

## 連携記事

# 大気のない天体表面で形成される金属鉄

## Metallic Iron Formed on the Surface of Airless Celestial Bodies

京都大学大学院理学研究科  
地球惑星科学専攻  
教授 野口高明  
Takaaki Noguchi

京都大学  
白眉センター  
特定助教 松本 徹  
Toru Matsumoto

### 1 はじめに

大気とは天体を取り巻く気体のことである。地球の標準大気圧は海拔0mで約 $10^5$  Paであり、約78%の窒素、約21%の酸素、および、それ以外の成分からなる。多くの酸素が大気中に含まれているため、赤鉄鉱 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ や磁鉄鉱 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ からなる鉄鉱石を溶鉱炉で溶解する際には、炭素で還元しないと金属鉄が得られないのはよくご存じの通りである。この地球の大気圏は薄いといっても地球からかなり遠くまで広がっている。高度約100 km以上離れると宇宙空間というが、実際には高度400 kmを飛行する国際宇宙ステーションの周囲にも $10^5$ から $10^7$  Paの非常に薄い大気が存在する<sup>1)</sup>。このような薄い超高層大気中には原子状酸素が存在し、宇宙船外に銀などを曝露すると腐食される<sup>2)</sup>。さらに地球から離れて惑星間空間に到るとそこは極超高真空( $10^{-14}$  Pa)<sup>3)</sup>の世界となる。

太陽系には、水星・金星・地球・火星・木星・土星・天王星・海王星という8つの惑星があることはご存じの方が多いだろう。8つの惑星の中では、水星には大気がほぼない。正確には $<5 \times 10^{-10}$  Paのごくわずかな大気は存在するが、ナトリウム、マグネシウム、酸素などが主な成分である<sup>4)</sup>。

水星と金星以外の惑星には、それらの周囲を回る衛星が存在している。地球の衛星はいうまでもなく月である。月やほとんどの衛星にも大気はない。月の場合 $3 \times 10^{-10}$  Pa程度というごくわずかなナトリウムやカリウムが主成分の大気しかなく<sup>5)</sup>、実質的には水星も月も大気はないといって良いであろう。例外は $1.5 \times 10^5$  Paの窒素大気を持つ土星の衛星タイタン<sup>6)</sup>と1.5から1.9 Paの窒素大気を持つトリトン<sup>7)</sup>である。

太陽系には、惑星や衛星以外にも、非常に沢山の小さな天体が存在する。それらは太陽系小天体とよばれ、代表的な天体が小惑星と彗星である。小惑星は最大でも直径1000 kmに届かず、ほとんどの小惑星は数十 km以下の大きさ<sup>8)</sup>しかなく、大気を持たない。

$10^{-7}$ から $10^{-10}$  Paという高真空でありほぼ大気がない(か

つ酸素もない) といってよい水星や月、あるいは、 $10^{-14}$  Paという超高真空の惑星間空間に直接曝露されている小惑星の表面では、3, 4章で述べるように2価や3価の鉄イオンを含む鉱物から金属鉄が形成される。2章では、大気のない天体表面で何がそのような変化を生じさせているかについて解説する。

### 2 大気のない天体表面では何が天体表面物質を変化させているか：宇宙風化の話

#### 2.1 太陽から流れ出すプラズマ流：太陽風

1において、惑星間空間は超高真空であると述べた。しかし、惑星間空間には何も物質がないのかというと、そうではない。太陽からは太陽風という低エネルギー(1核子当たり約1 keV)のプラズマ流が放出されており、この太陽風が惑星間空間に満ちている。太陽風の成分で最も多いのは陽子、次に多いのがヘリウムイオンで陽子の1/20程度である<sup>9)</sup>。ヘリウムよりも原子番号の大きい元素のイオンはさらに少ない。地球軌道周辺における太陽風の平均速度は約450 km<sup>s</sup><sup>-1</sup>であり、太陽風の荷電粒子の数密度はおおよそ $7 \times 10^6$  個m<sup>-3</sup>である<sup>10)</sup>。確かに太陽風の荷電粒子はこのようにごく希薄にしか存在しないのだが、太陽風を長期間照射されることで、大気のない天体表面に存在する物質の表面から数十から100 nmまでが変化するのである。具体的にどのような変化が起きるかについては、3章で説明する。なお、この深さを何が規制しているかということ、太陽風荷電粒子の持つエネルギーである<sup>11)</sup>。

#### 2.2 メテオロイド(流星体)

また、地球軌道付近の惑星間空間の場合、数個km<sup>-3</sup>ではあるが固体の微粒子(おおよそ200  $\mu\text{m}$ が最頻値とされる<sup>12)</sup>)も存在しており、メテオロイド(流星物質)という。メテオロ

イドの地球との平均的相対速度は約 $20\text{kms}^{-1}$ あり<sup>12)</sup>、これらが地球大気に衝突するといわれる流星となって発光する。なお、似た言葉に隕石という言葉がある。隕石は大気に衝突してきた物質が地表にまで到達した物体のことを言う。メテオロイドが大気のない天体に衝突する場合、メテオロイドを減速させる大気がないため超高速のまま衝突する。大気のない天体が惑星間空間に長期間曝露されるとこのメテオロイドの衝突の影響も表面物質に影響を与えることになる。主にこの2つの効果によって、長期間惑星間空間に曝露されていた大気のない天体表面が徐々に変化することを宇宙風化(space weathering)<sup>13)</sup>という。

### 2.3 その他の要素

このほか、太陽の表面で起きる太陽面爆発(太陽フレア)やそれに伴う太陽コロナ中のプラズマが大量に放出される現象(コロナ質量放出)では、太陽風と比べて3桁以上高エネルギーの荷電粒子線が放出される。この時に放出される粒子線のことを太陽宇宙線<sup>14)</sup>という。この太陽宇宙線や太陽系外を起源とする高エネルギーの荷電粒子線である銀河宇宙線、あるいは、太陽紫外線も大気のない天体表面物質を変化させるといわれているが、その効果の程度は明らかではない<sup>15)</sup>。

## 3 月における宇宙風化について

### 3.1 メテオロイド衝突によって形成されるサブ $\mu\text{m}$ サイズの金属鉄

次に、太陽風の照射とメテオロイド衝突によっておこる宇宙風化とはどのような現象であるかを、月を例にもう少し細かく見ていこう。図1は、1969年7月20日に月の静の海に着陸したアポロ11号の着陸船イーグル号に乗っていたオルドリントン飛行士の写真である。この写真の左下付近には、あたかも地球の土を踏んでいるかのように宇宙服の靴の足跡が多数写っているのがわかる。これは地球の土(土壌)の場合のように、岩石が風化浸食されて作られた砂や泥が更に土壌中の生物の影響で細かくなったものではなく、長期間にわたって大小のメテオロイドが衝突し続けることで月表層物質が粉砕されて作られたもの<sup>16)</sup>である。このようなメテオロイドの超高速衝突による粉砕効果というのは大気のない天体表面を変化させる重要な過程である。そして、月の表面を覆うこのような未固結の砂状の物質のことをレゴリス(regolith)<sup>16)</sup>とよび、特に細かな分画のことを、地球の地質学用語を借用してソイル(soil)<sup>16)</sup>とよぶこともある。

先に述べたように、メテオロイドは超高速で衝突してくるため、単に大気のない天体表面の物質を粉砕するだけではなく、衝突時に高温高圧を発生し、表面の物質を溶融させる。こ

のため、月のレゴリス中には岩石の破片が溶融し形成されたガラスと溶融していない岩石の破片が一体化してできたものが多量に含まれる。この物質のことを地球の火山学用語を借用してアグルチネイト(agglutinate)<sup>16)</sup>という。図2(a)にアグルチネイトの1粒子全体の走査電子顕微鏡像(二次電子像)の例を示す。滑らかな面は岩石がメテオロイドの衝突で融解した結果作られたガラスである。図2(b)は2(a)の四角で囲まれた部分の拡大像である。ネックレス状に連なっている輝点群がいくつもあることが分かる。これらは金属鉄である。このような金属鉄は、岩石が超真空真空中で融解した際に $\text{Fe}^{2+}$ イオンが還元されて金属鉄として結晶化したものである。

### 3.2 月における宇宙風化についての論争

月の表面がより長期にわたって惑星間空間に曝露されると変化が起きることが言い出されたのは今から70年ほど前で、アポロ計画で月に人類が着陸するよりも20年近く前のことである<sup>17)</sup>。Goldは、クレーターから伸びる光条(ray)という明るい筋が、地形学的に古いクレーターほど不明瞭になるのは、光条のところで露出している物質が段々と暗くなっているか、月の他の場所から暗い物質がもたらされたのではないかと述べている。その後、月の地形の詳しい観測から、惑星間空間により長期間曝露されている月の物質ほど、より暗くなる、すなわち反射能が低くなるだけでなく、より暗い場所が太陽光を反射する際に得られる反射スペクトルの特徴をより明るい場所のスペクトルと比べると、より暗いところでは、全体的に反射能が下がりつつも、短波長の可

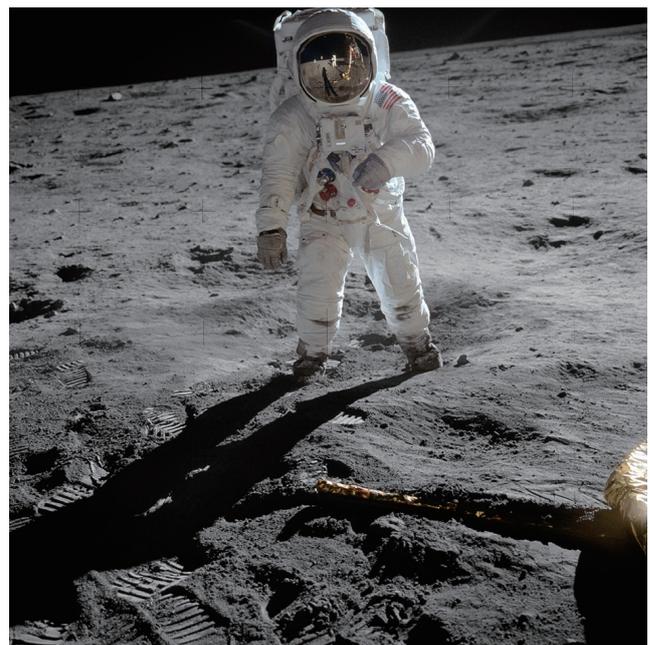


図1 アポロ11号のオルドリントン宇宙飛行士。月面に宇宙服の靴の足跡が沢山残っていることがわかる。Wikipediaより(Online version in color.)

視光の方が長波長の可視光よりも相対的に反射能が低くなることも分かった<sup>18)</sup>。これらの現象を暗化 (darkening) と赤化 (reddening) という。すなわち、月の宇宙風化における暗化と赤化の原因は何かということが論争となった。

アグルーチネイトのガラスが原因という説、度重なる粉碎と熔融を経験しているアグルーチネイトのほうが単位体積当たりの帯磁率が高く、図1にみられるような細かな金属鉄を多く含むと考えられることにもとづき、ガラス中の細かな金属鉄粒子が原因という説、太陽風照射による鉱物表層の非晶質化が原因という説、メテオロイド衝突によって非常に高温になった物質が蒸発し、物質が周囲に再凝縮した層中に形成されるナノメートルサイズの鉄が原因ではないかといった多くの説が提唱された<sup>19)</sup>。

1990年代後半に、レゴリス粒子表面に、大きさ数から100 nmの金属鉄が包埋された厚さ数百 nmの非晶質珪酸塩層が存在することが透過電子顕微鏡観察により明らかになった<sup>20)</sup>。非晶質珪酸塩層の化学組成はその直下の鉱物の化学組成と

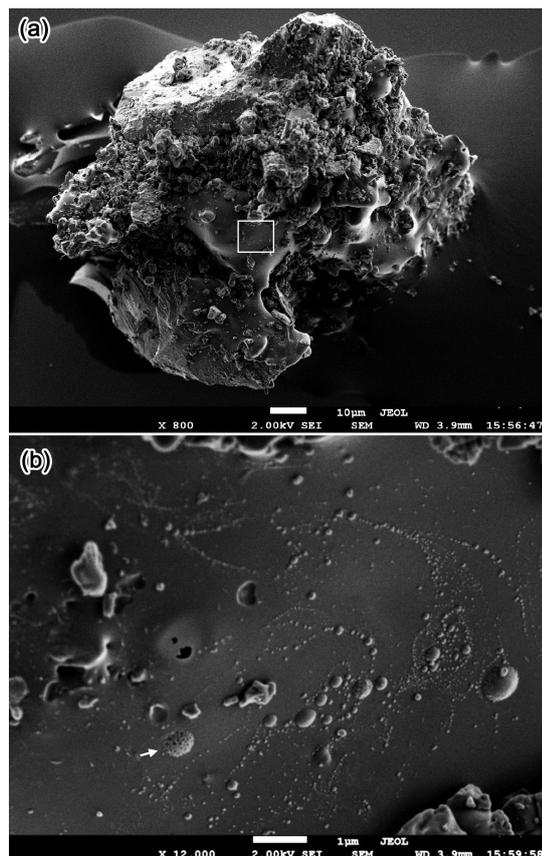


図2 アポロ17号の持ち帰った月のレゴリス粒子 (アグルーチネイト) の二次電子像。(a) 粒子の全体像。特に粒子中央付近は岩石が融けてできたガラスで覆われており、滑らかな表面をしている。(b) (a) の画像中央部の四角で囲まれた範囲の拡大像 (二次電子像)。滑らかなガラスの表面にネックレス状に直径0.1 μm以下から0.4 μmの輝点がいくつも並んでいる。これらは金属鉄である。岩石が融解した際に岩石中のFe<sup>2+</sup>イオンが還元されて金属鉄となったと考えられている。白い小さな矢印で示した直径約0.5 μmの物体は宇宙風化を受けた硫化鉄と考えられる

は無関係であることと、薄く一様に鉱物を覆っていることからメテオロイドの超高速衝突で蒸発した物質が再凝縮した物であると考えられた。特に、20 nmよりも小さな金属鉄超微粒子 (しばしばnanophase iron : npFe<sup>0</sup>とよばれる) を含む場合が典型的な再凝縮層とされる (図3)。理論的な研究によって、20 nm程度より小さな金属鉄超微粒子が透明な鉱物の内部に分布していると暗化と赤化を生じると考えられたため<sup>21)</sup>、月の宇宙風化といえは、npFe<sup>0</sup>を含有する再凝縮物層が典型であると考えられるようになった。

## 4 照射誘起偏析によって形成される金属鉄：小惑星イトカワと月

### 4.1 S型小惑星における宇宙風化

火星と木星の軌道の間を中心にして、110万以上の小惑星とよばれる小天体が存在している。その一部には地球の軌道と交差する軌道を持つ地球近傍小惑星とよばれる一群の小惑星がある。火星と木星の間にある大部分の小惑星のことをメインベルト小惑星という。地球近傍小惑星とメインベルト小惑星で火星に近い軌道を持つ物には、太陽光の反射スペクトル形状分類でS型小惑星とよばれる天体が最も多い。地球には隕石とよばれる大部分が小惑星起源と考えられる岩石が衝突してくる。それらの85%以上が普通コンドライトとよばれ

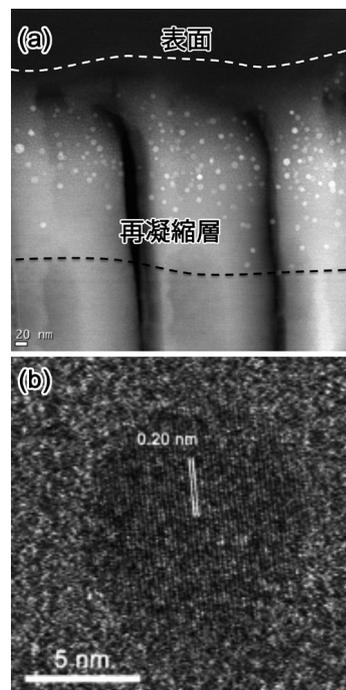


図3 アポロ15号の持ち帰ったレゴリス粒子表面に存在する再凝縮層中に存在する20 nm未満の金属鉄。(a) HAADF-STEM像。金属鉄が明るい輝点として表面付近にだけ存在することが分かる。なお、縦に入る2本の黒く縦に伸びている部分は超ミクロームで試料を切り出したことによる、試料の裂け目である。(b) 輝点の一つの高分解能像。α鉄の(110)面の格子縞が見える

る隕石である。

ところが、普通コンドライトを砕いてそれらの起源となる小惑星のレゴリスを模した物質を作り反射スペクトルを測定すると、S型の小惑星とは合わない。まるで、月の岩石を砕いて撮った反射スペクトルと、月のレゴリスの反射スペクトルを比較した場合と同様に、隕石の粉にわずかに金属鉄超微粒子を加えると暗化と赤化してS型小惑星のスペクトルが再現できるとされた<sup>22)</sup>。そのため、S型小惑星でも月と同様にメテオロイドの超高速衝突によって蒸発した物質が再凝縮し、再凝縮層中に金属鉄超微粒子が存在すると考える研究者が多かった。

#### 4.2 小惑星イトカワ試料から見出された金属鉄超微粒子

ところが、2010年に地球近傍S型小惑星イトカワから持ち帰られた試料を調べると、月のような再凝縮あるいはスパッタリングで周囲の鉱物からもたらされた物質が蒸着されている層の膜厚はせいぜい15 nmしかなく、また、金属鉄ではなく硫化鉄超微粒子が存在していた。また、その層の直下から50 nm程度の深さまでは鉱物の結晶構造が部分的に乱されており、特に構造が乱されているところに金属鉄超微粒子が存在することが明らかになった<sup>23-25)</sup>。表面から深さ約50 nm付近は特に構造が歪んでおり、太陽風起源の水素やヘリウムが最も蓄積しているところと考えられる。この部分には時に扁平楕円体状の微小な空隙が形成されていることがある。図4(a)は、このような微小な空隙のある照射損傷層のHAADF-STEM像である。照射損傷層中の2 nm程度の大きさの数多くの輝点は照射誘起偏析した金属鉄超微粒子である。図4(b)は、この空隙と周囲の高分解能像である。空隙の縁近くに金属鉄超微粒子の格子縞を見ることができる。照射損傷層といっても、空隙内部を除くと格子縞がよく見えることから分かるように、構造は乱れてはいるが十分に結晶度が良いことが分かる。こうした火ぶくれ状の膨らみは、粒子線照射によって形成されるプリスタリング（インプラントされたイオンが中性となりバブルとなって膨らみを作る現象<sup>26)</sup>）と同じ現象であると考えた。そして、小惑星イトカワにおける金属鉄超微粒子は鉱物中の $\text{Fe}^{2+}$ イオンが還元されて形成された照射誘起偏析物であると我々は主張した。しかし、太陽風照射では結晶は単に非晶質化するだけであり、このような偏析現象もプリスタリングも起き得ず、TEM試料加工時やTEM観察中に生じたアーティファクトであるという根強い批判が古くからの月試料の研究者から出されたりした。

#### 4.3 月試料から見出された金属鉄超微粒子

ところが、BorgesとStroudは、月試料中のイルメナイト $\text{FeTiO}_3$ 結晶からプリスタを発見しただけでなく、プリスタ中

にヘリウムガスが残存していることを示した<sup>26)</sup>。さらに、中国の嫦娥五号は月の海（地上から暗く見える部分）の一つである嵐の大洋に着陸し試料を地球に持ち帰った。持ち帰られた試料の宇宙風化はアメリカやソ連の月から持ち帰った試料よりも宇宙風化の程度が低く、イトカワの場合と同様に、鉱物中の $\text{Fe}^{2+}$ イオンが還元されて形成された照射誘起偏析物としての金属鉄超微粒子が存在することを明らかにした<sup>27,28)</sup>。

イトカワのような、 $\text{Fe}^{2+}$ を含む珪酸塩鉱物からの照射励起偏析による金属鉄超微粒子形成は、太陽風に曝露されている期間が比較的短い（おそらく数十万年以下）間は顕著である

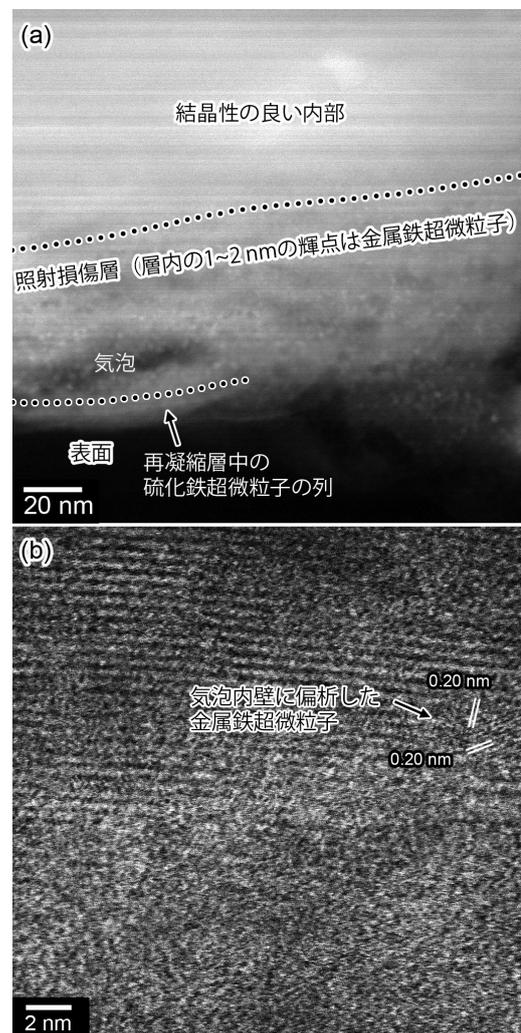


図4 はやぶさ初号機が持ち帰った小惑星リュウグウのかんらん石という鉱物表面付近の透過顕微鏡画像。(a) HAADF-STEM像。照射損傷内にある大きさ約2 nm程度の輝点は、照射励起偏析した金属鉄超微粒子である。照射損傷層中の明るさの「むら」は、照射損傷中に形成されている扁平楕円体状の空隙や、おそらく太陽風起源のガスがより集中して密度が下がっているところと考えられる。また、表面の一部には周囲からもたらされた物質が再凝縮して形成された10 nm程度の厚さの再凝縮層も見られる。その中には硫化鉄超微粒子の列も観察される。超マイクロトームで切り出した試料。(b) (a)の気泡の内壁の高分解能像。輝点に対応する $\alpha$ 鉄の(110)面の格子縞が見える。照射損傷層の鉱物の格子縞は空隙内では明瞭ではないがその周囲では明瞭であり、照射損傷層の結晶度は意外に良い

が、更に長期にわたって照射を受けると、ひとたび形成された金属鉄超微粒子も母相の鉱物も照射損傷が著しくなり、太陽風の撃ち込まれる深さまでの全てが非晶質化してしまうのではないかと我々は考えている。

さらに、金属鉄超微粒子の母相では逆に $\text{Fe}^{3+}$ イオンが増加するという現象がイトカワ、月の両方で報告されており<sup>29,30</sup>、太陽風中の電子のインプラントも含めて照射偏析反応を考えないと、照射損傷偏析は十分には理解できないのだと考えられる。これは今後の課題と言えよう。また、太陽風では、多量の陽子だけでなく多量の電子も照射される（プラズマ流全体としては中性である）ことから、太陽風により水素が大気のない天体表面に供給されているともいえる。このため、宇宙風化によってごく微量の $\text{H}_2\text{O}$ が形成する可能性がいわれてきたが、実際にアトムプローブトモグラフィ（APT）によってイトカワ粒子の最表面から $\text{H}_2\text{O}$ が検出されている<sup>31</sup>。このような効果も今後の宇宙風化研究では考慮すべき点であろう。

## 5 太陽風照射が硫化鉄と反応して形成される金属鉄ひげ状結晶

### 5.1 小惑星イトカワ試料から見出された金属鉄ひげ状結晶

今まで見てきたのは、 $\text{Fe}^{2+}$ イオンを含む珪酸塩鉱物や珪酸塩ガラスからの金属鉄の析出であった。硫化鉄は小惑星や彗星の物質に豊富に含まれるが、大気のない天体表面での硫化鉄の宇宙風化は全く研究されていなかった。イトカワ試料には硫化鉄（トロイライト FeS）が含まれている。硫化鉄の宇宙風化では珪酸塩とは全く異なる独特の機構で金属鉄が形成されることが我々の研究で明らかになった<sup>32</sup>。

我々はイトカワ粒子に含まれる硫化鉄の表面を走査電子顕微鏡で観察し、金属鉄ひげ状結晶が硫化鉄表面に広く分布す

ることを見出した（図5）。ひげ結晶は最大で3マイクロメートル程度の長さを持ち、硫化鉄表面の広い範囲を覆っていた。金属鉄ひげ結晶の微細な内部組織を観察するために、TEM分析を行った結果、金属鉄のひげ結晶が惑星間空間に曝露された硫化鉄表面に成長していることがわかった（図6）。

ひげ結晶が成長している硫化鉄表面は、太陽風の貫入深さ程度（約50 nm）までスポンジ状に変化し非常に多孔質に変化しており、本来FeとSが1:1のストイキオメトリが成立しているトロイライトの値と比べ、鉄に対して硫黄が少なくなっていた。このことから、イトカワ粒子の金属鉄のひげ結晶は、太陽風照射によって硫黄が失われた結果、過剰になった鉄原子から成長したと推測した。イトカワが属しているS型小惑星の表面は硫黄が欠乏することが観測から示唆されている<sup>33</sup>。我々の研究は、実際に硫黄の消失が起こる直接的証拠を示しただけでなく、その仕組みも初めて示したことになる。ひげ結晶の伸長の仕組みはまだよくわかっておらず、電子部品を短絡させることで知られるスズウィスカの成長と似て、昼夜の熱サイクルによる応力などが関係している可能性がある。宇宙空間における特殊な結晶成長を示唆する点でも、金属鉄ひげ状結晶は興味深い。

### 5.2 月試料から見出された金属鉄ひげ状結晶

月試料には、イトカワと比べてはるかに少ないが硫化鉄（トロイライト）が含まれていることが知られている。我々は、アポロ11号と17号が回収した月レゴリス試料も分析した。イトカワの物よりは一回り大きな金属鉄ひげ状結晶を発見した<sup>34</sup>（図7）。50年以上にわたる月のレゴリス粒子の研究の歴史があるにもかかわらず、今まででこのようなひげ状の金属鉄結晶は全く知られていなかった。

ひげ結晶は多数の細長い結晶から成り立っており、それぞれ

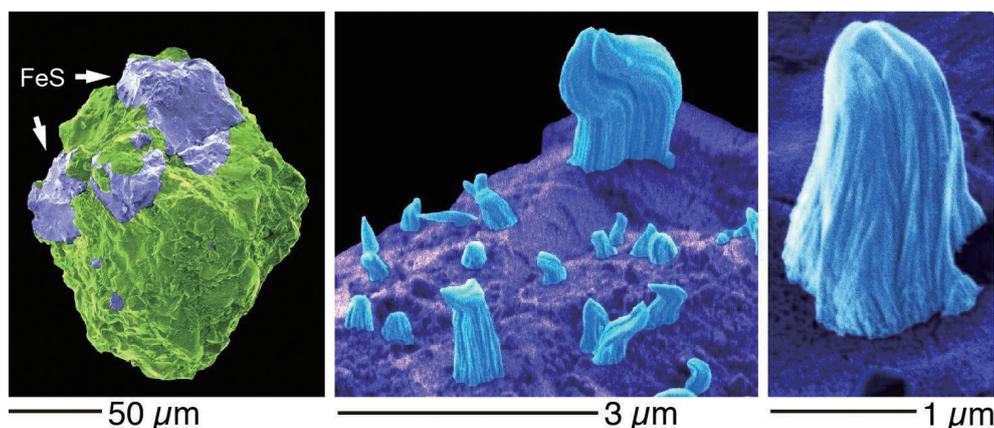


図5 イトカワ粒子の走査型電子顕微鏡写真。わかりやすさのため画像を着色している。(左) 分析したイトカワ粒子のひとつ。硫化鉄（紫色）と珪酸塩（緑色）で構成される。(中央) 硫化鉄（紫色）表面の金属鉄のひげ状結晶（青色）。(右) ひげ状結晶の拡大図 (Online version in color.)

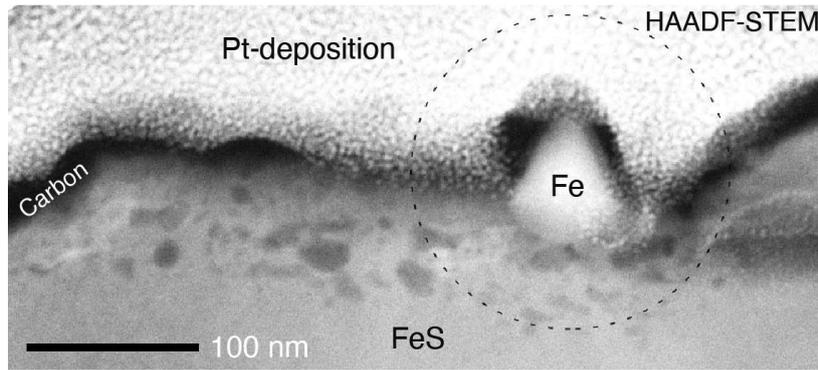


図6 硫化鉄の断面のHAADF-STEM像。試料の上面には、STEM観察用の切片作成時に表面を守るための白金と炭素で蒸着を行ってある。硫化鉄の表面下に存在する泡が、暗い斑点として確認できる。丸で囲んだ箇所小さな金属鉄が成長している

れの隣り合った結晶はある方位を共通にして、多孔質になった硫化鉄と接しているひげ結晶の根元から結晶が次々に生まれて、ひげ状金属鉄が成長したと考えられる。ひげ結晶は大きく湾曲してもそれぞれは単結晶であった。(これは我々を悩ませている点でもあり、逆に読者の皆様からのご指摘をいただければ幸いである)。

このように、惑星間空間に曝露されている硫化鉄があればひげ状金属鉄結晶の成長はほぼ間違いなく起きているであろう。これは、ひげ状金属鉄結晶が、天体表面の物質がどのくらい長期間惑星間空間に曝されているかを知る新たな指針となることを意味する。月のレゴリスの硫黄は月の岩石よりも重い同位体に富んでおり、硫化鉄から硫黄が失われることがその同位体異常の原因だと長い間予想されてきた<sup>19)</sup>。今回の発見はその予想を裏付ける初めての鉱物学的な証拠ともなる。硫化鉄から失われた硫黄の一部は月面の重力圏を脱出せずには月面の別の場所へ移動する可能性もあり、最終的には月の極域の氷中に捕まり月面氷の化学組成に影響する可能性があるだろう。

## 6 小惑星リュウグウの宇宙風化

最後に手短かに小惑星リュウグウにおける宇宙風化はどのようなであったかについて手短かに触れておきたい。小惑星リュウグウを作っている物質は、層状珪酸塩(いわゆる粘土鉱物の仲間である)、酸化鉄、硫化鉄、炭酸塩が主要な鉱物である。我々は、最も多量に含まれる層状珪酸塩鉱物と、酸化鉱物・硫化鉱物・炭酸塩鉱物の2つに分けて研究を行った。リュウグウではイトカワと比べて表面が溶融している試料の割合が数倍も高く、メテオロイド衝突の影響がイトカワのような無水鉱物からなる物質よりも容易に溶融しやすい事が分かった。これはリュウグウの粒子が数十%にまでなるミクロな空隙を持つため、熱伝導率が硬い鉱物よりも低くなり、メテオ

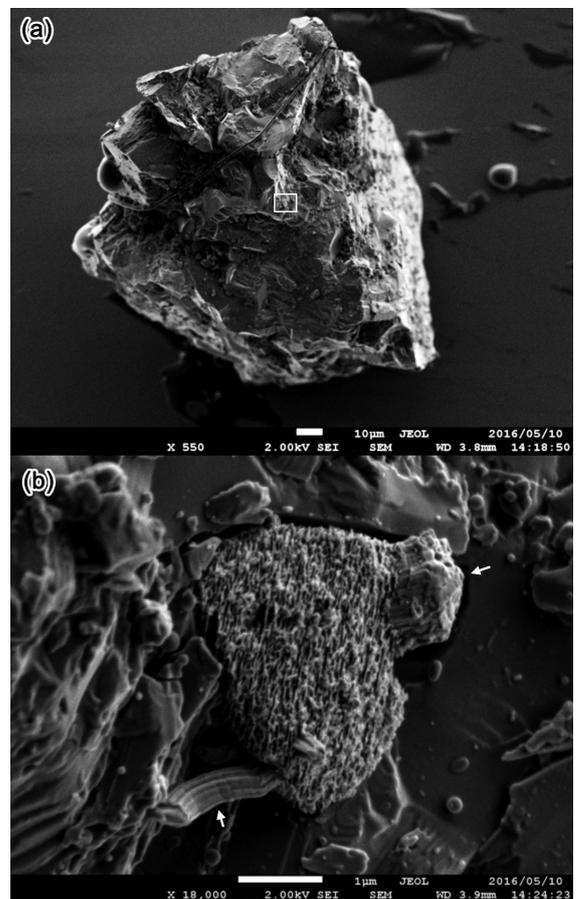


図7 アポロ17号の回収したレゴリス粒子。(a) 粒子全体の二次電子像。(b) (a)の四角で囲んだ領域の拡大像。画像中央部の表面が網目状に多孔質になっているのが宇宙風化を受けた硫化鉄である。硫化鉄の表面から鉄ひげ結晶が成長している(2カ所の白い矢印)

ロイド衝突によって砂粒同士が擦れ合うことで表面が溶融していると考えられる<sup>35)</sup>。層状珪酸塩鉱物が太陽風照射やメテオロイド高速衝突による加熱では、多くの $Fe^{3+}$ イオンを含む層状珪酸塩中が還元されて金属鉄が形成されるということはほとんどないことが分かった<sup>35)</sup>。しかし、硫化鉄が宇宙風化

を受けるとやはり金属鉄ひげ結晶が形成されていることが分かった<sup>36)</sup>。我々は、大気のない天体表面に硫化鉄があり、そこに太陽風照射されていれば、必ずや金属鉄ひげ結晶が存在すると予測していたので、この発見は我々にとってはもはや当然のことではあったが、予想通りであったことは非常に嬉しいものであった。

## 7 まとめ

本稿では、惑星間空間という非常に厳しい環境に置かれた大気のない天体の表面では $\text{Fe}^{2+}$ イオンが還元されて金属鉄が形成されるということについて解説した。表面を変化させる過程として、月の宇宙風化の研究ではメテオロイドの高速衝突が特別視されて研究が進んできた。しかし、我々の小惑星イトカワ試料の研究が契機となって、 $\text{Fe}^{2+}$ を含む珪酸塩鉱物への太陽風照射による照射励起偏析によって金属鉄超微粒子が形成されることが明らかになり、太陽風照射の宇宙風化における重要性が再認識されるようになっている。また、同じ太陽風照射であっても、 $\text{Fe}^{2+}$ を含む硫化鉄の場合は、硫化鉄から硫黄が失われつつ金属鉄ひげ結晶が成長するという、珪酸塩鉱物とは全く異なる機構で粗粒な金属鉄が形成される。このような宇宙風化による新しい金属鉄成長機構を発見し解明することができた。硫化鉄はイトカワだけでなく、月、さらにはリュウグウなどに広く分布しており、我々はそのどれからも金属鉄ひげ結晶を見出すことができた。特に、月試料については50年以上にわたって膨大な数の研究者が粒子表面を走査電子顕微鏡で観察してきたはずである。いかに先入観無く研究を行うことが難しいということもこの事実は示しているとも言えるだろう。

## 謝辞

まず、イトカワ、リュウグウの両小惑星から試料を回収してきたJAXAの関係者の方々に感謝する。本研究は、彼らの尽力によって小惑星試料が地球に持ち帰られたからこそ得られた成果である。また、イトカワ、リュウグウの研究は初期分析の間に行われた内容も多く、両方の初期分析チームとJAXAキュレーション施設の方々にも感謝したい。月試料の研究は、名古屋大学の日高洋教授、国立極地研究所の木村眞博士、九州大学の岡崎隆司准教授との共同研究であり、また、金属鉄ひげ結晶の研究は、ドイツ・イエナ大学のFalko Langenhorst教授とDennis Harries博士（現ルクセンブルク宇宙科学センター）との共同研究が不可欠であった。本研究は、科学研究費番号24244088, 17K18807, 19H00725, 19K0094, 21H05424, 18J00579, 18K13610を使用して得られた結果である。

## 参考文献

- 1) <http://www.braeunig.us/space/atmos.htm>
- 2) 木本雄吾, 宮崎英治, 石澤淳一郎, 嶋村宏之: J. Vac. Soc. Jpn., 52 (2009), 475.
- 3) Encyclopedia of Astrobiology, ed. by M.Gargaud, W.M.Irvine, R.Amils, H.J.Cleaves, D.P.Pinti, J.C.Quintanilla, D.Rouan, T.Spohn, S.Tirard and M.Viso, Elsevier, (2020).
- 4) <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/mercuryfact.html>
- 5) S.A.Stern: Rev. Geophys., 37 (1999), 453.
- 6) H.B.Niemann, S.K.Atreya, S.J.Bauer, G.R.Carignan, J.E.Demick, R.L.Frost, D.Gautier, J.A.Haberman, D.N.Harpold, D.M.Hunten, G.Israel, J.I.Lunine, W.T.Kasprzak, T.C.Owen, M.Paulkovich, F.Raulin, E.Raaen and S.H.Way: Nature, 438 (2005), 779.
- 7) A.P.Ingersoll: Nature, 344 (1990), 315.
- 8) W.F.Bottke, Jr., D.D.Durda, D.Nesvorný, R.Jedicke, A.Morbidelli, D.Vokrouhlický and H.Levison: Icarus, 175 (2005), 111.
- 9) U.Feldman, E.Landi and N.A.Schwadon: J. Geophys. Res., 110 (2005), A07109.
- 10) Introduction to Space Physics, ed. by M.G.Kivelson and C.T.Russell, Cambridge University Press, (1995).
- 11) W.M.Farrell, D.M.Hurley and M.I.Zimmerman: Icarus, 225 (2015), 116.
- 12) S.G.Love and D.E.Brownlee: Science, 262 (1994), 550.
- 13) B.Hapke: J. Geophys. Res., 106 (2001), 16833.
- 14) L.I.Dorman and D.Venkatesan: Space Sci. Rev., 64 (1993), 183.
- 15) C.J.Bennett, C.Pirim and T.M.Orlando: Chem. Rev., 113 (2013), 9086.
- 16) Lunar Source Book, ed. by G.H.Heiken, D.T.Vaniman and B.M.French, Cambridge University Press, (1991).
- 17) T.Gold: Mon. Not. Royal Astron. Soc., 115 (1956).
- 18) B.E.Clark, B.Hapke, C.Pieters and D.Britt: In Meteorite and the Early Solar System II, ed. by D.S.Lauretta, H.Y.McSween and R.P.Binzel, University of Arizona Press, (2006).
- 19) New View of the Moon, Rev. Mineral. Geochem., ed. by B.L.Jolliff, M.A.Wieczorek, C.K.Shearer and C.R.Neal, Mineralogical Society of America and Geochemical Society, 60 (2006).
- 20) L.P.Keller and D.S.McKay: Geochim. Cosmochim. Acta,

- 61 (1997), 2331.
- 21) B.Hapke : Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy, Cambridge University Press, (2012).
- 22) R.P.Binzel, D.F.Lupishko, M.Di Martino, R.J.Whiteley and G.J.Hahn : in Asteroids III, ed. by W.F.Bottke Jr., A.Cellino, P.Paolicchi and R.P.Binzel, University of Arizona Press, (2002), 255.
- 23) T.Noguchi, T.Nakamura, M.Kimura, M.E.Zolensky, M.Tanaka, T.Hashimoto, M.Konno, A.Nakato, T.Ogami, A.Fujimura, M.Abe, T.Yada, T.Mukai, M.Ueno, T.Okada, K.Shirai, Y.Ishibashi and R.Okazaki : Science, 333 (2011), 1121.
- 24) T.Noguchi, M.Kimura, T.Hashimoto, K.Konno, T.Nakamura, M.E.Zolensky, R.Okazaki, M.Tanaka, A.Tsuchiyama, A.Nakato, T.Ogami, H.Ishida, R.Sagae, S.Tsujimoto, T.Matsumoto, J.Matsuno, A.Fujimura, M.Abe, T.Yada, T.Mukai, M.Ueno, T.Okada, K.Shirai and Y.Ishibashi : Meteoritics Planet. Sci., 49 (2014) 185.
- 25) T.Matsumoto, A.Tsuchiyama, A.Miyake, T.Noguchi, T.Nakamura, K.Uesugi, A.Takeuchi, Y.Suzuki, Y.and T.Nakano : Icarus, 257 (2015), 230.
- 26) K.D.Burges and R.Stroud : Geochim. Cosmochim. Acta, 224 (2018), 64.
- 27) L.Gu, Y.Chen, Y.Xu, X.Tang, Y.Lin, T.Noguchi and J.Li : Geophys. Res. Lett., 49 (2022), e2022GL097875.
- 28) Z.Guo, C.Li, Y.Li, Y.Wen, K.Tai, X.Li, J.Liu and Z.Ouyang : Geophys. Res. Lett., 49 (2022), e2021GL097323.
- 29) L.Hicks, J.C.Bridges, T.Noguchi, A.Miyake, J.D.Piercy and S.H.Baker : Meteorit. Planet. Sci., 55 (2020), 2599.
- 30) H.Xian, J.Zhu, Y.Yang, S.Li, X.Lin, J.Xi, J.Xing, X.Wu, H.Yang, Q.Zhou, A.Tsuchiyama, H.He and Y-G.Xu : Nat. Astron., 7 (2023), 280.
- 31) L.Daly, M.R.Lee, L.J.Hallis, H.A.Ishii, J.P.Bradley, P.A.Bland, D.W.Saxey, D.Fougerouse, W.D.A.Rickard, L.V.Forman, N.E.Timms, F.Jourdan, S.M.Reddy, T.Salge, Z.Quadir, E.V.Christou, M.A.Cox, J.A.Aguiar, K.Hattar, A.Monterrosa, L.P.Keller, R.Christoffersen, C.A.Dukes, M.J.Loeffler and M.S.Thompson : Nat. Astron., 5 (2021), 1275.
- 32) T.Matsumoto, D.Harries, F.Langenhorst, A.Miyake and T.Noguchi : Nat. Comm., 11 (2020), 1117.
- 33) T.J.McCoy, 他16名 : Meteorit. Planet. Sci., 36 (2001), 1661.
- 34) T.Matsumoto, T.Noguchi, Y.Tobimatsu, D.Harries, F.Langenhorst, A.Miyake and H.Hidaka : Geochim. Cosmochim. Acta, 299 (2021), 69.
- 35) T.Noguchi and T.Matsumoto, 他138名 : Nat. Astron., 7 (2023), 170.
- 36) T.Matsumoto, T.Noguchi, 他138名 : Nat. Astron., accepted.

(2023年5月31日受付)