令和2年9月25日発行 年4回発行 第29巻3号 ISSN 0918-273X













●特集「古今未曽有の日本の月/火星 地下世界探査 (UZUME)計画」
●2019年度最優秀発表賞受賞論文
●連載:系外惑星,あかつき, 木星・氷衛星へ,海外研究記

The Japanese Society for Planetary Sciences

日本惑星科学会誌 「遊・星・人」 投稿規定

日本惑星科学会

1. 投稿可能な記事

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

2. 投稿資格者

日本惑星科学会会員及び編集委員会が適当と認 めた者.

3. 投稿原稿及びその送付

①原則として,投稿原稿はワープロなどにより電子 的に作成されたものであること.

また, 原稿のファイル形式については「学会誌原 稿作成の手引」に従うこと.

- ②投稿に際しては、原稿を日本惑星科学会編集専門委員会委員長宛に送付すること、(連絡先は「学会誌原稿作成の手引」参照.)送付方法は、 E-mailによる送付が望ましい.但し、プリントアウトした原稿2部の郵送による送付も可とする.な お郵送された原稿は原則として返却しない.
- ③編集委員会が原稿を受領すれば、その日を受領 日として、受領した旨投稿者に通知される.

4. 査読及びその後の取扱い

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

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

5. 校正

校正は投稿者の責任において行う,また,校正は原 則として誤植の訂正に限る.

6.別刷り

論文の PDF ファイルを提供する.

7. 著作権

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

8. 倫理規定

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

9. 投稿料·出版費

原則として無料.

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

日本惑星科学会誌 遊·星·人

第29巻 第3号

目 次

卷頭言 金田 英宏	103
「2019年度最優秀発表賞受賞論文」 太陽系外縁天体の衛星形成と潮汐進化 荒川 創太, 兵頭 龍樹, 庄司 大悟, 玄田 英典	104
特集「古今未曽有の日本の月/火星地下世界探査 (UZUME)計画」	
古今未曽有の日本の月/火星地下世界探査 (UZUME)計画	
春山 純一, 河野 功, 西堀 俊幸, 岩田 隆浩, 山本 幸生, 桜井 誠人, 他3名	115
古今未曽有の日本の月/火星地下世界探査 (UZUME)計画におけるアウトリーチ活動の歩みとその成果 新井 真由美,藤原 靖,山田 竜也,河野 功,春山 純一	122
月縦孔地形による放射線防護効果 内藤 雅之, 長谷部 信行, 天野 義春, 小平 聡	132
系外惑星「遠い世界の物語」その13 ~系外惑星大気中の鉱物雲~ 大野 和正	138
一番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦 その43 ~明日の金星は今日より涼しい?~ Y. J. Lee	150
みんなでふたたび木星へ, そして氷衛星へ その5 ~ガニメデレーザ高度計GALAで測る氷の世界と地下の海~	
塩谷 圭吾, 木村 淳, 小林 正規, 荒木 博志, 野田 寛大, 他6名・1チーム	153
遊星人の海外研究記 その3 ~フランスで生活する楽しさとちょっとの苦労~ 小玉 貴則	171
「第5回iSALE講習会」参加報告 嶌生 有理	176
2020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	180
JSPS Information	181

Contents

Preface	H. Kaneda	103
Formation and evolution of moons around trans-Neptunian objects		
S. Arakawa, R. Hyodo, D. Shoji, ar	nd H. Genda	104
Unprecedented Zipangu Underworld of the Moon/ Mars Exploration (UZUME) program		
J. Haruyama, I. Kawano, T. Nishibori, T. Iwata, Y. Yamamoto, M. Sakurai, an	d 3 authors	115
The progress of outreach activity of the UZUME (Unprecedented Zipangu Underworld of the Moon/Mars Exploration M. Arri, V. Erijeren, T. Verrada I. Verrage and J.	n) program	199
M. Arai, Y. Fujiwara, T. Yamada, I. Kawano, and J	. Haruyama	122
Radiation shielding by the Lunar vertical hole	IS Kadaina	129
	I S. KOUAIFA	132
Tales of distant exoplanet worlds (13) – Mineral clouds in exoplanetary atmospheres –	K Ohno	138
	II. Onno	100
Road to the first star: Venus orbiter from Japan (43) – Is tomorrow cooler than today on Venus? –	Y. J. Lee	150
To Jupiter again together and to icy moons (5) - Measuring icy world and internal ocean with the Ganymede Laser Altimeter (GALA) –		
K. Enya, J. Kimura, M. Kobayashi, H. Araki, H. Noda, N. Namiki, 5 authors	and 1 team	153
Letter from planetary people working abroad (3)		
- Pleasures with a bit of troubles of living in France -	T. Kodama	171
Report on "5th iSALE Short Course"		
	Y. Shimaki	176
Announcement of public offering for Space Science Incentive Award		
Society for Promotion of Space	ace Science	180
ISPS Information		191
Jor o mitor mation		101

卷頭言

巻 頭 言

巻頭言の執筆を承りました名古屋大学の金田です. 私自身, 惑星科学会に所属しておらず, 専門は赤外線天文学(銀河や星間物質)のため, 編集長から依頼を受けたときは躊躇しました が, 学会員でなくても巻頭言を書けるという貴学会の懐の深さに感銘を受け, お引き受けしまし た.

私はもともとは太陽活動に興味があり、「ようこう」から研究が始まりました. その後、「あすか」 による銀河面X線リッジ放射で学位をとり、「あかり」で赤外線に移籍しました. これまで25年 以上, JAXA宇宙科学研究所(ISAS)のプロジェクトに深く関わっています. 現在は長年の夢 であるSPICA実現を目指し、プロジェクト推進と大学での研究教育との二足の草鞋を履いてい ます. 若いころから過酷なISASの衛星プロジェクトで鍛えられたおかげで、今の自分があると 思います. その恩返しという意味で、今はいろんな形で惑星探査ミッションにも関わらせて頂い ています. 編集長とお知り合いになったのも、Destiny+を通してでした.

科学面では、名大は「あかり」中間赤外線全天画像の作成を担当したのですが、私にとって最 初は邪魔ものであった前景の太陽系ダスト放射の存在が、色々と調べていくうちに銀河ダスト・ 星間ダストとの関連性に強く興味を持つようになり、私が指導した学生の一人は惑星間ダストで 学位を取りました.近年は、千葉工大の木村宏さんが主宰するダスト国際会議のコアメンバー として開催に協力し、知見・交流を広げています.また、SPICAは超高感度な赤外分光により、 SPICA科学3本柱の一つである惑星系形成の研究(円盤ガス散逸・雪線・ダスト進化)のみな らず、太陽系内・系外の惑星大気分光の研究においても大きな貢献ができます.

惑星科学はさまざまなミッションが立ち上がって、世の中の人気もあって勢いを感じます. 私 は宇宙科学に携わる一員として、現状を心強く感じると同時に、うらやましくもあります. ただ、 衛星搭載の装置技術という点では、天文ミッションで築いてきた実績はまだまだ誇れるものが あり、色々とお力になれると思います. 今後も天文学と惑星科学が共存共栄の形で支え合える よう、自分はその一助となれればと思います.

金田 英宏 (名古屋大学)

「2019年度最優秀発表賞受賞論文」 太陽系外縁天体の衛星形成と潮汐進化

荒川 創太^{1,2}, 兵頭 龍樹³, 庄司 大悟^{4,3}, 玄田 英典⁴

2020年3月30日受領, 査読を経て2020年6月3日受理

(要旨) 直径1,000 km以上の太陽系外縁天体は現在6つ発見されており,近年の観測から,これらの大型の外縁天体は衛星を持つことが明らかになった.我々は,巨大衝突とその後の潮汐進化によってこれらの衛星系が形成されたと考え,巨大衝突と潮汐軌道進化の数値計算によって観測と整合的な衛星系が形成される条件を調べている.本稿では,外縁天体の形成・集積機構と1,000 kmサイズの外縁天体の熱史の関係,巨大衝突による衛星形成に対する分化状態の影響,そして潮汐による衛星系の軌道進化,の3つの話題について議論する.離心率の小さい衛星系が多数存在するという観測事実から,我々は,太陽系外縁部においては100 kmサイズ以上の微惑星が太陽系初期数百万年以内に形成され,これらが衝突を繰り返すことで1,000 kmサイズの外縁天体を形成し,さらに巨大衝突によって衛星系も作られたというシナリオを提示する.

1. はじめに

太陽系の外縁部,海王星の軌道よりも外側には多 数の小天体が存在し,これらの小天体は太陽系外縁 天体,あるいは単に外縁天体と呼ばれる.1992年に (冥王星を除いて)最初の外縁天体が発見 [1] され て以降,現在では2,500天体以上発見されている¹. 外縁天体は太陽系の外側領域における微惑星・惑 星形成の歴史を記録していると考えられており,そ の集積過程を理解することは重要である.

現在発見されている外縁天体のうち, 直径1,000 km以上のものは7つある²(冥王星, カロン, エリ ス, ハウメア, マケマケ, Gonggong³, クワオアー. カロンは冥王星最大の衛星である). そして, カロン を除く6つの天体は全て衛星を持つことが知られて いる [3, 4]. これらの衛星系の質量比は1/10から 1/1,000程度であり、衛星の離心率は0.1程度かそ れ以下のものが多い(表1).これらの衛星系の形成 機構についてはよくわかっていない部分も多いが、 特に冥王星・カロン系の形成機構として巨大衝突が 有力視されている [6].また、大型の外縁天体表層 の色の多様性も巨大衝突によって生み出された可能 性があり [7]、冥王星だけでなく他の1,000 kmサイ ズの外縁天体も巨大衝突を経験し、その際に衛星系 を形成したのかもしれない.

巨大衝突とその後の潮汐進化によってこれらの衛 星系が形成されたとして、観測されている衛星系の 特徴から、衝突前の外縁天体の内部状態(分化状 態,温度など)や集積過程に対してどのようなことが 言えるだろうか.後述(2.3節)するように、1,000 km サイズの外縁天体の巨大衝突においては衝突による

 ^{1.}東京工業大学理学院地球惑星科学系
 2.国立天文台
 3.宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
 4.東京工業大学地球生命研究所sota.arakawa@nao.ac.jp

¹散乱円盤天体やケンタウルス族も含めると3,871天体発見されて いる(2020年3月19日現在). Minor Planet Center website (https://minorplanetcenter.net/mpc/summary) を参照. ²セドナの直径は995±80 km と求められており [2], 本研究では 直径1,000 km以上の外縁天体に含めないものとした. なお, セド ナに衛星は見つかっていない.

³2007 OR₁₀は2020年2月5日にGonggongと命名された.

本体 (半径)	_{最大の} 衛星 (半径)	質量比	本体の自転	衛星の自転	公転周期	離心率
冥王星 (1187 km)	カロン (606 km)	1.2 × 10 ^{−1}	153.2 時間	153.2 時間	153.2 時間	5 × 10-5
エリス (1163 km)	ディスノミア (350 km)	3 × 10-2	25.9	(不明)	379	< 4 × 10 ⁻³
ハウメア (816 km)	ヒイアカ (150 km)	4.5 × 10−³	3.91	9.8	1187	5 × 10-2
マケマケ (715 km)	<i>MK 2</i> (90 km)	2 × 10-3	7.77	(不明)	300–16000	(不明)
Gonggong (770 km)	Xiangliu (180 km)	1 × 10-2	22.4 or 44.8	(不明)	605	0.3
クアオワー (535 km)	ウェイウォット (40 km)	4 × 10-4	8.84 or 17.7	(不明)	289	0.15

表1: 直径1,000 km以上の太陽系外縁天体とその衛星(質量比,自転・公転周期,離心率).

温度上昇の効果は限定的であり,衝突直後の衛星 や中心天体の内部状態は衝突前の状態を反映する. そして,潮汐による軌道進化は衛星と中心天体の内 部状態に強く依存するため,観測されている衛星系 の軌道から外縁天体の熱史,集積史を制約すること が可能であると期待される.

本稿では、外縁天体の形成・集積機構と1,000 kmサイズの外縁天体の熱史の関係、巨大衝突によ る衛星形成に対する分化状態の影響、そして潮汐 による衛星系の軌道進化、の3つの話題について、 我々の理論研究の結果をもとに議論する.2章では 外縁天体の集積過程として提案されている様々なシ ナリオについて、形成される1,000 kmサイズの外縁 天体がどのような内部状態になると期待されるか、 簡単な熱進化の計算からの見積もりを示す.3章で は巨大衝突によってどのような衛星が形成されるの か、数値流体シミュレーションによって調べた結果 を紹介する.4章では巨大衝突によって形成された 衛星系がその後潮汐によってどのように軌道進化す るのか、粘弾性モデルを用いた熱進化と軌道進化の カップリング計算の結果から議論する.

2. 外縁天体の集積過程と熱進化

標準的な惑星形成シナリオによると,惑星は以下 の3段階プロセス,つまり,(1)原始惑星系円盤にお ける固体微粒子の合体成長,(2)mmサイズに成長 した固体微粒子凝集体の集積による微惑星形成, (3) そして微惑星の集積, によって形成されたと考 えられている. また, 近年では微惑星に固体微粒子 凝集体が集積することで惑星へと成長するシナリオ も提案されている.太陽系外縁天体の形成に関して も、大質量微惑星円盤における1 kmサイズの微惑 星の集積 [8], 低質量微惑星円盤における固体微 粒子凝集体の集積 [9] , 原始惑星円盤中でのスト リーミング不安定 [10] や永年重力不安定など [11] によって濃集した固体微粒子凝集体の重力不安定 による微惑星形成,原始惑星円盤中での微惑星へ の固体微粒子凝集体の集積(いわゆるペブル集積) [12]. 等の様々なモデルが提案されている. そして. それぞれのモデルにおいて予想される微惑星サイ ズとその後の集積タイムスケールが異なる. 掩蔽観 測によって1 km程度以下の外縁天体が発見されて おり、0.1-1 kmサイズの外縁天体の個数が推定さ れている [13, 14]. これらの結果は、外縁天体が1 km程度の微惑星として誕生し、微惑星集積による 暴走成長でより大きな外縁天体が形成された場合の サイズ分布 [8] と整合的であり、サイズ分布は1-2 km付近に超過を持つ。一方で、カロン表面のクレー ターサイズ分布 [15] は1 km程度以下の外縁天体 の個数が少ないことを示唆しており、1 kmサイズの 微惑星の暴走成長が予言するサイズ分布と一致しな い. さらに、100 kmサイズの外縁天体の二重小惑星 の質量比、軌道、色などの特徴は、外縁天体が原始 太陽系星雲中で100 kmサイズの天体として誕生した 場合によく説明できることが指摘されている [10].



図1: 放射性核種の壊変熱による半径100 kmの微惑星中心の 温度進化. 橙は原始太陽系星雲誕生後300万年後に微惑 星が誕生した場合,青は200万年後に誕生した場合の結果 である.実線は天体内部での冷却メカニズムとして対流を 考慮した場合,破線は熱伝導のみを考慮した場合である.

2.1 放射性核種の壊変による微惑星の熱進化

上述のように,外縁天体の集積過程として様々な シナリオが提示されているが,微惑星形成・集積過 程の違いは外縁天体の熱史にどのような違いを生み 出すだろうか.我々は放射性核種の壊変による微惑 星の熱進化を計算し,微惑星サイズに対する依存性 を調べた.

図1に短寿命放射性核種の壊変熱による半径100 kmの微惑星の熱進化計算の結果を示す. 微惑星内 部の温度構造は1次元球対称を仮定し, 伝導及び対 流による熱輸送過程 [16] を考慮した⁴. 天体中心の 温度は, 短寿命核種²⁶A1の壊変による温度上昇と, その後の対流・伝導による温度低下を経験する. 半 径100 kmの未分化な氷微惑星の場合, 温度上昇 のタイムスケールは100万年, 冷却のタイムスケール は1,000万年程度である(図1). 微惑星の形成時刻 (t = 0は太陽系最初期の高温凝縮物の形成年代, 45.67億年前とする), 及び対流を考慮するか否かに よって最高到達温度は異なるが, 天体内部が氷の融 点(約273 K) に達しない場合は150 K以下では初 期条件によらず似た熱進化をたどる.

図1同様に, 短寿命放射性核種の壊変熱による 半径10 kmの微惑星の熱進化計算の結果を図2に 示す. 半径10 kmの微惑星の場合, たとえ太陽系初 期100万年のタイミングで微惑星が形成されたとして も、その後数百万年以内にほぼ全ての壊変熱を熱伝 導によって失うことがわかる⁵.これは形成後1,000 万年程度の期間、天体内部に²⁶A1の壊変熱を蓄える ことのできていた半径100 kmの微惑星の熱進化と は対照的である.

上で得られた熱進化の微惑星サイズ依存性は,小 惑星内部の熱伝導による冷却タイムスケール tcoolと 熱源となる放射性核種の半減期t1/2とを比較するこ とで理解できる.熱伝導による冷却タイムスケール は以下の式で与えられる.

 $t_{cool} \sim \rho CR^2 / (3 k) \sim 4 \times 10^7 (k / 5 W m^{-1} K^{-1})^{-1} (R / 100 km)^2$ 年. ここで $\rho \sim 2,000 kg m^{-3}$ は微惑星の密度, $C \sim 1,000 J kg^{-1} K^{-1} は比熱容量, R は半径, そして k は$ 熱伝導率である⁶. これを主要な熱源である短寿命 $核種²⁶A1の半減期(<math>t_{1/2} = 7.2 \times 10^7$ 年)と比較すると, 微惑星サイズが100 km程度以上の場合には,微惑



図2: 放射性核種の壊変熱による半径10 kmの微惑星中心の温度 進化. 線種の違いは微惑星の形成時刻の違いを表している.

⁴本研究において我々は混合距離理論を用いて対流による熱流 量を計算した.しかし,本手法による熱流量の見積もりには数倍 程度の不定性があると考えるべきであろう(文献 [17] の解説を 参照されたい).

⁵図2に示した計算においては、対流は天体内部の冷却に寄与しない。

⁶氷天体の熱伝導率は空隙を考慮しない場合には100 Kで 5 W m⁻¹ K⁻¹ 程度であるが、空隙を含む場合には1桁ないし2桁 程度低下すると考えられる.また、氷が非晶質であった場合にも 熱伝導率は低下する [18]. 固体微粒子凝集体の熱伝導率につい ては著者らの論文 [19, 20] 等を参照されたい. 星形成時に存在していた短寿命核種による壊変熱 は半減期よりも十分長いあいだ天体内部に閉じ込め られるため、壊変熱がほぼ全て温度上昇に寄与し、 冷却タイムスケール程度の期間は高温になる(ただ し、これは対流の効果を無視した場合にのみ成り立 つ.対流の効果を考慮した場合には、対流による冷 却と放射壊変による加熱の釣り合いで最高到達温 度が決まる).一方で、半径が10 km程度以下の微 惑星の場合には、²⁶A1の半減期よりも冷却タイムス ケールのほうが短いため、微惑星形成後t1/2程度の 期間に発生した壊変熱のみが温度上昇に寄与する. また、半減期よりも短いタイムスケールで微惑星は 冷却する.

2.2 集積時の重力エネルギーの 解放による加熱

直径1,000 km程度以上の大きな天体の場合,集 積時に解放される重力エネルギーも主要な熱源にな り得る.そしてその加熱の度合いは,集積メカニズ ム(微惑星集積 [8] か固体微粒子凝集体の集積 [9] か)や集積のタイムスケール,そして天体サイズなど に依存する.我々は,まず微惑星集積によって1,000 kmサイズの外縁天体が成長した場合について,次 に固体微粒子凝集体の集積によって成長した場合 について,それぞれ検討する.

天体集積によって解放される重力エネルギー E_{grav} は、内部密度一様の仮定の下、下式で与えられる. $E_{\text{grav}} = 0.6 G M^2 / R.$

ここでGは万有引力定数, Mは天体質量である.ゆ えに,解放された重力エネルギーのうちある割合 η_h(<1)が天体内部に熱エネルギーとして持ち込ま れ,温度上昇に寄与したとすると,集積による温度 上昇ΔTは下式で見積もることができる.

 $\Delta T = \eta_{\bullet} \bullet 0.6 G M / (C R) ~ 170 (\eta_{h} / 0.5) (R / 1,000 km)^{2} K.$ ここで天体内部密度は2,000 kg m⁻³,比熱容量は 1,000 J kg⁻¹ K⁻¹を仮定した.熱エネルギーへの変換 効率 η_{h} は不定性が大きいパラメータであるが,微 惑星集積を考える場合には0.5程度以下であろう [21].ゆえに,微惑星集積によって外縁天体が1,000 kmサイズの天体へと成長した場合,集積時の重力 エネルギーの解放によって100 K程度の温度上昇が 期待される⁷.



図3:半径1,000 kmの外縁天体が固体微粒子凝集体の集積で 成長した場合の、天体表層付近の温度の見積もり、温度T は集積タイムスケールτおよび熱エネルギーへの変換効率 ηhに依存する.集積前の固体微粒子凝集体の温度は40 K と仮定した。

一方,固体微粒子凝集体の集積によって成長する 場合,重力エネルギーの解放は天体表層で起こる ため,温度上昇は衝突エネルギーの持ち込みと輻 射による冷却との釣り合いで決まる[7].図3に半 径1,000 kmの外縁天体が固体微粒子凝集体の集 積で成長した場合,表層付近の温度が集積タイムス ケールによってどのように変化するか示した.この計 算において,固体微粒子凝集体の天体表層への衝 突速度は脱出速度と仮定した.図3からわかるよう に,集積タイムスケールが100万年よりも短い場合に は天体表層の温度が100-200 K程度まで上昇し得 る一方,1,000万年よりも長い場合には天体の温度 は集積する固体微粒子凝集体の温度とほぼ等しく 温度上昇は小さい.

以上より,1,000 kmサイズの外縁天体はその形成 プロセスによって異なる内部温度になることが予想 される.(a) 微惑星が100 kmサイズで誕生し,その 後衝突合体を繰り返して成長した場合,100 kmサイ ズの微惑星は形成後約1,000万年間は150-200 K の内部温度にあり,さらに微惑星集積で形成される 1,000 kmサイズの外縁天体は100 K程度温度が上

⁷この見積もりにおいては、簡単のため、天体内部で一様に温度上 昇したと仮定している。微惑星集積時に衝突点のごく近傍ではこ れより遥かに大きな温度上昇が起こり、結果として局所的に溶融 する可能性がある。



図4: 半径500 km(橙) および半径1,000 km(青) の未分化な外 縁天体の長寿命放射性核種の壊変熱による天体中心の熱 進化. 熱伝導・対流の冷却メカニズムを考慮し時間進化を 計算している. 実線は原始太陽系星雲誕生後1,000万年後 に200 Kだった場合, 破線は40 Kだった場合の計算結果で ある.

昇するだろう. これは氷天体の溶融・分化が起こり 得る温度である. (b) 一方, 1 kmサイズの微惑星の 集積によって1,000 kmサイズの外縁天体が形成さ れた場合には,太陽系初期数百万年以内に外縁天 体の成長が完了しない限り集積する微惑星はすで に冷却されており,集積による重力エネルギーの解 放(100 K程度)のみが寄与するであろう. (c) また, 固体微粒子の集積によって1,000 kmサイズの外縁 天体へと成長するシナリオでは,形成後の内部温度 は(集積タイムスケールが1,000万年以上の場合に は)100 K以下になると予想される.

長寿命の放射性核種(²³⁸U, ²³⁵U, ²³²Th, ⁴⁰Kなど) の壊変熱は1,000 kmサイズの外縁天体の10億年ス ケールの熱進化において重要である [22] が、壊変 熱で100 K程度の温度上昇が起きるまでには数億 年程度かかる(図4).ゆえに、衛星形成を引き起こ す巨大衝突がそれ以前に発生する場合には、少なく とも巨大衝突直前の温度構造を考える上で長寿命 核種の壊変熱の影響は考えなくてよい.また、天体 内部の温度が約150 Kよりも高くなると対流によって 温度上昇が抑制されるため、長寿命核種の壊変熱に よる外縁天体の溶融・分化は起こらないだろう⁸.

2.3 巨大衝突による温度上昇の見積もり

巨大衝突によって2天体の質量のほぼ全てが1つ の天体に取り込まれるとき、衝突前後での自己重力 エネルギーの差分から温度上昇を見積もることがで きる.回5に半径 R_{tar}の外縁天体に半径 R_{imp} (< R_{tar}) の天体が衝突するときの温度上昇ムTを示す.重力 エネルギーの解放による温度上昇は天体半径の2乗 に比例するため、半径1,000 kmの外縁天体同士の 衝突では約200 Kの温度上昇がある一方、半径500 kmの天体の場合は巨大衝突による温度上昇は50 K以下である.冥王星とカロンは半径1,000 km程 度の2天体の巨大衝突によって形成されたと考えら れており [6,7]、衝突時の温度上昇が溶融・分化を 引き起こす可能性もあるが、半径500 km程度の外 縁天体の場合には巨大衝突によって全球溶融する可 能性は低いだろう.



図5: 半径RtarおよびRimp (< Rtar)の2つの外縁天体が巨大衝突した際の温度上昇ΔTの見積もり. 衝突合体によって解放された重力エネルギーは全て温度上昇に使われると仮定した.</p>

3. 巨大衝突による衛星形成

我々は2章で、巨大衝突前の1,000 kmサイズの 外縁天体はその形成・集積機構によって溶融・分化 している場合とそうでない場合と両方の可能性があ

⁸ただし,対流による熱輸送が効くかどうかは仮定する粘性の値 に依存する.対流が発生しない,高い粘性を仮定した場合には 長寿命核種の壊変熱で分化し得る.



図6: 質量4 × 10²¹ kgと2 × 10²¹ kgの2つの分化した外縁天体の巨大衝突による衛星形成の数値流体シミュレーション.計算設定は、衝突前の2天体の氷・岩石比が共に1、衝突速度は脱出速度、衝突角度は75度である.この計算には文献 [24]のSPH法のコードを用い、総粒子数120万の計算を実施した.計算開始後166,230 秒後の時点で質量比0.054の衛星系が形成されており、この時点での衛星系の離心率は0.53である.

ることを示した.では,現在観測されているような質 量比がおよそ1/10から1/1,000程度の衛星系(表1) はどちらの場合に再現可能なのだろうか.過去の研 究では,冥王星・カロン系のような質量比の大きい衛 星系は未分化の天体同士[6,7],あるいは部分分化 状態[23]の天体同士の巨大衝突で形成されており, 完全に分化している天体同士の巨大衝突によって大 きな衛星を形成することは困難であると考えられて きた.一方,質量比1/100程度の衛星やそれよりも 小さな衛星がどのように形成されたのかはよくわかっ ておらず,(カロンのように)衝突した天体が直接分裂 し衛星を形成するモデルと,巨大衝突後に円盤を形 成しその後再集積する(地球の月形成と似た)モデ ルの両方が考えられる.

そこで我々は、SPH法を用いた巨大衝突の数値シ ミュレーションによって、様々な質量比の衛星系が形 成できるかどうか調査した(文献 [24] の計算コード を用いた).図6は分化天体同士の巨大衝突ののち、 衝突した天体の分裂によって衛星が形成される場 合のシミュレーション結果の一例である.計算開始 後166,230秒後のスナップショットから、巨大衝突に

よっていくつかの塊状の分裂片(衛星または系外に 放出される天体になる)と粒子状のばらばらな破片と が形成されることが見て取れる。我々は天体の分化 状態,質量比,総質量,組成,及び衝突速度・角度 を変えてパラメータサーベイを行い、衛星の形成条 件と形成される衛星系の質量比を調べた [5]. その 結果.(1) 衝突前の2天体が分化しているかどうかに よらず、脱出速度程度の低速かつ衝突角度75度程 度のかすり衝突が起きた場合、質量比1/10程度の 衛星系が形成されうる。(2) 衝突前の2天体が分化し ているかどうかによらず, 脱出速度程度かつ衝突角 度45度程度の衝突によって質量比1/100-1/1.000 程度の様々な衛星系を衝突天体の分裂によって作 ることができる。(3) 一方で、衝突によって形成され た円盤(中心天体に重力的に束縛されているばらば らな破片)の質量からその後の再集積で形成され る衛星の質量を見積もる [25] と衛星系の質量比は 1/1.000程度以下になってしまい、これは観測を説 明できない、ということが明らかになった(詳細は 文献 [5] を参照されたい). つまり, 衝突前の2天体 が分化していようといまいと、巨大衝突による衝突

天体の分裂によって、観測されている質量比1/10-1/1,000程度の様々な衛星系を形成可能であること が示された.

大型の外縁天体における衛星の存在頻度につい ても簡単に議論する. 巨大衝突の衝突角度はランダ ムであるとみなすことができ,衝突角度 θ 以上の衝 突である確率は $P_1(\theta) = \cos^2(\theta)$ となる. また, 典型 的な衝突速度は脱出程度であると考えてよいだろう [6]. よって,衝突角度 θ 以上の衝突で衛星系が形成 されると仮定した場合,現在6天体知られている直 径1,000 km以上の外縁天体において,それぞれ1 回の巨大衝突によって衛星を形成できる確率 $P_6(\theta)$ は以下で与えられる.

 $P_6(\theta) = [P_1(\theta)]^6 = \cos^{12}(\theta).$

これに具体的な数値を代入すると*P*₆(45°)=1.6%, *P*₆(30°)=18%となり,観測される衛星の存在頻度 (6天体中6天体)が再現されない可能性のほうが高 いことがわかる⁹.このことは大型の外縁天体は典 型的に複数回の巨大衝突を経験し,いずれかの衝 突によって衛星系が形成されたということを示唆し ているのかもしれない.

4. 衛星系の潮汐による軌道進化

我々は巨大衝突によって観測される外縁天体の衛 星系の質量比を説明できることを明らかにした.で は、衛星系の離心率や公転周期はどのような条件 のもとで再現可能なのだろうか.巨大衝突の数値シ ミュレーションの結果、形成直後の衛星系の離心率 は0から1の全範囲に分布することが明らかになっ た[5].一方で、観測される衛星系の離心率は概ね 0.1程度あるいはそれ以下であり、これは潮汐による 軌道進化を反映していると考えられる.潮汐による 軌道進化は天体内部の状態に強く依存するため、軌 道進化のシミュレーション結果を観測と比較するこ とで、衛星系形成直後の天体内部の状態、ひいては 1,000 kmサイズの外縁天体の形成プロセスを制約 できる. 本稿では、中心天体と衛星がともに未分化の場合 について、天体の熱進化と軌道進化のカップリング 計算の結果を紹介する(計算には文献 [26] の手法 を用いた).中心天体及び衛星は内部が一様な球で あると仮定し、天体内部の温度Tの時間変化は潮汐 散逸による加熱¹⁰、放射性核種の壊変による加熱、 そして対流・熱伝導による冷却を考慮し計算する. 次に、その時刻における天体内部の温度から粘性 η を求め、これを用いて衛星系の離心率 e、軌道長半 径 a、中心天体及び衛星の自転角速度 Ω_p, Ω_sの時間 変化を計算する.そして次の時刻における加熱・冷 却率を計算する.これを計算機内でタイムステップ 毎に繰り返すことで熱進化と軌道進化のカップリン グ計算ができる.

対流によるエネルギー輸送の大きさは、天体表層 の不動蓋(stagnant lid)の厚さ D_{id} 及び天体内部 と表層の温度差 $T-T_s$ とから計算した(深さ D_{id} 以上 の天体内部領域において等温であると仮定した). 不動蓋の厚さと天体半径の比はヌッセルト数Nuと 呼ばれ、対流の数値シミュレーションに基づく経験 式から計算される(詳細は文献 [26]を参照された い¹¹).氷天体内部の粘性は以下の式で与えられる.

 η (T)= $\eta_{\rm ref} \exp[(E_{\rm a} / R_{\rm g} / T_{\rm m}) (T_{\rm m} / T - 1)].$

ここで η ref は融点での粘性, E_a は活性化エネルギー, R_g は気体定数, T_m は融点である. 多結晶氷の粘性 は結晶粒径 r_0 に依存することが知られており [27], 下式で与えられる.

 $\eta_{\rm ref} \sim 10^{10} (r_0 / 1 \ \mu m)^2 \ {\rm Pa \ s.}$

未分化の外縁天体の場合, 天体内部はミクロンサイ ズの氷及び岩石粒子が混合された状態になっている と考えられる.このような状況下では, Zenerのピン 止め効果 [28] によって結晶粒成長が抑制されるこ と知られており,これは水氷と微量の不純物を混合 した系における粒成長実験 [29] においても確認さ れている.ピン止め効果の理論に基づくと,安定結 晶粒径rは不純物粒子の粒径dと体積分率fを用い てr~(4d)/(3f)で与えられる [28], ゆえに、ミクロ

⁹セドナも含めて7天体中6天体に衛星が存在すると考えた場合, 衛星系の存在頻度を再現できる確率は, θ = 45°のとき5.5%, θ = 30°のとき31%となり,再現可能性はセドナを考慮しない場 合と比較して高くなる.

¹⁰なお、本稿で紹介する計算結果において潮汐散逸による加熱量 は長寿命核種の壊変熱の寄与と比べて十分小さく無視できる。 ¹¹ただし、本研究で用いた内部構造モデルはヌッセルト数の算出時 の仮定に必ずしもそぐわない、より定量的な議論のためには、3次 元対流計算によって多様な条件下でヌッセルト数を調べ、本研究 で考える状況下で適用可能な経験式を明らかにする必要がある。



図7:(左)直径1,200 kmの外縁天体と直径120 kmの衛星からなる系の離心率進化.色の違いは衛星形成時点での温度の違いを表す.衛星と中心天体は初期に同じ内部温度を持つと仮定している.離心率の時間変化が不連続なところでは、(衛星の自転角速度)/(平均運動)が整数または半整数になっていて、その前後で離心率の時間微分が不連続に変化している(詳細は文献 [5, 33] 等を参照されたい).(右)中心天体(実線)及び衛星(破線)の温度進化.色の違いは衛星形成時点での温度の違いを表す.衛星形成後約1億年後以降の熱進化は、初期に仮定した温度にほとんどよらないことがわかる.

ンサイズの岩石粒子を10 vol. %程度以上含む未分 化氷天体において,氷の結晶粒径はミクロンサイズ になり,融点での粘性はηref~10¹⁰ Pas程度の値をと り得る¹².また,対流運動によって結晶内部に転位 が増加し歪みが蓄積すると,これを解消するために (動的)再結晶が起こる [31].再結晶後の粒径は流 動応力に依存し,ピン止め効果などによって粒成長 が阻害されている場合には地質学的なタイムスケー ルで結晶粒径が小さく保たれる可能性もある.

潮汐による軌道進化は著者らの論文 [5] の手法 を用いて計算した.ただし、本稿で紹介する計算で は複素ラブ数んを粘弾性モデルに基づいて計算し ている(粘弾性モデルはアンドレードモデルを採用 した.詳細は文献 [26] を参照されたい).また、軌 道進化の計算に必要な関数であるeccentricity function [32] を±200次まで計算することで、離 心率約0.9以下での軌道進化を正しく計算できるよ うにした.

図7(左)に直径1,200 kmの外縁天体と直径120

kmの衛星からなる系の離心率進化を示す.初期の 温度Tiniは中心天体と衛星とで等しい¹³と仮定し,初 期の離心率はe = 0.3,軌道長半径はa = 3,500 kmとした.初期温度が250 Kの場合には衛星形成 から45億年後の離心率がほぼe = 0になっている のに対し,100 Kからの場合には最終的な離心率が 0.9以上になっていることがわかる.初期温度を変え て計算を行なった結果,240 K以上から潮汐進化し た場合にはe < 0.1に円軌道化する一方,230 K以 下から進化した場合にはe > 0.5(多くの場合には e > 0.9)の高離心率軌道になった.また,図7(右) に中心天体及び衛星の温度進化を示す.未分化な外 縁天体の冷却タイムスケールに関する議論(2.1節) から,100 kmサイズの衛星は1億年程度で長寿命 核種の壊変熱と熱伝導による冷却の釣り合いで決

¹³もちろん、中心天体と衛星の温度が厳密に等しいということは 現実的でない、例えば、カロンのような大きな衛星は巨大衝突時 にインパクター(巨大衝突する2天体のうち小さいもの)の一部が 分裂することで形成される(図6).ここで2章の議論から、インパ クターよりターゲット(巨大衝突する2天体のうち大きいもの)のほ うが衝突直前に高温であると考えられるので、衛星の形成直後 の温度は中心天体よりも低いかもしれない.ただし、巨大衝突に よる加熱が中心天体と衛星のそれぞれに対してどの程度効くの かは自明ではなく、衛星のほうが高温になる可能性もある。今後、 様々な初期条件で巨大衝突のパラメータサーベイを実施し、衛星 系の初期温度について精査する必要がある。

¹²ただし,多くの(分化している)氷衛星や冥王星については多く の場合,氷マントルのηrefとして10¹⁴ Pas程度の値が用いられて いる [30].今後,未分化な氷天体のηrefについて,小さな衛星の 軌道進化や地形の緩和などの情報から観測的に制約が与えられ ることを期待したい.



図8: 衛星と中心天体での散逸の比Aの温度依存性. 衛星の自転 と公転は同期しており、その周期は30時間とした. 色の違い は中心天体の自転周期P_pの違いである. 散逸の比Aが1よ りも大きい場合には衛星での潮汐散逸によって系の離心率 が低下し、Aが1よりも小さい場合には離心率が上昇する.

まる温度に落ち着くと予想される. これが正しいこ とは計算結果からも読み取れる. 一方, 直径1,000 km程度の中心天体の場合は長寿命核種の壊変熱 と対流による冷却の釣り合いによって1億年後以降 の熱進化が決まる.

衛星系の離心率進化は、衛星と中心天体とどちら の内部で潮汐によるエネルギー散逸が起きているか によって決まる(例えば冥王星・カロン系の潮汐進化 に関する文献 [33] を参照されたい).衛星と中心天 体での散逸の比Aは下式で与えられる.

 $A \sim (\text{Im}(k_{2s}) / \text{Im}(k_{2p})) (R_s / R_p)^{-1}.$

ここで k2sとk2pは衛星と中心天体の複素ラブ数, Rs とRpは衛星と本体の半径である. 複素ラブ数は一様 球の粘弾性モデルから計算した. 衛星の自転が公 転と同期しており, 衛星と中心天体の内部温度が等 しいという仮定の下で, 散逸の比Aを計算すると図 8が得られる. ここでPpは中心天体の自転周期であ る. 中心天体の自転速度にもよるが, 衛星の内部温 度が240 K以上のときにはA>1となって離心率が 低下, それ以下の場合には離心率が上昇することが わかる. これは離心率の時間進化(図7左)と整合的 な結果である.

以上より,未分化の中心天体および衛星の熱進化 と軌道進化のカップリング計算から,衛星系が円軌 道化するためには初期に240 K以上という氷の融点 に近い高温状態を仮定する必要があることが明らか になった.一方で、観測されている衛星系の多くは 離心率0.1程度以下であり、全ての衛星系が240 K から273 Kの狭い温度範囲で形成されたと考えるの は厳しいと思われる.ゆえに我々は、外縁天体の衛 星系は未分化天体ではなく分化天体の可能性が高 いと結論づけた.今後、分化天体の衛星系について も潮汐軌道進化の計算を行い、実際に離心率の小 さな衛星系が形成されやすいのかどうか検証してい く予定である.

5. まとめと今後の展望

太陽系の海王星より外側には多数の太陽系外縁 天体が存在しており、これらは太陽系の外側領域に おける微惑星・惑星形成の歴史を記録していると考 えられる.近年の観測から、直径1,000 km以上の 外縁天体は全て衛星を持つことが明らかになった. 我々は、巨大衝突とその後の潮汐進化によってこれ らの衛星系が形成されたと仮定して、観測されてい る衛星系の特徴を再現するための条件を理論的に 調べた(図9).

2章では、主に1次元の天体内部の熱進化計算か ら、外縁天体の形成・集積機構によって1.000 km サイズの天体が形成された時点での温度が異なるこ とを示した. 外縁天体の二重小惑星の特徴 [10] や カロン表面のクレーターサイズ分布 [15] からは太陽 系外縁において微惑星は100 kmサイズで誕生した というシナリオが支持されている.この場合にはそ の後の微惑星集積によって形成される1,000 kmサ イズの外縁天体は200 K以上の高温になり、場合に よっては氷の溶融、天体の分化を経験することが明 らかになった. 一方, 掩蔽観測 [13, 14] などから示 唆される1 kmサイズの外縁天体の個数密度は、微 惑星がまず1 kmサイズの天体として形成され、その 後の暴走成長によって1,000 kmサイズの天体まで 成長したという説を支持する、この場合には1.000 kmサイズの天体の内部温度は200 K以下になるで あろう.

3章では,SPH法を用いた巨大衝突による衛星 形成の数値流体シミュレーション [5] によって何が わかったのかを簡単にまとめた(図9上).最も重要



図9:本研究のまとめ.(上)巨大衝突による衛星形成の数値シミュレーションの結果の1例.(下)衛星形成後の潮汐による軌道進化の概念図. 数値シミュレーションによると形成直後の衛星は離心率が大きい一方,観測からは現在の離心率は小さいことがわかっている.ゆえに,衛 星形成後の潮汐による軌道進化によって離心率を減少させる必要がある.潮汐による軌道進化は衛星及び中心天体の熱進化に依存し, これは外縁天体の形成・集積メカニズムと密接に結びついている.

な結論は、衝突する2天体が分化していようがいま いが、脱出速度程度の衝突によって質量比1/10-1/1,000程度の様々な衛星系を形成可能であるとい うことである.この質量比の範囲は現在観測されて いる衛星系の質量比の分布と整合的であり、これは 巨大衝突が衛星系の形成プロセスとして有力である ことを裏付けるものである.

4章では、粘弾性モデルを用いた未分化天体の衛 星系の熱進化と潮汐軌道進化のカップリング計算 を行い、衛星系の離心率が0.1程度以下になる条件 を調べた(図9下).巨大衝突直後の衛星系の離心 率は0から1の全範囲に分布する一方、観測されてい る衛星系の多くは離心率0.1程度以下である.我々 のカップリング計算から、衛星系の離心率が0.1以 下に低下するのは(氷の粘性に関する不定性はある が)衛星形成直後の温度が240 K以上の場合に限ら れるということが明らかになった.これは、全ての衛 星系が240 Kから273 Kの狭い温度範囲で形成さ れたとは考え難いことから,外縁天体の衛星系は分 化した天体の潮汐進化によって形成されたことを間 接的に支持していると解釈できる.

今後の展望として,まず分化した天体の衛星系 について熱進化と軌道進化のカップリング計算を 行い,溶融・分化した衛星が本当に円軌道化できる のかどうかを確認する必要がある.また,外縁天体 が分化している場合とそうでない場合とでアルベド や色にも違いが生じることが期待される.よって, 100-1,000 kmサイズの微惑星の集積および熱進 化の計算から天体表層アルベドのサイズ依存性を求 め,これをHerschelやSpitzerによる赤外での熱 放射観測 [34] から求められている天体サイズとアル ベドの関係と比較することで,衛星の潮汐進化以外 の視点からも太陽系外縁部における微惑星形成・集 積プロセスを議論することができるだろう. 114

日本惑星科学会誌Vol. 29, No. 3, 2020

謝辞

指導教員である中本泰史教授には、本研究およ びその他全ての研究において有益なコメント,指導, 助言をいただきました、心より感謝申し上げます、ま た,2019年度も惑星科学杯(フットサル大会)を企 画・実施していただき、心身ともに充実した状態で学 会初日の発表に臨むことができました. 幹事の皆様 および一緒に参加された皆様に御礼申し上げます。 フットサル終了後、国立天文台の堀安範氏には東工 大の後輩と一緒に京都の美味しいラーメンをご馳走 になり、ポスター発表でも潮汐に関する有益なコメン トをいただきました. 深謝いたします. さらに, 査読 者である北海道大学の鎌田俊一氏には多数の建設 的なコメントを頂き、本稿の改善する上で大きな助け となりました、ここに厚く御礼申し上げます、本研究 は日本学術振興会の特別研究員奨励費(17I06861) の助成を受けました.

参考文献

- [1] Jewitt, D. and Luu, J., 1993, Nature 362, 730.
- [2] Pál, A. et al., 2012, A&A 541, L6.
- [3] Parker, A. H. et al., 2016, ApJL 825, L9.
- [4] Kiss, C. et al., 2017, ApJL 838, L1.
- [5] Arakawa, S. et al., 2019, Nat. Astron. 3, 802.
- [6] Canup, R. M., 2005, Science 307, 546.
- [7] Sekine, Y. et al., 2017, Nat. Astron. 1, 0031.
- [8] Schlichting, H. et al., 2013, ApJ 146, 36.
- [9] Shannon, A. et al., 2016, ApJ 818, 175.
- [10] Nesvorný, D. et al., 2019, Nat. Astron. 3, 808.
- [11] 冨永遼佑ほか, 2019, 遊星人 28, 172.
- [12] Johansen, A. et al., 2015, Sci. Adv. 1, e1500109.
- [13] Schlichting, H. et al., 2012, ApJ 761, 150.
- [14] Arimatsu, K. et al., 2019, Nat. Astron. 3, 301.
- [15] Singer, K. N. et al., 2019, Science 363, 955.
- [16] Kimura, J. et al., 2009, Icarus 202, 216.
- [17] 鎌田俊一, 2018, 遊星人 27, 286.
- [18] Andersson, O. and Inaba, A., 2005, Phys. Chem. Chem. Phys. 7, 1441.
- [19] Arakawa, S. et al., 2019, Icarus 324, 8.
- [20] Arakawa, S. et al., 2019, Prog. Theor. Exp. Phys.

2019, 093E02.

- [21] McKinnon, W. B. et al., 2008, in The Solar System Beyond Neptune, 345 (Univ. of Arizona Press).
- [22] Kimura, J. and Kamata, S., 2020, Planet. Space Sci. 181, 104828.
- [23] Canup, R. M., 2011, AJ 141, 35.
- [24] Genda, H. et al., 2015, Icarus 262, 58.
- [25] Hyodo, R. et al., 2015, ApJ 799, 40.
- [26] Shoji, D. et al., 2013, Icarus 226, 10.
- [27] 久保友明, 2007, 遊星人 16, 13.
- [28] Smith, C. S., 1948, Trans. AIME 175, 15.
- [29] Kubo, T. et al., 2009, J. Miner. Petrol. Sci. 104, 301.
- [30] Kamata, S. et al., 2019, Nat. Geosci. 12, 407.
- [31] 久保友明, 2008, 低温科学 66, 123.
- [32] Ferraz-Mello, S., 2013, Celest. Mech. Dyn. Astr. 116, 109.
- [33] Cheng, W. H. et al., 2014, Icarus 233, 242.
- [34] Santos-Sanz, P. et al., 2012, A&A 541, A92.

特集「古今未曽有の日本の月/火星地下世界探査(UZUME)計画」 古今未曽有の日本の月/火星地下世界探査 (UZUME)計画

春山 純一¹, 河野 功¹, 西堀 俊幸¹, 岩田 隆浩¹, 山本 幸生¹, 桜井 誠人¹, 大槻 真嗣¹, 諸田 智克², 石上 玄也³, 月火星の地下空洞直接探査リサーチグループ

(要旨) Unprecedented Zipangu Underworld of the Moon/ Mars Exploration (UZUME:古今 未曽有の日本の月/火星の地下世界探査計画)は,月や火星の縦孔とその底の奥に広がる溶岩チューブのよ うな地下空洞の探査を目指すものである.本計画では,理学目的として,1)「生命圏」の発現,そしてその「持 続条件」,および2)人類の「居住圏」拡大の可能性についての知識を積み重ねることを掲げ,これまで,宇 宙科学研究所宇宙理学委員会のもとで「月火星の地下空洞直接探査リサーチグループ」において検討を重 ねてきた.現在,ワーキンググループとなることを目指している.本特集では,UZUME計画に関わる,解 説論文2本ほか,査読論文4本を本号,ならびに次号以降に収録予定である.本稿では,UZUME計画の 概要を解説する.



図1: SELENE搭載地形カメラが2009年に発見した縦孔の位置.1:マリウス丘の縦孔(303.3°E, 14.2°N).2:静の海の縦孔(33.2°E, 8.3°N),3:賢者の海の縦孔(166.0°E, 35.6°S).背景はSELENE/地形カメラ画像.

1. 月の縦孔・地下空洞

2009年,日本の月周回探査機Selenological and Engineering Explorer (SELENE,かぐや) に搭載された地形カメラは,直径深さともに数10m

宇宙航空研究開発機構
 東京大
 3.慶応大
 Haruyama.junichi@jaxa.jp

にも及ぶ縦孔を,月のマリウス丘,静の海,賢者の 海に発見した(図1)[1-3].ハワイ島や日本の富士山 麓は,月の海と同じ玄武岩質溶岩に覆われている が,そこには火成活動起源の地下空洞「溶岩チューブ」 が数多く見られることから,これら月の縦孔は,溶岩 チューブに開いたものとの仮説が立てられた[1-3].

その後、米国探査機Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) に搭載された狭角カメラによる高 解像度画像データにおいて、これらの縦孔底は通



図2: LRO狭角カメラによる,月の静の海の縦孔直下視画像(Product ID: M12671087R). 縦孔の底は,お椀型をしておらず,また縦孔周辺に 飛散物が見られない. これらのことは,縦孔は溶岩チューブのような地下空間に開いたものとの仮説を支持する. 撮像時の太陽角度と,縦 孔底の明暗境界位置から深さ107mと求められている.



図3: LRO 狭角カメラによる,月の静の海の縦孔直下視画像(左: Product Id_M155016845R)と斜め撮像画像(右: Product ID_ M152662021R).斜め観測から直下視で見えていた三つの岩の奥に空間が広がっていることが分かる.右画像の三日月状の明るいとこ ろは,縦孔の壁でおおよそ47mの張り出し,すなわち高さ60mにも及ぶ空洞の入り口になっている.(両図中の楕円は,安田遼氏による)

常のクレータとは異なり,お椀型となっていないこと や,縦孔周りには飛散物がまったく見られないこと が確認され(図2)[4],月の縦孔は地下空洞に開いた ものとの仮説がより強く支持されることになった.

更に、LRO狭角カメラによる斜方観測では、 SELENEの発見した三つの巨大な縦孔底に、明ら かに水平方向に延びている地下空間が存在すること が見いだされ、この仮説が更に一層支持されること になった[4].

その後、「海」領域には、十にも及ぶ縦孔、あるい は陥没地形が発見されているが[5]、画像データ以外 にも、「月の縦孔は、溶岩チューブに開いたもの」とす る仮説を支持する探査データが得られてきている。 2017年,米国の重力場探査機Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL)のデータ解 析結果から、マリウス丘の縦孔から西方向,縦孔が 見られるリル構造に沿って、質量が相対的に欠損し ていることが見いだされた[6].また、SELENE搭載 の能動的なレーダ探査装置であるLunar Radar Sounder(LRS)のデータに、このマリウス丘の縦 孔がみられたリル構造にほぼ沿った場所数カ所に、 地下からのエコーの急激な減少(地下の空洞の存 在を示唆する)の後に引き続いてみられる強い反射 (チューブの底の存在を示唆する)を示すものが発見 された[7].これから推察するに、この溶岩チューブ は距離にして50kmに及ぶ.



図4: マリウス丘の縦孔(矢印先)近傍で得られたSELENE搭載レーダサウンダー受信波のプロファイル. 横軸は,真空を仮定したときの反射 面の深さ.月の平均半径1737.4kmが、ここでは0km. 縦軸は反射波強度.月表面からの最も強い反射(赤点)と,より深部からの二番目 に強い反射(青点)が見られる.これら一番目と二番目の強い反射の間に急激な反射の減少が見られ,地下空洞の存在を強く示唆する[7].



図5: a:MRO搭載HiRISEが撮像したエリシウム山近傍の縦孔列(28.5N,139.9E, EPS_04629_2090). b:aの四角枠拡大図. 火星にも, 多 数の縦孔が見つかっており, 中には本図のように, 縦孔や陥没地形が鎖状に連ななってみられるものがあり, その下に溶岩チューブが存在 しているのが想像に難くない. 図は, Goto et al. (2017)[10]より転載.

このように,近年得られた様々なデータから,月の 地下空洞の存在が,そしてそれは溶岩チューブであ ることが,確実なものになりつつある.

2. 火星の縦孔・地下空洞

火星においても、月と同様の縦孔が発見されてい る[8]. その形態から、火星の縦孔も溶岩チューブに 開いたものと考えられる.すでに火星では発見され た縦孔の数は、50以上にも上り[9]、最初に発見され たアルシア山の麓の他、かつて海に囲まれていたと されるエリシウム山にも、多数見つかっている[10] (図5).アルシア山、エリシウム山地域は共に、火星 の1年のうち1-2週間ほど,温度-圧力関係から液層 の水が存在しうる可能性が高く,生命探査の重要候 補地である.また,利用可能性も高い.火星の縦孔・ 地下空洞探査において,地球により近い月の縦孔・ 溶岩チューブの探査で培われる知見と経験が,非常 に有用になることは言うまでも無い.

3. 月火星の縦孔・地下空洞の基地 としての有用性とUZUME計画

月火星の溶岩チューブが重要視されるのは何故 か?それは、人類が活動領域を地球から宇宙に拡げ て行く際に、優れた居住域を提供すると考えられる からである[1,3,11]. 例えば, 月火星の溶岩チューブ の様な地下空間は, 宇宙からの放射線や, 微隕石か ら, 人類や機器を守ってくれる. (月の縦孔内におけ る, 放射線の影響については, 本特集号の内藤らに よる論文を参照されたい.)また月表面は, 極端な温 度変動がある場所であるが, マリウス丘や静の海の 縦孔に関わる地下空洞は, 約-20℃, 非常に一定し た温度環境であると理論的に推測されている. 火星 表面には砂嵐が発生するが, それもまた, 地下空間 であれば, 影響がきわめて少ないであろう.

アポロ11号による人類初の月面着陸は、すでに50 年以上前のことである.当時、人類はすぐにでも宇 宙へとその活動領域を広げていくかに見えた.しか し月面の過酷な環境は人類の訪れを拒み、また一方 で、アポロ計画や旧ソ連のルナ計画による優れたリ モセンデータ、合計400kg近くにもなる岩や砂の試 料をもとに、月の科学が一気に推し進められたこと で、逆に、月の科学探査の魅力を失わせ、結果的に 月探査を推し進める原動力が無くしてしまったのか もしれない.実際、月への回帰が始まるのは、1990 年代を待たねばならなかった.

今世紀に入って再び、日本をはじめ、欧米、イン ド、中国が、月探査へと乗り出している。そうした中、 月の溶岩チューブ探査も探査対象として、注目を浴 びつつある。例えば、2018年3月、日本によるホスト で、各国の宇宙機関の閣僚級会合International space exploration forum 2 (ISEF2)が開催 されたが、それに先立ち、International Space Exploration Coordinate Group (ISECG) により まとめられたGlobal Exploration Roadmap (GER) 3版で、将来の探査地点候補として"lava tube"の語 句が記されたりしている。

こうした動きもふまえ,我々,宇宙理学・工学者, 更に教育現場や科学館など文化施設に籍をおく 者たちで,月火星の縦孔,地下空洞探査を進めよ うとしている.この探査計画をUnprecedented Zipangu Underworld of the Moon/Mars Exploration (古今未曽有の日本の月/火星地下世 界探査)「UZUME」計画とよんでいる.

2016年,30名以上に上る研究者達の申請により, JAXA/宇宙科学研究所の宇宙理学・工学委員会の もとに「月火星の地下空洞直接探査リサーチグルー プ」が設置され,探査の第一歩をより現実的にしよう としてきた.2020年度には次のステップとなるワーキ ンググループへ移行し,2020年代半ばのプロジェク ト実現を目指す.

4. UZUME計画における科学探査

宇宙理工学委員会のもとに設置された国際宇宙 探査専門委員会による中間報告書(2019年3月)に よれば、「惑星科学の大目的は『ハビタビリティ』に かかわる知識を増やしていくこと」である.すなわち、 (1)過去にどのように生命や生命を育んだ環境「生 命圏」が生まれ、その後、進化維持されたかという 「持続条件」といった知識を増やしていくこと (2) 今後、我々人類の住む世界「居住圏」を宇宙へと「拡 大」していくうえで必要な宇宙の知識を増やしていく こと、である.

惑星科学の大目的(1)の「生命圏」の起源と進化 維持に関わる要素は、多種多様にあるが、地球のよ うな固体天体でも最も重要な要素の一つは「火成活 動」である.火成活動は、地表面、大気、更には深 海に物質・エネルギーの再分配をもたらし、環境に 大小様々な規模の変動をもたらす.言い換えると、 環境変動に敏感な「生命圏」の変化を理解するには 「火成活動の理解」が必須である.

月の地下空洞直接探査によって調査を行おうと する月の「溶岩チューブ」は、地球にも見られる溶岩 流によって形成される地下空洞である. 火成活動が 大規模、広範囲になれば、より多くの生態系へと影 響し、「生命圏」の激変を生むことにもなるが、溶岩 チューブの形成は、溶岩の長距離輸送を可能にし、 火成活動の影響を広範囲に広げることから、溶岩 チューブの形成は、火成活動そのものだけでなく、 生命圏への火成活動への影響, という点で重要な因 子である、また、溶岩チューブのサイズや形状等か らは溶岩流の物理的諸量が求まり、それらは、例え ば溶岩流の温度などの噴出情報を知る手がかりとな る. 更にまた、月火星の火成活動を知る上で縦孔が 最適な場所の一つである.というのも、縦孔の垂直 「壁」が露頭だからである. 地質活動を理解する上で 露頭が重要なのは言うまでも無い. 月の縦孔壁には 層構造が見られている(図6)[3,4]. その調査は、天



図6: LROによる静の海の縦孔の斜め観測画像(直下視画像は、図2ならびに図3の左図). 縦孔の壁には各数m程度の厚さからなる層構造 がみられ、地質学的に極めて重要な露頭となっている. (Product ID_M144395745L).

体の噴出物の時代変遷を語ってくれるであろう.

こうした溶岩噴出情報によって, 天体の火成活動 によるエネルギー再分配や水を含む揮発性物質や ダストの放出等によるに環境変動の可能性に関わ る知見が高まり, ひいては「生命圏」がどのように生 まれ, その後, 進化維持, あるいは破壊されたかの 理解においても重要な情報を与えることが期待され る.

溶岩チューブを構成する岩体は、月表面表層の砕 屑された、或いは礫化した環境とは異なり、固化し たときの状態そのままである.このため、溶岩チュー ブは、過去の磁場や、過去に噴出した揮発性物質、 そして、地下深部物質等の情報を保持している可能 性が高い.こうした情報は、天体の火成活動、さら にまた、天体での生命現象の起源と進化の理解に とって、有意義である.例えば、磁場は多くの生命 現象にとっては有害となる宇宙放射線を遮蔽する効 果があるため、月での残留磁化の情報は、月、ひい ては固体天体一般の磁場の形成メカニズムを解明す る手がかりとなる.言い換えれば、月での残留磁化 の情報は、固体天体での生命圏の発現の有無、ある いはその条件を推察する上で重要な情報となる.

5. UZUME初号機

前節に述べたように,月の縦孔・地下空洞は,月 惑星における生命生存圏の発現と維持,また人類 の居住圏の拡大につながる鍵をいくつも有しており, 世界的にも注目を浴びており,月における最も重要 な探査対象である.

一方で、月の縦孔・地下空洞は、月周回軌道から のリモートセンシングによってのみ知られており、対 象が地下にあることで、その詳細は不明である.将 来のサンプルリターンを含む詳細な理学探査、基地 建設着手のためにも、月の縦孔・地下空洞に関して 最も基本的な情報である、(1)地下空洞は実際どの 程度巨大なのか、そして、また(2)その地下空洞が 溶岩チューブである可能性はどの程度有るのかとい う情報の収集を、最初にそして確実に行う必要があ る.そのため、まず、縦孔付近にピンポイント着陸し なければならない、しかし、これまで日本は月軟着 陸の実績がなかった.そこが大きな壁であった.

しかし、JAXA宇宙科学研究所は、2022年度に 月ピンポイント着陸探査SLIMを実施すべく開発を 進めている.このSLIMのヘリテージを、UZUME の初号機に大いに利用できることがみえてきたので ある. 実際に,地下空洞内のデータを得るのに,広 角カメラと,できればレーザ測距計が有用であるが, そうした機器は既に民生品として小型・軽量のもの が開発されている.もちろん,宇宙機搭載品としての 耐環境性は十分に確認,場合によっては改良してい く必要はあるが,SLIM搭載機器重量範囲に十分載 るものと思われる.さらに,これら機器以外にも,さ らにエクストラな観測もできるであろう.

もちろん,実際の探査計画を推し進める上で,更 なる工学的挑戦は多い.それは次の三つの課題に集 約されよう:1) 垂直移動,2) 不整地踏破,3) 未知領 域調査.

縦孔底へのアプローチは、オーソドックスには、 ローバによるものが考えられる.投擲マシンの検討 もなされている.更に、近年の急速なロボット技術 の発展は、多肢型のロボットの可能性もまた、検討 に値するものとなっている.多肢型のロボットは、垂 直降下のみならず、不整地踏破、未知領域調査まで、 多様な場面で、時には形状を変えるなどして、作動 されることも期待される.

縦孔底へのアプローチとして,最近になって可能 性を高めているひとつに,通信を確保するテザー付 きのプローブを,探査機が縦孔上空を通過する際に 投下しようというものがある.

問題は、プローブが投下後のハードランディング に耐えられるか、テザーによる緩衝制御は可能か、 投下後の探査は実現可能か、ということである.し かし、はやぶさ2号機でのミニローバによる自律探 査、近く行われる月面へのミニプローブ投下計画 OMOTENASHIなどのヘリテージによって、問題 解決の可能性も見えてきている.こうしたミニプロー ブによる探査可能性を高め、他月探査プロジェクト との相乗りを含めた「パスファインダー」的な探査を、 UZUME計画では視野に入れている.

6. UZUMEのアウトリーチ活動

UZUME計画では,理学,工学の他に,もう一つ 重要な柱を立てている.それはアウトリーチである.

UZUME計画は,将来的には,人類の宇宙への 進出を目指すものである.それは,理学者・工学者 だけでなされるものではない.より多くの,一般の人 達とともになしていく計画である.そのためには,現 在の計画を知ってもらうことが必要である.そして, 単に「支援をお願いします」ではなく,「一緒にやって いきましょう」とする活動を目指している.UZUME のアウトリーチ活動には,高校や高専の先生方,科 学館の方々に担ってもらっている.本特集号の新井 らによる解説記事を参照されたい.

7. 終わりにかえて

何故,人は月を,そしてその先を目指すのか?それ は,自然は人類に必ずしも優しくなく,人類はその生 存環境を様々に求めておくことが必要であるからで ある.にも関わらず,1972年に,アポロ17号が月面 を去って以来,人類は月へと訪れていない.その理 由としては,多額になってしまった予算のことなども あるだろうが,やはり,過酷な月面環境が挙げられよ う.しかし,月の縦孔の発見により,状況が変わろう としている.月に,そして火星に,人類が新たな世界 を築ける天然の環境が用意されているようなのであ る.もちろん,そのような世界のことはもっと先に考 えればよい,という考えもあるかもしれない.しかし, 少しずつでもその可能性を知るための情報を集める ことは,科学者にとって興味あふれることである.

月火星で人類が切り拓く新たな世界は、初期にお いては、人類にとって究極の極限環境である.少な い人的・物的資源を効率良く使って、活動を維持・発 展させなければいけない.その過程で、科学者に よって大いなる知見が得られるであろう.得られた 知見は、地上での活動、特に少子高齢化が進行する 我が国にとって有益なものとなることが期待されよ う.

更に一方で、本特集号でも論じられるように、人 類の生存環境の拡大に資する情報とは別に、月や火 星の様々な科学課題を解明できるための様々な知見 が、月や火星の地下空洞探査で得られる。

UZUME(古今未曽有の日本の月/火星地下世界 探査)を行う価値は高い.現在,50人近くの日本人 科学者とエンジニアが,計画を実現に至らせようと議 論を行っている.もちろん,困難にあふれた探査に なるであろう.一度や二度で成し遂げられないことは 確実である.それ故,UZUME計画では,宇宙理学 者・工学者だけでなく,様々な人たちが,様々な面で 活躍していくことになっていく.本特集でUZUME 計画に様々な面から興味を持っていただけたらと思 う.UZUME計画,「是非,一緒にやりませんか」.

謝辞

本解説記事は、2019年度、日本航空宇宙学会主 催の宇宙科学技術連合講演会予稿として投稿され た「UZUME計画 その現状と今後について」を 元としています.許諾いただいた当学会に謝意を表 します.図5については、Goto.Y., et al.., (2017), JAXA-RM-16-008から転載しています. 許諾い ただいた著者らならびにJAXA出版に謝意を表し ます.

参考文献

- Haruyama, J. et al., 2009, Geophysical Research Letters 36, L21206.
- [2]. Haruyama, J. et al., 2010, 40th Lunar and Planetary Science Conference, abstract #1285.
- [3]. Haruyama, J. et al., 2012, in Moon Prospective Energy and Material Resources. Springer, 139.
- [4]. Robinson, M.S. et al., 2012, Planetary Space Science 69, 18.
- [5]. Wagner, R.V. and Robinson, M.S., 2014, ICARUS 237, 52.
- [6]. Chappaz, L. et al., 2017, Geophysical Research Letters 43, DOI: 10.1002/2016GL071588.
- [7]. Kaku, T. et al., 2017, Geophysical Research Letters 44, 10,155.
- [8]. Cusshing, G.E. et al., 2007, Geophysical Research Letters 34, L17201.
- [9]. Cusshing, G.E. et al., 2015, 2nd International Planetary Caves Conference, abstract #9026.
- [10]. Goto. Y. et al., 2017, JAXA-RM-16-008.
- [11].Hörz, F. 1985, in Lunar Bases and Space Activity of the 21st Century, 405.

^{特集「古今未曽有の日本の月/火星地下世界探査(UZUME)計画」} 古今未曽有の日本の月/火星地下世界探査 (UZUME)計画における アウトリーチ活動の歩みとその成果

新井 真由美¹, 藤原 靖², 山田 竜也³, 河野 功⁴, 春山 純一⁴

(要旨) 月火星の縦孔・地下空洞直接探査(UZUME) 計画の広報アウトリーチを2013年より実践してきた.研究者やアウトリーチチームによるボランタリーな研究広報とは別に,月の縦孔が取り上げられた映画,舞台,賞等多様なメディアでの展開がここ何年かで登場してきている.これは,月の縦孔の発見と地下空洞の存在の可能性が示された研究結果をうけて,その場所が脚本家・主催者等に魅力的に映ったからであろうか.本稿前半では,UZUME計画アウトリーチ活動の変遷を振り返り,その課題認識を行う.後半ではUZUME計画が目指す月の縦孔や地下空間を題材としてとりあげた多様なメディア作品等の紹介を行いつつ,月火星の縦孔・地下空洞を一般に広く知ってもらうための道筋について考察する.

1. 背景および目的

2009年,日本の月探査機SELENE(愛称「かぐ や」)の科学者チームは、月に3つの巨大な縦孔を 発見した[1].同様の縦孔は火星にも発見されてい る[2].こうした縦孔の底には、横方向に広がる巨大 な地下空洞が広がっていると考えられており、隕石や 放射線の遮蔽性から将来の月/火星面基地建設地と しても有望視されている、月火星の縦孔および地下 空洞を探査する計画「Unprecedented Zipangu Underworld of the Moon/Mars Exploration (UZUME:古今未曽有の日本の月/火星地下世界 探査)計画」(以下,UZUME計画と略す)が、現在、 多くの研究者により構想されている、計画では、月 面基地候補としての環境探査(人類の存在領域の拡

1.日本火星協会 2.横浜国立大学大学院 3.ナスピア/宇宙作家クラブ 4.宇宙航空研究開発機構 arai@marssociety.jp 大) もさることながら,地質・地形・環境の探査,生命 探査など多くのそして重要な科学探査が視野に入れ られている.縦孔の数は限られ,また基地として有 意義なことから先取権を主張する国が現れ,科学探 査に大いに支障を来すとも限らない.UZUME計画 の実現のためには,この探査の様々な面での重要性 を国内に訴え,計画を進める予算を獲得する必要が ある.多額の予算を使う宇宙開発プロジェクトでは, 国民の支持を得る必要があり,そのために,アウト リーチ活動が重要であると考える.

筆者らは、UZUME計画は教育面等で日本の社 会に大きく貢献できる要素を含むと考え、2013年よ り月の縦孔に関する「月の縦孔探査かるた」(後に、 「月の地下どうくつ探検かるた」と改名)を開発し、か るたイベントを実施してきた[3,4].また、UZUME 研究に携わる研究者による一般向けの講演会も推 進してきた.さらに、2017年の月の縦孔に続く地下 空洞の発見に関する研究発表は、テレビやネットの ニュースでも取り上げられ、多くの一般市民の目に触 れる絶好の機会であった[5].そこで、本稿前半では、 UZUMEアウトリーチ活動の変遷を振り返り、その 課題と解決策を考察するとともに、後半では、昨今 の多様なメディア展開の事例を取り上げ、月の縦孔 を一般に広く知ってもらうための道筋について考察 する.

2. UZUMEアウトリーチ活動

アウトリーチ活動とは、文部科学省による用語説 明では「国民の研究活動・科学技術への興味や関心 を高め、国民のニーズを研究者が共有するため、研 究者自身が国民一般に対して行うコミュニケーショ ン活動のこと」と解説している[6]. UZUMEにお けるアウトリーチ活動は、第1に研究者自身によるも の、第2に研究会等に参加している関係者(研究者 以外も含む)からなるアウトリーチチームによるもの があげられる.

2.1 UZUME研究者によるアウトリーチ活動

第1にUZUME計画に携わる研究者自身による 主なアウトリーチの取り組みについて①から④で紹 介する(表1).

 研究者自身による講演活動 	
② 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)での特別公開	
③ 月球儀への縦孔名記載	
④ 研究者による一般書籍や一般雑誌への執筆活動	

表1: UZUME研究者による主なアウトリーチの取り組み

①研究者自身による講演活動

講演の依頼を外部団体から受けて実施する場合 もあるが、UZUME計画に携わるメンバーからの働 きかけにより、講演会開催に至った事例もある。例 えば、本稿筆者である春山が講演を行った例として は、ミュージアムパーク茨城県自然博物館の第65回 企画展「洞くつ探検一地下に広がるふしぎな世界一」 開期中の講演会「月で見つけたスゴイ地下洞くつの 話」や、千葉市科学館の千葉キッズサイエンストーク 「月に行く時代がやってきた~月の地下空洞の発見~」 等である。

②宇宙航空研究開発機構(JAXA)での特別公開 IAXA相模原キャンパス特別公開では、研究者に よるUZUME計画の展示紹介に加え、本稿著者の 春山らによる呼びかけでJAXA以外に所属する学 生や社会人によるボランティアも加わり、本計画の PRやファン獲得に一丸となり取り組んでいる。

③月球儀への縦孔名記載

地球儀メーカーの株式会社 渡辺教具製作所の 月球儀への縦孔名記載も,月の縦孔のPRに一役 買っていると考える.2013年に製作された月球儀 KAGUYAは,月探査機「かぐや」による月面の詳細 な探査情報をもとに作られたもので,本稿著者の春 山が記載に主体的に関与している.月球儀は,馴染 み深い黄色の月と,高度が色分けされたグレーの月 と2種類あり,どちらも「静かの海縦穴」「マリウス丘 縦穴」「賢者の海縦穴」と記載されている(図1).さ らに、「かぐや」の探査情報を元に作られた平面版の 月面ポスター「KAGUYA月面図」にも3つの穴名の 記載があり,渡辺教具製作所の渡辺美和子取締役 会長は、「月面ポスターは、プレゼントにお勧めです」 と述べている.



図1: 月球儀KAGUYA(画像提供:渡辺教具製作所)

④研究者による一般書籍や一般雑誌への執筆活動

月の縦孔に関する記載のある書籍や雑誌を表2に まとめた.前述の①②③は宇宙や月に興味のある人 が主対象であったが,④の書籍になることで,対象 は大きく広がったといえよう.例えば,佐伯和人氏の 著書『月は僕らの宇宙港』には,縦孔の特徴やでき 方,月面基地として有利である点などが述べられて おり,挿入地図には「静かの海の縦孔」名が記載さ れている.また,この書籍は,全国学校図書館協議 会が中学校の部の課題図書2017として認定された ことで,全国の書店や図書館,学校図書館に設置さ れ,さらに読書感想文の書き方サイトが独自に登場 したり、大阪府立中央図書館では第10回本のPOP 広場入賞作品にも選ばれたりしている[7].課題図 書に選ばれた理由を佐伯氏に伺ったところ「出版社 の方に聞いた話では、近年学校では能動的な学習と いうのが推進されており、本書のミニ実験コーナー が評価されたのではないか」ということである. ま た. UZUME計画のリーダーで本稿筆者の春山は. 電子書籍で『月の縦孔・地下空洞とは何か:月探査機 「かぐや」による縦孔発見から「UZUME」計画まで』 を出している、ここには、月の縦孔発見に至る経緯 のほか、発見の意義、月のみならず太陽系内の縦孔・ 地下空洞についても記載している. また、UZUME 計画のアウトリーチについても、どの書籍よりも詳細 に述べている[8]. また. 寺蘭淳也氏の著書『夜ふか しするほど面白い月の話』は、宇宙飛行士の山崎直 子氏推薦の帯には「宇宙探査やIAXAの広報に長 年携わってきたテラ金さんの言葉だからこそ魅力が 伝わってきます」と記載があり、この書籍全体は、 寺 薗氏のわかりやすい口調とテンポのよい解説からな るQ&A形式でまとめられている. 具体的には「Q 月 に穴があると聞きました。本当ですか? A 洞窟 の一部が崩壊してできた穴/はい. 月には穴があり ます、この穴とは、別項で触れたクレーターのことで はありません.正真正銘の「穴」です.」という出だし で述べられ、「かぐや」が発見したことや、 溶岩チュー ブのでき方,「ウズメ計画」にも触れている[9].

タイトル	著者名/出版社名/発売日等
世界はなぜ月をめざすのか	佐伯和人(著), 講談社 (ブルーバックス)(2014/8/21)
月は僕らの宇宙港	佐伯和人(著), 新日本出版社(2016/10/23)
ジュニアエラ (特集 月探査最前線)	朝日新聞出版刊(2017年8月号) p.13-20 佐伯和人(監修)
月の縦孔・地下空洞とは何か: 月探査機「かぐや」による縦孔発見 から「UΖUME」計画まで	春山純一(著),ロビー出版; 第二版(一) 版 (2016/10/25), Kindle版
夜ふかしするほど面白い「月の話」	寺薗淳也(著), PHP文庫(2018/1/18)
月はすごい 資源・開発・移住	佐伯和人(著),中公新書 (2019/9/18)

表2:研究者が執筆した月の縦孔が紹介されている一般向け書籍等

2.2 アウトリーチチームによる取り組み

第2に, UZUMEアウトリーチチームが主体となっ たUZUMEの主なPR活動について,以下,①から ⑤で紹介する(表3).

① 「月の地下どうくつ探検かるた」の企画・制作・実施
②「高等学校の授業」での紹介
③「宇宙博2014-NASA・JAXAの挑戦」への出展
④「子供向けイベント」の企画・実施
⑤ ホームページやFacebookページの開設・運用

表3: UZUMEアウトリーチチームによるUZUMEの主なPR活動

①「月の地下どうくつ探検かるた」の企画・制作・実施

本稿筆者の新井は、UZUME計画を分かりやす く市民に伝える科学コミュニケーション・ツールとし て「かるた」を考案し、2013年、「月の縦孔探査かる た研究会」を発足し、有志でかるたの製作を行い、 2014年より各種イベントにかるたを出展してきた(図 2).かるたは「月の地下どうくつ探検かるた」と命名 し、2014年からの3か年で15回以上行った.神奈川 県の「子どもサイエンスフェスティバル」や「青少年の ための科学の祭典」、大阪市立科学館で開催された 「こどものためのジオ・カーニバル」への出展等を通 じ、小学生を中心に実施し、合計体験人数は1000人 を超える.またFacebookページも開設しイベントの 告知なども行った.かるた体験時には、月に関する 10分程度の紙芝居を行い、月の縦孔・地下空洞への 興味を喚起させ、研究の意義を事前に伝えた.



図2:「月の地下どうくつ探検かるた」とロゴの例

②「高校の授業」での紹介

2015年7月の神奈川県立立向の岡工業高等学校 定時制・総合学科 生徒会が「フランス国立先端技 術学校 卒業研修生13名」を対象にかるたを実践し た.また,同科の理数「地球生態学入門」(学校設定 科目2~4年次選択科目)では,2019年に9名を対 象に,東海大学大学院JAXA技術研修生の郭 哲也 氏による授業「月の地下空洞の探索」を実施した.か るた実践を通した事前学習も合わせて行った.いず れも当時,同校の理科教論であり,本稿筆者の藤原 がコーディネートしている.

③「宇宙博2014-NASA・JAXAの挑戦」への出展 2014年に幕張メッセで開催された宇宙博(主催 NHK, NHKプロモーション,朝日新聞社)に出展協 力した.具体的には,縦孔のジオラマ模型の展示, 「月の縦孔探査かるた」(原案)のポスター展示,さら には、展示前での研究者自身による生解説やボラン ティアによる展示解説も行った.模型前で、本稿筆 者の春山が解説を始めると50名を超える人だかり ができ、質問が絶えなかった.また、かるた(原案) は、本稿筆者の新井が現場で紹介し解説を行った (図3).

④「子供向けイベント」の企画・実施

かるた以外のイベントを考案し、地方での展開を 試みた.本稿筆者の新井が茨城県つくばみらい市 で主催している「つくばみらい子供科学教室」内で、 2015年には「月の地下の家をつくろう!」というオリ ジナルワークショップを企画・実施した.これは、絵 本『ちか100かいだてのいえ』(偕成社,いわいとし お著)から発想を得て、月の地下に住むうさぎから パーティの招待状が届き、うさぎのリクエストに応え て、地下に様々なアイテムを手分けして描いて月の地 下空間を作り上げるという工作型の子供向けイベン トである.このイベントでは、月の地下に森や、学校、 遊園地など多様な機能を持たせて、楽しい月の地下 世界を子供たちに想像させた.



図3:「宇宙博2014」での様子



図4: 「月の地下の家をつくろう!」完成作品と月の地下パーティーへの招待状(右下)

⑤ホームページやFacebookページの開設・運用

UZUMEのホームページは本稿著者の山田が中 心に管理し,Facebookページは,同じく本稿著者 の藤原と新井が中心に更新を行っている[10-12]. 月に関する記事や,学会等での発表の予告,かるた イベントの案内などを掲載しているが,更新頻度は 不定期である.

2.3 アウトリーチの課題と解決策

UZUMEのアウトリーチ活動の課題は、大きく次 の4点をあげる.①本業の傍らボランティアで行うた め、時間的・身体的・金銭的負担がかかる.②アウ トリーチの成果が見えにくい.③メンバーがあまり増 えないため、現状のアウトリーチ展開(かるた活動、 ホームページ更新、Facebook更新など)には限界 がある.④アウトリーチの成果が研究本体へフィード バックもしくは、寄与しているのか分からない.

解決策としては、①は心身ともに無理のない範囲 で行うことが先決であるが、研究予算から旅費等 の支援が出るよう働きかけていきたい、②について は、イベント等の後には学会等での発表を心がけて きたが、今後は本稿のような記事投稿に力を入れて いきたい、③については、毎年、JAXA相模原の特 別公開で、UZUMEブースのサポートをUZUME計 画の応援団とも呼べるボランティア有志が行い、そ の研究の意義や将来性について研究者とともに市民 に訴えてきた、各種"イベント"というものを通じて、 UZUMEはまさにボランティアや市民、そして多彩 な研究者と一体となって盛り上げていく計画である 素地が確立してきている、少しずつではあるが、着 実に応援団は増えてきており、今後も継続が必要と 感じる.④アウトリーチの成果のUZUME計画への 還元であるが、これはまさに今後積極的にしかけて いきたい、その一つとして本稿を位置付けたいと考 えている.

3. 多様なメディア展開事例

UZUME関係者による書籍やアウトリーチチームによるイベント実施等に限らずとも、2016年以降、 多様なメディア(映画、テレビ番組、舞台、コンテスト等)内に、月の縦孔・地下空洞が登場・紹介されている。特に2017年の月の縦孔・地下空洞に関する発見 のテレビニュースは広く国内にその存在をPRする一 助になったと考える。多様なメディア展開の事例を 表4に記すとともに、以下に紹介する。

3.1 まんが『宇宙兄弟』

まず1つめは、まんが『宇宙兄弟』に月の縦孔が掲 載されている。具体的には第28巻に、主人公の一 人のムッタが、月面で穴を発見するシーンが登場す る(図5)[13].講談社経由で「なぜ、月の縦孔を登 場させたのか?」についてインタビューを行なったとこ ろ「パラソルアンテナが紛失してしまった理由を考え たら、月のトンネルに落ちたのでは?という仮説がた ち、その形を考えたら縦孔が結果的に登場した」と の回答を得た。また、縦孔を著者が知ったきっかけ については「上記のパラソルアンテナを考えていた流 れで、月のトンネルに落ちたのでは?という話が出て から、地下空洞の存在を知りました。ですので、その ことに詳しかったわけではないです.」との回答を得ている.



図5:「宇宙兄弟」 ©小山宙哉/講談社

3.2 小説「映画ドラえもんのび太の月面 探査記」

続いて2つめは,書籍『小説「映画ドラえもんのび 太の月面探査記」』である[14].国民的人気キャラク ターのドラえもんの作品に月の縦孔・地下空洞が登 場するシーンは,のび太がうっかり月の穴に落ちると いう設定で始まる.本稿著者の新井は,文字情報だ けで展開していく小説版の月地下世界が,映画では どのようにビジュアルとして描かれるのか,非常に興 味を持った.また,小説は,小学生向けのルビ付き の本と,ルビのない本の2種類が出ている(図6).



図6: 小説「映画ドラえもん のび太の月面探査記」 左:ルビ付き小学生向け 右:大人向け 小説風 藤子・F不二雄(原作),辻村深月(著),小学館(2019/2/12)

カテゴリ	作品名等	主催・製作者・公開日等
まんが	宇宙兄弟(28巻)	小山宙哉(著), 講談社 (2016/4/22発売)
書籍	小説「映画ドラえもんのび太の月面探査記]	藤子・F・不二雄(原作), 辻村深月(著), 小 学館(2019/2/12)
映画	映画ドラえもん のび太の月面探査記	藤子プロ・小学館・テレビ朝日・シンエ イ・ADK 2019 (3/1 公開)
テレビ番組 プラネタリウム	忍たま乱太郎の宇宙大冒険withコズミックフロント ☆NEXT月ウサギがクレーターをかけるの段	初回テレビ放送:2016年3月5日 プラネタリム:2017年制作
舞台	超絶ブルームーン ~2067年, 宇宙の果ての秘密基地へキミに愛に行く~	宇宙食堂, 2017/7/28~30開演
コンテスト	第3回宇宙建築賞『Uzumarch』	宇宙建築コンテスト実行委員会(主催) 2016年10月募集

表4: 月の縦孔が登場する多様なメディア



図7:「映画ドラえもん のび太の月面探査記」ポスターとロゴ (c)藤子プロ・小学館・テレビ朝日・シンエイ・ADK 2019

3.3 映画ドラえもん のび太の月面探査記

3つめは、この映画版である.月の地下空洞は、月 に住むルカたちの居住空間になっており、1本の大 きな木をシンボルに、小川が流れ、家畜などを飼っ ている豊かな世界として描かれている(図7.図8). 映画では、前人未踏で暗黒の月の地下世界を色彩豊 かに魅力的に描かれており、ほのぼのとした平和な 世界として表現されている.登場人物のセリフ「月に こんな たて穴があるなんて」(しずかちゃん)や[こ こは月のマグマの通り道, 溶岩チューブを改造して つくったコロニーなんだ | (ルカ)には、研究者が述べ る言葉とは異なる一種の感動を覚えた。小学館のド ラえもんルームを通じて、月の縦孔を登場させた経 緯について伺ったところコメントを頂戴したので一部 紹介する、「八鍬新之介監督が、科学雑誌かインター ネットのニュースを見てかぐやのデータをもとに発見 された月の縦孔について知ったそうです。 シナリオ 会議の際に,著者の辻村深月先生と八鍬監督とで 相談をしていく中で、月の縦孔のことについて話題 になり、辻村深月先生が脚本を書かれたそうです」

3.4 プラネタリウム番組『忍たま乱太郎』

4つめは、プラネタリウム『忍たま乱太郎の宇宙大 冒険 with コズミッククフロント☆NEXT 月ウサ ギがクレーターをかけるの段』である[15]. 忍たま乱 太郎は、NHKで放送されている子供向けの人気ア ニメである.「月ウサギがクレーターをかけるの段」 の初回テレビ放送は2016年3月で、その後2017年に プラネタリウム番組としてつくばエキスポセンターや ぐんまこどもの国児童会館、佐賀県立宇宙科学館等 の全国8館以上のプラネタリウムで上映されている.



127

図8: 「映画ドラえもん のび太の月面探査記」のワンシーン (c)藤子プロ・小学館・テレビ朝日・シンエイ・ADK 2019

大まかなあらすじは、以下のとおりである.山田先生 がでんこさんに女装し、月に行ってしまう.乱太郎た ちは、宇宙船になった"あひるさんボート"で月まで追 いかけて行く.月で出会ったサングラスをかけたウサ ギの道案内で月観光をする.「虹の入り江」「チェーン クレーター」「直線壁」「ティコクレーター」そして、「ど うくつ(マグマの流れたあと)」が高精細画像で紹介 される、というもの.つまりここでは、月の穴は月の 代表的な観光スポットの一つとして登場している.

3.5 舞台「超絶ブルームーン」

5つめは、舞台『超絶ブルームーン~2067年、宇宙 の果ての秘密基地へキミに愛に行く~」である、宇宙 専門の演劇ユニット「宇宙食堂 | が2017年に公演し たものである(図9). UZUME計画も特別協力とし て名を連ね.劇場通路に科学解説パネルを展示さ せていただいた.本舞台では、月の縦孔は月面基地 (コロニー)として、地下の横穴は月の空港につなが る迷路として登場する(図10).また、月の重力キャ ンペーンとして「UZUMEキャンペーン」という名が 用いられ、アマテラスオオミカミの説明も俳優のセリ フにある、脚本家の新井総氏に月の縦孔を脚本に取 り入れたきっかけを伺ったところ、以下のような回答 を得たので紹介する.「これは、日常的な宇宙リサー チの一環です、本公演は、月基地が舞台の『月面半 魚人』という作品の続編で、『月面半魚人』の公演と 「かぐや|打上げがほぼ同時期で、ずっと「かぐや|の データは拾っていました.次に月の話をする時は、か ぐやのデータを使おうと考えていました. そして本公 演では、縦孔の奥に月基地(コロニー)を作る設定に しました、そしたら、公演終了の49日後に、横穴発 見のニュース!創作劇が未来を的中した瞬間でした.

いやぁ面白い. 宇宙や未来は, 繋がっているんです」



図9: 月をテーマにした舞台のポスター(提供:宇宙食堂)



図10:舞台『超絶ブルームーン~2067年、宇宙の果ての秘密基地へ キミに愛に行く~』(提供:宇宙食堂) (a)壇上の奥に見えるグレーの大地が月の大地。人々はその下 (地下の孔の中)に住んでいる…というイメージ (b)縦孔迷路の入口の扉。

3.6 建築デザインのコンテスト「宇宙建築賞」

6つめは、2016年に開催されたコンテスト「宇宙 建築賞」のテーマに選定されたことである.このコ ンテストは、宇宙飛行士の山崎直子氏をはじめ建築 家や研究者の協力のもと、「宇宙建築の会」が2014 年度から始めたものである.第1回目の課題は「宇 宙観光」、第2回目は「木星の月」、そして第3回目は 「Uzumarch」であった(図11).Uzumarchという 名称だけでは全くイメージが湧かないが、具体的に は22世紀に月面洞窟に居住を始めた第一世代の人 類が舞台になった超短編SFを読み、「人類の未来 について有益な月面施設を設計する」ことが設定条 件であった.このコンテストの課題を決めたのは、主 催団体の宇宙建築コンテスト実行委員会であり,本 稿著者の春山は,審査員として依頼を受け参加して いる.第3回の応募作品は21作品あり,大学生や社 会人のチームなどが応募している.本稿著者の新 井も,社会人の有志チームで「PEACE PLANET project」と題して応募し入賞している.全作品は ホームページで公開されている[16].コンテスト形式 をとることで,質の高い"未来の月地下空間基地"の アイディアが集まり,かつ,応募者チームらは,月や その地下での建築・生活・国際協力などについて深く 考察を重ね,作品に仕上げたことであろう.



図11: 建築デザインコンテスト「第3回宇宙建築賞」募集要項の一部抜粋 課題はUzumarch。 ©宇宙建築コンテスト実行委員会/TNL

4. 考察とまとめ

UZUMEのアウトリーチは、2012年頃より、研究 者自身による活動(フェーズI)と、その周辺のコミュ ニティからなるアウトリーチチームによる活動(フェー ズⅡ)とで、並行して行われてきた(図12). JAXA 特別公開や「かるた」イベント等は、宇宙や科学に関 心がある親子や大人が主なターゲットであり、来場 者も主にイベント開催地周辺住民が大部分であると 想定される.一方,書籍であれば全国に読者が広が り、月の縦孔について知名度・理解度が広がると考 える.また、宇宙博については、期間も2か月以上と 長く来場者は37万7,318人と発表された. そのうち 例えば1%の来場者が月の縦孔のジオラマやかるた のポスターに目を止めてくれたなら宣伝効果は高い. その中で、月の縦孔・地下空洞に深く興味関心を持っ た人がインフルエンサーとなってくれることを期待 する. さらに、2016年頃より、映画やテレビ、プラネ タリウム番組など多様なメディアに月の縦孔が登場

するようになった.これは,UZUMEの研究チーム やアウトリーチチームによる直接的な宣伝や交渉に よる広がりではないことが,関係者による取材で明 らかになった.多様なメディア媒体への掲載により, いわゆる宇宙や月の研究に関してアンテナの高い高 関心層や,インフルエンサー以外の一般市民へター ゲットが広がったことは,月の縦穴・地下空洞の認知 度向上につながったと期待される.

2015年に、かるた取りのイベント実施の際に小学 生200名以上にとったアンケートでは、「かるたを通 じて、新たな発見(学び)があった」と答えた子供は 参加者の6割を占めた、そして約5割の子供たちは、 もっと知りたいと回答した. さらに, UZUME計画 への応援の声やかるた自体への好評価も得た.しか しながら、月の地下どうくつに行ったとしたら何をし たいか?というアンケートへの回答では、ゲームやひ るね等、日常の暮らしや遊びの延長で回答する子供 が80%以上を占めた. はるばる月に行っても何をし たらいいのか即時にイメージが湧かないのも無理は ないが、子供たちには月世界に憧れや夢を抱いて欲 しいものである、2016年以降は、多様なメディアが 月の縦孔・地下空洞を取り上げているため、市民が月 の縦孔について知る機会が増してきていると考える (フェーズⅢ). その結果. 読者や観覧者にとって月 の地下世界がより身近に感じられ、未来に想いを馳 せ、想像する機会も増えたのではないかと考える.

2019年はアポロ11号の月面着陸から50周年の年 であった.そのため全国各地で月をテーマにした催 しの開催や、天文雑誌の特集号の発売、テレビ等で の特別番組が放映された.その際に、月の縦孔・地 下空洞についてもこの機運に乗じて、世間に存在が より知れ渡るチャンスがあった.そこで、2019年のア ポロ特集号の雑誌4冊を調べたところ縦孔に関す る記載は2か所のみであった.寺薗氏による解説記 事内での記述「月に縦穴が存在することなど、科学 的に重要な成果が次々と見つかり、月の科学に対し て大きな貢献を行った.」[19]と、ispaceの秋元衆平 氏の発言「死の湖には学術的に興味深い縦穴があ る」[20]である.いずれの雑誌も月特集号ではあっ たものの、「かぐや」が発見した3つの月の縦孔名や UZUME計画に関する記述はなかった(表5).

仮に、雑誌等に月の縦孔・地下空洞の存在につい て記載があり、初見の読者が多くいたとして、知名 度が増したとしても、以下の点まで紹介される保障 はない、①月の縦孔・地下空洞は、日本の月周回衛星 「かぐや」が世界に先がけて発見したものである点、 ②月の縦孔に探査機を送り、日本が世界に先がけて 詳細な探査をしたいと研究計画を練っている科学 者コミュニティがいる点、③地下の構造的特徴から 月面基地として適した空間であることについて科学 的な特徴と合わせて紹介される点等.以上から、筆 者らはこれまで見えてきた課題を克服し、UZUME



図12:UZUMEアウトリーチ展開の広がりと3つのフェーズ

雑誌名・号・特集名	特集内容(月に関する部分)	「縦孔」の記載	付録 / 「縦孔」の記載の有無
ナショナル・ジオグラフィック 日本版 2019年7月号 『アポロ11号 月面着陸から50年 月に再 び立つ日』	●月へのカウントダウン ・アポロ11号の成功 ・人類は再び月を目指す ●新たな宇宙時代へ: ・宇宙を目指す国や民間企業 ・月や火星に進出する意義	なし	 ●両面ボスター 「THE EARTH'S MOON/月の素顔」 →「記載なし」
月刊 星ナビ 2019年7月号 『アポロ11号月面着陸から50年 保存版別冊付録●アポロ計画全記録 神話の 英雄を育てた計ローン』	●Geography of the Moon デカルト高原(白尾元理)	7月号 記載なし	 ●別冊付録 「アポロ計画全記録」 (解説:寺薗淳也) →「記載なし」
2019年8月号 『アポロ11号月面着陸から50年 アポロが 拓いた月の科学』	 ●ビジュアル天体図鑑「月の新たな一面」 (文:脇屋奈々代) ●アポロの遺産 探査によって拓かれた月のサイエンス(解説/寺薗淳也・白尾元理) 	8月号 記載あり P.44に1行	●両面ポスター 「アポロ計画クライマックス」×「月面 マップ」 →「記載なし」
日経サイエンス 2019年8月号 『大特集アボロから半世紀 人類、月へ』	 あの「小さな一歩」から アボロ10号 飛行士たちの足跡を追う アボロの収穫 月の石が語る太陽系の黎明期 月誕生に新説「シネスティア」 月探査ミッションの通信簿 日本が払む有人探査へのロードマップ 月面争奪戦 開かれた月面基地ムーンビレッジ構想 	あり。P.52 「死の湖には学 術的に興味深い 縦穴がある」 (ispace秋元 氏)	_

表5: アポロ11号月面着陸から50周年の特集号記事の比較 [17][18][19][20]

アウトリーチのフェーズIVを,戦略的に考える時期に 入ったと考えている.国内外では,小型月着陸実証 機(SLIM)の計画や月軌道プラットフォームゲート ウェイ計画が現実味を帯びていく中で,月の縦孔・地 下空洞探査の存在を世間から取り残されたかのよう な錯覚に陥る.しかしながら,月の縦穴を扱った映 画や小説,まんが,舞台等の多様なメディア媒体の 力に後押しされ,大きく励まされながら,UZUME 計画を実現に導きたい.2019年3月,日本航空宇宙 学会の宇宙ビジョン2050に,月の地下空洞を利用し た月面基地のキービジュアル(提供:JAXA)が採用 されている[21].このビジュアルは,本稿著者の春 山と河野への取材をもとに制作されたものである. このキービジュアルの登場により,良い意味で二次 利用が始まっている.

将来の有人月利用に向けて,月で何をしたいか・ 何をするべきかについてイメージが湧かない子供た ちが大多数であった.月の地下空洞は,その構造的 な特徴のみならず,放射線防御や温度などの観点か らも基地として最適である.そういった科学的知識 も周知していきたい.多様なメディア媒体の力との 相乗効果で,次世代を似合う子供たちに月火星の地 下世界への夢や憧れ,月火星を利用する未来社会を 描く力の養成をフェーズIVで行っていきたい.

謝辞

本稿執筆にあたり,以下の皆様にご協力頂いた. 小西麻理科様(小学館ドラえもんルーム/ドラえも ん),新井総様(劇団ユニット 宇宙食堂 主宰/宇宙 演劇),仲山優姫様(株式会社コルク/宇宙兄弟), 寺薗淳也様(会津大学 准教授/書籍・雑誌紹介), 佐伯和人様(大阪大学 准教授/書籍・雑誌紹介), 渡辺勝巳様(佐賀県立宇宙科学館 館長/ドラえも ん),渡辺美和子様(渡辺教具製作所 取締役会長/ 月球儀),Nicospyder様(イラストレーター/かるた イラスト).ここに記して深謝の意を表する.

参考文献

- Haruyama, J.et al., Geophys. Res. Lett. 36, L21206, 2009.
- [2] Cusshing, G.E. et al. 2007, Geophys. Res. Lett. 34, L17201.
- [3] 新井真由美他, 2013, 宇宙科学技術連合講演会 2F18.
- [4] 新井真由美他, 2015, 日本地球惑星科学連合
- [5] Kaku, T. et al., Geophys. Res. Lett.44,2017.
- [6] https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/

gijyutu/gijyutu2/shiryo/attach/1345270.htm

- [7] 佐伯和人, 2016, 新日本出版社
- [8] 春山純一, 2016, ロビー出版
- [9] 寺薗淳也, 2018, PHP文庫
- [10] http://kazusa.net/uzume/
- $[11]\ https://www.facebook.com/uzume.exploration/$
- [12] https://www.facebook.com/uzume.karuta
- [13] 小山宙哉, 2016, 宇宙兄弟28巻, 講談社
- [14] 藤子·F·不二雄 (原作), 辻村深月 (著), 2019, 小学館
- [15] https://www.d-dpictures.co.jp/ planetarium/1270/
- [16] https://tnlabsa.wixsite.com/tnlab/spacearchitecture-award
- [17] ナショナルジオグラフィック日本版,2019年7月号
- [18] 月刊 星ナビ, 2019年7月号
- [19] 月刊 星ナビ, 2019年8月号
- [20] 日経サイエンス, 2019年8月号
- [21] https://www.jsass.or.jp/wpcontent/uploads/2019/05/JSASS_ SpaceVision2050_20190313_JPN.pdf

特集「古今未曽有の日本の月/火星地下世界探査(UZUME)計画」 月縦孔地形による放射線防護効果

内藤 雅之¹, 長谷部 信行², 天野 嘉春³, 小平 聡¹

2020年6月26日受領, 査読を経て2020年7月25日受理

(要旨)本研究では月面と縦孔周辺における放射線環境について考察した.月面は大気や磁場がなく, 銀河宇宙線や太陽粒子線といった高エネルギー粒子に直接さらされる過酷な放射線環境である.月面に おける放射線被ばく量は実効線量当量で約420 mSv/y (太陽活動極小期)であり,こうした放射線環境 に長期間人類が滞在するためには放射線防護と被ばく量の管理が不可欠である.見積の結果,縦孔内 の被ばく量は概ね一次粒子の立体角と共に減少した.マリウス丘で観測された縦孔を仮定した場合,孔 の底の被ばく量は最大で約25 mSv/yとなり,A1の防護壁に換算すると約1 mに相当する防護効果が得 られることが明らかになった.縦孔環境は放射線防護の観点から有望であり,将来の長期間の有人探査 において重要であるといえる.本研究は,これから行われようとしているUZUME計画に重要な科学的 知見を与えるものである.

1. 宇宙の放射線環境

月面をはじめとする宇宙空間は銀河宇宙線(GCR: Galactic Cosmic Ray)や太陽粒子線に直接さら される放射線環境である.これらの宇宙放射線は 地球上では厚い大気と磁場によって遮蔽されている ので,地表における宇宙放射線由来の年間被ばく量 は約0.39 mSv/yである.国際宇宙ステーションが 周回する地球低軌道は地球磁場によってこれらの 粒子の一部は遮蔽されているが,月や深宇宙ではこ れらによる遮蔽効果は得られない.Mars Science Laboratory (MSL)の航行期間中の観測によれば, 深宇宙における定常被ばくの線量率は約660 mSv/ yである[1].重篤な放射線被ばくは深刻な健康被害 を及ぼす可能性があるため,将来の有人宇宙滞在を

1.量子科学技術研究開発機構,

2.早稲田大学先進理工学部物理学科,

3.早稲田大学基幹理工学部機械科学·航空宇宙学科 naito.masayuki@gst.go.jp 考えたとき,宇宙放射線による被ばくは探査期間を 制限する要素の一つである.従って,長期間の宇宙 滞在には,乗組員の放射線防護と被ばく量の管理が 不可欠である.

銀河宇宙線は太陽系外から定常的に飛来する粒 子群で,そのほとんどが高エネルギーの荷電粒子 によって構成される.構成粒子の約87%が陽子,約 12%がヘリウム核,残りの約1%がリチウム以上の重 粒子成分である[2].銀河宇宙線粒子は太陽風が引 き延ばした惑星間磁場と相互作用して変調されるた め,太陽活動に依存してその強度が変化する.太陽 活動は約11年を周期として極大と極小を繰り返して おり,銀河宇宙線の強度は太陽活動極大期に極小 となり,極小期に極大となる.太陽活動極大期に極小 となり,極小期に極大となる.太陽活動極小期と極 大期における銀河宇宙線のフラックスはそれぞれ 5 particles/cm²/sと2 particles/cm²/s程度で ある[3].銀河宇宙線粒子のエネルギースペクトルは 複数のモデルが構築されており,数百MeV/nにピー クをもち,10 GeV/n 以上の高エネルギーでは冪型

スペクトルである[3, 4].

太陽粒子線は爆発的な太陽活動によって太陽表 面から宇宙空間へ放出される粒子群である ほと んどの太陽粒子は10 MeV/n以下であり、固体や液 体中の飛程*がµm程度と短い. そのため防護が容 易であり、放射線被ばくとして問題になることはあ まりない、しかしながら、大規模な太陽フレアやコ ロナ質量放出などの太陽イベントに伴い、GeV/nを 超える高エネルギー粒子(SEP: Solar Energetic Particle)が大量に放出される。一部の大規模イベ ントではSEPのフラックスが極めて大きく、二次粒子 (中性子)の線量率が短時間で上昇するイベントとして 地上で観測される. これらをGLE(Ground Level Enhancement)イベントと呼んでいる. GLEイベン トは1951年に中性子モニターが導入されて以来、約 70年間で70以上が観測されている[5]. こうしたイベ ントは地表で観測されるものだが、地球周回の月表 面でも同様に大規模な粒子イベントとして観測され るだろう. これまでの地球周回衛星による観測では 1イベントで最大10¹⁰ particles/cm²近いフラックス のGLEイベントが報告されており[6]、大規模イベン トでは被ばく量も大きくなることが懸念される.

これらの放射線から身を守るための手段として, 放射線遮蔽材による受動的な防護や電場・磁場を 用いた能動的な防護が検討されてきた[7,8].特に 月面に関しては,月面物質や月の溶岩洞を放射線 防護に利用することが有望である[9,10].かぐや (SELENE)の観測によって発見された縦孔地形は, その成因から地下の溶岩洞へと続いていると考えら れている[11].溶岩洞の内部は低線量率な放射線環 境に加え,安定した温度環境と微小隕石から身を守 ることが可能であり,過酷な宇宙環境で人類が滞在 するための候補地として有望視されている[9].

これまでに月の溶岩洞を利用した放射線防護が 検討されている一方,その入り口としての縦孔とその 周辺領域の放射線環境は十分な検討がなされてい ない.そこで本研究では,月面と縦孔周辺領域の放 射線線量率を数値シミュレーションによって見積も り,それらを比較することで縦孔地形による放射線 防護効果を評価した.

2. 放射線線量率の見積もり

月面の放射線はその成因によって以下の3つに大 別される。

- ① 月外部由来の放射線
- ② 外部由来の放射線が月物質と相互作用すること によって生じる二次放射線
- ③月面の天然放射性核種の崩壊によって生じる放射線

①は銀河宇宙線と太陽粒子線が代表的であり、
②にはこれらの高エネルギー粒子が月物質の原子核と核破砕反応を起こすことで生成する軽い原子核の他、中性子、電子、ガンマ線、π粒子、μ粒子などが含まれる。二次粒子の中で最も影響の大きいのは中性子である。これらは一連の数値シミュレーションによってその被ばく量を見積もることが可能である。

核破砕反応による高速中性子の生成率は一般に 標的となる物質の平均原子量が大きいほど大きくな る.実際,月面ではFeやTiに富む玄武岩質の海の方 がA1やCaに富む斜長石質の高地よりも高速中性子 の存在量が大きくなることが観測によって示されてい る[e.g., 12].本研究では線量率のワーストケースとし ての見積もりを得るため,海の月面組成としてアボロ 12号のリターンサンプルの元素組成[13]を採用した. 一方で,Slaba et al.[14]は様々な月面の元素組成に 対して線量率を計算し,元素組成の二次粒子線量率 への寄与は最大で銀河宇宙線に対しては9%,GLE イベントに対しては6%と見積もっている.このことか ら,月面元素組成について二次粒子が線量率に与え る影響は大きくないことが明らかになっている.

銀河宇宙線と代表的なGLEイベントを一次粒子 として月面と縦孔地形周辺に照射し,一次粒子と二 次粒子による月面線量率と縦孔内の線量空間分布 を数値シミュレーションによって見積もった.粒子の 輸送と生成の計算には粒子・重粒子輸送計算コード PHITS ver.3.17[15]を用いた.図1に計算に用いた ジオメトリの概念図を示す.縦孔の大きさはφ50 m × 43 m(マリウス丘の縦孔)とし,孔の底から水平に 高さ17 mの溶岩洞へつながると仮定した[16].月面 の線量計算は縦孔領域外の月面上φ1 m × 1 mを 観測領域として実効線量当量を得た.

^{*}物質中を粒子が走る平均の距離

図2に本研究で使用した一次粒子のエネルギース ペクトルを示す.銀河宇宙線のスペクトルはDLRモ デル[3]を使用した.太陽活動極大期(2001年)と極 小期(2010年)のスペクトルについて,水素から鉄ま での原子核を一次粒子として照射した.GLEイベン トとして,定量的なスペクトルが得られている近年の イベントから比較的強度の大きい2000年7月,2003 年10月,2005年1月のGLEを選択した[6].エ ネルギー領域は銀河宇宙線・GLEイベントともに 10 MeV/nから10 GeV/nまでとした.

③はK, Th, U系列の放射性核種由来のガンマ線 が主である. これらの元素存在量はこれまで複数の ガンマ線観測によって月面の存在量分布が求められ ており[e.g., 17, 18], その存在量から線量率を推定 可能である. これらの不適合元素は共通してコペル ニクスの南東部周辺(フラマウロ地域)で最大濃度が 観測されている. 今回は線量率が最大になる場合を 仮定するため, K, Th, Uについてそれぞれ観測値 の最大となる4,300 ppm, 13 ppm, 7.3 ppmを採 用し,線量率を求めた.

それぞれの放射線の存在量から線量への換算に は国際放射線防護委員会の2013年勧告[19]によっ て得られた,人体モデルへ等方照射したときの実効 線量当量への変換係数を用いた.



図2: 銀河宇宙線(太陽活動極小期: GCR min, 極大期: GCR max)とGLEの陽子スペクトル[3, 6].

3. 月面の放射線線量率

銀河宇宙線とGLE粒子照射時の一次粒子・二次 粒子による月面の縦孔領域外での線量率をそれぞ れ表1に示す. 定常被ばくである銀河宇宙線による 線量率は太陽活動極小期で416 mSv/y, 極大期で も161 mSv/yとなった. 極小期の一次粒子による被 ばく量は356 mSv/yであり, Zeitlin et al.[1]によっ て見積もられた深宇宙での被ばく量の約半分であ る. 月によって銀河宇宙線の半分は遮蔽されている ため, 実測値と比較して矛盾しない結果が計算で得 られている. JAXAの規定する宇宙飛行士の生涯 被ばく量の制限は表2の通りである[20]. これらの 比較からも, 月面での長期間の滞在を考えた場合, 戦略的な放射線防護と被ばく量管理の必要性は明 らかである.

GLEイベントによる被ばく量は銀河宇宙線による 線量率と比較して大きく、1 Svを超えるイベントもみ られる.一方で、GLEイベントによる被ばくはほとん どが一次粒子によるものであり、二次粒子の寄与は 小さい、それに対して、銀河宇宙線は二次粒子の線 量率が全体の20%前後を占める.この違いは銀河 宇宙線とGLE粒子のエネルギー分布の違いに起因 するものである. 図2からもわかるように, GLE粒子 はいずれも100 MeV以下の低エネルギー領域の粒 子の占める割合が大きい。100 MeV以下の陽子の 核破砕反応断面積は小さいため, GLEの線量への 二次粒子の寄与が小さくなったと考えられる.太陽 活動極小期と極大期の銀河宇宙線で比較しても、極 大期の方が二次粒子線量率の占める割合が大きく なっている. 図2から、極大期の方が極小期よりも高 エネルギー粒子の占める割合が大きいことがわかる ため、合理的である.

ー次粒子のエネルギー分布の違いは遮蔽材を用 いた際の防護効果にも表れる.図3はアルミニウム とポリエチレンを遮蔽材として用いた場合の太陽活 動極小期の銀河宇宙線と3つのGLEの線量率の変 化である.エネルギーの低い粒子の割合が大きい 2000年7月と2003年10月のGLEイベントは10g/ cm²以下の遮蔽で被ばく量を10%以下まで低減可能 だが,銀河宇宙線や2005年1月のGLEイベントのよ うな高エネルギー成分が大きいイベントでは遮蔽効
果が小さいことが分かる.これらの遮蔽効果の差は 入射粒子の飛程の長さの違いに起因する.

表1と図3から分かる通り,GLEイベントによる線 量は非常に大きいが,遮蔽材を用いたGLE粒子の 防護は十分現実的である.従って,有人宇宙滞在に 際しては太陽活動を定常的に観測し,大規模イベン ト時には一時的に防護壁内に退避することで重篤な 被ばくを避けることができる.

天然放射性元素由来のガンマ線による線量率は 計算によって0.32 mSv/yと求められた.表1の値 との比較から分かる通り,天然放射性元素由来の 線量率は銀河宇宙線やGLE粒子による線量率と 比較して3桁から4桁小さい.従って,月面における 被ばく量の位置による変動は元素組成の違いによ る二次粒子の線量率にのみ依存すると考えてよい. Slaba et al.[14]から,月面線量の変動は全体とし ては数%のオーダーであると推定されるため,月全 球の線量率は概ね一様であるといえる.ただし,本 研究で対象としている縦孔地形など,月面に存在す る地形が一次粒子の一部を遮蔽することによって局 所的に低線量領域を形成することは考えられる.

4. 縦孔とその周辺の線量分布

ここまでの結果から分かるように、一次粒子が GLE粒子の場合には二次粒子はほとんど発生しな い.縦孔内部の一次粒子による線量空間分布は、イ ベントが変わっても線量率の絶対値が変わるのみ で、ほとんど同様の分布を示すと考えられる.従っ て、縦孔領域の線量分布については銀河宇宙線の 太陽活動極小期のみを扱い、その結果を一次粒子 と二次粒子に分けて記載する.それぞれについて別 の粒子イベントの月面線量率で規格化することで、 縦孔領域のそのイベントの線量分布を概ね推定は可 能である.

図4に縦孔中央φ10 m の線量率の深さ依存性を 示す.線量率は一次粒子・二次粒子ともに深さと共 に減少し,全線量率は孔の底で約25 mSv/yと,月 面縦孔領域外の10%以下になった.遮蔽材によって 線量率を10%まで低減するには,アルミニウムなら 約250 g/cm²,ポリエチレンなら約150 g/cm²が必 要である(図3).この厚さの遮蔽材を月面に直接持ち 込むことは輸送コストが大きく,現実的ではない.こ

	GCR (太陽活動極小期)		GCR (太陽活動極大期)		2000.07. GLE		2003.10. GLE		2005.01 GLE	
	実効線量		実効線量		実効線量		実効線量		実効線量	
	当量	誤差	当量	誤差	当量	誤差	当量	誤差	当量	誤差
	(mSv/y)		(mSv/y)		(mSv)		(mSv)		(mSv)	
一次	356	16.6	125	4.3	2330	134	1610	92.9	194	13.6
二次	59.6	6.7	35.8	1.6	26.2	21.8	< 0.1		3.9	3.4
計	416	17.7	161	4.8	2360	136	1610	93.0	197	13.7

表1: 月面での銀河宇宙線とGLEイベントによる実効線量当量.

宇宙飛行を初めて	実効線量当量 (mSv)					
行った年齢	男性	女性				
27-30	600	500				
31-35	700	600				
36-40	800	650				
41-45	950	750				
46-	1,000	800				

表2.: 宇宙飛行士の生涯被ばく制限[20].



図3: 銀河宇宙線とGLEイベントにアルミニウム(AI, 実線)とポリ エチレン(PE, 点線)を遮蔽材として用いた場合の線量率の 遮蔽厚さ依存性.0g/cm²でそれぞれ値を規格化している. のことから,縦孔を利用することによる遮蔽は遮蔽 材を使用するよりも効果的であり,低線量率を月面 で実現するための手段として有望であるといえる.

縦孔内の線量率の変化は概ね立体角の変化によ るものである.一次粒子の線量率は線源の立体角の 変化(図4緑太線)とほとんど線形に変化している. 一方で,二次粒子の寄与は孔の底で50%程度まで 増加している.二次粒子の寄与の増加は二次粒子源 となる壁や地面の占める立体角が孔の深くに入るほ ど増加するためであると考えられる.なお,このとき 天然放射性元素由来のガンマ線の存在量も壁や地 面の立体角と共に増加すると考えられる.今回仮定 したK,Th,Uの存在量であれば,その被ばく量は 最大で約1.2 mSv/yである.

月物質によって遮蔽され,一次粒子を天頂開口部 の立体角分まで被ばく量を低減することができると いう縦孔の特徴は,宇宙環境の放射線防護では特 に有効である.図3に示したように,銀河宇宙線のよ うな飛程の極端に長い粒子イベントに対しては防護 材を用いた放射線防護は効果が薄い.従って,縦孔 環境は一次粒子となるイベントの種類や大きさに寄 らずほぼ一定の割合で被ばく量を低減可能であり, 月面で人類が長期間滞在するのに有望な候補地で あるといえる.

図5に縦孔の底から高さ1 mの領域における線量 率の水平位置依存性を示す.銀河宇宙線による線 量率は縦孔の縁周辺(±25 m)で約20 mSv/yであ り,横孔に入ることでさらに小さくなる.国際放射線 防護委員会の定める地球上での公衆被ばくの基準 値は1.0 mSv/y,職業被ばくの基準値は50 mSv/y 及び100 mSv/5yである[21].従って,縦孔を利用 することで職業被ばくの基準値程度まで被ばく量を 軽減することが可能である.直径50 mの縦孔中心 から側方の横穴(溶岩洞)へ75 m移動することで銀 河宇宙線による被ばく量は太陽活動極小期でも1.0 mSv/y以下となり,地球上の公衆被ばく基準値以下 の放射線環境を実現可能である.

ここで, Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) の斜め観測によれば,横穴の奥行は最低10数 mと されている[16].また,数値計算による見積もりで溶 岩洞の径は最大で数百mからkm[11,22],レーダ 観測による見積もりで約50 kmの長さが見込まれて いる[23]. したがって, 溶岩洞を利用して銀河宇宙 線による被ばく量を1.0 mSv/y以下に抑えることは 十分現実的であると考えられる. ただしこの場合, 天然放射性元素由来のガンマ線による被ばく量が 同程度存在する可能性がある. そのため, 本研究で 示す1 mSv/y前後の低線量環境についての計算精 度は十分でないことは留意すべきである.

なお、本研究では溶岩洞を縦孔の底からつながる 平らな空間として仮定している.実際には地面に起 伏あることや横穴が湾曲していることが考えられる. 実際の放射線環境を推定するには縦孔内部の地形 を調査し、その形状に即して計算のジオメトリを変 更する必要がある.



図4: 太陽活動極小期の銀河宇宙線による線量率の縦孔深さ依 存性. 比較のため一次粒子の立体角の変化を0 mで規格化 して示している(緑太線).



図5: 縦孔の底における銀河宇宙線線量率の水平方向位置依存性.

5. まとめ

本稿では、月面及び月縦孔地形周辺の放射線線 量を見積もった.定常的に降り注ぐ銀河宇宙線による 被ばく量は太陽活動極小期に最大の約420 mSv/y となった.また、月面の放射線環境は場所による変 化はほとんどないと予想される.太陽の大規模イベ ント(例えば地表で観測されるようなGLE)が発生し た場合、1 Svを超える被ばく量が懸念されるが、大 部分の太陽粒子イベントはエネルギーの低い粒子に よる被ばくが支配的であるため、数g/cm²の遮蔽材 によってほとんどを防護可能である.

一方,縦孔の内部では被ばく量は概ね立体角の 変化に従って減少した.太陽活動極小期の銀河宇 宙線の被ばく量は、マリウス丘の縦孔の底では約25 mSv/yまで低減可能である.縦孔の底の中心から 水平に75 m(側壁から50m)程度の空間が存在す れば、公衆被ばくの基準値である1.0 mSv/y以下 まで被ばく量を抑えることができる.従って、縦孔 地形は宇宙環境において地球と同程度の低線量空 間を提供することができ,月における長期間の有人 滞在を考えたとき、有望な地形であるといえる.本 研究は古今未曽有の日本の月/火星地下世界探査 (UZUME)計画に向けて重要な科学的知見を提供 するものである.より詳細な放射線環境するために は、縦孔内部の放射線と地形環境の実測が不可欠 である.

謝辞

本稿を投稿するにあたり、査読者である慶應義塾 大学の寺沢和洋様に有意義なコメントと提案を多数 いただきました.この場を借りて御礼申し上げます.

参考文献

- [1] Zeitlin, C. et al., 2013, Science 340, 1080.
- [2] Simpson, J. A., 1983, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 33, 323.
- [3] Matthiä, D. et al., 2013, Adv. Sp. Res. 51, 329.
- [4] O'Neill, P. M. and Foster, C. C., 2013, Tech.

Rep., NASA/TP-2013-217376.

- [5] Lopate, C., 2006, in Sol. Eruptions Energ. Part., 283.
- [6] Mewaldt, R. A. et al., 2012, Sp. Sci. Rev. 171, 97.
- [7] Durante, M., 2014, Life Sci. Sp. Res. 1, 2.
- [8] Naito, M. et al., 2020, Life Sci. Sp. Res. 26, 69.
- [9] Angelis, G. De et al., 2002, J. Radiat. Res. 43, S41.
- [10] Reitz, G. et al., 2012, Planet. Space Sci., 74, 78.
- [11] Haruyama, J. et al., 2009, Geophys. Res. Lett. 36, L21206.
- [12] Hareyama, M. et al., 2016, Nucl. Instr. Meth. A. 828, 145.
- [13] Lucey, P., 2006, Rev. Mineral. Geochemistry 60, 83.
- [14] Slaba, T. C. et al., 2011, Radiat. Res. 176, 827.
- [15] Sato, T. et al., 2018, J. Nucl. Sci. Technol. 55, 684.
- [16] Robinson, M. S. et al., 2012, Planet. Space Sci.69, 18.
- [17] Prettyman, T. H. et al., 2006, J. Geophys. Res.111.
- [18] Yamashita, N. et al., 2010, Geophys. Res. Lett. 37, L10201.
- [19] ICRP, 2013, ICRP Publ. 123. Annu. ICRP, 42.
- [20] JAXA, 2013, http://iss.jaxa.jp/med/research/ radiation/.
- [21] ICRP, 2007, ICRP Publ. 103. Annu. ICRP, 37.
- [22] Blair, D. M. et al., 2017, Icarus 282, 47.
- [23] Kaku, T. et al., 2017, Geophys. Res. Lett. 44, 10,155.

系外惑星「遠い世界の物語」その13 ~系外惑星大気中の鉱物雲~

大野 和正

2020年6月30日受領, 査読を経て2020年7月24日受理

(要旨)系外惑星の大気組成は、惑星の形成・進化過程を探る重要な手がかりである.系外惑星大気は トランジット分光観測などによって近年盛んに調べられている.しかし、多くの系外惑星は厚い雲に覆わ れていると考えられており、それらの大気組成を類推するのは容易ではない.本稿では、系外惑星に存 在が示唆される鉱物雲に関する基本的な背景を紹介した後、筆者らの近年の研究から明らかとなった鉱 物雲の鉛直構造や大気観測への影響に関する知見を紹介する.また、雲微物理モデルを応用することで 「曇った系外惑星の大気組成に対してどのような示唆が得られうるか?」「得られた大気組成は過去の惑 星形成過程にどのような示唆を与えうるか?」といった問いにも答える.

1. はじめに

今日までに4100個を超える太陽系外惑星が 発見され(2020年6月時点, NASA Exoplanet Archiveを参照). 系外惑星の発見は2019年のノー ベル物理学賞にも選ばれた.太陽系外には中心星 近傍を公転する灼熱の巨大ガス惑星(ホットジュピ ター). 大きく歪んだ楕円軌道を持つ惑星(エキセント リック・プラネット)、地球と海王星の中間サイズを持 つ惑星(スーパーアース¹)といった、太陽系には存在 しない多種多様な惑星が存在することが知られてい る. 近年ではケプラー宇宙望遠鏡などによる系外惑 星探査により、およそ2つに1つの太陽型星が系外 惑星を保持すること、スーパーアースの出現頻度が 巨大ガス惑星より桁で高いことといった統計的な情 報も明らかとなってきている[1].「多種多様な系外 惑星系はどのような物理・化学プロセスによって生ま れてきたのか?」これに答えることは、今日の惑星科

学および天文学における大目標の1つであると言って も過言ではないだろう.

系外惑星の大気組成は惑星の起源を探る有力な 手がかりの1つである.惑星大気は,惑星形成の舞 台となる原始惑星系円盤中のガスの捕獲や惑星材 料物質の蒸発・脱ガス等によって形成されると考え られており,大気組成は過去の形成過程を反映して いると期待される.例えば円盤ガス由来の大気は水 素に富むことが,一方で脱ガス大気は水蒸気や二酸 化炭素といった重元素に富むことが期待される.ま た,原始惑星系円盤は場所によって化学組成が異な ることを利用し,大気組成から惑星の形成場所を推 定する試みもなされている.

系外惑星の大気は地上・宇宙望遠鏡の双方から 盛んに調べられている. 観測的に系外惑星の大気 を探る上で,近年問題となっているのが系外惑星大

¹ここでのスーパーアースの定義付けは実は古典的なものである. 近年では地球と海王星の中間サイズの惑星のうち,約1.5地球半 径より小さい惑星をスーパーアース,それより大きい惑星をミニネプ チューンと呼ぶ風習が広まっている.本稿では便宜上,両分類をま とめてスーパーアースと呼称する.

気に存在する雲である. 雲とは大気中に存在する固 体(または液体)の微粒子群(エアロゾル)の総称であ り 本稿では特に蒸気の冷却凝縮から形成される 凝縮雲を雲と呼ぶ、水星以外の太陽系の惑星には 例外なく雲が存在し、我々の地球には水の雲、金星 には硫酸の雲、火星にはドライアイス(CO₂)の雲、木 星や土星にはアンモニアなどの雲、天王星や海王星 にはメタンなどの雲といったように、惑星の温度に 応じて多種多様な雲が存在する.本稿では系外惑星 の大気観測と絡めて、系外惑星における雲形成過程 について筆者らの近年の研究成果も交えて紹介して いく、なお、凝縮雲以外の大気エアロゾルとして、大 気中の炭化水素などの光化学反応で形成される有 機物ヘイズも近年注目を集めている. 系外惑星にお けるヘイズ形成と大気観測への影響については川島 氏による遊星人記事[2]などを参照されたい。

2. 系外惑星の大気観測と雲の問題

2.1 系外惑星のトランジット分光観測

系外惑星大気の観測手法はいくつかあるが、今日 までに最も広く行われているのはトランジット分光観 測である.トランジット分光観測とは、系外惑星大 気の不透明度が観測する光の波長に応じて異なると いう性質を利用した観測手法である.図1の概略図 を用いて具体的に紹介しよう. 系外惑星が中心星の 前を横切ると 中心星の一部が隠されることで減光 が起きる、減光の一部は惑星大気に存在する分子 や原子が中心星の光を吸収・散乱することで起きる 分子や原子には特定の波長で光を強く吸収する性質 があるため、減光率(トランジット深さと呼ばれる)は 観測波長によって異なる. 分子・原子の種類毎にど の波長の光を吸収するか異なるため、減光率の波長 依存性(大気透過光スペクトルとも呼ばれる)を調べ ることで大気組成を類推することができる. これま で約40天体ほどの系外惑星に対してトランジット分 光観測は行われており、H2O, Na, K, Heといった 様々な分子・原子の発見に成功している[3]. トラン ジット分光観測については福井氏と成田氏や川島氏 による遊星人記事[2.4]も参照されたい.

トランジット分光観測は複数の天体に対して行わ れているが、その中で大気分子の吸収が非常に弱 い系外惑星というものが多数報告されている.この ような観測スペクトルは波長依存性が弱いことから、 無特徴(featureless)、あるいは平坦(flat)スペクト ルなどと呼ばれている.平坦スペクトルの起源には いくつかの可能性があるが、その中でも広く受け入 れられているのが「系外惑星の大気上層に雲が存在 し、大気透過光を遮っている」という説である.雲に



図1: トランジット分光観測の原理の概略図. 系外惑星が中心星の前を横切った時の減光率(トランジット深さ)は惑星と中心星の半径比の2 乗に比例する.トランジット深さは観測波長によって異なり,これは大気の不透明度の波長依存性に起因している.トランジット減光率の 波長依存性を調べることで大気組成を類推できる. よって大気吸収が弱められているという説はトラン ジット分光観測が行われ始めた2000年代初頭から 示唆されており,近年のハッブル宇宙望遠鏡による 高精度観測によって確信的なものとなった[5].観測 スペクトルの平坦度合いから,系外惑星の雲はかなり 上空に雲頂²が存在することが示唆されている.例えば スーパーアースGJ436bやGJ3470bでは~10⁻³気圧³, スーパーアースGJ1214bでは~10⁻⁵気圧より上空に雲 頂が存在することが示唆されている[5-7].平坦スペ クトルは程度の差はあれど,スーパーアースからホッ トジュピターまで様々な系外惑星で報告されている.

系外惑星における雲の存在は平坦スペクトル以外 からも観測的に示唆されている.例えば大気透過光 スペクトルの可視波長域には、トランジット深さが短 波長に向かうほど連続的に増加するスロープ構造が 頻繁に観測されており、レイリー散乱を引き起こす 微小なエアロゾルの存在が示唆されている[8].系外 惑星の1軌道周期の間の光度変化(位相光度変化)は 大気の水平構造を探る有力な手段であるが、いくつ かの惑星の光度曲線は雲による反射光を反映して いると考えられている[9].これらの観測も雲の存在 を示唆するものだが、雲以外の解釈も可能である点 には注意が必要である.これらのトピックに関して は筆者の論文[10,11]などを参照されたい.

2.2 系外惑星における鉱物雲

冒頭で紹介したように,惑星大気には温度に応じて多種多様な雲が形成されうる.大気観測が行われる系外惑星の多くは中心星近傍の灼熱環境にあり,鉱物の雲という風変わりなものが大気中に存在すると考えられている.具体的な鉱物雲の成分は温度に応じて多岐に渡る.例えば温度500—1000Kの惑星ではKClやNa₂Sなどのアルカリ金属の雲が,1000—1500Kの惑星ではMgSiO₃などのケイ酸塩の雲が,2000Kを超えるような超高温惑星においてもコランダム(Al₂O₃)など高温凝縮物の雲が存在し

うる[12]. 系外惑星以外でも、中心星近傍の系外惑 星と温度帯が近い褐色矮星に対して、色指数や光度 の時間変動性などから鉱物雲の存在が示唆されている.

中心星近傍の系外惑星は潮汐固定状態⁴にある と考えられている.このような惑星では,昼-夜面の 日射差が激しい大気循環を駆動しており,大気上層 での鉱物雲形成を促進していると考えられる.激し い大気循環の存在は,大気大循環モデルを用いた 理論研究[13]に加えて,惑星の位相光度変化や分 子の吸収線のドップラーシフトなどの観測からも示 唆されている[14,15].激しい大気循環は大気上層 への雲の輸送を引き起こしうる.大気循環計算に Passive tracerを導入した研究によると,雲を構成 する微粒子(雲粒)が十分に小さければ~10⁻³-10⁻⁵気 圧のような大気上層まで雲は輸送される[16,17].こ のように,中心星近傍という特異な環境は,大気中 に分厚い鉱物雲を形成するのに適した環境であると 見ることもできる.

2.3 系外惑星における鉱物雲モデリング

系外惑星の大気観測を解釈する上で,雲の取り扱いには様々な手法がある.ここではそれらのうちの 代表的なものを紹介する.最も単純な手法は,雲が 特定の高度より下層の透過光を波長に依存せず遮 断すると仮定する,雲を"地面"として扱うものである [18].一見粗雑に見える手法であるが,実装が容易 かつ雲粒が観測波長より大きい場合には良い近似と なるため,観測を解釈する上で現在も幅広く利用さ れている.この手法は雲頂高度を推定する上で有用 であるが,一方で仮定した雲頂がどのような条件下 (大気組成など)で生成されるか,また物理的に尤も らしいかに関しては分からないという短所がある.

雲の鉛直構造や光学特性を左右する重要な要素 として、雲粒のサイズがあげられる.例えば、微小 な雲粒は重力落下の速度が小さく、大気上層まで広 がった雲を形成する傾向がある.また、観測波長よ り小さい雲粒はレイリー散乱を引き起こし、観測スペ クトルの形状に影響を与える.これらの性質を捉え るため、雲粒のサイズに何らかの仮定をおくモデル がしばしば利用されている.例えば、Ackerman氏 とMarley氏によるモデル[19]は、雲粒の落下速度

²雲が観測者に対して光学的に厚くなる高度をここでは指す.
³静水圧平衡大気を仮定して、圧力座標で高度を表現するのが慣習となっている.この方法であれば高度を定量する際に地面を定義する必要がない.低大気圧ほど大気上層に対応する.
⁴惑星の自転と公転の周期が同期していることを指す.つまり、地球と月の関係のように、惑星が常に同じ半球面を中心星に向けていることになる.

と大気の平均鉛直速度の比が一定になると仮定して 雲の鉛直構造を推定する手法をとっており,複数の 系外惑星に適用されている.別のアプローチとして, 雲粒のサイズを一定と仮定して重力落下と鉛直混合 の釣り合いから鉛直構造を推定する手法もあり,大 気循環計算におけるPassive tracerの平均鉛直分 布をよく再現することが知られている[16,17].これ らの手法は簡便さを保ちつつ,ある程度の物理的根 拠に基づいて雲構造を推定できる長所がある.一方 で,仮定した雲粒サイズが現実的かどうか分からな いという短所が存在する.

近年注目を集めているのが、 雲微物理モデルと呼 ばれる雲粒の生成・輸送・成長を自己無撞着に計算 する手法である、地球における雲形成は、水蒸気が 大気エアロゾルを核として雲粒を生成し、凝縮およ び衝突併合で成長した雲粒が雨として地表に落下す るという一連の過程を含む、 雲微物理モデルは、 こ れら雲の一生を可能な限り厳密に取り扱おうという ものである. 雲微物理モデルの系外惑星への応用 はHelling氏らが先駆的に行い[20],近年では筆者 らを含む複数のグループが精力的に取り組んでいる [21-23]. 雲微物理モデルは雲粒サイズを仮定する必 要がなく、雲の構造を半ば"予言"することも原理的 には可能である、しかし、 雲の構造を決める様々な 物理量(雲粒の種となる凝結核の存在量や大気組成 など)が系外惑星において未知なことに加えて、理論 そのもの(例えば核形成率など)にも多くの不定性が 内包される点には注意が必要である.次章からは、 筆者らの雲微物理モデルを用いた研究[21,24]から 得られた鉱物雲形成に関する知見を紹介していく.

3. 鉱物雲の形成過程と大気観測 への影響

系外惑星における鉱物雲形成過程を調べるにあ たって、筆者らはモーメント法に基づいた微物理モ デルを用いた。モーメント法とは雲粒サイズ分布の モーメント⁵の時間進化を計算する手法であり、地球 の雲形成のモデリングにも用いられている[25]. 筆 者らの過去の研究においても、地球や木星の雲の鉛 直質量分布や平均サイズをモーメント法でよく再現 できることが実際に確認された[26]. 以下では、スーパーアースGJ1214bに存在が示唆 されているKCl雲を1つの例として、雲の鉛直構造 やトランジット分光観測への影響を見ていく.KCl はGJ1214bの温度帯で最も存在量が高い凝縮可能 な鉱物である.KCl蒸気の凝縮、衝突合体による 成長、重力落下による沈降、大気循環による鉛直 輸送を考慮し、雲粒の数密度、質量密度、KCl蒸気 密度の1次元移流拡散方程式を解くことで雲の平均 鉛直分布を求めた.大気循環による雲粒の輸送は、 GJ1214bに対する大気循環計算[17]から得られた 渦拡散係数を用いて拡散項として近似した.

雲微物理モデルを用いる目的の1つは、系外惑星 大気中で雲粒がどのようなサイズを持つのかを理解 することである. 雲粒サイズに制約を与えることがで きれば、雲の鉛直方向の広がりや観測スペクトルを 解釈する際の助けとなる. 形成されうる雲の構造を 網羅するため、筆者らは雲底における凝結核の存在 量と大気の重元素存在量を様々な値に変えて計算 を行った. ここで重元素とは水素・ヘリウム以外の 元素を指す. 系外惑星大気の理論モデリングにおけ る共通の問題として詳細な大気組成が分からないと いう点があげられる.多くの研究では、太陽組成を ベースに重元素の存在量を増減させたものをモデル 内で仮定しており、本稿でもこの慣習に従う.参考ま でに太陽系の巨大惑星の大気重元素量は、木星で 太陽組成の~4倍, 土星で~9倍, 天王星と海王星で ~80倍とCの存在量から推定されている[27].

3.1 鉱物雲の鉛直構造

図2に様々な凝結核数密度(N_{CCN}),大気重元素 量における雲粒の平均サイズと雲質量密度の鉛直分 布を示した.鉱物雲の鉛直構造は,雲底付近での雲 粒成長過程で基本的に決まる.雲粒サイズは雲底付 近で急激に増加する(図2左列).これはKCI蒸気の 凝縮および雲粒の衝突合体による成長に起因してい る.凝縮蒸気の密度および雲質量密度はいずれも雲 底付近が最も高く,雲粒成長は雲底付近で最も効 率的になる.一方,大気上層では蒸気密度および雲

⁵i次のモーメントは $M_i \equiv \int_0^\infty m^i f(m) dm$ と定義される. ここでmは 粒子質量, f(m) dm は $m \ge m + dm$ の間の質量を持つ粒子の数 密度である. 0次のモーメントは総粒子数密度, 1次のモーメント は総質量密度に対応する.



図2: KCI雲の鉛直構造. 各図の縦軸は大気圧で, 低圧ほど上空に対応する. 左列は雲粒の平均サイズを, 右列は雲の質量密度を大気密度で 割ったもの(質量混合率)の鉛直分布を示している. 上段は太陽組成大気, 下段は重元素の存在量が太陽組成の100倍の場合の計算結 果である. 線の色の違いは雲底における凝結核数密度(NCCN)の違いに対応し, 灰色点線は雲底高度(KCI蒸気の分圧が飽和蒸気圧 を超える高度)を示している. Ohno & Okuzumi (2018) [21]の図3を改変.

粒数密度が低く, 粒子成長が非効率なため, 雲粒サ イズはほぼ一定となる⁶. Gao氏らによる雲粒が均質 核形成で蒸気から直接形成されることを仮定した計 算においても同様の傾向が見られている[22,28]⁷.

雲の鉛直方向の広がりは, 雲質量混合率(質量密 度と大気密度の比)の鉛直分布から読み取れる(図2 右列). 基本的に, 雲の鉛直質量分布は雲粒の重力 落下と渦拡散の釣り合いから決まっている. 大気深 層では雲粒の落下速度が遅く⁸, 鉛直分布は渦拡散 で主に決まるため, 雲質量混合率は鉛直方向にほぼ 一定となる. 一方, 大気上層では大気密度が低いた

*鉱物雲の大半の領域で雲粒は大気の平均自由行程より小さいた め、雲粒へのガスの抵抗則はエプスタイン則が適用される.この 場合、雲粒の終端速度は雲粒の半径と密度に比例、大気圧(もし くは大気密度)に反比例する. め雲粒の落下速度が大きくなり,上層に向かうほど 質量混合率が低くなる(つまり雲が薄くなる). 雲がこ れ以上上層に到達できなくなる高度は,雲粒の終端 速度が渦拡散の速度スケールを上回る高度におおよ そ対応し,雲粒サイズが小さいほど上空まで到達可 能となる.

雲粒がどの程度のサイズまで成長するかは,雲の 凝結核の存在量や大気組成などに依存する.例え ば,凝結核が大量に存在するほど上層の雲粒サイズ は小さくなる傾向がある.これは凝結核が多いほど 核一個あたりに分配される凝縮蒸気の量が少なくな ることに起因する.一方,雲粒サイズは大気の重元 素量が高いほど大きくなる傾向がある.これは,雲 の総質量(凝縮蒸気の存在量)が大気重元素量と共 に高くなり,より効率的に粒子成長が起きるためで ある.また,大気重元素量には雲の質量混合率を底 上げする効果もある.

系外惑星大気における凝結核量は未知のため, それに由来する雲粒サイズや鉛直質量分布の不定性 は存在する.しかし,凝結核量が未知でも雲粒平均 サイズの下限値を見積もることは可能である.図3に 雲底付近での成長を終えた後の雲粒サイズを凝結 核数密度の関数として図示した.先述した通り,雲

⁶実際には、雲粒の重力落下が渦拡散による輸送より早くなるよう な大気上層では、平均サイズは上層ほど小さくなる[22]. これはサ イズの小さい雲粒ほど終端速度が小さく、サイズ分布の小サイズ 側に属する雲粒が選択的に上層に巻き上げられることに起因す る. 図2の計算ではデルタ関数的なサイズ分布を仮定しており、こ のサイズ分布が有限の幅を持つことに由来する傾向は現れない. ⁷均質核形成を仮定すると、大気上層においても飽和蒸気から雲 粒が新たに形成される. 上層は蒸気量が低く、その場形成される 雲粒の総量は低いが、渦拡散による雲底からの雲粒輸送が非効 率な場合には重要となりうる.



図3: 上層における雲粒平均サイズ. 横軸は凝結核数密度である. 太陽組成の100倍の大気重元素量を仮定. 青点線は凝縮 蒸気を凝結核に等分配したとして見積もられるサイズ, 緑破 線は衝突成長の時間スケールと渦拡散の時間スケールが 等しくなるサイズを示している. Ohno & Okuzumi (2018) [21]の図5を改変.

粒サイズは凝結核数の増加と共に小さくなるが,十 分大きな凝結核数のときにあるサイズに漸近してい ることが見て取れる.これは数密度が高くなるほど 衝突成長が効率的になることに起因しており,雲底 における衝突成長タイムスケールと渦拡散タイムス ケールの釣り合いから,以下のように平均サイズの下 限値(図3の緑波線)を見積もることができる(詳細は [21]を参照).

$$r \sim 1 \mu m \left(\frac{H}{100 \ km}\right)^{5/8} \left(\frac{K_z}{10^3 \ m^2 \ s^{-1}}\right)^{-1/4} \left(\frac{q}{10^{-5}}\right)^{1/4}$$

ここでHは大気のスケールハイト, K₂は渦拡散係数, qは雲の質量混合率である. 雲粒の組成をKClとし, 重力加速度10 m s⁻²を仮定したが, これらへの依存 性は弱い. 典型的なパラメーターのもとでは, 雲粒 は少なくともミクロンサイズ程度までは成長すること をこの結果は示唆している. 大量の凝結核に凝縮蒸 気を分配することで雲粒サイズを小さくしても, その 後の衝突合体である程度のサイズまでは成長してし まうわけである.

3.2 雲粒の空隙率進化

ここまでの議論や過去の先行研究において、鉱物 雲を構成する雲粒は密に詰まった完全球であること が暗に仮定されている.しかし、鉱物雲を構成する 固体雲粒に対しては必ずしも妥当な仮定ではない. 例えば固体微粒子が衝突合体で成長すると、密に 詰まった完全球でなく大量の微粒子が寄り集まった 集合体(アグリゲイト,図4の左上パネル中の絵も参 照)となる.実際,地球大気に存在する雪片や煤など の固体微粒子はアグリゲイトであることが多い.アグ リゲイトは内部に大量の空隙を持ち,その空気力学 的および光学的性質は完全球と定性的に異なる.し かし,系外惑星の雲構造や観測スペクトルにどのよ うな影響を与えるのかはこれまで明らかでなかった.

そこで筆者らは、原始惑星系円盤内の固体微粒 子の密度進化モデル[29,30]を雲微物理モデルに応 用することで、"鉱物の雪雲"がどのように系外惑星 大気中に形成し、大気観測に影響を与えるのかにつ いて調べた[24]. モノマー(アグリゲイトを構成する 一個一個の微粒子)は雲底付近で凝結核に蒸気が 凝縮することで形成したと仮定し、その後の雲粒ア グリゲイトの衝突成長および空隙率進化を計算し た.計算においては凝結核数密度でなく、モノマー 半径をパラメーターとして変化させた.これは凝結 核に凝縮蒸気が分配されてモノマーが形成されると すると、モノマー半径と凝結核数は1対1で対応する ためである⁹.この計算の設定においては、高い(低 い)凝結核数密度は小さい(大きい)モノマーサイズ に対応する.

図4に雲粒の空隙率進化を考慮した場合の雲鉛 直構造を示す.まず平均サイズに着目すると,雲粒 アグリゲイトは完全球に比べてより大きなサイズまで 成長する(図4左上).これは同じ質量の粒子でも低 密度の粒子の方が大きいサイズを持つことに起因す る.雲粒の密度は成長に伴って減少し,大気上層の 比較的大きな雲粒アグリゲイトは物質密度より桁で 低い粒子密度を持つ(図4右上).ちなみに地球の雪 も大粒子ほど低い密度を持つ傾向があり,定性的に は整合的である.低密度な雲粒は落下速度も遅いた め,完全球の場合に比べてより大気の上層まで到達 する(図4中上).このように,雲粒の空隙率進化は巨 大な粒子で構成された鉛直方向に分厚い鉱物雲を

⁹具体的には、モノマー質量は雲底における蒸気量を凝結核数で 割った値とした.言い換えると、モノマーサイズが図3の青点線に 対応している.したがって、大きなモノマーサイズは少ない凝結核 数、小さいモノマーサイズは凝結核数が多い状況に対応する.こ の手法は凝結核の質量を無視しているが、凝結核の質量混合率 が凝縮蒸気の質量混合率より十分低ければ妥当な近似となる.



図4: 空隙率進化を考慮した場合の雲鉛直構造. 左列は雲粒平均サイズ, 中列は雲質量混合率, 右列は雲粒密度の鉛直分布を示している. 上 段ではモノマー半径0.1 μmを仮定し, 完全球(灰色線)とアグリゲイト雲(緑線)の鉛直分布を比較した. 下段ではモノマー半径0.01(深緑 線), 0.1(緑線), 1 μm(薄緑線)におけるアグリゲイト雲の鉛直分布を示した. どちらの図でも太陽組成大気を仮定している. Ohno et al. (2020) [24]の図3を改変.

形成するよう働く.

次に, 雲構造がモノマーサイズにどのように依存 するかを見ていく. 雲粒の平均サイズはモノマーが小 さいほど大きくなる(図4左下). 直感的ではないかも しれないが, これはモノマーサイズが小さいほど雲 粒の密度が低くなるという傾向に起因している(図4 右下). 雲粒密度はモノマーが小さいほど低くなるた め, 雲粒アグリゲイトはモノマーが小さいほどより上 層まで到達できるようになる(図4中下). ちなみに, モノマーサイズが大きい場合には雲粒密度が殆ど低 下せず, 完全球を仮定した場合とほぼ同じ鉛直構造 となる. これは, モノマーサイズが大きい場合には 衝突成長が非効率であることに起因している.

3.3 トランジット分光観測への影響

ここでは鉱物雲がトランジット分光観測にどのような影響を与えるのかを見ていく.大気の不透明度 (単位質量あたりの減光断面積)の計算においては 鉱物雲の吸収・散乱に加えて,大気分子(H₂,H₂O, CH₄,CO,CO₂,NH₃,H₂S,PH₃)による吸収・レイ リー散乱の寄与も考慮した.大気分子の存在量は 熱化学平衡計算から推定し,HITRAN2016の吸 収線リストを用いて分子の吸収断面積を計算した. 雲粒の光学特性は,完全球の場合はミー理論,ア グリゲイトの場合は修正平均場理論[31]から計算し た.KC1雲粒の複素屈折率は参考文献[32]が収集 したものを用いた.なお,現行のトランジット分光観 測がよく行われる可視・近赤外波長域ではKC1雲粒 の単一散乱アルベドが非常に高く,KC1雲粒の減光 断面積は散乱断面積とほぼ等しい.

図5に幾つかの理論大気透過光スペクトルを示した. 雲なし大気の場合は, 主にH₂OやCH₄の吸収 に起因するトランジット深さの特徴的な波長依存性 (フィーチャーと呼ばれる)が現れている. ~0.5µmよ り短波長では連続的にトランジット深さが増加して いるが, これは大気中のH₂などによるレイリー散乱 に起因する.

鉱物雲は現在観測が広く行われている可視・近赤 外波長域のスペクトルに大きな影響を与える. 雲が 存在する場合,ある高度より下層の透過光は雲に遮 られ,大気分子のフィーチャーは著しく弱められる (図5上). どれだけフィーチャーが弱められるかは 雲の鉛直構造に依存する. 完全球の場合,モノマー 半径が小さい(つまり凝結核数が多い)ほど雲が上 層まで到達するため、大気分子のフィーチャーが弱 められる.しかし、3.1節で紹介したように雲粒サイ ズには下限値があり、ある高度より上空に雲は到達 できない.そのため、フィーチャーは完全に消えるこ とはなく.雲頂より上空に存在する大気分子由来の



図5: 理論大気透過光スペクトル. 縦軸はトランジット深さ, 横軸 は観測波長である. 上図は完全球, 中図と下図ではアグリ ゲイト雲粒を仮定. 上図と中図では太陽組成, 下図では重 元素量が太陽組成の100倍の大気組成を仮定している. 線 の色の違いは雲粒アグリゲイトを構成するモノマー半径の 違いに対応する. 雲なし大気のスペクトルは黒線で示した. Ohno et al. (2020) [24]の図6, 7を改変.

フィーチャーは残り続ける. 言い換えれば, 雲によっ てフィーチャーを隠す効果には限度がある.

アグリゲイト零は完全球の場合と異なる形状の大 気透過光スペクトルを生成する(図5中). 完全球の 場合に比べてアグリゲイト雲はより上層に到達可能 なため、大気分子のフィーチャーをより効率的に弱 める.興味深い特徴として.波長に依存しない平坦 なスペクトルを生成する完全球とは異なり. アグリゲ イト雲は短波長ほどトランジット深さが増加する緩 いスロープ状のスペクトルを生成する。これはアグリ ゲイトの光学的性質に起因している. 密に詰まった 完全球の場合、粒子のサイズより短い波長域におい ては不透明度は波長に依存しないため、平坦なスペ クトルを生成する.一方、アグリゲイトは粒子サイズ より小さい波長域においても波長に依存する不透明 度を持つため¹⁰. 緩やかなスロープ状のスペクトルを 生成する. したがって、観測スペクトル内のスロープ 状の構造は、雲粒アグリゲイトの存在を観測的に実 証する手がかりとなりうる11.

アグリゲイト雲はモノマーがサブミクロンサイズの 時に最も効率よく可視・近赤外波長域のフィーチャー を弱める(図5中).理由は次の通りである.モノマー が大きい場合,雲粒アグリゲイトは落下速度が大き く大気上層に到達できないため,フィーチャーを隠 す効果が弱い.モノマーが小さい場合,雲粒アグリ ゲイトの散乱不透明度はモノマーが小さいほど小さ くなる.そのため,モノマーが非常に小さい場合, 散乱不透明度が減少する効果によってフィーチャー を隠す効果が弱まる.これらの効果により,大気上 層まで到達できるアグリゲイト雲の場合でも,フィー チャーを隠す効果には上限が存在する.

観測スペクトルの形状は大気組成にも依存する.

¹¹ただし,これは雲粒を構成する物質の光学特性にも依る点は留 意しておきたい。例えば,雲粒の単一散乱アルベドが低い(吸収が 散乱より卓越する)場合。フラクタル次元2以下のアグリゲイトとモ ノマーの不透明度はほぼ同じになり,原理的には区別することが できない.

¹⁰実際にはアグリゲイトのフラクタル次元などにも依存しており、あ る程度コンパクト(フラクタル次元が2より大きい)なアグリゲイトは 波長に依存しない不透明度を持ちうる.今回の計算では、殆どの 場合で雲粒アグリゲイトはフラクタル次元2(質量が面積に比例) を持っており、モノマーサイズより長い波長域ではアグリゲイトの 不透明度は常に波長に依存する.



図6:スーパーアースGJ1214b の大気透過光スペクトル. 先行研究で得られている各波長のトランジット深さをエラーバー(1σ)付きの点で示し た. 左図は可視--赤外波長域全体の観測点を,右図はハッブル宇宙望遠鏡の広視野カメラ3(HST-WFC3)の観測点を拡大して示した. 各色線は異なる重元素量の大気毎に雲粒のモノマー半径(凝結核数密度)を変えて得られるベストフィット理論スペクトルを示している. 黒点はHST-WFC3およびスピッツァー宇宙望遠鏡の赤外線カメラ(Spitzer-IRAC)による最新の観測点[5,34]を示しており,これらの 観測点とのカイ二乗を自由度で割った値は57.1(太陽重元素量), 37.1(10 倍重元素量), 6.61(100 倍), 2.03(1000 倍)である. Ohno et al. (2020) [24]の図8 を改変.

例えば大気の重元素量が高い場合,全体的にフィー チャーが弱まったスペクトルが生成される(図5下). これは重元素が多いほど大気の平均分子量が増加 し、大気のスケールハイトが小さくなることに起因し ている.また、重元素に富んだ大気ではより密度の 高い鉱物雲が形成されうるため、雲によってフィー チャーを弱める効果が強まる傾向もある.したがっ て、大気の重元素量が高いほどより平坦に近いスペ クトルが生成される傾向がある.

4. スーパーアースGJ1214bへの応用

ここで、雲モデルを実在のスーパーアースに適用す ることで、大気組成や過去の形成過程にどのような 示唆が得られうるかを紹介しよう.これまでに約10 天体ほどのスーパーアースに対してトランジット分光 観測が行われており、大半のスーパーアースに対して 雲の存在が示唆されている.そのため、スーパーアー スの大気観測を解釈する上で、雲の影響を適切に考 慮することは重要である.スーパーアースの形成論と 大気に関しては荻原氏と堀氏による天文月報記事 [33]も参照されたい.

本稿では特に曇ったスーパーアースとして知られ るGJ1214bに着目する.GJ1214bはM型星周りを 公転する~6.5地球質量,~2.7地球半径の惑星であ る.トランジット分光観測が最も盛んに行われてき たスーパーアースの1つであるが,顕著な波長依存性 が見られない平坦なスペクトルを示すことで知られ ている.Kreidberg氏らはハッブル宇宙望遠鏡によ る近赤外観測から,観測されている平坦なスペクト ルを説明するには少なくとも0.1--0.01 mbarより下 層の大気は雲に隠されている必要があることを示唆 した[5].一方で,GJ1214bがどのような組成の大気 を保持しているかは未だに明らかではない.

4.1 大気組成への示唆

GJ1214bのような曇った惑星に対しても、雲モデ ルによって雲の鉛直構造を制約することで、大気組 成を類推することが可能となる.図6にGJ1214bの 大気透過光スペクトルと理論スペクトルを示した.太 陽組成のような重元素に比較的欠乏した大気の場 合、GJ1214bの平坦なスペクトルを説明できるほど 分厚い雲を形成することができない.その結果、重 元素量が太陽組成の100倍以下のモデルでは観測 に比べて理論スペクトルの波長依存性が強くなりす ぎてしまう(これは特にHST-WFC3の観測との比 較で顕著である).一方、大気の重元素量が太陽組 成の100倍以上と非常に高ければ、十分に分厚い雲 を生成することで、観測されている平坦なスペクトル を説明可能となる.したがって、GJ1214bの平坦な スペクトルは分厚い雲の形成に適した重元素大気の 存在を示唆している可能性がある.

可視・近赤外域のフィーチャーは雲によって隠さ れてしまうが、一方で長波長域では雲が光学的に 薄くなることで大気分子のフィーチャーが見えるよ うになる。特に顕著なのは~4.3 μmに現れるCO₂ のフィーチャーである。CO₂の存在量は大気の重 元素量と共に増加するため、重元素大気の存在を 観測的に検証する情報の一つとなりうる。Spitzer-IRACの観測[34]もこの波長域でトランジット深さの 増加を示しており、CO₂の存在と矛盾しない。CO₂の フィーチャーは高重元素量モデルの場合でも~200 ppmほどの振幅があり、観測精度~20 ppmが予想 されている次世代宇宙望遠鏡のジェイムズ・ウェッブ 宇宙望遠鏡(JWST)によって検出できることが期待 される。

4.2 惑星形成過程への示唆

GJ1214bが高重元素量大気を保持している場合, 過去の形成過程にどのような示唆が与えられるかを 紹介しよう.スーパーアース質量の惑星は,原始大気 中で微惑星や小石が蒸発・乖離することで,大気の 重元素量が太陽組成の数百倍にまで増加しうること が理論的に示唆されている[35].高重元素量大気の 存在はこの理論予測と整合的である.一方で疑問と なるのが,何故GJ1214bはガス惑星にならなかった のかである.原始惑星はある臨界質量(古典的には ~10地球質量)を超えると,円盤ガスを暴走的に捕獲 することでガス惑星になることが示唆されている.こ の臨界質量は大気が重元素に富むほど小さくなる. 堀氏と生駒氏による大気構造計算[36]によれば,高 重元素量大気を持つ惑星の臨界質量は地球質量程 度となり,GJ1214bの質量を下回りうる.

GJ1214bがガス惑星でなくスーパーアースであると いう事実は、過去の形成時に暴走ガス降着を抑制す る何らかの機構が働いていた可能性を示唆する。例 えば、円盤ガスが散逸する直前に惑星が形成したこ とで、十分な量の円盤ガスを獲得できなかったのか もしれない[37]. あるいは、荻原氏と堀氏が提案す るように、円盤ガスの降着が円盤表層で主に発生し、 円盤赤道面に存在する惑星には十分な量のガスが 供給されなかった可能性もある[33,38]. ガス降着を 抑制するのとは別の可能性として,ガス円盤散逸後 のデブリ円盤に残留するガスが降着することで,重 元素に富んだ大気が形成されたという可能性も示唆 されている[39]. 系外惑星系の起源に迫るために, 大気観測とのシナジーも視野に入れた惑星形成理 論を構築することが今後重要となるであろう.

5. まとめと今後の展望

本稿では、系外惑星大気における鉱物雲形成過 程と大気観測への影響に関して、筆者らの研究か ら得られた知見を中心にまとめた. 雲の全体の構造 は、雲底付近での微物理過程に支配され、凝結核 が多く、大気の重元素量が高いほど分厚い鉱物雲 が形成される傾向がある。 大気透過光スペクトル観 測において、雲は大気のフィーチャーは著しく弱める が、雲がフィーチャーを隠す度合いには上限がある. 従来無視されてきた雲粒の空隙率進化は、雲の鉛直 構造や観測スペクトルに大きな影響を与えうるため。 今後の観測を解釈する際に可能性の一つとして検討 していく必要があるだろう. モデル計算と観測の比 較から、曇ったスーパーアースGJ1214bは分厚い鉱 物雲の形成を可能とする高重元素量大気を保持し ている可能性が示唆された. 高重元素量大気の存 在は,過去の大気形成過程を探る重要な手がかりと なる. 雲は長波長域では光学的に薄くなるため、次 世代望遠鏡による観測で大気組成に関してより堅い 結論を得ることができると期待される.

雲モデルから得られた知見は、従来の観測の解 釈にも影響を及ぼしうる。例えば2.1節で紹介したよ うに、観測スペクトルの可視波長域に頻繁に見られ るスロープ構造は微小な雲粒のレイリー散乱に起因 すると考えられてきた[8].しかし、筆者らの研究も 含む複数の雲微物理モデルを用いた研究は、鉱物雲 が観測されているようなスロープ構造を生成するこ とを予言していない¹².筆者らは、このスロープ構造 は寧ろ有機物ヘイズに起因していると考えている。

¹²雲粒がアグリゲイトの場合にはスロープ構造が現れるが、観測 されているスロープ構造に比べるとかなり緩やかなものとなって いる.

筆者と川島氏による近年の研究は、鉱物雲では説明 が難しい急なスロープ構造やスロープの傾きの惑星 温度依存性をヘイズによって説明できる可能性を示 した[10].実際の大気には鉱物雲とヘイズが共存し ていると考えられ、それぞれがどのように相互作用 (ヘイズが鉱物雲の凝結核になるなど)し、大気観測 に影響を与えるかは今後調べていく必要がある.

本稿を締めるにあたって、今後どのような観 測が計画されているかを最後に一部紹介しよう. 今後10年間でIWST(2021年打ち上げ予定). Twinkle(2023年打ち上げ予定), ARIEL(2028年 打ち上げ予定)といった次世代宇宙望遠鏡の打ち上 げが既に決まっており、より高精度・広波長域の大気 観測が可能となる。日本と欧州が共同で開発を進め る次世代赤外線天文衛星SPICAもESAのコスミッ ク・ビジョンM5ミッションの候補の一つとして検討 されており、採択されればIWSTより更に長波長域 を高感度で観測可能となる. 鉱物雲の構成物質は ~10 umより長波長域に雲自身のフィーチャーを持 ち、JWSTやSPICAでこれらのフィーチャーを見つ けられれば. 系外惑星の雲の性質に大きく迫ること ができるだろう. ARIELは~1000天体もの系外惑 星に対して大気観測を行うことが予定されており. 統計的な議論も可能になると期待される. 系外惑星 の大気観測が今後より盛んになっていくことは間違 いない. 観測の量・質ともに急増する今後10年を見 据えて, 観測結果を正しく解釈し, 系外惑星系の起 源に迫るための理論的枠組みを整えていくことが重 要である.

謝辞

本記事は,筆者が第一著者である参考文献 [21,24]の内容から主に構成されています.これらの 研究を遂行するにあたり,多くの実りある議論をして 頂いた共同研究者の東京工業大学の奥住聡氏と工 学院大学の田崎亮氏にはこの場をお借りして深く御 礼申し上げます.加えて,多くの助言をくださったカ リフォルニア大学サンタクルーズ校のXi Zhang氏, オランダ宇宙研究所の川島由依氏,カリフォルニア 大学バークレー校のPeter Gao氏には深く感謝致し ます.また,丁寧な査読をしてくださった匿名の査読 者様と、本記事の執筆機会を与えてくださった成田 憲保編集委員に深く感謝致します、本研究を遂行す るにあたり、特別研究員奨励費JP18J14557の援助 を頂きました、本稿の図はAASから転載許可を頂 き、Ohno & Okuzumi (2018)およびOhno et al. (2020)の図を改変し掲載させて頂いたものです。

参考文献

- [1] Fressin, F. et al., 2013, The Astrophysical Journal 766, 81.
- [2] 川島 由依, 2020, 遊星人 29, 2.
- [3] Madhusudhan, N., 2019, Annual Review of Astronomy and Astrophysics 57, 617.
- [4] 福井 暁彦, 成田 憲保, 2014, 遊星人 23, 1.
- [5] Kreidberg, L. et al., 2014, Nature 505, 69.
- [6] Knutson, H. et al., 2014, Nature 505, 66.
- [7] Benneke, B. et al., 2019, Nature Astronomy 3, 813.
- [8] Lecavelier Des Etangs, A. et al., 2008, Astronomy and Astrophysics 481L, 83L.
- [9] Parmentier, V. et al., 2016, The Astrophysical Journal 828, 22.
- [10] Ohno, K. and Kawashima, Y., 2020, The Astrophysical Journal Letters 895, 47.
- [11] Ohno, K. and Zhang, X., 2019, The Astrophysical Journal 874, 2.
- [12] Morley, C. et al., 2012, The Astrophysical Journal 756, 172.
- [13] Showman, A. and Guillot, T., 2002, Astronomy and Astrophysics 385, 166.
- [14] Knutson, H. et al., 2007, Nature 447, 183.
- [15] Louden, T. and Wheatley, P., 2015, The Astrophysical Journal Letters 814, L24.
- [16] Parmentier, V. et al., 2013, Astronomy and Astrophysics 558, 91.
- [17] Charnay, B. et al., 2015, The Astrophysical Journal 813, 15.
- [18] Howe, A. and Burrows, A., 2012, The Astrophysical Journal 756, 176.
- [19] Ackerman, A. and Marley, M., 2001, The Astrophysical Journal 556, 872.

- [20] Helling, C. et al., 2008, Astronomy and Astrophysics 485, 547.
- [21] Ohno, K. and Okuzumi, S., 2018, The Astrophysical Journal 859, 34.
- [22] Gao, P. and Benneke, B., 2018, The Astrophysical Journal 863, 165.
- [23] Ormel, C. and Min, M., 2019, Astronomy and Astrophysics 622, 121.
- [24] Ohno, K. et al., 2020, The Astrophysical Journal 891, 131.
- [25] Grabowski, W. et al., 2019, American Meteorological Society 100, 655.
- [26] Ohno, K. and Okuzumi, S., 2017, The Astrophysical Journal 835, 261.
- [27] Atreya, S. et al., 2020, Space Science Reviews 216, 18.
- [28] Gao, P. et al., 2018, The Astrophysical Journal 855, 86.
- [29] Kataoka, A. et al., 2013, Astronomy and Astrophysics 554, A4.
- [30] Wada, K. et al., 2008, The Astrophysical Journal 677, 1296.
- [31] Tazaki, R. and Tanaka, H., 2018, The Astrophysical Journal 860, 79.
- [32] Kitzmann, D. and Heng, K., 2018, MNRAS 475, 94.
- [33] 荻原 正博, 堀 安範, 2019, 天文月報 112, 12.
- [34] Gillon, M. et al., 2014, Astronomy and Astrophysics 563, 21.
- [35] Venturini, J. et al., 2016, Astronomy and Astrophysics 596, 90.
- [36] Hori, Y. and Ikoma, M., 2011, MNRAS 416, 1419.
- [37] Lee, E. and Chiang, E., 2016, The Astrophysical Journal 817, 90.
- [38] Ogihara, M. and Hori, Y., 2018, The Astrophysical Journal 867, 127.
- [39] Kral, Q. et al., 2020, Nature Astronomy 66K.

150

ー番星へ行こう! 日本の金星探査機の挑戦 その43 ~明日の金星は今日より涼しい?~

Yeon Joo Lee¹ 訳:今村 剛²

(要旨)あかつきを含む複数の宇宙機による金星の紫外観測データを組み合わせることにより、金星のアル ベドの長期変動が見出された.この変動は太陽光エネルギー収支に影響し、帯状風速度の変動をもたらし ていると考えられる.この成果を報告した私たちの論文を紹介する.



図1: 4つの宇宙機による金星の紫外観測. ヴィーナスエクスプレス(2006~2014年), メッセンジャー(2007年), ハッブル宇宙望遠鏡(2011年), あかつき(2011年, 2015年~2017年). ヴィーナスエクスプレスとあかつきが画像を取得したのに対し, メッセンジャーとハッブル宇宙望遠 鏡は印を付けた領域の分光スペクトルを取得した. (画像は文献[9]より引用)

金星は全天で太陽と月に次いで明るい天体で,肉 眼で簡単に見ることができます.この明るさは太陽 光を宇宙空間にはね返す惑星規模の厚い雲層によ るもので,可視域の反射率はほぼ100%に達します [1].しかし,1世紀前にRoss [2]が金星の紫外線画 像に暗い斑点を発見しました.その後多くの観測に よって,暗い斑点は金星の雲の中に常に存在してい て,その濃さと形状が時間とともに変化することが わかりました.驚くべきことに,現在に至るまでこの 紫外吸収の源は,その化学組成が未同定であること

1.ドイツ・ベルリン工科大学/

- EU Horizon 2020 MSCA-IFフェローシップ 2.東京大学
- y.j.lee@astro.physik.tu-berlin.de

から「未知吸収物質」と呼ばれています. 吸収物質に はいくつか候補があり, OSSO, S₂O, S_x, FeC₁₃の ほか[3,4], 微生物の可能性[5]まで挙げられていま す. 化合組成を特定できていない主な理由は, 観測 されているような広い波長域に広がった吸収スペク トルや長い化学的寿命をどの候補物質もよく説明で きないことです.

未知吸収物質は主に近紫外域(波長320~380 nm)で太陽光を吸収し,様々な雲の形態をこの波長 域で最もよく見ることができます(図1).そのため, この未知吸収物質を追跡するために波長365 nm付 近で多くの観測が行われてきました.吸収の強さは 可視域である青色にかけて低下しますが,オレンジ 色あたりまでも吸収が存在します[6].太陽光エネル



図2: 2006年から2018年にかけての低緯度の紫外アルベドの変化. ヴィーナスエクスプレス(2006-2014年), ハッブル宇宙望遠鏡(2011), あ かつき(2015-2017)のデータを合わせて示したもの. (画像は文献[9]より引用)

ギーがこの波長域に集中しているため、この未知吸 収物質による太陽光エネルギーのわずかな吸収も雲 層の加熱に重要な役割を果たしていると考えられま す[7-9]. このことは、未知吸収物質の量の変化が大 気加熱に直接影響する可能性を示唆しています.か つて私たちは、未知吸収物質の空間分布が顕著に 変化していることを示しました[8]. しかし、未知吸 収物質の絶対量が変化しているかどうかは、絶対量 の変化と観測機器の経年変化の影響の切り分けに 曖昧さが残るため、難しい問題でした.

今回私たちが発表した論文では、単一の観測機 器のデータを用いるのではなく、近い時期に異なる 機器で独立に測定された値を比較することにより未 知吸収物質の量的変化を求める方法を考えました [9]. 私たちはヴィーナスエクスプレス(2006~2014 年)、メッセンジャーの金星フライバイ(2007年)、ハッ ブル宇宙望遠鏡(2011年)、金星探査機あかつき (2011年, 2015年~2017年)が取得した紫外データを 集め、太陽光散乱角や緯度領域など条件をそろえて 比較したところ(図1)、紫外アルベドの長期的な変化 が見出されました、図2のようにヴィーナスエクスプレ スとハッブル宇宙望遠鏡のデータに重複した傾向を 確認できたほか、2007年のメッセンジャーのデータ や2011年のあかつきのデータとも整合していました. 紫外アルベドの10年スケールの長期変動の大きさは ファクター2に達し、そこに短期的な変化が重なって いることがわかりました.このような紫外アルベドの 変化はこれまで想定されていなかったものです.

紫外アルベドの変動が大気の放射エネルギー収 支や力学に与える影響を解明するために、私たちは モデル計算をもとにさらなる解析を行いました.ま ず、このレベルのアルベド変化があると大気中の太 陽光加熱が-25%から+40%程度の範囲で変化す ることがわかりました.また、このような太陽光加 熱の変化は全球的な大気循環に影響を与え、雲頂 高度での高速帯状風(スーパーローテーション)の速 度が変化しうることもわかりました.モデル計算で 示された風速変化の大きさは、2006年には80~90 m/sだった風速が2012年には110 m/sまで上昇し て2016年には95 m/sまで低下したという観測結果 [10,11]とよく合っています.2006~2008年と2016 年にはアルベドが高かったため太陽光エネルギー 152



図3: アルベドの変化から帯状風速度の変化に至る一連の大気現象のイメージ.

の吸収量が減り,結果として全球的な大気循環が弱 くなって帯状風が遅くなっていたのでしょう.一方, 2011~2014年のアルベドが低かった時期には逆の 現象が起こり,太陽光エネルギーの吸収量が増えて 帯状風が速くなったと考えられます(図3).

我々の研究によって, 金星の惑星規模の気象シス テムが長期変動していることがわかりました. このこ とは金星で気候変動が生じていることを意味してお り、もしそうであれば、金星は地球以外では初めて 現在進行形の気候変動が見つかった惑星ということ になります。一方で、これは気候変動ではなく太陽 活動度サイクルに伴う周期的な変動である可能性も あります. あかつきや、2020年と2021年に予定され るベビコロンボの金星フライバイ、そして将来の金星 探査ミッションにより継続的な観測を行うことによっ て初めて、現状を理解することができるでしょう. さ らに,将来の金星ミッションで未知吸収物質の直接 サンプリングを行い化学組成を特定できれば、紫外 アルベドの変動の根本的な原因がわかるはずです. それまでは、残念ながら今日の観測から明日の金星 の天気を推測することはできません. しかしながら、

明日の金星の天気が今日とは違うものになることは わかっています.

参考文献

- [1] Zasova, L. V. et al., 1981, Adv. Space Res. 1, 13.
- [2] Ross, F. E., 1928, Astrophys. J. 68, 57.
- [3] Mills, F. P. et al., 2007, Geophys. Monogr. Ser. 176, 73. (Washington, D. C.:AGU)
- [4] Frandsen, B. N. et al., 2016, Geophys. Res. Lett.43, 11.
- [5] Limaye, S. S. et al., 2018, Astrobiology 18, 1181.
- [6] Perez-Hoyos, S. et al., 2018, J. Geophys. Res. 123, 145.
- [7] Crisp, D., 1986, Icarus 67, 484.
- [8] Lee, Y. J. et al., 2015, Icarus 253, 1.
- [9] Lee, Y. J. et al., 2019, Astron. J. 158, 126.
- [10] Khatunstev, I. V. et al., 2013, Icarus 226, 140.
- [11] Horinouchi, T. et al., 2018, Earth Planets Space 70, 10.

みんなでふたたび木星へ、そして氷衛星へその5 ~ガニメデレーザ高度計GALAで測る 氷の世界と地下の海~

塩谷 圭吾^{1,2}, 木村 淳³, 小林 正規⁴, 荒木 博志^{5,2}, 野田 寛大^{5,2}, 並木 則行^{5,2}, 押上 祥子¹, 石橋 高⁴, 東原 和行¹, 齋藤 義文¹, フスマン ハウケ⁶, GALAチーム

(要旨)表面を氷に覆われた「氷天体」. その代表格である木星氷衛星において,内部に海が存在する可能性をガリレオ探査機が示唆してから約20年 – 欧州宇宙機関(ESA)が主導する木星氷衛星探査機(JUICE)は,2022年の打ち上げに向けてその開発が進められている. JUICEは2029年に木星系に到達し, エウロパ,カリストのフライバイ観測,およびガニメデでは極周回軌道からの詳細観測を行う予定である.

ガニメデレーザ高度計(GALA)はJUICEの科学観測機器のひとつであり、氷天体に適用される初めての レーザ高度計である.GALAの科学目標の柱は(1)地形情報にもとづく氷テクトニクスの理解、(2)潮汐応答 の測定を通した内部構造の理解(地下海の存否確認や特徴把握を含む)、(3)表面の小規模粗度と反射率の 理解、である.地下海を含むサイエンスは、アストロバイオロジーの観点からも意義が大きい.

これらの科学目標のため、GALAは軌道上から氷衛星表面への距離測定(測距)を高密度・高精度で繰り 返し行う.特にガニメデについては全球にわたって、地形情報だけでなくマクロな表面変位および回転変動、 さらに小規模粗度と反射率を計測する.測距においてはノミナル高度500 kmから送信レーザパルス(17 mJ, 波長1064 nm,ノミナル30 Hz/最大50 Hz)を氷衛星表面に照射し(ノミナルスポットサイズ50 m,スポット 間隔50 m)、反射パルスを受信して、送受信パルスの時間差から距離を求める.小規模粗度と反射率の情報 は、受信パルスの強度やパルス幅の時間的広がりから得る.好条件地点での測距精度は約1 mである.

GALAの開発はドイツを中心に、日本、スイス、スペインのチームによる国際協力によって進めている。日本チームは心臓部とも言える受信部の3つのモジュール(後置光学系モジュール(BEO)、焦点面機器モジュール(FPA)、アナログエレクトロニクスモジュール(AEM))を開発する重要な役割を担っている。本稿ではJUICEおよびGALAの概要、科学目標、および機器開発について解説する。

1. イントロダクション

1.1 木星探査の歴史と氷衛星研究の重要性

木星探査の歴史は、1973年に木星に初めて接近

1.宇宙航空研究開発機構
 2.総合研究大学院大学
 3.大阪大学
 4.千葉工業大学
 5.国立天文台
 6.ドイツ航空宇宙センター
 enya.keigo@jaxa.jp

して撮像を行ったアメリカ航空宇宙局(NASA)の パイオニア10号にまで遡る[1]. その後パイオニア11 号,ボイジャー1号・2号,ユリシーズ,カッシーニ, ニューホライズンズと続く[2-4]. これらのミッション はNASA主導で遂行されたもので(ユリシーズ,カッ シーニでは欧州宇宙機関(ESA)の寄与も大きい), 木星系の観測はいずれもフライバイによって行われ た.その後やはりNASAの木星探査機であるガリレ オが,初めて木星系に留まって詳細な観測を行った (1995-2003)[5]. このミッションで得られた重要な 科学的知見のひとつは,木星の主要な氷衛星(エウ



図1: 木星氷衛星探査機JUICE(左)およびガニメデレーザ高度計GALA(右)の完成予想図.

ロパ,ガニメデ,およびカリスト)に対して,氷の地殻 の下に全球規模の地下海(液体水圏)を持つ可能性 が示唆されたことであった[6,7].

地球においては、海が生命の誕生や進化におい て重要な役割を果たした可能性が議論されている. しかし現時点では、海の存在が確認できている惑 星は地球の一例のみである.もし木星氷衛星の地下 という、地球と全く異なる環境に海が存在すること を実証し、かつその特徴を明らかにできれば、その 意義はアストロバイオロジー(宇宙生命論)の観点で も大きい.惑星系における海の概念は大幅に拡張さ れ、また地球外で生命が居住可能な環境の候補とし て重要な意味も持つと考えられる.

1.2 木星氷衛星探査ミッションJUICE

Jupiter Icy Moons Explorer(JUICE)はESA が主導し,日本やアメリカも参加する国際協力によ る木星氷衛星探査計画である(図1)[8,9].JUICE の科学目標の柱としては,以下が挙げられている.

- 巨大ガス惑星周辺における生命居住可能領域 (Emergence of habitable worlds around gas giants)
- 巨大ガス惑星の代表例としての木星系(Jupiter system as an archetype for gas giants)

JUICEは木星の主要な氷衛星の探査を主目的と して、その周回軌道に入って詳細な観測を行う初め てのミッションであり、ESAが主導する初めての木 星系探査ミッションでもある.JUICEは2012年に ESAの長期計画であるCosmic VisionのL1(大型 計画の初号機)に選出されており、2022年に予定され ている打ち上げを目指して探査機の開発が進められ ている.JUICEには11個の科学観測機器が搭載さ れる予定である.

JUICEはギアナ宇宙センターから2022年にアリ アン5ロケットによって打ち上げられた後,地球,金 星,地球,火星,そして地球の順でのスイングバイを 経て,2029年後半に木星系に到着する予定である. その後,カリスト,エウロパでの複数回のフライバイ を経て,2032年にガニメデの極周回軌道に入る.ガ ニメデでは表面からノミナル高度500 kmの極周回 軌道にて全球観測を行う.JUICEの木星系での全 観測期間は4年5か月にわたる予定である(ただしリ ソースが許容する場合,高度200 km軌道によるミッ ション延長の可能性がある).

1.3 ガニメデレーザ高度計GALA

Ganymedeレーザ高度計(Ganymede Laser Altimeter: GALA)は、JUICEに搭載される科学

波長	1064 nm
レーザ出力	17 mJ
送信パルス幅	2.9 ns (1 σ)
サンプリング	30 Hz/50 Hz(ノミナル/最大)
頻度	
スポット間隔	50 m(30 Hz, 高度 500 km にて)
ビーム拡散角	100 µrad (1/e ² , 全角)
スポットサイズ	50 m (直径. 高度 500 km にて)
受信望遠鏡口径	25 cm
視野	580 μrad
検出器	Avalanche Photo-Diode (APD)
デジタル波形	整合フィルタ
処理フィルタ	
総質量	24 kg
サイズ	39 cm $ imes$ 35 cm $ imes$ 42 cm
消費電力	51 W(30 Hz にて)
データレート	15.84 kbit/秒(30 Hz にて)
距離測定精度	1 m (好条件地点にて)

表1: GALA の主な仕様

観測機器のひとつであり、衛星表面の氷テクトニク スや地下海の調査に密接に関わる装置である[10]. GALAチームはその科学目標の柱を以下のように定 めている[10,11].

(1)地形情報にもとづく氷テクトニクスの理解

(2)潮汐応答の測定を通した内部構造の理解

(3)表面の小規模粗度と反射率の理解

これらの科学目標に向けて開発するGALAは, シングルビーム・単一受光素子のレーザ高度計であ る. その第1の機能は,軌道上から高指向性のレー ザパルス(波長 1064 nm,ノミナル周波数30 Hz)を 氷衛星の表面に照射し(ノミナルスポットサイズは直 径約50 m),反射光を受信してレーザの往復の所要 時間から距離測定(以後,測距)を行い,スポット照 射地点の高度を測定することである.これとあわせ て,反射光の強度およびパルス幅の時間的な広がり から,観測地点の反射率,傾斜,および粗さについ ても情報を得る.GALAの主な仕様を表1に示す.

JUICEの他の搭載機器と同様に、GALAはエウ ロパ,カリストに対しては複数回のフライバイ観測を 行う一方,ガニメデに対してはノミナル高度500 km の極周回軌道から継続的に観測を行う.その結果,



図2:表面変形とその位相ずれ、および経度秤動の概念図. 天体 と軌道のサイズの比は現実と異なり、また物理量は強調し て示してある.ガニメデ内部に地下海が存在する場合は表 面変位や経度秤動の大きさが増加し、位相ずれは小さくなる 傾向にあることが、理論モデルによって予測されている.

ガニメデ全球にわたる3次元的地形情報および反射 特性だけでなく、そのマクロな形状および軌道運動 の時間変化(表面変位,位相ずれ,経度秤動)につい てデータを得る.図2は表面変位,位相ずれ,経度 秤動の概念を示したものである.これらの量は潮汐 作用を通じて地下海の有無や特性を反映すると考え られる(これらの理論的な予想については第2節を 参照).このようにして得られたデータをもとに、上記 の科学目標に臨む.

GALAは氷天体に対して適用される初めてのレー ザ高度計である.また,天体のマクロな形状や軌 道運動の変化を実測して,地下海の存否を含めた 内部構造を推定するというアプローチを行うのも, GALAが初となる.

GALAの科学目標に関する詳細は第2節に,また 装置およびその開発については第3節に示す.

1.4 国際協力プロジェクトとしてのGALA

GALAの開発はドイツ航空宇宙センター(DLR)を 中心として,ドイツ,日本,スイス,スペインによる国 際協力体制のもとで進めている(図3).

GALAの開発において日本チーム(GALA-J)



図3: GALAにおける機器開発の国際分担(略称の意味はLEU: レーザエレクトロニクスユニット, LHM:レーザヘッドモジュー ル, BEO:後置光学系モジュール, FPA:焦点面機器モジュー ル, AEM:アナログエレクトロニクスモジュール, RFM:レン ジファインダーモジュール, DPM:データプロセッシングモ ジュール, PCM:パワーコントロールモジュール).

は、後置光学系モジュール(Back-End Optics: BEO),高感度検出器(Avalanche Photodiode: APD)の開発を含む焦点面機器モジュール(Focal Plane Assembly: FPA),アナログエレクトロニク スモジュール(Analogue Electronics Module: AEM)の3つのハードウエアを担当する(当初はこれ らに加えて受信望遠鏡も日本が担当する国際分担で 進めていたが、全体スケジュールを最適化するため 現状の分担に変更することになった).スイスはレン ジファインダーモジュール(Range Finder Module: RFM)を、スペインはパワーコンバータモジュール (Power Converter Module: PCM)を担当する.

日本の担当部分は高感度受信検出器を含み,光 学,エレクトロニクス,機械・構造,および熱設計が 複雑に絡み合う,GALAの心臓部とも言える.その ほかに,日本が主担当ではないものの,GALA-Jで はパフォーマンスモデル(GALA全体の性能をシミュ レートするソフトウエア)を自主的に開発している.

2. GALAの科学目標

GALAが定める科学目標の柱は,(1)地形情報に もとづく氷テクトニクスの理解,(2)潮汐応答の測定 を通した内部構造の理解,および(3)表面の小規模 粗度と反射率の理解である.これらの科学目標につ いて2.1~2.3節にて述べる.2.4節ではJUICEに搭 載される他の科学観測機器とのシナジーおよび波 及効果について述べる.

2.1 地形情報にもとづく氷テクトニクスの理解

ガニメデをはじめとする氷衛星の表面は氷から なる地殻に覆われ、そこには地球型の岩石天体に 見られる地形とは大きく異なる様式を持った構造 が、様々な空間スケールで存在する(図4.5).氷の テクトニクスに支配された天体進化を解明するため には、地形学的特徴を詳細に把握することが必須 である.

しかしながら、従来の巨大惑星系探査ではレー ザ高度計が使用されなかったこともあり、 定量的な 地形情報は過去の探査で立体視画像が得られてい るごく僅かな領域に限られる.また.過去に木星系 衛星を調査したボイジャー探査機やガリレオ探査 機の観測はフライバイによるものだったため、撮像 や分光観測領域の表面カバー率が悪く、空間解像 度にも大きな不均質がある. 特に極域については 空間解像度が著しく低いか、あるいはデータが欠 落している. そのような不十分なデータに基づいて 作られた地質図は、全表面の半分以上が地形的特 徴の判読ができない領域となっている[12]. こうし たデータの不完全性はクレータ年代学に基づく地 質年代の推定にも十億年オーダーの大きな不定性 をもたらし、進化の解明に必要な地質と時間軸の 対応づけを困難にしている.

JUICEによる極周回軌道からのガニメデ観測は、 この状況を本質的に改善する.以下に、現状で判明し ている地質学的特徴を概説し、GALAでの詳細な調 査によって期待される科学的知見について述べる.

2.1.1 ガニメデ

ガニメデ表面の地質は大きく3つに分類される.



図4: ガリレオ探査機によって得られたガニメデのクローズアップ画像に,高度500 kmの極周回軌道において予想されるGALAのレーザス ポットを赤点で示した図.

Bright Terrainと呼ばれ,相対的に反射率が高 く溝状の構造が卓越する領域,Dark Terrainと 呼ばれ相対的に反射率が低く衝突クレータで飽和 した領域,そして天体衝突によって形成した構造 (Impact Structure)である.

(1) Bright Terrain

相対的に反射率が高い(波長~1 µmにおけるア ルベドの平均値で約0.6)この領域は、Groove(ある いはGrooveの集合体としてのSulcus)と呼ばれる 溝状の地形で特徴付けられ、ガニメデ表面の約2/3 を占める(図5). 高さ数十~数百m、波長1 km程度 の起伏を持った溝 (Groove) が帯状に束になり、皺 のような外見を作り出している.水平方向のスケール は長大で、1000 kmを超えるものも多い.

Grooveはその形成以前から存在している古い地 質を引き裂くような形態を取ることから、表面の伸 張応力によって形成した正断層の集合体と解釈され ている.応力と断層形成という地質活動が、地球に おいてはプレートの生成や移動, 消滅に特徴づけら れるいわゆるプレート・テクトニクスによって駆動さ れているのに対し, そういった運動が見られないガ ニメデでは,内部の温度変化や液体水の固化に伴う 全球的な体積膨張や,内部での固体氷対流に伴う 上昇流などが応力源として提案されている[13,14].

しかしながら,地形学的情報の不足からそのよう な応力源となるイベントの発生時期や規模は分かっ ていない.またクレータ年代学に基づいて,この Bright Terrainの典型的な年代は約20億年前と 推定されているが,データの欠如や衝突フラックス の推定における不定性によって,8億年前から40億 年前までの曖昧さがある[15].

GALAが高空間分解能で全球測定を行えば、定 量的なGrooveの形状解析を通して弾性リソスフェ アの厚さや表面拡大の全球総量を見出すことがで き,Bright Terrainの形成のために必要な体積膨 張量,すなわち内部温度の変化量あるいは地下海の 固化量などの推定に繋げることができる.これは内



図5: ガニメデにおける代表的な地質学的特徴. 左上: Bright Terrainに見られるGroove (Uruk Sulcus), 右上: Dark Terrainに見られる Fossae (Lakhmu Fossae), 左下:直径40 kmの衝突クレータ (Achelous crater), 右下:緩和が進んで起伏がなくなった古い衝突 地形 (Buto Facula, 直径245 km).

部の熱史を制約する重要な情報にもなる. Groove の起伏の波長がリソスフェアの厚さで決まる点も, 熱 進化を制約する手がかりとなる.また, JUICEの可 視光カメラ (JANUS) が得る高空間分解能の画像 データと連携して小スケールの衝突クレータを同定 すれば,地形の形成年代を高精度で推定することが 可能となる.各地質領域の形態とそれらの層序,そ して各地形が持つ年代を組み合わせた知見は,ガニ メデのテクトニクス様式の理解と進化の解明に本質 的な寄与をもたらすものと期待できる.

(2) Dark Terrain

相対的に反射率が低い(波長~1µmにおけるアル ベドの平均値で約0.25)この領域は、衝突クレータ で飽和した古い年代(40億年以上前)を持ち、ガニメ デ表面の約1/3を占める[15].衝突クレータに重な るように存在するFurrow(あるいはFurrowが卓 越する領域としてのFossae)と呼ばれる溝状の地形 は、その形態がGrooveに似ているが、年代の古さ を反映した大きな緩和や侵食を受け、やや丸みを帯 びた畝のような形態に近い(図5).

このFossaeの成因がGrooveと同様に表面の 拡大や伸張応力にあるのかは分かっていないが, Furrowの分布が同心円状に見えることから,巨大 な衝突イベントに伴う多重リング構造との解釈があ る[16].一方で,Grooveを形成した体積変化イベン トがDark Terrainにも構造を作り,衝突イベント 起源としてのFurrowと混在している可能性もある. 特にBright Terrainとの境界領域では,推定年代 や物質学的特徴の違いも注意深く読み取りながらそ の起源を把握することが必要となる.

(3) Impact Structure

ガニメデでの衝突クレータの形態は、サイズが大 きくなるに従って単純(お椀)タイプ、平底タイプ、中 央丘タイプ、中央孔もしくは中央ドーム型タイプ、そし て複雑・多重リングタイプへと変化する.こうした傾 向はカリストやエウロパにも同様に見られる.ただし クレータの個数には大きな差異があり, エウロパ, ガ ニメデ, カリストの順に少ない. また, 氷天体上のク レータのサイズと深さの関係は地球型岩石天体のそ れとは異なり, 形態が変化するサイズが月よりも小さ い(同じサイズの平底クレータは月よりも浅く, かつ 平底の中央部がやや高まっている). さらに大きいサ イズのクレータでは深さ/直径比の傾きが変わり, 大 きいほど浅くなる[17].

このような傾向は、アイソスタシーのもとではス ケールの大きい地形ほど粘性緩和が進み、形状が 長期的に変化することと対応している.粘性緩和の 度合いはリソスフェアの厚さで決まり、その厚さは熱 流量で決まる.そのためクレータの粘性緩和度は熱 進化を制約する重要な手がかりとなる.また、粘性 緩和の進行に伴う応力場の変化は断層の形成に発 展する可能性があり、クレータ内の断層構造(同心円 状か放射状か)もリソスフェアの厚さで決まる.

したがって、大きな粘性緩和度が期待できる大き なクレータに対してGALAを用いて深さ/径比の計 測を行い、あわせて高解像度画像を用いた断層構造 の解析を行うことは、ガニメデの熱進化史を理解す るために重要である、また、ほとんど緩和しないと 考えられる小さいクレータの深さ/直径比を正確に 求めることも、大きなクレータの緩和度推定に必須 である. 深さ/直径比決定のためにはクレータ内に 複数のデータ点が必須となるため、小さいクレータ はデータ密度の高い高緯度地方に存在するものに着 目すべきである. また, クレータが複数の地質ユニッ トをまたぐ場合や、クレータ形成後のテクトニクスに より変形している場合(例えば、クレータを二分する ような巨大な断層が走っている場合など)には、深さ /直径比の解釈が複雑になる. そのため単一地質ユ ニット内にあり、巨大な断層で引き割かれていないク レータについて, まず着目すべきであろう.

2.1.2 エウロパ

JUICEはエウロパに対して2回のフライバイを行う.その際にGALAはエウロパ表面からの探査機の高度が1300 km以下において測距を行う.エウロパの表面にもガニメデと同様に多様な地質構造が存在するが,ガニメデよりも表面年代が総じて若い(典型的な地形形成年代として4000万年前)点が最も大

きな違いである[15]. エウロパ表面の地質は大きく3 つに分類される. 第1にLineamentと呼ばれる線状 構造, 第2にMottled Terrainと呼ばれる局所的 な崩壊地域, 第3に外来の天体衝突によって形成し た構造 (Impact Structure) である.

LineamentはガニメデにおけるGrooveと同様に 氷地殻の応力の履歴であり、画像データと連係した 地形年代の推定を通して、地殻進化の規模と時間ス ケールが対応付けられる. また近赤外分光などによ る物質化学的情報との連携は、氷地殻における物質 循環の理解にも繋がる. Mottled Terrainは氷地 殻が局所的に融解した[ホットスポット]的な領域と して注目されている. 特に, 測線上にあるTheraと Thraceと呼ばれる2つの巨大なMottled Terrain は、地形的外見の乱雑さからChaotic Terrainと も呼ばれ、その内部に局所的な融解領域、いわゆる 内部湖が存在することを示唆する領域として解釈さ れている[18].液体水は固体氷に比べて高密度(小 体積)なため、地殻浅部に液体水が存在するとその 上層が沈下し表面氷を破壊する. すなわちこうした 領域は、その起伏を計測することで地殻内部の状態 を知る窓となる。

また,ガニメデと同様にクレータの深さ/直径比の 実測から粘性緩和度を見出し,リソスフェア厚さと 熱流量の推定へと繋げることも,内部状態の理解に 有効である.

2.1.3 カリスト

JUICEはカリストに対しては10回以上のフライバ イを行う.その際にGALAは探査機の高度が1000 km以下において測距を行う.従来の探査によって 得られたカリスト表面のデータは,両極域で欠落し ているなどカバー率と質のいずれも悪い.JUICEは 木星周回フェーズにおいてその軌道を木星赤道面 (衛星公転面)に対して最大22度傾けるため,カリス トへのフライバイ時は高緯度領域の観測も可能とな る.カリストの表面は一様に衝突地形が卓越し,衝 突クレータ同士が重なり合う飽和状態にあること から,推定される地質年代は40億年以上前と古い [15].こうした地形的特徴や反射率の低さはガニメ デのDark Terrainに類似していることから,クレー タの深さ/直径比の実測にもとづくリソスフェア厚さ や熱流量の推定を目指す。

2.2 潮汐応答の測定を通した内部構造の理解

潮汐変形のデータは、リモートセンシングによって 地下海の存否を判断するための最も重要な情報と なる.地球-月系と同じように、木星と衛星の間にも 重力相互作用による潮汐が働き、惑星と衛星に周期 的な形状や運動の変化をもたらす(図2).その変化 量は衛星の構成成分と内部構造に依存する.特に 氷衛星に対しては、変化量が地下海の有無に依存し て有意に異なることが理論計算から予測されている [19].GALAは探査機から衛星表面への測距を継 続的に行うことで衛星全体の形状変化をモニタリン グし、潮汐に伴う衛星表面の変位(鉛直方向の変化) と回転変動(いわゆる秤動、水平方向の変化)を捉え る.

2.2.1 表面変位

ガリレオ衛星のフライバイ探査を行ったガリレオ 探査機は、ガニメデ、カリスト、及びエウロパのいず れにおいても、周期変動する木星磁場に衛星が応 答して生じた衛星内部の誘導電流による二次磁場の 兆候を捉えた[7].これは衛星内部に地下海の存在 を示唆する観測結果である.ただしガニメデにおい ては、自身が固有磁場を持っていることなどから解 釈が難しく、地下海の存在を強く制約するには至っ ていない.また、ハッブル宇宙望遠鏡を用いたガニ メデのオーロラ観測からも地下海の存在が示唆され ているが、同様の理由で確定的とは言えない[20].

そこで地下海の存否について確証を得るために, GALAは従来とは異なる測地学的アプローチによっ てこれに挑む.地下海が存在しない,すなわちH₂O 層の全てが固化して深部の岩石層と固着している場 合と,地下海がある場合とでは,潮汐に伴う衛星表 面の変形量が異なることが理論的に見積もられてい る[18].

ガニメデをはじめとするガリレオ衛星の内部構造 は、平均密度と慣性能率の制約のもとで組成含有率 とその内部成層度が推定されている.慣性能率が小 さいガニメデの内部は、明瞭な分化状態にあると考 えられている.そして表層が厚さ約1000 kmにおよ ぶH₂O主体の層に覆われ、地下海があるとすればそ れは、低圧相の氷からなる表層の氷地殻と、高圧相 の氷からなる高圧氷マントルに挟まれて存在すると 思われる[21].

このような内部構造を仮定した潮汐変形の粘弾性 モデル計算によれば、地下海が存在する場合、表面 変位をあらわす変位ラブ数(h₂)は1.0~1.7であり、 その位相ずれ(変位が最大となる軌道上の位置と近 木点とのなす角)は10度以下となる.一方で、地下海 が存在しない場合のh₂は0.1~1.6であり、位相ずれ は0~60度以上に達する[19].ここで見られる不定 性は主に氷殻の厚さや粘性率、剛性率が持つ不定 性に主たる要因があり、例えば高圧氷層の粘性率が 低い場合は、地下海が存在しない場合でもh₂が大き くなってしまう.これはすなわち、変位ラブ数だけで は地下海の存否を決定できないことを意味するが、 変位の位相ずれと合わせることによってこの制約が 可能となる.

エウロパにおいては、ガニメデよりも木星に近い ことから大きな潮汐変位が予想される.しかしエウ ロパに対するJUICEの2回のフライバイはエウロパ と木星との位相が同一となるタイミングで行われる ため、潮汐応答の検出が原理的に不可能である.カ リストにおいては、地下海がない場合の潮汐変位が 0.5 m程度と見積もられている一方、地下海が存在 する場合の振幅は4 m以上になると予想されている [22].カリストに対しては様々な軌道位相でのフライ バイが行われるため原理的には潮汐変位の検出が 可能だが、フライバイ回数が少ないことに加えて軌 道の交差点がほとんどないため、実際には潮汐変位 の検出はかなり困難であると考えられる.

2.2.2 回転変動

エウロパ,ガニメデ,カリストはいずれも,その公 転周期と自転周期が一致した同期回転と呼ばれる 状態にある.そのため1回の公転における平均として は「常に同じ面を惑星に向ける」が,その公転の最中 に木星から受ける潮汐トルクによって自転速度は変 動する(この変動を強制秤動と呼ぶ).ガリレオ衛星 の公転面は木星の赤道面にほぼ一致しているため, 強制秤動は主に経度方向に発生する.

こうした変動があると、測距の際に衛星表面にお いてレーザ照射のスポット位置が系統的にずれるた め、GALAによる長期間観測からその大きさを検出 できる可能性がある.さらに地形のステレオ画像を 用いた相対的に精度の良い数値地形モデルが構築 されれば、GALAの観測と組み合わせることで変動 の測定精度が上がる.

強制秤動の大きさは内部構造に依存することが 理論的に示されており、ガリレオ衛星以外の天体、 例えばカッシーニ探査機による土星系衛星での秤 動の測定が、地下海の存在を判別する手段のひとつ として用いられている[23].ガニメデの秤動の大きさ は、地下海の有無も考慮した上で、ガニメデ赤道上 での位置に換算して6.5~9 m程度と見積もられてい る.一方JUICEで期待される秤動の検出精度が数 m程度であることを考えると、これをもって地下海の 存在を確定的に判別することは難しそうである.い ずれにしても、従来の理論モデルは衛星の固体層を 完全弾性体と仮定しているため、粘弾性的な振る舞 いを考慮したより現実的なモデル計算を行う必要が ある.

エウロパに対しては潮汐変位と同様に,2回のフラ イバイ時の軌道位相が同一となるために経度秤動の 検出は原理的に不可能である.またカリストの秤動 の振幅もガニメデと同程度と見積もられているが,ガ ニメデより観測数が少ないことを考えると,潮汐変位 と同様に秤動の検出自体が困難と考えられる.

2.3 表面の小規模粗度と反射率の理解

地形情報の取得や潮汐応答の検出がレーザの往 復の所要時間を用いた測距に基づくのに対し、受信 レーザパルスの時間的拡がりや強度の変化によって 表面状態に関する情報を得ることも期待できる。

2.3.1 表面の小規模粗度

レーザの照射スポット(高度500 kmからの測距に おけるスポットサイズは直径約50 m)中に高さ数m 以上の起伏があると,反射パルスの幅が時間的に広 がる(ピーク強度は下がる).地表面に傾斜がある場 合も同様である.氷衛星の表面は,大気のない地球 の月の表面がそうであるように,継続的な天体衝突 を経たことにより細かいレゴリス状になっていると考 えられているが,数メートル規模の起伏については 情報がなく,GALAによる測定が初となる. 衛星表面の起伏を作り出す主要因は断層運動な どのテクトニクスや天体衝突であるが、小さな空間ス ケールでは、日射に伴う氷の昇華や、木星磁気圏中 のプラズマ粒子によるスパッタリングが大きな寄与 を果たしている可能性もある.GALAがもたらす小 規模粗度の定量的な情報と、地質ユニットとの関係 や日射やプラズマ粒子などの外的要因との関係を見 出し、特にガニメデに対してはその緯度経度分布も 考察することで、外的な要因による起伏変化の素過 程と変化の時間スケール(いわゆる風化速度)の解明 を目指す.

2.3.2 反射率

氷衛星の反射率は、全球平均ではエウロパ、ガニ メデ、カリストの順に高く、また地質ユニット間でも 違いがある(一般に古い地質ほど低反射率).また、 木星磁気圏中の高エネルギー粒子のスパッタリング の影響によって、公転方向の前方と後方でも有意な 違いがある.さらに、固有磁場を持つガニメデでは、 極域の反射率が高く「極冠」と呼ばれる特徴も持っ ている.

能動的にパルスを照射するレーザ高度計である GALAのデータを用いることで、全球的にほぼ同じ 条件でレーザ波長での入射強度と反射強度の比を 求めることができる.高度や表面の傾斜を補正し、 近赤外分光による観測結果との照合を通して、レー ザ波長での天体の反射率マップを求めることがで き、放射線や紫外線による反射率の変化の理解を 大きく進めることが可能となる.

2.4 他機器観測とのシナジー・波及効果

GALAによる観測がもたらす氷テクトニクス,地 下海を含む内部構造,そして表面組成に関する知見 は,JUICEが他に搭載する様々な機器の観測結果 と組み合わせることで,さらに多角的に深めること ができる.

例えば可視カメラJANUSが得る画像データは, GALAの計測位置を特定し,点の情報を面的な表 面地質の理解へと繋げる最も重要な連携機器であ る.氷層を透過するレーダのRIMEや重力場測定を 行う3GMは地質の産状把握に寄与し,可視赤外撮 像分光計MAJISや紫外分光系UVS,サブミリ波 分光系SWIは様々な波長で表面の組成に関する情 報を得る.磁力計J-MAGは木星磁場の変動に伴う 衛星の電磁感応をモニターし,非熱的中性粒子観測 器PEPや電波・プラズマ波動観測器RPWIによる 観測のサポートを得て,地下海の規模や組成(電気 伝導度)を制約する.こうした複眼的なアプローチで 氷衛星,特に地下海の環境を把握することによって, アストロバイオロジーの観点での研究も進むと考え ている.

GALAをはじめJUICEに搭載される観測機器 のデータを総合して得られる氷衛星についての知見 は、木星系の理解に貢献するだけには留まらない. 太陽系形成理論と連携することによって、一般的な 惑星系・衛星系形成モデルの構築に寄与することが 期待される.

近年,数多く発見されている系外惑星系を成す天体の年齢,質量,軌道等は多様性に富んでいるが, 観測から得られる情報量には,観測対象までの距離に起因する限界がある.いっぽうGALAおよび JUICEの他の機器を用いた探査は,対象は太陽系 における木星系という特定のターゲットに限定され るが,得られる情報の詳細さでは系外惑星観測を圧 倒する.したがって両者は相補的である.GALAお よびJUICEの機器がもたらす情報は,太陽系外の 惑星系・氷衛星を研究していく上で重要なテンプレー トとなり,足掛かりになると考えている.

3. 機器開発

GALAの装置全体の概要,諸元および国際分担 については第1節で述べた.本節ではまずGALAの 機能と構成要素について述べ(3.1節),次に特に日本 における開発について重点的に解説する(3.2節).

3.1 GALAの機能・構成

シングルビーム・単一受光素子のレーザ高度計で あるGALAの第1の機能は、軌道上から氷衛星表面 へのレーザ測距を行い、氷衛星表面におけるレーザ 照射箇所の高度を測定することである.これに加え て、受信した反射光の強度やパルス幅の時間的な広 がりから、観測地点の反射率や傾斜・粗さについて も情報を得る. GALAのハードウエアは複数のモジュールによっ て構成される(図3). 各モジュールの機能を, 測距信 号の大まかな流れに沿って以下に記す.

- <u>LHM・LEM</u>:内蔵するNd:Yagレーザによって, 波長1064 nm,出力17 mJの送信パルスを生成 する.送信パルス幅は2.9 ns,ノミナルおよび最 大サンプリング頻度はそれぞれ,30 Hzおよび50 Hzである.
- 送信望遠鏡: 生成された送信レーザパルスをガニ メデなどの観測天体表面に照射する. ノミナルの 照射スポットサイズは 50 mである.
- 受信望遠鏡: 観測天体表面で反射したレーザパルスを受信・集光し, BEOに導入する. 開口径25 cmの軸対称光学系から成る.
- <u>BEO</u>: 微弱な受信レーザパルスをできる限り高い シグナルノイズ比で受けることができるよう, 焦点 面ピンホールによる空間フィルタリング, バンドパ スフィルタによる波長フィルタリングを行う.
- <u>FPA:</u>BEOを経て導入された受信レーザパルス を、APD検出器によって光学的信号からアナロ グ電気信号へと変換する.またFPAには送信 レーザパルスの一部を導入する経路が設けてあ り、送受信レーザパルスを同一の検出器で計測す ることができる.
- <u>AEM</u>: FPAから出力されたアナログ電気信号を デジタル信号に変換する.
- <u>RFM</u>: AEMから出力されたデジタル信号を受け、送受信パルスの時間差や受信パルスの波形、 強度等を定量化する.
- <u>DPM</u>: GALAの主コンピュータであり、装置の制 御を行い探査機とのインターフェースの役割を持 つ.
- <u>PCM</u>: GALAに各種電圧の電源供給を行う.

3.2 日本における開発

GALA-Jは国際協力によるハードウエア開発で BEO, FPA, およびAEMの3つのモジュールを担 当する(図3). また主担当ではないものの, GALA 全体の性能をシミュレーションするソフトウエア(パ フォーマンスモデル)の開発を自主的に行っている. 本節ではこれらの開発について述べる.

モジュール	モデル	使用目的	最終使用場所
BEO	STM1	熱構造モデルとして使用.特殊機械 I/F,	日本(自主モデル ³⁾)
および		表面処理の試作等	
FPA ²⁾	STM2	熱構造モデルとして使用.	$DLR \rightarrow ESA$
	S05 (SIM)	STM 相当シミュレータ(相手方実験用)	$DLR \rightarrow HDT^{4)}$
	EM1-1	検出器周辺の電気モデルとして使用	$DLR \rightarrow ESA$
	BEO 単体	光学系の試作・実証・対環境試験	日本(自主モデル)
	試作モデル		
	EM1-2	検出器周辺の熱設計実証モデル	日本(自主モデル.
			適宜 DLR, HDT に貸し出し)
	EM1-3	PFM 等価設計モデル.表面処理改良・PFM 製造・	日本(自主モデル.
		組立の経験獲得. 噛み合わせ・総合実証試験・	適宜 DLR, HDT に貸し出し)
		特殊実験法確立の相手方として使用	
	(EM2)	FM 準拠モデル.欧州にて全体噛合せ・	ドイツ側計画変更のため廃止
		総合実証試験	
	PFM	フライトモデル	$DLR \rightarrow ESA$
	FS	フライトスペア	$DLR \rightarrow ESA$
AEM	STM	熱構造モデル	$DLR \rightarrow ESA$
	AEM SIM	シミュレータ(相手方実験用)	DLR → ベルン大学
	EM1-1	システム試験用	$DLR \rightarrow ESA$
	EM1-2	RFM との IF 確認用	日本
	EM1-3	RFM との IF 確認および設計検討用	日本
	(EM2)	FM 準拠モデル.欧州にて全体噛合せ・	ドイツ側計画変更のため廃止
		総合実証試験	
	PFM	フライトモデル	$DLR \rightarrow ESA$
	FS	フライトスペア	$DLR \rightarrow ESA$

表2: GALA-J における開発モデル(ハードウエア)およびその目的".

¹⁾モジュール未満の規模の試作や,モジュールを試験するために開発した装置は含めていない.²BEO単体試作モデル以外は全てBEOとFPA のそれぞれについて製作する.³⁾欧州を含む公式のGALAプロジェクトでは要求されていないが,日本担当分の開発のため不可欠と判断して 開発したモデル.⁴HENSOLDT社(ドイツ).ドイツにおけるGALAの主契約企業.

3.2.1 開発モデル群(ハードウエア)とその目的: Model philosophy

宇宙用の機器開発では、段階的に複数のモデル(ハードウエア)を製作することが一般的である. GALA-Jにおける開発モデルおよびその目的 (Model philosophy)を表2に示す.

このように通常の同規模の国内プロジェクトと比 べて多くのモデルを開発する理由は幾つかある: 欧 州との「堅い」国際分担であることは、その要因の ひとつとなっている.また、GALA全体の方針とし て、多数の国・機関にわたる国際分担において、各モ ジュールの機能を模擬するハードウエア(シミュレー タ)を製作して相互交換することがインターフェース対 応の基本路線とされたことが挙げられる. あわせて, 単にGALA-Jが複数のモジュールを担当しているこ とも,開発モデルが多数になる要因となっている.

日本担当モジュールに求められる機能・性能要求 および制約条件は挑戦的で、モジュール自体の開発 のためにも試験・実証方法を確立するためにも、計 画したことを消化するだけでは不十分で、試行錯 誤が不可欠であった、そのため欧州を含む公式の GALAプロジェクトでは要求されていなくても、フラ イトハードウエアと同等の設計による自主的な実証 モデル(EM1-3)一式の開発が不可欠と判断した、こ のことも、日本で開発するモデルの数が増す要因と して寄与している.



図6: BEOの光学設計. 上段が光学系の構成, 下段が結像特性を示す

3.2.2 BEO

BEO (Backend Optics)は、受信望遠鏡が集光 したレーザパルスに適用する後置光学系モジュール である.その主な役割は、微弱な受信レーザパルス をできる限り高いシグナルノイズ比で検出するため、 空間フィルタリングおよび波長フィルタリングを行う ことである.BEOの光学設計を図6に、機械的設計 を図7に示す[24].

BEO の入射開口は直径700 μmのピンホール で、受信望遠鏡の焦点面に位置するようにドイツ側 とBEO間の機械的インターフェース条件を定めてあ る.空間フィルタリングの役割はこのピンホールが担う.ピンホールを通過した受信レーザパルスは、高精度の波長フィルタリングを行うため第1レンズでコリメートされた後、バンドパスフィルタを経て、第2レンズによって再結像する.

光学系の高効率化のため、レンズ(石英製)の枚数 を最小限の2枚とし(ドイツによる当初の設計例では 4枚)、各レンズの両面に反射防止コートを施した.ま た縮小光学系(倍率0.52)にすることでBEO・FPA間 アラインメントの実現性・堅牢性を確保する方式にし た(ドイツの当初の設計例では等倍光学系).このよ うな光学系を設計制約のもとで実現するため、接着



図7: BEOおよびFPAの外観(上)および断面図(下).

剤を使わない保持構造およびそれと整合する特殊な レンズ形状を設計し,特注品として製造した(図6). その結果,実現した透過効率(バンドパスフィルタを 除いて99.8%以上)は余裕を持って要求(98%)を上 回る,理想値に近いものであった.

高性能のバンドパスフィルタの開発も重要課題で あった.入念な設計検討と試験および製造の結果, 透過帯(1064 nm帯)の全域で透過率95 %以上(要 求値は90 %), 遮蔽帯の遮蔽率6桁以上(要求は5桁) など,たいへん良い特性を実現した.

レンズおよびバンドパスフィルタについては、交渉 により欧州の規格標準と擦り合せつつ,国内で放射 線,温度,湿度等についての認定試験を遂行した. BEOの筐体はステンレス(SUS316)を母材とし, 高精度機械加工による一体材料からの削り出し部 品として設計した.その結果,筐体内のレンズやバン ドパスフィルタ等の部品は,ネジ締結で組み立てる だけで保持および内部アラインメントが自動的にで きる方式になっている.また,BEOの筐体は放射線 シールドを兼ね,その形状・肉厚が内部の光学素子 の放射線遮蔽の要求を満たすよう計算して設計して ある.さらに,BEO筐体はドイツ側との機械的イン ターフェースを兼ねている.その高精度の要求を満 たすためにも,高精度の機械加工は重要な役割を果 たした.

BEOには、打ち上げ時に筐体内部の閉空間を排

気するための系路を設けてある.迷光対策として, 筐体と内部スペーサの幾何学的形状の組み合わせ により,(長さに比べて)細い排気経路が4回の折れ 曲がりを経て,初めて外界に通じる構造にしてある (迷光が混入するために必要な反射回数はもっと多い).

設計においては、光学的アラインメントや部品の 製造精度、熱変形、物性の温度依存性等を考慮し た公差(許容誤差)解析を行い、すべての公差を決 定した.その結果、BEOについては最終的には製 造時に接着および光学的微調整を要することなくド イツ側との高精度の機械的インターフェースや厳しい 許容空間の制約、放射線遮蔽、環境条件(温度域、 振動)等の要求と光学特性を両立する設計解を得る ことができた.

いっぽうBEOとFPAの間のアラインメントについ ては、公差解析と設計検討により、光軸をZ方向と した場合におけるXY方向の面内シフトだけは光学 特性を測定しながらの微調整が必要と判断した.そ のためBEO・FPA間に機械的な調整自由度を設け た(図7).このようなシンプルな機構でじゅうぶんに 事足りるのは、前述の縮小光学系の効果で、XY面 内方向の許容度を大き目に確保できたことによる(そ の結果、Z方向のアラインメント許容度は若干、犠牲 になっているが問題にならない程度である.また、 ここでは傾きの誤差は事実上、無視できる).なお、 この部分にも迷光対策を施してあり、迷光が侵入す るためには5回の折れ曲がりを含む経路を経る必要 がある.

実験的には、このような機能・性能および制約条件への適合の全てを、複数のハードウエアモデルの 開発を経て、EM1-3にて実証することができた(表2).

3.2.3 FPA

FPA (Focal Plane Assembly) は、APDセンサ を含むAPDモジュールを中心に、その周辺機器をまと めた焦点面機器モジュールである(図7). FPAの主な 役割は、光学信号(受信レーザパルスおよび送信レー ザパルスの一部)を電気信号に変換することである.

受信レーザパルスは受信望遠鏡とBEOを経て FPAに導入され、APDセンサに照射される.また FPAは送信レーザパルスの一部を導入する光ファイ バーを持ち、FPA内にて極小ボールレンズによる収 束と、極小金属鏡による2回反射を経てAPDセン サに至る. FPA内部は許容空間の制約が厳しく通 常の鏡の据え付けが困難だったため、鏡を内部に取 り付ける構造部品と一体化し、その一部を研磨して 金コートを施すことで反射光路を実現した. これら の構造により、送受信レーザパルスの時間差や強度 比、パルスの時間幅の広がり等を同一の検出器で計 測・比較することができる. APDセンサからの出力 信号はAPDモジュール内のトランスインピーダンス アンプ(帯域は100 MHz)で増幅され、AEMに出力 される.

GALAのAPDモジュールは、Excelitas Technologies 社製の民生品APDセンサおよびAPDモジュール をベースとし、JUICEミッションで要求されてい る性能要求や環境耐性要求を満たすようカスタマ イズや認定試験等を行って開発したものである。 Excelitas Technologies社のAPDセンサはYag レーザの基本波長(1064 nm)において高い検出効 率を持つことで知られており、これまで多くの宇宙 ミッションで使用された実績がある。例えば日本の 月惑星ミッションでは月探査機「かぐや」に搭載され たレーザ高度計LALTや、小惑星探査機「はやぶさ 2」のLIDARでも使用されている。

APDセンサは、微小な光信号をアバランシェ効 果によってセンサ内部で信号を増倍することができ るが、増倍率やノイズレベルが大きな温度依存性を 持つことも知られている.GALAのAPDモジュール では、プリアンプやAPD温度制御用ペルチエ素子、 温度センサなどがひとつの基板に載ったハイブリッ ドICとして、コンパクト(直径2 cm程度)な筐体中に パッケージ化されている(図7).このことが外部から のノイズ混入防止や高精度の温度制御、そしてFPA およびGALA全体のコンパクト化に寄与している.

APDモジュールの開発では、木星圏磁場中の大 強度の電子線に対するAPDセンサの性能劣化が重 要な課題であった.そのためAPDセンサの放射線 耐性を調べるための電子線照射を、フランス国立航 空宇宙研究所ONERAにて行った.さらに量子科 学研究機構放射線研究所でのプロトン照射試験や 東工大のコバルト施設での照射試験も行い、放射線 シールド設計に必要な情報を得た.また、電子線に よって引き起こされる偽信号の評価をするため、京



図8: 組 み 合 わ せ た 状 態 の AEM(角 型 の 基 板) および BEO+FPA(中央部). いずれもモデルはEM1-3.



図9: DLRでのAEM-RFM間インターフェース試験.

都大学原子炉実験所(現京都大学複合原子力科学 研究所)のライナック加速器を用いた電子線照射試 験を行った.また,光ファイバーについては交渉によ り欧州の規格標準と擦り合せつつ,国内で放射線, 温度,湿度等についての認定試験を遂行した.これ らの結果をもとに,FPA筐体および内部構造体が 放射線シールドの機能を兼ねて,トータルで遮蔽に 関する要求を満たすよう設計した.

FPAの設計においては他にも多くのハードルが あった.例えば外部とのインターフェース温度が大 きく変動する環境でAPDを運用温度(25℃)に保つ 熱設計や,柔軟性と伝熱能力の厳しい要求を同時に 満たす熱ストラップを含む排熱系の実現は重要な 課題であった.また,欧州の規格標準と擦り合わせ 交渉をしながら進める特殊表面処理などに取り組ん だ.これらの要求を満たす機能・性能を,限られた 許容空間その他の条件の範囲内で実現することは 挑戦的であったが,設計解を見出すことができた(図 7).実験的には複数のハードウエアモデルを経て, EM1-3にて全ての機能・性能および制約条件への 適合を実証することができた(表2).

3.2.4 AEM

AEM(Analogue Electronics Module)の第 1の役割は, APDモジュールの出力信号を受け200 Msps(Megasamples per second)のレートと12 bitの分解能でADCサンプリングを行い, スイス チームが担当するRFMにデジタルデータとして送信 することである(図8).

GALA開発の検討が始まった当初から,200 Msps,12 bitのADCサンプリングおよびRFMへ の高速通信は重要な課題であった.試作・改良を繰 り返し,最終的にはフライトモデルとほぼ同じ基板・ 部品を用いたモデル(EM1-3)をGALA-Jにて自主 的に製作して細部までの調整を行った.RFMとのイ ンターフェース試験はDLRでしか行えないため,最 終的な調整のためDLRに繰り返しEM1-3を持ち込 んで試験を行った(図9).その結果ADCサンプリン グ,高速通信,およびノイズレベルなどの性能要求を 満たせることが実証できた.

AEMのその他の役割は、APDセンサに逆バイア ス電圧として印加される高電圧(300~400 V)の供 給、APDセンサの温度コントロールを行うペルチエ 素子の駆動、およびハウスキーピングデータの収集 である.これらの機能についてもEM1-3までの開発 で実証できている.

3.2.5 パフォーマンスモデル (GALA全体評価ソフトウエア)

ここで言うパフォーマンスモデルとは、GALA全

ケース	ミッションフェーズ	高度(km)	測距精度 要求(m)	誤測距 確率要求	R_SNR	C_SNR
Α	エウロパフライバイ観測	1300	-	< 0.2	> 22	23.2
В	ガニメデ極周回軌道観測(I)	500 ± 50	< 10	< 0.2	> 22	28.8
С	ガニメデ極周回軌道観測(II)	500 ± 50	< 2	< 0.1	> 43	202
D	ガニメデ極周回軌道観測(III)	500 ± 50	< 1	< 0.1	> 122	357

表3: 測距精度に関する要求および計算値

体の性能をシミュレーションするソフトウエアのこと である.パフォーマンスモデルは、ハードウエアへの 要求設定や設計、および実験結果の考察等におい て重要な役割を果たす.そのため日本はパフォーマ ンスモデル開発の主担当ではないものの、GALA-J でもソフトウエアの開発を行い、ドイツと共有してダ ブルチェックを行いつつ運用している[25].その活 用例を以下に記す.

GALAの性能要求を規定する量として,ガニメデ の極周回軌道観測およびエウロパフライバイ観測を 念頭に置いた測距精度と誤測距確率がある(表3). 実際の測距値の誤差が測距精度を逸脱する確率 は,誤測距確率以下に抑える必要がある.この要求 を満たすには,受信パルス波形のSNR (Signal to Noise Ratio)が,閾値(*R_SNR*; Required SNR) を超えている必要がある.

そのためにまずR_SNRを、表2に示したA~Dの 4ケースについて、GALA受信波形のシミュレーショ ンによって求めた。GALA受信模擬波形データを複 数作成し、そのピークタイミングの統計変動から誤 測距確率を得た。受信模擬波形データは{[基準波 形]+[正規分布ランダムノイズ]}の適合フィルタ処理 で作成した.次に、得られた誤測距確率が表2に示 した要求値と等しくなるように正規分布ランダムノイ ズのレベルを調整し、確定した受信模擬波形データ のSNRをR_SNRとした(表3). ここでケースAにお ける測距精度の要求値は10 m、SNR =[基準波形 ピーク値]²/[正規分布ランダムノイズ分散値]とした [25]. さらに R_SNR の実現可能性を検証するために は、GALAの機器性能や観測条件を考慮して計 算したSNR (C_SNR ; Calculated SNR)が、 $C_SNR > R_SNR$ を満たさなければならない [25,26]. ここで、木星周囲の放射線環境による APDの性能劣化の影響の度合いが重要となるが、 従来は文献データからの推定に頼っていた.そのた めGALA-Jではその環境を模擬した2 MeV電子線 及び50 MeVの陽子線をAPDに照射し、APD放 射線劣化を再評価した[25,27].この結果をGALA 性能評価モデルに組込みC_SNRを計算した結果、 AEMのノイズの影響評価を除きA~Dの4ケースで $C_SNR > R_SNR$ であることを確認できた(表2) [27].

4. 打ち上げに向けて

4.1 当面のスケジュール

本稿執筆時点(2020年6月)においてBEO, FPA, およびAEMのいずれについても, EM1-3(フライト ハードウエアと同一設計の試験・実証モデル)の製作 およびそれらを統合した試験を終えている(表2). こ こに来てようやく, 開発の実現性が実証できたと言 える.

GALA-Jでは2020年度にPFMを製作してドイツ に出荷する. PFMの開発はEM1-3の実績をもとに, フライトハードウエア特有の品質保証・清浄度・段取 り・文書提出等の要求を踏まえて遂行する. 出荷に 関連する各地の審査等も経た後には、ドイツにおい て全体組立ておよび試験を行い、さらにJUICE探 査機に搭載して統合試験に臨む.JUICEは2022年 に、フランス領ギアナのクールーにあるギアナ宇宙 センターから打ち上げられる予定である.

4.2 GALA開発の経験・教訓と今後への応用

GALA-Jの開発は様々な面で,これまでに経験し たプロジェクトに比べて多くの労を要するものであっ た.ここで挙げやすい要因を示すとすれば,まず, 日本が3つ(も)の重要なモジュールを担当したこと, BEO・FPAおよび関連する試験装置・実証方法等を 宇宙研が責任を負って実際に開発したこと,挑戦的 な機能・性能・インターフェース要求,そして多数のモ デルを非常に限られたスケジュールで開発する必要 があったこと等は大きなハードルであった.

同様にGALA全体における国際分担の変更,X 線天文衛星「ひとみ」の不具合を受けたプロジェクト 推進方針への影響および審査・契約への影響,海 外企業との交渉,ドイツ政権に起因する予算上の問 題の影響,GALA全体におけるモデル開発ポリシー の変更,欧日における新型コロナウイルス禍,これら の相乗効果などからも,GALA-Jプロジェクトは大 きな影響を受けた(途中の変更はその時々で最適化 のためなされたことは書き添えておきたい).このよう な開発プロジェクトを,大量の文書と審査を前提と する「堅い」欧州の方式と両立して遂行することから 得られた経験や教訓は大きい.

またGALA-J内で自主開発したEM1-3一式も, スケジュール,予算,および人的リソースを圧迫した (最終的にはEM1-3はGALA-J内だけでなく日欧を 行き来して大活躍している).

宇宙機搭載レーザ高度計の重要性は今後ますま す高まり、広範な用途に適用されていくと考えられ る.既に、GALAで開発したAPD検出器モジュー ルを小型月着陸実証機SLIMで用いることが議論さ れている.また月面等の縦穴探査におけるレーザ測 距の応用に向けても、コンタクトを受け情報提供をし ている.衛星あるいは航空機からの地球観測にも、 レーザ高度計は有用である.

GALAの開発を経て得た技術と経験を他のプロ ジェクトや次世代の人材ともぜひ共有して、今後の レーザ高度計開発や、レーザ高度計に限らない本格 的な国際協力プロジェクトなどにぜひ活かして行き たい.

謝辞

ドイツ,スイス,スペインのチームと共同で進めて いるGALA-Jの活動は,宇宙科学研究所およびそ の他の機関,また内外の審査委員,事務の方々に支 えられております.関わっている全ての方々に深く感 謝いたします.

GALA-Jの開発は多くの企業の方々と進めてきま した.当初は実現性も不明だった多数の課題に対し て単なる発注・請負を超えて,直接の議論や実験等 を繰り返しご一緒に取り組んで頂いていた,明星電 気株式会社,株式会社クリスタル光学,株式会社内 藤電誠町田製作所,夏目光学株式会社,株式会社 森川製作所,横浜プレシジョン株式会社,ジェピコ 株式会社,Excelitas Technologies,フジトク株 式会社,Materion,株式会社トプコン,株式会社オ プトクエスト,株式会社PTIJ,株式会社FAMサイ エンス,株式会社エム・アール・ジェイ,アストロオプ トの皆様に,心より感謝いたします.

参考文献

- [1] Opp, A. G., 1974, Science 183, 302.
- [2] Smith, E. J. et al., 1992, Science 257, 503.
- [3] Hansen, C. J. et al., 2004, Icarus 72, 1.
- [4] Stern, S. A., 2008, Space Science Reviews 140, 3.
- [5] Johnson, T. V. et al., 1992, Space Science Reviews 60, 3.
- [6] Kivelson, M.G.et.al., 2002, Icarus 157, 507.
- [7] Schubert, G. et al., 2004, in Jupiter: The planet, satellites and magnetosphere, 281.
- [8] Grasset, O. et al., 2013, Planet. Space Sci. 78, 1.
- [9] 木村淳ほか, 2013, 遊星人 22, 146.
- [10] Hussmann, H. et al., 2019, 2019CEAS 11, 381.
- [11] Kimura, J., et al., 2019, Trans. JSASS Aerospace Tech., Japan 17, 2, 234.
- [12] Global Geologic Map of Ganymede, SIM3237, https://astrogeology.usgs.gov/search/map/

Ganymede/Geology/Ganymede_SIM3237_ Database.

- [13] Showman, A. P. and Malhotra, R., 1997, Icarus 127, 93.
- [14] Bland, M. T. and Showman, A. P., 2007, Icarus 189, 439.
- [15] Zahnle, K. et al., Icarus 163, 263.
- [16] Hirata, N. et al., 2020, Icarus, https://doi. org/10.1016/j.icarus.2020.113941
- [17] Schenk, P., 2001, Nature 417, 419.
- [18] Schmidt, B. et al., 2011, Nature 479, 502.
- [19] Kamata, S. et al., 2016, J. Geophys. Res. Planets 121, 1362.
- [20] Saur, J. et al., 2015, J. Geophys. Res. 120, 1715.
- [21] Anderson, J. D. et al., 1996, Nature 384, 541.
- [22] Moore, W. B. and Schubert, G., 2003, Icarus 166, 223.
- [23] Cadek, O. et al., 2016, Geophys. Res. Let. 43, 5653.
- [24] Enya, K. et al., 2018, Proc. SPIE, vol.10698, 106984L.
- [25] Araki, H. et al., 2019, Trans. JSASS Aerospace Tech., Japan 17, 2, 150.
- [26] Gunderson, K. and Thomas, N., 2010, Planet, Space Sci. 58, 309.
- [27] Kobayashi, S. et al., 2016, JpGU Meeting abstract 2016, PPS11-P08.
遊星人の海外研究記 その3 ~フランスで生活する楽しさとちょっとの苦労~

小玉貴則

1. 興味と決意

私は、2019年1月から現在までフランスのボル ドー大学にて、ポスドク研究員として系外惑星大気 に関する研究に従事してきました.この体験記は、 海外での研究に興味があるがなかなか動き出せな い後輩たちを勇気付ける例になればと思い、筆をと りました.なぜならば、英語力がかなり低かった数 年前の自分にとって、海外での研究生活は全く想像 できないものだったからです.なぜそんな私が海外 に来たのかを説明するために、少し私の研究生活の 思い出話をしたいと思います.

私は学生時代に大きな影響を様々な教員から受 け、多くの国際学会に参加する機会を与えていた だきました.英語を用いた研究発表が苦手な私も、 徐々に慣れ、楽しめるものになっていきましたが、海 外に対する漠然とした憧れを持つだけでした.そん なある日、指導教官である阿部豊先生との雑談の中 で、惑星大気循環に関する近年のフランスの研究グ ループ動向の話をしました.雑談の中ではあるもの の、生き生きと、そして嬉しそうに彼らの研究の話を していた阿部先生の顔を今でも覚えています.そし て、『小玉は、彼らのような研究ができるようになる といいな』と僕に言っていました.その時から、私は 彼らのグループの研究を必死にフォローするようにな り、いずれ海外に行って研究したいと思うようになり ました.

l.Laboratoire d'astrophysique de Bordeaux, Université de Bordeaux, CNRS takanori.kodama@u-bordeaux.fr

学位取得後,東京大学大気海洋研究所にてポ スドクになり1年が過ぎた頃、私にとって大きな転 機となる, 憧れのフランス パリ大学 Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD) で の 滞在の機会が巡ってきました. JSPS Core-tocore Program 'International Network of Planetary Sciences'に滞在をサポートしていただ きました. 渡仏直前に, 指導教官であった阿部先生 が亡くなられ、僕の飛行機が先生のお葬式の日でし た. 機内で、『絶対に成長するぞ』と誓ったことを覚 えています、パリに2ヶ月滞在し、系外惑星大気循環 についての共同研究をしました. 意気込みに反して, 十分な交流や意見交換ができたとは言えるものでは なく,毎日悔しい思いをしていたことを覚えています. しかし, 苦悩した分だけ, なんとかなるという根拠の ない自信もつき、真剣に海外での研究を考えるよう になりました.

その後, AAS Job Registerなどで海外でのポス ドク公募を習慣的に見るようになり, 現在のポストの 公募を見つけました. その時は震えました. なぜな らば, 阿部先生との雑談で話をしていた研究者(現 在の私の上司のJérémy Leconte博士)がポスドク の募集をかけていたからです. そこから応募書を作 成, 応募, そして運良く面接(Skype)に進みました. 面接の内容は, これまでの研究, これからのプロ ジェクト内容など, よくある面接でした. 面接から1 週間後, 採用の通知をいただきました. 憧れだったフ ランスチームに入ること, 海外での研究, 阿部先生 との議論した日々, すべてのことに対して, 楽しみな 気持ちと不安な気持ちが混ざって, 数日はなにもで



図1: 夜のブルス広場と水鏡.

きなかったです. 阿部先生のお葬式とはじめてのパ リ留学からちょうど1年後,ボルドー大学での研究 が始まりました.

2. ボルドーでの生活

ボルドーの説明を簡単にすると、フランスで6番目 に人口の多い街で、ワインと観光が有名です。別名 『月の港』と呼ばれ、2007年に街全体がユネスコ世 界文化遺産に登録されています(図1).

海外での生活で最初の関門はビザでしょう.フラ ンスの場合,研究者は,研究者ビザという種類のビ ザを発行してもらう必要があります.フランス大使館 にて,事前予約し,受け入れ機関が発行したコンバ ンション・ダキュイ(受け入れ協定書)と必要書類を 提出し,申請します.研究者ビザのビザ申請は出国 予定の3週間前に行うことが必要でしたが,必ず提 出しなければならないコンバンション・ダキュイがボ ルドー大学からなかなか貰えないかつ海外郵便で 郵送だったため,かなりギリギリになっていまいまし た.この時点で発行される研究者ビザは3ヶ月の期 限付きであるため、フランスに到着後,滞在許可書 を正式に取りなおすことになります.

私の場合は、出発前にすでに家を決めていたた め、到着後すぐに入居しました、知り合いの中には、 ボルドーに来てから賃貸を探す人もいましたが、ボル ドーはこの5年で急激に地価があがっており、あまり お勧めはできません.なので、長期滞在をする際に は、可能ならば、その街の開発などの動向を知って おくとスムーズになります.もちろん、内見をせずに 賃貸契約をすることは、ギャンブルの要素を含みま すが….ここまで、私のケースでは大きな問題はあり ませんでした.

到着後、滞在許可書を3ヶ月以内にゲットするとい うミッションがあります.しかし、私は、『3ヶ月以内』 という言葉に甘え,銀行口座の開設や電気の契約な どに加え、新しい研究環境や生活の整備などにか まけて後回しにしてしまいました、今思うと、役所で の事務手続きを日本的な感覚で捉えてしまっていた のだと思います。申請期限の1ヶ月前に県庁に予約を とり、滞在許可書発行手続きに出向きました. しか し、そこには心を折るのに十分な長さの行列があり ました、2時間ほど並んだあとでしょうか、申請窓口 が所々カーテンを閉めはじめ、最終的にすべての窓 口が閉まってしまいました. そうです. 申請時間が終 わったのです. 日本では考えられない対応に、苛立 ちと自分の甘さを痛感しました。もう一度予約を取 り直し、今度は時間を守らずに、窓口が開く時間に 並びました. やっとの思いで手続きをしようとした矢 先 担当者から滞在許可書の発行が期日までに間 に合わないと知らされました. 臨時の滞在許可書を 発行してもらうことになり事なきを得ましたが、発行 までの数日は長く感じました.同時のタイミングで、 健康保険の申請もしたのですが、保健カードを受け 取るまでに1年もかかるとは、その時は予想をしてい ませんでした.そんな感じで、多少の苛立ちと苦労 の末に滞在許可書をはじめ、生活に必要な準備を進 めていきました.やはり直面したのが文化の違いで した.これはフランスに限ったことではないと思いま すが、『日本での当然のサービスは、こちらでいうや りすぎ』、『最低限のことしか期待しない』、『まあそ んなもんだろ、と開き直る』の3つを早めに理解する と、海外での長期滞在がグッと楽になると思います.

到着後すぐに感じた文化の違いの中で強く印象に 残っていることの1つに、デモ活動があります.一般 的に、ヨーロッパの国では労働者の権利を守るため に多くのデモ活動が行われています.私がフランス に到着した時期では、『黄色いベスト運動』が盛んに 行われていました.ボルドー市民はフランスの中でも 活発な方で、到着した翌週に、市役所前で市民vs 警察(+放水車)があり、車が暴徒により燃やされて いて、衝撃を受けました(現在では落ちつています) (図2).



図2: 家の前を通る黄色いベストたち.

これまでのこの海外研究記の著者はアメリカだっ たのに対し,私はフランスですが,初期手続きの際, 私は英語で対応しました.ボルドーは観光地で,多く の旅行者が頻繁に訪れる街なので,ほとんどのレス トランや小売店で英語が通じます.とは言うものの, 英語が使えずフランス語が必要になるケースも多く あります.ボルドー大学では,海外からの学生と研 究者のために,レベル別のフランス語の授業を提供 しており,私はその授業を受けました.週に1回2時 間というものでしたが,最低限のフランス語は学ぶこ とができました.

ボルドーの生活の中で欠かすことのできないもの として、ワインがあります. 読者のみなさんの中でも 『ボルドー=ワイン』と認識されている方が多くいると 思います. ボルドーは、世界的にも有名なワインの産 地で、人々の生活に深く根付いています、毎回ではあ りませんが、セミナー中にワインを飲んでいたり、ワ インとチーズを持って外で論文を読んだりすることも 珍しくありません. ボルドーワインと言っても. その中 には産地に基づいて60の分類があります。有名なも のでは、Médoc(メドック)やGraves(グラーヴ)のよ うな力強く余韻の長い赤ワイン、Sain-Émillion(サ ン・テミリオン)のまろやかなワインなどがあります。 ボルドーワインの場合, 生産する際にいくつかの厳し い条件があり、その中で土壌に手を加えてはいけな いというものがあります.よって、その年の気候と土 壌の状況により、ワインは大きく影響を受けます. ま た、年によって異なるぶどうの出来により、混ぜる品 種と割合を変え、それぞれの産地・シャトーの個性 を出しています. ワインを勉強するために日本人も多 く滞在しており、比較的大きな日本人コミュニティが あります. これ以上ワインのことを書くと、 ワインを 勉強しに来ているみたいになってしまうので、もっと ボルドーでのワイン生活について興味がある方は. 直接私に声をかけてください。(図3)。

3. フランスの大学って

私は、気候シミュレーションを用いた系外惑星大 気の特徴付けと惑星のハビタビリティに関する研究 を行っています、パソコン1台(とネット環境)あれば どこでもできる研究なので、日本にいた時と研究環



図3: ワイン博物館.

境自体は大きく変化していません。強いて言うなら、 気候モデルをフランスのLMD GCMに変え、その 開発をしているくらいです、大型のモデル開発の場 合は、そのモデルの裏に隠されているフィロソフィー や展望をより密に議論する必要があり、開発グルー プに近い場所にいることで議論も容易にでき、より スムーズに研究が遂行できているとうメリットがあり ます. 私が所属している研究グループは、教員5名、 ポスドク2名、博士課程学生2名、エンジニア2名の 比較的小さなグループですが、惑星形成~大気の 物理・化学進化まで広く扱っているグループです. エ ンジニアがいることもあり、かなり分業が進んでいま す. グループミーティングは2週間に1回程度あり. ゲ ストを招待するセミナーは月に1回あります。言語は 基本的には英語です. フランスの地方大学なのです が、小さなミーティングであっても、英語で議論する ようにと言う教育方針があり、少し驚きました.また、 驚いた点の1つに、休憩時間の長さがあります。典 型的な1日の例を挙げると、朝9時頃に大学に到着 し、10時半から30分雑談をしながらコーヒーを飲み ます. その後、12時くらいから昼食を食べ、だいた い14時まではお昼休憩です。そして、4時から1時間 コーヒーを飲みます. 帰宅時間は個人差があります が. 基本的に18時には誰もいなくなります. 日本で こんな生活をしていたら怒られそうな気がしますが. びっくりするくらいオフィスにいません、その上、有 給が多く(僕の場合で年間60日くらい、全てを使いき れなくて、事務の方に怒られています)、バケーショ ンをしっかりとります. 最初の頃は、こんな研究スタ イルでなぜ高い生産性を維持できているかわかりま せんでした。今でも完全に理解したわけではありま せんが、わかったこととしては、『研究に対するハー ドルの低さ』があると思っています. 我々日本人は じっくりと検討し実行するのに対し、ちゃんとやり直 すのですが、品質が悪くてもいいからまずやってみる というスタイルを多くの研究者がとっていると感じま した. 長い休憩の時間でお互いのことをよく知り. コ ラボレーションの障壁を下げ、まずなにかやってみる という流れを多く見た気がします. このスタイルがす べて日本人に合うとは思いませんが、今後の私の研 究に対し、良い経験になったと感じています.

4. コロナ禍に飲み込まれる

私が経験した、この時期に書かねばならないこと に『コロナによる生活の変化』があります. 日本でも 大きな問題として毎日のようにニュースで取り上げら れていますが、フランスでも同様に大きな影響を及ぼ しています.日本と同様に、フランスも3月16日の夜、 非常事態宣言・外出禁止令が発令されました. 楽天 的なフランス人にとって、ショックだったものだった そうです. この外出禁止令も日本での『~要請』とは 全く異なるもので、罰金(135€~)という、強いもの であったのにかかわらず,発令当時,このショック療 法はうまく機能していなかったように見えました.加 えて、バケーション文化がより悪い状況を引き起こし ました. 在宅勤務ができる職種以外の人たちが公園 に溢れ、大きなクラスターを形成し、瞬く間に歯止め が効かない状況になりました(2週間で国内感染者 約5万7千人,35万件以上の違反行為).フランスの文 化としてマスクをしないという習慣があります. フラ ンスの文化では、マスクは体調が悪い時にするもの なので、マスクや手を洗うという日本で当たり前の習

慣がありませんでした. そのため、このコロナの状況 でもマスクを買うことができませんでした. 日本でも マスクが小売店から消えたと聞いていますが、そも そもマスク自体の生産数が低かったフランスでは絶 望的でした、私は日本人なので、もともとある程度の 枚数のマスクを持っていたので、この状況を乗り越 えられました、マスクが手に入らなくて困っていた同 僚にマスクをあげた時、宝物のように扱っていました (彼は大事な時にマスクをすると言って、綺麗にたた み、リュックに入れました)、研究生活も大きな影響 を受け、自宅勤務をすることになりました、しかしな がら、前述したように、インターネットとパソコンがあ れば研究を行えるため、家から出られないこと以外 は、特に問題はありませんでした、5月11日以降、段 階的に解除が始まり,現在(7月),レストランやカフェ などは再開し、徐々に通常の活動を取り戻していま す、大学は、日本の大学と同じように、リモートで授 業を行なっていますが、博士課程学生とスタッフは 大学で研究することが可能になりました. もちろん. 大学での研究を強いているわけでなく、自宅勤務も 認められています. 私は週に3回程度大学に来て研 究をしている状況です。

コロナに関連して、残念なこともわかってしまいま した、それは人種差別です、多少の文化の差異から 生じる不便などを感じていましたが、フランスの文化 を含め、フランスでの研究生活が気に入っていまし た.しかし、コロナ下での緊迫した状況で、人々にも 心に余裕がなくなり、アジア人への差別がフランス 国内で始まりました. まさか日本人が差別されるな んて想像もしていなかった私には衝撃でした. 私の 周りではあまり被害はなかったのですが、トラムでの 暴言やスーパーで避けられる感じは私も経験しまし た. 差別はとても根深い問題ですし、私がどうこうで きる問題ではありませんが、悲しい側面を垣間見て しまった気がします、これからの通常をどう定義する のかわかりませんが、(これまでの)通常の海外滞在 では、こんな経験をすることはないと思います、これ から海外に渡航し、研究をしようと考えている人に なにを伝えたらいいか正直わかりませんが、そのよう な悲しいことがあることも理解しておいた方がいい と思います.

5.まとめ

日本に一時帰国した際に、顔色がよくなったとよく 言われます. 目まぐるしく変化する環境に対応するだ けで精一杯の自分では認識できませんでしたが、そ のくらいにはフランスでの生活があっているのだと 思います. この研究生活で出会った研究者. 特に同 世代の仲間と頻繁に議論でき、一緒に開発・研究で きたことは、私のこれからの研究において宝物にな ると思います、海外に行くべきだと言う強い意見を言 うつもりはありません. 日本にいても着実にいい研 究ができると思います.しかし、私の場合、この海外 経験は私の研究スタイルを変え、これから中堅・シニ アになる上でのビジョンを与えてくれたとてもいい経 験でした、英語が全くできなかった自分ですが、 情 熱を持って一直線に進むことでなんとか乗り越えら れてきた気がします、背中を押してくださった、 指導 教員であった阿部先生,田近先生,玄田先生,生駒 先生に、この場を借りて感謝したいと思います。 少し 困難の面を書きすぎた気がしますが、これから海外 を目指す(目指そうとしている)皆さんにとって、この 海外研究記が皆さんの背中を少しでも押すことので きるものになると嬉しいです。ここで書けなかったネ タがまだまだあるので、学会などで見かけた際に聞 いてください. また皆さんと議論できることを楽しみ にしています。

「第5回iSALE講習会」参加報告

嶌生 有理¹

2020年6月3日~6月30日にかけて第5回iSALE 講習会がオンライン形式で開催された.本講習会は 例年夏季に国立天文台三鷹キャンパスにて短期集 中形式で開催されてきたが、本年度はコロナ禍の影 響を受け、国立天文台シミュレーションプロジェクト (Center for Computational Astrophysics, 以 下CfCAと略す)の支援のもと週1回・全5回のオン ライン形式での開催となった.参加者は学部生・院 生を含めて過去最高の合計22名であった.講習会 はCisco WebExを用いた講師による講義スライド の解説、CfCAの共同利用計算機でのiSALE実 行およびpvSALEPlot解析の実演に加え、講師陣 が新規に執筆した講習会テキスト(座学講義編,実 践編)による自習によって進められた.本講習会テ キストはiSALEのwiki(https://www.wakusei. jp/~impact/wiki/iSALE/?第5回+iSALE講習 会)に掲載されており、特に衝突物理の基礎を体系 的に記述した座学講義編はiSALEを利用しない研 究者も一読の価値がある. 遠隔開催で不足しがちな 講師とのコミュニケーションは、ビジネスチャットツー ルであるSlackを用いた情報の共有とフォローアップ およびCisco WebExによる補講の開催で補うなど, 日本全体で研究活動が困難な状況での新たな取り 組みがなされた、講習会のスケジュールを以下に示す。

■ 2020年 6月 2日(火),座学講義編1

13:30 - 13:45 講習会の流れについての説明13:45 - 14:15 iSALEの概要

1.宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 shimaki@planeta.sci.isas.jaxa.jp 14:30 - 15:30 衝突物理学と数値流体計算の基礎 (前半, 講義編テキスト3章まで) 15:30 - 15:45 国立天文台共同利用計算機について

の解説

15:45 - 16:00 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

■ 2020年 6月 9日(火),座学講義編2

13:30 - 14:30 衝突物理学と数値流体計算の基礎
(後半, 講義編テキスト4章)
14:45 - 15:30 iSALEを使った研究紹介
15:30 - 16:00 iSALEを使った研究展開について
(講義編テキスト5章)

■ 2020年 6月 16日(火),実践編1

13:30 - 14:00 ~/iSALE-DellenにおけるiSALE 実行と配布ファイルの解説(実践編テキスト 1,2章)
14:00 - 14:45 iSALE入力ファイル(asteroid.inp)の読み方解説(実践編テキスト 3.1節)
15:00 - 15:30 iSALE入力ファイル(material.inp)の読み方解説(実践編テキスト 3.2節)
15:00 - 15:30 iSALE開発チームによる例題の紹介 (実践編テキスト 3.3節)

■ 2020年 6月 23日(火),実践編2

13:30 - 14:00 iSALEの計算出力についての解説 (実践編テキスト 4.2節)
14:00 - 14:30 iPythonを用いたpySALEPlotの解説 説(実践編テキスト 4.3節)
14:45 - 16:00 初級課題(実践編テキスト 4.4節) ■ 2020年 6月 26日(金),補講1 16:00 - 19:00 初級課題

■ 2020年 6月 30日(火),実践編3

13:30 - 15:30 中級課題(実践編テキスト 5章) 15:30 - 16:00 計算サーバへの申請方法の解説

■ 2020年 7月 3日(金),補講2

16:00 - 19:00 中級課題

iSALEは惑星科学分野において近年広く 利用されている数値衝突計算コードであり, impact-SALE(Simple arbitrary Lagrangian Eulerian)の略称である[1]. iSALEは欧米の研究 者を中心に開発・改良されており,弾性・塑性モデ ル,破壊モデル,空隙モデルなど,地球惑星科学分 野で重要かつ複雑な衝突現象を扱えるように工夫さ れている[2-4]. iSALEは室内衝突実験との比較か ら天体衝突のような大規模な衝突現象まで広く扱う ことができることから,現在までに150編を超える iSALE関連論文が出版されている.

iSALEは完全なオープンソースコードではなく, 開発者らに利用申請を行うことで科学目的限定で の利用が認められている.日本国内では,千葉工 業大学の黒澤耕介氏が中心となって活動している iSALE users group in Japanが利用申請の窓口 となっている.さらにiSALEの利用促進を目的とし て,これまでにiSALE勉強会[5-6]およびiSALE 講習会[7-9]が開催されてきた.特にiSALE講習会 では,衝突現象や数値計算の初学者に対する敷居 が低くなるよう工夫がなされてきた.

研究者が所有するコンピュータへのiSALEの導 入と実行および計算結果の解析は、それなりの労 力と計算機資源が必要となる.この問題を解決する 方法の一つが、国立天文台CfCAの共同利用計算 機を利用する方法である.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(計算サーバ、解析サーバ)にリモートログ インし、必要最小限の入力ファイルと解析スクリプト を編集することで、数値計算と解析作業が実施可能 となる.ただし、国立天文台CfCAの計算機を利用 するには年度毎にCfCAのwebページから申請を行 う必要がある.本講習会は、iSALEを用いた研究 に興味がある学生と研究者を対象として、CfCAの 共同利用計算機を期間限定で利用して実施された. iSALEの概要や入力ファイルの取り扱いについては 以前の記事[1,5-9]や講習会テキスト実践編を参照 いただきたい.本稿では、初の試みとなったオンライ ン開催について記述する.

本年度は2020年2月から全国に拡大した新型コ ロナウイルス感染症の拡大防止のため、国立天文 台CfCA主催で離散日程でのオンラインでの開催と なった.3月から国内研究集会の開催が順次延期・ 中止となる中で、本講習会の実習には現地開催が必 ずしも必要ではないことから, 講師陣とCfCAスタッ フらはオンラインでの開催を試みることになった. さ らに、例年3日間の短期集中形式であった講習会を 毎週火曜日午後に2.5時間・全5回の講義形式とした ことで、受講者が講習の合間に十分な自習時間を取 れるという利点もあった、結果として、参加者は学部 生・院生を含めて過去最高の合計22名であった. 講 習会は講師の黒澤耕介氏からiSALEの座学と実践 について解説・実演いただき、機材へのログインやト ラブルシューティングについては国立天文台CfCA の伊藤孝士氏と加納香織氏に支援していただいた. また、受講者からの質問を簡便にするためにSlack チャンネルが開設され、資料の共有や接続方法、 ちょっとしたTipsなどの細やかな情報が共有され た. SlackによるフォローアップはVPN接続トラブル やJupyterLabの導入, pySALEPlotの実行方法, 講義で聞き逃した点のフォローなど大いに活用され た. また、実践編での自習を助けるため、手厚い2回 の補講も開催された.補講とSlackによるフォロー アップでは、講師の末次竜氏(大島商船高等専門学 校)と脇田茂氏(Purdue University)も参加いた だき. 助言をいただいた.

講習会の前半2回では、黒澤講師から講習会の 流れについて説明があった後、講習会テキスト座学 講義編の内容に沿って、惑星科学と天体衝突現象、 iSALE概要、衝突物理学と数値流体計算の基礎に ついての講義がなされた。座学編の講義内容はこれ までに開催された講習会の内容を整理・凝縮した形 で体系化されており、短い講習時間で全てを理解す



図1: Macのスクリーンショット機能で撮影した講習会の集合写真.

るには大容量のものであった.しかし,講師陣が十 分な時間と熱量で執筆した講習会テキスト座学講義 編を熟読することで,講義内容を自習することが可 能となっている.そのため,講習会に参加されてい ない方々にもぜひ一読をおすすめしたい.また,初 日の後半はCfCAの加納氏からCfCAの解説とその 利用方法についてご紹介いただいた.本年度は離散 日程での講習であったため,受講者は共同利用計算 機を例年よりも長期間に渡って利用することができ た.受講者(図1)はCisco WebEXを用いた講師に よる解説を聞きながら手元の講義資料を参照し,講 義の途中で随時質問する形式で講義が進められた. しかしながら,受講者は通常カメラオフで聴講に集 中していたため,黒澤講師は受講者の反応を確認す ることができずに難儀していたようだ.

講習会の後半3回では講義テキスト実践編の内容 に沿って、iSALEを実行するための2つの入力ファ イル(asteroid.inp, material.inp)の解説と実行 方法、およびpySALEPlotを用いた計算結果の解 析方法が実演された.実践編では受講者もCfCAの 計算機にログインし、入力ファイルの編集、計算の 実行と結果の確認、解析スクリプトの編集を行った. リモートの計算機からファイルを送受信するための Cyberduckや, pySALEPlotを編集・実行するた めの開発環境であるJupyterLabの導入など、新た な取り組みも行われた.実践編では黒澤講師が入力 ファイルや解析スクリプトの編集とiPythonによる 実行を実演いただいたのだが,初学者には一部高度 な部分もあったように思われた.この点は,Slackに よる質問とCisco WebExによる補講で丁寧にフォ ローされていた.何より,実践編では例年と比較して 十分な実習時間があったため,講義テキスト実践編 を参照しながら各自で好みの計算に取り組んだよう だった.実践編中級課題では,pySALEPlotの機 能であるcraterGrowth関数を用いたクレータ半径 と深さの時間発展,最大圧力フラグを用いた衝撃波 面と膨張波面の可視化,最大衝撃圧力分布などが 取り扱われた.筆者にとっては,特にフラグを用いた 可視化は様々な解析に応用できる考え方だと大変参 考になった(図2).

講義の最終日には受講者の実習成果の報告会が あり、各自の研究にちなんだ計算結果が紹介され、 黒澤講師からiSALEの適用限界を踏まえたコメン トがなされた。例えば、温度分布に着目した室内衝 突実験を模擬した計算について、iSALEには熱伝 導や輻射による冷却は実装されていないため注意 が必要であること、また高空隙率物質の音速以下の 低速度衝突について、iSALEは流体計算コードで あるため正しく物理現象が表現できない点が指摘さ れた。筆者もハーフスケールSCIを模擬した計算を 行ったのだが、半球殻弾丸を構成する格子が少ない ため圧力が十分に表現できていない可能性を指摘 された。こうしたコメントが得られる点も講習会のメ リットである。

講習会の最後には、iSALEを用いた研究を継続 するために必要なCfCAへの共同利用申請方法が 紹介された.iSALEは2つの入力ファイルを編集す るだけで様々な衝突を表現できるが、設定すべき適 切なモデルパラメータを選択するには、ユーザがあ る程度の計算を実行して勘所を掴む必要がある.本 講習会で執筆された講習会テキストは、そのような 自習に大いに役立つであろう.本年度の講習会は終 了してしまったが、講習会テキストを見て興味を持た れた方は、iSALE users group in Japanに相談 してみると良いだろう.

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,末次竜氏,脇田茂氏に感謝 いたします.また,国立天文台CfCAの伊藤孝士氏,

「第5回iSALE講習会」参加報告/嶌生



図2: 衝撃波面(赤), 膨張波面(緑)の可視化の例.

加納香織氏には講習会中の計算サーバ・解析サーバ の利用などの環境を提供していただき,講習会中も 細やかなフォローをしていただきました.この場をお 借りして感謝申し上げます.

参考文献

- [1] 黒澤耕介ほか, 2014, 遊星人 23, 103.
- [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.
- [5] 常昱, 2014, 遊星人 23, 156.
- [6] 末次竜, 2015, 遊星人 24, 63.
- [7] 脇田茂, 2015, 遊星人 24, 346.
- [8] 石山謙, 2018, 遊星人 27, 337.
- [9] 藤谷渉, 2019, 遊星人 28, 338.

2020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 2020年度の第13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)に掲示しておりま 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、是非ともご推挙いただきます 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.

●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

業績の審査は、推薦理由となる研究業績に関連して

```
1.公益財団法人宇宙科学振興会 事務局 admin@spss.or.jp
```

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

2020年10月31日(土)必着.

●表彰式

選考結果は2021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2021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)をご覧いただき, 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)論文リスト,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 JSPS Information

JSPS Information

◇日本惑星科学会第136回運営委員会議事録

◇日本惑星科学会賛助会員名簿

◇日本惑星科学会主催・共催・協賛・後援の研究会情報

◇日本惑星科学会第136回運営委員会議事録

- 期 間: 2020年5月18日(月)~5月22日(金)
- **.** 提:1. 学会賞選考委員の選任について2. 2020年秋季講演会の開催準備について

運営委員会委員:

出席(23名)

中本 泰史, 中村 昭子, 倉本 圭, 和田 浩二, 諸田 智克, 関根 康人, 玄田 英典, 中村 智樹, 中島 健介, 寺田 直樹, 田中 秀和, 竹広 真一, 小林 浩, 臼井 寛裕, 奥住 聡, 荒川 政彦, 北里 宏平, 佐伯 和人, 関 華奈子, 田近 英一, 平田 成, 薮田 ひかる, 渡部 潤一 欠席(なし)

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

議題1:学会賞選考委員に下記の会員8名を選任したいので,本委員会の同意を求める.

野村	英子	浦川	聖太郎	諸田 智克	藤谷	渉
中島	健介	奥住	聡	道上 達広	癸生り	川 陽子

参考: · 学会賞選考委員は、総務専門委員会が推薦した委員を運営委員会で承認する.

- ·委員の構成は8名とし、委員の中から委員長を選出する。
- ・委員長は委員の互選により選任する.
- ·委員の任期は1年とし再任を妨げない.

審議結果: 議題は原案のとおり承認された(可23・否0).

議題2:2020年秋季講演会の開催準備に関する下記提案の承認を求める.

提案内容: 2020年秋季講演会の開催準備を以下の方針で進める.

- ・オンライン形式で開催する.
- ・開催時期は11月を念頭に置く.
- ・開催準備は,現在の会津LOCメンバーを中心にして行うが,オンライン学会に識見ある全会員からの情報提供とサポートを要請する.

182

- ・LOC から要請があれば、学会から必要な財政的支援を行う.
- ・最優秀発表賞の選考と表彰,最優秀研究者賞の受賞講演をオンラインで実施する方向で学会賞 選考委員会と共に検討する.

提案理由:

2020年日本惑星科学会秋季講演会は、会津大学(福島県会津若松市)において9月23日から25日の会期 で開催する予定であった.しかし、新型コロナウイルス感染症の流行が全国的に予断を許さない状況であり、 また JpGU-AGU Joint Meeting 2020 の開催(オンライン)が7月中旬となり、秋季講演会の開催時期との 間隔調整が必要となった.

この様な状況について、LOC 委員長からの発議に基づき2020年4月16日から24日にかけて、学会長を含む運営委員会メンバーでメール上で議論した。

審議結果:

議題は原案のとおり承認された(可23・否0).

以上

◇日本惑星科学会賛助会員名簿

2020年8月2日までに, 賛助会員として本学会にご協力下さった団体は以下の通りです. 社名等を掲載し, 敬意と 感謝の意を表します. (五十音順)

·Harris Geospatial 株式会社

・株式会社ナックイメージテクノロジー

・株式会社ノビテック

◇日本惑星科学会主催・共催・協賛・後援の研究会情報

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

2020/11

11/12-14 日本惑星科学会2020年秋季講演会

(a) オンライン開催

(b) 日本惑星科学会

(c) https://www.wakusei.jp/meetings/fall_meeting/2020/

2020/12

12/2-4 第61回高圧討論会

- (a) オンライン開催
- (b) 日本高圧力学会
- (c) https://www.highpressure.jp/new/61forum/

編集後記

今号は特集「古今未曽有の日本の月/火星地下世 界探査 (UZUME)計画」をお送りします. ゲストエ ディター の春山純一さんのご尽力で充実した誌面に なりました. 特集「古今未曽有の日本の月/火星地下 世界探査 (UZUME)計画」は次号にも続きますので ご期待ください.

世の中は再びコロナウィルスが猛威を振るってき ました.連日の新規感染者数が記録更新したという ニュースに驚きながら、飲み会や出張を控え、遠隔 授業の資料作りや遠隔での学生指導に四苦八苦し ています.コロナウィルスのために様々な制限がか かっている中ではありますが,著者のみなさん,編 集委員のみなさん,印刷所のみなさんなど多数の 方々のご尽力により,9月号も予定通りに発行できる 運びとなったことを嬉しく思っています.ありがとう ございます.

しばらくはコロナウィルスのために不自由な生活 が続くと思いますが、遊星人は通常通り定期的に発 行していければと思っております.皆さんからの原稿 を心よりお待ちしておりますので、今後ともよろしく お願いいたします. (杉山) 編集委員

和田 浩二 [編集長]

杉山 耕一朗[編集幹事]

春山 純一 [特集「古今未曽有の日本の月/火星地下世界探査 (UZUME)計画」ゲストエディター] 上椙 真之, 岡崎 隆司, 小川 和律, 鎌田 俊一, 木村 勇気, 黒澤 耕介, 小久保 英一郎, 坂谷 尚哉, 関口 朋彦, 瀧川 晶, 田中 秀和, 谷川 享行, 長 勇一郎, 成田 憲保, はしもと じょーじ, 濱野 景子, 本田 親寿, 三浦 均, 諸田 智克, 山本 聡, 渡部 潤一

2020年9月25日発行 **日本惑星科学会誌 遊・星・人 第29巻 第3号** 定 価 一部 1,925円(税込・送料込) 編集人 和田 浩二(日本惑星科学会編集専門委員会委員長) 印刷所 〒224-0044 神奈川県横浜市都筑区川向町787-1 株式会社 シュービ 発行所 〒105-0012 東京都港区芝大門2-1-16 芝大門MF ビルB1階 株式会社イーサイド登録センター内 日本惑星科学会 e-mail:staff@wakusei.jp TEL:03-6435-8789/FAX:03-6435-8790 (連絡はできる限り電子メールをお使いいただきますようご協力お願いいたします)

本誌に掲載された寄稿等の著作権は日本惑星科学会が所有しています. 複写される方へ

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

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル 学術著作権協会

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

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

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

学会誌原稿作成の手引き

日本惑星科学会編集専門委員会

原稿の様式

○投稿原稿:

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

○最終稿:

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

投稿原稿送り状の雛型および各チェックリストは ウエブサイト

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

2. タイトル

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

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

3. 要旨

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

4. セクション

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

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

5. 述語

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

6. 字体

一数字, 英字は半角とする. また() []: ;など区切り記号も半角を用いる.
 一変数は斜体, ベクトルと行列は太字, を使う.

7. 句読点

句読点は全角の","と"."を用いる.

8. 図. 表

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

図作成のガイドライン:

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

9. 脚注

脚注は"l"などの記号をつける.

10. 文献の引用

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

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

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

参考文献

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

[2] 惑星太郎, 1993, 天文月報 86, 186.

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

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

11. 投稿原稿送付先

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

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



The Japanese Society for Planetary Sciences

