

# 空隙率の大きい粉体層への衝突の数値シミュレーション

和田浩二 (千葉工業大学惑星探査研究センター)

イントロダクション：近年の小惑星探査によって、小惑星表層は細かい粒子からなるレゴリス層に覆われ、衝突クレーターと思しき窪み地形や衝突破片（イジェクタ）と思われる巨礫が多数存在し、さらにはいかにも衝突で埋め込まれたような窪みを伴う岩石が存在するなど、天体衝突特有の地形・構造の存在が確認されている。これらの地形・構造の形成条件を明らかにするためには、小惑星における衝突クレーター形成過程やイジェクタ放出・再堆積過程に関する理解即ちスケーリング則が必要であるが、その確立には至っていない。それは、小惑星の構造・環境に原因がある。レゴリス層で覆われた小惑星表層およびラブルパイルである小惑星自体は破片の集合体すなわち粉粒体と考えられ、さらに微小重力であることから高い空隙率を保持していると推定される。つまり小惑星は微小重力下にある高空隙粉粒体と考えられるが、その環境下での衝突過程についてのスケーリング則が確立されていないのが現状なのである。

本研究では、小惑星表層に刻まれた衝突過程を理解するべく、微小重力下の高空隙粉体層への天体衝突を想定した数値シミュレーションを行う。具体的には、粒子法の一つである離散要素法 (DEM) を用い、半径 1mm の球形粒子からなる粉体層へ半径 3mm および 9mm の弾丸を比較的低速度 ( $< 300\text{m/s}$ ) で衝突させる。今回はとくに、弾丸の貫入過程とその抵抗則に注目して解析を行った。これまでの実験的研究によって砂層やエアロジェルへの貫入抵抗則は得られているが [e.g., 1,2], 小惑星表層を模擬した微小重力高空隙粉体層における貫入抵抗則は明らかになっておらず、これを求めることが今回の目的である。このような貫入抵抗則は、将来の小惑星探査におけるアクティブな衝突実験やペネトレーター探査を計画するにあたって重要な検討要素でもある。

シミュレーション設定：DEM における粒子間相互作用は、粒子同士の反発係数と摩擦係数で与えられるが今回は反発係数を 0.4、摩擦係数を 0.5 と固定した。またそれとは別に粒子間付着力として接触している粒子ペアには一定の付着力が働くこととした。標的となる粉体層は半径 1mm の標的粒子 38 万個を 20cm 四方の箱に自由落下させることで形成した。粒子間付着力や粒子の回転抵抗を導入することにより空隙率の異なる 4 種類 (43, 50, 62, 72%) の粉体層を用意することができた。本研究において振ったパラメータは、重力 ( $1\text{G}$  および  $10^{-4}\text{G}$ )、粒子間付着力 ( $10^{-1}\text{N}$ ,  $10^{-5}\text{N}$ )、弾丸の大きさ (3mm, 9mm)、衝突速度 (30, 100, 300 m/s) である。なお、衝突シミュレーションの際には、回転抵抗を入れず、粒子間付着力もどの粉体層においても一定とした。

結果と議論：シミュレーションの結果、速度の 2 乗に比例する抵抗則が得られた。これは用意した範囲で粉体層の空隙率などパラメータに依存しないようである。速度の 2 乗に比例する抵抗則はいわゆる流体力学的抵抗であり、これは  $1\text{G}$  下の砂層への衝突やエアロジェルへの貫入実験においても見られ [1,2], 十分大きなレイノルズ数が実現されていると考えることができる。さらに、速度の 2 乗に比例する抵抗力に加えて、速度の 1 乗に比例するいわば粘性抵抗が見られた。これは、粒子間相互作用モデルに起因するものかも知れないが、今後室内衝突実験とも比較し検証していく必要がある。

[1] Katsuragi, H. and Durian, D. J., 2007, Nature Physics 3, 420.

[2] Niimi, R. et al., 2011, Icarus 211, 986.