

低重力下クレーターサイズに対する レゴリス粒子固着力の影響

木内真人¹, 中村昭子¹, 和田浩二²

¹神戸大学大学院理学研究科, ²千葉工業大学惑星探査研究センター

Experimental study of low velocity impact onto granular media under reduced gravities: Effects of the regolith layer strength

Masato Kiuchi^{1*}, Akiko Nakamura¹, Koji Wada²

¹Graduate School of Science, Kobe University, ² Planetary Exploration Research Center, Chiba
Institute of Technology

はじめに

小天体表面における重力加速度は微小である。クレーター観測から小天体表面の進化の過程や表層の物性を推定するためには、クレーター直径の重力依存性を理解することが重要となる。しかし重力がクレーター形成に与える影響はこれまで詳細には確かめられていない。これまでに我々は0.01-1 Gの範囲でシリカサンド標的（粒径140 μm）に対して低速度衝突実験を行い、結果クレーター直径は重力加速度の約0.2乗に比例した。得られた重力依存性は、先行研究で行われた高速度衝突実験（Gault and Wedekind, 1977; Schmidt and Housen, 1987）の結果と調和的であった（木内他, 2016, 宇宙科学に関する室内実験シンポジウム）。これまでに行った実験条件下では重力支配域であったが、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の影響が重力の影響を卓越する条件が存在すると予想される。クレーター形成に対する固着力と重力の影響が遷移する境界は粉体層の固着力・重力加速度・クレーターサイズにより決定されるが、明確にはわかっていない。本研究では、固着力がシリカサンドより大きいアルミナ粒子（粒径60 μm）を標的物質として低重力・低速度衝突実験を行い、固着力の影響の卓越を観察した。

実験方法

標的容器を落下させることで標的にかかる重力加速度を模擬的に小さくする装置を開発し、衝突実験を行った。標的容器が落下している間に上方向から弾丸が自由落下して標的上面に衝突する。クレーター形成の様子は高速度ビデオカメラによって撮影され、クレーター直径は撮影された画像から決定する。落下中に標的にかかる重力加速度は 0.014 ± 0.007 Gであった。標的にはアルミナ粒子（粒径60 μm）を用い、直径20 cm、深さ8 cmの円筒容器に充填し、上方向から荷重をかけることで空隙率0.42まで圧縮し

た（緩い充填時の空隙率は約 0.6）。弾丸には直径 8 mm のステンレス球（密度 7.9 gcm^{-3} ）を用い、速度 $4.5 \pm 0.01 \text{ ms}^{-1}$ で衝突させた。また 1 G 下でも同様のクレーター形成実験を行った。実験は宇宙科学研究所の縦型銃チャンバ内で行ったが、今回の実験では大気下でのみ行っている。

結果と考察

図 1 に規格化クレーター半径 π_R と規格化重力 π_2 の関係を示す。 $\pi_R = R \times (\rho/m)^{1/3}$, $\pi_2 = ga/v^2$ と表され、 R はクレーター半径、 ρ は標的密度、 m は弾丸質量、 g は重力加速度、 a は弾丸半径、 v は衝突速度である。図 1 より、1 G 下と 0.01 G 下で形成されるクレーター直径に大きな違いがないことがわかる。これまでに我々が行った低重力実験より、重力支配域ではクレーター直径は重力加速度の約-0.2 乗に比例する（木内他, 2016, 宇宙科学に関する室内実験シンポジウム）。図 1 中の点線は、重力支配域の場合に 1 G でのクレーターサイズから予想される π_R と π_2 の関係を表している。実際に 0.01 G 下で形成されたクレーターサイズは重力依存性から予想されるクレーターサイズよりも十分小さく、0.01 G 下では重力支配域から逸脱していることを示しており、アルミナ粒子層の固着力の影響が重力の影響を卓越していると考えられる。一方、1 G 下で重力支配域もしくは強度支配域をとるかはこの結果から決定することはできない。

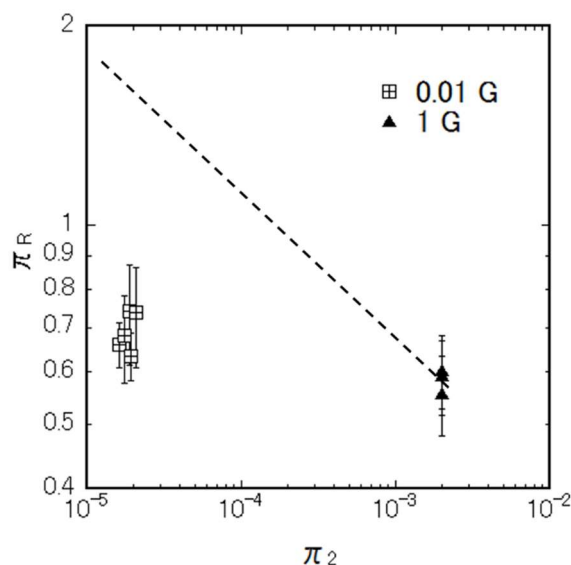


図 1: 規格化クレーター半径 π_R と規格化重力 π_2 の関係

次に、固着力と重力の影響が逆転する境界条件について考える。これらの影響を比較するために、クレーターを形成するために消費されるエネルギーについて考える。

$$\text{Cratering Energy} = k_1 Y D^3 + k_2 \rho g D^4 \quad (1)$$

(1)式は、左辺がクレーターを形成する全エネルギー、右辺第1項が標的強度に対してクレーターを形成するために消費される仕事量、第2項が重力に対してクレーターを形成するために消費される仕事量を表す（Charters and Summers, 1959）。ここで、 Y は標的強度、 D はクレーター直径、 k_1 と k_2 は係数である。右辺の2つの項を比較すると、 Y が $\rho g D$ に対して十分大きいときは強度支配域、 $\rho g D$ が Y に対して十分大きいときは重力支配域となることがわかるが、遷移域では Y と $\rho g D$ がどのような関係をとるかはわかっていない。固着力を粒子層のせん断強度 Y とし、固着力と重力の影響が逆転する境界での $Y/\rho g D$ の値の範囲を考える。

せん断試験を行った結果、粒径 140 μm のシリカサンド粒子層のせん断強度は $180 \pm 85 \text{ Pa}$ となった。粒径 60 μm のアルミナ粒子層のせん断試験は行っていないが、理論式 (Rumpf, 1970) より推定するとシリカサンド粒子層の約 5 倍となることから、アルミナ粒子層のせん断強度を約 900 Pa とする。シリカサンドとアルミナ粒子に対するクレーター形成実験の結果から得られた $Y/\rho g D$ の値を表 1 に示す。シリカサンド標的に対するクレーター形成実験より、0.01 - 1 G の範囲でクレーター直径は重力依存性を示したため重力支配域であるといえる。この結果より、 $Y/\rho g D \leq 15$ の範囲では重力支配域をとることがわかる。一方、アルミナ粒子標的での 0.01 G 下で結果は強度支配域を示したため、 $Y/\rho g D \geq 300$ の範囲では強度支配域をとることがわかる。これらのことから固着力と重力の境界となる $Y/\rho g D$ の値は、 $15 < Y/\rho g D < 300$ の範囲に制約することができる。比較として、Collins et al. (2011) では花崗岩への高速度衝突の数値シミュレーションを行っているが、強度支配域と重力支配域の遷移域での $Y/\rho g D$ は 0.3 - 7 程度の値をとっている。この値は今回の実験で得られた範囲よりやや小さいが、数値シミュレーションでは岩石に対するクレータリングを考えているため一概に比較することは難しい。

表 1: $Y/\rho g D$ の値

標的	$\rho g D$ [Pa]	Y [Pa]	領域	$Y/\rho g D$
シリカサンド (1 G)	450	180	重力支配域	0.4
シリカサンド (0.01 G)	12	180	重力支配域	15
アルミナ (1 G)	270	900	不明	3
アルミナ (0.01 G)	3	900	強度支配域	300

まとめ

模擬低重力下で粉体標的に対する低速度クレーター形成実験を行った。固着力の比較的大きいアルミナ粒子を標的とした場合、0.01 G 下と 1 G 下で形成されるクレーター直径にほぼ変化はなかった。これはアルミナ粒子の固着力の影響が重力の影響を卓越したために重力依存性を示さなかった、つまり強度支配域でのクレータリングを観察したと考えられる。強度支配域と重力支配域の境界条件として $Y/\rho g D$ の値を考え、また重力支配域を示したシリカサンド標的でのクレーター形成実験の結果を組み合わせることで、境界条件を $15 < Y/\rho g D < 300$ の範囲に制約した。今後はシリカサンド (粒径 140 μm) とアルミナ粒子 (粒径 60 μm) の間のせん断強度をもつと推定される標的に対してクレーター形成実験を行い、境界条件の範囲をより制約する。注意点として、今回アルミナ粒子に対して行った実験は全て大気下で行ったものであり、大気の影響を考慮していない。大気の影響はクレーターサイズを小さくする影響があるため (Schultz, 1992; Suzuki et al., 2013), 真空チャンバ内で同様の実験を行うことが必要である。

参考文献

- Gault, D. E. and J. A. Wedekind, 1977. Experimental hypervelocity impact into quartz sand – II, Effects of gravitational acceleration. In *Impact and Explosion Cratering*, Pergamon Press, New York, 1231-1244.
- Schmidt, R. M. and K. R. Housen, 1987. Some recent advances in the scaling of impact and explosion cratering. *Int. J. Impact Eng.* **5**, 543-560.
- 木内真人, 中村昭子, 大村知美, 和田浩二, 2016. 模擬低重力における低速度クレータ形成実験, 宇宙科学に関する室内実験シンポジウム
- Charters, A.C. and Summers, J.L., 1959. Some comments on the Phenomena of High Speed Impact. NOLR 1238, U.S. Naval Ordnance Laboratory, White Oak, Silver Springs, Maryland, 200-221.
- Rumpf, H., 1970. Zur Theorie der Zugfestigkeit von Agglomeraten bei Kraftübertragung an Kontaktpunkten. *Chemie. Ing. Techn.*, **42**, 538-540.
- Schultz, P.H., 1992. Atmospheric effects on cratering efficiency. *J. Geophys. Res.* **97**, 975–1005.
- Suzuki, A.I., Nakamura, A.M., Kadono, T., Wada, K., Yamamoto, S., Arakawa, M., 2013. A formation mechanism for concentric ridges in ejecta surrounding impact craters in a layer of fine glass beads. *Icarus* **225**, 298–307.
- Collins, G.S. , Elbeshhausen, D. , Davison, T.M. , Robbins, S.J. , Hynes, B.M. , 2011. The size-frequency distribution of elliptical impact craters. *Earth Planet. Sci. Lett.* **310**, 1–8 .