

粉体と液滴の衝突における粉体液体物性の効果

桂木洋光

九州大学大学院総合理工学研究院

1. はじめに

粉体層と固体弾の衝突現象は惑星科学のみならず土木工学や基礎物理の立場からも興味深い現象であり、近年盛んに研究されている。発表者は特に基礎物理の立場から低速での粉体層と固体弾の衝突動力学の実験的研究を行ってきた[1, 2]。ただし、これらの研究はインパクトによる変形はターゲットである粉体のみに限られており、インパクトである固体弾は充分固くその変形は無視出来るものであった。

そこで、これらの粉体-固体弾衝突研究の拡張としてインパクトも変形し得る衝突現象の物理を明らかにするために、発表者らは最近、水滴と粉体層との衝突現象の研究に取り組んできた[3]。前回研究会では、ターゲットとしてはSiC 研磨粉を用い、インパクトとしては水滴を用いた結果について報告した。特に、粉体の粒径と水滴の衝突速度（水滴の自由落下高さ h ）を変化させた場合に様々なクレーター形状が形成されることを見出し、図1に示される相図を作成した。

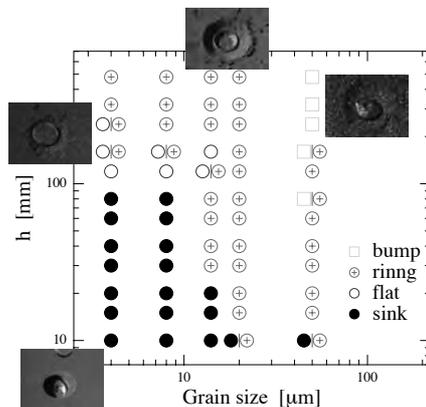


図1 : SiC 研磨粉と水滴の衝突クレーター相図

また、形成されるクレーターの径は、衝突による水滴の変形の度合いによりスケールされることが分かり、以下のスケールングを得た。

$$R/R_l \sim (\rho_g/\rho_l)We^{1/4} \quad (1)$$

ここで、 R はクレーター半径、 R_l は液滴半径、 ρ_g は粉体層のバルク密度、 ρ_l は液滴密度、無次元数

$We = 2R_l\rho_l v^2/\gamma$ はウェーバー数である（ただし、 v は衝突速度および液滴表面張力）。

今回はこれらの結果をふまえて、ターゲットとしてSiCに加えてガラスビーズを用いた場合、液滴の表面張力および粘性を変化させた場合の効果、のそれぞれを系統的に調べ、クレーター形態等について実験的研究を行った。その結果について報告する。

2. 実験系

実験系は前回と同様で、ハイトゲージにマウントしたノズル先端に液滴を作り、自由落下により粉体層に衝突させ、その様子的高速カメラによる観察し、クレーター形状のレーザー変位計による計測を行った。ターゲット粉体としてはSiC 研磨粉（粒径 4, 8, 14, 20, 50 μm ）に加えてガラスビーズ（粒径 5, 18, 50, 100 μm ）を用いた。これらの粉体層サンプルに液滴（約 2 - 5 mm の直径）を様々な高さ（10 - 480 mm）から落下衝突させた。液滴としては水の他に表面張力をコントロールするためにエタノール、粘性をコントロールするためにグリセリンを用いた。衝突の様子は TAKEX 製高速カメラ FC350CL で 210 fps のフレームレートにより撮影され、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 LJJ-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。図2に用いた実験の写真を示す。手前が液滴落下系と高速カメラであり、奥がレーザー変位計による表面計測系である。装置の制御およびデータのハンドリング等は NI 社製の LabVIEW によって行われた。

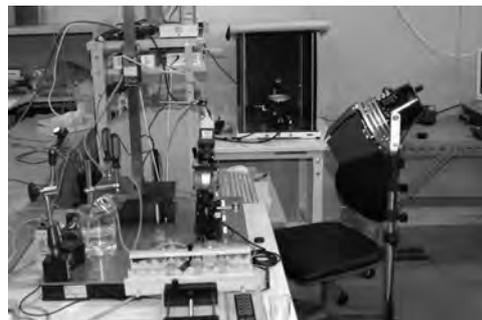


図2 : 実験系

3. 結果

基本的な衝突の様子は前回報告の SiC 研磨粉 vs 水滴とほぼ同様となった。液滴のサイズは衝突の動力学やクレーター形状にはほとんど影響を与えず、粉体の粒子形状や親水性の具合も大きな影響を及ぼさなかった。ただし、粒径の小さな (20 μm 以下の) 親水性粒子 (ガラスビーズ) の粉体層はキャピラリーブリッジ効果により粉体層が堅牢となり、衝突液滴はクレーターを作らず表面で拡張し、そのまま粉体層へ浸透する挙動 (デポジッション) が確認された。

インパクト液滴の表面張力をエタノール水溶液を用いて下げた場合、液滴の衝突による分裂やフィンギング不安定性が顕著となった。また、液滴粘性をグリセリン水溶液を用いて増加させると衝突による液滴の変形が抑制され、液滴がより安定となることが分かった。

続いて特徴的長さスケールとして、クレーター径を表面形状データより求め、そのスケールリングを確認した。液滴の変形度合いは液滴粘性に依存していたが、クレーター径はインパクト液滴の粘性にはほぼ依存せず、前回報告と同様のスケールリング [式 (1)] が全ての実験データで再確認された (図 3)。

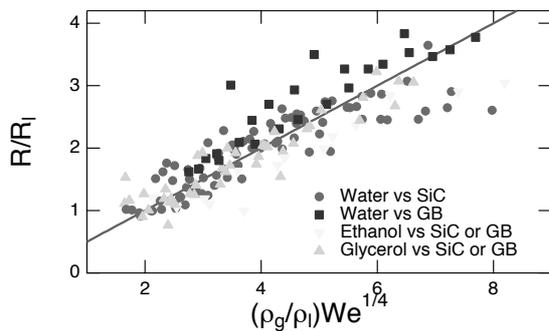


図 3 : クレーター径スケールリングプロット

また、衝突を特徴付ける時間スケールとして液滴振動の減衰時間 t_b と液滴の浸透時間 t_p を高速カメラで取得した画像をもとに計測した。これらの時間スケールのウェーバー数依存性を図 4 に示す。図 4 より、これらの特徴的時間スケールがウェーバー数 (すなわちその主要変数である衝突速度) にほとんど依存せず、主に液滴の粘性に依存することが分かる。特に浸透時間は粘性の 1/2 乗に比例して増加することが実験結果より示唆されたが、この結果は従来のポーラスメディアへの液体浸透の時間スケールの挙動 (ウォッシュバーン則 [4]; 浸透時間は粘性の 1 乗に比例する) とは明らかに異なるものとなった。

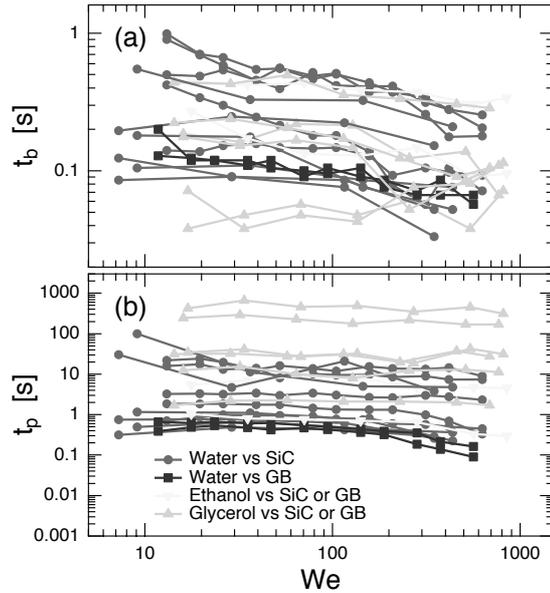


図 4 : 特徴的時間スケールのウェーバー数依存性

4. まとめと今後

様々な粉体層と液滴との間の衝突現象の系統的实验研究を行い、衝突クレーター形状の形態、特徴的長さスケール、および時間スケールの粉体・液体物性依存性を調べ以下の結果を得た。

粉体層の粒子形状は結果にあまり影響を及ぼさないが、細かい親水性粒子による粉体層では表面強度が増し、クレーター形成ではなく、液滴のデポジッションが観察された。

液滴の粘性は液滴の衝突による変形を抑制するが、結果として形成されるクレーター径のスケールリングは粘性に依存せず、液滴と粉体の密度比およびウェーバー数に依存することが分かった。

一方で衝突の特徴的時間スケールは、衝突速度にはほぼ依存せず、液滴粘性に強く依存することが確認され、その液滴依存性を表すスケールリングは、通常のポーラスメディアへの液体浸透とは異なるものとなった。

今後は、より高速での液滴変形撮影を通して、液滴変形のダイナミクス、液滴内部での流れの解析等が重要な課題となる。

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] H. Katsuragi, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 218001 (2010).
- [4] E. W. Washburn, *Phys. Rev.* **17**, 273 (1921).