

クレーター内部に残存した高速度衝突インパクト物質の変成

松原光佑¹, 山口祐香理¹, 中村昭子¹, 長谷川直², 新原隆史³, 和田武彦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岡山理科大学理学部, ⁴自然科学研究機構国立天文台

研究背景

太陽系内においては、天体同士の衝突によって物質の輸送が行われている。近年の分光観測により、月や分化した小惑星の表面から水や水酸基が検出されており [1,2], また、月や小惑星 Vesta の衝突地形にはカンラン石が濃集する様子が確認されている [3,4]。これらの物質の一部はインパクト天体からもたらされた可能性が考えられているが、その起源については議論が続いている。本研究では、天体衝突によってもたらされた水や鉱物の状態について調査するために高速度衝突実験を行い、インパクト物質の水和状態や結晶性の変化について調査した。

実験手法

二段式軽ガス銃を用いて、直径 3 mm 程度の岩石弾丸を鉄鋼ターゲットに対して約 3-7 km/s で垂直衝突させた。岩石弾丸として、内部に水酸基を含む含水物質である蛇紋岩および無水物質であるカンラン岩を用いた。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、およそ 40-140 GPa の衝突圧力が生じ、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た。クレーター内部には溶融した弾丸物質が付着しており、その結晶性や水和状態を推定するために 3 種類の分析を行った。

顕微ラマン分光測定では、岩石弾丸およびクレーター試料に対して波長 532 nm, ビーム径 0.7 μm のレーザーを試料に対して照射し、150-1800 cm^{-1} の波数領域のスペクトルを取得した。赤外分光測定では、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 0.7-2.5 μm および 1.3-27 μm (高精度で測定できるのは 15 μm 程度まで) とした。昇温脱離ガス分析では、蛇紋岩を衝突させたクレーター試料を 1000 °C まで昇温するステージ上で加熱し、放出されるガスを質量分析計を用いて分析した。加熱に伴って脱離する水とケイ素の量を観察するため、 $m/z=18$ および 28 の物質をモニタリングした。

結果

弾丸物質に関わらず、クレーター内部には白黒の物質が広く付着し、また局所的に褐色の物質が存在している様子が確認された。カンラン岩弾丸を約 7 km/s で衝突させたクレーター内部のラマンスペクトルは、測定箇所に関わらずカンラン石に特有のピークが確認された。蛇紋岩弾丸を衝突させたクレーターでは、ピークが認められず、アモルファスがクレーター内部に広く存在していることが示唆される一方、一部の試料において、クレーター底付近の褐色部分からはカンラン石、リム付近の褐色部分からは蛇紋石の存在を示すピークが確認された。検出されたカンラン石および蛇紋石に対してピークフィットを行い、半値幅から結晶性を評価した。その結果、カンラン岩弾丸を衝突させたクレーター内部のカンラン石や蛇紋岩弾丸を衝突させたクレーター内部の蛇紋石は、未衝突の弾丸と比較してピーク幅が広く、衝突によって結晶性が悪化したことが示唆された。また、カンラン石は衝突前のピーク幅が 10 数 cm^{-1} であり、衝突後は数 cm^{-1} 程度しかピーク幅が変化しなかったのに対し、蛇紋石は元のピーク幅が

50 cm⁻¹程度と広く、また衝突によってピーク幅が2倍以上に広がっている様子が確認された。これらとは対照的に、蛇紋岩を衝突させたクレーターから検出されたカンラン石のピーク幅は衝突圧力の増加に伴って減少する傾向を示し、すなわち衝突圧力が高いほど結晶性が良いカンラン石が残存することが示唆された。このようなカンラン石の成因として、蛇紋岩弾丸内に存在するカンラン石組成アモルファス内の原子が衝突によって整列した可能性や、メルトからカンラン石が晶出した可能性が考えられる。

クレーター内部について取得した赤外反射スペクトルは、弾丸物質や衝突速度に関わらず水酸基と分子水の吸収が隣接する3 μm帯において吸収を示した。蛇紋岩弾丸を衝突させたクレーター試料は、衝突圧力が約100 GPaを超えると、3 μm帯における吸収深さはカンラン岩を衝突させたクレーターと同程度であった。これは100 GPaを超える衝突によるクレーターでは吸着水のみが測定に影響を及ぼしており、クレーター内部に残存した弾丸物質はほとんど水和していないことを示唆する。また、いずれの衝突速度においても水酸基による1.4 μmの吸収は確認されなかった。ここから、蛇紋石由来の水酸基はクレーター内部にほとんど保存されないことが示唆される。一方、低い衝突圧力においては分子水の吸収を示す6.1 μmの吸収が確認され、その吸収深さは3 μm帯の吸収とともに増加する傾向がみられ、3 μm帯の吸収はほぼ分子水に起因すると考えられる。軽石に対して蛇紋岩を衝突させた実験的研究 [5] では、蛇紋石の分解によって生じた水蒸気がメルトに捕獲されることを示唆している。本実験においても同様にクレーター内のメルトに蛇紋岩由来の水蒸気が捕獲され、その捕獲作用は低速度衝突において顕著であった可能性がある。また、80 GPaを超える衝突において、カンラン石の存在を示す5.6 μmの吸収が確認された。ラマンスペクトルから示唆されたように、高速度衝突においてより結晶性の高いカンラン石が形成され、赤外分光測定においてもカンラン石が検出されるようになったと考えられる。

昇温脱離ガス分析では、衝突速度に関わらず数百度以上においてクレーター内部からの水の脱離が確認された。赤外分光測定の結果とは対照的に、最も高速の7 km/s衝突クレーターから最も多くの水の放出が確認された。3-5 km/s衝突クレーターでは水とケイ素が同時に放出されるピークが確認され、このような水はガラスに捕獲された水もしくは分解せずに残存した蛇紋石に起因する可能性がある。蛇紋石の熱重量分析を行った先行研究 [6] では、蛇紋石はおよそ600-700°Cにかけて顕著に水を放出することが確認されている。本研究では試料がこの温度に達する前に測定が終了したものの、3 km/s衝突クレーターはおよそ600°C以降に多くの水を放出する兆候を示している。これは低速度での衝突クレーターの内部には蛇紋石が残存することを示唆する可能性があり、ラマン分光測定によって蛇紋岩を3 km/sで衝突させたクレーター内部から蛇紋石が検出されたことと整合的である。

謝辞

本研究はJAXA宇宙科学研究所の超高速度衝突実験施設および宇宙放射線装置の共同利用実験により行い、文部科学省先端研究基盤共用促進事業（コアファシリティ構築支援プログラム）JPMXS0441200024で共用された機器を利用した成果です。

参考文献

- [1] S. G. Jarmak et al. (2024) Planet. Sci. J. 5, 183
- [2] S. Li and R. E. Milliken (2017) Sci. Adv. e1701471
- [3] S. Gou et al. (2020) Icarus, 345, 113776
- [4] E. Ammannito et al. (2013) Nature, 504, 122-125
- [5] R. T. Daly and P. H. Schultz (2018b) Science Advances, 4, eaar2632
- [6] C. Viti (2010) American Mineralogist, 95, 631-638