

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：34310

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H07335

研究課題名(和文)磁気機能性流体を用いた沸騰熱伝達能動制御技術の開発

研究課題名(英文)Active control of boiling heat transfer using magnetic functional fluid

研究代表者

山崎 晴彦 (Yamasaki, Haruhiko)

同志社大学・研究開発推進機構・助教

研究者番号：10780900

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：電磁誘導計測法および近赤外線を用いた光学的可視化により、非一様磁場下における沸騰気泡は、印加磁場強度を増加させるにつれ減少することが定量的に示された。また、数値シミュレーションにより、気泡離脱は表面張力と磁気浮力が支配的であることがわかった。伝熱面に非一様磁場を印加することで、核沸騰領域において、最大13%もの熱伝達率の向上を確認した。非一様磁場下を印加することで、沸騰熱伝達を能動的に制御することが可能であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：It is found that volume of vapor bubble under non-uniform magnetic field decrease with increase of magnetic field intensity by both ways of electromagnetic induction method and optical visualization using a near infrared ray. Numerical simulation revealed that surface tension and magnetic buoyancy are dominant for bubble detachment. By applying non-uniform magnetic field to the heater surface, the heat transfer enhanced up to 13% in fully developed nucleate boiling region. It is possible to actively control of boiling heat transfer by applying non-uniform magnetic field.

研究分野：流体工学

キーワード：磁気機能性流体 沸騰熱伝達 気液二相流 数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

近年の産業機器の高性能化、小型化に伴い、その除熱限界の飛躍的向上と熱抵抗の低減を可能とする熱交換技術の開発が求められている。その中でも、沸騰熱伝達は革新的な熱交換技術を創生する大きな手段である。しかし、沸騰熱伝達を能動的に制御するような技術は未だ確立されていない。沸騰能動制御技術が確立できれば、より高精度・高効率な産業機器の誕生、さらには熱輸送分野での宇宙開発等にも繋がるのが期待される。流体中の気泡の離脱挙動に関する能動的制御に関する研究は数少なく、これまで超音波、磁場など外部よりエネルギーを加えて気泡の離脱挙動を変化させる試みがあるが、実用化には至っていない。例えば、磁気機能性流体を用いた気泡の能動的制御では、その流体が黒色不透明なため可視化することが困難であり、基礎的な流動特性が把握できないことが原因として挙げられる。著者らはこれまで従来の計測法では困難であった磁気機能性流体中の固相・気相の計測を可能とした。また、単孔を通過する気体流量制御を行い、気泡制御の重要な因子である圧力の制御に成功した。これらの成果は、沸騰気泡制御が可能であることを示すものと考えられる。また、伝熱面より気泡が排除される方向へ力が作用するため、沸騰熱伝達の飛躍的向上および除熱限界の向上可能である。

2. 研究の目的

磁気機能性流体中の気泡が磁場に感応する性質に着目し、磁場下における沸騰気泡制御を行うことにより、新しい沸騰能動制御技術を提案する。本研究では、磁場による沸騰熱伝達の能動的制御を目的とし、磁気機能性流体の沸騰熱伝達の諸特性、主に磁場下での沸騰気泡生成について調査を行う

(1)磁場下における気泡生成過程のメカニズムを明らかにする。

(2)沸騰熱伝達の計測およびその基礎特性の把握。

3. 研究の方法

(1)磁場下における気泡生成過程のメカニズムを明らかにする。

磁気機能性流体中は黒色不透明であるために、従来の光学的な可視化方法では観測することが困難である。そのため本研究では、電磁誘導計測を用いることにより、非接触計測を行う。また同時に、波長域の長い近赤外線光を用いて光学的な可視化を行う。さらに、気泡生成過程における気泡に作用する力・圧力また、気泡形状の調査するために、有限体積法をベースとして数値シミュレーションを行う。

(2)沸騰熱伝達の計測およびその基礎特性

の把握

伝熱面の影響を減らすために、熱源として白金線を用いたプール沸騰による実験装置を作製する(図1)。白金線に通電する電力および白金線の抵抗値より入熱条件を変化させ、熱電対により、バルクの液温を計測することで、沸騰熱伝達を評価する。

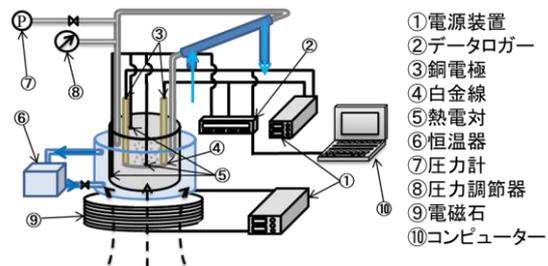


図1 白金線を用いた沸騰熱伝達特性評価装置

4. 研究成果

(1)磁場下における気泡生成過程のメカニズムを明らかにする。

ポリ α オレフィンベース磁性流体と低沸点溶媒であるn-ヘキサンをそれぞれ30 Vol. %, 70 Vol. % 混合させた流体を用いた。ポリ α オレフィンベース磁性流体は強磁性微粒子であるフェライト($\text{Fe}_2\text{O}_3 : \text{Fe}_3\text{O}_4 = 6:4$)を10 Vol. % の割合で母液であるポリ α オレフィンに安定分散させた流体である。単一気泡沸騰を実現するために、伝熱面には、鏡面加工を施した円錐形状の銅棒を用いた。これにより、沸騰気泡は円錐の頂点より生成することが可能となる。図2に電磁誘導計測法による沸騰離脱気泡の計測波形を示す。波形はwavelet法により処理を行った。図より、外部印加磁場を増加するにつれて、誘導起電力が減少する、つまり沸騰気泡体積が減少することがわかる。これまでの研究では、沸騰気泡のボイド率のみの計測しか行うことができなかったが、本研究により、沸騰単一気泡

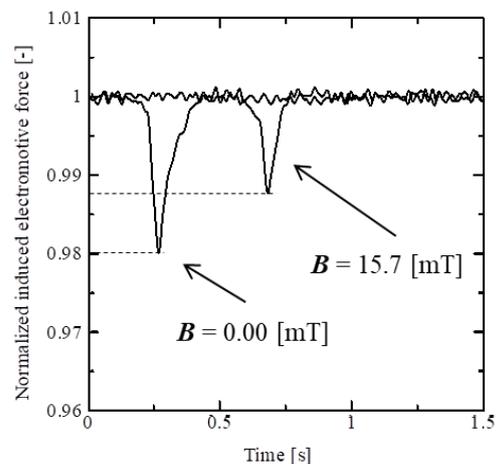


図2 単一沸騰気泡通過時の誘導起電力

の体積の計測を行うことが可能であることが示された。また、単一沸騰気泡の場合、外部磁場 15.7 mT の際、26%体積が減少することがわかった。このことから、これまでの研究 (Yamasaki et. a., 2015) により示された印加磁場強度の増加による沸騰ボイド率の増加傾向は、磁気圧力による気泡体積を縮小させる効果より、気泡の離脱を促進する効果が上回ったことが原因と決定付けられる。

磁場下における気泡運動挙動を解明するために、近赤外線光源を用いた磁気機能性流体中の気泡計測を行った。光学的可視化試験には、ポリ α オレフィンベースの磁性流体を n-ヘキサンに 5.0 Vol. % 希釈した流体を用いた。これは、磁性流体を希釈しない場合では、赤外線透過することができなかつたためである。近赤外線光源は、波長域 800~1000 nm の赤外線を照射可能である。可視化により、非一様磁場下における離脱気泡径を図3示す。また、図3に力学的釣合いを考慮して作成した理論式も併せて示す。図3より、印加磁場強度を増加させるにつれて、離脱気泡径が減少することが確認できる。理論式との比較をすると良い一致を示すことが確認できる。

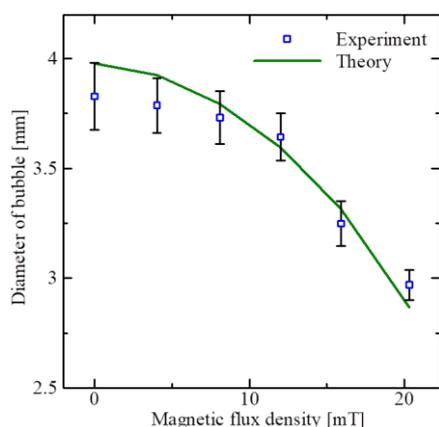


図3 非一様磁場下における離脱気泡直径

また、磁場下における気泡運動挙動を解明するために、有限体積法をベースとした CIP 法を用いて、数値シミュレーションを行った。図に気泡生成時から離脱に至るまでの気泡に係る各力成分を示す。表面張力は時間経過に関わらず一定の値を示し、気体運動量流束は他の力に比べ非常に小さい値を示す。また、表面張力と気体運動量流束以外の力は時間経過と共に、増加傾向にあり、慣性力と粘性抵抗、磁気浮揚力の増加量は同程度であるが浮力の増加量は他の力に比べ大きいことがわかる。磁気浮揚力と浮力の大きさに関しては、両方の力とも気泡体積の大きさに大きく依存するものの、磁化および磁場勾配の大きさが流体の密度差に比べて小さいため、浮力の方が磁気浮揚力よりも大きくなるのがわかる。さらに、0.065 秒付近までは表面張力が他の力よりも大きいことが確認できる。これは気泡体積が小さく、また、表面張力が

十分に大きいため、気泡成長速度も抑制されることが原因である。また、0.065 秒付近から 0.085 秒付近までは、浮力が表面張力よりも大きくなるものの、離脱条件を満たしていない。すなわち、気泡に作用する慣性力と粘性抵抗と表面張力の合力が浮力および磁気浮揚力の合力よりも大きいため、離脱には至らないことがわかる。また、0.125 秒付近で合力が 0 を超える。すなわち、気泡が離脱する条件を満たすことが確認できる。

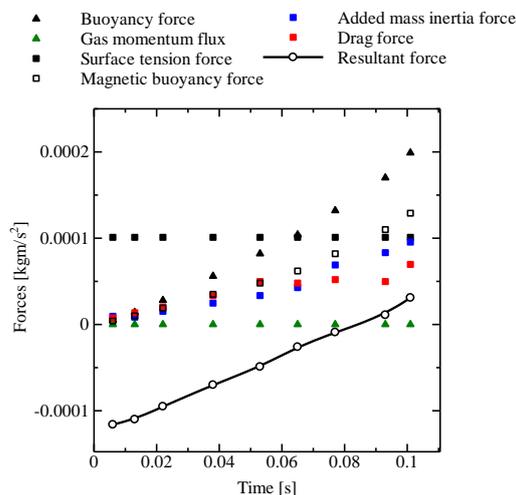


図4 非一様磁場下における成長気泡に作用する力の計算結果

(2) 沸騰熱伝達の計測およびその基礎特性の把握.

沸騰熱伝達の計測を行うために、白金線を用いたプール沸騰による磁気機能性流体の沸騰熱伝達の計測を行った。白金線は直径 0.2 mm、長さ 40 mm の細線である。ポリ α オレフィンベース磁性流体と低沸点溶媒である n-ヘキサンをそれぞれ 30 Vol. %, 70 Vol. % 混合させた流体を用いた。図5に沸騰熱伝達係数の計測結果を示す図より $q < 1.86 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ の低熱流束域まで自然対流領域が確認できる。また白金線の表面熱流束が $1.86 \times 10^5 < q < 4.70 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ の範囲の中熱流束域では、サブクール沸騰領域に達し、白金線の表面熱流束が $4.70 \times 10^5 < q \text{ W/m}^2$ の範囲の高熱流束域においては、供試流体の沸騰領域は核沸騰領域に達することが確認できる。サブクール沸騰領域において、熱伝達率は無磁場時と比較して磁場強度 $H=6.07 \text{ kA/m}$ で 11.5 %, $H=12.1 \text{ kA/m}$ で 13.2 %, $H=18.2 \text{ kA/m}$ で 13.0 %, $H=27.1 \text{ kA/m}$ で 12.1 %, $H=36.2 \text{ kA/m}$ で 11.1 % 増加することが確認できる。一方、外部非一様磁場の印加時では、白金線表面熱流束は全印加磁場条件において上昇するものの、その上昇率は磁場強さに依存しないことが確認できる。これは、サブクール沸騰領域においては、加熱面より生成される沸騰気泡の減少に伴い、磁気圧力および磁気排除力による影響が小さくなることが原因であるものと考えられる。また、核沸騰領域では、磁場の影

響が顕著に確認でき、無磁場時と比較して磁場強度 $H=6.07$ kA/m のとき 4.20 %, $H=12.1$ kA/m のとき 9.43 %, $H=18.2$ kA/m のとき 13.8 %, $H=27.1$ kA/m のとき 14.6 %, $H=36.2$ kA/m のとき 14.5 % 増加することが確認された。核沸騰領域においては、加熱面より形成される沸騰気泡が増加するため、磁気排除力および磁気圧力による影響が大きくなり、沸騰熱伝達は磁場の影響を顕著に受けたものと考えられる。さらに、18.2 kA/m 以上の磁場を印加時では、供試流体が飽和磁化に達するために、十分な磁気浮揚力が得られず磁場強度による影響が見られなかった。

以上より、沸騰気泡に非一様磁場を印加することで、磁気圧力と磁気浮力の影響により、沸騰気泡の体積、離脱周期を変化させることができ、沸騰熱伝達特性を能動的に制御することが可能であることがわかった。

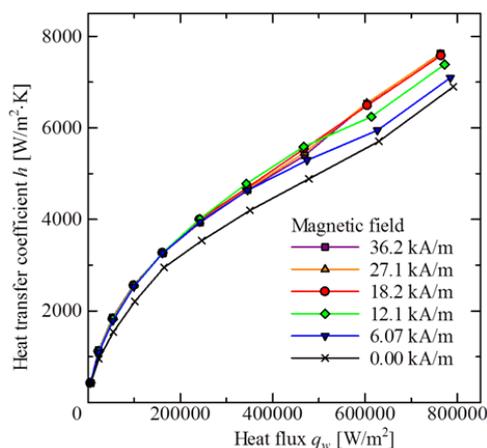


図5 磁気機能性流体の沸騰熱伝達係数

<引用文献>

① H. Yamasaki and H. Yamaguchi, Electromagnetic measurement of vapor void fraction in binary magnetic fluid, International Journal of Advances in Science and Technology, JIC Special issue, 2015, 153-160

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

① Haruhiko Yamasaki and Hiroshi Yamaguchi, “Numerical Simulation of Bubble Deformation in Magnetic Fluids by Finite Volume Method”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 431, pp. 164-168, 2017, 査読有。

② 山崎晴彦, 山口博司, ”磁性流体を用いた気体流量制御”, 日本機械学会論文集, 82巻, 833号, p. 15-00559, 2016, 査読有。

[学会発表] (計7件)

① Haruhiko Yamasaki and Hiroshi Yamaguchi, “Bubble behavior in magnetic fluid and its applications”,

Taiwan-Japan International Conference on Magnetic Fluids 2017, Taichung Taiwan, Dec. 14-16 (2017).

② Haruhiko Yamasaki and Hiroshi Yamaguchi, “Bubble Transfer by Magnetic Fluid and Its Application”, The 7th International Workshop of Energy Conversion, Nantong, China, Nov. 25-28 (2017).

③ Haruhiko Yamasaki, Makoto Ueta and Hiroshi Yamaguchi, “Behavior of Bubble Detached from Orifice in Magnetic Fluid”, the Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, Okinawa, Japan, Oct.28-30 (2017).

④ 山崎晴彦, 上田誠, 山口博司, 「磁性流体を用いた気体流量制御装置」, 平成28年度磁性流体連合講演会, 北海道大学, 12月8日(2016).

⑤ Haruhiko Yamasaki, Makoto Ueta and Hiroshi Yamaguchi, “Controlling Gas Flow in Magnetic Fluid”, Thirteenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan, Oct. 10-12 (2016).

⑥ Haruhiko Yamasaki and Hiroshi Yamaguchi, “Numerical Simulation of Bubble Deformation in Magnetic Fluids by Finite Volume Method”, 14th International Conference on Magnetic Fluids, Ekaterinburg, Russia, July 14-18 (2016).

⑦ 上田誠, 山崎晴彦, 山口博司, 「磁性流体を用いた流量制御技術」, 第28回「電磁気力関連のダイナミクス」シンポジウム, 慶応大学, 5月18-20日(2016).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山崎 晴彦 (YAMASAKI, Haruhiko)

同志社大学・研究開発推進機構・助教

研究者番号: 10780900