

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B)）

研究期間：2019～2023

課題番号：19KK0094

研究課題名（和文）ナノビームを用いた小惑星リュウグウ試料の研究：C型小惑星の宇宙風化の解明に向けて

研究課題名（英文）Nanobeam Study of Asteroid Ryugu Samples: Toward Understanding Space Weathering of C-type Aster

研究代表者

野口 高明（Noguchi, Takaaki）

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：40222195

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：はやぶさ2探査機の持ち帰ったC型小惑星リュウグウ初期分析チームの一つである「砂の物質分析班」班長の本研究代表者野口、研究分担者松本と三宅、国際共同研究者Ishii, Stroud, Zega, Zolensky, Abreu, Harries, Langenhorst, Leroux, Beck, Bridges, Leeらからなる総勢65名のチームによって、リュウグウの宇宙風化が解明された。リュウグウの宇宙風化では、メテオロイド衝撃加熱による表面の溶融が顕著であった。また、太陽風照射が重要な役割を果たしている宇宙風化も見出すことができた。太陽風照射による宇宙風化は含水層状珪酸塩と無水鉱物では全く異なっていた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙風化とは、大気のない天体が宇宙空間に長期間曝されている間に徐々に変化していく現象のことである。はやぶさ2探査機が持ち帰った小惑星リュウグウの試料を（走査）透過電子顕微鏡で詳細に研究した。リュウグウ物質には、表面から10ミクロンが隕石が小惑星に衝突した際の衝撃加熱で溶融したものが存在していた。リュウグウは含水層状珪酸塩鉱物という結晶水あるいはヒドロキシ基として水を含む鉱物を多量に含むが、この溶融層は完全に脱水していた。地上観測やはやぶさ2探査機その場観測でリュウグウは天体全体が加熱され脱水している天体であるように見えていた原因はこの脱水溶融層にリュウグウ表面が薄く覆われているためらしい。

研究成果の概要（英文）：Principal Investigator Noguchi as leader of the Material Analysis "Sand" Team of the Initial analysis of the asteroid Ryugu samples, the research co-PIs Matsumoto and Miyake, and the international collaborators Ishii, Stroud, Zega, Zolensky, Abreu, Harries, Langenhorst, Leroux, Beck, Bridges, Lee, and others, a team of 65 members in total, elucidated the space weathering of Ryugu. In the space weathering of Ryugu, melting of the surface due to meteoroid impact heating was prominent. The team also found that solar wind irradiation plays an important role in space weathering. The modes of the space weathering by solar wind irradiation were quite different between those found on the hydrous layered silicates and on the anhydrous minerals.

研究分野：鉱物学、隕石学

キーワード：リュウグウ C型小惑星 (S)TEM 砂の物質分析班

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

研究代表者の野口高明は、はやぶさ2探査機が小惑星リュウグウより持ち帰る大きさ50ミクロン以下の微小粒子の鉱物・岩石学的分析を国際共同研究として行う「砂の物質分析班」の班長に選出された。リュウグウは、メインベルト小惑星(小惑星主要部)で最も多いC型小惑星に分類される。大気のない天体表面は、太陽からの低エネルギープラズマ流である太陽風の照射や微小隕石の衝突に長期間曝露されることでどのような変化を变化するか(宇宙風化をするか)を解明することが、砂の物質分析班の最大の研究課題である。野口らは小惑星イトカワの試料について宇宙風化の研究を世界で最初に行ったが、近年、国内にない機器や技術を持った海外の研究者によって、イトカワ表物質表面や月レゴリス試料表面の変化は非常に詳しく解明されつつある。本研究では、これらの機器や技術を持つ海外の複数の研究機関の研究者のところに野口と若手研究者の研究分担者の松本徹博士がリュウグウ試料を持って赴き共同研究を行う。そうして得られた結果と他の班員の成果を合わせることによって、リュウグウ構成物質の多様性の解明、今まで全く未解明であったC型小惑星の宇宙風化過程の解明を行うことを最大の目標とした。

### 2. 研究の目的

国際共同研究として設定された、はやぶさ2回収試料初期分析は6つの班に分かれており、野口が班長を務める「砂の物質分析班」は、砂サイズ(100 $\mu$ m径程度以下)の試料を用いて、(1)C型小惑星の宇宙風化を解明すること、(2)砂サイズの試料からリュウグウの岩石・鉱物学的研究を行い、石サイズ(1mm径程度以上)の試料を用いて岩石・鉱物学的研究を行う「石の物質分析班」の成果と比較すること、(3)小惑星表面物質に混入する他の天体起源の物質を発見することが当初目的である。上記(1)の目的を達成するために、はやぶさ初号機回収試料の宇宙風化研究で、国内にない機器や技術を持ちイトカワ表物質表面や月レゴリス試料表面の変化は非常に詳しく解明した海外の研究者達との国際共同研究として砂の物質分析班の研究を、本研究費を用いて推進することが第一の目的であった。また、(2)についても、小惑星リュウグウの構成物質として当時想定されていたCM炭素質コンドライトの研究で顕著な業績を上げられている海外の研究者達にも「砂の物質分析班」に参加していただき、本研究費を用いて研究推進することが第二の目的であった。

### 3. 研究の方法

研究初年度末に、惑星科学最大の国際会議であるLunar and Planetary Science Conferenceで、「砂の物質分析班」班員に参加して下さった方々と会合を持つ予定でいた。ところが、COVID-19パンデミックによって会議は中止され、結局、渡航できない状態は研究期間ずっと続いた。この状況に対応して、研究計画を根本的に変更した。「砂の物質分析班」の班員は最終的に65名にもなった。このため、国内・国外の研究者を、始めに私が声をかけた16名の研究者をトップとする16のユニットに分けて試料を各ユニットの代表に試料を配分して研究する形とした。メール会議を定期的に行うことで情報交換した。2名の副班長は宮原明准教授(広島大)とHope A. Ishii博士(ハワイ大)になっていただいた。

#### (1) リュウグウ試料のハンドリング

日本のリターンサンプルは、できる限り大気との接触を遮断し試料を回収し、回収後は超高純度窒素雰囲気中で試料を保管・配分している。本研究における試料の開封やハンドリングは、既存の窒素置換グローブボックスと、その中に設置したマイクロマンピュレータ付のアイピースレス実体顕微鏡を使って行った。

#### (2) FE-SEM観察とFIB-SEM加工

貴重な微小試料を確実にハンドリングできる研究者は国内・国外とも予想以上に少なかった。このため、京都大鉱物学講座のFIB-SEMで三宅(敬称略)が130枚に及ぶ多数の超薄切片試料作成を行った。そして、130枚のうち約40枚を内外の班員に送付し、(S)TEMによる一般的な鉱物学記載を依頼した。さらに、野口がAu板に貼り付けたリュウグウ試料を国内外の13ユニットに送り、宇宙風化に関係しそうな微細組織の探索を依頼した。発見した宇宙風化組織の研究や、鉱物学的な研究のために、試料を受け取った海外の共同研究者達によって約30枚の超薄切片が作成された。本科研費で海外への試料の送料120万円以上を支払うことができた。

#### (3) 京大における(S)TEM観察・分析

SEMでリュウグウ試料表面を一粒ずつ詳細に観察し、少しでも宇宙風化が疑われる試料は超薄切片を作成し、(S)TEMで三宅・伊神洋平博士(砂の物質分析班班員)・松本・京都大化学研の治田充貴准教授(砂の物質分析班班員)と観察・分析を行った。溶融メルトの付着やナノクレターが生じた炭酸塩を見つけ、その断面から最初の照射損傷組織を確認できた。

#### (4) 九大における(S)TEM観察・分析

リュウグウ試料は層間水が失われたサポナイト（含水層状珪酸塩の一種）を多く含むことが「化学分析班」の研究から判明していたため、一部の試料は完全大気遮断で試料ハンドリング・加工・(S)TEM 分析を行う必要があった。全行程大気非曝露での試料のハンドリング・観察・加工・(S)TEM 試料加工観察は、「砂の物質分析班」班員の斉藤光准教授・波多聰教授（九大総理工）と行った。

#### (5) 国内・海外の共同研究者による(S)TEM 観察・分析

(S)TEM 観察分析は、京大、神戸大、JAMSTEC 高知コア研、東北大、九大、アメリカではハワイ大、ローレンスバークレー研究所、イェール大、米国海軍研究所、アリゾナ大、ドイツではイェナ大、フランスではリール大、イギリスではレスター大、グラスゴー大、Diamond Light Source で行われた。

### 4. 研究成果

野口が全てのユニットからのデータをとりまとめて、「砂の物質分析班」の初期成果論文として、リュウグウの宇宙風化とリュウグウの鉱物学の 2 つの論文を出版できた(Noguchi et al., 2023a, b)。引き続き 松本がリュウグウの宇宙風化論文第 2 報を書き出版された(Matsumoto et al., 2024)。砂の物質分析班の副班長であり国際共同研究強化 (B) の共同研究者である Ishii のユニット（ハワイ大）からは、球状磁鉄鉱の成因についての論文が出版できた(Dobrică et al., 2023)。共同研究者である Leroux 教授（リール大）のユニットからはリュウグウと CI コンドライトの層状珪酸塩の(S)TEM-EDS を使った詳細な比較を行った研究など 3 本が出版できた(Leroux et al., 2023; Bahae-eddine Mouloud et al., 2024; Laforet et al., 2024)。共同研究者の Beck 教授（グルノーブルアルプ大）のユニットからは有機ナノグロビュールと鉱物の関係についての論文が出版できた（(S)TEM はリール大にて実施）(Phan et al., 2023)。共同研究者の Langenhorst と Harries のユニット（イェナ大）からは硫化鉱物の最初期の宇宙風化についての研究が出版できた(Harries et al., 2024)。

#### (1) C 型小惑星における宇宙風化

リュウグウ試料は強い水質変成作用を受けており、この作用で形成された二次鉱物が主要鉱物である。量の多い順に列挙すると、含水層状珪酸塩鉱物（蛇紋石とサポナイト）、磁鉄鉱  $Fe_3O_4$ 、ピロータイト  $Fe_{1-x}S$ 、ペントランダイト  $(Fe, Ni)_9S_8$ 、ドロマイト  $CaMg(CO_3)_2$ 、Fe を含むマグネサイト  $(Mg, Fe)CO_3$  である。これらの主要鉱物は CI コンドライトとほぼ同じである。

#### 含水層状珪酸塩の宇宙風化

リュウグウ試料の主要鉱物の 9 割程度が含水層状珪酸塩である。そこで、「砂の物質分析班」（およびその一環である本研究）では、まず含水層状珪酸塩の宇宙風化に注目して研究を行った。リュウグウ試料の宇宙風化組織では、メテオロイド衝突による加熱・溶融組織が顕著であった（図 1a）。直径 1km 未満の小惑星において、メテオロイド衝突による加熱・溶融組織が顕著であることは想定されていなかった。しかし、図 1a の FE-SEM による二次電子像から分かる様に、粒子表面が溶融し激しく発泡したことがあったことが読み取れる。我々はこれを Frothy layer（泡立っている層という意味）と名付けた(Noguchi et al., 2023a)。

Frothy layer の断面の超薄切片を FIB-SEM で作成し(S)TEM で詳細に観察・分析を行った。図 1b はそうした超薄切片（表面付近の断面薄片）について、(S)TEM を用いて撮像された高角環状暗視野像（HAADF-STEM 像）である。HAADF-STEM 像においては、平均原子番号が大きな物質ほど明るく写る。現在はガラスとなっている、衝撃加熱時には溶融していた層中には、多くの気泡（V）や円状（三次元的には球状）の輝点が存在している。(S)TEM に取り付けられているエネルギー分散型 X 線分光器（EDS）からこれらの輝点は Fe-Ni 硫化鉱物（ピロータイトとペントランダイト）である。この組織は、溶融時に、珪酸塩メルトと鉄ニッケル硫化物メルトが分離したことを示している。メテオロイド衝突による瞬間加熱を模擬した CM コンドライトへのレーザーパルス照射実験でも、ガラス中に多くの気泡や Fe-Ni 硫化物メルトの球状の粒が形成されており、その組織は frothy layer とよく似ている(Thompson et al., 2019)。Frothy layer はメテオロイド衝突による加熱・溶融層であると考えられる。珪酸塩と硫化物の両者が溶融していることから約 1200°C を超える温度にまで加熱されて溶融したことから、溶融層である frothy layer は脱ヒドロキシ化し、ほぼ無水物になっている。Frothy layer の厚さは数  $\mu m$  以上あるため、小惑星リュウグウの表面を覆うレゴリス物質に frothy layer を持つレゴリス粒子が多量に存在しているならば、表面物質の反射スペクトルを観測すると、一見、小惑星リュウグウの物質は強い加熱を受けて脱水しているように見えてしまうであろう。これが地上観測やはやぶさ 2 探査機によるその場計測で、リュウグウが強い加熱を受けた CM コンドライトに似た物質と誤認された要因と「砂の物質分析班」は考えた。

太陽風照射による含水層状珪酸塩鉱物の宇宙風化組織は frothy layer よりも判別しにくい。「砂の物質分析班」で太陽風照射による宇宙風化組織と判断したリュウグウ粒子表面の二次電子像を図 2a に示す。宇宙風化を明らかに受けていない粒子の表面と比較すると比較的平滑で 100 nm 程度の大きさの穴 (黒い点) が点々と存在している。この smooth layer の断面の超薄試料の TEM 像 (明視野像) と、表層 1 カ所と内部 2 カ所の電子回折パターンを図 2b に示した。電子回折パターンから、太陽風照射損傷を受けた含水層状珪酸塩は表面から約 100 nm が非晶質化し、それ以深では含水層状珪酸塩鉱物の結晶構造が維持されていることが分かった。明らかに宇宙風化を受けていないリュウグウ試料に、太陽風を模擬した低エネルギー (4 keV) He<sup>+</sup>イオンを照射する照射実験を「砂の物質分析班」班員の仲内博士 (JAXA, 現立命館大)、瀧川准教授 (東大)、橋教授 (東大) が行った。照射前後の試料表面を比較すると、照射後には smooth layer とよく似た表面に変化していることが FE-SEM による観察で明らかになった。この照射実験試料の断面の超薄切片試料を FIB-SEM で作成し (S)TEM 観察・分析を行うと、Smooth layer とよく似た構造を持つ層が形成されていた。これらのことから総合的に判断して、smooth layer は含水層状珪酸塩鉱物の照射損傷層と推測した (Noguchi et al., 2023a)。月やイトカワでは普遍的に存在していたナノメートルサイズの金属鉄 (np Fe<sup>0</sup>) は、含水層状珪酸塩の宇宙風化ではごくわずかしか見出すことができなかった。

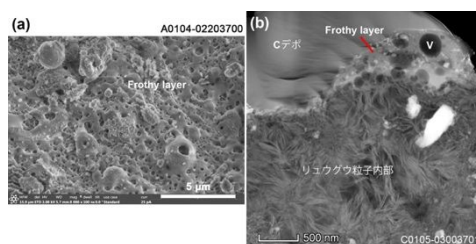


図 1 メテオロイド衝撃加熱による宇宙風化組織 (Frothy layer) (a)表面の FE-SEM による二次電子像。(b)表面断面の超薄切片の (S)TEM による HAADF-STEM 像。V は空隙 (あるいは泡)。

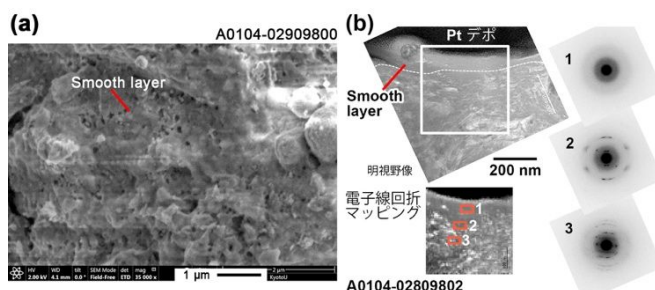


図 2 太陽風照射による宇宙風化組織 (Smooth layer) (a)表面の FE-SEM による二次電子像。(b)表面断面の超薄切片の (S)TEM による HAADF-STEM 像。(b)の左上の (S)TEM による明視野像の四角の範囲の電子線回折マッピング像をその下に示す。電子線回折マッピング像中の領域 1, 2, 3 から得られた電子線回折パターンを (b)の右列図 1 から 3 に示す。1 のみ非晶質である。

### 無水鉱物の宇宙風化

無水鉱物は含水層状珪酸塩鉱物とは全く異なる宇宙風化組織を持っていた。太陽風照射を受けたピロータイト Fe<sub>1-x</sub>S 表面は多孔質化しており、その表面から図 3a に示した金属鉄ひげ結晶が形成されていた (Matsumoto et al., 2023)。金属ひげ鉄の生成は、太陽風照射や (マイクロ)メテオロイド衝突に伴い、数千年の期間で揮発性の高い元素が鉄化合物から選択的に消失することにより駆動されていると考えられる。松本と野口らは、イトカワや月試料の硫化鉄でも同様のひげ結晶を発見している (Matsumoto et al., 2020, Matsumoto et al., 2021)。硫化鉄中の Fe<sup>2+</sup>イオンの還元と金属鉄ひげ結晶の生成は、大気のない天体表面に硫化鉄が存在すれば普遍的に起こる現象であると考えられる (Matsumoto et al., 2023)。

鉄を含むマグネサイト (Mg, Fe)CO<sub>3</sub> は、太陽風照射によって結晶表面から深さ約 100 nm までの Fe<sup>3+</sup>が Fe<sup>2+</sup> に還元されると共に CO<sub>2</sub> が失われて、Fe を含むペリクレス (Mg, Fe)O の微細結晶集合体に変化していた (Matsumoto et al., 2023)。また、磁鉄鉱 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> では、太陽風照射によって Fe<sup>3+</sup>と Fe<sup>2+</sup> が Fe<sup>0</sup>金属鉄に還元され、さらに金属鉄がさらに窒素と反応し窒化鉄が形成されていた。窒素の起源はリュウグウ内部とは考えにくい。なぜならばリュウグウの有機物は窒素をほとんど含まないからである。窒素の起源としては、リュウグウに衝突した太陽系遠方起源の窒素を多く含む化合物を含む塵と推定される (Matsumoto et al., 2023)。宇宙空間に曝露されていた表面に存在していた大きなピロータイト Fe<sub>1-x</sub>S 結晶構造を詳細に調べると、表面付近では Fe<sup>3+</sup>の割合が減少していき、宇宙空間に曝露されていた部分では全て Fe<sup>2+</sup>となり、ストイキオメトリック FeS であるトロイライトに変化していた (Harries et al., 2024)。この変化はピロータイトの最初期の太陽風照射による宇宙風化の影響と考えられる。

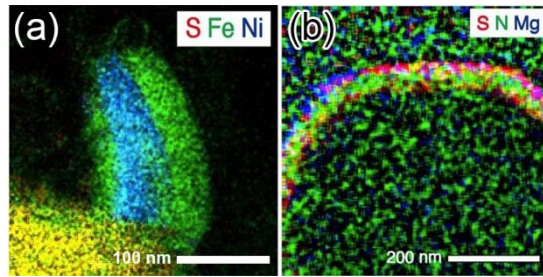


図 3 (a)ピロータイト結晶表面から成長する鉄ひげ結晶の複合元素マップ。(b)磁鉄鉱表面に存在する厚さ 50 nm 程度の窒化鉄口アルダイト層。共に(S)TEM-EDS によって得られた。

## (2) 砂サイズ試料の観察・分析に基づく小惑星リュウグウ試料の鉱物学的特徴

「砂の物質分析班」への試料配分量は初期分析全体に配分された試料量のわずか 0.2wt.% に過ぎなかったにも関わらず、国内外の透過電子顕微鏡研究者を集結したおかげで、リュウグウ試料の鉱物学についても他班に勝るとも劣らない成果を上げることができた(Noguchi et al., 2023b; Dobrică, E. et al. 2023; Leroux, H. et al. 2024; Laforet et al. 2024; Bahae-eddine Mouloud et al. 2024)。表 1 は各研究チームが発見した鉱物のリストである。同定できた副成分鉱物の数は他研究チームに勝るとも劣らない。数が全てではないとはいえ、ごく微量の試料を詳細に調べ尽くしたことが分かるであろう。他にも本研究費の共同研究者による論文で査読中のものもある。最終的には 10 本を超えると予想される。

表 1 リュウグウ試料を研究した異なる班によって同定された相や物体

チーム名	同定された鉱物 主要鉱物	副成分鉱物	同定された物体	文献名
化学分析班 (初期分析)	サボナイト, 蛇紋石, 磁鉄鉱(木 莓状, ブラケット状, 球果状), ピロータイト, ベントランダイ ト, 苦灰石, Fe に富むマグネ サイト	ヒドロキシアパタイト, Mg-Na リン酸塩, Na に富む層状珪酸塩, オリビン, 低 Ca 輝石(こ こまで(1)), スピネル, クロム鉄鉱, イル メナイト, キューバ銅鉱 (2)	オリビンと低 Ca 輝石を産するク ラスト	Yokoyama et al. 2022; Kawasaki et al. 2022
石の物質分 析班(初期 分析)	同上(但し, ピロータイトのポ リタイプ 4C)	(1), (2)に加えて, 高 Ca 輝石, ヒボナイ ト, ペロプスカイト, マンガノクロマイト, 閃 垂鉛鉱, ドーブリーライト, シュライバーサイ ト, アラボグダナイト, 方解石, あられ石(こ こまで(3)), トチリナイト, ダイゼニ イト, 白金族硫化物, ウスタイト, 金属鉄, 石膏 *	コンドルール様 物体, CAIs, 弱変 質クラスト, GEMS 様物体, ピ ロータイト中の 流体包有物	T. Nakamura et al. 2022; Mikouchi et al. 2022; Matsuno et al. 2022; Kimura et al. 2022; Nakashima et al. 2023, Nakato et al. 2022
砂の物質分 析班(初期 分析)	同上(但し, ピロータイトのポ リタイプ 4C, 5C, 6C, 及びトロ イライト)	(1), (2), (3)に加えて, エスコラア イト, ポリディマイト, (アラボグダナイトでは なく)トランスジョーダナイト, モアッサナ イト, 低結晶度層状珪酸塩, 金属鉄, ペリクレ ス, ロナルダイト	オリビンと低 Ca 輝石を産するク ラスト	Noguchi et al. 2022; Harries et al. 2022; Matsumoto et al. 2022; Thompson et al. 2022; Dobrică et al. 2022; Nakato et al. 2022; Noguchi et al. 2023; Matsumoto et al. 2023
フェーズ 2 高知	同上	(1), (2)に加えて, (ドーブリーライトで はなく)ゾレンスキアイト, 石墨, あられ石, 低結晶度層状珪酸塩	残存コンドル ール, 残存 AOA	Ito et al. 2022; Liu et al. 2022; Tomioka et al. 2022; McCain et al. 2023; Yamaguchi et al. 2023
フェーズ 2 三朝	同上	(1)	残存コンドル ール, 残存 AOA	E. Nakamura et al. 2022

\*地球大気に曝露されることで形成された

以上述べてきたように、本研究費によって国際共同研究としてのリュウグウ試料初期分析の「砂の物質分析班」の研究活動は十分に強化されたことが分かるだろう。

## <参考文献>

- Bahae-eddine Mouloud et al. 2024. Meteorit. Planet. Sci. <https://doi.org/10.1111/maps.14124>.  
 Burgess, K. D. and Stroud, R. M. 2018. Geochim. Cosmochim. Acta 224, 64–79.  
 Dobrică, E. et al. 2023. Geochim. Cosmochim. Acta 346, 65–75.  
 Grott, M. et al. 2019. Nat. Astron. 3, 1–6  
 Harries, D. et al. 2024. Meteorit. Planet. Sci. <https://doi.org/10.1111/maps.14176>.  
 Laforet, S. et al. 2024. Astrophys. J. 963:L45 (11pp). 10.3847/2041-8213/ad2b65.  
 Leroux, H. et al. 2023. Meteorit. Planet. Sci. 10.1111/maps.14101.  
 Matsumoto, T. et al. 2020. Nature Comm. 11, 1117.  
 Matsumoto, T. et al. 2021. Geochim. Cosmochim. Acta 299, 69–84.  
 Matsumoto, T. et al. 2023. Nat. Astron. 8, 207–215. 10.1038/s41550-023-02137-z.  
 Noguchi, T. et al. 2023a. Nat. Astron. 7, 170–181. 10.1038/s41550-022-01841-6.  
 Noguchi, T. et al. 2023b. Meteorit. Planet. Sci. <https://doi.org/10.1111/maps.14093>.  
 Phan, T. H. V. et al. 2023. Meteorit. Planet. Sci. 10.1111/maps.14122.  
 Thompson, M. S. et al. 2019. Icarus 319, 499–511.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 9件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 T. Noguchi, T. Matsumoto, A. Miyake et al.	4. 巻 7
2. 論文標題 A dehydrated space-weathered skin cloaking the hydrated interior of Ryugu	5. 発行年 2023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 E. Dobrica, H. A. Ishii, ... T. Noguchi, T. Matsumoto, A. Miyake 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 有
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 該当する
1. 著者名 Matsumoto Toru, Noguchi Takaaki, Miyake Akira 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 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 H. Leroux, ... T. Noguchi, T. Matsumoto, A. Miyake 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 有
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 該当する

1. 著者名 T. Noguchi, T. Matsumoto, A. Miyake 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 有
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 該当する

1. 著者名 Mouloud Bahae eddine, ... T. Noguchi, T. Matsumoto, A. Miyake 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 有
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 該当する

1. 著者名 Laforet Sylvain, .... T. Noguchi, T. Matsumoto, A. Miyake et al.	4. 巻 963
2. 論文標題 Linking Cause and Effect: Nanoscale Vibrational Spectroscopy of Space Weathering from Asteroid Ryugu	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L45 ~ L45
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ad2b65	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 該当する

1. 著者名 Phan Van T. H., ... T. Noguchi, T. Matsumoto, A. Miyake 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 有
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 該当する

1. 著者名 D. Harries, T. Matsumoto, ... T. Noguchi, A. Miyake et al.	4. 巻 -
2. 論文標題 Incipient space weathering on asteroid 162173 Ryugu recorded by pyrrhotite	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.14176	査読の有無 有
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 該当する

[学会発表] 計8件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 T. Noguchi et al.
2. 発表標題 Dehydration decomposition of phyllosilicates in the C-type asteroid Ryugu material by space weathering.
3. 学会等名 85th Meteoritical Society Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Matsumoto et al.
2. 発表標題 Nano Phase Opaque Minerals in Vapor Deposited Rims Found on Samples from C-Type Asteroid Ryugu
3. 学会等名 85th Meteoritical Society Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 D. Harries, F. Langenhorst, T. Matsumoto, T. Noguchi et al.
2. 発表標題 Incipient space weathering on 162173 Ryugu recorded by crystallographic changes of pyrrhotite
3. 学会等名 85th Meteoritical Society Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 T. Noguchi et al.
2. 発表標題 Mineralogy and surface modification of small grains recovered from the asteroid 162173 Ryugu
3. 学会等名 Hayabusa Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Matsumoto et al.
2. 発表標題 Surface morphologies and space weathering features of Ryugu samples
3. 学会等名 Hayabusa Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Noguchi et al.
2. 発表標題 Mineralogy and Space Weathering of Fine Fraction Recovered from Asteroid (162173) Ryugu
3. 学会等名 53rd Lunar and Planetary Science Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Matsumoto et al.
2. 発表標題 Space Weathering of Anhydrous Minerals in Regolith Samples from the C-Type Asteroid Ryugu
3. 学会等名 53rd Lunar and Planetary Science Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Thompson, P-M. Zenatta, T. J. Zega, T. Noguchi et al.
2. 発表標題 Evidence for Micrometeoroid Bombardment on the Surface of Asteroid Ryugu
3. 学会等名 53rd Lunar and Planetary Science Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究分担者	三宅 亮 (Miyake Akira)  (10324609)	京都大学・理学研究科・准教授  (14301)	
研究分担者	松本 徹 (Matsumoto Toru)  (80750455)	京都大学・白眉センター・特定助教  (14301)	

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0件

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
---------	---------