

## 数値シミュレーションで見る粉体層への衝突貫入過程

和田浩二 (千葉工業大学), 中村昭子 (神戸大学)

**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体層と考えられ、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体層と考えられるが、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、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、直径  $410\mu\text{m}$  の球形粒子からなる粉体層へ直径  $6\text{mm}$  の弾丸を比較的低速度 ( $70\text{m/s}$ ) 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], 小惑星表層を想定した粉体層への天体衝突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。加えて本シミュレーション設定は、我々が行っている室内実験を模擬するものでもあり [3], 実験結果の確認と解釈を可能とするものである。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。今回は反発係数を  $0.01, 0.1, 0.4, 0.9$ , 摩擦係数を  $0.1, 0.5, 0.8$  と振って計算を行いその依存性を見た。標的となる粉体層は直径  $420\mu\text{m}$  の標的粒子 (物性は石英)  $38$  万個を  $4.2\text{cm}$  四方の箱に自由落下させることで形成した。結果として高さ約  $1.5\text{cm}$ , 空隙率  $43\%$  の粉体層が形成された。この標的に水平方向から直径  $6\text{mm}$  のポリスチレン物性の弾丸を  $70\text{m/s}$  で衝突させる (図 1a)。衝突の際には標的壁面を全て取り去り、壁での反射波の影響を排除した。

**結果と議論:** 貫入過程の詳細な状況を明らかにすべく、衝突貫入シミュレーション中の粒子をその蓄積弾性エネルギー量に応じて色づけした。弾性エネルギーは粒子にかかっている弾性力の指標ともなることから、色づけした粒子の分布で標的粉体層内の力鎖 (force chain) の分布も観察することができる。

結果として、まず衝突直後には衝突点を中心とした半球状の衝撃波様の領域が形成されること (図 1b)、またそこから約  $400\text{m/s}$  の速度で分離波 (detached precursor wave) が伝播していくこと (図 1c) が判明した。この分離波は離散要素の集合体である粉体層に特有の波であり、その速度は 1 次元の非連結ばねモデルで説明される音速 [4] とほぼ同じものであった。

弾丸にかかる力は、貫入直後とくに弾丸が半分めり込むまでは大きく、それ以後のクレータ孔が形成しつつ貫入する過程において働く力とは違う傾向がみられた (図 2 左)。また貫入直後では粒子間摩擦係数が大きいほど弾丸がより減速された。このことは、貫入直後では弾丸を押し返す粒子が弾丸のほぼ半球全面にわたっており (図 1b)、特に側面付近の粒子からのシアが重要な役割を果たした結果であると考えられる。その後のクレータ孔が形成されつつ弾丸が貫入する過程では、弾丸は主にその前面に接触している少数の粒子のみから力を受ける (図 1c,d) ことから、貫入直後とその後で弾丸が受ける抵抗の性質の違いが理解できよう。さらに貫入過程では弾丸が受ける力の分布は不均一であり (図 1c,d)、粉体特有の力鎖の不均一分布を反映したものと考えられる。実際弾丸にかかっている力には揺らぎが見られる (図 2 左)。しかしながら、その揺らぎを平均

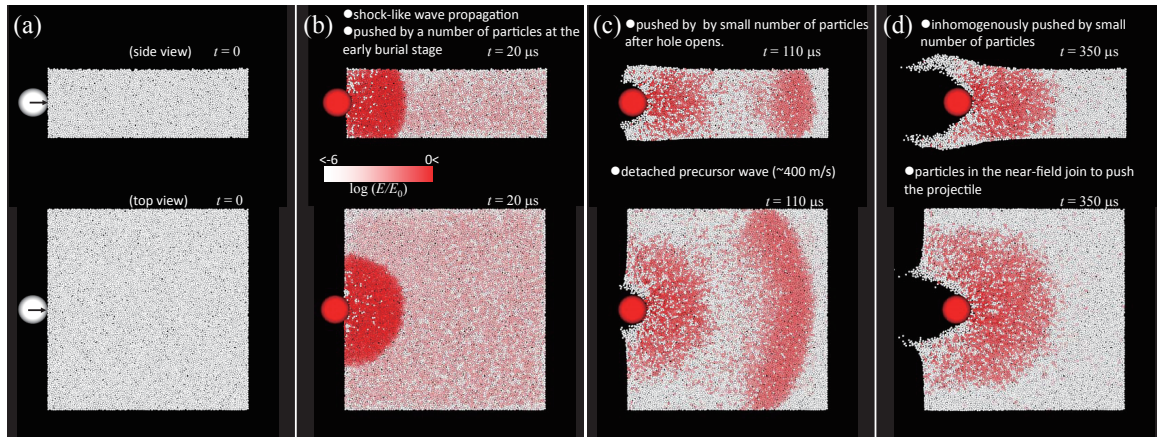


図 1: (a) 衝突初期状態および (b) 衝突直後  $20\mu\text{s}$ , (c)  $110\mu\text{s}$ , (d)  $350\mu\text{s}$  の断面スナップショット (反発係数 0.4, 摩擦係数 0.5). 上段が横から, 下段が上からの断面図. 粒子の蓄積弾性エネルギー  $E$  に応じて色付けされている. 規格化に用いた  $E_0$  は標的粒子同士が  $10\text{m/s}$  で衝突するときの衝突エネルギー.

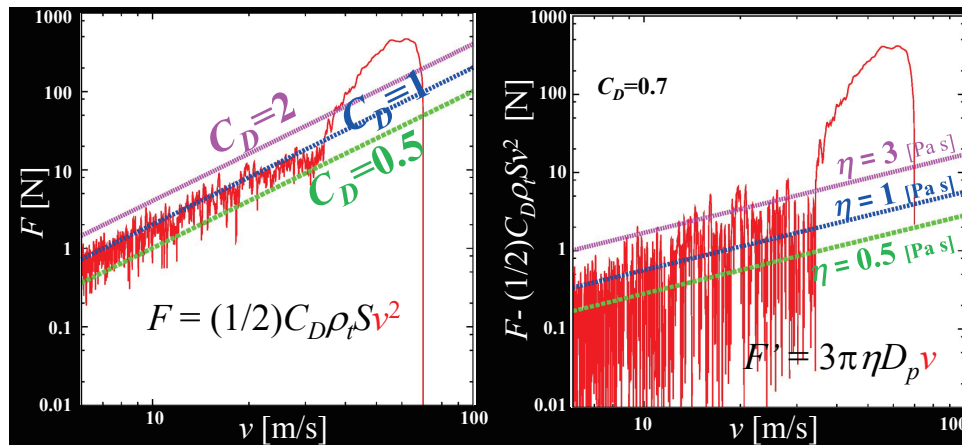


図 2: (左) 弾丸にかかる力  $F$  を貫入速度  $v$  に対してプロットした図. 図中の線は, 抵抗係数  $C_D$ , 標的層バルク密度  $\rho_t$ , 弾丸断面積  $S$  を用いて慣性抵抗  $F = (1/2)C_D\rho_t S v^2$  を表した場合のもので,  $C_D$  値が各々 0.5, 1, 2 のものを示す. (右) 弾丸にかかる力から慣性抵抗 ( $C_D = 0.7$  とした) を差し引いた力を貫入速度に対してプロットした図. 図中の線は, 粘性率  $\eta$ , 弾丸直径  $D_p$  を用いたストークスの粘性抵抗  $F' = 3\pi\eta D_p v$  で,  $\eta = 0.5, 1, 3 \text{ Pa s}$  に対して表示したもの. 反発係数 0.4, 摩擦係数 0.5.

して見れば, 弾丸にかかる力は貫入速度の 2 乗に比例することは明瞭であった. これを慣性抵抗としてみた場合, 粒子間反発係数や摩擦係数にほとんど依らず抵抗係数はおよそ  $0.5 - 1.0$  程度となった. また, 貫入速度の 1 乗に比例する抵抗の存在も示唆され, これを粘性抵抗とみなせば粘性率はやはり反発係数や摩擦係数に依らずおよそ  $0.5 - 3 \text{ Pa s}$  となった (図 2 右). 反発係数や摩擦係数に依らないのは, 粉体層中で粒子同士が密に接している状態にあり粒子間の相対運動が大きいこと, および弾丸はおもに正面の粒子から抵抗を受けるためにシアがあまり効かないこと, が原因と考えられる.

室内実験においても, 速度の 1 乗及び 2 乗に比例する貫入抵抗の存在が示唆されており, 抵抗係数  $\sim 0.9 - 1.5$ , 粘性率  $\sim 2 \text{ Pa s}$  という結果が得られている [3]. 本研究で得られた数値シミュレーションの結果はこの実験で得られた結果と調和的である.

今後は小天体表層環境, すなわち微小重力環境下で様々な空隙率を持つ粉体層を作成し, そこにおける詳細な衝突シミュレーションを行う予定である.

[1] Katsuragi, H. and Durian, D. J., 2007, Nature Physics 3, 420. [2] Niimi, R. et al., 2011, Icarus 211, 986. [3] Nakamura, A. M. et al., Icarus, submitted. [4] Hascoët, E. et al., 1999, Physical Review E 59, 3202.