

ダスト凝集体への固体弾衝突による変形および破壊

桂木洋光, J. Blum¹

名古屋大学大学院環境学研究科, Technische Universität Braunschweig¹

1. はじめに

微小な固体微粒子が相互衝突による合体を繰り返し、微小粒子の集合による高空隙率のフラクタル的なダスト凝集体が微惑星形成の初期段階で形成されていたと考えられているため、ダスト凝集体の衝突動力学を正しく把握することは、惑星科学的見地から重要な課題である。そのような背景から、高空隙率ダスト凝集体の衝突現象に関する実験的研究が近年盛んに行われている[1]。これらのダスト凝集体の衝突実験では、宇宙空間で起こる現象をなるべく忠実に再現するために、同サイズのダスト凝集体同士の、微小重力・真空環境下での衝突が主な研究対象となってきた。

上述のように高空隙率ダスト凝集体は太陽系形成の材料としての関心から研究されることが多いが、微小な固体粒子群が構成する凝集体の力学特性自体は、基礎的な粉体物理学もしくはソフトマター物理学の研究対象としても興味深い。巨視的な固体粒子群（例えば直径が mm 程度のガラスビーズ）を重力下で容器内に積層させた場合、その充填率はおよそ 0.6 程度を示し、その値を大幅に小さくすることは難しい。しかし、 μm 程度のサイズの微小粒子であればファンデルワールス力等の凝着力の影響により、重力下でも自立する低充填率（高空隙率）凝集体を形成することが可能となる。このような高空隙率ダスト凝集体の力学特性は巨視的な粉体層のそれとどのような点が異なるのだろうか？

この素朴な疑問に答えるため、本研究では高空隙率ダスト凝集体に固体弾を自由落下衝突させ、その応答を高速カメラで捉える実験を行った。実験で得られたデータを解析することにより、高空隙率ダスト凝集体の衝突動力学特性をガラスビーズ等の通常の粉体をターゲットとして用いた場合の結果[2]と比較しながら議論し、その基礎力学特性を明らかにしたい。更に、ダスト凝集体の具体的な強度値に相当する物理量を見積もることにも取り組む。

2. 実験

衝突実験においてターゲットとなるダスト凝集体としては、直径約 $1.5 \mu\text{m}$ の球形の SiO_2 粒子群を用いて、直径 20 mm、高さ 20 mm の円柱状サンプル（充填率 $\phi = 0.35$ ）を準備した（ダスト凝集体サンプルの準備等についての詳細は[3]を参照）。弾丸としては、球形のガラス（直径 $D=4.0 \text{ mm}$ 、密度 $\rho_p=2.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ）、鉄（ $D=4.0 \text{ mm}$ 、 $\rho_p=7.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ）、鉛（ $D=4.5 \text{ mm}$ 、 $\rho_p=11 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ）を用い、自由落下により衝突速度 $v_0=0.19-3.2 \text{ m/s}$ の範囲でダスト凝集体に衝突させた。実験は真空チャンバー内で行われ、チャンバー内の残留圧力は 0.10 Pa に固定した。実験系全体の写真を図 1 に示す。衝突の様子は高速カメラ（Photron SA-5）で 42,000 fps のフレームレート、 $20 \mu\text{m}/\text{pixel}$ の解像度、 $512 \times 320 \text{ pixels}$ の撮影領域で取得された。実験系にはレーザーによるプロファイル計測系も組み込まれているが、手動制御によるデータ取得となったため制度は限られるものとなったためその詳細は本報告では割愛する。

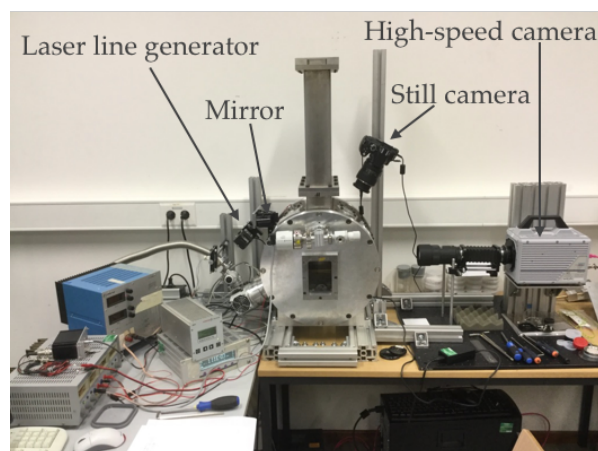


図 1：実験系全体の写真。中央が真空チャンバーで右側に高速カメラが設置されている。レーザーラインとカメラを用いたクレーター計上計測系も作りこまれている。

3. 結果

3-1. クレーター形成相と破壊相

衝突速度と弾丸密度を系統的に変化させることにより、衝突の結果としてあらわれる結果として(i)クレーター形成と(ii)破壊の2種類の相を確認した。それぞれの相の具体例を図2に示す。

図2(a)のクレーター形成相では、球形の固体弾の衝突痕がターゲット中央付近にみられる。しかし、通常の巨視的粉体層へ固体弾を衝突させた場合のような掘削物の放出は確認できず、クレーターの形状は弾丸の球形状とほぼ一致することがレーザーを用いたプロファイル計測で明らかになった。これは、クレーター形成が弾丸の衝突による塑性変形のみで起こっていることを示唆しており、ダスト凝集体がガラスビーズや砂と明確に異なるクレーター形成のモードを持っていることを示していると言える。

一方、衝突時の弾丸が持つ運動エネルギーが十分大きな場合は、クレーター形成ではなくターゲット凝集体の破壊が起こった(図2(b))。破壊相では、衝突により形成された亀裂がターゲット全体に進行している様子が確認された。

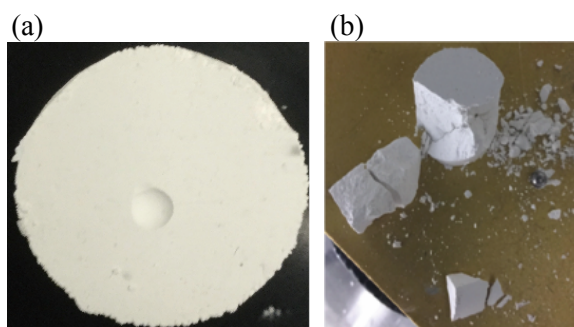


図2 : (a)弾丸の自由落下衝突によりダスト凝集体表面に形成されたクレーター形状の例。掘削されたエジェクタなどの放出はみられない。(b)衝突のエネルギーが十分大きい場合に見られる破壊の例。

3-2. 衝突の動圧と破壊基準

前節で議論した衝突エネルギーに依存した相の変化を定量的に解析するため、本研究では衝突時にターゲットが受ける動圧を高速度カメラで取得した動画より推定する技術確立した。手法の詳細は[4]に譲るが、画像解析により得られた動圧 P_{dyn} のピーク値 $\max(P_{\text{dyn}})$ と衝突の運動エネルギー E の関係

を全ての衝突についてプロットしたものを図3に示す。図中の直線は両対数プロットにおける傾き1の直線によるフィットであり、 $\max(P_{\text{dyn}}) = V_s^{-1}E$ という比例関係に対応する。ここで V_s は体積の次元を持つ量であり、フィッティングの結果得られた V_s の値は弾丸の体積 V_p と近い値となった。このことは、衝突により影響を受ける部分の(ターゲット中の)体積が衝突弾丸の体積とほぼ等しいということを示している。

また、 $\max(P_{\text{dyn}})$ の値が10 kPaを超えた4点では、ターゲット凝集体の破壊が確認された(その他はクレーター形成相)。すなわち、クレーター形成と破壊の相を分ける閾値が10 kPaということになる。この10 kPaという値は、高空隙率ダスト凝集体の引張強度にほぼ対応する[5]。

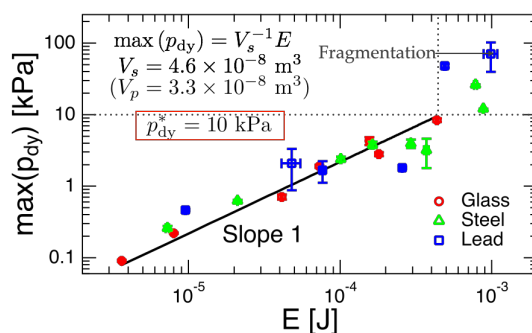


図3 : 弾丸運動の画像解析より求めた衝突動圧のピーク値 $\max(P_{\text{dyn}})$ と衝突運動エネルギー E の関係。

4. まとめ

高空隙率(低充填率)ダスト凝集体の力学特性を明らかにするために、固体弾を自由落下衝突させる実験を行った。実験の結果、衝突エネルギーに依存して、クレーター形成もしくは、凝集体の破壊がみられた。両者の相境界を定量的に議論するために、弾丸の高速画像より衝突動圧を計測する技術確立し、系統的解析を行った結果、衝突動圧が凝集体の引張強度に対応する10 kPaを超えると破壊が起こることが明らかになった。

参考文献 :

- [1] J. Blum, Space Sci. Rev. **214**, 52 (2018).
- [2] H. Katsuragi and D. J. Durian Nat. Phys. **3**, 420 (2017); Phys. Rev. E **87**, 052208 (2013).
- [3] J. Blum et al., J. Visual. Exp., e515411 (2014).
- [4] H. Katsuragi and J. Blum, Astrophys. J. **851**, 23 (2017).
- [5] J. Blum et al., Astrophys. J. **652**, 1768 (2006).