

玄武岩標的に形成されたクレーターの 三次元形状測定から導かれるスケーリング則

高木 靖彦 (愛知東邦大学)、長谷川 直, 鈴木絢子 (ISAS/JAXA)

衝突クレーター形成のスケーリング則が強度項と重力項により成り立っていることは良く知られている。この内、重力項に関しては、石英砂やガラスビーズを標的に用いた多くの実験により検証が行われている。一方、強度項の検証のための実験は意外に少なく、岩石標的を用いた系統的实验はほとんど行われてこなかった。クラックの無い均質な岩石資料を一定量入手することが難しいことが、その理由の一つと考えられる。

今回、クラックが無い良質の玄武岩を入手することができたので、系統的なクレーター形成実験を行い、強度スケーリング則の検証を目指した。実験に用いた標的は、柱状摂理の玄武岩より切り出した $200 \times 200 \times 90$ mm の大きさの直方体である。切り出した方向は、柱の軸に垂直な方向に長辺が向いており、衝突の方向は、短辺の向き、すなわち柱状摂理に平行な方向である。質量は $10.55 \sim 10.73$ kg で、密度は 2920 ± 10 kg/m³ であった。

実験は、JAXA 相模原キャンパスにある二段式軽ガス (水素) 銃を用いて行った。実験条件は、
弾丸

材質	WC、ステンレス、アルミニウム、ナイロン
形状	球 (直径 1.0, 2.0, 3.2, 7.1 mm)
質量	4~218 mg

標的

材質	玄武岩 (ウクライナ産)
形状	直方体 (大きさ $200 \times 200 \times 90$ mm)
質量	$10.55 \sim 10.73$ kg
密度	2920 ± 10 kg/m ³

衝突速度 $2400 \sim 6100$ m/sec

衝突角度 90°

であった。計 28 ショットの実験を行い、形状測定が可能なクレーターを形成することに成功した。

形成されたクレーターの 3 次元形状は、レーザー変位計 (Keyence LK-H150) を付けた 3 次元形状測定装置 (COMS E-Measure3D) により測定した。レーザースポットの径が約 $120 \mu\text{m}$ であり、測定間隔は $200 \mu\text{m}$ とした。測定の様子を図 1 に、測定された形状の一例を図 2 に示す。

使用したレーザー変位計は、垂直に照射されたレーザーが表面で反射された光を 17 度傾いた方向で測定する構造になっているため、垂直に近い斜面が存在する部分では正確に測定されない事が図 2 で見られる。しかし、このようなデータ点はクレーター部分の $1/10000$ 以下であるので、容積等の測定結果への影響は無視できる。

測定された三次元形状データより、三次元画像解析ソフトウェアを用い、クレーターの容積、開口部の面積を求めた。また、最深点を通るプロファイル (例: 図 3) を作成し、上述の異常データでない事を確認した

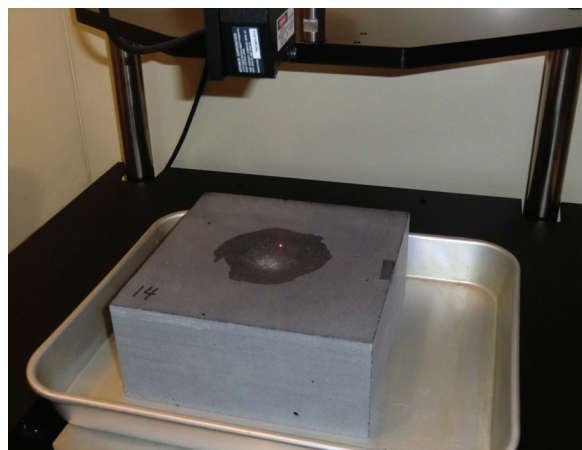


図 1. 三次元形状計測の様子

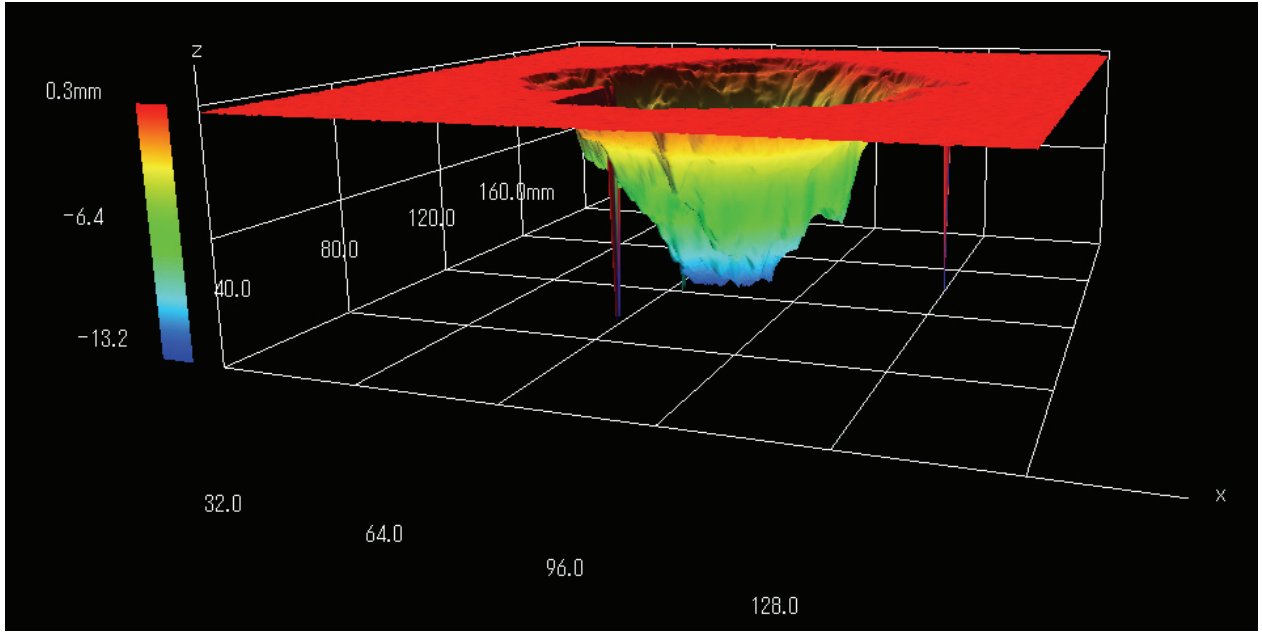


図 2. 計測された三次元形状の一例

うえて、最深点からリムまでの距離をクレーター深さとした。クレーター直径は、開口部の面積と等しくなる円の直径とした。

これらの結果を今までの研究結果と比較するため、よく使われている無次元 π パラメータ[1] を用いて整理した。使用した π パラメータは以下の 5 つである：

$$\pi_D = \left(\frac{\rho_t}{m} \right)^{1/3} D, \quad \pi_d = \left(\frac{\rho_t}{m} \right)^{1/3} d, \quad \pi_v = \frac{\rho_t V}{m},$$

$$\pi_3 = \frac{Y}{\rho_p v_i^2}, \quad \pi_4 = \frac{\rho_t}{\rho_p}$$

ここで、 D, d, V が形成されたクレーターの直径、

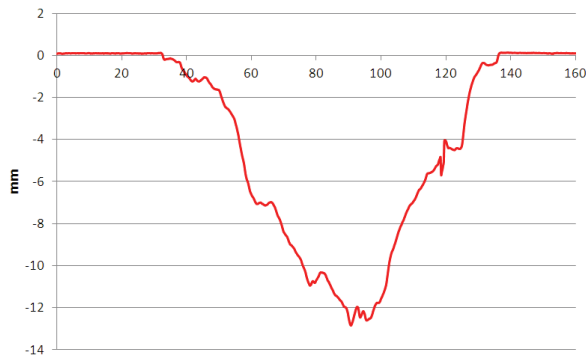


図 3. クレータープロファイルの例

深さ、容積、 m が弾丸質量、 v_i が衝突速度、 ρ_t と ρ_p が弾丸と標的の密度、 Y が標的強度である。ただし、標的強度の測定ができていないので 20 MPa と仮定して計算した。

図 4-6 に無次元化された直径 π_D 、深さ π_d および容積 π_v と強度スケーリングのパラメータ π_3 の関係を示す。いずれの図においても、 π_3 との強い負の相関とともに、弾丸（密度）への依存性が顕著にみられる。

そこで、 π_3 と密度のパラメータ π_4 を独立変数とした多重回帰分析を行い、 π_D 、 π_d および π_v への π_3 と π_4 の依存指数を求めた。結果は、深成岩と堆積岩を用いた他の研究の結果 [2, 3] と合わせて表 1 にまとめた。

今回の結果は、Gault (1973) の "dense crystalline rock" を用いた実験結果に近く Suzuki et al. (2012) の堆積岩を用いた実験結果とは明確な違いを示している。堆積岩中の衝撃波の減衰が大きい事が原因ではないかと考えられるが、最終的な結論を得るためには減衰率の測定や異なった岩石を用いたクレーター形成実験が必要である。

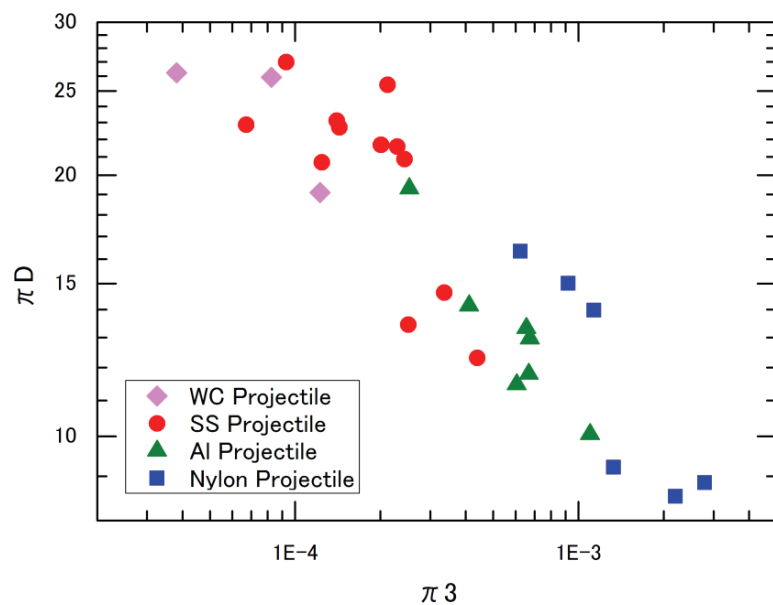


図 4. 正規化されたクレーター直径 π_D と π_3 の関係。

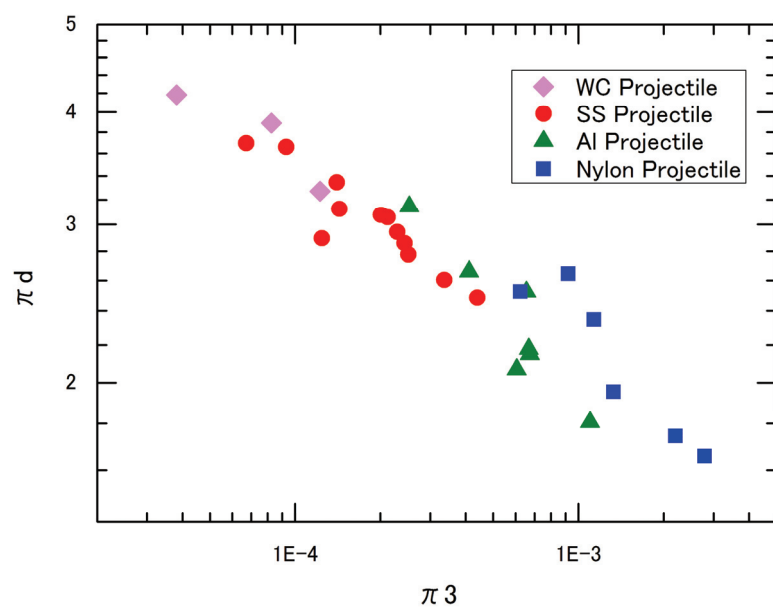


図 5. 正規化されたクレーター深さ π_d と π_3 の関係。

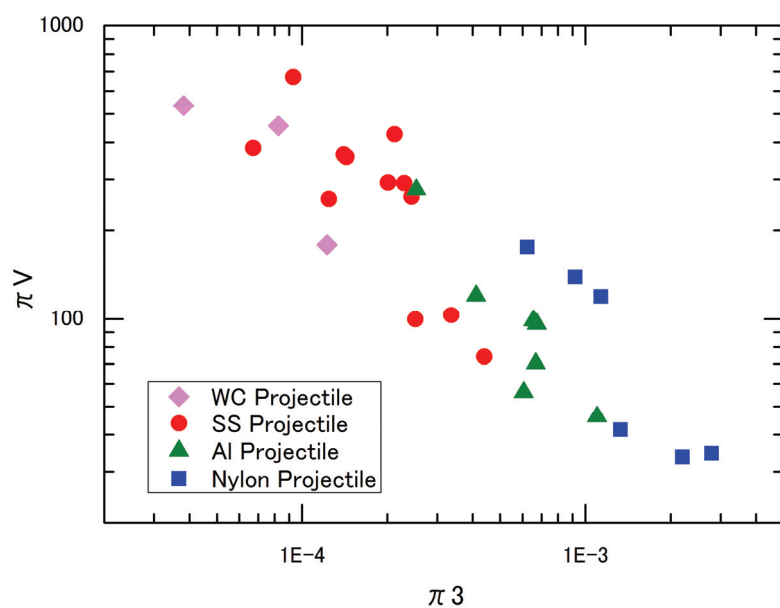


図 6. 正規化されたクレーター容積 π_v と π_3 の関係。

表 1.

	標的	$\pi_D \propto \pi_3^a \pi_4^b$		$\pi_d \propto \pi_3^c \pi_4^d$		$\pi_V \propto \pi_3^e \pi_4^f$	
		a	b	c	d	e	f
今回	玄武岩	-0.38±0.06	0.11±0.07	-0.27±0.03	0.08±0.03	-1.04±0.14	0.45±0.18
Gault (1973)	深成岩	-0.370	0.203	-0.357	0.190	-1.133	0.633
Suzuki et al. (2012)	堆積岩	-0.22±0.02	0.11±0.07	-0.25±0.02	0.01±0.05	-0.71±0.05	0.23±0.17

引用文献

- [1] Holsapple, K. (1993), The scaling of impact processes in planetary sciences, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **21**, 333-373
- [2] Suzuki, A. et al. (2011), Laboratory experiments on crater scaling-law for sedimentary rocks in the strength regime, *J. Geophys. Res.* **117**, E08012
- [3] Gault, D. E. (1973), Displaced mass, depth, diameter, and effects of oblique trajectories for impact craters formed in dense crystalline rocks, *Moon* **6**, 32-44

謝辞

実験は、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所スペースプラズマ共同利用設備を利用して行いました。

玄武岩資料は愛知県岡崎市のファニチャーストーン株式会社 (<http://www.f-stone.com/>) より購入しました。