

粉体と水滴の衝突

桂木洋光

九州大学大学院総合理工学研究院

1. はじめに

粉体メディアへ固体弾を衝突させることにより形成される粉体衝突クレーターは、惑星科学的興味の外に粉体の基礎物理の関心もあって、今世紀に入り盛んに研究されるようになった。我々はこれまで特に粒径が 0.1 mm 程度の比較的大きな粒径の粉体層（主にガラスビーズ）に、1 m/s オーダーの低速で固体弾を衝突させたときの動力学に注目し、これを高精度で計測する実験系を作成した。この実験系を用い、粉体の（固体弾衝突に対する）抵抗力が速度の二乗に比例する慣性抵抗と侵入深さに比例する摩擦抵抗の和として表現されることをこれまで明らかにしてきた [1]。また、この衝突抵抗力における容器壁の効果についても実験的に明らかにしてきた [2]。

粉体はその散逸や離散性などから統一的物理の枠組みを作ることが容易ではない。一方で連続体として取り扱うことが可能な流体の物理は古くから発展してきた。特に衝突現象に関する現象も盛んに研究されてきており、例えば、流体層に流体を衝突させることによりミルククラウン形状が観察されることは良く知られている。また、固体への液滴の衝突は工業的な応用の重要性もあり、これまで幅広く研究されている [3]。

また、粉体と流体を混合させたスラリーの挙動は土木工学を始め様々な工学的に重要な問題と関係し、やはり長く研究がなされてきている。しかしながら、工学的応用の要請から得られた研究成果の多くは経験則にとどまっており、スラリーやペーストに関する基礎物理の解明はやはり十分ではない。特に粉体と流体の混合系におけるダイラタンシーなどは直感に反する現象であり、その起源を正しく理解することにより様々な応用の可能性は更に一層広げられるだろう。

これらの研究背景を受け、ここでは、特にこの粉体と流体の混合について焦点を当てる。しかし、それらが予め完全に混じり合った状態ではなく、衝突により混合する際の遷移状態に注目することとする。より具体的には、粉体層に液滴を滴下して起こる衝突現象を議論する。この現象は、衝撃力の他に表面張力、濡れ、粉体層の塑性変形、粉体と流体の混合など様々な効果が関わることとなり、複雑な現象となる。

流体と粉体層の衝突では、濡れによる浸透が起こり、固体弾衝突の場合のように抵抗力を直接計測することは容易ではない。一方で、衝突イベント終了後は流体が粉体層へと吸収されるので、衝突における粉体層の最終形状計測が比較的容易となる。

2. 実験系

実験系としてはシンプルなものを用いる。衝突させる流体には水を用いた。ノズルをハイトゲージにマウントして、水滴の落下高さを容易に調整可能な系を構築し、このノズルにシリンジポンプを用いて水を低速で押し出すことにより水滴を作成した。水滴のサイズが表面張力の限界を超えると自重によりピンチオフされ、自由落下によって粉体層へ衝突する。

粉体としては昭和電工製の炭化珪素研磨粉を用いた。粒径は分布を持つがその中央値がそれぞれ 4, 8, 14, 20, 50 μm である 5 種類のものを用いて粉体層サンプルを作成した。これを直径 30 mm のプラスチックシャーレに充填し被衝突粉体層サンプルとした。

この粉体層サンプルに水滴（約 5 mm の直径）を様々な高さ（10, 15, 20, 30, 40, 60, 80, 120, 160, 240, 320, 480 mm）から落下衝突させた。衝突の様子を竹中システム製の高速カメラ FC350CL で 210 fps のフレームレートにより撮影した。また、衝突イベント終了後のクレーター形状はキーエンス製ライン型レーザー変位計 LJG-030 とコムス製電動ステージ PM80B-100X, PS60BB-360R を組み合わせた表面計測系により測定されたが、この結果は紙数の関係からここでは割愛する。

3. 結果

3-1. 衝突による水滴変形の時間スケール

衝突の様子を捉えた 1/210 秒毎の画像の典型例を Fig.1 に示す (Fig.1 撮影の実験条件は落下高: 160 mm, 粉体層粒径: 4 μm)。水滴は粉体への衝突により大きく変形し、同時に粉体層を変形させスプラッシュを吹き上げてクレーターを形成している様子が分かる。衝突後の 2 フレームで水滴は拡張を停止し、収縮に移行していることが見て取れる。この拡張から収縮に移行する時間スケール (10^{-2} 秒) は、水滴の落下高さや粉体層粒径に

依存せず全ての実験条件でほぼ同様の値となった。撮影レートの2,3フレーム内での現象なので精度が十分ではないが、この時間スケールは水滴の表面張力の作る時間スケールとして以下のように概算される値とオーダーが一致する。

$$\begin{aligned} t_\gamma &= \sqrt{m_w/\gamma} \\ &= \sqrt{60 \times 10^{-6}/(72 \times 10^{-3})} \\ &= 3 \times 10^{-2} \text{ (s)} \end{aligned}$$

ここで、 γ は表面張力、 m_w は水滴の質量である。

3-2. 水滴分裂とウェーバー数

収縮に引き続き中央で水滴が跳ね返りを起こし、更に水滴の分裂が起こっている。この分裂は落下高さが充分小さいとき以外は多くの実験条件下で観察された。Fig. 1では分裂した水滴は再び合体しているが、落下高さが充分高い（大きな衝突エネルギー）場合は、水滴は最初の変形時に分裂して再合体しないこともあった。

一般に水滴の衝突を特徴付ける無次元量としては、ウェーバー数

$$We = \rho u^2 L / \gamma$$

が用いられる。ここで ρ は水滴の密度、 u は衝突の速度（落下高さの関係）、 L は特徴的長さ（ここでは水滴の直径）である。このウェーバー数が大きな値であれば、衝突による慣性力が卓越し表面張力の効果はほぼ無視出来る。今回の実験条件ではウェーバー数は全て10以上(多くが 10^2 のオーダー)となり衝突による慣性力が支配的な領域であることが分かる。水滴を固体壁に衝突させた場合にスプラッシングや分裂が起こる臨界ウェーバー数についても過去によく調べられているが、その固体壁物性依存性等については未だに明らかになっていない[4]。ここでは更に粉体層が塑性変形をしているので状態はより複雑となる。

3-3. 水滴浸透の時間スケール

水滴は分裂・再合体後に振動し、最終的にはゆっくりと粉体層内に沈んでいく。この時間スケールは1~10秒程度であり非常に長い。この時間スケールを導き出す次元解析は容易ではなく、粉体の濡れの効果や水の粘性等様々な要因が複雑に絡み合った現象となっているためであると考えられる。このため、流体ベースの次元解析のみでは限界があり、粉体の特性を組み入れた時間スケールの見積もりが今後の課題と考えている。

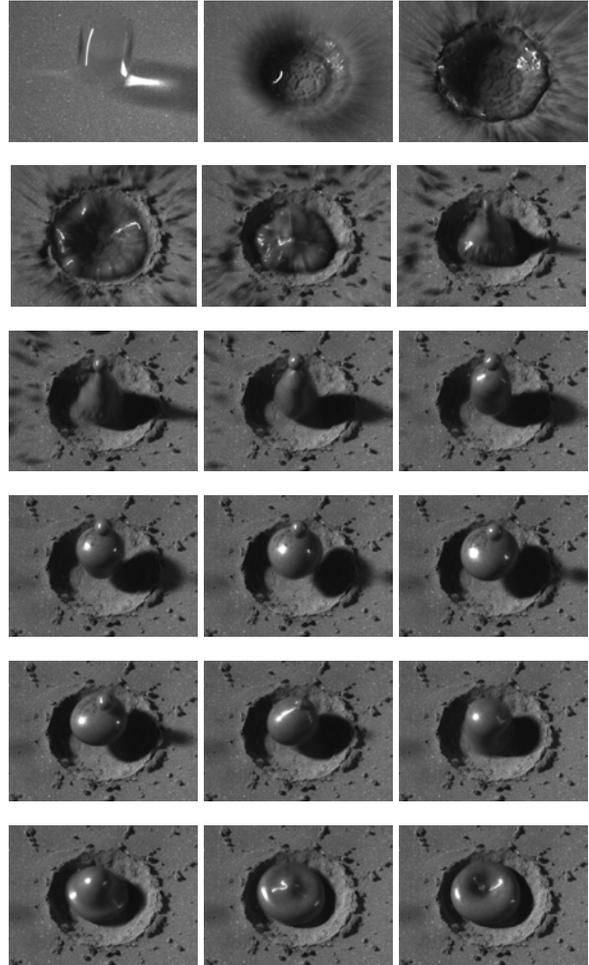


Fig. 1. 水滴（直径約5 mm）を160 mmの高さから粒径4 μm の粉体層への自由落下衝突の高速撮影画像（各画像間インターバル、シャッター速度ともに1/210秒）。

4. まとめと今後

粉体層へ水滴を衝突させ、水滴と粉体層の変形の様子を高速撮影し、特徴的な時間スケールを決定する物理機構を議論した。

この他にレーザー変位計により最終的な粉体層変形（クレーター）形状についても測定し、特徴的長さスケールについても発表では議論した（ここでは紙数の制限から割愛する）。今後の課題としては粉体の特性を取り入れた次元解析、フレームレートを上げた高速撮影などが考えられる。

参考文献：

- [1] H. Katsuragi and D.J. Durian, *Nature Phys.* **3**, 420 (2007).
- [2] E.L. Nelson et al., *Phys. Rev. Lett.* **101**, 068001 (2008).
- [3] A.L. Yarin, *Ann. Rev. Fluid Mech.* **38**, 159 (2006).
- [4] K. Range and F. Feuillebois, *J. Colloid Interface Sci.* **203**, 16 (1998).