

## 含水コンドライト母天体の形成年代・場所 Formation ages and places of hydrated chondrite parent bodies

藤谷 渉<sup>1\*</sup>  
FUJIYA, Wataru<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> マックスプランク研究所  
<sup>1</sup>Max Planck Institute

When and where hydrated chondrite parent bodies accreted is a key question to understand the origin of chondritic water and the dynamical processes of the solar system evolution.

The ages of aqueous alteration can be inferred from  $^{53}\text{Mn}$ - $^{53}\text{Cr}$  systematics of aqueously-formed secondary minerals (carbonates in CM, CI, and CR chondrites and fayalite in CV, CO, and ordinary chondrites). The  $^{53}\text{Mn}$ - $^{53}\text{Cr}$  ages of carbonates and fayalite in carbonaceous chondrites (CCs) are similar, 3.5 – 5 Myr after the birth of the solar system (represented by CAIs in CVs) (Fujiya et al., 2013; Doyle et al., submitted). Fayalite in ordinary chondrites (OCs) seems to have formed slightly earlier (~1 Myr) than that in CCs. These observations are consistent with  $^{26}\text{Al}$ - $^{26}\text{Mg}$  ages of chondrules (e.g., Kita and Ushikubo, 2012). The  $^{53}\text{Mn}$ - $^{53}\text{Cr}$  ages of aqueous alteration indicate that water activity on CC and OC parent bodies started almost contemporaneously, and that the dominant heat source for aqueous alteration is the decay energy of  $^{26}\text{Al}$  (half-life: 0.7 Myr). Based on these ages, numerical simulations of the thermal history of CC and OC parent bodies suggest that they accreted 2.5 – 4 Myr after CAIs (Sugiura and Fujiya, 2014).

The formation places of chondrite parent bodies in the protoplanetary disk are more difficult to be inferred. The estimated water (ice) to rock mass ratios of CCs and OCs (<0.6) (e.g., Clayton and Mayeda, 1999), significantly lower than the solar value (1.2) (Lodders, 2003), suggest that CC and OC parent bodies accreted near from the snow line. The inferred D/H ratios and O isotopic compositions of water in CCs are likely to be significantly different from those of primordial (molecular cloud) water and/or most Oort-cloud comets measured so far, indicating that they must have recorded various degrees of isotopic re-equilibration between primordial water and nebular gas (Alexander et al., 2012; Krot et al., 2013). Model predictions on the location of the snow line 2.5 – 4 Myr after CAIs (e.g., Ciesla and Cuzzi; 2006) and both the temporal and the spatial distribution of H and O isotopic ratios of water in the protoplanetary disk (e.g., Yang et al., 2011, 2013) suggest that hydrated chondrite parent bodies accreted in the main asteroid belt. I am currently trying to constrain the contribution of C from cometary inorganic ice to the C inventory in CCs. Carbon isotopic ratios of carbonates in Murchison (CM) suggest that C reservoirs in primitive aqueous fluids were highly enriched in  $^{13}\text{C}$  with  $\delta^{13}\text{C} > 70$  ‰, which provides no evidence for C contribution from cometary ice (Fujiya et al., submitted).  
Keywords: Hydrated chondrites, Formation ages, Formation places, Compositions of stable isotopes

## NWA1232 CO<sub>3</sub>隕石に含まれる水質変成の痕跡を示すクラスト Aqueously altered clasts in the NWA1232 CO<sub>3</sub> carbonaceous chondrite

松本 恵<sup>1\*</sup>; 留岡 和重<sup>2</sup>; 瀬戸 雄介<sup>2</sup>; 三宅 亮<sup>3</sup>; 桐石 美帆<sup>2</sup>; 梅原 まり子<sup>2</sup>; 山本 由紀子<sup>2</sup>;  
浜根 大輔<sup>4</sup>

MATSUMOTO, Megumi<sup>1\*</sup>; TOMEOKA, Kazushige<sup>2</sup>; SETO, Yusuke<sup>2</sup>; MIYAKE, Akira<sup>3</sup>; KIRIISHI, Miho<sup>2</sup>;  
UMEHARA, Mariko<sup>2</sup>; YAMAMOTO, Yukiko<sup>2</sup>; HAMANE, Daisuke<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学研究基盤センター, <sup>2</sup> 神戸大学大学院理学研究科, <sup>3</sup> 京都大学大学院理学研究科, <sup>4</sup> 東京大学物性研究所  
<sup>1</sup>CSREA, Kobe Univ., <sup>2</sup>Graduate School of Science, Kobe Univ., <sup>3</sup>Graduate School of Science, Kyoto Univ., <sup>4</sup>ISSP, Tokyo Univ.

これまで、水質変成や角礫岩化の痕跡を示す CO 隕石はほとんど報告されていないことから、CO 母天体はドライで静的な天体であると考えられてきた。しかし、Northwest Africa 1232 (NWA1232) は、熱変成度の異なる3つの岩相 (A, B, C) からなる角礫岩組織を示す珍しい CO<sub>3</sub> 隕石である<sup>[1,2]</sup>。さらに最近、我々は、NWA1232 隕石の岩相 A 内に、熱変成度の異なる多数の小さな (直径 100-1800 μm) クラストが存在することを見出した<sup>[3,4]</sup>。これらのクラストの多くは、非常に熱変成度が低く、含水鉱物を含んでいる。NWA1232 隕石が示すこれらの特徴は、CO 母天体の形成過程に関する新たな情報を含んでいると考えられる。本研究では、これらの含水鉱物を含むクラストについて、形成過程の解明を目的に岩石・鉱物学的特徴を詳しく調べた。隕石薄片の組織観察・組成分析には SEM-EDS, TEM-EDS, EPMA-WDS を、微小鉱物の結晶相同定には SPring-8 の SR-XRD を用いた。

クラストは岩相 A 内の広い範囲に分布しており、それらのうち含水鉱物を含むものが大部分であり、岩相 A の約 2 vol. % を占めている。クラストの多くは、単一のコンドリユールとその周りをリムのように囲む細粒なマトリックス物質からなるが、比較的大きく複数のコンドリユールや CAI を含むものも少数存在する。

クラスト中のコンドリユールは、ほとんどが Type I であり、オリビン斑晶は Fe-Mg ゾーニングを示さず、均質 (Fa<sub>1</sub>) である。このような特徴は、熱変成度の低い CO<sub>3.0</sub> 隕石に類似している。また、コンドリユール中のエンスタタイト斑晶やメソスタシスの一部は、微小な (10-20 nm) 層状ケイ酸塩鉱物と少量の Fe, Si, Mg に富む非晶質物質に交代している。これらの非晶質物質中には、ごく少量の細粒な (<100 nm) オリビン粒子が含まれている。TEM 観察の結果、層状ケイ酸塩のほとんどは、~0.7 nm の層間隔を示すことから、サーペンティンであると考えられる。ただし、1.0-1.1 nm の層間隔をもつメクタイトも少量存在する。これらの層状ケイ酸塩は、組成的には非晶質物質と区別できない。

一方、クラストのコンドリユールを囲むリム状のマトリックスは、主に Fe, Si, Mg に富む非晶質物質からなり、比較的粗粒な (1-2 μm) マグネタイト, Mg に富むオリビン, エンスタタイト, 細粒な (100-500 nm) オリビン, トロイライト, 微小な (10-20 nm) サーペンティンを含んでいる。サーペンティンは、組成的には非晶質物質と区別できない。この非晶質物質は、鉱物学的特徴・化学組成がコンドリユール中の非晶質物質に類似している。

以上の結果から、クラストは弱い水質変成を経験していると考えられる。一方、水質変成の影響はクラストの外部には及んでいないことから、クラストは、母天体中の、隕石が最終的に固化した場所とは異なる場所で水質変成を経験した後、角礫岩化作用によって細かく破碎し、岩相 A 内に混合したと考えられる。また、クラスト中のコンドリユール、マトリックスの鉱物学的特徴・化学組成は、極めて始原的とされる ALHA77307 CO<sub>3.0</sub> 隕石<sup>[5]</sup> に類似しており、成因的な関連が示唆される。

References: [1] Kiriishi and Tomeoka (2008), JMPS, 103, 161-165. [2] Umehara et al. (2009), JAMS Annual Meeting (abstract). [3] Kiriishi et al. (2009), JAMS Annual Meeting (abstract). [4] Matsumoto et al. (2014), JpGU Meeting (abstract). [5] Brearley (1993), GCA, 57, 1521-1550.

キーワード: CO 隕石, クラスト, 角礫岩化, 水質変成, TEM, SR-XRD

Keywords: CO chondrite, clast, brecciation, aqueous alteration, TEM, SR-XRD

## MgO-SiO<sub>2</sub>系における非晶質珪酸塩の水質変成実験 Hydrothermal alteration experiments of MgO-SiO<sub>2</sub> amorphous silicates

高橋 竜平<sup>1</sup>; 土山 明<sup>1\*</sup>; 三宅 亮<sup>1</sup>; 河村 雄行<sup>2</sup>

TAKAHASHI, Ryohei<sup>1</sup>; TSUCHIYAMA, Akira<sup>1\*</sup>; MIYAKE, Akira<sup>1</sup>; KAWAMURA, Katsuyuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 岡山大学大学院環境生命科学研究科環境科学専攻

<sup>1</sup>Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, <sup>2</sup>Graduate School of Environmental and life Science, Okayama University

Hydrothermal alteration is one of the important processes for solid evolution in the early solar system. So far, many experiments have focused on reaction between aqueous fluids and meteorite itself or crystalline silicates, such as olivine and pyroxene (e.g., [1, 2]). Reaction with amorphous silicates is also important because interstellar dust as original building blocks of planetesimals is mostly amorphous [3] and primitive amorphous silicates are present in cometary dust as GEMS (e.g., [4]) and some carbonaceous chondrites (e.g., [5]). Hydrothermal alteration experiments with amorphous silicates were also carried out using natural GEMS [6] and synthetic materials with CI composition [7]. However, any experiments using amorphous silicates in a simple system have not been made. In this study, hydrothermal alteration experiments of amorphous silicates in the system MgO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O were carried out to understand basic features of hydrous layer silicate formation.

Nanoparticles of amorphous silicates ~10 nm in size with nearly enstatite and forsterite compositions (E and F: Mg/Si = 1.15 and 2.02) were synthesized by the induction thermal plasma method as starting materials. Intermediate compositions were also prepared by mixing E and F (ME, M and MF: Mg/Si=1.25, 1.5 and 1.75). Three types of experiments were made. (1) Synthetic experiments: Starting materials and pure water (water/rock ratio: W/R=5.0) were sealed and heated at 50, 100, 150 and 200°C or held at room temperature for 0 to 1344 hrs. The run products were dried in vacuum and examined by powder X-ray diffraction (XRD) and SEM/EDX. (2) In-site experiments: Starting materials mixed with pure water (W/R=5.0) were exposed in water-saturated atmosphere at 60°C and repeatedly measured by in-situ powder XRD (total duration: 9-292.5 hrs.). The final run products were dried in vacuum and measured again by powder XRD. (3) Swelling experiments: some dried run products were immersed in ethylene glycol, glycerol or water and measured by powder XRD to check swelling.

Layer silicates formed in all the run products even at room temperature. Brucite and sometimes magnesite were formed in runs using F. XRD reflection peaks of the layer silicates are weak and broad particularly for the (001) peak suggesting that they are thin and have low crystallinity. The (001) lattice spacing and the chemical compositions of the run products together with the results of the swelling experiments indicate that the layer silicates are disordered mixed layer minerals of stevensite (Mg-smectite) or vermiculite, serpentine and talc. The (001) peak becomes sharper to some extent and shift to higher  $2\theta$  (smaller lattice spacing) with increasing run duration or temperature except for runs using E. The crystallinity and degree of mixing order also changed by drying process. The experimental results can be explained by that aqueous solutions of high degree of supersaturation with respect to layer silicate minerals formed by instantaneous dissolution of metastable amorphous silicate nanoparticles with high reactivity, and disordered mixed layer minerals metastably formed from these solutions. The presence of disordered mixed layer minerals in some carbonaceous chondrites, such as in CI [8], indicates that they formed from amorphous silicates. It should also be noted that we could not discuss hydrothermal conditions based on the present features of layer silicate minerals in meteorites, as they could be different from those during hydrothermal alteration.

[1] Jones and Brearley (2006) GCA, 70: 1040. [2] Ohnishi and Tomeoka (2007) MAPS, 42: 49. [3] Kemper et al. (2004) ApJ, 609: 826. [4] Bradley et al. (1994) GCA, 58: 2123. [5] Greshake (1997) GCA, 61: 437. [6] Nakamura et al. (2005) MAPS, 40: A110. [7] Noguchi et al. (2008) MAPS, 43: A177. [8] Tomeoka and Buseck (1988) GCA, 52: 1627.

キーワード: 含水層状珪酸塩, 水質変成作用, 炭素質コンドライト, 誘導熱プラズマ法, 不規則混合層鉱物

Keywords: hydrous layer silicate, hydrous alteration, carbonaceous chondrites, induction thermal plasma method, disordered mixed layer minerals

## 水熱変成・脱水加熱実験による炭素質コンドライト中に見られるネフェリン形成過程の推定 Hydrothermal and heating experiments: Implications for formation process of nepheline in carbonaceous chondrite

市村 隼<sup>1\*</sup>; 瀬戸 雄介<sup>1</sup>; 留岡 和重<sup>1</sup>; 大井 修吾<sup>2</sup>  
ICHIMURA, Shun<sup>1\*</sup>; SETO, Yusuke<sup>1</sup>; TOMEOKA, Kazushige<sup>1</sup>; OHI, Shugo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 京都大学大学院理学研究科

<sup>1</sup>Graduate School of Science, Kobe University, <sup>2</sup>Graduate School of Science, Kyoto University

CO、CV 隕石には、ネフェリン ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) やソーダライト ( $\text{Na}_4\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{Cl}$ ) といった Na に富む鉱物が存在し、コンドライト組織全体に分布している (e.g., Kimura et al., 2014; Matsumoto et al., 2014)。これらの鉱物は周囲の鉱物に比べ著しく平衡凝縮温度が低いことから、星雲からの直接凝縮物ではなく、母天体上での水質変成により形成したと示唆されている (e.g., Russell et al., 1998; Tomeoka and Itoh, 2004)。Na 元素は、揮発性が高く、水の活動により容易に移動するという特徴から、母天体上の水質変成プロセスを解読する上で重要なトレーサーとなる。ただし、実際の隕石母天体環境を模擬した上で、Na に富む鉱物が生成した実験例はほとんどない。そこで本研究では、ネフェリンの前駆物質とされるメリライトおよび斜長石に対して、pH が異なる様々な溶液を用いて水熱変成実験を行い、隕石母天体における水質変成過程の解明を目指した。

出発物質には、合成メリライト ( $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ ) および天然産の斜長石 ( $\text{Na}_{0.52}\text{Ca}_{0.48}\text{Al}_{1.48}\text{Si}_{2.52}\text{O}_8$ ) 粉末試料を用いた。反応溶液には、1N-HCl (pH 0)、 $\text{H}_2\text{O}$  (pH 7) 0.1N (mol/l) -NaOH (pH 13)、1N-NaOH (pH 14) の4種類を用い、さらに  $\text{SiO}_2$  成分を様々な量比で加えた。各溶液の  $\text{Na}^+$  濃度は 1 mol/l になるように NaCl を加え、溶液と試料の体積比 (W/R) は 10, 100, 1000 に調整した。水熱変成実験は小型オートクレーブを使用し、温度 200 °C、圧力約 15 気圧で 168 時間行った。回収試料の相定・組成分析には、X線回折装置 (XRD)、走査型電子顕微鏡および透過型電子顕微鏡を用いた。さらに、実験生成物の脱水・相転移過程を明らかにするために、熱重量・示差熱分析 (TG-DTA) 実験を行った。

メリライトを出発物質として W/R = 100 かつ中性から塩基性の条件で行った実験では、 $\text{SiO}_2$  成分が少ない場合はハイドログロシュラー ( $\text{Ca}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_{1.6}[\text{O}_4\text{H}_4]_{1.3}$ ) が生成した。 $\text{SiO}_2$  成分が多い場合は、アナルサイム ( $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )、ネフェリンハイドレート ( $\text{Na}_3\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12} \cdot \text{H}_2\text{O}$ )、ベーシックカンクリナイト ( $\text{Na}_8\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}[\text{OH}]_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) およびトベルモライト ( $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}[\text{OH}]_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) が確認された。ネフェリンハイドレートとベーシックカンクリナイトは、溶液の pH が高いほど生成量が増える傾向にある。また、W/R を 10 倍 (W/R = 1000) にした実験では新たな反応生成物は見られなかったものの、W/R を 0.1 倍 (W/R = 10) にした実験では、アナルサイムとベーシックカンクリナイトが生成した。酸性溶液 (pH 0) を用いると、メリライトが溶解し、二次的な固相生成物は見られなかった。

斜長石を出発物質として W/R = 100 で行った実験では、酸性から中性溶液の条件下において新たな反応生成物は見られなかったものの、塩基性の条件下ではアナルサイム、ネフェリンハイドレートの生成が確認された。ネフェリンハイドレートに関しては、メリライトと同様に、pH の高い条件において生成する傾向がみられた。W/R = 10 にしても、生成物の鉱物相組み合わせは変わらなかった。

合成したネフェリンハイドレート (含水量 11 wt %) を対象に、大気圧中 5 °C/min の昇温速度条件において TG-DTA 実験を行ったところ、約 100 °C から結晶構造中の  $\text{H}_2\text{O}$  が脱離し、約 800 °C で脱水反応が完了した。また、DTA および XRD の結果から、この昇温速度条件では約 800 °C でネフェリンへの相転移が生じる。また、昇温速度を変えて相転移温度を観測し、相転移に必要な時間と温度の関係を解析したところ、400 °C に保持された環境において、ネフェリンハイドレートからネフェリンへの相転移は、少なくとも約  $10^3$  年で進行するという結果が得られた。アナルサイム (含水量 8wt%) については大気圧中 2 °C/min の昇温速度条件で TG-DTA 実験し、脱水反応は約 120 °C から開始し、約 500 °C で完了した。少なくとも 1000 °C の時点でネフェリンと非晶質物質に変成していることが XRD により判明した。ただし、DTA 曲線が示す挙動が複雑で、ネフェリンの転移時間と温度の関係を見積もることはできなかった。

以上の結果から、メリライト・斜長石は、Na に富む中性~アルカリ溶液と反応すると、直接ネフェリンに変成するのではなく、ハイドログロシュラー、ネフェリンハイドレート、アナルサイムといった含水鉱物に変成することが明らかになった。溶液中の Si イオン濃度が高い条件では、アナルサイムが生成し易く、低い場合は  $\text{Al}_2\text{O}_3$  に富むハイドログロシュラー、ネフェリンハイドレートが生成される傾向にある。また、アナルサイム、ネフェリンハイドレートを加熱脱水した場合は、比較的容易にネフェリンに変化することが判明した。本研究の実験条件は、炭素質コンドライトの母天体においても十分に起こりうる環境である。炭素質コンドライト中のネフェリンも、ネフェリンハイドレートやアナルサイムなどの中間生成物を經由して形成されることが示唆された。

キーワード: ネフェリン, メリライト, 水質変成, 水熱変成実験, 脱水加熱実験, 炭素質コンドライト

---

PPS22-04

会場:A02

時間:5月28日 10:00-10:15

Keywords: nepheline, melilite, aqueous alteration, hydrothermal experiments, dehydration heating experiments, carbonaceous chondrite

## MAC 88107 隕石の微細組織：この隕石は本当に星雲集積岩か Microtextures in the MAC 88107 carbonaceous chondrite: Is this meteorite really a primary accretionary rock?

酒井 碧<sup>1\*</sup>; 留岡 和重<sup>1</sup>; 瀬戸 雄介<sup>1</sup>; 三宅 亮<sup>2</sup>

SAKAI, Midori<sup>1\*</sup>; TOMEOKA, Kazushige<sup>1</sup>; SETO, Yusuke<sup>1</sup>; MIYAKE, Akira<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻地質学鉱物学教室

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Kobe University, <sup>2</sup>Department of Geology and Mineralogy, Graduate School of Science, Kyoto University

MAC 88107 隕石は、CM-CO グループの中間的な性質を持つ ungrouped 炭素質コンドライトである<sup>[1]</sup>。一般的な炭素質コンドライトは、コンドリュールなどの粗粒な構成物とそれらの間を埋める細粒なマトリックスからなり、マトリックスは隕石の>30 vol.%を占める。これに対し、MAC 88107 隕石はマトリックスを持たず、大部分がコンドリュール、CAI、AOA とそれらを囲むリムからなる。リムは星雲中でコンドリュールの表面に塵が付着して形成されたと一般に考えられており<sup>[2]</sup>、MAC 88107 隕石のようにコンドリュール、CAI、AOA とリムのみからなる隕石は、母天体上で角礫化等の作用を受けず、星雲から集積したままの組織を保持する「星雲集積岩」であるとされている<sup>[2]</sup>。しかし、最近の研究<sup>[3,4]</sup>で、CV 隕石中のコンドリュールのリムについて、水熱変成・角礫化・運搬といった母天体内での過程で形成されたことを示唆する組織が観察された。<sup>[3, 4]</sup>の説では、リムは前駆コンドライトマトリックスの残留物だと考えられている。

リムが母天体内で形成される可能性が示されたことを受け、本研究では、星雲集積岩とされる MAC 88107 隕石の形成過程を再評価することを目的として、詳細な観察・分析を行った。組織観察、組成分析には SEM-EDS, STEM-EDS を用い、リム中の微小鉱物の同定には Spring-8 の SR-XRD を用いた。

MAC 88107 隕石中のコンドリュール、CAI、AOA を囲むリムは、大部分が細粒 (<1 μm) の鉱物からなり、所々に粗粒 (1 - 10 μm) のフォーステライト、エンスタタイトの鉱物片とファヤライト-マグネタイト-ヘデンバージャイトの集合体を含んでいる。SR-XRD 測定及び STEM 観察から、リムの細粒な部分は主に微小な層状ケイ酸塩を含む非晶質物質からなり、その他に、オリビン、輝石、ペントランダイト、マグネタイトを含むことが分かった。

また、リムの多くに脈 (幅~10 μm) があることも MAC 88107 隕石の特徴である。脈は粗粒な (>1 μm) マグネタイト、ファヤライト、ヘデンバージャイトからなる。先行研究<sup>[1]</sup>では、このような脈は、コンドリュール中の不透明鉱物ノジュールが酸化される際の体積膨張に伴う応力の増大で生じたと考えられている。しかし、この説では、不透明鉱物ノジュールを含まない CAI のリムに同様の脈が存在することの説明が難しい。また、現在の岩相が衝撃を受けて生じた割れ目由来だと考えると、隣接する複数のコンドリュール/リムを貫く脈が存在してもよさそうだが、そのような脈は存在しない。これらのことは、脈は、コンドリュール/リムの前駆岩相に衝撃で生じた割れ目由来する可能性を示唆している。

互いに隣接するリムの間には、粗粒なマグネタイト、ファヤライト、ヘデンバージャイトからなり、リム中の脈と構成鉱物・組織がよく似た層 (幅 5 - 30 μm) が存在する。この層は Krot et al.(2000)<sup>[1]</sup>でも報告されており、インターリムレイヤーと呼ばれている。

また、MAC 88107 隕石に複数のコンドリュールを含むクラストが存在することを確認した。クラストは直径 150 - 500 μm の円~楕円形をしており、隣接するコンドリュール、リムと直接あるいはインターリムレイヤーを介して接している。クラスト内のコンドリュールは、リムやインターリムレイヤーを持たない。ほとんどのクラストのマトリックスは、クラスト外のコンドリュールが持つリムと構成鉱物・組織がよく似ている。このことは、コンドリュール/リムが角礫岩化によって形成されたクラストであり、のちに運搬の際に摩耗して丸くなったものである可能性を示している。

以上の結果から MAC 88107 隕石は星雲からの集積後、(1) 角礫化によるクラストの形成、(2) それらクラストの運搬と摩耗、(3) 再集積と固化、の過程を経ていると考えられる。

### 引用文献

[1] Krot et al. (2000) MAPS 35, 1365?1386. [2] Metzler et al. (1992), GCA 56, 2873?2897. [3] Tomeoka and Ohnishi (2010), GCA 74, 4438?4453. [4] Tomeoka and Ohnishi (2014), GCA 137, 18?34.

キーワード: MAC 88107 隕石, 星雲集積岩, 炭素質コンドライト, 角礫岩化, 水質変成, コンドリュールリム

Keywords: MAC 88107, Primary accretionary rock, Carbonaceous chondrite, Brecciation, Aqueous alteration, Chondrule rims

## 平衡コンドライト中のオリビンに含まれる負晶からのオリビン平衡形の推定 Estimation of the equilibrium form of olivine from negative crystals in an equilibrated chondrite

中村 隆太<sup>1\*</sup>; 土山 明<sup>1</sup>; 三宅 亮<sup>1</sup>; 松本 徹<sup>1</sup>; 大井 修吾<sup>1</sup>; 瀧川 晶<sup>1</sup>; 上杉 健太郎<sup>2</sup>  
NAKAMURA, Ryuta<sup>1\*</sup>; TSUCHIYAMA, Akira<sup>1</sup>; MIYAKE, Akira<sup>1</sup>; MATSUMOTO, Toru<sup>1</sup>; OHI, Shugo<sup>1</sup>;  
TAKIGAWA, Aki<sup>1</sup>; UESUGI, Kentaro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 財団高輝度光科学研究センター

<sup>1</sup>Division of Earth and Planetary Sciences, Kyoto University, <sup>2</sup>Japan Synchrotron Radiation Research Institute

オリビンは地球や太陽系だけでなく宇宙にも普遍的に存在する鉱物である。最近、第一原理計算によりオリビンの表面エネルギーを求めることにより、平衡形が議論され [1]、結晶表面での水素原子吸着による星間空間での水素分子生成や [2]、水分子吸着による地球の水の起源が議論されている [3]。分子吸着と反応には結晶表面の面指数による違いがあり、結晶形状を3次元的に理解することは重要である。天然に産出するオリビンの結晶形状について記載はあるが、表面自由エネルギーが最小となる平衡形の形状についてはよくわかっていない。はやぶさサンプルと平衡コンドライトの詳細分析により、平衡コンドライト中のオリビンには数  $\mu\text{m}$  サイズのファセットをもつ空隙(負晶)が存在することが明らかとなった [4]。このような負晶は平衡コンドライトが受けた熱変成(最高温度  $800^\circ\text{C}$  程度)により、平衡形であることが期待される。これまで微細な負晶の3次元形状を定量的に測定する手段はなかったが、集束イオンビーム(FIB)を用いたサンプリングとマイクロCTを用いて、その手法が開発された [5]。本研究の目的は、平衡コンドライト中のオリビンに含まれる負晶の3次元形状を定量的に明らかにし、その平衡形を求め、第1原理計算結果と比較することにある。

Tuxtuac 隕石(LL5)の薄片から、オリビン中に負晶に富む部分を光学顕微鏡により見出し、 $30 \times 30 \times 60 \mu\text{m}$  程度の大きさをFIB(FEI Quanta 200 3DS)を用いて切り出した。サンプルのマイクロCT撮影(SPring-8BL47XU7 keV)を行い、 $70.5 \text{ nm/voxel}$  で3次元CT像を得、CT像の2値化により負晶の抽出をおこなった。一方、ホストのオリビン結晶について、SEM/EBSD(JEOL 7001F/HKL CHANNEL5)を用いて結晶方位を求め、CTにより求めた3次元形状と比較した。3Dデータから測角により、負晶の面指数を決定した。

今回のサンプルには、ほぼ同じ平面上に存在する2- $4 \mu\text{m}$  のサイズの負晶7個が認識できた。これらは、はやぶさサンプル [5] と同様に healed crack であると考えられる。すべての負晶は同一の結晶方位をもつファセットが発達しており、その形状も類似していた。このことは、これらの負晶の形状が平衡形に近いものであることを示唆している。(100), (001), (011) は明確に観察でき、最も発達している面は(100)である。CT像の空間分解能が十分ではないが(010), (120), (001), (011), (102), (343) がファセットとして出現しているように見える。また、少なくとも一部の稜は丸みを帯びている。

第一原理計算(真空中0 K)によると、フォルステライトの表面エネルギーは(010)が最も小さく次いで(120), (001), (101), (111), (021), (110)の順となっている [1]。今回得られた負晶には表面エネルギーの低い(010), (120), (001)も見られるが、最も発達した(100)はエネルギーが高く [6]、また(011), (102), (343)もエネルギーの高い面と考えられる。この理由としては、結晶表面への吸着分子による表面エネルギーの変化、表面自由エネルギーの温度依存性やカイネティックな効果の可能性が挙げられる。もし真空中で高い表面エネルギーを持つ面が、結晶表面への分子の吸着によりエネルギーが低くなるとすると、表面構造の違いによる分子吸着の異方性が表面の安定性に大きな役割を果たしていることになる。一方、フォルステライトの水素雰囲気中での蒸発実験では、約  $1400^\circ\text{C}$  以下の温度ではa軸方向の蒸発速度はb, c軸方向の蒸発速度よりも小さく [7]、今回の観察結果と調和的である。

- [1] Bruno et al, 2014, J. Phys. Chem. C, 118, 2498.
- [2] Vattuone et al, 2013, Phil. Trans. R. Soc, A371, 20110585.
- [3] Navaro-Ruiz et al, 2014, PCCP, DOI:10, 1039/c4cp00819g.
- [4] Tsuchiyama et al, 2014, MAPS, 49, 172.
- [5] Tsuchiyama et al, 2014, MAPS, 49, 404.
- [6] Takahashi, Personal communication.
- [7] Takigawa et al, 2009, ApJ, 707, 97.

キーワード: 平衡形, 負晶, 平衡コンドライト, オリビン, 第一原理計算, 表面エネルギー

Keywords: equilibrium form, negative crystal, equilibrated chondrite, olivine, Ab initio, surface energy

## I型コンドリュールの再現実験

## An experimental study on the formation of the type I chondrules

今柴直也<sup>1\*</sup>;磯部博志<sup>2</sup>IMAE, Naoya<sup>1\*</sup>; ISOBE, Hiroshi<sup>2</sup><sup>1</sup> 情報・システム研究機構 国立極地研究所, <sup>2</sup> 熊本大学<sup>1</sup>National Institute of Polar Research, <sup>2</sup>Kumamoto University

## はじめに

コンドリュール再現実験はこれまで主として全圧1気圧のIW-0.5の酸素分圧下で行われてきた。この条件ではFeO成分に富むII型コンドリュールを形成する。本研究では、IW-3からIW-5でコンドリュールの再現実験を行った。この条件では、FeO成分に乏しいI型コンドリュールを形成する。I型コンドリュールの再現実験はCohen and Hewins (2004)で試みられているが、急冷実験に限られる。本研究では、100 °C/h付近の冷却速度で、I型コンドリュールの組織・組成の再現を目的として実験を行った。

## 実験

出発物質として、(1) Allende 隕石 (CV3.2)、(2) NWA1465 隕石 (グループ化されてない炭素質コンドライト)、および(3) コンドライト組成の粉末調合試薬 (金属鉄、サンカルロスオリビン、タンザニア産エンスタタイト、三宅島産アノーサイト、アフガニスタン産ディオプサイド)、の3種の粉末焼結体を用いた。粉末焼結体は、主に水素雰囲気下で、最高温度950 °Cで1分間加熱、270 °C/hの昇温・冷却速度で作成した。コンドリュール再現実験は、ピーク温度は1200-1550 °C、冷却速度は80-10000 °C/hの範囲で、容器内には試料と直接接しないようにシリカガス源を用いる場合と、用いない場合とで行った。用いた炉は、還元雰囲気用の大気圧以下に圧力制御可能な低圧炉で、全圧は主に約100 Paに設定した。実験容器は、上部に1 mm径の穴を開けたアルミナ容器内に、0.2 mm径のモリブデンワイヤーで粉末焼結体を吊るす。シリカ粉末を用いる場合は、容器の底に置いた。容器内物質の蒸気圧は、最高温度の1450 °C付近で1 Pa程度である。アルミナ容器の外は水素ガスで全圧を約100 Paに制御すると、アルミナ容器内に水素ガスは流入し、容器内部も全圧は外部と同じになる。この時、熱化学計算によりピーク温度(1450 °C)でシリカ粉末がある時の酸素分圧はIW-3で、シリカ粉末がない時は、IW-4と求まる。(1) および(2) は金属鉄に乏しい組成を出発物質とする実験で、これまでに計53回(シリカガスあり23回、なし30回)、(3) は金属鉄を多く含む組成で、計21回(同様に11回、10回)行った。実験生成物は、研磨片にして、エレクトロン・プローブ・マイクロ・アナライザー (JXA-8200) で組織観察と、主要構成鉱物、ガラス、およびバルクの分析を行った。

## 結果・議論

Allende 隕石、NWA1465 隕石の焼結体を用いた実験において、ピーク温度が1450 °C、冷却速度が100 °C/hで、丸みのあるかんらん石 (フォルステライト) をエンスタタイト斑晶が取り囲むポイキリティック組織を呈するI型コンドリュールに類似する組成と組織を有する生成物を得た。このかんらん石は、“溶け残り鉱物”で、鉄に富むかんらん石が還元した組織を呈する“dusty olivine” およびフォルステライトの2種の溶け残りかんらん石が確認できた。これはコンドリュール組織にも共通している。この組織・組成は、シリカガス源がある実験で顕著で、I型コンドリュールによく類似する。しかし、炭素質コンドライトのI型コンドリュールには通常、多数の丸い数ミクロン径の金属鉄粒子をポイキリティックに含むが、実験生成物には多くない。全岩組成変化を求めたところ、鉄成分は大きく減少していた。試料保持に用いたモリブデンワイヤーへの鉄成分の吸収は、ワイヤー断面の分析から評価したところ、全岩組成変化に比べて、1桁小さい。したがって、鉄成分は金属鉄に還元することなく、蒸発していると考えられる。

調合試薬を用いた実験では、ピーク温度が1500 °C以上で、金属鉄が溶融し一塊になる傾向が認められた。1500 °C未満では、低溶融のため、金属鉄は試料内部では均一に分布したが、試料表面では金属鉄の欠損が見られた。これは試料表面付近の金属鉄が蒸発したと考えられる。これらの組織は、いずれも天然のコンドリュール組織とは一致しない。

以上の実験結果を考慮すると、金属鉄を含む前駆物質よりも金属鉄に乏しい前駆物質がI型コンドリュールを作った可能性がある。しかしながら、炭素質コンドライト中のI型コンドリュールに多産する丸い金属粒子の起源として、微小な溶融した金属鉄粒子はコンドリュール溶融時に外部より注入されたか、コンドリュール形成時に気相が鉄に飽和していた可能性がある。

## 文献

Cohen B. A. and Hewins R. H. 2004. *Geochim. Cosmochim. Acta* 68, 1677-1689.

キーワード: コンドリュール, I型, コンドリュール形成, 再現, 実験的研究

Keywords: chondrule, type I, chondrule formation, reproduction, experimental study



PRE95410 隕石母天体の宇宙線照射年代と平均公転軌道半径  
Cosmic-ray exposure age and heliocentric distance of the parent body of the rumuruti  
chondrite PRE 95410

小長谷 智哉<sup>1\*</sup>; 中嶋 大輔<sup>1</sup>; 中村 智樹<sup>1</sup>; 長尾 敬介<sup>2</sup>

OBASE, Tomoya<sup>1\*</sup>; NAKASHIMA, Daisuke<sup>1</sup>; NAKAMURA, Tomoki<sup>1</sup>; NAGAO, Keisuke<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻, <sup>2</sup> 東京大学大学院理学系研究科附属地殻化学実験施設

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Materials Science, Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>2</sup>Geochemical Research Center, Graduate School of Science, University of Tokyo

We measured concentrations and isotopic ratios of noble gases in the rumuruti (R) chondrite Mt. Prestrud (PRE) 95410. This meteorite contains high concentrations of solar and cosmogenic noble gases, from which solar gas implantation rate (concentrations of solar noble gases implanted per unit time) can be estimated. By comparing the solar gas implantation rates between PRE 95410 and lunar regolith samples, the parent-body heliocentric distance of the meteorite can be obtained, as solar wind flux is inversely related to the square of heliocentric distance. Based on the exposure model of solar noble gases and galactic cosmic rays, we calculated the exposure age on its parent body ( $15.4 \pm 5.2$  Ma), exposure age in space after ejection from the parent body ( $9.5 \pm 1.3$  Ma), and heliocentric distance of the parent body ( $1.3 \pm 0.2$  AU). The calculated exposure age in space is consistent with the peak of space exposure age distribution of other R chondrites. The derived heliocentric distance suggests the location of parent body when constituents of the PRE 95410 meteorite were exposed to the solar wind. From the previous studies of mineralogy and chemistry, R chondrites might have formed between the regions where ordinary and carbonaceous chondrites formed (2-4 AU). Hence the heliocentric distance of the PRE 95410 parent body studied in this work is not consistent with the formation region. This may imply that the parent body of the PRE 95410 migrated from the R chondrite formation region to the inner area where irradiated by solar wind before the ejection of the meteorite ( $9.5 \pm 1.3$  Ma). Kr isotopic ratios show excesses of <sup>80</sup>Kr and <sup>82</sup>Kr produced by neutron capture reaction on Br during space exposure. The minimum radius of the PRE 95410 meteoroid was calculated as 53 cm from the abundances of neutron-induced Kr.

Keywords: Rumuruti chondrite, noble gas analysis, cosmic-ray exposure age, heliocentric distance

## コンドライト隕石のSr同位体異常 Nucleosynthetic Strontium Isotope Anomalies in Carbonaceous Chondrites

横山 哲也<sup>1\*</sup>; 深海 雄介<sup>1</sup>; 奥井 航<sup>1</sup>; 伊藤 伸朗<sup>1</sup>; 山崎 洋<sup>1</sup>  
YOKOYAMA, Tetsuya<sup>1\*</sup>; FUKAMI, Yusuke<sup>1</sup>; OKUI, Wataru<sup>1</sup>; ITO, Nobuaki<sup>1</sup>; YAMAZAKI, Hiroshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学地球惑星科学専攻

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

We present precise Sr isotopic compositions in samples from sequential acid leaching experiments for three carbonaceous chondrites, Allende, Murchison, and Tagish Lake, together with those in the bulk aliquots of these meteorites. The chondritic acid leachates and residues were characterized by Sr isotope anomalies with variable  $\mu^{84}\text{Sr}$  values ( $10^6$  relative deviation from a standard material) ranging from +120 to -4700 ppm, documenting multiple nucleosynthetic sources within a single meteorite. In addition, the  $\mu^{84}\text{Sr}$  patterns across leaching samples for individual chondrites differed from one another. The highest  $\mu^{84}\text{Sr}$  values were observed for leaching Step 3 (HCl+H<sub>2</sub>O, 75 °C) for Allende and Murchison likely because of the incorporation of calcium and aluminum-rich inclusions (CAIs). In contrast, extremely low  $\mu^{84}\text{Sr}$  values were observed in the later fractions (Steps 6 and 7) for Murchison and Tagish Lake, suggesting the existence of s-process-enriched presolar SiC grains derived from AGB stars.

A  $\mu^{84}\text{Sr}$ - $\epsilon^{54}\text{Cr}$  diagram was prepared with the CAIs and bulk aliquots of carbonaceous chondrites and other meteorites (non-carbonaceous) that were plotted separately; however, they still formed a global positive correlation. CAIs presented the highest  $\mu^{84}\text{Sr}$  and  $\epsilon^{54}\text{Cr}$  values, whereas carbonaceous chondrites and noncarbonaceous meteorites had intermediate and the lowest  $\mu^{84}\text{Sr}$  and  $\epsilon^{54}\text{Cr}$  values, respectively. The positive trend was interpreted as resulting from global thermal processing in which sublimation of high  $\mu^{84}\text{Sr}$  and  $\epsilon^{54}\text{Cr}$  carriers generated the excess  $\mu^{84}\text{Sr}$  and  $\epsilon^{54}\text{Cr}$  signatures in CAIs, while noncarbonaceous planetesimals accreted from materials that underwent significant thermal processing and thus had relatively low  $\mu^{84}\text{Sr}$  and  $\epsilon^{54}\text{Cr}$  values. Apart from the global trend, the carbonaceous chondrites and noncarbonaceous meteorites both exhibited intrinsic variations that highlight an isotopic dichotomy similar to that observed in other isotope combinations (e.g.,  $\epsilon^{54}\text{Cr}$ - $\epsilon^{50}\text{Ti}$ ,  $\epsilon^{54}\text{Cr}$ - $\Delta^{17}\text{O}$ ). A plausible scenario for creation of the intrinsic variations involves local thermal processing (e.g., flash heating for chondrule formation) caused by additional selective destruction of presolar grains different than that caused by global thermal processing. The existence of such a global positive trend and local variations for two meteorite groups suggests a complicated dynamic history for the dust grains with respect to thermal processing, material transportation, and mixing in the protoplanetary disk prior to planetesimal formation.

キーワード: Sr 同位体, プレソラー粒子, 酸リーチング, コンドライト, 元素合成, 熱プロセス  
Keywords: Sr isotopes, presolar grains, acid leaching, chondrites, nucleosynthesis, thermal processing

## 完全分解法を用いたコンドライト隕石全岩の高精度Nd同位体比測定 High precision neodymium isotopic analysis of chondrites with complete sample digestion

深井 稜汰<sup>1\*</sup>; 横山 哲也<sup>1</sup>; 鏡味 沙耶<sup>1</sup>  
FUKAI, Ryota<sup>1\*</sup>; YOKOYAMA, Tetsuya<sup>1</sup>; KAGAMI, Saya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学 地球惑星科学専攻

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

A variety of isotope anomalies have been discovered in bulk chondrites and differentiated meteorites (e.g., Cr, Mo [1, 2]). These results point to the existence of planetary-scale isotope heterogeneities for refractory heavy elements, which are most likely due to the heterogeneous distribution of presolar grains (e.g., SiC, graphite) in the protosolar nebula before the onset of planetesimal formation.

High precision Nd isotope analyses in meteorites have been the center of interest in recent cosmochemistry community. One of the most remarkable results is that chondrites possess  $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  ratios  $\sim 20$  ppm lower than those in terrestrial rocks [3]. The anomaly was interpreted to be caused by the Sm-Nd fractionation via early differentiation of the terrestrial mantle. On the other hand, variations in stable Nd isotopes (e.g.,  $^{148,150}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ) have been documented in chondrites [4]. Although the authors concluded that the observed variation was due to incomplete digestion of presolar grain-bearing samples, the existence of Nd isotope anomalies in bulk aliquots of chondrites remains unclear unless high precision Nd isotope data with complete sample digestion become available.

In this study, we revisit high precision Nd isotope analysis of chondrites coupled with a new sample digestion technique that confirms complete dissolution of acid resistant presolar grains. We also develop a modified dynamic multicollection method using TIMS to improve the analytical reproducibilities.

We investigated two carbonaceous chondrites (Murchison, CM2; Allende, CV3), five ordinary chondrites (Kesen, H4; Chergach, H5; Saratov, L4; Hamlet, LL4; St. Severin, LL6). The ordinary and Rumuruti chondrites with a petrologic grade greater than 3 were dissolved by a conventional acid digestion method using  $\text{HNO}_3 + \text{HF} + \text{HClO}_4$  [5]. For carbonaceous chondrites, each sample was digested using a high-pressure digestion system (DAB-2, Berghof) with  $\text{HF} + \text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4$  to completely dissolve acid resistant presolar grains [6].

The Nd isotope compositions were measured by TIMS (Triton-plus, Tokyo Tech). In previous studies, Nd isotope compositions of bulk meteorites have been commonly measured in the “static-multicollection” mode, which may be affected by the time-related deterioration of Faraday cups [7]. In contrast, the “multi-static” [8] or “dynamic-multicollection” methods can reduce the effect of cup deterioration by acquiring Nd isotopes with multiple lines of different cup configurations within a single analytical cycle. In this study, we developed a modified “dynamic-multicollection” method.

In contrast to the static mode, the dynamic method achieved improved reproducibilities as follows;  $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ : 2.8 ppm,  $^{148}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ : 4.5 ppm, and  $^{150}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ : 9.2 ppm. It should be noted that improvements of reproducibilities are evident for  $^{148}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  and  $^{150}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  ratios even compared to those obtained in the multi-static method (6 ppm and 19 ppm, respectively) conducted in [8].

All samples have  $\mu^{142}\text{Nd}$  values 20 – 30 ppm lower than the terrestrial value. In contrast, all but one sample (Allende) have  $\mu^{148}\text{Nd}$  values indistinguishable from the terrestrial value. Likewise,  $\mu^{150}\text{Nd}$  values in chondrites are generally within the range of the terrestrial component. Although the data points are limited, this study suggests that stable Nd isotopes were homogeneously distributed in the protosolar nebula, at least for carbonaceous, ordinary, and Rumuruti chondrites.

References: [1] Trinquier, A. et al. (2007) *ApJ*, 655, 1179. [2] Burkhardt, C. et al. (2011) *EPSL*, 312, 390. [3] Boyet, M. and Carlson, R. (2005) *Science*, 309, 576. [4] Carlson, R. et al. (2007) *Science*, 316, 1175. [5] T. Yokoyama et al. (1999) *Chem Geol.*, 157, 175. [6] T. Yokoyama et al. (2015) *EPSL*, in press. [7] Brandon, A. et al. (2009) *GCA*, 73, 6421. [8] Caro, G. et al. (2006) *Geochim*, 70, 164.

キーワード: 同位体不均質, 同位体異常, コンドライト, Nd, TIMS, プレソーラー粒子

Keywords: isotopic heterogeneity, isotopic anomaly, chondrite, neodymium, TIMS, presolar grain

## 質量依存同位体分別から考察するアエンデ隕石 F(UN) CAI 前駆物質の化学組成 Chemical composition of a precursor material of an Allende F(UN) CAI estimated from a mass dependent fractionation

福田 航平<sup>1\*</sup>; 比屋根 肇<sup>1</sup>; 高畑 直人<sup>2</sup>; 佐野 有司<sup>2</sup>; 橋元 明彦<sup>3</sup>  
FUKUDA, Kohei<sup>1\*</sup>; HIYAGON, Hajime<sup>1</sup>; TAKAHATA, Naoto<sup>2</sup>; SANO, Yuji<sup>2</sup>; HASHIMOTO, Akihiko<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 東京大学大気海洋研究所, <sup>3</sup> 北海道大学宇宙理学専攻

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Science, The Univ. of Tokyo, <sup>2</sup>AORI, The Univ. of Tokyo, <sup>3</sup>Department of CosmoSciences, Hokkaido University

Calcium-aluminum-rich inclusions (CAIs) are considered to be the oldest solid materials in the solar system [e.g., 1, 2]. Some CAIs show mineralogy, texture, and isotopic signature that have experienced melting, evaporation and recrystallization [e.g., 3, 4]. These CAIs have lost primordial chemical compositions caused by evaporative loss of less refractory elements such as magnesium and silicon from the melt. Hence, in order to understand the origin and evolution of such 'igneous' and isotopically fractionated CAIs, estimations of primordial compositions of these CAIs are required.

Estimations of primordial compositions of 'normal' igneous CAIs have been conducted by determination of mass dependent isotopic fractionation degrees in Mg and Si [5, 6], but those of igneous CAIs with *Fractionation* and *Unknown Nuclear* effects (FUN [e.g., 7]) have been poorly carried out. FUN CAIs are amongst solar system materials with extreme mass dependent isotopic fractionations in Mg, O, and Si. The origin of FUN CAIs is still not well understood, but they must have information about an earliest stage of the solar system evolution. Here we report chemical and Si isotopic compositions of a CAI from Allende, called AL1B-F. AL1B-F is a forsterite-bearing CAI which shows large mass dependent isotopic fractionations in oxygen and magnesium [8]. These fractionation signatures indicate that AL1B-F is related to FUN CAIs.

FEG-EPMA (JEOL JXA-8530F, the Univ. of Tokyo) was used for petrologic studies. Silicon isotopic compositions have been measured by the NanoSIMS installed at Atmosphere and Ocean Research Institute, the Univ. of Tokyo.

AL1B-F is composed of two parts, a forsterite-rich core and a spinel-rich mantle. Among these two parts are filled with abundant secondary minerals (e.g., sodalite and nepheline). Silicon isotopes of forsterites and Al-Ti-rich pyroxenes in AL1B-F show a large mass dependent isotopic fractionation of up to  $\sim 22$  ‰/amu.

In order to estimate the primordial composition of AL1B-F, we combined Si and previously measured Mg and O isotopic data [8]. If we assume that mass dependent isotopic fractionations in AL1B-F were resulted from simple one-stage evaporation event,  $\sim 80\%$  of Mg and  $\sim 75\%$  of Si must have been lost (evaporated) from the molten precursor of AL1B-F based on the experimentally determined isotopic fractionation factors [9]. Because of the presence of abundant secondary minerals, it is not possible to precisely determine the bulk chemical composition of the present AL1B-F. If we assume, however, that secondary minerals in AL1B-F are alteration products of primary melilites with Ak mole% of, e.g.,  $\sim 89$ , which is a composition of melilites in the Vigarano forsterite-bearing FUN CAI 1623-5 [10], the estimated precursor composition for AL1B-F would be  $\sim 34$  wt% MgO and  $\sim 50$  wt% SiO<sub>2</sub>. The result suggests that the precursor of AL1B-F also have a Mg- and Si-rich composition like C1, 1623-5, and CMS-1 FUN CAIs [9, 11].

References: [1] Bouvier A. and Wadhwa H. (2010) Nat. Geosci, 3, 637-641. [2] Connelly et al. (2012) Science, 338, 651-655. [3] MacPherson G. J. and Davis A. M. (1993) GCA, 57, 231-243. [4] MacPherson G. J. et al. (2012) EPSL, 331-332, 43-54. [5] Grossman L. et al. (2008) GCA, 72, 3001-3021. [6] Bullock E. S. et al. (2013) MAPS, 48, 1440-1458. [7] Clayton R. N. and Mayeda T. K. (1977) GRL, 4, 295-298. [8] Hiyagon H. and Hashimoto A. (2008) MAPS, #5128. [9] Mendybaev R. A. et al. (2013) GCA, 123, 368-384. [10] Davis A. M. et al. (1991) GCA, 55, 621-637. [11] Williams C. D. et al. (2014) LPS XXXV, #2146.

キーワード: FUN CAI, 質量依存同位体分別, ケイ素同位体, 二次イオン質量分析計

Keywords: FUN CAI, mass dependent isotopic fractionation, silicon isotopes, ion microprobe

## Vigarano 隕石産 Type B1 CAI の酸素同位体分布 Oxygen isotopic distribution of Type B1 CAI from the Vigarano

山本 淳博<sup>1\*</sup>; 川崎 教行<sup>1</sup>; 坂本 直哉<sup>1</sup>; 塚本 尚義<sup>1</sup>

YAMAMOTO, Yoshihiro<sup>1\*</sup>; KAWASAKI, Noriyuki<sup>1</sup>; SAKAMOTO, Naoya<sup>1</sup>; YURIMOTO, Hisayoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学

<sup>1</sup> Hokkaido University

隕石に含まれる Ca-Al-rich inclusion (CAI) は、太陽系最古の岩石である。CAI はその構成鉱物内・鉱物間において不均一な酸素同位体組成をもつ (e.g., Yurimoto et al., 1998)。CAI 鉱物の不均一な酸素同位体組成は、初期太陽系星雲の異なる酸素同位体組成をもつ領域における、複数回溶融、凝縮、固体中での拡散などの熱プロセス中、あるいは隕石母天体上での変成変質作用中に決定されたと考えられている (Yurimoto et al., 2008)。しかし、各 CAI、各鉱物において、その酸素同位体組成を決めた最も効果的なプロセスは異なる。本研究では、CAI 中の不均一な酸素同位体分布が、どのように決まったかを理解するために、CAI 中の広範囲にわたり系統的に酸素同位体分析を行い、岩石観察結果と比較した。

試料には Vigarano 隕石中の Type B1 CAI を用いた。試料の観察と元素分析は FE-SEM-EDS (JEOL JSM-7000F; Oxford X-Max 150) を用いて行った。酸素同位体分析は SIMS (Cameca ims-1280 HR) で行った。二次イオンの  $^{16}\text{O}^-$ 、 $^{17}\text{O}^-$ 、 $^{18}\text{O}^-$  を 3 つの検出器で同時に検出するマルチコレクションモードを用い、25 ミクロン間隔で 40 x 40 点格子状に 1 mm 角を 3 領域、計 4800 点分析した。二次イオンは一点あたり 10 秒ずつ分析し、プレスパッタ、ステージ移動を含めた分析時間は、一点あたり 55 秒であった。

本 CAI は、6.5 x 3 mm の大きさで、不規則で波打った外形をしている。CAI は、スピネル、メリライト、アノーサイト、Al-Ti に富むオーサイト (ファッサイト) から成るコア部と、主にメリライトから成るマントル部で構成され、周囲は Wark-Lovering リムに囲まれる。この CAI は大きく欠損してその本体の形は不明である。バルク化学組成は、一般的な Type B1 CAI のものと一致する (Grossman, 1975)。相図より、メルトからの結晶化順序はスピネル、メリライト、アノーサイト、ファッサイトである (Stolper, 1982)。

各鉱物の酸素同位体比は三酸素同位体図上では、CCAM 線上に沿って分布していることがわかった。構成鉱物ごとに分けたヒストグラムを見ると、スピネルとメリライトはそれぞれ  $^{16}\text{O}$ -rich ( $\delta^{18}\text{O} = -45$  パーミル) と  $^{16}\text{O}$ -poor ( $\delta^{18}\text{O} = 11$  パーミル) の部分に集中している。アノーサイトは  $^{16}\text{O}$ -rich と  $^{16}\text{O}$ -poor の部分それぞれにピークをもつバイモーダルな分布を示している。ファッサイトは  $^{16}\text{O}$ -rich の測定点が多く、 $^{16}\text{O}$ -poor 側にテールをもつ。

分析した CAI の酸素同位体分布は、 $^{16}\text{O}$  に富む側から、スピネル、ファッサイトとアノーサイト、メリライトの順であり、メルトからの結晶化から単純に説明することは不可能である。したがって、本 CAI の酸素同位体分布は、一度以上の複数回再溶融の結果、もしくは加熱溶融以外のプロセスで決定されていたと考えられる。

キーワード: CAI, 隕石, 酸素同位体, SIMS

Keywords: CAI, meteorite, oxygen isotope, SIMS

## アエンデ隕石 Type C CAI の酸素同位体分布と加熱溶融の Al-Mg 年代 Al-Mg chronology and oxygen isotope distributions of multiple melting for a Type C CAI from the Allende

川崎 教行<sup>1\*</sup>; 加藤 千図<sup>2</sup>; 伊藤 正一<sup>3</sup>; 若木 重行<sup>4</sup>; 伊藤 元雄<sup>4</sup>; 坂本 尚義<sup>1</sup>  
KAWASAKI, Noriyuki<sup>1\*</sup>; KATO, Chizu<sup>2</sup>; ITOH, Shoichi<sup>3</sup>; WAKAKI, Shigeyuki<sup>4</sup>; ITO, Motoo<sup>4</sup>;  
YURIMOTO, Hisayoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学, <sup>2</sup>IPGP, <sup>3</sup> 京都大学, <sup>4</sup> 海洋研究開発機構  
<sup>1</sup>Hokkaido University, <sup>2</sup>IPGP, <sup>3</sup>Kyoto University, <sup>4</sup>JAMSTEC

隕石に含まれる CAI (Ca-Al-rich inclusion) は、初期太陽系星雲中で何度も加熱溶融を経験し形成したとされている (e.g., Yurimoto et al., 1998)。このことは、初期太陽系で過渡加熱イベントが繰り返し起きていたことを示す。CAI 中には、半減期 73 万年で <sup>26</sup>Mg へと壊変する消滅核種、<sup>26</sup>Al の痕跡が見つまっている (e.g., MacPherson et al., 1995)。よって Al-Mg 相対年代系を用いることで CAI 加熱イベントの年代測定が可能だが、そのためには、CAI 加熱溶融履歴の詳細な理解が必要である。本研究では、アエンデ隕石の Type C CAI, EK1-04-2 の岩石学的研究と酸素同位体分析による加熱溶融履歴の評価を行った。それに基づき、異なる溶融履歴を経た鉱物それぞれに対して Al-Mg 年代測定を行い、CAI の加熱溶融年代を求めた。

試料の観察と元素分析、結晶方位解析は FE-SEM-EDS-EBSD システム (JEOL JSM-7000F; Oxford X-Max 150; Oxford HKL) を用いて行った。酸素・Al-Mg 同位体分析は SIMS (Cameca ims-1270, ims-1280HR) で行った。

EK1-04-2 は約 2 mm の大きさの CAI 破砕片で、主にスピネル、アノーサイト、オリビン、ディオプサイドから成る。EK1-04-2 は、構成鉱物の量比と化学組成の違いによりコア部とマントル部に分けられる。コア部では、自形のスピネルが他鉱物の結晶に囲まれている。アノーサイトは自形から半自形を示す。オリビンは半自形から他形を示し、自形のアノーサイト、スピネルと接する。ディオプサイドは他形を示し、スピネル、オリビンを囲む。したがってコア部の構成鉱物の結晶化順序は、スピネル、アノーサイト、オリビン、ディオプサイドの順となる。マントル部はコア部と同じ鉱物組み合わせだが、コア部が部分溶融、再結晶化した組織をもつ。

鉱物の酸素同位体組成は、CCAM ライン上で分布し ( $\delta^{18}\text{O} = -44$  から  $+9$  ‰)、EK1-04-2 が化学的に非平衡であることを示している。スピネルは <sup>16</sup>O に富む組成 ( $\delta^{18}\text{O} \sim -43$  ‰) をもち、一方でアノーサイトは <sup>16</sup>O に乏しい組成 ( $\delta^{18}\text{O} \sim +8$  ‰) をもつ。コア部のオリビンとパイロキシンは均一な酸素同位体組成 ( $\delta^{18}\text{O} \sim -15$  ‰) をもつ。マントル部のオリビンとパイロキシンは、コア部の同鉱物に比べて <sup>16</sup>O に乏しい組成 ( $\delta^{18}\text{O} = -13$  から  $-4$  ‰) をもつ。鉱物の Al-Mg 同位体分析の結果、スピネルは  $(^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al})_0 = (3.5 \pm 0.2) \times 10^{-5}$ 、アノーサイトは  $(-1 \pm 5) \times 10^{-7}$ 、コア部のオリビンとパイロキシンは  $(-1 \pm 7) \times 10^{-6}$  のライン上にプロットされた。マントル部のオリビンとパイロキシンは、コア部の同鉱物よりも低い  $\delta^{26}\text{Mg}$  値を示した。

同位体的非平衡と岩石学的特徴から、EK1-04-2 の形成過程は以下のように考察される。前駆 CAI は、太陽系誕生から 43 万年後に形成した。その少なくとも 160 万年後に、CAI は部分溶融し、部分溶融メルトと周囲の <sup>16</sup>O に乏しい星雲ガスとの間で酸素同位体交換が起こった。<sup>16</sup>O に乏しいコア部のオリビンとパイロキシンはこの部分溶融メルトから結晶化した。その後、Al-rich コンドリュールが CAI に付着し、再び部分溶融が起こり、マントル部を形成した。最後に、アノーサイトの酸素・マグネシウム同位体は、アエンデ隕石母天体上での変成作用中に固体中の原子拡散により再分配された。本研究から、EK1-04-2 は初期太陽系円盤を少なくとも 160 年以上漂い、その間に二度の加熱溶融を経験したことがわかった。また、母天体上での変成作用により、CAI の酸素同位体と <sup>26</sup>Al-Mg 系は、結晶サイズによって部分的に攪乱されていることが示された。

## 小惑星表層での衝突他天体物質の混合: 破壊・潜りこみ・固化 Mixing of exogenic impactor materials on the surface of asteroids: Disruption, penetration, and consolidation

中村 昭子<sup>1\*</sup>  
NAKAMURA, Akiko<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学大学院理学研究科  
<sup>1</sup> Graduate School of Science, Kobe University

HED 隕石には、数%の炭素質コンドライトクラストを含むことが示されていたが、探査機 Dawn の観測によって、小惑星 Vesta の表面に衝突によって炭素質コンドライト物質がもたらされた痕跡が見つかった。Almahata Sitta 隕石は、地球大気突入前に 2008TC<sub>3</sub> と呼ばれる小惑星であったが、ユレイライトを主成分とする砕屑角礫岩であり、エンスタタイトコンドライトや普通コンドライト、炭素質コンドライトなど多種類の破片からなっている。木星族彗星 Wild2 の塵は、分析の結果、太陽近傍の高温領域で形成されたと考えられる物質を含むことが明らかにされた。つまり、彗星にはその形成と進化のいずれかの段階で、温度履歴の異なる物質が混合した。このように小天体では異なる起源をもつ物質が混合するプロセスが普遍的に、また、繰り返し起こったと考えられる。

我々は衝突による物質混合過程について明らかにするため、空隙を持った小天体に対して、どのような物質がどのような速度で衝突した場合にどの程度破壊されるか、どの程度潜りこむか、固化されるかについて、模擬小天体標的と岩石・金属・多孔質焼結体といったさまざまな弾丸を用いた衝突実験を行うことで調べた。その結果、(1) 外来物質(衝突体)の破壊の程度は、初期発生圧力と外来物質の動的強度の比で記述できること、(2) 岩石質の塵が衝突したときに達する深さは、破壊を考慮すると、相手がたとえ空隙率 90% の氷天体であっても、せいぜい塵サイズの 100 倍であること、ただし、(3) 空隙を多く含む外来物質の場合は、空隙を失うというマイクロな破壊により全体の破壊をまぬがれて大きな塊として残存しやすく、より表層深くまで潜りこむ可能性があること、(4) 微細粒子からなるレゴリス層への高速衝突では、層の圧密による温度上昇により、外来粒子の破片同士あるいは破片とレゴリス粒子の固着がおこること、がわかった。

本発表では、以上を、天体空隙率・衝突体サイズ・衝突速度に着目して整理し、特に小惑星の観測事実と比較しながら議論する。

キーワード: 小惑星, 衝突, 実験, 隕石, レゴリス

Keywords: asteroids, collision, laboratory experiments, meteorites, regolith

## Experimental confirmation of ringwoodite crystallization from shock-induced melts Experimental confirmation of ringwoodite crystallization from shock-induced melts

MUTOU, Daiki<sup>1</sup> ; SEKINE, Toshimori<sup>1\*</sup> ; KOBAYASHI, Takamichi<sup>2</sup> ; MASHIMO, Tsutomu<sup>3</sup> ; OHFUJI, Hiroaki<sup>4</sup>  
MUTOU, Daiki<sup>1</sup> ; SEKINE, Toshimori<sup>1\*</sup> ; KOBAYASHI, Takamichi<sup>2</sup> ; MASHIMO, Tsutomu<sup>3</sup> ; OHFUJI, Hiroaki<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Hiroshima University, <sup>2</sup>NIMS, <sup>3</sup>Kumamoto University, <sup>4</sup>Ehime University

<sup>1</sup>Hiroshima University, <sup>2</sup>NIMS, <sup>3</sup>Kumamoto University, <sup>4</sup>Ehime University

Many high-pressure phases have been identified in meteorites that experienced heavy collisions. The presence of high-pressure phase may provide an estimate of pressure condition. However, the dynamic formation conditions may not be equal to those at static pressures and there is no firm experimental report to indicate the ringwoodite formation at dynamic pressures, although there are Hugoniot data and trials to synthesize ringwoodite by shock compressions. We tried to confirm the ringwoodite formation by hypervelocity impacts from two powdered mixtures of biotite and cristobalite (sample A) and phlogopite and cristobalite (sample B) for Fe-rich and Mg-rich ringwoodites, respectively. When we used stainless steel containers for recovery, the container had reacted with the biotite melt to form chromite spinels. No spinel phase was observed in sample B. When we used copper containers for sample A, X-ray diffraction data on the recovered samples indicated a spinel phase ( $a = 0.8257$  nm). Because the lattice constant is greater than that of Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> (ahrensite) and significantly less than those of magnesioferrite and magnetite, the composition can be a Fe-rich ringwoodite. However, detailed scanning electron microscopy indicated no obvious crystals on the polished surface where there were many spherical voids. Finally the Raman spectroscopy investigations detected spectra similar to Fe-rich ringwoodite in the voids. We will try to investigate the spinel phase using analytical transmission electron microscopy.

The present experimental results confirm the formation of ringwoodite from shock-induced melts. Further studies need to provide Mg-rich ringwoodite formation and the minimum dynamic pressures required to the formation. If such experiments are extended to the other high-pressure phases present in meteorites, the shock pressure estimation will be more powerful and helpful than the present.

キーワード: ringwoodite, shock-induced melt, crystallization, recovery shots  
Keywords: ringwoodite, shock-induced melt, crystallization, recovery shots



## 準安定な lingunite の生成 Formation of metastable lingunite

河野 真利<sup>1</sup>; 久保 友明<sup>1\*</sup>; 加藤 工<sup>1</sup>; 上原 誠一郎<sup>1</sup>; 近藤 忠<sup>2</sup>; 亀卦川 卓実<sup>3</sup>; 肥後 祐司<sup>4</sup>;  
丹下 慶範<sup>4</sup>  
KONO, Mari<sup>1</sup>; KUBO, Tomoaki<sup>1\*</sup>; KATO, Takumi<sup>1</sup>; UEHARA, Seiichiro<sup>1</sup>; KONDO, Tadashi<sup>2</sup>;  
KIKEGAWA, Takumi<sup>3</sup>; HIGO, Yuji<sup>4</sup>; TANGE, Yoshinori<sup>4</sup>

<sup>1</sup>九州大・理, <sup>2</sup>大阪大・理, <sup>3</sup>Photon Factory, <sup>4</sup>JASRI  
<sup>1</sup>Kyushu Univ., <sup>2</sup>Osaka Univ., <sup>3</sup>Photon Factory, <sup>4</sup>JASRI

Lingunite (hollandite-type NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) has been frequently found in shocked meteorites with other high-pressure minerals (Liu and El Goresy, 2007). According to the laser-heated diamond anvil cell (LHDAC) experiment by Liu (1978), following the decomposition of albite (NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) into jadeite (NaAlSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>) plus silica (SiO<sub>2</sub>) at 2-3 GPa, these phases recombine to form lingunite in the range of pressure between 21 and 24 GPa, and then it decomposes again into calcium ferrite-type NaAlSiO<sub>4</sub> plus stishovite at pressures above 24 GPa. Similarly, Tutti (2007) observed lingunite as a minor phase at 21-23 GPa and 2273K using LHDAC. In contrast to these LHDAC studies, high-pressure experiments using multi-anvil type (MA) apparatus revealed that the maximum solubility of NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> component in hollandite structure is limited to ~50 mol% at 14-25 GPa and 1073-2673K (Yagi et al., 1994, Liu, 2006) and NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> lingunite is not stable at least up to 2273K (Akaogi et al., 2010). This contradiction has not been solved yet, which makes it difficult to understand the shock conditions for the presence of lingunite in shocked meteorites.

To investigate the lingunite puzzle, we focused on the formation process of lingunite by conducting time-series experiments. We performed high-pressure experiments at 18-27 GPa and 1073-2023K using both LHDAC and MA apparatus. Powders of natural albite, oligoclase and labradorite are used as starting materials. Existing phases were identified by X-ray diffraction method.

The quenching experiments using MA apparatus revealed that lingunite does not form in 5 min, but forms in 60 min as a single phase from oligoclase at 20 GPa and 1473K. In situ X-ray diffraction study indicated that oligoclase becomes amorphous with increasing pressure and temperature. At 22 GPa and 1473K, lingunite first crystallizes from the complete amorphous oligoclase in 100 sec, and it decomposes into stishovite and CAS phase in 60 min. These results suggest that lingunite forms as a metastable phase by solid-state reaction after the amorphization of oligoclase, which might have also occurred with maskelynite in shocked chondritic meteorites (Tomioka et al., 2000). In contrast, lingunite was not observed when albite and labradorite were used as starting materials. The amorphization pressure increases with increasing albite component. The pressure condition for complete amorphization of albite is higher than that for the lingunite formation. No lingunite observed from the albite sample in this study implies that the complete amorphization is required for the metastable formation of lingunite by solid-state reaction. In the case of labradorite, lingunite was not formed even after the complete amorphization. This is consistent with the observation that lingunite with labradorite composition in martian shocked meteorites crystallized not by solid-state reaction but from plagioclase melt (e.g., El Goresy et al., 2013).

## Shock-metamorphosed zircons from the Jack Hills metaconglomerate in the Narryer Gneiss Complex, Western Australia

### Shock-metamorphosed zircons from the Jack Hills metaconglomerate in the Narryer Gneiss Complex, Western Australia

山本 伸次<sup>1\*</sup>; 小宮 剛<sup>1</sup>  
YAMAMOTO, Shinji<sup>1\*</sup>; KOMIYA, Tsuyoshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院総合文化研究科

<sup>1</sup>Department of Earth and Astronomy, Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo

An intense flux of extraterrestrial bodies into inner solar system during ca. 3.8-4.1, called as Late Heavy Bombardment (LHB), has been hypothesized originally from studies of the Moon. Extraterrestrial impacts by meteoritic bodies and comets on the early Earth play a significant role for the initial state of crustal, atmospheric and biological evolution. Considering the planetary size, the Earth should have suffered approximately 20 times the impact flux compared to the Moon. Ancient terrestrial evidence of impact in the early Earth is, however, scarcely preserved due to surface erosion, sedimentary burial and tectonic destruction. To date, the oldest impact structure on the Earth is the 2.02 Ga Vredefort Dome, South Africa, and another oldest evidence of impact is 3.47-3.24 Ga spherule layers in the Barberton Greenstone Belt, South Africa. The impact chronology from these spherule layers suggest that the impact flux was significantly higher 3.5 Ga than today, but there are no terrestrial evidence of impact prior 3.5 Ga.

Geological information during Hadean era (before 4.0 Ga) can be deduced from detrital zircons as old as 4.4 Ga preserved in metasedimentary rocks at Jack Hills in the Narryer Gneiss Complex, Western Australia. Previous studies have reported that the Jack Hills metasedimentary rocks contain detrital zircons with ages continuously spanning from ca. 3.0 up to 4.4 Ga, but evidence of impact, such as shock-metamorphosed minerals, have not been confirmed. In the study we first report shock-metamorphosed detrital zircons from the Jack Hills metaconglomerate, in the Narryer Gneiss complex, Western Australia. A total of 8993 detrital zircons were investigated for the surface and internal structure using a scanning electron microscope and optical microscope with/without acid treatment, and four types of shock-metamorphosed zircons were currently identified; (1) curvi-planar (non-planar) feature (n = 6), (2) multiple sets of planar feature (n = 7), (3) partly granular (polycrystalline) texture (n = 2), and (4) fully granular texture (n = 10). Of these four, multiple sets of planar feature are proved for diagnostic evidence for impact origin, and now observed as annealed (decorated) planar feature, probably due to post-impact thermal heating or regional metamorphic overprint. Coarse polycrystalline zircon represents several micro-meter sized crystallites in a glassy  $ZrSiO_4$  matrix that may resulted from shock-induced amorphization and subsequent recrystallization. This grain shows abundant micro-vesicles and tiny  $ThSiO_4$  phase suggesting incipient melting and degassing.

Shock-metamorphosed zircons are often utilized for impact-dating due to their partly or completely Pb-loss (age resetting). Therefore, impact age determinations on shock-metamorphosed detrital zircons from the Jack Hills metaconglomerate would provide significant clues not only for the deciphering the impact history on the early Earth but also for the verifying LHB hypothesis.

## 黒色カンラン石の電子顕微鏡観察による火星隕石の衝撃温度圧力履歴の推定 Shock P-T history of Martian meteorites as revealed by electron microscopy of "brown" olivine

竹之内 惇志<sup>1\*</sup>; 三河内 岳<sup>1</sup>; 山口 亮<sup>2</sup>

TAKENOUCHI, Atsushi<sup>1\*</sup>; MIKOUCHI, Takashi<sup>1</sup>; YAMAGUCHI, Akira<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 国立極地研究所

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, <sup>2</sup>National Institute of Polar Research

1. はじめに 火星隕石の多くは非常に強い衝撃を受けており様々な衝撃変成組織を示す。その中でもカンラン石の黒色化は火星隕石特有のものである。TEMによる詳細な観察によると、カンラン石の黒色化の原因はカンラン石中に晶出した直径5 - 20 nmほどの金属鉄または磁鉄鉱のナノ粒子であることが知られている。これら鉄ナノ粒子は火星での衝撃変成作用により形成されると考えられているが、形成条件や形成過程の詳細については不明な点が多く、これらを解明することで火星での天体衝突現象に新たな制約を与えることが期待される。本研究では、黒色カンラン石を含む火星隕石と含まない火星隕石、強い衝撃を受けた普通コンドライトを観察、比較し、黒色カンラン石の形成過程と形成条件を明らかにすることで、火星での天体衝突現象の特異性を探ることを試みた。

2. 試料 観察には火星隕石8つ (NWA 1950, LAR 06319, LEW 88516, Y984028, NWA 1068, RBT 04262, LAR 12095, Tissint) と強い衝撃を受けているLコンドライト1つ (NWA 4719) を用いた。NWA 1950, LAR 06319, LEW 88516, Y984028 はカンラン石が黒色化しており、他の隕石では黒色化していない。

3. 結果と考察 薄片観察では、カンラン石粒子内で数十 $\mu$ mのスケールでの不均質な着色が見られた。また、LAR 06319, LEW 88516, Y984028 ではショックメルトの周囲でカンラン石の再結晶化が観察され、そのような部分ではカンラン石の着色が見られなかった。

黒色化領域は無着色領域に比べてSEMによるBSE像で明るいコントラストを呈し、クラックが少なく、EBSDによる結晶構造解析によると結晶度も悪かった。NWA 1950の黒色カンラン石では、その明るい領域は微小なレンズ状集合体であり、周囲にはサブミクロンサイズの鉄粒子が存在する。TEMとSTEMによる観察では、従来の鉄ナノ粒子に加えて、サイズの大きい薄膜状やロッド状の鉄粒子が見られ、いずれも周囲にSiの濃集相は見られなかった。また、EBSDとラマン分光による分析によると黒色カンラン石を含む火星隕石にはショックメルトの側でリングウッドイトなどの高圧鉱物が存在せず、ショックメルト中に気泡や自形のカンラン石が存在することから、このメルトは減圧後に固化したと考えられる。

黒色カンラン石を含まない火星隕石とコンドライトにおいてはショックメルトの周囲で高圧鉱物が確認されるためメルトは高圧の間に冷却・固化したと考えられ、そのような領域では局所的にカンラン石の着色が見られた。それらの領域は黒色カンラン石に似た微細組織を示すことから同様の形成過程を持つと考えられ、ショックメルトの周囲などに存在することから、黒色化(鉄ナノ粒子の形成)には短時間の高温が必要であることが推測される。これは、黒色カンラン石の不均一な着色が温度の不均一を反映している可能性を示唆している。結晶内の温度不均一は熱伝導により1秒以内で解消されてしまうため鉄ナノ粒子もそれに近い時間スケールで形成されたと考えられる。

ナノ粒子の形成は周囲にSiの濃集相が見られないことなどからカンラン石の還元実験の初期に見られる機構に近いと考えられ、その場合、鉄粒子の形成速度はカンラン石中の鉄の拡散が律速することが知られている。しかし、カンラン石中での鉄の拡散は遅く温度の不均一を反映できないため、カンラン石よりも拡散速度が数桁速い高圧相(wadsleyiteやringwoodite)に転移した際に拡散が起こったことが必要である。黒色カンラン石中のレンズ状の低結晶度領域はもともと高圧相である可能性があり、その場合、温度の不均一性を十分反映可能である。黒色カンラン石を含む火星隕石は、隕石全体のカンラン石が高圧相転移するような高温高圧の状態に一時的に(数ms)置かれた可能性がある。黒色カンラン石を含む隕石によく見られたカンラン石の再結晶化や高圧相の消失は、全体が高温になりショックメルト周囲の冷却が遅れて引き起こされたと考えられる。

4. 結論 このように黒色カンラン石を含む隕石は隕石全体で瞬間的に不均一な高温高圧状態が存在し、全体的に高温になるような特異な温度圧力履歴を持ち、それは火星からこれらの隕石を放出した衝撃が他の衝突に比べ大規模であった事に対応していると考えられる。衝突温度圧力履歴の見積もりは主に高圧鉱物の存在により推定がなされているが、黒色カンラン石を含む隕石は高圧鉱物を含まないにも関わらずより強い衝撃を受けた可能性がある。これは高圧鉱物の有無だけでは必ずしも衝撃の規模は推定できず、詳細な観察に基づいた速度論的な面からの推定が重要であることを示唆している。

キーワード: 火星, 火星隕石, 高圧鉱物, 衝撃, 黒色カンラン石

Keywords: Mars, Martian meteorite, High pressure mineral, shock, brown olivine

## 衝撃変成石英のカソードルミネッセンスとその圧力依存性：新しい衝撃圧力計の構築へ向けて Pressure dependence of cathodoluminescence spectra of shocked quartz.

常ユイ<sup>1\*</sup>; 鹿山 雅裕<sup>2</sup>; 田近 英一<sup>3</sup>; 関根 康人<sup>1</sup>; 関根 利守<sup>4</sup>; 西戸 裕嗣<sup>5</sup>; 小林 敬道<sup>6</sup>  
CHANG, Yu<sup>1\*</sup>; KAYAMA, Masahiro<sup>2</sup>; TAJIKA, Eiichi<sup>3</sup>; SEKINE, Yasuhito<sup>1</sup>; SEKINE, Toshimori<sup>4</sup>;  
NISHIDO, Hirotsugu<sup>5</sup>; KOBAYASHI, Takamichi<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 東大理地惑, <sup>2</sup> 神戸大理地惑, <sup>3</sup> 東大新領域複雑理工, <sup>4</sup> 広島大理地惑, <sup>5</sup> 岡山理科大自然科学研究所, <sup>6</sup> 物質材料研究機構

<sup>1</sup>Earth & Planetary Sci., Univ. of Tokyo, <sup>2</sup>Earth & Planetary Sci., Kobe Univ., <sup>3</sup>Complexity Sci. & Eng., Univ. of Tokyo, <sup>4</sup>Earth & Planetary Sci., Hiroshima Univ., <sup>5</sup>Research Institute of Natural Science, Okayama Univ. of Science., <sup>6</sup>National Institute for Material Science (NIMS)

天体衝突は太陽系において普遍的に生じる現象であり、惑星形成から地球惑星環境の進化を理解する上で重要な役割を果たす。地球上に存在する衝突クレーターは天体衝突現象の産物であり、物質科学的な側面から衝突現象を理解するための重要な研究対象である。とりわけ、衝突起源物質の分布と衝撃時に経験した衝撃圧力条件の復元は、惑星スケールでの衝突の物理現象に関する知見を与えるものと言える。これまで、地球上の主要な造岩鉱物のひとつである石英を用いた様々な衝撃圧力の推定法（たとえば、PDFs）が提案されているものの、その多くは定量性が低い。近年では、物質に電子線照射した際に放出される発光現象であるカソードルミネッセンス（cathodoluminescence, CL）が注目されており、特に石英の発光特性については衝撃変成作用に依存することが報告されている。しかしながら、これまで衝撃変成石英を対象としたCLによる系統的な分析及び検討はなされていない。そこで本研究では、衝撃変成作用が石英の発光特性に及ぼす影響を定量的に評価するために、系統的な衝撃圧縮実験を行い、その回収試料のCLスペクトル測定を行った。

衝撃圧縮実験には、物質材料機構に設置されている一段式火薬銃を用いた。ステンレス製の回収容器内に封入した出発試料の石英単結晶（合成および天然に産する石英）に対して、衝突速度0.5 - 1.8 km/sの条件で金属製（アルミ、ステンレス、タンダステン）の飛翔体を衝突させることで、5 - 40 GPaの衝撃圧力を石英試料に加えた。回収試料は研磨薄片として、岡山理科大にて電子顕微鏡に回折格子型分光器を組み合わせたSEM-CL（Scanning Electron Microscopy-Cathodoluminescence）を用いて石英を一粒ごとにCLスペクトル測定した。

計102個の粒子に対してCLスペクトル測定を行った結果、衝撃圧力の上昇に伴ってスペクトルパターンの急激な変化が認められた。出発試料は赤色領域に位置する630 nm付近にブロードなピークを持つものの、10 - 20 GPaの衝撃圧力を加えた回収試料については青色領域である450-460 nm付近にブロードなピークが出現し、衝撃圧力の増加に伴い青色発光強度は増加する傾向を示した。また、20 GPa以上の衝撃圧力では青色領域における発光強度の増加率がさらに上昇することが確かめられた。一方、630 nm付近の発光強度は衝撃圧力に依存せず、いずれの試料においても変化はほとんど見られない。

隕石クレーターに産する石英と同様の顕著な青色発光は高温型の外形をなす石英（例えば、仙台市郷六産の石英など）においても認められる。また、衝撃変成作用を受けた石英と低温下における発光特性（例えば活性化エネルギー）が類似していることから、 $\alpha$ - $\beta$ 相転移により生じたドフィーネ双晶（Dauphine twins）に関連する欠陥が発光に寄与していると考えられる。一方、TEM観察により石英の衝撃回収実験においてもドフィーネ双晶が確認されている。したがって、本研究で見られた青色発光強度の増加は、衝撃により生成したドフィーネ双晶に関連する欠陥密度の増加に起因すると示唆され、その定量的な評価を行うことで新たな衝撃圧力計の構築が可能となることが期待される。

キーワード: 衝撃変成作用, 衝撃変成石英, カソードルミネッセンス  
Keywords: shock metamorphism, shocked quartz, cathodoluminescence

## CBタイプ炭素質コンドライト Gujbaに含まれる高圧相 High-pressure polymorphs in Gujba CB type carbonaceous chondrite.

宮原 正明<sup>1\*</sup>; 大谷 栄治<sup>2</sup>; 山口 亮<sup>3</sup>  
MIYAHARA, Masaaki<sup>1\*</sup>; OHTANI, Eiji<sup>2</sup>; YAMAGUCHI, Akira<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 広島大学理学研究科地球惑星システム学専攻, <sup>2</sup> 東北大学理学研究科地学専攻, <sup>3</sup> 国立極地研究所

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Systems Science, Graduate School of Science, Hiroshima University, <sup>2</sup>Department of Earth and Planetary Materials Science, Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>3</sup>National Institute of Polar Research

One of the most unambiguous evidences for shock metamorphism is a dense polymorph, high-pressure polymorph in and around the shock-melt veins and/or melt-pockets of shocked meteorites. Now, the existences of high-pressure polymorphs have been reported from ordinary chondrite, enstatite chondrite, ureilite, eucrite, iron meteorite, lunar meteorite, Apollo sample and Martian meteorite (e.g., Ohtani et al., 2004; Miyahara et al., 2014). On the other hand, it is widely accepted that carbonaceous chondrites were less shocked than ordinary chondrites, implying that high-pressure polymorphs would not be included in carbonaceous chondrites. However, Hollister et al. (2014) identified ringwoodite and stishovite from Khatyrka CV type carbonaceous chondrite. Shock metamorphism in carbonaceous chondrites may be overlooked or underestimated. CB type carbonaceous chondrite is a unique grouplet because it consists mainly of metallic Fe-Ni and chondritic fragment (Weisberg et al., 2001). Although the origin of CB type carbonaceous chondrite has been under debated, some previous studies propose that it may be formed through a planetesimal collision (Weisberg et al., 2010). In this study, we investigated a high-pressure polymorph in CB type carbonaceous chondrite, Gujba to clarify its shock metamorphism history and origin using FEG-SEM, EPMA and laser Raman spectroscopy.

We prepared a polished Gujba sample for this study. Gujba studied here consists of metal and chondritic fragment. Shock-melt veins occur widely between the chondritic fragments and metals. The major constituent minerals of the chondritic fragments are low-Ca pyroxene ( $\text{Fs}_{1-5}$ ,  $\text{En}_{89-98}$ ,  $\text{Wo}_{0-6}$ ), Mg-rich olivine ( $\text{Fa}_{1-18}$ ,  $\text{Fo}_{82-99}$ ) and Ca pyroxene ( $\text{Fs}_{1-13}$ ,  $\text{En}_{41-66}$ ,  $\text{Wo}_{32-57}$ ) based on EPMA analysis. Many mineral fragments and fine-grained chondritic fragments are entrained in the shock-melt veins. We confirmed the existences of many kinds of high-pressure polymorphs from such fragments and chondritic fragments adjacent to the shock-melt veins. Raman spectroscopy analyses indicate that olivine entrained in the shock-melt veins transform into wadsleyite. A small amount of ringwoodite is accompanied with some wadsleyite. Low-Ca pyroxene is replaced with akimotoite, majorite or probably bridgmanite. Minor Fe-rich olivine ( $\text{Fa}_{39-40}$ ) and albitic feldspar ( $\text{Ab}_{82}\text{An}_{13}\text{Or}_5$ ) are entrained in the shock-melt veins. Lamellar ringwoodite occurs in the Fe-rich olivine. The albitic feldspar is replaced with jadeite, lingunite or maskelynite. We also clarified the distributions of these high-pressure polymorphs in Gujba studied here. High-pressure polymorphs occur ubiquitously in and around the shock-melt veins, indicating that the parent-body of Gujba was heavily shocked. The metals, which consist of kamacite and minor FeS, show evidence for melting. Alternatively, we can also infer that Gujba is a part of shock-met veins induced by a collision.

### References

- Miyahara et al. (2014) Discovery of coesite and stishovite in eucrite. Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A., doi: 10.1073/pnas.1404247111.
- Ohtani et al. (2004) Formation of high-pressure minerals in shocked L6 chondrite Yamato 791384: constraints on shock conditions and parent body size. Earth and Planetary Science Letters 227, 505-515.
- Hollister L.S., et al. (2014) Impact-induced shock and the formation of natural quasicrystals in the early solar system. Nature Communications, doi: 10.1038/ncomms5040.
- Weisberg M.K. and Kimura M. (2010) Petrology and Raman spectroscopy of high pressure phases in the Gujba CB chondrite and the shock history of the CB parent body. Meteoritics & Planetary Science 45, 873-884.
- Weisberg M.K. et al. (2001) A new metal-rich chondrite grouplet. Meteoritics & Planetary Science 36, 401-418.

キーワード: 炭素質コンドライト, 高圧相, 衝撃変成

Keywords: carbonaceous chondrite, high-pressure polymorph, shock metamorphism

## 衝撃を受けた隕石中のメジャーライトガーネットの対称性 Symmetry of majorite garnet in shocked chondrites revisited: A TEM study

富岡 尚敬<sup>1\*</sup>; 宮原 正明<sup>2</sup>; 伊藤 元雄<sup>1</sup>  
TOMIOKA, Naotaka<sup>1\*</sup>; MIYAHARA, Masaaki<sup>2</sup>; ITO, Motoo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 海洋研究開発機構高知コア研究所, <sup>2</sup> 広島大学理学研究科地球惑星システム学専攻

<sup>1</sup>Kochi Institute for Core Sample Research, JAMSTEC, <sup>2</sup>Department of Earth and Planetary Systems Science, Graduate School of Science, Hiroshima University

Majorite is a garnet-structured mineral with a composition on the join  $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$ - $(\text{Mg,Fe})_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ , which contains Si in the octahedral sites. Al-free majorite samples synthesized by Kawai-type multianvil apparatus are known to have a tetragonal symmetry (space group  $I4_1/a$ ) [1]. However, all of natural Al-free majorite samples found in shocked chondrites have been reported to be cubic ( $Ia-3d$ ) [2]. Single-crystal X-ray study of a synthetic  $\text{MgSiO}_3$  majorite clarified the tetragonal distortion of majorite is caused by Mg-Si ordering in the octahedral sites [3]. Subsequent microstructural observations of synthetic Al-free majorite by TEM concluded that the tetragonal phase is formed from the cubic phase through the cation ordering even upon rapid quenching ( $10^3$  °C/sec) and the symmetry reduction phase derives modulated and twinning structures [4]. On the contrary, cubic  $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$  majorite in shocked chondrites is inferred to have been preserved due to higher cooling rate than that in high-pressure synthesis where the cation ordering is inhibited.

Due to very small tetragonal distortion from the cubic phase ( $c/a = 0.99$ ) and very weak extra reflections for the tetragonal phase, it is difficult to judge the symmetry of small amount of natural majorite samples by powder X-ray diffractometry. For the symmetry analyses of submicron-sized grains, single-crystal electron diffraction is a suitable method, since the intensities of weak reflections to diagnose the tetragonal symmetry are enhanced by the effect of dynamical diffraction. In this study, we revisit symmetries of majorite grains in shocked ordinary chondrites (Tenham; L6, Y-75100; H6) and also synthetic  $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$  majorite by TEM. The intensity of  $\{101\}$  reflections, which appears only for the  $I4_1/a$  tetragonal phase, is under investigation by selected area electron diffraction.

### References:

- [1] e.g. Kato, T., and Kumazawa, M. (1985) Garnet phase of  $\text{MgSiO}_3$  filling the pyroxene-ilmenite gap at very high temperature. *Nature*, 316, 803-805.
- [2] e.g. Smith, J.V., and Mason, B. (1970) Pyroxene-garnet transformation in Coorara meteorite. *Science*, 168, 832-833; Jeanloz, R. (1981) Majorite: Vibrational and compressional properties of a high-pressure phase. *J. Geophys. Res.*, 86, 6171-6179.
- [3] Angel, R.J., Finger, L.W., Hazen, R.M., Kanzaki, M., Weidner, D.J., Liebermann, R.C., Veblen, D. R. (1989) Structure and twinning of single-crystal  $\text{MgSiO}_3$  garnet synthesized at 17 GPa and 1800 °C. *Amer. Mineral.*, 74, 509-512.
- [4] e.g. Heinemann, S., Sharp, T.G., Seifert, F., and Rubie, D.C. (1997) The cubic-tetragonal phase transition in the system majorite ( $\text{Mg}_4\text{Si}_4\text{O}_{12}$ ) - pyrope ( $\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ ), and garnet symmetry in the Earth's transition zone. *Phys. Chem. Minerals*, 24, 206-221.; Tomioka, N., Fujino, K., Ito, E., Katsura, T., Sharp, T., and Kato, T. (2002) Microstructures and structural phase transition in  $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$  majorite. *Eur. J. Mineral.*, 14, 7-14.

キーワード: メジャーライト, 衝撃変成, 高圧相転移, TEM

Keywords: majorite, shock metamorphism, high-pressure phase transition, TEM

## 小惑星ベスタにおける大規模衝突：ダイオジェナイトからの岩石学的証拠 Basin forming event on Vesta: Petrologic evidence from a diogenite, NWA 5480

山口 亮<sup>1\*</sup>; Barrat Jean-Alix<sup>2</sup>; 白井 直樹<sup>3</sup>; 海老原 充<sup>3</sup>  
YAMAGUCHI, Akira<sup>1\*</sup>; BARRAT, Jean-alix<sup>2</sup>; SHIRAI, Naoki<sup>3</sup>; EBIHARA, Mitsuru<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 国立極地研究所, <sup>2</sup>Universite Europeenne de Bretagne, U.B.O.-I.U.E.M., <sup>3</sup> 首都大学東京  
<sup>1</sup>National Institute of Polar Research, <sup>2</sup>Universite Europeenne de Bretagne, U.B.O.-I.U.E.M., <sup>3</sup>Tokyo Metropolitan University

The HED (Howardite, Eucrite, Diogenite) meteorites are the largest group of achondrites, and are derived from the regolith and crustal lithologies of asteroid 4-Vesta, which is the only surviving differentiated protoplanet in the Solar System. Diogenites are considered to have been derived from intrusions from within the crust or from a deep global layer. Some of them display high levels of platinum group element (PGE) concentrations that have been attributed to impact events on the parent body.

NWA 5480 is an unusual olivine diogenite. It has a heterogeneous crystalline texture. Irregular and subrounded clasts of dunite and fragments of olivine and chromite are set in an igneous matrix mainly composed of Low-Ca pyroxene. In some cases, large dunite clasts are intersected by pyroxene matrix. Flow textures are observed near some clasts. Olivine, chromite, and pyroxene show minor chemical zoning, implying relatively rapid cooling compared to typical diogenites. NWA 5480 contains a significant amount of PGE (CI x ~0.001 for Ir) with chondritic relative proportions. All these lines of evidence support that NWA 5480 is an impact melt breccia from a target composed of olivine and pyroxene-rich lithologies.

Upon heating of olivine diogenites, low-Ca pyroxene is the earliest phase to melt, and olivine and chromite are the last at >~1600 C. The irregular and rounded shape resulted from resorption, and pyroxene veins and flow textures formed by violent mixing during impact melting. The pyroxene matrix crystallized from impact melts. Cooling rates estimated from the shape of Ca zoning of profiles near the rims in olivine fragments could be several tens of C/year, corresponding to burial depths less than a few km in impact melt sheet. An impact crater with diameter >a few hundreds km would be needed to produce impact melt sheet >a few km in thickness. Thus, we suggest that NWA 5480 was derived from impact melts from a very large crater of Vesta. The bulk chemical compositions indicate that the target was an area where olivine and orthopyroxene-rich rocks are largely exposed. However, there are no such areas on Vesta except minor olivine spots. Thus, it is likely that NWA 5480 sampled a part of large impact melt sheet (>a few km thick) formed by melting of deep crustal materials rich in olivine and orthopyroxene. One of the best candidates is the Rheasilvia basin (~500 km diameter), where orthopyroxene-rich materials were observed in the crater floor.

キーワード: ダイオジェナイト, ベスタ, 衝突溶融岩, 衝突クレーター  
Keywords: diogenite, Vesta, impact melt breccia, impact crater

## 玄武岩質ユークライト NWA 7188 における $^{147}\text{Sm}$ - $^{143}\text{Nd}$ 年代と $^{146}\text{Sm}$ - $^{142}\text{Nd}$ 年代 $^{147}\text{Sm}$ - $^{143}\text{Nd}$ and $^{146}\text{Sm}$ - $^{142}\text{Nd}$ chronology of a basaltic eucrite, NWA 7188

鏡味 沙耶<sup>1\*</sup>; 横山 哲也<sup>1</sup>; 白井 寛裕<sup>1</sup>; 深井 稜汰<sup>1</sup>  
KAGAMI, Saya<sup>1\*</sup>; YOKOYAMA, Tetsuya<sup>1</sup>; USUI, Tomohiro<sup>1</sup>; FUKAI, Ryota<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京工業大学大学院地球惑星科学専攻

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

Eucrites are achondritic meteorites originating from the Vesta's crust. They can be petrographically classified into basaltic and cumulate eucrites. Determination of precise ages for eucrites will constrain the period of igneous activity and the following thermal metamorphism of Vesta and may further provide insights into its differentiation and thermal history. We investigate the long-lived  $^{147}\text{Sm}$ - $^{143}\text{Nd}$  ( $T_{1/2} = 1.06 \times 10^{11}$  yr) and the short-lived  $^{146}\text{Sm}$ - $^{142}\text{Nd}$  ( $T_{1/2} = 6.8 \times 10^7$  yr [1]) systematics of a basaltic eucrite, NWA 7188 and compare the results with the ages obtained in previous chronological studies on cumulate and basaltic eucrites. To obtain highly precise age data, we developed the techniques for determining Nd and Sm concentrations and Nd isotope compositions in meteorite samples.

NWA 7188 was crushed and sieved into four sizes; G1) 500 — 1700  $\mu\text{m}$ , G2) 250 — 500  $\mu\text{m}$ , G3) 106 — 250  $\mu\text{m}$ , and G4)  $\leq 106$   $\mu\text{m}$ . G3 and G4 were separated into pyroxene and plagioclase grains by handpicking. We determined the  $^{147}\text{Sm}$ - $^{143}\text{Nd}$  and  $^{146}\text{Sm}$ - $^{142}\text{Nd}$  ages of NWA 7188 using G1, G3-px, G4-px, G3-pl, and G4-pl. These were dissolved using a mixture of concentrated pure acids ( $\text{HClO}_4$ , HF, and  $\text{HNO}_3$ ). After the sample digestion,  $\sim 10\%$  of the solution was removed and mixed with  $^{149}\text{Sm}$ - and  $^{145}\text{Nd}$ -enriched spikes to determine the Sm and Nd concentrations by ID-ICP-MS (X-series II, Thermo). The remainder of the sample solution was used for highly precise Nd isotope analysis by TIMS (TRITON plus) with the dynamic multicollection mode. Nd was separated by a three-step column chemistry procedure; 1) major elements were removed by passing through a cation exchange resin, 2) Ce was removed using the LN resin (Eichrom) by oxidizing  $\text{Ce}^{3+}$  into  $\text{Ce}^{4+}$  using  $\text{KBrO}_3$  [2] and 3) Nd was separated from Sm using the LN resin. We achieved  $\text{Ce}/\text{Nd} \sim 3 \times 10^{-5}$  and  $\text{Sm}/\text{Nd} \sim 4 \times 10^{-5}$  with  $\geq 91\%$  Nd recovery.

The  $^{147}\text{Sm}$ - $^{143}\text{Nd}$  mineral isochron of NWA 7188 yields an age of  $4203 \pm 970$  Ma. In contrast, we obtained a much older  $^{146}\text{Sm}$ - $^{142}\text{Nd}$  mineral isochron age of  $4549 \pm 28_{40}$  Ma when an initial solar system ratio of  $^{146}\text{Sm}/^{144}\text{Sm} = 0.0094$  at 4568 Ma was applied [1]. It is presumed that thermal metamorphism on the Vesta has some effects on the  $^{147}\text{Sm}$ - $^{143}\text{Nd}$  age while the  $^{146}\text{Sm}$ - $^{142}\text{Nd}$  age represents the timing of the last Sm-Nd isotopic closure. Therefore, we use the  $^{146}\text{Sm}$ - $^{142}\text{Nd}$  age of NWA 7188 in the following discussion.

The  $^{146}\text{Sm}$ - $^{142}\text{Nd}$  age ( $4549 \pm 28_{40}$  Ma) for NWA 7188 is consistent with the  $^{147}\text{Sm}$ - $^{143}\text{Nd}$  age for cumulate eucrites ( $4546 \pm 8$  Ma [3]) within analytical uncertainties. This suggests that the parent body processes associated with the last Sm-Nd isotopic closure were contemporaneous for basaltic and cumulate eucrites. Likewise, the  $^{146}\text{Sm}$ - $^{142}\text{Nd}$  age of NWA 7188 is not resolvable from the metamorphic age of Agoult [4]. According to the  $^{53}\text{Mn}$ - $^{53}\text{Cr}$  systematics [5], the last global Mn/Cr fractionation in the mantle of the Vesta occurred at  $4564.8 \pm 0.9$  Ma, the timing when basaltic magmas have formed in the mantle. This implies that basaltic eucrites quenched rapidly on the surface of eucrite parent body, but thermal metamorphism may have affected both Sm-Nd and U-Pb systematics. No apparent age difference between basaltic and cumulate eucrites implies that both types of eucrites might have experienced similar cooling history as opposed to their petrographic distinction, or more likely that the time difference is too subtle to be resolved by the  $^{146}\text{Sm}$ - $^{142}\text{Nd}$  system.

References: [1] Kinoshita, N. et al. (2012) *Science*, 335, 1614-1617. [2] Tazoe, H. et al. (2007) *JAAS*, 22, 616-622. [3] Boyet, M. et al. (2010) *EPSL*, 291, 172-181. [4] Iizuka, T. et al. (2014) *EPSL*, 409, 182-192. [5] Lugmair, G.W. and Shukolyulov, A. (1998) *GCA*, 62, 16, 2863-2886.

キーワード: 玄武岩質ユークライト, Sm-Nd 年代学, NWA 7188

Keywords: basaltic eucrite, Sm-Nd chronology, NWA 7188



## Divnoe 隕石中のカンラン石結晶方位定向配列と化学組成に基づく形成過程に関する研究 Olivine petrofabric and chemical study of Divnoe ungrouped primitive achondrite

長谷川 輝<sup>1\*</sup>; 三河内 岳<sup>1</sup>; 山口 亮<sup>2</sup>; 白井 直樹<sup>3</sup>; 海老原 充<sup>3</sup>

HASEGAWA, Hikari<sup>1\*</sup>; MIKOUCHI, Takashi<sup>1</sup>; YAMAGUCHI, Akira<sup>2</sup>; SHIRAI, Naoki<sup>3</sup>; EBIHARA, Mitsuru<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 国立極地研究所, <sup>3</sup> 首都大学東京

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, <sup>2</sup>National Institute of Polar Research, <sup>3</sup>Tokyo Metropolitan University

Brachinite は主にカンラン石から構成されるエコンドライトの 1 グループであるが、まだあまり形成過程についての理解は進んでいない。brachinite に属する隕石は現在 30 個ほど見つかったが、それ以外に“brachinite-like”と呼ばれる ungrouped の隕石がいくつか存在している (Day et al. 2012; Keil 2014)。これらは岩石学的特徴や酸素同位体比、微量元素組成などに brachinite との関連性が見られるが、完全には一致せずに ungrouped となっているものである。これらの隕石を詳細に研究し、brachinite と比較していくことで brachinite の形成過程を含めた惑星分化過程へ理解が得られることが期待される。Divnoe は 1981 年にロシアで発見された隕石で、brachinite との関連性が指摘されているが、現在 ungrouped に分類されている (Graham 1983; Petaev et al. 1994)。Divnoe は大部分がカンラン石で構成されているが、薄片試料を観察するとカンラン石の各粒子が特定の方位性を持つ様子が見られる。近年、diogenite 中のカンラン石粒子の結晶方位性に着目した研究によって、その隕石が母天体において固体状態にあった時に塑性変形を受けたことが指摘されている (Tkalcic et al. 2013)。このように、隕石中の鉱物結晶方位を研究することは、その隕石母天体における火成活動、形成過程に強い制約を与えることが期待される。そこで本研究では、Divnoe 隕石のカンラン石の結晶方位定向配列 (crystallographic preferred orientation: CPO) に着目した。鉱物の CPO は鉱物が転位クリープによって変形する過程で発達する岩石組織のひとつである (大内 2013)。転位クリープは地球の下部地殻や上部マントルにおけるカンラン石の最も一般的な変形メカニズムであるため、隕石中の CPO を地球岩石中のものと比較することは、隕石母天体での形成過程を考えていく上で非常に重要である (Karato et al. 1986)。本研究では、電子線後方散乱回折法 (EBSD) を用いて薄片試料の分析を行い、カンラン石の結晶方位の配列を調べた。それと同時に ICP-MS を用いた全岩の微量元素測定を行った。以上の鉱物学と全岩化学組成、そしてカンラン石の結晶方位定向配列を組み合わせることで Divnoe の形成過程についての考察を行った。

Divnoe の薄片試料は同じ岩石チップから 2 枚用意した (#11 と #16)。まず光学顕微鏡によって観察を行った後、鉱物組成や元素マップのために EPMA (electron probe micro analyzer, JEOL JXA-8800) を用いた。その後、#11 の薄片を EBSD の付いた FEG-SEM (JEOL JSM-5900LV) を用いて観察、カンラン石の結晶方位測定を行った。Divnoe の全岩化学組成は首都大学東京の ICP-MS を用いて測定した。分析条件は Shirai & Ebihara (2004) に準ずる。観察を行った Divnoe の薄片は主にカンラン石から構成されている他、輝石も少量見られた。カンラン石はおおむね  $1 \times 0.5$  mm で輝石はこれよりも大きく、 $1 \times 2$  mm であった。カンラン石は波状消光を示していた。EPMA による分析から、カンラン石の組成は  $Fe_{0.72}Mg_{0.28}$  であり、ほぼ均質であった。EBSD でカンラン石の結晶方位を調べると、特に [001] (c 軸) が良い配向性をもつことが明らかとなった。これはカンラン石の伸長方向と一致しており、先行研究でも議論されているようにマグマ中で集積した際に配向性が形成されたと考えられる (Ando et al. 2003)。さらに詳細に分析、解析を行い、地球の岩石からわかっているすべり場などと比較をしていく予定である。全岩化学組成分析から Divnoe は軽希土類元素が CI コンドライトの 100 分の 1 程度と激しく枯渇していることがわかった。親鉄元素は CI コンドライトの半分程度とわずかしこ枯渇が見られなかった。鉱物粒子内の元素均一性や結晶配向性などから Divnoe は集積岩と考えられるが、集積岩としては親鉄元素に富みすぎている。このように親鉄元素に富んだ集積岩を作るには、鉄隕石をインパクトなどにより付加することが考えられるために、金属鉄組織の観察やさらなるカンラン石結晶方位解析を行っていく必要がある。

小惑星ベスタにおけるダイオジェナイト形成の為の結晶化・冷却条件  
Crystallization and cooling conditions for the diogenite formation in the turbulent magma  
ocean of the asteroid 4 Vesta

川畑 佑典<sup>1\*</sup>; 永原 裕子<sup>1</sup>

KAWABATA, Yusuke<sup>1\*</sup>; NAGAHARA, Hiroko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

<sup>1</sup>Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

The asteroid 4 Vesta has been completely differentiated to core and mantle despite its small size, of which surface materials are howardite-eucrite-diogenite (HED) meteorites that we know the detailed petrology, and therefore, is a good target for understanding differentiation of terrestrial planets. A new differentiation model for crust formation was developed by taking magma ocean fluid dynamics, chemical equilibrium, presence of <sup>26</sup>Al, and cooling into consideration with special care to crystal separation. The role of crystal size, thickness of the conductive lib, and fO<sub>2</sub> are evaluated as parameters. Large crystals (1cm) settle and form a km-thick cumulate layer of orthopyroxene with Mg# of 0.70-0.90 in 20 thousand years, which almost agrees with the Mg# of diogenites, whereas thinner layers are formed if the grain size is smaller.

キーワード: マグマオーシャン, 小惑星ベスタ, HED 隕石

Keywords: magma ocean, Asteroid 4 Vesta, HED meteorites

## 始原的エコンドライト隕石 NWA 6704 の鉱物化学的研究 A mineralogical and chemical study of primitive achondrite NWA 6704

日比谷 由紀<sup>1\*</sup>; 小澤 一仁<sup>2</sup>; 飯塚 毅<sup>3</sup>; 山口 亮<sup>4</sup>  
HIBIYA, Yuki<sup>1\*</sup>; OZAWA, Kazuhito<sup>2</sup>; IIZUKA, Tsuyoshi<sup>3</sup>; YAMAGUCHI, Akira<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東京大学, <sup>2</sup> 東京大学, <sup>3</sup> 東京大学, <sup>4</sup> 国立極地研究所

<sup>1</sup>The University of Tokyo, <sup>2</sup>The University of Tokyo, <sup>3</sup>The University of Tokyo, <sup>4</sup>National Institute of Polar Research

**Introduction:** Primitive achondrites provide unique insights into the early stage of growth and differentiation of planetesimals. Northwest Africa (NWA) 6704 is an ungrouped primitive achondrite found in Algeria in 2010. This meteorite is composed mainly of low-Ca pyroxene, olivine, feldspar, chromite, awaruite, heazlewoodite, pentlandite, and whitlockite. The U-Pb dating of this meteorite shows the crystallization age of  $4563.75 \pm 0.41$  Ma (1). To better understand the formation process of this primitive meteorite, we carried out a mineralogical and chemical study of NWA 6704 using SEM-EDS, EPMA and LA-ICP-MS.

**Results & Discussion:** Seven polished thin sections (TS-1<sup>7</sup>; 10×18mm; 10×20mm; 9×10mm; 10×12mm; 10×11mm; 15×28mm; 19×28mm) have been investigated. The texture is best characterized by the existence of many orthopyroxene (Opx) megacrysts up to 1.56 cm in length ( $\text{Fs}_{40-42}\text{En}_{53-57}\text{Wo}_{3-4}$ ). Olivine ( $\text{Fa}_{50-53}$ ) typically occur as interstices associated with feldspar and have subhedral shapes, but locally occur as the vermicular olivine within the Opx. The vermicular olivine share the same optical extinction position under crossed-nicols and occurs only in one place near the center of each Opx crystal if present. Feldspar ( $\text{Ab}_{91-93}\text{An}_{5-6}\text{Or}_{2-30}$ ) occurs in the Opx and the interstices as anhedral cusped grains with extremely low dihedral angles and sharing the same optical extinction position over up to 1cm, which implies that it's pseudomorph of a melt-filled interstitial pore. Other phases include chromite ( $\text{Cr}\# = 0.90-0.96$ ) and awaruite (78-81 wt% Ni) also occur associated with feldspar. We estimated  $f\text{O}_2$  of FMQ -2.6 using the Oliv-Opx-Spl oxygen geobarometer (4).

The texture is properly represented by aggregate of large Opx hollow (skeletal) megacrysts with finer interstices. Other phases such as olivine are present in the hollow cores, and some of them are isolated from the interstices. The contiguity of feldspar in the Opx megacrysts with or without olivine in three dimensions is clearly demonstrated by the fact that the same optical extinction position are shared by feldspar isolated in the megacrysts and those present in the interstices. The distribution of the Opx hollow crystal and the vermicular olivine are highly heterogeneous. In TS-1 and TS-6, Opx <6.2 mm across are dominant and more than five of them include vermicular olivine; in TS-2<sup>5</sup> and TS-7, Opx megacrysts up to 1.56cm across are common and only a few of them contain vermicular olivine. The vermicular olivine may be a decomposition product of the precursor pyroxene through the abrupt heating (>1400 °C). There is a negative correlation between size of Opx and the number of vermicular-olivine bearing Opx. Given this fact, a new scenario can be derived: this vermicular olivine and its host acted as nuclei for crystallization of hollow Opx crystals, and the number of nuclei limits the size of Opx. Thus, more nuclei in a given area result in smaller grain size as seen in TS-1,6. The abnormally large size of Opx and its hollow morphology indicates that the initial crystallization occurred under rapid cooling. The SEM images, however, show that some pigeonite contain sub-micrometer-size augite ( $\text{Fs}_{17}\text{En}_{45}\text{Wo}_{39}$ ) exsolution lamellae. We estimated equilibrium temperatures of 1050 °C using two-pyroxene geothermometry (3) and of 773 °C using Oliv-Spl FeMg<sub>-1</sub> exchange thermometry (4). The cooling rate between 1100-950 °C was estimated to be ~0.02 °C/hr from the thickness and wavelength of multiple exsolution lamellae (5), indicating significant decrease in cooling rate at a later crystallization stage. The inferred thermal history suggests high internal temperature of the parent planetesimal due to <sup>26</sup>Al decay, which was abruptly heated by impact followed by rapid cooling up to the ambient temperature to sustain slower cooling.

**References:** (1) Iizuka et al. (2013), (2) Warren et al. (2012), (3) Lindsley & Andersen (1983), (4) Ballhaus et al. (1991), (5) Jackson (1961)

キーワード: 始原的エコンドライト, NWA6704

Keywords: Primitive achondrite, NWA6704