

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 4月24日現在

機関番号：22604

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760134

研究課題名（和文）疎水性表面微細構造の最適化による層流域の抵抗減少効果に関する研究

研究課題名（英文）Laminar drag reduction by optimization of hydrophobic microstructure

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

研究成果の概要（和文）：流路壁面の表面性状（親水・疎水，表面構造）が気液界面の挙動に与える影響，その気液界面が抵抗減少効果に及ぼす影響を数値解析により明らかにした．本研究の結果，疎水性の表面微細構造の場合のみ，微細構造内に気泡を保持して気液界面を形成することが分かった．この気液界面は最大 33% の抵抗減少効果を生じさせる要因であることを示した．抵抗減少効果は気液界面の位置や配置，流路高さ， Re 数の影響を受けることを明らかにした．

研究成果の概要（英文）：We investigated the effect of the wall surface properties (hydrophilicity or hydrophobicity, surface microstructure) on the behavior of gas-liquid interface and the effect of the gas-liquid interface on the drag reduction in a micro channel by numerical simulation. Only if the microstructure with a hydrophobic surface, the gas-liquid interface is formed in the fine structure. The Gas-liquid interface is the factors that give rise to drag reduction effect up to 33%. The drag reduction effect is affected by the location and the elevation of the gas-liquid interface, the channel height, and the Re number.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：流体力学・混相流

キーワード：抵抗減少，層流，疎水性，マイクロバブル，マイクロチャンネル

1. 研究開始当初の背景

近年，MEMS 技術の発達に伴いマイクロ流体デバイスが注目され，その流体力学的観点からの性能向上が求められている．それに伴い，流れ場のスケールの小さい層流域における抵抗低減手法が注目されており，さまざまな研究が行われている．微小スケール流れでは，流路壁面の表面粗さ等の物理的性質や

疎水性・親水性に代表される化学的性質が流れに大きな影響を及ぼす．これに関連して，流路表面に疎水性微細構造を有する流路では，構造内に気泡が保持されることが知られている．そしてこの気泡によって流れに見かけのすべりが生じ，抵抗減少効果が得られることが実験的に明らかにされている．さらに，形成された気泡の形状が主流の流速によっ

て変化するとの報告もされている。

実験的研究とは別に数値シミュレーションを用いた研究も広く行われている。Sbragaglia と Sugiyama は格子ボルツマン法 (LBM) と有限差分法を用いて横溝を持つマイクロチャンネル内のすべり長さでレイノルズ数の関係を示している。Chang らは正方孔、正方ピラー、横溝、縦溝の4パターンのすべり境界条件が配置されたマイクロチャンネル流れの解析を行い、各パターンの幅やレイノルズ数がすべり長さを与える影響を解析した。しかし、これらを始めとした解析的研究において、微細構造内の気液界面の形成条件や、形成された後の気液界面の挙動の影響はほとんど考慮されていない。

2. 研究の目的

疎水性微細構造による抵抗減少効果に関して、気相の存在の重要性が指摘されているが、その界面の挙動を流動場で直接観察した研究はほとんどなく、気液界面挙動と抵抗減少効果の詳細な関係は分かっていない。この気泡が抵抗減少効果に及ぼす影響を明らかにするには、マイクロな視点からの気液界面の挙動や界面付近の流動特性を観測する必要があるが、そのスケールの小ささからこれらを実験的に明らかにすることは非常に困難であり、数値シミュレーションを用いた研究が必要となってくる。しかしながら、これまでに気液界面の形成や挙動を考慮した数値シミュレーションはほとんど為されておらず、レイノルズ数や接触角、微細構造のスケールなどが気液界面の形成や挙動に及ぼす影響、そしてその気液界面と抵抗減少効果の関係を明らかにする事は非常に重要であると考えられる。

よって、本研究ではマイクロスケール流れにおける流路壁面の表面性状が気液界面の挙動に与える影響を数値シミュレーションを用いて明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

気液界面の挙動の表現にはレベルセット法を用いた。支配方程式は非圧縮性のナビエ・ストークスの式および連続の式である。ナビエ・ストークスの式中の外力は表面張力項のみ考慮した。解析には有限要素法である商用個ソフトの COMSOL を用いた。

4. 研究成果

マイクロスケール流れにおいて、微細構造の形状や寸法や接触角が微細構造に形成される気液界面に及ぼす影響を明らかにした。解析は層流の矩形管内流れを対象とし、微細構造は流路下壁に付加した。本解析で用いた微細構造の形状の一例(キャビティパターン)を図1に示す。この他にもスパン方向に溝を

切ったりッジパターンも用意した。流路壁面の接触角は $\theta = 20^\circ, 60^\circ, 108^\circ, 130^\circ$ の4種類とし、 $20^\circ, 60^\circ$ は親水性を、 108° と 130° は疎水性を表現するものとした。流路を空気で満たした状態を初期条件とし、流路入口から 20°C の水を $Re = 10$ で流入させ、溝近傍の気液界面の挙動を解析した。図2および3に解析結果の代表例を接触角 $\theta = 60^\circ$ および $\theta = 108^\circ$ の場合について示す。図の青い部分は水を、無色部分は空気を表している。図に示すように、 $\theta = 60^\circ$ の親水性壁面の流路では時間とともに水が微細溝内に流入した。それに対し、図3に示す $\theta = 108^\circ$ の疎水性壁面の流路では、水が流入する際に微細溝内に浸入せず、表面張力によって微細溝上部に気液界面を形成した。このことから、微細構造に気泡を保持し続けるためには、微細構造表面の接触角が高い必要があるといえる。

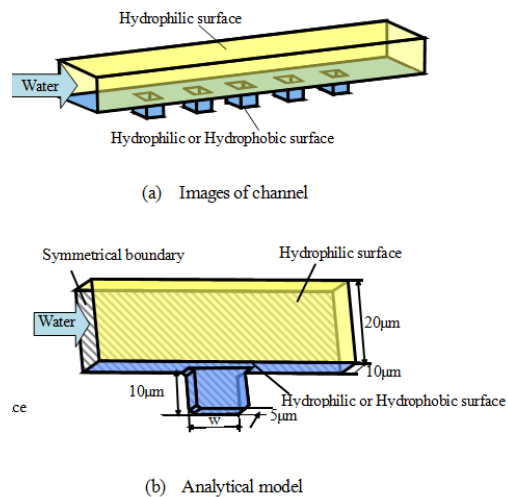


図1 解析モデル

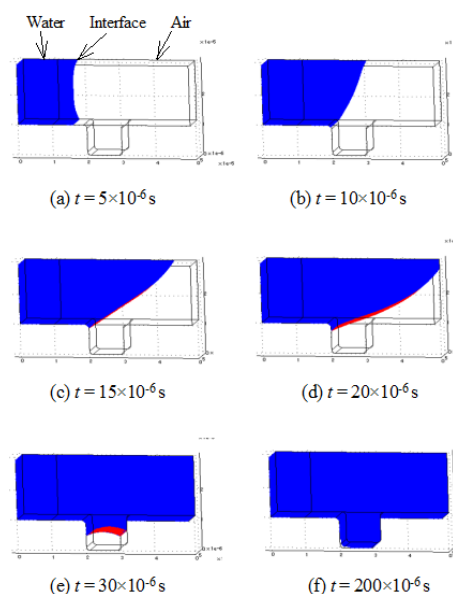


図2 気液界面の形成過程 ($w=10\mu\text{m}$, $\theta=60^\circ$)

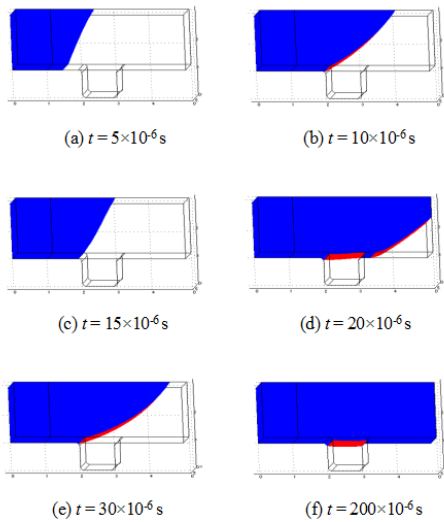


図3 気液界面の形成過程($w=10\mu\text{m}$, $\theta=108^\circ$)

次に、この気液界面が主流の状態に応じてどのように変化するかを調べた。つまり、微細構造上部に気液界面を形成させた後、上流に加える圧力を増加させ、界面挙動を観察した。図4に解析結果の一例として、 $\theta=130^\circ$ のリッジパターンの結果を示す。主流の差圧の上昇(Re数の増加)に伴い、気液界面が溝の奥へと下降していった。これは、増加した主流の圧力に表面張力で支えられている気液界面が耐えられなくなるためと考えられる。図5に各条件における主流の流入圧と界面下降距離の関係を示す。界面下降距離は微細構造の上端から界面の下端までの距離とした。どの条件においても、圧力の増加に伴って界面位置が下降している。また、 $\theta=130^\circ$ のキャビティパターン流路における界面が最も安定してその位置を保ち、 $\theta=108^\circ$ のリッジパターン流路における界面が最も主流の圧力の影響を受ける事がわかる。これより、本シミュレーションの流れ方向の幅を同じにした条件においては、リッジパターンに比べキャビティパターンの方が気液界面を安定した状態で保持出来ると言える。さらにリッジ、キャビティ両パターン流路において、 $\theta=108^\circ$ の壁面の方が $\theta=130^\circ$ の壁面よりも気液界面が大きく変化している。これは、より高い接触角を示す壁面を使用することで気液界面のラプラス圧が増加し、主流圧力の影響を受けにくい安定した気液界面を保てることを意味している。これらの結果は実験的に行われた気液界面の測定結果と定性的に一致する。

前述したように、壁面に微細構造を有する疎水性壁面は適切な条件では微細構造内に気相を保持する。従来の研究で示されているように、その気液界面上では液体は滑り、その結果抵抗減少効果が生じる。さらに、微細

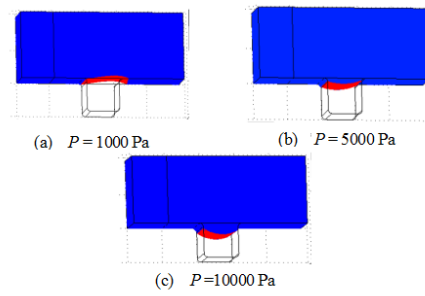


図4 主流圧力の増加による気液界面の移動

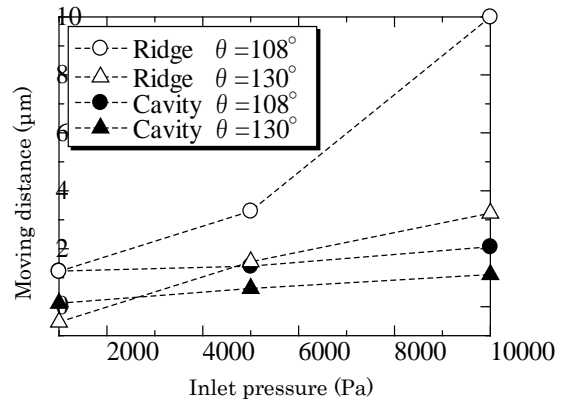


図5 主流圧力と気液界面移動距離の関係

構造に形成された気液界面は、主流の圧力によってその位置を変化させる。そしてこの気液界面の変化は、主流の流動抵抗に影響を及ぼすと考えられる。その気液界面の位置の変化をふまえ、Re数や気液界面の位置、流路の寸法が抵抗減少効果に及ぼす影響について考察する。

図6に解析を行う流路モデルを示す。界面部分はすべり境界条件として扱った。流路下壁のすべり・すべり無し境界条件の割合は1:1、界面の下降距離は0~10 μm の範囲とした。解析結果は溝部においてzだけ下壁を下降させた同形状の流路との比較を行った。

図7に抵抗低減率DRと無次元数 w/h の関係を示す。流路高さ h の減少およびすべり壁境界条件の長さ w の増加とともに、DRが増加することがわかる。この結果から、すべりによってより大きな抵抗低減を生じるためには、すべり面積割合が等しい流路であっても、一つ一つのすべり壁長さ w が流路に対して相対的に大きい値を持つ必要があると考えられる。気液界面割合が一定の場合にDRを増加させるためには現実的には流路サイズを減少させる方法が適していることが分かる。また、 w/h の値が小さいときはDRは w/h とともに増加するが、 w/h の増加とともに一

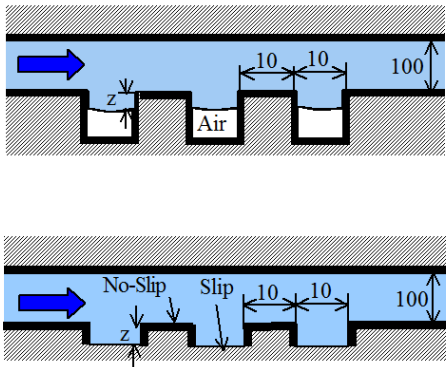


図6 気液界面が移動する場合の解析モデル

定の値に近づいていき、最大で33%となった。

図8に $w=10\mu\text{m}$ 、流路長さを $1000\mu\text{m}$ 、 $h=100\mu\text{m}$ の場合におけるRe数とDRの関係を示す。図より明らかなように、Re数の増加に伴ってDRは減少している。また、 $z=3\mu\text{m}$ と $z=10\mu\text{m}$ におけるDRはほぼ0であり、流動抵抗はすべりの有無に関わらずほとんど変化しなかった。これらの結果は、界面が下降するに従って気液界面でのすべりが主流に与える影響よりも、溝の存在による流路高の増加や粗さの影響が大きくなることを示唆している。これらの結果から、気液界面によって抵抗減少効果を得るためには、気液界面が微細溝内に下降していかず、微細溝上部でその位置を維持し続ける必要があるといえる。

研究の結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 壁面微細構造を有する流路における気液界面の挙動解析を行った。壁面接触角 $\theta=108^\circ$ 、 130° の表面微細構造では微細構造内に気泡を保持して気液界面を形成した。一方、 $\theta=60^\circ$ 、 20° では微細構造内に水が流入した。形成された気液界面は、主流の圧力や壁面接触角の影響を受けてその位置や形状を変化させた。
- (2) 流路壁面に固相(すべり無し境界条件)と気相(すべり境界条件)を交互に配置したモデルを用いて解析を行った結果、最大33%の抵抗減少効果が確認でき、抵抗減少効果は気相の配置や流路高さ、Re数の影響を受けることがわかった。抵抗減少効果は界面の位置にも依存し、本研究で行った流れの条件では界面が $3\mu\text{m}$ 以上溝の奥へと下降するとすべりによる抵抗減少効果は得られなかった。

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3件)

- ① Satoshi OGATA and Keigo SHIMIZU, Drag Reduction by Hydrophobic Microstructures, Journal of Environment and Engineering, Vol. 6, No. 2 (2011), pp. 291-301.

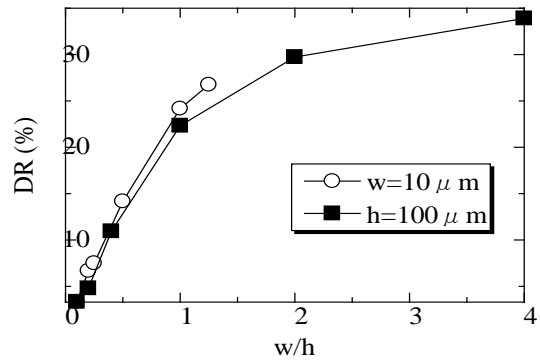


図7 抵抗低減率に及ぼすスケールの影響

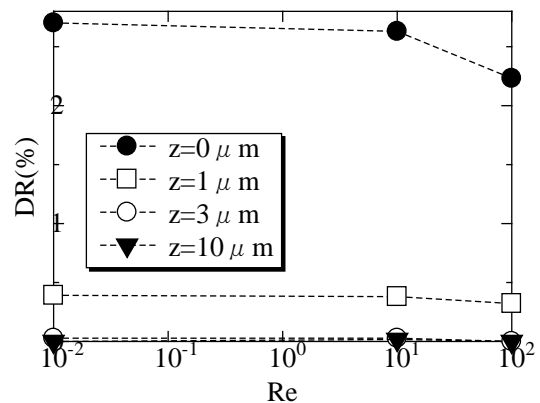


図8 抵抗減少率に及ぼす界面位置の影響

[学会発表] (計21件)

- ① 高橋智史, 小方 聡, 疎水性微細構造に形成されるマイクロバブルによる流れの抵抗低減 COMSOL conference 2011 Tokyo, 2011-12
- ② 川合智大, 小方 聡, マイクロチャンネル内流れにおける壁面性状の影響, 日本機械学会 2011 年度年次大会講演論文集, No. 11-1, Vol. 2, 2011-9.
- ③ 関川雅文, 小方 聡, 疎水性微細構造によるマイクロチャンネル流れの抵抗減少効果 日本機械学会 流体工学部門講演会, No. 10-8, 2010-10, pp. 357-358.

[その他]

ホームページ等

<http://www.eng.metro-u.ac.jp/fluid/home/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: 50315751