

● 松本 徹 特定助教

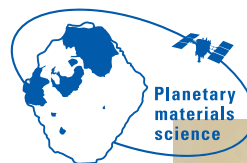
Toru MATSUMOTO (Assistant Professor)

研究課題：小惑星リュウグウとイトカワの試料から探る宇宙における固体の進化と変遷
(Understanding evolution of solids in space environments
by studying regolith samples from the asteroid Ryugu and Itokawa.)

専門分野：惑星物質科学、鉱物学 (planetary materials science, mineralogy)

受入先部局：理学研究科 (Graduate School of Science)

前職の機関名：九州大学 基幹教育院
(Faculty of Arts and Science, Kyushu University)



小惑星は太陽系形成時に形作られたため、初期太陽系の物質がそのままの状態が残っています。そのため、地球や生命の誕生に至る太陽系の歴史を知る上で重要な手がかりとなる天体です。宇宙探査機「はやぶさ」と「はやぶさ2」はそれぞれ小惑星イトカワと小惑星リュウグウを探索し、小惑星の砂を地球に持ち帰りました。私はこれまでに、小惑星イトカワの砂の表面が織りなすミクロな模様に注目して、水に乏しい乾いた天体であるイトカワの歴史や天体表層での物質進化を理解することを試みてきました。研究の結果、宇宙空間でのみ進行する結晶成長の存在も明らかになってきました。一方で、水や有機物に富むリュウグウ試料の分析が2021年から世界各地で開始されました。白眉プロジェクトでは、リュウグウ試料の研究を中心に、宇宙環境で変化する固体の多様性を探究したいと考えています。

Asteroids are leftover remnants of planet formation and important clues as to the origin and evolution of the early solar system. Japanese spacecrafts *Hayabusa* and *Hayabusa 2* explored asteroid Itokawa and asteroid Ryugu, respectively, and brought back surface materials on the asteroids. So far, I have studied surface micro-morphologies of mineral particles from Itokawa. I have focused on space weathering, which refers to the gradual alteration of minerals exposed to the space environment. I found wide-spread occurrence of iron metallic “whiskers” on Itokawa samples. They are unique crystals caused by unique crystal growth caused by space weathering on the airless surface. I expect that understanding space weathering on asteroids will provide insight into the evolution of solids in the interstellar environments, such as the production of interstellar iron metals. In 2021, initial analysis of Ryugu samples has been started. Ryugu is rich in organic materials and water. In this Hakubi project, I will examine Ryugu samples to understand the diversity of materials evolved under the space environments.

小惑星から太陽系の歴史を探る

宇宙では年老いた星の周りで固体の塵が形成され、星間空間を旅したのち、その一部が太陽系の材料となります。我々の太陽系の惑星は、約46億年前に太陽を取り巻いていたガスと塵が集積して形作られたと考えられています。こうした初期太陽系の歴史を知る手がかりとなる天体が小惑星です。小惑星は大きな天体になれずに取り残された惑星材料の残骸と言えます。その成分や成り立ちを調べることで、太陽系の出発物質や、地球や生命の誕生に至る太陽系の進化を理解することが期待されます。小惑星の構成物を天文観測に

よって推定する上での大きな障壁は、太陽風（太陽から吹き出す主に水素イオンの風）の照射や微小隕石の衝突によって宇宙環境に曝された鉱物に変化してしまうことです。この現象は「宇宙風化」と呼ばれています。宇宙風化は小天体表面の色や化学組成を変化させるため、観測から小惑星の成分を正確に判断することを難しくさせます。日本の宇宙探査機「はやぶさ」と「はやぶさ2」はそれぞれ小惑星イトカワと小惑星リュウグウを探索し、小惑星の砂を地球に持ち帰ることに世界で初めて成功しました。持ち帰った試料の分析によって、小惑星の構成物や進化史、表層での宇宙風化が解

き明かされつつあります。

結晶の表面模様が伝える小天体の歴史

10年前探査機はやぶさが持ち帰った小惑星イトカワの微粒子は、水に乏しくケイ酸塩や硫化鉄で構成されています。これらの特徴が普通コンドライトという隕石種と一致することから、小惑星は地球に飛来する隕石の故郷であることが証明されました。私は、これまでイトカワの微粒子の分析に従事し、その中で微粒子の表面構造に注目してきました（図1）。鉱物結晶の表面には、可視光の波長より小さい（ $<400\text{nm}$ ）大きさの模様が刻まれており、電子線を使った電子顕微鏡を用いることで多様な表面模様の姿を垣間見ることができます。イトカワ微粒子の表面模様には、現在のイトカワ（大きさ約500m）の約40倍程度の大きさをもつ母天体で作られた模様や、天体衝突によって岩が砕かれ砂が生まれた痕跡、太陽風を長時間浴びて形成した模様が見つかりました。私はこうした研究を通じて、砂の表面模様から小惑星が辿った一連の歴史を読み解く手法を発展させてきました。

イトカワ微粒子の硫化鉄（ FeS ：鉄と硫黄の化合物）の表面を観察したところ、ひげ状に伸びた金属鉄結晶が見つかりました（図2）。このひげ結晶は、硫化鉄から硫黄原子だけが選択的に失われたことで、過剰となった鉄原子によって生成したと推定しています。硫黄原子の消失の原因は太陽風の照射による原子の弾き出しや太陽風水素による還元反応が考えられます。イトカワと同種の小惑星では、表層の硫黄の存在度が低いことがNASAの宇宙探査で観測されており、その原因は20年以上の間未解明でした。ひげ結晶の発見は、宇宙風化によって天体表面から硫黄が実際に消失する証拠とその仕組みを初めて示しました。一方で、ひげ状に伸長した金属鉄の形態は地球外物質で未知であり、宇宙暴露環境でのみ進行する結晶成長の存在が明らかになりました。金属鉄は星間空間において様々な化学反応の触媒作用となります。イトカワ試料の研究は、星間空間でのイオン照射によって金属鉄が生成する機構の理解につながると期待しています。

小惑星リュウグウ試料の分析

2020年末、探査機はやぶさ2が小惑星リュウグウの砂を持ち帰りました。リュウグウはイトカワと違い水や有機物が豊富だと予想されており、生命や海の起源を知る上で重要な天体です。今後はイトカワ粒子の研究を発展させ、小惑星表面で進行する物質の多様な進化を解明したいと考えています。特にリュウグウで起きた、有機物など揮発性物質が関与した宇宙風化に注目します。この研究によってリュウグウの歴史を理解するとともに、宇宙環境で進化する様々な固体の姿を理解することを目指します。

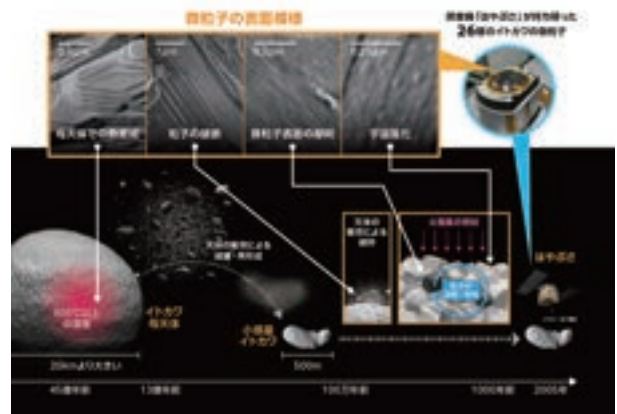


図1 小惑星イトカワの微粒子に見られた表面模様の電子顕微鏡像（©JAXA）。

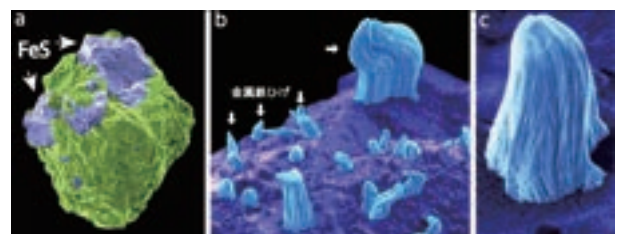


図2 小惑星イトカワの微粒子の電子顕微鏡像（擬似カラー）。硫化鉄結晶（ FeS ）の表面には、目には見えないサイズのひげ状金属鉄が発達している。小惑星の砂が数百年・千年程度のあいだ宇宙空間に曝されると「ひげ」が生えてくるようだ。

参考文献

- [1]Matsumoto et al. (2016) Space weathering of iron sulfides in the lunar surface environment. *Geochim. Cosmochim. Acta* **187**, 195-217.
- [2]Matsumoto et al. (2020) Iron whiskers on asteroid Itokawa indicate sulfide destruction by space weathering. *Nature Comm.* **11**: 1117.
- [3] 日経サイエンス編集部／坂本 尚義「はやぶさ微粒子が語る波乱の小惑星史」日経サイエンス 2016 年 10 月号。