

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K13981

研究課題名（和文）宇宙風化模擬実験から探る、太陽系小天体表面の有機物の化学進化

研究課題名（英文）Evolution of organic materials promoted by space weathering

研究代表者

松本 徹（Matsumoto, Toru）

京都大学・白眉センター・特定助教

研究者番号：80750455

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：小惑星リュウグウの砂の初期分析を通じて、天然物の宇宙風化組織の観察と、イオン照射実験との比較を行った。揮発性物質が関連する予想外の成果として、磁鉄鉱の表面が窒化していることを見いだしたことである。詳細を観察した結果、窒化鉄(Fe₄N)が磁鉄鉱を覆っていることが示された。この結果から、リュウグウ表面へ窒素化合物を豊富に含む微小隕石が衝突していると考察した。窒素化合物に富む物質の起源天体として、太陽系の外側に分布する彗星や氷天体が考えられる。上記の成果を含めたリュウグウの宇宙風化の研究をNature Astronomyに投稿し、出版に至った。またプレスリリースをおこなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

リュウグウ粒子の磁鉄鉱表面の窒化鉄の発見は、CIコンドライトよりもアンモニアに富む天体の欠片が少なからず飛来していることを意味する。彗星が豊富に窒素化合物を含むことが観測から推定されている一方で、彗星起源の宇宙塵にはアンモニア化合物が観察されないという矛盾が存在していた。リュウグウの窒化鉄の存在は、彗星の塵は元々窒素化合物に富むが地球に飛来したのちに失われてしまったことを示唆する。この結果は、太陽系の物質進化を理解するために重要であるだけでなく、小惑星から直接的に試料が回収されたサンプルリタンの科学的意義を社会に示すものである。

研究成果の概要（英文）：Through initial analysis of regolith samples from the asteroid Ryugu, I observed the space weathering structures of Ryugu samples and experimental products of ion irradiation. An unexpected result related to volatile materials was the finding of iron nitride (Fe₄N) covering the magnetite particles. This result suggests that nitrogen-rich micrometeorites impacted on the Ryugu surface. Comets and icy bodies in the outer solar system are considered as possible origin of the nitrogen compound-rich materials. The study of the space weathering of Ryugu, including the above results, was submitted to Nature Astronomy for publication. A press release was also issued.

研究分野：地球外物質学

キーワード：宇宙風化 リュウグウ 電子顕微鏡

1. 研究開始当初の背景

探査機はやぶさ2が回収したC型小惑星リュウグウの試料は、我々が初めて手にする有機物や水に富む天体の表面物質である。太陽風の照射や微小隕石の衝突によって駆動される「宇宙風化」と呼ばれる天体の表面で進む物質の変化は、太陽系天体の形成や宇宙における固体の進化を探る鍵ともなる。本研究では、リュウグウ試料の微細な表面組織の特徴を明らかにし、粒子線照射実験との比較も行って、リュウグウ表面で起こる無機鉱物・有機物の生成と変化の全体像を解明する。

2. 研究の目的

2020年末、探査機はやぶさ2はC型小惑星リュウグウから砂粒子を採取し無事に地球に送り届けた。リュウグウを含むC型小惑星では、無機鉱物・有機物・氷の出発物質から粘土鉱物などが水熱変成を経て形成した。大規模な地質活動がないため太陽系初期の物質が保存されている。一方、天体表面では現在まで宇宙風化による化学進化が進んだと推定される。本研究が追求する問いは、(1)宇宙風化は水や有機物に富む小惑星の色変化・化学組成変化にどのように作用するのか、(2)揮発性化合物の宇宙風化はどのような素過程で進行するのか、(3)宇宙風化により小惑星表面ではどのような物質の多様性がもたらされるのか?という点である。本研究では、リュウグウの試料を観察し、宇宙環境の模擬実験との比較も行い、有機物や水に富む小惑星の表面の宇宙風化を解明する。これにより、小惑星表面の固体物質が辿った多様な化学進化を明らかにする。

3. 研究の方法

分析手法として、走査型電子顕微鏡や透過型電子顕微鏡を用いた。分析対象は初期分析によって京都大学に配布されていたリュウグウ試料である。宇宙風化組織を探するため、微小な表面組織の観察を行った。またリュウグウ試料やCIコンドライトのイオン照射実験も初期分析の期間に行った。研究計画を考案した当初は、太陽風の照射を模擬したイオン照射実験を研究の中心に据えていた。しかし、後述するように揮発性元素が関連するリュウグウの宇宙風化の挙動には微小隕石の衝突が深く関わっていたことがわかった。これは予想しておらず、本研究期間はリュウグウ試料の観察にまずは主眼を置いた。結果として研究目標は達成されたと考えている。

4. 研究成果

本研究は、有機物に富む小惑星表面で起こる変化の解明を目指している。2021年度から、小惑星リュウグウから持ち帰った試料の初期分析が始まったため、リュウグウの初期分析に参加する形で、小惑星表面で起こる化学進化の一旦を明らかにすることを試みた。具体的には、京都大学で主に行われた初期分析に参加し、炭素質小惑星の宇宙風化組織の同定を試みた。まず、粒子

表面の微細な模様や化学組成・鉱物種を調べ、太陽風や微小隕石衝突によって変成した組織の探索を行なった。また、リュウグウの初期分析チームは多くの海外研究機関が参加しているため、京都大学においてリュウグウ粒子の取り出しや固定、初期的な試料の記載を行なったのち、海外研究機関へ試料を送ることで研究協力の推進に貢献した。リュウグウ試料の主成分は、層状珪酸塩と呼ばれる含水鉱物が占めている。それらの天然の宇宙風化産物はこれまでに誰も見たことがなかったため、宇宙風化の同定は困難であったが、表面模様の変化や結晶構造の変化など証拠を電子顕微鏡観察によって見つけることで、リュウグウの試料に宇宙風化の痕跡が残されていることを示すデータを得た(図1)。加えて、水質変成の産物として知られている硫化鉄や磁鉄鉱、炭酸塩鉱物の表面においても宇宙風化の組織を記載した。これにより、リュウグウの表面の宇宙環境の中で変化した鉱物の特徴をおおまかにとらえることを達成した。

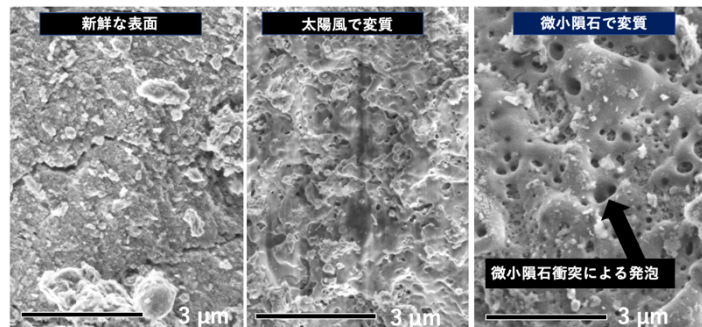


図 1 宇宙風化を受けた層状珪酸塩の表面の SEM 画像。

層状珪酸塩はその構造に水分子と OH 基を含むが、太陽風の照射と微小隕石の衝突によって粒子表面は脱水していたことが分かった。この観察結果から、小惑星リュウグウで観測された赤外スペクトルにおいて水の吸収が弱く見えていた原因を説明できた(Noguchi, Matsumoto et al. 2022, *Nature Astronomy*)。

一方で、本研究で推測していた揮発性物質の化学変化において、予想外の発見が磁鉄鉱の分析によって得られた。リュウグウ試料の宇宙風化を受けた磁鉄鉱の表面について、透過型電子顕微鏡によって元素分布を調べると、磁鉄鉱の表面の 50nm 程度の領域で窒素が濃集していることがわかった(図 2)。そこで electron diffraction mapping を使った詳細な分析の結果、窒化鉄(Fe_4N)が磁鉄鉱を覆っていることがわかった。また窒素の濃集層は、鉄の濃度も高く、 α 鉄の電子線回折パターンも得られた。一方で、宇宙風化を受けた磁鉄鉱で窒素が存在しない粒子も存在し、その表面では 50nm 程度の深さまで鉄の濃度が高く、 α 鉄が存在した。

窒化鉄は隕鉄中に見つかる超高压鉱物であるが、リュウグウには当てはまらない。そのため、分析結果を以下のように解釈した。(1) リュウグウ表面への太陽風の照射や微小隕石の衝突によって、磁鉄鉱から選択的に酸素が消失し、過剰となった鉄原子から α 鉄が生成する。(2) 微小隕石の衝突によって生じた蒸気は反応性の高いアンモニアに富み、 α 鉄と衝突蒸気が反応した結果、窒化鉄が形成した。(2)のプロセスにおいて、リュウグウのような CI コンドライト組成の衝突蒸気を仮定すると窒化鉄は安定に存在しないことがわかり、衝突物に窒素化合物が豊富に含まれていたと推定した。CI 組成よりも豊富な窒素化合物を固体として含む天体は、太陽系の外側に分布する彗星や氷天体が考えられる。この考察は、現在のリュウグウの軌道である地球領域に、CI コンドライトよりもアンモニアに富む天体の欠片が少なからず飛来していることを意味する。彗星が豊富に窒素化合物を含むことが観測から推定されている一方で、彗星起源の宇宙塵にはアンモニア化合物が観察されないという矛盾が存在する。リュウグウの窒化鉄の存在は、彗星の塵は元々窒素化合物に富むが地球に飛来したのちに失われてしまったことを示唆する。

上記の成果を含めたリュウグウの宇宙風化の分析結果を論文として投稿し、出版に至った(Matsumoto et al. 2023, *Nature Astronomy*)。また、論文の受理に伴いプレスリリースをおこなった。

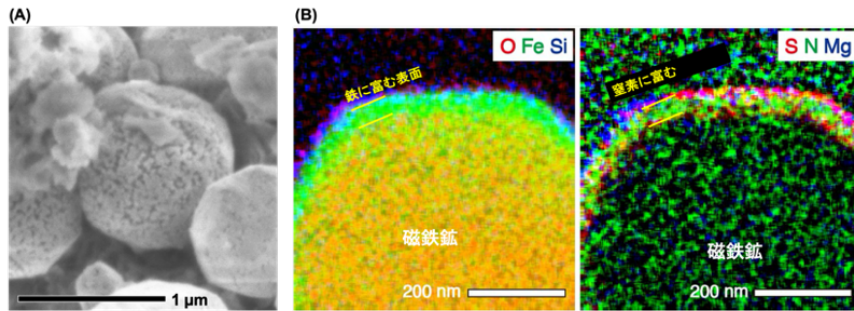


図 2 リュウグウ粒子の磁鉄鉱と表面の窒化鉄の層(右図の元素マップのうち、緑色部分)。

引用文献：

Noguchi, et al. (2022) "A dehydrated space-weathered skin cloaking the hydrated interior of Ryugu." *Nature Astronomy* 7.2: 170-181.

Matsumoto, et al. (2023) "Influx of nitrogen-rich material from the outer Solar System indicated by iron nitride in Ryugu samples." *Nature Astronomy* 8.2: 207-215.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Matsumoto Toru et al.	4. 巻 8
2. 論文標題 Influx of nitrogen-rich material from the outer Solar System indicated by iron nitride in Ryugu samples	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 207 ~ 215
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-023-02137-z	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mouloud Bahae eddine et al.	4. 巻 -
2. 論文標題 Four dimensional STEM analysis of the phyllosilicate rich matrix of Ryugu samples	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Meteoritics & Planetary Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/maps.14124	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Phan Van T. H. et al.	4. 巻 -
2. 論文標題 In situ investigation of an organic micro globule and its mineralogical context within a Ryugu "sand" grain	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Meteoritics & Planetary Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/maps.14122	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Stroud Rhonda M. et al.	4. 巻 -
2. 論文標題 Electron microscopy observations of the diversity of Ryugu organic matter and its relationship to minerals at the micro to nano scale	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Meteoritics & Planetary Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/maps.14128	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Noguchi Takaaki, Matsumoto Toru et al.	4. 巻 -
2. 論文標題 Mineralogy and petrology of fine grained samples recovered from the asteroid (162173) Ryugu	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Meteoritics & Planetary Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/maps.14093	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Leroux Hugues et al.	4. 巻 -
2. 論文標題 Phyllosilicates with embedded Fe based nanophases in Ryugu and Orgueil	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Meteoritics & Planetary Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/maps.14101	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tomioka Naotaka et al.	4. 巻 7
2. 論文標題 A history of mild shocks experienced by the regolith particles on hydrated asteroid Ryugu	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 669 ~ 677
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-023-01947-5	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Dobrica Elena et al.	4. 巻 346
2. 論文標題 Nonequilibrium spherulitic magnetite in the Ryugu samples	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Geochimica et Cosmochimica Acta	6. 最初と最後の頁 65 ~ 75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gca.2023.02.003	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Noguchi Takaaki, Matsumoto Toru, et al.	4. 巻 7(2)
2. 論文標題 A dehydrated space-weathered skin cloaking the hydrated interior of Ryugu	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 170-181
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-022-01841-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Nakamura T., Matsumoto M., et al.	4. 巻 379
2. 論文標題 Formation and evolution of carbonaceous asteroid Ryugu: Direct evidence from returned samples	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 eabn8671
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.abn8671	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kawasaki, N., Nagashima, K., Sakamoto, N., Matsumoto, T., Bajo, K. I., Wada, S., ... & Yurimoto, H	4. 巻 8(50)
2. 論文標題 Oxygen isotopes of anhydrous primary minerals show kinship between asteroid Ryugu and comet 81P/Wild2.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eade2067
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.ade2067	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tomioka, N., Yamaguchi, A., Ito, M., Uesugi, M., Imae, N., Shirai, N., ... & Tsuda, Y.	4. 巻 -
2. 論文標題 A history of mild shocks experienced by the regolith particles on hydrated asteroid Ryugu	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-023-01947-5	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Toru Matsumoto
2. 発表標題 Surface Morphologies and Space Weathering Features of Ryugu Samples
3. 学会等名 8th Hayabusa symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toru Matsumoto
2. 発表標題 Space weathering of iron sulfides on airless bodies
3. 学会等名 8th Hayabusa symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toru Matsumoto
2. 発表標題 Space weathering of anhydrous minerals in regolith samples from the C-type asteroid Ryugu
3. 学会等名 53th Lunar and Planetary Science Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

日焼けで隠された水に富む小惑星リュウグウの素顔 https://www.sci.kyoto-u.ac.jp/ja/news-101

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 The 85th Annual Meeting of The Meteoritical Society	開催年 2022年～2022年
---------------------------------------------------------------	--------------------

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------