

界面動電駆動流によるサブミクロン粒子選択的分離

Selective Separation of Sub-micron Particles Using Electrokinetically Driven Flow

80224049 山本尊博(Takahiro Yamamoto) Supervisor 菱田公一(Koichi Hishida)

1. 緒言

マイクロチャネルの多機能化・高集積化を目指した次世代マイクロ流体デバイスの構築には、熱流動センシング⁽¹⁾と界面動電現象による熱流動制御を巧みに融合させ、液体内の物質分離が選択的に行われるマイクロ混相熱流体制御システムの確立が強く望まれている。これまで物質分離を目的とした流動制御技術は流路加工を施す、即ち MEMS 技術を用いた手法が一般的であったが⁽²⁾、デバイスの多機能化に伴う流路形状の複雑化が大きな課題であった。本研究では、界面動電現象の支配的なパラメータである溶液の導電率に着目し、単純な二流体混合 T 字型マイクロチャネルを用いたサブミクロン粒子分離手法の開発を行った。

2. 計測装置

倒立顕微鏡(Nikon, TE300)を用いた計測システムを図 1 に示す。光源には連続光である Nd:YAG レーザ($\lambda = 532 \text{ nm}$)を用い、各種光学フィルタにより蛍光剤が練りこまれたサブミクロン粒子からの蛍光波長($\lambda = 560 \text{ nm}$)のみを抽出し $656 \text{ pixel} \times 494 \text{ pixel} \times 12 \text{ bits}$ の CCD カメラ(浜松フォトニクス, C-4880)を用いてフレーム間隔 36 ms で撮像した。対物レンズには倍率 40 倍で光の屈折による像の歪みを抑える効果のある油浸対物レンズ(Nikon, CFI Plan Fluor, $NA = 1.3$)を使用した。なお本計測装置における奥行き方向の計測深度は $3.7 \mu\text{m}$ である。

3. 実験流路及び作動流体

実験流路は図 2 に示すような幅 $200\text{--}400 \mu\text{m}$ 、深さ $50 \mu\text{m}$ の T 字型流路を、ソフトリソグラフィ法を用いて PDMS とカバーガラスの張り合わせにより作製した。

作動流体として 5 mMol/l の HEPES 緩衝液(Sigma Aldrich Co. Ltd.)を用い、塩化カリウム(KCl)を加えることで表 1 に示すような、導電率比が 1:10 となる二種の溶液 I, II を作製した。各々の溶液に粒子径 $1.0 \mu\text{m}$ のポリスチレン蛍光粒子(Molecular Probes, Inc.)を体積比率 0.2% で混入した。なお本実験で使用した粒子表面には、カルボキシル基が付加されており、緩衝液内では粒子表面が負極に帯電し($100 \mu\text{C}/\text{cm}^2$)、相互のクーロン力により安定に分散している。

4. 結果及び考察

4.1 T 字型マイクロチャネルを用いた粒子分離

流路端 A より溶液 I, 流路端 B より溶液 II を注入し出口との水面差による静圧駆動流によって、等流量で送液した。定常状態において、全ての流路端に白金電極を挿入し、流路端 A, B には $300\text{--}700 \text{ V}$ の直流高電圧を印加して、出口は接地した。電界印加開始時刻を $t = 0$ とした時のジャンクション部における時系列瞬時画像を図 3 に示す。 $t = 0$ において、サブミクロン粒子は溶液内に均一に分散しているが、 $t = 3.6 \text{ s}$ には、導電率の低い溶液 I に存在する粒子が導電率の高い溶液 II へと移動し、不均一な粒子濃度場が形成される。

マイクロ PIV を用いてジャンクション部(Region 1, $z = 25 \mu\text{m}$)における定常状態での粒子速度ベクトルの計測を行った

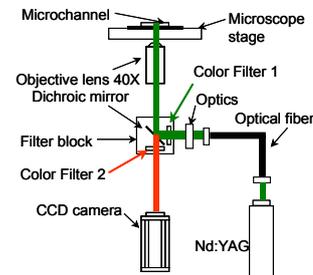


Fig. 1. Schematic of measurement system using a microscope.

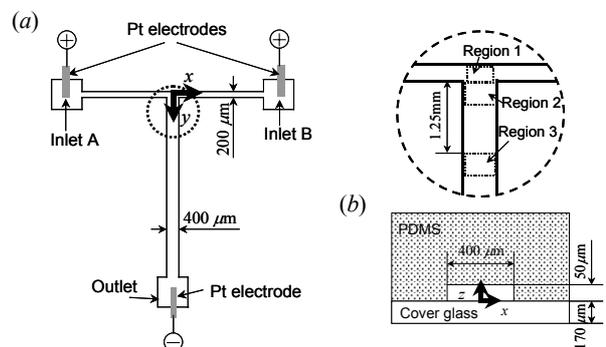


Fig. 2. Schematic of (a) top and (b) cross-sectional views of T-shaped microchannel.

Table 1. Fluid properties

5 mM HEPES	Stream I	Stream II
pH	7.2	7.2
Conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	270	2650

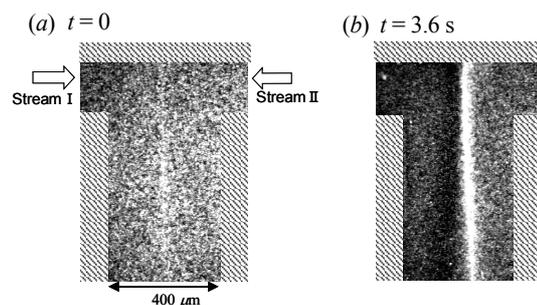


Fig. 3. Instantaneous flow images in junction area at (a) $t = 0$, (b) $t = 3.6 \text{ s}$ on the application of 350 V DC electric field.

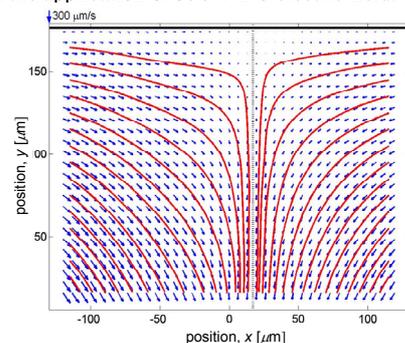


Fig. 4. Particle velocity field and streamlines measured by micro-PIV in Region 1 ($z = 25 \mu\text{m}$).

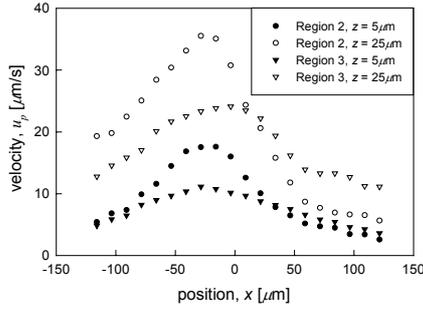


Fig. 5. Spanwise particle velocity (u_x), versus spanwise distance of microchannel (x), in Region 2 and 3 ($z = 5, 25 \mu\text{m}$).

ところ、図4に示す様に導電率の低い溶液I内に存在する粒子の x 方向速度が増加していることが定量的に確認された。さらに、下流域(図2(a)のRegion 2 & 3, $z = 5, 25 \mu\text{m}$)における粒子の x 方向の速度成分 u_x を算出したところ、計測を行った全ての領域において、サブミクロン粒子が x 方向へと駆動され、特に導電率勾配が大きな流路中心付近(溶液I, IIの分子拡散による混合領域)にピーク値を取る移動速度分布となっている(図5)。導電率の等しい二種の溶液を用いて同様の実験を行った場合はこの様な粒子の移動は計測されなかった。

また、下流域(Region 3)においては、均一に分散している粒子は電界印加後、図6に示すように導電率の高い溶液IIへと完全に分離され、電界強度を調節することで局所的な粒子濃度を変化させる事が可能となった。

4.2 数値シミュレーションによる流動場解析

導電率の異なる二種の溶液を用いた際のT字型マイクロチャネルにおける流動場及び電場数値解析を行った。流れを定常非圧縮と仮定しN.S方程式(1)、物質輸送方程式(2)及び電荷保存の式(3)を連立して解いた。

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \right) + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (1)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (-D \nabla c + c \mathbf{u}) = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0 \quad (3)$$

ここで、 σ は溶液の導電率、 V は電位である。電気浸透流は壁面の滑り速度(Helmholtz-Smoluchowski式)として与えた。図7(a)に静圧駆動流及び電気浸透流の合成の流線を示す。溶液I, II共に流路中心に対してほぼ対称に流れている。しかし、図7(b)に示すように電気力線は導電率の高い溶液から低い溶液が側へと横切るように形成されている。即ち、図8に示すように、負極帯電粒子は電気泳動により流路を横切る方向(x 方向)へ力を受け、導電率の低い溶液から高い溶液へと分離され、正極帯電粒子は、負極帯電粒子とは逆方向に電気泳動の力を受けるため、導電率の高い溶液側へは分離されないことが明らかとなった。即ち、本手法は粒子の帯電状況に応じて流路内で選択的な粒子分離が可能とである。

4.3 十字型マイクロチャネルへの拡張

本粒子分離手法はT字型の流路形状に限らず、実際のアプリケーションで見られる様な十字型の流路へ応用可能である。流路端A, B, Cに導電率比が1:5:10となるような溶液A, B(蛍光粒子を混入), Cを注入し静圧駆動流で送液し(図9(a))流路内に導電率勾配を形成させた。図9(b)に示すように、T字型と同様に負極帯電粒子は電界印加後、導電率の高い溶液へ移動し分離が可能である。

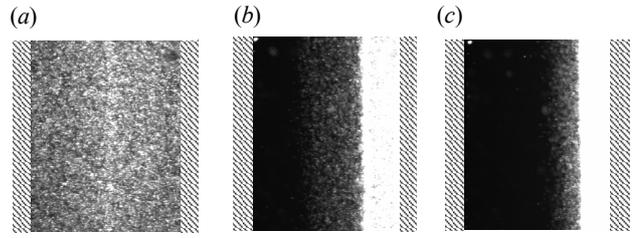


Fig. 6. (a) Uniformly seeded flow image of downstream (Region 3, $z = 25 \mu\text{m}$). Non-uniform flow images of particle density at same location on the application of (b) 500 V and (c) 750 V.

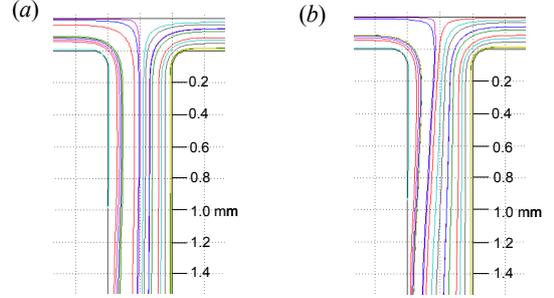


Fig. 7. (a) Stream lines and (b) electric field lines obtained from numerical simulation.

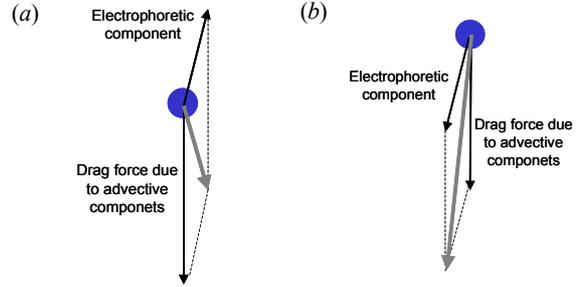


Fig. 8. Particle migration of (a) negatively charged particles and (b) positively charged particles in conductivity gradient.

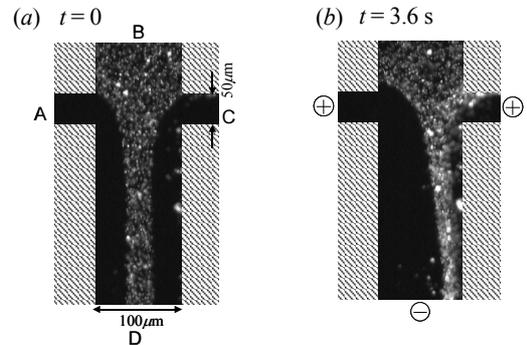


Fig. 9. Instantaneous images of flow field in junction area (a) without electric field, and (b) at $t = 3.6 \text{ s}$ after applying 100 V electric field.

5. 結言

マイクロ混相熱流体制御システムの確立を目指し、界面動電駆動流を用いた選択的粒子分離技術の開発を行った。界面動電現象の支配的なパラメータである溶液の導電率に着目することで、複雑な流路加工を施すことなく、単純なT字型及び十字型マイクロチャネルを用いた粒子分離が可能となった。本手法は、粒子の駆動力として電気泳動を用いているため、帯電状況及び電界強度を調節することで局所的な粒子濃度を制御可能である。

参考文献

- (1) Yohei Sato, 他2名, *Proc. μTAS 2002*, 1 (2002), 512.
- (2) Anne Y. Fu, 他4名, *Nature*, 17(1999), 1109.