

宇宙風化を模擬した多様な鉱物への水素イオン照射実験 Hydrogen ion irradiation of various minerals simulating the space weathering.

内田 はるか¹、*瀧川 晶^{1,2}、土山 明¹、鈴木 耕拓³、中田 吉則³、三宅 亮¹、高山 亜紀子¹
Haruka Uchida¹, *Aki Takigawa^{1,2}, Akira Tsuchiyama¹, Kohtaku Suzuki³, Yoshinori Nakata³, Akira Miyake¹, Akiko Takayama¹

1. 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻、2. 京都大学白眉センター、3. 若狭湾エネルギー研究センター
1. Division of Earth and Planetary Science, Kyoto University, 2. The Hakubi Center for Advanced Research, Kyoto University, 3. The Wakasa Wan Energy Research Center

大気のない天体表面において、太陽風によるイオン照射などにより起こる天体表層のレゴリスの物性変化を宇宙風化と呼び [1, 2]、月や小惑星の試料表面には、ブリスターと呼ばれる水ぶくれ構造や非晶質層などの宇宙風化層が報告されている [3, 4]。宇宙風化を模擬した照射実験の中でも、太陽風の大半を占める水素イオンを使った実験は数少ない [e.g., 5]。本研究では、多様な鉱物種への水素イオン照射実験をおこない、鉱物毎の水素イオンの照射による構造変化の違いを調べた。

小惑星物質を模擬し、照射試料として forsterite (Fo_{100} , 合成)、olivine (Fo_{92} , San Carlos, USA)、enstatite (En_{99} , Tanzania)、spinel (MgAl_2O_4 , 合成)、corundum (Al_2O_3 , 合成)、enstatite組成 ($\text{MgSi}_{0.97}\text{Al}_{0.03}\text{O}_3$) のガラス、serpentine ($\text{Mg}\# = 0.98$, South India)、FeS を模擬した pyrrhotite ($\text{Fe}_{0.90}\text{S}$, Chihuahua, Mexico)、鉄隕石 ((Fe, Ni)、Nantan meteorite (III CD)) を用いた。試料は大きさ $3 \times 5 \times 0.5$ mm の板に加工し、表面を研磨後、化学研磨処理した。

実験は若狭湾エネルギー研究センターでおこなった。加速エネルギー 40 keV の H_2^+ を照射量 10^{16} 、 10^{17} 、 10^{18} ions/cm² になるように時間を変えて照射した。照射時間が 60 分以上の試料には水冷ステージを利用した。照射後の試料は走査型電子顕微鏡 (FE-SEM, JEOL JSM 7001F) により表面構造を観察した。一部の試料は、集束イオンビーム加工 (FE-FIB, FEI Helios NanoLab 3G CX) によりブリスターを含む TEM 試料を作成し、透過型電子顕微鏡 (FE-TEM JEOL JEM 2100F) により断面構造と照射による結晶構造の変化を観察した。

SEM 観察では、olivine、enstatite、spinel、pyrrhotite は照射量 10^{18} ions/cm²、forsterite、corundum は 10^{17} ions/cm²、serpentine は 10^{16} ions/cm² で初めてブリスターが観察された。鉄隕石と enstatite ガラスには表面変化が観察されなかった。大半の鉱物は $3 \mu\text{m}$ 程度の楕円形のブリスターが均一に分布していたが、enstatite 上には波状形のブリスター構造がみられ、serpentine 上のブリスターは不均一に分布していた。

TEM 観察は、ブリスターが見られた照射量の enstatite、forsterite、olivine、serpentine、pyrrhotite と、enstatite のみ 10^{17} ions/cm² の試料に対しても行った。 10^{18} ions/cm² の enstatite 試料表面のブリスター直下には空隙が観察され、ブリスター表皮の空隙側はほぼ非晶質化していたが、最表面付近には斜方輝石の結晶構造が維持されていた。また、enstatite の波状ブリスターは a 軸方向に伸長していることがわかった。 10^{17} ions/cm² の enstatite 試料は、わずかな結晶構造の乱れが確認されたのみであるため、enstatite の非晶質化に必要な照射量は $10^{17} \sim 10^{18}$ ions/cm² の間であることがわかった。Forsterite、olivine、pyrrhotite のブリスター表皮は、わずかな結晶構造の変化のみで非晶質化は見られなかった。serpentine のブリスター表皮は、表層まで完全に非晶質化していた。

Enstatite、forsterite、olivine などイオン結合性のケイ酸塩や酸化物は結晶中の水素拡散速度は実験時間に比べて非常に遅いが [e.g., 6]、照射による欠陥などを通じて気泡が核生成・成長し圧力が上昇した結果、ブリスター構造を作ったと考えられる [7]。シリカガラスと純鉄中の水素の拡散係数 [13, 14] から求められた水素拡散時間は、実験時のイオン照射時間に比べてはるかに短い。Enstatite ガラスと鉄隕石にはブリスターは観察されていないのは、照射により打ち込まれた水素は試料中に蓄積せず、ブリスターが生成しなかったためであると考えられる。

本研究により、enstatite 非晶質化に必要な水素イオン照射量に初めて制約が与えられた。また、鉱物の水素

イオン照射による非晶質化やブリスター形成に必要な照射量、ブリスター構造は、小惑星レゴリスが多種類の鉱物からなるとき、複数の鉱物のブリスター構造の違いから、太陽風照射年代に詳細な制約を与えられる可能性を示唆している。

[1] Hapke (2001) JGR, 106, E5, 10039-10073. [2] Clark B. E. et al. (2002) in Asteroid Space Weathering and Regolith Evolution, Asteroids III. pp. 585-599.. [3] Noguchi et al. (2014) MAPS, 49, 188-214. [4] Margolis et al. (1971) LPSC, 2, 909. [5] Demyk et al. (2004), A&A, 420, 233-243. [6] Stalder and Skogby (2003) PCM, 30, 12-19. [7] Muto and Enomoto (2005), Materials Trans., 46, 2117-2124. [8] Shang et al. (2009) GCA, 73, 5435-5443. [9] 羽木, 林, 大谷 (1978) 日本金属学会誌, 8, 801-807.

キーワード：宇宙風化、小惑星、イオン照射

Keywords: space weathering, asteroid, ion irradiation

CMコンドライトの照射実験：はやぶさ2リターンサンプルの表面組織の推定

Irradiation experiments on CM chondrites: To estimate surface textures of the returned samples by Hayabusa 2

*野口 高明¹、三宅 裕二²、岡崎 隆司²、大澤 崇人³、芹澤 弘幸³、藪田 ひかる⁴、中村 智樹⁵

*Takaaki Noguchi¹, Yuji Miyake², Ryuji Okazaki², Takahito Osawa³, Hiroyuki Serizawa³, Hikaru Yabuta⁴, Tomoki Nakamura⁵

1. 九州大学基幹教育院、2. 九州大学大学院理学研究院、3. 日本原子力研究開発機構、4. 広島大学大学院理学研究科、5. 東北大学大学院理学研究科

1. Faculty of Arts and Science, Kyushu University, 2. Department of Earth and Planetary Science, Kyushu University, 3. Japan Atomic Energy Agency, 4. Department of Earth and Planetary System Science, Hiroshima University, 5. Department of Earth Sciences, Tohoku University

Introduction: In 2020, Hayabusa 2 spacecraft will return the surface and sub-surface samples from the asteroid (162173) Ryugu, a C-type asteroid. We will have an opportunity to investigate pristine materials from a C-type asteroid. Because CM chondrites contain solar gases and because most of them contain abundant subangular mineral and lithic fragments, they are regolith breccias (e.g. [1], [2], [3] and references therein). Although solar noble gases are restricted to the clastic matrix [1], [2], textures related to the solar wind irradiation and/or micrometeoroid impacts have not been identified among CM chondrites. Although there are many spectroscopic studies of CM chondrites (e.g. [4]), only a few studies are focused on the textural changes related to the micrometeoroid impacts and solar wind irradiation on CM chondrites (e.g. [5], [6]). In this study, we performed spectrum measurements, micro-petrographic study, and C K α X-ray absorption near-edge structure measurement of irradiated CM chondrites. These studies will serve to understand the space weathering on the surface of fine-grained Ryugu grains because it is highly likely that space weathering will be found on the surface of Ryugu grains.

Samples and methods: We performed irradiation of 4 keV He⁺ ions on Murchison CM chondrites at Takasaki Advanced Radiation Research Institute, Japan Atomic Energy Agency (TARRI, JAEA). The fluences are 5×10^{16} and 5×10^{17} He⁺/cm², which correspond to $\sim 10^2$ - and $\sim 10^3$ -year irradiation at 1.1 AU (the averaged orbital radius of Ryugu). Reflectance spectra of the irradiated surface were measured at JASCO Co. Ltd. by using JASCO V-670 absorption spectrometer with an integrating sphere. The irradiated samples were observed by field-emission scanning electron microscope (FE-SEM) at JAEA and Kyushu University. We observed the samples by using 2 or 3 kV acceleration voltage to avoid structural changes during observation. Thin samples were prepared by using scanning electron microscope-focused ion beam sample preparation machine and low acceleration voltage Ar milling machine at Kyushu University. They were observed by transmission electron microscope (TEM) at Kyushu University.

Results and discussion: Reflectance spectrum of the sample irradiated by a fluence of 5×10^{16} He⁺ does not show remarkable difference from the spectra of an un-irradiated sample. By contrast, a broad absorption from 0.7 to 1.4 μ m, related to the absorption by Fe-rich serpentine group minerals, is disappeared in the case of the sample irradiated with 5×10^{17} He⁺. These data suggest that 1000-year equivalent solar wind irradiation gives an effect on the shape of reflectance spectra, which is similar to the effect by dehydration [4]. There is no remarkable difference in surface morphology of the sample irradiated by a fluence of 5×10^{16} He⁺ from those of un-irradiated sample. On the other hand, the sample irradiated with 5×10^{17} He⁺ shows blistering on both matrix and chondrules. The surface of fine-grained matrix has a ~ 30 -nm thick amorphous layer. In the amorphous layer, a small amount of nanoparticles is

observed. Their 0.2-nm lattice fringes suggest that they are nanophase Fe⁰. In the case of the sample irradiated with 10¹⁷ He⁺ has ~60-nm amorphous rim containing abundant bubbles (blistering), which is especially remarkable in cronstedtite-tochilinite intergrowth. Just below the amorphous layer, both cronstedtite and tochilinite show sharp lattice fringes. The amorphous rim contains abundant nanoparticles is observed. They also show 0.2-nm lattice fringes, suggestive of nanophase Fe⁰. This result is consistent with [5].

References: [1] Nakamura T. et al. (1999a) GCA 63, 241-255. [2] Nakamura T. et al. (1999b) GCA 63, 257-273. [3] Krot A. et al. In: Meteorites and the early solar system II, pp. 679-712. [4] Hiroi T. et al. (1993) Science 261, 1016-1018. [5] Matsuoka M. et al. (2015) Icarus 254, 135-143. [5] Keller L. P. et al. (2015) LPSC 46, Abstract #1913.

キーワード：照射実験、CMコンドライト、透過電子顕微鏡

Keywords: irradiation experiment, CM chondrites, TEM

天体表面でのレゴリスの粒子摩耗を模擬した石英粒子の摩耗実験と粒子3次元形状変化

Abrasion experiments of quartz particles simulating the regolith abrasion on airless bodies: change in their 3D shapes

*小川 倫弘¹、土山 明¹、門川 隆進¹、櫻間 卓志¹、中野 司²、上杉 健太郎³

*Motohiro Ogawa¹, Akira Tsuchiyama¹, Tokiyuki Kadokawa¹, Takushi Sakurama¹, Tsukasa Nakano², Kentaro Uesugi³

1. 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻、2. 産業技術総合研究所地質情報研究部門、3. 高輝度光科学研究センター SPring-8

1. Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Geological Survey of Japan, AIST, 3. SPring-8/JASRI

小惑星イトカワや月の表面から持ち帰ったレゴリス粒子にはエッジの丸い粒子が見出され、機械的摩耗が起こったことが指摘されている [1,2]。水などの流体が存在しない天体における粒子の摩耗では、運動により粒子同士が擦れ合う必要がある。イトカワでは、粒子運動をもたらしたプロセスとして微隕石衝突で励起された地震波による振動[1]やYORP効果、潮汐力[3]などが挙げられている。本研究では粒子同士がこすれあった場合、どのように粒子自身の形状やエッジの形状が変化するかを明らかにするために、摩耗実験を行なった。

実験は、石英粒子を用いて、粉碎機（安井器械：マルチビーズショッカー）により行なった。石英は隕石や月試料にはほとんど含まれていないが、かんらん石や輝石などと同程度の強度を持ち、多量のサンプルを容易に準備できることから、本研究では石英を選んだ。無色透明な石英（インド産）の単結晶を超硬合金乳鉢で粉碎し、1-2 mmの粒子を篩により選別した。この粒子約6.5 gをメノウ（石英微細結晶の集合体）製の容器（10 ml）に充填率が約50%となるように封入し、粉碎子を入れずに上下振動を伴う回転運動を行い、粒子同士が擦れ合うようにした。

本研究では、2種類の実験を行なった。実験1では、特定の回転速度(1500 rpm, 2500 rpm)において様々な時間(5分、30分、120分、180分)で実験を行なった。それぞれの実験について、摩耗により生成された粉(250 μm以下の粒子)を篩により選別し、実験前後の粒子の質量の差から粉の質量を求めた。摩耗を受けた粒子の中から無作為に選んだ150個以上の粒子の3次元形状を、東北大学のX線CT装置により撮影した(管電圧140kV, 画素サイズ~14.5 μm)。実験2では、着色した3種類の石英（紫水晶、黄水晶、黒水晶）単結晶を粉碎し、各2粒子（1-2 mm）を上記の石英粒子に混ぜた。実験1と同じ2種類の回転速度において、積算時間が1分、5分、10分、30分、60分、120分、180分となるように摩耗を行なった。それぞれ時間毎に、着色粒子を取り出して、その3次元構造をSPring-8 BL20B2のマイクロX線CTを用いて高分解能で求めた(25keV, 画素サイズ2.75 μm)。撮影した粒子は洗浄後、メノウ容器に戻し、摩耗サイクルを繰り返した。

個々の粒子のCT画像より、体積、表面積を求めるとともに、キャリパー法および楕円体近似法により3軸長を求め、3軸比、angularity（近似楕円体体積/粒子体積）、sphericity（粒子表面積/近似楕円体相当表面積）を求めた。実験2に関しては、CT像から3Dモデルを作成し、個々の粒子の3次元形状変化を求めた。実験1、実験2ともに、時間とともに摩耗による粉の生成量およびsphericityは増加し、粒子の体積、面積、angularityは減少した。これらの値の変化量はsphericityを除いて2500 rpmの方が1500 rpmより大きかった。また、その変化率は実験開始直後から30分程度で大きく減少した。一方、平均3軸比に関しては、実験1において、1500 rpmでは時間が経過してもほとんど変化しないが、2500 rpmでは平均3軸比が大きくなる（等方的になる）傾向が見られた。実験2では、個々の粒子の3軸比の変化の仕方はそれぞれ異なり、全体として実験1に見られるような3軸比変化の挙動が現れることが分かった。

着色により区別した個々の粒子形状の時間変化からは、2500 rpmでは主に粒子のエッジが欠けることにより、1500 rpmではエッジはほとんど欠けずに徐々にすり減ることにより、それぞれ摩耗が進行することがわかった。回転速度の違いによる今回の結果は、このような摩耗プロセスの違いにより説明できる。イトカワや

月のレゴリス粒子の平均3軸比と比較すると、[4]で詳しく議論するように、イトカワ粒子は激しい摩耗プロセスを経験しておらず、月粒子はより激しい摩耗のプロセスを経験した可能性がある。

[1] Tsuchiyama et al. (2011) *Science*, 333: 1121. [2] Tsuchiyama et al. (2016) 4th *Symp. Solar System Materials*, abstract. [3] Connolly et al. (2015) *EPS*, 67: 12. [4] Tsuchiyama et al. (2017) *JpGU*, abstract.

キーワード：イトカワ、月、摩耗

Keywords: Itokawa, lunar, abrasion

Genesis-DOS試料中に打ち込まれた太陽風起源希ガスのCME起源粒子検出

Detection of CME components of solar wind noble gas from DOS sample of *Genesis*

*殿谷 梓¹、馬上 謙一¹、Olinger Chad²、Jurewicz Amy J³、坂口 勲⁴、鈴木 拓⁴、Burnett Donald⁵、糸瀬 悟⁶、石原 盛男⁷、内野 喜一郎⁸、塚本 尚義^{1,9}

*Azusa Tonotani¹, Ken-ichi Bajo¹, Chad T Olinger², Amy J G Jurewicz³, Isao Sakaguchi⁴, Taku Suzuki⁴, Donald S Burnett⁵, Satoru Itose⁶, Morio Ishihara⁷, Kiichiro Uchino⁸, Hisayoshi Yurimoto^{1,9}

1. 北海道大学、2. ロスアラモス国立研究所、3. アリゾナ州立大学、4. 物質・材料研究機構、5. カリフォルニア工科大学、6. 日本電子(株)、7. 大阪大学、8. 九州大学、9. 宇宙航空研究開発機構

1. Hokkaido University, 2. Los Alamos National Laboratory, 3. Arizona State University, 4. National Institute for Materials Science, 5. California Institute of Technology, 6. JEOL Ltd, 7. Osaka University, 8. Kyusyu University, 9. JAXA

はじめに：太陽風中に保持された太陽風起源希ガスは、太陽活動を調査するトレーサーとして有用である。近年、NASAによる太陽風サンプルリターン計画(*Genesis*ミッション)により持ち帰られた太陽風照射試料の希ガス同位体研究から、UVレーザーアブレーション法などの希ガス同位体分析によって太陽風元素・同位体組成やその照射量が報告されている(e.g. Heber et al., 2009; 2012)。太陽風照射試料から太陽活動を明らかにする上で重要なポイントは、太陽風中の各粒子の持つエネルギーと照射された固体試料との関係であり、それらは照射試料内の空間分布として保持されている。しかしながら、太陽風の注入深さが小さいため、希ガスの深さ方向空間分布はこれまでの分析手法では明らかになっていない。

近年、微小領域の希ガス同位体深さ方向分析を実現させる装置として同位体ナノスコープ(LIMAS)が開発された(Bajo et al., 2015)。LIMASは、高強度フェムト秒レーザー(パワー密度： $\sim 10^{20}$ W cm⁻²)を用いてトンネルイオン化を行う二次中性粒子質量分析器(SNMS)の一種である。*Genesis*試料中の太陽風起源Heの深さ方向分布は、LIMASによる深さ方向分析により決定された(Bajo et al., 2015)。しかしながら、コロナ質量放出(CME)により放出された高エネルギーHe粒子の想定される濃度(3×10^{18} atoms cm⁻³)がLIMASサンプルチャンバー内の残留Heガスより得られる信号強度と同等の大きさであった。したがって、試料深部領域(>120 nm)のHe、つまりCME粒子が確認できるレベルの高精度な分析は確立されていなかった。そこで本研究では、より高精度・低ブランクの希ガス同位体深さ方向分析を行うための測定法の開発を行った。

実験手法：本研究では、*Genesis*サンプルリターンにより持ち帰られた試料のうち、Si基盤上にアモルファスカーボンフィルムをコーティングした(DOS)試料をサンプルとして用いた。スタンダード試料として、15keVの⁴Heを照射したDOS試料(He-DOS)と27keVの²²Neを照射したDOS試料(Ne-DOS)、非照射のDOS試料(Blank-DOS)を用意した。

LIMASの分析条件については、まず収差補正機構を用いて、プライマリーイオンビームの直径を1.5 μmにセッティングした。⁴He⁺の周回数は100周に設定し、イオンゲートを用い、⁴Heの妨害イオンである¹²C³⁺を除外した。また、サンプルチャンバー内の残留Heを除去するために、より希ガス排気速度の速いイオンポンプ(Agilent Vaclon Plus 500 (StarCell))を導入した。

太陽風起源希ガス同位体を検出するための深さ方向分析のラスタ領域は20 × 30 μmに設定し、その中心部分を解析データとして用いた。

LIMASによるデプスプロファイル後、原子間力顕微鏡(Asylum Technology, MFP-3D-BIO-J)を用いて、クレーター形状を測定した。

結果：深部領域のHe濃度はBajo et al.(2015)と比較して1桁以上減少した(4×10^{17} atoms cm⁻³)。その結果、太陽風起源He検出を高精度に行うことが可能となり、CME粒子照射深度に相応する100 nm以深のHe粒子の照射痕跡がLIMASで初めて確認された。さらに、深さ方向分析では初めてとなる太陽風起源²⁰Ne同位体の検出

にも成功した.

キーワード : Genesis、太陽風、希ガス、コロナ質量放出、SNMS、深さ方向分析

Keywords: Genesis, Solar wind, Noble gas, CME, SNMS, Depth profile

レーザー衝撃圧縮とX線自由電子レーザー回折によるフォルステライト単結晶の超高速高圧構造相転移観察

Time-resolved analysis of shock-driven structure transformation of forsterite single crystals using power laser and x-ray free electron laser

*奥地 拓生¹、Purevjav Narangoo¹、尾崎 典雅²、瀬戸 雄介³、丹下 慶範⁴、関根 利守⁵、松岡 健之⁶、高橋 謙次郎⁶、犬伏 雄一⁴、矢橋 牧名⁷、田中 和夫²、兒玉 了祐^{2,6}

*Takuo Okuchi¹, Narangoo Purevjav¹, Norimasa Ozaki², Yusuke Seto³, Yoshinori Tange⁴, Toshimori Sekine⁵, Takeshi Matsuoka⁶, Kenjiro Takahashi⁶, Yuichi Inubushi⁴, Makina Yabashi⁷, Kazuo Tanaka², Ryosuke Kodama^{2,6}

1. 岡山大学惑星物質研究所、2. 大阪大学大学院工学研究科、3. 神戸大学大学院理学研究科、4. 高輝度光科学研究センター、5. 広島大学大学院理学研究科、6. 大阪大学光科学センター、7. 理化学研究所放射光科学総合研究センター

1. Institute for Planetary Materials, Okatama Univ., 2. Faculty of Engineering, Osaka Univ., 3. Faculty of Science, Kobe Univ., 4. JASRI/SPring-8, 5. Faculty of Science, Hiroshima Univ., 6. Photon Pioneers Center, Osaka Univ., 7. RIKEN SPring-8 Center

太陽系を構成する惑星や衛星の形成の際には、天体間の衝突現象が重要な役割を果たしてきた。このような衝突現象においては、衝突した物質は、衝突の速度に応じて衝撃圧縮される。太陽系内の宇宙空間に残存する隕石の一部には、このような衝撃圧縮によって発生した動的な高圧力の下で、構造相転移を経て生成した高密度の結晶構造が、準安定状態のまま凍結されている場合がある。その代表例が、地球型惑星の主構成鉱物であるカンラン石（斜方晶系）の高圧相の一つであり、カンラン石よりも約11%高い密度を持つ、リングウッドイト（立方晶系）である。リングウッドイトは静水圧力下では18GPa以上で安定な構造であるが、これまでに動的な高圧力条件下で合成された例はない。よって隕石中にいま存在しているリングウッドイトの形成の条件は全く不明である。このリングウッドイトの形成に至る過程を実験的に再現することができれば、天体衝突現象の規模や時間スケールを定量的に評価するための道を開くことができる。

我々は、兵庫県西播磨に設置されたX線自由電子レーザー施設・SACLAにおいて、パワーレーザーで衝撃圧縮した試料の構造を表すX線回折パターンを、高時間分解能で取得する実験を進めている。この手法により、衝撃圧縮された結晶の構造と圧力を、ピコ～フェムト秒の時間分解能で観察することができる。そこで隕石に含まれるリングウッドイトの産状を考慮しつつ、衝撃圧縮されたフォルステライト（ Mg_2SiO_4 組成のカンラン石）の単結晶が相転移に至るまでの過程を時間分解して観察した。特定の方位に切り出した厚さ50 μm の結晶薄板に100方向からパワーレーザーを照射して、発生させた衝撃波を伝播させつつ、X線回折パターンの形状および強度の変化を計測した。レーザーのパルス長は4ナノ秒であり、その照射とXFEL照射の間の遅延時間は、衝撃波が伝播を開始する4ナノ秒から、圧縮及びその後の膨張がほぼ終了する12ナノ秒までの間で、2ナノ秒間隔に設定した。XFELのエネルギーは10 KeVとした。X線の吸収長が200 μm 程度であることから、厚さ50 μm の結晶の内部をすべて一緒に観察している。粗い時間分解能における予察的な結果ではあるが、以上の実験により、フォルステライト単結晶内を進む衝撃波の伝播を計測するとともに、結晶構造と発生圧力の時間変化を捉えることに初めて成功した。結果はナノ秒以下の短い時間スケールにおけるリングウッドイト構造への相転移の発生を十分に示唆するものであった。

キーワード：フォルステライト、リングウッドイト、X線自由電子レーザー、レーザー衝撃圧縮、高速度衝突
Keywords: forsterite, ringwoodite, x-ray free electron laser, laser-driven shock compression, high-speed collision

電子線ホログラフィーを用いたナノスケール隕石磁気学

Nanometer-scale paleomagnetism of meteorites using electron holography

*木村 勇氣¹、山本 和生²

*Yuki Kimura¹, Kazuo Yamamoto²

1. 北海道大学低温科学研究所、2. ファインセラミックスセンター

1. Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, 2. Japan Fine Ceramics Center

Remanent magnetization of minerals is very sensitive to the formation and experienced environments such as temperature and magnetic field. To better understand the formation environments of individual extraterrestrial minerals, we attempted to apply the electron holography to nanoparticles extracting from a meteorite. As the result, we succeeded to elucidate a magnetic structure of framboidal magnetite, which has been aligned periodically in three-dimensionally and proposed its formation process in a parent body of the Tagish Lake meteorite [1]. This method will allow us to reveal formation temperature of individual tiny minerals in the solar nebula and precipitation temperature of individual minerals during thermal aqueous alteration inside a corresponding asteroid. More recent years, several reports about paleomagnetic studies of meteorites has been reported [e.g. 2]. Here, we will show our present approaches to visualize the magnetic structures of individual extraterrestrial minerals and to constrain its formation environment, which was not unveiled by conventional paleomagnetic studies using a bulk mineral.

[1] Yuki Kimura et al., Nature Communications, 4 (2013) 2649.

[2] J. Bryson, et al., Earth and Planetary Science Letters, 388 (2014) 237.

Acknowledgment: This work was supported by a Grant-in-Aid for Challenging Exploratory Research from KAKENHI (16K13909).

キーワード：電子線ホログラフィー、残留磁化、透過型電子顕微鏡、タギシュレイク隕石、マグネタイト、水質変質

Keywords: Electron holography, Remanent magnetization, Transmission electron microscopy, Tagish Lake meteorite, Magnetite, Aqueous alteration

イトカワ粒子表面のサブミクロンクレーターの記載

Properties of submicron craters on Itokawa regolith particles

*松本 徹¹、長谷川 直¹、塚本 尚義^{1,2}*Toru Matsumoto¹, Sunao Hasegawa¹, Hisayoshi Yurimoto^{1,2}

1. 宇宙科学研究所、2. 北海道大学

1. Institute of Space and Astronautical Science, 2. Hokkaido University

探査機「はやぶさ」は、S型小惑星イトカワ表層のレゴリス(細かな砂の層)から、数十から百マイクロメートル程度の大きさの微粒子を回収した[1]。イトカワ表面への小天体衝突は、クレーター形成[2]やレゴリスの流動[3]、小惑星表面のスペクトルが変化する宇宙風化にも寄与した[4,5]と推測されている。このため、小惑星イトカワの地形変化や表面物質の時間発展を理解する上で、小惑星表層において様々なスケールで起こる衝突現象を理解することは重要である。

はやぶさが回収した微粒子の表面には、衝突現象に起因するサブミクロンサイズのクレーター構造が見つかっている[6-8]。これらのクレーターは、極限られた数の微粒子表面に集中して見つかった。このことやクレーターの形態・面密度から、これらのクレーターは、イトカワ表面への小天体衝突によって生じた微小な破片が微粒子表面に衝突して形成した、二次的なクレーターであると推測されている[7,8]。しかし、これまで報告された微粒子表面のクレーターの個数はわずか24個であり、報告されたクレーターの形態や分布がイトカワ微粒子全体の特徴を代表しているかどうか判断できない。そこで本研究では、走査型電子顕微鏡を用いて、複数のイトカワ微粒子表面を詳細観察し、多数のクレーターの形態・分布の記載を行うことで、それらの起源を制約することを試みた。

本研究では、10 μ mから200 μ mの大きさの微粒子34個に対して観察を行った。微粒子の観察は、宇宙科学研究所キュレーション施設に設置された走査型電子顕微鏡(日立SU6600)を用いて行った。2kVに加速された電子線を使って、微粒子表面の高真空下での二次電子像観察を行った。微粒子表面の鉱物相の同定は、エネルギー分散型X線分光分析装置(X-Max20)を用いて行った。

観察の結果、いずれも80 μ m以上の大きさの8つの微粒子の表面に、10 nmから700 nm程度の大きさのクレーターを認識した。これらの粒子は観察した80 μ m以上の大きさの微粒子の約40%を占める。それぞれの微粒子表面に30個-100個程度のクレーターを確認した。クレーターはリムや内部に溶融物を伴っており、月レゴリス粒子表面で観察されているサブミクロンサイズのクレーターの形態[9]と良く似ている。3つの微粒子表面の約400個のクレーターのサイズ・面密度分布から、クレーターを形成した衝突物のフラックスを推定した。この際、クレーターが蓄積する年代は1000年と仮定した。これは、クレーターが存在する微粒子表面には、太陽風が鉱物表面に蓄積した痕跡であるブリストア構造が発達しており、その形成期間が10³年程度と推定されることによる[5]。求めた衝突物のフラックスを、イトカワの軌道である1AUから1.5AUの範囲での惑星間塵ダストのフラックスモデル[10]、月レゴリスのサブミクロンサイズのクレーター形成物質のフラックス[9]と比較した。結果、求めた衝突物のフラックスは、惑星間ダストフラックスに比べて高い値を示し、月レゴリスにおけるフラックスと近い値を示した。月レゴリスにおいて、サブミクロンサイズのクレーターは、惑星間塵ダストの直接的な衝突でなく、二次的な衝突によって形成された可能性が高いと考えられている[8]。今回の結果は、イトカワにおいても月レゴリス同様に二次衝突が主な起源であることを示しており、大気のない天体表面において、二次的な衝突はサブミクロンサイズのクレーター形成において重要な役割を果たしていると推定される。

[1] Nakamura et al. (2011) *Science* 333: 1113. [2] Michel et al.(2009) *Icarus*, 200(2), 503-513. [3] Miyamoto, (2014) *Planetary and Space Science* 95: 94-102.[4] Hiroi et al. (2006) *Nature* 443(7107): 56-58. [5] Noguchi et al. (2014) *MAPS*, 49, 188-214. [6] Nakamura et al. (2012) *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109(11) E624-E629. [7] Matsumoto et al.(2016) *Geochimica et Cosmochimica Acta* 187: 195-217.[8] Harries et al.(2016) *Earth and Planetary Science Letters* 450 : 337-345. [9] Morrison and Clanton (1979) *LPS X*, Abstract pp.1649-1663 [10]Jehn (2000). *Planet. Space Sci.*, 48,

1429-1435.

キーワード：レゴリス、小惑星イトカワ、クレーター
Keywords: Regolith, Asteroid Itokawa, Crater

X線回折バルク分析法によるCO3コンドライトの鉱物学と熱史解析

Application of an X-ray diffraction method to polished thin section of CO3 chondrites: Mineralogy and thermal history

*今栄 直也^{1,3}、中牟田 義博²

*Naoya Imae^{1,3}, Yoshihiro Nakamuta²

1. 情報・システム研究機構 国立極地研究所、2. 九州大学総合研究博物館、3. 総合研究大学院大学

1. Antarctic Meteorite Research Center, National Institute of Polar Research, 2. Kyushu University Museum, Kyushu University, 3. SOKENDAI

はじめに

石質隕石のX線回折データはそのキャラクタリゼーションに有効である。通常行われる光学顕微鏡による組織観察とEPMAによる主要鉱物組成によるキャラクタリゼーションとは独立である。比較的容易に、整合的な結果を得るだけでなく、さらに定量的な結果を得ることができる。この手法を用いてCO3コンドライトの鉱物学的研究と熱史解析を行った。

実験

使用したX線回折装置はリガク製のSmartLabで、1cm幅の長手制限スリットを使用し、研磨薄片を100rpmで面内回転してその全域にX線をあてて、粉末X線回折パターンを取得した。CuK α 線(管電圧40kV、管電流30mA)を用いた。CO3コンドライトは10試料の研磨薄片で、隕石名とサブタイプは、それぞれ、ALH77307 3.03, Y81020 3.05, Colony 3.0, A881632 3.1, Y791717 3.3, Y983589 3.4, Lance 3.5, A882094 3.5, ALH77003 3.6, and Isna 3.8である。

結果と議論

かんらん石(130)のピークはサブタイプが3.8では単一ピークであるが、3.6以下ではピークが2つにスプリットする。これは、低角側がマトリックスを構成する鉄に富むかんらん石で、高角側がコンドリュール(主としてI型)のフォルステライト端成分に近いかんらん石に由来する。それらの半値幅とサブタイプとの間に明瞭な相関が認められる。さらに、これらのスプリットした積分強度比のサブタイプとの相関を見ると、CO3.0のみが相関からはずれてMg/Feが高い。これはCO3.0のマトリックスにアモルファス相が多いという報告(Howard et al., 2014; Bonato et al., 2016)と整合する。こうした系統的な差異は母天体内部の温度史を反映している。かんらん石中のMg-Fe元素拡散律速によりフォルステライト的なかんらん石の粒子(平均粒子直径50 μ m)の縁(厚みd)が鉄に富むかんらん石に変化すると考えることができる。したがって厚みdは、かんらん石のFe-Mgの平均拡散距離を意味する。スプリットした積分強度比(I_{Mg}/I_{Fe})は、幾何学的モデル解析により体積比(V_{Mg}/V_{Fe})と関連づけできる。この結果、強度比からdが求まる。単斜エンスタタイトのMg-Fe拡散は起きない条件も考慮すると、母天体の最高到達温度は620-900Kと求まる。この結果は、Schwinger et al. (2016)と整合的である。さらに、この解析手法からCO3.0のアモルファス相のモードは11-22%と求まる。

文献

Bonato E. et al. 2016. 79th Ann. Meeting. Met. Soc. #6466.

Howard K. T. et al. 2014. 45th LPSC #1830.

Schwinger S. et al. 2016. GCA, 191, 255.

キーワード : CO3コンドライト、鉱物学、熱史、X線回折、アモルファス珪酸塩

Keywords: CO3 chondrites, mineralogy, thermal history, X-ray diffraction method, amorphous silicates

隕石中のコンドリュール形成過程の4Dその場観察 4D in situ observation of formation process of chondrules

*上梶 真之¹、上杉 健太郎¹、星野 真人¹

*Masayuki Uesugi¹, Kentaro Uesugi¹, Masato Hoshino¹

1. 公益財団法人高輝度光科学研究センター

1. Japan synchrotron radiation research institute

Chondrule is tiny rocky spherules around 1mm in diameter, and constitutes a large volume of chondrite which dominates more than 80% of meteorites fallen onto the Earth. Dating studies using radiogenic nuclides have showed that they were formed in very early stage of the solar nebula evolution, and thus would show the important step of the evolution of solid materials which formed rocky planets, i.e. terrestrial planets and asteroids.

Their shape clearly indicates that they were solidified from molten droplets. However, the formation process of them, such as heat source and thermal history, precursor material, formation region in the early solar nebula, are still unknown.

In previous studies, several heating experiments for the reproduction of their characteristic textures were conducted. However, complete reproduction of their textures has not been succeeded yet. One of the difficulties is that growth process of crystals inside the chondrules is difficult to observe. Silicate materials melted above 2000K emits strong radiation. In this situation, phenomenon occurred inside a few mm sample is difficult to observe with high spatial resolution by visible light.

In this study, we developed a new devise for in situ 4D observation, 4D means 3D + time elapse, of crystallization process of chondrules using synchrotron radiation computed tomography, and conducted heating experiments of analog materials. We show preliminary result of the experiments, and discuss the problems of heating experiments of previous studies based on the results obtained by our new setup. We will also show future plan for our investigation, and also show the possible heating experiment for the chondrule formation using the system.

キーワード：コンドリュール、その場観察加熱実験、4D-CT

Keywords: chondrules, in situ observation heating experiment, 4D-CT

マイクロX線CT・FIBシリアルセクションングを用いたIvuna隕石のマトリクスの3次元構造観察

Three-dimensional structure of matrix of the Ivuna meteorite using micro X-ray CT and FIB serial sectioning

*北山 晃¹、土山 明¹、三宅 亮¹、中野 司²、上杉 健太郎³、竹内 晃久³、高山 亜紀子¹、伊藤 正一¹

*Akira Kitayama¹, Akira Tsuchiyama¹, Akira Miyake¹, Tsukasa Nakano², Kentaro Uesugi³, Akihisa Takeuchi³, Akiko Takayama¹, Shoichi Itoh¹

1. 京都大学理学部地球惑星科学専攻地質学鉱物学教室鉱物学講座、2. 産業技術総合研究所、3. SPring-8 公益財団法人高輝度光科学研究センター

1. Kyoto University, 2. AIST, 3. SPring-8 / JASRI

CIコンドライトは、バルク組成が揮発性元素を除いて太陽大気 of 化学組成と類似し、太陽系で最も始原的な隕石であり [1]、非常に強い水質変成を受けている。マトリクスは層状珪酸塩により構成され、マグネタイト、硫化物、炭酸塩や硫酸塩などの鉱物粒子を含んでいる。層状珪酸塩には、サーペンティンとサポナイトからなる粗粒なもの、サーペンティン、サポナイトとフェリハイドライトからなる細粒なものがある[2]。また、CIコンドライトは異なる岩相をもつ岩片が集積したものである。Ivuna隕石のSEMを用いた研究により、構成鉱物に基づいて4種類の岩相が認識されている[3]。一方、複数のCIコンドライトについて、SEMとTOF-SIMSによりマトリクスの組織と化学組成に基づいて8種類の岩相に分類され、それらの集積・水質変成モデルが提案されている[4]。それぞれの岩相は微細で複雑な組織を有しており、その詳細な3次元構造を明らかにすることにより、従来の2次元観察ではわからなかった情報（例えば空隙など）を得、水質変成前の状態を推定し、また水質変成プロセスの詳細（例えば、流体の移動方向など）を理解できることが期待される。このため、本研究では、X線CTとFIB(集束イオンビーム)シリアルセクションングを用いて、Ivuna隕石のマトリクスの高分解能3次元構造観察を行った。

本研究ではまず、FE-SEM/EDX (JEOL JSM7001F/Oxford Instruments X-Max^N 150mm²)を用いて、Ivuna隕石の複数の岩片についてそのマトリクス・鉱物粒子の詳細な組織観察と元素分析・マッピングを行った。その結果に基づいて、そのうちの一つの岩片からFIB (FEI Helios NanoLab G3) により箱型のサンプル (~25 μm) を切り出し、大型放射光施設SPring-8のBL47XUにおいてSIXM (Scanning Imaging X-ray Microscopy)[5]を用いてX線CT撮影を行い、約100 nm/画素でその3次元構造を得た。次にこのサンプルに対してFIBによるシリアルセクションングとFE-SEM観察 (FEI Helios NanoLab G3) を行うことにより、サンプルの一部の領域についてより高分解能での連続的なBSE像を間隔40 nmで得た。これらの3次元CT像とSEM像から画像解析を行い、マトリクスの構成物や鉱物粒子の形状を抽出した。

薄片のSEM観察・EDX分析により、この岩片のマトリクスはMgに富み、主として粗粒で伸長した層状珪酸塩 (幅約50 nm、長さ約500 nm) からなることが分かった。また、マグネタイト、ピロータイト、Niを含む硫酸塩鉱物粒子を含むが、炭酸塩鉱物は見られない。これらの特徴は、先行研究[3]の岩相II (炭酸塩をほとんど含まず硫酸塩が支配的に、先行研究[4]の岩相CGA (Coarse-grained phyllosilicate aggregate) に対応している。また、マトリクスは、Mgに富む層状珪酸塩をFeに富む層状珪酸塩が取り囲む2次元的には球状にみえる数μmの物体 (以降PC: phyllosilicate compositeと呼ぶ) からなることわかった。

CT像には、PCだけでなく、マグネタイトの棒状結晶 (約1×5 μm) や不定形や六角平板状をした空隙が見出された。六角平板状の空隙 (約3×1 μm) は、その外形からピロータイトあるいは炭酸塩が溶脱した抜け殻結晶であるものと考えられる。シリアルセクションングによるSEM像では、PCやマグネタイトが明瞭に認識できるが、空隙にはスパッタされた物質が再堆積しておりSEM像のみでは空隙とは認識できない。PCは連続SEM像によって抽出可能で、その3次元形状は不規則な楕円体である。PCやマグネタイト結晶の伸長方向はランダムであり、水質変成時に顕著な流体の移動はなかったものと考えられる。また、サブミクロンの微細な鉱物あるいは非晶質珪酸塩の集合体が強い水質変成作用を受けて、PC集合体としてのマトリクス組織が形成され

たのかもしれない。

[1] Anders and Grevesse (1989) *GCA*, 53: 197-214. [2] Tomeoka and Buseck (1988) *GCA*, 52: 1627-1640. [3] Endreß and Bischoff (1993) *MAPS*, 28: 345 (abstr.). [4] Morlok et al. (2006) *GCA*, 70: 5371-5394. [5] Takeuchi et al. (2013) *J. Synchrotron Rad.*, 20: 793-800.

キーワード : CIコンドライト、水質変成

Keywords: CI meteorite, aqueous alteration

始原的炭素質コンドライトAcfer 094マトリクスの3次元構造：非晶質珪酸塩の探索

3D structure of primitive carbonaceous chondrite Acfer 094: investigation of amorphous silicates

中藤 亜衣子¹、*土山 明¹、松本 恵²、松野 淳也¹、三宅 亮¹、上杉 健太郎⁴、竹内 晃久⁴、中野 司⁵、
バッカロ エピファニオ³、ラッセル サラ³

Aiko Nakato¹, *Akira Tsuchiyama¹, Megumi Matsumoto², Junya Matsuno¹, Akira Miyake¹, Kentaro Uesugi⁴, Akihisa Takeuchi⁴, Tsukasa Nakano⁵, Epifanio Vaccaro³, Sarah Russell³

1. 京都大学大学院 理学研究科 地球惑星科学専攻、2. 神戸大学 研究基盤センター、3. ロンドン自然史博物館、4. 公益財団法人高輝度光科学研究センター、5. 産業技術総合研究所 地質情報研究部門

1. Kyoto University, Division of Earth and Planetary Sciences, 2. Kobe University, Center for Supports to Research and Education Activities, 3. National History Museum, London, 4. Japan synchrotron radiation research institute, 5. AIST, Geological Survey of Japan

Introduction: 非晶質珪酸塩は、chondritic porous (CP-) IDPsの主要構成物として知られ、太陽系で最も始原的な物質の1つである。しかし、隕石中の非晶質珪酸塩は、ごく一部の限られた試料からしか報告されておらず[e.g., 1, 2, 3]、またCP-IDPs中の非晶質珪酸塩との関係性も明らかになっていない。

炭素質コンドライト隕石Acfer 094は、プレソーラー粒子に富み、含水鉱物をほとんど含まないことなどから、最も始原的な隕石の1つであると考えられている[e.g., 1, 4, 5]。また、そのマトリクスに非晶質珪酸塩を多く含むことが報告されている[1, 2]。我々は、始原的炭素質コンドライト隕石中の非晶質珪酸塩の起源、初期太陽系での固体原材料物質の集積過程、および水質変成過程を明らかにすることを目的として、Acfer 094のマトリクスにおける非晶質珪酸塩を含む組織の3次元構造に着目した。

Methods: 約1x2 mmの研磨厚片について、試料全体の不均質性の有無を確認するため、FE-SEM観察を行った。得られたEDS/BSE-mapを元に、約25x25x30 μmサイズのXCT試料をFIB (Focused Ion Beam) で作成した。これらの3次元構造を非破壊で観察するため、SPring-8 BL47XUにて高解像度(画素サイズ: ~100 nm)の放射光X線CT撮像を行った。この時、鉱物を識別するためDETと呼ばれる吸収コントラストを用いた手法[6]、空隙・水・有機物を識別するためSIXMと呼ばれる位相・吸収コントラストを同時に取得できる手法[7]で撮像し、これらを複合させた解析[8]を行った。

Results and Discussion: FE-SEM/EDS観察から、マトリクスは比較的均質な組成・組織であることが確認された。また、先行研究[e.g., 9]で報告されている非常に¹⁶O-poorな酸素同位体組成を示す宇宙シンプレクタイト (Cosmic Symplectite, COS) [7]に組織・組成の類似する粒子がマトリクス中に複数分布していた。COSは天体上での変成・変質に弱い物質であることが知られているため、非晶質珪酸塩が含まれる始原的な領域の指標になると考え、COSを含むマトリクス領域とマトリクスの代表的な組織を示す領域をFIBにより、それぞれ切り出した。

これらの観察の結果、マトリクスは空隙率や組織の異なる複数の岩相から構成されることが明らかになった。例えば、水質変成鉱物と思われる針状の細粒結晶を含む非常に空隙率の低い岩相(岩相4)や、10-20 μmサイズで周囲と明確に区別できる非常に空隙率の高い岩相(岩相1)など様々な組織・変成度を示す岩相が複雑に混合している。特に空隙率の非常に高い岩相1については、XCTから推定される組織・組成が、CP-IDPに似通っていることから、マトリクスの中でも非晶質珪酸塩に富む領域ではないかと期待される。発表では、本領域についてのTEMによる詳細観察の結果を含め、各岩相と非晶質珪酸塩の有無および変成度の違いを議論する。

References: [1] Greshake, 1997, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61, 437-452. [2] Balnd et al., 2007, *Meteoritics & Planetary Sciences*, 42, 1417-1427. [3] Leroux et al., 2015, *Geochimica et*

Cosmochimica Acta, 170, 247-265. [4] Nagashima et al., 2004, *Nature*, 428, 921-924. [5] Nguyen and Zinner, 2004, *Science*, 303, 1496-1499. [6] Tsuchiyama A. et al., 2013, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 116, 5-16. [7] Takeuchi A. et al., 2013, *J. Synch. Rad.* 20, 793. [8] Tsuchiyama et al., 2017, 48th LPSC, 2680. [9] Sakamoto et al., 2007, *Science*, 317, 231-232.

キーワード：非晶質珪酸塩、GEMS、炭素質コンドライト、Acfer 094

Keywords: amorphous silicate, GEMS, carbonaceous chondrite, Acfer 094

硫化鉄微粒子の大気突入における溶融急冷過程再現実験

Melting and quench experiment of iron sulfide fine particles at atmospheric entry

室園 健人²、*磯部 博志¹

Kento Murozono², *Hiroshi Isobe¹

1. 熊本大学大学院先端科学研究部基礎科学領域、2. 熊本大学理学部

1. Department of Earth and Environmental Sciences, Faculty of Advanced Science and Technology, Kumamoto University, 2. Faculty of Science, Kumamoto University

はじめに 定常的に地球に落下する隕石物質においては、直径0.1mm前後の微粒子が最大の質量フラックスを持つことが知られている。それら微粒子は、高層大気突入時に加熱・急冷され、様々な組織を持つ溶融微小隕石を形成する。大気との相互作用は酸化を伴う溶融をもたらす、微小隕石の組成が変化するとともに大気組成にも影響を与えうる。本研究では、高温炉中で微粒子を自由落下させる実験系 (Isobe and Gondo, 2013) を用いて、始原的隕石の主要構成成分の一つである硫化鉄微粒子の急加熱・急冷実験を行い、高層大気条件における硫化鉄の酸化挙動と組織形成過程について検討した。

実験 試料は、市販のFeS試薬を粉碎して作成した径約100 μ mの不定形粒子を用いた。出発物質粒子の観察、分析を行ったところ、試料は純粋なFeSではなく、酸化鉄マトリックス中にサブミクロン径の硫化鉄長柱状粒子が配列した組織を示す部分および一部金属鉄相からなっていた。また、不定形の空隙も存在していた。粉末X線回折の結果、FeS相は隕石物質中の硫化鉄相と同じtroiliteであった。加熱・急冷実験はケラマックス縦型小型管状炉を用い、FeS粒子の比重および酸素分圧を考慮してガス流量を制御した。本実験では、典型的な粒径の粒子は2秒以内に最高温度条件に達し、約0.5秒間1400 $^{\circ}$ C以上の温度まで加熱された後急冷される。酸素分圧は、FMQ +1.5 log unitとした。実験生成物は、走査電子顕微鏡による外形観察および粒子内部組織の観察、組成分析を行った。

結果および考察 実験生成物粒子全体の形状は、球形だけではなく、円盤状または陥入部を持つものも観察された。粒子表面は、ほとんどが溶融によりなめらかな性状を示した。粒子表面に沿った樹枝状結晶組織や、骸晶状組織を示すものも存在した。粒子断面の観察・分析の結果、出発物質に見られたtroilite相、酸化鉄/硫化鉄混合相および金属相の混合組織は消失し、粒子内部まで溶融していることを示していた。多くの粒子で溶融部分の組成は均質化しており、出発物質粒子の平均組成と比較して粒子毎に異なる比率でSの減少とOの増加が起こっていた。ただし、Feと(S + O)の比はほぼ1:1で一定であった。

酸化によって、Oを含む硫化鉄粒子表面にFe₃O₄組成の被膜が形成されているものも観察された。また、酸化が進んでSが失われた粒子では、FeOメルト中に幅1 μ m程度のFe₃O₄柱状結晶が配列した成長組織を示すものも存在した。Fe-S-O三成分系の相関係においては、FeS - FeO tie line 付近にFeOおよびFeSに飽和したリキダス面が存在することが報告されている (Ueda et al., 2008)。本実験において、1秒以下の短時間の加熱によっても、硫化鉄微粒子にFe-S-O三成分系の相関係によって規定された組成変化が起こることが示された。これは、大気加熱による隕石物質からのS成分の揮発が起こるためには、大気からの酸素の付加を必要とすることを示していると考えられる。酸素に乏しい大気を持つ惑星においては、隕石物質の加熱による大気へのSの付加は抑制されている可能性がある。

キーワード：トロイライト、微小隕石、Fe-S-O系、磁鉄鉱、大気加熱

Keywords: troilite, micro meteorit, Fe-S-O system, magnetite, atmospheric heating

Fe-Ni-S融体の弾性特性から探る火星内部構造

Interior structure of Mars estimated from elastic properties of liquid Fe-Ni-S

*寺崎 英紀¹、下山 裕太¹、真木 まゆみ¹、黒川 冬華¹、浦川 啓²、西田 圭佑³、斉藤 龍之介¹、田窪 勇作¹、柴崎 裕樹⁴、坂巻 竜也⁴、町田 晃彦⁵、肥後 祐司⁶、近藤 忠¹

*Hidenori Terasaki¹, Yuta Shimoyama¹, Mayumi Maki¹, Fuyuka Kurokawa¹, Satoru Urakawa², Keisuke Nishida³, Ryunosuke Saito¹, Yusaku Takubo¹, Yuki Shibazaki⁴, Tatsuya Sakamaki⁴, Akihiko Machida⁵, Yuji Higo⁶, Tadashi Kondo¹

1. 大阪大学大学院理学研究科、2. 岡山大学大学院自然科学研究科、3. 東京大学大学院理学研究科、4. 東北大学大学院理学研究科、5. 量子科学技術研究開発機構、6. 高輝度光科学研究センター

1. Graduate School of Science, Osaka University, 2. Graduate School of Natural Science and technology, Okayama University, 3. Graduate School of Science, The University of Tokyo, 4. Graduate School of Science, Tohoku University, 5. Natural Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology, 6. Japan Synchrotron Radiation Research Institute

To give a constraint core composition and interior structures of terrestrial planets, elastic properties, such as sound velocity and density, of liquid Fe-light element alloys at high pressure are required together with geodesy observations. In this study, we have measured sound velocity and density of liquid Fe-Ni-S (S=17-30 at%) using ultrasonic pulse-echo and X-ray absorption methods combined with multi-anvil apparatus up to 14 GPa and studied the effects of pressure and sulfur content on the elastic properties. Measured sound velocity (V_p) of liquid Fe-Ni-S increased non-linearly with pressure and its pressure dependence is well fitted by the Birch-Murnaghan equation of state. Obtained bulk modulus of liquid Fe-Ni-S decreases with increasing sulfur content. Based on these obtained properties, we will discuss estimated radius and sulfur content of Martian core by comparison with observed moment of inertia data of Mars.

キーワード：火星、中心核、液体、音速、密度

Keywords: Mars, Core, liquid, sound velocity, density

衝撃実験による玄武岩中カンラン石の微細構造と火星隕石中カンラン石との比較

Microstructure of olivine in basalt recovered from shock experiment and a comparison with olivine in Martian meteorites

*竹之内 惇志¹、三河内 岳¹、小林 敬道²、山口 亮³

*Atsushi Takenouchi¹, Takashi Mikouchi¹, Takamichi Kobayashi², Akira Yamaguchi³

1. 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻、2. 物質・材料研究機構、3. 国立極地研究所

1. Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, 2. National Institute for Materials Science, 3. National Institute of Polar Research

火星隕石には衝撃により黒色化したカンラン石が報告されている。この黒色化はカンラン石中に晶出した鉄ナノ粒子が原因と考えられており、火星隕石に特有である。先行研究ではいくつかの形成過程が考えられてきたが、未だ統一の見解は得られていない (e.g., Treiman et al., 2007)。その形成過程・条件の解明は、天体衝突現象の理解や火星隕石の起源などを考える上で重要であり、定量的に制約する必要がある。本研究では、このような火星隕石中に見られる黒色カンラン石の形成条件・過程を明らかにするために衝撃回収実験を行った。これまで、カンラン石の微細構造変化観察のための衝撃実験では、カンラン岩やカンラン石粉末試料などが用いられてきた。黒色カンラン石を含む火星隕石は、玄武岩～レルゾライト質であり、比較のためにはそれらに近い試料で衝撃実験を行う必要がある。本研究では長崎県北松浦産のカンラン石を含む玄武岩をターゲットとして用いた。この玄武岩は鉄に富んだカンラン石 (Fo69程度) を含んでおり、岩石組織やカンラン石の組成が火星隕石 (特にolivine-phyric shergottite) に非常に近い。そのため、カンラン岩やカンラン石粉末試料を用いた衝撃実験に比べ、火星隕石により近い条件でカンラン石が受ける衝撃の影響を観察することが可能である。

実験には物質材料研究機構の一段式火薬銃を用いた。試料の玄武岩は厚さ約1 mmの円形ディスクに整形し、ステンレスのコンテナに詰めてターゲットとした。飛翔体は到達衝撃圧20~40GPaでは3 mm厚のステンレス板を、50GPaでは2 mm厚のタングステン板を用いた。4回実験を行い、実際の到達衝撃圧はターゲットへの衝突直前の飛翔体速度から計算し、それぞれ22.2、28.7、39.5、48.5 GPaであった。回収した試料から薄片試料を作成し、偏光顕微鏡、走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察を行った。また、薄片から収束イオンビーム法 (FIB) により試料を切り出し、透過型電子顕微鏡 (TEM) を用いた観察も行った。カンラン石の着色については、変質により着色した領域もあるため、TEM観察によりナノ粒子の有無を確認した。

薄片観察によると22.2 GPaの実験試料中では斜長石が波状消光を示し、28.7 GPa以上の実験試料中では斜長石は全てガラス化していた。輝石やカンラン石は、最も強い衝撃を受けた試料 (48.5 GPa) でも波状消光と弱いモザイク化を示すのみであった。また、衝撃圧が28.7 GPa以上の試料中では細い衝撃溶融脈が観察されたが、高圧鉱物はいずれの試料中にも発見されなかった。39.5 GPaと48.5 GPaの衝撃圧の回収試料ではカンラン石中にラメラ状の組織が観察された (ラメラの幅は38.5、48.5 GPaでそれぞれ $\sim 0.25 \mu\text{m}$ 、 $\sim 1 \mu\text{m}$)。このラメラ状組織をFIBで切り出してTEMで観察したところ、ラメラ状の組織は高密度に欠陥構造が入る領域に対応していた。しかし、そのようなラメラ状組織を含めてカンラン石中に鉄ナノ粒子は発見されなかった。

これまでの研究でNorthwest Africa 1950隕石の黒色カンラン石はラメラ状組織の集合であることが明らかになっている (Takenouchi et al., 2015)。今回の実験で観察されたカンラン石中のラメラ状の組織はそれらと類似していた。しかし、この領域はナノ粒子を含まず、黒色カンラン石に見られる特徴も示さなかった。三河内他 (2011) ではカンラン石粉末試料を用いた40 GPa程度の衝撃実験によりカンラン石中に僅かにナノ粒子が形成されることが報告されている。高い空隙率を持つ粉末試料では玄武岩に比べて衝撃時の温度が高いと考えられ、ナノ粒子の形成には高圧だけでなく、粉末試料で達成されるような高温が必要であると推測される。つまり、カンラン石の黒色化は、高圧により欠陥の集合体のラメラ状組織が形成され、高温により鉄の拡散が起きてナノ粒子が形成されるという過程を辿る可能性が今回の実験から示唆された。また、衝撃圧の強さ

によってカンラン石に見られるラメラ状組織のサイズが変化することから、このようなラメラ状組織は衝撃時の圧力の指標に応用できる可能性がある。実際の火星隕石で観察されるラメラ状組織は幅が $\sim 2 \mu\text{m}$ ほどであり、48.5 GPaの実験試料で観察されたものに近い。一方、ラメラの数密度は火星隕石の方が高く、火星隕石では鉄ナノ粒子も形成されているため、温度の違いがラメラの数密度を支配している可能性がある。その為、より多くの実験を重ねることで、天然のカンラン石に見られるラメラ状組織のサイズと数密度から衝撃時の温度と圧力に制約を与えることが可能になると期待される。

キーワード：衝撃実験、火星隕石、カンラン石

Keywords: Shock-recovery experiment, Martian meteorite, Olivine

Stepwise Heating and Vacuum Crushing Analyses of Noble Gases in Martian Meteorites

*小池 みずほ¹、角野 浩史²、佐野 有司¹、小嶋 稔³

*Mizuho Koike¹, Hirochika Sumino², Yuji Sano¹, Minoru Ozima³

1. 東京大学 大気海洋研究所、2. 東京大学大学院 総合文化研究科 広域科学専攻 基礎科学系、3. 東京大学大学院 理学系研究科 地球惑星科学専攻

1. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, 2. Department of Basic Science, Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo, 3. Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo

Introduction: Martian meteorites are valuable and possibly sole direct samples from Mars until future sample-return. Trapped noble gases in the meteorites are important, because they can provide not only strong evidence of their Martian origin [1][2], but also chemical and/or isotopic evolution of Martian atmosphere. However, noble gases in the meteorites are complicated mixtures of several sources; Martian atmosphere, Martian interior, radiogenic, cosmogenic, and terrestrial air (e.g.[3]–[9]).

In order to retrieve the exact Martian atmospheric records from the meteorites, one needs to know the trapping mechanism and trapped sites of the noble gases. As the first step, we have conducted combined stepped heating and vacuum crushing of several shergottites.

Samples: Tissint and SaU 008 are olivine-phyric shergottites. Tissint, fell in Morocco in 2011, is characterized by its numerous shock-melted glasses with small bubbles (<10 μm –ca. 100 μm), which might contain Martian atmosphere [8][10]. Heating analyses of pairs of SaU008 showed the incorporation of elementally fractionated terrestrial air (EFTA) in deserts [7][9]. EFTA effects were also observed in NWA 7397, a slightly weathered poikilitic shergottite [8][11]. NWA 10441 is a recently found highly shocked and moderately weathered shergottite. It is composed of ca. 15% of shock-melted glasses with a lot of vesicles [12].

Analytical Methods: The noble gas analyses were conducted with a VG3600 at the University of Tokyo. A ca. 100–200 mg chip of the each sample was separated into two groups; one for stepped heating and the other for vacuum crushing. The former fraction was heated in steps of 400 °C, 600 °C, 800 °C, 1000 °C, 1300 °C, and 1800 °C. The latter fraction was crushed with 2–10 MPa hydraulic ram to extract noble gases presumably from bubbles and/or fluid inclusions. The crushed samples were then picked-up and also stepped heated for comparison. All samples and vacuum lines were baked at ca. 200 °C in vacuum for overnight before the analyses.

Results & Discussion: *Neon:* Most stepped heating data showed high contributions of cosmogenic Ne, while all crushing data indicated air-like Ne. This is due to either terrestrial air or Martian atmospheric Ne. It is difficult to distinguish the two because we do not know the exact ²⁰Ne/²²Ne of Martian atmosphere, although some plausible values are estimated [9].

Argon: Middle to high temperature heating showed high ⁴⁰Ar/³⁶Ar ratios. After corrections for cosmogenic ³⁶Ar and radiogenic ⁴⁰Ar, the trapped ⁴⁰Ar/³⁶Ar ratios indicate significant contribution of Martian atmospheric Ar. However, all crushing data were almost identical to terrestrial Ar. This may be attributable to either (i) expected bubbles in the shock-melted glasses did not contain Martian atmosphere or (ii) the crushing was not enough to extract gases from the bubbles.

Krypton and Xenon: As similar to Ar, high temperature heating showed excesses in ¹²⁹Xe/¹³²Xe ratios, indicating significant Martian contributions. All crushing data plotted on a mixing line between terrestrial air and EFTA (or Martian interior) in a diagram of ⁸⁴Kr/¹³²Xe_{trapped} – ¹²⁹Xe/¹³²Xe ratios. These data also support the possibility of absent of Martian atmosphere in the expected bubbles.

References: [1] Owen et al (1977) *JGR* 82, 4635-4639. [2] Becker and Pepin (1984) *EPSL* 69, 225-242 [3] Ott (1988) *GCA* 52, 1937-1948. [4] Bogard and Johnson (1983) *Science* 221, 651-654. [5] Schwenger (2007) *MaPS* 42, 387-412. [6] Wiens (1988) *EPSL* 91, 55-65. [7] Mohapatra et al. (2009) *GCA* 73, 1505-1522. [8] Wieler et al. (2016) *MaPS* 51, 407-428. [9] Park et al. (2017) LPSC XLVIII abst#1157. [10] Chennaoui Aoudjehane et al. (2012) *Science* 338, 785-788. [11] Ruzicka et al. (2015) Meteoritical Bulletin, No. 102. [12] Meteoritical Bulletin Database, (No.104, in prep).

キーワード：火星隕石、希ガス同位体、分析化学

Keywords: Martian meteorites, noble gas isotopes, analytical cosmochemistry

The Difference Acidic Condition of Aqueous Alteration Event of Nakhla and Yamato 000593 Based on Chemical Speciation

*菅 大暉¹、左合 なつみ¹、宮原 正明¹、大東 琢治²、稲垣 裕一²、山口 亮³、大谷 栄治⁴
 *Hiroki Suga¹, Natsumi Sago¹, Masaaki Miyahara¹, Takuji Ohigashi², Yuichi Inagaki², Akira Yamaguchi³, Eiji Ohtani⁴

1. 広島大学大学院理学研究科、2. 分子科学研究所 UVSOR、3. 国立極地研究所、4. 東北大学大学院理学研究科
 1. Graduate School of Science, Hiroshima University, 2. UVSOR Synchrotron, Institute for Molecular Science, 3. National Institute of Polar Research, 4. Graduate School of Science, Tohoku University

Nakhlites (e.g., Nakhla, Lafayette, Governador Valadares, Millar Range (MIL) 03346, and Yamato (Y) 000593) originating from the near-surface of the Mars are expected to record a water-rock reaction (alteration) occurred on the Mars. One of the representative alteration textures is “iddingsite texture”, which is observed in and around the olivine grain of nakhlites [e.g., 1]. A nonstoichiometric distorted olivine-type mineral laifunite $[(\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+})_2(\text{SiO}_4)_2]$, which is one of the alteration products of original olivine, was formed in the iddingsite texture [2]. The iddingsite was crosscut by fusion crust, indicating that the iddingsite including laifunite was formed on the Mars before it was delivered to the Earth [3]. A member of Nakhlites, Y 000593 and MIL 03346, which are expected to originate from the subsurface (~10 m in depth) of the Mars, has a remarkable amount of jarosite $[\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6]$ -bearing iddingsite [2, 4]. Iron sulfates including jarosite were detected on several provinces of Mars' s surface such as Meridiani plume, strongly suggesting the existence of surface (or sub-surface) liquid water (probably high acidic brine) at least one period in the Martian history [5, 6]. These jarosite-bearing nakhlites would become a keystone for a direct linkage between Martian meteorites and Martian surface materials. Therefore, we have tried to describe secondary minerals in the Yamoato 000593 for elucidating environment on the Mars during a wet-period by using a microscopic speciation technique; a FIB-assisted STXM combined with a TEM/STEM observation.

A polished chip sample of Y 000593 (subsample, 120) was prepared for this study. Iddingsite textures were observed using a FE-SEM/EDS first. A laser micro-Raman spectroscopy was employed for phase identification. Ultra-thin sections of iddingsite textures were prepared by a FIB system for STXM and FE-TEM/STEM analyses.

Laihunite, Opal-A $[\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}]$, jarosite, natrojarosite $[\text{NaFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6]$, goethite $[\text{FeO}(\text{OH})]$, and ferrihydrite $[5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}]$ were identified from the iddingsite of Y 000593 based FIB-assisted STXM-TEM/STEM analyses subsequent to FE-SEM/EDS and Raman analyses. The presence of natrojarosite, one of the quad phase of jarosite [7], suggests that Y 000593 experienced low pH (= 1-4), low temperature (80-240 °C), and SO_4 -rich aqueous alteration process. Iddingsite can form below 500 °C, and most of them were formed between 100 and 50 °C [8], which is consistent with the alteration temperature of Y 000593 deduced from the existence of natrojarosite. The alteration condition of Nakhla with siderite (FeCO_3) -bearing iddingsite texture was estimated to be about mid pH (= 6-8), low temperature (150-200 °C), and CO_2 -rich fluid [9]. Because Mars rover Opportunity detected sulfate minerals such as jarosite and natrojarosite, Y 000593 is a better sample than the other near-surface nakhlites to understand the late-stage acid-sulfate alteration event. Laihunite (was formed at temperatures between 400-800 °C in [10]) was only reported from Y 000593 and MIL 03346 in the near-surface nakhlites, implying that these two nakhalite might have experience different alteration process compared to other near-surface nakhlites [4]. Our STXM-TEM/STEM analyses reveal the alteration process from original olivine to laihunite; $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ ratio gradually decreases from olivine to laihunite, which probably corresponds to the difference of superlattices of laihunite (2M and 3M phase) [11]. Short time oxidation

related to formation of the 2M phase [11], suggests that Y 000593 experienced a temporary heating event. We found mismatch on the formation temperatures between natrojarosite and laihunite. The discrepancy may indicate that these minerals were formed different alteration events; i.e., laihunite was formed before the late-stage acid-sulfate alteration event.

[1] Treiman, 2005. [2] Noguchi et al., 2009. [3] Treiman and Goodrich, 2002. [4] Hallis and Taylor, 2011. [5] Klingelhöfer et al., 2004. [6] Ehlmann et al., 2016. [7] Papike et al., 2006. [8] Treiman et al., 1993. [9] Bridges and Schwenzer, 2012. [10] Banfield et al., 1990. [11] Tomioka et al., 2012.

キーワード : Nakhlite、Yamato 000593、Iron sulfate mineral、Laihunite、Acidic aqueous alteration on the Mars、FIB-assisted STXM/TEM

Keywords: Nakhlite, Yamato 000593, Iron sulfate mineral, Laihunite, Acidic aqueous alteration on the Mars, FIB-assisted STXM/TEM

Eucriteの結晶化実験から推測するNon-cumulate eucrite中シリカ多形の形成過程

Formation of silica polymorphs in non-cumulate eucrites as inferred from crystallization experiment

*大野 遼¹、山口 亮²、竹之内 惇志¹、三河内 岳¹

*Haruka Oono¹, Akira Yamaguchi², Atsushi Takenouchi¹, Takashi Mikouchi¹

1. 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻、2. 国立極地研究所

1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. National Institute of Polar Research

1.はじめに シリカ鉱物は様々な温度圧力条件下で準安定相を含めて23種以上の多形を持つ(例, 木原, 2001)。例えば、Tridymiteは400°C以下で、六方晶系から直方晶系を経て、単斜晶系または擬直方晶系に転移する(Graetsch and Flörke, 1991)。また、シリカ鉱物は熱水変成などによって晶出することが広く知られている。例えば隕石中では、Serra de Magé (Cumulate eucrite) 中に晶出したQuartzの細脈は水からの沈殿であるとされている(Treiman et al., 2004)。このように、シリカ鉱物は低温での熱史の理解や水質変成等の二次変成の影響を考察する上で重要な鉱物であると考えられるが、隕石中では「シリカ」としか記載されていないことがほとんどである。我々は、これまでにEucrite隕石に着目し、Cumulate eucriteとNon-cumulate eucrite中のシリカ鉱物の詳細な観察と分析を行うことで、小惑星Vestaの地殻深部と表層付近での比較を行い、低温での熱史と水質変成などを含む二次変成の履歴の解明を試みてきた(e.g., Ono et al., 2016)。中でも、Non-cumulate eucrite中の玄武岩質岩片に存在するシリカ鉱物の組み合わせは多種多様であり、それらの起源は不明な点が多い。そこで本研究では、急冷過程でEucrite質なマグマからシリカ鉱物がどのような組み合わせで晶出するかを確かめるために、Eucriteを用いた結晶化実験を行った。

2.試料・手法 実験には、典型的なEucriteであるNon-cumulate eucriteのMillbillillieを用いた。Millbillillieを10 μm程度の粉末状にすりつぶし、125 mgのペレットに圧縮した後、白金ワイヤー上に乗せ、シリコニット製縦型電気炉中で、1300°Cで48時間熔融・均質化してから850°Cまで1°C/hrで冷却した。CO₂とH₂の混合により、全圧は1気圧、酸素分圧はlog*f*O₂=IW-1とした。得られた試料を薄片にして、光学顕微鏡とSEMによる観察およびEPMAによる元素マッピングによりシリカ鉱物の位置を特定し、その後、EBSD像解析と顕微ラマン分光によってシリカ鉱物の相同定を行った。

3.結果・考察 実験から得られた試料には、短冊状に伸長した斜長石と輝石が観察され、それらの粒間に自形のシリカ鉱物が存在していた。輝石は著しい化学的ゾーニングを示していた。EBSD像解析とラマンスペクトルの結果から、シリカ鉱物はすべてCristobaliteであることが確認された。この結果から、Eucrite質なマグマから急冷過程で最初に晶出するシリカ鉱物はCristobaliteであり、その組織から輝石と斜長石が結晶化した後に析出したということが明らかになった。これを我々の先行研究で得られたNon-cumulate eucrite中のシリカ鉱物の組織や組み合わせの結果から、どのようにして各種のシリカ鉱物が形成されたかを以下に議論する。Yamato-75011の玄武岩質岩片中にはCristobaliteとQuartzの集合体が存在した。本研究での実験結果とHackle fracture patternと呼ばれる組織(Seddio et al., 2015)に似た組織が存在することから、集合体はCristobaliteからQuartzへの部分転移によるものであると考えられる。Pasamonteの玄武岩質岩片中には、半自形のCristobalite、Quartz、直方晶系のTridymiteが共存していた。実験結果から、半自形のCristobaliteが最初に晶出し、角礫化した後に熱変成によってQuartzと直方晶系のTridymiteに相転移した可能性が考えられる。そして、Stannernには不定形のQuartzのみが存在していた。Stannernは熱変成度がType 4と比較的高いことから、最初に晶出したCristobaliteが熱変成を受けて、全てQuartzに相転移したことが推測される。

4.結論 本研究では、1°C/hrという急冷過程においてEucrite質なマグマから最初に晶出するシリカ鉱物は自形のCristobaliteであることを明らかにした。この結果から、Non-cumulate Eucrite中に存在したシリカ多形はCristobaliteからの相転移によってできる可能性を示唆することができた。また、その相転移は、実際の隕石の冷却速度が1°C/hrよりも遅い速度だったためか、もしくは熱変成などの二次変成によって起こったもので

あることが推測された。

キーワード：シリカ鉱物、ユークライト、結晶化実験、クリストバライト、石英、相転移

Keywords: Silica minerals, Eucrite, Crystallization Experiment, Cristobalite, Quartz, Transformation

Origin of silica minerals in basaltic eucrites

*金丸 礼¹、山口 亮^{1,2}、西戸 裕嗣³

*Rei Kanemaru¹, Akira Yamaguchi^{1,2}, Hirotsugu Nishido³

1. 総合研究大学院大学、2. 国立極地研究所、3. 岡山理科大学

1. The Graduate University for Advanced Studies, 2. National Institute of Polar Research, 3. Okayama University of Science

ユークライト隕石は、小惑星ベスタを起源に持つと考えられている分化隕石の一種である。先行研究から、ユークライトは、固化後、母天体上で様々な二次的プロセス（熱変成作用、衝撃変成作用、交代作用）を受けていることが知られている。本研究は、異なる熱変成度を示す玄武岩質ユークライト中のシリカ鉱物の化学組成、組織、産状を指標とし、二次的プロセスにアプローチする。玄武岩質ユークライトの熱変成度[1]を、輝石の鉱物学的特徴からタイプ1から6に分類した。また、シリカ鉱物を、走査型電子顕微鏡やカソードルミネッセンス顕微鏡により観察した。この結果、熱変成度とシリカ鉱物の種類やその組織との間に関連性が見出された。熱変成度が中程度より低いユークライトにおいて石英は、微細な結晶の集合体として産し、粗粒なトリディマイトのリムや内部に脈状に分布する。細粒な石英は二次的に形成した可能性が高いと推察された。一方、熱変成度が高いユークライト中のシリカ鉱物は、ほとんど粗粒なトリディマイトである。特に、AgoultとEET 90020は高温変成作用が示唆されており[2]、この事実とトリディマイトの産状は調和的である。このように、二次的なシリカ鉱物の産状は隕石母天体上での複雑な二次的変成作用を明らかにする指標となる。

キーワード：ユークライト、シリカ鉱物、カソードルミネッセンス

Keywords: eucrites, silica minerals, Cathodoluminescence

メソシデライト母天体におけるメタルシリケート混合年代の決定 Determination of the age of the metal-silicate mixing on the mesosiderite parent body

*羽場 麻希子¹、山口 亮²、Lai Yi-Jen³、Wotzlaw Jörn-Frederik³、Schönbächler Maria³

*Makiko K. Haba¹, Akira Yamaguchi², Yi-Jen Lai³, Jörn-Frederik Wotzlaw³, Maria Schönbächler³

1. 東京工業大学理学院地球惑星科学系、2. 国立極地研究所、3. スイス連邦工科大学

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2. National Institute of Polar Research, 3. ETH Zurich

Mesosiderites are polymict breccias composed of roughly equal amounts of silicates, which are similar to HED meteorites, and Fe-Ni metal. This meteorite group has been thought to have formed by mixing of crustal and core materials without including much of the mantle. Although several scenarios have been proposed for the metal-silicate mixing, the origin of Fe-Ni metal that was molten at that time and the mechanism of the mixing event are still open questions. Therefore, a well-constrained age of the metal-silicate mixing is important information to improve our understanding of the formation process of mesosiderites. Although the Sm-Nd and Mn-Cr ages of mesosiderites have revealed that the metal-silicate mixing occurred 20–150 Ma after the solar system formation (Stewart et al., 1994; Wadhwa et al., 2003), the age still has a large range more than 100 million years. In order to determine a more precise age of the metal-silicate mixing event, it is necessary to analyze the minerals which had formed during the mixing event. Also, it is necessary that the sample has remained closed systems for chronometers throughout the later impact events. In this study, we present the ^{92}Nb - ^{92}Zr and U-Pb ages of mesosideritic rutiles and zircons in consideration of the formation mechanisms of the minerals. The goal of this study is to determine the age of the metal-silicate mixing event that formed mesosiderites.

Four mesosiderites having different metamorphic grades, Vaca Muerta (1A), NWA 1242 (2A), A 882023 (2/3A), and Estherville (3/4A), were used in this study. Rutiles and zircons were separated from residual samples after dissolving the metal parts and silicate parts with concentrated acids. Subsequently, rutile grains were dissolved in HNO_3 -HF using Parr[®] bombs. The Nb/Zr ratio and Zr isotope measurements were performed using a quadrupole ICPMS and a Neptune Plus MC-ICPMS, respectively, at ETH Zurich. Four individual zircons (70–200 μm in diameter) were spiked with 3–5 mg of EARTHTIME ^{202}Pb - ^{205}Pb - ^{233}U - ^{235}U tracer solution and dissolved in concentrated HF using Parr[®] bombs. U and Pb were separated using a HCl-based column chemistry and measured using a TRITON Plus TIMS at ETH Zurich.

The rutiles from each sample yielded $^{93}\text{Nb}/^{90}\text{Zr}$ ratios of 12.7 ± 0.8 in Vaca Muerta, 9.9 ± 0.4 in NWA 1242, 1.61 ± 0.12 in A 882023, and 1.26 ± 0.08 in Estherville. The $^{93}\text{Nb}/^{90}\text{Zr}$ ratios decrease with increasing metamorphic grades of our samples from Vaca Muerta (1A) to NWA 1242 (2A), A 882023 (2/3A), and Estherville (3/4A). Since the metamorphic grades of mesosiderites were established during the metal-silicate mixing event (e.g., Delaney et al., 1981), the rutiles likely formed during this event. The Nb-Zr data from rutiles are plotted on a single isochron line (Fig. 1), which indicates that the ^{92}Nb - ^{92}Zr decay system of mesosideritic rutiles has not been disturbed by later impacts after they formed during the metal-silicate mixing event. Using the initial $^{92}\text{Nb}/^{93}\text{Nb}$ ratio of rutiles ($(7.5 \pm 0.7) \times 10^{-6}$) and the solar system initial $^{92}\text{Nb}/^{93}\text{Nb}$ ratio from Iizuka et al. (2016), the ^{92}Nb - ^{92}Zr age of rutiles was calculated to be 44 ± 16 Myr after CAI. This age corresponds to the absolute age of 4524 Ma.

According to Haba et al. (2015), mesosiderites have two kinds of zircons: (I) relict zircons that crystallized before the mixing event, and (II) secondary zircons that formed through the mixing event. Typical secondary zircons show quite low U (~ 0.3 ppm) and Th (~ 0.04 ppm) contents because they formed after

the incorporation of U, Th, and REE into abundant phosphate minerals. All zircon grains measured in this study have very low U contents, which indicate that they are secondary zircons, and yielded a weighted mean ^{207}Pb - ^{206}Pb age of 4528.4 ± 1.4 Ma (2σ). This age is in good agreement with the ^{92}Nb - ^{92}Zr age of rutiles. Therefore, the metal-silicate mixing event that formed mesosiderites is considered to have occurred at 4528.4 ± 1.4 Ma.

キーワード：メソシデライト、メタルシリケート混合年代、放射年代測定、ジルコン、ルチル

Keywords: mesosiderites, metal-silicate mixing event, radiometric dating, zircon, rutile

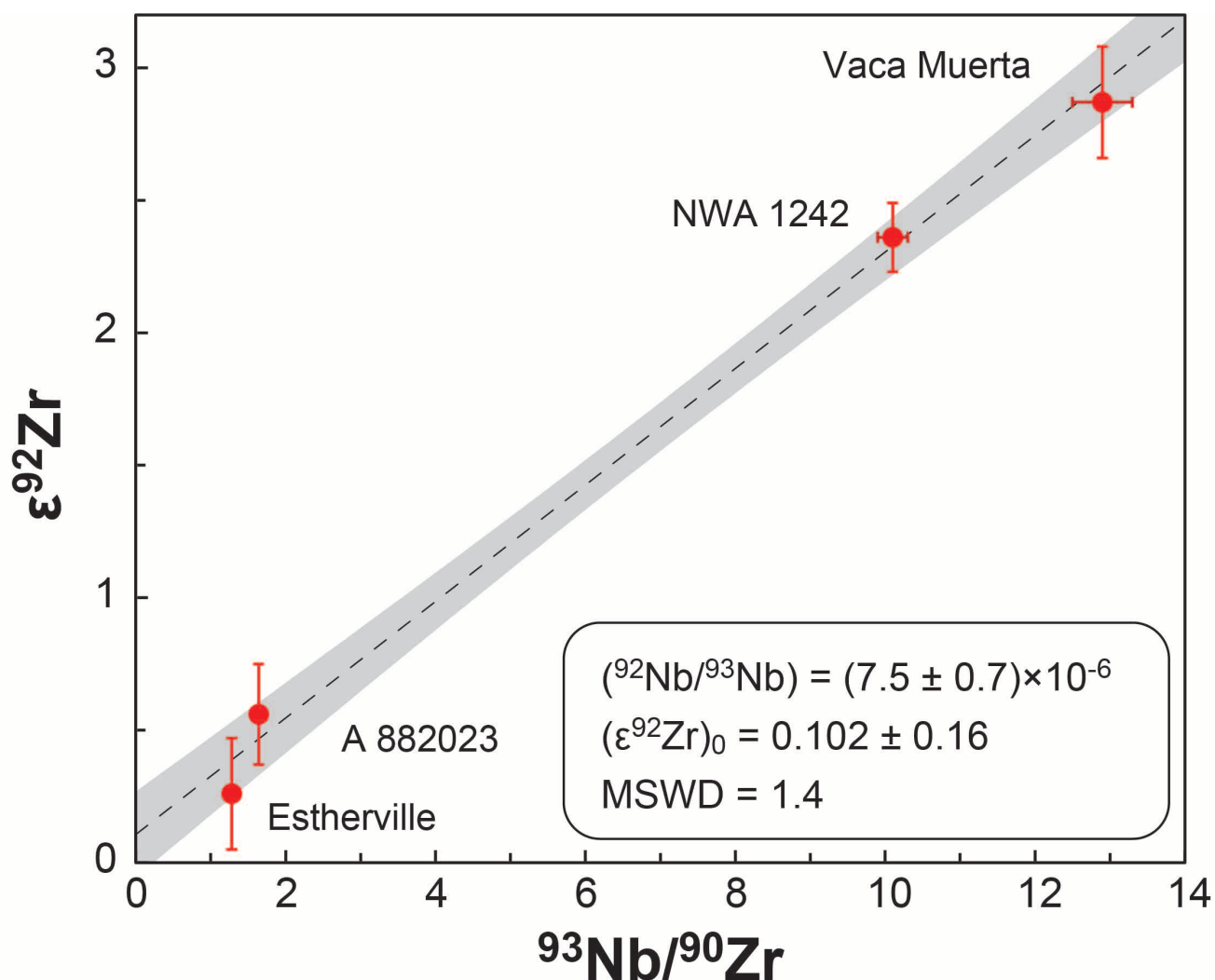


Fig. 1. Nb-Zr isochron diagram for mesosideritic rutiles. The isochron regression and error envelope (95% probability) are shown as a dotted line and gray area, respectively. The data-point errors are 2σ .

パラサイト隕石BrenhamのHf-W年代学 Hf-W chronology of the pallasite Brenham

*本馬 佳賢¹、飯塚 毅¹

*Yoshitaka Homma¹, Tsuyoshi Iizuka¹

1. 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

Pallasites are stony-iron meteorites consisting mainly of rounded olivine and metal. The formation process of the pallasite meteorites have been investigated from the petrological and chemical data, but it is still enigmatic. Two major hypotheses are considered: (i) fractional crystallization of olivine at core-mantle boundary on their parent bodies and (ii) metal-silicate mixing generated by a catastrophic impact. Determining the precise age of the pallasites and, more preferably, their constituent phases, are key to constraining the formation process and the nature of the parent bodies. In this study, Hf-W isotopic analyses have been performed on metal, olivine, and non-magnetic fractions of Brenham, a main group (MG) pallasite. Taking into account the effects of neutron capture and nucleosynthetic anomaly, the $\epsilon^{182}\text{W}$ value of the Brenham metal fraction is determined as $-3.43 \pm 0.23 / -0.30$. The tungsten isotopic value of Brenham metal corresponds to a model age of $-0.22 \pm 2.94 / -3.34$ Myr after the CAI formation. The result indicates that the differentiation on the MG pallasite parent body had occurred within the first 2.7 Myr of the solar system history. We further reveal that the olivine and non-magnetic fractions yielded substantially higher $\epsilon^{182}\text{W}$ value than the metal fraction. Extrapolating an internal isochron using the metal and olivine fraction data yields an age older than the CAIs. This unrealistically old age would be attributed to the apparent elevated $\epsilon^{182}\text{W}$ values of the olivine fractions due to neutron capture. Such neutron capture effect on the $\epsilon^{182}\text{W}$ values can be potentially corrected by analyzing Hf stable isotopes in the fractions.

キーワード：石鉄隕石、Hf-W年代学、コア-マントル分化

Keywords: stony-iron meteorite, Hf-W chronology, core-mantle differentiation

局所サンプリングによるCRコンドライト中のメタル相における強親鉄性元素及びオスミウム同位体分析

Determination of highly siderophile elements and osmium isotope compositions in metal phases from CR chondrites using micro sampling technique

*中西 奈央¹、横山 哲也¹、岡林 識起¹、嶋崎 究¹、臼井 寛裕¹、岩森 光^{1,2}

*Nao Nakanishi¹, Tetsuya Yokoyama¹, Satoki Okabayashi¹, Kiwamu Shimazaki¹, Tomohiro Usui¹, Hikaru Iwamori^{1,2}

1. 東京工業大学、2. 海洋研究開発機構

1. Tokyo Institute of Technology, 2. Agency for Marine-Earth Science and Technology

Metal plays a key role in physicochemical processes that fractionate siderophile elements from lithophile elements in the early solar system, generating variable chemical reservoirs before the onset of planetesimal formation. Highly siderophile elements (HSEs: Re, Os, Ir, Ru, Pt and Pd) have great affinity for Fe-Ni metals relative to silicates. HSEs are refractory and exist as gas only at high temperatures. Therefore, geochemical investigation on HSEs in metal phases for a variety of meteorites can provide an important clue for understanding high temperature processes in the solar nebula. In particular, the ¹⁸⁷Re-¹⁸⁷Os isotope system gives chronological information regarding the fractionation of HSEs.

CR chondrites contain 40–60 vol. % of chondrules with 5–8 vol. % of metal grains and have unique characteristics for the coexistence of metal phases with chondrules [1, 2]. Therefore, CR chondrites are suitable for understanding the genetic linkage between metals and chondrules. Metal grains are found in three different locations of CR chondrites; chondrule interior (“interior grain”), chondrule surficial shells (“margin grain”), and the matrix (“isolated grain”). Previous studies on CR metals [2, 3] suggested that CR metals could have formed via melting and recondensation of surrounding vapor, although the details for the origin of CR metals remains unclear.

In this study, we tried to established a formation model for the series of three types of CR metals based on their HSE abundances and Os isotope compositions. We prepared thick sections of three CR chondrites: NWA 801, NWA 7184, and Dhofar 1432. The petrography and the mineral compositions of these sections were examined with SEM-EDX (Hitachi 3400; Bruker Xflash 5010). We analyzed the abundances of HSEs, major (Fe and Ni), and minor (P, S, Cr, and Co) elements for multi-spots of these grains using fs-LA-ICP-MS (IFRIT, Cyber Laser) and EPMA (JEOL-JXA-8530F), respectively. In addition, we determined Os isotope compositions for two isolated grains in NWA 801. The details for Os isotope analysis using a micro milling system and N-TIMS (TRITON plus, Thermo Fisher Scientific) are described in [4].

The Pd/Ir ratios in all types of CR metal grains decreased rapidly with the increase of Ir concentration. Equilibrium condensation of metals from a gaseous reservoir does not account for the large variation of Pd/Ir. From the HSE abundances in metal grains obtained, we calculated the partition coefficients (*D*) of HSEs between solid and liquid metals. We found that the order of *D* values determined for individual HSEs were consistent with those calculated from the experimental partitioning data [5]. Next, we estimated the initial composition of metal phases that fits the observed data points using the fractional crystallization model. The Ir-normalized initial HSE abundances are all chondritic excluding the Pd/Ir ratio. We speculate that Pd could have been lost during chondrule formation process before metal crystallization, because Pd is relatively volatile among the HSEs. From these evidences, we conclude that CR metals have most likely formed via fractional crystallization.

We found that two isolated metals analyzed have $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ratios (0.1258, 0.1261) close to that of bulk CI (0.1263–0.1265) and CR (0.1253–0.1271) chondrites [6]. Such consistent Os isotope ratios suggest that isolated grains in CR chondrites have formed from a CI-like precursor with preserving the original CI-like $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ratio without substantial Re-Os fractionation. This scenario is supported by the chondritic HSE (excluding Pd) initial abundances in CR metals estimated by the fractional crystallization model.

References: [1] Lee et al. (1992) *GCA*, 56, 2521–2533. [2] Jacquet et al. (2013) *MAPS*, 48, 1981–1999. [3] Connolly et al. (2001) *GCA*, 65, 4567–4588. [4] Nakanishi et al. (2013) *LPSC*, abstract #2407. [5] Chabot and Jones (2003) *MAPS*, 38, 1425–1436. [6] Walker et al. (2002) *GCA*, 66, 4187–4201.

キーワード：コンドライト、メタル相、オスミウム同位体、CRコンドライト
Keywords: chondrite, metal phase, Osmium isotopes, CR chondrtie

Mineralogical and petrological study of plagioclase-bearing lodranite, Yamato 981988.

*安武 正展¹、山口 亮^{1,2}

*Masahiro YASUTAKE¹, Akira Yamaguchi^{1,2}

1. 総合研究大学院大学、極域科学専攻、2. 国立極地研究所

1. Dept. of Polar Science, SOKENDAI, 2. National Institute of Polar Research

Introduction Primitive achondrites are meteorites that have both chondritic and achondritic features. Acapulcoite-lodranite clan is the second largest clan of primitive achondrites [1]. Acapulcoites and lodranites are primarily distinguished based on their grain sizes. Acapulcoites have finer-grained textures (~0.2 mm) whereas lodranites have coarser-grained textures (~0.5-0.7 mm) [2, 3]. Acapulcoites have chondritic modal abundances and bulk chemical compositions. Most lodranites have modal abundances depleted in plagioclase and/or troilite and fractionated bulk chemical compositions. Several transitional acapulcoite-lodranite meteorites have been found. The transitional group has larger grain sizes than acapulcoites, whereas they have modal abundances rich in plagioclase and bulk chemical compositions relatively similar to acapulcoites rather than lodranites [4, 5, 6]. The transitional group provides us with the further clues on the igneous and metamorphic processes on the parent body.

Samples and methods We investigated one polished thin section (PTS) of Y 981988. The PTS was observed by an optical microscope and a FE-SEM (JEOL JSM 7100F). Mineral compositions were obtained by using of an EPMA (JEOL JXA8200). The lattice preferred orientations (LPO) were measured by using of an EBSD detector (Oxford instruments AZtec HKL) mounted on the FE-SEM.

Results Y 981988 shows a coarse-grained texture (~0.7 mm) mainly consisting of olivine (43 vol.%) (Fo_{93}), orthopyroxene (34 vol.%) ($\text{Wo}_{3.0}\text{En}_{88}$) plagioclase (10 vol.%) ($\text{Or}_{2.5-4.8}\text{Ab}_{78-84}$), and Fe,Ni-metal (6 vol.%). Plagioclase occurs interstitially. Some plagioclases partly or entirely enclose olivine and orthopyroxene grains. The lattice preferred orientations of plagioclase crystals are the same in wide areas up to ~6mm width. The PTS contains a large augite crystal (~7 mm) ($\text{Wo}_{43-46}\text{En}_{50-53}$) that poikilitically encloses olivine and orthopyroxene chadacrysts. Minor mineral includes phosphate, schreibersite, troilite and chromite (molar $\text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})\times 100 = 14-16$, molar $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})\times 100 = 51-57$). The pyroxene equilibration temperatures [7] are estimated to be ~1120°C from orthopyroxene and ~1090°C from augite. These temperatures are similar to those of other lodranites [2].

Discussion The mineral compositions are within the range of acapulcoite-lodranite meteorites. The coarse-grained texture favors that Y 981988 is a lodranite. However, modal abundance rich in plagioclase is similar to acapulcoites rather than lodranites.

McCoy et al. [3] found that plagioclase modal abundances among lodranites are correlated with Fa content of olivine, except for EET 84302. They argued that relatively large abundances of plagioclase were caused by low degree of silicate partial melting. They indicated that mafic silicate compositions or low peak temperatures caused low degree of partial melting. The modal abundance of plagioclase of Y 981988 is not correlated with olivine composition.

These observations indicate that Y 983119 suffered silicate partial melting over the solidus temperature, but probably did not experience removal of silicate melt. We suggest that Y 981988 is a transitional acapulcoite-lodranite meteorite.

Reference [1] Weisberg et al., (2006), *Meteorites and the early solar system II*, 19-52. [2] McCoy et al., (1996), *GCA*, 60, 2681-2708. [3] McCoy et al., (1997), *GCA*, 61, 3, 623-627. [4] Yugami et al., 1998, *Antarct. Meteorit. Res.*, 11, 49-70. [5] Floss, (2000), *Meteorit. Planet. Sci.*, 35, 1073-1085. [6] Patzer et al., (2004), *Meteorit. Planet. Sci.*, 39, 1, 61-85. [7] Lindsley, (1983), *Ame. Mineral.*, 68, 477-493.

キーワード：隕石、プリミティブエコンドライト、アカプルコアイトーロドラナイト隕石
Keywords: Meteorite, Primitive achondrite, Acapulcoite-lodranite meteorite

水蒸気雰囲気下におけるフッ素アパタイトの水素拡散実験

Hydrogen diffusion experiment of fluorapatite under water vapor conditions

*東 佳徳¹、伊藤 正一¹、渡邊 賢^{2,3}、坂口 勲³

*Yoshinori Higashi¹, Shoichi Itoh¹, Ken Watanabe^{2,3}, Isao Sakaguchi³

1. 京都大学大学院理学研究科, 2. 九州大学大学院総合理工学研究院, 3. 物質・材料研究機構

1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University, 3. National Institute for Materials Science

アパタイトは、 $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$ で表される普遍的な副成分鉱物であり、陰イオンサイトにF、Cl、OHを含むことから、地球内部や地球外天体内部における水-岩石相互作用の痕跡を残していると考えられている (e.g., [1]). 近年、月や火星試料中のアパタイト結晶の水素同位体組成に基づいて、その天体における水の起源や進化を探る研究が盛んになされている (e.g., [2][3]). しかし、アパタイト結晶の水素同位体組成が、結晶化した際のマグマの値を反映しているのか、それとも結晶化後の水素拡散によって二次的に変化した値であるかは不明瞭である。アパタイト中の水素拡散挙動を理解することは、その水素同位体組成がどのようにして獲得された値であるかを明らかにすることにつながる。最近になって、結晶軸のc軸方向に対するアパタイト結晶中の水素拡散係数が初めて報告された[4]。本研究では、アパタイト結晶中における水素拡散挙動をより詳細に明らかにするため、結晶異方性と含水量依存性の二点に注目した水素拡散実験を行った。

実験試料には、含水量の異なる二種類の天然フッ素アパタイトの単結晶(Durango産: ~500 ppm H_2O [2], Morocco産: ~4000 ppm H_2O [5])を用い、Durango産の結晶は、結晶軸のc軸に対して二通りの方向に切り出している。これらの試料を用いて、重水の水蒸気を拡散源としたトレーサー拡散実験を、500-700Cの温度範囲で行った。拡散プロファイルの取得には、京都大学設置の二次イオン質量分析計(CAMECA ims 4f-E7 SIMS)を用いた。拡散プロファイルから、表面領域で水素と重水素の交換が見られ、両者の和が一定であることから、拡散機構がシンプルな水素同位体の交換反応であることが明らかになった。温度帯と結晶軸の異なる試料の拡散プロファイルからも、それぞれ拡散係数を求め、500-700Cにおける水素拡散のアレニウス則を求めた。

Durango産アパタイトのc軸に対して鉛直方向の水素拡散係数は、平行方向の水素拡散係数に比べて、およそ5倍速かった。含水量の異なるMorocco産の結果からは、水素拡散にOHの量が大きく影響しないことが示唆された。アパタイトの水素拡散の活性化エネルギーは、含水鉱物の水素拡散の活性化エネルギーと同程度であることから、類似の拡散メカニズムを持つことが示唆された。含水鉱物中の水素拡散は、結晶中で水素が酸素との結合を切り替えながら輸送されるGrotthuss mechanismと呼ばれる水素輸送機構に従うと考えられている(e.g., [6])。この拡散メカニズムによるアパタイト結晶中の水素拡散は、アパタイト結晶中の他の元素の拡散と比較して、桁違いに速く、活性化エネルギーも小さいことが明らかになった。本研究の結果から、アパタイト結晶の水素同位体組成が、水成分との反応によって、含水量に影響を与えることなく変化することが示された。水素拡散は、地球外におけるアパタイト結晶の水素同位体組成の決定に重要な役割を果たした可能性がある。

References

[1] Harlov (2015) *Elements*, **11**, 171–176. [2] Greenwood et al. (2011) *Nature Geosci.*, **4**, 79–82. [3] Usui et al. (2015) *Earth Planet. Sci. Lett.*, **410**, 140–151. [4] Higashi et al. (2017) *Geochem. J.* **51**, 115–122. [5] McCubbin et al. (2015) *Am. Mineral.*, **100**, 1668–1707. [6] Marion et al. (2001) *Am. Mineral.*, **86**, 1166–1169.

キーワード：水素、アパタイト、拡散、二次イオン質量分析法

Keywords: Hydrogen, Apatite, Diffusion, SIMS

NanoSIMSを用いたHコンドライト中アパタイトの水濃度測定：インジウム埋込サンプルの活用

Water Content Analyses on Apatite Grains in H Chondrites by NanoSIMS : Application of Indium Mounting Method

*音田 知希¹、小池 みずほ¹、高畑 直人¹、佐野 有司¹、清水 健二²

*Satoki Onda¹, Mizuho Koike¹, Naoto Takahata¹, Yuji Sano¹, Kenji Shimizu²

1. 東京大学大気海洋研究所、2. 海洋研究開発機構 高知コア研究所

1. Atmosphere and Ocean Research Institute, the University of Tokyo, 2. Kochi Core Center, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

普通コンドライトの母天体は一般に無水であったと考えられてきたが、落下Hコンドライトの一部にはハライト[NaCl]が存在することが報告されている[1][2]。このことは普通コンドライト母天体における水の関与を示唆している。普通コンドライト母天体の水の起源については未だによくわかっておらず、母天体が集積する際にもともと取り込まれていた可能性や、彗星のような氷を含む天体が母天体に衝突した可能性が指摘されている[1]。普通コンドライトの水の起源を明らかにすることは初期太陽系における水のふるまいを理解する上で非常に重要である。本研究では特にHタイプコンドライトに着目した。

アパタイト[Ca₅(PO₄)₃(F,Cl,OH)]はOH⁻, F⁻ およびCl⁻ を含むリン酸塩鉱物である。アパタイトはHコンドライトを含む隕石中に広く見られ、水やハロゲンなどの揮発性物質の情報を記録する[3]。さらに、Hコンドライト中のアパタイトの一部はハライトの形成過程と関連があることが指摘されており[2]、母天体上の水のふるまいを探る手がかりになると期待される。しかし、これまで報告されているHコンドライト中のアパタイトの水濃度は100-1000ppm程度[2]と低く、その水濃度を定量的に求めることは困難であった。

このような低い濃度の水をその場分析により定量できるという点で、二次イオン質量分析計(SIMS)はHコンドライトにおけるアパタイトの水濃度の定量において有効である。SIMSによる固体試料の質量分析では、しばしば試料をエポキシ樹脂に包有させる手法が用いられる。エポキシ樹脂は試料中の空隙に入り込んで埋めるため保持性が高く、隕石のような脆い固体試料を扱う際に適している。しかし、有機物である樹脂が試料の空隙に入り込むため、水の分析に対して影響を及ぼす。隕石試料にはクラックをはじめとした空隙が存在しているものが多く、隙間に入り込んだ樹脂による汚染が著しいため、水濃度および水素同位体の測定には不向きである。

本研究では固体試料を金属インジウムに埋め込む手法に着目した[4][5][6]。インジウムは融点が156°Cと低く、やわらかく加工しやすい金属である。金属インジウムに埋め込んだ試料は保持性ではエポキシ樹脂に劣るものの、主成分に水素を含まず、試料の空隙に入りこみにくいため、エポキシ樹脂よりも水の分析に対する影響は少ない。そのため、水濃度が比較的低い(H₂O~100-1000ppm)試料についてもSIMSを用いた水濃度・水素同位体分析を行えると期待される。実際に、De Hoog et al. (2014) [4]が中部大西洋海嶺の斑レイ岩に含まれるジルコンに対してCameca 4fを用いて測定した際に、エポキシ樹脂に埋め込んだ試料の水素イオン(H⁺)のバックグラウンドが165-180cpsであったのに対し、金属インジウムに埋め込んだ試料については18-21cpsであったと報告しており、金属インジウムに埋め込む手法により水素のバックグラウンドを小さくできることが確認されている。

本研究では東京大学大気海洋研究所のNanoSIMS 50を用い、アパタイト試料およびオリビン(アリゾナ州San Carlos産)試料について、エポキシ樹脂とインジウム樹脂に埋め込んだものの水濃度および水素同位体を分析し、比較検討した。さらに、インジウム埋め込みを行ったHコンドライト中のアパタイトにおける水濃度分析を行い、Hコンドライト母天体の水について議論した。

参考文献

[1] Zolensky et al. (1999) Science, **285**, 1377-1379.

- [2] Jones, McCubbin & Guan (2016) *Amer. Min.*, **101**, 2452-2467.
- [3] McCubbin & Jones (2015) *Elements*, **11**, 183-188.
- [4] De Hoog et al. (2014) *GCA*, **141**, 472-486.
- [5] Usui et al. (2012) *EPSL*, **357-358**, 119-129.
- [6] Shimizu et al. (2017) *Geochem. J.* (accepted)

キーワード : アパタイト、Hコンドライト、水濃度、NanoSIMS、インジウム埋め込み

Keywords: apatite, H chondrite, water content, NanoSIMS, indium mounting

High precision Sr isotope measurements for bulk chondrites with complete sample digestion

*深井 稜汰¹、横山 哲也¹、奥井 航¹、長谷川 翔¹

*Ryota Fukai¹, Tetsuya Yokoyama¹, Wataru Okui¹, Sho Hasegawa¹

1. 東京工業大学 地球惑星科学系

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

Nucleosynthetic isotope anomalies have been discovered in bulk chondrites and differentiated meteorites for various refractory heavy elements (e.g., Cr, Ru [1, 2]). In the most cases, the extent of isotope anomalies is variable across different types of meteorites. These results point to the existence of planetary-scale isotope heterogeneities, which are most likely due to the incomplete mixing of dust grains and/or selective destruction of presolar grains during thermal processing in the early solar nebula. However, the processes that have led to the observed isotope heterogeneity are not fully understood. High precision stable Sr isotope analyses on bulk meteorites have been conducted in some previous studies ([3–5]). These studies found isotopic variations of $^{84}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios across three types of chondrites (enstatite, ordinary, and carbonaceous chondrites). However, the extent of Sr isotope heterogeneities across entire classes of chondrites remains unclear due to the limited number of Sr isotope data with sufficiently high precision. In addition, not all studies have performed complete digestion of samples that contained acid resistant presolar grains.

In this study, we revisited high precision Sr isotope analysis of chondrites coupled with a robust sample digestion technique that confirmed complete dissolution of presolar grains. We also improved the analytical reproducibilities of Sr isotope measurement from previous studies by adopting the dynamic-multicollection method with TIMS.

The reproducibilities for NIST 987 standard obtained in a single analytical campaign were 16 ppm for $^{84}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio ($n = 7$, 2SD), which are two times superior to those in previous studies [3–5]. We investigated four enstatite chondrites (EH and EL), seven ordinary chondrites (H, L, and LL), and four types of carbonaceous chondrites (CI, CM, CO, and CV). Three types of ordinary chondrites possess generally uniform $\mu^{84}\text{Sr}$ values* ($= -12 \pm 29$ ppm; 2SD). By contrast, enstatite and carbonaceous chondrites possess variable Sr isotopic compositions depending on each subgroup. For instance, EL chondrites show the lowest $\mu^{84}\text{Sr}$ values ($= -30 \pm 26$ ppm) among all types of chondrites, while EH chondrites show $\mu^{84}\text{Sr}$ values indistinguishable from ordinary chondrites ($= -12$ ppm ± 36 ppm). On the other hand, a CI chondrite (Y-980115) shows $\mu^{84}\text{Sr}$ values ($= 14 \pm 14$ ppm) that is resolved from those of CV chondrite (Allende) showing the highest $\mu^{84}\text{Sr}$ values ($= 36 \pm 21$ ppm) among all types of chondrites. The observed global trend for the $\mu^{84}\text{Sr}$ value that range from -30 ppm for EL chondrites to 36 ppm for CV chondrites is consistent with the results of other heavy refractory elements (e.g., Mo [6], Ru [2], Nd [7]), which have been induced most likely by the selective destruction for presolar grains via nebular thermal processing. Furthermore, the existence of the local trend observed in carbonaceous chondrites would reflect the additional processes that may have occurred in the outer Solar System before the accretion to each parent body for carbonaceous chondrites.

* Parts per 10^6 relative deviation from the standard, NIST 987

[1] Trinquier, A. et al. (2007) *ApJ*, **655**, 1179. [2] Fischer-Gödde, M. and Kleine, T. (2017) *Nature*, **541**, 525. [3] Moynier, F. et al. (2012) *ApJ*, **758**, 45. [4] Paton, C. et al. (2013) *ApJL*, **763**, 40. [5] Yokoyama, T. et al. (2015) *EPSL*, **416**, 46. [6] Burkhardt, C. et al. (2011) *EPSL*, **312**, 390. [7] Gannoun, A. et al. (2011)

PNAS, **108**, 7693.

キーワード：同位体異常、コンドライト、高精度同位体分析

Keywords: Isotope anomalies, chondrites, high precision isotope analysis

Origin of Mo isotope dichotomy between carbonaceous chondrites and non-carbonaceous meteorites

*永井 友一郎¹、横山 哲也²、平田 岳史¹

*Yuichiro Nagai¹, Tetsuya Yokoyama², Takafumi Hirata¹

1. 東京大学大学院理学系研究科附属地殻化学実験施設、2. 東京工業大学理学院地球惑星科学系

1. Geochemical Research Center, Graduate School of Science, The University of Tokyo, 2. Department of Earth and Planetary Science, School of Science, Tokyo Institute of Technology

The existence of nucleosynthetic isotope anomalies for refractory heavy elements in bulk meteorites evidently points to the heterogeneous distribution of dust grains with distinct isotopic compositions in the early solar nebula. Molybdenum is a promising element for the study of nucleosynthetic isotope anomalies in meteorites; previous studies found that bulk meteorites and their constituents including CAIs, chondrules, and presolar materials had nucleosynthetic isotope variations for Mo [1-6]. Recently, Warren [7] discovered isotopic dichotomy for O, Ti, and Cr between carbonaceous chondrites (CCs) and non-carbonaceous meteorites (NCs: ordinary, enstatite, and rumuruti chondrites, differentiated meteorites). Budde et al. [2] suggested that Mo isotopic compositions for CCs and their components could be discriminated from those of NCs. However, highly precise Mo isotopic data for NCs are limited so far because of analytical difficulties. In this study, we provide high precision Mo isotope data for NCs measured with N-TIMS to better understand the origin of source materials for NCs that represent the materials existed in the inner part of the early Solar System.

Molybdenum isotope analyses for nineteen NC samples from ten meteorite groups (ordinary chondrites: H, LL; rumuruti chondrites; irons: IIAB, IIE, IIIAB, IVA, IVB, ungrouped) have been made in this study. The meteorite samples were dissolved with HF-HNO₃ and HCl-HNO₃. Molybdenum was purified by employing two-stage chemical separation technique [8]. Molybdenum isotope analysis was performed with N-TIMS using TRITON *plus* (Thermo Fischer Scientific Inc., Bremen) installed at Tokyo Institute of Technology [9].

The extent of Mo isotope anomalies for NCs is clearly discriminated from that of CCs. Most importantly, the data points for NCs defined a positive linear correlation on the $\mu^{94}\text{Mo}-\mu^{95}\text{Mo}$ diagram passing through the origin (i.e., Earth's composition), whereas those for CCs deviate from the Earth-NCs correlation line. An exception is that IVB irons and ungrouped irons (Chinga) have Mo isotopic compositions similar to CCs, presumably indicating that the parent bodies for these irons have formed under the physical condition (e.g., $f\text{O}_2$) similar to those of CC parent bodies [10-11]. Our observation suggests the existence of contributor which produced Mo isotopic difference between NCs and CCs. A possible carrier phase that involved in this difference is the type X presolar SiC enriched in ⁹⁵Mo and ⁹⁷Mo [6], although a dominant contributor of Mo isotope anomalies are considered to be the mainstream SiC [3].

Based on the data presented here, we propose that the observed Mo isotopic dichotomy has been formed across the formation region of meteorite parent bodies by the time when parent bodies of irons have accreted. The accretion of iron parent bodies for NCs (IIAB, IIE, and IVA) and for presumed CCs (IVB) occurred within 0.3 Myr after CAI formation in the basis of the Hf-W system along with the S contents in irons [12]. The early formation of the two reservoirs regarding Mo isotope anomalies could be associated with the dramatic migration of giant planets that ultimately disturbed the composition of asteroid belt

[13]. Therefore, determination of the timing of giant planet formation is crucial to decode the origin of Mo isotope dichotomy.

$$* \mu^i\text{Mo} = [({}^i\text{Mo}^{96}\text{Mo})_{\text{sample}} / ({}^i\text{Mo}^{96}\text{Mo})_{\text{std}} - 1] \times 10^6$$

reference: [1] Burkhardt et al. (2011) *EPSL*, **312**, 390. [2] Budde et al. (2016) *EPSL*, **454**, 293. [3] Nicolussi et al. (1998a) *GCA*, **62**, 1093. [4] Nicolussi et al. (1998b) *ApJ*, **504**, 492. [5] Savina et al. (2007) *LPSC*, **38**, #2231. [6] Pellin et al. (2006) *LPSC*, **37**, #2041. [7] Warren (2011) *EPSL*, **311**, 93. [8] Nagai and Yokoyama (2014) *Anal. Chem.*, **86**, 4856. [9] Nagai and Yokoyama (2016) *JAAS*, **31**, 948. [10] Campbell and Humayun (2005) *GCA*, **69**, 4733. [11] Walker et al. (2008) *GCA*, **72**, 2198. [12] Kruijer et al. (2014) *Science*, **344**, 1150. [13] Walsh et al. (2011) *Nature*, **475**, 206.

キーワード：隕石、初期太陽系、モリブデン、同位体異常

Keywords: meteorite, early solar system, molybdenum, isotope anomaly

Zn stable isotope contribution to constraint ureilite formation process

*Genevieve Claire Hublet¹, Vinciane Debaille², Luc S Doucet², Richard C Greenwood³, Akira Yamaguchi¹, Nadine Mattielli²

1. National Institute of Polar Research, 2. Université Libre de Bruxelles, 3. The Open University

Ureilites are ultramafic achondrites. They are usually considered to be derived from a single parent body (UPB) now-disrupted. They are mainly composed of olivine and pigeonite. This is already demonstrated that ureilites are mantle restites. But, this hypothesis is not consistent to explained preservation of the primitive characteristics such as the O heterogeneity in ureilites [1] and confirmed by the new $\Delta^{17}\text{O}$ data in our samples. In this study, we report new Zn stable isotopic composition and also ^{26}Al - ^{26}Mg systematic for seven monomict ureilites Yamato (Y) 790981, Y 791538, Y 981750, Y 981810, Asuka (A) 881931, Allan Hills (ALH) 81101 and ALH 84136 to constraint the ureilite formation by smelting process.

Zn isotope analysis of our seven samples yielded non-chondritic and heterogeneous composition in $\delta^{66}\text{Zn}$ signatures ranging $+0.61 \pm 0.01\%$ to $+2.68 \pm 0.11\%$. This heterogeneity in Zn can reflected the isotopic signature of the precursor(s). In opposition, Zn is a moderately volatile element, and alternative explanation already mentioned by previous studies suggested this heavy isotope enrichment may reflect volatilization process following major impact [2]. This explanation is generally supported by the correlation between the $\delta^{66}\text{Zn}$ and the Zn abundance in ureilites. However, this hypothesis is not well supported by the shock degrees. In our study, we evaluated the possibility that $\delta^{66}\text{Zn}$ signature could be produced by smelting process during ureilites genesis like already suggested by [3-4]. To evaluate the effects of such a volatilization process during smelting, we modeled the Zn isotope fractionation in ureilites on the basis of the Rayleigh distillation equation, according to [5] when Zn isotope fractionation was explored during the smelting process in the metallurgic industry. In this model, we made the assumption that UPB precursor had an initial composition in Zn content and $\delta^{66}\text{Zn}$ signature similar to a CI type chondrite. The smelting degrees of our samples were evaluated based on their Zn content. Based on this assumption, we show that the observed $\delta^{66}\text{Zn}$ variability in our ureilites match the data obtained using the smelting process model.

On the other hand, smelting process can occur only if the UPB precursor starts to melt. During this step, the ureilite witch is the residues should be depleted in incompatible elements like suggested by the REE pattern in ureilites [6]. Based on the new REE data [6] and our data, we evidenced correlation between $(\text{Dy}/\text{Lu})_n$ ratios and the degrees of smelting modeled. This observation suggests that smelting degrees increased with the degrees of melting (F).

Finally, based on ^{26}Al - ^{26}Mg isotopic system, no isochron has been obtained with the $\delta^{26}\text{Mg}^*$ and $^{27}\text{Al}/^{24}\text{Mg}$ data analyzed in our samples. If all these samples crystallized at the same time, the $\delta^{26}\text{Mg}^*$ data suggest our samples could come from different parent bodies. However, our data set could also reflect different crystallization ages from a single parent body. Considering the smelting process for ureilites formation, this hypothesis could be considered since smelting was a local process. Assuming all the ureilites originated from a single parent body with a chondritic composition, a model age can be determined. This model age reflects the time when the ureilite common source differentiated from a chondritic reservoir. This differentiation can be modeled at 1.09 ± 0.75 Ma after the CAI formation. [1] Clayton R. & Mayeda T. (1988) GCA, 52, 1313-1318. [2] Moynier F. et al. (2010) Chem. Geol., 276, 374-379. [3] Singletary S. & Grove T. (2003) Meteorit. Planet. Sci., 38, 95-108. [4] Goodrich C.A. et al. (2007) GCA, 71, 2876-2895. [5] Mattielli N. et al. (2009) Atmos. Environ., 43, 1265-1272. [6] Barrat J.-A. et al. (2016), GCA, 194, 163-178

MC-ICPMSを用いた普通コンドライトコンドルールの高精度Mg同位体分析

High precision Mg isotopic measurement of chondrules from ordinary chondrite meteorite using MC-ICPMS

早川 瑛庸¹、福田 航平¹、飯塚 毅¹、*比屋根 肇¹

Akinobu Hayakawa¹, Kohei Fukuda¹, Tsuyoshi Iizuka¹, *Hajime Hiyagon¹

1. 東京大学大学院理学系研究科

1. Graduate School of Science, The University of Tokyo

短寿命放射性核種である²⁶Al（半減期73万年）は、惑星物質の相対的な年代差を議論する上で広く用いられてきた。太陽系最古の物質とされているCa, Al-rich inclusions (CAIs)の高精度なAl-Mg同位体分析から太陽系誕生時の²⁶Al/²⁷Al比は 5.25×10^{-5} であることが明らかとなった [1, 2]。また、未分化隕石の主要構成物質であるコンドルールの形成年代は、CAIsよりも150-400万年後であるとされてきた [3]。しかし近年、高精度なU-Pb年代測定法から、コンドルールの中にはCAIsと同時期に形成していたものも存在することが示唆された [4]。さらに、U-Pb年代が分かっているエコンドライト隕石のAl-Mg同位体分析から逆算した²⁶Al/²⁷Alの初生比は 1.33×10^{-5} という値を示し、CAIsよりも有意に低い値となった [5]。これらの相対年代と絶対年代の矛盾は、初期太陽系における²⁶Alの分布に空間的な不均一が存在した可能性を示唆する。

初期太陽系における²⁶Alの分布の解明は、Al-Mg年代系の妥当性の評価だけではなく、²⁶Alを熱源とした惑星の分化過程など、惑星の進化を考察する上で重要である。分布を議論するために、様々な隕石種およびその構成物質の高精度なAl-Mg同位体分析が必須であるが、特にコンドルールについては分析例が少なく、先行研究は炭素質コンドライト中のコンドルールに限られている [e.g, 6, 7]。そこで本研究では初期太陽系における²⁶Alの空間的均一性を議論することを目的として、マルチコレクター型の誘導結合プラズマ質量分析器 (MC-ICPMS)を用いた高精度Mg同位体分析手法の開発を行った。また、開発した手法の確度を確かめるため、炭素質コンドライト中のCAIを3つ試験的に分析した。さらに、同手法をこれまで分析例のない普通コンドライト中のコンドルールに適用し、炭素質コンドルールとの比較を行うことで、²⁶Alの分布を議論した。

本研究ではNWA 3118 (CV 3)隕石のCAIを2つ、Allende (CV 3)隕石のCAIを1つ、NWA 7936 (LL 3.15)隕石のコンドルール6つについてMg同位体分析を行った。サンプルのMg同位体比は、純粋なMg溶液であるDSM-3 [8]からの偏差を取り、ppmレベルで算出した ($= \mu^{26}\text{Mg}^*$)。地球の岩石であるBCR-2とJB-2について測定を行った結果、それぞれ $\mu^{26}\text{Mg}^* = -5.9 \pm 11.2, 2.3 \pm 20.0 (2\sigma)$ という値を示し、先行研究 (e.g., [9]) と同程度の確度と精度の分析に成功した。3つのCAIsのデータを用いてアイソクロンを引いた結果、²⁶Al/²⁷Alの初生比は $(^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al})_0 = (5.08 \pm 0.84) \times 10^{-5}$ と求まった。また、アイソクロンの切片からは $\mu^{26}\text{Mg}^*_0 = -25 \pm 103$ ppmという値を示し、先行研究とよい一致を示す結果となった[1, 2]。このことから、確立した手法の確度の高さが再確認された。

6つのLLコンドルールのうち5つのLLコンドルールは太陽組成(0.10)に近い²⁷Al/²⁴Mg比(0.091-1.04)を示した。太陽系形成時の²⁶Al/²⁷Al比およびMg同位体比が均一であり ($(^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al})_0 = 5.23 \times 10^{-5}, \mu^{26}\text{Mg}^*_0 = -40$ ppm)、物質形成時から²⁷Al/²⁴Mg比が変化しなかったと仮定すると、現在の太陽組成に近い²⁷Al/²⁴Mg比をもつ物質の現在の $\mu^{26}\text{Mg}^*$ は²⁶Alの壊変の寄与から0 ppmを示すことが予測される。しかし本研究の結果から、LLコンドライト隕石中の太陽組成に近い²⁷Al/²⁴Mg比をもつコンドルールが異なる $\mu^{26}\text{Mg}^*$ を示すことが分かった。また、誤差の範囲を越えて負の値を示すコンドルールも見つかった。したがって、本研究の結果から初期太陽系において²⁶Alが不均一に分布していた可能性が示唆された。

また、先行研究と比較した結果、普通コンドライトのコンドルールは炭素質コンドライトのコンドルールに比べて低い $\mu^{26}\text{Mg}^*$ を示すものが存在することがわかった。 $\mu^{26}\text{Mg}^*_0 = -40$ ppmという値を用いて太陽系形成時における初生²⁶Al/²⁷Al比を算出した結果、炭素質コンドルールはCAIと同等もしくは67%ほど低い値を示したのに対し、普通コンドルールはCAIに対して47%ほど低い値を示した。以上の結果から、普通コンドライト

および炭素質コンドライトコンドルールにおいて、 ^{26}Al の寄与が不均一であった可能性が示唆された。

[1] Jacobsen B. et al. (2008) *Earth and Planet. Sci. Lett*, **272**, 353-364. [2] Larsen K. K. et al. (2011) *The Astrophysical Journal Lett*, **735**, L37. [3] Kita N. T. et al. (2013) *Meteoritics and Planet. Sci*, **48**, 1383-1400. [4] Connely J. N. et al. (2012) *Science*, **338**, 651-655. [5] Schiller M. et al. (2015) *Earth and Planet. Sci. Lett*, **420**, 45-54. [6] Luu T.-H. et al. (2015) *PNAS*, **112**, 1298-1303. [7] Olsen M. B. et al. (2016) *Geochim. Cosmochim. Acta*, **191**, 118-138. [8] Galy A. et al. (2003) *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, **18**, 1352-1356. [9] Bizzarro M. et al. (2005) *The Astrophysical Journal*, **632**, L41-L44.

キーワード：マグネシウム同位体、誘導結合プラズマ質量分析法、コンドルール、難揮発性包有物、初期太陽系

Keywords: Mg isotopes, ICPMS, chondrule, CAI, early solar system

アエンデ隕石の火成CAIにみられる鋳物の結晶成長と酸素同位体の非平衡分布との関係

Crystal growth and disequilibrium distribution of oxygen isotopes of minerals in an igneous Ca-Al-rich inclusion from the Allende carbonaceous chondrite

*川崎 教行¹、サイモン スティーブ²、グロスマン ローレンス²、坂本 直哉³、塚本 尚義^{3,1}

*Noriyuki Kawasaki¹, Steven B Simon², Lawrence Grossman², Naoya Sakamoto³, Hisayoshi Yurimoto^{3,1}

1. 宇宙科学研究所、2. シカゴ大学、3. 北海道大学

1. ISAS/JAXA, 2. The University of Chicago, 3. Hokkaido University

隕石に含まれるCAI (Ca-Al-rich inclusion)は、高温鋳物から成る、太陽系最古の岩石である (Connelly et al., 2012)。CAIを構成する鋳物の酸素同位体比は、三酸素同位体図上で、CCAM (carbonaceous chondrite anhydrous mineral)ラインと呼ばれる非質量依存分別線上にプロットされる同位体非平衡分布をもつことが知られている (Clayton et al., 1977; Clayton, 1993)。鋳物内・鋳物間における酸素同位体の非平衡分布の起源は、二次イオン質量分析法 (SIMS)を用いたCAI構成鋳物の局所分析データなどにに基づき、長年議論されているが (e.g., Yurimoto et al., 2008 and references therein), まだ解決には至っていない。起源の解明のため、本研究では、アエンデ隕石の火成Type B1 CAI (TS34; e.g., Clayton et al., 1977)の構成鋳物の酸素同位体組成の局所分析と²⁶Al-²⁶Mg年代測定を行い、CAI鋳物の結晶成長、晶出順序と対応させた。それにより、火成CAIの鋳物内・鋳物間における酸素同位体の非平衡分布が、CAI結晶化中の、メルトの酸素同位体組成変化により形成されたことがわかった。局所同位体分析は、北海道大学のSIMS (Cameca ims-1280HR)で行った。

火成組織をもつTS34 CAIは、主にメリライト、ファッサイト (TiとAlに富む単斜輝石)、スピネルと、少量のアノーサイトから成る。分析した鋳物の酸素同位体組成は、先行研究 (Clayton et al., 1977; Connolly et al., 2003)と調和的に、CCAMライン上に分布した。スピネルは均一に¹⁶Oに富む組成 ($\Delta^{17}\text{O} = -22.7 \pm 1.7 \text{ ‰}$, 2SD), メリライトは均一に¹⁶Oに乏しい組成 ($\Delta^{17}\text{O} = -2.8 \pm 1.8 \text{ ‰}$)を示し、酸素同位体組成と結晶成長との相関は見られない。ファッサイト単結晶は、Tiに富む組成からTiに乏しい組成へと徐々に変化する、顕著な結晶成長ゾーニングを示す。酸素同位体組成のラインプロファイルにより、ファッサイトの酸素同位体組成は結晶成長に対応した連続的な変化が観察された。ファッサイトの酸素同位体組成は、その結晶成長が進むにつれ、¹⁶Oに乏しい組成 ($\Delta^{17}\text{O} \sim -3 \text{ ‰}$)から¹⁶Oに富む組成 ($\Delta^{17}\text{O} \sim -23 \text{ ‰}$)に変化していた。この酸素同位体組成の広がり、TS34 CAI鋳物の酸素同位体分布の全範囲に相当する。ファッサイト結晶成長中の酸素同位体組成の変化は、メルトの酸素同位体組成が、¹⁶Oに乏しい組成から富む組成へと変化していたことを示し、メルトの変化は¹⁶Oに富む周囲の星雲ガスとの酸素同位体交換により起きたものだと考えられる。初期に結晶した¹⁶Oに乏しいファッサイトは、メリライトと平衡な酸素同位体組成 ($\Delta^{17}\text{O} \sim -3 \text{ ‰}$)をもち、メリライトの結晶化の終了近くから結晶し始めたものであろう。一方、¹⁶Oに富み、リキダス鋳物であるスピネル (Stolper, 1982)は、一連の溶融・結晶化イベントでは溶け残り鋳物であったと考えることができる。アノーサイトの酸素同位体組成は、 $\Delta^{17}\text{O} \sim -2 \text{ ‰}$ から -9 ‰ の間に分布し、その範囲はファッサイトの酸素同位体分布の片側に該当する。アノーサイトとファッサイトの酸素同位体組成の関係は、ファッサイト結晶成長の初期から中間期にかけて、アノーサイトがファッサイトと同時に結晶成長していたことを示唆する。以上のTS34 CAI構成鋳物の晶出順序の関係は、CAIメルトの相平衡図 (Stolper, 1982)と調和的である。TS34 CAIに記録された、鋳物内・鋳物間の酸素同位体の非平衡分布は、メルトからの結晶成長、晶出順序に対応していることが示された。導かれた形成過程から、初期太陽系円盤内のTS34 CAIの形成領域には、¹⁶Oに富むリザーバーと¹⁶Oに乏しいリザーバーが存在していたことが示唆される。TS34 CAIのメリライトとファッサイトの²⁶Al-²⁶Mg鋳物アイソクロンは、 $(^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al})_0 = (5.003 \pm 0.075) \times 10^{-5}$ のAl同位体初生比を示し、カノニカル年代 (Larsen et al.,

2011)との相対年代差は 5 ± 2 万年である。本研究により、太陽系誕生から約5万年後までに、 ^{16}O に富むリザーバーと ^{16}O に乏しいリザーバーが、太陽系星雲内に存在していたことが明らかとなった。

A combined study of Be-B and Al-Mg systematics on CH and CH/CB CAIs

*福田 航平¹、藤谷 渉²、比屋根 肇¹、杉浦 直治¹、鹿児島 涉悟³、高畑 直人³、佐野 有司³

*Kohei Fukuda¹, Wataru Fujiya², Hajime Hiyagon¹, Naoji Sugiura¹, Takanori Kagoshima³, Naoto Takahata³, Yuji Sano³

1. 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻、2. 茨城大学理学部、3. 東京大学大気海洋研究所

1. Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, 2. College of Science, Ibaraki University, 3. Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

Beryllium-10, which decays to ¹⁰B with a half-life of 1.4 Myr [1], is considered as a key indicator of irradiation processes in the Early Solar System (ESS). However, recent numerical studies [2, 3] have demonstrated that ¹⁰Be can be produced by stellar processes with neutrino reactions, which rendered reconsideration of the origin of ¹⁰Be in the ESS. In order to further understand the origin of ¹⁰Be, it is important to determine the accurate initial abundances of ¹⁰Be in several types of meteoritic components. Previous studies implied that CH and CB chondrites contain a high proportion of the outer solar system material based on their bulk Mg- and Cr-isotopic compositions and ¹⁵N-rich bulk compositions [e.g., 4, 5]. If this is correct, CH and CB CAIs may have information different from CAIs in other types of chondrites. In the present study, we have conducted Be-B and Al-Mg measurements on CH and CH/CB CAIs with newly determined Be/B relative sensitivity factors using synthetic glass standards.

We studied 8 CAIs from the Sayh al Uhaymir 290 (CH) and the Isheyevu (CB/CH) chondrites. Be-B and Al-Mg measurements were conducted with a NanoSIMS 50 at Atmosphere and Ocean Research Institute (AORI), The Univ. of Tokyo. Seven out of 8 CAIs show highly variable initial ¹⁰Be/⁹Be ratios ranging from 1.1 to 33 x 10⁻⁴. They cannot be explained by a molecular cloud origin [6, 7] or a stellar origin [3], suggesting that they have experienced solar cosmic ray irradiation near the proto-Sun. In contrast to Be-B systematics, all CAIs studied here do not show resolvable excesses in ²⁶Mg. This could be attributed to: (1) heterogeneous distribution of ²⁶Al in the protoplanetary disk, (2) formation prior to injection of ²⁶Al, or (3) late formation after a significant decay of ²⁶Al. (1) is unlikely because CH and CB/CH CAIs may have formed in the same region as that of CV CAIs (= near the proto-Sun) as inferred from the Be-B systematics [e.g., 8-12, this study]. (2) is possible because CH and CB/CH CAIs have highly refractory nature relative to CV canonical CAIs. (3) may be a simpler interpretation. If (3) is the case, the transportation mechanism from near the proto-Sun to the accretion region of CH and CB parent bodies must have existed at least until the timing of CH and CB/CH CAI formation.

[1] Korschinek G. et al. 2010. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B.* 268:187-191. [2] Yoshida T. et al. 2008. *ApJ.* 686: 448-466. [3] Banerjee P. et al. 2016. *Nat. Commun.* 10, 1038. [4] Van Kooten E. M. M. E. et al. 2016. *PNAS.* 113: 2011-2016. [5] Bonal L. et al. 2010. *GCA.* 74: 6590-6609. [6] Desch S. J. et al. 2004. *ApJ:* 602, 528-542. [7] Tatischeff V. et al. 2014. *ApJ.* 796,:124 (20pp). [8] McKeegan K. D. et al. 2000. *Science.* 289: 1334-1337. [9] Sugiura N. et al. 2001. *MAPS.* 36:1397-1408. [10] Chaussidon M. et al. 2006. *GCA.* 70:224-245. [11] Wielandt D. et al. 2012. *ApJ.* 748: L25 (7pp). [12] Gounelle M. et al. 2013 *ApJ.* 763: L33 (5pp).

キーワード：宇宙線照射、原始太陽系円盤、難揮発性包有物、二次イオン質量分析計

Keywords: cosmic ray irradiation, solar protoplanetary disk, Ca, Al-rich inclusion, SIMS