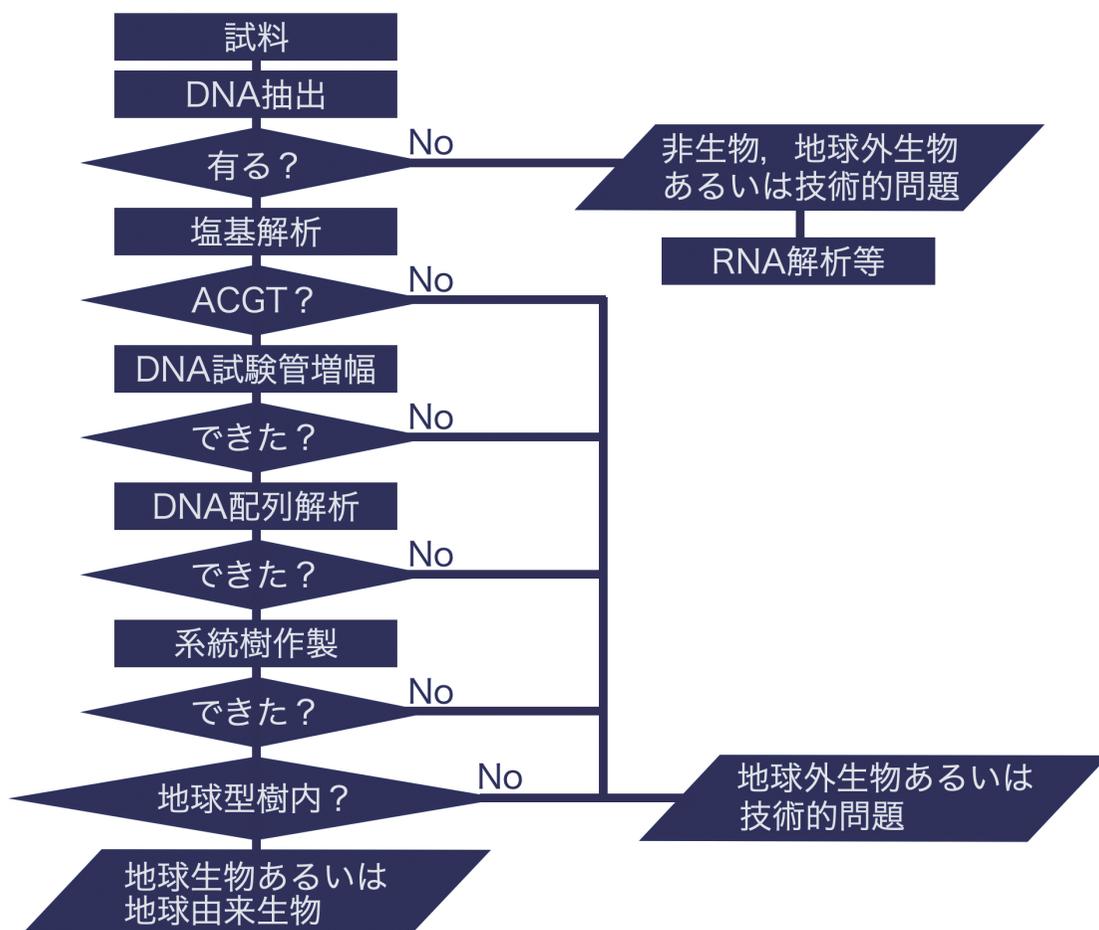


図13: 地球外試料のDNA分析フローチャート[31]. 得られた試料のDNA分析を行って、DNAが無ければ生物でないか、地球外生物あるいは技術的問題である。その場合RNA分析等を行う。DNAがあった場合、その塩基を分析しACGTであれば、PCR増幅、DNA配列決定、系統樹を作製して、地球生物の系統樹に入るかどうかを分析する。塩基がACGTでない場合やこれらの分析ができない場合には、地球外生物か、技術的問題である。系統樹解析ができる場合には系統樹上の位置から、どのような生物であるかの判定ができる。地球から移動した生物か、その天体から地球に移動した生物が系統樹上の位置で判定できる。

性があるという点である。例えば、ある液体が生命に利用可能であるためには、その液体が天体表面に存在する必要がある。同様に元素がその環境に存在しなければ利用できない。ある元素が炭素のように多種の分子を構成するためには、中心となる元素が多価で、しかもその元素の酸化還元状態が極端な還元型や極端な酸化型でなく、多種の原子と結合できる必要がある[2]。生命の基礎となる分子が生命誕生前にその天体表面に非生物的に供給されなければ利用される可能性が低い[2]。

こうした点を考慮するならば、太陽系の地球型の

天体、すなわち火星では、水を液体として用いて、炭素を主要元素として用い、酸素、水素、窒素を用いた有機化合物を主成分とする生命である可能性が高い [2, 30]。隕石からアミノ酸が多種供給されることを考えれば、アミノ酸の重合体を触媒分子として用いる可能性も高い[2, 30]。

一方、核酸を構成するリボースや核酸塩基が隕石中に見つかっているが、隕石中リボースの含量が低いことを考えると、遺伝物質としてDNAあるいはRNAを用いているという保証はない[2, 30]。アミノ酸の種類や核酸塩基が地球型と異なる可能性も考

表10. 火星で地球由来微生物が増殖可能な微小環境[17].

地球由来微生物が増殖可能な天然微小環境	説明
水蒸気が利用可能	大気中, 土壌間隙空間, 岩空隙等の水蒸気あるいはエアロゾル
氷関連	霜, 氷, レゴリス等の地下水, 氷河由来の液体あるいは気体の水
塩水関連	潮解塩, 水中, 氷表面, 結晶塩, 岩塩中の塩水
岩や土壌粒子の表面の水薄膜 (水活量が 0.9 以上の場合)	レゴリス粒子, 粘土鉱物, 氷表面, 岩石表面の水薄膜
地下水あるいは熱水 (微小環境ではない)	液体水
周期的凝集水や結露を受ける場所 (水活量が 0.9 以上の場合)	レゴリス粒子, 粘土鉱物, 氷表面, 岩石表面の水薄膜
鉱物中の水 (微生物生存可能ではない)	鉱物に結合した水 (粘土鉱物薄膜間水分子等)

慮しておく必要がある[2, 30].

膜脂質に関しても同様の推定ができる。つまり、地球生物の細胞は脂質膜で囲まれていて、脂質膜が細胞内部の分子を閉じ込めているが、地球生物の脂質膜には多種類の脂質が使われている[34]。したがって、地球外生物の細胞も脂質膜で囲まれているはずであるが、膜脂質分子として特定の脂質分子を想定することはできない。

地球の原核生物種の多くは、細胞の大きさが直径 $1 \mu\text{m}$ ほどであり、形は球状あるいは桿状である。地球外生物の細胞の大きさと形は不明である。しかし地球生物を参考にするならば、細胞の最も小さい可能性として $1 \mu\text{m}$ ほどの直径で、球状あるいは桿状細胞を想定しておく必要がある[2, 30].

4.4 どこを探すか: 地球微生物の生存場所

この項では、まず地球の微生物を対象に増殖可能な場所の検討を行う。微生物の増殖に必要な因子や成分は多種にのぼる。元素でいうと本連載第一回[1]表10に示した元素が生体内に含まれている。主要な生命構成元素として炭素、水素、酸素、窒素、硫黄、リンがある。エネルギーを確保するための電子受容体と電子供与体の組み合わせも必要である。増殖するためには液体の水が細胞内で保持される必要がある。増殖の環境も、適切な温度、pH、酸化還元

状態、紫外線強度の範囲である必要がある(表6)。これらの中で一つでも条件が欠けると微生物は増殖できない。

微生物細胞の密度は、必要な物質の中で、最も少ない物質の量によって規定される。しかし、微生物細胞が $1 \mu\text{m}$ 以下の直径で、質量も一細胞あたり 1 pg 以下であることから、その増殖に必要なとするエネルギーや元素の量は非常に少ない[2, 21, 30]。したがって、これらの環境因子を考える上で、必要な物質が得られる環境はほとんどどこにでもあった方がよい。すなわち、微生物は μm スケールの微小環境で増殖可能であると理解されている。実際 COSPAR の議論に基づく報告[17]では、微生物が増殖可能な微小環境を表10のように整理している。すなわち、微生物は微小な環境であっても増殖可能である。

生物が増殖できる環境としては温度 ($-18^\circ\text{C} \sim 120^\circ\text{C}$)、水活量 ($1.0 \sim 0.6$, これは相対湿度 $100\% \sim 60\%$ に相当する) が重要である(表6)。放射線耐性微生物は $5,000 \text{ Gry}$ まで生存可能なので、火星表面で放射線強度が問題になることはない[17, 21, 30]。紫外線も太陽光の直射を受けると生存できないが、ダストやレゴリスは厚さ 1 mm 以下で紫外線を遮蔽できるので[17]、土壌中で紫外線の影響は受けない。つまり、温度と湿度を同時に満足する範囲であれば、

土壌中で微生物は増殖可能と考えて良い[17, 21, 30].

生命が誕生すれば、生存可能な場所に生命は進出する。地球表面近くでは、火成岩の塊の中以外の場所には、ほとんどすべての場所に微生物がいると考えて良い。溶融溶岩中では炭素化合物は安定に存在できないので火成岩中に微生物はいない。一方、火成岩であっても水の浸透が可能な亀裂部分には微生物細胞が見つまっている[35]。これ以外の場所でも、水と微生物が侵入することが可能であれば、どこであれ微生物が増殖する可能性がある。海水表面付近では光合成に依存した生物相があり、200 m以深の海水では生物密度は低下するが、その密度は深海でもゼロにはならない[1]。また、アタカマ砂漠の最も乾燥した地帯や南極の砂漠でも 10^4 細胞/g土壌程度の微生物が見つまっている[36]。こうした環境では、水がほとんど無かったり、極低温であったりする。こうした因子は細胞数を少なくする効果をもつものの細胞を完全になくすわけではない。

地球生物が死滅しない環境、つまり生存可能な環境はさらに広範囲である。温度が増殖条件より低く液体窒素温度まで、湿度が増殖条件より低く湿度0%まで、圧力が増殖条件より低く真空まで、微生物は増殖できないが、死滅することはない(表6)[17, 18, 30]。微生物が増殖できない場合でも特に低温あるいは乾燥では死滅することなく、仮死状態で休眠細胞が保存される。低温や乾燥は寧ろ休眠細胞の保存に適した環境である。実際、研究室や微生物種保管施設では凍結乾燥した微生物細胞が半永久的に保存されている[17, 18, 30]。

いっぽう増殖を停止した微生物細胞はその成分が何らかの理由によって分解することでやがて死滅し、仮に増殖可能な環境に再度おかれたとしても増殖することはできなくなる。また細胞構成成分も変質してしまう。死滅の要因として例えば放射線や紫外線によるDNAの切断あるいは損傷がある。紫外線耐性の微生物も紫外線が当たる環境で数年、紫外線が当たらない環境では数十年で死滅する[30]。

それよりもはるかに長い時間スケールで、細胞を構成する高分子の分解が進行する[30]。分解の速度は環境に依存するために単純に何年と言うことはできない。例えば、分解酵素が働く常温の水中では数

時間から数日で核酸やタンパク質の分解は進行する[30]。逆に、乾燥した状態、真空中、低温では分解は極めて遅く、核酸やタンパク質は数千年以上保存される。数千万年前の化石中のペプチド鎖(タンパク質の一部)が報告されている[30]。

つまり、高分子が残存している細胞を検出しようとした場合には火成岩中以外の様々な場所が対象となりうる。ただし注意すべきは、化石中のペプチド鎖分析は大型化石でおこなわれたという点である。つまり、試料を目視で発見できれば解析して有機化合物を検出することができるが、問題はその試料をどのように発見するかということになる。微生物細胞は小型で、細胞一つであれば顕微鏡無しに検出することはできない。バイオマツ(微生物細胞の層状の被膜)、バイオフィルムであれば目視できるが、岩石試料であればそれを見つけるためには新しい試料面を研ぎだす必要がある。つまり、目視によって試料を見つけることは極めて困難である。ただし、手当たり次第に有機化合物ないし有機物粒子を探査するという方法はありうる。有機化合物が発見された場合には前記フローチャートのような詳細分析を行うことが可能であり、その価値がある。

4.5 探査地で検討すべき環境因子

具体的な探査地は生命探査以外の科学目標や工学目標、探査可能性や容易性、装置の開発段階など様々な因子を考慮して検討されるはずである。

前項で検討したように、微生物の増殖を制限する重要な因子は、水の活量と温度である[17, 18]。水の活量と温度は細胞内で液体の水が存在できるかどうかに関わる。ここで水や凍土は、その中あるいはその側で、水の活量は1.0となり、増殖に必要な水の活量0.6を上回る。あるいは、蒸気の噴出している場所では、水の活量は高くなる可能性が高い。こうした水の活量の大きい場所で、温度の充分高い場所があれば、生命探査候補地となる(表6参照)。つまり、温度と水の活量が増殖条件を満たす場所(温度 - 18°C ~ 120°C, 水活量1.0 ~ 0.6)が生命探査の第一の候補地となる。

ここで、温度と水活量を考える理由は液体の水が鍵となる。しかし、上記の条件の外でも塩の潮解による塩水は存在する。上記の温度水活量の範囲か

ら外れれば地球微生物の生育はできないが、火星に微生物が存在したとして、塩の潮解による塩水の存在場所が増殖可能な場所となるかもしれない。

4.6 火星表面での特徴的地形や環境の評価

後述するように、火星表面にある環境を地球由来微生物で汚染しないことが国際条約によって要求されている。これは惑星保護とよばれている。火星表面で地球生物が増殖可能な場所は、惑星保護上の特別領域とよばれている[17]。惑星保護方針では、特別領域を、それ以外の場所と比べてより強い惑星保護の対象領域としている。火星に現在も増殖する生物がいた場合に、特別領域はそれを見つける可能性の高い場所とも考えられる。この節ではRummelら(2018)が行った火星特別領域の報告[17]、CoPP(米国アカデミーの惑星保護委員会)の火星での惑星保護に関する報告[18]を参考に地球生物が増殖可能な場所を検討する。

(1) RSL.

周回機の撮像によって、クレーター斜面で季節的に現れては消える黒い筋(0.5~5 m)が多数確認されている(図14)。これは、Recurring Slope Lineae (RSL)と呼ばれる現象である[17, 37, 38]。温暖な時期にクレーター斜面に黒い筋が伸長し、やがて消える。この現象が毎年繰り返されることが確認されると「確定したRSL」と呼ばれる。黒い筋の伸長あるいは繰り返しのどちらかだけが確認された場合には、「部分的に確定したRSL」とよばれる。RSLがどのような機構で現れるかははっきりしていないが、Rummelら(2018)はいくつかの機構を紹介して、RSLは地下の水に由来する活動である可能性が高いとしていた[17]。しかし、CoPPでは水の関与に関しては否定的な解釈を行っている[18]。その理由はいくつかあるが、RSLに含水過塩素酸塩の赤外線吸収があるという結果はデータ処理の不備であった可能性があると指摘されている。また、RSLが観測されている緯度を考えるとRSLの流出高度は地下凍土の位置より高いこと、RSLが停止する地形の斜度が粒子の流れで説明できること、等が指摘されている[18]。ただし、地下凍土からの水蒸気の発生がRSLと関連している可能性はまだ残っている。

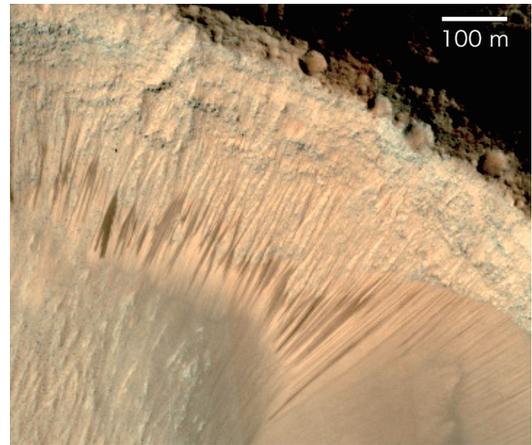


図14: マリネリス峡谷メラス谷のRSL (11.5 S, 290.3E) [17]. HiRISE画像 ESP_031059_1685の一部。画像はNASA/JPL/University of Arizona.

(2) ガリー

ガリー(gullies)は浸食によってできた尾根(alcoves)に挟まれた峡谷(channels)と扇状地(aprons)を持つ構造である[17, 39](図15)。Rummelら(2018)は火星特別領域の関連でガリーを4種に分類した。Taxon 1のガリーは南半球中緯度にある温度が極めて低い場所(CO₂露点温度)のガリーで、極低温であるため、おそらく水は関係しない。Taxon 2は比較的新しい比較的低温な地域のガリーで、地下に氷があるかもしれないが、氷の融解による水でできた可能性が高い。Taxon 3は温暖な地域のガリーで、地下の氷がない。Taxon 4はRSLに付随して観察されるガリーで、項目(1) RSLの記述が適用される[17]。しかしその後CoPPでは、多くのガリーに水は関係せず、CO₂の霜が関係した現象であろうと結論している[18]。

(3) クレーター

クレーターは、その形成時のエネルギーによって熱水活動が起きるが、現在に至るまで熱水活動が継続していると推定されたクレーターはない[17]。

(4) 地下水

地下水が存在する可能性も検討されている[17]。

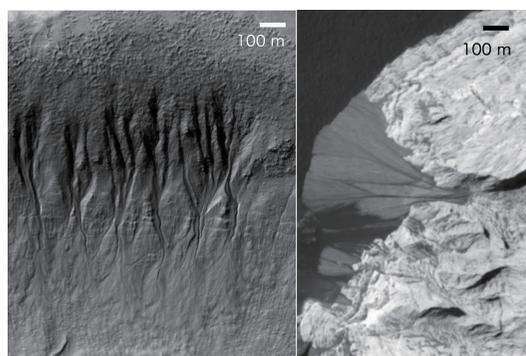


図15: 火星のガリーで、浸食によってできた尾根(alcoves)に挟まれた峡谷(channels)と扇状地(aprons)が見られる[17]. 左: 中緯度(37.46 S, 222.95 E)のクレーター斜面のガリー(HiRISE画像 ESP_033290_1420の一部). 右: 赤道域(8.41 S, 313.31 E)のガリー(HiRISE画像 ESP_018518_1715の一部). 画像は NASA/JPL/University of Arizona.

火星表面の浸食の度合いと火星史初期の地下水量の推定から、最大時(30~35億年前)には火星が平均0.5 ~ 1 kmに相当する水を保有していたと推定されている。現在でもこれらの水の大部分は、表面付近から少なくとも数kmの深さにおよぶ極域の水と、元素崩壊熱によって氷層の下に形成される深部地下水として残っている可能性がある。これらの水の大部分は鉱物空隙水としてトラップされるが、それ以上の水量がある場合には液体の水として存在する可能性がある[17]。流出峡谷(outflow channels)は、この地下水の存在を反映している可能性がある。流水峡谷の中には200万年前から10億年前に形成されたと推定されるものも報告されている[17]。

地下水のもっとも直接的な探査は、周回機 Mars Express からのレーダー(MARSIS: Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding)探査として行われた。この探査によって火星南極域(Planum Australe地域)地下水の下に2 km幅の液体の水の存在を示唆する反射が報告された[22]。

火星全域の地下200 ~ 300 mより浅い地下水は検出されていないが、それが発見された場合には特別領域として扱われる。また、地下10 m程度より浅い部分のレーダーの解像度は低いので、表面25 cm

から10 mまでの地下水の存在可能性は否定できない[17]。

(5) 斜面の黒い筋(線)

斜面の暗い筋模様(dark slope streak)が数十年にわたって現れたり消えたりする現象が主に赤道域で報告されている[17, 39](図16)。この現象は、季節変化や筋の伸長がない点がRSLとは異なっている。この現象に水の関与した可能性も提案されているが、大部分は乾燥ダストの崩壊であろうと推定されている[17]。

(6) 極域砂丘斜面の黒い筋(線)

極域砂丘(dune)斜面で黒色の筋が観察されている。火星の冬季、温度がCO₂の霜点(約150 K)から上昇する時に現れ、幅2~3 mで数十mほどの長さになる。夏期には見えなくなるが翌年同じ場所に出現する。温度が低温であるため、塩水であっても液体では存在し得ないので、地球由来生物増殖の可能性は無いと判定されている[17]。

(7) 地熱地帯

周回機Odysseyに搭載されたTHEMIS (Thermal Emission Imaging System)の赤外線画像(約100 m / pixel)の解析から地熱異常の検出が試みられた。しかし赤外線画像は、場所による撮像時間の違い、表面の粒子径の違い、岩石類度、地形の斜度や割れ目等によって影響を受けるため、解析は複雑で、はっきりとした地熱地帯は報告されていない[17]。

(8) 洞窟や岩石亀裂

火星でも火山性洞窟が多数検出されている(図17)。洞窟は地表に比べて湿度が高く、温度変化が少ない、太陽紫外線から護られるなど、微生物増殖や生存に対して有利な条件をもっている。地球由来微生物の増殖可能性は不明であるが、潜在的に特別領域として扱う事になっている[17]。

CoPPでは岩石亀裂内部の温度は場所により充分高く(-25°C, 248 K)準安定な水があり、地球微生物が代謝可能な場所があるかもしれないとしている[18]。ただし、地球微生物が増殖可能かどうかは不明である。



図16: ダストで覆われた斜面にある黒い筋. 火星Acheron Fossae地域にある地溝の日の当たる斜面と地溝底の画像(37.32 N, 229.11 E) [17]. HiRISE画像 PSP_001656_2175の一部. 画像はNASA/JPL/University of Arizona.

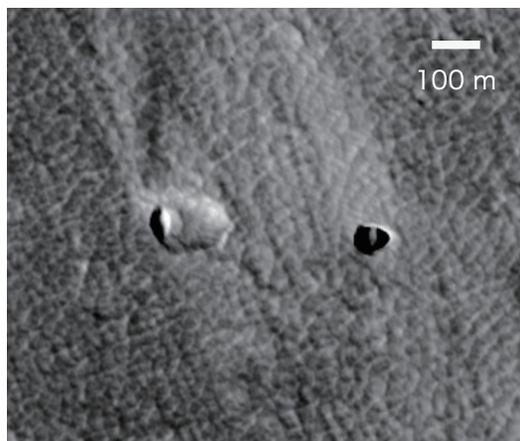


図17: アルシア山の北東部にある陥没でできた穴(2.27 S, 241.90 E) [17]. HiRISE画像 ESP_014380_1775の一部. 画像はNASA/JPL/University of Arizona.

(9) 表層付近の土壌

表層付近の土壌中の温度と湿度のモデル計算が行われている。Phoenix着地点での表面土壌温度、大気湿度を用いて、土壌中の凍土をモデル化した場合、湿度60%を実現する際の温度は -73°C 以下であり、夏期に 255K (-18°C)以上になる場合の湿度は10%以下であった[17]。

VikingからCuriosityに至る観測結果を用いて、過塩素酸塩の潮解図との比較も行われた[17, 40]。温度が高い場合に過塩素酸塩は広い湿度の範囲で潮解を起こす(図18)。一方、温度が低く湿度が低すぎる場合には結晶となり、温度が低く湿度が高すぎる場合には塩の結晶と水の混合物となる。VikingからCuriosityに至る観測結果を用いた解析の結果、過塩素酸塩が潮解を起こす時間帯は限られていた[17, 40]。また潮解が起きた場合でも、その温度は地球由来生物の増殖温度をはるかに下回っていた[17, 40](図18)。

CoPPは火星全球に対して地下温度と湿度のモデル計算を行った[18]。このモデル計算では、熱特性の異なるいくつかの地表(レゴリス, 小石, 氷で固化したレゴリス等)を仮定し、一年で最も高温になる時の一日の平均温度を推定した。その結果、表層約

10 ~ 60 cmの温度は北半球では 245K (-28°C)以下であった。しかし南半球では地表の組成によるが、少なくとも約60 cmの深度まで 245K (-28°C)以上になった。さらに、地下数十mから地下100 m以深まで、地熱によって 245K (-28°C)以上になると予想された[18]。

温度と相対湿度の両方を考慮した検討も行われた。土壌中と大気とのガスの交換がない閉鎖環境(塩が固化している場合など)であれば、表面20 ~ 30 cmの氷あるいはレゴリス中で微生物の増殖可能な環境、 245K (-28°C)以上で水活量0.5以上、が実現可能であると結論している[18]。

その後の研究から新しい知見も増えている。火星表面で液体の水は存在しにくい、火星表面にある塩(過塩素酸塩等)の潮解によって塩水は存在する可能性がある[41]。実験的にも、赤道域から高緯度域にかけて一日に6時間程度であれば、表面か表面直下に準安定な潮解水が一年の内の数日間存在しうることが示されている[41]。

またExoMars Trace Gas Orbiter (TGO)は、赤道付近にあるマリネリス峡谷の中央部に40.3重量%の水に相当する水素を含む領域を報告している[42]。この観測結果は、この領域の表層近く深さ1 m前後のレゴリス中に、氷か水和塩が存在していることを示唆している[41]。

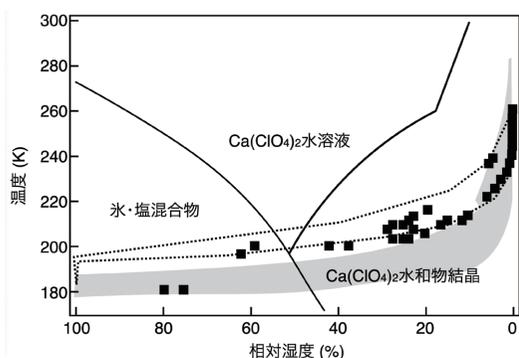


図18: 過塩素酸の状態図。点線はVikingのモデル計算結果, 黒四角はPhoenix着陸機の測定データ。灰色領域はCuriosity探査車測定データの範囲。Rummel J. D., et al. (2014)[17]およびMartínez, G. M. et al. (2017) [40]より作成。

(10) 降雪

Phoenix着陸機のLIDAR(Light Detection And Ranging)によって, 日の出前に雪が地上に到達することが観測された[17]。これは火星の極域に限らず火星のどこでも起きうる。ただし, 雪は夜の最低温時に積もり, 日が昇るとすぐに昇華, 融解/蒸発するので, この現象によって地球由来微生物の生存可能な環境が形成されるかどうかは不明である[17]。

(11) 新しいクレーター

周回機の観測によって, 中緯度から高緯度域で新しいクレーターが見つかっている(例えば図19)。直径は1.0~24 mで, 衝突によって放出された白っぽい物質がクレーター周辺に広がっている場合もある。放出された白っぽい物質は数ヶ月から数年で消失するので, 衝突によって放出された氷の破片であろうと推定されている[17]。赤道付近の新しいクレーターは黒色なのに対し, 白っぽいクレーターの大部分は北緯39~65度で見つかっている。これは, 氷層より上のダスト層が低緯度で厚く, 高緯度で薄いことと付合している。これらの氷は白色で, 土壌間隙水ではなく, レゴリス含量が1%以下の氷であろうと推定されている[17]。

(12) 多角形が多数連続する地形

中緯度から高緯度では, 数mから数十mの多角形が蜂の巣状に続く地形が広く見つかっている(図20)。こうした地形は地球でもあり, 比較的浅い凍



図19: 明るい色の物質を放出した新しいクレーター (55.58 N, 150.6 E)。クレーターは2008年1月26日から2008年9月18日の間にできた[17]。HiRISE画像 PSP_010625_2360の一部。画像はNASA/JPL/University of Arizona。

土が徐々に消失することに起因していると推定されている。また火星の多角形連続地形の見られる場所は, 周回機の中性子分光測定によって地下水が想定される地域と付合している。これらの場所では比較的浅い凍土が想定されるので, 探査機の着陸あるいは衝突によって地球由来微生物が生存可能な領域となりうる[17]。

(13) 地下水床

火星は歴史的に, 自転軸や軌道要素の変化によって現在の低緯度地域にも氷河を発達させた可能性がある。極域から赤道域までアマゾニア代(30億年前から現在まで)の氷関連堆積物が見つかっている[17]。

地下水に関する情報は, レーダー, 中性子分光法, 赤外線画像解析によって行われてきた。この中で, サウンディング・レーダーSHRADとMARSISはそれぞれ垂直解像度約10 mあるいは100 mである。レーダーによって38度以北でレゴリス間隙水以上の氷を含む厚さ80~170 mの氷床が見つかっている。これらは表層から10 m近くにまで達しているかもしれない[18]。実際, 北緯39度以北でレゴリスをほとんど含まない氷が地表数m近くにまで存在することが, 新しいクレーターの存在によって分かっている[18]。

中性子分光法と赤外線画像解析によって表面付近約1 mの氷の情報が得られる。中性子分光法の約500 km/pixelの画像によって北緯45度以北および南緯60

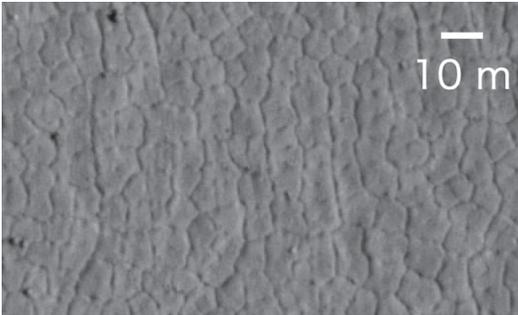


図20:多角形の連なる地形の例. こうした地形は地下にある永久凍土が季節的熱収縮によって割れる事で形成される. 表面の柔らかい土壌が次第に失われると, 蜂の巣形の浅い溝が見えるようになる[17]. HiRISE画像 PSP_005761_1145 (65.305 S, 136.562 E)の一部. 画像はNASA/JPL/University of Arizona.

度以南の中高緯度地域の大部分の領域で表面付近1 mに氷が見つかった[18]. 約3 pixels/degreeの粗い画像分解能の赤外線画像解析によって, 北緯35度以北および南緯60度以南にほぼ連続した氷カレゴリス空隙を埋める氷が検出されている[18].

ただし, 中性子分光法と赤外線画像解析は地下約1 mよりも深い部分の情報は与えない. また赤外線画像解析では, 赤道付近は表面温度の季節変化が少ないため, また南半球ではダストが多いため, 地下10 cmより深い部分にある氷を検出できない. したがって, 赤道付近で表面付近の氷が赤外線画像解析で検出されないことは氷が無いことを意味するわけではない[18]. 実際Mars Odysseyの中性子分光法による観測は赤道付近のいくつかの場所で水素の過剰を検出していて, これは地下水由来である可能性がある[18, 42].

前述した地下温度と湿度のモデル計算では, 南北緯度49度以下の低緯度地域の水平な表面あるいは南北緯度25度以下の赤道域の極に向けた斜面には, 表面約1 mに安定な氷が存在し得ないという結果である[18]. しかし, こうしたモデル計算は土壌が大気と拡散平衡にあることを仮定している. 大気との拡散が塩の固化などで妨げられた場合には, 氷が存在しても良い[18].

以上をまとめるなら, 北緯35度以北および南緯約50度以南の両極側表面付近深さ1 mより浅い場所には氷があり, 赤道付近でも表面付近深さ1 mより

浅い場所に氷がある可能性がある. すなわち北緯約35度から南緯約50度の間の低緯度で, 約10 ~ 100 cmの深さに氷がないとするはっきりとした証拠はない. また全球において1 ~ 10 mに氷が無いとするはっきりとした証拠はない[18].

(14) 着陸機由来の環境変化

着陸機による様々な作用で, 地下水を融解して地球由来微生物の生存可能な環境が人工的に形成される可能性がある. 着陸機の脚, ローバーの車輪, 熱源, 特にロボットアーム, 岩の掘削等でその場所に氷がある場合, エアロシェル, 熱シールド, スカイクレーン等が氷を含む場所に落下した場合なども考慮する必要がある. 衝突によって破壊炎上する場合も想定する必要がある. これらの現象は個々の計画や計画外の事象を含めて個別に検討すべきであるが[17], ここではこれ以上ふれない.

(15) 水の流出や, 蒸気や粒子の噴出地

上述の地形的要素以外でも, 地下水の流出あるいは, 地下の氷や水からの蒸気や粒子の噴出の場所があれば, 生命生存可能性のある場所となる. 例えばガリーやRSLの深部地下水から蒸気が噴出する経路があった場合, その途中で生命増殖条件を満たす可能性がある.

メタンの生成過程は, 生物学的なものと非生物学的なものが知られている. しかし, 何れのメタン生成機構でも, メタン生成のために水あるいは蒸気が関与している[43]. メタン噴出地はまだ見つからないが[39], もし見つければエネルギー源と蒸気も同時に発見されることになり, 重要な生命探査地の候補となる.

(16) 生命探査候補地のまとめ

Rummelら(2018)の報告[17]とCoPPの報告[18]をまとめるならば, 火星表面での様々な特徴的な地形のなかで, はっきりと水の活動と関係づけられるものは無い.

一方, 低緯度地域に地下水床(1 mより浅い)がある可能性があり, 大気との気体交換が無い土壌など, その上に地球微生物増殖可能な環境がある可能性がある. 中性子分光法と赤外線画像解析で地

下水床が見つかった場所であれば、地下水床の深度は地下1 m以内でありその可能性がある[18]。実際ExoMars TGOは、赤道付近にあるマリネリス峡谷の中央部に40.3重量%の水に相当する水素を含む領域を報告している[42]。これは、この領域に表層近く深さ1 m前後のレゴリス中に氷か水和塩が存在していることを示唆している[41]。こうした地球微生物の増殖可能な場所は、生命探査地の第一の候補である。

地下の水か氷に由来する液体、あるいは蒸気や粒子が噴出している場所が生命探査地の第二の候補となる。すなわち、ガリーやRSLの流出物、未発見ではあるがメタンと共に噴出してくる粒子あるいは液体等が分析対象物となる。これらは特別領域からはずれるわけではないが、地球由来微生物の生存可能領域に試料採集装置を直接接触させる可能性のある第一の候補に比べて、そこからの流出物を探査の対象とする第二の候補の方が、惑星保護の観点から好ましい。

また、中高緯度地域には数 mより浅い地下水床が見つかっている。これらの場所の温度は低く、地球微生物の増殖は困難である。しかし、水活量が高いはずで、火星微生物がいないとは断言できない。地下水床があり潮解塩水の存在が可能な場所は第三の候補としても良い。例えば、中緯度から高緯度域の新しいクレーター周辺に広がっている、衝突によって放出された白っぽい物質は、潮解塩水由来の物質を含む可能性がある。

4.7 惑星保護との関連

前項で解説した火星表層の解説は、惑星保護に関わる報告を参考にした[17, 18, 41]。惑星保護では地球由来の微生物によって地球外の環境を汚染しないこと(フォワードコンタミネーション)と地球外の有害な物質を地球環境に持ち込まないこと(バックワードコンタミネーション)が目的とされている。惑星保護は国際宇宙条約第9条によって規定されており、惑星保護方針(具体的な方法)はCOSPARの惑星保護パネル(Planetary Protection Panel)によって審議決定され、COSPAR理事会によって承認される[41]。日本ではJAXA(日本宇宙航空研究開発機構)がCOSPAR惑星保護方針を元に惑星保護の

プログラム標準を定めている[44]。

(1) 特別領域

COSPARの惑星保護パネルでは様々な検討を行ってきたが、2023年報告では、特別領域を次のように定義している。特別領域とは、地球由来生物が増殖する可能性のある領域で、それは火星現存生物が存在する可能性が高い場所と理解される[41]。COSPAR2020年の報告では確定した特別領域はないが、下記のような地形はさらに詳しいことがわかるまでは特別領域として扱うことが提案されている[45]。

- ・ 観測によって見つかった地形
ガリー(taxon 2~4)、それに付随した明るい筋、地下洞窟、5 m 以深の地下、RSL(確定したものと及び部分的に確定したもの)
- ・ まだ見つかっていない地形
地下水、メタン発生源、地熱活動、新しい流出峡谷
- ・ ケース・バイ・ケースで評価することが必要な地形
斜面の黒い筋、Pasted-on terrain(ガリーで新たに堆積した層)、RSL(候補)

COSPAR2020年の報告ではガリーTaxon 1はCO₂によると考えられるので特別領域ではないが、他のガリーTaxonは特別領域として扱われている。これらのガリーは地下に融解する可能性のある氷があるか、RSLに関連している場合に特別領域となり得るとしていた[17]。

次項で説明する2023年の報告[41]では上記のような地形の個別検討は行っていないが、COSPAR2021年の報告[46]ではCOSPAR2020年の報告[45]を踏襲しているのでこれらの地形の特徴に係わる検討は今後も参考になる。

(2) COSPARの惑星保護パネル2023年報告

COSPAR惑星保護パネル2023年報告では火星無人探査車に関わる惑星保護に関して報告している[41]。そこでは、知られている微生物増殖の下限温度 - 18℃に対して、低温での微生物活動の低下は指数関数なので最低温度の認定が困難であるとして、温度のマージン10℃を採用した。そして惑星保護の

特別領域を温度 -28°C 以上で水活量0.5以上の場所と定義している[41]. さらに、特別領域を判定する時間範囲を指定し、今後500年間、温度と水活量が上記の基準を満たす可能性がある場合に特別領域となることを確認している[41].

一方、惑星保護の制約を多少緩める提案もある[41]. すなわち、1a) 探査活動が表面だけの場合、あるいは1b) 探査活動が地表から1 m以内でありそこに地下水の存在が中性子や熱的データによって見られない場合であって、かつ2) 活動場所が特別領域から十分に離れている場合には惑星保護要求を緩めてもよいのではないかと提案である。また、探査機表面の微生物が火星で探査活動を行っている過程で死滅することを、惑星保護要求実現の過程として考えることが提案されている。しかし、微生物の環境耐性が強く、紫外線も薄いダスト層(数 μm)で遮蔽される事等から、これらの提案はガイドラインとしてはまだ採用されていない[41].

報告では、探査車に付着した粒子がダストストームによって火星全球に運ばれる可能性を検討しているが、今後の検討が必要であるとしている。微生物の火星環境での死滅効果の検討や、火星で微生物が運搬される機構の検討、火星地下に関する情報、気候モデルも必要であるとしている[41].

また、計画では予期しなかった特別領域が探査中に見つかった場合などには、運用中に惑星保護の検討を行う必要性も指摘している[41]. さらに、JAXAのMMX (Mars Moon eXploration)での惑星保護の検討[36]が参照されて、惑星保護基準の達成が一律な方法ではなく、探査計画ごとに検討され、審査、評価されて良いと、個別の惑星保護審査過程が承認されている[41]. 惑星保護検討ではリスク・マネジメントの手法が参考になるとして、NASAの場合に標準となる方法を提案している[41]. さらに、今後予想される有人探査では地下水、洞窟等の利用が予想される。その前に、有人探査によるこれらの場所への影響に関する知見を得る必要があるとしている[41].

(3) 惑星保護に関する今後の検討事項

COSPAR惑星保護パネル2023年報告[41]では変更された点が多く、火星における着陸探査を進め

る上では、予め様々な点を検討しておく必要がある。本項では、筆者の私見を付記して今後の検討の参考に資する。

着陸地に関して、高緯度はもちろん赤道域であっても地下水存在の可能性があるので、まずは中性子分光結果等から地下水存在可能性を把握する必要がある。そして着陸地に関してモデル計算を行い、特別領域であるかどうかの評価を個別に行っておく必要がある。

生命探査を行うのであれば、生命増殖条件(温度と水活量)を満たす場所を探す可能性があり、必然的に特別領域の探査となる。赤道域で中性子分光によって水素が検出されている場所や、地下からの噴出・流出等のある場所が生命増殖条件を満たす場所の候補になるが、これは特別領域となり得る。したがって生命探査を行う場合には、惑星保護との関連を予め検討しておくことが必要である。

また、これまでの特別領域の定義では、地球生物増殖可能な場所すなわち温度と水活量を指標にしている[41]. さらにその周辺で、探査車から遊離した粒子が、地球生物増殖可能な場所に風などによって搬送される可能性を考慮している。こうした地球生物増殖可能な場所を汚染する具体的な過程の検討が、必要かつ十分な惑星保護措置を設計する際に必要となる。

こうした点に関してCoPPでは、単に地球由来の微生物が増殖するかどうかではなく、それが周囲に伝播するかどうかという点に着目していることは検討に値する[18]. そして、地下水が相互に連結していない場合には、かりに地下水が地球由来微生物で汚染した場合でも、それが伝播する可能性は低いと言及している[18]. 予め、生命のいる可能性の高い場所、汚染の可能性の低い場所、汚染の伝播可能性の低い場所を識別して評価する必要がある。

こうした点では、前述の第二の候補、すなわち生命増殖可能性のある場所からの噴出物や流出物を探査対象とする場合、地球生物による汚染が広がる確率を下げるができる。さらに第三の候補、高緯度地域の地下水の上は塩の潮解液があっても低温であるため地球生物増殖可能性が低い。

掘削する場合や試料採集時には、ドリル先端や試料採集部分が生命増殖可能領域に接触する可能

性がある。この部分の滅菌を保証することが重要で、現場での滅菌手法の検討(要否も含めて)が必要である。

さらに、米国アカデミーCoPP報告の1ページ目では「宇宙機で運ばれた地球生物による汚染と、地球外天体上の地球外生命をどのように識別するか、という方法に関する科学的共通認識はない」としている[18]。つまり、地球由来微生物が火星環境で増殖したとき、それを地球外生命と区別できないことを危惧している。しかし、本解説の4.2項で説明したように、発見された微生物のアミノ酸種とDNA配列の解析から、それが火星固有の生物か探査機に付着して到着した生物かを判別することは可能である[31]。この点も今後の惑星保護で検討すべき項目である。

惑星保護方針は国際的な協議によって決まるので、欧米の検討状況を把握するとともに、我が国でも必要な検討を行って、惑星保護の国際的な議論をリードする必要がある。MMXの惑星保護方針に関わる研究成果[36]は、惑星保護検討の先進的例として高く評価されている[41]。

4.8 火星での生命探査のまとめ

探査する具体的な場所に関しては、他の探査関連項目(緯度、地形、斜度、日照、土質等)、あるいは生命探査以外の科学目標と合わせて検討し決定されるべきである。探査においては、これらの環境因子の観測や土質、土壤成分の分析等も、生命生存や生命増殖可能性を判定するうえで重要な資料となる。とりわけ温度と湿度は微生物の有無との関連を調べる上で重要な測定項目である。

火星は全体としては乾燥して低温であり、生命にとっては過酷な環境である。しかし、局所的には地球生物であっても増殖可能な環境がありうる。温度(-18℃ ~ 120℃)と水活量(0.6 ~ 1.0:湿度60% ~ 100%に相当する)が同時に達成されて、生命増殖を支え得る場所が生命探査の第一の候補となる。例えば低緯度での1 m以浅の地下水床等が候補となる。次に生命増殖を支える場所からの流出物が第二の候補となる。すなわち、ガリーやRSLの流出物、メタンと共に噴出してくる粒子あるいは液体が第二の候補となる。惑星保護の観点からどちらも特別領域であることにはかわりないが、第二の候補の方が汚染

を広げる可能性が低い。さらに第三の候補として、中高緯度地域の数 mより浅い地下水床がある。中高緯度地域の地下水床の温度は低く、地球微生物の増殖は困難である。しかし、潮解塩水の存在可能な場所は火星微生物がいないとは断言できない。

生命探査では必然的に惑星保護における特別領域を探査することになる。予め、十分な惑星保護の検討を行い、国際的な議論をリードしつつ準備を行うことが必要である。

地上実験室や宇宙で用いられている様々な測定の方法も、一度で地球外生命を検出することはできない。したがって、生命探査では多段階の探査が必要である。その際、初段の探査で、多少の擬陽性の可能性があっても、できるかぎり検出漏れの少ない方法で探査を行うことが重要である。厳密な基準で地球外生命を判定しようとすると、非地球型の生命を見逃す可能性が高まるからである。例えば、有機化合物、アミノ酸、触媒活性を探査の対象として、その形状を補助的に用いることで、見逃し無く生物の候補粒子を探査することが期待される。

これまでのアストロバイオロジー関連の火星探査では、質量分析装置が頻度高く用いられてきたが、 μm の画像解像度をもつ顕微画像取得が重要である。この点では成分別に染色できる蛍光顕微鏡が有用である。非生物の有機化合物、たとえば隕石由来の有機化合物の粒子を擬陽性として検出する可能性があるが、これは生命の存在可能性を考える上で重要な情報である。

一端、有機化合物の粒子が発見された場合には、アミノ酸の種類およびDL分析、さらにDNAの塩基分析、配列解読と系統樹作製によって、非生物、地球生物、地球から移動した生物、地球外生物を判定することができる。アミノ酸種を地球生物が用いている20種あるいは隕石が含む多種のアミノ酸と比較することで、生命かどうかの判定、および地球型生物か地球外生物かの判定を行うことができる。アミノ酸種のDL解析を行うことでそれを補助することができる。DNA塩基配列を解析することで、火星固有の生物か地球と火星の間を移動した生物かということも判定することもできる。

既に有機化合物の存在が確認されているゲール・クレーターのカンバーランド泥岩掘削試料が地球に

帰還した場合には、蛍光顕微鏡や赤外顕微鏡、ラマン顕微鏡で有機化合物の存在形状を確認し、アミノ酸種分析によってその有機化合物の由来を明らかにできるはずである。

生命探査を行う意義として、もし地球外生命が発見されたとき、それが人類史上の非常に大きな発見になることがある。また今後、火星での有人探査が計画されている事を考えると、火星表面に火星特有の生物がいるかどうかを確認することは、火星特有の生物がいるかどうかに関わらず、惑星保護の観点から重要である。

もし太陽系内に地球外生命が発見されるならば、その場観測によって詳細な分析を行うことが可能である。さらに試料を地球に持ちかえることによって、高度な分析手法が利用可能になる。それらの分析によって、生命に関するいくつかの根本的問いに対する情報を得ることが可能になる。つまり地球外生命が発見されれば、地球生物に限定されない一般生物学とでも言うべき生命科学が始まることになる。

引用文献

- [1] 山岸明彦, 2023, 日本惑星科学会誌 32, 16.
- [2] 山岸明彦, 2023, 日本惑星科学会誌 32, 68.
- [3] Yang, Y. et al., 2009, *Biol. Sci. Space* 23, 151.
- [4] Yang, Y. et al., 2008, *Biol. Sci. Space* 22, 18.
- [5] Yang, Y. et al., 2008, JAXA-RR-08-001, 35.
- [6] Kawaguchi, Y. et al., 2016, *Astrobiology* 16, 363.
- [7] Arrhenius, S., 1908, *Worlds in the making: The evolution of the universe*. Translated by Borns, H. (New York: Harper and Brothers).
- [8] Cottin, H. et al., 2017, *Space Sci. Rev.* 209, 83.
- [9] Kawaguchi, Y. et al., 2013, *Origins. Life. Evol. Biosph.* 43, 411.
- [10] Yamagishi, A. et al., 2021, *Astrobiology* 21, 1451.
- [11] Yamagishi, A. et al., 2021, *Astrobiology* 21, 1461.
- [12] Yamagishi, A. et al., 2018, *Astrobiology* 18, 1369.
- [13] Kawaguchi, Y. et al., 2020, *Frontiers Microbiol.* 11, 2050.
- [14] Tomita-Yokotani, K. et al., 2021, *Astrobiology* 21, 1505.
- [15] Kobayashi, K. et al., 2021, *Astrobiology* 21, 1479.
- [16] 宮本英昭ほか, 2016, *地学雑誌* 125, 171.
- [17] Rummel, J. D. et al., 2014, *Astrobiology* 14, 887.
- [18] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2021, *Report Series: Committee on Planetary Protection: Evaluation of Bioburden Requirements for Mars Missions* (Washington, DC: The National Academies Press).
- [19] Villanueva, G. L. et al., 2015, *Science* 348, 218.
- [20] 吉村 義隆ほか, 2018, 日本惑星科学会誌 27, 147.
- [21] 吉村 義隆ほか, 2021, *分析化学* 65, 1.
- [22] Orosei, R. et al., 2018, *Science* 361, 490.
- [23] 山岸 明彦, 2011, 日本惑星科学会誌 20, 108.
- [24] Plumb, R. C. et al., 1993, *Mars: Past, Present, and Future - Results from the MSATT Program, Part 1* (Houston: Lunar and Planetary Institute) 40.
- [25] Hecht, M. H. et al., 2009, *Science* 325, 64.
- [26] Grotzinger, J. P. et al., 2014, *Science* 343, 388.
- [27] Vaniman, D. T. et al., 2014, *Science* 343, 1243480.
- [28] Webster, C.R. et al., 2015, *Science* 347, 415.
- [29] Freissinet, C. et al., 2015, *J. Geophys. Res. Planets* 120, 495.
- [30] Enya, K. et al., 2022, *Life Sci. Space Res.* 34, 53.
- [31] Enya, K. et al., 2022, *Space Sci. Rev.* 218, Article number 49.
- [32] ThermoFisher, 2010, *Molecular Probes Handbook*, 11th ed. (ThermoFisher Scientific).
- [33] Impey, C., 2022, *Acta Astronautica* 197, 387.
- [34] Alberts, B. et al., 2010, *細胞の分子生物学 第5版* (Newton Press).
- [35] Suzuki, Y. et al., 2020, *Commun. Biolo.* 3, Article number 136.
- [36] Fujita, K. et al., 2019, *Life Sci. Space Res.* 23, 73.
- [37] McEwen, A. S. et al., 2011, *Science* 333, 740.
- [38] Ojha, L. et al., 2015, *Nature Geosci.* 8, 829.
- [39] 逸見 良道ほか, 2018, 日本惑星科学会誌 27, 152.
- [40] Martínez, G. M. et al., 2017, *Space Sci. Rev.* 212,

295.

[41] Olsson-Francis, K. et al., 2023, Life Scie. Space Res. 36, 27.

[42] Mitrofanov, I. et al., 2022, Icarus 374, 114805.

[43] Atreya, S. K. et al., 2007, Planet. Space Sci. 55, 358.

[44] 宇宙航空研究開発機構, 2022, JMR-014惑星等保護プログラム標準 改訂A.

[45] COSPAR, 2020, Space Res. Today 208, 10.

[46] COSPAR, 2021, https://cosparhq.cnes.fr/assets/uploads/2021/07/PPPolicy_2021_3-June.pdf

著者紹介

山岸 明彦



東京薬科大学 生命科学部 名誉教授. 東京大学 大学院理学系研究科 相関理化学専攻 博士課程修了. 理学博士. 日本学術振興会 奨励研究員, カリフォルニア大学バークレー校 博士研究員, カーネギー研究所 植物生理学部門 博士研究員, 東京工

業大学 生命理工学研究科 助手, 東京薬科大学 助教授, 准教授, 教授を経て, 2018年3月退職して4月より名誉教授. 専門は分子生物学・微生物学. 日本惑星科学会, 極限環境生物学会, 宇宙生物科学会, 生命の起原および進化学会に所属. 日本学術会議 連携会員.

もう一つの月世界へ：火星衛星探査計画MMX その2 ～火星の月の攻略法～

中村 智樹¹, 竹尾 洋介², 池田 人²,
MMXミッションオペレーションワーキングチーム

(要旨) MMXでは約3年に及ぶ長期の観測を火星衛星2つに対して行う。フォボスの2年半のリモセン観測と2回のサンプル採取、ダイモスの半年弱のリモセン観測、これらリモセン観測とサンプル分析の合わせ技で火星衛星の起源に迫る。本稿ではフォボス、ダイモスの観測計画とその目標について概説する。

隕石の研究を始めた学部生のころから、宇宙の物質は130億年以上かけてどのように変遷してきたのか知りたいと思っている。太陽系の始まりを記憶する未分化な始原隕石や小惑星、彗星などの太陽系小天体に対する興味は尽きない。一方、以前から火星の衛星は気になっていた。なぜなら昔の文献に、地球の月と異なり、火星の月は暗く小惑星かもしれない、と書いてあったからだ。MMX計画が立ち上がり始めた当初、参画を声がけいただいた際、火星衛星は小惑星と思い込んでいた私は、2つ返事で飛び乗った。日本で3回目の小惑星サンプルリターンミッションだと意気込んだ。

その後、同じく当初から参画していた東工大の玄田さんに、いやいや火星衛星は小惑星ではなく、火星に小惑星のような天体が衝突して、上空に舞い上がった破片が火星の周りに塵円盤を作り、その中でいくつかの小天体が集積し、そのうち2つがフォボスとダイモスとして今も残っているのだ、と教わった。確かに、2つの月がほぼ同じ軌道面にあることや、似たような暗い色(スペクトル)をしていること(図1)をうまく説明できる。2016年だったと思う。その後、過去のフォボス、ダイモスの観測データを勉強し、C型小惑星リュウグウのリモセン結果やサンプル分析結果[1]を理解するに至ると、私にはフォボスやダイモスの

反射スペクトル(図1)は、やはり小惑星のスペクトルに思えてくる。したがって、私はフォボスから回収したサンプルがリュウグウに似た小惑星物質であっても驚かない。一方、フォボスが巨大衝突の高温高圧および混合を経てできた物質だとすると、どうして小惑星に似た暗い色になったのか、実に興味深い。火星は始原的小惑星に比べると圧倒的に明るい。どうして、衝突で火星物質が混ざっても暗いのか、ぜひ理解したい。

MMXミッションは「はやぶさ」、「はやぶさ2」に続く、日本の3度目のサンプルリターンミッションである。しかし先例2つと大きな違いが二つある。一つ目は、MMXはフォボス、ダイモスを訪れた最初の探査機ではない、ということである。火星衛星に特化した観測ではないが、複数の欧米の火星探査機が、特にフォボスは画像、分光データ(UV, 可視, 近赤外, 中間赤外: 可視と近赤外は図1)のデータを多数取得している(例えば, [2])。したがって、「はやぶさ」、「はやぶさ2」がイトカワとリュウグウに訪れた最初の探査機であったのと異なり、MMXミッションでは単にフォボスの画像を取得したり、スペクトルを取るだけでは新規の発見にならない(し、論文も書けない)。したがって、過去のミッションで達成できなかった空間解像度やSNで画像や分光データを取得したり、過去のミッションで得られなかった種類のデータを得なければならない。二つ目は、惑星間空間に単体で存在する小惑星とは異なり、火星の月は火星の

1. 東北大学

2. 宇宙航空研究開発機構

tomoki.nakamura.a8@tohoku.ac.jp

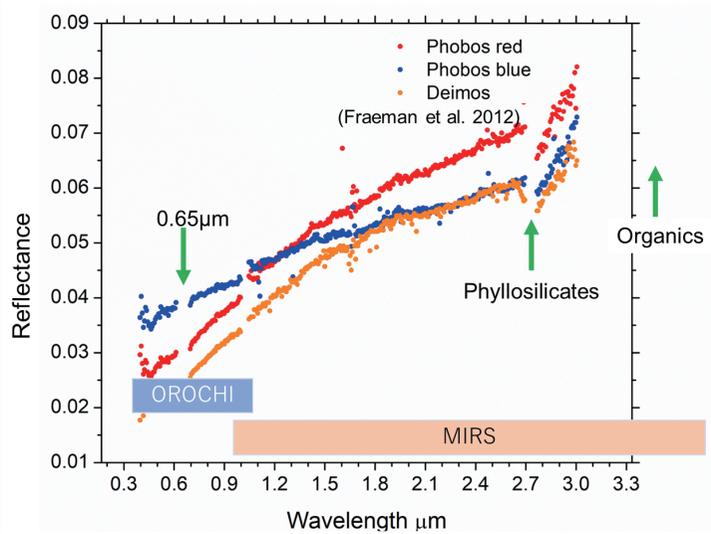


図1: Mars Reconnaissance Orbiter探査機に搭載されたCRISM分光計で取得されたフォボスの青領域, 赤領域, およびデイモスの反射スペクトル([2]を改変). 図下部の帯は, MMXに搭載されるマルチバンドカメラ(OROCHI)と近赤外分光計(MIRS)の観測可能範囲.

重力の影響を受けて火星を周回しているということである。したがって、火星の月を近傍から定期的に観測するためには、探査機も火星の月と同じような軌道で火星を周回しなければならない。特に火星の月への接近観測では、火星と月の両方の重力の影響を考慮する必要がある。

MMX探査機は火星圏に到着後、フォボスの共軌道(フォボスと離れてフォボスと同じ軌道にいること)を経由し、最終接近のためのフェーディング運用を経て、Quasi-Satellite Orbit(QSO)に遷移する。様々な高度のQSO軌道(図2A)に、着陸運用期間を除いて、約2年半滞在する。QSOは擬周回軌道(直訳は擬衛星軌道だけど)と呼ばれ、枝葉を切り取った単純な理解として、フォボスの火星周回軌道の直径と周期はそのままにして少しだけずらした軌道と理解することができる。探査機はフォボスとともに火星を周回する。フォボスは火星に潮汐ロックされているので、探査機からフォボスを見ると自転しているように見える。したがって、この軌道にいれば、探査機はフォボスの全球を火星まわり1周回で観測できることになる。実際の軌道は探査機がフォボスにかなり近づくため、探査機をフォボスに落下させないためにフォボスを周回させる必要があり、単純ではない。

フォボスと火星の位置を固定した座標系で見ると(図2A)、各高度の擬周回軌道を平易に理解することができる。

一方、フォボス-太陽方向を固定した、いわゆる慣性系の座標で表現したのが図3である。この場合、探査機は図中心のフォボスの自転方向と反対側にフォボスを円運動しながら周回するように描かれる。MMXでは以下の異なる軌道半径の4つのQSOを使う。周期は慣性座標系(図3)における周期である。

- QSO-H(半径100×198km):
フォボスの周りを1周するのに約32日
- QSO-M(半径50 x 94 km):
フォボス1周約4.3日
- QSO-LA(半径33 x 56 km):
フォボス1周約30.6時間
- QSO-LC(半径20 x 27 km):
フォボス1周約9.3時間

例えばQSO-Hでは、探査機は16日連続でフォボスの昼側に滞在し、次の16日間は夜側に滞在する。昼の間、探査機は自転するフォボスを観測できる。したがって、基本的には昼側で観測に集中し、夜側で

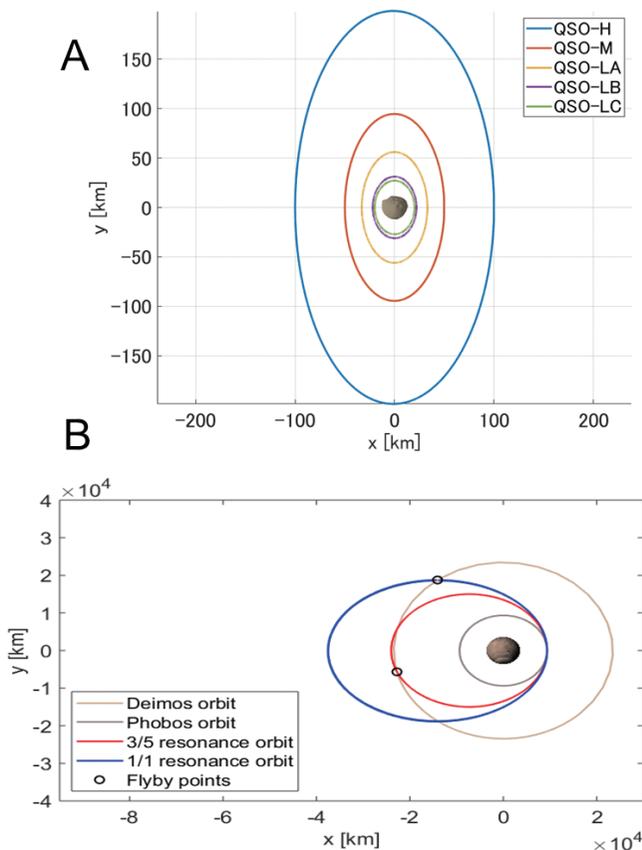


図2: フォボスのQSO観測軌道([4]を一部壊変). (A)フォボス-火星方向が固定された座標系. 高度の異なる5つのQSOが, フォボスを中心として描かれており, x軸負の方向は火星への方向, xy平面はフォボス軌道面である. 潮汐ロックされているので, 図の中でフォボスは回転しない. (B)ダイモス観測のためのフライバイ軌道. 3:5共鳴軌道と1:1共鳴軌道を示す. 中心に固定された火星に対して, 太陽は反時計回りに, 探査機は時計回りに自転する.

データを地球に転送する. リュウグウ(直径約1km)と比較すると, フォボスは直径が約20倍, 表面積が約400倍である. したがって, はやぶさ2に比べ, リモセンのデータは爆発的に増える. 海外局も併用し, 効率的に観測データを地球に転送する綿密な計画を立てている.

太陽系で地球は火星の内側にあるので, 図3において地球の方向はある範囲に限られる. 探査機は基本的にはフォボスを指向し, 地球上の日本が可視の時間帯に地球を向きデータを転送し, 一方, フォボスの夜側の時間帯には, 可能な範囲で火星の観測も行う. 巨大な火星と近接したフォボスの周りを周回するため, 探査機は周期的に火星やフォボスの陰に入る(蝕). この時間が長いと探査機の太陽電池パドルで

の発電量に影響があるため, 日陰発生時間が短い高高度の周回軌道に退避しなければならない. また, 探査機と地球の間に火星・フォボスが来る「掩蔽」や, 探査機と地球の間に太陽が来る「合」で観測が制限されることも考慮する. このように, さまざまな障害となる条件を考慮し, ミッション全期間(約3年)での長中期計画を策定した(図4). ミッションオペレーションワーキングチーム(私が主査で池田さん, 竹尾さんが副査)の40名程度の国際チームが6年間70回以上の会合を重ねて作ったものである. 計画はかなりフレキシブルに設定した. 着陸運用が不調のケースなど, 対応を決めている.

この図から, 探査機はどの期間にどの軌道にいるのか, 地球との片道通信時間はどの程度か, 蝕, 合,

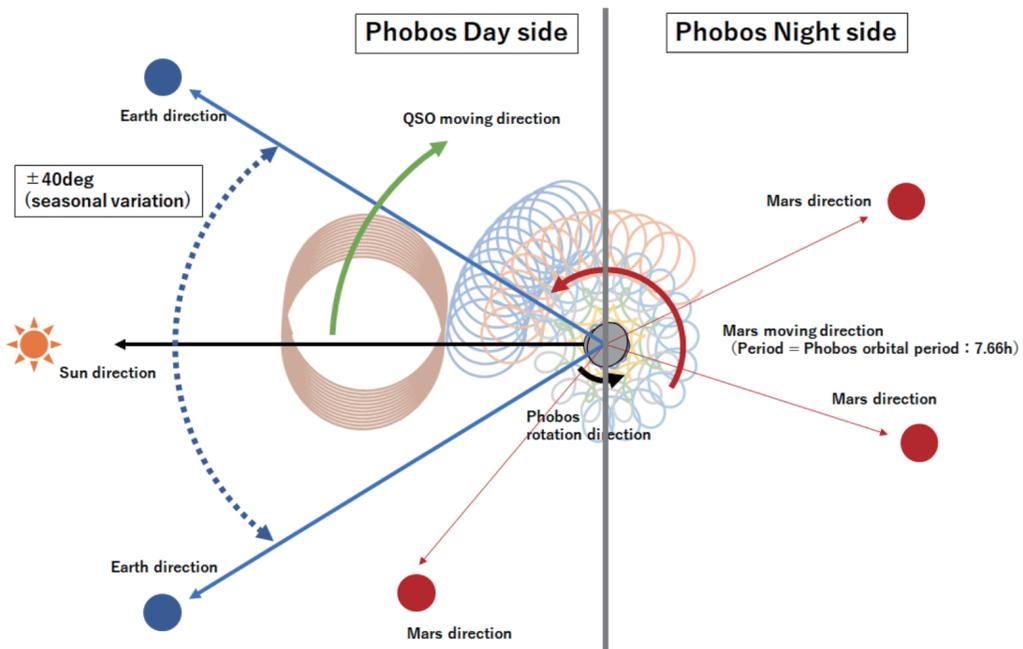


図3: フォボスを中心とした慣性座標系における探査機, 地球(青), 火星(赤)の位置 [4]. フォボス-太陽方向は固定.

掩蔽の影響を一目で理解することができる。詳細な説明は省くが、ミッション全期間を6つのフェーズに分けた。

Phase 0:

火星圏到着, 火星軌道投入, フォボス共軌道

主な観測: デイモスフライバイ観測, 共軌道からの火星, フォボス観測

Phase 1:

フォボス擬周回軌道 QSO-H,M

主な観測: 形状モデル作成のための観測, 着陸候補50地点観測

Phase 2:

フォボス擬周回軌道 QSO-M, LA, LC

主な観測: 着陸地点の決定のための着陸候補地点の詳細観測
フォボスの詳細科学観測(地形, 分光, 化学組成)

Phase 3:

フォボス擬周回軌道 QSO-M, LA

および着陸運用2回

主な観測: 着陸地点への降下中, 着陸中, および上昇中観測

ローバーによるフォボス表面観測

Phase 4:

フォボス擬周回軌道 QSO-M, LA

主な観測: フォボス科学観測, 可能であれば QSO軌道面を傾けた極地観測

Phase 5:

デイモスフライバイ軌道

主な観測: 共鳴軌道からのデイモス観測 (10周回以上).

Phase 5ではフォボスの共軌道から探査機の軌道長半径を拡大し, デイモス軌道に近づける。デイモスの火星公転周期と探査機の公転周期を整数倍にする(共鳴軌道)ことで, 周期的に探査機とデイモスが会合するように設定した。図2Bはデイモス周期: 探査機周期 = 1:1および3:5の共鳴軌道を示している。1:1では約30時間ごと, 3:5では約90時間ごとに探査機とデイモスは会合する。軌道半径が大きい方が, 会合時の探査機とデイモスとの相対速度が大き

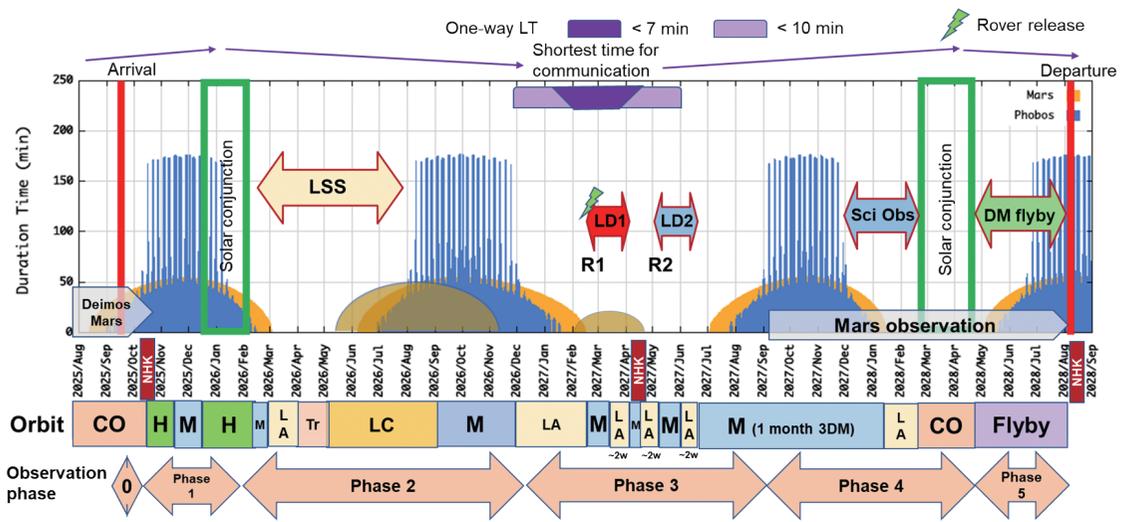


図4: フォボス(フェイズ1~4)とダイモス(フェイズ5)の現在の科学運用計画。フェイズ3では2回のタッチダウンが計画されているが、時間と場所は暫定。火星観測は、フォボスとダイモスの観測とともに主にフェイズ4とフェイズ5で行われる。上図は、火星(オレンジ)とフォボス(青)による蝕の継続時間(縦軸)を示している。蝕の継続時間の推定には、QSO-LA軌道を仮定した。下段には、観測フェイズと対応する期間の探査機の軌道(QSOの種類:H, M, LA, LC, 3DM)が記述されている。略語 CO: フォボス共軌道, H: QSO-H, M: QSO-M, LA: QSO-LA, TR: transition from LA to LC, LC: QSO-LC, 3D-M:3D-QSO, LSS:着陸地点選択期間, LD:着陸運用, R:着陸リハーサル, Sci Obs:フォボスの科学観測, DMフライバイ: ダイモスのフライバイ観測。

くなる。そのほか、ダイモスの観測可能領域の広さや観測太陽条件などを考慮して、最適な共鳴軌道を選択する。ダイモスへの最近接距離は100-200 kmを想定しており、この高度から観測できると、フォボスのQSO-H(軌道半径100×200 km)からの観測と空間分解能が同等になり、2つの月を詳細に比較検討できる。本当にフォボスとダイモスは同じ物質でできているのか、が知りたいところである。

図1は今までで得られたフォボスとダイモスのベストの反射スペクトルデータ[2]である。スペクトルは単調で赤く、層状ケイ酸塩のOH吸収(2.7ミクロン)が少しありそうであるが、肝心の吸収の一番深いところが観測できていない。また、唯一、特徴のある0.65ミクロン吸収も、データが割れていて、詳細にはわからない。MMXでは、より赤外側に広げて有機物の吸収(~3.5ミクロン)を含む広い波長範囲をカバーできるマルチバンドカメラと赤外分光計を搭載する(OROCHI, MIRS: [3]で紹介)。両者は観測可能波長範囲が約1ミクロンで重なっており、データをつなげることができる。また、1ピクセル当たりの空間解像度もほぼ一緒であり、効率的な解析をするこ

とができる。さらに、空間解像度もQSO-LCにおいて、過去のデータの一桁以上よいデータが取得できる。これにより、これまでに発見されていない物質が特定される可能性がある。

加えて、フォボスの全球の元素存在度のデータを中性子、ガンマ線分光計(MEGANE [3])や質量分析計(MSA [3])で推定することができる。元素組成を調べることができるのが、はやぶさ2と大きく違う。これら2年半に及ぶ観測により、詳細な地形、スペクトル、さらに元素存在度を推定することで、フォボスの成因に大きな制約を与えることができる。特に元素組成はフォボスが未分化な物質でできているのか、分化した(火星のような)物質を含んでいるのか、判断するための重要なデータである。当然、最終的な決め手は回収サンプルの詳細分析である。このようにして、火星の月の起源をMMXで一発で仕留めたい。それに向けて、今後は遅滞なく、確実に準備を進めていきたい。

本稿に概説したMMXの科学観測計画の詳細は専門誌に公表済みである[4]。MMXの観測計画をミッションオペレーションワーキングチームで考え始

めた2016年当時、私は探査機の運用や観測計画策定に関して完全な素人であった。それから7年たち、池田さんや竹尾さん、他のメンバーから助けてもらい、毎日のようにMMXの観測運用を考えているので、さすがにもう素人ではないと思う。フォボスとダイモスは、大気のない大きな岩石の塊である。それを探査機からどう観察し、どう分析すればよいか、を考えることは、リュウグウのサンプルを電子顕微鏡に入れて、どこをどのモードで観察し、元素分析すればよいか、を考えるのに似ている[1]。物質科学を知らないと、岩石天体のどこをどう観測すればよいか、優先順位をつけるのは難しい。その意味で、将来の岩石天体の観測やサンプルリターンミッションで

は、物質科学の素地がある若手が、臆せずリモセン観測に参画すれば、能力を発揮し大きく貢献できると思っている。

参考文献

- [1] 中村智樹ほか, 2023, 遊星人 32, 226(本誌).
- [2] Fraeman, A. A. et al., 2012, GRL:Planets 117, E00J15.
- [3] 倉本圭, 2023, 遊星人 32, 123.
- [4] Nakamura, T. et al., 2021, Earth, Planets and Space 73, 227.

著者紹介

中村 智樹



東北大学大学院 教授
 東京大学大学院理学系研究科
 物理学専攻博士課程を中退し九州
 大学理学部助手。博士(理学)。
 NASA/JSC太陽系探査部門、
 独マックスプランク研究所・宇宙
 化学部門に留学、九州大助教授を経て2012年から
 現職。初期太陽系進化学研究室を主宰。はやぶさ、
 はやぶさ2では初期分析を担当、MMXでは科学戦
 略チーム「Origin of Phobos and Deimos」のPI、
 およびミッションオペレーションワーキングチーム主
 査を担当。

エスアイ、アクセルスペース等を経て2019年から現
 職。主に宇宙機の姿勢制御や画像処理を専門とした
 研究に従事、MMXでは航法誘導系、ミッションオペ
 レーションワーキングチーム副主査及びコマンド計
 画立案系を担当。

池田 人



JAXA/研究開発部門 主任研
 究開発員
 九州大学大学院工学府航空宇宙
 工学専攻博士後期課程修了。博士
 (工学)。2008年宇宙航空研究開
 発機構(JAXA)入社。主に宇宙
 機の軌道力学系システムの開発および運用、アスト
 ロダイナミクス関連の研究に従事。MMXでは軌道
 系、運用設計等を担当。

竹尾 洋介



JAXA研究開発部門 主任研究
 開発員
 筑波大学院数理物質科学研究科
 博士課程を中退。東京工業大学
 院機械系博士課程単位取得満期
 退学。修士(理学)。NECネッツ

みんなでふたたび木星へ、そして氷衛星へ その7 ～木星系氷衛星探査機 JUICE, 日本からの 参加の経緯と現状～

齋藤 義文¹, 関根 康人², JUICE-Japanチーム

(要旨) 木星系氷衛星探査計画JUper ICy moons Explorer—JUICEは2023年4月に無事打ち上がり、その後搭載機器の初期チェックが実施された。これまでにJUICE探査機は、Near Earth Commissioning Phase (NECP) に予定していた作業の実施を完了しこれからCruising Phaseに入るところである。日本が参加している搭載観測装置であるRPWI, PEP/JNA, GALA, SWI, JMAG, JANUSに関しても、ここまでの初期チェックの結果はほぼ良好である。本稿では、JUICE-JAPAN所内プロジェクトがスタートしてから現在までの経緯と、日本が参加している機器を含む初期チェックの現状についてその概要を述べることにする。

1. はじめに

木星氷衛星探査計画 JUICE探査機は2023年4月14日の現地時間午前9時14分にフランス領ギアナ/クールーにあるギアナ宇宙センターからアリアン5ロケットで、予定より1日遅れて打ち上げられた。打ち上げ約3分後にはノーズフェアリングが開き、28分後には衛星が分離、JUICEは所定の軌道に投入されて打ち上げは成功した。その後、JUICE探査機および搭載観測装置の初期チェックが実施されたが、本稿を準備している7月の中旬までには、予定されていたNear Earth Commissioning Phase (NECP) の作業はすべて実施され、JUICEの初期チェックを完了したとの連絡がJUICEのプロジェクトマネージャからあった。これらの初期チェックの結果は7月19日にオランダ・ノルドヴァイクにあるESAのESTECで開催されたNear Earth Commissioning Review (NECR) Board Meetingで発表された。ほとんどの機器は想定通りの動作を確認することができ、ここまでは満足のい

く結果であったと言える。また、打ち上げがノミナル日程で実施されてロケットによる軌道投入精度が良好であったため、燃料に余裕があることからガニメデ周回高度200 kmでの30日間の観測実施が現実になりつつある。本稿では、日本からのJUICEへの参加に関して、JUICE所内プロジェクトがスタートしてから、現在までの経緯と現在の状況について簡単に紹介する。

2. JUICE所内プロジェクトスタート

EJSMの検討に始まりJUICEへの参加に至った経緯については、本連載の前回記事[1]で紹介された。ここでは、宇宙理学委員会の国際共同木星総合探査計画WGがJUICEを出口として新たにスタートした頃からのJUICEへの日本からの参加について紹介する。私がJUICEに最初に関わったのはそれより少し前の2012年の前半であった。JUICEの搭載機器提案チームが欧州を中心に形成され、搭載機器の国際AOに対して提案を準備する段階で、私は機器提案チームの1つに参加することになった。機器提案チームの多くのメンバーとは、当時、BepiColombo/MMOに搭載される観測装置の開

1.宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

2.東京工業大学 地球生命研究所
saito@stp.isas.jaxa.jp



図1: 左:打ち上げ前, フランス領ギアナの発射台に設置されたアリアン5ロケット. 右:打ち上げ直後のアリアン5ロケット.

発を一緒に進めていたという経緯があり, その機器提案チームに招待されたためである. このような, 機器提案チームに参加したいというグループが7つあったが, 提案に先立って理学委員会の機器提案参加に関する審査が行われ, 7つ全てのグループが, 宇宙研からのサポートを得て提案に参加することとなった. 2013年2月には, 搭載機器の国際AOの結果が発表され, 日本から参加する4つの機器RPWI, GALA, SWI, PEP/JNAが選定されると同時に日本からサイエンス参加する2つの機器JMAG, JANUSも選定された[2]. 残念ながら私の参加した提案チームの提案は採択されなかったが, そのこともあり私は日本からのJUICEへの参加を取りまとめる立場でJUICEに関わることとなった. その時, 2013年9月に誕生したのが, JUICE所内プロジェクトの前身となった木星探査WGであった.

木星探査WGはその後, 2014年2月末に, 当時新たに作られた小規模プロジェクト(小規模プロジェクトはその後, 小規模計画と戦略的海外共同計画の2つにカテゴリが分かれることとなった)にミッション提案し, 理学委員会の審査を受審, 2014年9月に採択されたことで, 小規模プロジェクトの第1号ミッションとして進められることになった.

3. 審査の日々

JUICEは小規模プロジェクト第1号ミッションとして, 宇宙科学研究所の所内プロジェクトという位置づけで進められたが, より大きな規模の機構プロジェクトと同様, ミッションの進行に伴って段階的に審査を受けることになった. ただ, それらの審査が宇宙研のミッションに適用された歴史はまだ浅かったという事に加えてJUICEは小規模プロジェクトの第1号ミッションであったことから, 初期の審査では一体何を審査すればいいのか審査委員も十分には理解していなかったというようなことがあった. 現在ではミッション立ち上げ時に使われることになったCML(Concept Maturity Level)もJUICEが小規模プロジェクトとして進められることが決まった時にはまだなく, 通常のタイミングよりは少し遅いタイミングではあったが, 2017年9月に実施されたプロジェクト移行審査の際にCMLの達成状況を確認することとなった. CMLの達成状況を確認することによって, ミッション立ち上げ時に何を明確しておく必要があるのか, 審査の際に何を審査されるのかが大変分かりやすくなったと感じたことを覚えている.

2015年にJUICEはプリプロジェクト候補チームと

なり、翌2016年には、プリプロジェクトとなったが、JUICEの予算要求はなかなか認められず、一方で欧州ではプロジェクトのフェーズが先へと進んでいく時期がしばらく続いた。この間、欧州のJUICEプロジェクトマネージャに会って日本の予算状況について説明する機会が何度かあったが、その度にまだ予算要求が認められていないと説明せざるを得なかったのは大変苦しかった。2018年になってようやく予算が認められて、プリプロジェクトからプロジェクトとなったが、プロジェクトになるまでに何度か足踏みしたこともありそれだけ受審した審査の数も増えることになってしまった。

4. 予想外のコロナ禍の下で

2018年度からは晴れてプロジェクトとなり、プロジェクト期間全体の予算も認められて日本が担当する機器の開発を全速力で進めることができるようになったのであるが、そこでまた難題が発生することになった。2019年度の終わりから全世界に大きな影響を及ぼしたコロナ禍である。日本が担当する機器のうち、RPWI、PEP/JNAについては、欧州におけるコロナウイルス感染拡大の影響が大きくなる前にフライト品の欧州への納品を終えていて良かったのであるが、GALAは大きな影響を受けることになってしまった。GALAのPI機関はドイツのDLRで、ハードウェアはドイツの他日本、スペイン、スイスなどいくつかの国が担当部分を製作し、ドイツで最終的な観測装置として組み上げられた。これらの欧州の国々では日本より少し早くコロナウイルスの感染拡大によって都市封鎖などが行われ、ドイツへの出張も禁止となってしまったことなどからフライト品を仕上げるために必要な現地での組合せ試験が思うようにできず、日本担当部分のフライト品製作が予定よりも遅れることになってしまった。欧州側でも遅れは生じてはいたが、それでも何とかフライト品の準備を進めており、日本でもこれ以上の遅れは許されない状況であった。結果的には、多くの方々の努力により、何とかこの困難は乗り越えることが出来、ハードウェア開発の責任を果たすことができた。コロナ禍は当然のことながら予想外の出来事であり、一時はどうなることかと思ったが、何とかになって本当に

良かったと思う。

5. 初期チェックの結果に満足

フライト品を欧州に納品した後は、欧州の観測装置取りまとめ機関やメーカでそれぞれの観測装置全体の組み上げと試験が実施されたのち、各観測装置は、衛星に組み込まれて衛星の総合試験が実施された。日本におけるハードウェア開発という意味では、欧州における試験中にフライト品に問題が発生した場合にフライト品と置き換えるためのフライトスペアの欧州への納品で完了した。これについても、一部はコロナ禍の影響を受けることとなったが、それほど大きな問題は無く進めることができた。

JUICEの打ち上げは元々の計画では2022年5-6月であったが、コロナ禍の影響などで探査機の一部の構成機器・観測機器の納入が遅れていたため、一旦2022年8-9月に延期されることになった。その後、やはりコロナ禍の影響で各PI機関、製造担当企業の閉鎖に伴う作業遅延が生じたことなどから再度延期されて2023年4月となった。冒頭で述べたように、JUICEは2023年4月14日の現地時間午前9時14分に打ち上がり、その後、NECP期間中である4月16日から7月11日の間に、搭載観測機器の初期チェックが実施された。最初に、磁力計のブームの伸展や、搭載機器の1つであるRIME(Radar for Icy Moon Exploration)のアンテナの伸展があった。磁力計のブームは問題なく伸展したものの、RIMEのアンテナの伸展が途中で止まってしまい、その対処にしばらく時間がかかっていたが、5月12日に無事伸展できたとの知らせがあり関係者一同胸を撫で下ろした。日本がハードウェアを提供したRPWI、PEP/JNA、GALAについては、RPWIのアンテナ伸展の成功も含めて機器は正常に動作することが確認された。他、日本がサイエンス参加しているJMAG、JANUSに関しても、機器の動作に問題ないことが確認された。SWIについては、一部正常に機器が動いていない部分があることが判明したが、これについては運用でカバーできるという報告があった。PEP/JNAについては、低圧部の試験と、フルレベルではないが、高圧ONの試験も実施されて正常に動作することが確認された。フルレベルの高圧ONの試験は、

衛星からのアウトガスが減ると考えられる金星フライバイ後に実施される予定である。GALAについては、レーザーを照射しても反射する対象がない状態での試験ではあるが、日本が提供したレーザー光の受信部分も正常に動作していることが確認できた。今後、月・地球スイングバイ時にレーザー照射の試験を行うべく、DLRとESA間で協議中である。各機器の現状とその詳細については、各機器の担当から今後本連載で報告される予定であるため、本稿では概要の状況報告にとどめることにしたい。ここまで実施された初期チェックの結果は概ね満足できるものであったと言える。

6. おわりに

今後JUICEは、2024年に月・地球スイングバイ、2025年に金星スイングバイ、2026年に2回目の地球スイングバイ、2029年に最後の地球スイングバイを経たのち、木星へと向かい、2031年に木星軌道に投入され、最終目的地のガニメデ軌道に投入されるのは、2035年の予定である[2]。

JUICE所内プロジェクトの前身となった木星探査WGが設立されてから10年経ったが、JUICEミッションが終了して、プロジェクトを終了するまでまだあと15年近く続く予定で、JUICEは4半世紀にわたる長期のプロジェクトであると言える。ハードウェアの開発は打ち上げ後の機器チェックをもって完了するが、これからは木星系における観測に向けてサイエンス活動を活発化させていく予定である。

参考文献

- [1] 関根康人ほか, 2023, 遊星人 32, 128.
- [2] JUICE-Japan公式ホームページ<https://juice.stp.isas.jaxa.jp/>

火の鳥「はやぶさ」未来編 その30 ～Ryugu「石」分析チームによる科学成果～

中村 智樹¹, 天野 香菜¹, 松岡 萌², 黒澤 耕介³, 二宮 和彦⁴, 大澤 崇人⁵,
木村 勇氣⁶, 玄田 英典⁷, 田中 智⁸, はやぶさ2初期分析「石」チーム

(要旨) 初期分析「石」分析チームではリュウグウのミリメートルサイズのサンプル(探査機が2回目のタッチダウンで採取した最大サンプルを含む17粒子)を日米欧の放射光施設、ミュオン施設などを利用し物質分析を行った[1]。その結果、リュウグウ母天体の原始惑星系円盤内での形成位置、集積物質の岩石鉱物学的情報、集積した氷の種類、天体内部での水との反応による化学進化、天体衝突の影響について知見が得られた。リュウグウサンプルには、水岩石反応の進行度が異なる物質が混在していることが判明した。リュウグウサンプルの物性(破壊強度、熱拡散係数、比熱、密度など)を実測した。この実測値を使って、リュウグウ母天体形成後の天体内部の加熱による温度経時変化、および衝突破壊プロセスの数値シミュレーションを行い、リュウグウの形成進化を再現した。

1. 「石」分析チーム紹介

「石」とはリュウグウサンプルの粒っぽい粒子を指す。大きさは約1 mm以上である。当然、粉っぽいサンプルもあり、それは「砂」と表現し、野口高明氏の「砂」チームの研究対象である。当初は我々のチームは「粗粒粒子の岩石鉱物チーム」のような覚えにくい名称であったが、野口さん、橘さんとの会話で、「わかりにくいので「石」と「砂」にしよう」と即決した。以来、国内は「石」チーム、海外は「Team Stone」として覚えていただいた。

中村はリターンサンプルの初期分析は3回目である。NASAの「スターダスト」計画、はやぶさ初号機のイトカワサンプルも解析した。その過程で、チーム

構成については多くのことを学んだ。そのLessons Learnedを生かして、石チームを慎重に作った。石チームは日、米、英、仏、独、伊、ベルギー、中国からの科学者からなる12グループ、総勢約150名の国際チームである。人数が多くなったのはLessons Learnedで得た中村の方針で、それぞれの分析グループのリーダーだけではなく、グループ全体で「石」チームに入ってもらい、高い意識で分析をしてもらうためである。「石」チームを構成する12グループは、有機的に組み合わせられ、それぞれ具体的な役割がある。チームで特に力を入れたのは、1. 探査機リモセンデータと回収サンプル分光データの接続、2. サンプルの物性分析とリュウグウ母天体の形成進化のシミュレーションの接続、3. 放射光分析と電子顕微鏡分析との接続、である。以下、この3つの項目にこだわった理由を説明したい。

1.1 探査機リモセンデータと回収サンプル分光データの接続

スターダスト、はやぶさ初号機ともにサンプル量が十分でなく、回収サンプルの反射スペクトルがきちんと測定できていない。一方、はやぶさ2ミッションでは

1. 東北大学

2. 産業技術総合研究所

3. 千葉工業大学

4. 大阪大学

5. 日本原子力研究開発機構

6. 北海道大学

7. 東京工業大学

8. 宇宙科学研究所

tomoki.nakamura.a8@tohoku.ac.jp

十分な量のサンプルが回収されたため、観測で得られる小惑星の反射スペクトルと実際の回収サンプルのスペクトルを比較できる。この観点から「石」チームには東大・杉田氏らのリモセングループと隕石分光分析の国際グループの両方に加わってもらった。

単純に考えると探査機はリュウグウ表面のサンプルを採取したので、探査機で観測したリュウグウ表面のスペクトルとその表面から回収したサンプルのスペクトルは同じになるはずである。しかしながら、両者のスペクトルは完全には一致しない。比較すると、探査機で得られたスペクトルは含水鉱物の吸収深さ(赤外の波長 $2.7\mu\text{m}$ 吸収)が半分程度であるが分かった[2]。これは探査機がサンプルを回収する際に弾丸を発射し、小惑星表面の石を砕いて回収するため、回収されたサンプルは衝突破壊で新しく露出した宇宙風化していないフレッシュな含水鉱物の表面が多いことを示唆する。一方、探査機が測定した小惑星の表面は宇宙塵爆撃に晒されて脱水したため $2.7\mu\text{m}$ 吸収が浅くなったと考えられる[3]。したがって、C型小惑星のスペクトルもS型小惑星のそれと同様に宇宙風化の影響を受けていることが分かった。

1.2 サンプルの物性分析とリュウグウ母天体の形成進化のシミュレーションの接続

リュウグウは水質変成後、破壊を経て形成されたラブルパイル小惑星である。最初に氷と岩石が集積し、リュウグウの母天体が形成された。その後、天体内部が昇温して、氷が溶け液体の水になり、水質変成が進行した。この水・岩石反応の時間・温度変化を具体的に知るには、リュウグウ構成岩石の比熱とか、熱伝導度の実測値が必要である。母天体は最終的には破壊される。この場合も、どのように破壊されるかについて具体的に検討するには、リュウグウ構成岩石の破壊強度、弾性波速度などの実測値が必要である。したがって、リュウグウ母天体の熱進化、衝突破壊のシミュレーションをより正確に行うには、回収サンプルの物性分析を行う必要がある。この観点に基づき、「石」チームには、東工大・玄田氏リードのシミュレーショングループと、宇宙研・田中氏リードの物性分析グループに加わってもらった。これらのチームの共同作業から多くのことが分かった。例えば、母天体の衝突破壊の際は、衝突により高温高压

になるのは衝突面付近の大変限られた領域で、母天体の大部分は高温高压を経ずに破壊されるということである。

1.3 放射光分析と電顕分析との接続

物質分析では全体像の把握と個別の特徴的な岩片や結晶の分析の両方が求められる。探査機リターンサンプルのように貴重なサンプルにおいては、非破壊分析である放射光分析は重要である。日、独、仏の研究グループからなる放射光分析の専門家がCT分析による3次元構造の把握、XRF分析による元素の3次元分布の把握、XRD分析による鉱物組み合わせの把握などを行った。CT分析やXRF分析で特定された特徴的な物質の一部は、東北大学の松本氏らがFIBを用いて取り出し、SPRing-8でナノスケールの解像度の放射光CT分析を行い[4]、その後、電子顕微鏡による観察を行った。東北大学の中嶋氏は、数多くの樹脂や配合率、および研磨方法を検討し、多孔質なリュウグウサンプルの処理方法を検討した[5]。そのようにして得られた研磨面を東大・三河内氏をはじめとする国際チームが詳細な電子顕微鏡観察を行った。

2. 多忙な初期分析

初期分析の期間(2022年6月から1年間)は、ちょうどコロナ禍の時期に重なり、多くの制限を受けた。それぞれの分析グループは、負けずに工夫を凝らして乗り切った。いくつかの分析グループの分析苦労話を、それぞれのグループの主要メンバーに記載してもらったので紹介する。

2.1 スペクトル測定グループ(天野氏, 松岡氏)

石チームの一連の分析フローの最上流であった反射分光測定において、我々はリュウグウ試料を地球大気に触れさせることなく測定するためのセルを設計した(図1)。金属製のセルに試料や標準反射板を納め、分析波長域で透明な光学窓材をOリングと樹脂板でクランプするというしくみである。リハーサルとしてCIコンドライトを真空中で加熱して脱水させ、加熱後の試料を大気に曝すことなく分析し、反射スペクトルにおける分子水の特徴(特に波長 $3\mu\text{m}$

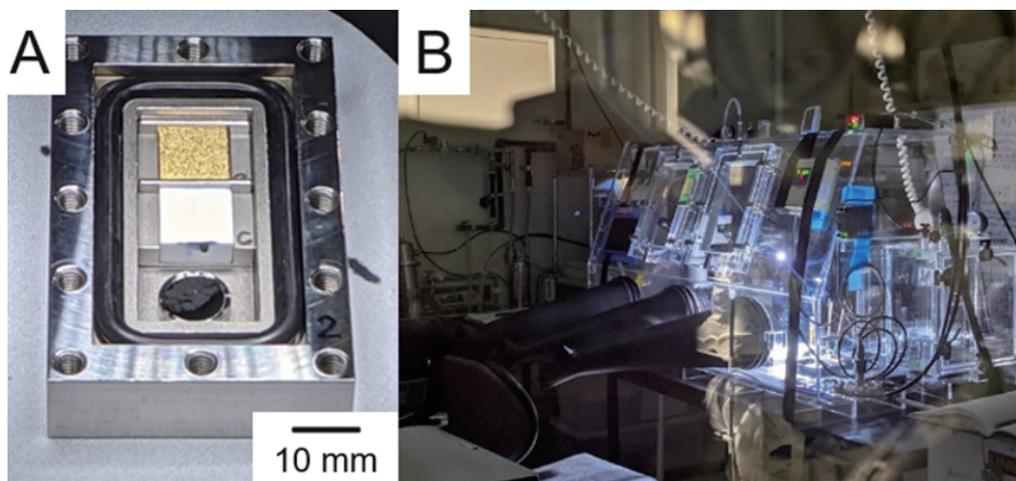


図1: A. 大気遮断分光測定用セルに収められたリュウグウ粒子C0002(上から3つ目の黒い物質). B. 不夜城となった東北大学のグローブボックス. Aのセル全体が窒素パージしたチャンバー(B)内に置かれている.

の吸収特徴)に基づいて、試料に水分の混入が起らないかを調べた。成功の秘訣は、試料とともにセル内に収まるOリングから水分を除去する手順を加えたことであった。加熱された試料とOリングを同じ空間に密封すると、Oリングに吸着していたわずかな水分ですら隕石試料に吸われてしまうようなのである。この結果、我々は試料に水分を吸着させない測定手順の確立に至った。

このほか工夫が必要となったのは、少量の暗い物質であるリュウグウ試料から、いかにして有効な反射スペクトルを得るかということであった。そのためにはリュウグウ試料を置くための試料皿にも可視光および赤外波長域でともに反射率が低く、顕著な吸収特徴を持たないものが望まれた。我々は植毛紙をはじめとするありとあらゆる黒い物質を買い集め、反射分光特性を調べた。そんな中、光陽オリエントジャパン株式会社が販売する「ファインシャット極」は可視および赤外波長域で反射率が1%以下と暗く、シート状であるためにハンドリングにも難がなかった。リュウグウよりも暗い「極」により、反射率2%程度のリュウグウの反射分光測定が実現されたのである。

2.2 ミュオンを使った非破壊元素分析 (二宮氏, 大澤氏)

初期分析においては、加速器から得られる素粒

子であるミュオンを利用した元素分析実験を実施した。ミュオンは非破壊で軽元素を定量することが可能であり、リュウグウの石を破壊せずに、バルクの元素組成を得ることができた。この研究成果は、異分野の研究者が集まり、リュウグウ試料の分析に向けて団結した10年以上に及ぶ基礎開発と、いくつもの幸運と偶然が重なることによりもたらされた。

ミュオンは電子のおよそ207倍の質量を持つ粒子で、これが元素に捕まると非常に高いエネルギーの特性X線を発する。この性質はミュオンの研究者にとっては「当たり前」だったため、その素晴らしい応用可能性にまだ気付いていなかった。しかし2010年にミュオンの研究者と地球惑星科学者が邂逅することになり、全く新しい可能性が開けることになった。ミュオンを使ってリュウグウ試料を分析する計画はこうして始まった。

ミュオン元素分析法の開発は長期に及んだが、本分析法はリュウグウサンプルの分析の前までは数グラムという大きな試料にしか適用できなかった。これは負ミュオンビームを効率的に収束する方法が無いことと、加速器から得られるミュオンの強度が弱いことによる。我々はミュオンビームの特性を正確に理解することで、バックグラウンドを下げて感度を向上させ、10 mgの試料まで分析可能なシステムをどうにか完成させた(10 mgは十分多いと思われるだろうが、ミュオンの元素分析の常識から言えば破格

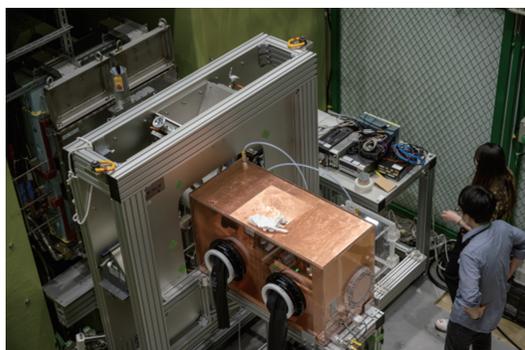


図2: リュウグウサンプルのミュオン分析を行った多くの銅板を使って構築したJ-ARCの実験システム。

の小ささであり、この苦労話だけで数ページは書ける。図2に示しているのは、グローブボックスを備えた測定システムの写真である。システムの内部はすべて銅でおおわれており、バックグラウンド信号が銅に由来するものしかないように工夫している。

ミュオン分析は2021年の6-7月にかけて、茨城県東海村大強度陽子研究施設(J-ARC)で実施された。石チームの初期分析フローは、破壊分析を行う前のこの時期が実験を行える唯一の期間であり、試料配布後に分析の機会を得た。この時期は例年、加速器の運転を止めている時期であったが、関係者の多大な努力といくつかの「たまたま」が重なり加速器の運転期間が延長され、実際の分析ができる運びになった。実に幸運であった。

最後の、そして最大の幸運は、工学チームの神業に裏打ちされた「はやぶさ2」ミッションの大成功である。我々は今回10 mgの試料までを分析可能なシステムを開発したが、使用できる試料がそれより少ないとどうしようもなかった。しかし今回120 mgという、予想を遥かに超える多量の試料が提供されることになり、高精度の分析を行うことができたのは本当に幸運であった。

多くの幸運に支えられたミュオン元素分析実験であったが、当然のことながら入念なシミュレーションを行ったうえで実施したものである。その中で関係者を和ませた(実際のところ笑う所ではないのだが)エピソードの一つを紹介しよう。リュウグウ試料を実験施設まで運搬する際の破損から守るために、可能な限り振動を避ける運搬が求められた。中村は仙台の東北大から、茨城の東海村のJ-ARCまで実際に車

で移動して運搬のシミュレーションを行ったところ、一番揺れが大きかったのはなんとJ-ARCのある原子力科学研究所内の道路であった。これを機会に道路整備の予算を確保していただきたいものである。

2.3 電子線ホログラフィーによる磁場観察の舞台裏(木村氏)

電子線ホログラフィーを用いて、局所磁場観察を行う上で最も重要かつ難しい点は、オリジナルの磁区構造を失うことなく、残留磁場を記録している粒子を見つけ出し、透過電子顕微鏡(TEM)用の薄片化試料を作製することにある。事前の想定として最も可能性の高い鉱物はマグネタイト、次いでピロタイト(硫化鉄鉱物の一種)であった。通常であれば、汎用型の走査電子顕微鏡(SEM)を用いて組織観察や元素分析を行うことで、目的とする粒子を容易に見つけられる。しかし、今回は、そうはいかない。電子顕微鏡のレンズは一般に磁界型なので、試料に強い磁場がかかってしまう。地球の磁場が $\sim 50 \mu\text{T}$ なのに対して、アウトレンズタイプのSEMは $\sim 1000 \mu\text{T}$ と20倍強い磁場となる。そのため、粒子を探し出す方法として様々な手法や装置を検討した。その結果、日本電子製の卓上SEM(JCM-7000, NeoScope)を一番小さな加速電圧(5 kV)で使用すれば、地球の磁場程度の環境下で、試料を観察/元素分析できることが分かった(図3A)。この条件では、空間分解能は低く、元素分析も大きな制限を受けるが、それでも $1 \mu\text{m}$ 程度の粒子であれば検出できることをオルゲイユ隕石を用いたリハーサル分析で実証できた。

続いて、集束イオンビーム(FIB)装置を用いて、TEM観察用の厚さ100nm程度の薄片化試料を作製するのに気を使った。リュウグウ試料は想像以上に脆く、さらに、非常に強いチャージアップで試料が動いたり、脱落したりしてしまうのである。試行錯誤の末、冷却FIBを用いて試料温度を -90°C に制御した環境下で、SEMモードを使わずに薄片化試料を作製した(図3B)。その後、試料が途中で脱落しないか幾度となく不安に駆られながら、グローブボックス(図3C)とスパッタ蒸着装置を何度も往復し、カーボン蒸着で固定したTEM試料を作製した。その結果、地球磁場を有意に超えるような磁場環境に晒す

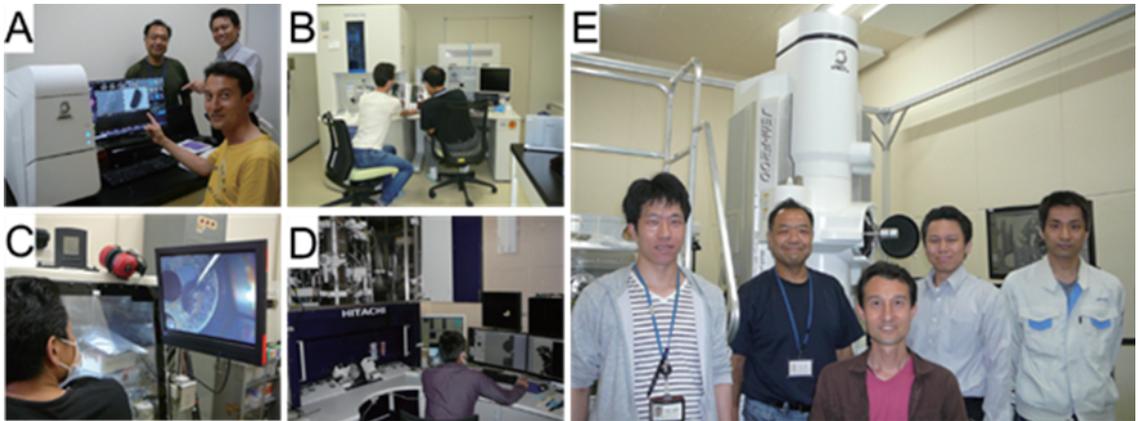


図3: ホログラフィーメンバーによる磁区構造分析の様子。A. 卓上SEMによる磁性鉱物探索。B. FIBによる薄片化。C. グローブボックスでの試料セット。D. ホログラフィー観察。E. S/TEMによる構造解析を行い安堵するメンバー(中心が木村氏)。

ことなく電子線ホログラフィーで磁性鉱物の磁区構造を観察できた(図3D)。そして、この後に強い磁場を持つ汎用型のS/TEMを用いて目的の磁性鉱物であることを確認して、初めて安堵することができた(図3E)。

2.4 数値計算 および 物性測定グループ (黒澤氏, 玄田氏, 田中氏)

数値計算サブチームは玄田がとりまとめとなり2019年はじめ頃に結成された。当初は玄田, 黒澤, 兵頭, 脇田, 杉浦で構成され, 石チームの中では最小人数のチームであった。母天体の熱史と大規模衝突による破壊の数値計算を実行することを念頭において玄田がメンバーを選定した。途中から田中が率いる物性測定チームが合流した。数値計算サブチームの最初の任務は, リュウグウ, 及びその母天体の起源と進化を解明するために必要なパラメータを洗い出し, 物性測定チームに提案することであった。幾度かのオンライン会議を経て空隙率, 音速, 熱膨張率, 断熱&等温体積弾性率, 体積弾性率の圧力依存性, 定圧比熱, 熱拡散率, 安息角, 臨界応力を選定し, 提案した。試料の少なさと測定の困難さから測定できなかったパラメータもいくつかあるが, 最終的にはほとんどの基本的な機械物性, 熱物性, さらに電磁気特性までも測定するに至った。

物性測定チームは2021年8月頃から定期的にオンライン会議を行い, 測定スケジュールを入念に確認

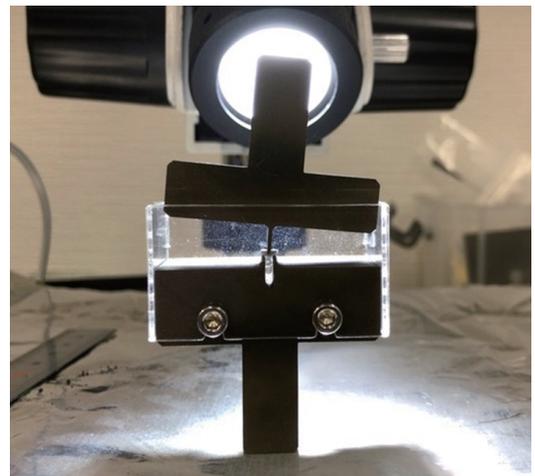


図4: リュウグウの石の3点曲げ実験のために製作した治具, 上が押し, 下が受けである。取手部を通常の試験機のクランプで挟んで使用した。千葉工業大学工作センターで製作された。試験片はテスト用の地球の岩石。

していた。ある会議で黒澤が何気なく物性計測後の試料はその後どうするのか?と尋ねたところ, 田中が粉末にして赤外分光測定に回される予定と答えた。「えっ!?どうせ壊すなら強度を測れませんか?」と言ってみた結果, リュウグウ試料の3点曲げ実験が急遽スケジュールに組み込まれた。~1 mm程度の強度が未知の試料に対して, 確実にデータを得るには小型の専用治具を作成して3点曲げを行うのが最善という田中の判断であった。試験はピンポイントで11月7日, 8日。田中が宇宙研の試験機のスケジュールを

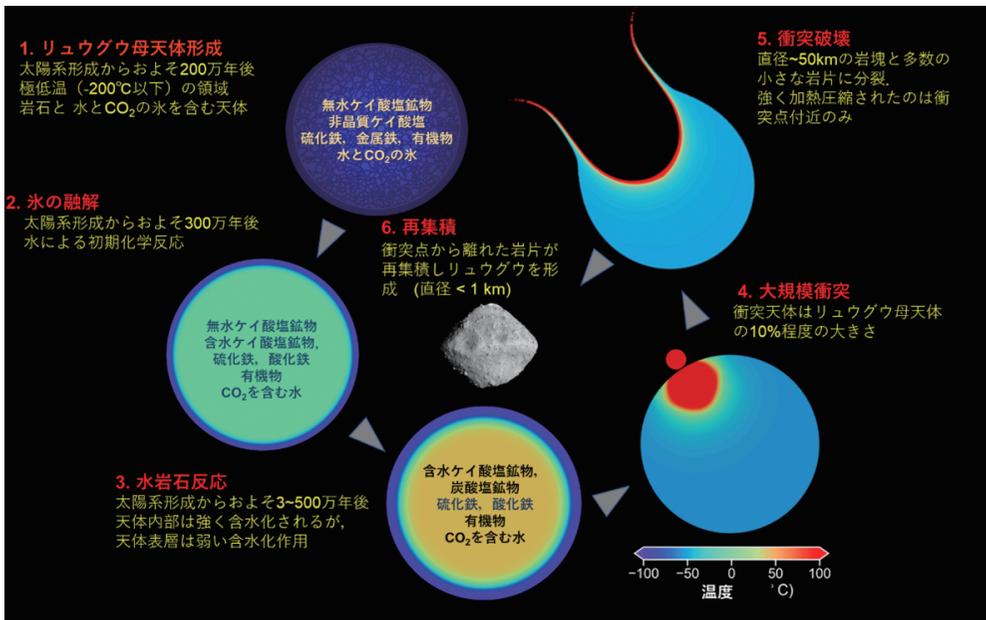


図5: リュウグウ母天体の形成進化プロセス [1]. 天体内部の温度分布や年代, 衝突破壊のプロセスは数値シミュレーションで求めた。

抑え、黒澤が測定器具の製作を担当した。千葉工業大学工作センターの村越茂氏にご協力いただき、なんとか間に合わせることができた(図4)。続いての困難は試料の側面が樹脂で固められていることであった。3点曲げ実験の結果に影響を与えることは明らかで、事前に取り除く必要があった。そこで、千葉工業大学 惑星探査研究センターにて保有していた CI chondrite simulantを油圧プレスでペレットに加工して、リュウグウの石に見立て、所有している刃物(Victorinoxのナイフ、超音波カッター、工作カッター、カミソリ)で側面を切断するテストを行った。その結果、細胞切断用の極薄カミソリを選定した。実験当日は田中がこのカミソリで側面を切り落とし、樹脂を取り除くことに成功した。リュウグウの石は不思議な触感で刃がスッと入り、途中まではきれいに切れるが、さらに力を加えると切れ目から割れるような挙動であった。よく乾燥したハードタイプのチーズに近い(中村の感想)。3点曲げ実験では変位に従って応力が線形に増加し、ある時点で応力が急降下するという教科書的な脆性挙動を示し、当初の予想に反して美しいデータをとるに至った。なお樹脂が付着している切片、曲げ試験で破壊した粒子についても回収し、JAXAに返却した。

数値計算サブチームでは脇田、玄田が熱史計算を、黒澤、玄田、兵頭、杉浦が衝突計算を担当した。2021年の10月初旬に物性計測チームに試料が配布され、物性計測が始まった。その分析日報を受けて黒澤が衝突計算に必要な状態方程式(EOS)パラメータを作成し、玄田が数値計算に入れるテーブルを作成し、兵頭、杉浦が計算実行&後解析を行う体制で計算を進めていった。解析が進行するに連れて報告された物性値が速報値から変わっていくため、その都度計算をやり直すのに苦労した。12月に初期成果論文にまとめ始め、12月末には投稿した。なかなか大変だったが、世界で初めて小惑星物質そのものから得られた物性データを使った数値衝突計算を行い、確定値に近づいているという実感があり、例えるならライブ前日のような高揚感のある日々であった。論文にまとめていく過程で、最終版と思って黒澤が設定したパラメータの一部に解析途中の値が改訂されず使われていたことに気がつくという心臓が縮みあがる出来事があったのだが、パラメータ更新ごとに計算と作図をやり直すという流れができあがっていたため、投稿前に修正を間に合わせることができた。

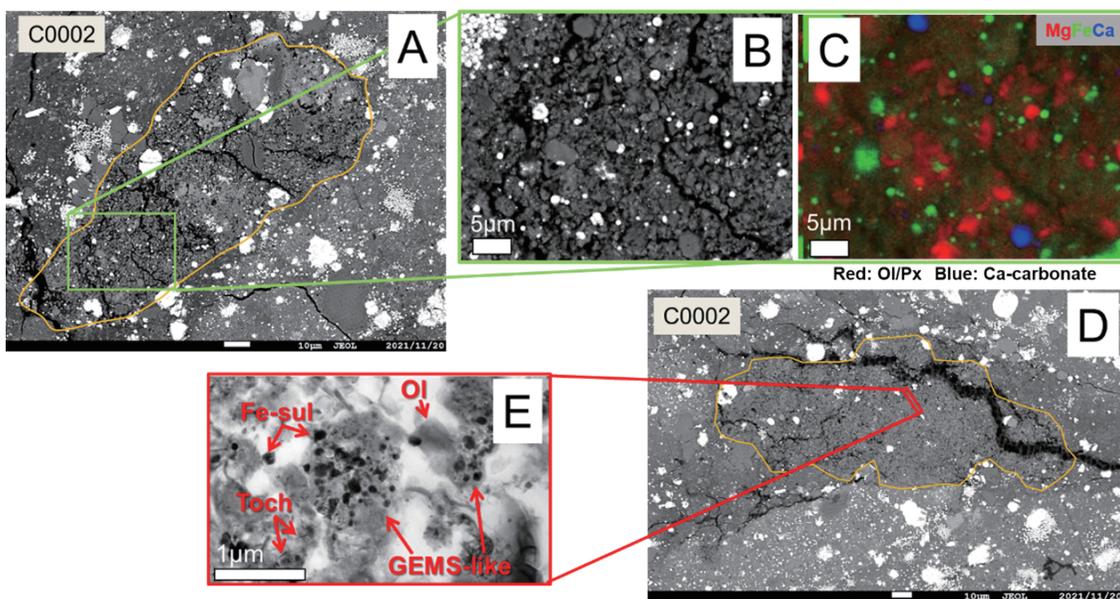


図6: 今回の分析で最大のサンプル(C0002)から発見された天体形成時の原始的な物質の特徴を残した岩片 [1]. A. 岩片の全体像, B. 岩片の一部拡大, C. (B)と同じ領域の元素分布. 赤色の粒子はカンラン石, または輝石. 緑は硫化鉄, またはマグネサイト, 青はCa炭酸塩. D. 岩片の全体像, E. 岩片の拡大像. 数百nmの大きさの非晶質ケイ酸塩や硫化鉄で形成される微粒子(GEMS-likeと表示), およびカンラン石(Ol)などが主な構成物質. A-Dは走査型電子顕微鏡画像, Eは透過型電子顕微鏡画像.

3. リュウグウ形成プロセス

多くの分析結果を踏まえ、「石」分析チームから初期成果論文を発表した[1]. この論文には多くのリュウグウサンプル研究のSeedが含まれている. 論文本体のほか, 100ページを超えるSupplemental materialが付属する. 今後のリュウグウサンプルの研究に参考になれば幸いである. 論文の骨子は以下の通りである(多くの記述は, 初期成果論文のプレスリリース[6]をもとに改編).

リュウグウサンプルの物質分析, 物性測定結果を導入して行った数値シミュレーションの結果を図5に示す. 以下に, どのような物的証拠がリュウグウサンプルに残されていたのかを説明する.

3.1 母天体形成過程と形成領域

リュウグウサンプルには非常に弱い磁場の情報が残されていた. この情報は, リュウグウの母天体が太陽系のもととなった原始惑星系円盤のガス中で誕生した可能性が高いことを示唆する. つまり, リュ

ウグウは太陽から遠く離れた太陽光が届かない円盤ガスの暗闇の中で生まれたことになる. その領域は -200°C 以下の極低温であったと推定され, 水の氷だけでなく, CO_2 氷粒子も存在していた. サンプル中の最も二次的変質の弱い岩片(図6)の情報から, 岩石粒子の大部分は非晶質ケイ酸塩であり, 加えてカンラン石, 輝石, スピネルなどの無水ケイ酸塩, 鉄鉱物や有機物であったと推定される. リュウグウ母天体は, その領域に存在していたこれらの岩石粒子と水を取り込んで形成された.

二次変質が進んでいないリュウグウサンプルから, 太陽近くの高温下でできた粒子(Ca, Al)に富む包有物やコンドリュール, 以下では高温微粒子と呼ぶ)を発見した(図7). このことはリュウグウ母天体の極低温の形成領域に, 太陽の近くの高温でできた粒子が少量共存していたことを意味する. これらの高温微粒子はすべて小さく(約30ミクロン以下), 小さな粒子が選択的に太陽近くから太陽系外側まで移動したと考えられる. これは, 太陽系誕生時の内側と外側の大規模物質混合の証拠となる.

上に示したようにJ-PARCにてリュウグウサン

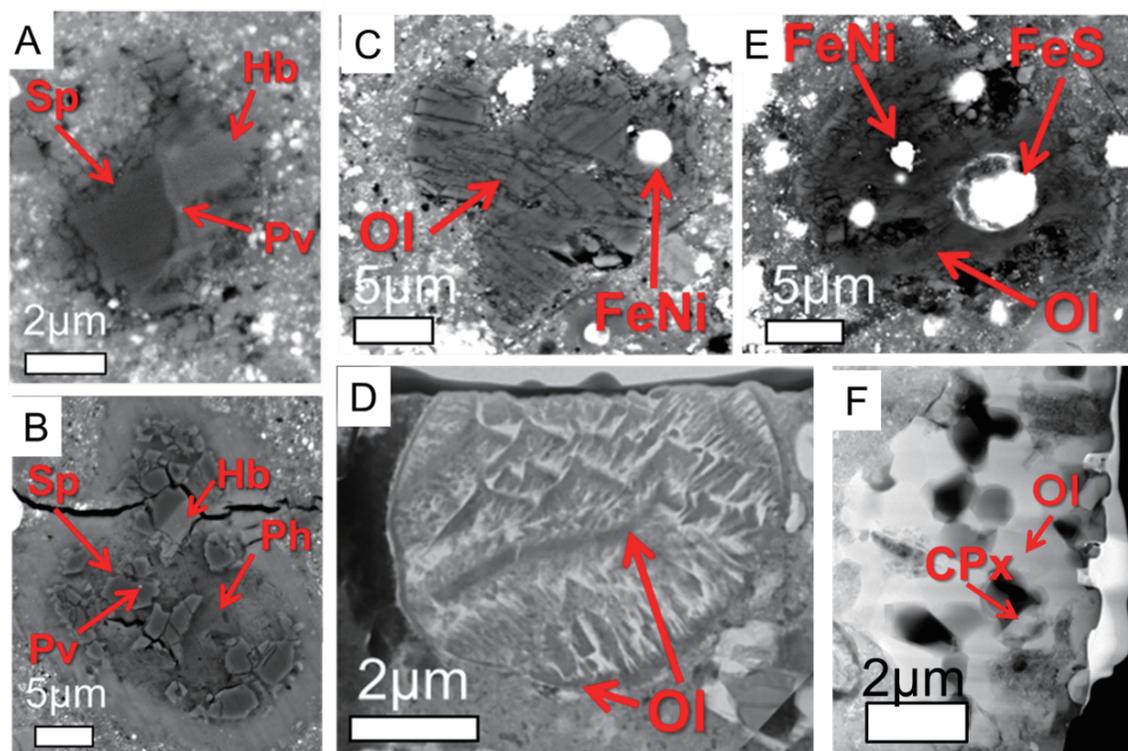


図7: リュウグウサンプル中に発見されたCa, Alに富む包有物(CAI)とコンドリユール [1]. A, B. Al-Mgスピネル(Sp), ヒボナイト(Hb), ペロブスカイト (Pv) などから形成されるCAIs.一部は層状ケイ酸塩 (Ph)に変質している, C.-D. 溶融したカンラン石(Ol), 金属鉄(FeNi), 硫化鉄(FeS)から形成されるコンドリユール, F. 多孔質なカンラン石で, 空孔の一部にCa輝石(CPx)を含む. A-C, Eは走査型電子顕微鏡写真. D, Fは透過型電子顕微鏡写真.

ル10粒子(総計126 mg)に対して行ったミュオンビームを使った元素組成分析(図2)により, リュウグウの窒素や炭素を含め主要元素の存在度はCI炭素質隕石(=太陽)に近いことが分かった。つまり, リュウグウの元素存在度は極めて未分化であることがわかった。一方, 酸素濃度はリュウグウはオルゲイユCIコンドライトよりも約25%少なかった。これはCIコンドライトが地上に落下後, 大気中の水分を吸収し, さらに大気下で酸化されたことを示唆する。

3.2 母天体内部での岩石と液体の水による反応

上述したように, 母天体集積時は水を含む多様な固体微粒子の集合体であった(図6)。これらの原材料が母天体内部で水やCO₂と反応し含水鉱物や炭酸塩鉱物を形成した。水質変成時の水温は, 変成時に形成された硫化鉄の安定関係や結晶構造などから, およそ25~50℃であったと推定される。

水質変成で形成された六角板状の硫化鉄(ピロタイト)結晶内部の数ミクロン径の空孔に閉じ込められた液体の水を発見した。水を凍らせて飛行時間型2次イオン質量分析計で分子種を調べると, 水は塩や有機物を含む炭酸水であった。

リュウグウサンプルの多くは~1 mm程度の微小岩片が集まってできた角礫岩であった。これらの岩片を構成する鉱物が多様であることは, 水質変成の際の条件の違い(水岩石比 W/R など)で説明できる。岩片は $W/R < 0.2$ でできた物質と, $0.2 < W/R < 0.9$ でできた物質があった。前者は母天体の表層付近の低温で水が溶けにくかった環境でできた岩片(図6)であり, 後者は母天体内部の水が豊富な環境でできた物質であると推定される。その後の衝突で母天体が破壊され, 母天体内部と表層の物質が混合された結果, 現在のリュウグウには程度の異なる水質変成を経た岩片が保存されている。

興味深いのは, リュウグウの母天体内部で液体の

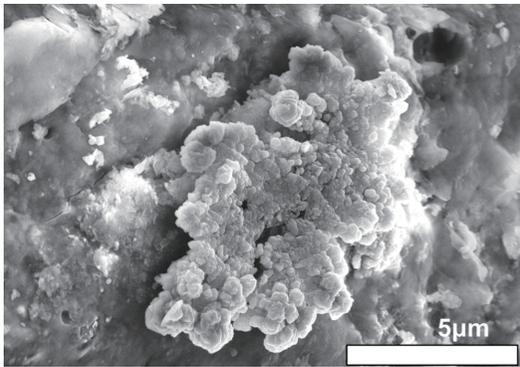


図8:リュウグウサンプルの表面に見えられたテーブルサンゴに似た形をしたCuとSからなる結晶[1]. 極微小の薄い結晶が積層している。走査型電子顕微鏡写真。

水からテーブルサンゴのような形をした結晶が成長していたことである(図8)。どのような組成の水から晶出したのが未解明であるが、リュウグウ母天体の内部には地球の海に似た環境が存在していたと考えられる。

3.3 リュウグウサンプルの特性から推定されたリュウグウ母天体形成過程

上述したように、リュウグウサンプルの各種物性を測定した(図4)。今回の「物性」計測のハイライトは弾性波速度、曲げ強度、熱物性(比熱、熱拡散率)の定量、電磁気学特性の定量である。基本的な量を小惑星のリターンサンプルで計測できた世界初の例である。

リュウグウサンプルにはマグネタイトが多く含まれており、上述した木村氏のグループのホログラフィー観察により(図3)、特徴的な磁力線分布(渦状磁区構造:図9)が確認された。この構造は一般のハードディスクよりも安定で、太陽系の年代(46億年)以上の長期間、磁場を保持できる。マグネタイトの内部、および周辺の磁場はこの結晶が形成された当時の磁場を反映している。上述したように、リュウグウ母天体は、磁場を持つ原始惑星系円盤ガスの内部で形成され、その後の水質変成によりマグネタイトが形成された可能性が高い。

リュウグウサンプル16粒子の体積をSPring-8で精密に求めた(空間解像度約0.9ミクロン)。サンプルの質量は吸着水の影響を避けるため大気遮断のグローブボックス内で測定した。その結果、サンプルの平均密度は $1.79 \pm 0.08 \text{ g/cm}^3$ であった。この値は探査機からの観測で見積もった小惑星リュウグウ全体

の密度(1.19 g/cm^3)より大きく、小惑星内部に30%以上の隙間があることを示唆する。このことは現在のリュウグウが母天体の破壊の結果形成された、第二世代のラブルパイルであることと整合的である。

3.4 母天体の熱史と衝突破壊の数値シミュレーション

母天体の誕生から、天体内部の昇温、水質変成の経時変化、大規模な衝突破壊の数値シミュレーション(図5)を、実際の小惑星サンプルの物性実測値を使って行った。小惑星から回収したサンプルの物性の測定結果を、その小惑星の形成進化の数値シミュレーションに使ったのは世界で初めてである。

放射性元素 ^{26}Al の崩壊熱による母天体内部の温度変化を数値シミュレーションで解析した。その結果、太陽系形成後約200万年後に -200°C 以下の環境で母天体が誕生し、約300万年後に水質変成が始まり、およそ500万年後に天体内部の各所が最高温度($\sim 50^\circ\text{C}$)に達したことが分かった。母天体の形成は一度に短時間でできたことを仮定しており、天体が段階的に成長した場合は、天体形成跡時期は200万年よりも早くなる。

リュウグウはかつてポラーナ、またはエウラリア小惑星族に属していたと考えられている[7]。つまり、リュウグウの母天体が破壊されて、これらの小惑星族の小惑星が形成されたと考えられる。これらの族に属する小惑星の質量を合算すると、リュウグウ母天体は破壊前は直径100 km程度であったと考えられる。数値シミュレーションの結果、母天体の1/10程度の他天体が母天体に正面衝突すると、最大径が $\sim 50 \text{ km}$ 程度(ポラーナやエウラリアと同程度の直径)の天体と多くの小天体が形成されることが分かった。現在のリュウグウは、この衝突で発生した岩片が集合してできたと考えられる。

衝突シミュレーションの結果、衝突地点付近の非常に限られた物質のみが高温高压を経験する(例えば、 $>10 \text{ GPa}$ に到達するのは母天体の0.2%体積程度)が、破壊強度は低いので、母天体のほとんどの部分が破壊されるが、高温高压を経験していない。このことは、高い衝撃圧、衝撃温度を経験したリュウグウのサンプルほとんど見つからなかったこと、多くのリュウグウ粒子にクラックが観られることと整合的である。

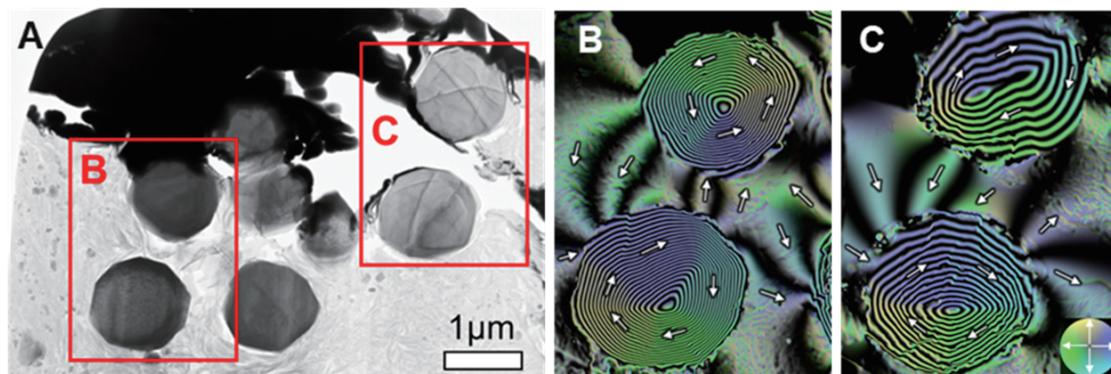


図9: A. マグネタイト微結晶に残された古地磁気の記録 [1]. リュウグウ試料から切り出した超薄切片中のマグネタイト球状結晶の透過型電子顕微鏡像 B. C.磁束分布像. 矢印と色は磁化の方位. 粒子の内部に渦状磁区構造が見られる. 粒子の外側に見られる磁力線はマグネタイトからの漏れ磁場である.

多くのチームメンバーがコロナ禍の中、世界各地で同時進行的に分析を行ってくれた。オンライン会議で情報共有すればよいと簡単に考えていたが、メンバーは日米欧地球全体にいたので、どこかが昼な時は、他方は早朝、深夜なのでそんなに便利ではないと実感した。しかし、次々に発見があり、考察を重ねることでリュウグウの形成史が見えてくるにつれ、リュウグウサンプルにはこれまでの隕石研究からは決して見えていなかった情報が秘められていると確信した。今後は、集積時の円盤領域の物質の情報を残す部分に特化した研究を継続し、可能な限り太陽系の時計を巻き戻す作業に集中したい。

謝辞

本稿を書く機会を与えてくださった渡邊誠一郎氏に感謝します。

参考文献

- [1] Nakamura, T. et al., 2022, Science 379, eabn8671.
- [2] Matsuoka, M. et al., 2023, in press.
- [3] Noguchi, T. et al., 2023, Nature Astronomy 7, 170.
- [4] Matsumoto, M. et al., 2023, Submitted.
- [5] Nakashima, D. et al., 2023, Meteoritics, in press.
- [6] 東北大学理学部プレスリリース 2022年9月26日
<https://www.sci.tohoku.ac.jp/news/20220926-12281.html>
- [7] Sugita, S. et al., 2019, Science 364, 252.

著者紹介

中村 智樹



東北大学大学院 教授
 東京大学大学院理学系研究科鉱物学専攻博士課程を中退し九州大学理学部助手。博士(理学)。NASA/JSC太陽系探査部門、独マックスプランク研究所・宇宙

化学部門に留学、九州大助教授を経て2012年から現職。初期太陽系進化学研究室を主宰。はやぶさ、はやぶさ2では初期分析を担当、MMXでは科学戦略チーム「Origin of Phobos and Deimos」のPI、およびミッションオペレーションワーキングチーム主査を担当。

一番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦 その55 ~GCMで再現された金星大気中の波と赤道 ジェットの準周期的変動~

高木 征弘¹, 安藤 紘基¹, 今井 正亮², 杉本 憲彦³, 松田 佳久⁴

(要旨) 金星大気中の波を大気大循環モデル (GCM) によって再現し, 大気スーパーローテーション (SR) の時間変動との関係を調べました. 雲頂付近 (高度約70 km) で観測される4日波・5日波はロスビー・ケルビン (RK) 不安定によって励起され, 赤道ケルビン波と中高緯度ロスビー波が臨界緯度で結合した構造をもちます. どちらも角運動量を赤道向きに輸送し低緯度のSR (赤道ジェット) を強化します. 5日波 (GCM中では5.8日波) の作る下部雲層の赤道ジェットが発達すると, 赤道反対称な構造をもつ7日波が現れ, 角運動量を赤道域から中緯度に輸送することで赤道ジェットを解消します. 5日波と7日波が交互に成長・減衰を繰り返すことにより, 280日程度の時間スケールをもつ赤道ジェットの準周期的な変動が生じます. これらの結果はあかつき観測とも整合的です.

1. はじめに

地球大気にはロスビー波やケルビン波, 傾圧不安定波などのさまざまな波が存在し, 大気大循環に大きく影響しています. 金星大気にも熱潮汐波や4日波・5日波といったさまざまな惑星規模の波が存在し, スーパーローテーション (SR) をはじめとする金星の大気大循環の形成に重要な役割を担っていると考えられています. しかしながら, 大気運動の観測が難しいことから, その空間構造や成因, 角運動量や熱の輸送などはほとんどわかっていませんでした. あかつき赤外線カメラ (IR2) によって発見された下部雲層 (高度約48-55 km) の赤道ジェット (SRの回転角速度が赤道域で極大をもつ現象) とその時間変動 [1] には, 波による角運動量輸送が本質的であると予想されています. 金星大気中の波を調べることは, その気象を理解しSRの維持メカニズムを解明

する上で非常に重要です. 本稿では大気大循環モデル (GCM) で再現された4日波・5日波などの構造や成因と, 波によって引き起こされるSR (下部雲層の赤道ジェット) の時間変動に関する最近の結果 [2,3] をご紹介します.

2. 金星大気中の波

金星は高度約48-70 kmに存在する濃硫酸エアロゾルの雲で完全に覆われており, 雲頂 (高度約70 km) 以下を観測することが困難です. しかしながら, 紫外線で観測される雲模様の時間変化から, 雲頂付近には太陽加熱によって励起される熱潮汐波のほか, 周期4日と5日の波 (4日波と5日波) が存在することが1980年代から知られていました [4]. 4日波 (5日波) は低緯度 (中緯度) にシグナルをもち, 背景の平均東西風よりも速い (遅い) 位相速度を持つことから, ケルビン波 (ロスビー波) と言われています. これらの波の構造は長らくわかっていませんでしたが, Venus Expressやあかつきの観測結果から, 5日波は中緯度を中心をもつ赤道対称な東西波数1の渦であることが明らかになってきました [5-7]. あかつき

1. 京都産業大学 理学部

2. 東京大学 大学院理学系研究科 天文学教育研究センター

3. 慶應義塾大学 法学部 日吉物理学教室, 自然科学研究教育センター

4. 東京学芸大学 自然科学系

takagi.masahiro@cc.kyoto-su.ac.jp

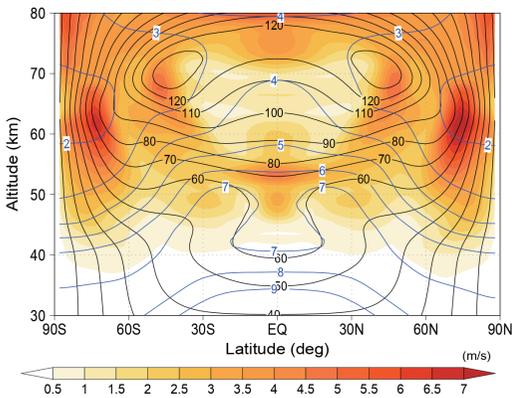


図1: 準定常状態で得られた平均東西風の緯度-高度分布. 風速を黒線, 回転周期 (空気が金星を東西一周する周期, 単位は日) を青線, 風速の時間変動の大きさ (標準偏差, 単位はm/s) をカラーシェードで示す.

中間赤外カメラ (LIR) の観測によると, 雲層中 (高度65 km付近) には周期3.6, 5.0, 5.4, 6.1日の波も存在しているようです [8]. また, 金星夜面の赤外線観測や雲物理GCMの結果からは, 低緯度の下部雲層で雲の光学的厚さが周期的に変化しており, 下層雲が東西波数1のケルビン波的な構造の波によって強く影響されていることが示唆されています [9-14]. こうした数日の周期をもつ波は熱潮汐波や山岳波のように太陽加熱や地形によって直接励起されているわけではなく, 地球の傾圧不安定波のように力学的な不安定によって自発的に作られるものと考えられます.

3. 数値モデル

波の再現実験には地球GCMとして開発されたAFES [15,16] を金星用に改変したAFES-Venus [17] を用いました. 放射過程をニュートン冷却で近似するなどした非常に簡略化されたGCMですが, 雲層中の温度分布や熱潮汐波の再現性を向上させる改良が加えられています [18]. AFES-Venusでは金星の自転方向を地球と同じ東向きとしています. したがって, モデルで再現されるSRも東向きであることにご注意ください. 理想化したSR状態を初期値とし, 51地球年ほど数値積分して準定常状態を求め, 最後の585日のデータを用いて波を解析しました. AFES-Venusの詳細やこれまでの成果について

てはすでに何度かこの連載でも紹介されていますので, 適宜ご参照ください.

4. GCMの解析結果

4.1 東西平均場

図1に準定常状態で得られた平均東西風の緯度-高度分布を示します. 現実的な強度のSRが維持され, 雲頂付近 (高度約70 km) には弱い中緯度ジェットが存在しています. SRの回転周期 (空気が金星を東西一周する時間) はほとんどの領域で緯度とともに単調減少し, 高度70 km付近では低緯度で4日, 中緯度で3日, 高緯度で2日程度です. つまり, 角速度でみるとSRは低緯度ほど遅く, 高緯度ほど速く回転しています. ただし, 高度40-52 kmには明瞭な赤道ジェットが形成されており, この高度域では回転周期は中緯度 (30°付近) で極大を持ちます. 赤道ジェットの上部 (47-55 km) には平均東西風の時間変動の極大がみられ, 4.6節で示すように, あかつきIR2の観測によって発見された下部雲層の時間変動する赤道ジェットの存在 [1] と整合的です.

4.2 波の周期解析

東西風と南北風の周期解析の結果, GCM中には周期3.3, 5.8, 4.8, 7, 1.7-3.6日といったさまざまな周期の波が存在していることがわかりました. 観測されたSRとGCMで再現されたSRとの速度差や, 波の臨界高度や臨界緯度 (波の位相速度と平均東西風の風速が一致する高度や緯度) の位置などを考慮すると, 3.3日波と5.8日波は雲頂で観測されている4日波と5日波に対応すると考えられます. 7日波は赤道に対して反対称な水平風速分布をもち, 下部雲層の赤道ジェットの時間変動に関係していることがわかりました. 紙幅の都合上, 以下では3.3日, 5.8日, 7日波の構造を示し, 5.8日波と7日波によって引き起こされる赤道ジェットの時間変動について説明します.

4.3 3.3日波

帯域フィルタとコンポジット解析によって得られた3.3日波 (雲頂で観測される4日波に対応) の高度70

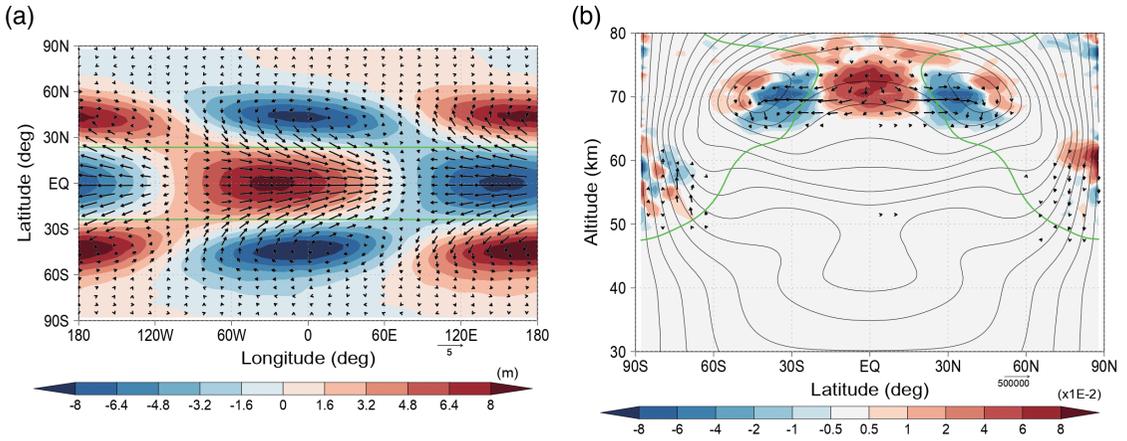


図2: (a) 高度70 kmにおける3.3日波の水平構造. 水平風をベクトル, 高度場偏差をカラーシェード (単位は m) で示す. 緑線は臨界緯度. (b) 3.3日波に伴うEP flux (ベクトル) と平均東西風の加速率 (カラーシェード, 単位は m/s/day). 緑線は臨界緯度・高度.

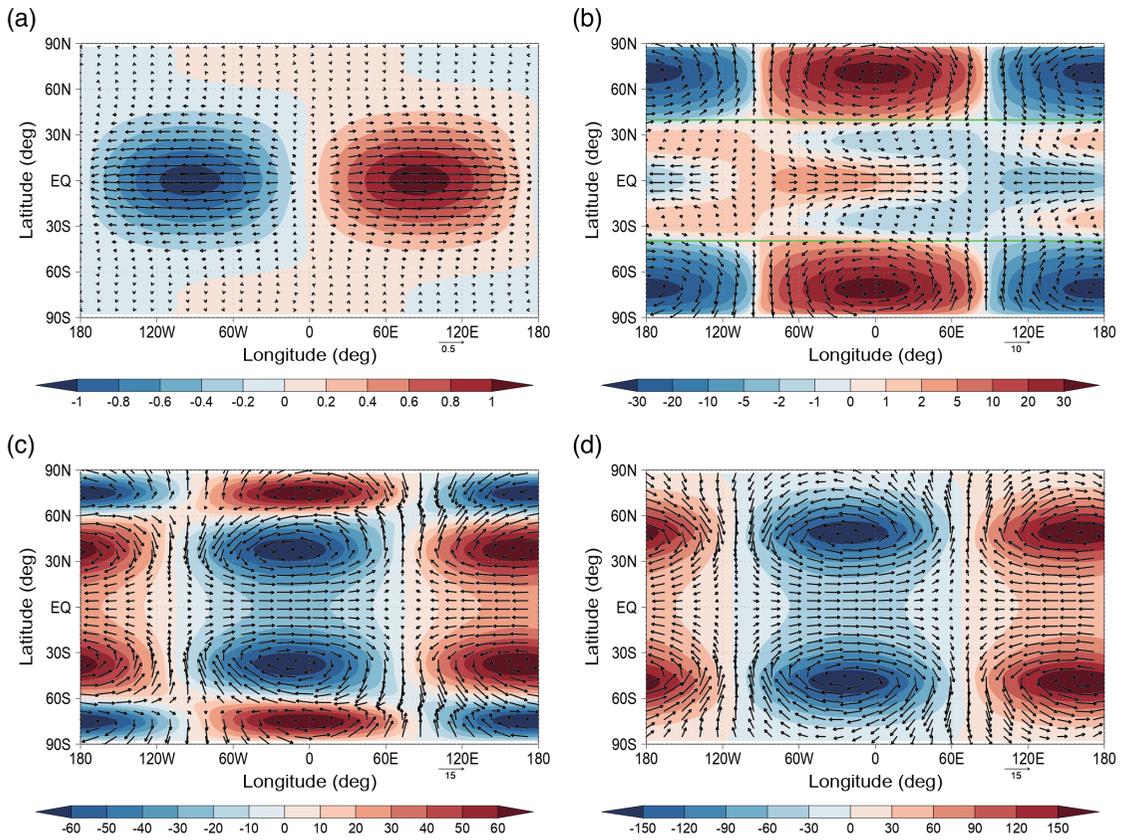


図3: 5.8日波の高度 (a) 30 km, (b) 52 km, (c) 60 km, (d) 70 kmにおける水平構造. 水平風をベクトル, 高度場偏差をカラーシェード (単位は m) で示す. 緑線は臨界緯度.

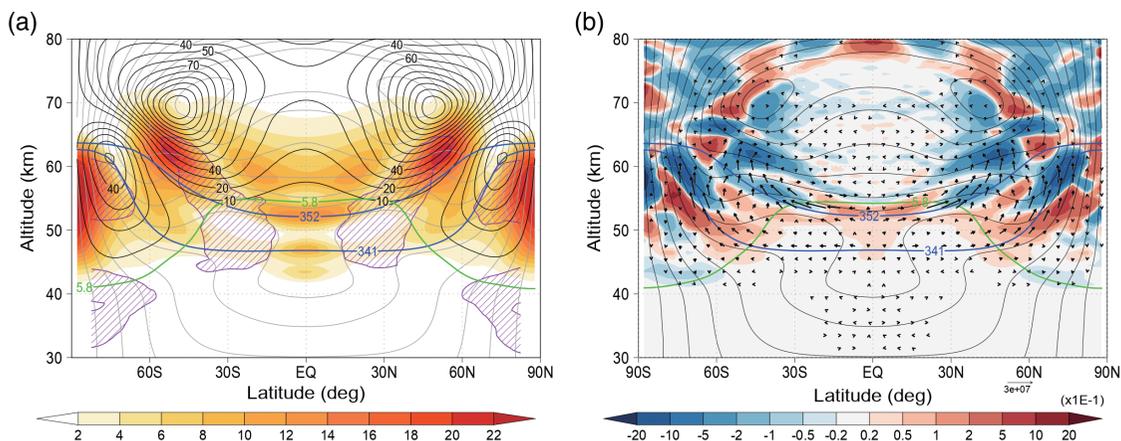


図4: 5.8日波の緯度-高度構造。(a) 東西平均した水平風の運動エネルギー密度 (カラーシェード, 単位は $\text{kg}/\text{m}^3\text{s}^2$), 高度場偏差の振幅 (黒線, 単位は m), 平均東西風の風速 (灰色線, 単位は m/s), 紫のハッチは渦位の南北勾配が負の領域を示す。(b) EP flux (ベクトル) と平均東西風の加速率 (カラーシェード, 単位は $\text{m}/\text{s}/\text{day}$)。緑線は臨界緯度・高度, 青線は352 K (上) と341 K (下) の等温位面。

kmでの構造を図2aに示します。3.3日波の東西波数は1で、緯度方向には臨界緯度(約 25°)の低緯度側と高緯度側に振幅を持ちます。臨界緯度より低緯度側では、高度場偏差と位相の揃った東西風が卓越し南北風が弱いこと、波の位相速度が平均東西風よりも速いことなどから、低緯度の構造は赤道ケルビン波であると考えられます。一方、臨界緯度より高緯度側では、地衡風のな中緯度渦が卓越していること、波の位相速度が平均東西風よりも遅いことなどから、高緯度側の構造はロスビー波であると考えられます。臨界緯度を横切る水平風に注目すると、東西風と南北風が負の相関をもち、角運動量を赤道側に輸送していることがわかります。これらの特徴はロスビー・ケルビン (RK) 不安定 [19] とよく一致しており、3.3日波が赤道ケルビン波と中緯度ロスビー波の結合が引き起こすRK不安定によって励起されていることを示しています。このような波のカップリングが可能になっているのは、SRの回転角速度が低緯度(高緯度)で遅い(速い)ためです。

図2bは3.3日波に伴うEliassen-Palm (EP) フラックスと、EPフラックスの収束による平均東西風の加速率です。EPフラックスは赤道付近から臨界緯度を越えて中緯度に向かい、臨界緯度よりも低緯度(高緯度)側で平均東西風を加速(減速)します(熱輸送が無視できる場合、EPフラックスは角運動量フ

ラックスと逆向きであることに注意)。この結果は3.3日波がSRの子午面循環メカニズムに寄与する可能性を示しています。

4.4 5.8日波

図3, 4に5.8日波(雲頂で観測される5日波に対応)の構造を示します。5.8日波も東西波数1の構造を持ちますが、臨界高度が低緯度で持ち上がり(図4b)、臨界高度より下に存在する赤道ケルビン波、上に存在する中緯度ロスビー波および高緯度ロスビー波から全体が構成されるため、水平構造が赤道対称性を保ったまま高度とともに大きく変化することが特徴です。高度30-40 kmでは赤道ケルビン波が卓越し(図3a)、高度40-65 kmの臨界緯度より高緯度側には赤道対称な地衡風渦のペア(高緯度ロスビー波)が存在します(図3b)。臨界高度直下の高度52 kmでは赤道ケルビン波の南北スケールがかなり小さくなり($10^\circ\text{S}-10^\circ\text{N}$)、臨界緯度より低緯度側(緯度 $20^\circ-35^\circ$)に別の赤道対称な地衡風渦のペア(中緯度ロスビー波)が現れます。高度47-52 kmでは赤道ケルビン波と高緯度・中緯度ロスビー波のあいだの東西風と南北風が負の相関をもち、臨界緯度をはさんで角運動量を赤道向きに輸送します。臨界高度より上に赤道ケルビン波は存在せず、中(高)緯度ロスビー波の南北スケールが高さとともに増大(減少)し

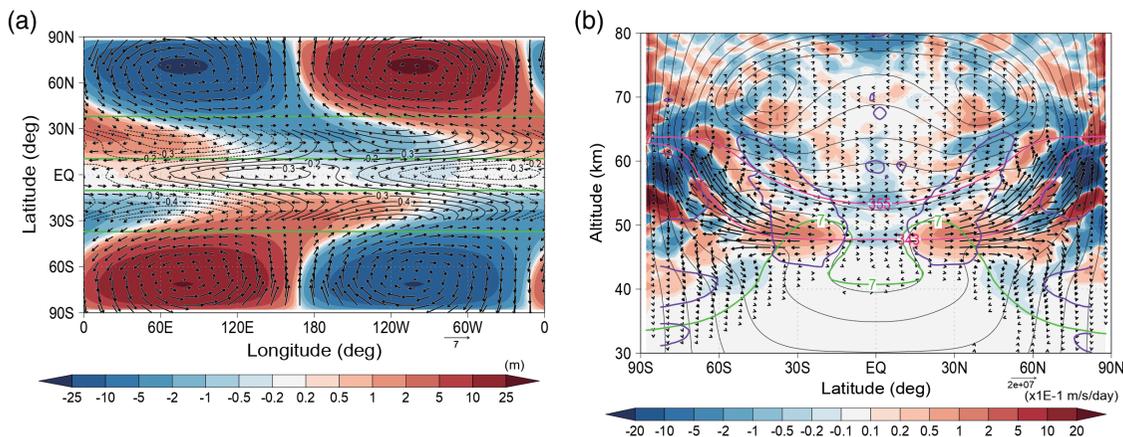


図5: (a) 高度48 kmにおける7日波の水平構造. 水平風をベクトル, 高度場偏差をカラーシェード (単位は m) で示す. 緑線は臨界緯度. (b) 7日波に伴う EP flux (ベクトル) と平均東西風の加速率 (カラーシェード, 単位は m/s/day). 赤線は355 K (上) と343 K (下) の等温位面, 紫線は基本場の渦位の南北勾配が符号を変える位置を示す (紫線で囲まれた領域の中では渦位の南北勾配は負).

ます (図3c). 雲頂付近の高度70 kmでは高緯度ロスビー波が消失し, 中緯度ロスビー波だけが卓越します (図3d, 4a). この構造は雲頂で観測される5日波の赤道対称な中緯度渦 [5-7] とよく似ています. 平均東西風に相対的な位相速度も観測とGCMでほぼ一致していることから, 雲頂の5日波は5.8日波の中緯度ロスビー波部分であると考えられます.

赤道ケルビン波の運動エネルギーは高度47 kmおよび52 km付近に極大を持ちます (図4a). これらの高度では, EPフラックスが等温位面に沿うように臨界緯度を超えて低緯度から中高緯度に向かい, 角運動量が赤道ケルビン波と中緯度ロスビー波および高緯度ロスビー波のあいだで赤道向きに輸送されます (図4b). この結果から5.8日波は赤道ケルビン波と中・高緯度ロスビー波によるRK不安定で励起されていることが示唆されます. 5.8日波の赤道向き角運動量輸送によって赤道域の平均東西風が加速され, 赤道ケルビン波の存在する下部雲層に赤道ジェットが作られます (4.6節). また, EPフラックスが中高緯度で鉛直上向きになっていることからわかるように, 5.8日波の中・高緯度ロスビー波は顕著な極向き熱輸送を伴います. RK不安定における熱輸送の役割は浅水系に基づく従来の枠組み [19] では理解できないため, 理論的に予測されている金星大気中の傾圧不安定 [20-22] との関係なども含め, 今後詳しい研究が必要です.

これまでの研究で指摘された東西波数1の傾圧不安定波 [23] や下部雲層のストリーク構造を作るロスビー波とケルビン波 [24], 下層雲に影響するケルビン波的な波 [9-14] はいずれも5.8日波として理解することができます. また, 5.8日波の著しい特徴である惑星規模の赤道対称性は, 雲頂で観測される雲模様がほぼ赤道対称であること [25] や, 雲頂温度の変化が南北両極域で同期する現象 [26] の物理的な解釈を与える可能性があります.

4.5 7日波

図5aに7日波の水平構造 (高度48 km) を示します. 7日波も東西波数1の波ですが, 赤道反対称な南北構造をしており, 赤道上に南北風の極大が存在します. 5.8日波が作る赤道ジェットによって臨界高度が赤道域で10 kmほど沈んでいるために (図5b), 高度41-51 kmには4つの臨界緯度 (10° および 38° 付近) が存在します. このため, 7日波の位相速度は赤道域と中高緯度で平均東西風より遅く (西進), 亜熱帯域 (10° - 38°) で速く (東進) になっており, それぞれの緯度帯には西進赤道ロスビー波 (10° S- 10° N), 東進中緯度ロスビー波 (10° - 38°), 西進高緯度ロスビー波 (38° - 90°) が存在しています (ただし, 赤道域の波は赤道ロスビー波ではなく, 混合ロスビー重力波の可能性もあります). これらの波の相互作用により, 低緯度側の臨界緯度付近では極向き, 高緯度側

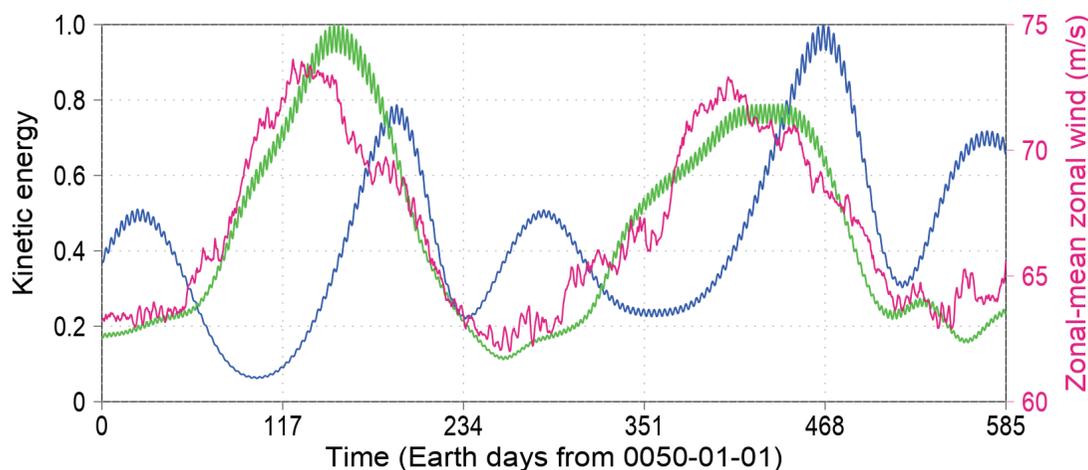


図6:5.8日波(緑)と7日波(青)に伴う水平風の運動エネルギー(それぞれの最大値で正規化, 左軸)と高度48-54 kmで平均した赤道上の平均東西風(マゼンタ, 右軸)の時間変化。

の臨界緯度付近では赤道向きの角運動量輸送が生じ(図5b), 平均東西風が赤道域と中高緯度で減速, 亜熱帯域で加速されます。この結果は, 7日波の成因が5.8日波によって作られた赤道ジェットを解消するために生じるシア不安定であることを示唆します。

4.6 波と赤道ジェットの時間変動

図6に5.8日波と7日の運動エネルギーと下部雲層(高度48-54 km)で平均した赤道上の平均東西風速の時間変化を示します。まず, 5.8日波の成長に伴って角運動量が赤道域に輸送され, 赤道ジェットが強まります(60-120日付近)。赤道ジェットがピークに達すると7日波が成長を開始し(120日付近), その成長とともに5.8日波が減衰し, 7日波の角運動量輸送によって赤道ジェットが弱まります(120-230日付近)。赤道ジェットがもっとも弱まる時期には, 低緯度の平均東西風の緯度分布は剛体回転からむしろ等速分布(角速度が赤道で極小)に近づきます。290日以降は7日波の減衰とともに5.8日波が成長を始め, 赤道ジェットが再度強化されます。以上のサイクルが繰り返されることにより, GCMの中では時間スケール280日程度の準周期的な赤道ジェットの時間変動が引き起こされています。

あかつきIR2の夜面観測によると, 下部雲層の平均東西風には顕著な赤道ジェットが存在する時期と剛体回転に近い時期があることが示唆されています

[1]. 変動の時間スケールは不明ですが, 赤道ジェットの強度は10 m/s程度です。5.8日波と7日波によって作られる赤道ジェットの時間変動はこの観測結果を定性的・定量的に説明する可能性があります。しかしながら, IR2夜面観測は観測範囲が非常に限られているため(東西方向に70°程度), 観測された東西風には東西平均成分だけでなく波や擾乱の成分が含まれている可能性があります。特に, 下部雲層には5.8日波の赤道ケルビン波(東西風偏差の振幅7-9 m/s程度)が存在しているため, 平均東西風に赤道ケルビン波の東西風が重なることにより, 見かけの赤道ジェットが観測される可能性もあることに注意が必要です。

あかつき紫外カメラ(UVI)の観測から, 雲頂で観測される5日波は20日程度で増幅し50日程度で減衰することが指摘されています[7]。このような波のライフサイクルの存在は, 波と平均東西風(SR)の相互作用による基本場の時間変化と, そこで生じる不安定波の成長・減衰過程を反映したものかもしれません。

5. まとめ

Venus Expressやあかつきによる近年の観測により多くの新しい観測事実がもたらされた結果, 数値モデルによる金星大気シミュレーションが進展し,

4日波や5日波、下部雲層の赤道ジェットなどに関する理解が進展しつつあります。しかしながら、7日波に対応すると思われる波はこれまでのところ観測されていませんし、あかつきLIRが見いだした多数の波とGCM中の波の対応関係もまだ調べられていません。7日波は低緯度で強い鉛直流を伴わないため、下層雲の観測では検出しにくいのかもしれません。謎につつまれた金星雲層中の波の3次元構造を観測する新手法として、現在、複数の子衛星を用いた衛星間電波掩蔽観測 (CROVA) が検討されています [27]。新たな観測の実現により金星の大気循環の理解が進展するものと期待されます。

本稿では金星大気重要な波である熱潮汐波について触れることができませんでした。機会があれば熱潮汐波についても最近の進展をご紹介しますと思います。

謝辞

本研究は地球シミュレータ公募課題「AFESを用いた金星・火星の高解像度大循環シミュレーション」の一環として実施され、JSPS科研費 JP19H01971, JP19H05605, JP23H00150, JP23H01249の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Horinouchi, T. et al., 2017, *Nat. Geosci.* 10, 646.
- [2] Takagi, M. et al., 2022, *J. Geophys. Res.: Planets* 127, e2021JE007164.
- [3] Takagi, M. et al., in revision, *J. Geophys. Res.: Planets*.
- [4] Del Genio, A. D. and Rossow, W. B., 1990, *J. Geophys. Res.* 47, 293.
- [5] Kouyama, T. et al., 2013, *J. Geophys. Res.: Planets* 118, 37.
- [6] Kouyama, T. et al., 2015, *Icarus* 248, 560.
- [7] Imai, M. et al., 2019, *J. Geophys. Res.: Planets* 124, 2019JE006065.
- [8] Kajiwar, N. et al., 2021, *J. Geophys. Res.: Planets* 126, e2021JE007047.
- [9] Carlson, R. W. et al., 1991, *Science* 253, 1541.
- [10] Crisp, D. et al., 1991, *Science* 253, 1538.
- [11] Peralta, J. et al., 2019, *Geophys. Res. Lett.* 46, 2399.
- [12] Ando, H. et al., 2021, *J. Geophys. Res.: Planets* 126, e2020JE006781.
- [13] Ando, H. et al., 2022, *J. Geophys. Res.: Planets* 127, e2021JE006957.
- [14] Karyu, H. et al., 2023, *J. Geophys. Res.: Planets* 128, e2022JE007595.
- [15] Ohfuchi, W. et al., 2004, *J. Earth Simul.* 1, 8.
- [16] Enomoto, T. et al., 2008, *Description of AFES2: Improvements for high-resolution and coupled simulations* (New York: Springer).
- [17] Sugimoto, N. et al., 2014, *J. Geophys. Res.: Planets* 119, 1950.
- [18] Suzuki, A. et al., 2022, *J. Geophys. Res.: Planets* 127, e2022JE007243.
- [19] Iga, S. and Matsuda, Y., 2005, *J. Atmos. Sci.* 62, 2514.
- [20] Young, R. E. et al., 1984, *J. Atmos. Sci.* 41, 2310.
- [21] Takagi, M. and Matsuda, Y., 2005, *Geophys. Res. Lett.* 32, L19804.
- [22] Takagi, M. and Matsuda, Y., 2006, *Geophys. Res. Lett.* 33, L13102.
- [23] Sugimoto, N. et al., 2014, *Geophys. Res. Lett.* 41, 7461.
- [24] Kashimura, H. et al., 2019, *Nat. Commun.* 10, 23.
- [25] Rossow, W. B. et al., 1980, *J. Geophys. Res.* 85, 8107.
- [26] Sato, T. M. et al., 2014, *Icarus* 243, 386.
- [27] Yamamoto, T. et al., 2021, *J. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci.* 69, 179.

著者紹介

高木 征弘

京都産業大学理学部教授。東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻博士課程退学。博士(理学)。東京大学大学院理学系研究科助手、同助教、京都産業大学理学部准教授を経て、2018年より現職。

安藤 紘基

京都産業大学理学部准教授。東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻博士課程修了。博士(理学)。日本学術振興会特別研究員(PD)、京都産業大学理学部助教を経て、2023年より現職。

今井 正堯

東京大学大学院理学系研究科天文学教育研究センター特任助教。北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻博士後期課程修了。博士(理学)。産業技術総合研究所特別研究員、日本学術振興会特別研究員(PD)を経て、2023年より現職。

杉本 憲彦



慶應義塾大学法学部日吉物理学教室教授。京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻修了。博士(理学)。名古屋大学大学院工学研究科COE研究員、慶應義塾大学法学部日吉物理学教室専任講師、同准教授を経て、2020年より現職。

松田 佳久

東京学芸大学名誉教授。東京大学大学院理学系研究科地球物理学専攻修了。理学博士。東京学芸大学教育学部助手、気象大学校助教授、東京大学大学院理学系研究科助教授、同准教授、東京学芸大学教育学部教授を経て、2017年3月退職。同年4月より名誉教授。

新連載「みつめる, みつもる」その0 連載開始記念企画「惑星科学研究における見 積もり」座談会

瀧 哲朗¹, 田中 秀和², 黒澤 耕介³, 三浦 均⁴

(要旨) 様々な研究分野においてそうであると同様に, 惑星科学の研究の中でも「見積もり」と呼ばれる技術(あるいは操作)は極めて重要な役割をもつ。このたび遊星人では「見積もり」をテーマにした新連載「みつめる, みつもる」を開始する運びとなった。連載開始に先立ち, 連載の内容に関連した座談会が有志によって行われた。この記事では去る7月に行われた座談会の様子をお届けすることで新連載の知名度向上を図り, 連載初回記事の露払いとなることを目指す。

1. はじめに

遊星人の新しい連載企画「みつめる, みつもる」が12月号から始まる予定だ。この連載は惑星科学研究の中の様々な場面における「見積もり」をテーマにしたものである。その主な狙いは, (1)幅広い研究分野の読者, 特に初学者に向けて「研究の中に出てくる数字や数式の間接的感覚(見積もり)」を言語化して共有する, (2)教科書に載せるには具体的過ぎてそぐわないが, 雑誌論文では詳細と見做され省かれてしまう「隙間」の部分掘り下げ, まとまった解説記事として学会誌という媒体で世に送り出すというものになっている。

「遊星人に見積もりをテーマにした連載があると有益そうなので, ぜひ新企画を立ち上げましょう」というお話をいただいたのは, 本稿¹の執筆時点からちょうど1年前, 2022年7月のことだ。主筆者が遊星人の編集委員に加入したのは2021年の同時期だったと記憶しているが, その後1年間は特にこれといった貢献のない事実上の幽霊編集委員であった。1年の幽霊

期間と1年の構想期間を経て, こうして無事に連載企画が走り出したことは主筆者としても感無量である²。

さて, 数度の編集会議を経て無事に連載が始まる運びにはなったのだが, 新しい(かつ, これまでのものとはやや毛色の異なる)連載が前触れもなく始まるだけでは, 読者のみなさまに受け入れてもらえないかもしれないという懸念が主筆者の中にあった。そこで今回は識者の皆さまにお集まりいただいて「惑星科学研究における見積もり」をテーマとした座談会を行い, それを新連載の予告編という位置づけで記事にまとめることにした。

本記事では座談会の様子を読者諸氏にお届けするとともに, 新連載企画の趣旨をたっぷりと紹介し, さらに新連載の知名度向上を全力で狙うものとする。

2. 「惑星科学研究における見積もり」 座談会

2.1 見積もりとは何だろうか

¹本稿の筆者は後述する座談会に参加した4名である。しかしながら座談会の報告記事であるという本稿の性質から, § 1.3 および脚注は主筆者(=瀧)の一人称視点で書かれているという点をご承知おきいただきたい。

²本稿を執筆している段階ではまだ連載本編が無事に始まるという保証は全くないのだが, ここではそのことは一度忘れておく。

1. 東京大学

2. 東北大学

3. 千葉工業大学

4. 名古屋市立大学

takitetsuo@gmail.com



図1: 座談会当日の様子。左上から反時計回りに田中秀和氏、三浦均氏、黒澤耕介氏、主筆者。当日の回線速度の都合で主筆者とその他の方々との間で画質に差があるが、他の方々の顔をぼかそうという意図はない。

瀧 というわけで、本日は朝からお集まりいただきありがとうございます。この座談会は、メインゲストに田中秀和さん³、そして編集委員から新連載の発起人の一人として黒澤耕介さん⁴、さらに編集長として三浦均さん⁵にご参加いただいています。本日はよろしくお祈りします。

一同 よろしくお祈りします。

瀧 まずメインゲストである田中さんに、研究の中での「見積もり」との付き合い方やご経験を語っていただくというところから始めさせていただければと

³惑星形成の分野で「見積もり」と言えばこの人」と名前が挙がる方の一人である。主筆者も研究会などでビシバシやられ…大変お世話になっている。

⁴この新連載は主筆者が黒澤さんに唆されたことによって誕生した。また企画の立ち上げまでには何度も(様々な場所で)相談に乗っていただいた。新連載立ち上げの作業は主筆者が事前に思い描いて…もとい見積もっていたよりも遥かに大変だったので、この場を借りて黒澤さんに深く恨み言を申し上げると共に、企画がちゃんと形になるまで導いてくださったことに深く感謝の意を表したい。

⁵見積もりを愛する遊星人編集長。本連載の開始を快く応援してくださいとと共に、今回の座談会についても快く参加を了承してください。

思うんですけど、いかがでしょうか？

田中 自分がメインゲストだというのは今初めて聞きました。今日はこんなに沢山参加者がいるから、自分はあまり喋らなくて良くて楽だなと思ったんですけど…。

瀧 (えっ…)

田中 今日のテーマは「見積もり」ということなのですが、我々の研究はもうほとんど「見積もりをしているだけ」ですよ。極めて定性的な研究の場合が多くて、具体的な値はそれほど重要じゃない。でもオーダーくらいはどうしても重要になるよね…ということで、「研究イコール見積もり」という風に考えていいんじゃないかと思います。

瀧 なるほど、「研究の中での見積もり」と言うよりは、むしろこの分野における研究は見積もりそのものであると。

田中 遊星人における科学的な記事はすべて見積もり。見積もらない研究はほとんどないと思って良いですよ。

瀧 そうなってしまうと今日のトークテーマも「研究と見積もり」というよりは、もう研究それ自体になって

しまう感じですね。すべては見積もりであるという。

田中 そうだと思いますね。見積もりじゃないという例外ありますか？

三浦 例外とは少し違うかもしれませんが、例えば数値計算の研究だと「こういうモデルで数値計算しました。その結果こうなりました」という話がされることは多いと思うんですけど、でも「数値計算したら確かにそうなんだろうけど…」っていう風を感じる時が結構ありますよね。これは見積もっていないことにならないでしょうか。

田中 それは見積もりの道具の問題ですよ。その研究は数値計算という道具で何かを見積もっている。それとは別に式だけを使って見積もれば、それはなんか解析的な見積もりになると言った具合に。

三浦 個人的には「見積もり」と言うときは「割り算掛け算くらいでとりあえずオーダーを見積もるもの」というイメージがありました。

田中 そういうこともあるかもしれません。シンプルに実感したいということですよ。つまり今回の座談会で考えたいのは「シンプルな見積もり」ということなんでしょうか。

瀧 確かに見積もりの中にも段階とかグレードはありそうですね。今度の新連載は、見積もりの中でも特に「シンプルさ」に重きを置いた見積もりを取り扱うものという位置づけになるんですかね。

三浦 個人的には田中さんのおっしゃる意味で広く「見積もり」と言っても、まずは本当に四則演算だけでできる程度のものがあって、その一段階上に積分とかを使って解析的に求めるものがある、さらにその上に数値計算みたいなものがあるという風を感じていて、今回の連載で対象にしている「見積もり」は、その一番最初の「四則演算でできるもの」というイメージがちょっとありました。

瀧 正確さの段階みたいな。

三浦 あー、そうですね。正確さでレベル分けすると、そういう感じで3段階くらいある。定量性とか…なんていうんだろう。正確性なのかな？ そういう尺度を使うと僕は勝手に3段階くらいに分類して考えているイメージですね。

田中 何かを見積もるときに「この関数だけはちょっと複雑なんだけど、その x と $f(x)$ の関係さえ使えば、あとはもう四則演算で済む」なんていうこともありま

す。

三浦 確かに、そういう意味では先ほどの3段階の中間もありますね。

田中 その関数が非常に普遍的でいつでも使えるのなら「シンプルな見積もり」にもその関数は使っているよってことになりますね。

黒澤 かつて遊星人に掲載された『林太陽系の日々』で見た話なんですけど[1]、林先生も難しい関数はテーブルを作っておいて、この数字を入れたらこの数字になるみたいなことをパッと分かるようにしていたとか⁶。

田中 テーブルとか図になっていれば関係は明らかですよ。とにかく関係が明らかでありさえすれば良い。例えばベッセル関数なんかも「よく知っている」関数なので、もうそれは明らかなものとして見積もりに使えばいいんです。

一同 (笑)

瀧 あらためて言語化してみると「見積もり」という言葉からイメージするものも、人によって結構違っていきそうですね。惑星科学という分野は、やっぱりどうしてもそこまで厳密な検証を経ながら進むことはできないので、研究自体が見積もりのようなものであるという側面もありますし、その過程の中の一部を取り出してそれを見積もりと呼ぶ場合もあるという。

田中 はい、いろいろな数値計算をしたり、または室内での模擬実験を行うことで惑星についての見積もりを実行しているわけですね。

三浦 そうすると「見積もり」と「オーダーエスティメーション」ってちょっと意味合いが違うんですかね。

田中 それはやはりどれぐらいの精度でやっているかという話になりますかね。パーセントオーダーの精度を出すのか、ファクターでいいのか、それともオーダーなのか、使っている式の精度によって見積もりの結果の精度も違ってきますよね。

三浦 そういう意味では、瀧くんが前日に送ってくれたメモ⁷の中で、質問項目として「新連載でどんな記事を読みたいと思うか」という話があったと思うんですけど、僕が勝手に期待していたのは「可能な限り四則

⁶引用文献[1]の図2bなどからその様子が窺える。

⁷主筆者は段取りを極めて大切にしている人間なので、座談会で想定される話題を事前に見積もり、そのリストを参加者に共有していたのである。ただしリストは前日の夕方に送った。

演算だけで、どこまで、何が説明できるか]みたいな話を色々な分野について聞きたいなというあたりでした。

田中 非常に難しい話になってしまっていると、周りの人が理解するのは大変ですからね。よりシンプルに理解したいというのは、まあ、常に私たちの目標なわけです。

三浦 そうですね、自然科学の目標ですよ。いま惑星科学会の講演を聞いていても、やっぱり分野がすごい細分化されていて、それぞれとても詳細に研究されている。それ自体は良いことなんだろうけど、詳細なところまで話が進みすぎていると、自分が普段扱ってない分野になるとなかなかフォローは難しいなと思うことが正直結構あります。でも、そういった他分野の話もできれば理解したいという気持ちも勿論ある。特に惑星科学会は頑張ってるシングルセッションを維持している学会なので基本的に全部の話が聞ける。そうなっている以上は、できる限り全ての話を理解したい。この連載が、そういう意味で幅広い分野への理解の一助になってくれると嬉しいなと思っていますね。

瀧 はい、ぜひそういう連載にしていきたいと僕も思っています⁸。

2.2 事前の見積もりの大切さ

瀧 物事をシンプルに理解するための手段としてのシンプルな見積もり、例えば微分方程式を割り算と掛け算にしてしまおうとか、そういう最も簡単なレベルの「見積もり」を考えたときに、ご自身の研究の中の「見積もり」との付き合い方に関するエピソードをお聞きしたいです。ざっくり分けて、理論研究の中で出てくる見積もり、黒澤さんのやっぺらっしゃるような実験的な研究の中で出てくる見積もり、さらには今日集まっている我々はみんな数値計算もやっていますけど、数値計算と見積もりとの共存のさせ方というか、両者をどういう風に突き合わせていくか、そういったあたりについてご自身の研究経験からのお考えをお願いしますか。

三浦 黒澤さんは実験装置をよく作られていると思うんですけど、実験装置って数値計算のプログラム

と違って、作っちゃったらなかなか直せないですよ。なので作る前に詳細な設計というか、デザインが必要と思うんですけど、その時にこういった見積もりが重要になってくるのかといったあたりをぜひ聞いてみたいです。

黒澤 まあ、当然やりたい実験に合わせて装置の仕様を作っていくわけなんですけれど……ちょっと、その、基本的にはですね、お金の見積もりの方が効いてきちゃうんですよ。

田中 お金の見積もりがオーダーエスティメートだと大変なことになっちゃう。

一同 (笑)

黒澤 あとは「この範囲で使える装置」というのをガチガチに固めて作ると、その実験が終わったらその装置がいなくなっちゃいますよね。なので、お金が許す範囲の中で一番多くを包含できるものを目指します⁹。例えばガス圧を上げなきゃいけない実験をやりたいときにチャンバーを大きくしすぎるとものすごく大変¹⁰になってしまう。そういうところから徐々に詰めていって「これくらいのサイズ感が良さそうなので、その中で一番大きく作りましょう」という感じ。

三浦 装置の材質とかを選択するときに「こういった圧力に耐えられるためにはこれくらいの厚みが必要」みたいなところも見積もるんですかね？

黒澤 その辺になってくると構造計算の話になってきちゃうので、僕らみたいな素人じゃなくて専門のチャンパー屋さんがいないと難しいですね。特に高圧の場合は装置が外向きに破壊されて実験者に危害が及ぶ可能性もあるので、オーダーエスティメートのレベルではダメで、専門業者さんの過去の実績に基づいてしっかりと設計をしていただく必要があります。

田中 いろいろな過去の経験の蓄積のもとで装置を作るわけですよ。そもそも全然経験のないところの「見積もり」にチャレンジするのはかなり簡単ではないです。

黒澤 学生実験みたいに試行錯誤することが重要な要素になるものもありますが、巨額の予算を使って長く使える実験装置を作ろうという場合にはやはり経験の有無というのは大事な要素ですよ。

瀧 実験研究の中で出てくる「見積もり」は、ポスト

⁸ 主筆者自身が記事を書くわけではないのでなかなか無責任な発言である。

⁹ 「チャンパーは大きければ大きいほどいい」という格言があるらしい。

¹⁰ 予算が大変。

プロセスというか、結果を見た後にやる見積もりが多くなってくるんですか？

黒澤 いや、そんなこともなくて、実験条件を決めるときには事前の「見積もり」がとても重要です。例えば、私が学生の頃にやっていた発光分光分析だと「どれくらいのエネルギーを投入したらどれくらいの発光量が期待できるか」というのを、あらかじめ見積もった上でゲインを決めたりとか、「実験装置の特性として、これくらいの光量だったらこれくらいのゲインにすると何カウント取れてSNが一番いい」みたいなことを見積もってから実験します。

田中 まさに見積もりが重要な場面ですよ。その見積もりを間違えると「この実験設備じゃ全然ダメだった」なんてことになってしまふ。実験の前の段階で非常に詳細に見積もって「この実験をやることで、こういう結果を得ることができる」というのを綿密に調べておかないと、とんでもないことになる。

黒澤 そうですね。そういう話だと、具体例を出すと良くないかもしれないんですけど、(中略)¹¹。まあ、結果としては関連分野の研究がすごく進んだので、全くの無駄ということではもちろんないんですけど。

三浦 新しい物理が見つかったという意味では、大いに意義があったわけですよ¹²。

田中 事前の見積もりは詳細にしなきゃいけないのは当たり前なんですけど、失敗することも当然多い。具体例は記事にするのが難しい場合があるので、ちょっと具体例を話すのは非常に難しいんですけど¹³……そもそも全部ちゃんと見積もれるんだったら、もうそれ以上は詳細な研究を一生懸命する必要なんてないよね。やっぱりいろいろな不定性がある中で見積もりをしているので失敗は当然ある。「こんなのもうほとんど決まってるよね」という話に説得力をつけるために詳細な研究をやるということもあるかもしれないけれども、我々が本当にやりたいのはいろいろ

ろな不定性がある中で研究をすることなので、そういう見積もりは失敗することも多い。

三浦 見積もりをするときって基本的には既知の物理法則・既知の現象に基づいてオーダーエスティメーションをするわけですけど、実際は未知の現象が隠れていたりとか、現実はいろいろシンプルじゃないということなんですよ。先ほどの黒澤さんの話¹⁴みたいな感じで「当然失敗する」って言ったら変ですけど、見積もり通りに行かないことも当然ある。

田中 複雑な要素がいろいろと絡み合ってきて予想外なことが起こる。でも我々は予想外のことで新発見をしたいので、予想外のことが起きるの自体はウェルカムですよ。そういう意味でも、やっぱり事前の見積もりは、少なくとも既知の現象についてはきちんと盛り込んでおく必要があって、そのためにはそれなりの知識が必要になってくる。

三浦 そういう意味では、まだそこまでの知識は蓄えられてない、若手の……多分この記事の想定読者にもなると思うんですけど、大学院生とか若手の人がきちんと見積もりをするっていうのはなかなか難しいことではあるのかもしれないですね。

田中 まあ、それはどのレベルの人でも……常に見積もりは難しいので、その「難しいこと」をやっているから、我々の研究は研究として成り立っているわけだよ。

三浦 そうですね。四則演算だから簡単というわけではないってことですね。

瀧 既知の物理・既知の現象をちゃんと考慮することは必要にしても「見積もりに失敗したら研究としてはむしろ面白くなる」という観点は重要ですね。

田中 でも当然分かりうることは事前にちゃんと分かっておかないと批判の元になってしまう。本当に「これは事前には予想できなかったね」というレベルの「予想外」であればウェルカム。

瀧 分かるべきことを事前にちゃんと見積もって正しく分かっておく、つまり正しく予想しておくことで初めて、予想外の何かが起きたときにそれが「予想外」だと分かるという。

田中 そうですね。何が原因かっていうのを明らかに

¹¹具体例を出すのは本当に良くなかったので、本稿ではこの部分は涙を飲んで割愛している。

¹²読者諸氏に黒澤さんのお話の具体的な内容をお伝えできないのがとても残念だが「見積もりは失敗していたものの結果的にはこれまで人々が気づいていなかった新しい物理が見つかった。当初の目論見とは異なってしまったが関連分野の研究は大いに進展した。それはそれでうれしい」という話が行われた。

¹³本当に難しい、本当に面白いのは具体例の部分なので本当に難しい。

¹⁴先ほど「割愛」された話のこと。みんなこの話が大層気に入ってらしく、今回の座談会の中では度々言及されている。しかしながらあまりに具体例過ぎるので本稿に載せることは決してできない。

にするためには当たり前のことを潰していかないといけないわけで、やはりどんな分野であっても事前の見積もりというのは非常に重要だという感じになりますよね。

三浦 コストがかかる研究ほど重要になる。

瀧 確かに。今回の座談会には機器開発が専門の方はいないですけど、観測機器の設計とかではそれこそ重要そうですね。

田中 それはもう非常に綿密な計画が必要です。

2.3 ポストプロセスとしての見積もり

瀧 ここまで「事前の見積もり」のお話をさせていただいたんですけど、一方で「ポストプロセスとしての見積もり」というものも研究の中で頻繁に出てきますよね。

三浦 自分の日常生活の中でよく出てくるのは、学生が「こんな計算結果が出ました」と何か持ってきたときですね。結果の妥当性をチェックするには、そういう見積もりが欠かせないと思います。正しいかどうかの判断基準としての「見積もり」ですね。

田中 数値計算でも実験でも間違いは必ず起こるので「経験上これは絶対正しい」というところでチェックをするというのが非常に重要ですね。そういうチェックを全部クリアしてこそ新しい発見が発見になるんです。

黒澤 僕らがやってるような衝突実験だと「投入した運動エネルギー以上のことが起きてる」とみたいなケースがあります。

田中 エネルギー保存のチェックは重要ですね。

黒澤 以前、水氷の蒸発実験をやっていたときに、まあ普通に水蒸気量が得られて「よしよし、ちゃんと結果が出てきた」って最初は思ったんですね。でも投入した運動エネルギーから水蒸気発生量の上限を見積もって、実験で得られた水蒸気量と比較してみたら、上限を超えて水蒸気が発生していることが分かったんです。どこから出てきた？なんでだ？って思って調べたら、砕けた氷がチャンバーの壁にひっついていて……チャンバーの壁は室温だったので、そこで蒸発してる方が圧倒的に多くて。

三浦 じゃあ、本当はほとんど昇華しないはずだったのに……。

黒澤 床は液体窒素で冷やしていたんですけどね。

なるほど、冷やすのは床だけじゃダメなのか！って、そこで気づけました。もし、結果が得られた段階で一度立ち止まって見積もることをせずに「たくさん水蒸気出ました」って論文を書いていたなら、もうとんでもないことになるところだった。

田中 やっぱりまずは当然成り立つべきことがちゃんと成り立っているかどうか。そういうことを確認した上での新発見ですよ。

三浦 そういう意味では自分自身に対するチェックでもありますね。人へのツッコミだけでなく、自分が出した結果に対して自己チェックとして行うべきものとしての見積もり。

田中 もちろんそうですね。数値計算するにしても常にダブルチェックしていないと、どんな結果でも出てきてしまうので。

三浦 言い方はあれですけど¹⁵、やっぱり自分で自分の結果を客観的に検証できるのがプロなのかなって気がしますね。やりっぱなしじゃなくて、ちゃんと自分で自分の結果を客観的に見られる人。

田中 できるだけ独立なダブルチェックができるといいですね。

瀧 数値計算の場合だと、見積もりと数値計算は基本的には同じ方程式系を使ってしまっただけですけど、数値的に解くのと手で解析的に見積もるのとで、独立の手法によるダブルチェックという意味合いは大きいですね。

2.4 終わりなき見積もり

黒澤 田中さんといえば、というところで話題にすると、自己相似的衝突カスケードの天体サイズ分布のべきが一個の数字で出てくるっていうあれ[2]は、なんかすごく素晴らしいなと思っているんですけど、あれはポストプロセスに当たるんですか？数値計算でやってみたらそういうべきが出てくるけど、なんでかなっていうところから始めたということなんですか？

田中 あれはまたちょっとここまで出てきた「見積もり」とは別で、どういう風に近似計算をするかという話です。モデルを立ててから、それを使って何かを示していくという類のもの。もともとはIcarusに

¹⁵主筆者自身の発言も含め、この座談会では「言い方があれ」な部分が多々見られるが、今回は可能な限り「あれ」なまま残すことにしている。何故ならばその方が面白いからである。

Williams & Wetherillという論文[3]があって¹⁶、そこでなにか非常に美しくない計算をしていたので……まあ、こんなバツと綺麗に行くじゃんと思ったのでバツとやったというか、できるだけシンプルな形で示すのが重要だという意味ではここまでの話にもつながるかもしれない。

三浦 その計算は、いわゆる「解析的な計算」になるんですかね。

田中 そうですね。当時、論文紹介のゼミがあったんですけど、そこで他の人が発表しているのを聞いて「こんなじゃダメだ。でもこうやればいいんじゃない？」みたいな。そういう研究です。

三浦 最初の方でも出てきましたが、我々は自然科学を研究しているわけですけど、やっぱり「いかにシンプルにできるか」っていうのは重要だなという気はしますね。無駄な要素を省いて一番削ぎ落としたりして……なんて言うんだらう？ 真理というか、そういうのがある。それを見つけるためには見積もりがやっぱり重要だろうと。

田中 見積もるときにもいろんな式を組み合わせで見積もりを行うわけだけど、どの式が仮定なのか、どの式はもう絶対合っているのか、そういうのを整理して「この仮定とこの仮定がちょっと怪しいね」とか、場合によっては「これはいらないね」というのを明確にすることもとても重要になります。

三浦 そうですね。

田中 詳細な研究をした後に、この見積もりがどのくらい合っていたか、またこっちの仮定はどのくらい合っていたのか、そして合っていたらどうしてそういう仮定が合っているのか、一見当たり前じゃないような式がどうして常に成り立っているのか……っていうことを調べて「原因」を明らかにするのが、詳細な研究をしたあとに続く次のステップです。

三浦 見積もりというものが仮説に相当するという側面も意識しておく必要がありますね。

田中 まずは当たりの前を非常にシンプルに考えておいて研究をする。すると、実際はそんなにシンプルじゃなくて複雑になるんだけど、複雑になること

でそのシンプルなところからどうズれてくるのかということが分かってくる。そういうふう整理しながら進んでいく必要がある。「なんかこんな関係が出てきて不思議だね」で終わってしまうのは、まあ、あまりまともな研究じゃない。

三浦 そうですね。普通、研究には「仮説があり、それを検証する」という流れがあるわけだから、まずは仮説が必要なわけですけど、ここで重要なのは、単に仮説を立てるだけじゃダメというところで……。

田中 はい、できるだけシンプルにして、どういう仮定をしているのか、どういう当たり前の式を使っているのかを整理することが重要です。説得力をもたせるためにはどうしても数式が必要になってくるわけですけど、そこで見積もりに基づいてちゃんと仮説を立てておいてから検証する。で、必要に応じてその仮説というか見積もりを再度修正して……という繰り返しの流れの中で答えにたどり着く。そのためにもやっぱり見積もりがいっぱい必要なんです。三浦さんが言ったみたいに、仮説の部分を適当にやったら後で道に迷っておしまいになってしまう。

三浦 見積もり無しでは具体的なものは得られないということですね。結果は出たけど結局どういうことなのかをシンプルに理解することは難しい。

瀧 事前の見積もりというのは説得力のある仮説を提示するための行為という側面があって、一方でポストプロセスとしての見積もりは得られた結果の妥当性チェックであるのと同時に、なるべくシンプルに本質を理解しようという試みなんですかね。

田中 ただ、なんかいろいろ頑張って数値計算結果を解釈しようとはしているんだけど、辻褃合わせ¹⁷みたいになってしまっているものも結構ある。「なんかまあこんなんで説明できるよね」「あー、説明できたからもういいや」みたいな。

瀧 本当はその「辻褃」が合ったら、今度はその辻褃がどこかで破綻しないかというのを次の仮説としてより深く検証していくことも必要なわけですよ。

田中 そうですね。どうして一見自明ではない関係がうまく成り立っちゃうのか、それが成り立つ条件はどうなのか、どういう条件だとその関係が成り立たな

¹⁶この話も相当に「具体的」だが、ここまではギリギリセーフと主筆者が判断して座談会参加者一同の責任のもとでそのまま掲載してみた。いわゆる連帯責任というやつである。

¹⁷主筆者が決める本日のパワーワード第1位(この後も何度か出てくる)。

くなるのかとか、そういう適用範囲みたいなものを明らかにしなきゃいけない。

瀧 研究を深めて発展させていくためには「見積もりを繰り返す」研究生活を送る必要があるということですね。

三浦 そうですね。見積もりは終わることがない。

瀧 見積もりが終わると見積もりが始まる(笑)

三浦 今は、何かの「関係」とそれに対する見積もりについての話をしてきたと思うんですけど、最近流行っているAIなんかだと、どんな「関係」があるのかを見つけるのは得意なんでしょうけど、じゃあなんでその関係が成り立つのかということを考えようと思ったら、そこにこそ物理を知っている、物理を理解している人間の……えーと、「人間力が試される」って言ったらちょっと言い過ぎかもしれないですけど、そういうのがあるわけですよね。

瀧 そういう意味で今後見積もりの重要性が増していく可能性はありますね。簡単に結果が得られる世の中になればなるほどに。

三浦 AIを誰でも自在に扱える時代になったらAIじゃできないところを鍛えていくことが求められるようになる気がするので、そうすると見積もりの重要性が相対的に上がっていきそうです。

瀧 最近の数値計算研究は既にそういう側面が強くなっているという感もありますよね。公開ライブ러리や公開コードがかなり充実してきていて、計算するだけだったら誰にでもできちゃう……まで言い切るとさすがに言い過ぎになりますけど¹⁸、「誰にでもできる」という時代に近づいてきているという実感があるので、そういう時代にこそ見積もりの能力を鍛えるというのが重要になってきそうです。

三浦 黒澤さん達が精力的にやっているiSALEの講習会¹⁹なんかは、やっぱり誰でも使える……って言ったらちょっと言い過ぎだけど、ある程度使いやすいパッケージになっているものだから、まあ数値計算は誰にでも実行できてしまうと思うんですけど、講習会の場では、こういった「見積もり」みたい部分

を取り扱っていたりしますか？

黒澤 講習会では衝突物理学の基礎みたいところから始めていまして、「こういう既知の関係式があって、これを解くには手計算ではここが限界で、じゃあここから先は数値計算しなきゃいけないですよ」っていう導入をしているんですよね。オーダーエスティメートのレベルだったら既によく知られている関係式が使えるけれども、じゃあそのオーダーの中のファクターがいくつなんだろうって考えたらもう少し詳細にやる必要があって、詳細にやろうとするとどうしても空間二次元以上の現象になってきて、じゃあ解析的にやるのは難しいですよ？ というわけでiSALE使いましょう！って感じの。

瀧 講習会ではむしろ見積もりの限界を示すことによって数値計算の必要性をアピールするというロジックなんですね！

三浦 iSALE講習会だから！

瀧 iSALE講習会で「いや、見積もりの方が重要なんだよ」とは言えないですからね！

黒澤 講習会の範囲ではどうしても系統立てたパラメータサーベイみたいのところまでやってもらうのは時間的に厳しいので、各自で何かお題を決めて一つ数値計算をやってもらって「それなりの絵が描けるよね」と納得してもらうところが限界という感じです。本当はパラメーターを変えて物理を検証していくところまで行ければ理想的ですけど。

田中 でもそこまで行けば講習会が終わったあとで個人的に時間をかけていろいろやりたい人はやれるという状態なわけですよね。

瀧 そうしたら、講習会の後にこの連載を読んで見積もりの大切さを認識しつつ計算を重ねて行ってもらえるといいですね。

2.5 時代の流れと見積もりの流れ

瀧 先ほど三浦さんから出していただいたAIの進展の話とちょっと似た話題になるんですけど、惑星科学研究の中での見積もりの位置づけの変遷という点について考えてみたいと思います。個人的には、おそらく時代とともにある程度は位置づけが変わってきているんじゃないかなと予想しているんですけど、自分は研究を始めてまだ10年くらい²⁰なので……。先輩である皆さまは僕よりも長く業界にいらっ

¹⁸ この座談会では参加者が次々に言い過ぎていく。

¹⁹ 衝突物理コードiSALEの新規参加者向け講習会のこと。2015年から黒澤さんを含む有志によって運営されており、2017年以降は国立天文台CfCAとの共催で行われている。詳細は以下などを参照：<https://www.cfca.nao.ac.jp/node/1085>

しゃるので、ご自身が感じてきた変化についてお聞きできればと。

三浦 うーん、僕はいま20年くらいです。でも、そこまで感じていない。見積りの重要性みたいなものがあり方が変わったなっていう印象はあまりないですね。

瀧 なるほど見積りの重要性は普遍的なものであるという。

田中 昔は数値計算をするのも大変だったので「数値計算できない」という境界条件があって。どう見ても無理な仮定で、現実には成り立ってなさそうというのは分かっているんだけど、でもそういう仮定の下で解析的に計算してみましょうみたいなことはあった。いろいろ特殊関数とか使って「この仮定が成り立っていればこれで解析的に積分できるよね」みたいな研究はありましたよね。でも今はもう大抵できるので、数値計算が。

三浦 そうそう。できちゃうんですよね。そういう意味では、昔は数値計算の限界っていう境界条件が身近にあって不便だったからこそ逆に人間が必死に工夫したっていう面はありそうですね。今は何もかもが便利になってしまった。

田中 無理な仮定をする必要がなくなったということですね。

黒澤 ちょっと思い出したんですけど「機械学習に任せればとにかく結果が予想できるんだから理由なんか気にする必要はない」という時代が近い将来に来るという予想をしている人もいて、そういう視点もあるのかなという気はしているんですけど、それについてはどう思いますか？つまり、今こういう風に我々が「見積りが重要」と言ってるのは、まだ「機械学習の能力が不十分」という境界条件に縛られているから、そういう考えになっているだけなんだという風に言い換えることもできると思うんですけど。

三浦 僕のイメージとしては機械学習って問題は解けてもどうしてそうなってるのかは結局わからないっていうイメージなんですよ。

黒澤 はい、いまのポイントは「とにかく結果が出てくる」ということなのかなって思います。とにかくも

のすごい速度と精度で結果が出てくる。これからさらに計算機や機械学習手法が発展していくと、僕らみたいな研究者の役割っていうのも自ずと変わってくるんじゃないか…みたいな話ですね。

三浦 個人的にはやっぱり「とにかく結果が出てくる」ときの「なんでかは分からない」というところは嫌だなというのがあります。そこを理解したいというのが好奇心で、つまり我々のモチベーションじゃないですか。

田中 そこを理解したいがためにやっているのか、それとも結果を得るためにやっているのか、そこをはっきりさせるべきという話かもしれない。結果を得なくてもよくて、ただ理解したいんだったらそれは自己満足じゃないかと、そういう論理なんでしょうね。結果が得られるということを否定してしまったら、それはもうあなたが個人的に楽しんでいるだけだよって言う。

三浦 そういう人もいらっしゃるかもしれない。いや、いろんな人がいていいとは思んですけどね。結果だけわかればいいっていう人も、もちろんある。

田中 ちゃんと理解しようとする、いつになっても結果にたどり着けないという部分はある。そこでどうするかということですよ。理解にこだわっているということは、あなたはもう結果を得ることは完全に諦めたんですねと言われてしまうかもしれない。

一同 (笑)

三浦 ただ理学系の研究って結構そういうのが多いですよ。その当時は全く役に立たなかった理解でも時代を経て新しいテクノロジーの発見につながったみたいなのは、やっぱりあると思うので「なんでそうなるの」というのを理解しようとする人が一定数いた方がいいかなって言うのはちょっと思います。

田中 でも、それもやっぱり機械学習が発展していなかった時代の話なので。今後どんどん機械学習が進化していくという時間軸のもとで、その考え方が成り立つかどうかは分からないですよ。

三浦 うーん、そうですね。未来の機械学習が「理由」まで出してくるなら脅威ですね。もう見積りも勝手にしてくれて、ここに新しい物理がありますよとか言い出すと、ちょっとそれはすごい世界だなって気がします。

田中 理由というか、経験の積み重ねによる経験則

²⁰ここで言う「10年」は10%程度のズレしか含まれていない、かなり精度の良い見積りとなっている。

というのがどんどんできてくる。このパラメータ範囲ではこの法則が成り立つんだという明らかな結果が出てきてしまうかもしれません。

瀧 理由というものの価値が今と変わってくるといことですよ、多分。

三浦 まあ、その範囲で絶対に成り立つ経験則がたくさんあったら、確かに理由なんてなくても予言・予想はできるようになっちゃうわけだから、理由まで知らなくてもいいってことになるかも。

田中 でも結局は、最初の方で言っていた「大体は四則演算でいけるけど、ここの積分だけはこの x と $f(x)$ の関係があって、それを使えばあとは四則演算で説明できる」ってのを、もうちょっと難しい話にしただけのことなのかもしれません。

黒澤 最近だと普通に使われるようになった主成分分析ってやつがあるじゃないですか。あれも、こう……あまりに複雑すぎるいろんな結果があるときに、それを分析にかけると勝手に上手く整理してくれて、その後で人間が「じゃあこの“PC1”っていう要素は何に対応しているんだ？」って考えるみたいなことをやるんですけど、多分そのうちいろんなパラメータを入れると「この相関はこれによって出てます」まで答えてくれるようになりますよね？ そういう時代になったときに研究者は何をすべきかみたいなことを考え始めると結構難しい話かもしれない。

三浦 そこまでいくと、そういう世界って面白いのかどうかという話にもなってきますよね。例えば今や将棋とか囲碁なんかってコンピュータの方が人間より強いわけじゃないですか。じゃあ名局を見たかったらコンピュータ同士にやらせればいいじゃんって考えもありそうですけど、それって面白いのかなっていう。まあ、科学とはちょっと話が違うかもしれないですけど。

黒澤 その話で言うと、藤井さん²¹いらっしゃいますよね。彼はコンピュータを相手に練習してすごく上達してるらしいですよ。そういう風にコンピュータを上手く利用してすごくなった部分もある。だから我々もそうならないかなければならないと思います。

藤井さんと重ねるのはちょっとおこがましいですが²²。

三浦 確かに、コンピュータの結果を人間が自分なりに消化して自分の力にするっていう使い方はありでしょうね。やっぱり藤井さんの中でも何かしら「理解」という形に落とし込んでいるのかなっていう気がなんとなくします。コンピュータの膨大な試行錯誤を人間が理解して、人間がその傾向を何かのシンプルな法則に落とし込んでいるから本番で強いのかなっていう。例えば我々の今の例だと、膨大な経験則をAIが出してきたときに、人間がその経験則を理解するシンプルな法則を見つけたら、それはAIが出してきたものより多少精度は低いかもしれないけど、より広い範囲を予言できるようなものになっていて……みたいな。まあ、それがどう役に立つかって言われたらちょっと今すぐ答えられませんけど。

瀧 まあ確かに理屈がわからないと適用範囲がわからないみたいな部分はありますよね。将来的にはもしかしたら本当に“全パラメーター空間”を計算できるようになるのかもしれないですけど、そうじゃないんだったら、やっぱり理解がないと適用範囲もないので。

三浦 でもそういう適用範囲も「この範囲だったら、この精度で合う」みたいなところまでは、現在のAIでも出せそうな気がします。

瀧 範囲内は予言できてでも例えば外挿はできませんよね。まあ外挿は常に難しいんですけど。

三浦 そうそう外挿は難しい。外挿は常に難しいわけですけど。でも機械学習でこの範囲だったらこの法則成り立つ、この範囲だったら別の法則が成り立つっていうのを全部切れ目なくいろんな経験則を出せば、まあ実用的な範囲では全部予言はできてしまうってことになりかねないですよ。

瀧 そうなってくるとやっぱり難しい。将来どう生きるべきか²³は結構難しいですね。

三浦 そうそうそう。どう生きるべきかっていう。

瀧 我々が10年後、20年後にどう生きるかは見積もりが難しい。

²¹主筆者は藤井システムが全盛を誇っていた時期に将棋を(微かに)かじっていたので、もちろんこれは藤井猛九段のことであると切り切りたいところなのだが、文脈的には確実に藤井聡太七冠(記事執筆時点)のことであろう。

²²将棋ファンの皆様に見つかって怒られる前に主筆者が代弁しておく。「それはそう」。

²³座談会時点では2023年7月に公開された話題の某映画はギリギリ公開前だったので、ここでは心の底からどう生きるべきかを心配している。

三浦 うまいこと言った!²⁴ 確かにね、我々もこの先で何を武器にするかっていうのを考えていかないとダメですよ。

2.6 数値計算と見積もり

黒澤 先ほどの話題と少し被るんですが、パソコンの性能が上がったことで皆さんの研究は変わりましたか? つまり昔だったら「この数値計算は大変だから頑張って手でやろうかな」みたいになってたところを、今だったら「こんなの1分で済むから何も考えずに最初から計算させちゃおうぜ!」みたいな研究生生活の変遷はありますか?

瀧 事前に人間がいろいろ考えるよりも計算しちゃった方が早いケース、つまり「まずは計算をして、結果を見てから理解しましょう」で済む範囲が広がっているとは思いますが、やっぱり人間ってそこまで賢くはないので、容易に数値計算できる部分は数値計算してみた方がいいかなと。

三浦 僕もどちらかというところ「とりあえず数値計算しちゃえ」という方が多かったです。でも中には「こういう現象が起こる」という予言をまず手計算だけでしておいて、その後で数値計算したら本当にその通りに起こったみたいな経験もあります。そのときはすごい達成感を得ました。数値計算なしの論文とそれを数値計算して実際に検証できたという論文が出るとやっぱり嬉しい。

瀧 それはすごく気持ちよさそうですね。

三浦 そういって、これは僕の中で「よくできた論文だな」として自画自賛しています。

田中 でもそれは問題があって……正しい式を使って正しい見積もりをやっていて、それで本当はもう結果は決まっているのに無駄な数値計算をしたということですよ?

一同 (爆笑)

三浦 もちろん一応理由付けをして数値計算するんですけどね。まあ確かに予言どおりにシミュレーション結果が出てくるのはつまらないと言えつまらない。

田中 大事なのは、どの関係式・どの仮定をチェックするための数値計算なのかということなんです。何の不定性もなく解析的に分かっているものをただ数値積分したら、それはちょっとまずいよね。

²⁴このとき主筆者はその日一番のドヤ顔をしていた。

三浦 うーん、イメージとしては、平均場を使って解析的に出した計算を平均量にしないでちゃんと揺らぎまで入れてやったらどうなるかといった感じの仕事です。

田中 その場合も、その平均場の近似が何故成り立つのか、どうしてこの近似で良かったのか、そういう近似が成り立つ適用範囲はどこなのかということを考えないといけない。で、数値計算をやることで「こういう適用範囲だったんだな」としてことをチェックするとか。

瀧 そういう意味では、近似には絶対に適用範囲があつてどこかで必ず破綻するんで、数値計算は「近似が正しく破綻する」ことを確かめるためのものという使い方もありますね。

田中 そうですね。破綻することも、仮定が成り立たないことを見つけるのも、それぞれちゃんと一つの結果なんです。シンプルな結果に合う数値計算結果だけを求めるのは間違っていて、シンプルな予想と合わせるためだけだったら数値計算をやる必要はない。シンプルなところからズレが出ることが研究の進展。だから、もうびっくりと合って「あ、これはなかなか良くやったな」とか思っちゃいけない。ズレたことこそを成功としなくちゃ。

三浦 肝に銘じておきます²⁵。

2.7 これから見積もりを始める人へ

瀧 ちょうどいい話の流れになったので²⁶、これから研究を始める学生や駆け出しの若手の人たちに対して、見積もりとの付き合い方についてのアドバイス……というところちょっと堅苦しいですが、皆さんからのコメント的なものをお願いしたいです。

三浦 いわゆるオーダーエスティメーションのことって、体系的に教えてもらえる機会があまりないイメージがあるんですよ。

瀧 例えば見積もり専用の授業とかはないですよ、多分。

三浦 アメリカのどこかの大学でオーダーエスティ

²⁵文章にするとなかなか刺激的なやりとりであるが、座談会は極めて和やかな雰囲気で行進していたということを申し添えておく(図1に示した参加者各位の爽やかな笑顔をご確認いただきたい。もちろん図1に使った画像の撮影は座談会の最後に行われたものであり、場が荒れる前に撮影しておいたものとかでは決してない)。

²⁶本当に…?

メーションの講義をやってるという話を聞いたことがあって、それはいいなと思っていたんですけど、日本ではあまりそういう話を聞かない。でも教科書があるわけでもないと思うから、独学でやるのは結構難しいと感じています。なのでゼミとかを活用して欲しいですね。例えば数値計算している人だったら、簡単な四則演算を道具にして自分の計算結果が合っているか常に見積もる習慣をつけて、それをゼミとかで共有するようにしていくと地力が付くかなと思います。

田中 計算にバグがないかチェックするためには、とにかくそれなりの量の見積もりと、見積もりの習慣が必要です。なんか変な結果が出て「新発見だ」という風になってしまうのは、さっきも言ったように素人だと。

三浦 ゼミなんかで計算結果を発表するときも、ちゃんとした見積もりがあれば発表に説得力をもたせられるし、結果としてそれで聴衆を説得できたら自信にもつながる。そしてもちろん見積もり力²⁷も上がります。数値計算をしている人限定のアドバイスになってしまっていますが、とにかく常日頃からそういう訓練をして、見積もりを習慣化していくのが大事なのかな。

田中 ただ、辻褄合わせの、あまり説得力のない説明もよく見るので……。

三浦 そこを見極めて指摘してあげるのは教員の仕事ですよ。それはなんか変だよって。そしたら学生も「これは変なんだな」って分かってくれる。

瀧 見積もりの良し悪しを見極めるのは、見積もる能力よりもさらに一段上の能力という気はしますね。

田中 でも見積もりは必ず数式を使ってやるので……正しい式を使って正しい見積もりを行うというだけのことなので、別に誰にでもできるよ。

黒澤 かつて門野さん²⁸から言われたのは「昔の人は封筒の裏にこうやって計算したんだよ」ってやつで、簡単な見積もりは封筒の裏にその場でやれっていうのを実験室で教わりました。

瀧 と言いますと？

黒澤 門野さんが言ったのは「実験中も常にチェッ

クをしながら進みましょう」ということだったんです。でも実際の実験中はただ作業をこなすことだけに追われてしまうというのもよくある話で、後から「あー、あそこでちゃんと見積もっていたら軌道修正できていたのに」みたいな経験は結構あります。

三浦 実験でも理論計算でも、ある程度はその作業に慣れていないと、作業をするだけでいっぱいになってしまっていて、見積もりをする余裕が作れないかもしれないですね。適切に見積もりをするためには、プログラミングとか実験作業に習熟している、見積もりに頭のリソースを割く余裕を作れるようにしておく必要があるのかも。

黒澤 その余裕のある状態へと至るためには、どういう訓練を積みばいいと思いますか？

三浦 うーん、プログラミングとかはもう「やるしかない」という気がちよつとします。とにかく自分で書いて、動かして、バグを取って……っていう経験を積まない。実験なんかでもきつとそうですよ。時間をかけて実験装置を使い倒さないと習熟しないという。結局のところ「いかにそれに時間をかけるか」っていうのは結構重要かもしれないです。もちろん効率よく覚えることは大事ですけど、やっぱり自分の力にしようと思ったら自分の手を動かさないとどうしようもない。

瀧 実験なりプログラミングなりに習熟するのと同時に、見積もりにも習熟していく必要があると思うんですけど、やっぱりこれも手を動かした経験を積んでいくのが基本的には重要なんですかね。

黒澤 ここまで聞いていて「筋トレと似たような話なのかな」って思ったんですけど、でも僕も筋トレしてるわけじゃないんで²⁹、あんまり筋トレに例えるのもあれですね。あとは実験だけの経験を積もうとするんじゃないくて、実験と見積もりはセットなんだって意識してやっていくのが重要じゃないかな。

瀧 最初の方の話でもありましたけど、研究の前には見積もりがあって研究の後にも見積もりがあって、さらにそれはまた次の研究の見積もりにつながっていくので、とにかく常に自分の研究と見積もりをセットにして手を動かしていくというのが大事ですかね。

三浦 あとは見積もりっていう「別の方法」とか「別の

²⁷「みつもりよく」と「みつもりちから」のどちらなのか気になると思うので補足しておく、ここは「みつもりよく」だった。

²⁸産業医科大学教授の門野敏彦氏のこと。

²⁹筋トレしてるわけじゃないのかよ……!と思ったがその場では飲み込んだ(でもここに書く)。

視点」があるということを知っておくだけでも意味があるのかも。

瀧 なるほど。

三浦 まだ経験が浅い学生さんだと、なにかとんでもない計算結果になっているのにそれをそのまま出して行くことは結構ある。出てきた答えを別の視点から見ると、ダブルチェックの方法が存在すると知っているだけでも立ち止まるきっかけにはなりそうですね。

田中 ただし、あまりチェックばかりしていると今度は研究が進まなくなるのでバランス感覚も大事ですね。まずは失敗してもいいからとにかく進んで、一段落してからチェックする方が良いこともある。すごく慎重に確認しながら次に進む人もいるし、チャレンジングに進めていってある程度進んでからチェックする人もいる。人によってバランスが違いますよね。まあ、あまりにチェックが足りないとかさすがに後ですごく痛い思いをするので……ある程度は途中でチェックしないと厳しいよねっていうのは、だんだんみんな痛い目を見ることで覚えていく。

黒澤 ちなみに田中さんはどっちのタイプですか？ガンガンいっちゃう方が、慎重な方が。

田中 うーん、そこは誰と比較するかの問題ですよ。すごく慎重な人から見れば「なんかすごく危ない橋を渡る人だな」と思われているだろうし、逆の人から見ると「なんかすごく慎重だな、こいつ」と思われている。そういういろんな人がいるので……なかなか具体例は言えないけど、この座談会は具体例を出しづらいから難しいですね。

瀧 実際に原稿化する際は上手くぼかすんで、この場では名前を出しても大丈夫ですよ³⁰。

三浦 そうそう。僕はもう編集してくれるのを見越して喋りたいこと喋ってます。

田中 でも、あまりに面白おかしくやると瀧くんが記事にすくなっちゃうかもしれないから注意しなきゃいけない。

三浦 まあでも、投稿前には原稿を一回見せてくれ

るんですよね？

瀧 それはもちろんです。

三浦 じゃあ、そこでストップをかけられるから大丈夫でしょう³¹。

田中 ちょっと[黒澤さんが序盤で出したとても具体的な話]とかは載せるの厳しいよね。

2.8 合わせることを目的にしない

瀧 ちょうど[黒澤さんが序盤で出したとても具体的な話]に話題が移ったので、それに関連して「見積もりに失敗した具体例³²」を共有しておくのと若い人たちの役に立ちそうな気がします。皆さん、具体的な失敗談みたいなものってお持ちですか？

田中 見積もりは大体失敗するんで、失敗は常に山のようにあります。失敗した例は一生懸命宣伝しないからなんとなく目立たないだけで。

三浦 でも見積もりに失敗して詳細な結果と合わなかったってことは「何かを見落としていた」という事実が明らかになったという意味なので、その見落としていた要素さえ突き止めれば失敗とも言い切れないですよ。

田中 当然気づくべきだったところでちょっと変なことしちゃってたな……ってなると、まあ、その度合いによっては失敗だよ。

黒澤 あー、確かにそれだと失敗になっちゃうかもしれないですね。

瀧 田中さんが「辻褄合わせ」というワードを何度か出していますが、それと似たような話で「本来は合っていないはずのものを見積もり上は合っていると思い込んでしまった」みたいなパターンはありえますよね。

田中 なんか「こうなると説明つくからこれでいいや」みたいなやつはあるよね。

瀧 これは結構ガチの失敗パターンだと思うんです。

田中 だからあんまりね、合うことを目標にすると、やっぱりそれに引っ張られてしまうので良くない。ズレはズレでちゃんと結果なんだと、そしてその原因を明らかにすればそれはもう本当に素晴らしい結果なんだって認識は重要ですよ。

³⁰ここまで本稿をご覧になってきた読者諸氏にご賢察されていることと思うが、実は「残念ながら掲載に至らなかった話題」がそれなりの分量で存在している。特に「あなたはいつ・どこで計算していますか?」というセクションは丸ごと削除された。そんな無難そうな話題がどうして掲載不可になったのかは皆さまのご想像にお任せする。

³¹というわけで、本稿は参加者の皆さまの了承を得て掲載されている。

³²しきりに具体例を出すように誘導してくる座談会である。

三浦 つまり「合わせることを目的にしない」というのが大事なのかな。

田中 合わせることも、予期しないズレを見つけることが我々の仕事です。ただ、やっぱりね、なんか変なズレがあるとちょっとドキッとします。またなんかバグなのかなって。

一同 (笑)

瀧 この「合わせることを目的にするな」というのは、今回の座談会のかなり重要なメッセージになりそうですね³³。

田中 はい、合わないところこそ新発見が隠れているかもしれません。もちろん何のチェックもせずに新発見だと喜んでいたら恥ずかしいことになるので、いろいろと考える範囲のチェックをした上での「新発見」ですが、どれだけ石橋を叩いてやると研究になるのかという度合いは人によってかなり違うので、そこもまた難しいところなんですけどね。

2.9 新連載の開始に寄せて

瀧 そろそろいい時間になってきましたので、最後にあらためて新連載についてお話を伺っておきたいと思います。この連載に期待することや、どんな記事を読みたいかというご意見はありますか？

田中 うーん、まあ、見積もりを面白くするのはなかなか難しく、単に正しい式を使って正しく値を入れれば正しい結果が出てくる。そこには当たり前のことしかなくて、すごいことは何もなし。常に重要なのは、使っている式やモデルはどのような仮定をしていてどれくらいの精度なのか、そしてそれがどういう条件のもとで成り立っているのかというのを明確にすることだけです。

瀧 (連載記事のハードルが上がっていく……)

田中 また、見積もりを発展させて詳細な研究をやったという場合にも、見積もりのどの部分をチェックするための「詳細な研究」をやろうとしていたのかをはっきりと意識する必要があります。すでにガチガチの関係式が成り立っている問題だったら、見積もりで話は済んでいるのだから、さらに詳細な研究をする必要なんて全くない。そういう研究をして「結果的にすごく精度のいい見積もりになっていました」なん

ていうのも、すごいことは何もなくでですね、ただ当たり前の式を当たり前に計算したから普通に見積もりができただけです。だから「なにかアクロバティックな見積もりができました」なんていうのは、使っている式の妥当性をちゃんとチェックしていないせいで不思議なことが起きたように見えているだけです。使っている式をちゃんと理解していれば「不思議な見積もり」というものは決してありえない。

瀧 (連載記事のハードルが上がっていった……) そういう意味では、この連載は当たり前のことが当たり前に書かれているものであってほしいというわけですね。

田中 はい、そういう「アクロバティックな見積もりができました」みたいな感じの記事になってしまうと、ちょっと心配な気がします。そういう人は、どういう式を使ってどういう仮定のもとでやっているかということを理解していないから、なにかすごく不思議なことが起きたように感じているんだと思います。そういう記事を書いてしまうと、自分がちょっと不注意な人間だという宣伝になってしまうかもしれません。

瀧 当たり前のことの当たり前さをちゃんと伝えられるような連載になるよう精進します³⁴。ありがとうございました。

三浦 僕の勝手な希望としては、この連載は大学院生や、なんなら学部生が読んでも面白って思えるようなものになるといいなって思っています。先ほど田中さんが仰ったように、まあ見積もりってというのはある意味当たり前のことなんだけど、当たり前のことをきっちりやるってというのは結構難しいことです。

瀧 そうですね。

三浦 例えばプロ野球選手だって、打つ投げ走るっていう、ある意味当たり前の動きをととても高いレベルでできるからプロとしてプレーできてるわけで、その当たり前のことを「きちんとやる」っていう、そういうものを示す連載になってくれるといいなって思います。

瀧 当たり前のことを当たり前にきちんとやるってすごいことですよ。

三浦 あとは、自分が学部生のときのことを思い出すと「簡単な式を使ってこういうことがわかる」って

³³ カラー原稿だったら「予期しないズレを見つけることが我々の仕事です」辺りを赤太文字にするところである。

³⁴ 繰り返しになるが本編の記事を書くのは主筆者ではない。口から無責任な発言がどんどん出てくる。

うのをシンプルに説明されると結構ワクワクしたので、そういったワクワクを次世代の人たちにも届けられたらいいなと。今の遊星人の記事は、どちらかというと専門家に近い人たち向けの記事が多いという印象はあるので、もうちょっと若手の人が読んで楽しめるような、そういった連載になると嬉しいなというのは個人的に思っています。

瀧 そうですね、ありがとうございます!では最後に発起人である黒澤さんからもお願いします。

黒澤 私としては、「当たり前」の式というもの分野がちょっとでも離れると当たり前じゃなくなるので、他の分野で当たり前に使われてる式がどこから出てきて、どういう思想でその式を使って、それをどう料理してその数字が出たのか……っていうのが、いろんな分野から出てきてくれると面白いなと期待しています。

瀧 なるほど、分野間の相互理解を助けるような連載になってほしいと。

三浦 分野横断的な議論にもつながる連載ということですね。

瀧 本日はお集まりいただきありがとうございます。とても濃密な座談会になったと思います。

一同 ありがとうございました。

3. おわりに

今回は新連載「みつめる、みつもる」の開始に向けて「惑星科学研究における見積もり」をテーマとした座談会を行い、新連載の予告編という位置づけで本稿を執筆した。田中秀和氏を始めとする参加者の方々の濃密な見積もりトークの魅力之余さず原稿に落とし込むことは主筆者の筆力では望むべくもないが、その一部でも読者のみなさまにお届けできていれば幸いである。

今後予定されている本連載の査読記事著者陣³⁵のお名前はまだ伏せておくことにするが、極めて質の高い記事が次々に掲載される見込みであり、主筆者自身も一読者として連載の開始を心待ちにしているところだ。この連載が読者諸氏の、特にこれから研

究を始める若い方々の研究生活の一助となれば望外の喜びである。

本連載に関してご意見・ご要望がある場合は、ぜひお近くの編集委員までご一報ください。

引用文献

- [1] 中澤清, 2011, 遊星人 20, 61.
- [2] Tanaka, H. et al., 1996, Icarus 123, 450.
- [3] Williams, D. R and Wetherill, G. W., 1994, Icarus 107, 117.

³⁵今回は予告編なので例外だが、連載本編の記事は査読記事を基本とする予定である。

著者紹介

瀧 哲朗

東京大学大学院総合文化研究科 特任研究員。東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻博士課程修了。博士(理学)。大学院を退学後は国立天文台天文シミュレーションプロジェクトと東京大学大学院総合文化研究科の間を行ったり来たりしつつ2023年より現職。専門は惑星形成過程の理論的研究だったが最近は惑星が出来た後の研究にも手を出し始めた。趣味は早寝早起き。

田中 秀和

東北大学大学院理学研究科天文学専攻教授。博士(理学)。東京工業大学大学院理工学研究科応用物理学専攻博士課程修了後、同大学所属にて日本学術振興会特別研究員PD、同大学理工学研究科地球惑星科学専攻助手、北海道大学低温科学研究所助教授等を経て、2016年より現職。

黒澤 耕介

千葉工業大学 惑星探査研究センター 上席研究員。東京大学大学院新領域創成科学研究科博士課程修了。博士(科学)。日本学術振興会特別研究員PD、宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 宇宙航空プロジェクト研究員、千葉工業大学 惑星探査研究センター 研究員を経て2019年から現職。専門は、衝突物理学。日本惑星科学会、日本地球化学会、生命の起原および進化学会に所属。趣味はギター演奏と変わった楽器の収集と演奏。最近Jew's Harpを買いました。

三浦 均

名古屋市立大学大学院理学研究科 准教授。筑波大学大学院数理物質科学研究科宇宙物理学専攻博士課程修了。博士(理学)。日本学術振興会特別研究員PD、東北大学大学院理学研究科地学専攻特任助教を経て、2013年から現職。専門は、結晶成長学と、その地球惑星科学への応用に関する理論的研究。日本惑星科学会、日本結晶成長学会、日本天文学会、日本鉱物科学会に所属。2021年1月より、本誌の編集長を務めている。趣味は囲碁とトランポリン。最近、五十肩のせいでトランポリンが跳べないことを嘆いている。

惑星ラボからこんにちは！その9 ～東京大学大学院総合文化研究科～

黒川 宏之¹, 小宮 剛¹, 鈴木 建¹, 成田 憲保¹, 諏訪 雄大¹, 鹿山 雅裕¹,
澤木 佑介¹, 谷川 衝¹, 土井 靖生¹, 吉田 慎一郎¹, 福井 暁彦¹, 小玉 貴則¹

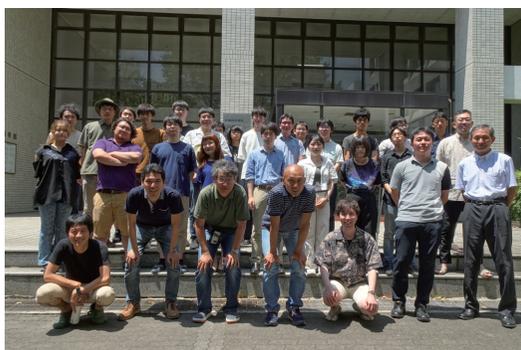


図1: 集合写真.

1. 組織

日本惑星科学会のみならず、こんにちは！東京大学大学院総合文化研究科には地球惑星科学と宇宙科学を研究する2つの研究グループがあります。広域科学専攻広域システム科学系・宇宙地球部会と先進科学研究機構・成田研究室です。現在、広域システム科学系・宇宙地球部会には9名の教員と7名の研究員、19名の大学院生、先進科学研究機構・成田研究室には3名の教員と4名の研究員、4名の大学院生が所属しています(図1)。これらの研究グループはともに東京大学駒場キャンパスにあります。両グループの研究室に学部生・大学院生として所属するには、総合文化研究科(大学院生)・教養学部(学部生)を通じて進学できる他、一部の教員の研究室には理学系研

1. 東京大学大学院総合文化研究科
hirokurowaka@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

究科の地球惑星科学専攻および天文学専攻(大学院生)・理学部(学部生)を通じて進学できます。

2. 研究紹介

2.1 宇宙地球部会:地球グループ

地球グループでは、地球や太陽系内外の惑星・衛星の起源と進化について、研究を進めています。本グループには専門の異なる4名の教員が在籍し、それぞれの強みを活かして、物質科学的・計算科学的手法を用いた研究を行っています。

地球に関しては、地質学的・地球化学的手法と理論モデル計算・シミュレーションの両面から総合的に研究することで、地球の形成過程、大陸成長、大気・海洋および生命進化の解明を目指しています。地質学的・地球化学的手法では、地球史の情報を記録する地質体の野外調査を行い(図2)、また、採取した試料の室内分析を実施することで、地球表層環境と生命の共進化の解読を行っています。野外調査においては、カナダ・ラブラドル半島やアフリカのガボンなど、世界各地に赴いて地質調査・試料採取を行っています。さらに、地球の形成や進化に関する理論モデルを構築し、シミュレーションを実施することで、地球の形成過程や全球的な物質循環の理解を目指しています。こうした理論研究では、スーパーコンピュータを用いた大規模シミュレーションを行う一方で、時には紙と鉛筆だけで勝負する解析計算で研究を行うこともあります。

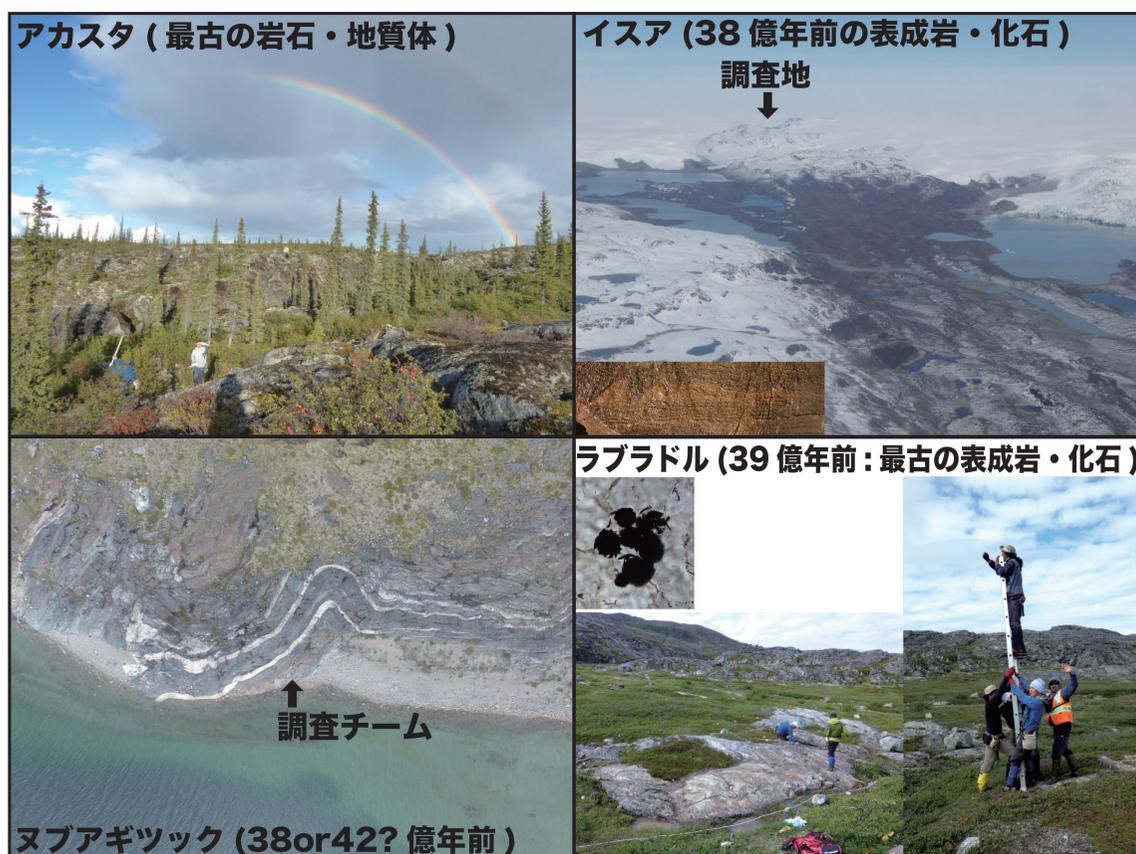


図2: 地球グループの野外調査。

地球以外の惑星・衛星に関しては、理論モデル計算・シミュレーション研究に加えて、地球外試料の分析や太陽系探査を通じた研究を行うことで、惑星系の起源や惑星・衛星の多様性の解明を目指しています。惑星誕生の場となる原始惑星系円盤における天体集積過程について理論シミュレーションを実施するとともに、そうした天体集積の過程を記録する小天体・衛星探査計画(はやぶさ2, MMXなど)に参画することで、惑星系の形成メカニズムを実証的に調べています。また、地球以外の惑星・衛星(月や、金星、火星、太陽系外惑星)の進化についての理論研究を通じ、惑星・衛星進化の多様性を追求しています。さらに、将来の有人探査の先駆けとも言える月や火星の水資源探査計画(LUPEX, International Mars Ice Mapper)にも参画しています。

物質学的研究と理論研究を一つのグループ内で

密に連携して研究を行っているグループは極めて稀です。両方に取り組みたい人にも、一方に没頭したい人にも、おすすめの研究環境です。

2.2 宇宙地球部会:宇宙グループ

宇宙グループは、理論天体物理学を基盤に、多岐にわたる領域で活動する研究者集団で、その主要な関心領域は恒星物理学です。その活動範囲は天体風や天体プラズマの輸送機構、原始惑星系円盤や惑星系の進化、超新星爆発の駆動機構、光子・ニュートリノ・重力波を組み合わせたマルチメッセンジャー、高密度天体の構造とその引き起こす高エネルギー現象、恒星や連星系の進化に基づく連星ブラックホールの形成、赤外線観測天文学まで、広範に及びます。

その中でも、特に駒場宇宙グループの特徴は、質

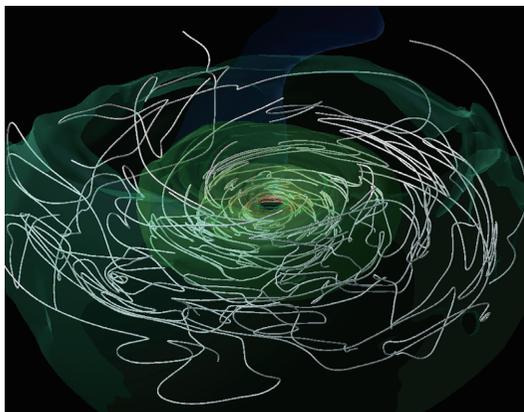


図3: 降着円盤の磁気流体シミュレーション結果の1例。

量にかかわらず恒星の物理学の研究を行うという点で、太陽のような低質量星からベテルギウスのような大質量星までを対象としています。日本国内でこれほど幅広い恒星物理学を研究しているグループは唯一と言って過言ではありません。

また、宇宙流体における風や流れの駆動メカニズムの解明には、磁気流体力学という電磁気学と流体力学を融合させた手法を駆使しています(図3)。このアプローチは、特定の天体に縛られず、さまざまな天体や宇宙流体に見られる共通の物理過程を理解することを目指しています。「波動」、「乱流」、「エネルギー輸送」などのキーワードが、その研究の焦点を示しています。

さらに、宇宙グループでは輻射輸送と流体力学を組み合わせた輻射流体力学計算や重力多体計算を含む、多様な物理現象に対する研究も行っています。これらの問題に取り組むために、スーパーコンピューターを活用しています。

2.3 先進科学研究機構・成田研究室

成田研究室では、惑星が主星の前面を通過する「トランジット惑星」に特に注目し、宇宙望遠鏡や世界各地の地上望遠鏡を駆使して新しい系外惑星を発見し、その惑星の質量・半径・軌道・大気などを調べて、多様な惑星と惑星系がどのようにしてできたのか、それぞれの惑星がどんな世界なのかを明らかにする研究を行なっています。

最近はNASAのトランジット惑星探索衛星TESS



図4: 成田研究室でのMuSCAT4の開発風景(2023年7月)。

による惑星サーベイに参加し、新しいトランジット惑星の発見に取り組んでいます。成田研究室では観測装置開発も行なっていて、TESSと連携した新しいトランジット惑星の発見やその後の追観測では、成田研究室で開発した多色同時撮像カメラ「MuSCATシリーズ」が使われています。MuSCATシリーズは日本の岡山、スペインのテネリフェ島、アメリカのマウイ島にある1.5 m~2 mの3台の望遠鏡に搭載されており、現在はオーストラリアのサイディング・スプリング天文台にある2m望遠鏡用に4台目のMuSCAT4を開発しています(図4)。

成田研究室ではこのように自分たちで開発した観測装置で豊富な観測時間を持つほか、すばる望遠鏡やジェームズウェッブ宇宙望遠鏡などの共同利用観測時間への観測提案も積極的に行なっています。こうした観測では、惑星形成・軌道進化の理論や惑星大気の大気理論を念頭において、観測を通して理論研究の発展に貢献することを目指しています。そのため、理論研究者と連携した共同研究を積極的に進めています。

近年の主な成果としては、MuSCATシリーズやすばる望遠鏡を用いた観測で多数の新しいトランジット惑星を発見しており、その中には赤色矮星のハビタブルゾーンにある地球型惑星や、赤色矮星まわりの短周期巨大惑星、白色矮星まわりの短周期惑星など、まだ発見数が多くないユニークな惑星も含まれています。

また、今後は2020年代に打ち上げ予定のESAのトランジット惑星探索衛星PLATOや、同じくESAの系外惑星大気赤外線分光サーベイ衛星計画Arielなどの衛星計画、2030年代以降には地上の30m望遠鏡計画TMTや日本の紫外線宇宙望遠

鏡計画LAPYUTA, NASAのHabitable Worlds Observatoryなどの計画に参加を予定しています。

実際に望遠鏡で観測をして新しい系外惑星を発見したり, その性質を明らかにする観測的研究に興味がある人, そうした観測と連携した理論的研究に興味がある人, 観測を実現するための新しい観測装置を開発することに興味がある人, 上記のような系外惑星分野の将来計画に参加したいという人は, ぜひ成田研究室での学生・ポストドクを考えてみてください。

3. 研究室生活

宇宙地球部会と先進科学研究機構・成田研究室がある東京大学駒場キャンパスは, 渋谷から二駅という利便性のある立地であるとともに, 自然豊かで都会のオアシスのようなキャンパスです。日々のセミナー等の研究活動に全力を注ぐとともに, 時には自然に囲まれたグラウンドでサッカーをするなど, 充実した研究室生活を送ることができます。

ウェブサイト:

広域科学専攻広域システム科学系・宇宙地球部会:

<https://ea.c.u-tokyo.ac.jp/>

先進科学研究機構・成田研究室:

<https://naritalab.wixsite.com/narita-lab>

遊星人の海外研究記 その11 ～メトロの客は、プレソーラー粒子と私だけ～

瀧川 晶¹

1. はじめに

博士号を取得したら、ポスドクになって、そのうちどこか外国で研究をするつもりでいた。周りの研究者を見ても、だいたいそうだから、研究者になるための「必修」だと思っていた。当時のシステムでは、国内の学振PDは3年間の採用期間のうち、1/3の期間で海外での研究が許されていた。一方、海外学振(海外特別研究員)は2年間海外で研究ができる。海外に行くのなら1年では時間が足りないから海外学振と国内学振に申請して、両方通ったら海外学振にしようかと思っていた。それが、予想外にSPDの面接に呼ばれた。当時、SPDだと海外学振と同様、海外で研究できる期間が採用期間の最大1/2だったので、良い待遇で比較的長く海外に行けることになる。それで最初から1年半アメリカに行くことを前提に、京大で研究員をすることにした。国内学振での海外研究は、あくまで出張扱いである。そのため、京都に半年→1年半アメリカ→1年京都、という変則的な研究スタイルになった。国内での受け入れ研究者の理解が必要であるが、国内学振PDで行う海外での研究は、途中で帰ってくる場所もあるし、気楽に挑戦できる。これほどフレキシブルになりうる研究環境はあるだろうか。なお、現在だと国内の学振PDでも採用期間の2/3も海外に行けるそうなので、このスタイルが可能だ。ただし、アメリカでの1年半も京都での1年半も十分とは思えず、その後も京大で研究を続けるこ

とになった。何年行くのが最適かというのは正解のない難問だろう。

2. ことばのはなし

滞在先として狙っていたのはカーネギー研究所だった。プレソーラー粒子研究をしているLarry R. Nittler博士らがおり、指導教員だった永原裕子博士がかつてポスドクをしていて、素晴らしいところであると聞いていた。とりあえず認知してもらわねばならぬと思い、博士2年の終わりに、LPSCのポスター会場でLarryに話しかけた。“May I ask you a question?”と聞いたら、満面の笑顔で“NO!!”と返された。今でこそお茶目なLarryと思えるが、意を決した学生に冗談はやめた方がいい。

学位をとってすぐに京大に籍を移し、半年でアメリカに行くというのは、私の力量ではやや無理があった。特に英語力が問題で、考えていれば言いたいことは言えるし、研究発表はなんとかできるが、普通の会話がからっきしだった。渡米したての頃、同時期にポスドクをしていた癸生川さん[1]に助けってもらってアパートを契約した(図1)。目についたマンションに突撃して、空き部屋の有無を聞くというスタイルで、こんな一人ではとてもできなかった。逆に言えば、どうやってアパートを探すか知らずに渡航した自分もなかなかだと思う。しかし、助けを借りてばかりもいられない。契約したアパートでインターネットを契約したいのに、電話口で相手が何を言っているかわからなくて泣きたくなった。さらに、研究所で皆が交わすなんでもないおしゃべりが理解できず、自分が

1. 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻
takigawa@eps.s.u-tokyo.ac.jp



図1: アパートに入居した初日。何も無い部屋でやたら長い契約書を読んでいる。最初にしたのはマットレスをAmazon.comで買うこと。家具は去っていくポストクから買いつけ、帰国するときは全てドネーションさせてもらった。

空気になったような気がした。なんでもいいからこっちが喋れば、向こうも察してゆっくり喋ってくれるし話題だつて気を使ってくれるのに、日本語と同じなのに、そういう風に思えなかった。わからない状況に対して萎縮していたのだと思う。夫と一緒に渡米したのだから、向こうのコミュニティに完全に溶け込む感じでもなく、偶然空いていたオフィスは一人部屋、隣の部屋のポストクの子は、お節介ではないタイプで早口だった。しかも、学振のPDというのはボスに雇われているわけではなく、こちらがやりたい研究があつていくものなので、向こうから積極的に仕事を覚えさせるための濃密なコンタクトは期待できない。みんな親切だが、よく聞く“ポストク時代の友達”ができそうになかった。これはいかんと英語を学び、日本に帰国する前には事態は随分改善した。しかし、何事も最初が肝心なので、渡米する前にもう少し英語力があれば、研究以外の面はもっと豊かに暮らせたのではないかと思う。特に、私は内弁慶な人間であり、弁慶になってからが強いタイプだ。楽しく暮らすため

にはいかに早く弁慶になれるかが重要である。「適当なおしゃべり」を封じられたらなすべがなかった。

余談ではあるが、振り返ってみると、帰国後の方がコミュニケーション力は向上したようだ。電話で泣きそうになったのは2012年で、帰国したのは2014年、それから数年した2017年でも、海外から英語の電話を受けるのは随分心の準備が必要なことであつた。しかし、2023年の今、突然英語で電話が来たら、わからないことはあつても怖くはない。つまり、私に必要だつたのは真面目に英語に向き合うきっかけであり、海外へ引越すという荒療治がなかったら、真面目には向き合うことはしなかったであろう。当たり前の話だが、英語に自信のない若者よ、いますぐ始めた方がいい。

2. Lunch Club

Lunch Clubは1947年から続くカーネギー研究所のもっとも由緒ある伝統である(図2)。研究所やその近くにはカフェテリアや購買のようなものがない。仕方がないので、研究者は各自お弁当を持ってくるか、「誰かにランチを作ってもらう」ことになる。Lunch Clubのメンバーは、毎日12:30ちょうどにMerle Tuve Roomに行く。すると、毎日研究所の誰かが作った多国籍ランチにありつける。そして、自分がランチを食べた回数に応じて、大きなキッチンでメンバーのために20-25人分のランチを作る。毎日参加する人だと、一年に2週間くらいランチ作りを担当する。食事を食べるのは無料で、食事を作るのは自腹だ。ポストクやスタッフ研究者が午前中をかけてランチを作り、みんなで食べる。お代わりもする。なんと面白い制度だろうか。Vera Rubin博士が私の作ったランチを食べてくれたこともあるのだ。

Lunch Clubには三つのルールしかない。

- No seconds before 12:45 p.m.
- No complaints about the food allowed (compliments are ok).
- No serving hotdogs more than once a week.

食事はピュウフェスタイルだ。サラダとメインディッシュを作ってパンを用意し、皿やカトラリーとピッチャーに水、フルーツ、デザートを並べたら準備完了となる。昨日の残り物も並ぶ。メインディッシュは肉

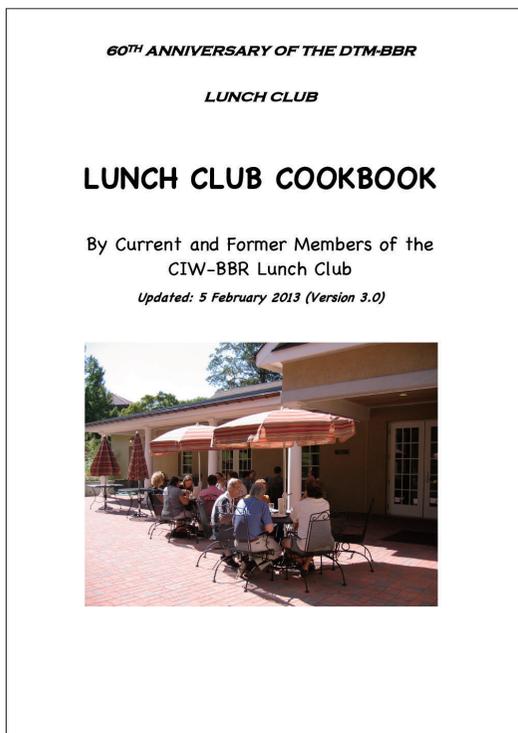


図2: 100ページを超えるLunch Club Cookbook. 歴史や仕組み, 評判の良いレシピが載っている. 天気の良い日は写真のように外で食べる.

入りとベジタリアン用の二種類を用意する. スープの日もあればホットドックの日もあり, シニアスタッフの美味しい定番料理もある. ある時, イタリア料理を用意したら, Conel Alexander博士が「なんでAkiがリゾットなんだ!」と文句を言って, メンバーから「No complaints!」と笑われていた. ポスドクが作る多様な国の料理は楽しみなのだ. しかし作る方は大変だ. 何せ20-25人分の食事が12:30ちょうどに準備できていないといけなないので, まとめて作れるものであることが肝心である. ベジタリアンでも食べられるメニューがいいし, 材料を物理的に運べるだけの重さに抑える必要がある. 私は計画するのも作るのも楽しいタイプだった. メインはレシピも考えて作らねばならないが, サラダはミックスサラダをボールに入れるだけだし, フルーツもりんごや葡萄を丸ごと並べるだけ. デザートは美味しそうなクッキーか何かをスーパーで買って, 置いておけば良い. 気が向いたら誰かを真似してブラウニーを作ってみたり, 誰かが作った

メニューから作りやすそうなアイデアをもらって真似してみたりもした. 大きなキッチンで大量の料理を作るのは気持ちの良いものである. しかし, 楽しいばかりではなく, 20人分の食事数日分の買い出し, という重労働があった. 車がないものだから, 手押しカートのようなものにも買い込んだ食材を詰め込んで, スーパーから研究所まで大変な思いをして運んでいた. 他のメンバーが車を出そうか?とってくれると, 大丈夫!と断ってしまっていた. 頼んでいいのに, と今なら思う. そういうところは駄目だった.

やっぱり担当の日は大変なので, 最初だけ参加して辞めてしまうポスドクも多いし, 私自身も, ランチに持参したサンドイッチを食べたり, 適度な頻度で参加していた. いつかカーネギーにポスドクでいく人がいれば, ぜひ挑戦してみたい. 米は重たいのでAmazonで頼んで研究所に送りつけると良い.

3. メトロの客

言葉はぼちぼちでも, 研究は進む. 目的は1ミクロンほどのプレソラーアルミナ粒子の結晶構造などの鉱物学的特徴を明らかにすることだった. そのために, 隕石を酸処理して酸化物粒子を取り出し, 走査型電子顕微鏡で組成分析と表面観察をおこなってから, NanoSIMSで同位体分析をする. 集束イオンビーム(FIB)法を使って薄膜化し, 透過型電子顕微鏡で微細組織や組成, 結晶構造を観察する. たった1ミクロンの粒子に4つの装置を使った分析をする. 当時, FIBは使い始めたばかりだったし, 透過型電子顕微鏡もNanoSIMSも触ったこともなかった. やることも学ぶこともたくさんあって, 時間もあった. 研究所の小さなキャンパスは, 美しい芝生の上にせいぜい2階建てくらいの低い建物が点在している. 地下には一流の分析装置がずらっと並んでいるが, 外からの眺めはとてものんびりしている. 近くには小川が流れ, 朝夕には時折鹿が散歩にくる. 春には桜が咲き(図3), 夏には近所の家々の庭に電飾のような螢(比喩ではない, 最初イルミネーションかと思った)が舞い飛び, 秋になると紅葉する. 朝研究所に行き, 夕方アパートに戻る. ワシントンは治安がいいので, 熱中すれば夜中まで分析していても良い. 二階に行けばLarryがいて, 議論や質問の相手をしてくれる.



図3: 桜が満開のCarnegie Institution of Washingtonのキャンパス。右手の建物に居室があり、地下にNanoSIMSがあった。

優秀な研究者とポストドクが好きに研究し、雑用に追われている人など存在しないように見えた(本当のところはわからない)。

集束イオンビーム加工と透過型電子顕微鏡分析は、海軍研究所(Naval Research Laboratory)にいたRhonda Stroud博士に教わった。朝、Rhondaの家まで歩いて行き(RhondaとLarryは夫婦なので二人の家というのが正確だ)、車に同乗させてもらってNRLに向かう。たわいもない話や研究の話をしながらワシントンDCの中心を抜け、ポトマック川を超えて40分くらいだった。透過型電子顕微鏡を使うは初めてだったが、Rhondaが目にも止まらぬ速さであれこれ操作して、装置はピーピー言っていて、なんとなくわかるが全くわからない、という状態だった。質問を浴びせながら分析していたが、それだけではできるようにならない。やはり、技術を身につけるためには、身近に装置があつてたくさん手を動かさないと難しい。透過型電子顕微鏡はカーネギーにはなかったが、京大にあった。そのため、透過型電子顕微鏡の技術を学ぶのは帰国してからとなった。結果として、京大とカーネギー研究所の組み合わせは、最良だったのではないかと思う。NRLのFIBはクリーンルームにあつたので、びっくりするくらいダボダボのクリーンルーム用スーツを着て分析を行った(日本のクリーンルームには大概Sサイズのウェアがあるが、NRLにはそんな需要はないようだ)。FIBはカーネギーにもあつたので、やり方を学んだ後は、あのダボダボのスーツを着る必要はなくなった。し

かし、カーネギーにはFIBを使ってTEM用試料を作る人がいないものだから、自分で工夫してやり方を作っていった。やり方を聞いても、やり方を教えられないからやらないほうがいい、というのではなく、やってみたら?と返ってくるのは新鮮で、私はそういうのでやる気が出るタイプだ。

分析では、NIST(National Institute of Standards and Technology)に行くこともあつた。一人でRed Lineというメトロに乗って北に向かい、終点のShady Groveで降りる。初めてNISTに訪問するとき、Edward Vicenzi博士に駅まで迎えに来てもらう手筈になっていた。プレッシャー粒子の入った試料ホルダを抱えて、家の近くの駅からメトロに乗り込み、予定している分析のことを考えながら外を眺めていた。何駅か過ぎてふと気がつくと、さっきまでまばらにいたはずの人がいない。周囲に誰も座っていない。それどころか、車両に誰もいない。運転手のところに行こうと思ったが、なんとメトロは車両間の移動ができないことに気がつく。一人きりで電車で揺られている。これはまずい。何事かと思っている間に、電車は暗いトンネルに入り、あろうことか停車した。私は何をしてかしたのだろう。とにかくまずい。大事な試料が手元にある。約束の時間も迫っている。完全にどうしようもない。そうなる私を取りうる選択肢は一つしかなく、真っ赤な非常用連絡ボタンを押した。"Hello? Ah, I'm on this train..."すると、私だけに乗せた電車がおもむろバックし、駅に戻った。扉が開き、怯えた私が外に飛び出すと、一言もなく、何事もなかったかのように電車は動き出した。思い返せば手前の駅で何かアナウンスをしていたような気もする。Out of service 的なことだったのだろうが、間違いなく一回しか言っていないと思う。そういうことはうんざりするくらい繰り返してくれアメリカ。

4. おわりに

ワシントンにはスミソニアン博物館をはじめ、多くの美術館・博物館もあり、週末は時々散歩に行った(図4)。長い休みにはボルチモアやニューヨークに遊びにいったり、いくつかの国立公園やメキシコへ旅行したりもした。アメリカで暮らすことで、文化の違

いに興味が出て、色々な違いを大切にできるように
なっただと思う。新しい分析技術を学び、人との繋がりが
できたことは大切な財産であるが、それだけでなく、
研究の根っこが世界に広がったという気持ちは、
何ものにも代え難い。DeepLやZoomやChatGPT
がある2023年でも、それは変わらないはずだ。コロ
ナで渡航が困難だった数年が過ぎ、海外での研究に
目を向け始めた学生も多いだろう。同時期に海外で
研究をしていた癸生川さん[1]や藤谷さん[2]の渡航
期も合わせて読むと、例え同じ場所であったって、心
に残ることは実に多様であり、自分がどうなるかなん
て、行ってみないとわからないことがわかるだろう。

参考文献

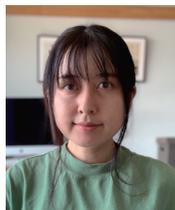
- [1] 癸生川 陽子, 2022, 遊星人 31, 236.
- [2] 藤谷 渉, 2022, 遊星人 31, 309.



図4: ナショナルパークで凧揚げをする様子。写真にあるワシントンモ
ニュメントは2011年の地震の後、修復工事が進められていた。

著者紹介

瀧川 晶



東京大学 大学院理学系研究科
准教授. 東京大学 大学院理学系
研究科 地球惑星科学専攻 博士
課程修了. 博士(理学). 日本学術振
興会特別研究員SPD, 京都大学
白眉センター 特任助教を経て,

2020年3月より現職. 専門は, 宇宙鉱物学・実験宇宙
物理化学. 日本惑星科学会, 日本鉱物科学会, 日本
天文学会に所属.

第15回月惑星探査データ解析実習会を終えて

出村 裕英¹, 月惑星探査データ解析実習会世話人一同

(要旨) 第15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『USGS-ISISの使い方』でした。新型コロナウイルス感染症対策としてzoomとSlackを併用した多地点オンライン実習会の形式を採用していますが、準備に時間が欲しいと言った声を踏まえて、短期集中スタイルから時間をかけて準備し作業時間も十分取れるような分散開催スタイルを初めて試みました。申し込みのあった受講生の内訳は9機関(早稲田大学, 神戸大学, 東京大学, 総合研究大学院大学, 名古屋大学, 放送大学, JAXA, 会津大学, ほか企業1)14名, 講師・TAおよび世話人が2機関(JAXA, 会津大)6名。本実習会は、日本惑星科学会, 神戸大CPS, 会津大学ARC-Spaceの共催で行われました。

第15回の月惑星探査データ解析実習会は、前回同様の zoom/Slack併用のオンラインで行われました。今回のテーマは米国PDSデータの較正・解析ツールとして有名な『USGS-ISISの使い方』でした。以前の対面式実習会と同様にこれまでは短期集中(合宿)スタイルで行われてきましたが、「事前準備や解析の時間を十分に取りたい」という参加者の声を踏まえて、今回初めて時期を分散させた実施スタイルを試みました。事前準備対応回を複数設け、座学をzoom配信とその録画配信の2度ずつ実施し、成果発表会を行いました。録画回も講師・TAは世話人と共に参加しており、ブレイクアウトルームやSlackを活用しつつ、配信途中および録画が終わった後の質疑応答にもリアルタイムで対応しました。オンラインならではの試みです。アンケート結果を見ると好

評でしたので、時期を分散させた実施スタイルも取り入れていきたいと考えています。とはいえ、現地参加ならではの利点も捨て難いので、短期集中ハイブリッド型と時期分散オンライン型それぞれに合ったテーマでの実施を模索していきます。

今回申し込みのあった受講生の内訳は9機関(早稲田大学, 神戸大学, 東京大学, 総合研究大学院大学, 名古屋大学, 放送大学, JAXA, 会津大学, ほか企業1)14名, 講師・TAおよび世話人が2機関(JAXA, 会津大)6名でした。成果発表会は都合がつかず解析結果の資料のみの参加も多かったですが、力作揃いで講師も感嘆するレベルが数多く見られました。なお、本実習会は、日本惑星科学会月惑星探査育英会, 神戸大CPS, 会津大ARC-Spaceの共催で行われました。

開催日程: 2022年分散開催 第1回, 第2回の各2日間は同内容を2回ずつ実施

第1回10月28日(金), 10月31日(月)

第2回11月8日(火), 11月11日(金)

成果発表会12月9日(金)

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

開催場所: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-14

参加状況:

事前準備	10/21, 24, 25, 28, 31	参加者のべ27名, 7機関
#1 HowToUseISIS	10/28	参加者11名, 5機関(世話人&講師3, TA1)
#1 HowToUseISIS	10/31	参加者16名, 6機関(世話人&講師3, TA2)
#2 HowToUseISIS	11/8	参加者10名, 7機関(世話人&講師3, TA1)
#2 HowToUseISIS	11/11	参加者15名, 6機関(世話人&講師3, TA2)
成果発表会	12/9	参加者13名, 8機関(世話人&講師5, TA1)

講師:

佐藤広幸(JAXA/JLPEDA)

主な内容:

#1 ISISの使い方(基本編)

#2 ISISの使い方(応用編)

世話人(アルファベット順):出村裕英, 平田成, 本田親寿, 北里宏平, 小川佳子, 大竹真紀子

参加者アンケート結果

●集中講義スタイルではなく分散開催したことについての意見や感想

自分の都合の良い日程で参加できたのでよかった。

1回の受講でわからなかったことを再度学び直すチャンスがあり, 助かりました。

集中講義と比較して, ツールに慣れ親しむことができた感じがする。

講師との距離感が少し遠く, 質問しにくかったです。

座学を自分の好きなタイミングで受講できたのがよかったです。

●座学実習会座学への意見・要望・感想

自分にはやってみて出てきた画像が正しいものかどうかの判断が難しかったです。やってみた結果の正誤を判断するための基準がPDFの資料にも書いてあると助かります。

難しいですが, 頑張ってます。引き続き宜しくお願い申し上げます。

事前準備以前のところでJAXA内からはSLACK

へのアクセスをブロックされたりしたのが痛かったです。早めにアクセスして事前準備をしっかりとしておくべきでした。

もう少し参加者の反応が欲しかった。

●完全オンラインでの実施に対するご意見・要望・感想

今回のようなアフターフォローが受けられるなら, 自分のペースで進められる分, 完全オンラインの方が利点が大きいのと思った。

限られた時間しかない状況でも参加しやすいので非常に助かりました。

録画を後で見られる形式は非常にありがたかった。仕事との融通が効くし, 後で不明点を見直すこともできたため。

時間が合わせやすく助かりました。ありがとうございました。

環境によりますが, 文字が大きく見えない環境ではPDFの配布がもう少し早いと予めプリントアウトしやすいです。また, PDFは完全な画像よりコピーアンドペーストできるものだと助かります。

困ったときに画面共有でみてもらえるのがいいと思いました。

個別のアシスタントがやりやすいので良いと思う。ありがたいです。

準備不足の者がこのようなことをいうのは恐縮ですが、事前準備終了後に講義のビデオの見直しを随時できるとありがたいです。何回か見直したいです。

カメラを出来るだけオンにして実施してはどうか。参加者の状態がわからない時間が多かったので、悩んでいるのか、離席しているのか、DLを待っている状態なのか、せめてカメラでわかるとよいかもしいない。

日程的な制約がなく参加しやすいです。

●次回以降の希望テーマとしては下記が挙げられました。

火星, Ames stereo pipeline, 探査機から得られるデータを使ったシミュレーション, astropyやOpenCVなどpythonを用いた画像処理。

●実習会への意見・要望・感想(記名)

内田雄揮(修士1年)完璧に使いこなすまでは習熟できませんでしたが、一人ではやろうとも思えなかったものにトライできて良い勉強になりました。この度は本当にありがとうございました。

中山舜介(修士2年)また新しくできることを増やしていただきました。ありがとうございました。

豊川広晴(博士1年)今後の研究に活きる貴重な実習会でした。

西川明男(JAXA職員)宇宙科学の研究者ではないので図々しいかと思いましたが、データ解析をサポートする業務のエンジニアにも貴重な学習の機会を下さり、ありがとうございました。

宮崎理紗(JAXA職員)今回の実習内容で教えていただいた内容をすぐ解析業務に繋がられました。オンラインや録画共有など、柔軟にご対応いただきありがとうございました。

著者紹介

出村 裕英



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

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

「2023年度iSALE講習会」参加報告書

豊田 優佳里¹

2023年6月2日から6月30日にかけて、週1回・全5回の離散日程でiSALE講習会が開催された。iSALEとはImpact-SALE (Simplified Arbitrary Lagrangian Eulerian)の略であり、数値衝突計算コードの一つである。本講習会は国立天文台シミュレーションプロジェクト(以下、CfCA)の支援のもとオンライン形式で開催され、14名(PD 2名, 博士学生2名, 修士学生8名, 学部学生2名)が参加した。講師は黒澤 耕介氏(千葉工業大学惑星探査研究センター), 黒崎 健二氏(神戸大学), 松本

侑士氏(国立天文台CfCA), 伊藤 孝士氏(国立天文台CfCA)の4名に務めていただき、機材の準備や講義動画のアップロード等の支援を加納 香織氏(国立天文台CfCA)に行なっていただいた。図1に講習会最終日に撮影した集合写真を示す。講習会では、衝突物理学と数値流体計算に関する講義、iSALEの実行及び計算出力に関する実践的な演習、補講での宿題解説、各自の計算結果発表会が行われた。講習会の時間割を以下に示す。

■2023年6月2日(金)

- 13:30 - 13:45 講習会の流れについての説明
- 13:45 - 15:30 iSALEの概要と衝突物理学と数値流体計算の基礎1
- 15:30 - 15:35 国立天文台共同利用計算機についての解説
- 15:35 - 15:40 国立天文台共同利用計算機へのログイン方法についての解説
- 15:40 - 16:10 講習会専用サーバ上でのiSALE実行と配布ファイルの解説
- 16:10 - 16:30 iSALE開発チームによる例題の紹介

■2023年6月9日(金)

- 13:30 - 14:45 衝突物理学と数値流体計算の基礎2
- 14:50 - 15:20 iSALE入力ファイル(asteroid.inp)の読み方解説
- 15:20 - 16:00 iSALE入力ファイル(material.inp)の読み方解説
- 16:00 - 16:30 iSALEの計算出力についての解説

■2023年6月16日(金)

- 13:30 - 14:30 衝突物理学と数値流体計算の基礎3
- 14:30 - 15:30 JupyterLab上でのpySALEPlotの解説
- 15:30 - 16:30 初級課題

1. 神戸大学大学院理学研究科

yukari.m.toyoda@kitty.kobe-u.ac.jp

■2023年6月23日(金)

13:30 - 16:30 中級課題

■2023年6月30日(金)

13:30 - 15:30 各自の計算

15:30 - 16:15 各自の計算結果発表

16:15 - 16:30 計算サーバへの申請方法の解説



図1: 2023年度iSALE講習会最終日に撮影した集合写真.

iSALEは天体衝突現象を取り扱える様に、欧米の惑星科学者が提供しているShock physics codeの一つである[1-4]。すでに多くの研究者が使用しており、150報を超える研究成果が査読付き論文として出版されている。iSALEは流体運動だけでなく、物質の弾塑性体応答も同時に解くことができるため、HydrocodeではなくShock physics codeと呼ばれている。更に、岩石の破壊の物理を反映したモデル、金属の物性を反映したモデル、融点付近での流動化を表現したモデル、空隙の圧密モデル、ある閾値を超える応力を受けた際の流動化を表現したモデル等が実装されている。iSALEに関する詳しい情報は今年度のiSALE講習会のページに掲載されているため、詳細を知りたい方はそちらを参照していただきたい¹。

¹2023年度 iSALE 講習会のご案内 | CfCA - Center for Computational Astrophysics, <https://www.cfca.nao.ac.jp/content/isale2023>

本講習会では、講習会の前日から講習会終了1週間後(6/1-7/7)まで国立天文台CfCAの共同利用計算機を一部講習会専用に貸し切って使用した。この共同利用計算機にはiSALEを実行する環境が整備されており、利用者は計算機にリモートログインすることでiSALEの実行及び計算結果の解析を自由に行うことができた。また、対面での学会や研究会が再会されつつある中、本講習会は離散日程でのオンライン講習会の利便性と効率の良さを考慮し、オンラインで開催された。そのため、講義に関する連絡はSlack上で行われ、講義及び補講はCisco WebEx上で実施された。更に、YouTubeにて講義の録画を限定公開しており、講義への参加ができない場合も録画視聴での講習会への参加が可能であった²。また、講義や計算に関する質問は講義前に行われる補講やSlack上で講師陣に聞くことが

²参加者のうち3名が録画視聴での講習会参加であった。

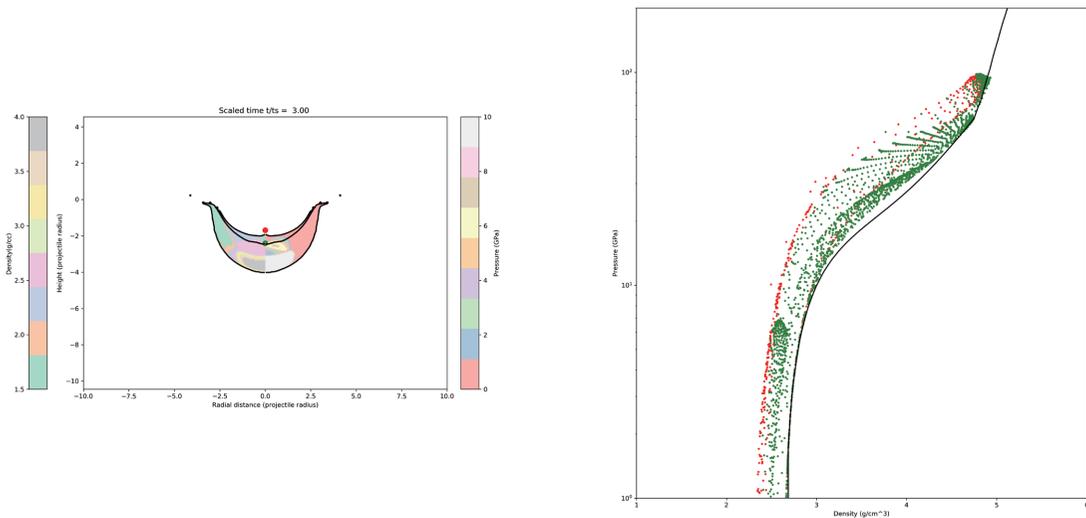


図2: 2023年度iSALE講習会中級課題にて作成した2つの球状天体の衝突計算結果の解析例. 左図は左半分に密度分布, 右半分に圧力分布を可視化して表している. 図中のプロットはそれぞれ衝突した球の重心位置を表す. 右図は個々のトレーサー粒子の密度と圧力の関係を表す. 基準となるユゴニオ曲線を実線で示している.

できた³.

1日目はiSALEの概要, 基本的な衝突物理学, 数値流体計算, 状態方程式に関する講義から始まり, その後国立天文台CfCA共同利用計算機に関する解説が行われた. また, 実践として計算機へのログイン, iSALE開発チームによって準備されている例題ファイルの展開及び実行を行なった. 講義及び実践は講師陣が執筆した講習会テキスト(座学講義編・実践編)をもとに行われた. 講義は衝突現象の数値計算に関して短い期間で理解できるよう体系化されており, 非常に充実した内容であった. また, iSALE開発チームによる例題は全部で16題あり, iSALEで行える計算を知る上で非常に参考になった.

2日目は衝撃波の補足, 弾性体モデル, 塑性体モデル, 降伏応力モデル, 熱弱化モデル, 微小空隙圧密モデルに関する講義が行われた. 実践では, 初級課題の入力ファイル及び出力ファイルをサーバー上で確認しながらの解説が行われた. 入力ファイルの解説によって, iSALEの実行に必要なパラメータについて学ぶことができた. また, 計算の出力ファイルの解説によって, 計算中に発生したエラーの確認方法や

³Slackでの質問に対し, 講習会期間中2営業日以内を目処とした対応が取られていた.

計算時間の見積もり方法について学ぶことができた.

3日目は数値流体計算を行う際の注意事項に関する講義から始まった. 実践では, JupyterLab上でのpySALEPlotの実行, 初級課題の入力ファイル及び描画スクリプトの編集を行った. JupyterLabを用いた解説によって, Python初学者の筆者でも描画スクリプトの処理内容を理解し, iSALEによる計算結果を図として描画する方法について学ぶことができた.

4日目は実践として中級課題の描画スクリプトの編集を行った. これまでは計算結果の全体像を描画する方法について学んできたが, 中級課題ではトレーサー粒子を用いて着目した計算領域を定量的に解析する方法を学ぶことができた. 解説を聞きながら自身の描画スクリプトを編集するのは難しかったが, 適切なタイミングで参加者の進捗状況が確認され, 必要に応じてBreakout roomでの個別指導が実施されるという手厚いサポートが活かしていた. 図2に中級課題で筆者が作成した計算結果の解析例を示す.

5日目は各自の計算及び発表準備, 各自の計算結果発表会, 国立天文台CfCA計算サーバ利用申請方法の解説が行われた. 参加者は自身の興味に合わせて様々な計算を行っており, 非常に聞き応え

のある発表会であった。講習会は離散日程であるため、参加者は自身の計算にじっくり取り組めたようであった⁴。最終日は発表会の後にオンライン懇親会が行われ、講師や他の参加者と親睦を深めることができた。

以上、2023年度iSALE講習会への参加報告を行った。筆者は実験系出身者であり数値計算初挑戦であったが、十分に付いていける初学者に優しい講習会であったと感じた。その理由は以下の通りである。一つ目は、講習内容の予習復習を行う環境が整っている点である。講習会は離散日程であるため、自習を行う時間が十分に確保できた。また、講義や実践内容を細かく解説しているテキストがあること、YouTubeで講義の内容が視聴できることも自習を行う上で非常に有用であった。二つ目は、講義ごとに宿題が用意されている点である。実際に自分の手を動かして宿題に取り組むことで、講義内容を確実に習得することができた。また、自身で宿題を完遂する

ことができなかったとしても、授業前に行われている補講に参加し、解説を聞くことで問題を解消することができた。三つ目は、講習会のゴールとして自身の行いたい計算を行う発表会が設定されている点である。講習会期間中はSlackでの質問を行えるため、参加者は積極的に自身の計算に関する助言を求めていた。このように自身の行いたい計算のために試行錯誤する経験によって、iSALEを実行する知識や技能を十分に身につけることができた⁵。

最後に、本講習会の開催にあたりご尽力いただいた講師の黒澤 耕介氏、黒崎 健二氏、松本 侑士氏、伊藤 孝士氏に感謝致します。また、国立天文台 CfCAの加納 香織氏、波々伯部 広隆氏には機材の準備及び講習会中における細やかなフォローをしていただきました。この場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Amsden, A. et al., 1980, Los Alamos National Laboratories Report, LA-8095: 101p.
- [2] Ivanov, B. A. et al., 1997, International Journal of Impact Engineering 20, 411.
- [3] Collins, G. et al., 2004, MAPS 39, 217.
- [4] Wünnemann, K. et al., 2006, Icarus 180, 514.

⁴筆者はiSALEを用いた花崗岩球の低速度衝突の計算を実行したが、花崗岩球が大きくダメージを受けてしまう結果となってしまう、実験を再現することができなかった。衝撃波の発生しないような低速度衝突を扱う場合は、工夫が必要であるようだ。

⁵勿論、論文公表に耐えるような計算を行うにはまだまだ修行が必要である。

著者紹介

豊田 優佳里



神戸大学大学院理学研究科学術研究員。神戸大学大学院理学研究科惑星学専攻博士課程修了。博士(理学)。研究テーマは多孔質氷の低速度衝突過程に関する実験的研究。

2023年度 宇宙科学奨励賞公募のご案内

公益財団法人 宇宙科学振興会¹

公益財団法人宇宙科学振興会では、宇宙科学分野で優れた研究業績を挙げ、将来の宇宙科学の発展に大きな役割を果たすことが期待される若い研究者を顕彰し、宇宙科学奨励賞を授与いたします。ここに2023年度の第16回宇宙科学奨励賞候補者のご推薦を募集いたします。推薦要綱の詳細は当財団のホームページ(<http://www.spss.or.jp>)に揭示しておりますが、当奨励賞の概要は以下の通りです。皆様の周りで優れた業績を挙げ将来の活躍が期待される若手研究者をご存知の際には、是非ともご推薦いただきますようお願い申し上げます。

●表彰の趣旨

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

●授与機関

公益財団法人 宇宙科学振興会

●候補者

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

●業績の審査

1.公益財団法人 宇宙科学振興会 事務局
admin@spss.or.jp

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

●賞の内容

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

●推薦締切日

2023年10月31日(火)必着。

●表彰式

選考結果は2024年1月に推薦者と受賞者に通知するとともに、当財団ホームページにおいて発表する。その後2024年3月初旬に表彰式を行い、受賞者には受賞対象となった研究に関する講演をして頂く。

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

●お問い合わせ先および推薦書送付先

〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台3-1-1
公益財団法人宇宙科学振興会 事務局
E-mail: admin@spss.or.jp
Tel: 042-751-1126(火、木)

JSPS Information

- ◇日本惑星科学会第158回運営委員会議事録
- ◇日本惑星科学会第159回運営委員会議事録
- ◇日本惑星科学会第59回総会議事録
- ◇日本惑星科学会賛助会員名簿
- ◇日本惑星科学会主催・共催・協賛・後援の研究会情報

◇日本惑星科学会第158回運営委員会議事録

期間:2023年4月28日(金)～5月9日(火)

議題:EPS誌の会計業務契約と次年度の科研費申請について

運営委員会委員:

出席(23名)

竝木 則行, 今村 剛, 中村 昭子, 玄田 英典, 保井 みなみ, 奥住 聡, 関根 康人, 大竹 真紀子, 千秋 博紀, 小林 浩, 田中 秀和, 諸田 智克, 瀧川 晶, 臼井 寛裕, 三浦 均, 横田 勝一郎, 中本 泰史, 亀田 真吾, 関 華奈子, 村上 豪, 百瀬 宗武, 野村 英子, 癸生川 陽子

欠席(0名)

成立条件:期間内に議決返信のあった者を委員会出席とみなす

議決方法:上記期間内に steering@wakusei.jp 宛に投票

議題 1:

EPS 誌会計業務契約の委託について, 新しい業者との契約の了承を求める。

経緯:

- ・ 昨年度まで会計関連業務は, 五学会とUnibio Press とで委託契約をしていた。
- ・ 昨年度終盤にUnibio Press から, 業務の縮小化のため昨年度末までで契約を打ち切りたいという申し出があった。

現状と今後:

- ・ Unibio Pressとの協議の結果, 次の契約相手が見つかるまでとの条件で延長することになった。今期中途での打ち切りを織り込んだうえで, 現契約を自動更新する。
- ・ 次の契約相手についてEPS運営委員会で検討し, (株)プロアクティブに今年度途中より委託する方向とした。

年額96万円+税程度になる予定である。※(株)プロアクティブ:神戸に本社のある業者。SGEPSSの事務業務委託先。

審議結果:

議案は原案のとおり承認された(可23・否0)。

議題2:

EPSの次年度科研費(今回)の申請は、SGEPSSの単独申請を考えている。その了承を求める。

今後:

各学会での承認を経て(JpGUを目処に)、科研費申請に関するアイデアの吸い上げを夏ごろまでに行う。

審議結果:

議案は原案のとおり承認された(可23・否0)。

以上

◇日本惑星科学会第159回運営委員会議事録

日時:2023年5月19日(金)18:30-20:30

場所:オンライン開催

運営委員:

出席者 16名

竝木 則行, 今村 剛, 中村 昭子, 玄田 英典, 保井 みなみ, 奥住 聡, 大竹 真紀子, 千秋 博紀, 小林 浩, 田中 秀和, 諸田 智克, 三浦 均, 横田 勝一郎, 亀田 真吾, 村上 豪, 百瀬 宗武

欠席者7名

白井 寛裕, 中本 泰史, 関 華奈子, 関根 康人, 瀧川 晶, 野村 英子, 癸生川 陽子
(委任状:3通)

オブザーバー:

寺田 直樹(2022年学会賞選考委員長)

藪田 ひかる(2023年秋季講演会組織委員長)

門屋 辰太郎(2023年連合大会プログラム委員)

佐伯 和人(財務専門委員)

藤谷 渉(総務専門委員)

議題・報告事項:

1. 日本地球惑星科学連合:プログラム委員会(門屋 連合大会プログラム委員)
 - ・ 2023年度JpGUにおける学協会セッションは3つ
 - ・ 来年度の委員は伊藤 祐一会員, 吉田 辰哉会員

- ・ 来年度の惑星科学セッションのコンビーナ3人は承諾済
2. 2022年度最優秀研究者賞について(寺田 2022年学会賞選考委員長)
- ・ 最優秀研究者賞の選考経過について説明がなされた
 - ・ 応募者は3名うちキャリアオーバーは2名
 - ・ 応募資格緩和についての説明がなされた(今年はそれにより応募者が増えたわけではない)
 - ・ 4月27日のオンラインによる選考委員会において、野津翔太会員を候補者として決定した
 - ・ 野津会員は学生発表賞も取っていたが、その以前および以後両方の素晴らしい業績により受賞候補者として選出された
 - ・ 上記は本運営委員会において承認された
3. 学会賞選考委員の入れ替え(保井 総務専門委員長)
- ・ 2023年度学会賞選考委員について、3名は継続、5名は新規(再任予定の1名が今年の審査に参加困難なため)
 - ・ 委員長:黒川 宏之会員, 委員:癸生川 陽子会員(1年のみ), 檜村 博基会員, 鈴木 絢子会員(以上, 継続), 百瀬 宗武会員, 亀田 真吾会員, 山本 聡会員, 鎌田 俊一会員(以上, 新規)
 - ・ 上記は本運営委員会において承認された
4. 2023年秋季講演会について(藪田 2023年秋季講演会組織委員長)
- ・ 活動計画についての報告がなされた
 - ・ 会期:2023年 10月11日(水)-13日(金), 12日に総会と懇親会
 - ・ 開催形式:基本的に対面, 状況に応じてZoom利用する可能性あり
 - ・ 場所:口頭発表会場 広島市文化交流会館, ポスター会場 JMSアステールプラザ, 懇親会場 ホテルメルパルク広島
 - ・ 7月3日:参加申込開始, 7月24日:発表申込締切, 9月1日:参加申込締切
 - ・ 参加費:正会員 5,000円, 学生会員 3,000円, 非会員 6,000円, 懇親会費 7,000円
 - ・ 今年は一般講演会なし
 - ・ 懇親会費を学生は低額にするか, 今後検討
5. 今後の秋季講演会の開催形態について(玄田 行事部長)
- ・ 発表時間(一般講演)が年々短くなってきている(去年は8分)旨の説明がなされた
 - ・ 当面はシングルセッションを継続, パラレルはLOCの負担が大きい, 惑星科学という特性上シングル希望の意見が強い
 - ・ 発表時間(Q&Aを含む)を10分以上確保するためには(発表数が多い場合)セレクションの必要あり, セレクションする場合は遊星人に明記する
 - ・ 2023年度の広島開催では試験的にSOCを立ち上げる, それ以降はSOCもしくは投稿順によりセレクション
 - ・ これまでの経験から必ずしもいつもセレクションをしなければならないわけではなかった
 - ・ 投稿順でのセレクションはレベルの低い発表をはじけない, そのため今年はSOCを立ち上げて少し様子見
 - ・ セレクションするとポスター会場の確保が困難?日にちによって貼り替えが必要かも
 - ・ これまででもLOCがセレクションしたことはある(例えば旭川), 旭川LOC(鎌田会員)へコンタクトしてみる
 - ・ セレクションについては総会では(採めるかもしれないので)話さない
 - ・ 上記, 今後の活動指針は本運営委員会において承認された

6. 第16期下期決算(佐伯 財務専門委員)

- ・ 決算報告がなされた
- ・ まだ監査は終わっておらず、総会までには監査を終わらせたい
- ・ イーサイドが3月で撤退し木田さんが独立したことにより、伝票がバラバラに来て作業量が多い
- ・ 会費収入はほぼ例年通り(データベースでは一般会員の会費収入になぜか端数が出ている, 入金額と通帳の額は一致していることは確認している)
- ・ 学会誌出版事業収入もほぼ例年通り
- ・ 昔使っていたみずほ銀行に振り込まれ続けていた遊星人著作権料を今年初めて雑収入に入れた
- ・ 事務委託費という支出がなくなった(これまではイーサイドに委託)
- ・ 業務委託費として木田さんの給料と経費を扱う
- ・ 秋季講演会事業料支出は同収入と同額となった
- ・ 管理費(事務局関連), レンタルオフィス代, レンタルサーバー代などが新たに必要になった
- ・ 学会賞特別会計は例年とほぼ同じ
- ・ 監査委員から、「木田さんへお願いすることを契約書を作って明文化するように」とのコメントあり
- ・ 以上は総会にて承認を行う

7. 第17期上期予算執行状況(横田 財務専門委員長)

- ・ 会計中間報告がなされた
- ・ 収入, 支出ともにほぼ予算案通り
- ・ 収入: 支払済み会員数 369名, 未納会員数: 226名

8. ウェブサーバのメモリ増設について(千秋 情報化専門委員長)

- ・ 2022年度秋季講演会の前後でウェブサーバの反応がとても遅くなり, メモリ不足ではないかと判断
- ・ 対応として, メモリを1Gから4Gに増設したい旨の提案がなされた(2000円/月程度の出費)
- ・ メモリを増設してもいずれ溢れるかもしれないが, その周期を長くはできるだろう
- ・ 動作が重く感じたら再起動するという手もあるが, 活発に利用されている状況では落とせない
- ・ 増設費用は月割りなので, 秋季講演会前後に増設するというのも手ではある
- ・ もう少し様子見をして秋季講演会前に増設する, という提案がなされ, 本運営委員会において承認された

9. 次期EPS編集委員長の選考委員の選出について(大竹 欧州誌専門委員長)

- ・ 3名推薦する必要あり, 今年度中に選考したいので夏までに選考委員を出したい
- ・ 会長・副会長・大竹欧文誌専門委員長の4名で推薦する旨の提案がなされ, 本運営委員会において承認された

10. 遊星人の発行状況報告(三浦 編集専門委員長)

- ・ つつがなく発行されている
- ・ 新連載が3つほど企画されている
- ・ 編集幹事は瀧川会員から関口会員へ引継がれた

11. 第16期下期活動報告, 第17期上期活動計画(保井 総務専門委員長)

- ・ 第16期下期活動報告として, JpGU, 秋季講演会, 遊星人, EPS, 最優秀研究者賞, 最優秀発表賞・優秀発表賞, 惑星探査データ解析実習会, 共催・協賛・後援, 学会運営(総会や運営委員会), 学会員数などについて説明がなされた

- ・ 第17期上期活動計画として、JpGU、秋季講演会、遊星人、EPS、最優秀研究者賞、フロンティアセミナー、惑星探査データ解析実習会などについて説明がなされた
12. 入退会状況報告(保井 総務専門委員長)
- ・ 正会員一般:508名, 正会員学生:82名, シニア会員:42名(少し増えた), 賛助会員:3名
13. 第59回総会の議長・書記の推薦について(保井 総務専門委員長)
- ・ 議長に片岡章雅会員, 書記に細野七月会員が推薦され, 本運営委員会において承認された
14. その他
- ・ 事務局新体制について会長などがチェックして, 各種委員にしわ寄せが行かないようにする努力が必要
 - ・ 会長の所信表明として, 他学会との交流(特に若手の交流)を増やす活動を行っていきたい
 - ・ 専門委員会の委員長を引継ぎについて, 今期のうちに計画的に引継ぎをし, 次の運営委員会で選考されるようにする
 - ・ steering MLにたくさんの人が残っているのが問題なので, 過去の会長・副会長くらいを残してあとは除く
 - ・ 学生賞審査への協力要請, 惑星科学会側はSGEPSS側に比べてコメントが少ないのでなるべくコメントを

以上

◇日本惑星科学会第59回総会議事録

日時:2023年5月22日(月) 12:30-13:30

場所:オンライン開催

正会員数:590名

定足数:59名

参加人数:84名(投票時参加人数は103名)

委任状:88通(議長:83通, はしもと じょーじ会員:2通, 保井 みなみ会員:2通, 中村 昭子会員:1通)

1. 開会宣言

保井総務専門委員長が開会を宣言した。

2. 議長団選出

運営委員会からの推薦で議長に片岡 章雅会員, 書記に細野 七月会員が選出された。

3. 議事

3.1. 審議事項

・第16期下期(2022年度活動報告)(竝木会長)

日本地球惑星科学連合2022年大会及び秋季講演会の開催状況などの説明がなされた。学会誌、欧文誌の発行が問題なく行われたことが説明された。最優秀発表者賞、優秀発表賞の受賞があった事が説明された。惑星科学フロンティアセミナーの開催などがあった事が説明された。

・第17期上期(2023年度)基本方針(竝木会長)

日本地球惑星科学連合2023年大会が現在開催中である事及び2023年度秋季講演会が開催予定などの説明がなされた。学会誌、欧文誌の発行予定がある事が報告された。最優秀発表賞、優秀発表賞がある事が報告された。フロンティアセミナー及び探査データ解析実習会が開催予定である事が報告された。竝木会長からの所信表明演説が行われ、関連学会との連携の継続、体制・組織の報告などがされた。

・第16期下期(2022年度)会計決算報告(佐伯財務専門委員)

2022年度はイーサイドが撤退したため、元タイーサイドで働いていた木田氏に事務委託を行ったなどの説明がなされた。監査委員の方から木田氏の定量的に明確な契約書を作るようにと意見されたなどの説明がなされた。おおよそ例年通りの収入であったが、ただし5000円の端数があり、本来一般会員は1万円単位なのでこの端数は出ないはずなので、原因調査中との報告がなされた。この原因について調べる事で監査合格となった。また、2011-2021年分の過去著作権料が入った口座が発見されたため、これを現在使っている口座に移動したとの報告があった。

・会計監査報告(大概会計監事)

終始決算に誤りの無い事が報告された。

・その他

特になし。

・質疑応答及び討論

イーサイドの撤退に関して管理費の増額はどれくらいか、改善の見通しはあるか、会費の値上げなどの可能性はあるかとの質問がなされた。佐伯財務専門委員より、現行の体制はこれまでとほぼ変わらないコストで動いているが、これから外部委託を増やすと、増額の可能性があるとの回答がなされた。

・採択

審議事項の採決が行われ、賛成: 191(うち出席者103)、反対: 0、保留: 0により採択された。

3.2. 報告事項

・第17期上期(2023年度)予算執行状況(横田財務専門委員長)

2023年度予算執行状況に関して予定通り執行されている事が報告された。

・2022年最優秀研究者賞受賞者発表(寺田学会賞選考委員長)

野津 翔太会員が最優秀研究者賞に選ばれた。

・2023年秋季講演会について(薮田2023年秋季講演会組織委員)

2023年度秋季講演会の開催計画について報告がなされた。開催期間は2023年10月11日(水)-13日(金)であり、広島市内(口頭は広島市文化交流会館、ポスターはJMSアステールプラザにて)で対面を主に開催を予定していると報告がなされた。7/3から参加申込開始予定との報告がなされた。

・各種専門委員会・作業部会等報告

なし。

- ・その他
特になし.

4. 議長団解任

5. 閉会宣言

保井総務専門委員長が閉会を宣言.

以上

◇日本惑星科学会賛助会員名簿

2023年9月25日までに、賛助会員として本学会にご協力下さった団体は以下の通りです. 社名等を掲載し、敬意と感謝の意を表します. (五十音順)

- ・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.

* 2023/8

** 2023年8月7日(月)-8月11日(金) Asia-Pacific Regional IAU Meeting 2023 (APRIM2023)

- (a) ピックパレットふくしま
- (b) 国際天文学連合 (IAU), 日本学術会議, 会津大学, 日本天文学会
- (c) 問い合わせ先(<https://aprim2023.org/contact/>)

** 2023年8月8日(火)-8月10日(木) 第51回可視化情報シンポジウム

- (a) グランドパーク小樽
- (b) (一社)可視化情報学会
- (c) 第51回可視化情報シンポジウム・事務局 (E-mail: [symp2023\[at\]vsj.jp](mailto:symp2023[at]vsj.jp))

* 2023/9

** 2023年9月20日(水)-9月22日(金) 日本流体力学会 年会2023

- (a) 東京農工大学 小金井キャンパス
- (b) 日本流体力学会
- (c) 年会2023実行委員会 (E-mail: [jsfm2023\[at\]nagare.or.jp](mailto:jsfm2023[at]nagare.or.jp))

編集後記

こんにちは。編集幹事の関口です。本号2023年9月25日号は8月4日が私の編集入稿締め切り日でした。この時期北の大地旭川でも今年は連日の30℃超えです。夏真っ盛り。自宅裏の"Farm Sekiguchi"でもやっと夏野菜の遅い収穫期が始まりました。その年の夏野菜収穫開始を告げる、年に一度のニンニク大収穫。78株8月2日に全部採り切り、今朝はミニトマトが22個、ピーマン4個、万願寺トウガラシ8本、ナス2本、キュウリ5本が採れました。毎日の収穫、このあと半月後には今日の数倍の取量になるはず。毎朝早起き。雑草取りとトマトの脇芽取り、ズッキーニの人工授粉が朝の日課。キュウリとズッキーニはほんとに毎日収穫しないと1日おいただけでお化けサイズ

になってしまいます。炒め物や浅漬け、もろみ味噌を付けて生で。そして毎晩おビール。「トマトが赤くなると医者が青くなる」と言うそうですが、畑仕事と野菜食の私の夏はとっても健康的。否、欠かさぬ晩酌alcoholは不健康な日々なのか。夏、晴耕雨読(関口)。

[以下Farm Sekiguchi今年の作物一覧!? ナス科: 中玉・ミニトマト69株!, ナス10株, ピーマン6株, 万願寺トウガラシ6株, ジャガイモ8株, ウリ科: キュウリ8株, カボチャ7株, ズッキーニ1株, ネギ属: ニンニク78株, 葉ネギ4株, 長ネギ100本位, ニラいっぱい, その他の種: ラッカセイ8株, ミョウガ1株, アスパラガスいっぱい, ニンジンいっぱい, テーブルビートいっぱい]

編集委員

三浦 均 [編集長]

関口 朋彦 [編集幹事]

荒川 創太, 上根 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, 瀧 哲朗, 瀧川 晶, 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

2023年9月25日発行

日本惑星科学会誌 遊・星・人 第32巻 第3号

定 価 一部 1,925円(税込・送料込)

編集人 三浦 均(日本惑星科学会編集専門委員会委員長)

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

発行所 日本惑星科学会事務局

〒604-8206

京都市中京区新町通三条上ル町頭町112 菊三ビル2階 201号室(Ogyaa's御池内)

Tel: 075-708-5984

e-mail: staff@wakusei.jp

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

本誌に掲載された寄稿等の著作権は日本惑星科学会が所有しています。

複写される方へ

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

1. 原稿の様式

○投稿原稿：

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

○最終稿：

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

投稿原稿送り状の雛型および各チェックリストはウェブサイトで

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

2. タイトル

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

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

3. 要旨

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

4. セクション

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

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

5. 述語

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

6. 字体

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

7. 句読点

句読点は全角の“,”と“.”を用いる。

8. 図、表

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

図作成のガイドライン：

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

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

9. 脚注

脚注は“1”などの記号をつける。

10. 文献の引用

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

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

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

参考文献

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

11. 投稿原稿送付先

遊星人編集長 三浦 均
 e-mail : chiefeditor@wakusei.jp
 電子メールで送付できない場合は下記へ郵送
 日本惑星科学会事務局
 〒604-8206
 京都市中京区新町通三条上ル町頭町112
 菊三ビル2階 201号室(Ogyaa's御池内)
 Tel: 075-708-5984
 e-mail: staff@wakusei.jp



The Japanese Society for Planetary Sciences

