

結晶内に存在する有機高分子によるバイオミネラル結晶の構造制御 Structural control of biominerals by intracrystalline organic macromolecules

奥村 大河^{1*}, 鈴木 道生², 長澤 寛道², Peter R. Buseck³, 小暮 敏博¹

Taiga Okumura^{1*}, Michio Suzuki², NAGASAWA, Hiromichi², BUSECK, Peter R.³, Toshihiro Kogure¹

¹ 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻, ² 東京大学 大学院農学生命科学研究科 応用生命化学専攻, ³ School of Earth & Space Exploration & Department of Chemistry/Biochemistry, Arizona State University

¹ Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, ² Dept. Applied Biological Chemistry, Grad. Sch. Agricultural and Life Sciences, The Univ. Tokyo, ³ School of Earth & Space Exploration & Department of Chemistry/Biochemistry, Arizona State University

高等生物がつくる骨や歯、貝殻といったバイオミネラルは、無機的に形成された鉱物とは違った微細構造や諸特性を示すものが多い。この要因として、無機結晶内部に含有されている微量な有機画分あるいは有機高分子が様々な影響を与えている可能性が議論されている。しかしながら、有機高分子がどのように無機結晶と相互作用をしてこれらの微細構造や諸特性が発現されているかは、ほとんど明らかにされていない。我々は透過型電子顕微鏡 (TEM) や走査透過電子顕微鏡 (STEM) のコントラストにより結晶内の有機高分子が可視化できることに着目し、この手法によって有機高分子が結晶の微細構造や特性にどのように機能しているかを調べてきた。さらに、バイオミネラルから抽出された有機画分を添加して *in vitro* で形成された結晶を同様に評価し、結晶と有機物の相互作用を解明する研究を進めている。本発表でその成果の一部を紹介することで、有機-無機相互作用の解明を目指す本研究が地球惑星物質科学の他分野にも応用可能かどうか、検討してもらえればと思う。

本研究では、二枚貝の貝殻を構成する稜柱層と呼ばれる構造に着目した。アコヤガイ (*Pinctada fucata*)、タイラギ (*Atrina pectinata*)、イワガキ (*Crassostrea nippona*) という三種類の貝殻を比較することで、それぞれの稜柱層に含まれる有機画分の機能を考察した。これらの貝殻の稜柱層はすべて方解石であり、柱状の結晶の集合体で構成されている。まず熱重量分析 (TG) を用いて結晶内部に含まれる有機画分の量を概算すると、どの試料にもおよそ 3 wt.% 含まれていることが分かった。次に集束イオンビーム試料加工装置 (FIB) を用いて定方位の薄片試料を作製し、TEM で観察した。これらの貝殻の方解石結晶の明視野像において、フォーカス量を大きく変化させると粒状の Fresnel コントラストが結晶中に分散していることが確認できた。この Fresnel コントラストの大きさは十数 nm であり、結晶内の有機高分子に対応する可能性が考えられた。これを確認するために、STEM を用いた電子線エネルギー損失分光分析 (EELS) を粒状の Fresnel コントラストの部分とその周囲で行い、比較した。炭素 (C) の K 吸収端の微細構造に注目すると、Fresnel コントラストから得られたスペクトルだけに有機物由来と考えられるピークが検出された。以上により、この粒状の物質は結晶内有機高分子であると示唆された。さらに STEM により得られる Z-contrast 像の電子線トモグラフィーを使って、結晶内有機高分子の三次元分布を可視化した。すると、アコヤガイやイワガキでは結晶を sub-grain に分けるように有機高分子が分布しているのに対し、タイラギでは一様に分布していた。アコヤガイやイワガキのように有機高分子が偏って分布することにより、結晶に小角粒界や歪みを導入し、その微細構造に影響を与えるのみならず、劈開の抑制のような機械的な性質にも影響を与えていることが示唆された。

また、貝殻から抽出した有機物を添加し *in vitro* で方解石結晶を成長させる実験も行った。その結果、同様に結晶内部に Fresnel コントラストが観察され、EELS によってこれらが有機物であることが確認された。また、アコヤガイの有機物には結晶に欠陥を導入する性質があることが示唆され、天然の貝殻で見られた微細構造がある程度再現された。

キーワード: 結晶内有機高分子, バイオミネラル, 炭酸カルシウム, 有機-無機相互作用, 電子顕微鏡, 微細構造

Keywords: intracrystalline organic macromolecules, biomineral, calcium carbonate, organic-inorganic interaction, electron microscopy, microstructure

超炭素質南極微隕石に記録される有機物-鉱物-氷相互作用：氷質小天体でのごくわずかな水質変成の痕跡

Evidence of minimum aqueous alteration in rock-ice body recorded in ultracarbonaceous micrometeorite

藪田 ひかる^{1*}, 野口 高明², 伊藤 正一³, 辻本 真一², 坂本 直哉³, 橋口 未奈子³, 阿部 憲一³, キルコイン デイビッド⁴, 大久保 彩⁵, 岡崎 隆司⁶, 橘 省吾³, 寺田 健太郎¹, 中村 智樹⁷, 海老原 充⁸, 永原 裕子⁵

Hikaru Yabuta^{1*}, Takaaki Noguchi², Shoichi Itoh³, TSUJIMOTO, Shinichi², Naoya Sakamoto³, Minako Hashiguchi³, ABE, Ken-ichi³, KILCOYNE, David A. L.⁴, OKUBO, Aya⁵, Ryuji Okazaki⁶, Shogo Tachibana³, Kentaro Terada¹, Tomoki Nakamura⁷, Mitsuru Ebihara⁸, Hiroko Nagahara⁵

¹ 大阪大学, ² 茨城大学, ³ 北海道大学, ⁴ パークレー国立研究所, ⁵ 東京大学, ⁶ 九州大学, ⁷ 東北大学, ⁸ 首都大学

¹Osaka University, ²Ibaraki University, ³Hokkaido University, ⁴Advanced Light Source, ⁵Tokyo University, ⁶Kyusyu University,

⁷Tohoku University, ⁸Tokyo Metropolitan University

Introduction:

Ultracarbonaceous micrometeorites (UCMMs) are unique extraterrestrial materials that represent large sizes of high carbon contents [1]. In our recent study of an UCMM D05IB80 collected from near the Dome Fuji Station, Antarctica [2], it has been revealed that: (i) ten-micron-sized large organic material accounted for most part of the sample, (ii) the organic material was extremely rich in nitrogen functional groups such as nitrile, imine, and amide, (iii) sulfur is identified within the organic material surrounded by pyrrhotite rim, and (iv) there was no anomalies in hydrogen, carbon and nitrogen isotopic compositions. These features have not been observed from typical chondritic organic material, while they are partially similar to those from CR3 chondrite [3] and some particles from Comet Wild 2 [4]. In order to enhance our understanding of the origin and formation of UCMMs, we have carried out TEM observation of the focused ion beam (FIB) section of D05IB80.

Experimental:

Bulk mineralogy of an UCMM D05IB80 was investigated by using synchrotron radiation X-ray diffraction (SR-XRD) at the Photon Factory. D05IB80 was embedded in epoxy and ultramicrotomed into 70-nm-thick sections. After ultramicrotomy, the potted butt of the micrometeorite was analyzed by a Hokudai isotope microscope system at Hokkaido University. A thin section was prepared by the dual beam FIB-SEM JEOL JIB-4501 at Ibaraki University. Carbon-, Nitrogen-, and Oxygen-X-ray absorption near edge structure (XANES) spectra of the FIB section were acquired using a scanning transmission x-ray microscope (STXM) at the beamline 5.3.2.2., Advanced Light Source, Lawrence Berkeley National Laboratory. After STXM, the FIB section was observed by JEOL JEM-2100F field emission TEM at JEOL Corporation and by JEOL JEM-2100 at Ibaraki University.

Results and discussion:

Elemental mapping analysis and high resolution observation of the boundaries between the UCMM and the epoxy were performed. There are two types of boundaries between them, one is smooth and another is globular. Although morphologies are considerably different between these boundaries, high-resolution images revealed that there are very thin (< 5 nm) layers composed of less electron transparent material than carbonaceous material at the surfaces of both boundaries. Both of the surface areas containing less electron transparent material are enriched in C, O, Si, S, and Fe.

Minor crystalline phases identified are olivine and Ni-bearing pyrrhotite. Olivine occurs as a polycrystalline ag-gregate. On the other hand, Ni-bearing pyrrhotite occurs as fine-grained subhedral to rounded crystals embedded in amorphous silicate. The size and morphology of the amorphous silicate object containing Ni-bearing pyrrhotite are similar to GEMS (glass with embedded metal and sulfide) that are commonly observed in chondritic porous inter-planetary dust particles (CP IDPs) (e.g., [5]). However, no Fe-Ni alloy was identified from these GEMS-like objects. Observation of Ni-bearing pyrrhotite and GEMS-like objects without metals implies that the UCMM are very slightly aqueously altered. This condition could have been locally occurred at the early formation stage of the rock-ice bodies including comets and icy asteroids. The repetitive warming process of ice might have promoted the formation of ten micron-sized large, nitrogen-rich organic material observed from D05IB80. Association of organic material and sulfur supports the presence of fluid chemistry on the parent body. These features appear to be a very pristine signature of interaction of mineral, ice, and organics in the primitive small body.

References:

[1] Nakamura et al. (2005) MAPS 40, A110. [2] Yabuta et al. (2012) LPSXXXXIII, Abstract 2239. [3] Peeters et al. (2012) LPSXXXXIII, Abstract 2612. [4] De Gregorio et al. (2010) GCA, 74, 4454. [5] Bradley and Dai (2004) Ap. J. 617, 650. [6] Dworkin et al. (2001) PNAS 98, 815.

キーワード: 超炭素質南極微隕石, 有機物, 有機物-鉱物-氷相互作用, 氷質小天体, 水質変成, 走査型透過電子顕微鏡

Japan Geoscience Union Meeting 2013

(May 19-24 2013 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2013. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



PPS24-02

会場:106

時間:5月23日 11:15-11:30

Keywords: ultracarbonaceous antarctic micrometeorite, organic compounds, organics-minerals-ice interaction, rock-ice body, aqueous alteration, STEM

炭素質コンドライトの大きな同位体異常をもつ隕石有機物の水素・窒素同位体組成と産状

Isotopic compositions and morphology of isotopically anomalous organic matters in carbonaceous chondrites

橋口 未奈子^{1*}, 小林 幸雄², 坂本 尚義¹
Minako Hashiguchi^{1*}, Sachio Kobayashi², Hisayoshi Yurimoto¹

¹ 北海道大学大学院理学研究院自然史科学部門, ² 北海道大学創成研究機構

¹Natural History Sci., Hokkaido Univ., ²CRIS, Hokkaido Univ.

[はじめに] 炭素質コンドライト隕石には、D や ¹⁵N に富む有機物が含まれている (Busemann et al., 2006; Nakamura-Messenger et al., 2006 など)。D や ¹⁵N の過剰をもつことから、このような有機物は分子雲や初期太陽系円盤外縁部において生じたと考えられているが、その起源や進化過程は議論の最中である。隕石から分離した不溶性有機物 (IOM) は、不均質な水素・窒素同位体組成を示す (Busemann et al., 2006) ことから、隕石有機物の起源や進化過程は多様であったと考えられる。そのため、個々の隕石有機物の特徴を明らかにしていくことが重要である。また、同位体異常をもつ有機物は、多様な産状をしていることが報告されており (Hashiguchi et al., 2011)、産状の違いは有機物の形成や進化過程を反映している可能性がある。

CM, CR コンドライト隕石は、有機物を多く含む隕石である (Alexander et al., 2007)。また、水質変質を経験しているため (Brearley, 2006)、隕石母天体上の有機物の進化過程が記録されている可能性がある。本研究では、CM, CR コンドライト隕石の大きな同位体異常をもつ有機物の水素・窒素同位体組成、産状を明らかにし、その起源や進化過程に制約を与えることを目的とした。

[実験手法] 試料は NWA 801 (CR2) 隕石と、Murchison (CM2) 隕石の研磨薄片である。同位体比分析には、北海道大学の同位体顕微鏡 (Cameca ims-1270 + SCAPS) (Yurimoto et al., 2003) による同位体イメージングを用いた。有機物の産状観察には FE-SEM-EDS を用いた。

[結果] NWA 801 隕石マトリックス部約 0.08 mm²、Murchison 隕石マトリックス部 0.04 mm² から、D あるいは ¹⁵N に富み、水素と窒素を含む炭素質スポットを合計 28 個見いだした。D の過剰は最大で 7,920 パーミル、¹⁵N の過剰は最大で 2,620 パーミルであり、その幅は CR2 コンドライト隕石および Murchison 隕石の不溶性有機物中のホットスポットの値 (Busemann et al., 2006) と同等であった。同位体組成と元素組成から、これらの大きな D や ¹⁵N の過剰を持つ物質は隕石有機物に対応すると考えられる。

大きな同位体異常を持つ隕石有機物において D の過剰と ¹⁵N の過剰の程度の相関性は強くなく、片方だけの大きい過剰を示す有機物が大部分であった。また、Murchison 隕石には、NWA 801 隕石よりも D に富む有機物の割合が少なかった。産状観察の結果、D や ¹⁵N に富む有機物は、単独で存在する粒子または複数の粒子によるアグリゲイトであった。Murchison 隕石と NWA 801 隕石のどちらにおいても、有機物の産状の違いと D や ¹⁵N の過剰の大きさの違いには関連が見られなかった。

[議論] 同位体的特徴から、大きな H と N の同位体異常を示す物質は、分子雲や初期太陽系円盤外縁部において、イオン分子反応 (Millar et al., 1989; Rodgers and Charnley 2008 など) や塵表面反応 (Watanabe and Kouchi, 2008)、自己遮蔽効果 (Le Petit et al., 2002; Lyons et al., 2009 など) による多様な同位体分別効果によって生じた同位体過剰を引き継いで形成した有機物であると考えられる。

Murchison 隕石には、NWA 801 隕石に比べて大きく D 過剰を示す有機物が少ないという結果は、隕石母天体上の二次的な変化を反映していると考えられる。CM2 コンドライト隕石は CR2 コンドライト隕石よりも水質変質の程度が大きいと考えられている (Brearley, 2006)。また、太陽系の水は隕石有機物のような大きな D の過剰を示さない (Robert, 2006) ことから、Murchison 隕石の有機物の D の過剰は、水質変質時の水との同位体交換反応で小さくなった可能性がある。

本研究において、有機物の同位体組成は水質変質の影響を受けていることが示唆されたが、有機物の産状の違いと水素・窒素同位体組成に関連は見られなかった。我々の先行研究では、NWA 801 隕石の、大きく D 過剰を示す有機物粒子において、産状の違いと D の過剰の大きさに関連がないことを示している (Hashiguchi et al., 2011)。これらの結果は、隕石母天体への集積前に、既に多様な形状や多様な同位体組成をもつ有機物が形成していた事を反映していると考えられる。

キーワード: 隕石有機物, 炭素質コンドライト, 同位体組成, 産状, 同位体イメージング

Keywords: Chondritic organic matters, Carbonaceous chondrites, Isotopic composition, Morphology, Isotope imaging

隕石中の炭素質ゼノリスクリラストの有機物分析 Characterization of Carbonaceous Xenolithic Clasts in Meteorites

癸生川 陽子^{1*}, Zolensky Michael², Kilcoyne David³, Rahman Zia⁴, Cody George¹
Yoko Kebukawa^{1*}, Michael Zolensky², A. L. David Kilcoyne³, Zia Rahman⁴, George D. Cody¹

¹カーネギー研究所, ²NASA Johnson Space Center, ³Advanced Light Source, Lawrence Berkeley National Laboratory, ⁴Jacobs-Sverdrup

¹Carnegie Institution of Washington, ²NASA Johnson Space Center, ³Advanced Light Source, Lawrence Berkeley National Laboratory, ⁴Jacobs-Sverdrup

Primitive xenolithic clasts are found in many regolith-bearing meteorites [1]. They are most commonly similar to type 1-2 carbonaceous chondrites, but significant differences usually exist. Here we report organic analyses of these carbonaceous clasts in Sharps (H3.4), Zag (H5) and Kapoeta (Howardite) using C-, N-, and O- X-ray absorption near edge structure (XANES), and Fourier transform infrared micro-spectroscopy (microFTIR), with mineralogical observations using a transmission electron microscope (TEM).

Approximately 100 nm-thick sections were extracted with a focused ion beam (FIB) at JSC from the carbonaceous clasts. The sections were analyzed using the micro FTIR, and 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. After XANES analysis, some of the sections were observed by TEM.

C-XANES and FTIR spectra of clasts in Zag and Kapoeta show a mostly aromatic nature with minor aliphatic signatures. The carbonyl features obtained by C-XANES might have been caused by the focused ion beam (FIB) used in sample preparation. C-XANES spectra of clasts in Zag and Kapoeta do not show significant 1s- π^* exciton features, suggesting that these clasts have not experienced high temperature, probably <200°C [2], although their parent meteorites have been subjected to strong thermal processing.

The clasts in Sharps have distinctive features from those in Zag and Kapoeta. Sharps (H3.4) meteorite contains unusual large carbonaceous clasts up to ~1 cm in diameter, which have been reported earlier as poorly graphitized carbon with Fe,Ni metal [3]. C-XANES spectra show two types of carbonaceous material in the Sharps clasts: (1) aggregates of graphite-like carbon, and (2) poorly graphitized carbon with O-bearing functional groups. Graphite-like carbon aggregates show significant 1s- π^* exciton features which indicate they have been subjected to high temperatures (~700-1000°C) [2]. TEM observation indicates these aggregates are poorly-crystallized graphite with lattice fringes of 3.5-3.75 Å. The other type of carbonaceous material is distributed throughout the clast. C-XANES of these areas shows carbonyl groups as well as aromatic C=C with a small amount of aliphatic C-H. Lower 1s- π^* exciton intensities observed in the matrix area indicate that this phase did not experience heating temperatures as high as the graphite-like carbon. TEM observation of this area reveals mainly pyroxene and olivine, the former as laths as in anhydrous chondritic interplanetary dust particles (IDPs) [4].

These primitive xenolithic clasts in Sharps, Zag and Kapoeta have organic features that are distinct from their parent meteorites and preserve their history from before final accretion on single parent bodies. However, they may also have been affected by secondary processes on their parent bodies. In addition, clasts in Sharps contain graphite-like carbon which experienced higher temperatures compared to their surrounding materials. The origin of the graphite-like carbon is probably different from its surrounding material, which indicates a very complex history. Our results from these clasts support the idea of radial mixing in the early Solar System.

References: [1] Zolensky M. Z. et al. 2009. 40th Lunar & Planetary Science Conference, Abstract #2162. [2] Cody G. D. et al. 2008. Earth and Planetary Science Letters 272: 446-455. [3] Brearley A. J. 1990. Geochimica et Cosmochimica Acta 54: 831-850. [4] Zolensky M. E. et al. 1990. Cosmic dust catalog 11. NASA Johnson Space Center/Planetary Science Branch Publication 83: 170.

地球と小惑星の水素・窒素・酸素の同位体組成類似性の起源：水の起源 Origin of H, N and O isotopic correlations between Earth and asteroids: Origin of water

垓本 尚義^{1*}

Hisayoshi Yurimoto^{1*}

¹ 北海道大学理学研究院

¹ Natural History Sciences, Hokkaido University

水素同位体の同一性の観点から、地球の水は地球に集積した小惑星によりもたらされたという説が学界では主力である。しかしながら、なぜ、小惑星の水の水素同位体比を決定した原因についての考察は収束していない。この問題を収束させるためには直接比較できるパラメーターを追加する事が必要であり、ここでは水素、窒素、酸素の同位体組成を同時に考えることにより地球の水の起源を考える。

内惑星と小惑星の酸素同位体比は地球とほぼ同じ値を持っている (Yurimoto et al, 2008)。窒素同位体組成においても同様と思われる (Marty et al, 2011; Alexander et al, 2012)。水素同位体比は内惑星間において非常に大きな変動を示すが、火星と金星の重水素濃縮はどちらも惑星大気形成後現在までの大気散逸の結果だと考えられており、元々は地球と同じ値を持っていたと考えられている。いくつかの小惑星についても大きな重水素濃縮が見られるが、それらを除くと小惑星も地球とほぼ同じ水素同位体組成を持っていたと考えてよい (Marty et al, 2011; Alexander et al, 2012)。以上の結果は小惑星を含む内惑星はこれらの3つの元素において元々同じ同位体組成を持っていたと考えて良いことを示唆する。筆者は太陽系全体におけるこれらの元素の同位体組成の変動が太陽系の氷成分を考えることにより統一的に説明できる事を示した (本大会)。同様のバックグラウンドを適用することにより内惑星領域のこれらの元素の同位体均質性の起源を説明する。その結果によると、内惑星のこれらの同位体比は内惑星領域において原始太陽系星雲ガスから凝縮した氷と外惑星領域に存在した氷が惑星形成のための集積により適当な割合でミキシングした事を示唆する。

このような過程が惑星系世紀に存在した事は、最近分析された小惑星上の液体の水の酸素と水素の同位体組成により実証された。これらの結果は、将来の惑星探査による小惑星、彗星、氷衛星の低温凝縮成分を含む固体 (氷) の分析が重要であり、地球の水の起源の特定の鍵となる情報を与える事が明らかになった。

キーワード: 小惑星, 地球, 同位体, 水

Keywords: asteroid, Earth, isotope, water, H₂O

エフレモフカ隕石 Type A Ca-Al-rich inclusion のメリライトの酸素同位体と化学組成 ゾーニング

Oxygen isotopic and chemical zoning of melilite crystals in a Type A Ca-Al-rich inclusion of Efremovka CV3 chondrite

川崎 教行^{1*}, 坂本 直哉², 垠本 尚義³

Noriyuki Kawasaki^{1*}, Naoya Sakamoto², Hisayoshi Yurimoto³

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

コンドライト隕石に含まれる難揮発性包有物 CAI (Ca-Al-rich inclusion) は、高温鉱物の集合体であり (Grossman, 1972), 初期太陽系星雲の最内縁部で形成したとされている (MacPherson et al., 2005; Yurimoto et al., 2008)。CAI の鉱物間、鉱物内の酸素同位体分布から、CAI 形成領域である初期太陽系星雲の最内縁部では、 ^{16}O に富むガスと ^{16}O に乏しいガスの混合が起こっていたことが示唆されている (e.g. Itoh and Yurimoto, 2003; Yurimoto et al., 2008)。

Fluffy Type A CAI に含まれる逆累帯構造の化学組成ゾーニングをもつメリライト結晶は、初期太陽系星雲ガスからの凝縮物であると考えられており (MacPherson and Grossman, 1984), ガスの酸素同位体組成を保存していることが期待される。本研究では、エフレモフカ隕石の Type A CAI, HKE 01 のメリライトの酸素同位体と化学組成を分析し、その形成過程と、初期太陽系星雲の Type A CAI 形成領域のガスの酸素同位体組成を明らかにした。

試料の観察と元素分析は FE-SEM-EDS (JEOL JSM-7000F; Oxford INCA Energy) を用いて行った。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。

HKE 01 は、それぞれコア・マントル構造から成る二つのドメインで構成されていた。逆累帯構造の化学組成ゾーニングをもつメリライトが両ドメインのマントル部で見られた。一つのドメインのメリライトは、CCAM (carbonaceous chondrite anhydrous mineral) ライン上で $\delta^{18}\text{O} = 5\text{-}10$ パーミルと ^{16}O に乏しい均一な酸素同位体組成を示した。これは、このドメインのメリライトが ^{16}O に乏しい単一のリザーバー下で形成したことを示唆する。一方で、もう一つのドメインのメリライトの酸素同位体組成は、CCAM ライン上で ^{16}O に乏しい組成から ^{16}O に富む組成まで連続的に分布していた。また、酸素同位体組成はドメイン内部から外縁に向かうにつれ、 ^{16}O に富んでいく傾向を示したため、 ^{16}O に乏しい組成から ^{16}O に富む組成へと酸素同位体組成が変化するリザーバー下で形成したと考えられる。逆累帯構造の化学組成ゾーニングをもつメリライト結晶は、圧力が下がる過程で凝縮し形成したと考えられているため (MacPherson and Grossman, 1984), 本研究の結果から、ガスが ^{16}O に乏しい組成から ^{16}O に富む組成へと変化するときに、ガスの圧力も減少していたことが示唆される。この環境の変化は、太陽系星雲の最内縁部では ^{16}O に富む太陽ガスと ^{16}O に乏しい星雲ガスが混ざり合っていると考えられている (Yurimoto et al., 2008) ので、その交じりあう前線領域 (Itoh and Yurimoto, 2003) か領域をまたぐ動径方向のドメイン輸送 (Ciesla, 2007) の途中に対応すると考えられる。二つのドメインはそれぞれの形成後に合体し、HKE 01 を形成した。

キーワード: Type A CAI, メリライト, SIMS, 酸素同位体, 初期太陽系星雲

Keywords: Type A CAI, melilite, SIMS, oxygen isotopes, solar nebula

二次イオン質量分析計を用いた FUN ヒボナイト包有物に関する同位体的研究 An ion microprobe study of FUN-like hibonite-bearing inclusions from the Murchison (CM2) meteorite

福田 航平^{1*}, 比屋根 肇¹, 佐々木 翔吾¹, 藤谷 渉², 高畑 直人³, 佐野 有司³, 森下 祐一⁴
Kohei Fukuda^{1*}, Hajime Hiyagon¹, Shogo Sasaki¹, Wataru Fujiya², Naoto Takahata³, Yuji Sano³, Yuichi Morishita⁴

¹ 東京大学 大学院理学系研究科, ² マックスプランク研究所, ³ 東京大学 大気海洋研究所, ⁴ 産業技術総合研究所 地質情報研究部門

¹ Graduate School of Science, The Univ. of Tokyo, ² Max Planck Institute for Chemistry, ³ AORI, The Univ. of Tokyo, ⁴ Geological Survey of Japan, AIST

難揮発性包有物の中には FUN 包有物と呼ばれるマイナーなグループが存在し、それらは3つの同位体的特徴(1. O, Mg, Si などにおいて重い同位体に富んだ質量依存同位体分別を示す 2. 安定同位体(特に ^{48}Ca , ^{50}Ti) に起源の不明な同位体異常を持つ 3. ^{26}Al 壊変起源である ^{26}Mg の過剰が見られない)を示すことから、一般的な CAI とは区別される。 ^{26}Mg の過剰が見られないことから、FUN 包有物の形成時期は ^{26}Al が完全に壊変した後かもしくは ^{26}Al が太陽系に持ち込まれる以前であったことが考えられるが、 ^{48}Ca や ^{50}Ti に同位体異常がみられる事実はそれらが太陽系最初期に形成された可能性を示唆する。FUN 包有物の起源は未だ詳しく理解されておらず、これらの形成プロセスを理解することは、太陽系における物質進化や同位体均一化のプロセスを考察する上で非常に重要である。

マーチソン隕石から分離したヒボナイト包有物に対して二次イオン質量分析計を用いた Mg 同位体分析を行った結果、大きな質量依存同位体分別 ($<50\text{‰amu}$) と初生 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比が誤差の範囲でゼロを示す3つの FUN らしき包有物 (MC037, 040, 003) を発見した。本研究では、これら3つの包有物と FUN 包有物との関連を調べるため、二次イオン質量分析計 NanoSIMS 50 および ims-1270 を用いた Mg, Ca, Ti 同位体分析を行った。

Mg 同位体分析の結果、MC040 と MC003 は比較的均一な質量依存同位体分別(それぞれ $^{26}\text{Mg}=97\sim107\text{‰}$, $29\sim35\text{‰}$)を示したのに対し、MC037 は粒子ごとに大きくばらついた分別度合いを示した($^{26}\text{Mg}=27\sim95\text{‰}$)。おそらく、MC037 に含まれるヒボナイトやスピネルは蒸発イベント継続中の様々な段階で晶出したが、MC040, 003 に関しては蒸発イベントの最終段階に結晶化したことが示唆され、それぞれの包有物は異なる加熱イベントを経験したと考えられる。また、Ca, Ti 同位体測定の結果、MC037, 040 に関しては ^{48}Ca に誤差を超えた同位体異常は検出されなかったが、 ^{50}Ti に小さな同位体異常 ($<10\text{‰}$) が検出された。MC003 においては、 ^{48}Ca , ^{50}Ti ともに同位体異常が確認された。

大きな Mg 同位体分別や、初生 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比が誤差の範囲でゼロを示すこと、さらには ^{48}Ca や ^{50}Ti に異常が確認されたことから、これら3つのヒボナイト包有物は新しい FUN 包有物であることが示唆される。以上の結果や先行研究の結果を踏まえると、これらの要素(質量依存分別、 ^{26}Al の量、安定同位体異常の度合い)には包有物ごとに大きなバリエーションがあることが見えて来た。これらの包有物の相互関係や形成環境に関する知見を得るために、ヒボナイト包有物に対して今後さらなる SIMS 分析を行って行く予定である。

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, カルシウム同位体, チタン同位体
Keywords: FUN inclusion, hibonite, ion microprobe, Mg isotope, Ca isotope, Ti isotope

LIME カンラン石からみる炭素質コンドライトの变成履歴

Low-iron, manganese-enriched olivine in amoeboid olivine aggregates in carbonaceous chondrites.

小松 睦美^{1*}, Fagan Timothy², 三河内 岳³

Mutsumi Komatsu^{1*}, Timothy Fagan², Takashi Mikouchi³

¹ 早稲田大学高等研究所, ² 早稲田大学教育学部地球科学教室, ³ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

¹Waseda Institute for Advanced Study, Waseda University, ²Department of Earth Sciences, Waseda University, ³Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, University of Tokyo

Introduction:

Low-iron, manganese-enriched (LIME) silicates (olivine and pyroxene) are important components found in some primitive materials formed in the early solar system. This type of silicate has wt % MnO/FeO >0.1, and usually <1.0 wt.% FeO, and is interpreted as a condensate that preserves the redox state of solar nebula gas [1]. LIME silicates were originally identified in IDPs and matrix in primitive chondrites [2], and subsequently found in chondrules in primitive chondrites [3], and in cometary particles from the Stardust samples [e.g., 4].

LIME olivine has been also described in amoeboid olivine aggregates (AOAs) from CR chondrites [5], and Y-81020 and Acfer 094 [6]. In this study, we have studied seven carbonaceous chondrites (Efremovka, Leoville, Vigarano, Y-86009, Allende, Y-81020, NWA 1152) with variable degree of alteration in order to examine the relationship between Mn content in olivines and their formation and alteration conditions.

Results and Discussion:

Low-Fe, Mn-rich olivine is observed in AOAs from Y-81020 (CO3.0) and Y-86009 (CVoxB). In the NWA 1152 (ungrouped C) AOAs, most olivines are forsteritic (Fo92-99), and several olivine analyses show enrichments in MnO (up to 0.4wt.%) and MnO/FeO ratio up to 0.7. Although the MnO/FeO ratio of Mn-rich olivine in NWA 1152 AOAs is not as high as in LIME olivine, it is likely that the formation of Mn-rich olivine is related to LIME olivine. Thermodynamic models show that LIME-like olivine in AOAs can form by gas-solid reactions as temperature declines to near 1100 K [e.g., 1]. The model of Ebel et al. [1] indicates that Mn-rich, Fe-poor olivine forms under relatively low oxygen fugacities (solar composition, no dust enrichment). Based on our observations, when the Mn-rich olivine is present in AOAs, it generally occurs at the edges of the inclusion. This is consistent with the condensation calculation that predicts Mn-enrichment with decreasing temperature [1].

The CV chondrites are subdivided into the reduced (CVred) and two oxidized subgroups. The CVoxB (e.g., Kaba, Bali) experienced hydrous alteration that resulted in formation of phyllosilicates, magnetite, fayalite, andradite, and salite-hedenbergite pyroxenes [7]. On the other hand, the CVoxA (e.g., Allende) experienced alteration under different conditions resulting in formation of nepheline, sodalite, andradite, salite-hedenbergite pyroxenes, fayalitic olivine, and zoning toward Fe-rich rims (Fo55) in primary olivines (Fo98). Compared to the oxidized subgroups, secondary minerals are rare in CVred.

Mn-rich olivine is observed in Y-86009 (CVoxB), however, it is not observed in reduced CV chondrites and Allende. Thermal alteration occurred in both reduced CVs (to a minor extent) and Allende (to a higher degree). The absence of Mn-rich olivine in the two types of meteorites may indicate the loss of Mn from olivine during the thermal alteration. Because Fe is introduced to AOA olivines during thermal alteration [e.g., 8], loss of Mn from olivine would occur with the Fe-enrichment in olivines.

It has been also shown that the rimmed AOAs which experienced annealing after aggregation tend to have lower Mn contents [6]. This is consistent with our prediction that Mn was lost by heating. It is likely that Mn-rich olivine was originally present in many AOAs as a primary phase, and then lost during the thermal processing. Therefore, Mn-rich olivine in AOAs can be a sensitive indicator for the thermal processes such as annealing in the solar nebula [1] and parent body thermal alteration.

[1] Ebel D. S. et al., 2012. MaPS 47:585-593.

[2] Klock W. et al., 1989. Nature 339: 126-128.

[3] Ichikawa and Ikeda, 1995. Proc. NIPR symp. 8:63-78.

[4] Zolensky M. E. et al. 2006. Science 314: 1735-1753.

[5] Weisberg M. K. and Connolly Jr. H. C. 2008. Lunar Planet. Sci. Conf. 37, #1981.

[6] Sugiura N. et al. 2009. MaPS 44:559-572.

[7] Krot A. N. et al., 1998. MaPS 33:623-645.

[8] Chizmadia L. et al., 2002. MaPS 37:1781-1796.

Japan Geoscience Union Meeting 2013

(May 19-24 2013 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2013. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



PPS24-08

会場:106

時間:5月23日 14:15-14:30

キーワード: 隕石, 炭素質コンドライト, 2次変成, AOA

Keywords: meteorites, carbonaceous chondrites, secondary alteration, AOA

Ningqiang 隕石中のコンドリュール・CAIのNa交代変成プロセスの解明 Sodium metasomatism of chondrules and Ca-Al-rich inclusions in the Ningqiang carbonaceous chondrite

松本 恵^{1*}, 留岡 和重¹, 瀬戸 雄介¹, 三宅 亮², 浜根 大輔³

Megumi Matsumoto^{1*}, Kazushige Tomeoka¹, Yusuke Seto¹, Akira Miyake², Daisuke Hamane³

¹ 神戸大・院理, ² 京都大・院理, ³ 東京大・物性研

¹Kobe Univ. Sci., ²Kyoto Univ. Sci., ³Univ. Tokyo, ISSP

初期太陽系の氷微惑星において、揮発性・水溶性の高い元素は流体の活動に伴って活発に挙動し、微惑星上の様々な化学的变化に関与したと考えられる。CV, CO隕石中のCAI・コンドリュールは、ネフェリンやソーダライトなどのNaに富む鉱物を様々な量含んでいる。これらのNaに富む鉱物は、CAIやコンドリュール中に含まれる初生の斜長石やガラス、メリライトを交代して二次的に形成しており、このような変成作用はNa交代変成と呼ばれる。近年のCOコンドライトの研究から、Na交代変成は、隕石母天体の熱変成度と正の相関関係を示すことが明らかになり、隕石母天体におけるNaに富む熱水と初生鉱物との反応過程であった可能性が高いと考えられている。Ningqiang隕石は他のコンドライト隕石と異なり、マトリックス中に豊富にネフェリンとソーダライトを含んでいる。また、コンドリュールとCAI中にもネフェリンとソーダライトを含んでいるが、その量や特徴は明らかにされていない。本研究では、Ningqiang隕石中のCAI、コンドリュールのNa交代変成に注目し、それぞれに含まれるネフェリンとソーダライトの成因を調べた。

SEM, TEM, STEM観察から、CAIとコンドリュールは強いNa交代変成を受けていることが分かった。97% (66/68個) のコンドリュールはメソスタシスを含んでいるが、コンドリュールに対して占める体積 (5.4 vol. %) はCV, CO隕石に比べて非常に小さい。メソスタシス中の斜長石の一部は、ネフェリンやソーダライト、Feに富むカンラン石、ヘデンバージャイトによって交代されている。このような変成は、コンドリュールの縁から中心に向かって進行しており、比較的大きい (> 1 mm) コンドリュールの中心部分にのみ、斜長石は残っている。比較的小さい (< 1 mm) コンドリュール中には斜長石は含まれておらず、メソスタシスは細粒 (~ 10 μm) なネフェリン、ソーダライト、ディオプサイド、Feに富むカンラン石、ヘデンバージャイトで構成されている。これらのことは、メソスタシス中の斜長石やガラスが全て二次的な鉱物に置き換わる強いNa交代変成が起こったことを示唆している。

CAIはNingqiang隕石中に少量 (1 vol. %) しか含まれておらず、同様に顕著なNa交代変成の痕跡を示す。TEM, STEM観察から、マトリックスと接する部分でCAI中のメリライトを交代して、ネフェリンやソーダライト、トロイライト、Feに富むカンラン石・スピネルが形成していることがわかった。ネフェリンとFeに富むカンラン石中には、しばしばメリライトの微粒子 (< 100 nm) が観察された。このような変成は、CAIの縁部分で顕著である。

本研究の結果から、コンドリュール・CAI中でNaに富む鉱物 (ネフェリン、ソーダライト) とFeに富む鉱物 (Feに富むカンラン石、輝石、スピネル) が二次的な変成作用により、同時に形成していることが示された。これらの二次的な鉱物は、Ningqiang隕石のマトリックス中にも含まれている。これらのマトリックス中の鉱物は、Na交代変成を受けたコンドリュールやCAIから供給された可能性がある。

キーワード: Ningqiang, nepheline, Na-metasomatism, chondrule, CAI, TEM

Keywords: Ningqiang, nepheline, Na-metasomatism, chondrule, CAI, TEM

Allende 隕石に含まれる特異な dark clast の微細組織：前駆岩相と変成履歴の推定 Microtextures of unusual dark clasts in the Allende chondrite: Implications for their precursor and alteration processes

酒井 碧^{1*}, 留岡 和重¹, 瀬戸 雄介¹, 三宅 亮²

Midori Sakai^{1*}, Kazushige Tomeoka¹, Yusuke Seto¹, Akira Miyake²

¹ 神戸大院・理, ² 京都大院・理

¹Kobe Univ. Sci., ²Kyoto Univ. Sci.

Dark clasts (also known as dark inclusions) commonly occur in CV and CO chondrites. They range in texture from chondritic one, with chondrules and Ca-Al-rich inclusions (CAIs) embedded in a matrix, to aggregates consisting almost exclusively of fine-grained Fe-rich olivine. In the past, dark clasts were considered to be primary aggregates of condensates from the solar nebula^[1]. However, more recent studies have shown that dark clasts exhibit evidence indicating parent-body alteration processes such as chondrule-pseudomorphs, fibrous and vesicular olivines^[2,4], and thus they suggested that dark clasts underwent aqueous alteration and subsequent thermal metamorphism in the meteorite parent body. We found two unusual dark clasts from the Allende CV chondrite that are mineralogically different from the dark clasts studied in the past in many respects. Here we present the results of mineralogical and petrological study of those two dark clasts using an SEM-EDS, an EPMA-WDS, and a TEM-EDS.

The two dark clasts (~86 mm² and ~5 mm²) were found in a polished thin section of the Allende meteorite (~1066 mm² in total area). Both clasts contain chondrule-pseudomorphs (~0.17 mm in average diameter), which are considerably smaller than chondrules (0.49 mm) in the host meteorite. The entire clasts, including pseudomorphs, mainly consist of fine grains (<10 micron in diameter) of Fe-rich olivine (~91 vol%) and Ca-rich pyroxene (6 vol%) and minor amounts of nepheline and opaque minerals (pentlandite and awaruite). From the criteria proposed by Krot et al. (1995a)^[3], they can be classified as type B. Type B dark clasts are considered to have experienced extensive aqueous alteration and subsequent dehydration in the parent body^[2,4]. Olivine grains in the dark clasts are very homogeneous in composition (Fo₆₀) and most of them contain vesicles and Fe-Ni sulfide inclusions. Some of the pseudomorphs have abundant nepheline, spinel, and perovskite. Nepheline is known as a secondary mineral produced by Na-metasomatism of plagioclase and melilite in CAIs^[6]. Perovskite and spinel are typical primary minerals in CAIs. Therefore these pseudomorphs were probably formed from CAIs.

The dark clasts are surrounded and intersected by Ca-rich veins. These veins have three layered structure. The central layer consists of andradite and kirschsteinite and other layers consist of hedenbergite-diopside pyroxene. The boundary between veins and the clasts is clear, whereas that of veins and surrounding Allende matrix is irregular and gradational.

Previous studies on type B dark clasts in Allende reported that chondrule pseudomorphs in dark clasts and chondrules in their host are similar in size distribution, and thus concluded that the precursor of dark clasts have a lithology identical to the host^[4]. However pseudomorphs in the clasts we studied show much smaller sizes than chondrules in the Allende host. This suggests that the precursor lithology of the clasts was different from Allende. Other previous studies suggested that Ca-rich veins were formed by aqueous alteration that occurred after incorporation of the clasts into the host meteorite^[5,7]. However our observations show that such veins are absent in the host meteorite. These results suggest that the veins probably formed in the precursor lithology of the dark clast, before incorporation of the dark clasts into the host meteorite. The presence of the veins penetrating one of the clasts indicates that the veins were formed after the dark clast lithology was converted to fine-grained aggregates by extensive alteration.

[1]Kurat et al. (1989) Z.Naturforsch, 44a, 988-1004.

[2]Kojima et al. (1993) Meteoritics, 28, 649-658.

[3]Krot et al. (1995a) Meteoritics, 30, 748-775.

[4]Kojima and Tomeoka. (1996) GCA, 60, 2651-2666.

[5]Buchanan et al. (1997) GCA, 61, 1733-1743.

[6]Russell et al. (1998) GCA, 62, 698-714.

[7]Krot et al.(2000) Geochemistry International, 38, S351-S368.

キーワード: dark clast, 水質変成, 熱変成, Allende, 炭素質コンドライト

Keywords: dark clast, aqueous alteration, thermal metamorphism, Allende, carbonaceous chondrite

Yamato81020 CO3.0 コンドライトに含まれる層状ケイ酸塩鉱物に富む CI-like なクラスト

CI-like phyllosilicate-rich microclasts in the Yamato81020 (CO3.0) chondrite

森家 智嗣^{1*}, 留岡 和重¹, 瀬戸 雄介¹, 三宅 亮²

Satoshi Moriya^{1*}, Kazushige Tomeoka¹, Yusuke Seto¹, Akira Miyake²

¹ 神戸大 院理, ² 京都大 院理

¹Kobe Univ. Sci., ²Kyoto Univ. Sci.

炭素質コンドライトは、現存する物質の中で極めて始原性の高い隕石と考えられており、微惑星集積初期の天体環境を知ることに最も適した物質である。そして、この炭素質コンドライトの始原性を表す指標の一つとして、岩石学タイプによる分類が提唱されている [1]。CO コンドライトは、この分類上最も変成程度の小さいとされるタイプ 3.0 のコンドライトを持ち、その一つが今回研究に用いた Yamato81020 コンドライトである。Yamato81020 コンドライトは、水や熱による変成の影響が極めて小さい隕石で、角礫化の痕跡や衝撃の影響も見られない [2-3]。しかし今回、Yamato81020 コンドライトを調査したところ、マトリックス中から、明らかに水質変成の影響を受けたクラストを 20 個発見したため、その鉱物学的特徴を示し、成因について考察する。

本研究の組織観察および化学組成分析には SEM-EDX および TEM-EDX を、結晶相同定には SPring-8 BL10XU の SR-XRD を用いた。また TEM, SR-XRD の試料作製には集束イオンビーム加工装置を用いた。

本研究で発見したクラストは、大きさ 30- 300 μm の比較的小さな組織である。組織は主に、 $< 1 \mu\text{m}$ の細粒な鉱物で構成されており、内部に $\sim 10 \mu\text{m}$ の鉱物斑晶を含むが、コンドリュールや CAI などの隕石構成組織は含まない。そして全岩化学組成を分析したところ、ホストのマトリックスと比べて、Mg, Si, Al に富み、Fe に乏しい。クラストの細粒な構成鉱物の鉱物相を同定するために、クラスト 20 個の中からランダムに 6 個のクラストを選び出し、放射光 X 線回折実験を行った。回折ピークを同定したところ、オリビンやマグネタイトの回折ピークに加え、全てのクラストから、サーペンティンやスメクタイトなどの層状ケイ酸塩鉱物のピークを発見した。TEM 観察を行ったところ、11- 14 Å の層間隔を持つスメクタイトの存在を確認した。今回 TEM 観察ではサーペンティンの存在は確認できなかった。また、20 個中 8 個のクラストの組織内部に、水質変成組織であるマグネタイトの球状微粒子の集合体（フランボイダル・マグネタイト）が含まれていることがわかった。さらにそのうち 4 個のクラストには、マグネタイトの板状（プラケット）組織も共存することが確認できた。これらの岩石学的特徴は、大きく水質変成の影響を受けたとされる CI コンドライトと似通っており、これらのクラストは CI コンドライトに似た環境下で生成されたと考えられる。また、ホストのマトリックスについても同様に、放射光 X 線回折によって鉱物相を同定した結果、微弱ながら層状ケイ酸塩鉱物であるサーペンティンのピークを確認できた。

これらの結果から、Yamato81020 コンドライトでは、母天体全体として水質変成を経験しており、また、クラストとマトリックスの様な大小様々な変成度の領域が存在したことが考えられる。またそれらの変成度の異なる領域が混じり合う、角礫化の過程が存在したことが示唆され、Yamato81020 隕石母天体は、現在考えられているよりも複雑な進化過程を経ていることが考えられる。

[1] Van Schmus and Wood (1967) *GCA* **31**, 747. [2] Rubin and Wasson (2005) *GCA* **69**, 211. [3] Scott et al. (1992) *GCA*, **56**, 4281.

キーワード: CO3.0, Yamato81020, CI-like, クラスト, 層状ケイ酸塩, 水質変成

Keywords: CO3.0, Yamato81020, CI-like, clast, phyllosilicate, aqueous alteration

コンドライト母天体におけるネフェリン形成条件の推定：水熱変成実験による溶液/岩石比と溶液 pH への制約

Constraints on water/rock ratio and solution pH of nepheline formation in chondrite parent bodies.

市村 隼^{1*}, 瀬戸 雄介¹, 留岡 和重¹, 三宅 亮²
Shun Ichimura^{1*}, Yusuke Seto¹, Kazushige Tomeoka¹, Akira Miyake²

¹神戸大 院理, ²京都大 院理
¹Kobe Univ. Sci., ²Kyoto Univ. Sci.

揮発性の強い Na を多く含むネフェリン ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) やソーダライト ($\text{Na}_4\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{Cl}$) といった鉱物が、しばしば CO、CV 隕石の難揮発性包有物 (CAI) やコンドリュールに存在する。かつて、これらの鉱物は原始星雲中で形成されたと考えられていたが、近年の研究によって、母天体中で CAI やコンドリュールが Na^+ に富む熱水と反応し形成された可能性が高いことが分かってきた。しかし、その変成については未だ十分な実験的な検証は行われておらず、不明なことが多い。本研究では、ネフェリンの前駆物質と考えられるメリライトおよび斜長石が、異なる pH の Na 溶液との反応でどのように変化するかを調べた。また、母天体中のネフェリン生成プロセスにおける熱による脱水過程を想定した加熱実験も行った。

メリライト (ゲーレナイト端成分 Geh_{100} , $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) は電気炉を用いて合成し、これを水熱変成実験の出発物質とした。斜長石は天然の An_{50} 組成 ($\text{Na}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{Al}_{1.5}\text{Si}_{2.5}\text{O}_8$) のものを用いた。pH の異なる 4 種類の溶液、HCl (pH 0), H_2O (pH 7), 0.1N-NaOH (pH 13), 1N-NaOH (pH 14) を用いて実験した。また、それぞれの溶液について NaCl を溶解させ Na^+ 濃度が 1 mol/l に揃うように調整した。メリライトを出発物質とした実験では、二酸化ケイ素を様々な量比で加えた。各々の実験は、粉末試料と溶液 (36 mg / 1.68 ml) を PTFE 製のオートクレーブに導入し、温度 200 °C、圧力約 15 気圧の条件下で 168 時間行った。加熱実験では、水熱変成実験で生成が確認された鉱物を温度 500-800 °C、24 時間の条件で電気炉を用いて実験を行った。実験回収試料の相同定は、X 線回折装置 (XRD) および走査型電子顕微鏡 (SEM-EDS) を用いて行った。

メリライトと pH 14-7 の溶液を用いた実験では、ハイドログロシュラーの生成が確認された。メリライトと二酸化ケイ素 (重量比 10 : 6) の混合物と pH 14 の溶液を用いた実験では、ネフェリンハイドレート ($\text{Na}_3\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{H}_2\text{O}$) の生成が確認され、pH 13, 7 の溶液を用いた実験ではアナルサイム ($\text{NaAlSi}_2\text{O}_6\text{H}_2\text{O}$) の生成が確認された。一方、同一試料 / 溶液について、溶液 / 試料 (W/R) 比を 10 倍にして行った実験では、ネフェリンハイドレートの生成は確認されなかった。メリライトと二酸化ケイ素の混合物と pH 0 の溶液を用いた実験では、いずれもメリライトが大部分液相に溶解したが、生成物はなく二酸化ケイ素だけが残った。斜長石と pH 14 の溶液を用いた実験では、ネフェリンハイドレートとアナルサイム両方の生成が確認されたが、それ以外の pH 13, 7, 0 の溶液を用いた実験結果は、メリライトと二酸化ケイ素の 10 : 10 の混合物の実験結果とほぼ同じであった。加熱実験では、水熱合成実験の生成鉱物であるアナルサイムを出発物質とした。500-700 °C の実験では変成生成物は確認されなかった。800 °C の条件で行った実験では、アナルサイムは非晶質化した。

これらの実験から、メリライトおよび斜長石は、200 °C で、 Na^+ に富む水溶液によって含水のネフェリンハイドレート、アナルサイムに容易に変成することがわかった。それら変成生成物の種類や量は、溶液の pH や SiO_2 濃度に強く依存している。また、変成には溶液 / 試料比が重要な要素の一つであり、溶液 / 試料比が高いと変成が起こりにくくなる傾向があることもわかった。以上の結果は、ネフェリンは隕石の水質変成を解読する上で、層状ケイ酸塩とは別の視点から、重要な手がかり (pH、 SiO_2 濃度、溶液 / 岩石比などに制約) を与える可能性のある物質であることを示している。今回の加熱実験ではアナルサイムからネフェリンに変成する条件を求めることはできなかったため、今後さらに実験を行う必要がある。

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, 炭素質コンドライト

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

アポロ 16 号レゴリス角礫岩に含まれるセンチメートルサイズ衝撃溶融岩片に記録された後期重爆撃の痕跡

Evidence for Late Stage Heavy Bombardment from Centimeter-sized Impact Melt Clasts in Apollo 16 Regolith Breccias

新原 隆史^{1*}, ベアード スカイ², スウィンドル ティモシ², クリング デービッド¹

Takafumi Niihara^{1*}, BEARD, Sky P.², SWINDLE, Timothy D.², KRING, David A.¹

¹CLSE LPI-USRA, NASA Lunar Science Institute, ²アリゾナ大学, NASA Lunar Science Institute

¹CLSE LPI-USRA, NASA Lunar Science Institute, ²University of Arizona, NASA Lunar Science Institute

Isotopic ages from lunar rocks cluster around 4.0-3.8 Ga [e.g., 1,2] and are interpreted to indicate terminal lunar cataclysm [3]. However, this age cluster can be also interpreted as the overprint of a single large impact event; the Imbrium basin forming event. To evaluate this issue, we are focusing on impact melt clasts in ancient regolith breccias that lithified ~3.8 Ga recovered at the Apollo 16 traverse site. Norman et al. [4] first addressed and reported that at this issue and report at least 4 distinct impact events are required based on petrological textures and Ar-Ar ages of large-sized Apollo 16 impact melt rocks. Among 25 samples, they found ages from 3.75 to 3.96 Ga. To further test this issue, we examined 11 impact melt clasts from 60016, 65095 and 61135 [6-8].

To clarify the origins of impact melt clasts, we focus on compositions of relict minerals and bulk compositions. Relict minerals could remain information about original target materials if the shock-metamorphic overprint is not severe. For 6 melt clasts from 60016, at least 4 different target regions are required; Clast 1 comes from a terrain with high bulk Al_2O_3 (26.4 wt. %) and bimodal compositions in mafic minerals (Mg-suite and ferroan anorthosite), Clasts 2, 3 and 4 come from a terrain with low Al_2O_3 (20.4-16.4 wt %) composition and relatively ferroan composition in mafic minerals (Mg-suite), Clast 5 comes from a terrain with high-bulk Al_2O_3 (23.9 wt. %) and high Mg# in mafic minerals (Mg-suite), and Clast 6 comes from a terrain with low bulk Al_2O_3 (18.6 wt. %) and high-Mg# in mafic minerals (Mg-suite). All clasts have high- K_2O (>0.3 wt. %) and - P_2O_5 (>0.3 wt. %), and require KREEPy material [6]. Three clasts from 65095 have similar relict mafic mineral (Mg# in olivine = ~79.5) and bulk (Al_2O_3 = ~23.5 wt. %; K_2O = 0.16 wt. %; P_2O_5 = 0.22 wt. %) compositions among the clasts implying they have a same origin, however, different origin from clasts from 60016 [7]. Five regions in 2 clasts from 61135 might be generated by mixing of two end member melts; high-K (K_2O = 0.72 wt. %) and low-K (K_2O = 0.27 wt. %) and require at least one distinct impact site [8].

We obtained Ar-Ar shock retention ages for 6 impact melt clasts from 60016 and a clast from 65095 [6]. We find evidence for at least five different impact events clustered within short span of 4.0-3.7 Ga for 6 clasts from 60016. However, a recent thermal disturbance of the K-Ar system means that the formation age of the one clast in 65095 analyzed so far cannot be determined precisely enough to compare. Analyses of siderophile elements in some of these clasts also point to multiple impact events [9].

From the combined results from relict minerals and bulk compositions, 11 melt clasts require at least 6 individual target regions with KREEPy material. Ar-Ar ages confirm that clasts from 60016 originated from at least 5 distinct impact events. Thus, multiple impact events occurred in or near the PKT region and impact melt clasts were not produced by a single (i.e., Imbrium) impact event.

References: [1] Papanastassiou D.A. and Wasserburg G.J. 1971. EPSL 11. 37-62. [2] Turner G et al., 1973. Proc. LPSC 4, 1889-1914. [3] Tera F et al., 1974. EPSL 22, 1-21. [4] Norman M.D. et al., 2006 GCA. 70, 6032-6049. [5] Korotev R.L. 1994. GCA 58, 3931-3969. [6] Niihara T. et al., 2012.GCA submitted. [7] Niihara T. and Kring D.A. 2012 MAPS 47, Suppl. #5074. [8] Niihara et al., 2013 LPSC 44 submitted. [9] Liu et al., 2013 LPSC 44 submitted.

キーワード: アポロ 16 号, 衝撃溶融岩片, 後期重爆撃, KREEP

Keywords: Apollo16, Impact melt, Late Stage Heavy Bombardment, KREEP

D'Orbigny のガラスの起源: angrite 母天体の理解に向けて Origin of D'Orbigny glass: Towards the understanding of the angrite parent body

鈴木 博子^{1*}, 三河内 岳¹, 小澤 一仁¹
Hiroko Suzuki^{1*}, Takashi Mikouchi¹, Kazuhito Ozawa¹

¹ 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 Science, The University of Tokyo

D'Orbigny は angrite の中でもガラスを豊富に持つ点で特異な存在であり (Kurat et al., 2001), ガラスの成因を明らかにすることは D'Orbigny の形成過程, そして angrite 母天体の物理化学的性質の理解に重要である。これまで D'Orbigny のガラスについては, Varela et al. (2003) や Kurat et al. (2004) により, 星雲ガスからの凝縮物が交代作用により変質を受けたものであると主張されてきた。しかし, ガラスだけでなく結晶部も星雲ガスからの凝縮物であるとするこの説は, D'Orbigny を火成岩と考える諸説 (Mittlefehldt et al., 2002 など) と相反するものである。本研究では, 実体顕微鏡・SEM 観察や EPMA・EDS 分析に基づいてガラスの成因を明らかにし, ガラスの起源が不明であるために錯綜していた D'Orbigny の成因に関する議論を解決し, angrite 母天体内部の過程に関する情報をより正確に抽出できるようになったことを示す。

D'Orbigny は緻密部と多孔質部よりなる (Kurat et al., 2001)。本研究で用いた試料は晶洞が存在することから多孔質部であると考えられる。試料中のガラスは厚さ 0.1mm の膜状に薄く広がって D'Orbigny の鉱物と接している。薄く広がったガラスの表面は Varela et al. (2003) が foamy glass と称した泡状の構造を持つ。ガラス断面には円や楕円状の空隙が見られ, まれに Fe 酸化物や輝石の樹枝状結晶ができています。さらに, angrite にはないカリ長石, 石英, 斜方輝石など地球由来の鉱物片を含む平均粒径 10 ミクロン以下の破片の集合体が D'Orbigny ガラスを覆い, 接触部に沿って D'Orbigny ガラスとは異なり K を含み SiO₂ に富んだガラスが挟在する。鉱物片集合体は, ガラスの近傍で部分融解組織を示すこともある。D'Orbigny 結晶部には, ガラスとの境界から 0.5mm の範囲に限って, 結晶の溶解や FeS が二相に分解している組織が認められる。

D'Orbigny ガラスの平均化学組成は全岩と同じである。組成のばらつきは酸化物プロット上で D'Orbigny の主要鉱物組成を結んだ範囲に入る。Varela et al. (2003) が報告しているように, 組成の異なる部分が墨流し様の流理構造を示すものもある。ガラスに接する D'Orbigny の olivine は, 内側に最大 5 ミクロンの厚さで外に向かって Mg に富む層を持ち, その外側には 2 ミクロンの厚さで外に向かって Fe に富む層を持つ。さらに, ガラスは, olivine に向かって Fe と Mg に乏しくなっている。

D'Orbigny ガラスの平均組成は全岩組成とほぼ一致しているため, 外部からのメルト等の混入は考えにくい (Varela et al., 2003)。最大粒径が 1mm 程度の結晶からなる完晶質な岩相と全岩と同じ組成のガラスは, それらの生成に必要な冷却速度が大きく異なるため, 両者を同時に形成することは不可能である。衝撃変成の証拠はまったくないため, 衝撃による融解の可能性も排除される (Varela et al., 2003)。また, D'Orbigny 組成のガラスの表面が, SiO₂ に富んだガラスを挟んで地球由来の鉱物片集合体に覆われることから, 融解が地球上で起きたと判断される。ガラスと olivine の組成不均一は, olivine がいったん溶けた後に急成長したことを示している。以上から, D'Orbigny ガラスは angrite 母天体上で形成されたものではなく, D'Orbigny が地球の大気圏を落下中に摩擦熱によって融解し, そのメルトが結晶の隙間や晶洞などに入り込み, 地球上で固結したものであると結論される。D'Orbigny は多孔質な特徴を持ち, 隕石内部にメルトが移動し易かったと考えられる。この結論は D'Orbigny の希ガスが, バルクでは宇宙線照射起源のものが多く, ガラスでは太陽 (地球大気) 成分を多く含む (Busemann et al., 2006) ことも整合的である。

D'Orbigny のガラスは, 地球の大気圏落下中の摩擦発熱によるものである。D'Orbigny の組織と空隙に向かう系統的な鉱物組み合わせ, 化学組成のゾーニングなどからも D'Orbigny は火成岩であると考えて良い (Mittlefehldt et al., 2002; Suzuki et al., 2012)。以上の結論から, D'Orbigny の持つ様々な情報から地球での現象によるものを区別し, マグマ生成や分化等の母天体過程に関する情報を正確に抽出し, 母天体内部の物理化学的性質の理解が可能となった。

ETV-MC-ICPMS 法による隕石試料のタングステン同位体分析 Tungsten isotope analysis of meteorite samples using ETV-MC-ICPMS technique

岡林 識起^{1*}, 坂田 周平¹, 平田 岳史¹

Satoki Okabayashi^{1*}, Shuhei Sakata¹, Takafumi Hirata¹

¹ 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

¹Department of Earth and Planetary Sciences, Kyoto University

Hf-W chronometer is based on the decay of ^{182}Hf to ^{182}W with a half-life of 8.9 Myr. Hf is strongly lithophile elements, whereas W is moderately siderophile elements. Thus, the Hf-W age can provide critical information about the timing of metal-silicate differentiation (core formation) processes at the early stage of the planetary formation. Moreover, both the Hf and W is strongly refractory elements, the Hf-W age can reflect the timing of condensation or segregation of the metallic nuggets from chondritic reservoir at the early sequence of the solar system.

The thermal ionization mass spectrometry (TIMS) is widely used for W isotope analysis. However, a micro-gram amount of W is desired for Hf-W chronological studies in this technique. The ICP-MS technique coupled with the conventional nebulization technique is also used for W isotope measurement. With this technique, total amount of W required for the isotopic ratio measurements could be 50 - 100 ng. On the other hand, typical ion transmission efficiency from sample to ion collector would be <0.1% under the sample introduction using the nebulizer. This suggests that the sample introduction efficiency (i.e., high transmission efficiency) can be dramatically improved when the loss of sample mist could be minimized. To achieve this, we have developed a sample introduction technique using the electrothermal vaporization (ETV) technique for W isotope analysis.

In this study, W sample in 2% HNO_3 solution is loaded on the Re filament located in a small volume ETV chamber to achieve minimum loss of W vapor and also to reduce the memory of W within the chamber. Temperature of the Re filament is controlled by the incident current (0 - 4 A). The W evaporation is carried out under the two different ambient gasses, Ar or He. We found that W signal intensity profile obtained under the Ar carrier gas is spiky and unstable, and this is not suitable for the precise isotopic analysis. In strike contrast, the signal intensity profile obtained under the He carrier gas is very smooth and stable. Moreover, with the He carrier gas, total number of W atoms was about 1.7 times higher than that achieved by the Ar carrier gas. Taking these points into account, He carrier gas was used throughout the W isotope measurements.

The isotope analysis was carried out using various amount of W solution sample. As a result, we found that <25 ng of W can reveal the precise W isotope ratio. The W isotope ratios of some meteorite samples were also measured using the ETV-MC-ICPMS technique. The results will be discussed in this presentation.

Keywords: MC-ICP-MS, isotope, ETV, meteorite

超高感度極微量質量分析装置を用いた太陽風起源希ガスの分析 Development of novel mass spectrometer to analyze solar wind noble gases

馬上 謙一^{1*}, 糸瀬 悟², 松谷 幸², 石原 盛男³, 内野 喜一郎⁴, 工藤 政都², 坂口 勲⁵, 坎本 尚義¹

Ken-ichi Bajo^{1*}, Itose Satoru², Matsuya Miyuki², Ishihara Morio³, Uchino Kiichiro⁴, Kudo Masato², Sakaguchi Isao⁵, Yurimoto Hisayoshi¹

¹ 北海道大学, ² 日本電子, ³ 大阪大学, ⁴ 九州大学, ⁵ 物質材料研究機構

¹Hokkaido University, ²JEOL Ltd., ³Osaka University, ⁴Kyushu University, ⁵NIMS

Solar-gas-rich regolith breccia from asteroids has been studied [e.g., 1, 2], which were irradiated by solar wind (SW) on the parent body surface. Regolith breccia was lithified by compaction process from regolith soils. The compaction processes which were recorded in the breccias should reveal a migration, deposition, SW irradiation of the soil. To figure out the SW distribution in the breccia high spatial resolution is required because SW implanted layer is less than 100 nm [2].

LIMAS (Laser Ionization Mass nanoScope) [3] is a time-of-flight sputtered neutral mass spectrometer (TOF-SNMS) with non-resonant laser post-ionization system which can observe in-situ distributions of all elements in solid materials down to tens nm level. LIMAS is mainly composed of Ga focused ion beam (FIB) for sputtering, femtosecond laser for post-ionization of sputtered particles, and multi-turn mass spectrometer (MULTUM II [4]).

An n-type Si wafer, which was irradiated by 30 keV ⁴He of 2×10^{16} ions/cm² was used to evaluate and confirm sensitivity for He. The sputtering crater was 6.4×15.2 μm² and measurement area is 2.1×4.1 μm² of the center. The detection limit of ⁴He for the system is about 10^{18} ions/cm³ for ⁴He. The performance of LIMAS should be improved towards higher sensitivity and lower background noises because bulk concentrations of solar-He in gas-rich meteorite is 10^{-2} - 10^{-4} cm³STP/g [e.g., 1] which can be translated into 10^{16} - 10^{18} atoms/cm² for rocky material (density ~ 3 g/cm³).

References: [1] Goswami J. N. et al. (1984) Space Sci. Rev., 37, 111-159. [2] Wieler R. et al. (2002) in Rev. Mineral. Geochem., 47, 21-70. [3] Ebata S. et al. (2012) Surf. Interface Anal., 44, 635-640. [4] Okumura D. et al. (2005) Eur. J. Mass Spectrom., 11, 261-266.

キーワード: 希ガス, 太陽風, 局所分析, 質量分析

Keywords: Noble gas, Solar wind, Microscopic analysis, Mass spectrometry

イトカワレゴリス粒子の宇宙風化微細組織の評価：太陽風を模擬したイオン照射実験との比較

Estimation of space weathering morphologies of Itokawa regolith particles by comparison with ion irradiation experiments

松本 徹^{1*}, 土山 明², 瀧川 晶², 安田啓介³, 中田吉則³, 三宅 亮²

Tooru Matsumoto^{1*}, Akira Tsuchiyama², Aki Takigawa², Keisuke Yasuda³, Yoshinori Nakata³, Akira Miyake²

¹ 阪大. 理. 宇宙地球科学, ² 京大. 理. 地球惑星科学, ³ 若狭湾エネルギー研究センター

¹Osaka University, ²Kyoto University, ³The Wakasa wan energy research center

探査機はやぶさが回収した小惑星イトカワのレゴリス粒子は、大気のない固体天体表面の現象についての情報を保持すると期待される。3次元形状分析より、エッジの丸い粒子が存在することが観察され、粒子の丸みは小惑星表面での地震振動による機械的摩耗もしくは太陽風によるスパッタリングにより形成した可能性が指摘された [1]。一方で透過型電子顕微鏡 (STEM) により、粒子表面に太陽風照射に起因する 100nm 程度の厚さの宇宙風化層が観察された [2,3]。しかし、これら宇宙風化層の厚さとエッジの丸みには、はっきりとした相関が認められなかった [4]。これより粒子の丸みは機械的摩耗が原因である可能性が高いと考えられた。しかし CT 分析 (数 μm スケール) と STEM 分析 (nm スケール) の比較はスケールに差があり直接的な比較としては不十分であり、また太陽風照射が粒子形状に与える効果も明らかでない。これまで数十 nm から数 μm の観察に適する走査型電子顕微鏡 (SEM) でイトカワ粒子表面が観察されており [5]、観察された表面組織を太陽風に起因する構造に注目して評価する事が重要である。そこで本研究では、太陽風によるイトカワ粒子の宇宙風化を模擬した高エネルギー粒子照射実験を行うとともに、照射試料とイトカワ粒子の表面微細組織の比較を試みた。照射実験は若狭湾エネルギー研究センターにて行われた。イトカワ粒子模擬物質として、イトカワ粒子のオリビンと近い組成を持つ 100 μm 程度のスリランカ産オリビン粒子 (Fa_{30}) を使用した。10 keV から 50 keV の H^+ , $^4\text{He}^+$ イオンを 1×10^{16} ions/cm² から 1×10^{18} ions/cm² の照射線量にて試料に照射した。照射前後で、試料表面を電界放出型走査型電子顕微鏡 (FE-SEM JSM7001F: 京都大学) による表面組織の微細観察を行い表面形態の変化を評価した。また、照射後の試料の一部は集束イオンビーム加工装置 (FEI Quanta 200 3DS: 京都大学) で切り出し、透過型電子顕微鏡 (H8000k: 京都大学) によって試料断面の構造を観察した。FE-SEM 観察の結果、 3×10^{17} ions/cm² 以上の照射量では試料表面に多数の blister (水膨れ状の) 構造が観察された。blister のサイズは 100 nm から 3 μm であり、照射イオンのエネルギーが大きい試料ほど blister の平均サイズは大きい傾向にあった。200 nm から 300 nm の blister に覆われた照射試料の断面を TEM 観察した結果、表面下に数 nm から 200 nm の大きさの空隙で満たされた層が観察され、100 nm 以上の大きさの空隙が表面を押し上げ blister を形成していることが明らかとなった。空隙は H, もしくは He イオンで満たされていたと考えられる。同様の空隙構造を持つ宇宙風化層が、イトカワレゴリス粒子の超薄切片の STEM 観察により観察されている [3]。層の厚さが He の貫入深さと一致することから、太陽風の He イオンによりこれらの空隙が形成されたと推測されている。また、FE-SEM を用いた観察によりイトカワ粒子表面にも空隙と同サイズの blister 構造が観察されている [5]。実験における照射量 3×10^{17} ions/cm² は He の太陽風の照射年代に換算すると、およそ 1500 年になり、イトカワレゴリス粒子の blister は 10^3 年オーダーの太陽風照射期間を経て形成されたと考えられる。宇宙風化層に観察される Solar flare track 密度から算出した太陽風照射年代は 1000 年程度であると見積もられ [3]、本研究により見積もった照射年代とおおよそ一致している。このように太陽風による宇宙風化層の形成は粒子のレゴリス層の滞在期間 (<約 3 百万年) [6] より短い時間で起こると考えられる。対して粒子の丸みをもたらす機械的な摩耗はレゴリス層中で数百万年の時間で作用した可能性がある。[1] Tsuchiyama A. et al. (2011) Science, 333, 1125-1128. [2] Noguchi T. et al. (2011) Science, 333, 1121-1125. [3] Noguchi T. et al. (2012) Met. Planet. Sci. submitted. [4] Tsuchiyama A. et al. (2013) LPSC XLIV, 2169. [5] Matsumoto T. et al. (2013) LPSC XLIV, 1441. [6] Nagao K. et al. (2011) Science, 333, 1128-1131.

キーワード: イトカワ, レゴリス, 宇宙風化

Keywords: Itokawa, regolith, space weathering

大気のない天体でのレゴリス粒子の摩耗：イトカワと月レゴリスの比較 Abrasion of regolith particles on airless bodies: comparison between Itokawa and lunar regolith

土山 明^{1*}, 松島 亘志², 松本 徹³, 中野 司⁴, 雨宮 大樹¹, 松野 淳也¹, 永野 宗³, 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

Akira Tsuchiyama^{1*}, Takashi Matsushima², Tooru Matsumoto³, Tsukasa Nakano⁴, Daiki Amemiya¹, Junya Matsuno¹, Takashi Nagano³, Akira Shimada³, Kentaro Uesugi⁵, Akihisa Takeuchi⁵, Yoshio Suzuki⁵, Makiko Ohtake⁶

¹ 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, ² 筑波大学大学院システム情報工学科, ³ 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻, ⁴ 産業技術総合研究所, ⁵ 高輝度光科学研究センタースプリング8, ⁶ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
¹Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, ²Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba, ³Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University, ⁴AIST, ⁵JAXA/SPring-8, ⁶ISAS/JAXA

Preliminary examination of Hayabusa samples suggests that Itokawa regolith have experienced following processes on the airless body [1]. (1) Formation of fine particles (~100 μm) by impact of small objects onto Itokawa [2]. (2) Irradiation and implantation of solar wind to particles on Itokawa's uppermost surface [3]. (3) Formation of space weathering rims (thin amorphous layers (<100 nm) with Fe-rich nano-blobs and sometimes blisters) on the particle surfaces mainly due to implantation of solar wind He with the time scale of ~ 10^3 yr [4,5]. (4) Abrasion of the particles, called "space erosion", probably due to grain motion by impact-induced seismic waves in a regolith layer with time scale of sufficiently longer duration than 10^3 yr [1,2,6]. Processes (3) and (4) should be repeated [3]. (5) Final escape of particles from the asteroid by impact within the residence time of < 8 Myr [3].

Evidence for the abrasion is mainly based on their 3D shapes and surface micro-morphologies obtained by x-ray micro-tomography [2]. The shape distribution of Itokawa particles cannot be distinguished from that of fragments formed by high-speed impact experiments [7], indicating that the particles are consistent with fragments mechanically crushed by impact. About 3/4 of the particles examined have sharp edges while rest of them have rounded edges at least on a part of the particle surface, suggesting that the fragments have been abraded. The shape distribution of lunar regolith particles (Apollo 16 highland samples: 60501) [8] was also compared. It was suggested that they are more spherical than the Itokawa and impact particles [2]. However, the lunar regolith samples were not imaged grain-by-grain by tomography [8], and imperfect separation of grains might affect the shape distribution data.

In the present study, 3D shapes of lunar regolith particles were obtained by the same method as the Itokawa particles. Particles (~50-100 μm) picked up from 60501 and 10084 (Apollo 11 mare sample) were imaged grain-by-grain at BL47XU of SPring-8 using imaging tomography system with the effective spatial resolution of 200 or 500 nm. The longest, middle and shortest axis lengths (a, b and c) were obtained by ovoid approximation of solid portion extracted from CT images. The 3D shape distributions in b/a vs. c/b diagram were compared using Kolmogorov-Smirnov (K-S) test.

The shape distribution of 60501 particles (number of particles: N=21) can be clearly distinguished from those of the Itokawa particles (N=59) and impact fragments (N=6201) with P=0 (P: probability in the K-S test) while this cannot be distinguished from the previous 60501 data (N=55) with P=0.80. The rest of the lunar particles (N~90) will be analyzed. It has been reported that the mean b/a and c/b ratios of mare lunar regolith (0.72-0.78 and 0.73-0.86, respectively [9]) is larger than those of impact fragments (0.71 [8]). The present results and the previous data show that lunar regolith is more spherical than the impact fragments although lunar regolith is clearly the product of impact on the lunar surface. This strongly suggests that the regolith was abraded. The cause of the abrasion may be grain motion during gardening by impacts. The degree of abrasion is larger than the Itokawa particles due to larger scale of impacts and longer regolith residence time.

References: [1] Tsuchiyama A. et al. (2013) LPS XLIV, Abstract #2169. [2] Tsuchiyama A. et al. (2011) Science, 333, 1125-1128. [3] Nagao K. et al. (2011) Science, 333, 1128-1131. [4] Noguchi T. et al. (2011) Science, 333, 1121-1125. [5] Noguchi T. et al. (2012) Meteoritics & Planet. Sci., submitted. [6] Matsumoto T. et al. (2013) This volume. [7] Capaccioni F. et al. (1984) Nature, 308, 832-834. [8] Katagiri J. (2010) Proc. 12th Internat. Conf. Engin., Sci., Construct., Operat. in Challenging Environments, Am. Soc. Civil Engin., 254-259. [9] Heiken G. H. et al., Eds., Lunar Sourcebook (1991).

キーワード: はやぶさ計画, アポロ計画, 宇宙風化, 衝突, X線CT, スプリング8

Keywords: Hayabusa mission, Apollo mission, space weathering, impact, x-ray tomography, SPring-8

微隕石研究のための新しい分析スキームの開発と特異な鉱物学的特徴を持つ微隕石の発見

Development of a new analytical scheme for micrometeorites and discovery of micrometeorites with intriguing mineralogy

辻本真一¹, 野口 高明^{1*}, 岡崎 隆司², 中村 智樹³, 海老原 充⁴, 伊藤 正一⁵, 永原 裕子⁶, 橘 省吾⁵, 寺田 健太郎⁷, 藪田 ひかる⁷
Shinichi Tsujimoto¹, Takaaki Noguchi^{1*}, Ryuji Okazaki², Tomoki Nakamura³, Mitsuru Ebihara⁴, Shoichi Itoh⁵, Hiroko Nagahara⁶, Shogo Tachibana⁵, Kentaro Terada⁷, Hikaru Yabuta⁷

¹ 茨城大学, ² 九州大学, ³ 東北大学, ⁴ 首都大学東京, ⁵ 北海道大学, ⁶ 東京大学, ⁷ 大阪大学

¹Ibaraki University, ²Kyushu University, ³Tohoku University, ⁴Tokyo Metropolitan University, ⁵Hokkaido University, ⁶University of Tokyo, ⁷Osaka University

Introduction: Combined mineralogical and isotopic studies of individual Wild 2 cometary particles revealed that the materials formed in the inner solar system had been transported to the outer solar system before the formation of the Wild 2 comet [e. g. 1,2,3,4]. We sought another analytical scheme for MM (micrometeorite) studies. In this new analytical scheme, we have two objectives: identification of nonchondritic MMs and identification of asteroidal MMs with mineralogy indistinguishable from CP IDPs, which are regarded as cometary grains [5].

Samples and methods: MMs used in this study were found in the surface snow collected near the Dome Fuji Station, Antarctica in 2003 and 2010. The surface snow was melted and filtered in a clean room. After identification of MMs, we performed SR-XRD, FIB section preparation, TEM, micro-Raman, SEM, EPMA, INAA, and/or noble gas mass spectroscopy for each MM.

Results and discussion: We investigated twelve MMs and could classify them into five types based on their mineralogy: refractory MMs, chondrule-like MMs, fine-grained polycrystalline MMs, coarse-grained crystalline MMs, and phyllosilicate-rich MMs. Here we show the mineralogical results of two MMs with intriguing mineralogy.

Refractory MM A MM is composed mainly of anorthite, diopside, and spinel. A BSE image of the cross section of the MM showed that it has an amoeboid structure, in which small (<5 micrometer) Al-rich and Ti-bearing diopside exists on its surface and its interior and anorthite fills the interstices of diopside. The major minerals are similar to those in type C CAIs [6]. Although its amoeboid structure suggests low degrees of melting during the formation event, the MM has a compact interior, in which diopside and anorthite have triple junctions with ~120° angles. Therefore, the refractory object was probably formed by low degrees of melting and subsequent prolonged cooling. It is different from meteoritic type C CAIs that experienced intense melting and crystallization from melt droplets. Fine-grained material attached on the refractory object is composed of GEMS (glass with embedded metal and sulfide)-like objects, olivine, pyrrhotite, and carbonaceous material. Because GEMS-like objects have not been identified among meteorites yet, this MM may have derived from a comet.

Fine-grained polycrystalline MM A MM is composed of small (<400 nm) crystals of Fe-bearing olivine, Fe-free low-Ca pyroxene, Fe-Ni metal, Fe sulfide, amorphous silicate, and interstitial carbonaceous material. Although these crystals have often triple junctions with ~120° angles suggestive of recrystallization, both olivine and low-Ca pyroxene show almost no compositional zoning. The low-Ca pyroxene crystals elongate near the a-axis direction and are composed of a unit cell-order mixture of ortho and clino low-Ca pyroxene with stacking disorders. Its microstructure indicates rapid cooling (>20-30 K hr⁻¹) from above 1275K [7]. Both olivine and low-Ca pyroxene in this MM contain abundant tracks with ~5 x 10¹⁰ cm⁻², which corresponds to ~10⁴-year exposure to the solar wind [8]. Tracks in olivine are erased by flash heating above ~600 °C [9]. Because typical cometary IDPs are heated to >720 °C [10], it is plausible that the MM was derived from an asteroid instead of a comet although any materials similar to this MM have not been found among meteorites.

References: [1] Zolensky et al. (2006) Science 314, 1735-1739. [2] McKeegan et al. (2006) Science 314, 1724-1728. [3] Nakamura et al. (2008) Science 321, 1664-1667. [4] Matzel et al. (2010) Science 328, 483-486. [5] Ishii et al. (2008) Science 319, 447-450. [6] Krot et al. (2008) GCA 72, 2534-2555. [7] Brearley and Jones (1993) LPS XXIV, 185-186. [8] Bradley (2006) In: Meteorites, Comets, and Planets. [9] Fraundorf et al. (1982) GCA 45, 915-943. [10] Joswiak et al. (2005) Workshop on dust in planetary systems (abstract), #4106.

キーワード: 微隕石, 透過電子顕微鏡, 希ガス, 集束イオンビーム, 放射化分析

Keywords: micrometeorites, TEM, noble gas, FIB, INAA

南極雪中から回収された宇宙塵の化学組成 Chemical compositions of cosmic dust samples recovered from Antarctic snow

海老原 充^{1*}, 関本俊², 白井直樹¹, 辻本 真一³, 野口 高明³, 中村 智樹⁴, 岡崎 隆司⁵, 伊藤 正一⁶, 橘 省吾⁶, 藪田 ひかる⁷, 寺田 健太郎⁷, 大久保 彩⁸, 永原 裕子⁸
Mitsuru Ebihara^{1*}, Shun Sekimoto², Naoki Shirai¹, Shinichi Tsujimoto³, Takaaki Noguchi³, Tomoki Nakamura⁴, Ryuji Okazaki⁵, Shoichi Itoh⁶, Shogo Tachibana⁶, Hikaru Yabuta⁷, Kentaro Terada⁷, Aya Okubo⁸, Hiroko Nagahara⁸

¹ 首都大学東京大学院理工学研究科, ² 京都大学原子炉実験所, ³ 茨城大学理学部, ⁴ 東北大学大学院理学研究科, ⁵ 九州大学大学院理学研究科, ⁶ 北海道大学大学院理学研究科, ⁷ 大阪大学大学院理学研究科, ⁸ 東京大学大学院理学系研究科

¹Department of Chemistry, Tokyo Metropolitan University, ²Kyoto University Research Reactor Institute, ³College of Science, Ibaraki University, ⁴Department of Earth and Planetary Materials Sciences, Tohoku University, ⁵Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University, ⁶Department of Natural History Sciences, Hokkaido University, ⁷Department of Earth and Space Science, Osaka University, ⁸Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo

We investigated four micrometeorites (MMs) recovered from Antarctic ice: D10IB034, D10IB103, D10IB179, and D10IB187. Bulk mineralogy was investigated by SR-XRD, TEM, FE-EPMA, and INAA. Analytical procedure for INAA was essentially the same as used for Itokawa grains [1]. The MMs were irradiated with neutron (total neutron fluence: 6.1×10^{18} n/cm²) along with reference standards at Kyoto University Research Reactor Institute (KURRI). After cooling for a few days, the MMs were measured for gamma-ray activity by using germanium semiconductor detectors at KURRI.

A total of eight elements (Na, Sc, Cr, Fe, Co, Ni, Sm and Ir) were determined at least for one MM sample. Their abundances relative to CI chondrite and Fe contents of individual samples show that siderophiles (Co, Ni, Ir) are more variable and depleted compared with lithophiles (Na, Sc, (Sm)). Compared with literature data for bulk and matrix samples of CM and CR meteorites, an agreement is not good within the limited data set. Even in the comparison with MMs from Antarctic ice, the four dust MMs from Antarctic snow seem to have distinct chemical features.

The FeO/Sc ratio can be used for judging the origin of planetary materials. When these ratios for the four MMs of this study are compared with data for bulk chondrites, Earth, Moon, Mars, olivine and pyroxene separates from ordinary chondrites and the Itokawa grain samples [1], the four MM samples along with chondritic materials and Itokawa grains have higher FeO/Sc ratios than those for terrestrial samples. This suggests that the four MMs are extraterrestrial in origin although their compositions are not chondritic and are not similar to MMs from ice.

Two MMs (D10IB034 and D10IB179) yielded definite values for both Co and Ni. Their abundances and ratios give us reliable judgement for the origin of planetary materials. If their contents relative to Fe contents are compared with those for Itokawa grains [1] and some constituent minerals of L and LL chondrites, the two MM from Antarctic snow are on the line defined by the CI Co/Ni ratio, clearly indicating their extraterrestrial origin. This further suggests that these MMs contain tiny metal particles or primitive materials having high and unfractionated Co and Ni abundances. Crustal materials of differentiated planets like Earth and 4 Vesta (HED parent body) also plotted in lower left region off the CI line. One MM (D10IB103) seems to be also in such region.

Only one MM sample (D10IB034) was observed to have a distinct value of Ir. When its ratio relative Co and Ni is compared with data for chondrules from ordinary chondrites (mostly unequilibrated ordinary chondrites; [2]), bulk chondrites and chondritic metals in addition to the Itokawa grain [1], bulk chondrites and chondritic metals mostly converge around the cross defined by CI ratios for Ir/Ni and Ir/Co. These elements are typical siderophile elements and, hence, they are not largely fractionated in bulk chondrites, chondritic metals and even in iron meteorites. Instead, chondrules show a large spread in Ir/Ni and Ir/Co ratios [2]. CI-normalized Ir/Fe and Ir/Co ratios of chondrules are arrayed on the line having a slope of 1, implying that chondrules have unfractionated (chondritic) Co/Ni ratios with a large variation of Ir abundances. The Itokawa grains also fit on this line [1]. It is observed that the MM D10IB034 also stay on the same line. The difference between the Itokawa grain and the Antarctic dust sample is on the Ir content. We interpret that the MM D10IB034 contains an early condensate in which Ir condensed but Co and Ni scarcely did.

References: [1] Ebihara M. et al. (2011) *Science*, 333, 1119-1121. [2] Grossman J. N. and Wasson J. T. (1982) *GCA*, 46, 1081-1099.

キーワード: 宇宙塵, 微小隕石, 化学組成

Keywords: cosmic dust, micrometeorites, chemical composition

南極雪から回収された宇宙塵の希ガス同位体 Noble gas isotopes of micrometeorites collected from Antarctic snow

岡崎 隆司^{1*}, 飛松 優¹, 野口 高明², 辻本 真一², 大久保 彩³, 中村 智樹⁴, 海老原 充⁵, 伊藤 正一⁶, 藪田 ひかる⁷, 橘 省吾⁶, 永原 裕子³, 寺田 健太郎⁷

Ryuji Okazaki^{1*}, Yu Tobimatsu¹, Takaaki Noguchi², TSUJIMOTO, Shinichi², Aya Okubo³, Tomoki Nakamura⁴, Mitsuru Ebihara⁵, Shoichi Itoh⁶, Hikaru Yabuta⁷, Shogo Tachibana⁶, Hiroko Nagahara³, Kentaro Terada⁷

¹九州大学大学院理学研究院, ²茨城大学理学部理学科, ³東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, ⁴東北大学大学院理学研究科地球科学専攻, ⁵首都大学東京理工学研究科, ⁶北海道大学大学院理学研究院自然史科学部門, ⁷大阪大学理学研究科

¹Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University, ²College of Science, Ibaraki University, ³Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, ⁴Department of Earth and Planetary Materials Sciences, Faculty of Science, Tohoku University, ⁵Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Metropolitan University, ⁶Department of Natural History Sciences, Hokkaido University, ⁷Department of Earth and Space Science, Osaka University

As a comprehensive study [e.g., 1], we have been investigating micrometeorites (MMs) collected from Antarctic snow in 2003 and 2010 by JARE. MMs used in this study were recovered by filtering melted snow water at 20 °C in a clear room at Ibaragi Univ. Each MM was investigated by several analytical methods: identification using SED-EDS, followed by characterization by SR-XRD, TEM, micro-Raman, SEM, and EPMA analyses, and additionally by INAA, and/or noble gas mass spectroscopy. We classified the MMs investigated into five types based on their mineralogical features: 1) refractory, 2) chondrule-like, 3) fine-grained polycrystalline, 4) coarse-grained crystalline, and 5) phyllosilicate-rich MMs. Here, we report results of noble gas analyses for the MMs and show the relation between their noble-gas and mineralogical features.

Each of the samples mounted on Mo sheets was removed using acetone, and packed into an Al cup. The Al cups were set in a sample holder of a small furnace (designed for submicrogram to milligram samples) equipped with a purification line of the noble gas mass spectrometer at Kyushu Univ. The samples were heated *in vacuo* at 150 °C for 1 day to reduce adsorbed atmospheric gas contamination. Each sample was heated stepwise at 400, 650, and 1800 °C to extract noble gases. Absolute abundances and ratios of noble gas isotopes were calibrated by measuring known amounts of atmospheric gas and a He standard gas with ³He/⁴He of 1.71E-4. Blank levels of He and Ne at every extraction temperatures are reasonably low but those of the other elements are comparable to those released from MMs: e.g., ⁴He = 5E-12, ²⁰Ne = 5E-13, ³⁶Ar = 1E-12, ⁸⁴Kr = 1E-14, ¹³²Xe = 3E-15 cm³ STP for the 1800 °C blank run.

Samples studied are two chondrule-like MMs, one fine-grained MM, and three coarse-grained MMs, and are 30-60 micrometers in diameter. Isotopic ratios of He and Ne are indicative of solar wind (SW) origin, while elemental ratios of ⁴He/²⁰Ne are <90, lower than SW value (~650 [2]). Release profiles of SW noble gases are different among MMs: two out of seven begin to release noble gases at 400 °C, three at 650 °C, and two at 1800 °C. This indicates that they were heated to varying degrees during atmospheric entry. Plotting ⁴He concentrations against ⁴He/²⁰Ne ratios, a positive correlation is observed in the MMs, as is the case with Itokawa particles [3], IDPs [4], unmelted MMs [5, 6], and cosmic spherules [7]. The largest amounts of He and Ne among the MMs studied were obtained from a fine-grained MM (D03IB67), which consists mainly of sub-micron olivine and low-Ca pyroxene grains. This MM releases noble gases at 400-1800 °C, indicating that this MM was not heated above 400 °C during atmosphere entry. The TEM observation revealed that this MM contains abundant solar flare track with ~5E10 /cm² density, which corresponds to >1E4-years exposure [8] to solar wind and flare. The presence of the flare track is consistent with the noble gas release temperature, since the track can be erased by flash heating above ~600 °C [9].

A chondrule-like MM (D03IB057) and a single olivine MM (D10IB170) contain only small amounts of He and Ne with the lowest ⁴He/²⁰Ne ratios (1.4 and 0.4, respectively). They release detectable amounts of noble gases only at 1800 °C. Both of the MMs show signs of higher degrees of heating: the uppermost surface layer of D03IB057 is partly melted, while that of D10IB170 is decomposed into magnetite and glass.

References: [1] Yabuta et al. (2012) LPSC XXXXIII (Abs. #2239). [2] Heber et al. (2009) GCA 73, 7414-7432. [3] Nagao et al. (2011) Science 333, 1128-1131. [4] Nier and Schlutter (1990) Meteoritics 25, 263-267. [5] Osawa and Nagao (2002) Antarct. Meteorite Res., 15, 165-177. [6] Osawa et al. (2003a) Meteorit. Planet. Sci. 38, 1627-1640. [7] Osawa et al. (2003) Antarct. Meteorite Res. 16, 196-219. [8] Bradley (2006) In: Meteorites, Comets, and Planets. [9] Fraundorf et al. (1982) GCA 45, 915-943.

キーワード: 微隕石, 希ガス, 太陽風

Keywords: micrometeorites, noble gas, solar wind

南極とつぎ岬から回収した非溶融宇宙塵の鉱物学的研究

Mineralogical study of phyllosilicate-rich unmelted micrometeorites recovered from "Cape Tottuki" in Antarctica

田澤 賢^{1*}, 中村 智樹¹, 木村 勇気¹

Ken Tazawa^{1*}, Tomoki Nakamura¹, Yuki Kimura¹

¹ 東北大学大学院理学研究科地学専攻

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

In the present study, seventy six particles recovered from ice at "Cape Tottuki" in Antarctica were identified as Antarctic micrometeorites (AMMs) by SEM/EDS chemical analysis. Among them, twenty eight relatively less heated AMMs were analyzed by synchrotron X-ray diffraction (S-XRD) using Gandlfi camera, which reveals bulk mineralogy of individual AMMs. Based on the results of S-XRD, we have selected four primitive AMMs. They were embedded in resin and were sliced to be ultrathin sections by ultra microtomy. The ultrathin sections were analyzed by 200-KeV FE-TEM equipped with EDS, which is able to determine nano-scale mineralogy. Rest of the particles, which remained in the resin, were polished and analyzed by EPMA/WDS, which is able to determine the local and bulk chemical composition. We accomplished this multistage detailed analysis, and revealed the mineralogy and the physicochemical properties of each small cosmic dust particle.

The results of the multistage analysis indicated that KTP2H6 is a member of Tagish Lake type micrometeorites, which are believed to come from D-type asteroids in the outer main asteroid belt. HTP2H6 consists mainly of fine-grained saponite and magnetite. The survival of hydrous mineral saponite indicates that the particle almost escaped deceleration heating when it entered the Earth's atmosphere, because saponite is decomposed at 700 degrees Celsius during the brief heating. AMMs had been stayed deeper in the blue ice field in Antarctica for about 30 thousand years, however, the crystal structure was well preserved. Thus, KTP2H6 preserve material characteristics of D-type asteroids.

KTP3I6 was also identified as Tagish Lake type micrometeorites, but it was slightly heated in the atmosphere. Although its phyllosilicate and carbonate phases were decomposed to amorphous phase and magnesiowustite, respectively, we could know the type of phyllosilicate from chemical composition. Si-rich compositions of phyllosilicates indicate that saponite is a major phyllosilicate before decomposition in the atmosphere. Magnesiowustite showed very Fe-rich composition, indicating that the particle had had Fe-rich carbonate. Fe/Mg ratios of the carbonates in KTP3I6 are the highest among carbonates found in Tagish lake meteorite and Tagish Lake-type micrometeorites. This means that the particle is identified as D-type asteroids material, but its formation process is different from the Tagish Lake meteorite. Therefore, we propose KTP3I6 is one of the varieties of D-type asteroids property. In addition, two anhydrous AMMs were also investigated in detail, however, they were highly decomposed during the atmospheric entry and also altered in the Antarctic ice layer.

キーワード: 宇宙塵, タギッシュレイク隕石, D型小惑星, 炭素質コンドライト

Keywords: micrometeorites, Tagish Lake meteorite, D-type asteroids, carbonaceous chondrites

日本・ベルギー合同によるナンセン氷原での南極隕石探査

The search for Antarctic meteorites in the Nansen Ice Field by the joint team of JAPAN and BELGIUM

今栄 直也^{1*}, 赤田幸久¹, クリストフ・ベルクラッツ⁵, クレイス・フィリップ³, デバイレ・ビンシェン⁴, ゴダリス・スチーブ³, ヒューブレット・ジェネビエール⁴, 小島秀康¹, 三河内岳², パン・ルースブレック・ナディア⁴, ウエンディ・デボー⁴, 山口亮¹, ハリー・ゼコラリ³

Naoya Imae^{1*}, Yukihisa Akada¹, Christophe Berclaz⁵, Philippe Claeys³, Vinciane Debaille⁴, Steven Goderis³, Genevieve Hublet⁴, Hideyasu Kojima¹, Takashi Mikouchi², Nadia Van Roosbroek⁴, Wendy Debouge⁴, Akira Yamaguchi¹, Harry Zekollari³

¹ 国立極地研究所, ² 東京大学, ³ ベルギー自由大学, ⁴ ベルギー自由大学, ⁵ ベラール

¹National Institute of Polar Research, ²University of Tokyo, ³Vrije Universiteit Brussel, Belgium, ⁴Universite Libre de Bruxelles, Belgium, ⁵BELARE

これまで、セール・ロンダーネ山南方のナンセン氷原での組織的な隕石探査は JARE-29 および BELARE2010-2011 で行われているのみである。今回、JARE-54 夏隊と BELARE2012-2013 の合同チームによって、2012?2013 年シーズンにナンセン氷原での隕石探査を実施した。メンバー構成は JARE が FA1 名を含む 4 名および BELARE が FA1 名を含む 6 名であった。この結果、合計約 420 個、総重量約 76kg のあすか隕石を採集した。

自国出国は 2012 年 12 月初め、帰国は 2013 年 2 月中旬で、出入国期間は 66 日ほどであった。この期間のうち、2012 年 12 月下旬?2013 年 2 月初めの約 40 日間ナンセン氷原に滞在し、隕石探査を行った。Dronning Maud Land Air Network (DROMLAN) を利用し、航空機でベルギーの南極プリンセス・エリザベス (PE) 基地に入り、ここを起点とし、基地よりスノーモービルでナンセン氷原へアクセスした。前半 2013 年 1 月中旬まではナンセン氷原南西部エリア域の探査を行った。後半 1 月中旬以降はキャンプ地を移動し、東北部エリア域での探査を実施した。この間の気温は^{-15??30} の間で推移し、多くの日に風速毎秒 10 m 以上のカタバ風が東より吹いた。キャンプには JARE は居住用モジュール、BELARE はコンテナを用いた。モジュール、コンテナ、および燃料槽の移動は雪上車で PE 基地より支援いただいた。

探査は、スノーモービル (Ski-doo) 10 台を用い、移動速度は時速 10 km 以下で、先頭を 1 名の FA が先導する V 字形状による方法を行った。各自が携帯 GPS のナビゲーション機能を活用し、隕石探査域の記録には航跡機能、隕石発見地点の記録には位置入力機能を利用した。今後、これらのデータの整理を行い、隕石の分布と重量の詳しい解析を行う予定である。ベースキャンプ地を移動直後より 12 日間連続の悪天候による停滞があるなど期間を通して約半分の期間が停滞であったが、当初の予想を上回り、多くの大きい隕石を採集することができた。最初のキャンプ地では約 15 日探査が実施でき、約 6.5kg の隕石を筆頭に約 360 個の隕石を回収した。キャンプ地の移動後は探査を実施出来たのは 5 日ほどであったが、約 60 個の隕石を採集した。これら合計約 420 個の隕石の多くは、コンドライトであり、この中に炭素質コンドライトや今回の探査では最大の 18 kg のコンドライトを含んでいる。また、エコンドライトも多く見つかった。今後、キュレーション作業は、国立極地研究所南極隕石ラボラトリにおいて行うことになる。なお、東南部エリアを中心に未探査エリアが残っており、近いうちにこの地域の探査を計画予定である。

謝辞：本隕石探査を実施するにあたり、PE 基地から多大なる支援を受けた。Alain Hubert 基地長を始め、記して感謝致します。

キーワード: 隕石探査, あすか隕石, 第 54 次日本南極地域観測隊, ベルギー南極観測隊 2012-2013

Keywords: meteorite search, Asuka meteorites, JARE-54, BELARE2012-2013

二次イオン質量分析法による流体包有物の同位体分析法の開発 I Development of isotope analysis of fluid inclusions by secondary ion mass spectrometry I

石橋 充子^{1*}, 坂本 直哉², 杵本 尚義³
Atsuko Ishibashi^{1*}, Naoya Sakamoto², Hisayoshi Yurimoto³

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 北海道大学大学院理学研究院自然史科学部門
¹Natural history Sci., Hokudai, ²CRIS, Hokudai, ³Natural history Sci., Hokudai

流体は惑星表層及び深部において元素移動や元素循環の媒体として働く主要な要素であり、流体の作用により地質現象がコントロールされる事も多い。地質現象を引き起こした過去の流体についてはそのとき生成した岩石の記録から間接的に推測されていた。しかしながら、過去の流体はしばしば鉱物中の流体包有物としてトラップされているので、もし流体包有物の分析ができれば過去の流体についての情報を直接得る事が可能になる。しかも、個々の流体包有物の鉱物内の位置関係は地質時間の経過と対応しているので、もし流体包有物を個別に分析できれば、一連の地質作用の間の流体の進化についての情報を得ることができる。特に、同位体分析は流体の起源についての有益な情報を与える。

従来の質量分析法では流体包有物の測定は抽出法により実施されており、この方法は1mm以上の大きな流体包有物まで測定可能であるので、適用対象が限定されていた。岩石中では流体包有物の大きさは数から数十ミクロンのものが多いのでこの微小な流体包有物に適用可能な質量分析法の開発が重要である。また、その場分析が可能になれば、流体進化についての研究も飛躍的に進展すると考えられる。このような空間分解能を持つ質量分析法として二次イオン質量分析法(SIMS)が考えられる。しかしながらSIMSでは試料を真空中に露出する必要があるため、流体の分析は不可能である、本研究では、流体包有物のSIMS分析を行う事を目標とし、SIMS分析用試料調製法の開発研究を行った。

SIMS分析を安定に行うためには以下の試料条件を整える必要がある:(1)表面が平滑な鏡面平面であること(2)流体包有物が研磨面上に露出していること(3)試料表面が導電性を有すること。

条件(1)(2)を満足させるため、流体包有物を凍結させた状態で研磨ができる冷凍研磨機を開発した。冷凍研磨機は液体窒素浴を内蔵する研磨盤を有し、研磨中盤上は-100℃で温度管理可能である。常温から-100℃に約14分で到達する。この研磨盤上にアルミナ研磨シートを置き、流体包有物の乾燥冷凍研磨を可能にした。

研磨面への大気中の水蒸気凝縮を防止し、流体包有物露出面を導電状態に加工する(条件(3))ため窒素雰囲気グローブボックスを整備し、グローブボックス中に冷凍研磨機とイオンコーター装置(サンヨー電子SC-701AT)を設置した。イオンコーター試料台は冷却状態で使用でき、金薄膜作成中に試料を-100℃以下に保持した状態で研磨面に直接金薄膜を形成でき、条件(3)を満足する。また、研磨面の研磨状態を観察できる冷却試料台を有した反射顕微鏡も同時に設置した。現在の問題点は、凍結流体の試料面露出状態の簡便な観察判定法の確立であり、試行錯誤をくり返している。

キーワード: 流体包有物, 二次イオン質量分析法, 冷凍研磨, 同位体

Keywords: fluid inclusions, secondary ion mass spectrometry, freezing polish, isotope

LL5-6 普通コンドライト隕石中のリン酸塩鉱物の岩石学的研究, H₂O 含有量及び水素同位体組成

Petrography, H₂O contents and hydrogen isotopic composition of phosphate minerals from LL5-6 ordinary chondrites

柳井 佳穂里^{1*}, 伊藤 正一¹, 垓本 尚義¹, ジェームズ グリーンウッド², サラ ラッセル³

Kaori Yanai^{1*}, Shoichi Itoh¹, Hisayoshi Yurimoto¹, James Greenwood², Sara Russell³

¹ 北海道大学大学院理学研究院, ²Wesleian University, ³Natural History Museum, London

¹Department of Natural History Sciences, Hokkaido University, ²Wesleian University, ³Natural History Museum, London

Ordinary chondrites of petrologic types 4 to 6 exhibit a sequence of progressive chemical and textural equilibration, and contain Cl-rich apatite grains (e.g., Jones et al., 2011).

Previous study reported that the water contents of chlorapatite are very low (<100ppm), even though apatite grains in ordinary chondrites seem to have a significant H₂O contents based on a deficit of anions (Jones et al., 2011). As results, they suggest that apatite grains were formed with a dry and halogen-bearing fluid that has been derived by degassing of chondritic melts.

In the preliminary study, we reported the petrography, H₂O contents and hydrogen isotopic compositions in chlorapatite from Mocs L5-6 and Ensisheim LL6 ordinary chondrites using secondary ion mass spectrometry (SIMS). The H₂O contents of apatite grains in Ensisheim (LL6) and Mocs (L5-6) are estimated to be ~60 ppm and ~35 ppm, respectively. These H₂O contents are similar to the previous reported values from LL chondrites (Jones et al., 2011). The hydrogen isotopic compositions of apatite grains from Ensisheim are extremely D-rich (dD= ~+17000 permil). Remarkably, we found the reaction texture between apatite grain and olivine grain from Ensisheim LL6 chondrite, which reported that of texture from St. Severine LL6 chondrite (Jones et al., 2011). However, the origin of extremely D enrichment of those of Ensisheim LL6 is unclear whether this is resulting from LL6 general characteristics of thermal process of parent body or from unique results of late reaction by fluids only for Ensisheim LL6 chondrite, because of limited study of preliminary examination.

In this study, we will report the petrography of phosphate minerals with other thin sections, LL5-6 (Ensisheim LL6 and Tuxtuac LL5) to compare it with those of Ensisheim LL6 chondrite. Thin section (Tuxtuac) loaned from Natural History Museum, London (NHM) were used in this study. Phosphate grains were identified using elemental X-ray mapping using scanning electron microscope (FE-SEM JEOL JSM 7000-F) and energy dispersive X-ray spectrometry (EDS Oxford INCA Energy) at Hokkaido University.

Phosphate minerals (merrillite and apatite) from Tuxtuac show the reaction texture at the boundary of olivine and phosphate minerals. However, the chemical compositions (P, Cl and Ca) of olivine grain are homogeneously distributed using 5kV, even if those of distribution are enriched in the rim of olivine grain with 15kV X-ray mapping. This suggests that the reaction texture with BSE image might be resulting from the effect of edge crystal. On the other hand, the Cl-zonation in the reaction texture between olivine and apatite from Ensisheim LL6 chondrite with D-enrichment signature are identified with 5KV X-ray mapping.

In the future, we will further examine the petrography of phosphate minerals from other LL4-6 chondrites has already been loaned thin sections from NHM and compare with the petrography, hydrogen isotopic compositions of phosphate minerals to give an constraint for the origin of D-enrichment of phosphate minerals in the Ensisheim LL6 chondrite.

キーワード: アパタイト, 水素同位体, LL 普通コンドライト, リン酸塩鉱物

Keywords: apatite, Hydrogen isotope, LL ordinary chondrite, phosphate mineral

アエンデ隕石 CAI のメリライト結晶の高精度酸素同位体比イメージングによる太陽系星雲ガスの酸素同位体組成の推定

Oxygen isotopic composition of the solar nebula gas inferred from high-precision isotope imaging of melilite crystals

朴 昌根¹, 若木 重行¹, 坂本 直哉^{1*}, 小林 幸雄¹, 坎本 尚義¹

Changkun Park¹, Shigeyuki Wakaki¹, Naoya Sakamoto^{1*}, Sachio Kobayashi¹, Hisayoshi Yurimoto¹

¹ 北海道大学

¹ Hokkaido University

High-precision isotope imaging analyses of reversely zoned melilite crystals in the gehlenitic mantle of Type A CAI ON01 of the Allende carbonaceous chondrite reveal that there are four types of oxygen isotopic distributions within melilite single crystals: (1) uniform depletion of ^{16}O ($\delta^{18}\text{O} = -10$ permil), (2) uniform enrichment of ^{16}O ($\delta^{18}\text{O} = -40$ permil), (3) variations in isotopic composition from ^{16}O -poor core to ^{16}O -rich rim ($\delta^{18}\text{O} = -10$ permil to -30 permil, -20 permil to -45 permil, and -10 permil to -35 permil) with decreasing akermanite content, and (4) ^{16}O -poor composition ($\delta^{18}\text{O} > -10$ permil) along the crystal rim. Hibonite, spinel, and perovskite grains are ^{16}O -rich ($\delta^{18}\text{O} = -45$ permil), and adjoin ^{16}O -poor melilites. Gas-solid or gas-melt isotope exchange in the nebula is inconsistent with both the distinct oxygen isotopic compositions among the minerals and the reverse zoning of melilite. Fluid-rock interaction on the parent body resulted in ^{16}O -poor compositions of limited areas near holes, cracks, or secondary phases, such as anorthite or grossular. We conclude that reversely zoned melilites mostly preserve the primary oxygen isotopic composition of either ^{16}O -enriched or ^{16}O -depleted gas from which they were condensed. The correlation between oxygen isotopic composition and akermanite content may indicate that oxygen isotopes of the solar nebula gas changed from ^{16}O -poor to ^{16}O -rich during melilite crystal growth. We suggest that the radial excursions of the inner edge of the protoplanetary disk gas simultaneously resulted in both the reverse zoning and oxygen isotopic variation of melilite, due to mixing of ^{16}O -poor disk gas and ^{16}O -rich coronal gas. Gas condensates aggregated to form the gehlenite mantle of the Type A CAI ON01.

キーワード: コンドライト, メリライト, CAI, SIMS, 酸素同位体イメージング, 太陽系星雲ガス

Keywords: Chondrite, Melilite, CAI, SIMS, Oxygen isotope imaging, Solar nebula gas

Fluffy type A CAI 中メリライト結晶の酸素同位体ゾーニングと結晶成長の関係 Relationship between oxygen isotope zoning and crystal growth in melilite crystals from fluffy type A CAI

片山 樹里¹, 伊藤 正一^{1*}, 坎本 尚義¹

Juri Katayama¹, Shoichi Itoh^{1*}, Hisayoshi Yurimoto¹

¹ 北海道大学大学院理学研究院

¹Department of Natural History Sciences, Hokkaido University

The oxygen isotopic microdistributions within melilite measured using in situ secondary ion mass spectrometry correspond to the chemical zoning profiles in single melilite crystals of a fluffy Type A Ca-Al-rich inclusion (CAI) of reduced CV3 Vigarano meteorite. The melilite crystals show chemical reverse zoning within an individual single-crystal from the akermanite-rich core to the akermanite-poor rim. The composition changes continuously with the crystal growth. The zoning structures suggest that the melilite grew in a hot nebular gas by condensation with decreasing pressure. The oxygen isotopic composition of melilite also changes continuously from ¹⁶O-poor to ¹⁶O-rich with the crystal growth. These observations suggest that the melilite condensation proceeded with change consistent with an astrophysical setting around the inner edge of a protoplanetary disk where both ¹⁶O-rich solar coronal gas and ¹⁶O-poor dense protoplanetary disk gas could coexist. Fluffy Type A CAIs could have been formed around the inner edge of the protoplanetary disk surrounding the early sun.

キーワード: FTA, SIMS, oxygen isotope, CAI

Keywords: FTA, SIMS, oxygen isotope, CAI

Be-B 法を用いた melilite に富む CAI の年代決定の試み

Beryllium-bron measurement of a melilite-rich calcium-aluminium-rich inclusions in the NWA5958 CM chondrite

山野辺 正邦^{1*}, 中村 智樹¹, 嘉数 勇基², 石田 初美¹

Masakuni Yamanobe^{1*}, Tomoki Nakamura¹, Yuki Kakazu², Hatsumi Ishida¹

¹ 東北大理学研究科, ²CSNSM Univ. Paris Sud-CNRS/IN2P3

¹ Faculty of Tohoku University, ²CSNSM Univ. Paris Sud-CNRS/IN2P3

CAIs (Ca, Al-rich Inclusions) are the oldest object in the solar system. In CAIs, there are evidence of now-extinct isotopes like ²⁶Al and ¹⁰Be. They have a short-half-life (<100Ma) and because of short-half-life, they are expected to indicate an accurate relative age. In order to estimate a relative age using now-extinct isotopes, it is required that they were homogeneously distributed in the solar nebula. In terms of ²⁶Al, it has been almost already proven that they were homogeneously distributed in the solar nebula, while ¹⁰Be has not proven yet. ²⁶Al decays by electron capture to ²⁶Mg with a half-life of 0.71Ma. ¹⁰Be β -decays to ¹⁰B with a half-life of 1.5Ma. In terms of Al-Mg chronology, it is difficult to detect excess of ²⁶Mg in CAIs which experienced late-stage alteration (e.g reheating in the nebula or asteroids), because the Mg diffusion in anorthite where Al-Mg measurements were made is fast. The B diffusion, however, in melilite where Be-B measurements were made is slow. Therefore, it is suggested that Be-B chronology is effective way to measure a relative age of CAIs which experienced late-stage alteration. Hence, it is significant to confirm that ¹⁰B was distributed in solar nebula homogeneously or heterogeneously.

In this study, we have carried out Be-B measurements in one CAI (Type-A CAI) from CM chondrite NWA5958. This CAI consists mainly of a large melilite crystal and small spinel and perovskite are contained as inclusions in the melilite. Our SIMS measurements at Tohoku University showed that this CAI has ¹⁰B excesses in melilite. The initial ¹⁰Be/¹⁰B ratio inferred 4.6×10^{-2} . This ratio is much higher than those obtained in other CAIs from CV chondrites (e.g. 9.5×10^{-4} ; MacPherson et al. 2003, 7.2×10^{-4} ; Sugiura et al. 2001). We have also analyzed rare earth elements (REEs) abundance and oxygen isotopes ratios of this CAI. Melilite shows nearly flat (unfractionated) CI-normalized REEs pattern with anomalies in Eu and ¹⁶O-rich composition, whereas melilites in CV chondrites usually have ¹⁶O-poor composition (e. g. Clayton et al. 1977). REE pattern indicates that the large melilite in this CAI formed from a melt, thus the CAI experienced melting by reheating in the nebula. ¹⁶O-rich oxygen isotope ratios suggest that this CAI stayed nearer the Sun, while CAIs in CV chondrite stayed away from the Sun because of ¹⁶O-poor composition of melilite. Our result implies that the nebula gas near the Sun contained much more ¹⁰Be than the gas far from the Sun. This suggests that ¹⁰B was distributed in solar nebula heterogeneously and Be-B system can't measure a relative age.

キーワード: Be-B 法, CAI, メリライト

Keywords: Be-B system, CAI, melilite

アエンデ隕石中のコンドリュールの内部組織 Internal structure of chondrules from Allende CV3 chondrite

高橋 栄一^{1*}, 津田 彩花¹, 西田 圭佑¹, 佐々木 理², 柳田 泰宏³, 奥村 聡³, 中村 美千彦³, 中本 泰史¹

Eiichi Takahashi^{1*}, Ayaka Tsuda¹, Keisuke Nishida¹, Osamu Sasaki², Yasuhiro YANAGIDA³, Satoshi Okumura³, Michihiko Nakamura³, Taishi Nakamoto¹

¹ 東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻, ² 東北大学理学部自然誌標本館, ³ 東北大学理学系大学院地学専攻

¹ Magma Factory, Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, ² Museum of Natural History, Tohoku University,

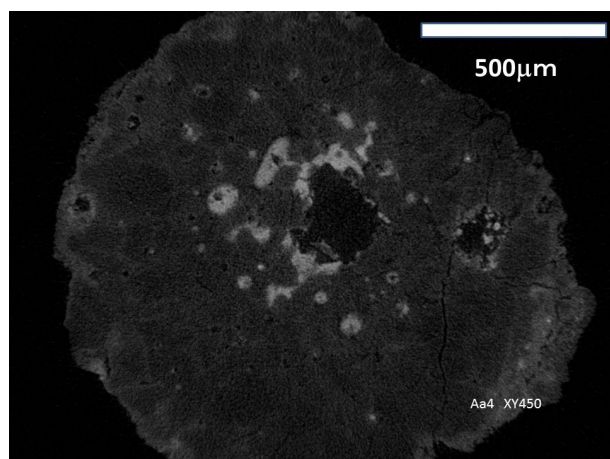
³ Department of Earth Science, Tohoku University

In order to clarify 3D shapes and internal structure of chondrules in Allende CV3 chondrite, we have separated 180 chondrules grains and investigated them with X-ray CT apparatuses (Scan Xmate-D180RSS270, Scan Xmate-D160TSS105/11000) recently installed at the Museum of Natural History, Tohoku University. 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 (rugby-ball shape) and oblate-spheres (pancake shape) (Tsuda et al. JPGU 2013). Chondrules with porphyritic textures distribute in all three shape categories. Chondrules with granular texture (lower melting degree than porphyritic) also show nearly homogeneous distribution. 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 will be discussed from the shock-wave heating model (e.g., Miura et al., 2008).

Melting textures of Fe-FeS and silicates were observed by high-resolution X-ray CT (Scan Xmate-D160TSS105/11000). Coagulation processes of molten Fe-FeS melt in chondrules were observed. An example of cross section of a porphyritic chondrule is shown in Fig. 1, which shows "the smallest core formation process" in the early solar system. Our observation shows that 1) there are group of "chondrules" which have undergone melting of Fe-FeS only (peak temperature:1000-1200 degreeC), 2) coagulation and separation process of Fe-FeS and silicate takes place during short heating duration, 3) degassing of sulfur would be the main source of bubbles.

キーワード: アエンデ隕石, コンドリュール, 内部組織, 金属とシリケートの分離

Keywords: Allende, Chondrule, internal texture, metal-silicate separation



Tagish Lake 炭素質隕石中のコンドリュール、CAIs, forsterite aggregates を囲む細粒リムの形成メカニズム Formation mechanism of fine-grained rims surrounding chondrules, CAIs and forsterite aggregates in Tagish Lake

高山 亜紀子^{1*}, 留岡 和重¹

Akiko Takayama^{1*}, TOMEOKA, Kazushige¹

¹ 神戸大学大学院理学研究科

¹ Graduate school of Science, Kobe University

Introduction: Tagish Lake carbonaceous chondrite consists of two major lithologies: carbonate-rich and carbonate-poor [1]. Most chondrules and coarse-grained aggregates in Tagish Lake are surrounded by fine-grained rims [1]. The origin of fine-grained chondrule rims has been controversial [e.g. 2-7]. Nakamura et al. [6] suggested that the rims in the carbonate-rich lithology were formed during brecciation on the parent body (or bodies). In contrast, by studying the carbonate-poor lithology, Greshake et al. [7] concluded that formation of the rims by dust accretion in the solar nebula most convincingly accounts for their observations. Here we present the results of our mineralogical and petrological study of fine-grained rims surrounding chondrules and coarse-grained aggregates in the carbonate-poor lithology of Tagish Lake.

Results and Discussion: We found 87 chondrules, 14 forsterite aggregates, and two CAIs in the two thin sections (~114 microns²). These coarse-grained components are embedded in the dominant matrix (84.1 vol.%) consisting mainly of phyllosilicates with minor amounts of Fe-Mg carbonate, magnetite, forsteritic olivine, Ca carbonate, and Fe-(Ni) sulfides. Most chondrules consist of irregularly shaped cores composed of forsterite and enstatite and phyllosilicate-rich outer zones (POZs) (5-100 microns in thickness). Also, characteristic round pseudomorphs of opaque nodules that consist largely of phyllosilicates were commonly found in both core and the POZs. The observation suggests that the POZs are altered zones which were formed by replacing the peripheries of chondrules.

96 % of the chondrules are surrounded by fine-grained rims which are significantly less porous than the matrix. The volume abundances of the minerals in the rims are significantly different from those of the matrix (e.g. Ca carbonate is totally absent). Most rims contain characteristic fractures that run radially from the core/altered zone boundaries, penetrate both altered zones and rims, and terminate at the rim/matrix boundaries. All of the CAIs and forsterite aggregates are also surrounded by fine-grained rims which are identical to those of the chondrules in texture, mineralogy and chemical compositions.

We found 55 clasts that consist of materials texturally and mineralogically identical to the fine-grained rims surrounding the coarse-grained components. We also found a large clast that contains three chondrules and three forsterite aggregates. The chondrules in this clast also have altered zones. The matrix of the clast exhibits fractures that run radially from the surfaces of the chondrules and forsterite aggregates and interconnect them. They always terminate at the clast/matrix boundary.

These observations suggest that the chondrules, CAIs, forsterite aggregates, and their rims and the clasts originated from a common precursor region in the meteorite parent body that was different from the location where the host meteorite was finally lithified. That is, the rims are remnants of matrix material of the precursor region. This model is essentially consistent with those previously proposed for the carbonate-rich lithology of Tagish Lake [6] and the hydrated clasts in the Vigarano and Mokoia CV3 chondrites [4, 8].

References:

[1] Zolensky et al. (2002) MAPS 37, 737-761. [2] Metzler et al. (1992) GCA 56, 2873-2897. [3] Sears et al. (1993) Meteoritics 28, 669-675. [4] Tomeoka and Tanimura (2000) GCA 64, 1971-1988. [5] Trigo-Rodriguez et al. (2006) GCA 70, 1271-1290. [6] Nakamura et al. (2003) EPSL 207, 83-101. [7] Greshake et al. (2005) MAPS 40, 1413-1431. [8] Tomeoka and Ohnishi (2010) GCA 74, 4438-4453.

キーワード: Tagish Lake 炭素質隕石, コンドリュール・リム, 水質変成, 角礫岩化

Keywords: Tagish Lake carbonaceous chondrite, Chondrule rims, Aqueous alteration, Brecciation

Acfer331 CM2 コンドライト隕石のコンドルールを覆う細粒リムの岩石学的記載 Petrography of fine-grained rim surrounding chondrule in the Acfer331 CM2 chondrite

浅川 淳^{1*}, 伊藤 正一², 垓本 尚義²

Jun Asakawa^{1*}, Shoichi Itoh², Hisayoshi Yurimoto²

¹ 北海道大学大学院理学院自然史科学専攻, ² 北海道大学理学研究院自然史科学部門

¹Department of Natural History Sciences, Hokkaido University, ²Department of Natural History Sciences, Hokkaido University

(イントロダクション)

コンドライト隕石中のコンドルールは、一般的に細粒リムによって囲まれている。細粒リムは星雲中のダストの付着成長によって形成された (Metzler et al. 1992), あるいは母天体内の変質作用により形成された (Tomeoka and Tanimura, 2000) と考えられている。どちらの起源であってもこの細粒リムは、水質変質によって組織や化学組成が変化してしまうため、その起源を明らかにするためには、水質変質の程度の違いにより、細粒リムにどのような変化が起こるのかを評価することが重要である。そこで、本研究では、Acfer 331 隕石の水質変質の異なる領域においてマトリクスと細粒リムの岩石組織学・化学組成学的研究を行い水質変質作用の影響を評価した。

(実験方法)

本研究での実験試料は、Acfer331 CM 2 コンドライト隕石を用い、薄片試料を作成した。マトリクス部の主要構成鉱物は、含水鉱物である粘土鉱物であるため、水を用いた研磨作業により、膨張、変形、破壊が起こり、元の組織が変化する可能性がある (Ohashi et al., 2008)。そのため、水を使用した研磨試料、水を使用しない研磨試料を作成して、組織や化学組成の違いを評価し、薄片作成方法を検討した。ダイヤモンドブレードで切り出しただけの試料と比較したところ、元々マトリクス部には、空孔は存在せず、水を使用した研磨試料では選択的に Fe に富む粘土鉱物が破壊され、組織が変化している可能性が高いと評価された。そのため、水を使用しない研磨方法を採用し、岩石学的研究を行った。岩石学的観察には、北海道大学設置の FE-SEM (JEOL JSM-7000 + EDS 検出器 (Oxford INCA Energy)) を用いて、隕石薄片全体 (12 x 14mm) の X 線元素マッピング及び微小領域の 30 x 30 ミクロンのパルク定量分析を行い、水質変質の程度及び元素組成の比較を行った。

(結果と議論)

マトリクス部と細粒リム部の主要構成鉱物は、どちらも細粒な層状ケイ酸塩で構成されていた。隕石薄片全体の X 線元素マッピングにより、MgO の化学組成が異なる領域や CaSO₄·2H₂O の脈を示す領域が観察された。この化学組成の異なる特徴を示す領域は、これまでの研究により、水質変質の程度が異なることが考えられている (Howard et al., 2009)。この MgO に富んだ分布及び CaSO₄·2H₂O の分布を示す領域に注目し、水質変質の程度の異なる 2 つの領域を評価し、細粒リムを持つコンドールの岩石学的記載をこれら 2 つの領域に対応させ比較を行った。

領域 (1) は、CaSO₄·2H₂O や MgO に富んだ脈のない領域とした。領域 (1) に存在する細粒リムは、inner rim と outer rim に分かれた層構造になっていた。Fe-Si-Al-Mg 三角ダイアグラムにおいて inner rim は、MgO に富む組成範囲にプロットされ、それと比較し、outer rim とリム周辺部のマトリクス物質は、MgO に乏しい組成範囲にプロットされた。outer rim とリム周辺部のマトリクス物質は、同じ組成範囲にプロットされ、組成の違いはみられなかった。

領域 (2) は、CaSO₄·2H₂O や MgO に富んだ脈のある領域とした。細粒リムは、領域 (1) でみられたような inner rim と outer rim の層構造を示さなかった。Fe-Si-Al-Mg 三角ダイアグラムにおいて細粒リムとマトリクスは、どちらも同じような化学組成範囲を示し、その組成範囲は、領域 (1) の細粒リムやマトリクスでみられた化学組成範囲をあわせもつ範囲にプロットされた。

領域 (2) のマトリクス部は、CaSO₄·2H₂O の脈があり、MgO に富む特徴を示したことから、領域 (1) と比較して、水質変質度が高いと考えられる。また、領域 (1) の inner rim の細粒リムは、周囲のマトリクス部と比較して MgO に富む特徴を示したが、領域 (2) の細粒リムでは、水質変質を強く受けていると考えられるマトリクスと同じ化学組成範囲となり、層構造を示さず、変質の影響により化学組成が周りのマトリクスと同じような分布となっていることを示唆した。以上より、領域 (2) の細粒リムや周囲のマトリクスで観察された岩石学的組織の変化は、母天体内部での局所的な mm-scale の水質変質の影響によるかもしれない。

キーワード: 水質変質, 細粒リム, 炭素質コンドライト, マトリクス

Keywords: aqueous alteration, fine-grained rim, carbonaceous chondrite, matrix

Mg/Si 比を変えた MgO-SiO₂ 系非晶質珪酸塩の水質変成実験Hydrothermal alteration experiments of amorphous silicates in the system of MgO-SiO₂ with different Mg/Si ratios高橋 竜平^{1*}, 土山 明¹, 松野 淳也¹, 瀬戸 雄介²Ryohei Takahashi^{1*}, Akira Tsuchiyama¹, Junya Matsuno¹, Yusuke Seto²¹ 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, ² 神戸大学大学院理学研究科¹Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, ²Graduate School of Science, Kobe University

隕石は太陽系初期の物質進化過程を記録しており、太陽系の初期進化を理解するにあたって重要な物質である。炭素質コンドライトは、その化学組成が揮発性元素を除いた太陽大気のスเปクトル分析から得られた化学組成と類似するため、これらの中でも最も始原的であると考えられている。多くの炭素質コンドライトは serpentine, saponite などの層状珪酸塩や炭酸塩鉱物を含み、母天体での水質変成を受けていると考えられる。とくに、CI、CM、CR コンドライトは強く水質変成を受けている。このような水質変成過程を理解することは、太陽系の物質進化過程を理解する上で重要である。このため、水質変成を模擬した実験的研究が行われている。たとえば Ohnishi and Tomeoka [1] は enstatite 結晶を出発物質として水質変成実験を行い、serpentine や saponite の生成条件を議論した。一方、太陽系を作った固体原材料物質は非晶質珪酸塩であると考えられ、非晶質珪酸塩の水質変成作用を理解することが重要である。

Noguchi et al. [2] は CI コンドライト組成から Fe, Ni, S を除いた組成をもつ非晶質珪酸塩を出発物質として用いて、水質変成実験を行い、serpentine, saponite などの鉱物が反応性の高い非晶質物質と純水との反応で容易に生成することを明らかにした。しかしながら、反応初期に生成した層状珪酸塩は未同定であり、層状珪酸塩の生成プロセスもよくわかっていない。

本研究では非晶質珪酸塩からの層状珪酸塩の生成プロセスを理解するために、MgO-SiO₂-H₂O 系の単純系において水質変成実験を行った。とくに炭素質コンドライトの主要な水質変成鉱物である serpentine (Mg₃Si₂O₅(OH)₄) に着目し、出発物質である非晶質珪酸塩の Mg/Si 比の違いが serpentine の生成にどのような影響を及ぼすのかを考察した。

出発物質として用いた非晶質珪酸塩は熱プラズマ法で合成した粒径約 10nm の微粒子である。Mg/Si = 1.15, 1.25, 1.50, 1.75, 2.02 の 5 種類の組成のものに純水を加え (Water/Rock 比 (重量比) は 5.0)、密封したテフロン容器内で 150°C において 8, 24, 72, 168, 504 時間加熱した (圧力: 3.0 bar)。実験生成物は粉末 X 線回折法 (XRD) により鉱物同定を行い、電界放出型走査型顕微鏡 (FE-SEM) および透過型電子顕微鏡 (TEM) 観察と EDX による組成分析を行った。

すべての実験で層状珪酸塩が生成した。Mg/Si 比が 1.5 より大きいもの (Mg/Si=1.75, 2.02) では、168 時間以上で brucite (Mg(OH)₂) または magnesite (MgCO₃) が生成した (magnesite 中の C は容器として用いたテフロンに由来すると考えられる)。層状珪酸塩の底面反射はブロードであり、一般には出発物質の Mg/Si 比の値が大きくなるほど底面層間隔は連続的に短くなり (0.77-1.26nm)、また反射ピーク強度は大きくなった。Mg/Si=2.02 の組成では、実験時間の増加に従い層間隔が減少し、504 時間の実験では最も serpentine に近い層間隔を持つものが得られた。従って、serpentine と同じ Mg/Si 比 (1.5) を持つ非晶質珪酸塩から serpentine が生成しやすいわけではないことが分かった。

FE-SEM 観察では、実験生成物は数ミクロン以上の塊状物質になっており 10nm 粒子の痕跡は認められなかった。実験生成物の Mg/Si 比は出発物質より小さくなっており、Mg が選択的に水に溶出し、水溶液から層状珪酸塩や brucite (magnesite) の析出が起こったと考えられる。

実験生成物の Mg/Si 比と実験生成物の層間隔を考慮すると、実験生成物の層状珪酸塩は serpentine と stevensite (3 八面体のスメクタイトの一種) の不規則混合層鉱物になっている可能性が考えられる。TEM 観察では層状構造をもつものが観察されるがその詳細な構造は今後の課題である。

[1] Ohnishi and Tomeoka (2007) Meteoritics & Planetary Science, 42, 49-61. [2] Noguchi (2010) JpGU Meeting, PPS009-10.

キーワード: 水質変成過程, 炭素質コンドライト

Keywords: aqueous alteration process, carbonaceous chondrite

コンドライト母天体におけるサーペンティン、スメクタイトの生成条件の推定 Experimental study on serpentine and smectite formation on chondrite

宇津木 綾香¹, 瀬戸 雄介¹, 留岡 和重^{1*}, 浜根 大輔²

Ayaka Utsuki¹, Yusuke Seto¹, Kazushige Tomeoka^{1*}, Daisuke Hamane²

¹神戸大・院・理, ²東京大・物性研

¹Kobe Univ., Sci., ²Univ. Tokyo, ISSP

Aqueous alteration is one of the significant processes that occurred widely in the early solar system. Indeed, several groups of carbonaceous chondrites contain abundant hydrous phyllosilicates, most of which formed by aqueous alteration of anhydrous silicates such as olivine. Mineral species of the phyllosilicates is known to be unique for groups of carbonaceous chondrite; CM and CO groups contain serpentine, while CV contains mainly smectite. In CI and CR groups, both serpentine and smectite are found. These differences should be reflected from chemical conditions on their parent body, and yet are still unknown. In the present study, we conducted the hydrothermal alteration experiments using olivines (Fo100, 80, 50, 20, 0) with various pH solutions (pH 0, 7, 10, 14) as starting materials. They were sealed into gold capsules, loaded into a test-tube-type hydrothermal apparatus, and heated at 300°C under 500 bar. Run durations are 1 week and 1 month. All recovered products were analyzed by powder X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscope (SEM) equipped with an energy-dispersive X-ray spectrometer (EDS) and transmission electron microscope (TEM). As the results, serpentine was formed in various proportions by replacing Mg-rich olivine (Fo100, 80, 50) irrespective of pH conditions. On the other hand, smectite was formed replacing Fe-rich olivine (Fo20, 0) under alkaline condition (pH 14). Under the present conditions, we did not observe paragenesis of both serpentine and smectite, which might occur replacing Fo20~50 under alkaline conditions. EDS analyses showed that molar ratio of Fe/(Fe+Mg) in those phyllosilicates is significantly lower than that of olivine used as starting material. These results are basically consistent with previous studies [Ohnishi and Tomeoka (2007), MAPS; Zolensky et al. (1989), Icarus] where it has been suggested that aqueous alteration in the parent bodies occurred under high pH condition. The present study would provide more constraints on the aqueous-alteration conditions of the meteorites.

キーワード: 炭素質コンドライト, 水質変成, 熱水変成実験, サーペンティン, スメクタイト

Keywords: carbonaceous chondrite, aqueous alteration, hydrothermal experiments, serpentine, smectite

火星隕石中カンラン石の電子顕微鏡観察による鉄ナノ粒子観察 Investigation of iron-nanoparticles in Martian meteorite olivine using electron microscopy

竹之内 惇志^{1*}, 小暮 敏博¹, 井上 紗綾子¹, 三河内 岳¹
Atsushi Takenouchi^{1*}, Toshihiro Kogure¹, Sayako Inoue¹, Takashi Mikouchi¹

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

¹ Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo

1. はじめに

火星隕石, 特にシャーゴッタイトに含まれるカンラン石は強い衝撃作用により黒色化しており, また吸収スペクトルや磁化率が元のカンラン石とは異なることが知られている。これらの変化の原因はカンラン石中に晶出した平均 20nm 程度の大きさの鉄ナノ粒子であることが指摘されている [1,2]。また, Van de Moortele et al. [2] の磁化率測定によると, 鉄ナノ粒子の鉱物種が金属鉄だけでなく磁鉄鉱の存在が示唆され, Kurihara et al. [3] は観察で実際に磁鉄鉱が観察されたことを報告した。また, 三河内他 [4] は衝撃実験によりその選択が上昇温度の違いによって起こることを示した。しかし, これらの鉄ナノ粒子の形成過程や衝撃圧・温度との関係は詳しくわかっていない。本研究は金属鉄と磁鉄鉱の 2 種類の鉄ナノ粒子が共存すると言われているルールゾライト質シャーゴッタイト Northwest Africa 1950 (NWA1950) 隕石を, 最新の電子顕微鏡手法により詳細に調べること, この問題に関して新たな知見を得ることを目的とした。

2. 試料・手法

今回用いた試料は NWA1950 隕石であり, 主要構成鉱物はカンラン石 (75wt %) , 輝石 (35wt %) , マスケリナイト (8wt %) である [5]。カンラン石は黒色化しているが, その色づきにはそれぞれの粒子内でもばらつきがある。

観察には走査型電子顕微鏡 (SEM) , 透過型電子顕微鏡 (TEM) , 走査透過型電子顕微鏡 (STEM) を主に用いた。SEM の観察では電子線後方散乱回折 (EBSD) を用いた結晶方位の特定やエネルギー分散型 X 線分析 (EDS) による元素分析を行った。TEM では粉碎試料と収束イオンビーム (FIB) 法により切り出した薄膜試料を用いて制限視野電子回折やナノ電子回折, 高分解能 TEM 像による格子間隔測定により鉄ナノ粒子の鉱物種の同定を行った。STEM では広角円環状検出暗視野 (HAADF) 検出器により Z コントラスト像の観察や, EDS により組成像を取得した。

3. 結果

粉碎試料の TEM 観察では従来報告されていた数十 nm の鉄ナノ粒子とともに, 100nm を超える不定形・自形の大きな金属鉄粒子が観察された。他にも周囲を殻状の磁鉄鉱で囲まれた金属鉄粒子がひとつの結晶片でのみ観察された。次に岩石薄片の SEM 反射電子像によってこのような大きな金属鉄粒子の分布を調べた。その結果, カンラン石母結晶内に三次元的に見ると板状であると思われる Fe の多いカンラン石の領域と, その中にそれと斜めに交差するように鉄を多く含む粒子が配列する構造が観察された。EBSD で結晶方位を測定すると, この板状カンラン石の領域は母結晶の (100) などの結晶面に沿って形成されていた。この領域をより詳細に観察するために FIB 法で薄膜試料を作製し, TEM/STEM による観察を行った。これにより SEM で観察された粒子は厚さ数十 nm の薄膜状の形態を持ち, ナノ電子回折より金属鉄であることが確認された。さらに STEM の Z コントラスト像により, 薄膜状金属鉄を含む板状のカンラン石の領域には金属鉄ナノ粒子は含まれないこと, 板状のカンラン石の周囲には糸状の金属鉄微粒子の存在も確認された (図 1)。また STEM による組成像でも金属鉄の周囲にシリカの多い領域等は見られなかった。

4. 結論

今回の観察では SEM と TEM , STEM を組み合わせることによって, 様々な金属鉄粒子の形態が見つかり, それらのカンラン石母結晶における分布などが明らかにされた。また金属鉄を包有する磁鉄鉱という興味深い構造も見つかった。これらの粒子のさらなる観察・解析により衝撃変成時における温度圧力履歴の解明やリモートセンシングの分野での応用が期待される。

参考文献

[1] Treiman A. et al., 2007, J. Geophys. Res. 112, E04002, doi:10.1029/2006JE002777.2007. [2] Van de Moortele B. et al., 2007, Earth Planet. Sci. Lett. 262, 37-49. [3] Kurihara T. et al., 2009, 40th LPSC, #1049. [4] 三河内 岳ら, 2011, 日本惑星科学会誌, 20, 61-68. [5] Mikouchi T., 2005, Meteorit. Planet. Sci., 40, 1621-1634.

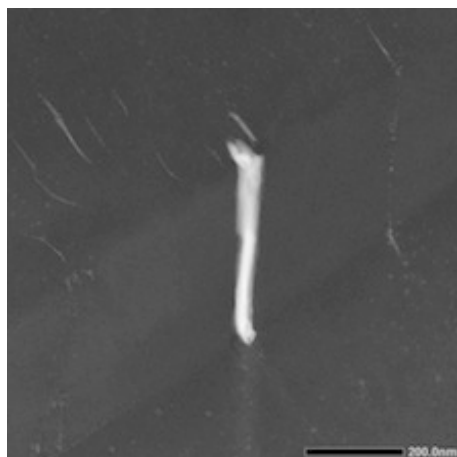
キーワード: 火星隕石, カンラン石, 電子顕微鏡, 衝撃, ナノ粒子

Keywords: Martian meteorites, olivine, electron microscope, shock, nanoparticle

PPS24-P16

会場:コンベンションホール

時間:5月23日 18:15-19:30



磁場勾配によって誘導される並進運動を用いた始原的隕石構成粒子の非破壊同定 Nondestructive identification of a single primitive-grain using the translational motion induced by field gradient

久好 圭治^{1*}, 澤野麗正¹, 田健登¹, 植田千秋¹
Keiji Hisayoshi^{1*}, Keisei Sawano¹, Kento Kuwada¹, Chiaki Uyeda¹

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

始原的隕石は、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。このような分析に先立って、隕石を構成する個々の粒子の物質識別を、非破壊で効率よく実施する手段が望まれる。近年、私たちは磁場勾配力による並進運動を利用した新しい磁化測定法を確立し、これに基づく物質同定法を提案した。すなわち重力の無視できる希薄な空間に開放した固体粒子は、その内部に誘導される磁気的エネルギーのため、永久磁石レベルの低磁場で、並進や回転を引き起こす。この運動は体積力に由来するため、同一の磁場分布の中では、粒子の質量に依存せず物質固有の磁化率のみに依存する。物質はそれぞれ固有の磁化率を持つので、この方法で得た磁化率を文献値と対応することで、単一粒子の物質識別ができる。これまでに私たちは mm ~ sub-mm サイズの反磁性粒子について、微小重力環境下の磁場勾配中に試料を解放し、試料の並進運動で得た磁化率が文献値と一致することを確認した。しかしながら隕石を構成する粒子の大多数は、sub-mm サイズ以下の常磁性体あるいは強磁性（フェリ磁性）体である。そこで今回、これらの条件の粒子に関しても上記の原理で物質識別が可能か、検証するための実験を進めた。

微小重力は前回に引き続き、室内型の小型落下ボックスを用いて発生させた。落下距離は 1.8m、有効な微小重力継続時間は 0.5 秒以下である。上記のボックスに観測装置を収納する必要があるため、装置の大きさを直径 30cm 以下に小型化した。具体的には小型のネオジム磁石プレートを使用した磁気回路を新たに導入することにより、試料の磁気並進運動の距離を約 2cm に縮小した。さらに、この距離の縮小により、粒子が終端速度に到達するまでの所要時間を 0.5 秒以下に短縮できた。

現在、磁化測定は SQUID や VSM で行うことが一般的である。しかしこれらの方法では、試料サイズの減少とともに、試料ホルダーからのバックグラウンド信号の寄与が顕著となる。また、試料の質量測定が不可欠であるが、これも 10 μ g 以下では実施が難しい。これに対し、私たちが提案する方法では、原理上（試料の運動が観測可能な限り）無制限に小さい試料の磁化率を測定できる。

隕石に限らず、混合試料の分析の前段階として、物質の種類を非破壊で分離・同定することが望まれる。すでに有機化学・生化学の分野では、精密測定に先立ってクロマトグラフィにより、有機分子の混合物を分子量ごとに同定する技術が確立しているが、無機試料でも、有機物と同様の分析過程が望まれる。常磁性、強磁性およびフェリ磁性体で、磁気並進運動を用いた測定原理の有効性が確認されれば、ほぼ全ての固体物質で物質識別が実現することになる。

キーワード: 磁場放出, 非破壊同定, 微小重力, 並進運動, 磁化測定, 体積力

Keywords: magnetic ejection, nondestructive identification, microgravity, translational motion, magnetization measurement, body force

惑星物質試料ホルダの洗浄

A Cleaning Method for Extraterrestrial Sample Holder

石橋 之宏^{1*}, 唐牛 譲¹, 矢田 達², 上相 真之¹, 八亀 彰吾³, 藤村 彰夫², 岡田 達明², 安部 正真²

Yukihiro Ishibashi^{1*}, Yuzuru Karouji¹, Toru Yada², Masayuki Uesugi¹, Shogo Yakame³, Akio Fujimura², Tatsuki Okada², Masanao Abe²

¹ JAXA・惑星探査プログラムグループ, ² JAXA宇宙科学研究所, ³ 東京大学大学院理学系研究科

¹Lunar and Planetary Program Group, JAXA, ²Inst. of Space and Astronautical Sci., JAXA, ³Grad. School of Sci., Univ. of Tokyo

The Hayabusa spacecraft captured particles at the surface of a near-Earth asteroid (25143)Itokawa [1]. The samples were stored in the reentry capsule of Hayabusa, and successfully brought to the Planetary Material Sample Curation Facility (PMSCF) of JAXA in 2010 [2,3,4]. They were extracted from the capsule and have been preserved in PMSCF[3,4]. Typical size of the sample is less than 100 micron, so handling of them is performed with a micro-manipulation system in the clean chamber filled with purified nitrogen [4]. Picked up samples are identified by FESEM-EDS observation, then each of them is placed on the gridded quartz glass plate in the sample holder for preservation.

Contamination control of extraterrestrial samples is essential matter, and it is important to handle and preserve samples without terrestrial contamination and alteration as possible. We hereby report the cleaning of quartz glass plates which contacts with samples directly.

The cleaning processes are performed in the clean room of PMSCF. A series of ultra sonic cleanings is a typical procedure for all materials such as metals and glasses. The first step of ultra sonic cleaning is to remove mainly organic impurities. Its solvent is typically 2-propanol. The cleaning in the solvent is repeated more than twice with 40 kHz frequency band for 20min, changing the solvent each time. The next step is to remove particles and ions. Its solvent is ultrapure water, overflowing from the ultrasonic bath to keep providing fresh water. The frequencies for the cleaning are 40, 100, and 1000 kHz bands. The cleaning is repeated twice at each frequency for 20 to 30 min. After the series of ultrasonic cleanings, water on the cleaned parts are removed by the purified nitrogen gas blow or air in clean booth.

For quartz glass, an additional acid and alkali treatment is performed after the series of ultra sonic cleanings. They are washed by heated alkali and acid solutions to remove organics, ions, and particles again. The washing method is a batch cleaning, and its procedure is our modified RCA method, originally for washing semiconductor wafer. The alkali and acid solutions are used twice respectively with ultrapure water rinse. After the cleaning and drying, the quartz glass plates is assembled to the cleaned holder or case with a cover, and stored in a desiccator filled with purified nitrogen.

The cleanness of washed quartz glass plate was evaluated with 4 methods. After our previous study [5], the detection limit was improved for metals and ions, and the analysis method was changed for organics.

1. Contaminant metals remained on the plate were extracted with 3 ml of HCl (0.35%) with H₂O₂ (0.3%), then 32 elements (B, Na, Mg, Al, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Co, Cu, Zn, Ga, Sr, Y, Zr, Mo, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Ba, La, Hf, Ta, W, Pt, Au, and Pb) were examined with inductively coupled plasma mass spectrometry. They were 1x10⁷ to 1x10¹⁴ atoms/cm² on the plate. Some contaminated elements are detected, but the amount of most of the elements does not affect the scientific analysis such as ion-probe measurement.

2. Contaminant ions were extracted with 60 ml of purified water, then 8 of ions (F⁻, Cl⁻, Br⁻, NO₂⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, PO₄³⁻ and NH₄⁺), lactic acid, acetic acid, formic acid and a few amines are examined with ion chromatography. They were less than 1x10⁻⁹ g/cm² on the plate.

3. Organics released by thermal desorption from the surface of the plate was collected to Tenax^(R) adsorbent resin. The collected organics are measured with gas chromatography mass spectrometer. Total amount of the organic carbon was less than 1x10⁻⁸ g/cm² on the plate.

4. Contaminant particles, larger than a few micron, were not observed by microscopes.

References

[1] Fujiwara, A. *et al.* (2006) *Science* **312**, 1330. [2] Abe, M. *et al.* (2011) *LPS* **42**, #1638. [3] Fujimura, A. *et al.* (2011) *LPS* **42**, #1829. [4] Yada, T. *et al.* (2012) *MAPS* in press. [5] Ishibashi, Y. *et al.* (2012) *LPS* **43**, #2887.

キーワード: 惑星物質試料, 汚染管理, 洗浄, はやぶさ, イトカワ

Keywords: extraterrestrial sample, contamination control, cleaning, Hayabusa, Itokawa