

玄武岩標的上の衝突クレーター形成実験 (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 (JAXA)

1. はじめに

本稿は、平成 22 年度スペースプラズマ共同利用に「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」というテーマで採択されたものの報告である。

衝突クレーターのサイズに関するスケーリング則は、一般に、

$$E = K_1 Y D^3 + K_2 \rho g D^4$$

という形であらわされる。ここで、 E が衝突の運動エネルギー、 D がクレーター直径、 Y が標的強度、 ρ が標的密度、 g が表面重力、 K_1 と K_2 が定数である。この式の右辺の第一項は、標的を破壊するのに使われるエネルギーを、第二項は、標的物質を表面より上部に持上げるのに必要なエネルギーを表しており、それぞれ強度スケーリング項、重力スケーリング項と呼ばれている。

このうち重力スケーリングに関しては、砂やガラスビーズ等を用いた室内実験が数多くなされており、検証が行われている。また、その結果に関しては多くの議論があるが、微小重力実験での検証も行われている [Takagi et al., 2004]。しかし、強度スケーリングに関しては、均質で大きな標的が得難い等の問題点のため、十分行われてこなかった。本研究では、その検証をめざして、玄武岩を標的に用いた衝突クレーター形成実験を行った。

2. 実験方法

標的には、石材店より入手したウクライナ産の柱状玄武岩 (図 1) を、柱状摂理に垂直な方向に切断して 200 mm × 200 mm × 90 mm に整形 (図 2) したもの 8 個を用いた。密度は、2900 kg/m³ であった。弾丸には、直径 3.2 mm のアルミニウム球およびステンレス球を用いた。これを新型二段式軽ガス銃により 3.2 ~ 5.3 km/sec で衝突させた。各実験の条件は表 1 にまとめた。



図 1



図 2

形成されたクレーターの表面写真を図 3 に示す。この図に見られるような放射状の破壊が多くの標的で見られた。整形された標的の中心は柱状玄武岩の中心軸にほぼ一致しており、中心軸に平行な向きで衝突が行われているので、この放射状の破壊は、玄武岩が固まる時の熱履歴を反映し

たものと考えられる。

このように、経度方向により直径が大きく異なるので、砂のクレーターのように、単純に直径を求めることができない。そこで、図4に示すように、撮影した表面の写真に衝突点から8方向に線を引き、その線ごとに半径を求め、その平均の2倍を直径とした。得られた結果は表1にまとめた。誤差は、8方向の半径の標準偏差（の2倍）である。

クレーターの（最大）深さと容積の測定に関しては、3次元形状測定器により行った。ただし、クレーターの大きさが測定範囲を超えるもの2個については深さが、3個については容積が測定できていない。これらに関しては、何らかの工夫をして今後測定する予定である。深さと容積の測定結果についても表3にまとめた。

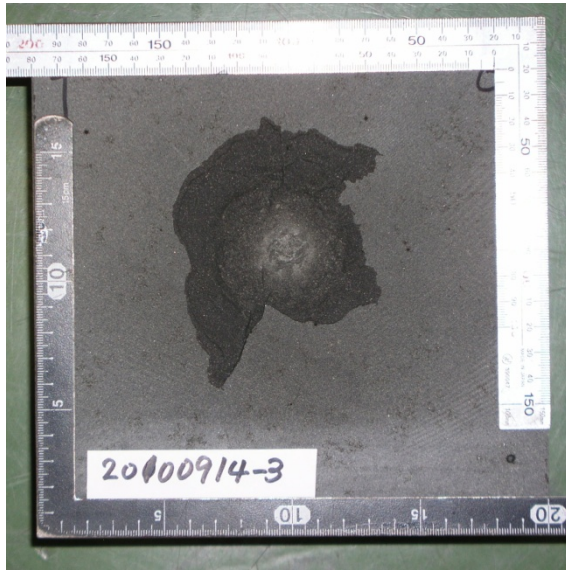


図 3

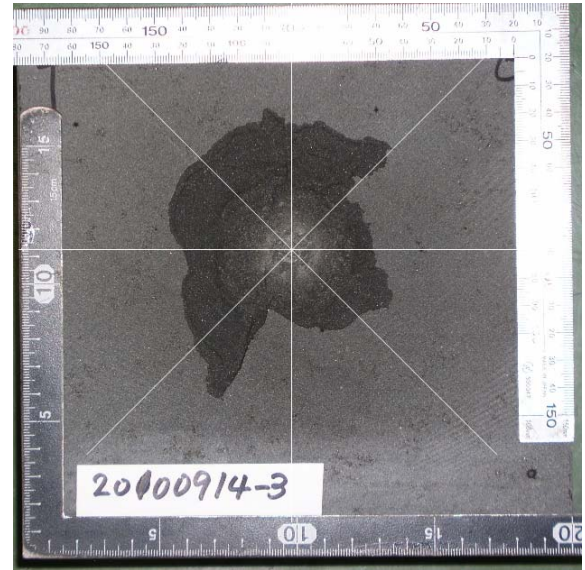


図 4

#	弾丸材質	弾丸質量 (g)	衝突速度 (m/sec)	エネルギー (Joule)	直径 (mm)	深さ (mm)	容積 (mm ³)
1	Al	0.048	3246	253	31.3±5.4	5.55	1480
2	SUS	0.135	3541	846	75.3±16.2	12.15	
3	Al	0.047	3293	255	29.2±9.4	6.52	1480
4	SUS	0.133	3168	667	45.8±10.9	10.44	4420
5	SUS	0.133	5203	1800	97.0±20.8		
6	SUS	0.133	4239	1190	75.4±17.7		
7	Al	0.047	4155	406	35.0±3.3	7.06	1780
8	Al	0.047	5299	660	47.2±9.6	8.34	4600

表 1

3. 実験結果

図 5 の赤丸は、前節で述べた方法により測定したクレーター直径と衝突エネルギーの関係を示している。比較のため、Lange et al. (1984) 及び Polanskey & Ahrens (1990) が斑禰岩を標的に用いて行った実験の結果を黒四角で示した。火山岩と深成岩という組織の違いがあるにも関わらず、今回の結果が斑禰岩の結果とほぼ一致していることは興味深い。

今回の結果を最小二乗フィットすると

$$D = 10^{-0.0 \pm 0.2} E^{0.62 \pm 0.07}$$

という結果になる。ここで、 D が直径 (mm)、 E が衝突エネルギー (Joule) である。直径がエネルギーの約 2/3 乗に比例するという結果になり、初めに述べた強度スケーリングの係数の倍になっている。その理由は現在のところ不明であるが、斑禰岩の結果ともほぼ一致していることから、何らかの理由があると考えられる。

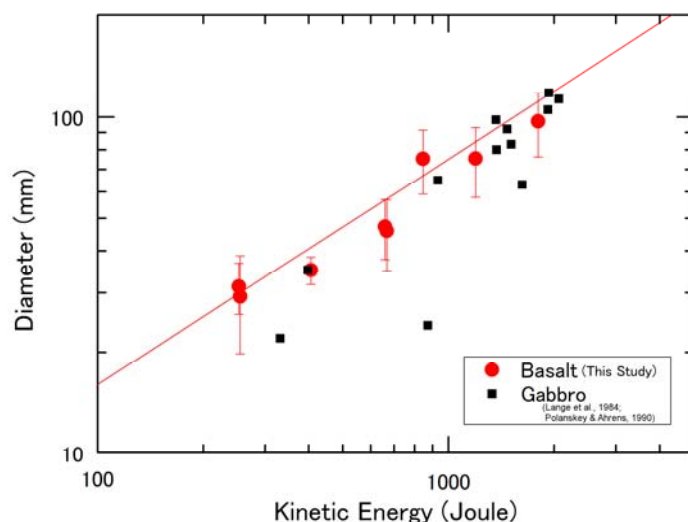


図 5. 形成されたクレーター直径と衝突エネルギーの関係

図 6 には、3 次元形状測定器で測定したクレーターの直径と衝突エネルギーの関係を示した (赤丸)。青い×で示したのは、ノギスで計測した値である。ノギスで計測した値の方が系統的に小さくなっているのは、最深部を計れていないことによると考えられる。そこで、3 次元形状測定器で測定したデータのみを用いて、深さと衝突エネルギーの関係を求めると、

$$d = 10^{-0.5 \pm 0.3} E^{0.53 \pm 0.10}$$

という結果が得られた。ここで、 d が直径 (mm)、 E が衝突エネルギー (Joule) である。

同様に、図 7 には、3 次元形状測定器で測定したクレーターの容積と衝突エネルギーの関係を示した (赤丸)。容積と衝突エネルギーの関係は、

$$V = 10^{-2.7 \pm 0.5} E^{1.2 \pm 0.2}$$

となった。ここで、 V が容積 (10^3 mm^3)、 E が衝突エネルギー (Joule) である。

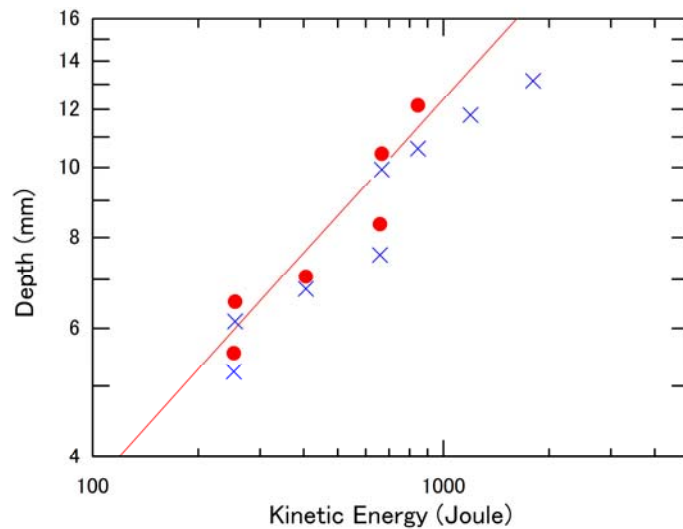


図 6. 形成されたクレーターの深さと衝突エネルギーの関係

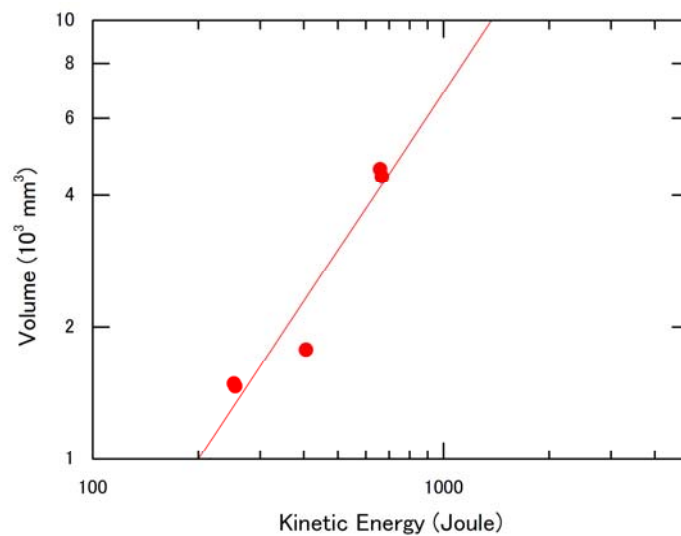


図 7. 形成されたクレーター容積と衝突エネルギーの関係

4. おわりに

今回の結果は、形成されたクレーターの容積が衝突エネルギーの（誤差の範囲内で）1 乗に比例する結果になっており、単純な強度スケーリングが確認されたように見える。しかし、直径はエネルギーの 0.62 乗、深さは 0.52 乗という結果になっており、矛盾した結果になっている。この原因は、全体としてデータ点が少ないため、弾丸にアルミニウム球とステンレス球を用いた実験結果を混在させて解析せざるをえなかったことに起因していると考えられる。したがって、今後さらにデータ点を増やし、弾丸の材質別に解析を進める必要があると考えられる。

引用文献

Lange, M. A., T. J. Ahrens, and M B. Boslough (1984) *Icarus* **58**, 383-395
 Polanskey, C. A. and T. J. Ahrens (1990) *Icarus* **87**, 140-155