

衝突による高空隙率粗粒標的の熱物性変化に関する実験的研究

畠生有理 (宇宙航空研究開発機構)

Experimental study on collisional evolution of thermophysical properties of porous rough targets

Yuri Shimaki (Japan Aerospace Exploration Agency)

はじめに

はやぶさ2搭載小型衝突装置 SCIは多孔質岩塊から構成される小惑星リュウグウ表層に直径14.5 mの重力支配域クレータを形成すると同時に、副クレータを含む同心円状の地形変化を形成した[1]。この地形変化は、長軸と短軸の比が約3である不規則形状のSCI前方破片によって形成されたと推定されている。副クレータは小惑星上のクレータスケール則の構築において重要であるが、弾丸形状がクレーター形状に与える影響はよくわかっていない。他方、衝突直下点では弾丸と標的の破碎が生じ、その衝突残留熱は小惑星の水質変成や脱水反応の起源と考えられている[2-4]。SCI事後観測では人工クレータ内外の有意な熱物性変化は検出されていないが[5]、熱カメラによるその場衝突残留熱計測は衝突物性変化を検出する上で重要である。本研究では弾丸形状がクレーター形状に与える影響および衝突残留熱計測による物性変化検出を目的として、粉体標的への衝突実験を行った。本年度は(1)弾丸アスペクト比が重力支配域クレーター形状に与える影響および(2)多孔質粉体標的の衝突残留熱計測について実施する計画であったが、コロナ禍再拡大の影響を受けて(2)が実験中止となったため、(1)の結果について報告する。

実験方法

弾丸はアスペクト比 h/w (h : 高さ, w : 直径) を変化させた円柱弾丸とサボを用い、直径4.8 mmのナイロン円柱 ($h/w = 0.5$ to 1.0)、直径2 mmのAl/Cu円柱 ($h/w = 0.5$ to 1.5)、直径1 mmのAl/Cu弾丸 ($h/w = 1.0$ to 4.0)を衝突速度2.0-2.9 km/sで標的に衝突させた。弾丸加速ガスによるエジェクタ擾乱とクレータ形状変化を防止するため、チャンバー上部に風防を設置した。標的は直径45 cm、高さ16 cmの容器に充填した珪砂5号(粒径約400 μm)とガラスビーズFGB300(63-53 μm)を用いた。真空度は3-15 Paとした。衝突時の弾丸姿勢はチャンバー側方から高速度カメラHPV-Xとレーザー照明CAVILUXによる影写真法によって撮像し、クレーター形成過程は上方から高輝度照明、高速度カメラPhantom v1612、近赤外高速度カメラFast M3k、熱赤外カメラBOLを用いて撮像した。実験後、レーザープロファイラを用いて4方向のクレータ断面形状を取得し、クレータの深さ d 、平均リム直径 D_{rim} 、平均直径 D を計測し、複数視点のク

レータ画像と Metashape を用いて形状モデルを作成した。クレータ画像から長径 a 、短径 b を計測し、高速度ビデオ画像から弾丸姿勢の鉛直からのズレ角 θ を計測した

結果と議論

衝突エネルギーとクレータ平均直径の関係を図 1 に示す。クレータ直径は衝突エネルギーの増加とともに増加し、同一エネルギーの条件では硅砂 5 号よりも FGB300 でクレータ直径が大きかった。これは、砂の安息角 (37°) がガラスビーズの安息角 (24°) よりも大きいことに起因すると考えられる[6]。一方、弾丸姿勢の鉛直からのズレ角 θ がクレータ平均直径に与える影響は小さいことがわかった。

弾丸アスペクト比 h/w とクレータの直径深さ比 d/D の関係を図 2 上に示す。iSALE での予備計算による過渡クレータ形成結果と同様に、弾丸密度が大きく、 h/w が大きいほど（弾丸が棒形状に近いほど） d/D が大きいクレータが形成された。さらに、 $h/w > 3$ で d/D の増加が顕著であり、 θ が小さいほど d/D は大きくなることがわかった。

弾丸アスペクト比 h/w とクレータ楕円率 b/a の関係を図 2 下に示す。その結果、 $h/w > 3$ かつ $\theta > 20^\circ$ では $b/a < 0.96$ となるものの、本実験条件でのクレータ楕円率は 0.92 以上と真円に近いことがわかった。細粒で安息角の小さい FGB300 では楕円率が 1 に近いことから、過渡クレータ形成後の壁面崩落によって最終クレータ形状が支配されていることを示唆している。

室内実験や宇宙衝突実験から、SCI のような中空弾丸が形成するクレータ直径は、同等質量の稠密な弾丸によって推定できることがわかっている[1]。他方、本実験結果から、棒形状の弾丸はクレータ直径と楕円

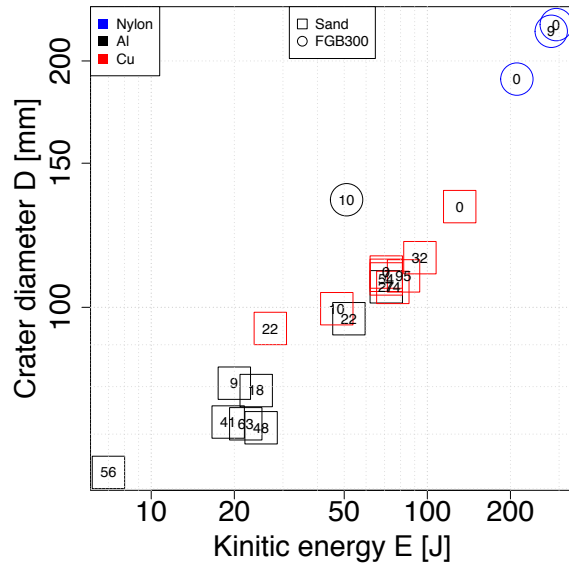


図 1. 衝突エネルギーとクレータ直径の関係。プロット内数値は弾丸姿勢の鉛直からのズレ角 θ を示す。

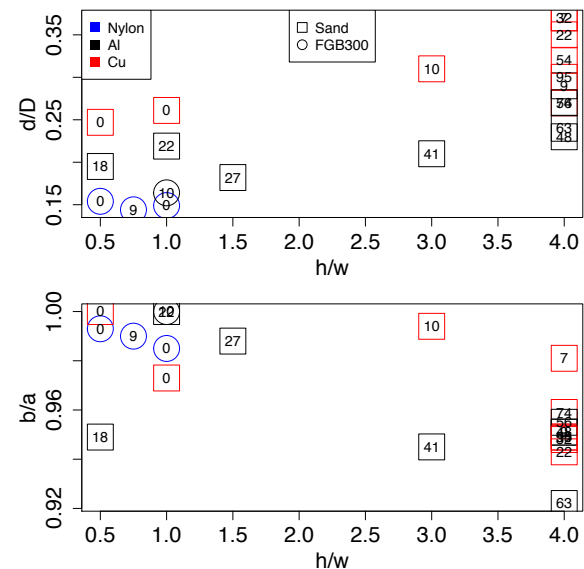


図 2. (上)クレータ直径深さ比 d/D 、および (下)クレータ楕円率 b/a の弾丸アスペクト比 h/w 依存性。

率に与える影響は小さいが、直径深さ比を有意に増加させることを示した。これは、棒形状弾丸の場合は通常の点源近似よりも深くまで弾丸が貫入することを示している。本実験結果から、副クレータ解析における直径計測は不規則形状の SCI 前方破片を同等質量の稠密な弾丸によって推定できることが示唆された。

謝辞

本研究の遂行にあたり、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所の超高速衝突実験共同利用施設を利用しました。熱赤外カメラは立教大学の福原哲哉氏の装置を使用させていただきました。JAXA/ISAS の長谷川直氏と木内真人氏には実験遂行にご協力いただきました。千葉工大の黒澤耕介氏には様々な助言をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [1] Arakawa, M. et al. (2020) *Science*, 368(6486), 67-71.
- [2] Rubin, A. E. (2005) *Scientific American*, 292(5), 80-87.
- [3] Sugita, S. et al. (2019) *Science*, 364(6437), eaaw0422.
- [4] Yasui, M. et al. (2021) *Communications Earth & Environment*, 2(1), 1-8.
- [5] Sakatani, N. et al. (2020) 51st Lunar and Planetary Science Conference, #1358.
- [6] Kiuchi, M. (2019) PhD. Thesis.