

口頭講演 | R5：地球外物質

■ 2023年9月16日(土) 9:00 ~ 12:00 | 821 杉本キャンパス

R5：地球外物質

座長:松本 恵 (東北大学)、山本 大貴(九州大学)、瀬戸 雄介(大阪公立大学)、橘 省吾(東京大学)

9:00 ~ 9:15

[R5-01] ルチルの衝撃変形微細組織

*梅田 悠平¹、永井 優馬¹、富岡 尚敬²、関根 利守³、宮川 仁⁴、小林 敬道⁴、遊佐 斉⁴、奥地 拓生¹ (1. 京大・複合研、2. 海洋研究開発機構、3. 中国高圧科学研究中心、4. 物質材料研究機構)

9:15 ~ 9:30

[R5-02] 3次元衝撃実験により変形したカルサイトの微細組織

*富岡 尚敬¹、黒澤 耕介²、大野 遼³、新原 隆史⁴、松井 孝典² (1. 海洋研究開発機構・高知コア研究所、2. 千葉工業大学・惑星探査研究センター、3. 立命館大学・総合科学技術研究機構、4. 岡山理科大学・基礎理学科)

9:30 ~ 9:45

[R5-03] 分化隕石中シリカ鉱物共存組織のFIB-TEM観察

*竹之内 惇志¹、伊神 洋平²、三宅 亮²、大野 遼³、三河内 岳⁴、山口 亮⁵ (1. 京大・総博、2. 京大・理、3. 立命館、4. 東大・総研博、5. 極地研)

9:45 ~ 10:00

[R5-04] 玄武岩と火星模擬土壌の短時間加熱実験による火星隕石の衝撃溶融の検証

「発表賞エントリー」

*佐藤 武¹、三河内 岳² (1. 東大・院理、2. 東大・総研博)

10:00 ~ 10:15

[R5-05] 放射光X線CTを用いたDaG999コレイライト中炭素粒子の内部構造観察

*安武 正展¹、松本 恵³、松野 淳也²、土山 明^{2,4}、上杉 健太郎¹、竹内 晃久¹ (1. JASRI、2. 立命館大、3. 東北大、4. 広州地球化学研究所)

10:15 ~ 10:30

[3Lecture-201-11-6add] 休憩

10:45 ~ 11:00

[R5-07] はやぶさ2リターンサンプル表面の微隕石衝突メルトとマイクロクレータのナノCT・TEM分析

*松本 恵¹、松野 淳也²、土山 明^{2,3}、中村 智樹¹、榎戸 祐馬¹、菊入 瑞葉¹、安武 正展⁴、上杉 健太郎⁴、竹内 晃久⁴、延寿 里美⁵、奥村 翔太⁶、三津川 到⁶、 瑠、三宅 亮⁶、はやぶさ2 初期分析コアチーム (1. 東北大学、2. 立命館大学、3. 中国科学院・广州地化研、4. (公財) 高輝度光科学研究センター、5. 愛媛大学、6. 京都大学)

11:00 ~ 11:15

[R5-08] CIコンドライト及び小惑星リュウグウ試料のカンラン石主要・微量元素組成から推測する起源物質

*三河内 岳¹、吉田 英人¹、増田 みなみ¹、ゾレンスキー マイケル² (1. 東京大学、2. NASAジョンソン宇宙センター)

11:15 ~ 11:30

[R5-09] Orgueil(CIコンドライト)隕石中角礫化岩片の鉱物モード多様性と水質変成度の関連について

*増田 みなみ¹、三河内 岳²、Zolensky Michael³ (1. 東大・院理、2. 東大・総研博/院理、3. NASA JSC)

11:30 ~ 11:45

[R5-10] Kaidun隕石におけるC1岩相の鉱物学的多様性

「発表賞エントリー」

*荻谷 賢英¹、三河内 岳²、Zolensky Michael³ (1. 東京大学・院理、2. 東京大学・総研博/院理、3. NASA ジョンソン宇宙センター)

11:45 ~ 12:00

[R5-11] コンドライトのサブタイプ3.0分類の検討

*木村 眞¹、ワイスバーク マイケル²、山口 亮¹ (1. 国立極地研究所、2. ニューヨーク市立大学)

[zoom] Zoom

ルチルの衝撃変形微細組織

Shock deformation microstructures in rutile

*梅田 悠平¹、永井 優馬¹、富岡 尚敬²、関根 利守³、宮川 仁⁴、小林 敬道⁴、遊佐 斉⁴、奥地 拓生¹
*Yuhei Umeda¹, Yuma Nagai¹, Naotaka Tomioka², Toshimori Sekine³, Masashi Miyakawa⁴,
Takamichi Kobayashi⁴, Hitoshi Yusa⁴, Takuo Okuchi¹

1. 京大・複合研、2. 海洋研究開発機構、3. 中国高圧科学研究中心、4. 物質材料研究機構
1. Kyoto Univ. KURNS., 2. JAMSTEC, 3. HPSTAR, 4. NIMS

惑星構成鉱物の衝撃変形特性に関する研究は、インパクトクレーターの岩石や隕石が経験した衝突履歴を読み解くために必要不可欠である。二酸化チタン (TiO_2) は圧力・温度によって様々な結晶構造に変化し[1]、常圧安定相としてはルチルがある。自然界では、 TiO_2 の多形がドイツ・リースクレーター[2]、月クレーター[3]、コンドライト隕石[4]などから見つかっている。これらの衝撃を受けた岩石試料の組織分析から、積層欠陥などの衝撃変成組織や α - PbO_2 型構造への高圧相転移が確認されているが、その形成機構や高圧下での変形特性は十分に理解されていない。 TiO_2 の衝撃変成についての実験的研究は、主に衝撃回収実験によって行われてきた。単結晶ルチルの衝撃回収試料には、強い剪断応力によって積層欠陥が形成され、その近傍で α - PbO_2 型構造への相転移が確認された[5]。一方で、高空隙率の粉末のルチルでは、同様の衝撃圧力においても積層欠陥および高圧相は確認されなかった[6]。このことから、出発試料の空隙に起因する衝撃温度の違いは、 TiO_2 の衝撃変成機構や高圧相転移機構に大きな影響を与えることが示唆されている。

本研究では、物質・材料研究機構の一段式火薬銃を用いて衝撃回収実験を行った。空隙の効果を検討するために、出発試料にはルチルの単結晶とペレット化した粉末（空隙率30%）を準備した。両者の衝撃圧力は30 GPaで行った。衝撃圧縮実験後、回収した試料について、X線回折法（XRD）による結晶相同定、透過型電子顕微鏡（TEM）による微細組織観察を行った。単結晶試料のXRDとTEM分析の結果、ルチルの{101}面に積層欠陥が卓越していることが明らかとなり、塑性変形における支配的な転位のすべり系が{101}<01>であったことが示唆された。また、一部のルチルが α - PbO_2 型構造へ相転移していることが確認され、その結晶方位関係は[010]Rt//[001] α - PbO_2 であった。トポロジー解析により、この相転移は中間構造としてフッ化カルシウム型構造を経由して、無拡散型の機構により起きた可能性が高いことが明らかとなった。一方、衝撃圧縮後の粉末試料は、ルチル相のみから成り、絡み合った転位を持つ粒子と転位がほとんどない再結晶化した粒子から構成されていることが分かった。積層欠陥はほとんど確認されなかった。粉末ルチルについては、すべり系{110}[001]が卓越した可能性が高いことが明らかとなった。

参考文献[1] Nishio-Hamane et al., *Physics and Chemistry of Minerals*, (2010).[2] El Goresy et al., *Earth and Planetary Science Letters*, (2001). [3] Hou et al., *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, (2021).[4] Xie et al., *Acta Geochimica*, (2023).[5] Kusaba et al., *Physics and Chemistry of Minerals*, (1988).[6] Tan et al., *Journal of Physics: Condensed Matter*, (2018).

キーワード：ルチル、衝撃回収実験、変形、欠陥

Keywords: Rutile, Shock recovery experiment, Deformation, Defect

3次元衝撃実験により変形したカルサイトの微細組織

Microstructures of calcite deformed by 3-D shock experiments

*富岡 尚敬¹、黒澤 耕介²、大野 遼³、新原 隆史⁴、松井 孝典²

*Naotaka TOMIOKA¹, Kosuke Kurosawa², Haruka Ono³, Takafumi Niihara⁴, Takafumi Matsui²

1. 海洋研究開発機構・高知コア研究所、2. 千葉工業大学・惑星探査研究センター、3. 立命館大学・総合科学技術研究機構、4. 岡山理科大学・基礎理学科

1. KOCHI, JAMSTEC, 2. PERC, Chiba Inst. Tech., 3. Res. Org. Sci. Tech., Ritsumeikan Univ., 4. Dept App. Sci., Okayama Sci. Univ.

【はじめに】衝突現象は太陽系の形成に基礎的なプロセスの一つである。この履歴を読み解くために隕石鉱物の衝撃実験が行われ、その回収試料と隕石試料の変形・相転移組織の比較から、衝撃変成度の評価が行われてきた [1]。含水コンドライトの主要鉱物の一つである炭酸塩鉱物については、変形双晶・転位・分解が圧力指標として用いられているが、10GPa以下の低圧力領域では、明確な指標が存在しないのが現状である [2]。このような中我々は、3次元的に衝撃が減衰する、天然の衝突現象に近いジオメトリでのカルサイトの衝撃実験を行った [3]。その回収試料の偏光顕微鏡観察とiSALEコードを用いた圧力分布の見積もりに基づき、2.5-3.0 GPaを超える圧力では、粒子に波状消光が卓越することを明らかにした [3]。波状消光の観察は、簡便に薄片全体の低圧力条件の評価を行える利点がある。一方で、サンプルリターン試料の様に加工による試料損失を可能な限り避けたい微小・希少試料に対しては、観察が困難である。そこで本研究では、微小領域加工・観察が可能なFIB-TEM法によりカルサイトの変形微細組織を行い、その圧力効果を探ることを目的とした。

【実験】3次元衝撃実験は、Carara産大理石を直径30mm、長さ24mmの円筒形に加工し、チタン製コンテナに封入した後、惑星探査研究センターの2段式軽ガス銃を用いて、直径4.8mmのポリカーボネート球を衝突させ、衝突点近傍にてピーク圧力13GPaを発生させた [3]。本研究では、新たにピーク圧力が16 GPaでの実験も行った。これら2試料から研磨薄片を作成し、偏光顕微鏡にて光学性の観察を行った。更に、高知コア研究所のFIB (Hitachi SMI-4050) を用いて、超薄切片を作成し、透過電子顕微鏡 (TEM: JEOL JEM-ARM200F) による微細組織観察を行った。非衝撃圧縮のカルサイトについても、同様にTEM観察を行った。

【結果】非衝撃圧縮のカルサイトは、偏光顕微鏡下でシャープな消光を示す。TEMによる観察では、双晶ラメラに加えて転位が観察され、その平均密度は 1.4×10^9 ($1/\text{cm}^2$) であった。1-2 GPaの衝撃圧力を受けたカルサイト粒子は、非衝撃圧縮試料と同様にシャープな消光を示した。転位密度は $4.1-7.4 \times 10^8$ ($1/\text{cm}^2$) で、非衝撃圧縮のカルサイトと顕著な差は認められない。一方4 GPaの試料は明瞭な波状消光を示す。TEM観察では、自由転位に加えて $1 \mu\text{m}$ 以下の幅で絡まり帯状になった転位組織が観察された。「帯」以外の領域の転位密度は 9.2×10^8 ($1/\text{cm}^2$) で、2GPa以下の粒子と同程度である。同様に波状消光を示す5 GPaの試料では転位が絡まった領域が広く分布し、7-16GPaの試料では、切片の全領域で高密度に転位が絡まった組織を持つ。上記いずれの試料においても、制限視野電子線回折はシャープな単結晶パターンを示し、結晶亜粒界は認められなかった。

【考察】本研究で観察された自由転位の密度は圧力に依存せず、非圧縮のカルサイトが元々持っている組織に近いと考えられる。一方、波状消光を示す粒子が急増する約3GPa以上の圧力条件では、高密度に絡まった転位網が発達することが明らかになった。ユゴニオ弾性限界 (1.2-1.4 GPa) を越える圧力条件では、大理石中の個々のカルサイト粒子は塑性変形をおこすが、歪速度が極めて早いために、特定の結晶面に転位の形成が集中すると考えられる。更に高い圧力条件では、結晶方位の依存性は小さくなり、絡まった転位が粒子全体に

形成される。高密度転位歪によるミクロンスケールでの結晶方位の変化は、電子線回折で特定できないほど小さいものの、数百ミクロンスケールでは優位な変化量を持ち、偏光顕微鏡にて観察される波状消光を作り出している可能性が高い。

小惑星リュウグウの表層粒子は強い水質変成を受けカルサイトを含むが、その衝撃変形については、まだ詳しい報告はない。最近、微小断層や硫化物高圧相等の評価から、リュウグウの経験した圧力は約2GPaと見積られた [4]。今後カルサイトの転位組織観察を行うことで、衝撃圧力が更に制約できると期待できる。

文献 [1] Stöffler et al. (2008) *MaPS*, 53, 5–49. [2] Langenhorst (2002) *Bull. Czech. Geol., Sur.*, 77, 265–282. [3] Kurosawa et al. (2022) *JGR. Planet.*, 127, e2021JE007133. [4] Tomioka et al. (2023) *Nat. Astron.*, 7, 669–677.

キーワード：カルサイト、衝撃実験、転位、透過電子顕微鏡

Keywords: Calcite, Shock experiments, Dislocations, Transmission electron microscopy

分化隕石中シリカ鉱物共存組織のFIB-TEM観察

FIB-TEM observation of silica minerals coexisting in achondrites

*竹之内 惇志¹、伊神 洋平²、三宅 亮²、大野 遼³、三河内 岳⁴、山口 亮⁵

*Atsushi TAKENOUCHI¹, Youhei Igami², Akira Miyake², Haruka Ono³, Takashi Mikouchi⁴, Akira Yamaguchi⁵

1. 京大・総博、2. 京大・理、3. 立命館、4. 東大・総研博、5. 極地研

1. The Kyoto Univ. Museum, 2. Kyoto Univ., 3. Ritsumeikan Univ., 4. The Univ. Museum, The Univ. of Tokyo, 5. Natl. Inst. of Polar Res.

シリカにはいくつかの多形が存在し、分化隕石中にはシリカ多形が様々な組み合わせで共存している。シリカの各相はメルトやガラスからの結晶化か、結晶化後の相転移で形成されたと考えられる。常温常圧では石英が安定相であるため、多形の多様な組み合わせは、主に相転移時の温度と速度論に支配されている。そのため、シリカの組み合わせと隕石の熱履歴の対応関係が指摘されており (e.g., Ono et al. 2019; 2021), 各相の相転移速度や相転移条件を精査することで冷却速度計としての利用が期待されている。本研究では分化隕石中のシリカの形成過程を精査するため、昨年度の単斜-擬直方トリディマイト共存組織 (MC-trd, PO-trd) の観察 (竹之内他2022) に引き続き、様々な組み合わせのシリカについて集束イオンビーム (FIB) による切り出しと透過型電子顕微鏡 (TEM) による観察を行った。

試料加工と観察は京都大学大学院理学研究科のFIB (Helios NanoLab G3 CX) とTEM (JEM-2100F) を用いた。試料はクリストバライト (Crs) と擬直方トリディマイト (PO-trd) の共存組織を持つ安山岩質の分化隕石Erg Chech 002 (EC002) とCrsと石英 (Qtz) の共存組織を持つユークライト隕石のStannern, 単斜トリディマイト (MC-trd) とQtzの共存組織を持つユークライト隕石のMillbillillieを用いた。

EC002ではCrsとPO-trdの直線的な境界が観察され、境界には他形の曹長石と自形のチタン鉄鉱が分布していた。また、境界面と平行に $(110)_{\text{Crs}} // (110)_{\text{PO}}$ 及び $[1-1-1]_{\text{Crs}} // [001]_{\text{PO}}$ の方位関係が見られた。このtrdはアルカリ長石の包有物を含んでおり、回折像では超構造を示す回折点が観察されなかった。StannernではCrsとQtz間に明瞭な方位関係は今のところ観察されておらず、球状のCrsがQtz中に存在する組織が観察された。両者ともクロム鉄鉱やチタン鉄鉱の包有物を含み、Crsには積層欠陥や双晶が見られた。MillbillillieではMC-trd中に半自形で存在するQtzを観察したところ、複数のQtz粒子が同じ結晶学的方位で存在していた。QtzとMC-trd間に方位関係があると考えられるが、MC-trdの指数をつけることができていないため、今後電子後方散乱回折法 (EBSD) も組み合わせて解析を進める予定である。また、Millbillillie中のQtz粒子には特徴的な毛鉤状の割れを持つ粒子が存在するため、それらも同様に観察を行った。毛鉤状の割れを持つQtzはいくつかの結晶で形成されており、各単結晶の中で弱い劈開面 $\{10-11\}$ に平行に割れが入っていることが確認された。

本研究によるとCrsとQtzの共存組織は方位関係を持たない形成過程をもつ。CrsとQtzの共存組織の比較的単純な形成過程としては、全体がCrsとして結晶化し、一部がQtzへ相転移する場合と、一部がCrsとして結晶化し、その後残ったメルトまたは固化したガラス部がQtzとして結晶化する場合などが考えられる。CrsからQtzへの相転移が方位関係を持つかは未確認であり、今回の結果だけでは形成過程を制約するには至らないが、球状のCrsの存在から後者の形成過程を経ている可能性が高いと考えられる。これに対し、CrsとPO-trd間、QtzとMC-trd間には方位関係が存在し、それらの多形は結晶方位関係を持つような形成過程を経ている。特にCrsとPO-trdは SiO_4 四面体を作る六員環シートの積層方向である $[111]_{\text{Crs}}$ と $[001]_{\text{PO}}$ が平行であり、僅かな変位で相転移した組織であることが示唆された。これはCrsからtrdへの相転移途中でクエンチした組織と考えられ、EC002が比較的高温なtrdの安定領域から急に冷却したことを示唆している。MCとQtzの共存組織は、Crs+trdやCrs+Qtzの共存組織からCrsがQtzまたはtrdへと相転移する場合や、すべてMC-trdとなってから一部がQtzへ相転移する場合などが考えられる。前者の場合、QtzとMCの方位関係を説明するため

にはCrsとQtzの共存組織または相転移時にも方位関係がある必要がある。一方、MC-trdは加熱実験により毛鉤状の割れを伴うQtzへ相転移するという報告（Ono et al. 2021）もあるため、MC-trdとQtzの共存組織はMC-trdからのQtzへの相転移により形成された可能性が高い。

本研究により一部のシリカ多形の組み合わせには明瞭な方位関係が存在し、相転移で形成されることが明らかとなった。今後も観察・実験を通して各シリカ組み合わせの形成過程を明らかにしていく。

キーワード：シリカ、分化隕石、相転移、熱履歴、トリディマイト

Keywords: silica, achondrites, phase transition, thermal history, tridymite

玄武岩と火星模擬土壌の短時間加熱実験による火星隕石の衝撃溶融の検証

Assessment of Shock Melting of Martian Meteorites as Deduced from Short Time Heating Experiments of Basalt and Martian Soil Simulants

*佐藤 武¹、三河内 岳²*Takeru Sato¹, Takashi Mikouchi²

1. 東大・院理、2. 東大・総研博

1. Univ. of Tokyo, 2. Univ. of Tokyo

はじめに：火星隕石は岩石・鉱物学的特徴からシャーゴットタイト、ナクライト、シャシナイトの大きく3種類に分類される。このうちシャーゴットタイトには、EETA 79001など火星での強い衝撃によって形成した衝撃溶融物 (shock melt) を豊富に含むものが存在する (Bogard and Johnson, 1983)。また、これらの衝撃溶融物には、火星の土壌 (レゴリス) 成分が含まれている可能性があることが長年議論されてきた (e.g., Rao et al., 2018, 2021; Walton et al., 2010)。しかし、実際の衝撃溶融は岩石と微粒の土壌との間の反応であり、そのような再現実験はこれまで実施されていない。そこで我々はシャーゴットタイトの衝撃溶融を想定して、玄武岩バルク試料と火星の模擬土壌を用いた短時間の加熱実験を行った。特に、火星土壌候補として火星土壌模擬物質 (JSC Mars-1) と火星探査機により火星表層で豊富に発見されている鉄明礬石粉末 (e.g., Tosca et al., 2005; King et al., 2010) を用いた検証を行い、本学会ではその経過を報告する。

方法：本研究の加熱実験では、カンラン石フィリク質シャーゴットタイトを模した、ハワイ島産のピクライト玄武岩を使用し、火星土壌の模擬物質としてJSC Mars-1 (Allen et al., 1997) と鉄明礬石粉末 (スペインEl Descuido 鉱山) の2種類を使用した。2枚の玄武岩スライス (約1 x 1 x 0.2 cm) の間にいずれかの模擬土壌粉末を挟み、全体をPt箔で包み、これを白金るつぽに入れ、酸素分圧制御縦型電気炉 (株式会社シリコンット製) を用いて1100~1300度における10秒~60分までの加熱を行った。実際の衝撃溶融は高温・高圧下で起こっているが、高圧の継続時間よりも残留熱の寄与する時間の方がはるかに長く、溶融の主要因と考えられるため (e.g., Takenouchi et al., 2017)、本実験では圧力はあえて考慮せずに高温のみを模擬した実験とした。加熱実験は全圧1気圧下で行い、H₂とCO₂の混合ガスにより火星マグマ固化時の酸素雰囲気に近いlogfO₂=QFM-1に設定した。各実験時間後には室温で急冷し、実験生成物を断面が見えるように切断して研磨片を作製した。岩石組織は反射光学顕微鏡で観察し、鉱物およびガラス組成の分析はEPMA (JEOL JXA-8900L及びJEOL JXA-8530F、いずれも東京大学) により行った。

結果：表1にJSC Mars-1を用いた実験の結果を示す。1150度の5分、10分、60分加熱ではシャーゴットタイトの衝撃溶融に似た組織が生成した。また、元の玄武岩に比べて輝石と斜長石の量が減少しており、一部の結晶は完全に、残りの結晶でもリムの溶融が確認された。JSC Mars-1粉末は60分間で完全に溶融し、5分間と10分間で部分的に溶融した。また、異なる位置に生成したガラスの組成分析では有意な組成差が確認されず、加熱中に融液が試料内部に広く運ばれ、メルト組成が均一化したことが示唆された。1分以上の加熱によって生成したメルト組成は輝石及び斜長石の混合物 (輝石:斜長石=3:2) に近いものであったが、1分未満の加熱では輝石のみが溶融しており、JSC Mars-1や斜長石の溶融はほとんど観察されなかった。1125度での鉄明礬石粉末の実験では、10秒間の加熱で部分的に溶融し、30秒と1分間の加熱では完全に溶融していた。

考察と結論：本研究から、カンラン石フィリク質シャーゴットタイトを模擬したピクライト玄武岩のバルク試料と火星模擬土壌との混合に対応する溶融温度条件は、~1150度であることが判明した。一般的に火星隕石をはじめとする玄武岩組成では、斜長石は輝石よりも溶融温度が低いことから、斜長石の方がより早く溶融すると予想されるが、加熱時間が1分より短いと斜長石はほとんど溶融せず、輝石の寄与が大きい溶融物が形成された。このような短時間の加熱における斜長石の溶融しにくさは、斜長石溶融のカイネティクスに依存すると考えられるが、シャーゴットタイトに含まれるマスケリナイトは溶融することなく非晶質化したことが指摘されており (e.g., Milton and De Carli, 1963; Fritz et al., 2005)、本実験の結果は衝撃変成によるマスケリ

ナイトの形成に関連していると考えられる。1分以下の短時間溶融実験では、JSC Mars-1に比べて鉄明礬石粉末の方がより溶融しやすかった。これは、これらの粒径の違い（JSC Mars-1：0.3mm, 鉄明礬石粉末：0.1mm）に関連していると考えられるが、衝撃溶融時の火星土壌の取り込みをよりよく理解するために追加の実験（特に高温で短時間の実験）を行う予定である。

キーワード：火星隕石、シャーゴッタイト、加熱実験、レゴリス、マスケリナイト

Keywords: Martian Meteorite, Shergottite, Heating Experiment, Regolith, Maskelynite

表 1 JSC Mars-1 を用いた加熱実験の結果

	10秒	30秒	1分	5分	10分	60分
1300度	△	○	○	-	-	◎
1200度	△	△	○	-	-	◎
1150度	△	△	△	○	○	○
1125度	△	△	△	-	-	○
1100度	-	-	-	-	-	△

◎：ほとんど(~90%)が溶融、○：少量(~10%)が溶融、△：わずかに(~5%)溶融

放射光X線CTを用いたDaG999ユレイライト中炭素粒子の内部構造観察

Observation of internal structure of diamond in carbon grains in DaG 999 ureilite.

*安武 正展¹、松本 恵³、松野 淳也²、土山 明^{2,4}、上杉 健太郎¹、竹内 晃久¹

*Masahiro YASUTAKE¹, Megumi Matsumoto³, Junya Matsuno², Akira Tsuchiyama^{2,4}, Kentaro Uesugi¹, Akihisa Takeuchi¹

1. JASRI, 2. 立命館大, 3. 東北大, 4. 広州地球化学研究所

1. JASRI, 2. Ritsumeikan Univ., 3. Tohoku Univ., 4. CAS/GIG

はじめに：ユレイライトは主に粗粒なカンラン石と輝石からなる超苦鉄質深成岩様のエコンドライトである。この隕石はサンプル間で酸素同位体が質量分別線に乗らないことから、大規模溶融は経験していないと考えられており、始原的エコンドライトとされることもある。この隕石中には、エコンドライトとしては例外的に多量の炭素が含まれており、主にグラファイトとダイヤモンドから成る炭素粒子として産する。炭素粒子中のダイヤモンドの成因としては、結晶構造的特徴、及び準安定相であるロンズデライトが産することから衝撃によって形成したとする説が有力視されている[1など]。一方で近年の研究により、従来想定されていたナノスケールの微細結晶ではなくマイクロサイズのダイヤが発見されるなど[2]、衝撃説に疑問を呈する報告も存在しており整合的理解には至っていない。我々は、走査結像X線顕微鏡（SIXM）を用いることで、ほとんど理解されていなかった炭素粒子の組織を詳細に観察できることを明らかにした。本件では、複数の炭素粒子を観察した結果から、それらの形成過程を考察する。試料と手法 試料はDaG 999の薄片試料を用いた。表面観察にて確認した3つの炭素粒子から集束イオンビーム装置（Helios NanoLab G3, FEI）を用いて、それぞれの粒子から2-3個の微小試料を作成した。CT撮影は、SPring-8, BL47XUにて行った。CT撮影は、8keVでのSIXMに加えて、詳細な鉄の3次元分布を明らかにするために鉄吸収端(7.11 keV)を挟んで7keV及び7.35keVでのナノCTを行った。結果と考察 観察した炭素粒子を粒子1-3とする。粒子1は破碎された鉱物片で構成された領域に産する。平板状の形状をしており表面は凹凸である。粒子2と3は、Ol-Pigモノミクトユレイライト様の岩片中に産する。この岩片中のカンラン石は、平面割れ目を示し、細粒化した輝石も一部確認される。衝撃変成度はU-S3であると推測される。粒子2は不定形でありアメーバ状の突起がカンラン石中、粒間に潜りこむような形状をしている。粒子3はブレード状であり、大部分がカンラン石に取り囲まれている。粒子2、粒子3の表面状態は共に凹凸である。粒子3中央部の凹凸は、粒子先端部と比較して細粒であり、凹凸に弱い配向性が見られる。CT撮影によりこれら粒子の3次元構造を確認すると、粒子1、粒子2は比較的一様なグラファイト中に10-20um程度のマイクロダイヤが産する構造を持っている(図1a)。一部のダイヤモンドは特徴的な産状を持ち、双晶のように産するもの、板状に集合して産するものが確認された。マイクロダイヤ中には鉄に富む包有物が多く存在している。一方で、粒子3は、非常に細粒な粒子からなっており、粒径は数十nmサイズであると推測される(図1b)。微細粒子はダイヤモンドとグラファイトの中間的な値を持ち、2相が混合した値であると考えられる。全ての微小試料は層構造が発達しており、粒子伸長方向とほぼ平行である。また観察した試料全てに鉄に富むシートが存在する。一部には、板状に発達した粗粒なマイクロダイヤの集合体が層構造と平行に存在する。これらの粗粒ダイヤモンド中には鉄に富む包有物が多く存在する。一部には層構造とほぼ直行方向に面構造があり、画素値が完全に一致しないもののダイヤモンドと思われる相から成る。この構造は層構造に切られるように存在し、層構造の発達以前に形成したものと推測される。粒子1と粒子2に産するマイクロダイヤは、惑星説の根拠の一つであるマイクロダイヤの産状と類似している。一方で、粒子3の細粒組織は、Goalparaなどの強い衝撃を受けた試料に見られる炭素粒子の構造に類似している。しかしながら、粒子2と粒子3は同じ岩片中に産するため、これら粒子の熱史や衝撃史は同じはずである。またマイクロダイヤ中に選択的に鉄包有物が観察され、これは粗粒ダイヤの形成過程に関与していることが示唆される。本結果は、ユレイライト中炭素粒子の組織が複雑かつ多様性のあるものである事を示している。ダイヤモンドの形成過程も

これまでに想定されている単一プロセス、シングルイベントではない可能性が高い。 [1] Nakamuta et al. (2016) JMPS, 111, 252-269. [2] Miyahara et al. (2015) GCA, 163, 25-26.

キーワード：放射光CT、隕石、ユレイライト、ダイヤモンド、グラファイト

Keywords: SR-CT, meteorite, ureilite, diamond, graphite

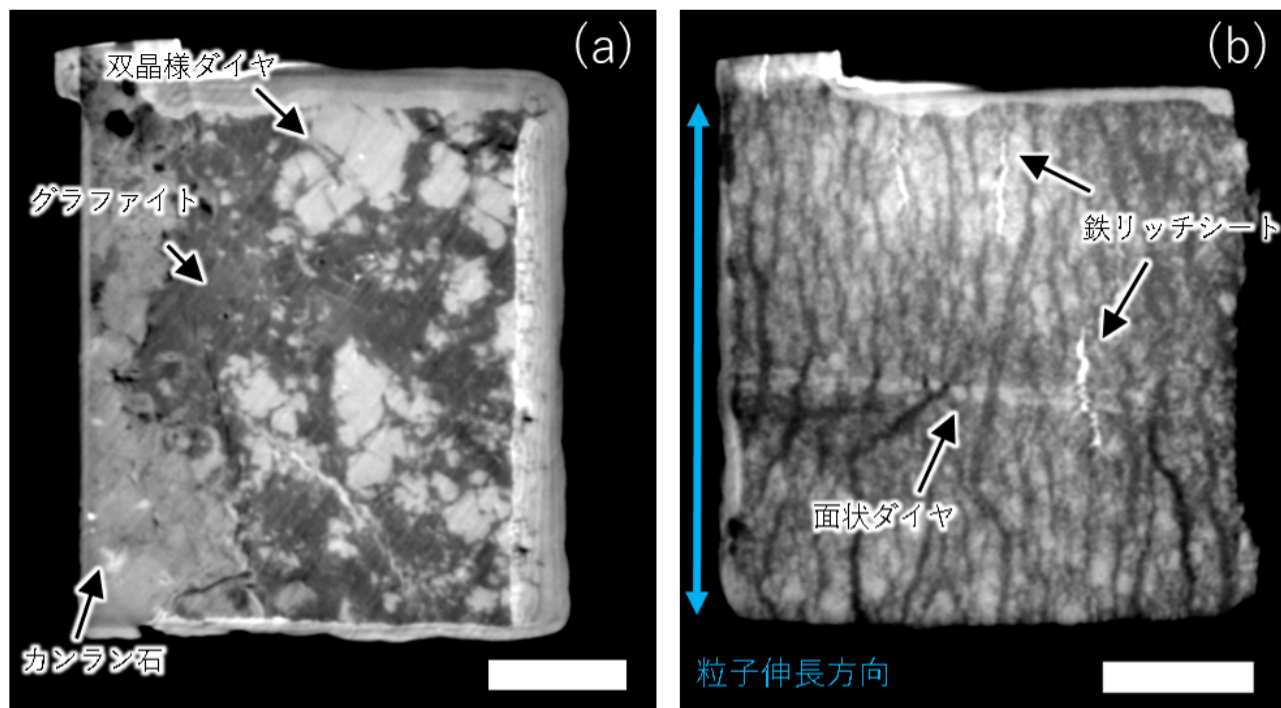


図1. 炭素粒子のCT断面像. (a) 粒子2の位相像. グラファイト中にマイクロダイヤモンドが囲まれるように産する. 図上部には双晶様に産するダイヤモンドが見られる. (b) 粒子3の位相像. 試料全体に粒子伸長方向（紙面上下）と平行な層構造が発達している. また、特徴的に鉄に富むシートが含まれる. 図中央には層構造とほぼ直行方向（紙面左右）に面状のダイヤモンドと思われるものが分布する. この構造上下方向の層構造に切られている事が分かる. 図中スケールバーは10 μ m.

口頭講演

R5：地球外物質

座長:松本 恵 (東北大学)、山本 大貴(九州大学)、瀬戸 雄介(大阪公立大学)、橘 省吾(東京大学)

2023年9月16日(土) 09:00 ~ 12:00 821 (杉本キャンパス)

10:15 ~ 10:30

[3Lecture-201-11-6add]休憩

はやぶさ2リターンサンプル表面の微隕石衝突メルトとマイクロクレータのナノCT・TEM分析

Nano-CT and TEM analysis of impact melt splashes and microcraters on asteroid Ryugu samples

*松本 恵¹、松野 淳也²、土山 明^{2,3}、中村 智樹¹、榎戸 祐馬¹、菊入 瑞葉¹、安武 正展⁴、上杉 建太郎⁴、竹内 晃久⁴、延寿 里美⁵、奥村 翔太⁶、三津川 到⁶、琦³、三宅 亮⁶、はやぶさ2 初期分析コアチーム *Megumi MATSUMOTO¹, Junya Matsuno², Akira Tsuchiyama^{2,3}, Tomoki Nakamura¹, Yuma Enokido¹, Mizuha Kikuri¹, Masahiro Yasutake⁴, Kentaro Uesugi⁴, Akihisa Takeuchi⁴, Satomi Enju⁵, Shota Okumura⁶, Itaru Mitsukawa⁶, Sun Mingqi³, Akira Miyake⁶, Hayabusa2 initial analysis core-team

1. 東北大学、2. 立命館大学、3. 中国科学院・广州地化研、4. (公財) 高輝度光科学研究センター、5. 愛媛大学、6. 京都大学

1. Tohoku Univ., 2. Ritsumeikan Univ., 3. GIG, CAS, 4. JASRI, 5. Ehime Univ., 6. Kyoto Univ.

探査機はやぶさ2が持ち還った小惑星リュウグウ粒子は、主にMgに富む層状ケイ酸塩からなり、Fe-Ni硫化物、マグネタイト、炭酸塩、アパタイトを含み、CIコンドライトに類似した化学的・岩石鉱物学的特徴をもつ[e.g., 1,2]。これらの粒子のなかには、表面に微隕石衝突によって生成したと考えられるマイクロクレータや衝突溶融メルトが見られ、小惑星表層で宇宙空間への暴露を経験したと考えられるものが見つかっている[e.g., 3]。本研究では、このような粒子のうち、A0067、A0094粒子について観察を行い、多数のマイクロクレータと衝突溶融メルトを確認した。本発表では、このうち比較的大きな衝突溶融メルト(A0067-melt#1, A0094-melt#1)とマイクロクレータ(A0067-crater#1)について、走査型電子顕微鏡(SEM)、放射光X線ナノCT(7-8 keV)、透過型電子顕微鏡(TEM)による観察・分析を行った結果を報告する。A0067-melt#1は径 $\sim 20 \mu\text{m}$ の液滴形状を示し、ケイ酸塩ガラス部分とその上に付着する液滴状のFeに富む硫化物(径 $\sim 10 \mu\text{m}$)からなる。これを集束イオンビーム(FIB)を用いてA0067粒子本体から切り出し、ナノCT/TEMによる断面観察を行ったところ、ケイ酸塩ガラスと硫化物の境界は滑らかで、ガラス内部には径 $\sim 7 \mu\text{m}$ の気泡が含まれていた。ケイ酸塩ガラスは均質でMg-Feに富む組成(Mg#: ~ 0.64)をもつ。硫化物部分は、トロイライトとペントランダイトからなるマトリクス中にデンドライト様の α -(Fe-Ni)粒子(200-300 nm)を多数含んでおり、Fe-S-Niメルトの急冷により形成したと考えられる。A0094-melt#1は砂時計様の形状を示し($\sim 15 \times 5 \mu\text{m}$)、2つのケイ酸塩ガラス液滴が接合して固化したものと考えられる。これについても同様にナノCT/TEM観察を行ったところ、内部は不均質で、径2-5 μm 程度の大きさのFeに富む領域(Mg#: $\sim 0.52-0.55$)とFeに乏しい領域(Mg#: ~ 0.79)からなるまだら状組織を示した。両領域の境界は不鮮明で、どちらの中にも多数の気泡(径 $< 2 \mu\text{m}$)および少量の低結晶炭素質物質(径0.3-1 μm)が見られた。低結晶炭素質物質は多孔質で、微小なFe-Ni硫化物粒子やMg-Feケイ酸塩ガラスを含むものもあり、彗星塵中に見られる始原的有機物によく似た組織をもつ[e.g., 4]。また、Feに富む領域中には多数の球形～不定形のFe-Ni硫化物(径 $< 500\text{nm}$)、カンラン石(径1-2 μm)粒子が見られた。A0067-crater#1は径 $\sim 5 \mu\text{m}$ 、深さ $\sim 4 \mu\text{m}$ のすり鉢形状を示し、クレータ壁面は衝突溶融メルトによって覆われていた。メルトは壁面に平行に発達したケイ酸塩ガラス層と硫化鉄層からなる互層構造を示す(層厚30-250 nm)。硫化鉄層は主にトロイライト粒子(径200-500 nm)からなる。ケイ酸塩ガラス層は、大部分を占めるMg-Feに富むケイ酸塩ガラス部(Mg#: ~ 0.72)とクレータ壁面沿って分布するシリカに富むガラス部からなり、両者は滑らかで明瞭な境界をもつ。また、どちらのケイ酸塩ガラスも気泡(径 $< 200 \text{nm}$)と硫化鉄粒子(径 $< 100 \text{nm}$)を含む。産状および化学組成から、これらのケイ酸塩ガラスは、ケイ酸塩メルトの液相不混和により分離したのではなく、もともと異なる組成をもつケイ酸塩がガラス転移点付近の温度で混合した可能性が高い。本研究の衝突溶融メルト

は、微隕石衝突時の加熱により、リュウグウ表層物質や衝突体が溶融急冷し形成したと考えられる。A0094-melt#1に見られるまだら状の組織は、衝突溶融メルト中に複数の起源の異なる物質が混合している可能性を示唆する。衝突溶融メルトの大部分を占めるMg-Feケイ酸塩ガラスの組成は、上述のようにMg#にバリエーションをもつが、これらの組成は(Si+Al)-Mg-Fe三角ダイヤグラム上で、CI（太陽）組成[5]とFe頂点を結ぶラインの延長上にプロットされる。このことは、本研究の衝突溶融メルトがいずれも同じ材料物質から生成したことを示唆する。発表では、これらの材料物質の起源および衝突溶融メルトの形成過程について議論する。 [1] Yokoyama et al. (2022) *Science*. [2] Nakamura et al. (2022) *Science*. [3] Noguchi et al. (2022) *Nat. Astronom.* [4] Matrajt et al. (2012) *MAPS*. [5] Lodders (2021) *Space Sci. Rev.*

キーワード：小惑星リュウグウ、微隕石衝突、衝突溶融メルト

Keywords: asteroid (162173) Ryugu, micrometeoroid impact, impact melt splash

CIコンドライト及び小惑星リュウグウ試料のカンラン石主要・微量元素組成から推測する起源物質

Origins of olivine grains in CI chondrites and asteroid Ryugu samples as inferred from their major and minor element compositions

*三河内 岳¹、吉田 英人¹、増田 みなみ¹、ゾレンスキー マイケル²

*Takashi MIKOUCHI¹, Hideto Yoshida¹, Minami Masuda¹, Michael E. Zolensky²

1. 東京大学、2. NASAジョンソン宇宙センター

1. Univ. of Tokyo, 2. NASA/JSC

はじめに：小惑星リュウグウ試料中に微量の無水ケイ酸塩（特にカンラン石）が発見されたことから、リュウグウ母天体において、少量の前駆物質がその後の水質変成を免れたことが示唆されている[1]。これら無水鉱物の起源は、酸素同位体組成からアマーバ状カンラン石集合体（AOA）様物質かコンドルール様物質と考えられている [2,3]。我々はCIコンドライトのIvuna隕石とOrgueil隕石を小惑星リュウグウ試料と同様の方法で分析し、これらの角レキ化隕石にも同様の無水ケイ酸塩が存在することを見出したが[4]、今回もう一つのCIコンドライトであるAlaisのカンラン石粒を分析したので、その分析値も合わせて、CIコンドライト／リュウグウ試料中のカンラン石組成と起源の制約について報告する。

結果：Alaisのカンラン石粒は、Mgマップによって明らかのように、Feに富む層状ケイ酸塩マトリックスを持つ岩相中に散在する鉱物片（～20ミクロンの大きさ）または凝集体として存在する。ほとんどのカンラン石粒は10ミクロン以下の大きさであるため、鉱物モード組成は0.1%以下である。カンラン石粒の形態は様々で、角ばったものもあれば丸みを帯びたものもあるが、常に薄い（<0.5ミクロン）Feに富んだリムを伴っている。これらの薄いリムを除けば、カンラン石組成は主要元素、微量元素ともに均質である。カンラン石組成はFo99に集中しており（ほとんどがFo99.3-98.5）、まれにFeに富むカンラン石（Fo~92.3）が存在する。MnO含有量は0.0-0.7 wt%であるが、LIMEカンラン石（MnO/FeO>1 in wt%）が1%程度存在する。Cr2O3は0.03-0.67 wt%である。ほとんどのカンラン石粒はCaに乏しいが（CaO:<0.1wt%）、一部のFeに富むカンラン石（Fo~98.5）はわずかに高いCaを含む（~0.2wt% CaO）。

考察と結論：Alaisのカンラン石組成は、Ivuna、Orgueil、そしてリュウグウ試料と、組織と鉱物組成の両方で顕著な類似性を示し、CIコンドライトとリュウグウ試料が共通の起源を共有していたことが再確認できた。Alaisのカンラン石存在量はIvunaと似るが、Orgueilとリュウグウ試料よりも明らかに高い。この違いは、我々が分析したAlaisの研磨試料が小さかったためのサンプルバイアスの可能性があるが、母天体での角レキ化過程において、カンラン石を含む岩相の量比が多い（水質変成[1]が弱い）部分を起源とする岩片を多く含んだ可能性も示唆される。これらCIコンドライト／リュウグウ試料中のカンラン石の主要・微量元素含有量をプロットすると、明らかに2つの成分があることがわかった。例えば、MnとCrの間には正の相関があるが、明らかに2つのトレンドを示している[4]。1つは比較的Mnに富みCrに乏しいトレンド（MnO: 0-2 wt%、Cr2O3: 0-0.5 wt%）で、酸素同位体分析[2,3]からAOA起源を示唆する。LIMEカンラン石粒は、Mnに富む末端がこのトレンドに沿ってプロットされている。これとは対照的に、他のトレンドは比較的Crに富み、Mnに乏しく（MnO: 0-0.5 wt%、Cr2O3: 0-0.6 wt%）、このような組成は酸素同位体データからコンドルール起源を示唆する [2,3]。同様に、Fa含有量とCaO量は2つの組成クラスターを示す。1つは比較的Mgに富み（Fo99.3-98.8）、Caが低い（CaO:<0.05 wt%）もので、もう1つは比較的Mgに乏しく（Fo98.8-98.2）、Caが高い（CaO:~0.2 wt%）ものである。前者はAOA起源で、後者はコンドルール起源と考えられる。これらのCI／リュウグウ前駆物質の寄与を母天体の構成要素として考えると、AOA様物質の寄与

がより大きく見え、母天体の形成領域と関係している可能性がある。また、カンラン石の大きさと組成の間に明確な相関は見られないことから、これらの前駆物質は母天体集積時に等しく取り込まれたと考えられる。

参考文献：[1] Nakamura T. et al. (2022) Science 10.1126/science.abn8671. [2] Liu M.-C. et al. (2022) Nature Astron., 10.1038/s41550-022-01762-4. [3] Nakashima D. et al. (2023) Nature Comm., 14:532. [4] Mikouchi T. et al. (2022) 85th Ann. Meeting of MetSoc, #6180.

キーワード：CIコンドライト、小惑星リュウグウ、カンラン石、アメーバ状カンラン石集合体（AOA）、コンドルール

Keywords: CI chondrite, Asteroid Ryugu, Olivine, Amoeboid olivine aggregat (AOA), Chondrule

Orgueil(CI コンドライト)隕石中角礫化岩片の鉱物モード多様性と水質変成度の関連について

On the relationship between modal abundances of minerals and degrees of aqueous alteration of the brecciated fragments in the Orgueil CI chondrite

*増田 みなみ¹、三河内 岳²、Zolensky Michael³

*Minami Masuda¹, Takashi Mikouchi², Michael Zolensky³

1. 東大・院理、2. 東大・総研博/院理、3. NASA JSC

1. UTokyo Sci., 2. UTokyo UMUT/Sci., 3. NASA JSC

はじめに：CIコンドライトは、多くの元素存在比が太陽組成とよく一致することから、太陽系で最も原始的な隕石と考えられている。近年、JAXAの探査機「はやぶさ2」が持ち帰った小惑星リュウグウの試料が、化学的・鉱物学的にCIコンドライトグループとほぼ一致することが報告されている [e.g., 1-3]。CIコンドライトの主要構成鉱物は層状ケイ酸塩、マグネタイト、硫化鉄(磁硫鉄鉱)、炭酸塩、リン酸塩、カンラン石、輝石であるが [4,5]、CIコンドライトは岩石学的・鉱物学的に不均質な角礫岩であり、様々な大きさや岩相の異なる岩片で構成される。先行研究ではCIコンドライトの異なる隕石間の鉱物モード組成の違いを調査しているが、個々の隕石内の岩片の不均質性についての情報は不十分である[6,7]。CIコンドライトは角礫化していることが大きな特徴であるため、個別の隕石ごとの鉱物モード組成よりも岩片ごとの鉱物モード組成の方がより重要であると考え、本研究では、Orgueil隕石の個々の岩片に注目して、鉱物モード組成を比較することで、岩片同士の不均質性を議論することを目的とする。

試料と手法：試料としてOrgueil隕石の1~3mmサイズの小粒子3つの研磨片と、1.5 cm~2 cmの大きな試料の研磨片を用意した。まず光学顕微鏡による観察を行い、次にFE-EPMA (JEOL JXA-8530F)を用いて、各試料について15元素の元素マッピングを実施した。EPMA分析によって得られた元素マッピングの結果から、ImageJソフトを用いて鉱物モード組成を求めた。また、各試料中の個々の角礫化岩片についても同様の解析を行った。

結果と考察：EPMA分析から、Orgueil隕石は主に200 μm ~2,3 mmの範囲の岩片で主に構成される角礫岩であることが観察された。まず、小粒子3つの試料について、研磨片全体の鉱物モード組成を求め、次に、角礫化岩片であると明確に識別できる21の岩片について、鉱物モード組成を求めた。大きい粒子についても、角礫化岩片であると明確に識別できる12の岩片について、同様に鉱物モード組成を求めた。

小粒子3試料と大きな1試料で分析した全33岩片の鉱物モード組成をまとめると表1のようになる(硫酸塩を除いて100%に規格化)。カンラン石と輝石が岩片に含まれる場合、マグネタイトの含有量は平均以下となる傾向がある。マグネタイトはCI母天体における水質変成が進むことで形成される二次鉱物であるのに対し、カンラン石や輝石は水質変成前から存在し、水質変成を経験するほど存在量が減っていく鉱物であると考えられるので、このような岩片は、他の岩片よりも水質変成の影響が少ない岩片であると推測できる。マグネタイトとドロマイトはどの岩片にもある程度含まれているが、強い相関関係はみられなかった。小粒子中の岩片サイズが小さいこと、解析した岩片の数が少ないことからデータにばらつきが多く、また、マップの解像度が足りないため、本来みられる相関関係が示されていない可能性が考えられる。

CIコンドライト隕石は地球での風化を経験した際、微小な硫化物が変質し、脈状の硫酸塩を形成したことが指摘されており[8]、硫酸塩を除いて規格化することで地球風化の影響を考慮して鉱物モード組成を比較することができるが、地球風化を受ける前の硫化物の含有量を推測することは難しい。リュウグウ試料は地球風化の影響を受けていないため、CIコンドライト試料とリュウグウ試料を比較する際には、地球風化の影響を考慮することが重要であり、また、CIコンドライトは岩片によって異なる性質や水質変成の程度が反映されている可

能性があるので、今後CIコンドライトとリュウグウ試料の研究では、試料全体だけでなく、角礫化したそれぞれの岩片に注目することが必要である。

参考文献 [1] Yada, T. et al. (2021) *Nature Astron.* 6, 214–220. [2] Yokoyama, T. et al. (2022) *Science*, eabn7850. [3] Nakamura, T. et al. (2022) *Science*, eabn8671. [4] Tomeoka, K., & Buseck, P. R. (1988) *GCA*, 52, 1627-1640. [5] Lee, M. R., & Nicholson, K. (2009) *EPSL*, 280, 268-275. [6] Morlok, A. et al. (2006) *GCA*, 70, 5371-5394. [7] Alfing, J. et al. (2019) *Chem. Erde, Geochem.*, 79, 125532. [8] Gounelle, M., & Zolensky, M. E. (2001) *MAPS*, 36, 1321-1329.

キーワード：CIコンドライト、オルゲイユ隕石、鉱物モード組成

Keywords: CI chondrite, Orgueil meteorite, modal abundance

	Org小1_01	Org小1_02	Org小1_03	Org小1_04	Org小2_01	Org小2_02	Org小2_03	Org小2_04	Org小2_05	Org小2_06
層状ケイ酸塩	96.32	95.43	93.82	93.90	94.10	95.53	94.44	99.11	96.50	92.62
マグネタイト	1.56	3.73	3.66	2.78	2.43	3.96	2.85	0.89	2.30	6.61
硫化鉄	1.69	0.07	0.14	0.13	0.15	0.26	0.05	—	—	0.12
ドロマイト	0.33	0.54	1.79	3.19	1.66	0.21	2.53	—	0.89	0.64
ブリュネライト	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ca炭酸塩	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Caリン酸塩	0.10	0.21	0.59	0.00	1.66	0.04	0.14	—	0.31	0.01
カンラン石、輝石	—	0.03	—	—	—	—	—	—	—	—

	Org小2_07	Org小2_08	Org小2_09	Org小3_01	Org小3_02	Org小3_03	Org小3_04	Org小3_05	Org小3_06	Org小3_07	Org小3_08
	93.29	98.08	95.50	95.87	99.10	96.63	96.66	97.10	96.70	96.65	98.45
	2.83	1.85	2.68	3.15	0.83	1.82	2.67	2.05	3.11	1.40	1.10
	0.02	—	1.06	0.01	—	0.02	0.00	0.01	—	—	—
	3.72	0.07	0.72	0.92	—	1.15	0.41	0.44	0.14	0.43	0.41
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	0.13	—	0.04	0.04	—	0.39	0.26	0.40	0.05	—	—
	—	—	—	0.01	0.07	—	—	—	—	1.52	0.04

	Org大_00	Org大_01	Org大_04	Org大_17	Org大_18	Org大_21	Org大_26	Org大_30	Org大_31	Org大_33	Org大_35	Org大_36
	92.96	95.37	91.43	94.44	90.34	90.06	94.93	96.16	93.12	92.56	92.79	92.74
	6.76	4.63	7.49	5.02	7.82	9.04	4.48	3.44	6.26	6.46	6.56	6.69
	0.04	—	—	—	—	0.05	0.59	0.45	0.46	—	0.33	0.31
	0.28	—	1.08	0.55	1.84	0.90	0.59	0.40	0.62	0.98	0.66	0.58
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	0.05	—	—	—	—	—	—	—	—	0.06	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	0.04	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表 1

Kaidun隕石におけるC1岩相の鉱物学的多様性

Mineralogical diversity of the C1 lithologies in the Kaidun meteorite

*荻谷 賢英¹、三河内 岳²、Zolensky Michael³

*Kenei OGIYA¹, Takashi Mikouchi², Michael E Zolensky³

1. 東京大学・院理、2. 東京大学・総研博/院理、3. NASA ジョンソン宇宙センター

1. Univ. of Tokyo, 2. Univ. of Tokyo, 3. NASA

はじめに：Kaidun隕石はポリミクト角礫岩であり、コンドライト物質にはC1、C2、CM1、CM2、CV3、EH3-5、EL3、OC関連物質等、様々な物質が含まれる。本研究はKaidunにおける強い水質変成を受けたC1物質(Kaidun C1)に焦点を当てる。C1は岩石学的特徴に乏しく、その分類が難しいことが知られているが、近年の新規に発見された隕石や小惑星リュウグウ試料等に関する研究からその多様性が強調されている(e.g., Russell+ 2022, Nakamura+ 2022)。Kaidun C1は、Kaidunの母天体に集積する以前に異なる小惑星母天体にて水質変成を受けたことが指摘されており、それらを分析することで様々な小惑星母天体の形成・進化史に定量的な制約を与えることが可能である。また、Kaidunは多様な起源の岩片を含む他に類を見ない隕石のため、そのC1物質を調べることで、ungrouped C1など、C1の多様性をさらに拡大する物質の発見が期待される。そこで、本研究ではKaidun C1を既知のC1であるCI1やCM1、CR1などと比較し、C1物質の多様性に関して体系的に理解することを目的としている。また、Kaidun C1に含まれる主要鉱物である層状ケイ酸塩や鉄硫化物、炭酸塩の詳細な化学組成分析が先行研究にて網羅的に行われていないことから、特にこれらの分析を行った。

試料と分析手法：本研究ではKaidunの6枚の研磨片について分析を行った。試料の観察や分析には東京大学地球惑星科学専攻のFE-EPMA (JEOL JXA-8530F)を用いた。

結果と考察：6試料の観察から発見されたC1関連岩片は45個である。このうち38個の岩片は定量分析を行う上で十分な大きさの粗粒な硫化物を含んでおり、342個の硫化物を分析した。硫化物は主にpyrrhotite、pentlanditeで一部はtroiliteであると考えられる(図1)。

さらに21個の岩片でdolomiteが観察され、187個の粒子について分析を行った。Dolomiteの含まれる岩片のマトリックス組織はCIのものと類似する特徴があり、また、ほとんどのdolomite組成はCaよりもMgに富んでおり、CIで見られる傾向と一致している(Johnson & Prinz 1993, de Leuw+ 2010)。一方で、一部でCaに富む組成の粒子が存在している(図2)。このような組成のdolomiteはCIでは見られず、既知の隕石ではCMのみで見られる特徴であり、このような特徴がCI類似岩片で観測された点が特徴的である。

また、本研究ではコンドリュール仮晶を含む岩片で、既知のKaidun CM1と組織的にも異なるC1岩片を見出した。変質したコンドリュールにはAlに富む層状ケイ酸塩が含まれており、CR1との関連が推測される(Weisberg & Huber 2007)。他にもCV1-2と考えられる特異な岩片も観察され、Kaidunですでに報告されているCV3岩片がさらに強い水質変成を受けたものである可能性がある(Tomeoka & Ohnishi 2011)。

結論：先行研究ではKaidunにおける炭素質岩片が、CI、CM、CRのそれぞれのグループの範囲に収まらず、場合によっては中間に位置するような酸素同位体的特性を持つことが報告されている(MacPherson+ 2009)。また、岩石・鉱物学的観察を加え、Kaidunの炭素質岩片は初期の $\Delta^{18}\text{O}$ 値に関わらず(前駆物質がCM様であっても)、CI-CRと同様の条件で変質したと結論づけている。このようにKaidun炭素質岩片には少なくともCI、CM、CRを包含する連続した物質が存在するという考えが支持されている。

本研究においてKaidun C1岩片の組織観察、及び鉱物化学組成分析を行った結果、半数以上の岩片はCIと関連していることが示唆された。一方で、CI類似岩片において、いくつかのdolomiteの分析からはCMとの関連

性が見出された。この結果はKaidun炭素質岩片にCI-CMの中間的な物質が存在することを鉱物学的分析から示したと同時に、そのような特性がC1物質においても観察されることを見出した。

また、コンドリュール仮晶を含むC1岩片が観察され、CR1やCV1-2との関連が示された。これらの岩片は前駆物質がCR3やCV3であり、それらがCI-CRと同様の条件で、岩石学的タイプ1に分類されるほど強い水質変成を受けた可能性を示している。この観察結果からは、Kaidun C1岩相の更なる多様性の広がりを示すとともに、CI-CMを含む連続性がさらに拡張され、CRやCVをも含む可能性を示した。

キーワード：炭素質コンドライト、水質変成、岩石学的タイプ1、炭酸塩鉱物、鉄硫化物

Keywords: Carbonaceous chondrite, Aqueous alteration, Petrological type 1, Carbonate minerals, Iron sulfides

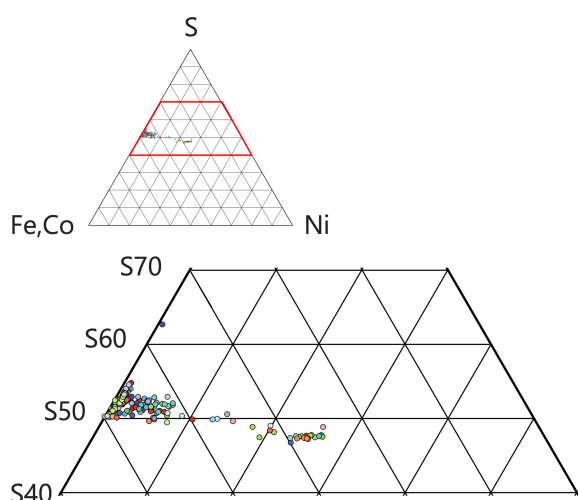


図1
38個のKaidun C1岩片における鉄硫化物組成

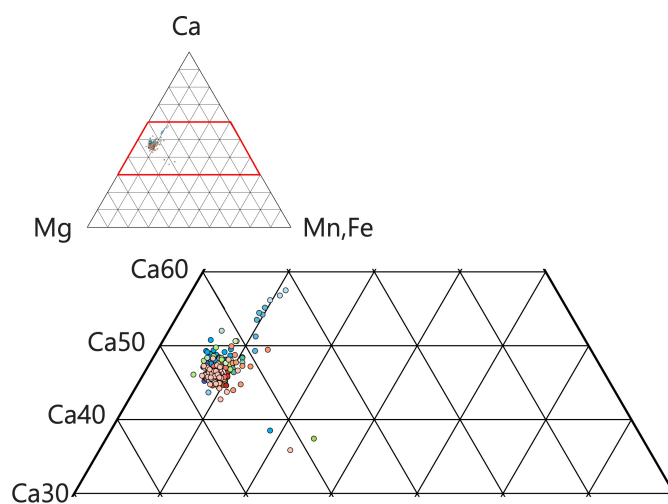


図2
21個のKaidun C1岩片におけるdolomite組成

コンドライトのサブタイプ3.0分類の検討

Classification of subtype 3.0 chondrites

*木村 眞¹、ワイスバーク マイケル²、山口 亮¹

*Makoto Kimura¹, Michale K. Weisberg², Akira Yamaguchi¹

1. 国立極地研究所、2. ニューヨーク市立大学

1. National Institute of Polar Research, 2. City University of New York

コンドライトは始源的隕石とされるが、大部分のものは様々な程度に熱変成作用や水質変成作用などの二次的作用を被っている。このような作用を反映する岩石鉱物学的特徴などにより、コンドライトは岩石学的タイプ1-6に分類されている。その中でもタイプ3コンドライトは二次的作用の影響が少ない最も始源的なものとされている。しかしながらタイプ3コンドライトも軽微な熱変成作用や水質変成作用を受けており、その程度は様々である。そのため熱変成作用を反映するサブタイプがタイプ3コンドライトには提唱され、熱ルミネッセンス法によりサブタイプ3.0から3.9に細分類されている [1]。それらの中ではサブタイプ3.0コンドライトが二次的作用の影響が最少で始原的な特徴をほぼ保存しているものと考えられている。このため母天体集積以前のコンドライト構成物質の岩石鉱物学的特徴や化学組成・同位体組成、年代などを明らかにするためにサブタイプ3.0コンドライトは最も重要な試料となっている。

サブタイプ3.0コンドライトの分類に関しては様々な基準がさらに検討されてきた。本研究では多種の鉱物データを文献からまとめ、このように重要な試料であるサブタイプ3.0の分類基準を主として岩石鉱物学的観点から再検討した。特に着目したものはカンラン石の微量元素分布と長石中の[Si4O8およびMgO成分である。これらの含有量からサブタイプ3.0とサブタイプ3.1以上を区別することが可能である。またFe-Ni金属の組織および化学的特徴によってもサブタイプ3.0は他と区別することが可能である [2]。加えて純粋なクロム鉄鉱の存在、Amoeboid olivine inclusion中のFeに富むオリビンのリム幅、ラマン分光分析などによってもサブタイプ3.0は特徴づけられる。またサブタイプ3.0のコンドライトはサブタイプ3.1以上のものに比べてAl-Mg年代やコンドルール中の構成鉱物の酸素同位体組成が乱されていないといった特徴も保持している。なおサブタイプ3.0はオリビン中のCr組成 [3] やFe-Ni金属の組織 [2] によりさらに3.00-3.10に区分されているが、このような細分類は他の鉱物あるいは化学的特徴では困難である。

一方、水質変成作用を受けたCM及びCRコンドライトは岩石鉱物学的特徴によりサブタイプ3.0-2.0(あるいは1)に分類されている [4, 5]。しかしながら、上記のような鉱物組成に基づいてサブタイプ3.0と2.9を区別することは困難である。また同位体組成などでも区別は困難である。したがって、サブタイプ3.0と2.9を区別するために次の基準を提案する。1) タイプ3.0コンドライトでは、主要なケイ酸塩鉱物(カンラン石、輝石、斜長石)、金属鉄、及び硫化鉱物は水質変成作用による組織上の変化を光学顕微鏡あるいはSEMスケールでは示さない。2) 難揮発性包有物やコンドルール中では水質変成作用に弱いとされるメリライトや斜長石は変質の特徴を全く示さない。これらはサブタイプ2.9では変質し存在量も減少する。3) 最も水質変成作用に弱いコンドルール中のガラスはサブタイプ3.0では大部分が変質しないで残っているが、サブタイプ2.9では変質し、存在量は減少する。なお酸素を含むプレソーラー粒子やマトリックス中の非晶質物質の存在度はサブタイプ3.0と2.9の区分と調和的である。

サブタイプ3.0はすべてのコンドライトグループで確認されているわけではない。CI, CV, CK, R, H, EH, ELグループではサブタイプ3.0は報告されていない。サブタイプ3.0が存在しないことは、主に母天体におけるコンドライトグループ間の二次的作用の程度の違いを反映していると思われる。

文献： [1] Sears et al. 1980. Nature 287: 791-795. [2] Kimura et al. 2008. MAPS 43: 1161-1177. [3] Grossman and Brearley. 2005. MAPS 40: 87-122. [4] Rubin et al. 2007. GCA 71: 2361-2382. [5] Kimura et al. 2020. Polar Sci. 26: 100565.

キーワード：コンドライト、分類

Keywords: Chondrite, Classification

口頭講演

R5：地球外物質

座長:松本 恵 (東北大学)、山本 大貴(九州大学)、瀬戸 雄介(大阪公立大学)、橘 省吾(東京大学)

2023年9月16日(土) 09:00 ~ 12:00 821 (杉本キャンパス)

[zoom]Zoom

Zoomはこちら