

口頭講演 | R5：地球外物質

■ 2024年9月14日(土) 14:00 ~ 15:30 | 会場 ES025 東山キャンパス

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)、松本 徹(京都大学)

14:00 ~ 14:15

[R5-11] たんぽぽ計画によってISSに搭載されたシリカエアロゲルに捕獲されたマイクロメテオロイドの鉱物学的特徴

*野口 高明¹、三宅 亮¹、藪田 ひかる²、癸生川 陽子³、菅 大暉⁴、田端 誠⁵、奥平 恭子⁶、山岸 明彦⁷、矢野 創⁸
(1. 京都大学・院理、2. 広島大学・院先進理工、3. 東京工業大学・院理、4. 高輝度光科学研究センター、5. 千葉大学・院理、6. 会津大学・コンピュータ理工、7. 東京薬科大・生命科学、8. 宇宙航空研究開発機構)

14:15 ~ 14:30

[R5-12] ナトリウムに富むリュウグウ粒子のSTXM分析

*松本 徹¹、野口 高明¹、荒木 暢²、湯澤 勇人²、三宅 亮¹ (1. 京都大学、2. 分子科学研究所)

14:30 ~ 14:45

[R5-13] 小惑星リュウグウ試料およびCIコンドライトに見られる非晶質 含水・含ナトリウム マグネシウム・リン酸塩の重要性

*三河内 岳¹、吉田 英人²、林 悟²、増田 みなみ²、鍵 裕之²、杉山 和正³、中村 智樹⁴、ゾレンスキー マイケル⁵
(1. 東大・総研博、2. 東大・理、3. 東北大・金研、4. 東北大・理、5. NASAジョンソン宇宙センター)

14:45 ~ 15:00

[R5-14] 小惑星リュウグウ試料の岩相分類と水質変成度の関連について

*増田 みなみ¹、三河内 岳²、吉田 英人¹、中村 智樹³、ゾレンスキー マイケル⁴ (1. 東大・理、2. 東大・総研博、3. 東北大・理、4. NASAジョンソン宇宙センター)

15:00 ~ 15:15

[R5-15] リュウグウサンプル中のGEMS様非晶質ケイ酸塩を含む始原的岩相

*松本 恵¹、土山 明^{2,3}、安武 正展⁴、中村 智樹¹ (1. 東北大学、2. 立命館大学、3. 広州地球科学研究所、4. JASRI/SPring-8)

15:15 ~ 15:30

[R5-16] GEMS模擬粒子を用いた水質変成実験

*土山 明^{1,2}、延寿 里美³、 海洋、 琦、丁兴¹、王 园园⁴、何 昭露¹、杜 静¹、李 珊¹、席 佳鑫¹、林 1、 邱 健¹、井村 悠登⁵ (1. 広州地球科学研究所、2. 立命館大学、3. 愛媛大・院理、4. 東大・院理、5. 京大・院理)

たんぽぽ計画によってISSに搭載されたシリカエアロゲルに捕獲されたマイクロメテオロイドの鉱物学的特徴

Mineralogy of micrometeoroids captured in silica aerogel aboard the ISS by the Dandelion Project

*野口 高明¹、三宅 亮¹、藪田 ひかる²、癸生川 陽子³、菅 大暉⁴、田端 誠⁵、奥平 恭子⁶、山岸 明彦⁷、矢野 創⁸

*Takaaki NOGUCHI¹, Akira MIYAKE¹, Hikaru Yabuta², Yoko Kebukawa³, Daiki Suga⁴, Makoto Tabata⁵, Kyoko Okudaira⁶, Akihiko Yamagishi⁷, Hajime Yano⁸

1. 京都大学・院理、2. 広島大学・院先進理工、3. 東京工業大学・院理、4. 高輝度光科学研究センター、5. 千葉大学・院理、6. 会津大学・コンピュータ理工、7. 東京薬科大・生命科学、8. 宇宙航空研究開発機構

1. Kyoto University, 2. Hiroshima University, 3. Tokyo Institute of Technology, 4. JASRI, 5. Chiba University, 6. University of Aizu, 7. Tokyo University of Pharmacy and Life Sciences, 8. JAXA

はじめに：地球低軌道には2~4万t/yのメテオロイド（惑星間空間を移動している天然の固体物質）が到達している[1]。一方、南極宇宙塵からの推算降下率は3~5kt/yであり[2]、大部分のメテオロイドは大気圏突入時に蒸発すると推定される。このため、大気圏突入前のメテオロイド研究は重要である。メテオロイドは、回収可能人工衛星表面の衝突痕残留物[3, 4]、宇宙空間に曝露したシリカエアロゲル中の捕獲粒子[5, 6]として捕集できる。本発表では、JAXAが2015-2019年に国際宇宙ステーション（ISS）の日本実験棟「きぼう」船外プラットフォームで実施した「たんぽぽ」計画のうち、2016~2017年に反地球面で曝露した超低密度シリカエアロゲルから抽出したメテオロイドについて報告する。

試料と実験方法：メテオロイド超高速衝突時に形成された細長い穴（衝突トラック）を含むエアロゲルをJAXA/ISASの初期分析設備の高清浄環境にて同定、計測、抽出した（試料ID: SD2A0000T）。この衝突トラックは全長約8mmで、球根状部分から直線状トラックが2本伸び、終端に残留粒子が捕獲されていた。九大にてスライドガラス2枚で本試料を挟み圧縮し、終端粒子がエアロゲル表面に現れる直前まで超音波切削し、金板に圧入した。終端粒子からは、（走査）透過電子顕微鏡（S）TEM観察および走査透過X線顕微鏡を使ったX線吸収端微細構造（STXM-XANES）分析試料を、京大のThermo Fisher Helios NanoLab G3 CX集束イオンビーム装置で切り出した。（S）TEMは九大のThermo Fisher Tecnai G2-F20を用いた。STXM-XANES分析はKEK-PFのBL-13で行った。

結果と議論：SD2A0000Tの終端粒子1と2（TP1と2）の大きさはそれぞれ、約 $10 \times 6 \times 5 \mu\text{m}$ 、約 $6 \times 5 \times 3 \mu\text{m}$ であった。TP1と2共にエアロゲルへの侵入方向は丸くなっており、背後側に溶融発泡した粒子由来物質とエアロゲルの混合物が存在していた。共に低Ca単斜輝石の単結晶であり、それぞれ $\text{En}_{88.4 \pm 0.4}$ と $\text{En}_{89.2 \pm 1.8}$ 、CaとAlは検出限界以下、0.1-0.2 wt.% Cr_2O_3 であった。STXM-XANES分析では、低Ca単斜輝石に特徴的なO-, Mg-, Fe-XANESスペクトルが得られた。ISS船外曝露した別のエアロゲルから終端粒子を回収分析した先行研究では、終端粒子中のオリビンと低Ca単斜輝石はFeに富んでいた（ Fo_{64-84} , Wo_{3-4} , En_{84-86} ）[6]。[6]の試料では3酸素同位体比が測定されており、 $\Delta^{17}\text{O} (=0.52 \times \delta^{18}\text{O} - \delta^{17}\text{O})$ が $-2.6 \sim 0$ で、CRコンドライトのタイプII（オリビンや低Ca単斜輝石が $<90 \text{ Mg\#} = \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}) \times 100$ ）コンドルールやWild 2彗星のコンドルール様物体に類似していた[7, 8]。本研究と[6]だけでなく、過去の地球低軌道での捕獲メテオロイドのオリビンと低Ca単斜輝石もFeに富む[3 : Fo_{66-83} ; 4 : Fo_{56-71} , En_{63-71} ; 5 : Fo_{29-77}]。81P/Wild2彗星から回収されたコンドルール様物体ではタイプI（ $\geq 90 \text{ Mg\#}$ ）に比べてタイプIIの比率が高い[9]。試料数はまだ限られるとはいえ、本結果及び先行研究を総合すると、地球低軌道から回収されたメテオロイドでもタイプII類似物質の割合が高いと推定

される。黄道光ダストの軌道計算から、地球軌道付近のメテオロイドの9割以上が木星族彗星起源と推定されている[10]。今後、たんぽぽで捕集したメテオロイドの酸素同位体測定を行うことで、上述の理論的推定に物質科学的な裏付けが与えられると期待される。

引用：[1] Love & Brownlee 1994. *Science* 262, 550. [2] Rojas+ 2021. *EPSL* 560, 116794. [3] Rietmeijer & Blandford 1988. *JGR* 93, 11943. [4] Zolensky+ 1994. In: *Analysis of Interplanetary Dust*, 291. [5] Hörz+ 2000. *Icarus* 147, 559. [6] Noguchi+ 2011. *EPSL* 309, 198. [7] Nakamura+ 2008. *Science* 321, 1664. [8] Tenner+ 2018. In: *Chondrules*, Chap. 8. [9] Gainsforth et al. (2015) *MAPS* 50, 976. [10] Nesvorný+ 2010. *ApJ* 713, 816.

キーワード：マイクロメテオロイド、たんぽぽ計画、国際宇宙ステーション、輝石

Keywords: micrometeoroid, TANPOPO mission, International Space Station, pyroxene

ナトリウムに富むリュウグウ粒子のSTXM分析

STEM analysis of sodium-rich grains recovered from asteroid Ryugu

*松本 徹¹、野口 高明¹、荒木 暢²、湯澤 勇人²、三宅 亮¹

*Toru MATSUMOTO¹, Takaaki Noguchi¹, Toru Araki², Hayato Yuzawa², Akira Miyake¹

1. 京都大学、2. 分子科学研究所

1. Kyoto University, 2. UVSOR

はじめに：C型小惑星リュウグウの試料は粘土鉱物など水質変成物が主成分である。これらは、リュウグウの母天体において、氷と無水鉱物、そして有機物が化学反応すること（水質変成）によって形成された [e.g., 1,2]。リュウグウの試料には、ナトリウムに富む岩相が見つかったが[2,3]、詳細な記載は行われていなかった。一方で、著者らはこれまでにリュウグウの試料に地球外物質で観察例がないナトリウム炭酸塩を報告した[4]。ナトリウム炭酸塩は母天体が冷却された段階での0度以下の低温の水環境で形成したと考察された。リュウグウにおける水質変成はこれまで40度程度の温水環境が想定されていたが、従来知られているよりも更に低温領域での小惑星内部の水環境の痕跡が試料に残されている可能性がある。本研究ではナトリウム炭酸塩が含有する化合物種を調べることで、リュウグウの低温水に溶け込んだ物質を理解することを目的とした。

実験：本研究では、国際公募分析によって配布されたC室から回収されたリュウグウ粒子(C0071)を試料として用いた。粒子をインジウムに固定し、走査型電子顕微鏡を用いた粒子表面の元素マッピングを行った。そして分析対象とする領域から、集束イオンビーム加工装置を使い、厚さ約150nm、10x5 μ mの面積をもつ切片を切り出した。この切片に対して、分子科学研究所に設置された走査型透過X線顕微鏡(STXM)を用いて、X線吸収端近傍構造分析(XANES)を行った。STXM測定では、大気暴露で試料輸送を行った。測定は炭素のK吸収端(C-XANES)、窒素のK吸収端(N-XANES)、硫黄のL吸収端(S-XANES)の領域で行った。

結果と議論：粒子C0071は長径約1.5mmの大きさで、その表面に見られたナトリウムに富む部分から切片を取り出した。粒子の表面の約1 μ mの深さあたりまでのC-XANESスペクトルでは炭酸塩(290.4eV)のピークが見られ、これは炭酸塩鉱物に対応すると推定される。SEM観察によってNaの濃集が確認されていることからNa炭酸塩である可能性がある。炭酸塩の強いピークが見られた領域から取得したS-XANESでは、170eV付近、182eV付近にピークが見られ、この特徴は硫酸塩化合物に類似する[5]。加えて、炭酸塩の強いピークが見られた領域のN-XANESスペクトルにおいては、401eV付近と405eV付近にピークが現れた。この組み合わせは硝酸塩化合物に類似している[6]。リュウグウ試料には地球上での変質の産物であるカルシウム硫酸塩が報告されている[7]。しかし、本試料は窒素置換で継続的に保管されており、大気暴露された時間はおよそ2分程度であることから、地球での風化・変質の影響は非常に少ないと考えられる。そのため硫酸塩のシグナルはリュウグウ試料に元々含まれていた物質に由来すると推定される。先行研究のリュウグウ試料の熱水抽出実験によって、硫酸イオンと硝酸イオンが報告されている[8]。本分析で確認されたピークが硫酸塩・硝酸塩化合物に対応するならば、これらは、水への可溶性の高い成分としてリュウグウの母天体を流れた水に溶け込んでおり、炭酸塩鉱物とともに沈殿した物質であると推測される。今後、切片に含まれる鉱物の詳細を明らかにするため、透過型電子顕微鏡によって切片を観察する予定である。

引用：[1] Yokoyama et al. 2022 Science 379 7850 [2] Nakamura et al. 2022 Science 379: 8671 [3] Yamaguchi et al, 2023 Nature Astronomy 7:398-405 [4] 松本, 他, 2024 JpGU abstract#PPS08-02 [5] Sarret et al. 1999 Geochimica et Cosmochimica Acta 63 22 3737-3779 [6] Leinweber et al. 2007 Journal of Synchrotron Radiation 14.6 500-511 [7] Imae et al. 2024 Meteorite and Planetary Science. doi: org/10.1111/maps.14178 [8] Yoshimura et al. 2023 Nature Communications 14:5284

キーワード：リュウグウ

Keywords: Ryugu

小惑星リュウグウ試料およびCIコンドライトに見られる非晶質 含水・含ナトリウム マグネシウム・リン酸塩の重要性

Important occurrence of amorphous hydrated Na-bearing Mg phosphate in Asteroid Ryugu samples and CI chondrites

*三河内 岳¹、吉田 英人²、林 悟²、増田 みなみ²、鍵 裕之²、杉山 和正³、中村 智樹⁴、ゾレンスキー マイケル⁵

*Takashi MIKOUCHI¹, Hideto Yoshida², Satoru Hayashi², Minami Masuda², Hiroyuki Kagi², Kazumasa Sugiyama³, Tomoki Nakamura⁴, Michael Zolensky⁵

1. 東大・総研博、2. 東大・理、3. 東北大・金研、4. 東北大・理、5. NASAジョンソン宇宙センター

1. Univ. Museum, Univ. of Tokyo, 2. Fac. of Sci., Univ. of Tokyo, 3. Inst. Mat. Res., Tohoku Univ., 4. Fac. of Sci., Tohoku Univ., 5. NASA-JSC

はじめに：JAXA小惑星探査機「はやぶさ2」が持ち帰った小惑星リュウグウ試料が、鉱物学的・化学的にCIコンドライトとほぼ同じであるという発見は、初期太陽系におけるCIコンドライトの重要性を再認識させた。リュウグウ試料やCIコンドライトなどの「CIコンドライト的試料」は、母天体で強い水質変成を受け、Mg-Fe層状ケイ酸塩や炭酸塩・磁鉄鉱・磁硫鉄鉱などの変質鉱物から成る。これらの鉱物は、水質変成の度合いに応じて、存在量や化学組成が異なることが議論されているが、本研究では、微量しか存在しないものの、その存在の重要性が示唆されるMgリン酸塩についてリュウグウ試料とCIコンドライトの両方において詳細な分析を行ったので、その結果を報告する。

試料と分析手法：リュウグウ試料とCIコンドライト（OrgueilとIvuna）の研磨片を東京大学のFE-EPMA（JEOL JXA-8530F）で分析した。Mgリン酸塩については、東京大学地殻化学研究施設で顕微ラマン分光を行った。Orgueil切片中のMgリン酸塩については、0.1 mm以下の粒子を研磨片より分離して、XRDでの分析も行った（東北大Rigaku XtaLAB Synergy-S）。

結果と考察：リュウグウ試料では、Mgリン酸塩の粒子は最大で0.15 x 0.1 mmの不定形で、0.4 x 0.3 mmに達するクラスターを形成しているものも見られたが、多くの場合は、0.1 mm以下の微小な粒子として少量のみ存在していた（全体での存在量は0.1 vol%以下で、C0040-01のみMgリン酸塩が約10 vol%）。Mgリン酸塩の特徴的な組織は、劈開状の割れ目で、時には2方向に沿って発達するが、ランダムな方向を持つ細い割れ目も存在した。Mgリン酸塩のEPMA分析でのトータルは通常60-70 wt%であったが、まれに80 wt%を超える粒子も存在した（最大90 wt%：31 MgO、2 Na₂O、54 P₂O₅, wt%）。割れ目が顕著であるほどトータルが低くなる傾向が見られ、元のMgリン酸塩からの水和（脱水?）の程度が様々であることが示唆された。

CIコンドライトでは、Ivuna、Orgueilともに、リュウグウ試料とサイズ、組織、化学組成がよく似たMgリン酸塩を少量ながらも見出すことができた。ただし、地球風化の影響を明瞭に受けており、CI中のMgリン酸塩では、P₂O₅とNa₂Oの含有量が減少するにつれて、SO₃（～24 wt%）、MnO（～7 wt%）、Niを多く含む傾向が見られた。SとNiの供給源は明らかにFe-Ni硫化物で、Mnは炭酸塩またはイルメナイトからと考えられる。CI中のMgリン酸塩には小さなピット状の穴が見られ、地球での風化によって元素の溶脱が起きたことを支持していた。

CIコンドライト的試料はミリ～サブミリスケールで角レキ化しているが、角レキ岩片の一部には、水質変成の程度が低いものがあり、少量のカンラン石などが残存している。そこで、Mgリン酸塩の存在と水質変成との関連を議論するために、どのような岩片にMgリン酸塩が存在するかを解析した。その結果、リュウグウ試料では、Mgリン酸塩は水質変成度の低い岩片にのみ存在していることが明らかになった。このような岩片で

は、Mgリン酸塩は、水／岩石比がまだ低い時に、流体から析出する最初のリン酸塩相と考えられ、Fe-Niリン化合物と共存することから、低酸素雰囲気中で形成したことが示唆された。CIコンドライトのMgリン酸塩も同様の産状であり、カンラン石が存在するあまり水質変成を受けていない岩片に伴っていた。

顕微ラマン分光では、蛍光の影響が強く明確なラマン信号は得られなかったが、ごく弱いラマンピークが見られるMgリン酸塩粒子が存在した。しかし、Orgueilから分離したMgリン酸塩は、XRD分析では非晶質であった。

結論：このように、CIコンドライト的物質の水質変成度の低い岩片には、Mgリン酸塩が少量ながらも普遍的に含まれることが明らかになった。最近、同様のMgリン酸塩はNASA OSIRIS-RExがサンプルリターンした小惑星ベンヌ試料中にも豊富に含まれることが明らかになっている。ベンヌ試料にはカンラン石を含む水質変成度の低い岩片が多いことから、Mgリン酸塩と水質変成の関係は、我々の結果と一致する。これらのMgリン酸塩は、トータルが低いことから含水と考えられ、Naを最大5 wt%近く含むこと、さらに非晶質であることから、正確には「非晶質 含水・含ナトリウム マグネシウム・リン酸塩」である。このようなMgリン酸塩は、これまで認識されていなかった初期太陽系の重要な水のキャリアであり、より多くのCIコンドライト的物質でのMgリン酸塩の搜索、分析が必要と言える。

キーワード：Mgリン酸塩、小惑星リュウグウ、CIコンドライト、水質変成、小惑星ベンヌ

Keywords: Mg phosphate, Asteroid Ryugu, CI chondrites, Aqueous alteration, Asteroid Bennu

小惑星リュウグウ試料の岩相分類と水質変成度の関連について

On the relationship between lithological classification and degree of aqueous alteration in Asteroid Ryugu samples

*増田 みなみ¹、三河内 岳²、吉田 英人¹、中村 智樹³、ゾレンスキー マイケル⁴

*Minami Masuda¹, Takashi Mikouchi², Hideto Yoshida¹, Tomoki Nakamura³, Michael Zolensky⁴

1. 東大・理、2. 東大・総研博、3. 東北大・理、4. NASAジョンソン宇宙センター

1. Univ. Tokyo, Sci., 2. Univ. Tokyo, Univ. Museum, 3. Tohoku Univ., Sci., 4. NASA-JSC

はじめに

「はやぶさ2」小惑星探査機によって地球に持ち帰られた小惑星リュウグウの試料は、太陽系初期の物質進化を理解する上で貴重な情報源となっている。リュウグウはC型小惑星に分類され、太陽系でも最も始原的な物質の一つとされているCIコンドライトとの鉱物学的・化学的類似性が指摘されている。リュウグウ試料、CIコンドライトともに、岩石学的・鉱物学的には不均質な隕石で、角礫化した岩片で構成されることが特徴である。主な構成鉱物として、層状ケイ酸塩、マグネタイト、磁硫鉄鉱、炭酸塩、リン酸塩、カンラン石などが挙げられる。

リュウグウ母天体は、太陽系の外側の低温領域（約-200℃以下）で形成されたと考えられており、水と二酸化炭素が氷として存在していた可能性が示唆されている。その後、放射性元素の崩壊熱により氷が融解し、天体内部で水-岩石反応が進行した。この過程で、天体内部は強く含水化される一方、表層は比較的弱い含水化を受けたと推測される。さらに、大規模衝突により分裂された小さな岩片が再集積することで現在のリュウグウが形成されたと考えられており、これが角礫化岩片で構成される現在の姿につながっている。

これまでにリュウグウ試料の鉱物組合せに注目した岩相分類が行われているが、本研究では、各岩相の割合を正確に見積もり、さらに水質変成度との関連に注目することで、リュウグウ母天体における水質変成プロセスの解明を目指した。

試料と分析手法

「はやぶさ2」が採取したチャンパーA（表層物質）とチャンパーC（地下物質を含む）の合23枚のリュウグウ試料研磨片を対象に、FE-EPMA（東大・理・地惑のJEOL JXA-8530F）によるBEI観察と元素マッピングを行った。観察された鉱物組み合わせに基づき、これまでに試料を6つの主要な岩相（I~VI）と「その他」に分類が行われているが（Mikouchi T.+2022）、各岩相の存在度を元素マップを対象としてAdobe Photoshopで解析した。

結果と考察

分析を行った試料の総面積は46.57 mm²であった。リュウグウ試料全体では、水質変成度の弱い岩相II（23%）、水質変成度の強い岩相III（41%）、IV（18%）が多く観察され、最も水質変成の進んでいない岩相I（0.1%）は非常に稀であった。これは、リュウグウ母天体が中程度からそれ以上に進んだ水質変成を経験した角礫を多く含むことを示している。研磨片のサイズと岩相の関係については、4-5 mm程度の研磨片では複数の岩相が混在する一方、1-2 mm程度の研磨片では単一の主要岩相が観察される傾向が見られた。この結果は、リュウグウを構成する角礫化岩片が主に数mm程度のサイズを主体として存在することを示唆している。

チャンパーAとチャンパーCの試料を比較すると、チャンパーAの試料は岩相III（50%）、IV（30%）が多く、チャンパーCの試料は岩相II（36%）が多い傾向が見られた。また、粗粒の炭酸塩が特徴の岩相V（7.2%）がチャンパーCの研磨片ではほとんど見られなかったことから、岩相Vは岩相IIと共存することが少ないことが推測される。

これらの結果は、リュウグウ母天体内部での不均一な水-岩石反応の痕跡を示していると考えられ、天体内部での水/岩石比の違いによる不均一な水質変成の進行を反映していると考えられる（Nakamura T.+

2022)。岩片は水/岩石比を基準とすると、水の割合が少ない環境（水/岩石 < 0.2 ）でできた物質と、水の割合が高い環境（ $0.2 < \text{水/岩石} < 0.9$ ）でできた物質の大きく2種類に分けることができる。前者は天体の表層付近の冷えやすく氷が溶けにくかった環境でできた物質、後者は天体内部の水が豊富な環境でできた物質と推測される。

結論

リュウグウ試料の岩相存在度と水質変成度の関連性から、リュウグウ母天体内部での不均一な水-岩石反応の痕跡が明らかになった。この結果は、C型小惑星の形成・進化過程や、太陽系初期の物質進化を理解する上で重要な知見を提供する。

現在のリュウグウには、リュウグウ母天体の表層と内部の物質が混在しており、これらの岩片を構成する鉱物の多様性は、水との化学反応の際の条件の違いで説明できる。本研究の結果は、リュウグウが地球上で発見される隕石と異なり、地球上での風化を受けていない貴重な試料であることを改めて示している。

今後の課題として、各岩相内のより詳細な鉱物モード組成分析や、CIコンドライトとの定量的比較が挙げられる。特に、CIコンドライトの代表であるOrgueilやIvunaに対しても同様の岩相分け、鉱物モード組成分析を行う必要がある。これらの研究を通じて、リュウグウ母天体における水質変成プロセスのより詳細な理解が期待される。

キーワード：小惑星リュウグウ、CIコンドライト、水質変成、角礫化

Keywords: Asteroid Ryugu, CI chondrite, aqueous alteration, brecciation

リュウグウサンプル中のGEMS様非晶質ケイ酸塩を含む始原的岩相

Highly primitive clasts with GEMS-like grains in Ryugu C0002 sample

*松本 恵¹、土山 明^{2,3}、安武 正展⁴、中村 智樹¹

*Megumi MATSUMOTO¹, Akira Tsuchiyama^{2,3}, Masahiro Yasutake⁴, Tomoki Nakamura¹

1. 東北大学、2. 立命館大学、3. 広州地球科学研究所、4. JASRI/SPRing-8

1. Tohoku Univ., 2. Ritsumeikan Univ., 3. GIG, 4. JASRI/SPRing-8

小惑星リュウグウは木星以遠の太陽系遠方で形成した微惑星に起源をもつラブルパイル小惑星である^[1]。探査機はやぶさ2が持ち帰ったリュウグウ粒子は、主にMgに富む層状ケイ酸塩、Fe-Ni硫化物、マグネタイト、炭酸塩、アパタイトからなり、水質変成度の高いCl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ことが分かっている^[1,2]。このうち初期分析が行われたC0002粒子中の岩片Fragment 4, 5は、彗星塵中のGEMS (glass with embedded metal and sulfide)^[3]に似た特徴をもつ非晶質ケイ酸塩粒子を含み、これまで分析されたリュウグウサンプルの中で最も始原的な岩片と考えられている^[1]。これらの岩片はリュウグウ母天体の材料となった太陽系遠方の始原物質を明らかにする上で重要な試料である。本研究ではFragment 4, 5の鉱物学的特徴を明らかにするため、放射光X線ナノCT (XnCT)、透過型電子顕微鏡 (STEM-EDS) による分析を行った。

本研究ではC0002粒子の研磨片C0002-Plate5^[1]から集束イオンビーム (FIB) を用いて切り出したFragment 4, 5のブロックサンプル (それぞれ25 μm , 15 μm の立方体) をDET-SIXM法によるXnCT分析^[4]に用いた (実効的な空間分解能は約200 nm/pix)。またこれらのブロックサンプルからFIBを用いて超薄切片を切り出しSTEM-EDS分析に用いた。

XnCTおよびSTEM-EDS分析からFragment 4, 5はよく似た特徴をもち、主にGEMS様非晶質ケイ酸塩 (~100-500 nm) からなる細粒多孔質なマトリクス中に細粒 (最大数 μm 程度) なMgに富むカンラン石と輝石、ピロータイト、マグネタイト、カルサイト、有機物を含むことが分かった。また直径数 μm -10 μm の球状の低結晶質ケイ酸塩粒子も複数含まれていた。カンラン石、輝石は板状、ウィスカー状、不定形など様々な形状をもつ。ピロータイトは不定形の細粒粒子として含まれており、リュウグウの主要な岩相に含まれる六角板状粒子^[1]は観察されなかった。マグネタイトはフランボイド状の粒子またはその集合体として主にクラックに沿って形成しており、カルサイトは球状の形状をもつ。球状の低結晶質ケイ酸塩粒子はピロータイト粒子からなるリムをもち、内部にクラックを含むものも見られた。

GEMS様非晶質ケイ酸塩はピロータイト、ペントランダイトのナノ粒子をインクルージョンとして含む。主要元素 (Si, Fe, Mg) 組成は彗星塵中のGEMS粒子に比べてやや均質で組織的、化学的な特徴は始原的炭素質コンドライトに含まれるGEMS様非晶質ケイ酸塩^[5]に類似している。またGEMS様非晶質ケイ酸塩は縁から低結晶質の含水層状ケイ酸塩に交代しており、弱い水質変成を受けていることが分かった。カンラン石、輝石の輪郭は明瞭で含水層状ケイ酸塩に交代している様子は見られないことから、水質変成の程度は主要なリュウグウ岩相に比べて非常に低いと考えられる。球状の低結晶質ケイ酸塩粒子は全体が低結晶質の含水層状ケイ酸塩に交代していることから、交代変成を受ける前の前駆物質は非晶のケイ酸塩であったと考えられる。そのような球形状の非晶質ケイ酸塩粒子は、これまで隕石、宇宙塵サンプル中には報告されておらず、リュウグウサンプルに特有の構成物である可能性がある。

[1] Nakamura et al. (2022) *Science*. [2] Yokoyama et al. (2022) *Science*. [3] Keller and Messenger et al. (2011) *Geochim. Cosmochim. Acta*. [4] Tsuchiyama et al. (2024) *Geochim. Cosmochim. Acta*. [5] Leroux et al. (2015) *Geochim. Cosmochim. Acta*.

キーワード：小惑星リュウグウ、GEMS、水質変成

Keywords: asteroid (162173) Ryugu, GEMS, Aqueous alteration

GEMS模擬粒子を用いた水質変成実験

Aqueous alteration experiments using GEMS simulant particles

*土山明^{1,2}、延寿里美³、海洋¹、琦¹、丁¹、王⁴、何昭露¹、杜静¹、李珊¹、席佳鑫¹、林¹、邱健¹、井村悠登⁵

*Akira TSUCHIYAMA^{1,2}, Satomi Enju³, Haiyang Xian¹, Mingqi Sun¹, Ding Xing¹, Yuanyuan Wang⁴, Zhaolu He¹, Jing Du¹, Shan Li¹, Jiixin Xi¹, Xiaojun Lin¹, Jian Di¹, Yuto Imura⁵

1. 広州地球科学研究所、2. 立命館大学、3. 愛媛大・院理、4. 東大・院理、5. 京大・院理

1. Guangzhou Inst. Geochem., 2. Ritsumeikan Univ., 3. Ehime Univ. Sci., 4. Tokyo Univ. Sci., 5. Kyoto Univ. Sci.

はやぶさ2探査機が小惑星リュウグウから地球に持ち帰ったサンプルは、初期分析によりCIコンドライトに対応した物質であることが明らかにされた(例えば[1])。その水質変成作用の詳細が調べられ、主として非晶質珪酸塩からなるGEMS様物質などの岩石成分と氷が集積して形成されたリュウグウ母天体内部で、氷が融けて生じた水質流体にGEMS様物質が溶解し、含水層状ケイ酸塩、磁鉄鉱、磁硫鉄鉱、アパタイト、ドロマイト、ブリュネライトなどの二次鉱物が、水溶液の過飽和度低下とともにこの順に析出した、というモデルが提唱された[2]。本研究では、このような水質変成作用の初期段階を再現するために、GEMS模擬粒子を出発物質として水質変成作用実験を行った。GEMS模擬物質は誘導熱プラズマ (ITP) 法[3]により作成した。これはCI組成 (Si:Mg:Fe:S:Al:Ca:Na:Ni=1 : 1.03 : 0.848 : 0.421 : 0.085 : 0.06 : 0.058 : 0.049) をもち、(Fe,Ni), FeSを含む非晶質珪酸塩の球状微粒子 (~100 nm径) から主としてなっている (少量のMgO, (Fe,Ni), FeS, 珪酸塩ガラスなどの不完全反応物質を含む)。一部の実験では、GEMSの平均組成 (Si:Mg:Fe:S:Al:Ca:Na:Ni=1 : 0.67 : 0.56 : 0.3 : 0.07 : 0.04 : 0.03) を用いた。窒素置換した純水に還元剤および炭酸イオン源として

(1) ギ酸、(2) ヘキサメチレンテトラミン+炭酸水素アンモニウム、あるいは(3) 酢酸アンモニウム+炭酸水素アンモニウムを溶解させた水溶液 ($X(\text{CO}_2)/X(\text{H}_2\text{O}) = 0 \sim 0.0612$, $X(\text{NH}_3)/X(\text{H}_2\text{O}) = 0 \sim 0.0365$) を、岩石/水比が5 (一部は1) となるようにGEMS模擬物質を加え、密閉されたテフロン容器中で、200°Cで168~1550時間加熱した。実験生成物の分析は、粉末X線回折、SEM/EDS、TEM/EELS、顕微ラマン分光を用いて行った。全ての実験において、低結晶度の含水層状ケイ酸塩 (M-S-H) が生成し、底面反射の位置からは、純水あるいは(1) (2) の水溶液の場合にはサーペンティンの、(3) の場合にはサポナイト的なものであった。鉄酸化物として、純水の場合には赤鉄鉱、(1) (2) の場合には磁赤鉄鉱、(3) の場合には磁鉄鉱+赤鉄鉱が生成されたが、リュウグウ試料のような磁鉄鉱のみからなる生成物は得られなかった。これらの鉄酸化物は微細粒子 (多くは数10 nm以下) が単独あるいは集合体としてM-S-Hからなるマトリクス中に存在し、一部には樹枝状晶も見られた (Fig. 1a)。ほとんどの実験で、少量の硬石膏が生成していたが、炭酸塩の生成は認められなかった。(1) の一部には $\text{C}_{20}\text{H}_{14}$, $\text{C}_{14}\text{H}_{10}\text{O}$ と考えられる有機結晶、(2) の一部にはBoussingaultite ($(\text{NH}_4)_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)、(3)にはefremovite ($(\text{NH}_4)_2\text{Mg}_2(\text{SO}_4)_3$)、 $\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}$ の生成が見られた。また、ラマン分光により、GおよびDバンドを持つIOMを確認できた。実験生成物は、空隙率の異なる数10 μm サイズの塊の集合体である (Fig. 1b)。出発物質は、GEMS模擬粒子

(~100 nmの球状粒子) は集合して空隙率の異なる数10 μm サイズの塊から成っており、実験生成物に見られた組織は、この出発物質の組織を反映している。リュウグウ試料のマトリクスも同様のサイズスケールで空隙率の異なる領域から成り[2]、母天体での集積の組織を反映しているのかもしれない。より長時間の加熱により鉄酸化物微細粒子の粗大化が期待され、実験生成物はリュウグウ試料に見られる水質変成作用の最初期の状態を示しているのかもしれない。一方で、ITPにおける不完全反応物質である珪酸塩ガラスの球状物質 (数10 μm サイズ) は、炭素質コンドライトにおけるコンドリュールの模擬物質と見なすことができ、炭素質コンドライトと同様にこれが水質変成を受けていることも確認できた。今回の実験ではリュウグウ試料に見られたような鉱物やその結晶形状の再現は不完全で、とくに磁赤鉄鉱や硬石膏の生成は、今回よりも還元的な条件での実験が今後必要であることを示している。[1] Nakamura T. et al. (2023) Science, 379, eabn867. [2]

Tsuchiya A. et al. (2024) GCA, 375, 146-172. [3] Enju S. et al. (2022) A&A, 661, A121.

キーワード：リュウグウサンプル、Mg-S-H、炭素質コンドライト、GEMS様物質、誘導熱プラズマ

Keywords: Ryugu samples, Mg-S-H, carbonaceous chondrites, GEMS-like material, induction thermal plasma

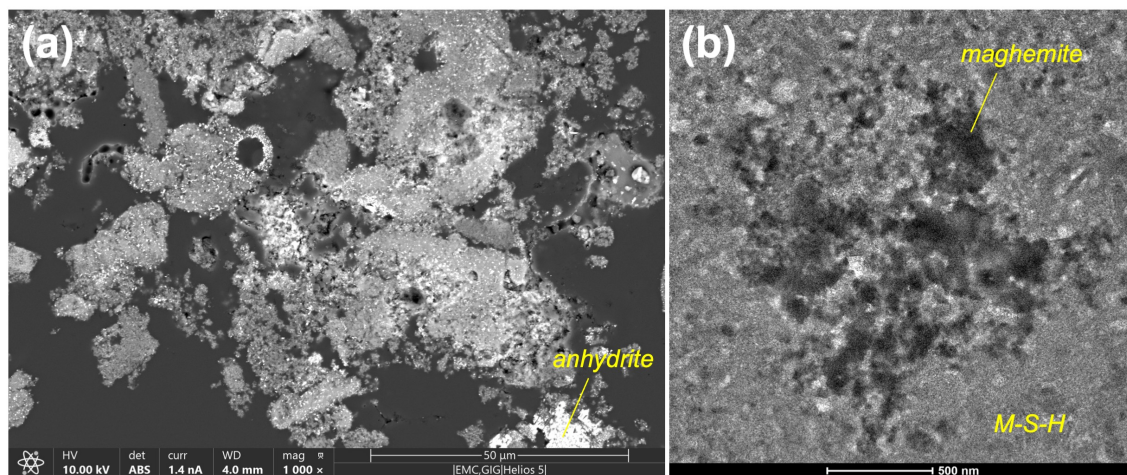


Figure 1. (a) SEM/BSE image of Run 11 (CI composition, water + NH_4HCO_3 : $X(\text{CO}_2)/X(\text{H}_2\text{O})=0.0317$, $X(\text{NH}_3)/X(\text{H}_2\text{O})=0.0317$, $W/R=5$, 200°C , 1550 hrs.). Different brightness of matrix roughly corresponds to different porosity. (b) TEM/bright field image of Run 07 (CI composition, water + CH_2O_2 : $X(\text{CO}_2)/X(\text{H}_2\text{O})=0.0435$, $X(\text{NH}_3)/X(\text{H}_2\text{O})=0$, $W/R=5$, 200°C , 168 hrs.) showing a dendritic aggregate of maghemite.