

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04217

研究課題名（和文）機能表面による気泡の捕獲・輸送・生成技術の構築と混相熱流動機構の究明

研究課題名（英文）Establishment of technology of bubble entrapment, transport, and generation using functional surfaces and investigation of flow and heat transfer mechanisms in multi-phase flows

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） 3,300,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、機能表面による気泡の捕獲・輸送・生成技術の構築と気液二相流場の熱流動機構の究明を目的として、水平チャンネル内気液二相流・自然対流気液二相流を対象とした実験を行った。前者の研究では上壁に機能表面を有するチャンネルを用いた実験を行い、撥水部と主流方向の角度が低い場合、機能表面の利用が気泡群の捕獲と輸送に対して有効であることを明らかにした。一方、後者の研究では機能表面を有する伝熱板を用いた実験を行い、撥水部の存在により伝熱促進が生じることを明らかにした。この促進は伝熱面近傍での液体混合の増加に起因し、それは撥水部で合体した気泡による揺動運動と界面からの渦放出によって誘起されると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義：本研究で得られる成果を利用することにより、気液二相流に関する数理モデルや数値計算手法の開発に貢献することができる。

社会的意義：本研究で得られる成果は伝熱促進・反応促進・抵抗低減技術に利用可能であることから、開発された技術を利用した二酸化炭素の削減により、低炭素社会の実現が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, bubbly flows in a horizontal channel and natural convection bubbly flows have been investigated to establish a technology of bubble entrapment, transport and generation using functional surfaces and clarify the flow and heat transfer mechanisms in multi-phase flows. For the former, the entrapment and transport of air bubbles were conducted using an oriented hydrophobic strip on a hydrophilic surface. Measurements showed that the use of functional surfaces was a promising way of directing air bubbles in bubbly flows. For the latter, velocity and temperature measurements were carried out under a constant wall heat flux. Measurements showed that the heat transfer coefficient with bubble injection was higher with the functional surfaces than without the surfaces. This resulted from the promotion of wall-normal mixing of warm and cold liquid, which was induced by the activation of both wobbling motion of coalesced rising bubbles and vortex shedding from these bubbles.

研究分野：熱工学

キーワード：混相流 対流熱伝達 機能表面

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

気泡は、機械・化学・船舶・医療など幅広い分野で利用されており、多くの場合、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。例えば、自然対流熱伝達の効果的な促進法の1つである気泡注入法では、ミリバブルの場合、伝熱面近傍の気泡の界面運動に伴う渦放出が、また、マイクロバブルの場合、気泡群の間欠的バースティング運動が熱伝達促進の主な支配因子となる。また、大型船舶の摩擦抵抗低減技術の1つであるマイクロバブル法では、壁面に集積した気泡群の運動形態が乱流境界層の構造を支配している。このため、壁面近傍の気泡挙動の制御が可能となれば、気泡利用効果の飛躍的な向上が期待できる。

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利用した、気泡の捕獲・輸送・生成技術を構築し、その利用時における混相熱流動機構を実験的に究明することである。ここでは、水平チャンネル内気液二相流、自然対流気液二相流に対して調査を行う。

3. 研究の方法

3.1 実験装置および実験方法

(1) 水平チャンネル内気液二相流

実験装置の概略図を図1に示す。実験装置は、上流チャンバー、矩形流路、テスト板、下流チャンバー、気泡発生装置、ポンプおよび流量計から構成された。作動液体には 22°C の水道水を使用した。テスト板は流路内部の上壁に取り付けられた。座標軸は、流れ方向を x 、垂直方向を y 、スパン方向を z ($z=0$: テスト板中央) とした。レイノルズ数 Re は $Re = u_b h / \nu$ として定義した。ここで、 u_b は主流方向バルク速度、 h は流路高さ、 ν は水の動粘度である。

機能表面を有するテスト板の概略図を図2に示す。テスト板は、厚さ 25 mm のアクリル板、熱水処理が施された厚さ 200 μm のアルミ板、および厚さ 130 μm のテフロンテープにより構成され、アルミ板およびテフロンテープの表面はそれぞれ、親水性 (HPI)、撥水性 (HPO) を有する。撥水部と主流方向の角度 ϕ は 15, 30, 45, 60° とし、撥水部の流れ方向の長さは 50 mm とした。

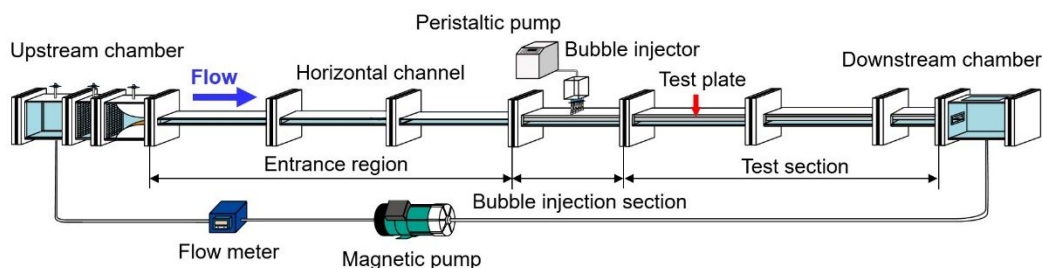


図1 実験装置

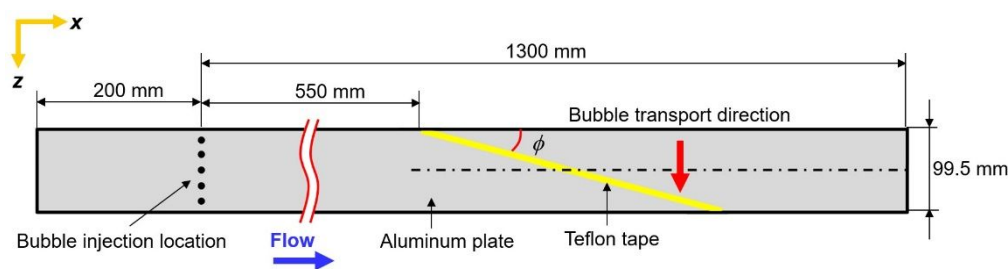


図2 機能表面を有するテスト板

(2) 自然対流気液二相流

実験装置の概略図を図3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。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。作動液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。

機能表面を有する伝熱板の概略図を図4に示す。カプトンテープ上にテフロンテープを部分的に張り付けることによって伝熱面表面の機能化を図った。テフロンテープ、およびカプトンテープの表面はそれぞれ、撥水性 (HPO)、親水性 (HPI) を有する。加熱開始点は伝熱板の先端から 100 mm 下流の位置とした。また、撥水部の流れ方向の長さ L_H は 1, 2, 4 mm とした。

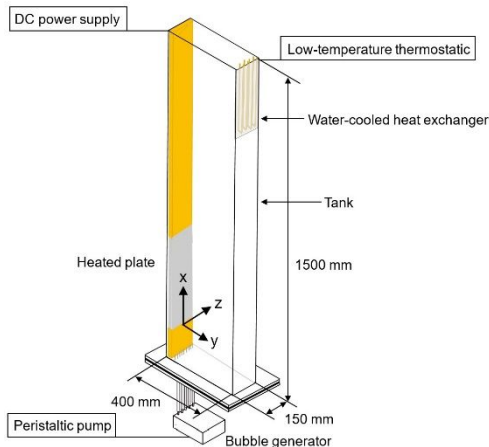


図3 実験装置

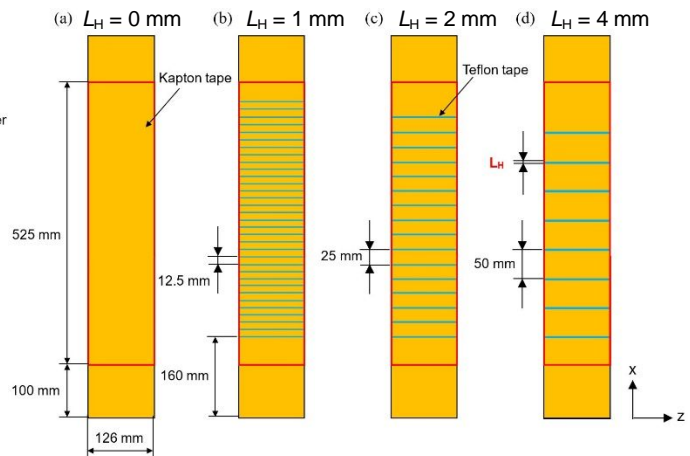


図4 機能表面を有する伝熱板

3.2 計測手法

(1) 水平チャンネル内気液二相流

気泡群の可視化には高速度カメラ, 2 台の LED 光源およびパソコンを用いた. テストプレートに沿って移流する気泡群を撮影するために, カメラおよび LED 光源を流路下部に設置した.

(2) 自然対流気液二相流

温度計測には K 型熱電対, 氷冷式基準接点, およびデータアキュイジションユニットを使用した. 一方, 気液二相速度計測には DPSS レーザー, ND フィルター, シリンドリカルレンズ, 赤色 LED 光源, カラー CCD カメラ, およびパソコンを用い, トレーサ粒子には多孔質粒子を用いた.

4. 研究成果

(1) 水平チャンネル内気液二相流

$\phi = 30^\circ$, $Re = 2000 \sim 5000$ の条件にて撮影された移流気泡群の可視化画像を図 5 に示す. $Re = 2000$ の条件では, 全ての注入気泡が撥水面で捕獲され, 気泡同士の合体の結果として, 大きな気膜が生成される (図 5a). $Re = 3000$ の条件では, 撥水面後方エッジにて, 気泡同士の合体により, 部分的に気膜生成が生じ, エッジに沿って輸送される (図 5b). $Re = 4000$ の条件では, 合体した気泡がエッジに沿って輸送されるが, 流体抵抗の増加により, エッジから離脱する気泡が確認できる (図 5c). 最後に, $Re = 5000$ の条件では, 撥水面で捕獲されずにそのまま下流に移流する気泡が多く存在する (図 5d).

機能表面の利用による気泡群の輸送効果を議論するため, 気泡輸送率 Γ を図 6 に示す. 気泡輸送率は $\Gamma = 1 - \alpha_D / \alpha_U$ によって定義される. ここで, α_U は撥水部の上流における気泡存在頻度であり, α_D は撥水部の下流におけるそれである. 全ての気泡が z 座標負の領域から正の領域に輸送される場合, $\Gamma = 1$ となる. 図 6 から, $Re = 2000$ の条件では, 全ての角度において, Γ が 1 近くの値となり, 注入された気泡はほぼ全て輸送されていることがわかる. また, $3000 \leq Re \leq 5000$ の範囲では, Re および ϕ の増加とともに, Γ が低下する. 一方, $\phi = 15^\circ$ の条件に着目すると, いずれの Re 数においても, Γ は 0.9 よりも高くなり, おおむね全ての注入気泡の輸送に成功している. このため, 機能表面の利用は, 特に, 撥水部と流れ方向の角度が低い場合, 水平チャンネル内気液二相流の気泡群輸送に対して有効であると言える.

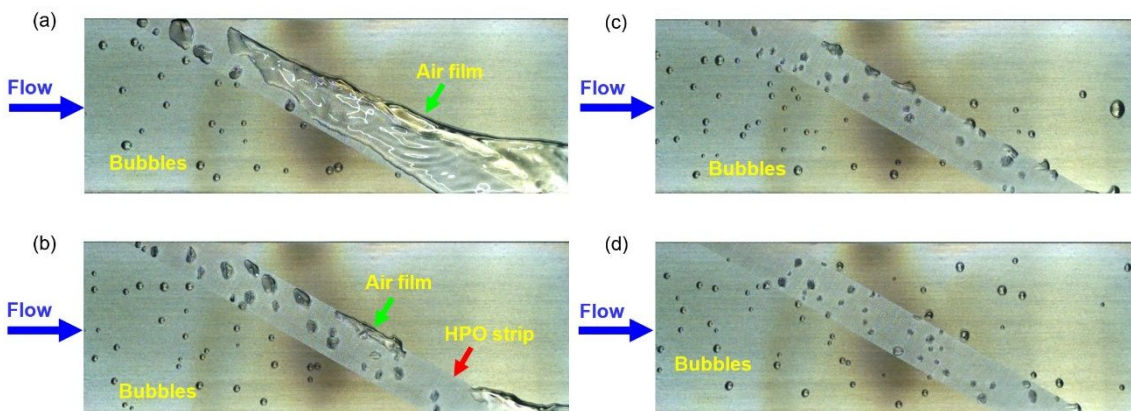


図5 気泡群可視化画像 (a) $Re = 2000$ (b) $Re = 3000$ (c) $Re = 4000$ (d) $Re = 5000$

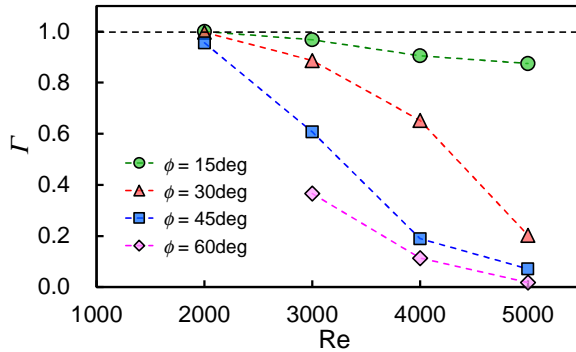


図6 気泡輸送率

(2) 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7に示す。図中の TPF, SPF はそれぞれ二相流（気泡注入時）、単相流（気泡非注入時）を意味する。図7より、部分的な撥水部の存在により、いずれの条件においても熱伝達が促進していることがわかる。特に、 $L_H = 2\text{mm}$ の場合の熱伝達率が広範囲の x に対して最も高くなる。

$x = 150\text{mm}$ の位置における液体上昇速度 u_L 、壁垂直方向の液体変動速度 v_L' の RMS 値 $\langle v_L'v_L' \rangle^{0.5}$ 、レイノルズ応力 $\langle u_L'v_L' \rangle$ の分布を図8-10に示す。ここで、 u_L は主流方向の液体変動速度である。図8より、撥水部の有無にかかわらず、気泡注入時の u_L は気泡非注入時のそれに比して著しく高くなる。これは、気泡非注入時の液体上昇速度に比して極めて高い上昇速度を有する気泡群の液体連行によって誘起される。また、撥水部の存在により、伝熱面近傍の u_L が低下する。伝熱面近傍の液体上昇速度の低下は、非加熱領域（伝熱面の加熱開始点上流部）からの低温液体の温度境界層への輸送を抑制するため、伝熱劣化をもたらす。図9より、撥水部の存在により、 $\langle v_L'v_L' \rangle^{0.5}$ が増加することがわかる。伝熱面付近での $\langle v_L'v_L' \rangle^{0.5}$ の増加は、高温液体と低温液体の混合を活発化させることから、伝熱促進をもたらす。図10より、撥水部の存在は伝熱面付近の $\langle u_L'v_L' \rangle$ の低下を招くことがわかる。 $\langle u_L'v_L' \rangle$ の低下は、非定常渦運動の抑制を意味するため、伝熱劣化をもたらす。

図8-10で示された速度計測結果を踏まえると、部分的な撥水部の存在に伴う熱伝達の促進は伝熱面近傍での液体混合の増加に起因しており、それは主に撥水部で合体した気泡による揺動運動と界面からの渦放出に誘起されると考えられる。

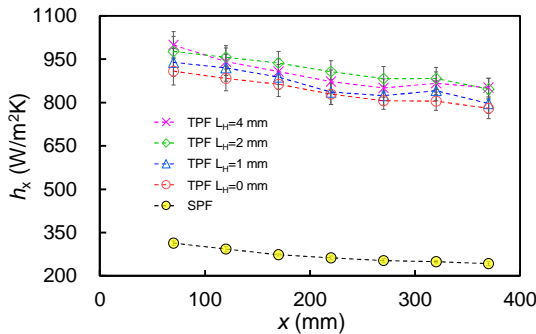


図7 熱伝達率

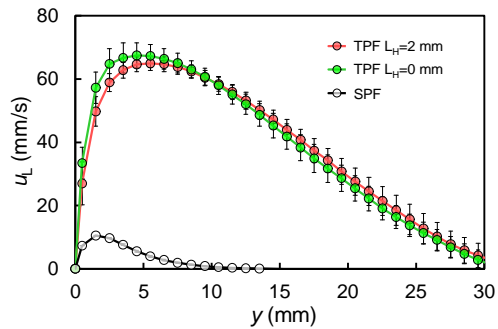


図8 液体上昇速度

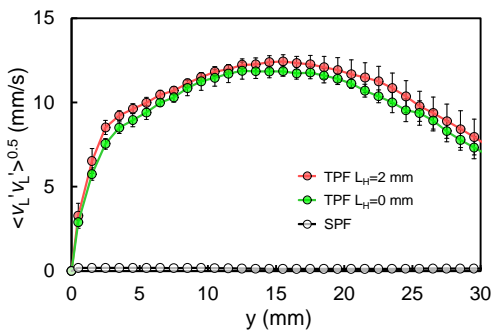


図9 壁垂直方向の液体変動速度のRMS値

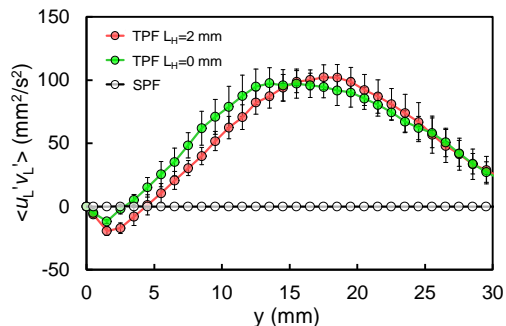


図10 レイノルズ応力

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Atsuhide Kitagawa, Petr Denissenko, Yuichi Murai	4. 巻 62
2. 論文標題 Entrapment and cross-flow transport of air bubbles by a hydrophobic strip in a turbulent channel flow	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Experiments in Fluids	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00348-021-03288-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Atsuhide Kitagawa, Reona Kobayashi, Yasuharu Munezane	4. 巻 14
2. 論文標題 Experimental investigation of natural convection bubbly flows along a vertical heated plate with mixed-wettability surfaces	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Visualization	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s12650-021-00819-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 小林玲緒奈, 北川石英
2. 発表標題 異なる濡れ性を有する鉛直加熱平板に沿う自然対流気液二相流の熱流動特性
3. 学会等名 混相流シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 里田大志, 北川石英
2. 発表標題 機能表面による水平チャンネル内気泡輸送の可視化計測
3. 学会等名 第48回 可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Taishi Satoda, Atsuhide Kitagawa
2. 発表標題 Visualization and measurement of bubbles transported by mixed wettability surfaces in a horizontal channel
3. 学会等名 Proc. 31th International Symposium on Transport Phenomena
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Atsuhide Kitagawa, Reona Kobayashi, Yasuharu Munezane
2. 発表標題 Flow and heat transfer characteristics of natural convection bubbly flow along a vertical heated plate with mixed wettability surfaces
3. 学会等名 Proc. 31th International Symposium on Transport Phenomena
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 里田大志, 野淵頌平, 北川石英
2. 発表標題 機能表面を利用した水平チャンネル内流れにおける気泡輸送
3. 学会等名 混相流シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 熊野友稀, 西村拓馬, 北川石英
2. 発表標題 フィルタ構造を有するマイクロチャンネル内流れにおける粒子捕獲
3. 学会等名 混相流シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsuhide Kitagawa, Daisuke Hara, Tomiki Kumano, Takuma Nishimura, Taishi Tonooka
2. 発表標題 Visualization of particle trapping in microchannels with different filter structure
3. 学会等名 Proc. 30th International Symposium on Transport Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Reo Eguchi, Atsuhide Kitagawa
2. 発表標題 Enhancement of natural convection heat transfer using bubble injection and mixed wettability surfaces
3. 学会等名 Proc. 30th International Symposium on Transport Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsuhide Kitagawa, Shohei Nobuchi, Taishi Satoda
2. 発表標題 Transport of bubbles in horizontal channel flow using mixed wettability surfaces
3. 学会等名 Proc. 30th International Symposium on Transport Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林玲緒奈, 北川石英
2. 発表標題 鉛直平行平板間自然対流気泡流の流動および熱伝達特性
3. 学会等名 混相流シンポジウム2021
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------