

## 宇宙風化作用シミュレーション実験試料の透過型電子顕微鏡を用いた観察

## Laboratory simulation of space weathering: Formation of nanophase particles and the microscopic study

# 中村 圭子[1], 佐々木 晶[2], 濱邊 好美[2], 倉橋 映里香[3], 廣井 孝弘[4]

# Keiko Nakamura[1], Sho Sasaki[2], Yoshimi Hamabe[3], Erika Kurahashi[4], Takahiro Hiroi[5]

[1] 神大・理・地球惑星, [2] 東大・理・地球惑星, [3] 東大・理・地惑, [4] ブラウン大地学

[1] Earth and Planetary Sci., Kobe Univ, [2] Earth and Planetary Sci., Univ. Tokyo, [3] Earth and Planetary Sci., Univ. of Tokyo, [4] Earth and Planetary Sci. Univ. of Tokyo, [5] Dept. Geological Sci., Brown Univ.

宇宙風化作用シミュレーション実験試料の透過型電子顕微鏡観察結果を報告する。ダスト衝突を模擬したレーザー照射が鉱物表層部数百 nm を瞬時に加熱し、蒸発・再凝縮した結果、多数の微小鉄粒子を含むアモルファスリムが形成していた。小惑星表層部には微小鉄粒子が存在しているであろうことは理論的に予言されていたが、今回の観察で実験物質の光学的変化がその微小鉄粒子に起因することが確認できた。これらの微小鉄粒子は形状・サイズともに月試料中のものと酷似している。パルスレーザーを用いた宇宙風化作用シミュレーション実験が光学的、鉱物・結晶学的にも小惑星（あるいは月）のレゴリス表層部を模擬するに大変有効である。

宇宙風化作用 小惑星と隕石の反射スペクトルの間には、多くの場合構成鉱物を反映した対応関係があり、隕石の母天体が論じられている。しかし、隕石の中でも最も多く発見されている普通コンドライトとそれに対応すると考えられている S 型小惑星のスペクトルは実際にはほとんど一致しない。これはレゴリスで覆われた小惑星表面が微小隕石衝突や太陽風といった「宇宙風化作用」によって光学的に徐々に変化しているためと考えられている。Hapke(1975)は、反射率の低下やスペクトルの赤化、吸収帯の弱化といった光学的変化は、小惑星の表層部数百  $\mu\text{m}$  に形成されている微小鉄粒子を含むリムに起因すると理論的に提唱した。Keller & McKay(1993,1997)は実際にアポロ月面表土試料から微小鉄粒子を含むリムを発見している。

宇宙風化作用模擬実験 Yamada ら(1999)は小惑星（または月）表層部への微小ダスト衝突をパルスレーザーにより再現する宇宙風化作用シミュレーション実験を行った。惑星構成鉱物であるカンラン石と輝石のそれぞれを小惑星表土の粒子径に相当すると考えられる  $75\mu\text{m}$  以下に粉碎して押し固めたペレットを真空チェンバー内に装填し、ダスト衝突現象に相当する 6-8ns のパルスレーザー（波長 1064nm、エネルギー 30mJ）を当てた。それらの実験試料の反射スペクトル測定では反射率の赤化が確認されている。また Hiroi & Sasaki(1999,2001)はこれらの実験試料の反射スペクトルを計算的に混合したスペクトルが、S 型 R 型それぞれの小惑星のスペクトルを非常によく再現するという結果を得ている。

観察手法 今回我々はこの実験試料の光学的変化の原因を探るために、高分解能透過型電子顕微鏡 (HRTEM) を用いて観察を行った。TEM に取り付けられているエネルギー分散型 X 線分光器 (EDX) は、実験的に k-因子を確立して定量分析が可能である。パルスレーザーを照射した試料から色の变化している粒子をピックアップしてエポキシに埋め込み、ミクロトームを用いて厚さ 70nm 以下の超薄膜片に切削し、TEM 用試料とした。

観察結果及び考察 30mJ のパルスレーザーを 5 回照射したカンラン石試料の表層付近では、TEM 暗視野像で強度のコントラスト変化が観察された。これはレーザー照射による加熱のため結晶の転位が起こっているためと考えられる。試料表層部 200nm ほどにはアモルファスのリムが形成されていた(図 1 参照)。このアモルファスリムの数箇所を EDX 分析して平均をとった組成 (atom%) を以下に示す。O 59.05 (57.07), Si 18.10 (14.08), Mg 20.60 (25.05), Fe 2.25 (3.80) (注: 括弧内は前駆物質であるカンラン石の組成)。このように本来のカンラン石の組成とは異なり、Si が超過していた。レーザー照射回数が 5 回のもものでは確認できなかったが 20 回照射の試料の方では、このアモルファスリムが複数重なって形成された重複層が確認できた。このようなアモルファスリムはダスト衝突を模擬したレーザー照射によって瞬時に加熱されたカンラン石粒子表面が蒸発・再凝縮した結果を示している。さらに、このリムの中には数 nm ~ 数十 nm のナノ微粒子が多数分布していた。これらの微粒子は単結晶及び多結晶の形を取り、レーザー照射回数が 5 回のものとは比べ 20 回照射の試料の方が多結晶の形をとる割合が増加していた。これらの微小粒子は微小領域電子線回折および制限視野回折像からメタル鉄 体心立方/  $a=0.2874\text{nm}$  であることが確認された。粒子の HRTEM 像は平均  $0.204\text{nm}$  の格子間隔を示しており、これもメタル鉄の(110)面間隔 ( $d_{110}=0.203\text{nm}$ ) に矛盾しない。これらの微小鉄粒子は形状・サイズともに月試料中のものと酷似している。

結論 今回の電子顕微鏡観察によって、ダスト衝突を模擬したレーザー照射が鉱物表層部数百 nm を瞬時に加

熱し、蒸発・再凝縮した結果、多数の微小鉄粒子を含むアモルファスリムが形成することがわかった。また、実験物質の光学的変化がその微小鉄粒子に起因することが確認できた。パルスレーザーを用いた宇宙風化作用シミュレーション実験が光学的、鉱物・結晶学的にも小惑星（あるいは月）のレゴリス表層部を模擬するに大変有効である。近い将来予定されている惑星サンプルリターン計画のためにも、この実験試料を用いて様々な手法で統一した小惑星表層検証が期待できる。

図1 30mJのパルスレーザーを5回照射したカンラン石(ol)試料の表層部のTEM明視野像。矢印で示すよう大きさ数nmから数十nmの微小鉄粒子がアモルファスリム内に点在している。

