

## 月表層の宇宙風化

野口高明（九州大学・基幹教育院）

### 1. イントロダクション

月の表面は未固結の物質で覆われている。この未固結の物質のことをレゴリスという（粒径 1 cm 未満のレゴリス物質のことをソイルと呼ぶこともある）。月形成から今日に至るまで絶え間なく月に衝突している様々な大きさの隕石によって、月表面の物質は粉砕され続けている。レゴリス層の厚さは、月の海で 4-5 m、月の高地で 10-15 m であり、 $1.5 \text{ mm}/10^6 \text{ yr}$  の割合でレゴリス層の厚さは増加しているとされている（Taylor, 1982）。大きさ 10 nm から 1 cm の隕石（正確にはメテオロイド）は  $10^6 \text{ kg/yr}$  も月に衝突している（Grün et al., 2011）。それらは、10 から 72 km/s という高速で衝突してくるため、表面物質を粉砕するだけでなく、隕石の衝突地点は高温になり、レゴリスの構成物を熔融・蒸発させる。隕石の衝突によって、レゴリス層の物質はエジェクタとして水平方向には移動するが、月からエジェクタが失われることはほぼ無視できる。

大気のない天体である月の表面は、今述べたように隕石の高速衝突に曝されているだけでなく、太陽風（ $\sim \text{keV/nucleon}$ ）・太陽宇宙線（ $\sim \text{MeV/nucleon}$ ）・銀河宇宙線（数百  $\text{MeV-GeV/nucleon}$ ）といった様々なエネルギーを持った荷電粒子にも曝されている。このように、月レゴリスは惑星間空間の環境との相互作用を長期に渡って記録していると考えられ、太陽活動の長期モニタリングにも利用できると考えられる。また、将来は月基地の材料にもなる可能性や、月基地で利用するための水の探査、核融合発電に必要な  $^3\text{He}$  の資源としても月レゴリスは重要である。なお、本研究は、日高洋（名大）、岡崎隆司（九大）両氏や大学院生との共同研究である。

### 2. 月レゴリスの反射スペクトルの変化とその原因の探求

月レゴリスの構成物質は、大まかに分けると、既に存在していた岩石が砕かれて形成された岩片・鉱物片、アグルーチネイト、ガラススフェールからなる。アグルーチネイトとは、隕石の衝突によって局所的に岩石が融解し形成されたメルトが熔融していない岩片・鉱物片を取り込んで固化した物質である。また、ガラススフェールは、メルトの衝突エジェクタあるいは爆発的噴火によって形成されたメルトのしぶきである。これらのうち、初めの 3 者で大部分を占める。

月レゴリスの反射スペクトルと、月の岩石を粉砕して細かくした物質の反射スペクトルを比較すると、大きな違いがある。岩石を粉砕したものでは、約  $0.9 \mu\text{m}$  と約  $1.9 \mu\text{m}$  付近を中心とした 2 つの顕著な吸収帯が見られる。これらは、輝石やカンラン石中の  $\text{Fe}^{2+}$  の配位子

場効果による吸収帯である。レゴリスでは、この吸収帯の著しい減衰、反射能の全体的な低下（暗化）、長波長側の反射能の相対的増加（赤化）が見られる。このような反射スペクトルの変化とそれらを引き起こした原因のことを宇宙風化と呼ぶ。可視から近赤外域の反射スペクトルの変化は、これらの波長程度、レゴリス物質の表面付近が変化することに起因すると考えられる。レゴリスには、アグルーチネイトが多く含まれることが、単なる粉碎物との違いであるため、そのガラスがスペクトルの変化の原因ではないかと考えられたこともあったが、アグルーチネイトのガラスは、吸収帯の著しい減衰とスペクトルの暗化を起こすがスペクトルの赤化を起こせないことが明らかになった（Lucey et al., 2006）。

スペクトルがより変化したレゴリス（熟成度 *maturity* が高いという）は、より強磁性共鳴の強度が大きく、単磁区からなるような微細な金属鉄を多く含むと考えられる（McKay et al., 1991）。また、レゴリスを構成粒子のサイズにより分級して測定すると、より細粒のフラクションほど、スペクトル変化と強磁性共鳴強度が共に大きい（Lucey et al., 2006）。これらのことから、微細な金属鉄がスペクトルの赤化を担っていると考えられるようになった。Hapke (1975)は、反射スペクトルの赤化は、半透明媒体中に分散する nm スケールの散乱体の影響であることを述べていたが、これが赤化の標準モデルとなった。Keller and McKay (1997)は、Keller and McKay (1993)において発見したレゴリス粒子の表面の再凝縮層（微小隕石の衝突によって蒸発した物質が蒸着された、基盤の鉱物には含まれない元素を含む薄層）中に数-100 nm 径の微細な金属鉄（nanophase Fe<sup>0</sup>）が多数含まれることを透過電子顕微鏡（TEM）を用いて見出した。これらの研究により、微小隕石の衝突加熱によって蒸発した物質が周囲のレゴリス粒子表面に再凝縮され、その層に含まれる Fe<sup>2+</sup>が還元されることで形成された nanophase Fe<sup>0</sup> が月の宇宙風化＝反射スペクトルの変化の原因であることが明らかになった。

### 3. 宇宙風化をレゴリス粒子の表面変化として捉え直す

前章で述べたように、月レゴリスのスペクトル変化が微小隕石の衝突加熱に伴う現象であることが明らかになった。しかし、イントロダクションで述べたように、スペクトル変化を引き起こさない表面の変化は荷電粒子の照射損傷でも生じる。月レゴリス粒子表面で起きていること全般を研究することは、大気の無い天体表面と惑星間空間環境との相互作用をより良く理解することにつながるであろう。以下、宇宙風化という言葉の意味を拡大し、大気の無い天体表面と惑星間空間環境との相互作用という意味で用いる。

レゴリス粒子表面形状の走査電子顕微鏡（SEM）観察は、アポロ計画で月試料が持ち帰られて直ぐに始められ、様々な形状の付着物（メルトスプラッシュやガラススフェールなど）や直径 10 $\mu$ m 程度のマイクロレーター、アグルーチネイトガラス表面の数から数十

$\mu\text{m}$  の金属鉄などが報告されている (McKay et al., 1991 参照)。しかし、これらの研究は高分解能の SEM が開発される以前の研究であり、先に述べたような再凝縮層を同定することはできていない。小惑星イトカワから持ち帰られた微粒子を高分解能で観察できる Field emission (FE) SEM で観察することによって、月試料で観察されていたものよりもかなり小さなマイクロクレーターが見出された (Nakamura et al., 2012)。また、イトカワ粒子の TEM 観察によって、イトカワ粒子の表面には微細な火ぶくれ状の膨らみであるブリスタが存在することが Noguchi et al. (2014) によって示唆され、FE SEM 観察によってブリスタがイトカワ粒子の表面にかなり普遍的に存在することが明らかになった (Matsumoto et al., 2015)。ブリスタは初めて Assonov et al. (1994) によって月レゴリスで指摘されたが、大した根拠なしに観察時の artifact だとされ、無視されていた。これらの研究から明らかなように、月レゴリス粒子も FE SEM によって表面観察をし直すことは重要である。著者と共同研究者達は、FE SEM で多くのレゴリス粒子の表面を観察し、特徴的な組織を検討し直すと共に、太陽風・太陽宇宙線・銀河宇宙線の照射についても分析し、両者を比較検討している。

#### 4. 我々の研究の紹介とその目指すもの

FE SEM による観察結果にもとづいて、TEM で表面付近の断面を観察し、1990 年代の TEM による研究結果の再評価を行っている。従来の月レゴリス粒子の研究では、多数のレゴリス粒子を樹脂に包埋・研磨し、電子線マイクロプローブ (EPMA) の元素マッピングによって、微小隕石の衝突によって蒸発した物質の再凝縮 (実際には Fe の濃集層) が普遍的に観察されるとされている (Lucey et al., 2006)。しかしながら、たかだか 100nm の厚さの蒸着層に分散して存在する nanophase Fe<sup>0</sup> が EPMA の元素マッピングで検出できるほど濃集しているのかは、検討し直す必要がある。我々の FE SEM での観察では、レゴリス粒子の表面で厚いガラスに覆われていない部分では、太陽風による照射損傷組織が粒子表面に観察され、nanophase Fe<sup>0</sup> を含む非晶質再凝縮層は今のところ見出されていない。一方、メルト (現在はガラス) 層の表面付近に nanophase Fe<sup>0</sup> が存在する場合がある。現状からも、従来の研究におけるミクروسケールとナノスケールの組織の対応は十分ではないことが示唆される。これらの対応関係を明らかにして、nanophase Fe<sup>0</sup> を含む層の形成機構を再検討につなげたいと考えている。

太陽風による照射損傷によって形成される層は、月レゴリスの場合は非晶質層であるといわれている (Keller and McKay, 1997)。一方、イトカワの微粒子の場合では、部分的な非晶質化である (Noguchi et al., 2011; 2014)。Noguchi et al. (2011; 2014) では、照射期間が短いため、完全に非晶質化に至っていないのだろうと述べたが、イトカワが過去にもっと太陽に近づくなどして再結晶を起こしたのではないかという説もある (Langenhorst et al., 2014)。

月レゴリス粒子の場合、鉱物片としては斜長石が多い。イトカワ粒子でも斜長石は照射損傷によって非晶質化している。また、月レゴリスでも高Ca輝石では、イトカワ粒子と同様に部分的に照射損傷を受けている層は厚い。このように、鉱物の構造の違いも考慮に入れて、検討し直すことで、月レゴリスとイトカワ微粒子の見かけの違いを解消することができると考えられる。

太陽風による照射損傷を受けたレゴリス粒子は、よりダルな辺や角を持つ。ダルな辺や角を持つ場合は、ブリスタが存在する場合が多い。そして、ダルな辺や角を持つレゴリス粒子の方がシャープな辺や角を持つものよりも、太陽風起源の希ガスをより多く含む傾向がある。月レゴリス粒子は、レゴリスガーデニングによって月の表面とやや内部を行き来しているだけでなく、衝撃による加熱も複数回受けていると予想されるが、大まかには形状・照射損傷の程度・太陽風の照射量に相関があることを示している。

レゴリス粒子表面には、さまざまな衝突の組織が見られる。顕著な組織は、液滴が潰れたような形状を持つメルトスプラッシュ、非常に薄く広く広がってはいるが衝突してきた方向が推測できるメルト薄層、マイクロクレーターである。特に二番目に述べたメルト薄層は、従来、再凝縮層と考えられてきた層と同じように薄いことから両者は同じものである可能性がある。それ以外にも、イトカワ微粒子の表面に存在するものと共通の特異な組織が月レゴリス粒子にも存在する。月とイトカワでは天体のサイズが極端に異なるにも関わらず、共通に起きる物理過程もあるということの意味する。

ポスト・はやぶさの時代では、研究できる大気のない天体試料が2種類になった。惑星間空間環境と大気のない天体表面の相互作用について、天体のサイズ、日心距離の違い、表面物質の違いによって、宇宙風化にどのような違いが生じるか、また、共通性があるかを、実例にもとづいて解釈ができるようになることを我々は目標として、研究を行っている。

文献 Assonov et al. (1991) 29th Lunar Planet. Sci. Conf. abstract #1635.; Grün et al. (2011) Planet. Space Sci. 59, 1672-1680.; Hapke (1975) The Moon 13, 339-353.; Keller and McKay (1997) Geochim. Cosmochim. Acta 61, 2331-2340.; Keller and McKay (1993) Science 261, 1305-1307.; Langenhorst et al. (2014) Earth Planet. Space 66, 118 (8).; Lucey et al. (2006) in Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 60, 83-219.; Matsumoto et al. (2015) Icarus 257, 230-238.; McKay et al. (1991) in Lunar Source Book, 285-356.; Noguchi et al. (2011) Science 333, 1121-1125.; Noguchi et al. (2014) Meteorit. Planet. Sci. 49, 185-214.; Nakamura et al. (2012) Proc. Nat. Acad. Sci. 109, 4031-4032.; Taylor (1982) Planetary Science: A Lunar Perspective.