

令和元年5月19日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06119

研究課題名(和文) 二相熱流動制御を目的とした高機能表面の創製と壁面気泡挙動操作技術の開発

研究課題名(英文) Creation of functional plates for control of two-phase flow and heat transfer, and development of an approach for control of near-wall bubble behavior

研究代表者

北川 石英 (Kitagawa, Atsuhide)

京都工芸繊維大学・機械工学系・准教授

研究者番号：80379065

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、機能表面を利用した気泡挙動操作技術を開発するため、自然対流気液二相流および、マイクロチャネル内気液二相流を対象とした実験を行った。その結果、研究¹では、撥水部の幅が2 mmの機能表面を利用することにより、熱伝達率が約30%増加することがわかった。これは、撥水部での円滑な気泡の付着と離脱により、伝熱面付近の気泡存在頻度が増加したことに起因する。一方、研究²では、並列配置の撥水性ポケットを有するマイクロチャネルを利用した場合、液体流量が100～400 $\mu\text{L}/\text{min}$ の条件では、空気充填ポケットからの気泡生成が生じ、また、その気泡発生頻度は液体流量の増加とともに増大することがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的には、取得した実験データを利用することにより、マイクロバブルや大気泡気液二相流に関する数値モデルおよび数値計算手法の開発に貢献することができる。また、本研究で開発された壁面気泡挙動操作技術は、船舶などに対する気泡注入法の改善や気泡利用型熱流体デバイスの性能向上のための有効な手段として、機械・化学・船舶・医療などの幅広い分野での活用が期待されることから、地球環境問題の解決と低炭素社会の実現に大きく貢献することができる。

研究成果の概要(英文)：In this study, natural-convection two-phase flows and two-phase flows in microchannels have been investigated experimentally in order to develop an approach for controlling near-wall bubble behavior using functional plates. For the natural-convection two-phase flows, in the range of the width of hydrophobic region, WH, from 0 to 2 mm, the heat transfer coefficient increases by about 30% using the functional plate at WH=2 mm. This results mainly from an increase in the bubble concentration near the heated wall because of temporal attachment of bubbles at hydrophobic regions. For the two-phase flows in microchannels, in the range of the liquid flow rate from 100 to 400 micro l/min, bubbles can be intermittently generated from air-filled pockets only using air permeability of PDMS. In addition, the bubble generation frequency increases monotonically as the liquid flow rate increases.

研究分野：熱工学

キーワード：対流熱伝達 気泡運動制御 機能表面

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

気泡は、スケール別に、マイクロバブルから大変形を伴うミリバブルに分類され、現在、機械・化学・船舶・医療の分野において盛んに利用されている。このような状況のもと、多くの場合では、壁面近傍の気泡挙動が利用効果や機器性能に直接的影響を与える。このため、壁面近傍気泡挙動の制御が可能となれば、気泡注入効果のさらなる向上が期待できる。気泡制御に関する国内外の技術として、医療の分野では光ピンセット技術が、また、機械の分野では超音波技術が利用され、これまでに一定の成果が得られている。しかし、気泡サイズ、制御範囲、そして、使用環境などが制限されていることから、汎用性の高い壁面気泡挙動操作技術の確立が強く望まれている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、表面性状が部分的に異なる機能表面を用いた壁面気泡挙動操作技術を開発し、それを利用することにより、二相熱流動の制御を図ることである。ここでは、自然対流気液二相流とマイクロチャンネル内気液二相流を対象とした調査を行う。

3. 研究の方法

3.1 実験装置および実験方法

自然対流気液二相流

実験装置の概略図を図1に示す。実験装置は高さ1.5 mの透明アクリル製容器、伝熱板、直流安定化電源、ぜん動ポンプ、気泡発生装置、水冷式熱交換器および恒温循環水槽から構成された。気泡発生装置は容器底部に、伝熱板は容器側壁に平行になるように設置し、伝熱板表面の加熱条件を等熱流束加熱条件とした。作動流体には水道水を使用した。座標軸は、流れ方向を x ($x=0$: 加熱開始点)、壁垂直方向を y ($y=0$: 伝熱板表面)、奥行き方向を z ($z=0$: 伝熱板中央) とした。

機能表面の概略図を図2に示す。伝熱板の表面に親水部と撥水部を複合させた機能表面を貼り付けた。図中の W_H は機能表面の撥水部の幅を意味し、本報では $W_H=0, 0.5, 2.0$ mm の3条件について調査を行った。なお、 $W_H=0.5, 2.0$ mm の条件では、機能表面における撥水部の総面積と親水部の総面積の比を1:50とした。加熱開始点は伝熱板の先端から100 mm 下流の位置とした。

マイクロチャンネル内気液二相流

実験装置の概略図を図3に示す。実験装置は、マイクロチャンネル、顕微鏡およびシリンジポンプから構成された。マイクロチャンネルおよびシリンジは、シリコンチューブおよびステンレスニードルを介して連結した。作動液体には 22°C に設定した純水を使用し、シリンジポンプで吸引することによりマイクロチャンネル内へと流入した。圧力差を考慮し、シリンジの水面高さをマイクロチャンネルの高さと同じに設定した。液体流量 Q は $100 \leq Q \leq 400 \mu\text{L}/\text{min}$ とした。

マイクロチャンネルは、厚さ 0.15 mm の石英ガラス板とPDMS(ポリジメチルシロキサン)から構成された。マイクロチャンネルのポケット配置の概略図を図4に示す。マイクロチャンネルの流路高さは約 $200 \mu\text{m}$ であった。流路内には計12個のポケットが存在する。

3.2 計測方法

自然対流気液二相流

温度計測には、K型熱電対、水冷式基準接点およびデータアキュイジションユニットを用いた。伝熱板表面温度 T_w と伝熱板遠方での

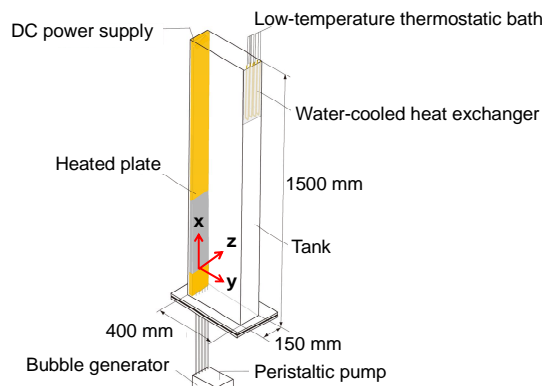


図1: 実験装置

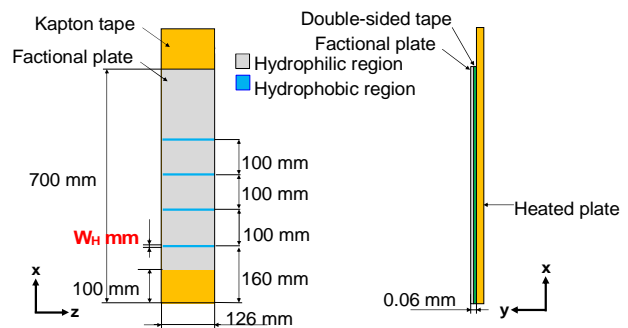


図2: 伝熱板

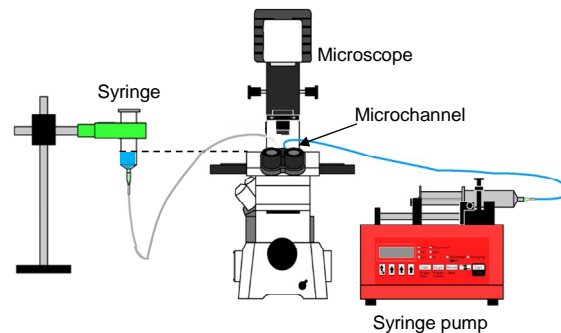


図3: 実験装置

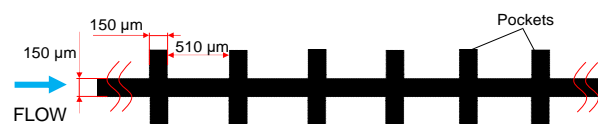


図4: マイクロチャンネル内のポケット配置

液体温度 T_{∞} の計測には、K 型熱電対、氷冷式基準接点および高速データアキュジションユニットを用いた。サンプリング周波数を 5 Hz、温度計測時間を 540 s 間とし、各温度には、510 ~ 540 s 間の平均値を用いた。局所熱伝達率 h_x は $h_x = q_w / (T_w - T_{\infty})$ として算出した。ここで、 q_w は伝熱面における熱流束である。一方、PTV による気泡速度計測を行うため、カラー CCD カメラ、半導体レーザー、シリンドリカルレンズ、ND フィルター、赤色 LED および PC を用いた。

マイクロチャネル内気液二相流

マイクロチャネル内にてポケットの気液界面から生じる気泡発生頻度 f は可視化画像計測によって算出された。可視化計測には、顕微鏡、ハロゲンランプ、1 倍の対物レンズ、モノクロ CMOS カメラおよび PC を用いた。

4. 研究成果

自然対流気液二相流

計測位置 x と熱伝達率 h_x の関係を図 5 に示す。図中の TPF, SPF はそれぞれ、気泡注入時、気泡非注入時を意味する。まず、気泡注入の有無に着目すると、図 5 から、いずれの機能表面においても、気泡注入に伴い熱伝達率が著しく増加することがわかる。次に、機能表面の撥水部の幅 W_H に着目すると、 $W_H=0.5, 2.0$ mm の場合での熱伝達率が $W_H=0$ mm の場合のそれよりも高いことがわかる。特に、 $W_H=2.0$ mm の場合での熱伝達率が最も高く、機能表面を利用しない場合 ($W_H=0$ mm, TPF) に比して、最大 27% の熱伝達率の増加が確認できる。

$x=460$ mm の位置における気泡上昇速度 u と壁垂直方向の気泡存在頻度 ε を図 6 および図 7 に示す。図 6 より、 $0 < y < 35$ mm の範囲では、撥水部の幅に対する気泡上昇速度の変化は小さいことがわかる。一方、図 7 より、いずれの機能表面においても気泡存在頻度分布のピーク存在位置は壁近傍に存在し、壁近傍では、 $W_H=2.0$ mm の場合の気泡存在頻度が最も高くなることがわかる。

$x=260$ mm の位置における撥水部の幅 1 mm あたりの気泡の壁面付着確率および壁面離脱確率を図 8 に示す。図 8 より、 $W_H=2.0$ mm の場合に比して、 $W_H=0.5$ mm の場合の付着確率・離脱確率が高いことがわかる。ここで、付着確率と離脱確率の差を計算すると、 $W_H=0.5$ mm の場合 (0.036) よりも、 $W_H=2.0$ mm の場合 (0.022) においてその差が小さい。これは、後者の場合では撥水部の幅 1 mm あたりに残留する気泡数が少ないことを意味する。上流での撥水部における気泡残留数の低下は、下流での壁近傍の気泡存在頻度の増加をもたらす。これは、図 7 の結果と符合する。通常、気泡数密度の増加は浮力源の増大をもたらすため、気泡群誘起型上昇流を加速させる。この伝熱面近傍での上昇流の加速は、低温液体の温度境界層への輸送に対して直接的に寄与し、高温・低温液体の伝熱面垂直方向の熱交換に間接的に寄与することから、結果として、熱伝達が促進する。

マイクロチャネル内気液二相流

液体流量 $Q=400 \mu\text{L}/\text{min}$ の場合でのポケットにおける気液界面の時系列画像を図 9 に示す。図 9 より、各ポケットの気液界面が時間とともに緩やかに成長し、最終的には、流れのせん断作用により、ポケットから気泡が発生する様子が確認できる。なお、可視化観

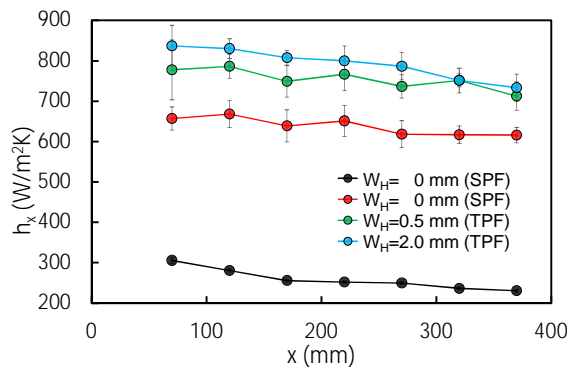


図 5 : 熱伝達率

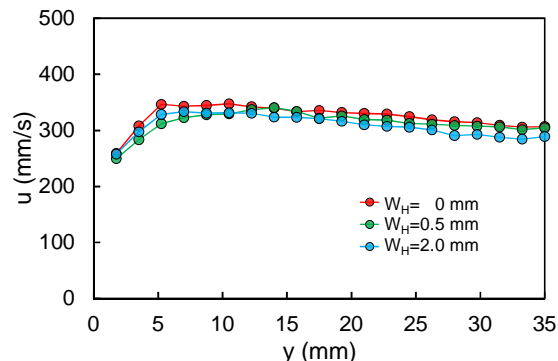


図 6 : 気泡上昇速度

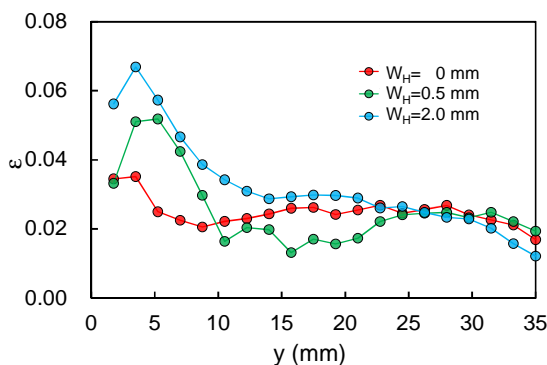


図 7 : 気泡存在頻度

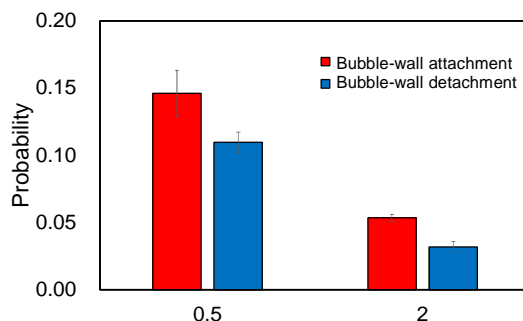


図 8 : 気泡壁面付着・離脱確率

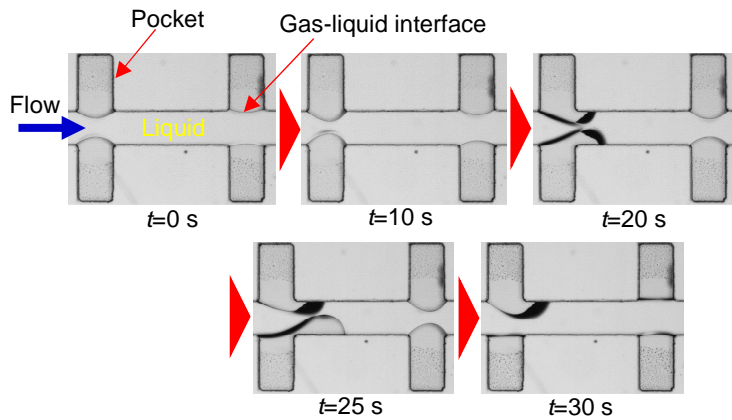


図 9 : 気泡界面の時系列画像

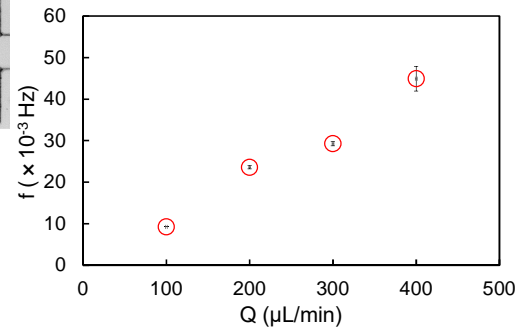


図 10 : 気泡発生頻度

察結果によれば、主として、2つの気泡生成パターンが存在する。1つは、個々のポケットから単独に気泡が生成されるパターンである。もう1つは、向かい合うポケットの気液界面同士が干渉した結果として、気泡が生成されるパターンである。いずれの液体流量に対しても同様の現象が生じるものの、その発生頻度は両者に強く依存する。

液体流量 Q とポケットからの気泡発生頻度 f との関係を図 10 に示す。ここで、気泡発生頻度は、気泡発生頻度は、各ポケットから生成される 1 秒間あたりの平均気泡数として定義している。図 10 より、 $100 \leq Q \leq 400 \mu\text{L}/\text{min}$ では、全ての液体流量にて、空気充填ポケットからの気泡生成が生じていることがわかる。つまり、本手法では、PDMS の有する空気の透過性のみにより気泡が発生している。また、その気泡発生頻度は、液体流量の増加とともに増加することがわかる。これは、液体流量の増加とともに、気液界面の引き伸ばしが促進するためである。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Atsuhide Kitagawa, Petr Denissenko, Yuichi Murai, Effect of heated wall inclination on natural convection heat transfer in water with near-wall injection of millimeter-sized bubbles, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.113, 2017, 1200-1211
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.009>

〔学会発表〕(計 1 2 件)

大西幸乃夫, 武久翔紀, 北川石英, Petr Denissenko, 村井祐一, 萩原良道, 気泡生成によるマイクロチャネル内流れの混合, 日本混相流シンポジウム 2016, 2016

Shota Kumokawa, Atsuhide Kitagawa, Yuichi Murai, Temperature and velocity measurements of laminar natural convection from an inclined heated plate in water with bubble injection, Proc. 24th International Symposium on Transport Phenomena, 2016

雲川翔太, 北川石英, 傾斜加熱平板に沿う気泡誘起型液体上昇流の PTV 計測, 関西支部第 92 期定時総会講演会, 2017

北川石英, 気泡と機能表面の複合利用による自然対流熱伝達の促進, 日本伝熱学会関西支部第 24 期第 1 回講演討論会, 2017

中谷光宏, 永井優太郎, 北川石英, 村井祐一, 気泡注入法と機能表面の利用による自然対流場の伝熱促進, 日本混相流シンポジウム 2017, 2017

Atsuhide Kitagawa, Nakatani Mitsuhiro, Yutaro Nagai, Yuichi Murai, Heat transfer enhancement of natural convection from a vertical heated plate by a combination of bubble injection and functional plates, Proc. 10th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows, 2017

Yukinobu Ohnishi, Atsuhide Kitagawa, Petr Denissenko, Yuichi Murai, Experimental study on particle trapping in a microchannel using gas-liquid interface, Proc. 10th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows, 2017

江口玲央, 北川石英, 村井祐一, 機能表面に沿う自然対流気液二相流の可視化画像計測, 第 46 回可視化情報シンポジウム, 2018

原大介, 北川石英, 村井祐一, 空気充填ポケット領域を有するマイクロチャネル内の粒子捕獲の可視化, 第 46 回可視化情報シンポジウム, 2018

Daisuke Hara, Atsuhide Kitagawa, Petr Denissenko, Yuichi Murai, Visualization and measurement of particle trapping in a microchannel with air-filled pockets, Proc. 29th International Symposium on Transport Phenomena, 2018

Reo Eguchi, Atsuhide Kitagawa, Yuichi Murai, Measurement of bubbly flows along vertical heated

plates with different surface conditions , Proc. 29th International Symposium on Transport Phenomena , 2018

Atsuhide Kitagawa , Effect of wall surface wettability on natural convection heat transfer in water with bubble injection , Proc. 29th International Symposium on Transport Phenomena , 2018

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.cis.kit.ac.jp/~kitagawa/kitagawa.html>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

(2)研究協力者

研究協力者氏名：村井祐一 , Пётр Денисенко , 萩原良道

ローマ字氏名：Yuichi Murai , Petr Denissenko , Yoshimichi Hagiwara

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。