

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 27 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21360431

研究課題名（和文）MHD を応用した新しい海水・油分離装置の開発

研究課題名（英文）Development of Seawater-Oil Separators Based on Magnetohydrodynamics

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

研究成果の概要（和文）：電磁流体力学（MHD）を応用した海水油分離装置は、理論的な研究がほとんど行われていなかった。このため分離性能の向上が難しい状況であった。本研究で我々は、海水が電解質であると考えたイオン（移動）モデルを提案した。分離装置の磁場中での働きを明らかにするため、このモデルの数値計算を行った。さらに、この分離装置をもつ試験プラントを作成し、実験的に理論モデルの妥当性を明らかにした。これらの結果から、分離装置の改良法について提案を行った。

研究成果の概要（英文）：There has been little theoretical work on the mechanism of a seawater-oil separator based on magnetohydrodynamics (MHD), which has constricted the development of the device. In this work, we proposed the multi-ion transport model in a magnetic field assuming that seawater is of electrolytic solution. We have carried out numerical calculation of the model to clarify how the device works in the magnetic field. Moreover, we have constructed the test plant with the device, and experimentally have confirmed the numerical model. From the results, we have proposed means for improvement of the device.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2010 年度	8,100,000	2,430,000	10,530,000
2011 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：海洋保全，環境技術，磁気分離

1. 研究開始当初の背景

日本国内に限ってみても、油による海洋汚染は、1997 年のナホトカ号事故以降も、ニュース等で度々報道されている。安全学の観点から見て、油流出事故件数を、現状以上に減らすことは難しくなっていると言わざる

を得ない。油による海洋汚染は、事故の発生を抑制する努力だけではなく、漏洩した油回収技術が重要視されている。

油回収の主な形態は、特殊なポンプなどによって漏洩した油を吸引し、フィルター等を使って物理・化学的に回収する方法である。

オイルフェンス中の油のように、海水と油の比重差が大きく、両者が分離して存在するような場合、この方法で効率よく油を回収できる。一方、漏洩した油が、長時間、風や海流で拡散された場合には、揮発成分が抜けるため油は海水を取り込み、褐色のねばねばしたエマルジョンを形成する。このような油の回収には、この方法が向いていない。なぜなら、エマルジョンを形成した油粒子と海水の密度の差がほとんど無いため、浮力による海水と油の分離は困難となり、油と同時に大量の海水を回収してしまう。さらに、フィルターを用いてエマルジョンを形成した油分子と海水を分離しようとしても、粘性が高くフィルターがすぐに目詰まりを起こすからだ。

エマルジョンを形成した油粒子による汚染に対しては、中和剤と呼ばれる化学物質を用いて、ナノメートルオーダーまで油粒子を微細化し、広範囲に拡散・希釈する方法がとられる。しかしながら、中和剤は、それ自身が非常に毒性の高い物質である。さらに、原油や船舶燃料となる油には、微生物が分解しないベンゼン基を持つ油の成分が多量に含まれる。全く油を回収しないこの方法は環境負荷が大きいと言わざるを得ない。最近では、油と結合する磁性粉を散布し、強力な超伝導マグネットを用いて磁性粉ごと油を回収する方法も考案されている。しかしながら、散布する磁性粉は莫大な量になる上、広範囲に拡散した磁性粉を全て回収することは困難である。また、超伝導マグネットに付着した物質を定期的に取り除かなくてはならないため、連続運転が不得意であり、処理能力を上げることも難しい。

我々のグループが研究課題として取り組んだ「MHD を応用した海水・油分離装置」は、化学物質を環境に散布する必要がない。また、分離法の原理から、海洋汚染で最も問題となっているエマルジョンを形成した油粒子に対して有効な方法であると考えられる。さらに、構造が簡単であることから、原理的にはメンテナンスが簡便で、連続運転が可能であることが予想される。このような優れた特徴をもつ分離装置である。この分離技術が実用化できれば、海水浄化の画期的な発明となると考えられる。

2. 研究の目的

図 1 は MHD 分離装置の概念図を示している。海水と油の混ざった汚水は、吸入ダクトから分離装置内に入る。海水の流れと同一方向に磁場 B を印加し、 B と垂直な方向に(紙面手前から奥に向かって)電流 J を流す。このときフレミング左手の法則により、海水には上から下に向かって力 F_L が作用する。一方、油粒子は電気が流れないため電磁場から力

を受けない。(このときの油粒子の状況は、水中に存在する泡の状況と似ている。水は密度が高いため下向きに強い重力を受けるが、泡は極めて密度が低いため作用する重力はほとんど無視できる。このとき泡は、水の受ける重力の反作用で水面に向かって進むことになる。この反作用は浮力と呼ばれる。)したがって、力 F_L を受ける海水から、油粒子は反作用 F_R を受けることになる。分離力 F_S は、 F_L と逆向きなので、油粒子は下から上に向かって移動しはじめる。十分長い区間で海水に力を作用させれば、汚水排出ダクト側に全ての油粒子を移動させることができる。言い換えれば、油で汚染された海水から、MHD を応用することで綺麗な海水を取り出すことが出来る。

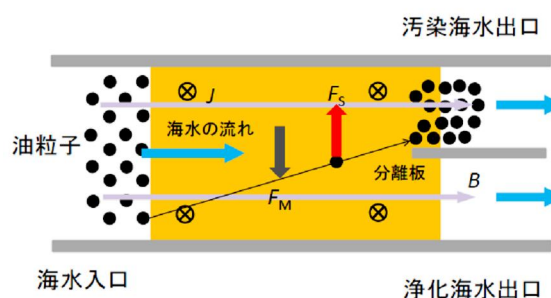


図 1. MHD 分離装置の原理図

しかしながら、この分離装置は実験的に分離が可能であるという報告がなされただけで、分離装置に関する理論的考察はほとんど行われていなかった。分離特性を上げるためには、この分離装置内での海水や油粒子の振る舞いを扱える理論的な研究が必要である。そこで本研究は、理論的な考察が行える数値計算モデルを提案することにした。また、この数値モデルの妥当性を実験的に検証した。

さらに、実際の分離装置は、超伝導磁石内にあるため、分離装置内の様子を詳細に光学観測することは困難であるが、この計算モデルを基にして、分離装置の問題点を明らかにし、問題点の解決法を考察する。これらのプロセスにより分離装置を改良することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) 従来の研究で行われていた MHD モデルの手法は、海水を電気伝導率の低い液体金属と考え、理論計算が行われている。したがって、電流は、電場ドリフト電流と磁場ドリフト電流の 2 つを考えている。ところが、海水では、電極付近で電気分解が起きることにより、電流が海水を流れている。つまり、イオンの濃

度差に起因した拡散電流が電流成分として存在する。特に、通常の電気分解では、拡散電流が通電現象の最も支配的な成分であることが知られている。従来のMHDモデルでは拡散電流を取り扱っていないため、電気分解現象を正確に取り扱える計算モデルが必要である。そこで、海水を、電気伝導を担うイオンが流体である水（溶質）に溶けた電解質と考え、ミクロな視点に立ったイオン（移動）モデルを構築する。

(2)分離実験装置の基礎特性に関して報告されているものは少ない。そのため、試験のプラントを作成し、実験的にも分離装置の基礎特性を計測するとともに、分離性能向上の障害となる問題点を明らかにする。

(3)作成した分離実験用の試験プラントから得られる分離装置の基礎特性パラメータを計算モデルと比較し、計算モデルの妥当性について評価する。特に、分離装置の分離能力に大きく関与すると考えられる分離装置内の海水の流れについては、本研究以前では全く明らかにされておらず、妥当な計算モデルを用いて詳細を明らかにすることが有効でると考えられる。

(4)海水に油滴が混ざった場合について、数値計算を行い、分離装置の基礎特性が流路形状によりどのように変化するかを明らかにする。また、この計算結果から、分離装置の効率を上げるために必要な知見を得る。

4. 研究成果

(1)海水の流動的性質は、溶質である水を流体として扱い、ナビエ・ストークス方程式を基に計算する。一方、溶媒であるイオンの動きは、ネルンスト・プランク方程式を用いる。これらの方程式を連立し、有限要素法により数値的に解くという手法が、平行電極板を流れる海水の電気分解において J. Lu らにより提案されていた。彼らのモデルは、2次元の計算モデルであるため、磁場効果を入れるには3次元モデルを作成する必要がある。このため本研究では、まず J. Lu らのモデルを3次元に拡張した。

また、海水流量が少ない場合、電極板を海水が流れるに従い電気分解が進行する。このため、電極間に生じる電極分布が均一でなくなり、入口から出口に向かい、拡散電流が徐々に大きくなるのが数値計算よりわかった。このことは、従来用いられたMHDモデルからでは説明できず、装置内の海水の流れを解明する上で、イオンモデルの導入が不可欠であることを示唆している。海水流量が大きい場合は、電気分解が進行する前に新たな

海水が供給される。そのため、MHDモデルとイオンモデルの差はほとんどなくなることもわかった。

(2) (1)で2次元から3次元へ拡張したイオンモデルが妥当かどうかを判断するため、平行平板電極を持ち、断面が1辺10cmの正方形となる海水流路を作成し、検証実験を行った。電極板で計測した電流値と電圧の実測値は、イオンモデルから見積もられる理論値とほぼ等しいことがわかった。また、実験より測定された電圧値は、電極板の材質、形状、表面荒さ等で若干の変化が見られることも確かめた。このことは、電極の種類により、電極表面に形成される電気二重層の状態が異なることが原因と考えられる。現段階では電気二重層の状態を正確に取り扱うことは難しく、数値計算モデルと実験を比較する場合、測定した電圧値だけで妥当性を評価することは非常に難しいことがわかった。

(3)分離装置の電極材として最適と考えられるものをいくつか候補に挙げ、実験的に検証を行った。最終的にカーボン板と、チタン板に白金メッキしたものがよいことがわかった。カーボン板は、非常に高価なものを使用しないと電極が気泡発生により傷つき、長時間の運転で漏水が見られることがあることがわかった。また、カーボン板は精密加工も難しい。一方、チタン板の場合、白金メッキをきっちりしなくても、チタン板に白金をスパッタリングすることで長時間の電気分解に耐えられる電極板が容易に自作できることがわかった。このため、白金のスパッタリングを施したチタン板を電極材として以降の実験では使用することにした。

(4)磁場を上げることで海水に作用できるローレンツ力は大きくなる。このため、分離装置には超伝導磁石の使用が不可欠である。磁場中実験を行うに当たっての超伝導マグネットの仕様を考察した。実験装置は、分離原理から明らかなように層流領域で使用することが望ましい。装置を大型化しようとした場合、単に流路断面を大きくすると、レイノルズ数の関係より、流速が上げられない。従って、処理速度向上のためには、流路を大きくするのではなく、断面積が10cm²程度の流路を複数設け、並列処理する方が良いとの結論になった。このため本研究では、室温ボア径2インチの超伝導マグネットを試験プラント用に使用することを決めた。諸条件を満たすように超伝導磁石の仕様を決め、超伝導磁石の発注を行った。以降、磁場中実験はこの超伝導磁石で行った。

(5)本研究以前の先行研究としては、武田ら

による分離実験の報告がある。武田らは、内径1インチの室温ボアを持つ超伝導磁石を用い、海水流路を水平方向にした分離装置で分離実験を行っていた。我々もこの報告を参考に水平流路を持つ分離装置を作成した。分離装置では、電極で電気分解が起きるため、水素ガスや塩素ガスの気泡が発生する。水平方向の海水流路をもつ分離装置の場合、これらの気泡は集結し大きな泡の塊となって電極付近に留まる。海水の流れだけでは完全に排出できないため、分離装置内を流れる電流値が不安定になることがわかった。また、分離装置の流路を水平方向から約 5° 傾けることで流路から大きな気泡の塊は移動し始めることがわかった。分離装置内を流れる電流値が長時間安定するためには、さらに海水流路に勾配をつけなければならず、超伝導磁石の設置が容易ではなくなるということが明らかとなった。

さらに、直径2mmのポリプロピレン製の球状模擬粒子を用いた実験では、重量分率が約8%を超えると通電が難しくなる現象が観測された。これは気泡が不導体である模擬粒子を結合させ、より大きな不導体を形成するため電流が流路を流れにくくなるためと考えられる。

以上の2つの問題を改善するため、海水流路を鉛直方向に変更することを決定した。このため試験プラントをほとんど作り直すことになった。海水流路を垂直方向に変更することで、陰極側で発生する水素ガスは、お互いに結合し大きな気泡に成長することなく、小さな泡のまま分離装置外に排出されることが確認出来た。塩素ガスについても、気泡の成長はみられたが、水平流路に比べ気泡の体積は小さく容易に分離装置外に排出されることを観測した。さらに、重量分率10%のポリプロピレン模擬粒子が入った海水を用いても長い時間にわたって分離装置の電流が安定することも確認出来た。

以上の実験から、水平流路では長時間の分離実験は不可能であり、武田らの水平流路分離装置の報告は、短時間の運転に限ったものではないかと考えられることを指摘した。垂直流路をもつ分離装置が長時間運転にふさわしいことを実験的に示せたと考えている。

(6) (1)で考案した3次元のイオンモデルに、各イオンに作用するローレンツ力の効果を取り入れ、磁場中での海水の電気分解現象を取り扱えるイオンモデル(磁場に拡張したイオンモデル)を提案した。

この計算モデルを用いて、今までわかっていなかった分離装置内の海水の流れを評価した。その結果、電極間では、海水の流れに垂直な方向にローレンツ力が発生し、圧力勾配が生じる。この圧力勾配によって、海水の

流れは曲げられることがわかった。また、この海水流れの蛇行は、ローレンツ力の増大とともに顕著になり、最終的には電極板の入口および出口付近に渦が発生することが明らかになった。この様子を図2に示す。零磁場で海水にローレンツ力が働いてない状態では、汚水側と浄化側の出口から排出される海水流量は等しい。ローレンツ力増大とともに、海水流れの曲がりや渦が流路内に発生するため、汚水側を流れる海水は徐々に少なくなる。一方、浄水出口より排出される海水流量は大きくなる。

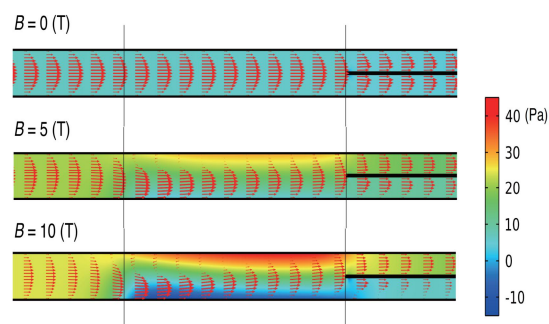


図2. 海水流速0.1m/s, 電極間電流1Aにおける分離装置内の海水の流れと圧力の磁場依存性

この数値計算の妥当性を確かめるため、数値計算と同じ形状をした分離装置を作成し、浄化側と汚水側の海水流量の比を計測し、理論値との比較を行った。ローレンツ力の小さな(海水流れが僅かに流路を蛇行する)領域では、実験値と計算値がほぼ一致することがわかった。また、ローレンツ力が大きくなり、流路内に渦が発生する領域でも、実験値と計算値の差は約5%であることがわかった。これらのことから、我々の提案する磁場に拡張した3次元イオンモデルは、分離装置内の海水の流れをほぼ再現できると考えられる。

(7) 汚水側と浄水側の海水流路の比率は、分離板よりも下流側にある配管流路形状にも著しく影響されることが、実験および数値計算からわかった。また、分離板より下流の流路形状は、汚水側・浄化側の海水流量の比だけに寄与するのではなく、分離が進行している領域での海水の流れに対しても大きな変化をもたらすことがわかった。これらのことから、分離装置の最適化には、分離装置部分だけでなく、分離プラント全体の形状を考慮する必要があることがわかった。

(8) ローレンツ力により電極板入り口付近に発生する渦は、流路の有効断面積を小さくする。また、この渦はかなり後方まで海水を攪拌していると考えられる。整流板を用いるこ

とでこの渦を消すことは、難しいことがわかった。そこで、電極の形状を変化させ、ローレンツ力が海水に作用する領域を変化させることで、渦が低減できるかどうかについて現在、数値計算を行っている。この計算から入口の渦の解消に関する知見が得られると考えている。

(9) 電気分解が起こるため、(6)の計算モデルを用いて見積もられたイオン濃度は、電極付近で、数%程度高くなることがわかった。このため、電極付近に拡散電流が支配的な領域が出現する。有限要素法で数値計算を行う場合には、このことを念頭に置き、電気分解反応によるイオン濃度の差が取り込めるよう、メッシュの切り方を工夫する必要があることもわかった。

また、分離装置の運転で現在想定している海水流量では、電気分解によりイオン濃度が変化する前に新しい海水が供給される状況になることがわかった。このため、拡散電流が支配的な領域は、電極付近の僅かな領域であることも明らかとなった。そこで、従来から使われているMHDモデルを用いて、海水の流れを計算した。この結果、ほぼイオンモデルと同様の海水の流れが得られた。計算に用いる物理パラメータは、MHDモデルの方が少ないため、計算の速度はMHDモデルの方が速い。そこで、油粒子が海水に混ざった場合の数値計算については、MHDモデルを用いて簡略な計算を行い、考察を行なった。MHDモデルを用いて分離特性を測定した結果、 $30\mu\text{m}$ 程度の油粒子までは、十分な分離性能があることがわかった。これより小さな油粒子についても分離区間を長くすることで分離は可能であることが数値計算的に明らかとなった。さらに、仕切り板の位置を変化させることで分離特性が大きく変化することも報告した。分離板を電極板と重なるように設置することで、排出される海水の浄化度は上がる。一方、浄化された海水の排出量はこのとき少なくなる。排出される海水の純度と処理能力が複雑に変化するため、様々なパターンの分離装置の形状で数値計算を行い、最適な分離形状を今後探る必要があることがわかった。

(10) イオンモデルを用いて計算される流れ場を基に、球状の模擬粒子を分離装置入口から入れた場合の粒子軌跡について数値計算を行った。その結果、粒子直径が $100\mu\text{m}$ のものに対して、この分離法は十分な分離性能があることがわかった(図3)。

一方、理論的に有効であると考えられる直径 $100\mu\text{m}$ の模擬粒子を用いて分離実験を行っても上手く分離できないことがわかった。この実験と理論の違いは、数値計算の結果から、模擬粒子が通電領域の壁面に模擬粒子が集

まり、そこで停滞することが原因であると考えられる。したがって、通電領域の壁面に集まる油粒子を回収することができれば、装置の性能の著しい向上が望めると考えられる。現在、壁面に集まった模擬粒子の回収方法について検討中である。

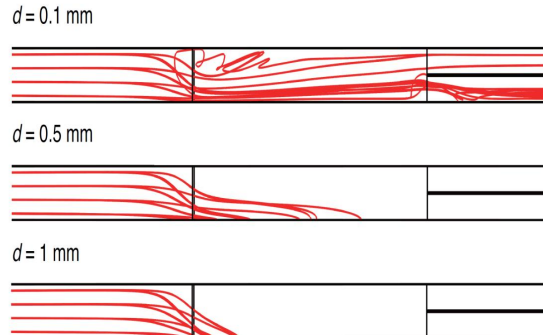


図3. 磁場 10T, 電極間電流 1A, 海水流速 0.1m/sにおける油粒子の軌跡

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 Y.Nakamoto, T.Akazawa, Y. Iwamoto, T. Umeda, Numerical simulation of seawater flows and electrolysis in a MHD-based oil separator, Proceedings of Techno-Ocean 2010, アブストラクト審査有, CD-ROM.

[学会発表] (計5件)

- ① 赤澤 輝彦, 岩本 雄二, 梅田 民樹, ローレンツ体積力を利用した海水・油分離装置の最適形状に関する研究, 2011年度秋季低温工学・超電導学会, 2011年11月9日, 石川県金沢市金沢歌劇座
- ② 赤澤 輝彦, 岩本 雄二, 梅田 民樹, ローレンツ体積力を利用した海水・油分離装置内での海水の流れに関する研究, 2011年春季低温工学・超電導学会, 2011年5月18日, 茨城県つくば市材料研究機構研究交流センター
- ③ 赤澤 輝彦, 中本 雄也, 岩本 雄二, 梅田 民樹, MHD型海水・油分離装置内の海水の流れと電気分解に関する研究, 2010年度秋季低温工学・超電導学, 2010年12月1日, 鹿児島県鹿児島市かごしま県民交流センター
- ④ Y.Nakamoto, T.Akazawa, Y. Iwamoto, T.

Umeda, Numerical simulation of seawater flows and electrolysis in a MHD-based oil separator, Techno - Ocean 2010, 2010年10月14日, 兵庫県神戸市国際会議場

- ⑤ 赤澤 輝彦, 大塚 康平, 岩本 雄二, 大角和也, 中本 雄也, 梅田 民樹, 平行平板電極中を流れる海水の電気分, 2009年秋季低温工学・超電導学, 2009年11月19日, 岡山県岡山市岡山大学創立50周年記念館

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

梅田 民樹 (UMEDA TAMIKI)
神戸大学・海事科学研究科・准教授
研究者番号：90243336

岩本 雄二 (IWAMOTO YUJI)
神戸大学・海事科学研究科・准教授
研究者番号：80244680