

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02361

研究課題名(和文) バラスト水処理に利用できる電磁力型生物分離海水浄化装置の開発

研究課題名(英文) Development of electromagnetic force-type seawater-purification-unit for ballast water

研究代表者

赤澤 輝彦 (Akazawa, Teruhiko)

神戸大学・海事科学研究科・准教授

研究者番号：30346291

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：電磁力を利用した海水・油分離装置をバラスト水処理に応用するための知見を得る研究を行った。分離装置内の海水流れや、これまで注目されていなかった不純物にはたらく分離力のメカニズムにも注目した。海水流れの研究から、電極幅を小さくすることで分離性能を向上できることがわかった。また、高ローレンツ体積力下で分離空間に発生する渦による分離力低下は、分離空間内に整流板を設けることで抑制できる。しかしながら、ローレンツ体積力が小さな場合、整流板設置は分離で不利となることがわかり、この問題解決には不純物まわりの局所流れと流路内の海水流れの結合効果を考慮する必要があることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、バラスト水処理で主流となる方式は、フィルターを用いて大きな生物の物理濾過が行なわれている。バラスト水中の不純物濃度が高い場合、フィルター洗浄が頻繁に行われるため、処理が進まない問題がある。電磁力型海水・油分離装置は、整流板を用いて電極幅方向の流路幅を小さくすることで高い分離性能を得られることが分かってきており、処理量の問題を克服できればフィルターに代るデバイスとなる可能性を秘めている。

研究成果の概要(英文)：We have researched on applying electromagnetic seawater/oil separation equipment to ballast water treatment. In this study, we have focused not only on the seawater flow inside the separator, but also on the mechanism of the separation force that acts on impurities. Research on seawater flow has shown that separation performance can be improved by reducing the electrode width. In addition, vortices generated in the separation space under high Lorentz-body-force decrease the separation force. These can be suppressed by installing a straighten plate in the separation space. However, in the case that the Lorentzian body force is not large, installing the straighten plate is disadvantageous for separation. In order to solve this problem, it may be necessary to consider the coupling effect of the local flow around the impurity and the seawater flow in the channel.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：ローレンツ体積力 バラスト水浄化 海水・油分離

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

空荷の船舶は姿勢安定のため、出港地で海水を取水しバラストとして利用する。バラスト水は積荷港で船外に排出される。バラスト水には水生生物が含まれるため、世界各地で外来種による生態系の破壊などの環境問題が起きている。この問題に対応するため、2004年に国際海事機関(IMO)で、取水・排水時にバラスト水を無害化処理することを義務づけたバラスト水管理条約が採択された。その後、様々なバラスト水浄化処理技術が提案され製品化された。現在、多くの船舶で採用されている主なバラスト水管理システムは2種類である。そのどちらの方式も物理フィルターで0.05mm程度までの大きさの微生物を除去する。その後、フィルターで除去できなかったバラスト水中の微生物を、電気分解や薬剤投入により次亜塩素酸を用いて殺処理する方法と、強力な紫外線を照射し殺処理する方法である。(それ以外の手法は価格競争に勝てず徐々に市場から消えている状況である。)ただし、主となっている2つの方法は、以下の問題を抱えている。1番目として、フィルターを用いて比較的大きな生物は濾過するが、バラスト水中にゴミや生物が多量に含まれている場合、フィルターの洗浄が頻繁に必要となり処理が遅くなったり、最悪な場合には処理が全く進まなくなる。次に、微生物の中には、悪環境化で生体として生きられない場合、強固な膜で細胞体を覆い休眠状態(孢子・シスト)で生き延びようとするものがある。また、休眠卵と呼ばれる強固な殻を形成した卵を産む生物も存在しており、外界変化に強い耐性をもつ休眠卵がバラスト水に入り込む場合、2つの方法は生態を除去できず、殺処理するために、薬剤濃度を高濃度にしたり、照射紫外線量をさらに強力にしなければならず処理時間が長くなる問題がある。これらの問題を解決できる新たなバラスト水処理手法の確立が必要となっていた。

2. 研究の目的

本研究グループは電磁力を利用した海水・油分離装置を研究している。この装置の原理を以下に説明する(図1)。海水が流れるダクトに対向する1組の電極板を取り付け、海水に電流密度 J で通電を行う。また、海水の流れる方向に磁場 H を印加する。海水は導電体であるため、(フレミング左手の法則に従って)ローレンツ力と呼ばれる電磁力 F_L が働く。一方、油は不導体であるためローレンツ力を電磁場から受けず、海水に働くローレンツ力積力の反作用 F_S を受ける。分離空間の後方に仕切板を導入し、流路を分割すれば、海水の流れを汚水排出側の流れと、浄化された海水排出側の流れに分けることができる。原理を簡単に説明するため不導体の油で説明したが、海水と異物の電気伝導度さえ異なれば原理的には物質の分離は可能となる。これは質量密度の違いにより、単位体積あたりに作用する重力の差を利用した重力濾過分離とよく似ている。(ただし、研究成果で詳細については述べるが、分離力を分離対象物が海水から受ける単純な浮力として扱うべきではなく、分離対象物まわりの局所流れに起因した圧力勾配と粘性力に起因しているため、厳密には複雑な力となる。)分離に電磁力を用いるため、海水に加える力の向きや大きさを比較的簡単に制御できる利点をもつ。装置内の海水流れ方向を水平にしても、鉛直にしても分離は可能であり、装置設計の自由度が高い。また、フィルターなどの消耗品の補充や、環境に新たな物質を散布する必要がない。さらに、可動部がなく構造が極めて単純であるためメンテナンスが容易などの多くの利点があげられるユニークでクリーンな装置である。さらに、最も普及している次亜塩素酸で化学処理を行うバラスト水処理法とも非常に相性が良いと推察される。この分離装置をバラスト水処理に最適化すれば、上述した既存のバラスト水処理装置の問題点を克服することができるのではないかと考え、フィルターレスな分離運転を行うための対策法や、細かな生物を効率良く濾過ができる新たな対策法に関する知見を得ることを研究の目的とした。

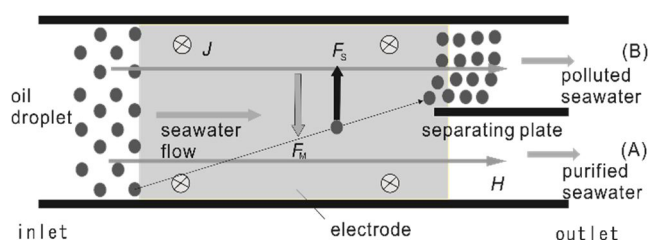


図1. 電磁力型海水・油分離器の分離原理図

3. 研究の方法

(1) 分離器に磁場を印加する超伝導磁石は極低温まで冷却されているため、磁場空間は金属製のジャケットで覆われている。このため磁場空間全体を直接光学観測することは難しい。分離器内の海水流れを正確につかめず、分離能率が上がらないため、先行研究グループは開発研究を放

置した。我々はその困難を解決するため、数値解析実験と分離実験の結果を比較・考察することで、分離器内の海水や分離対象物の流れに関する知見を得て、分離器の改良を行い性能向上を目指す手法をとる。さらに、分離装置内での海水流れだけでなく、分離対象物にはたらく分離力についても数値計算実験から詳細に考察することとした。

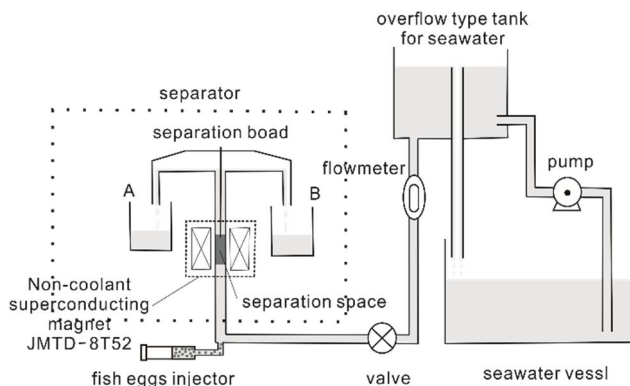


図2. 分離実験装置全体図

(2) 従来の研究では分離対象物が油であったため、海水を循環させ使用していたが、本装置は海水に通電を行うため、実験時間経過とともに海水の電気分解が進行し次亜塩素酸濃度が上昇する。このため生体の損傷が大きくなり、分離評価が難しくなる問題が生じた。図2に分離実験装置の概略図を示す。次亜塩素酸濃度を下げるために海水循環を極力避けることができるように海水貯槽タンクを大型化し、生体での分離実験が行い易いように改修を行った上で分離実験を行う。

4. 研究成果

(1) 電磁場を印加した電解液中の電荷液とは異なる電気伝導率をもつ不純物にはたらく力は Leenov ら[1]により報告されている。しかしながら、多くの実験では、彼らが示した圧力勾配に起因した体積力の値のみを電磁気的な浮力として取り込み海水から受ける分離力(反力)を見積もっている。つまり分離対象物まわりの局所流れの効果は無視している。我々のグループも本研究以前は同様の分離力評価を行っていたが、2次元モデルでは分離力が全くはたらかないことから、分離力を電磁力による単純な浮力であると仮定することへの危険性に気付いた。そこで、分離力の起源について改めて考察し直すことにした。一様な電磁場が印加された一様な電解液は、その中に一様な圧力勾配が生じ、静止している。この電解液中に1つ不導体球を置くと、不導体と電解液の電気伝導率の違いにより、電流密度分布に歪が生じる。この歪によりストークス近似を行うと不導体球まわりに図3のような局所流れが生じる。この局所流れの出現により、電磁場が電解液に作る一様な圧力勾配から見積もられる浮力よりも0.75倍になった反力を受ける。しかしながら、Leenov らが仮定したストークス近似は極めて遅い流れでしか成り立たないため、我々はナビエストークス方程式から数値計算を用いて局所流れを再現し、電解液から不導体球が受ける反力の大きさが約0.55倍になることを示した。この電磁力により電解液中の不導体球に作用する力は、これまで無視していた局所流れの効果により、小さくなることがわかり、これまでの研究では分離力を過大に評価していることが分かった。

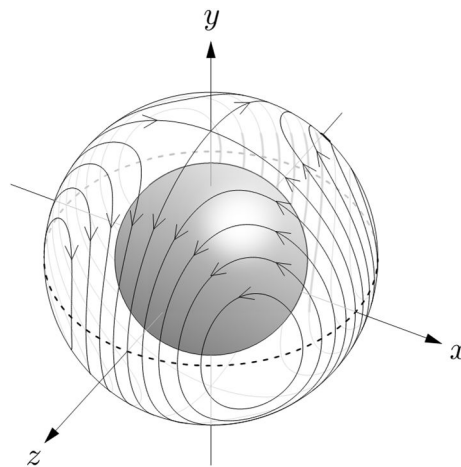


図3. 電磁場が印加された海水中の不導体球まわりに生じる局所流れ。磁場方向z軸正向き、電流方向x軸正向きである。

(2) 不導体球まわりの局所流れの効果が無視できない程度に近づいた2つの不導体球を仮定し、数値シミュレーションを行った。その結果、磁場(z軸)方向および電場(x軸)方向に球が並ぶと不導体球同士には斥力がはたらき、ローレンツ体積力がはたらく(y軸)方向に並べた場合には引力がはたらくことが分かった。不導体球まわりの局所流れは、分離力の大きさ評価だけでなく、分離性能向上に向けた考察において、無視できない効果であることが分かってきた。

(3) 上述した不導体まわりの局所流れは、図3に示すように不導体が球対称であれば生じる局所流れも球対称となるため、流体から受ける粘性応力は打ち消される。一方、分離対象物が球対称からずれた場合、生じる局所流れも歪なものになるため、圧力勾配や粘性応力が変わってくることを光学観測実験と数値計算から示した。特に磁場中での光学観測実験から、円柱形状のものが分離空間壁面に底部平面を接していた場合に分離力がはたらかにくいことが実験的にわかった。さらに数値計算からも分離力が極めて小さくなることが確かめられた。本分離法において、

特定形状の分離対象物を分離する場合には、装置壁面に対象物を接触させないような装置形状の工夫が必要であることがわかった。

(4) 同じ流路断面積を持ち、電極間距離の異なる2種類の分離器を用いて、実験的に流路断面形状による分離性能の違いを考察した。電極間距離 $D = 16\text{mm}$ 、電極幅 $W = 27\text{mm}$ の長方形流路断面をもつ分離器(#1)と、 $D = 27\text{mm}$ 、 $W = 16\text{mm}$ の断面形状をもつ分離器(#2)の2種類(ともに分離区間電極長200mm)を作製した。電極板表面での平均電流密度 i が 310A/m^2 となるように海水に通電を行った。また、分離器入口での平均海水流速 u が 0.1m/s となるようにした。海水に飛び魚の卵(粒径約2mm)を混ぜ合わせ、分離実験を行った。出口A、Bから排出された卵の個数をそれぞれ N_A 、 N_B として、分離能率を $S = N_B/(N_A+N_B)$ の式を用いて評価した。この結果を図4に示す。1Tまでの印加磁場に対し S は、#1、#2共にほぼ直線的に増加する。ただし、#2の方が分離率の増加割合は大きいことが分かる。また、#1では3T付近で S が最大値96%をとる。一方、#2では、7Tで約98%の分離を示している。以上の結果とこれまでの分離器内の海水流れの考察から、 W の小さな分離器の方が分離性能が良くなることが分かった。分離性能を高めるためには W の小さな分離器を設計することが重要であることが示唆された。また、海水に印可する F_L を上げていくと、分離は顕著に起こるが、 F_L をある値よりも大きくしても分離率が下がってくるということがわかった。これは分離空間の海水に印可される F_L の効果により、渦のような海水流れの乱れが生じ、分離性能が低下していると推測される。

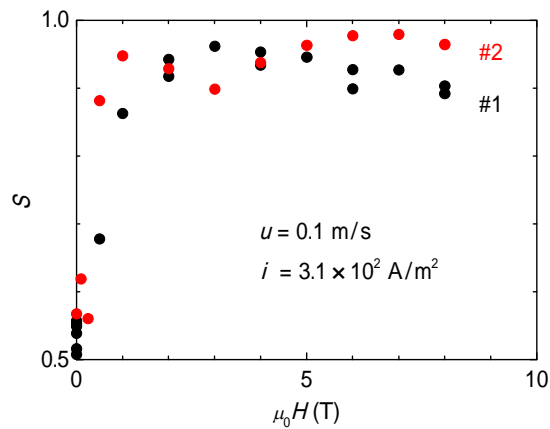


図4. 分離率の磁場依存性

この結果を図4に示す。1Tまでの印加磁場に対し S は、#1、#2共にほぼ直線的に増加する。ただし、#2の方が分離率の増加割合は大きいことが分かる。また、#1では3T付近で S が最大値96%をとる。一方、#2では、7Tで約98%の分離を示している。以上の結果とこれまでの分離器内の海水流れの考察から、 W の小さな分離器の方が分離性能が良くなることが分かった。分離性能を高めるためには W の小さな分離器を設計することが重要であることが示唆された。また、海水に印可する F_L を上げていくと、分離は顕著に起こるが、 F_L をある値よりも大きくしても分離率が下がってくるということがわかった。これは分離空間の海水に印可される F_L の効果により、渦のような海水流れの乱れが生じ、分離性能が低下していると推測される。

(5) この海水流れの乱れを分離空間に整流板を設置することで抑制出来るかどうかの知見を得るため、分離区間電極長200mm、電極間距離28mm、電極幅28mmの正方形流路断面を持つ2つの分離器を作製した。1つは、分離空間内に整流板を設けていないもの(#3)、もう1つは、分離空間に海水流れに平行で電極板に対し直交する向きに整流板を設け、整流板により分離空間の流路が分割された分離器(#4)を作製した。図5に電極板に垂直な方向から見た#4分離器の整流板の配置を示す。整流板により分離空間の流路は入口から50mmおきに2分割、3分割を繰り返す構造となっている。電極間に流れる電流を1A、分離器入口での平均海水流速を 0.1m/s として、磁場を変化させることで海水に作用する F_L を変化させ、分離器の特性を調べた。分離器から排出される海水量の偏り及び数値計算実験の結果から、分離空間内に整流板を設置すると海水流れの乱れは抑制されることは確かめられた。一方、図6に示す分離率の磁場依存性は、磁場を大きくしていくと#3では3T付近で S の上昇が止まり、その後ほぼ一定になる。一方、#4の S は磁場増大とともに8Tまで飽和すること無く単調に増加した。8Tでの S は94%であり、この値は#3の最大値よりも大きい。注目すべき点は、低磁場 ($0\text{T} < \mu_0 H < 1\text{T}$) において#3で観測された磁場増大に伴う S の急激な上昇が#4では観測されなかったことである。低磁場におけるこの S の振る舞いの違いは、整流板の設置が単純に海水流れの乱れを抑制しているだけではないことを示して

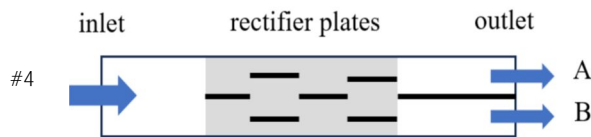


図5. #4分離器の整流板配置

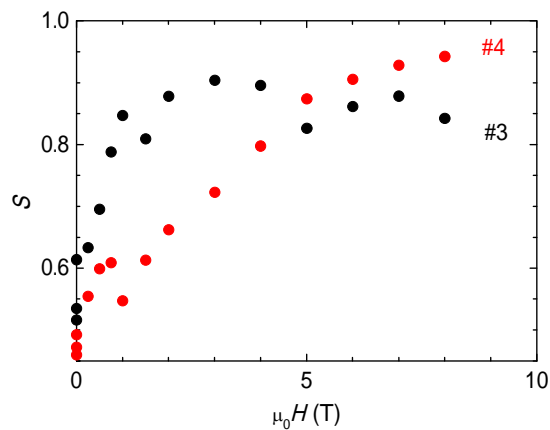


図6. 分離率の磁場依存性。

この値は#3の最大値よりも大きい。注目すべき点は、低磁場 ($0\text{T} < \mu_0 H < 1\text{T}$) において#3で観測された磁場増大に伴う S の急激な上昇が#4では観測されなかったことである。低磁場におけるこの S の振る舞いの違いは、整流板の設置が単純に海水流れの乱れを抑制しているだけではないことを示して

いる．整流板の配置により分離対象物の分離速度が数値計算から見積もられる値よりも著しく低下していることが示唆された．局所流れと分離装置内の流れが強く結合している可能性があり，分離対象物が整流板に近づいたときの詳細な海水流れを明らかに必要するがあることがわかった．

<引用文献>

[1]D.Leenov and A.Kolin J.Chem.Phys.**22** 683(1954)．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 赤澤輝彦, 岩本雄二, 梅田民樹
2. 発表標題 ローレンツ力型海水・油分離装置中の不導体（油）に働く力
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 赤澤輝彦, 東凌歩, 岩本雄二, 梅田民樹
2. 発表標題 電磁力型海水・油分離装置の流路断面形状と魚卵の分離性能
3. 学会等名 第99回 低温工学・超電導学会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 東凌歩, 赤澤輝彦, 岩本雄二, 梅田民樹
2. 発表標題 ローレンツ力型海水・油分離装置の流路断面形状と魚卵の分離性能
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 東凌歩, 赤澤輝彦, 岩本雄二, 梅田民樹
2. 発表標題 ローレンツ力型分離装置を用いたとびこの分離
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 赤澤輝彦, 岩本雄二, 梅田民樹
2. 発表標題 ローレンツ力を利用した海水・油分離装置中の不導体に作用する力
3. 学会等名 第103回低温工学・超伝導学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 橋本祐希, アモリンケンジラファエル, 浅野晃平, 白石浩貴, 後藤駿介, 赤澤輝彦, 岩本雄二, 梅田民樹
2. 発表標題 電磁力型海水・油分離装置における整流板の分離性能への影響
3. 学会等名 第106回低温工学・超伝導学会研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 赤澤輝彦, 橋本祐希, アモリンケンジラファエル, 浅野晃平, 白石浩貴, 後藤駿介, 岩本雄二, 梅田民樹
2. 発表標題 ローレンツ体積力を利用した海水・油分離器内に設置した整流板の効果
3. 学会等名 第71回 応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2024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
研究 分担者	梅田 民樹 (Umeda Tamiki) (90243336)	神戸大学・海事科学研究科・准教授 (14501)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	岩本 雄二 (Iwamoto Yuji) (80244680)	神戸大学・海事科学研究科・准教授 (14501)	
研究分担者	長松 隆 (Nagamatsu Takashi) (80314251)	神戸大学・海事科学研究科・准教授 (14501)	
研究分担者	青木 誠 (Aoki Makoto) (40796059)	お茶の水女子大学・基幹研究院・基幹研究院研究員 (12611)	
研究分担者	細井 祥子（田辺祥子） (Hosoi Shoko) (80423226)	滋賀県立大学・環境科学部・准教授 (24201)	

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