

水滴と粉体の衝突現象

九州大学 総合理工学研究院 桂木 洋光¹

炭化珪素研磨粉からなる粉体層に水滴を自由落下衝突させた際に観察される衝突変形および浸透現象についての実験結果について報告する。計測系としては高速度カメラおよびレーザー変位計を用い、クレーターの形状およびそれを特徴付けるクレーター半径のスケージング則について議論する。まず水滴の衝突速度およびターゲット粉体層の粒径を変化させて、観察されるクレーター形状の形態学的分類を行った。その結果、シンク型、リング型、バンプ型などの水滴と粉体の衝突に特徴的なクレーター形状が発見された。また、クレーターを特徴付ける量としてクレーター半径を計測し、水滴と粉体層の(バルク)密度比およびウェーバー数によりスケールされることを見いだした。

1 はじめに

粉体における衝突現象は、地球惑星科学的興味その他に粉体の基礎物理の関心から近年盛んに研究されつつある。特にこれまでは非粘着性の粉体層に m/s 程度の低速で固体弾を衝突させた場合に形成されるクレーターの形態学 [1]、固体弾動力学 [2]、粉体ジェット噴出 [3] などが主な研究対象であった。一方で液滴の衝突現象についても、ミルククラウン形状の美しさや工学的応用の見地から長く研究がなされてきた [4]。しかし、粉体層に液滴を衝突させた場合の挙動については、これらの要素現象/技術の進展に反してこれまで十分な研究の報告がなされていなかった。液体と粉体の混合は非常に複雑で理解の難しい現象を容易に生み出すことからこれまで詳細な研究対象としては避けられてきたのかもしれない。

そこで我々は、粉体層に水滴を衝突させた場合に起こるクレーター形成現象について詳細に調べることとした。ただし、実験での衝突速度は数十 cm からの自由落下による m/s オーダーまでの加速に限られ、衝突液滴のサイズは毛管長の限界から mm 程度に制限されている。このように、本実験系は通常の地球惑星空間で起こる衝突クレーター形成現象に比べると非常に低速で小スケールなものとなる。しかし、このような粉体層と液滴の衝突、混合過程は雨粒化石形状 [5] の起源や材料工学などの分野にとっても重要な素過程と捉えることが出来ると考えている。本研究では特にこの新たな現象についての研究の第一段階として形態学的な研究に主眼を置いて、クレーターの分類、定量的特徴付けを行う。

¹E-mail: katsurag@asem.kyushu-u.ac.jp

2 実験系

ターゲット粉体としては粒径が $4 \sim 50 \mu\text{m}$ のラフな形状を持つ炭化珪素研磨粉を用いた。これを直径 30 mm 、厚さ 10 mm の小さな容器に手で詰めてすりきりにより平坦面を出した。ハイトゲージに取り付けたノズルにシリンジポンプを用いて非常にゆっくりと水を流し込むことにより、ノズル先端に水滴を成長させた。水滴は自重により切り離されターゲットに自由落下衝突する。このときの水滴半径はおおよそ 2.4 mm であった。衝突の様子は高速度カメラ (210 fps) で撮影され、水滴および粉体層の変形の様子が解析された。衝突後に水滴は粉体層に浸透し、衝突の痕跡としてクレーターを残す。このクレーター形状をレーザー変位計と電動 X ステージおよび回転ステージを組み合わせたレーザープロフィロメトリシステムを用いて測定した。この形状測定の結果からクレーター形状の特徴的長さスケール（半径）が求まる。実験系の概念図を図 1 に示す。これの測定結果や解析を通して粉体と水滴の衝突・浸透の物理について議論する。

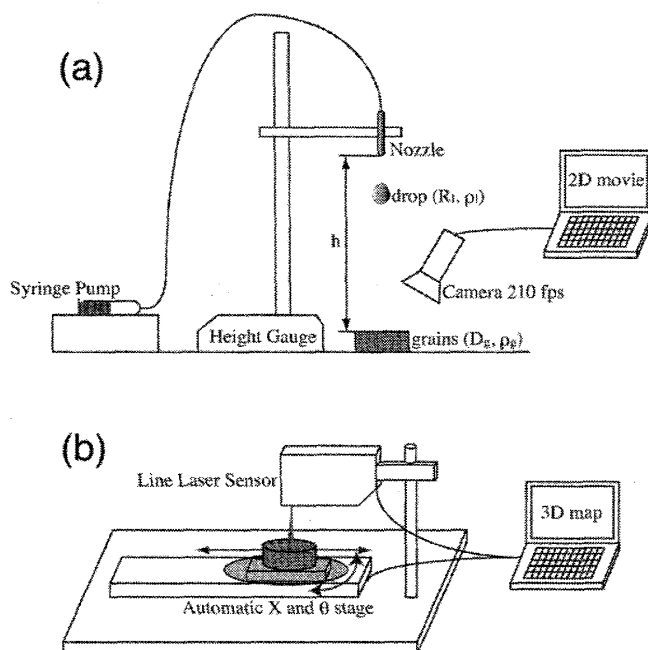


図 1: 実験系概念図. (a) 液滴生成落下系 + 高速度カメラ. (b) クレーター形状測定用レーザープロフィロメトリシステム.

3 結果

系統的に水滴の衝突速度（水滴の自由落下高さ）およびターゲット粉体層の粒径を変化させて、形成されるクレーター形状をシンク型（低速衝突領域）、リング型（高速衝突領域）、フラット型（シンク型とリング型の境界領域）、バンプ型（大粒径粉体層への高速衝突領域）の 4 種類に分類した（図 2）。

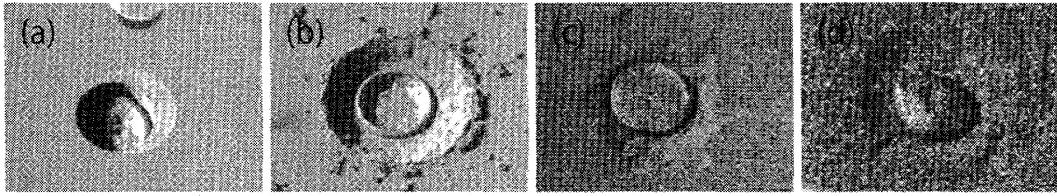


図 2: 特徴的クレーター形状. (a) シンク型, (b) リング型, (c) フラット型, (d) バンプ型.

また, 得られた形状の表面計測よりクレーター半径 R を求め, R が以下のスケーリングに従うことを見いだした.

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

ここで R_l , ρ_g , ρ_l はそれぞれ水滴半径, ターゲット粉体層のバルク密度, 水滴の密度であり, $We = 2\rho_l R_l v^2 / \gamma$ (ウェーバー数) は衝突慣性 (衝突速度 v によって特徴付けられる) と表面張力 γ のバランスを記述する無次元数である. 固体壁と水滴の衝突による水滴の変形が $We^{1/4}$ でスケールされることは奥村らにより次元解析的に求められており [7], 両者のスケーリングの一致はクレーターのサイズが水滴の変形により主に決定されていることを示唆している [6]. 更に R の密度比依存性は密度の高いターゲット粉体層が衝突により水滴をより大変形させ, それにより大きな半径のクレーターが形成されていることを示している. この密度比依存性の部分は適当な仮定をおいた上での運動量輸送を議論することで導くことが出来る.

以上の結果に加え, 水滴以外の液滴 (エタノールまたはグリセロール) や炭化珪素研磨粉以外の粉体 (ガラスビーズ) を用いた場合にもこのスケーリングがほぼ成立することが分かった. 実験により得られたデータを図 3 に示す.

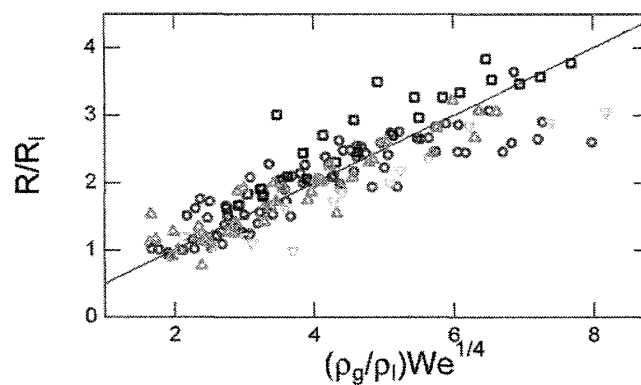


図 3: クレーター半径スケーリング. 異なるマークは異なる粉体と液滴の組合せを示す.

4 まとめ

粉体層と液滴の衝突により形成されるクレーター形状についてその形態を分類し，特徴的長さスケール（クレーター半径）の従うスケーリング則を実験的に見いだした．具体的には，スケーリングは変形物体の運動量輸送に由来すると考えられる密度依存性と液滴の大変形によるウェーバー数依存性の積で表現された．今後はより詳細の液滴変形ダイナミクス，液滴内部の流れ解析などについて調べていきたい．特にリング型クレーター形成のメカニズムに迫るためには，液滴内部での流れの可視化解析が必要となる．

参考文献

- [1] J. S. Uehara et al., *Phys. Rev. Lett.* **90**, 194301 (2003).
A. M. Walsh et al., *Phys. Rev. Lett.* **91**, 104301 (2003).
- [2] H. Katsuragi and D. J. Durian, *Nature Phys.* **3**, 420 (2007).
- [3] S. T. Thoroddsen and A. Q. Shen, *Phys. Fluids* **13**, 4 (2001).
D. Lohse et al., *Nature* **432**, 689 (2004).
J. R. Royer et al., *Nature Phys.* **1**, 164 (2005).
- [4] A. L. Yarin, *Annu. Rev. Fluid Mech.* **38**, 159 (2006).
- [5] E. Desor, *Edinburgh New Phil. J.* **49**, 246 (1850).
R. Metz, *J. Sediment. Petrol.* **51**, 265 (1981).
- [6] H. Katsuragi, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 218001 (2010).
- [7] K. Okumura et al., *Europhys. Lett.* **62**, 237 (2003).