

固体弾の流体への低速衝突によるクラウンパターン形成

桂木洋光

名古屋大学大学院環境学研究科

1. はじめに

液滴の固体壁もしくは流体層への衝突により形成される、いわゆる「ミルククラウンパターン」は古くから知られており、Worthington の先駆的研究により [1] その姿がとらえられて以来、多くの研究が行われてきている。近年では計算機や高速度カメラの技術革新がめざましく、ミルククラウン形成の他にもジェット形成等を含めた流体衝突の研究の進展に大きく寄与している [2]。

しかし、これまでの研究の多くは、水滴などの液滴を固体壁もしくは流体層へ衝突させた場合に集中しており、固体弾を流体層へ衝突させた実験例は意外にも数少ない。また、液滴を粉体層のような柔らかい標的へ衝突させた例も近年までほとんどなかった。本研究では、これらのこれまであまり行われていなかった流体衝突によるクラウンパターン形成現象を実験的に調べる。

本実験の典型的一例として、図 1 に鉄球を水の層に自由落下衝突させた場合のクラウン形成の様子のスナップショット（衝突を側面から撮影した図となるが、後にフィンガー数を計測する場合は、上からの衝突画像を用いた）を示した。また、図 2 に水滴と粉体層の衝突によるフィンガリングの様子を示した。これらの実験により、ソフトマテリアルの衝突によるクラウンパターン形成の基礎解明を目指す。

クラウンパターン形成に関連する天体現象としては、はやぶさにより持ち帰られたイトカワサンプル表面に見られるナノクレーターがある。このナノクレーターの周囲にはクラウン形状のような突起があることが報告されている [3]。

宇宙空間のような真空、低温の世界で起こることを実験室で直接的に再現することは容易ではない。しかもイトカワのクレーターは直径が 100 nm 程度と極微の世界でもある。



図 1 : 鉄球-水衝突によるクラウン形成

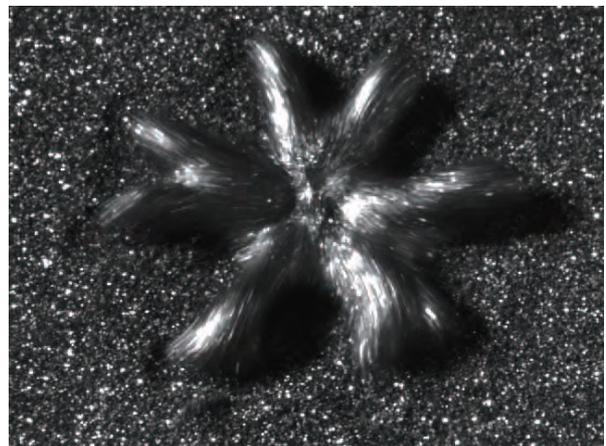


図 2 : 水滴と粉体層の衝突によるフィンガー形成の様子

本研究では、これらの極限状態を直接的に模擬することは諦め、実験室内で流体や粉体を用いた衝突実験を行い、その結果により宇宙空間で起こっていることの類推を行う材料を整備することを目標とする。

2. 実験系

今回新たに行った実験では、弾丸として直径が 3, 6.35, or 8 mm の鉄球を用い、標的としては、水もしくはシリコンオイルを用いた。最も大きく変化させた物性は標的流体の粘性であり、0.65 – 200 cSt の範囲で変化させた。鉄球を 2 – 60 cm の高さより自由落下により標的流体に衝突させ、その様子を高速カメラ (Photron SA-5) により 5,000 fps で撮影した。撮影したスナップショットの例を図 3 に示した。フィンガリング不安定性によるクラウンパターン形成を確認することが出来る。実験条件を変化させた場合に、このクラウンパターンのフィンガー数がどのように変化するかを調べた。

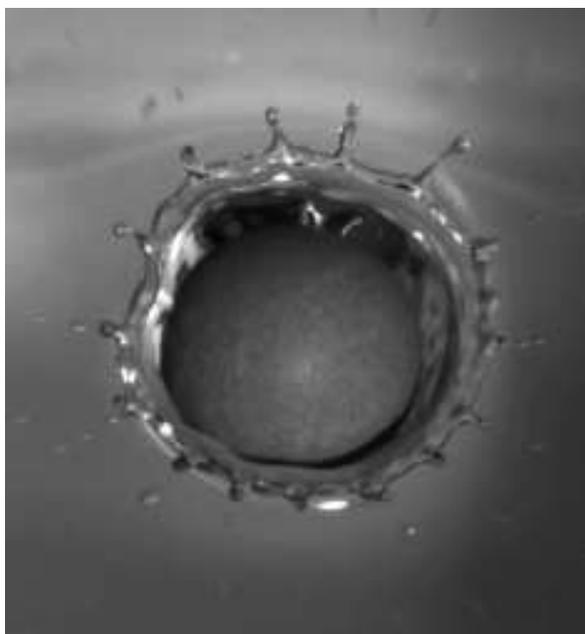


図 3 : 鉄球 ($d=6.35$ mm) の水 ($\nu=0.89$ cSt) への衝突 ($v=1.5$ m/s) .

3. 結果

実験結果の画像よりカウントされたフィンガー数 N は、流体衝突を特徴付けるレイノルズ数 Re やウェーバー数 We を用いて解析された。ここで Re および We はそれぞれ、

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta}$$
$$We = \frac{\rho v^2 d}{\gamma}$$

であり、 ρ, ν, d, η , および γ はそれぞれ密度、代表速度、代表長さ、粘性、および表面張力である。ここで代表速度は衝突速度を取り、代表長さとして、表面張力と粘性から導出される長さスケールを用いると、衝突レイノルズ数 $I = We^{1/4} Re^{1/2}$ が求まる[4]。液滴の固体壁への衝突によるフィンガー数は $N \sim I^{3/4}$ となることが知られている[4]。一方で Bhola らの研究によると、 $N = We^{1/2} Re^{1/4} / 4\sqrt{3}$ となることが報告されている[5]。本実験での結果は、両者のスケージングによりある程度説明出来ることが確認された。

4. 議論

ただし、この結果により、イトカワのナノクレーター形状を流体衝突のフィンガリングパターンと直接結論付けることは出来ない。イトカワのナノクレーターの形状と、フィンガリング不安定性との関係から、衝突速度等を見積もることは可能であるが、計算された値の信頼性は低い。例えば、真空状態ではレイリーテイラー不安定性は起きないこと[6]や、流体変形によるクラウンパターンはすぐに緩和して形状を保てないことなどが問題点として挙げられる。特にイトカワのナノクレーターのような天体上のクラウンパターンの謎を解き明かすためには、今後も、粘弾性標的、真空チャンバー等を用いた広範で徹底的な衝突実験による詳細な研究が必要である。

参考文献

- [1] A. M. Worthington, *Philos. Trans. R. Soc. Lond. A* **180** (1897) 137.
- [2] A. L. Yarin, *Annu. Rev. Fluid Mech.* **38** (2006) 159.
- [3] E. Nakamura et al., *PNAS* doi:10.1073/pnas.1116236109 (2012).
- [4] H. Marmanis and S. T. Thoroddsen, *Phys. Fluids* **8** (1996) 1344.
- [5] R. Bhola and S. Chandra, *J. Mater. Sci.* **34** (1999) 4883.
- [6] L. Xu, W. Zhang, and S R. Nagel, *Phys. Rev. Lett.* **94** (2005) 184505.