

小惑星リュウグウの砂つぶに見つかった ナトリウム塩鉱物

松本 徹

Matsumoto Toru

1. はじめに

太陽系の天体のうち、水を豊富に含む天体は地球だけではなく、小惑星や氷天体にも多くの水が存在することが分かってきた。これらの天体では、かつて内部に液体の水が存在し、鉱物や有機物と反応して様々な変化を引き起こしていたと考えられている。宇宙航空研究開発機構（JAXA）の探査機「はやぶさ2」は、小惑星リュウグウを探査し、2020年に表面の砂を地球に持ち帰った。リュウグウは地上からの反射スペクトルの観測により、水や有機物に富む炭素質コンドライトに類似する物質で構成されていると予想されていた。リュウグウの砂に対する一連の初期分析が行われ、その化学的・岩石学的な特徴が、隕石の中でも極めて希少なCI炭素質コンドライトと呼ばれる隕石種に対応することが明らかになった^{1,2)}。リュウグウやCI（イヴナ型）隕石の大きな特徴は、水の中で生まれた鉱物が岩石の大部分を構成していることである。リュウグウの砂の主成分は層間に水を含む粘土鉱物であり、次に存在の高い硫化鉄、磁鉄鉱、カルシウム-マグネシウム炭酸塩はいずれも水環境で生成した鉱物である。また、アミノ酸や核酸等、生命の材料として重要である多様な有機分子も検出された³⁾。これら化合物の合成も天体内部での水環境が深く関わっている⁴⁾。

現在のリュウグウは900 m弱程度の大きさであるが、かつては数十kmの大きさを持つ母体となった天体（母天体）が太陽系の始まった頃の約45億年前に存在したと推定されている^{1,2)}。その内部は

放射性同位体の崩壊熱によって温められ、母天体の材料となった氷が融解したことに伴って最大で100℃の程度のお湯で満たされていたと考えられている。こうしたことから、リュウグウの砂は、太陽系の形成初期に水的环境がどのように発展したかを知るための重要な試料であるといえる。

小惑星から直接持ち帰った砂には、地球に落下する隕石では見られないような未発見の物質が保持されている可能性がある。その1つは、水に溶けやすい、あるいは吸湿しやすい物質である。地球大気下の湿気を含む状況で変化してしまう物質は、宇宙空間から持ち帰ったままの新鮮な状態でなければ気付くことも難しいからである。隕石の多くは落下から発見までに長い年月を経ており、実際に地表での風化の痕跡も見られる。その点で、リュウグウの砂は小惑星から直接的に地球に持ち帰った物質であり、地上で想定される変質を免れている。また、リュウグウの砂が地球へ帰還して以降、JAXAの試料保管施設（キュレーション）において、純度の高い窒素ガスの環境下で注意深く保管されてきた。そこで、筆者らは、小天体の水環境に関連する新しい手がかりを探るために、リュウグウの砂を大気から極力隔離したうえで、鉱物組織に対する微小領域分析を行った。本稿では砂の観察によって見つかった塩の結晶⁵⁾について紹介する。

2. ナトリウム塩鉱物の観察

初期分析以降、リュウグウの砂は国際公募分析

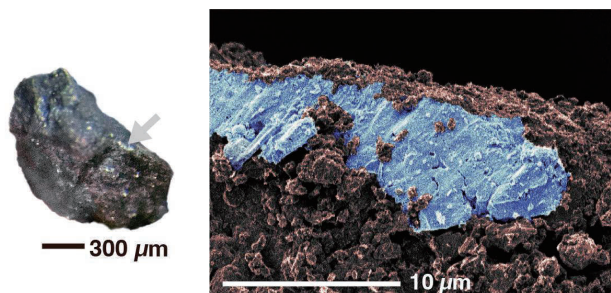


図1 (左) リュウグウ粒子の光学顕微鏡像。矢印はナトリウム炭酸塩脈を指す、(右) リュウグウの砂表面で見られたナトリウム炭酸塩脈(青色)の擬似カラー電子顕微鏡画像

を通じて世界中の研究者に配布されている。本研究でも用いた試料は公募分析に申請したのちに配布いただいた。筆者らは、まず JAXA/宇宙科学研究所のキュレーション施設を利用して、空気に触れることなく小惑星の砂を観察できる設備(グローブボックス、密閉型試料容器、エアロック付きの走査型電子顕微鏡)を活用した。大気から隔離した状態を保ちながら、リュウグウの砂を光学顕微鏡や走査型電子顕微鏡(SEM)で観察したところ、砂つぶの表面に白い鉱物脈が発達していることを見出した(図1)。長さは最大で0.5 mm程度であった。電子顕微鏡に備え付けられた特性X線による元素種の分析から、それらがナトリウムに富む見慣れない元素比の特徴を示すことから、リュウグウや地球外試料でこれまでに見つかっていない鉱物である可能性に気付いた。

そこで、この砂つぶ内部の岩石学的な特徴を捉えるために、兵庫県の大規模放射光施設 SPring-8 のビームライン BL20XU に設置されたX線トモグラフィーとX線回折を利用することで、砂つぶに対する三次元的かつ非破壊での観察を行うことにした。X線トモグラフィーの分解能は約0.5 μmであり、構成鉱物の種や形状を高分解能で撮影することができる。同時にX線回折モードに切り替えることができ、主な構成鉱物の相同定が可能である。本研究では、撮影中にリュウグウの砂が大気に曝露されることを防ぐために、X線を透過するカプトンの筒に粒子を封入できる小型容器を開発した。窒素ガス環境のグローブボックス内で粒子を容器に密閉してビームラインに持ち込むという形で利用する。撮影の結果、構成鉱物はリュウグウの大半の岩相と同様に粘土や硫化鉄で構成されており、鉱物と水

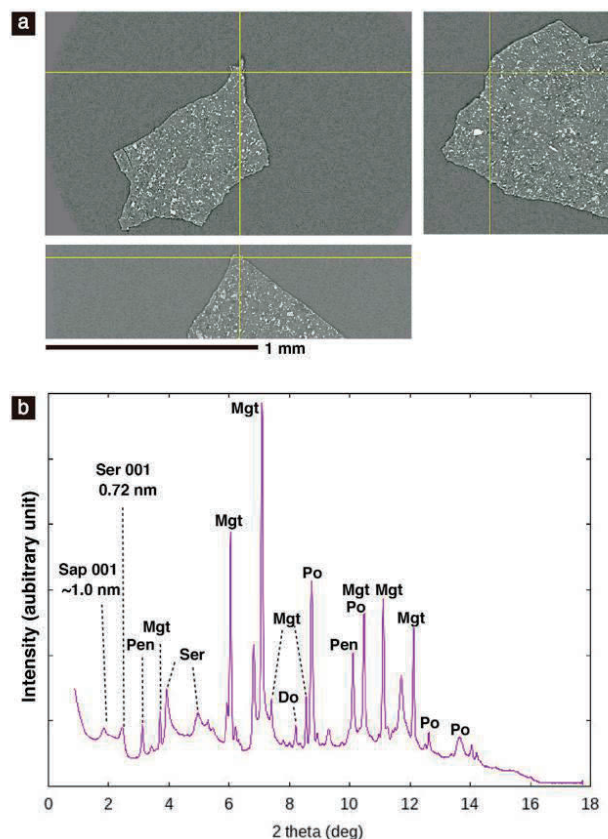
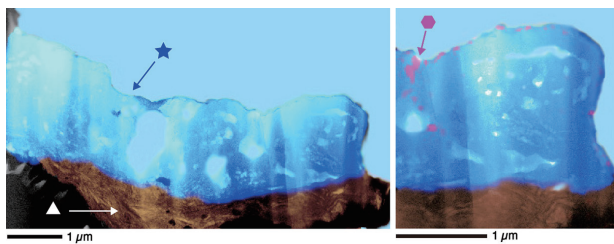


図2 (a) トモグラフィーのデータから再構成した三次元像、(b) リュウグウ粒子から取得したXRDデータ

との相互作用が進んでいることが分かった(図2)。ナトリウムを含む鉱物を示すX線回折ピークは見られず、白い脈も砂つぶのごく表層にのみ分布することが分かった。次に結晶脈に対する透過型電子顕微鏡観察を行うことで最終的な相同定を行うことにした。透過型電子顕微鏡(TEM)による観察を行うためには、電子線が透過可能な、厚さ100 nm程度の切片を粒子の表面から切り出す必要がある。この目的のために収束イオンビーム装置(FIB)を用いた。狙った位置から正確に切片を切り出すためには、粒子の三次元的な形状の情報が必要であった。そこでX線トモグラフィーによって撮影した粒子の外形を用いることで、切片の切り出し位置や向きの詳細を検討することができた。

TEMで切片を観察した結果、結晶脈の主成分はナトリウム炭酸塩(natrite: Na_2CO_3)とその一水和物(thermonatrite: $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)であることが分かった(図3)。これら炭酸塩は200 nm程度の小さな塩化ナトリウム(NaCl)の結晶も伴っていた。見つかった炭酸塩はリュウグウの鉱物の中でも最も電子線に



★ナトリウム炭酸塩 ●塩化ナトリウム △粘土

図3 ナトリウム炭酸塩脈の断面の詳細な様子（透過型電子顕微鏡画像に擬似着色した）

粘土（三角印：茶色の部分）の表面にナトリウム炭酸塩（星印：青色の部分）が分布している。100 nm 程度の大きさの塩化ナトリウム（六角形印：マゼンタの部分）も含まれる

対して弱く、TEM 観察の最中に蒸発してゆくのが特徴的であった。そのため、電子線回折図形の取得には大変苦労した。特性 X 線による元素種分析からフッ素や硫黄も数%含むことから、フッ化ナトリウムや硫酸塩を含有することも予想された。TEM 以外の手法でも鉱物相の同定を行うために、愛知県岡崎市の極端紫外光研究施設（UVSOR）の放射光走査型透過 X 線顕微鏡（STXM）を利用し、軟 X 線の吸収スペクトルを測定した。ナトリウム炭酸塩部分の炭素の K 吸収端と硫黄の L 吸収端を測定した結果、それぞれ CO_3 と SO_4 の構造に特徴的なピークが現れた。このことから水和の状態は不明であるがナトリウム硫酸塩も含有されていることが分かった。

3. 塩鉱物の析出過程

発見された鉱物はいずれも水に非常に溶けやすい性質を持つ塩の結晶である。水に溶けやすいということは、液体が極めて少なく塩分濃度が高くなれば結晶が析出できなかったと推定される。そのため筆者らは、リュウグウの砂を作る多くの鉱物が母天体で沈殿したあとに、液体の水が失われる現象が存在し、その際に塩の結晶が沈殿したと考えた（図4）。液体がなくなる現象として考えられる可能性の1つは、塩水の蒸発である。母天体の内部から表層の宇宙空間へまでつながる割れ目が生まれれば、天体内部の液体は減圧されて蒸発すると考えられる。地球上では大陸内部に取り残された湖が干上がった時に高い濃度の塩水が生じ、ナトリウム炭酸塩や岩塩等が析出することが知られている。これらは「蒸発岩」と呼ばれており、リュウグウ母天体でも蒸発岩が生

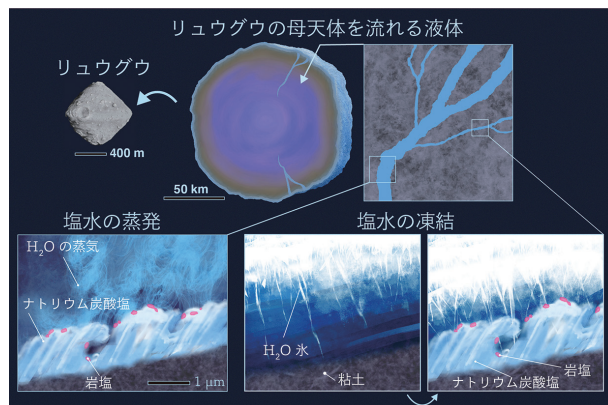


図4 リュウグウの母天体での塩結晶の形成

まれたのかもしれない。地球の塩湖は pH9 以上のアルカリ性を示し、そこには Na^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} や Cl^- , F^- 等今回リュウグウで見つかった炭酸塩を作るイオン種が主に溶け込んでおり析出する鉱物も類似している。もう1つの可能性は、液体の凍結である。母天体を温めていた放射性元素が乏しくなると天体は冷えてゆき、塩水は徐々に凍結するはずである。塩水に溶けた陽イオンや陰イオンは水には取り込まれにくいので、凍結が進むと残された塩水の濃度は高くなる。すると濃い塩水からは塩結晶が析出する。凍結した水はやがて現在に至るまでに宇宙空間へと昇華してしまったと考えられる。現在のリュウグウに大量の液体は見られず、そしてリュウグウの砂つぶも湿っていることはなく、母天体を流れたはずの液体の水がどのように失われたのか分かっていなかった。今回の研究により、リュウグウの母天体では蒸発、もしくは凍結によって液体の失われる現象が起こったことが示された。リュウグウ試料の大部分を占める粘土鉱物は水分子や OH 基を取り込む形で生成する。粘土が沈殿したのちも液体の水は消費されずに母天体に残っていたのだろう。

4. 他の太陽系天体との比較

リュウグウの砂で見つかったナトリウム炭酸塩は地球に飛来する隕石では見つかっておらず、小惑星の砂から発見されたことは予想外であった。一方で、NASA の小惑星探査機 OSIRIS-REx はリュウグウと似た小惑星ベヌーを探索し、2023 年に試料を地球へ送り届けた。ベヌー試料の初期分析から、その構成鉱物は粘土や硫化鉄等リュウグウと極めて似てい

ることが示された⁶⁾。そしてベヌーにもナトリウム炭酸塩が見つかり、両者の天体の最後の水環境も似ていることが分かってきた⁷⁾。2つの異なる天体から塩の鉱物が見つかったことから、これらは炭素質の小天体に広く分布しているかもしれない。リュウグウは硫黄に富み、ベヌーは窒素に富む等の両者の違いも見いだされており⁸⁾ 今後の研究が注目される。一方、準惑星のセレスや木星の衛星エウロパ、土星の衛星エンセラダス等、小惑星よりも大きく、地下に海が広がっていると予想される天体でも塩類が検出されている。例えばセレスには内部海の物質が凍って吹き出す氷火山があり、ナトリウム炭酸塩は噴出物の主要な成分である。エンセラダス表層の氷の裂け目から噴き出す間欠泉にはナトリウム炭酸塩や塩化ナトリウムが含まれる。種々の塩類は天体の水の成分や進化を反映している。そのため、塩の結晶はリュウグウと太陽系の海洋天体との水環境の共通性や違いを比較できる新しい手がかりになると期待される。とりわけ太陽系の塩水環境に注目することは、生命の材料である有機物の水中での化学反応場を理解することにもつながるため、太陽系天体の観測とリターンサンプル分析の両面から地球外塩水に関する研究が進展することが期待される。視点を銀河系に向けると、ジェームズ・ウェッブ宇宙望

遠鏡等の活躍によって太陽系外の惑星にも海の存在が示唆される天体が次々と発見されている。今後、系外惑星の観測技術が更に発展し、大気組成や表面環境、水の存在状態に関する情報が蓄積されていけば、太陽系の天体と他の恒星系における「水の世界」との本質的な共通性と相違が明らかになってくるだろう。そのとき、リュウグウのような始原的天体に記録された痕跡は、宇宙における水と塩、有機物の関連をひもとく鍵となり、生命の起源を問う科学の核心に迫る手がかりとなるかもしれない。

参考文献

- 1) Yokoyama, T., *et al.*, *Science.*, **379**, eabn7850 (2022)
- 2) Nakamura, T., *et al.*, *Science.*, **379**, eabn8671 (2023)
- 3) Naraoka, H., *et al.*, *Science.*, **379**, eabn 9033 (2023)
- 4) Takano, Y., *et al.*, *Nature Communications.*, **15**, 5708 (2023)
- 5) T. Matsumoto., *et al.*, *Nature Astronomy.*, **8**, 1536-1543 (2024)
- 6) Lauretta, D., *et al.*, *Meteoritics & Planetary Science.*, **59.9**, 2453-2486 (2024)
- 7) McCoy, T., *et al.*, *Nature.*, **637.8048**, 1072-1077 (2025)
- 8) Glavin, D., *et al.*, *Nature Astronomy.*, 1-12 (2025)

(京都大学白眉センター)