界面動電現象によるサブミクロン粒子分離技術*

山本 尊博^{*1}, Shankar DEVASENATHIPATHY^{*2}
佐藤 洋平^{*3}, 菱田 公一^{*3}Separation Technique of Sub-Micron Particles
Using Electrokinetically Driven FlowTakahiro YAMAMOTO, Shankar DEVASENATHIPATHY,
Yohei SATO and Koichi HISHIDA^{*4}^{*4} Department of System Design Engineering, Faculty of Science and Technology, Keio University,
3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 223-8522 Japan

An electrokinetic separation and/or filtering technique of charged order one-micron diameter particles in solution is demonstrated for further development of a multi-phase microfluidic device. Two buffered particle-laden streams of different ionic conductivities are introduced through a simple T-shaped microchannel. The fluid is driven by both pressure and a DC electric field. Upon application of an electric field, the particles are extracted from the lower conductivity stream and stacked into the higher conductivity stream. Both particle density imaging and quantitative velocity fields using micron-resolution particle image velocimetry are presented in order to investigate the flow and electric fields. Numerical simulations of the process in the conductivity gradient show the generation of a transverse electric field, consequently force acting on particles is selectively controlled in a simple geometry microchannel.

Key Words: Electrokinetic Phenomena, Selective Separation, Sub-Micron Particles, Conductivity, Micro-PIV

1. 緒 言

手のひらサイズのデバイス上で微量液体試料の分析・化学薬品の反応合成を簡易的に行う Lab-on-a-chip やマイクロ TAS 等のマイクロ熱流体デバイスの研究開発⁽¹⁾が急速に進んでいる。これまで、マイクロスケール空間分解能を有する熱流動センシング技術が開発され⁽²⁾⁻⁽⁴⁾, デバイス上に設置された数 μm から数百 μm 幅のマイクロチャネル内の熱流動現象を詳細に把握する事が可能となってきた。デバイスの更なる高集積化・多機能化を目指す次世代マイクロ熱流体デバイスの構築には、

これら熱流動センシング技術と内部の熱流動制御技術との融合が強く望まれている。これにより、選択的に物質分離・輸送が行われている生体内システムに類似したマイクロ混相熱流体制御システムを構築することで、例えば従来の大型医療機器の超小型化又は生体内の不良な臓器に取って代わる新たなシステムへの貢献が可能となる。

これまで、溶液内に存在する特定物質の選択的分離技術は数多く行われており、一般に Field-Flow Fractionation (FFF)と称される。Paulら⁽⁵⁾は、緩衝液内に存在する粒子や物質の拡散係数の違いにより分離する H-filter を提案している。この手法は、外部の機械的駆動力を必要としないという利点があるが、原理的に一回の操作によって完全に分離を行うことができない。また、分離の目的となる粒子に蛍光色素を染み込ませモニタリングし、流動スイッチング制御により分離する Cell Sorter 等の開発⁽⁶⁾も行われているが、実流動場に

* 原稿受付 2003 年 12 月 16 日。

^{*1} 学生員、慶應義塾大学大学院理工学研究科(〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1)。^{*2} Department of Mechanical Engineering, Stanford University (Stanford, CA 94305, USA)。^{*3} 正員、慶應義塾大学理工学部。

E-mail: hishida@sd.keio.ac.jp

見られる高濃度粒子場への適用が困難である。即ち、これまでの物質分離技術は流路加工を施す MEMS 技術を用いた手法が一般的であったが、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、流路形状が比較的単純な 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を提案する。本手法は、導電率が大きく異なる二種の溶液を用い、制御が容易な界面動電現象により駆動させ、粒子の帯電状況に応じて分離する手法である。更に、マイクロ粒子画像流速計(マイクロ PIV)を用いた詳細な粒子速度計測、及び数値シミュレーションによる流動構造解析を行い、粒子分離メカニズムを明らかにする。また、本研究により得られた知見により、本分離手法の十字型マイクロチャネルへの拡張を試みた。

2. 記号表

A	: 流路断面積
c	: 濃度
D	: 拡散係数
E	: 電界
H	: マイクロチャネル垂直方向長さ
J	: 電流密度
L	: マイクロチャネル水平方向長さ
p	: 圧力
Re	: レイノルズ数
u	: 流体速度
u_p	: 粒子速度の x 方向成分
v	: 流体のバルク速度
V	: 電位
w	: マイクロチャネル深さ
μ	: 粘性係数
ρ	: 密度
σ	: 溶液の導電率

添字

1	: 図 2 における位置 1
2	: 図 2 における位置 2
I	: 導電率の低い溶液
II	: 導電率の高い溶液
A	: 図 2 における位置 A
B	: 図 2 における位置 B

Fig. 1. Schematic of particle separation system using a simple T-shaped microchannel. Positively and negatively charged particles in a conductivity gradient are extracted to different streams on the application of an electric field.

3. 原理

図 1 に T 字型マイクロチャネルを用いた粒子分離機構の模式図を示す。本手法の特徴は、導電率の大きく異なる二種の溶液を流し、電界を印加することで流動場に非対称な電場を形成させ、粒子の電気泳動により分離する点にある。

二種の溶液を流路端のリザーバの水面差による静圧駆動流によって送液を行う。マイクロチャネル内の流速は通常遅く層流($Re = 10^{-2} \sim 10^{-5}$)であるため、二種の溶液は分子拡散により混合し溶液の導電率勾配が形成される。ここで、流路端に電極を挿入し電界を印加すると、流動場の導電率勾配により、電気力線が二種の溶液界面を横切る様な非対称な電場が形成される。溶液内で負極に帯電している粒子は、電場により力を受け、電気泳動により導電率の高い溶液側へと分離される。一方、正極に帯電している粒子は導電率の低い溶液側へと駆動され分離される。

導電率勾配が存在する際の非対称な電場形成を確認するために、単純にモデル化した解析を行い、二種の溶液界面を横切る電流密度を算出した。解析に用いた T 字型マイクロチャネルの概略図を図 2 に示す。ここでは、溶液の電荷密度、電流の対流及び拡散、壁面近傍に形成される電気二重層は無視できると仮定した。また、導電率が低い溶液の領域を I、高い溶液の領域を II とし、両者は図 2 の実線で示される様な直線で分割され、領域内では均一な導電体とした。ここでは、二流体界面が、図 2 の点線で示されるマイクロチャネル中心線より非常に短い距離 δl だけシフトしている場合を考え、 δl はマイクロチャネル水平方向の長さ L

Fig. 2. Schematic showing T-junction geometry with solution I and II. Common interface between two solutions is shifted by a length, δl from the channel centerline. V is the voltage at the two reservoirs and V_j is the voltage at the junction.

に比べ十分短とした。また、両領域の垂直方向長さ h もマイクロチャネル垂直方向の長さ H よりも十分短とした。ジャンクション部中心における電位を V_j とした。

本実験では、図 2 中の位置 1, 2 における流路断面積 A_1, A_2 は等しく、また、位置 A, B における断面積 A_A, A_B は流体の連続の式より、以下の関係が成り立つ。

$$A_A = A_1 \frac{v_1}{v_A} \quad (1)$$

$$A_B = A_2 \frac{v_2}{v_B} \quad (2)$$

ここで、 v_1, v_2, v_A, v_B は図 2 中の断面 1, 2, A, B における流体のバルク速度である。

各々の溶液において、質量及び電荷の保存は式 (3), (4) で示される。

$$\oint_A \vec{v} \cdot d\vec{A} = (v_1 A_1 + v_2 A_2) - (v_A A_A + v_B A_B) = 0 \quad (3)$$

$$\oint_A \sigma \vec{E} \cdot d\vec{A} = \sigma_I A_1 \left(\frac{V - V_j}{L} \right) + \sigma_{II} A_2 \left(\frac{V - V_j}{L} \right) - \sigma_I A_A \left(\frac{V_j}{H} \right) - \sigma_{II} A_B \left(\frac{V_j}{H} \right) = 0 \quad (4)$$

次に、キルヒホッフの法則より溶液間での電流の保存式は、溶液 I 及び II の導電率 σ_I, σ_{II} を用いて式 (5) で示される。

$$w \int_0^h \sigma_I E_{I,I} dy = -w \int_0^h \sigma_{II} E_{I,II} dy \quad (5)$$

ここで、 $E_{I,I}$ は溶液 I から II へ、 $E_{I,II}$ は溶液 II から I への水平方向の電界であり、 w はマイクロチャネルの深さである。式 (1) から (4) から得られる関係式を式 (5) に代入することにより、式 (6) に示すように溶液 I から II へ流れる電流が得られる。

$$w \int_0^h \sigma_I E_{I,I} dy = \sigma_I A_1 \left(\frac{V - V_j}{L} \right) - \sigma_I A_A \left(\frac{V_j}{H} \right) = \frac{V \sigma_I A_1}{H} \times \frac{\left(\frac{v_1}{v_A} \cdot \frac{\sigma_I}{\sigma_I + \sigma_{II}} + \frac{v_2}{v_B} \cdot \frac{\sigma_{II}}{\sigma_I + \sigma_{II}} - \frac{v_1}{v_A} \right)}{1 + \frac{L}{H} \cdot \frac{1}{(\sigma_I + \sigma_{II})} \cdot \left(\frac{v_1}{v_A} \cdot \sigma_I + \frac{v_2}{v_B} \cdot \sigma_{II} \right)} \quad (6)$$

($v_2/v_1 - v_B/v_A$) = 0 の時、溶液 I から II へ流れる電流は 0 となるが、後述する本実験条件では、数 μA の電流が流れ、非対称な電場が形成され粒子分離が可能となる。

4. 計測装置及び計測方法

4.1 実験流路

実験流路は図 3 に示すような幅 $200 \mu m$ 及び $400 \mu m$ 、深さ $50 \mu m$ の T 字型マイクロチャネルを、ソフトリソグラフィ法⁷⁾を用いてシリコン系樹脂の PDMS (信越化学工業株式会社, EK1601) と顕微鏡用カバーガラス (松浪硝子株式会社, 厚さ $170 \mu m$) により作製した。

ガラス基板上にネガティブのフォトリソ剤 (Micro-Chem Inc., SU-8 50) をスピナーにより厚さ $50 \mu m$ に塗布する。フォトマスクを用いて、紫外光照射により露光してリフトオフすることで基板上に流路形状を作製した。ガラス基板上の型に PDMS を流し込み硬化させ、型取りされた PDMS とカバーガラスを張り合わせた。流路端には、プラスチックの円筒 (直径 $10 mm$ 、高さ $12 mm$) をエポキシ系接着剤により接着し、溶液のリザーバとした。リザーバには、白金電極を挿入し高圧電源 (KEPCO Inc., BOP 1000M) により電界を印加した。

4.2 作動流体

作動流体として 5 mMol/l の HEPES 緩衝液 (Sigma Aldrich Co. Ltd.) を、イオン交換水を用いて作製した。次に、一方の溶液に塩化カリウム

Fig. 3. Schematic of (a) top and (b) cross-sectional views of T-shaped microchannel.

Table 1. Fluid properties

Buffer solution		HEPES	
		Stream I	Stream II
Molarity	[mMol/l]	5	5
pH	[-]	7.2	7.2
Conductivity	[$\mu\text{S}/\text{cm}$]	270	2650

Table 2. Properties of fluorescent particles

Material noun		polystyrene
Diameter of particles	[μm]	1.0
Density	[g/cm^3]	1.055
Absorption wavelength	[nm]	540
Emission wavelength	[nm]	561

(KCl)を加えることで表 1 に示すような、溶液の導電率が 1:10 となる二種の溶液 I, II を作製した。KCl は溶液内で完全に解離し、カリウムイオン(K^+)及び塩化物イオン(Cl^-)の拡散係数がほぼ等しいため($D_{\text{K}^+} = 1.96 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$, $D_{\text{Cl}^-} = 2.03 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$), イオンの拡散速度の違いによって生じる二液界面での電場形成現象、即ち Liquid Junction Potential (LJP)⁽⁸⁾の影響はないものと仮定できる。

本研究では、後述する計測装置を用いて鮮明な粒子画像を撮像するために、表 2 に示すような粒子径 1.0 μm のポリスチレン蛍光粒子(Molecular Probes Inc.)を選定し、各々の溶液に体積比率 0.1 %で混入した。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均一に分散している。なお、粒子表面の帯電による溶液の導電率増加は非常に小さく、

Fig. 4. Schematic of measurement system using a microscope.

体積比率 0.1 %の粒子混入で導電率 7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の増加であった。

4.3 計測装置

倒立蛍光顕微鏡(株式会社ニコン, TE300)を用いた計測装置を図 4 に示す。流動場に混入された蛍光粒子の可視化のため、光源には連続光である Nd:YAG レーザ(Laser Compact Co. Ltd., LCS-DTL-316, 波長 532 nm)を用い、流動場に照射した。ハイパスフィルタを用いて、蛍光粒子からの蛍光波長(560 nm)のみを抽出し 656 pixels $\times$ 494 pixels $\times$ 12 bits の CCD カメラ(浜松フォトニクス株式会社, C4880-80)によりフレーム間隔 37 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系対物レンズ(株式会社ニコン, CFI Plan Fluor, NA = 1.3), 及び広い視野の確保が可能な 10 倍の乾燥系対物レンズ(株式会社ニコン, Fluor, NA = 0.5)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⁽⁹⁾は、それぞれ 3.7 μm 及び 16.8 μm である。

Fig. 5. Instantaneous images of flow field in junction area at (a) $t = 0$, (b) $t = 1.8$ s and (c) $t = 3.7$ s. On the application of 350 V DC electric field particles drift from stream I to the adjacent stream II.

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

5. 実験結果及び考察

5.1 T字型マイクロチャネルを用いた粒子分離

流路端 A より導電率の低い溶液 I (Stream I), 流路端 B より導電率の高い溶液 II (Stream II) を注入し出口との水面差による静圧駆動流によって, 等流量比で送液した. 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 V から 750 V の直流高電圧を印加し, 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 5 に示す. $t = 0$ において, 負極に帯電しているサブミクロン粒子は溶液内に均一に分散しているが, $t = 3.7$ 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. また, ジャンクション部より 1.25 mm 下流域の Region 3 (図 3(b)) において, 電界印加開始前及び 500 V, 750 V の電界印加後の定常状態における流動場瞬時画像を図 6 に示す. 均一に分散している粒子は電界印加後, 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.

5.2 マイクロ PIV による粒子速度計測

ジャンクション部及び下流域 (図 3(a) の Region 1, 2 及び 3, $z = 5, 25 \mu\text{m}$) における定常状態での粒子速度計測を行った. 粒子速度計測には蛍光粒子をトレーサとして, マイクロ PIV を用いた. 粒子速度ベクトルの算出には, 相互相関法及び輝度差累積法の組み合わせによる階層的探索法を用い⁽¹⁰⁾, ガウシアン補間法によるサブピクセル精度化を行った⁽¹¹⁾. サブミクロン粒子は, その径の小ささからブラウン運動による揺らぎで速度ベクトルに乱れを与える. ブラウン運動が時間的に偏りのないランダムな運動であることから, Santiago ら⁽¹²⁾ による速度ベクトルの時間平均化により, その影響が除去される事が示されている. 本実験でも, 速度ベクトル算出の際, 100 時刻の画像から得られたベクトルの時間平均化を行っている. なお,

Fig. 7. Particle velocity field measured by micro-PIV in Region 1 ($z = 25 \mu\text{m}$).

速度計測の空間分解能は $6.7 \mu\text{m} \times 6.7 \mu\text{m} \times 3.7 \mu\text{m}$ (40倍対物レンズ使用時)であった。

図7に、Region 1, $z = 25 \mu\text{m}$ における粒子速度ベクトルを示す。マイクロ PIV により計測される速度は、流体速度と粒子の電気泳動速度の和となり、電界印加により、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。下流域(図 3(a)の Region 2 及び 3, $z = 5, 25 \mu\text{m}$)における粒子の x 方向の速度成分 u_p を算出し、図 8 に示す。下流域では、 x 方向の流体速度がほぼ 0 となるにもかかわらず、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にピーク値を取る移動速度分布となっている。また、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。

5.3 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シミュレーションを行った。流れを定常非圧縮と仮定し以下の連続の式、Navier-Stokes 方程式、物質輸送方程式及び電荷の保存方程式を連立して解いた。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (7)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \right) + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}_{\text{ext}} \quad (8)$$

Fig. 8. Spanwise particle velocity (u_p), versus spanwise distance of microchannel (x), in Region 2 and 3 ($z = 5, 25 \mu\text{m}$).

N.S 方程式の外力項には、電界印加による流体への体積力及び流動場に混入された粒子からの抗力が含まれるが、本研究では無視できるものと仮定した。また、電界印加によって発生する電気浸透流は Helmholtz-Smoluchowski 式⁽¹³⁾から算出される壁面の滑り速度として与えた。物質輸送方程式は式(9)で与え、本実験では二種の溶液間で化学反応による物質生成がないため右辺は 0 となる。溶液内には多種のイオンが存在するが、単一のイオンのみと仮定し、その濃度より導電率を与えた。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (-D \nabla c + c \mathbf{u}) = 0 \quad (9)$$

前述した解析と同様に、溶液内を流れる電流の対流及び拡散は無視できるとし、電流密度を式(10)とした。

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (10)$$

定常状態において、電荷の保存式は式(11)となる。

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (11)$$

式(10)及び(11)より、式(12)が得られる。

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0 \quad (12)$$

2 次元有限要素法による解析が可能な FEMLAB (COMSOL AB.)を用いて、式(7), (8), (9)及び(12)を連立して解くことにより、流動場の速度及び電場を算出した。

図 9(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 9(b)に示すように

Fig. 9. (a) Stream lines and (b) electric field lines obtained from numerical simulations.

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。

図 10 の模式図に示す様に、表面が負極による帯電している粒子は、静圧駆動流及び電気浸透流に抗力によって下流へと駆動される。一方、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る事が数値シミュレーションから明らかとなった。また、正極に帯電した粒子は、負極帯電粒子とは逆方向の電気泳動により移動するため、導電率の高い溶液側へは分離されない。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なる。

また、数値シミュレーションから得られた電位分布より x 方向の粒子の電気泳動速度を算出し、マイクロ PIV を用いて計測された実験値との比較を行った(図 11)。本研究では、2 次元シミュレーションを行ったため、流路奥行き方向中心($z = 25 \mu\text{m}$)での実験値とシミュレーション結果を比較した。Region 2 においては定量的に良好な一致を示したが、Region 3 においては、値に差異がみられる。これは、シミュレーションにおいて、帯電粒子の存在による電場の変化や、電界印加による流体への体積力、及び粒子抗力の反力を考慮していないが、実際には粒子が流動場に影響を及ぼしていることに起因している。

5.4 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や Y 字型等の様々な形状へ応用可能である。図 12

Fig. 10. Schematic of particle migration in conductivity gradient. (a) Negatively charged particles move toward high conductivity stream and (b) positively charged particles move to low conductivity stream due to the electrophoresis by transverse electric field.

Fig. 11. Spanwise particle velocity (u_p) obtained from numerical simulations compared with the particle velocity detected by micro-PIV in Region 2 and 3 ($z = 25 \mu\text{m}$).

Fig. 12. Schematic of particle separation in the next-generation microfluidic device. Both negatively and positively charged particles are separated to different outlets.

Fig. 13. Instantaneous images of flow field in junction area (a) without electric field and (b) at $t = 3.6$ s after applying 100 V electric field.

に十字型マイクロチャンネルを用いた選択的な粒子分離システムの概念図を示す。図 12 では、流路の出口が 2 つであるが、帯電状態の異なる粒子の種類に応じて複数の出口を設け、選択的に分離された粒子を抽出することも可能となる。

ここでは、前実験と同様に負極帯電粒子を用いて十字型マイクロチャンネル内における粒子分離を例として示す。図 13(a)に示すように流路端 A, B, C に導電率比が 1:5:10 となるような溶液 I, II (負極帯電粒子を混入), III を注入し静圧駆動流で等流量比で送液し、チャンネル内に導電率勾配を形成させた。電界印加後、図 13(b)に示すように負極に帯電した粒子は導電率の高い溶液へ移動し分離され、十字型の流路形状への適用が可能である事が示された。

6. 結 言

マイクロスケール混相熱流体制御システムの確立を目指し、界面動電現象を用いた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 字型マイクロチャンネルを用いた粒子分離手法を提案した。

流動場に導電率の大きく異なる二種の溶液を等流量比で送液して導電率勾配を形成することで、

電界印加により、流れを横切る方向の電界を発生させ、溶液内で帯電している粒子を分離させる事が可能となった。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の変化を操作可能である。

本実験では、分離対象の粒子に蛍光粒子を用い、マイクロ PIV による詳細な粒子移動速度を計測した。また、導電率勾配が存在する流動場の数値シミュレーションを行い、T 字型マイクロチャンネル内における流動及び電場解析結果より、粒子分離メカニズムの詳細を解明した。

本手法は、T 字型マイクロチャンネルに限定されず、T 字型や十字型の複数の組み合わせを有した流路形状への適用が可能であり、特定物質の選択的分離・輸送が行われるマイクロ混相熱流体制御システム構築への貢献が期待される。

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金基盤研究(A)(No.15206024)及び若手研究(A)(No.14702030)、第二著者は平成 14 年度文部科学省最先端分野学生交流推進制度によったことを記して謝意を表する。

文 献

- (1) Stephen Quake, *Micro Total Analysis Systems* 2003, **1**, (2003), 1.
- (2) 稲葉・ほか 3 名, 機論, **68-675, B** (2002), 3033.
- (3) 入澤・ほか 3 名, 機論, **68-674, B** (2002), 2803.
- (4) Yamamoto, T., ほか 4 名, *11th Int. Symp. Appl. Laser Tech. Fluid Mech.*, (2002), Web-site.
- (5) Paul Yager, ほか 6 名, *Micro Total Analysis Systems* 1998, **1**, (1998), 207.
- (6) Anne Y. Fu, ほか 4 名, *Nature*, **17**, (1999), 1109.
- (7) Hosokawa, K., Maeda R., *Micro Electro Mechanical Systems* 2001, (2001), 174.
- (8) Matthew, S. M., ほか 2 名, *Electrophoresis*, **23**, (2002), 2642.
- (9) Meinhart, C.D., ほか 2 名, *Meas. Sci. Tech.*, **11**, (2000), 809.
- (10) Abe, M., ほか 3 名, *9th Int. Symp. Appl. Laser Tech. Fluid Mech.*, (1998), Web-site.
- (11) Westerweel, J., *Meas. Sci. Tech.*, **8**, (1997), 1397.
- (12) Santiago, J. G., ほか 4 名, *Exp. Fluids*, **25**, (1998), 316.
- (13) Ronald F. Probstein, *Physicochemical Hydrodynamics*, New York, John Wiley & Sons, Inc.