

平成22年 4月 1日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20760117
 研究課題名 (和文) 抵抗低減流体の壁面極近傍流動特性と乱流抵抗低減メカニズムに関する研究
 研究課題名 (英文) Flow characteristics of drag reducing fluids near the wall surface and turbulent drag reduction mechanism
 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)：抵抗低減流体である高分子水溶液および蒸留水のマイクロチャンネル内流れにおける壁面極近傍の流動特性を PTV とエバネッセント光を組み合わせて明らかにした。蒸留水の速度分布は壁面からの距離 z が $53\text{nm} < z < 300\text{nm}$ の領域において二次元ポアズイユの分布とよく一致し、従来の速度測定の分解能を大きく向上させることが出来た。一方、高分子水溶液の速度分布は、 $53\text{nm} < z < 300\text{nm}$ の領域で同一流量の蒸留水と比較して大きく増加した。その勾配は壁面近傍ほど大きくなった。また、この傾向は分子量の増加とともに顕著になった。

研究成果の概要 (英文)：The velocity profile of dilute polymer solutions and a distilled water near the wall surface in a microchannel was clarified using a particle tracking velocimetry technique combined with evanescent wave illumination. The results obtained for the velocity profile of a distilled water using fluorescent particles with a diameter of 20 nm was found that the resolution of the velocity profile near the wall surface was drastically improved from the conventional result. On the other hand, the velocity profile of dilute polymer solutions increased significantly compared with that of distilled water, and the gradient of the velocity profile increases with the increase of the molecular weight.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
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：流体工学・非ニュートン流

キーワード：抵抗低減, 非ニュートン流体, エバネッセント光, 速度分布,

1. 研究開始当初の背景

近年、工学的スケールの微小化と計測技術の発達にともない、微小スケールの流れ場における流体の流動が注目されている。このような微小スケールではマクロスケールと比

較して、流れに及ぼす固液界面の影響が無視できないほど大きい。これは、微小スケール流れが慣性力や重力よりも粘性力や表面張力の影響を強く受けることによる。マイクロデバイス内の反応の多くは壁面上で行われ

ることを考慮すれば、壁面極近傍での流体の挙動を知ることは重要であるといえる。

一方、抵抗低減流体として知られる高分子水溶液の流量は微小管内流れにおいてニュートン流体の流量より最大 15%増加するという報告がある。しかし、マイクロ PIV による速度分布測定では高分子と蒸留水の速度分布にほとんど違いがないことも同時に示された。よって、マイクロ PIV の測定限界以下の壁面極近傍領域のみで抵抗減少効果に起因する現象が生じていると考えられているが、主な要因とされるすべり層や希薄層の形成に関する実験的解釈、高分子の壁面吸着に関する知見は不十分である。

他方、壁面近傍の流動を観察する手法として、エバネッセント光顕微鏡を用いた研究が行われている。エバネッセント光顕微鏡は光の全反射時にしみだすエバネッセント場を利用することで、壁面から数百 nm の領域のみの蛍光粒子を観察出来るという利点を持つ。これを利用し、蒸留水と希薄高分子水溶液の壁面近傍における速度分布が異なることが報告された。しかしながら、測定は一種類の分子量の高分子のみであり、高分子水溶液の流動現象を考察するためのデータが不足していると考えられる。分子量が異なれば高分子の大きさだけでなく長さも異なるので、高分子の壁面吸着やバルク流れにも影響があると考えられるが、それが壁面近傍の流れに及ぼす影響は不明である。さらに、上述した実験において使用された蛍光粒子の粒径はエバネッセント光の観察領域と同スケールであるため、高分子水溶液だけでなくニュートン流体に対しても速度分布測定の分解能が不足していると考えられる。

2. 研究の目的

分子量の異なる希薄高分子水溶液およびニュートン流体である蒸留水に対し、エバネッセント場に対し十分に粒径の小さい蛍光粒子を用いて速度分布測定の分解能向上を目指すとともに、従来の研究と比較し、より壁面近傍領域での速度分布を明らかにし、高分子水溶液による抵抗減少効果のメカニズムの解明の一助とすることを目的とする。

3. 研究の方法

流れ場中の壁面極近傍観察にはエバネッセント光顕微鏡システムを用いる。エバネッセント光は光が全反射する際に生じるしみ出し光である。エバネッセント光の光強度 I は界面からの距離 z に従って、指数関数的に減少する。それは以下の式に示される。

$$I(z) = I_0 \exp(-z/d) \quad (1)$$

ここで、 I_0 は壁面における光強度、 d はしみだし深さを示す。しみだし深さは以下の式に示される。

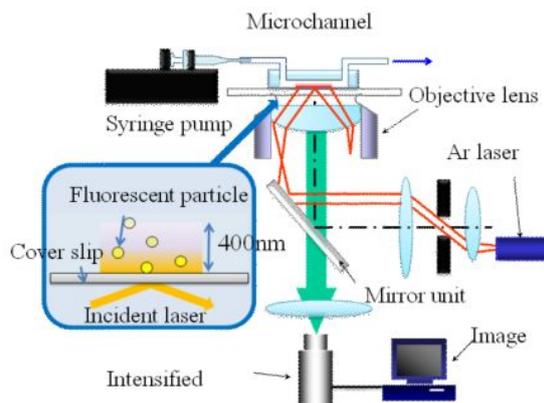


Fig.1 Evanescent wave illumination system

$$d = \frac{\lambda_0}{4\pi} (n_1^2 \cdot \sin^2 \theta_1 - n_2^2)^{1/2} \quad (2)$$

ここで、 λ_0 は入射光の波長、 n_1 はガラスの n_2 は供試流体の屈折率、 θ_1 は入射角である。 θ_1 を変えることによって d を変えることができる。本実験において、エバネッセント光は壁面から数百 nm 程度までの領域を照明する。図 1 にエバネッセント光顕微鏡システムを示す。装置はエバネッセント顕微鏡、アルゴンレーザー、ICCD カメラ、マイクロチャンネル、シリンジポンプから構成される。マイクロチャンネル内の測定部にエバネッセント光を生じさせ、壁面近傍の蛍光粒子を励起させる。生じた蛍光は ICCD カメラにより撮影される。

供試マイクロチャンネルは高さ $50 \mu\text{m}$ 、幅 1mm 、長さ 20mm である。観察面はガラス、流路は PDMS を用いて製作した。マイクロチャンネル内を流れる供試流体はシリンジポンプにより一定流量で供給される。しみだし深さを変化させ得られた蛍光粒子画像を PIV 解析し、それらをしみだし深さごとに積算することで蛍光粒子の平均速度分布を求めた。本実験ではトレーサー粒子として蛍光ポリスチレン粒子 $\phi 20\text{nm}$ および $\phi 100\text{nm}$ を使用した。また、供試流体として蒸留水および 5ppm の 4 種類の分子量のポリエチレンオキシド (SE-5, SE-15, SE-30, SE-70) 水溶液を用いた。分子量はそれぞれ 43,000, 150,000, 300,000, 580,000 である。また、自作の細管粘度計による粘度測定の結果、供試高分子水溶液の非ニュートン粘性は認められなかった。

4. 研究成果

図 2 に PIV 解析し得られた流路中蛍光粒子の移動速度を蒸留水および SE-30 5ppm について示す。(a) は静止状態、(b) は流動状態である。流速を与えると、分布が全体的に移動していることがわかる。ブラウン運動の移動確率密度分布は概ね正規分布と一致した。

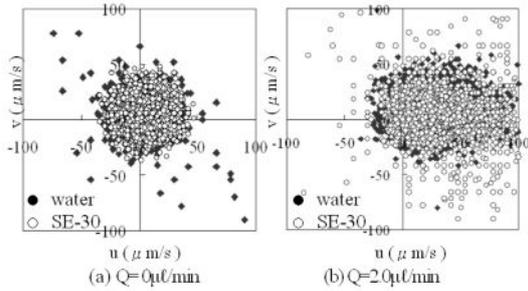


Fig.2 Particle position

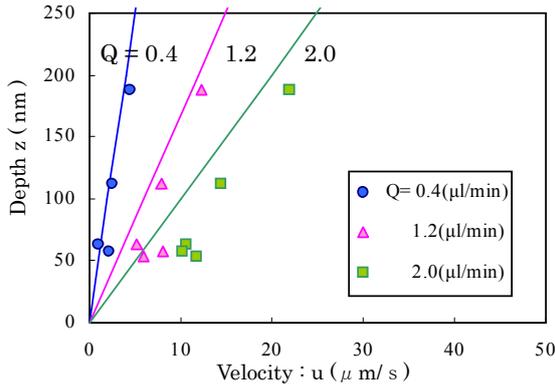


Fig.3 Velocity profiles of water with ϕ 20m tracer

図3に粒子径20nmのトレーサー粒子を用いた場合の蒸留水の水速度分布測定結果を示す。図中の実線はニュートン流体の二次元ポアズイユ流れの水速度分布である。縦軸zはエバネッセント光のしめだし深さの1/2に蛍光粒子半径を足したものであり、観察された粒子の中心を表している。図3より、粒子径20nmの水速度分布は二次元ポアズイユの水速度分布とよく一致しており、従来の粒子径100nmの結果と比較し、より壁面近傍の領域まで速度分布が測定可能であることが分かる。これは粒子径が100nmの場合、粒子径はエバネッセント光の観察領域(約数100nm)とほぼ同スケールであったため、z方向の分解能が不足したことによる測定限界だと考えられる。よって、粒子径20nmのナノ粒子を用いたエバネッセント光による速度測定は、壁面近傍でより有用であることがわかった。

図4に粒子径20nmの蛍光粒子を用いて測定した蒸留水および希薄高分子水溶液の水速度分布を流量0.4 (μ /min), 1.2 (μ /min), 2.0 (μ /min)の場合に対して示す。図中の実線はニュートン流体の二次元ポアズイユ流れの水速度分布である。粒子径20nmの希薄高分子の水速度分布は、同流量の蒸留水と比較してどの流速においても概ね増加した。また、希薄高分子水溶液の水速度勾配は壁面近傍ほど大きくなり、壁面からの距離の増加とともに速度勾配が減少した。

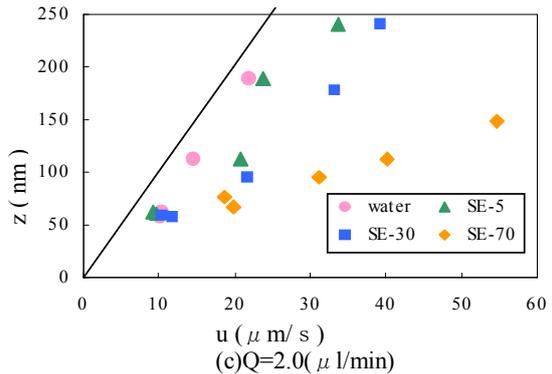
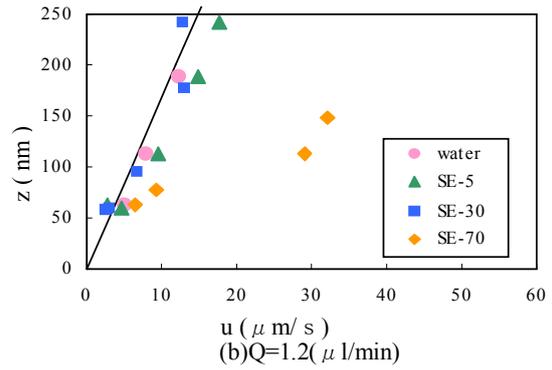
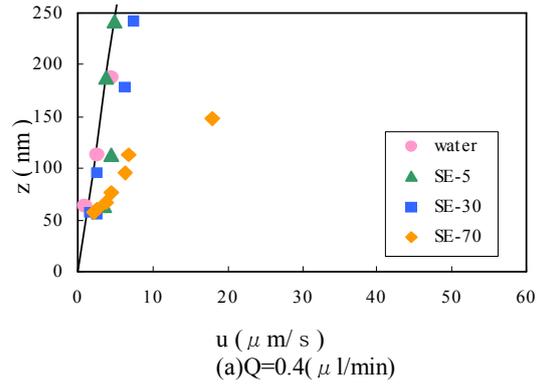


Fig.4 Velocity profiles in dilute polymer solutions.

ここで、高分子の吸着層の厚さが速度分布に影響を及ぼす可能性について考察する。流速が $0 \mu\text{m/s}$ となる壁面からの距離を高分子吸着層上部、見かけの界面と定義し、速度分布の近似曲線から、見かけの界面位置を求めた。表1に見かけの界面位置を示す。見かけの界面位置は約30-50nmを示し、高分子吸着層厚さはマイクロチャンネル高さの2%であり、速度分布への影響についてはわずかであると考えられる。また、流量が増加すると界面位置がわずかに下降傾向を示した。これは、高分子にせん断応力がかかると高分子の絡み合いが解けながら流れ方向に伸びるため高分子層が薄くなったためと考えられる。また、高分子の分子量が増加すると界面位置がわずかに上昇傾向を示した。これは高分子鎖が長くなると、高分子吸着層の体積が増加するためだと考えられる。

Table.1 Thickness of adsorption layer

Flow rate	SE-5	SE-30	SE-70
	(M_w : 43,000)	(M_w : 300,000)	(M_w : 580,000)
Q=0.4 μ l/min	51	37	53
Q=1.2 μ l/min	40	47	48
Q=2.0 μ l/min	34	31	37

本研究では、エバネッセント光による壁面極近傍のニュートン流体の速度分布測定技術の確立を目指すとともに、分子量の異なる希薄高分子水溶液の壁面極近傍における流動特性を明らかにすることを目的とし、エバネッセント場に対し十分に粒径の小さい粒径 20nm の蛍光粒子を用いて速度分布測定を行った。実験は $Re = 1.93 \times 10^{-5} \sim 9.63 \times 10^{-5}$ の範囲で行った。供試希薄高分子水溶液は 5ppm のポリエチレンオキサイド水溶液である。得られた結果を以下に示す。

(1) 蒸留水の速度分布は壁面極近傍 (53nm < z < 300nm) の領域において二次元ポアズイユの分布とよく一致することがわかった。粒子径が 100nm 以上の蛍光粒子を用いた従来の速度分布測定における測定限界が壁面から約 100nm であるのと比較し、エバネッセント光による速度測定の分解能を大きく向上させることが出来た。

(2) 希薄高分子水溶液の速度分布は、壁面極近傍 (53nm < z < 300nm) の領域で同一流量の蒸留水と比較して大きく増加した。その勾配は壁面近傍ほど大きくなり、壁面からの距離の増加とともに減少した。この傾向は分子量の増加とともに顕著になった。

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 6 件)

- ① 小方 聡, 清水 圭吾, 撥水性微細構造による抵抗減少効果に関する研究, 日本機械学会論文集, 査読有, 75 巻 758 号 B 編, (2009), pp. 1960-1966
- ② Satoshi OGATA and Takeshi FUJITA, Effect of Surfactant Additives on Generation and Development of Laminar Boundary Layer on a Flat Plate, Journal of Fluid Science and Technology, 査読有, Vol. 4, No. 3 (2009), pp. 558-566.
- ③ Ming YANG, Satoshi OGATA, Arata KANEKO, Keisuke YAMOTO, Development of Micro Metallic Valve for μ TAS, Journal of Solid Mechanics and Materials, Vol. 3, No. 5 (2009), pp. 729-738. 査読有

- ④ 渡辺 敬三, 小方 聡, バイオポリマーの抵抗減少効果に関する研究 (麹菌を培養した水溶液の円管内圧力損失), 日本機械学会論文集, 75 巻 752 号 B 編, (2009), pp. 585-589. 査読有
- ⑤ 小方 聡, 神田 健介, 小野塚 拓也, 楊明, エバネッセント光による壁面極近傍の流動測定に関する研究 (高分子添加がマイクロチャンネル内流れに及ぼす影響), 日本機械学会論文集, 74 巻 748 号 B 編, (2008), pp. 2452-2458. 査読有
- ⑥ Ken YAMAMOTO and Satoshi OGATA, 3-D thermodynamic analysis of superhydrophobic surfaces, Journal of Colloid and Interface Science, Volume 326, (2008), pp. 471-477. 査読有

[学会発表] (計 16 件)

- ① Satoshi OGATA and Keigo SIMIZU, Effect of textured hydrophobic surfaces on microchannel, 2009 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE2009-10678, Lake Buena Vista, Florida, USA (2009-11, 15)
- ② 高橋 翔子, 小方 聡, エバネッセント光による希薄高分子水溶液の壁面極近傍流動特性の評価, 日本機械学会 流体工学部門 講演会, (2009-11, 7~8), 名古屋工業大学, 愛知県名古屋市
- ③ 河野 雄飛, 神田 健介, 小方 聡, 楊明, エバネッセント光を用いた壁面近傍におけるナノ粒子の濃度分布の計測, 日本機械学会 2009 年度年次大会講演会, (2009-9, 13~16), 岩手大学, 岩手県盛岡市
- ④ 小方 聡, 新谷 大志, 極低 Re 数域の円柱周りの流れに及ぼす界面活性剤添加の影響, 日本機械学会 2009 年度年次大会講演会, (2009-9, 13~16), 岩手大学, 岩手県盛岡市
- ⑤ 小方 聡, 神宮 一斐, 神田 健介, 楊明, 3D-TIRFMによるナノ粒子密度分布測定と溶液の電気的影響の評価, 日本機械学会 2008 年度年次大会, 2008-8, 3~7 横浜国立大学, 神奈川県横浜市

他 11 件

[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