日本惑星科学会誌 遊・星・人 第22巻 第1号

目 次

巻頭 言 田近 英————————————————————————————————————	3
特集「月惑星探査の来たる10年:第二段階のまとめ:その2」 107P/Wilson-Harrington サンプルリターン計画	4
橘 省吾, 浦川 聖太郎, 吉川 真, 中村 良介, 石黒 正晃	
始原天体有機物研究の今とこれから II. 不溶性有機物(IOM)	14
火の鳥「はやぶさ」未来編 その1 ~小惑星探査からの惑星科学~ 渡邊 誠一郎,はやぶさ2プロジェクトチーム	23
一番星 へ行こう! 日本の金星探査機の挑戦 その20 〜惑星間空間クルーズの道中にて〜 今村 剛	32
「天体の衝突物理の解明(VIII) 〜小天体の衝突・軌道進化〜」参加報告 保井 みなみ	34
研究会「太陽系小天体への再挑戦」の開催報告 吉川 真, 中村 良介, 高橋 典嗣	40
「第2回惑星科学最前線セミナー」開催報告 木村 淳, 栗田 敬, 久利 美和, 倉本 圭, はしもと じょーじ	······· 44
新刊書評 中島 健介	48
New Faces 山田 竜平, 佐藤 雅彦, 瀧川 晶, 藤谷 渉, 濱野 景子	49
JSPS Information	······ 59

表紙デザイン:BROOKS

Contents

Preface	E. Tajika	3
Special issue : Planetary exploration in a coming decade activity: Reports of Sample-return from 107P/Wilson-Harrington		
S. Tachibana, S. Urakawa, M. Yoshikawa, R. Nakamura, and M	I. Ishiguro	4
The study of organic molecules in small primitive bodies, no future: II. Insoluble organic matter (IOM)	ow and the	
Y. 1	Kebukawa	14
Phoenix "Hayabusa": A tale of the future (1) — Planetary science from asteroids —		
S. Watanabe and Hayabusa2 Pro	ject Team	23
Road to the first star: Venus Orbiter from Japan (20) — On a long journey in the interplanetary space —		
	. Imamura	32
Report of the meeting of 'Physics of Impact Process of Sola Bodies (VIII)'	ar System	
	M. Yasui	34
The report of the symposium of "Challenge Again to Small System Bodies"	Solar	
M. Yoshikawa, R. Nakamura, and N.	Takahashi	40
A report on the 2nd seminar for the forefront of planetary J. Kimura, K. Kurita, M. Kuri, K. Kuramoto, and G. I		44
Book review K.	Nakajima	48
New Faces R. Yamada, M. Sato, A. Takigawa, W. Fujiya, F	K. Hamano	49
JSPS Information		59

巻頭言

日本惑星科学会が設立された1992年は、ちょうどバブル崩壊の頃であった。大学では大学院重点化が始まり、インターネットを使ったメールのやり取りが日常化した頃である。いま思えば、古き良き昭和時代が名実ともに過去のものとなり、世の中が大きな音を立てて転換し始めた時期だった。

この間、太陽系外惑星の発見やアストロバイオロジーの新興があり、21世紀に推進すべき 惑星科学の最重要課題へと発展した。またわが国においては、自前の惑星探査の成功が学会設 立時の状況を根本的に変え、学会やコミュニティの在り方にも大きな変革を迫っている。

そもそも惑星科学とは、究極的には「地球の科学」をも包含する、きわめて普遍的かつ総合的な研究領域のはずである。地球科学者を巻き込んでさらに多様な研究や探査計画がなされるようになることが望ましい。その意味において、いまの惑星科学会は、狭義の惑星科学に埋没しているきらいがないか。やや逆説的ではあるが、研究者数の増加と研究の多様化の陰で、研究者の意識は学会設立時より逆に狭くなっていないか危惧される。

一方で、同時期に地球惑星科学関連学会合同大会から発展した日本地球惑星科学連合大会の右肩上がりの成長は、6日間18会場パラレル開催(2012年大会)という状況をもたらした。その結果、直接関係するごく一部のセッションしか出席しない、という研究者の行動が顕著になった。秋も一番関係の深い学会しか参加しなくなったため、結果的にいまどこの学会でもセッションの多様性が失われているという。このことは、大学院重点化や講座制解体がもたらした教育の縮小再生産とも密接に絡み合っているように感じられる。常々批判されている学問の縦割り・細分化は、ますます進行していることが明らかである。広い視野と俯瞰的なものの見方を養うことは、大学においても学会においてもより困難な状況に陥っている。

日本惑星科学会の秋季講演会は(無論小規模だからではあるが、たぶん意識的に)1会場で行われてきた。太陽系形成論における理論と物質科学の意思の疎通が、20年以上前とは雲泥の差があるほど深まったことは、学会活動の大きな成果といえるだろう。ただ、このやり方は発表数の増加によってそろそろ限界に近づいている。学会の今後の在り方を考える上で、とても悩ましい問題である。

それでも、私たちは、私たちが住んでいるこの世界を理解するために、できる限り広い視野と好奇心を持ち続けたいものである。惑星科学は、本来それが可能なはずの特権的な学問分野なのだから。

田近 英一(東京大学)

特集「月惑星探査の来たる10年:第二段階のまとめ:その2」

107P/Wilson-Harrington サンプルリターン計画

橘 省吾¹,浦川 聖太郎²,吉川 真³,中村 良介⁴,石黒 正晃⁵ 2012年10月1日受領。2013年1月11日受理。

(要旨) 地球外始原物質(より古い情報を記憶する物質)の科学は私たちの太陽系の歴史を銀河の歴史と実証的につなげる唯一の手段である。「はやぶさ」「はやぶさ2」の探査天体よりさらに始原的な情報が残されている可能性が高く、また来る10年に往復探査が可能な天体である107P/Wilson-Harrington(彗星/小惑星遷移天体)へのサンプルリターン探査を提案する。本探査計画は惑星物質科学の進展のみならず、太陽系初期につくられる揮発性物質を多く含む小天体の物理的特性を明らかにできる探査であり、惑星形成論においても大きな貢献をなすものである。

1. 始原物質を科学すること

太陽系内の多様な惑星や準惑星、衛星を生み出した 材料といえるのが、小惑星や彗星といった現在も太陽 系に数多に存在する小天体である。一部の小天体では 天体規模の融解も起きず、集積したままの未分化な状態を保持し、初期太陽系でつくられた物質が保存されている(太陽系誕生以前の物質も一部保存されている)。 それゆえに、未分化な太陽系小天体は古い時代の情報を保存した「始原天体」とよぶことができる。

宇宙科学の究極の目標は、ビッグバン以降に冷却される宇宙のなかでどのようにさまざまな階層構造がつくられ、そのなかでいかにして地球に生命が誕生したかを明らかにすることといえる。過去の宇宙やさまざまな進化段階の天体、他の惑星系の観測的研究は、太陽系、地球、地球生命の普遍性や特殊性をさぐることにつながる。太陽系惑星探査は、太陽系における地球や生命の普遍性、特殊性の理解に迫る。また、地球や地球生命の理解は、地球科学分野の最大目標のひとつ

であり、マントル物質や太古代岩石の分析などから、 多数のアプローチがなされている。始原天体起源物質 の分析は、宇宙科学の範疇に含まれるが、アプローチ としては地球科学に近く、太陽系の歴史そのものを地 球外物質から実証的に読み解くということになる。

人類はこれまでに始原天体由来と思われる物質を隕石や宇宙塵としてすでに手にしており、始原天体起源物質の分析研究は、宇宙科学・惑星科学の発展に大きく寄与してきた。例を挙げれば、太陽系元素存在度の決定[e.g., 2, 3]、太陽系誕生年代(CAI形成年代)の決定[e.g., 2, 3]、初期太陽系進化の時間スケール制約[e.g., 4, 5]、初期太陽系における高温過程(CAI、コンドリュール)の解明[e.g., 6]、酸素同位体不均一と太陽系進化の関連の理解[e.g., 7]、恒星内元素合成への制約(プレソーラー粒子)[e.g., 8]、地球外有機物の発見[e.g., 9]などがそれにあたる(初学者向け教科書として, [10]なども参考にされたい)。

電磁波を使っておこなわれる天文観測や探査機によるリモートセンシング観測では、情報が縮退してしまうことは否めない。しかし、地上での物質の詳細分析は、組織、構造、元素、同位体など多角的な情報を、より詳細に得ることができるという強みを活かし、上記のような進展を宇宙科学にもたらしてきた。

tachi@ep.sci.hokudai.ac.jp

^{1.} 北海道大学

^{2.} 日本スペースガード協会

^{3.} 宇宙航空研究開発機構

^{4.} 産業技術総合研究所

^{5.} ソウル大学

サンプルリターンがもたらしたエポックメーキングな発見

サンプルリターン探査で回収された物質の分析によって、太陽系科学を大きく進展させる発見がなされてきた。これまで人類が能動的に地球外から持ち帰った物質は、米国アポロ計画で採取された月岩石、旧ソ連ルナ計画で採取された月土壌、米国スターダスト探査機が採取したWild2彗星塵、そして日本の「はやぶさ」探査機が採取した小惑星イトカワ表面の塵である。原子レベルでは、ジェネシス探査機によって採取された太陽風粒子もある。

月土壌サンプル中の斜長石の発見から誕生したマグマオーシャン仮説[11]は、月に限らず、分化天体の初期進化に対する重要な制約となっている他、月の起源、内部構造およびその不均質に関する重要な情報が得られた。また、月試料の年代測定に基づくクレーター年代学は他の天体にも応用され、惑星地質学において重要なツールとなっている。

スターダスト探査機がWild2彗星から採取した彗星 塵子[12]の大半は、小惑星帯からの隕石中の鉱物と同様に、太陽系平均的同位体組成をもつ粒子であった。 また、試料中に、難揮発性包有物CAIやコンドリュールといった始原隕石コンドライトに含まれる高温を 経験した物質が含まれていることも明らかとなった。 これらの事実は、初期太陽系において、内側領域(数 AU)から外側(彗星形成)領域(20-30AU)への物質移動 があったということを示唆する。

「はやぶさ」探査機の回収コンテナからは小惑星表面への二度のタッチダウン時に捕集したと思われる1500粒以上の微粒子が発見された.回収試料の初期分析によって、小惑星イトカワは太陽系最初期に誕生し、ひっそりと46億年を過ごした500 mの小さな天体ではなく、一度は20 kmを越えるような大きな天体として高温の時代を経験、さらに破壊・再集積といった過程を経て現在の姿になり、今なお太陽風の照射や隕石衝突によって、表層物質は破壊、移動、小惑星からの離脱を経験している活動的な天体であることがわかった[13, 14, 15, 16, 17, 18, 19].

ジェネシス探査機によって採取された太陽風粒子の 分析によって、太陽風粒子の酸素同位体がCAIの持 つ酸素同位体組成に近いことが報告された[20]. CAI は、始原隕石のバルク酸素同位体組成や地球や月、火星の岩石に比べ、¹⁶Oに富む異常な酸素同位体組成を持つと考えられてきたが、CAIこそが太陽系の平均的酸素同位体組成を保持していることがわかった。これもまた宇宙で採取した物質の地上での高精度分析が可能であったからこその知見である。

これらいずれの発見も太陽系科学にとってはエポックメーキングなもので,私たちの太陽系観を大きく変えるものであった.

3. これからの始原物質科学と始原天体サンプルリターンの意義

月の石や太陽風粒子と異なり、始原天体由来と考え られる隕石や宇宙塵は地球上に沢山存在し、 先に例を 挙げたとおりの太陽系科学への貢献を成し遂げてきた. 特に、近年の始原物質研究の進展により、始原物質形 成の段階まで遡ると、地球や海、生命の原材料物質と もいえる鉱物、水、有機物が相互に化学反応を起こし、 物理的に作用しあい、構造をつくっていることがわか ってきた[e.g., 21, 22]. すなわち, 生命, 海, 地球の 原材料物質は、太陽系最初期にはお互いに密接な関係 を持ち、また、それらの相互作用の結果として、生命 や海. 地球を生み出す材料となった可能性すらある. 「はやぶさ2」計画において、リターンサンプル分析の サイエンスのひとつの柱はこの点で、地球に有機物が もたらされる前の小天体での最終進化を明らかにする ことを目標としている. 初期太陽系円盤→微惑星→地 球という流れを追うことになる.

有機物や氷に関して、別の見方をすると、氷や有機物の主成分となる酸素、炭素、窒素は宇宙において、水素、ヘリウムに次いで多い元素であり、それらがつくる分子は天文観測でも分子雲や円盤の構造を調べるツールとして用いられてきた。今後、ALMAなどを用いて、より高い空間分解能でC-H-O-N系ガスの分子種や同位体組成の分布が見えてくることが期待される。始原物質中の主として固体のC-H-O-N系物質から得られる情報は、天文観測によるガス情報に対して相補的なものとなり、観測天文学とあわせ、比較惑星系物質科学の展開が期待される。さらに、C-H-O-N系物質は、低温の分子雲から原始惑星系円盤の高温期、小天体での熱過程において、相変化することで様々な固体をつくり、広い温度領域のイベントのトレーサーとなる物

質ともいえる.したがって、分子雲での低温物質形成から、原始惑星系円盤の進化の普遍性や特殊性、初期太陽系円盤の詳細進化のトレースまで可能となる対象ということができる.地球外物質分析が太陽系を越え、初期太陽系円盤→太陽系母分子雲→銀河へと時間、空間を遡り、銀河の物質科学へと向かう流れといえる.

太陽系の始原水や始原有機物を研究するにあたって. 氷・鉱物中の水、有機物およびそれらと共存する鉱物 が相互関係を保った試料を分析することが重要である が、地球上での汚染や揮発成分の損失が起こりうる隕 石や宇宙塵などから、水や有機物に関して、完全な始 原情報を得ることは難しい、また、水や有機物を多く 含む始原物質ほど強度が低く、大気圏突入時に燃え尽 きるというバイアスがある可能性もある(実際,宇宙 塵には超炭素質物質などが発見されているが[23], 隕 石としては存在しない). さらに. 地球上で発見され る試料の場合、どのような天体が母天体なのか、また、 母天体のどの部分から来たものであるのか知ることが できない. スターダスト探査で回収された彗星塵中の CAIやコンドリュールが宇宙塵として地球に降ってき ても、我々はおそらく小惑星帯起源の塵だと判断する ことだろう.

「私たちはどこから来たのか」を考える人類が「地球」「海」「生命」の材料を追い求め、それらが生まれた場の進化を理解したい、さらには銀河とのつながりを知りたいと考えることは自然な帰結である。そのための情報は、太陽系最初期の始源水や始源有機物に残されている。これらの始原物質を手にするための手段は、それが地上に降ってくるのを待つことではない、科学的根拠をもとに目標天体を定め、自らの意志と技術によって、そのありかを訪ね、欲しい始原物質を探し当てて、地球上の実験室に持ち帰ることでのみ実現できる

4. 107P/Wilson-Harrington サンプ ルリターン計画:概要と科学目標

太陽系小天体への探査計画は、我が国でも「はやぶさ2」プロジェクトが進行中であり、世界各国でもこれからの10年に向けて、開発や立案が進んでいる(表1). サンプルリターンの第一の対象となる小惑星は、可視・赤外線反射スペクトルを用いて分類され、太陽からの距離の違いに応じて、支配的な型がS→C→D

と変化する。反射スペクトルの違いは小惑星を構成す る物質の違いを反映し、初期太陽系には太陽からの距 離に応じた惑星材料物質の分布の違いがあったことを 示唆する.「はやぶさ」が訪れたイトカワはS型小惑 星に分類され、近地球型小惑星では最も多く存在する タイプの小惑星である. S型小惑星は普通コンドライ トの母天体であることがイトカワ粒子の分析から示さ れた[13, 14]. 一方,「はやぶさ2」, OSIRIS-REx, MarcoPolo-RなどがサンプルリターンをめざすC型小 惑星は炭素質コンドライトとの類似性が指摘されてお り、また、D型小惑星はTagish Lake隕石という特殊 な炭素質コンドライトとの類似性が示唆されている。 さらに遠方にはカイパーベルト天体、さらにオールト 雲天体. そしてそれらが太陽に接近する軌道を持つこ とで生まれる彗星が存在し、これらの天体群には氷や 揮発性有機物の固体が含まれていると考えられる。彗 星核は将来めざすべき探査候補天体であるが、活動し ている彗星核に降下し、確実なサンプリングをおこな うことは技術的に非常に難しい. Stardust ミッション では、高速フライバイ時にエアロジェルを利用して塵 を捕獲し地球に持ち帰った. 回収試料からは有機物が 発見され、また、回収試料の熱水抽出によって、アミ ノ酸であるグリシンの存在が確認されている.しかし. 高速衝突のためにサンプル(とくに揮発性物質)はかな りのダメージを受けており、氷や有機物の始原物質の サンプルリターンに成功したとは言い難い. また当初 は彗星からのサンプルリターンをターゲットとしてい た欧州のRosettaも、途中でランデブー+ランダーに よるその場分析へと計画を変更している.

彗星ではないが、最近の観測でメインベルト帯にありながら彗星のような尾が認められる小惑星が発見されている。このような天体をメインベルト彗星 (MBC)という。元々は外惑星以遠でつくられた小天体が惑星移動に伴う力学的影響でメインベルトまで散乱された可能性もある[24]。MBCが彗星活動を起こす原因として、他の小天体の衝突によるダストの放出、熱的な影響による氷成分の昇華、あるいはその両方(衝突により露出した表面下層からの氷成分の昇華)という説が考えられている。これまで発見された9つのMBCのうち、133P/Elst-Pizarro、176P/LINEAR、P/2005 U1(Read)は力学進化シミュレーションにより、メインベルト外側に位置するテミス族小惑星を起源とする

表1:現在・将来の小天体サンプルリターンミッション.

ミッション(機関)	ターゲット天体	探査方式	期間	現状
Dawn (NASA)	Vesta/Ceres	ランデブー	2007 - 2015	運用中
New Horizons(NASA)	Pluto他太陽系外縁天体	フライバイ	2006-2020頃	運用中
Rosetta (ESA)	67P/Churyumov- Gerasimenko (短周期彗星)	ランデブー /着陸	2004 - 2015	運用中
Phobos-Grunt (Russia)	Phobos(火星衛星)	サンプルリターン	2011 - 2014	失敗
Hayabusa-2(JAXA)	1999 JU3(C型小惑星)	サンプルリターン	2014 - 2020	開発中
OSIRIS-REx(NASA)	1999 RQ36(B型小惑星)	サンプルリターン	2016 - 2023	開発中
NEOSSat (CSA)	地球近傍小天体(スペースガード)	観測	2011 - 2013	開発中
Human NEO(NASA)	NEO	有人	2025 -	開発中
MarcoPolo-R(ESA)	2008 EV5(C型小惑星)	サンプルリターン	2020年代	Cosmic Vision 選抜過程
Comet Surface Sample Return(NASA)	彗星核	サンプルリターン	2016 –	New Frontier 選抜過程
Trojan Rendezvous & Tour (NASA)	トロヤ群小惑星複数	フライバイ	2019 –	New Frontier 選抜過程
Comet Hopper(NASA)	46P/Wirtanen(短周期彗星)	着陸	2016 - 2023	Discovery 選抜過程
ソーラー電力セイル (JAXA)	メインベルト小惑星・ トロヤ群小惑星	フライバイ/ ランデブー	2020年代	WG段階
Hayabusa-MkII(JAXA)	D型小惑星/枯渇彗星	サンプルリターン	2020年代	WG段階
Triple-F (ESA)	79P/duToit-Hartley(短周期彗星)	サンプルリターン	2020年代	WG段階

表2:107P/Wilson-Harringtonの物理諸元.

軌道長半径	2.639888 AU	離心率	0.624139	公転周期	4.29 年
軌道傾斜角	2.7839°	近日点引数	91.3630°	昇交点黄経	270.4868°
直径	3.46 ± 0.32 km	アルベド	0.059 ± 0.011	スペクトル型	CF (C~B型)

と言われている[25]. テミス族小惑星には比較的高い割合でB型小惑星が存在している. テミス族のB型小惑星のうちいくつかには, 分光観測により含水鉱物の存在が示唆されている. さらに, テミス本体では, 水氷や有機物が検出されている[26]. このように理論, 観測の両面からメインベルトに, 水や有機物を含む非常に始原的な天体が存在しえることが強く示唆されている.

4.1 107P Wilson-Harrington

MBCは太陽系の形成の様子を解き明かすために鍵となる天体であるが、メインベルト外側に軌道をもつ小天体をターゲットに、来る10年にサンプルリター

ン探査を実現するのは困難である。そこで、107P/W Wilson-Harringtonを探査天体として提案する。107P は地球近傍小天体であり、1949年の発見時に尾が検出されたが、その後の観測では彗星活動が認められていない[27]。現在の外観は小惑星と同様であり、彗星から小惑星へと遷移した天体(彗星/小惑星遷移天体)と考えられる。小惑星番号(4015)も合わせてナンバリングされている。107Pの軌道は、a=2.640AU、e=0.624、i=2.784°でありアポロ型の地球近傍小天体である(表2)。 軌道進化シミュレーションにより時間を遡ったとき、その起源は65%の確率でメインベルト外側領域の小惑星、4%の確率で木星族彗星であると考えられている。可視測光観測から、スペクトル型は

自転周期	運動状態など	全回転運動量ベクトル (自転軸)方向	形状の3軸比	実現可能性
7 1 5 11 11 11	タンブリング	黄経=310°黄緯=-10° 黄経=132°黄緯=-17°	1.0 : 1.0 : 1.6	困難
7.15時間	六角形形状	黄経=330°黄緯=-27°	1.5 : 1.5 : 1.0	可能
	衛星を伴う	黄経=330°黄緯=-27°	不明	衛星のため注意深い運用を要求
3.58時間	クレーター地形	不明	不明	やや速い自転のため, 注意深い 運用を要求

表3:107P/Wilson-Harringtonの運動状態とサンプルリターンミッションの実現可能性.

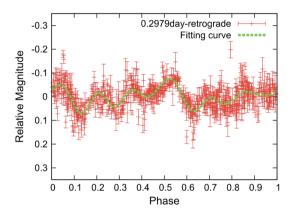


図1: 自転周期を7.15時間と仮定した場合の107P/Wilson-Harringtonのライトカーブ.

C型とF型の中間(CF型)と報告されている、F型はB 型に酷似したスペクトル型であり、B型程ではないが やや青みがある. また, 可視分光観測ではB型小惑星 である(3200) Phaethonと良く似たスペクトル型を示 す. 赤外線天文衛星スピッツァーの観測から直径3.46 ± 0.32 km. アルベド 0.059 ± 0.011 と報告されている. 自転周期はこれまで、6.1時間[28]と3.556時間[29]と いう2つの報告があったが、2009年から2010年にか けておこなわれた地上観測キャンペーンにより、7.15 時間あるいはその半周期である3.58時間がもっともら しいとわかった[30](表3). この地上観測では、ライ トカーブから107Pの自転方向, 形状, 運動状態など も推定している。図1に、7.15時間と仮定した時のラ イトカーブを示す. 通常の小惑星は1回の自転の間に 2回の光度変化が表れるが、107Pは1回の自転の間に 同じ振幅を示す光度変化が6回表れる. 6回もの光度 変化が起こるライトカーブの解釈として、六角形形状、 タンブリング、クレーター地形、衛星の存在が考えら れる。図2に六角形形状を仮定した形状モデル、図3 にタンブリングを仮定したの場合の形状モデルを示す. 六角形形状の場合、3軸(長軸:短軸:自転軸)の長さ 比は1.5:1.5:1.0となり、自転軸方向は黄経=330°、 黄緯=-27°付近となる. タンブリングを仮定した形 状の場合、3軸(長軸:短軸:自転軸)の長さ比は1.0: 1.0:1.6となる. このとき, 全回転角運動量の方向は 黄経=310°, 黄緯=-10°あるいは黄経=132°, 黄緯= - 17°付近となる. タンブリングの歳差周期は2.38時 間、章動角はおよそ65°となる、一方、この地上観測 キャンペーンは位相角(太陽-107P-観測者の角度)50° 付近の時期におこなわれており、クレーターのような 地形があれば、斜め方向からの日射のため影が生まれ る. この影によっても、ライトカーブ中に光度振幅が 生まれる可能性がある。この場合、1回の自転の間の 光度振幅回数は3回と考えることができ、自転周期は 3.58時間となるが、3.58時間の周期では、[29]の観測 データに対して周期性が表れるものの、[28]のデータ に対しては周期性が表れないという問題がある. 位相 角の小さい時期(例えば、2013年5月頃)の追観測で、 ライトカーブの振幅回数に変化が表れるかなど確認す ることで、タンブリングの有無の決定などが可能にな るだろう. ライトカーブ中の減光が衛星による掩蔽現 象であるという可能性も否定できないが、直接的に衛 星の存在を示唆する観測結果は得られていない. なお. 自転の方向はいずれの解釈であっても、逆行回転であ ることがわかっている.

4.2 科学目標

107Pは過去に彗星活動を起こしていたこと、軌道力学から推定される元軌道がMBCと同様にメインベルト外側の可能性が高いこと、さらにスペクトル型がC~B型であることから、元々MBCのような天体であり、現在のようなNEO軌道に進化した後に、他天体衝突や太陽熱の影響で彗星活動を起こしたという仮説が成り立つ、もし、MBCのような天体であれば、

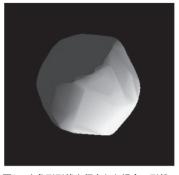






図2: 六角形形状を仮定した場合の形状モデル. (左)自転軸方向からの俯瞰, (中央)左図の右側から見た赤道方向の俯瞰, (右) 左図の下側から見た赤道方向の俯瞰.







図3: タンブリングを仮定した場合の形状モデル. (左) 自転軸方向からの俯瞰, (中央) 左図の右側から見た赤道方向の俯瞰, (右) 左図の下側から見た赤道方向の俯瞰. 全回転運動量ベクトルを中心に2.38時間で歳差しながら, 7.15時間で自転している. 章動角が65°であるため, 中央図, 右図は65°横倒しとなる.

水氷や有機物を含んでいることが期待できる. 一方, 107Pの軌道は太陽熱の影響を強く受けるNEO軌道である. それにも関わらず, 1949年の発見時を除き彗星活動は見られないことから, 表面に豊富な水氷や有機物は存在しない可能性もある. このような状況から推測すると, 1949年の彗星活動は他天体衝突により表面が削られ, 表層下の氷の層が露出し, 熱的な影響で氷成分が揮発したことが原因であるかもしれない(実際, 地上観測で示したタンブリング, クレーター地形という解釈は他天体衝突を示唆する). あるいは氷の層が露出せずとも,衝突で表層の地層が薄くなったことで氷成分が揮発することも考えられる. このような特徴をもつ107Pのサンプルリターン探査では以

下のような科学目標を設定する.

(1) 宇宙低温物質を用いた初期太陽系円盤進化学

107Pは彗星が小惑星へと遷移した天体(彗星/小惑星遷移天体)である可能性が高いため、その地下物質には、私たちがまだ手にしたことのない太陽系初期の氷や天体での変成をほとんど受けていない有機物がそのままの形で保存されていることが充分期待される。これらの物質を採取し、分子雲から初期太陽系円盤で小天体が形成されるまでの歴史を紐解く、具体的には、採取試料の鉱物種や組成、組織から天体での熱や水による変成の程度を精査し、変成程度が最小限もしくは未変成部分に存在する有機物や氷から、分子雲から太

陽系最初期にかけての有機分子の進化(分子雲で有機 物の複雑化はどこまで進んだのか、分子雲でつくられ る同位体異常はどのように消えるのか)、氷の進化(太 陽系最初期の氷の酸素、水素同位体組成は太陽、地球 とどのように違うのか、氷の酸素同位体と鉱物酸素同 位体はどのような関係をもつか)を明らかにする. 彗 星活動のためにサンプル採取ができない場合も想定し. 表面にランダーを着陸させ、ガス成分の組成や同位体 の分析もおこなう. これらの知見を基に、分子雲から 初期太陽系円盤までの揮発性物質の進化・混合に関す る知見を得、ALMAやTMTなど電波や赤外線で得ら れる様々な進化段階の原始惑星系円盤や分子雲におけ る揮発性物質の分布や進化と合わせ、比較惑星系円盤 進化学を展開する. これにより我々の太陽系における 水や有機物の進化の普遍性、特殊性の議論が可能にな る.

(2) 彗星/小惑星遷移天体の実体解明

彗星/小惑星遷移天体の構造や運動, 軌道進化, 表 面熱変成などの実体はいまだ不明である. もし. NEO 軌道をもつ天体に、水氷や有機物が発見できれば、 ニースモデルで提唱されたように、始原的で未分化な 小天体が軌道進化に伴い太陽系内部にまで広く分布し ていることを立証することとなる。107Pの直径は3.46 kmであるが、このサイズは小天体の物理特性を調べ る上で、興味深いサイズである。 イトカワおよび 「OSIRIS-REx」,「はやぶさ2」ターゲット天体である 1999RQ36, 1999JU3の直径は、それぞれ約550 m. 560 m. 900 mである. 小天体の強度支配領域と重力 支配領域の境界はおおよそ直径1 km程度であるため、 直径3.46 kmの107Pの地形や地質が明らかになれば、 イトカワ、1999RQ36、1999JU3の探査結果と合わせて、 強度支配領域から重力支配領域へ変遷するにつれて、 小天体の構造や地形、地質がどのような変化するのか 包括的に理解することができる。また、表面回収試料 には近地球軌道への軌道進化以降の太陽光による表面 熱変成の効果が残されていることも期待され(現在の 軌道で最表面は100℃近くまで上昇する可能性があ る)、氷成分をまったく含まない最表面有機物を内部 有機物(や氷)と比較して、表面での熱プロセスを明ら かにする.

上記,科学目標に基づき、ミッションのサクセスクライテリアをまとめる.

ミニマムサクセス: 彗星小惑星遷移天体である107Pを訪れ、その場りモートセンシングをおこなう. 形状、体積、質量、空隙率といった基本的な物理情報から内部構造の推定をおこなう. 衝突体による掘削痕の観測によって、内部の直接観測をおこない、水氷をはじめとする揮発性物質、有機物の検出を試みる. イトカワや1999JU3、1999RQ36との相違点を見いだし、太陽系小天体の地形や内部構造に対する包括的な知見を得る. ランダーを着陸させ、表面物質の組成や軽元素同位体組成を測定する.

フルサクセス:ミニマムサクセス項目に加え、リモートセンシングにより安定的な自転状態であることが確認された後、表面にタッチダウンし、サンプル採取をおこなう.最表面試料、内部掘削試料など異なる進化段階を保持していることが期待される複数地点での回収をおこなう.回収サンプルは冷凍状態で地球に持ち帰り、始原天体起源の有機物や氷の研究を展開する.氷が含まれていた場合には、世界初の地球外氷のサンプルリターンとなる.

エクストラサクセス: サンプルカプセルを地球に投下した後,次の探査候補天体へ向かい,その場リモートセンシングを引き続きおこなう.探査天体数が増えることで,探査した天体同士の比較検討という,新たな研究段階へとステップアップする.現在,世界中の大規模サーベイ望遠鏡により,新月期には50天体以上の地球近傍小天体が発見されている.今後10年の間に,マルチランデブーが可能な地球近傍小天体の発見は十分期待できる.

4.3 搭載候補機器

多バンド可視カメラ: 地上観測により判明したC~B型というスペクトル型の確認をおこなう. 地上観測の空間分解能では、表面の地域の違いによるスペクトル型の分布を検出することは困難であったが、探査機からの高空間分解能観測によって、地域によるスペクトル型の違いや偏りを検出し、スペクトル型の分布マップを作成する. スペクトル型の確認のためには、少な

くとも測光精度~10%が必要であり、より詳細な調査をおこなうためには~1%の測光精度が理想的である. 1μ m付近まで波長域を長くとることで、D型小惑星との区別が可能となるため、波長域は 0.4μ mから 1μ m程度までを想定している.

レーザー測距/重力場計測装置:107Pの直径,形状,表面地形,重力といった基本的な物理情報を取得する.そこから,密度や空隙率を求め,内部構造を推定する.クレーターの数や直径,深さから107Pの表面でどのような衝突履歴があったのか調査する.それにより,107Pの彗星活動の原因として他天体衝突という仮説が可能であるのか判定する.目標精度は~7%とする(はやぶさ実績値と同程度)(体積計測目標精度:~5%,重力計測目標精度:~3%).

可視-赤外分光イメージャ:0.44 μm程度の波長域で分光イメージを取り、鉱物、水、有機物の空間分布をマッピングする。波長分解能10 nm程度、空間分解能はグローバルマッピング時には10 m程度、着陸候補地点や人工衝突掘削地点の観測には1 m程度を想定する。

中間赤外カメラ:温度、熱慣性の全球マッピングをおこなう。これにより、低高度からのリモートセンシングがおこなえない領域についても、表面を構成する物質の粒径や岩塊の存在を推定することができる。「はやぶさ2」と同程度の機器を予定している。

ランダー: 天体表面で内部構造,表面状態観察,物質分析をおこなう. 地中レーダーを搭載し,数-数十m深さでの反射面の存在の有無や構造から,氷や空隙の存在深さ・状態を調べる. 可視〜近赤外領域の多バンド撮像ができる顕微鏡システム, <1〜4μm波長領域の分光イメージャを用いて,リモートセンシングより1〜2桁詳細な空間スケールでの物質分布,地質構造を調べる. 飛行時間型質量分析計もしくは波長可変レーザー分光計を用いて,表面揮発性物質の化学組成,同位体組成測定をおこなう. 熱量測定もおこなう. ロボットアームの搭載が可能であれば,天体地下10cm以深部の掘削もおこない,内部の撮像,掘削試料の分析をおこなう. 蛍光 X 線分光器, LIBS など多元素分析をおこなう. 蛍光 X 線分光器, LIBS など多元素分

析装置も搭載候補である.

サンプラー: 「はやぶさ | 「はやぶさ2 | に搭載するプ ロジェクタ発射型サンプラーはより強度の小さいこと が期待される107Pにおいても有効な試料採取手段の ひとつと考えられる。ただし、層序が保たれないこと、 衝突時に揮発性物質の逃散がありうることなどの欠点 も考えられるため、他の方法での試料採取もおこなう、 コアラーによるサンプリングがひとつの候補である. コアラーは「はやぶさ2」でも検討はされたが、表面強 度が不明な点やコアラー回収時の巻き込みトラブルの 可能性などから搭載が見送られた. 物質強度が弱いこ とが期待される107P表面では実現可能性は高まる. 「はやぶさ2|では揮発性成分をコンテナから逃さない シール方法の開発をおこない、また地上回収直後に揮 発性物質のみを先に回収する準備をおこなっている. それらの手法は本探査でも有効である。 サンプル収納 部の新規要素としては、世界初の地球外氷サンプルリ ターンをめざすべく. 冷凍装置付きサンプルカプセル の開発をおこなう. もしくはTriple Fミッション(表 1)で検討されているように、カプセル分離までは探査 機側で冷却し、カプセル切り離し後は、サンプルコン テナとカプセル表面との間に低熱伝導率、大熱容量の 物質を用い. 温度状況を極力抑えるという手法もあり うる.

5. ミッション実現性および実現に向けて必要な技術課題

107Pの軌道傾斜角は2.7839°と小さいため比較的探査機が訪れやすいものの、 ΔV は6.9~km/s程度であり、「はやぶさ」および「はやぶさ2」の推進エンジンで探査することは困難である。しかし、探査が不可能ほど大きな ΔV ではなく、 $\mu 20$ イオンエンジンのような新たな技術開発で到達可能であると期待される。地上観測が示す107Pの自転軸方向は黄緯30°以下程度と低く、やや横倒しで自転している。そのため、全球マップを作成するのは困難であるかもしれない。ただし、地上観測による自転軸の推定は不定性が大きく、現状で全球マップの作成が不可能であるかどうか断言できない。また、タンブリングを起こしていれば、その複雑な回転状態からタッチダウンによるサンプル採取は困難である。しかし、先に述べたように回転状態に関しても

様々な解釈が考えられる. いずれにしても今後の地上 観測でより詳細な情報を収集する必要がある. 2020 年頃までに数回以上の観測好機があるので、継続的な 観測をおこなうことで形状やタンブリングの有無につ いて、確度の高い情報が得られることだろう. 衛星の 有無については、ライトカーブに急激な減光が表れな いため、衛星存在の可能性は高くないと思われるが、 必要に応じて、レーダー観測をおこなうことで確認で きるであろう. 現状、様々な不確定性はあるが、107P は地上観測によって、ミッション実現のための様々な 問題点を他の小天体に比べ、早期に浮き彫りにできて いるとも言える.

搭載機器については、必要最低限のリモートセンシング観測の実施には「はやぶさ2」と同程度のもので可能である。ただし、サンプリングが可能かどうかは保証されないため、表面物質の観察や分析をおこなう着陸機の搭載は必須であるため、その開発が重要課題である。日本単独での開発が困難な場合には、Rosettaや「はやぶさ2」の着陸機開発の実績を持つDLRなど海外の機関との協力などを仰ぐことも検討すべきであると考える。サンプル採取に関しては、水氷や有機物といった揮発性物質をどのように安定的に回収するのかについては技術検討する必要がある。

6. まとめ

天文学の進展で我々は開闢直後の宇宙の姿や太陽系 外の惑星の姿まで知ることができる。しかし、天文学 で得られる情報は主として光子からで、様々な情報が そこに縮退されている. それに比べ. 地球外物質から は光のみからは決して得られないより深化した情報を 得ることができ、人類の知の広がりに大きな貢献をす ることができる。2020年代以降、世界の宇宙機関で 計画されている太陽系探査には、サンプルリターン計 画が多く含まれる.サンプルリターン探査は、到着し た天体でその場観測のみをおこなう惑星探査計画と違 い、回収試料をその時代の最先端手法で地上分析でき る点が最大の利点である. サンプルリターン探査のひ とつの流れはより始原的な物質(より古い情報を記録 する物質)を持ち帰り、太陽系の歴史を銀河の歴史と つなげることであろう. 物質科学の銀河系への広がり である。それゆえに各国で小惑星や彗星へのサンプル

リターンが計画され、その長期展望のなかに、107P の探査も位置づけられる(工学的見地からもより遠く のより始原的天体からのサンプルリターンをめざすた めのマイルストーンとなりうる). 107Pのサンプルリターン探査を通じ、我々は始原天体の物理的特性を把握し、さらに表面および地下試料の採取により、10年の内に手にしうる最高の始原物質から、銀河、太陽系、地球とつづく時間の流れを追うことができる.

謝辞

今後の世界各国のサンプルリターン計画について, 矢野創氏にご教示いただきました。また,査読者の中村智樹氏,木多紀子氏には大変有益なコメントをいただきました。ここに記して御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Lodders, K., 2003, Astrophys. J. 591, 1220.
- [2] Connelly, J. N. et al., 2008, Astrophys. J. 675, L121.
- [3] Amelin, Y. et al., 2002, Science 297, 1678.
- [4] Russel, S. S. et al., 2006, in Meteorites and the early solar system II, 233.
- [5] Wadhwa, M. et al., 2006, in Meteorites and the early solar system II, 715.
- [6] Connolly, H. C., Jr., 2008, in Protoplanetary dust, 230.
- [7] Yurimoto, H. and Kuramoto, K., 2004, Science 305, 1763.
- [8] Zinner, E. K., 2003, in Meteorites, comets, and planets,
- [9] Pizzarello, S. et al., 2006, in Meteorites and the early solar system II, 625.
- [10] 松田准一, 圦本尚義編, 2008, 宇宙·惑星化学(地球化学講座 2)(培風館).
- [11] Wood, J. A. et al., 1970, in Proc. Apollo 11 Lunar Sci. Conf., 965.
- [12] Brownlee, D. et al., 2006, Science 314, 1711.
- [13] Nakamura, T. et al., 2011, Science 333, 1113.
- [14] Yurimoto, H. et al., 2011, Science 333, 1116.
- [15] Ebihara, M. et al., 2011, Science 333, 1119.
- [16] Noguchi, T. et al., 2011, Science 333, 1121.
- [17] Tsuchiyama, A. et al., 2011, Science 333, 1125.

- [18] Nagao, K. et al., 2011, Science 333, 1128.
- [19] Nakamura, E. et al., 2012, Proc. Nat. Acad. Sci. 109, doi: 10.1073/pnas.1116236109.
- [20] McKeegan, K. D. et al., 2011, Science 332, 1528.
- [21] Nakamura-Messenger, K. et al., 2006, Science 314, 1439.
- [22] Glavin, D. P. and Dworkin, J. P., 2009, Proc. Nat. Acad. Sci. 106, 5487.
- [23] Duprat, J. et al., 2010, Science 328, 742.
- [24] Levison, H. F., 2009, Nature 460, 364.
- [25] Haghighipour, N., 2009, Meteorit. Planet. Sci. 44, 1863
- [26] Rivkin, A. S. and Emery, J. P., 2010, Nature 464, 1322.
- [27] Ishiguro, M. et al., 2011, Astrophys. J. 726, 101.
- [28] Osip, D. et al., 1995, Icarus 114, 423.
- [29] Harris, A. W. and Young, J. W., 1983, Icarus 54, 59.
- [30] Urakawa, S. et al., 2011, Icarus 215, 17.

始原天体有機物研究の今とこれから Ⅱ. 不溶性有機物(IOM)

癸生川 陽子¹

2012年12月20日受領, 2013年2月1日受理,

(要旨) 隕石中の有機物の大部分は酸や溶媒に溶けない不溶性有機物(Insoluble Organic Matter, IOM)と呼ばれる複雑な高分子有機物からなっている。このような有機物は、芳香族骨格に脂肪族鎖やC=O等の官能基が置換した分子構造を持ち、原始太陽系星雲や隕石母天体での化学的・熱的作用を受けることで、様々な化学構造変化を起こす。したがって、変成過程の痕跡を記録している隕石有機物を調べることは、太陽系形成初期の物質進化の解明に重要な役割を果たすことが期待される。本稿では、隕石有機物、特にIOMの起源と進化について、最近の研究結果をまとめてレヴューする。

1. 初めに

本論文は、隕石中の「不溶性有機物」を中心に、できる限り新しい研究結果を踏まえて、太陽系形成初期における有機物の起源と進化を包括的に捉えようと試みたつもりである。隕石中に見つかっている、アミノ酸に焦点を置いた近年の研究動向に関しては、薮田氏による「始原天体有機物研究の今とこれから I. アミノ酸」[1]を参考にして頂ければ幸いである。

始原的なコンドライト隕石には最大で数wt%程度の有機物が含まれており、その大部分(>70%)は不溶性有機物(Insoluble Organic Matter, IOM)と呼ばれる、複雑な高分子有機物である(図1[2]).この先は簡単のためにIOMと記述する。これらの有機物は原始太陽系星雲や隕石母天体での化学的・熱的作用を受けることで、H/C比の減少や同位体比の変化等の様々な化学構造変化を起こす。したがって、変成過程で受けた痕跡を記録している隕石有機物を調べることは、太陽系形成の初期過程で起こった物質進化過程の解明に重要な役割を果たすことが期待される。IOMはHCl/HFあるいはCsF/HF処理により無機成分を溶かした残差として回収される、黒っぱい粉末である。このような有機物の分離はかなり古くから行われていたようで、

19世紀末にはOrgueil隕石(CII, 1864年フランスに落下)から珪酸塩鉱物を溶かして炭質物が得られたという記録がある[3]。本格的に隕石中の有機物に注目が集まったのは1969年、オーストラリアにMurchison隕石(CM2)が落下して以降であろう。ちなみに同年は、メキシコにAllende隕石(CV3)の落下、日本の南極探検隊による南極隕石の発見、そしてアポロ11ミッションによる月の岩石の回収など、惑星物質科学にとって重要な試料の当たり年であった。Hayatsuら[4]は、熱分解・化学分解ガスクロマトグラフィーや赤外分光などの手法を用いてIOMを分析し、芳香族骨格に脂肪族鎖、COOH、OH、C=Oといった官能基を持つ複雑な分子構造を持つことを確認した。今でも彼らの提案した基本的な分子構造は揺らいでいない。

2. 不溶性有機物(IOM)の起源

これまでに議論されてきたIOMの起源については 諸説あるが、大きく2つに分けることができよう. 1 つは、星間空間あるいは原始太陽系円盤の外縁部の極 低温環境で形成されたとする考えである. まず、分子 雲コアでのイオン・分子反応に続き、星間塵に吸着し た分子の粒子表面反応により低分子有機物(ギ酸、メ タノール、ホルムアルデヒド等)が生成[5]、さらに星 間塵の氷マントル中でこれらの低分子有機物が紫外線

図1: Murchison隕石の不溶性有機物(IOM)のモデル図. Rは同様の有機構造のネットワークを表す. 図の出典[2].

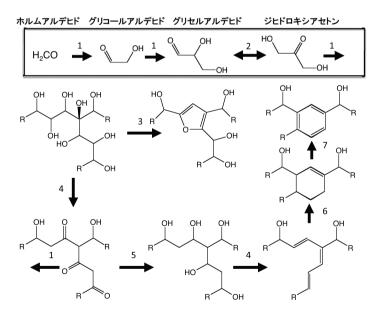


図2:ホルモース反応及びそれに引き続き複雑な高分子有機物へと重合する過程の模式図. 反応1:ホルムアルデヒドの重合, 反応2:分子内転移による異性化, 反応3:脱水及び閉環反応によりフラン状構造の形成, 反応4:脱水反応によりケトン(C=O)やオレフィン(C=C)構造の形成, 反応5:還元反応, 反応6:閉環反応, 反応7:脱水素反応により芳香族構造の形成. 図の出典[13].

による光重合反応により高分子化したと考えられている[6]. さらに近年,太陽系形成初期過程において, 原始太陽系円盤の表面付近で,太陽からの紫外線を受

けて上記の反応が起こったとする提案がなされた[7]. ギ酸等の低分子有機物は、分光観測により星間空間に 広く存在が確認されている[5]. また、星間空間の赤

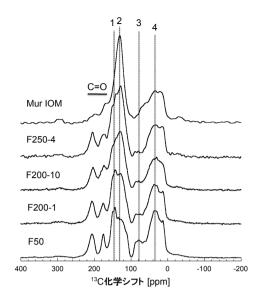


図3:ホルムアルデヒドを出発物質として生成された高分子有機物及びMurchison隕石のIOMの¹³C-NMRスペクトル、50℃で生成した有機物(F50)及び、F50を200℃で1時間(F200-1)、200℃で10時間(F200-10)、250℃で4時間(F250-4)、水熱したもの、1:エノール(OHが結合した二重結合炭素)、2:芳香族またはオレフィン(C=C)、3:アルコール(C-OH)、4:メチン基(C-H)、図の出典[13].

外スペクトルの $3.4 \mu m$ バンド(脂肪族炭素の吸収領域)とIOMの赤外スペクトルとの一致も観測されている[8]. さらに、重水素を含むイオン・分子反応は発熱反応であるため、極低温におけるイオン・分子反応では、有機物に重水素の濃集が起こる[9]. ^{15}N についても同様である。したがって、IOMに見られる重水素や ^{15}N の過剰は星間空間、あるいは原始太陽系円盤の外縁部起源であると考えられている[10].

2つめは、高温の原始太陽系星雲を起源とする説である。星雲中のCO及び H_2 ガスを出発物質としてメタン及び鎖状炭化水素を形成する、フィッシャー・トロプシュ反応:

$CO+3H_2 \rightarrow CH_4+H_2O$

を基とした重合反応により、炭化水素を含んだ複雑な高分子有機物が形成されるというものである[11]. しかし、(a) IOM は芳香族炭化水素の割合が高いが、生成物には鎖状炭化水素が多い、(b) 重水素の濃集を説明できない、(c) 触媒となる金属や酸化物(例えばマグネタイトや鉄ニッケル合金など)と IOM との共存関係があまり見られない、といった理由によりあまり受け入れられていなかった。しかし、最近 Nuthら[12]に

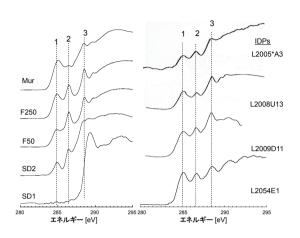


図4:ホルムアルデヒドを出発物質として生成された有機物 (F50: 50°Cで生成, F250: F50をさらに水熱したもの), Murchison隕石のIOM(Mur), 81P/Wild2彗星から採集された塵(SD1, SD2), 惑星間塵(Interplanetary dust particles, IDPs)の炭素X 線吸収端近傍構造(C-XANES)スペクトル. 1:オレフィン(C=C), 2:二重結合炭素に結合したケトン(C=C-C=O), 3:カルボキシル(COOH). 図の出血[13]

よる, 混合ガスに N_2 を加え, フィッシャー・トロプシュ反応にハーバー・ボッシュ反応:

$N_2+3H_2\rightarrow 2NH_3$

を組み合わせた実験により、再び注目を集めている。 彼らの実験により、これまでは触媒効果を失わせてしまうと考えられていた、粒子表面への有機物のコーティングが自己触媒作用を持つことにより効果的に反応を進行させ、なおかつ、IOMのような窒素や芳香族炭化水素を含んだ複雑な高分子有機物を形成することが示唆された。

そして近年3つめとしてCodyら[13]により、ホルムアルデヒド(CH_2O)を出発物質とするホルモース反応:

2CH₂O → C₂H₄O₂(グリコールアルデヒド)

 $C_3H_6O_3$ (グリセルアルデヒド) 作用の 糖類 を基にした重合反応(図2)による、太陽系形成初期の 始原天体における液体の水の存在下での IOM の形成 が提案された。ホルムアルデヒドは星間空間や彗星からも見つかっていることから[14]、このような始原天体におけるホルムアルデヒドの存在は充分に考えられる。また、星間空間に存在するホルムアルデヒドは重

水素の割合が高いため[15]、星間空間由来のホルムア ルデヒドが始原天体に存在していたとすれば、IOM における重水素濃度の高さも説明できる。核磁気共鳴 (Nuclear Magnetic Resonance, NMR) や X 線吸収端近 傍構造(XANES)分析の結果をみると、Codyらの合成 した高分子有機物は、始原的なコンドライト隕石に含 まれるIOMと類似した分子構造を持っていることが 分かる[13](図3、図4)、さらに、系にアンモニアを加 えることにより、低温での重合反応が速度論的に有利 になり、なおかつ、IOMとの分子構造レベルでの類 似性が増すことが分かった[16]。また、ホルムアルデ ヒドを基に重合された有機物には、スターダストミッ ションにより81P/Wild2彗星から採集された塵や, 彗 星起源と考えられている惑星間塵(Interplanetary Dust Particle, IDP) に含まれる有機物との類似性も見 られる[13](図4). したがって、81P/Wild2彗星塵や IDPに含まれる有機物が元となって、隕石母天体での 水質変成や熱変成を受けることで, 隕石有機物 (IOM)へと進化していったのかもしれない.

隕石有機物分析や天文観測,室内実験から、様々なIOM形成のシナリオが提案されているが、複数の起源が寄与している可能性もあり、未だIOMをはじめとした隕石有機物の起源は完全には解明されていない、いずれにせよ低分子有機物から高分子有機物へと進化してゆき、彗星に存在するような始原的なものから、水質変成や熱変成を経て、隕石にみられるような様々なバリエーションを持つIOMへと進化していったと考えられる。隕石母天体でのIOMの進化については以下の章で述べる。

3. 不溶性有機物(IOM)の進化

3.1 水質変成

水質変成を受けた代表的な隕石グループは、CI、CM、CR炭素質コンドライトである。これらの隕石はさらに、水質変成度の高いものから岩石学タイプ1~3に分けられる。例えば、岩石学タイプ2のCMコンドライトはCM2というように記述する。これらの隕石のIOMのNMR分析によると、CR2<CI1<CM2の順でやや芳香族炭素の割合の増加がみられるが[17]、赤外吸収スペクトル[18](図5A)、ラマンスペクトル

[19]、及びH/C元素比[20、21](図6)にはあまり差はみられない。IOMの熱分解生成物をガスクロマトグラフ質量分析法(GCMS)などにより詳細に分析すると、水質変成に伴い、エーテル結合(-O-)の減少や、芳香族部分のベンゼン環の数の減少などがみられるようである[22]。また、IOMから熱水処理により分離されたアンモニアの量は大きく異なり、多いものから、GRA 95229(CR2) >Orgueil(CI1) >Murchison(CM2) >Ivuna(CI1) >Renazzo(CR2) >Bells (Unusual CM2)となっている[23]。しかし、水質変成度の違い(岩石学タイプ)や隕石グループ間での系統的な変化は見られない。一方、IOM中の水素同位体比(δ D値)は隕石グループ間で大きな違いが見られる[20、21](図6)。CRコンドライトでは高い値をとり、CM、CIコンドライトではやや低い値となっている。

まとめると、これらの隕石のIOMは、岩石学タイプによる系統的な変化はあまりみられず、むしろ隕石グループ間でやや違いがみられるようである。したがって、IOMの化学構造は、岩石学タイプにより示されるような水質変成度よりも、変成を受けた環境の違いを反映しているように思われる。

3.2 熱変成

熱変成を受けた代表的なコンドライト隕石のグルー プは、CV及びCO炭素質コンドライト、普通コンド ライト(OC), エンスタタイト・コンドライト(EC)で ある. 熱変成度の低いものから岩石学タイプ 3.0~6 に分けられる. これらの隕石は200℃以上の高温を経 験しており、低温(0~150℃)の水質変成を受けた隕石 に比べ、IOMの分子構造に大きな変化が見られる. ラマン分光法やX線吸収端近傍構造(XANES)分析に よると、これらのIOMは熱変成に伴いグラフェン構 造が発達したことが分かる[19, 24]. また赤外分光法 を用いることにより、グラフェン構造だけでなく、熱 変成に伴う各種有機官能基の減少を詳細に観測するこ とができた[18](図5). 特に、カルボニル基(C=O)の 変化は温度以外の要因も反映していることが分かり. 興味深い. 以下に赤外分光分析により得られた熱変成 によるIOMの変化[18]を少し詳しく紹介する.

様々なコンドライト隕石のIOMの赤外吸収スペクトルは、スペクトルの特徴に基づいて4つのグループ $(A\sim D)$ に分けられた、グループAは、芳香族C=Cに

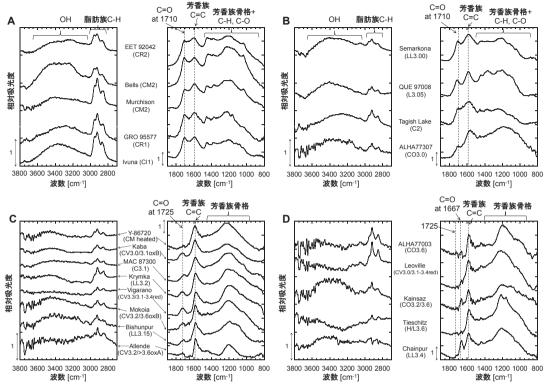


図5: 様々なコンドライトIOMの赤外吸収スペクトル. スペクトルの特徴に基づき, A ~ Dのグループに分けた. それぞれ左側: 3800 ~ 2700cm¹, 右側: 1900 ~ 800cm¹. IOMの受けた熱履歴はA<B<C≈Dと考えられる. なお, グループC, Dの一部に脂肪族C-Hが多くみられるが, 原因として(a) 芳香族C=Cのピーク高さでスペクトルを規格化しているため, グラフェン化が進み赤外活性な芳香族C=Cが減少するに従ってその他のピークが過大評価される, (b) 有機汚染, の2つが考えられる. 図の出典[18].

対して、O-H、脂肪族C-H、C=Oが多くみられること が特徴であり、熱変成を受けていないタイプ1、2の 炭素質コンドライト(CR, CM, CI)が含まれる(図 5A). グループBは、グループAよりも上記の有機官 能基の存在度がやや少ないことが特徴であり、弱い熱 変成を受けたタイプ 3.0の普通コンドライト、CO炭 素質コンドライトが含まれる(図5B). グループCは. 芳香族C=Cに対してさらに他の官能基が少なく、芳 香族C=C及び芳香族骨格のピークがシャープになっ ていることから芳香族構造の発達が見られることが特 徴であり、熱変成を受けたタイプ3.1以上の普通コン ドライト、CV3炭素質コンドライトが含まれる(図 5C). グループDは、グループCと似ているが、C=O のピーク位置に明確な違いが見られ、タイプ3.1以上 の普通コンドライト、炭素質コンドライト(CV3. CO3) が含まれる(図5D). C=O に注目してみると、グ ループA>B>Cの順で芳香族C=Cに対するC=Oの存 在度の低下が見られ、グループA、Bに比べ、グルー プCではC=Oのピーク位置の高波数へのシフトが見 られた. これは、熱変成によりC=Oの存在度が下が ると共に、カルボキシルやエステルから、ラクトン型 の構造(図7)に変化した結果と考えられる. グループ Dは最も低波数にC=Oのピークがみられ(図5D)。不 飽和ケトン構造(図7)に由来すると考えられる。 グル ープCとDに属する隕石が経験した温度に大差はない ため[24]、これらの分子構造の違いは温度によるもの ではなく.酸化還元環境の違いによるものであると考 えられる. したがって、グループDに属する隕石は、 比較的水の存在度が高い環境で熱変成を受けたために, 脱炭酸反応などによりカルボキシル基が減少すると共 に、新たに酸化されることにより不飽和ケトン型の構 造が形成されたと考えられる. グループC、D共に

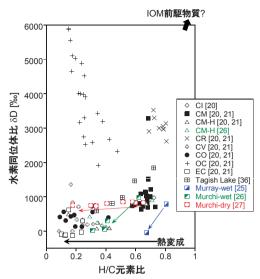


図6: 炭素質コンドライト(CI, CM, CR, CV, CO), 普通コンドライト(OC), エンスタタイト・コンドライト(EC), 加熱を受けたCMコンドライト(CM-H), 及び, Tagish Lake隕石のIOMの水素同位体比(δD値)とH/C 元素比のプロット. Murray隕石IOMを300℃で6日間水熱(Murraywet [25]), Murchison隕石IOMを270, 300, 330℃で3日間水熱(Murchi-wet [26]), 及び, Murchison隕石IOMを不活性ガス雰囲気下で加熱(Murchi-dry[27])のデータも重ねてプロットした. 図は[20, 21]を改変. Tagish Lakeは [36], Murray-wetは[25], Murchi-wet及びCM-Hは[26], Murchi-dryは[27]を引用.

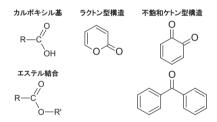


図7: カルボキシル基, エステル結合, ラクトン型構造, 及び不 飽和ケトン型構造の例.

CVコンドライトを含んでいることを考慮すると,これらの違いは同一母天体内における局所的な水の存在量の違いを反映していることが示唆される.

一方、IOMのH/C元素比と水素同位体比(δ D値) の関係をみてみよう(図 δ)。CV、CO炭素質コンドライト及びエンスタタイト・コンドライト(EC)は、H/C元素比と δ D値共に低い値を持っており、熱変成を受けていないコンドライト(CI、CM、CR)様のIOMが熱変成を受けることにより、H/C比・ δ D値共に減少したと考えることができる。しかし、普通コンドラ

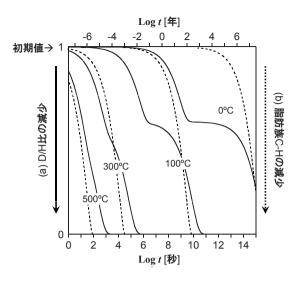


図8: (a)Cody らの方法[13]をもとに重水素化して合成した模擬IOMの水熱実験から求めたD/H比減少のプロファイル(実線)[28], (b)Murchison隕石のIOMを不活性ガス雰囲気下で加熱し、赤外吸収スペクトルの変化から求めた、脂肪族C-Hの減少のプロファイル(破線)[29].

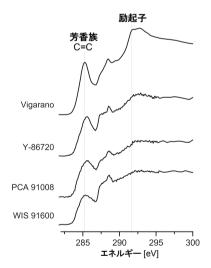


図9: WIS 91600(300 ~ 500°C), PCA 91008(500 ~ 750°C), Y-86720(>750°C), Vigarano(CV3.1/3.4) 隕 石 のIOMの C-XANESスペクトル、図の出典[34].

イト(OC)のIOMは、H/C比の減少が見られるものの、高い δ D値を持っている[20, 21]. これらの違いは何を意味するのだろうか?

IOMの加熱実験の結果と比較してみよう. 図6に、 Murray 隕石(CM2)のIOMの300℃,6日間[25],及び、 Murchison 隕石(CM2)のIOMの270,300,330℃,3 日間[26]。それぞれの水熱実験結果を重ねてプロット してある. いずれも、 δD 値及びH/C元素比の減少が 見られる. 一方. 水を加えない不活性ガス雰囲気下に おけるIOMの段階加熱(250~800℃)実験の結果. δD 値には顕著な減少は見られず、H/C比が大きく減少 している[27](図6). まとめると、比較的低温・水の 存在下では同位体比の減少が顕著に進み(図6におい て矢印の傾きが大きい)、比較的高温・水の不在下で はH/C元素比の減少が顕著である(図6において矢印 の傾きが小さい)といえよう。またこのことは、反応 速度論実験の結果からも確かめられる. 図8は. (a) Codyらの方法[13]をもとに重水素化して合成した模 擬IOMの水熱実験から求めたD/H比減少のプロファ イル[28], 及び(b) Murchison 隕石の IOM を不活性ガ ス雰囲気下で加熱し、赤外吸収スペクトルの変化から 求めた脂肪族C-H減少のプロファイル[29]。を重ねて プロットしたものである. (a)と(b)を比較すると. 300℃程度を境に低温側ではD/H比の減少が速く,高 温側では脂肪族C-Hの減少が速いことが分かる.

以上を踏まえ、様々なコンドライトの水素同位体比 (δD値)とH/C元素比との関係[20, 21](図6)を考え てみよう、まず、IOMの前駆物質は2章で述べたよう に星間空間起源の高いδD値を持っていたと考えられ る. また、H/C元素比は一般に加熱により減少する ことから、IOMの前駆物質のH/C比も高いと予測で きる. したがって、IOMの前駆物質は図6において右 上(おそらくグラフ枠の範囲外)にプロットされるであ ろう. 低温の水質変成のみを受けた隕石は、H/C比 があまり変化せずに、 δ D値が減少する(図6: CR, CI, CM). おそらく、分子構造はあまり変化せずに、比 較的δD値の低い水と同位体交換が起こったのであろ う. 引き続き熱変成を受けるとH/C比も減少する(図 6: CV, CO). 一方, 水質変成をあまり受けずに熱変 成を受けると、 δ D値はあまり減少せずに、H/C比の みが減少する(図6: 普通コンドライト[OC]). このよ うな過程を経て、図6にみられるような複雑な δ D値 とH/C比の関係に至ったと考えることができよう. なお、普通コンドライトのIOMにみられる高い δD 値は、議論の的となっており、金属鉄などが水熱変成 により酸化され、母天体から水素が失われた際の同位 体分別に伴いδD値が高くなったとも考えられている [21].

3.3 短期的な加熱による変成

南極で発見された隕石の中には、CM、CIコンドラ イトの特徴を持っているが加熱による脱水などが見ら れるものが多数存在する. Nakamura[30]はこれらの 隕石を岩石・鉱物学的特徴に基づき、4つの加熱ステ $- \tilde{y}$: $\lambda = \tilde{y}$: (<300°), $\lambda = \tilde{y}$: (300~500°). ステージIII($500\sim750$ °C)、ステージIV(>750°C)に分 類した. これらの隕石は水質変成の後に. 衝突あるい は太陽輻射熱等により、一般的なコンドライトが経験 した熱変成よりも短期間の加熱を受けたと考えられて いる[31]. このようなCMコンドライトのIOMの熱分 解ガスクロマトグラフィー分析の結果、加熱温度の高 いものほど、熱分解生成物の量が少ないことが分かっ た[32]. これは、高温を経験したものほど、IOMに含 まれる側鎖や架橋構造が減少し、より芳香族構造が発 達した結果. 熱分解によって分離しにくくなったもの と考えられる. このことは、Y-86720隕石(経験温度 >750℃)のIOMの赤外吸収スペクトルに脂肪族C-Hや C=Oがあまり見られないことからも分かる[18](図 5C). また、加熱によるH/C比の減少も見られる[20] 21, 26](図6: CM-H). しかし、熱履歴の指標とされ るラマンスペクトルのGバンド位置・半値幅を見てみ ると、750℃以上を経験したと考えられるY-86720隕 石は、一般的なCMコンドライトの範囲内に収まって いる[19]. 同様に熱履歴の指標とされる, C-XANES スペクトルのグラフェン構造に由来する励起子のピー クも、Y-86720隕石にはあまり見られない[24]. 例え ば325~600 ℃ を経験したとされるAllende隕石 (CV3.2/>3.6) [33]のラマンやC-XANESスペクトルと 比べると、Y-86720のIOMはずっと始原的にみえる. さらに、WIS 91600(300~500℃)、PCA 91008(500~ 750℃)、及びY-86720のC-XANESスペクトルの励起 子のピークは、Vigarano隕石(CV3.1/3.4、経験温度 300~400℃ [33])と比べると非常に低い[34](図9). こ のような、ラマンスペクトルのGバンドやC-XANES の励起子は、いずれも芳香族の環状構造に起因し、こ れらの発達はIOM中のグラフェン構造の発達度を示 す. したがって. 南極隕石などにみられる加熱を受け たCMコンドライトは、加熱時間が短期間だったこと により、長い期間熱変成を受けたCVやCOコンドラ イトほどにはグラフェン構造が発達しなかったと考え ることができる.一方で、H/C比や側鎖の減少は、短期間の加熱でも比較的速く進行するのであろう.

3.4 Tagish Lake 隕石

もう一点特筆すべきなのは、2000年1月にカナダ西 部の凍った湖に落下した、Tagish Lake 隕石である. 隕石の一部は、数日中に手で触れることなく回収され、 冷凍保存されたため、地球の物質による汚染の最も少 ない隕石と言える. Tagish Lake 隕石は. 一般的な炭 素質コンドライトの母天体と考えられているC型小惑 星よりもさらに始原的なD型小惑星起源であると考 えられている[35]. 岩石学タイプは2だが、CIとCM との中間的な特徴を持っており、未分類の炭素質コン ドライトとされている. 最近, Tagish Lake隕石の4 つの異なる岩相(5b, 11h, 11i, 11v)から分離された IOMの分析が行われた[36]。それぞれの岩相のIOM の水素同位体比(δ D値)とH/C元素比は. 5b>11h>11i >11v>Previous(以前の試料[20])の順に減少が見られ (図6). 母天体での水質変成度の違いを反映している と考えられている[36]. また、Tagish Lake隕石の IOM(以前の試料[20])とWIS 91600(経験温度300~ 500℃のCMコンドライト)のIOMの¹³C NMRスペク トルの類似が見られることなどから、これら隕石との 関係性も指摘されている[34]. Tagish Lake 隕石には、 加熱を受けたCMコンドライトのような含水鉱物の脱 水は見られないため、比較的低温での短期的な加熱を 反映している可能性もある.

4. 有機物と鉱物との関係

最後になるが、IOM研究において重要な点として、これらの有機物が独立に存在しているわけではない、ということが挙げられる。つまり、有機物は隕石中で共存する鉱物などの無機物質と密接に関わりあっており、その関係を無視することはできない。例えば、隕石中の有機物と粘土鉱物との共存関係が観測されている[37,38]。また、IOMの模擬物質としてフミン酸を使った加熱実験から、サポナイト(粘土鉱物の一種)の存在下においては有機物の熱的安定性が増すことが分かっており[39]、このような粘土鉱物が有機物を保護する役割を果たした結果、これらの周囲には有機物が残留しやすいことが示唆された。一方で、Murchison

隕石のバルク試料とIOMとで有機物の熱分解を比べると、バルク試料、つまり鉱物と共存している状態の有機物の熱分解の方が促進されたという結果もある[29]。また、Murchison隕石の透過電子顕微鏡による観測から、アモルファス炭素が硫化物の周囲を<2nm程度の厚さで取り巻いていることが見られ、フィッシャー・トロプシュ反応により硫化物の周囲に有機物が形成されたことが示唆されている[40]。

以上のような研究結果から鉱物種により有機物に及ぼす影響は様々であることがうかがわれ、今後個々の鉱物とIOMとの関係性を系統的に明らかにしていく必要があろう。また、IOMと水との水素同位体交換を考えるときに、含水鉱物との同位体交換や分配も考慮すべきである[21]. このような有機物と鉱物との関係は未だあまり研究が進んでおらず、今後は隕石中の有機物と鉱物の共存関係の詳細な観測を進めると共に、これら共存鉱物を含めた実験的研究が必要であろう。太陽系初期の物質進化過程の統一的な解明には、このような有機物と無機物質との関係性の理解が不可欠である。

5. 今後の展望

今後、さらに隕石コレクションやリターンサンプルコレクションが増えれば、パズルのピースを埋めるように初期太陽系での有機物の進化過程が解明されていくことが期待される。また分析技術の進歩と共に、隕石ほど多様な分析手法を適用できなかった、IDPなどの微小試料からより多くの情報を得られるようになるだろう。

はやぶさミッションによるリターンサンプルからの画期的な成果[41-46]は記憶に新しく、後続のミッションが待ち遠しい限りである。特に、はやぶさ2ミッションは、有機物を多く含むと考えられるC型小惑星をターゲットとしているため、まさに始原天体の有機物研究にはうってつけである。特に、(a)隕石有機物との類似性を直接確かめられる、(b)宇宙風化の影響を調べる、(c)地球上の有機物による汚染が最小限である、といった点において注目される。さらに、今後はより始原的なD、P型小惑星をターゲットとしたミッションも検討されている。D、P型小惑星起源と考えられている隕石は非常に少なく(先に紹介したTagish

Lake 隕石がその1つである), これらの小惑星からの 試料が手に入れば, 我々の太陽系始原物質に関する知 識は飛躍的に向上するだろう.

謝辞

原稿執筆の機会を与えてくださり、また査読者として有益なコメントをして頂きました薮田ひかる先生 (大阪大学)に感謝致します。筆者は日本学術振興会の支援を受けています。

参考文献

- [1] 薮田ひかる, 2010, 遊星人 19, 28.
- [2] Derenne, S. and Robert, F., 2010, Meteorit. Planet. Sci. 45, 1461.
- [3] Mueller, G., 1953, Geochim. Cosmochim. Acta 4, 1.
- [4] Hayatsu, R. et al., 1977, Geochim. Cosmochim. Acta 41, 1325.
- [5] Herbst, E. and van Dishoeck, E. F., 2009, Annu. Rev. Astro. Astrophys. 47, 427.
- [6] Greenberg, J. M. et al., 1995, Astrophys. J. 455, L177.
- [7] Ciesla, F. J. and Sandford, S. A., 2012, Science 336, 452.
- [8] Ehrenfreund, P. et al., 1991, Astron. Astrophys. 252, 712
- [9] Millar, T. J., 2002, Planet. Space Sci. 50, 1189.
- [10] Aléon, J., 2010, Astrophys. J. 722, 1342.
- [11] Anders, E. et al., 1973, Science 182, 781.
- [12] Nuth III, J. A. et al., 2008, Astrophys. J. 673, L225.
- [13] Cody, G. D. et al., 2011, PNAS 108, 19171.
- [14] Mumma, M. J. and Charnley, S. B., 2011, Annu. Rev. Astro. Astrophys. 49, 471.
- [15] Loren, R. B. and Wootten, A., 1985, Astrophys. J. 299, 947.
- [16] Kebukawa, Y. et al., Astrophys. J. 投稿中.
- [17] Cody, G. D. and Alexander, C. M. O'D., 2005, Geochim. Cosmochim. Acta 69, 1085.
- [18] Kebukawa, Y. et al., 2011, Geochim. Cosmochim. Acta 75, 3530.
- [19] Busemann, H. et al., 2007, Meteorit. Planet. Sci. 42, 1387.

- [20] Alexander, C. M. O'D. et al., 2007, Geochim. Cosmochim. Acta 71, 4380.
- [21] Alexander, C. M. O'D. et al., 2010, Geochim. Cosmochim. Acta 74, 4417.
- [22] Sephton, M. A. et al., 2000, Geochim. Cosmochim. Acta 64, 321.
- [23] Pizzarello, S. and Williams, L. B., 2012, Astrophys. J. 749, 161.
- [24] Cody, G. D. et al., 2008, Earth Planet. Sci. Lett. 272, 446
- [25] Yabuta, H. et al., 2007, Meteorit. Planet. Sci. 42, 37.
- [26] Oba, Y. and Naraoka, H., 2009, Meteorit. Planet. Sci. 44, 943.
- [27] Okumura, F. and Mimura, K., 2011, Geochim. Cosmochim. Acta 75, 7063.
- [28] Kebukawa, Y. and Cody, G. D., 2012, 43rd LPSC, Abstract 1034.
- [29] Kebukawa, Y. et al., 2010, Meteorit. Planet. Sci. 45, 99.
- [30] Nakamura, T., 2005, J. Mineral. Petrol. Sci. 100, 260.
- [31] Nakato, A. et al., 2008, Earth Planets Space 60, 855.
- [32] Kitajima, F. et al., 2002, Geochim. Cosmochim. Acta 66, 163.
- [33] Huss, G. R. et al., 2006, Meteorites and the Early Solar System II (Eds. Lauretta, D. S. and McSween, H. Y. Jr.), Univ. of Arizona, USA, pp. 567-586.
- [34] Yabuta, H. et al., 2010, Meteorit. Planet. Sci. 45, 1446.
- [35] Hiroi, T. et al., 2001, Science 293, 2234.
- [36] Herd, C. D. K. et al., 2011, Science 332, 1304.
- [37] Pearson, V. K. et al., 2002, Meteorit. Planet. Sci. 37, 1829.
- [38] Kebukawa, Y. et al., 2009, Chem. Lett. 38, 22.
- [39] 癸生川陽子, 中嶋悟, 2008, 遊星人 17, 232.
- [40] Brearley, A. J., 2002, 33rd LPSC, Abstract 1388.
- [41] Nakamura, T. et al., 2011, Science 333, 1113.
- [42] Yurimoto, H. et al., 2011, Science 333, 1116.
- [43] Ebihara, M. et al., 2011, Science 333, 1119.
- [44] Noguchi, T. et al., 2011, Science 333, 1121.
- [45] Tsuchiyama, A. et al., 2011, Science 333, 1125.
- [46] Nagao, K. et al., 2011, Science 333, 1128.

火の鳥「はやぶさ」未来編 その1~小惑星探査からの惑星科学~

渡邊 誠一郎」、はやぶさ2プロジェクトチーム

(要旨)「はやぶさ」後継機としてC型小惑星をめざす「はやぶさ2」は開発の山場を迎えている。初期太陽系の記憶を留め、物質混合の指標に富む始原天体の試料を持ち帰り、鉱物-水-有機物相互作用による物質進化の多様性を実証し、地球への物質供給の様態を解明する。さらに宇宙衝突実験を行って微小重力瓦礫天体(微惑星アナログ)の物理特性を調べ、地下の物質を回収をも試みる。地上観測ではスペクトルも自転軸の向きも不確定な天体である。その天体の素顔をさまざまな装置で観測しつつ、そのデータからリアルタイムで運用オプションを選択し、着地と試料回収を試みる。洗練された技術による自在な運用が、科学成果を最大にする理工一体の探査の姿を連載していく。

今回から始まる小惑星探査機「はやぶさ2」の連載では、日本惑星科学会の皆さんにミッションのイメージを共有してもらうことを目的にしたい. 私の「はやぶさ」のイメージは夜空を切り裂く火焔の長い尾、まさに火の鳥である. 皆さんはどうだろうか.

手塚治虫の『火の鳥』. その「②未来編」で語られる 人類の滅亡. ただ1人残った山之辺マサトは火の鳥か ら宇宙生命(コスモゾーン)の神秘を明かされ, 永遠の 生命を与えられる. 地球の復活を見守るために...

1. うなぎとはやぶさ

名古屋と言えば「ひつまぶし」、稚魚の不漁で昨夏は蒲焼きの高騰が話題となった。ウナギは孵化するとレプトケファルスと呼ばれる幼生を経てしらすうなぎ(グラスイール)となって日本沿岸に現れ川を遡る。ニホンウナギ(Anguilla japonica)の故郷は長い間謎だった。東京大学大気海洋研究所(2010年までは海洋研究所)の塚本勝巳のグループが40年にわたってその謎を追い続け、2005年6月には生後2日(ウナギは生まれ

つき耳石を持ち日輪が形成される)の幼生をグアム西 方の海底山脈(西マリアナ海嶺南部)[1]で、2009年5月 には卵をそのすぐ南の海域[2]で、それぞれ採取する ことに成功した。近くでは産卵期の親ウナギも捕獲さ れ、ニホンウナギの故郷は解明された(読み物としては、 例えば、[3])。

著者(渡邊)は以前,フィリピン海プレートの拡大が ニホンウナギの大回遊の起源ではないかという与太話 を語ったことがあった[4]. 少なくとも,ウナギ属の 種分化や幼生を海流に乗せて大量にばらまく拡散戦略 の成功は、プレートテクトニクスによる大陸や地峡、 海嶺、多島海などの配置変化と密接に結びついていた はずである.地球科学と遺伝子解析からうなぎの年代 記が書かれていくことを大いに期待したい.

でも、何でうなぎなのか、はやぶさの話ではないのか、実は両者は私の中では妙に呼応する。地球に接近する多数の小惑星・隕石の楕円軌道と日本に襲来する多数のニホンウナギの回遊環路、小惑星に行ってサンプラで砂粒や塵を採取するサンプルリターンとグアム沖に出かけネットで仔魚や卵を採取するリサーチフィッシング。太陽系環境と放射年代を刻んだ小惑星の粒子と海洋環境を日輪に刻んだウナギの耳石。地球史に影響を与えた隕石の母天体を探る小惑星探査機のフライトと日本文化の一翼を担う食材の誕生地を探る海洋

^{1.} 名古屋大学大学院環境学研究科/宇宙航空研究開発機構はや ぶさ2プロジェクト

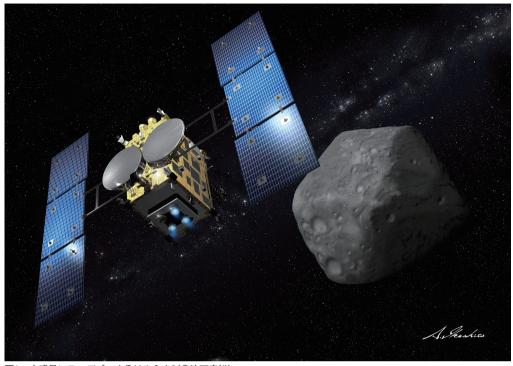


図1:小惑星にランデブーするはやぶさ2(©池下章裕).

調査船のクルーズ、そして、惑星科学と放射年代学から辿る海と生命の歴史と地球科学と分子系統学から遡る海と魚類の進化…

太陽系を回遊する小惑星の群れに切り裂くように飛び込み獲物を捕らえるはやぶさの一撃、イメージは共有してもらえただろうか. え、無理. そういう方は「うなぎ、はやぶさ」でググって欲しい. 蒲焼きが太陽電池パネルって…相模原と言えば「はやぶさ重」になるか. 閑話休題.

2. はやぶさ2プロジェクトの経緯

小惑星探査機「はやぶさ2」は、「はやぶさ」の後継機として、地球接近小惑星(Near-Earth Asteroids: NEA)の1つを訪れて、表面物質の地球への持ち帰り(サンプルリターン)をめざしている(図1)。現在のところ、C型小惑星(162173)1999 JU $_3$ を探査対象天体として、2014年後半の打ち上げを目標にタイトなスケジュールで開発が進められている。NEAというのは、地球軌道に接近する小惑星で、もともと小惑星の故郷であるメインベルト(軌道長半径が2.15—3.25 AU)に

あったものが木星など他の惑星の重力摂動によって運ばれたもので、数百万年から数千万年で太陽に飛び込むか、地球などの惑星に衝突するか、あるいは木星軌道以遠に放出されるかの運命にある過渡的な天体である。

はやぶさ2計画は2007年6月にプロジェクト準備審査を経てプリプロジェクトとなっていたものの、本格的な起動は2010年6月のはやぶさ帰還後であった.小惑星サンプルリターン技術実験を行う工学実証ミッションであったはやぶさに対し、はやぶさ2はその技術を使って始原天体からの試料採取をめざすという理学ミッションを持った探査機である.ただし、はやぶさは数々のトラブルに見舞われており、トータルな意味でのサンプルリターン技術が確立できたとは言い難かった。そのため、その技術をより確実なものにし、それを駆使して科学成果を最大限にするような運用を行うことがミッション成功の鍵となる。その意味でまさに工学と理学が一体となって進めるべき探査であることがはやぶさ2ミッションの大きな特徴である。

はやぶさ2プロジェクトにはいくつかの課題があった。まずは非常にタイトな開発スケジュールのもと、

基本設計は初号機を踏襲したものとなり、搭載機器に ついても初号機から踏襲するものは開発評価モデル (EM) や試作モデル(PM) を制作せずにいきなりフラ イトモデル(FM)を制作する方式が採られた。初号機 制作から10年が経過し、調達/性能の観点から部品 等を変更せざるを得ない中で、この方式での開発はリ スクを抱えることを意味する。また、宇宙航空研究開 発機構(JAXA)の中で、月・惑星探査プログラムグル ープ(JSPEC)が担当するミッションであるという形式 的な理由から、宇宙科学研究所(ISAS)の宇宙理学委 員会において科学的意義などの議論が行われて来なか った、そのため、正統性に疑念が持たれることとなっ た. さらに、はやぶさ2のサイエンスチームがはやぶ さ初号機のグループから惑星科学コミュニティ全体へ となかなか広がらなかった. これはタイトなスケジュ ールと準同型機ということで理学的観点から搭載機器 の工夫ができる自由度が少ないこともあったが、プロ ジェクト内外でのコミュニケーションの少ないことが 主要な原因であった.

こうした状況の下で、2010年9月には惑星科学研究センター(CPS)が主催した月惑星探査緊急討論会や、2010年日本惑星科学会秋季講演会での議論を踏まえ、2010年11月にはプロジェクトとコミュニティをつなぐ「はやぶさ2から考えるサイエンス研究会」が発足した。そして同研究会の継続的な議論を通じて、2011年末までに搭載機器のサイエンスPIの交替を含む新メンバーのプロジェクト参加によるチーム強化が図られた。

また、2011年10月のISAS宇宙理学委員会ではやぶさ2の集中審議が行われ、同委員会の下にはやぶさ2タスクフォース(TF) [座長:渡部潤一(国立天文台三鷹)]が設置された、プロジェクト外の小惑星や惑星物質、惑星形成論の専門家とプロジェクトのサイエンスを中心とするメンバーが参加して、2012年9月までに14回の会合を重ねた、2012年12月のISAS宇宙理学委員会にTF活動総括が報告されたが、そこでは「C型小惑星である1999 JU3をターゲットとするはやぶさ2の科学の意義は高いものである。それを核にした、様々な宇宙科学分野を巻き込んだ分野横断的な議論の場を作り出していくことは可能であり、そして、そのことが日本において惑星科学だけでなく宇宙科学全体を盛り上げることにつながると強く確信する。そのた

めに、宇宙理学委員会は、はやぶさ2への積極的関与 を今後も続けるべきである.」と述べられている².

TFの活動と軌を一にして全JAXAでのプロジェクト推進体制の構築が進められ、2012年9月から10月にかけてプロジェクトマネージャとして國中均、サブマネージャとして稲場典康、プロジェクトサイエンティスト(PS)として渡邊誠一郎が就任し、吉川真はミッションマネージャとなるなど、プロジェクトの中核の体制強化が図られた、PSの渡邊はTFの流れを汲んでプロジェクトとコミュニティをつなぐ役割が期待されているが、ミッション経験が無いため、吉川真をはじめ安部正真・田中智・藤本正樹・小林直樹のISASの探査経験者と石黒正晃(ソウル大学)からなるPSチームを中核として、さらに観測機器チームや地上観測チームからのメンバーを加えた統合サイエンスチームを新設して、サイエンスをより強力に推進する体制が2012年のうちに構築された。

3. 小惑星探査の意義

小惑星探査はマイナーな天体を訪れる"おたく"的なミッションであるとの誤解が、主に惑星科学から遠い分野の研究者にあると言う。そもそも1天体だけを訪れる惑星探査は、全天の多くの天体に望遠鏡が向けられる天文観測衛星からすると普遍性に関する疑義がつきまとうらしい。『遊・星・人』の読者のほとんどには釈迦に説法であろうが、小惑星探査の意義について確認しておきたい。一言で言えば「小惑星の科学」ではなく、「小惑星からの惑星科学」を展開することに意義がある。

小惑星探査の第一の意義は小惑星が太陽系最初期の (場合によっては太陽系形成前にも遡る)記憶を留めている可能性があるという点にある。天体表面の単位質量の重力エネルギーは $GM/R \approx G\rho D^2$ (ここで、Gは万有引力定数、M、R、D、 ρ はそれぞれ天体の質量と半径、直径、平均密度)であり、直径1000 kmの天体では、内部エネルギーに換算して200 K程度の温度に、運動エネルギーに換算すると、0.6 km/s程度の速

^{2.} 宇宙科学研究所の理学班員の方なら宇宙理学委員会の議事録・ 会議資料のページ

http://www.isas.jaxa.jp/home/rigaku/member/siryo.phpの 第 38回会議資料の中にTF 活動総括が掲載されているのでぜひご覧いただきたい.

度に相当する.最大の小惑星ケレス[(1) Ceres]の直径が950 kmであるから、かつてより大きな母天体を構成していなかったとすれば、集積によって融解や強い熱変成を受けた可能性は低いと考えられる(ただし、軌道離心率は大きいため、数km/s程度の衝突を経験し、局所的な熱変成を受けた可能性は残る).一方でベスタ[(4) Vesta]のように平均直径が525 kmしかなくても融解を経験したと考えられる天体があり、26Alのような短寿命核種が熱源と推定されている.しかし、26Alが熱源として有効なのは太陽系最初期の物質であるCaやAlに富む難揮発性包有物(CAI)の形成後数百万年以内であり、太陽系の最初期の分化過程と考えられる.つまり、小惑星は分化しているにせよしていないにせよ、太陽系形成直後の重要な情報を保持している可能性が高い.

特に天体形成後に組織が大きく変質するような高温を経験していない始原天体では、太陽系形成前後の記憶がプレソーラー粒子、CAI、コンドリュールなどの構成粒子毎に刻まれている可能性がある。あるいはガスとの反応や母天体上での熱水が関与した鉱物反応(水質変成)を記録している可能性がある。特に含水鉱物や有機物などの低温物質が壊されずに残っていれば、こうした記憶が保持されている可能性は高い。これは、地球や月のように集積による高温を経験した大きな分化天体からは決して得られない情報である。

小惑星探査の第二の意義は、小惑星メインベルトにちょうど原始太陽系円盤(以下、円盤という)の雪線(snow line)が位置していたため、強い動径方向の組成勾配が期待され、円盤での固体物質の混合過程が記録され得ることである。雪線とはH2Oがそれより内側では昇華し、外側では凝縮するような太陽を囲む境界線である。円盤中にダストが浮遊している間は雪線が地球軌道より内側まで入っていた可能性が指摘されているが、太陽放射が直接円盤中央面にも届くようになると小惑星メインベルト中に位置するようになる。

雪線より内側では固体物質は岩石が主体となるが、外側では氷が主体となり、組成は大きく変化する。さらに有機物の昇華温度や分解温度なども雪線前後に分布するため、有機物組成も大きく変化する。小惑星の表面スペクトルがおおまかには、火星軌道のすぐ外側で高軌道傾斜角のハンガリア族がE型、メインベルトの内側領域でS型、中央でC型、外側領域や木星軌道

にあるトロヤ群でD型と分布しているのは(図2参照)、組成がそれぞれ、還元的で金属に富むエンスタタイトコンドライトタイプ、岩石主体で有機物に乏しい普通コンドライトタイプ、酸化的で有機物に富む炭素質コンドライトタイプ、低温有機物や氷を含むより低温物質(2000年にカナダに落下したTagish Lake隕石などに相当するとの見解もあるが不確定)に対応していると考えられている(例えば、[5]). しかし、個々の天体の中でどの程度組成の不均一があるかは分かっておらず、探査によって、雪線付近での物質混合の程度が解読できると期待される.

小惑星探査の第三の意義は、地球への物質供給、とりわけ水や有機物の供給についての知見を得ることができることにある。地球は水の惑星と言われるが、海洋の地球全体の質量に占める割合がは

$$f_{\rm s} = \frac{3a_{\rm s}d_{\rm s}}{R} \frac{\rho_{\rm s}}{\overline{\rho}} \approx 2.3 \times 10^{-4}$$

に過ぎない. ここで、 $R \ge \bar{p}$ は地球の半径 (6.4×10^3) km) と平均密度($5.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$), a_s , d_s , ρ_s は, そ れぞれ海洋の地表に占める面積比(0.71),海洋平均深 度(3.7 km), および海水の密度($1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)である. 地球全体に占める水の割合となると, 地表の水の 97.5% は海洋にあるが、マントル中には海洋の5-10 倍程度の水が蓄えられうる(例えば、[6]). しかし、こ れを考慮しても地球の水の質量比は0.1%程度に過ぎ ず非常に小さい、地球のマントル中には強親鉄元素(白 金族元素など鉄と親和性が強くコア形成によってマン トルから取り除かれる元素)が過剰に存在していて. 地球集積の最終ステージで付け加えられたとするレイ トベニア(late veneer)仮説が提唱されている(例えば、 [7]). これに従えば、例え、主要な集積時の材料物質 に水がまったく入っていなくても、数%の炭素質コ ンドライト物質(含水量:1-10%)のレイトベニアが 付け加えられれば、地球の水の量は説明できる.

一方で、エンスタタイトコンドライトや普通コンドライトにも地球と同程度かそれ以上の水が含まれているため、それらから地球ができたとしても水の量にただちに問題がある訳ではない。さらに円盤ガスのもとで地球が成長したなら、水素分子を主成分とする分厚い大気が地表を覆うため、 H_2 の酸化によって H_2 Oができた可能性が高い(例えば、[8])。このように地球の水の起源には不確定性が多いため、小惑星の含水量や

水の中の水素同位体比(D/H比)を調べることが重要である。特に、含水量の表面分布や鉛直方向変化を定量的に押さえることで天体スケールでの平均含水率を推定できれば意義深い。

有機物に関しては、母天体上での鉱物-水-有機物相 互作用の解明が鍵となる。 生命起源物質は低分子から ボトムアップで合成された(ストレッカー反応など)の か、複雑な高分子が初生的に生じた後、加水分解によ って形成された(フィッシャー・トロプシュ型反応な ど)のか議論がある[9]. 隕石に比べ大気圏突入による 熱変成や地球物質による汚染がずっと少ないリターン サンプルの分析によって、宇宙における有機物進化の 本格的な解明が可能となる. 隕石の有機物分析は、鏡 像分子の非対称性と水質変成の関係³[9]など興味深い テーマが数多くあるが、無機物分析に比べてまだまだ 系統的な研究が進んでいない。特に組織を見ながら、 有機物と鉱物の関係を解析することはほとんどなされ ていない. サンプルが地上にもたらされる2020年ま でに有機物の総合的な分析の技術開発を戦略的に進め ることが重要である.

小惑星探査の第四の意義は、惑星成長の衝突過程を明らかにする天然の物証を探ることにある。小惑星には、イトカワのように岩塊や砂が弱い重力により集まった瓦礫天体(rubble-pile 天体)が多く存在すると考えられている。こうした微小重力瓦礫天体は惑星成長のもととなった微惑星のアナログ天体とみなすことができる。破壊過程を取り入れた惑星成長過程の研究がようやく本格的に行われるようになった(例えば、[10])が、その理解を進展させるには微惑星の衝突に対する振る舞いを知ることが不可欠である。小惑星に対する大規模衝突実験はその有力な手段である[11]。さらに天体表面に残されたクレーターや岩塊のサイズ分布、回収試料の衝撃変成の様子や年代などを分析することで小惑星の衝突過程を明らかにすることができる。

4. 探查対象天体 1999 JU₃

はやぶさ2の探査対象天体である1999 JU3は, 1999

年5月10日に米国のリンカーン地球接近小惑星探査 (LINEAR) プロジェクトによって発見された。その後,確定番号162173が付いている。1999 JU $_3$ の軌道要素を示したものが表1である。a>1.0 AU, q<1.017 AUであるので1999 JU $_3$ はアポロ型軌道(地球軌道と交差し、主に地球軌道の外側にある。)のNEAである。

表1:小惑星(162173)1999 JU₃の軌道要素.

軌道要素	記号	値	備考
軌道長半径	a	1.18953 AU	
軌道離心率	e	0.19026	
軌道傾斜角	i	5.88404°	対黄道面
近日点引数	ω	211.423°	
昇交点経度	Ω	251.617°	
平均近点角	M	226.571°	
近日点距離	q	0.96321 AU	=a(1-e)
遠日点距離	Q	1.41585 AU	=a(1+e)
公転周期	T	473.875 day	1.30年

(注) JPLのWebより引用. 元期は2012年9月30日.

1999 JU₃については、はやぶさ2の探査候補に選ばれた後、2007年から2008年にかけて観測キャンペーンが行われ(例えば、[12])、また、2012年にも追加の観測が行われた。それらの観測に基づいて決められた主な物理パラメタは、自転周期7.63時間、直径0.8 km、幾何アルベド0.06である。形状はほぼ球形であるため、自転軸の向きを小惑星の変光曲線(ライトカーブ)から決めることが難しい。石黒正晃らが中心となった国際的なチームによる自転軸向きの解析が行われているが、現在のところ確定はできていない。

1999 JU_3 の可視波長域での反射スペクトルの分光観測は、いくつか行われており、C型であることはほぼ確実だが、より細かい特徴を議論するためには信頼性が乏しい。さらに観測時期によって結果には違いがあり、中には $0.65~\mu$ m近傍に吸収帯(事実なら含水鉱物の存在を示唆する)と解釈できる凹みが見られる観測データもある(例えば、[12])。このスペクトルの差異は観測誤差に起因する見かけのものである可能性も否定できないが、天体表面に複数の異なる物質に覆われた領域が存在し、観測位相によって反射スペクトルが変化した可能性も指摘されている。

近赤外波長域の観測では1μm帯や2μm帯の吸収を 持たずかつ緩やかな右上がりの連続成分を持つスペク

^{3.} Murchison隕石中の非タンパク性のアミノ酸イソバリンの右と 左の鏡像異性体(D体、L体)の偏りに不均質があり、イソバリ ン/アラニン比と蛇紋石/カンラン石比の間には正の相関が ある、蛇紋石はカンラン石の水質変成で生成される含水鉱物 である。

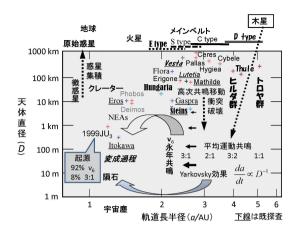


図2: 小惑星メインベルトからの物質輸送過程.

トルという典型的なC型の反射スペクトルが得られている。中間赤外波長域の測光データからは、前述の天体の直径や幾何アルベドが求められている他、熱慣性が数百程度であるとされている。これは厚いレゴリス層を持つ月や大型小惑星(50 $J/m^2/s^{1/2}/K$ 程度)とレゴリス層が少なく礫に覆われたイトカワ(750 $J/m^2/s^{1/2}/K$)の中間的な値となっている。ここで熱慣性 Γ とは、日変化に伴う小惑星の単位面積当たりの実効的な熱容量が $\Gamma \omega^{-1/2}$ (ただし、 ω は小惑星の自転角速度)で与えられるような量で、 $\Gamma = (\rho C_P k)^{1/2}$ と書ける(ρ , C_P , kはそれぞれ、表面物質の密度、単位質量当たりの定圧熱容量、熱伝導率である)。

1999 JU_3 の起源を考えるために、小惑星メインベルトからの物質供給について図2に従って説明しよう。軌道長半径と天体直径の平面に主な小惑星をプロットしたものである。小惑星名のフォントによってスペクトル型の違いを表している。ただし、(4) Vesta は V型、(21) Lutetia は M型である。メインベルトではおおまかに見れば、内側から E型、S型、C型と分布し、一番外側に D型が分布するが、分布にはかなり重なりがある。火星の衛星である、Phobosと Deimos は小惑星を捕獲したものと考えられているが、ともに C型もしくは D型である。

小惑星メインベルトでは小惑星どうしの衝突によって破片が生成される。破片のうち10kmよりも小さいものはYarkovsky効果によって軌道角運動量(a)が変化して動径方向に移動する。Yarkovsky効果というのは小惑星のもつ熱慣性によって、天体表面温度が最高

となり表面熱輻射が最大となる方向が太陽方向からずれるため、公転方向のトルクが生じて公転角運動量すなわちaが変化する効果である。自転軸が公転面に垂直な場合、自転方向が順行または逆行に対してaは増大または減少する(日効果)。自転軸が横倒しの場合は、自転方向によらずaは減少する(年効果)。中間的な場合、両効果が重なるが、日効果の方が卓越する場合が多い。そのため、衝突によって生成された破片は動径方向に広がる。その動径移動速度は天体直径に反比例して、小さいものほど速く移動する。

Yarkovsky 効果によって、動径方向に移動した破片 は、平均運動共鳴(小惑星の公転周期と摂動天体の公 転周期が簡単な整数比となる軌道長半径での共鳴)や 永年共鳴(小惑星軌道の近日点方向や昇交点方向の回 転角速度と惑星系の対応する固有角振動数が一致する ことでの共鳴. 例えば[13])の位置に到達すると. 離 心率が増大し、火星や地球の軌道と交差するようにな る. 地球軌道付近に小惑星を供給する共鳴としては, メインベルトの内側領域にある3:1の平均運動共鳴 (2.50 AU)と v₆永年共鳴(小惑星の近日点移動角速度 が土星のそれと一致する共鳴、軌道傾斜角が0なら 2.15 AU) が重要である. ただし. 非常に小さい破片 小惑星はYarkovsky 効果による移動速度が速すぎて. 共鳴をすり抜けて地球周辺に供給される可能性がある. こうしたサイズによる違いは地球にもたらされる物質 供給過程を考える上で重要である.

地球近傍小惑星(NEA)はこのようなメカニズムで メインベルトから供給された破片小惑星であると考え られる. 火星や地球などの惑星との相互作用で, 遠日 点距離が小さくなりメインベルトから切り離され. よ り小さい軌道長半径を取るものが生まれる。はやぶさ 2の探査対象天体である1999 JU3はそのような小惑星 の1つである. 軌道進化の計算から, 1999 JU3は v6永 年共鳴によって、小惑星メインベルト内側領域からも たらされたと推定されている。実はメインベルト内側 の低軌道傾斜角領域にはErigone族と呼ばれるC型の スペクトル型を持つ衝突族があり、数億年前に起こっ たと推定される衝突破壊によって生じた多くの破片小 惑星がメンバーとして同定されている[14]. 前述の Yarkovsky効果によって、1 kmサイズの逆行自転の 破片であれば、0.2 AUほど内側に移動して v₆永年共 鳴領域に供給され得ることがわかっている.

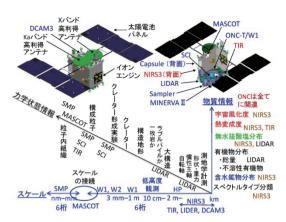


図3: はやぶさ2の搭載機器と機器間の連携(杉田精司・ONCチームの原図を改変). 搭載機器の略号については本文参照.

実は地上観測で得られた1999 JU $_3$ の可視・近赤外波長域のスペクトルは、Erigone族の最大小惑星である(163) Erigoneのスペクトルと類似している。こうした状況証拠から1999 JU $_3$ はErigone族の破片小惑星の1つとして生成され、数億年をかけて ν_6 永年共鳴領域に運ばれて離心率が上昇し、やがて地球と近接遭遇し、NEAとなったという仮説が成り立ち得る。はやぶさ2による探査は、まさにこうした地上からの観測だけでは決着がつかない仮説に対して、リモートセンシングやリターンサンプル分析を通じて、新たな知見や年代軸を導入することで、検証を可能とし、天体の起源を明らかにできると期待される。

5. 搭載機器

ごく簡単にサイエンスに関係する搭載機器を紹介する(図3). 探査機が小惑星に到着し全球観測をするホームポジション(HP)は高度20 kmとされているので,以下その数値を用いる.

近赤外分光計(NIRS3) は有効口径30 mm, F1.0の 集光部に回折格子を組み合わせた光学系に、128画素 のInAsフォトダイオードリニアアレイセンサーを組 み合わせた分光計で、波長1.8 $-3.2~\mu$ mを波長分散30 nm/pixel以下で分光する。視野全角は0.1°でHPでの 分解能は35 mで、表面を一点一点分光していく、受 動冷却により185 K程度のセンサー温度を実現して、 S/N > 50を達成する。検出をめざす主な吸収帯とし ては、27 μ mのOH基の伸縮振動と2.9 $-3.0~\mu$ mのH₂O



図4: 小型搭載型衝突装置によるクレーター形成実験 (⑥池下章裕).

の変角振動であり、含水率や含水鉱物種が天体表面で どの程度変化するかの情報が得られる。これは試料採取を行う着地地点を決めるにも最重要の情報である。

中間赤外カメラ(TIR)はフィルタにより制限された 波長8—12 μmの光を画素 320×240, 視野角 16°×12°の 2次元非冷却ボロメータ(受光した感熱素子の温度変化を抵抗値変化から検出する赤外線検知素子)により撮像する装置である.解像度はHPで17 mである.金星大気探査機「あかつき」に搭載されたLIRを利用している.小惑星の表面温度を相対精度 0.3 K, 絶対精度 3 Kで測定し,自転温度変化から表面の熱慣性分布を 20% 程度の精度で決めることを目標としている.熱慣性の値は表面状態(岩塊存在度や砂層粒径など)を推定するのに使える.また,TIRの観測は Yarkovsky 効果などの実証に必要なデータを与える.

光学航法カメラ(ONC)は探査機の姿勢軌道制御用バス機器であるが、特に望遠カメラ(ONC-T)はフィルタ分光によるマルチバンド可視光カメラとして理学目的に使用される。 1024×1024 のCCDで、 $0.39\,\mu\mathrm{m}$, $0.48\,\mu\mathrm{m}$, $0.55\,\mu\mathrm{m}$, $0.70\,\mu\mathrm{m}$, $0.86\,\mu\mathrm{m}$, $0.95\,\mu\mathrm{m}$ $0.67\,\mu\mathrm{m}$, $0.86\,\mu\mathrm{m}$, $0.95\,\mu\mathrm{m}$ $0.87\,\mu\mathrm{m}$, $0.86\,\mu\mathrm{m}$, $0.99\,\mu\mathrm{m}$, $0.87\,\mu\mathrm{m}$, $0.86\,\mu\mathrm{m}$, $0.99\,\mu\mathrm{m}$, $0.87\,\mu\mathrm{m}$, $0.99\,\mu\mathrm{m}$, 0

レーザ高度計(LIDAR)もまた姿勢軌道制御用バス機器であるが、理学目的にも使用される。小惑星に対してレーザ光パルスを照射し、表面からの反射光パルスが戻ってくるまでの時間を計測して小惑星表面までの距離を決める装置である。ONCと組み合わせての小惑星形状モデルの作成や内部空隙率の推定、自由落下運用による重力計測などが重要な任務である。また表面ラフネスの測定やレーザ波長(1064 nm)での小惑星表面の幾何アルベドの測定、小惑星周辺空間の浮遊ダストの検出などが行われる。

はやぶさ2は打ち上げ後、宇宙空間で円錐+円筒状のサンプラホーン(金属製の固定ホーンと伸展ホーンの間をベクトラン製の布ホーンで接続)を伸展する.サンプラ(SMP)は、小惑星の着地時にサンプラホーンが接地した状態でTaの弾丸を発射し、イジェクタとして上方に放出された粒子をキャッチャーに捕らえるように設計されている。うまくいけば3回のサンプル確保が可能なように設計されている。また、伸展ホーン部先端は折り返しがつけられていて、小惑星からの離脱時に一時的に減速することで折り返しにたまった粒子をキャッチャーの方に送り込んで試料捕獲量を増やす工夫がなされている。キャッチャーは再突入カプセルに収納されメタルシールされる。リターンサンプルの分析のサイエンスについては、今後の連載で詳しく述べることとしてここでは触れない。

小型搭載型衝突装置(SCI)は質量2kgの銅のライナ がPBX爆薬の爆轟によって加速成形され、半球殻状 となって約2 km/sで小惑星表面に衝突する(図4). 爆 薬の爆発の際、構造物が四散するため、事前にSCIを 切り離し、母船を小惑星の陰に退避させた後に爆発さ せる。衝突のリアルタイムでの観測をするために退避 の途中で分離カメラ(DCAM3)を切り離し、これによ って衝突による放出物の撮像を行う. これによって衝 突位置が制約できるとともに、衝突地点の表面構造や 衝突のスケーリング則に関する知見が得られると期待 されている. 衝突破片が収まるのを待って、母船は生 成クレーターを探索し、ONC、NIRS3、TIRによるク レーターの撮影を行い, 地下物質や表層地下構造に関 する情報を得る予定である。可能であれば、クレータ -放出物に覆われた表面に着地し、サンプリングを試 みる. これによって地下物質の試料回収をして. 小惑 星表面の鉛直構造に関する知見を深めたいと考えてい る.

小型ランダMASCOTはドイツ航空宇宙センター (DLR)が中心となってフランス国立宇宙研究センター (CNES)が協力して開発している小惑星表面をホッピングにより移動できる小型着陸機である。搭載機器としては多色広角カメラ(CAM)、多波長熱放射計 (MARA)、磁力計(MAG)、分光顕微鏡(MicrOmega、分解能20 μ m、観測波長 0.9—3.5 μ m)がある。母船から切り離された直後から撮像を開始し、着地後も観測を進め、2回のホッピングで向きを変えて観測を続ける。MASCOTはリモートセンシング(1 km—1 cm)とリターンサンプル分析(1 mm—100 nm)のスケールギャップをつなぐ位置を占めるため非常に重要である。また、小型ローバMINERVA-II (複数台)も搭載される予定である。

現在、はやぶさ2は開発の山場を迎えており、システム機械環境サーベイ試験(図5)に続いて搭載機器をつなぎシステムとしてのインターフェース上の問題を把握することを主目的とする一次噛み合わせ試験に臨んでいる。

6. ミッションシナリオ

小惑星探査には、地上観測で事前に得られる探査対象天体情報がきわめて限られているという本質的な困難がある。そのため、小惑星に近づくアプローチフェーズと小惑星にランデブーするミッションフェーズにおいて、「その場」観測を実施し、運用に必要な天体の各種物理/光学情報を獲得し、その情報(および不定性)に応じて、その後の運用をダイナミックに切り替えていく必要がある。よって、事前のミッションシナリオは不確定性の大きな小惑星質量、自転軸の向き、表面温度分布、地形、地表面状態などについて想定し得る複数のモデルを用意し、各モデル(の組み合わせ)に応じた運用シナリオのオプションをあらかじめ用意しておくことが求められる。これらの運用シナリオ・オプションの総体をミッションシナリオと呼ぶべきである。

1999 JU₃の自転軸の向きは今のところわかっていない. 探査機は基本的には小惑星と地球を結ぶ線上に位置する. このため, 仮に自転軸が横倒しであった場合,極上空にあって半球のみが観測できる時期と,赤道上



図5: システム機械環境サーベイ試験に臨むはやぶさ2 (⑥JAXA).

にあって自転に伴いほぼ全球が観測できる時期が概ね 1/4 公転周期(約4ヶ月弱)毎に繰り返される。こうした状況において、全球リモートセンシングと着地点選定、リハーサル降下などを経て着地することはスケジュール的にかなりきついため、綿密な運用計画が必要である。

はやぶさ2ミッションは、リアルタイムの判断に基づく運用の精確さが科学成果の質を大きく左右する. 工学的制約と理学的要望がせめぎあう中で、次々と難しい決断をしていかねばならない。ミッションシナリオを共有し、理工一体で推進することが必須の探査なのである。なお、的確で迅速な判断を行うにはデータ通信量の確保が最重要であり、臼田の64 mアンテナの後継問題ともからんで、Kaバンドが活用できる体制の構築が望ましい。

はやぶさ2の搭載機器のフライトモデル(FM)はほぼできあがりつつあるが、ミッションシナリオに関してはこれから詰めていく必要がある。サイエンスの成果をより高めるために学会セッションや研究会などを企画していくので、皆さんからもぜひ様々な提案やアイディアをいただければと思っている。

「はやぶさ」の大気圏再突入. その燃えさかる体にわずかに先行して、卵のような再突入カプセルがオレンジ色の弧を描いてオーストラリアの大地に吸い込まれていった. 中にはイトカワの正体を明らかにする小さくも貴重なサンプルが格納されていた. それはまさに、太古から繰り返し地球に降り続く小惑星の無数のかけら、海や生命の材料をもたらしたかもしれない天

からの贈り物を象徴するシーンのようであった.この 鮮烈な光景を脳裏に焼き付け、われわれは次の願いを かなえる努力を進めている.「はやぶさよ、さあ、再 び舞い上がり、賢者の石を抱いて火の鳥となれ.」

マサトは孤独に耐えかね一人さまよい歩く. 彼はまだ知らない. 夜空に美しい光芒の引いて赤茶けた大地に落ちた火の鳥「はやぶさ」のかけらから, 再び生命の歩みが始まろうとしていることを. 気の遠くなるような長い長い年月をかけて繰り返されようとしている輪廻...

つづく

謝辞

本連載を提案いただいたはしもとじょーじ編集委員 長に感謝申し上げたい. また, 忙しい中で原稿を精読 いただき, いくつもの不備を指摘いただいたプロジェ クトメンバーの方々にお礼を申し上げる.

参考文献

- [1] Tsukamoto, K., 2006, Nature 439, 929.
- [2] Tsukamoto, K. et al., 2011, Nature Commun. 2:179.
- [3] 塚本勝巳, 2012, 世界で一番詳しいウナギの話(飛 鳥新社ポピュラーサイエンス).
- [4] 渡邊誠一郎, 2006, 理フィロソフィア10(名古屋 大学理学部・理学研究科広報誌)8.
- [5] 廣井孝弘, 杉田精司, 2010, 遊·星·人 19(1), 36.
- [6] 岩森光, 2007, 地学雑誌 116, 174.
- [7] O'Neill, H. St. C. and Palme, H., 1998, in The Earth's Mantle: Composition, Structure, and Evolution (Cambridge Univ. Press), 3.
- [8] 生駒大洋, 玄田英典, 2007, 地学雑誌 116, 196.
- [9] 高野淑識, 大河内直彦, 2010, 遊·星·人 19(4), 254.
- [10] 小林浩, 2011, 遊·星·人 20(4), 317.
- [11] 荒川政彦ほか、2012、遊・星・人21(3)、247.
- [12]川上恭子ほか、2010、遊・星・人 19(1)、4.
- [13] 長沢真樹子, 2008, 遊・星・人 17(4), 223.
- [14] Vokrouhlický, D. et al., 2006, Icarus 182, 118.

一番星へ行こう! 日本の金星探査機の挑戦 その20 ~惑星間空間クルーズの道中にて~

今村 剛¹

(**要旨**)「あかつき」を打ち上げてから1000日が過ぎた. 金星周回軌道投入はまだまだ先である. 長期クルージングが抱える課題について考えてみる.

1. はじめに

2013年2月13日,「あかつき」は打ち上げから1000日目を迎えた。もともとは2010年5月に打ち上げたあと200日で金星周回軌道に入る予定であったから[1],その5倍の期間を惑星間空間で過ごしたことになる。2015年暮れに計画されている金星周回軌道投入までの折り返し地点にも来ていないが、このあたりで現状を紹介しつつ、長い巡行期間を研究者サイドがどう乗り切るか考えてみたい。はやぶさ2、日欧水星探査BepiColombo、日本からの参加も見込まれるESAの木星探査JUICEなど、はじめから長い巡行期間を予定している今後のミッションも似た問題を抱えるはずである。

2. あかつきの今

現在「あかつき」は、金星周回軌道にいる場合に比べて近日点が太陽に若干近い太陽公転軌道上にいる[2]. 近日点では当初予定より38%も強い太陽光を浴びるため、探査機の表面材の反射率が経年劣化で徐々に下がっていくと、熱入力の増加がいつか深刻な問題を引き起こすかもしれない。今のところ大きな問題は起きていないが、およそ200日ごとに訪れる近日点通過のたびに全体的に温度が上がっており、注視していく必要がある。この困難な状況で探査機を少しでも安

全な状態に保つため、熱入力に対して比較的強いと考えられる高利得アンテナ取り付け面を太陽に向けた姿勢を保っている。そのため地球との通信には高利得アンテナではなく方向可変な中利得アンテナを使うことが余儀なくされており、か細い回線での運用となっている。ただしこのような熱の問題は、金星に着いたあとは太陽からの距離が十分にあるので解決するはずである

金星周回軌道投入の失敗と新軌道計画に基づく軌道制御など、慌ただしく過ぎていった2011年暮れまでの状況とは違うものの、現在も緊張感あふれる運用が続いている。一見同じような作業を日々繰り返しているが、探査機・地球・太陽の位置関係や探査機の様々なサブシステムの状態が徐々に変化するのに応じて、コマンドの中身を改訂し続けねばならない。前述のように探査機の温度の推移を眺めて対策を講じねばならないこともある。いつまでもルーチンワークにはならず、ただ待っていれば過ぎていく時間ではない。

3. 研究体制の維持

2010年に金星周回軌道投入に失敗して金星到着が一気に遠ざかったとき、どうやって理学メンバーの士気を維持していくのか、改めて金星に到着するころに実働となる次の世代をどうやって取り込んでいくのかと、途方に暮れた、かつて火星探査機「のぞみ」が同じように期せずして長期間の巡行を余儀なくされたが、このときは巡行中も太陽風などの観測を続けていたし、

ミッションを支える宇宙プラズマのコミュニティには 研究活動を支える地球磁気圏や電離圏の観測衛星があった.しかし今回はそのようなことは期待できない. 2011年に金星の測光観測などを実施したが,あくまで期間限定のキャンペーンである. 開発段階でもない,データも出ない5年間,研究体制を維持できるのか. 今も答えは出ていないが,結果的には次に述べるような活動が「あかつき」の体制を支えつつある.

まず、他の衛星プロジェクトで活躍している数人のメンバーがいる.「あかつき」に搭載された赤外カメラや観測データ処理装置と同等のものが「はやぶさ2」に搭載されることも大きい. ある分野で突き抜けた能力を持つ者は分野を選ばず貢献できるものだと思い知る. 衛星ミッションの機会がなかなか増えない現状では、専門分野を狭くとらえずに、広く宇宙探査に貢献するのだという意識で貪欲に経験を積んでいくべきであろう.

金星大気研究に関しては、ESAの金星探査機Venus Expressのデータを用いた研究に、学生やポスドク研究者を中心として積極的に取り組んでいる。公開データを使うこともあれば、機器チームに共同研究者として参加してデータを使うこともある。Venus Expressが取得した画像データを「あかつき」のデータ処理パイプラインに流して、ツールの検証も兼ねて科学研究に取り組む者もいる。腕は磨き続けねば錆びついてしまう。このような取り組みがあってこそ、「あかつき」の観測データを手にしたとき速やかに成果を引き出すことができるだろう。

「あかつき」の運用と金星大気研究という名目で、ポスドク研究者を入れ替わり立ち替わりJAXAの任期付き職で受け入れているが、このことも次世代の研究者の開拓に結びついている。運用に携わることで探査機システムの理解が深まるのはもちろんだが、いよいよ「あかつき」が金星に到着したとき、仮に運用に直接携わることのできない立場であったとしても苦楽を共にした探査機のデータを無視することはできないだろう(というのは私の希望である).

火星大気探査などの後継ミッションを惑星大気コミュニティで検討していることも、「あかつき」を支えるこのコミュニティが「探査」を強く意識しつづけるうえでプラスに働いていると感じる。惑星大気大循環モデルなど、「あかつき」をはじめとする惑星環境探

査を汎用的に支えるツールを整備するという動機付け にもなっている. 惑星探査から完全に離れた研究生活 もありうるが, いったん離れたあと戻ってくるのは容 易でない.

開発段階から中心的に関わってきた仲間が少しずつ、様々な事情で「あかつき」から距離を置かざるをえなくなってきているが、これは当初から覚悟していたことである。それを補い、新たに研究体制を構築して金星到着時に第2のピークを迎えられるかどうか。これはプロジェクトの努力だけでどうにかなるものではない。少なからぬリスクをはらむ気の長いミッションに身を投じる若い研究者を高く評価する雰囲気を、母体となる研究者コミュニティに醸成していかなくてはならないだろう。

長旅がいよいよ骨身に染みる惑星間空間クルーズの 後半、これからが正念場である。

参考文献

- [1] Nakamura, M. et al., 2011, Earth Planets Space 63, 443.
- [2] 山田学, 廣瀬史子, 2012, 遊星人 21,1号, 71.

「天体の衝突物理の解明(VIII)〜小天体の 衝突・軌道進化〜」参加報告

保井 みなみ1

1. はじめに

2012年11月18日から20日にかけて、北海道大学低 温科学研究所にて第8回 [天体の衝突物理の解明 | 研究 会が行われた。8回目となった今回は「小天体の衝突・ 軌道進化」と題し、小惑星や彗星などの小天体の衝突 やその結果生じる軌道進化等の様々な物理現象を、数 値的手法及び観測的手法を用いて研究されている石黒 正晃さん(ソウル大学)、伊藤孝士さん(国立天文台)、 樋口有理可さん(東京工業大学)、そして吉田二美さん (国立天文台)の4名を招待講演者としてお招きし、そ れぞれの研究について語って頂いた。また、参加者は 51名にのぼり(図1), 招待講演以外に29件の一般口頭 発表と10件のポスター発表があった. 招待講演時間 は1講演当たり1時間,一般口頭発表は1講演当たり 30分と時間配分がなされ、講演途中の質問は自由と なっている。そのため、今年も各日終了時間が30分 以上オーバーする程の活発な議論が行われ(図2)、研 究会は大盛況の内に幕を閉じた. 本稿では. 研究会で の講演内容や研究会の様子について紹介する. なお. あくまで筆者の講演に対する理解や、筆者から見た研 究会の雰囲気について報告するため、詳細な各講演の 内容は衝突研究会のHP(http://www.impact-res.org/ impact12/index.html) にアップされている要旨などを ご覧頂きたい.

2. 講演概要

表1に研究会のプログラムを示す。まずは、招待講

演の話題について紹介する.

2.1 招待講演

招待講演のトップバッターであった石黒正晃氏は 「小惑星帯における衝突現象の観測的研究」と題し. メインベルト彗星のダスト放出について近年の観測結 果を報告して頂いた. これまで発見されたメインベル ト彗星は、多くが氷の昇華によってダストを放出して いる. しかし、2009年に発見された596Scheilaのダス ト放出は氷の昇華では説明できず、観測から小天体の 衝突によってダスト放出が起こっていると報告された。 そして、596Scheilaのダストの尾を最もよく再現でき る衝突条件を数値計算と室内実験結果から推定した結 果、小天体が596Scheilaの進行方向後方から衝突した ことが示された. 小惑星の衝突放出物の観測は始まっ たばかりであり、今後も自然衝突現象のその場観察の 進捗に注目したい. 伊藤孝士氏は「月の非対称クレー ター分布と近地球小惑星」と題し、月のapex(進行方 向)とantiapex(進行逆方向)のクレーター頻度分布の 非対称性(apex側の方がクレーターが多い)が、近地 球小惑星の軌道進化で説明可能かどうかを検証するた めの数値実験結果を紹介して頂いた。衛星上のクレー ター非対称分布はその公転速度と衝突天体の衝突速度 に依存するため、非対称分布から衝突天体の力学的特 性について制約することが出来る. 近地球小惑星の各 軌道を数値積分して月面への衝突頻度の非対称性を求 めた結果、観測されているクレーター分布よりも非対 称性が小さくなった. 観測事実と整合させるため. 既 知の近地球小惑星よりも衝突速度が遅い小惑星が必要 とのことであった. 樋口有理可氏は「太陽系初期にお ける彗星と惑星の衝突」と題し、オールト雲形成の裏

表1:天体の衝突物理の解明(VIII)のプログラム.

*は招待講演を示す.

11月18日(日)

- 13:00-13:30 河本 泰成(神戸大) 「同サイズ微惑星 の衝突破壊における破片速度分布」
- 13:30-14:00 藤田 智明(東大) 「天体スケールにおける衝突破壊モデルの再検討|
- 14:00-14:30 小林 浩(名大) 「衝突・破壊のどのような物理量が惑星形成に重要か」
- **14:45-15:15 平田 成**(会津大) 「小惑星イトカワ上 のBlack Boulderの特徴とその成因 |
- 15:15-15:45 青木 隆修(神戸大) 「小惑星表面における岩塊の安定姿勢についての研究」
- 15:45-16:15 道上 達広(近畿大) 「脆性モルタル球 の衝突破壊に関する実験的研究」
- 16:30-17:30 *石黒 正晃(ソウル大) 「小惑星体における衝突現象の観測的研究」
- 17:30-18:00 荒川 政彦(神戸大) 「はやぶさ2 SCIによるサイエンスと衝突実験|
- 18:00-18:30 杉田 精司(東大) 「Spectroscopic observation of 1999JU3 and implications for collisional evolution |
- 18:30 ~ ポスターセッション

11月19日(月)

- 09:00-09:30 **桂木 洋光**(名大) 「固体弾の流体への 低速衝突によるクラウンパターン形成 |
- 09:30-10:00 和田 浩二(千葉工大PERC) 「数値シミュレーションで見る粉体層への衝突貫入過程」
- 10:00-10:30 **岡本 尚也**(神戸大) 「無重力下でレゴ リス層を貫入する低速度弾丸の減速過程|
- **10:45-11:15 中村 昭子**(神戸大) 「低速度再集積によるregolith mixing」
- 11:15-11:45 木内 真人(神戸大) 「レゴリス層への 再集積過程を模擬した低速度斜め衝突実験」
- 11:45-12:15 **玄田 英典**(東大) 「地球型惑星形成と デブリ円盤」
- 13:15-14:15 *伊藤 孝士(国立天文台) 「月の非対称 クレーター分布と近地球小惑星|
- **14:15-15:15 *樋口 有理可**(東工大) 「太陽系初期に おける彗星と惑星の衝突+α」
- 15:30-16:30 *吉田 **二美**(国立天文台) 「太陽系小天 体の物理特性」
- 16:30-17:00 栗山 祐太朗(東大/ISAS) 「衝突溶融 物の形状観察による月面クレータ中央丘形成時間の推 完 |
- 17:00-17:30 本田 親寿(会津大) 「月面に形成された光条を持つクレーターの光条消失時間の地質依存性」
- 17:45-18:15 桑原 秀治(東大) 「衝突蒸気雲中の化 学組成のエントロピー依存性に関する研究 - 惑星質 量と衝突起源大気組成の関係-」
- 18:15-18:45 黒澤 耕介(ISAS) 「極限状態における

- 珪酸塩のHugoniot曲線 隕石重爆撃期の大気進化への応用-」
- 19:00~ ポスターセッション&懇親会

11月20日(火)

- 09:00-09:30 保井 みなみ(神戸大) 「強度支配域に おけるクレーター形成過程のフラッシュ X 線を用いた 可視化実験」
- 09:30-10:00 **門野 敏彦**(産業医科大) 「衝突実験で のクレーターレイの成因 |
- 10:00-10:30 高木 靖彦(愛知東邦大) 「玄武岩を用 いたクレーター形成実験 |
- 10:45-11:15 柳澤 正久(電通大) 「ナイロン-ナイロン衝突の超高速度撮影」
- 11:15-11:45 **海老名 良祐**(電通大) 「ナイロン-ナイロン衝突におけるジェッティング」
- 11:45-12:15 高橋 悠太(電通大) 「ナイロン-ナイロン衝突における蒸気雲の発光」
- 13:15-13:45 田中 今日子(北大) 「微惑星衝撃波に よる氷微惑星の蒸発」
- 13:45-14:15 **嶌生 有理**(名大) 「氷ダスト天体の衝 突進化に関する実験的研究」
- 14:15-14:45 羽山 遼(神戸大) 「同一面への事前衝 突を受けた氷試料の衝突破壊強度」
- 15:00-15:30 **鈴木 絢子**(神戸大/CPS) 「強度を変えた焼結雪標的への衝突におけるエジェクタ速度」
- 15:30-16:00 長岡 宏樹(神戸大) 「角礫岩隕石がで きるまで」

ポスター発表

- 諸田 智克(名大) 「過去30億年における太陽系内側の衝 突率の長期変化」
- 上本 季更(東大/ISAS) 「月サウスポール・エイトケン 盆地の地質解析から推定する巨大衝突」
- 千秋 博紀(千葉工大PERC) 「小天体周りのダストの運動」
- 今井 啓輔(電通大) 「電通大における木星火球の観測」
- 常 **昱**(東大) 「チクシュルーブ・クレーター内部のイジェクタとその堆積過程」
- 片桐 陽輔(電通大) 「木星火球シミュレーション:メタンバンド観測の有効性」
- 黒澤 耕介(ISAS) 「衝突生成細粒放出物による初期金 星大気からの水蒸気除去」
- 翼 瑛理(東大) 「警察における衝突科学 弾丸を用い た衝突実験-」
- 森山 正和(電通大) 「電通大における木星火球のメタン バンド観測」
- 谷川 享行(北大) 「原始惑星系円盤中における固体原始惑星へのダスト降着流」



図1: 衝突研究会参加者の集合写真.



図2:講演会の様子.

側で起こる微惑星の軌道進化に関する理論的研究について紹介して頂いた.原始惑星が成長すると,残った微惑星はその後惑星に衝突したり,太陽系外に散乱する他,オールト雲候補になるものが考えられる.この3つの運命の確率のパラメータ依存性を数値計算で求めた結果,微惑星は惑星へ衝突するまたはオールト雲候補となるより10倍高い確率で,太陽系外に放出されることがわかった.また,この数値計算結果をアニメーション化して見せて頂き,どのように微惑星がオールト雲候補となり,円盤分布から球殻分布へ進化するのかを目で見て分かりやすく紹介して下さった.最後に,吉田二美氏からは「太陽系小天体の物理特性」と題し,近地球小惑星,メインベルト小惑星,木星トロヤ群,太陽系外縁天体の軌道分布,サイズ分布,自

転速度分布の最新情報を紹介して頂いた、近年の観測技術の飛躍的な向上により、より小さな天体や遠い天体の詳細な軌道、サイズ、自転速度が分かりつつある。このような分布が明らかになると、小天体の軌道進化に関して知見が得られる。吉田氏の講演では、近地球小惑星がメインベルトから軌道進化して現在の形になる過程で、何らかの物理メカニズムによってサイズ分布が変化したことが報告された。小惑星のカタログもデータ数が増え、これまで観測バイアスによって制約されていた情報も明らかになり、今後より小天体の軌道進化や起源に関する知見が得られるようになるだろう。

2.2 一般口頭発表

今年も、招待講演の話題以外にも天体の衝突現象に 関する様々な研究成果が発表された。以下では、7つ のカテゴリーに分けて、それぞれ簡単に紹介する。

(1) 衝突破壊現象の物理素過程に関する実験的研究

惑星形成過程においては、天体の衝突破壊現象は必ず起こる。微惑星同士または微惑星と原始惑星の衝突時,小天体や隕石の惑星表面への衝突時に生じると考えられる。今回、その衝突破壊現象における様々な物理素過程を室内実験で調べた報告が5件あった。そのうち4件は、標的の破壊に着目したものであった。標的には様々なものが用いられ、氷または岩石の高空隙標的(嶌生、道上)、弾丸と同じサイズの球状氷標的(河本)、複数回の衝突を経験した氷標的(羽山)であった。同じ衝突エネルギーでも、標的の物性が異なるとその衝突破壊強度や破片の飛翔速度は大きく異なる。これ

は、破壊に寄与する衝撃波の減衰や標的の物質強度(圧縮強度や引張強度)が異なるためである。様々な標的物質の衝突破壊強度や破片飛翔速度が明らかになりつつあるが、これら全ての結果を少数のパラメータ依存性で説明できる様なスケーリング則を確立することが、実際の惑星衝突を議論する上で今後の課題となるだろう。また、弾丸の破壊に着目した研究も紹介され、複数の母天体由来の破片からなる隕石の成因を探るため、岩石弾丸の衝突破壊強度と、隕石衝突の際に起こると考えられる衝突圧密程度を調べた結果が報告された(長岡).

(2) 衝突破壊を考慮したデブリ円盤、惑星形成モデル

模擬物質を用いて行った室内実験の結果を実際の天 体衝突現象に応用するにあたっては、数値計算からも 多くの有益な示唆が得られる。今回は、衝突破壊を考 慮した惑星成長モデルについての発表があり、実際に 衝突破壊を受けた天体がどの程度破壊され、進化過程 にどう影響するのかが議論された(藤田、小林)、両研 究において、惑星の成長に効果的な衝突は大規模なカ タストロフィック破壊のような高いエネルギーによる ものではなく、衝突エネルギーの小さい小規模破壊(ク レータリング破壊)が効果的であることが示された. その定量的な議論のためには、衝突で生じた破片の総 質量と衝突エネルギーの関係が重要であり、室内実験 で定量的に明らかにする必要性について語られた。 一 方. 原始惑星同士の衝突によって生じた衝突破片はデ ブリ円盤の供給源と考えられており、その衝突破片の 供給持続時間を明らかにすることで、太陽系外惑星で 観測されているデブリ円盤を説明できる可能性がある. 今回は、原始惑星同士の衝突によって発生した破片の 進化を数値計算で解き、その面密度、寿命、明るさの 時間変化とデブリ円盤の観測結果との整合性を議論し た研究が紹介された(玄田).

(3) クレーター形成過程の実験的研究

クレーター形成過程には様々な物理素過程が絡んでおり、その過程を明らかにすべく室内実験が盛んに行われている。今回も、その一端が紹介された(保井、門野、鈴木)、保井は石膏の高速度衝突実験を行い、クレーター内部構造の時間進化をフラッシュ X線を用いて初めてその場観察することに成功した。その際、クレーター孔の成長の様子や弾丸の破壊によるピット

成長を明らかにした. 門野氏は砂のクレーター形成実 験によるエジェクタ噴出の際の粒子の運動やそのパタ ーンの詳細な観察を行い、 粉体運動の数値計算との比 較から定性的なレイの特徴を明らかにした。鈴木氏は、 強度の異なる焼結雪標的を用いたクレーター形成実験 を行い、雪粒子の噴出速度を放出位置毎に詳細に調べ てスケーリング則を求めた、また、均質な玄武岩を用 いたクレーター形成実験を行い、先行研究のクレータ ースケーリング則と比較した結果が紹介された(高木). さらに、三次元計測用顕微鏡を用いてより精度の高い クレーター体積の計測を行うことで、従来のスケーリ ング則が岩石種類で異なることを示した. スケーリン グ則は保井、鈴木氏も議論しているが、いずれも Holssapleらによって提案されたスケーリング則とは 異なる結果が示された. 今後さらに研究が進むにつれ て、新たなクレータースケーリング則が確立するかも しれない.

(4) 月面のクレーターに関する研究

実際の天体表層に存在するクレーター特有の構造に ついては、その形状や周囲のエジェクタ堆積物の観測 結果から様々な成因が考えられている. 今回は. 月面 に存在するクレーターの特徴的な構造について2件の 発表があった。一つは、中央丘をもつクレーターにお いて観測されている衝突メルトから、中央丘クレータ ーの形成過程を議論するというものである(栗山). 栗 山氏は、SELENEおよびLROCデータの解析から得 た衝突メルトの組成や地形の特徴と、メルトの推定粘 性率から求めたメルト固化時間を用いて、中央丘の形 成時間を推定した。衝突メルトを持つ中央丘クレータ ーは他にも存在することから、今後他のクレーターを 解析することでより確かな議論が出来るかもしれない. もう一つは、クレーターの光条消失と宇宙風化(鉄の 還元)の関係を調べた研究である(本田). 本田氏は、 月面のFeO量が海と高地で異なることに着目し、 SELENEデータを用いた光条クレーターのクレータ -年代決定から、従来月面上では同じと言われていた 光条消失時間がFeO量の多い海の方がかなり短いこ とを求めた.

(5) 粉体層, 流体層の衝突現象素過程の実験的, 理 論的研究

天体の表層は、レゴリス等の砂(月、小惑星)や液体 の海(地球)で覆われている。このような様々な天体表 層上で起こる衝突現象の物理素過程を明らかにするこ とも重要である. 小惑星は小天体の衝突によって放出 されたエジェクタが再び集積し、その表面がレゴリス やボルダーで覆われる。このエジェクタ再集積に伴う 小惑星表層への粒子貫入過程を理解するため、弾丸の 抵抗則に関する理論的、実験的研究が紹介された(和田、 岡本、中村)、和田氏は粉体層への天体衝突を想定し た数値計算、岡本氏は砂及びビーズ層への低速度衝突 実験を行い、粒子速度に依存する慣性抵抗及び粘性抵 抗を求めた。中村氏は、様々な粒径の砂及びビーズ層 への衝突実験から粒子速度に依存しない抵抗力を求め. 砂がビーズより抵抗力が大きくなることを明らかにし た. また、エジェクタ再集積の際のエジェクタの振舞 いを明らかにするため、砂及びビーズ層への低速度斜 め衝突実験を行い、衝突角度と弾丸の反発係数を系統 的に調べた研究が紹介された(木内), さらに、液体層 への弾丸衝突時に発生するクラウンパターン形成の基 礎を解明するため、水及び粘性体への固体弾丸衝突実 験を行い、エジェクタのひだ本数と衝突条件(粘性率 など)の関係を調べた研究が紹介された(桂木). 桂木 氏によると、実験結果は従来提案されている流体力学 のパラメータを用いたスケーリング則で説明できると いうことであった.

(6) 衝撃波, ジェッティング, 蒸気雲の物理化学的研究

衝突体が衝突した瞬間. 衝突体や標的中には閃光が 走り、衝撃波が伝播する. さらに衝突点付近からはジ エッティングと呼ばれる高速のエジェクタが吹き出し. 蒸気雲と呼ばれるガスが発生する.この閃光.衝撃波. ジェッティング、蒸気雲に関して6件の発表があった. 電通大のグループ(柳澤,海老名,高橋)はナイロン同 士の衝突実験を行い、衝突時の高速度ビデオカメラ画 像, 閃光強度とスペクトルデータを基に, 閃光, 衝撃 波、ジェッティング、蒸気雲の生成条件や物理条件を 調べた、柳澤氏はカメラ画像と閃光強度、スペクトル の比較から、閃光、スパイク、ジェッティングそれぞ れの発生時間を求め、発生順序を推定した、海老名氏 は、カメラ画像を詳細に解析し、高橋氏は測光データ を基に、それぞれジェッティングの速度、質量、測光 強度が残存大気圧に依存することを明らかにした.蒸 気雲は天体の大気組成進化に影響するため、その組成 や圧力の推定は非常に重要である. 今回は. 衝突圧力

(エントロピー)の高低によってどのような組成をもった蒸気雲・初期大気が発生し得るのかについての数値計算(桑原),室内実験から惑星大気の散逸量を決めるエネルギー変換率を衝突圧力とエントロピーの関係から調べた研究(黒澤)が紹介された。また、原始惑星系円盤ガスと微惑星との相対速度によって発生する衝撃波による微惑星の氷蒸発に着目し、衝撃波速度と上昇温度の関係を数値計算によって求め、微惑星蒸発が起こる太陽系内の領域、および蒸発による惑星形成過程への影響について議論した結果が紹介された(田中).

(7) 小惑星に関する研究及び小惑星探査

はやぶさ初号機の試料カプセルが地球に帰環して2 年が経ち、小惑星イトカワについて様々なことが明ら かになりつつある. 一方で、はやぶさ2号機(はやぶ さ2)の開発も着々と進行中である。本研究会では、 はやぶさ初号機の撮影画像を用いた岩塊に関する研究 が2件(平田. 青木). はやぶさ2に関する報告が2件(荒 川、杉田)あった。イトカワ表面には特徴的なアルベ ドをもった黒い岩塊(black boulder)が発見されてい る. 平田氏はその起源は衝撃暗化であると推測し、衝 撃暗化を引き起こした衝突規模を見積もった. 実際に. その規模に相当する衝撃変成度合を受けたと考えられ る証拠がイトカワサンプルに見つかり、衝撃暗化の可 能性が高いことが報告された。また、イトカワ表面に 一部貫入しているように見られる岩塊があり、その岩 塊の安定度は小惑星表層の砂粒径や形状と関係がある と考えられる. そこで青木氏は、砂に金属円柱を埋め 込んで一定速度で引っ張った際の倒れた傾斜角度と砂 の厚みの関係を調べ、安定度が砂の安息角に依存する ことを報告した. はやぶさ2は2014年に打ち上げ. 2018年に探査候補小惑星1999JU3(C型小惑星)へ到着. 調査する予定である。イトカワとは異なるタイプの JU3を調べるために様々な観測機器、さらには新たな 機器も搭載される予定である。今回は、その一部とし て、JU3に衝突体を衝突させ内部物性を調べる小型衝 突装置SCI(荒川), JU3の表面組成を調べ、水の有無 を検証するための可視カメラONC(杉田)について報 告があった.

2.3 ポスター発表

1日目と2日目の夕方には、ポスターセッションの時間が設けられた。2日目は懇親会も兼ねて行われ、

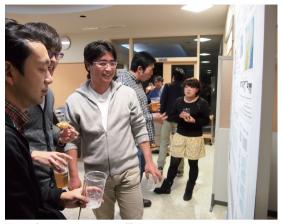


図3: ポスターセッションの様子.

お酒や食べ物を手にしながらポスターの前で活発に議論する様子が随所に見られた(図3). ポスター会場はそれほど広くなく発表数も10件と多くなかったため、発表者をすぐに見つけて研究成果を聞きやすい環境にあり、討論時間も大いにあるためにじっくりと議論する事が出来たのではないだろうか. このような雰囲気は、多くの質問が出来て自分の理解が進むため、衝突研究会の様な小規模の研究会の利点の1つだと思う.

3. 最後に

今年の研究会も発表中での質問が活発に交わされ、例年の事ながら設定時間を大幅にオーバーして3日間の日程が終了した。今年は昨年以上に参加者、発表者も増え、大学や研究室間の壁を越えた交流が盛んに行われた。また、学部生、修士学生といった若い人の存在が多く見られた。それだけ、惑星科学における「衝突」というものに興味を持って研究する学生が増えつつあるということであろう。

衝突研究会は来年度も開催予定である。世話人代表が諸田智克さんから鈴木絢子さんに交代することから、また別の新たな視点から組まれた衝突研究会を期待したい。次回もまた、幅広い分野から講師をお招きし、盛んな議論を巻き起こすような研究会になることを楽しみにしたい。そして、本研究会に興味を持っているがまだ参加したことがないという方、大歓迎!来年には是非とも参加して頂き、活発な議論に加わって頂きたい。

謝辞

この研究会を開催するにあたり、ご尽力された世話人の方々、低温科学研究所の方々に感謝申しあげます。また大変面白い、勉強になる話題を提供して下さった講演者の方にも、感謝致します。最後に、本報告を執筆する機会を与えて下さった世話人代表の諸田智克さん、本報告書執筆にあたり多くのアドバイスやご指摘をして下さった和田浩二さんに感謝致します。どうも有難うございました。

研究会「太陽系小天体への再挑戦」の開催報告

吉川 真1. 中村 良介2. 高橋 典嗣3

1. はじめに

小惑星探査機「はやぶさ」の人気がまだ冷めていない中、「はやぶさ2」が本格的に動き出した。イトカワサンプルの分析も進行している。また、すばる望遠鏡や赤外線天文衛星「あかり」での小天体観測も行われている。さらには、理論や実験によっても、太陽系小天体について新たな知見が得られている。このように、現在は、まさに太陽系小天体の科学が本格的になった時代と言ってよい。このような背景のもとで、「太陽系小天体への再挑戦」研究会が開催された。

この研究会は、始原天体研究会、「はやぶさ2|サイ エンスチーム、日本スペースガード協会の3つのグル ープが合同して企画されたものである. まず, 始原天 体研究会(代表:中村良介)であるが、この研究会は、 1998年から「レオニード流星群観測小研究会」として、 そして2004年からは始原天体研究会として開催され てきたものである。2000年前後のしし座流星群の時、 アマチュアとプロとで情報交換しながら観測しようと いう趣旨で毎年1回か2回開催されていた. しし座流 星群の後もプロアマの両方が参加する太陽系小天体に ついての研究会として継続されてきた. 二つ目の「は やぶさ2」サイエンスチームであるが、「はやぶさ」を 引き継ぎより拡大・強化されたサイエンスチーム(プ ロジェクトサイエンティスト:渡邊誠一郎氏)である. もちろん. 「はやぶさ2」が行うサイエンスについて. 検討・機器開発・研究をするチームである. そして三 番目がスペースガード協会(NPO法人, 理事長:高橋



^{2.} 産業技術総合研究所



図1:研究会の様子(小林俊通氏撮影).

典嗣)であるが、スペースガード協会では、2008年から毎年「スペースガード研究会」というものを開催している。テーマはスペースガード(天体の地球衝突)であるが、毎回、関連する分野の研究者とジョイントして開催してきた。これまで、「天体力学N体力学」、「1m級型望遠鏡による天体観測」、「スペースデブリ」、「時間変動観測」というテーマで関係する研究グループと共催しており、今回が第5回目となる。今回の研究会の取りまとめは日本スペースガード協会が行った。

以上のような背景のもとで、2012年11月25日に、宇宙航空研究開発機構(JAXA)の相模原キャンパスにて開催された。プロアマ合わせて約70名の参加者があり、非常に盛会となった(図1).

2. 講演内容

研究会のプログラムを表1に示す. 合計23件の研究 発表を5つのセッションに分けて行った. ここでは,

^{3.} 日本スペースガード協会 yoshikawa, makoto@jaxa, jp

表1: 「太陽系小天体への再挑戦」研究会プログラム.

■ はじめに

第5回スペースガード研究会(「太陽系小天体への再挑戦」研究会)の開催について

吉川真

■ セッション1【流星・小惑星】

● 同時多点観測による微光流星の軌道分布調査

藤井大地・松本桂

● 小惑星 Itokawa の宇宙風化と重力地形の関係

阿部新助・Hayabusa/NIRS,LIDAR チーム

● 高軌道傾斜角を持つメインベルト小惑星の可視光分光観測

岩井彩・伊藤洋一・寺居剛

● (624) Hektor の詳細な測光観測結果

浜野和弘巳

● 太陽系におけるトロヤ群天体の軌道安定性について

Patryk Sofia Lykawka · Jonathan Horner · Thomas Mueller

●仮想小惑星の太陽風環境下における帯電状態に関する数値解析

金 正浩・八田真児

●日本人による多重小惑星の発見

佐藤 勲

●太陽系小天体名の発音調査

佐藤 勲

■ セッション2【はやぶさ2・1999JU3】

● 「はやぶさ2 | プロジェクトの現状

吉川 真・渡邊誠一郎・國中 均・「はやぶさ2」プロジェクトチーム

● (162173) 1999 JU3 の国際キャンペーン測光観測

黒田大介・石黒正晃・長谷川直・はやぶさ2地上観測グループ

● 1999 JU3 の分光観測と「はやぶさ2」分光観測への展望

杉田精司・黒田大介・亀田真吾・長谷川直・鎌田俊一・廣井孝弘・安部正真・石黒正晃・ 高遠徳尚・吉川 真

● 小惑星 1999 JU3 関連流星群の調査

上田昌良

■ セッション3【サーベイ】

● すばる望遠鏡次世代広視野撮像装置 Hyper Suprime-Cam による太陽系小天体サーベイ

寺居 剛・吉田二美・HSC サーベイ太陽系グループ

■ あかり指向観測モードIRCスロースキャンによる小惑星の観測

長谷川直・臼井文彦・黒田大介・瀧田 怜・Thomas G. Mueller

● 多様なカタログデータから見えてくる小惑星帯の姿

臼井文彦・長谷川直・春日敏測・石黒正晃・黒田大介・大坪貴文

● 地球近傍ダストの起源

石黒正晃·Hongu Yang·Yoonyoung Kim·臼井文彦·上野宗孝·向井正

■ セッション4【スペースガードセンター】

● スペースガード研究センターの紹介

高橋典嗣・吉川 真

● 美星スペースガードセンターにおけるスペースデブリ観測

西山広太

● TDI モードの応用による人工衛星 / スペースデブリの光度短周期時間変動観測 Ⅱ

奥村真一郎・浦川聖太郎・西山広太・坂本 強・浅見敦夫・橋本就安・高橋典嗣・吉川 真

■ 富士山山頂での観測可能性の調査

坂本 強・浦川聖太郎・吉川 真

● Sub-km サイズ地球近傍小惑星 2011 XA3 の高速自転

浦川聖太郎・阿部新助・大塚勝仁

■ セッション5【将来ミッション】

● 来る10年+小天体関連の各ミッション提案の概要

中村良介

● 太陽系小天体探査プログラムワーキンググループ準備チームの今後の活動

吉川真

全体討論

各講演について簡単に紹介する.

2.1 セッション1

セッション1では、流星や小惑星ついて多様な話題の発表があった。まず、流星については、4台のビデオカメラによる多点同時観測により数千個の同時観測に成功している研究が報告された(藤井・松本)。中には、「はやぶさ2」の探査天体である1999 JU3に似た軌道の流星も観測されている。

小惑星についてでは、「はやぶさ」のデータを用いてイトカワの宇宙風化について調べた報告(阿部)によると、宇宙風化と重力傾斜やクレーター地形との間には顕著な相関があるということである。

望遠鏡による観測では、高軌道傾斜角を持つメインベルト小惑星の可視光分光観測(岩井・伊藤・寺居)と(624) Hektorの詳細な測光観測(浜野和)の発表があった. 軌道傾斜角が大きい(10度以上)では、小さいものよりもD型小惑星の割合が大きいことが報告された. また、(624) HektorはD型の木星トロヤ群小惑星であるが、長期にわたるライトカーブ観測や多色測光観測が行われ、自転や形状等についての詳細なデータが報告された.

理論的計算では、トロヤ群天体の軌道安定性についての報告(Lykawka・Horner・Mueller)があった。太陽系形成時の微惑星が木星型惑星のトロヤ群天体としてどのくらい存在できるのかを数値的に調べた結果、40億年間存在できた割合は木星で25%、海王星で1~5%であり、土星と天王星では0%であった。

小天体の研究会としてはユニークな発表として、太陽風による小惑星の帯電についての報告(金・八田)があった。宇宙機帯電解析ツールを小惑星に適用して、小惑星の昼間側と夜側についての帯電状況が推定された。また、多重小惑星についてはまだ日本人による発見はないが、掩蔽やライトカーブの観測で衛星の存在が確実視されている小惑星の紹介(佐藤)があった。さらに、太陽系小天体についての発音の調査とその日本語表記についての詳細な報告(佐藤)もあった。

2.2 セッション2

セッション2は「はやぶさ2」についてのセッションである。まず「はやぶさ2」プロジェクトの概要と現状の紹介(吉川・渡邊・國中・他)があった。「はやぶさ2」

プロジェクトは現在,フライトモデルの製作中で,2014年度冬期の打ち上げを目指して進行中ということである.

最近の大きな進展として、「はやぶさ2」の探査対象 天体である小惑星1999 JU3の観測結果についての報 告が2件続いた。最初に測光観測についての国際キャンペーンの結果の報告(黒田・石黒・長谷川・他)があり、12の天文台で得られたライトカーブのデータを 解析することで、絶対等級、Gパラメータ、アルベドなどの値を正確に決めた他、自転に関する解析状況に ついての報告があった。

次に可視光分光観測の結果についての報告(杉田・黒田・亀田・他)があった。1999 JU3はC型小惑星であることは分かっているが、その精密なスペクトルデータが得られると、探査のための事前検討に非常に有効である。ここでは、GEMINI-S望遠鏡による可視光分光観測データより、この小惑星が比較的高温で加熱脱水を経験したCM2隕石に似た物質で覆われている可能性が高いことが報告された。

小惑星1999 JU3に関連した流星群についての調査 (上田)も行われた. 2008年から2011年までの観測では,この小惑星に由来した流星群は観測されなかったということである.

2.3 セッション3

セッション3では、小惑星のサーベイとダストについての研究が報告された。まず、すばる望遠鏡の次世代広視野撮像装置Hyper Suprime-Cam(HSC)による太陽系小天体サーベイについての報告(寺居・吉田・他)があった。HSCは約1.8平方度を一度に撮影できるカメラであり、これを用いて近地球天体、メインベルト、トロヤ群、外縁天体、彗星など様々な太陽系小天体についての観測提案が紹介された。

一方、スペースからの観測として赤外線天文衛星「あかり」の小惑星観測(長谷川・臼井・黒田・他)がある。「あかり」の近中間赤外線カメラIRCを用いて88個の小惑星についてアルベドと直径が計測された。このうち25個は、初めて計測されたものである。

このように観測データが増えてくると、天体のカタログも充実してくる。多様なカタログから小惑星帯を調べた報告(臼井・長谷川・春日・他)がなされた。現在、赤外線サーベイ衛星による小惑星カタログは、

IRAS,「あかり」、WISEの3つがある。これらのデータと軌道・等級・スペクトル型などのデータとを合わせてみると、小惑星帯の多様性が見えてくる。

別の話題になるが、地球近傍ダストの起源についての報告(石黒・Yang・Kim・他)があった。一般にダストの起源は小惑星か彗星であると言われているが、黄道光や対日照の観測によりその起源を調べようという試みである。ハワイ・マウナケアでの観測の結果、ダストの光学特性は低アルベド小惑星や彗星核と矛盾しない結果になった。

2.4 セッション4

セッション4は、日本スペースガード協会での研究の発表である。まず、日本スペースガード協会のスペースガード研究センターの紹介(高橋・吉川)があった。日本スペースガード協会では、天体の地球衝突や宇宙環境問題に取り組んでおり、小惑星やスペースデブリの観測を行っている。

まず、美星スペースガードセンターにおけるスペースデブリ観測についての紹介(西山)があった。スペースデブリは、通常の天体観測とは異なって、移動速度が一般的に非常に速いという特徴がある。そのような天体を観測するためのシステムやデータ処理についての報告があった。さらに、スペースデブリの光度の短周期時間変動の観測についての報告(奥村・浦川・西山・他)があった。スペースデブリの回収を行おうとする場合、その物体の回転情報を得ておくことが重要である。言わばスペースデブリのライトカーブの取得のためにTDI(Time Delay Integration)という手法を用い、数十秒で明るさが変化していく様子が観測された。

全く別の可能性の検討として、富士山山頂での観測可能性の調査報告(坂本・浦川・吉川)があった。標高が3700 mを超える富士山頂は、赤外線や紫外線による観測にとっては条件がよくなる。気象条件や晴天率などを確認するために、富士山山頂にスカイモニターを設置して調査を行ったところ、2012年夏の調査で約53%の晴天率であった。

最後に、地球近傍小惑星 2011 XA_3 の自転についての観測報告(浦川・阿部・大塚)があった。この小惑星はサブkmサイズの地球接近小惑星であるが、ライトカーブと多バンド測光観測の結果、自転周期が約44分、タイプはC型ないしV型であり、大きさは $170\sim250$

mと推定された. 高速自転小惑星としてはこのサイズ は2番目に大きいものである.

2.5 セッション5

最後のセッション5では、今後の宇宙ミッションの提案についての議論が行われた。日本惑星科学会で議論されている「来る10年」の検討における小天体関連ミッションの報告(中村)とJAXAの太陽系小天体探査プログラムワーキンググループ準備シーム(WGT)での検討の報告(吉川)がなされた。「来る10年」の検討では、エンセラダス探査、トロヤ群探査、枯渇彗星核探査、イトカワ再訪、フェイトン探査などが検討されているという報告があった。一方、小天体WGTでは、これまでは枯渇彗星核であるWilson-Harringtonのサンプルリターンが検討されていたが、状況の変化を受けて、トロヤ群探査(サンプルリターンを含む)の検討を開始したとの報告があった。

3. まとめ

以上のように、たった1日の研究会にしては、非常に盛りだくさんの内容で、かつ、活発な議論が行われた研究会であった。研究会の後、参加者の一部が集まってさらに懇親会も行ったが、2日間くらいかけてよりじっくりと議論をしたかったというような感想も聞かれた。このように、太陽系小天体についての研究は急速に広がりを見せている。研究会のタイトルは「太陽系小天体への再挑戦」であるが、多数の「更なる挑戦」が今後も期待できそうである。今回の研究会が、プロとアマチュアの観測活動をさらに刺激して、探査や理論的研究などと相乗効果をもたらすことに少しでも役に立ったのなら幸いである。

「第2回惑星科学最前線セミナー」開催報告

木村 淳¹, 栗田 敬², 久利 美和³, 倉本 圭⁴, はしもと じょーじ⁵

1. 開催の背景

一般社会や国民に対する科学への興味の糸口として. 惑星科学の研究成果は様々な機会に幅広く取り上げら れてきている。一方で、惑星科学は比較的あたらしい 研究分野であり、従来の教育の場でその取り扱いが明 確にされているわけではない、高校や中学などの教育 現場では、惑星科学は「地学」の括りで教えられてい る場合が多いが、現在の高校理科教科においては地学 を履修できる場が減少しているのが現状である。この 波は大学での初年度教育や教養課程教育にもおよぶこ とが懸念され、惑星科学の今後を語る上でも無視でき ない状況となっている. 一方で. 「はやぶさ |や「かぐや | をはじめとする惑星探査などには多くの国民が関心を 寄せ、またよりよい社会あるいは自然災害に備えるた めに地球について学びたいと考えている国民も少なく ない. このような現状を踏まえ. 高校や中学. 社会一 般の現場で惑星科学の成果をどのように伝えたら良い のか、従来の教育体制における物理・化学・生物・地 学という縦割り型科学分類の枠組みを外れたところに 惑星科学が果たし得る役割があるのではないか、など の視点に立った情報交換や議論を行う場が必要である.

そうした動機付けのもとで、2012年12月22日(土) に惑星科学研究センター(CPS)において「第2回惑星科学最前線セミナー」が開催された。CPSが主催する本セミナーの第1回目は同年3月に行われ、教育・文

化活動従事者に向けて惑星科学の最新トピックを提供する講座として開催された、2回目となる今回は、教育やアウトリーチの現場で活躍される方々と惑星科学研究者との情報交換に重きを置き、「高校・中学などの教育の現場で惑星科学をどのように伝えたら良いのか?」をテーマとする議論の場とした。

2. プログラムと講演内容紹介

本セミナーにあたっては世話人で選定した講演者に話題提供をお願いし、中学や高校などの教育現場に従事する方々も参加しやすいよう平日を避けた12月22日の土曜日に開催した、終日を使って行われたセミナーの前半では、高校教育の現場で地学・惑星科学の教育に従事する教員やアウトリーチ活動に携わる方々から、各校での取り組みの実情や問題点を明らかにして頂き、その延長線上で科学啓蒙活動や大学初年度教育と高校とのインターフェースの問題点などを紹介して頂いた、また後半は、惑星科学の研究者側からの話題提供として、惑星科学の新しい視点である「Habitability」が理科教材としてどのような可能性があるのか、いくつかの例に基づいて説明をして頂いた、以下、簡単かつ著者の視点ではあるが、本セミナーの一端を紹介したい。

はじめに桐朋中学・高等学校の上原隼氏には、惑星科学にまつわる地学教育の現状について、今年度が教育課程改変年度にあたることに関連した講演をいただいた。平成25年度から新学習指導要領が全面実施されるのを前に、高校の理数科目は今年度から新要領(理科は、物理基礎、物理、化学基礎、化学、生物基礎、生物、地学基礎、地学で構成)が先行実施されており、

^{1.} 惑星科学研究センター (CPS)

^{2.} 東京大学地震研究所

^{3.} 東北大学

^{4.} 北海道大学

^{5.} 岡山大学

junkim@ep.sci.hokudai.ac.jp

第2回惑星科学最前線セミナープログラム[1]

- 上原隼(桐朋中学・高等学校)「中高生の地学の学習 |
- 猪熊真次(香川県観音寺第一高校)「本校での惑星科学に関する取組みの紹介と香川県の地学教育の現状 について」
- 谷川智康(兵庫県三田祥雲館高校)「天文部活動の現状と課題」
- 新井真由美(日本科学未来館)「惑星科学に関連した科学館における多様な科学コミュニケーション活動」
- 岡本義雄(大阪教育大・附属高天王寺校)「高校でのクレータ年代測定実習を通して見る地学教育の現状 と将来への展望 |
- 久利美和(東北大)「大学から見る高校課題研究の現状、学会高校生セッションの紹介など」
- 栗田敬(東大地震研)「地球と火星の表層環境」
- 木村淳(北海道大/CPS)「太陽系における生命発生場」
- 倉本圭(北海道大/CPS)「系外惑星にみるHabitability」

総合討論

懇親会

物理・化学・生物・地学の4領域から3領域を学ぶことが必修となる(従来は2領域)ことなど、本セミナーの基調となる話題から始めていただいた。また全国の高校1年生における地学基礎の履修率は7.5%(物理36%、化学54%、生物57%)にとどまり、大学入試に対しては地学が特に私立大入試において無力であることなどのリスクの高さが敬遠され、地学が好きでも受験で使えないジレンマがある現状が報告された。さらには、平成25年度は地学の検定済教科書が存在しない(履修率の低い科目の教科書を出版社が作っても商売にならない)という実情にも驚かされた。

次に香川県立観音寺第一高校の猪熊真次氏からは、スーパーサイエンスハイスクール(SSH)制度指定校としての惑星科学関連活動の例として、西はりま天文台等での実習を含む自然体験合宿や、JAXAやJPLなど国内外の研究施設・大学の見学研修活動の紹介があった。加えて、科学技術振興機構(JST)によるサイエンス・パートナーシップ・プロジェクト(講座型学習活動支援、SPP)の一環として、ボーリング調査を通した「学校のある大地の成り立ちを探る」取り組みなどを報告いただいた。また地学教育の現状として、理科教員の多くは自分の専門科目を教えたがるために新学習指導要領で理科3領域が必修となっても、地学教員がいない多くの普通科高校では地学科目が開講されな

い. こうした状況を変えるためには第一に地学教員の増員が必要だが、そもそも学校現場からの要望がないことから地学教員の採用試験自体がほとんど実施されていない、そこで「地学」という名称を「防災教育」や「総合科学」などに改めて専門性を薄めることや、採用試験の専門科目を地学単一ではなく地学+物理のように2科目で実施することによって、惑星科学を専門的に学んだ人材を教員として採用できる道が開けるのでは、との案が議論された.

続いて三田祥雲館高校の谷川智康氏からは、SSH制度指定校の活動として、教科「探究」をベースにした理数系学習プログラムを開発し、天体力学や風力発電、有機合成化学などの講座を3年間にわたって展開していることの紹介があった。兵庫県下の高校でも地学教育は絶滅状態にあり、こうした学校独自の学習プログラムを組むこと以外には地球惑星科学に触れる機会がないとのことである。また天文部顧問としての視点から、夜間に部活動を行うことの困難や、大学への繋がりの一環であるAOや推薦入試の拡大を求める意見が出された。ただしこれには、例えば成績は良くても意欲が低く、通常の入試を回避する手段としてAOを使うような不穏当な志願者が生じる弊害もあるとの指摘もあった。

日本科学未来館の新井真由美氏からは、未来館の目



図1:セミナー風景.

標を「先端科学技術を文化のひとつとしてとらえ社会全体で共有する」と掲げ、それに向けた具体的な取り組みとして、人材(科学コミュニケーター)育成や、未来館と社会との媒介をなすメディア、研究者・技術者、産業界、ボランティアなど8つのネットワークの形成、先端科学技術の情報発信とその手法開発などの活動が紹介された。「親しみやすさや楽しさ」と「研究の精密さ」の表現の両立を意識することや、迫力ある映像・音声の臨場感や観察を通した驚き・感動だけでなく、「ものより人」をコンセプトとした直接対話による共鳴効果なども重視し、惑星科学の魅力や夢について市民と研究者が語り合い新たな価値を獲得できる場を提供することが強く意識されている。

大阪教育大学科学教育センター・附属高等学校天王 寺校舎の岡本義雄氏には、はじめに「クレータ年代学 を高校生と楽しむ」と題した火星表面のクレータカウンティング実習例を紹介していただいた。大変な作業 ではあるが、データをプロットしてすぐに興味深い年代測定の結果が出ることは生徒の興味を大いに引き、地味な統計でも実は最新の科学の最先端の研究や科学 論争につながることを実感でき好評である。理科履修 に関しては、教養主義を取っていることから基礎4科目すべてを必修としている。一方で最近の生徒の傾向として、無駄やリスクを避け最小の努力で最大の成果を掴もうとする「最適解幻想」にとらわれがちであり、その結果の一端としてAOや推薦入試が増加しているのではないかとの指摘もあった。

東北大の久利からは、所属する教育研究支援部アウトリーチ支援室の活動として、公開講座や出前授業の 推進、仙台市天文台や教育委員会などとの地域協力協 定、サイエンス・エンジェルなど学内プロジェクト推 進に関する紹介があった。また、JSTによる大学・高等専門学校向け理数系学習環境支援事業の一環である「未来の科学者養成講座」として、東北大学は「科学者の卵養成講座」のプログラムが採択され、全国から選抜された100名の高校生を対象に大学講師陣による高レベルの講義とレポート課題を与え、高評価者は発展コースとして大学各研究室に配属されて研究課題の実施を行っている。それらの発表の場として、地球惑星科学連合大会など各種学会講演会での高校生セッションを活用するなどの展開も紹介された。

本セミナーの後半では、従来の理科教育にある縦割り型の物理・化学・生物・地学という枠組みを融合した「惑星科学」という研究分野の課題例として、惑星科学の研究者からHabitabilityをキーワードにしたいくつかのトピック紹介が行われた。栗田からは、地球と火星の表層環境の違いや火星での大規模変動の有無というトピックの中で、火星の温度圧力環境や流水活動の地形学的痕跡を通して示唆される、過去の火星表層での水の存在可能性についての講演がなされた。また地球との表層環境の大きな違いとその原因を探る「謎」として、火星では平均気圧の年変動幅が非常に大きい(2地球年間で30%変化、地球ではせいぜい1%)こと、気温の日変動幅が非常に大きい(火星では60℃にも達する)こと、一方で気温の高度減率がほとんどないことなどが示された。

木村は、生命発生場を液体水と岩石との相互作用系と定義した上で、そのような場が存在する地球外候補 天体として氷衛星をとりあげた。そして一部の衛星で存在が示唆されている地下海の推定方法に関する多角的なアプローチをレビューした。天体内部に地下海が存在することによって、潮汐力による表面変形が大きくなり特徴的な地形が生成することや、衛星にかかる惑星磁場の周期変動に応答した二次的な磁場が生じ得ることなどが、リモートセンシング観測を通した地下海の存在予想に有用であることなどが説明された。

倉本からは、ビッグバン宇宙から冷却・分化を経た 末に地球のような生命を育む惑星が形成する条件について一定の答えを出してくれるのが系外惑星のサイエンスである、という視点に立ったレビューがなされた、近年の観測からは、ハビタブルゾーンにありつつ地球より巨大なスーパーアースという新たな天体カテゴリが発見されているが、理論的見地からは、例えば地球 初期大気に多く存在し雷放電などで有機物の生成に寄与すると考えられている水素がスーパーアースではその後も残存してしまう問題や、強大な圧力によってコア物質の融点が上がる結果、コアが凍結し磁場が生成できなくなる問題、そして巨大な固体天体でも地球同様にプレートテクトニクスが生じるかは自明でない問題など、生命活動に適さない環境になるいくつかの可能性がある点に触れ、ハビタビリティの見直しが必要であるとの見解を示した。また、現在の地球のような外部依存型生命圏に対して氷衛星の地下海のような内部依存型生命圏があるように、そもそも惑星がハビタブルゾーンにある必要はないとの視点も示した。

3. 結び

以上、駆け足だが「第2回惑星科学最前線セミナー」 の概要について紹介した. 急な呼びかけだったにもか かわらず、科学と社会のつながりや、科学の教育、惑 星科学の将来などに興味を持つ20名近い参加者が集 い、その所属も多岐にわたったことから大いに盛り上 がるセミナーとなった。本セミナーは発表中の質問も 歓迎する自由な雰囲気で行われ、そのためか議論が大 いに盛り上がり一時はスケジュールが1時間ほど押す こともあったが、それだけ参加者のそれぞれが問題の 重要性を認識しているテーマだったことの表れだろう と感じている. 今回のセミナーの目的は、中学高校教 育やアウトリーチの現場の現状を報告していただきな がら、惑星科学が地学教育などに果たせる役割を議論 することであった. 前章でそれらの概略を紹介したよ うに、本セミナーでは各現場での活動内容や問題点の 実情をそれぞれに紹介することがメインとなり、本セ ミナーをもって現状の教育現場の問題点を解決するた めの具体的なアウトプットが構築されたわけではない. これは世話人の不徳の致すところではあるが、セミナ ーで掲げたテーマや提供された話題の幅の広さ・見え てきた問題点の根深さ、そして参加者から次回以降の 開催を求める声が多くあがったことは、問題解決の糸 口を見いだすには今回の議論だけでは到底足りないこ とを示すものだったと感じている。第3回以降の開催 時期やテーマは未定だが、社会との重要なコミュニケ ーションの場として、また日々変わりゆく教育状況や 科学の進展を柔軟にフォローできるセミナーとして.

継続的に開催していきたい. そしてその機会がさらなる理科教育の充実と惑星科学コミュニティの拡大につながることを期待したい

最後に、セミナー開催を支えて頂いたオーガナイザーの皆様や、多くの興味深い話題提供を頂いた発表者の皆様、そしてセミナーを盛り上げて頂いたすべての参加者の皆様に厚く御礼申し上げます。

[1] セミナーでの講演資料と映像は、

https://www.cps-jp.org/~sicg/outreach/fy2012/top-seminar2/top-seminar2.html で公開している.

書評

「惑星気象学入門 ―金星に吹く風の謎―|

松田佳久著(岩波科学ライブラリー 183) 岩波書店 ISBN: 987-4-000-29583-3

発行日:2011/08/25 価格(税込):1365円 112頁

中島 健介1

本書は「あかつき」による金星探査の開始をにらんで企画された、日本の惑星大気力学の草分けによる惑星気象学の概観である。しかし周知のように「あかつき」は軌道に入れず2015年(または16年)の再挑戦を目指しており、本書もその記述から始まる。この背景からすれば、本書を手に取るのを躊躇する方も多いかも知れない。ところがどっこい、手軽なサイズと一見平易なスタイルだが本書の目標は高く、熟読に応える刺激的な一冊である。

本書は3つの部分からなる。最初の3章は、地球型 惑星の大気の様相及び、それを決定する物理を一覧す る. この部分で軽いショックを感じたのは. 過去の解 説書の多くが人間に身近な地球、あるいは探査が進ん でいる火星をトップに選んでいるのに対して、本書が 躊躇いなく金星・地球・火星という順番を選択してい ることである. この選択は、大気量などを勘案すれば 極めてロジカルであり、その結果、たとえば惑星表層 環境の決定で本質的な「温室効果」について、最初に 金星の文脈で存分に議論し、それを地球・火星に適用 することが可能となる. 著者にとって「惑星気象学」 の目的が、諸惑星大気の個別の記述ではなく一つのパ ラメタ空間中での関連付けた理解であることが、この 選択にもうかがえる.次の1章は、木星型惑星とタイ タンを扱っているが、ここでも著者は4つ巨大惑星の 比較、さらには地球型惑星との相違の考察など、統一 的な視点を崩さない、終章は著者の本領である金星に 戻り, 超回転の理論を, 初期の歴史から最新の論文ま でコンパクトながら広い目配りで議論する. ここで最 近の学位取得者を含めて日本の各世代の研究が紹介さ

れていることは、日本の研究者への激励の表れであろう.

本書の「縦書き・数式無し」スタイルには、研究者 指向の方は物足りなさを感じるかも知れない. そのよ うな読者はもちろん。著者の主著[1]に取り組むべき であるが、その前にもう一度、本書を注意深く読んで 頂きたい、すると、各所に散在する「よくわかってい ない」「今後の研究が期待される」というフレーズが 改めて目に入る.「もう分かっているのに」と不満を 感じられる方は、これらが相当にストイックな使われ 方をしていることに注意すべきである. それだけに、 著者がきちんと記述することを選んだ題材、例えば第 一章における温室効果のくだりは極めて明快で,「中 学生でも理解出来る」と言って過言ではない. 本書の 題材の全てに関して、本書の著者をも満足させられる レベルの理解を達成することは、惑星大気の研究者に とって大きなチャレンジである。付け加えれば、本書 の各所にはこの十年の理解の前進がさりげなく埋め込 まれており、実は玄人にとっても「お得な一冊」と言 える.

本書の最後で、やはり話は「あかつき」に戻る. 理論家である本書の著者をしても、惑星気象学の発展のために「観測は絶対に必要」なのである. 数年後、本書を書きかえるべき惑星気象学の新展開は実現できているであろうか.

参考文献

[1] 松田佳久, 2000, 惑星気象学(東京大学出版会).

New Faces 49

New Faces

山田 竜平(国立天文台 RISE 月惑星探査検討室)

皆様、こんにちは、国立天文台RISE月惑星探査検討室所属の山田竜平と申します。2009年3月に東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻にて博士号を取得し、現在は佐々木晶先生の下で、国立天文台RISE月惑星探査検討室の研究員として惑星科学の研究を続けております。上記のように私は、博士号を取得してすでに4年近く経過しており、また博士号を取得するまでに3年余分に時間がかかっているので、とてもNew Faceといえるような存在ではないですが、いろいろなご縁で執筆の機会をいただいたので、これを機に、私の博士号を取得するまでの時代と更にポスドク時代の研究生活についてご紹介したいと思います。

私の専門は広義で言えば固体地球惑星物理学ですが、 これまでは惑星探査、特に惑星地震探査、惑星地震学 という特にマイナーな(?)分野で研究を進めてきまし た. 私が「惑星探査」という分野を始めて知ったのは、 大学学部4年生のときでした。当時、私は名古屋大学 の地球惑星科学科に所属し, 地球惑星物理学講座とい う講座に配属されたばかりでした. その講座の新歓パ ーティーか何かで、ある先生から、今宇宙研という所 で、おもしろい事をやっている、月に地震計と温度計 を打ち込んでネットワークを作るんだ、というなんだ か壮大でおもしろそうな話を聞きました. それが [LUNAR-A][1]ミッションという惑星探査ミッション を知った始めで、[もうすぐ打ちあがる(2000年当時)] という話だったので、今のうちに是非、惑星探査ミッ ションに関わっておきたいと強く興味をもつようにな りました. その後で、紹介していただいたのが、昔宇 宙研にいたという噂があった山本哲生先生(現北海道 大学)でした. 学部の卒業研究では山本先生の下で赤 外線天文衛星IRASにより取得された赤外スペクトル データの解析を行い、TiC ダストの光学特性を調べま



した. ここで、初めて宇宙探査データを扱うことができました.

名古屋大学を卒業後, 山本先生の紹介で当時 LUNAR-A ミッションのプロジェクトマネージャであ った水谷仁先生を紹介していただき、東大の大学院に 入って念願の宇宙科学研究所で研究を行う事ができる ようになりました. しかし、そこでまっていたのはま さに「苦難」というべき日々の連続でした. 修士のと きに、LUNAR-Aミッションで使用する「ペネトレー タ」に搭載する地震計(月震計)の開発に関わる事にな ったのですが、それがなかなか大変で、来る日も来る 日も試験の日々、そして不具合の連続、 もちろん、我々 は世の中に一つしかない最高のものを作ろうとしてい るので、そんなに簡単なわけではありません、特に、 ペネトレータは人工衛星からの切り離しで天体表面に 自由落下させて、内部に搭載した観測機器ごと貫入埋 設設置させる装置ですので、内部の搭載機器はその貫 入時の衝撃(~10000 G)に耐えられるだけの耐衝撃性 が要求されます. また、月で起こる多くの地震はアポ 口で実施した月面地震観測結果(e.g., [2])より、変位に してÅレベルの極微動である事が分かっています. 10000 Gの衝撃に耐えた後に、なおかつ極微小の振動 を捉えられるだけの地震計の構造を確立するには、多

くの労力を伴いましたが、チーム一丸となって、なんとか要求される性能を満たすだけの地震計の開発に成功することができました[3]. ただ、一方で様々な不運や不幸も重なって、LUNAR-Aプロジェクト自体が暗礁に乗り上げてしまい、なかなか打上げまでに漕ぎ着ける事ができませんでした。私の腹づもりとしては、当初博士論文は開発した地震計で取得した月震データを使って書けるだろうと勝手に考えていたのですが、なかなかそうはいかず、結局LUNAR-Aミッション自体は2007年1月を持って中止となりました。まさに世の中の厳しさと、惑星探査プロジェクトの難しさを身をもって体感することとなってしまいました。

一方、惑星探査ミッションに学生時代に関わってい た事でいろいろと得られたものもあります。惑星探査 ミッションには非常に多くの方が関わっているので. いろいろな方とのつながりができます。特にいろいろ な大学の先生とのつながりで、 学ぶ事は多かったです。 宇宙研では,藤村彰夫先生,田中智先生,白石浩章さ んなどに実験や測定の基礎、測定データの解釈の仕方、 実験屋、研究者としての精神や心構えなどを教えこま れました. また, 当時東工大の小林直樹先生(現宇宙 研)や東大地震研の竹内希先生には、地震データの解 析手法や計算プログラミング手法をいろいろと学ばせ ていただきました. 月震計の性能評価を行うためによ く名古屋大学の犬山地震観測所に足を運び、地震観測 試験を行っていたのですが、そこの先生である山田功 夫先生(現中部大学)には、地震計の事や、地震観測の やり方、ノイズ対策や配線手法などをいろいろと教え ていただきました、皆さん、スパルタな方が多くて、 毎日のようにぼろぼろにされていたのですが、何とか 喰らいついて、多くの事を学び取ることができたと思 います。また、人工衛星や宇宙用機器の試験への参加 などは、探査をやっていればこそできた経験だと思い ます. 宇宙研時代には、ミッションの中止など、何度 かドン底に落ちいって、困難な時期もあったのですが、 おかげですっかり打たれ強くなった気がします. 私は とても褒められたような学生ではなく、時間はかかっ たものの、なんとか学位取得まで漕ぎ着けられたのは、 供にミッションを支えてきた多くの方々のおかけだと 思っています.

宇宙研時代の話の締めとして、もう少しペネトレータの話をしておくと、LUNAR-Aの中止を経た後もペ

ネトレータの開発は続き、ペネトレータの耐衝撃性自体は無事に確立されました[4]. ペネトレータは固体天体表面に無人観測ネットワークを構築するうえで、優れたツールであり、多点で同時に地震データ、温度データが得られる点での科学的価値は客観的に見ても極めて高いと言えます。現状、日本のペネトレータは世界最高の性能を確立した独自のものであり、いまだ世界の追従を許していません。個人的な見解になりますが、このままでは「宝の持ち腐れ」になってしまうので、早急にどんな形であれ、「ペネトレータ」を使用した固体惑星探査を実行するべきだと思っています。さて、長くなってしまいますが、ポスドク時代の話にも少し触れておきます。東大で学位を取得した後す

にも少し触れておきます。東大で学位を取得した後すぐに、運良くフランス、トゥールーズのRaphael Garcia氏に声をかけて頂き、トゥールーズ第3大学で1年間研究員として研究をする事になりました。Garcia氏はもともと地球の地震学が専門でしたが、2009年当時NASAで提案していた惑星地震探査計画に関わり始めたところで、日本で似たような事をしていた私と一緒に仕事をする事になりました。トゥールーズ大学では、月面で最大の科学的成果を得るのにどのような地震計ネットワークを構築するのが最適であるか、数値シミュレーションにより最適ネットワークを設計する手法について研究を行いました[5]。この手法は月面や地震観測だけでなく、様々な地球物理観測に応用できるので、将来の探査計画を立案するのに非常に有用な手法となります。

フランスでは、特にフランス語で結構苦労したのですが、異なる言語、文化圏で生活、仕事していく事は非常に刺激的でした。また、相模原に閉じこもっているだけでは出会えないような人たちとのたくさんの良い出会いもありました。実は、今この原稿もパリの一室で執筆しているのですが、私が今、パリに派遣されているのもこのフランスでの縁があったからでしょう、いろんな物事に対して、(良い意味で)多少肩の力を抜いて望めるようになったのもこのフランスの自由な気風に触れた事が大きいと思います。若い学生の方達にはぜひ一度、海外での研究生活を経験する事をお勧めします。

フランスから帰国後は再び宇宙研に戻り、これも過去の縁で、宇宙研の水谷研究室の先輩であった山本幸生さんとJAXAの科学衛星運用データ利用センター

New Faces 51

(C-SODA)で一緒に仕事をする事になりました。山本 さんは元々, 惑星地震探査に興味を持っていた方で, 一緒にこれまでにない惑星地震探査データ(メインは Apolloの月震データですが)のデータベース、公開シ ステムを日本で作ろうと盃を交わしました。 そこで、 Apolloでの観測当時から現在に至るまで月震の分野 の第一線で研究を続けているテキサス大学の中村吉雄 先生のところを二人でオースティンまで訪ね、約一か 月以上に渡って、データと情報の収集を行いました. ほぼ二人での作業だったのでリレーショナル型データ ベースと公開システムの一応の完成を見るまでは一年 近くの時間を要しましたが、これまで公開されていな かったデータも含め、7年半に及ぶ観測のほぼ全ての Apollo地震データをアーカイブでき、そのメタデータ も含めてWeb上で公開できるようにしました[6]. 惑 星地震データの公開システムとしては評判も良く、世 界最高のものだと思いますので、まだ発展途上の部分 もありますが、ぜひ皆さんお使いいただければと思い ます[http://darts.jaxa.jp/planet/seismology/].

最後に、現在の話になりますが、C-SODAでの仕事 の後、今は国立天文台のRISE 月惑星探査検討室(就 任当時RISE月探査プロジェクト)で研究員として 佐々木晶先生の下、惑星科学の研究を続けられていま す. 今, 天文台に来て約1年半になりますが, 今の主 な仕事は次期月探査計画SELENE-2と次期小惑星探 査計画はやぶさ2での機器開発や科学検討になります. SELENE-2では、軟着陸機での地震探査計画に携わる 一方、VLBI電波源を用いた月重力場探査に関する検 討、開発も進めています。また、はやぶさ2では天文 台だけでなく千葉工業大学や会津大学のスタッフの方 たちと供にレーザー高度計に関する仕事に取り組んで います. これまでは地震探査に注力してきましたが. VLBI電波源やレーザー高度計を使用してリモートセ ンシングにより、天体の内部構造情報を得る事も可能 です。現在は、幅広く内部構造探査に関われるよう。 様々な探査機器、手法について学ぶと供に、その機器 で何がどこまで分かるのか鋭意、研究を続けています (e.g., [7]). また, せっかく作った惑星地震データベー スや日本では「かぐや」で得られた有用な月探査デー タもたくさんありますので、現在はそれらを使っての 月の科学、主に内部構造の研究も同時に進行していま す.

以上、長文になりましたが、私はもうすぐ12年、 一回りになろうかというくらい、主に惑星探査に関わ ってきました(とてもNew Faceではなさそうです が..). 紆余曲折も多かったですが、その分学ぶ事も 多く、普通に机に座っていただけではできないような 経験もたくさんできました. 惑星探査は労力も多く, 時間はかかるのですが、惑星科学を支える「本質」の 一つなので、誰かがやらなければならない仕事だと思 います、それ以上に、自分が関わった機器でこれまで の科学を変える重要なデータが得られるというのは非 常にエキサイティングな事です、とはいえ、これまで は、月探査、地震探査という狭い分野に注力していた ので、いざRISEに来て幅広く探査に関わるといろい ろと勉強不足も感じます. これからは、日本及び世界 で固体惑星探査をやる、内部構造探査をやるとなれば、 常に声をかけていただけるくらい鋭意成長していきた いと思いますので、皆様、今後ともご指導の程、よろ しくお願い致します。また、この場をもって、これま での研究生活を支えてくださった、諸先生、先輩方に 御礼申し上げます.

参考文献

- [1] Mizutani, H. et al., 2003, Adv. Space. Res. 31, 2315.
- [2] Nakamura, Y. et al., 1982, J. Geophys. Res. 87 supplement, A117.
- [3] Yamada, R. et al, 2009, PSS 57, 751.
- [4] 田中智, 2011, 日本惑星科学会誌·遊星人 20, No.3, 208.
- [5] Yamada, R. et al., 2011, PSS 59, 343.
- [6] 山田竜平, 2012, 宇宙科学情報解析論文誌 1, 121.
- [7] 山田竜平, 2012, JPGU Meeting, P-PS25.

佐藤 雅彦(九州大学地球変動講座)

皆様こんにちは、九州大学地球変動講座の佐藤雅彦です。2012年9月に東京工業大学地球惑星科学専攻において、綱川秀夫教授のご指導の下、学位を取得しました。博士論文のタイトルは「In-situ magnetic hysteresis measurement of magnetite under high pressure up to 1 GPa: Implication for source of the Martian magnetic anomaly」です。火星には、地殻岩石の残留磁化を起源とする磁場『磁気異常』があることが知られています[1]。火星のダイナモ作用は、約40億年前に停止したため[2]、地殻の残留磁化はそれよりも前に磁化して、現在まで保存されている必要があります。どのような磁性鉱物が火星地殻中に含まれていれば上記を説明出来るか、という事を高圧下その場磁化測定実験を使ってアプローチした研究です。

博士課程までは、火星の磁気異常に関する研究をしてきました。そして現在は、「川砂ジルコンを用いた古地磁気強度研究」に取り組んでいます。地球史を通じた磁場強度の変化を、ジルコンから読み取ろう、という研究です。研究の詳細につきましては、今後の学会等でお話し出来ればと思います。火星、地球とターゲットとする惑星は異なりますが、どちらも『岩石の磁性』に関する研究をしています(あまり聞き慣れないかもしれませんが、岩石磁気学と言います)。ここでは、私が現在に至るまでの、様々な『切っ掛け』について書かせて頂きます。

私は修士課程の時、東工大地惑専攻の『MMコース』という特殊なコースに所属していました。惑星電磁気学、惑星物理学、同位体化学、鉱物学、と全く異なる分野の4研究室合同で授業やセミナーをするというプログラムです。自身の専門分野以外についても相当な量の勉強をしなくてはならず、当時は大変でした。特に印象に残っているのは、合同のセミナーです。4研究室の教員に加えて、生駒大洋先生までいるものですから、色々な視点から質問が出て来ました。発表準備は大変でしたが、広い視野で物事を考える大切さを教わりました。現在の自分にとって、その時の経験が大きな財産になっていると思います。



MMコースを通じて中澤清先生と交流があった事も、自分の現在に大きく影響しています。先生は、学生達が悩んでいそうな頃合いを見て、定期的にガス抜きに(飲み屋に)連れて行ってくれました。私も修士1年の時、進路について悩んでいましたが、中澤先生に色々と相談に乗って頂きました。その後も節目で重要な示唆(お説教?)を頂いた気がします。自分が研究者としての進路を選ぶ事になった切っ掛けは、中澤先生と出会った事なのではないかなと思っています。

火星の研究をする切っ掛けとなったのは、修士2年の4月に綱川先生とした立ち話でした。専攻の新入生歓迎会の時に、「これからは、惑星岩石磁気学をやってみたら面白いかもしれないよ」「それは面白そうですね!」というやり取りをしました。その数日後、綱川先生から火星の岩石に関する論文が送られて来た事を今でも良く覚えています。実はそれまで、火星に関する知識はほとんど無かったのですが、関連する論文や教科書を読み進めるうちに、すっかり火星研究にはまってしまいました。綱川先生には、それから学位を取るまでの間、色々とご迷惑をおかけしたと思います。

博士課程に進学して1年間は、博士論文の研究テーマを考えるために、論文をあれこれと読んでいました。そして、火星の磁気異常データを理解するためには、『高圧下での鉱物の磁気的性質を知る事が重要』だと考えるようになりました。しかし、高圧発生セルと磁力計を組み合わせた測定装置を自分自身で一から作ることは現実的には難しく、どうしたものか…、と悶々とした日々を送っていました。転機が訪れたのは、

New Faces 53

2009年9月に金沢で開催された、地球電磁気・地球惑星圏学会でした。網川研究室OBの高知大学山本裕二助教から、「実は高知大学に高圧下その場磁化測定装置がある」という事を教えて頂きました[3]. この事が切っ掛けとなって、高知大学の装置を使用させてもらい、博士論文研究の実験を行う事が出来ました。高知大学の小玉一人教授、西岡孝教授、山本裕二助教には、実験装置の使い方を一から教えて頂き、大変お世話になりました。

こうして今までの自分を振り返ってみると、非常に 多くの人々のご好意に支えられて今日に至っているの だな、と改めて実感させられます。今までお世話になった皆様に、この場を借りてお礼を申し上げます。こ れからは諸先輩方から助けて頂いた分を, 若い人たち に還元出来るように日々精進して行きたいと思います. もし私に協力出来そうな事があれば, どしどしご連絡 下さい!

最後に、New Face執筆の機会を与えて頂きありが とうございます。惑星科学会のみなさま、これからよ ろしくお願いします。

- [1] Mitchell, D. L. et al., 2007, J. Geophys. Res. 112,
- [2] Acuña, M. H. et al., 1999, Science 284, 790.
- [3] Sato, M. et al., 2012, Geophys. Res. Lett. 39, L04305.

瀧川 晶(京都大学理学研究科)

皆様こんにちは、瀧川晶(たきがわあき)と申します. 2012年の3月に東京大学大学院理学系研究科において、 橘省吾准教授(現北海道大学)と永原裕子教授の指導の もと、学位を取得しました. 2012年の4月から京都大 学地質学鉱物学教室にて、また、10月からはカーネ ギー研究所(Carnegie Institution of Washington, USA)にて特別研究員SPDとして研究をしています.

1. 研究について

太陽系で形成した最も古い固体物質(CAI; Ca-Alrich inclusion)の年代測定から求められた45.68億年というのが、太陽系の年齢とされ、いわば太陽系の元年といえます[1]. 私はそれより前に、太陽系の原材料物質がどこでどのように作られ、どのような履歴を経て、そして太陽系形成最初期に何が起こったのかを、多様な物質科学的手法で調べ、紀元前太陽系の姿を明らかにようと研究をしています。

定性的には、進化末期の恒星の周りでダストとよば れる微小鉱物が気相から凝縮し、宇宙空間を漂い、分 子雲に取り込まれて、そこから原始太陽系円盤が形成 した、と説明されますが、その詳細はほとんどわかっ



ていません.以前遊星人にも起稿させていただきましたが、これまでに、進化末期の恒星周囲を模擬した条件における鉱物の成長異方性を実験的に調べ、さらに実際に星周ダストが放射する赤外観測スペクトルとの比較をおこなうことで、ダストを供給し続けている恒星でおこる事象を明らかにしようとしてきました[2-5]. 一方、プレソーラー粒子と呼ばれる隕石中の大きな同位体組成の異常を示す微粒子には、恒星周囲でのダスト形成から隕石母天体での変成まで、あらゆる出来事が積分され記録されています。そこで、星間空間に放り出されたダストがどのような履歴を経てプレソー

ラー粒子として現在の姿になったのかを調べるため, 最近では、京都大学の土山明教授、三宅亮准教授らと 共にダスト模擬物質への低エネルギーイオンの照射実験を行なっています。また、現在カーネギー研究所でLarry R. Nittler博士、Conel M. O.'D. Alexander博士、Rhonda Stroud博士らと行なっている研究でもありますが、1ミクロンほどのプレソーラー粒子の表面構造や結晶構造、化学組成、同位体分布を調べることで、プレソーラー粒子が経験してきた素過程を明らかにしようと挑戦中です[6].

進化末期の恒星周囲の鉱物が放射する赤外線と、手に取れる隕石中のプレソーラー粒子、というのは、スケールも観察手法も違う対象です。しかし、それぞれから上手く情報を引き出して組み合わせることで初めて太陽系の歴史の一端がわかるはずとの考えから、大きく1つの研究と捉えて取り組んでいます。

2. 惑星科学との出会いとこれまで

今から10年ほど前、まだ受験勉強をしていた頃に、駅で藤井旭さんの宇宙大全[7]を買って、なんとも気分が高揚したのを覚えています。惑星科学や天文学に向かう興味が刺激されたのではなく、宇宙への漠然とした憧れが盛り上がったようでした。今思い返すと驚くのですが、分子雲や銀河の写真を見て、「これがどうやってできたのだろう」とは思わず、「綺麗だ。宇宙はすごいな」と思ったのです。

その頃の私にとっての実際の宇宙といえば、NASAと宇宙ステーションの名前くらいで、当初、東大工学部の航空宇宙に進学するつもりでした。しかし、教養学部のころに友人から、航空宇宙では計算ばかりやらされてつまらないという話を聞きつけました。もちろんそんなはずはないのでしょうが、その時は、それでは嫌だと見切りをつけてしまいました。結局、何をやっているかと聞かれたときに、「地球を研究している」と答えられるのが気に入って、地球惑星物理学科に進みました。

そうして、私はただ地球惑星科学者になりたかっただけなので、惑星とは水金地火木…と覚える以上のものではなく、オリビンの化学式も知りませんでした.しかし学部三年生の冬学期に、授業でCAI中のメリライトを合成するという実験に触れ、それが転機になりました。46億年前というとんでもなく昔にできたものが今手元にあって、それがどうしてできたかを考

えることが許されるということにただ興奮し、46億年前の何かを知ろうとしているということだけで、実験や観察が楽しくて仕方がありませんでした。足を踏み入れた惑星科学の中の世界からみる地球や宇宙は、色を変えて形を変えて、今もやはり魅力的です。それは、学部四年生から学位をとるまで、橘省吾博士と永原裕子博士に、研究はあくまで自由に、そして必要なときに必要なだけの議論ができる環境を作っていただいたからであり、また、東京大学でお二人を含めた多くの人に支えられた幸福な学生時代を過ごせたからであると思っています。これまでの感謝の気持ちを込めて、私の財産となっているお二人とのエピソードをいくつか紹介したいと思います。

初めての研究は、学部四年生の時に橘さんの指導のも とおこなった、隕石中短寿命放射性核種の起源がⅡ型超 新星爆発ではないか、というものでした[8]、その成果 をLPSC(Lunar and Planetary Science Conference)で 発表しようということになりました. 学部生だった私 は、国内学会にも数度参加しただけで、英語も話せず、 大規模な国際会議がどういうものかを全く知りません でした。橘さんは口頭で発表することを提案され、そ の口調は当たり前のようだったので、ヒューストンに 行くまでは緊張しつつもどこか気楽な気持ちでいまし た. それがいよいよ会場に着き、その規模や演台の高 さを目の当たりにして,「これは随分,大変なことだ」 と認識したのです. さらに、発表前日になって永原さ んにも発表練習をみていただき、発表スライドを大幅 に修正した方がいいというコメントをいただきました. より質の高い発表になることは明らかでしたが、私の 頭をよぎった、前日だから修正するよりは練習を、と いう発想は橘さんと永原さんにはなかったように思い ます. 今では笑い話ですが. あの時ほど真っ暗な気持 ちを味わったことはありませんし、それから橘さんと 徹夜でスライドに向かって格闘したことは忘れようも ありません。このときに限らず橋さんは、助言を求め られると、私の力量ではかなり無謀なことでも、基本 的には挑戦する方に発言をされました. その結果, し ばしば厳しい状況を招いていましたが、その都度本当 にたくさんの時間と労力をかけてくださったために、 背伸びをし続けることができ、大いに鍛えられました.

もう一つ思いだすのは、修士二年でセミナー発表を していた時のことです。発表の最後に今後の大きな展 New Faces 55

望を話すと、永原さんがしばしの沈黙の後、「それがわかったら何なの?」と質問をされました。十分に大きく遠くの目標を示したつもりでいたので、この質問は強烈な印象を残しています。その後も折に触れて、それがわかったら何かしら?と考えることが習慣になりました。この習慣により、同じ実験していても、少しずつ研究対象となる世界が拡がっていくように思います。ちなみに、永原さんの居室を訪ねると、どんなに忙しくても「何?」と少しの時間でも必ず対応してくださり、学生生活の間で「後で」と言われたことがありません。見習おうと思っても、これがなかなかできません。

春から半年間過ごした京都大学は素晴らしい環境で、また戻って研究生活を送ることを楽しみしています. 現在所属するカーネギー研究所でも、新しい環境、コ ミュニティ、分析機器など、学ぶべきことが沢山あり、 充実した日々を過ごしています。これからの30年あ まりの研究者生活で、何をどこまで明らかにしたいか をよく考え、少しずつ進んでいきたいと思っておりま す、皆様、今後ともどうぞ宜しくお願い致します。

- [1] Bouvier, A. and Wadhwa, M., 2010, Nature Geoscience 3, 637.
- [2] 瀧川晶ほか、2007、遊星人 16、128、
- [3] Takigawa, A. et al., 2009, ApJL 707, L97.
- [4] 瀧川晶ほか、2010、遊星人 19、148.
- [5] Takigawa, A. and Tachibana, S., 2012, ApJ 750, 149.
- [6] Takigawa, A. et al., 2010, LPS XXXXII, #2599.
- [7] 藤井旭, 2000, VISIBLE宇宙大全, 作品社.
- [8] Takigawa, A. et al., 2008, ApJ 688, 1382.

藤谷 涉(Max-Planck-Institut für Chemie)

みなさま初めまして、藤谷渉(ふじやわたる)と申します、2012年3月に比屋根肇准教授の指導のもと、東京大学大学院理学系研究科にて博士号を取得しました、学位を取得してすぐ、2012年4月にドイツ・ライン川河畔の町マインツにあるマックスプランク研究所(化学)に拠点を移し、Peter Hoppe博士のグループで研究を続けています。

私の研究内容は、主に同位体を用いた宇宙化学的手法で隕石など地球外物質を分析し、太陽系のとくに最初期の進化を解明することです。修士課程では、隕石物質中のクロム同位体異常について研究しました[1]。同位体異常の存在は、初期太陽系の原始惑星系円盤内で同位体組成が不均一だったということを示しており、その起源や均一性の程度は円盤内の物質循環と関係する非常に重要な研究テーマです。私が研究を始めたころは、そのような異常の原因はよくわかっていませんでしたが、極めて大きな同位体異常を示す未発見のプレソーラー粒子が存在しているのではないか、という示唆は得られていました。そこで、私はNanoSIMSという高空間分解能SIMSを用いて、クロム同位体異常



のキャリアの探索に乗り出しました。大学院に入学してからいろいろな論文を勉強し、このテーマにたどり着くまでに半年、それから酸を用いた隕石の化学処理という慣れない作業による試料の準備に半年かかり、NanoSIMSで実験を開始したのは修士課程2年の6月で、それから分析手法の開発に取りかかりました。しかしながら、実験はなかなかうまくいかず、そうこうしているうちに海外の2つの研究グループが同じテーマに取り組んでいることを知り、困難な競争になることがわかってきました。結果的にはその海外の研究グループがいち早くクロム同位体異常のキャリア(クロ

ムスピネルのナノ粒子)を発見し、私としてはプライオリティーを失う結果となってしまいましたが、研究テーマの設定から試料の準備、分析手法の開発を一人で行い、一流の研究者と争ったことは私にとって大きな糧となりました。とはいえ、いつまでも結果が出ないなか、誰それがいい成果を出しただの、論文を投稿しただの、DC1に採用されただのといった情報を耳にするのは、辛いものでした。

博士課程に進学してからは、隕石中の炭酸塩の年代 測定を研究テーマにしました。修士課程ではやや博打 的な研究テーマだったので、博士課程では、年代測定 のように、きちんと測れば何らかの結果が得られるも のをやろうと考えたのです、とは言っても、きちんと 分析をして信頼できるデータを提供するのは決して易 しいことではなく、それこそが分析屋の使命でもあり ます、博士課程では新しい分析手法を開発することに より、これまでにない確度および精度の年代測定に成 功しました. そしてその年代データをもとに始原的な 小惑星の形成と進化のモデルを構築しました[2,3]. 幸 いにも, 博士課程での研究はD1の後半には面白い結 果が得られていたので、とくに辛い思いをすることは ありませんでした. 強いて言えば頑張って書いた論文 がリジェクトされたり、その反論をエディターにアピ ールしたりしたのが少々ほろ苦い思い出です. この論 文のやりとりでは、いかに論文の内容をわかりやすく、 魅力的に、かつ短くまとめて書くか、またリジェクト しようとしているエディターといかに戦うかといった ことを勉強するいい経験になりました(結局、最初の エディターの判断を覆し、アクセプトにこぎつけるこ とができました).

話は前後しますが、前述のとおり修士課程の研究はあまり順調には進まなかったものの、修論を提出した直後の2009年2月に三鷹の国立天文台で開かれた「同位体組成と元素の起源の研究会」に参加しました。そのとき天文台の梶野敏孝准教授が私のクロム同位体異常についての研究発表に関心を示して下さり、また私のほうも梶野さんが以前からアイデアを温めていた超新星起源プレソーラー粒子のリチウムとホウ素に関する研究に興味をもちました。ちょうどそのころ、2009年夏に東工大・東大グローバルCOEプログラム「地球から地球たちへ」が採択され、私は運良くRAとして、海外にインターンシップをする機会を得ました。そこ

で、2010年の春にマインツに2か月滞在してプレソーラー粒子のリチウムとホウ素の分析を行いました[4]. 言うまでもなく、これが現在のポスドク先とコネを作るきっかけになったわけです.滞在先としてマインツを選んだのは、Hoppe氏にプレソーラー粒子のホウ素を分析した経験があったことや、中嶋大輔博士(現ウィスコンシン大学)が以前に滞在していて色々とアドバイスを受けられたことなどが主な理由です.このときの滞在では、共同研究でいい成果が得られたのはもちろんですが、その自由に議論できる研究室の雰囲気を肌で感じ、自分の意見をきちんと主張することの大切さも学ぶことができました.

以上、四方山話をしてしまいましたが、このような 大学院生活を経て、マインツでポスドクをするに至り ました. 以前滞在した際にできた友達や研究所のスタ ッフの助力のおかけで、ビザの取得、住居探し(これ が外国人にはかなり大変)や保険への加入など、生活 の基盤を整えるのに困難はありませんでした. 現在は. クリスマスやカーニバル. ビールやサッカーといった ドイツの文化を楽しみつつ、プレソーラー粒子やはや ぶさサンプルの分析に心血を注いでいます. そして私 にとって外せないドイツの文化が音楽、学部時代の私 が趣味であるオーケストラを散々やり倒してきたこと をご存知の(そしてそのために進学の際にいろいろと ご迷惑をおかけした)先生方からは、音楽ばかり聴き に行かないように、と散々釘を刺されたものですが、 申し訳ありません、ベルリンフィルなど超名門オーケ ストラの演奏をたっぷり堪能しております(日本だと チケットが高いので・・・). マインツにはあと2年 ほど滞在する予定ですので、しばらくは惑星科学会秋 季講演会に参加できそうにありませんが、素晴らしい 研究成果を手土産に次回みなさまとお会いできるのを 心より楽しみにしております.

参考文献

- [1] Fujiya, W. et al., 2011, Geochem. J. 45, 275.
- [2] Fujiya, W. et al., 2012, Nat. Comms. 3, 627.
- [3] Fujiya, W. et al., 2013, Earth Planet. Sci. Lett. 362, 130.
- [4] Fujiya, W. et al., 2011, Astrophys. J. 730, L7.

New Faces 57

濱野 景子(東京大学大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻)

皆様こんにちは、濱野景子と申します. 2012年3月に東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻でなんとか学位を取得し、現在も同専攻で特任研究員として研究をしています。「なんとか」と書いたのは、私事で博士課程の途中で長期お休みをし、さらに取り組むべき新しいテーマも見つけられないままに復学したからです。それにも関わらず嫌な顔をせず受け入れてくださった指導教官の阿部豊先生にはとても感謝しています。

私の主な興味は「惑星の大気や表層環境の違いはど こからきているのか | という問いにあります、学位論 文では、大気進化の最も初期の段階に焦点をあて、ジ ャイアント・インパクトを経て形成した惑星が固化す るまでの固体・大気進化について理論的な検討を行な いました. もともと学部4年までは現在の地球での気 候や物質循環を研究したいと思っていたのですが、学 部の授業で当時助手だった杉田精司さんに、迫力あふ れる語り口で実験を指導していただいたのが、惑星科 学に転向する最初の契機となりました。実験自体もと ても楽しくやりがいのあるものでしたが、数々のミス をし、失明しかけたこともあって、残念ながら私は実 験家としての適正に欠けているようだということも身 をもって学びました. その後受けた阿部先生の講義内 容に感化され、地球だけでなく惑星大気一般の大気放 射や気候を研究しようと、大学院入試直前に志望を変 更して、惑星システム科学講座へと進学しました.

大学院に進学したものの一番興味のあった惑星大気の放射については、残念ながら携わることはできませんでした。というのは研究室のメンバーはみな異なったモデル・テーマを進める、という研究室の方針があり、大気放射モデルの構築は他のメンバーが進めていたからです。研究室には他にも粘弾性体モデルや分子動力学法、流体計算など異なった手法で様々なテーマに取り組んでいる方々がいて、その多岐にわたる内容にまずとても驚きました。また研究室にはもう1つ、できるだけ幅広い分野を勉強する、という方針があり、阿部先生自身がそれを実践されていました。当時の私



は良くも悪くも文字通り真に受けて、ただ闇雲にいろいる手を出し撃沈していましたが、このとき聞きかじった単語たちは別のことを考えているときにひょんなきっかけで思い出され、芋づる式に視野を広げてくれるなど役立っています。何と何がどこで繋がっていて同じ箱に入っているのか、というものの見方を培うきっかけにもなってくれました。

修士1年も終わりに差しかかり、大気放射計算に後ろ髪をひかれつつも、研究テーマを衝突蒸気雲の流体計算に定めました。このテーマはその後泥沼にはまることになってしまうのですが、学部での実験とこの研究テーマを通じて、当時東大の松井研に所属していた方々と知り合えたのは今でも得がたい財産です。雨の日に水たまりをみて突然イジェクタの放出角度について熱心な議論が展開されたのは、大学院に入りたての私には衝撃的で、研究者たるものいつ何時も研究のことを考えているのだと感銘を受けたのを覚えています。そのときの「何をみても衝突に見えるのですね」という尊敬を込めた私のつぶやきが、「何をみても衝突に見えてしまうなんて(かわいそうに)」という哀れみの言葉として受け取られてしまったのは、少し悲しい思い出です。

修士論文では、衝突による物質の供給と惑星外への 散逸とを評価することに取り組みました。が、その後 の博士課程では少しの不運と私の力不足とで袋小路に 迷い込んでしまいました。その結果の一部は最終的に 論文にはなりましたが、当時は自分の研究の意味を見 失い、新しいテーマを模索しただひたすらもがいてい た記憶しかありません. ちょうどそのころ, 当時ポスドクであった夫が1年ほどオーストラリアの研究機関に行くという話があり, 行き詰まり八方ふさがりだった私は, 少し研究から離れて冷静になろうと, 休学し同行することにしました. 結局夫の滞在は伸びに伸びて1年どころではすまなかったのですが, 向こうの学生がそれまで私が目指していたものとは全く異なる研究意識・スタイルで楽しく研究している姿がよいカルチャーショックとなり, 結果として研究へ戻る力となってくれたと思います.

最後にあと半年もがいてテーマを見つけられないなら大学をやめる、と決めて復学しました。アイデアを検討してはボツということを繰り返しながら、ジャイアント・インパクトという惑星形成の描像や、ハイドロダイナミックエスケープによる初期惑星からの大気散逸、水蒸気大気の射出限界などそれまでに得た知識を組み合わせ、全溶融した惑星が固化するまでの固体惑星と大気の初期進化を追うという発想を得ることができました。学位論文では、それらを結合した惑星初期進化モデルを構築し、惑星のサイズや初期組成が全く同じでも、軌道半径によって固化時間や水量が全く異なる惑星になりうるというアイデアを提案しています。

こうして振り返ってみると、何事も全く思い描いていたとおりにはならないものだなと改めて感じます。 長期休学や博士課程終盤でのテーマ替えなど決して順調とはいえない学生生活でした。それでも幸運なことに単なる遠回りに終わらず、迷走を重ねながらも現在も研究が続けられているのは、セミナーや学会発表、論文、講義、また居酒屋での四方山話などなど、いろんな場面でこれまでいただいた知見や励ましの言葉のおかげです。今後はもう少しこの社交的でない性格をなんとかして、言葉を頂くだけでなく返せるようにしていきたいと思いますので、みなさまどうぞよろしくお願いいたします。 ISPS Information 59

JSPS Information

- ◇日本惑星科学会第98回運営委員会議事録
- ◇日本惑星科学会第99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98回運営委員会議事録

期 間:2012年11月26日(月)~12月2日(日)

議 題: 欧文誌専門委員会委員の承認

運営委員会委員:

出席者(23名)

渡邊誠一郎,井田 茂,田近英一,倉本 圭,荒川政彦,永原裕子,林 祥介,渡部潤一,中村昭子,橘 省吾,中本泰史,中村良介,並木則行,三河内 岳,小久保英一郎,平田 成,千秋博紀,荒井朋子,城野信一,高橋幸弘,小林直樹,佐々木 晶,はしもとじょーじ

欠席者なし

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e-mailにより投票

議 題:

欧文誌専門委員会委員の承認をお願いしたい.

欧文誌専門委員会委員 大竹真紀子(JAXA) 議題は全会一致で承認された. 賛成:23, 反対:0

◇日本惑星科学会第99回運営委員会議事録

期 間:2012年12月20日(木)~12月26日(水)

議 題:第12期役員等の選出

運営委員会委員:

田近英一, 渡邊誠一郎, 倉本 圭, 中村昭子, 荒川政彦, 林 祥介, 生駒大洋, 渡部潤一, 並木則行, 永原裕子, 井田 茂, 千秋博紀, はしもとじょーじ, 平田 成, 荒井朋子, 小久保英一郎, 橘 省吾, 佐々木 晶, 城野信一, 小林直樹

欠席者:

渡部潤一, 荒井朋子, 藤本正樹

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e-mailにより投票

オブザーバー:

中本泰史(議題1が認められると運営委員会委員) 杉田精司(議題1が認められると運営委員会委員)

報告:

1. 役員等選挙結果

日本惑星科学会会長選挙結果

有権者数 633

投票総数 129[有効票129]

投票率 20.4%

順位 得票数 氏名

1 122 田近英一

次点 3 渡邊誠一郎

4 散票

以上により、第12期会長として田近英一会員が選出された.

日本惑星科学会運営委員選挙結果

有権者数 633

投票総数 984(投票者数82×12名連記)

[有効票824, 白票 160]

投票率 13.0%

順位	得票数	氏名
1	45	倉本 圭
2	42	渡邊誠一郎
3	40	中村昭子
4	33	荒川政彦
5	29	林 祥介
6	26	生駒大洋
7	26	渡部潤一
8	26	並木則行
9	25	永原裕子
10	24	井田 茂
11	21	千秋博紀
12	20	はしもとじょーじ
次点	20	中本泰史

19

- *日本惑星科学会役員選挙規定5(2)「得票同数の場合は年少者を優先する」から、はしもと じょーじ 会員 が12位、中本 泰史会員を次点とする。
- 19票の杉田 精司会員, 小林 直樹会員の順も同様.

杉田精司 小林直樹

以上により、第12期運営委員として12名の会員が選出された.

JSPS Information 61

2. 会長選任による運営委員

上記開票結果および会則第12条3項により以下8名の運営委員が会長によって選出された.

平田 成(会津大)

荒井朋子(千葉工大)

小久保英一郎(国立天文台)

藤本正樹(ISAS)

橘 省吾(北大)

佐々木 晶(国立天文台)

城野信一(名大)

小林直樹(ISAS)

3. 専門委員会委員長

上記開票結果および会則第12条4項により各専門委員会委員長および部会長が会長によって選出された.

総務専門委員長 平田 成

行事部会長 中村昭子

財務専門委員長 荒井朋子

編集専門委員長 はしもとじょーじ

欧文誌専門委員長 佐々木 晶

将来計画専門委員長 荒川政彦

将来惑星探查検討G長 並木則行

情報化専門委員長 千秋博紀

対外協力専門委員長 小久保英一郎

連合連携専門委員長 永原裕子

議 題:

議題 1. 会則第 12 条 2 項により会長によって選出された副会長の承認

副会長 渡邊誠一郎, 倉本 圭

なお、これにともない、中本泰史 会員と杉田精司 会員が運営委員に繰り上げられる.

議題 2. 会則第 12条 7項により会長によって選出された各部会委員長の承認

行事部会長:中村昭子

将来惑星探查検討 G 長: 並木則行

議題3. 会則第12条6項による監事候補者の選出

監事候補者として関谷実 会員および松田佳久会員が選出された.

◇日本惑星科学会替助会員名簿

2013年3月25日までに、賛助会員として本学会にご協力下さった団体は以下の通りです。社名等を掲載し、敬意と感謝の意を表します。(五十音順)

アメテック株式会社カメカ事業部 株式会社五藤光学研究所 有限会社テラパブ 株式会社ニュートンプレス

◇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。

2013/05

19-24 日本地球惑星科学連合大会

- (a) 幕張メッセ国際会議場, 千葉県, 千葉市 (b) 日本地球惑星科学連合(日本惑星科学会共催)
- (c) http://www.jpgu.org/meeting/

2013/06

02-09 第29回宇宙技術および科学の国際シンポジウム(ISTS)

- (a) 名古屋市国際会議場 (b) 第29回宇宙技術および科学の国際シンポジウム組織委員会・日本航空宇宙学会(日本惑星科学会協賛)
- (c) http://www.ists.or.jp/2013/

2013/11

20-22 日本惑星科学会秋季講演会

- (a) 石垣市民会館, 沖縄県, 石垣市 (b) 日本惑星科学会主催
- (c) https://www.wakusei.jp/meetings/fall_meeting/

編集後記

編集幹事を引き継ぎました、諸田です。前編集幹事と比較して編集精度が極度に低下するのでは?とハラハラされていた方々、ご安心ください。本文を読まれているということはクリティカルなへマはしていないものと思われます。入稿までこぎつけたのもすべて編集長と前編集幹事をはじめとして多くの方々からのサポートがあったおかげです。心より感謝致します。しかし、いまだ予断を許さない状況です。次号があります。

さて、この原稿を書いている2月初旬は卒論、修論

の追い込み時期です。周囲の学生たちが目を腫らしながらパソコンに向かって念仏を唱えるように唸っているのをみると恐怖さえ覚えます。自分が学生時代そのような状態になっていた記憶はないのですが、むしろ最近は様々な締め切り地獄に追われて取り乱すことが多くなりました。皆さんも原稿提出の締め切りにはご注意願います。

では、 渾身の力で執筆された熱い原稿を心よりお待ち致しております.

編集委員

はしもとじょーじ[編集長], 諸田智克[編集幹事]

来たる10年事務局(大槻 圭史, 小林 直樹, 出村 裕英, 並木 則行) [特集「月惑星探査の来たる10年: 第二段階のまとめ」ゲスト・エディター]

生駒大洋,岡崎隆司,奥地拓生,木村勇気,倉本圭,小久保英一郎,白石浩章,杉田精司,杉山耕一朗,関口朋彦,田中秀和,谷川享行,本田親寿,山本聡,渡部潤一,渡部直樹,和田浩二

2013年3月25日発行

日本惑星科学会誌 遊・星・人 第22巻 第1号

定 価 一部 1.750円(送料含む)

編集人 はしもと じょーじ(日本惑星科学会編集専門委員会委員長)

印刷所 〒501-0476 岐阜県本巣市海老 A&A 日本印刷株式会社

発行所 〒223-8526 横浜市港北区日吉4-1-1 慶應義塾協生館2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: 045-534-3881/FAX: 045-534-3882

(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。