

「微小隕石衝突・太陽風に曝された小天体表面における揮発性物質の振る舞い」

京都大学白眉センター 松本徹

小惑星や月などの大気のない小天体表面の固体は、太陽から飛来する荷電粒子(太陽風)や微小天体の衝突に直接曝されることになるため、地球の岩石とは異なる特有の変化を受ける。隕石衝突は結晶に熱的作用を及ぼす。一方、太陽風は鉱物結晶内部に 100nm 程度貫入し、結晶構造の変化や、スパッタリング(原子の弾き出し)を引き起こす。これらの一連の変化は、地上での岩石の風化と対応させて宇宙風化と呼ばれている。宇宙風化は、天体の光学特性や、岩石や砂が天体表面に滞在した年代、地質活動を知る指標になる。また、月面レゴリスにおける水の生成が宇宙風化によって引き起こされることなど、宇宙風化が天体表面の揮発性物質の分布や再配置に大きな影響を与える現象が近年わかってきた。本講演では、発表者の研究を中心に、小惑星イトカワ・リュウグウや月のレゴリス試料の研究から明らかにになりつつある小天体表面の鉱物の変化や揮発性物質の振る舞いについて紹介する。

イトカワにおけるレゴリスの活動, 微小衝突史の痕跡: アポロ試料やイトカワ粒子の研究から、宇宙風化を受けた鉄を含む無水の珪酸塩鉱物の表面ではナノメートルサイズの金属鉄の微粒子がこれらの層に析出し、この鉄微粒子はレイリー散乱によって可視-近赤外領域の反射スペクトルを変化させることが広く知られてきた。粒子のごく表面では、1000 年程度のタイムスケールで太陽風由来の水素やヘリウムガスが泡状組織として蓄積して膨らむ(ブリスター)。また、ブリスターは表面の顕著な形態変化として認識できる。そこでイトカワ粒子表面のブリスターの分布を調べたところ、個々のレゴリス粒子が宇宙風化を受けながら様々なレゴリスの活動(衝突・熱疲労破砕やかき混ぜ、摩耗)を経験していることがわかった[1]。

イトカワや月レゴリスの表面にはミクロンメートル以下の小さな衝突クレーターが見られる。イトカワ粒子の場合は直径 1 μm に満たないクレーターが大半である。イトカワ粒子表面の約 1000 個のクレーターのサイズ分布を計測したところ、その衝突頻度は惑星間塵のフラックスよりも高かった。この結果は、惑星間塵の 1 次的な衝突で飛び散った破片によって大半のクレーターが形成したことで説明され、レゴリスが多くの二次的な衝突に曝されていることが明らかになった[2]。

硫化鉄(FeS)表面における硫黄の消失とひげ結晶: 小惑星や月の表面では、硫黄の量や同位体組成が時間的に変化したことが推測されていた。そこで、イトカワ粒子の硫化鉄の表面を観察したところ、金属鉄がひげ状に伸長した結晶が見られた。その長さは 1-2 マイクロメートルであり、しばしば曲がっている。棘状の結晶はホイスカー: ひげ結晶と呼んでいる。金属鉄は bcc 構造をもつアルファ鉄であった。また、硫化鉄自体は多孔質の表面となっており、太陽風の打ち込みに特徴的な結晶構造の乱れが見られた。このような多孔質の構造は、硫化鉄内部に蓄積された太陽風水素と硫化鉄との化学反応($\text{H}_2 + \text{FeS} = \text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{S} + 2\text{e}^-$)や太陽風イオンが引き起こす原子のスパッタリングによって発達した可能性がある。金属鉄のひげ状結晶は、硫黄原子が太陽風

照射や隕石衝突時の加熱によって選択的に失われたことで、過剰な鉄原子から生成したと推測される。イトカワのような S 型の小惑星では硫黄の組成のみが隕石と比べて少ないことが蛍光 X 線によって観測されており、この特徴は 20 年以上謎であった。イトカワの硫化鉄の特徴は、宇宙風化によって選択的に硫黄が消失することを示しており、小惑星のごく表面では硫黄が欠乏する証拠を初めて与えた[3]。

一方で月レゴリスについても調べた結果、硫化鉄に同様のひげ状結晶を見出した。月面環境の場合、硫化鉄から解放された硫黄化合物の多くは月の重力圏を脱出できず、鉱物への吸着と脱離を繰り返して、一部は極低温の極域の永久影の領域にトラップされる可能性がある。それらが硫黄に富む極域氷の組成に寄与している可能性があることを提案した[4]。

硫黄のように揮発性が高い元素を含む鉱物は宇宙環境で特殊な変化が進行する可能性があり、水や有機物に富むリュウグウ試料での新しい発見が期待される。

[1] T. Matsumoto, et al., *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **187**, (2016) 195–217.

[2] T. Matsumoto, et al., *Icarus*, **303**, (2018) 22-33.

[3] T. Matsumoto, et al., *Nature Communications*, **11** (2020) 1-8.

[4] T. Matsumoto, et al., *Geochimica Cosmochimica Acta*, **299** (2021) 69-84.