

# 氷天体上の高速斜め衝突により発生する

## ホットスプリング

○笹井 遥<sup>1</sup>, 荒川政彦<sup>1</sup>, 保井みなみ<sup>1</sup>, 長谷川直<sup>2</sup>

<sup>1</sup>神戸大学大学院理学研究科, <sup>2</sup>宇宙航空研究開発機構

### 1. 背景

小惑星リュウグウは水の氷と揮発性物質を主成分とする氷天体であると言われており[1], リターンサンプルの分析では, 30°Cまでの有機物とケイ酸塩鉱物に関連する水質変成作用の証拠が見つまっている[2]. 従って, 加熱によりリュウグウ母天体上の水氷が溶けて液体の水が存在した可能性がある. 本研究では, 母天体表面の水氷を溶かす熱源として氷天体間的高速衝突に着目した. 衝突は残留熱をクレーター周囲に埋め込み, その熱が水氷を温めることで, クレーターの底にホットスプリングを形成した可能性がある. ホットスプリングが形成されれば, その内部で水質変成が起きたかもしれない. 本研究では, 氷微惑星の模擬物質である, 多孔質氷標的に対する斜め衝突実験を行い, 赤外線高速カメラによるクレーター底部の温度測定を行った.

### 2. 手法

神戸大学と宇宙航空研究開発機構(ISAS/JAXA)の2段式軽ガス銃を用いて高速衝突実験を行った. 多孔質氷標的の作成は直径710 $\mu$ m以下の氷粒子を圧密して行なった. 標的空隙率は40-60%である. 弾丸には直径4.7mmと7mmのポリカーボネート球を用い, 衝突速度は3.0-6.2km/sとし, 衝突角度は30°, 90°とした. 衝突後, 標的周囲に高温ガスが流入することを防ぐため, 標的の前方にアクリル板を設置した. 標的の表面にはスリットを取り付けることでエジェクタの放出方向を制限し, クレーター底部の観測を行いやすくした. 高速赤外

線カメラ(撮影速度3000fps)を用いて, クレーター底面の温度計測を行った.

### 3. 結果

実験後に回収した標的上のクレーター底部には, 凹凸が交

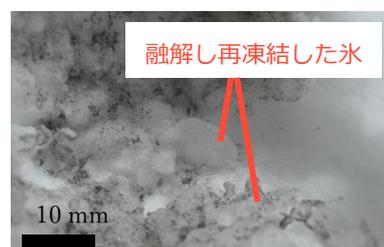


図1 クレーター底部の再凍結メルト層

互に並んだ網目状の, 再凍結したメルト層が見られた(図1). 網目状の層が一部破壊されて粒子状になっており(図1), メルト粒子は1cmもの厚みを持つものもあった. メルト一部は, 衝突から数10ms後までにクレーターから放出された.

図2は衝突速度3km/sと6km/sのときのクレーター壁面の平均温度履歴である(衝突角度はともに90°). クレーター内壁全体の平均温度の最高値は, 初期のクレーター形成中はともに40°Cであったのに対し, エジェクタ放出後はそれぞれ2.4°Cと0.1°Cとなった. 高速ほど衝撃圧力が高くクレーター形成中の内壁温度も高くなると考えられるが, 6km/sでは赤外線カメラの撮影速度が足りず計測できなかったと考えられる. 0°C以上の持続時間は, 3km/s, 6km/sでそれぞれ830ms, 83msとなり, 6km/sの方が冷却速度が大きかった. これはメルトが粒子状に壊れ, メルト体積に対してその表面積が大きくなり, 冷却しやすかったからと考えられる.

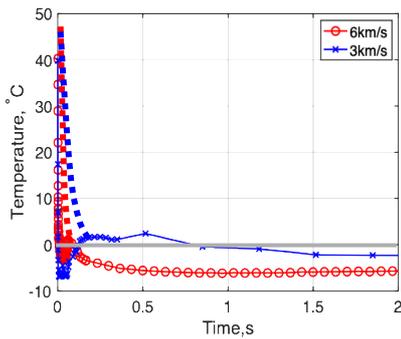


図2 クレーター壁面の平均温度の履歴

同様に衝突角度  $30^\circ$  (斜め衝突) と  $90^\circ$  (正面衝突) のときのクレーター壁面の平均温度の履歴を比較する (衝突速度はともに  $3\text{km/s}$ )。クレーター内壁全体の平均温度の最高値は、クレーター形成中はそれぞれ  $27^\circ\text{C}$  と  $40^\circ\text{C}$  となり、エジェクタ放出後は  $0^\circ\text{C}$  と  $2.4^\circ\text{C}$  となった。正面衝突の方が斜め衝突よりも、弾丸運動量が効率的に上昇とメルト生成に使われたと考えられる。0度以上の持続時間は  $30^\circ$ ,  $90^\circ$  でそれぞれ  $400\text{ms}$ ,  $830\text{ms}$  となり、 $90^\circ$  (正面衝突) の方が長時間維持された。正面衝突の方が、メルト量が多いため、温度の持続時間も長いと考えられる。熱伝導によりメルトが冷却されると仮定すると、温度の持続時間は熱拡散距離の二乗に比例する。クレーター直径が  $10\text{cm}$  のとき、 $0^\circ\text{C}$  以上の持続時間が  $830\text{ms}$  とすると、クレーター直径が  $100\text{m}$  の場合の  $0^\circ\text{C}$  以上の持続時間は10日程度と見積もられる。また、クレーター内壁には局所的に  $70\text{--}140^\circ\text{C}$  程度の最高温度を示したホットスポットが数点確認され、最長で  $10\text{s}$  以上の間  $0^\circ\text{C}$  以上が持続した (衝突速度  $3\text{km/s}$ , 衝突角度  $30^\circ$ )。クレーター直径が  $10\text{cm}$  のとき、 $0^\circ\text{C}$  以上の持続時間が  $10\text{s}$  とすると、クレーター直径が  $100\text{m}$  の場合の  $0^\circ\text{C}$  以上の持続時間は4ヶ月程度と見積もられた。

#### 4. 考察

図3は衝突後のクレーター周囲の最高温度の分布である。横軸はクレーターのピット半径 ( $L_R$ ) で規格化したクレーター中心からの距離で1がクレーター壁面にあたる。縦軸は最大の温度上昇を、初期温度

から  $0^\circ\text{C}$  までの温度上昇で規格化した値で、1が  $0^\circ\text{C}$  に当たる。色付きのシンボルは赤外線カメラで計測したクレーター壁面の平均温度の最高値を表す。それらのうち、塗り潰したものはクレーター形成中の最高値を表し、中抜きが、クレーター形成後の最高値を表す。白ぬきの丸は、先行研究の多孔質氷に対する正面衝突実験の際のクレーター周囲の最高温度の計測値を表す[3]。衝突速度、標的孔隙率の影響はクレーター半径  $L_R$  によりスケールされている。図中の2本の曲線は、クレーター形成中のクレーター壁面の最高温度と、クレーター周囲の最高温度のそれぞれ最高値と最小値を通るように引いた線である。曲線と縦軸の  $0^\circ\text{C}$  のラインが交わる距離は1.1と1.5であることから、氷が一度  $0^\circ\text{C}$  以上となった領域は、規格化距離が1-1.3の間であることがわかる。クレーター半径  $L_R=2\text{--}5\text{cm}$  であるため、実際のメルト層の厚みは  $0.6\text{--}1.5\text{cm}$  となり、今回の実験結果 (図1) と整合的である。スケールから直径  $100\text{m}$  程度のクレーターのメルト層は  $10\text{m}$  ほどであると推定される。

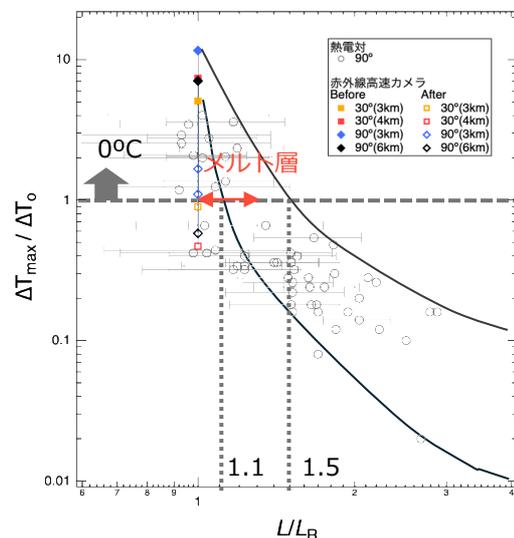


図3 クレーター周囲の最高温度の分布

#### 参考文献

- [1] Nakamura et al., 2022. *Science*, 379.6634: eabn8671. [2] Ito et al., 2022. *Nature Astronomy*, 6.10, 1163-1171. [3] Sasai, et al., 2024. *Icarus*, 411, 115929

