

低速度クレーター形成実験をもとにした イトカワ dimple 地形の成因の検証および 火星衛星表層地形との比較

○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

はやぶさによる表面画像より, 小惑星イトカワにはミリメートルからセンチメートルサイズの粒子層により構成される地形 (smooth terrain) が存在することが明らかになっており, ボルダーが付随した dimple と呼ばれる窪み地形が観察されている. この地形の成因としてボルダーの低速度衝突などが考えられているが (Nakamura et al., 2008), 成因は明らかではない. イトカワ脱出速度 (0.17 ms^{-1}) を下回るような低速度衝突で形成されるクレーターサイズを推定するうえで, Holsapple (1993) などのスケーリング則が適用可能かどうかは未知である. 上記のスケーリング則はクレーターが衝突体に比べ十分に大きい場合を前提としているためであり, またクレーターサイズの重力依存性を実験的に調べた研究は少ない. これまで高重力下 (Schmidt and Housen, 1987) と低重力下 (Gault and Wedekind, 1977) での高速度実験があり, クレーター直径は重力加速度の-0.17 乗に比例するという結果が得られているが, 低速度領域ではこれまで確かめられていない. また, 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が, 境界となる条件は明確にはわかっていない.

我々は標的を定荷重ばねで吊るして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, 低速度での衝突クレーター形成実験を行った. 標的にはシリカサンド (粒径 ~ $140 \mu\text{m}$) を用い, 弾丸には直径 8 mm のステンレス球 (密度 7.9 g cm^{-3}) を用いた. 速度 $1\text{-}5 \text{ m s}^{-1}$ の範囲で衝突させた結果を図 1 に示す. クレーター直径は $1\text{-}0.25 \text{ G}$ の重力加速度の -0.21 ± 0.01 乗に比例した. これは先行研究の高速度衝突で得られた値 (-0.17 乗) とおおむね近い値である. 一方, 0.01 G 下で得られたクレーター直径はべき乗の関係から予想される直径を下回っている. これは重力の与える影響が小さくなり, 標的粒子の固着力の影響が表れた結果であると考えられる. 次に, クレーター形成時間と重力加速度の関係を図 2 に示す. クレーター形成時間は高速度ビデオカメラで上方向から撮影した画像から決定した. 図 2 中の矢印のプロットはクレーター直径が $30 \pm 3 \text{ mm}$ の結果のみを示して

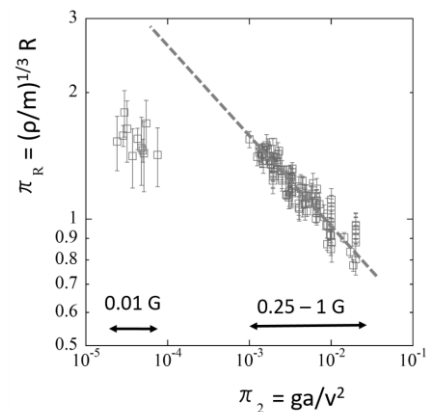


図 1: 規格化重力 π_2 と規格化クレーター半径 π_R の関係

g : 重力加速度, a : 弾丸半径,
 v : 衝突速度, R : クレーター半径,
 ρ : 標的密度, m : 弾丸質量

おり、実線は次元解析で求められる重力支配域でのクレーター形成時間 $t = (D/g)^{0.5}$ (Melosh, 1989) を示している (D :クレーター直径). これらと比較すると、1 - 0.25 G ではクレーター形成時間は理論値に近い範囲をとっているが、0.01 G 下では理論値を下回っている. 強度支配域でのクレーター形成時間は次元解析では $t = D/(Y\rho)^{0.5}$ と表され (Y :標的強度), シリカサンド層のせん断試験から求めた固着力 180 ± 85 Pa を代入すると、クレーター形成時間は 0.07 - 0.12 s となる. これは、実験で得られた 0.01 G 下でのクレーター形成時間と調和的である. これらのことから、0.01 G の結果はクレーター直径だけではなく、形成時間の観点から見ても強度支配域を示しているといえる. 本実験条件では 0.25 - 0.01 G の範囲で重力支配域から強度支配域に遷移していると考えられ、遷移する境界での $Y/\rho g D$ は 1.6 - 35 の範囲に制約できる ($Y = 180$ Pa とする). 花崗岩標的への高速度衝突の数値シミュレーション(Collins et al., 2011)では、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と調和的であるが、数値シミュレーションでは岩石に対するクレーターリングを考えているため、一概には比較できないことに注意が必要である.

本実験で得られた結果をもとに、イトカワ表面での 2 次クレーターサイズを見積もった. 表面画像より dimple に付随するボルダーはメートルサイズであり、このようなボルダーが脱出速度 0.17 m s^{-1} 以下で smooth terrain に衝突した場合を考える. smooth terrain での粒子層の密度は $0.95 - 1.6 \text{ g cm}^{-3}$ と推定され (Kiuchi and Nakamura, 2014), これらの条件と本実験で得られた低速度域での結果を用いると、脱出速度の 0.1 倍以上の速度で衝突した場合、観測画像から得られている dimple 直径程度のクレーターが形成されることがわかった (ボルダー直径の 2-4 倍程度). この結果はイトカワの dimple の成因がボルダーの低速度衝突である可能性を支持する.

フォボス表面のメートルサイズのボルダーに同様の見積もりを行ったところ、脱出速度の以下の衝突速度でボルダー直径の 2 - 7 倍程度のクレーターが形成され得るが、表面画像からはボルダーが付随する dimple 地形は確認できない. 同様にダイモス表面にも dimple 地形は確認できない. この要因として、フォボスやダイモス表層のレゴリス固着力が大きいため、形成されるクレーターが小さくなっている可能性が考えられる. 上記で求めた境界条件を用いると、強度支配域をとるときフォボスやダイモスのレゴリス固着力は数 100 Pa 以上であると推定される. 一方 dimple が存在するイトカワ smooth terrain では重力支配域をとると考えられ、レゴリス固着力は数 Pa 以下と推定される. 火星衛星でレゴリス固着力が大きいのは、有機物の存在などによる表層物質の物性の違いが影響しているのかもしれない.

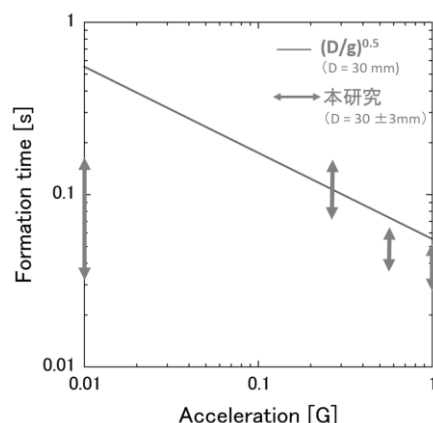


図 2: 重力加速度とクレーター形成時間の関係