

LIGGGHTS による衝突計算

末次竜

産業医科大学

惑星や小天体は天体同士の衝突による合体や破壊で形成されたため、衝突現象は太陽系形成において非常に重要な物理過程といえる。そのため衝突現象はこれまでに衝突実験や衝突シミュレーションによって調べられてきた。特に後者の衝突シミュレーションは、計算機の発達により手元でも大規模な計算が可能となったため研究が盛んに行われている。

現在、よく使用される計算法は SPH 法と格子法に大別される。どちらも流体力学を基礎方程式とし衝撃波を取り扱えるため、惑星科学や天文学において起こる衝突速度が km/s 以上の物理現象の計算が可能である。また一般に公開されたコードもある (iSALE, SOVA, GADGET など)。一方、砂などの粉体の挙動を調べるために用いられるのは、構成粒子同士の衝突を正確に計算する個別要素法 (DEM) である。高速衝突を取り扱うことは困難であるが、イジェクタカーテンなど構成粒子同士の衝突が重要となる物理の解析など、DEM でしかできないことも多く存在する。しかし SPH 法などと比較すると普及しておらず、惑星科学向けの公開コードも無い。

一方、工学分野では一般に公開されている DEM コードもあり、そのなかの一つである LIGGGHTS (LAMMPS improved for general granular and granular heat transfer simulations) は分子動力学コードの LAMMPS を粉粒体計算用に改良したものであり、非球形、付着力等の計算も可能である (Kloss et al. 2012)。そこで本研究では LIGGGHTS を用いて研究を行ったので、その結果を紹介する。

イジェクタカーテンの解析 (Kadono et al. 2020)

ガラスビーズへの衝突実験ではイジェクタにしばしば模様が現れ (図 1a)、この模様が月のクレーター周りのレイの起源である可能性が指摘されている (Kadono et al. 2015)。模様の成因はイジェクタ内での粒子同士の衝突と考えられるが、詳細な衝突過程は不明なため LIGGGHTS を用いて調べた。

標的は 20cm×20cm×7cm の箱に半径 1mm の粒子 112 万体を、地球重力下 (9.8m/s^2) で上から降らせることで用意し、弾丸は半径 1.3cm (1mm の粒子 1000 体で構成)、衝突速度 100m/s で計算を行った。

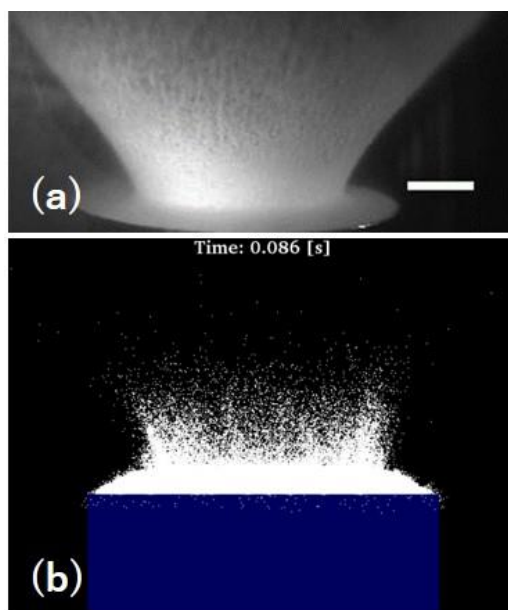


図 1: イジェクタカーテンの様子 (a) ガラスビーズへの衝突実験 (b) 数値計算

その結果、図 1b のように数値計算においてもイジェクタに模様が見られた。また粒子同士の衝突を考慮したモデルに数値計算結果を組み込むことで求めた典型的な模様のサイズは、実験結果とファクターの差(1/3 程度)はあるが、おおむね一致したといえるだろう。

大粒子がイジェクタカーテンに与える効果 (Kadono et al. 2019)

従来のガラスビーズを用いた実験では粒子サイズは同一であり、その場合はイジェクタカーテンに網目模様が見られた(図 1a)。一方、大粒子が混入した場合のイジェクタカーテンは、大粒子の粒径が大きくなるにつれて一様なメッシュ構造から非一様なフィラメント構造に変化する(図 2a, b)。小惑星探査機「はやぶさ 2」の SCI による衝突実験で観測されたイジェクタカーテンも非一様な構造であるため、リュウグウ表層にある大粒子が寄与した可能性がある。そこで LIGGGHTS を用いて大粒子がある場合の粉体の挙動を詳しく調べた。

10 万体の粒子で構成された半径 5cm、高さ 15cm の円柱を 20m/s で地面に衝突させ、地面に広がる様子を解析した。なお円柱は大粒子(1mm、2.5mm、4mm)と小粒子(0.5mm)の二つのサイズで構成され、混合割合も大粒子 20wt%と 40wt%の場合で行った。計算の結果、実験同様に大粒子のサイズが大きくなるにつれて、小粒子の広がりが一様な拡散から非一様な拡散に変化することが明らかになった(図 2c, d)。粒子が密な領域と疎な領域のコントラスト比の時間変化もよく似ており、イジェクタの広がりが大粒子に阻害される可能性が高いといえる。

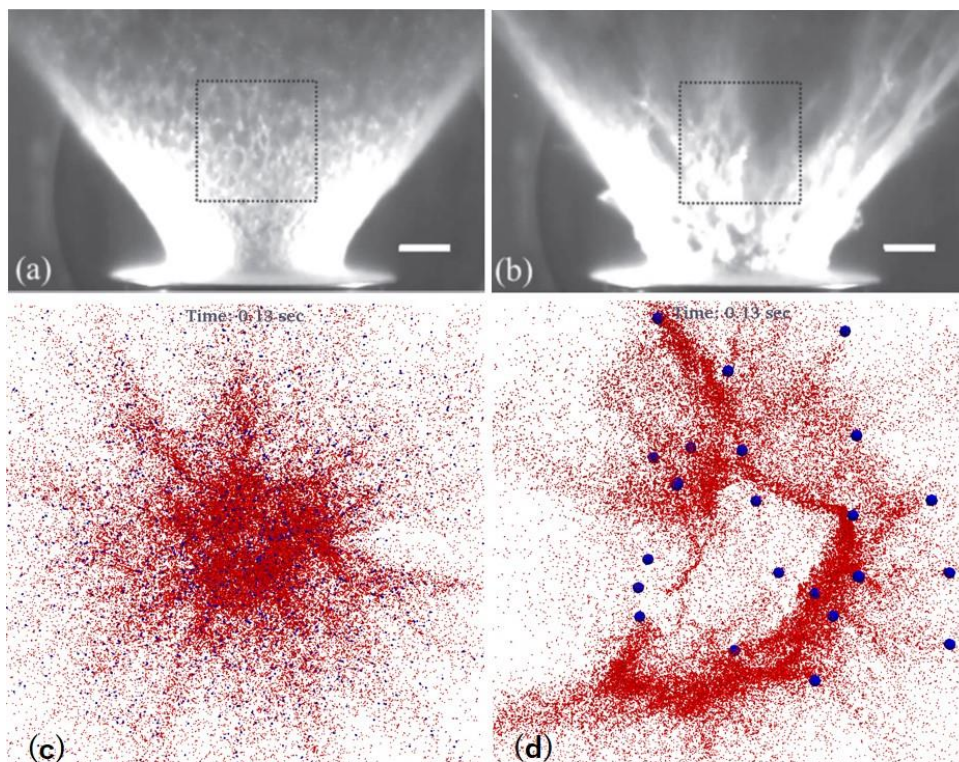


図 2 : 大粒子が小粒子の振舞いに与える効果 ガラスビーズ(0.1mm)に大粒子を混ぜた衝突実験 (a) 大粒子 1mm, 20wt%, (b) 4mm, 20wt%。小粒子(0.5mm)に大粒子を混ぜた数値計算 (c) 大粒子 2.5mm, 20wt% (d) 4mm, 20wt%