

年代サイトメトリーの隕石解剖学への応用 Age-cytometry : new approach for meteorite anatomy

平田 岳史^{1*}; 伊藤 正一¹

HIRATA, Takafumi^{1*}; ITOH, Shoichi¹

¹ 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

¹School of Science, Kyoto University

The chronology for meteorite samples has played an important role to decode the early sequence of the solar system. Among the chronometers based on the radio-active decay of long-lived nuclides, because of the high time resolution of the resulting age data, the U-Pb chronometry has been widely used to define the timing of formation of refractory inclusions or to understand the formation sequence of the chondrite parental body. The high time resolution on the U-Pb chronometers was achieved by the small contribution of the analytical uncertainties in the isotope ratio measurements onto the resulting age data, and also because of the well-defined decay constants for ^{238}U , ^{235}U and ^{232}Th nuclides. Moreover, the U-Pb isotope systematics has further advantages of evaluating of system closure since the sample formation or crystallization of minerals, and therefore, reliability of the resulting age data can be rigorously tested. Using the U-Pb chronometer, the resulting time-resolution can become as small as 0.2 ? 1 Ma range for chondritic materials, but this could not be high enough to understand the planetary formation during the runaway growth or to understand the timing of the core formation. To overcome this, we are trying to measure in-situ $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ ratio from individual minerals by means of combination of two ion collectors. Details of the instrumentation and operational conditions would be demonstrated in this talk.

Cytometry is the quantitative analysis of cells and cell systems. Cytometry measures optical properties of cells, and most often uses fluorescence to measure specific antigen molecules, intracellular ions and DNA/RNA using antibodies, indicator dyes, or nucleic acid-specific probes. Cells may be live or fixed, depending on the application, and individual cells can often be physically sorted. ? Advantage of the cytometry are the analysis speed, detection sensitivity, the ability to measure many parameters simultaneously, and the ability to sort individual cells, and therefore, mechanism or process of elemental metabolism could be precisely evaluated based on the extensive number of cells (e.g., Benfall et al., *Science*, 2011; Bodenmiller et al., *Nature Biotechnology*, 2012). This approach can also be applied to understand the solar system evolution based on the numerous number of age data. In recent ten years, we have demonstrated the unique study approach using the distribution pattern of sample ages based on the series of precise age data collected from large number of samples (i.e., age-cytometry) [e.g., Rino et al., *PEPI*, 2008; Iizuka et al., *Geology*, 2008; Iizuka et al., Iizuka et al., *Chem. Geol.*, 2009; Iizuka et al., *GCA*, 2010]. With the high-time resolution age data obtained by present analytical technique using the LA-ICPMS, further precise and quantitative discussion could be made on the solar system evolution through the age-cytometry. The newly developed high-resolution and high-throughput age determination system using a laser ablation-ICP mass spectrometry has a potential to become a significant tool to promote an age-cytometry.

Keywords: meteorite anatomy, cytometry, solar system evolution, multiple collector mass spectrometry, laser ablation-ICPMS, ICP-mass spectrometry

玄武岩質ユークライト Juvinas 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, Juvinas

鏡味 沙耶^{1*}; 横山 哲也¹

KAGAMI, Saya^{1*}; YOKOYAMA, Tetsuya¹

¹ 東京工業大学地球惑星科学専攻

¹Dept. Earth and Planetary Sciences, Tokyo Tech

Eucrites are interpreted to have originated from the asteroid 4-Vesta which differentiated into crust and mantle. The chronology of eucrites is important to understand the formation and differentiation of planets/ planetesimals in the early Solar System. The combination of two chronometers, short-lived ^{146}Sm - ^{142}Nd system ($T_{1/2}=6.8\times 10^7\text{yr}$) and long-lived ^{147}Sm - ^{143}Nd ($T_{1/2}=1.06\times 10^{11}\text{yr}$), is useful to decode the thermal history of the eucrite parent body, because they have the same closure temperature [1]. To obtain precise Sm-Nd ages for eucrites and other achondrites, it is indispensable to develop highly precise Nd isotope analysis.

We investigated the ^{147}Sm - ^{143}Nd and ^{146}Sm - ^{142}Nd chronometers for a brecciated basaltic eucrite, Juvinas. We examined samples of whole rock powder (W.R.), 400 mesh grains, plagioclase (Pl), and pyroxene (Px). Plagioclase and pyroxene grains were obtained by handpicking. Samples were dissolved using a mixture of concentrated pure acid (HClO_4 , HF, and HNO_3) and heating at 195 °C. About ten percent of the solution was removed and spiked with ^{149}Sm - ^{145}Nd in order to precisely measure Sm and Nd concentrations by ID-ICP-MS (Thermo X-series II at Tokyo Tech). We separated Nd from the rest of the solution via a four-step column chemistry. Nd isotope ratios in W.R., 400mesh, Pl, and Px were analyzed by TIMS (Thermo TRITON-plus at Tokyo Tech) with the dynamic multicollection method.

The ^{147}Sm - ^{143}Nd mineral isochron diagram of Juvinas, yielded an age of $4610\pm 410\text{Ma}$. In contrast, the ^{146}Sm - ^{142}Nd systematic for Juvinas yielded an initial $^{146}\text{Sm}/^{144}\text{Sm}$ ratio of 0.0157 ± 0.0074 . This gives $4618^{+38}_{-63}\text{Ma}$ for the age of Juvinas when an initial solar system ratio of $^{146}\text{Sm}/^{144}\text{Sm}=0.0094$ at 4568 Ma is assumed [1]. The self-consistency of the ^{147}Sm - ^{143}Nd and ^{146}Sm - ^{142}Nd ages for Juvinas supports early crust-mantle differentiation on the eucrite parent body as was proposed by previous chronological studies on basaltic eucrites (e.g., Pb-Pb, Al-Mg, Mn-Cr, and Hf-W; [2-5]).

It has been suggested that cumulate eucrites provide internal isochron ages younger than basaltic eucrites due to a longer history in the deep crust or late thermal disturbance during later meteorite bombardment event(s) [6]. Because of the limited Sm/Nd variation in the meteorite components analyzed, the Sm-Nd ages obtained in this study have uncertainties several times larger than those in previous studies [6]. The ^{147}Sm - ^{143}Nd age and the initial $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ratio for Juvinas are consistent with those obtained by the mineral isochrons of three cumulate eucrites within analytical error ($4546\pm 8\text{Ma}$; [6]). However, our ^{146}Sm - ^{142}Nd age is older than the proposed ^{147}Sm - ^{143}Nd age for cumulate eucrites, indicating that the crystallization of basaltic eucrites predates the timing when the Sm-Nd systematics for cumulate eucrites reached a closure temperature. It should be noted that Juvinas is a brecciated basaltic eucrite which may not record a correct Sm-Nd age. Further investigation is required to obtain more precise Sm-Nd ages utilizing unbrecciated basaltic eucrite to reveal the thermal history on the eucrite parent body.

References: [1] N. Kinoshita et al., (2012) *Science*, 335, 1614 [2] S.J.G. Galer and G.W. Lugmair, (1996) *MAPS*, 31, A47. [3] M. Wadhwa et al., (2003) *LPSC XXXIV*, 2055. [4] G.W. Lugmair and A. Shukolyukov, (1998) *GCA* 62, 2863. [5] T. Kleine et al., (2004) *GCA* 68, 2935.

[6] M. Boyet et al., (2010) *EPSL* 291, 172.

アエンデ隕石 Type C CAI の Al-Mg 鉱物アイソクロン Al-Mg mineral isochron of a Type C CAI from Allende

川崎 教行^{1*}; 加藤 千図²; 伊藤 正一³; 伊藤 元雄⁴; 若木 重行⁴; 坂本 尚義¹

KAWASAKI, Noriyuki^{1*}; KATO, Chizu²; ITOH, Shoichi³; ITO, Motoo⁴; WAKAKI, Shigeyuki⁴; YURIMOTO, Hisayoshi¹

¹北海道大学, ²ワシントン大学セントルイス, ³京都大学, ⁴海洋研究開発機構

¹Hokkaido University, ²Washington University in St. Louis, ³Kyoto University, ⁴JAMSTEC

隕石に含まれる CAI (Ca-Al-rich inclusion) は、45.67 億年前に形成された太陽系最古の岩石である (Amelin et al., 2002)。CAI からは、半減期 73 万年で ²⁶Mg へと壊変する消滅核種 ²⁶Al が、多量に含まれていた痕跡が見つかっており (e.g., MacPherson et al., 1995), Al-Mg 相対年代系を適用できる。本研究では、アエンデ隕石の Type C CAI, EK1-04-2 (Ito et al. 2000) の詳細な岩石学的研究と酸素同位体分析, Al-Mg 年代測定を行い, CAI の加熱溶融の年代を求めた。

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。酸素同位体分析と Al-Mg 年代測定は SIMS (Cameca ims-1270) 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。二次変質鉱物のネフェリン, ソーダライト, 鉄に富むオーサイトの一部が見られる。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, スピネルの量がコア部より少なく, 他形を示すスピネルとアノーサイトが見られ, ディオプサイドが Mg に富み Ti に乏しいという特徴の違いがある。

構成鉱物の酸素同位体組成は CCAM ライン上で分布した ($\delta^{18}\text{O} = -44$ から $+9$ パーミル)。スピネルはコア・マントル部両方で ¹⁶O に富む ($\delta^{18}\text{O} \sim -43$ パーミル) 均一な組成をもっていた。一方でアノーサイトはコア・マントル部両方で均一に ¹⁶O に乏しい ($\delta^{18}\text{O} \sim 8$ パーミル)。オリビンとディオプサイドは, コア部とマントル部で異なる組成を示した。コア部のオリビンとディオプサイドは均一な酸素同位体組成を示し, スピネルとアノーサイトの中間の値を示した ($\delta^{18}\text{O} \sim -15$ パーミル) が, マントル部のオリビンとディオプサイドはコア部のものよりも ¹⁶O に乏しくその同位体組成は不均質であった ($\delta^{18}\text{O} = -13$ から -4 パーミル)。つまり, 酸素同位体組成から見ると, この CAI はスピネルの結晶化作用, コア部のオリビンとディオプサイドの結晶化作用, マントル部のオリビンとディオプサイドの結晶化作用に大別され, マントル部のオリビンとディオプサイドとは互いに化学平衡の関係にない。

Al-Mg 分析のアイソクロン図から, コア部のスピネルは $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}_0 = (3.52 \pm 0.15) \times 10^{-5}$ の傾きを持つ線上にプロットされるが, コア部のオリビン, ディオプサイド, アノーサイトは $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}_0 = (5 \pm 5) \times 10^{-7}$ の傾きを持つ線上にプロットされた。この傾きの差は約 460 万年の年代差に相当する。一方で, マントル部のオリビンとディオプサイドはコア部のオリビン, ディオプサイド, アノーサイトからなる直線の下側にプロットされた。

以上の岩石学的組織と酸素同位体分布から, コア部は次のように形成されたと考えられる。¹⁶O に富む組成をもつスピネルを含んだ EK1-04-2 前駆 CAI が部分溶融を経験した。そのメルトと ¹⁶O に乏しい初期太陽系星雲ガスとの間で酸素同位体の交換が起こり, 部分溶融メルトから ¹⁶O に乏しいオリビン, ディオプサイド, アノーサイトが再結晶化した。この部分溶融イベントはスピネル形成から約 460 万年後に起こり, 溶融温度は約 1600K であった。次に, この周りに Al-rich コンドリュールのような ¹⁶O に乏しく $\delta^{26}\text{Mg}_0$ 値の低い物質が少量付着し, 再び部分溶融と固結のイベントを経験した。アノーサイトだけが最も ¹⁶O に乏しい酸素同位体組成をもつのは, この CAI がアエンデ隕石母天体に取り込まれた後に起こった熱変成作用の結果と考えられる。

本研究から, この CAI は原始太陽系円盤中で少なくとも約 460 万年間漂っており, その間に複数回の加熱溶融イベントを経験していたことがわかった。

キーワード: Al-Mg, CAI, SIMS, 酸素同位体, 初期太陽系星雲

Keywords: Al-Mg, CAI, SIMS, oxygen isotopes, solar nebula

LL4-6 普通コンドライト隕石中リン酸塩鉱物の水含有量及び水素同位体組成 Water contents and hydrogen isotopic compositions of phosphate minerals from LL4-6 ordinary chondrites.

柳井 佳穂里¹; 伊藤 正一^{2*}; グリーンウッド ジム³; ラッセル サラ⁴; 坂本 尚義¹

YANAI, Kaori¹; ITOH, Shoichi^{2*}; GREENWOOD, James³; RUSSELL, Sara⁴; YURIMOTO, Hisayoshi¹

¹ 北海道大学自然史科学専攻, ² 京都大学地球惑星科学専攻, ³ ウェズリアン大学地球環境科学専攻, ⁴ ロンドン自然史博物館鉱物学部門

¹Department of Natural History Sciences, Hokkaido University, ²Department of Earth and Planetary Sciences, Kyoto University,

³Department of Earth and environment Sciences, Wesleyan University, ⁴Department of Earth Sciences, Natural History Museum, London

地球の水の起源は、これまで様々な研究により、複数の供給源が考えられてきた。どの材料物質から供給されたのかを議論する際に、水素同位体組成が指標としてよく用いられている。

彗星は、水の供給源の有力な候補の一つである。オールト雲起源の彗星は分子雲低温領域で形成するアモルファス氷を保存している。分子雲低温領域では、イオン分子交換反応によって重水素に富む氷が形成されるため、多くの彗星は高い D/H 比を持っている。

地球には、彗星以外の地球外物質も飛来する。普通コンドライト隕石は落下隕石の9割を占めるもっともありふれた隕石である。これは、隕石母天体である S 型小惑星が、火星と木星の間にある小惑星帯の中央より内側の軌道を周回しており、他の小惑星と比較して地球に近い軌道を持つためである。普通コンドライト隕石は、全岩の鉄の存在量によって H、L、LL の3種類に分類される。LL コンドライト隕石のうち、あまり熱変成を受けていない Semarkona (LL3.0) は層状ケイ酸塩を含んでいる。この層状ケイ酸塩について、Deloule and Robert (1995) は、他の太陽系物質と比較して高い水素同位体組成 (+4600 ‰? δD ? +3300 ‰) を持つことを示した。また、彼らは、この水素同位体組成の起源が、彗星のような低温領域で形成された氷の値を反映していることを示唆した。S 型小惑星が地球に近い軌道を持っていることから、LL コンドライト隕石の水素同位体組成は、地球近傍領域まで彗星がきたことを裏付ける可能性がある。

そこで普通コンドライト隕石に注目し、比較的熱変成を受けた L コンドライト隕石の Mocs (L5-6) 及び Ensisheim (LL6) に含まれるリン酸塩鉱物(アパタイト及びメリライト)の水素同位体組成を測定した。その結果、Mocs (L5-6) は $\delta D = 0 \pm 100$ ‰で地球の海水と同程度の水素同位体組成を示した。一方、Ensisheim (LL6) は?17000 ‰と非常に高い D/H 比を示した。以上より、普通コンドライト隕石の中でも LL コンドライト隕石は、高い D/H 比を持ち、熱変成度の高い LL コンドライト隕石も D/H 比が大きいと考えられる。しかし、熱変成度が高い普通コンドライト隕石の H₂O 含有量は低い。そのため、バルク分析では吸着水による影響が大きく、他の LL コンドライト隕石も高い D/H 比を持つのかは不明だった。

本研究では、熱変成度の異なる4つの LL コンドライト隕石に含まれるリン酸塩鉱物について、二次イオン質量分析計 (SIMS) を用いた局所同位体分析により地球の水による汚染の影響を少なくして水素同位体組成を測定した。

本研究では、LL4-6 に分類されている自然史博物館所有の普通コンドライト隕石 (Soko-Banja (LL4)、Tuxtuac (LL5)、Bandong (LL6)、Ensisheim (LL6)) の岩石薄片を用いた。リン酸塩鉱物の探索及び定量分析には、熱電界放出型走査電子顕微鏡 (FE-SEM JEOL JSM 7000-F) 及びエネルギー分散型 X 線検出器 (EDS Oxford INCA Energy) を用いた。また、リン酸塩鉱物の H₂O 定量及び水素同位体分析には、二次イオン質量分析装置 (Cameca ims-1270 SIMS) を用いた。

リン酸塩鉱物の H₂O 含有量は、どのサンプルでも 100 ppm 以下という値を示した。水素同位体組成はいずれも重水素に富んでおり、かつ、サンプル毎に異なっていた。特に Ensisheim (LL6) のリン酸塩鉱物の δD 値は、最大で 23000 ‰という他の太陽系物質と比較しても非常に高い D/H 比を示した。

Soko-Banja (LL4) 及び Tuxtuac (LL5) のリン酸塩鉱物の高い D/H 比は金属鉄と水との酸化反応により生成する水素ガスの散逸により説明可能である。しかしながら、Ensisheim (LL6) 及び Bandong (LL6) のリン酸塩鉱物の非常に大きい D/H 比は、この反応による説明が難しい。したがって、LL6 の水素同位体組成の成因は、変成後に彗星のような他の天体によりもたらされたことを示唆していた。

キーワード: 水素同位体, 二次イオン質量分析計, リン酸塩鉱物, アパタイト

Keywords: Hydrogen isotope, SIMS, phosphate, apatite

異なる Ca/Ti 比をもつペロブスカイトの酸素拡散挙動 Oxygen diffusion in perovskite with different Ca/Ti ratio

橋口 未奈子^{1*}; 坂口 勲¹; 廣瀬 左京²; 大橋 直樹¹
HASHIGUCHI, Minako^{1*}; SAKAGUCHI, Isao¹; HIROSE, Sakyō²; OHASHI, Naoki¹

¹(独)物質・材料研究機構, ²(株)村田製作所

¹National Institute for Materials Science (NIMS), ²Murata Manufacturing Co., Ltd.

<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、アノーサイト、ペロブスカイト (CaTiO₃) などの鉱物から構成される。CAI 鉱物は、三酸素同位体図上において質量に依存しない傾き 1 の直線に沿う分別を示す [Clayton et al. (1973)] ことから、初期太陽系内の酸素同位体環境の情報を保存していると考えられ、議論が行われている [Yurimoto et al. (1998); Itoh and Yurimoto (2003); Katayama et al. (2012); Park et al. (2012)]. そして、CAI 鉱物は、星雲中や隕石母天体上で熱による変成を経験していると考えられるため、鉱物の酸素拡散挙動を理解する必要がある。

ペロブスカイトは他の CAI 鉱物よりも数桁大きい酸素拡散係数を示す [Gautason and Muehlenbachs (1993); Ryerson and McKeegan (1994); Sakaguchi and Haneda (1996)]. そのため、ペロブスカイトの酸素同位体組成は、CAI 鉱物の酸素拡散挙動を理解する手がかりとなる [Ito et al. (2004); Park et al. (2012)]. しかし、ペロブスカイトの酸素拡散係数の報告例は少なく、また、先行研究の報告値には約 1 桁の違いがある。本研究では、酸素拡散挙動を変化させる要因としてペロブスカイトの Ca/Ti 比に着目し、Ca/Ti 比の異なるペロブスカイトの酸素拡散係数を求めるため、¹⁸O をトレーサーとしたガス-固体間の同位体拡散実験を行った。

<実験手法> 高純度の CaCO₃, TiO₂ 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を行った後、粉末をシート状に成形し、大気中 1350 °C 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得た。但し、ボールミル粉碎時に ZrO₂ が混入する可能性があるため、Ca/Ti 比は粉末混合時から約 0.001-0.0015 ずれると考えられる。

試料は、機械研磨による鏡面仕上げ後、研磨ダメージを除去するため、大気中 1200 °C で 1 時間アニールを行った。さらに、¹⁸O₂ ガス中において、750-1050 °C 温度下で数時間アニールさせ、二次イオン質量分析装置 (Cameca ims-4f) を用いて ¹⁸O 濃度プロファイルを取得し、酸素拡散係数を求めた。

<結果と議論> Ti に富むペロブスカイト多結晶では、再表面から始まる拡散 (拡散 A)、数 100 nm の深さから始まる拡散 (拡散 B) の存在が確認された。再表面と数 100 nm における二次イオン像において、¹⁸O⁻ は粒子状に分布しており、2 つの拡散はどちらも体積拡散であると考えられる。Ca に富むペロブスカイトでは、このような 2 つの拡散パスは見られなかった。拡散 A, B どちらにおいても、ペロブスカイトの酸素体積拡散係数は Ca/Ti 比によって異なることが分かった。950 °C 大気圧下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 7×10^{-10} cm²/s, Ca/Ti 比を 0.098 として焼成した試料では、 7×10^{-13} cm²/s (拡散 A), 1×10^{-11} cm²/s (拡散 B) であり、全ての試料の拡散係数は、先行研究の報告値 [Gautason and Muehlenbachs (1993); Sakaguchi and Haneda (1996)] より大きい値であった。

炭素質コンドライト隕石の CAI において、¹⁶O に乏しいペロブスカイト [Ito et al. (2004)] と ¹⁶O に富むペロブスカイト [Park et al. (2012)] が報告されている。前者は、熱変成で酸素同位体組成が変化したものであると考えられ、一方、後者は熱変成を逃れたものであると考えられている。拡散係数の大きさから、ペロブスカイトの酸素同位体組成は、CAI が最終的に経験した熱履歴を反映していると考えられ、本研究の結果から、熱拡散によってペロブスカイトの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可能性がある。また、ペロブスカイトの酸素拡散挙動を理解するためには Ca/Ti 比を調べる必要があることが分かった。

今後、NanoSIMS を用いた分析を行い、ペロブスカイトの Ca/Ti 比が酸素拡散挙動を変化させるメカニズム、および Ti に富むペロブスカイトに 2 つの拡散 (A, B) が見られた原因を解明していきたいと考えている。

キーワード: ペロブスカイト, 酸素拡散
Keywords: Perovskite, Oxygen diffusion

低い Al/Mg 比を示す FUN ヒボナイト包有物の発見 Newly identified hibonite-bearing FUN inclusions with low Al/Mg ratios

福田 航平^{1*}; 比屋根 肇¹; 佐々木 翔吾¹; 三河内 岳¹; 藤谷 渉²; 高畑 直人³; 佐野 有司³; 森下 祐一⁴
FUKUDA, Kohei^{1*}; HIYAGON, Hajime¹; SASAKI, Shogo¹; MIKOUCHI, Takashi¹; FUJIYA, Wataru²; TAKAHATA,
Naoto³; SANO, Yuji³; MORISHITA, Yuichi⁴

¹ 東京大学大学院理学系研究科, ² マックスプランク化学研究所, ³ 東京大学大気海洋研究所, ⁴ 静岡大学大学院理学研究科
¹Graduate School of Science, The Univ. of Tokyo, ²Max Planck Institute for Chemistry, ³AORI, The Univ. of Tokyo, ⁴Graduate
School of Science, Shizuoka Univ.

難揮発性包有物の一種である FUN(Fractionation and Unknown Nuclear effects) やヒボナイト (CaAl₁₂O₁₉) 包有物は、カルシウムやチタンの安定同位体に異常を示すものや消滅核種 ²⁶Al の壊変起源である ²⁶Mg の過剰が確認されないものが存在する。安定同位体に異常を示すことから、これらの包有物は同位体均一化が完了していない時期、つまりは初期太陽系の進化過程における最初期段階に形成したことが伺える。また、²⁶Al の痕跡が確認されないことは、これらの包有物が、恒星起源の ²⁶Al が太陽系に持ち込まれる前、もしくは太陽系内の ²⁶Al の分布が均一化される前に形成された可能性を示唆する。従って、FUN 包有物やヒボナイト包有物に関する研究は、太陽系最初期の進化史を紐解く上で重要である。

本研究では太陽系最初期の物質進化、特に同位体均一化プロセスに制約を与えることを目的とし、Murchison 隕石から分離した3つのヒボナイト包有物に対して二台の二次イオン質量分析計 (Cameca ims-1270, NanoSIMS 50) を用いたマグネシウム、カルシウム、チタン、および酸素同位体分析を行った。Al-Mg および Ca, Ti 同位体分析の結果、大きな質量依存同位体分別 (~55 ‰/amu) と初生 ²⁶Al/²⁷Al 比がゼロ、さらに Ca および Ti の安定同位体に有為な異常 (~1%) をもつ、FUN ヒボナイト包有物を3つ (MC037, MC040, MC003) 発見した。これはつまり3つの包有物が物質混合過程継続中に形成した可能性を示す結果である。また、本研究において見つかった FUN 包有物中のヒボナイトは、従来報告されていたそれに比べて Al/Mg 比が非常に小さい。特に MC040 に関しては報告されている中でも最大級の同位体分別を示したのにも関わらず、Al/Mg 比はそれらに比べて1~2桁小さい。これは、従来報告されていた FUN ヒボナイト包有物に比べ、3つの FUN 包有物の前駆物質がより Mg に富んでいた可能性を示唆する。また、酸素同位体組成は $\Delta^{17}\text{O} = \sim -23\text{‰}$ の質量依存同位体分別直線上にプロットされた。従って、3つの包有物の前駆物質は一般的な難揮発性包有物である CAI と同等の組成 ($\delta^{17,18}\text{O} = \sim -50\text{‰}$) を持っていたことが明らかとなった。さらに、組織観察の結果、急冷された構造を示すものがあり、形成時の加熱・冷却過程に新たな制約を与える可能性がある。FUN 包有物の形成過程には現段階でも不明な点が多いが、本研究によって前駆物質の組成ならびに同位体異常の程度、また加熱・冷却過程についてさらなる多様性が確認された。

キーワード: FUN 包有物, ヒボナイト, 二次イオン質量分析計, マグネシウム同位体, カルシウムおよびチタン同位体, 酸素同位体

Keywords: FUN inclusion, hibonite, ion microprobe, Mg isotopes, Ca and Ti isotopes, oxygen isotopes

NWA 3118 (CV) 隕石 igneous rim 中の O-16 に富むオリビン O-16-rich olivine in igneous rim from NWA 3118 (CV)

松田 望^{1*}; 坂本 直哉²; 坂本 尚義³
MATSUDA, Nozomi^{1*}; SAKAMOTO, Naoya²; YURIMOTO, Hisayoshi³

¹ 北海道大学大学院理学院自然史科学専攻, ² 北海道大学創成研究機構, ³ 北海道大学理学研究院自然史科学部門
¹Natural History Sciences, Hokkaido University, ²CRIS, Hokkaido University, ³Natural History Sciences, Hokkaido University

隕石中の主要構成物である難揮発性包有物 (CAI) およびコンドリュールは、質量に依存しない酸素同位体異常を持つ (Clayton, 1993). 一般に CAI は O-16 に富み、コンドリュールは O-16 に乏しいと考えられてきた. 近年, CR2 コンドライト隕石のコンドリュールリムから O-16 に富むオリビン粒子の存在が報告され始めており (Takeda et al., 2002; Nagashima et al., 2013), コンドリュール形成場に存在していたコンドリュール前駆物質の酸素同位体の情報を保持している可能性が示唆される. また, コンドリュールリムの O-16 に富むオリビンは CR2 以外にもどれくらい分布しているのか知られていない. 本研究では, 岩石学的記載および同位体顕微鏡を用いた酸素同位体イメージングにより CV3 コンドライト隕石のコンドリュールリムの O-16 に富む物質の分布を明らかにすることを目的とした.

試料には, NWA 3118 (CV3) 中のコンドリュールを用いた. 組織観察および化学組成分析は FE-SEM-EDS (JEOL JSM-7000F; Oxford X-Max 150) を, 結晶方位解析には EBSD システム (Oxford HKL) を用いた. 酸素同位体イメージは同位体顕微鏡 (Cameca ims-1270 + SCAPS) を用いた.

観察したコンドリュールは, 直径約 1.4 ミリメートルの Mg-rich (タイプ I) porphyritic コンドリュールである. コンドリュールは Mg に富むオリビン, low-Ca 輝石および長石質なメソスタシスで構成されている. コンドリュールリムは火成作用を経験したと考えられる岩石学的特徴を示し, 最大 400 マイクロメートルの幅を持ち, コンドリュール全体を囲んでいる. コンドリュールリムは Fe に富むオリビンが主成分鉱物であり, low-Ca 輝石, High-Ca 輝石および硫化鉱物が存在する. この Fe に富むオリビン粒子は Fe-Mg の化学組成ゾーニングが認められ, 隕石母天体上で起こった変成作用により Fe 成分が固体拡散によって Mg と交換したものと考えられる.

酸素同位体イメージングの結果, リム中に O-16 に富むオリビン粒子を 7 個発見した. サイズは, 10-30 マイクロメートルであった. さらに, O-16 に富む領域は粒子全体ではなく, 一部分だけであり, O-16 に乏しいオリビンに囲まれていることが分かった. また, 酸素同位体の不均質分布と化学組成分布は一致していなかった. これらの観察結果は, O-16 に富むオリビンを核として O-16 に乏しいオリビンがオーバーグロースしたことを示す.

CV コンドライト隕石のコンドリュールリムにも O-16 に富むオリビンが存在することから, コンドリュール形成領域に O-16 に富む物質および O-16 に乏しい物質の両方が存在していたことが示唆される.

キーワード: コンドリュールリム, コンドリュール, 酸素同位体組成, 炭素質コンドライト, SIMS
Keywords: chondrule rim, chondrule, oxygen isotopes, carbonaceous chondrite, SIMS

コンドリュールの内部組織とその成因 Internal structure of chondrules and their possible origin

高橋 栄一^{1*}; 中本 泰史¹
TAKAHASHI, Eiichi^{1*}; NAKAMOTO, Taishi¹

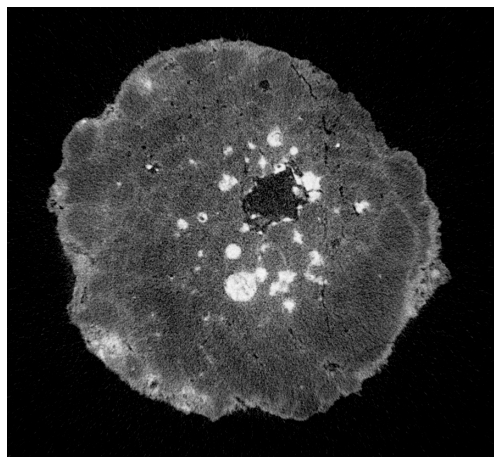
¹ 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻
¹Earth & Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

In order to clarify 3D shapes and internal structure of chondrules in Allende chondrite, we have separated 180 chondrules grains and investigated them with X-ray CT apparatus (Scan Xmate-D180RSS270) recently installed at the Museum of Natural History, Tohoku University (Tsuda et al., JPGU 2013). We also developed an optical device to measure 3D shape of chondrules or other spherical objects (Nishida et al. JPGU 2013). Our results revealed that chondrules shapes show wide distribution consisting of true spheres, prolate-spheres and oblate-spheres. Chondrules with porphyritic textures distribute in all shape categories. Chondrules with barred olivine texture (quenched from super-heated melt) show a distribution between true sphere and oblate-shape. Implication of the 3D shapes and internal texture of chondrules are consistent with the shock-wave heating model (e.g., Miura & Nakamoto, 2002, 2008).

Due to the density contrast, textures of Fe-FeS phase are most easily observed by X-ray tomography. By melting, coagulation and growth of Fe-FeS phase occur in chondrules. In some chondrules, coagulation resulted in mini-core formation (driven by surface energy minimization, see Fig.1). It is suggested that duration of heating episodes could be estimated by coagulation textures of Fe-FeS. If chondrules were formed by shock heating mechanism (e.g., Miura & Nakamoto, 2002, 2008), separation of molten silicate and coagulated Fe-FeS droplets would have taken place during acceleration and slow down of chondrules. Accordingly, significant chemical fractionation took place by dynamic processes during chondrules formation.

In X-ray CT images, many chondrules are surrounded by 50-200 micron thick rims. Coagulation and growth of Fe-FeS grains are observed in chondrules-rims as well as inside of chondrules indicating that temperature may have exceeded ~1000C (eutectic point in the Fe-FeS) in the chondrule-rims. The common appearance of growth texture of Fe-FeS grains supports high-temperature origin of chondrule-rims rather than metasomatic origin. Clear textural distinction between chondrules and their ambient rims may correspond with presence or absence of melting in silicates. Most abundant element that volatilized below 1000C is sulfur. It is suggested that sulfur would have acted as a glue to coagulate dust particles onto molten droplets (chondrules) during shock heating episodes.

キーワード: 隕石, コンドリュール, 組織, 起源, X線トモグラフィー
Keywords: meteorite, chondrule, texture, origin, X-ray CT



加熱・急冷実験による溶融微小隕石の再現 Artificial cosmic spherules produced by heating and quenching experiments

権藤 貴明^{1*}; 磯部 博志¹
GONDO, Takaaki^{1*}; ISOBE, Hiroshi¹

¹ 熊本大学大学院自然科学研究科理学専攻

¹ Grad. Sch. Sci. Tech., Kumamoto Univ.

隕石には、我々人類が地球上で得られる最も古い、かつ最も始原的な惑星物質が含まれている。隕石のうちセンチメートルサイズ以下の微小な粒子を特に、微小隕石 (MMs: micrometeorites) という。地球に飛来する微小隕石の総量は、隕石物質よりも圧倒的に多く、年間約3万トンが地球に落下集積しており、そのバリエーションも非常に豊富である。そのため、微小隕石は太陽系の始原的物質の研究を行う上で非常に重要である。微小隕石は、地球に飛来する際、大気圏において急激に加熱され、その後急冷される。その熱履歴は、微小隕石の速度、入射角及び質量に依存する。

地表に到達する通常の隕石は、加熱された部分はアブレーションによって失われ、溶融皮殻より内側の岩石内部は加熱の影響を受けていないため母天体の情報を保持している。しかし、微小隕石では粒子が非常に小さいために、加熱の影響が粒子内部に及んでいる可能性がある。そのため、採集された微小隕石内部がどの程度の加熱の影響を受けているのかを知ることは、地球落下前の微小隕石本来の性質を知る上で重要である。

そこで、本研究では、大気加熱による溶融を受けたと考えられる典型的な微小隕石の粒径である、直径 100 μm 程度の粒子について、大気突入の際の加熱・冷却過程の再現を試みた。実験には、Allende 隕石 (CV3)、Murchison 隕石 (CM2)、Zag 隕石 (H コンドライト) を用いた再現実験を行った。そして、それら実験生成物と天然の微小隕石とを比較し加熱による微小隕石への影響と、その起源物質についての検討を行った。

実験の結果、それぞれの出発物質ごとでそれぞれ異なるバリエーションに富む粒子が観察された。実験生成物の観察においては、完全に溶融し球形になった粒子 (微小隕石の中で特に cosmic spherules と呼ばれるもの) に相当する球形の粒子に注目し観察を行った。それぞれ隕石物質を用いた実験において Cryptocrystalline S-type spherules や Barred olivine spherules, Porphyritic olivine spherule など天然の cosmic spherules で報告されている組織に非常に似た粒子の再現に成功した。これにより、地球軌道近傍に存在する惑星間微小物質について、その起源を推定することが可能である。

キーワード: 微小隕石, 炭素質コンドライト, H コンドライト, 大気加熱, コスミックスフェルール

Keywords: micrometeorite, carbonaceous chondrite, H chondrite, atmospheric heating, cosmic spherule

コンドリュール及びCAI微細組織の再現実験: 還元ガス浮遊法によるアプローチ Experimental reproduction of microtextures of chondrules and CAIs by reducing-gas levitation technique

瀬戸 雄介^{1*}; 市村 隼¹; 松野 淳也²; 高橋 竜平²; 土山 明²; 小原 真司³

SETO, Yusuke^{1*}; ICHIMURA, Shun¹; MATSUNO, Junya²; TAKAHASHI, Ryohei²; TSUCHIYAMA, Akira²; KOHARA, Shinji³

¹ 神戸大学・院・理, ² 京都大学・院・理, ³ 高輝度光科学研究センター

¹Kobe Univ. Sci., ²Kyoto Univ. Sci., ³JASRI

Chondrules are the most abundant component in chondrites. They are mm-sized round (or irregularly) shaped particles mainly composed of silicates, which formed by the rapid cooling of droplets of molten or partially molten rock in space before they accreted. They show unique and diverse internal micro-textures (e.g., porphyritic olivine, barred olivine, radial pyroxene, etc.), even if they have same bulk compositions. These internal textures, therefore, should reflect not only starting material compositions, but also nebular conditions, such as gas species and their partial pressures, heating and cooling rate. CAIs are another major component in chondrites, which are also known to show the evidence of molten and quenching textures. The conditions of chondrule formation, however, remain poorly constrained, because the reproduction of the chondrule formation processes in a laboratory is experimentally difficult, especially in terms of container-less arrangement and reducing (low- fO_2) ambient. In the present study, we conducted gas-levitation and laser heating experiments in order to reproduce micro-textures of chondrules and CAIs, and constrain their formation conditions.

As starting materials, we used (i) natural olivine (FO_{90}) from San Carlos, USA, (ii) matrices of Murchison CM meteorite, and (iii) mixed compounds of melilite ($Ca_2Al_2SiO_7$) + spinel ($MgAl_2O_4$) which are analogue to CAIs. The molten-quenched droplets of these samples were obtained using the gas-levitation and laser-heating experiments, which avoided both contamination of the molten samples and heterogeneous nucleation by crucible surfaces, at SPring-8 BL04B2. 1-2 mm-sized droplets were heated by a continuous-wave CO_2 laser, and were levitated in 96% Ar + 4% H_2 gas to achieve reducing ambient. The temperature during heating was monitored by a pyrometer. Surfaces and internal textures of the recovered samples were analyzed using SEM-EDX and -EBSD (JEOL, JSM-6480LAI and JSM-7100F).

(i) As a result of experiments using San Carlos olivine, olivine was re-crystallized under any condition. They show micro-porphyritic texture consisting of fine grained (1 to 5 μm) olivine, which are equal in composition to the starting material. Magnetite (Fe_3O_4) or hematite (Fe_2O_3) was completely absent, which suggests the low fO_2 (at least MFQ buffer) was maintained during the present experiments. (iii) The recovered sample of Murchison CM chondrite shows barred-olivine like texture. The platy (10 μm thickness) olivine crystals (Fa_{20-40}) are embedded in a FeO-SiO₂-rich glass. Idiomorphic fine (1 μm) magnetite are also observed in the glass. EBSD analyses revealed that most of the olivine plates are normal to b-axis, and the crystallographic orientations in a parallel platelet domain are identical. (iii) As a result of experiments using melilite and spinel compounds, dendritic spinel was always crystallized from surfaces to core irrespective of sample size and cooling rates, and they are embedded in Al-rich glass phase. The demonstrations of the present study show that reducing-gas levitation experiments is a powerful technique to simulate the molten-quenched texture of early solar materials.

キーワード: コンドリュール形成, 溶融急冷組織, 結晶成長, 無容器加熱法, 棒状オリビン

Keywords: Chondrule formation, Molten-quenched texture, Crystal growth, Containerless heating, Barred olivine

NWA1232 CO3 隕石中の熱変成度の異なる岩片を含む岩相 A unique lithology in the NWA 1232 CO3 chondrite containing clasts of different meta- morphologic grades

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

MATSUMOTO, Megumi^{1*}; TOMEOKA, Kazushige²; SETO, Yusuke²; YAMAMOTO, Yukiko²; UMEHARA, Mariko²; MIYAKE, Akira³; 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.

Northwest Africa 1232 (NWA 1232) is a CO3 carbonaceous chondrite consisting of three lithologies (A, B, and C) that went through different thermal histories [1,2]. Kiriishi et al. [3] found that lithology A contains many small clasts (100-400 micron in diameter) scattering throughout the lithology. These small clasts typically consist of one chondrule surrounded by matrix and show little evidence of thermal metamorphism. Such unique lithology has not been known in other CO3 chondrites and potentially provides new insights into the formation of CO3 chondrites. Here we report the results of detailed mineralogical and petrological study of NWA 1232. The study was performed using SEM-EDS, TEM (STEM)-EDS, EPMA, and SR-XRD.

The thin section of NWA 1232 studied consists of lithologies A (738 mm²), B (624 mm²), and C (196 mm²) that are separated by sharp boundaries. In lithology C, olivine phenocrysts in type I chondrules have relatively homogeneous compositions (Fa₃₋₁₃) and exhibit weak Fe-Mg zoning; these correspond to metamorphic grade 3.4. The matrix consists mainly of fine grained (100-500 nm in diameter) olivine that is relatively homogeneous in composition (~Fa₆₀). In lithology B, olivine phenocrysts are more Fe-rich (Fa₁₉₋₄₂) and exhibit distinct Fe-Mg zoning; these correspond to metamorphic grade 3.7. The matrix is mainly composed of relatively coarse-grained (>500 nm in diameter) olivine that is very homogeneous (~Fa₄₀).

In contrast, chondrules and matrix in lithology A exhibit considerable chemical and textural diversities. Olivine phenocrysts in chondrules vary widely in composition from Fa₁ to Fa₄₃. Most of Mg-rich olivine phenocrysts in Mg-rich chondrules show almost no Fe-Mg zoning; these are similar to those in CO 3.0 chondrites. Their surrounding matrix consists mainly of very fine-grained Mg-Si-Fe-rich amorphous material. On the other hand, most of Fe-rich phenocrysts in Fe-rich chondrules show distinct Fe-Mg zoning and their surrounding matrix consists mainly of coarse-grained (>500 nm in diameter) Fe-rich (~Fa₄₀) olivine; these are similar to those in highly metamorphosed CO 3.7 chondrite. There are also many other chondrules whose olivine phenocrysts have compositions intermediate between the Mg-rich and Fe-rich olivines described above. The matrix surrounding these chondrules mainly consist of fine-grained (100-500 nm in diameter) Fe-rich olivine similar to those mildly metamorphosed CO chondrites.

The chemical and textural heterogeneities observed in lithology A cannot be explained by thermal metamorphism of a single lithology. The results suggest that lithology A is composed of many clasts that underwent various degrees of thermal metamorphism in different locations of the parent body. The results further imply that CO chondrites had once experienced various degrees of thermal metamorphism in different locations in the parent body and subsequently went through extensive brecciation and mixing.

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).

キーワード: CO chondrite, thermal metamorphism, brecciation, clast, chondrule, matrix

Keywords: CO chondrite, thermal metamorphism, brecciation, clast, TEM, SR-XRD

Allende 隕石の水熱変成実験：隕石母天体の水質環境の解明を目指して Hydrothermal alteration experiments of the Allende meteorite

飯国 恒之^{1*}; 留岡 和重¹; 瀬戸 雄介¹
IIKUNI, Tsuneyuki^{1*}; TOMEOKA, Kazushige¹; SETO, Yusuke¹

¹ 神戸大学大学院理学研究科

¹ Graduate school of Science, Kobe University

はじめに: 炭素質コンドライトは、化学的・年代学的に最も始原的な物質であると考えられる一方で、それらの多くは隕石母天体上で水や熱による変成を受けた痕跡を残している。特に水と岩石の相互作用は微惑星の初期物質進化を支配した重要な変成作用と考えられている。水質変成によって生成される二次鉱物は隕石の化学的タイプごとに異なり、このことは隕石母天体の水質環境(温度, 変成期間, pH, 水/岩石比, 酸素分圧など)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の主要構成鉱物であるカンラン石や輝石に関しては、水質変成実験が行われ、溶液種や pH と生成鉱物の関係について報告されている #1-#2。一方、実際の炭素質コンドライトを用いた研究例 #3 は少ない。本研究では、炭素質コンドライトの中でも水による変成程度が低い CV3 タイプの Allende 隕石を出発物質として、炭素質コンドライト母天体を模擬した条件下で、水熱変成実験を行った。

実験: 出発物質として Allende 隕石をブロック状 (2.5 mm × 2.5 mm × 6 mm) にカットしたものを用いた。反応溶液は過去の研究例 #4 を参考にして、H₂O (pH 7), 3.1 × 10⁻⁶ N-NaOH (pH 8.5), 1.0 × 10⁻⁴ N-NaOH (pH 10), 1N-NaOH (pH 14) を用いた。溶液/岩石体積比 (W/R) は母天体環境として考えうる 0.5 #5, 2, 8 とした。試料容器としてステンレス製の耐圧容器に封入した PTFE 容器のダブルカプセル (外容器: 25 ml, 内容器: 1 ml) を用いた。外容器に塩酸と等しいモル量のマグネシウムおよび鉄を導入し、H₂ ガスを発生させることで試料室内を還元雰囲気にした。変成実験は、すべて温度 200 °C、圧力約 15 気圧 (200 °C での水の飽和蒸気圧)、時間 168 時間の条件下で行った。回収試料は、放射光 X 線回折装置 (SR-XRD) を用いて結晶相同定を行い、走査型電子顕微鏡 (SEM-EDX) を用いて微細組織の観察および組成分析を行った。

結果と考察: pH 7 かつ W/R:0.5 の条件を除いたすべての条件でマトリックス中にサーペンティンが生成していることが確認された。サーペンティンはマトリックス中のオリビンの隙間を充填するように生成しており、pH が高くなるほどサーペンティンの生成量が大きくなる傾向が見られた。また、強塩基 (pH 14) かつ低 W/R 比 (0.5) の条件ではスメクタイトの生成も確認された。ほぼすべての条件で、試料表面に Calcite (CaCO₃) が生成しており、H₂O (pH 7) を用いた実験でのみ Anhydrite (CaSO₄) が生成していた。Allende 隕石を出発物質として用いた本研究の結果は、カンラン石や輝石を出発物質として用いた過去の研究と比べて、比較的低温かつ中性溶液条件でも十分に含水鉱物化が進行することを示している。

#1 Ohnishi and Tomeoka (2007) MPS, 42, 49-61. #2 Iishi and Han (2000) Neues Jahrbuch Fur Mineralogie-Monatshefte 2:49-59. #3 Jones and Brearley (2006) GCA, 70, 1040-1058. #4 Zolensky et al. (1989) Icarus, 78, 411-425. #5 Clayton and Mayede (1998) GCA, 63, 2089-2104.

キーワード: 炭素質コンドライト, 水熱変成実験, 含水鉱物, Allende

Keywords: carbonaceous chondrite, hydrothermal experiments, hydrated minerals, Allende

電子線ホログラフィーによるフランボイダルマグネタイトの磁場構造と生成過程の 解明 Electron Holography Reveals Nanometer Scale Magnetic Structure of Framboidal Mag- netite and its Formation Process

木村 勇気^{1*}; 佐藤 岳志²; 中村 智樹¹; 中村 教博¹; 野澤 純³; 塚本 勝男¹; 山本 和生⁴
KIMURA, Yuki^{1*}; SATO, Takeshi²; NAKAMURA, Tomoki¹; NAKAMURA, Norihiro¹; NOZAWA, Jyun³; TSUKAMOTO,
Katsuo¹; YAMAMOTO, Kazuo⁴

¹ 東北大学大学院理学研究科地学専攻, ² (株) 日立ハイテクノロジーズ, ³ 東北大学金属材料研究所, ⁴ ファインセラミック
クスセンター

¹Tohoku University, ²Hitachi High-Technologies Corporation, ³Tohoku University, ⁴Japan Fine Ceramics Center

Small solar system bodies were formed as agglomerates of dust and ices 4.6 billion years ago. Several million years after asteroid formation [1], the ice melted due to radioactive heating inside the larger asteroids [2] and/or highly energetic impacts [3]. Then, water plays several major roles in the chemistry of asteroids, both in mineralization and in the formation of organic compounds. Currently, bulk liquid water no longer exists in meteorites. We see only the signature of water in ancient asteroids as veins of hydrothermally deposited minerals [4] or water trapped in salt crystals [5] in meteorites. The Tagish Lake meteorite, which is a unique Type 2 carbonaceous chondrite, has a signature of aqueous process in the matrix that is abundant micrometer-sized polyhedral particles of magnetite [6]. The framboids are three-dimensionally ordered colloidal crystals of magnetite nanoparticles. The uniformity of the size distribution and the similar morphology of the magnetite nanoparticles in each of the colloidal crystals suggest that they were formed through homogeneous nucleation from a highly supersaturated isolated solution in a single nucleation event.

Here we show evidence of how magnetite nanoparticles assembled into periodic structures based on a nanometer scale paleomagnetic method using electron holography in an examination of the framboidal magnetite in the Tagish Lake carbonaceous chondrite [7]. An attractive force such as magnetism never contributes to the formation of colloidal crystals [8], but the repulsive force caused by the surface charge of the magnetite is able to work. To overcome the repulsive force, the density of magnetite nanoparticles in a solution must be sufficiently high in an isolated solution as a water droplet parches in microgravity. We used electron holography to visualize the magnetization of the meteoritic minerals for the first time and found that magnetite grains in the framboid have no external magnetic force, i.e., they have a flux-closure vortex structure, which allowed the formation and preservation of the colloidal crystals. We conclude that these framboids formed in tiny water droplets with pH of 7-12 containing ions such as Ca²⁺ and Mg²⁺ at levels of 10⁻¹⁴-10⁻¹⁵ mol m⁻², just before exhaustion of water during thermal alteration in a hydrous asteroid.

[1] Fujiya, W., Sugiura, N., Hotta, H., Ichimura, K. & Sano, Y. Evidence for the late formation of hydrous asteroids from young meteoritic carbonates. *Nature Communications* **3**, 627 (2012).

[2] Endress, M., Zinner, E. & Bischoff, A. Early aqueous activity on primitive meteorite parent bodies. *Nature* **379**, 701-703 (1996).

[3] Rubin, A. F. Collisional facilitation of aqueous alteration of CM and CV carbonaceous chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta* **90**, 181-194 (2012).

[4] Tomeoka, K. Phyllosilicate veins in a CI meteorite: evidence for aqueous alteration on the parent body. *Nature* **345**, 138-140 (1990).

[5] Zolensky, M. E. *et al.* Asteroidal water within fluid inclusion-bearing halite in an H5 chondrite, Monahans (1998). *Science* **285**, 1377-1379 (1999).

[6] Nozawa, J. *et al.* Magnetite 3-D Colloidal Crystals Formed in the Early Solar System 4.6 Billion Years Ago, *Journal of the American Chemical Society* **133**, 8782-8785(2011).

[7] Kimura, Y. *et al.* Vortex magnetic structure in framboidal magnetite reveals existence of water droplets in an ancient asteroid, *Nature Communications*, **4** (2013) 2649 doi: 10.1038/ncomms3649.

[8] Philipse, A. P. & Maas, D. Magnetic colloids from magnetotactic bacteria: chain formation and colloidal stability. *Langmuir* **18**, 9977-9984 (2002).

キーワード: マグネタイト, 電子線ホログラフィー, タギシュレイク隕石
Keywords: Magnetite, Electron holography, Tagish Lake meteorite

C-XANES analyses of carbonaceous solid inclusions from Monahans halite C-XANES analyses of carbonaceous solid inclusions from Monahans halite

癸生川 陽子^{1*}; Zolensky Michael²; Kilcoyne David³; Rahman Zia⁴; Fries Marc²; Cody George⁵
KEBUKAWA, Yoko^{1*}; ZOLENSKY, Michael²; KILCOYNE, David³; RAHMAN, Zia⁴; FRIES, Marc²; CODY, George⁵

¹北海道大学 大学院理学研究院 自然史科学専攻 地球惑星システム科学, ²NASA Johnson Space Center, ³Lawrence Berkeley National Laboratory, ⁴Jacobs-Sverdrup, ⁵Geophysical Laboratory, Carnegie Institution of Washington

¹Department of Natural History Sciences, Hokkaido University, ²NASA Johnson Space Center, ³Lawrence Berkeley National Laboratory, ⁴Jacobs-Sverdrup, ⁵Geophysical Laboratory, Carnegie Institution of Washington

Monahans meteorite (H5) contains fluid inclusion-bearing halite (NaCl) crystals [1]. Microthermometry and Raman spectroscopy showed that the fluid in the inclusions is an aqueous brine and they were trapped near 25°C [1]. Their continued presence in the halite grains requires that their incorporation into the H chondrite asteroid was post metamorphism [2]. Abundant solid inclusions are also present in the halites. The solid inclusions include abundant and widely variable organics [2]. Analyses by Raman microprobe, SEM/EDX, synchrotron X-ray diffraction and TEM reveal that these grains include macromolecular carbon similar in structure to CV3 chondrite matrix carbon, aliphatic carbon compounds, olivine (Fo₉₉₋₅₉), high- and low-Ca pyroxene, feldspars, magnetite, sulfides, lepidocrocite, carbonates, diamond, apatite and possibly the zeolite phillipsite [3]. Here we report organic analyses of these carbonaceous residues in Monahans halite using C-, N-, and O- X-ray absorption near edge structure (XANES).

Approximately 100 nm-thick sections were extracted with a focused ion beam (FIB) at JSC from solid inclusions from Monahans halite. The sections were analyzed using the scanning transmission X-ray microscope (STXM) on beamline 5.3.2.2 at the Advanced Light Source, Lawrence Berkeley National Laboratory for XANES spectroscopy. C-XANES spectra of the solid inclusions show micrometer-scale heterogeneity, indicating that the macromolecular carbon in the inclusions have complex chemical variations. C-XANES features include 284.7 eV assigned to aromatic C=C, 288.4-288.8 eV assigned to carboxyl, and 290.6 eV assigned to carbonate. The carbonyl features obtained by C-XANES might have been caused by the FIB used in sample preparation. No specific N-XANES features are observed. Various degrees of 1s-σ* exciton shown in the C-XANES spectra indicate that the solid inclusions contain macromolecular carbon which experienced various degree of thermal processing. The natures of the macromolecular carbon in the solid inclusions observed by C-XANES are consistent with the previous studies showing that the solid inclusions have not originated from Monahans parent body [1-3].

References: [1] Zolensky et al. 1999. Science 285: 1377-1379. [2] Fries et al. 2011. 74th MetSoc #5390. [3] Zolensky et al. 2013. 76th MetSoc #5200.

Keywords: C-XANES, Halite, Carbon, Chondrite, Organic matter

イトカワレゴリス粒子の3次元構造：月レゴリス粒子との比較 3D shapes of Itokawa regolith particles: comparison with lunar regolith particles

土山明^{1*}; 松島 亘志²; 松本 徹³; 中野 司⁴; 松野 淳也¹; 島田 玲³; 上杉 健太郎⁵; 竹内 晃久⁵; 鈴木 芳生⁵; 大竹 真紀子⁶; 中村 智樹⁷; 上相 真之⁶; 矢田 達⁶; 西泉 邦彦⁸
TSUCHIYAMA, Akira^{1*}; MATSUSHIMA, Takashi²; MATSUMOTO, Toru³; NAKANO, Tsukasa⁴; MATSUNO, Junya¹; SHIMADA, Akira³; UESUGI, Kentaro⁵; TAKEUCHI, Akihisa⁵; SUZUKI, Yoshio⁵; OHTAKE, Makiko⁶; NAKAMURA, Tomoki⁷; UESUGI, Masayuki⁶; YADA, Toru⁶; NISHIIZUMI, Kunihiko⁸

¹ 京都大学大学院理学研究科, ² 筑波大学システム情報工学研究科, ³ 大阪大学大学院理学研究科, ⁴ 産総研, ⁵ スプリング8, ⁶ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, ⁷ 東北大学大学院理学研究科, ⁸ カリフォルニア大学宇宙科学研究所
¹Graduate School of Science, Kyoto University, ²Graduate School of Systems and Information Engineering, ³Graduate School of Science, Osaka University, ⁴AIST/GSJ, ⁵JASRI/SPring-8, ⁶JAXA/ISAS, ⁷Graduate School of Science, Tohoku University, ⁸Space Sciences Laboratory, University of California

Regolith particles were returned from the surface of asteroid Itokawa by the Hayabusa spacecraft. The sample analysis elucidated a variety of surface processes on the asteroid (e.g., [1]): (1) Formation of regolith by impacts of small objects, with selective escape of the finest-scale particles. (2) Implantation of solar wind into the uppermost particle surfaces and formation of space-weathering rims. (3) Grain abrasion, probably due to seismic-induced particle motion. Processes (5) and (6) might have been repeated. (7) Final escape of particles from the asteroid by impact within the past 8 million years (1-3 million years [3]).

During the course of the analysis, 3D size and shape features of the Itokawa particles were obtained by SR-based x-ray microtomography to understand the origin and evolution of the regolith particles on Itokawa's surface [2,3]. In particular, the particle shape distribution with respect to their three-axial ratios was obtained and compared with that of fragments formed by high-speed impact in laboratory experiments [4,5] and of lunar regolith samples [6]. The 3D shapes of the lunar samples have been examined by tomography [6] but not grain-by-grain as performed for the Itokawa samples. In addition, the procedure for measuring the three axial lengths was different between the regolith particles and the impact fragments: the former was obtained from 3D external particle shapes by ovoid approximation [2,3,6], while the latter by bounding box method using a calliper [4,5]. In order to make strict comparison between them, lunar regolith particles were examined by the same method as the Itokawa particles, and the three axial lengths were measured from the tomography data by bounding box method that was newly developed in the present study.

The 3D shapes of 70 particles from 105-250 μm sieved fraction of Descartes highland (60501) and 74 particles from <1 mm sieved fraction of Mare Tranquillitatis (10084) were obtained by microtomography at BL47XU of SPring-8. Furthermore, the 3D shapes of new 24 Itokawa particles (3 of them are from Dr. M. Meier, personal communication) were also examined in addition to the previous 48 particles [3]. The three axial lengths were measured in the orders of short to long and long to short axes to compared with the data of [3] and [4], respectively. The shape distribution in a Zingg diagram was compared using the Kolmogorov-Smirnov test.

The shape distribution of the Itokawa particles cannot be distinguished from that of the impact fragments of [4] but can be distinguished from that of [3]. This may suggest that the Itokawa particles resulted from mechanical disaggregation, as a response to impacts with a specific condition. In contrast, the shape distribution of the lunar regolith particles can be distinguished from that of the Itokawa particles and the impact fragments although lunar regolith is the product of impact on the lunar surface. The lunar particle shapes are more equant than the others. The both lunar samples examined are matured (Is/FeO = 80 and 78 for 60501 and 10084, respectively [7]). These regolith particles should become equant from the shapes similar to the impact fragments by mechanical disaggregation or abrasion due to repeated impacts during a long residence time in the regolith layer although a specific process for the shape change is not known.

[1] Tsuchiyama (2013) Elements, 10: in print. [2] Tsuchiyama et al. (2011) Science, 333: 1125. [3] Tsuchiyama et al. (2013) Meteor. & Planet. Sci., 1-16. doi: 10.1111/maps.12177. [4] Fujiwara et al. (1978) Nature 272: 602. [5] Capaccioni et al. (1984) Nature 308: 832. [6] Katagiri (2010) Proc. 12th Internat. Conf. Engin., Sci., Constr., Operat. in Challeng. Environ., 254-259. [7] Morris et al. (1978) Proc. Lunar Planet. Sci. Conf., 9th, 2287.

キーワード: はやぶさ計画, 粒子形状, スプリング8, X線CT, アポロ計画, 衝突

Keywords: Hayabusa mission, particle shape, SPring-8, x-ray tomography, Apollo mission, impact

小惑星イトカワのレゴリス粒子の表面微細構造から考察するレゴリスの宇宙風化過程 Surface micromorphology of regolith particles from Asteroid Itokawa: Implication for space weathering of regolith

松本 徹^{1*}; 土山 明²; 三宅 亮²; 野口 高明³; 中村 智樹⁴; 中村 美千彦⁴; 松野 淳也²; 島田 玲¹; 上杉 健太郎⁵; 中野 司⁶
MATSUMOTO, Toru^{1*}; TSUCHIYAMA, Akira²; MIYAKE, Akira²; NOGUCHI, Takaaki³; NAKAMURA, Tomoki⁴; NAKAMURA, Michihiko⁴; MATSUNO, Junya²; SHIMADA, Akira¹; UESUGI, Kentaro⁵; NAKANO, Tsukasa⁶

¹ 阪大. 理. 宇宙地球科学, ² 京大. 理. 地球惑星科学, ³ 茨城大. 理. 理学, ⁴ 東北大. 理. 地学, ⁵ 高輝度光科学研究センター, ⁶ 産業技術総合研究所

¹Osaka University, ²Kyoto University, ³Ibaraki University, ⁴Tohoku University, ⁵JASRI/Spring-8, ⁶GSJ/AIST

惑星間空間にさらされた大気のない天体表面では、主に微小隕石の衝突と太陽風の照射により、表面の光学物性が変わり反射スペクトルが変化する。これらの現象は宇宙風化と呼ばれ、シリケイト天体ではナノ鉄微粒子の生成が原因と考えられ、観測から天体表面の物質的情報を得ることを難しくさせている。小惑星表面においても、太陽風照射・微小隕石衝突による宇宙風化が考えられているが [1]、具体的な宇宙風化の進行過程を理解するためには小惑星サンプル分析が不可欠である。2010年 S 型小惑星イトカワ表層からのレゴリス粒子 (小惑星表層の微細粒子) を回収した探査機はやぶさが地球に帰還した。イトカワ粒子の初期分析により、太陽風の打ち込みの証拠や、粒子表面に主に太陽風照射に起因するナノ鉄微粒子を含む宇宙風化リムが観察された [2-4]。一方で、一部の粒子外形は丸みを帯び、その表面微細構造をもち小惑星表層で起こるとされる摩耗作用を受けた構造が観察されている [5][6]。本研究では、イトカワ粒子の表面モルフォロジーに注目した。特に粒子表面構造の系統的な分類・解釈を行うとともに、宇宙風化リムの観察を行うことで、小惑星表層のレゴリス粒子の活動と、小惑星の宇宙風化過程との関連性を明らかにすることを試みた。まず、19 個のイトカワ粒子について X 線マイクロトモグラフィ (CT) による 3 次元外形の評価・走査型電子顕微鏡 (FE-SEM) による表面微細構造の観察を行った。その結果、レゴリス粒子表面は、レゴリス粒子生成時もしくは生成後に破断した面、レゴリス粒子形成前の matrix/regolith breccia 内の空隙での蒸発・凝縮により生成した面に分類できることが明らかとなった。また CT・FE-SEM 分析から、これらの表面の種類に関係なく、摩耗作用を受けた丸みを帯びた表面が存在することが分かった。続いて、1 つのイトカワ粒子に対して透過型電子顕微鏡 (TEM/STEM) を用いた宇宙風化リムの断面構造観察を行い、FE-SEM にて観察した表面構造との比較を行った。TEM/STEM で観察した宇宙風化リム内部には空隙が存在し、空隙の一部は表面を押し上げて、大きさ数十 nm のプリスター (水ぶくれ状の) 構造を形成していた。この構造は FE-SEM 観察によって表面の凸状構造として認識できることが明らかになった。プリスターを伴うリムはイトカワ粒子の宇宙風化リムのうち、最も長時間太陽風に暴露され形成したリムと考えられており (10^3 - 10^4 年 [4])、粒子の表面観察のみで粒子表面の宇宙風化の程度を判断できることを示した。本研究では、粒子表面のプリスター分布から小惑星表層のプロセスと関連した S 型小惑星の宇宙風化プロセスについて考察した。従来 S 型小惑星の宇宙風化プロセス (スペクトル変化) は太陽風照射 (10^6 年) とそれに続く微小隕石衝突 (10^9 年) の 2 つの異なるタイムスケールで進行すると提案されていた [7]。宇宙風化を受けたイトカワ表面のレゴリス層の年代も 10^6 年程度である [8]。一方で、イトカワ粒子の宇宙風化リムの発達は、 10^3 - 10^4 年程度で進行すると考えられる。このタイムスケールの不一致を本研究の観察結果から考察した。まずプリスター分布と粒子の丸みに相関性がないことから、摩耗過程は、太陽風照射ではなく、地震震動による粒子同士の機械的摩耗の可能性が高く、宇宙風化リムの形成よりも長いタイムスケールで起こる現象であると考察した。機械的摩耗は宇宙風化リムの剥離を引き起こすと考えられる。一方でレゴリス粒子の破碎による宇宙風化表面の更新、レゴリス粒子のかき混ぜ・移動を示唆するプリスター分布の不均一性が観察された。イトカワの宇宙風化のタイムスケールを考えると、個々のレゴリス粒子の局所的な表面に太陽風照射によって宇宙風化リムが 10^3 - 10^4 年程度で発達しても、イトカワ表層でのプロセス (レゴリス粒子の破碎、摩耗、かき混ぜなど) により、イトカワ全体を考えたときのスペクトルの変化は徐々に進行し、最も遅い場合で 10^6 年程度で起こるといった描像が考えられる。[1] Clark B. E. (2002) Asteroid, 585-599. [2] Nagao K. et al. (2011) Science, 333, 1128-1131. [3] Noguchi T. et al. (2011) Science, 333, 1121-1125. [4] Noguchi T. et al. (2013) Met. Planet. Sci. 27, 1-27 [5] Tsuchiyama A. et al. (2011) Science, 333, 1125-1128. [6] Matsumoto T. et al. (2013) LPSC XLIV, 1441. [7] Vernazza et al. (2009) Nature, 458, 993-995. [8] Busemann et al. (2013) Hayabusa 2013: Symposium of Solar System Materials.

キーワード: イトカワ, レゴリス, 宇宙風化

Keywords: Itokawa, regolith, space weathering

磁気体積力による並進運動を用いた隕石微粒子の抽出と同定 Extraction and Identification of Primitive Grains Driven by Magnetic Volume Force.

久好 圭治^{1*}; 植田 千秋¹
HISAYOSHI, Keiji^{1*}; UYEDA, Chiaki¹

¹ 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

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

これまで地球科学の諸分野では、磁性鉱物を抽出・同定する手段として、磁場勾配力が用いられてきた。しかしこの動作原理は、試料に働く磁気体積力が重力に比して十分大きい時に成立するため、磁鉄鉱、Fe-Ni合金等、自発磁化をもつ一部の物質でだけで有効であると考えられてきた。

周知のように始原的隕石に代表される惑星始原物質は、起源の異なる多様な粒子の集合体であるため、SIMSや顕微ラマンなど様々なマイクロプローブ技術を駆使して研究が進められている。しかし、集合体表面のin-situ分析で、構成粒子をもれなく把握できる保証は必ずしもない。そのため精密分析の前段階として、隕石を構成する個々の粒子を分離・識別することが望まれるが、そのための有効な手法は確立していない。

前回までに私たちは、磁場勾配力による並進運動を利用して、自発磁化を有さない一般の物質の磁化を測定する方法を確立し、これに基づく物質同定の方法を提案した。具体的には微小重力条件下で、磁場強度が単調減少する空間に反磁性粒子を解放し、それらが磁場ゼロの方向へ並進する速度を解析することで、磁化率を検出した。上記の運動は磁気体積力に由来するため、磁場分布が同一の場合、磁場の外での終端速度は粒子質量に依存せず、物質固有の磁化率のみに依存する。従ってこの終端速度を測定することで、質量計測なしに磁化率が検出できる。

上記のセットアップで、異種粒子の集団を磁場勾配中の一点で開放した場合、磁場の外で粒子は物質の種類ごとに別々の集団に分離して並進することが期待される。さらに集団ごとの速度から磁化率を検出し文献値と比較することにより、物質の種類を非破壊で識別することができる [1-3]。

上記の原理に基づき、今回、無機物質 vs 有機物質、および反磁性体 vs 常磁性体の分離・識別を試みた。具体的には、無機物質としてグラファイト、SiCおよびコランダム、有機物質として、ポリプロピレン、ポリスチレン、ポリエチレンの粒子混合物を準備し、その分離を行った。粒子は50-100 μm の大きさである。一方、反磁性体 vs 常磁性体の分離では、反磁性体のグラファイト、ビスマスおよび合成フォルステライトと、常磁性体のサンカルロスオリビンの粒子を分離することができた。

微小重力は前回同様、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、微小重力継続時間は約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。それらの装置は、NdFeB磁石製の磁気回路($B < 0.8\text{T}$)、電動アクチュエーターを装備した真空チャンバー、試料ホルダー解放信号受信装置、試料ホルダーコントローラー、電池、撮影用HVビデオカメラで構成される。

磁気分離の適応範囲はこれまでの自発磁化を有する一部の物質に限られていたが、今回の計測により一般の固体物質に拡張される展望が得られた。有機化学・生化学の分野ではクロマトグラフィの技術を用いて、有機分子の混合物を分子量ごとに分離する方法が確立している。無機物質でもこれと同様の過程が確立すれば、始原的隕石の分析のみならず固体天体表土のその場分析等への展開が考えられる。

Reference

- [1] K. Hisayoshi, S. Kanou and C. Uyeda : Phys.:Conf. Ser., 156 (2009) 012021.
- [2] K. Hisayoshi, C. Uyeda, K. Kuwada, M. Mamiya and H. Nagai, : Phys.:Conf. Ser., 327 (2011) 012058.
- [3] C. Uyeda, K. Hisayoshi, and S. Kanou : Jpn.

キーワード: 磁気放出, 非破壊同定, 磁気抽出, 微小重力, 並進運動, 磁気体積力

Keywords: magnetic ejection,, nondestructive identification, magnetic extraction, microgravity, translational motion, magnetic volume force