

## 高せん断流れ場中の膜面堆積粒子の分離分散挙動に関する数値シミュレーション

日大生産工(院) ○藤平 拓朗 日大生産工 安藤 努  
PIA 小池 修, 東大環安セ 辰巳 玲

## 1. 緒言

水の浄化などの水処理分野で膜ろ過技術が使用されている。この膜ろ過においては、膜表面の粒子堆積および膜細孔内に粒子が詰まるファウリングによる透過流束の低下は避けられない。膜面に対して平行な流れを与えるクロスフロー膜ろ過では、ろ過が進行するに従って膜面に堆積する粒子は増加することがなくなる<sup>1)</sup>。この現象は、膜面に堆積する粒子が増大することにより、膜へ接近する方向へ働く力が減少し、せん断場における粒子に働く揚力と等しくなるため定常流束になりそれ以上堆積しないと考えられている。この間、またはこの後において一度膜面に堆積した粒子が剥離していることになる。

本研究では高せん断流れ場中の膜面堆積粒子の分離分散挙動を調べる。今回、仮想堆積粒子を考え、せん断速度の変化により粒子がどのような挙動を示し、剥離するのかを調べる。また、摩擦の有無により粒子-粒子間および粒子-膜間における摩擦力がどれだけ分離分散挙動に関わるのかを調べる。

## 2. シミュレーションモデル

本研究では、粒子および流体運動を同時に解くシミュレータ(SNAP-F)<sup>2)</sup>を用い、シミュレーションを行った。微粒子分散液の溶媒は Newton 流体とし、非圧縮性流体について、ブラウン運動である熱揺動項および粒子加速度項を追加した Navier-Stokes 方程式<sup>2,3)</sup>に従う。微粒子分散液中の粒子の並進運動は Newton の運動方程式、回転運動は Euler の運動方程式に従う。粒子に働く相互作用として接触力、DLVO 力、流体力を考慮している。

## 3. シミュレーション条件

計算条件を表 1 に、計算領域を図 1 に示す。本研究では、仮想堆積粒子を考え、せん断速度を

変化させたシミュレーションを実施する。仮想堆積粒子の配列は 4 つの粒子の上に粒子 1 つが乗るような配置にしている。つまり、体心立方構造を考えた配列となっている。現実では粒子の配列はランダムであるが、粒子を整列させることで粒子剥離のシナリオを想定し、このような配列にした。せん断速度は距離に対する速度勾配である。凝集粒子の引張強度を表す Rumpf の式および流体力である Newton の粘性法則の 2 つの式を使用し、代表せん断速度  $\dot{\gamma}$  を定義した。この代表せん断速度および実際に使用したせん断速度  $\dot{\gamma}_0$  を使用し、無次元せん断速度  $\dot{\gamma}_0^* (= \dot{\gamma}_0 / \dot{\gamma})$  を定義した。無次元せん断速度  $\dot{\gamma}_0^* = 1.5$  [-] とし、 $2\dot{\gamma}_0^*$ ,  $4\dot{\gamma}_0^*$  の 3 パターンで比較を行った。

摩擦の有無によるシミュレーションは無次元せん断速度  $2\dot{\gamma}_0^*$  を採用し、比較を行う。

表 1 計算条件

Particle diameter : $d$ [ $\mu\text{m}$ ]	0.1
Number of particles [-]	128
Hamaker constant : $A$ [ $\times 10^{-20}$ J]	4.7
Nondimensional shear rate : $\dot{\gamma}_0^*, 2\dot{\gamma}_0^*, 4\dot{\gamma}_0^*$ [-]	1.5, 3.0, 6.0
Coefficient of friction between particles [-]	0, 0.1
Coefficient of friction between particle membrane [-]	0, 0.1

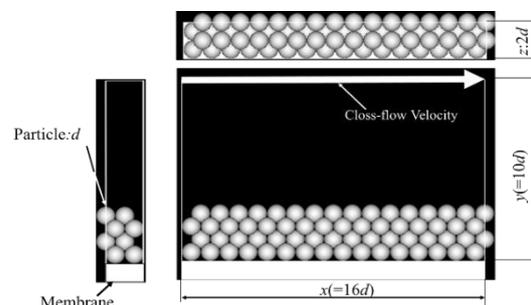


図 1 計算領域

Numerical simulation on separation and dispersion behavior of membrane surface deposited particles under high shear flow field

Takuro FUJIHIRA, Tsutomu ANDO, Osamu KOIKE and Rei TATSUMI

#### 4. シミュレーション結果

本研究では、無次元せん断速度 $\dot{\gamma}^*$ を変化させたシミュレーションを行った。無次元せん断速度を変化させた時のNBA(Nondimensional Boundary Area)と無次元時間( $t^* = \dot{\gamma}_0 \cdot t$ )の関係を図2に示す。NBAとは粒子の凝集状態を表す指標で、凝集体の表面積を粒子の表面積の和で除したものである。つまり、NBAが1の時、分散状態を表し、0に近づけば近づくだけ凝集状態を表す。図2からせん断速度を変化させたことにより剥離挙動に違いがあることがわかる。また、せん断速度上昇により分散時間が短縮していることがわかるが、 $2\dot{\gamma}_0^*$ と $4\dot{\gamma}_0^*$ のNBAの立ち上がり方が非常に似ている部分がある。つまり、せん断速度を変化させても分散過程に違いはあまり見られないことがわかる。図3に摩擦の有無による $2\dot{\gamma}_0^*$ の時間毎の粒子挙動を示す。図中の等高線は流体の速度を表す。図3より摩擦がある場合、せん断速度を与えると2層目の粒子が流動方向にずれ、 $t^* = 27.2$ の時に1層目の粒子の直上に乗り、3層目および4層目の粒子の配列が乱れていないのがわかる。その後、配列が乱れ構造欠陥により剥離していく様子が確認できた。摩擦が無い場合、ある場合と比べ、短い時間で粒子の分散が確認された。図4に摩擦の有無によるNBAの時間推移を示す。図4より摩擦が無い場合せん断を与えてすぐに分散に向かうが、摩擦がある場合、 $t^* = 400$ を超えた辺りから急激に分散していくことがわかる。

#### 5. 結言

せん断速度を変化させたシミュレーションより、粒子の剥離過程に違いが生まれ、分散過程に違いはあまりでないことが確認された。摩擦の有無によるシミュレーションでは、分散挙動に違いがでた。摩擦がある場合、構造が壊れにくい、摩擦が無い場合は壊れやすいため、摩擦力は分散挙動に関わることが確認された。

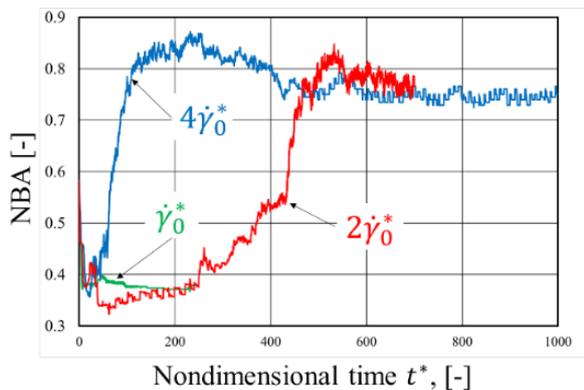


図2 せん断速度変化によるNBAの時間推移

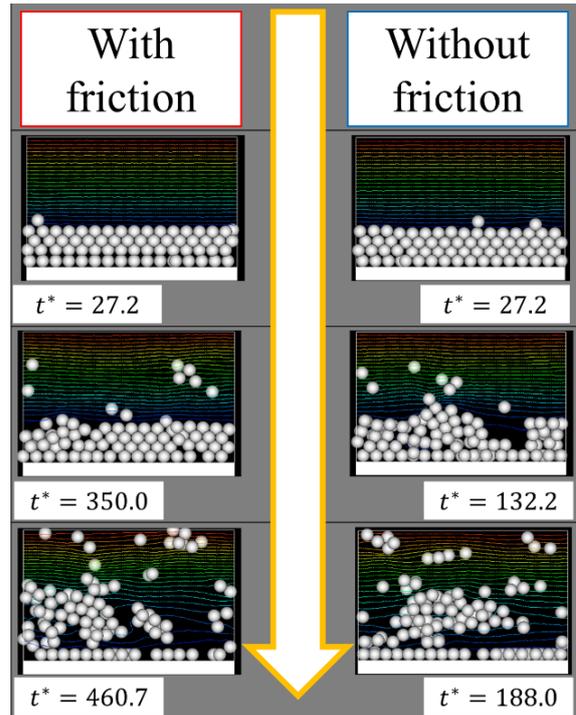


図3 摩擦の有無による $2\dot{\gamma}_0^*$ の時間毎の粒子剥離状況

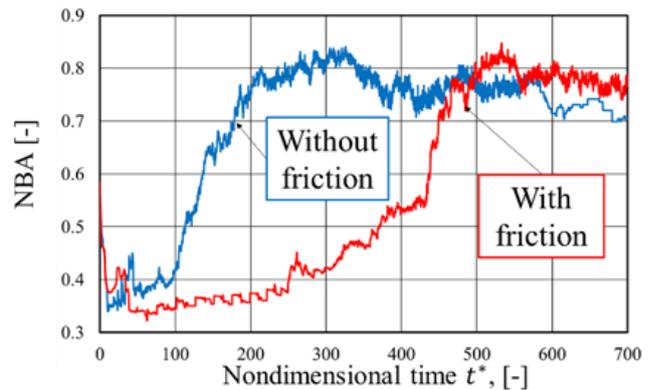


図4 摩擦の有無によるNBAの時間推移

#### 参考文献

- 1) R. Makabe, *et al.*, Limiting flux in microfiltration of colloidal suspensions by focusing on hydrodynamic forces in viscous sublayer, *AIChE J.*, in press 64, 2018, pp.1760-1765
- 2) M. Fujita, Y. Yamaguchi, Simulation model of concentrated colloidal nanoparticulate, *Phys. Rev. E*, 77, 2008, 026706.
- 3) T. Ando, *et al.*, Simulation of fouling and backwash dynamics in dead-end microfiltration :Effect of pore size, *J. Membr. Sci.*, 48, 2012, pp. 392-393