

粉体対流時の応力鎖構造の変化

飯川 直樹¹, バンディ・マヘッシュ², 桂木 洋光¹

¹ 名古屋大学大学院 環境学研究科

² 沖縄先端科学技術大学院大学 構造物性相関研究ユニット

概要

粉体層に重力加速度よりも大きな振動を加えると、層内で粒子が上昇する領域と下降する領域が形成されて対流が起きることが知られている。その物理機構の理解は自然科学や粉体操作の過程を伴う様々な産業技術において重要である。本研究では光弾性円盤で構成された2次元粉体層に鉛直タッピングを加える実験を行い、粉体対流時の応力鎖の変化について調べた。その結果、粉体対流時には各粒子に加わる力の増加と応力鎖構造の等方化が起きることが明らかになった。

Force Chain Reorganization under Granular Convection

Naoki Iikawa¹, Mahesh M. Bandi², Hiroaki Katsuragi¹

¹Department of Earth and Environmental Sciences, Nagoya University

²Collective Interactions Unit, OIST Graduate University

Abstract

The convective motion of particles occurs when a granular pack is vibrated. Understanding the physical mechanism of the granular convection is important in natural science and industrial techniques handling granular materials. In this study, a two-dimensional system of photoelastic disks subject to vertical tapping against gravity was experimentally monitored. We then investigated the convection-induced reorganizations of force chain structure and orientation. As a result, the increase of inner force and the reorientation of force chain to isotropic structure in a tapped granular pack were observed.

1 はじめに

粉体は多数の固体粒子の集合体と定義され、全体として複雑な流動性や特殊な圧縮性などの特異な物性を示す。例えば粉体層の底部に鉛直振動を加えると、粉体層に加わる加速度が重力加速度を超える場合に層内で粒子が上昇する領域と下降する領域が局所的に形成されて粉体粒子の対流が起きることが知られている。

この粉体対流は時に粒子のサイズ分級を引き起こすため、粉体操作の過程を伴う様々な産業技術において重要視されるだけでなく、惑星科学を中心とした自然科学分野でも注目が集まっており、最近では

惑星表面における隕石衝突が粉体層に振動を与えて粉体対流を発生させ、粒子の移動を起こしたとするモデルも提案されている [1]。

粉体対流を産業技術や自然科学分野へ応用するためにはその物理機構を理解することが重要となるが、その物理機構の詳細は未だ解明されておらず、これまでに多くの研究がなされてきた [2]。本研究ではこれまでの研究とは異なるアプローチとして、応力鎖と呼ばれる鎖状の形をした粉体層の内部応力分布の変化から粉体対流を特徴づける。

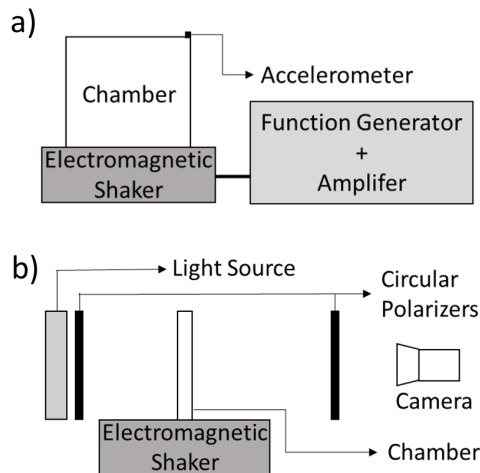


図 1: (a) 実験系の模式図. (b) 光学系の模式図.

2 実験方法

実験は図 1(a) のような擬二次元系のセットアップで行った. 本研究では粉体層の応力鎖構造を実験的に調べるため, 粉体として光弾性円盤を使用している. 光弾性とは外力の加わった透明材料が複屈折を起こす性質のことで, この複屈折の程度を調べることで材料に加わる応力を推定できる. 実験では 2 種類の大きさ (直径 15 mm と 10 mm, 厚さは共に 10 mm) の光弾性円盤を大粒子 200 個・小粒子 400 個の混合比で充填した実験容器 (高さ 300 mm, 幅 300 mm, 奥行 11 mm) に電磁式加振装置を用いて鉛直方向のタッピング (1 周期の正弦波) を加えることで粉体層に振動を加え, 2 秒の時間間隔で 1000 回タッピングした. 実験容器の右上には加速度センサーが取り付けられており, タッピングごとの実験容器に加わる加速度を計測する. タッピングの強度 Γ (最大タッピング加速度と重力加速度の比) を 2.5, 5, 10, 20 と変化させ, 特性時間 T (実験容器に重力加速度と反対方向の加速度が加わる継続時間) を 2.5 ms, 5 ms, 10 ms と変化させることで合計 11 パターンの条件 ($\Gamma = 20$ かつ $T = 10$ ms の場合は実験系の制限により測定できなかったため) で実験を行った.

本研究では粒子の動きと応力鎖の変化について調べるために図 1(b) のような光学系を使用した. 実験容器の前方に置いた円偏光板の有無により, 各粒子の位置を示すオープンニコル画像 (図 2(a)) と応力鎖が可視化されたクロスニコル画像 (図 2(b)) の 2

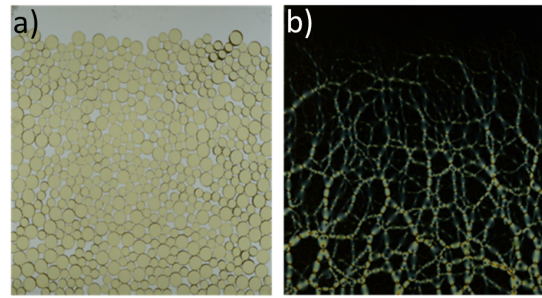


図 2: (a) オープンニコル画像. (b) クロスニコル画像.

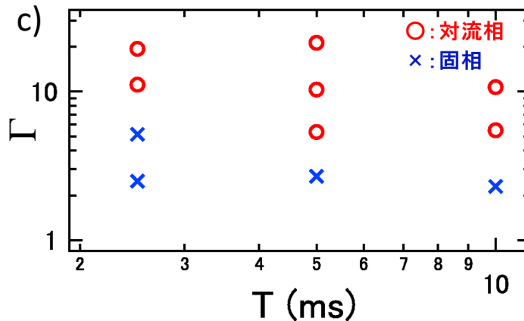
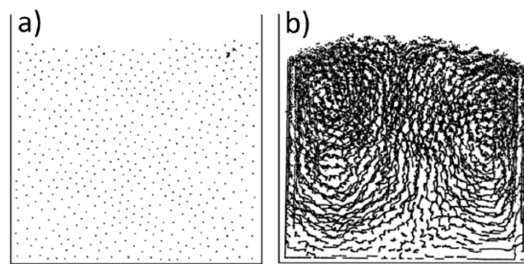


図 3: (a) $\Gamma = 2.5, T = 10$ ms, (b) $\Gamma = 10, T = 10$ ms の実験条件における実験容器内の粒子の動き. (c) 各実験条件での対流発生の有無を表す相図.

種類の画像を取得でき, 取得した画像を解析することで粉体対流の発生の有無, 粉体対流時の各粒子に加わる力の変化と応力鎖構造の変化を調べた.

3 結果

3.1 粉体対流の発生条件

各実験条件での粒子挙動を調べることで, 本研究における粉体対流の発生条件を明らかにする. オープンニコル画像から実験容器内の各粒子の位置を推定し, その軌跡をプロットしたものが図 3 である. 図

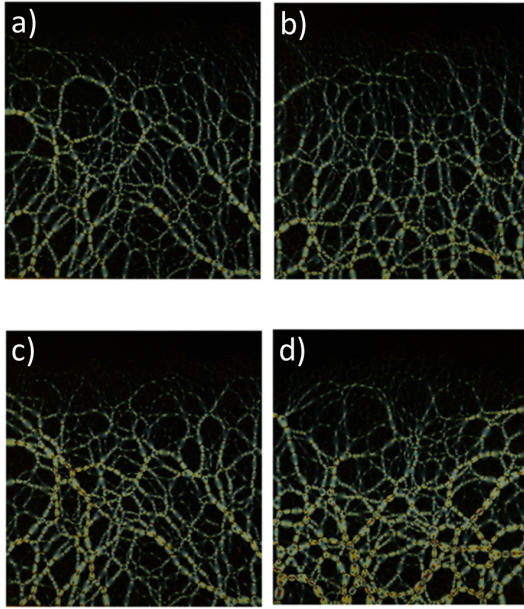


図4: 固相での応力鎖の (a) 初期状態 ($\tau = 1$) と (c) 最終状態 ($\tau = 1001$). 対流相での応力鎖の (b) 初期状態と (d) 最終状態.

3(a) の場合は粒子の位置がほとんど変化しないのに対して、図 3(b) の場合は粒子の移動が見られ、粒子が実験容器の中央で上昇し両側の壁付近で下降する対流的な動きが起きていることがわかる。図 3(a) のような粉体層の状態を固相、図 3(b) のような状態を対流相として区別すると、相図は図 3 (c) のようになる。この相図から本研究における粉体対流の発生条件はおおむね $\Gamma \geq 5$ であるが、 T が短い場合には粉体対流の発生には 5 よりも大きな Γ が必要となることがわかる。

3.2 粉体対流時の応力鎖の変化

粉体対流の発生の有無による粉体層の応力鎖の変化について調べる。本論文で示す固相と対流相のデータはいずれも実験条件 $\Gamma = 2.5, T = 2.5$ ms (固相) と $\Gamma = 20, T = 2.5$ ms (対流相) の場合におけるものである。図 4 (a) & (b) はそれぞれ固相と対流相における応力鎖の初期状態 ($\tau = 1$) を示し、図 4 (c) & (d) はそれぞれの相の応力鎖の最終状態 ($\tau = 1001$) を示す。これらを見比べてみると、固相と対流相の応力鎖の変化には大きな違いがあることがわかる。固相では応力鎖の変化が小さく、初期の

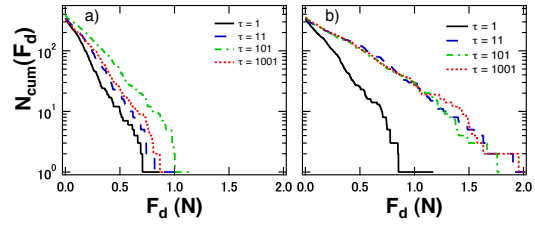


図5: (a) 固相と (b) 対流相での F_d の累積頻度分布の変化. 各色の線はタッピング回数を表す.

主要構造が最終状態でも維持されているのに対して、対流相では最終状態で水平方向の応力鎖が発達しており、加えて下層の応力鎖が太くなっている。そこで、固相と対流相の応力鎖の変化を各粒子に加わる力の変化と応力鎖の構造変化という 2 つの観点から定量的に評価する。

3.2.1 各粒子に加わる力の変化

クロスニコル画像における各粒子の表面輝度値の勾配の平均値 (G^2) は粒子に加わる力 F_d と関係にあるため、 $\langle G^2 \rangle$ を計算することで F_d を間接的に推定することができる [3]. 各粒子の $\langle G^2 \rangle$ を計算するためには個々の粒子の位置と直径を推定する必要があるが、クロスニコル画像上でこれらを推定することは難しい。そこで、オープンニコル画像から各粒子の位置と大小直径を推定する。推定した粒子の位置と直径をクロスニコル画像に適用して各粒子の $\langle G^2 \rangle$ を計算する。その後、 $\langle G^2 \rangle$ を F_d に変換する校正曲線を用いて各粒子に加わる力を推定する。校正曲線は実験とは別に事前に作成したもので、1 粒子に様々な大きさの圧縮力を加えた際の $\langle G^2 \rangle$ を大小の粒子ごとに計算し、二次曲線でフィッティングすることで作成している。

図 5 (a) & (b) はタッピング回数ごとの固相と対流相の F_d の累積頻度分布である。これらの F_d の累積頻度分布から、固相ではタッピング後の分布の変化が小さいのに対して、対流相ではタッピング後の分布の顕著な変化が見られる。そこで、これらの分布を次のような指数関数 [4] でフィッティングする。

$$N_{cum}(F_d) = A_F \exp\left(-\frac{F_d}{F_0}\right) \quad (1)$$

ここで A_F は無次元の定数であり、 F_0 は力の次元を持つ定数である。タッピング前後の F_0 の変化に

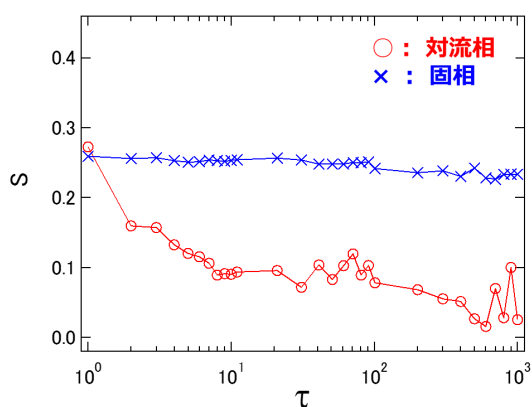


図 6: 固相と対流相での S の変化様式の違い.

ついて調べると、固相の場合ではタッピング前後で $F_0 = 0.15 \text{ N}$ のままほとんど変化しないのに対して、対流相では初期状態では $F_0 = 0.15 \text{ N}$ 程度だった F_0 が 10 回程度のタッピングで $F_0 = 0.40 \text{ N}$ に変化し、その後飽和することがわかった。この F_0 の変化は図 4 で見られる傾向と整合的であり、対流相のほうが固相よりもタッピング前後での各粒子に加わる力の増加量が多い。

3.2.2 応力鎖構造の変化

一般に応力鎖のようなネットワーク構造を直接的に評価することは難しい。そこで応力鎖がある基準をもとに短い直線素子に分割し、統計的解析を行うことで応力鎖構造を定量的に評価する。本研究では、クロスニコル画像を二値化後、細線化し、細線化した応力鎖を交差点あるいは端点間で直線近似することで直線素子を得る [3]。この時、各素子の長さ l_i と重力方向からの角度 θ_i (θ の範囲は $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) を同時に取得する。応力鎖構造の変化を定量的に評価するため、 l_i と θ_i を用いて応力鎖の配向秩序 S を次のような形で定義する。

$$S = \left(\frac{2}{L} \sum_{i=1}^n l_i \cos^2 \theta_i \right) - 1 \quad (2)$$

ここで L は応力鎖の総長 ($\sum l_i$) を示す。 S はすべての直線素子の角度が重力方向と平行であれば 1 を示し、重力方向と垂直であれば -1 を示す。そして、各直線素子の角度がすべて 45° あるいはランダムであれば S は 0 を示す。本研究では大小 2 種類の円盤

の混合によりランダムな粒子配置をとるため、直線素子が重力となす角がすべて 45° になることはなく、したがって $S = 0$ であれば応力鎖が等方的に発達している状態にある。このことは実際の応力鎖構造を見ることによっても簡単に確認することができる。

図 6 は固相と対流相での応力鎖の配向秩序 S のタッピング回数 τ 依存性を示す。この図から、初期状態では固相と対流層のどちらも $S \sim 0.25$ を示し、やや重力方向に沿った応力鎖構造が見られるが、その後の推移は異なる。固相ではタッピング後も S が初期値からほとんど変化せず、応力鎖構造が初期状態から最終状態までほぼ一定であることが分かる。それに対して対流相ではタッピング回数が増えるに連れて S が減少し、 $S = 0$ に漸近している。したがって対流相ではタッピングによって応力鎖構造が等方化しており、初期状態に比べて水平方向の応力鎖が相対的に発達していると言える。

4 まとめと今後の展望

これまでの解析結果をまとめると、粉体対流の発生時には各粒子に加わる力の顕著な上昇と水平方向の応力鎖の相対的な発達による応力鎖の等方化が起きることが明らかになった。これらの変化は数回程度のタッピングで飽和しているように見えるため、これらの結果には相関があるものと考えられる。

今後は高速度カメラを用いた高時間分解能での 1 タップ中の応力鎖の変化を調べることで、粉体対流時の各粒子に加わる力の顕著な上昇と水平方向の応力鎖の相対的な発達の原因について調べる予定である。

参考文献

- [1] T. M. Yamada *et. al.*, arXiv:1508.06485, (2015).
- [2] A. Mehta, *Granular Physics*, Cambridge Univ. Press, (2007).
- [3] N. Iikawa *et. al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **84**, 094401 (2015).
- [4] Liu *et. al.*, *Science*, **269**(5223), 513 (1995).