
日本惑星科学会誌 遊・星・人

第26巻 第1号

目次

巻頭言 荒川 政彦	3
-----------	---

「2015年度最優秀研究者賞受賞記念論文」

局所分析から探る隕石有機物の起源と進化 癸生川 陽子	4
----------------------------	---

エポックメイキングな隕石たち その11

～Allan Hills 84001隕石～太古の火星を明らかにする隕石～ 三浦 弥生	15
--	----

一番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦 その30 ～1 μ mカメラで金星昼&夜～

岩上 直幹, はしもと じょーじ, 澤井 健太, 坂野井 健, 高木 聖子, 亀田 真吾	21
--	----

遊星百景 その7 ～月のクレータ, ジョルダーノ・ブルーノ～

諸田 智克	23
-------	----

「天体の衝突物理の解明(XII)～水質変成から探る太陽系物質進化～」参加報告

杉浦 圭祐	25
-------	----

第9回月惑星探査データ解析実習会を終えて

本田 親寿, 松岡 萌, 小野寺 圭祐, 大竹 真紀子, 石原 吉明, 晴山 慎, 平田 成, 出村 裕英	30
---	----

「第四回iSALE勉強会」参加報告 大村 知美

	33
--	----

新刊書評 倉本 圭

	35
--	----

訂正：一番星へ行こう! 日本の金星探査機の挑戦 その26 ～金星到着～

中村 正人, 山崎 敦, 田口 真, 岩上 直幹, 佐藤 毅彦, 高橋 幸弘, 今村 剛	36
--	----

JSPS Information	37
------------------	----

Contents

Preface	M. Arakawa	3
<hr/>		
Multiple imaging approaches for origin and evolution of organic matter in meteorites	Y. Kebukawa	4
<hr/>		
Epoch-making meteorites (11)		
— Allan Hills 84001 – a time capsule of ancient Mars —	Y. N. Miura	15
Road to the first star : Venus orbiter from Japan (30)		
— Venus' day & night seen by the 1μm camera —		
N. Iwagami, G. L. Hashimoto, K. Sawai, T. Sakanoi, S. Takagi, S. Kameda		21
My favorite topography (7)		
— The 20-km-diameter lunar crater Giordano Bruno —	T. Morota	23
Attendance report of the meeting “Physics of impact process of astronomical bodies XII		
— Investigation of material evolution in solar system via aqueous alteration —”		
	K. Sugiura	25
A report on the 9th school of lunar and planetary exploration data analyses		
C. Honda, M. Matsuoka, K. Onodera, M. Ohtake, Y. Ishihara, M. Hareyama		30
Participating report of 4th iSALE shock physics code workshop		
	T. Omura	33
Book review	K. Kuramoto	35
Corrigendum: Road to the first star : Venus orbiter from Japan (26)		
— Arrival at Venus —		
M. Nakamura, A. Yamazaki, M. Taguchi, N. Iwagami, T. Satoh, and 2 authors		36
JSPS Information		37

巻頭言

1992年に発足した日本惑星科学会は、今年で四半世紀という区切りの年を迎える。発足当時の目標であった日本発の惑星探査を実現するため、日本各地で多くの人々が様々な形で尽力してきた。その結果、小惑星探査に月探査、そして金星探査が実現している。さらに、現在も小惑星探査が運用中であり、ESAとの共同ミッションである水星探査は打ち上げ間近となっている。このように幾つもの惑星探査が実現したのは、惑星探査の成功を望む理工学コミュニティの力である。惑星科学会の会員は、このようなコミュニティの一員として惑星探査の実現に寄与できたことに誇りを持っていると思う。

一方、その過程で我々の学会は、惑星探査を実現することの難しさを知り、また、成功した時の喜びを知った。しかしながら、日本の宇宙開発という荒海の中で、1つの成功を次に繋げることや1つの失敗から回復することの難しさにも直面し、四半世紀前には考えられないほど多くの経験をしてきた。そして、その経験を礎にして、今、新たなミッションの実現に多くの人達が参加している。

学会の発足当時、惑星探査はこの学会の活動の中心にはなく、それはアメリカやヨーロッパからもたらされる遠い存在だった。それが、今では惑星探査は学会の身近にあり、毎週のようにどこかで惑星探査のミーティングや研究会が開かれている。惑星探査は、惑星形成論を実証するための手段であり、そのサンプルリターンにより原始太陽系星雲の謎を解き明かす切り札になり、地球という生命を育む惑星を理解するためには無くてはならない存在だと、多くの人々が実感できるようになった。

このように今日の日本惑星科学会では、惑星探査が学会活動の中心の1つとして大きな位置を占めている。しかしながら、運営組織は25年前の発足当時からはほぼ変わっておらず、運営の実体と現在の組織に歪みが生じているように思える。探査を実現する母体の一つとして、この学会はその組織も現状に合わせて作り替えて行くべきであろう。14期では、この四半世紀で学会が蓄積した惑星探査に関する経験が次世代に受け継がれ、さらに、探査に携わる多くの人達が共同作業できる環境を構築することを目指したい。

荒川 政彦(神戸大学大学院理学研究科)

「2015年度最優秀研究者賞受賞記念論文」 局所分析から探る隕石有機物の起源と進化

癸生川 陽子¹

2017年1月18日受領, 査読を経て2017年2月1日受理.

(要旨) 始原始的な隕石などの地球外物質には多様な有機物が含まれている。これらの大部分は複雑な化学構造を持つ固体有機物である。mm～cmサイズでの全体分析(バルク的な分析)からは、隕石母天体における水質変質や熱変成により、有機物の化学構造が系統的に変化することが知られている。一方で局所分析からは、このような母天体変成のトレンドから外れるような有機物や、1つの隕石の中でも有機物の化学構造や形状に多様性があること、特定の鉱物との共存関係などが明らかになってきた。このようなnm～μmスケールでの局所分析から、m～km、ひいてはAUスケールでの物質の混合を伴う複雑な有機物の進化過程があることが伺われる。本稿では、このような局所分析・イメージング分析から得られた太陽系形成過程に伴う有機物の起源と進化の知見を、筆者らの研究を中心に紹介する。

1. はじめに

分子雲が重力により収縮し、原始太陽、原始惑星系円盤が形成され、ダストの衝突合体成長により、微惑星が形成された[1]。月隕石や火星隕石を除く大部分の隕石はこのような微惑星の生き残りであり、いわば太陽系46億年の歴史を詳細に記録している化石である。太陽に近い高温の領域ではダストは岩石や金属から構成されているが、太陽から遠く温度の低い領域(雪線以遠)のダストは、岩石、金属と有機物の他に氷を含んでいる[2]。Greenberg[3]は、ケイ酸塩鉱物のコアの周りにCOなどの単純分子や有機物を含む氷マントルを持つサブミクロンサイズのダストを彗星塵の構造として提唱した(グリーンバーク・モデル)。これは彗星塵のモデルであるが、炭素質コンドライトと呼ばれる始原始的な隕石の母天体も鉱物・有機物・氷を含むダストから形成されたと考えられる。一方、コンドライトには白色の難揮発性包有物(Ca-Al-rich inclusion, CAI)やコンドリユールのような高温で形成した鉱物相も多く含まれる(なおこれらの高温凝縮物はStar-

dustミッションにより回収された彗星塵中にも見つかっている[4, 5])。このような高温鉱物相はXウィンドのような原始惑星系円盤中心部から噴き出す超音速ジェットにより太陽系の内側の高温領域から冷たい外縁部へ運ばれたと考えられている[6]。つまり初期太陽系において惑星系円盤内部では広く物質の混合が起こっていたのであろう。その後、混合した物質から微惑星が形成し、その中に含まれる²⁶Al等の短寿命放射性核種の崩壊熱により氷が溶けて液体の水となり、水質変質や熱変成が起こった[7]。このような内部からの熱だけでなく、衝突などによっても加熱、変成が起こったと考えられている[8]。水質変質時には、およそ0～150℃、pH6～12程度の流体により無水のケイ酸塩からフィロケイ酸塩(含水ケイ酸塩)が形成されるほか、比較的酸化的な環境が生じ、硫化鉄などが酸化されてマグネタイト(磁鉄鉱)が形成されるといった反応が起こったことが知られている[9]。

最も多く有機物を含む隕石は、炭素質コンドライトの中でもCM, CI, CRグループに分類されるものである。これらのグループは水質変質の度合いの大きいものから岩石学タイプ1～3に分けられ、例えばCM2のように表記する。それ以外のコンドライトのほとん

1. 横浜国立大学 大学院工学研究院
kebukawa@ynu.ac.jp

どは熱変成を受けており、熱変成度の小さいものから岩石学タイプ3~6に分類される。熱変成度の大きいもの(タイプ4~6)にはほぼ有機物は残っていない。

太陽(系)の元素存在度の上位5元素は、H, He, O, C, Nである[10]。有機物はそのうちの4つの元素、H, C, N, Oを含んでいるにもかかわらず、太陽系形成史を語るうえでおろそかにされてきた！太陽系形成史における有機物の役割やその形成と進化を知るためには、隕石の化学分析は有効な手段である。有機物分析の多くは、溶媒抽出によるターゲット分析(アミノ酸など見たい分子種を絞り、それに特化した微量分析)や、フッ酸・塩酸処理により鉱物成分を溶解させた残渣である複雑な高分子固体有機物(不溶性有機物: insoluble organic matter, IOM)の分析が多い。様々な変成度の隕石から抽出したIOMの分析から、隕石母天体での変成が進むに従い、IOMの化学構造、元素比、同位体比の系統的な変化が知られている[e.g., 11-14]。例えば、変成に伴いH/C比、D/H比が減少する傾向がみられる[12]。また、赤外分光、ラマン分光、核磁気共鳴(nuclear magnetic resonance, NMR)などの分光学的な手法により、変成にともなう有機物の化学構造の系統的な変化(芳香族化や脂肪族側鎖の減少)が明らかにされてきた[e.g., 11, 13, 14]。したがって、Alexanderら[12]は、様々な隕石に含まれるIOMは、もともとはすべて同様の化学構造・組成を持っており、母天体における変成過程で現在の隕石に見られるような様々なものに変化したと解釈している。ただしこれには異論もあり、隕石IOMのバリエーションは集積前の前駆物質の違いによるものだという考えもある[e.g., 15]。

一方で、顕微的手法を用いて隕石有機物のその場分析を行うと、有機物の構造が不均一であったり、特定の鉱物との共存関係がみられたりする。例えば、IOMの中にはナノグロブユールと呼ばれる、数百ナノメートル(最大1 μm)程度の球状の有機微粒子がみられる[e.g., 16]。しかしこのよう形状のはっきりした粒子はまれで、不溶性有機物のうちの10%程度である[17]。それ以外の有機物は鉱物の結晶粒界などに入り込んでいるのか観測が難しく、それらの二次元・三次元的な分布の全容は明らかになっていない。例えば、オスミウムで有機物をラベルした炭素質コンドライトの走査型電子顕微鏡(scanning electron microscope, SEM)観察から、含水ケイ酸塩(フィロケイ酸塩)が多く分布し

ているところに有機物も多く分布していることが知られている[18]。

隕石は最も手に入りやすく、最もよく分析されている地球外物質であり、隕石から得られる科学的知見は甚だしい。しかし、隕石が地球に落ちてくる過程において、サンプリングバイアスがあるのも事実である。現に、地球上で回収される隕石の大部分(落下が観測された隕石の85%以上)は普通コンドライトである[19]。しかしながら、隕石のふるさとである小惑星帯において、普通コンドライトの母天体と考えられているS型小惑星の割合(質量比)は比較的少なく(8%)、地球で回収される割合の少ない炭素質コンドライトの母天体と考えられているC型小惑星のほうが多い(53%) [20]。また、有機物など揮発性物質を多く含むより始原的なD/P型小惑星も多数観測されているが、これらを起源とする隕石はTagish Lake隕石[21]しか知られていない(WIS 91600隕石もTagish Lake隕石との関係性が指摘されている[22])。このようなサンプリングバイアスは、地球近傍小天体(near earth objects, NEO)のおよそ80%がS型(またはQ型)であることのほか[23]、このような揮発性物質を多く含む母天体は物理的にもろく、大気圏突入時などに破壊されてしまうことが多いためと考えられる。実際、惑星間塵(interplanetary dust particles, IDPs)と呼ばれる成層圏で回収される塵には、始原的なもの(炭素質コンドライト的なものや彗星由来と考えられるもの)が多い。また、大量の南極の雪を溶かして回収される微隕石(micrometeorites)には、特に炭素質に富むもの(ultracarbonaceous micrometeorites, UCAMM)が見つかっている[e.g., 24]。このように微小な試料は回収が難しく、地球由来の物質による汚染の心配もある。一方、このような、もろく始原的な物質は、他の隕石母天体に捕獲されている場合もある。様々な隕石で見つかっている捕獲岩クラスト(周りの岩石とは起源の異なるmmからcmサイズの捕獲岩)の中には、ダーククラストやCIクラストなどと呼ばれ、周りの物質よりも明らかに始原的で、母岩の熱変成の後に他天体より捕獲されたものと考えられているものがある[e.g., 25]。このような始原的なクラストは、普通コンドライトなどの丈夫な母岩に守られるため、比較的無傷で回収される。これらの中には少々変わった有機物が含まれている場合がある。

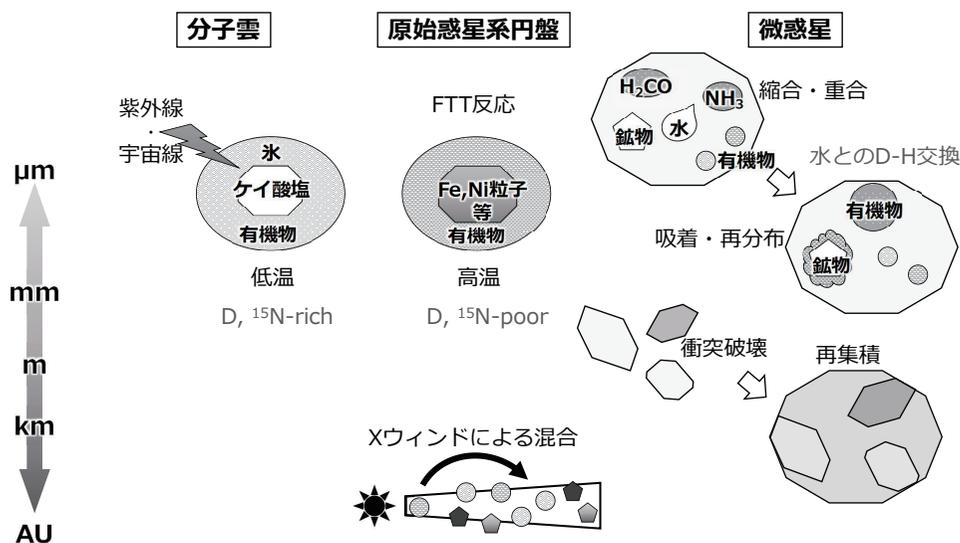


図1: 太陽系形成過程に伴う有機物の形成と進化。

本論文では、バルク的なIOM分析からはわからなかった有機物と鉱物との共存関係や、クラスト等に含まれる特異的な有機物の局所分析を紹介し、これらから示唆される太陽系初期物質進化過程における有機物の起源と進化について考察する。バルク的なIOM分析と実験的研究に基づく隕石母天体変成過程については、地球化学会誌に総説[26, 27]を書かせていただいたのでそちらも参考にされたい。

2. 太陽系形成過程に伴う有機物の形成と進化

まず、太陽系形成過程における有機物の形成・進化の経緯を、分子雲・原始惑星系円盤・微惑星の3つのステージに分けて見ていこう(図1)。

10K程度と極低温の分子雲では、イオン-分子反応や、紫外線・宇宙線による反応で有機物が形成されたと考えられている[e.g., 28]。ケイ酸塩ダスト表面を取り巻いている H_2O 、 CO 、 NH_3 等の様々な分子を含むアモルファス氷では、宇宙線や紫外線をエネルギー源とした反応により、多様な有機物が形成される。170-200Kにまで温度が上がると氷は昇華し、イエロー・スタッフと呼ばれる複雑な有機分子の混合物が形成されることが実験的に知られている[e.g., 29]。このような極低温環境においては、水素のイオン-分子反応に

より、反応性の高い H_3^+ イオンに重水素が濃縮するため、これらをもとに形成される有機物にも重水素の濃集が起こる[e.g., 30]。窒素については、同様のイオン-分子反応や自己遮蔽効果¹により ^{15}N の濃集が起こると考えられている[e.g., 32]。

原始惑星系円盤において、このようなダストの大部分は蒸発・再凝縮を経験するが、太陽からの距離に応じて、部分的にあるいは全体が生き残ったダストも存在すると考えられる。また、数百℃程度の領域では、 H_2 、 CO 等のガスと金属粒子などの触媒反応(フィッシャー・トロプシュ型反応: Fischer-Tropsch-type (FTT) reaction)により、金属粒子などの表面に有機物が形成される[e.g., 33, 34]。FTT反応で形成された有機物はおそらく星雲ガスを反映した同位体組成を持つと推測される。また、原始惑星系円盤では、Xウィンドにより内側の高温部で形成された物質が外側に輸送され低温物質を高温物質の混合が起こる[6]。

これらのダストが集積し微惑星が形成されると、 ^{26}Al の放射性崩壊などにより加熱され、氷を含む微惑

1. $^{14}\text{N}_2$ 分子と $^{14}\text{N}^{15}\text{N}$ 分子の光解離エネルギーが異なるため、主要な $^{14}\text{N}_2$ を解離させる波長の紫外線はすぐに減衰されるが、 $^{14}\text{N}^{15}\text{N}$ を解離させる紫外線は減衰せずに内部まで到達し、微量な $^{14}\text{N}^{15}\text{N}$ 成分を選択的に解離させることにより、 ^{15}N が選択的に反応に寄与する。もとは分子雲における CO 分子の酸素同位体組成を説明するために導入されたもの[31]。

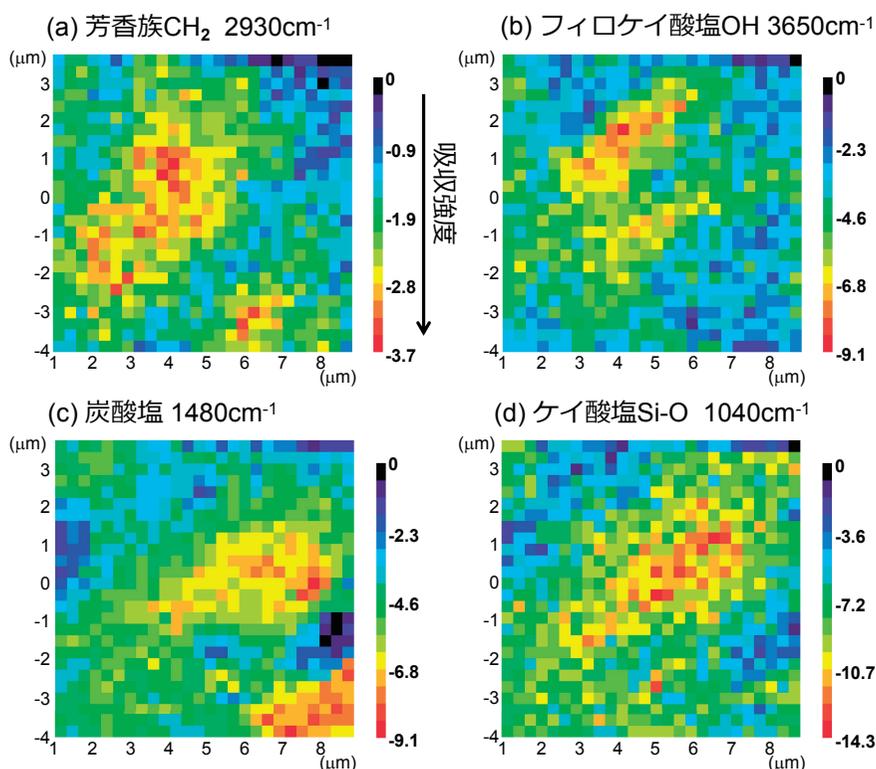


図2：Bells隕石の赤外分光イメージング。(a) 2930 cm^{-1} 芳香族 CH_2 、(b) 3650 cm^{-1} フィロケイ酸塩OH、(c) 1480 cm^{-1} 炭酸塩、(d) 1040 cm^{-1} ケイ酸塩Si-O。Kebukawaら[43]のFig. 5を改変。

星では水が溶けて水質変質が起こる。水質変質過程では、ホルムアルデヒドやアンモニアなどの単純な分子から、隕石に含まれる不溶性有機物(IOM)と化学構造のよく似た高分子固体有機物が形成されることが知られている[35-37]。また、流水による有機物の再分配、その過程における鉱物表面への吸着や鉱物を触媒とした化学反応が考えられる。さらに、比較的高温での水質変質やそれに引き続く熱変成過程においては、IOMの化学構造変化、すなわちH/C比の減少、脂肪族鎖・カルボキシ基の減少や芳香族化が進行することが実験的にも確かめられている[38, 39]。水質変質過程においては、分子雲など極低温環境に起因する重水素(D)に富む有機物と比較的D/H比の低い水との同位体交換により、有機物のD/H比が減少する[40]。比較的太陽系の内側で形成され含水量の少ない普通コンドライトなどの場合は、水が鉄を酸化することにより H_2 が抜ける際に同位体分別がおこった結果、水のD/H比が増加し、それに伴い有機物のD/H比の増加が起ると考えられている[41]。さらに、微惑星形成過程では、

これらの衝突破壊・再集積により、様々な変成度の物質の混合が起こる場合もある。

3. 鉱物と有機物の共存：赤外分光イメージング

赤外分光の利点は、有機物と鉱物両方の情報を得ることができ、なおかつ、顕微鏡的なイメージング分析が可能なことである。筆者らは、この手法を使って隕石の有機物と鉱物の共存状態を調べる試みを行ってきた(図2)。Bells (CM2)、Tagish Lake (C-ungrouped)隕石の赤外分光イメージングの結果、脂肪族C-H (2900 cm^{-1} 付近)の吸収強度の大きい領域とフィロケイ酸塩の構造水(3650 cm^{-1} 付近)または吸着水/層間水(3400 cm^{-1} 付近)の吸収強度の大きい領域にオーバーラップが見られた[42-44]。これらの結果はPearsonら[18]のSEM観測による有機物とフィロケイ酸塩の共存関係を裏付けるものである。赤外分光の空間分解能($1\text{ }\mu\text{m}$ 程度が限界)ではどのように有機物がフィロケイ酸塩と共存しているのかまではわからないが、フィロケイ

酸塩の表面に吸着しているか層間に入っていると推測される。一方、有機物と炭酸塩鉱物(1480 cm^{-1} 付近にピークを持つ)については、Bells隕石では共存が見られず、Tagish Lake隕石については共存がみられる場合とみられない場合があった[43, 44]。これは、比較的結晶サイズの大きな炭酸塩鉱物は独立に存在しているのに対し、結晶サイズの小さなものは、有機物とのインターカレーションにより分子レベルで混合していることを示しているのかもしれない。CodyとAlexander[11]は、水質変質度の異なる隕石IOMのNMR分析により、水質変質により徐々にIOMが酸化され、最終的に炭酸塩が形成されると推定していた。したがって、Bells隕石やNWA 852隕石よりも変質の進んだTagish Lake隕石では、IOMが酸化して一部が炭酸塩となり、有機物とのインターカレーションがみられるのかもしれない。

有機物とフィロケイ酸塩の共存関係については複数の要因が考えられる。まず、分子雲のグリーンバーグ・モデル粒子のようなものがそのまま残っていれば、ケイ酸塩の周りに有機物が取り巻いた構造がみられるはずだが、サブミクロンの粒子に有機物がコーティングされた構造は赤外分光の空間分解能では観測できない。しかし、このようなグリーンバーグ・モデル粒子のケイ酸塩が水質変質でフィロケイ酸塩になれば、上記のように、有機物とフィロケイ酸塩の共存関係がみられてもおかしくはない。

次に、円盤ガス中のFTT反応で形成された有機物の場合を考えてみよう。FTT反応では金属粒子などの周りに有機物が形成されるため、これら金属粒子が水質変質を受けた結果、酸化物や硫化物の周りに有機物が取り巻いた構造が観測されるであろう。このような金属酸化物や金属硫化物は赤外領域に特徴的なピークを示さないため[45]、有機物との共存関係は赤外分光イメージングでは観測できない。MET 00426隕石、QUE 99177隕石(ともにCR3)の透過型電子顕微鏡(transmission electron microscope, TEM)分析によると、Fe-Ni硫化物、Fe-Ni炭化物、磁鉄鉱などの周りに有機物(炭素質物質)の層がみられるという報告がある[46]。これらの炭素質物質がアモルファス炭素やグラファイト化があまり進んでいない炭素(poorly graphitized carbon, PGC)であることはわかっているが、これらがIOMと同様の化学構造を持つのか、異

なるのかは明らかではない。

最後に、IOM様の有機物が水質変質で出来た場合を考えてみよう。Codyらはホルムアルデヒドとグリコールアルデヒドを水熱すると隕石IOM様の複雑な高分子固体有機物が生成することを示した[35]。我々はさらにアンモニアを加えると有機物の生成量も増え、化学構造的にもIOMによく似た高分子有機固体ができることを示した[36, 37]。ホルムアルデヒドやアンモニアは、星間物質や彗星中に豊富に含まれるため[28, 47]、母天体集積時の氷にも含まれていたと考えられる。水質変質中にこのような反応が起こった場合、フィロケイ酸塩が触媒効果をもち、これらの周りに選択的に有機物が形成したのかもしれない。似たような反応として、ホルムアルデヒドとアンモニアからアルキルピリジンが形成される反応はカンラン石(水質変質によりフィロケイ酸塩を形成)により促進されることが知られている[48]。

現時点では有機物の形成過程と鉱物との共存関係には、様々な解釈が考えられる。実際は、複数の起源をもつ有機物の混合や、複数の進化過程を経て複雑に進化してきたのではないだろうか。このような有機物と鉱物の共進化についての研究はまだ始まったばかりである。今後、分析技術の発展や新しい地球外試料の増加などにより、この謎を解いていけるであろう。

4. 微小領域分析でみる有機物の多様性: STXM-XANES分析

赤外分光の空間分解能は、回折限界のため赤外光の波長程度に限られるが、より波長の短いX線を使えば、より高い空間分解能を得ることができる。そこで、走査型透過X線顕微鏡(scanning transmission X-ray microscopy, STXM)は微小領域分析の強力なツールである。STXMでは、入射X線の波長を変化させることにより、X線吸収スペクトルを得ることができる(図3)。元素は特定の波長(エネルギー)のX線(炭素のK殻であれば約290 eV)を吸収して、内殻電子が非占有軌道に遷移するが、非占有軌道の電子状態や化学状態により吸収エネルギーが微妙に異なる。これを利用して、0.1 eV程度のエネルギー分解能で得られるのがX線吸収端近傍構造分析(X-ray absorption near edge structure, XANES)である。この分析により赤外分光と比較的似た情報、すなわち有機物の場合は試

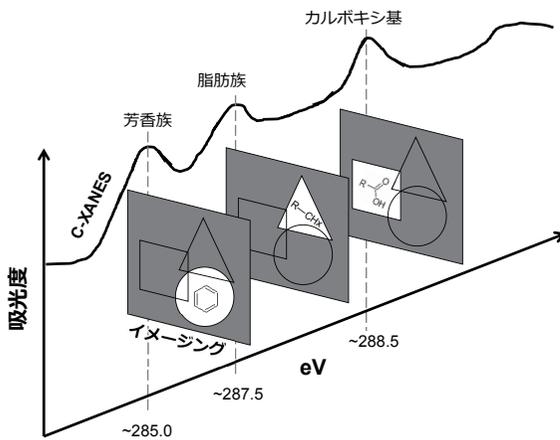


図3：STXM-XANES分析のイメージ。

料に含まれる有機官能基の情報を高空間分解能で得ることができる。しかし、有機物分析用のSTXMの場合、C、N、OのK殻の吸収領域(およそ280~600 eV)に特化しているため、無機元素についての情報は限られる。また、軟X線を透過させるために100 nm程度の薄片試料を作成する必要がある。試料作製の方法としては、集束イオンビーム(focused ion beam, FIB)装置を用いて、ガリウムイオンによるスパッタリングで薄片を削り出す、あるいはウルトラマイクロームを用いてダイヤモンドナイフにより切片を切り出す方法がある。ウルトラマイクロームにおいては、TEMなどの分析用には試料を樹脂に埋めて切片を作成する方法が一般的であるが、有機物を対象としたSTXM分析のためには樹脂は測定時に邪魔になるため、硫黄を溶かした液滴に埋めて固化させ、薄片化する。最近ではFIBを使用する方法が主流である。この手法は、重要な部分を直接切り出すことができ、比較的簡易であるが、イオンビームによる試料へのダメージに注意が必要である。有機物分析ができるSTXMは国内外の一部の放射光施設に限られる。筆者らが使用しているのは米国カリフォルニア州バークレーのLawrence Berkeley National Laboratory, Advanced Light Source (ALS)のビームライン5.3.2.2、愛知県岡崎市の分子科学研究所、UVSORのBL4U、茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構(KEK)、フォトン・ファクトリーのBL13Aである。

STXMにより、有機物のサブミクロンスケールで

の化学組成の不均一やこれらの母天体変成過程との関係が明らかにされつつある。例えば、Le Guillouら[49]は、Renazzo(CR2)、Murchison(CM2)、Orgueil(CI)隕石について、STXM-XANES及びTEM分析を行った。その結果、サブミクロンの有機物粒子(ナノグロビュール)と、鉱物粒子間にナノスケールで広がった有機物との2種類の有機物が見られ、粒子状のほうが比較的芳香族炭素が多く、広がった有機物はカルボキシ基が多かった。OrgueilやMurchisonなど水質変質をより受けている隕石のほうが、広がった有機物が多く見られたことや、化学組成の不均一性が多く見られたことから、水質変質時に化学変化が起こったことが示唆された。

有機物の起源を知るうえで、もう一つ重要なパラメーターは水素、炭素や窒素など軽元素同位体組成比である。特に水素や窒素の安定同位体比(D/H比及び $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 比)は、有機物の進化と起源を解明する優れたトレーサーである。STXMと同程度の空間分解能でこれらの同位体イメージングを行うことのできる高空間分解能二次イオン質量分析器(secondary ion mass spectrometry, SIMS)、NanoSIMSを用い、有機物の化学構造と同位体組成分布の関連性を同一試料の同一部位から得るという多角的なアプローチが近年行われるようになってきた。例えば、De Gregorioら[50]は、CI1(Orgueil隕石)、CM2(Murchison, Bells隕石)、CR1(GRO 95577隕石)、CR2(EET 92042, QUE 99177隕石)、CO3.0(ALH 77307隕石)のIOMについて、TEM、STXM-XANES、NanoSIMSを行い、184個のナノグロビュールの形状、化学構造、窒素同位体比を調べた。多くのナノグロビュールはIOMと同様の化学構造であったがややカルボキシ基に富んでおり、しばしば芳香族に富むナノグロビュールがあった。変質の進んだ隕石ほど、ナノグロビュールが大きく、芳香族に富むナノグロビュールの割合が少ないため、母天体過程で形成や変化したと考えられる。窒素同位体比には大きな幅があったが、形状や化学構造との相関は顕著には見られなかった。

次の章では、筆者らが行っている隕石中のクラストのSTXM-XANES分析について紹介する。

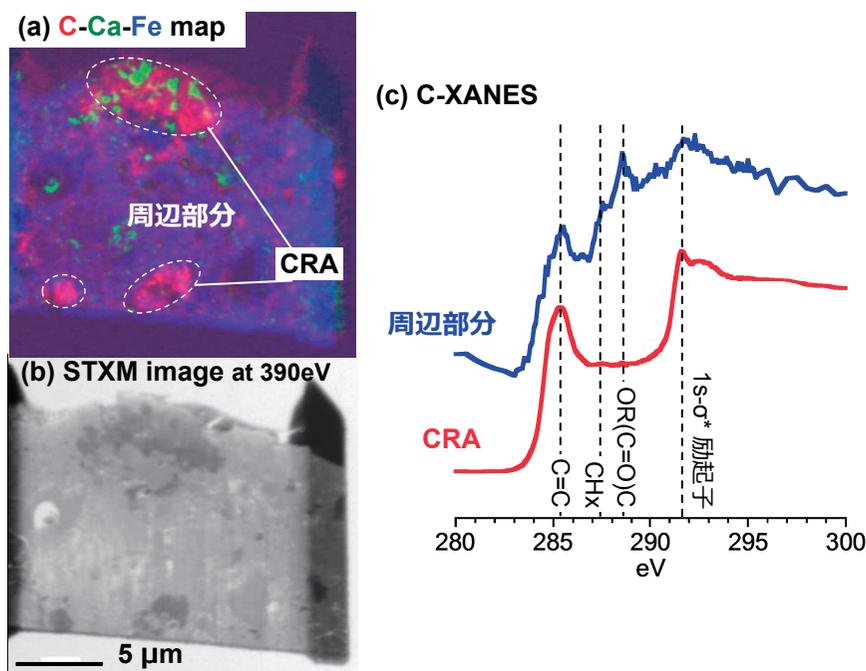


図4：Sharps隕石に含まれるクラストのSTXMによる(a) C-Ca-Fe map, (b) シングルエネルギーイメージ, (c) C-XANES スペクトル。Kebukawaら[51]のFigs. 7,8を改変。

5. 隕石中のクラスト(捕獲岩)

我々は、Sharps隕石(タイプ3.4普通コンドライト)に含まれる炭素質物質に富むクラストについて、FTIR, Raman, STXM-XANES, TEM及び希ガス同位体分析により多角的に調べた[51]。その結果について以下に紹介する。Brearley [52]により、Sharps隕石は5 mm程度の大きさのクラストを含んでおり、金属鉄・ニッケルを含むPGCからなる凝集体(carbon-rich aggregates, ここではCRAと略す)が含まれることが知られていたが、TEMによる分析にとどまっていたためその化学構造などの情報は限られていた。筆者らのSTXMによるイメージング分析の結果、数ミクロン程度の炭素の濃集している部分がみられた(図4a)。これらはBrearleyにより報告された炭素に富む凝集体(CRA)と考えられる。CRAのC-XANESスペクトルをみると、285 eVに芳香族炭素の吸収ピーク、291.7 eVにグラフェン構造の発達を示す励起子の吸収ピークが見られた(図4c)。また、CRAの周辺にも、

少ないが有機物が含まれており、C-XANES分析からは、285 eVの芳香族炭素のほか、287.5 eVに脂肪族炭素、288.5 eVにカルボキシ基の吸収ピークが見られた。このような特徴は、CI, CM, CRコンドライトに含まれるIOMに似ており、芳香族炭素骨格に脂肪族炭素や、カルボキシ基などの官能基を含む、原始的な化学構造であることが分かった。

クラストの有機物にCodyら[53]により提案されたC-XANESを用いた温度指標を適用すると、CRAが経験した平均加熱温度(T_{EFF})は700 °C~800 °C、その周辺部分が経験した平均加熱温度は最大で300 °C~500 °Cであると見積もられた。Codyらの温度指標では加熱時間を1000万年と仮定しているが、時間依存性はあまり大きくないため、加熱時間による誤差は少ないと考えられる。周辺部分を「最大で」としているのは、周辺部分にも細粒の炭素に富む凝集体が含まれており、それにより、温度の見積もりが過大評価されている可能性があるためである。

一方で、RietmeijerとMackinnon [54]により提唱された、TEMによりPGCのd002面間隔を調べてピー

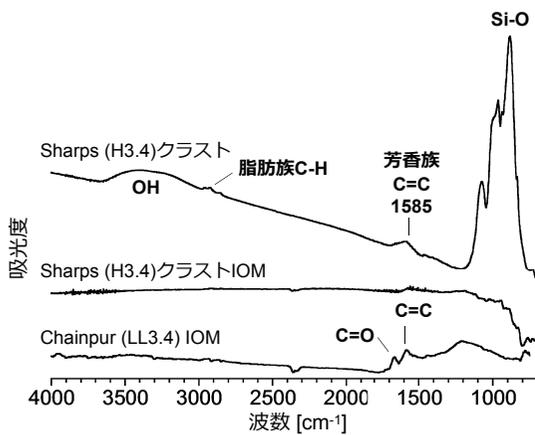


図5：Sharps隕石に含まれるクラスト及びIOMの赤外吸収スペクトル。比較としてSharps隕石と同じ岩石学タイプ(熱変成度)のChainpur隕石(タイプ3.4普通コンドライト)IOMのスペクトルも載せた。同様の熱変成度の隕石IOMと比較しても明らかにSharpsクラストのIOMには特徴がなく、赤外領域に吸収を持たないグラファイト的な構造であることがわかる。Kebukawaら[51]のFig. 3を改変。

ク変成温度(peak metamorphic temperature, PMT)を見積もる方法を用いると、CRAのピーク変成温度は300℃～400℃であった。これは、同じ方法でBrearley [52]により見積もられたCRAのピーク変成温度、 330 ± 50 ℃とおよそ一致する。TEM分析から求められた温度は「ピーク変成温度」であるにも関わらず、C-XANESから求めた「平均加熱温度」よりも低いのは不思議である。原因としては、TEMによる温度の見積もりは、地球の岩石に基づいており、圧力がかかった状態での温度スケールのため、圧力のあまり高くない条件と考えられる母天体では温度は過小評価されている可能性がある。我々は他にもラマン分光を用いて温度の推定を行った。ただし、分析上、ラマン分光から見積もられた値は、CRAとマトリックスの有機物の平均的な値となっているが、後に述べるように、クラストに含まれる炭素質物質の大部分はCRAであると考えられる。ラマン分光法では、 1580 cm^{-1} 付近のGバンド(グラファイトの六員環構造の面内伸縮振動)、及び 1350 cm^{-1} 付近のDバンド(その欠陥構造に由来)のピーク強度比や半値幅等を用いて、ピーク変成温度を求める方法が知られている。Dバンドの半値幅 Γ_D [cm^{-1}]を指標としてBusemannら[13]の式：

$$\text{PMT}(\text{℃}) = 931 - 5.10 \times \Gamma_D \text{ cm} + 9.1 \times 10^{-3} \times \Gamma_D^2 \text{ cm}^2 \quad (1)$$

及びCodyら[53]の式：

$$T_{\text{EFF}}(\text{℃}) = 899.9 - 3.0 \times \Gamma_D \text{ cm} + 1.4 \times 10^{-3} \times \Gamma_D^2 \text{ cm}^2 \quad (2)$$

を用いると、それぞれ約380℃及び約490℃と求めた。なお、Codyら[53]の式は、様々な隕石について、先に述べたC-XANESで求めた温度とBusemannら[13]の式から求めた温度の相関関係から得たものである。

分析方法により求まる温度が異なるのは、先に述べた様にキャリブレーションの方法などの問題もあるが、おそらくCRAの場合は、分析手法ごとに異なる化学状態を見ているからということが大きいと思われる。C-XANESはグラフェン構造の2次元的な発達を、Ramanはグラファイト状構造の欠陥などを反映、そしてTEMではグラファイト状物質の格子間隔をみているのである。それでも比較的よく調べられてきたIOMについては、CodyらのC-XANESの温度指標とBusemannらのRamanによる温度指標はおおよそよい相関を示す[53]、TEMによる指標も大きくかけ離れてはいない。しかし、Sharpsクラストに含まれるCRAの場合は、出発物質・加熱条件などが通常の隕石IOMとはかなり異なるため、異なる結果となったのではないかと推測される。このように、バルク的なIOM分析から知られているような母天体変成過程だけでは説明のつかない有機物が存在するのである。

筆者らはまた、Sharps隕石のクラストを酸処理(HF/HCl処理)することより、ケイ酸塩鉱物等を溶解させ、IOMを回収した。得られたIOMのC-XANESスペクトルはCRAのものとおよそ一致していたことから、IOMの大部分はCRAであると考えられる。これは、IOMの赤外スペクトル(図5)にほとんどピークが見られなかったことから裏付けられる。すなわち、赤外吸収を持つ脂肪族鎖や酸素を含む官能基がほとんど含まれていない、PGCやglassy carbonのような構造だと考えられる。酸処理前のクラストの赤外スペクトルには、有機物のピーク(2960 , 2925 , 2860 cm^{-1} の脂肪族C-H結合のピーク、 1585 cm^{-1} 付近の芳香族C=C結合のピーク)及び 1100 – 800 cm^{-1} にわたるケイ酸塩Si-O結合のピークが見られた。 1100 – 800 cm^{-1} のピークの特徴は、CI, CM, CRなどの水質変質を受

けた炭素質コンドライトよりも、CO、CVなどの熱変成を受けた炭素質コンドライトのものに似ており、カンラン石などの無水のケイ酸塩を多く含んでいることが示唆される。CRA部分の詳細なTEM分析からは、幅数百~数十nm程度のグラフェンシートが何層かまとまったものや、数十nmのpoorly-organized carbonの周りに、より層構造の発達した炭素が取り囲む構造が見られた。グラフェン層の向きはランダムであり、このようなランダムな配向のものはこれ以上のグラファイト化が難しいため、non-graphitizing carbonと呼ばれることがある。このような特徴は岩石学タイプ3.6以上の炭素質コンドライトに似ており[55]、始原的なCI、CMコンドライトとは異なる。また、CRA中には鉄-ニッケル合金や鉄-ニッケルカーバイドが含まれていることがあった。さらに、クラストIOMの希ガス分析を行った。希ガスは不活性で周りの物質と反応しないため、物質の形成環境や物理化学的過程の良いトレーサーとなる。クラストIOMの希ガス成分は、炭素質コンドライトに含まれる希ガスと類似しており、Xe等の重い成分が比較的豊富なQガス、プレソーラーダイヤモンドに含まれるHLと呼ばれる成分、プレソーラーSiCに含まれるNe-E(H)と呼ばれる成分が多く含まれていることが分かった。したがって、CRAはIOMと同様の前駆物質を持ち、プレソーラー物質も多く含まれていることが示唆される。

CRAの起源についてははっきりとした結論は得られていないが、いくつかの可能性を考えてみよう。分光的な観測から、星間塵に含まれる固体有機物の多くは水素化非晶質炭素(hydrogenated amorphous carbon, HAC)や多環芳香族炭化水素(polycyclic aromatic hydrocarbon, PAH)であると考えられている[56, 57]。こういった物質が凝集して、さらに変質が進むことによりCRAを形成したのかもしれない。実際、TEMにより観測されるCRAの構造は、HACにUV照射をしたものと類似している[58]。あるいは、CRA中に鉄-ニッケル粒子などがみられることから、原始惑星系円盤ガス中のH₂やCOによるFTT反応によりできた可能性もある。鉄によりグラファイト化が促進されることも知られており[59]、FTT反応で形成した炭化水素のグラファイト化がさらに進行してCRAを形成したのかもしれない。また、微惑星で形成されたとする、比較的熱変成度が高くかつ集積時に炭素質物質を多く

含んでいた微惑星内部で形成され(例えばユレイライトの母天体のような?)、衝突破壊などにより微粒子となってクラストの母天体に取り込まれたのかもしれない。

いずれにせよ、CRAは炭素質コンドライト的な希ガス成分を持っているため、前駆物質は炭素質コンドライトに含まれるIOMと似たようなものであったと考えられる。しかし先に述べたように、温度見積もりを考慮すると、IOMと前駆物質は同様であったとしても後にたどった加熱過程などは大きく異なると考えられる。CRAは何らかの形で最大800°C程度の高温を経験しており、その後CRAの周辺部分の物質(低温成分)と混合し、クラストの母天体が形成されたのであろう。さらにそのクラストの母天体が衝突破壊され、普通コンドライトの母天体(Sharps隕石の母天体)に取り込まれたと考えられる。すなわちCRAは少なくとも3つの異なる環境を経験したことになり、太陽系初期には複雑、かつ大規模な物質混合過程があったことをうかがわせる。

さて、ここまではSharps隕石に含まれるクラストの話であったが、最近筆者らが進めているZag隕石(タイプ3-5普通コンドライト)のクラストについて少し紹介したいと思う。Zag隕石は、液体の水をもつ流体包有物を含む岩塩が見つかったことで知られている[60]。Zag隕石のクラスト中にはマイクロメートルサイズの有機物の塊があり、その有機物部分をFIBにより切り出し、STXMによる化学構造分析及びNanoSIMSによる同位体イメージング分析を行った[61]。STXMによる有機物のC-XANES分析からは、芳香族炭素(sp²炭素)以外に特徴的なピークは見られなかった。しかし、Sharps隕石のCRAとは異なり、グラフェン状組織の発達を示す励起子のピークは見られなかったため、アモルファスな構造を持つ炭素質物質と考えられる。このようなC-XANESスペクトルの特徴は、水素化非晶質炭素(HAC)に似ている[62]。Zagクラスト中の有機物のD/H比と¹⁵N/¹⁴N比はともに高く、分子雲や太陽系外縁部の極低温環境の痕跡を留めている。このように、サイズが大きく、同位体異常を持つ有機物はUCAMMに類似しているが、化学構造には差異がみられる[63, 64]。このようなマイクロメートルサイズの有機物がどこでどのように成長したのかは未だ謎である。

6. まとめと今後の展望

以上のような局所分析からは、バルク的な分析から得られる母天体変成によるトレンドに収まらないような有機物や、有機物と鉱物の相互作用についての知見を得ることができる。さらに、有機物の化学的なプロセスだけでなく、物質の混合や流体の作用などの物理的な過程の解明にもつなげることができる。

これらのためには、最先端かつ多角的なアプローチによる局所分析が不可欠である。ここ10年ほどの分析技術の飛躍的な向上により、これまでに得られなかったような高分解能・高精度のデータが得られるようになった。それに伴い、これまで見えなかったような惑星物質の細部にわたる情報が得られるようになり、クラストやUCAMMなどから多様性に富む有機物の存在も明らかになってきた。これらは試料が少なく研究例も少ないため、重箱の隅をつついていようにもとらえられかねないが、先に述べたように隕石はサンプリングバイアスのある試料ということも考慮せねばならない。現在はまだこれらが「太陽系物質進化パズル」のどこのピースに該当するのか明らかではないが、さらなる分析技術の向上や分析試料数の増加、太陽系始原天体からのサンプルリターンや直接探査によるデータが増えるにつれて、今はまだつながらない空白の部分、ミッシングピースが埋められていき、こういった一見マイナーな物質の重要性が明らかになるのではないだろうか？

また、情報量が増えていくにつれ、複雑な物質進化過程が垣間見えるようになってきた。自然界はそんなに単純ではなく、それらをすべてつなげるシナリオの構築はより難しくなり、チャレンジングである。複雑難解な現実に悲鳴をあげつつも、自然界からの挑戦状を受けて立とうと気を引き締める次第である。

謝辞

この論文は2015年度日本惑星科学会最優秀研究者賞受賞記念論文として執筆の機会を頂きました。推薦して頂いた小林憲正教授を始め、審査員の方々に感謝します。また、学生時代にご指導頂いた中嶋悟教授、当時から共同研究させていただいているMike

Zolensky博士、STXMの紹介・指導を始め様々な実験のアイデアを頂いたGeorge Cody博士に感謝します。また、多数の共同研究者の方々、諸先輩方や同僚の皆様にお礼申し上げます。また、査読者により有益な意見を頂いたことに感謝します。

参考文献

- [1] Hayashi, C. et al., 1985, in *Protostars and planets II*, 1100.
- [2] Ciesla, F. and Charnley, S., 2006, in *Meteorites and the early solar system II*, 209.
- [3] Greenberg, J. M., 1998, *Astron. Astrophys.* 330, 375.
- [4] McKeegan, K. D. et al., 2006, *Science* 314, 1724.
- [5] Nakamura, T. et al., 2008, *Science* 321, 1664.
- [6] Shu, F. H., 1997, *Science* 277, 1475.
- [7] MacPherson, G. J. et al., 1995, *Meteoritics* 30, 365.
- [8] Rubin, A. E., 1995, *Icarus* 113, 156.
- [9] Brearley, A. J., 2006, in *Meteorites and the early solar system II*, 587.
- [10] Asplund, M. et al., 2009, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 47, 481.
- [11] Cody, G. D. and Alexander, C. M. O., 2005, *Geochim. Cosmochim. Acta* 69, 1085.
- [12] Alexander, C. M. O. D. et al., 2007, *Geochim. Cosmochim. Acta* 71, 4380.
- [13] Busemann, H. et al., 2007, *Meteorit. Planet. Sci.* 42, 1387.
- [14] Kebukawa, Y. et al., 2011, *Geochim. Cosmochim. Acta* 75, 3530.
- [15] Orthous-Daunay, F. R. et al., 2013, *Icarus* 223, 534.
- [16] Nakamura, K. et al., 2002, *Int. J. Astrobio.* 1, 179.
- [17] Pizzarello, S. et al., 2006, in *Meteorites and the early solar system II*, 625.
- [18] Pearson, V. K. et al., 2002, *Meteorit. Planet. Sci.* 37, 1829.
- [19] Weisberg, M. K. et al., 2006, in *Meteorites and the early solar system II*, 19.
- [20] DeMeo, F. and Carry, B., 2013, *Icarus* 226, 723.
- [21] Hiroi, T. et al., 2001, *Science* 293, 2234.
- [22] Yabuta, H. et al., 2010, *Meteorit. Planet. Sci.* 45, 1446.
- [23] Bottke Jr., W. F. et al., 2002, in *Asteroids III*, 3.

- [24] Duprat, J. et al., 2010, *Science* 328, 742.
- [25] Johnson, C. A. et al., 1990, *Geochim. Cosmochim. Acta* 54, 819.
- [26] 癸生川陽子, 2016, *地球化学* 50, 67.
- [27] 癸生川陽子, 2016, *地球化学* 50, 211.
- [28] Herbst, E. and van Dishoeck, E. F., 2009, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 47, 427.
- [29] 香内晃, 2005, *岩石鉱物科学* 34, 114.
- [30] Millar, T. et al., 1989, *Astrophys. J.* 340, 906.
- [31] Yurimoto, H. and Kuramoto, K., 2004, *Science* 305, 1763.
- [32] Aléon, J., 2010, *Astrophys. J.* 722, 1342.
- [33] Anders, E. et al., 1973, *Science* 182, 781.
- [34] Nuth, J. A., III et al., 2008, *Astrophys. J. Lett.* 673, L225.
- [35] Cody, G. D. et al., 2011, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 108, 19171.
- [36] Kebukawa, Y. et al., 2013, *Astrophys. J.* 771, 19.
- [37] Kebukawa, Y. and Cody, G. D., 2015, *Icarus* 248, 412.
- [38] Yabuta, H. et al., 2007, *Meteorit. Planet. Sci.* 42, 37.
- [39] Kebukawa, Y. et al., 2010, *Meteorit. Planet. Sci.* 45, 99.
- [40] Alexander, C. M. O. D. et al., 2012, *Science* 337, 721.
- [41] Alexander, C. M. O. D. et al., 2010, *Geochim. Cosmochim. Acta* 74, 4417.
- [42] Kebukawa, Y. et al., 2009, *Chem. Lett.* 38, 22.
- [43] Kebukawa, Y. et al., 2010, *Meteorit. Planet. Sci.* 45, 394.
- [44] Yesiltas, M. and Kebukawa, Y., 2016, *Meteorit. Planet. Sci.* 51, 584.
- [45] Salisbury, J. W. et al., 1991, *Infrared (2.1–25 micrometers) spectra of minerals* (Baltimore: John Hopkins University Press).
- [46] Abreu, N. M. and Brearley, A. J., 2010, *Geochim. Cosmochim. Acta* 74, 1146.
- [47] Mumma, M. J. and Charnley, S. B., 2011, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 49, 471.
- [48] Yamashita, Y. and Naraoka, H., 2014, *Geochem. J.* 48, 519.
- [49] Le Guillou, C. et al., 2014, *Geochim. Cosmochim. Acta* 131, 368.
- [50] De Gregorio, B. T. et al., 2013, *Meteorit. Planet. Sci.* 48, 904.
- [51] Kebukawa, Y. et al., 2017, *Geochim. Cosmochim. Acta* 196, 74.
- [52] Brearley, A. J., 1990, *Geochim. Cosmochim. Acta* 54, 831.
- [53] Cody, G. D. et al., 2008, *Earth Planet. Sci. Lett.* 272, 446.
- [54] Rietmeijer, F. J. and Mackinnon, I. D., 1985, *Nature* 315, 733.
- [55] Le Guillou, C. et al., 2012, *Meteorit. Planet. Sci.* 47, 345.
- [56] Jones, A., 1990, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 247, 305.
- [57] Muñoz Caro, G. M. and Dartois, E., 2013, *Chem. Soc. Rev.* 42, 2173.
- [58] Gadallah, K. A. K. et al., 2011, *Astron. Astrophys.* 528, A56.
- [59] Charon, E. et al., 2014, *Carbon* 66, 178.
- [60] Zolensky, M. E., 1999, *Science* 285, 1377.
- [61] Kebukawa, Y. et al., 2016, 79th MetSoc, abstract#6233.
- [62] Robertson, J., 1991, *Prog. Solid St. Chem.* 21, 199.
- [63] Yabuta, H. et al., 2012, 43rd LPSC, abstract#2239.
- [64] Engrand, C. et al., 2015, 46th LPSC, abstract#1902.

エポックメイキングな隕石たち(その11)： ～Allan Hills 84001隕石～太古の火星を明らかにする隕石～

三浦 弥生¹

2017年1月7日受領，査読を経て2017年1月27日受理。

(要旨) 火星起源と考えられる隕石の数は170個を超え，それらの多くは13億年前よりも若い結晶化年代を示すが，1984年に南極で発見されたAllan Hills 84001 (ALH 84001) は約45億年前という太陽系形成時期に近い結晶化年代を示す。炭酸塩鉱物や有機物を含む斜方輝石岩であるこの隕石は，古い時代の火成活動・水質変成・天体衝突の痕跡，それらの時期や規模に関する情報を与える貴重な隕石である。

1. はじめに

これまでに見つかっている隕石の数は55000個を超えるが(落下時や落下後に割れて別々の個体として登録されているものも含む)，そのうち火星起源隕石と同定されているものは170個あまりである[1]。1970年代前半までは，6個の隕石がシャーゴットタイト(Shergottite)・ナクライト(Nakhlite)・シャシナイト(Chassignite)に分類され，それらは若い結晶化年代や水質変成の痕跡を示すことから，大きな分化天体に由来すると考えられた[2]。分類名の頭文字から「SNC隕石」とも呼ばれ，酸素同位体組成や岩石学的特徴から共通の分化した母天体から来たことは多くの研究者が認めるところであった。しかし，当時は火星起源を示す直接的証拠は見つかっていなかった。その後，南極や砂漠から多くの隕石が見つかり，SNC隕石の数も増加した。1980年には南極で7.9 kgの比較的大きなシャーゴットタイトElephant Moraine A79001 (EETA79001)が発見された。この隕石は2つの異なる岩石組織(岩相A, B)からなり，さらに，それまでのシャーゴットタイト隕石には含まれていなかったcmスケールの衝撃ガラスを含んでいた。衝撃ガラス中には，アメリカの火星探査機Vikingによって測定された火星表層大気に似た組成の希ガスや窒素が存在して

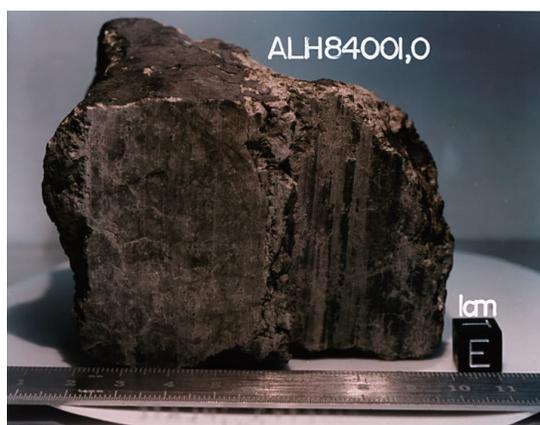


図1：ALH 84001の切断面の写真。
画像提供NASA/JSC/Stanford University.

いた。特に， $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比(約2000)や $^{129}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ 比(約2.5)は地球大気や他の隕石に見られる値より明らかに高く，火星起源を支持する証拠となった(これらの比が大きく変動するのは， ^{40}Ar や ^{129}Xe が ^{40}K や ^{129}I からの放射壊変生成核種であることが関係している)[3]。EETA79001については本連載(その4)[4]にて紹介されている。さらにその後，SNC隕石と共通の酸素同位体組成や鉱物学的特徴を持ちながら約45億年という古い結晶化年代を持つ南極隕石が見つかった(図1)。本稿では，Allan Hills 84001 (ALH 84001)と名付けられたこの隕石の特徴や得られている知見について紹介する。

1. 東京大学地震研究所
yayoi@eri.u-tokyo.ac.jp

ALH 84001は、1984年にアメリカの隕石探査隊によって南極大陸のAllan Hills地域で発見された重さ1.9 kgの斜方輝石岩である。発見当初は分化隕石の一種であるダイオジェナイトに分類され、詳細な研究は発見から10年ほど経った後に始まった[5]。ALH 84001は、酸素同位体や鉍物組成などにおいてSNC隕石と密接な関係を示すが岩石組成そのものや年代などは大きく異なっており、新たな種類の火星起源隕石に分類された。火星起源の斜方輝石岩(orthopyroxene)とされ、現在のところこの分類に属す隕石はALH 84001のみである[1]。ALH 84001が発見されるまでは、クレーター年代学から推定される火星表面の地質年代は大部分(3/4程度)が30億年よりも古いにもかかわらず[6]、いずれの火星起源隕石も若い年代を示すことは一つの疑問であった。特に多くのシャーゴットタイトが示す ≤ 5 億年となると、後期アマゾニアンと呼ばれる時代に相当し火星表面の約7%に過ぎない[7]。しかし、ALH 84001の発見により火星起源と考えられる隕石が必ずしも若い結晶化年代を持つわけではないこと、火星の岩石の種類は多様であることが示された。最近では砂漠の隕石からも従来よりも明らかに古い年代を示すシャーゴットタイトが見つかっていて(例えば、NWA7034 [8])、探査による火星観とのギャップは埋められつつある。

2. ALH84001の鉍物学的・化学的特徴

1994年にMittlefehldtは、詳細な鉍物学的、化学的研究をもとにALH 84001は発見直後の分類であるダイオジェナイトではなく新しいタイプの火星隕石であるとの報告を行った[9]。[9]によると、ALH 84001は粗粒な(およそ3.5 mm以下)圧碎状の斜方輝石岩で、化学組成は比較的均質である。マイナー相としてCa-Fe-Mg炭酸塩鉍物、クロム鉄鉍、マスケリナイト(ガラス化した斜長石)を含む。クロム鉄鉍中に3価の鉄が存在すること、硫化鉄がトロイライトではなくパイライトであること、Fe/Mn比がダイオジェナイトの範囲ではないこと、などダイオジェナイトとは異なる特徴が見られた。輝石やクロム鉄鉍の組成はシャーゴットタイト隕石EETA79001の岩相Aと類似し、マスケリナイトの組成はナクライトやシャシナイトの長石組成に類似する。均質な化学組成や大きな鉍物粒子サイズ

は、この隕石がSNC隕石よりもゆっくりと冷却されたことを示唆する。酸素同位体組成・軽元素同位体組成・化学組成・鉍物学的・年代学研究成果も続々と発表され(例えば、[10-13])、ALH 84001は新たな火星隕石メンバーとして広く認知されるようになった。

全岩化学組成からは、高Mg/Fe比を持つマフィック岩であることが示され、また、ニッケル、イリジウム、金などの元素濃度が低いことから、親鉄元素に乏しい古いマントルに由来する可能性が指摘された[14, 15]。

3. 年代学的研究

ALH 84001は衝撃や変成を受けた隕石であり、結晶化年代の他、衝撃や変成の年代が調べられてきた。Nyquist and Shih [16]は、全岩と鉍物分離した計22試料のSm, Ndを測定し、 ^{147}Sm - ^{143}Nd アイソクロン年代として 45.68 ± 0.88 億年の年代を得た。Sm-Nd系は変成に強く、結晶化年代を保持していると考えられる。同様の古いSm-Nd年代が別の研究グループからも報告されている。他方、Lu-Hf, U-Pb, Rb-Sr, Ar-Arなど他の壊変系は何らかの二次的な影響を受けて若い年代を示しており、多くの系が39-41億年の年代を与える(例えば、[17, 18])。分析を行った鉍物種あるいは親核種が存在すると考えられる鉍物相を考慮すると、炭酸塩やマスケリナイトが形成された年代が40億年前後と考えられる。岩石組織や年代情報から、マスケリナイト形成の後に炭酸塩が形成され、形成の時間差は1-2億年程度と推察される(ただし、破壊された炭酸塩にマスケリナイトが貫入しているような組織も見られることから二次的鉍物の形成史は単純ではない[19])。これらの時期は火星上でValley Network地形が発達した頃と重なり、今後の研究により当時の環境条件の推定に結びつくことを期待する。

ALH 84001はその後、長らく火星内部(地殻部分)に保持された後、小天体衝突により火星から放出され、宇宙空間を飛行して(飛行の期間を宇宙線照射年代と呼ぶ)、地球に落下し回収された(落下から現在までの期間を落下年代と呼ぶ)。ALH 84001の宇宙線照射年代は約1500万年で、見ついている火星隕石の中では2番目に長く、落下年代は約13,000年である[18]。すなわち、南極氷中に1年以上閉じ込められた後、

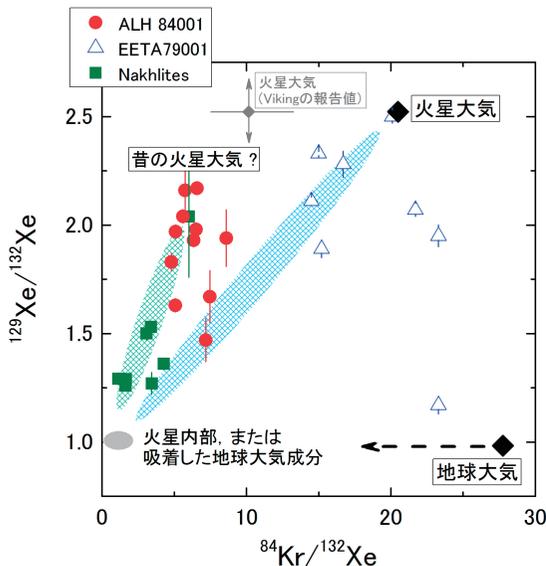


図2: 火星隕石の $^{129}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ 対 $^{84}\text{Kr}/^{132}\text{Xe}$ プロット. ALH 84001, EETA79001の衝撃ガラス, ナクライト, 火星大気組成, および地球大気組成をプロット. 隕石のデータは文献[25]およびその中の引用文献より. 火星および地球大気のデータは文献[21, 27, 28]より. 横軸の誤差は省略(一般的に相対誤差10-15%程度). ハッチ部分は, 引用データ以外の多くのシャーゴットタイトとナクライトがプロットされる領域を示す. 地球大気の矢印は, 吸着した際の元素分別の方向を示す.

運良く(隕石にとっては?)観測隊に発見された次第である. 南極氷中を隕石が運ばれるメカニズムも興味深いものである. 火星隕石の宇宙線照射年代は, (a) 他の石質隕石に比較すると全体の分布として短い傾向にある(ただし月隕石を除く), (b) 共通の照射年代を持つ隕石が多い, などの特徴が見られる. 本稿冒頭において, 現在までに発見された火星隕石の数は170個あまりと述べたが, (b)および他の特徴から, 多くの火星隕石は共通の小天体衝突で火星から放出されたと推察され, 現在我々が手にしている火星隕石が火星を飛び出すことになった衝突イベントの数は10程度と考えられている. 一緒に火星を飛び出しながら地球へは別々に落下した隕石達をローンチペアと呼び(地球への落下まで一緒の場合は単にペア, または同一隕石として扱われる), ローンチペアが多いことは火星隕石の特徴のひとつである.

4. 希ガス同位体組成・窒素同位体組成

SNC隕石が火星起源と考えられるようになった根拠のひとつは, 火星探査機Vikingによって報告された火星大気組成に類似した希ガスを含んでいたことである. Vikingによる火星表層大気組成は, その後のCuriosity探査において支持する結果が得られている([20, 21]ほか). ALH 84001にも火星大気に類似する特徴的な希ガスが含まれていて([22-24]ほか), 火星起源であることが示唆される. 図2に, ALH 84001および他の火星隕石の $^{129}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ 対 $^{84}\text{Kr}/^{132}\text{Xe}$ のプロットを示す. データのばらつきは, 複数の成分が混在していることを意味し, 図の左下側は火星内部の成分または隕石に吸着した地球大気成分, 上側は火星大気成分と考えられる. EETA79001の衝撃ガラスに関する結果の中で, 最も高い $^{129}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ 比は 2.50 ± 0.03 [25]で, 最近Curiosityにより報告された現在の火星大気の $^{129}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ 比(2.5221 ± 0.0063 [21])と良く一致している. 衝撃ガラスの年代ははっきりしないが, 結晶化年代の1.8億年よりは後のはずである. $^{84}\text{Kr}/^{132}\text{Xe}$ 比は, Vikingによる値は誤差が大きいため(Curiosityの報告値はまだない), 衝撃ガラス中に捕獲された $^{84}\text{Kr}/^{132}\text{Xe}$ 比と違いがあるかは定かではなく, 大気の希ガスを捕獲する際に元素分別が起こったかどうかははっきりしない. 元素分別の有無を調べるために玄武岩への衝撃実験を行った研究例があり, その結果によればマスケリナイトが形成されるような衝撃の際に捕獲する希ガスの元素分別は小さいとされ[26], 火星大気の $^{84}\text{Kr}/^{132}\text{Xe}$ 比はEETA79001が示す値に近いのかもしれない. Bogard and Garrison [25]は, シャーゴットタイト隕石の値をもとに火星大気の $^{84}\text{Kr}/^{132}\text{Xe}$ 比として 20.5 ± 2.5 を提案している. 図2からわかるように, ALH 84001も同様に高い $^{129}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ 比を示すが, $^{84}\text{Kr}/^{132}\text{Xe}$ 比は小さい傾向にある. これまでに得られた $^{129}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ 比の全岩としての最大値は 2.17 ± 0.01 でEETA 79001より若干低く(データの引用文献は図説明に記載), 過去の火星大気の比が現在よりも低いことを示しているのかもしれない. これらの希ガスが, ALH 84001中のどこに捕獲されているかは同定されていないが, 希ガスが放出される温度が $1300-1400^\circ\text{C}$ と比較的高いことから, 斜方輝石が高温まで安定な鉱物に捕獲されてい

と思われる。また、 $^{84}\text{Kr}/^{132}\text{Xe}$ 比が低い理由として、昔の火星大気組成を反映している、あるいは、EETA 79001とは捕獲メカニズムや捕獲サイトが異なる、などが考えられる。ナクライトに存在する水質変成鉱物内に取り込まれた希ガスがALH 84001と似た値を示すことから、その両方が理由とも考えられる。ナクライトの場合には火星大気希ガス成分はカンラン石からの変質鉱物であるイディングサイトに入っており、イディングサイトが形成された時代(6億年前以降)の火星大気である可能性は高い。ALH 84001やナクライトの値からは捕獲元の $^{84}\text{Kr}/^{132}\text{Xe}$ 比は、 $^{129}\text{Xe}/^{132}\text{Xe} = 2.1 - 2.5$ と仮定するならば、6-8と推定される。

Curiosityによる現在の火星大気の窒素同位体組成は、地球の $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 比に比べて57%高い($\delta^{15}\text{N} = 572 \pm 82\%$ [20])。一方、EETA79001の衝撃ガラス中に含まれていた窒素同位体比は $\delta^{15}\text{N} = 309 \pm 10\%$ 。(段階加熱法による分析で誤差も考慮し最大値が見られた1180℃での値[29])であった。ALH 84001においても、Miura and Sugiura [30]により $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 比が明らかに高い成分が見つけられているが($\delta^{15}\text{N} = 392.5 \pm 5.8\%$ 、および $134 \pm 49\%$:段階加熱法による分析で最大値が見られた800℃での値、および600℃以上で放出された窒素の合計について宇宙線照射起源成分を補正した後の値)、含有量が少なく捕獲サイトや取り込まれた年代はわかっていない。他の研究グループによっても分析が行われており、地球の窒素同位体比により近い値が報告されている。しかし、各々のグループの結果を比較すると含有窒素量が多いほど同位体比が地球の窒素同位体比に近い。火星大気よりも低い火星隕石中の $\delta^{15}\text{N}$ 値は地球起源窒素の影響を受けている可能性を否定できない。今後の研究により、ALH 84001中に含まれている高い $^{129}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$ 比や $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 比の成分について、捕獲元の値や捕獲した年代が明らかになれば、火星大気進化史への制約が強まり、火星の気候・環境変化の解明にも役立つはずである。鉱物学や年代測定手法と組み合わせた分析試料(鉱物相)の選択や高感度・低ブランク分析装置の開発を進めることが今後の課題とも言える。

5. 生命体の痕跡?

McKayらが1996年にサイエンスに発表した論文



図3: ALH 84001のcarbonate globulesの拡大写真。carbonate globulesの典型的なサイズは100 - 200 μm 。オレンジ色に見えるカルシウムに富む「コア」とそれを囲む「リム」から成る。リムの黒色部分は鉄に富むマグネタイトや硫化鉄を含み、その外側の白色部分は主にCa-Mg炭酸塩である。画像提供NASA/JSC/Stanford University.

[31]は世界中で話題となった。“Search for past life on Mars: Possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH 84001”というタイトルやこの論文に掲載されたバクテリアの微化石様形態が見られる写真を記憶されている方も多いのではなかろうか。ALH 84001の鉱物の割れ目から、有機物の一種であるPAHs (Polycyclic aromatic hydrocarbons, 環状芳香族炭化水素)や炭酸塩鉱物を主成分とするcarbonate globules(100 μm 程度の円盤状の炭酸塩鉱物の集合体: 図3)と呼ばれるものが見つかった。他の南極隕石では同様のPAHsは見られないことなどから、これらは地上での汚染によるものではなく隕石本来のものと考えられる。表面組織や内部構造の高解像度SEM, TEM観察によるとcarbonate globulesは、細粒で二次的なマグネタイトや硫化鉄などを含んでいて、地球のバクテリア起源のものと組織構造やサイズが類似している。[31]では、これら各々は非生物起源でも説明できるが、生物起源と考える方がPAHsも含めて多くの観察結果(存在や組織形態)を矛盾なく説明できると指摘している。生物起源か否かを解明するために、その後多くの研究者により詳細な組織観察や再現実験が行われた。例えば、ALH 84001で観察されるような微細なマグネタイトの形成については、無機的に作る事が可能という報告が多く(例えば、[32])、非生物起源との考えが主流となっている。一方で、炭酸塩の熱水分解ではそのような組織構造は形成されないので

生物起源も含め他の形成プロセスを考えるべきであるといった主張も少数ながら存在する(例えば, [33]).

その後も火星に生命が存在していた証拠を探す研究は, 火星隕石の分析や火星探査機による火星での直接的調査により試みられている. ナクライトやシャーゴットタイトといった火星隕石からも生物起源の可能性が否定できない微細構造が発見されている. また, 衛星画像をもとに火星表層には現在も液体の水が存在する可能性が指摘されていて, 生命が存在する／していた可能性を期待させる状況証拠は増えている. しかしながら存在を確定付ける決定的な証拠は見つかっておらず[34], これまでのところ生命の痕跡を発見するには至っていない.

6. おわりに

隕石の分析からは, 形成環境や年代などを詳細に調べることができる. ALH 84001は45億年前まで遡ることができる貴重な火星試料であり, そこからもたらされる情報は昔の火星に関する直接証拠となる. 近年は火星探査からの情報も増えており, 両者を比較することで新たな知見も生まれる. また, 火星隕石が火星のどこから来たのか, 探査機データと比較して候補地帯を探す研究も行われている. ALH 84001については, 主要鉱物組成や年代が一致する場所として北半球にあるSyrtris Majorの北東側や南半球にあるHellas Basinの北西側が候補として挙げられているが, マイナー鉱物も含めた全岩組成は一致しないなどまだ不確定性もある[35]. 近い将来, 火星隕石の起源場所が同定され, 隕石が存在していた環境をグローバルに知ることができることも期待したい.

謝辞

木村眞博士, 野口高明博士, 岡崎隆司博士からは, 本稿を執筆する機会と原稿への助言・コメントを頂きました. 査読者の三河内岳博士からは, 有益なコメントを頂きました. これらの方々に感謝いたします.

参考文献

[1] Meteoritical Bulletin Database, <http://www.lpi.usra.edu/meteor/>.

- [2] Reid, A. M. and Bunch, T. E., 1975, *Meteoritics* 10, 317.
- [3] Swindle, T. D., 2002, in *Noble Gases in Geochemistry and Cosmochemistry*, *Rev. Mineral. Geochem.*, 171.
- [4] 三河内岳, 2014, *遊星人* 23, 278.
- [5] Lindstrom, M. M. et al., 1994, 25th Lunar Planet. Sci. Conf., 797 (abstr.).
- [6] Tanaka, K. L. et al., 2014, U.S. Geological Survey Scientific Investigations Map 3292, <https://pubs.usgs.gov/sim/3292/>.
- [7] Tanaka, K. L. et al., 1992, in *Mars*, 345.
- [8] Nyquist, L. E. et al., 2016, *Meteorit. Planet. Sci.* 51, 483.
- [9] Mittlefehldt, D. W., 1994, *Meteoritics* 29, 214.
- [10] Clayton, R. N., 1993, in *Antarctic Meteorite Newsletter* 16 (3).
- [11] Dreibus, G., 1994, *Meteoritics* 29, 461 (abstr.).
- [12] Watson, L. L., 1994, *Meteoritics* 29, 547 (abstr.).
- [13] Grady, M. M. et al., 1998, *Meteorit. Planet. Sci.* 33, 795.
- [14] Warren, P. H. and Kallemeyn, G. W., 1996, *Meteorit. Planet. Sci.* 31, 97.
- [15] Kong, P. et al., 1999, *Geochim. Cosmochim. Acta* 63, 1865.
- [16] Nyquist, L. E. and Shih, C-Y., 2013, 44th Lunar Planet. Sci. Conf., #2182 (abstr.).
- [17] Lapen, T. J. et al., 2010, *Science* 328, 347.
- [18] Meyer, C. 2012, *Martian Meteorite Compendium*, <https://curator.jsc.nasa.gov/antmet/mmc/>.
- [19] McKay, G. A. et al., 1997, *Meteorit. Planet. Sci.* 32, A87 (abstr.).
- [20] Mahaffy, P. R. et al., 2015, *Elements* 11, 51.
- [21] Conrad, P. G. et al., 2016, *Earth Planet. Sci. Lett.* 454, 1.
- [22] Miura, Y. N. et al., 1995, *Geochim. Cosmochim. Acta* 59, 2105.
- [23] Swindle, T. D., 1995, *Geochim. Cosmochim. Acta* 59, 793.
- [24] Murty, S. V. S. and Mohapatra, R. K., 1997, *Geochim. Cosmochim. Acta* 61, 5417.
- [25] Bogard, D. D. and Garrison, D. H., 1998, *Geochim.*

- Cosmochim. Acta 62, 1829.
- [26] Wiens, R. C. and Pepin, R. O., 1988, *Geochim. Cosmochim. Acta* 52, 295.
- [27] Mathew, K. J. and Marti, K., 2001, *J. Geophys. Res.* 106, E1, 1401.
- [28] Ozima, M. and Podosek, F. A., 2002, *Noble gas geochemistry* (Cambridge Univ. Press).
- [29] Wiens, R. C. et al., 1986, *Earth Planet. Sci. Lett.* 77, 149.
- [30] Miura, Y. N. and Sugiura, N., 2000, *Geochim. Cosmochim. Acta* 64, 559.
- [31] McKay, D. S. et al., 1996, *Science* 273, 924.
- [32] Golden, D. C. et al., 2004, *American Mineral.* 89, 681.
- [33] Thomas-Keprta, K. L. et al., 2009, *Geochim. Cosmochim. Acta* 73, 6631.
- [34] Gibson, E. K. Jr., 2001, *Precambrian Res.* 106, 15.
- [35] Ody, A. et al., 2015, *Icarus* 258, 366.

一番星へ行こう!

日本の金星探査機の挑戦 その30

~1 μ mカメラで金星昼&夜~

岩上 直幹¹, はしもと じょーじ², 澤井 健太², 坂野井 健³,
高木 聖子⁴, 亀田 真吾⁵

(要旨) あかつき1 mmカメラで昼夜の画像が撮れ始めています。さて、何がみえているのか? ご案内。1 mmカメラは昼夜両方に的があり、昼は0.90 mmで雲による太陽散乱光から雲底高度51 kmの風を狙い、夜は1.01 mm熱放射で活火山探し。さらに0.90-0.97-1.01 mmで水蒸気・表面物性を狙います。

何も模様が見えませんがご心配なく想定内です。

1990年のガリレオ0.9 mm画像でもコントラストは3%のみ。

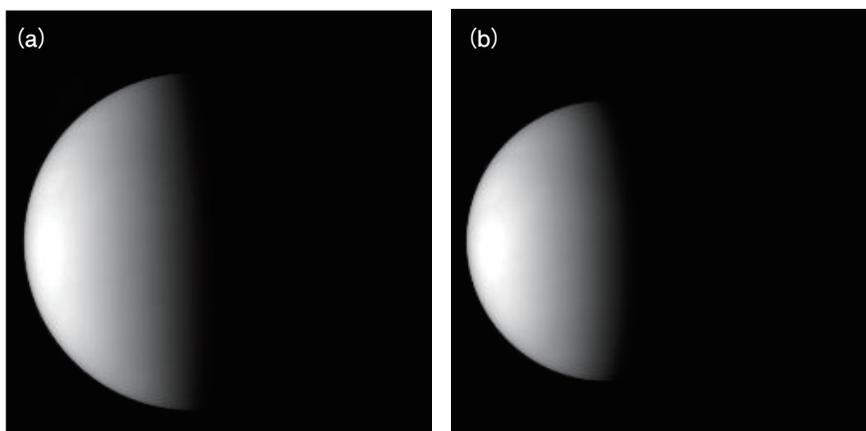


図1: 昼面0.9 mm画像(2016年5月7日6時と8時 金心距離7-9万km)。

ハイパスするとコントラストが見えてきます。2時間離れている割には似すぎてますが、あかつき公転速(9度/2時間)が大気超回転速(7.5度/2時間)に近いため、雲模様がほぼ同位相にみえているのです。0.9 μ m昼面の場合コントラストの源は雲厚ムラつまり下

層雲ムラです。このムラの動きから風を出します。

雲追跡チームに頼んで、図2から風ベクトル図を試作してもらいました。(村上真也さん堀之内武さんほかあかつき雲追跡研究チームのみなさまありがとうございます)風パターンは25年前ガリレオが1 μ mでみたのに似ていて西向き平均風速77 m/sと雲頂のそれよりかなり遅く、南北成分ほとんどなし。

1. アジア宇宙環境研究機構
2. 岡山大学大学院自然科学研究科
3. 東北大学大学院理学系研究科
4. 東海大学情報技術センター
5. 立教大学理学部
iwagamina@hotmail.co.jp

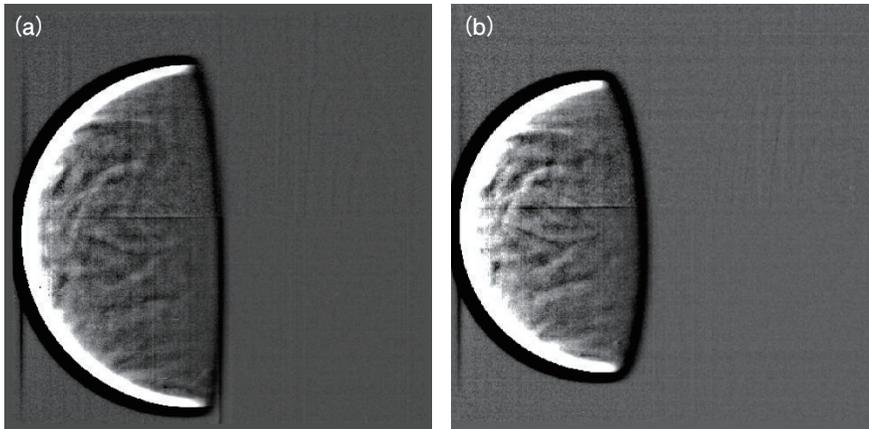


図2：昼面 ハイパス画像.

さて夜面は・・・

図4にアフロディーテ大陸が見えます(左下の暗い部分). 周囲より4 km 高いため30 K 寒く, 熱放射は半分なので暗く見えています.

図5ではマゼラン高度+VIRA 気温が仮定されており, 雲によるボケ効果(径100 km)考慮済みです. モザイク状に見えるのは, マゼラン高度データが緯度経度1度刻みのため.

夜面では地形+下層雲影が見えているはずなのですがなぜか地形ばかりが目立ちます・・・火山探しには好適. プランク関数の短波長側のためと理解しています.

活火山探し請御期待.

今後とも御支援よろしく

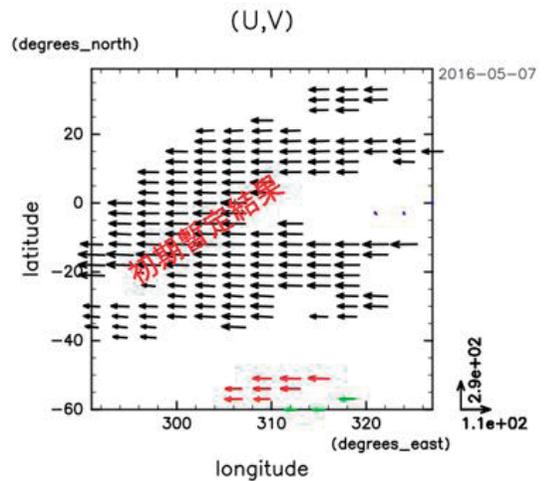


図3：試作風ベクトル.

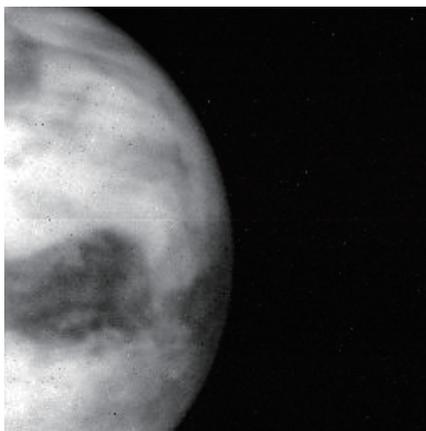


図4：夜面1.01 mm画像.
(2016年1月21日金心距離44,000 km)

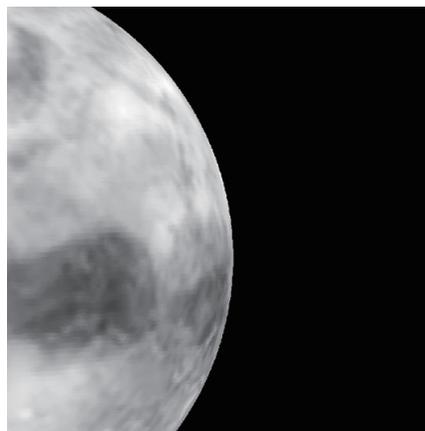


図5：表面熱放射シミュレーション.

遊星百景 その7

～月のクレータ，ジョルダーノ・ブルーノ～

諸田 智克¹

この企画が始まったのを見て、いつか担当が回ってくるのでは、と恐れていましたが、とうとう来ました。今回は私が思い入れのあるクレータの一つを紹介します。月の裏側にあるジョルダーノ・ブルーノ (Giordano Bruno) クレータです。ジョルダーノ・ブルーノクレータは直径約22 km で非常に新鮮な形状を保っているクレータです (図1)。このクレータに思い入れがある理由は、月周回衛星「かぐや」のデータを使って最初に研究し、最初に書いた論文がこのジョルダーノ・ブルーノクレータの形成年代に関してだったからです [1]。

イギリス、カンタベリーのガーベスが記した年代記において、西暦1178年に月で突如として明るい巨大な発光が起こった、という記録が残されています。それから約800年の時が流れて、Hartung [2] はこの記録を月面におけるクレータ形成の目撃証言と考え、アポロヤルナで得られた画像データをもとに、そのイベントで形成されたクレータを探索しました。その結果、ジョルダーノ・ブルーノクレータが年代記にある目撃証言の位置と一致することから、ジョルダーノ・ブルーノクレータは約800年前に形成されたと結論づけました。この仮説は月の秤動が大きいことなどからも支持されました [3]。

もしHartungの仮説が正しければ、800年前に地球のすぐ脇の月において一つの都市を破壊する程の天文学的現象が起こっていたことを意味しています。直径20 kmスケールのクレータは月において約3000万年に一度の頻度で形成されると考えられているおり、もし中世にこのようなことが起こったとすると、それは

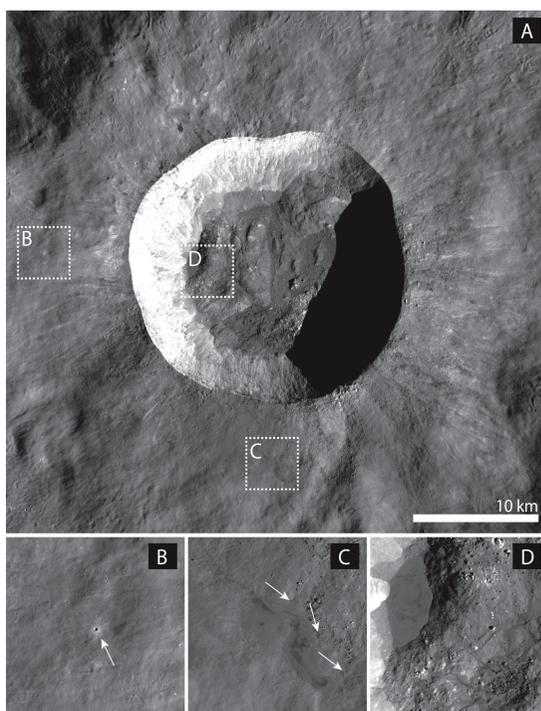


図1：ジョルダーノ・ブルーノクレータ。「かぐや」地形カメラデータ (<http://l2db.selene.darts.isas.jaxa.jp/index.html.ja>)。 (A) ジョルダーノ・ブルーノクレータの全体像。 (B) 放出物上にある新鮮な小クレータ。 (C) 放出物上にあるインパクトメルト。 (D) クレータ内部のメルトポンド。

非常に稀な現象といえます。本当に800年前にこんなことが起こったのでしょうか？

このクレータの形成年代を知ることは、Hartungの仮説が正しいか否かの問題だけでなく、惑星地質学の観点からも重要な意味を持っています。クレータは形成から時間が経つにつれ、地形が崩壊し、光条も宇宙風化作用によって消失します。ジョルダーノ・ブルー

1. 名古屋大学環境学研究所
morota@eps.nagoya-u.ac.jp

ノの形状や放出物は月面で最も新鮮であり [例えば, 4], その形成年代の理解は, 地形崩壊や宇宙風化のタイムスケールを決定する上で重要な校正データとなります。

もしジョルダーノ・ブルーノクレータの年代が800年なのであれば, その放出物やクレータ内部には, 10 mサイズのクレータはほとんど存在していないはずです。2008年2月に「かぐや」地形カメラデータは初めてジョルダーノ・ブルーノの高解像度(10 m/pixel)画像を取得しました。我々はその画像からジョルダーノ・ブルーノ放出物の上に, 多数の数10 mサイズの小クレータが存在していることを発見したのです。その小クレータの数密度から, ジョルダーノ・ブルーノの年代を100~1000万年と見積もりました。我々はこの結果から, ジョルダーノ・ブルーノは中世にできたクレータではない, と結論づけたのです。

その後, 米国の月探査機ルナ・リコネサンス・オービタ(Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO)が更に高解像度の画像データを取得しました。LRO画像データを用いた詳細観測によると, ジョルダーノ・ブルーノ放出物上のいくつかの小クレータはジョルダーノ・ブルーノ形成時に自身の放出物によってつくられた, “self-secondary crater”である可能性が指摘されており, 我々が見積もった年代は過大評価であった可能性がでてきました [5, 6]。一方で, ジョルダーノ・ブルーノとその二次クレータの形状の崩壊具合からは, 極度に若い年代を持つことは否定されており, 我々の見積もった年代とおおよそ整合的という結果もでてきます [7, 8]。

謝 辞

本原稿の執筆機会を与えてくださった本田親寿氏に感謝致します。

参考文献

- [1] Morota, T. et al., 2009, *Meteorit. Planet. Sci.* 44, 1115.
- [2] Hartung, J. B., 1976, *Meteoritics* 11, 187.
- [3] Calame, O. and Mulholland, J. D., 1978, *Science* 199, 875.
- [4] Grier J. A. et al., 2001, *J. Geophys. Res.* 106, 32847.
- [5] Plescia, J. B. et al., 2010, 41st Lunar Planet. Sci. Conf., 2038.
- [6] Xiao, Z. and Strom, R. G., 2012, *Icasus* 220, 254.
- [7] Basilevsky, A. T. and Head, J. W., 2012, *Planet. Space Sci.* 73, 302.
- [8] Shkuratov, Y. et al., 2012, *Icarus* 218, 525.

「天体の衝突物理の解明(XII)～水質変成から探る太陽系物質進化～」参加報告

杉浦 圭祐¹

1. はじめに

2016年11月10日から12日の3日間、六甲山の麓にある神戸大学六甲台キャンパスにて、研究会「天体の衝突物理の解明」が開催された(図1)。同研究会は通称「衝突研究会」の名で呼ばれ、理論や実験など幅広い手法を用いて天体衝突の物理を研究している者の発表、交流の場となっている。特に筆者のように惑星形成を理論の面から研究している者にとっては、室内衝突実験を行っている方々の研究成果を集中的に聞くことのできる貴重な機会である。今年で12回目を数えるこの研究会は、北海道大学の低温科学研究所での開催が通例であったが、去年まで会場を手配していただいていた方の異動の都合で今年は神戸大学での開催であった。毎年衝突物理に関連するテーマを掲げ、招待講師の方々にテーマに沿った招待講演をしていただくのがこの研究会の特徴であるが、今年は「水質変成から探る太陽系物質進化」というテーマが掲げられた。このテーマの下、招待講師の方々には隕石に含まれる水質変成を受けた成分を手がかりにして、過去の太陽系で何が起きたかを解明する研究について講演をしていただいた。このテーマに限らず幅広い分野の研究に関する一般講演も同様に行われ、21件の口頭講演と10件のポスター講演が行われた。また、実際に室内衝突実験を行っている研究室がある神戸大学での開催という利点を活かし、最終日の研究会終了後に神戸大学ラボツアーが行われ、2段式軽ガス銃などの実験設備を見学できるという貴重な機会も設けられた。



図1：研究会の集合写真。

本稿では衝突研究会の参加報告という形で、講演の概要と研究会の様子をごく簡単に紹介させて頂く。研究会の雰囲気を多少なりともお伝えし、研究会に興味をいただければ幸いです。ページ数の都合上、個々の講演の詳細についてお伝えすることはできないが、筆者の理解の範囲内で講演内容についてまとめ、お伝えしようと思う。各講演の要旨に関しては研究会のHP (<http://www.impact-res.org/impact16/>)にて公開されているので、より詳しく講演内容を知りたいという方はぜひそちらを参照していただきたい。

2. 講演概要

以下に研究会のプログラムを示す。

■11月10日(木)

中村昭子(神戸大)

「隕石母天体上の強度支配域のクレーターサイズ」
鈴木絢子(ISAS/JAXA)

1. 名古屋大学理学研究科
sugiura.keisuke@a.mbox.nagoya-u.ac.jp

「強度支配域の室内実験衝突クレーターに見られる形状効果」

荒川政彦(神戸大)

「凍結砂を用いた強度支配域の衝突クレーター形成過程に関する実験的研究」

田中秀和(東北大)

「ダストアグリゲイトのクレーター衝突破壊」

脇田 茂(天文台)

「iSALEを用いた微惑星衝突計算」

末次 竜(産業医大)

「iSALEを用いた重力支配域での衝突計算」

小川 諒(神戸大)

「鉄合金への衝突実験：鉄質天体のクレーター形状による軌道進化制約の可能性」

向井敏司(神戸大)

「超高速衝突試験によるマグネシウムの衝撃変形応答解析」

黒澤耕介(千葉工大)

「Spallationによる火星隕石放出過程の再評価」

岡本尚也(千葉工大)

「室内衝突実験と数値衝突実験による高速放出物の挙動」

■11月11日(金)

道上達広(近畿大)

「モルタル標的に対する斜め衝突実験～月の楕円クレーターと縦穴への応用」

金城秀征(東京大)

「層構造氷物質への斜め衝突実験 - エンセラダス・プリューム噴出維持機構への応用」

杉浦圭祐(名古屋大)

「微惑星の形状進化:弾性体SPH法を用いた微惑星の衝突破壊・重力再集積の数値計算」

中条俊大(東京大)

「DEMに基づいたラブルパイル小惑星の振動モード解析と衝突破壊への応用」

留岡和重(神戸大)

「始原天体の中で何が起こったか:水質変成を手がかりにして」【招待講演】

藤谷 渉(茨城大)

「水質変成の年代学と物質進化」【招待講演】

古川善博(東北大)

「衝突による水質変成と有機物」【招待講演】

松榮一真(神戸大)

「含水砂標的へのクレーター形成実験:SCI実験解析に向けて」

平田 成(会津大)

「形状・自転・衝突履歴から考える小惑星Ryuguの表面地質」

大村知美(神戸大)

「振動によるレゴリス層の密度進化に関する実験的研究」

■11月12日(土)

長谷川 直(ISAS/JAXA)

「あかり3ミクロン分光観測小惑星の近赤外YJHK分光観測」

石黒正晃(ソウル大)

「衝突現象の観測について」

小林 浩(名古屋大)

「衝突進化と惑星形成」

門野敏彦(産業医大)

「固体が破壊されるときに発生するX線の計測」

■ポスター講演

平田直之(神戸大)

「ディオオーネの構造地形の年代決定」

横山康喜(神戸大)

「重複クレーター形状の実験的研究」

鈴木絢子(ISAS/JAXA)

「小型ガス銃開発の現状報告」

木下敏輝(神戸大)

「月画像解析によるクレーター光条線長さの計測:Zモデルとの比較」

岡本千里(神戸大)

「水分化天体の衝突破壊実験」

黒澤耕介(千葉工大)

「衝突破碎岩石の内部摩擦による粘性加熱:衝撃熔融条件の再評価」

石橋 高(千葉工大)

「[低速]高速度衝突による炭素化合物の生成」

多田賢 弘(東京大)

「タイ東北部における0.79Ma衝突事変(オーストラリア・アジアテクトタイトの起源)のイジェクタ層の

探索」

金丸仁明(大阪大)

「小惑星イトカワにおける表面重力場への自転周期と内部密度分布の影響」

白井直樹(首都大)

「オーストラリアンテクトイト中での隕石成分の探索」

2.1 招待講演

研究会の2日目には、研究会のテーマである「水質変成から探る太陽系物質進化」に関連し、3件の招待講演が行われた。

1件目の招待講演である留岡和重氏の講演では、隕石に見られる水質変成の起源の研究とその理解について、歴史的な経緯を時系列に沿って紹介していただいた。講演では隕石の顕微鏡写真が多数紹介され、その観察から推察される過去に隕石が経験したと考えられる環境について分かりやすく解説していただいた。特に、1980年代には隕石中の含水鉱物の変成で作られたかどうかはわかっておらず、その後層状珪酸塩の脈の発見から母天体での水質変成でできたことと理解された、という話を聞き、太陽系の歴史への理解が時間とともにいかに深まっていったかが実感できた。

2件目の藤谷渉氏の講演では、短寿命放射性核種による年代測定を用いて測定される、隕石やそれに含まれる鉱物の形成年代について、具体的に紹介していただいた。特に親石性のハフニウムから親鉄製のタングステンへの放射壊変を用いることで、コア分化の時期を推定できるという話は印象的であった。また年代測定的手法だけでなく、水質変成の度を調べる方法とその指標(Rubin scale, Alexander scale, Howard scale)についても紹介していただき、大変勉強になった。

最後の招待講演は古川善博氏による講演で、天体衝突と水質変成の関連性に主軸を置いた講演をしていただいた。隕石にはコンドリュールと呼ばれる粒状の構成物が存在するが、コンドリュールの中にはリムと呼ばれる構造をその縁に持つものがある。このリムの形成起源の仮説の一つに、衝突加熱で蒸発した水による水質変成で作られたとするものがあると紹介されたが、大変興味深かった。講演によると、短寿命核種による加熱が期待できない時代や場所では、衝撃波によ

る水質変成が重要になる可能性があるとのことだったので、衝突物理の解明が岩石組成の理解にも影響を及ぼすと改めて実感できた。

2.2 一般口頭講演

今年も研究会のテーマである「水質変成から探る太陽系物質進化」に限らず、幅広い分野の一般口頭講演がなされた。以下では室内衝突実験やその他の室内実験に関するもの、数値シミュレーションや理論的手法を用いた研究に関するもの、小惑星とその観測に関するもの、の3つに分類し、特に面白いと感じた講演を中心に筆者の理解した範囲内で内容を紹介していく。

(1) 衝突実験、室内実験

衝突研究会と呼ばれる研究会だけあって、非常に多岐に渡る衝突実験に関する研究が紹介された。そのどれもが独創的であり、衝突実験の多様性やユニークさを楽しませていただいた。

鈴木氏の講演では、曲率のある面への衝突実験の結果が紹介された。平らな面への衝突実験が一般的であるが、一方で直径1 km以下の小さい天体上のクレーター形成には曲率の効果が重要となってくる。実験の結果、曲率が大きくなるとクレーター体積も増加することが分かった。iSALEと呼ばれる衝撃波物理を記述できる衝突計算コードを用いた数値計算とも比較を行い、クレーター体積の増加は曲率により衝突点から遠くでも衝撃圧が高くなるためであることが推定された。

荒川氏の講演では、強度支配域のクレーター形成過程を詳しく調べるため、凍結砂を用いた衝突実験の結果が紹介された。凍結砂の水分量を変えることにより、物質強度を系統的に変えることが可能であり、強度支配域での衝突現象をより詳しく調べることができる。実験結果を用いて、強度支配域における音速の依存性も含んだカップリングパラメータの導出と、放出物の軌道を表現できるモデルの構築を行い、その結果が紹介された。

向井氏の講演は天体の衝突現象という観点から少し離れ、工学的に強いマグネシウム合金を作るために衝突実験を利用する、というユニークなものであった。軽くて強い金属は工学的に有用である。マグネシウムは密度が小さく扱いやすいが、反面引張強度が小さく脆いという欠点もある。そこで他の金属元素を少量添

加することで強度を増やすということが行われており、向井氏は金属を添加したマグネシウムの強度の評価に衝突実験を用いていた。その結果、少量のイットリウムの添加により脆性的な破壊を抑えられることが示された。

金城氏の講演では、土星の衛星であるエンセラダスからの水の噴出を維持する機構を明らかにするための衝突実験の結果が紹介された。水の噴出を維持するためには、噴出口の壁面へ氷が凝結する機構よりも、氷ダストが壁面に凝結した氷を破壊する機構の方が卓越する必要がある。金城氏は破壊の機構の効率を調べるため、霜をまとった氷への衝突実験という非常に独創的な実験を行った。講演では破壊効率の速度依存性が紹介された。

大村氏からは衝突実験ではなく、砂の充填率の変化を調べた室内実験の結果が紹介された。天体表面のレゴリス層を構成する岩石粒子の充填率が振動によりどのように変化するか調べるため、砂の充填率が振動、及びタッピングでどのように変化するか調べた。その結果、重力と振動による加速度が同程度の時に最も充填率が増加しやすいことが示された。

門野氏からは、衝突破壊によって発生するX線を実験的に測定するという、一風変わった実験の結果が紹介された。破壊時の歪みにより電荷の偏りが生じ、破壊後にそれがもとに戻ることで電磁波を発生し、発光現象が起こる。実は破壊に伴う発光現象は一般的であり、氷砂糖の破壊でも可視光を観測することができるのである。講演では様々な物質を衝突破壊した際のスペクトルが紹介され、物質ごとの特性X線を検出可能であることが示された。

(2) 数値計算, 理論研究

衝突現象を理解するためには室内実験だけではなく、実験室スケールから天体スケールまで幅広い衝突現象を扱うことができ、詳細な解析が可能な数値計算の使用が極めて重要である。衝突研究会でもiSALE (impact Simplified Arbitrary Lagrangian Eulerian) コード、SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法、DEM (Discrete Element Method) といった手法を用いて衝突現象などを再現した研究が多数紹介された。

脇田氏の講演では、iSALEを用いて微惑星の衝突を再現し、微惑星の衝突でコンドリュールを作る溶融液滴が形成可能かどうか調べた結果が紹介された。半

径10 km程度の微惑星同士、衝突速度1 km/s程度の衝突計算を行った結果、表面付近から放出される物質は溶融しており、コンドリュールが形成可能であることが示された。

末次氏からは同じくiSALEを用いて、大規模破壊になるために必要な衝突エネルギーの閾値が、数値計算の解像度によってどのように変化するか調べた結果が紹介された。先行研究によりSPH法を用いた場合には解像度を増やすと閾値のエネルギーが減ることが示されていたが、他の手法でも同様の依存性があるか調べた形になる。その結果、iSALEを用いた場合にもSPH法と同様の傾向が見られることが示された。

黒澤氏からは、火星起源の隕石を火星から放出するための機構を、同じくiSALEを用いて調べた結果が報告された。火星はある程度大きくその脱出速度も5 km/sと高速であるので、火星隕石を説明するためには物質を高速で放出する機構が必要である。計算の結果、自由表面を超えた後に起きる後期加速によって高速な放出物を作ることが可能であることが示された。

岡本氏の講演では、衝突実験によって観測される放出物の挙動をSPH法で再現するために必要な数値計算解像度を調べた結果が報告された。解像度を様々に変えて、実験で観測された放出物の形状と比較することで、実験を再現するためには弾丸に 10^6 ものSPH粒子数が必要となることが分かった。

中条氏からは、ラブルパイル天体の振動モードを解析的に調べ、さらにDEMによる数値計算と比較した結果が紹介された。ラブルパイル天体の振動特性を調べることは、将来的な探査ミッションで天体の内部構造を調べる際に重要となる。このような解析的な議論は数値計算とは異なり包括的な理解が可能であるので、極めて有用であると感じた。

小林氏からは、多数の微惑星を統計的に扱うことで惑星と多数の微惑星の軌道計算を行い、惑星の離心率を下げる機構について調べた結果が紹介された。惑星は巨大衝突を経て形成されたと考えられており、巨大衝突は惑星の離心率を上げてしまうが、そのままだと現在の太陽系の小さい離心率を説明することができない。そのため、微惑星による力学的摩擦で離心率を下げる機構が提案されている。小林氏の講演では、惑星の離心率を下げるために必要な微惑星のサイズと量についての定量的な議論が紹介された。

(3)小惑星、観測

衝突研究会では実験、数値計算以外に、観測的な手法で小惑星の性質を調べた研究に関する講演も行われた。以下ではそのような観測に関連する3講演について紹介していく。

平田氏の講演では、はやぶさ2ミッションのターゲットである小惑星リュウグウの表面地質を、形状モデルの観点から調べた結果が紹介された。小惑星イトカワの観測から、表面に傾斜が適度に存在し細粒な物質が存在する場合、重力と遠心力ポテンシャルの和が小さい低地に細粒な物質が集まることが予想される。リュウグウの場合にもそのような場所があるか形状モデルを用いて議論した結果、あまりなさそうであるということが示された。

長谷川氏からは、あかり衛星の赤外分光観測のデータと追観測したデータを用いて、小惑星をスペクトルの特徴ごとに分類分けを行った結果が紹介された。含水鉱物は3ミクロン付近に強い吸収線を作るため、この波長域の分光観測から含水鉱物の有無を調べることができると考えられている。長谷川氏の講演では小惑星をBus-DeMeoの分類法を用いて分類した結果が紹介された。

石黒氏の講演では、P/2010 A2という小惑星からのダスト放出の起源についての議論がなされた。ダスト雲の形状を再現するためのモデル計算の結果が紹介され、このダスト雲の起源は破壊の衝突である可能性が高いとの結論が出された。

2.3 ポスター講演

研究会の2日目の夕方には、懇親会を兼ねたポスターセッションの機会が設けられた。お酒の力もあってか、終始和やかな雰囲気での議論ができたように思う。また、世話人の方々と神戸大学の学生の方々の尽力により、快適に議論ができた。筆者も木下氏とポスターセッションの時間に議論を行い、月表面の画像解析を行いクレーター光条線の長さを定量的に評価した研究について聞かせていただいたが、普段聞けないような話を掘り下げて聞く事のできる貴重な機会であったと感じた。

3. おわりに

今回の衝突研究会のテーマが「水質変成から探る太陽系物質進化」であったこともあり、筆者にはあまり馴染みのない隕石の組成、変成やそこから分かる太陽系の歴史について聞くことができ、非常に有用な研究会であったと感じた。また、このような隕石の詳細な観察や解析から太陽系の過去の詳細な姿が次々に明らかとなっている、ということが実感できた。一方でそのような過去の姿を説明できるような惑星形成のモデルの構築もこれから必要であり、より一層、観測、実験、理論の専門家が協力して研究を行うことの重要性も感じられた。

研究会の雰囲気としては終始和やかであり、活発かつオープンな議論がなされていた。改めて、衝突研究会が異なる分野で研究を行う研究者同士の重要な交流の場であることを実感した。この参加報告記事を読んでこの研究会に興味を抱いた方は、ぜひ次の機会に参加してみたいと思う。

謝辞

この研究会の開催にあたり尽力いただいた世話人の方々、及び神戸大学の方々には会場の準備や整備などを通して大変お世話になりました。この場をお借りして感謝申し上げます。

第9回月惑星探査データ解析実習会を終えて

本田 親寿¹, 松岡 萌², 小野寺 圭祐³, 大竹 真紀子⁴,
石原 吉明⁴, 晴山 慎⁵, 平田 成¹, 出村 裕英¹

2009年に始まった月惑星探査データ解析実習会は2016年9月に9回目が開催されました。本実習会は普段惑星探査データと自分の研究の間に少し距離がある方を対象にして、短期集中実習を通して距離を詰めていただくための一助となることを期待しています。

9回目を迎えた今回の実習内容は、7回目に実施した月面連続スペクトルデータ(SPデータ)と双対をなす月面スペクトルデータである月面多バンド撮像画像を用いた月面地質分類を目標設定しました。今回実習で紹介した地質分類手順は月地質図作成の研究グループで議論を続けてきた解析手法をスピニアウトしたものであり、その研究グループを代表してJAXAの大竹真紀子さん、石原吉明さん、聖マリアンナ医科大学の晴山慎さん、会津大学の平田成さんに講師をお願いしました。実習会には月惑星探査データ解析の初心者である学部生から小天体探査データに詳しいポスドクまでさまざまな技術・知識を持った10名(学部生3名、大学院生6名、PD1名)が参加し、最終的には月探査機かぐやの取得したマルチバンドイメージャデータ(MIデータ)を解析し、参加者それぞれが興味ある月面領域を地質分類した結果を実習会の中で成果報告しました。

実習会の詳細な内容は実習会Webページを見ていただくことにして、大まかに大竹さんによる「地質図」の持つ意味と鉱物スペクトル解析の初歩についての座学、石原さんによるKADIAS(Kaguya Data Integ-

rated Analysis System)の利用方法と米国月探査機LROのNACデータオルソ化(正射投影)ツールの紹介と実習、晴山さんによるMIデータを用いた地質分類の紹介と実習を行いました。特に今回の実習の目玉は月面多バンド撮像画像データを用いた地質分類であり、その解析環境には惑星探査画像データを扱っている人ならばよく耳にするENVI(Environmental for Visualizing Images)を利用しました。この解析ソフトウェアはGUIベースの高機能解析・可視化ツールで、IDL言語を利用して機能拡張も可能なりモートセンシング用統合処理パッケージです。逆に捉えると、高機能が故に初学者には敷居が高いのが難です(本田個人の意見です)。今回の実習はその最初の垣根を3日(実質2日)で乗り越えられる良い機会だったのではないかと思います。

今回の実習会ではMIデータを出発点として解析領域分のモザイク作業、反射率への変換、検出器切替波長(1 μm)でのギャップ補正などのデータ解析するにあたって必要な事前作業を学び、その上で解析手法として、主成分分析、独立成分分析、教師付き分類の例(SAM)、教師無し分類の例(K-means, ISODATA)、異常値マスクデータの作成を実習しました。これらの手法を組み合わせて参加者が思い思いの場所を解析し、最終日の成果報告会に臨みました。本田は世話人でありつつ実習生として参加していたのですが、参加者の皆さんは本田以上にさまざまな着目点をもった解析を行い、成果発表の資料まで作成にこぎ着けていたのには感心しました。一方で、探査データさえあればすぐに何か新しい科学的成果を得られるものでもなく、探査データの性質と解析アルゴリズムの理解、解析のトライエアンドエラーを繰り返しながら新たな科学的成

1. 会津大学先端情報科学研究センター宇宙情報科学クラス

2. 東北大学大学院理学研究科地学専攻

3. 東京学芸大学教育学部

4. 宇宙航空研究開発機構

5. 聖マリアンナ医科大学

chonda@u-aizu.ac.jp



図1：実習会の様子。

果を見出す目の重要性を実感できたのではないのでしょうか。今回の実習をきっかけとしてより多くの月惑星探査データを利用して頂き、皆さんの研究活動(解析アルゴリズムは探査データ以外にも適用できます)に活かされることを期待しております。

最後に、本実習会を資金面にてご支援いただいた日本惑星科学会、惑星科学研究センター(CPS)、フル機能試用版のENVIライセンスを提供いただいたHARRIS社に厚くお礼申し上げます。

開催日程：2016年9月28日13：00～9月30日17：00

開催場所：オフィスゴコマチ大会議室(京都)

主催：月惑星探査育英会 実行委員会

後援：日本惑星科学会、惑星科学研究センター(CPS)

実習会の詳細および資料：https://www.cps-jp.org/~tansaku/wiki/top/?school_mission-9

講師：大竹真紀子、石原吉明(宇宙航空研究開発機構)、晴山慎(聖マリアンナ医科大学)

世話人：平田成、出村裕英、本田親寿(会津大学)

参加者：10名(学部生3名、大学院生6名、PD1名)

参加者の声：

松岡 萌

(東北大学大学院理学研究科地学専攻博士課程2年)

今回の実習では、ENVIを用いた月表層物質の反射スペクトルデータ解析手法を非常にわかりやすく教えて頂きました。リアルタイムの解説と演習は、参考書

を見ながら自力で進めるよりも圧倒的に分かりやすく、この3日間でずいぶんENVIの扱いに慣れることができました。加えて、MGMや主成分分析の紹介等も大変勉強になりました。

ENVIは例えば複数地点の複数チャンネルにおける反射率のような大量の情報を、視覚的にわかりやすく図示するために非常に有効であることを今回の実習を通じて実感しました。今回の対象天体は月でしたが、将来的には他の天体においても実習で扱われた解析手法を用いて表層物質データの解析を行いたいと思います。基本的な扱いに習熟するよう今後もENVIの操作に親しんでいきたいと感じました。今後の研究にもぜひ活用しようと思います。

ENVIを用いるデータ解析は今まで未経験だったため、私のような初心者にはややハードではないだろうかと思われまして。しかし実際に実習に参加して質問のし易いアットホームな雰囲気になり、先生方や学生の皆さんに都度アドバイスを頂きながら無事に全日程を終えることができました。初日は大変な雷雨でしたが、ENVIスキルの習熟度に連動していたかのような最終日の晴天が印象的でした。世話人・講師の先生方、参加された学生の皆さん、どうもありがとうございました。

小野寺圭祐(東京学芸大学教育学部4年)

本実習会には今年で二回目の参加であった。今回は、かぐやのマルチバンド画像(MI)データの解析がテーマということで、月の研究をしている私としては心躍

る内容であった。普段は Apollo の月震データの解析を行っているため、画像解析をする機会はほとんど無い。しかし、この実習会では他分野からの参加も奨励されており、一から丁寧に教えてくれるため、私も気軽に参加することができた。

1日目、2日目は画像解析ソフト ENVI の使い方や地質図の基礎など解析に必要な知識や技術を実際の作業を通して学んだ。そして、3日目に解析実習を行い、最後に成果の発表を行った。解析実習では、モスクワの海とその周辺の自動分類を試みた。その結果、解析領域が 12 class に分類された。実習の時間が限られていたため、分類結果に対する十分な考察を行えなかったが、元の画像からは読み取れないことも画像解析をすることで様々な情報を得ることができた。

私は実習会を通して、画像解析の面白さや奥深さといったものを感じ、より興味を持つようになった。また、普段関わることのない他分野の学生とも交流することができ、非常に良い経験となった。来年以降の開催も期待したい。今回、このような機会を与えてくださった世話人をはじめ、講師や TA の方々には心から感謝申し上げたい。

ときの計算結果は実験とかなり整合的であることなどをお話されていました。適切な計算条件を選ぶため、自分の目的に合った先行研究を調べておくことも大切であるとのことでした。さらに、最新版であるiSALE-Dellenの特徴についても説明していただきました。新しく実装されたツールや導入されたモデルに加え、最新のマニュアルは100ページ超の丁寧なものになっていることも特徴であるそうです。

続けて2つ目の講義ではiSALEの入力ファイルの読み方について学びました。iSALEで計算を行う際に必要な、弾丸、標的の大きさや計算条件についての情報、また弾丸、標的物質についての情報は2つの入力ファイルにまとめられています。このファイルの中身を書き換えることで計算条件や書き出し物理量を変えること、またある地点にあった物質の温度や圧力の情報を時間ごとの位置と共に記録する、トレーサ粒子の設定ができます。講義中の実習では計算領域、衝突体サイズの変更やトレーサ粒子の挿入などを行いました。

3つ目の講義では、脇田氏からpySALEplotについての解説を受けました。まずはpySALEplotに用いられている言語である、Pythonについて学びました。Pythonは可読性、メンテナンス製に優れ、数値計算や描画のためのモジュールも豊富な言語であるそうです。次にpySALEplotについての簡単な説明を受け、続く実習では実際にpySALEplotでのグラフの作成も行いました。時間ごとの温度、ダメージの分布の図や圧力プロファイルなどを作成しました。初心者でもきれいな図を作成することができました。

4つ目の講義では、末次氏からiSALEのソースコードの改良についての講義を受けました。iSALEは基本的にソースコードを見なくても計算を行うことができますが、ソースコードを書き換えることで本来は固定されているデータの出力頻度の変更なども行えます。講義中の実習では実際にデータの出力頻度の変更を行いました。ソースコードの書き換えというと難しい印象があったのですが、どこに何が書かれているかを理解してソースコードを変更できるようになると、研究においてできることの幅が大きく広がりそうでした。

今回半日という短い時間ではありましたが、iSALEがどんなものであるかを知れたと共に、勉強会前のインストールサポートもあったおかげで、ほぼすべての参加者が実際にiSALEを操作することができました。



図2：勉強会の様子。

少人数ということもあって講義中にも質問が飛び交い、困ったときにはすぐに質問できる環境でした(図2)。実際の操作を行えたことで、iSALEを普段利用しない参加者もiSALEを身近に感じられるようになったと思います。私個人としては、iSALEは非常に手軽であり、また工夫次第でいろいろなことができる便利なツールであると感じました。普段シミュレーションを研究手法に用いない研究者も、iSALEならば気軽に取り入れることができそうだと思います。

最後になりましたが、勉強会を企画してくださった、またインストールのサポートをしてくださった世話人の方々に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 常昱, 2014, 遊星人 23, 156.
- [2] 末次竜, 2015, 遊星人 24, 63.
- [3] 岡本尚也, 2016, 遊星人 25, 121.
- [4] 脇田茂, 2015, 遊星人 24, 346.
- [5] 黒澤耕介ほか, 2014, 遊星人 23, 156.

系外惑星の事典

井田茂，田村元秀，生駒大洋，関根康人[編]

朝倉書店

2016年9月 総351頁 ISBN978-4-254-15021-6 C3544

倉本 圭¹



系外惑星の同定数は、いまや数千に達し、第二の地球と呼べるような生命に適した表層環境を持つ惑星の確証も、そう遠くない将来に実現するものと思われる。惑星科学には、宇宙における地球、そして生命の普遍性の理解を目指すという問題意識が核心にある。この核心を照らす方法はさまざまだが、観測天文学の進歩からもたらされた、もっとも新らしいかがり火が系外惑星といえるかもしれない。系外惑星には、その軌道配置、サイズ、密度、大気構造などに想像を超えた多様性が見いだされ、惑星形成や生命居住可能惑星の理解に根本的な再考を促してきたことは、遊星人においてもしばしば紹介されてきた通りである。

今回紹介する「系外惑星の事典」は、こうした目覚ましい進展を遂げつつある系外惑星の学問について、基礎的事項から最先端の知見に至るまで網羅的にまとめた書である。本書では、160あまりに分類された小項目につき、それぞれ基本的に2ページないし4ページの解説が読み切り形式で記述されている。また各小項目は5つの章に大きくくりされ、項目間の関連性を意識した配列がなされている。通読というよりは、「事典」として調べたい項目を拾い読む形での利用が中心になると思うが、周辺の関連項目に手軽に触れることができ、これは視点を広げるのに役立つであろう。観測的知見だけでなく、観測の技法や、生命居住可能性や惑星形成論といった、系外惑星を理解するための理論的枠組みとその最新像について、それぞれ章を割り当てて厚みのある解説がなされていることも、本書の大きな特色と言える。これらの章はバラバラと項目を眺め

るだけでも、この分野の研究が今何に注目しているのか把握することができる。また、この分野で活躍している研究者陣が執筆していることから、随所に次の展開に向けた問題意識を垣間見ることができ、これも刺激になる。

系外惑星の研究は急速な進展を見せているが、最初の系外惑星発見の報告から20年以上の月日が経過したのも事実であり、これまでに積み重ねられてきた知見はいまや相当のボリュームである。本書は、一層関心が高まりつつあるこの分野に新たにアクセスしようとする若手や隣接分野の研究者にとって、その全貌にアクセスできるタイムリーかつ便利なガイドブックとなっている。ポケットマネーからためらいなく購入できる価格設定ではないが、気になったらすぐに手に取ることができるよう、身近に置きたい一冊である。

1. 北海道大学大学院 理学研究院
keikei@ep.sci.hokudai.ac.jp

訂正：

一番星へ行こう! 日本の金星探査機の挑戦 その26 ～金星到着～

中村 正人¹, 山崎 敦¹, 田口 真², 岩上 直幹³, 佐藤 毅彦¹,
高橋 幸弘⁴, 今村 剛¹

日本惑星科学会誌『遊・星・人』2016年第巻25第1号に掲載された記事『一番星へ行こう! 日本の金星探査機の挑戦 その26 ～金星到着～』[1]に於きまして、ミスが1ヶ所ありました。以下の通り、お詫びして訂正致します。

6ページ左段下から5行目

(誤) 2016年12月10に探査機Y軸(概ね南北方向)の・・・

↓

(正) 2015年12月10に探査機Y軸(概ね南北方向)の・・・

参考文献

[1] 中村正人ほか, 2016, 遊星人 25, 4.

1. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
2. 立教大学理学部
3. 東京大学大学院理学系研究科
4. 北海道大学大学院理学院
t_imamura@edu.k.u-tokyo.ac.jp

JSPS Information

- ◇日本惑星科学会第117回運営委員会議事録
- ◇日本惑星科学会第118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117回運営委員会議事録

期 間：2016年12月15日(木)～12月21日(水)

議 題：第14期役員等の選出

運営委員会委員：

出席者 21名

荒川 政彦,

中村 昭子, 渡邊 誠一郎, 倉本 圭, 千秋 博紀, 和田 浩二, 田近 英一, 中本 泰史, 生駒 大洋,
諸田 智克, 林 祥介, 平田 成, はしもと じょーじ, 竹広 真一, 中島 健介, 田中 智, 寺田 直樹,
佐伯 和人, 中村 智樹, 上野 宗孝, 藪田 ひかる

欠席者 なし

オブザーバー：小久保 英一郎

(議題1が認められると運営委員会委員)

橘 省吾

(議題1が認められると運営委員会委員)

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

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 608

投票総数 147[有効票147]

投票率 24.2%

得票数 氏名

141 荒川 政彦

6 散票

以上により、第14期会長として 荒川 政彦 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	608
投票総数	1188(投票者数99×12名連記) [有効票 1035, 白票 153]
投票率	16.3%

順位	得票数	氏名
1	49	中村 昭子
2	48	渡邊 誠一郎
3	41	倉本 圭
4	39	千秋 博紀
5	34	和田 浩二
5	34	田近 英一
7	33	中本 泰史
8	32	生駒 大洋
9	31	諸田 智克
9	31	林 祥介
11	28	平田 成
12*	24	はしもと じょーじ
次点*	24	小久保 英一郎
次々点*	22	橘 省吾

以上により、第14期運営委員として12名の会員が選出された。

* 順位は日本惑星科学会役員選挙規定5の(2)による

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。

竹広 真一, 中島 健介, 田中 智, 寺田 直樹, 佐伯 和人, 中村 智樹, 上野 宗孝, 藪田 ひかる

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。

総務専門委員会長	諸田 智克
行事部会長	中島 健介
財務専門委員会長	竹広 真一
編集専門委員会長	和田 浩二
欧文誌専門委員会長	生駒 大洋
将来計画専門委員会長	中村 昭子
将来惑星探査検討G長	千秋 博紀
情報化専門委員会長	平田 成
対外協力・連携専門委員会長	田近 英一

議題 1. 会則第12条2項により会長によって副会長が選出されたので承認願いたい。

副会長 倉本 圭, 中本 泰史

なお、これにともない、小久保 英一郎 会員と 橋 省吾 会員が運営委員に繰り上げられる。
議題は全会一致で承認された(可21, 否0)。

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をお願いしたい。

行事部会長 中島 健介

将来惑星探査検討G長 千秋 博紀

議題は全会一致で承認された(可21, 否0)。

議題3. 会則第12条6項による監事候補者の選出

会長から、監事候補者として山岸 明彦 会員および 門野 敏彦 会員が推薦された。運営委員による投票の結果、全会一致で山岸および門野両会員が監事候補者として選出された。

◇日本惑星科学会第118回運営委員会議事録

期 間：2017年1月11日(水)～1月18日(水)

議 題：第14期専門委員会・部会委員の承認

運営委員会委員：

出席者 23名

荒川 政彦,

倉本 圭, 中本 泰史, 中村 昭子, 渡邊 誠一郎, 千秋 博紀, 和田 浩二, 田近 英一, 生駒 大洋,
諸田 智克, 林 祥介, 平田 成, はしもと じょーじ, 竹広 真一, 中島 健介, 田中 智, 寺田 直樹,
佐伯 和人, 中村 智樹, 上野 宗孝, 藪田 ひかる, 小久保 英一郎, 橋 省吾

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 steering-ml@wakusei.jp 宛に投票

議題1. 各専門委員会委員の承認をお願いしたい。

(◎の各専門委員会委員長, ○の部会長, グループ長については第117回運営委員会にて承認済み)

1)総務専門委員会

◎諸田 智克

平田 成, 長沢 真樹子, 奥住 聡, 谷川 享行, 保井 みなみ, 小林 浩

行事部会

○中島 健介

城野 信一, 中村 昭子, 木村 勇氣, 浦川 聖太郎, 奥住 聡, 木村 淳

2)財務専門委員会

◎竹広 真一

佐々木 貴教, 荒井 朋子, 中本 泰史

3)編集専門委員会

◎和田 浩二

三浦 均(編集幹事)

生駒 大洋, 上楯 真之, 岡崎 隆司, 奥地 拓生, 木村 勇氣, 黒澤 耕介

小久保 英一郎, 白石 浩章, 杉山 耕一郎, 関口 朋彦, 瀧川 晶田中 秀和, 谷川 享行, 成田 憲保,

はしもと じょーじ, 本田 親寿, 諸田 智克, 山本 聡, 渡部 潤一

4) 欧文誌専門委員会

◎生駒 大洋

大槻 圭史, 大竹 真紀子, 佐々木 晶, 三浦 弥生

5) 将来計画専門委員会

◎中村 昭子

柳澤 正久, 中本 泰史, 竹広 真一, 諸田 智克, 木村 淳, 癸生川 陽子
将来惑星探査検討グループ

○千秋 博紀

田中 智, 大竹 真紀子, 佐伯 和人, 寺田 直樹, 関根 康人

6) 情報化専門委員会

◎平田 成

千秋 博紀, 伊藤 孝士, 大竹 和生, 石岡 圭一, 荒川 政彦, 小川 和律, 石原 吉明, 納田 明達

7) 対外協力専門委員会

◎田近 英一

伊藤 洋一, 小久保 英一郎, 橘 省吾, 中本 泰史, 宮本 英昭, 小川 佳子, 矢野 創, 佐々木 晶
押野 翔一(連合大会プログラム委員・正), 黒川 宏之(同・副)

議題は全会一致で承認された(可23, 否0).

◇日本惑星科学会賛助会員名簿

2017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)

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
Exelis VIS株式会社

◇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.

2017/06

6/3-6/9 第31回宇宙技術および科学の国際シンポジウム

(a)ひめぎんホール, 愛媛県松山市道後町

(b)日本航空宇宙学会

(c)<http://www.ists.or.jp/>

編集後記

2017年2月1日、遊星人が総合学術電子ジャーナルサイト「J-STAGE」で公開されました。オンラインで記事が読めるのは本学会ウェブサイトと同様ですが、J-STAGEで公開されることで、CrossRefなど海外の電子ジャーナルサイト上の論文とも相互にリンクされるようになります。遊星人のグローバル展開です。そんな遊星人に、今後とも応援(論文や記事)をよろしくお願いたします。

ところで、最近の人工知能(AI)の進化はすごいですね。例えば、囲碁で世界のトップ棋士に勝ちました。他にも、車の運転、医用画像の診断、果ては国会答弁の原稿書きなど、一昔前では考えられなかったようなことがAIで実現可能だと思えるようになりました。人間の仕事がAIに奪われてしまうのでは、なんて不安が出てくるのも頷けます。

編集幹事の仕事だって、AIに取って変わられないとも限りません。J-STAGEへの原稿登録のような単純作業なんて、AIのほうが得意でしょう。人間はミスをするものです(ですので、J-STAGEへの登録情報に間違いがあっても、怒らずにこっそりと編集幹事までご連絡ください)。遊星人の校正チェックもAIは得意そうです。ページが98ページも飛ぶようなこともないでしょう(本誌25巻3号の編集後記を参照)。編集後記もAIが書けそうです。とある文学賞の1次選考を通過するような小説が書けるようですから、原稿入稿直前、編集幹事が原稿チェックに追われながら「編集後記のネタないでしょう」と不安に怯えることもなくなるでしょう。

どうやら、編集幹事はAIに仕事を奪われると心労が減るようです。ぜひ実現してほしいものです。(三浦)

編集委員

和田 浩二 [編集長]

三浦 均 [編集幹事]

生駒 大洋, 上相 真之, 岡崎 隆司, 奥地 拓生, 木村 勇氣, 黒澤 耕介, 小久保 英一郎, 白石 浩章, 杉山 耕一郎, 関口 朋彦, 瀧川 晶, 田中 秀和, 谷川 享行, 成田 憲保, はしもと じょーじ, 本田 親寿, 諸田 智克, 山本 聡, 渡部 潤一

2017年3月25日発行

日本惑星科学会誌 遊・星・人 第26巻 第1号

定 価 一部 1,750円(送料含む)

編集人 和田 浩二(日本惑星科学会編集専門委員会委員長)

印刷所 〒501-0476 岐阜県本巣市海老A&A日本印刷株式会社

発行所 〒105-0012 東京都港区芝大門2-1-16 芝大門MFビルB1階

株式会社イーサイド登録センター内 日本惑星科学会

e-mail : staff@wakusei.jp

TEL : 03-6435-8789 / FAX : 03-6435-8790

(連絡はできる限り電子メールをお使いいただきますようご協力お願いいたします)

本誌に掲載された寄稿等の著作権は日本惑星科学会が所有しています。

複写される方へ

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

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル 学術著作権協会

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

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

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