

数値シミュレーションによる急縮小部を通過する固液混相流れの考察

日大生産工 (院) ○本間 佳史 日大生産工 安藤 努
PIA 小池 修 東大環安セ 辰巳 怜

1. 緒言

人や粉粒体などの様々な流れを円滑にすることは経済損失の低減を図る上で有意である。しかし実際には、これらの流れにおいて停滞・閉塞現象が対象物に関わらず普遍的に発生することが報告されている^{1),2),3)}。この流れの停滞・閉塞現象の多くは通路・管路幅に依存しており、通路・管路幅が急激に縮小することによって発生し、周囲の環境に依存しているといえる。この停滞・閉塞現象を緩和する方法の一案として、急激に縮小する部分手前に、本来であれば流れの妨げとなる障害物を意図的に設置する方法があり、これまでに数値シミュレーションおよび実験によって人や粉粒体など様々な対象物の流れの停滞・閉塞緩和効果が報告されている^{1),2),3)}。しかし、固液混相流れを対象とした、このような現象は報告されてはいないのが現状である。

本発表では急縮小部を通過する固液混相流れにおいて、障害物の有無、開口径、障害物-オリフィス板間距離および粒子体積濃度をパラメータとした時の粒子の停滞緩和効果について数値シミュレーションを行ったので結果を報告する。

2. 数値シミュレーションモデルおよび条件

本研究で使用する数値シミュレーションでは圧力駆動によるオリフィス板開口部を通過する粒子の流れ⁴⁾を想定する。x軸方向の圧力勾配により、粒子は周囲の流れと共にx軸方向に駆動され、急縮小部であるオリフィス板表面上に堆積後、開口部を通過する。Fig. 1にシミュレーションの計算領域、オリフィス板厚さ、障害物-オリフィス板間距離、開口径、粒子、障害物、オリフィス板および溶媒の流れ方向を示す。長さは粒子直径 d を基準とする。

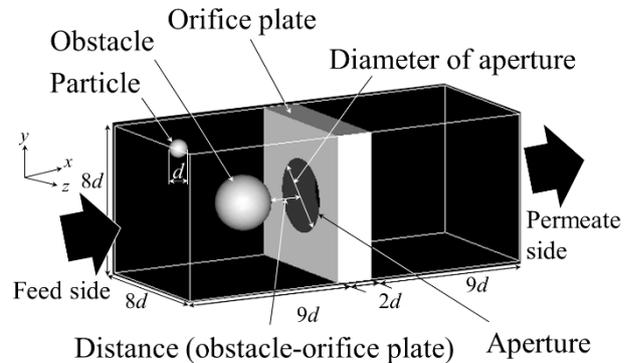


Fig. 1 Computational domain including membrane with a straight pore.

溶媒は Newton 流体を仮定し、流体場の支配方程式には非圧縮性 Navier-Stokes 方程式に粒子加速度項を加えた以下の方程式に従う。

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{v} - \frac{1}{\rho} \mathbf{D} + \Phi \boldsymbol{\alpha} \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\alpha} = \frac{\mathbf{v}^p - \mathbf{v}}{\Delta t} + \frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} - \nu \nabla^2 \mathbf{v} + \frac{1}{\rho} \mathbf{D} \quad (3)$$

ここで、 \mathbf{v} : 溶媒速度、 t : 時間、 ρ : 溶媒の密度、 p : 圧力、 ν : 動粘性係数、 \mathbf{D} : 圧力勾配、 Φ : 粒子とオリフィス板の存在確率、 $\boldsymbol{\alpha}$: 粒子加速度、 \mathbf{v}^p : 粒子の剛体速度を表す。

使用する数値シミュレータ (SNAP-F)⁴⁾では、本来メソスケール領域の粒子を扱うことを前提としているが、今回はマクロな粒子を仮定するため粒子間力は接触力のみとする。粒子運動には Newton/Euler の運動方程式を用いて以下の式に従う。

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F}^c + \mathbf{F}^h \quad (\mathbf{F}^h = -\int \varphi^p (\rho \boldsymbol{\alpha} + \mathbf{D}) d\mathbf{r}) \quad (4)$$

$$I \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = \mathbf{T}^c + \mathbf{T}^h \quad (\mathbf{T}^h = -\int \varphi^p (\mathbf{r} \times \rho \boldsymbol{\alpha}) d\mathbf{r}) \quad (5)$$

Study by numerical simulation of solid-liquid two phase flow through an abrupt contraction.

Yoshifumi HONMA, Tsutomu ANDO, Osamu KOIKE and Rei TATSUMI

ここで, m : 粒子質量, V : 粒子並進速度, F^c : 接触力, F^h : 流体力, ϕ^p : 粒子存在確率, r : 粒子中心からの距離, I : 慣性モーメント, ω : 角速度, T^c : 接触トルク, T^h : 流体トルクを表す.

シミュレーション条件を Table 1 に示す.

Table 1 Simulation condition.

Nomenclature	Value
Particle diameter [-]	d
Obstacle size	$3d$
Obstacle distance	$1d, 1.5d, 2d, 3d, 4d$
Aperture diameter	$4d$
Computational domain	$x, y, z=20d, 8d, 8d$
Maximum Reynolds number Re_{max} [-]	≈ 1
Concentration Φ_s [vol%]	6, 10, 15

3. 数値シミュレーション結果

最大シミュレーション時間時のオリフィス板上の堆積状況を Fig. 2 に示す. Fig. 2 内の下部の図はオリフィス板表面上に堆積する第一層の粒子を示す. 粒子色は粒子非存在時の開口部を通過する溶媒の最大流速を用いて無次元化を行った粒子速度を表す. 障害物設置に伴い, 停滞する粒子の総数が減少していることが分かる. また第一層の粒子堆積状況において, 障害物設置無しの条件では, 粒子による三角格子状の構造形成が確認ができるのに対し, 障害物設置有りの条件では三角格子の構造形成は確認できず, 堆積する粒子数が減少していることが分かる.

本研究の評価方法には粒子阻止率 $R(t)$ を用いる. 粒子阻止率 $R(t)$ は計算領域内の流入粒子数および流出粒子数によって評価され, 式(6)に従う.

$$R(t) = \left(1 - \frac{n_{out}(t;\Delta t)}{n_{in}(t;\Delta t)}\right) \times 100 \quad (6)$$

ここで $R(t)$: 時刻 t における粒子阻止率 [%], Δt : 時間間隔 [s], $n_{in}(\Delta t)$: 時間間隔 Δt の流入粒子数 [-], $n_{out}(\Delta t)$: 時間間隔 Δt の流出粒子数 [-] を表す. 粒子阻止率 $R(t)$ が低い値をとると堆積する粒子数が減少し, 粒子が円滑に流れているといえる. Fig. 3 に結果の一例として障害物設置有無における粒子阻止率を示す. Fig. 3 の時間軸には無次元時間 t^* を用いており, ここで無次元時間 t^* は粒子非存在時の開口部を通過する溶媒の最大流速および粒子直径を用いて無次元化を行った時間である. 無次元時間 $t^* \approx 200$ から障害物設置による粒子停滞緩和効果が確認でき, その後継続することが分かる.

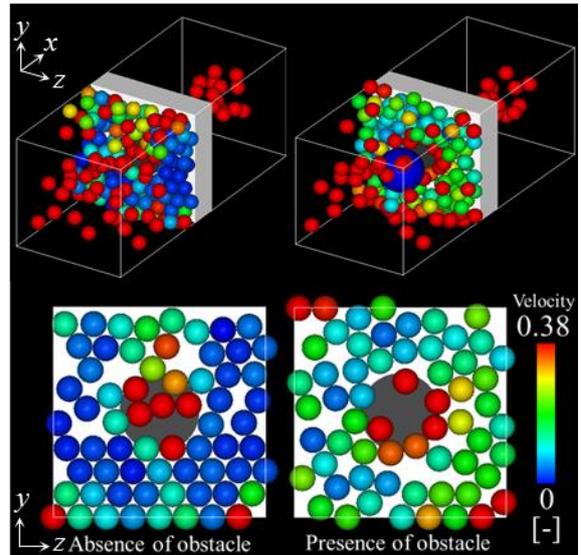


Fig. 2 Clogging situation by absence or presence of obstacle.

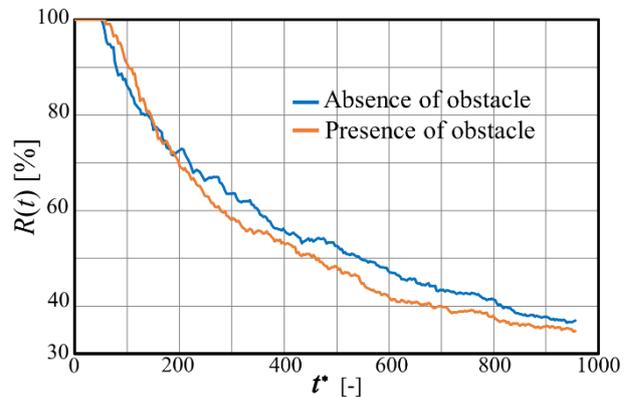


Fig.3 Rejection of particle rate.

4. 結言

講演会では, 数値シミュレーションを用いたパラメータ毎の障害物設置による粒子停滞緩和効果について, 比較検討を行ったものを報告する予定である.

[参考文献]

- 1) 西成活裕, 渋滞学, 新潮選書 (2006) 108
- 2) Iker Zuriguel *et al.*, Clogging transition of many-particle systems flowing through bottlenecks, *Sci. Rep.*, 4 (2014) 7324
- 3) F. Alonso-Marroquin *et al.*, Bottlenecks in granular flow: When does an obstacle increase the flow rate in an hourglass?, *Phys. Rev. E.*, 85 (2012) 20301.
- 4) Tsutomu Ando *et al.*, Simulation of fouling and backwash dynamics in dead-end microfiltration: Effect of pore size *J. Membr. Sci.*, 392-393 (2012) 48.