

令和元年6月3日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2018

課題番号：15K14265

研究課題名(和文)電磁力を利用した分離装置でのバラスト水無害化への挑戦

研究課題名(英文)Challenges to ballast water purification with Lorentz force type separators

研究代表者

赤澤 輝彦(Teruhiko, Akazawa)

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) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：我々は電磁力を応用した海水油分離装置の研究を行ってきた。本研究では、水生生物を分離できるように、この装置を改良した。この改良において、装置の流路形状と装置内の流れの関係について着目した。装置内の海水流れは、有限要素法を用いた数値シミュレーションと実際の分離装置を用いた実験の比較から明らかにした。この結果を基に、装置の流路形状の適正化を行った。最後に、改良した分離装置を用いて、魚卵の分離実験を行った。2Tの低磁場でも魚卵の分離が十分可能であることが分かった。このことは分離装置の更なる改良で、バラスト水浄化が行えることを強く示唆している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、バラスト水浄化法として採用されている手法では、休眠卵や孢子、シストなどの劣悪環境で生き残るものに対して十分な効果が得られない。新しい無害化技術の登場が待たれている。電磁力型分離装置は、これらの除去が可能である潜在性を持つことが本研究で示された。今後の研究により、より小さなものまで分離できるように装置を最適化できれば、新しいバラスト水浄化技術となり得る。

研究成果の概要(英文)：We have been studying seawater-oil separators using electromagnetic force. In this work, this device has been modified to remove aquatic organisms from ballast water. In the process of modification, we have focused on the relationship between the flow-path shape of the device and the seawater flow in the device. The seawater flow has been clarified from the comparison of the numerical simulation using the finite element method and the experiment using the actual separation device. Based on this result, we have improved the flow path shape. Finally, the separation experiments of fish eggs have been performed using the improved separation device. It has turned out that separation of eggs from seawater is sufficiently possible even in low magnetic fields($\sim 2T$). This strongly suggests that ballast water purification can be achieved by further improvement of the separation device.

研究分野：低温物理学

キーワード：バラスト水浄化 ローレンツ力 海水・油分離装置

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (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。バラスト水は立ち寄る港で積み荷の代わりに船外に排出される。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、バラスト水管理システムが製品化されてきている。製品化されているシステムのほとんどは、機械・物理濾過と生物・化学処理を組み合わせたハイブリッド処理機構をもつ。機械・物理濾過では、フィルター等によりミリメートル以上の大きさの生物を除去する。一方、ミリメートル以下の微生物や病原体については、化学・生物的処理で生体を死滅させ無害化する。ところが、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(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もある。シストや休眠卵を死滅させるだけの生物・化学処理を行えば、現在提案されている手法では、処理時間が非現実的なほどに長くなる。そのため、製品化されているバラスト水処理装置のほとんどは、シストや休眠卵には無対応であり、生体のみに対応した無害化処理である。休眠卵やシストの除去に対応した新たなバラスト水浄化法の確立が求められている。

2. 研究の目的

電磁力を利用した海水・油分離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ない。このため、海水に働くローレンツ力積力の反作用 F_S を油は受ける。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の違いにより作用する電磁力が異なることを分離には利用している(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濾過分離と良く似ている。)つまり、この手法は電磁力を使った物理濾過法である。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。このため、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、新たな物質を散布する必要がない。さらに構造が極めて単純で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な装置である。

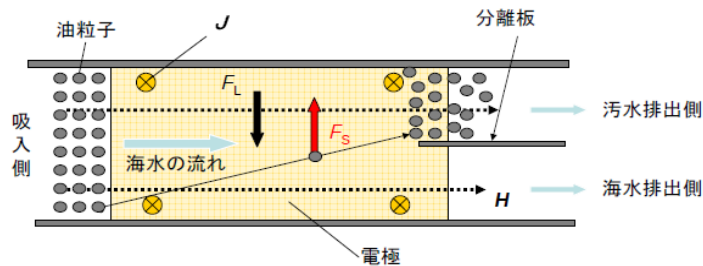


図1 分離装置の原理図

この分離装置を用いてバラスト水に潜む卵やシストの除去が可能ではないかと考えた。電磁力を用いた分離装置で水生生物のバラスト水からの除去の可能性についての知見を得ることが本研究の目的である。

3. 研究の方法

これまで海水・油分離装置として研究を行ってきたため水生生物が取り扱えるように実験システムを改良する。また、対象とする水生生物に最適な分離セルの検討を数値シミュレーションと実際の実験の比較から行う。最適と思われる分離対象を決め、分離実験を行い、分離装置の性能を評価する。

4. 研究成果

(1) 生物用分離実験システムを構築した。分離対象が細くなるため、海水流速を落としても流量が安定できるように図2のように改良したシステムを構築した。貯水用海水タンクから高所に設置した海水タンクにポンプで海水を移送する。高所の海水タンクは、超流(オーバーフロー)パイプで貯水タンクとつながっており、タンク内の海水面は一定で保たれる。分離セルに流れる海水流量は、調整バルブの開度を一定に保つことができる。実験期間中の流量が測定精度内で全く変化しないことを確認している。

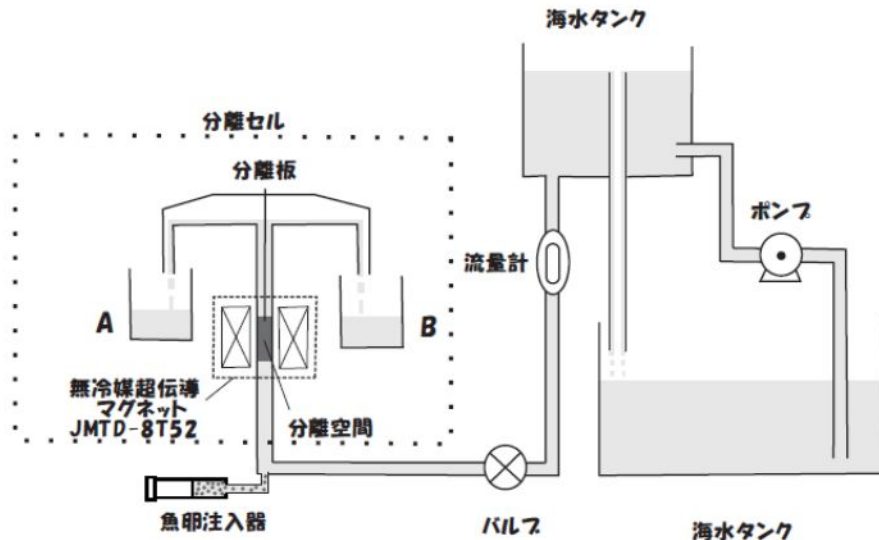


図 2 分離実験装置概略図

(2) 分離セル内の海水流れを考察するため、分離対象物を流さず海水のみ流した。海水の平均流速を 0.1m/s になるよう流用調整バルブで調整し、電極間を流れる電流が 1A となるよう定電流源を用いて制御した。分離空間に印加する磁場を大きくしていくと、分離セルの汚水排出口(A)側からの海水流量 Q_A は少なくなり、浄化海水排出口(B)側からの海水流量 Q_B は増える。これは数値シミュレーションの結果から以下のように解釈される。分離空間でローレンツ体積力が海水に作用するため、体積力の方向に新たに圧力勾配が生じる。分離空間出口で流路は A 側 B 側に分離版で仕切られるので、分離空間出口直後の B 側の圧力は A 側に比べて高くなる。一方、分離セル海水排出口では、A 側、B 側とも同じ圧力(大気圧)になる。分離版で仕切られた流路の入口と出口での圧力差は B 側の方が大きくなる。したがって、B 側流路を流れる海水の方が流速は速くなり Q_B が磁場増大とともに大きくなる。しかしながら、 Q_A と Q_B の磁場依存性について、数値シミュレーションの結果と分離装置を用いた実験結果では、定性的な振る舞いは同じであるが、大きな量的な差が生じていた(8T で Q_B を実験値と計算値で比較すると 10% 以上計算値の方が大きい)。この差の原因を様々に検討し、原因が A 側と B 側の海水流速の違いにより、排出口で A 側、B 側の海水の高さが異なることに起因していることに気づいた。海水の高さの違いを実験により計測し、数値シミュレーションの境界条件として出口側圧力に補正を行ったところ、実験値を計算値がほぼ再現することが分かり、数値シミュレーションにより分離装置内の海水流れを可視化することができるようになった。また、このことから、図 2 のように分離セル内の海水流れを下から上方向にすることは、先行研究の海水流路を横向きにした分離装置よりも、ローレンツ体積力に起因した海水排出量の偏り効果を抑制できていることもわかった。分離装置の原理からも明らかのように、排出海水の大きな偏りは、装置の分離性能を低下させることにつながるため、本研究で採用した海水流れの方向が正しいことも明らかにできた。

(3) 分離力となるローレンツ体積力を増大させたとき、 Q_A と Q_B の海水流量を抑える方法として、分離セルの流路断面形状に着目した。先行研究では流路断面が正方形の分離セルのみが用いられていたが、本研究では同じ流路断面積で様々な流路形状の分離セルを作製し実験を行うとともに、数値シミュレーションを行い比較・考察を行った。実験と数値計算から分離セルの断面形状は電極間距離が長い長方形流路断面形状を持つ方が Q_A と Q_B の海水流量の偏りを抑制できることが分かった。これは以下のように説明される。分離力となるローレンツ体積力を増大させたとき Q_A と Q_B の海水流量が偏る原因が電極幅方向に電磁力により生じる圧力勾配に起因している。流路断面積が一定であれば、電極間距離を伸ばすことは電極幅を小さくすることになる。海水に流れる電流密度を同じとすれば、電極幅が短いほど A 側、B 側の流路入口の圧力差は小さくなる。そのため、電極幅が短い長方形流路断面をもった分離セルの方が Q_A と Q_B の海水流量の偏りを小さくできる。また、海水を流れる電流密度が一定であれば、分離空間に印加する磁場は一樣であるので、分離対象物に作用する分離力は流路断面形状に依存しない。分離対象物が分離に必要な移動距離は電極幅が短いほど小さくなるため、電極幅が短い長方形流路断面形状を持つ分離セルの方が分離対象物の移動を考えた場合でも有利であることが分かった。さらに、分離空間内の海水流れを擾乱させる要因の一つである電極板から通電により発生する気泡の観点からも、電極幅を小さくすることは、電極板面積が縮小することになり、分離効率の向上につながると考えられる。これは、電極で発生する気泡量が電極間を流れる電流値に比例するため、電流密度が同じであれば、電極板面積の小さな分離セルの方が発生する

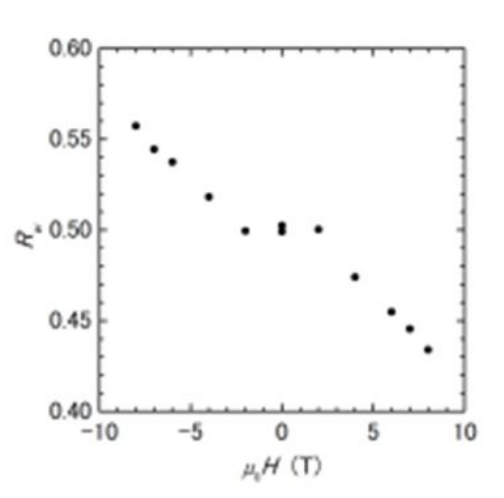


図3 R_w の磁場依存性

である。低磁場領域では、 Q_A と Q_B の海水排出流量の偏りがほとんど生じない領域があることがわかった。さらに磁場を大きくするに従い、排出量の偏りは単調に大きくなっていくことがわかるが、印加磁場 8T でも R_w は 43% を下まわらず、排水の偏り現象が流路断面形状や海水流れの方向の工夫により抑制できていることを示している。

次に、とびこの卵を分離対象物として海水に注入し、A 側の流路から出てきた卵の個数 N_A と B 側の流路から出てきた卵の個数 N_B を計測し、 $Re = N_A / (N_A + N_B)$ を用いて装置の分離能率の磁場依存性を評価したものが図 4 である。ここで、 $i = 325 \text{ A/m}^2$ 、 $u = 0.1 \text{ m/s}$ である。零磁場において Re は、ほぼ 0.5 であり卵の海水への注入は上手くできていることがわかる。2T の低磁場領域でも十分とびこの分離が可能であることが示された、また、高磁場領域では、排出海水の偏り現象により Q_A が少なくなるにもかかわらず高い分離能率を装置が示すことも明らかにできた。ミリメートルオーダーの魚卵に対しては大きな問題なくローレンツ力型分離装置で浄化できることがわかった。以上のことから、本分離装置が、バラスト水中の水生生物を除去できる潜在性を持つことを実験的に示せた。萌芽研究としての目的を達成できたと考えている。

気泡量が少なくなるためである。

(4) 以上の研究結果を基に、電極間距離 27mm、電極幅 16 mm、電極長 200mm の長方形流路断面を持つ分離セルを作製し分離実験を行った。分離対象物としては、粒径約 2mm のトビウオの卵を用いた。これは「とびこ」として市販されており容易に入手可能であること。粒径が比較的揃っていること。とびこで市販されているものは 1 粒 1 粒ばらばらに解されており、大きなむらなく海水に導入できること。また、比較的丈夫な膜で覆われており、分離性能を評価するときに、肉眼で個数を計測することが容易であるためである。

まず、とびこ用に作製した分離セルの Q_A と Q_B の海水排出流量の偏り $R_w = Q_A / (Q_A + Q_B)$ の磁場依存性について図 3 に示す。ここで、電流密度 $i = 325 \text{ A/m}^2$ 、海水平均流速 $u = 0.1 \text{ m/s}$

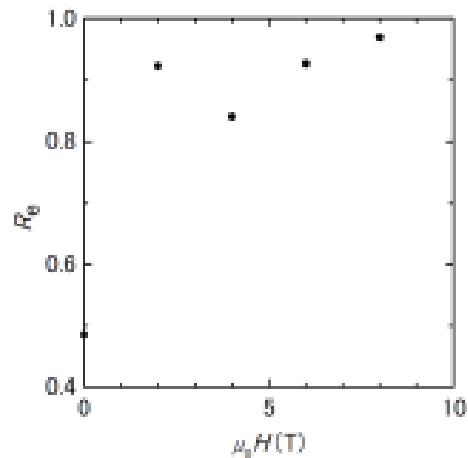


図4 Re の磁場依存性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

梅田民樹, 岩本雄二, 赤澤輝彦, ローレンツ力を利用した海水・油分離装置の数値シミュレーション, 「電磁力関連のダイナミクスシンポジウム」講演論文集, 査読無, No. 16-13, pp356-357, 2016年

〔学会発表〕(計5件)

赤澤輝彦, 上村直輝, 岩本雄二, 梅田民樹, ローレンツ力を利用した分離装置による海水からの魚卵の分離, 低温工学・超電導学会研究発表会, 2018年

赤澤輝彦, 上村直輝, 岩本雄二, 梅田民樹, ローレンツ力型海水・油分離装置による魚卵の分離, 第65回応用物理学会春季学術講演会, 2018年

梅田民樹, 岩本雄二, 赤澤輝彦, ローレンツ力を利用した海水・油分離装置の数値シミュレーション, 第28回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2016年

横尾太郎, 赤澤輝彦, 岩本雄二, 梅田民樹, ローレンツ力を利用した海水・油分離装置内の海水流れと流路断面形状の関係, 第63回応用物理学会春季学術講演会, 2016年

福島啓太, 赤澤輝彦, 岩本雄二, 梅田民樹, 磁場中を流れる海水の電気分解の数値シミュレー

ション，電気化学会第 83 回大会，2016 年

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

なし

6．研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。