

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5月22日現在

機関番号：14501
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2011～2012
 課題番号：23760160
 研究課題名（和文）高粘度スラリー系気泡運動のモデル化と気泡群シミュレーション技術の開発
 研究課題名（英文）Modeling of bubble motion in slurry and development of numerical method for predicting bubbly flows
 研究代表者
 林 公祐（HAYASHI KOSUKE）
 神戸大学・工学研究科・准教授
 研究者番号：60455152

研究成果の概要（和文）：膜分離活性汚泥法に基づく水処理機器内気泡流の数値予測技術の開発を目的として、気泡観察実験及び界面追跡法に基づく単一気泡運動詳細シミュレーション技術開発を実施し、気泡の抗力及び揚力に及ぼす水質汚染の影響をモデル化するとともに、これらのモデルを組み込んだ多流体モデルと界面追跡法に基づく気泡群シミュレーション技術を開発した。

研究成果の概要（英文）：An interface tracking method for predicting single bubbles in contaminated systems was developed and experiments on bubbles in liquids were carried out to develop a numerical method for predicting bubbly flows in wastewater treatment devices based on membrane bioreactor method. A drag and lift forces were modeled by accounting for the effects of surfactant on bubble motion. A multi-fluid model implementing these models was developed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：流体工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：流体工学，水資源

1. 研究開始当初の背景

多数の微細孔を有する膜を通すことで汚泥の固形分をろ過して清浄な処理水を得る膜分離活性汚泥法（MBR: Membrane Bioreactor）では、中空糸膜を通して汚泥を吸引することにより、汚染物質をろ過する。省スペースで清浄度の高い処理水が得られるため日本が国際的な競争力を有する次世代技術の一つとして期待されており、積極的に開発・利用が進められている。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、継続的な膜洗浄が必要となる点にある。通常、膜の下方から大量の空気の泡を吹き込み、これらの泡が作り出す流れによって膜表面を洗浄する。従って、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、言い換えれば、いかに気泡を含む流れを制御できるかという点にある。ところが、MBR内の流れは懸濁固形分を含み水の数十倍の粘度を有するスラリー様の汚染系気泡群という非常に複雑な流れであり、現状の数値予測技術ではこのような複雑流れを扱えない。このため、気泡発生用散気管の構造や配置などは経験のみに頼って設計されているのが現状である。従って、MBR機器内の気泡を含む流れの予測技術を確立することが当分野の技術課題となっている。

2. 研究の目的

MBRにおいて安定かつ効率的な水処理を

実現するためには、固形分の堆積による膜の目詰まりを効率的に防止する必要がある。本研究では、膜の目詰まり防止を目的とした気泡吹き込み部の合理的設計の実現を目標としており、このうちここでは、①汚染系気泡の運動に及ぼす懸濁粒子の影響のモデル化およびそのモデルを組み込んだ②気泡群を含む流れのシミュレーション技術の開発を目的とした。

3. 研究の方法

小規模な気泡観察容器を用いた気泡実験を実施するとともに、汚染系気泡数値シミュレーション技術を開発し、汚染系気泡に対する抗力及び揚力のモデルを検討した。粒子群の運動を検討する数値的道具として埋め込み境界法に基づく格子ボルツマン法の高度化を図った。また、MBR内気泡流をシミュレートするための多流体モデルに基づく数値計算技術を、上記抗力・揚力モデル及びOjimaらが提案した微細粒子が気泡合体に及ぼす影響に関するモデルを組み込んで開発した。

4. 研究成果

(1)汚染系気泡シミュレーション技術の開発
マランゴニ効果などで知られているように、界面活性剤が存在する汚染系における気泡は、清浄系気泡とは異なる振る舞いを示す。界面活性剤溶液中気泡運動を考察するための道具として界面上界面活性剤濃度分布や表面張力勾配に起因する界面上接線応力分布等を予測できる界面追跡法を開発した。計算手法の概要を以下に述べる。非圧縮性ニュートン流体に対する一流体形式に基づく連続の式及び運動方程式は各々以下の諸式で与えられる。

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \boldsymbol{\mu} [\nabla \mathbf{V} + (\nabla \mathbf{V})^T] + \mathbf{g} + \frac{1}{\rho} [\boldsymbol{\sigma} \boldsymbol{\kappa} \mathbf{n} + \nabla_s \sigma] \delta$$

ここで、 \mathbf{V} は速度、 t は時間、 ρ は密度、 P は圧力、 $\boldsymbol{\mu}$ は粘度、 \mathbf{g} は重力加速度、 σ は表面張力、 $\boldsymbol{\kappa}$ は曲率、 \mathbf{n} は界面法線ベクトル、 δ はデルタ関数である。また、 ∇_s は界面接線方向の勾配演算子である。液相中及び界面上の界面活性剤モル濃度 C 及び Γ は各々以下の輸送方程式に従う。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla C = \nabla \cdot D_C \nabla C - \mathcal{S}_C \delta$$

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial t} + \nabla_s \cdot \Gamma \mathbf{V}_s = \nabla_s \cdot D_S \nabla_s \Gamma + \mathcal{S}_\Gamma$$

ここで、 D_C は液相中の拡散係数、 \mathbf{V}_s は速度の

界面に対する接線方向成分、 D_S は界面上の拡散係数である。両式右辺第2項は吸脱着による界面-液相間のモル流束であり、ここでは次のFrumkinモデルによって評価する。

$$\mathcal{S}_\Gamma = k[C_S(\Gamma_{max} - \Gamma) - \beta\Gamma]$$

ここで、 k は吸着係数、 β は脱離係数、 C_S は界面近傍の液相中モル濃度、 Γ_{max} は最大吸着モル濃度である。

連続の式及び運動方程式の解法にはプロジェクション法を用いる。表面張力の法線方向成分 $\boldsymbol{\sigma} \boldsymbol{\kappa} \mathbf{n}$ の評価にはゴースト流体法を採用する。界面の記述にはレベルセット法を用いる。表面張力の接線方向成分 $\nabla_s \sigma$ に対してもゴースト流体法を適用できるが、計算が複雑になる。そこで接線方向成分に対してはCSF(Continuum Surface Force)モデルを利用する。

バルク中界面活性剤濃度の輸送方程式には次の二段階法を適用する。まず、界面において濃度勾配なし($\partial C / \partial n = 0$)の条件のもとで右辺第2項を無視して移流及び拡散を評価する。その後、第2項を加える。移流及び拡散を評価する際の流束なしの条件を満たすため、次式を解いて C の値を気泡内部に外挿する。

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + \text{sign}(\phi) \mathbf{n} \cdot \nabla C = 0$$

ここで $\text{sign}(\phi)$ は符号関数である。界面上濃度の輸送方程式は二次元空間上の移流拡散方程式であるが、次式を解いて $\nabla_s \Gamma = \nabla \Gamma$ を満足するように Γ を気液両相中に外挿すれば、ENO(Essentially Non-Oscillatory)スキームなどの通常の差分スキームを用いて離散化できる。

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial \tau} + \text{sign}(\phi) \mathbf{n} \cdot \nabla \Gamma = 0$$

表面張力の Γ 依存性は次式で評価する。

$$\sigma(\Gamma) = \sigma_0 \left[1 + \frac{RT\Gamma_{max}}{\sigma_0} \ln \left(1 - \frac{\Gamma}{\Gamma_{max}} \right) \right]$$

ここで、 σ_0 は清浄系の表面張力である。

(2)汚染系気泡運動のモデル化

汚染系気泡に作用する揚力と抗力のモデルについて検討した。図1に界面活性剤が一様せん断流中気泡の揚力係数 C_L に及ぼす影響を示す。 Eo_H はエトベス数、 ω は一様せん断流の速度勾配、 C_∞ は初期バルク界面活性剤濃度、 M はモルトン数である。界面活性剤濃度の増加に伴い C_L は低下している。このため、 C_L の符号が切り替わる Eo_H の値も界面活性剤濃度の増加に伴って低下している。高濃度の場合に C_L に対する ω の影響が見られるが、顕著ではない。

鉛直円管内清浄系テイラー気泡のフルー

ド数は、低モルトン数の場合はエトベス数のみで整理できる。また、著者はこれまでに、汚染系テラー気泡のフルード数は、気泡先端付近においてマランゴニ力が無視できる場合には、清浄な界面の表面張力ではなく汚染系気泡先端近傍における表面張力を用いてエトベス数を評価することで清浄系と同様に整理できることを明らかにしている。そこで、 σ_0 ではなく汚染系気泡先端の表面張力 σ_N を用いて Eo_H を評価して得た C_L - Eo_H 関係を図2に示す。 $Eo_H(\sigma_N)$ を用いることにより C_L を整理できている。このことから、マランゴニ力による界面移動度低下効果が小さい場合は、汚染による C_L 低下の主因は表面張力低下によるエトベス数変化にあるといえる。この場合には、既存の揚力係数モデルにおいて表面張力に汚染系の値を用いれば、汚染系気泡の揚力係数を評価できる。

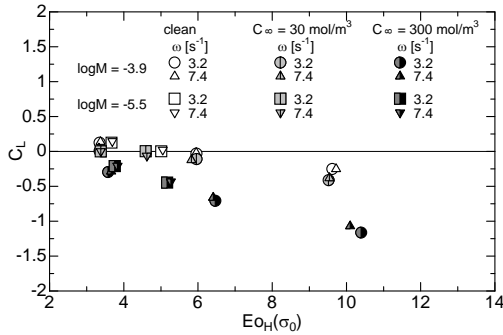


図1 せん断流中汚染系気泡の揚力係数(1)

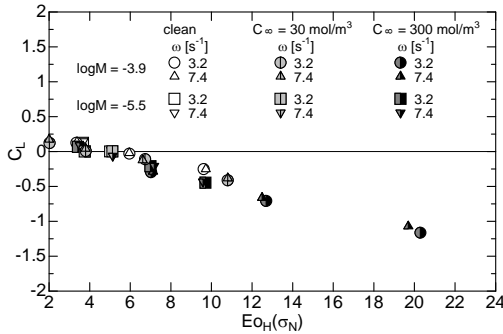


図2 せん断流中汚染系気泡の揚力係数(2)

さらに、Tomiyamaらの気泡抗力係数相関式のうち、エトベス数 Eo の関数として与えられている部分に界面活性剤の影響を考慮した。すなわち、

$$C_D = \max \left[\frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}), \frac{8}{3} \frac{Eo(\sigma)}{Eo(\sigma) + 4} \right]$$

ここで、 Re は気泡レイノルズ数である。 σ に、バルクの界面活性剤濃度に対する平衡濃度 Γ_{eq} から求めた値を用いて得た気泡速度を図3に示す。本修正モデルは実験データとよく一致しており、上記モデルが妥当性であることが確認できた。

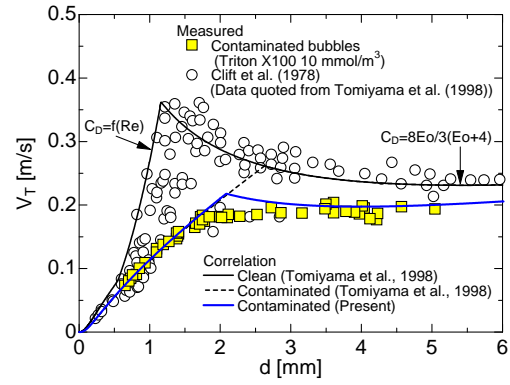


図3 気泡径に対する気泡上昇速度

(3) 気泡群シミュレーション技術開発
MBR内気泡流を数値予測するためには、多数の気泡の運動と自由表面の運動を取り扱う必要がある。そこで本研究では、Tomiyamaらが提案した気泡群の運動を多流体モデル、自由表面の運動をVOF法に基づく界面追跡法で計算する方法を基礎とし、上記(2)で提案した気泡抗力・揚力モデル及びOjimaらが提案した気泡合体モデルを組み込んだ。

連続気相、連続液相及び N 種の気泡群に対する連続の式を以下に示す。

$$\frac{\partial \alpha_{CL}}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_{CL} \mathbf{V}_C = 0$$

$$\frac{\partial \alpha_{CG}}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_{CG} \mathbf{V}_C = \sum_{p=1}^M \Gamma_{GBP}$$

$$\frac{\partial n_{Bp}}{\partial t} + \nabla \cdot n_{Bp} \mathbf{V}_{Bp} = -\gamma_{GBP} + R_p$$

ここで、 α は体積率、 n は気泡数密度、下付添字 CL は連続液相、 CG は連続気相、 C は一流体化した連続相を表す。 Γ_{GBP} 、 γ_{GBP} は自由表面を通じて連続気相と合体する気泡による質量輸送、 R_p は気泡合体による気泡群間の質量輸送である。一流体化した連続相及び気泡群に対する運動方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial \mathbf{V}_C}{\partial t} + \mathbf{V}_C \cdot \nabla \mathbf{V}_C = -\frac{1}{\rho_C} \nabla P + \frac{\mathbf{F}_v + \mathbf{F}_s}{\rho_C \alpha_C} + \mathbf{g} + \frac{1}{\rho_C \alpha_C} \left[\sum_{p=1}^M (M_{LBp} + M_{\Gamma p}) \right]$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}_{Bp}}{\partial t} + \mathbf{V}_{Bp} \cdot \nabla \mathbf{V}_{Bp} = -\frac{1}{\rho_G} \nabla P + \mathbf{g} - \frac{1}{\rho_G \alpha_{Bp}} (M_{LBp} + M_{\Gamma p} + M_{Rp})$$

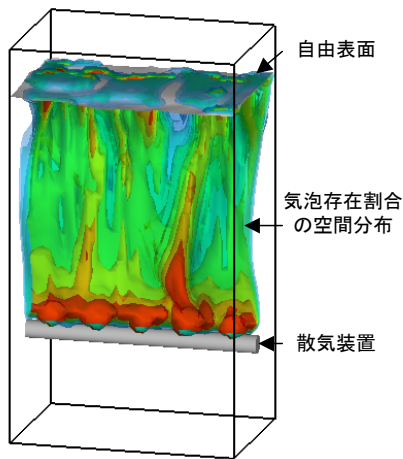


図4 MBR 模擬装置内流動シミュレーション

ここで、 F_v は粘性力、 F_s は表面張力、 $M_{\Gamma p}$ は自由表面から抜ける気泡とともに連続気相に移動する運動量である。 M_{LBp} は連続液相と気泡群間の相互作用を表しており、例えば抗力及び揚力は以下の諸式で与えられる。

$$M_D = \frac{3}{4} \frac{\alpha_{Bp}}{d_{Bp}} C_{DBp} \rho_C |V_{Bp} - V_C| (V_{Bp} - V_C)$$

$$M_L = \alpha_{Bp} C_{LFBp} \rho_C (V_{Bp} - V_C) \times \nabla \times V_C$$

抗力係数を上記(2)のモデルで与える。

$$C_{DBp} = \max \left[\frac{24}{Re_{Bp}} (1 + 0.15 Re_{Bp}^{0.687}), \frac{8}{3} \frac{Eo_{Bp}(\sigma)}{Eo_{Bp}(\sigma) + 4} \right]$$

また、揚力係数は Tomiyama らのモデルを基礎として、表面張力に汚染の効果を考慮すれば、

$$C_{LFBp} = \begin{cases} \min[0.288 \tanh(0.121 Re_{Bp}), f(Eo_{HBp}(\sigma))] & \text{for } Eo_{HBp} \leq 4 \\ f(Eo_{HBp}(\sigma)) & \text{for } 4 < Eo_{HBp} \leq 10.7 \\ -0.29 & \text{for } 10.7 < Eo_{HBp} \end{cases}$$

$$f = 0.00105 Eo_{HBp}^3 - 0.0159 Eo_{HBp}^2 - 0.0204 Eo_{HBp} + 0.474$$

R_p を評価するための合体モデルの詳細は省略するが、Ojimaらに倣い、微細粒子が気泡合体を促進する効果を、気泡合体モデルにおける液膜排出時間を短縮することで考慮した。

図4に開発技術を用いて気泡群の運動をシミュレートした例を示す。本計算では、MBR実機的设计を参考に、MBR縮小モデルとして散気管径20mm、散気穴径5mmとした。この場合の気泡の球等価直径は計測により25mmであることを確認し、その値を入口気泡径とした。散気穴数は5とした。散気穴から流出した気泡群が分散しながら上昇し、

自由表面に到達して自由表面の運動を誘起する様子が予測できている。

本計算技術の妥当性をさらに詳しく検証し、基盤技術として整備することにより、MBR機器の散気、膜配置等の設計に貢献できるものと期待できる。

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1件)

(1) Kosuke Hayashi, Roberto Rojas, Takeshi Seta, Akio Tomiyama, Immersed Boundary-Lattice Boltzmann Method Using Two-Relaxation Times, Journal of Computational Multiphase Flows, Vol.4, No.2, 2012, pp.193-209, 査読有。

[学会発表] (計4件)

① Kosuke Hayashi, Ryo Kurimoto, Shigeo Hosokawa, Akio Tomiyama, Effects of Surfactant on the Motion of Bubbles in Linear Shear Flows, Proc. of 2012 Japan-U.S. Seminar on Two-Phase Flow Dynamics, 10 pages, 2012年6月7-12日, 東京。

② Kosuke Hayashi, Akio Tomiyama, Effects of Numerical Treatment of Viscous and Surface Tension Forces on Predicted Interface Motion, Proc. of 9th International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, 6 pages, 2012年12月10-12日,メルボルン, オーストラリア。

③ Kosuke Hayashi, Akio Tomiyama, Interface Tracking Simulation of Bubbles in Clean and Contaminated Systems, Proc. of Korea-Japan CFD Workshop 2012, 8 pages, 2012年11月23日,釜山,韓国。

④ 林公祐, 富山明男, 粘性力及び表面張力の評価法が界面運動の数値予測に及ぼす影響, 第62回理論応用力学講演会, OS01-06, USB memory (2 pages), 2013年3月6-8日, 東京。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

林 公祐 (HAYASHI KOSUKE)

神戸大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 60455152