

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630456

研究課題名(和文) 海水中のマイクロバブルの電場・磁場による流動制御

研究課題名(英文) Control of the flow of microbubbles in seawater using electromagnetic fields

研究代表者

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

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)：マイクロバブルは直径が概ね50マイクロメートル以下の気泡で、海水浄化装置への応用の期待から近年注目されている。電磁場を用いたマイクロバブルの制御の可能性を検討するため、磁場中で流動する海水の電気分解実験を行い海水と電極で発生した気泡の動きを調べるとともに、イオン輸送モデル及び気液2相流モデルを用いた数値シミュレーションを行った。その結果、ローレンツ体積力を受け海水と気泡の流動が変化すること、気泡と海水とはローレンツ体積力の働きに違いがあり、そのことが海水と気泡の運動に影響を与えることが分かった。しかし、後者の効果は小さな気泡ではそれほど大きくはないと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Microbubbles are bubbles smaller than about 50 micrometers in diameter. They have attracted attention in recent years due to promising applications in seawater treatment devices. To investigate the possibility of using electromagnetic fields for controlling the flow of microbubbles in seawater, we performed experiments of seawater electrolysis under a magnetic field to analyze the behaviors of seawater and the bubbles generated at the electrodes, and carried out numerical simulations using a multi-ion transport model and a gas-liquid two-phase flow model. The results show that the Lorentz body force distorts the convection flow of seawater and floating bubbles, and that seawater and bubbles receive different magnitude of the Lorentz body force, which affects the flow of bubbles in the seawater. However, the latter effect may not be so large for small-sized bubbles.

研究分野：物理学

キーワード：海水浄化 マイクロバブル 電気分解 ローレンツ力 数値シミュレーション

### 1. 研究開始当初の背景

マイクロバブルは、発生時の直径が  $50\mu\text{m}$  以下の気泡である。比較的長時間水中に滞在する、海水などの電解質中では表面電位（ゼータ電位）を持つ、自己圧壊によりフリーラジカルを発生するなど通常の気泡とは異なる性質を持っている。また、浮遊物への付着による凝集効果も考えられる。近年これらの性質を利用して船舶や工場などからの汚染排水の浄化や殺菌を行う装置の開発や研究が盛んに行われている。マイクロバブルは、加圧溶解、キャビテーション、電気分解など様々な方法で発生させることができるが、一旦発生したマイクロバブルの動きを重力以外の方法で制御・回収することが難しく、有効な利用法を拓げていく上で問題点の一つとなっている。

我々はこれまでに電磁場を利用して海水から油滴を分離し、海水を浄化する研究を進めてきた。磁場中で海水に通電を行うと、磁場と電流密度に応じて海水にローレンツ体積力が働く。一方、油滴には電流が流れずローレンツ体積力が働かないため、この差を利用すれば海水から油滴を分離できる。実際、実験的・理論的研究により原理的には直径数  $10$  マイクロメートル程度の油滴を分離することが可能であることが明らかになっている。海水中の気泡についても電流が流れないため、同様の効果が働くと考えられる。この効果を利用し、マイクロバブルの流動制御ができるようになれば、油滴の除去だけでなく、気泡の浄化作用を利用した新しい装置の開発につながる可能性がある。

しかし、マイクロバブルは油滴と異なり、海水の電気分解自体で発生する、海水中で回りのイオン濃度に応じたゼータ電位を持つ、浮力により上昇し海水の対流を引き起こす、といった特徴があり、油滴とはかなり異なる挙動を示すことが予想される。そこで、マイクロバブルに焦点を当て、その運動を調べる研究が必要となっている。

### 2. 研究の目的

強磁場中で海水の電気分解実験を行い、海水の流れと発生した気泡の挙動を観測する。また、電気分解についてのイオン輸送モデルと気泡流に関する流体力学を用いた数値計算により、海水と気泡に対するローレンツ体積力の作用を解明する。これらを通じて、電磁場によるマイクロバブルの制御のための方法論を探ることを目的とする。

### 3. 研究の方法

研究は大きく実験研究と理論研究の2つからなる。実験研究としては、(1)磁場が印加可能で気泡の観測が容易な形状の電解セルを作成し、非磁性顕微鏡を組み合わせることで、電磁場が印加された海水中の気泡の挙動を調べ、気泡に関する基礎パラメータを評価する。(2)ローレンツ体積力による海水・

油分離装置は、ダクトに海水を流し、流れと垂直に電流を流し平行に磁場を印加することで、連続的に油水分離する装置である(図1)。この装置を作成・動作させて海水の流れを観測することで油水分離や気泡の制御に適した諸条件を調べるとともに、電極で発生した気泡の挙動を観測する。

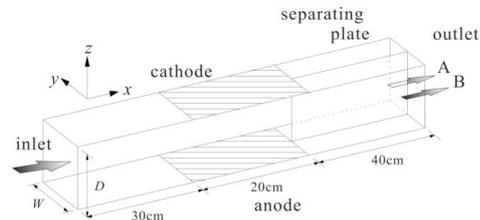


図1：海水・油分離装置の概念図

理論研究としては、(1)磁場中の電解セル、または図1の様なダクト中を流れる海水を複数のイオンを含む溶液と考え、それぞれの濃度の時間空間的变化を、磁場の効果を考慮した Nernst-Planck 方程式を用いて計算する。(2)気泡を含む海水を気液2相流として扱い、重力とローレンツ体積力を考慮することで、磁場中の電解セル、またはダクト中を流れる海水の流れと気泡の流れの数値シミュレーションを行うことで、気泡の流動制御の可能性を探る。

### 4. 研究成果

(1)基礎的データの収集を目的とし、アクリル板で作成した直方体の電解セルで、磁場なしでの食塩水の電気分解を行い、発生した気泡を顕微鏡で観察するとともに、動画の画像解析を行い気泡の上昇速度を測定した(図2)。その結果、この装置で陰極側で発生す

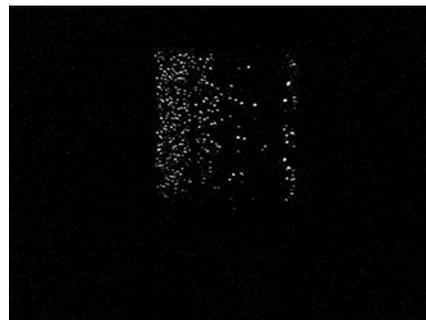


図2：電極で発生した気泡

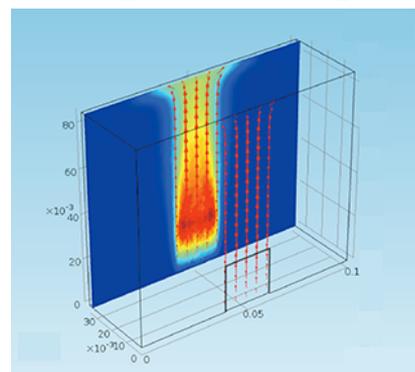


図3：数値シミュレーション結果

る水素の気泡直径は、当初想定したものよりやや大きく50~100マイクロメートルであることが分かった。また、2相流モデルを用い、電気分解時の海水と気泡の流動の数値シミュレーションを行い、実験結果と対応する結果が得られた(図3)。

(2) 2相流モデルを用い、ビーカーに電極板を挿入して海水の電気分解を行ったときの海水の対流と気泡の挙動の数値シミュレーションを行い、観測結果とほぼ一致する結果を得た。また、鉛直方向に0.05Tの磁場を印加した場合の数値シミュレーションを行い、海水の流れと気泡の動きが磁場の影響を受けることを明らかにした(図4)。このことは磁場による気泡の制御の可能性を示している。

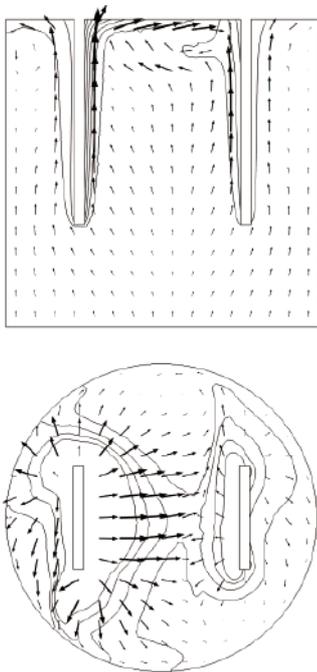


図4：磁場中の海水の電気分解の数値シミュレーション結果

(3) 図1の装置では、ローレンツ体積力のためダクト内を流れる海水が蛇行し、そのことが分離性能に影響する。その様子を調べるため、形状を変えたダクトを垂直に設置した図5の装置を作成し、2つの流出口からの流量を調べる実験を行った。その結果、流量の偏りは分離空間での単位体積あたりのローレンツ力とともに増加するが、ダクト断面の形状にも依存することが分かった(図6)。

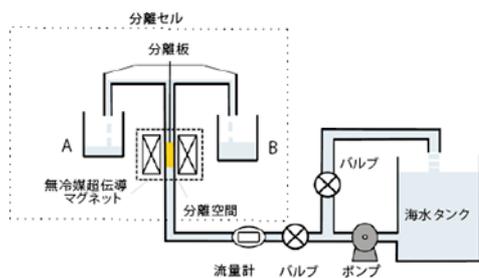


図5：海水・油分離装置の配置図

これらの結果は、数値シミュレーションでも定性的に説明できた。

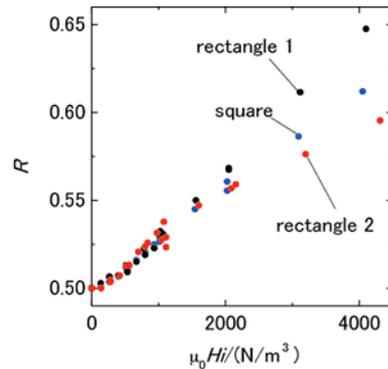


図6：ダクト流出口での流量比

(4) イオン輸送モデルを用い、ダクト内を流れる海水の磁場中の電気分解の数値シミュレーションを行い、イオン分布、電流の流れ、及びローレンツ力による海水の蛇行の様子を調べた。その結果、電極近くで流れが淀んでいる部分でイオン濃度の変化が大きく、そのことが海水の速度分布に影響を与えていることが分かった。このことは、磁場・電場中の海水の流れを知るためにはイオンモデルが必要となる場合があることを示している。

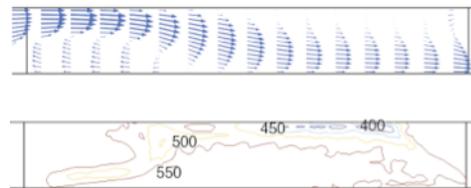


図7：イオン輸送モデルを用いた磁場中の電気分解の数値シミュレーション

(5) 気液2相流モデルを用い、図5に示した装置で海水の流れと気泡の挙動の数値シミュレーションを行った。その結果、気泡径がある程度大きければ、電極で発生した気泡が海水の蛇行に伴って流動するとともに、ロ

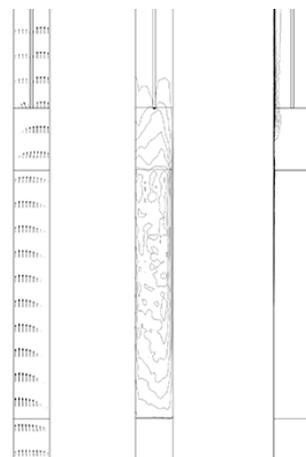


図8：ダクト内の気泡の発生と流動の数値シミュレーション

ローレンツ体積力の影響で分離し、流出口間で気泡密度に顕著な差が生じることが分かった(図8)。しかし、実際に実験で用いた装置で発生する直径50~100マイクロメートルの気泡では、密度差は小さく実験的観測は困難であることが予想される。実際、図5の装置では顕著な差は見られなかった。

#### 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 0件)

[学会発表] (計 6件)

① 永友勇氣、福田航平、赤澤輝彦、岩本雄二、梅田民樹、磁場中での海水の電気分解におけるマイクロバブルの挙動の数値シミュレーション、2014年春季低温工学・超電導学会、2014年(平成26年)5月26日、タワーホール船堀(東京都)

② 赤澤輝彦、岩田祐樹、永友勇氣、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に関する研究、2014年春季低温工学・超電導学会、2014年(平成26年)5月26日、タワーホール船堀(東京)

③ 赤澤輝彦、電磁力を利用した海水・油分離装置の開発の現状と問題点、第3回低温科学広島セミナー、2014年(平成26年)11月29日、広島大学東千田キャンパス(広島市)

④ 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回応用物理学会春期学術講演会、2016年(平成28年)3月22日、東京工業大学大岡山キャンパス(東京都)

⑤ 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(平成28年)3月29日、大阪大学吹田キャンパス(大阪府)

⑥ 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(平成28年)5月20日、慶應義塾大学日吉キャンパス(神奈川県)

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

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

##### (2) 研究分担者

赤澤 輝彦 (AKAZAWA, Teruhiko)  
神戸大学・大学院海事科学研究科・准教授  
研究者番号：30346291

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