

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11738

研究課題名(和文) 海水浸透圧発電のための濃度分極・ファウリング解消法の開発

研究課題名(英文) development of methods to reduce concentration polarization and fouling for osmotic power generation

研究代表者

奥村 哲也 (OKUMURA, Tetsuya)

長崎大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10380817

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：濃度分極およびファウリングのシミュレーションプログラムと計算モデルを開発し、浸透を阻害する要因を低減する方法について検討した。膜本来の性能を得るためには、中空糸膜の密度を小さくすること、水の流速を大きくすることが有効であることがわかった。また、気泡を導入することで水中のファウラントを除去し、固体表面に付着したファウラントを低減できる可能性があることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、メソスコピック領域を解析対象とし、水の流体力学的な挙動、イオンの移流・拡散挙動、気泡の挙動などを連成解析するプログラムを開発しており、従来の手法に比べてより複雑な現実に近い条件下でのシミュレーションが可能である。

また、膜分離技術は海水淡水化、血液透析、飲料の精製・濃縮、排水処理など、多くの分野で利用されている。いずれにおいても濃度分極・ファウリングは性能を低下させる現象であるため、本研究の解析法・成果が産業・医療など広い分野で活用されることが期待される。

研究成果の概要(英文)：The simulation programs and the computational models for concentration polarization and fouling were developed to study how to reduce the factors that inhibit permeation. It was found that reducing the density of the hollow fiber membranes and increasing the water flow rate were effective in achieving the original performance of the membranes. It was also found that the addition of air bubbles could remove foulants from the water and reduce the foulants attached to the solid surface.

研究分野：機械工学

キーワード：濃度差発電 浸透膜 濃度分極 ファウリング 格子ボルツマン法 粒子法

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

塩分濃度差発電は都市近郊において設置できる稼働率が高いクリーンな次世代発電システムとして期待されている。しかし、現在使用されている浸透膜モジュールでは、濃度差発電の実用化に必要な浸透量が得られていない。浸透膜が本来持っている浸透性能が発揮されていないことが指摘されており、現状の浸透膜においても性能を向上させる余地があることを示している。

2. 研究の目的

浸透水量を増やす最も現実的な解決法は、現状の浸透膜において、濃度分極およびファウリングといった浸透を阻害する要因を低減することである。そこで、本研究では、濃度分極およびファウリングをコンピュータ上で再現できる計算プログラムおよび計算モデルを確立し、それらを用いて阻害要因を低減する方法を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 浸透膜表面近傍の濃度分極

浸透膜の表面近傍に発生する濃度分極を実験により測定することは困難であるため、本研究では数値シミュレーションを行うことにより濃度分極の形成に及ぼす膜の配置について検討した。格子ボルツマン法 (LBM) を用いることにより、濃度分極というメゾスケールの現象を解析した。

(2) ファウリング

ファウリングを起こす物質 (ファウラント) の挙動を実験的に観察することは困難であるため、数値シミュレーションを実施した。本研究では、マイクロスケールの現象をシミュレートできる格子ボルツマン法を用いて計算を行った。水とファウラントの2成分の挙動を模擬するために、多成分・多相系計算モデルを用いた連成計算を行い、ファウラントの挙動が浸透性能に与える影響について検討した。

(3) 気泡を用いたファウラント除去

ファウリングを低減する方法として気泡を用いることが考えられるが、水・ファウラント・気泡・浸透膜がお互いに及ぼす現象は複雑であるため、実験的に除去メカニズムに迫るのは困難である。本研究では、大変形を伴う自由表面を取り扱うことが容易である粒子法を用いたシミュレーションを行うことにより、ファウラントの挙動に及ぼす気泡の影響について検討した。

4. 研究成果

(1) 濃度分極

中空糸の配置が浸透性能に及ぼす影響について検討するため、中空糸膜およびその近傍を模擬した計算モデルを開発した。計算モデルを図1に示す。水中に中空糸を1本、または13本 (今後、中空糸束と呼ぶ) 設置し、膜の表面の塩分濃度により水が浸透するとした。計算系の左端から一様流速で水が流入し、右端で流出する (速度、濃度の勾配ゼロとする)。また、計算系の上下端に周期境界条件を適用し、上下方向に中空糸および中空糸束が距離 L の間隔で並んでいる状態とした。 L を膜直径 d の2倍、4倍、6倍の3とおりについて計算を行った。

中空糸膜1つの浸透量に対する中空糸束における膜1つ当たりの浸透量の割合を図2に示す。なお、同じ L を持つ単一膜モデルと中空糸束モデルにおける浸透量から算出した結果であるが、膜単一モデルと中空糸束モデルで同じ L でも計算系の高さ H_2 が異なるため (水の流入量が異なってしまう)、浸透量を流量で除した単位流量当たりで評価した。いずれの L においても、縦軸の値が1より小さい。この結果は、中空糸束における膜1つ当たりの浸透量は単一膜における浸透量よりも少ないことを意味する。つまり、中空糸を束にすることで、膜本来の性能が発揮できないことを示している。図3に、計算系内における水の流速分布と浸透膜近傍の塩分濃度分布を

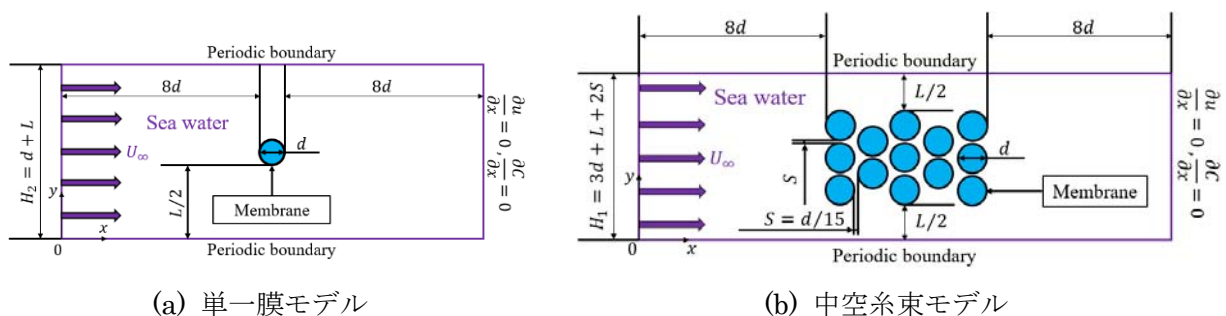


図1 濃度分極計算モデル

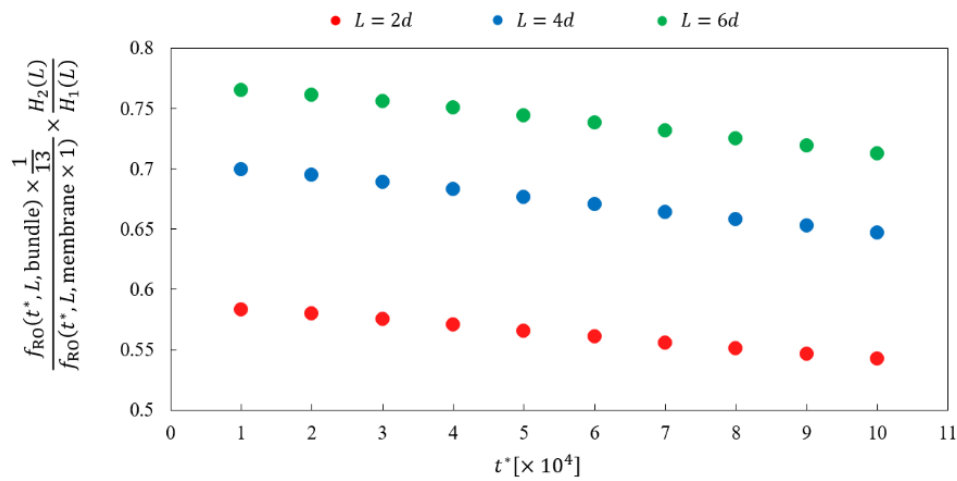


図2 単一膜に対する中空糸束での浸透量の割合

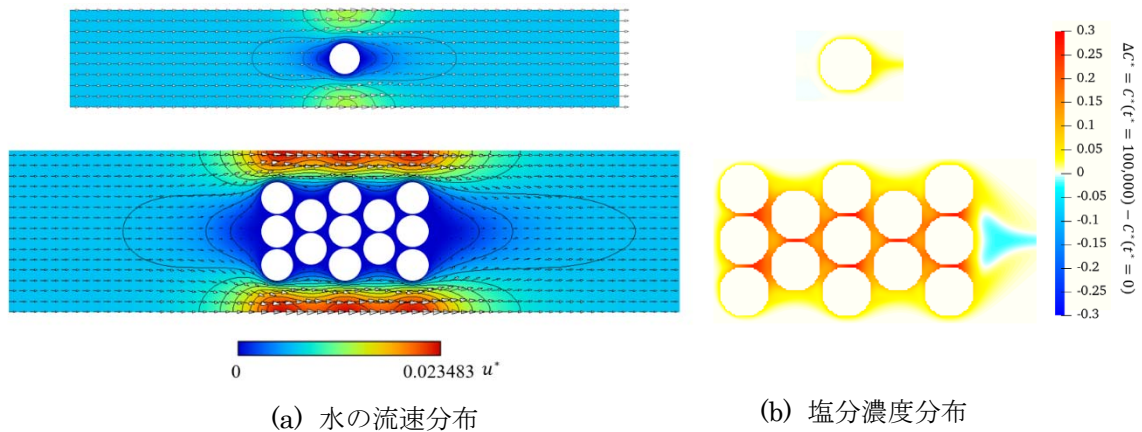


図3 水の速度分布と膜近傍の濃度分布

示す。流速分布に示されているとおり、浸透膜近傍では水の流速は小さいが、特に中空糸束内部の浸透膜の周囲において流速はかなり小さい。また、塩分濃度分布においても中空糸束における外側の浸透膜比べると、中空糸束内部の浸透膜近傍での濃度上昇が顕著に見られる。浸透膜近傍では水の流れが小さくなるため、塩分が浸透膜表面に留まったままになりやすく、濃度分極が発達しやすいことがわかる。

異なる中空糸の配置を設定した浸透シミュレーションにより、以下の結果が得られた。

- ① 膜を束ねると膜浸透性能は膜本来の性能よりも低くなる。
 - ② 中空糸束同士を近づけるほど、浸透性能は膜本来の性能より低くなる。
- これらの結果より、濃度分極を低減するために以下の方法が考えられる。
- ① 膜表面近傍の水の流れを速くする。
 - ② 中空糸束の内部にも水が流れやすくするようにする。例えば、中空糸束における膜の密度を小さくする事が考えられる。

(2) ファウリング

浸透膜表面近傍におけるファウラントの挙動が浸透性能に及ぼす影響を検討するため、水、ファウラントの挙動の連成計算および浸透膜による水の浸透現象を模擬した計算モデルと計算プログラムを開発した。計算モデルを図4に示す。計算系は、水と計算系の中央に配置されたファウラントで構成される。計算系の左右の両端は周期境界条件、計算系の上端は質量流速ゼロを適用した。計算系の下端は浸透膜を想定し、膜に接する水の一部が計算系外に流出するが、ファウ

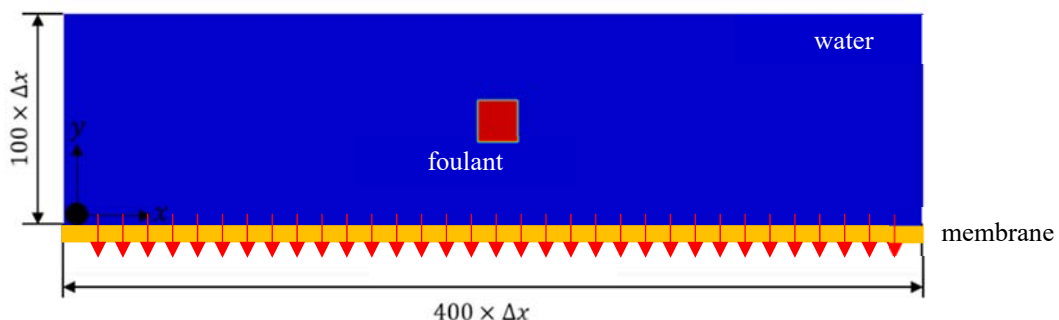


図4 ファウリング計算モデル

ラントは浸透膜によって系外への移動は妨げられる境界条件を適応した。ファウラントは液体と同様に變形できるものとし、物性は水と同じと仮定した。浸透膜とファウラントの間の相互作用力を変更することにより、浸透膜とファウラントの濡れ性を制御した。

図5にファウラントの密度分布を示す。図中の赤い領域はファウラントが多いことを示している。いずれの図においても赤い領域が計算系の下部に存在しており、浸透膜表面上にファウラントが付着するファウリングが発生していることがわかる。ファウラントと浸透膜の相互作用を変更することで、ファウラントの接触角を約 20~130° の範囲に変更することができた。接触角が小さいときファウラントが膜表面に拡がっており、接触角が大きいときに比べて浸透膜表面と接している部分が大きいことがわかる。

図6に定常状態に達した際のファウラントの接触角と浸透膜の浸透流量の関係を示す。接触角が大きいほど水の浸透量が多い傾向が見られる。つまり、浸透膜の表面に拡がりやすいファウラントは水の浸透量が少なくなり、表面に拡がりにくいファウラントは浸透量が多いことを示している。図5で見られるように、接触角が小さいファウラントは浸透膜を広く覆ってしまうため、水が浸透可能な膜面積が減少してしまうと考えられる。

ファウラントの量を変更した場合についてもシミュレーションを行い、水が浸透可能な膜面積を算出し、膜全体に対する割合（有効膜面積率）を算出した。有効膜面積率に対する浸透量の関係を図7に示す。水の浸透量はファウラントの量やファウラントの接触角に関わらず、有効膜面積比に比例していることがわかる。このことより、浸透性能を向上させるためには有効膜面積をいかに大きくできるかが重要であり、膜に対するファウラントの濡れ性を小さくする（接触角を大きくする）素材の選定が重要であると言える。

計算系の左右端に圧力差を与えることで、計算系内に左から右への流れを発生させた計算を行った。浸透膜に対するファウラントの接触角が 110° で圧力勾配が 15kPa/m の場合におけるファウラントの分布を図8に示す。浸透膜に付着したファウラントが浸透膜からはがれる現象が見られる。今回のシミュレーションでは、圧力勾配が 15kPa/m の場合において、接触角が 110° 以上になるとファウラントが浸透膜から除去されることが確認できた。水の流れが速いと浸透膜表面近傍のせん断力が大きくなるため、接触角が大きいファウラントは膜から除去されやすいと考えられる。ただし、接触角が小さいファウラントの場合は、せん断によってファウラントが浸透膜表面上に塗り広げられ、浸透量が低下する現象が見られた。したがって、単純に水の流れを与えれば良いというわけではないことを注意しなければならない。

ファウリングを模擬した浸透シミュレーションにより、以下の結果が得られた。

- ① 浸透量は、浸透膜の有効膜面積に比例する。
 - ② 膜表面近傍の流れによって浸透膜に付着したファウラントが除去できる場合がある。
- これらの結果より、ファウリングによる浸透量低下を低減するために以下の方法が考えられる。
- ① 膜表面はファウラントが付着しにくい素材を選定する。
 - ② その上で、膜表面に平行な流れを与える。

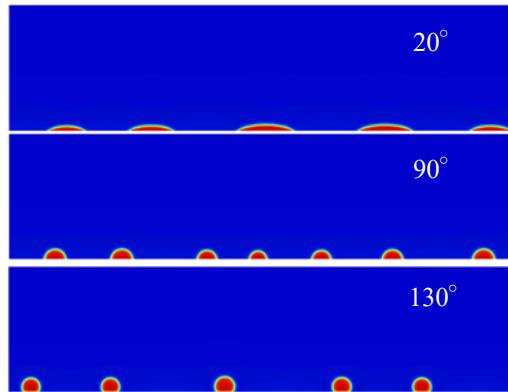


図5 ファウラントの分布

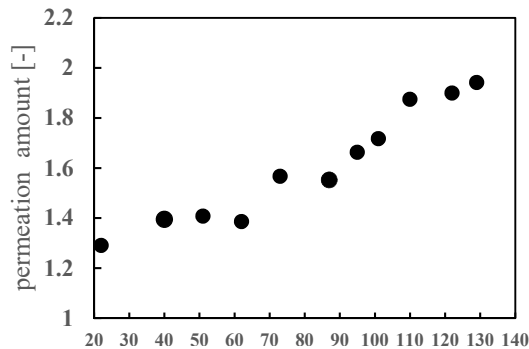


図6 浸透量と接触角の関係

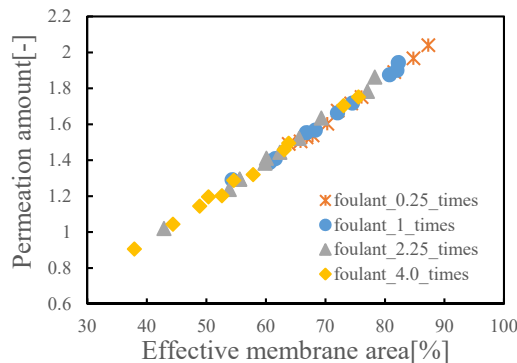


図7 浸透量と有効膜面積率の関係

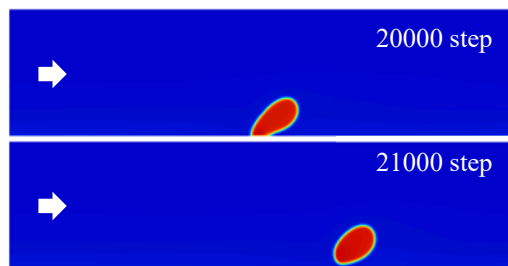
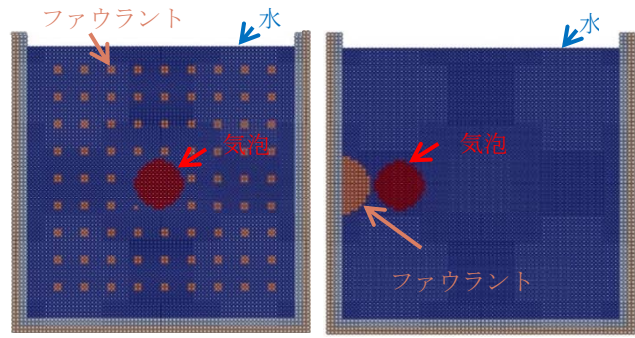


図8 ファウラントの分布

(3) 気泡を用いたファウラント除去

気泡を用いてファウリングを低減する方法の有効性について検討するため、粒子法を用いたとシミュレーションプログラムと計算モデルを開発した。本研究で用いた計算モデルを図9に示す。計算系は固体表面・水・ファウラント・気泡で構成されており、(a)ファウラント分散モデルは水中にファウラントが分散した状態、(b)ファウラント付着モデルは固体表面上にファウラントが付着している状態である。そこに気泡が存在した場合におけるファウラントの挙動(気泡への吸着や固体表面に対する付着の程度)について解析を行った。



(a) ファウラント分散モデル (b) ファウラント付着モデル

図9 ファウラント除去計算モデル

ファウラント分散モデルを用いた計算におけるスナップショットを図10に示す。気泡周辺のファウラントの一部は気泡と水の界面に存在している。つまりファウラントが気泡に吸着している様子が見られた。図11に気泡の重心からの距離に対するファウラントの密度分布を算出した結果を示す。気泡半径である $6\mu\text{m}$ 付近に見られるピークが気泡に吸着したファウラントを意味する。このピークは接触角が 180° の場合に顕著に見られ、撥水性のファウラントが最も気泡に吸着しやすいことを示している。

ファウラント付着モデルを用いた計算における、接触角が 60° と 120° の場合のスナップショットを図12に示す。接触角が 60° の場合はファウラントが固体表面に付着しているが、接触角が 120° の場合はファウラントが気泡に吸着している様子が見られる。計算を進めると、全ファウラントが気泡に吸着し、固体表面からファウラントが除去された。図13に固体表面からの距離に対するファウラントの分布を示す。気泡がない場合は固体表面にファウラントが付着した状態のままであるが、気泡がある場合は、気泡がない場合に比べて固体表面への付着量 ($0\mu\text{m}$ でのファウラント数) が減少し、ファウラントが固体表面から離れた位置に分布していることがわかる。特に、接触角が 120° の場合は、固体表面への付着がほぼ0になっており、ファウラントが固体表面から除去されたことがわかる。つまり、接触角が大きい、親水性のファウラントは、固体表面に付着していても気泡に吸着させることで除去できることを示している。

気泡によるファウラント除去のシミュレーションにより、以下の結果が得られた。

- ① 水中のファウラント (特に疎水性) は、気泡に吸着する。
 - ② 固体表面に付着したファウラントは、気泡によって低減・除去することができる。
- これらの結果より、浸透膜周辺に気泡を導入することによってファウリングを低減することができると考えられる。

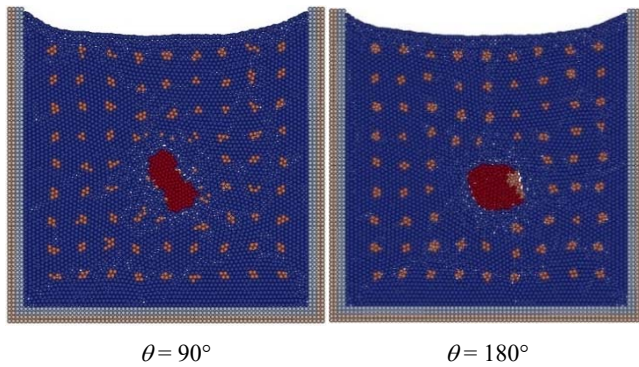


図10 スナップショット(分散モデル)

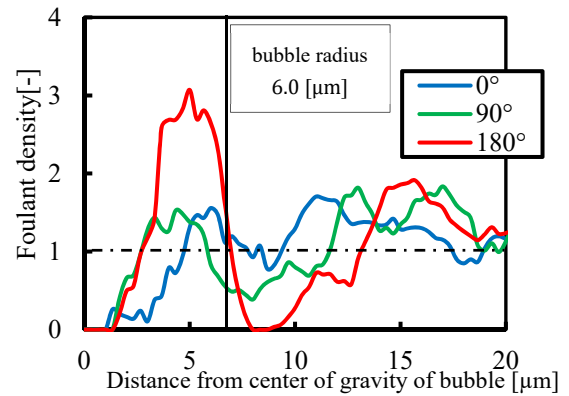


図11 気泡近傍のファウラント分布

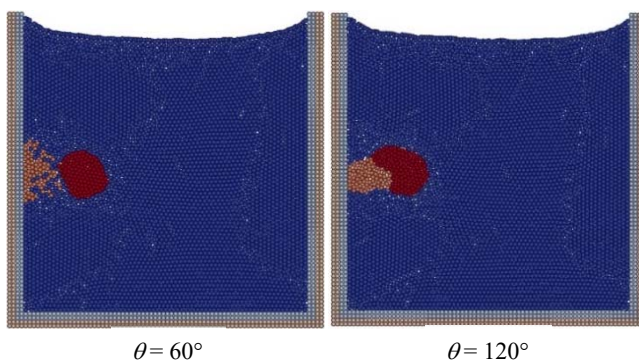


図12 スナップショット(付着モデル)

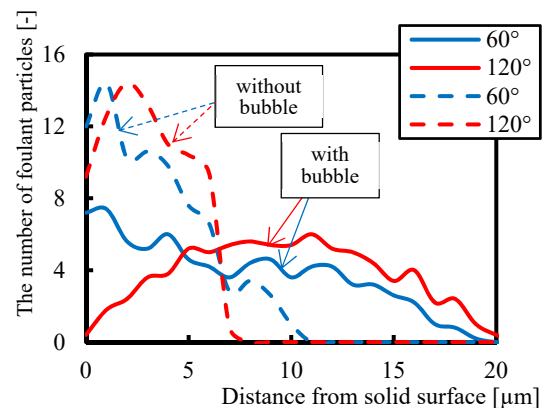


図13 固体表面近傍のファウラント分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 奥村哲也, 永安晃尚, 森山卓哉, 林秀千人
2. 発表標題 浸透膜表面近傍におけるファウラント挙動の数値シミュレーション
3. 学会等名 日本海水学会第70年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中匠, 奥村哲也, 林秀千人
2. 発表標題 LBMを用いた浸透膜表面近傍の濃度分極に関する研究
3. 学会等名 日本海水学会第70年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥村哲也
2. 発表標題 浸透膜に関する研究紹介 ~マクロ・ミクロ そして メソ~
3. 学会等名 長崎県工業技術センターシミュレーション技術研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 崎山陽呂斗, 西山誠悟, 奥村哲也, 林秀千人
2. 発表標題 気泡表面への不純物の吸着に関する数値シミュレーション
3. 学会等名 日本海水学会第72年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口豪, 田中匠, 奥村哲也, 林秀千人
2. 発表標題 中空系型浸透膜の配置が浸透量に及ぼす影響
3. 学会等名 日本機械学会2021年次大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------