

トンネルイオン化スパッタ粒子質量分析による小惑星イトカワ微粒子の分析

Measurement for a regolith particle recovered from asteroid Itokawa by Sputtered Neutral Mass Spectrometry with tunneling ionization

¹馬上 謙一、²坂口 勲、²鈴木 拓、³糸瀬 悟、³松谷 幸、⁴石原 盛男、⁵内野 喜一郎、³工藤 政都、⁶長尾 敬介、⁷瀬戸 雄介、¹坂本 尚義

¹北海道大学、²物質・材料研究機構、³日本電子、⁴大阪大学、⁵九州大学、⁶東京大学、⁷神戸大学

小惑星探査機はやぶさが小惑星イトカワの物質を地球に持ち帰って以来、大気のない小惑星表層での宇宙風化過程の研究が盛んに行われている [e.g., 1-3]。透過電子顕微鏡による微細構造観察によると、イトカワ粒子表面は太陽風によって構造と化学組成が変質していたことが明らかになった[2,3]。一粒子単位での希ガス同位体分析によって、これらの粒子には太陽風起源の希ガスが大量に注入されていることがわかった [1]。しかし、どのくらいのエネルギーの太陽風がどういった空間分布で照射されているかは明らかになっていない。そこで、新たに開発されたスパッタ中性粒子質量分析装置 LIMAS(Laser Ionization Mass nanoScope) [4, 5] を用い、希ガス同位体分析を数十nmスケールの空間分解能で行うことで、新たな宇宙風化過程を見いだすことを試みた。イトカワ粒子は数百年間太陽風に曝されているため、その表面に照射期間・照射環境に対応するHe分布を示すことが期待される。

LIMASは⁶⁹Gaイオンを固体試料表面に照射し、固体表面からスパッタされた原子や分子をフェムト秒 (fs) レーザーによってトンネルイオン化したイオンを質量分析するスパッタ中性粒子質量分析装置(SNMS)[5]である。この装置はGa収束イオンビーム(JIB-4500を改造, JEOL), 多重周回型質量分析計(MULTUM II, JEOL), fsレーザー(Astellra, Coherent)で構成されている。パルス状のGa-FIBによってスパッタされる粒子は極めて少ない。そこでスパッタされた中性粒子をfsレーザーによるトンネルイオン化によって効率的にイオン化し、そのイオンを飛行時間型質量分析計によって質量スペクトルを取得する。fsレーザーによるポストイオン化はそのイオン化領域(~50 × 50 × 50 μm³)にある粒子をすべてイオン化させるため多元素同時分析ができる。

今回分析したイトカワ粒子はRA-QD02-0169である。この粒子は表面に凹凸があるため実際上クレーター深さを測定することは難しい。そこで、標準試料としてオリビンに4 keVのHeをイオン注入した(注入量: 1 × 10¹⁵ ⁴He ions/cm²)オリビン研磨試料を用いた。この標準試料を用いて、イトカワ粒子のスパッタレート及び太陽風照射量を校正した。

RA-QD02-0169はn型Si基板の上に置き、ひとつの試料ホルダー上にこのSi基板とHe注入オリビン標準試料とをセットした。RA-QD02-0169は~30 μmと微小であるため取り扱いには慎重を要する。そこで、ピックアップ及びサンプルホルダーに設置する

際に顕微鏡が組み込まれている電動マニピュレーター(AxisPro, MicroSupport)を用いた。粒子設置後、サンプルホルダーは10 nm程度金の真空蒸着をした。そして、超高真空(8×10^{-8} Pa)に保たれた試料室に導入した。

Heの深さ方向分析は 15×15 pixel、計225点を一層として深さ方向にスパッタし、各層の 5×5 pixelの各イオンのピーク強度を積算することで深さプロファイルを作製した。1 pixelあたりの質量スペクトル積算数は200回で、1 pixelあたり200回のFIBパルス照射したGa-FIBのイオン電流は 60 nA、加速電圧30 kV、ビーム径は $\sim 1 \mu\text{m}$ で分析した。この分析条件での典型的なクレーターサイズは $8 \times 13 \mu\text{m}^2$ である。

Heを定量的に測定するためには $^4\text{He}^+$ と妨害イオンである $^{12}\text{C}^{3+}$ とを完全に分離する必要がある。そこでHeイオンをMULTUM II内を52周させ、質量分解能を上げてHeを定量した。この時の質量分解能は8600(10% valley)である。

RA-QD02-0169のスパッタレートは、同じ測定条件で深さ測定をしたHe注入オリビン標準試料を3Dレーザー顕微鏡(VX-200, Keyence)で観察した後、原子間力顕微鏡(MFP-3D-BIO-J, Asylum Technology)でクレーター深さを測定し、それを分析層数で割ったものとした。このスパッタレートから測定したRA-QD02-0169のクレーター深さを見積もった。また、RA-QD02-0169のHeドーズ量は、He注入オリビン標準試料で検出した総HeイオンカウントとRA-QD02-0169の総Heカウントとの比率から求めた。ただし、クレーター形状及び面積が同じであることを仮定した。RA-QD02-0169のHe深さプロファイルは、見積もったクレーター深さをを用い、Heドーズ量とクレーター面積から各層でのHe濃度に変換することで構築した。

References

- [1] Nagao, K. et al., 2011, Science 333, 1128.
- [2] Noguchi, T. et al., 2011, Science 333, 1121.
- [3] Noguchi, T. et al., 2013, M&PS, 49, 188.
- [4] Ebata, S. et al., 2012, SIA 44, 635.
- [5] 馬上他, 2013, 遊星人, 22, 86.