

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 28 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420160

研究課題名(和文) ナノ構造面による気泡運動制御とマルチスケール解析を用いた二相伝熱機構の総合的理解

研究課題名(英文) Bubble motion control using a functional plate and comprehensive understanding of two-phase heat transfer mechanism through multi-scale analysis

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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、気泡の運動特性に対する壁面濡れ性の影響を調査した。その結果、壁面の濡れ性が良いほど、壁面近傍での気泡存在頻度が高くなり、その結果として、気泡の上昇速度が増加することがわかった。また、局所的に濡れ性が異なる機能面を用いて、自然対流気泡流の実験を行ったところ、熱伝達率が最大5%増加した。この伝熱促進は、撥水領域での気泡の捕獲によって、伝熱面遠方への気泡の拡散が抑制されたためである。

研究成果の概要(英文)：In this study, the effect of the wall surface wettability on bubble motion characteristics has been investigated experimentally. The probability density distribution of bubbles near the wall increases at higher wettability, and as a result, the increase in the bubble rise velocity occurs at higher wettability. In addition, temperature measurements of natural convection gas-liquid two-phase flows have been performed using a functional plate with two types of wettability (i.e., hydrophobicity and hydrophilicity). The heat transfer coefficient with the functional plate increases by 5%. This increase is due to the suppression of the wall-normal bubble diffusion resulting from bubble capturing at the hydrophobic region.

研究分野：熱流体工学

キーワード：混相流 熱伝達 機能面

1. 研究開始当初の背景

「気泡」はスケール別に、超微細な「マイクロバブル」から大変形を伴う「ミリバブル」などに分類され、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。これは、全てのサイズの気泡に対して共通しており、例えば、自然対流熱伝達の効果的な促進法の一つである気泡注入法では、壁近傍での個々の気泡の上昇運動や気泡界面からの渦放出、そして、壁面上での気泡挙動（附着・バウンスなど）が熱伝達促進の支配因子となる。ここで、壁面近傍気泡挙動の人工的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ものの、多くの場合、気泡サイズ・制御範囲・使用環境等が制限されている。このため、汎用性の高い気泡運動制御法の確立が望まれている。

2. 研究の目的

本研究では、局所的に濡れ性が異なる「機能面」を創製し、それを利用することにより、壁面の気泡運動を制御することを最終目的としている。ここでは、研究の基礎段階として、自然対流熱伝達の促進を念頭に、壁面濡れ性・壁面傾斜角度・気泡運動・自然対流熱伝達の関連性を実験的に調査する。

3. 研究の方法

(1) 実験装置および実験方法

① 実験装置（非加熱条件）

実験装置の概略図を図1に示す。実験装置は、透明アクリル製容器（高さ2000 mm，幅200 mm，奥行き150 mm），テスト板，気泡発生装置およびチュービングポンプから構成された。気泡発生装置を容器底部に、疎水性表面もしくは超親水性表面を有するテスト板を容器側壁に平行になるように設置した。

② 実験装置（加熱条件）

実験装置の概略図を図2に示す。実験装置は、透明アクリル製容器（同上），伝熱板（等熱流束条件），可変直流安定化電源，気泡発生装置，チュービングポンプ，水冷式熱交換器および恒温循環水槽から構成された。気泡発生装置を容器底部に、親水性表面もしくは機能面を有する伝熱板を容器側壁に平行になるように設置した。

座標軸は、流れ方向を x ($x=0$: ニードル先端)，壁垂直方向を y ($y=0$: テスト板・伝熱板表面)，奥行き方向を z ($z=0$: テスト板・伝熱板中央) とし、鉛直上向き方向と x 軸とのなす角を ϕ とした。作動液体には 22 °C の水道水を使用した。

③ 気泡発生装置

気泡注入には5本の注射針(内径0.36 mm,

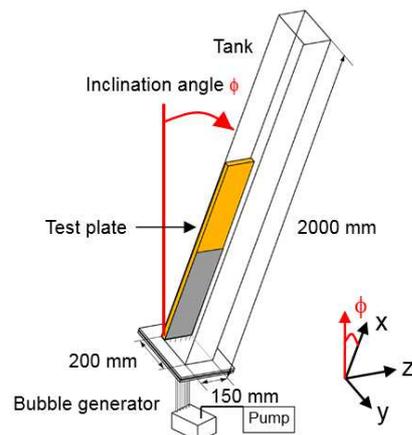


図1 実験装置（非加熱条件）

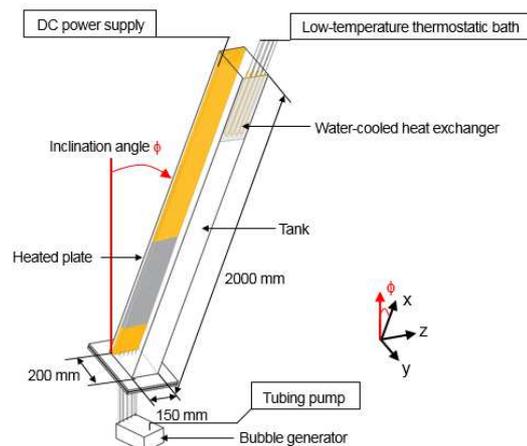


図2 実験装置（加熱条件）

外径 0.50 mm，刃面角度 12.0°) を用い、その設置位置を、 $x=-100$ mm, $y=10$ mm, $z=\pm 50, \pm 25, 0$ mm とした。気泡発生装置内への空気の供給にはチュービングポンプを用いた。チュービングポンプによる空気流量は 100 ml/min とした。画像処理計測の結果、気泡の注入頻度は 25 Hz 程度であると見積もられた。また、カメラにより撮影された気泡画像の構成ピクセルをもとに等価直径として算出した結果、平均気泡径は 2.3–2.8 mm と見積もられた。

(2) 計測手法

① 温度計測

伝熱板表面温度 T_w と伝熱板遠方での液体温度 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イ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。

② 速度計測

気泡速度計測には、CCD カメラ，赤色 LED および PC を用いた。赤色 LED はカメラの対面から照射した。これより、気泡像は投影像として取得された。計測断面は x - y 断面とした。個々の気泡の速度ベクトルは 3 時刻追跡法により算出した。

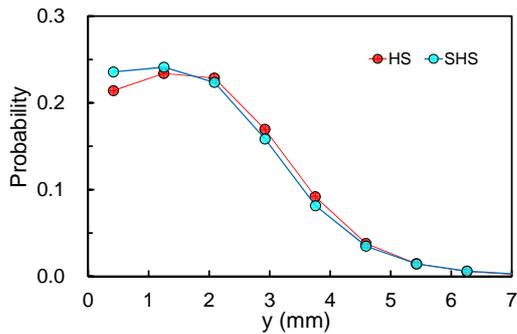


図3 気泡存在頻度

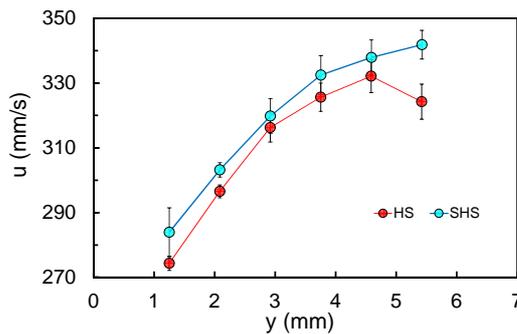


図4 気泡上昇速度

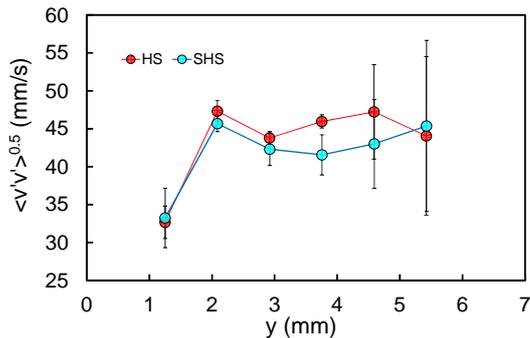


図5 壁垂直方向の気泡変動速度のRMS値

4. 研究成果

(1) 疎水・超親水面を上昇する気泡群 (非加熱条件)

$\phi=20^\circ$ の場合の気泡存在頻度の分布を図3に示す。図中の“HS”，“SHS”はそれぞれ、疎水面 (Hydrophobic Surface)，超親水面 (Super-Hydrophilic Surface) を意味する。図より、壁近傍では、超親水面の場合の気泡存在頻度が疎水面の場合のそれに比して高いことがわかる。これは、濡れ性が良くなるほど、水と壁面との親和性が高くなることから、液膜厚さが厚くなり、結果として、液膜による気泡の壁面衝突に対する吸収効果が増すためであると予想される。

$\phi=20^\circ$ の場合の気泡上昇速度 u の分布を図4に示す。図より、気泡存在領域 ($0 < y < 6$ mm) において、超親水面の場合の気泡上昇速度は、疎水面のそれに比して高いことがわかる。これは、図3にて示されたように、濡れ性の向上に伴い、壁面での気泡存在頻度が高くなる

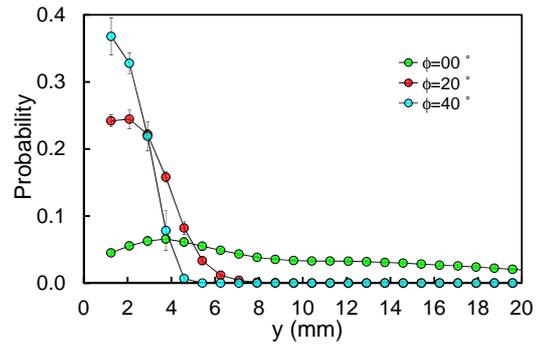


図6 気泡存在頻度

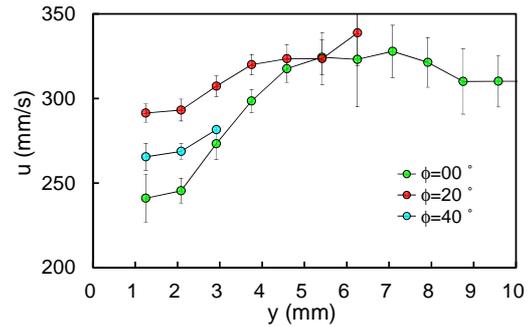


図7 気泡上昇速度

ことから、結果として、浮力源が増大するためである。

$\phi=20^\circ$ の場合の壁垂直方向の気泡変動速度のRMS値 $\langle v'v' \rangle^{0.5}$ の分布を図5に示す。図より、壁近傍では、超親水面の場合の $\langle v'v' \rangle^{0.5}$ と疎水面の場合のそれに大きな差が生じないことがわかる。しかし、 $2 < y < 5$ mm の範囲では、超親水面の場合の $\langle v'v' \rangle^{0.5}$ が、疎水面の場合のそれに比して小さい。つまり、超親水面の場合では、疎水面の場合に比して、壁垂直方向の気泡運動が抑制されている。これは、気泡の壁へ衝突が液膜により緩和されていることに起因すると予想される。

(2) 親水面を上昇する気泡群 (加熱条件)

気泡存在頻度を図6に示す。図から、 $\phi=0^\circ$ の場合の気泡は $0 < y < 20$ mm の広範囲にわたって存在するのに対し、 $\phi=20^\circ$ の場合の気泡は $0 < y < 8$ mm、 $\phi=40^\circ$ の場合の気泡は $0 < y < 4$ mm に存在することがわかる。また、気泡存在頻度のピーク位置は、傾斜角度が高いほど、壁面近傍に存在する。つまり、傾斜角度が高いほど、伝熱板近傍に気泡が集中する傾向にある。これは、傾斜角度が高くなるにつれて、気泡に作用する浮力の壁垂直方向成分 (つまり、壁に向かう力) が増加し、気泡の拡散が抑制されるためである。なお、画像処理解析結果から、本実験条件の範囲内では、気泡の壁への付着は全く確認されなかったことを付記しておく。

気泡上昇速度 u の分布を図7に示す。図より、伝熱面近傍では、 $\phi=20^\circ$ の場合の上昇速度が最も高くなることがわかる。この傾向は、

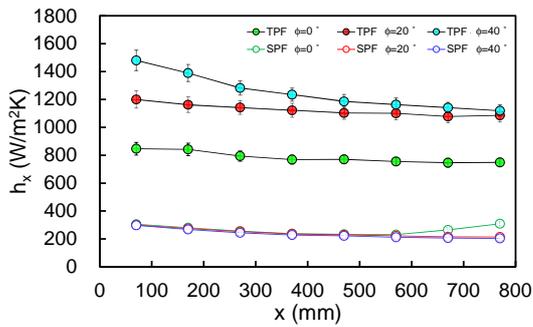


図8 熱伝達率

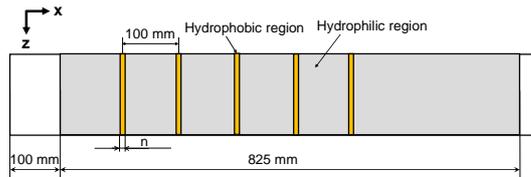


図9 機能面

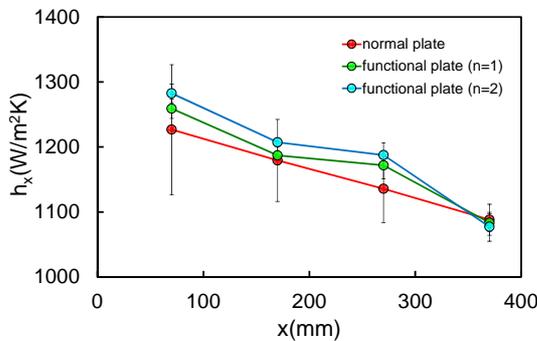


図10 熱伝達率

気泡数密度の結果と異なる。通常、気泡数密度の増加は、浮力源の増大（つまり、高速度の液体上昇流を誘起する）をもたらすため、結果として、気泡の上昇速度が増加する。しかし、傾斜角度の増加とともに、気泡に作用する浮力の壁並行方向成分が低下する。 $\phi=40^\circ$ の場合では、前者に比して後者が卓越し、その結果として、速度低下が生じたと考えられる。単一気泡の場合では、通常、傾斜角度とともに単調に上昇速度が低下する。これは、気泡群注入特有の効果に他ならない。

計測位置 x と熱伝達率 h_x の関係を図8に示す。図中の“TPF”、“SPF”はそれぞれ、二相流（気泡注入時）、单相流（気泡非注入時）を意味する。まず、気泡の有無に着目すると、気泡注入により全ての計測位置において熱伝達率が著しく増加することがわかる。また、気泡注入時の熱伝達率と気泡非注入時のそれとの比（熱伝達率比）は 2.4–5.5 となる。このことから、新水性を有する壁面を利用した場合、 $0 \leq \phi \leq 40^\circ$ の範囲では、いずれの伝熱板傾斜角度においても、気泡注入が自然対流熱伝達の促進に対して有効に機能すると言える。次に、傾斜角度の差に着目すると、傾斜角度の増加とともに熱伝達率も増加することがわかる。特に、 $\phi=40^\circ$ の場合の熱伝達率

比は 5.0–5.5 となる。これは、 ϕ の増加に伴う壁近傍での気泡数密度の増大と密接に関係する。

(3) 機能面を上昇する気泡群（加熱条件）

(2)で得られた結果をもとに、図9で示される機能面を作製した。機能面のベースは親水面であり、その面上に幅 n ($n=1, 2$ mm) の撥水領域を x 方向に 100 mm 間隔で設けた。

$\phi=20^\circ$ の場合の計測位置 x と熱伝達率 h_x の関係を図10に示す。図より、機能面を利用し、気泡を注入した場合の熱伝達率と、機能面を利用しない場合のそれとの比が、層流域において 1.02–1.05 となることがわかる。気泡の可視化結果より、局所的に存在する撥水領域での気泡のトラップが確認されたことから、この伝熱促進は、撥水領域での気泡の捕獲によって、伝熱面遠方への気泡の拡散が抑制されたためであると考えられる。また、撥水面の幅が狭い場合の方が、熱伝達が向上する。つまり、伝熱促進は、気泡が壁に一時的に捕獲される時間と密接に関係している。今回得られた伝熱促進率は最大5程度であるものの、気泡の壁での捕獲時間の最適化を図ることにより、今後さらなる伝熱促進が期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計8件)

① Atsuhide Kitagawa, Experimental study on natural convection two-phase heat transfer from an inclined heated plate in water, Proc. 16th International Symposium on Flow Visualization, 2014年6月24日, Okinawa Convention Center (沖縄市)

② 堀井俊宏, 上昇気泡群の運動特性に対する壁面傾斜角度と壁面濡れ性の影響, 第36回可視化情報シンポジウム講演論文集, 2014年7月21日, 工学院大学(東京)

③ 北川石英, 自然対流気液二相流の計測と制御, 日本混相流シンポジウム2014, 2014年7月28日, 道民センター「かでの2・7」(札幌市)

④ Shusaku Kawakami, Effect of wall surface wettability on bubble motion in a horizontal channel, Proc. 9th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows, 2015年9月23日, Hokkaido University (札幌市)

⑤ Yutaro Nagai, Experimental study on wall-attachment of microbubbles using different surface wettabilities, Proc. 9th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows, 2015年9月23日, Hokkaido

University (札幌市)

⑥ Shota Kumokawa, Flow and heat transfer characteristics of natural convection from an inclined heated plate in water with millimeter bubble injection, Proc. 9th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows, 2015年9月23日, Hokkaido University (札幌市)

⑦ 雲川翔太, 上昇気泡群を含む傾斜加熱平板自然対流の可視化画像計測, 可視化情報学会全国講演会 2015, 2015年10月10日, 京都工芸繊維大学 (京都市)

⑧ 永井優太郎, マイクロバブル群の壁面付着に対する濡れ性の影響, 可視化情報学会全国講演会 2015, 2015年10月10日, 京都工芸繊維大学 (京都市)

[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

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: