

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820047

研究課題名(和文) 気泡 膜間流動の乱流計測と詳細数値予測によるろ過膜洗浄機構の解明

研究課題名(英文) Measurement and Numerical Simulation of Flows between Bubbles and Membranes for Understanding Mechanism of Membrane Cleaning

研究代表者

林 公祐 (Hayashi, Kosuke)

神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60455152

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：気泡によるろ過膜洗浄に関する知見を得ることを目的として、気泡による汚れ除去過程の計測及び気泡の並列シミュレーションを実施した。その結果、壁面をスライドする気泡による洗浄効果がウエイク及び液相循環流効果に比べて卓越していること、気相流量が増加すると気泡数及び気泡径が増加するが気泡速度もともに増加するため、ある流量以上では洗浄効果の増加は得られないことを確認した。このことにより、パイロットスケール実験においても指摘されている高気相流量において洗浄効率が流量に依存しなくなるという実験事実の原因をある程度説明できる。また、気泡による洗浄過程を模擬する計算技術を開発した。

研究成果の概要(英文)：Measurements of cleaning processes due to bubble rising motion and numerical simulations for the bubble motion to investigate the mechanism of membrane cleaning. As a result, the following conclusions are obtained: (1) bubbles sliding on the membrane surface possess much larger cleaning efficiency compared to bubbles wobbling apart from the surface, (2) the cleaning efficiency does not increase even with increasing the gas flow rate for gas flow rates larger than a certain critical value, and (3) a numerical method based on the interface tracking method and GPGPU has been developed.

研究分野：混相流工学

キーワード：流体工学 水資源 混相流 気泡

1. 研究開始当初の背景

膜分離活性汚泥法 (MBR) では、多孔膜を通して汚泥を吸引することにより、汚泥を浄水と固形分・汚染物質に分離する。省スペースで清浄度の高い処理水を得られる点が本技術の長所である。一方、MBR の欠点は、懸濁微粒子による膜の目詰まりを防ぐために膜洗浄が必要なこと、そのランニングコストが高いことであり、したがって MBR 高効率化・安定化の要は、膜をいかに効率的に洗浄できるか、という点にある。通常運転中は、好気性微生物への酸素供給のために膜下方から吹き込んだ気泡が作り出す流れに膜表面洗浄効果も期待している。ところが、気泡の運動によって、実際にどのように膜が洗浄されているのか、そのメカニズムは不明である。

2. 研究の目的

本研究では、膜下方から吹き込まれた気泡によるろ過膜洗浄に関する知見を得ることを目的として、①気泡による汚れ除去過程の計測及び②気泡の並列シミュレーションを実施した。

3. 研究の方法

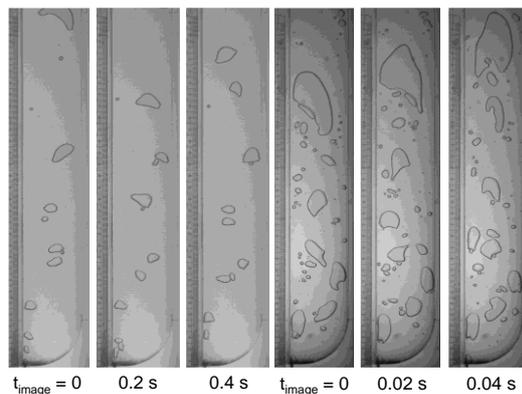
上記①では、まず、気泡によって汚れが洗浄される過程を観察した。このために小規模な気泡観察装置を製作し、擬似 2 次元気泡流れを形成した。また、汚れの洗浄速度を計測し、気泡運動及び気泡が誘起する液相の流れ (気泡誘起擬似乱れ) と洗浄速度の関係を検討した。②では、気泡による汚れ洗浄過程を調べるための詳細シミュレーション技術を開発した。

4. 研究成果

4. 1 流動様式

図 1 (a)に入口気相流量 $Q_{in} = 1.67 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ における容器内流れを例示する。散気穴から送出された気泡は左側壁面に沿って上昇するが、しばらく上昇した後壁力および装置右下部に形成された液相の渦構造の影響により壁面から離れている。気泡はそのあと右側壁面の方向へ移動するが、ある程度進行すると向きを変えて再び左側壁面へと近づいている。また、気泡合体のため上方の気泡が比較的大きい。図 1 (b)に $Q_{in} = 8.33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ における流れを示す。気泡合体頻度が高いため気泡径は図 1 (a)に比べて大きく、また壁面から気泡が離れる位置および再び左側壁面に近づく位置に多少の違いはあるものの、全体的な流れの構造には大きな違いはない。

以上の観察から、汚れ洗浄実験では左壁面の (a)気泡が壁面をすべる領域 ($y \sim 25 \text{ mm}$)、(b)気泡が壁面から離れている領域 ($y \sim 75-90 \text{ mm}$)、(c)気泡が壁面に近づく領域 ($y \sim 120-130 \text{ mm}$) に汚れを設置し、気泡運動及び気泡誘起液相流れと洗浄速度の関係を検討した。汚れは顔料を混ぜた水を乾燥固化して作成した。



(a) $Q_{in} = 1.67 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ (b) $8.33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

図 1 小規模容器内気泡流

4. 2 汚れ除去過程・洗浄速度

図 2 に領域 (a)における汚れ除去の様子を例示する。 $t_{image} = 0 \text{ s}$ において汚れの下方から気泡が壁面に沿って上昇している。この気泡は汚れ部を通過し終えるまで汚れに沿っている ($t_{image} = 0.01-0.02 \text{ s}$)。気泡は汚れ部通過後壁面から離れているが、このとき気泡の運動に伴って汚れの一部が流れ去っている。この過程において、気泡が汚れ表面上をすべる間は気泡-汚れ間に液膜が形成され、汚れ表面のせん断応力が大きくなっているものと考えられる。また、気泡通過後には、気泡の後流が汚れ近傍の液相流れを乱す。領域 (a)での洗浄要因はこれら気泡が汚れ表面をすべることによるせん断効果と気泡の後流による液相の乱れの効果が考えられる。

図 3 に領域 (b)における汚れ除去の様子を例示する。汚れは下方へ流れ落ちているが、これは、多くの気泡は汚れを設置した反対側の壁面近傍を通過するため汚れ付近では気泡の運動に伴って反時計周りの渦構造が形成されることによると考えられる。気泡が汚れに接近することは少なく、主として液相の流れにより汚れが除去された。

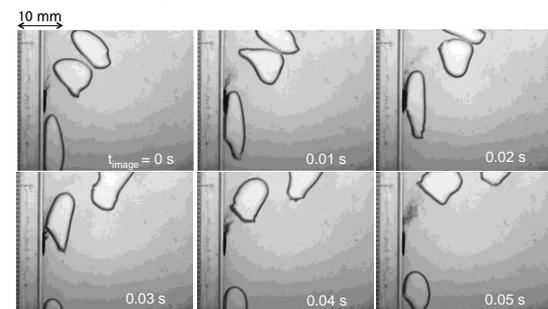


図 2 洗浄パターン A

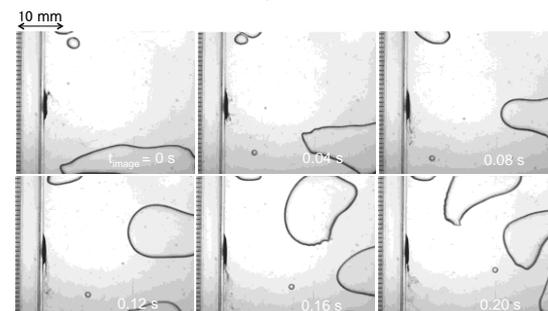


図 3 洗浄パターン B

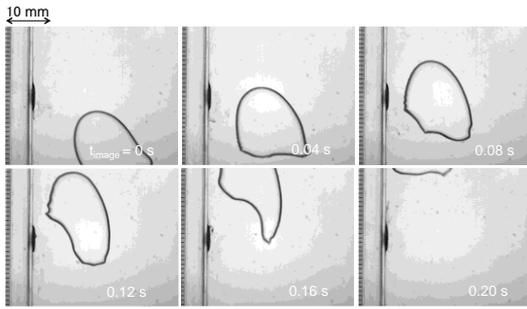


図4 洗浄パターンC

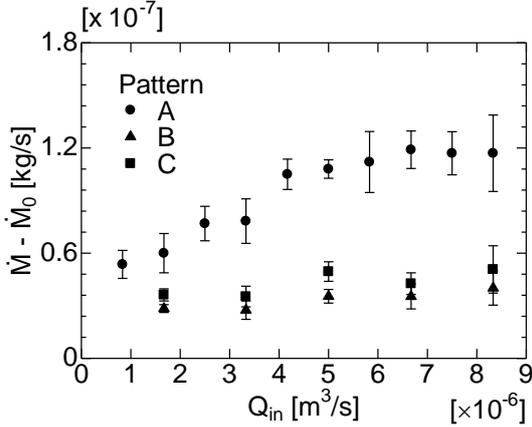


図5 洗浄速度

図4に領域(c)における汚れ除去の様子を示す。液相速度の変動により汚れは上下方向へとランダムに流れ落ちているが、気泡が壁面付近へと近づきながら上昇すると、汚れは気泡の上昇とともに上方へと流れている。この過程において、気泡が壁面に接近して気泡-壁面間距離が短くなると、気泡-壁面間の液相の下降速度が増加し、その結果、汚れ表面におけるせん断応力が増加する。このように、領域(c)では気泡によるせん断効果および気泡が誘起する液相の流れにより汚れが除去されている。

図5に各洗浄パターンにおける洗浄速度を示す。なお、 $Q_{in} = 0$ においても汚れが液中にわずかに溶出したため、その際の場合の洗浄速度を減じている。パターンAの洗浄速度が最も速い。他の2つのパターンの洗浄速度に大きな違いはない。また、いずれの領域でもある程度以上の Q_{in} になると洗浄速度は Q_{in} によらずほぼ一定となっている。

洗浄速度には汚れ表面における壁面せん断応力が及ぼす影響が大きいものと考えられる。そこで、各洗浄パターンにおける壁面せん断応力のオーダーを評価したところ、パターンAでは大きい、他の2つのパターンでは小さいことを確認した。

汚れ表面をすべるパターンAにおける気泡の効果をより詳しく検討するため、全計測時間に対する気泡が汚れ表面をすべる時間割合 R_T 、気泡通過頻度 f_B を画像処理により求めた。図6に R_T を示す。 Q_{in} の増加とともに R_T も増加しているが、 $Q_{in} = 5.0 \times 10^{-6} m^3/s$ 以上では増加幅は小さくなっている。

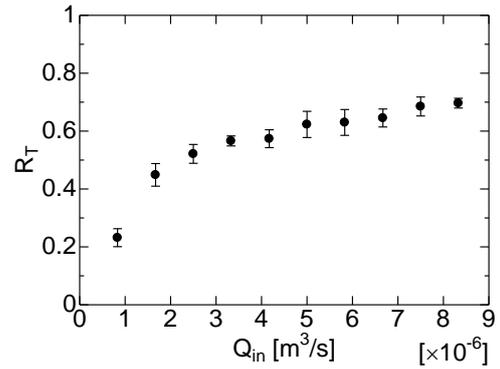


図6 気泡接触時間割合

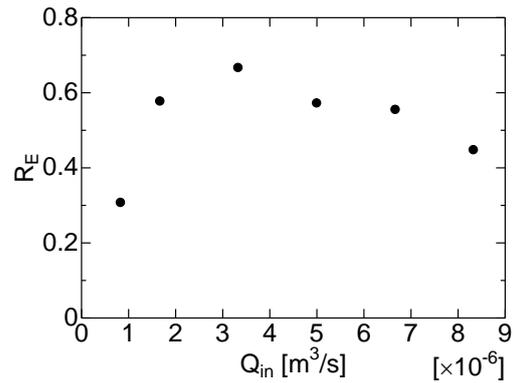


図7 気泡通過時間割合

R_T の傾向は洗浄速度の傾向と類似している。このことは、気泡が直接作用するせん断応力が汚れの除去に効果大きいことを示している。 Q_{in} の増加により試験部内の液相循環の液相速度と d_B が増加するので V_B は増加し、気泡が汚れ表面に作用する時間は短くなり、 R_T は Q_{in} を増加させても、単調に増大するわけではない。また、気泡速度等を代表スケールとして気泡が汚れ表面に作用する時間割合 R_E を見積もると図7のようになる。 R_E は $Q_{in} = 3 \sim 4 \times 10^{-6} m^3/s$ で最大となり、 R_T と同様の傾向が見られる。このことから、 R_T を考える際には V_B や d_B の依存性が重要となり、 Q_{in} を増加させても単調に R_T が増えないのは、 V_B の増加によるところが大きいと言える。

以上、壁面をスライドする気泡による洗浄効果がウエイク及び液相循環流効果に比べて卓越していること、気相流量が増加すると気泡数及び気泡径が増加するが気泡速度もともに増加するため、ある流量以上では洗浄効果の増加は得られないことを確認した。このことにより、パイロットスケール実験においても指摘されている高気相流量において洗浄効率が流量に依存しなくなるという実験事実の原因をある程度説明できる。

4. 3 気泡シミュレーション

図8に各気泡径における気泡画像とレベルセット法により予測した気泡の形状を比較する。実験、計算ともに気泡径が大きくなるにつれて気泡は楕円体型、揺動型から冠球型へと遷移している。実際の気泡に見られる

高波数の表面張力波はここでの計算分解能の限界のため捕らえられていないが、実際の気泡形状と予測された形状は概してよく一致している。

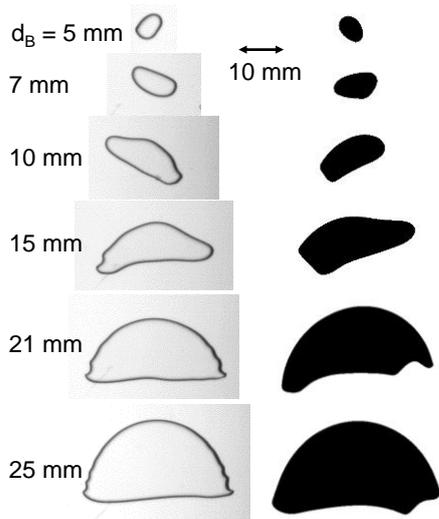


図8 気泡形状の比較

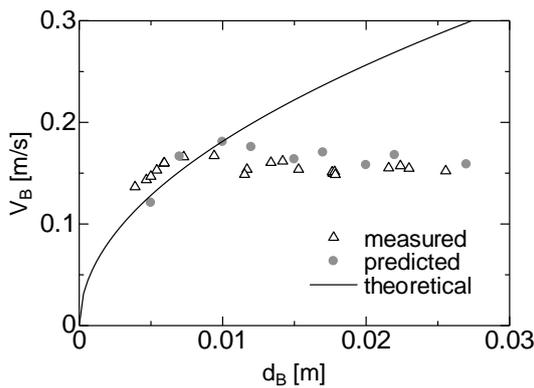


図9 気泡上昇速度

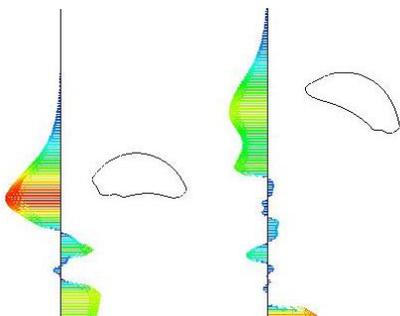


図10 壁面せん断応力分布

図9に単一気泡上昇速度の計算結果と本実験装置での測定結果、Graceらによる無限水液中における単一二次元気泡上昇速度の理論式(フルード数 $Fr = 0.579$)を示す。計算値と測定値は良好に一致している。気泡径が小さい領域($d_B \leq 0.01$ m)では、気泡径が大きくなるにつれて上昇速度も大きくなっており、理論とも一致している。気泡径が大きくなるに

つれて($d_B > 0.01$ m)理論式では上昇速度がさらに増加していくのに対し、実験と計算では上昇速度はほぼ一定となっている。これは容器の壁効果による抗力増大によるものである。

以上、気泡形状及び気泡上昇速度の観点から本計算手法の妥当性を確認できた。また、詳細な計算では高い空間分解能が必要となるが、その場合計算時間が長くなるため、高速計算実現のため GPGPU に基づく界面追跡並列計算手法を開発した。

$d_B = 20$ mm における壁面せん断応力分布を図10に示す。気泡通過時に気泡と同程度の高さの位置に大きなせん断応力が生じている。気泡下方にも気泡からの放出渦の影響でせん断応力が生じているが、上述のものに比べると小さい。また、気泡から壁面から離れると、気泡高さにおけるせん断応力も小さくなる傾向がある。このことから、気泡からの壁面せん断応力は気泡からの放出渦が壁面に衝突することよりも、気泡-壁面間での液相速度増加による効果がより大きいことがわかる。

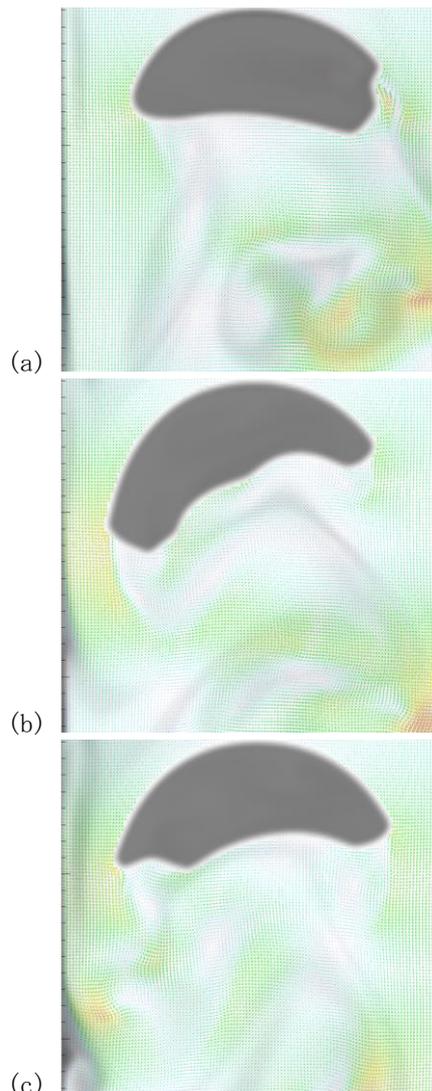


図11 気泡による汚れ除去過程

図11に汚れ除去過程を模擬した計算結果の一例を示す。ここでは、汚れは壁面全体に付着しているものとし、汚れの液相への流出速度は侵食速度関連式に倣い摩擦速度 u_w の3乗に比例するとした。(a)では気泡が壁面方向に移動しており、このとき気泡-壁面間の液相速度が増すことで壁面せん断応力が大きくなり、汚れの液相への移動が生じる。このあと気泡は壁面にさらに近づきながら上昇し、気泡端部からは渦が壁面方向へ放出される(b)。(a)において液相中に流出した汚れが(b)で放出された渦に干渉されながら液相中に広がっていく様子が確認できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2件)

- ① Kosuke Hayashi, Akio Tomiyama, Effects of Numerical Treatment of Viscous and Surface Tension Forces on Predicted

Motion of Interface, Journal of Computational Multiphase Flows, Vol.6(2), 111-126, 2014

- ② Ryo Sato, Kosuke Hayashi, Akio Tomiyama, Effects of Liquid Viscosity on Flows inside and outside a Bubble Diffuser Pipe, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.66, pp.197-205, 2015

[学会発表] (計 1件)

- ① 林 公祐, 富山明男, 汚れ系における気泡の界面追跡計算と物質移動, 混相流シンポジウム 2014, 2014.7.30, 道民センターかでる2・7 (札幌・北海道)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

林 公祐 (HAYASHI, Kosuke)

神戸大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 60455152