

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13610

研究課題名（和文）イトカワの粒子から探る太陽系小天体の硫黄消失メカニズムの解明

研究課題名（英文）Observation of Itokawa samples to understand the mechanism of sulfur depletion on asteroids.

研究代表者

松本 徹（Matsumoto, Toru）

九州大学・基幹教育院・特別研究員（PD）

研究者番号：80750455

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：探査機はやぶさが小惑星イトカワから持ち帰った微粒子の表面は、宇宙空間で物質が変化した履歴（宇宙風化と呼ばれる）が刻まれている。本研究では硫化鉄（鉄と硫黄の化合物）に着目して、硫化鉄の宇宙風化組織の観察を行った。観察の結果、地球外物質では全く知られていない、ひげ状に伸びた金属鉄の結晶を硫化鉄表面に発見した。金属鉄のひげ状結晶は、太陽から吹き出した荷電粒子である太陽風の打ち込みが硫化鉄（FeS）を分解させ硫黄を選択的に消失させることで成長したと推定した。この考察から、荷電粒子の照射は宇宙における硫黄と鉄の化学進化に大きな役割を果たした可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

NASAの小惑星探査によって、小惑星表面では硫黄のみが隕石物質に比べて欠乏していることが示唆されていたが、その具体的な仕組みは長年解明されていなかった。本研究は硫黄の消失が実際に小惑星表面で起きる証拠とその仕組みを初めて示した。この成果は、観測から小天体の化学組成を正確に推定し、太陽系惑星の構成物となった小惑星の材料やその進化の解明に役立つと期待される。

研究成果の概要（英文）：In this project, I (and co-workers) investigated surface structures of regolith particles recovered from asteroid Itokawa by the Hayabusa mission. I found metallic iron whiskers on iron sulfides (FeS) in the particles. The whiskers are newly found nano-structures among extraterrestrial materials and were likely formed via selective sulfur loss from the surface of iron sulfides caused by solar wind irradiation. I proposed that ion irradiation may play a fundamental role in the chemical evolution of iron and sulfur in the space environment.

研究分野：惑星物質科学

キーワード：小惑星 イトカワ 宇宙風化 硫化鉄 金属鉄

1. 研究開始当初の背景

大気のない小天体表面の物質は、太陽から吹き出した荷電粒子の流れである太陽風の照射や微小天体の衝突により時間変化することが知られており、この現象は宇宙風化と呼ばれる。NASA の小惑星探査によって、小惑星表面は隕石の組成に比べて硫黄に乏しいことが観測から示唆されていた。そして、硫黄の欠乏は、鉄と硫黄の化合物である硫化鉄の宇宙風化に起因すると予想されていた。小惑星表面の硫黄の消失は、本当の小惑星物質の組成を観測から見積もることを難しくさせるため、小天体の化学組成や成分を知る上で重要な現象である。

探査機はやぶさが採取した小惑星イトカワの微粒子は、小惑星の宇宙風化が保存されている試料である。そこで、本研究では、イトカワ微粒子の硫化鉄を網羅的に観察することを試みた。

2. 研究の目的

本研究では、イトカワ粒子に注目し、硫化鉄の宇宙風化組織を観察することで、小惑星表面における硫黄の挙動を解明することを目指した。

3. 研究の方法

硫化鉄を含むイトカワ粒子に対して、走査型電子顕微鏡を用いた表面観察を行った。その後、一部の粒子から電子線が透過可能な厚さ約 100nm の切片を切り出し、透過型電子顕微鏡による粒子断面の内部組織の観察を行った。またアポロ計画で回収された月粒子の観察も行った。

4. 研究成果

イトカワや月の砂の硫化鉄表面には、長さ数百 nm から 3 μ m 程度の金属鉄の結晶が広い範囲に分布していることがわかった(図 1)。こうした組織は、動物のひげのように見えることからひげ状結晶と呼ばれている。硫化鉄の表面は硫黄の量が少なく、太陽風の水素やヘリウムで満たされていたと思われる泡もあった(図 2)。そのため、太陽風の照射による硫黄原子のはじき出しや、充填した太陽風水素と硫化鉄の間の化学反応による硫化水素ガスの発生を経て、硫黄原子が選択的に失われて鉄原子が過剰になった結果、金属鉄のひげが成長したと推定した。また金属鉄の原子数に等しい硫黄原子が少なくとも消失したと仮定して、太陽風の照射による硫黄の消失率を見積もった結果、イトカワ表面で観測されていた硫黄の減少量を説明できることを明らかにした。

本研究で見出された金属鉄のひげ状結晶は、地球外物質では全く知られていない新奇な組織である。それらの観察から、小惑星表面における硫黄消失の物質科学的な証拠や速度を初めて示した。この成果は、観測から小惑星の化学成分を正確に理解し、小天体の形成や進化史の理解を深めることにつながると期待される。また、金属鉄のひげ状結晶は、はやぶさ 2 が持ち帰ったリュウグウ試料の分析において小惑星表面の歴史を知る上での重要な指標になると期待される。

一方で本研究では、イトカワ粒子の観察結果に基づいて、宇宙空間の粒子線照射環境における鉄や硫黄の進化についても考察を進めた。星間空間では、超新星爆発の衝撃波で加速された荷電粒子が硫化鉄の塵を分解し、金属鉄の生成と気相への硫黄の供給を引き起こすと予想されており、本研究はこの仮説を強く支持する結果となった。金属鉄は分子雲における化学反応の触媒になりえるため、荷電粒子の照射は星間空間の化学進化に大きな影響を与えるると予想されると考察した。

本研究の成果は、国際科学誌「Nature Communications」「Geochimica Cosmochimica Acta」にて報告された。

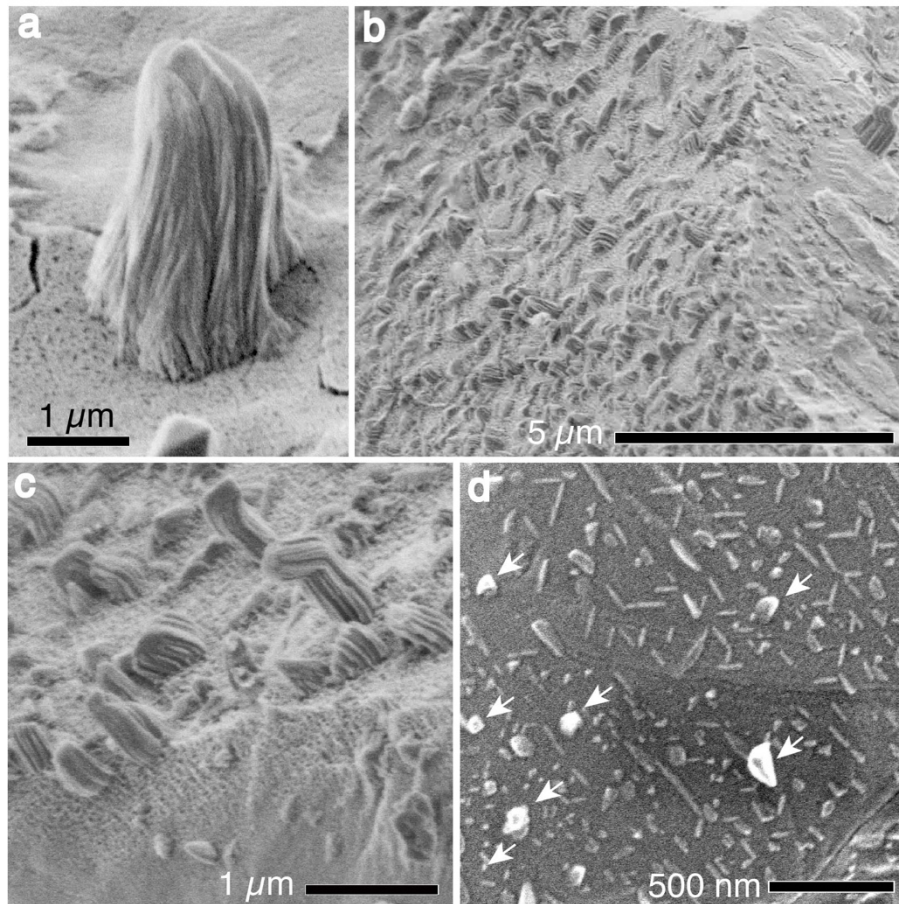


図 1 イトカワ粒子の硫化鉄表面の走査型電子顕微鏡画像。(a-c) 様々な倍率で撮影した金属鉄のひげ状結晶。束になって成長するため、縦に筋が見えます。(d) 真上から見た硫化鉄表面。ひげ状結晶を矢印で示しました。硫化鉄の特定の結晶方位に沿って伸びた板状の金属鉄が確認できます。

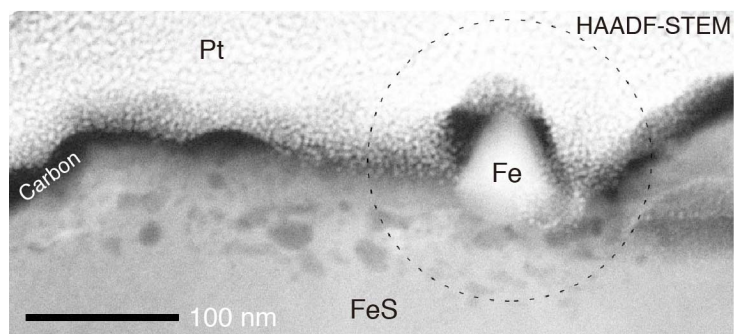


図 2 硫化鉄の断面の透過型電子顕微鏡の画像。切片の切り出し時に表面を守るため白金 (Pt) と炭素 (Carbon) の蒸着を行なっています。硫化鉄の表面下に存在する泡が、暗い斑点として確認できます。丸で囲んだ箇所に小さな金属鉄が成長しています。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2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 1件）

1. 著者名 Toru Matsumoto, Dennis Harries, Falko Langenhorst, Akira Miyake & Takaaki Noguchi	4. 巻 11.1
2. 論文標題 Iron whiskers on asteroid Itokawa indicate sulfide destruction by space weathering.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-020-14758-3	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 Matsumoto Toru, Noguchi Takaaki, Tobimatsu Yu, Harries Dennis, Langenhorst Falko, Miyake Akira, Hidaka Hiroshi	4. 巻 299
2. 論文標題 Space weathering of iron sulfides in the lunar surface environment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geochimica et Cosmochimica Acta	6. 最初と最後の頁 69 ~ 84
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.gca.2021.02.013	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2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Toru Matsumoto
2. 発表標題 SPACE WEATHERING OF IRON SULFIDE GRAINS FROM ASTEROID 25143 ITOKAWA
3. 学会等名 81st Annual Meeting of The Meteoritical Society 2018（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松本徹
2. 発表標題 小惑星イトカワのレゴリス粒子に見られる硫化鉄鉱物の宇宙風化組織
3. 学会等名 日本地球惑星連合大会2018年大会
4. 発表年 2018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
--	---------------------------	-----------------------	----

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 Annual Meeting of Meteoritical Society	開催年 2020年～2020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			
ドイツ		University Jena		