



超伝導強磁場下での気液界面の変形よりみたNaCl I 溶液の磁気特性の研究

李, 勝煥

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2003-09-30

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

神戸商船大学甲0037

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/DS100037>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



論 文 要 旨

* 論文内容の要旨を以下確認する。

審査委員長 武田 実 

(課程博士)

申 請 者	李 勝煥
専 攻	海洋機械エネルギー工学
指 導 教 官	武田 実

論 文 題 目 : 超伝導強磁場下での気液界面の変形よりみた NaCl 溶液の磁気特性の研究

要 旨

我々は地球表面の70%を占めている海洋への強磁場応用を目指し、最大12Tの強磁場を用いて超伝導電磁推進や海流電磁流体(Magnetohydrodynamics、MHD)発電などに関する研究を行ってきた。これらの研究において、電気分解に伴って発生する気泡が原因となって生じる推進効率や発電効率の低下の問題等がクローズアップされている。しかし、強磁場下で海水中に発生する気泡(気液界面)の挙動はほとんど分かっておらず、その気泡が推進効率等を低下させるメカニズムもまだ解明されていない。

最近、強磁場中においてNaCl溶液の気液界面が著しく変形されることが分かってきた。NaCl溶液は海水の主要な成分を構成しているため、この気液界面の変形は強磁場下での海水中の気泡の挙動を解明する上で注目すべき現象である。NaCl溶液の気液界面の変形現象は、NaCl溶液と空気の境界面に働く磁氣的応力が原因となって生じると考えられている。しかし、NaCl溶液に対する気液界面の変形のメカニズムについて、その濃度依存性に着目した系統的な実験やその理論的な説明は行われていない。さらに、静止状態だけでなく、流動状態のNaCl溶液に対する気液界面の変形現象もほとんど調べられていない。

そこで本研究では、強磁場下でのNaCl溶液の気液界面の変形に対する濃度依存性及び流速依存性を明らかにすることを目的とした。初めに、磁場下でNaCl溶液の磁化率を測定すると共に、比較的単純な静止している状態でのNaCl溶液のイオン濃度の違いによる気液界面の変形を調べ、理論的考察を加えた。次に、流れを伴う場合の流速及びイオン濃度による影響を調べた上で、気液界面の変形を利用して流れを制御する新しい応用の可能性を検討した。これらの研究によって得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 気液界面の変形に対する定量的な解析を行うために、SQUID磁化測定装置を用いて、 $25 \pm 0.05^\circ\text{C}$ 、6Tまでの磁場下でNaCl溶液の磁化率を精度よく測定した。そして、NaCl濃度に依存する蒸気圧の値より見積もった磁化率の計算値と測定値を比較した。その結果、測定値は計算値とほぼ一致した。飽和濃度以内でのNaCl濃度の増加による磁化率 χ の減少量は10%程度で

あり、密度 ρ の増加量約 17% に比べて小さかった。NaCl 溶液の気液界面の変形量は χ/ρ に比例するため、その変形量に対して磁化率の濃度依存性は無視できないことが分かった。

- (2) 6T までの印加磁場で静止している状態での NaCl 溶液の気液界面の変形を観測した。その結果、気液界面の変形量は磁場の 2 乗に比例して増大し、NaCl 濃度の増加と共に減少した。特に、後者の減少は 6T で 20% の濃度の増加に対して約 5% であった。得られた界面の変形量の実験値と計算値を比較したところ、水の場合は両者がよく一致した。また、NaCl 溶液の場合も 1T 以下の低い磁場下でよく一致した。しかし、磁場が強くなると NaCl 溶液の気液界面の変形量は計算値と合わなくなり、計算値より大きくなることが分かった。そこで、NaCl 溶液中では磁場によって濃度勾配が生じると仮定し、この濃度勾配による力(浸透圧による力)を考慮すれば、NaCl 溶液の気液界面の変形量に対する実験値と計算値が定量的によく一致することが分かった。従って、NaCl 溶液の気液界面は水溶液全体に作用する磁気力と濃度勾配による力(浸透圧による力)によって歪むことが明らかとなった。
- (3) 流れを伴う場合、気液界面の変形は静止している状態の界面の変形と異なり、磁場中心に対して非対称であった。また、気液界面の変形量は磁場と初期流速の増加に従い大きくなった。この変形量は一定の初期流速下で NaCl 濃度の増加と共に減少した。これらの変形量は磁気力と共に、流速の増加による界面上の圧力の降下、粘性による圧力損失、そして濃度勾配の減少の影響を受けることが明らかになった。
- (4) 最後に、NaCl 溶液の気液界面が磁場により変形を受けることを応用して、水溶液の流量の制御を試み、その流量の変化に対する流速及び濃度依存性を調べた。その結果、気液界面の変形による流量の減少は、100mL/min オーダーの流れに対して 10T で最大 23% 程度であった。この流量の変化は流速に依存したが、濃度には依存しなかった。この流量制御では、チャンバーのインレット側が水溶液で満たされた状態で制御されるので、インレット側の高さが重要なファクターとなる。

以上のことから次の結論が導かれた。

- (1) NaCl 溶液の気液界面の変形には密度だけでなく、磁化率に対する濃度の影響も考慮するべきである。
- (2) 静止している状態での気液界面の変形に対する NaCl 濃度依存性は、NaCl 溶液に作用する磁気力と濃度勾配による力(浸透圧による力)によって決められる。
- (3) 流れを伴う気液界面の変形に対する流速依存性は、流れによって生じる界面上の圧力の降下、粘性による圧力損失、そして濃度勾配の減少を考慮することによって説明できる。
- (4) チャンバーのインレット側の高さを適度を選べば、流量が 100mL/min オーダーの小さな流れを対象として、磁場による気液界面の変形を利用した NaCl 溶液の非接触流量制御が可能であると言える。

* Year of Degree Conferment 2003
* Number of Degree Conferment

Abstract of Dissertation

* I hereby confirm the following abstract of the Dissertation

Chairperson the Examination Committee Takeda Minoru

Candidate	Lee Seung-Hwan
Division	Ocean Mechanical & Energy Eng.
Academic Advisor	Takeda Minoru

Title of Dissertation : Studies on magnetic characteristics of NaCl aqueous solution from a viewpoint of the gas-liquid interface deformation by using high-field superconducting magnets

Abstract

Basic studies on electromagnetic ship thruster and seawater magnetohydrodynamics (MHD) generator, etc. by using high magnetic fields up to 12 T have been conducted, aiming at applications of high magnetic fields to a seawater system that occupies 70% of the earth surface. In these studies, some problems that lower thruster efficiency and generator efficiency caused by bubbles of electrolysis have been emphasized. However, details of the kinetic behavior of the bubbles (the gas-liquid interface) generated in seawater under a high magnetic field have not been clarified, and also the mechanism of lowering the efficiency has not yet been explained.

Recently, it has been reported that the gas-liquid interface of NaCl aqueous solution is markedly deformed in a high magnetic field. Since the NaCl solution is a main component of seawater, the gas-liquid interface deformation is an attracting phenomenon to clarify the kinetic behavior of the bubbles. The gas-liquid interface deformation of NaCl solution was considered to be caused by magnetic stress applied on the boundary surface between NaCl solution and air. However, no systematic studies on the mechanism of the gas-liquid interface deformation in terms of the NaCl concentration were carried out experimentally and theoretically. In addition, the interface deformation of NaCl solution neither under the flowing condition nor under the rest condition was examined.

The aim of this study is to elucidate the NaCl concentration dependence and flow velocity dependence on the gas-liquid interface deformation of NaCl solution under a high magnetic field. At the beginning, deformed variation with differing the NaCl concentration under the rest condition as well as the susceptibility of the NaCl solution have been measured. Then,

the theoretical consideration has been added. Next, the influence of the flow velocity and the NaCl concentration on the interface deformation under the condition of flow have been examined. In addition, the possibility of the new technique of flow control by using the gas-liquid interface deformation has been considered. The results of this study are as follows:

- (1) To make the quantitative analysis of the gas-liquid interface deformation, the susceptibility of NaCl solution was carefully measured in magnetic fields up to 6 T at $25 \pm 0.05^\circ\text{C}$ by using SQUID magnetometer. The measured value was compared with the calculated value of the susceptibility estimated from the value of vapor pressure in terms of the NaCl concentration. As a result, the measured value agreed with the calculated value. The decrease of the susceptibility χ with increasing the NaCl concentration within concentration of saturated solution was approximately 10%, and it was smaller than the increase of density ρ of approximately 17%. Taking into account that deformed variation of the gas-liquid interface of NaCl solution is proportional to χ/ρ , it was found that the concentration dependence of the susceptibility could not be disregarded.
- (2) The gas-liquid interface deformation of the NaCl solution under the rest condition was observed in magnetic fields up to 6 T. As a result, the deformed variation of the gas-liquid interface increased in proportion to the square of magnetic field and decreased gradually as NaCl concentration increased. In particular, the latter decrease was approximately 5% for a concentration of 20% increase at 6 T. When the measured value of the deformed variation was compared with the calculated value, both agreed well for the water. In the case of NaCl solution, a good agreement was satisfied in a low magnetic field below 1 T. However, when a high magnetic field was applied, it was observed that the measured value did not agree with the calculated value: The measured value was much larger than the calculated value. Considering the force of concentration gradient in NaCl solution (the force of the osmotic pressure) on the assumption that the concentration gradient was induced by magnetic field, it was found that the measured value of the deformed variation agree well with the calculated value. Therefore, the gas-liquid interface deformation of NaCl solution was determined by the magnetic force affecting the entire solution and the force of the concentration gradient (the force of the osmotic pressure).
- (3) Under the condition of flow, the gas-liquid interface deformation was asymmetrical for the magnetic center unlike the interface deformation under the rest condition. Deformed variation of the gas-liquid interface increased with increasing initial velocity and magnetic field. This deformed variation at a fixed initial velocity decreased as NaCl concentration increase. The deformed variation was clarified to be due to the influence of the pressure drop at the interface by increasing the flow velocity, the pressure loss by the viscosity, and the decrease of the concentration gradient by magnetic field.
- (4) Finally, the flow control of NaCl aqueous solution was examined with applying the gas-liquid interface deformation induced by magnetic fields; Detailed studies of the dependence of flow velocity and concentration on the change of flow rate were carried out. As a result, the decrease of the flow rate with the flow of 100 mL/min order by using the interface deformation was approximately 23% at most under magnetic fields up to 10 T. The change of flow rate was dependent on the flow velocity and not on the

concentration. Since the flow is controlled in the condition that the inlet side of the chamber was full with the solution, the height in the inlet side was an important factor.

Followings are the conclusions of this study:

- (1) The Influence of the NaCl concentration not only on the density but also on the susceptibility should be considered for the gas-liquid interface deformation of NaCl solution.
- (2) NaCl concentration dependence of the gas-liquid interface deformation under the rest condition was determined by the magnetic force affecting the NaCl solution and the force of concentration gradient (the force of the osmotic pressure).
- (3) Flow velocity dependence of the gas-liquid interface deformation under the condition of flow can be explained by the pressure drop on the interface with increasing the flow velocity, the pressure loss by the viscosity and the decrease of the concentration gradient by magnetic field.
- (4) The flow control without any contact using the gas-liquid interface deformation induced by magnetic field can be applied for the NaCl solution with 100 mL/min order flow, choosing the appropriate height in the inlet side of the chamber.