

氏 名	Wang Yan
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第7522号
学位授与年月日	平成27年7月24日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理解物質科学研究科
学位論文題目	

Effects of high magnetic fields on the behavior of feeble magnetic fluids  
(弱磁性流体の挙動に対する高磁場の効果)

主査	筑波大学教授	工学博士	目 義雄
副査	筑波大学教授	博士(工学)	武田 良彦
副査	筑波大学准教授	博士(工学)	田口 哲志
副査	筑波大学准教授	博士(工学)	柳原 英人
副査	物質・材料研究機構 主任研究員	博士(工学)	廣田 憲之

## 論 文 の 要 旨

The fluid flow plays a significant role in many material processes to decide the quality and performance of products. The control of fluid flow has been a crucial issue to improve materials qualities. Many attempts have been explored to control the fluid flow such as the space-based microgravity, forced convection, centrifugation, etc. The application of magnetic field has been regarded as an attractive means to control the fluid behavior since the dynamical effects on materials can be induced without direct contact. This feature, for example, enables us the contamination-free processing. Magnetic control of fluid flow is based on “the magnetic force” and “the Lorentz force” and has been actually applied in many industrial processes, especially for the control of convection in molten metals. Numbers of efforts have been devoted to understand the effects of magnetic field on the flow structure and stability of feeble magnetic fluid. However, there are still some phenomena not enough understood remaining, such as the fluid behavior in the solid-liquid coexisting system or high temperature processing. Particularly, owing to the high temperatures and very low light transparencies of liquid metals, the majority of investigations are based on computer simulations, and there are a limited number of evidences experimentally obtained on the behaviors of conductive melts in magnetic fields.

The objective of this thesis is to improve the magnetic control of fluid flow by experimental

observation of fluid behavior under high magnetic fields. For flow of non-conductive fluid, an *in-situ* optical observation system was developed based on Schlieren technique to visualize the fluid motion in non-conductive transparent solution under high magnetic fields. For flow of conductive fluid such as liquid metals, electrolyte aqueous solutions combined with a superconducting magnet were used as substitution of liquid metals in industrial electromagnets since flow conditions thereby were regarded as similar. Effects of magnetic fields on the thermal convection in such conductive aqueous solutions at ambient temperatures were then studied through heat transport measurements combined with shadowgraph technique-based visualization. The following are the accomplishments of this thesis.

#### *Effects of high magnetic field on non-conductive fluid flow*

The *in-situ* optical observation system utilizable in high magnetic fields was developed based on Schlieren technique. The fluid motions of optically transparent solution were successfully observed even in high magnetic field owing to the difference of the reflective index that depends on the concentration of solution. It was observed that the direction of diamagnetic non-conducting fluid flow was changed under spatially varied magnetic field. This phenomenon was understood qualitatively by considering the magnetic force acting on the high concentration solution and the surrounding solution.

#### *Effects of high magnetic field on conductive fluid flow*

Under the magnetic fields up to 12.0 T, the thermal convection in conductive solution was suppressed. The magnitude of this suppression effect depends on the applied magnetic field and the concentration of sample solutions. Through the comparison of magnetic field effects on diamagnetic and paramagnetic conductive fluids, it was found that the magnitude of this suppression effect depends on the electrical conductivity of sample fluids regardless of their magnetism. This suppression of the thermal convection of conductive fluids under the magnetic field was therefore experimentally confirmed as the effect of the Lorentz force.

The magnetic induction and damping of the thermal convection of the conductive fluid were experimentally demonstrated. Furthermore, the contribution of the Lorentz force and magnetic force on the thermal convection of feeble magnetic conductive fluids was separately evaluated by changing the magnetic field environment. These results show that the effect of the Lorentz force and the magnetic force can be investigated individually by using electrolytes aqueous solution combined with a superconducting magnet.

Owing to these experimental observations, the understanding of feeble magnetic fluid behavior under high magnetic fields was deepened. Especially, this thesis shows that, it seems feasible to understand the behaviors of liquid metals by using electrolytes aqueous solution combined with a superconducting magnet since flow conditions thereby are regarded as similar to those for liquid metals in industrial electromagnets. Use of aqueous solutions

enables us experiments under room temperature and also expected to bring spatial information about the convection in a fluid since they have optical transparency in many cases. Through the comparison of the obtained experimental evidence and the related numerical simulation results, the feeble magnetic fluid behavior under magnetic fields can be further understood and thus magnetic control processing can be promisingly optimized.

## 審 査 の 要 旨

[批評]

本研究は、電解質水溶液などの弱磁性水溶液の挙動に対する高磁場の影響を、光学的可視化および熱伝達計測に基づいて評価し、流体挙動の非接触制御について考察した研究成果をまとめたものである。磁場を用いた流体挙動制御は鉄やシリコンといった導電性融液の非接触制御手法として既に産業プロセスに用いられているが、実際の導電性流体の挙動は、高温で光透過性がないこと、磁場が印加されていることから可視化等の実験的評価が難しく、シミュレーション研究が中心となっている。プロセスの最適化には、実験的な評価が欠かせないことから、Wang Yan 氏は電解質水溶液を 12 T の高磁場下で用いることで、同等の条件を整えられると考え、本研究を実施した。

結晶溶解に伴う溶液中の濃度勾配による密度差で駆動される流れについて、高磁場中で利用できるシェリーレン光学系を作製して観測したところ、空間磁場の分布に依存して高濃度溶液の下降流の方向が変化した。非導電性水溶液で観測されたこの現象は、流体中での密度と磁化率の分布に基づいた定性的な考察から、この現象が水平方向に作用する磁気力の効果として理解されることを示した。また、扁平な空間に存在する流体に対し、下面から加熱し、上面で冷却するレイリーベナール対流の系において、反磁性と常磁性の導電性水溶液を使用し、シャドウグラフ法による可視化と、上下面での温度計測による熱伝達評価を行ない、それらの磁場中での挙動を系統的に評価した。磁気力の影響が小さい磁場中心で行なった実験では、流体の磁性に関わらず、対流が起こる上下面の温度差が 1°C 程度大きくなり、対流が抑制されることを見出した。また、抑制の程度は、水溶液の導電性と印加磁場に依存することを示した。この現象が流体の導電性に起因するローレンツ力の効果であることを定量的な考察から示し、磁場のオンオフで対流の開始・抑制を制御できることもデモンストレーションした。さらに、超伝導磁石内での実験位置と印加磁場を変化させた一連の実験により、ローレンツ力と磁気力の効果をそれぞれ抽出して評価できることを示した。これまで、ローレンツ力と磁気力の効果の重畳・分離については考慮されてこなかったため、この業績は、今後、磁場による流体挙動の非接触制御手法について検討するうえで非常に興味深い知見である。

これらを総合して、超伝導磁石により得られる高磁場と導電性水溶液を組み合わせることで、産業プロセスに用いられている磁場による金属融液挙動を検討するためのモデル系としても提案しており、工学的な波及効果も大きい。以上のことから、本研究は高く評価できる。

[最終試験結果]

平成27年6月17日、数理物質科学研究科学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、

著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。