
日本惑星科学会誌 遊・星・人

第25巻 第4号

目次

巻頭言 田村 元秀	135
-----------	-----

「2015年度最優秀研究者賞受賞記念論文」

衝撃蒸発・脱ガス実験から探る初期太陽系天体表層環境 黒澤 耕介	136
---------------------------------	-----

エポックメイキングな隕石たち その10 ～Y-81020 ～極めて始原的な日本の南極産隕石～	149
小松 睦美	

一番星へ行こう!日本の金星探査機の挑戦 その29 ～巨大な弓形雲頂温度構造の発見～

田口 真, 福原 哲哉, 今村 剛, 神山 徹, 二口 将彦, はしもと じょーじ, 他7名	155
------------------------------------------------	-----

系外惑星「遠い世界の物語」その8 ～中心星近傍の惑星を知る～	157
堀 安範	

遊星百景 その6 ～月面クレーター中央丘の地質～	161
大竹 真紀子	

Planet² RESCEUサマースクール2016参加報告

鎌田 俊一, 巽 瑛理, 平田 直之, 吉田 辰哉, 小玉 貴則	163
----------------------------------	-----

「プレソーラー粒子から探る星間ダストの進化と太陽系の起源」研究会報告	166
脇田 茂, 野沢 貴也	

2016年度惑星科学フロンティアセミナー参加報告	168
大村 知美	

2016年度日本惑星科学会秋季講演会報告	170
はしもと じょーじ	

JSPS Information	178
------------------	-----

Contents

Preface	M. Tamura	135
<hr/>		
Shock vaporization/devolatilization : Toward understanding the evolution of the surface environments on planetary bodies in the Solar system using an experimental approach	K. Kurosawa	136
<hr/>		
Epoch-making meteorites (10) —Y-81020—	M. Komatsu	149
<hr/>		
Road to the first star : Venus orbiter from Japan (29) —Discovery of Nanjakorya!—		
M. Taguchi, T. Fukuhara, T. Imamura, T. Kouyama, M. Futaguchi, and 8 authors		155
<hr/>		
Tales of distant exoplanet worlds (8) —The origin of close-in exoplanets—	Y. Hori	157
<hr/>		
My favorite view in planetary sciences (6) —Geology of crater central peak on the Moon—	M. Ohtake	161
<hr/>		
Report of Planet² RESCEU Summer School 2016		
S. Kamata, E. Tatsumi, N. Hirata, T. Yoshida, and T. Kodama		163
<hr/>		
Report of workshop for presolar grains in Mitaka, Japan	S. Wakita and T. Nozawa	166
<hr/>		
Participating report of Frontier Seminar 2016	T. Omura	168
<hr/>		
Report of 2016 fall meeting	G. L. Hashimoto	170
<hr/>		
JSPS Information		178

巻頭言

「ペール・レッド・ドット」

1915年、スコットランド出身の天文学者イネスは、南天の0等星ケンタウルス座アルファ星から約2度角離れた位置に、それと似た固有運動を示す暗い星を発見した。彼が台長であった南アフリカのユニオン天文台に、イギリスのアマチュア天体写真家であるフランクリン・アダムズが寄付した10インチ望遠鏡と写真機を用いた発見であったという。後にアメリカのオルデンが固有運動を精密に測定し、距離4.24光年の太陽系に最も近い恒星であることが確定した。これがプロキシマ・ケンタウリ星である。

主星の発見から約100年後となる今年8月25日に、この星のハビタブルゾーンに位置するほぼ地球質量の惑星が発見され、プロキシマbと名付けられた。過去16年にわたる別々のチームによる様々な観測を元に、欧州南天天文台のチームが今年に入ってから世界最高精度の可視光視線速度分光器HARPSを用いて3ヵ月強の集中的な観測を行い、確実な惑星であることが確認された。人類がついに、隣の恒星を回る生命を宿すことが有望な惑星を発見した系外惑星観測の記念すべきマイルストーンとなった。

最も近い恒星でありながら可視光で11等と暗い理由は、この星がM型星(赤色矮星)と呼ばれる太陽の1/10程度の軽くて低温度の星だからである。したがって、太陽型星まわりにある地球とは全く異環境の惑星であり、プロキシマbのハビタビリティについては多くの議論を呼んでいる。惑星は恒星からわずか0.05 auしか離れておらず、潮汐固定によって恒星に向けた面だけが温められ、アイボール・アースと呼ばれるようなハビタブル惑星となる予言もある。ちなみに、巻頭言のタイトルは、Pale Blue Dotをもじった、このプロジェクトの名称である。

系外惑星分野では、少なくとも今後10年間は、このような軽い恒星まわりの地球型惑星の観測が最重要観測対象のひとつとなる。その理由は観測的な制限のためでもあるのだが、系外惑星分野が発見や統計の時代を経ながらも特徴づけの時代に入りつつある今、最も詳しく観測できる近傍系外惑星の重要さは必然とも言える。2015年度から自然科学研究機構に発足したアストロバイオロジーセンターの重要課題でもあり、すばる望遠鏡用の新観測装置IRDも低温天体に向く赤外線を活用した地球型惑星探査を行う。さらには天文の枠を超えて、ブレークスルー・スターショット計画のような恒星間航行への関心もいっそう高まるだろう。

約20年前の系外惑星の発見は、太陽系を基準にして構成されてきた惑星科学にパラダイムシフトをもたらしたが、とりわけ非太陽型恒星まわりに惑星科学のさらなる展開を狙える時代が来ている。

田村 元秀 (東京大学大学院理学系研究科, 自然科学研究機構)
(アストロバイオロジーセンター, 同 国立天文台)

2015年度日本惑星科学会最優研究者賞受賞記念論文

衝撃蒸発・脱ガス実験から探る初期太陽系天体表層環境

黒澤 耕介¹

2016年10月12日受領, 査読を経て2016年11月4日受理.

(要旨) 高速度天体衝突は惑星の表層平均場に非平衡場を作り出し, 惑星システムへのパル的な環境変動を与える. そこからの緩和過程は惑星システムそのものに依存し, その多様性を強調する可能性がある. 筆者らの研究グループは平衡場を乱す主要因であると考えられる高エネルギー密度領域の物理・化学過程に注目し, その素過程の解明を目指して実験的研究を進めてきた. 本稿ではその成果を紹介するとともに, 近年の惑星形成理論の進展と合わせて初期太陽系天体の表層進化を推定するための展望について述べる.

1. はじめに

初期地球の表層環境を解明することは, 地球がなぜ生命あふれる惑星に成長できたのか? という比較惑星学の根本的な問に答えるために必須であろう. しかしながら, 現在のところ地質試料がジルコン粒子に限られる「冥王代」の地球表層環境で何が起こっていたのか? を探ることは難しい. 本稿ではこの時代が天体重爆撃の最中であること, そして頻発していた天体衝突が表層進化の主要な駆動力であったことに着目し, 天体衝突現象の理解から初期地球, そして初期太陽系の惑星/衛星/小天体表層進化を探るための方針を述べることにしたい.

以下に本稿の構成を述べる. 2章では天体衝突現象の特異性とその熱力学的記載について解説し, 特に「エントロピー法」の有用性について紹介する. 3章ではエントロピー法を用いて単発の天体衝突の帰結を推定するための筆者らの研究を紹介する. 4章では個々の天体衝突に関する知見と, 近年の惑星形成理論の進展を結びつけ天体重爆撃を記述するための確率論的モデルの構築について紹介する. 最後に5章ではこの数値モデルを用いた初期太陽系天体の表層環境の推定に向けて展望を述べる.

2. 天体衝突現象の熱力学的記載

地球マントル試料の強親鉄性元素濃度や, 月面のクレータ計数などから金属核形成後の地球には数億年の間に $\sim 10^{22}$ kgの物質が集積したことがわかっている[e.g., 1]. この質量は地球質量の0.1-1 wt%に対応し, 地球がおおよそ10 km太ったことになる. この時期の地球への典型的な衝突速度は $v \sim 20$ km/sであると推定されている[2]. 天体衝突で達成されるエネルギー密度は $e = v^2/2 = 200$ MJ/kgに達する. このエネルギー密度を温度 T と圧力 P に対応させると, それぞれ $T = e/C_p = 2 \times 10^5$ K, $P = \rho e = 6 \times 10^2$ GPaとなる. ここで $C_p \sim 10^3$ J/kg/K, $\rho \sim 3 \times 10^3$ kg/m³はそれぞれ典型的な岩石の定圧比熱, 密度である. 地球では中心核まで含めてもこのような高温あるいは高圧条件に達する場所は存在しない. すなわち天体衝突は地球上の平均場では決して駆動されない特異な物理・化学過程を引き起こしていただろう. 言い換えると天体衝突は惑星システムに非平衡場を作りだしていたと推定される. その後, 復元強制力によって平衡に慣らされていくことになるが, この環境応答は惑星システムそのものに依存し, 惑星の多様性を一層強調する一因になりえる. そして, 復元過程においては平均場では生じない特異な地質試料が残される可能性がある. この痕跡を紐解くことで過去の惑星システムの表層環境についての知

1. 千葉工業大学 惑星探査研究センター
kosuke.kurosawa@perc.it-chiba.ac.jp

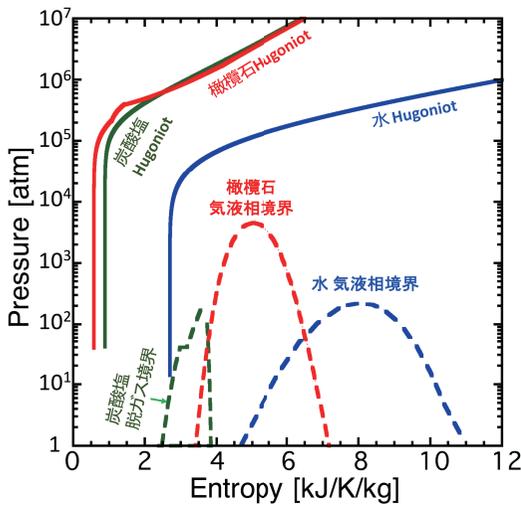


図1: エントロピー - 圧力平面上的の橄欖石, 炭酸塩, 水の Hugoniot 曲線と気液相境界. 断熱膨脹過程はこの平面で X 軸への垂線として表せる. 圧力の単位は 1 atm = 10⁵ Pa である. 黒澤 (2016) [27] の Fig.1 を改変.

見を得ることができるかもしれない. これが天体衝突時の高エネルギー密度領域を研究する重要性であり, 面白さであるといえよう.

天体衝突によって引き起こされる全ての物理・化学過程は衝突天体が持ち込んだ運動エネルギーが衝突天体そのものと被衝突天体物質の運動エネルギーと内部エネルギーへ分配された結果である. 筆者らの研究グループは衝突現象の中でも蒸発が起こるような特に高エネルギー密度領域の素過程の解明に取り組んできた. 以下では熱力学を用いてどのように衝突現象を記述できるのか? そしてその理論的枠組を用いるために必要な実験データは何か? について述べていく.

最初に衝突によって熔融や蒸発といった相変化が起こる理由を相図上の挙動として解説する. 衝突によって発生した圧縮波の伝播速度が標的の音速を超えると衝撃波が発生し, 相図上で Hugoniot 曲線上の点に移動する. このとき衝撃波面の前後で質量, 運動量, エネルギーは保存するが, 不可逆加熱によってエントロピーは増加する. 数 km/s という高速度衝突で達成される温度・圧力は周囲の環境に比べて高温・高压であるため, 希薄波の到達とともに圧縮された物質が周辺空間に急激に膨張する. 周辺物質に与える仕事で失われる内部エネルギーは, 膨張による内部エネルギーの変化に比べて無視できるほど小さく, この過程は断熱

過程(エントロピー変化 $dS = 0$)とみなせる. 不可逆加熱によってエントロピーは上昇しているため, もとの圧力, あるいはもとの体積まで膨張したときには相図上の異なる点に到達する. このとき相境界をまたいでいれば断熱膨脹中に相変化が起きた, ということになる. この挙動を理解するにはエントロピー S を横軸に圧力 P , あるいは温度 T を縦軸にとった図を用いると便利である [e.g., 3]. 図 1 に S - P 平面にプロットした橄欖石 [3], 炭酸塩 [4], そして水 [5, 6] についての Hugoniot 曲線と気液相境界を示す. 衝撃圧力が 1-10 GPa を超えると衝撃波が発生し, エントロピーが顕著に上昇することがわかる. 気液相境界は S - P 平面では上に凸の曲線として表され, しばしば Liquid-vapor dome などと呼ばれる [e.g., 7, 8]. ドームの内側は気相と液相が共存している状態(部分蒸発状態)である. 部分蒸発状態は P - T 図上では一本の直線である蒸気圧曲線上の点に対応することを注意しておこう. ドームの頂点は臨界点, 臨界点よりも低エントロピー側は蒸発開始に必要なエントロピー S_{iv} を圧力の関数として表した曲線, 臨界点よりも高エントロピー側は完全蒸発に必要なそれ S_{cv} に対応している. S - P 平面図では断熱解放曲線は X 軸(エントロピー)への垂線で表される. このことから Hugoniot 曲線と解放後に興味ある圧力¹における S_{iv} , S_{cv} が既知であれば, ある速度で天体衝突が起こったときに蒸発が起こるのかどうか, そして蒸発が起こるならば発生する蒸気量はレバールを用いて計算することが可能になる. このようにエントロピーを用いて整理することで, 天体衝突が起きたときに何が起こるのかを推定する際の見通しがよくなる. この理論的枠組は Ahrens and O'Keefe (1972) [9] によって提案され広く用いられている [e.g., 3, 4, 6-9]. 以下本稿では「エントロピー法」と呼ぶ.

ここでエントロピー法を用いるために必要なデータ, すなわち衝撃圧縮時に増加するエントロピー, そして解放後のエントロピーについて解説する. エントロピーは直接計測できる物理量ではないので, 実験データを用いて適当な熱力学的演算を行う必要がある. まず衝撃圧縮実験で得られた種々のデータを用いて S - P 平面上で Hugoniot 曲線を計算する手順について述べる. 原理的には熱力学第一, 第二法則の定義に従ってエントロピーの変化量

1. 多くの場合, 1気圧が参照値として用いられる.

$$dS = \frac{dE}{T} + \frac{P_{th}}{T} dV \quad (1)$$

を Hugoniot 曲線上の圧力まで積分すればよい(以下、エントロピー積分と呼ぶ)。ここで E , T , P_{th} , V はそれぞれ内部エネルギー、温度、熱圧力、比体積である。エントロピーは状態量であるため、積分経路は自由に決めてよいが、経路に沿って上記の物理量が既知であることが求められる。過去の一段式火薬銃 [e.g., 10], 二段式軽ガス銃 [e.g., 11], 高強度レーザー [e.g., 12], 核爆発 [e.g., 13] などを用いた実験によって地球科学的に興味のある物質の圧力 P , 比体積 V , 内部エネルギー E 空間上での Hugoniot 曲線は得られている場合が多い [e.g., 13, 14]。そこで積分経路を Hugoniot 曲線にとることが有効である [e.g., 7, 15-17]。よく知られているように Rankine-Hugoniot 方程式は P_H , V , E , V_s , u_p の5つの未知数と3つの式からなっており、この中の2つを計測することで他の物理量を一意に決定できる [e.g., 5]。ここで P_H , V_s , u_p はそれぞれ衝撃圧力、衝撃波速度、粒子速度である。 V_s と u_p の間には $V_s = C_0 + su_p$ という線型関係式²が多くの物質について成立することがわかっている。ここで C_0 , s はそれぞれバルク音速、定数である。そこで多くの場合 V_s と u_p が実験的に計測され、 C_0 と s が報告される [e.g., 13, 14]。 V_s と u_p の関係が既知になると衝撃圧縮時の比体積 V を標準比体積 V_0 と V_s と u_p を使って書き下すことができる。従って V_s と u_p の計測は物質の圧縮率を計測したことに等価である。 $V_s > 20$ km/s というような高速度領域についても上記の線型関係式がよい精度で成立することが確かめられている [e.g., 12, 13]。エントロピー積分を実行する際に必要な V , E についてはこのようにして求めることができる。残された問題は、 P_H と P_{th} の関係、そして E と T の関係の2つである。まず P_H と P_{th} の関係について述べる。衝撃圧力 P_H は内部エネルギーの変化に起因する熱圧力 P_{th} (Thermal pressure) と内部エネルギーに依存しない“冷たい”圧力 P_C (Cold pressure) の和

$$P_H(V, E) = P_{th}(V, E) + P_C(V) \quad (2)$$

で表される。(1)式中の圧力は熱力学の定義から内部エネルギーの変化によって生じる圧力、すなわち熱圧力である。従ってエントロピー積分を実行する際には熱圧力 P_{th} が既知である必要がある。前述したように

衝撃実験で C_0 , s を決めると衝撃圧力 P_H は一意に定まる。しかし P_{th} と P_C を独立に決定することはできない。熱圧力 P_{th} を推定するために Mie-Grüneisen EOS が頻繁に用いられる³。物質の熱・弾性情報を全て内包した体積 V の関数である Grüneisen parameter $\Gamma(V)$ を用いることで熱圧力は $P_{th} = \Gamma E/V$ と表される⁴。任意の体積における Γ の値が既知であれば Mie-Grüneisen EOS を用いて衝撃圧縮状態における熱圧力を計算できる⁵。続いて E と T の関係、つまり比熱について述べよう。エントロピー積分を行う際には Hugoniot 曲線に沿って比熱が既知である必要がある。衝撃温度計測は熱力学的には物質の比熱を計測することと等価である。従って衝撃温度データが報告されていれば、実験データを用いてエントロピー積分を実行することができる。残念なことに衝撃温度計測は不透明試料に対しては正確な計測が困難であることから十分なデータが存在しない場合が多くある。この場合は比熱を固体比熱の高温極限である Dulong-Petit の値 ($C_v = 3nR/\mu$, ここで C_v , n , R , μ はそれぞれ定積比熱、物質を構成する原子数、気体定数、平均分子量) で一定であると仮定することが多い。この手法で計算した衝撃温度とエントロピーは過去に一段式火薬銃、二段式軽ガス銃を用いた衝撃圧縮実験で得られたデータをよく再現する [17]。ただし、Grüneisen parameter の体積依存性や比熱に仮定が含まれ、計算結果がその仮定に依存することには注意が必要である。また珪酸塩に対する >10 km/s の衝突の際には熔融、解離、電離といった内部自由度を持つ比熱がエントロピー上昇に与える影響を無視できないことも注意しておこう。これについては後ほど 3.2 節で議論する。10 km/s 以上の天体衝突の帰結を調べるためにはやはり衝撃温度を実測することが必要である。ここでは Hugoniot 曲線を積分経路にとる方法を紹介したが、物質によって

2. この関係式は Hugoniot 曲線上で P - V - E の関係を与える。すなわち Hugoniot 曲線上でのみ成立する状態方程式である [e.g., 5]。
3. Cold pressure を推定する場合には Birch-Murnaghan EOS や Vinet EOS が用いられることが多い [e.g., 18]。
4. これは理想気体の状態方程式と同じ形式である。Grüneisen parameter は気相における比熱比に対応する変数と言える。比熱比は気相の膨張時の内部エネルギーから運動エネルギーへの変換効率を支配する変数である。
5. 多くの場合 Grüneisen parameter の体積依存性は既知でなく、経験的仮定 [e.g., 18] を用いて計算を進めることが多いことを注意しておこう。実験的に計測することは不可能ではない [e.g., 19] が、試料の準備と測定の高難度からデータに限られる。Grüneisen parameter の体積依存性については [20] に詳しい。

は異なる経路をとったほうが精度のよい熱力学データが揃っていることもあるようである[7]。特に物質強度の影響が無視できないような低圧条件でのHugoniot計測データの中には後に改訂された例[e.g., 21]もあり、データの吟味が重要である。

次に気液相境界について述べる。原理的には液相と気相が持つGibbs free energyを比較することで相境界を決定することができる。珪酸塩鉱物の蒸発を取り扱う際の困難は純金属が蒸発する場合と異なり、気相化学種が複数現れることであろう。この場合は鉱物組成から現れ得る気相化学種を予め予測した上で熱力学データベース[e.g., 22]をもとに気相での平衡組成を求め、その混合Gibbs free energyを用いる必要がある。理想気体の状態方程式が適用可能な低圧条件(大気圧程度)であれば、熱力学データが豊富に存在する上に混合Gibbs free energyを計算することができるので、上記の計算は比較的簡単に実行できる。このようにして計算された1気圧における各種鉱物の蒸発開始、完全蒸発エントロピー S_{iv} 、 S_{cv} は例えば[9]に示されている。これらのデータと前段落で述べた衝撃圧縮状態のエントロピーが用意できれば、ある衝突速度の天体衝突が起きた後に1気圧まで断熱膨張した状態の蒸発率や、化学平衡組成を求めることができる。

3. 個々の天体衝突後の蒸発と化学反応

3.1 炭酸塩岩を用いたエントロピー法の実証実験

前章で紹介したように衝撃蒸発現象を熱力学的に記述する枠組はよくできているように思われる。しかし、エントロピー法による予測値と実験結果が矛盾するケースが報告されていたことを紹介しよう。炭酸塩岩の衝撃脱ガス($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$)を起こす衝撃圧力の閾値 P_{id} である。標準状態にある試料が一回の衝撃波の通過で衝撃圧縮状態に達した場合のエントロピーは前章で述べた計算によって一意に定まるため、 P_{id} の矛盾はエントロピー法の妥当性に警鐘をならすものである。一般に蒸発(vaporization)と脱ガス(devolatilization)は区別して表現されるが、熱力学的には両者は同様に扱える。実験を行うと20 GPa程度の衝撃圧力で脱ガスを開始する[23, 24]という報告があるのに対し、エントロピー法の予測は55 GPaを超え

る衝撃圧力を受けなければ脱ガスを起こさない[25]。この矛盾はよく知られていたが、先行研究の実験結果、理論推定値の双方に問題点[26]があり、2011年の時点では未解決のままであった。過去の衝突実験の問題点はその多くが閉鎖系衝突実験であったこと、数少ない開放系衝突実験の報告もS/Nが低いことである。開放系衝突と閉鎖系衝突の違いについては「地球化学」誌の総説[27]にまとめたのでそちらをご参照頂きたい。理論推定値の問題点は使用するEOSによって P_{id} が33-70 GPaと大きく変動[e.g., 25, 28-30]し、EOSの信頼性に強く依存することであった。上述の $P_{id} = 55$ GPaは、EOSの中でも2016年現在もっとも信頼されている炭酸塩のANEOS(ANalytical Equations Of State)[31]による計算値である。この状況を踏まえて筆者らの研究グループはエントロピー法の妥当性を検証することを目的に炭酸塩岩を用いた衝突実験を計画した。方針は開放系かつ高精度で炭酸塩岩からの衝撃脱ガスを計測して実験データの決定版を出し、理論推定値と比較することである。

開放系における衝撃蒸発/脱ガス計測の非常に先駆的な取り組みにSugi et al. (1998) [32]がある。彼らは弾丸加速時にガスを用いない電磁銃を使って、水氷への低速衝突実験(< 0.4 km/s)を実施した。衝突が起こる実験チャンバに四重極質量分析計を連結し、発生した水蒸気の高精度定量計測も可能にしていた。優れた実験系であるが、達成可能な弾丸速度が低く、そのままでは炭酸塩岩の衝撃脱ガスを調べることはできなかった。そこで筆者らはこの技術を宇宙科学研究所の2段式水素ガス銃の実験系に拡張することを試みた。2段式水素ガス銃は標準状態にある“冷たい”任意の組成、サイズの弾丸を~9 km/sまで加速できる理想的な加速器の一つである。この弾丸速度は主要堆積岩からの衝撃脱ガスや水氷の衝撃蒸発を調べるには十分である。しかし、衝撃脱ガス量計測や衝撃発生蒸気の化学組成計測を行おうとすると、弾丸加速に用いる火薬燃焼ガスや水素ガスが実験チャンバ内に侵入し、化学汚染を引き起こしてしまうという致命的な弱点があった。筆者らは2段式水素ガス銃につきまとうこの弱点を克服することができれば、惑星科学的に興味ある物質の衝突誘起相変化・化学反応の理解が飛躍的に深まるという展望を抱き、2011年頃からこの問題に取り組んだ。

我々は実験チャンバへの化学汚染ガスの混入を極力

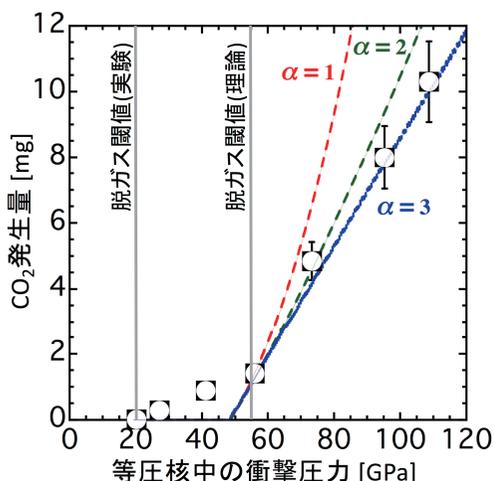


図2：炭酸塩岩の開放系衝突脱ガス実験結果。1次元インピーダンスマッチング法を使って計算した衝突直下点の衝撃圧力を横軸にとっている。弾丸に用いたアルミナと炭酸塩岩のHugoniotデータには文献[5, 14]にまとめられた値を使用した。Kurosawa et al. (2012)[4]のFig.10を改変。

防ぐため、2段式水素ガス銃の実験系に2つの工夫を施した。1つは小型実験チャンバ(~40 L)の上流側に汚染ガス拡散用の巨大ガス溜め(~2000 L)をとりつけたこと、2つ目は極薄プラスチックフィルム(12 μm 厚)で実験チャンバと巨大ガス溜めを含む2段式水素ガス銃の真空ラインを分離した上で、実験チャンバ内を若干陽圧にしたことである。弾丸は極薄フィルムを容易に貫通し標的に衝突するが、巨大ガス溜めへ拡散して薄くなった汚染ガスは実験チャンバに侵入できないという仕組みである。実験手順、条件、データ解析の詳細についてはKurosawa et al. (2012) [4]をご参照頂きたい。図2に衝撃圧力に対するCO₂の発生量を示す。ここでの衝撃圧力は衝突直下点で達成される最大圧力である。過去の実験研究と理論研究の脱ガス閾値を2つの縦線で示している。過去の実験研究と同様に~20 GPaの衝撃圧力で有意な脱ガスを検出したが、 P_{id} の理論推定値である~50 GPaを境にして脱ガス量の傾向が変化し、効率よく脱ガスを起こすことを見出した。続いてエントロピー法を用いて実験条件における脱ガス量の推定値を求めた。ここでは単純に自己相似的な衝撃波伝播を仮定し、衝撃圧力減衰指数 α をパラメータとした。実験チャンバの雰囲気圧力(2700 Pa)における脱ガス開始と完全脱ガスエントロピーはCa:C:O = 1:1:3の元素組成における化学平衡計算か

ら求めた。計算値は図2中に異なる α に対して3本の点線で示した。 $\alpha = 2-3$ を用いると $P > 50$ GPaで実験結果を概ね再現できていることがわかる。この衝撃圧力減衰指数の値は相変化を伴うような強い衝撃波伝播のときには妥当とされる値である[5]。 $P < P_{id}$ でも有意な脱ガスを検出しているが、これはシアバンドへのエネルギーの局所的な集中や、低衝撃圧条件で強度が効くときに引き起こされる粘性加熱などに起因すると推定される。前者の局所的なエネルギー集中は過去の2段式水素ガス銃を用いた平板衝突実験時の自発光観測結果[33]と調和的である。後者の過程は最近筆者らが行っているiSALEを用いた数値実験で観察されており、その影響は現在検討中[34]である。いずれにしてもこれらの過程による脱ガス効率は低く、 $P > P_{id}$ で系全体が一樣に加熱され、大規模な脱ガスが引き起こされるようである。 $P > P_{id}$ における実験結果と計算値の一致はエントロピー法の妥当性を実証的に示したはじめての例といえよう。

3.2 珪酸塩鉱物の熱力学データ

前節の実験からエントロピー法の枠組は妥当でありそうなることが確かめられた。すなわち珪酸塩鉱物に対して衝突時のエントロピー増加量とS-P平面上の気液相境界の形状が分かれば、天体衝突の帰結を定量的に推定することができると期待できる。ところが、2段式水素ガス銃は珪酸塩鉱物の衝撃蒸発現象を調べるには力不足であると言わざるを得ない。これは装置を壊さずに達成可能な弾丸速度が8-9 km/sであり⁶、珪酸塩鉱物を大規模に蒸発させることができないからである。このため>10 km/sの天体衝突が作りだす>200 GPaの極限状態については長らく未踏領域であり、衝突時のエントロピー増加量については既存のデータの外挿で推定されているのみであった。この状況は2000年以降に基礎科学研究にまで解放されるようになった超高強度レーザーの登場によって打破された。日本では大阪大学レーザーエネルギー学研究中心に設置されていた「激光XII号」が2006年以降に全国

6. 2段式水素ガス銃は火薬で断熱圧縮した高温高压の水素で弾丸を加速する装置である。弾丸の到達速度の上限は高温水素ガスの音速に比熱比で決まる定数を掛けた値になり、断熱圧縮条件によっては>10 km/sになる。一発のショットで装置を壊す覚悟と予算があれば、原理的には>10 km/sの加速も可能である。

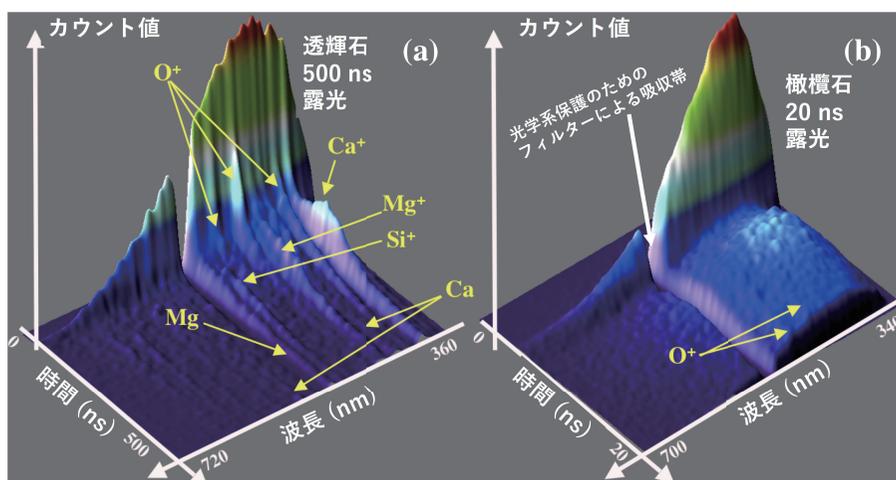


図3：大阪大学レーザーエネルギー学研究中心で行った珪酸塩鉱物の衝撃蒸発実験で得られた時間分解発光スペクトルの例。ここではカウント値そのものを示しており、感度較正を行っていないことを注意しておく。(a)透輝石試料。掃引時間は500 ns。灰色放射の連続光に続いて、種々の発光輝線が現れている。発光輝線ごとに異なる強度進化をしていることがわかる。Kurosawa et al.(2012)[37]のFig. 2を改変。(b)橄欖石試料。掃引時間は20 ns。試料中を伝播していく衝撃波を時間分解して観測できている。試料中を衝撃波が伝播していく段階ではなめらかな連続光が観察されている。従って放射率が既知であれば、輝度温度を計測できる。実際の温度計測はバンドパスフィルターを装着した別の計測器で空間分解して行われることが多い。ある時刻で試料裏面に衝撃波が到達し、発光強度が急激に現象する。これはShock breakoutと呼ばれている。

共同利用施設になった。高強度レーザーを標的に照射すると標的の表面が超高温・高圧のプラズマが発生し、急激に膨張する。その反作用によって標的は2段階水素ガス銃では達成不可能な粒子速度まで加速される。日本では門野敏彦氏を中心とする研究グループが世界に先駆けてこの技術を惑星科学研究に応用し成果をあげている[35-42]。その中で筆者は博士論文研究の一環として珪酸塩鉱物の衝撃蒸発実験に取り組んだ。高強度レーザーを珪酸塩鉱物に照射すると最大で~1000 GPa、珪酸塩鉱物同士の~30 km/s衝突で達成される衝撃圧力を達成することができる[e.g., 43]。この実験の内容についてはすでに遊星人に報告している[44]ので詳細はそちらに譲り、ここでは結果を簡単に紹介する。図3に高強度レーザーの照射によって衝撃圧縮された珪酸塩鉱物の可視光領域における時間分解発光スペクトルを示す。衝撃波が珪酸塩鉱物試料中に伝播すると灰色放射の連続スペクトルが観測されている。従って放射率を別途計測することによって衝撃圧縮時の輝度温度を計測できる。衝撃波が試料背面に達すると超臨界状態にある珪酸塩プラズマが真空中に膨張する。その過程で種々の発光輝線が観測されている。発光輝

線は気相から放たれるものなので、この結果は素性のわかった衝撃波を作用させたときに、>300 GPaの衝撃圧縮後の断熱膨張中に珪酸塩鉱物が蒸発したことを明確に示した例である。筆者らの研究グループの主要な結果は(1)発光分光計測によって珪酸塩鉱物(Quartz, Diopside, Forsterite)が~300 GPaの衝撃圧力を受けると確かに蒸発を起こすことを実証したこと[36-38]、(2)時間分解発光分光計測によって衝撃圧縮を受けた珪酸塩プラズマの時間変化を詳細に観察し、種々の発光輝線の強度進化からエネルギー分配過程において電子が電離吸熱、再結合発熱を介して一つのエネルギー貯蔵庫として振る舞い比熱に寄与する可能性が高いことを提案したことである[37]。また衝撃圧縮状態にある珪酸塩鉱物の自前のデータと近年報告されていた文献値を用いて>200 GPaの石英、透輝石のS-P Hugoniot曲線を計算した結果、現在のところ惑星科学分野で最頻出EOSであるM-ANEOSは、>200 GPaの衝撃圧縮で上昇するエントロピーを系統的に過小評価していることを指摘している[38]。このことは珪酸塩鉱物が従来想定されてきたよりも衝撃に弱く、分解し易いことを意味している。M-ANEOSの開発グ

Table 1: 高強度レーザーあるいはZ-machineを用いて得られた珪酸塩鉱物の熱力学データ. ここで u_p - V_s , P - T はそれぞれ圧縮率計測, 比熱計測を意味し, ここではそれぞれについて計測された粒子速度, 衝撃圧力範囲を示す.

鉱物名	u_p - V_s	P - T	参考文献
石英(SiO_2)	4 - 20 km/s	70 - 1000 GPa	[46, 48]
頑火輝石(MgSiO_3)	9 - 13 km/s	190 - 450 GPa	[49]
橄欖石(Mg_2SiO_4)	6 - 13 km/s	270 - 970 GPa	[43, 50]
酸化マグネシウム(MgO)	6 - 14 km/s	180 - 950 GPa	[47, 51]

ループはこういった近年の発見を受けM-ANEOSの改訂に着手しているようである[45]. この結果が持つ惑星科学的な意義については5章で触れることにする.

本章の最後に珪酸塩鉱物についての熱力学データについて近年の結果を紹介しておこう. 2009年以降は米国のSandia National Laboratoryに設置されているZ-machineが基礎科学研究に解放され, 利用されはじめている[8, 46, 47]. Z-machineは電磁力で金属の平板飛翔体を ~ 40 km/sまで加速し, 標的に衝突させることができる装置である. 大規模施設のため今のところ衝撃温度計測のための機器が導入されていないようであるが, ~ 2000 GPaまでの P - V - E Hugoniot曲線の高精度のデータが得られている. Table 1に高強度レーザー, もしくはZ-machineを用いて珪酸塩鉱物について得られたデータ[12, 43, 46-51]をまとめておこう. 筆者らの研究グループは幅広い P - T 領域で連続的な衝撃温度データを取得することを目指し, 高強度レーザーを用いた橄欖石の衝撃圧縮実験を実施した. 現在データ解析中である. 今のところマグネシウム珪酸塩のデータに限られている理由は, 光学計測の都合上試料が可視光領域で透明である必要があり, 現在の計測手法は不透明な鉄珪酸塩にはそのまま適用できないためである. このため不透明試料にも適用可能なX線トムソン散乱を利用した衝撃温度計測手法が登場し始めている[52]. 続いて気液相境界, つまり S_{lv} , S_{cv} のデータについて述べよう. 2章で述べたように大気圧より低圧条件では既存のデータを用いた熱力学平衡計算によって S_{lv} , S_{cv} を計算できる. 近年では第一原理分子動力学計算によって臨界点近傍における珪酸塩プラズマの熱力学データを計算する試みが行われ始めているようである[53]. これが実現されるとLiquid-vapor domeの形状をより精確に決定できるようになるだろう. 今後の進展に期待したい.

3.3 衝突化学

3.1., 3.2節でエントロピー法の理論的枠組みは確からしいことと, 近年の実験, 計算技術の向上によって珪酸塩鉱物についての熱力学データが充実しつつあることを述べてきた. 本節ではこれらを元にして衝突時に合成され環境に放出される化学種の推定方法について述べる. この方法はOhno et al. (2004) [54], Ishibashi et al. (2013) [55]によって確立されてきたものである.

最初に >10 km/sの衝突で引き起こされる化学反応を研究する上での基本方針を述べる. 図1でみたように >10 km/sで天体衝突が起こった際に達成される温度圧力は一般的に物質の臨界点を超える. 従って衝突直後には衝突天体が超臨界流体化する. 減圧中にLiquid-vapor domeを横切るところで, 超臨界流体から気相と液相が分離し2相以上が入り交じる“衝突蒸気雲”が形成される. 珪酸塩鉱物の臨界点の温度は5000-15000 Kと推定されており[3, 9], この段階では化学反応が速やかに進行し, 化学平衡に達するだろう. 蒸気雲内の温度が高く, 化学反応速度が十分に速い間は断熱膨張に伴う減温減圧に追従して化学平衡組成が変化していくと予想される. 更なる降温に伴って化学反応速度が低下し反応特徴時間が膨張特徴時間を上回ると, それ以上化学反応が進行しないことになる. これを化学凍結(クエンチ)と呼び, その時の温度は化学凍結温度と呼ばれる. 典型的な天体衝突における化学凍結温度は2000-3000 K程度と推定されている[56]. 従って衝突天体の化学平衡組成と, 化学凍結温度が既知であれば, 衝突後に環境に放出される化学種を推定できる. ある温度で全ての化学反応が停止するという仮定が置かれる場合が多い. これは“Freeze-out model” [57]と呼ばれ第一次近似として広く利用されている. 理想気体のEOSが適用可能かつ熱力学デー

タが存在する温度条件(多くの場合<6000 K)であれば, Gibbs free energy 最小化法を用いて各温度圧力における化学平衡組成を計算することができる. このとき系全体の混合エントロピーも得られる. 衝撃圧縮時の温度圧力に対して相対的に低温低圧の P - T 領域で絨毯爆撃的に計算を実施すると P - T - S の格子点が得られることになる. それぞれの格子点上のエントロピーと衝撃圧縮時のエントロピーを対応させることで, 格子点のそれぞれが何km/sの衝突後に辿る温度圧力になっているのかわかる, ということになる. 図4にこのように計算した衝突天体の P - T 平面における断熱解放経路を示す. この計算ではCIコンドライトの元素組成[58]を用いて化学平衡計算を行った. 参考のためHugoniot曲線と橄欖石に対応する気液相境界も示している. カラーバーはエントロピーを対応する衝突速度に換算し色分けしたものである. ここでは衝突天体物質が一樣に一次元インピーダンスマッチング法で計算される衝撃圧力を受けると仮定している. 今のところ隕石そのものを用いて>200 GPaのHugoniot曲線データを取得した例は存在しないので, 橄欖石のデータをモデル曲線として用いている. 橄欖石と実際の隕石物質の組成の違いによる影響は今後のデータの蓄積によって明らかになってくるであろう. 図5に化学凍結温度を1600 Kであると仮定した場合の化学平衡組

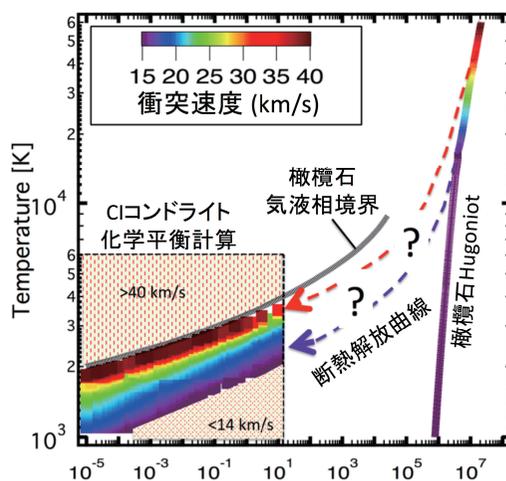


図4: 圧力-温度平面上におけるCIコンドライト様天体衝突時の断熱膨張曲線. CIコンドライトのHugoniot曲線として, 橄欖石のそれを近似的に用いた. この計算では10気圧まで理想気体のEOSが適用可能であると仮定して1000-6000 K, 10^{-5} - 10^{-1} 気圧の温度圧力領域で化学平衡計算を実施した. 橄欖石同士の正面衝突を仮定し, 2章に示した手順で衝突速度に対応するHugoniot曲線上のエントロピーを計算し, 化学平衡計算で得られた系の混合エントロピーと対応づけた. 参考のためM-ANEOSによる橄欖石の気液相境界も示した. 黒澤(2016)[27]のFig.8を改変.

成の衝突速度依存性を示す. 左図は主要気相成分, 右図は気相と凝縮相の間の酸素の分配を示している. こ

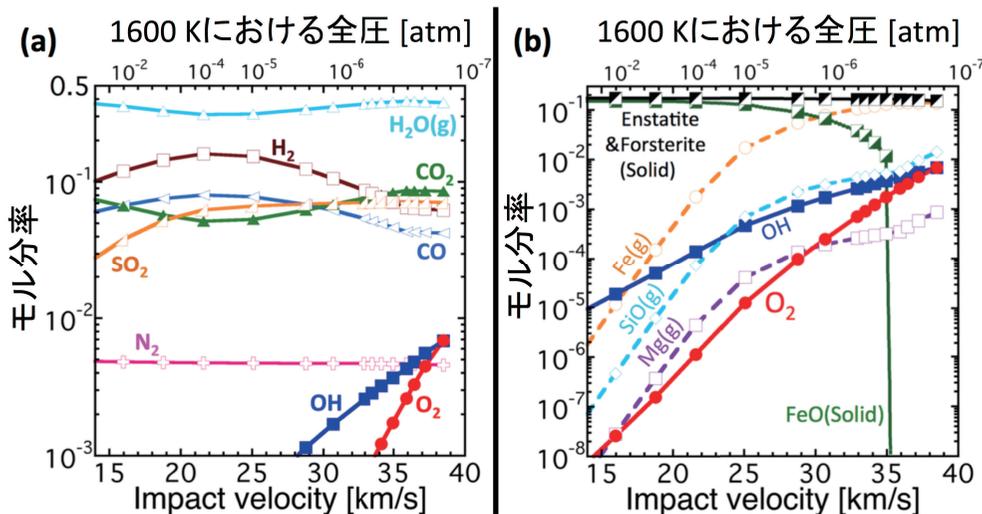


図5: 1600 KにおけるCIコンドライト組成の衝撃蒸気雲の化学平衡組成の衝突速度依存性. (a)主要気相成分, (b)酸素分配と金属ガス. 上X軸には断熱膨張経路で1600 Kに対応する系の全圧を示した. 自由分子流領域(< 10^{-6} 気圧)でも化学平衡に達するまで化学反応が進行すると仮定していることを注意しておこう. 現実的にはより高温で化学凍結を起こすと考えられる. 黒澤(2016)[27]のFig.9を改変.

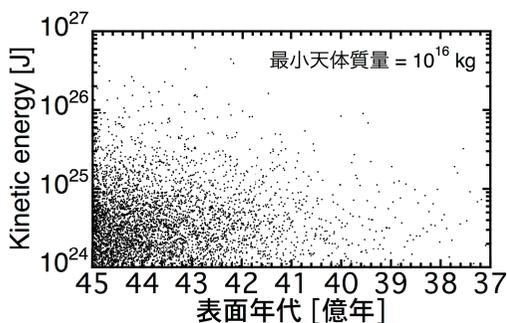


図6：確率論的重爆撃モデルの計算出力の一例。原始地球への天体衝突を想定している。個々の点が一つの衝突イベントで持ち込まれる運動エネルギーに対応している。

のようにエントロピー法の枠組で必要なデータが揃えば、最終的に発生する蒸気量やその組成まで定量的に推定することができる。図5の結果については5章で再度議論することにして。

ここで紹介した衝突蒸気雲中で生成される化学種の推定法は、(1)生成され得る化学種を予め予測していること、(2)ある化学凍結温度で全ての化学反応が停止すると仮定していること、などいくつかの仮定をおいていることには注意が必要である。注目している化学種については実験との比較を通じて、その都度その信頼性を検討する必要があると考えている。3.1.章で紹介した開放系気相化学分析技術は生成化学種の定量分析にそのまま活用可能である。現在、千葉工業大学惑星探査研究センターの高速衝突実験施設で、宇宙科学研究所に設置したものと同様の実験系を構築中である。彗星の衝突や水衛星表面での衝突化学にも拡張できるように標的の冷却システムを新規に製作した[59]。また数値衝突計算コードiSALE[60-62]の導入によって、室内衝突実験で得られた結果を物理的に解釈するための体制づくりも行っている。今後は衝突実験と数値実験を相補的に行い衝突化学の理解を深めていく予定である。

4. 天体重爆撃

3章では単発の天体衝突現象について解説した。本章ではその知見を天体重爆撃期の惑星表層の理解に向けてどのように活かしていくか、について述べていく。

1995年の系外惑星の発見[63]や、2005年のNice

modelの登場[e.g., 64]以来、太陽系のガス惑星の軌道がその誕生から現在に至るまで一定であったという制約がなくなり、様々なガス惑星の軌道進化モデル[e.g., 64-66]が提案された。これらの研究の進展が引き金となり、1970年から議論されてきた地球-月系の天体重爆撃についてようやく破綻のない衝突頻度モデル“A sawtooth-like timeline” [67]が提案された。また2000年以降、衝突天体群のサイズ分布[68, 69]、衝突速度分布[2, 66]、衝突総質量[e.g., 1, 70, 71]についても新しい制約が次々に得られている。天体重爆撃の理解に関する近年の進展に関しては[27]の総説にまとめたので、そちらもご覧頂たい。

天体重爆撃の天体群の素性が具体化してきたことによって、モンテカルロ法を用いて、天体群のサイズ/衝突速度/衝突角度分布から天体を一つずつ選び出し、衝突総質量に達するまで計算を続けるような確率論的重爆撃モデルを作ることの意義がでてきた、と筆者は考えている。図6にこのモデルのテスト計算例を示す。個々の点が一回の天体衝突イベントに対応し、衝突天体が持ち込む運動エネルギーを示している。このモデルの最大の長所は個々の計算点では衝突天体サイズ、衝突速度、衝突角度といった衝突条件が既知であるため、室内衝突実験や数値衝突計算から得られた新たな知見を簡単にモデルに組み込むことができるところである。

モデルの試用のために衝突掘削の物理をモデルに実装し、原始金星への天体重爆撃で発生する衝突放出物の総量を計算した。原始金星は集積時に現在の地球海洋質量程度の水を獲得したと考えられている。それに対して、現在の金星表層は極度に乾燥している。この問題に対して、金星は太陽に近いので海洋を形成せずに水蒸気大気をまとっている、水蒸気大気は光化学的に不安定なので、水素と酸素に分解して流体力学的散逸によって宇宙空間へ失われた、という説明がなされてきた。実際には水素は散逸できるが、金星サイズの惑星から240気圧相当の酸素を取り除く機構は未解明であった。計算の結果、酸化反応によって余剰酸素を取り除くのに十分な量の細粒岩石が放出されることがわかった。この研究の背景、モデルの詳細についてはKurosawa (2015) [72]を参照されたい。この機構は金星と地球の表層水の相の違い(水蒸気大気 or 海洋)が天体重爆撃に対する表層環境の応答を変化させ、表層

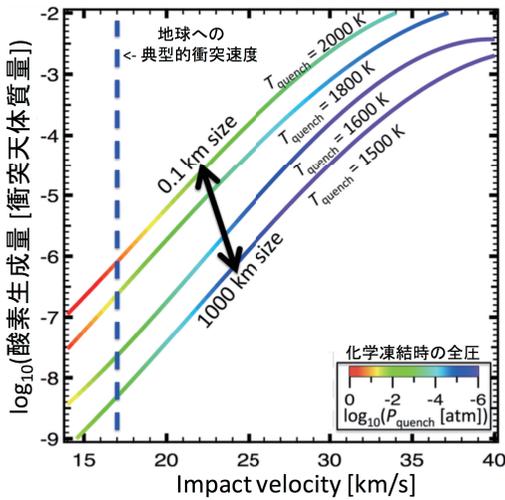


図7：CIコンドライト様天体衝突時の酸素生成量の衝突速度依存性。先行研究で提案された衝突天体サイズと化学凍結温度の関係式をそのまま適用した衝突天体サイズ依存性も示している。黒澤(2016)[27]のFig.10を改変。

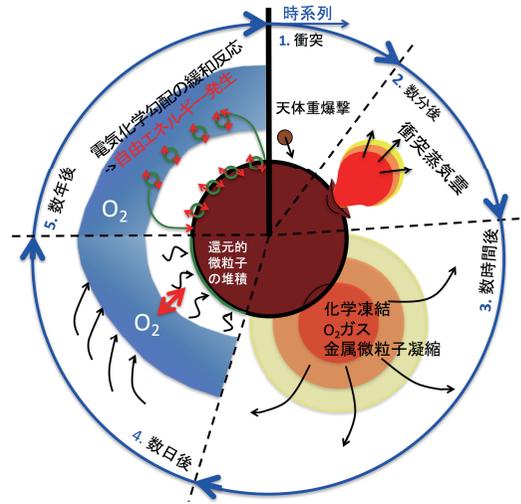


図8：衝突誘起電気化学勾配の概念図。

環境の劇的な違いを生じる原因となった可能性があることを示している。今後は衝突実験と数値衝突計算を相補的に駆使して衝突素過程の理解を深め、特に「地質に証拠を残す過程」に注目してモデルに実装していく予定である。

5. 天体重爆撃期の太陽系惑星/衛星/小惑星の表層環境の理解に向けて

本章ではここまで紹介してきた知見からどのように初期太陽系天体の表層環境を探っていくかの方針を示し、予察的な結果[73]を紹介する。衝突現象の帰結は衝突速度やサイズといった衝突条件に依存する。そして衝突条件は太陽系天体の軌道進化と密接に関連している。ある衝突史を与えた場合に前章で述べたモンテカルロ計算を複数回行うことで地質に影響を残すような衝突の発生確率を得ることができる。地球上の地質試料、惑星探査によるリモセンデータ、隕石試料、天体からの回収試料(月、イトカワなど)との比較を通じて、45-35億年前の太陽系の姿を解き明かすためのこれまでになかった制約を与えることができるようになって期待している。その計算出力として同時に天体重爆撃が及ぼす惑星表層への物理的・化学的影響も得られる。例えば環境に放出される気相化学種、前章でみたような衝突放出物量などである。統計的に尤もらし

い衝突史が決まった場合の初期惑星/衛星/小天体の表層環境も同時に決めることを目指してモデルの拡充を実施していく予定である。

本稿の最後にこのような検討の一例として原始地球へのCIコンドライトの衝突後の環境応答と地質に残り得る証拠について述べる。4章で紹介した近年の軌道進化モデル[66, 67]は、ガス惑星の移動に伴って地球と月への衝突速度の中間値が~2倍に上昇することを予見している。図5に戻ってCIコンドライトの衝突後の生成物へ衝突速度の上昇が及ぼす影響をみてみよう。衝突速度が上昇すると珪酸塩鉱物が分解し、強酸化的なガス(O₂, OH)と強還元的ガス(Fe, Mg, SiO)が同時に生成されていることがわかる。これまでCIコンドライトの衝突時の炭素の行方に注目した研究は実験的にも理論的にも行われてきたが、~50 mol%に迫る酸素の行方についての検討例は少なかった。これは衝突時に珪酸塩が分解したとしても、断熱膨張中に再度珪酸塩として凝縮すると仮定されてきた[e.g., 74]ためである。今回の筆者らの計算結果は高速度衝突時にはこの仮定が成立せず、珪酸塩が分解して気相へ放出され得るということを示唆している。レーザー照射実験ではこうして放出された酸素が衝突天体に含まれる炭素を酸化することが示されている[55]。図7に衝突天体質量で規格化した酸素生成量の衝突速

度依存性を示す。先行研究で提案された化学凍結温度の衝突天体サイズ依存性[75]を用いて酸素生成量の衝突天体サイズ依存性も同時に示している。もし41億年前を境にして衝突速度が2倍になるという予測が正しければ、生成される酸素量は~3桁ほど上昇することになる。化学凍結後の衝突蒸気雲がどのように環境に放出されるか?には更なる検討が必要であるが、ここでは凍結時の組成を保ったまま初期地球大気に放出されることを考えてみよう。大気のスケールハイトよりも大きい天体の衝突時には蒸気雲は宇宙空間へ断熱膨張し、十分に希薄になった後に地球大気に全球的に再供給されると考えられるので、比較的大規模(直径>10 km)の天体衝突時にはもっともらしい仮定であると思われる。珪酸塩の分解によって生じた強還元ガス(Fe, Mg, SiO)は上層地球大気と混合して圧力を受けると凝縮し、強還元微粒子として大気中を沈降していくと予想される。それに対し、強酸化ガス(O₂, OH)はそのまま大気中にとどまるであろう。このような状況では酸化還元の電位化学勾配による還元強制力が働き、環境中で徐々に元の珪酸塩に戻っていくだろう。このときに化学ポテンシャルの差分だけ自由エネルギーを環境中に放出すると期待される。我々はこれを「衝突誘起電気化学勾配」と名付け、検討を進めているところである。概念図を図8に示す。頻発する天体衝突が無機物である珪酸塩を分解し、地球上の分子化学進化を語る上で絶対不可欠な自由エネルギー[e.g., 76]を供給し得るとするのはこれまでに見落とされていた視点である。レーザー衝撃実験から見出された造岩鉱物が従来考えられてきたよりも衝撃に弱いという衝突物理の最新の知見が、冥王代地球表層環境研究に新たな展開をもたらし得ると例になるのではないかと期待している。我々は天体衝突で発生する酸素に注目したが、同時に発生するはずの強還元的成分についても注目され始めている。例えば微小隕石の超高速衝突が起きた場合でも鉄蒸気が発生する。この鉄蒸気が周辺岩石の表面で強制的に冷却され凝縮したものが宇宙風化を引き起こす鉄ナノ微粒子の起源であるとする指摘もある[77]。この過程は“Impact reduction”と呼ばれている[78]。

前段落で述べた天体衝突による過渡的酸素大気形成仮説は地質分析から検証できる可能性がある。例えば原始地球では地質試料中の硫黄の非質量依存型同位体

異常(MIF-S)が22-23億年前に消失している[e.g., 79]。これは地球史における酸素分圧の上昇とリンクしており、酸素分子が光化学反応ネットワークを壊すことによってMIF-Sが起こらなくなったと考えられている。硫黄の光化学反応ネットワークは大気中の酸素の混合率が10 ppmを超える程度で乱されると推定されている[80]。比較的規模の大きい一発の天体衝突で達成できる酸素分圧である。23億年以前の大規模衝突起源(例えばSpherule beds [e.g., 81])の地層中のMIF-Sの消失を検出できれば、超高速衝突による全球的な環境変動を実証できるのかもしれない。また火星隕石ALH84001中の炭酸塩の酸素同位体分析結果は41億年前の火星にはオゾン層があったことを示唆する[82]。最近Curiosityが発見した表層のマンガン酸化物は火星が過去に強酸化的な大気を持っていた証拠と考えられている[83]。今後はこれらの火星地質試料と天体衝突現象の関連も調べていく予定である。

6. まとめ

本稿では衝突蒸発現象を熱力学的に記述する枠組を紹介した。筆者らは2段式水素ガス銃を用いた開放系気相化学分析技術を確立し、代表的な堆積岩である炭酸塩岩について、この方法で脱ガス量を定量的に推定可能であることを確かめた。2000年以降に基礎科学研究に解放された高強度レーザーやZ-machineによってこの枠組で造岩鉱物の衝突蒸発を扱うための熱力学データがそろいつつある。時を同じくして、惑星形成理論の発展から地球-月系への天体重爆撃について破綻のないモデルが提案された。このような2000年以降に得られた衝突物理・化学、高圧物性物理、惑星形成理論の進展によって、天体衝突現象の帰結を「探針」のように用いて太陽系初期10億年の惑星表層進化を実証的に探ることができる時代になってきたと筆者は考えている。今後は室内衝撃実験と数値衝突計算を相補的に用いて、過去の惑星/衛星/小天体の表層環境を還元していく研究を展開していく予定である。

謝辞

本稿は日本惑星科学会2015年度最優秀研究者賞受賞記念論文として執筆させて頂きました。私に高速度

衝突現象の面白さとその比較惑星学における重要性を教えて下さった大学院生時代の指導教員である杉田精司先生に心より感謝致します。ここで紹介した研究は多くの方々との共同研究で得られたものです。この場をお借りして御礼申し上げます。学生時代に研究の「いろは」をご指導頂いた門野敏彦、石橋高、大野宗祐、関根康人、千秋博紀、和田浩二、石丸亮、吉越丈倫、鳥海崇、松井孝典の各氏、2段式水素ガス銃について教えて下さった長谷川直、川合伸明の両氏、大阪大学レーザーエネルギー学研究センターにおける実験で多大なるご助力を頂いた弘中陽一郎、境家達弘、重森啓介、佐野孝好、尾崎典雅、関根利守の各氏、学位論文研究の中間発表で衝突研究におけるEOSの重要性についてのコメントを下された阿部豊氏、衝突研究会でいつもの確かなコメントを下された荒川政彦、中村昭子、柳澤正久の各氏、最新の研究について教えてくれ、議論に付き合ってくれた鎌田俊一、黒川宏之、桑原秀治の各氏、実験装置についての私の拙いアイデアを具体化し、いつも素晴らしい実験システムを製作して下さったADCAP Vacuum technologyの青島国広氏に御礼申し上げます。数値衝突計算コードiSALEは私の研究の幅を大きく広げてくれ、室内実験と数値実験を相補的に組み合わせた研究展開が可能になりました。iSALEの開発者であるGareth Collins, Kai Wünnemann, Boris Ivanov, H. Jay Melosh, Dirk Elbeshausenの各氏に感謝致します。丁寧な査読をして下さった査読者の玄田英典氏に感謝致します。ここで紹介した研究は科学研究費補助金21244069, 24244071, 23840057, 25871212, 15H01067の援助を受けて行われました。また筆者は科学研究費補助金26610184の援助を受けています。

参考文献

- [1] Walker, R. J., 2009, *Chemie der Erde-Geochemistry* 69, 101.
- [2] Ito, T. and Malhotra, R., 2006, *Adv. Space Res.* 38, 817.
- [3] Melosh, H. J., 2007, *MAPS* 42, 2079.
- [4] Kurosawa, K. et al., 2012, *Earth Planet. Sci. Lett.* 337–338, 68.
- [5] Melosh, H. J., 1989, *Impact cratering: A geologic process*. Oxford University Press, New York.
- [6] Stewart, S. T. et al., 2008, *Geophys. Res. Lett.* 35, L23203.
- [7] Kraus, R. G. et al., 2012, *J. Geophys. Res.* 117, E09009.
- [8] Kraus, R. G. et al., 2015, *Nature Geosci.* 8, 269.
- [9] Ahrens, T. J. and O'Keefe, J. D., 1972, *The Moon* 4, 214.
- [10] Stewart, S. T. and Ahrens, T. J., 2005, *J. Geophys. Res.* 110, E03005.
- [11] Mosenfelder, J. L. et al., 2007, *J. Geophys. Res.* 112, B06208.
- [12] Hicks, D. G. et al., 2005, *Phys. Plasmas* 12, 082702.
- [13] Trunin, R. F. et al., 2001, *Experimental Data on Shock Compression and Adiabatic Expansion of Condensed Matter*, Russ. Federal Nucl. Cent., Sarov, Russia.
- [14] Marsh, S. P., 1980, *LASL Shock Hugoniot Data*. University of California Press, Berkeley, California.
- [15] 高木靖彦, 水谷仁, 1990, *惑星科学* 8, 1.
- [16] Senshu, H. et al., 2002, *J. Geophys. Res.* 107, E12, 5118.
- [17] Sugita, S. et al., 2012, *AIP Conf. Proc.* 1426, 895.
- [18] Tange, Y. et al., 2009, *J. Geophys. Res.* 114, B03208.
- [19] Asimov, P. D., 2012, *AIP Conf. Proc.* 1426, 887.
- [20] 土屋卓久, 2004, *高圧力の科学と技術* 14, 61.
- [21] Sekine, T. et al., 2008, *Earth Planets Space* 60, 999.
- [22] Chase, M. W., Jr., 1998, *NIST-JANAF Thermochemical Tables, Fourth Edition*, American Chemical Society and American Institute of Physics, Melville, New York.
- [23] Boslough, M. B. et al., 1982, *Earth Planet. Sci. Lett.* 61, 166.
- [24] Ohno, S. et al., 2008, *Geophys. Res. Lett.* 35, L13202.
- [25] Pierazzo, E. et al., 1998, *J. Geophys. Res.* 103, 28607.
- [26] Ivanov, B. A. and Deutsch, A., 2002, *Phys. Earth Planet. Int.* 129, 131.
- [27] 黒澤耕介, 2016, *地球化学* 50, 135.
- [28] Kieffer, S. W. and Simonds, C. H., 1980, *Rev. Geophys. Space Phys.* 18, 143.
- [29] Vizgirda, J. and Ahrens, T. J., 1982, *J. Geophys. Res.* 87, 4747.
- [30] Martinez, I. et al., 1995, *J. Geophys. Res.* 100, 15465.
- [31] Thompson, S. and Lauson, H., 1972, *Sandia National*

- Laboratory Rep. SC-RR-71 0714:113p.
- [32] Sugi, N. et al., 1998, *Geophys. Res. Lett.* 25, 837.
- [33] Kondo, K. and Ahrens, T. J., 1983, *Phys. Chem. Miner.* 9, 173.
- [34] 黒澤耕介, 玄田英典, 2016, 天体衝突の衝突物理の解明(XII), 神戸大学 (講演予定).
- [35] Kadono, T. et al., 2010, *J. Geophys. Res.* 115, E04003.
- [36] Kurosawa, K. et al., 2010, *Geophys. Res. Lett.* 37, L23203.
- [37] Kurosawa, K. et al., 2012, *J. Geophys. Res.* 117, E04007.
- [38] Kurosawa, K. et al., 2012, *AIP Conf. Proc.* 1426, 855.
- [39] Takasawa, S. et al., 2011, *Astrophys. J. Lett.* 733, L39.
- [40] Ohno, S. et al., 2014, *Nature GeoSci.* 7, 279.
- [41] Sakaiya, T. et al., 2014, *Earth Planet. Sci. Lett.* 392, 80.
- [42] Nagaki, K. et al., 2016, *MAPS* 51, 1153.
- [43] Sekine, T. et al., 2016, *Science Adv.* 2, e1600157.
- [44] 黒澤耕介ほか, 2010, *遊星人* 19, 332.
- [45] Collins, G. and Melosh, H. J., 2014, 45th LPSC Abst., #2664.
- [46] Knudson, M. D. and Desjarlais, M. P., 2009, *Phys. Rev. Lett.* 103, 225501.
- [47] Root, S. et al., 2015, *Phys. Rev. Lett.* 115, 198501.
- [48] Hicks, D. G. et al., 2006, *Phys. Rev. Lett.* 97, 025502.
- [49] Spaulding, D. K. et al., 2012, *Phys. Rev. Lett.* 108, 065701.
- [50] Bolis, R. M. et al., 2016, *Geophys. Res. Lett.* 43, 9475.
- [51] Miyanishi, K. et al., 2015, *Phys. Rev. E* 92, 023103.
- [52] Kritcher, A. L. et al., 2008, *Science* 322, 69.
- [53] Xiao, B. and Stixrude, L., 2016, *Goldschmidt Conf. Abst.* 3461.
- [54] Ohno, S. et al., 2004, *Earth Planet. Sci. Lett.* 218, 347.
- [55] Ishibashi, K. et al., 2013, *Earth Planets Space* 65, 811.
- [56] McKay, C. P. and Borucki, W. J., 1997, *Science* 18, 390.
- [57] Fegley, B. Jr. et al., 1986, *Nature* 319, 305.
- [58] Wasson, J. T. and Kallemeyn, W. K., 1988, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.* 325, 535.
- [59] Kurosawa, K. et al., 2016, 47th LPSC Abst., #1838.
- [60] Amsden, A. et al., 1980, Los Alamos National Laboratories Rep. LA-8095:101p.
- [61] Ivanov, B. A. et al., 1997, *Int. J. Impact Engin.* 20, 411.
- [62] Wünnemann, K. et al., 2006, *Icarus* 180, 514.
- [63] Mayor, M. and Queloz, D., 1995, *Nature* 378, 355.
- [64] Gomes, R. et al., 2005, *Nature* 435, 466.
- [65] Walsh, K. J. et al., 2011, *Nature* 475, 206.
- [66] Bottke, W. F. et al., 2012, *Nature* 485, 78.
- [67] Morbidelli, A. et al., 2012, *Earth Planet. Sci. Lett.* 355-356, 144.
- [68] Bottke, W. F. et al., 2005, *Icarus* 175, 111.
- [69] Bottke, W. F. et al., 2010, *Science* 330, 1527.
- [70] Jacobson, S. A. et al., 2014, *Nature* 508, 84.
- [71] Pahlevan, K. and Morbidelli, A., 2015, *Nature* 527, 492.
- [72] Kurosawa, K., 2015, *Earth Planet. Sci. Lett.* 429, 181.
- [73] Kurosawa, K. and Kuwahara, H., 2014, 45th LPSC Abst., #1920.
- [74] Hashimoto, G. L. et al., 2007, *J. Geophys. Res.* 112, E05010.
- [75] Gerasimov, M. V. et al., 1998, *Earth Moon Planets* 80, 209.
- [76] Kirschvink, J. L. and Weiss, B. P., 2003, *地学雑誌* 112 (翻訳: 磯崎行雄), 187.
- [77] Sheffer, A. A., 2007, PhD Thesis, University of Arizona.
- [78] Melosh, H. J., 2013, In: *Impact cratering Processes and Products* (Eds. Osinski, G. R. and Pierazzo, E.) Blackwell Publishing Ltd.
- [79] Farquhar, J. et al., 2000, *Science* 289, 756.
- [80] Pavlov, A. A. and Kasting, J. F., 2002, *Astrobiology* 2, 27.
- [81] Simonson, B. M. and Glass, B. P., 2004, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 32, 329.
- [82] Farquhar, J. et al., 1998, *Science* 280, 1580.
- [83] Lanza, N. L. et al., 2016, *Geophys. Res. Lett.* 43, 7398.

エポックメイキングな隕石たち(その10)： ～ Y-81020～極めて始原的な日本の南極産隕石～

小松 睦美¹

2016年10月1日受領，査読を経て2016年10月28日受理。

(要旨) 始原的隕石の中でも炭素質コンドライトは化学的に未分化であり，太陽系生成期の情報を保存する物質であると考えられている。しかしながら，ほとんどの炭素質コンドライトは，原始太陽系星雲内での個々の隕石構成物質の形成環境と母天体集積後の反応(変成・変質作用)に関する情報を併せ持つため，この二つを切り分けることがこれまでの歴史を正しく解釈する上での重要な課題となっている。岩石学タイプ3.0の隕石は，「極めて始原的な隕石」と呼ばれ，母天体での変成作用の影響が極めて小さく，太陽系生成初期の母天体集積時の状態を最も保存していると考えられている。国立極地研究所が所有するYamato(Y)-81020は，極めて始原的な特徴を持つ数少ないCO3.0コンドライトの一つであり，特に日本の研究者により多くの重要な成果が発表されてきた。

1. はじめに

Y-81020は，第22次南極地域観測隊が発見した隕石の一つである。1981-82年のやまと山脈付近の裸水帯での隕石探査では，133個の隕石を採取，そのうち7個が炭素質コンドライトであった。Y-81020の質量は270gであり，ペア隕石であるY-81021～81025を含むと，全岩で378gの隕石である(図1)。

現在国際隕石学会で認定されている炭素質コンドライトのうち，CO3と分類されているのは532個存在する(Meteoritical Bulletin Database, 2016年9月)。サブタイプが決定されているCO3は全部で72個あり，その内14個がCO3.0として分類されている。しかしながら，その多くは北西アフリカの砂漠で最近発見された隕石(NWA)であり，詳細な研究は行われていない。これまで詳しく研究されているのは，ALH 77307, ColonyとY-81020の3つのCO3.0隕石のみである。

ほとんどの炭素質コンドライトは，母天体で様々な程度の変成・変質作用を受けている。CO3.0隕石のように変成・変質作用の影響が少ない試料は，隕石全体



図1：Y-81020隕石の全体写真(国立極地研究所提供)。

から見ても極少数(CRの一部とCH, Ungrouped-Cの僅か)しか確認されていない。また，上記の3つのCO3.0隕石の内，ALH(ALHA) 77307は低い程度ではあるが水質変質を受けており[e.g.1]，Colonyは地球での風化の影響が大きい[2]。Y-81020にも軽微な水質変質の特徴が見られるものの，殆どの物質は変成・変質の影響を受けておらず，非常に貴重な隕石であるといえる。

Y-81020の初期の研究では，Mgに富むオリビンの組成とスピネルに富む難揮発性包有物(CAI)に多くの

1. 総合研究大学院大学 学融合推進センター
komatsu_mutsumi@soken.ac.jp

興味が注がれた[3-5]. 2000年代に入り炭素質コンドライトのサブタイプに関する議論が進むと、Y-81020の始原性が着目されるようになり、原始太陽系星雲での情報を最も良く保存する重要な隕石として広く認識された。後の章では、Y-81020から展開された研究の一部を紹介する。

2. COコンドライトと岩石学タイプ、サブタイプの評価

隕石母天体集積後の熱変成・水質変質作用については、岩石学タイプと呼ばれる番号により表される。タイプ4から6と番号が大きくなる程熱変成の度合いが増し、水質変質の程度は3, 2, 1の順に増加する。ほとんどの炭素質コンドライトは、岩石タイプ2または3に分類される。炭素質コンドライトの中でもCOコンドライトは、コンドリュールやCAIを多く含み、逆にマトリックスの量は相対的に少ないという特徴を持つ。全岩の揮発性成分は比較的乏しく、COコンドライト母天体での変成は主に温度に依存する反応であったと考えられ、その程度によりCO3.0-3.8のサブタイプに細分化される。またCO3隕石は熱変成作用の度合いが異なる隕石が多く発見されているため、母天体での熱変成の多様性を系統立てて議論することが可能である。

サブタイプの決定手法としては従来、コンドリュールに含まれるガラス(あるいはガラスから微細な結晶が晶出したメソスタシス)や斜長石の熱ルミネッセンス(TL)が用いられてきた[6]。しかしながらこの方法

は、普通コンドライトには広く適用できるものの、炭素質コンドライトでは、岩石学的な特徴と必ずしも一致しないことが分かってきた。そのため、TL法の代わりとなる炭素質コンドライトの化学的・岩石学的変化のサブタイプ評価指標が提案されており、以下に紹介するような系統的評価の確立にY-81020は大きく貢献している。

2.1 FeOに富むオリビンの組成

コンドライトの主な構成物であるFe-Mgコンドリュールは、FeOに乏しいタイプIコンドリュール(Mg#>90)とFeOに富むタイプIIコンドリュール(Mg#<90)に分けられる。[7]は、普通コンドライト中のタイプIIコンドリュールに含まれるFeOに富むオリビン中の Cr_2O_3 含有量やマトリックスの化学的特徴に着目し、サブタイプ評価の指標となることを示した(図2a)。普通コンドライトでは、岩石学サブタイプ3.0から3.2にかけて、FeOに富むオリビン中に存在する極細粒(<50nm)クロマイトの離溶により、オリビンの Cr_2O_3 含有量は系統的に変化する。クロマイトの離溶はサブタイプ3.2では完了すると考えられ、 Cr_2O_3 含有量のばらつきである標準偏差(σ)は、岩石学タイプ3.0から3.1にかけて増加し、その後緩やかな下降に転じ、組成が均一化する。また、 Cr_2O_3 含有量は3.1までは変化せず、それ以降はコンドリュールと接するマトリックスとの反応が進み、その結果、オリビン中の Cr_2O_3 含有量が減少することが示された。

さらに[8]では、COコンドライトでも普通コンドラ

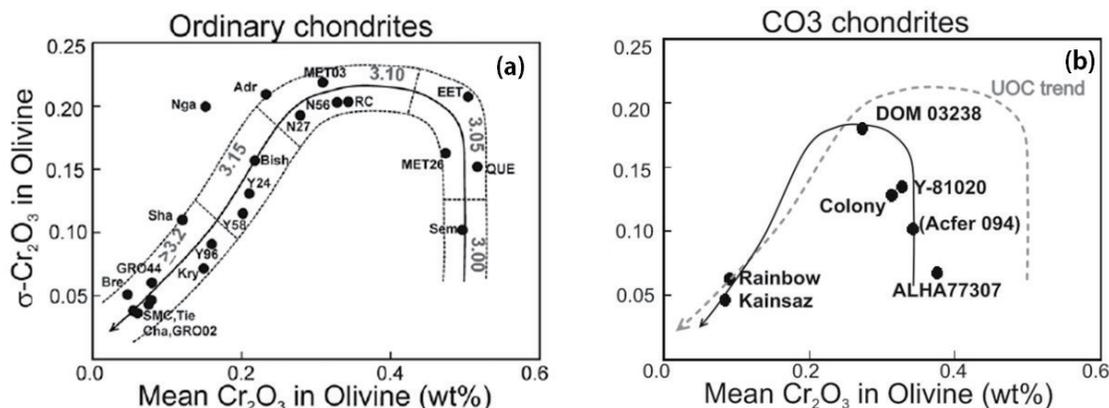


図2: 普通コンドライト(a)とCOコンドライトのCr量とサブタイプ(b)[5;6より引用]. タイプIIコンドリュールに含まれるFeOに富むオリビンの組成は、特に3.2以下の岩石学サブタイプの決定に有効である。Y-81020のサブタイプは3.05と分類される(b)。

イトと同様に、連続的な化学的変化が見られることが示された(図2b)。ALH 77307 (CO3.00)とDOM 03238 (CO3.1)と比較すると、Y-81020の Cr_2O_3 含有量は二つの隕石と近い値を持つが、その値の標準偏差 σ は二つの中間的な値を示し、Colony (CO3.05)と同程度の変成作用を受けたCO3.05とのサブタイプが見積もられている。

2.2 Fe-Ni 金属相の特徴

珪酸塩鉱物と同様に、Fe-Ni金属相からも極初期の二次変成作用の影響を読み取ることができる。[9]は、非平衡普通コンドライトとCOコンドライトの系統的な分析により、二次変成で生じるFe-Ni金属相の変化と岩石学的サブタイプの関連性について明らかにした。サブタイプ3.10以下の隕石に含まれるマトリックス中の金属相は、コンドリュール中の金属相に比べてCoに富む組成を持つ一方で、コンドリュール中の金属相では、岩石学タイプが増加するに従いNiに富む粒子の存在量が減少する。Y-81020の化学的及び鉱物学的特徴より、Y-81020のサブタイプは、普通コンドライトのサブタイプ3.0-3.10と同様の変成を経験したCO3.05と見積もられた。この手法により導き出されたサブタイプの値は、[8]により得られたタイプIIコンドリュール中のオリビンの Cr_2O_3 含有量からの評価と調和的である。

2.3 その他の指標

プレッシャー粒子の存在度も、その隕石の始原性を評価するための重要な指標である。プレッシャー粒子は、マトリックスに存在し、太陽系と大きく異なる同位体組成を持つことから、太陽系形成以前に存在した赤色巨星、AGB星や超新星爆発などを起源とする粒子であると考えられている。ナノダイヤモンド、グラファイト、炭化珪素、窒化珪素、酸化物、珪酸塩など、さまざまな鉱物がプレッシャー粒子として存在する。各粒子の熱的・化学的反応への耐性は異なるが、プレッシャー粒子の存在度と、含まれる隕石の岩石学タイプには相関があることが確認されており、母天体の二次変成作用の指標として用いることができる[e.g.,10]。COコンドライトでは岩石学サブタイプの増加に従い、ALH 77307 (CO3.00)、Colony (CO3.05)、Kainsaz (CO3.2)の順に炭化ケイ素などのプレッシャー粒子中

の希ガス存在度が減少することが確認されている[11]。[12]では、Y-81020のペア隕石であるY-81025が、ALH 77307よりも高いプレッシャー珪酸塩粒子存在度を持つことが示されており、Y-81020の高い始原性を示唆していると考えられる。

また、隕石中の高分子有機物のグラファイト化の度合いも岩石学サブタイプの決定、特に熱変成の履歴の評価に有効である。ラマン分析より、隕石中の高分子有機物はDバンド(欠陥構造; $\sim 1350 \text{ cm}^{-1}$)とGバンド(グラファイト; $\sim 1600 \text{ cm}^{-1}$)の二つのバンドを持つことが知られている。普通コンドライトでは、熱変成作用が進むにつれ、Dバンドの半値幅(FWHM-D値)が減少し、二つのバンドの強度比(I_D/I_G)の増加が見られ[13]。同様の相関がCOコンドライトでも確認されている[14]。Y-81020は始原的な高分子有機物の特徴を持つことが示されており、他の指標によるサブタイプの評価とも整合する[15]。

3. Y-81020コンドリュールのAl-Mg年代測定

始原的な普通コンドライトの分析により、普通コンドライトに含まれるFe-Mgコンドリュールは、CAIが形成された後、約100-250万年で形成されたとされる[16]。しかしながら炭素質コンドライトでは、26Al年代測定に必要なAlに富む鉱物やメソスタシスが少なく、粒径も小さいものが多いため年代測定が困難であった。[17]は、Y-81020の始原性に着目し、Fe-Mgコンドリュールに含まれるオリビン、輝石、斜長石について、 ^{26}Al を用いた年代測定を行った。太陽系初期の $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比を 5×10^{-5} とすると、タイプIとタイプIIコンドリュールの年代はそれぞれCAI形成後1.7-2.5Ma、2.0-3.0Maであることが示された。この形成年代は、始原的なL・LLコンドライト中のコンドリュールの年代とほぼ同じである。炭素質コンドライトと普通コンドライトは、その揮発性成分の違いから、太陽系の異なる場所で母天体が形成されたと考えられるが、異なるコンドライト種に含まれるコンドリュールの形成年代が類似した値を示すことは、太陽系星雲モデルに新たな制約を与えるものである。

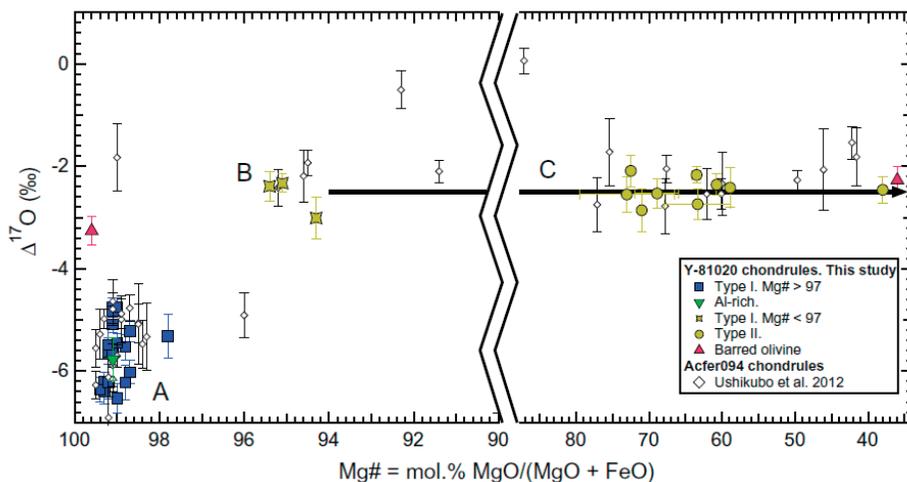


図3：原始的隕石であるY-81020とAcfer 094の“ホスト”の $\Delta^{17}\text{O}$ 値の比較。Mg#はコンドリュール中のオリビンと輝石組成の平均値より算出。本図が示すコンドリュールの進化は以下の通り；(A)コンドリュールの前駆物質は $\sim -5.5\%$ 程度の $\Delta^{17}\text{O}$ を持っており、ダストに富んだ環境(100×Solar)によりMg#>97のコンドリュールが形成された。(B)その後、正の(positive) $\Delta^{17}\text{O}$ を持つ H_2O 氷の付加により酸化的環境となりMg#<97、 $\Delta^{17}\text{O}$ が $\sim -2.5\%$ 程度タイプIコンドリュールが形成された。(C)さらなるダスト/氷の付加により、タイプIIコンドリュールが形成された。極めてFeに富むタイプIIコンドリュールは、Feに富む前駆物質の組成を反映していると考えられる。〔18〕より引用)

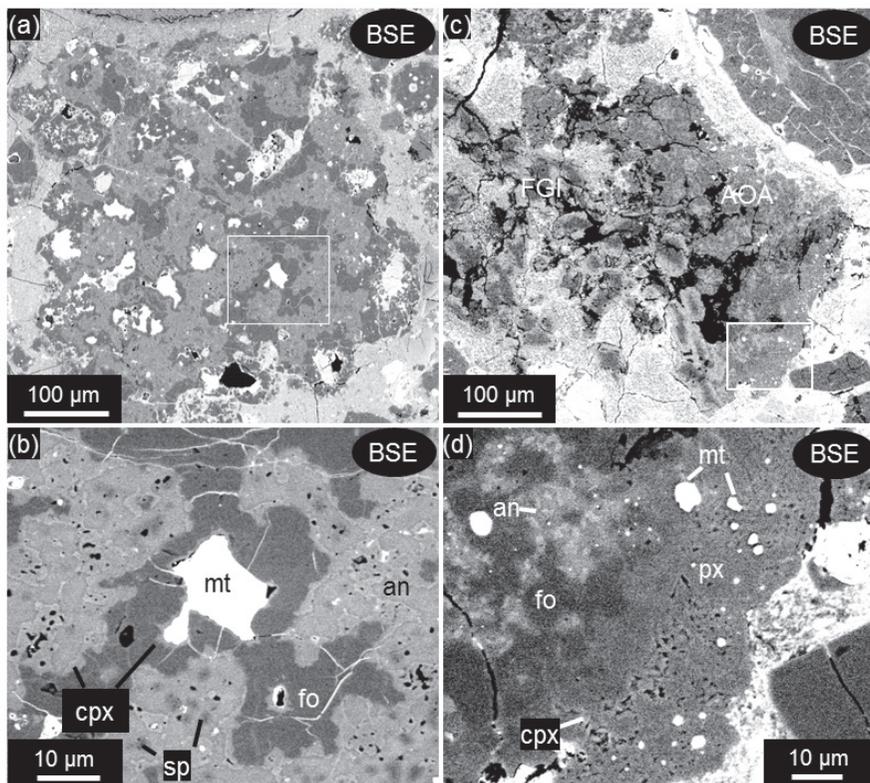


図4：Y-81020中のAOAの反射電子(BSE)像。(a,b) 始原的特徴を持つAOA。斜長石(an)とスピネル(sp)から成るコアが、Al-輝石(cpx)、Mgに富むオリビン(fo)、Fe-Ni金属相(mt)に囲まれているような特徴を示す。二次変成の特徴は見られない。(c,d) AOA周縁部のオリビンがMg輝石(px)に置き換わった特徴を持つAOAも存在する。

4. Y-81020 コンドリュール・CAIの酸素同位体組成

さらに[18]は、[19]の始原隕石分析結果を踏まえ、Y-81020コンドリュールの詳細な酸素同位体分析を行った。その結果、コンドリュール形成領域の酸素同位体の異なる二つのリザーバー ($\Delta^{17}\text{O}$ が $\sim -5.5\%$ と正の値を持つものの2種)とダスト量の変化により、タイプIコンドリュールとタイプIIコンドリュールが形成された過程を明らかにした(図3)。

一方、原始太陽系星雲のCAI形成領域においても、 ^{16}O に富むリザーバーと ^{17}O 、 ^{18}O に富むリザーバーが存在していたことが分っている。[20]は、Y-81020に含まれるFGI(細粒CAI)の酸素同位体局所分析により、一つのFGI中に酸素同位体組成の異なる鉱物が含まれていることを示した。このことは、細粒CAIが ^{16}O に富む環境($\Delta^{17}\text{O} = \sim -40$ から -50%)で形成され、その後の部分熔融等の加熱イベントにより ^{17}O 、 ^{18}O に富むガス($\Delta^{17}\text{O} = \sim 0$ から -15%)との酸素同位体交換が起こったことを示唆しており、これらを説明する分子雲の進化モデルが提唱されている。酸素同位体組成に関する詳細な議論については、[21]を参照されたい。

上記のような高精度同位体分析結果は、二次変成の影響がほとんど無いY-81020であるからこそ成し得た成果である。

5. AOA(amoeboid olivine aggregates)とLIME-オリビン

炭素質コンドライトの構成物の一つであるAOA(アメーバ状オリビンアグリゲイト)からも、多くの報告がなされている。AOAとはオリビンと難揮発性鉱物から成り立つ細粒のアグリゲイトで、CAIと類似した環境で形成されたと考えられている包有物である。[22]はY-81020を含めたCOコンドライトに含まれるAOAに着目し、サブタイプとAOA中のオリビンのFeO量増加に相関があることを示した。

AOAはその組織的な特徴と ^{16}O に富む同位体組成を持つことから、星雲から凝縮過程を経て形成されたと考えられている。Y-81020に含まれるAOAには母天体での二次変成の特徴は殆ど見られず、その構成鉱物は平衡凝縮計算[e.g., 23,24]で予想されるものと概ね一致する。また、一部のAOAでは周辺部がMg輝石(エ

ンスタタイト)に置換されており、形成後の再加熱を示唆している(図4)。またY-81020中のAOAには、LIME (low-Fe, Mn-enriched)オリビンと呼ばれる、特徴的な化学組成を持つオリビンが含まれていることが分かった[25]。Y-81020の始原性によりLIMEオリビンの初期状態が示され、Mgオリビン(フォルステライト)の凝縮形成が、還元的な環境においてより低温のLIMEオリビンを形成する温度まで継続したことが示唆された。また変成度の異なる他の隕石との比較により、母天体での二次変成によりLIMEオリビン組成が徐々に失われたことが新たに示された。

6. 最後に

以上のようにY-81020からは、その極めて始原的な特徴から、多くの興味深い成果が発表されてきた。特に、全隕石種の中でも最も始原的で地球風化の影響が少ない隕石の一つとして、原始太陽系星雲及び炭素質コンドライト隕石の母天体変成の理解に大きく貢献している。[21]は、“新鮮な寿司を提供する良い寿司屋を選ぶように”始原隕石の始原物質を分析対象とすることは重要である、と述べている。そういった意味では、Y-81020は“絶品が並ぶ極上の寿司屋”のような隕石と言って良い。本稿では書ききれなかった研究を含め、現在もY-81020を活用した研究が数多く行われており、今後もエポックメイキングな成果が発表されることが期待される。

謝辞

木村真博士、野口高明博士、岡崎隆司博士には本稿を執筆する機会をいただき、最後まで丁寧かつ的確なアドバイスをいただきました。山口亮博士、三河内岳博士には、原稿作成にご協力いただきました。また、査読者である牛久保孝行博士には、多くの有益なコメントをいただきました。この場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Ito, S. and Tomeoka, K., 2001, Antarctic Meteorites XXVI, 47.

- [2] Rubin, A. E. et al., 1985, *Meteorit. Planet. Sci.* 20, 175. 1271.
- [3] Graham, A. L. et al., 1985, *Meteoritics* 20, 654.
- [4] Kojima, T. et al., 1995, *Proc. NIPR Symp. Antarct. Meteorites* 8, 79.
- [5] Shibata, Y. and Matsueda, H., 1994, *Proc. NIPR Symp. Antarct. Meteorites* 7, 110.
- [6] Sears, D. W. G. et al., 1980, *Nature* 288, 791.
- [7] Grossman, J. N. and Brearley, A. J., 2005, *Meteorit. Planet. Sci.* 40, 87.
- [8] Grossman, J. N. and Rubin, A. E., 2006, 37th Lunar and Planetary Science Conference, no. 1383.
- [9] Kimura, M. et al., 2008, *Meteorit. Planet. Sci.* 43, 1161.
- [10] Huss, G. R. and Lewis, R. S., 1995, *Geochim. Cosmochim. Acta* 59, 115.
- [11] Huss, G. R. et al., 2003, *Geochim. Cosmochim. Acta* 67, 4823.
- [12] Kobayashi, S. et al., 2005, 46th Lunar and Planetary Science Conference, no. 1931.
- [13] Quirico, E. et al., 2003, *Meteorit. Planet. Sci.* 38, 795.
- [14] Bonal, L. et al., 2007, *Geochim. Cosmochim. Acta* 71, 1605.
- [15] Komatsu, M. et al., 2014, *Antarctic Meteorites XXXVII*, 45.
- [16] Mostefaoui, S. et al., 2002, *Meteorit. Planet. Sci.* 37, 421.
- [17] Kurahashi, E. et al., 2008, *Geochim. Cosmochim. Acta* 72, 3865.
- [18] Tenner, T. J. et al., 2013, *Geochim. Cosmochim. Acta* 102, 226.
- [19] Ushikubo, T. et al., 2012, *Geochim. Cosmochim. Acta* 90, 242.
- [20] Ito, S. et al., 2004, *Geochim. Cosmochim. Acta* 68, 183.
- [21] Yurimoto, H. et al., 2008, *In Reviews in Mineralogy & Geochemistry* 68, 141.
- [22] Chizmadia, L. et al., 2002, *Meteorit. Planet. Sci.* 37, 1781.
- [23] Ebel, D. S. et al., 2012, *Meteorit. Planet. Sci.* 47, 585.
- [24] Petaev, M. I. and Wood, J. A., 2005, *In Chondrites and the Protoplanetary Disk*, 373.
- [25] Komatsu, M. et al., 2015, *Meteorit. Planet. Sci.* 50,

一番星へ行こう!

日本の金星探査機の挑戦 その29

~巨大な弓形雲頂温度構造の発見~

田口 真¹, 福原 哲哉¹, 今村 剛², 神山 徹³, 二口 将彦⁴,
はしもと じょーじ⁵, 鈴木 睦⁶, 上野 宗孝⁷, 岩上 直幹⁸,
佐藤 隆雄⁶, 佐藤 光輝⁹, 高木 聖子¹⁰, 中村 正人⁶

(要旨) 「あかつき」の周回軌道投後、最初に中間赤外カメラ(LIR)が撮像した金星画像には、南北に延びる巨大な弓形の温度構造が映し出されていました。これは、地表付近で発生し雲頂高度まで伝播した重力波の姿を直接捉えた初めての例だと考えられています。「あかつき」が切り拓く新しい金星気象学の幕開けです。

この「弓形構造」(図1)を初めて見たとき「あかつき」プロジェクトマネージャーの中村は「何じゃこりゃ!」と叫んだと言われています。私はひとり自宅でこの画像を見ました。声に出したかどうか記憶に定かではありませんが、「何じゃこりゃ」と思ったことは確かです。現在、私たちはこの現象を「弓形構造」というつまらない名称で呼んでいます。しかし、「ナンジャコリャ」と命名しておくべきでした。もしかしたら、美しい日本語が国際共通語になるチャンスを逸したかもしれません。

驚くべきことに、この「弓形構造」は12月11日まで連続5日間ほぼ同じ経度上に存在していたことがわかりました。よく知られているように金星上空には赤道上で100 m/sにも達する西向き的高速風が吹いています。もし、この「弓形構造」が大気中に浮かんでいる物質の分布を反映しているのであれば、5日間に金星を1周以上してしまうはずですが、しかし、その場にとどまっているということは、それが何らかの波動現象であることを示しています。

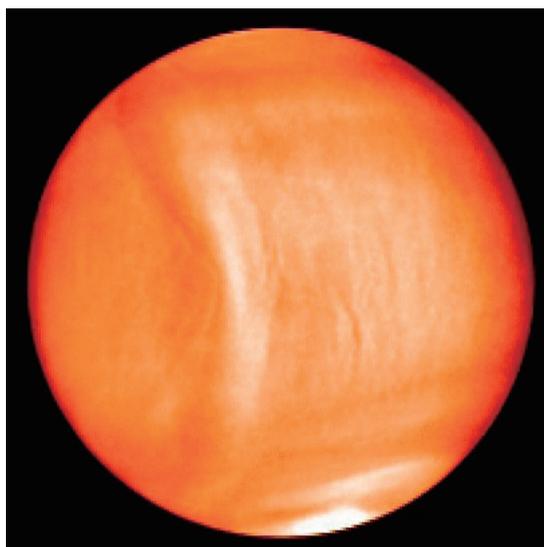


図1: 2015年12月7日05h26m UTにLIRによって取得された金星雲頂輝度温度分布。ほぼ、上が北、右が東です。高温ほど白く表示しています。南極上空が最も高温です。巨大弓形構造の他に、中高緯度で東西に延びる帯状の構造や低緯度にフィラメント状の低温領域が見られます。

1. 立教大学理学部
2. 東京大学大学院新領域創成科学研究科
3. 産業技術総合研究所
4. 東邦大学医療センター大森病院
5. 岡山大学大学院自然科学研究科
6. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究科
7. 神戸大学大学院理学研究科
8. 専修大学商学部
9. 北海道大学大学院理学研究院
10. 東海大学情報技術センター
taguchi@rikkyo.ac.jp

その後、2016年5月及び7~8月にも「弓形構造」が発生しましたが、その弓形の形状と発生場所がゆっくり回転する金星固体に固定されているという共通点がありました。しかも、「弓形構造」の中心位置はすべて地表面の高地に対応しているのです。また、UVIで撮られた紫外画像にもよく目をこらすと「弓形構造」

が認められました。

理論的考察及び計算機シミュレーションによって、「弓形構造」は赤道上地表付近で発生した重力波がおよそ高度65 kmの雲層上端まで伝播し引き起こした温度変動であることが推測されています。これまで、観測的には東西風の加減速分布や紫外吸収物質の分布から間接的に重力波の存在が予想されていましたが、今回のように重力波が引き起こす波頭が一目瞭然に画像としてとらえられたのは嚆矢となります。

では、一体どのようにして重力波は励起されているのでしょうか？—— *The answer is blowin' in the wind.*

系外惑星「遠い世界の物語」その8 ～中心星近傍の惑星を知る～

堀 安範^{1,2}

(要旨) 中心星近傍を周回する super-Earth は普遍的かつ豊富に存在することがわかってきた。短周期 super-Earth は剥き出しの岩石天体から大気を保持する天体まで多種多様な姿をしている。バラエティに富んだ短周期 super-Earth は一体どこで、どのようにして誕生したのだろうか。従来、惑星の質量および軌道要素の観点で議論される短周期 super-Earth の起源に対して、本稿では惑星大気という視点でその場形成および惑星移動の可能性を再検討する。

1. 中心星近傍のsuper-Earth

太陽系には火星軌道より内側に地球より大きな天体は存在しない。しかし、太陽系外に目を向けてみると、太陽系が特異な存在であるかのように、公転周期が数日程度の hot Jupiter や短周期 super-Earth が当然のように存在する。地上からの高精度視線速度測定および Kepler 宇宙望遠鏡による惑星探査から、hot Jupiter の存在頻度は恒星タイプに依らず、数%以下[1]なのに対して、太陽系近傍の太陽型星の少なくとも10%程度は短周期 super-Earth を保有することが分かってきた[2]。

ありふれた存在ともいえる短周期 super-Earth の発見は我々に1つの疑問を投げかける。これらの惑星は中心星近傍のその場で形成したのか、あるいは外側で形成した後に内側まで移動を経験したのか。この答えのカギを握るのが惑星の全体組成、すなわち惑星内部の岩石・鉄/水比や大気量である。

質量と半径から推定される平均密度によると、大気あるいは水といった揮発性成分をある程度、保持すると考えないと説明が付かないような短周期 super-Earth が多数見られる(図1参照)。これを裏付けるよ

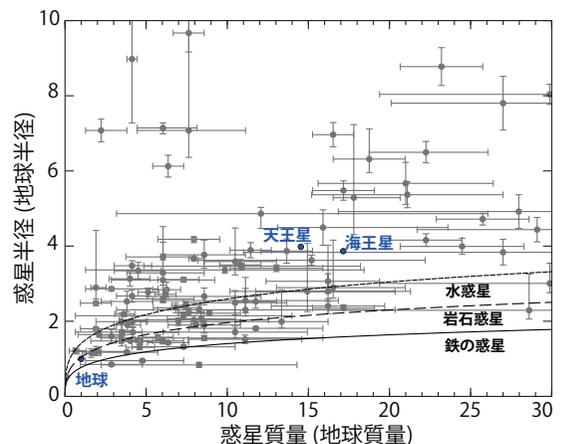


図1：短周期super-Earthの質量-半径関係。

うに、トランジット時の大気の透過光スペクトル観測から、これまでに8個(GJ1214b, GJ3470b, HAT-P-11b, GJ436b, HD97658b, 55 Cancri e, TRAPPIST-1b & c)の短周期 super-Earth で大気が存在が間接的に確認されている。観測とモデルスペクトルとの比較から予想される彼らの大気組成は、太陽系の地球型惑星とは異なり、水蒸気のような揮発性分子に富む大気あるいは水素主体の超還元的な大気を持つ可能性が高い。したがって、ベールに包まれた短周期 super-Earth がどのような経緯で誕生したかを紐解く一つの手がかりは、こうした奇異かつ適度な大気存在にあるといえる。

1. 自然科学研究機構 アストロバイオロジーセンター
2. 国立天文台 太陽系外惑星探査プロジェクト室
yasunori.hori@nao.ac.jp

もし適度な大気を持つ短周期super-Earthがその場で誕生したとすれば、中心星近傍の高温環境下で短周期super-Earthがそもそも大気を獲得できるのか。そして、もし大気を獲得できたとして、天体衝突や中心星からの届く高エネルギー粒子や強烈な紫外線およびX線照射に晒された状況下で長期間に渡って、大気を保持可能かどうか。本稿では、これらの視点に立って、中心星近傍のsuper-Earthの起源を考察していく。

2. 短周期super-Earthの大気

2.1 大気の獲得

惑星が最終的に木星や土星のような分厚い大気に覆われたガス惑星になるか、薄い大気を持つ地球型惑星になるかの命運を分けた一因は、コア(中心核)質量の違いとされている。コア質量が臨界値(典型的には10倍の地球質量[3])に達すると、暴走的に周囲の円盤ガスを降着する[4]。しかし、この臨界値は惑星の形成環境、すなわち円盤ガスの温度や密度、オパシティに依存する。加えて、もし短周期super-Earthが形成後、大気流失を経験していないとすれば、彼らはガス惑星になれなかったが、多すぎない、適度な大気量(=惑星質量の10%以下)は獲得したということになる。

それでは実際に、短周期super-Earthはその場でどれくらいの円盤ガス(水素リッチな大気)を獲得できるのだろうか。図2は太陽型星から様々な距離(0.1AU, 0.25AU, 2AU)に置かれた岩石コアが獲得する円盤ガス起源の大気量を示す。原始惑星系円盤は中心星への降着、光蒸発そして円盤風といった複合的プロセスを経て散逸する。そこで、原始惑星系円盤の典型的な寿命を100万年と想定して、円盤ガス密度が時間に対して指数関数的に減衰するとした。そして、短周期super-Earthは形成の最終段階に巨大衝突を経験した可能性を考慮し、惑星は初期に任意の高エントロピー状態にあるとした。通常、惑星は冷却過程で初期の情報を忘失するため、任意の初期状態の選択は最終的な熱進化の結果に強く影響しない。最後に、地球と同様に、岩石コア内部には放射性熱源が存在する。コンドライトで生じる放射壊変熱を模擬した熱源束を岩石コア表面に与えた(これらの計算方法や条件の詳細は[5]を参照)。

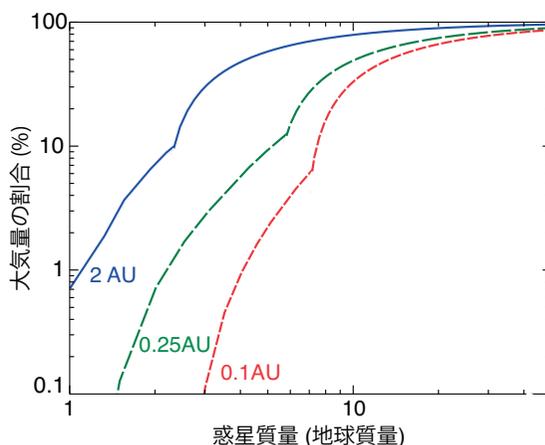


図2: 短周期super-Earthがその場で獲得する円盤ガス起源の大気量。

0.1 AU以内の高温環境でも、数倍の地球質量以上の岩石コアは(惑星質量の)1 wt%以上の水素リッチな大気を獲得できる。0.1 AU以遠の低温環境下になれば、同じ質量を持つ岩石コア質量でもより多くの大気量を獲得できる。いずれの軌道長半径の結果でも、あるコア質量を境に大気量が急激に増加する。これはガス惑星の形成時に起きる暴走ガス捕獲段階に突入するためである。この境界は大気量が概ね、10 wt%の時に位置している。言い換えると、内部構造モデルから示唆される天王星や海王星のような10-20 wt%の大気量を持つ短周期super-Earthは作りにくい。なぜなら、円盤ガスの流入は止まらず、彼らはすべからず、分厚い大気を持つ惑星になってしまう。逆に、10 wt%以下の水素リッチな大気であれば、短周期super-Earthはその場では周囲の円盤ガスから獲得可能である。

2.2 大気の散逸

さて、前小節では短周期super-Earthがその場で獲得する円盤ガス由来の水素リッチな大気について見てきた。それでは、こうした短周期super-Earthが中心星近傍領域の環境で水素リッチな大気を長期間、維持できるのだろうか。惑星から大気が流失する代表的な機構として、中心星からの紫外線やX線照射による加熱やJeans散逸(熱的散逸)、恒星風やコロナ質量放出に伴う高エネルギー粒子によるスパッタリング(非熱的散逸)、磁気流体波動による質量放出、天体衝突が挙げられる。

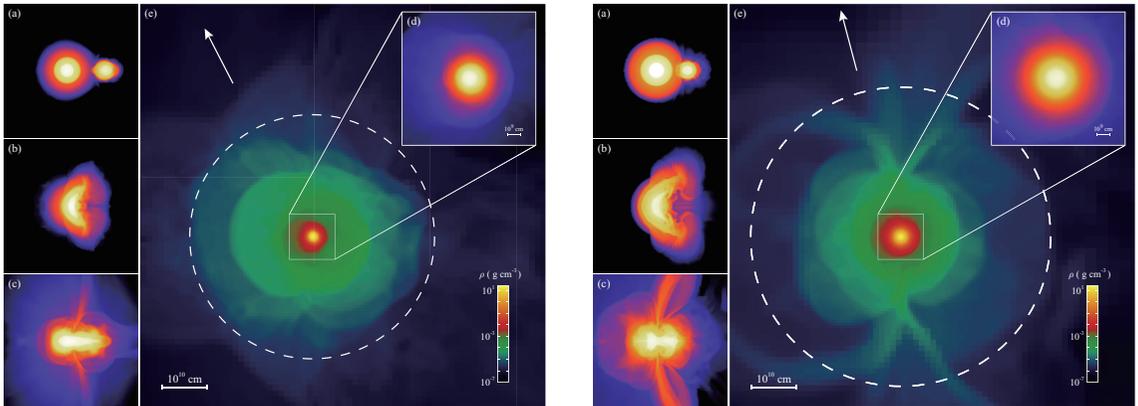


図3：太陽周りで0.1 AUに存在する短周期スーパーアースの3次元流体シミュレーション。(左図)4.3倍の地球質量に低速度の正面衝突(脱出速度)させた場合の密度の等高図：a)衝突直前，b)衝突直後，c)衝突から1.56時間後，d)衝突から18時間後。(右図)10倍の地球質量に高速度の正面衝突(3倍の脱出速度)させた場合：a)衝突開始，b)衝突から15分後，c)衝突から1.5時間後，d)衝突から21.5時間後。白破線は惑星のヒル半径，白矢印は中心星の方向を示している。いずれも目標天体は7.5 wt%のH/He大気を持ち，衝突天体は岩石天体。

短周期惑星に関しては，Jeans 散逸よりも流体力学的散逸が支配的な熱的散逸機構となる。中心星からの強烈な紫外線やX線照射による上層大気の流体力学的散逸については精力的に調べられている。ざっくりとは，0.1AU以遠にある短周期super-Earthは壊滅的な大気損失を免れる[6]。また，恒星風やコロナ質量放出と大気の相互作用の影響は惑星の固有磁場の強度にも依存するが，一般的に大気非熱的散逸は熱的散逸よりも影響は小さい。一方，磁気流体波動による質量放出は惑星自身の磁場と大気の乱流が駆動源となるため，必ずしも中心星からの距離と大気散逸は相関しない。さらに，この機構による質量散逸率は流体力学的散逸のケースと同程度になる可能性がある[7]。

最後に，天体衝突に伴う大気損失の影響はどうだろうか。惑星形成の最終段階では，火星サイズ以上の天体衝突(以下，巨大衝突)が繰り返し起きたと考えられている。こうした観点から，短周期super-Earthも同様に，巨大衝突を経験した可能性が高い。そこで，水素リッチな大気を持つ短周期super-Earthへの巨大衝突の影響を見てみる。図3は水素リッチな大気を持つ0.1 AUの短周期super-Earthに地球質量の岩石天体を衝突させた時の3次元流体シミュレーションの結果例である[8]。

短周期super-Earthが高速度衝突を経験する場合，衝撃波伝播で圧縮加熱された大気は惑星の重力圏以遠にまで拡がり，大部分の大気(～80%)が惑星から流

失する。それと同時に，惑星内部は高温且つ一様に混合された状態になる。一方，低速度衝突の場合には惑星の重力圏に滞留する大気量(～70%)は多く，惑星内部は非一様な組成分布となる。組成分布の非一様性は対流による熱輸送を障害し，非効率な熱輸送機構(例えば，二重拡散対流)が発達する可能性が高い。衝突条件の違いは惑星のその後の熱進化に対しても大きな影響を及ぼす。いずれにしても，天体衝突を経験したsuper-Earthはかなりの大気量を失うことになる。

3. 短周期super-Earthの起源

前節ではその場形成の描像に沿って，短周期super-Earthによる大気の獲得と損失を見てきた。ここで，一旦，整理すると，0.1 AU以内の短周期super-Earthはそもそも光蒸発で大気を失うとともに，獲得できる円盤ガス起源の大気量も少ない。一方で，0.1 AU以遠のsuper-Earthに関しては，光蒸発では大気を失いにくいだが，巨大衝突や磁気流体波動による質量放出で多かれ少なかれ大気を失う。ガス円盤から大気を獲得しやすい点を考慮すると，場合に依っては適度な水素リッチな大気量は実現されるかもしれない。しかし，これまでに大気存在が示唆される短周期super-Earthのすべては0.1 AUよりも遥かに内側領域に存在する。その場形成の立場だけで，彼らの多すぎない大気量が無矛盾に説明しようとする微調整あるいは

工夫が必要になる。

それでは、外側領域で十分に大きなコアまで成長した後、大気をまとい(ながら)、最終的に現在の位置に現在の大気量を持った短周期super-Earthが誕生したと考えればよいかという問題はそれほど単純ではない。外側の低温領域では、super-Earthのような大きなコアは多すぎない大気量ではなく、多すぎる分厚い大気をまとう可能性が高い。さらに、惑星移動説の場合もその場形成と同様、大気散逸は必然的に起きる。また、少なくとも複数惑星系で平均運動共鳴の関係にあれば、惑星移動の傍証となるが、残念ながら、適度な大気を持つ、いずれの短周期super-Earthにもこうした尽数関係が見られない。短周期super-Earthが過去に惑星移動した可能性は排除されないが、決定打に欠ける。こうした現状を打開する手立てとして、短周期super-Earthの内部組成を知ることができれば、例えば氷主体の惑星か否か、彼らの形成環境を制約できる。実際にGJ 1214bで試みられたような、潮汐変形を左右するLove数の推定[9]は今後の有効な手段といえる。

4. 今後の展望

Kepler宇宙望遠鏡の活躍で短周期super-Earthの発見数は飛躍的に増加した。しかし、それらの多くは非常に暗く、地上からフォローアップ観測するのは困難である。そのため、大気の有無や大気組成の推定といった惑星の特徴付けに成功した短周期super-Earthはこれまでにわずか8例しかない。今後、2017年に打上げ予定の全天惑星探査を目指したTESSによって、地上望遠鏡からフォローアップ観測可能な短周期super-Earthが多数発見されると期待される。それによって、8例から見えていた短周期super-Earthの姿が一般的なsuper-Earthの特徴を表しているかどうか明らかになるはずである。同時に、太陽系の地球型惑星は特別な存在なのかに対する答えも得られるはずである。そして、太陽系外の短周期super-Earthの真の姿を通して、混沌とした状態の惑星移動を含む惑星形成論が大きく進展することを期待する。

謝辞

今回、本稿の執筆機会をくださり、原稿を注意深く読んでいただいた成田憲保氏に感謝いたします。また、本稿で紹介した研究に携わっていただいた共同研究者の方々にこの場を借りて、感謝いたします。本研究の一部は日本学術振興会からの助成を受けております。

参考文献

- [1] Howard, A. W. et al., 2010, Nature 330, 653.
- [2] Petigura, E. A. et al., 2013, PNAS 110 (48), 19273.
- [3] Ikoma, M. et al., 2000, ApJ 537, 1013.
- [4] Pollack, J. B. et al., 1996, Icarus 124, 62.
- [5] Ikoma, M. and Hori, Y., 2012, ApJ 753, 66.
- [6] Owen, J. E. and Wu, Y., 2013, ApJ 775, 105.
- [7] Tanaka, Y. A. et al., 2014, ApJ 792, 18.
- [8] Liu, S-F. et al., 2015, ApJ 812, 164.
- [9] Nettelmann, N. et al., 2011, ApJ 733, 2.

遊星百景 その6

～月面クレーター中央丘の地質～

大竹 真紀子¹

今回は月面のクレーター中央丘に見られる、複雑で興味深い地質について紹介します。クレーターは月面だけでなく、地球、火星、小惑星など、どの固体天体の表層にも存在するわけですが、月面のクレーターは、これまでの月探査により非常に高い空間分解能のモノクロ画像や分光画像、連続分光データが得られており、周辺に見られる地形や地質についての研究も進んでいて、固体天体のクレーター形成過程を考える上での基礎情報を与えています。

月の場合、直径が約30 km以上のクレーターの中央に丘ができていて、これを中央丘と呼びます。中央丘は、元は地下にあった岩石がクレーターの形成に伴って隆起し、表層に顔を出したもので、これを調べることで地下の地層を覗くことができることから、地殻の窓と言われます。私は、月の地殻の化学組成を調べるためにこれまでたくさんの中央丘の解析をしてきましたが、その中で、高い空間分解能で観測することによって、幾つかの中央丘はとても複雑で興味深い地質を持っていることを知りました。例として、アリストルコスクレーター(直径40 km)の中央丘について見てみましょう(図1)。このクレーターは溶岩が冷え固まってできた海の中にありますが、中央丘には、鉄の含有量が非常に少なく(1 wt%以下)、ほぼ純粋に斜長石のみから構成される岩石と、鉄の含有量がそれより多く(最大8 wt%)、輝石が多く含まれる岩石の2種が存在します。また、これら2種の岩石の境目は非常に明瞭です。海の中に形成したクレーターにも関わらず、中央丘にほぼ斜長石から成る高地地殻と同種の岩相が存在し、またそれ以外にもう1種の、輝石を多く含む異なる岩相がこのように隣接して存在する理由は、もともと海の溶岩層の下には高地地殻が存在し、その地殻

の中に輝石が多く含まれる貫入岩があったところに天体が衝突し、海の溶岩層を貫いてその下にある地殻と貫入岩の2層が隆起し、たまたまその境目が見えていると考えることもできます。一方、最近の研究では衝突によって形成した溶融物が中央丘の上部や一部を覆っている例が報告されており[1]、またこの溶融物は中央丘本体とは大きく異なる組成であることが知られているため、アリストルコスクレーターの中央丘に見られる輝石が多く含まれる層は、このような衝突溶融物であると考えられることもでき、まだ決着はついていません。どちらでも大きな違いはないのでは、と思われるかもしれませんが、貫入岩であれば、高地地殻の平均組成はこの輝石が多く含まれる岩相も含めて考える必要がありますし、溶融物であれば地殻では無く、元は表層にあった物質(この場所では溶岩や溶岩が破碎された礫など)であり、地殻に含めるのは間違いということになります。これまで中央丘に見える岩相のすべてが地下に存在する地殻の一部だと仮定していた、地殻の組成推定手法そのものがおかしい可能性もあるのです。

これらの説のうちアリストルコスクレーターでどちらが正しいかを知るには、今後の研究を待つ必要がありますが、どちらにしても、高い空間分解能で観測することが複雑で不思議な地形・地質の発見をもたらし、それが月惑星科学にとって重要な情報とつながっている、という点が中央丘の地質の面白さだと思います。

参考文献

- [1] Osinski, G. R. et al., 2011, EPSL 310, 167.
- [2] Robinson, M. S. et al., 2010, Space Science Reviews, 150, 81.

1. 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所
ohtake.makiko@jaxa.jp

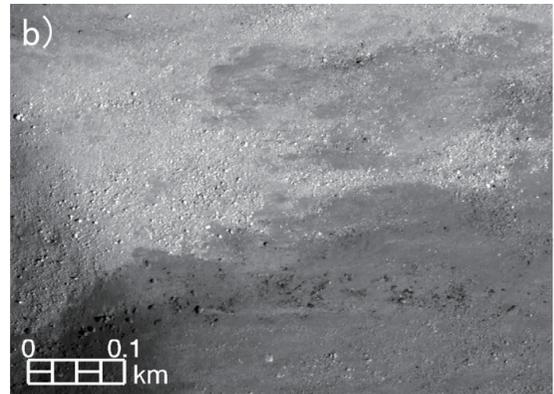
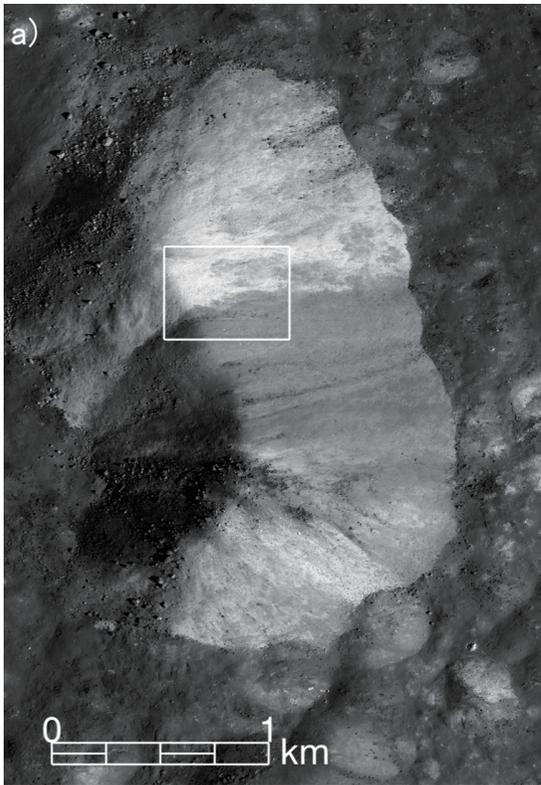


図1：アリストアルコスクレーターの中央丘。 Lunar Reconnaissance Orbiter搭載 Narrow Angle Cameraの画像(<http://wms.lroc.asu.edu/lroc>; [2])。元画像の空間分解能は50cm/pixel。

a) 中央丘全体。中央に尾根があり三角柱を横倒しにしたような形状をしている。上半分の明るい領域は鉄がほとんど含まれない純粋な斜長岩，下半分は鉄に富み輝石を含む別種の岩石。

b) a)中央付近白四角部の拡大。2つの層の境界付近。画面のほとんどは右方向へ傾斜している。

Planet² RESCEUサマースクール2016参加報告

鎌田 俊一¹, 巽 瑛理², 平田 直之³, 吉田 辰哉⁴, 小玉 貴則²

1. サマースクールの概要

2016年8月24日から8月26日までの3日間、Planet² RESCEUサマースクールに参加しました。このサマースクールは、毎年、東京大学大学院理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター (RESCEU) が主催してきたものです。RESCEUは天文学の研究者を中心に構成される初期宇宙について研究を行うグループですが、近年の太陽系小天体や系外惑星への興味などが共通することから、今年は惑星科学分野と共同開催のサマースクールが企画されました。つまり、宇宙論から惑星探査まで幅広いメンバーが集まるサマースクールでした。本年度より始まった日本学術振興会の先端研究拠点事業 (JSPS Core-to-Core Program) 「惑星科学国際研究ネットワークの構築」(拠点名称は“Planet²”という)により、海外の連携拠点機関から第一線の研究者が来日し、それぞれの専門分野の講義が行われました。会場は岐阜県高山市にある「飛騨高山温泉・臥龍の郷」の別館にある大広間でした。本サマースクールは前半に惑星科学の話題が集中しており、我々はこちらにのみ参加しました。我々の参加しなかった27日から28日にかけては、LIGOによる検出成功に沸く「重力波」など宇宙論に関わる講義や発表が行われたようです。

2. サマースクールのプログラムと感想

表1は我々の参加したパートのプログラムです。まず始めに東大の須藤教授 (RESCEUセンター長) から挨拶があり、続いて東大の杉田教授 (Planet²代表) から JSPS Core-to-Core Program について、神戸大 CPS やニース天文台など国内外の惑星科学拠点との連携関係、および本サマースクールの趣旨が説明されました。その後は系外惑星に関する講義が2つありました。まず Université de Genève の Ehrenreich 博士から系外惑星の観測的研究の歴史と現状、並びに将来の展望について (図1)、続いて Harvard University の Li 博士から系外惑星と恒星の間の潮汐作用に焦点を当てた理論研究について話題提供がなされました。講義後にはポスター発表が行われましたが、ここで巽ははやぶさの可視画像データを用いた、宇宙風化度のローカルな変化について発表を行いました。DLR の Schröder 博士は Dawn や Rosetta のカメラ開発をされており、はやぶさおよびはやぶさ2のカメラについて興味をもっておられるようでした。また、カメラ開発の苦労話なども伺うこともでき、カメラ開発の奥の深さを感じました (完璧なカメラはないという意味で)。

2日目は3件の講義に加えて、7件の口頭発表が行われました。最初の講義は、JHUAPL の Barnouin 博士による OSIRIS-REx についてでした。同探査機打ち上げ直前ということもあり、同ミッションのリード・サイエンティストである Barnouin 博士の来日は残念ながら叶いませんでしたが、Skype越しに予定通り90分間講義が行われました。その後3件の口頭発表がありましたが、そこで鎌田は衛星系における潮汐相互作用に関する最新の知見について発表しました。発表後

1. 北海道大学創成研究機構
2. 東京大学大学院理学系研究科
3. 神戸大学大学院理学研究科
4. 北海道大学大学院理学院
kamata@sci.hokudai.ac.jp

表1: RESCEUサマースクール前半のプログラム。タイトル前の(L)は講義を示す。

August 24

14:30 - 14:35	Yasushi Suto	Welcome address
14:35 - 14:45	Seiji Sugita	Core-to-Core Planet2
14:45 - 16:15	David Ehrenreich	(L) Detection and characterization of exoplanets
16:30 - 18:00	Gonjie Li	(L) Obliquity Variations of Stars and Planets
18:00 - 19:00	Poster viewing	
19:00 -	Dinner	

August 25

7:00 - 9:00	Breakfast	
9:00 - 10:30	Olivier Barnouin	(L) Asteroid sample-return mission OSIRIS-REx and its perspectives for Solar-System evolution
10:40 - 11:00	Yui Kawashima	Theoretical transmission spectra of transiting exoplanets with hazy atmospheres
11:00 - 11:20	Shunichi Kamata	Tidal interaction of satellite systems
11:20 - 11:40	Hikaru Yabuta	Dynamics observation of prebiotic microspheres through their chemical and morphological distributions: Attempt to define "Planetary Life"
11:40 - 13:00	Lunch	
13:00 - 14:30	Stefan Schröder	(L) An overview for Rosetta mission and cameras for ESA's three landers (Huygens, Philae, and MASCOT)
14:40 - 15:00	Moe Matsuoka	Space weathering simulation experiments of the Murchison CM2 chondrite with low-energy pulse laser irradiation
15:00 - 15:20	Naoyuki Hirata	Small satellites of Saturn
15:40 - 17:10	Seth Jacobson	(L) Theory of Solar System formation
17:20 - 17:40	Masataka Aizawa	Searching for exoplanetary rings via transit photometry
17:40 - 18:00	Gen Chiaki	Numerical studies of star formation in metal-poor clouds
18:00 - 19:00	Poster viewing	
19:00 -	Dinner	

August 26

7:00 - 9:00	Breakfast	
9:00 - 10:30	Tristan Guillot	(L) Interiors and atmospheres of giant planets: Present status and perspectives with Juno
10:45 - 12:15	Salvatore Vitale	(L) Characterization of compact objects with gravitational wave detections

には系外惑星系における潮汐に興味を持っておられる須藤教授に声をかけていただき、昼食をとる手が遅くなるほど話に花が咲きました。午後の講義はSchröder博士からCassiniのHuygensに始まりRosettaの最新報告に加え、はやぶさ2に搭載されているMASCOTのカメラまで、迫力のある画像の数々を交えて講義がなされました。その後には、Obs. Côte d'AzurのJacobson博士からGrand Tackモデルに基づく太陽系初期進化の最近の描像が示されました。また口頭発表も4件あり、そこで平田からは土星小型衛星の観測的

研究について話題提供をしました。発表後にはSchröder博士から声をかけていただき、小天体の表層進化について議論に花が咲きました。

3日目午前は2つの講義がありました。まず始めにObs. Côte d'AzurのGuillot博士から木星や土星といったガス惑星における地震学とJOVIAL計画について話題提供がなされました。最後の講義は、MITでLIGO計画に関わっているSalvatore Vitale博士による、重力波の基礎についてでした。これは文字通り「講義」で、タブレット端末を用いて重力波方程式の導出する

過程（手書き！）がスクリーン上で展開されました。惑星科学パート最後の挨拶では、杉田教授から次回の国際シンポジウムの予告（南フランスのVillefranche-sur-Merで開催予定）と、学生と若手研究者に向けて、JSPS Core-to-Core Programを活用した海外での研究を勧める旨の激励の言葉がありました。

上述のように本サマースクールでの講義の話題は、小天体探査の現状と将来、巨大ガス惑星や系外惑星の観測と理論、さらには重力波と非常に幅広く、宇宙惑星科学の最前線を一挙に俯瞰できる大変貴重な機会でした。以下に参加者の感想をまとめました。

鎌田：どの講義も口頭・ポスター発表も興味深かったのですが、特にGuillot博士による巨大ガス惑星における地震学確立に向けた話が、理論と観測が手を取り合って前進している様子が手に取るように分かる構成になっていたため、聞き入ってしまいました。

異：系外惑星の観測は日を追うごとに知見が増えている印象でしたが、自分ではなかなかまとめることができなかったので、今回のEhrenreich博士の講義は時代背景を踏まえたもので系外惑星への理解が向上しました。また、多くの講師の方々が観測結果の紹介に時間を割いておられたことがとても印象的で、自身の

今後の研究指針にも反映させたいと思いました。

平田：特に系外惑星分野の発展が著しい点が印象的でした。国内外の研究者が競って観測・理論両面から太陽系形成の一般化に取り組んでいることに感銘を受けました。

吉田：惑星探査に憧れを抱いていたため、探査に携わる方々から生の話を聞いたことに非常に感動しました。また、学生の先輩方が堂々と発表する姿を見て、自分も一層頑張らねばと身の引き締まる思いになりました。惑星科学を志すたくさんの友人たちと出会えたことも大きな収穫となりました。

小玉：目まぐるしく発展していく太陽系内・系外の研究の素晴らしい講義を受け、議論を通して自分の研究の位置を再確認できました。加えて、セミナーのあとの“雑談”を通して、現在の科学を駆動している研究者たちと知り合えたことは、これからの私の研究にとって、大きなメリットになると思います。

最後に、本サマースクールへの参加、並びに発表の機会をくださった東大の杉田教授に感謝申し上げます。また、本サマースクールで講義をされた皆様、並びに東大の生駒准教授をはじめ、運営に関わられた皆様に感謝いたします。



図1：Ehrenreich博士による最初の講義の様子。

「プレソーラ粒子から探る星間ダストの進化と太陽系の起源」研究会報告

脇田 茂¹, 野沢 貴也²

プレソーラ粒子とは一体何であろうか?そんな疑問への答えを探し求める研究者が集う「プレソーラ粒子から探る星間ダストの進化と太陽系の起源」研究会が2016年9月26日と27日に国立天文台三鷹キャンパスにて開催された。プレソーラ粒子とは、始原的な隕石中で発見されている主にサブマイクロメートルサイズの固体微粒子である。その同位体組成の特徴から、太陽系形成以前に太陽以外の星で形成されたと考えられている。彼らの化学的性質は星での元素合成過程、物理的性質は星間空間中での進化過程や微惑星中での変性過程などを理解する上で重要な記録を保持している。そこで、太陽系外物質である「プレソーラ粒子」の物理的・化学的性質に着目して、その起源と

進化を探ることが本研究会の目的であった。

今回の研究会は2日間という短い期間ではあったが、非常に密度の濃い内容であった。プレソーラ粒子とはどのようなものであるかという講演からの幕開けとなり、超新星における元素合成や地上実験室における隕石の分析などの最新の成果から、星間ダスト進化の理論や宇宙実験室での速報までを含む実に幅広い内容が発表された。本研究会のプログラムの詳細はウェブページを参照していただきたい [<http://th.nao.ac.jp/meeting/dta2016b/>](なお、講演資料のダウンロードは参加者のみに限っていることをご理解いただきたい)。研究会の目的の一つには、異分野間の交流が挙げられており、講演中にも質疑応答や議論が行える形



図1: 参加者の集合写真.

1. 国立天文台 天文シミュレーションプロジェクト
2. 国立天文台 理論研究部
shigeru@cfca.jp



図2：総括に聞き入る参加者たち。

式としていた。異なる分野の研究者の発表（例えば、隕石を分析する研究者からみた超新星での元素合成の研究者の発表など）が何よりも聞きたい情報であったり驚くような最新の情報があつたりしたためか、講演時間内にはとても収まり切らないほどに議論が盛り上がった。議長の方々は議論を優先させるべきか、時間を優先させるべきか苦勞されたことかと思う（議論を優先させて初日の昼食時間が短くなってしまったことをこっそりお詫びいたします）。星周で形成された特定の同位体組成を持つダスト、星間で漂っている間に破壊を受けたり成長したりするダスト、そして隕石中に含まれているプレソーラー粒子。これらを一連の流れとして理解する上で欠かせない最終段階のプロセスの一つ、原始太陽系星雲の進化に関する講演で本研究会は幕を閉じた。

本研究会に参加したお陰で、現状でのプレソーラー粒子にまつわる研究への理解は大いに深まった。そして深く知ってしまった分、星でのダスト形成からプレソーラー粒子として発見されるまでの間に、多くの情報と謎が取り込まれているということに気付かされてしまった。だからこそ、本研究会をきっかけとして、数多くの情報を隠し持っているプレソーラー粒子の素性を暴くような研究がさらに発展し、星間ダスト進化や太陽系形成史の解明が進むことを期待している。そして、我々もプレソーラー粒子に係る研究分野を盛り上げていきたい。最後になったが、忙しい中に関わらず講演を引き受けて下さった講演者の方々と議論を盛

り上げて下さった参加者の皆様に御礼を申し上げたい [図1, 2]。また、本研究会は国立天文台理論研究部主催の第5回目のシンポジウムであり、開催にあたっては色々支援して頂いたことをこの場を借りて感謝したい。

2016年度惑星科学フロンティアセミナー参加報告

大村 知美¹

今年の惑星科学フロンティアセミナーは、9月5日から8日にかけて北海道勇払郡むかわ町の穂別町民センターにて行われました(図1)。夏の北海道ということで涼しい、さわやかな気候を期待して神戸を出発しましたが、残念ながら天気はあまり良いとはいえず寒いくらいでした。これはこれでさすが北海道であるなと感じました。しかしながら民宿の方々、お店の方々など、町民の方々には非常に良くしていただきました。特に朝晩の食事はものすごいボリュームで、食べきれないほどの量の美味しい朝食にはじまり、夜も次から次へとイクラやシシャモ、ジンギスカン、朝に採れたばかりのトウモロコシなど、大変なおもてなしをして頂きました。参加者の皆さんもとてもフレンドリーな方ばかりで、とても楽しい4日間でした。

ここからはセミナーの内容について紹介させていただきます。今回のセミナーでは茨城大理学部の百瀬宗武氏を講師としてお招きして、”原始惑星系円盤観測

(ALMAを中心に)：現状と将来の展望”というテーマで2日間の講演をして頂きました(図2)。電波望遠鏡による観測技術は近年目ざましい発展を遂げており、2011年に運用が開始されたALMA望遠鏡では円盤の内部構造がはっきりと観察できるまでになっています。このことで、円盤進化に関する研究のさらなる発展が期待されています。

講義の内容は、まず導入として太陽系の古典的起源論にはじまり、観測データを理解する上で必要な理論についての説明、そしてALMA以前の研究の重要な結果についてのお話があり、最後にALMAの紹介とその主たる成果の概観について、また遷移円盤に関する最新の研究動向についても紹介していただきました。具体的な章だては以下の通りです。1. 太陽系の古典的起源論・輻射輸送の基礎・原始惑星系ガス円盤SEDの簡単解析、2. 星・惑星系形成過程の概要(基礎的な理解、関連する観測・数値計算結果、円盤形成)。



図1：穂別町民センター前での参加者集合写真。



図2：セミナーの様子。写真奥が講演中の百瀬氏。

1. 神戸大学大学院理学研究科
tomura@stu.kobe-u.ac.jp

3. 星間物質の概観と分子雲の主要な性質, 4. ダスト・分子ガスと輻射との相互作用, 5. 原始惑星系円盤の構造と進化～ ALMA 以前の重要な結果～, 6. ALMA の紹介と主たる成果の概観, および HL Tau リング構造の起源, TW Hya との比較, 遷移円盤に関する最新の研究動向

詳しい内容についてはここでは述べませんが(資料がいずれホームページで公開されるはずですので興味のある方はそちらをご参照ください), 全体的にどの章においても, 内容を理解する上で必要な基本的な内容からはじまり, 実際のデータと理論がどのように対応しているか丁寧に解説してくださいました。私は観測分野には馴染みが薄かったのですが, そういった者もスムーズに理解していけるような講義であったと思います。また, 講義の中で2000年頃からALMAにかけての円盤観測の画像をまとめて見てみると, ALMAの凄さを改めて感じさせられました。実際講義の終盤ではALMAによって得られるようになった観測成果を用いた研究についても多数紹介して頂き, この他にも様々な発見が生まれていくのをこれから見られるのだなあと思いきなしみな気持ちになりました。

お忙しい中, 丸2日間にわたる講義を行っていただいた百瀬宗武氏に改めて感謝いたします。また, セミナーの企画・運営をしてくださった実行委員会の皆様にも感謝いたします。そして, 私は参加費の補助を受けてこのセミナーに参加しましたので, 日本惑星科学会にも感謝いたします。惑星科学フロンティアセミナーは第一人者の講義を直接聴くことができ, さらに質問もしやすい雰囲気, 非常に活気のあるものです。自分の専門分野とは離れたテーマであっても, 講義を通して改めて自分の研究の立ち位置について考える機会になるかと思えます。また, セミナー以外の部分でも様々な魅力にあふれたものです。この参加報告から来年以降のセミナーへの参加に興味を持っていただければ幸いです。

2016年日本惑星科学会秋季講演会報告

2016年日本惑星科学会秋季講演会実行委員長(岡山LOC) はしもと じょーじ¹

2016年の日本惑星科学会秋季講演会は、2016年9月12日(月)～14日(水)の3日間、ノートルダム清心女子大学カリタスホールを会場にして実施されました。参加者数と発表件数はそれぞれ171人(事前参加申込108, 当日参加63)と143件(口頭100件, ポスター50件)で、前年と比べると参加者数は約2割減、発表件数はほぼ前年並でした。プログラムと予稿集の作成は行事部会がおこない、一般の口頭発表は1件あたり9分(質疑応答1分を含む)に設定されました。

会場となったノートルダム清心女子大学は秋季講演会を実施するには十分すぎる素晴らしい会場でした。会場を提供していただいたノートルダム清心女子大学と会場を借りる手続きなどをおこなっていただいた水野博会員に、お礼申し上げます。男性用トイレの数が不足しているのではとの懸念はありましたが、大きな混雑はなかったと思います。また、ポスター会場に自由に使うことのできる机と椅子があったことは、いろいろな打ち合わせをおこなうのに便利であったようです。

懇親会は浦川聖太郎会員のこだわりで、大学内の部屋を使用して会場費を節約し、食べ物と酒に重点がおかれました。懇親会の評判がよかったとしたら、それは浦川会員のお手柄であります。懇親会では、フットサル惑星科学杯の表彰式もおこなわれ、優勝チームには会長から賞状が授与されました。

本講演会は公益財団法人岡山工学振興会と公益社団法人おかやま観光コンベンション協会から補助金の交付を受けました。補助金の申請にあたっては、奥村真一郎会員、二村徳安会員、大西将徳会員が書類作成を

おこないました。本講演会を開催するにあたりご協力いただいた、秋季講演会実行委員会(岡山LOC)、行事部会、学生アルバイトの皆様にお礼申し上げます。

●秋季講演会

日程：2016年9月12(月)～9月14日(水)

場所：ノートルダム清心女子大学

〒700-0013 岡山市北区伊福町2丁目16-9

口頭発表：カリタスホール2階

ポスター発表：カリタスホール1階

懇親会：ヨゼフホール1階ラウンジ

講演数：口頭100件、ポスター50件

(最優秀研究者賞受賞講演および最優秀発表賞選考を含む)

●プログラム概要

○9月12日(月)

08:30 開場・受付

09:00 特別セッション 最優秀発表賞選考

10:55 学生・PDポスターフラッシュ1

11:10 ポスターセッション1 コアタイム

12:10 昼食

13:30 口頭発表セッション1 系外惑星

14:10 口頭発表セッション2 原始惑星系円盤

16:00 口頭発表セッション3 惑星形成I

17:22 最優秀研究者 受賞講演1

○9月13日(火)

08:30 開場・受付

09:00 口頭発表セッション4 惑星形成II

1. 岡山大学大学院自然科学研究科
aloc-m1@wakusei.jp

- 10:30 学生・PDポスターフラッシュ2
 10:45 ポスターセッション2 コアタイム
 11:45 昼食
 13:00 口頭発表セッション5 アストロバイオロジー
 ・火星・金星
 14:15 口頭発表セッション6 衛星・小天体
 16:10 総会
 17:10 最優秀研究者 受賞講演2
 18:30 懇親会(ヨゼフホール)
 21:00 完全退出

○9月14日(水)

- 08:30 開場・受付
 09:00 口頭発表セッション7 衝突・クレーター
 10:40 口頭発表セッション8 月
 11:52 昼食
 13:20 口頭発表セッション9 探査I
 15:37 口頭発表セッション10 探査II
 16:51 閉会

●会場アクセス概略



●口頭発表プログラム

口頭発表の講演時間は特別セッション15分(3分間の質疑時間含む)、一般セッション9分(1分間の質疑時間含む)です。下記では講演開始時刻、講演番号、第一著者名、和文表題を掲載しています。

○9月12日

- 08:30-08:55 受付(8時30分より開場)
 08:55-09:00 開催挨拶, 連絡事項

特別セッション：最優秀発表賞選考

(座長：大竹真紀子)

- 09:00 S01 系外惑星の大気透過スペクトルの多様性の
 解明：ヘイズ粒子の生成・成長・沈降の効果
 川島由依(東大)
 09:15 S02 多様な巨大惑星リングの形成過程につ
 いて 兵頭龍樹(神戸大)
 09:30 S03 原始太陽系円盤における非晶質フォル
 ステライトからの含水鉱物ダスト形成：内惑星
 領域への水供給プロセス 山本大貴(北大)
 09:45 S04 エジェクタ速度分布スケール則の構築と
 はやぶさ2インパクト衝突による地形変化
 領域の考察 松榮一真(神戸大)
 10:00 S05 火星集積期における大気形成と水分
 配 齊藤大晶(北大)
 10:15 S06 高純度石英ガラスの磁気異方性 荻野理
 史(阪大)
 10:30 S07 層状ケイ酸塩における太陽風プロトン
 の影響 仲内悠祐(JAXA)

- 10:45-10:55 休憩
 10:55-11:10 学生・PDポスターフラッシュ1
 11:10-12:10 ポスターセッション1コアタイム
 12:10-13:30 昼食

口頭発表セッション1：系外惑星

(座長：中本泰史)

- 13:30 O1-01 紫外線望遠鏡による低温星周りの
 系外惑星酸素大気検出の検討 堀越寛己(立教
 大)
 13:39 O1-02 ホットジュピターの高層大気構造と
 質量放出率の時間変動性 田中佑希(国立天文
 台)
 13:48 O1-03 1次元放射流体計算による集積期巨大
 ガス惑星からの水素輝線強度の推定・巨大ガス
 惑星形成への観測からの示唆 青山雄彦(東
 大)
 13:57 O1-04 リチウムに富んだ赤色巨星の検出と

惑星飲み込み説の検証 國友正信(名大)

14:06-14:10 座長交代

口頭発表セッション2：原始惑星系円盤・ダスト進化
(座長：城野信一)

14:10 O2-01 54Cr同位体比異常の成因：不均質な分子雲コア 中本泰史(東工大)

14:19 O2-02 原始惑星系円盤における非平衡電離度を考慮したMHDシミュレーション 藤井悠里(コペンハーゲン大)

14:28 O2-03 電子加熱による原始惑星系円盤の磁気乱流の抑制 森昇志(東工大)

14:37 O2-04 磁場駆動円盤風を考慮した原始惑星系円盤の進化 鈴木建(東大)

14:46 O2-05 巨大惑星による原始惑星系円盤のギャップ構造の理論モデルの構築 金川和弘(シユチェン大)

14:55 O2-06 遷移円盤 LkHa330に付随するスパイラル構造内での不均一なダスト成長 秋山永治(国立天文台)

15:04 O2-07 焼結ダストアグリゲイトにおける脆性塑性転移 城野信一(名大)

15:13 O2-08 原始惑星系円盤における鉛直方向拡散によるダストアグリゲイトの焼結 児玉季里子(名大)

15:22 O2-09 原始惑星系円盤形成段階の高空隙率ダストアグリゲイトの合体成長 本間謙二(東工大)

15:31 O2-10 原始惑星系円盤中の圧力パンプにおける岩石ダストの合体成長 瀧哲朗(国立天文台)

15:40 O2-11 低密度ダストの重力不安定による微惑星形成 道越秀吾(筑波大)

15:49-16:00 休憩

口頭発表セッション3：惑星形成I

(座長：小林浩)

16:00 O3-01 大規模N体計算が切り拓く惑星形成I：PENTACLE(1,000万粒子シミュレーションに向けて) 堀安範(アストロバイオロジー

センター)

16:09 O3-02 大規模N体計算が切り拓く惑星形成II：100万粒子を用いた微惑星集積 押野翔一(国立天文台)

16:18 O3-03 惑星形成N体計算の大粒子数化に向けて：FDPSを用いたP3T法の並列計算 山川暁久(東工大)

16:27 O3-04 高次化メッシュフリー法の導入と変形への対応 山本智子(東工大)

16:36 O3-05 DISPHを用いた月形成巨大衝突のパラメーターサーベイ 細野七月(京大)

16:45 O3-06 小惑星形状の衝突進化：弾性体SPH法を用いた微惑星の衝突計算 杉浦圭祐(名大)

16:54 O3-07 微惑星の衝突・破壊を考慮した地球型惑星形成 佐藤雄太郎(名大)

17:03 O3-08 衝突による惑星や衛星のコア・マントル比の進化 小林浩(名大)

17:12-17:22 休憩

17:22-18:22 最優秀研究者受賞講演1

(司会：中本泰史)

隕石有機物の起源と進化：太陽系初期進化への物質化学的アプローチ 癸生川陽子(横浜国大)

○9月13日

08:30 開場・受付

口頭発表セッション4：惑星形成II

(座長：萩原正博)

09:00 O4-01 詳細な原始惑星系円盤進化を考慮した固体惑星集積シミュレーション 萩原正博(国立天文台)

09:09 O4-02 巨大衝突によって形成される惑星系の構造 小久保英一郎(国立天文台)

09:18 O4-03 タンデム惑星形成論による原始地球物質モデル 二村徳宏(日本スペースガード協会)

09:27 O4-04 小惑星とカイパーベルト天体のサイズ分布から推察される初期微惑星サイズ 森

- 島龍司(カリフォルニア大)
- 09:36 O4-05 コンドリュールとマトリックス粒子の同時集積による岩石微惑星形成モデル 荒川創太(東工大)
- 09:45 O4-06 進化するガス円盤中のペブル集積による地球型各惑星への水供給 山村武(東工大)
- 09:54 O4-07 巨大衝突により生じるデブリ円盤からの天王星の衛星形成 石澤祐弥(京大)
- 10:03 O4-08 周惑星円盤内での微衛星形成の困難 芝池論人(東工大)
- 10:12 O4-09 捕獲された固体物質の周惑星円盤内での分布 末次竜(産業医科大)
- 10:21-10:30 休憩
- 10:30-10:45 学生・PDポスターフラッシュ2
- 10:45-11:45 ポスターセッション2コアタイム
- 11:45-13:00 昼食

口頭発表セッション5:

アストロバイオロジー・火星・金星

(座長:黒川宏之)

- 13:00 O5-01 「あかつき」金星周回軌道における初期科学成果の概要 佐藤毅彦(JAXA)
- 13:09 O5-02 水溶液中におけるメタンディオールの分解反応: ONIOM(QM:MM)法による解明 稲葉知士(早稲田大)
- 13:18 O5-03 氷衛星内部海でのクラスレートハイドレート形成に伴うアンモニウムイオンの取り込み 西谷隆介(阪大)
- 13:27 O5-04 火星大気のエ元素・同位体組成による天体衝突と大気散逸史への制約 黒川宏之(東工大)
- 13:36 O5-05 火星地表水 pHの進化と安定性. Fe₂₊光酸化反応の理論的考察と室内実験 田畑陽久(東大)
- 13:45 O5-06 球殻状鉄コンクリーションの形成数値シミュレーションと形成環境の制約 柴田拓真(名大)
- 13:54 O5-07 南極産 CRコンドライト隕石の水質変成度と始原性の評価について 小松睦美(総研大)
- 14:03 O5-08 室温付近での蒸発乾固の繰り返しによるアデニンとリボースからのアデノシンの合成 橋爪秀夫(物質・材料研究機構)
- 14:12-14:15 座長交代
- 口頭発表セッション6: 衛星・小天体
(座長:玄田英典, 樋口有理可)
- 14:15 O6-01 太陽系小天体における自転周期が表面重力場と与える影響 金丸仁明(阪大)
- 14:24 O6-02 火星衛星フォボス・ディモスの巨大衝突説における形成可能性 兵頭龍樹(神戸大)
- 14:33 O6-03 楕円軌道惑星による小惑星の一時捕獲 -火星衛星系の起源解明にむけて- 樋口有理可(東工大)
- 14:42 O6-04 火星衛星ダイモスのクレーター空間分布 平田直之(神戸大)
- 14:51 O6-05 火星の影響を受けた火星衛星表面の重力場と表層進化の関係 菊地紘(東大)
- 15:00 O6-06 セレスのクレーター形状と表層物性の推定 岡本千里(神戸大)
- 15:09 O6-07 セレスの内部海環境とその形成位置 関根康人(東大)
- 15:18 O6-08 冥王星の暗い赤道領域はカロン形成巨大衝突で作れるか? 玄田英典(東大)
- 15:27 O6-09 西はりま天文台 NICによる地球近傍小天体(1566) Icarusの近赤外測光観測 櫻井友里(岡山大)
- 15:36 O6-10 1998年うしかい座流星群突発出現と1972年ジャコビニ流星群不発の謎の完全解明 佐藤勲(日大)
- 15:45 O6-11 あかり3 μm分光観測小惑星のYJHK分光観測 長谷川直(JAXA)
- 15:54 O6-12 天体表面温度による表層物理状態の推定手法の検討 坂谷尚哉(JAXA)
- 16:03-16:10 休憩
- 16:10-17:10 総会
- 17:10-18:10 最優秀研究者受賞講演2
(司会:中本泰史)
衝撃蒸発実験から探る冥王代地球表層進化 黒澤耕介(千葉工大)

18:10-18:30 移動
 18:30-20:30 懇親会(ヨゼフホール)
 21:00 完全退出

○9月14日

08:30 開場・受付

口頭発表セッション7：衝突・クレーター

(座長：石橋高)

09:00 O7-01 模擬低重力下における低速度クレーター形成実験：微小重力下クレーターサイズに対するレゴリス粒子固着力の影響の推定
 木内真人(神戸大)

09:09 O7-02 模擬氷天体地殻を用いた強度支配域のクレータースケール則に関する実験的研究
 高野翔太(神戸大)

09:18 O7-03 ペネトレータを用いた天体表層の物性探査
 岡崎昌志(神戸大)

09:27 O7-04 石英ガラス球の衝突破壊実験における斜め衝突の効果
 吉田優作(神戸大)

09:36 O7-05 鉄質天体のクレーター深さ直径比の温度依存性：軌道進化制約の可能性
 小川諒(神戸大)

09:45 O7-06 室内実験によるレゴリス最表層密度進化の研究
 大村知美(神戸大)

09:54 O7-07 小惑星イトカワのレゴリス粒子に存在するナノクレーターの観察
 松本徹(JAXA)

10:03 O7-08 微小の室内衝突実験破片における3次元形状分布：ターゲット組織による影響
 門川隆進(京大)

10:12 O7-09 「低速」高速度天体衝突による還元的炭素化合物の生成
 石橋高(千葉工大)

10:21 O7-10 衝突点極近傍から放出される高速放出物：衝突実験とSPHシミュレーションの結果の比較
 岡本尚也(千葉工大)

10:30-10:40 休憩

口頭発表セッション8：月

(座長：山本聡)

10:40 O8-01 観測衛星によるハイパースペクトルリモートセンシングに基づく月地殻-マントルの構造の解明
 山本聡(国立環境研)

10:49 O8-02 リモートセンシングデータを用いた月面に分布するカンラン石の起源推定
 大竹真紀子(JAXA)

10:58 O8-03 月面クレータの地形緩和のタイムスケール
 武藤史樹(名大)

11:07 O8-04 月のマグマ噴出量からみた火成活動の不均質性
 田口雅子(名大)

11:16 O8-05 月のスコリア丘の形状からマグマの揮発成分の量を推測する試み
 佐伯和人(阪大)

11:25 O8-06 月内部進化の初期温度依存性
 小河正基(東大)

11:34 O8-07 赤外吸収分光法により検出される月隕石の水
 鹿山雅裕(東北大)

11:43 O8-08 深海洋底とプレートテクトニクスの起源、駆動力の解明、マルチインパクト仮説による月と地球深海洋底の起源
 種子彰(SEED SCIENCE Lab.)

11:52-13:20 昼食

口頭発表セッション9：探査I

(座長：千秋博紀、宮本英昭)

13:20 O9-01 はやぶさ2の科学観測
 渡邊誠一郎(名大)

13:29 O9-02 はやぶさおよびはやぶさ2試料キュレーションと地球外物質研究グループ
 安部正真(JAXA)

13:38 O9-03 はやぶさ2搭載レーザー高度計によるアルベド観測のための炭素質隕石反射率測定
 山田竜平(国立天文台)

13:47 O9-04 模擬画像作成のためのラフ地形モデル
 千秋博紀(千葉工大)

13:56 O9-05 含水鉱物による700nm吸収帯の分光撮像
 高松知広(立教大)

14:05 O9-06 JUICE/GALA-J(1)：JUICE搭載ガニメデレーザ高度計(GALA)－概要および日本チームの役割
 塩谷圭吾(JAXA)

14:14 O9-07 地球低周回軌道におけるアストロバ

イオロジー実験：たんぼぼ計画現況報告を中心に 小林憲正(横浜国大)

14:23-14:33 休憩

14:33 O9-08 火星衛星探査ミッションとそのサイエンス 倉本圭(北大)

14:42 O9-09 着陸機による火星環境探査の意義・戦略 白井寛裕(東工大)

14:51 O9-10 火星着陸探査計画のための生命探査装置 山岸明彦(東京薬大)

15:00 O9-11 MMXリモートセンシングによるフォボス分光観測と物質分布推定 中村智樹(東北大)

15:09 O9-12 フォボスのレゴリスはどのような進化過程を経ているのか? 宮本英昭(東大)

15:18 O9-13 フォボス表面の元素分析を行うためのLIBSを用いた隕石判別実験 堀内美沙(立教大)

15:27-15:37 休憩

口頭発表セッション 10：探査II

(座長：道上達広)

15:37 O10-01 月火星の地下空洞直接探査 UZUME計画 春山純一(JAXA)

15:48 O10-02 UZUME計画に向けて室内衝突実験からの考察：楕円クレーターと縦孔形成の実験的研究 道上達広(近畿大)

15:57 O10-03 スペクトルプロファイラデータ可視化Web-GIS「月光」の機能拡張：月面鉱物マッピングのための統計解析処理 飯村彰太(会津大)

16:06 O10-04 かぐや搭載スペクトラルプロファイラの観測点位置の高精度化 石原吉明(JAXA)

16:15 O10-05 宇宙科学研究所／月惑星探査データ解析グループの取り組みについて 大嶽久志(JAXA)

16:24 O10-06 着陸探査用その場元素分析・年代測定装置の開発 亀田真吾(立教大)

16:33 O10-07 Chang'e 3ローバ搭載月地下レーダ

およびSELENE月レーダサウンドによって雨の海で観測された地下構造の比較 熊本篤志(東北大)

16:42 O10-08 月面探査機に向けた土質調査を行なう超小型ローバ 吉光徹雄(JAXA)

16:51 閉会

プログラムに関するお問い合わせは、学会 LOC宛(下記メールアドレス)までお願い致します。

aloc@wakusei.jp

●ポスター発表プログラム

ポスターは1日目午前から3日目午前までの2.5日間掲示できます。下記では発表番号、第一著者名、和文表題をコアタイム毎に掲載しています。ポスターは最終日の午前中に撤収して下さい。

ポスター講演者のうち、学生・PDのご身分の方は、ポスターセッションコアタイム直前の「学生・PDフラッシュ」で1分間のフラッシュトークを行うことができます。該当者は、事前にフラッシュトークで使用する資料を送付して下さい(締め切り・送付メールアドレス等、送付要領は後日アナウンスします)。

ポスターセッション 1

コアタイム 1日目(9/12) 11:10~12:10

S01 系外惑星の大気透過スペクトルの多様性の解明：ヘイズ粒子の生成・成長・沈降の効果 川島由依(東大)

S02 多様な巨大惑星リングの形成過程について 兵頭龍樹(神戸大)

S03 原始太陽系円盤における非晶質フォルステライトからの含水鉱物ダスト形成：内惑星領域への水供給プロセス 山本大貴(北大)

S04 エジェクタ速度分布スケール則の構築とはやぶさ2インパクト衝突による地形変化領域の考察 松榮一真(神戸大)

S05 火星集積期における大気形成と水分配 齊藤大晶(北大)

S06 高純度石英ガラスの磁気異方性 荻野理史(阪大)

- S07 層状ケイ酸塩における太陽風プロトンの影響
仲内悠祐(総研大)
- P1-01 ガス惑星における重力ポテンシャルによる二層分離の影響 黒崎健二(東大)
- P1-02 原始惑星系円盤内縁領域の温度構造の解析解
植田高啓(東工大)
- P1-03 系外惑星データベース「ExoKyoto」の開発
山敷庸亮(京大)
- P1-04 周火星円盤状大気による火星衛星前駆天体の抗力捕獲 松岡亮(北大)
- P1-05 高解像度ラージエディーションで得られた火星大気最下層における対流の微細構造 村橋究理基(北大)
- P1-06 2極化した海惑星の表層環境：高圧氷形成による炭素循環への影響 中山陽史(東大)
- P1-07 MC-ICPMSを用いたコンドライト隕石の高精度Mg同位体分析 早川瑛庸(東大)
- P1-08 始原的炭素質コンドライトAcfer 094のマトリクスの微細構造 中藤亜衣子(京大)
- P1-09 原始太陽系星雲における親鉄性元素の分別過程—コンドライト中の金属粒子のSIMS分析 比屋根肇(東大)
- P1-10 マーチソン隕石およびアエンデ隕石に産する有機物のその場観察 二村徳宏(日本スペースガード協会)
- P1-11 室内実験による重複クレーター形状の研究 横山康喜(神戸大)
- P1-12 石膏球面にできる衝突クレーターからのエジェクタ破片放出過程に関する実験的研究 鈴木絢子(JAXA)
- P1-13 連続スペクトルデータを用いた月の海の鉱物量比推定手法の開発と適用 加藤伸祐(名大)
- P1-14 かくや分光データの自動分類に基づく月全球分光特徴量マップで見えてきた大規模地質の特徴 石原吉明(JAXA)
- P1-15 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 木下敏輝(神戸大)
- P1-16 月スワール探索のための、月面模擬画像作成と月探査画像との一致度評価 加藤裕明(会津大)
- P1-17 地球近傍小天体Icarusとその同一起源候補天体 2007 MK6の観測 浦川聖太郎(日本スペースガード協会)
- P1-18 日本で発見された2重小惑星 佐藤勲(日大)
- P1-19 地球が宇宙の中心に位置していないのに、赤方偏移が何故地球を中心として観測されるのか?量子赤方偏移の仮説では、観測中心と云う理由でその謎が解明出来た。種子彰(SEED SCIENCE Lab.)
- P1-20 地球と月のミッシングリンクを統一的に解明する、非常にユニークなアイデアによるマルチインパクト仮説 種子彰(SEED SCIENCE Lab.)
- P1-21 ティティウス・ボデーの法則の新証明と確認(マルチインパクト仮説の根拠) 種子彰(SEED SCIENCE Lab.)
- ポスターセッション 2
コアタイム 2日目(9/13) 10:45~11:45
- P2-01 将来の地下空洞直接探査に向けた月面及び縦穴内での放射線線量評価 長岡央(早稲田大)
- P2-02 月の溶岩流研究と縦穴探査の意義 諸田智克(名大)
- P2-03 月表面掘削探査用のオンサイト質量分析システム 豊田岐聡(阪大)
- P2-04 将来測地観測によるフォボス内部構造の制約 松本晃治(国立天文台)
- P2-05 はやぶさNIRSデータを用いた小惑星イトカワの近赤外スペクトルマップ作成 稲澤朋生(会津大)
- P2-06 はやぶさ2小型着陸機MASCOTの投下運用シミュレーション 那須翔太郎(会津大)
- P2-07 小惑星Ryuguのポテンシャル高分布と地形の予測 平田成(会津大)
- P2-08 会津大学宇宙情報科学クラスターの取り組み 出村裕英(会津大)
- P2-09 「はやぶさ2」中間赤外カメラTIRによる巡航中の観測 岡田達明(JAXA)
- P2-10 火星探査の着陸候補地点の検討：火星環境進化の理解に向けて 関根康人(東大)
- P2-11 SLIM搭載をめざしたマルチバンドカメラの開発現場と科学目的 佐伯和人(阪大)
- P2-12 BepiColombo日欧共同水星探査ミッション：

MMOプロジェクト最新状況報告 早川基
(JAXA)

- P2-13 JUICE-JAPAN木星氷衛星探査計画：日本の狙うサイエンス 関根康人(東大)
- P2-14 JUICE/GALA-J(2)：JUICE搭載ガニメデレーザ高度計(GALA)が拓くサイエンス 木村淳(東工大)
- P2-15 JUICE/GALA-J(3)：JUICE搭載ガニメデレーザ高度計(GALA)における回線設計・性能モデルシミュレーション 石橋高(千葉工大)
- P2-16 JUICE/GALA-J(4)：JUICE搭載ガニメデレーザ高度計(GALA)におけるエレクトロニクス・検出器関連開発 小林正規(千葉工大)
- P2-17 JUICE/GALA-J(5)：JUICE搭載ガニメデレーザ高度計(GALA)の逆モンテカルロ法による放射線損傷評価 小林進悟(量子科学技術研究開発機構)
- P2-18 JUICE/GALA-J(6)：JUICE搭載ガニメデレーザ高度計(GALA)における受光部の光学/構造/熱設計 塩谷圭吾(JAXA)
- P2-19 超小型ロケット飛翔型探査ロボット Shooting Scouter 加藤裕基(JAXA)
- P2-20 重力天体着陸探査に向けた元素分析装置「能動型蛍光 X線分光計」の開発 長岡央(早稲田大)
- P2-21 ソーラー電力セイルによるトロヤ群小惑星の探査計画 岡田達明(JAXA)
- P2-22 月・火星の縦孔・地下空洞探査(UZUME計画)のアストロバイオロジー的意義 小林憲正(横浜国大)

JSPS Information

- ◇日本惑星科学会第116回運営委員会議事録
- ◇日本惑星科学会第46回総会議事録
- ◇日本惑星科学会賛助会員名簿
- ◇日本惑星科学会主催・共催・協賛・後援の研究会情報

◇日本惑星科学会第116回運営委員会議事録

日 時：2016年9月12日(月) 18:40 - 20:40
 場 所：ノートルダム清心女子大学 ヨゼフホールB2203

運営委員：

出席者 14名

倉本 圭, 渡邊 誠一郎, 荒川 政彦, 中村 昭子, 千秋 博紀, 中本 泰史, 平田 成, 林 祥介, 春山 純一,
 竹広 真一, 諸田 智克, はしもと じょーじ, 小久保 英一郎, 生駒 大洋

欠席者 8名

田近 英一, 並木 則行, 井田 茂, 和田 浩二, 永原 裕子, 橘 省吾, 荒井 朋子, 佐々木 晶
 (委任状：議長7通, 諸田委員1通)

オブザーバー：

佐伯 和人(2017年秋季講演会実行委員)
 城野 信一(行事部会長)

議 題：

1. 会計第13期下期中間報告

竹広財務専門委員長より, おおむね予算通り執行しているとの報告がなされた。
 会費は支払い済みが501名, 未納129名。

2. 会計第14期上期予算案

竹広財務専門委員長より予算提案がなされた。各委員会からの予算要求にもとづき, 遊星人編集(原稿起こし+カラー)に15万円, 探査データ解析講習会の補助に15万円, フロンティアセミナーの補助に20万円を計上した。秋季講演会の収入・支出はともに64万円を見込んでいる。全体として58万円の赤字で, 赤字額は昨年度より8万円減。

Q. 赤字で予算を組まないといけいないのか。遊星人の予算は減らせないか。

A. 赤字の予算はやりたくないが, 予算を大きく変更しようがない。遊星人の原稿起こしは使われない年もある。予算案は原案どおりで了承された。

3. 自然災害に伴う会費免除措置等について

竹広財務専門委員長から説明がなされた。アナウンスは9月下旬の予定で, 2017年1月中旬締切予定。早め

の申請をお願いしたい。

4. 2017年秋季講演会実施案

佐伯秋季講演会実行委員から報告がなされた。日程は2017年9月27日～29日を予定し、オプション講演会を30日に行うことを検討している。会場は大阪大学豊中キャンパスのコンベンションセンターを予定しているが、現在建設中の理学部新棟に変更の可能性もある。LOC委員長は佐々木晶会員。大阪大学宇宙地球科学専攻から共催の承認を得た。参加者200名、口頭100件、ポスター60件を見込んでいる。収入・支出はともに64万円を見込んでいる。

大阪大学理学部との共催特典について議論が行われ、2014年講演会にならい「非発表の学部生・M1に限り、参加費を無料」とすることとなった。また、投稿料をとるかどうかについて、今年度の参加者などを見ながら次回連合大会の運営委員会までに検討することとなった。

5. 入退会について

諸田総務専門委員長から報告がなされた。正会員606、うち学生88(前年それぞれ630,91)。賛助会員が1増えた。

6. 総会の議長・書記の承認

諸田総務専門委員長より、第46回総会の議長に鈴木絢子会員、書記に末次竜会員がそれぞれ推薦され、承認された。

7. 役員選挙について

諸田総務専門委員長より、第14期(2017年1月－2018年12月)の役員選挙の概要の説明がなされた。第13期の選挙の投票率は18.4%で、20%を切ってしまっている。

選挙管理委員会として総務専門委員メンバーが提案され、了承された。また、選挙日程も提案され、了承された。

8. 2016年秋季講演会報告

はしもと2016年秋季講演会組織委員長より報告がなされた。投稿していて参加しなかった人がいた。

9. 遊星人の発行状況報告

和田編集専門委員長より書面による報告がなされた。

- ・遊星人はつつがなく発行されている。ここ最近の3号は薄くなっているので投稿をお待ちしている。
- ・第23巻(2014年)において2号と3号の間に98ページ(p.177-274)のページとびがあった。これについては第23巻のウェブページ上に明記済みで、また2016年9月号の編集後記においてお詫びの報告を掲載する予定。今回のことは、号間にまたがるページチェックを怠ったことが原因。今後は編集幹事のチェックリストに明記のうえ代々引き継ぎを徹底する。
- ・遊星人記事のJ-STAGE上における公開作業は粛々と進めている。作業に伴って講習会を受講する必要がある。それが10月12日に設定されている。公開は年明けになる可能性がある。

10. 日本地球惑星科学連合の報告

倉本会長から報告がなされた。

- ・連合の理事として、倉本、中村、田近が選出された。
- ・来年度連合大会はAGUとの共催。連合では、なるべく国際化の流れは前進させていきたいとの意見がある。共同セッションだけでなくこれまで通りの日本語セッションも残る。

11. 行事部会からの報告

城野行事部会長から報告がなされた。再来年の秋季講演会は旭川で行い、会場は旭川市科学館の予定。LOCの実働は北大が行う。時期は未定。

12. 最優秀発表賞受賞者の決定

- ・中本学会賞選考委員長より、今年は7人の応募があり、選考の結果、兵頭龍樹会員を受賞者として推薦する

ことが報告された。推薦のとおり、兵頭会員を受賞者とするものが決定した。

- ・研究者賞は今年に応募3名で2名が受賞した。応募が少ないのは問題であろう。たくさんの方に応募するよう声をかけて欲しい。次の研究者賞応募は例年通り行う。

13. 用語部会の設置要望に対する回答について

倉本会長より、以下のような回答が提案された。今回の外国語にもとづく学術用語の標準的読み仮名を制定する部会の設置要望については、外国語由来の名称に対して標準的な日本語を制定することの難しさ、会則上の部会の設置要件に関する会則上の問題、共同作業することが必要になるであろう天文学会は用語制定を当面は行わない方針であること、を理由として、部会の設置を見送る。ただし、学術用語を整理する研究会の設置はあってもいいだろう。

Q. 用語制定を当面は行わないという天文学会の回答は、正式な回答か。

A. 天文学会長の回答である。

回答の会長案は了承された。

- ・渡邊委員より、作業部会は会則上時限付きであるのに現状でそのように運用されていないとの指摘がなされた。
- ・春山委員より、議題の提案から審議までのプロセスを明確化すべきではないかとの意見があり、プロセスを確認した。会員からの要望は総務が受け付け、会長が審議を發議する。会員への返事までの期限を作るべきではないかとの意見が出た。

14. 運営委員の再選に関する規則について

中村委員より提案がなされた。現在の会則では多選規制がないが、他の学会ではさまざまな多選規制が見られる。惑星科学会も検討すべきでないか。会則改正を含む大掛かりな作業になるので、少なくとも総会2回での議論を減る必要があるだろう。以上に関し、運営委員会の継続性も考える必要があるだろうとの意見が出た。今後議論を進める方向となった。

◇日本惑星科学会第46回総会議事録

日 時：2016年9月13日(火) 16:10 - 17:10

場 所：ノートルダム清心女子大学 カリタスホール 2階

〒700-0013 岡山市北区伊福町2丁目16-9

正 会 員：606名

定 足 数：61名

参加人数：85名(開会時) (これに加えて非会員の傍聴者4名) > 96名(議事3.1採択時) > 96名(議事3.2採択時)

委 任 状：103通(ただし、内0通分は提出者が総会に参加したため無効)

議 長：102通

松本晃治会員：1通

1. 開会宣言

諸田総務専門委員長が開会を宣言。

2. 議長団選出

運営委員会からの推薦で議長に鈴木絢子会員、書記に末次竜会員が選出された。

3. 議 事

3.1. 第13期下期(2016年度)中間報告

- ・会計報告(竹広財務専門委員長)

例年通りの収入が見込まれているということが報告された。

支出は遊星人、サーバ基礎開発、EPS分担金などが予定されていることなどが報告された

- ・各種専門委員会報告

特になし

- ・質疑応答及び討論

特になし

- ・採択

第13期下期活動報告の採択が行われ、賛成：96名、反対：0名、保留：0名により採択された。

3.2. 第14期上期(2017年度)予算案

- ・説明(竹広財務専門委員長)

基本的には昨年度と同じだが以下の変更点などが説明された

- ・遊星人編集の原稿起こし+カラーページの増加のため10万から15万への変更による支出の増加

- ・賛助会員の一件増加による収入増加

提案予算は58万円の赤字で昨年度予算より8万円の赤字減少

- ・質疑応答及び討論

特になし

- ・採択

第14期上期予算案の採択が行われ、賛成：95名、反対：1名、保留：0名により採択された。

4. 報告事項

4.1. 自然災害に伴う会費免除措置について(竹広財務専門委員長)

今年度は2017年1月中旬締め切り

4.2. 学会賞授賞式：2015年度最優秀研究者賞および2016年度最優秀発表賞(中本学会賞選考委員長)

- ・2016年度最優秀発表賞は兵頭龍樹会員が選ばれた。
- ・2015年度最優秀研究者賞を黒澤耕介会員、発生川陽子会員が受賞した。

4.3. 2016年秋季講演会の報告(はしもと2016年秋季講演会組織委員長)

問題なく開催されていることが報告された。

4.4. 2017年秋季講演会の案内(佐伯2017年秋季講演会組織委員)

2017年9月27日(水) - 9月29日(金)の期間に大阪大学豊中キャンパスコンベンションセンターにて秋季講演会が開催されることが報告された。

4.5. 役員選挙の案内(諸田総務専門委員長)

第14期の役員選挙が行われる。そのため9月12日に選挙管理委員が設置されたことや、今後の選挙日程などが説明された。

4.6. その他

特になし

5. 議長団解任

6. 閉会宣言

◇日本惑星科学会賛助会員名簿

2016年12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, 愛知県松山市道後町
- (b)日本航空宇宙学会

編集後記

先月、光の科学に関する市民講座を担当しました。テーマは「人類と光」。人類がどのように「光」というものの性質を理解してきたのか、という科学史のお話です。一般向けの講座では、スライドによる講義だけではなく、実験などの実演をすると受けが良いようです。私は理論屋だから実験はできん、などとわがままを言うわけにもいきません。少しでも楽しんでもらえるよう、拙い手つきで実験のようなことをしています。

今回の市民講座では、小道具としてピンホールカメラを作ってみました。その歴史は古く、紀元前5世紀頃に中国で活躍した墨子の著書にその記載があるとか。話のまくらにもってこいだと思い立ち、ネットで調べた情報をもとに100円ショップで材料を買い揃えまし

た。暗箱には黒いゴミ箱を選択。ピンホールには使用済のテレホンカードの穴が良いという情報があったのですが、今や公衆電話を使う機会など皆無。家探しをして、なんとか使用済のク○カードを発見。ゴミ箱の底に穴を開けようとして勢い余って底をプチ抜くなどの失敗はありましたが、なんとか完成に漕ぎ着けました。完成したピンホールカメラを持って外に出て景色を見てみると、ちゃんと映ります。嬉しくなって、あっちやこっちを見て回りました。大学内でゴミ箱に顔を突っ込んでうろうろしていた私は、周囲の学生たちからはきっと不審者だと思われていたことでしょう。

ちなみに市民講座ですが、部屋が暗かったので映りはイマイチでした。(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 勇気, 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

2016年12月25日発行

日本惑星科学会誌 遊・星・人 第25巻 第4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。