

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 1 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420118

研究課題名(和文)濡れ性を利用した微小流路内の二相流の界面制御

研究課題名(英文)Control of gas-liquid interface for two-phase flow in small scale channel by using surface wettability of the channel wall

研究代表者

川原 顕磨呂 (Kawahara, Akimaro)

熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・准教授

研究者番号：20224818

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)：サブミリ・ミリスケールの微小空間では、スケール効果により表面張力の影響が体積力よりも大きくなることが知られている。そこで本研究では、この表面張力の影響を積極的かつ効果的に利用することにより、微小流路における流体相界面の制御を行うことを目的とした。流体と流路壁面の濡れ性をコントロールすることにより二つの相(気相と液相、あるいは液相と液相)から成る二相流れにおける相界面形状(気泡の長さ)の制御し、圧力損失の低減をできることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This study is to investigate the effects of the surface wettability on gas-liquid two-phase flow in mini- and micro-channels. Experiments were conducted for air (or nitrogen gas)-water two-phase flow in horizontal rectangular channels. In order to know the effects of surface wettability on the two-phase flow in mini-channel in the channels, the wettability around the gas inlet part in the channel was changed by coating hydrophobic agent. Flow pattern, bubble length, liquid slug length, bubble velocity and pressure drop were measured. From the measurement data, it is found that the hydrophobic surface makes bubble length longer in both the micro- and mini-channels. And then, the longer gas bubble could reduce the pressure drop. From the pressure drop data, the correlation for predicting the pressure drop was newly developed by accounting for the surface wettability.

研究分野：流体工学

キーワード：二相流 濡れ性 気泡長さ 圧力損失

1. 研究開始当初の背景

サブミリ・マイクロスケールの微小流路内(以後、ミニ・マイクロ流路と呼ぶ)の流れは、CPU等の各種電子機器の冷却、携帯機器用燃料電池内の流れ、MEMS(Micro-Electro-Mechanical System)技術を利用したマイクロ分析およびマイクロ化学反応、バイオ技術等の様々な工学・医薬分野への応用が進められている。そのようなミニ・マイクロ流路を利用したデバイスの一つであるマイクロリアクタは単位体積あたりの表面積が通常装置のそれより格段に大きいという特長を持つことから、気-液、液-液、固-液反応のような界面での効率的な反応が期待されている。しかしながら、流れは層流であるので、微小流路に導入された二つの流体間(例えば、液相と液相、気相と液相)の混合は容易ではない。そこで、不活性ガスを導入して気泡と液スラグ(気泡と気泡の間に挟まれた液体)を形成させ、液スラグ内に生じる循環流れを利用して二液体の混合を促進することが考えられている。したがって、混合をコントロールするためには気液二相の流動制御、特に気体と液体の体積率(あるいは気泡および液体の長さ)を制御する必要がある。そのような制御を行う上で、さまざまな気液混合方法や流路形状の変化が提案されている。また、この気泡の長さや形状は、流路壁面の濡れ性に密接に関係しており、この濡れ性を積極的に利用すればさらなる混合促進が期待できると考える。しかしながら、微小空間における濡れ性の効果を調べた研究はほとんどない。

2. 研究の目的

本研究では、上記の背景から二相流を利用したデバイスを対象として、ミニ流路、マイクロ流路を用いて流路壁面の濡れ性が気液二相流れに及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、供試流路として水力学相当直径が1 mmの矩形流路(マイクロ流路)と3 mmのそれ(ミニ流路)を用いた。以下では、マイクロ流路における結果について報告する。

図1は供試流路の概略を示す。流路はアクリル樹脂製の矩形流路であり、水平面に配置した。Port 1と2から水を導入した。水導入部の流路は幅 $W = 0.5 \text{ mm}$ 、高さ $H = 1.0 \text{ mm}$ の長方形であった。Port 1と2からの流路はY字で幅1.0 mm、高さ1.0 mmの正方形流路につながった。次に、Port 3から窒素ガスを導入し、T字型の混合部でそのガスを水の流れに供給した。したがって、Section 1の混合部で気液二相流が生じた。二相流はP1~P3の圧力測定区間を通過し、Port 5から大気中に排出された。Port 4は実験中、常に閉じていた。

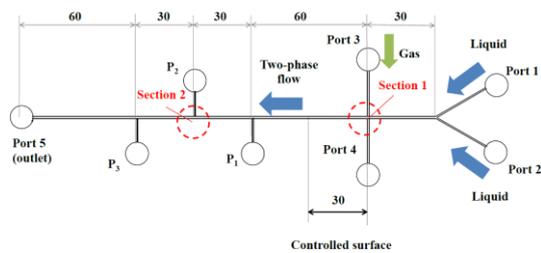
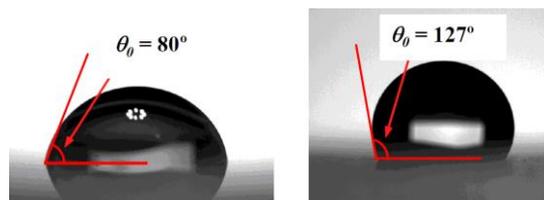


図1 供試流路の概略

流路は2枚のアクリル板を上下に合わせて作った。すなわち、下板に矩形断面の溝を加工し、その上に平らな板をかぶせた。次に、流路壁面の濡れ性による気液二相の流れへ影響を知るために、流路上板に疎水性のスプレー剤をコーティングした。予備試験の結果、気泡の発生に及ぼす気体導入部の影響が大きいため、混合部から30 mmの位置までの区間にコーティングをした。図2に示すとおり流路の壁面に液滴を落とし、その接触角 θ_a を測った結果、コーティング無しの θ_a は $\theta_a = 80^\circ$ 、コーティング無しのそれは $\theta_a = 130^\circ$ であった。すなわち、コーティングをした流路の方が濡れ性は悪い。



(a) コーティング無 (b) コーティング有
図2 流路壁面の濡れ性

4. 研究成果

図3に気泡の長さを流路幅で無次元化した L_G/W を気体と液体の体積流量比 Q_G/Q_L に対して示す。また、図中の実線は Garstecki らが矩形マイクロ流路を用いた実験に基づき提案した次式による計算値である。

$$\frac{L_G}{W} = 1 + B \frac{Q_G}{Q_L} \quad (1)$$

ここで、 B は気体混合部に依存する係数であり、本流路では $B = 1$ である。

濡れ性が比較的に悪い方(コーティング有)の L_G/W が良い方のそれより大きくなる。これは気液混合部近傍にコーティングを施したことにより、気泡導入時に気泡が引き伸ばされたためである。その流れの様子を図4に示す。気体の見かけ速度(見かけ速度=体積流量/流路断面積)が $jG = 0.1 \text{ m/s}$ 、液体のそれが $jL = 0.5 \text{ m/s}$ の条件下で、(a)に濡れ性が比較的に良い(コーティング無)、(b)に濡れ性が悪い(コーティング有)をそれぞれ示す。また、それぞれの写真は、右が混合部、左が試験区間の流れを示している。図(b)から

濡れ性が悪い場合、気体導入部で気体が引き伸ばされていることが確認できる。したがって、気体の流量を変えずに、流路壁面の濡れ性を利用することで気泡の長さを変化(制御)することができることが分かった。

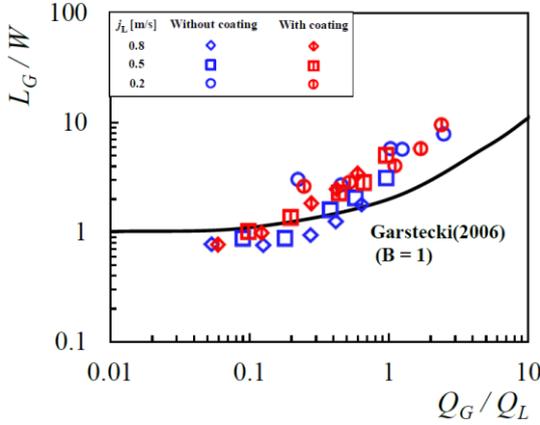


図4 気泡の長さ

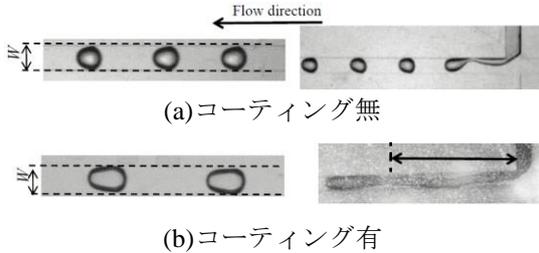


図5 観察された二相流の流れ

図5に二相流における摩擦圧力損失こう配 $(dP_f/dZ)_{TP}$ を気体の見かけ速度 j_G に対して示す。 $j_L \geq 0.5$ m/s の場合、濡れ性が悪い方の圧力損失が低下していることが分かる。これは、気泡が長くなった分、気泡の通過頻度が減少し、その気泡によって生じる液体スラグ内の渦の発生頻度が減少したためと考えられる。

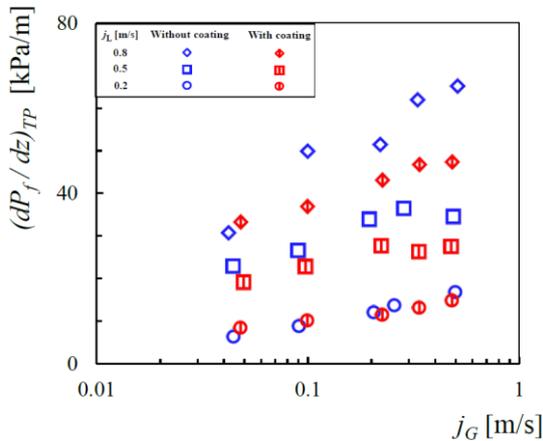


図6 気液二相流における摩擦圧力損失

次に、圧力損失の測定結果を Lockhart-Martinelli 法を用いた予測式と比較

してみた。Lockhart-Martinelli 法では、 $(dP_f/dZ)_{TP}$ は次式で表される。

$$\left(\frac{dP_f}{dZ}\right)_{TP} = \phi_L^2 \left(\frac{dP_f}{dZ}\right)_L \quad (2)$$

ここで、 ϕ_L^2 は二相摩擦乗数、 $(dP_f/dZ)_L$ は同一流路を液だけを流した時の圧力損失である。図7は二相摩擦乗数の実験値を次の Lockhart-Martinelli パラメータ X に対して示した結果である。

$$X = \sqrt{\frac{(dP_f/dZ)_L}{(dP_f/dZ)_G}} \quad (3)$$

ここで、 $(dP_f/dZ)_G$ は同一流路を気体だけを流した時の圧力損失である。さらに、図中の実線は、Chisholm & Laird による次式

$$\phi_L^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (4)$$

において、係数 C の値に Mishima-Hibiki の式を用いた時の計算値である。濡れ性の違いによらず X が減少すると ϕ_L^2 は大きくなる。一方、 X が一定の場合、 j_L が増加すると ϕ_L^2 は大きくなる。また、 $j_L \geq 0.5$ m/s の場合、濡れ性が悪い方(コーティング有)の ϕ_L^2 が小さいことが分かる。

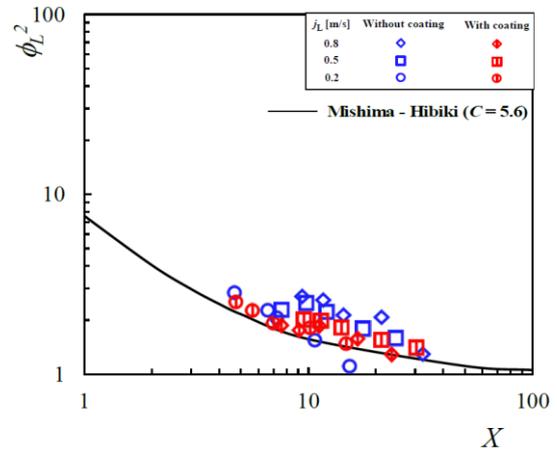


図7 二相摩擦乗数の実験値

Kawahara らは内径 0.25 mm のマイクロ流路を用いた実験から式(4)の係数 C について次式を提案している。

$$C = 1.38Bo^{0.04}Re_L^{0.25}We_G^{-0.12} \quad (5)$$

ここで、 Bo はボンド数、 Re_L は液相レイノルズ数、 We_G は気相ウェーバー数である。本実験値に適するように式(5)に気泡の長さの影響を考慮して、次式のように修正した。

$$C = 1.38Bo^{0.04}Re_L^{0.25}We_G^{-0.12}\beta^{0.2}\left(\frac{L_G}{W}\right)^{-0.1} \quad (6)$$

ここで、 β は気体体積流量比である。図 8 は実験値と式(2), (3), (6)を用いた計算値を比較した結果である。無次元気泡長さ (L_G/W) として気泡の長さを考慮することにより、気泡導入部の流路壁面の濡れ性の違いによらず、計算値は実験値と $\pm 30\%$ 以内で一致した。

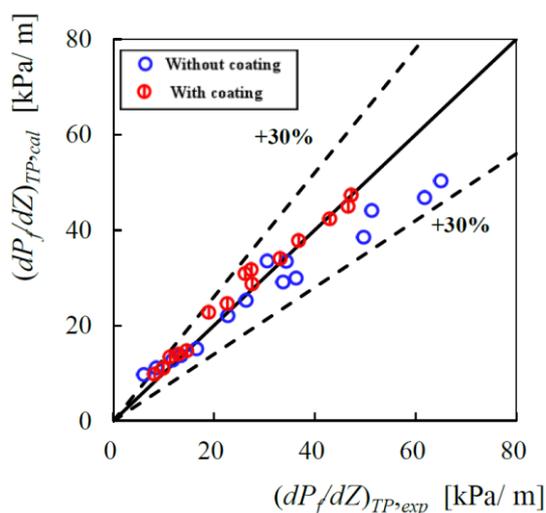


図 8 気泡長さを考慮した摩擦圧力損失の評価式による計算値と実験値の比較結果

最後にまとめとして、気泡導入部近傍の流路壁面の濡れ性を悪くすることで、気体の流量を一定に保ったまま、液体に導入される気泡の長さが長くなった。そして、それによって圧力損失が減少した。また、Kawaharaらの式に気泡の長さを考慮することにより圧力損失を評価することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

①Akimaro Kawahara, Michio Sadatomi, Wen Zhe Law, Mohamed H. Mansour, “Characteristics of Gas and Non-Newtonian Liquid Two-Phase Flows Through Circular Microchannel”, *Multiphase Science and Technology*, Vol. 27, Nos. 2-4, pp. 99-115 (2015).

R. Nagai, Y. Tabata, M. Sadatomi, A. Kawahara, ②A. Santoso, Experimental Study on Two-Phase Pressure Drop through Horizontal Mini-Channel with Y-Branch, *Journal of Mechanical Engineering and Automation*, Vol. 6, No. 3, pp. 78-84, (2016).

〔学会発表〕(計6件)

①K. Mitsuyasu, T. Takehira, A. Kawahara, Y. Yonemoto, M. Sadatomi, Surface Wettability Effects on Flow Characteristics in Two-Phase Flow Through Mini-Channel, *Proceedings of The 27th International Symposium on Transport Phenomena*, Paper No. ISTP27-057, 4 pages in USB memory, 20-23 September 2016, Honolulu, USA, (2016).

② Y. Tabata, R. Nagai, M. Sadatomi, A. Kawahara, Experimental study on gas-liquid

two-phase flow through horizontal rectangular mini-channel with Y-branch, *Proceedings of The 27th International Symposium on Transport Phenomena*, Paper No. ISTP27-055, 6 pages in USB memory, 20-23 September 2016, Honolulu, USA, (2016).

③Ritaro Nagai, Yuki Tabata, Michio Sadatomi, Akimaro Kawahara, Agus Santoso, Experimental Study on Two-phase Pressure Drop through Horizontal Mini-channel with Y-branch, *Proceedings of Global Symposium on Engineering and Applied Science (GSEAS)*, 8-10 March, 2016, Bangkok, Thailand, pp. 155-164 (2016).

④竹平知晃, 光安高二朗, 川原顕磨呂, 米本幸弘, 佐田富道雄, 矩形ミニチャンネル内を通過する気液二相流の流動特性に及ぼす濡れ性の影響, 日本機械学会九州支部第 68 期総会・講演会講演論文集, No.168-1, pp.189-190, (2016.3.15, 熊本大学)

⑤竹平 知晃, 光安高二朗, 川原顕磨呂, 米本幸弘, 佐田富道雄, 矩形ミニ流路内気液二相流の流動特性に及ぼす流路壁面の濡れ性の影響, 日本機械学会 2016 年度年次大会講演論文集, No.16-1, Paper No. J0270206, 4 pages in CD-ROM (2016.9.13, 九州大学).

⑥光安高二朗, 竹平知晃, 宮崎拓哉, 川原顕磨呂, 米本幸弘, 佐田富道雄, 矩形マイクロ流路内の二相流の流動特性に及ぼす濡れ性の影響, 日本機械学会九州支部第 69 期総会・講演会講演論文集, No. 178-1, pp. 81-82, (2017.3.14, 佐賀大学)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川原 顕磨呂 (KAWAHARA AKIMARO)

熊本大学・先端科学研究部・准教授

研究者番号：20224818

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

米本 幸弘 (YONEMOTO YUKIHIRO)

熊本大学・先端機構・助教

研究者番号：70516418

中島 雄太 (NAKASHIMA YUTA)

熊本大学・先端科学研究部・准教授

研究者番号：70574341

(4) 研究協力者

()