

高速度衝突による蛇紋岩インパクターの水和状態と溶融・噴出過程

松原光佑¹, 山口祐香理¹, 中村昭子¹, 長谷川直², 和田武彦³, 茅原弘毅⁴, 小池千代枝⁴

1. 神戸大学大学院理学研究科, 2. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所,
3. 国立天文台, 4. 大阪産業大学デザイン工学部

研究背景

太陽系内においては小惑星や彗星などの小天体の衝突によって物質が輸送されている。含水鉱物を含むインパクターの脱水過程に着目し、蛇紋岩などの含水物質をプレートやコンテナに封入したものをターゲットとした衝突脱水実験が行われているが[1][2]、これらは天体表面へインパクターが衝突する様子を模擬したものではない。蛇紋岩を弾丸として金属やシリカ砂に衝突させることでクレーター形成やレゴリスへの衝突貫入を模擬した衝突脱水実験も行われているが[3][4]、これらの実験は単一の衝突速度においてのみ行われており、衝突速度に対する蛇紋岩インパクターの脱水程度の依存性は明らかになっていない。

また、衝突の際にはエジェクタが噴出し、一部の物質は溶融して飛散する。このような物質に関して、地球への大規模衝突によるスフェリユール形成の数値計算[5]や高速度衝突実験によって形成されるコンドリュール状の液滴の観察[6]が行われている。

本実験では蛇紋岩を鉄鋼ターゲットやシリカ砂に異なる速度で衝突させ、クレーターや衝突生成物を分光測定することで水和状態を観察した。さらに、鉄鋼ターゲットへの衝突において飛散する液滴物質のサイズや空間分布に対する衝突速度の影響を解明することを目的とし、液滴物質の検出を試みた。

実験手法

二段式軽ガス銃を用いて ~3 mm サイズの蛇紋岩弾丸を鉄鋼およびシリカ砂に約 3-7 km/s で垂直衝突させた。鉄鋼ターゲットに対しては、比較のためにカンラン岩弾丸も衝突させた。チャンバー内は 1 Pa 程度に減圧している。このような条件で、鉄鋼ターゲット上には直径 1 cm 程度のクレーターが形成され、シリカ砂ターゲット中にはシリカ砂が固結したような衝突生成物が形成された。

鉄鋼ターゲットに形成されたクレーター底面の法線方向から 30° の角度で光を入射させ、垂直方向の反射スペクトルを FTIR を用いて取得した。測定波長は 1.3-27 μm (高精度で測定できるのは 15 μm 程度まで)とし、波数分解能は 4 cm^{-1} とした。また、衝突生成物の 0.1 wt% の KBr ペレットを作成し、透過スペクトルを FTIR を用いて取得した。測定波長は 1.4-29 μm とし、波数分解能は 1 cm^{-1} とした。

鉄鋼ターゲットへの衝突実験の際、ターゲット面上流側に二次標的としてアルミニウム板を設置し、エジェクタを衝突させた。実験後、回収したアルミニウム板を走査型電子顕微鏡を用いて観察した後、集束イオンビームを用いて断面を露出させ、エネルギー分散型 X 線分析によって元素マップを作成した。

結果

鉄鋼ターゲットの反射スペクトルにおいて、水酸基と水の吸収が隣接している 3 μm 帯の吸収が見られ、吸収の両端に引いた直線のコンティニュームから計算した吸収深さは衝突速度の増加に伴って減少する傾向を示した。無水物質であるカンラン岩を弾丸として衝突させたクレーターにおいても 3 μm 帯

における吸収が見られ、これは大気中からの吸着水に起因すると考えられる。衝突発生圧力が約 80 GPa を下回るクレーター試料はカンラン岩を衝突させたものよりも顕著な吸収を示した。また、このような低速度衝突クレーター試料においてのみ 6.1 μm における分子水による吸収が示された。衝突によって発生したエジェクタ中には蛇紋石から放出された水が含まれており、メルトはこの水蒸気を捕獲すると考えられる[4]。低速度衝突においては水蒸気を含むエジェクタの散逸が遅く、クレーター内のメルトが水蒸気を捕獲しやすかった可能性があると考えられる。衝突発生圧力が約 100 GPa を超えたクレーター試料はカンラン石に起因すると考えられる吸収を示した。カンラン石は蛇紋石が脱水酸基することで生じるため[7]、高圧力が生じる高速度衝突において蛇紋石の分解が促進された可能性がある。

シリカ砂への衝突による生成物の表面には、溶融を経験したと考えられる光沢を示す部分や蛇紋岩の破片が付着した部分が見られた。透過スペクトルを測定すると 3 μm 帯における吸収が見られ、最も低速の約 3 km/s で衝突させた生成物のみ 2.7 μm 付近に水酸基による吸収を示した。約 7 km/s で衝突させた生成物は水酸基による吸収を示さず、蛇紋岩弾丸は衝突発生圧力が約 21 GPa に達するまでにほぼ脱水したことが示唆される。蛇紋岩をターゲットとした衝突脱水実験を行った研究[1]では、蛇紋岩が空隙を持たない場合の完全脱水圧力は約 30 GPa である一方、蛇紋岩が空隙を持つ場合は約 15 GPa で完全脱水することが確認されている。これは蛇紋岩内の空隙が圧縮される際に生じた高温によって脱水が促進されるためであると考えられており、本実験においてもシリカ砂を圧縮しながら衝突生成物に取り込まれた蛇紋岩片は脱水が促進された可能性がある。一方、衝突生成物に捕獲されずターゲット内に単独で存在した蛇紋岩片は、シリカ砂との衝突点とは離れた位置から分離したものであり、脱水程度が低い可能性がある。

二次標的のアルミニウム板には多数の陥没した円形パターンが形成されており、典型的な直径は 50 μm 程度であった。元素分析の結果、アルミニウム板表面は C に富む 10 μm 程度の厚さの層で覆われており、円形パターンの内部は Al に富んでいることが分かった。また、弾丸由来と考えられる Si の付着量は少なく、局所的に存在しているのみであった。したがって、円形パターンは溶融したエジェクタ物質が付着したものではなく、エジェクタの衝突によって表面の C に富む層が除去され、下部のアルマイト層が露出したものであることが分かった。

謝辞

本研究は JAXA 宇宙科学研究所の超高速衝突実験施設および宇宙放射線装置の共同利用により行いました。

参考文献

- [1] J. A. Tyburczy et al. (1990) *Earth and Planetary Science Letters*, 98, 245-260
- [2] T. Sekine et al. (2015) *Icarus*, 250, 1-6
- [3] R. T. Daly and P. H. Schultz (2018a) *Meteoritics & Planetary Science*, 53, 1364-1390
- [4] R. T. Daly and P. H. Schultz (2018b) *Science Advances*, 4, eaar2632
- [5] B. C. Johnson and H. J. Melosh (2014) *Icarus*, 228, 347-363
- [6] C. Ganino et al. (2019) *Planetary and Space Science*, 177, 104684
- [7] C. Viti (2010) *American Mineralogist*, 95, 631-638