

空隙率の異なる付着性レゴリス層から受ける抵抗力の実験的推定

○櫻井諒太, 中村昭子
神戸大学大学院理学研究科

背景と目的

粉粒体層への衝突・貫入挙動の解明は、小天体の表面レゴリス層への衝突・貫入挙動や、天体表面の探査時における機材の挙動を理解するうえで重要である。空隙率や真空度が異なる場合の粉粒体層への貫入の実験は過去に行われているが[1][2]、この物理的メカニズムの研究の歴史は浅く、粉粒体から受ける抗力と粉粒体層の特性の関係は確立されていない。サブミリ～ミリサイズの粉粒体に対してセンチサイズの円柱や球を鉛直方向に 0 ~ 4 m/s の速さで衝突させた際の貫入抵抗について、ニュートン抵抗抗力と深さ依存の抵抗抗力が独立して作用していると、内部摩擦角との比例係数の導出がされている[3]。しかし、付着性粉粒体の場合は構成粒子サイズによって空隙率が異なるため、抵抗抗力に内部摩擦角だけでなく、空隙率が影響する可能性がある。

本研究では、付着性粉粒体層に対して、地球重力下かつ大気圧下で自由落下させたセンチサイズの弾丸が衝突・貫入する様子を観測し、粉粒体層から受ける抗力を定める比例係数を推定した。

実験・解析手法

実験試料として粒径 5, 15, 31, 59 μm (それぞれ空隙率 0.71, 0.65, 0.62, 0.58)の不定形アルミナ粒子をそれぞれ容器に充填し、間隔をあけて配置したコイル 5 つの内側に容器を設置した。容器直径の 1/3, 1/6, 1/12 のネオジム磁石円柱を弾丸として、初速度 1.5~2.5 m/s で粉粒体層に貫入させ、磁石が各コイルを通過する際に発生する誘導起電力が磁石の減速とともに小さくなる様子を記録した。

粉粒体に弾丸が貫入する際の運動方程式(外力としてニュートン抵抗抗力と深さ依存の抵抗抗力が作用)[3]を、粉体圧への壁の影響を考慮した Janssen の式を導入して変形した運動方程式

$$ma = -mg + \frac{C_D}{2} \pi a_p^2 \rho_g v^2 + \frac{k^* \pi a_p^2 \rho_g g D}{4 \mu_w K_a} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{4 \mu_w K_a}{D} |z|\right) \right\}$$

を用いて、記録した誘導起電力を再現するよう磁石に作用するニュートン抵抗抗力と深さ依存の抵抗抗力の無次元比例係数をそれぞれ C_D と k^* として求めた。ここで、 m 、 a 、 g 、 a_p 、 ρ_g 、 v 、 D 、 z はそれぞれ弾丸質量、弾丸加速度、重力加速度、弾丸半径、粉粒体層バルク密度、弾丸速度、容器直径、貫入深さであり、 μ_w と K_a については後述する。

結果

弾丸/容器直径比が 1/12 の場合、粒径が小さく初期空隙率が大きい方が C_D と k^* は小さくな

り、より深く貫入する。先行研究[1]と同じ条件を仮定し、導出した C_D と k^* を用いて最終貫入深さを導出すると今回実験を行った空隙率では先行研究[1]での結果よりも浅かった。原因としては容器壁の影響と弾丸形状の違いによるものと考えられる。

容器壁の影響: 深さ依存の抵抗力の項に入っているパラメータ μ_w と K_a はそれぞれ容器壁と粒子の間にはたらく摩擦係数、粉粒体層内部の垂直応力と水平応力の比を表している。 μ_w はアルミナ粒子とアクリル間の摩擦角を測定し、 K_a はアルミナ粒子の内部摩擦角[4]から導出したが、今回の実験では弾丸/容器直径比によって異なる値をとりうる可能性もあるため、 $\mu_w K_a$ の値を変化させて容器壁の影響の幅を考慮した。今回用いた運動方程式では、 $\mu_w K_a$ を大きくすると粉体圧が減少するため、深さ依存の抵抗力を維持するためには k^* の値を大きくする必要がある。その場合、速度が速い貫入直後の減速過程を再現するためには C_D の値を小さくする必要がある。弾丸/容器直径比が小さいほど $\mu_w K_a$ の変化による C_D の取りうる値の範囲、すなわち不定性は小さくなった。

弾丸形状の違い: 弾丸形状の違いについて粒径 15 μm 、弾丸/容器直径比が 1/3、弾丸直径が同じかつ長さが 2 倍異なる場合の C_D と k^* を同様の実験によって推定した。先行研究[1]と同じ条件での最終貫入深さで表すと、長い方は 8.0 cm、短い方は 11.5 cm になり、弾丸形状の違いによって最終貫入深さが約 1.5 倍異なった。

レゴリスへのボルダー低速度再衝突への応用

今回、粒径 15 μm 、弾丸/容器直径比が 1/12 の場合で導出した $C_D = 0.59$ 、 $k^* = 9.8$ を用いてレゴリスへのボルダー低速度再衝突について考える。イトカワ表面から放出したボルダーが再度イトカワ表面に衝突し、破壊されずに貫入すると仮定した場合に、ボルダーがイトカワ表面に露出する衝突速度鉛直成分の上限を推定した。レゴリス層はサブミリ～ミリサイズレゴリス[3]の場合(空隙率 0.40)も比較のため示す。重力やボルダーの密度、レゴリス層の密度は先行研究[4]での値を用いた。

レゴリス層の空隙率が 0.40 の場合、4 m 以上のボルダーの衝突速度鉛直成分の上限はイトカワの脱出速度 17 cm/s よりも大きい場合、この大きさのボルダーが再衝突する際は確実にイトカワ表面に露出する。それに対して空隙率が 0.65 の場合、衝突速度鉛直成分の上限は空隙率が 0.40 の場合の 1/5 以下(~5 cm/s)であり、あらゆるボルダーサイズにおいてイトカワの脱出速度を大きく下回る。すなわち、ボルダーが露出するためには衝突速度鉛直成分は 5 cm/s よりも小さい必要があると言える。

参考文献

- [1] L. V. Clark and J. L. McCarty, 1963, Technical Note NASA D-1519.
- [2] J. R. Royer et al., 2011, EPL 93, 28008.
- [3] H. Katsuragi and D. J. Durian, 2013, Physical Review E 87, 052208.
- [4] M. Kiuchi, A. M. Nakamura and K. Wada, 2019, JGR Planets 124, 1379.