

砂岩に対する衝突クレーター形成実験：弾丸密度の効果

鈴木 絢子^{1,6}, 笹森 務仁², 永木 恵太³, 義原 拓志⁴, 門野 敏彦⁵, 中村 昭子⁶,
長谷川 直⁷, 荒川 政彦⁶, 杉田 精司²

¹惑星科学研究センター, ²東京大学, ³大阪大学, ⁴九州工業大学, ⁵大阪大学
レーザーエネルギー学研究センター, ⁶神戸大学, ⁷JAXA/ISAS

1, 背景と目的

衝突現象は惑星形成において最も基礎的な現象の一つであり、太陽系内のほとんど全ての固体天体表面には衝突クレーターが観察される。それらのクレーターと形成条件—すなわちどのようなサイズ・組成などのものがどのような速度で衝突したのか—の関係を定量的に理解する鍵はスケーリング則の構築であり、様々な標的物質を用いたクレーター形成実験がこの数十年間に精力的に行われている [e.g. 1]。

火星表層のクレーターに対して、二次クレーターと一次クレーターを区別しながら衝突天体のサイズ分布を求めたり、クレーター年代学に関連して月クレーターとの対応を考察する際には、火星で広く確認されている堆積岩 [2] に対するスケーリング則が必要となる。近年火星では直径数 m のクレーターをも観察できる解像度のデータが取得されており [3]、強度支配域における堆積岩に対するクレータースケーリング則の確立が急務となっている。

そこで本研究では、代表的な堆積岩である砂岩を用いてクレーター形成実験を行った。これまでに得られている金属標的に対するクレーター形成のスケーリング則との相違点を調査することが目的である。今回は特に、弾丸密度の違いがクレーター体積に与える効果に着目する。

2, 実験手法

実験には、宇宙科学研究所の二段式軽ガス銃（新型銃）を用いた。標的はパキスタン砂岩（密度 2.3 g/cm^3 , 引張強度 4.6 MPa ）で、一辺 15 cm の立方体を準備した。弾丸はナイロン、ポリメチルメタクリレート、アルミナ、ソーダ石灰ガラス、ステンレス、チタン、タングステンカーバイドの 7 種類を用い、弾丸密度を $1.12 \sim 15.0 \text{ g/cm}^3$ の範囲で変化させた。弾丸の形状は直径 1 mm または 3 mm の球または円柱である。ナイロン製のサポ [4] を用いて加速し、速度 $2.0 \sim 6.9 \text{ km/s}$ で標的に衝突させた。各ショットでの弾丸の材質・密度と衝突速度を表 1 に示した。ショット終了後標的を回収し、形成されたクレーターを観察した。

3, 実験結果

形成されたクレーターの一例を図 1 に示した。衝突孔中心部には半球状や筒状のくぼみがあり、くぼみの内側は周囲よりも明るい色をしている。この場所は衝突点直下と考えられ、岩石が衝撃を受けた結果であると推測される [5]。加えて、弾丸がステンレスとタングステンカーバイドのショット (shot 03, 05, 08) では、衝突孔の周囲に自由表面近傍の岩石塊がはがれてスポールとなって飛び出したと考えられる形状のへこみが見られた (図1(a))。写真から衝突孔の面積を計測し、それと同等の面積を持つ円の直径（等価円直径）をクレーターの直径 D と定義した。スポールによると思われる部分は衝突孔の面積に含めないこととした。クレーターの深さの計測にはレーザー変位計を用い、一番深いと思われる点を通過するように 1 プロファイルを取得した。

取得したプロファイルのクレーター以外の部分から衝突前表面を推定し、そこからの深さをクレーターの深さ d とした。クレーターの体積は、形状を円錐と仮定して $V = \pi D^2 d / 12$ として求めた。

表 1：全ショットの衝突条件

shot No.	弾丸の材質	弾丸直径 [mm]	弾丸密度 [g/cm ³]	衝突速度 [km/s]
shot 01	ポリメチルメタクリレート	1	1.19 ^[6]	- ※1
shot 02	ナイロン	1※2	1.12 ^[7]	6.9
shot 03	タングステンカーバイド	1	15.0 ^[6]	2.0
shot 04	アルミナ	1	3.75 ^[8]	3.8
shot 05	ステンレス	1	7.8 ^[7]	3.6
shot 06	ソーダ石灰ガラス	1	2.5※3	4.8
shot 07	チタン	1	4.54 ^[7]	3.7
shot 08	ステンレス	1	7.8 ^[7]	2.6
shot 09	ナイロン	3	1.12 ^[7]	6.8
shot 10	ナイロン	3	1.12 ^[7]	4.9
shot 11	チタン	1	4.54 ^[7]	3.0

※1 加速時に弾丸が破壊されて複数個のクレーターが形成。このショットは以後の解析には含めない。

※2 このショットのみ弾丸の形状は円柱、高さ1mm。他は球。

※3 ユニチカ株式会社提供のカタログ値。

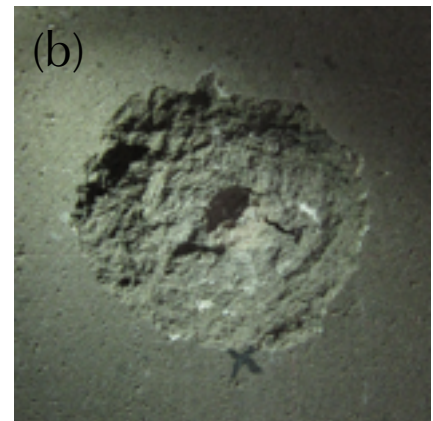
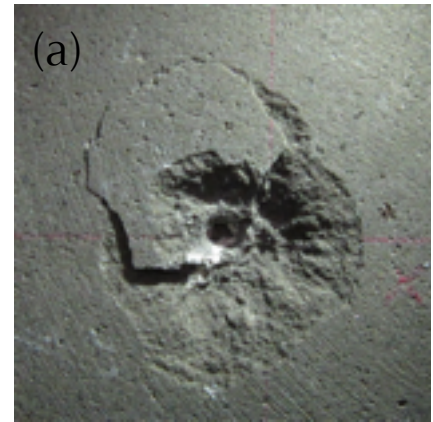


図 1：衝突で形成されたクレーターの写真。(a) ステンレスプロジェタイル、 $v_i=2.57\text{km/s}$ でのクレーター (shot 08)。図左上のスポールははがれずに残った。(b) ナイロンプロジェタイル、 $v_i=4.89\text{km/s}$ でのクレーター (shot 10)。

計測結果を用いて、クレーター体積、弾丸の運動エネルギー、弾丸の密度をそれぞれ以下のように無次元化した [1]。ここで V はクレーターの体積、 m 、 ρ_p 、 v_i はそれぞれ弾丸の質量、密度、衝突速度、 Y 、 ρ_t はそれぞれ標的の強度、密度を表す。 π_v はクレーター効率とも呼ばれる。

$$\pi_v = \frac{\rho_t V}{m} \quad \pi_3 = \frac{Y}{\rho_p v_i^2} \quad \pi_4 = \frac{\rho_t}{\rho_p}$$

図 2 は、規格化された弾丸の密度 π_4 とクレーター効率 π_v の関係を示したものである。弾丸密度の効果のみを調べるため、全ショットのうち、規格化された運動エネルギー π_3 がほぼ一定

のショット (shot 02, 03, 04, 07, 08, 09) のみを用いている。結果、クレーター効率 π_V は弾丸密度 π_4 の β 乗 ($\beta = 0.70 \pm 0.12$) でスケールされることがわかった。

ここで求めた β を用いて弾丸密度の違いを考慮し、クレーター効率の運動エネルギー依存性を求める。宇宙研において行ったこの一連の実験に加えて2010年9月に第3回CPS実験基礎実習の一環として行われた神戸大学の火薬銃を用いた実験結果も含めて推定する。神大火薬銃での実

験では、標的は同じパキスタン砂岩で弾丸はポリカーボネイト製の円柱 (密度1.26g/cm³, 直径14.8mm, 高さ20.0mm) である。結果、クレーター効率は、規格化された運動エネルギー π_3 の α 乗 ($\alpha = -0.75 \pm 0.05$) でスケールされることがわかった (図3)。

4. 考察

クレーター効率における弾丸密度依存性を示す β の値は、本実験では $\beta = 0.70 \pm 0.12$ となった。この値は、弾丸や標的に種々の金属を用いて構築されたスケーリング則 [9] で求められた値 0.52 ± 0.04 より大きい。この違いは、スポール現象の有無、標的の空隙率などが寄与していると予想される。岩石標的に特徴的なスポール現象は、衝突孔周囲の岩石をはがしてクレーター直径の増加に寄与する。空隙率を持つ岩石標的では、密度の高い弾丸の衝突によって弾丸の潜り込み (図1(a): 中心の筒状のくぼみ) が顕著となる。空隙を埋めるために衝突エネルギーが消費されるので空隙率の無い標的よりもクレーターが小さいなどの効果も表れる。今後は、別の種類の堆積岩を用いた実験結果も考慮し、これら岩石に特有な効果の定量的な制約に取り組む。

クレーター効率における弾丸の運動エネルギー依存性は、 π_3 の値の範囲は狭いが、本実験の結果のみを用いて得られた値も -0.70 ± 0.25 と

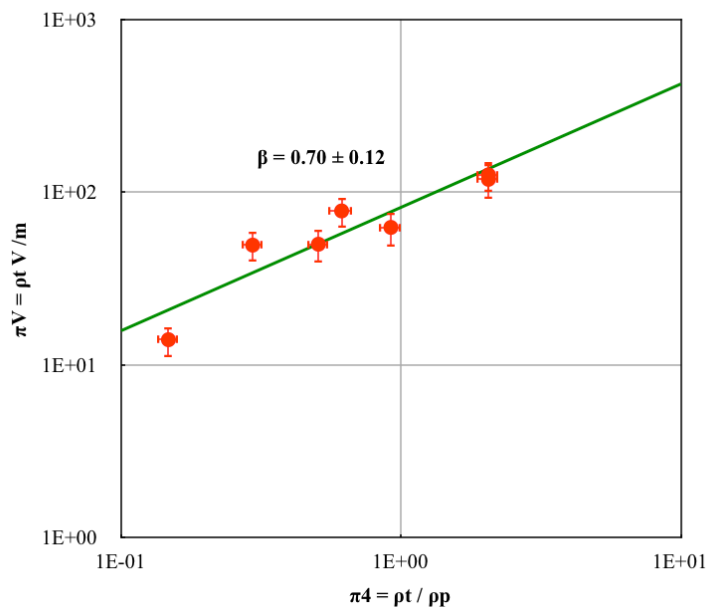


図2：弾丸密度の違いがクレーター効率に与える効果

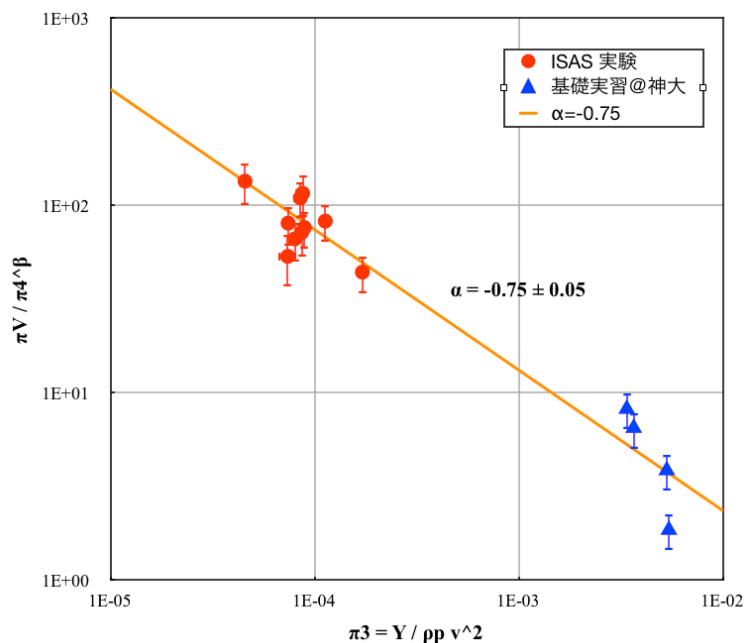


図3：弾丸密度の違いを考慮した、運動エネルギーとクレーター体積の関係

なった。どちらも、金属によるスケーリング則 [9] での値 -0.71 ± 0.03 と非常に近い。これは弾丸が標的を破壊する過程においては、岩石と金属であまり違いがないことを示唆していると考えられる。

謝辞

本実験は、大学院生の啓発と基礎訓練の場を提供することを目的に、惑星科学研究センター (CPS) / 神戸大-北大 GCOE プログラム「惑星科学国際教育研究拠点の構築」と衝突研究会が共同で開催しました。惑星科学研究センター (CPS) の公募研究会に採択され、サポートを受けています。

参考文献

- [1] K. A. Holsapple, (1993), The Scaling of Impact Processes in Planetary Sciences, *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 21:333-73.
- [2] W. Squyres et al., (2004) The Opportunity Rover's Athena Science Investigation at Meridiani Planum, Mars, *Science*, **206**, 1698.
- [3] S. McEwen et al., (2007) Mars Reconnaissance Orbiter's High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE), *Journal of Geophysical Research*, **112**, E05S02.
- [4] N. Kawai et al., (2010) Single microparticle launching method using two-stage light-gas gun for simulating hypervelocity impacts of micrometeoroids and space debris, *Review of Scientific Instruments*, **81**, 115105.
- [5] H. Poelchau et al., (2011), Impacts into Sandstone: Crater Morphology, Crater Scaling and the Effects of Porosity, *Lunar and Planetary Science Conference LXII*, #1838 (abstract).
- [6] Kaye & Laby Table of Physical & Chemical Constants 16th edition (1995), National Physical Laboratory, <http://www.kayelaby.npl.co.uk>.
- [7] 理科年表 平成 22 年 (机上版), 国立天文台編, 1041pp., 丸善.
- [8] 材料・物性表, アスザック株式会社, <http://www.asuzac-ceramics.jp/material/material1.htm>.
- [9] K. A. Holsapple and R. M. Schmidt, (1982) On the Scaling of Crater Dimensions, 2. Impact Processes, *Journal of Geophysical Research* **87**, B3, 1849-1870.