

サイズ頻度分布を持つ粒子層へのクレーター形成実験

保井みなみ¹, 山本裕也¹, 横田優作¹, 大川初音², 荒川政彦¹, 長谷川直³

1. 神戸大学大学院理学研究科 2. 神戸大学理学部 3. 宇宙科学研究所

1. はじめに

小惑星 Ryugu の表層は直径 10 m を超えるボルダーが多く存在し、その積算サイズ頻度分布はベキが $-2.5 \sim -3$ で近似できる[1, 2]. またこれらのボルダーの引張強度は熱慣性の測定から約 200 kPa と見積もられており、火成岩や堆積岩などの地球の岩石と比較して1桁以上小さい[3].

このようなボルダーで覆われた Ryugu 上には、直径 100 m 以下のクレーターが非常に少ないことがわかっている[1]. その原因として、以下の2つが考えられる。1つは、元から小クレーターが形成されない表面環境であるという Armoring 効果である。衝突天体が自身よりも大きなサイズのボルダーに衝突すると、ボルダーが破壊されるため、クレーターが形成され難くなることが考えられる。もう1つは、衝突励起振動によってボルダーが移動し、小クレーターが消失したという説である。この現象は、特に小クレーターのような小さなスケールの表面地形の消失メカニズムとしては有力である。

また、2019年4月5日、探査機はやぶさ2によって、Ryugu への人工クレーター (SCI) 形成実験が行われ、成功した。DCAM-3 のその場観測や、その後の ONC によるクレーターの撮影によって、形成された半球状のクレーターや、非対称で不均一なエジェクタカーテンが観察されている。これは、クレーター掘削過程や衝突破片の噴出が、大きなボルダーによって妨害された可能性を示唆している。

以上のことから、小惑星 Ryugu の小クレーター消失のメカニズム及び SCI クレーター形成に伴うエジェクタの不均一性の原因の解明のため、Ryugu 表層模擬物質を用いたクレーター形成実験を行った。今年度は、Armoring 効果によるクレーター形成効率の低下を調べるため、ボルダーのサイズ頻度分布及び強度を変化させた模擬試料を用いた。また、この模擬標的を用いて、エジェクタ放出過程を観察し、粒子の三次元速度解析法を構築した。

2. 実験方法

標的はガラスビーズ (引張強度約 30 MPa) と風化凝灰岩粒子 (鹿沼土: 引張強度 20~60 kPa) を用いた。ビーズは直径 0.1, 1, 3, 10 mm のものを等質量割合で混合した (混合, 1.97 g/cm³). 比較のために、直径 0.1 mm のみのビーズ標的も用意した (単一, 1.42 g/cm³). 風化凝灰岩粒子は直径 1~4 mm (細粒, 0.63 g/cm³) と直径 10~40 mm (大玉, 0.26 g/cm³) の2種類を用意した。

実験は、宇宙科学研究所の縦型二段式軽ガス銃を用いた。弾丸は直径 1 または 2 mm の密度の異なる6種類の球 (1.1~15.6 g/cm³) を用いた。衝突速度は 1.2~4.6 km/s である。また比較のため、神戸大学の縦型一段式軽ガス銃を用いて、衝突速度 40~213 m/s の低速度の実験も行った。

エジェクタ放出過程の観察は、混合ビーズ標的のみで行った。同期させた二台以上の高速カメラを用いて、同時に1つの粒子を追跡し、三次元空間座標を決定した。追跡する粒子を画像上で明確に示すため、色つきビーズを用いて、衝突点周囲に複数個配置した。色つきビーズの直径は 3, 10, 18 mm とした。

3. 実験結果と議論: クレーター形成効率

3.1. クレーター形状

図1は、衝突速度 4.4~4.6 km/s の各標的のクレーターを表している。この写真から、混合ビーズと大玉風化凝灰岩はクレーター形状が不規則であり、リムが明瞭ではないことがわかった。さらに、混合ビー



図1 クレーターの写真. a) 混合ビーズ, b) 細粒風化凝灰岩, c) 大玉風化凝灰岩. スケールは全て同じである。a)は弾丸半径が1 mm, b)とc)は2 mmのアルミ球を使用した。

ズの場合は、数個の 10 mm ビーズがクレーターの底に露出しているのがわかった。一方、細粒風化凝灰岩はほぼ半球であり、リムがはっきり確認できた。この3つのクレーターのプロファイルを示したのが、図2である。クレータープロファイルは3つの標的によく一致した。そして、クレーターの深さ・直径比は約 0.25 となった。

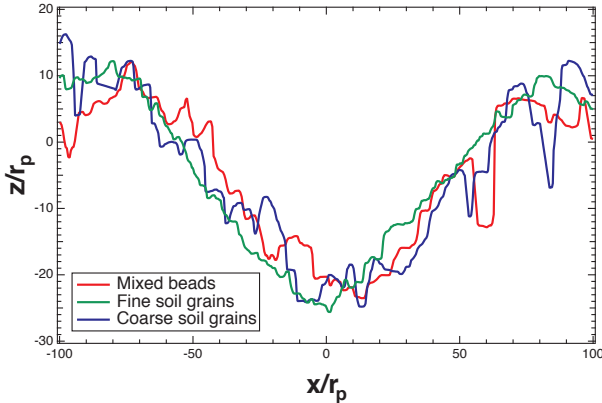


図2 クレータープロファイル。各標的は図1と同じである。各軸は弾丸半径 r_p で規格化している。

3.2. クレータースケール則

図3は弾丸の運動エネルギーとクレーターリム半径 R_{rim} の関係を示している。ビーズの場合、単一ビーズより混合ビーズの方が、同じ運動エネルギーでも R_{rim} が小さくなった。さらに、弾丸が 10 mm ビーズに直接衝突した場合 (fractured と記載), さらに R_{rim} が小さくなった。風化凝灰岩の場合、細粒よりも大玉の方が R_{rim} が小さくなった。以上の結果から、粒子サイズ頻度分布によるクレーターリム半径の低下が見られ、さらに大きな粒子が多いほど R_{rim} は小さくなった。一方、両標的の結果ともに、弾丸の運動エネルギー

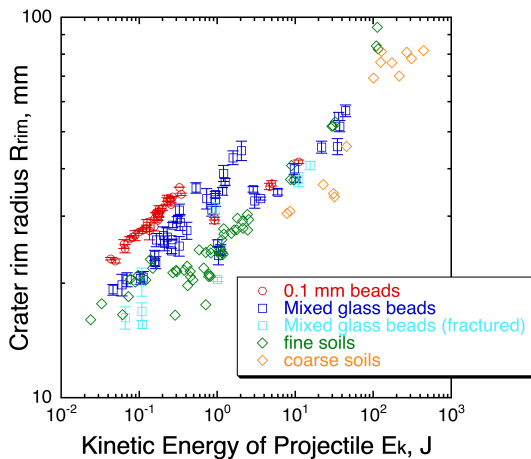


図3 弾丸の運動エネルギーとクレーターリム半径 R_{rim} の関係。

ギーが 1~10 J の間でオフセットが見られた。これは、衝突速度が 200 m/s から 1 km/s へと切り替わることによる、弾丸サイズの変化を示している。このオフセットの影響を考慮するため、実験結果をクレータースケール則を用いて、整理した。

クレーター半径に関するクレータースケール則は、以下の式を用いた[4]。

$$R_c \left(\frac{\rho_t}{m_p} \right)^{1/3} = K_1 \left(\frac{g r_p}{v_i^2} \right)^{-b} \left(\frac{\rho_t}{\rho_p} \right)^c \quad (1)$$

$$\pi_R = R_c \left(\frac{\rho_t}{m_p} \right)^{1/3} \quad (2)$$

$$\pi_2 = \frac{g r_p}{v_i^2} \quad (3)$$

$$\pi_4 = \frac{\rho_t}{\rho_p} \quad (4)$$

m_p は弾丸質量、 v_i は衝突速度、 ρ_t は標的密度、 g は重力加速度である。また、 R_c はクレーター半径であり、 $R_c = R_{rim}/1.26$ を用いて変換した[5]。 c は、同じ衝突速度・弾丸半径 (π_2 が一定) の場合の π_R と π_4 の関係から求めることができ、本研究では混合ビーズが 0.02, 細粒風化凝灰岩が 0.20, 大玉風化凝灰岩が 0.12 と得られた。

図4は、全標的の π_R と π_2 の関係を示している。 π_R は π_4^c で規格化しており、 c は各標的で求めた値を用いている。このパラメータ (π_R/π_4^c) を、クレーター形成効率と呼ぶ。なお、単一ビーズは混合ビーズの c を用いた。ビーズの場合、単一ビーズに比べて混合ビーズの方が若干クレーター形成効率が小さくなり、弾丸が 10 mm ビーズに直接衝突した場合は、さらにクレーター形成効率が小さくなるのがわかった。

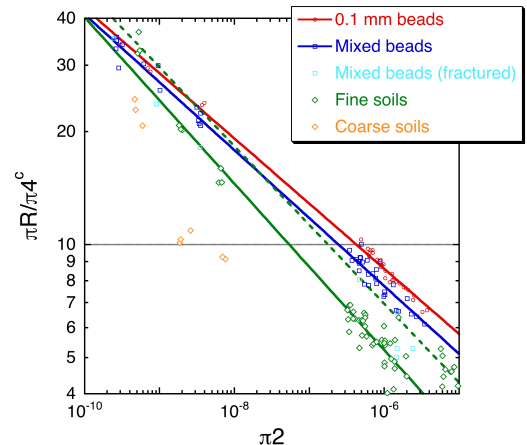


図4 クレーター形成効率。各線は式(1)を用いてフィッティングした結果を示す。

細粒風化凝灰岩の場合、クレーター形成効率の振る舞いが2つに分かれることがわかった。特に、クレーター形成効率が小さい方(実線)は、風化凝灰岩粒子の破壊の影響によるものであることが示唆される。大玉風化凝灰岩の場合、細粒に比べてクレーター形成効率がさらに小さくなることがわかった。単一ビーズ、混合ビーズ、2パターンの細粒風化凝灰岩の K_1 と b を調べた結果、単一ビーズは $K_1=0.78$, $b=0.17$, 混合ビーズは $K_1=0.64$, $b=0.18$, 細粒風化凝灰岩はクレーター形成効率が大きい方(点線)が $K_1=0.38$, $b=0.21$, 小さい方(実線)が $K_1=0.24$, $b=0.22$ となった。このことから、クレーター形成効率の減少度合いを示す b は標的物質には依存するが、粒子サイズ分布には依存しないことがわかった。そして、 b は風化凝灰岩の方が大きくなるため、 π_2 が 10^{-9} 以下になると全標的でクレーター形成効率がほぼ一致した。

3.3. SCI クレーター直径の見積もり

本研究で得られた混合ビーズ及び細粒風化凝灰岩のクレータースケール則と、SCIの衝突条件($v_i=2$ km/s, $m_p=2$ kg, $r_p=6.5$ cm [6, 7])及びRyuguの物性値($\rho_t=1.2$ g/cm³, $g=1.2 \times 10^{-4}$ m/s² [8])を用いて、SCIクレーターの半径を見積もった。その結果、混合ビーズは9.8 m, 細粒風化凝灰岩は12.1 mとなり、実際のSCIクレーター7.3 mに比べて1.5~2倍大きくなることがわかった。この結果から、SCIクレーターが小さい原因は、ボルダー強度等の標的構成粒子の物性の違いであると推測された。

4. エジェクタ放出過程

4.1. 解析方法

実験前に、標的に直方体のリファレンスを配置し、高速カメラで撮影することで、空間上に三次元座標を定義した(図5)。その後、衝突実験を行い、色つきビーズの中心位置をピクセル座標でImage Jを用いて測定した。このビーズのピクセル座標とリフ

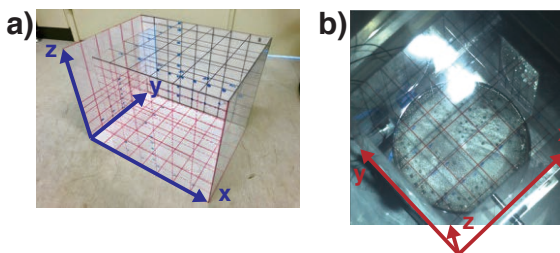


図5 a)リファレンスボックス, b)ボックスを標的に配置し、真上から撮影。

アレンス座標を重ね合わせることで、粒子の座標をxyz座標に変換し、三次元座標を決定した。

4.2. 結果

図6は、上記の手法を用いて解析したビーズの軌道の一例を示している。

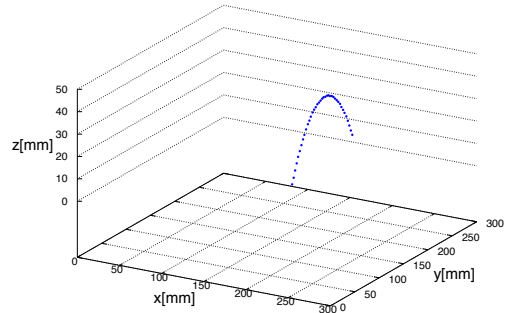


図6 追跡したビーズの一例。弾丸は直径1 mmの鉄球、衝突速度は1.2 km/s、ビーズの大きさは10 mm。

このビーズのx方向及びy方向は時間の一次関数で表され、z方向は二次関数で表された(図7)。このz方向の関数から、放出されたビーズの軌道が10 m/s²程度の重力加速度を受けた放物線として表現されたことから、この三次元解析の手法は妥当であると判断した。来年度は、さらにデータを増やし、この手法を用いて、放出速度分布及び放出角度分布に対する粒子サイズ頻度分布と強度の依存性を調べる予定である。

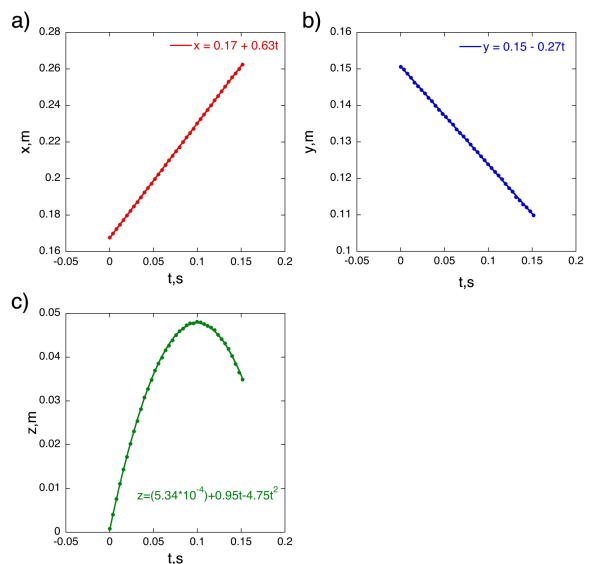


図7 各xyz方向におけるビーズの時間変化。a) x方向, b) y方向, c) z方向。a)及びb)は時間 t の一次関数, c)は二次関数で示され、得られた式をそれぞれ示している。

5. まとめ

ガラスビーズ及び風化凝灰岩粒子を用いたクレーター形成実験を行い、クレーター形成効率に対する粒子サイズ分布及び粒子強度の影響を調べた。さらに、ガラスビーズ標的に対し、エジェクタの三次元速度解析手法の確立を試みた。

- ・ 混合ビーズは、0.1 mm 単一ビーズに比べて、若干クレーター形成効率が小さくなった。
- ・ 細粒風化凝灰岩は、粒子の破壊の影響が $10^{-9} < \pi_2 < 10^{-6}$ で確認され、クレーター形成効率が約1.5倍小さくなった。
- ・ クレーター形成効率の減少度合いを示すべきはビーズが0.18、風化凝灰岩が0.21となり、標的粒子の強度が小さい方が大きくなるが、粒子サイズ分布には依存しなかった。
- ・ 複数の高速カメラとリファレンスボックスを用いる事で、エジェクタ粒子の三次元速度解析法を確立した。

6. 参考文献

- [1] Sugita et al. (2019), Science 364, eaaw0422.
- [2] Michikami et al. (2019), Icarus 331, 179–191.
- [3] Grott et al. (2019), Nature Astron. 3, 971–976.
- [4] Housen & Holsapple (2011), Icarus 211, 856–875.
- [5] Matsue et al. (2020), Icarus 338, 113520.
- [6] Arakawa et al. (2017), Space Sci. Rev. 208, 187–212.
- [7] Saiki (2015), Trans. JSME 118, No. 1164, p. 697 (in Japanese).
- [8] Watanabe et al. (2019), Science 364, 268–272.