

PPS021-01

会場:101

時間:5月23日 08:30-08:45

## 超高感度極微量質量分析システム“ LIMAS ”の開発 Development of Laser Ionization Mass Nanoscope: LIMAS

江端 新吾<sup>1\*</sup>, 石原 盛男<sup>1</sup>, 内野 喜一郎<sup>2</sup>, 糸瀬 悟<sup>3</sup>, 松谷 幸<sup>3</sup>, 工藤 政都<sup>3</sup>, 坎本 尚義<sup>4</sup>

Shingo Ebata<sup>1\*</sup>, Morio Ishihara<sup>1</sup>, Kiichiro Uchino<sup>2</sup>, Satoru Itose<sup>3</sup>, Miyuki Matsuya<sup>3</sup>, Masato Kudo<sup>3</sup>, Hisayoshi Yurimoto<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学, <sup>2</sup> 九州大学, <sup>3</sup> 日本電子, <sup>4</sup> 北海道大学

<sup>1</sup>Osaka University, <sup>2</sup>Kyushu University, <sup>3</sup>JEOL Ltd., <sup>4</sup>Hokkaido University

JAXA のはやぶさや NASA のスターダストなど多くのサンプルリターンミッションが実行され、小惑星や彗星のサンプルを直接分析することが現実となった。これらの分析結果は初期太陽系物質科学に多数の新知見をもたらしている。しかし、このような試料は極微量であり、詳細に分析するには微小領域を高感度で分析可能な装置が必要である。

我々は超高感度極微量質量分析システム“ LIMAS ”を開発している。本システムは Ga 収束イオンビーム、フェムト秒レーザー、多重周回型質量分析計“ MULTUM ”で構成されている。本発表では LIMAS の性能と開発状況について報告する。

キーワード: はやぶさ, スパッタ中性子質量分析, 収束イオンビーム, フェムト秒レーザー, 多重周回質量分析計

Keywords: Hayabusa, SNMS, Focused ion beam, Femto second laser, Multi-turn mass spectrometry

PPS021-02

会場:101

時間:5月23日 08:45-09:00

## 光電子顕微鏡を用いた鉄隕石のナノスケール顕微分光解析

## Microspectroscopic analysis of iron meteorite using photoelectron emission microscopy (PEEM)

小嗣 真人<sup>1\*</sup>

Masato Kotsugi<sup>1\*</sup>

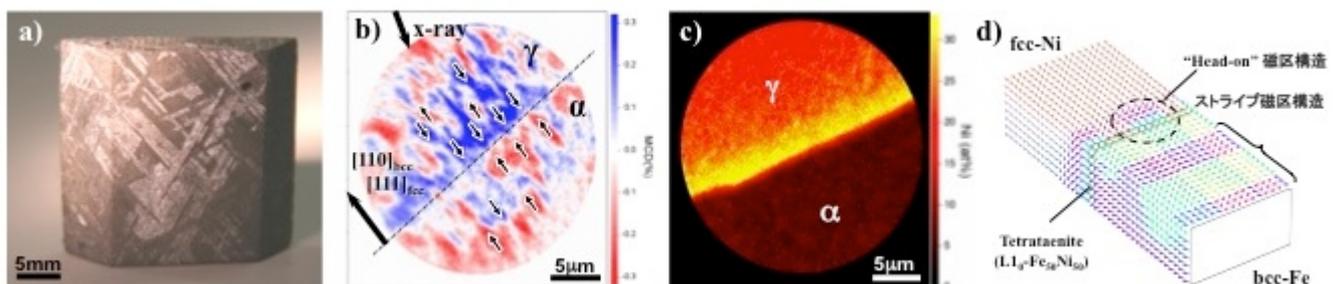
<sup>1</sup>SPring-8/JASRI

<sup>1</sup>SPring-8/JASRI

隕石の残留磁気は古代太陽系の知見を知る為の情報源として長らく調査されてきた。鉄隕石はウイドマンステッテン構造と呼ばれる特徴的な微細金属組織を示し、地球上のFeNi合金とは大きく異なる磁気ヒステリシスや磁気異方性を示すことが知られている。このことから、鉄隕石は惑星科学のみならず、物性科学においても興味深い研究対象である。そこで我々は鉄隕石を金属磁性材料の一種と位置付けて、その磁気特性の起源を金属組織と関連づけて直接調査した。

大型放射光施設SPring-8に設置された光電子顕微鏡を用いて磁区構造をナノスケールで直接観測した結果、界面において、互いに正対する「head-on」型の磁区構造が確認された。本構造は静磁エネルギーの損失が極めて大きく、通常のFeNi合金では期待できないユニークな磁区構造であった。同じ領域の組成と構造を調査したところ、界面では相と相FeNiに明確に分離しており、界面のごく近傍において、隕鉄特有の鉄ニッケル相「L10型FeNi規則合金」の薄膜が偏析していることが確認された。

これを理解するため、理論計算による検証を行った。テトラターナイトは通常のFeNi相と比較して保磁力と磁気異方性が飛躍的に高く、永久磁石のように振る舞うことから、周囲の磁化に強い影響を与え、head-on磁区構造の形成に至ることが示唆された。テトラターナイトは界面に偏在していることから、テトラターナイトの層状ネットワークが鉄隕石の磁気特性の担い手であると結論づけられた。テトラターナイトは磁気メモリとして優れた機能性(磁気異方性・保磁力)を示し、原料となるFeやNiは安価で資源が潤沢であることから、レアメタルフリーの次世代磁性材料として、今後磁気デバイスへの応用が期待される。



キーワード: 鉄隕石, 放射光, 光電子顕微鏡, 顕微鏡, 磁区構造, 古地磁気

Keywords: iron meteorite, synchrotron radiation, photoelectron emission microscopy, microscopy, magnetic structure, paleomagnetism

## 磁気放出運動に基づく簡易型微小重力装置を用いた始原的隕石構成粒子の非破壊同定 Nondestructive characterization of a single micron-sized primitive-grain realized by magnetic ejection in microgravity

久好 圭治<sup>1\*</sup>, 植田 千秋<sup>1</sup>  
Keiji Hisayoshi<sup>1\*</sup>, Chiaki Uyeda<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻  
<sup>1</sup> Graduate School of Science, Osaka Unives

近年、単一の微小粒子を対象とした様々な目的の精密分析が重要となりつつある。分析の前段階として物質の種類を非破壊で同定することが望まれるが、そのための有効な手法は確立していない。近年、われわれは、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新たに提案した。微小重力環境下で磁場勾配中に試料を解放し、磁場勾配力によって並進運動する試料の運動を解析することにより、反磁性物質の磁化率を検出した。物質はそれぞれ固有の反磁性磁化率を持つので、反磁性磁化率を精度よく検出することは物質を識別する原理の1つとして新たな手段となりうる。

磁場勾配をもつ空間において、微小重量環境で質量 $m$ の反磁性物質は  $ma = -m \quad B (dB/dx)$  で表される並進運動を行う。試料の加速度の値は、試料の磁化率と  $B (dB/dx)$  に比例する。ただし、 $B$  は磁場、 $(dB/dx)$  は磁場勾配をあらわす。試料の加速度より得られた磁化率は文献値とほぼ一致した。加速度  $a$  は反磁性磁化率 のみに依存し、質量  $m$  に依存しない。

従来の磁化測定法では、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 100 マイクログラム以下では実施が難しい。このため、試料サイズの減少と共に、測定が困難となる。われわれの提案するこの測定方法は、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することができる。

既存の微小重力実験施設は国内に数カ所しかなく、高額のコストがかかることもあり、ルーチンの分析手法としては利用しにくい状況にある。そこで今回、上記の原理に基づいて、導入が容易でしかも簡便に実施できる簡易型微小重力実験装置を製作した。これを用いて反磁性物質の同定を進めた。

実験装置は実験室内に設置できる規模で、落下距離は 1.5m、微小重力継続時間は約 0.6 秒である。試料は永久磁石で構成された磁気回路の約 0.7T の磁場中に放出される。落下装置は、大きさが 30cm × 30cm × 20cm の直方体のケースに、電動アクチュエーターを装備した真空チャンバー、試料ホルダー解放信号受信装置、試料ホルダー開閉コントローラー、磁石、電池、撮影用 HV ビデオカメラを搭載し、その重量は約 7kg である。落下装置は、1.5m の高さに設置された電磁錠に固定され、実験開始とともに、電磁錠から落下する。装置落下 0.2 秒後に、試料ホルダー解放信号が送られ、試料は磁場中に解放されて並進運動を行う。この運動を HV ビデオカメラを用いて記録する。試料を装填し落下装置を設置してから落下させ映像を取り出すまでに、これまでの大規模落下施設では複数の人員で 2 時間以上かかっていたが、この簡易装置では 1 人でおおよそ 30 分の行程で行える。

この装置を用いて、50-90  $\mu m$  のグラファイト粒子と 40-60  $\mu m$  のダイヤモンド粒子の磁化率の測定に成功した。また、グラファイトとダイヤモンドの混合した 40-90  $\mu m$  の粒子を磁場勾配中で解放すると、反磁性磁化率の違いによって、分離して並進運動を行うことが観察された。映像より解析された運動の加速度によって物質が同定される。今後観察はマクロレンズの使用や高速度撮影を行うことにより、空間分解能、時間分解能を向上させることによって、識別可能な試料の大きさは約 20  $\mu m$  程度までが期待できる。

始原的隕石を構成する粒子のサイズは、この簡易装置で測定が期待できる 20  $\mu m$  とほぼ同程度である。したがって、このサイズの微小粒子を非破壊で同定することができれば、始原的隕石を構成する粒子を分析する可能性が大きく広がることが期待される。観測された磁化率の値は  $-5 \times 10^{-6}$  から  $-2 \times 10^{-7} \text{ emu/g}$  の範囲内にあるが、隕石中の有機物質の反磁性磁化率はこの範囲内にあると予想される。よって、隕石を構成する微小の炭素物質についても、粒子単体で同定が可能となる。

キーワード: 反磁性磁化率測定, 非破壊, 同定, 磁気放出, 微小重力

Keywords: diamagnetic susceptibility measurement, nondestructive characterization, microgravity, magnetic ejection, field gradient force

PPS021-04

会場:101

時間:5月23日 09:15-09:30

## エフレモフカ隕石中 Fluffy Type A CAI のメリライトの酸素同位体組成分布 Oxygen isotopic compositions of melilite in Fluffy Type A CAI from Efremovka meteorite

川崎 教行<sup>1\*</sup>, 坂本 直哉<sup>2</sup>, 坂本 尚義<sup>3</sup>

Noriyuki Kawasaki<sup>1\*</sup>, Naoya Sakamoto<sup>2</sup>, Hisayoshi Yurimoto<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学大学院理学学院自然史科学専攻, <sup>2</sup> 北海道大学創成研究機構, <sup>3</sup> 北海道大学理学研究院自然史科学部門

<sup>1</sup>Natural History Sci., Hokudai, <sup>2</sup>CRIS, Hokudai, <sup>3</sup>Natural History Sci., Hokudai

CAI (Calcium-Aluminum-rich inclusion) は、太陽系で最も古い年代を示す岩石であり、太陽系形成の初期に起こったイベントを記録している。特に Fluffy Type A CAI 中の逆累帯構造を持つメリライトは、星雲中で圧力が下がっていく過程でガスから直接凝縮による結晶化により生成されたと考えられている (MacPherson と Grossman 1984)。本研究では、エフレモフカ隕石中 Fluffy Type A CAI のメリライト固溶体結晶におけるオケルマナイト-ゲーレンナイト組成と酸素同位体組成の分析を行った。試料はエフレモフカ隕石の研磨薄片を用いた。試料の観察と元素分析には FE-SEM-EDS (JEOL JSM-7000F, Oxford INCA Energy), 結晶方位解析には EBSD (HKL Channel 5), 酸素同位体分析には SIMS (Cameca ims-1270) を用いた。

本研究で観察した CAI は、10 x 3mm の大きさを持ち、ふわふわとした外形をしている。CAI は、多量のスピネルとアノーサイト、メリライト、Al-Ti に富むディオプサイドから成るコア部と、メリライト、Al-Ti に富むディオプサイドと少量のスピネルから成るマントル部とそれらを覆う Wark-Lovering リム (WL リム) で構成されている。メリライト単結晶は多くが約 15~25 ミクロンのサイズをもち、WL リム付近でメリライトの固溶体組成分布と酸素同位体組成が変化する二つの領域があった。

マントル部の一つの領域では、WL リムから内部約 200 ミクロンの範囲でメリライトは、それぞれの結晶の中心から粒界にかけて  $ak=25$  から 5 に変化する逆累帯構造を持っていた。一方、単結晶内部の酸素同位体組成は測定誤差範囲内で均一であった。しかし、この領域において、WL リムの近くのメリライト結晶は  $^{16}\text{O}$ -rich ( $\text{DELTA-}^{17}\text{O}=-19$  パーミル) であり、リムから離れた領域内側の結晶は  $^{16}\text{O}$ -poor ( $\text{DELTA-}^{17}\text{O}=-4$  パーミル) であり、その酸素同位体比は領域外側から内側にかけて連続的に変化していた。

マントル部の二つ目の領域では WL-Rim から内側約 40 ミクロンまでの範囲のメリライトは結晶粒界まで逆累帯構造 (組成範囲  $ak=25\sim 8$ ) を持っていた。しかし、それより内側の部分のメリライトは結晶の中心部分で逆累帯構造 (組成範囲  $ak=45\sim 30$ ) を持つが、その外側から正累帯構造 (組成範囲  $ak=30\sim 55$ ) に転じていた。正累帯構造部分の幅は 2~5 ミクロンであった。この二つ目の領域のすべてのメリライトの酸素同位体組成は累帯構造の違いや固溶体組成の違いに関わらず均一で  $\text{DELTA-}^{17}\text{O}=-3$  パーミルであった。

第一の領域の CAI が大きく成長しているとき、原始太陽系星雲ガスの酸素同位体比は  $^{16}\text{O}$ -poor から  $^{16}\text{O}$ -rich に変化した事を示しており、個々のメリライト結晶はそのガスから直接の凝縮物と考えられる。このとき星雲ガスの酸素同位体比の変化速度は個々のメリライト結晶の凝縮の成長速度よりゆっくりであった。一方、第二の領域は原始太陽系星雲ガスの酸素同位体比が  $^{16}\text{O}$ -poor のまま変化しない環境で形成した。その順番は、逆累帯構造を持つメリライト結晶が凝縮し、メリライトの集合体を形成した、その後、再加熱され、内側のメリライト結晶の粒界部分が部分溶解し、固化するとき融け残ったメリライトの上に、正累帯構造をもつメリライトが晶出したと考えられる。これらの二つの CAI はその後一つの CAI に合体し、現在観察される CAI を形作った。

キーワード: CAI, メリライト, 酸素同位体, 固溶体, コンドライト

Keywords: CAI, melilite, oxygen isotope, solid solution, chondrite

## Vigarano 隕石中 Fluffy Type A CAI におけるメリライト結晶の逆累帯構造に対応した酸素同位体ゾーニング Oxygen isotope zoning in reversely zoned melilite in Fluffy Type A CAI from Vigarano meteorite

片山 樹里<sup>1\*</sup>, 伊藤 正一<sup>1</sup>, 垪本 尚義<sup>1</sup>  
Juri Katayama<sup>1\*</sup>, Shoichi Itoh<sup>1</sup>, Hisayoshi Yurimoto<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学理学研究院自然史科学部門

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

Ca-Al-rich inclusion (CAI) を構成する各鉱物の酸素同位体組成は、三酸素同位体図上において質量に依存しない傾き 1 の直線に沿う分別を示している (Clayton et al., 1973)。この分布は、CAI 形成環境下において、各鉱物が結晶化に伴う <sup>16</sup>O-rich なリザーバーと <sup>16</sup>O-poor なリザーバーの混合の度合いの違いによる酸素同位体組成を反映している (e.g., Clayton, 1993)。従来の局所酸素同位体分析の結果により、複数回部分溶融プロセスに伴い形成した <sup>16</sup>O-rich なメルトと周囲の <sup>16</sup>O-poor なガスリザーバーとの間で、速やかに酸素同位体交換が起こったことで、各鉱物の酸素同位体分布が、この混合線に沿う分布となったと考えられている (e.g., Yurimoto et al., 1998)。さらに、ガスから直接凝縮したと考えられている細粒 CAI と呼ばれる各鉱物の酸素同位体分布は、<sup>16</sup>O-rich な酸素同位体分布を示している (e.g., Krot et al., 2002)。以上から、CAI 形成領域には、酸素同位体組成の <sup>16</sup>O-rich と <sup>16</sup>O-poor なガスリザーバーが存在することが一般的に受け入れられている。しかし、この CAI 形成領域における両者のガスリザーバーの関係は、不明瞭であった。

Fluffy Type A CAI (FTA) は、不規則な外形をしていることやメリライト結晶の逆累帯構造が存在していることにより、原始太陽系星雲ガスから直接固化したものであると言われている (MacPherson and Grossman, 1984)。すなわち、FTA を構成するメリライト単結晶の酸素同位体分布は、結晶成長時のガス環境下の値を反映していることが期待される。本研究では、<sup>16</sup>O-rich と <sup>16</sup>O-poor のガスリザーバーの関係を明らかにするため、Vigarano 隕石中 V2-01 FTA におけるメリライト単結晶の鉱物学的組織を評価し、その逆累帯構造に対応させた局所酸素同位体分布を明らかにした。

メリライトの累帯構造は、FE-SEM を用いた EDS による空間分解能約 1 μm の X 線マッピングにより決定した。また、この結晶境界は、FE-SEM を用いた EBSD による結晶方位マッピングにより詳細に評価した。得られたメリライト単結晶における逆累帯構造に対応させた酸素同位体組成は、二次イオン質量分析計を用いた約 3~5 μm の点分析による局所酸素同位体分析により取得した。

V2-01 FTA を構成するメリライト単結晶は、母天体集積時あるいは母天体上において圧密をうけ、形成時の組織が機械的に変形・破砕されている部分が多く認められ、結晶境界を評価した結果、大部分の結晶が、逆累帯構造を示していることがわかった。各鉱物内の酸素同位体分布は、ゾーニングを示さないものから約 30% のゾーニングを示すものまで様々であった。そのうち、2 つの単結晶 (Grain 8, Grain 21) において、酸素同位体ラインプロファイルを用いて評価した。Grain 8 は、コアからリムまで約 90 μm の範囲で  $\delta^{16}\text{O}$  から  $\delta^{16}\text{O}_5$  へと変化している逆累帯構造を示し、累帯構造の ak 組成変化に対応して、 $\delta^{16}\text{O}_8$  から酸素同位体組成が変化しはじめ、 $\delta^{16}\text{O}_5$  までの約 40 μm の範囲で  $^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  が -21% から -29% へと <sup>16</sup>O-rich に変化した。Grain 21 は、コアからリムまで約 65 μm の範囲で  $\delta^{16}\text{O}_{23}$  から  $\delta^{16}\text{O}_2$  へと変化している逆累帯構造を示し、累帯構造の ak 組成変化に対応して、 $\delta^{16}\text{O}_4$  から変化しはじめ、 $\delta^{16}\text{O}_2$  までの約 15 μm の範囲で  $^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  が -15% から -40% へと <sup>16</sup>O-rich に変化した。つまり、単結晶内で累帯構造の ak 組成変化に対応して、約 15~40 μm の範囲で酸素同位体組成が <sup>16</sup>O-poor から <sup>16</sup>O-rich へと変化していた。

FTA のメリライト単結晶における逆累帯構造に対応した酸素同位体ゾーニングは、結晶成長の間のガスリザーバーの酸素同位体組成の変化に対応していると考えられる (Yurimoto et al., 2008)。本研究では、少なくとも二つの結晶において、逆累帯構造に対応し、中心が <sup>16</sup>O-poor から、外側へ <sup>16</sup>O-rich へと変化する酸素同位体ゾーニングを示す単結晶を評価した。これは、メリライト単結晶の結晶成長の間にガスリザーバーの酸素同位体組成が <sup>16</sup>O-poor から <sup>16</sup>O-rich へと変化していたことを示している。つまり、CAI 形成領域においてメリライト単結晶が結晶成長する間にガスリザーバーの酸素同位体組成が <sup>16</sup>O-poor から <sup>16</sup>O-rich へと変化する領域が存在したことを示した。

## コンドリュール形成における新しい制約条件：溶融コンドリュール表面に沿った高速結晶成長

### A new constraint for chondrule formation: condition for rapid crystal growth along droplet surface

三浦 均<sup>1\*</sup>, 横山 悦郎<sup>2</sup>, 長嶋 剣<sup>3</sup>, 塚本 勝男<sup>1</sup>

Hitoshi Miura<sup>1\*</sup>, Etsuro Yokoyama<sup>2</sup>, Ken Nagashima<sup>3</sup>, Katsuo Tsukamoto<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大・理, <sup>2</sup> 学習院大・計セ, <sup>3</sup> 阪大・工

<sup>1</sup>Tohoku University, <sup>2</sup>Gakushuin University, <sup>3</sup>Osaka University

Barred-olivine (BO) chondrules are characterized by parallel set(s) of olivine bar crystals, which are platy in three-dimension [1,2]. A BO chondrule usually has an olivine crystal that covers the chondrule surface (rim). The olivine rim has the same crystallographic orientation as the inner olivine platelets. Tsukamoto et al. succeeded to reproduce the rim structure from a forsterite melt droplet in their container-less crystallization experiment using aero-acoustic levitation technique [3]. They found that the droplet cooled very rapidly at a rate of  $R_{cool} \sim 100 - 1000 \text{ K s}^{-1}$ , and then crystallized within a very short period of time less than  $\sim 1 \text{ s}$  at a large supercooling of  $DT \sim 600 \text{ K}$ . On the other hand, Tsuchiyama et al. also succeeded in reproducing the rim structure by evaporation in vacuum [4]. The cooling rate was  $R_{cool} = 1000 \text{ K hr}^{-1}$ , which is much slower than [3] by about three orders of magnitudes. Tsuchiyama et al. considered that the rim was formed by the rapid crystal growth along the droplet surface, which should become cooler than the interior by the latent heat of the evaporation. However, their hypothesis has not been verified yet.

To understand the formation mechanism of the rim structure, the crystal growth pattern inside the chondrule melt droplet should be investigated. We carried out numerical simulations of crystallization of a highly-supercooled melt droplet by using a phase-field method [5]. We considered the situation that a tiny crystal seeded at the droplet surface triggers crystallization of the droplet. We found that the rapid crystal growth along the droplet surface occurs when the cooling rate is considerably large. However, they did not investigate for a wide range of the supercooling of the droplet.

In this study, we investigated the condition of the rapid crystal growth along the droplet surface by using the phase-field method. We considered the cases that the seeding occurs when the surface of the droplet is supercooled by  $DT_s = 200, 300, 400, 500,$  and  $600 \text{ K}$ . The surface of the droplet cools at a constant heat flux;  $q_s = 5 \times 10^8, 1 \times 10^9, 2 \times 10^9, 5 \times 10^9,$  and  $1 \times 10^{10} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  for each  $DT_s$ . Because of the surface cooling, the droplet surface becomes cooler than the center by  $dT_{c-s} \sim 30 - 600 \text{ K}$  for the droplet radius  $r_d = 250 \text{ um}$  ( $\text{um} = \text{micro-meter}$ ). We found that the rapid crystal growth along the droplet surface occurred when  $dT_{c-s} \sim 100 - 200 \text{ K}$  or larger. The minimum value of  $dT_{c-s}$  for the rapid crystal growth along the droplet surface increases as  $DT_s$  increases. To derive the minimum value of  $dT_{c-s}$  analytically, we compared crystal growth timescales via two different routes inside the droplet; along the droplet surface, and across the droplet center. We found that the growth timescale along the surface becomes shorter than that across the center when  $a = dT_{c-s} / DT_s > \sim 0.2$ , which condition is rewritten by  $R_{cool} > \sim 2000 (DT_s / 300 \text{ K}) (r_d / 250 \text{ um})^{-2} \text{ K s}^{-1}$ . This condition is applicable for limited cases that satisfy the following two conditions; (a) crystal growth timescale is much shorter than a cooling timescale of the droplet, and (b) the supercooled droplet is a single component system, namely, the chemical composition of crystal is the same as the parent liquid. If the crystal growth kinetics depends on the growth direction, which usually comes from its crystal structure, we need small modification to the critical values of  $a$  and  $R_{cool}$  [5]. The new constraint for the rapid crystal growth along the droplet surface is applicable for limited cases, however, this is the first step to understand the formation mechanism of BO chondrule solidification texture.

Reference: [1] Tsuchiyama et al., *J. Geography*, **109**, 845-858, 2000 (in Japanese). [2] Noguchi, *Antarctic Meteorite Research*, **15**, 59-77, 2002. [3] Tsukamoto et al., *Antarct. Meteorites*, **24**, 179-181, 1999. [4] Tsuchiyama et al., *Geochim. Cosmochim. Acta*, **68**, 653-672, 2004. [5] Miura et al., *J. Appl. Phys.*, **108**, 114912, 2010.

キーワード: コンドリュール, バードオリビン, 形成条件, 結晶成長

Keywords: chondrule, barred olivine, formation condition, crystal growth

PPS021-07

会場:101

時間:5月23日 10:00-10:15

## とけ残り鉱物を含む微隕石の分類 Classification of micrometeorites bearing coarse-grained relict minerals

今栄 直也<sup>1\*</sup>, スーザン・テイラー<sup>2</sup>, 岩田尚能<sup>3</sup>  
Naoya Imae<sup>1\*</sup>, Susan Taylor<sup>2</sup>, Naoyoshi Iwata<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 国立極地研究所, <sup>2</sup> 米低温研, <sup>3</sup> 山形大学

<sup>1</sup>National Institute of Polar Research, <sup>2</sup>U.S. ACRREL, <sup>3</sup>Yamagata University

微隕石とは、地球に落下した大きさが約 100  $\mu$  m を主とする地球外物質で、南極大陸の氷床内から効率的に採集できる。そのほとんどがコンドライト質である。微隕石の多くは大気圏でほぼ全溶融している。残りの 10~15%は大気圏加熱を免れた鉱物を残存し、この鉱物をとけ残り鉱物と呼ぶ。本研究では、とけ残り鉱物の主要元素化学組成をエレクトロン・プローブ・マイクロアナライザーで分析し、既存のコンドライトの化学グループと比較した。また、とけ残り部の組織を良く残存する場合は、コンドライトの組織と比較した。とけ残り鉱物の多くは、かんらん石と低 Ca 輝石である。FeNi 合金、斜長石、含水鉱物、高 Ca 輝石、クロム鉄鉱、シリカ鉱物、および硫化鉄が少量認められる。

これまでに約 100 個のとけ残り鉱物をよく残存する微隕石を調べた。非平衡普通コンドライト中の 0.3wt% 未満の CaO 量のフォルステイト (FeO=1wt% 程度) が欠損する。これは微隕石が炭素質コンドライト的か普通コンドライト的かを区別する指標になる。とけ残り鉱物を含む微隕石の過半数は、炭素質コンドライトと関連づけられる。低 Ca 輝石の Ca 量は Renazzo タイプ (CR) では低い (CaO<0.5wt%) ので、他の化学グループ (CaO=0~3 wt%) と区別できる。約 30%ある普通コンドライトと関連づけられる多くは非平衡質である。残りの多く (10%以上) は高 Mn 型である。高 Mn 型は隕石や惑星間塵 (IDP) では認識されていないので極地氷床からのみ採集できる地球外物質である。また、組織に着目して次の様な事がわかる。炭素質コンドライトと関連づけられる微隕石のうち 4 個は、CO<sub>3</sub> のコンドリュールそのものであると考えられる組織を呈する。CO<sub>3</sub> コンドリュールサイズは他のコンドライトのコンドリュールに比べて小さく、約 100-200  $\mu$  m である。これは CO<sub>3</sub> コンドリュールが丁度微隕石のサイズほどに小さいために大気圏加熱を生き残ったと考えられる。

キーワード: 微隕石, 分類, コンドライト, 隕石

Keywords: micrometeorites, classification, chondrites, meteorites

PPS021-08

会場:101

時間:5月23日 10:45-11:00

## Murchison (CM2) 隕石の特異な粒状かんらん石インクルージョンのREEパターンおよび酸素同位体 REE pattern and oxygen isotopes in a unique granular-olivine inclusion from the Murchison (CM2) meteorite

井上 睦夫<sup>1\*</sup>, 伊藤正一<sup>2</sup>, 木村真<sup>3</sup>, 坂本尚義<sup>2</sup>, 中村昇<sup>4</sup>

Mutsuo Inoue<sup>1\*</sup>, Itoh Shoichi<sup>2</sup>, Kimura Makoto<sup>3</sup>, Yurimoto Hisayoshi<sup>2</sup>, Noboru Nakamura<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 金沢大学, <sup>2</sup> 北海道大学, <sup>3</sup> 茨城大学, <sup>4</sup> NASA Johnson Space Center

<sup>1</sup> Kanazawa University, <sup>2</sup> Hokkaido University, <sup>3</sup> Ibaraki University, <sup>4</sup> NASA Johnson Space Center

Murchison (CM) 隕石より微細な merrillite や nepheline を含む均質な粒状かんらん石 (Fa38.5) インクルージョン (MI-GO) を分離、微量親石元素 (REE、K、Rb、Sr、Ba) を同位体希釈質量分析法にて定量した。この MI-GO は鉱物的にも化学的にも水質変成の形跡がみられないにもかかわらず、大きな負の異常 (~70%) を伴う L-REE に富むスムーズな REE 存在度パターン (La,  $6.1 \times \text{CI}$ ; CI-norm. La/Lu ratio = 3.0)、アルカリ金属の分化 (CI-norm. K/Rb = 2.2) といった特徴がみられた。この REE パターンは、CV、CO グループや非平衡隕石 (UOCs) のコンドリュールや CAIs のみならず水質変成にさらされた CM 隕石のコンドリュールと異なり、むしろエコンドライトや月の玄武岩 (KREEP) に類似するものである。この特異な REE パターンの特徴はネブラでの分別や水質変成とは矛盾する一方、微小惑星などを舞台とした固相/液相または固相/固相過程の分別で説明できる。さらに MI-GO の起源を議論するため、かんらん石の酸素同位体組成を測定した。本年会では、REE を初めとした微量元素、構成鉱物に、酸素同位体の測定結果を加えることにより、本インクルージョンの起源および源始太陽系微小母天体の進化にもたらす制約を議論する。

PPS021-09

会場:101

時間:5月23日 11:00-11:15

## Reduced type に分類される CV3 炭素質コンドライト (RBT04143, QUE97186) の多様な形成進化過程 Diverse formation history recorded in two reduced-type carbonaceous chondrites RBT04143 and QUE97186

石田 初美<sup>1\*</sup>, 中村 智樹<sup>1</sup>, 三浦 均<sup>1</sup>, 嘉数 勇基<sup>2</sup>  
Hatsumi Ishida<sup>1\*</sup>, Tomoki Nakamura<sup>1</sup>, Hitoshi Miura<sup>1</sup>, Yuki Kakazu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大・理, <sup>2</sup> 九大・理

<sup>1</sup>Tohoku University, <sup>2</sup>Kyushu University

本研究では CV3 炭素質コンドライトの中で最も始原的である、reduced type に分類される 2 試料 (RBT04143, QUE97186) の形成進化過程を調べることを目的として詳細な鉱物学的、酸素同位体比的な研究を行った。

偏光顕微鏡を用いた観察によると、RBT04143 のマトリックスは空隙率が高く、円形のコンドリュールが多いのに対し、QUE97186 のマトリックスは粒子が密に詰まり、かつコンドリュールが一定方向に偏平していた。この理由としては母天体上でのショックが考えられる。QUE97186 のコンドリュール中のオリビンや輝石は、波動消光や planar deformation fractures を示した。これらの結果を Nakamura et al.,(2001)、Stoffler et al.,(1991) と比較したところ、約 20GPa 程度の衝撃圧が見積もられた。

次に、2 試料が受けた熱の履歴を調べるため、FE-EPMA を用いてマトリックス中の olivine 粒子の Fa# を測定した。結果、QUE97186 の Fa# が 40~60 の範囲をとるのに対し、RBT04143 の Fa# は 0~90 の幅広い値を示した。RBT04143 の結果より、原始惑星系円盤における CV3 母天体形成領域に存在していた olivine 微粒子の Fa# も、同様に幅広い値をとっていたと考えられる。一方、QUE97186 の Fa # が均質化した理由としては、母天体上でのショックによる衝撃加熱作用が示唆される。

マトリックスの細粒オリビンが熱の影響を受けていないことから、RBT04143 のコンドリュールや CAI は隕石母天体中における熱拡散による同位体比変動を受けておらず、原始惑星系円盤での様々なプロセスを保存していると考えられる。そこで、SIMS を用いて RBT04143 の Type A コンドリュールと TypeB CAI の酸素同位体分析を行った。TypeB CAI は、内側から melilite、fassite、diopside で構成されており、これらの鉱物の酸素同位体組成は、コアの melilite が 16O-poor、リムの diopside が 16O-rich という値を示した。このことから、CAI 中の鉱物の拡散速度が律速となるような星雲ガスとの酸素同位体交換が起こったことが示唆される。今回測定した Type A コンドリュールの中には、Fe-rich な olivine だけでなく Mg-rich な olivine が数か所見られた。Fe-rich な部分と Mg-rich な部分をそれぞれ測定したところ、Fe-rich な olivine の同位体組成は均一となっているのに対し、Mg-rich な olivine は 16O-rich な組成を示した。従って、この type A コンドリュールはネブラ中でコンドリュールが形成される際、Mg-rich なものは溶け残り前駆物質の同位体組成を保存しているのに対し、そのほかの部分は溶融し酸素を含むガスと同位体交換をした可能性が考えられる。

最後に、QUE97186 のマトリックスは強い衝撃変成の証拠を保存している。衝撃加熱により一部の硫化物は溶融しており、衝撃温度は 1170 度を超えていたことが分かった。この温度から冷却する際にオリビン微粒子の Fa# が均質化した可能性が高いため、今後は、オリビン微粒子中のサイズ分布と鉄マグネシウム拡散を考慮したシミュレーションを行い、冷却速度の程度を調べる予定である。

キーワード: CV3 炭素質コンドライト

Keywords: CV3 carbonaceous chondrites

PPS021-10

会場:101

時間:5月23日 11:15-11:30

## 始原的エンスタタイトコンドライト (EH3) の熱史の考察 Thermal metamorphism in type 3 Enstatite chondrites.

小松 睦美<sup>1\*</sup>, Fagan Timothy<sup>1</sup>, 三河内 岳<sup>2</sup>  
Mutsumi Komatsu<sup>1\*</sup>, Timothy Fagan<sup>1</sup>, Takashi Mikouchi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 早稲田・地球科学, <sup>2</sup> 東大・理・地球惑星

<sup>1</sup>Earth Sciences, Waseda University, <sup>2</sup>Earth and Planetary Sci., Univ. of Tokyo

### Introduction:

Enstatite chondrites represent initial formation and metamorphism under highly reduced conditions. Like the other chondrite groups, the enstatite chondrites underwent various degrees of thermal metamorphism resulting in distinct petrologic types [1]. Type 3 chondrites are the least metamorphosed type among chondrite groups. For ordinary chondrites, Sears et al. [2] subdivided type 3 into ten finer divisions (type 3.0 through 3.9) using thermoluminescence (TL) sensitivity as an indicator of metamorphic grade. Subsequently, some mineralogical changes with increasing subtype have been identified [3]. An approach similar to that of [3] has been applied to enstatite chondrites [4]; however, a systematic understanding of metamorphic reactions has not been attained and metamorphic sub-types have not been established for enstatite chondrites. In this study, we examined 5 enstatite (EH3) chondrites in order to assess variations in texture and mineral compositions among the EH3 chondrites (ALHA81189, ALH84170, Sahara97096, Y-691, and PCA82518). We also compared these observations with EH4 (Indarch) and EH5 samples (St.Marks and LEW88180) to gain a broad perspective of metamorphism of EH chondrites.

### Results and Discussion:

All of EH3 chondrites in this study are dominantly composed of FeO-poor pyroxene. Metallic and sulfide minerals occur as complex nodules which are composed of combinations of troilite, Fe-Ni metal, perryite, niningerite, djerfisherite, and daubreelite. Occasionally, oldhamite is also present.

ALHA81189 contains well-defined chondrules and chondrule fragments. Many chondrules are rimmed by silica or silica-rich rims in ALHA81189 and Y-691, whereas silica or silica-rich rims are not as abundant in ALH84170 and Sahara97096. In PCA82518, silica-rich rims were not identified. Instead, euhedral silica is observed inside chondrules.

Sulfide nodules are abundant in all EH3s. Sulfide/metal nodules in ALHA81189, ALH 84170 and Y-691 have sizes and shapes similar to silicate chondrules and are composed of combinations of troilite, kamacite, daubreelite, and niningerite. Generally, troilite and daubreelite occupy the cores of the spherules whereas kamacite usually occurs in the outer portions. Sulfides are more dispersed in PCA82518; the core-rim structure as described above is absent. In contrast, mixed sulfide/metal nodules are rare and sulfides tend to occur as dispersed crystals in Indarch (EH4), St. Marks (EH5) and LEW 88180 (EH5).

The Fa content of olivine, Fs content of pyroxene, and Ti and Cr contents in troilite show wide ranges of composition in the EH3 chondrites. Ti concentrations of troilite in ALHA81189 are lower than in the other EH3s, and those in PCA are the highest.

Based on the textural characteristics of EH3 chondrites, we can subdivide EH3s into 3 distinct groups: (1) Primitive, ALHA81189 and Y-691; (2) low degree of metamorphism, ALH84170 and Sahara 97096; moderately metamorphosed, PCA82518. This trend is supported by the chemical compositions of pyroxene and troilite; primitive EH3s have high Fs content in pyroxene and low Ti content in troilite, whereas metamorphosed EH3s have lower Fs content in pyroxene and higher Ti content in troilite. These results suggest that the reduction (lower  $f(O_2)$ ) occurred during thermal metamorphism [5].

**References:** [1] Zhang et al. (1995) JGR, 100, E5, 9417-9438. [2] Sears et al. (1983) LPS XIV, 682-683. [3] Grossman J. N. and Brearley A. J. (2005) Meteoritics & Planet. Sci., 40, 87-122. [4] Bendersky et al. (2007) LPS, XXXVIII, 2077. [5] Fagan T. J. et al. (2010) LPS XXVII, 1534.

キーワード: 隕石, コンドライト, 変成

Keywords: meteorites, chondrites, metamorphism

PPS021-11

会場:101

時間:5月23日 11:30-11:45

## イブナ CIコンドライト中のドロマイトの Mn-Cr 年代測定 Mn-Cr dating of dolomite in the Ivuna CI chondrite

藤谷 渉<sup>1\*</sup>, 杉浦直治<sup>1</sup>, 佐野有司<sup>1</sup>

Wataru Fujiya<sup>1\*</sup>, Naoji Sugiura<sup>1</sup>, Yuji Sano<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学

<sup>1</sup>The Univ. of Tokyo

CI chondrites are compositionally the most primitive rocks among the solar system materials, although they experienced pervasive aqueous alteration. In order to decipher their geological history, it is important to determine the timescale of the aqueous activity in the CI chondrite parent body.

<sup>53</sup>Mn-<sup>53</sup>Cr systematics (<sup>53</sup>Mn decays to <sup>53</sup>Cr with a half-life of 3.7 Myr) of dolomite and breunnerite measured with ion probes have been reported for the Orgueil CI chondrite (e.g. Hoppe et al., 2007). For the Ivuna CI chondrite, there is only one report on dolomite. Hence, further investigations are needed for the accurate Mn-Cr age determinations. Here we report Mn-Cr systematics of six dolomite grains in Ivuna.

Six dolomite grains in Ivuna were analyzed for Mn-Cr systematics with the NanoSIMS installed at Atmosphere and Ocean Research Institute, the Univ. of Tokyo. Their Mn concentrations range from 0.7 to 2.7 wt.%. <sup>53</sup>Ca<sup>+</sup>, <sup>52,53</sup>Cr<sup>+</sup> and <sup>55</sup>Mn<sup>+</sup> were measured with the O<sup>-</sup> primary ion beam (~5 micrometers in diameter, ~1 nA). The <sup>55</sup>Mn/<sup>52</sup>Cr relative sensitivity factor (RSF) of 0.690 is determined using a synthetic calcite standard doped with Mn and Cr (Sugiura et al., 2010). Errors on <sup>53</sup>Cr/<sup>52</sup>Cr and <sup>55</sup>Mn/<sup>52</sup>Cr ratios are based on the counting errors. <sup>53</sup>Cr excesses of the Ivuna dolomite are represented as permil deviations from the <sup>53</sup>Cr/<sup>52</sup>Cr ratio of the standard assumed to be 0.1134 (Lodders et al., 2009).

Obtained <sup>53</sup>Cr excesses are well correlated with <sup>55</sup>Mn/<sup>52</sup>Cr, which indicates the in-situ decay of <sup>53</sup>Mn. All data lie on a single regression line in the isochron diagram (i.e., no difference is found among slopes of the six grains) and the slope of the best fit line for the whole data corresponds to (<sup>53</sup>Mn/<sup>55</sup>Mn)<sub>0</sub> of (2.64 +/- 0.44) x 10<sup>-6</sup>. Then an absolute age of 4562.5 +/- 0.8/-1.0 Ma is calculated for dolomite in Ivuna using the LEW86010 angrite as a time anchor (Amelin, 2008; Lugmair and Shukolyukov, 1998).

The present data for dolomite in Ivuna gives a younger age than that in Orgueil reported by Hoppe et al. (2007) and Petit et al. (2009). However, these studies used silicate standards for calibration of <sup>55</sup>Mn/<sup>52</sup>Cr ratios of dolomite, which resulted in systematic errors in the obtained ages. If the RSFs are corrected, then the Mn-Cr ages of the Orgueil dolomite become consistent with that of the Ivuna dolomite. The Ivuna dolomite in this study is older than the Orgueil and Ivuna dolomite reported by Endress et al. (1996), which is unlikely due to the difference in the RSFs used. The reason for this discrepancy is unknown at this time.

Fujiya et al. (2011) reported Mn-Cr ages of calcite and dolomite in four CM chondrites, indicating that calcite and dolomite in CM and CI chondrites formed around the same time. Because calcite precipitation appears to have preceded dolomite formation (de Leuw et al., 2010), our data imply contemporaneous accretions of the CI and CM chondrite parent bodies and dolomitization occurred soon after calcite precipitation.

On the other hand, it seems that individual breunnerite grains in Orgueil show variable and younger ages than those of dolomite grains (Hoppe et al. 2007; Petit et al., 2009). Therefore, we conclude that the breunnerite formation persisted for at least 7 Myr following dolomite formation. Given that the Mn-Cr ages in Petit et al. are biased due to the RSFs, breunnerite formation (and therefore, aqueous alteration) in Orgueil lasted until ~4553 Myr (at least 10 Myr after dolomite formation in Ivuna).

キーワード: ドロマイト, CIコンドライト, Mn-Cr 年代測定, 水質変成

Keywords: dolomite, CI chondrite, Mn-Cr dating, aqueous alteration

PPS021-12

会場:101

時間:5月23日 11:45-12:00

## 炭素質コンドライト中における重水素に富む有機物に含まれるケイ酸塩粒子の酸素同位体組成

### Oxygen isotopic compositions of silicate grains associated with D-rich carbonaceous matters in a carbonaceous chondrite

橋口 未奈子<sup>1\*</sup>, 小林 幸雄<sup>2</sup>, 坂本 尚義<sup>1</sup>

Minako Hashiguchi<sup>1\*</sup>, Sachio Kobayashi<sup>2</sup>, Hisayoshi Yurimoto<sup>1</sup>

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

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

コンドライト隕石中の有機物は、D や <sup>15</sup>N に富むことが知られており、分子雲あるいは原始惑星系円盤の外縁部で形成したことが示唆されている。分子雲など極低温環境下では、ケイ酸塩粒子など星間ダスト粒子を核とした氷の層の中で有機物が形成されると考えられている [e.g. 1]。

これまでの我々の研究では、水素同位体イメージングを用いたその場分析により、CR2 コンドライト NWA 801 隕石のマトリックス中から、複数の重水素に富む炭素質物質を発見し、それらの形状観察を行った [2]。炭素質物質の水素同位体組成は 1360-11000 ‰ であり、これらは重水素に富むことから、分子雲あるいは原始惑星系円盤の外縁部で形成されたものと考えられた。また、発見した炭素質物質の中には、ケイ酸塩粒子を内包したリング状の炭素質物質 (ring globule) や、炭素質物質とケイ酸塩粒子の集合体 (globule aggregate) が存在した。

本研究では、これらの炭素質物質に含まれるケイ酸塩粒子に着目した。北海道大学の同位体顕微鏡 [3] を用いた酸素同位体 (<sup>16</sup>O, <sup>17</sup>O, <sup>18</sup>O) イメージングにより、ケイ酸塩粒子の酸素同位体組成を測定した。

計 12 個の ring globule や globule aggregate と共存するケイ酸塩粒子の酸素同位体組成には、太陽系物質の酸素同位体組成との違いが見られなかった。この結果は、ケイ酸塩粒子が太陽系内で形成されたものであることを示唆する。従って、ring globule と globule aggregate は、初期太陽系における原始惑星系円盤内で形成されたと考えられる。しかし、分子雲内のプレソーラーケイ酸塩粒子の大部分が、太陽系物質と同じ酸素同位体組成をもっていることを否定することは困難であり、分子雲において ring globule や globule aggregate が形成した可能性は否定出来ない。

今後、他の ring globule や globule aggregate の酸素同位体分析を進め、有機物とプレソーラー粒子の共存関係を統計的に検討することで、重水素に富む炭素質物質の起源の解明を目指す。

#### References

[1] Li, A. and Greenberg, J. M. (1997) *Astron. Astrophys.*, 323, 566

[2] Hashiguchi, M. et al. (2010) 73rd Annual Meeting of the Meteoritical Society., 5181

[3] Yurimoto, H. et al. (2003) *Appl. Surf. Sci.*, 203, 793

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

Keywords: Carbonaceous chondrite, Organic material, Oxygen isotopic composition, Isotopography

PPS021-13

会場:101

時間:5月23日 12:00-12:15

## New insight into origin and evolution of insoluble organic matter in meteorites New insight into origin and evolution of insoluble organic matter in meteorites

癸生川 陽子<sup>1\*</sup>, Wang Ying<sup>1</sup>, Cody George<sup>1</sup>  
Yoko Kebukawa<sup>1\*</sup>, Ying Wang<sup>1</sup>, George Cody<sup>1</sup>

<sup>1</sup> カーネギー研究所

<sup>1</sup>Carnegie Institution of Washington

Organic matter in meteorites provides us clues to understand the early Solar System history. Our recent study revealed that insoluble organic matter (IOM) in primitive chondritic meteorites is predominantly derived from the polymerization of interstellar formaldehyde with incorporation of ammonia, evidenced by molecular spectroscopic characters. Here we show molecular structures of laboratory synthesized formaldehyde polymer and compare with the formose solids to chondritic IOM using various spectroscopic methods; solid state <sup>13</sup>C nuclear magnetic resonance (NMR), Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy and X-ray absorption near edge structure (XANES). We will discuss about the kinetics of polymer yield, and effects of silicate minerals coexisting with chondritic organic matter. Isotopic exchange experiments with formaldehyde polymer and water also can explain the origin of deuterium enrichment in the IOM from carbonaceous chondrites. We featured <sup>1</sup>H-<sup>2</sup>H cross polarization NMR which allows us to see site-specific deuterium enrichment in organic polymers. The results show that organic hydrogen is very exchangeable with water. The deuterium enrichment of chondritic IOM could be explained by the deuterium exchange with water during aqueous alteration.

The final molecular structure of chondritic IOM has been shown to reflect the extent of parent body processing, and to have significant variations among chondrite classes and groups. The principal inference has been that the molecular structure of IOM changes as a result of environmental conditions in the parent body. Our recent studies of individual lithology of the Tagish Lake meteorite provides insight into the wide range of molecular structure complexity that existed locally in a single parent body. We conducted heating experiments of most pristine IOM from Tagish Lake. The molecular structure evolution observed in Tagish Lake is representable with flash heating with several hundred degree C. Thus, the changes in Tagish Lake IOM from different lithologies may reflect differing degrees of flash heating due to impact processes.

キーワード: 不溶性有機物, コンドライト, NMR, FTIR, XANES

Keywords: insoluble organic matter, chondrites, NMR, FTIR, XANES

## X線マイクロCTによる炭素質コンドライト中の有機物ナノグロビュールの3次元 的観察と画像シミュレーションによるCT像の評価

### Three-dimensional observation of organic nanoglobules by microtomography and evaluation of CT images by image simulation

松本 徹<sup>1\*</sup>, 土山 明<sup>1</sup>, 中村-メッセンジャー 圭子<sup>2</sup>, Michael.E.Zolensky<sup>2</sup>, 中野 司<sup>3</sup>, 上杉 健太郎<sup>4</sup>

Tooru Matsumoto<sup>1\*</sup>, Akira Tsuchiyama<sup>1</sup>, Keiko Nakamura-Messenger<sup>2</sup>, Michael.E.Zolensky<sup>2</sup>, Tsukasa Nakano<sup>3</sup>, Kentaro Uesugi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 阪大・院理・宇宙地球, <sup>2</sup> NASA Johnson Space Center, <sup>3</sup> 産総研地質情報研究部門, <sup>4</sup> JASRI

<sup>1</sup> Earth and Space Sci., Osaka Univ, <sup>2</sup> NASA Johnson Space Center, <sup>3</sup> GSJ/AIST, <sup>4</sup> JASRI

有機物ナノグロビュールと呼ばれる数百 nm の直径の球状有機物が、始原的炭素質コンドライト、IDPs、81P/Wild2 彗星塵中などに見つかっており、多くの場合その内部には空隙が存在している [1-3]。ナノグロビュールの成因として、<sup>15</sup>N、<sup>13</sup>C の正の同位体異常から分子雲や原始太陽系円盤外縁部などの極低温環境下での有機物氷の光化学反応の可能性 [4] や、有機物の天体中での水質変成 [1] などが挙げられている。もし、これらの過程を経て生成したのであれば、ナノグロビュール内部の空隙部分には、主に H<sub>2</sub>O と揮発性有機物で構成された氷あるいは流体で満たされていた可能性がある。しかし、これまでの TEM 観察などの破壊分析では、流体が存在しても試料作成時に失われ、その存在は確認されていない。従って、流体の存在の有無を確かめるためには、非破壊による隕石内部へのサブミクロンスケールの分析が必要とされる。

そこで本研究では SPring8 の BL47XU において、吸収コントラストを利用した結像型 X 線 CT [5] を用いて、炭素質コンドライトである Tagish Lake 隕石中のナノグロビュールの撮影を試みた。数十 μm の隕石破片サンプルを 7 keV で撮影し、各サンプルにつき約 800 スライス画像から成る 3 次元構造が得られた。

撮影した一部の隕石からウルトラマイクロームにより超薄切片を切り出し、TEM 観察を行った。TEM 像で確認できたナノグロビュールを CT 像と比較したところ、ナノグロビュールが確認できた。しかしながら、CT 像は TEM 像とは一対一には対応せず、また中心部で負の線吸収係数を持つなど、X 線の屈折の影響が考えられる。従って、CT 像からナノグロビュール内部の様子を推定することができなかった。また、CT 像において多くのナノグロビュールらしき物体が見られたが、TEM 観察と比較していないため、本当にナノグロビュールかどうかの判断が困難なものもある。

そこで、X 線の屈折と吸収を考慮した CT 像をシミュレーションによって求めることにより、CT 像のみから隕石中のナノグロビュールを特定し、さらにその内部の状態を明らかにできるか調べた。Tagish Lake 隕石マトリックス中の代表的な鉱物である saponite に囲まれているナノグロビュールを考え、内部は空隙がある場合、水で満たされている場合を想定した。平行 X 線が試料に入射し吸収・屈折を起こした透過光が検出器に到達した際の強度を求めた。線数係数と屈折率は物質の密度と組成から求めた。実際の撮影では結像光学系を使用したため、フレネルゾーンプレート (FZP) の焦点の像が拡大されるが、今回のシミュレーションでは検出器の位置は FZP の焦点に対応することになる。得られた透過強度から、検出器の画素サイズ (40.8nm)、point spread function (FWHM=360nm) を考慮し再構成計算によって CT 像を作成した。その結果、水を含むナノグロビュールと空隙を持たないものは CT 像で区別できないこと、また、有機物の膜が薄いナノグロビュールと球状の空隙は区別できないことが分かった。また、実効的な空間分解能は約 300 ミクロンであった。TEM 像との比較したナノグロビュールの CT 像とシミュレーションで得られた CT 像とを比較すると、このナノグロビュールは水を含んでいない可能性が高いことが分かった。しかし、シミュレーション結果と実際の CT 像は厳密に一致していない。これは、試料の不均一性や、FZP の焦点の試料との相対的な位置が撮影中に変化するなどの原因が考えられる。一方、シミュレーション結果により、CT 像からナノグロビュールの外形を決定できることが明らかになった。これよりナノグロビュールの 3 次元構造を定量的に求めることができた。

本研究により CT 像からナノグロビュールの隕石中の位置や分布の 3 次元情報を知ることができることが示された。将来的にはナノグロビュールの直前までサンプルを削り、SIMS などの分析を行うことで、流体が存在すればその組成や同位体分析が可能となるものと考えられる。

[1] Nakamura K. et al (2002) Int. J. Astrobiol., 1, 179. [2] Messenger S. et al. (2008) LPS XXXIX, Abstract #2391. [3] De Gregorio B. T. (2009) LPS XXXX, Abstract #1130. [4] Nakamura-Messenger K. et al (2006) Science, 314 1439-1442. [5] Uesugi K et al (2006) Proceedings of SPIE6318:63181F.

キーワード: 有機物ナノグロビュール, X 線 CT, 炭素質コンドライト, 画像解析

Keywords: X-ray microtomography, organic nanoglobule, carbonaceous chondrite, image simulation

PPS021-P01

会場:コンベンションホール

時間:5月23日 16:15-18:45

## LA-ICP-MSによる隕石の微量元素イメージングと同時定量分析 Trace element imaging and semi-quantitative analysis of meteorites by Laser ablation ICP-MS

福島 聡一郎<sup>1\*</sup>, 中井 泉<sup>1</sup>, 大石 昌弘<sup>2</sup>  
Souichiro Fukushima<sup>1\*</sup>, Izumi Nakai<sup>1</sup>, Masahiro Oishi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京理科大学, <sup>2</sup>TDK

<sup>1</sup>Tokyo University of Science, <sup>2</sup>TDK

【序】宇宙地球科学試料中に含まれる元素の2次元分布を調べる手段として、これまではEPMAが広く用いられてきたが、微量元素に対する分析感度は低い。これまで、唯一放射光マイクロビーム蛍光X線イメージングが高い感度を有していたが、微量重元素のマイクロビーム分析は困難であった。そのため、隕石中の微量重元素のイメージングはほとんど行われていない。本研究では高感度分析が可能なLA-ICP-MSを応用し、隕石中に含まれる白金族や希土類元素といった宇宙地球科学的に重要な微量重元素の2次元イメージング法の開発を行った。本法により、72元素におよぶ多元素同時分析が可能であることから、隕石中の微量重元素の分布を知ることが可能となり、隕石中に含まれる様々な元素の挙動を明らかにすることができる。また、イメージングと同時に得られた測定値より半定量分析を行い、イメージング像の定量化を試み、元素間の相関を明らかにした。

【実験】測定に用いた試料は石質隕石のCV3コンドライト North west Africa2086、鉄質隕石のSikhote-Alin、Gibeon、Odessa、Henbury、Nantan、石鉄隕石のFukang Pallasiteである。分析に用いたLA-ICP-MSは、Agilent 7500s(Agilent Technologies, USA)にLUV266X(New Wave Research)を組み合わせたものと、Agilent7500c(Agilent Technologies, USA)にUP 213 Universal Platform(New Wave Research, USA)を接続したものである。半定量分析の標準試料にはNIST612を用いた。測定は一定の面積で線分析を行い、各ラインから得られたデータを結合することによって2次元イメージング像を得た。

【結果と考察】石質隕石のLA-CP-MSによるイメージングの結果、CAI部分にOs, Ir, Ptなどの白金族元素やLa, Ce, Sm, Euなどの希土類元素を代表として、さまざまな重元素が凝集していることが分かった。さらにマトリックス部分においては、NiやCoなどの親鉄元素の間で分布に相関をみることができた。鉄隕石、石鉄隕石の鉄に富む部分では局所的に元素間の相関が見られるものの、全体的に均一に元素が分布していることがわかった。希土類元素の半定量分析の結果から、希土類元素間の特徴的分布パターンを明らかにすることができた。そのため、定量的イメージングの可能性を示すことができた。

LA-ICP-MSによるイメージングは従来法によるイメージングに比べ、非常に多くの微量元素に対する情報を1度に得ることが可能である。そのため、宇宙地球科学試料の強力な分析手段となることが期待される。

キーワード: ICP-MS, イメージング, 半定量分析

Keywords: ICP-MS, imaging, semi-quantitative analysis

## Allende 隕石から分離した富 Q ガス、貧 Q ガス炭素物質の X 線吸収分光学的比較 Carbon-XANES spectroscopic comparison of Q-gas rich and depleted fractions from Allende meteorite

藪田 ひかる<sup>1\*</sup>, 甘利幸子<sup>2</sup>, 松田准一<sup>1</sup>, 長谷川紀昭<sup>3</sup>, デイビッドキルコイン<sup>4</sup>  
Hikaru Yabuta<sup>1\*</sup>, Sachiko Amari<sup>2</sup>, Jun-ichi Matsuda<sup>1</sup>, Toshiaki Hasegawa<sup>3</sup>, David Kilcoyne<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻, <sup>2</sup> ワシントン大学, <sup>3</sup> 大阪大学超高压電子顕微鏡センター, <sup>4</sup> バークレー国立研究所

<sup>1</sup>Osaka Univ., Dept. Earth and Space Sci., <sup>2</sup>Washington Univ. Lab. Space Sci., <sup>3</sup>Osaka University, UHVEM, <sup>4</sup>Advanced Light Source, LBNL

### Introduction:

Although the planetary noble gases enriched in the heavy noble gases, Q gases, have been frequently studied, phase Q itself is yet to be identified. Matsuda et al. (2010) has reported that TEM observations did not show clear difference between Q-rich- and depleted- carbonaceous materials, while the Raman spectroscopic differences were observed between the two. They concluded that release of Q gases is not accompanied by mass loss but resulted from rearrangement of carbon structure during removal of Q (oxidation). Our previous study has revealed that the physically separated Q-rich density fraction may be rich in diamond-related  $sp^3$  carbon. Thus, the release of Q gases and/or phase Q could be related to carbon functional group chemistry rather than carbonaceous morphology. This study focuses on the XANES analyses of Q-rich- and depleted- materials from Allende meteorite to refine carbon chemistry that is likely associated to the release of Q gases. Moreover, Q-rich fractions obtained via the suspension and physical separation from Allende, respectively, are analyzed for comparison.

### Experimental:

An Allende meteorite was treated with HF-HCl for preparing an acid resistant carbonaceous residue. During the removal of elemental S from the residue with CS<sub>2</sub>, One-seventh of the total fraction of the residue suspended in the supernatant was recovered (AMD3). The rest of the fraction (AMD1), which is rich in Q gases, was further treated with Na<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> to remove Q gases, yielding the oxidized residue, AMD2. Apart from AMD samples, a Q-rich floating fraction (G1), was obtained by the freeze-thaw disaggregation of Allende meteorite in stainless beaker. All the samples were embedded in sulfur and ultramicrotomed. Carbon-XANES of these samples was conducted using STXM at Beam line 5.3.2, at the Advanced Light Source, Lawrence Berkeley National Laboratory.

### Results and discussion:

In C-XANES spectra of AMD1 and 2, aromatic and aliphatic carbons are much lower in AMD2 than those in AMD1. Carbonyl carbon is slightly higher in AMD2 than that in AMD1. On the other hand, the peak intensities of 1s- $\sigma^*$  exciton derived from graphene, are not changed between AMD1 and 2. The differences in molecular features between AMD1 and 2 may not be directly reflected by phase Q, but more likely indicate the changes in major organic macromolecule by oxidation. Nonetheless, the depletion of aliphatic and production of carbonyls probably influence the structural rearrangement related with the release of Q-gases. No quantitative change of 1s- $\sigma^*$  exciton intensity before and after oxidation indicates that phase Q is unlikely related to graphene.

Only one clear difference between C-XANES spectra of AMD1 and 3 is a peak at 287.43 eV in AMD 3 is remarkably developed compared to AMD1. A peak around at this energy is generally assigned to aliphatic carbon, or alternatively, another  $sp^3$  carbon such as -C-CF of fluorinated diamond (Yu et al. 2003). The peak may have an important relation to Q-richness, since noble gas concentrations in AMD3 are 2-4 times higher than those of AMD1 (Amari et al. 2003).

G1 showed a quite different C-XANES spectrum from those of AMD1 and 3. While aromatic carbon is low, two unidentified peaks are detected. One of the two peaks is possibly derived from diamonds or their related compounds. Such spectral features are very similar to those in the Q-rich density fraction. Additionally, C-XANES spectra of different regions of G1 are heterogeneous. These spectra are not exactly the same as those of individual density fractions in our previous study. It may be because the individual density fractions show more detailed spectral features that were covered in bulk fractions, or might have been partially contaminated with Teflon beaker used in the past treatment by Matsuda et al. (1999). To summarize, it is further suggested that some  $sp^3$  carbon may be related to the release of Q gases and/or phase Q.

キーワード: 隕石, コンドライト, Q, 炭素物質, XANES, 希ガス

Keywords: meteorite, chondrite, Q, carbonaceous matter, XANES, noble gas

## シリカエアロゲルへ高速衝突した隕石有機物の赤外・ラマン分光分析 Infrared and raman spectroscopic analyses of the chondritic organic matter shot into silica aerogel by impact experiment

緒方 雄一郎<sup>1\*</sup>, 藪田ひかる<sup>1</sup>, 中嶋悟<sup>1</sup>, 奥平恭子<sup>2</sup>, 森脇太郎<sup>3</sup>, 池本夕佳<sup>3</sup>, 長谷川直<sup>4</sup>, 横堀伸一<sup>5</sup>, 三田肇<sup>6</sup>, 小林憲正<sup>7</sup>, 今井栄一<sup>8</sup>, 橋本博文<sup>4</sup>, 田端誠<sup>4</sup>, 河口優子<sup>5</sup>, 杉野朋弘<sup>5</sup>, 矢野創<sup>4</sup>, 山下雅道<sup>4</sup>, 山岸明彦<sup>5</sup>, たんぼぼ WG<sup>4</sup>  
Yuichiro Ogata<sup>1\*</sup>, Hikaru Yabuta<sup>1</sup>, Satoru Nakashima<sup>1</sup>, Kyoko Okudaira<sup>2</sup>, Taro Moriwaki<sup>3</sup>, Yuka Ikemoto<sup>3</sup>, Sunao Hasegawa<sup>4</sup>, Shinichi Yokobori<sup>5</sup>, Hajime Mita<sup>6</sup>, Kensei Kobayashi<sup>7</sup>, Eiichi Imai<sup>8</sup>, Hirofumi Hashimoto<sup>4</sup>, Makoto Tabata<sup>4</sup>, Yuko Kawaguchi<sup>5</sup>, Tomohiro Sugino<sup>5</sup>, Hajime Yano<sup>4</sup>, Masamichi Yamashita<sup>4</sup>, Akihiko Yamagishi<sup>5</sup>, TANPOPO Working Group<sup>4</sup>

<sup>1</sup>大阪大学, <sup>2</sup>会津大学, <sup>3</sup>(財)高輝度光科学研究センター, <sup>4</sup>宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部, <sup>5</sup>東京薬科大学, <sup>6</sup>福岡工業大学, <sup>7</sup>横浜国立大学, <sup>8</sup>長岡技術科学大学

<sup>1</sup>Osaka University, <sup>2</sup>University of Aizu, <sup>3</sup>JASRI/SPring-8, <sup>4</sup>ISAS/JAXA, <sup>5</sup>Tokyo University of Pharmacy, <sup>6</sup>Fukuoka Institute of Technology, <sup>7</sup>Yokohama National University, <sup>8</sup>Nagaoka University of Technology

序論: 今日、地球に宇宙物質が年間総量数万トン降下していることが知られている。同様に、約46億年前の初期地球にも、隕石や宇宙塵などの宇宙物質が多量に供給され、その中に含まれている有機物が地球の生命原材料物質となったという「Exogenous delivery」という考え方がある(Chyba & Sagan, 1992)。これらの始原小天体有機物の構造や組成を明らかにすることによって、生命原材料物質の起源と宇宙での化学進化について理解することは重要である。

宇宙有機物は隕石や宇宙塵に保存される形で地表に到達するものもあるが、大気圏突入の際に熱変成を受けたり、地球物質による汚染を受ける可能性がある。それらの影響を排除するために、国際宇宙ステーション上に、極めて密度の低いシリカエアロゲルを設置して、宇宙塵を採集する「たんぼぼ計画」が計画されている。ただし、この捕集法の場合でも、宇宙塵がエアロゲルとの衝突により変成することが考えられる。そこで、本研究では、隕石微粒子の高速衝突模擬実験を行い、衝突前後の隕石有機物の分子構造の変化を見出すことを目的とした。

実験: 宇宙科学研究所・スペースプラズマ実験施設の二段高速ガス銃を用いて、マーチソン隕石微粒子(撃ち込み前の粒径は約100 μm)を4 km/sでシリカエアロゲルに撃ち込んだ。エアロゲルに撃ち込まれた隕石微粒子をタングステン針と細筆で取り出し、2枚のアルミ板(約5mm角)にはさんでハンドプレスした。撃ち込みを行っていないマーチソン隕石粒子も、同様に調製した。このようにして圧着された隕石微粒子を、片方のアルミ板上に載せた状態で、赤外顕微分光装置FTIR-620とラマン分光装置で測定を行った。また、SPring-8, BL43IRの高輝度赤外顕微分光装置IFS120HRで10 μm毎にマッピング分析を行った。測定条件はいずれも反射モード、分解能は4cm<sup>-1</sup>で行った。

結果: 赤外分光測定では、3種類の隕石微粒子で脂肪族炭素(3000、2900、2880cm<sup>-1</sup>)、芳香族炭素(約1600cm<sup>-1</sup>)、SiO(1100cm<sup>-1</sup>)に帰属すると考えられるピークが検出された。また高輝度赤外顕微分光でマッピング測定を行った結果、隕石微粒子中で脂肪族炭素、芳香族炭素、SiOに富む領域がそれぞれ検出された。脂肪族炭素と芳香族炭素の領域の分布は似ていたが完全には一致していなかった。SiOと考えられる領域は二箇所あり、一方は脂肪族炭素と芳香族炭素と一致したが、もう一方は一致しないという波数による分布の差異が見られた。一般に、熱作用を経験した隕石有機物は脂肪族炭素を消失しやすいことが知られているが(Yabuta et al. 2005)、今回の研究では脂肪族炭素が検出されたので、4km/sの衝撃による有機物の変成は低いと考えられる。

顕微ラマン分光測定では、赤外スペクトルで炭素由来のピークが検出された3種類の微粒子から、炭素物質に特徴的なDバンド(約1350cm<sup>-1</sup>)とGバンド(約1580cm<sup>-1</sup>)が検出された。ガス銃撃ち込みを行った隕石微粒子のピーク位置、半値幅の大きさは、撃ち込み前の隕石微粒子と近い値を取り、撃ち込みによる有機分子構造の変成は少ないことが考えられる。本研究で得られたGバンドのピーク位置と半値幅は、Murchison隕石の不溶性有機物を測定した値(Busemann et al., 2007)に近かった。一方で、Dバンドの値は文献値と異なっていた。本研究で、撃ち込み前後での隕石微粒子のラマンパラメータの値は近い範囲に収まっていることから、文献値との差は測定条件の違いによるものだと考えられる。

以上の赤外分光とラマン分光の両実験から、4km/sの衝撃を受けた隕石粒子は、有機物を含む微粒子と含まない微粒子に分かれることと、有機物が検出された隕石微粒子については、脂肪族炭素と芳香族炭素を共に含んでいる点で衝撃前の隕石有機物の組成に似ていたことから、変成の影響は低いことが明らかとなった。ラマン分光でD、Gバンドが検出された領域は赤外分光で炭素由来のピークが見られた領域と重なることから、互いの測定結果は確からしい。赤外、ラマン分光でピークが検出される粒子とされない粒子が存在するのは、撃ち込みの衝撃作用による揮発性物質の部分的な蒸発あるいは分布の移動によるものかもしれない。たんぼぼ計画での宇宙塵採集の実現性を示すため、今後さらに多くの分光測定を要する。

キーワード: 隕石, 宇宙塵, 高速衝突, 赤外分光, ラマン分光, たんぽぽ計画

Keywords: meteorite, cosmic dust, impact heating, infrared spectroscopy, Raman spectroscopy, TANPOPO mission

## ALH84001 中のリン酸塩鉱物の U-Pb 年代と D/H 比 U-Pb Dating and D/H Ratio of Phosphates in the Martian Meteorite ALH84001.

太田 祥宏<sup>1\*</sup>, 高畑 直人<sup>2</sup>, 佐野 有司<sup>2</sup>, 杉浦 直治<sup>1</sup>  
Yoshihiro Ota<sup>1\*</sup>, Naoto Takahata<sup>2</sup>, Yuji Sano<sup>2</sup>, naoji sugiura<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学理学系研究科, <sup>2</sup> 東京大学大気海洋研究所

<sup>1</sup>School of Science, University of Tokyo, <sup>2</sup>AORI, University of Tokyo

火星における水の存在については探査機の成果の他、隕石の元素や同位体分析によって明らかにされてきた。火星隕石中で水をターゲットにした局所分析では OH 基を含むことがあるリン酸塩鉱物 (アパタイト ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3[\text{F}, \text{Cl}, \text{OH}]$ ) や ウィットロカイト ( $\text{Ca}_9[\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}](\text{PO}_4)_6(\text{PO}_3\text{OH})$ ) を用いることが多い。この OH 基に由来すると考えられている水素同位体比の研究が多く行われてきた [1], [2]。またリン酸塩鉱物には U も濃集しやすいため、U-Pb 系での年代測定も多く行われている [3]。そこで本研究では高精度な空間分解能を持つ NanoSIMS を用いて火星隕石におけるリン酸塩鉱物中の水の濃度、水素同位体比が隕石の年代によってどのように変動しているのか調べることを目標とし、最初にもっとも古い年代を持つとされる火星隕石の ALH84001 に含まれるリン酸塩鉱物での U-Pb 年代の測定と D/H 比の測定、水の濃度の測定を行った。あらかじめ SEM-EDS でリン酸塩鉱物の場所を探した隕石薄片を金でコーティングしておいた。U-Pb 年代の測定条件は  $\text{O}^-$  を一次イオンとして使用し、ビーム強度は 10nA、約 10  $\mu\text{m}$  のスポット径でリン酸塩鉱物の 1 つのグレイン中で複数点の測定を行った。スタンダードとして年代が正確に分かっているカナダの Prairie Lake で産出された PRAP と呼ばれるリン酸塩鉱物 (アパタイト) を用いた [4]。その結果、このリン酸塩鉱物の U-Pb 系と Pb-Pb 系の年代がともにおよそ 40 億年という値になった。この結果はエラーの範囲内で先行研究 [3] の結果と調和的であった。D/H 比の測定条件は同じく  $\text{O}^-$  を一次イオンとして使用し、ビーム強度は 1nA、3  $\mu\text{m}$  程度のスポット系で U-Pb 系の年代測定を行ったものと同じ粒の他、いくつかのリン酸塩鉱物の粒で D/H 比の測定を行った。表面に吸着した水は  $10^{-7}$  torr の高真空下で 80 程度に熱した状態で 1 昼夜焼くことで除去できた。スタンダードとしてモロッコ産のアパタイトの他、地球のいくつかの産地で採れたアパタイトを用いた。モロッコ産のアパタイトに関してはガスマスをを用いて 1200 で 1 時間加熱することで水を抽出し、水の濃度のスタンダードとして用いた。この結果得られた ALH84001 の D/H 比は地球の軽い水とのミキシングラインに乗るような傾向を示し、エンドメンバーとして、最低でも 3000 ‰ を越えるような重い水を発見した。また水の量は非常に少ないことがわかった。この結果は先行研究よりも少し重い結果を示している [5]。これまでの研究では複数のリン酸塩鉱物のデータをまとめて 1 つの年代を引いていたが、本研究では 1 つリン酸塩鉱物だけでも年代を決定することに成功した。また同時に年代を測定したリン酸塩で D/H 比の測定を行うことに成功し、おそらく地球の水ではなく火星の水と思われる結果を得ることができた。ポスターではこの結果を紹介し、それが示す年代と水の同位体比の意味と今後の方針について議論したい。

[1] Leshin L. A. et al.(2000) *Geophys Res. Lett.* **27** 2017-2020, [2] Greenwood J. P. et al.(2008) *Geophys Res. Lett.* **35** L05203, [3] Terada K. et al.(2003) *Meteoritics&Planet.Sci.* **38** 1697-1703, [4] Sano Y. et al.(1999) *Chem. Geol.* **153**, 171-179. [5] Sugiura N. and Hoshino M. (2000) *Meteorol. Planet. Sci* **35**, 373-380.

キーワード: 火星隕石, ALH84001, U-Pb 年代測定, D/H 比, リン酸塩

Keywords: martian meteorite, alh84001, U-Pb dating, D/H ratio, phosphate

## Efremovka CV3 炭素質コンドライト中に見られる衝撃溶融脈の鉱物学的特徴とその形成過程について Mineralogical characterization and formation process of shock-induced melt veins in the Efremovka CV3 chondrite

関川 知里<sup>1</sup>, 瀬戸 雄介<sup>1\*</sup>, 三宅 亮<sup>2</sup>, 留岡 和重<sup>1</sup>  
Chisato Sekigawa<sup>1</sup>, Yusuke Seto<sup>1\*</sup>, Akira Miyake<sup>2</sup>, Kazushige Tomeoka<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 神戸大・院・理, <sup>2</sup> 京都大・院・理

<sup>1</sup>Dept. Earth and Planet. Sci., Kobe Univ., <sup>2</sup>Dpt. Geology and Mineral., Kyoto Univ.

An understanding of shock effects is important to bring out the impact history of the solar system. A shock-induced melt vein is one of the typical textures caused by impact; the vein is considered to be formed by rapid shear melting and be solidified along the shearing plane in extremely short times. Mineralogy of the shock-induced melt veins have been well studied in highly shocked ordinary chondrites so far, while there are few studies of carbonaceous chondrites which are usually considered to have been experienced relatively weak shock metamorphism.

Efremovka, grouped as a CV3 carbonaceous chondrite, is known to be experienced a strong shock metamorphism classified with a shock stage of S4. Although the previous studies on Efremovka mainly focused on the chemical/isotopic properties, the detailed mineralogical and petrographic characteristics remain to be known. We made a SEM observation of the Efremovka thin sections with a total area of about 200 mm<sup>2</sup>, and found distinguish veins or puddles including spherical globules of Fe-Ni metal, Fe-sulfide in the matrix. In order to clear whether these objects have been actually experienced melting or not, and to clear its formation process, we undertook a mineralogical study regarding on the veins (tentatively called "melt vein") compared with the other area of the matrix (called "normal matrix") using transmission electron microscopy (TEM) and synchrotron radiation X-ray diffraction (SR-XRD).

The veins are often observed near chondrule-matrix boundaries, and sometimes penetrate into the adjacent chondrules or matrices. For site-specific samplings, the melt veins and the normal matrix were lifted up from the thin section and were trimmed to feasible shapes for SR-XRD and TEM experiments using a focused ion beam (FIB) technique. The SR-XRD and TEM experiments show the clear differences between the melt veins and the normal matrix, especially as to the constituent olivines. The unit cell volume data from SR-XRD and the TEM-EDX analyses consistently indicate that the olivine of the melt veins (Fo<sub>73</sub>) is poorer in Fe contents than that of the normal matrix (Fo<sub>45</sub>). A clear difference is also seen in the grain size; the olivine size in the melt veins is significantly larger (~300 nm) than that in normal matrix (~100 nm). Moreover, appearances of lattice defects in the olivines is different; from TEM observation, dislocation densities in the melt vein's olivines are much lower than those in normal matrix in spite of the evidence of the heavy shock impact.

These results indicate that the melt veins have certainly experienced a different formation process from that of normal matrix, which are apparently affected by melting and quenching processes. During these processes, olivine in the veins grew larger in size and become poorer in Fe contents than those in original matrix. On the other hand, as for most parts of Efremovka matrix escaping from melting, the shock wave effect can be found in compaction of matrix and high dense dislocations in the constituent minerals. The present study reveals that chemical and mineralogical disproportions are caused by melting and quenching process. Such shock-induced process may be one of the factors generating a diversity of meteorites.

キーワード: 炭素質コンドライト, 溶融脈, 衝撃変成, エフレモフカ, 透過電子顕微鏡, 放射光 X 線回折  
Keywords: carbonaceous chondrite, melt vein, shock metamorphism, Efremovka, TEM, SR-XRD

## Bensour 隕石 (LL6) の化学組成・鉱物組成の不均一性: はやぶさサンプル分析との関連 Heterogeneity of chemical and mineral compositions of Bensour meteorite (LL6) in relation to Hayabusa sample analysis.

永野 宗<sup>1\*</sup>, 土 山明<sup>1</sup>, 下林典正<sup>2</sup>, 瀬戸雄介<sup>3</sup>, 今井悠太<sup>1</sup>, 野口遼<sup>1</sup>, 松本徹<sup>1</sup>, 松野淳也<sup>1</sup>  
Takashi Nagano<sup>1\*</sup>, Tsuchiyama Akira<sup>1</sup>, Shimobayashi Norimasa<sup>2</sup>, Yuusuke Seto<sup>3</sup>, Yuuta Imai<sup>1</sup>, Ryo Noguchi<sup>1</sup>, Tooru Matsumoto<sup>1</sup>, Matsuno Junya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 阪大. 院理. 宇宙地球, <sup>2</sup> 京大. 院理. 地球惑星, <sup>3</sup> 神戸大学. 院理. 地球惑星

<sup>1</sup>Earth and Space Sci., Osaka Univ., <sup>2</sup>Earth and Planetary Sci., Kyoto Univ., <sup>3</sup>Earth and Planetary Sci., Kobe Univ.

昨年6月小惑星探査機「はやぶさ」が地球に帰還した。「はやぶさ」は小惑星イトカワを観測し、イトカワ表面のサンプルを持ち帰ってくることに成功した。小惑星はそれが誕生したころの記録を比較的好くとどめていると考えられており、そのサンプルを分析することにより太陽系初期の様子を知る手がかりを得ることができると期待されている。しかし、実際に「はやぶさ」が持ち帰ったサンプルは、大きくとも100 μm程度であり、多くは10 μm以下の粒子である[1]。このように試料が微小な場合、試料から得ることのできる化学組成や含まれる鉱物の割合はイトカワ表面を構成する物質を代表しないと思われる。そこで、試料が小さくなるとバルクと比べて化学組成や鉱物組成がどのように変化するかを、隕石組織と関連して調べる必要がある。

はやぶさ探査機の赤外観測によりイトカワの表面物質はコンドライト隕石(LL5, 6)に類似していると考えられている[2]。そこで、本研究ではLL6コンドライトであるBensour隕石をもちいて、元素マッピングをおこなうことにより、サンプルサイズを小さくすると化学組成や鉱物組成がどの程度変動するのかを定量的に調べた。元素マッピングは、研磨薄片上の約4 mm × 4 mmの領域2カ所において、1024 × 1024画素サイズで、13元素(Al, Ca, Cr, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, S, Si, Ti)について行った。また、得られた元素マップから鉱物マップを作成した。測定範囲に含まれていた鉱物は、olivine, Ca-poor pyroxene, Ca-rich pyroxene, plagioclase, apatite, whitlockite, taenite, kamacite, chromiteであった。

得られた元素マップおよび鉱物マップを、画像上において4分割、16分割と分割数を大きくしていき、各分割数で分割された領域での特性線強度や鉱物モードの標準偏差を求めた。特性×線強度や鉱物モード、および分割数を増やしていくことによるこれらの標準偏差の変化は、2つの測定領域で大きく異なることはなく、今回測定した領域が隕石のおおよその平均的な特徴を代表していると考えられる。各元素について、特性×線強度で規格化した標準偏差が分割数を大きくするとどのように増加するかを比較した。P, NiやCrといった存在度の小さな元素は、SiやMgといった存在度の大きな元素に比べて、規格化した標準偏差が大きい。これは、このような存在度の小さな元素が局所的に分散して存在している特定の鉱物(それぞれ、Caリン酸塩鉱物、taeniteやchromite)に濃集しているためである。一方、存在度が小さくても規格化した標準偏差が比較的小さい元素(K, Mn, Ti)もあり、これらの元素はモードの大きな鉱物(Kはplagioclase, Mn, Tiはpyroxene)中に低濃度で存在していることによるものである。今回の解析により、はやぶさサンプルの初期分析で分配された粒子サイズ[3]において、LL6コンドライトで各元素のばらつきがどの程度になるかを定量的に予想することができる。

Bensour隕石の研磨薄片を提供していただいた早稲田大学のT.Fagan博士に謝意を表す。

[1] Nakamura T. et al. (2011) abstract in 42nd LPSC. [2] Abe M. et al. Science, 312, 1334-1338. [3] Tsuchiyama A. et al. (2011) abstract in this conference.

キーワード: はやぶさ計画, コンドライト隕石, 組織  
Keywords: Hayabusa, chondrite meteorite, composition

## Conditions of aqueous alteration of C-type asteroids deduced from mineralogy and oxygen isotope ratios of CM chondrite G Conditions of aqueous alteration of C-type asteroids estimated from oxygen isotope ratios of carbonate in CM chondrites

吉岡 勝樹<sup>1\*</sup>, 中村智樹<sup>1</sup>, 藤巻宏和<sup>1</sup>, 嘉数勇基<sup>1</sup>

Katsuki Yoshioka<sup>1\*</sup>, Tomoki Nakamura<sup>1</sup>, Hirokazu Fuzimaki<sup>1</sup>, Yuki kakazu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Science

CM chondrites have undergone prevailed aqueous alteration that changed mineralogical and isotope signatures of water-bearing C-type asteroids (Zolensky and McSween, 1998; Clayton and Mayeda 1984). In the present study, we studied a CM chondrite GRA06172 that has never been studied in detail in order to estimate the degree and the conditions of aqueous alteration occurred on a meteorite parent body. A polished section was observed by a SEM/EDS and analyzed by an EPMA/ WDS. A small piece (200 microns in size) of matrix was analyzed by synchrotron radiation X-ray diffraction to identify minerals, since matrix minerals are too small to identify by using a scanning electron microscope.

SEM observations suggest that approximately half of the meteorite consists of primary rocks (Metzler et al., 1992) where chondrules were mantled by thick fine-grained rims and aggregates of PCPs occur on the rims. The other half is clastic matrix that was produced by fragmentation of the primary rock. This observation indicates that the meteorite is a breccia. Mesostasis glasses in both type-I and ?II chondrules are aqueously altered but most of anhydrous silicates such as olivine and low- and high-Ca pyroxenes are unaltered.

The results of the X-ray diffraction analysis indicate that matrix is composed mainly of serpentine and tochilinite, which suggests that matrix has undergone aqueous alteration. The presence of tochilinite limits the temperature experienced by this meteorite to be lower than 245C. (Gooding and Zolensky, 1992). In addition, sharp diffraction peaks from low-Ca pyroxene were detected. This indicates that some of anhydrous silicates survived aqueous alteration.

The EPMA analysis suggests that most of matrix composition fall within the area enclosed by composition PCP and two serpentine compositions on a Si-Mg-Fe ternary diagram as was reported in the McSween (1986). The average matrix composition changes with progressive alteration (McSween, 1986) and suggests that the degree of aqueous alteration experienced by GRA06172 is similar to or even higher than that for Murchison.

In addition, the mineralogical alteration index defined by Browning (1995) (when the number of oxygen of serpentine is nine, the index is calculated by  $2 - (\text{Fe}^{3+} / (2 - \text{Si}))$ ) is approximately 0.65, which indicates that the meteorite altered to a degree higher than Murchison (1.57). Based on the CM chondrite classification scheme (CM2.6-2.0) defined by Rubin (2007), the average value of FeO/SiO<sub>2</sub> in PCP (2.8) and mineralogical and other characteristics of the meteorite suggest that it is classified to CM2.5 that is the same as Murchison. These results suggest that the extent aqueous alteration on GRA06172 is intermediate similar to or slightly higher Murchison, although small gaps are present between estimations from different models (i. e., McSween, 1986 vs Rubin, 2007).

There are many carbonate with sizes up to 100 microns in the matrix. Oxygen isotope analysis of the carbonate and co-existing serpentine is in progress using SIMS at Tohoku University (CAMECA ims-6F) so as to estimate water temperature and water / rock ratio during aqueous alteration.

キーワード: 炭素質コンドライト, 水質変成, 酸素同位体

Keywords: carbonatous chondrite, aqueous alteration, oxygen isotope

## Type B CAIの局所 Al-Mg 同位体分布: 部分溶融と年代の関係 Al-Mg isotope distribution in Type B CAI: partial melting and chronology

伊藤 正一<sup>1\*</sup>, Steven Simon<sup>2</sup>, Lawrence Grossman<sup>2</sup>, 坂本 尚義<sup>1</sup>  
Shoichi Itoh<sup>1\*</sup>, Steven Simon<sup>2</sup>, Lawrence Grossman<sup>2</sup>, Hisayoshi Yurimoto<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学理学研究院自然史科学部門, <sup>2</sup>Dept. Geophys. Sci., The Univ. Chicago

<sup>1</sup>Natural History Sci., Hokudai, <sup>2</sup>Dept. Geophys. Sci., The Univ. Chicago

我々太陽系最古の岩石である Ca-Al に富む包有物 (CAIs) の酸素及び Al-Mg 同位体組成は、極初期数百万年間の太陽系の環境を解明することにつながる特有の痕跡を残していることがわかってきた。一つの CAI における鉱物間及び鉱物内における酸素同位体組成が、 $^{17}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$  で地球の標準海水の値と比べ約 4 パーセント異なる分布を示し、不均一に分布している。この不均一な酸素同位体分布は、複数回溶融イベントにより形成した酸素同位体組成の異なる液から結晶化した結果であるといわれている。さらに、これら異なる酸素同位体組成を示す鉱物は、Al-Mg アイソクロン図において、一つの直線上に分布している場合や複数の直線上に分布している場合が、一般的に報告されている。本研究で用いた Allende 隕石中の Golfball 及び TS34 と名付けられた type B CAI は、一般的な Type B CAI 全岩組成を示す。特に golfball CAI は、特有な岩石学的組織を示し、メリライト結晶に富むコアがファッサイト結晶に富むマントルに囲まれている組織を示す。岩石学的研究及び酸素同位体分布から、これらの CAI は、少なくとも 2 回の溶融イベントを経験していることがいわれている。本研究では、溶融時期の異なるスピネル結晶及びメリライト結晶の Al-Mg 年代アイソクロンを明らかにし、部分溶融による鉱物アイソクロンの年代系を評価することを目指した。

結果と考察: 局所 Al-Mg 同位体分析には、北海道大学設置の Cameca ims-1270 SIMS を用いた。Golfball CAI の Al-Mg 同位体組成は、二つの異なるアイソクロンを示し、ゲーレンナイト成分に富んだコア部は、 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$  初生比で、 $4.9 \pm 0.8 \times 10^{-5}$ 、リム部のメリライトで、 $1.9 \pm 1.2 \times 10^{-5}$  となり、その年代差は、約百万年となった。スピネルは、前者の線の上にプロットされ、一方、コア部の塊状メリライトは、後者の線の上にプロットされた。以上から、Golfball は酸素同位体交換を伴う複数回溶融イベントにより形成したと考えられた。TS34 CAI は、二つの異なるアイソクロンを示し、マントルのメリライトは、 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$  初生比で、 $.5 (6) \times 10^{-5}$ 、スピネルは、初生  $^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$  比を 0 とし、 $5.5 (4) \times 10^{-5}$  となり、その年代差は、約 20 万年となった。これらの結果は、複数回溶融により結晶化したと考えられている酸素同位体組成および岩石学的研究の結果と調和的である。

キーワード: SIMS, Al-Mg isotope, CAI, oxygen

Keywords: SIMS, Al-Mg isotope, CAI, oxygen

## 高感度イオン撮像素子 SCAPS-II のノイズ評価 Noise analysis of SCAPS-II ion imager

坂本 直哉<sup>1\*</sup>, 青山 聡<sup>2</sup>, 川人 祥二<sup>3</sup>, 坂本 尚義<sup>4</sup>

Naoya Sakamoto<sup>1\*</sup>, Satoshi Aoyama<sup>2</sup>, Shoji Kawahito<sup>3</sup>, Hisayoshi Yurimoto<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 北大・創成, <sup>2</sup> ブロックマン・テクノロジー, <sup>3</sup> 静大・電工, <sup>4</sup> 北大・理

<sup>1</sup>CRIS, Hokudai, <sup>2</sup>Brookman Technology Inc., <sup>3</sup>Electronics, Shizuoka Univ., <sup>4</sup>Natural History Sci., Hokudai

天然における元素や同位体比の存在度は6桁を超えるレンジに分布している。その分析には高感度な質量分析法が広く適用され、ほとんどの場合、信号としてイオンが用いられる。これらの二次元分布を定量的に測定するために、計数を蓄積して信号の統計的変動を小さくできる積分型のイオンイメージャSCAPSが開発され、投影型二次イオン質量分析装置と組み合わせてサブミクロンの空間分解能を保ったままパーミルオーダーの精度を実現している。SCAPSはイオンを直接検出可能な35万個の独立した画素で構成され、各画素が50000イオンを蓄積可能であり読み出しノイズ2~3イオン相当を達成している。しかし、1枚のイメージ取得に20秒かかり、1秒あたりの最大計数率は約1000イオン/画素であった。本研究では、高速に画素信号を読み出すことで時間あたりに計数可能なイオン数を向上させるイオンイメージャSCAPS-IIを開発してノイズの評価を行い、シングルイオンからの検出を試みた。

画素信号を高速に読み出すには、読み出し回路のノイズに打ち勝つように入射イオンにより画素キャパシタに蓄積する信号電荷を効率よく出力電圧に変換する必要がある。そのために、SCAPS-IIでは画素の信号電荷を複数回サンプリングして積分することで相対的にノイズを低減する多重サンプリング機構を組み込んだ。さらに、信号電荷Qを蓄積する画素キャパシタCの容量を14fFから3.5fFへと小さくすることにより、 $Q=CV$ の関係に従ってイオン1個が入射したときの出力電圧V(変換ゲイン)を増大させた。また、イメージのダイナミックレンジを向上させるために、蓄積した信号電荷が飽和レベルに達した画素だけを検出器内部でダイナミックにリセットするコンディショナルリセット機能も追加した。

SCAPS-IIのイオンに対する応答性を求めるために、二次イオン質量分析計Cameca ims-1270を用いて10keVで加速したSi<sup>+</sup>イオンを検出器中央部に均一に照射した。検出器は熱雑音を抑制するために液体窒素を用いて-100℃に冷却した。1画素あたりの入射イオン数が100イオン以上の時、入射イオン数が増えるにつれて画素からの出力電圧は高くなり10000イオン/画素で飽和した。この時、イオン照射領域の画素出力のノイズは傾き1/2で増大していき統計的変動に従う。画素出力とノイズの延長線が150マイクロボルトで交わることから、変換ゲインは150マイクロボルトと見積もられ、従来(30マイクロボルト)の5倍向上したことが分かった。読み出し速度は1回サンプリング時で12.5Hz、16回サンプリング時では8.3Hzを達成した。

しかし、1回サンプリング時のノイズが450マイクロボルトであるのに対し、16回サンプリング積分時で250マイクロボルト(1.7イオン相当)であった。統計的には4分の1まで低減されるべきであるため、統計に従わないノイズ源が存在することを示す。ノイズ源を特定する為に、画素を切り離して多重サンプリング機構に信号源として一定電圧を印可し、複数回サンプリングを行った所、サンプリング回数に応じて統計的にノイズが低減されたため、多重サンプリング機構そのものは理想的にノイズが低減させていた。そこで、多重サンプリングして得たイメージをさらに複数枚平均化してノイズを低減する事を試みた所、平均化するイメージ枚数を増やすにつれてノイズは減少していったが、ある枚数からは増加に転じた。これは時間に依存したノイズの存在を示す。CMOSセンサにおいて、時間に依存したノイズとして1/fノイズがノイズ源として考えられる。イメージを複数枚平均化する手法を用いて、イオン照射を行った。3.5フレーム/秒のイメージを50枚平均(合計14.4秒)した時、ノイズレベル50マイクロボルトであり、イオンが入射した部分のヒストグラムでは1イオンの信号を示す150マイクロボルトのピークを分離することができた。フレーム速度をより高速に行う事で、リアルタイムにシングルイオン検出が可能となると考えられる。

PPS021-P10

会場:コンベンションホール

時間:5月23日 16:15-18:45

## 非晶質ケイ酸塩の水熱合成実験:コンドライト変成過程と無機有機相互作用 Hydrothermal alteration experiments of amorphous silicates: effect of organic-inorganic interaction.

野口 遼<sup>1\*</sup>, 土山 明<sup>1</sup>, 藪田 ひかる<sup>1</sup>, 市川 聡<sup>2</sup>

Ryo Noguchi<sup>1\*</sup>, Akira Tsuchiyama<sup>1</sup>, Hikaru Yabuta<sup>1</sup>, Satoshi Ichikawa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻, <sup>2</sup> 大阪大学ナノサイエンス教育研究センター

<sup>1</sup>Earth and Space Sci., Osaka University, <sup>2</sup>Nanoscience Design, Osaka University

炭素質コンドライトは太陽系初期の情報を記録している最も始原的な隕石である。中でもCIコンドライトは化学的に最も始原的である一方で、その母天体で強い水質変成作用を受けていることが知られている。太陽系始原物質の進化を考える上で、CIコンドライトの変成過程を理解することは重要である。我々は過去に、太陽系始原物質の模擬物質としてCIコンドライト類似組成の非晶質ケイ酸塩の水質変成実験を行い、水質変成過程で鉱物生成に与える水/岩石比などの影響を明らかにした [1]。本研究では、炭素質コンドライト中に豊富に含まれる (~2%) [2] 有機炭素が炭酸塩などの鉱物生成に影響を与えた可能性に注目し、コンドライト隕石の水質変成過程における無機有機相互作用の影響を明らかにする目的で、非晶質ケイ酸塩と有機物の水質変成実験を行った。非晶質ケイ酸塩試料として、鉄を含まないCI類似組成を持つガラス (SiO<sub>2</sub>-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-Na<sub>2</sub>O) をタングステン乳鉢を用いて砕いた粉末試料を用いた。有機物には、コンドライト中に存在するアミノ酸のうち、含有濃度の高いグリシンとアラニン、変成度の低いGRA95229隕石中のアミノ酸存在比 (1.00 : 2.56) [3] に基月混合したものをを用いた。これらの物質を、ステンレスの耐圧ジャケットを外装したテフロン容器中に超純水 (Milli-Q) と共に大気圧下で封入し、150度で1~8週間加熱した。水/岩石の質量比は1.0及び5.0とした。加熱して得られた実験生成物を溶液と固体物質に分離し、固体物質を真空中で乾燥した。固体の一部を24時間熱水抽出し、その溶液を高速液体クロマトグラフィーで分析した。残った固体物質を粉末X線回折を用いて分析した。

X線粉末回折分析より、全ての実験条件で、水質変成を受けたコンドライトに広く存在する saponite 及び serpentine が生成した事が分かった。加えて、一部の隕石中に見られる aragonite も全ての実験で生成したが、calcite は生成しなかった。高速液体クロマトグラフィーを用いた溶液の分析より、加熱時間の増加に伴ってアミノ酸の総量が減少する傾向が見られた。この結果は、水質変成が進行したコンドライトほどアミノ酸濃度は少ないことと調和的であった。一方で、アラニン/グリシンの比は水質変成の進行に従って減少し、水質変成が進行したコンドライトではアラニン/グリシン比が高いことと逆の傾向を示した。

[1] Noguchi et al. (2011) 42th LPSC, abstract #1789

[2] Pizzarello et al. (2006) Meteorites and the Early Solar System II. 625-651

[3] Martians et al. (2007) Meteoritics and Planetary Science 42, 2125-2136

キーワード: 炭素質コンドライト, 水質変成過程

Keywords: carbonaceous chondrites, aqueous alteration process