

微小重力下での高速度衝突クレーター形成実験 II

木内真人¹, 岡本尚也¹, 長足友哉², 長谷川直¹, 中村昭子²

¹宇宙航空研究開発機構, ²神戸大学大学院理学研究科

High-velocity impact experiments into granular materials under microgravity II

Masato Kiuchi^{1*}, Takaya Okamoto¹, Yuuya Nagaashi², Sunao Hasegawa¹, Akiko Nakamura²

¹Japan Aerospace Exploration Agency, ²Graduate School of Science, Kobe University

はじめに

小天体表面における重力加速度は微小であり, クレーターの観測から小天体表面の進化の過程や表面の物性を推定するためには, クレーター形成に重力が与える影響を理解することが重要となる. クレーターサイズに対する重力の影響について調べた研究は過去にいくつかあり, 低重力下および高重力下で様々な速度域 ($1 \text{ m s}^{-1} \sim 6.6 \text{ km s}^{-1}$) で衝突実験が行われている[1-5]. これらの多くの実験ではクレーター直径は重力の $-0.17 \sim -0.19$ 乗に比例するという結果が得られている一方, 重力依存性が見られなかった実験例もある. また, 小惑星表面のような微小重力環境ではレゴリス層の固着力(強度)の影響が重力の影響を卓越する条件が存在する可能性がある. クレータリングが重力支配域から強度支配域に遷移する条件は, 異なる重力下での実験データが限られていることもあり, 明確にはわかっていない. 本研究では, 粉体標的に対して低重力下で衝突クレーター形成実験を行い, クレーター直径の重力依存性および粉体層強度がクレーターサイズに与える影響について調べた.

実験方法

我々は, 宇宙航空研究開発機構(JAXA)施設内にある縦型式二段銃の真空チャンバー内に簡易な落下装置を構築することで, 低重力下で高速度衝突実験を行える装置を開発した[6]. 落下装置で実現できる重力加速度は $0.04 \sim 0.07 \text{ G}$ であり, この装置を用いて粉体標的に対する高速度衝突実験を行った. 標的には珪砂(粒径: $\sim 425 \mu\text{m}$, 粒子密度: 2.5 g cm^{-3}), 微小ガラスビーズ(粒径: $\sim 44 \mu\text{m}$, 粒子密度: 2.5 g cm^{-3}), 微小アルミナ(粒径: $\sim 40 \mu\text{m}$, 粒子密度: 3.9 g cm^{-3})の3種類を用い, 弾丸には直径 1 mm のガラス球(密度: 2.5 g cm^{-3})および直径 4.76 mm のポリカーボネイト球(密度: 1.2 g cm^{-3})の2種類を用いた. 標的粒子は縦横 $30 \times 30 \text{ cm}$, 高さ 15 cm のステンレス製容器に充填し, 衝突速度 1.2 km s^{-1} , 真空チャンバー内の雰囲気圧が約 500 Pa の条件下で実験を行った.

結果と議論

重力加速度と最終クレーター直径の関係を図1に示す. 珪砂標的の結果は, 1 G 下よりも低重力下で形成されるクレーターの方が大きくなっていることを示す. 珪砂標的の

結果から、クレーター直径は重力加速度の -0.18 乗に比例し、これは先行研究で得られた重力依存性と調和的である[1-4]。一方、微小ガラスビーズ標的と微小アルミナ標的では、1 G 下と低重力下でクレーター直径に大きな違いが見られなかった。

次に、規格化クレーター半径 π_R と規格化重力 π_2 を用いて整理した結果を図 2(a) に示す。ここで、 R をクレーター半径、 ρ を標的密度、 m を弾丸質量、 g を重力加速度、 a を弾丸半径、 v を衝突速度とすると、 $\pi_R = R \times (\rho/m)^{1/3}$ 、 $\pi_2 = ga/v^2$ と表される。1 G 下の衝突実験例との比較のため、

乾いた砂標的の結果[7]とガラスビーズ標的の結果[8]を図 2(a)中に示す。珪砂標的の結果は 1 G 下・低重力下ともに、先行研究の乾いた砂標的のスケージング則とよく合っている。微小ガラスビーズ標的の 1 G 下の結果は、先行研究のガラスビーズ標的の延長線上にのっているが、微小アルミナ標的の 1 G 下の結果は、砂標的ともガラスビーズ標的とも合わない。標的の種類によってクレーターサイズが異なる理由として、粒子の内部摩擦角の影響が考えられる。数 m s^{-1} での低速度衝突実験で得られたクレーター直径 D と内部摩擦角 θ の関係[9]を(1)式に示す。

$$D \propto (\tan\theta)^{-0.56} \quad (1)$$

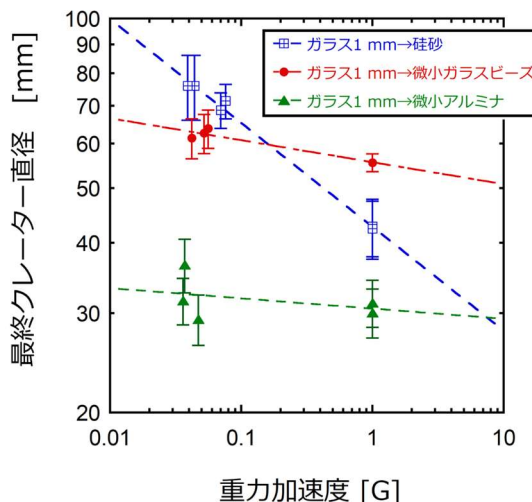


図 1 : 重力加速度と最終クレーター直径の関係

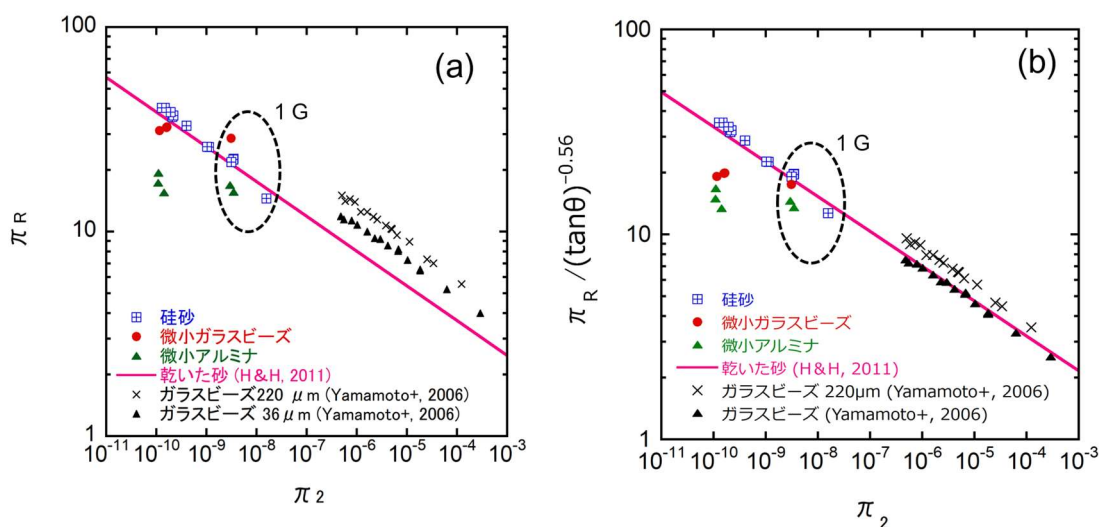


図 2 : (a) π_R と π_2 の関係 (b) 内部摩擦角の影響を考慮した π_R と π_2 の関係

(1)式の関係が高速度域でも成り立つと仮定し、内部摩擦角依存性を考慮して整理し直した結果を図2(b)に示す。内部摩擦角の値として、不規則形状粒子（珪砂，微小アルミナ）には 38° ，球形粒子（微小ガラスビーズ）には 24° を用いた[9]。内部摩擦角の影響を考慮すると、珪砂標的と微小ガラスビーズ標的の1G下での結果は良くスケーリングされているが、微小アルミナ標的の結果は下回っている。これは、珪砂標的や微小ガラスビーズ標的の空隙率（0.4~0.42）よりも微小アルミナ標的の空隙率(0.56)が大きいことが影響しているのかもしれない。

微小ガラスビーズ標的と微小アルミナ標的のクレーターサイズに重力依存性が見られなかった理由として、粉体層強度の影響が考えられる。粉体層強度を Y とすると、 Y が $\rho g D$ よりも十分大きいときは重力支配域，十分小さいときは強度支配域となるが、重力支配域から強度支配域に遷移する条件は明確にはわかっていない。ここでは粉体層の強度として引張り強度を考える。標的粒子層の引張り強度 Y_t は以下の理論式から見積もることができる[10]。

$$Y_t = \frac{1-P}{P} \times \frac{F_v}{d^2} \quad (2)$$

P は空隙率， F_v は粒子間力， d は粒子直径を表す。粒子間力は、遠心法による様々な粒子付着力の測定値[11]をもとに、真空度の違いによる吸着分子の影響[12]を考慮して見積もった。(2)式から見積もられた珪砂，微小ガラスビーズ，微小アルミナの各粒子層の引張り強度はそれぞれ3 Pa，1500 Pa，380 Paであった（表1）。ここで、本実験条件でクレーターが強度支配域で形成されたと仮定すると、クレーター直径は以下の様に表される[e.g., 13]。

$$\frac{D}{2a} = H \left(\frac{Y_t}{\rho v^2} \right)^{-\mu/2} \left(\frac{\rho}{\delta} \right)^{-0.4} \quad (3)$$

δ は弾丸密度， H と μ は定数であり， H と μ の値は標的の空隙率に依存する[14]。空隙率が0.36~0.4のガラスビーズ焼結体に対するクレーター形成実験[15]の結果から， $H=0.45 \pm 0.2$ ， $\mu=0.60 \pm 0.08$ が得られ、

この値を珪砂標的と微小ガラスビーズ標的のクレーター直径の見積もりに用いた。また、空隙率が0.52の石膏に対するクレーター形成実験[14]の結果から， $H=0.27 \pm 0.05$ ， $\mu=0.56 \pm 0.03$ が得られ、この値を微小アルミナ標的のクレーター直径の見積もりに用いた。図3の実線が各標的の強度支配域での規格化クレーター半径を示しており、図3右側の各矢印が π_R の推定の不確かさの範囲を示している。微小ガラスビーズ標的と

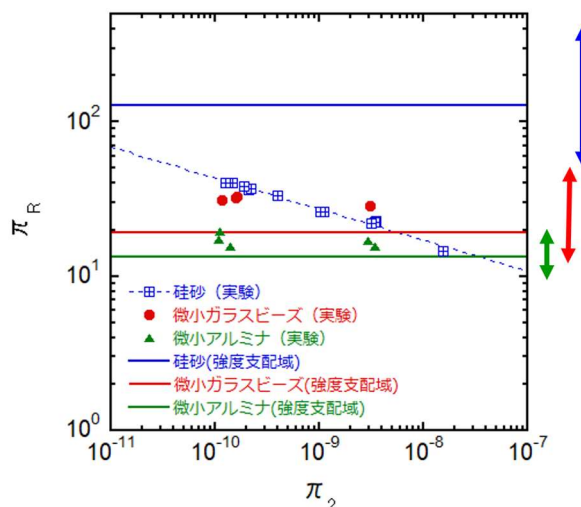


図3：強度支配域でのクレーターサイズ

微小アルミナ標的の実験結果が強度支配域で予想されるクレーターサイズの範囲内に収まっていることから、これらの標的でクレーターサイズに重力依存性が見られなかった理由として、標的強度の影響が表れていたことが予想できる。各実験条件での $Y/\rho gD$ の値と実験結果が示すクレーターリングの領域を表 1 に示す。これらの結果から、標的強度がクレーターサイズに影響を与える条件が $Y/\rho gD \geq 0.8$ と制約できる。注意として、重力支配域から強度支配域の遷移領域は衝突速度によって異なることが予想されており[e.g., 13]、上記の結果は衝突速度 1.2 km s^{-1} での制約条件である。比較として、数値計算で得られた遷移域での $Y/\rho gD$ の値は、衝突速度 8 km s^{-1} で $0.3 \sim 7$ [16]、衝突速度 12 km s^{-1} で ~ 0.04 [17]である。

上記の結果を用いて、小惑星上のクレーターサイズにレゴリス層強度が影響する条件を考える。レゴリス粒子が SiO_2 から成る不規則形状粒子で粒子層の空隙率が 0.6 とすると、(2)式からレゴリス層の引張り強度は、粒子直径が 1 mm のとき 4 Pa 、 1 cm のとき 0.04 Pa となる。レゴリス層の強度の影響を受ける小惑星上のクレーター直径の範囲を表 2 に示す。エロスやフォボスのようなサイズの天体では、粒子直径が 1 mm 以上では直径 1 m 以下のクレーターにしか強度が効かない一方、イトカワやリュウグウサイズの天体では、粒子直径が 1 mm の場合は直径 $30 \sim 45 \text{ m}$ 程度のクレーターまで強度が影響する。ただし、粒子直径が 1 cm では、イトカワやリュウグウサイズの天体でも直径 1 m 以下のクレーターにしか強度が効かない。これは、センチメートル以上の粒子サイズを持つリュウグウにおいて、直径 14.5 m の SCI クレーターが重力支配域のスケーリング則に従う[18]ことと調和的である。上記よりも固着力の大きい粒子ならば、より大きいクレーターに対してレゴリス強度が影響すると考えられる。

表 1 実験条件

標的	粒径 (μm)	重力 (G)	引張り強度 (Pa)	$Y/\rho gD$	領域
硅砂	425	1	3	4×10^{-3}	重力
硅砂	425	0.07	3	4×10^{-2}	重力
微小ガラスビーズ	44	1	1500	1.8	強度 or 遷移
微小ガラスビーズ	44	0.04	1500	32	強度 or 遷移
微小アルミナ	40	1	380	0.8	強度 or 遷移
微小アルミナ	40	0.04	380	17	強度 or 遷移

表 2 レゴリス強度の影響を受けるクレーター直径

天体直径 (km)	粒径 1 mm	粒径 1 cm
0.5 (イトカワサイズ)	$\leq 45 \text{ m}$	$\leq 0.5 \text{ m}$
1 (リュウグウサイズ)	$\leq 30 \text{ m}$	$\leq 0.3 \text{ m}$
20 (エロス, フォボスサイズ)	$\leq 0.6 \text{ m}$	$\leq 0.01 \text{ m}$

まとめ

本研究では、宇宙航空研究開発機構施設内にある縦型式二段銃の真空チャンバー内に構築した落下装置を用いて、低重力下での衝突クレーター形成実験を行った。粒径が比較的大きい硅砂標的（ $\sim 400 \mu\text{m}$ ）ではクレーター直径は重力依存性を示した一方、粒径が小さいガラスビーズ標的とアルミナ標的（ $\sim 40 \mu\text{m}$ ）では重力依存性が見られなかった。理論式から粒子層の引張り強度を見積もり、強度支配域でのクレーターサイズを計算した結果、粒径の小さい標的で形成されたクレーターは標的強度の影響を受けていることがわかった。また、標的強度がクレーターサイズに与える条件として、衝突速度 1.2 km s^{-1} で $Y / \rho g D \geq 0.8$ を得た。実験で得られた制約条件をもとに、レゴリス強度が影響を与える小惑星上のクレーター直径を見積もった。

参考文献

- [1] Gault, D. E. and J. A. Wedekind (1977). In *Impact and Explosion Cratering*, Pergamon Press, New York, 1231-1244.
- [2] Schmidt, R. M. and K. R. Housen (1987). *Int. J. Impact Eng.* 5, 543-560.
- [3] Cintala, M. J., Horz, F., & See, T. H. (1989). *Proceedings of the 19th Lunar and Planetary Science Conference*, 627-639.
- [4] Kiuchi, M., Nakamura, A. M., Wada, K. (2019). *Journal of Geophysical Research: Planets*, 124, 5, 1379-1392.
- [5] 高木靖彦 (2012). *日本マイクログラビティ応用学会誌* 29, 163-168.
- [6] 木内真人他 (2020), 令和元年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム講演集, SA6000149029 (4 pages).
- [7] Housen, K. R., & Holsapple, K. A. (2011). *Icarus*, 211(1), 856-875.
- [8] Yamamoto, S. et al. (2006). *Icarus*, 183, 215-224.
- [9] 木内真人(2019). 神戸大学大学院理学研究科博士論文.
- [10] Rumpf, H. (1970). *Chemie. Ing. Techn.*, 42, 538-540.
- [11] Nagaashi, Y., Aoki, T. and Nakamura, A. M. (2021). *Icarus*, 360, 114357.
- [12] Perko, H. A., Nelson, J. D. and Sadeh W. Z. (2001). *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 127, 371-383.
- [13] Holsapple, K. A. (1993). *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 21, 333-373.
- [14] Okamoto, T. and Nakamura, A. M. (2017). *Icarus*, 292, 234-244.
- [15] 平岡賢介 (2008). 神戸大学大学院理学研究科博士論文.
- [16] Collins, G. S. et al. (2011). *Earth and Planetary Science Letters*, 310, 1-8.
- [17] Prieur, N. C. et al. (2017). *Journal of Geophysical Research: Planets* 123, 1555-1578.
- [18] Arakawa, M. et al. (2020). *Science*, 368(6486), 67-71.