

障害物周りでの粉粒体の流れ場

遠藤圭太, 桂木洋光

名古屋大学大学院 環境学研究科 地球環境科学専攻

概要

粉粒体の出口流と障害物の関係は、様々な産業技術や自然現象と関連があるにもかかわらず、その物理機構は十分には理解されていない面もある。本研究では、障害物の影響下において重力により駆動される2次元粉粒体流出実験を行い、出口からの流量とそのゆらぎを測定した。また、高速カメラにより出口流の粒子個々の動きを追跡した。データより、出口におけるマクロな流量の一様性と、障害物周りでの粉粒体出口流のミクロな時空間的非常一様性を明らかにした。

Granular flow field around an obstacle

Keita Endo, Hiroaki Katsuragi

Department of Earth and Planetary Science, Nagoya University

Abstract

The relationship between granular exit flow and obstacles is one of the most important issues in various industrial technologies and natural phenomena. However, its physical mechanism has not been understood well so far. In this study, we conducted a simple experiment of two dimensional granular exit flow driven by gravity under the influence of an obstacle. The granular flow rate and its fluctuation were measured using load cells. In addition, from the images of the granular exit flow acquired by a high-speed camera, we tracked the motions of all particles by means of Particle Tracking Velocimetry (PTV). From the obtained data, we found the homogeneity of the macroscopic flow rate. In contrast, the microscopic grain scale granular flow field around the obstacle is spatiotemporally very inhomogeneous.

1 はじめに

流動状態にある粉粒体は、一般的な流体とは異なる非直感的な振る舞いを示す。粉粒体流の代表的な特徴の一つとして、重力下での出口流の流量が積層高さに依らず常に一定となるという性質がある。一方で、流体の場合は、流量が層厚に依存して変化することが知られている（トリチェリの定理）。粉粒体の場合、出口流量は積層厚には依存しないが、粒子直径と出口幅に大きく依存する [1]。特に、出口幅が粒子直径に対してある条件まで小さくなると、粉粒体の粒子群が出口でアーチ構造を形成して目詰まりを起こす『閉塞』と呼ばれる現象が発生する。この

現象は、工場の生産ラインなどの場面で粉粒体材料を輸送する際に、度々深刻な問題となる。更に、粉粒体出口流の中に障害物を配置すると、流れ場が影響を受けて、流量や閉塞条件が変化することが知られている [2-4]。障害物の効果は、群衆や動物の流れを制御することにも応用されており [5-7]、社会環境的にも重要な要素である。

以上で挙げられた粉粒体出口流の諸性質は、経験的には広く知られており、様々な産業技術や自然現象とも関係があるが、その物理的な機構には未解明な点が多く残されている。本研究では、特に粉粒体出口流における障害物の影響に焦点を当て、2次元での粉粒体出口流実験を行い、流出状態を特徴づけ

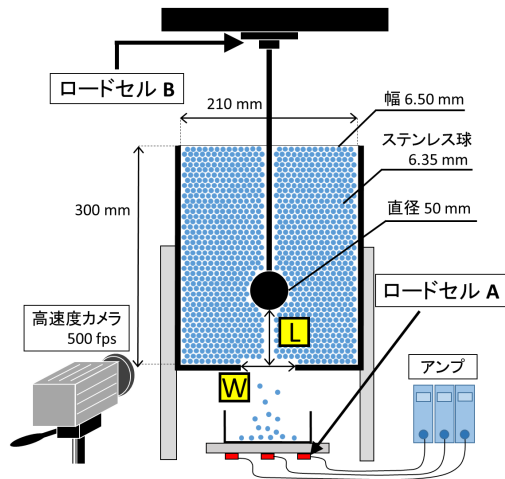


図 1: 実験系の概略図。
容器下部の出口の幅 W と出口からの障害物までの距離 L をパラメータとする。

るマクロな流量の測定とともに、高速度カメラで撮影した流れ場のデータから個々の粒子のマイクロな追跡を行った。その結果、粉粒体出口流の中に障害物を挿入した場合、流量が一定に保たれるのに対し、障害物周辺では時間的にも空間的にも非一様な流れ場が生じることが確認された。

2 実験

実験では、アルミによる側壁および底壁をアクリル板で挟んだ擬 2 次元容器（横幅 210 mm, 高さ 300 mm, 厚さ 6.5 mm）に障害物として直径 50 mm, 厚さ 6 mm のステンレス円盤を挿入し、容器内を直径 6.35 mm のステンレス球で満たした後、出口を開放することで重力により駆動される出口流を発生させる。流出中、出口下の受け皿に設置したロードセルセンサー A で流量を測定する（図 1）。また、障害物は万能試験機のロードセルセンサー B にステンレス棒（直径 6 mm）で繋がっており、障害物にかかる抵抗力についても測定可能な実験系となっている（ただしこの測定結果については本稿では触れない）。更に、粉粒体が流出中の 2 次元容器を正面から高速度カメラで撮影し、記録した粉粒体流の流れ場の動画を粒子追跡法（PTV: Particle Tracking Velocimetry）により解析する。実験系における主要なパラメータとしては、出口幅 W と出口からの障害物の距離 L をとる。具体的には、 W は 25, 30, 40, 60 mm と変化させ、 L は 5 mm 毎に 10 mm ~ 50 mm, 10 mm 毎に 50 mm ~ 100 mm と変化させて実験を行った。

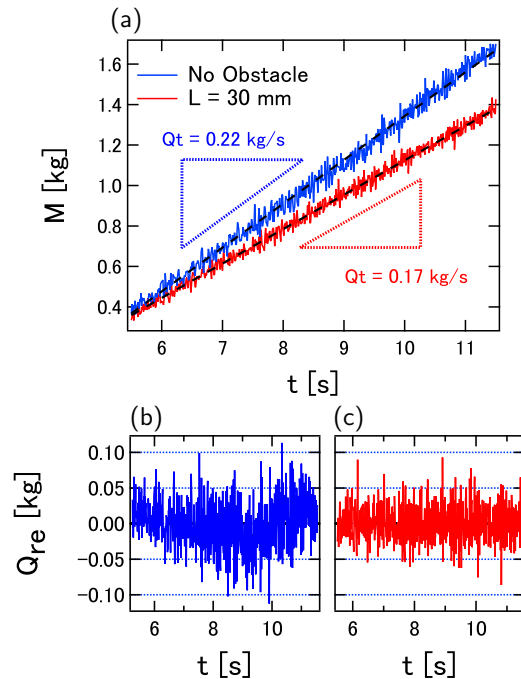


図 2: ロードセル A による流量測定。
(a) 障害物がない場合（青）とある場合（赤）（ $L = 30$ mm）での出口から流出した粒子の総量の時間変化。黒破線の傾きが各流量の平均に相当する。(b) 障害物なし (c) 障害物ありのそれぞれの場合の平均流量周りのゆらぎの時間変化。出口幅 W は 25 mm で共通。

3 結果と考察

3.1 マクロ流量測定

まず、粉粒体出口流における障害物の影響についてのマクロな特徴付けのために流量測定を行った。図 2 は障害物がない場合とある場合（ $L = 30$ mm）の流量を測定した結果である。ここで、出口幅 W は両方のケースで 25 mm とした。図 2(a) の障害物なしのデータ（青実線）より、障害物がない場合に出口流の流量が一定となるという粉粒体出口流の特徴が確認できる。また、障害物を挿入した場合においても流量は一定に保たれることが図 2(a) の赤実線より分かる。この定常性は層厚が 6 粒子程度の高さになるまで保たれる。ただし、流量の平均値 Q_t の値を比較すると、障害物がない場合の流出の方が Q_t の値が大きく、障害物の影響により流出量が減少していることが分かる。人の流れ等では障害物を置くことにより流量が増加する場合もあるが、本実験では定常流領域のみで流量を測定しており、人の流れで見られるような小規模閉塞を伴いながら流れる場合は考慮されていない。そのような場合の正味流量

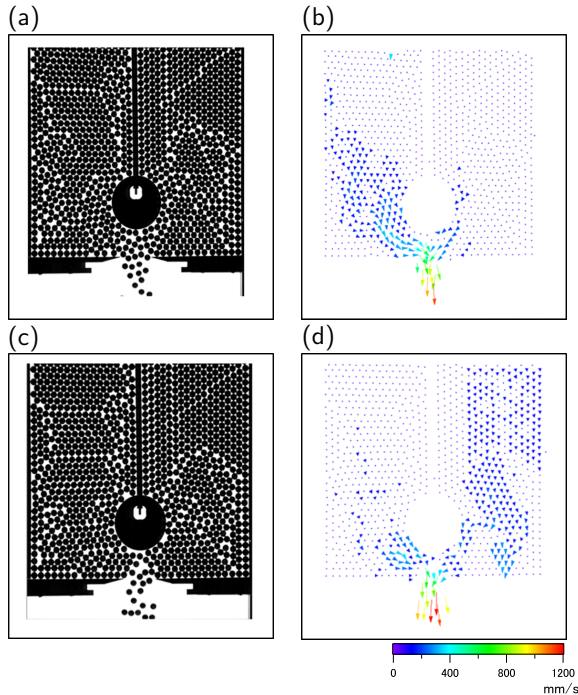


図 3: 障害物影響下での粉粒体出口流の速度場。(a), (c): 高速度カメラで取得した障害物挿入時の粉粒体出口流の画像データであり, (c) は (a) の 68 ms 後の画像データである. (b), (d): (a), (c) のそれぞれの状態における各粒子の速度場のベクトル表示 ($W = 30$ mm, $L = 25$ mm).

を計測することは今後の課題となる。

次に, 測定データから流量の平均値 Q_t を引いて, 平均流量の周りのゆらぎ $Q_{re} = Q - Q_t$ を障害物なしとありの場合について求めた結果を図 2(b), (c) にそれぞれ示す. 図 2 の (b) と (c) を比較すると, 障害物を挿入した場合の方が流量ゆらぎが小さくなっているように見える. 特に, 障害物なしの場合 (図 2(b)) に見られる流量ゆらぎの長周期成分が障害物ありの場合 (図 2(c)) では抑制されている. このような障害物挿入による流量ゆらぎの減少は, 障害物によって出口付近での粒子の動きが影響を受け, スムーズに流れるような整流効果を示しているのではないかと推測される. しかし, このゆらぎの特徴付けについては, まだ系統的な解析が十分にできていないので, 今後系統的かつ定量的な検証が必要である.

3.2 ミクロな流れ場の解析

上述のような粉粒体出口流のマクロ流量特性は, 粉粒体流を構成する個々の粒子のミクロな運動により支配され特徴付けられているはずである. この粉粒体出口流におけるミクロな流れ場とその障害物に

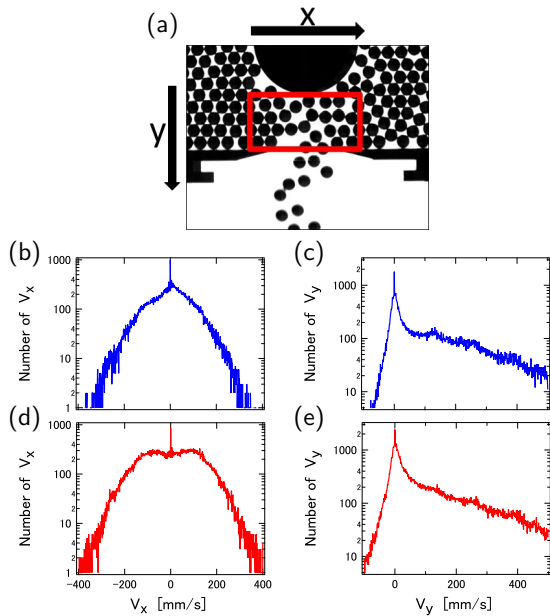


図 4: 出口付近の解析領域と速度分布.

(a) に示した赤枠内部領域の粒子の速度分布を求めた (鉛直成分は下向きを正). 障害物がない場合の速度分布の水平成分 (b) と鉛直成分 (c), 障害物がある場合 ($L = 30$ mm) の速度分布の水平成分 (d) と鉛直成分 (e) をそれぞれ示す. 出口幅 W は 25 mm で共通.

よる影響を調べるために, 個々の粒子の追跡を行った解析の結果について以下で議論する.

障害物を挿入した場合の粉粒体出口流において, 高速度カメラで撮影した画像を PTV 処理して速度場を求めた結果の例を図 3 に示す. 図 3(a), (c) は高速度カメラで取得した障害物の影響下にある粉粒体出口流の粒子画像のスナップショットを示し, (c) は (a) の 68 ms 後の状態である. また, 図 3(b), (d) はそれぞれ (a), (c) の状態における各粒子の速度場をベクトル表示したものである. 図 3(b), (d) から, 障害物の影響下にある粉粒体出口流の流れ場の構造が時間的にも空間的にも非一様となっていることが分かる. 特に, この流れ場は障害物の右側と左側の領域で入れ替わり流れが生じる『交互流』のような構造を示すことが見てとれる. このような非一様なミクロ流れ場が, どのようにして図 2(a) で見られるようなマクロには一様である出口流を作り出すかを確認するために, PTV 解析の結果に基づいて粒子の速度分布を調べた.

出口付近における粒子速度の水平成分 (V_x) と鉛直成分 (V_y) の速度分布を示したのが図 4 である. 解析した出口付近の領域は図 4(a) の赤枠で囲まれ

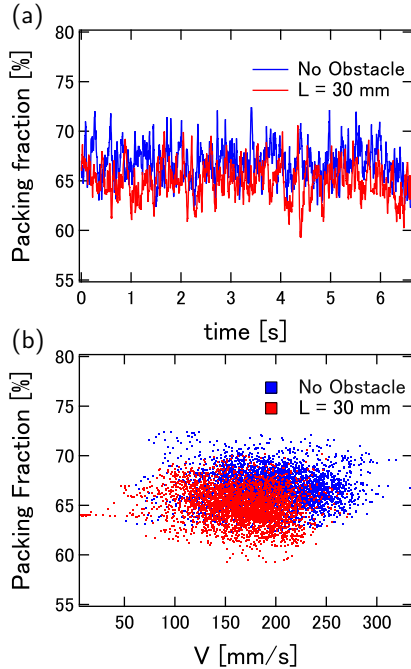


図 5: 充填率の時間変化と平均速度との相関。解析領域は図 4(a) の赤枠内部と同じ領域。(a) 障害物がない場合 (青実線) と挿入した場合 (赤実線) の充填率の時間変化。(b) 障害物がない場合 (青点) と挿入した場合 (赤点) の充填率と平均速度 $\langle V \rangle = \sqrt{\langle V_x^2 + V_y^2 \rangle}$ の相関。出口幅 W は 25 mm で共通、障害物の位置は $L = 30$ mm。

た部分 (幅 50 mm, 高さ 30 mm) であり、鉛直成分 (V_y) は下向きを正とする。図 4(c), (e) を見ると、鉛直成分については、障害物がない場合とある場合で明確な差が見られない。一方で、水平成分に注目すると (図 4(b), (d)), 障害物がない場合では $V_x = 0$ 付近で単一のピークを持つような分布を示すのに対し、障害物を挿入した場合は分布がブロードになりピークが分裂しているように見える。この結果から、障害物を挿入した場合、粒子は比較的大きな水平速度成分を持って出口に向かい、左右両方向から来た粒子が衝突し合い運動がランダムとなり (粉体温度が上昇し)、同時に充填率が下がることにより、閉塞を回避しながらランダムで一様な出口流に収束することを示すのではないかと推測される。

このとき、左右の流れの衝突により生じる出口付近の充填率の変化についても解析を行った。その結果を図 5 に示す。図 5(a) では障害物なし (青実線) と障害物あり (赤実線) の状態での充填率の時間変化を示しており、わずかに障害物なしの場合の方が充填率が大きいことが分かる。これは V_x の非一様性

が障害物ありの場合の方が顕著で、その効果により、出口付近での粒子同士の衝突が活発化されて、充填率が下がったためであると考えられる。このことは障害物による整流効果のミクロな直接的証拠と言える。一方で、図 2 で議論したように、障害物がある場合では流量が小さくなる。そこで、出口付近での粒子速度の平均値 $\langle V \rangle = \sqrt{\langle V_x^2 + V_y^2 \rangle}$ と充填率の関係を図 5(b) にプロットした。速度と充填率にわずかに正の相関があるようにも見えるが、この傾向については今後より多くの実験データを解析して判断する必要がある。

4 まとめと今後の展望

本研究では、重力により駆動される粉粒体出口流における障害物の効果について調べるためにシンプルな実験を行った。この結果より、障害物によって出口流の流量の平均値は減少するが、そのゆらぎも減少することが分かった。また、障害物の周りの流れ場の個別追跡 (PTV) から、障害物を回り込むような流れの影響により、粒子速度の水平成分のピークが分裂することが分かった。この水平成分の速度の影響により、出口付近の充填率が減少していることも解析から明らかとなった。この効果が障害物による整流効果をもたらしていると考えられるが、現状ではまだ 2 ケースの比較しかできておらず、今後はより詳細な実験と解析が必要となる。

参考文献

- [1] W. G. Beverloo et al., *Chemical Engineering Science* **15**, 260 (1961)
- [2] K. To et al., *Physical Review Letters* **86**, 71 (2001)
- [3] I. Zuriguel et al., *Physical Review Letters* **107**, 278001 (2011)
- [4] S. C. Yang and S. S. Hsiau, *Powder Technology* **120**, 244 (2001)
- [5] 加藤 寿裕, 第 20 回交通流シミュレーションシンポジウム論文集, 83 (2014)
- [6] G. A. Frank and C. O. Dorso, *Physica A* **390**, 2135 (2011)
- [7] I. Zuriguel et al., *Scientific Reports* **4**, 7324 (2014)