

## 出口付近の障害物が離散的流れに与える効果についての実験的研究

遠藤圭太, 桂木洋光  
名古屋大学大学院環境学研究科

### 1. はじめに

災害時に出口に殺到する人の流れはときに重大な将棋倒し等のパニックを誘発する場合がある。このような出口付近での急激な流れの詰まり現象を妨げる方法の一つとして出口付近に障害物を配置することが有効であるといわれている。出口付近に配置した障害物が離散体の流れ場に及ぼす影響についての研究はこれらの被害を未然に防ぐために有効であるため、近年盛んに行われている<sup>1)</sup>。

しかし、人間や動物等を実験や観測研究に用いることは一般に簡単ではない。そこで本研究では、粉体粒子を用いて出口流における障害物の効果について実験的研究を行うこととした。

流動状態にある粉体は、流体とは異なる非直感的な振る舞いを様々に示すことが知られている。例えば粉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値となるという性質がある。流体の出口流では、流量が層厚に依存して変化することが古くから知られており（トリチェリの定理）、流量が一定となるのは粉体出口流の独特な性質であると言える。

粉体出口流の場合、出口からの排出流量は積層厚には依存しないが、は排出される粒子の直径と出口幅の関係に大きく依存することが知られている<sup>2)</sup>。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、粉体の構成粒子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体材料を輸送する際に、度々深刻な問題となることがある。

しかし、上述のように粉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<sup>3-5)</sup>。実際に障害物の効果は、群衆や動物の流れを制御することにも応用されてお<sup>1,6)</sup>、社会環境的にも重要な要素であると言える。

このような背景のもと、本研究では出口流における障害物の効果を実験的に調べるため、重力により駆動される粉体の出口流実験を行うこととした。

### 2. 実験系

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た。流出中、出口下の受け皿の底に設置したロードセルセンサーAで流量を測定した（図1）。また、障害物上部にあるステンレス棒（直径6 mm）は万能試験機のロードセルセンサーBに繋がっており、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、この測定については本稿では触れない）。さらに、粉体が流出中の2次元容器を正面から高速カメラで撮影し、記録した粉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パラメータとなる。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の範囲をそれぞれ変化させて実験を行った。

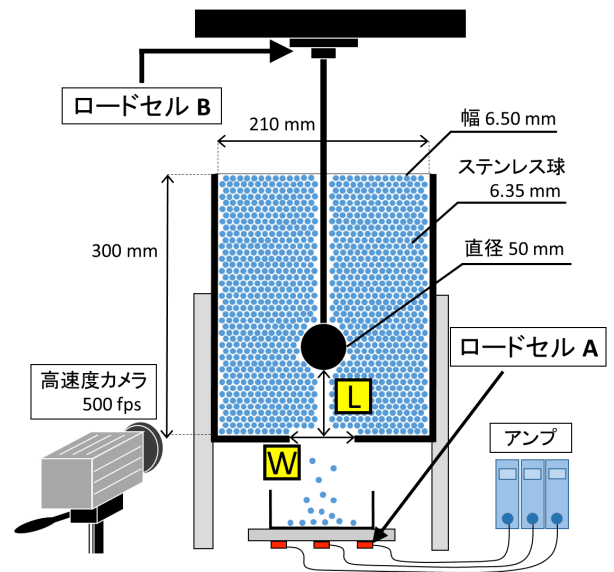


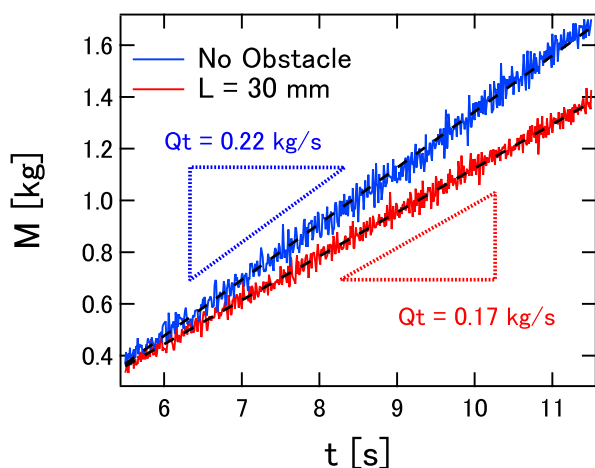
図1：実験系概念図。容器下部の出口の幅 $W$ と出口からの障害物までの距離 $L$ が主要パラメータ。

### 3. 結果

#### 3.1 流量測定

まず、粉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）の出口からの流量をロードセルセンサーAで測定した結

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 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 の赤実線より分かる．ただし，流量の平均値  $Q_t$  の値を比較すると，障害物がない場合での流出の方が  $Q_t$  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．



4. 図表, 写真

図 2 : ロードセル A (図 1) による流量測定結果．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．

### 3.1 流れ場測定

上述のような粉体出口流のマクロ流量特性は，粉体流を構成する個々の粒子のマイ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．この粉体出口流におけるマイクロな流れ場とその障害物による影響を調べるために，個々の粒子の追跡も行った．障害物を挿入した場合の粉体出口流において，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

すことも見てとれる．このような非一様なマイクロ流れ場が，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し，障害物がどのように流れ場に影響を及ぼすかについても発表では議論する予定である．

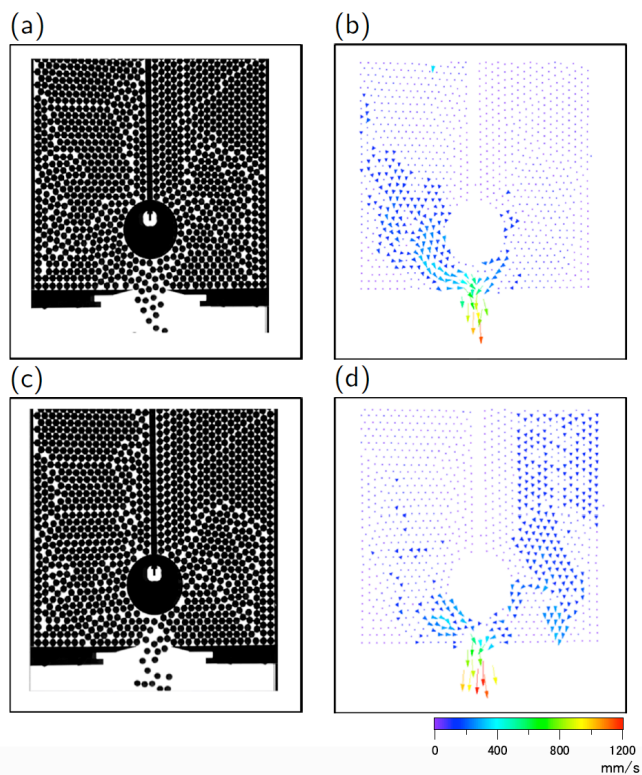


図 3 : 障害物影響下での粉体出口流の速度場．(a), (c) : 高速度カメラで取得した障害物挿入時の粉体出口流の画像データであり，(c) は(a) の 68 ms 後の画像データである．(b), (d) : (a), (c) のそれぞれの状態における各粒子の速度場のベクトル表示（ $W=30$  mm,  $L=25$  mm）．

### 参考文献

- 1) I. Zuriguel et al., Sci. Rrep. **4**, 7324 (2014)..
- 2) W. G. Beverloo et al., Chem. Eng. Sci. **15**, 260 (1961).
- 3) K. To et al., Phys. Rev. Lett. **86**, 71 (2001).
- 4) I. Zuriguel et al., Phys. Rev. Lett. **107**, 278001 (2011).
- 5) S. C. Yang and S. S. Hsiau, Powder Tech. **120**, 244 (2001).
- 6) G. A. Frank and C. O. Dorso, Physica A **390**, 2135 (2011).