

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^{1*}

FUJIYA, Wataru^{1*}

¹ マックスプランク研究所

¹Max 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}Mn - ^{53}Cr systematics of aqueously-formed secondary minerals (carbonates in CM, CI, and CR chondrites and fayalite in CV, CO, and ordinary chondrites). The ^{53}Mn - ^{53}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}Al - ^{26}Mg ages of chondrules (e.g., Kita and Ushikubo, 2012). The ^{53}Mn - ^{53}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}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}C with $\delta^{13}\text{C} > 70\text{‰}$, 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 CO3 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 CO3 carbonaceous chondrite

松本 恵^{1*}; 留岡 和重²; 瀬戸 雄介²; 三宅 亮³; 桐石 美帆²; 梅原 まり子²; 山本 由紀子²;
浜根 大輔⁴

MATSUMOTO, Megumi^{1*}; TOMEOKA, Kazushige²; SETO, Yusuke²; MIYAKE, Akira³; KIRIISHI, Miho²;
UMEHARA, Mariko²; YAMAMOTO, Yukiko²; HAMANE, Daisuke⁴

¹ 神戸大学研究基盤センター, ² 神戸大学大学院理学研究科, ³ 京都大学大学院理学研究科, ⁴ 東京大学物性研究所

¹CSREA, Kobe Univ., ²Graduate School of Science, Kobe Univ., ³Graduate School of Science, Kyoto Univ., ⁴ISSP, 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 CO3 隕石である^[1,2]。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^[3,4]。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・鉱物学的な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、単一のコンドリュ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ュールや CAI を含むものも少数存在する。

クラスト中のコンドリュールは、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_{10}) である。このような特徴は、熱変成度の低い CO3.0 隕石に類似している。また、コンドリュ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ュ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ュ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ュール、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 CO3.0 隕石^[5] 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-SiO₂系における非晶質珪酸塩の水質変成実験 Hydrothermal alteration experiments of MgO-SiO₂ amorphous silicates

高橋 竜平¹; 土山 明^{1*}; 三宅 亮¹; 河村 雄行²

TAKAHASHI, Ryohei¹; TSUCHIYAMA, Akira^{1*}; MIYAKE, Akira¹; KAWAMURA, Katsuyuki²

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

¹Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, ²Graduate 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-SiO₂-H₂O 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-situ 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 2θ (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^{1*}; 瀬戸 雄介¹; 留岡 和重¹; 大井 修吾²
ICHIMURA, Shun^{1*}; SETO, Yusuke¹; TOMEOKA, Kazushige¹; OHI, Shugo²

¹ 神戸大学大学院理学研究科, ² 京都大学大学院理学研究科

¹Graduate School of Science, Kobe University, ²Graduate 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)、 H_2O (pH 7) 0.1N (mol/l) -NaOH (pH 13)、1N-NaOH (pH 14) の4種類を用い、さらに SiO_2 成分を様々な量比で加えた。各溶液の 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。回収試料の相同定・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、 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。 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 H_2O 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 Al_2O_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では、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^{1*}; 留岡 和重¹; 瀬戸 雄介¹; 三宅 亮²

SAKAI, Midori^{1*}; TOMEOKA, Kazushige¹; SETO, Yusuke¹; MIYAKE, Akira²

¹ 神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, ² 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

¹Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Kobe University, ²Department 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^[1]。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して一般に考えられており^[2]、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」とであるとされている^[2]。しかし、最近の研究^[3,4]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。^[3, 4]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ーマグネタイトー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^[1]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に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)^[1]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^{1*}; 土山 明¹; 三宅 亮¹; 松本 徹¹; 大井 修吾¹; 瀧川 晶¹; 上杉 健太郎²
NAKAMURA, Ryuta^{1*}; TSUCHIYAMA, Akira¹; MIYAKE, Akira¹; MATSUMOTO, Toru¹; OHI, Shugo¹; TAKIGAWA, Aki¹; UESUGI, Kentaro²

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

¹Division of Earth and Planetary Sciences, Kyoto University, ²Japan 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 μm 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°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、30x30x60 μm 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 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 μm 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INETI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°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

今栄 直也^{1*}; 磯部 博志²

IMAE, Naoya^{1*}; ISOBE, Hiroshi²

¹ 情報・システム研究機構 国立極地研究所, ² 熊本大学

¹National Institute of Polar Research, ²Kumamoto 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℃/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℃で1分間加熱、270℃/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℃、冷却速度は80-10000℃/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100Paに設定した。実験容器は、上部に1mm径の穴を開けたアルミナ容器内に、0.2mm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℃付近で1Pa程度である。アルミナ容器の外は水素ガスで全圧を約100Pa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℃)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℃、冷却速度が100℃/hで、丸みのあるかんらん石(フォーステライト)をエンスタタイト斑晶が取り囲むポйки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”およびフォーステライトの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йки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℃以上で、金属鉄が溶融し一塊になる傾向が認められた。1500℃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、微少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^{1*}; 中嶋 大輔¹; 中村 智樹¹; 長尾 敬介²

OBASE, Tomoya^{1*}; NAKASHIMA, Daisuke¹; NAKAMURA, Tomoki¹; NAGAO, Keisuke²

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

¹Department of Earth and Planetary Materials Science, Graduate School of Science, Tohoku University, ²Geochemical 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 ± 5.2 Ma), exposure age in space after ejection from the parent body (9.5 ± 1.3 Ma), and heliocentric distance of the parent body (1.3 ± 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 ± 1.3 Ma). Kr isotopic ratios show excesses of ⁸⁰Kr and ⁸²Kr 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^{1*}; 深海 雄介¹; 奥井 航¹; 伊藤 伸朗¹; 山崎 洋¹
YOKOYAMA, Tetsuya^{1*}; FUKAMI, Yusuke¹; OKUI, Wataru¹; ITO, Nobuaki¹; YAMAZAKI, Hiroshi¹

¹ 東京工業大学地球惑星科学専攻

¹Department 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+H₂O, 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, プレソーラー粒子, 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^{1*}; 横山 哲也¹; 鏡味 沙耶¹
FUKAI, Ryota^{1*}; YOKOYAMA, Tetsuya¹; KAGAMI, Saya¹

¹ 東京工業大学 地球惑星科学専攻

¹Department 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 ~ 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^{1*}; 比屋根 肇¹; 高畑 直人²; 佐野 有司²; 橋元 明彦³
FUKUDA, Kohei^{1*}; HIYAGON, Hajime¹; TAKAHATA, Naoto²; SANO, Yuji²; HASHIMOTO, Akihiko³

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

¹Department of Earth and Planetary Science, The Univ. of Tokyo, ²AORI, The Univ. of Tokyo, ³Department of Cosmochemistry, 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 ~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, ~80% of Mg and ~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., ~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 ~34 wt% MgO and ~50 wt% SiO₂. 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^{1*}; 川崎 教行¹; 坂本 直哉¹; 坂本 尚義¹

YAMAMOTO, Yoshihiro^{1*}; KAWASAKI, Noriyuki¹; SAKAMOTO, Naoya¹; YURIMOTO, Hisayoshi¹

¹ 北海道大学

¹ 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 に富むオーザイト (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 は大きく欠損してい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}O -rich ($\delta^{18}\text{O} = -45$ パーミル) と ^{16}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}O -rich と ^{16}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}O -rich の測定点が多く、 ^{16}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}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^{1*}; 加藤 千図²; 伊藤 正一³; 若木 重行⁴; 伊藤 元雄⁴; 坂本 尚義¹
KAWASAKI, Noriyuki^{1*}; KATO, Chizu²; ITOH, Shoichi³; WAKAKI, Shigeyuki⁴; ITO, Motoo⁴;
YURIMOTO, Hisayoshi¹

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

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 ²⁶Mg へと壊変する消滅核種、²⁶Al の痕跡が見つかった (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 ¹⁶O に富む組成 ($\delta^{18}\text{O} \sim -43$ ‰) をもち、一方でアノーサイトは ¹⁶O 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 ¹⁶O 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 ¹⁶O に乏しい星雲ガスとの間で酸素同位体交換が起こった。¹⁶O 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 ²⁶Al-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^{1*}

NAKAMURA, Akiko^{1*}

¹ 神戸大学大学院理学研究科

¹ 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 2008TC₃ 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、空隙を失うというミ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度衝突では、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, Daiki¹ ; SEKINE, Toshimori^{1*} ; KOBAYASHI, Takamichi² ; MASHIMO, Tsutomu³ ; OHFUJI, Hiroaki⁴
MUTOU, Daiki¹ ; SEKINE, Toshimori^{1*} ; KOBAYASHI, Takamichi² ; MASHIMO, Tsutomu³ ; OHFUJI, Hiroaki⁴

¹Hiroshima University, ²NIMS, ³Kumamoto University, ⁴Ehime University

¹Hiroshima University, ²NIMS, ³Kumamoto University, ⁴Ehime 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 Fe₂SiO₄ (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¹; 久保 友明^{1*}; 加藤 工¹; 上原 誠一郎¹; 近藤 忠²; 亀卦川 卓実³; 肥後 祐司⁴;
丹下 慶範⁴
KONO, Mari¹; KUBO, Tomoaki^{1*}; KATO, Takumi¹; UEHARA, Seiichiro¹; KONDO, Tadashi²;
KIKEGAWA, Takumi³; HIGO, Yuji⁴; TANGE, Yoshinori⁴

¹九州大・理, ²大阪大・理, ³Photon Factory, ⁴JASRI

¹Kyushu Univ., ²Osaka Univ., ³Photon Factory, ⁴JASRI

Lingunite (hollandite-type NaAlSi₃O₈) 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 (NaAlSi₃O₈) into jadeite (NaAlSi₂O₆) plus silica (SiO₂) 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 NaAlSiO₄ 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 NaAlSi₃O₈ component in hollandite structure is limited to ~50 mol% at 14-25 GPa and 1073-2673K (Yagi et al., 1994, Liu, 2006) and NaAlSi₃O₈ 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^{1*}; 小宮 剛¹
YAMAMOTO, Shinji^{1*}; KOMIYA, Tsuyoshi¹

¹ 東京大学大学院総合文化研究科

¹ 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^{1*}; 三河内 岳¹; 山口 亮²

TAKENOUCHI, Atsushi^{1*}; MIKOUCHI, Takashi¹; YAMAGUCHI, Akira²

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

¹Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, ²National 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 μ 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压鉱物が存在せず、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压鉱物が確認されるためメルトは高压の間に冷却・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 秒以内に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压相 (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压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压相転移するような高温高压の状態に一時的に (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压相の消失は、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压状態が存在し、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压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压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。これは高压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, 高压鉱物, 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^{1*}; 鹿山 雅裕²; 田近 英一³; 関根 康人¹; 関根 利守⁴; 西戸 裕嗣⁵; 小林 敬道⁶
CHANG, Yu^{1*}; KAYAMA, Masahiro²; TAJIKA, Eiichi³; SEKINE, Yasuhito¹; SEKINE, Toshimori⁴;
NISHIDO, Hirotugu⁵; KOBAYASHI, Takamichi⁶

¹ 東大 理 地惑, ² 神戸大 理 地惑, ³ 東大 新領域 複雑理工, ⁴ 広島大 理 地惑, ⁵ 岡山理科大 自然科学研究所, ⁶ 物質材料研究機構

¹Earth & Planetary Sci., Univ. of Tokyo, ²Earth & Planetary Sci., Kobe Univ., ³Complexity Sci. & Eng., Univ. of Tokyo, ⁴Earth & Planetary Sci., Hiroshima Univ., ⁵Research Institute of Natural Science, Okayama Univ. of Science., ⁶National 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、 α - β 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^{1*}; 大谷 栄治²; 山口 亮³
MIYAHARA, Masaaki^{1*}; OHTANI, Eiji²; YAMAGUCHI, Akira³

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

¹Department of Earth and Planetary Systems Science, Graduate School of Science, Hiroshima University, ²Department of Earth and Planetary Materials Science, Graduate School of Science, Tohoku University, ³National 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 (Fs₁₋₅, En₈₉₋₉₈, Wo₀₋₆), Mg-rich olivine (Fa₁₋₁₈, Fo₈₂₋₉₉) and Ca pyroxene (Fs₁₋₁₃, En₄₁₋₆₆, Wo₃₂₋₅₇) 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 (Fa₃₉₋₄₀) and albitic feldspar (Ab₈₂An₁₃Or₅) 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^{1*}; 宮原 正明²; 伊藤 元雄¹
TOMIOKA, Naotaka^{1*}; MIYAHARA, Masaaki²; ITO, Motoo¹

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

¹Kochi Institute for Core Sample Research, JAMSTEC, ²Department 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 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 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 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^{1*}; Barrat Jean-Alix²; 白井 直樹³; 海老原 充³
YAMAGUCHI, Akira^{1*}; BARRAT, Jean-alix²; SHIRAI, Naoki³; EBIHARA, Mitsuru³

¹ 国立極地研究所, ²Universite Europeenne de Bretagne, U.B.O.-I.U.E.M., ³ 首都大学東京

¹National Institute of Polar Research, ²Universite Europeenne de Bretagne, U.B.O.-I.U.E.M., ³Tokyo 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 line 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}Sm - ^{143}Nd 年代と ^{146}Sm - ^{142}Nd 年代 ^{147}Sm - ^{143}Nd and ^{146}Sm - ^{142}Nd chronology of a basaltic eucrite, NWA 7188

鏡味 沙耶^{1*}; 横山 哲也¹; 臼井 寛裕¹; 深井 稜汰¹

KAGAMI, Saya^{1*}; YOKOYAMA, Tetsuya¹; USUI, Tomohiro¹; FUKAI, Ryota¹

¹ 東京工業大学大学院地球惑星科学専攻

¹Department 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}Sm - ^{143}Nd ($T_{1/2} = 1.06 \times 10^{11}$ yr) and the short-lived ^{146}Sm - ^{142}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 μm , G2) 250 — 500 μm , G3) 106 — 250 μm , and G4) ≤ 106 μm . G3 and G4 were separated into pyroxene and plagioclase grains by handpicking. We determined the ^{147}Sm - ^{143}Nd and ^{146}Sm - ^{142}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 (HClO_4 , HF, and HNO_3). After the sample digestion, $\sim 10\%$ of the solution was removed and mixed with ^{149}Sm - and ^{145}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 Ce^{3+} into Ce^{4+} using 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}Sm - ^{143}Nd mineral isochron of NWA 7188 yields an age of 4203 ± 970 Ma. In contrast, we obtained a much older ^{146}Sm - ^{142}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}Sm - ^{143}Nd age while the ^{146}Sm - ^{142}Nd age represents the timing of the last Sm-Nd isotopic closure. Therefore, we use the ^{146}Sm - ^{142}Nd age of NWA 7188 in the following discussion.

The ^{146}Sm - ^{142}Nd age ($4549 \pm {}^{28}_{40}$ Ma) for NWA 7188 is consistent with the ^{147}Sm - ^{143}Nd age for cumulate eucrites (4546 ± 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}Sm - ^{142}Nd age of NWA 7188 is not resolvable from the metamorphic age of Agoult [4]. According to the ^{53}Mn - ^{53}Cr systematics [5], the last global Mn/Cr fractionation in the mantle of the Vesta occurred at 4564.8 ± 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}Sm - ^{142}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 Shukolyukov, 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^{1*}; 三河内 岳¹; 山口 亮²; 白井 直樹³; 海老原 充³

HASEGAWA, Hikari^{1*}; MIKOUCHI, Takashi¹; YAMAGUCHI, Akira²; SHIRAI, Naoki³; EBIHARA, Mitsuru³

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, ³ 首都大学東京

¹Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, ²National Institute of Polar Research, ³Tokyo 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 1×0.5 mm で輝石はこれよりも大きく、 1×2 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 $\text{Fo}_{72\pm 80}$ 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に結晶化・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^{1*}; 永原 裕子¹

KAWABATA, Yusuke^{1*}; NAGAHARA, Hiroko¹

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

¹Earth 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 ²⁶Al, and cooling into consideration with special care to crystal separation. The role of crystal size, thickness of the conductive lib, and fO₂ 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^{1*}; 小澤 一仁²; 飯塚 毅³; 山口 亮⁴
HIBIYA, Yuki^{1*}; OZAWA, Kazuhito²; IIZUKA, Tsuyoshi³; YAMAGUCHI, Akira⁴

¹ 東京大学, ² 東京大学, ³ 東京大学, ⁴ 国立極地研究所

¹The University of Tokyo, ²The University of Tokyo, ³The University of Tokyo, ⁴National 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 ± 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-1⁷; 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 (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-2⁵ 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₋₁ 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 ²⁶Al 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

レーザーポストイオン化SNMSを用いたプレソーラー SiC の同位体分析手法の開発 Development on the post-ionization SNMS and application for the isotopic measurement of Presolar SiC grains

諏訪 太一^{1*}; 寺田 健太郎¹; 河井 洋輔¹; 藪田 ひかる¹; 豊田 岐聡¹; 石原 盛男¹; 青木 順¹
SUWA, Taichi^{1*}; TERADA, Kentaro¹; KAWAI, Yosuke¹; YABUTA, Hikaru¹; TOYODA, Michisato¹;
ISHIHARA, Morio¹; AOKI, Jun¹

¹ 大阪大学大学院理学研究科

¹ Graduate School of Science, Osaka University

プレソーラー粒子とは太陽系形成時の高温な環境下の同位体的均質化を免れた粒子であり、太陽系の前駆天体である AGB 星や超新星の元素合成過程を反映する同位体比異常を持つことが知られている。これまで始原的隕石中に SiC、グラファイト、ダイヤモンドなどが発見され、2 次イオン質量分析計 (SIMS: Secondary Ion Mass Spectrometry) による主要元素の同位体比分析が行われてきたが、SIMS でスパッタされた粒子のうち大部分が中性粒子であり、2 次イオン生成率は 1% 以下と非常に低いため、特に微量な重元素の同位体分析は困難であった。

本研究では、大阪大学で開発中のレーザーポストイオン化 2 次中性粒子質量分析計 (SNMS: Sputtered Neutral Mass Spectrometry) によるプレソーラー SiC の Si 同位体比分析について報告する。SNMS とは、ビーム径 40nm~2 μ m の Ga イオンビームによってスパッタされた中性粒子を、 10^{14} ~ 10^{15} W/cm² の高強度のフェムト秒レーザーでポストイオン化することによって 2 次イオン生成効率を 1000 倍以上に向上させる次世代のイオンプローブである (中林ほか。2014 年の連合大会で報告)。質量分析部には、多重周回飛行時間型質量分析計 (MULTUM) を搭載し、質量分解能数万で複数の元素を同時に分析することが可能である。

SNMS による Si 同位体の予備分析の結果、N₂(=28.006 amu), CO(=27.995 amu), ²⁸SiH(=28.985 amu) などの妨害ピークから ²⁸Si(=27.977 amu) や ²⁹Si(=28.976 amu) のピークを分離でき、Instrumental mass fractionation は 150~200 ‰/amu であることがわかった。また SiC 研磨剤や Si プレートなどの標準試料を測定した結果、Terrestrial な Si 同位体比に再現性があることがわかった。次に、マーチソン隕石の酸残渣を H₂O₂、K₂Cr₂O₇ で酸化分解し有機物の大部分を除去した "KC" 画分 (Amari et al. 1994) 中のプレソーラー SiC 候補の Si 同位体比を分析したところ、 $\delta^{30}\text{Si}/^{28}\text{Si} = 100\sim 200\text{‰}$ 、 $\delta^{29}\text{Si}/^{28}\text{Si} = 130\sim 200\text{‰}$ の重い同位体比異常が確認できた。

キーワード: SIMS, プレソーラー粒子, その場分析, 同位体比異常, 核合成, 隕石

Keywords: SIMS, presolar grain, in-situ analysis, isotope anomaly, nuclear synthesis, meteorite

レーザーアブレーションICP質量分析法を用いたリン酸塩鉱物の高精度局所ウラン-トリウム-鉛年代測定法の開発 Development of precise in-situ U-Th-Pb dating of phosphate using LA-MC-ICP-MS

坂田 周平^{1*}; 伊藤 正一¹; 平田 岳史¹
SAKATA, Shuhei^{1*}; ITOH, Shoichi¹; HIRATA, Takafumi¹

¹ 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

¹Laboratory for Planetary Science, Kyoto University

隕石中のリン酸塩鉱物はウラン・トリウムを高濃度 (<10 μ g/g) で含み、リン酸塩鉱物のウラン-鉛系の放射年代測定を通じて微惑星の形成年代が制約されてきた^{1),2)}。隕石中のリン酸塩鉱物は熱や隕石の衝突による変成作用³⁾や水との反応を経験している可能性があり、これらの複雑な過程を理解するためには高空間分解能年代測定が重要である。しかし、普通コンドライト隕石母天体の形成過程を明らかにするためには数百万年程度の時間分解能が必要であり¹⁾、局所年代測定を用いて議論に必要な年代精度を達成することはできていない。レーザーアブレーション法は空間分解能やサンプリング形式に関して柔軟なアプローチが可能な手法であり、近年では多重検出器型の質量分析計と組み合わせることで高精度の年代測定が可能であると報告されている⁴⁾。本研究ではリン酸塩鉱物から推定されている微惑星の熱史により詳細な制約を与えることを目標に、レーザーアブレーション法と多重検出器型 ICP 質量分析法を組み合わせた高精度局所リン酸塩年代測定法の開発を行なう。

レーザーアブレーション ICP 質量分析法 (LA-ICP-MS 法) を用いたリン酸塩鉱物の局所ウラン-トリウム-鉛年代測定において必要な精度が得られていない要因として以下の点が挙げられる。(1) サンプリング量の不足に由来する計数統計誤差、(2) 高精度分析に適した年代が均質である標準リン酸塩試料の欠如、(3) 非放射壊変起源鉛に由来する標準物質中の鉛同位体比の不均一、(4) 揮発性の異なる元素比測定におけるマトリックス効果、(5) ²⁰⁴Pb の同重体である ²⁰⁴Hg からの質量スペクトル干渉である。本研究では以下のアプローチを通じてこれらの問題を解決することを目指す。(a) インターフェイス部の改良及び複数点同時アブレーション法⁵⁾を用いた感度の向上、(b) マダガスカルアパタイト⁶⁾の均質性の評価、(c) ²⁰⁷Pb 法による標準物質中の非放射壊変起源鉛補正法の評価、(d) フェムト秒レーザーによるマトリックス効果の低減及び三鉛同位体図を用いた閉鎖系評価法の開発、(e) ²⁰⁸Pb 規格化によるアイソクロン法の評価。また、分析に有利なウラン・トリウム濃集相を特定するための広域ウラン-トリウム-鉛同位体イメージングや液中レーザーアブレーション法⁷⁾による分析可能性についても検討を行なう。

参考文献

- 1) Gopel et al., Earth and Planetary Science Letters, 121, 153-171 (1994).
- 2) Allegre et al., Geochimica et Cosmochimica Acta, 59, 1445-1456. (1995).
- 3) Yin et al., Meteoritics and Planetary Science, 49, 1426-1439 (2014).
- 4) Buhn et al., Annals of the Brazilian Academy of Sciences, 81, 99-114 (2009).
- 5) Yokoyama et al., Analytical Chemistry, 83, 8892-8899 (2011).
- 6) Thomson et al., Geochemistry Geophysics Geosystems, 13, 1-23 (2012).
- 7) Okabayashi et al., Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 26, 1393-1400 (2011).

キーワード: 母天体, リン酸塩, ウラン-トリウム-鉛年代学, レーザーアブレーション ICP 質量分析法
Keywords: Parent body, Phosphate, U-Th-Pb geochronology, LA-ICP-MS

アパタイト結晶の水素拡散実験 Hydrogen diffusion experiment of apatite crystal.

伊藤 正一^{1*}; 橋口 未奈子²; 坂口 勲²; 坂田 周平¹; 平田 岳史¹

ITO, Shoichi^{1*}; HASHIGUCHI, Minako²; SAKAGUCHI, Isao²; SAKATA, Shuhei¹; HIRATA, Takafumi¹

¹ 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, ² 独立行政法人 物質・材料研究機構

¹Department of Earth and planetary sciences, Kyoto University, ²National institute for materials science

近年、コンドライト隕石、分化隕石、月、火星などの地球外物質試料を用いた太陽系や地球の水の起源についての研究が盛んに行われている (e.g., Greenwood et al., 2008; Greenwood et al., 2011; Alexander et al., 2012). なかでも月や普通コンドライト隕石に含まれる含水鉱物の一種であるアパタイト結晶の水の定量及び水素同位体組成を用いた月のマグマ中の水の起源や地球軌道付近の水の起源に注目した研究が行われている (e.g., Greenwood et al., 2011; Yanai et al., 2014 JGU). しかしながら、マグマ中や母天体中での熱変成に伴うアパタイト結晶の水素拡散挙動が不明瞭であるため、アパタイト結晶に含まれる水の起源の議論は明らかになっていない。

本研究では、アパタイト結晶の水素拡散挙動を理解するため、フッ素アパタイトを用いて水素拡散実験を行った。

水素拡散実験に用いたフッ素アパタイト結晶は、一つの自形の Durango 産アパタイト結晶から複数切片を C 軸に対して鉛直方向に切り出し、ダイヤモンドで研磨して鏡面に仕上げた結晶を使用した。大気圧 D₂O/O₂ ガス雰囲気下で 400 °C-700 °C の温度下で数時間アニールし、試料中に D₂O を拡散させた。D₂O ガスの圧力は、60 °C の飽和蒸気圧下で行った。D の濃度プロファイルを取得するために、京都大学設置の二次イオン質量分析装置 (Cameca ims-4f-E7) と NIMS 設置の二次イオン質量分析装置 (Cameca ims-4f) を用い、水素拡散係数を求めた。D の濃度を求めるための標準試料として、Durango 産フッ素アパタイトに 40 keV の加速電圧で dose 量 5x10¹⁴ ions/cm² の D イオン打ち込みした試料を用いた。また、実験に先立ち、結晶に含まれる水素を定量分析し、全マス分析により他の不純物を同定・定性分析した。

深さ方向 D 濃度プロファイルと水素濃度プロファイルを比較すると、試料表面付近から内部にかけて D の自己拡散が認められる領域では、元々含まれる水素との交換で重水素の拡散が起こっている事が確認された。

本発表では、水素拡散実験により取得したアパタイト結晶の水素拡散係数を報告し、アパタイト結晶の水素拡散挙動について議論する。

キーワード: 水素, アパタイト, 拡散係数, 初期太陽系, 二次イオン質量分析系

Keywords: Hydrogen, apatite, diffusion coefficient, early solar system, SIMS

ペロブスカイトのCa/Ti比と酸素拡散挙動の関係 Relationship between oxygen diffusivity and Ca/Ti ratio in perovskite

橋口 未奈子^{1*}; 坂口 勲¹
HASHIGUCHI, Minako^{1*}; SAKAGUCHI, Isao¹

¹ 独立行政法人物質・材料研究機構

¹ National Institute for Materials Science (NIMS)

<はじめに> 炭素質コンドライト隕石中のCa, Alに富む難揮発性包有物(CAI)は、太陽系で最も古い年代を示す岩石であり、メリライト、スピネル、ペロブスカイト(CaTiO_3)などの鉱物から構成される。これらのCAI鉱物は、三酸素同位体図において質量非依存の傾き1の直線に沿う不均一な分布を示す(Clayton et al. 1973)。この分布から、初期太陽系星雲中のCAI形成環境の酸素同位体組成について議論が行われている(Yurimoto et al. 1998, Itoh and Yurimoto 2003, Park et al. 2012)。しかし、CAI鉱物の不均質な酸素同位体組成が、鉱物結晶化時の環境を反映しているのか、または結晶化後に経験した加熱イベントによる酸素拡散の結果であるかは未だ明らかではない。これらの議論には、CAIが経験した熱履歴と、それに伴う鉱物の酸素拡散挙動の理解が必須である。ペロブスカイトは、他のCAI鉱物よりも酸素拡散が速く(Yurimoto et al. 1989, Ryerson and McKeegan 1994, Gautason and Muehlenbachs 1993, Sakaguchi and Haneda 1996)、CAI鉱物の酸素拡散挙動を理解し、CAIの熱履歴に定量的な制約を与える上で有用な鉱物である。

固体の拡散挙動は、試料中の不純物濃度によって変動する(Sakaguchi et al. 2010など)。また、Tiに富むペロブスカイトでは酸素拡散が遅くなることが報告されており(橋口ら, 2014 JpGU)。酸素拡散挙動を理解する為には化学組成との相関を調べる必要がある。本研究では、ペロブスカイトの酸素拡散挙動を明らかにするため、CaまたはTiに富むペロブスカイトを用いて酸素拡散実験を行った。

<実験手法> 高純度の CaCO_3 、 TiO_2 粉末を出発物質とし、Ca/Ti比が0.098-1.002の混合粉末を作成した。部分安定化ジルコニア(PSZ)ボールを用いたボールミル粉碎、成形を行った後、大気中1350℃で2時間焼成し、Ca/Ti比の異なるペロブスカイト多結晶を作製した。ボールミル粉碎時の ZrO_2 の混入によるCa/Ti比のズレは、約0.001の精度で補正している。試料は、化学機械研磨を行った後、大気圧 $^{18}\text{O}_2$ ガス中において、750-1000℃温度下で20分~数時間アニールし、試料中に ^{18}O を拡散させた。二次イオン質量分析装置(SIMS)(Cameca ims-4f)を用いて ^{18}O 濃度プロファイルを取得し、酸素拡散係数を求めた。また、試料断面において、NanoSIMS(Cameca NanoSIMS 50)を用いた高空間分解能イオンイメージングを行い、 ^{18}O イオンの分布を調べた。

<結果と議論> 深さ方向 ^{18}O 濃度プロファイルから得た酸素拡散係数は、Caに富む試料ほど大きい値を示した。Ca/Ti比を0.998として焼成した試料では、表面付近に ^{18}O の高濃度領域が確認され、試料表面と内部においてそれぞれ異なる拡散経路(拡散I, II)が見られた。950℃における拡散係数は、Ca/Ti比を1.002として焼成した試料では $8 \times 10^{-10} \text{cm}^2/\text{s}$ 、Ca/Ti比を0.098として焼成した試料では、 $7 \times 10^{-13} \text{cm}^2/\text{s}$ (拡散I)、 $1 \times 10^{-11} \text{cm}^2/\text{s}$ (拡散II)であった。Ca/Ti比を0.098として焼成した試料表面の拡散(拡散I)を除き、先行研究の報告値(Gautason and Muehlenbachs 1993, Sakaguchi and Haneda 1996)よりも大きい拡散係数が得られた。

試料断面の ^{18}O 濃度イメージにおいて、表面から内部にかけて ^{18}O 濃度は減少し、拡散している様子が確認された。また、Tiに富む試料ほど、粒界近傍で ^{18}O 濃度が減少していた。ここから、粒界近傍では酸素拡散がブロックされる層が形成していると考えられる。酸素拡散のブロッキング層の形成は、 CaTiO_3 と同じペロブスカイト構造をもつ BaTiO_3 でも観察されている(Watanabe et al. 2011)。

本研究の結果から、Ca/Ti比のわずかな違いによってもペロブスカイトの酸素拡散挙動が異なり、Caに富むほど拡散が速くなる事が明らかとなった。ペロブスカイトの組成がCaに富む場合、熱拡散によって酸素同位体組成が変動するタイムスケールは、これまで考えられていたよりも短時間であると考えられる。本発表では、ペロブスカイトの酸素欠陥挙動および拡散メカニズムについても議論する。

キーワード: ペロブスカイト, 酸素拡散挙動

Keywords: perovskite, oxygen diffusivity

還元タイプCV3コンドライトであるエフレモフカ隕石中のタイプB CAIにおける変成作用

Metamorphism of a type B CAI from the reduced CV3 chondrite Efremovka.

榎戸 祐馬^{1*}; Fagan Timothy¹; 荒金 陽樹¹
ENOKIDO, Yuma^{1*}; FAGAN, Timothy¹; ARAGANE, Haruki¹

¹ 早稲田大学

¹ Waseda University

Calcium-aluminium-rich inclusions (CAIs) are among the first rocks to form in the solar nebula and are abundant in CV chondrites [1,2]. Most CAIs have been altered and the understanding of metamorphic effects is essential for interpreting the metamorphic conditions of parent bodies and formation conditions in the solar nebula. Especially, the CV3 chondrite Allende has undergone relatively strong metamorphism, and previous studies have addressed effects of metamorphism on Allende CAIs [3,4]. On the other hand, the CV3 chondrite Efremovka has undergone less metamorphism than Allende [5]. Therefore study of Efremovka is useful for understanding more primitive conditions. In this study, we describe secondary minerals, their textures and modal abundances in a type B CAI from Efremovka (CGI-10), using elemental mapping, quantitative EPMA, cathodoluminescence, and Raman spectroscopy. We compare secondary features of CGI-10 with Allende CAIs, particularly with the Allende type B CAI 4022 (see [3]).

CGI-10 is a type B CAI with primary spinel, anorthite and fassaite, all with 16O-rich compositions, and melilite that is 16O-poor [6]. The main secondary minerals in CGI-10 are sodalite, nepheline, Fe-bearing spinel and an elongate secondary mineral (ESM) with composition $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$. These secondary minerals are concentrated in FeO-alkali-rich domains near the CAI rim. Similar minerals and textures are observed in Allende CAIs [3]; however, FeO-alkali-rich domains are more abundant in Allende CAIs than in CGI-10 (approx. 1.5 mode% in CGI-10 vs. 8% in CAI 4022) and ESM is more abundant in the FeO-alkali-rich domains of Allende CAIs than in CGI-10 (trace in CGI-10 vs. 2.5 mode% in 4022). Furthermore, the main ESM in Allende appears to be dmisteinbergite [7,8], whereas the main ESM in Efremovka CGI-10 appears to be anorthite, based on the similarity of its cathodoluminescence (CL) to the CL of primary anorthite. Dmisteinbergite occurs in coal heaps in Chelyabinsk, Russia that underwent pyrometamorphism at low pressure (Earth surface), over a short time (10 to 15 years), at temperatures ranging up to 1200°C and in the presence of gases of varying compositions and variable $f(\text{O}_2)$ [9]. Some crystallization in the coal heaps apparently occurred during annealing while the heaps cooled from peak temperatures [9]. Although peak metamorphic temperatures were lower in Allende than in the Chelyabinsk coal heaps, it is possible that Allende shared some similarities in metamorphic conditions (low pressure, variable gas compositions, short heating & cooling times) that favored the formation of dmisteinbergite instead of anorthite.

In contrast with Allende CAIs [4], no grossular-rich veins were identified in CGI-10, and the mode of secondary minerals in CGI-10 (~2%) is much less than in Allende type B CAIs (~30%), consistent with the interpretation that Allende was metamorphosed at higher temperature than Efremovka [5]. On the other hand, the concentration of Na₂O in CGI-10 is similar to that of a similar Allende CAI (both approx. 0.3 wt%). The similarity in Na₂O-abundances suggests that infiltration of Na into CAIs during metamorphism is not due completely to metamorphic temperature, but is related to other factors (for example, composition and abundance of fluid available during metamorphism). In any case, CGI-10 has undergone some metamorphic recrystallization. Thus, when Efremovka CAIs are used to interpret conditions from the solar nebula, metamorphic effects should also be considered.

[1] Scott and Krot (2005) in *Chondrites of the Protoplanetary Disk*, Krot et al. (editors), p. 15-53.

[2] Krot et al. (2009) *GCA* 73, 4963-4997.

[3] Fagan et al. (2007) *MaPS* 42, 1221-1240.

[4] Krot et al. (2008) *GCA* 72, 2534-2555.

[5] Bonal et al. (2006) *GCA* 70, 1849-1863.

[6] Fagan et al. (2004) *MaPS* 39, 1257-1272.

[7] Fintor et al. (2014) *MaPS* 49, 812-823.

[8] Brearley et al. (2014) *LPSC* #2287.

[9] Sokol et al. (1998) *Eur. J. Mineral.* 10, 1003-1014.

キーワード: CAIs, CV3 コンドライト, 変成作用

Keywords: Ca-Al-rich inclusions, CV3 chondrites, metamorphism

還元的条件下におけるアエンデ隕石の水熱変成実験 Hydro thermal experiments of Allende CV3 chondrite under reducing condition

飯国 恒之¹; 瀬戸 雄介^{1*}; 留岡 和重¹; 三宅 亮²; 市村 隼¹
IIKUNI, Tsuneyuki¹; SETO, Yusuke^{1*}; TOMEOKA, Kazushige¹; MIYAKE, Akira²; ICHIMURA, Shun¹

¹ 神戸大学・院・理, ² 京都大学・院・理

¹ Kobe Univ. Sci., ² Kyoto Univ. Sci.

多くの炭素質コンドライトは様々な程度の水質変成を受けており、その変成生成物は化学的タイプによって異なる。これは、隕石母天体における変成環境（温度、期間、pH、水/岩石比、 fO_2 など）の違いを反映していると考えられる。これまで炭素質コンドライト母天体の水質変成環境を明らかにするために、幾つかの実験的研究が行われているが、実験上の制約から、母天体として想定される環境と比べてやや極端な条件（酸化的、高い温度・圧力、高い溶液/岩石比）で行われており、実際に隕石母天体を再現していない可能性が高かった。

そこで本研究では、Allende CV3 隕石を出発物質として、炭素質コンドライト母天体の環境により近いと思われる条件（特に還元的、低温度、低圧力、低溶液/岩石比）下における水熱変成実験を行った。反応溶液は、pH 7.0、8.5、10.0、14.0 の4種類のNaOH溶液を使用し、水/岩石体積比（W/R）を0.5、2.0、8.0に調整した。反応容器は外容器（テフロン/ステンレス製、25 ml）、内容器（テフロン製、1 ml）を用い、外容器に塩酸とマグネジウムを入れ、 H_2 ガスを発生させることで反応容器内を還元的雰囲気にした。金属鉄を酸化還元度のマーカーとした予備実験から、容器内の fO_2 は最大で 1.0×10^{-25} 気圧と見積もられ、隕石で想定される値に近いことを確認した。すべての実験は温度 200 °C、圧力約 15 気圧、期間 168 時間の条件で行った。回収試料については、放射光 X 線回折法（SR-XRD）を用いて結晶相同定を行い、SEM-EDS を用いて組織観察・分析を行った。また一部の試料については（S）TEM 観察を行った。

実験の結果、殆どの回収物は元のブロック形状を保ったが、pH 14、W/R 8.0 の条件では脆弱化し原型を失っていた。ブロックの表面には magnetite、anhydrite、calcite などの析出物がランダムに点在しており、表面組織との関連は見られなかった。さらにブロックを切断研磨し、断面を観察したところ、マトリックス中のカンラン石の粒子間を充填するように変成物質が生成することを確認した。生成物の大部分は serpentine であり、すべての条件で有意な量の生成を確認した。また pH 14 かつ W/R 0.5 の条件では serpentine に加えて smectite が生成することを確認した。pH 7 かつ W/R 0.5 の条件では、非晶質物質の生成を確認した。SR-XRD による回折ピークの強度解析と SEM の画像解析を行ったところ、全体的に溶液 pH および W/R が高いほど変成生成物の量が大きくなる傾向が見られた。TEM 観察から、層状ケイ酸塩鉱物はオリビンの粒子表面から直接成長しており、カンラン石の (100) 面（酸素の六方最密充填構造の積層方向）と層状ケイ酸塩の積層面方向が一致することが分かった。このような結晶学的方位関係は実際の隕石中の変成組織でも知られており、エネルギー障壁の小さい（あるいは反応速度の速い）相転移であることが示唆される。

本研究では、i) 還元的条件下では、低温（200 °C）かつ中性溶液（pH 7.0）条件下でも、わずか 168 時間という短い期間で有意な水質変成（特に層状ケイ酸塩化）反応が進行すること、ii) W/R は変成生成物の種類や量に大きな影響を与えることを示した。この結果は炭素質コンドライト母天体における水質変成の解釈に重要な制約を与える可能性がある。

キーワード: 炭素質コンドライト, 水熱変成実験, アエンデ, 層状ケイ酸塩, 蛇紋石

Keywords: carbonaceous chondrite, hydrothermal experiment, Allende, phyllosilicate, serpentine

炭素質隕石の反射スペクトルによるC型小惑星の水質変成の特性化 Characterization of aqueous alteration of the C-complex asteroids by reflectance spectra of carbonaceous chondrites

佐藤 勇大^{1*}; 中村 智樹¹; 仲田 愛里¹; 松岡 萌¹
SATO, Yudai^{1*}; NAKAMURA, Tomoki¹; NAKATA, Airi¹; MATSUOKA, Moe¹

¹ 東北大学大学院理学研究科地学専攻

¹Department of Earth and Planetary Materials Sciences, Faculty of Science, Tohoku University

C-complex asteroids are a key object to elucidate the evolution of volatile materials in the solar system, because they are enriched in volatiles and most abundant asteroids. Therefore, we need to investigate the mineralogy and the degree of aqueous alteration of the C-complex asteroids using reflectance spectroscopy. Each absorption band observed in reflectance spectra of C-complex asteroids should be characterized and assigned based on reflectance spectra of carbonaceous chondrites which are thought to derive from the C-complex asteroids (e.g. Beck et al. 2010, Takir et al. 2013). Therefore, we need to measure reflectance spectra of hydrated carbonaceous chondrites whose mineralogy and petrology are well characterized. In this study, we measured reflectance spectra of 16 CM carbonaceous chondrites under vacuum (2hPa) using a FT-IR (Fourier Transform Infrared) spectrometer and investigated relationships between features of reflectance spectra and mineralogical properties, especially between the degree of aqueous alteration and properties of $3\mu\text{m}$ and $0.7\mu\text{m}$ absorption bands that are related to hydrous minerals. All CM chondrite samples were characterized in detail by synchrotron X-ray diffraction and electron microscopy (Nakata et al. 2014).

There is a weak correlation between the $3\mu\text{m}$ -band absorption position and subtype of the meteorites that expresses the alteration degrees (Rubin et al. 2007). Samples with the absorption position at shorter wavelengths are more altered, while those with the absorption position at longer wavelengths are less altered. This trend is consistent with previous studies (Beck et al. 2010, Takir et al. 2013). However, samples with the absorption position at middle wavelengths show a wide range of alteration degrees. Therefore, it is the case that the absorption position at shortest or longest wavelengths corresponds to greatest or least alteration, respectively. In addition, Fe/Mg ratios of matrix phyllosilicates and the $3\mu\text{m}$ -band absorption position show a weak correlation. The absorption position shifts from long to short wavelengths with decreasing Fe contents.

On the other hand, $0.7\mu\text{m}$ -band depth shows no correlation to subtype and thus the $0.7\mu\text{m}$ -band properties seem to have no relation to the degrees of aqueous alteration. The $0.7\mu\text{m}$ -band depth also shows no correlation to Fe/Mg ratio of matrix phyllosilicates. Since the $0.7\mu\text{m}$ band is attributed to Fe^{3+} and Fe^{2+} charge transfer in phyllosilicates, the lack of the correlation suggests no clear relation between the alteration degrees and $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ ratios of matrix phyllosilicates.

In this study, we investigated relationships between $3\mu\text{m}$ and $0.7\mu\text{m}$ band properties and the mineralogy of CM carbonaceous chondrites, and we show that it is possible to characterize to some extent the degrees of aqueous alteration of C-complex asteroids using reflectance spectroscopy.

Keywords: aqueous alteration, C-complex asteroids, reflectance spectra

浮遊法による放射状輝石コンドリュールの組織再現実験 Experimental reproduction of textures of radial pyroxene chondrules by a gas-jet levitation

野村 逸郎^{1*}; 中村 智樹¹; 木村 勇氣²; 塚本 勝男³; 三浦 均⁴; 上相 真之⁵; 上杉 健太郎⁶;
星野 真人⁶

NOMURA, Itsuro^{1*}; NAKAMURA, Tomoki¹; KIMURA, Yuki²; TSUKAMOTO, Katsuo³; MIURA, Hitoshi⁴;
UESUGI, Masayuki⁵; UESUGI, Kentaro⁶; HOSHINO, Masato⁶

¹ 東北大学大学院理学研究科, ² 北海道大学低温科学研究所, ³ 大阪大学大学院工学研究科, ⁴ 名古屋市立大学大学院システム自然科学研究科, ⁵ 宇宙航空研究開発機構, ⁶ 高輝度光科学研究センター

¹Graduate School of Science, Tohoku University, ²Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, ³Graduate School of Engineering, Osaka University, ⁴Graduate School of Natural Sciences, Nagoya City University, ⁵Japan Aerospace Exploration Agency, ⁶Japan Synchrotron Radiation Research Institute

Chondrules, igneous silicate spherules, formed by transient heating and rapid cooling, are ubiquitously contained in primitive chondrites. But, the formation conditions of chondrules in the protoplanetary disks are still unclear. In order to constrain the formation conditions of chondrules, a number of reproduction experiments in a electric furnace have been performed (e.g., Tsuchiyama et al., 1980). In these experiments, a melt droplet sample was hung on a platinum wire and thus the melt did contact with a platinum loop wire, possibly leading to heterogeneous nucleation near equilibrium temperatures. While, Tsukamoto et al. (2000) started a non-contact method, namely acoustic levitation method and microgravity levitation for the first time for chondrule synthesis, followed by Nagashima et al. (2006) who employed a gas jet levitation method. In both cases, space environment was simulated because crystallization of a melting silicate sphere occurs in a levitated condition.

In this study, we performed experiments to reproduce the textures of radial pyroxene chondrules using the gas jet levitation furnace used in Nagashima et al. (2006). Samples are 1-2mm spheres and chemical compositions of the samples are similar as of the natural radial pyroxene chondrules excluding iron. The sample was completely melted at about 1600-1800 °C with a 100W CO₂ laser and cooling rate after heating was about 10⁴-10⁶ K / hr. We used an argon gas in order to levitate samples. After the experiment, the samples were analyzed by optical microscope and scanning electron microscope. Three dimensional images of the internal texture were also obtained after crystallization using X-ray computed tomography at SPring-8 (BL20B2).

The textures similar to natural radial pyroxene chondrules were reproduced at the cooling rates of about 10⁴ K/hr. At faster cooling rates (10⁵-10⁶ K/hr), samples became transparent glass without any crystals. These glass chondrules rarely exist in nature. The cooling rates (~10⁴ K/hr) that successfully reproduced chondrules are slower than the calculated cooling rate (10⁶ K/hr) of the melt whose temperature decreases by radiation alone in vacuum. When the nucleation center of the radial texture was observed by high magnification optical microscopy, there in most cases exists a tiny particle that is different from the radial pyroxene. This implies the importance of the heterogeneous nucleation from the tiny particles, which might be formed prior to the formation of the radial texture or impurities simply coming from dusts or the chemical reagent. These experimental data would lead to a discussion on the chondrule formation in the protoplanetary disk in the presence of gases that slowed down the cooling.

Keywords: chondrule, radial pyroxene chondrule, gas jet levitation

コンドリュールの形状を用いた、還元タイプと酸化タイプ CV 3 コンドライトにおける衝突作用の指標

Chondrule shapes as indicators of shock deformation in reduced vs. oxidized CV chondrites

青木 錬^{1*}; Fagan Timothy¹
AOKI, Ren^{1*}; FAGAN, Timothy¹

¹ 早稲田大学

¹ Waseda University

CV3 chondrites are classified into oxidized and reduced subgroups based mostly on the speciation of Fe into silicates and oxides (oxidized, CV3ox) or Fe-Ni metal (reduced, CV3red)[1,2]. Both oxidized and reduced subgroups are type 3, indicating low metamorphic grade; however, the CV3ox chondrite Allende has undergone metamorphism at higher temperatures and has experienced a greater degree of recrystallization than the CV3red chondrites Leoville and Efremovka [3]. It has been proposed that the lower extent of recrystallization in Leoville and Efremovka is due to an early impact event that deformed the CV3 parent body, causing lower porosities [4] and expelling ice from the part of the parent body where Leoville and Efremovka came from [5].

To identify evidence of deformation in the CV3 chondrites, we determined modal abundances of object types (chondrules, matrix, CAIs, etc.) and shapes of chondrules in three thin sections of CV3red chondrites (two of Efremovka and one of Leoville) and in two thin sections of CV3ox chondrites (both of Allende). Mosaics of the thin sections were prepared using the following types of images: plane polarized light and reflected light from petrographic microscope; back-scattered electron (BSE) and elemental (Na, Mg, Al, Si, P, S, K, Ca, Ti, Fe among others) maps collected by EPMA (JEOL JXA-8900 at Waseda University). Grids were overlain on the mosaic images and object types were identified at each grid node; between 1200 and 1700 points were counted on each thin section. Lengths and widths of chondrules were determined for each thin section. Ratios of (L-W)/L, where L = chondrule length and W = chondrule width, were calculated as indicators of two-dimensional chondrule shapes. As described below, distinct lengths vs. widths were identified in the CV3red chondrites, but Allende chondrules were more equant. Orientations of the chondrule lengths in the CV3red chondrites were measured and plotted in rose diagrams to evaluate similarities in chondrule orientations.

Modes show that the CV3red chondrites have lower proportions of matrix than the two CV3ox thin sections (Leoville and Efremovka matrix modes are 22-32%, compared to 34-40 mode % matrix in the two Allende thin sections) (also see [6]). Ratios of (L-W)/L tend to be near 0.1 in the chondrules from Allende, indicating circular shapes in the plane of the thin section. In contrast, (L-W)/L ratios in the Leoville and Efremovka thin sections tend to be near 0.4-0.5, indicating more elongate shapes. Chondrules in one Efremovka thin section are slightly more equant than in the other two CV3red thin sections (most [L-W]/L values 0.25-0.40 vs. 0.35-0.50), probably as a result of orientation of the thin section vs. fabric in Efremovka. Furthermore, rose diagrams of long axes of chondrules show that the chondrule long axes are clustered together along a common orientation in each thin section of Leoville and Efremovka.

Porous matrix would compress more easily than chondrules and CAIs, so the low abundances of matrix in the CV3red chondrites could be explained by compression during shock. Such compression of matrix is consistent with the low porosity of CV3red chondrites [4]. The elongation of chondrules along a common orientation also could result from shock deformation. Therefore, the modes, and chondrule shapes and orientations support the interpretation that CV3red chondrites were deformed by shock and that CV3ox chondrites were less affected by this impact event on the CV3 parent body [5].

[1] McSween (1977) GCA 41, 1777-1790.

[2] Weisberg et al. (2006) Meteorites and the Early Solar System 2, Lauretta and McSween (editors) p. 19-52.

[3] Bonal et al. (2006) GCA 70, 1849-1863.

[4] Macke et al. (2011) MaPS 46, 1842-1862.

[5] MacPherson and Krot (2014) MaPS 49, 1250-1270.

[6] Ebel et al. (2009) LPSC 40, abstract 2065.

キーワード: CV コンドライト, 変成, コンドリュール, 衝突作用

Keywords: CV chondrites, metamorphism, chondrules, shock deformation

磁気並進運動を用いた鉄濃度差による隕石鉱物の抽出・同定 Attempt to Extract and Identify Weak-magnetic and Ferro/Ferri-magnetic Grains Included in Chondrites by Magnetic Force.

久好 圭治^{1*}; 栗田 健登¹; 植田 千秋¹
HISAYOSHI, Keiji^{1*}; KUWADA, Kento¹; UYEDA, Chiaki¹

¹ 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

¹ Institute of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University

自然界に存在する固体物質の多くは、無作為に混合された異なる物質からなる小さな粒子の集合体として構成される。このような試料を分析するのに、様々なマイクロプローブ技術を駆使して研究が行われてきたが、試料を構成している粒子をもれなく完全に識別できる保証は必ずしもない。ここで有機化学の分析手法に目を向けると、異種分子の混合体を研究する場合に、クロマトグラフィ技術によって、分子量ごとに混合体の分子を抽出・同定する技術が確立している。無機粒子の集合体でも、不均一な粒子の集合体から個々の粒子を抽出し、分析の初期段階でそれらを分離・識別することが望まれるが、有効な手法はまだ確立していない。

私たちは、このような分離・識別を実現するための原理を反磁性物質について提案してきた [1][2]。この方法は、微小重力条件下で、一方向に単調減少する磁場により試料粒子に誘導される磁気体積力が引き起こす並進運動に基づいている。重力や空気抵抗が無視できるとき、この並進運動を解析することによって、物質に固有の反磁性磁化率を質量計測なしで検出した。

この原理に基づき、私たちは、常磁性や強磁性/フェリ磁性粒子に、この方法を拡張する。磁場勾配力は一般的に質量 m と粒子の磁化に比例するので、常磁性や強磁性/フェリ磁性粒子への拡張が可能となる。常磁性粒子も、反磁性と同様に固有の単位質量あたりの常磁性磁化率を持つ。したがって、観測された並進運動から得られた常磁性磁化率をそれらの文献値と比較することによって、非破壊で常磁性粒子を識別することが可能となる。鉄の含有量が異なるサンカルロス産オリビン粒子とミャンマー産オリビンの粒子で分離実験を行なった。さらに、隕石を構成する微粒子も同様に磁場中でその鉄濃度の差により分離・回収することを試みた。また、強磁性/フェリ磁性粒子を並進運動から得られた飽和磁気モーメントを用いて識別することができる。

微小重力は室内型の小型落下シャフトを用いて発生させた。落下距離は 1.8m, μ G 継続時間は約 0.5 秒である。実験装置は 30 × 30 × 20cm の直方体の落下ボックス内に配置した。装置は、NdFeB 磁石製の磁気回路 ($B < 0.6$ T), 磁場勾配を利用した試料開放装置を装備した真空チャンバーおよび撮影用 HV カメラで構成される。

Reference

- [1] K. Hisayoshi, S. Kanou and C. Uyeda : Phys.:Conf. Ser., 156 (2009) 012021.
- [2] C. Uyeda, K. Hisayoshi, and S. Kanou : Jpn. Phys. Soc. Jpn. 79 (2010) 064709.

キーワード: 並進運動, 微小重力, 磁気分離, 磁気抽出, 非破壊同定

Keywords: translational motion, microgravity, magnetic separation, magnetic extraction, nondestructive identification

普通コンドライト隕石の部分溶融実験：珪長質な小惑星地殻形成過程への制約 A Partial Melting Study of an Ordinary Chondrite Composition with Application to the Felsic Asteroidal Crust Formation

臼井 寛裕^{1*}; Jones John²; David Mittlefehldt²
USUI, Tomohiro^{1*}; JONES, John²; DAVID, Mittlefehldt²

¹ 東京工業大学, ² アメリカ航空宇宙局
¹Tokyo Institute of Technology, ²NASA

Melting experiments of a synthesized, alkali-bearing, H-chondrite composition were conducted at ambient pressure with three distinct oxygen fugacity conditions (IW-1, IW and IW+2). Oxygen fugacity conditions significantly influence the compositions of partial melts. Partial melts at IW-1 are distinctly enriched in SiO₂ relative to those of IW and IW+2 melts. The silica-enriched, reduced (IW-1) melts are characterized by high alkali contents and have silica-oversaturated compositions. In contrast, the silica-depleted, oxidized (?IW) melts, which are also enriched in alkali contents, have distinctly silica-undersaturated compositions. These experimental results suggest that alkali-rich, felsic, asteroidal crusts as represented by paired achondrites Graves Nunataks 06128 and 06129 should originate from a low-degree, relatively reduced partial melt from a parent body having near-chondritic compositions. Based on recent chronological constraints and numerical considerations as well as our experimental results, we propose that such felsic magmatism should have occurred in a parent body that is smaller in size and commenced accreting later than those highly differentiated asteroids having basaltic crusts and metallic cores.

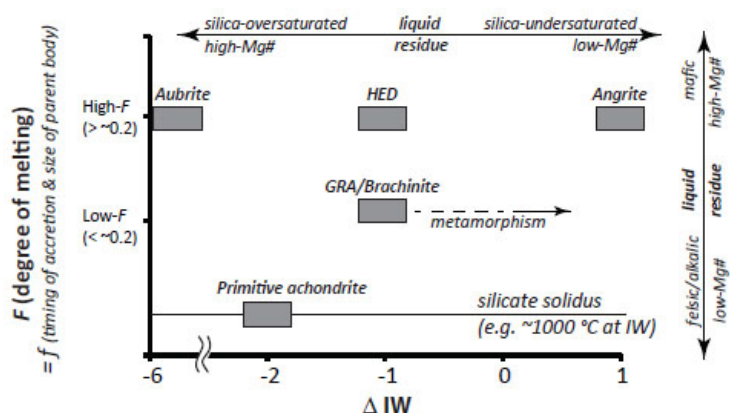
Figure caption:

Summary of magmatic conditions of achondrite suites in terms of degree of melting and fO₂ (relative to IW). See [1] for details.

Reference:

[1] Usui, T., Jones, J. H., Mittlefehldt, D. W. A partial melting study of an ordinary (H) chondrite composition with application to the unique achondrite Graves Nunataks 06128 and 06129. *Meteoritics and Planetary Sciences*, in press.

キーワード: 小惑星, 地殻, 普通コンドライト
Keywords: asteroid, crust, ordinary chondrite



Type 7 及び Type 5 普通コンドライトに含まれる高圧相について High-pressure polymorphs in Type 7 and 5 ordinary chondrites

齋藤 優人¹; 宮原 正明^{1*}; 山口 亮²

SAITOU, Masahito¹; MIYAHARA, Masaaki^{1*}; YAMAGUCHI, Akira²

¹ 広島大学理学研究科地球惑星システム学専攻, ² 極地研究所

¹Department of Earth and Planetary Systems Science, Graduate School of Science, Hiroshima University, ²NIPR

Most ordinary chondrites experienced shock metamorphism on their parent-bodies. Many kinds of high-pressure polymorphs occur in shocked ordinary chondrites, and their impact pressure conditions have been estimated based on a phase equilibrium diagram. Ordinary chondrite is classified into petrologic Type 3 to Type 7 based on the degree of thermal metamorphism. The parent-body of ordinary chondrite is expected to consist of Type 7, Type 6, Type 5, Type 4 and Type 3 from inner to outer portions based on Onion shell model. Many previous studies have tried to estimate impact pressure conditions recorded in Type 6 ordinary chondrite using high-pressure polymorphs. However, other Type ordinary chondrite such as Type 5 and 7 have been hardly investigated so far. A systematic investigation using all petrologic Types is required to reveal an impact history on the parent-body of ordinary chondrite. In this study, we tried to estimate impact pressure conditions based on high-pressure polymorphs in Type 7 and Type 5 ordinary chondrites.

Asuka 880844 H7, Asuka 880933 LL7, Yamato 790120 H7, Yamato 790960 H7, Jilin H5 and Bassikounou H5 ordinary chondrites are obtained for this study. Preliminary optical microscopic observations reveal that all samples except for Yamato 790120 H7 and Yamato 790960 H7 include shock-melt veins. So, we focused our investigations on Asuka 880844 H7, Asuka 880933 LL7, Jilin H5 and Bassikounou H5 samples. Both Type 5 and Type 7 consist mainly of olivine, Low-Ca pyroxene, plagioclase, nickel-iron alloy and troilite. Although shock-melt veins occur in all samples, high-pressure polymorphs were not identified. We expected that feldspars in and around the shock-melt veins become amorphous (maskelynite). However, Raman analyses indicate that only a few feldspar become maskelynite. It is expected that high-pressure and -temperature conditions were achieved during a dynamic event, and high-pressure polymorphs would be formed in and around the shock-melt veins once in Type 7 at that time. However, the high-pressure polymorphs would be back-transformed into their low-pressure polymorphs again because high-temperature condition was retained even if after the dynamic event. Accordingly, it is difficult to estimate shock pressure conditions recorded in Type 7 based on high-pressure polymorphs. We used only H type ordinary chondrite as a Type 5 sample. It is inferred that the parent-body of H type ordinary chondrite may be smaller in size compared to L and LL Type. The duration of high-pressure condition during a dynamic event depends on the size of an asteroid. It is likely that the duration of high-pressure condition on H type ordinary chondrite parent-body is very short so that a high-pressure polymorph could not form, implying that few high-pressure polymorphs form in H5 ordinary chondrite

キーワード: 普通コンドライト, 高圧相, Type 7, Type 5

Keywords: ordinary chondrite, high-pressure polymorph, Type 7, Type 5

衝撃変成石英の微細組織分析：衝撃圧縮様式が平面変形構造方位角分布へ与える影響

Effect of pressure loading path on PDFs orientation of planar deformation features (PDFs) in shocked quartz.

常 ユイ^{1*}; 田近 英一²; 関根 康人¹; 関根 利守³; 小林 敬道⁴

CHANG, Yu^{1*}; TAJIKA, Eiichi²; SEKINE, Yasuhito¹; SEKINE, Toshimori³; KOBAYASHI, Takamichi⁴

¹ 東大 理 地惑, ² 東大 新領域 複雑理工, ³ 広島大 理 地惑, ⁴ 物質材料研究機構

¹Earth & Planetary Sci., Univ. of Tokyo, ²Complexity Sci. & Eng., Univ. of Tokyo, ³Earth & Planetary Sci., Hiroshima Univ.,

⁴National Institute for Material Science (NIMS)

Shocked quartz is the most widely known and convincing evidence of asteroid impact. It is characterized by presence of amorphous shock metamorphic microstructures, i.e., planar deformation features (PDFs). The PDFs are detectable by the optical microscope as thin straight parallel lamellae, spacing less than 10 μm , commonly orientated parallel to rational crystallographic planes of low Miller indices such as, (0001), {101n}, {112n}, {1122} planes. Previous shock recovery experiments show that the crystallographic orientations of PDFs (e.g., {1012}, {1013}, {1122} orientation) are formed at different shock pressure [Horz et al., 1968; Langenhorst & Deutch, 1994]. Therefore, the distribution and frequency of PDFs orientations of shocked quartz can be used to estimate average shock pressure, which is one of the most crucial parameters to constrain impact process and mechanism on the Earth and other solid bodies in the solar system.

The mechanism for PDFs formation is considered as local amorphization caused by the lattice collapse, on the shock front during shock wave passing through the quartz crystal [Goltrant et al., 1992]. The elastic instabilities in the shear modulus of specific planes occur with shock intensity. Therefore, they should be sensitive to the pressure loading path especially to the most intense first shock.

However, previous pressure calibration schemes are based on compilation of different shock experiments with different shock loading path (i.e., single shock method and reverberation method) [e.g., Stöffler & Langenhorst, 1994]. In this study, we therefore conducted a series of shock recovery experiments in order to clarify a characteristic features of PDFs for different pressure and different loading path.

The shock recovery experiments were conducted in the National Institute for Material Science (NIMS) with a one stage propellant gun. Start materials are natural and synthetic quartz crystals. The velocity range of flyer plate was 0.5 to 1.8 km/s, which produces peak shock pressure from 5 to 40 GPa for reverberation samples, and from 5 to 25 GPa for single shock samples, based on the impedance matching method. Recovered samples were mounted on epoxy resin. Orientations of PDFs were measured with 4-axis universal stage (U-stage) microscope.

In our experiments, shocked quartz grains show PDFs under the shock pressure over 10 GPa. At pressure above 30 GPa, grains are almost transformed to totally amorphous glass, but still remains their original crystal shapes (diaplectic glass). We will compare the characteristic features of PDFs orientation distribution for quartz grains shocked both by single shock and reverberation methods, and also discuss the sensitivity to the two different pressure loading paths, and revisit the previous pressure calibration schemes.

キーワード: 衝撃変成作用, 衝撃変成石英, 平面変形構造 (PDFs), 衝撃回収実験

Keywords: shock metamorphism, shocked quartz, planar deformation features, shock recovery experiment

月隕石に存在する水の痕跡 Traces of water in lunar meteorite

鹿山 雅裕^{1*}; 富岡 尚敬²; 大谷 栄治³; 瀬戸 雄介¹; 福田 惇一⁴; 関根 利守⁵; 宮原 正明⁵; 小澤 信³;
三宅 亮⁶; 留岡 和重¹; Fagan Timothy⁷; 西戸 裕嗣⁸
KAYAMA, Masahiro^{1*}; TOMIOKA, Naotaka²; OHTANI, Eiji³; SETO, Yusuke¹; FUKUDA, Jun-ichi⁴;
SEKINE, Toshimori⁵; MIYAHARA, Masaaki⁵; OZAWA, Shin³; MIYAKE, Akira⁶; TOMEOKA, Kazushige¹;
FAGAN, Timothy⁷; NISHIDO, Hirotugu⁸

¹ 神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, ² 海洋研究開発機構高知コア研究所, ³ 東北大学大学院理学研究科地学専攻, ⁴ Department of Geology and Geophysics, Texas A&M University, ⁵ 広島大学大学院理学研究科, ⁶ 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, ⁷ 早稲田大学教育学部地球科学専修, ⁸ 岡山理科大学生物地球学部

¹ Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Kobe University, ² Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ³ Department of Earth and Planetary Materials Science, Graduate School of Science, Tohoku University, ⁴ Department of Geology and Geophysics, Texas A&M University, ⁵ Graduate School of Science, Hiroshima University, ⁶ Department of Geology and Mineralogy, Graduate School of Science, Kyoto University, ⁷ Department of Earth Sciences, School of Education, Waseda University, ⁸ Department of Biosphere-Geosphere Science, Okayama University of Science

アポロ計画により回収された月の岩石試料からは含水鉱物の存在や水質変成作用の痕跡は見出されておらず、全岩分析からも含水量は 1 ppb 以下であると推定されていた (例えば、Taylor et al. 2006)。このことから、月は表面から内部におよぶまで水に枯渇した環境であると考えられてきた。しかし最近では、チャンドラヤーン 1 号によるリモートセンシングを用いた月面観測から、反射スペクトルにおいて多量の水分子や OH 基が検出されており (Pieters et al. 2009)、物質科学の分野においても、月のマグマ過程初期に生成した玄武岩に属するアポロ試料から 46 ppm もの水を含む火山ガラスが発見され (Saal et al. 2008)、また斜長岩からは 5-6.4 ppm もの構造水を有する斜長石が見出されている (Hui et al. 2013)。さらに、はんれい岩質クラストを有する月隕石 NWA2977 からは、0.7-1.7 wt.% もの多量な構造水をもつアパタイトが報告されている (McCubbin et al. 2010)。このように、最近の研究から月には従来推定されてきた以上に多くの水が存在することが提唱されてきたものの、直接的な証拠はまだ少ない現状である。さらに、月の水に関する研究の多くは表面に分布する岩石を対象にしたものにすぎず、月深部に分布する岩石の含水量についてはほとんど議論されていない。本研究では、化学組成ならびに結晶化年代から月深部にマagma過程末期の残液から晶出したとされている玄武岩質・はんれい岩質の月隕石を対象に電子顕微鏡ならびに分光分析を用いて鉱物学的記載ならびに構成鉱物の含水量の評価を試みた。

電子顕微鏡観察の結果、この月隕石は玄武岩質およびはんれい岩質クラストとクラストの間を埋める礫化した基質から構成される。玄武岩質クラストには数十 μ m ほどのシリカ粒子が点在し、これは放射光 X 線回折ならびにラマン分光分析から石英と同定された。Charles et al (1971) によると、月のような水に欠乏した環境では深さ 10 km 以上でのみ石英が生成すると示唆されており、このことからこの月隕石は深部で産出したことが分かる。さらに、礫化した基質においてのみモガナイトを含む数十 μ m のシリカ粒子が確認された。衝撃溶融脈においては、モガナイトを含むシリカ粒子の外縁に高压相であるコーサイトやスティショバイトが分布する。このことから、モガナイトは地球上での風化作用や衝突の際の逆相転移に由来せず、月起源の産物といえる。ラマン分光分析によるピークの相対強度から、このシリカ粒子のモガナイト含有量は最大で 90 wt% 以上であることが判明した。地球上で産するモガナイトの生成には水が関与しており、含有量が 20 % を超えるものはすべてアルカリ流体からの蒸発岩起源とされている (Heaney and Post 1992)。さらに、モガナイトはカルサイトを伴い、ヒュージョン・クラスト付近や衝撃溶融脈中のカルサイトには発泡した痕跡や溶融ガラスとの共存が認められる。このことから、モガナイトと共にカルサイトも月起源と考えられ、その生成に流体が大きく関与していたことが推察される。これらの事実は月深部において流体活動が生じていたことを意味しており、月内部の形成過程に水が大きく作用したことを示唆している。今後は玄武岩質およびはんれい岩質クラストの主要構成鉱物であるかんらん石、輝石および長石を対象とした顕微赤外吸収分析を行い、各鉱物における含水量の定量評価を試みる。

第一原理熱力学積分分子動力学法の開発と木星核の熱化学状態への応用 Insight into the thermochemical state of the Jovian core from ab initio thermodynamic integration MD

谷内 聖^{1*}; 土屋 卓久¹

TANIUCHI, Takashi^{1*}; TSUCHIYA, Taku¹

¹ 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター

¹Geodynamics Research Center, Ehime University

The thermochemical state of the Jovian rocky core still remains unclear. Although the rocky components of the cores in gas giants are likely to be MgO, SiO₂ and Fe (Guillot, 1999), reported melting condition are still limited up to ~500-1500 GPa (Boates and Boney, 2013; Millot *et al.*, 2015; Bouchet *et al.*, 2013), which are far lower than the Jovian core P,T condition (4 TPa and 20 kK) estimated based on the equations of state of gas materials determined by ab initio calculations (Nettelmann *et al.*, 2012), primarily due to experimental difficulty. Thermochemical state (e.g., solid or liquid) of these materials might influence the tidal dissipation of planets and the mixing of the core and envelope. In order to clarify the phase equilibria, we have developed a new technique for calculating free energies of liquid and crystalline states based on the thermodynamic integration method (Frenkel and Smit, 2001) combined with the ab initio molecular dynamics method.

We obtained the following new findings: (1) calculated density of the MgO-SiO₂-Fe mixture is found highly consistent with the modeled Jovian core density, (2) although the melting temperatures of MgO and SiO₂ are higher than the modeled Jovian core temperature, the eutectic temperature is lower. These could serve for more detailed modeling of Jovian interior.

Keywords: ab initio calculation, thermodynamic integration method, Jovian core

小型走査型X線顕微鏡と収束イオンビーム法を用いたアエンデ隕石中マトリクスの有機物分析 Investigation of organic matter in the matrix of Allende meteorite using FIB and compact STXM

菅 大暉^{1*}; 武市 泰男²; 宮本 千尋³; 間瀬 一彦²; 小野 寛太²; 高橋 嘉夫³
SUGA, Hiroki^{1*}; TAKEICHI, Yasuo²; MIYAMOTO, Chihiro³; MASE, Kazuhiko²; ONO, Kanta²;
TAKAHASHI, Yoshio³

¹ 広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻, ² 高エネルギー 加速器研究機構物質構造科学研究所, ³ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

¹Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University, ²Institute of Materials Structure Science, KEK,

³Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

Allende meteorite (Allende), which classed as carbonaceous meteorite (CV3), fell in Pueblito de Allende, Chihuahua State, Mexico, on February 8, 1969. Allende is composed of chondrule, Calcium-aluminium-rich inclusions (CAIs), Amoeboid olivine aggregates (AOAs), Fe/Ni metal, and matrix. Organic matters (OM) is contained in matrix phase, however, distribution of OM in the Allende at the micrometer-scale has not investigated yet.

In this study, we analyzed a focused ion beam (FIB) milled thin section (approximately 150 nm) of Allende transected a region of fine-grained matrix employing carbon X-ray absorption near-edge structure (C-XANES) spectroscopy using compact scanning transmission X-ray microscope (cSTXM), which is installed to BL-13A at Photon Factory, high energy acceleration research organization. The cSTXM analysis revealed that the thin section of matrix of Allende contains c-rich grains, the C-XANES spectra were obtained from eight of these grains of which are similar to Allende's insoluble organic matter (IOM) reported by Cody et al. (2008). Some of eight c-rich grains has exciton peak of the diamond (288.6-288.9 eV). Existence of this peak indicates the possibility that nano-diamonds were contained in these grains. In addition, one of the c-rich grains has possibility of contain of C-N bond (nitrile or heterocyclic imine). As to diffuse OM, distributing like vein, whose C-XANES were carboxylic rich OM compared to grains. Diffuse OM was investigated in CM and CI chondrites by C-XANES, whose compositions were mainly labile and low molecules OM and which was carboxylic rich OM was reported by Le Guillou et al. (2014). However, C-XANES of diffuse OM, was investigated in this study, was different from already reported. This difference caused from the difference of empirical temperature between CV, CI, and CM.

From these results, OM was existed in matrix phase as small grain and diffuse OM. And cSTXM measurement was revealed that speciation of OM. Grains have IOM-like feature, and possibility of containing nano-diamonds and C-N compounds. Diffuse OM is carboxylic-rich OM. As to the future work, existence of nano-diamonds and C-N compounds should be confirmed by TEM observation and N-XANES, respectively. In addition, metamorphosis of OM between OM and inorganic minerals when thermal denaturation should be investigate using cSTXM and Raman microscope.

Keywords: Allende meteorite, Scanning Transmission X-ray Microscope, Organic matter, Focused ion beam, Carbon XANES, Characterization