

模擬低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², 長足友哉³, 長谷川直¹, 中村昭子³

¹宇宙航空研究開発機構, ²千葉工業大学惑星探査センター,

³神戸大学大学院理学研究科

背景と目的

小天体表面の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、クレーターサイズのスケージング則を確立することが重要である。小天体表面の特徴は近年の探査より徐々に明らかになってきており、例えば小惑星イトカワの表面は mm~cm サイズの粒子から構成される領域と m サイズのボルダーから構成される領域に二分されている一方、小惑星リュウグウは cm サイズ以上の粗い粒子やボルダーによって全球的に覆われている。このように小天体レゴリス層は多様な物性(粒子サイズ・内部摩擦角・空隙率)を持つが、クレーターサイズは粒子層の物性に依存すると考えられる。過去には様々な粒状物質に対して衝突実験が行われており、標的物質によってスケージングパラメータが得られているが(e.g., Housen and Holsapple, 2011), 内部摩擦角や空隙率がクレーターサイズに与える影響について系統的に調べた研究は少ない。

また、小天体の表面重力は微小であり、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である。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として、低重力下および高重力下で様々な速度域で衝突実験が行われている(e.g., Gault and Wedekind, 1977; Schmidt and Housen, 1987; Cintala et al., 1989; Kiuchi et al., 2019). また、微小重力環境ではレゴリス層の固着力が重力の影響を卓越する条件が存在する可能性があるが、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。「濡れた砂」標的などを用いて標的強度の影響が観察された例もあるが(Schmidt and Housen, 1987), 「dry」な粒子では観察された例はない。本研究は、様々な粉体層に対して模擬低重力下で高速度衝突実験を行うことにより、粉体標的の内部摩擦角・空隙率・固着力がクレーターサイズに与える影響を調べた。

実験方法

JAXA 施設内の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、粉体標的に対する高速度衝突実験を行った。落下装置により実現できる重力加速度は 0.04~0.07 G であり、低重力継続時間は約 0.4 s である(木内他, 2020 年度衝突研究会)。また、低重力条件にくわえ、1 G 下でも実験を行った。標的には硅砂(粒径:~425 μm), 微小ガラスビーズ(粒径:~44 μm), 熔融アルミナ(粒径:~40 μm), ガラスビーズ(粒径:~220 μm)の 4 種類を用いた。標的の空隙率はそれぞれ, 0.36, 0.42, 0.40, 0.54 であった。粒子形状は、硅砂と熔融アルミナは不規則形状、微小ガラスビーズとガラスビーズは球形である。速度 1.2 km s^{-1} と 6.0 km s^{-1} で直径 1 mm のガラス球弾丸および直径 4.76 mm のポリカーボネイト球弾丸を衝突させ、高速度カメラによりクレーター形成過程を観察した。

結果と議論

硅砂標的では、1 G 下よりも低重力下の方がクレーター直径が明確に大きくなっており、クレーター直径は重力加速度の -0.17 乗に比例した。これは先行研究で得られた重力依存性と

調和的である。一方、微小ガラスビーズ標的とアルミナ標的では、1 G 下と低重力下でクレーター直径に大きな違いは見られず、これは固着力の影響で重力依存性が見られなかったためだと考えられる。また、標的の種類によってもクレーター直径は異なり、ガラスビーズ、微小ガラスビーズ、硅砂、アルミナの順にクレーター直径は小さくなった。これは、標的の内部摩擦角と空隙率が影響していると考えられる。

我々は平行平板せん断試験を行い、標的の内部摩擦角 θ と固着力 C を測定した。測定値を表 1 に示す。内部摩擦角は粒子形状に依存し、不規則形状粒子の方が球状粒子よりも大きい値となる。一方、固着力は粒径および粒子形状による違いは見られなかった。ここで、重力支配域での π スケーリングを用いたスケーリング則の式(e.g., Holsapple, 1993)を以下に表す。

$$\pi_R = K \pi_2^{-\frac{\mu}{2+\mu}} \pi_4^{\frac{2+\mu-6\nu}{3(2+\mu)}} \quad (1)$$

ここで、 $\pi_R = (\frac{\rho t}{m})^{1/3} R$, $\pi_2 = \frac{ga}{v^2}$, $\pi_4 = \frac{\rho}{\delta}$, であり、 R はクレーター半径、 ρ は標的密度、 δ は弾丸密度、 m は弾丸質量、 a は弾丸半径、 v は衝突速度、 g は重力加速度、 K , μ , ν は定数を表す。硅砂と微小ガラスビーズ、ガラスビーズの実験結果より、 μ と K の内部摩擦角依存性として、 $\mu = 0.38 \times (\tan \theta)^{-0.189}$, $K = 0.66 \times (\tan \theta)^{-0.64}$ の経験式を得た。iSALE を用いた粉体標的への数値計算結果(Prieur et al., 2017)と比較すると、 μ の θ 依存性は調和的だが、 K の θ 依存性は異なる結果となった。また、硅砂とアルミナの実験結果より、 μ と K の空隙率依存性として、 $\mu = 0.45 \times P^{0.12}$, $K = 0.37 \times P^{-0.41}$ の経験式を得た。ここで、 P は空隙率を表す。 μ と K の空隙率依存性は数値計算結果(Prieur et al., 2017)と調和的であった。

微小ガラスビーズ標的と熔融アルミナ標的の実験結果より、1 G 下ですでに固着力の影響が現れ始めている可能性がある。ここで、固着力 C と重力に関するパラメータ $\rho g D$ の比を考えると、 $C / \rho g D \geq 0.13$ でクレーターサイズに固着力の影響が出るという条件が得られた(衝突速度が 1.2 km/s での条件であることに注意)。この条件をリュウグウの SCI クレーターに適用する(衝突速度 2 km/s, リム直径 17.6 m)。SCI クレーターはクレーターサイズやエジェクタの特徴から重力支配域で形成されたと考えられており、またリュウグウ表層の強度は 1.3 Pa 以下だと見積もられている(Arakawa et al., 2020)。本実験結果から重力支配域では $C / \rho g D < 0.13$ であることから、リュウグウ表層の固着力は ~ 2 Pa と見積もられる。これは従来の推定値と調和的である。

表 1 標的の物性

標的	粒径, μm	空隙率	内部摩擦角, $^\circ$	固着力, Pa
硅砂	425	0.36	36.0 ± 0.2	131 ± 11
微小ガラスビーズ	44	0.42	25.5 ± 1.0	104 ± 38
熔融アルミナ	40	0.54	37.0 ± 1.2	122 ± 58
ガラスビーズ	220	0.4	25.7 ± 2.1	56 ± 81