

玄武岩標的クレーター形成実験から求められた スケーリング則

(衝突クレーター形成に関する強度スケーリング則の再検証)

高木 靖彦 (愛知東邦大学)、長谷川 直、田端 誠、黒澤 耕介 (ISAS/JAXA)

はじめに

衝突クレーター形成は太陽系の形成・進化において最も普遍的な現象であると考えられており、その過程を解明するために、砂のような非固着性の物質、岩石、金属など様々な物質を用いた実験が行われてきた。しかし、太陽系内で最も普遍的に存在していると考えられる玄武岩を用いた実験はほとんど行われていなかった。その理由の一つとして、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考えられる。

今回我々は、クレーター形成実験に適切な大きさのクラックの非常に少ないウクライナ産の玄武岩を入手することができた。そこで、この資料を用いて系統的なクレーター形成実験を行い、物質強度が支配する場合のスケーリング則の検証を目指した。

実験

(1) 実験条件

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。計 16 回の実験を行い、実験条件は以下の通りである。

弾丸物質	タングステンカーバイト、ステンレス鋼、アルミニウム、ナイロン
弾丸形状	球
弾丸直径	1.0mm、3.2 mm (1/8 inch)、7.1 mm (9/32 inch)
弾丸質量	4 ~ 218 mg
衝突速度	2400 ~ 5900 m/sec
衝突角度	90 °

(2) 標的

今回の実験に使用した 24 個の標的は、3 本の柱状摂理玄武岩 (ウクライナ産) より切り出したものである。衝突の方向が柱状摂理の軸の向きに平行になるような向きで直方体を切り出している。

大きさは 200 × 200 × 90 mm で、質量は 10.55 ~ 10.73 kg で、密度は $2920 \pm 10 \text{ kg/m}^3$ であった。



図 1. 使用した玄武岩。赤いビニールテープの長さが約 20 cm。

(3) 測定

形成されたクレーターの一例を図2に示す。柱状摂理の軸中心から放射方向へ延びる破断面が多くのクレーターで顕著に見られた。これは、玄武岩が固まった時の影響と思われる。形状が中心軸対象でないため、クレーター直径を一義的に測定することが困難であった。そこで、図2に示したように、8方向での衝突点からリムまでの径を測定し、その平均の2倍を直径とした。図5中のエラーバーは、この測定値の標準偏差 (1σ) を示している。



図2. クレーター直径測定方法

結成されたクレーターの深さと容積は、Keyence®のデジタル3次元顕微鏡VHX-1000を用いて測定された。図3に3次元形状と断面の測定の様子を示す。測定されたクレーター断面の例を図4に示す。

ただし、いくつかのクレーターに関しては、水平方向の大きさが測定範囲を超えていたため、直径から求めた面積 S と深さ d の積に、測定できたクレーターから求められた係数の平均である 0.28 を乗じて求めた。

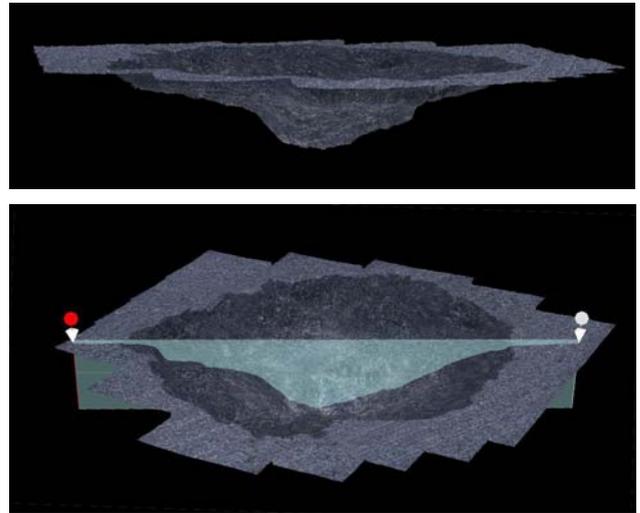


図3. 測定された3次元形状と断面の例

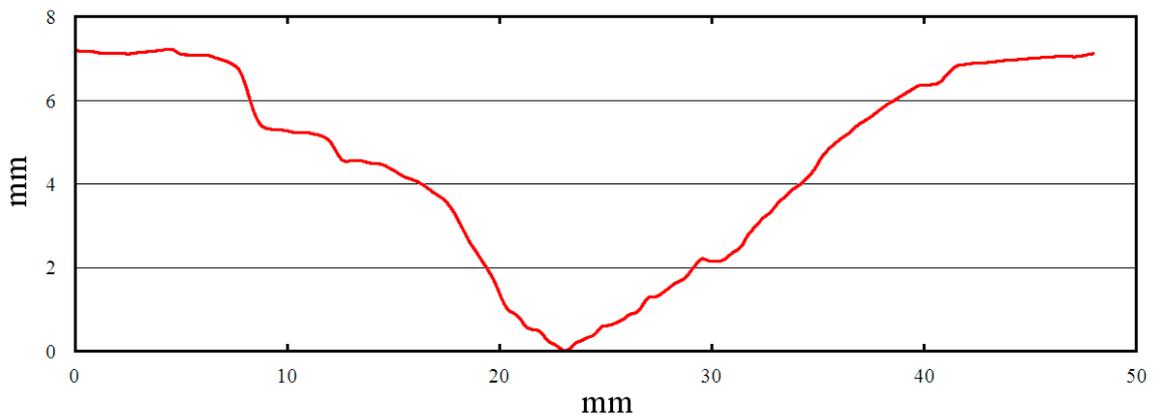


図4. 三次元形状計測器で計測されたクレータープロフィールの一例。高さが約2倍強調されている。

実験結果

計測された直径 D 、深さ d 、および容積 V と衝突エネルギー E との関係を図5～7に示す。図5に示された小さな黒点は、30年近く前に Caltech で行われた斑糲岩を用いた実験 [1], [2] の結果である。

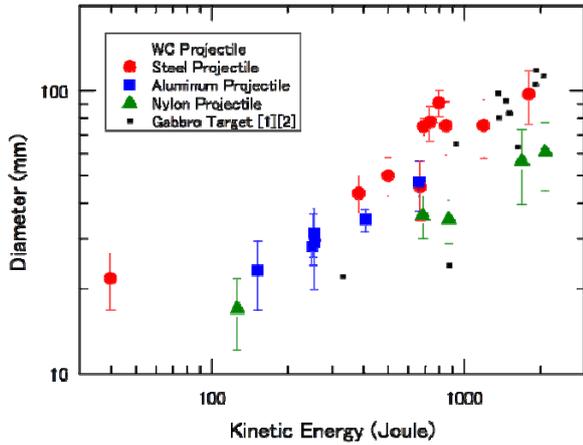


図5. クレーター直径と衝突エネルギーの関係

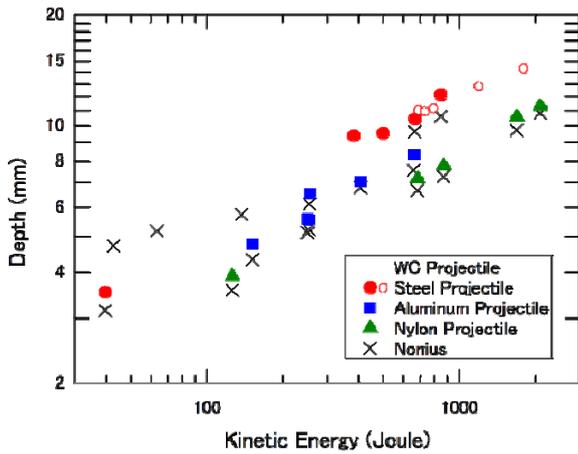


図6. クレーター深さと衝突エネルギーの関係。×はノギスで測った深さを比較のために示した。

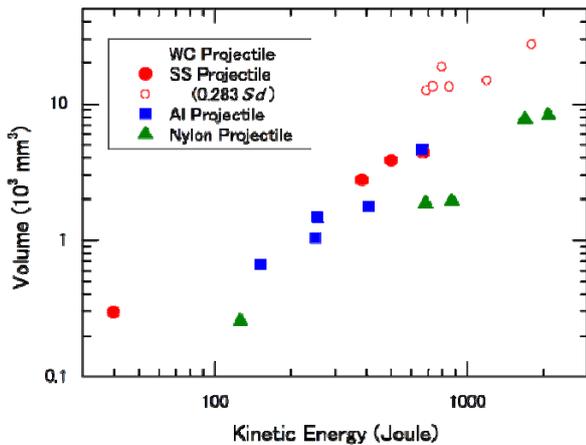


図7. クレーター容積と衝突エネルギーの関係

いずれの図においても弾丸（密度）への依存性が明確に見てとれる。そこで、クレーター直径、深さ、容積が衝突速度、弾丸密度などの衝突条件にどのように依存しているかを調べ、先行研究と比較するため、よく使われる次の無次元パラメーター [3] を使ってまとめた：

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

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

ここで、 D 、 d 、 V が形成されたクレーターの直径、深さ、容積、 m が弾丸質量、 v_i が衝突速度、 ρ_p と ρ_t 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。

これらの無次元パラメーターを用いて結果をまとめた図を図8～10に示す。

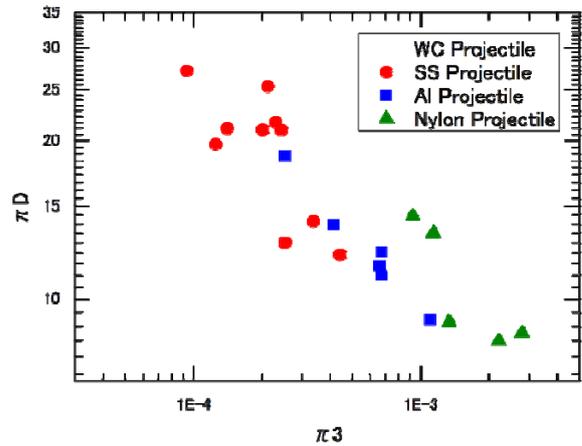


図8. π_D と π_3 の関係

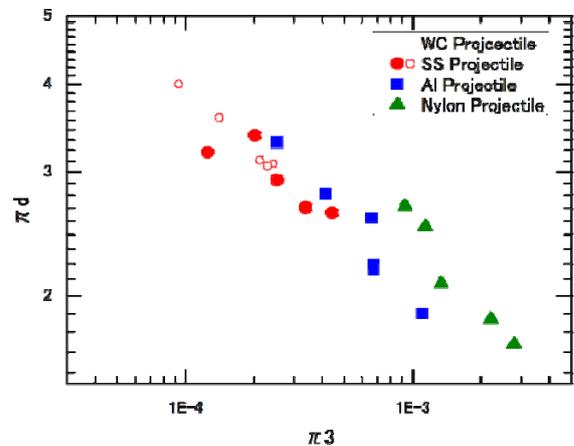


図9. π_d と π_3 の関係

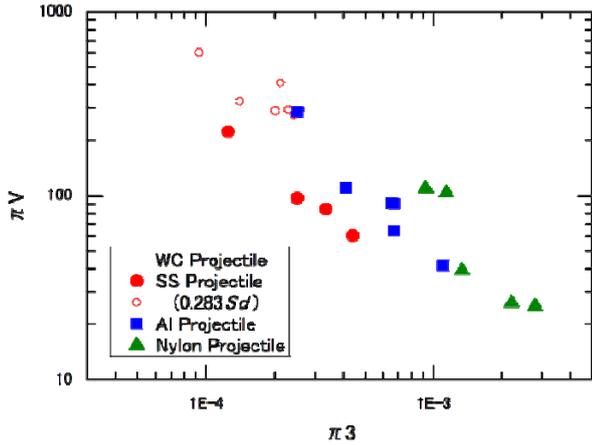


図 10. π_V と π_3 の関係

いずれの図においても、 π_3 および弾丸密度 (π_4) に対する依存性が明確に見られるので、 π_3 および π_4 を独立変数とした多重回帰分析を行った結果、

$$\begin{aligned} \pi_D &\propto \pi_3^{-0.40 \pm 0.07} \pi_4^{0.13 \pm 0.09} \\ \pi_d &\propto \pi_3^{-0.30 \pm 0.03} \pi_4^{0.10 \pm 0.04} \\ \pi_V &\propto \pi_3^{-1.15 \pm 0.17} \pi_4^{0.51 \pm 0.21} \end{aligned}$$

という関係が求められた。これらの係数を先行研究で求められたものと比較したものが表 1 である。

今回の実験結果は、深成岩を用いた実験 [4] の結果に近いことを示している。一方、堆積岩を用いた実験 [5] の結果より、全ての係数の絶対値が有意に大きいことを示している。これは、堆積岩中での衝撃波の減衰率が大きいことに原因があると考えられる。

まとめと次年度の計画

- 玄武岩を標的としたクレーター形成実験を 24 回行い、形成されたクレーターの直径、深さ、容積のデータを取得した。
- それらのデータおよび実験条件を無次元量化し、それらの間の関係を多重回帰分析によりもとめ

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	-0.40±0.07	0.13±0.09	-0.30±0.03	0.10±0.04	-1.15±0.17	0.51±0.21
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

た。

- 新たに導入されるレーザー式 3 次元形状測定器を用いて、クレーター容積の再計測を行い、無次元量間の関係式を精密化していくことが次年度の中心である。
- その結果を含めて次年度中に論文にすることを目標とする。

引用文献

- [1] Lange, M. A., T. J. Ahrens, and M. B. Boslough (1984), Impact cratering and spall failure of gabbro, *Icarus* **58**, 383-395
- [2] Polanskey, C. A. and T. J. Ahrens (1990), Impact spallation experiments: Fracture patterns and spall velocities, *Icarus* **87**, 140-155
- [3] Holsapple, K. (1993), The scaling of impact processes in planetary sciences, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **21**, 333-373, doi:10.1146/annurev.ea.21.050193.002001.
- [4] 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, doi:10.1007/BF02630651
- [5] Suzuki, A., S. Hakura, T. Hamura, M. Hattori, R. Hayama, T. Ikeda, H. Kusuno, H. Kuwahara, Y. Muto, K. Nagaki, R. Niimi, Y. Ogata, T. Okamoto, T. Sasamori, C. Sekigawa, T. Yoshihara, S. Hasegawa, K. Kurosawa, T. Kadono, A. M. Nakamura, S. Sugita, and M. Arakawa (2012), Laboratory experiments on crater scaling-law for sedimentary rocks in the strength regime, *J. Geophys. Res.* **117**, E08012, doi:10.1029/2012JE004064

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。