

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05801

研究課題名(和文) 気液界面制御可能な表面微細構造によるマイクロチャネルの流動抵抗・流入抵抗の低減

研究課題名(英文) Reduction of inlet and flow resistance of microchannel by microstructure capable of controlling gas-liquid interface

研究代表者

小方 聡 (Ogata, Satoshi)

首都大学東京・理工学研究科・准教授

研究者番号：50315751

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：表面構造で抵抗を制御可能な壁面を創生するため、表面構造とマイクロチャネル流れの流動抵抗や流入抵抗の関係を調査した。気液界面形成過程の可視化観察により、微細構造の形状やサイズおよび濡れ性により三重線および気液界面挙動が大きく変化することが分かった。これらの挙動は4パターンに大別され、主流流速と三重線の速度、および微細構造の形状によりどのパターンが出現するかが決定されることを明らかにした。一方、疎水性壁面上の三重線挙動の非定常性を利用し、堆積した粒子を効率良く運搬する方法を新しく考案した。さらに、微細な親水性網目構造を有する壁面を用いて、層流域における抵抗減少効果を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We investigated the effect of the surface microstructure on inlet and flow resistance of microchannel in order to create wall surfaces that can control the resistance. Experimental results revealed the following. Flow Visualization results showed that triplet lines and gas-liquid interface behaviors greatly changed due to the shape and dimension of microstructure and wettability. These behaviors were roughly divided into four patterns, which pattern was determined by the mean flow, the velocity of the triplet line, and the shape of microstructure. We proposed a new method of transporting sediment particles by using the unsteadiness of the triple lines on the hydrophobic surface. By using a wall with a fine hydrophilic network structure, laminar drag reduction was obtained.

研究分野：流体工学

キーワード：抵抗低減 疎水性 親水性 濡れ性 微細構造

1. 研究開始当初の背景

省エネルギーや地球温暖化防止の観点から、流体の流動における抵抗低減が注目されている。現在では工業製品の小型化が進み、MEMS に代表される非常に小さいスケールの装置が作られるようになってきた。装置の小型化は、省エネルギーの促進ばかりでなく省資源化に繋がるため重要であるが、現時点で解決すべき問題も多い。装置の小型化を妨げる要因として、本研究では流体工学に関連する①流路の微小化とともに大きく増加する圧力損失、②疎水性の流路で生じる流入圧力の増大、に着目した。マイクロチャネル流れの工業的応用先であるマイクロ化学チップやマイクロ熱交換器などで使用する液体や溶液は、化学反応、細胞培養、吸着抑制などの点からチャネル内の親水・疎水性の性質が変えられない場合が多い。機器の高性能化・高効率化や小型化のためには、表面の性質を変えずに、流動を自在に制御(低減・増加)させる手法の確立が必要である。

良く知られているように、マイクロチャネル流れの流動抵抗は表面を疎水性にすることで低減可能である。低減メカニズムに関連して、これまでの研究では気泡界面が重要な役割を担っていること、界面位置と抵抗低減率に密接な関連があることが明らかにされた。しかしながら、現時点では親水性壁で抵抗低減を得たという報告はない。従来の疎水性壁を用いた抵抗低減に関しても、気泡が安定して構造内に存在し続ける条件や抵抗低減に最適な微細構造に関する知見もほとんどない。

2. 研究の目的

親水性・疎水性などの表面の化学的性質に依存せず、表面構造のみでマイクロチャネル流れの流動抵抗や流入抵抗を自在に制御させることが可能な壁面を創生するため、以下の項目を明らかにする。

- (1)気液界面形成メカニズム・・・微細構造に液体が流入する様子、構造内に微細気泡が形成される様子を詳細に明らかにする。特に、固・気・液の三相が接する線の移動速度に着目し、この移動速度に及ぼす微細構造パターン・表面張力・平行接触角・Re 数の影響などを明らかにする。
- (2)微細構造が抵抗に及ぼす影響・・・規則的・ランダム表面微細構造がマイクロチャネル流動の流動・流入損失に及ぼす影響を実験的に明らかにする。
- (3)新規壁面の創生・・・流動抵抗や流入抵抗を低減可能な新しい親水・疎水性壁面を創生する。

3. 研究の方法

供試流体には純水とエタノール混合液を用い、エタノール濃度を 0%から 100%まで変化した供試流体を使用した。各供試流体に対する試験流路の濡れ性を評価するために、

液滴の平衡接触角、前進接触角、後退接触角を測定した。

本実験で使用したマイクロチャネルの概略図を図 1 に示す。マイクロチャネルは Test spacer をアクリル板および Under cover で挟み込むことによって矩形流路を形成し、Top cover を介して同一トルクでボルト締めしている。Test space、Under cover、Top cover はステンレス鋼 SUS304 製である。Test spacer は中央部に幅 1mm、長さ 50 mm の矩形スリットを有し(図 2)、スリット部には図 3 に示す微細構造加工が施されている。本研究では表 1 に示すような 4 種類の微細構造を用意した。Test spacer は微細構造を施した後、トリアンチオールによる撥水加工を行った。

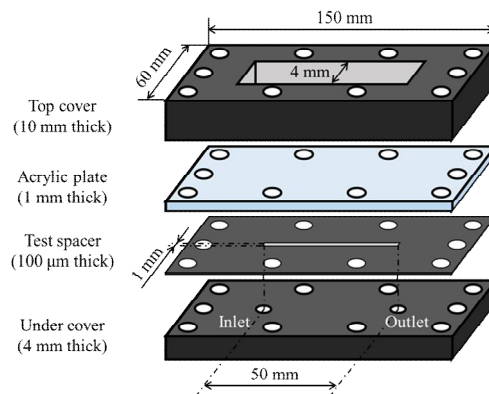


図 1 マイクロチャネル概略図

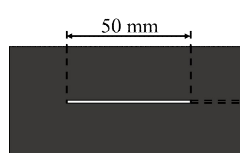


図 2 チャネル寸法

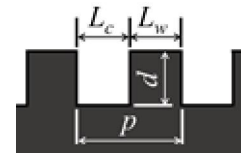


図 3 微細構造

表 1 微細構造の諸元

Channel	L_c [μm]	L_w [μm]	d [μm]	p [μm]	d/L_c [-]
Channel A	100	100	200	200	2
Channel B	50	50	100	100	2
Channel C	100	100	100	200	1
Channel D	200	200	100	400	0.5

微細構造内に気液界面が形成される様子を図 4 に示す実験装置を用いて観察した。装置はマイクロチャネル、高倍率ズームレンズ (VW-Z450, KEYENCE) または長距離ズームレンズ (VW-Z35, KEYENCE) を装着したハイスピードカメラ (VW-9000, KEYENCE)、シリンジポンプ (Nexus 6000, Chemyx Inc.) により構成されている。実験は流路内が空気満たされた状態から開始し、Inlet から 5 mm の地点をハイスピードカメラにより、気液界面の前進および微細構造近傍における気液界面の挙動の観察を行った。前者の場合には長距離ズームレンズの倍率 200 倍、フレームレート 1000 fps で撮影を行い、後者の場合に

は高倍率ズームレンズの倍率 450 倍、フレームレート 4000 fps で撮影を行った。

また、気液界面が形成される際の流体の詳細な流れを明らかにするために、供試流体にトレーサ粒子を添加して PIV 計測を行った。撮影は高倍率ズームレンズの倍率 450 倍で行い、フレームレートは 1000 fps とした。トレーサ粒子は Nylon particle (KANOMAX 製、密度 1.02 g/cc, 平均粒径 4.1 μm) を用いた。

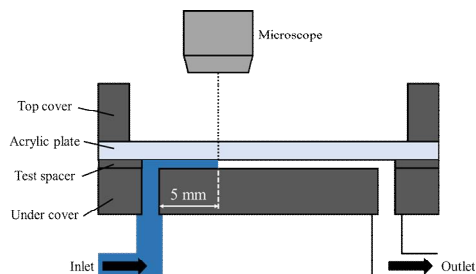


図 4 可視化方法の概要

4. 研究成果

Channel C においてエタノール 0% (純水) とエタノール 100% の各溶液が流れる様子を観察した。各溶液の観察結果を図 5 に示す。供試流体は左から右に流れており、気液界面は深さ方向への湾曲により黒く映っている。エタノール 0% (図 5a) では、気液界面が下流側に凸形状であり、流路壁面ではキャビティに気泡がトラップされていることが分かる。エタノール 100% (図 5b) では、気液界面が上流側に凸形状であり、流路壁面での気泡のトラップは観察されなかった。

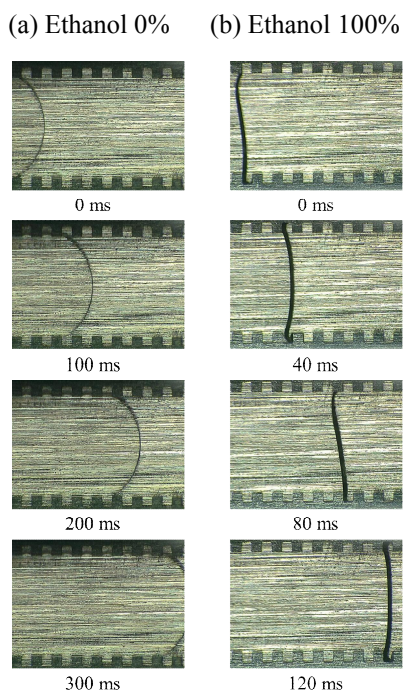


図 5 気液界面の移動の様子

実験の結果、観察された気液界面は図 6 に示すような 4 種類のパターンに分類され、固相・液相・気相が交わる点である三重線がそれぞれ異なる挙動を示した。各分類は、(a) 三重線がキャビティ内に浸入せず、キャビティ内に空気がトラップされる、(b) 三重線がキャビティ内に浸入するが、キャビティ内に空気がトラップされる、(c) 三重線がキャビティ内に侵入し、全ての壁面が濡れるがキャビティ内に気泡が存在する、(d) 三重線がキャビティ内に侵入し、キャビティ内が液相で満たされる、となった。Type (a) が観察された条件はエタノール濃度が 20% 以下の場合であり、微細構造の形状には依存しなかった。Type (b), Type (c), Type (d) では、エタノール濃度と微細構造のアスペクト比の両方に依存しており、エタノール濃度が高くなるにつれて、また、アスペクト比が小さくなるにつれて、Type (b) から Type (c) へ、Type (c) から Type (d) へと変化していく。

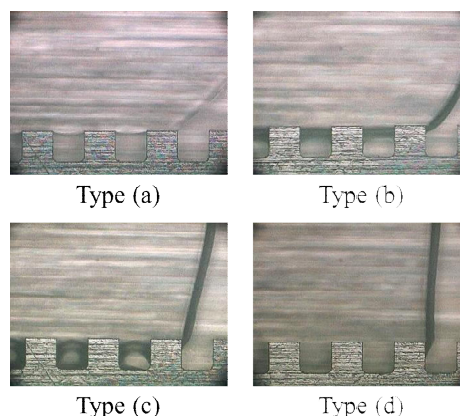


図 6 観察された界面の 4 パターン

主流流速に対する三重線の相対的な速度と微細構造の形状により (b) ~ (d) のうちの挙動を示すのかを予測することが可能であると考える。図 7 に主流流速 u により無次元化した、微細構造側壁を移動する三重線の速度 u_{down} を示す。計測の結果、 u_{down} はエタノール含有率の増加とともに増加した。ここで、主流の気液界面が微細構造の通過に要する時間は L_c/u 、三重線が微細構造の上端から下端へ移動するのに要する時間は d/u_{down} と概算することができるので、 $L_c/u = d/u_{down}$ を満たすときに三重線の挙動は (b) から (c) へ変化すると考えられる。図 8 にアスペクト比 d/L_c と三重線の無次元速度 u_{down}/u の関係を示す。図 8 において、点線で示す (b) と (c) の境界の傾きは $d/L_c \approx 2/3 \times u_{down}/u$ となった。本研究では u_{down} を約 1.5 倍大きく見積もっている可能性があるが、これはエッジ部におけるピン止めや三重線の速度が一定であるとは限らないことが影響していると考えられる。また、(c) から (d) へと変化する

場合には三重線が微細構造内を移動する時間は $(d + L_c)/u_{down}$ と概算できるので、(c)と(d)の境界線も図中の破線のように直線で表すことが可能である。

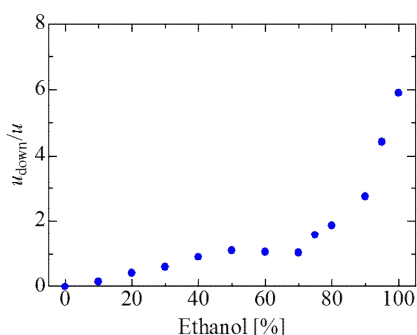


図7 三重線の移動速度とエタノール濃度

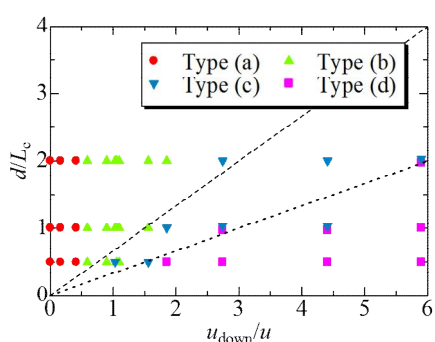


図8 気液界面パターンと d/L_c , u_{down}/u

気液界面が形成される際の詳細な流れを観察するために、供試流体にトレーサ粒子を添加してPIV計測を行った。図9に各気液界面形成過程のPIV計測を行った結果の代表例を示す。

Type (a)の気液界面形成過程では、気液界面が下流側の微細構造のエッジに到達した際に、流速の上昇が観察された(46 ms)。特に、微細構造上面から100 μm 位置での上昇が顕著であった(構造の一片は100 μm)。気液界面に近い地点だけでなく、気液界面から離れた位置においても流速が上昇していた。この流速の上昇は、三重線が微細構造のエッジに到達する頃には収まっていた(52 ms)。

一方、Type (b)の気液界面形成過程でも、Type (a)と同様に気液界面が下流側のエッジに到達した際に、流速の上昇が確認された(15 ms)。こちらもType (a)と同じように、微細構造上面から100 μm 位置での上昇が大きく、また、気液界面に近い位置だけでなく、気液界面から離れた位置においても流速が上昇していた。この流速の上昇は、Type (a)と比較して大きく、図9(II)–15msでは流速が速すぎるために粒子を追い切れていない箇所が目立った。また、三重線が微細構造のエッジに到達しても流速の上昇は収まらず0 msと比較して17 msは流速が大

きいことが分かる。

また、Type (c)に関してはType (a), (b)と同様に気液界面が下流側のエッジに到達した際に流速の上昇が確認された。また、三重線が微細構造のエッジに到達しても流速の上昇は収まりきっていなかった。Type (c)の気液界面形成過程では、三重線が微細構造内に浸入する際に微細構造内に向かうような流れが観察された。一方、Type (d)の気液界面形成過程では、気液界面が跳ね上がれようとして速度が上昇した。Type (d)は流速の上昇が最も大きく、特にB地点における流速の上昇が他のTypeの気液界面形成過程と比較して大きかった。

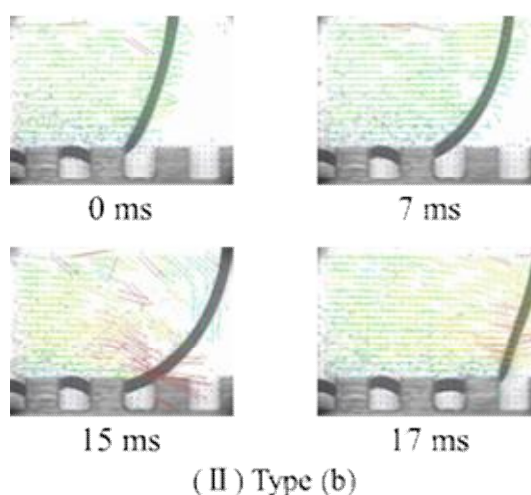
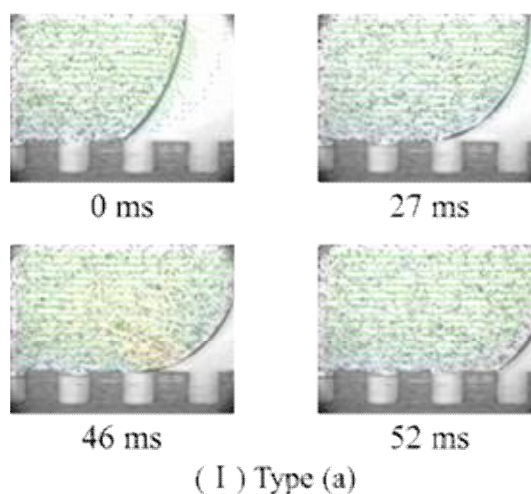
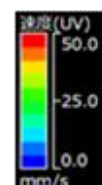


図9 気液界面形成過程のPIV結果

前述した疎水性壁面上の三重線の挙動の非定常性に着目して、これを壁面に堆積した粒子を効率良く運搬する方法に適用出来ることを発見した。具体的には、撥水性塗料を塗布した流路幅93 mm、長さ290 mmのアクリル樹脂性の流路に砂を散布し、その上に水

を流して排砂性能（砂などの微粒子を洗い流す性能）を調査した。流量は三重線が観察できるほど少量とした。その結果を図 10 に示す。図中のローマ数字は撥水塗料の塗布パターンである。縦軸は撥水塗料を塗布していない壁面に対しての性能の向上率を示している。図より明らかなように、撥水性を塗布すると排砂性能が向上することが分かる。その向上割合は流量が少ないときほど顕著であることが示された。これは、道路わきなどの排水溝に堆積した泥や砂などを洗い流す性能の向上に直結すると考えられる。

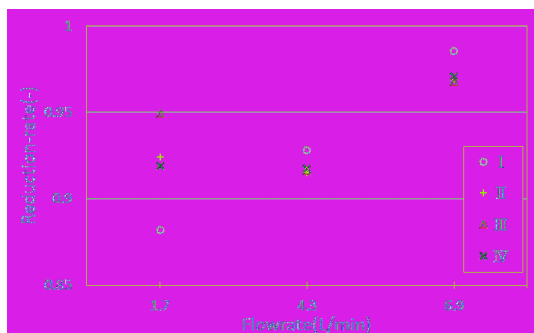


図 10 排砂性能に及ぼす撥水性の影響

一方、親水性壁面の抵抗減少効果に関連して、前述の微細構造より非常に小さい微細構造であるが、微細な親水性網目構造を有する壁面を用いて実験を行った。すなわち、矩形管の一片に親水性であるゲルを敷き詰めて、その圧力損失を測定した。本研究ではゲルとして食用の寒天を用いた。その結果を図 11 に示す。図中の S は寒天の膨潤度(水分量)である。膨潤度が高いほど寒天の濃度が低いことを意味している。図より、親水性壁である寒天壁で層流域における流れの抵抗減少効果が生じることが明らかになった。膨潤度の増加に伴って抵抗低減率は増加することが分かった。この抵抗減少効果は、寒天壁内部流動により説明できることを示した。

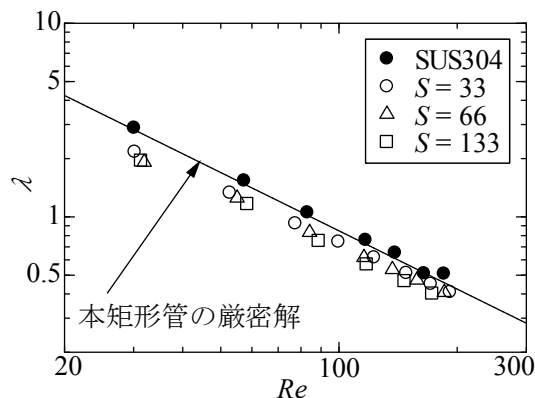


図 11 寒天壁の管摩擦係数

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

(1)Yanuar, Gunawan, Waskito, K.T., Ogata, S., Effect of agar jelly coating in rectangular pipe to flow drag reduction, Journal of Applied Fluid Mechanics, Volume 10, 2017, pp. 1161-1166, DOI: 10.18869/acadpub.jafm.73.241.26701

(2)小方 聡, 大保 忠司, 能見 基彦, 寒天ゲルを利用した流れの抵抗低減, 月刊『機能材料』(2017-11)

(3)山本 憲, 廣瀬 雄哉, 武澤 英之, 小方 聡, 気泡トラップによるマイクロチャンネル内スリップ流形成過程の可視化, 日本機械学会論文集, 2016, DOI:10.1299/transjsme.16-00164

[学会発表] (計 26 件)

(1)小方 聡, 大保 忠司, 能見 基彦, 高東 智佳子, 壁面性状が固液界面近傍流動に及ぼす影響に関する研究, 関東支部第 24 期総会・講演会, 2018 年

(2)佐野 智成, 小方 聡, 微細粒子の堆積とその流動挙動に関する研究, 第 65 回レオロジー討論会 2017 年

(3)青木 健司, 小方 聡, 大保 忠司, 能見 基彦, 高東 智佳子, 壁面性状が平板摩擦抵抗に及ぼす影響に関する研究, 関東支部第 23 期総会・講演会, 2017 年

(4)廣瀬 雄哉, 山本 憲, 武澤 英之, 小方 聡, キャピティを有するマイクロチャンネルにおける気泡トラップの可視化観察, 日本機械学会第 94 期流体力学部門講演会, 2016 年

(5)廣瀬 雄哉, 武澤 英之, 山本 憲, 小方 聡, 疎水性微細構造のアスペクト比と接触角が気液界面形成に及ぼす影響, 日本機械学会第 93 期流体力学部門講演会, 2015 年

[その他]

ホームページ等

<http://www.comp.tmu.ac.jp/ogatalab/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

小方 聡 (OGATA, Satoshi)

首都大学東京・理工学研究科・准教授

研究者番号：50313751

(2)研究分担者

山本 憲 (YAMAMOTO, Ken)

東京理科大学・工学部機械工学科・助教

研究者番号：70749100