

## スターダスト彗星塵 T112 の鉱物学的特徴 : AOA との比較 MINERALOGY OF STARDUST COMETARY GRAIN T112: SIMILARITY TO AMOEBOID OLIVINE AGGREGATES.

小松 睦美<sup>1\*</sup>, 三河内 岳<sup>2</sup>, Fagan Timothy<sup>1</sup>, Zolensky Michael<sup>3</sup>  
KOMATSU, Mutsumi<sup>1\*</sup>, MIKOUCHI, Takashi<sup>2</sup>, FAGAN, Timothy<sup>1</sup>, ZOLENSKY, Michael<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 早稲田大学, <sup>2</sup> 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, <sup>3</sup> NASA ジョンソン宇宙センター

<sup>1</sup> Waseda University, <sup>2</sup> Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, University of Tokyo, <sup>3</sup> NASA Johnson Space Center

### Introduction:

The successful analysis of comet 81P/Wild 2 particles returned by the Stardust mission has revealed that the Wild 2 dust contains abundant silicate grains that are much larger than interstellar grains and appear to have formed in the inner regions of the solar nebula [1]. Wild 2 particles include minerals which are isotopically and mineralogically similar to CAIs [e.g., 2], chondrules [e.g., 3], and amoeboid olivine aggregates (AOAs) [e.g., 4] in chondrites. In this study, we have examined the mineralogy of the Track 112 particle and compared the possible relationships between T112 and AOAs.

### Results and Discussion:

Our two TEM grids from T112 are dominated by 4 micron -sized forsteritic olivine. Submicron sized chromite is associated with the olivine. The olivine from T112 is near end-member forsterite, but shows a slight enrichment of Fe toward the grain rim. In the least metamorphosed chondrites, most AOAs consist of forsterite. Enrichment of olivine in fayalite component is correlated with petrologic subtype of a host meteorite [5]. In CV chondrites, Fe-enrichment is distinct in Allende (petrologic type >3.6). The Fe enrichment on the rim of T112 olivine may have been caused by a minor degree of thermal processing after the condensation of forsterite.

From EDS analyses, the chromite grains have high Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content (up to 65 wt. %), and yield Al-absent compositions with intermediate Mg# ; however, it is likely that some Mg detected by EDS is from neighboring olivine and that the grains are closer to pure chromite in composition. Chromite is a minor phase in Wild 2 particles. Cr-rich spinels have been identified in the chondrule-like particle Torajiro [3] and associated with Coki-B Kool fragments (T141 [6]); however, these spinels have significant Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Three possibilities for the formation of chromite can be considered: (i) direct condensation from a gas; (ii) crystallization from chondrule melt; (iii) metamorphism/aqueous alteration. (i) Modeling by [7] predicts that Cr-rich spinel crystallizes in mixed vapor + silicate liquid + refractory solid reactions at high temperatures in dust enriched systems, but always with significant Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. (ii) This modeling [7] also shows that chromite is stable with silicate liquid at high dust enrichment, but textures of T112 particle do not appear to be typical of chondrules. Furthermore, the 16O-rich composition of olivine in the potted butt sample from (T112) is more consistent with AOAs than chondrules. (iii) Tiny Cr-rich grains surrounding olivine in type 3 ordinary chondrites were identified by [8] as products of incipient metamorphism. The T112 chromite might have a similar origin.

The forsteritic, 16O-rich composition of T112 olivine suggests a condensation origin. Slight enrichment in Fa-content along the olivine rim suggests some metamorphism. At this point, we consider metamorphism the most likely origin of T112 chromite.

References: [1] Brownlee D. E. et al. (2006) Science 314:1711-1716. [2] Zolensky M. et al. (2006) Science 314:1735-1739. [3] Nakamura T. et al. (2008) Science 321:1664-1667. [4] Nakamura-Messenger K. et al. (2011) MaPS 46:1033-1051. [5] Komatsu M. et al. (2001) MaPs 36:629-641. [6] Joswiak D. J. et al. (2009) MaPS 44: 1561-1588. [7] Ebel D. and Grossman L. (2000) GCA 64:5339-366. [8] Grossman J. N. and Brearley A. J. (2005) MaPS 40:87-122.

キーワード: 隕石, 炭素質コンドライト, 彗星塵

Keywords: meteorites, carbonaceous chondrites, cometary dust

## Efremovka 隕石中 Fluffy Type A CAI の酸素同位体分布 Oxygen isotopic distribution of Fluffy Type A CAI from Efremovka

川崎 教行<sup>1\*</sup>, 坂本 直哉<sup>2</sup>, 塚本 尚義<sup>3</sup>KAWASAKI, Noriyuki<sup>1\*</sup>, SAKAMOTO, Naoya<sup>2</sup>, YURIMOTO, Hisayoshi<sup>3</sup><sup>1</sup> 北海道大学大学院理学院自然史科学専攻, <sup>2</sup> 北海道大学創成研究機構, <sup>3</sup> 北海道大学理学研究院自然史科学部門<sup>1</sup>Natural History Sci., Hokudai, <sup>2</sup>CRIS, Hokudai, <sup>3</sup>Natural History Sci., Hokudai

太陽系は、ダストが合体成長を繰り返し現在の姿になったと考えられている。微惑星以降はモデル計算により説明されているが、微惑星までの過程は未解明である。未分化な隕石には、太陽系初期のダストが保存されており、特に Fluffy Type A CAI (FTA CAI) というふわふわした外形をもつ難揮発性包有物は、別々に形成した複数のドメインの集合体であり、ガスから直接凝縮したまま溶融していないミクロンサイズの結晶を含んでいると考えられている。また、CAI 形成領域で、<sup>16</sup>O に富むガス環境と乏しいガス環境が存在していたと考えられている (Yurimoto et al. 2008)。本研究では、Efremovka 隕石中の FTA CAI について岩石学的研究と酸素同位体分析を行い、微小なダストの成長過程と形成環境の解明を目的とした。

試料の観察と元素分析は FE-SEM-EDS (JEOL JSM-7000F; Oxford INCA Energy) を用いた。メリライトの結晶方位解析は EBSD システム (HKL Channel 5) で行い、個々のメリライト粒子の結晶境界を決定した。酸素同位体分析は SIMS (Cameca ims-1270) で行った。

本 FTA CAI は、約 1 cm × 4 mm の大きさでふわふわとした外形をもつ。外縁は Wark-Lovering リム (WL リム) に囲まれている。本 CAI は、それぞれが WL リムによって囲まれた約 1 cm のドメイン 1 と約 3 mm のドメイン 2 に分けられた。

ドメイン 1 の WL リムから 40 ミクロンまでの距離のメリライトは、それぞれが逆累帯構造を示した。典型的な化学組成は、結晶中心で ak30、結晶境界で ak15 であった。結晶粒界に沿いファッサイトが見られた。その層よりも CAI 内側に位置するメリライトは、結晶中心部分で逆累帯構造で、その周りから正累帯構造に転じるという同心円状の累帯構造を示した。典型的な化学組成は、結晶中心で ak35、その周りで ak30、結晶境界で ak40 であった。それぞれの累帯構造をもつメリライトは、すべて <sup>16</sup>O に乏しく ( $\delta^{18}\text{O} = 5$  から 10 パーミル) 均一であった。ドメイン 2 の WL リムから 150 ミクロンまでの距離のメリライトは逆累帯構造を示し、結晶中心で ak15、結晶境界で ak5 であった。メリライトは、CAI 内側で <sup>16</sup>O に乏しく ( $\delta^{18}\text{O} = 0$  パーミル)、WL リム付近で <sup>16</sup>O に富む ( $\delta^{18}\text{O} = -40$  パーミル) という変化が見られた。

FTA CAI の逆累帯構造をもつメリライトは、圧力が下がる過程での星雲ガスからの凝縮によって形成したと考えられている (MacPherson and Grossman 1984)。両ドメインの逆累帯構造をもつメリライトも、圧力が下がる過程で星雲ガスから凝縮したと考えられる。ドメイン 1 内側の同心円状の累帯構造をもつメリライトは、凝縮ではより複雑な温度圧力条件の変化が必要であり、部分溶融を受けて、逆累帯構造の周りから正累帯構造の結晶成長が起こり形成した可能性が高い。メリライト粒界のファッサイトは粒界を濡らしたメルトから結晶化したものであると考えられる。ドメイン 1 のメリライトの酸素同位体組成は均一であるため <sup>16</sup>O に乏しい環境下で形成した一方で、ドメイン 2 のメリライトの酸素同位体分布から、メリライト凝縮中に周りのガスは、<sup>16</sup>O に乏しい環境から富む環境へ変化していたと考えられる。

両ドメインの逆累帯構造をもつメリライトは、結晶中心の化学組成がそれぞれ ak30、ak15 であり、ファッサイトとの共融点よりも低い温度で形成したと考えられる。Yoneda and Grossman (1995) の熱力学計算によれば、両ドメインのメリライトの凝縮は温度 1570 K、圧力  $10^{-2}$  atm 以下の環境で起こり、結晶は圧力の減少に伴い成長した。もし結晶成長が等温で起こったとすると両ドメイン間の環境の圧力比は約 1.5 倍から 2 倍である。仮に 1400 K で成長したとすると、ドメイン 1 のメリライトが  $3.2 \times 10^{-4}$  atm から  $2.2 \times 10^{-4}$  atm、ドメイン 2 のメリライトが  $2.2 \times 10^{-4}$  atm から  $9.7 \times 10^{-5}$  atm の圧力降下に伴い凝縮した。一見、両ドメインは連続した圧力変化環境で形成したと思えるかもしれないが、メリライトの酸素同位体比は、両ドメインが異なる星雲ガス環境下で形成したことを示し、その後 1 つの CAI へと集積したと考えられる。

本研究により、CAI 形成領域ではミクロンサイズのダストがガスから直接凝縮し、集積過程において異なる温度圧力条件や酸素同位体環境を経験してミリメートルサイズのドメインに成長し、ドメイン同士がさらに合体しセンチメートルサイズに成長するプロセスがあったことが分かった。

キーワード: Fluffy Type A CAI, メリライト, 累帯構造, ダスト成長, 酸素同位体組成, 原始太陽系星雲

Keywords: Fluffy Type A CAI, melilite, chemical zoning, dust coagulation, oxygen isotopes, solar nebula

## Ningqiang 隕石中の多孔質な Type A CAI の酸素同位体分布 Oxygen isotopic distribution of a porous Type A CAI from Ningqiang chondrite

浜田 怜奈<sup>1\*</sup>, 坂本 直哉<sup>2</sup>, 坂本 尚義<sup>3</sup>HAMADA, Leina<sup>1\*</sup>, SAKAMOTO, Naoya<sup>2</sup>, YURIMOTO, Hisayoshi<sup>3</sup><sup>1</sup> 北海道大学大学院理学院自然史科学専攻, <sup>2</sup> 北海道大学創成研究機構, <sup>3</sup> 北海道大学理学研究院自然史科学部門<sup>1</sup>Natural History Sci., Hokudai, <sup>2</sup>CRIS, Hokudai, <sup>3</sup>Natural History Sci., Hokudai

隕石中の Ca や Al に富む難揮発性包有物 (CAI, Calcium-Aluminum-rich Inclusion) は、最も古い年代を示す岩石であり、質量に依存しない酸素同位体異常を示すことがよく知られている。気相から凝縮したと考えられている細粒 CAI には、しばしばミクロンサイズの穴が見られるが、穴そのものに言及した研究は少ない (Lin and Kimura, 2003; Wasson et al., 2000)。そこで、本研究では Ningqiang 隕石中に発見した多孔質な粗粒 CAI の岩石学的記載と酸素同位体分析を行い、穴の成因を明らかにすることで、CAI 形成過程で生じたイベントを明らかにすることを目的とした。

試料の組織観察と元素分析にはエネルギー分散型 X 線分析装置付き電子顕微鏡 (FESEM-EDS, JEOL JSM-7000F; Oxford INCA Energy) を用いた。結晶方位解析には電子線後方散乱回析 (EBSD, HKL Channel 5) と光学顕微鏡を用いた。酸素同位体分析には二次イオン質量分析計 (SIMS, CAMECA ims-1270) を用いた。

本研究で観察した粗粒 CAI は大きさ約 2 × 2mm で、一部不規則な部分があるがほぼ円形に近い外形を持つ。この CAI の大部分はメリライト、ディオプサイド、スピネル、ペロブスカイトなどの高温鉱物から構成されているが、薄片上で CAI 全体の 30% 近くの面積を小さな穴 (void) が占める多孔質な構造を持つ。CAI の外縁はメリライト-スピネル-アノーサイト-ディオプサイドから成る Work-Lovering rim によって取り囲まれている。全岩組成は Type A CAI に位置し、メリライトの存在度が高いことから、ペロブスカイトの多い Type A CAI に分類された。

本 CAI には細粒 CAI に見られるような 3 ミクロン以下の小さな穴に加え、丸みを帯びた不規則な形状の 10-30 ミクロンサイズの大きな穴が観察された。前者は、5 ミクロン程の小さなメリライト結晶と 2-3 ミクロンのペロブスカイトが集まる 50-100 ミクロンの領域と、Work-Lovering rim のすぐ内側の領域に分布する。後者は、300 ミクロン以上の大きなメリライト単結晶の内部に分布する。

小さな穴がある領域のメリライト結晶は、中心がオケルマナイト成分に富み、外側がゲーレナイト成分に富む逆累帯構造を示した。Type A CAI の逆累帯構造を持つメリライトはガスから凝縮したと考えられており (MacPherson and Grossman, 1984)、この領域のメリライトの酸素同位体比は結晶ごとに異なり、 $\delta^{18}\text{O} = -40$  から 0 パーミルの間の値を持っていた。そのため、小さな穴のある領域のメリライトは溶融を経験していないと考えられる。そして、小さな穴はメリライトやペロブスカイトが凝縮・集積する過程で形成したと考えられる。

大きな穴を内包するメリライト結晶は、穴が分布する領域でゲーレナイト成分に富み (ak2-5)、穴の無い領域はオケルマナイト成分に富んでいた (ak15-24)。それぞれの領域で酸素同位体組成も異なり、穴の無い領域は  $\delta^{18}\text{O} = -20$  から -10 パーミル、穴のある領域は  $\delta^{18}\text{O} = -5$  パーミルであった。また、CAI の一部の領域では、穴の近くにネフェリンが存在していた。ディオプサイドとアノーサイトのリム構造が穴の周囲の壁にできている穴もあった。Ningqiang 隕石には、母天体上で水質変質を受けポーラスになったと考えられている CAI が報告されている (Sugita et al., 2009)。本 CAI の大きな穴が水質変質により形成したとすれば、メリライト結晶のゲーレナイト成分に富む部分から優先的に穴があくか、穴があく過程でメリライトがゲーレナイト成分に富む必要がある。今後化学組成のゾーニングとメリライトの結晶成長の関係を詳しく解析し、大きな穴の成因を考察していきたい。

キーワード: 穴, CAI, 酸素同位体組成, Ningqiang, メリライト

Keywords: void, CAI, oxygen isotopic composition, Ningqiang, melilite

## コンドリュールに見られる棒状カンラン石組織再現のための急冷条件 Rapid cooling of chondrule to reproduce olivine bars observed in barred olivine chondrules

三浦 均<sup>1\*</sup>, 塚本 勝男<sup>1</sup>

MIURA, Hitoshi<sup>1\*</sup>, TSUKAMOTO, Katsuo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大・理

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Materials Science, Tohoku University

Chondrules are millimeter-sized and spherical-shaped crystalline grains consisting mainly of silicate material. Since chondrules occupy about 80 vol.% of chondritic meteorites in abundant cases, they must have great information about the early history of our solar system. They are considered to have formed from molten droplets about 4.6 billion years ago in the solar nebula; it is believed that they melted and cooled again to get solidified in a short period of time. They have various solidification textures that record the solidification process. Barred olivine (BO) chondrules show a unique texture characterized by parallel set(s) of olivine bars in a thin section. BO chondrule usually has an olivine crystal, which is termed as rim, which covers the chondrule surface. This olivine rim has the same crystallographic orientation as inner olivine bars, which connect to the rim. It is considered that the crystallographically continuous structure was formed by morphologic instability during olivine growth, like dendritic crystals. However, initial process of the morphologic instability that produces the olivine bars has not been investigated in details.

We investigated the initial process of formation of BO texture based on numerical simulation of solidification of chondrule melt. The thermodynamically consistent phase-field model for a binary alloy based on the entropy functional is adopted here. We adopted  $Mg_2SiO_4$ - $Fe_2SiO_4$  binary system in which only olivine is considered as a solid phase. We carried out a numerical simulation of a molten olivine droplet solidifying from a platy seed crystal at droplet surface. Under an extremely rapid cooling condition, in which the cooling rate is 5000 K/s, the platy seed crystal overgrew keeping its flat interface at the beginning of solidification, and then changed to cell-like pattern due to morphological instability. The initial stage before the instability can be considered as the formation of olivine rim, and the cell-like pattern as that of olivine bars. In this case, the average width of bars is about 5 micrometer in numerical result, which is comparable to that observed in natural BO chondrules ranging from 5 to 100 micrometer. If we consider that the bar width is proportional to a root of the cooling rate, the required cooling rate to reproduce 100 micrometer thickness is evaluated as  $12.5 \text{ K/s} = 45000 \text{ K/hr}$ , which is much faster than the canonical value of 1000 K/hr inferred from traditional experiments. We also found that the rim and olivine bars showed zoning profile in  $Fe/(Mg+Fe)$  value, which was similar to that of laboratory-synthesized BO chondrules.

Our numerical simulation of solidification of chondrule melt suggested that the cooling rate should be much faster than that inferred from traditional experiments to produce olivine bars of 5 ? 100 micrometer in width such as observed in natural BO chondrules.

キーワード: コンドリュール, 凝固組織, 結晶成長, 累帯構造

Keywords: chondrule, solidification texture, crystal growth, zoning profile

## Allende 隕石粉末を用いた微小隕石加熱過程の再現実験 Artificial micrometeorites from powdered Allende meteorite

権藤 貴明<sup>1\*</sup>, 磯部 博志<sup>1</sup>

GONDO, Takaaki<sup>1\*</sup>, ISOBE, Hiroshi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 熊本大学大学院自然科学研究科理学専攻

<sup>1</sup> 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。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。微小隕石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り、様々な組織が報告されている (e.g. Genge et. al., 2008, Imae et. al., 2011)。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、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  $\mu\text{m}$  程度の粒子について、大気突入の際の加熱・急冷過程の再現を磯部・権藤 (2012) の方法を用いて行った。実験では、Allende 隕石粉末を使用し、加熱実験の前後での試料の変化に焦点を置き観察及び分析を行い、実験前後での試料の対応関係や加熱による変化についての検討を行い、実際に採取された微小隕石との比較も行った。

実験の結果、今までに報告されている微小隕石の特徴と非常に類似した粒子 (急冷組織のデンドライトやカンラン石に富む球状の粒子、多孔質の粒子など) が観察された。また、実験生成物の約 70% の粒子で粒子表面に硫化鉄が偏在しており、これは、珪酸塩メルトと硫化物メルト間の不混和によって、珪酸塩メルトから硫化物メルトが吐き出される現象が起きたためと考えられる。このような、粒子表面に付着した硫化鉄の組織は、微小隕石からは報告されていない。これは実際の微小隕石では、表面の硫化鉄相が大気上層で取り除かれている可能性を示唆している。このことは、微小隕石が、特に高層大気における火山活動以外での硫黄化合物の定常的供給源となっている可能性を示している。その他、粒子全体に棒状の結晶が規則的に発達している粒子や、低い四角錐の結晶が表面に見られる粒子など、特徴的な組織を示す粒子が観察された。これら微小隕石の再現実験結果について紹介すると共に、微小隕石形成過程における熱履歴の影響について議論する。

キーワード: 微小隕石, 加熱 / 急冷実験, Allende 隕石, 大気加熱

Keywords: micrometeorite, heating / quenching experiment, Allende meteorite, atmospheric entry

## 炭素質コンドライト隕石中の D と $^{15}\text{N}$ に富む有機物の関係 Correlations between D and $^{15}\text{N}$ -rich organic matters in a carbonaceous chondrite

橋口 未奈子<sup>1</sup>, 小林 幸雄<sup>2</sup>, 坎本 尚義<sup>1\*</sup>  
HASHIGUCHI, Minako<sup>1</sup>, Kobayashi Sachio<sup>2</sup>, YURIMOTO, Hisayoshi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 北大・院理, <sup>2</sup> 北大・創成

<sup>1</sup>Natural History Sci., Hokkaido Univ., <sup>2</sup>CRIS, Hokkaido Univ.

炭素質コンドライト隕石には D や  $^{15}\text{N}$  に富む有機物が含まれている [1-2]。D や  $^{15}\text{N}$  に富む有機物は、分子雲あるいは原始太陽系円盤の外縁部において生じたと考えられている [1-2] が、D や  $^{15}\text{N}$  の過剰の関係は明らかになっていない。これまでの研究では、炭素質コンドライト中の有機物の D と  $^{15}\text{N}$  の過剰を示す領域は、互いに一致するという報告 [1] がある一方で、互いに一致していないという報告がある [2]。D と  $^{15}\text{N}$  の過剰の関係を明らかにすることは、同位体異常をもつ有機物の成因を明らかにする上で重要である。

本研究では、炭素質コンドライト中の有機物の D および  $^{15}\text{N}$  の過剰のその場分析を試みた。NWA 801 CR2 コンドライト隕石から作成した岩石薄片のマトリックス部に対して、直接同位体イメージングを行うことにより、有機物の D および  $^{15}\text{N}$  それぞれの同位体異常の空間的分布を求めた。著者らによるこれまでの研究により、NWA 801 隕石は多くの D に富む有機物を含むことが明らかになっている [3]。同位体イメージングには、北海道大学の同位体顕微鏡 (Cameca ims-1270 + SCAPS [4]) を用いた。直径約 50 ミクロンの一次  $\text{Cs}^+$  イオンビームを用いて、 $\text{H}^-$  および  $\text{D}^-$ ,  $^{12}\text{C}^-$ ,  $^{12}\text{C}^{14}\text{N}^-$ ,  $^{12}\text{C}^{15}\text{N}^-$  の二次イオンイメージを取得した。分析前と後に  $^{12}\text{C}$  イメージを取得することで、分析中に炭素質物質が消失していないかを評価した。同位体イメージングの後、FE-SEM-EDS (JEOL JSM-7000F, Oxford INCA Energy) を用いて同位体異常をもつ物質の詳細な観察を行った。

NWA 801 CR コンドライト隕石マトリックス 0.2 mm<sup>2</sup> 中から、7 個の D に富むスポットと 6 個の  $^{15}\text{N}$  に富むスポットを発見した。5 個の D に富むスポットおよび 6 個の  $^{15}\text{N}$  に富むスポットからは  $^{12}\text{C}$  が検出された。分析前後に取得した  $^{12}\text{C}^-$  イメージを確認すると、分析中  $^{12}\text{C}$  は消失することなく検出されていた。D と  $^{15}\text{N}$  の過剰を示すスポットは互いに一致していなかった。これらの物質の水素、窒素同位体組成は、それぞれ 2,300-7,900 パーミル、1,100-1,200 パーミルであった。D と  $^{15}\text{N}$  の過剰を示す炭素質物質は似た形状を示し、丸あるいは不規則な形状の炭素質粒子あるいは複数の炭素質粒子によるアグリゲイトであった。

D あるいは  $^{15}\text{N}$  に富み炭素を含むこれらの物質は、分子雲あるいは原始太陽系円盤外縁部で形成した有機物であると考えられる。大きな D および  $^{15}\text{N}$  の過剰は、非常に低温な環境で形成すると考えられている [5, 6]。D および  $^{15}\text{N}$  に富む有機物は、NWA 801 隕石母天体における二次プロセスを逃れた始原的な有機物であると考えられる。D と  $^{15}\text{N}$  の過剰が空間的に一致していなかったことは、D や  $^{15}\text{N}$  の過剰を担うキャリアは互いに異なる、もしくは D や  $^{15}\text{N}$  の過剰の起源は異なることを示唆する。

2 個の D に富む物質からは  $^{12}\text{C}$  は検出されなかった。分析前後における  $^{12}\text{C}^-$  イメージで  $^{12}\text{C}$  が検出されていなかったため、分析中に炭素質物質が消失した可能性は無い。D に富むスポットの水素同位体組成は、それぞれ 3,400 および 3,800 パーミルであった。元素分析により、D に富むスポットから Si および O, Mg, Fe, Al が検出された。先行研究により、Renazzo CR コンドライト隕石の層状ケイ酸塩は D に富むことが示されている [7] ことから、本研究により発見した D に富む物質は層状ケイ酸塩である可能性がある。

### Reference

- [1] Nakamura-Messenger et al (2006) Science, 314 1439-1442.
- [2] Busemann et al. (2007) Science, 312, 727-730.
- [3] Hashiguchi et al. (2011) Workshop on Formation of the First Solids in the Solar System, No. 1639, p.9012
- [4] Yurimoto et al. (2003) Appl. Surf. Sci., 203-204, 793-797.
- [5] Millar et al. (1989) ApJ, 340, 906-919.
- [6] Terzieva and Herbst (2000) Mon. Not. R. Astron. Soc. 317, 563-568.
- [7] Deloule and Robert (1995) GCA, 59, 4695-4706.

キーワード: D と  $^{15}\text{N}$  に富む有機物, 炭素質コンドライト, D と  $^{15}\text{N}$  過剰の関係, 同位体イメージング

Keywords: D and  $^{15}\text{N}$ -rich organic matters, Carbonaceous chondrite, Correlation of D and  $^{15}\text{N}$  enrichment, Isotope imaging

## LL6 普通コンドライト Kilabo 隕石の微小粒子における衝突変成組織の観察 The observation of shock textures in fragments of Kilabo, LL6 ordinary chondrites

八亀 彰吾<sup>1\*</sup>, 上楢 真之<sup>2</sup>, 唐牛 謙<sup>2</sup>, 石橋 之宏<sup>2</sup>, 矢田 達<sup>2</sup>, 岡田 達明<sup>2</sup>, 安部 正真<sup>2</sup>, 藤村 彰夫<sup>2</sup>

YAKAME, Shogo<sup>1\*</sup>, UESUGI, Masayuki<sup>2</sup>, KAROUJI, Yuzuru<sup>2</sup>, ISHIBASHI, Yukihiro<sup>2</sup>, YADA, Toru<sup>2</sup>, OKADA, Tatsuaki<sup>2</sup>, ABE, Masanao<sup>2</sup>, FUJIMURA, Akio<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科, <sup>2</sup> 宇宙航空研究開発機構

<sup>1</sup>University of Tokyo Department of Science, <sup>2</sup>JAXA

2005年、小惑星探査機「はやぶさ」はS型小惑星イトカワに到着した。地上観測及び「はやぶさ」による遠隔探査の結果、イトカワの反射スペクトルのデータは、LもしくはLL普通コンドライトの岩石タイプ5-6の隕石が宇宙風化を受けた場合に得られる反射スペクトルのデータとよく一致することが明らかになった。「はやぶさ」はイトカワ表面のMUSES-Seaと呼ばれる地域より表面物質の試料採集を行い、2010年に地球に帰還した。その後行われた初期分析において、鉱物の存在量、鉱物組成および酸素同位体比などの分析結果から、イトカワ帰還試料がLL4-6の普通コンドライトと多くの類似点を示すことが明らかになった。

しかし初期分析に用いられたイトカワ帰還試料の試料サイズは数十ミクロン程度のものがほとんどであり、大きな問題点となっている。なぜなら、イトカワ表層においてこれらの微小試料がどのような部分からどのような過程を経て微細化したのかを知ることは難しく、この試料からより大きなスケールの鉱物組成や組織へ目を向ける事は困難となっている。一方で地球に飛来する隕石は、月隕石や火星隕石を除いてその母天体は不明であるが、多くの試料が存在し、これまでに種々の手法で研究が行われてきた。しかしこれまでに行われてきた隕石の研究は、ミリメートルからセンチメートルサイズの試料に対するものであり、ミクロンサイズの微小粒子にどのような組織や構造が観察され、どのような特徴が保持されやすいのかを解明するための研究は行われてこなかった。

そのため、ミクロンサイズの隕石試料の詳しい記載と分析を行い、試料の微小領域からより大きなスケールへ目を向け、イトカワ帰還試料の試料サイズ以上のスケールで議論を行っていく事は重要である。またそこから、これまで分析されてきた母天体不明の隕石試料にも新たな知見をもたらす可能性が期待される。

そこで本研究では、LL6普通コンドライトのKilabo隕石を使い、ミクロンサイズの微小粒子中に見られる衝突組織に注目した。衝突組織は普通コンドライト中に一般的に観察され、小惑星表層の衝突現象によって作られると考えられている。小惑星イトカワは初期分析の結果から、母天体小惑星が衝突により砕け、破片の一部が再集積して現在のイトカワになった事や、回収された試料の形状は衝突の影響を受けている事が示唆されている。よって本研究ではミクロンサイズの隕石試料と、より大きなミリメートルサイズの隕石試料中に観察される衝突組織を調べ、両者を比較した。

現在までの比較の結果、カンラン石や長石内に観察される衝撃組織の1つである planar fracture が大きなミリメートルサイズの粒子には面積比にして39%しか観察されなかったのに対し、小さなミクロンサイズの粒子の54%に観察された。一方で、Kilabo隕石には多くの衝撃脈が観察できることが先行研究でわかっており、ミリメートルサイズの粒子には大きな衝撃脈が観察されたが、ミクロンサイズの粒子に溶解組織はほとんど観察できなかった。

今回の結果より、衝突組織には小さな試料中に多く観察される組織とほとんど観察されない組織があることがわかった。イトカワ表層物質は、衝突による角礫化作用を受けていると考えられているため、これらの衝突組織がイトカワ表層物質にも発達し、角礫化作用に影響を与えている可能性が考えられる。また衝突組織によっては特定の鉱物に発達しやすい組織もあり、角礫化作用によって作られたミクロンサイズの粒子は元の岩石の鉱物組成や組織を正しく反映していない可能性も考えられる。

キーワード: 隕石, はやぶさ, イトカワ, 衝突変成, 普通コンドライト

Keywords: Meteorite, Hayabusa, Itokawa, Shock metamorphism, Ordinary Chondrite

## L, LL5-6 普通コンドライト中アパタイト結晶の H<sub>2</sub>O 含有量及び水素同位体組成 H<sub>2</sub>O contents and hydrogen isotopic composition of apatite crystals in L, LL5-6 ordinary chondrites

柳井 佳穂里<sup>1\*</sup>, 伊藤 正一<sup>1</sup>

YANAI, Kaori<sup>1\*</sup>, ITOH, Shoichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学大学院理学院自然史科学専攻

<sup>1</sup>Natural History Sci., Hokudai

### (イントロダクション)

普通コンドライト隕石の岩石学的タイプ 4-6 の違いにより、その隕石を構成している鉱物の化学組成及び岩石学的組織が異なることから、タイプ 4 から 6 に向かって、熱変成の度合いが進んでいることがいわれている。とりわけ、隕石母天体内の流体については、その存在の証拠があるにもかかわらず (Li et al., 2000; Dunn et al., 2010; Jones et al., 2011)、その流体の性質は、ほとんどわかっていない。近年、熱変成時における流体の性質を調べるために、母天体内の流体と反応しながら結晶化したと考えられているリン酸塩鉱物であるアパタイト結晶とメリライト結晶の鉱物学的研究及び H<sub>2</sub>O 含有量について研究が行われるようになってきた (e.g., Jones et al., 2011)。本研究では、L, LL5-6 普通コンドライト隕石中アパタイト結晶の岩石学的研究及び二次イオン質量分析法による H<sub>2</sub>O の定量と局所水素同位体分析を試みた。

### (実験手法)

本研究では、4 種類の L, LL5-6 に分類されている普通コンドライト隕石 (Barwell (L5)、Mocs (L5-6)、Carnegie (L6)、Ensisheim (LL6)) の岩石薄片及び岩石切片を樹脂にマウントし表面研磨した薄片試料を用いた。アパタイト結晶の探索及び定量分析には、北海道大学設置の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、アパタイト結晶の H<sub>2</sub>O 定量及び水素同位体分析には、北海道大学設置の二次イオン質量分析装置 (Cameca ims-1270 SIMS) を用いた。標準試料及び隕石試料は、試料表面の吸着水を低減するために、約 2ヶ月間、超高真空チャンバー内に保持してから分析を行った。標準試料には、Dorango アパタイト結晶 (0.0478wt%) と Linopolis アパタイト結晶 (1.28wt%) を用いて、H/18O 比と水含有量による検量線により、隕石試料のアパタイト結晶の H<sub>2</sub>O 含有量を見積もった。また、San carlos オリビン結晶 (~20ppm) も同時に測定し、アパタイト結晶と比較を行った。水素同位体分析には、Dorango アパタイト結晶 (dDSMOW=-121permil) を用いた。分析誤差は、約 20permil (2sigma) であった。SIMS による詳細な分析条件は、Greenwood et al. (2011) を参照した。

### (結果と議論)

SIMS により見積もられたアパタイト結晶の H<sub>2</sub>O 含有量は、そのクラックや変質部を避けて、Ensisheim (LL6) のアパタイト結晶のみで推定する事に成功した。標準試料のアパタイト結晶の検量線から見積もられた H<sub>2</sub>O 含有量は、35 ppm、18 ppm という値を示した。標準試料に比べて水含有量が一桁低い値を示したため、同時に測定した San carlos オリビン結晶の H/18O 比と比較したところ、どちらも 5 倍程度高い値を示した。今後、より低い水含有量の標準試料 (数 10ppm) を含めて、普通コンドライト隕石に含まれるアパタイト結晶の H<sub>2</sub>O 含有量を推定していく予定である。

Ensisheim 中アパタイト結晶の水素同位体組成は、D-rich である傾向を示した。しかしながら、標準試料である Dorango アパタイト結晶 (478ppm) に比べて Ensisheim 中アパタイト結晶の H<sub>2</sub>O 含有量は、約一桁低い値のため、定量的に見積もることができなかった。今後、このような低い H<sub>2</sub>O 含有量を示すアパタイト結晶の水素同位体組成を推定する手法も含めて議論していく予定である。

キーワード: 普通コンドライト, アパタイト結晶, 結晶水, 水素同位体組成, SIMS

Keywords: ordinary chondrite, apatite crystal, H<sub>2</sub>O, hydrogen isotopic composition, SIMS



## リン酸塩鉱物を用いた D'Orbigny 母天体の水濃度推定：惑星形成過程における水の挙動解明に向けて Water Content of the 4.56Ga D'Orbigny Parent Body Estimated from Phosphate

鈴木 博子<sup>1\*</sup>, 太田 祥宏<sup>2</sup>, 佐野 有司<sup>2</sup>, 飯塚 毅<sup>1</sup>, 三河内 岳<sup>1</sup>, 小澤 一仁<sup>1</sup>, 永原 裕子<sup>1</sup>

SUZUKI, Hiroko<sup>1\*</sup>, OTA, Yoshihiro<sup>2</sup>, SANNO, Yuji<sup>2</sup>, IIZUKA, Tsuyoshi<sup>1</sup>, MIKOUCHI, Takashi<sup>1</sup>, OZAWA, Kazuhito<sup>1</sup>, NAGAHARA, Hiroko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 東京大学大気海洋研究所海洋地球システム研究系

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, University of Tokyo, <sup>2</sup>Division of Ocean and Earth Systems, Atmosphere and Ocean Research Institute, University of Tokyo

惑星の形成過程における水の挙動の理解は、太陽系や惑星の進化、地球の水の起源を考える上で、必要不可欠である。本研究では、太陽系初期(4.56Ga 前後)に形成された微惑星に由来する angrite 隕石 D'Orbigny を用いて、その母天体の水濃度を推定した。水濃度は、NanoSIMS によって隕石のリン酸塩鉱物中の水素濃度を測定し、その結果と鉱物学的観察から予想される D'Orbigny メルトの結晶化過程およびマンツルの融解を考慮することにより推定した。

D'Orbigny は主に plagioclase, clinopyroxene, olivine から構成され、ophitic な組織と空隙や晶洞が多く見られる特徴的な組織を持つ (Kurat et al., 2001; Mittlefehldt et al., 2002)。リン酸塩鉱物の結晶化のタイミングを明らかにするために、EPMA と FE-SEM を用いた微細構造観察と元素マッピングを行った。リン酸塩鉱物は粒間 (Mittlefehldt et al. (2002) が "mesostatis" と呼んだ領域) に出現し、そこに向かって olivine 中の Fe と Ca および clinopyroxene 中の Fe, Al, Ti は極端に濃集し、Mg がほぼ含まれなくなり、olivine と kirschsteinite が intergrowth を形成する。Intergrowth の内側には、骸晶状のリン酸塩鉱物に加え ulvospinel と troilite が存在し、さらに中心にしばしば troilite により囲まれ輪郭が丸みを帯びた空隙が存在する。このような鉱物配置順は、いずれの粒間でも同様である。この微細構造から、リン酸塩鉱物は、troilite と空隙 (丸みを帯びた形状から気泡の痕と考えられる) が形成される前に、結晶化最終ステージの残液から結晶化したことが分かった。

同定されたリン酸塩鉱物のうち、粗粒 (20 μm) な 3 粒について東京大学大気海洋研究所の NanoSIMS によって水素濃度および同位体組成を分析した。その結果、リン酸塩鉱物の水濃度は平均 0.03wt%,  $D/H=2.9 \times 10^{-4}$ ,  $D=840 \pm 10$  ‰であることがわかった。この D/H は彗星と火星隕石の D/H の下限と近いことから、火星を作った微惑星は D'Orbigny 母天体に類似したものであった可能性 (小惑星帯と火星に近いこととも調和的) や、D'Orbigny 母天体の水が彗星起源であった可能性が考えられる。

D'Orbigny の全岩希土類元素 (REE) パターン (CI で規格化したもの) はほぼ水平で、Eu も含めて REE に分別がないこと (Mittlefehldt et al., 2002)、真球に近い 1cm の巨大な空隙 (気泡) が存在すること、ophitic 組織、olivine と clinopyroxene が中心からリン酸塩鉱物を含む粒間に向かって連続的に Fe に濃集することから、D'Orbigny は結晶集積岩ではなく液体がほぼ閉じた系で固結したものと考えられる。リン酸塩鉱物晶出までの結晶化度を粒間部の troilite と空隙の体積から求めたところ、98 体積%と推定された。リン酸塩鉱物の水濃度とこの結晶化度、およびリン酸塩鉱物を apatite と仮定して apatite メルト間の H<sub>2</sub>O の分配係数 (McCubbin et al., 2011) を用いて、D'Orbigny メルト中での水濃度は 0.003~0.011wt% と計算される。真球状空隙と晶洞の存在は D'Orbigny メルトの結晶化開始時にも発泡していたことを示す。この結晶化初期の気泡を仮に 100% H<sub>2</sub>O とし、apatite 晶出時までメルトと常に平衡 (飽和状態) にあると仮定し、気体の状態方程式と真球空隙と晶洞の分率を用いると、気泡となっていた水は、メルトの水濃度に換算して 0.0005~0.0034wt% と推定される。二つの水濃度推定値の合計が D'Orbigny メルト中の含水量となる。D'Orbigny の REE 間には分別が認められないことからマンツルの高い (30~40%) 融解度を仮定し、D'Orbigny 母天体のマンツルの水濃度は 0.001~0.006wt% と推定される。これは地球の水濃度 0.046wt% (地球内部の水量を海水と同量 (Hirschmann, 2006) とした場合) の 3~13% に相当する。本研究から、惑星の成長に寄与した可能性のある微惑星が惑星形成初期に少量ではあるが無視できないほどの水を保持していたことが明らかになった。今後この方法を様々な種類の隕石に適用することにより、惑星の形成過程における水の挙動が明らかにできると期待される。

## Ningqiang 隕石母天体におけるネフェリン形成プロセスの解明：透過型電子顕微鏡・放射光 X 線回折による研究 Na-metasomatism in the Ningqiang carbonaceous chondrite : A TEM and SR-XRD study

松本 恵<sup>1\*</sup>, 瀬戸雄介<sup>1</sup>, 三宅亮<sup>2</sup>, 留岡和重<sup>1</sup>, 杉田光弘<sup>1</sup>

MATSUMOTO, Megumi<sup>1\*</sup>, SETO, Yusuke<sup>1</sup>, MIYAKE, Akira<sup>2</sup>, TOMEOKA, Kazushige<sup>1</sup>, SUGITA, Mitsuhiro<sup>1</sup>

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

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

始原的隕石である炭素質コンドライト中の CAI (難揮発性包有物) は、原始星雲から高温で凝縮した構成物であると考えられている。ところが、この CAI 中に Na に富み低温で凝縮するネフェリン ( $(\text{Na}, \text{K})\text{AlSiO}_4$ ) が含まれている。ネフェリンは二次的に CAI 鉱物を変成し形成したものであると考えられており、このような変成作用は Na 交代変成と呼ばれている。近年の CO コンドライトについての研究 [1,2] から、Na 交代変成の程度は、隕石母天体の熱変成程度と相関があり、Na 交代変成は母天体中での変成過程であることが明らかになってきた。Na 交代変成が母天体中での変成過程であったとすると、その母天体の大部分を構成するマトリックスがこの変成の影響を免れることは難しいと考えられる。しかし、これまでにマトリックスの Na 交代変成について研究された例はない。

Ningqiang 隕石は、全岩の Na 含有量が CV グループのコンドライトに比べて高く [3]、約 6 割の CAI が Na 交代変成を受け、ネフェリンを含んでいることが明らかにされている [4]。また、マトリックス中にもネフェリンが含まれている可能性が示唆されており、Ningqiang 隕石は Na 交代変成過程を明らかにする上で重要な情報を含んでいると考えられる。そこで、本研究では Ningqiang 隕石中のコンドリュールおよびマトリックスについて詳しく観察・分析し、Na 交代変成の痕跡を調べた。

走査型電子顕微鏡および透過型電子顕微鏡による詳細な観察の結果、Ningqiang 隕石のコンドリュールの 9 割以上が (39/41 個) がメソスタシス (斑晶と斑晶の間を埋める物質) 中にネフェリンを含んでおり、Na 交代変成を受けていることが明らかになった。これらのネフェリンは、メソスタシス中の斜長石を交代して形成している。また、ネフェリンと同様にして少量ソーダライトも形成している。多くのコンドリュール中では、斜長石のほとんどがネフェリンおよびソーダライト化していることから、Ningqiang 隕石のコンドリュールの Na 交代変成度は高いと考えられる。

マトリックスについても、放射光 X 線回折実験および高分解能 X 線元素マッピングを行った結果、その 1 割の体積をネフェリンとソーダライトが占めていることが明らかになった。これらのネフェリンとソーダライトはマトリックス中に細粒な ( $<10 \mu\text{m}$ ) 粒子としてほぼ均質に分布している。このような多量のネフェリンとソーダライトがマトリックス中に均質に含まれている隕石はこれまでに報告例がない。Ningqiang 隕石の高い Na 含有量 ( $\sim 3.76 \text{ mg/g}$ ) [3] は、本研究試料のマトリックス体積 ( $\sim 40 \text{ vol.}\%$ ) および上述のネフェリン、ソーダライトが占める割合から求めた Na 成分量 (全岩  $\sim 4 \text{ mg/g}$ ) と良く一致しており、これらの鉱物が Na 元素の主要なホスト鉱物であることが分かった。

Ningqiang 隕石は、CAI とコンドリュールの大部分、マトリックス全体がネフェリンおよびソーダライトを多く含んでいることから、Na 交代変成は Ningqiang 隕石の母天体が集積してから母天体上で大規模に起こった可能性が高い。このことは、Ningqiang 隕石の Na 交代変成プロセスが、CO コンドライト母天体で起きたとされる Na 交代変成のプロセスと非常に似ていることを示している。Na 交代変成は初期太陽系において、多くの隕石母天体上で普遍的に起こっていたと考えられる。

本研究の結果は、Na 交代変成プロセスの痕跡がマトリックスにも顕著に表れることを示している。これまでにコンドリュールや CAI において Na 交代変成の痕跡が報告されてきた隕石について、再度マトリックスに着目し調べることで、Na 交代変成を明らかにする新たな手がかりが得られる可能性は高い。

参考文献: [1] Kojima et al. (1995) *Meteoritics & Planetary Science* 33, 1139-1146. [2] Tomeoka and Itoh (2004) *Meteoritics & Planetary Science* 39, 1359-1373. [3] Rubin et al. (1988) *Meteoritics* 23, 13-23. [4] Sugita et al. (2009) *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences* 104, 296-300.

キーワード: 炭素質コンドライト, ニンチェン隕石, ネフェリン, ナトリウム交代変成, 透過型電子顕微鏡, 放射光 X 線回折  
Keywords: carbonaceous chondrite, Ningqiang, nepheline, Na-metasomatism, TEM, SR-XRD