

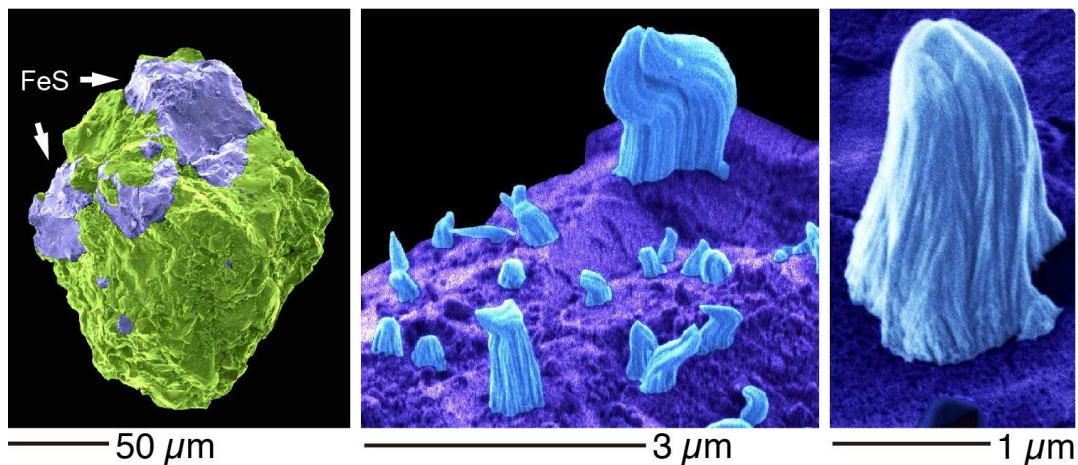
小惑星イトカワで発達した金属鉄のひげ状結晶を発見 -宇宙における鉄と硫黄の化学進化を知る鍵-

日本学術振興会特別研究員の松本徹研究員および九州大学基幹教育院野口高明教授、ドイツのイエナ大学の Harries 研究員と Langenhorst 教授、京都大学理学研究科の三宅准教授の研究グループは、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に、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発見しました。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) を分解させることで成長したと考えられます。この考察から、荷電粒子の照射が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ました。

硫化鉄は小惑星や彗星の物質に豊富に含まれますが、その天体表面での変化はよく分かっていませんでした。研究グループは、イトカワ微粒子に含まれる硫化鉄の表面を電子顕微鏡で観察し、金属鉄のひげ状結晶が硫化鉄表面に広く分布することを発見しました(図)。硫化鉄の表面は硫黄の量が少ないことから、太陽風の照射によって硫化鉄中の硫黄原子が選択的に失われ、鉄原子が過剰になった結果、金属鉄が成長したと推定しました。

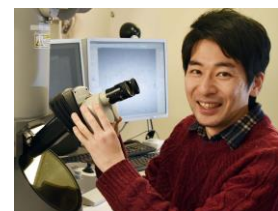
小惑星表面は硫黄に欠乏することが観測から示唆されており、本研究は硫黄の消失が実際に起きる証拠とその仕組みを初めて示しました。この成果は、小天体の形成史や、生命にとって重要な地球への硫黄の輸送量の理解につながると期待されます。一方、恒星の間の空間(星間空間)では、荷電粒子の照射が硫化鉄の塵を分解し、金属鉄と硫黄の分離を引き起こすと予想されてきました。本研究はこの仮説を強く支持し、太陽系の材料となった星間空間の硫黄と鉄の挙動に対する理解を前進させました。

研究成果は、「Nature Communications」(DOI: 10.1038/s41467-020-14758-3)に2020年2月28日付でオンライン公開されました。



(図) イトカワ微粒子の走査型電子顕微鏡写真。わかりやすさのため画像を着色しています。(左)分析したイトカワ粒子のひとつ。硫化鉄(紫色)とケイ酸塩(緑色)で構成されます。(中央)硫化鉄(紫色)表面の金属鉄のひげ状結晶(青色)。(右)ひげ状結晶の拡大図。

研究者からひとこと：
金属がひげ状に成長する仕組みは材料学的にも謎が多く、本研究をきっかけにさらなる分析が期待されます(松本)。



松本研究員

【論文の情報】

著者名: Toru Matsumoto, Dennis Harries, Falko Langenhorst, Akira Miyake, Takaaki Noguchi
論文表題: Iron whiskers on asteroid Itokawa indicate sulfide destruction by space weathering
掲載雑誌: Nature Communications
掲載年月: 2020年2月28日
DOI: 10.1038/s41467-020-14758-3

【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(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ています。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ました。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ました。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ます。小天体の硫黄の量を知ることは、小天体の集積や衝突を通じた初期地球への硫黄の輸送量を理解し、生命が誕生した環境を推定する上で重要です。

一方、荷電粒子が鉱物に及ぼす変化を調べることは、恒星の間の空間(星間空間)における荷電粒子に満ちた環境での化学進化を理解する上で重要です。星間空間は密度の濃い分子雲を経て新しい星が生まれる場所であり、星間空間から太陽系を含む惑星系に物質が供給されます。

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す。しかし、硫化鉄は存在量が少なく、わずかな観察例からは目立った変化が見られませんでした。一方、はやぶさの帰還カプセルからの微粒子の収集が進み、近年になり十分な数の粒子が分析可能になったことで、研究グループ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ました。

【分析手法】

10個の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て粒子表面の観察を行いました。その後、一部の粒子から電子線が透過可能な厚さ約100nmの薄い切片を切り出しました。そして、透過型電子顕微鏡を用いて切片の断面を見ることで、粒子の内部組織の観察を行いました。

【研究結果】

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りました(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ます。一方、硫化鉄の表面の一部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りました(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、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が起こり、硫黄原子がより多く失われて鉄原子が過剰になった結果、金属鉄が成長したと推定しました。調べた硫化鉄の組成はFe:S=1:1のため、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、小惑星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ました。

【議論と結論】

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す。それらの観察から、小惑星表面における硫黄の消失について物質科学的な証拠を初めて示しました。この成果は、小天体の形成史や地球への硫黄の輸送量の理解につながると期待されます。

一方で星間空間では、超新星爆発が生み出す衝撃波で加速された荷電粒子が硫化鉄の塵を分解することで、金属鉄が生まれ、硫黄は気体になると予想されています。本研究はこの仮説を強く支持する結果となりました。金属鉄は分子雲における化学反応の触媒になりえます。また、硫黄の気体はのちに有機物や氷、鉱物に取り込まれて太陽系の材料物質になると考えられています。したがって、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と予想されます。

硫化鉄は初期太陽系の物質に普遍的に含まれます。金属鉄のひげ状結晶などの硫化鉄の特徴は、はやぶさ2が持ち帰る予定の小惑星リュウグウの砂の分析において、小惑星表面の歴史を知る上で重要な手がかりになると期待されます。

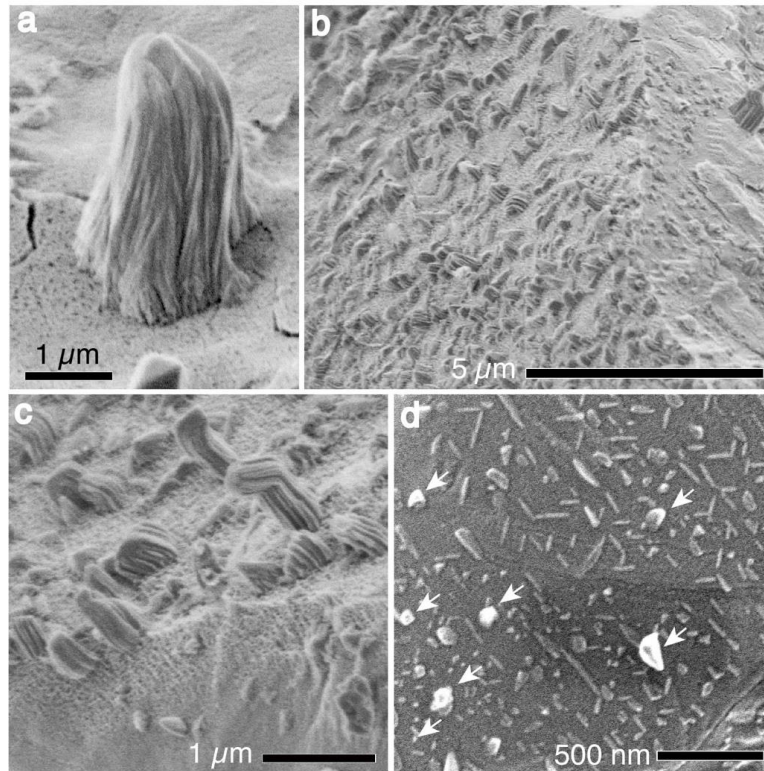


図 1 イトカワ粒子の硫化鉄表面の走査型電子顕微鏡画像。(a-c) 様々な倍率で撮影した金属鉄のひげ状結晶。束になって成長するため、縦に筋が見えます。(d) 真上から見た硫化鉄表面。ひげ状結晶を矢印で示しました。硫化鉄の特定の結晶方位に沿って伸びた板状の金属鉄が確認できます。

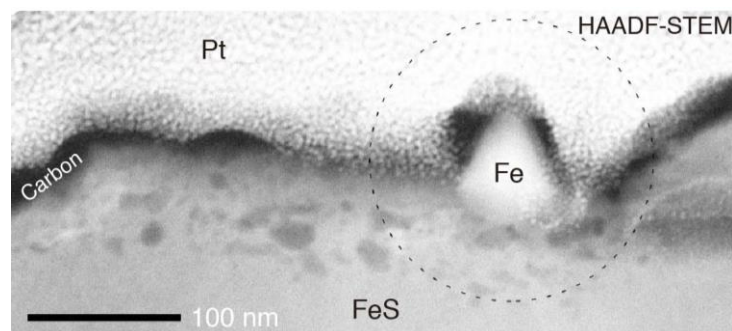


図 2 硫化鉄の断面の透過型電子顕微鏡の画像。切片の切り出し時に表面を守るため白金(Pt)と炭素(Carbon)の蒸着を行なっています。硫化鉄の表面下に存在する泡が、暗い斑点として確認できます。丸で囲んだ箇所に小さな金属鉄が成長しています。

【研究への支援】

本研究は、JSPS 研究拠点形成事業(惑星科学国際研究ネットワーク)、科学研究費助成事業(18J00579)、特別研究員奨励費(18K13610)の支援のもと行われました。

【問い合わせ】

＜研究に関すること＞

日本学術振興会特別研究員 PD 松本徹

TEL: +49 (0) 3641-948736

Mail: matsumoto.toru.502@m.kyushu-u.ac.jp,

基幹教育院 教授 野口高明

TEL: 092-802-6003 Mail: tnoguchi@artsci.kyushu-u.ac.jp

<報道に関すること>

九州大学広報室

TEL:092-802-2130 FAX: 092-802-2139

Mail:koho@jimv.kyushu-u.ac.jp

京都大学総務部広報課 国際広報室

TEL:075-753-5729 FAX:075-753-2094

Mail:comms@mail2.adm.kyoto-u.ac.jp