日本惑星科学会誌 遊·星·人

第29巻 第1号

目 次

卷頭言 犬塚 修一郎	
「2018年度最優秀研究者賞受賞記念論文」 紀元前太陽系を探る:質量放出星から太陽系への物質進化 ^{瀧川 晶}	4
核合成起源同位体二分性と初期太陽系の進化 深井 稜汰	
一番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦 その41 ~LIRの新しい可能性~ 神山 徹, 福谷 貴一, 今村 剛	22
火の鳥「はやぶさ」未来編 その20 ~小惑星リュウグウからのリターンサンプル分析の全体像~ 安部 正真, 橘 省吾, 小林 桂, 伊藤 元雄, 渡邊 誠一郎	
遊星人の海外研究記 その2 ~日米の大同&小異~ 門屋 辰太郎	
惑星ラボからこんにちは!その2 ~公立大学法人会津大学・宇宙情報科学研究センター(ARC-Space)~ 本田 親寿	43
「天体の衝突物理の解明 (XV) ~小惑星の表層進化~」開催報告 末次 竜, 岡本 尚也, 鎌田 俊一, 嶌生 有理, 杉浦 圭祐, 保井 みなみ	
日本惑星科学会 2019年秋季講演会開催報告 河北 秀世	52
New Face 深井 稜汰	54
JSPS Information	56

Contents	
Preface S. Inutsuka	3
Dust formation and evolution from mass-losing stars to the solar system	-
A. Takıgawa	- 4
Nucleosynthetic isotopic dichotomy and evolution of the early solar system R. Fukai	14
Road to the first star: Venus orbiter from Japan (41) – New comer boosts LIR performance –	-
T. Kouyama, K. Fukuya, and T. Imamura	22
 Phoenix "Hayabusa": A tale of the future (20) Overview of return sample analysis from asteroid Ryugu - 	0.0
M. Abe, S. Tachibana, K. Kobayashi, M. Ito, and S. Watanabe	28
Letter from planetary people working abroad (2) - Similarity and differences between Japan and US -	
S. Kadoya	38
Hello from the planetary labs! (2) - Aizu Research Center for Space Informatics (ARC-Space), the University of A	izu -
C. Honda	43
Report on "Physics of Impact Process of Solar System Bodies (XV)"	10
R. Suetsugu, T. Okamoto, S. Kamata, Y. Shimaki, K. Sugiura, and M. Yasui	46
Report on the 2019 fall meeting of Japan Society for Planetary Sciences	
H. Kawakita	52
New Face R. Fukai	54
JSPS Information	56

巻 頭 言

2018年度夏に新学術領域研究「星惑星形成」が採択されました.この領域では、「惑星形成 過程を銀河系の進化の中で解き明かす」という壮大なテーマを掲げています。現在の宇宙は宇 宙の始まりであるビッグバンから138億年程度経過していることが分かっており、太陽系を含む 構造である銀河系が形成された頃はそのごく初期であると考えられています. 銀河系の形成期 は重元素がほとんど無かったため、炭素よりも重い元素を多量に含む太陽系のような惑星系が 生まれることは不可能でした.しかし、銀河系の元となる構造が生まれた後も星形成活動が断 続的に継続し、星の中での核融合により重元素が合成され銀河系内の星間空間に放出され続 けます. 重元素は固体微粒子(星間ダスト)の主な成分となり、それは「最近」形成された固体惑 星の材料物質となります、したがって、固体惑星のうち、生命を宿すことができる「ハビタブル 惑星」を形成する条件も宇宙年齢に匹敵する長い時間をかけて少しずつ整うことになります、こ の星形成と固体微粒子の増加は銀河系中心付近ほど活発であり、時間と共に銀河系の外側領 域に拡大してきました。つまり、このような銀河の進化により、ハビタブル惑星が生まれる環境 が銀河系の内側から外側へ「開拓 | されたことになります。約46億年前に生まれた太陽系の真 の起源を探るため、銀河系進化の枠の中で惑星形成過程を研究するのが、我々の新学術領域 のテーマです. 研究テーマは、星団の形成・惑星系の形成・惑星大気の形成進化・系外惑星系 の観測などを幅広く含み、関連研究者の総力を結集して進めます。また、「比較的重元素量に 富む太陽系も銀河系内の現在の位置よりは内側の星団内で形成され、銀河系の外側に移動し てきた」という仮説の検証も目指します. なお, 今年の秋の科研費申請時期に公募研究を(再度) 募集します. 本テーマに関連する内容の研究を進めている方からの積極的な応募を期待してい ます. http://star-planet.jp/

また,我々は国際会議Protostars & Planets VIIを2021年4月に京都にて開催します. 本新学術領域の研究者が中心となって進めていますが,新学術領域「水惑星」等からの協力 も得ています.この会議は星形成研究と惑星科学の分野において最も重要な国際会議であ るProtostars & Planets シリーズの第7回大会であり,アジアで初の開催となります.特に このシリーズの第2会大会の収録は(故)林忠四郎先生らが執筆された太陽系形成論を収録し ていることでも有名です.この会議の収録は分野をレビューする三十程度の章からなり,提出 されたプロポーザルを審査して章の執筆者を決めることになります.プロポーザルの締め切り は2020年4月1日です.当該分野で活躍されている方々からの積極的応募を期待しています. http://ppvii.org/

犬塚修一郎(名古屋大学大学院·理学研究科)

「2018年度最優秀研究者賞受賞記念論文」 紀元前太陽系を探る: 質量放出星から太陽系への物質進化

瀧川 晶

2019年9月21日受領, 査読を経て2019年12月1日受理

(要旨) 先太陽系粒子は、太陽より一世代前の晩期星で形成し、星間空間を経て太陽系原材料物質の一つになった、星周ダストの生き残りである。星周ダストやダスト形成場の観測,先太陽系粒子の分析、ダスト形成実験を組み合わせることによって、先太陽系粒子固有の形成・変質履歴と、星周ダストの一般的特徴や形成過程という、相補的な情報を得ることが可能となる。本稿では、アルミナ(Al₂O₃)を鍵として、 晩期星から太陽系形成に至るまでの、物質の形成と進化を紐解く試みを紹介する。

1. 太陽系の原材料とは

太陽系の原材料物質とは何であろうか. コンドラ イト隕石に含まれる難揮発性物質CAI (Calcium-Aluminum-rich inclusion)は,現在からおよそ46 億年前に太陽系で形成した最古の物質であると考え られている. 特に隕石などの物質分析から議論をす る際には, CAIの形成を太陽系の出発点,「紀元」 として取り扱うことがおおい. 惑星形成もしくは銀河 における物質循環の立場からすると,太陽系の始ま りはCAI形成よりずっと前である. 原始太陽系円盤 は,その母体となった太陽系分子雲の崩壊により形 成された. その分子雲を構成するガスや塵は,多数 の進化末期の恒星(晩期星,晩期型巨星,質量放出 星とよばれる)から放出された物質である. したがっ て,太陽系の原材料物質は,遡れば太陽より一世代 前の晩期星からの放出物を起源とする.

実際,始原的隕石や南極微隕石,彗星塵中に は,先太陽系(プレソーラー)粒子と呼ばれる,超新 星や漸近赤色分岐(Asymptotic Giant Branch;

1.京都大学 白眉センター/大学院理学研究科地球惑星科学専攻 takigawa@kueps.kyoto-u.ac.jp 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻 takigawa@eps.s.u-tokyo.ac.jp AGB) 星などの進化末期の恒星の大気や放出ガス から形成して現在まで生き残ったと考えられる粒子 が稀に存在する.先太陽系粒子は,酸素や炭素など の同位体組成が太陽系物質と大きく異なることによ り同定される (図1).同位体組成が進化末期の恒星 での元素合成によりよく説明されるため,超新星や, 赤色巨星,漸近赤色分岐星などの恒星を起源として いると考えられている.

しかしながら、太陽系物質の大半は、いわゆる太 陽系の同位体組成をもち、進化末期の恒星で形成 した先太陽系ダストが直接生き残ったものはごくわ ずかである. 先太陽系粒子が示す同位体組成のば らつきを平均しても太陽系の同位体組成にならない (図1). 大半の先太陽系粒子は星間空間や太陽系形 成時に同位体的に均質化,もしくは一度ガス化して 太陽系分子雲や原始太陽系円盤で再凝縮したのだ ろう、一度ガス化してしまうと、同位体は均一化し、 また,鉱物学的情報も失われるため,太陽系粒子か らその起源となった天体の情報を得ることはできな い. 現在みつかる先太陽系粒子は, 破壊過程を運 良く生き残ったか、太陽系形成の途中でもたらされ たものかもしれず、どれほど太陽系原材料物質を代 表しているかは不明である. それを踏まえた上でも. 先太陽系粒子は間違いなく太陽系形成以前に形成 した原材料物質の一つであり、太陽系の歴史を一世 代前の恒星までつなぐ細い糸なのだ.

先太陽系粒子が形成した晩期星でのダスト形成 過程はどのようなものであっただろうか. 先太陽系 粒子そのものに残された情報は定量的だが断片的 であり、ダスト形成の全貌を掴むのは難しい、そのた め、晩期星でのダスト形成そのものを研究し、星周 ダスト形成の一般的描像を描くことが重要になる. 太陽系に原材料を供給した晩期星はすでに寿命を 終えているが、現在、晩期星周で形成されているダ ストは、赤外線分光を用いて観測することができる. さらに ALMAを代表とする高空間分解の電波干渉 計観測により、恒星での星周ダスト形成領域を観測 的に調べることも可能となっている. このような観測 と、ダスト形成環境を模擬した実験を組み合わせる ことで、観測されるダストがどのような形成過程を経 たものであるかの知見を蓄積できる. さらに先太陽 系粒子から得た情報と比較することによって、先太 陽系粒子の形成環境や変質の歴史とともに,先太陽 系粒子のダストとしての特殊性や普遍性を明らかに することができるだろう.

2章では、酸素に富む晩期星で形成した先太陽 系粒子に関する知見、3章では、晩期星でのダスト 形成について説明した上で、4、5章では筆者がこれ までおこなってきた研究の紹介をする、4章では、ア ルミナに富むAGB星でのダスト形成と恒星風の加 速機構について、5章では、隕石中に先太陽系粒子 として存在するアルミナダストに関する研究について 述べ、先太陽系粒子を鍵に、太陽より一世代前の恒 星へと物質科学的につなげる試みを紹介したい.

2.太陽系の原材料・先太陽系粒子

先太陽系粒子は、太陽系では形成できないほど 大きな同位体異常を示し、太陽形成前に晩期星周 囲で形成したと考えられている.太陽系形成前に作 られていても、太陽系の物質と同位体組成で区別が できないものも存在する可能性がある.そのため、 現在定義されている先太陽系粒子は、太陽系形成 以前から生き残っている物質の少なくとも一部とい うべきであろう.先太陽系粒子は、変質をほとんど 受けていない炭素質コンドライトや彗星由来と考え られている惑星間塵に多く含まれている. 先太陽系 粒子を最も多く含む始原的隕石においても, 先太陽 系珪酸塩は隕石全体の60 ppm(マトリクス中で200 ppm)程度しか存在しない. 先太陽系粒子には, ナ ノダイアモンド, グラファイト, SiCなどの炭素に富む 物質と, アルミナ (Al₂O₃), スピネル (MgAl₂O₄)な どの酸化物, 主に非晶質の珪酸塩などの酸素に富 む物質がある. 酸素に富む先太陽系粒子のうち, 珪 酸塩が最も豊富で, 酸化物はおよそ一桁少ない [1]. 酸素に富む先太陽系粒子の酸素 (図1) やアルミニ ウム, マグネシウムの同位体組成, また, 一部の粒 子に関してはSi, Ti, Crなどの同位体組成が測定さ れ, 先太陽系粒子の起源は, 主に低-中質量の赤色 巨星やAGB星で, 一部は新星や超新星爆発に由来 することがわかってきた.



図1: 先太陽系粒子(珪酸塩および酸化物)の酸素同位体組成 (データはthe Presolar Grain Databaseより[2]).

3. 質量放出星でのダスト形成

晩期星は、恒星風や超新星爆発とともに、大量の ガスやダストを宇宙空間に放出する。特に、低-中 質量の晩期星であるAGB星は、高い質量放出率に 特徴づけられ、銀河系における主な物質供給源であ る。例えば、太陽程度の質量のAGB星であれば、現 在の太陽風(10⁻¹⁴ M_{Sun}/year)より6から10桁近く 高い質量放出率となる。質量放出星の恒星風速度 は数 km/sから最大で30 km/sにも達し、この恒 星風とともに大量の物質を宇宙空間に放出する。恒 星風を加速させるためには,重力に打ち勝つ力が必要である.加速機構としては,恒星からの輻射圧による加速(輻射駆動風)とガス圧勾配による加速(熱駆動風),音波や衝撃波,アルフベン波などの波による加速機構がある.中でも輻射駆動がもっとも効果的な質量放出機構であると考えられている[3].

輻射駆動風は,高い光度を持った天体の光を,吸 光度の高い物質(原子や分子,ダスト)が受けること で引き起こされる.ダストが主な光の吸収源である 場合は特に,ダスト駆動風(dust-driven-wind)と 呼ばれる [4]. AGB星のダスト形成は恒星のごく近 傍(<数恒星半径)の恒星大気外層で始まる.気相 から凝縮したダストは,恒星からの輻射圧を受けて 外側に加速され,ダストは周囲のガスを摩擦により 加速させる.

恒星周囲に存在するダストは、中心星の可視光や 紫外線を吸収し、赤外線を放射する、星周ダストの 赤外スペクトルは、分子の伸縮振動や変角運動エネ ルギーに対応しているため、組成や結晶構造の情報 を含んでいる. そのため、実験室で測定された鉱物 や合成試料の赤外スペクトルと, 観測スペクトルを比 較することで、星周環境にどのようなダストが存在す るかを推定することができる [e.g., 5]. 特に結晶質 の鉱物は、結晶構造の周期性を反映して比較的鋭い ピークを示すため、複数のピーク波長を用いること で、鉱物相の同定が可能となる.一方、非晶質物質 は、結晶構造に長周期構造を持たないためにブロー ドな赤外スペクトルを示す. そのため, 結晶質ダスト と比べて観測スペクトルからその性質を推定するこ とは困難である、しかし、組成や温度によってブロー ドピークの波長が変化することが知られており、組 成の推定も行われる、組成と結晶構造の他にも、温 度, サイズ, 粒子形状, 集合体か否かによって, スペ クトルは変化する. そのため、多様なパラメータがス ペクトルにどのように影響を与えるかが実験室にお いて調べられ、候補鉱物の赤外吸収スペクトルをも ちいた観測スペクトルのフィッティングにより、星周 ダストの同定が進められてきた [6].

AGB星は、進化に応じてC/O比が大きくなる. C/O比が1より小さいものをM型星、およそ1の星 をS型星、そして1より大きいものをC型星と呼ぶ. 酸素に富むM型のAGB星で観測された星周ダスト として, 非晶質珪酸塩, 結晶質珪酸塩 (Mg₂SiO₄, MgSiO₃), 酸化物 (Al₂O₃, MgAl₂O₄, [Mg_x, Fe_{1-x}] O)などがある [6].

4. アルミナに富むAGB星の謎

4.1 星周難揮発性ダスト

酸素に富む晩期星の高温の大気が冷却すると、ダ ストとして最初に凝縮するのは、難揮発性の酸化物 であると考えられている.結晶質Al₂O₃であるコラン ダム (*a*-Al₂O₃)は、最も豊富な難揮発性の鉱物であ り、最初に凝縮する星周ダストとして取り扱われるこ とが多い.コランダムの他に、Tiの酸化物であるル チル (TiO₂)やZrO₂も候補であるが、元素存在度は Alに比べて格段に低い.

難揮発性ダストは, 珪酸塩などより低温で凝縮す るダストの凝縮核となりうる. さらに, 後述するよう に, 珪酸塩と同等な量のアルミナダストが存在する AGB星も多くある. 難揮発性のダストがどのように できているのか, その多様性を知ることは, ダスト 形成と進化を考える際のスタート地点となる.

4.2 結晶質星周難揮発性ダスト:13 μmフィーチャー論争

赤外線分光観測により、酸素に富むAGB星の約 40%から13 µmに単独のピークをもつダスト放射 が観測されている [e.g., 7]. この放射の起源として は、コランダム、スピネル、シリカなどが提案されて きた[7-12]. シリカは8.7-9 µmに強いピークを示す が、13 µmに伴う8.7-9 µmのピークの観測はされ ていない. 球形のコランダムは12.7 µmに強いピー クと13.2 µmに弱いピークを示す. 球形のスピネル は、13.0-13.2 µmに強いピーク、16.8 µmに弱い ピークを示す.13 μmフィーチャーに伴う2つのピー ク(16.8および 32 μm)を根拠にスピネルが13 μ mフィーチャーの起源であると主張されていたが [8, 11], 後に16.8 µmのピークはCO2の分子線である と示された [7]. このように, 13 µmフィーチャーは, 酸素に富むAGB星に普遍的に観測されるにもかか わらず、その起源は長く論争のままであった、

筆者らは、コランダムの成長実験をおこない、コ

ランダムのa.c.m結晶面に直交する方向への成長 速度の異方性を求めた [13]. その結果,凝縮コラン ダムがc軸にやや扁平な形状になると予想した。さ らに、そのような形状のコランダムが放射する赤外 スペクトルは、13.2 µmのサブピークを伴わず、観 測される13 µmをよく説明することを示した (図2). ピークの半値幅はダストのサイズやアスペクト比にわ ずかな分布があれば説明できることも示した. さら に、Zeidlerら [14]は、室温から928 Kまでのコラン ダムとスピネルの反射スペクトル測定から光学定数 を求めた. 高温になるほどコランダムもスピネルも主 ピーク位置が長波長になり、コランダムは300-928 Kで12.73-12.94 µmにピークを示し、スピネルは 13.17-13.53 µmにピークが移動することを明らか にした.この結果は、室温より高温になるとスピネ ルは観測されるより長波長にピークがシフトしてし まうことを意味する、Zeidlerら[14]はまた、筆者ら の結果を元に、 c軸にやや扁平なコランダムの場合、 300-738 Kで12.92-13.07 µmとなり、観測をよく 説明できることを示した.温度,サイズ,形状という パラメータを考慮すると、13 µmフィーチャーはス ピネルでは説明ができず、複数のパラメータを変化 させても説明ができるコランダムと考えるのが妥当 であると結論づけられた.



図2:宇宙望遠鏡ISOで観測された13 μmフィーチャーの平均値 (灰色)と球状コランダム(破線), c軸にやや扁平な楕円体 コランダム(赤色),形状分布をもたせたc軸にやや扁平な 楕円体コランダム(青色)の比較([13] を改変).

4.3 星周非晶質アルミナの正体

非晶質の珪酸塩は~10 μmと18 μmにピークを もつブロードなスペクトルを示すことがよく知られて いる.酸素に富むAGB星のうち、非晶質珪酸塩ダ ストに由来する10 μmのブロードフィーチャーが卓 越する天体がおよそ半数ある、このような天体を"珪 酸塩に富むAGB星"と呼ぶ。一方。10 μmに比べて 12 µmのブロードィーチャーが卓越するような天体 はおよそ40%存在する [7]. このような天体を"アル ミナに富むAGB星"と呼ぶ、これは、Al₂O₃組成をも つ固体を一般的にアルミナと呼び、12 µmのブロー ドィーチャーが非晶質のアルミナでよく説明できる ためである [e.g., 7]. 13 μmフィーチャーを示す天 体は、ほぼすべての場合、~12 µmにピークをもつ ブロードなダストフィーチャーを伴っている. アルミ ナに富むAGB星周には、珪酸塩ダストと同等の量 のアルミナダストが存在すると考えられている.太陽 系の元素存在度仮定するとA1はSiに比べて一桁以 上量が少ないにも関わらず、アルミナダストがなぜ豊 富に存在するのか、本節では、このアルミナに富む AGB星の"アルミナ"がどのようなダストであるかを議 論する.

アルミナは様々な結晶構造をもつことが知られて いる. 熱力学的に安定な結晶構造は一つで、コラン ダム (a-Al₂O₃)である. それ以外の結晶質アルミ ナは、すべて遷移アルミナと呼ばれる準安定なアル ミナで、酸素パッキングが面心立方格子構造(facecentered cubic, fcc) 構造をもつ γ -Al₂O₃、 δ -Al₂O₃、 λ -Al₂O₃、 θ -Al₂O₃と、六方最密格子構造 (hexagonal close-packed, hcp)をもつa-Al₂O₃、 κ -Al₂O₃、 χ -Al₂O₃などがある.

酸素に富むAGB星から観測される12 µmのブ ロードフフィーチャーは、当初、星周yアルミナダス トの放射によるものであると考えられていたが [15], ゾルゲル法で合成した非晶質アルミナで観測スペク トルをよりよく説明できることが示されると[16],以 降数多くの論文で、この非晶質アルミナが12 µmブ ロードフィーチャーの放射源として用いられてきた。

コランダムは熱力学的に高温で安定なので、平衡に 近い条件であれば、多様な元素からなる星周ガスか らコランダムが凝縮すると考えられる.しかし、非晶 質アルミナを形成するためには、ガスの急冷など極端 な非平衡環境が必要である.非晶質のアルミナが凝 縮するような非平衡条件で、アルミニウムと酸素だけ を選択的に固体に取り込むことが可能なのだろうか. 筆者らは、アルミナに他の元素が固溶した場合 に、どのようなダストが形成されうるかを調べるため に、高温ガスの急冷環境が再現できる、誘導熱プラ ズマ (Induction thermal plasma; ITP) 装置を 用いてAl-Mg-O, Al-Si-Mg-O系での凝縮実験を おこなった [17]. 出発物質として、金属アルミニウ ム、MgO粉末、シリコンを用い、出発物質中のAl/ SiもしくはAl/Mg比を変化させた実験をおこなっ た.出発物質は、10000K程度のアルゴンと酸素か らなるプラズマガス中に送られ、溶融・ガス化する. ガスは10⁴-10⁵ K/sで急冷し、固体微粒子が凝縮す る.凝縮した試料を回収し、粉末X線回折、透過型 電子顕微鏡観察、フーリエ変換赤外分光(FT-IR) 分析をおこなって、試料の同定および観測との比較 をおこなった.

その結果, ITP装置のような急冷条件であっても, 非晶質アルミナだけが凝縮することはなく,準安定 な遷移アルミナの一つである δ アルミナが主に生成 することがわかった.この結果は先行研究とも調和 的である [18]. Siを10%程度含むと,一部は非晶質 に,一部は酸素原子がfcc構造を保ったまま、入もし くは γ アルミナ構造をとることがわかった.さらにSi が多くなると、A1/(Si+A1) = 0.75までは、凝縮物 の組成は出発物質の平均とほぼ同じだが、SiとA1 が同程度入った出発物質 (A1/(Si+A1) = 0.5) から の凝縮物は、組成が不均一で、A1に富む非晶質、ム ライト、そしてSiに富む細粒 (<20 nm)の粒子が見 られた.

AlとOだけを含む急冷ガスから凝縮した δ アルミ ナの赤外吸収スペクトルは、12 μ mにピークをもつ ブロードフィーチャーの上に、10-20 μ mにかけて 多数のピークを示す.このような鋭いピークは観測と 合わない.また、Si含有量が25%より多くなると、12 μ mピークに対して、10 μ mのピークが強くなり、同 様に観測と合わなくなる.一方、Siを10%ほど含むア ルミナは、12 μ mにピークを示し、観測をよく説明で きることを明らかにした(図3).つまり、酸素に富む AGB星から観測される12 μ mのブロードフフィー チャーの起源は、従来考えられていた非晶質アルミ ナだけではなくSiを不純物として含む準安定アルミ ナダストでもよいとすることを示唆している.

実験室においては、ゾルゲル法以外にも、スパッ

タ蒸着などで非晶質アルミナを合成する方法もある が、星周条件下でおこるかは不明である.また、観 測ロケットを利用した凝縮実験では、通常の重力下 ではるアルミナが凝縮する条件においても、微小重 力下において、コランダムの凝縮がおこることが示 されており、重力の影響も考慮されるべきであろう [18, 19]. 普遍的に観測される星周アルミナの正体 が完全に理解されるためには、観測スペクトルを再 現することと、星周環境で無理なく形成できる過程 を示すことの両面が合わさる必要があるだろう.



図3: 酸素に富むAGB星T Cepのダスト放射スペクトル(黒実線) と,実験室で得られたダストアナログ物質の赤外スペクトル の比較([17]を改変). 点線は,T Cepのスペクトルから,実 験で得られたSiを10%含むアルミナのスペクトル(オレンジ) を差し引いたもの.

4.4 アルミナに富むAGB星での ダスト形成と恒星風の加速

アルミナに富むAGB星の非晶質珪酸塩とアルミ ナのダスト量の比を説明するためには、太陽系元素 存在度とAlがすべてアルミナダスト形成で消費され たと仮定して、およそ90%のSiが気相に残っている 必要がある。12 μmブロードフィーチャーをSiを含 む準安定アルミナで説明する場合と、従来のように 非晶質アルミナで説明する場合が考えられるが、ど ちらにせよ、星周ガスからAlを選択的にダストに凝 縮させなければならない。前節で述べたように、実 験室でSiを含むアルミナの形成に成功したが、ITP 装置においては、基本的にすべてのガスは急冷して 固体になるため、固体形成によるガスの分別は再現 できていない、非晶質あるいは準安定ダストを作れ るような非平衡条件で、Alおよび一部のSiが選択 的にダストに取り込まれるかどうかは自明ではない.

そこで、筆者らは、アルミナに富むAGB星大気 において、選択的にAlがダストに取り込まれ、Siが 気相に残っている、という仮説をたて、観測的な検 証をおこなった、アルミナに富むAGB星であるう みへび座W星(W Hya)のAlOおよびSiOガス分 子の分布を、アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (Atacama Large Millimeter/ submillimeter Array)を用いて観測した [23]. W Hyaは近傍(78 pc)にある、典型的なアルミナに富むAGB星で、過 去の赤外分光観測から、ダストの58%が非晶質シリ ケイト、34%が非晶質アルミナであると考えられてい る [20]. 赤外線および可視光での偏光観測により、 W Hyaは2-3恒星半径にダストシェルをもつことも 示されている [21-23].



図4: ALMAで 観測したW Hyaの(上)AIO (N = 9-8)と(下) 29SiO (v = 0, J = 8-7)の分布. 図左下の楕円はビームサ イズ, 破線は中心星からの距離 ([24] を改変).

図4に観測したAIO (N = 9-8)および²⁹SiO (v = 0, J = 8-7)の分布を示す。AIOが恒星から約3恒星 半径以内に分布しているのに対し、²⁹SiOは10恒星 半径以上、3 σ の検出限界で40恒星半径まで分布し ていることがわかった。

Ohnakaら [22]で観測されたダストの散乱光の 分布とA10の分布を比較すると、両者はきわめてよ く一致しており、アルミナダストが主に恒星のごく近 傍で形成したことを示唆する. 一方, 珪酸塩のダスト 形成がどの程度おこっていたかを見積もるために、 W Hya大気での一次元輻射輸送計算をおこなっ た.計算では、SiOガス分子のある割合がダスト形 成で消費されたと仮定し、その時の恒星からの距離 に対する²⁹SiO分子の輝度分布を求めた、その結果、 観測された²⁹SiOの分布を説明するためには、加速 はダストシェルより外側でおこり、少なくとも²⁹SiO分 子の70%以上が気相に残っている必要があること がわかった. ダストの赤外分光観測から見積もられ たSiOの凝縮量はおよそ10%であり、ガスの観測か らもダストの観測からもW Hyaでは珪酸塩の凝縮 が効率的におこっていないといえる。

我々が提案するW Hyaの恒星風の加速モデルに ついて説明する (図5). ダストシェル内部のダスト質 量 (5⁻¹⁰x10⁻¹⁰ M_{Sun})を, 定常的に形成するアルミナ ダストで説明しようとすると、変光周期を389日、質 量放出率を1.3 x 10⁻⁷ M_{sun}/yrと仮定して,数十変 光周期かかる. つまり、大量のアルミナが脈動大気 中に集積していることになる. アルミナは恒星からの 光の吸収率は低く、[26]、恒星風の加速が引き起こ されないことで説明できる.この間に、脈動する恒 星大気において、アルミナ粒子はサブミクロンサイ ズには十分に成長していると考えられる [25]. 光の 吸収率の低いアルミナであっても、 ミクロンサイズま で成長すると散乱の効果が強くなり、一転して輻射 圧を効果的に受けるようになる [27]. さらに、アルミ ナとは別粒子として、非晶質珪酸塩ダストが起こる. SiOの90%が気相に残っていても、珪酸塩の凝縮に よりダスト量は倍増する.もともと濃集していたアル ミナに加えて、SiOの一部が珪酸塩ダストになったこ とにより、恒星風の加速が引き起こされたのだと考 えられる、恒星風が加速されると、ガス密度と温度 は急速に下がり、ダスト形成効率は大きく下がる、 そ

の結果, SiOの大半が気相に残ったまま放出され, 赤外分光観測でみられるようなアルミナに富むAGB 星になったのだろう.



図5:うみへび座W星での酸化アルミニウムとケイ酸塩ダストの形 成および恒星風の加速のイメージ図 ([24] を改変).

5. 先太陽系アルミナ粒子から探る 太陽系原材料ダストの形成

先太陽系アルミナ粒子は、1994年に初めて発見さ れて以降, 数百粒子以上報告がある [e.g., 28-34]. 隕石中のアルミナの存在度が低いにも関わらず多く の先太陽系アルミナ粒子が発見されたのは、隕石の 酸処理により、酸に難溶な酸化物を濃集させ、効率 的に分析する手法が多く用いられてきたからである. しかし、先太陽系アルミナ粒子の結晶構造は、ほと んどの場合調べられていない. 二次イオン質量分析 法による同位体組成測定は、試料表面にイオンビー ムを照射し、ガス化させる必要があるため、粒子の もともとの表面組織や形状は失われる.同位体測定 後に生き残った粒子も、表面から数十nmは一次イ オンビームによるダメージ層が残る. これより深い領 域はもともとの結晶構造が残されていると考えられ, Stroudら[35, 36]により、先太陽系アルミナ粒子の 結晶構造が初めて調べられた.発見した先太陽系ア ルミナ粒子を集束イオンビーム加工で薄膜化し、透 過型電子顕微鏡 (TEM) での分析をおこない, コラ ンダム, 非晶質アルミナ, hcp構造のアルミナを報告 した

結晶の外形は,必ずしも結晶の表面エネルギーに 支配された理想形にはならず,形成条件によって特 徴的な晶癖・晶相になる場合がある[13, 37-39]. 非 晶質として凝縮し,その後の再加熱で結晶化した場 合,結晶外形は,非晶質ダストの外形を残すことも あるだろう.

そこで筆者らは、非破壊状態での先太陽系粒 子の表面組織の情報を得るため、同位体組成分 析に先立って、粒子の組織や結晶構造を分析する という手法をとった [33]. 試料は普通コンドライ ト QUE 97008 (LL3.05), Semarkona (LL3.0), Bishunpur (LL3.15), Roosevelt County 075 (H3.1) の酸処理残渣を用いた.まず、アルミナ粒子 一粒一粒の表面組織や形状をSEM観察により記載 した.粒子は金箔上に希薄に分散し、SEMステージ を回転、傾斜させることで、四ないし五方向からの二 次電子像を取得した.その後、すべての粒子に対し て二次イオン質量分析法により同位体測定を行った.

その結果,全粒子のおよそ6%が先太陽系粒子で あることがわかった.図6,7に分析を行った先太陽 系および太陽系粒子の例を示す.同位体分析前に取 得した表面組織や形状の情報から,先太陽系粒子 と太陽系粒子には形態上の明らかな違いはないこと がわかった(図7,[33]).多くの先太陽系粒子は,粒 子表面に凸凹が多く,また,粒子外形も不規則な形 状であった.一方,図6で示すように,発達した結晶 面に囲まれた半自形の粒子も発見された[34].これ らの先太陽系粒子を薄膜化し,結晶構造や内部組 織を調べた結果,調べられた先太陽系アルミナ粒子 はすべてコランダムであることがわかった.

(1) 半自形の先太陽系コランダム

QUE 97008の酸処理残渣から,半自形のコラン ダム粒子QUE060を発見した.この粒子は,r面と 呼ばれる{011}面(菱面体晶系で表記)で囲まれてお り(図6A),これは,Hartmanが予想した,コラン ダムが真空中での形成したときに示す発達した結晶 面と一致した[37].したがって,QUE060粒子は, AGB星の大気で気相から直接凝縮したコランダム の存在を示す初めての証拠といえるだろう.さらに, QUE060の内部には,変調構造を伴う²⁶Mgの濃集 領域が複数みられた(図6C).QUE060は¹⁷Oに富 み,高い²⁶A1/²⁷A1の初生比(~0.1)を示すため,低 質量のAGB星由来であると考えられる[30].²⁶A1が 放射壊変して生じた²⁶Mgは,コランダム中のMg溶 解濃度100 ppmに対して数桁多い. そのため, 高温 になると式(1)の反応により, スピネルを析出すると 考えられる.

 $({}^{26}Mg_{x}{}^{27}Al_{1-x})_{2}O_{3} = x{}^{26}Mg^{27}Al_{2}O_{4} + (1-2x){}^{27}Al_{2}O_{3} + 2xO (1)$

しかし、Mgの濃集領域の結晶構造は、コランダムの 基本構造 (酸素のhcp構造)を保っており、スピネル はみられなかった.したがって、コランダムが凝縮し、 ²⁶A1がすべて²⁶Mgに放射壊変した後に、スピネルが 形成しない程度のわずかな加熱を受けて²⁶Mgが濃 集したと考えられる.²⁶A1の半減期は約70万年で、星 周ダストの形成タイムスケールに比べて十分に長い. したがって、加熱を受けたのは、星間空間に放出さ れて以降と考えられる、同位体異常を残していること から,加熱環境としては、周囲に酸素原子の少ない、 星間空間がもっとも可能性が高いと考えられる、次 節で述べるように、凹凸のある表面組織は星間空間 でのエネルギー粒子線との衝突に起因すると考えら れるため、QUE060はAGB星から放出されてから 比較的早く分子雲に取り込まれたか、周囲が他のダ ストなどで覆われて守られていた可能性がある。



図6:半自形の先太陽系コランダムQUE060の二次電子像(A)と TEM明視野像(B)および変調構造の暗視野像(C). 発達し た結晶面はr{011}面([34]を改変).

(2) 不規則形状・凹凸表面組織を示す先太陽系コラ

ンダム

不規則形状の先太陽系アルミナ粒子(図7左)の 起源は、不規則形状の非晶質アルミナが凝縮し、そ の後の加熱で結晶化した、もしくは、もともとは自形 や半自形であったが、粒子の衝突などで破壊され形 状が変化した結果であると考えられる。 先太陽系粒 子が受ける変質過程の内. 母天体での熱や水質変 成は、先太陽系粒子の同位体異常を失わせる、星間 空間における、超新星爆発による衝撃波で加速され たガスとダストの衝突や、ダスト同士の衝突、 宇宙 線の照射は、主な星周ダストの破壊過程であると考 えられている、そのため、星間空間での変質過程を 模擬して、 コランダムに対するイオン照射実験をおこ なった. そのうち. 50 keVのHe⁺イオンを照射した コランダムに対し、隕石から酸化物を抽出するため の酸処理と同じ処理を行い、その時の表面組織の 変化を調べた、その結果、イオン照射によるダメー ジ層が酸に溶解することで、先太陽系粒子や太陽系 粒子にみられるような凹凸組織をよく再現すること がわかった、したがって、先太陽系粒子や太陽系粒 子の表面に多くみられる凸凹組織 (図7)は、星間空 間でのエネルギー粒子線や太陽系での太陽風照射 などによる何らかの原因ダメージ層が酸処理により 取り除かれた結果である可能性が高い. 酸処理によ る表面組織変化については, SiC粒子に関して過去 に報告があり、酸処理残渣中の多くの種類の粒子に おいて、酸処理により表面組織が失われている可能 性ある [40]. 準安定なアルミナや非晶質アルミナも この酸処理で溶解してしまうため、結果として先太 陽系アルミナにはコランダムが多く発見されると考え られる [33]. 同様の表面組織をもつ太陽系粒子 (図 7) に関しては、太陽風の照射によるダメージ、ある いは、原始太陽系円盤での衝撃波などによる水素イオ ンの照射によるダメージ層の形成などが考えられる.



図7:不規則形状・凹凸に富む表面組織を示す先太陽系コランダム(左)と太陽系コランダム(右)([33]を改変).

(3) 酸素に富むAGB星大気からの最初の凝縮物

ダスト内部に酸化チタンの微粒子を複数含むコラ ンダムを発見した.これは、先太陽系粒子にも太陽 系粒子にもみられた.酸化チタン粒子が複数である こと、コランダム粒子の中央に存在しないことから、 コランダムの凝縮核になったのではなく、成長中に 取り込まれたか、Tiを固溶したコランダムが形成し、 酸化チタンを析出したと考えられる.

気相からダストが形成する時,すでに存在するダ ストを核として凝縮する場合(不均質核形成)と,自 ら核形成をしてダストが形成する場合(均質核形成) がある.同じ化学組成・結晶構造のダストでも,均質 核形成する必要があるかどうかでダスト形成条件は 大きく異なる.そのため,酸素に富むAGB星で最初 に凝縮するダストに関して議論がなされてきた.星 周コランダムがすべて均質核形成であるとはいえな いが,このような粒子は星周ダスト核形成を議論す る上での強い根拠となるだろう.

これまで発見した先太陽系コランダム粒子は,分 析のバイアスも含まれるが,多くが1µm程度の大き さである. 珪酸塩に富むAGB星では,コランダムは 観測されておらず,また,珪酸塩が豊富に凝縮でき る環境では,コランダムが成長することは難しいと考 えられる. そのため、ミクロンサイズの先太陽系アル ミナは,先に述べたアルミナに富むAGB星を起源と していると予想される.今後,先太陽系珪酸塩の多 様性や先太陽系アルミナのサイズによる特徴の違い を調べることで,珪酸塩にとむAGB星とアルミナに 富むAGB星でのダスト形成の違いを議論できるだ ろう.

6. おわりに

筆者らの星周アルミナ・先太陽系アルミナ粒子の 研究を通して得られた,アルミナに富むAGB星での ダスト形成から太陽系に至るまでのシナリオについ て述べる.恒星のごく近傍でコランダムが最初の凝 縮物として凝縮し,それと同時に,やや外側の領域 で非晶質もしくは (Siをわずかに含む)準安定なアル ミナが凝縮する.非晶質や準安定アルミナの形成領 域の温度は,コランダムに結晶化しない1100K以下 の温度であろう.コランダムと非晶質/準安定アルミ ナは、脈動する大気の中で、ともに1ミクロン程度ま で成長する.アルミナの成長、および珪酸塩が凝縮 し始めることにより、恒星風の加速が引き起こされ、 ダストとガスは宇宙空間に放出される.一部のダス トは始原的な特徴を保ったまま分子雲に取り込まれ るが、ほとんどのダストは、宇宙線や超新星爆発の 衝撃波により加速された水素やヘリウムイオンとの 衝突により損傷を受け、二次的な表面組織や構造と なったと考えられる.きわめて断片的な知見を強引 につなぎ合わせることには注意が必要だが、このよ うなシナリオは今後の議論のたたき台となりうるだ ろう.今後、先太陽系珪酸塩粒子の鉱物学的記載、 珪酸塩に富むAGB星におけるダスト形成の観測・理 論的理解を進めることで、より包括的な議論をおこ なうことが重要である.

宇宙鉱物学 (Astromineralogy) は、赤外分光 観測技術の発展とともに開拓され、実験室での赤外 スペクトル測定と理論的なダストスペクトルの研究と 合わさり、どのような星にどのようなダストが存在す るのか、という記載宇宙鉱物学的研究から進められ てきた. 星周ダストの赤外放射スペクトルは. 星周 ダストのさまざまな情報が縮退しており、手にとって 分析ができる鉱物ほど正確で定量的な情報を得る ことができない. そのため、様々なパラメータをもつ ダストのスペクトルを用いてスペクトルフィッティング を行い、もっとも合うものを見つける、という手法が しばしばとられてきた.しかし,そのようなダストが 形成するか、という観点を入れると、パラメータは無 限ではなくなる、例えば、我々のITP装置を用いた 実験により、急冷条件でも非晶質アルミナができる とは限らないこと、そして、Siを10%含むアルミナダ ストが気相から凝縮可能であり、非晶質アルミナで なくとも、観測を説明できるということを明らかにし た (4.3節). この結果は、これまでのアルミナに富む AGB星のアルミナは非晶質アルミナである。 という 常識を再考するきっかけになると期待している. そ れだけでなく、宇宙鉱物学において、「観測スペクト ルを再現するかどうか」と同時に、「非平衡あるいは 実際の星周環境で形成可能かどうか」という点が同 じくらい深く議論されるべきであると考える. そのた めには、より質の高い室内ダスト合成実験データを 取得し、さらに"動かぬ証拠"である先太陽系粒子の

分析から星周ダスト形成の条件を見出す努力を続け ることが重要であろう.

謝辞

本稿は日本惑星科学会2018年度最優秀研究者賞 受賞記念論文として執筆いたしました.本稿で紹介 した研究は,推薦してくださった橘省吾教授をはじ め,数多くの研究者の方々との共同研究で進めて参 りました.この場をお借りしてお礼申し上げます.5 年間に渡り,自由でアカデミックな環境での研究活 動を提供し,支えてくださった京都大学白眉センター と関係者の皆様に,深く感謝いたします.また,本稿 の香読者である圦本尚義教授にお礼申し上げます.

本研究は,科学研究費助成事業 学術研究助成 基金 助成金 若手研究 B (15K17787),基盤研究 B (16H04080, 19H01935),基盤研究 A (19H00712) の助成を受けています.

参考文献

- [1] Amari, S. 2014, Mass Spectrometry 3, S0042.
- [2] Hynes, K. M. and Gyngard, F., 2009, Lunar and Planetary Science XXXX, 1190.
- [3] Höfner, S. and Olofsson, H., 2018, The Astronomy and Astrophysics Review 26, 1.
- [4] Sedlmayr, E. and Dominik, C., 1995, Space Sci. Rev. 73, 211.
- [5] 茅原弘毅 他, 2006, 遊星人 15, 44.
- [6 Henning, T., 2010, Astromineralogy (Springer).
- [7] Sloan, G. C. et al., 2003, Astrophys. J. 594, 483.
- [8] Posch, T. et al., 1999, Astron. Astrophys. 352, 609.
- [9] Posch, T. et al., 2003, in Exploiting the ISO Data Archive Infrared Astronomy in the Internet Age, Features of oxide dust particles in circumstellar shells of AGB stars, 141.
- [10] Speck, A. K. et al., 2000, Astron. Astrophys. Sup. 146, 437.
- [11] Fabian, D. et al., 2001, Astron. Astrophys. 373, 1125.
- [12] DePew, K. et al., 2006, Astrophys. J. 640, 971.
- [13] Takigawa, A. et al., 2015, Astrophys. J. Supp. Ser. 218, 2.
- [14] Zeidler, S. et al., 2013, Astron. Astrophys. 553, A81.

- [15] Onaka, T. et al., 1989, Astron. Astrophys. 218, 169.
- [16] Begemann, B. et al., 1997, Astrophys. J. 476, 199.
- [17] Takigawa, A. et al., 2019, Astrophys. J. 878, L7.
- [18] Ishizuka, S. et al., 2016, Chemistry of Materials 28, 8732.
- [19] Ishizuka, S. et al., 2018, Nature Communications 9, 3820.
- [20] Khouri, T. et al., 2014, Astron. Astrophys. 570, A67.
- [21] Norris, B. R. M. et al., 2012, Nature 484, 220.
- [22] Ohnaka, K. et al., 2016, Astron. Astrophys. 589, A91.
- [23] Ohnaka, K. et al., 2017, Astron. Astrophys. 597, A20.
- [24] Takigawa, A. et al., 2017, Sci. Adv. 3, eaao2149.
- [25] Gobrecht, D. et al., 2016, Astron. Astrophys. 585, A6.
- [26] Woitke, P., 2006, Astron. Astrophys. 460, L9.
- [27] Höfner, S., 2008, Astron. Astrophys. 491, L1.
- [28] Hutcheon, I. D. et al., 1994, Astrophys. J. Lett. 425, L97.
- [29] Huss, G. R. et al., 1994, Astrophys. J. 430, L81.
- [30] Nittler, L. R. et al., 1994, Nature 370, 443.
- [31] Nittler, L. R. et al., 2008, Astrophys. J. 682, 1450.
- [32] Floss, C. and Stadermann, F. J., 2012, Meteorit. Planet. Sci. 47, 992.
- [33] Takigawa, A. et al., 2014, Geochim. Cosmochim. Ac. 124, 309.
- [34] Takigawa, A. et al., 2018, Astrophys. J. Lett. 862, L13.
- [35] Stroud, R. M. et al., 2004, Science 305, 1455.
- [36] Stroud, R. M. et al., 2007, Lunar and Planetary Science XXXVIII, 2203.
- [37] Hartman, P., 1980, Journal of Crystal Growth 49, 166.
- [38] Takigawa, A. et al., 2009, Astrophys. J. Lett. 707, L97.
- [39] Ozawa, K. et al., 2012, Am. Mineral. 97, 80.
- [40] Bernatowicz, T. J. et al., 2003, Geochim. Cosmochim. Ac. 67, 4679.

核合成起源同位体二分性と 初期太陽系の進化

深井 稜汰

2019年8月27日受領, 査読を経て2019年11月23日受理

(要旨)太陽系の進化過程を考える上で,惑星形成以前の情報は不可欠である.コンドライト隕石は,原始太陽系星雲の物理化学過程を記録した未分化な隕石である.コンドライト隕石の全岩組成には,核合成起源の同位体異常が見られる.この同位体異常は,太陽系形成以前に作られたプレソーラー粒子が原始太陽系星雲で時空間的に不均質分布していたことに由来する.

近年,炭素質コンドライトのTi・Cr・Sr・Mo・Nd同位体組成は,エンスタタイトコンドライト・普通コンド ライト・その他の分化隕石の同位体組成と異なっていることがわかった.この結果は,原始太陽系星雲 の内側・外側領域に,同位体二分性が存在していたことを示唆する.二分された領域の同位体組成の違 いを説明するには,木星コアによる原始太陽系星雲の空間的な分断が必要という解釈が主流になってい る.本論文は同位体二分性を主なトピックとし,同位体組成の違いを生んだ物質・元素間の傾向の違いな どを総合的に議論する.

1. 序論

太陽系の固体物質,特に岩石惑星がどのように形 成・進化してきたかを解明することは,近年の惑星科 学研究においてますます重要になってきている.古 典的な太陽系形成モデルによると,太陽系の微惑 星は数マイクロメートルの微粒子が合体成長をくり かえし形成したと考えられている[1など].そのため, 現在の惑星の軌道・質量・化学組成といった特徴は, 原始太陽系星雲における固体物質が受けた物理化 学過程に由来している.原始太陽系星雲内の情報 は,地球や火星のように大規模なコアーマントルの 分化・ケイ酸塩層の分化を経験していない,未分化 な小惑星由来のコンドライト隕石(以下コンドライト) に残されている.コンドライトは大きく4つの構成要 素(難揮発性包有物・コンドリュール・Fe-Ni合金・マ トリックス)からなる岩石で,エンスタタイトコンドラ

1.東京大学 理学系研究科 地殼化学実験施設 ryota.fukai@gmail.com イト・普通コンドライト・炭素質コンドライトの3種類 に大分される.近年の小惑星探査において,はやぶ さが普通コンドライトと類似した反射スペクトルを示 す小惑星(S型小惑星)・はやぶさ2が炭素質コンドラ イトと類似した反射スペクトルを示す小惑星(C型小 惑星)に着陸したことは有名である.コンドライトの 鉱物学・地球化学的研究により,原始太陽系星雲に おける固体物質の凝縮過程・輸送過程など様々な現 象が理解されている[2など].

前述の構成要素の他に、コンドライトに微量に含 まれている「プレソーラー粒子」は、隕石の化学的研 究において非常に重要な物質である.プレソーラー 粒子は、多くの元素において太陽系平均とは大きく 異なる同位体組成を持っている[3など].そのため、 プレソーラー粒子は太陽系形成以前に存在した恒星 で形成したと考えられている.コンドライト中に現存 するプレソーラー粒子は、隕石母天体における変成 や、原始太陽系星雲内の物理化学過程による同位体 均質化を免れた先太陽系物質の生き残りである.お そらく, 原始太陽系星雲にはより多くのプレソーラー 粒子が存在していたが, 上述の過程を経て, 太陽系 の固体物質の同位体組成は大局的には均質化した と考えられてきた.

一方,近年の研究成果により,多くのコンドライト 全岩はTi・Cr・Sr・Mo・Ru・Ba・Nd・W同位体などで 地球と異なる同位体組成をもつことがわかっている [4など].この同位体変動は,隕石全岩の「核合成起 源同位体異常」または「同位体異常」と呼ばれている. 隕石全岩に同位体異常が存在することは,原始太陽 系星雲においてプレソーラー粒子が時空間的に不 均質分布していたことを示している.同時に,コンド ライト母天体と地球が異なる時空間で形成したこと を表している.つまり,プレソーラー粒子によって変 動する同位体組成は,惑星物質の形成過程を辿る上 での重要なトレーサーである.

同位体異常の起源を理解することは、原始太陽系 星雲における熱過程や物質輸送過程を探る上で重 要である.本論文では、まず核合成の種類や機構に ついて解説(2章)した後に、近年話題を呼んでいる同 位体異常の「二分性」に関する研究を中心に紹介す る(3章). 最後に、結論と今後の展望を述べる(4章).

2. 核合成起源同位体異常とは

固体物質のもつ同位体比は、大きく2つの要因に よって変動する.1つは、質量依存同位体分別であ る.この分別は、同位体の質量数の差異に伴う化学 平衡の平衡定数(平衡同位体効果)、運動エネルギー (動的同位体効果)の差によって生じる.もう1つの要 因は、質量数の差異では定式化できない同位体分 別(非質量依存同位体分別)である.非質量依存同位 体分別は原子核の体積・形の差(フィールドシフト効 果)・磁気モーメントの差(磁気同位体効果)などによっ て生じる.さらに非質量依存の同位体変動を起こす プロセスとして広く知られるのが、放射性元素の壊 変による影響、大気の光化学反応、宇宙線照射によ る核反応、核合成などである.天然試料に観測され るこれらの非質量依存の同位体変動は、一般に同 位体異常と呼ばれる.

本論文で紹介する同位体組成のデータは,全ての (質量分析計内・天然を問わず)質量依存同位体分別 の効果を補正している. つまり, 隕石試料の同位体 比の差異は, 非質量依存の同位体変動を反映する. 扱う隕石試料・同位体の選定, 結果の検証により, 本論文で議論される隕石全岩に見られる同位体不 均質性は, 基本的に全て「核合成起源同位体異常」 と解釈される.

プレソーラー粒子は顕著な核合成起源同位体異 常を示し、漸近巨星分枝星や重力崩壊型超新星爆 発における核合成過程を記録している。漸近巨星分 枝星では、He燃焼殻に貯蔵された中性子がFeなど の原子核に捕獲され、遅い中性子捕獲反応(sプロセ ス)が起きる.sプロセスは主にFe-peak以降の元素 からPbまでの元素を合成するので、漸近巨星分枝 星由来プレソーラー粒子のSr・Mo・Ndなどは、sプ ロセスで出来た同位体(s核種)に富む同位体組成を 持っている.さらに、漸近巨星分枝星由来プレソー ラー粒子のもつ同位体組成は、理論的に得られたs プロセス端成分の同位体組成とよく一致している[5 など].

一方重力崩壊型超新星爆発では、その爆発的な エネルギーの解放によって、中性子過剰なFe-peak 元素の合成(例:50Ti,54Cr)や速い中性子捕獲反 応(rプロセス)などが起きる、rプロセスは主にFepeak以降の元素からUまでの元素を合成する. 重 力崩壊型超新星爆発由来プレソーラー粒子について はまだ情報が少なく、一部54Crの過剰を示す粒子 の報告がある程度である[6,7]. 重力崩壊型超新星 爆発由来のプレソーラー粒子が.rプロセスで出来た 同位体(r核種)に富む同位体組成を持っているかは 未だ不明であり、重要な研究課題となっている.し かし、太陽系のFe-peakより重い元素は、概ね「s核 種 + r核種」で出来ていると言えるので、rプロセス で出来る同位体組成は(太陽系の平均同位体組成) - (sプロセスで出来る同位体組成:理論値 または 漸近巨星分枝星由来プレソーラー粒子の測定値)と いう計算によって求められる.

このように,各恒星で出来たプレソーラー粒子が 持つ同位体組成を端成分とすることで,隕石全岩に 見られる同位体異常の起源を判別することができ る.図2から4までの同位体比プロットには,s核種 に富む(s-excess),r核種に富む(r-excess)傾向が それぞれ矢印で示されている.



 図1: 隕石全岩のµ54Cr-µ50Tiデータを示す図(Cr: [9, 11-15], Ti: [14, 16-18]). 全てのデータは同一の隕石から得られており, 特に同一研究グループ(Cr: [9] - Ti: [17], またはCr-Ti: [14])からデータが報告されている場合は, 重複するデータがあっても同一研究グループの報告のみ採用している. Warren [10]では, 国際会議のアブストラクトのデータも含めコンパイルしているが, ここでは掲載していない. µiM = ((Rmeteorites / Rterrestrial) - 1) × 10⁶), R = iM/jM を表す. プロットの誤差は, 各論文に掲載されている測定誤差を示す.

3. 同位体二分性

3.1 同位体二分性の発見

隕石全岩に同位体異常があることは、2000年代 に質量分析計の分析精度向上に伴って,様々な元素 において明らかになりつつあった[8,9など]. 炭素質 コンドライトは特に大きな同位体異常を示し、エンス タタイトコンドライトや普通コンドライトは地球に近 い組成・または区別できない組成を示す傾向にある. Warren [10]は、過去の研究で得られたTi·Cr同位 体のデータを使って、地球を含む様々な惑星物質は 同位体異常によって大きく2つのグループに分類され ると提唱した(同位体二分性).1つのグループは、炭 素質コンドライトと一部の分化隕石で構成されるCC (Carbonaceous Chondrites) - groupである. も う一方のグループは、エンスタタイトコンドライト・普 通コンドライト・(火星由来と考えられている)SNC 隕石・(小惑星ベスタ由来と考えられている)HED 隕石などで構成されるNC (Non-Carbonaceous meteorites)-groupである. Ti・Cr同位体比の二次 元プロット上で、NC-groupとCC-groupは異なる 傾きを持っている(図1). つまり, NC・CCの同位体二

分性は、単純な二成分混合などの単一の物理化学 過程では達成されない.更に、NC・CC間には組成 のギャップがあり、中間的な同位体組成をもつ物質 がないことが見てとれる.これらの結果から、NC・ CCには形成時に時空間的な分断があり、それぞれ の形成領域で異なる物質輸送が進行していたと考え られる.

Warrenの結果をもとに、更に発展した解釈を導 いたのがBudde et al. [19], Kruijer et al. [20] である、著者達はTi・Cr同位体の結果に続き、Mo 同位体に同様の二分性を見出した. NC・CCはMo 同位体比の二次元プロット上で、異なる回帰直線を 作る(図2). CC-groupはNC-groupよりr核種に富 んでおり、Ti・Cr同位体の結果と同様にNC・CCの 中間的な同位体組成の物質は存在しない. NC・CC の回帰直線は切片が異なり、ほぼ平行な傾きを持つ ことから、単一の過程では両者のMo同位体組成を 説明することはできない. さらに著者達はHf-W年 代測定によってNC・CC母天体の分化年代の差を求 め、NC・CCの時空間的な分断の存在をより明確に 示した. それでは、原始太陽系星雲は一体何によっ て分断されTi・Cr・Mo同位体二分性を生んだのだろ うか.

著者達はその原因を,他の岩石惑星より先に誕生



図2: 隕石全岩のµ94Mo−µ95Moデータを示す図(EC (Enstatite Chondrites), OC (Ordinary Chondrites): [21-23], CC: [19, 22-24], CAI: [25]). 2本の直線は, NC・CCそれぞれのプロットから得られた回帰直線である(計算には「ISOPLOT」を用いた). プロットの誤差は, 各論文に掲載されている測定誤差を示す.

した「木星コア」であろうと解釈した.より詳しいシ ナリオは以下の通りである.木星による分断によっ て、太陽系外側から内側へ粒子が落下することが阻 害され、NC・CC領域の物質は混合しなかった.分 断が起きている間、NC・CCそれぞれの形成領域に 存在する粒子は微惑星レベルに成長した.この時点 でNC・CC領域のMo同位体組成には二分性が存在 した.その後微惑星は木星の移動によって擾乱を受 け、現在の小惑星帯の軌道に輸送された(この部分 はグランド・タックモデルと同様).この論文の発表 以降、同位体二分性の原因として「木星コア」の存在 を前提とする論文が大半を占めるようになるほど、イ ンパクトのある説であった.

3.2 同位体二分性の起源

同位体二分性について議論するとき、原因となる 物質(例えば漸近巨星分枝星由来・超新星爆発由来 などのプレソーラー粒子)を考えることは、原始太陽 系星雲の物理化学過程を理解する上で重要である。 Mo同位体二分性を発見したKruijerらは、具体的 にどのような物質の空間的不均質性がNC・CCの同 位体比の違いを生んだのか、深く言及しなかった。 後続の論文では、Mo同位体二分性をつくった物質 について詳しく議論がなされた。Worsham et al. [21]は、重力崩壊型超新星爆発由来プレソーラー 粒子がCC形成領域に選択的に輸送されたことで、 CC-groupがr核種に富む同位体組成を獲得した、 というモデルを提案した(図2).

一方で、Fukai and Yokoyama [26]は、NC· CC両者を含むコンドライト全岩のNd同位体分析を 行った.著者達がNd同位体に注目した理由の1つに は、Ndの核合成起源が関係している.Wanajo [27] は、ある条件下の重力崩壊型超新星爆発で起きるr プロセスでは、質量数130以上(Ba以降)の元素は合 成されない、というシミュレーション結果を示した. Ndの質量数は144程度なので、重力崩壊型超新星 爆発由来プレソーラー粒子がCC形成領域に混入し たとしても、形成領域のNd同位体比は乱されない. このことから、もしWorshamらの説のようにMo同 位体二分性が重力崩壊型超新星爆発由来プレソー ラー粒子の混入によって生まれたならば[21]、隕石 全岩にNd同位体二分性が存在する可能性は低いと 考えた.

しかし著者達の予想に反して,NC・CC間にはNd 同位体二分性が存在した(図3).つまり,元素によっ て同位体二分性を形成する原因は異なり,重力崩壊 型超新星爆発由来プレソーラー粒子以外にも,二分 性の原因となる物質を考える必要が出てきたのであ



図3: 隕石全岩のµ142Nd-µ150Ndデータを示す図(EC・OC・CC: [26, 28], CAI: [25]). 原点を通る直線は, 地球組成とsプロセス端成分 [5]との混合直線を示す. EC・OC・CC・CAIの誤差は分析結果の2 SD (two standard deviations)を示す. CAI-subtracted CCの 誤差は, 分析結果の誤差を伝播させた2 SE (two standard errors)を示す.

 る. それでは、Nd同位体二分性の原因となった物 質はなんだろうか. 最も有力な候補は、コンドライ ト中に含まれるCAI (Calcium-aluminum-rich inclusions: 難揮発性包有物)であると考えられる [26, 29].

CAIは太陽近傍で凝縮したと考えられる高温凝 縮物であり、太陽系最古の年代を示すこと(4567 Ma: [30]), 隕石全岩よりも大きな同位体異常をもつ こと[25]で知られている(図2-3). CAIが同位体異 常をもつということは、CAI形成領域と地球にもま たプレソーラー粒子の時空間的不均質性があったと いうことだが、その原因は本論文では議論せずNC・ CCの違いにのみ着目する. CAIは、NC-groupに はほとんど含まれておらず、CC-groupには最大3% ほど含まれている[31]. Fukai and Yokoyama [26]は、炭素質コンドライト全岩の同位体組成から CAIの同位体組成をマスバランス計算で取り除き, CAI-subtracted CCの同位体組成を計算した.結 果として、NC-groupとCAI-subtracted CCの同 位体不均質性は, 二成分混合で説明できることがわ かった(図3). CC-groupからCAIを取り除くことで、 同位体二分性に特徴的な組成のギャップは無くなっ たため、Nd同位体二分性の原因はCC形成領域に 輸送されたCAIである可能性が高い. Ndをはじめ とする親石性かつ難揮発性の元素(Ti, Srなど)は、

CAI中の元素存在度が高いため,同様のモデルで 同位体二分性をおおむね説明することが出来る(Ti: [32], Sr: [28]).

それでは、Ndとは異なり親鉄性元素であるMo 同位体二分性を、CAIの輸送によって説明するこ とはできるのだろうか. Render et al. [22]による と、「CC-groupからCAIの寄与を取り除くと、NCgroupの同位体組成に近づく」という傾向はMo同位 体にも見られる.しかし、CAIのMo存在度が比較 的小さいことから、CAIを取り除いただけではNC・ CCの同位体組成の差異は説明できない.結論とし て、Mo同位体二分性は主に重力崩壊型超新星爆 発由来プレソーラー粒子、Nd同位体二分性は主に CAI によって引き起こされたと考えるのが、現状最 も妥当と言えそうである.

3.3 NC-group・CC-group内の 同位体不均質性

NC-group・CC-group間に見られる同位体二分 性の原因についてここまで議論してきたが、それぞ れのグループの中にも同位体不均質性は存在してい る(図1-4). ここからは、各グループ内の同位体不均 質性に関する研究例を紹介する.

NC-groupは,数種類のコンドライトと分化隕石 で構成されている.NC-group内で地球と最も良



図4: 隕石全岩のμ84Sr-μ150Ndデータを示す図(EC·OC·CC: [26], CAI: [25]). 原点を通る直線は,地球組成とsプロセス端成分 (太線: [36], 破線: [37])との混合直線を示す. EC·OC·CC·CAIの誤差は分析結果の2 SDを示す. CAI-subtracted CCの誤差は,分析結 果の誤差を伝播させた2 SEを示す.

い一致を見せる隕石種として、エンスタタイトコンド ライト(Cr: [9]), IAB型鉄隕石(Mo: [21])が挙げ られる.地球とこれらの隕石母天体は、おおむね同 一の同位体リザバーで形成したと考えられている。 一方で、NC-groupの中で比較的大きな同位体異 常を示すのが、分化隕石の一種であるユレイライト 隕石である(Cr: [9, 33]). Schiller et al. [34]は, NC-groupのCa同位体異常の大きさが各隕石母天 体の質量に比例することを主張した. 著者達は、質 量が小さい天体(ユレイライト母天体)はCC-group 由来物質の降着量が小さく、 質量が大きくなるに つれ降着量が増すというモデルを提唱している. Yokovama et al. [23]では、エンスタタイトコンド ライト・普通コンドライト・ルムルチコンドライトにMo 同位体不均質性を発見した.原因として、原始太陽 系星雲で一部のプレソーラー粒子が中心星付近で 起きた熱過程によって選択的に破壊され、ガスとし て分離するモデルを提案した。もしくは、 コンドライ ト毎のマトリックス存在量・Fe-Ni合金存在量の違 いによっても、NC-groupのMo同位体不均質性が 説明可能であるとしている. このようにNC-group の同位体不均質性は元素によって見られる傾向が異 なり、それらを現時点で統一的に説明できるモデル はない

CC-groupは、化学組成・酸素同位体組成によっ

て分類された8種類の炭素質コンドライトサブグルー $\mathcal{T}(CV \cdot CK \cdot CM \cdot CO \cdot CB \cdot CH \cdot CR \cdot CI) \geq$, $CH \cdot CR \cdot CI \geq$ のグループに分類されない例外的な隕石(タギシュ レイク隕石など)で構成されている。サブグループ間 での同位体組成の違いはCr同位体で最も明瞭に示 されている[9]. Sugiura and Fuiiva [35]はコンド ライト母天体の集積年代とCr同位体異常に相関関 係があることを指摘し、Cr同位体異常の原因が原 始太陽系星雲の時間的な組成変化であることを主 張した. 一方Fukai and Yokoyama [28]は、CV・ CM·CO·CIコンドライトにSr·Nd同位体不均質性 が存在することを示した(図4). Cr同位体比の結果 と異なり、Sr・Nd同位体異常と集積年代の相関関係 は得られなかった、そこで、Sr・Nd同位体不均質性 を説明する新たなモデルとして、CC形成領域への粒 子輸送モデルを提案した(図5). 小惑星と隕石の対 応関係から、CV母天体は円盤の比較的内側、CM・ CO母天体は円盤の比較的外側で形成したことが推 察される[38]. CC-groupの母天体は全て木星以遠 で形成されたとすると、CV母天体は木星付近で形 成されたことになる. 近年のシミュレーション結果か ら、木星形成領域のすぐ外側では、ガス圧力勾配の ギャップが生じることによって比較的大きい粒子が 濃集することが示されている[39].木星よりも内側 の領域から輸送された(CC-group平均と異なる同



図5:Sr-Nd同位体不均質性を表す概念図([28]より一部改変).

位体組成の)粒子が, CV母天体付近に濃集することで, CM・CO母天体との差異を説明することができる.

しかしこのモデルは、CC-groupの中で最も太陽 系の外側に由来すると考えられてきたCIコンドライ トが、小さい同位体異常を示すことを上手く説明で きない、CC-group間の不均質性はより複雑な機構 を表している可能性があり、様々な元素の測定から より多角的に検証する必要がある。

4. 結論と今後の展望

隕石全岩のもつ核合成起源同位体異常は、初期 太陽系に起きた様々な物理化学過程を表している. 特に近年発見された同位体二分性は、隕石母天体が 形成した時空間的な違いを明瞭に示している.炭素 質コンドライトに代表されるCC-groupの形成領域 と、エンスタタイトコンドライト・普通コンドライトな どのNC-groupの形成領域は、木星コアによって空 間的に分断されていたというのが有力な説である.

NC-group内, CC-group内に見られる同位体 不均質性の原因を明らかにすることも重要である. NC-groupの同位体不均質性は,熱過程によるプ レソーラー粒子の破壊や,マトリックス・Fe-Ni合金 の含有量の違いによって引き起こされた可能性があ る. CC-groupの同位体不均質性は,母天体の集積 年代の違いや、NC形成領域から輸送された粒子の 不均質分布によって引き起こされた可能性がある.

このように、隕石全岩の同位体異常の原因を解釈 する際、隕石母天体の「空間的な」分布・「時間的な」 分布を軸に議論が進められてきた。しかし、 隕石母 天体の「空間的な」分布というのは、小惑星と隕石の 対応関係をある程度仮定した上で得られる. 間接 的な証拠である. 隕石と小惑星表面の反射スペクト ルが完全に一致する例は少ないことからも、隕石が 由来する場所の情報に欠ける標本なのは間違いな い. 一方で、はやぶさ2やOSIRIS-RExのサンプル リターン探査は、直接リモートセンシング探査をした 小惑星から岩石試料を入手し、対応した化学情報を 実験室環境で得ることができる. この方法により. 小惑星の空間分布に加え、小惑星の宇宙風化など の影響も考慮することができ、より精密な議論がで きることが期待される. そのためにも, 我々が手にし ている隕石試料を用いた信頼できる宇宙化学データ ベースの構築や、微小量サンプルからできる限り多く の情報を引き出すスキームの確立などが、今後不可 欠になるだろう.

謝 辞

本論文の執筆を勧めてくださった瀧川晶博士,丁 寧にコメントをして頂いた査読者の飯塚毅博士に厚 く御礼申し上げます.本論文の議論やデータの大部 分は,東京工業大学地球惑星科学系にて提出した 自身の博士論文をもとにしています.当時の指導教 員である横山哲也博士をはじめ,ご指導頂いた臼井 寛裕博士,羽場麻希子博士らに深く感謝致します.

引用文献

- Hayashi, C., 1981, Prog. Theor. Phys. Sup. 70, 35.
- [2] Scott, E. R. D. and Krot, A. N., 2014, Treatise Geochem. 2nd edition vol. 1, 65.
- [3] Zinner, E., 2014, Treatise Geochem. 2nd edition vol. 1, 181.
- [4] Fischer-Gödde, M. and Kleine, T., 2017, Nature 541, 525.
- [5] Arlandini, C. et al., 1999, Astrophys. J. 525, 886.
- [6] Dauphas, N. et al., 2010, Astrophys. J. 720, 1577.
- [7] Qin, L. et al., 2011, Geochim. Cosmochim. Acta, 75, 629.
- [8] Dauphas, N. et al., 2002, Astrophys. J. 565, 640.
- [9] Trinquier, A. et al., 2007, Astrophys. J. 655, 1179.
- [10] Warren, P. H., 2011, Earth Planet. Sci. Lett. 311, 93.
- [11] Shukolyukov, A. and Lugmair, G. W., 2006, Earth Planet. Sci. Lett. 250, 200.
- [12] Qin, L. et al., 2010, Geochim. Cosmochim. Acta 74, 1122.
- [13] Larsen, K. K. et al., 2011, Astrophys. J. Lett. 735, L37.
- [14] Hibiya, Y. et al., 2018, Geostand. and Geoanalytical Res. 43, 133.
- [15] Mougel, B. et al., 2018, Earth Planet. Sci. Lett.481, 1.
- [16] Leya, I. et al., 2008, Earth Planet. Sci. Lett. 266, 233.
- [17] Trinquier, A. et al., 2009, Science 324, 374.
- [18] Zhang, J. et al., 2012, Nat. Geosci. 5, 251.
- [19] Budde, G. et al., 2016, Earth Planet. Sci. Lett. 454, 293.
- [20] Kruijer, T. S. et al., 2017, Proc. of the National

Academy of Sci. 114, 26.

- [21] Worsham, E. A. et al., 2017, Earth Planet. Sci. Lett. 467, 157.
- [22] Render, J. et al., 2017, Geochem. Perspec. Lett.3, 170.
- [23] Yokoyama, T. et al., 2019, Astrophys. J. 883, 62.
- [24] Budde, G. et al., 2019, Nat. Astron. 3, 736.
- [25] Brennecka, G. A. et al., 2013, Proc. Nati. Acad. Sci. 110, 43.
- [26] Fukai, R. and Yokoyama, T., 2017, Earth Planet. Sci. Lett. 474, 206.
- [27] Wanajo, S., 2013, Astrophys. J. Lett. 770, L22.
- [28] Fukai, R. and Yokoyama, T., 2019, Astrophys. J. 879, 79.
- [29] Burkhardt, C. et al., 2016, Nature 537, 394.
- [30] Connelly, J. N. et al., 2012, Science 338, 651.
- [31] Hezel, D. C. et al., 2008, Meteorit. Planet. Sci.43 (11), 1879.
- [32] Gerber, S. et al., 2017, Astrophys. J. Lett. 841, L17.
- [33] Yamakawa, A. et al., 2010, Astrophys. J. 720, 150.
- [34] Schiller, M. et al., 2018, Nature 555, 507.
- [35] Sugiura, N. and Fujiya, W., 2014, Meteorit. Planet. Sci. 49 (5), 772.
- [36] Qin, L. et al., 2011, Geochim. Cosmochim. Acta 75, 7806.
- [37] Hoppe, P. and Ott, U., 1997, AIP Conf. Proc. 402, 27.
- [38] Burbine, T. H., 2014, Treatise Geochem. 2nd edition vol. 2, 366.
- [39] Desch, S. J. et al., 2018, Astrophys. J. Sup. 238, 11.

ー番星へ行こう! 日本の金星探査機の挑戦 その41 ~LIRの新しい可能性~

神山 徹¹, 福谷 貴一², 今村 剛³,

(要旨) 中間赤外線カメラ(LIR)のデータ解析技術の進展から,LIRのデータに埋め込まれている様々な 情報が得られるようになってきました。例えばスーパーローテーション維持機構に重要な「熱潮汐波」の 全球的な構造を3次元的にとらえることに成功しています。また画像の低ノイズ化にも成功し、あかつきの 悲願だった金星の夜の風速分布も手に入りつつあります。金星到着以降、巨大山岳波の発見など驚きの 画像を送り続けているLIRの新しい展開についてご紹介します。

1. LIRによる金星観測

中間赤外カメラ、LIRでは8-12µmの赤外線を用 い、対象からの熱放射を利用して観測を行います. このためLIRでは金星自身から放たれる熱放射を 観測することができ、加えてこの波長帯では太陽光 の反射は十分暗いことから、金星を昼・夜別なく観 測することができます(図1). 雲頂高度の観測に関し て,太陽光の反射を利用するUVIやIR1, IR2では、 データは昼面のみに制限されることから、あかつき が搭載する5つのカメラのうちLIRだけが金星の昼・ 夜の区別がない観測データを提供可能です.

また、Pioneer VenusやVenus Expressなど過 去の極軌道衛星とは異なり、あかつきは赤道軌道を 周回しています.このためあかつきは赤道を中心とし て両半球に広がる現象の観測を得意とします.たと えば太陽光による雲の加熱を励起源とする「熱潮汐 波」と呼ばれる、スーパーローテーションの生成・維 持に重要な大気波動があるのですが,熱潮汐波は 赤道から極域,また昼・夜両面を覆う全球的な構造 を持ち,過去の探査ではその全貌をとらえることが 困難でした.あかつきの持つ赤道軌道と昼・夜の区 別なく観測が行えるLIRの組み合わせにより,熱潮 汐波の全球的な構造を観測的に捉えることが金星 探査の歴史上はじめて可能になりました.

このように雲頂高度というある特定の高度におい て熱潮汐波の全球探査が可能となりましたが、大気 の現象は当然高度方向にも広がりを持ち、熱潮汐波 の働きを理解するためには3次元的な探査が求めら れます.あかつきでは「電波掩蔽」観測により、電波 が通過する緯度・経度に対して高度方向の情報を取 得しているものの、より広範囲の3次元情報の取得 は大気現象の理解に役立ちます.

このような課題があり、ミッションチームでは金星 雲から放射される熱放射がどのように宇宙空間まで 到達するか、放射伝達計算に基づき詳しい議論を行 いました. 議論の成果としてLIR単体でも(限定され た高度範囲であるものの)高さ方向の情報が得られ ることが認識されました.本記事ではこの成果を活 用し、熱潮汐波による温度場の3次元構造を明らか

 ^{1.}産業技術総合研究所人工知能研究センター
 2.東京大学大学院 理学系研究科
 3.東京大学大学院 新領域創成科学研究科
 t.kouyama@aist.go.jp



図1. 2015年12月7日に同じタイミングで取得された(a) UVI, (b)LIR観測画像. LIR画像中の実線は赤道, 白点線は昼夜境界線を示す. LIR は金星雲層から発せられる熱放射を観測するため, 昼・夜両面の情報が得られる.

にした結果を報告するとともに、さらにLIRのノイズ 低減処理により、金星雲頂高度における昼・夜両面 の風速構造を得た成果について紹介します。

2. LIRデータ解析の新たな展開

2.1 観測高度の出射角依存性を利用した, LIRによる大気3次元観測

LIRでは熱赤外波長を扱います. この波長は金星 大気を深く透過できるものの,金星を分厚く覆う雲 により散乱を受けるため,LIRでは主に金星雲層高 度から射出される熱放射が観測されることになりま す.この熱放射は単一の高度から射出されるものが 観測されるわけではなく,雲の散乱の程度に合わせ ある幅を持った高度範囲の熱放射が観測されること になります.放射伝達計算によりLIRでは高度60-75kmの範囲から射出される熱放射が積分されたも のを観測すると見積もられています[1].

このようにLIRでは金星雲層の上部高度を観測 します.一方で、金星は全球をすきまなく雲が覆う ことから、熱放射が射出される向きによって雲の見 かけの厚みが変わることになります(図2a). この効 果により出射角ごとにLIRが観測する高度が変化し ます. 図2bではどの高度がLIRによってより観測さ れるかの指標となる寄与関数を,いくつかの出射角 について示しています. 直下観測条件では最も深い 高度の情報まで得られる一方,出射角が大きくなる につれてその高度が上層にシフトしていく様子が分 かります. 寄与関数の広がる効果により重なる高度 幅あるものの,直下視と出射角60°では実効的に3 kmほど高度方向に差のある情報が得られると見積 もられています[2].

出射角ごとにLIRデータを区別することができれ ば、異なる高度の情報が得られることになります. ちょうど良いことに同じ出射角を持つ領域は金星 ディスク上で同心円状に分布し、出射角が大きくなる ほど半径が大きくなり(図2c)、出射角ごとにデータを 区別することが可能です.つまり2次元センサである LIRから様々な高度の情報が得られることを意味し ています.もともとLIRでの観測の特性として昼・夜 区別なく全球的にデータが得られることは分かって いましたが、さらに高度方向にも情報が得られる特 性が認識され、LIR単体でも3次元的な情報が抽出



図2. (a) 出射角の違いによって観測高度が変わる概略図. eは出射角を示す. もし雲の密度がどの高度でも一定とすると、光路長の変化に合わせ観測可能高度は1-coseに従って上昇する. (b) 出射角0°, 45°, 60°における寄与関数の高度分布. (c) LIR画像中での出射角45°, 60°に相当する領域(白線). Kouyama et al [2]より抜粋.

可能という測器としての新たな描像が得られていま す.

2.2 LIR画像の低ノイズ化による模様追跡

LIR観測の別の観点として、軌道投入以前に予想 された以上にLIR画像に小規模な雲の擾乱構造が みられない、という事情がありました、事前に行われ ていた地上観測の研究成果等から, LIRでも紫外 波長でみられる細かな模様のような小規模な大気の 乱れが観測されると期待されていました[3]が、実際 には小規模な擾乱による温度の乱れをLIR画像で 識別することは困難でした. これは2.1章で示した ようなLIRが持つ 10kmの幅の寄与関数による効 果が影響していると考えられています、寄与関数の 幅分. 高度方向に情報が足し合わされ. 高度方向に 小さな構造をもつような温度擾乱はその振幅がキャ ンセルされ、LIRのもつ温度分解能(△T=0.3 K)を 下回ってしまうためです. 逆にLIRによってはじめて 同定された地形固定の「定在波[4]」にとってはこの 特性は有利に働きました. 定在波は鉛直波長が100 kmにもなると予想され、大気下層から雲層までつな がった構造を持つことから鉛直積分の効果はあまり

効かず,他の構造に対して相対的に強調される形に なります.事実LIRでは大小さまざまな定在波構造 の検出に繰り返し成功しています[5].

では本当に高度方向にもスケールの小さい小規模 擾乱の情報はLIRでは検出できないのでしょうか. 結論としてはLIR画像の温度分解能を向上させるこ とにより、その検出ができました、LIRの温度分解 能はノイズ成分によって決まっています[6]. そのあ らわれ方はランダム的であり、シンプルに画像を重 ね合わせることで統計的により減少させることが可 能です.一方で単純に画像を重ね合わせるのではな く、LIR画像を緯度経度展開したL3プロダクト[7] を用い、スーパーローテーションとともに動く座標上 において画像の重ね合わせを実施しました. これに よりスーパーローテーションによって移流される成分 のみが強調されることになります(地形固定成分も 除去できる).結果.期待した通り温度分解能が向上 し、目視においても相関などの統計処理においても 雲模様の識別性が改善しました(図3 [8]).

この成果によりついにLIRによる大気擾乱の追跡 が可能となり、これまで世界でまだ誰も成功してい ない、雲上層高度(65-70km)における昼・夜の区別



図3. 重ね合わせによるノイズ低減手法の流れとその効果.

のない風速分布の導出が可能となりました.

3. 観測成果

3.1 熱潮汐波による温度擾乱の全球構造

2.1章で紹介した通り、LIR観測高度の出射角依 存性と、あかつき赤道軌道上からの全球観測の組 み合わせにより、熱潮汐波の構造が(雲上層高度に 限定されるものの)3次元的に得られました.まず図 4では出射角60°に着目し(代表高度:69 km),2016 年10月から2019年1月まで、3金星年以上のLIR画 像を平均して得られた熱潮汐波構造を示していま す.南北両半球とも赤道から中緯度帯まで波数2, 半日潮汐成分の構造が卓越し、緯度45°より高緯度 帯では波数1、一日潮汐成分の構造が明瞭になる様 子が見られています.

このように両半球にわたり,ローカルタイムに欠け のないデータセットが得られたのはLIRが初めてで す.さらに1金星年ごとに熱潮汐波構造の調査を行っ た結果,振幅,位相どちらも時間変化が小さく,安 定して存在することが確認されました[2].

次に異なる出射角ごとにデータを平均し,高度に よる構造の違いが調査されました.赤道での輝度温 度プロファイルを位相角ごとに表示してみると,出 射角が大きくなるにつれ,つまり高度が高くなるにつ れ、ローカルタイムが小さくなる方向に半日潮汐成分 の位相が変化する様が確認され(図5)、同様の高度 を観測した電波掩蔽観測[9]と良い整合性を示して いました.この位相関係は下層で励起された熱潮汐 波が上方に向かって伝搬している様を示すものであ り、熱潮汐波が少なくとも定性的にはスーパーロー テーションを加速している証拠をとらえたと考えられ ています.このような観測事実は理論研究に有益な 情報として活用が検討されています.

3.2 昼と夜とで異なる南北風の向き

2.2章で示したように、スーパーローテーションに よる大気の移動を考慮しながら画像を重ね合わせる ことで、スーパーローテーションに乗って、あるいは スーパーローテーションに近い速度で移動する模様 のみが強調されます.1時間おき、あるいは2時間お きに取得されたLIR画像を昼側10時間,夜側9時間 分の平滑化幅を持って重ね合わせた結果を図6に示 しています.昼面,夜面ともに目視でも確認できるほ ど雲模様が明瞭になり,昼側で雲模様が赤道から 極向きに発散していくさまが確認される一方,夜側 では逆に極から赤道に収束する模様の動きが確認 されました[8].

このような南北風速の波数1構造が存在すること は,熱潮汐波の理論的研究から予想されていました (たとえば[10]).しかし紫外波長観測では観測範囲



図4. LIRによって初めて同定された熱潮汐波の全球構造(出射角60°のデータを利用). 3金星年分のLIR画像を平均処理することで導出. 熱 潮汐波は太陽光加熱を励起源とするため、その構造が固定されている金星地方時一緯度座標系において平均処理を行った.



図5. 複数の出射角を用いて導出した赤道上空での温度プロファイル(実線). 点線は波数2成分のフィッティング結果を示す. 高度による位相 変化を見やすくするため, 金星の午前域に存在する温度極大位置にマークをした.

が昼側のみに限られるなど,過去の探査で観測的に 確かめた事例はなく,LIRにより初めて同定されま した.ここまでは定性的な評価ですが,波数1構造 の強度や昼・夜平均した際に残る全球平均としての 南北風の強さ(つまり子午面循環の真の強度)につい て, 定量的な調査がまさに今行われています.

4. まとめ

本記事では最近目覚ましい発展のあった、あかつ



図6. ノイズ低減処理により取得された昼・夜のLIR緯度経度展開画像. 矢印は確認された雲模様の南北移動方向を示す.

き/LIRの解析手法について紹介するとともに,この 手法を用いて得られた観測成果,特にスーパーロー テーションの維持・生成に深く関与していると考えら れている熱潮汐波に関する成果を紹介しました.過 去の観測では得られなかった情報が手に入ったこと により,理論的研究がさらに進むものと期待されて います.

また画像重ね合わせによるノイズ成分を低減す る処理そのものは一般的な処理であるものの,長く ミッションに参加しているメンバー(また長くあかつ きデータを見ているはずの世界中の研究者)では雲 模様を効果的に抽出する手順にまでは到達できま せんでした.画像重ね合わせに関する成果は新しく ミッションに参加したメンバーがフレッシュな視点で 試行した結果であり,それが世界初の成果につなが りました.思い込みのない新しい視点をミッションに 加え続けることの大切さもこの研究成果から再認識 しています.

参考文献

 Taguchi, M. et al., 2007, Advanced Space Research 40, 861.

- [2] Kouyama, T. et al., 2019, Geophys. Res. Lett. 46, 9457. doi: 10.1029/2019GRL083820.
- [3] Sato, T. M. et al., 2014, Icarus 243, 386.
- [4] Fukuhara, T. et al., 2017, Nat. Geoscience 10, 85.
- [5] Kouyama, T. et al., 2017, Geophys. Res. Lett. 44, 12098. doi: 10.1002/2017GRL075792.
- [6] Fukuhara, T. et al., 2011, Earth Planets Space 63, 1009.
- [7] Ogohara, K. et al., 2017, Earth Planets Space 69, 167.
- [8] Fukuya, K. et al., 2019, In proc. EPSC-DPS2019, 397.
- [9] Ando, H. et al., 2018, J. Geophys. Res. 123, 2270.
- [10] Takagi, M. et al., 2018, J. Geophys. Res. 123, 335. doi: 10.1002/2017JE005449.

火の鳥「はやぶさ」未来編 その20 ~小惑星リュウグウからの リターンサンプル分析の全体像~

安部 正真¹, 橘 省吾², 小林 桂³, 伊藤 元雄⁴, 渡邊 誠一郎⁵

(要旨) 探査機「はやぶさ2」は小惑星リュウグウ表面での試料採取のための二回の着陸運用を成功させ、 現在,地球帰還に向けて,飛行中である.2020年末に地球に届けられるリュウグウ試料は,地球帰還か ら6ヶ月の期間, JAXAキュレーション施設内に設置された専用のクリーンチャンバーの中で,地球大気 にさらされず,窒素ガス中で初期記載される.その後,一部試料に対し,外部機関でのJAXA主導の高 次キュレーションならびに「はやぶさ2」科学チームによる初期分析がおこなわれる.地球帰還から18ヶ月 後には,それらの分析結果はカタログ化され,国際公募による分析に試料が配布される.本稿では,初 期記載,高次キュレーション,初期分析に関し,それぞれの目的や実施内容,計画について示し,国際公 募開始以前にJAXAならびに「はやぶさ2」プロジェクトが主導しておこなうリュウグウ試料分析の全体像 を紹介する.

1. リュウグウ表面での試料採取

探査機「はやぶさ2」は小惑星リュウグウでの近傍 観測(2018年6月-2019年11月)を終えた.リモート センシング観測によって,(1)リュウグウが独楽(コ マ)を上下に重ねたような形をしており,平均半径は およそ450 mであること,(2)バルク密度が1.19 ± 0.03 g cm-3であり,炭素質コンドライトの密度を 想定すると,天体全体として,50-60%の空隙率を もつこと,(3)表面全域に10 mを超える大きな岩塊 (大きさ約25 cmを超える岩石を岩塊とよぶ)が多く 存在し,リュウグウ表面物質の幾何アルベド(反射 能)は~4.5%しかなく,典型的な炭素質コンドライト よりも暗いこと,(4)表面全域に2.72 μmの吸収が

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所
 東京大学・宇宙惑星科学機構
 3.岡山大学・惑星物質研究所
 4.海洋研究開発機構・高知コア研究所
 5.名古屋大学・大学院環境学研究科
 abe.masanao@jaxa.jp

見られるが、含水鉱物を含む炭素質コンドライトに 比べ、吸収が弱いこと、などが明らかとなった [e.g., 1-3]. また、着陸機MASCOTによって、表面に細 かい粒子が積もっているような様子は見られないこ と、数cmサイズの表面岩石の熱伝導度が隕石の典 型値より小さいことが明らかになった [4, 5]. これら の事実は、リュウグウが既存の隕石とは異なる物質 科学的特徴をもつことを示唆する、含水鉱物の低い 存在度は、リュウグウが加熱などによって含水鉱物 を失ったためか、そもそも母天体で水質変成があま り進行しなかったためか、いずれかの可能性が考え られるが、現時点でははっきりとしない。

「はやぶさ2」は2019年2月,7月の二度,リュウグ ウ表面への着地に成功した.試料採取のための弾 丸の発射も確認された.「はやぶさ2」サンプラーシス テム [6-8] は「はやぶさ」を踏襲しており,弾丸発射 型の試料採取機構が宇宙環境で動作することが初 めて示された.第一回目の着地および試料採取は赤 道付近でおこなわれた.第二回目の着地は衝突装置 SCIによって赤道付近につくられた人工クレーター 周辺でおこなわれ、採取された試料にはクレーター から掘り起こされた地下物質が含まれていることが 期待される。

初回と二回目の着陸の間にはサンプルキャッチャ 内の試料導入口位置を変更し、二度の着陸で得ら れた試料をサンプルキャッチャ内の個別の格納室に 収納した.2019年8月には、サンプルキャッチャを地 球帰還カプセル内のサンプルコンテナに収納する運 用もおこない、試料採取運用における全動作が無事 に完了した.「はやぶさ2」は小惑星リュウグウ近傍で の運用を11月に終え、現在、地球へ帰還中である. 地球帰還カプセルは2020年末に地球に届けられる.

2. JAXAキュレーションにおける 初期記載

2.1 キュレーション設備への帰還試料受入

「はやぶさ2」の帰還試料の受入については, JAXA宇宙科学研究所の地球外物質研究グループ が, JAXA相模原キャンパスに設置された試料受入 れ設備(キュレーション設備)を用いて行う.

帰還試料は探査機の帰還カプセルのサンプルコ ンテナ内のサンプルキャッチャに収納されている. 地球帰還時に探査機から分離されたカプセルは豪 州で回収される予定である.カプセルは回収後,現 地でサンプルコンテナ内のガスが回収された後,輸 送コンテナに封入され,日本に空輸され,キュレー ション設備に運び込まれる予定である.帰還カプ セル回収からキュレーション設備への搬入までは, JAXAに組織されたカプセル回収隊が主導して行 い,地球外物質研究グループの作業はサンプルコン テナ受入後からスタートする.

2.2 サンプルコンテナの クリーンチャンバー搬入

キュレーション設備受入時,サンプルコンテナに は,帰還カプセルのインスツルメンタルモジュールと 呼ばれる構造体や,サンプルアブレータ(熱防御材) がついているため,そのままではクリーンチャンバー には入れられない.そのため,クラス10000レベルの 加工洗浄室と呼ばれるエリアで、インスツルメンタル モジュールとサンプルアブレータの除去を行う.特に サンプルアブレータはサンプルコンテナと締結してい るネジからの熱の流入を防ぐために、ネジ頭までア ブレータで蓋をされているため、フライス盤を用いて アブレータを削り出すという加工作業をクリーンルー ム内に独立排気エリアを設けて行う必要がある.

余計なものを取り除いたサンプルコンテナは表面 を清浄にした後, 試料準備室(クラス1000) で蓋開 封機構に組付けられる.サンプルコンテナは帰還 試料の大気暴露を防ぐためにメタルシールされて いる.サンプルコンテナの蓋は内と外の二重構造に なっており,ラッチ拘束された外蓋とばね力によっ て,内蓋がサンプルコンテナのシール部に押し付け られることで内部の密閉が保たれている.サンプル コンテナの内蓋だけをジグを使って反跳を抑え,外 蓋とばねを除去してから,最終的に蓋開封機構に組 付けられることになる.

2.3 試料の取り出しと初期記載

「はやぶさ2」の試料受入れのためのクリーンチャ ンバー(以下CCと略す)は、第2処理室(クラス100 ~1000)に設置され、5室(CC3-1,2,3; CC4-1,2) から構成されている(図1,2.4節). 蓋開封機構は台 車でCC3-1下部に設置され、CC3-1の下面フランジ に取り付けられる. 蓋開封機構取り付け後にクリー ンチャンバー内は真空環境にされる.

サンプルコンテナの開封は、内蓋を抑えている機 構をチャンバー外からの操作で解除し、内蓋を持ち 上げることで行う、内蓋はサンプルキャッチャと締 結されているため、この操作で、サンプルキャッチャ がサンプルコンテナから露出する、露出したサンプ ルキャッチャをCC3-1の第1トランスファーロッドで つかみ、CC3-2へ水平搬送する、CC3-2で第1トラ ンスファーロッドを用いてサンプルキャッチャを反転 し、内蓋を下にして、CC3-2の第1ステージに設置する.

サンプルキャッチャはA, B, C室の3部屋構成に なっており、1回目の着地の際の採取試料はA室に、 2回目の着地の際の採取試料はC室に入っている. CC3-2の第1ステージではキャッチャA室の蓋のネ ジを外し、蓋を取り除く.

蓋を取り除いた後、CC3-2の第2トランスファー



図1:「はやぶさ2」試料受入れ専用の新クリーンチャンバー.5室構成(CC3-1からCC4-2)となっている.

ロッドを用いてCC3-2の第2ステージに移動させ, スコープカメラで観察しながら,A室の試料の一部 を,鉗子機構を用いてピックアップし,CC3-2内に 設置した石英皿に保管する.その後,CC3-2の第3 ステージに移動させ,A室の開口部に試料飛散防止 用石英キャップを載せてから,CC3-2の第3トランス ファーロッドを用いてCC3-3に移動させる.ここまで の作業をすべて真空環境下で行う.サンプルキャッ チャがCC3-3に移動完了後,CC3-3とCC3-2の間 のゲートを閉めてから,CC3-3を窒素パージし,以 降,窒素雰囲気下でグローブ操作を行う.

CC3-3からは、サンプルキャッチャはキャッチャ ハンドリング治具を介してつかむことで、グローブ操 作でも安全かつ確実にその分解および試料の取り 出しが行えるようになっている。サンプルキャッチャ は分解する前に、CC4-2室で全体重量を計測し、回 収された試料のおおよその総量を計測する。その 後、CC4-1で、A室の試料の取り出し、B室の取り外 し、B室の試料の取り出し、C室の取り外し、C室の 試料の取り出しを行う。

各室からの試料の取り出しは,各室の開口部に 石英容器をかぶせた状態で全体を反転させて,各 室内の試料を石英容器に移し変える.この手法は, 「はやぶさ」初号機でも行った方法である. 石英容器 に移し替えられた各室の試料は再度CC4-2に移さ れ、各室の試料重量を計測したのち、光学観測と分 光観察を行う、光学観察では試料のサイズ分布に ついての概略の情報も得る予定である.分光観察 はここでは集合体としての分光データを取得予定で ある.分光観察はFTIRによる反射スペクトル測定 と、フランス宇宙天体物理学研究所(IAS)が開発し たMicrOmegaによる分光イメージ測定を準備中で ある. MicrOmegaは,「はやぶさ2」のMASCOT に搭載された分光イメージャーを帰還試料の測定 が行えるように専用に新規製作したものを用いる. このMicrOmegaの使用は2019年6月にJAXAと CNES間で締結された「IAXA地球外試料キュレー ションセンターにおけるMicrOmegaでの「はやぶさ 2|帰還試料分析に関する協力活動についての実施 取り決め」によって実現したものである.

各部屋の試料の集合体としての測定後に,個別粒 子のピックアップを行う.「はやぶさ」初号機では最 大でも300µmサイズの試料であったのに対して,「は やぶさ2」ではmmサイズの試料も帰還することが期 待されている. そのため,地球外物質研究グループ では,mmサイズの試料もハンドリングできるツール を開発中である.個別粒子はピックアップされた後, 個別の容器に収納され,光学顕微鏡での記載を行う.また大きなものは個別の秤量と分光データの取 得を予定している.個別粒子のピックアップと観察 は,大きい粒子から行い,最初の6か月間では最大 200粒子程度と考えている.

2.4 JAXAキュレーション設備

ここまで, 帰還カプセル回収から, 試料の個別ピッ クアップと試料の初期記載までの流れを説明した. 続いて, 試料受入設備について簡単に紹介する.

試料受入れ設備の検討の経緯については. [9] に書かれている. 2015年から検討がスタートし、ク リーンルームとクリーンチャンバーの完成は2018 年である. クリーンルームを,「はやぶさ」初号機用 クリーンルームの隣の部屋に新しく新設し、その中 に、「はやぶさ2 | 専用のクリーンチャンバーを設置 している. 「はやぶさ2」のクリーンチャンバーは5室 構成で、CC3-1, 3-2, 3-3, 4-1, 4-2と呼ばれている。 CC3-1, 3-2は真空環境下でのハンドリング、CC4-1, 4-2は窒素環境下でのハンドリングを行える仕様で、 CC3-3はその両方の機能を備えている。チャンバー はステンレス製で内面は複合電解研磨処理され超 精密洗浄されている. クリーンルームへ設置後ベー キングで脱ガス処理を行い、真空環境下では残留ガ ス分析四重極型質量分析計(RGA-QMS)を用いて、 窒素環境下では大気圧イオン化質量分析計(API-MS)を用いて環境モニタを行う. 窒素ガスについて は、最高グレードの液体窒素から気化器および流出 型純化機を用いて不純物を取り除くと同時に、循環 型純化器でクリーンチャンバー内のガスを随時精製 しながら環境を維持する.

「はやぶさ」初号機のチャンバー構成が2室であっ たのに対し、「はやぶさ2」では5室構成となったのに は理由がある。一つは真空環境下での試料の取り 出しおよび保管を可能にするために、専用のCC3-2 を作ったことである。CC3-2には真空環境で動作す る機構を複数取り付け、ネジの取り外しや蓋の取り 外し、試料の回収などを行うことが可能である。ま た各種スコープカメラを備え、サンプルキャッチャ 内の試料の様子や作業の様子をリアルタイムで観 察できる機能も備えている。またCC3-3は真空環 境から窒素環境に変えるエアロック機能を備えると 同時に,拡張ポートを備え,将来の新しい機能を付 加できるようにしている.前述のMicrOmegaによ る分光測定機能は,チャンバー仕様の決定後に追 加することが決まったため,このポートを用いて行 う.拡張ポートにはゲートバルブがついているため, MicrOmega測定が完了した後には,別の機能を付 け替えることも可能である.

CC4-2も「はやぶさ」初号機にはなかった作業用 チャンバーである。「はやぶさ」初号機の帰還試料は ほとんどが100μm以下と小さく、静電制御マニピュ レータ[10]と呼ばれる専用のハンドリングツールを 開発し、これまで約1000粒子のピックアップに成功 しているが、作業効率が悪く、当初は1日1粒程度の ハンドリングがやっとであった.「はやぶさ2」では限 られた時間で初期記載を完了し、後段の詳細分析に 分配する作業を速やかに行う必要がある. 幸い. [は やぶさ2」の帰還試料は初号機よりも大きなサイズで あることが期待されており、 試料ハンドリングも手作 業で拾い上げることも可能なように、 チャンバー上面 をすべて窓面として、手元を目視して作業できるよう なチャンバーを新たに設計している. これにより光 学観察も、光学顕微鏡をチャンバー内に入れること なく、窓越しに設置観察できると同時に、電動モー タを用いて自動マッピングも可能となり、試料観察 の効率も格段に向上している.

CC4-1は「はやぶさ」初号機の静電マニピュレータ を設置したチャンバーと同様な設計であるが,主に キャッチャハンドリング治具を用いた,キャッチャの 分解作業を,個別ピックアップした試料の一時保管 スペースとして用いる予定である.

CC4-1とCC4-2にはハンドリングツールや試料容 器の出し入れのための搬入出用のポートが用意さ れており,専用の搬入出用チャンバーを取り付けて, チャンバー内を真空排気および窒素置換を繰り返し 行い,清浄化された環境にしてからゲートバルブを 開け,出し入れを行う.テフロン製のジグなどは水分 や大気の脱ガス効率が悪く,清浄化まで時間がかか る傾向があるため,「はやぶさ2」用の搬入出ポート は内部ヒータを備えており,脱ガス効率を上げて,も のの出し入れの作業性の向上も図っている. CC4-2の搬入出ポートはフーリエ変換赤外分光光 度計(FTIR)の測定チャンバーの接続ポートも兼ね ている.FTIRはキャッチャの各室から取り出した 試料を集合体として石英容器に回収した後,拡散 反射スペクトルデータを取得することを予定してい る.測定光のスポットサイズは1 mm ゆ程度であるた め,試料サイズが大きい場合は,個別の反射スペクト ルデータも取得可能である.測定波長範囲は0.67µ mから5µmと「はやぶさ2」搭載の近赤外線分光計 NIRS3の観測波長域をカバーしており,リモートセ ンシングデータとの比較することが可能である.チャ ンバー上部にはサファイヤ製の窓があり,チャンバー 外に設置したFTIR測定装置と外部光学系を介し て,チャンバー内の試料を分光測定する.

重量測定については、CC4-2に接続した搬入出 室を介して、秤量装置をCC4-2に導入して行う予定 である、「はやぶさ」初号機では秤量装置を、ゲート バルブを介して隔離し、測定時のみゲートを開ける 方式であったが、装置から秤量皿までの距離がある ため振動の影響を受けやすく、測定精度が十分出 せない問題点があった. そのため,「はやぶさ2」で は装置本体を専用のアルミケースで覆うことでコンタ ミネーション源となることを極力避けると同時に、秤 量測定時のみチャンバー内に導入し、測定終了後は 速やかに外に出すことで、チャンバー内汚染を極力 低くする方式を選択している. この方式はNASAの Johnson Space Centerが採用している方式でも ある. チャンバー内はドライな窒素環境下でグロー ブ操作や窒素循環の風の摩擦により静電気が発生 しやすく、秤量装置は静電気の影響を受けやすいた め、秤量想定時には、金属メッシュを取り付けた専 用の風防を用いて測定環境の安定化を実現し、測定 精度の向上を図っている.

CC4-1には将来の試料保管のための拡張ポート も用意している.初号機では、同様の拡張ポートに 試料保管庫を取り付け、保管庫には無電源で駆動す るゲッタポンプが2式搭載されている.保管庫に試 料保管後、保管庫をチャンバーから切り離すことで、 停電時にも安全に試料保管をすることが可能であ る.

チャンバー内で用いるハンドリングツールおよび 試料容器は合成石英または、ステンレスおよびアル ミまたはテフロンを原則としている.チャンバー搬入 前には,超純水および有機溶剤で超音波洗浄を行い、メタル製品以外は酸アルカリ溶液を用いた洗浄 も併用している.有機物除去に関しては、ベーク処 理する方法もあるが、有機物以外の汚染レベルが悪 化することを考慮して、UVオゾン洗浄を採用するこ とを検討している.

3. 初期記載後の試料分配の流れ

3.1 Phase2キュレーションの位置づけ

帰還試料受入れ6か月後に,初期分析を開始する ことになっている.また初期記載作業と並行して, キュレーション主導のもと,高次キュレーション(以 後Phase2キュレーションと呼ぶ)をJAXA外部の 研究機関と共同で行うことになっている.Phase2 キュレーションについては2015年3月に開催された 第5回キュレーション専門委員会でその必要性が議 論された.

その時の資料によれば、必要性については「「はや ぶさ2」の帰還後、その試料に最も多く接する機会 を持つのはISASキュレーショングループである.し たがってそのハンドリングの経験から、初期分析や、 外部の研究者からは提案されていない研究テーマ を創出することが出来るはずである. 拠点分析は、 このキュレーションメンバーの経験を生かしたサイ エンステーマに基づく分析を実施する枠組みとして、 「はやぶさ2」の試料から得られるサイエンス成果を 最大化するために設定することを目的とする.また、 拠点との共同研究を通し、キュレーションとその他 の研究施設の人材交流、技術情報交換などを行い、 将来のサンプルリターンへの人材育成を実施する.」 とある.

初期分析との違いについては次のように整理され た.初期分析は試料が帰ってくる前にあらかじめ徹 底的に議論された分析フローにのっとって,試料が 帰ってきてから短期間に科学成果を出すことを目標 とするものである.一方,Phase2キュレーションは, 試料の帰還後,ある個々の試料,あるいはある試料 のグループに対して,初期記載で得られたデータを もとに,帰還試料全体の特徴などを踏まえた上で, 与えられた試料から最大の科学成果が得られるよう サイエンステーマ・目標を設定し、それを達成する分 析フローを検討して、実施するものである。

その後,専門委員会での2度にわたる書類審査を 経て,2015年5月の第6回キュレーション専門員会で, 岡山大学・地球惑星物質科学研究センター(現惑星 物質研究所)(Phase2三朝:代表中村栄三)と国立 研究開発法人・海洋研究開発機構(JAMSTEC)高 知コア研究所(Phase2高知:代表伊藤元雄)の2か 所が選定された.そして、キュレーション主導のも と、それぞれの研究機関がリュウグウ試料の分析を 独立に担当することとなる.

JAMSTEC高知コア研究所については,2018年 4月の第14回キュレーション専門委員会において,地 球外物質研究グループが連携協定や共同研究契約 を結んでいる大学共同利用機関法人・自然科学研究 機構・分子科学研究所,大学共同利用機関法人・情 報・システム研究機構・国立極地研究所,高輝度光 科学研究センターの研究機関と連携する体制に拡 張することを提案し,承認されている(ただしあくま でも主体は高知コア研究所である).

3.2 Phase2三朝の取り組み

岡山大学惑星物質研究所(IPM)は、小惑星探 査機「はやぶさ」によってもたらされた小惑星イト カワ由来の帰還試料の初期分析を担当し、限られ た微粒子試料の総合解析によって、微小重力天 体表層環境に関する新たな物質科学知見を得た [11]. その初期分析において重要な役割を果たし たのは, 多様な局所分析, バルク分析機器を組み 合わせ対象試料から複合的な物理化学情報を取り 出すことを可能とした地球惑星物質総合解析シス テム(Comprehensive Analytical System for Terrestrial and Extraterrestrial Materials: CASTEM)を用いた総合物質科学的解析であっ た[12]. そして小惑星リュウグウからの帰還試料の Phase2キュレーションにおいても、さらに発展した CASTEMを最大限活用し、総合的な観点から帰還 試料の起源・進化に関わる情報を抽出する予定であ る. そして国際AOの基礎となる基本的な物質科学 的情報を与え、継続的な研究の効率化を図ることを 目的とする.

小惑星探査機「はやぶさ2」によるリモートセンシ

ングによって得られた形体・形状情報、物性、物質 科学的情報によって、小惑星リュウグウの描像の理 解が進みつつある[2]. 岡山大学惑星物質研究所で 実施するPhase2キュレーションにおいては、これ らの情報に基づき推定される物質科学的多様性を 持つ微小重力天体形成モデルをあらかじめ想定し [13]. 帰還試料の総合解析によってそのモデルを検 証する準備を進めている. リュウグウは、分光学的 手法によって有機物質を含むことが示唆されており、 太陽系環境における有機―無機物質の共進化およ びマクロな小惑星形成・進化に関する物質科学的検 証が最大のサイエンステーマとなる。岡山大学惑星 物質研究所では、地球近傍小惑星の形成およびそ の後の物質進化における彗星の関与を強く示唆する 物質科学的証拠を隕石試料中に見出している[14]. そしてリュウグウにおいても同様の形成・進化モデル が適用可能であり、それを示す物質科学的痕跡を 帰還試料に探りたいと考えている. そのため、多様 な解析手法のなかから最適な手法を組み合わせる CASTEM2をさらに拡張し、LC超高質量分解能有 機質量分析計およびGC有機質量分析計をシステム に導入することによって、多くの有機物質を含むと推 定されるリュウグウからの帰還試料に対応できる解 析体制の整備を行った. これらの有機物質解析シス テムに加え、電子顕微鏡や二次イオン質量分析計, 安定同位体質量分析計,希ガス質量分析計を中心と したシーケンシャルな分析ルーチンの開発、評価に 精力的に進めている。また、Phase2キュレーション 実施向けた人的体制整備にも取り組む.

3.3 Phase2高知の取り組み

Phase2高知は、JAMSTEC高知コア研究所を 中核として複数の研究機関(国立極地研究所、分子 科学研究所UVSOR,高輝度光科学研究センター (SPring-8),首都大学東京、大阪大学、あいちシ ンクロトロン光センター、マリン・ワーク・ジャパン) と連携し、小惑星リュウグウ試料分析の実施体制を 整えている.彼らは、地球由来の汚染を極力排した 国内外研究機関間の試料輸送手段の検討、複数の 分析機器間での試料搬送法の確立、そして汚染源 となる地球物質の物質化学的データの取集から始ま り、リュウグウ試料の分析を見据え、連携研究機関 が持つ分析機器・技術の先鋭化にチームとして取り 組んできた [15-18].

リュウグウ試料に含まれる有機物と含水鉱物は. 微小・微細な組織として複雑に共存する可能性が高 い. そこで、Phase2高知では、リュウグウ試料の 分析に対して以下の取り組みを実施する.(1)放射 光分析を中心とした非破壊分析から質量分析などの 破壊分析へとシームレスにつなげた分析システム(二 次元・三次元の高解像度組織観察、分子構造・化学 種同定, 軽元素同位体比, 結晶構造, 主要·微量元 素組成など)を開発し、試料の物質科学的特徴を総 合的に取得する.(2)得られた分析結果・手法は. 初期分析チームへフィードバックするとともに、国際 AOやキュレーション作業に資するベンチマークとす る.(3)国立極地研究所が保有する多様な地球外 物質(隕石、微隕石)の分析データを利活用し、リュ ウグウ試料の太陽系物質としての普遍性と特殊性を 探求する.

3.4 JAXAキュレーションにおける詳細分析

相模原のキュレーション施設内で行う詳細分析に ついて,第14回キュレーション専門委員会で提案が あり,承認されている.

キュレーションで実施する初期記載は原則として 非破壊・非汚染としているため、実施できる測定は 光学観察, 分光観測と秤量測定に限られている. は やぶさ初号機ではサンプルカタログ作成に当たり, SEM/EDS測定を行い、試料の鉱物種データを取 得しているが、「はやぶさ2」 試料には有機物が多く 含まれていることが想定されており、SEM測定にお いて電子ビームによる試料ダメージが懸念されるこ とから、初期記載では実施されないため、一部の試 料について、次の目的のためにキュレーションにて早 い段階で試料ダメージを許容する詳細分析の実施 が認められている、その目的とは、その時の資料に よれば、「(1)持ち帰った試料が小惑星リュウグウ起 源の試料なのかどうかを明確にする.(2)リュウグ ウ試料がどのタイプの惑星物質と近いかを明らかに する.(3)リュウグウ試料に対して、汚染物質がどの 程度含まれるかを明らかにする.」の3点である. 上 記の目的を達成する為に、原則として地球外物質研 究グループの装置を用いて行う予定である.

3.5 海外機関への試料分配

このほか、初期記載後の試料分配先としては、 JAXA・NASA間で結ばれたMOUに基づき、試料 帰還後1年以内にNASAに10%の試料を分配する ことが決まっている。またMOUには分配する試料 はrepresentativeでunprocessedであることと 明記されており、「はやぶさ2」の初期記載でSEM/ EDSを実施しない理由にもなっている。また、帰還 後1年半後には国際公募研究(国際AO)を開始する ことも記載されており、そのためのカタログ作りも前 述の機関への試料分配後に継続して行う必要もあ る。さらに高次キュレーションの海外枠として、一部 の試料を海外チームに、国際公募研究の開始前に 分配することもかねてから提案されており、その分配 のタイミングと分配先についての検討が現在も継続 中である。

以上,初期記載から国際公募研究までの試料分配 のタイミングについての現時点での案を図2に示す.

4.「はやぶさ2」チームがおこなう リュウグウ試料初期分析

初期分析の役割は,(1)リュウグウ表面試料がどう いう物質であるかを明らかにし,(2)「はやぶさ2」計 画が掲げるサイエンス目標をリターンサンプル分析 から解明することに挑み,(3)その後の国際分析(国 際AO)に対し,リュウグウ試料の科学的ポテンシャ ルを示すことである.

「はやぶさ2」計画が掲げてきたサイエンス目標は, 1) 微惑星から小惑星に至るまでの熱変成とそれに 伴う物質進化の紐解き,2) 衝突破壊・合体のプロセ スを含めた小天体物理進化の謎解き,3) 小惑星で の鉱物・水・有機物相互作用による有機物複雑進化 過程の探索,4) 原始太陽系円盤内での高温物質か ら揮発性物質までの物質混合・循環の解明である。 初期分析では、これらの4つの目標の下に、銀河・分 子雲,初期太陽系円盤、微惑星、メインベルト小惑 星、近地球型小惑星といった進化ステージごとの物 質進化を追うことを目標とする[6,19].「はやぶさ2」 がリュウグウで得たkm-mmスケールでの観測情報 を,mm-原子スケールの分析情報と結びつけ、観測



Principle flow for HYB2 returned samples

図2:「はやぶさ2」帰還試料の試料分配予定. 試料の分配比率については最終的にはHayabusa2 Sample Allocation Committee(HSAC) で決定される予定である.

データを解釈する物質科学的証拠を提供することも 重要な役割として当然含まれる.(1),(2)で十分な成 果が得られれば,自ずと(3)の役割を果たすことがで きるものと考えている.

持ち帰られた試料が(地球起源ではなく)リュウグ ウ起源であることを鉱物種,組織,同位体などの分 析から結論づけた上で,これまでのリュウグウでの 観測結果 [e.g., 1-5] をもとにして,以下のような科 学目標に取り組む.

4.1 リュウグウ試料とはなにか

これまでの地上の隕石や惑星間塵コレクションに 見られる化学的,岩石鉱物学的多様性の中に,リュ ウグウ試料を位置づけることである.イトカワ粒子 に対しても,初期分析でその作業がおこなわれた [20-22].着陸機MASCOTによるリュウグウ表面 の詳細観察では,コンドライトに見られるようなmm サイズのコンドリュール,CAI様の構造が確認され た一方で[4],熱放射計での分析では,数cmサイズ の表面岩石の熱伝導度が地上の隕石より小さいこと が明らかとなった[5].これはリュウグウ表面岩石が 隕石より空隙率が高いことを示唆し,リュウグウの 岩石がこれまで人類が手にした地球外物質とは異な る可能性が高いことを意味する(空隙率が高く脆い 岩石であれば、大気圏突入時に破壊され、地上に隕 石として落ちてこない可能性がある).リュウグウ試 料とはなにか、まずはこの点を明らかにする.

4.2 太陽系の初期化学条件

太陽系始原物質には、太陽系形成以前に進化末 期の恒星周囲で形成された微粒子(太陽系とは極端 に異なる同位体組成をもち、プレソーラー粒子とよ ばれる)が一部含まれる。始原隕石に比べ、宇宙塵 により多くのプレソーラー粒子が含まれていること が知られている. リモートセンシング観測が示すリュ ウグウは含水鉱物起源のOH振動が表面全域に見 られるものの、その存在度は含水鉱物を含む炭素質 コンドライトより少ないものであった [3]. その原因 は加熱による脱水であったかもしれないし、そもそ も含水鉱物形成が進んでいないのかもしれない [2, 3]. リュウグウが加熱による脱水を経験した天体で はなく, 鉱物と水の反応が限定的で, 彗星的天体で あった場合には、 リュウグウ試料にプレソーラー粒 子が高濃度で含まれている可能性がある. 分子雲や 初期太陽系円盤外縁部に起源をもつと考えられる重 水素や15Nに富んだ有機物についても同様の期待が あり,超炭素質宇宙塵のように有機物に富む場合に は,太陽系初期の低温起源有機物も多く含まれる可 能性がある.

4.3 初期太陽系物質進化

コンドライトは,全岩化学組成,鉄の酸化還元状 態,酸素同位体などの違いで化学的に分類される. 一部の隕石には化学グループの異なる岩片が入って いることが知られているが,小惑星規模で化学的多 様性があるかどうかはわかっていない.「はやぶさ2」 は表面二地点への着陸に成功し,試料回収オペレー ションをおこなった.二地点からの回収試料の化学 的・岩石学的・鉱物学的特徴から,小惑星の化学的 多様性の有無を明らかにする.

また,コンドライトには,初期太陽系円盤で高温 ガスの凝縮や,固体物質の高温溶融でつくられた難 揮発性包有物(CAI)やコンドリュールが含まれる. それらの岩石学・鉱物学的観察,元素・同位体分析 を組み合わせ,形成条件を制約するとともに,放射 性同位体の壊変系を利用して形成年代を決定する. リュウグウ試料に含まれる初期太陽系円盤物質の形 成年代は,リュウグウ母天体の形成年代の制約とな る.

4.4 リュウグウ母天体での熱変成・水質変成

形成直後のリュウグウ母天体(微惑星)では、²⁶A1 などの短寿命放射性核種の壊変などで天体の加熱 が起こりうる.母天体にH₂O氷が含まれていた場合 には、氷が溶け、岩石と水との反応で含水鉱物が 形成される.リュウグウ試料の鉱物組み合わせや組 成、組織を調べることで、リュウグウ母天体で起き た熱や水による物質変成の有無や程度を解明する. また、放射壊変系を利用して、変成・変質年代を決 定する.リュウグウはラブルパイル天体であることか ら[1,2]、表面試料には母天体の様々な深さで形成 された岩石試料が混在している可能性もある.試料 ごとの変成度などから、母天体での変成プロセス、 構造や熱史について知見が得られることも期待され る.

4.5 リュウグウの形成・進化・現在の地質活動

リュウグウがどのように形成され、進化してきたか

を理解するためには、リュウグウ試料のバルク密度, 強度,熱伝導率、アルベドなどの物性情報は有用で ある.これらの情報をもとに、リュウグウがラブルパ イル天体であることの実証や「はやぶさ2」が観測し た科学データの物質科学的意義付けが可能となる. 衝突による衝撃変成や物質混合の証拠がある場合 には、衝撃の規模の推定や(可能な場合)衝撃脈の 年代測定などから、小惑星での衝突の歴史、ラブ ルパイル天体形成時期の考察をおこなうことができ る.

小惑星イトカワ表面粒子の分析で、小惑星は現在 においても、表面地質活動が続いていることが発見 された [11, 23-25]. リュウグウ試料に対しても, 宇 宙風化プロセス(太陽風イオンの撃ち込み)の有無や 宇宙風化年代を決定する.また、宇宙線生成核種 量からも粒子の表面滞在期間を求め、C型小惑星で の宇宙風化プロセスを初めて明らかにする。特に二 回目の着陸では、SCIインパクトでのイジェクタとし て、地下物質が採取されている可能性が高い。一回 目の着陸時の回収試料との岩石学・鉱物学的差異や 宇宙線生成核種量などを調べ、地下物質の同定を おこなう、地下物質と表面物質の違いからは、表面 地質プロセスの考察が可能となる。例えば、表面か ら数十cm以上の深さでは太陽光加熱の影響が少な いため、太陽光が表面での脱水を引き起こした場合 には含水鉱物量に差異が見られるかもしれない.

4.6 海や生命の材料の進化の場としての 小惑星

太陽系小天体の水や有機物は,地球の海や生命の 材料物質となった可能性がある.これまで,炭素質コ ンドライト中の水素のD/H比が地球の海のD/H比 と似ていることから,炭素質コンドライトが地球に水 をもたらしたという議論がおこなわれてきた.炭素質 コンドライトはC型小惑星との関連が指摘されてきた が,リュウグウ試料のD/H比から,C型小惑星が地 球の水の起源となりうるかどうかという議論が初め て可能となる.また,アミノ酸や糖などの生体関連分 子にも注目し,生命材料物質の宇宙における最終進 化の場としての小惑星の役割を明らかにする.

4.7 分析体制

「はやぶさ2」サンプラーシステムの特徴により[6-8],初期分析で扱う試料を,mmサイズ程度の粗粒 粒子,<100µmサイズ程度の細粒粒子,コンテナ内 で採取されたガスとする.粗粒粒子はサンプルコン テナ内で着地点ごとに分けて,収納されるため,採 取地点固有の情報や不均一性の議論が可能であ る.一方で,細粒粒子はサンプルキャッチャ内で混 合の可能性があり,表面全体の平均的特徴や表面 での地質プロセスである宇宙風化の評価などに用い る.また,コンテナから回収されるガス成分は,存 在すれば,世界で初めての気体状態のリターンサン プルとなるが,試料中に含まれる揮発性有機物や表 面から遊離する太陽風希ガスなどが得られる可能性 があると考えている.

これらの試料の特徴を考慮して、分析チームには 分析対象に応じた6つのサブチームを設けている. 同位体分析・化学分析チーム(バルク元素・同位体分 析,微小部同位体分析,年代測定),粗粒粒子に対 する鉱物学・岩石学的研究チーム(非破壊三次元組 織·鉱物分析, 鉱物·組織記載, 分光特性, 粒子物 理特性),細粒粒子に対する鉱物学的,岩石学的研 究チーム(微細構造分析,宇宙風化,ならびに他チー ムへの試料準備ハブ).ガス成分分析チーム(太陽 風希ガス,太陽宇宙線希ガス,銀河宇宙線希ガス, 揮発性有機物,H2O),不溶性有機物分析チーム(化 学組成・同位体組成(バルク,局所,官能基),構造), 可溶性有機物分析チーム(分子元素組成,同位体組 成,構造,光学異性体,生体関連分子)の6つのチー ムである. それぞれのチームを率いるのは、 圦本尚 義(北大),中村智樹(東北大),野口高明(九州大), 岡崎隆司(九州大), 薮田ひかる(広島大), 奈良岡 浩(九州大)である. 各チームには海外からの研究者 も参加し、国際チームとして、分析をおこなう、また、 分析結果を統合し、 リモートセンシング観測と連携 したサイエンスを展開するための統合チームも組織 し、分析チーム全体として、リュウグウ試料の詳細 記載,「はやぶさ2」サイエンスへの物質科学からの 貢献をおこなう.

5. まとめ

探査機「はやぶさ2」はリュウグウ表面ならびに地

下浅部から採取された試料を2020年末,地球に持ち帰る.「はやぶさ2」が見たリュウグウは,典型的な 隕石試料とは異なる物質でできている可能性がある. C型小惑星とはなにか,私たちは初めて物質科 学から明らかにすることができる. 探査機による観 測データとあわせ,リュウグウおよび太陽系の起源 と進化に関する新たな制約をリターンサンプルから 存分に引き出したい.

参考文献

- [1] Watanabe, S. et al., 2019, Science 364, 268.
- [2] Sugita, S. et al., 2019, Science 364, 252.
- [3] Kitazato, K., 2019, Science 364, 272.
- [4] Jaumann, R., 2019, Nat. Astron. 3, 971.
- [5] Grott, M. et al., 2019, Nat. Astron. 3, 971.
- [6] Tachibana, S. et al., 2014, Geochem. J. 48, 571.
- [7] Okazaki, R., 2017, Space Sci. Rev. 208, 107.
- [8] Sawada, H., 2017, Space Sci. Rev. 208, 81.
- [9] 安部正真, 圦本尚義, 2018, 遊星人 27, 92.
- [10] 藤村彰夫, 2011, 静電気学会誌 35, 255.
- [11] Nakamura, E. et al., 2012, PNAS 109, E624.
- [12] Nakamura, E. et al., 2003, ISAS Report SP 16, 49.
- [13] Potiszil, C. et al. (under review), Astrobiology.
- [14] Nakamura, E. et al., 2019, Proc. Japan Acad. Ser. B 95, 165.
- [15] 伊藤元雄, 2017, ぶんせき9, 403.
- [16] Ohigashi, T. et al., (in revision), Review of Scientific Instruments.
- [17] Shirai, N. et al., (in revision), Meteorites & Planetary Science.
- [18] Uesugi, M. et al., (in revision), Review of Scientific Instruments.
- [19] 橘省吾, 2013, 遊星人 22, 261.
- [20] Yurimoto, H. et al., 2011, Science 333, 1116.
- [21] Nakamura, T. et al., 2011, Science 333, 1113.
- [22] Ebihara, M. et al., 2011, Science 333, 1119.
- [23] Noguchi, T. et al., 2011, Science 333, 1121.
- [24] Tsuchiyama, A. et al., 2011, Science 333, 1125.
- [25] Nagao, K. et al., 2011, Science 333, 1128.

遊星人の海外研究記 その2 ~日米の大同 & 小異~

門屋 辰太郎¹

1. はじめに

学位取得後まもなく渡米をし,おおよそ2年半の 間,アメリカ・ワシントン大学シアトル校(UW)で研 究を行ってきました(図1).学生時代に3ヶ月間,ペ ンシルバニア州立大学(Penn.State)で研究をした ことも合わせると,それなりにまとまった期間を英語 圏で生活してきたことになります.では,あなたは海 外で生活をしたかったのですか?と問われると,目の 前のことを追いかけるうちに海外に出てしまったとい うばかりで,特に海外生活を強く志す意志も忌諱も なかったのが正直なところです.

このような意識で海外生活を始めてしまった,非 常に狭い範囲の体験記ですが,一つのケーススタ ディとして読んでいただければ幸いです.



図1: ワシントン大学. 左手前の建物に地球・宇宙科学専攻が入居 しています.

1.Department of Earth and Space Sciences/ crosscampus Astrobiology Program, University of Washington skadoya@uw.edu

2. シアトルで生活を始めるまで

私は、学部の卒業研究から博士課程まで東京大 の田近先生の元で指導を受けました。田近先生のお 人柄や研究室メンバーの雰囲気、何よりここでの研 究テーマが自分に合っていたこともあり、修士や博 士課程への進学段階では特に転学・留学をすること は考えていませんでした。

大学院に進学する前の海外経験は、片手で余るく らいの観光旅行と学部時代に参加した中国での野 外調査実習、そして高校のプログラムとして参加し たオーストラリアでの2週間のホームステイ語学実習 でした.加えて、大学院進学後に4度の国際学会参 加.取り立てて多くも少なくもない経験だと思いま す.ただし、英語漬けの2週間をオーストラリアで経 験したことが、英語で生活することに対する心理的 なハードルが下がる最初の転機でした.

2つ目の転機は、ペンシルバニア州立大学 (Penn. State)に3ヶ月間滞在し、研究をしたことでした.高 校の同級生が近くにいて、また滞在先から日々の活 動までお膳立てされていたホームステイの時と違い、 ビザの取得から住居・ライフラインの契約まで、単身 で初めて経験する海外生活でした.ただ、3ヶ月とい う比較的短い期間だったこともあり、ひとまず研究 に没頭していたらホームシックを感じることもなく、 あっという間に滞在期間が終わってしまったという のが、この時の正直な感想です.

このように2週間・3ヶ月とステップを踏んで海外 滞在を経験したことで,海外生活に対する心理的な ハードルが徐々に下がっていたことが,その後ふらっ と海外に出てしまう、大きな要因だったと考えていま す.

3. いざシアトルへ

2017年,博士課程を修了し,応募していた複数の 公募の中の一つ,そして唯一採用されたのがUWの Catling教授のもとでのResearch Associateでし た(助教という訳が出てきますが,要はポスドク研究 員).唯一,採用された公募でしたし,海外での生活 に対してハードルがなかったこともあり,ここにいか ないという選択肢はありませんでした.

当時のメールから時系列を振り返ると、2月21日に 応募書類を送付、3月15日に書類の1次選考を通過 したと連絡が届き、5月17日に書類の2次選考通過 の連絡とオンラインでの面接日程の調整、実際の面 接は連合大会直後の5月29日でした。

面接は、これまでの研究経過や私自身の進路の 希望,採用時のプロジェクトについて計1時間ほど話 し、1週間程度で合否の連絡を送るという説明を受 けて終了.しかし、ここから2週間近く音沙汰のない 状況が続きます.6月12日にしびれを切らして、駄目 元で確認のメールを送ったところ、折り返しのメール で採用通知を受けたのが翌13日.上位候補が辞退 した上での採用だったのだろうと思うのですが、諦 めずにメールを送ってみて良かったです.

アメリカに留学する方の多くが取得するのがJ-1ビ ザ (交流訪問者ビザ)です.J-1ビザ取得にはDS-2019という,受け入れ機関発行の書類が必要で、こ のDS-2019がUWから届いたのが,採用通知から 1ヶ月がたった7月10日ごろ.同じくビザ取得に必要 な、アメリカ大使館での面接を受けたのが8月3日. アメリカ大使館に預けたパスポートが、ビザ付きで 返ってきたのが8月10日ごろ.そして、シアトルに到 着したのが8月15日でした.応募をしてから半年、採 用通知を受けてからも2ヶ月と、かなり慌ただしくバ タバタと渡航準備・手続きをしたことを覚えています.

このように、UWへの着任時は2ヶ月で渡航手続 きをしたのですが、これはかなり短い方のようです. 例えば、Penn. State滞在時にもJ-1ビザを取得しま したが、この時は、渡米が決まってからDS-2019が 発行されるまでに約2ヶ月、大使館での面接までに さらに約1ヶ月,渡米は面接からさらに約1ヶ月後と, 手続きを開始してから実際の渡米まで4ヶ月あまりを 費やしました.こうした手続きの進行速度は,受け入 れ機関のやる気と大使館での面接の予約状況に大 きく左右されるため,なかなかスケジュールが読め ないなという印象です.

4. 研究のこと

いよいよシアトルでの研究生活が始まりました. が、研究に関しては日本にいた時と全く変化はない というのが、2年余りを過ぎた現在での全体的な感 想です、"海外研究記"という割には、海外ならでは の研究の苦労が特にないというのが、本稿を書くに あたっての一番大きな苦労であるくらいです. 私自身 は、院時代から現在までシミュレーションを用いた 研究を行なっているため、日々大学に通い、論文を 読んで、モデルを作り、コードに落として、計算を走 らせ、結果を図示・解釈していく、というのが研究の 一連の流れです. この大きな流れは、日本でもシアト ルでも全く変わっていません.

東大の時との大きな違いといえば、セミナーの形 式です.週2でセミナーに参加しているのですが、こ ちらでのセミナーは、学内の参加者が自分の研究を 発表・議論するというものではなく、外部から講演 者を招き、その研究発表を聞くというスタイルが主で す.ただ、こうしたセミナーの形式に関しては、日本 国内・国外の差というよりも大学間の差の方が大き く、例えばPenn.Stateの時には、研究室ごとにセ ミナーを行い、そこで各自の研究の進捗を発表・議 論をするという、私が日本で経験していたものと近い スタイルで行っていました。

UWでのセミナーに関して一つありがたいのが,希 望者には外部の講演者と1対1で議論をする時間が 設けられていることです.毎回希望者が多く,またこ の予約は先着順のため、うかうかしていると機会を 取り逃がすこともままあるのですが、それでも今まで 論文でしか名前を見たことがなかったような方と話 し、疑問をぶつけたり、あるいは自分の研究を紹介 したりできる、非常に貴重な機会だと思っています.

セミナーに関して一つ衝撃的だったのが、論 文購読会です. 私の参加する, Cross-Campus Astrobiology programでは隔週で論文購読会が あるのですが、学生とポスドクだけで開かれるこの 会の開催場所が大学近くのパブ.毎回、お酒を飲み ながら論文について議論をしており、かつその費用 は大学から援助されています.お酒を飲みながらで もきちんと議論をするだろうという、大学から学生へ の信頼と、お酒を飲みつつ論文について楽しく議論 をしようという考え方に、驚きました.

論文に関していえば、学生さんの論文を書くこと へのハードルの低さにも驚いています.実験をして結 果が出たら、レポートを書く感覚で文章にまとめると いうような、ある種の気軽さで論文執筆を始めてい る印象です.翻って私は、かなり気合いを入れない と英文が書けないため、どうしても筆が遅くなってし まいます.こうした論文を書く気楽さは、そもそも英 語が母語であるということに加え、文章を書くトレー ニングをきちんと受けていることが原因のように思い ます.例えば、私の所属する環境学専攻にはテクニ カルライティングの授業が3つあり、ここでは論文や 学会発表、一般向け科学記事やプロポーザルの書 き方について学んでいるそうです.英語に慣れてい て、執筆技術もあれば、当然、論文を書くことへの ハードルも下がりますよね.

5. 海外での生活のこと

滞在先の家は、ビザの手続きに目処が立った段階 で探しました. Penn. State滞在時も現在も、大学 が提供しているサービス("大学名 + housing"で 検索するとなんらかの情報が引っかかるはず;残念 ながらUWでは大学運営の仲介サービスは最近無く なったようですが¹)を利用し、物件の契約を行いま した.

Penn. State滞在時は集合住宅の半地下のワン ルーム (studioと呼ばれます)を借りました. ただ し,家具なし物件のため,家具のレンタル・サービス を利用せねばならなかったこと,水道・電気・ネット ワークの契約を自分でしなければならなかったこと, そして,アメリカは基本的に年単位の賃貸契約であ るため,3カ月だけの賃貸では違約金を支払わなけ ればならなかったことから,費用がかなりかさんでし まいました.今思えば,3ヶ月であればホテルで生活 したほうがよかったかなとも思います.

一方,シアトルでは一軒家のstudio部分を間借り しています.地上階には大家さんが生活しておられ るものの基本的に行き来はなく,また家具付きで光 熱費等込みの賃貸料であるため,Penn.State時に 比べ費用が安く抑えられました.

どちらの契約も日本にいる間にメールベースで行 なったため、内見はしませんでした.一方、最初の1 週間はホテル滞在でその間に家を探したという、他 の方の経験も聞いたことがあります.結果的に、どち らの住居にも満足していますが、見切り発車の契約 は大きな賭けでしたので、内見をしない契約は当然 ながらお勧めできません.



図2:旧日本人街にある日本語で書かれた案内標識.この地区に、 日系スーパー、そしてマリナーズの本拠地Tモバイルパーク (旧セーフコ・フィールド)があります。

生活に関して大きく変わったのは、自炊をきちんと するようになったことでしょうか、日本にいるときは、 外食やコンビニで買ったお弁当が主だったのですが、 シアトルでは外食をするとどうしても高く、また市販 の惣菜にバリエーションもあまりないため、どうして も自炊をせねばならなくなっています、幸い、シアト ルには日本人が多いこともあって、日系のスーパーが 市内にあり、そこではお米に醤油、味噌にみりんま で購入することができます(図2).このため、やる気 さえあれば、食材に関しては特に問題がありません.

アメリカというと車社会のイメージが私の中にはあ りました.しかし、シアトル市内のみであれば、バス や地下鉄等の公共交通機関の利用のみで特に不便 なく生活することができます.実際、ワシントン州発 行の免許を所持していますが、シアトル市内で運転 をしたことはこれまでありません.運転免許の取得 は、ワシントン州と日本との相互協定により、日本で の運転免許を所持していれば試験が免除されてい ます².同様の協定は、他の州とも結ばれているよう です.

日常生活で驚いたことといえば、犬に関する文化 があります、大型犬から小型犬まで、しっかりとト レーニングされた犬を連れて歩いている人を街中で 見かけるのですが、彼らはバスにも乗ってきます、時 に、座席に大人しく座っている犬の姿は、日本では なかなか見られないものかもしれません、また、学 内でもよく犬が闊歩しています、私のオフィスがある フロアには、少なくとも2頭の犬がおり、うち1頭は 定期的にフロアをパトロールし、各オフィスを訪問し てはおやつを要求してきます(図3).私自身は犬が 好きなので大丈夫なのですが、犬が苦手な方にとっ てはぎょっとする状況かもしれません.



図3: オフィスをパトロールし,おやつを要求するロッキー先輩. 滴 るよだれの量がすごい.

アメリカ生活で一番大きな苦労は, 言葉の問題を 除けば, 水回りに関することです. トイレは, 温水洗 浄便座なんてものはありませんし, また気をつけて いないとよく詰まります. また, 前述した通り, 半地 下の部屋を借りているため, 大雨が降ると雨水が浸 入してくるということもありました.

お風呂に関しては、シャワーからお湯を出そうと 思っても水しか出ないということがよくあります.お そらく、湯水を貯めておく水槽が小さいのだろうと思 うのですが、タイミングが悪ければ、例えば大家さん が使った直後にシャワーを浴びると、シャワーのお 湯が突然冷水になるなんてことさえあります.当然、 浴槽にお湯を貯めることはできず、唯一この点に関 しては日本に帰りたいと思うばかりです.

6. 英語を使った生活のこと

3年弱の間アメリカで生活をしていますが、英語で の生活にはいまだに苦労を感じています. というより も、むしろ周りに苦労を強いているといった方が正 確かもしれません.

仕事の面に関して言えば、英文を読んだり書いた りする経験がある分、比較的マシな状況です。そも そも人と話をする機会がそれほど多くないという状 況もあるのですが、英語での議論をする際には、あ る程度の原稿や想定問答、また要点をまとめた文書 資料を事前に用意できるため、なんとかなっていま す。ただしこれは、特に研究に関しては何か聞くべき 中身があるはずだというスタンスでこちらの発言を 聞いてもらえることと、そもそも1対1であれば、こ ちらのペースに合わせて相手が話してくれていると いうことが大きいかもしれません。何はともあれ事前 準備の必要性を感じる毎日です。

日常生活に関しても、日々の買い物程度であれば、 応対のフォーマットが決まっているため、あまり苦労 は感じません。しかし、グループランチや懇親会等、 グループでの雑談には、会話についていくのに精一 杯で、その輪に加わることはほとんどできません。ま た、こちらではバスで隣り合わせになった人やタク シーの運転手から話しかけられることもよくあるの ですが、事前準備が当然出来ない、このような状況 には、毎回あたふたしてしまいます。



図4: 大学から臨むレーニア山. コーヒーの商品名にも使われている山です. タコマ富士とも呼ばれる, 綺麗な山影ですが, 冬場などは特に曇り の日が多いため, なかなかその姿を見られません. 逆に, レーニア山を見ることができると, 幸せな気持ちになります.

英語に関して一番の懸念は,教育に関するもので す.今後のキャリアを考えると教育経験も積んでいく ことが必要で,例えば同僚のポスドクは実際に授業 を行ってその経験を積んでいます.一方,私の英語 ではまだまだ授業をするレベルに程遠く,この点で 大きな遅れを取っていると感じています.

いずれにせよ、きちんと英語で生活をしていくため には、ただ英語圏で生活をするだけでなく、意識的 に様々な機会で英語を使うことをしていく必要があ ります、この点、まだまだ試行錯誤を繰り返している ような状況で、今後も精進が必要だなと考えていま す.

7. さいごに

たまの日本帰国時,特に帰国初日に会った方に は、"そんなに話す人間だったっけ"と驚かれることが よくあります.日本とは異なる文化圏で生活をしてい ることで知らず知らずのうちにストレスがたまり,日 本語で会話できる機会にはそれが一気に噴出してい るようです.

しかし,ストレスを感じているだけかと言われる と当然そんなことはありません.今まで暮らしてきた 文化や気候の違う環境で生活することは新鮮で(図 4),それ自体を楽しく感じています.また,研究に関 して言えば,日本にいようと海外にいようと,その中 身にも苦労にも達成感にも変わりはありません.シア トルにいても日本にいた時と同じように,一つ一つ 課題に取り組み,これによって充実した生活を送る ことができています.今後この経験がどう役に立っ ていくのかはさておき,少なくともこの数年間の経験 は非常に楽しいものでした.

日本を離れて以来,残念ながら、なかなか秋の惑 星科学会に参加することができていません.ただ, 連合大会内には参加し、そこでみなさまにお目にか かれることを楽しみにしております.これからどこで 生活していくのかさっぱりわかりませんが、今後とも よろしくお願いいたします.

脚 注

- UWの例: https://www.ielp.uw.edu/life-at-theuw/housing/(2020/1/15閲覧)
- 運転免試験相互免除の例: https://www.seattle. us.emb-japan.go.jp/itpr_ja/00_000234.html (2020/1/15閲覧)

惑星ラボからこんにちは!その2 公立大学法人会津大学・ 宇宙情報科学研究センター(ARC-Space)

本田親寿

宇宙情報科学研究センターに ついて

我々はもともと情報システム学部門の「宇宙惑星 情報学講座」「パターン処理学講座」と「会津大学先 端情報科学研究センター宇宙情報科学クラスター」 を兼任していました。2019年度から文部科学省の月 惑星探査アーカイブサイエンス拠点として認定され、 宇宙情報科学クラスターから「宇宙情報科学研究セ ンター|として発展的に移行・設置されました。本セン ターは惑星科学と情報科学を融合した宇宙情報科 学分野で宇宙航空研究開発機構(IAXA)やICT企 業と連携して、過去に実施された探査・観測データ を活用した公募型共同研究を実施するなどしてデー タの付加価値向上やソフトウェア開発を行い. その 成果を学術コミュニティに提供することを目的として います. 宇宙航空研究開発機構(JAXA)との連携 を通じて研究・開発をすすめることが多いです. こう したアーカイブサイエンス拠点としての研究・開発以 外にも、教員が参画している幾つかの月・惑星探査 プロジェクトに対してソフトウェアを提供したり、プ ロジェクトへの参加有無に関係なく惑星科学的な研 究も行っています.

この本センターの規模はセンター併任教員6名(出 村,平田,小川,北里,本田,奥平)であるのに対し て,大学院生が最近の実績だと1学年3-9名程度(学 部生は2年生後半から配属となり1学年当り20名以 上) 配属されています. 本センターの大学院生はほと んど会津大学からの進学ですが, センター併任教員 が受け入れた他大学もしくは高専からの学生は少な いですが実績あります.

2. 研究紹介

本センターが取り組んでいる公募型共同研究など についてはwebページをご覧下さい.大学院生が取 り組んでいる研究・開発はセンターが取り組んでい る共同研究と密接に関係していることもありますが, センター紹介のwebページには載っていない研究・ 開発もあります.ここでは学生が取り組んでいる研 究内容を中心に紹介しますが,中でもセンターの活 動内容に密接に関係したソフトウェア・GISの開発系 研究テーマを選ぶ大学院生が多いです.それ以外に も月・惑星探査データの解析や月・惑星・小天体に関 するモデル数値計算,地球観測データの解析を選 ぶ大学院生もいます.情報学系の大学なので,最近 は月・惑星探査データを入力とした機械学習を研究 テーマに選ぶ学生も増えました.

ソフトウェア・GISの開発系研究テーマとして 取り組んでいるソフトウェアや地理情報システム (GIS),データベースは大別して五つあります. HARMONICS, AiGIS, HEATは小天体探査に 役立てる目的で、月光とtanpopoDBはそれぞれ既 にアーカイブされている月探査データやISSミッショ ンデータの検索・閲覧の利便性の向上を目的として 研究・開発に取り組んでいます.HEAT(小惑星探 査機はやぶさ2搭載の中間赤外カメラTIRのデー

^{1.}公立大学法人会津大学,宇宙情報科学研究センター

 $^{(\}texttt{ARC-Space})$

chonda@u-aizu.ac.jp



図1: グループ学生の全体セミナーの様子.

タ校正と探査データの解析を行うためのソフトウェ アです)を除くこれらのソフトウェアとGISはARC-Spaceのwebページに詳細に紹介されています.

惑星科学的な研究として月・惑星探査データの解 析やモデル数値計算にも取り組んでいます. 最近は 月周回衛星かぐやの地形カメラ(TC)データを用い た地形解析やマルチ分光カメラ(MI)データを用い た鉱物吸収に関する研究,小惑星イトカワ,リュウ グウやCeresなどの小天体探査データを用いた地形 や鉱物・水の吸収に関する研究に取り組んでいます. その他に,小天体の軌道計算から小天体表面地形 や岩塊の様子を考察する研究,クレーターの空間分 布を定量化する手法の研究,地球観測衛星データを 用いたInSAR解析と火山の継続的なモニタリング に関する研究・開発に取り組んでいます.

近年,情報学系の大学で流行している研究テーマの一つが機械学習を応用した研究です.我々のグループだと米国LROの高解像度画像を入力とした 月面岩塊の自動抽出,かぐや画像を入力とした月面 Swirlや光条クレーターの自動抽出や月面地質自動 分類,たんぽぽ画像を入力とした研究対象となる微 粒子トラック痕の自動分類に関する研究テーマに取 り組んでいます.

3. 教育と研究テーマ

大学院生の所属は会津大学大学院コンピュータ 理工学研究科コンピュータ・情報システム学専攻とな ります。この専攻の学生のうち約半分が他大学から を含む留学生です 従って大学院の授業は基本的 に英語で行われます. グループの研究内容に直接関 連する科目は五つあり、月・惑星探査データの構造 や太陽系天体の軌道計算または探査機の軌道計算 や観測機器の視野を計算することができるNASA/ NAIF開発のSPICE Toolkitに関する授業。月·惑 星探査データを実際に解析する実践的な授業,外 部の連携研究機関から講師を招いて行われる最先 端の技術に関して学ぶ授業など、月・惑星探査にま つわるさまざまな科目が用意されています. この他に 情報学系の大学院で行われる授業も履修しますが、 グループの学生に聞いてみたところデータ構造とア ルゴリズム、機械学習、ビッグデータサイエンスなど の科目を履修しているようです.

我々のグループから博士課程に進んだ学生はまだ



図2: 大学院生の研究の様子. 自分の研究だけでなく, 授業の課題も計算機と向き合う時間が長くなります.

いません.大学全体としても博士課程に進む学生は 1学年20名程度でその多くが海外からの留学生で す.また情報学系大学であることから,博士課程に おける研究テーマとしては惑星科学分野だけではな く情報学分野での寄与もしっかり考慮した研究テー マ設定が必要となります.ただし修士課程修了であ ればその限りではないと私は思います.過去に卒業 した学生の修士論文も情報学分野への寄与は大小 様々でした.

大学院の研究活動で最初のハイライトは最初の 夏に訪れます.修士課程1年生は研究テーマと研究 計画を夏までに固めて、プレゼンテーションを通し てグループ外教員による審査を受けます.先輩学生 の研究・開発を引き継いで自分の大学院における研 究テーマに設定する学生が多いですので研究紹介 の欄をご覧下さい.研究テーマの内容によってはグ ループ外教員や学外の連携研究機関や企業と協働 で進めることもあります.また、国際学会での発表 が大学院の単位取得として認められているので(認 定は最大1回)、研究をすすめる上でのマイルストー ンに国際学会発表を設定して研究計画を立ててい る学生が多いです.また国際学会以外に、自分の研 究テーマから少し離れて宇宙関連を含むさまざまな 開発系ハッカソンに挑む学生もいます. ICT企業の みならず一般企業で働く方々と短期間で行うハッカ ソンへの参加経験が学生の研究活動にプラスに働く ことが多く,またハッカソン参加後にそのときの開発 経験を自分の研究へフィードバックできる学生もい るので,そのような活動も我々は応援しています.

「天体の衝突物理の解明(XV) ~小惑星の表層進化~」開催報告

末次 竜¹, 岡本 尚也², 鎌田 俊一³, 嶌生 有理², 杉浦 圭祐⁴, 保井 みなみ⁵

1. はじめに

2019年11月27日(水)~29日(金)の三日間,千葉 工業大学スカイツリータウンキャンパスにおいて「天 体の衝突物理の解明 (XV) ~小惑星の表層進化 ~」を開催した(図1).研究会の目的は天体の衝突 現象に関係する物理の理解であり,2005年に初開 催されて以降,会場の変更等はあったが毎年継続的 に開催され,今回で第15回を迎える.

この研究会では毎年,議論の軸となるテーマを設 定しており,今年度のテーマは「小惑星の表層進化」 である.毎年4,5月頃に世話人らでテーマについて 相談し決めているが,今年度は相談時期に探査機 「はやぶさ2」による小惑星リュウグウ表面への宇宙 衝突実験の成功もあり,比較的早い段階で今回の テーマとなった.当然,探査機「はやぶさ2」の結果も 含めた議論が望まれるため,探査に大きく関わって おられる荒川政彦氏(神戸大学),杉田精司氏(東京 大学),坂谷尚哉氏(宇宙航空研究開発機構)の三名 にご講演をお引き受けいただいた.こうした内容で 一般講演を募集した結果,首都圏開催ということも あり講演数が例年よりも増加し,最終的には口頭講 演が28件(招待講演含む),ポスター講演が15件,参 加者総数は55名となった.

以下では研究会の内容をごく簡単に紹介する(文

1.產業医科大学
 2.宇宙航空研究開発機構
 3.北海道大学
 4.東京工業大学
 5.神戸大学
 ryos@med.uoeh-u.ac.jp

中敬称略). 各講演のスライドや要旨は研究会のウェ ブページにアップロードしているので, 詳細はそち らを参考にしていただけたら幸いである(http:// www.impact-res.org/impact19/index.html). なお毎年,研究会の内容は初回[1]を除いて参加者 に報告をお願いしてきたが,私(末次)自身はこれま で報告記事を執筆していなかったため,今回は15年 ぶりに開催報告という形をとらせていただくことにした.

2. プログラム

<<口頭講演>>

■11月27日(水)

鈴木大輝(アストロバイオロジーセンター)
「彗星衝突による有機分子運搬の可否」
岩佐海詩(神戸大学)
「衝突掘削による氷小天体カラーへの影響」
豊田優佳里(神戸大学)
「土星リングを模擬した多孔質氷球の反発に関する 実験的研究」
杉村瞭(神戸大学)
「物質強度を変化させた模擬小惑星標的を用いた高 速度クレーター形成実験〜クレータースケール則の 導出,エジェクタ放出過程の解析〜」
樋口誠(北海道大学)
「冥王星の衝突クレーターの深さ-直径比とその理論 的解釈」
中村昭子(神戸大学)

「衝突弾丸物質の残存」 保井みなみ(神戸大学) 「石膏及びガラス球の衝突破壊強度に対する斜め衝 突の影響| 中村誠人(神戸大学) 「氷微惑星を模擬した氷球の斜め衝突実験| ■11月28日(木) 山本裕也(神戸大学) 「リュウグウ表層を模擬した低強度粗粒標的に対す るクレーター形成実験」 **杉浦圭祐**(東京工業大学) 「小惑星の高速自転変形の数値計算とリュウグウな どのコマ型の形成条件について 金丸仁明(大阪大学) 「小惑星Rvuguに働くYORP効果の数値計算:自 転状態の進化史の解明に向けて| **道上達広**(近畿大学) 「小惑星リュウグウにおけるメートルサイズのボル ダー3軸比| 荒川政彦(神戸大学)【招待講演】 「はやぶさ2-SCIとDCAM3による宇宙衝突実験」 **杉田精司**(東京大学)【招待講演】 「はやぶさ2観測データから見えてきた小惑星リュウ グウの進化史| 坂谷尚哉(宇宙科学研究所)【招待講演】 「はやぶさ2中間赤外カメラの観測結果| 和田浩二(千葉工業大学) 「SCIクレータから放出されたイジェクタ粒子のサイ ズ推定」 門野敏彦(産業医科大学) 「小惑星Ryuguでの宇宙衝突実験: 放出物のパター ンとボルダー **巽瑛理**(Instituto de Astrofísica de Canarias) 「極域観測から示唆されるリュウグウのスペクトル進 化上 ■11月29日(金) **黒澤耕介**(千葉工業大学)

「炭素質隕石シミュラントからの衝撃脱ガス」 柳澤正久(電気通信大学) 「月面衝突閃光の発光メカニズム」

阿部新助(日本大学) 「月面衝突閃光と微光流星の多波長同時観測による メテオロイドのサイズ分布決定| **布施綾太**(日本大学) 「衝突閃光の実験・観測・数値シミュレーションによ る研究| **鈴木宏二郎**(東京大学) 「塑性ガスモデル数値流体力学によるペネトレータ 貫入シミュレーション 池田晋太郎(神戸大学) 「衝突によるラブルパイル天体の自転速度変化」 **黒崎健二**(名古屋大学) 「水素大気を持つ惑星の天体衝突」 **城野信一**(名古屋大学) 「木星の形成に伴うコンドリュールの形成| 大村知美(名古屋大学) 「小規模衝突による傾斜地形緩和に関する実験的研 究丨 長足友哉(神戸大学) 「自由落下ダスト流に形成するクラスター間衝突実 験丨 <<ポスター講演>> **塩本純平***(神戸大学) 「D型小惑星模擬標的の衝突破壊実験」 **堀川和洋***(神戸大学) 「始原的隕石母天体を模擬した衝突破壊に関する実 験的研究| **長野巧***(神戸大学) 「フラッシュX線による衝突破片の速度-質量分布の 観測:乾燥粘土を用いた強度と空隙率に対する依存 性の研究」 笹井遥*(神戸大学) 「多孔質天体を模擬した雪のクレーター形成実験及

「バルジ地形に形成される衝突クレーターに関する

「クレーター形成時のエジェクタ放出過程における3

び衝突残留熱の計測|

横田優作*(神戸大学)

大川初音*(神戸大学)

中澤風音*(東京工業大学)

実験的研究」

次元粒子追跡」

47

「放出物カーテンにおけるパターン形成のメカニズム 解明に向けた多粒子衝突シミュレーション」

末次竜 (産業医科大学)

「LIGGGHTSによる衝突計算」

嶌生有理 (宇宙科学研究所)

「Ryugu クレーターの熱物性」

黒澤耕介 (千葉工業大学)

「大気中斜め衝突現象の高速シュリーレン撮像」

黒澤耕介 (千葉工業大学)

「iSALE users group in Japan 活動報告」

岡本尚也(宇宙科学研究所)

「DESTINY+ミッション搭載カメラによる小惑星 Phaethon表層の観測:機上校正方法に関する検 討」

佐藤峰南 (千葉工業大学)

「米国西部に分布する白亜紀-古第三紀境界セクションの強親鉄性元素およびオスミウム同位体組成バリ エーション」

平田直之(神戸大学)

「リュウグウクレーターの東西不対称性の起源に関 する理論的考察」

門野敏彦 (産業医科大学)

「爆発によるクレーター形成:衝突との対応」 (*はポスター2分講演者)

3. 講演概要

各講演内容を簡単に紹介するが,関係性が強い 講演については,まとめて紹介していることについて ご了承いただきたい.

3.1 11/27(水)

鈴木(大): 天体衝突で地球に持ち込まれる有機分子の生存率を数値計算で調べた.計算で得た分子が生存可能な温度領域の割合と衝突角度ごとの衝突確率から,生存率が従来よりも低くなることを示した.

岩佐:トロヤ群小惑星のカラーの二分性に対する天 体衝突の表面掘削の寄与を調べ,臨界衝突エネル ギーより小さいエネルギーで小天体の半球全体が更 新されうることを示した.

豊田: 土星リングの薄さを維持するには構成粒子同

士の非弾性衝突が重要である.衝突実験で氷球の 反発係数を調べ、ある衝突速度以上で非弾性衝突 に推移することを明らかにした.

杉村: 天体には物質強度があるが従来の掘削流の モデルは物質強度を無視している. 衝突実験の結果 をもとにモデルを改良しリュウグウ表面の物質強度 に制約を与えた.

樋口:探査機New Horizonsによる観測結果から 冥王星のクレーターの深さと直径の関係を求めた. その関係からクレーターの形状変化が起こるサイズ を調べ,リソスフィアの厚さなどを見積もった.

中村(昭):小惑星表層にある反射率が異なる物質 はインパクターの残骸である可能性が指摘されてい る.実際に衝突実験を行い,放出物にインパクター の破片が多数含まれうることを示した.

保井,中村(誠): 天体は多くの場合,角度を持って 衝突することから,衝突実験で大規模破壊に必要と されるエネルギーの衝突角度依存性を調べた.斜め 衝突の場合,衝突速度の(標的表面に対する)法線 成分を用いることで,エネルギーと破片質量が冪の 関係になることを示した.ただし冪指数は,標的の 構成物質(石膏や氷など)によって異なる.

ポスター講演:口頭講演の増加から,これまで二 日目に行っていたポスター講演を今年は初日に行っ た.毎年,ポスター講演者のなかには,学外で初め て発表する学生がいる.そうした学生と他機関の研 究者との研究交流を促すために,二年前から学生 にのみポスターの内容を紹介する2分発表の時間を ポスター講演の前に設けている.今年度は2分発表 の定着もあり,発表スライドに実験結果や数値計算 結果の動画を入れるなどの積極的な研究紹介が目 立った.その結果,ポスター講演は大変盛り上がり, 予定していた時間では足りず,講演の時間を超えて も議論が行われていた.

3.2 11/28(木)

山本: リュウグウ表層を模擬した大きさの異なる粒 子で構成された標的への衝突実験を行い, 粒子破 壊で消費されるエネルギーの効果をスケーリング則 に考慮する必要があることを示した.

杉浦: リュウグウのコマ型形状の形成に自転速度が 及ぼす影響を数値計算で調べ,高速で自転し構成



図1: 集合写真(杉村瞭氏(神戸大)提供).

粒子間の摩擦が大きい場合には, コマ型形状になり 得ることを示した.

金丸: リュウグウの観測結果(軌道・形状モデル等) と熱モデルから, YORP効果による自転速度変化を 見積もり, 10万~100万年の時間スケールで自転が 減少していることを示した.

道上: リュウグウ表面にあるメートルサイズの岩塊の 三軸比を測定した結果,それらの平均値は衝突破 壊で形成される破片の比の値とおおむね一致してお り,岩塊は衝突破壊で形成された可能性が高い.

荒川: SCI(Small Carry-on Impactor)の弾丸 はリュウグウ表面から約60°の角度で斜め衝突し直 径14.3mで中心にピットがあるクレーターを形成し た.クレーターの形状は半円形であり,これは衝突 点近くの岩塊が影響した可能性が高く,実際,分 離カメラDCAM3(Deployable CAMera in 3rd generation)で撮影されたエジェクタも岩塊に阻害 され岩塊方向へはほとんど放出されていない.また 長時間エジェクタカーテンがリュウグウ表面と接し ていることやクレーターの大きさが重力支配域のス ケーリング則とよく一致することから,リュウグウ表 面の強度は極めて小さく重力に支配されていること を明らかにした.

杉田: ONC (Optical Navigation Camera)のリュ ウグウ表層のスペクトル観測により、リュウグウはC 型小惑星のうち含水吸収の無いグループに分類され た、これはリュウグウの母天体と推測されているポ ラナ、オイラリアの特徴とも一致している、また表層 の多くの岩塊も同じスペクトルである、そのため、こ れら岩塊が母天体への天体衝突で生まれた破片と すると、母天体の内部は加熱され均一だった可能性 がある、一方、小さいクレーターが表層に少ないこと から、リュウグウ表層の更新速度は100万年以下とい う非常に短い時間スケールであることが示唆される。 **坂谷**: リュウグウ表面の熱慣性をTIR (Thermal InfraRed Imager)で全球的及び局所的に調べた が. 基本的に均一であり. その値は2001m⁻²s^{-0.5}K⁻¹ 程度であることを明らかにした. これは岩塊の性質 が低熱慣性(=高空隙)であり、値が地球上の隕石と 異なるのは地球の大気通過時の破壊により, 採取で きる隕石にバイアスがかっている可能性があること を示唆している.一方、より詳細な解析では、ホット

スポットと呼ばれる周囲よりも熱慣性がさらに低い 領域や高い熱慣性をもつ岩塊など不均質性も存在 することが示された.

和田, 門野: DCAM3で観測されたSCIによるエ ジェクタカーテンと掘削流のモデルとの比較から,エ ジェクタの主要な構成粒子サイズは1~10cmである ことを見積もった.一方,エジェクタカーテンがフィ ラメント構造になったのはエジェクタ内にある大粒子 が影響した可能性が高い.またこれらの結果から, リュウグウの地表面下の粒子サイズ分布にも制約を 与えた.

巽: リュウグウ表面のスペクトル傾斜の観測から極 域は他と比べると青く, さらに0.7µmバンドの吸収 が見られることから含水鉱物が存在し新鮮な表層 である可能性が高い.

3.3 11/29(金)

黒澤:小惑星内の揮発成分の衝突への反応の解明 はリュウグウのサンプル解析等で重要となる. C型 小惑星を模擬した標的への衝突実験を行い, H₂や CO₂などのガスが検出されたことを報告した.

柳澤, 布施, 阿部: 衝突閃光は主に月面への天体衝 突で生じる発光現象であり詳細なメカニズムは不明 である. 最近のふたご座流星群により生じた閃光の スペクトルの解析では, 3000Kの黒体放射のスペク トルとおおよそ一致した. また衝突する天体自体にも 制約を与えるためにレーダーや大型望遠鏡を用いた 観測成果についても報告した. さらに, 衝突実験と 数値計算を用いた相補的な研究にも着手しており, 衝突による閃光の発光効率の詳細が見積もられつ つあることが示された.

鈴木(宏):流体計算で粉流体の挙動を示す「圧縮 するが膨張しないモデル」を用いた衝突計算を行っ た. クレーターの底の硬化といった従来と異なる結 果が示され,より現実的な計算にむけた改良が進行 中である.

池田:小惑星の自転速度進化に対する天体衝突の 寄与を見積もるために数値計算を行い,天体衝突は 質量比の有無に関わらず基本的に自転速度を減少 させることを明らかにした.

黒崎:大気を持つ天体同士の衝突は天王星の自転 軸の傾斜からも、しばしば起こった可能性がある. 数値計算によって衝突合体にはコア同士の衝突が 重要であることを示した.

城野: 天体衝突によるコンドリュール形成モデルで は, 岩石の溶融に原始惑星系円盤内で数km/sの 衝突速度が要求されるが, 木星重力によって到達で きうることを数値計算で明らかにした.

大村:斜面上のクレーターの緩和を調べるために衝 突実験を行い,クレーター径の重心位置と傾斜角の 経験式を求めた.傾斜角が小さい時,緩和を無視し た先行研究の式に近づくことも示した.

長足:自由落下させた砂からできるクラスター同士 を衝突させた結果,衝突速度が数値計算から予測 される値より速い場合でもクラスター同士が付着成 長する可能性があることを示した.

4. まとめ

今年度は「小惑星の表層進化」というテーマで研 究会を開催し、多くの方にご参加していただき、小 惑星だけでなくダスト、コンドリュール、衛星、惑星 などを対象とした衝突現象についてご講演いただい た. 例年に比べ小惑星に関係する講演が多かったの は、今年度テーマもさることながら、やはり「はやぶ さ2」が得た小惑星リュウグウの探査結果の影響が 大きいだろう. 昨年度のテーマが「探査機はやぶさの 成果と挑戦:初号機から2号機へ」であり、講演中に 「岩塊だらけの表面に予定通りタッチダウンできるの か?」、「衝突実験を行って、クレーターやエジェクタ を観測できるのか?」という議論が行われていたこと を考えると、今年一年間の探査結果が、惑星科学に とっていかに重要で、また様々な方のご尽力で得ら れたものかと思わずにはいられない. 2020年はリュ ウグウの探査結果の更なる解析や、「はやぶさ2」が 二回のタッチダウンで採取したサンプルの回収計画 に加え、NASAの小惑星探査機オサイリス・レック スのベンヌへのタッチダウンなどもあり、小惑星につ いての知見がさらに深まるのが今から楽しみである.

5.おわりに

昨年度の懇親会や参加報告記事[2]で私や世話人 にかけられた期待(プレッシャーとも言う)に応えられ たのかは不明ですが、今回の経験をもとに来年度に むけて動き始めておりますので、ご期待下さい、特 に5年後、10年後といった将来的な衝突研究を考え ると若手研究者の参加は非常に重要となってきます ので、少しでも衝突現象にご興味があればお気軽に ご参加ください(いきなり世話人への勧誘や参加報 告書の依頼などはしませんので…).まるで世話人代 表を終えたような雰囲気をだしていますが、来年度 も引き続き私が努めますので、どうぞよろしくお願い いたします.

最後になりましたが、今年の研究会は国立天文台 の研究交流委員会から開催助成金をいただきまし た.その申請過程や旅費見積もりでは国立天文台シ ミュレーションプロジェクトの伊藤孝士氏、増子京 子氏にご尽力いただきました.心より感謝申し上げ ます.また会場は千葉工業大学より提供していただ きました.千葉工業大学の黒澤耕介氏と下山亜希子 氏には会場設営でお手数おかけいたしました.誠に ありがとうございました.

参考文献

[1] 和田浩二ほか, 2005, 遊星人 14, 202.

[2] 脇田茂, 2019, 遊星人 28, 94.

日本惑星科学会 2019年秋季講演会開催報告

河北秀世



図1:講演会会場(京都産業大学神山ホール).

2019 年秋季講演会は2019年10月7日(月)-10月 9日(水),京都産業大学上賀茂キャンパスにて開催さ れました.京都産業大学は創設者が宇宙物理学・天 文学の研究者であり,宇宙物理学,天文学の教育・ 研究に力を入れております.このような地において惑 星科学会秋季講演会を開催することを嬉しく思う次 第です.

講演会会場には同キャンパスの神山ホールを使用 いたしました. 口頭発表, 総会, 学会賞記念講演に は 1600 人収容可能な大ホールにて行いました. コ ンサートも開催可能な音響および照明設備を利用す

1.京都産業大学 kawakthd@cc.kyoto-su.ac.jp ることができて発表者のみなさまには充実した講演 ができたのではないでしょうか. ポスター発表は大 ホールに隣接した 1F ロビーにて行いました. ひどく 混雑することもなく, また閑散とすることもない十分 な広さでありました.

参加者として345名(うち事前参加者169名,当日 参加者176名)の方々が講演会に集われました。例年 通り学部生および修士1年の未発表の学生の参加費 を無料といたしました。京産大の関係教員の担当講 義にて講演会のことを宣伝して頂いたので、84名に のぼる多くの方に参加いただきました。また、会場 が京産大入り口のバス乗り場に近接していたため、 通りがかりの学生の方々がポスター発表を覗いてい きました.惑星科学のよい宣伝になったのではないかと思います.

初日の冒頭に「最優秀発表賞応募講演」(3分間の 質疑込みで一人15分間口頭講演+ポスター発表)が 6件ありました. その後「一般口頭講演」が3分間の 質疑込みで一人12分間の発表が67件行われました。 さらに、107件のポスター発表が行われ、初日夕刻 のコアタイムには終了時刻まで熱心な議論がかわさ れました. 今年も昨年の講演会にて導入された「口 頭発表+ポスター発表 |を企画し、38件の発表が行 われました. 昨年は口頭によるポスター紹介が3分 で行われましたが、聞いている側からは冗長に感じ られたので短くしてはどうかという意見がLOCで上 がったので、試みとして今年は2分間の口頭発表時 間としてみました.また、ポスター口頭発表とコアタ イムの日程を同じ初日に設定しました。このためポス ター発表のコアタイムの時間が短くなりました.事後 のアンケートによると、この形式の発表に概ね好意 的でありましたが、コアタイムを増やしたほうがいい という意見もみられました. 複数セッションへの移行 も含めて今後引き続き検討していく必要があると思 われます、この他に2日目に最優秀研究者賞受賞講 演が2件総会の後に行われました。口頭発表者が持 ち時間を守っていただけたのとスムーズに入れ替わ れたことで、ほぼプログラムどおりに進行することが できました。また、初日に「日本の惑星探査に関する 説明会:非専門家向け!」,2日目に「超小型探査機 やイプシロンロケットをいかした惑星科学の新展開 に関するパネル討論会が昼休みを利用して行われま した.

懇親会は2日目夜に京産大キャンパス内の並楽館 4FのBABY FACE PLANET'Sにて行いました. 124名(うち事前参加申し込み77名,当日申し込み 47¥名)の多くの方に参加いただきました.開宴直後 には今年のノーベル物理学賞のニュースが入り,系 外惑星の発見の業績により Michel Mayor 博士 と Didier Queloz 博士が受賞されたことが会場に 知らされると大いに盛り上がりました.終了後は多く の方々が京都の街に繰り出して引き続き交流を深め られたとの話を伺いました(そのためか3日目の午前 セッションの参加者の出足が鈍かったようです).

3日目午前には NHK Eテレのサイエンス ZERO



図2:ロ頭発表の様子.

の取材が入りました.火星の月探査計画に関連する 口頭発表2件の撮影と数名の学会会員へのインタ ビューが行われました.口頭発表の様子は講演会終 了後の11月にサイエンスZERO『日本の"お家芸"サ ンプルリターン 世界初!火星の月探査へ』の冒 頭に放映されました.

講演会LOCメンバーは河北秀世,高木征弘,竹 広真一,佐々木貴教,瀧川晶,安藤紘基,佐々木洋 平の7名で構成しました.秋季講演会のWebコンテ ンツ編集作業は学会Webページ担当の北大の吉田 辰哉さんに依頼しました.また,京産大と京大の大 学院生に会場の設営撤収と口頭発表時の会場係を お願いしました.受付事務とポスターパネルの設置 撤収等を(株)日商社に依頼しました.

他にも講演会の準備と実施に際して,多くの方の ご助力をいただきました.京都産業大学からは神山 ホールの無償の使用許可と資金援助を受けました. 京産大理学部事務室の森さまには,京産大での各 方面との折衝や会場準備,NHK取材対応など全面 的にサポートしていただきました.神山ホールスタッ フの中西さまには大ホールの設営と講演会当日での 口頭発表時の照明とスライドのコントロールをしてい ただきました.前年のLOC並びに行事部会のみなさ まからは多くの助言をいただき,大変助かりました. 最後に,参加者のみなさまの熱心な発表と議論のお かげで無事に講演会を開催することができました. LOCを代表してお礼申し上げます.

New face

深井 稜汰

(東京大学 理学系研究科 地殻化学実験施設)

日本惑星科学会の皆様,はじめまして.深井 稜 汰(ふかい りょうた)と申します.隕石をはじめとす る宇宙地球物質の同位体比分析・元素存在度分析を 専門としています.隕石の化学的情報から,初期太 陽系の物質進化を解明することを目標としています (詳しくは今号にて紹介しています[1]).2019年3月 に,東京工業大学・地球惑星科学系の横山 哲也(よ こやま てつや)教授のもとで学位を取得し,現在は 東京大学・地殻化学実験施設の平田 岳史(ひらた たかふみ)教授のもとで研究員をしています.

私は学部2年生の時地球惑星科学科(以下,地惑) に進学しましたが,少なくとも学部生の間に研究者 を志したことはなかったと記憶しています.そもそも 私は胸を張れるような物理や化学の素養がなく,大 学の授業についていくのは大変でした.そんな中で, 高校までには本格的に触れたことのなかった銀河・ 恒星・惑星といった対象に惹かれ,地惑を志望しま した.今よりなお未熟であった私は,当時の地惑の 先生方に迷惑をかけたかと思いますが,そんな私を 受け入れてくれる地惑を大変有難く思いました.た だし,研究者というビジョンは見えておらず,高校教 員になるというのが当面の目標でした(2014年に高 校教員免許を取得しました).

学部4年生で研究室に所属してからは、大学生活 に充実感を感じはじめました.幅広い知識に欠ける という自覚があった自分ですが、研究はある種「自 分の武器で勝負できる」フィールドだと感じました. ペーパーテストに比べ、自分が出した分析結果をプ レゼンすることや、論文執筆に向けて議論を深めて いく作業が好きでした.研究室所属を通して、ようや



く自分なりの勉強法を身につけられたのだと思いま す.

修士2年頃,修士課程からはじめたテーマ(コンド ライト隕石のNd同位体異常)がある程度実を結びは じめた時が,自分の転機だったように思います.自分 の出したデータに十分な解釈を見出せていなかった 私ですが,ある時ふと作ったグラフを見て「これはイ ケる」と感じたことを鮮明に覚えています.自身と同 ーのテーマについて,複数のグループが研究に取り 組んでいたのを後に知り,ライバルであったグループ がNature誌に論文を出版した時[2]目の前が真っ 白になるような(というと大げさですが)感覚がしたの も覚えています.ただ,その時のレース的感覚も今ま での大学生活では味わえない興奮でした.その後, 横山先生のご指導の甲斐あり,自分達の成果も無事 Earth and Planetary Science Letters誌に掲 載され一息つきました[3].

修士課程での充実した経験を経て,博士課程進 学以降も継続して研究生活を楽しんできました.一

ryota.fukai@gmail.com

方で, 学会で他分野の研究者の方と議論する機会 や、研究テーマを自分で考えるという機会も増えて おり、徐々に「自分の武器だけでは不十分なのかも」 という感覚になってきている頃でした. そんな折, 東 京都の高校で「地学基礎」の教員として講師をやら ないか、というお誘いを受けました. 高校で「地学」 を履修したことがなかった私は、基礎的な知識に絶 望的に欠けていましたが、持ち前の安請け合い精神 で仕事を引き受けました。毎週2回の授業を進めな ければならないので、矢継ぎ早に予習を行い、毎回 授業時には生徒にフィードバックを要求し、自分の 知識をブラッシュアップしながら教員として働きまし た.この時、学部の授業でわからなかった事はここ (地学の教科書)に書いてあったのか!と大変驚くと ともに、基礎に立ち返る重要性を叩き込まれたよう に思います。

未だにこのスタイルは変わらず, ゼミや学会に追わ れながらマラソンの水分補給のように足りない知識 を補充し, 面白い研究を日々探しています. 自分の 武器を使って惑星科学に活発な議論を引き起こせる よう, 日々努力致します. 今後ともよろしくお願い致 します.

参考文献

- [1] 深井, 2020, 遊星人, 29 (1), 14.
- [2] Burkhardt, C. et al., 2016, Nature, 537, 394.
- [3] Fukai, R. and Yokoyama, T., 2017, Earth Planet. Sci. Lett., 474, 206.

JSPS Information

◇日本惑星科学会 第135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135回運営委員会議事録

- 期 間:2019年12月2日(月)~12月6日(金)
- 議 題:RFI回答文書改訂2019作業部会の設置及び構成員の承認

運営委員会委員:

- 出席(22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
- 欠 席(1名) 渡部 潤一

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:RFI回答文書改訂2019作業部会の設置及び構成員の承認

提案内容:

惑星探査専門委員会の下に「RFI回答文書改訂2019作業部会」(以下、「作業部会」)を設置する。 作業部会委員長は、惑星探査専門委員会委員長が兼任する。 作業部会の活動期間は2020年3月までとする。

作業部会は以下の委員長及び委員から成る。

●作業部会委員長 寺田 直樹(東北大学、惑星探査専門委員会委員長)

●作業部会委員

倉本 圭(北海道大学)(主査) 諸田 智克(東京大学)(副査) 玄田 英典(東京工業大学)(副香) 亀田 真吾(立教大学)(副査) 笠原 慧(東京大学)(副査) 安部 正真(IAXA) 荒井 武彦(足利大学) 荒井 朋子(千葉工業大学) 生駒 大洋(東京大学) 石橋 高(千葉工業大学) 石原 吉明(国立環境研究所) 石丸 亮(千葉工業大学) 伊藤 元雄(JAMSTEC) 今村 剛(東京大学) 岩田 隆浩(IAXA) 臼井 文彦(神戸大学) 大坪 貴文(JAXA) 岡崎 降司(九州大学) 岡田 達明(JAXA) 小川 和律(JAXA) 小郷原 一智(滋賀県立大学) 鎌田 俊一(北海道大学) 鹿山 雅裕(東京大学) 唐牛 譲(IAXA) 河原 創(東京大学) 木村 淳(大阪大学) 木村 智樹(東北大学) 木村 宏(千葉工業大学) 木村 勇気(北海道大学) 熊本 篤志(東北大学) 黒崎 健二(名古屋大学) 洪 鵬(千葉工業大学) 神山 徹(産業技術総合研究所) 小林 憲正(横浜国立大学) 小林 正規(千葉工業大学) 坂谷 尚哉(JAXA) 嶌生 有理(JAXA) 白石 浩章(JAXA)

杉田 精司(東京大学) 関 華奈子(東京大学) 関口 朋彦(北海道教育大学) 関根 康人(東京工業大学) 巽 瑛理(東京大学) 田中 智(JAXA) 田中 佑希(東北大学) 谷川 享行(一関工業高等専門学校) 長 勇一郎(東京大学) 辻 健(九州大学) 津村 耕司(東京都市大学) 出村 裕英(会津大学) 長岡 央(JAXA) 中川 広務(東北大学) 中島 健介(九州大学) 並木 則行(国立天文台) 成田 憲保(アストロバイオロジーセンター) 野口 里奈(IAXA) 長谷川 直(JAXA) 春山 純一(JAXA) 晴山 慎(聖マリアンナ医科大学) 平井 隆之(千葉工業大学) 福原 哲哉(立教大学) 藤井 友香(東京工業大学) 藤田 和央(JAXA) 藤谷 渉(茨城大学) 堀 安範(アストロバイオロジーセンター) 三河内 岳(東京大学) 宮本 英昭(東京大学) 村上 豪(JAXA) 矢田 達(JAXA) 矢野 創(JAXA) 薮田 ひかる(広島大学) 山岸 明彦(東京薬科大学) 山田 学(千葉工業大学) 山田 竜平(会津大学) 山本 聡(宇宙システム開発利用推進機構) 吉岡 和夫(東京大学)

吉川 真(JAXA) 吉田 二美(千葉工業大学) 吉村 義隆(玉川大学) 和田浩二(千葉工業大学) 渡邊誠一郎(名古屋大学)

●上に加えて、惑星探査専門委員会委員および会長も作業部会委員として参加する。

荒川 政彦(神戸大学)	齋藤 義文(JAXA)
臼井 寛裕(JAXA)	千秋 博紀(千葉工業大学)
大竹 真紀子(JAXA)	中本 泰史(東京工業大学)
癸生川 陽子(横浜国立大学)	

議題は承認された(可22, 否0).

以上

◇日本惑星科学会賛助会員名簿

2020 年 2 月 1 日までに, 賛助会員として本学会にご協力下さった団体は以下の通りです. 社名等を掲載し, 敬意 と感謝の意を表します. (五十音順) ・Harris Geospatial 株式会社

・株式会社ナックイメージテクノロジー

・株式会社ノビテック

◇日本惑星科学会主催・共催・協賛・後援の研究会情報

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

2020/05

5/24-28 JpGU-AGU Joint Meeting 2020

(a) 千葉県千葉市

(b) JpGU

(c) http://www.jpgu.org/meeting_2020/

2020/09

2020年9月23日(水)-25日(金) 日本惑星科学会2020年秋季講演会

(a) 会津大学(b) 日本惑星科学会

編集後記

この冬はとても暖かい日が続いています.山陰も 例外ではなく,日本海側でありながら雪が全く降り ません.例年なら白くなっているはずの山々が青々と したままです。先日はあまりの暖かさに近場の山に 登山に行ってしまい、おもいがけず運動不足解消が できてしまいました.そうはいっても雪が恋しくなっ ている今日この頃です.

遊星人の著者・読者の皆さんにお知らせですが, 本号より遊星人の印刷を株式会社シュービさんにお 願いすることになりました.印刷所変更に伴ってカ ラー印刷の費用が改定され,これまでより大幅に安 くなります. 皆さんにおかれましては今後のカラー印 刷の利用を改めてご検討頂けると幸いです. なお, それ以外の部分については特に変更はありません. この場を借りまして, これまで印刷を行って頂いた日 本印刷株式会社さんにお礼申し上げるとともに、株 式会社シュービさんに今後のご支援をお願いする次 第です.

それでは皆さんからの原稿を心よりお待ちしてお ります. 今後ともよろしくお願いいたします.

(杉山)

編集委員 和田 浩二 [編集長] 杉山 耕一朗[編集幹事] 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3月25日発行 **日本惑星科学会誌 遊・星・人 第29巻 第1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.