

# 低強度粗粒標的に対する衝突実験：アーミング効果を含んだクレータースケール則の構築

山本裕也<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>, 横田優作<sup>1</sup>

1 神戸大学大学院理学研究科, 2 宇宙科学研究所

はじめに：近年の探査ミッションにより小惑星表面の詳細な様子が明らかになってきた。例えば(162173) Ryugu では天体表面に多数の衝突クレーターが発見され、様々なサイズや空隙率、強度のボルダーを持つことが確認された[1,2,3]。また、直径数 10m 以上のクレーターサイズ頻度分布から外挿されるサイズによると、直径数 10m 以下の小さなクレーターが欠乏していることがわかった。この小さなクレーターの欠乏は(433) Eros や(25413) Itokawa でも確認されている[4,5]。欠乏のメカニズムとしてアーミング効果が論じられていて、標的粒子の力学的強度や弾丸とのサイズ比の両方がアーミングに寄与することがわかってきている[6,7,8]。そこで、本研究では、これまでの研究よりもより低強度・高空隙の標的粒子を用いて、標的粒子の強度と弾丸とのサイズ比がクレーター形成効率に及ぼす影響を調べた。

実験手法：標的には直径 1~4 mm (細粒, 平均半径 1.5 mm) と 1~4 cm (大玉, 平均半径 6.4 mm) の 2 種類の風化凝灰岩粒子を用いた。この凝灰岩粒子の圧壊強度を計測したところ、細粒で約 60 kPa, 大玉で約 13 kPa で、粒子一個の平均空隙率はそれぞれ 77 %, 85 % だった。衝突実験は、神戸大学と宇宙科学研究所に設置された縦型ガス銃を用いて行い、弾丸には直径 3mm の球 (SUS, ジルコニア, アルミナ, ガラス, ナイロン) を、直径 2 mm の球 (WC, 銅, SUS, ジルコニア, チタン, アルミニウム, ナイロン) を用いた。これらをそれぞれ 40~200 m/s と 1.2~4.5 km/s の衝突速度(U)で正面衝突させた。衝突の様子は高速度カメラで  $10^3$ - $10^5$  fps で観測した。

結果：形成されたクレーター形状を調べたところ、細粒標的では、お椀型クレーターが形成されて弾丸密度が大きくなるほど深さ直径比が増加していたが、大玉標的では、歪な形状のクレーターが形成され、クレーター深さが構成粒子サイズと同程度であったため、深さ直径比のばらつきが大きく、クレーターリムが不明瞭だった。高速度カメラで衝突前後の衝突点付近の様子を観察すると、衝突後すぐに細かい砂煙が発生し放出されたのち、標的粒子が放出されていることが確認でき、衝突点近傍で弾丸が標的粒子を破壊していることがわかった。形成されたクレーターのサイズを運動エネルギー( $E_k$ )で整理すると、細粒標的と大玉標的ともに、全体の傾向として運動エネルギーに対して右肩上がりだったが、 $0.1 \text{ J} < E_k < 0.6 \text{ J}$  の範囲でクレーター半径が増加しないオフセット領域が存在した。また、標的粒子のサイズの違いによるクレーターサイズの違いも見られ、大玉標的に形成されるクレーターは細粒標的に形成されるクレーターに比べて 0.8 倍程度の大きさだった。クレーターサイズを  $\pi$  スケール則で整理すると、細

粒標的に関して、オフセットを挟んで二つのトレンドがあり、大玉標的に関して、同じ  $\pi_2$  での細粒標的の  $\pi_R$  と比較して、 $\pi_R$  が小さくなることがわかった。このことから従来の重力支配域のクレーターサイズスケール則では、空隙が大きく、強度が小さい粒状標的に形成されるクレーターサイズをスケージングできないことがわかった。

議論： Mizutani et al (1983)で提案されたスケージング則を改良して、終段階有効エネルギー  $I$  が衝突点付近での標的粒子の破壊とクレーターキャビティを形成するための粒子の放出の両方に使われていると仮定し、アーマリング効果を含んだクレーターサイズスケール則を考えた。衝突の際に破壊された標的粒子の数  $\alpha$  を考慮することで、標的粒子の破壊に使われるエネルギーとし、クレーター直径  $D$  と  $I$ 、標的粒子の半径  $d$  に関して以下の関係が得られた。  $I =$

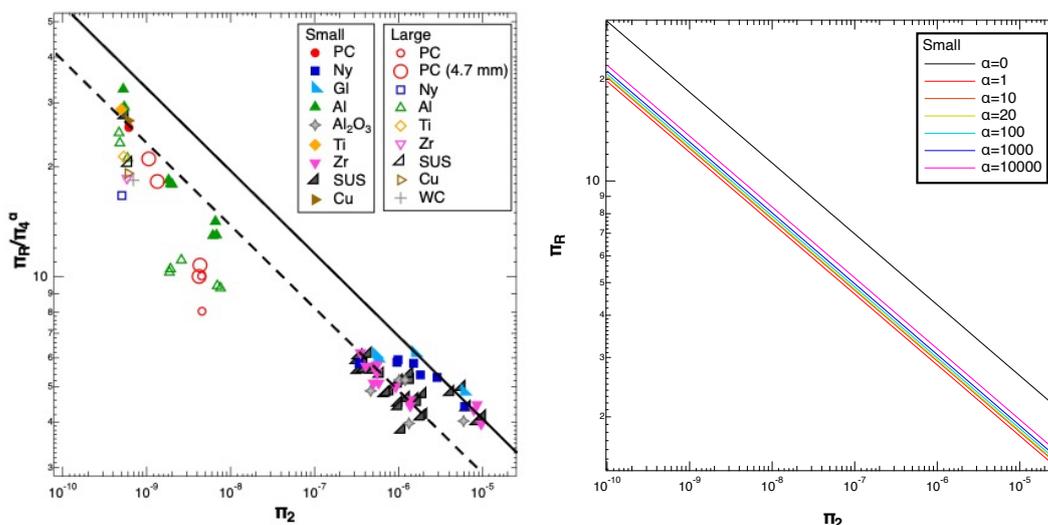
$$k_3 \left\{ \rho \left( \frac{D}{D_2^*} \right)^4 + \alpha \delta_t \left( \frac{d}{D_2^*} \right)^3 \right\}. \rho \text{ は標的バルク密度, } \delta_t \text{ は標的粒子密度, } D_2^* \text{ は典型的なクレーター直径, } k_3 \text{ は定数.}$$

本研究のオフセットは  $\alpha$  を変化させることで表現でき、実験結果から  $I$  と  $\alpha$  の関係を求めたところ、 $\alpha = A \cdot I^n$ ,  $A$  は定数,  $n \approx 0.98$ , だった。これらの関係から、アーマリング効果によるクレーターサイズ減少係数  $f$  を含んだ  $\pi$  スケージング則が以下のように表現できた。

$$\pi_R^* = k_5 f \pi_2^{-0.21} \pi_4^{0.20}, f = \left\{ 1 - k_3 A I^{n-1} \delta_t \left( \frac{d}{D_2^*} \right)^3 \right\}^{1/4} \dots (*)$$

右下図は式(\*)で弾丸を  $\phi=3 \text{ mm}$  の SUS 弾丸と仮定して壊れた標的粒子の数  $\alpha$  を変えた時の  $\pi_R \pi_4$  と  $\pi_2$  の関係を示す。本研究で求めた  $n$  の値がほぼ 1 であったことから、衝突速度が大きくなるほど ( $\pi_2$  が小さくなるほど)、 $\alpha$  が大きくなるが、壊れた標的粒子の数によらず一定の割合でクレーター形成効率が低下することがわかった。

- [1]Michikami et al (2019), [2]Sugita et al (2019), [3]Yada et al (2022), [4]Chapman et al (2002), [5]Hirata et al (2009), [6]Tatsumi and Sugita(2018), [7]Güttler et al.(2012), [8]Yasui et al (2022)



図は左から、 $\pi_R \pi_4$  と  $\pi_2$  の関係、アーマリング効果を含んだ  $\pi_R \pi_4$  と  $\pi_2$  の関係