

ラブルパイル小惑星を模擬した粗い粒子地形に対する クレーター形成実験

巽瑛理（東大新領域）、杉田精司（東大理/東大新領域）

1. 背景と目的

はやぶさなどの近年の小惑星探査により、小惑星表面の詳細な姿が明らかになりつつある。例えば、イトカワの表面は mm~m 程度の礫で覆われていること、衝突由来と考えられる円形の窪地 [1]が存在することなどが分かってきた。クレーター数密度からはクレーター表面年代が推定できる。表面年代の分布は、その天体の力学的進化を理解するための非常に重要な制約条件となる。クレーター数密度からクレーター表面年代を得るには、クレータースケールリング則と衝突頻度の情報が必要である。先行研究で岩盤における強度スケールリングを用いて、75Myr – 1Gyr という年代を推定している [2]。しかし、強度支配スケールリング則が適切である保証はない上に、他のスケールリング則を用いると年代推定値は2桁ほども変更してしまうことも分かっている [3]。

イトカワのように km サイズ以下の天体表面は粗粒な岩塊で構成されることが予想されており、10m 程度の隕石によってカタストロフィックに破壊されることを考慮すると、小天体上では、インパクターサイズと標的構成粒子径が同程度の衝突が頻繁に起きていることになる。このように、表面が粗粒な場合についてどのようなスケールリング則を用いるのが適当かは判断が難しい。特に、標的粒子径が大きい場合には、その粒子を破壊することによりエネルギーを散逸し、クレーター形成効率が下がる効果（アーマリング効果）がある可能性もある [2]。そこで、本研究では粗粒なターゲットでのアーマリング効果がどのように評価できるか（重力則か材料強度則か）実験的に明らかにすることを目的とした。

2. 実験

本研究ではインパクターのサイズと標的構成粒子径が同程度になる条件のもとで、衝突速度を変え、クレーター形成実験を行った。クレーターリム直径をレーザー変位計で計測した。天体表面での破壊現象を再現するため、礫の模擬物として、比較的強度の低いガラスビーズ焼結体とパミスを用いた。それぞれの参考強度は表 1 のとおりである。ガラスビーズ焼結体はパミスや玄武岩と比較すると、単位体積あたりの破壊エネルギーは 1/10~1/100 と小さく、破壊しやすい。

東京大学の縦型一段式軽ガス銃と ISAS の縦型二段式軽ガス銃を用いてそれぞれ低速度（70 – 190 m/s）と高速度（1 – 6 km/s）でのを行った。低速度域と高速度域でのインパクターはポリカーボネート製で、それぞれ 0.76g（φ 10 mm）、0.068g（φ 4.8 mm）である。

Table 1 Material properties.

	Density (g/cm ³)	Compressive strength (MPa)	Disruption energy for unit volume (J/m ³)
Ordinary chondrite*	3.0 - 3.8	~50	~5E6
Carbonaceous chondrite**	2.0 - 3.5	0.3 - 30	n/a
Basalt***	~2.7	~100 - 300	2E6
Pumice****	0.4 - 0.6	~0.76	1E6
Sintered glass-beads	1.4 - 1.5	n/a	5E4

*Flynn and Durda (2004), **Tsuchiyama (2009), ***Fujiwara et al. (1989), ****Flynn et al. (2014)

2-1. レゴリス層上に岩塊が分布する場合：小天体では、小さな隕石衝突によっても全球的な振動が励起されることが知られている[4]。衝突励起地震によって粒度偏析が起こり（Brazil Nut Effect）、その結果、大きな礫が表面に現れ細粒のレゴリス層がその下に形成する可能性がある。実際、イトカワ表面には底面が細粒物質で覆われた円形の窪地が幾つも見つかっている[1]。そのような層状構造が存在する場合に、礫層厚みがクレーター形成効率に与える影響を見積もった。礫を 1cm 程度のガラスビーズ焼結体もしくはパミスで模擬し、レゴリスを 200 μ m のガラスビーズで模擬した。礫層の厚みを 0, 20, 40 mm と変化させクレーター形成実験を行った。

2-2. 岩塊のみで構成される場合：クレーター形成効率の下限值を見積もるため、礫層厚さが無限大の極限として全てが礫で構成されているターゲットを考える。礫を 1 cm 程度のパミスで模擬し、クレーター形成実験を行った。

3. 結果

実験結果は 2 つの無次元変数, $\pi_R = (\rho/m_p)R_c$, $\pi_2 = ga/U^2$ で整理した(e.g., [5]). R_c はクレーター半径, m_p は弾丸質量, g は重力, a は弾丸半径, U は衝突速度である。比較のため、Dry sand 重力則の結果[6]を各図中の破線で示している。

3-1. レゴリス層上に岩塊が分布する場合：ガラスビーズ焼結体を用いた低速度での実験結果を Fig.1 に、パミスを用いた高速度での実験結果を Fig. 2 に示す。低速度での実験において、焼結体の層がある場合にはガラスビーズだけのときに比べて形成効率が下がる。焼結体層の厚みが厚い場合と薄い場合を比較すると、薄い場合には低衝突速度では焼結体層の厚みが厚いものと同じ程度のクレーター形成効率に留まるが、高速度で、ガラスビーズの重力則に漸近することが分かる。一方、焼結体層が厚い場合には実験を行った速度範囲では重力則への漸近は見られなかった。焼結体層が薄い場合に重力則と同程度のクレーターができたときには、インパクターが焼結体層を貫通していたことを鑑みると、焼結体層が厚い場合でも、さらに速度が高くなり焼結体層を貫通する程度の速度になれば重力則へ漸近するという推論が

成り立つ。

パミスを用いた高速度での実験結果を見ると、厚みが厚いほど重力則に遷移する速度が高くなっていることが分かる。ここで、礫層厚みが十分に厚い場合であっても、速度が高くなると重力則と匹敵するサイズのクレーターが形成されることに注目されたい。

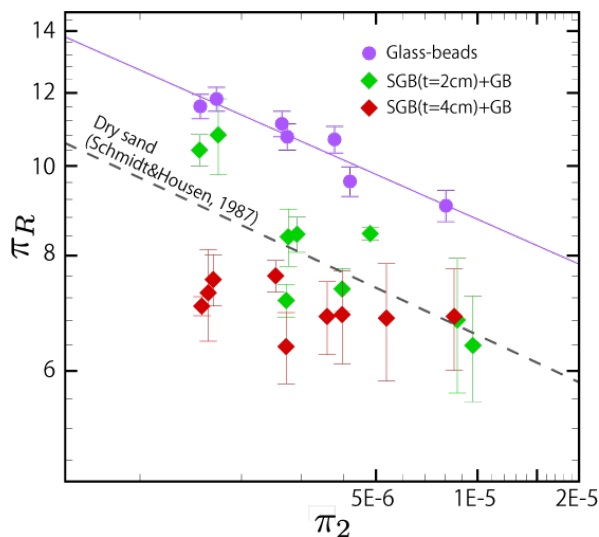


Figure 1: ガラスビーズ焼結体 (SGB) でできた礫層がガラスビーズ (GB) の上にある場合. 衝突速度が上がり、焼結体層を弾丸が貫通した場合には、クレーターサイズはガラスビーズの時と同程度の大きさになる。

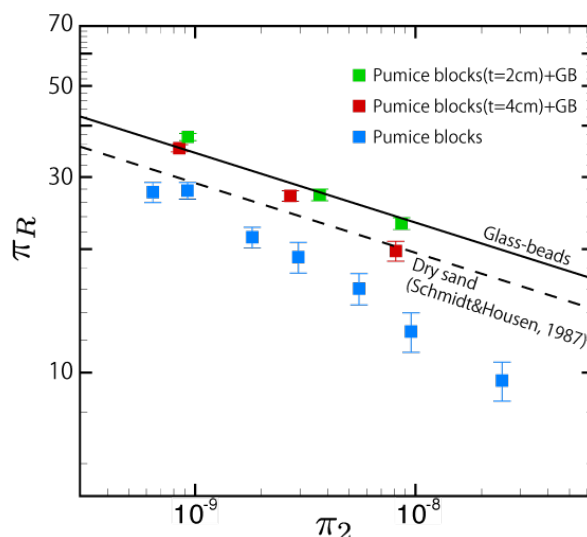


Figure 2: パミス小礫がガラスビーズの上にある場合. Fig.1 の結果と同様に、衝突速度が十分に大きく、礫層を貫通する場合にはクレーターサイズはガラスビーズの時と同程度の大きさになる。また、礫層の厚みが無限大の極限でも、速度が十分に大きいと重力則と同程度のクレーター形成効率となる。

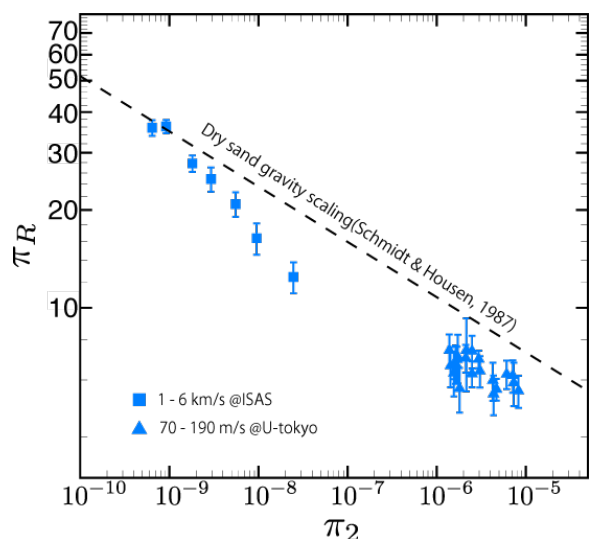


Figure 3: パミス礫で構成された標的に対するクレーター形成効率. 衝突エネルギーがターゲット構成粒子破壊エネルギーと同程度の時 (70-190m/s) にはクレーター形成効率は重力則に対して 40%ほど小さくなるが、衝突エネルギーが破壊エネルギーに対して十分に大きくなると、重力則と同程度の形成効率になる。

3-2. 岩塊のみで構成される場合: パミス礫のみで構成された標的についての実験結果を Fig. 3 に示す. 低速度と高速度で形成効率の傾きが変化するように見える. 1km/s 以下と以上の領域に分けると、1km/s 以下では形成効率は重力則に対して下がっていき、 π スケールリング上で緩やかな傾きを持つものに対して、1km/s 以上では速度が上がるに従って形成効率は重力則よりも急な傾きを持っている。この低速度と高速度での結果から外挿すると、重力則よりも最大で 40%程度形成効率が下がることが分かった。

4. 考察と議論

パミスとガラスビーズ焼結体の2種類の強度を持つ構成粒子で再現されたとおり、弾丸が礫層を貫通し、ガラスビーズ層の流線が発達する場合にはクレーターサイズはガラスビーズの時と同程度の大きさになる。この時、ガラスビーズ焼結体の破壊エネルギーはパミスに比べて1~2桁程度小さいため、重力側へ遷移するエネルギーも1~2桁程度小さくなったと考えられる。つまり、標的の強度によって重力側へ漸近する条件が変わることを示している。一方で、礫層が無限大の極限であり弾丸が礫層を貫通することがあり得ない条件であっても、衝突エネルギーが十分に大きい場合には重力側と同程度のクレーター形成効率を持つことが分かった。この結果は先行研究[7]の結果と調和的である。これは、衝突時に発生する圧力が十分に大きく、掘削流が粒子間の摩擦の効果を凌駕する程度に発達するからであると考えられる。

礫のみで構成されるターゲットに対する衝突実験結果より、衝突エネルギーと構成粒子の破壊エネルギーの関係からクレーター形成効率を減少させるアーミング効果を3つの領域に分けられると考えられた (Fig. 4)。①衝突エネルギーが十分に小さくターゲット構成粒子を破壊しないような場合には、クレーターは運動量保存により律則される[8]。②衝突エネルギーがターゲット構成粒子と同程度の場合には、表面にあるターゲット構成粒子を破壊することによりエネルギーを散逸し、クレーター形成効率は重力側と比較し小さくなる。③衝突エネルギーが十分に大きくなると、高い初期圧力により、ターゲット構成粒子間の摩擦力を凌駕する流線が発達し、粒子径はもはやクレーター形成に影響を及ぼさなくなってくるため、重力側と同程度のクレーターが形成される。

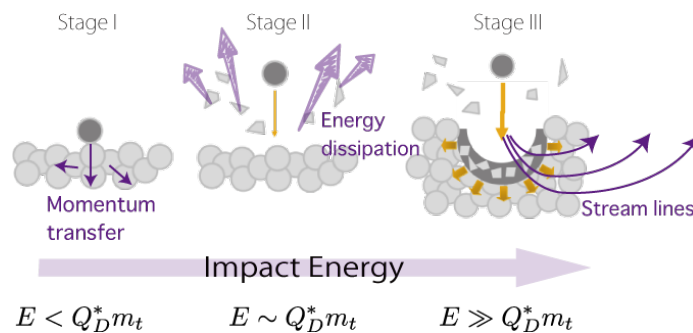


Figure 4: アーミング効果の分類。アーミング効果は衝突エネルギーに応じて3つの領域に分類できると考えられた。

参考文献

- [1] Hirata, N. et al., *Icarus*, 200, pp. 486-502, (2009). [2] Michel, P. et al., *Icarus*, 200, pp.503-513, (2009). [3] Tatsumi, E. and S. Sugita, #1909, 46th LPSC, (2015). [4] Miyamoto, H. et al., *Science*, 316, pp. 1128-1131, (2007). [5] Holsapple, K.A., *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 21, pp.333-373, (1993). [6] Schmidt, R.M. and K.R. Housen, *Int. J. Engng*, 5, pp. 543-560, (1987). [7] Holsapple, K.A. and K.R. Housen, #2538, 45th LPSC, (2014). [8] Guettler, G.C. et al., *Icarus*, 220, pp. 1040-1049, (2012).