## 粒体の物理

## **Structures in sand streams**

## 砂の流れに現れる断続パターン

## Detlef Lohse & Devaraj van der Meer

Nature Vol.459(1064-1065)/25 June 2009

砂などの粒状の物質をさらさらと自由落下させると、その連続的な流れはやがて、断続的な複数のクラスター(固まり)へと分裂していく。高価な高速度ビデオカメラを数メートルの高さから落下させるという"独創的"な実験により、どうしてこのようなことが起こるのかが明らかになった。

池に石を投げ込むと、水が勢いよく飛び上がることはよく 知られている。高速度ビデオカメラや連写カメラで撮影す ると、噴出した水が小さな水滴に分裂していく様子が見え る。この現象は芸術家のヒントにもなり、例えば Andrew Davidhazy(ロチェスター工科大学教授)などは、高速度撮 影による写真作品を発表している。

一方で、これと非常によく似た現象が、粘着性のない細かい砂の上に石を落としたときにも観察されており $^1$ 、まさに興味深く注目に値する。このような「粒体」の流れが液体とよく似た振る舞いを見せる理由は、粒子どうしの衝突が非弾性衝突であるために、粒子が集まってより大きな構造を作るからだとされ、私たちはこれまでこの説明を信じてきた $^{2,3,4}$ 。しかし、米国・シカゴ大学のRoyer らは、この見解が間違っていることを示す論文をNature~6月 $^25$ 日号 $^1110$ ページに発表した $^5$ 。大きな構造を作る原動力は、あまりに小さすぎてこれまではクラスター、つまり粒子の固まりを作ることはできないだろうと考えられてきた力によるのであった。

液体の流れにおける小滴の形成(図 1a)は、表面張力、つまり小滴の形を保たせている力が原因のレイリー・プラトー不安定性によって起こる。この不安定性の解明は、ベルギーの物理学者 Joseph Plateau と英国の物理学者レイリー卿らによって行われ、19 世紀後半に流体力学の概念を発展させる要となった。そしてそれ以来、教科書にも載っている基礎知識となった $^6$ 。その一方で、砂のような「粒体」の流れ(図 1b)では、液体の流れとは対照的に、表面張力が働かないと考えられてきた。そして粒体は、衝突時に働く斥力を除いて「互いに力を及ぼし合わない粒子の集まり」と定義されてきた $^7$ 。それゆえ、粒体の流れが液体の流れと

よく似たクラスターに分裂することは、まさに驚くべきことだったのである。

Royerらは今回、粒体では、ナノメートルの範囲まで及ぶ 粒子間に働く小さな力が微小な表面張力になり、その強さは 水の表面張力の10万分の1にもかかわらず、砂の流れの中 で粒子がクラスターを形成する現象を説明できることを示し た<sup>5</sup>。彼らはこれを2つの技術を巧妙に組み合わせて達成し た。1つは、ナノメートルスケールで砂粒の間に働く力を原 子間力顕微鏡で測定したことであり、もう1つは、メートル スケールで粒体の流れの発展を追跡したことである。実験で は、砂やその他の粒体を漏斗から流出させ、流れといっしょ に動く高速度ビデオカメラを使って撮影した。つまり、ク ラスター形成の動力学を、ほぼ1秒間にわたって流れとと もに動く座標系で追ったわけだ。実際には、8万米ドル(約 800万円)もする高速度カメラを数メートルの高さから落下 させる必要があった。着地時にカメラに加わる衝撃は十分に 吸収されるようにしておいたとはいえ、文字通り息をのむよ うな試みだった。

Royerらは、粒子間に働くナノメートル範囲の凝集力と、自由落下の最初の数メートルにおける流れ構造の発展との間の、直接的な相関関係を調べた<sup>5</sup>。そして、凝集力の強さを変えると、動力学つまり流れがクラスターに分裂する仕方が直接変化することを見いだした。粒子間の凝集力の強さは、具体的には、粒子表面の粗さや湿度を変えたり、あるいは異なる物質を使うことで変化させた。注目すべきことに、ナノメートルスケールの凝集力を抑えると、クラスター形成は起こらなくなったのである。

私たちは、この印象的な現象を2つの類似現象から説明

しようと思う。1つ目は、粒子が形成するクラスター(固まり) の形に関連している。Rover らも指摘しているように 5、ク ラスターの形は、分裂するときに2つの円錐形をつなげた 形の「首」ができることを含め、液体をナノメートルスケー ルで噴出させた際にできる小滴とよく似ている。この現象 は、分子液体をナノメートルスケールのノズルから真空中 へ注入する様子をシミュレーションした分子動力学研究で 最初に見つかった8。こうした研究から、ナノメートルスケー ルの流れの中の分子数が少なく、熱ゆらぎがあるとき、ク ラスターの形状は不規則になることがわかっており、この 点は Royer らの粒体の流れで見られたクラスターと非常に よく似ている。砂の流れに含まれている砂粒の数も、巨視 的な液体の流れに含まれる巨大な分子数と比べればはるか に少ない。

2つ目の類似現象は、星を取り巻くガス円盤中の塵の粒 子から惑星系が形成する現象だ。この場合、最初のステッ プはメートルサイズの岩の形成だが、このプロセスがどの ようにしてキロメートルサイズの微惑星の形成へと続くの かは、岩の間に働く重力がとても弱いことを考えると未解 明の問題である $^9$ 。しかし、Royer らの研究は、十分な時間 が与えられれば、たとえ微小な力でも構造を形成できるこ とを教えてくれる。

これまで、「粉体」に対して「粒体」を定義する際に用い てきた性質の1つは、粒子の間に働く凝集力がないという ことだった $^{7}$ 。しかし、Royer らによる粒体の流れにおける クラスター形成の観察は、科学者たちがこれまで信じてきた ことに反して、粉体と粒体の違いはもっと不明確であること を示している。事実、粒子の速度の差が小さく、時間スケー ルがかなり大きいとき、大きな粒子でさえ、粉のように振る 舞うことがある。

小さな引力がおよぼす効果は、自由落下する粒体の流れ以 外にもみられるかもしれない<sup>1</sup>。たとえば、柔らかくて細か い砂に重い物体が衝突すると砂が飛び上がるが、その砂の「は ね」の部分に形成される構造は、同種の凝集力と関連してい る可能性が高い<sup>1</sup>。そのような関連性が実際に存在するかど うかを調べるには、Royer らが今回粒体の流れに対して行っ たような先駆的な研究が今後必要だ。(新庄直樹 訳)

Detlef Lohse と Devaraj van der Meer は、J.M. バーガーズ研究センタ 一科学技術部門流体物理グループと、トゥエンテ大学の力学・プロセス・ 制御研究所 (IMPACT) と MESA+ ナノテクノロジー研究所に所属している。

- 1. Lohse, D. et al. Phys. Rev. Lett. 93, 198003 (2004).
- 2. Jaeger, H. M., Nagel, S. R. & Behringer, R. P. Rev. Mod. Phys. 68, 1259-1273 (1996).
- 3. Kadanoff, L. Rev. Mod. Phys. 71, 435-444 (1999).
- 4. Goldhirsch, I. Annu. Rev. Fluid Mech. 35, 267-293 (2003). 5. Royer, J. R. et al. Nature 459, 1110-1113 (2009).

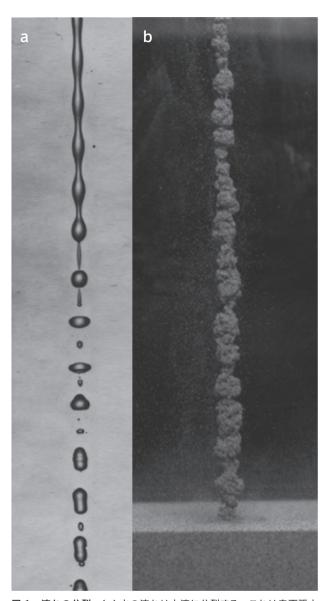


図 1:流れの分裂 (a) 水の流れは小滴に分裂する。これは表面張力 によって起こる現象である(画像は参考文献 10 から転載)。 (b) 同 様に、砂などの粒体の流れもまた、粒子のクラスター(固まり)に分 裂する(画像は参考文献1から転載)。粒体の具体例としては、粘着 性のない細かい砂へ物体が衝突したときにできるものなどがある。粒 体では、粒子の間のナノメートルの範囲に働く力によって、分裂とクラ スター形成のプロセスが起こり、この力が通常の液体の10万分の1 の表面張力を発生させることを Royer らは示した 5。

- 6. de Gennes, P.-G., Brochard-Wyart, F. & Quere, D. Capillarity and Wetting Phenomena: Drops, Bubbles, Pearls, Waves (Springer, 2003).
- 7. Duran, J. Sands, Powders, and Grains 1st edn (Springer, 1999).
- 8. Moseler, M. & Landman, U. Science 289, 1165-1169 (2000).
- Johansen, A. et al. Nature 448, 1022-1025 (2007).
- 10. Rutland, D. F. & Jameson, G. J. J. Fluid Mech. 46, 267-271 (1971).