

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 5 月 13 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14652

研究課題名(和文) 揺動物体群と分散性気泡流の連成数値計算手法の開発

研究課題名(英文) Development of numerical method for interaction of flexible structures and bubbly flow

研究代表者

栗本 遼 (Kurimoto, Ryo)

神戸大学・工学研究科・助教

研究者番号：90711903

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：MBRの設計開発において、内部流動を予測及び可視化できる数値計算は強力なツールとなる。しかし、膜の揺動を考慮する必要性や内部流動に関する知見はほとんどない。本研究では流動可視化可能な実験装置を用いて、内部流動の観察、模擬汚泥の除去率測定、画像処理による膜の揺動評価を実施した。気相体積流束、中空糸膜の弛緩率、液相物性を変更させた。内部流動可視化実験において、液相物性が異なることにより上昇する気泡の径や数に差異が生じた。これは気泡が膜固定部や膜との衝突による分裂のし易さと相関があった。さらに液相物性の差異による気泡径や気泡数の変化が、膜に付着させた汚泥の除去速度に影響を及ぼすことが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた知見は中空糸膜を用いた膜分離活性汚泥法の設計開発に資するものであるとともに、内部流動を予測するための数値計算技術の開発指針に資するものである。また、流路内構造物による気泡流の流動構造の変化に関する知見はまだ少ないが、膜固定部や膜との干渉により気泡流の流動構造が変化する結果が得られた。さらに、液相物性(非ニュートン流体)の違いは流路内構造物による気泡流の流動構造の変化に影響を及ぼす結果が得られた。これらの点から、高い学術的意義を有する研究成果が得られた。

研究成果の概要(英文)：Numerical simulation would be useful for design and development of membrane bioreactors (MBR) in the view of visualization and prediction of flow in MBR plants. Experimental data on a relation between motion of membraned and bubbly flow are lacking, although motion of membranes should be implemented in the numerical simulation. We carried out experiments to observe bubbly flow, measure removal rate of a sludge and evaluate motion of membranes in an experimental setup with hollow fiber membranes. Liquid property affects bubble break-up at a lower tie plate and membranes. Liquid property affects the number of bubbles and those diameter in bubbly flows, since frequency of bubble break-up occurring at lower tie plate and membranes varies. This variation of the structure of bubbly flows affects removal rate attached to sludge.

研究分野：流体工学

キーワード：気泡流 揺動物体 非ニュートン流体 膜 除去速度

1. 研究開始当初の背景

膜分離活性汚泥法(MBR)は、世界的な水処理問題を解決できる有力な技術である。MBRでは汚水中に浸漬した多孔膜により、ろ過水と固形物に分離する。固形物の膜目詰まりによる性能低下を防ぐための洗浄が必要であり、膜洗浄にかかる高いランニングコストが大きな問題となっている。洗浄手法の一つとして、汚水中に散気し、分散した気泡の流れによる膜洗浄がある。ランニングコスト低減には、気泡流による効率的な膜洗浄が必要である。中空糸膜からなるMBRでは、数百本の膜から成るエレメントがモジュールとして設置される。気泡は膜群間を上昇し、膜への接触や液相流れ誘起によるせん断応力が洗浄に寄与する。また、気泡流の流動により膜の揺動が生じ、この揺動が膜洗浄に及ぼす影響は無視できないと考えられる。これは気泡と膜との接触の増加もしくは減少につながるためである。よって、洗浄促進には気泡流と膜群の揺動との相関の把握が重要となる。

2. 研究の目的

MBRの設計開発を考える上で、内部流動の把握は重要となる。様々な機器の設計開発において、内部流動を容易に予測及び可視化できる数値計算は強力なツールとなっている。数値計算によるMBR内部流動の予測において膜の揺動を考慮すべきかという点は、数値計算技術を開発する上で重要な検討事項である。また、膜が多数存在する場合の気泡流の流動構造に関する実験データは非常に少なく、数値計算による流動予測の妥当性を検討することが難しいのが現状である。その要因として、膜が多数存在する実機内部の流動構造や膜の揺動を実験的に把握することが困難であるためである。そこで本研究では、実機よりも小規模な実験装置を用いて、内部流動の観察、模擬汚泥の除去率測定、画像処理による膜の揺動評価を実施した。また、実機の内部流動を考える上で、液相物性の影響を把握する必要がある。そのため、液相として水及びキサントガム水溶液を用いて実験を実施した。

3. 研究の方法

図1に本研究で用いた実験装置の概要を示す。中空糸膜には外径2mmのPVDF膜を用いた。中空糸膜は上下のタイプレートを用いて固定した。中空糸膜は3.3mmの間隔で13本をy方向に一列に配置し、それをx方向に三列設置した。中空糸膜の弛緩率 ϵ は 0.5×10^{-3} とした。液相には水道水及び0.8g/Lのキサントガム水溶液を用いた。コンプレッサー、レギュレータ、流量計を通過した圧縮空気を実験装置の下部から散気管により気泡として発生させた。図2に膜を固定するタイプレート部分を含む水平断面(x-y)における位置関係を示す。図中の黒点は下部に設置した散気管の気泡が発生する孔の位置を表している。タイプレートの各列の幅は13mmであり、各列間の間隔は12mmである。図中に示した中空糸膜のz方向中段に模擬汚泥や揺動評価用の印を取り付けた。模擬汚泥は20g/Lキサントガム水溶液に視認性向上のために粉絵具を混ぜたものを用いた。模擬汚泥は膜の円周方向に均一では無く、y方向手前面に取り付けた。模擬汚泥除去速度は、実験開始前の汚泥質量に対して、気泡が最初に模擬汚泥付着位置に到達した時間から除去までに要した時間から求めた。

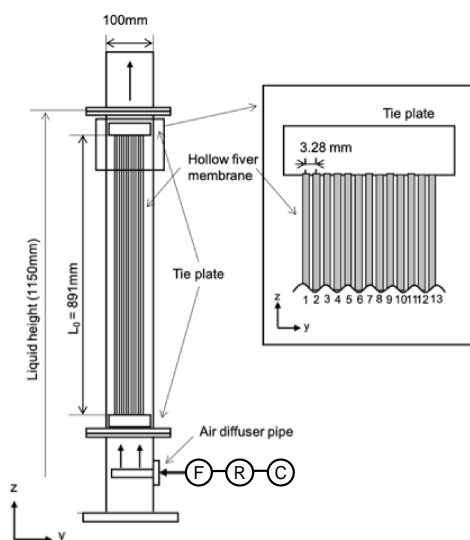


図1 実験装置概略

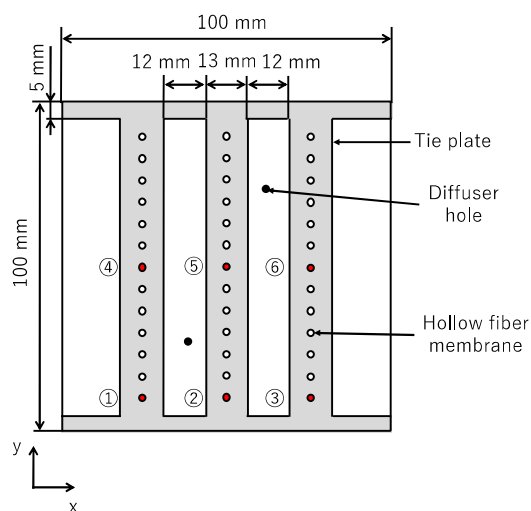
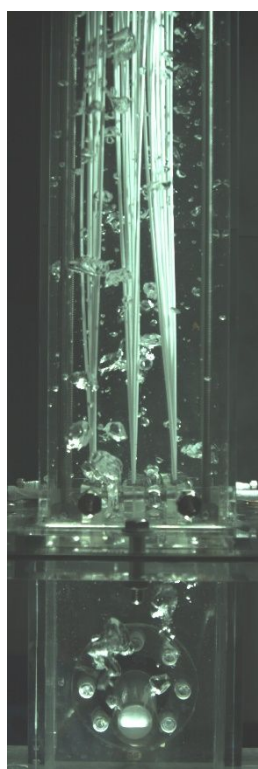


図2 膜配置及び模擬汚泥塗布位置

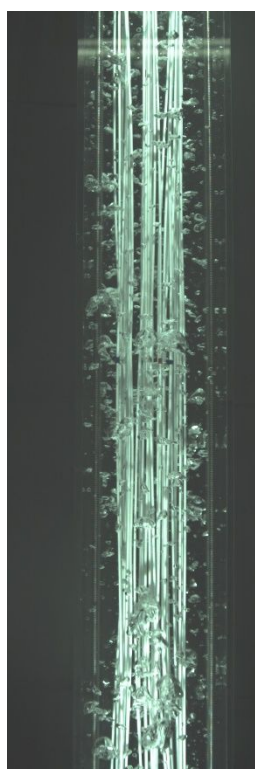
4. 研究成果

一例として図3に $J_G = 7.7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ における水中の気泡流の装置下部及び装置中段における流動の様子を示す．散気管から放出された気泡はタイプレートに到達し，タイプレート間の流路をタイプレートへの衝突を伴いつつ通過する．タイプレート通過後の気泡はタイプレートへの衝突により分裂し，気泡径が小さくかつ気泡数が増加している．装置中段においては，さらに気泡径の減少および気泡数の増加が見られる．これは，膜への衝突による気泡の分裂が要因である．

図4に $J_G = 7.7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ におけるキサンタンガム水溶液中の気泡流の装置下部及び装置中段における流動の様子を示す．散気管から放出された気泡は水中の場合に比べて若干大きく，これはキサンタンガム水溶液の粘度が水の粘度に比べ大きいことに起因している．タイプレートに到達した気泡はタイプレート間を通過し膜群間を上昇するが，タイプレート間通過時の気泡分裂の発生は水中の場合に比べて非常に少なく，気泡径は大きく気泡数は少ない．装置中段においても，装置下部における気泡径と気泡数に大きな差異は生じない．図3及び4より，液相粘度の変化が膜群内を通過する気泡の径や数に影響を及ぼすこと，またその影響の要因はタイプレートや膜による気泡分裂にあることが明らかとなった．



装置下部

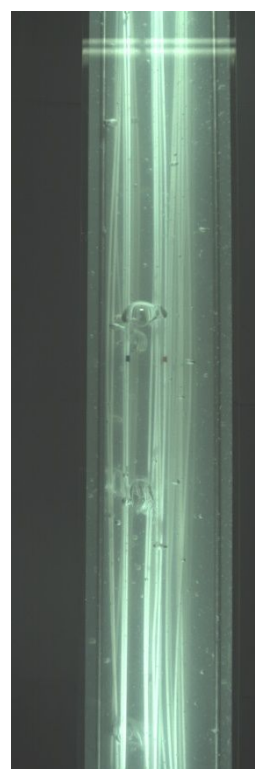


装置中段

図3 水中気泡流の流動



装置下部



装置中段

図4 キサンタンガム水溶液中気泡流の流動

図5, 6に $J_G = 7.7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 及び弛緩率 $\varepsilon = 0$ 及び $\varepsilon = 5.0 \times 10^{-3}$ における水及びキサンタンガム水溶液中の平均除去率を一例として示す．全ての箇所において，弛緩率の違いに依らず平均除去率は水の場合のほうが大きい．これは図3, 4で示したように，気泡数の大きな違いが影響していると考えられる．気泡が膜に衝突する際に汚泥に直接接触し膜から除去する場合や，気泡が汚泥近傍を通過することにより誘起される流れが汚泥を除去すると考えられ，キサンタンガム水溶液中においては気泡径が大きい一方で気泡数が少ないために気泡と汚泥との干渉が減少するためであると考えられる． $\varepsilon = 0$ の場合，水中における平均除去率は $\varepsilon = 5.0 \times 10^{-3}$ の位置において高い．図2に示した $x-y$ 平面図から， $\varepsilon = 0$ の位置は散気管の孔と近い位置のため汚泥近傍を通過する気泡数及び気泡径が比較的大きいことが要因である． $\varepsilon = 5.0 \times 10^{-3}$ の位置もまた $x-y$ 平面図において散気孔からの距離は近いが，タイプレート間はタイプレート及び流路壁面間に比べて気泡が通過しづらいことや汚泥の付着面が y 方向手前面であるためであると考えられる．各膜位置における除去率の傾向はキサンタンガム水溶液の場合も同様となる． $\varepsilon = 5.0 \times 10^{-3}$ の場合，水中における平均除去率は $\varepsilon = 0$ の場合よりもかなり小さい．これは気泡の上昇に伴う液相の流れにより膜が気泡から遠ざかる方向へ移動することが要因であると考えられ，膜密度が高い $\varepsilon = 5.0 \times 10^{-3}$ の位置では膜同士の干渉によりその影響が少ないため，除去率がほとんど変化しなかったと考えられる．キサン

タンガム水溶液の場合に ε の違いを比較すると、 $\varepsilon = 5.0 \times 10^{-3}$ においては除去率の増加が見られた。 $\varepsilon = 5.0 \times 10^{-3}$ でありキサンタンガム水溶液の場合には、膜密度の高い流路中心側へ移動するような動きをする気泡が見られた。このような動きにより、近傍の気泡通過頻度が増加したことが除去率増加の要因であると考えられる。

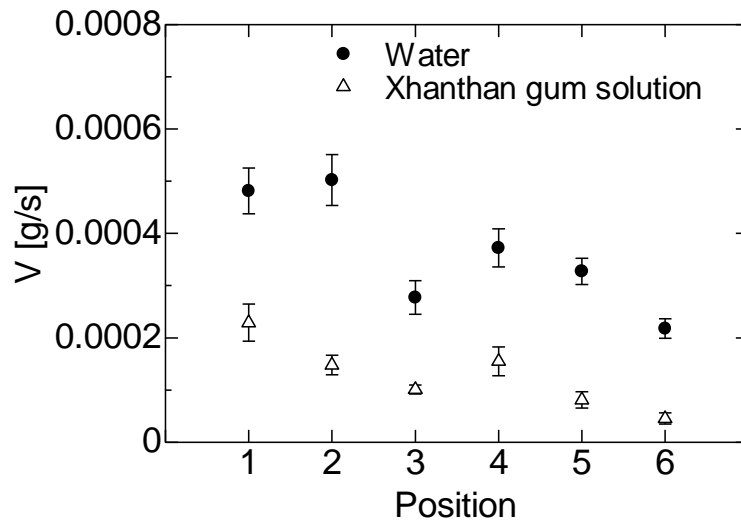


図5 液相物性が平均除去率に及ぼす影響 ($\varepsilon = 0$)

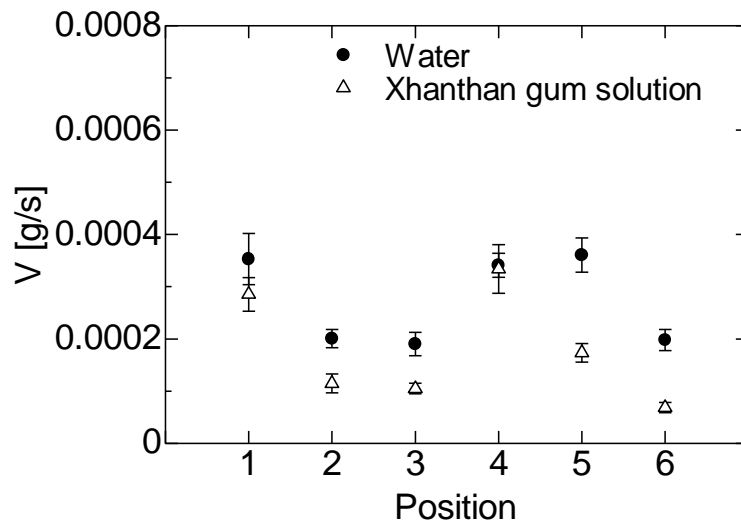


図6 液相物性が平均除去率に及ぼす影響 ($\varepsilon = 5.0 \times 10^{-3}$)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ryo Kurimoto, Kosuke Hayashi, Akio Tomiyama	4. 巻 33
2. 論文標題 Removal of Sludge attached to the Wall of a Planar Vessel due to Bubble Motion	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Multiphase Science and Technology	6. 最初と最後の頁 53 ~ 66
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1615/MultScienTechn.2021039128	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高屋 慎, 栗本 遼, 林 公祐, 富山明男
2. 発表標題 気泡流による中空糸膜の汚れ除去と揺動に関する研究
3. 学会等名 混相流シンポジウム2021
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Multiphase Fluid Dynamics Lab https://www.lab.kobe-u.ac.jp/eng-mfd/
--

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------