

# 堆積岩を使ったクレーター形成実験

門野 敏彦<sup>1</sup>, 池田 卓矢<sup>2</sup>, 緒方 雄一郎<sup>3</sup>, 岡本 尚也<sup>4</sup>, 楠野 葉瑠香<sup>5</sup>, 桑原 秀治<sup>6</sup>,  
笹森 務仁<sup>6</sup>, 関川 千里<sup>4</sup>, 永木 恵太<sup>3</sup>, 新居見 励<sup>3</sup>, 羽倉 祥雄<sup>4</sup>, 服部 真希<sup>6</sup>,  
羽村 太雅<sup>6</sup>, 羽山 遼<sup>4</sup>, 武藤 祐太<sup>6</sup>, 義原 拓志<sup>7</sup>, 長谷川 直<sup>8</sup>, 黒澤 耕介<sup>8</sup>,  
鈴木 絢子<sup>4,9</sup>, 中村 昭子<sup>4,9</sup>, 杉田 精司<sup>6</sup>, 荒川 政彦<sup>4,9</sup>

<sup>1</sup>大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター, <sup>2</sup>京都大学, <sup>3</sup>大阪大学・理,  
<sup>4</sup>神戸大学, <sup>5</sup>立正大学, <sup>6</sup>東京大学, <sup>7</sup>九州工業大学, <sup>8</sup>JAXA・ISAS,  
<sup>9</sup>惑星科学研究センター(CPS)

## 1. はじめに

近年の惑星探査では、光学計測装置の発展により火星上の～数 m のクレーターなど非常に高解像度の画像が取得されるようになった。火星におけるこのようなクレーターの分布は飛来した小天体のサイズ分布を反映しており、月面上のクレーターから得られた分布と比較することによってクレーター年代学の根幹となる基本情報（たとえば各時代における、より小天体のサイズ分布）の精度が上がるのが期待される。また、小天体のサイズ分布を決定する際には、天体の衝突により生成された一次クレーターと、その際に飛び出した破片が作る二次クレーターを区別しなければならない。これらの作業で重要となるのが、衝突条件（入射粒子の質量・密度、衝突速度、標的の密度・強度）と結果（クレーター体積など）との関係＝スケーリング則である。数 m サイズのクレーター形成は重力よりも標的の強度に支配されており、さらに、火星や地球では表面のかなりの部分が堆積岩で覆われているため、「堆積岩に対する強度域のスケーリング則」が必要である。

1960 年前後に始まったクレーター形成実験によりこれまで非常に多くのデータが得られており、スケーリング則が整備されてきている [1,2]。しかしながら、堆積岩に対するクレーター形成実験は系統的に行われておらず信頼できるスケーリング則も得られていない。本研究では、いくつかの代表的な堆積岩を用いて弾丸の種類と衝突速度を変えてクレーター形成実験を行い、スケーリング則を確立する。これまで得られている金属や火成岩に対するスケーリング則と今回の結果を比較し、類似点と相違点を議論する。

## 2. 実験と結果

宇宙航空研究機構・宇宙科学研究本部の二段式軽ガス（水素及びヘリウム）銃、神戸大学の火薬銃を使って実験を行った。入射粒子はナイロン、タングステンカーバイド、アルミナ、SUS、ガラス、チタン、標的としては、日本産砂岩、中国産砂岩、パキスタン産砂岩、大理石、の4種類を使用した。速度を 0.8 km/s から 7.1 km/s まで変えて実験を行った。

ショット終了後、標的を回収しクレーター形状を調べた（図1）。クレーターの表面積  $S$ （図1の白線で囲まれた部分）を測定し、さらにレーザープロファイラを用いてクレーターの断面形状を計測し深さ  $d$  を求めた（図2：図1の破線に沿った断面）。クレーターが円錐であると仮定して体積  $V$  を  $Sd/3$  として求めた。

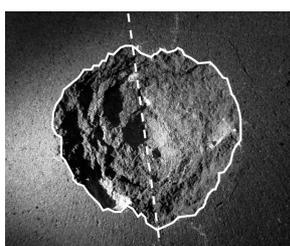


図1：クレーター（ナイロン 3.2 mm, パキスタン産砂岩, 速度 6.8 km/s)

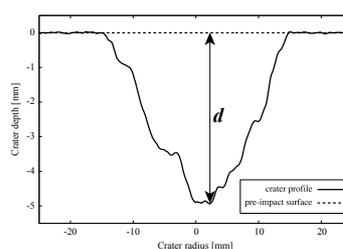


図2：クレーター断面

### 3. 考察

三つの無次元量,  $\pi_1 = \rho_t V / m_p$  ( $V$  はクレーター体積,  $\rho_t$  は標的密度,  $m_p$  は弾丸の質量),  $\pi_3 = (Y / \rho_p U^2)$  ( $Y$  は標的強度,  $\rho_p$  は弾丸密度,  $U$  は衝突速度),  $\pi_4 = (\rho_t / \rho_p)$  を考える. まず, 一定の  $\pi_3$  のもとで  $\pi_4$  を変えて実験を行い,  $\pi_1$  と  $\pi_4$  の関係を求めた (図3). 結果は  $\pi_1 \sim \pi_4^{0.23 \pm 0.17}$  である. バラツキ (誤差) が大きい, これはクレーター体積が  $\pi_4$  (密度比) だけでなく, 弾丸の強度や延性度にも依存しているからかもしれない.

次に,  $\pi_1$  を  $\pi_4^{0.23}$  で規格化し,  $\pi_3$  の関数としてプロットした (図4). 過去の堆積岩に対するクレーターのデータ[3-5]も同時にプロットしてある. ただし,  $\pi_3$  の標的強度  $Y$  として, 各標的に対して実測した引張強度の値を用いた. 結果は, 過去のデータも含めて, ほぼ直線の関係を示している. ここで, 赤丸が二段式水素銃, 緑四角が二段式ヘリウム銃, 青菱形が火薬銃での結果を表している. 我々のデータをべき乗則でフィットすると,  $\pi_1 / \pi_4^{0.23} = (0.23 \pm 0.11) \pi_3^{-0.63 \pm 0.06}$ , となった.

図4には, 過去に得られている金属[2,6], 火成岩[7]などに対するクレーター体積のスケーリング則を直線で示してある. これらのスケーリング則をプロットする際にも標的強度として引張強度を用いた. 堆積岩のデータは金属や火成岩の直線と一桁以内で一致しているが, 系統的に小さい値を取っているようである.

堆積岩は火成岩に比べて, 1) 強度が弱い (クレーターは大きくなる), 2) 揮発成分が含まれている (蒸発にエネルギーが使われクレーターは小さくなる), 3) 空隙率が大きい (衝撃波の減衰が激しくクレーターは小さくなる), という特徴があると予想されていた[4,5,8]が, それぞれがどの程度の効果を持っているのかはわかっていない. 今回の堆積岩の結果と火成岩の結果を比較すると  $\pi_1$  は一桁以内に収まることが示された. これは1) の効果は  $\pi_3$  の強度として引張強度を用いることによりスケール則に取り込むことができることを意味している. また, それでもまだ残る差は, 2) および/または3) の効果と考えられる. 実際, 大きな  $\pi_3$  では, 火成岩の直線 (破線) は堆積岩のデータに近づいているようにも見える. これは, 大きな  $\pi_3$  すなわち小さな衝突速度では蒸発がほとんど起こらず, 火成岩と堆積岩の違いが無くなっているのではないか, すなわち2) が効いているのではないか, ということが示唆される. また, 今回用いた堆積岩のうち, 密度が大きい (空隙率が小さい) 日本産砂岩と大理石では火成岩に近い値になっている (緑四角データ5つのうち,  $\pi_3$  が大きい方から3つのデータ). これは3) の効果も無視できないということを示しているのかもしれない.

### 4. まとめ

堆積岩に対するクレーター形成実験を行い, 衝突条件とクレーター体積に関するスケーリング則を求めた. 結果は,

$$\pi_1 = (0.23 \pm 0.11) \pi_3^{-0.63 \pm 0.06} \pi_4^{0.23 \pm 0.17},$$

となった. ここで  $\pi_3$  の標的強度として引張強度を用いている. これらのデータは, 同様に強度を引張強度として算出した火成岩や金属の結果と一桁以内で一致した. しかしながら, 系統的に火成岩などの結果よりも小さくなっており, これは空隙率や含有揮発成分蒸発の効果も無視できないことを示している. これらの効果の定量的評価は今後の課題である.

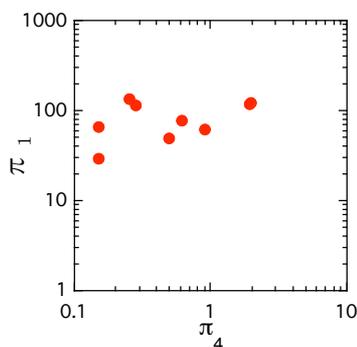


図3 :  $\pi_1$  と  $\pi_4$

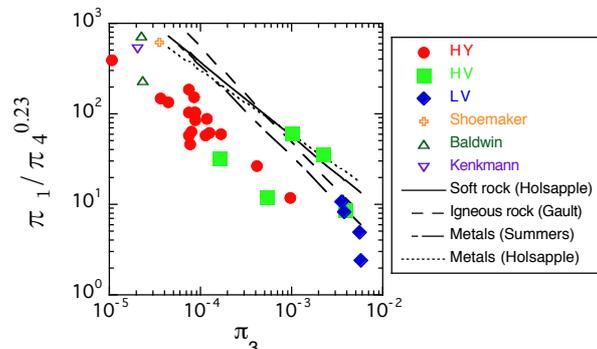


図4 :  $\pi_1 / \pi_4^{0.23}$  と  $\pi_3$

## 謝辞

本研究は宇宙科学研究所スペースプラズマ施設との共同研究であり、大学院修士・博士課程の学生に対する啓発と基礎訓練の場を提供することを目的として、CPS/神戸大学-北海道大学 GCOE プログラム「惑星科学国際教育研究拠点の構築」と衝突研究会の共同で企画されました。この企画に賛同・協力していただいた、赤星、近藤、柴田、土山、留岡、福岡、藪田、各先生に感謝いたします。また、火薬銃の運転に関して、神戸大学の三軒氏と桂氏にお世話になりました。

## 参考文献

- [1] H. J. Melosh, Impact Cratering, Oxford (1989)
- [2] K. Holsapple, Ann. Rev. Earth Planet. Sci., **21** 333-373 (1993)
- [3] E. M. Shoemaker et al., Am. J. Sci., **261**, 668-682 (1963)
- [4] E. C. Baldwin et al., Meteo. Planet. Sci., **42**, 1905-1914 (2007)
- [5] T. Kenkmann et al., Meteo. Planet. Sci., **46**, 890-902 (2011)
- [6] J. L. Summers, NASA TN D-94 (1959)
- [7] D. E. Gault, The Moon, **6**, 32-44 (1973)
- [8] S. W. Kiefer and C. H. Simmonds, Rev. Geophys. Space Phys. **18**, 143-181 (1980)