

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

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

¹ 大阪大学大学院理学研究科

¹ Graduate School of Science, Osaka University

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

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

SNMS による Si 同位体の予備分析の結果、 N_2 (=28.006 amu), CO (=27.995 amu), ^{28}SiH (=28.985 amu) などの妨害ピークから ^{28}Si (=27.977 amu) や ^{29}Si (=28.976 amu) のピークを分離でき、Instrumental mass fractionation は 150~200 ‰/amu であることがわかった。また SiC 研磨剤や Si プレートなどの標準試料を測定した結果、Terrestrial な Si 同位体比に再現性があることがわかった。次に、マーチソン隕石の酸残渣を H_2O_2 、 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ で酸化分解し有機物の大部分を除去した "KC" 画分 (Amari et al. 1994) 中のプレソーラー SiC 候補の Si 同位体比を分析したところ、 $\delta^{30}\text{Si}/^{28}\text{Si} = 100 \sim 200 \text{‰}$ 、 $\delta^{29}\text{Si}/^{28}\text{Si} = 130 \sim 200 \text{‰}$ の重い同位体比異常が確認できた。

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

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

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

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

¹ 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻
¹Laboratory for Planetary Science, Kyoto University

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

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

参考文献

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

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

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

伊藤 正一^{1*}; 橋口 未奈子²; 坂口 勲²; 坂田 周平¹; 平田 岳史¹
ITO, Shoichi^{1*}; HASHIGUCHI, Minako²; SAKAGUCHI, Isao²; SAKATA, Shuhei¹; HIRATA, Takafumi¹

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

¹ 独立行政法人物質・材料研究機構

¹National Institute for Materials Science (NIMS)

<はじめに> 炭素質コンドライト隕石中のCa, Alに富む難揮発性包有物(CAI)は、太陽系で最も古い年代を示す岩石であり、メリライト、スピネル、ペロブスカイト(CaTiO₃)などの鉱物から構成される。これらのCAI鉱物は、三酸素同位体図において質量非依存の傾き1の直線に沿う不均一な分布を示す(Clayton et al. 1973)。この分布から、初期太陽系星雲中のCAI形成環境の酸素同位体組成について議論が行われている(Yurimoto et al. 1998, Itoh and Yurimoto 2003, Park et al. 2012)。しかし、CAI鉱物の不均質な酸素同位体組成が、鉱物結晶化時の環境を反映しているのか、または結晶化後に経験した加熱イベントによる酸素拡散の結果であるかは未だ明らかではない。これらの議論には、CAIが経験した熱履歴と、それに伴う鉱物の酸素拡散挙動の理解が必須である。ペロブスカイトは、他のCAI鉱物よりも酸素拡散が速く(Yurimoto et al. 1989, Ryerson and McKeegan 1994, Gautason and Muehlenbachs 1993, Sakaguchi and Haneda 1996)、CAI鉱物の酸素拡散挙動を理解し、CAIの熱履歴に定量的な制約を与える上で有用な鉱物である。

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

<実験手法> 高純度のCaCO₃、TiO₂粉末を出発物質とし、Ca/Ti比が0.098-1.002の混合粉末を作成した。部分安定化ジルコニア(PSZ)ボールを用いたボールミル粉碎、成形を行った後、大気中1350℃で2時間焼成し、Ca/Ti比の異なるペロブスカイト多結晶を作製した。ボールミル粉碎時のZrO₂の混入によるCa/Ti比のズレは、約0.001の精度で補正している。試料は、化学機械研磨を行った後、大気圧¹⁸O₂ガス中において、750-1000℃温度下で20分-数時間アニールし、試料中に¹⁸Oを拡散させた。二次イオン質量分析装置(SIMS)(Cameca ims-4f)を用いて¹⁸O濃度プロファイルを取得し、酸素拡散係数を求めた。また、試料断面において、NanoSIMS(Cameca NanoSIMS 50)を用いた高空間分解能イオンイメージングを行い、¹⁸Oイオンの分布を調べた。

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

試料断面の¹⁸O濃度イメージにおいて、表面から内部にかけて¹⁸O濃度は減少し、拡散している様子が確認された。また、Tiに富む試料ほど、粒界近傍で¹⁸O濃度が減少していた。ここから、粒界近傍では酸素拡散がブロックされる層が形成していると考えられる。酸素拡散のブロッキング層の形成は、CaTiO₃と同じペロブスカイト構造をもつBaTiO₃でも観察されている(Watanabe et al. 2011)。

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

キーワード: ペロブスカイト, 酸素拡散挙動

Keywords: perovskite, oxygen diffusivity

還元タイプCV3コンドライトであるエフレモフカ隕石中のタイプB CAIにおける変成作用 Metamorphism of a type B CAI from the reduced CV3 chondrite Efremovka.

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

¹ 早稲田大学

¹Waseda University

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

キーワード: CAIs, CV3 コンドライト, 変成作用

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

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

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

¹ 神戸大学・院・理, ² 京都大学・院・理

¹Kobe Univ. Sci., ²Kyoto Univ. Sci.

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

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

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

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

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

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

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

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

¹ 東北大学大学院理学研究科地学専攻

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Keywords: chondrule, radial pyroxene chondrule, gas jet levitation

コンドリュールの形状を用いた、還元タイプと酸化タイプ CV 3 コンドライトにおける衝突作用の指標 Chondrule shapes as indicators of shock deformation in reduced vs. oxidized CV chondrites

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

¹ 早稲田大学

¹Waseda University

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

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

Modes show that the CV3red chondrites have lower proportions of matrix than the two CV3ox thin sections (Leoville and Efremovka matrix modes are 22-32%, compared to 34-40 mode % matrix in the two Allende thin sections) (also see [6]). Ratios of (L-W)/L tend to be near 0~0.1 in the chondrules from Allende, indicating circular shapes in the plane of the thin section. In contrast, (L-W)/L ratios in the Leoville and Efremovka thin sections tend to be near 0.4~0.5, indicating more elongate shapes. Chondrules in one Efremovka thin section are slightly more equant than in the other two CV3red thin sections (most [L-W]/L values 0.25~0.40 vs. 0.35~0.50), probably as a result of orientation of the thin section vs. fabric in Efremovka. Furthermore, rose diagrams of long axes of chondrules show that the chondrule long axes are clustered together along a common orientation in each thin section of Leoville and Efremovka.

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

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

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

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

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

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

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

キーワード: CV コンドライト, 変成, コンドリュール, 衝突作用

Keywords: CV chondrites, metamorphism, chondrules, shock deformation

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

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

¹ 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻

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

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

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

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

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

Reference

[1] K. Hisayoshi, S. Kanou and C. Uyeda : Phys.:Conf. Ser., 156 (2009) 012021.

[2] C. Uyeda, K. Hisayoshi, and S. Kanou : Jpn. Phys. Soc. Jpn. 79 (2010) 064709.

キーワード: 並進運動, 微小重力, 磁気分離, 磁気抽出, 非破壊同定

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

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

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

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

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

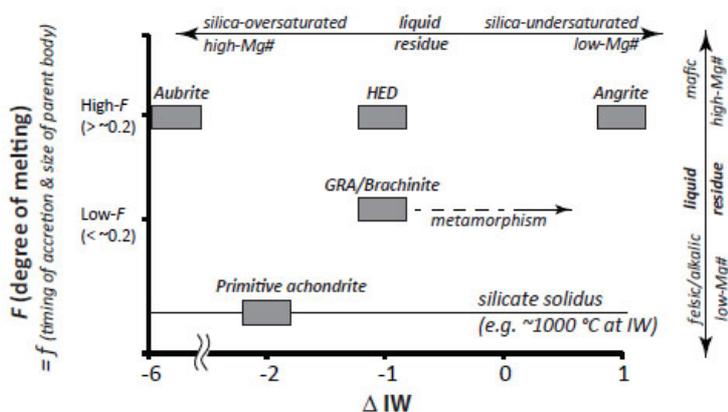
Figure caption:

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

Reference:

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

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



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

齋藤 優人¹; 宮原 正明^{1*}; 山口 亮²

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

¹ 広島大学理学研究科地球惑星システム学専攻, ² 極地研究所

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

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

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

キーワード: 普通コンドライト, 高圧相, Type 7, Type 5

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

衝撃変成石英の微細組織分析：衝撃圧縮様式が平面変形構造方位角分布へ与える影響
Effect of pressure loading path on PDFs orientation of planar deformation features (PDFs) in shocked quartz.

常 ユイ^{1*}; 田近 英一²; 関根 康人¹; 関根 利守³; 小林 敬道⁴
CHANG, Yu^{1*}; TAJIKA, Eiichi²; SEKINE, Yasuhito¹; SEKINE, Toshimori³; KOBAYASHI, Takamichi⁴

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

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

⁴National Institute for Material Science (NIMS)

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

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

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

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

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

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

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

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

鹿山 雅裕^{1*}; 富岡 尚敬²; 大谷 栄治³; 瀬戸 雄介¹; 福田 惇一⁴; 関根 利守⁵; 宮原 正明⁵; 小澤 信³; 三宅 亮⁶; 留岡 和重¹; Fagan Timothy⁷; 西戸 裕嗣⁸
KAYAMA, Masahiro^{1*}; TOMIOKA, Naotaka²; OHTANI, Eiji³; SETO, Yusuke¹; FUKUDA, Jun-ichi⁴; SEKINE, Toshimori⁵; MIYAHARA, Masaaki⁵; OZAWA, Shin³; MIYAKE, Akira⁶; TOMEOKA, Kazushige¹; FAGAN, Timothy⁷; NISHIDO, Hirosugu⁸

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

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

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

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

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

谷内 聖^{1*}; 土屋 卓久¹

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

¹ 愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター

¹Geodynamics Research Center, Ehime University

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

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

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

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

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

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

¹Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University, ²Institute of Materials Structure Science, KEK, ³Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

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

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

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

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