

非一様ゼータ電位場における電気浸透流の三次元過渡流動構造

Three-Dimensional Transient Structure of Electroosmotic Flow in Nonuniform Zeta-Potential Field

80717114 中村 翼 (Tsubasa Nakamura) Supervisor: 佐藤洋平 (Yohei Sato)

1. 緒言

マイクロ流体デバイスの液体輸送手段として広く用いられている電気浸透流は、流速が壁面帯電量の指標であるゼータ電位に比例する。マイクロチャンネル内では表面修飾や混合場の影響により壁面電位分布が複雑となっており^[1]、精緻な流動制御に向けて詳細な流動構造の把握が必要である。本研究では粒子追跡流速計 (PTV) および反復計測法を用いた高時空間分解能を有する三次元時系列速度計測を行い、非一様ゼータ電位場における電気浸透流動構造の解明を行うことを目的とする。

2. 電気浸透流の理論および流れのスケール解析

マイクロチャンネル内に液体を送液すると壁面が帯電することにより、壁面近傍にイオンが局在し電気二重層が形成される。このとき電界 E を印加すると層内のイオンが運動されて電気浸透流が発生する。壁面ゼータ電位 ζ_w が一様である時、電気浸透流速度 U_{eof} はすべり速度を有する流れとして以下の Helmholtz-Smoluchowski の式で与えられる。

$$U_{eof} = -\frac{\epsilon \zeta_w E}{\mu} \quad (1)$$

ϵ および μ はそれぞれ液体の誘電率および粘性係数である。図1のように、 $x=0$ を境にゼータ電位がステップ的に変化する $y=0$ の壁面と、任意のゼータ電位を有する $y=L$ の壁面で構成された流路を考える。壁面速度はステップ状分布、せん断応力はデルタ関数とする。 $y=0$ から発生した運動量は流路内の流体に輸送され、その際の緩和時間は次式で記述される^[2]。

$$\tau_{ef} = \frac{L^2}{\nu} \quad (2)$$

なお ν は液体の動粘性係数である。一方 $y=0$ における X 方向の速度勾配により、壁面と平行方向にも運動量輸送が生じるが、その拡散距離 δ_p は以下で表わされる。

$$\delta_p = \sqrt{2\nu\tau_{ef}} = \sqrt{2}L \quad (3)$$

3. 計測原理

電気浸透流速度 U_{eof} は、粒子の見かけの速度 U_p から粒子の電気泳動速度 U_{ep} を差し引くことで求められる。 U_p については、低レイノルズ数流れの再現性に着目し、図2に示すように電界印加時 $t=0$ msからの時系列計測を繰り返し、同時刻のベクトルを重ね合わせて空間的な速度情報を増加させる。その後、粒子のブラウン運動の影響およびPTVのアルゴリズム誤差を軽減させるために空間平均を行うことで算出する。また電気泳動速度 U_{ep} は事前に電流モニタリング法^[3] およびPTVを用いて計測を行う。

4. 計測装置および条件

撮像系は図3のように倒立顕微鏡および高速度カメラから構成され、反復計測のために直流電源とカメラの同期システムを構築した。パルクの計測は水銀ランプによる落射照明、壁面近

傍の計測は半導体レーザによるエバネッセント波照明を用いた。マイクロチャンネルは、異なる材質による非一様ゼータ電位場を有する流路として図4(a)に示すように幅700 μm 、深さ78 μm のI字流路を持つPDMSに、厚さ170 μm のホウケイ酸カバーガラスを貼り合わせて作製した。また表面修飾による非一様ゼータ電

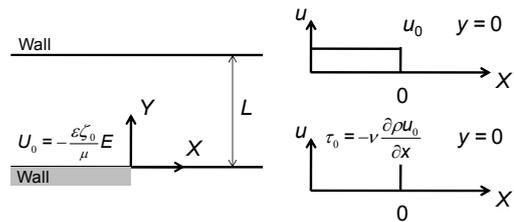


Fig. 1. Two-dimensional channel with step change zeta-potential.

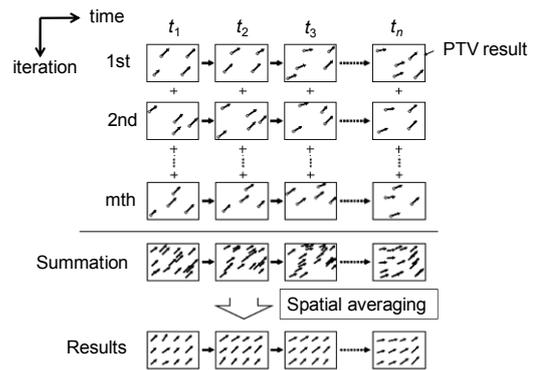


Fig. 2. Concept of iteration measurement method using PTV.

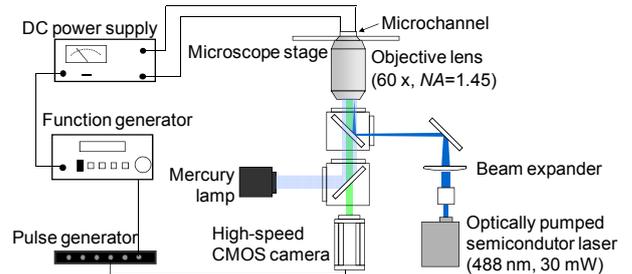


Fig. 3. Schematic of measurement system.

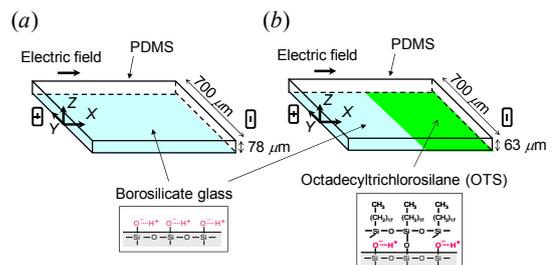


Fig. 4. Schematic of (a) PDMS-glass microchannel and (b) PDMS-glass-OTS microchannel.

位場を有する流路として、図4(b)に示すように幅700 μm 、深さ63 μm のI字流路を持つPDMSに、 $\mu\text{-CP}$ 法^[4]により片側半分をOTSで表面修飾したガラスを貼りつけて作製した。作動流体は5 mmol/l HEPES溶液に1 mmol/l KCl を加えて作製し、粒径500 nmのポリスチレン蛍光粒子を 1.22×10^{10} 個/ m^3 で混入した。電気浸透流の緩和時間 $\tau_{\text{eof}} = 10^{-3}$ sおよび電気泳動の緩和時間 $\tau_{\text{ep}} = 10^{-7}$ sを考慮し、時間分解能を400 μs と設定とすることで、電気泳動を準定常と見なして電気浸透流の過渡応答計測を行った。電界は $E = 250 \text{ V/cm}$ を印加し、電気泳動速度は事前の計測により $U_{\text{ep}} = 1335 \mu\text{m/s}$ と求められた。

5. 計測結果および考察

5.1. 異なる材質による非一様ゼータ電位場を有する流路

図4(a)に示した、異なる材質により構成された流路の幅方向中央における、深さ方向速度分布を図5に示す。壁面近傍速度が時間に依らず一定であるのに対し、流路中央では5 ms程度で定常に達する様子が捉えられ、(2)式から導かれる緩和時間 $\tau_{\text{eof}} = 6.83 \text{ ms}$ と良好な一致を示した。定常状態においては直線状の速度分布となっており、最小自乗法によるフィッティングから求めた壁面速度を(1)式に代入することで、ガラスのゼータ電位は -103 mV 、PDMSのゼータ電位は -77 mV と求めた。また、得られた壁面速度をすべり速度とする二次元ジェット流モデルとの比較を行った結果良好な一致を示したことから、異なる材質で構成される流路における電気浸透流は、異なるすべり速度を持つジェット流の重ね合わせとして表わされることが示された。

5.2. 表面修飾による非一様ゼータ電位場を有する流路

図4(b)に示した流路におけるガラス・OTS壁面近傍の速度分布を図6に示す。ガラス近傍速度が2100 $\mu\text{m/s}$ 程度であるのに対しOTS近傍速度が1600 $\mu\text{m/s}$ 程度となっており、表面修飾による速度抑制効果が確認された。図7(a)にXZ平面における速度ベクトルマップを示す。 $t = 0.5 \text{ ms}$ で $z = 0 \mu\text{m}$ および $z = 63 \mu\text{m}$ で運動量が発生しており、 $t = 4.5 \text{ ms}$ においては運動量が流路中央まで達することで定常状態となっている。またガラス近傍からOTS近傍に進むにつれて速度が落ち込むのに伴い、連続の法則より深さ方向流れが発生している様子が分かる。図7(b)に以下の連続の式から求める、 $z = 8.8 \mu\text{m}$ における深さ方向速度分布を示す。

$$\frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial u}{\partial x} \quad (4)$$

深さ方向流れが発生している領域は $x = 60 \sim 120 \mu\text{m}$ 程度であり、(3)式から求める運動量拡散距離90 μm と同程度のスケールであることが確認された。また図8に、ゼータ電位の境界から十分離れた上流および下流における深さ方向速度分布を示す。上流では負の圧力勾配が、下流では正の圧力勾配が生じているが、これは上・下流の壁面速度の差異により、流量を補償するために内部圧力が発生したためであると考えられる。実際に二次元ジェット流および圧力駆動流の重ね合わせによる解析モデルと比較した結果良好な一致を示しており、電界と平行にステップ的にゼータ電位が変化する場における電気浸透流動構造は、二次元ジェット流および圧力駆動流で記述されることが示された。

6. 結言

非一様ゼータ電位場における電気浸透流の三次元過渡流動構造を解明するため、高時空間分解能を有するPTVおよび反復計測法による時系列速度計測を行った。材質の異なる流路における電気浸透流動構造は、異なるすべり速度を持つジェット流の重ね合わせとして表わされることが示された。また表面修飾を

施した流路においては、ガラス近傍速度に比べOTS近傍速度が低下することが確認され、質量保存則により深さ方向流れおよび圧力勾配が生じることが確認された。実験結果と解析モデルとの一致から、二次元ジェット流および圧力駆動流の重ね合わせのモデルによって記述されることが示された。本研究で得られた知見は混合場や表面修飾場のような非一様ゼータ電位を有するデバイスにおける電気浸透流制御に貢献すると考えられる。

参考文献

- [1] Y. Kazoe & Y. Sato, *Anal. Chem.*, **79**, 6727-6733, 2007.
- [2] D. Yan *et al.*, *Phys. Fluids*, **19**, 017114, 2007.
- [3] X. Huang *et al.*, *Anal. Chem.*, **60**, 1837-1838, 1988.
- [4] Y. Xia & G. M. Whitesides, *Annu. Rev. Mater. Sci.*, **28**:153-84, 1998

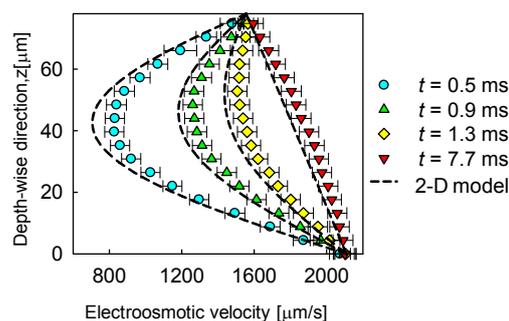


Fig. 5. Velocity profiles in the channel consisting of different materials.

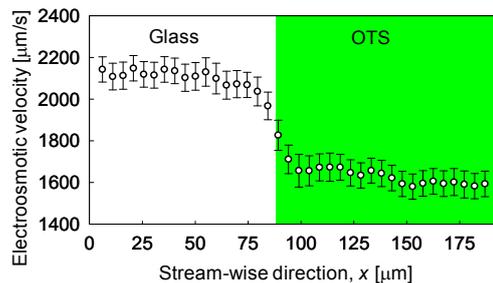


Fig. 6. Near-wall velocity profile in the surface modified channel.

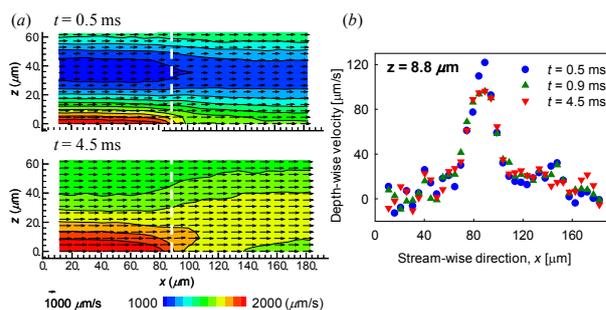


Fig. 7. (a) Velocity vector maps in the XZ-plane. (b) Depth-wise velocity along the stream-wise direction at $z = 8.8 \mu\text{m}$.

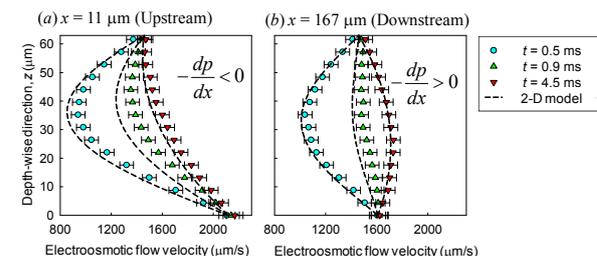


Fig. 8. Velocity profiles in the Z-direction at (a) $x = 11 \mu\text{m}$ and (b) $x = 167 \mu\text{m}$.