

二次元流路内の固液混相流における出口前障害物設置による粒子流れの影響

日大生産工(院) ○有働 開 日大生産工 安藤 努
PIA 小池 修 東京大学環境安全研究センター 辰巳 怜

1. まえがき

世の中には様々な粒子流れがある。粒子流れは停滞や、粒子が出口を閉塞するといった渋滞現象が、流路幅が急激に狭くなる出口などにおいて多く発生することが報告されている¹⁾。

サイロや、ホッパー内の粉体流れでは出口前に障害物を設置することで、粉体が出口を閉塞する確率を大幅に下げ、粒子流れを促進したという報告がある²⁾。しかしこのような障害物設置による効果は、食品、化学、土木製品等の原材料に用いられている固液混相流においては報告されていない。

そこで数値シミュレーターを用いて、固液混相流における出口前障害物設置による粒子流れの影響を調査した。パラメータは障害物設置距離 L と障害物形状(円柱、三角柱)とした。

2. シミュレーション

今回数値シミュレーターSNAP-F³⁾を用いて解析を行った。溶媒はニュートン流体とし、流体の運動方程式はナビエーストックス方程式に粒子加速度項を付与したものを採用した。粒子の並進運動はニュートンの運動方程式を、回転運動にはオイラーの運動方程式を採用した。今回用いたシミュレーションモデルを図1に示す。図の赤色の領域が固相領域で、青色の領域が液相領域である。各寸法の d は粒子直径を示しており、障害物設置距離は図中の L で示した。円柱障害物の直径は $3d$ とし、三角柱障害物は円柱障害物の体積と等しく、形状は正三角形とした。出口直径は $3d$ 、出口を形成する傾斜壁の角度は図に示すように 45° とした。また流路は奥行が粒子一個分で、二次元流路とした。溶媒は水、粒子は球形固体粒子を用いた。粒子体積濃度は40 vol%、出口における最大 Re 数は約2とした。

障害物設置による粒子流れ促進の評価指標としてシミュレーション終了までに流出した総流出粒子数 N_{out} の障害物設置による増加割合 ΔN_{out} で評価した。 ΔN_{out} が正の値だった場合、

障害物設置によって流出粒子数が増加したことになるため、粒子流れが促進されたといえる。また流入粒子数と流出粒子数の比が定常に達した後シミュレーションを終了した。

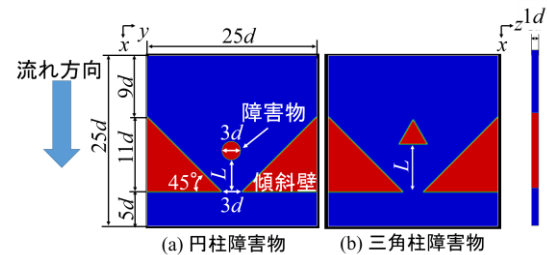


図1 シミュレーションモデル

3. シミュレーション結果

図2に各条件における最終ステップの流路内を示す。図2(a)~(c)は全領域を、(d)~(f)は(a)~(c)内の白い破線で囲まれている領域の拡大図である。ここで粒子の色は粒子速度を示し、その値はカラーバーの色に対応する。また v_{max} は障害物無しかつ粒子無しにおける最大流速である。図2(d)~(f)に注目すると、傾斜壁に停滞し、粒子速度が0に近い粒子が、三角柱障害物は他の条件と比較して少ないことが確認できた。障害物設置によって傾斜壁の粒子速度が増加しており、粒子堆積が減少していることが確認できた。

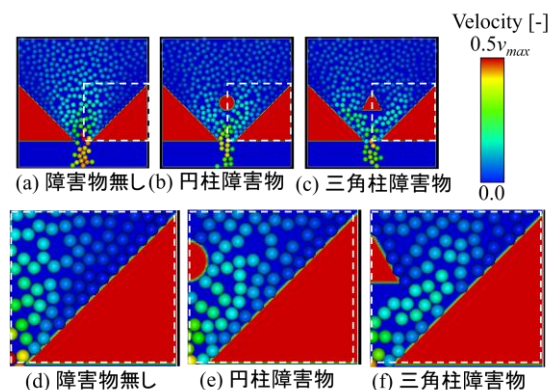


図2 最終ステップにおける粒子速度($L = 6d$)

Effect on particle flow by setting an obstacle of solid-liquid two-phase flow inside two dimensional flow channel

Kai UDO, Tsutomu ANDO, Osamu KOIKE and Rei TATSUMI

次に各条件における N_{out} の増加割合を図3に示す。横軸は L を d で除したもので、縦軸の ΔN_{out} は、障害物設置による N_{out} の増加割合で次の式で求めた。

$$\Delta N_{out} = \frac{N_p - N_n}{N_n} \times 100 [\%]$$

$\left[\begin{array}{l} N_p: \text{障害物設置における流出粒子数} [-] \\ N_n: \text{障害物無しにおける流出粒子数} [-] \end{array} \right]$

図3より三角柱障害物の $L = 6 \sim 8d$ において ΔN_{out} の値が正の値であったため、粒子流れの促進が確認できた。また最適値は $L = 7d$ で、16.4%障害物無しよりも N_{out} の値が大きかった。

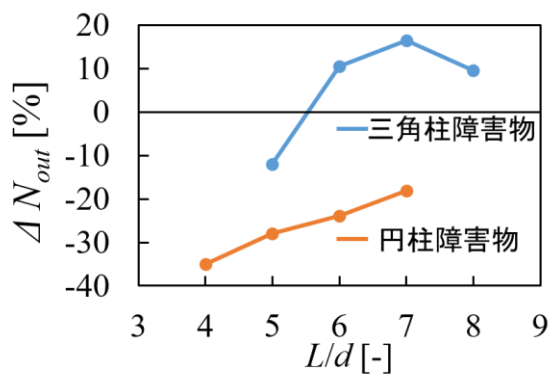
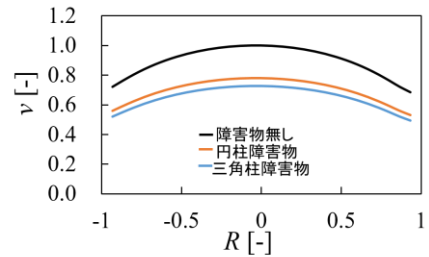


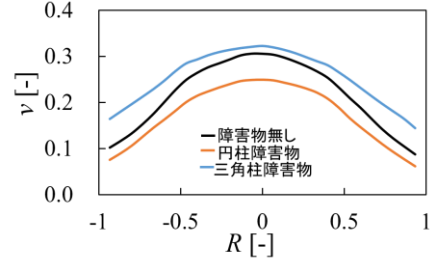
図3 障害物設置による N_{out} の増加割合

4. 考察

粒子体積濃度40 vol%において障害物設置による粒子流れの促進が確認できた。そこで障害物設置によるどのような影響が粒子流れを促進させているのかを考察した。図2に示すように三角柱障害物を設置することで傾斜壁に粒子が停滞しにくいことがわかり、停滞粒子が減少することで、出口の流体・粒子流量が増加したことが考えられた。そこで各条件における出口流速を解析した。解析結果を図4に示す。図4(a)は粒子無しの、(b)は最終100ステップ間の平均出口流速を示している。縦軸は障害物無しかつ粒子無しにおける最大流速を代表速度とした無次元速度で、横軸 R は出口中心を0とした時の無次元長さで、1および-1は出口の左端、右端を示している。図4のように粒子無しの場合、障害物設置により出口流速が減少しているのに対し、粒子が十分に停滞している最終ステップ近傍では三角柱障害物条件における平均出口流速がどの条件よりも大きいことがわかる。このことより障害物設置による N_{out} 増加は障害物設置によって停滞粒子が減少し、流体・粒子流量が増加したことが要因と考えられる。



(a)粒子無しにおける出口流速



(b)粒子有りにおける最終100ステップ間の平均出口流速

図4 障害物設置($L=6d$)による出口流速

5. 結言

今回数値シミュレーションを用いて固液混相流における障害物設置による粒子流れの影響について解析を行った。粒子体積濃度40 vol%では、三角柱障害物で $L=6 \sim 8d$ において ΔN_{out} の値が正の値を示しており、障害物設置による粒子流れの促進が固液混相流において確認できた。三角柱障害物を設置することで傾斜壁に停滞する粒子数が減少し、流体・粒子流量が障害物無しよりも大きいことがわかった。このことが粒子流れ促進における要因であると考えられた。今後は障害物設置により傾斜壁の停滞粒子数が減少する要因について考察する。また粒子体積濃度をパラメータにして解析を行い、 L および障害物形状の粒子体積濃度の違いにおける最適値を探索する。

参考文献

- 1) Z. Iker *et al.*, Clogging transition of many-particle systems flowing through bottlenecks, Sci. Rep., 7324 (2014) pp.4-10.
- 2) I. Zuriguel *et al.*, Silo Clogging Reduction by the Presence of an Obstacle, Phys. Rev. Lett., 278001 (2011) pp.107-111.
- 3) T. Ando *et al.*, Simulation of fouling and backwash dynamics in dead-end microfiltration: Effect of pore size, J. Membr. Sci., 392-393 (2012) pp.48-57.