ドーナツ型チャネルを用いた電気浸透流の
界面電流測定法の開発*張 丹^{*1}, 李 輝^{*2}, 鬼頭修己^{*3}
牛島達夫^{*3}, 岩本吉弘^{*1}Development of Measuring Method for the Interface Current of
Electroosmotic Flow in Doughnut ChannelDan ZHANG^{*4}, Hui LI, Osami KITO, H,
Tatsuo USHIJIMA and Yoshihiro IWAMOTO^{*4} Department of Engineering Physics, Electronics and Mechanics,
Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology,
Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 466-8555 Japan

It is known that the interface current exists besides the bulk current in the channel of the electroosmotic flow (EOF). Interface current in electric double layer (EDL) is a main driving force of the EOF. However, due to its small size and the various geometrical constraint to access EDL, it is difficult to measure the interface current experimentally. In this study, a specially designed doughnut channel is utilized to measure the interface current. Two parallel doughnut-shaped glass plates were used for the doughnut channel. It is possible to adjust the height of doughnut channel continuously. Experimental studies were carried out on fully developed steady EOF in this channel. The characteristics of the interface current were examined. It is the first time that the interface current in a EOF was measured directly by experimental method. The structure of the EOF or EDL was considered in relation to the interface current.

Key Words: Interface Current, Electroosmotic Flow, Micro-Channel, Interfacial Phenomena, Electric Double Layer, Flow Measurements

1. 緒 言

マイクロ流路内の微小な流速や流量を伴う流れ,あるいは非常に狭いチャネル内の流れでは,チャネルと流体の界面の効果が顕著になることから,表面張力や界面動電現象などの特殊な現象が生じ,それらの現象が流れに大きく影響する.そのような界面動電現象の一つに電気浸透流がある.電気浸透流は異なる物質の界面に平行な電場を加えたとき,界面付近に存在する電気二重層の電荷がクーロン力を受け,流れが生じる現象である.電気浸透流は,マイクロ流路における流れの駆動源として分析化学,マイクロリアクター,バイオチップなどに応用されている⁽¹⁾⁽²⁾.

これまでの電気浸透流に関する研究は以下の二つの分野に大別される.一つは電気浸透流の応用に関するものである.電気浸透流の特徴である流路断面内での均一速度分布特性を利用し,各種の化学種,タンパク

質などの分離・分析に有効に応用するもので分析化学の分野において多くの研究がなされ実用化されている⁽³⁾.また,電気力により流れが駆動されるため機械的な可動部がないのでマイクロ流路のポンプとして広く応用されている⁽⁴⁾.他の一つは,電気浸透流の構造解明に関するものである.電気浸透流を規定するもっとも重要な変数として,壁面に現れる電荷による表面電位(ゼータ電位)が多くの研究で測定されてきた⁽⁵⁾⁽⁶⁾.最近ではマイクロ PIV, ナノ PIV など測定技術の発展によりマイクロ流路内の速度分布測定が可能になり,複雑な形状のマイクロ流路での速度分布の調査が行われ速度分布に及ぼすさまざまな効果について解明されてきた⁽⁷⁾⁽⁸⁾.しかし,電気二重層厚さ,表面電荷密度,界面電流など物理量が流れの構造解明に重要であるが測定の困難さのため十分に測定されてこなかった.特に電気二重層内を流れる電流,すなわち界面電流は電気浸透流の駆動源であるため力学的に重要である.また,界面電流は狭い領域に多くの電流が流れるため,流れへのジュール加熱の影響が現れることが知られている.Chang ら⁽⁹⁾は,ジュール加熱は二次元マイクロチャネルを流れる電気浸透流に影響していることを数値的に解析した.Osuga ら⁽¹⁰⁾は,赤外線

* 原稿受付 2009年6月19日.

^{*1} 名古屋工業大学大学院工学研究科機能工学専攻(☎ 466-8555 名古屋市昭和区御器所町).^{*2} (株)デンソー(☎ 448-8661 刈谷市昭和町1-1).^{*3} 正員,名古屋工業大学大学院工学研究科.

E-mail: ushijima@nitech.ac.jp

サーモグラフィを用いて電気浸透流の断面内の温度分布を測定し、壁近傍の温度が中心部より 0.68°C 高くなっていることを実験的に示した。彼らはこの原因が電気二重層を流れる界面電流のジュール加熱作用であると推測しているが電流値の定量的評価は得られていない。

本研究はマイクロ流路内の電気二重層を流れる界面電流の測定法の開発を目的とする。電気二重層は極めて薄い層(およそ $0.1\text{ }\mu\text{m}$ ⁽⁸⁾ 以下)のため、界面電流とバルク電流を分離して測定することは極めて困難である。ここでは距離 h (平板間距離) を隔てて平行に設置した二枚のドーナツ型ガラス平板からなるマイクロ流路を用いることにより界面電流を定量的に測定する方法を開発した。また測定された界面電流と電気浸透速度の間の関係についても考察した。

2. 基礎式

2.1 ドーナツ型チャネルにおける電気浸透 図1に Helmholtz モデルの電気浸透を示す。固体と液体を接触させると電荷量の絶対値が等しい電荷が相対して界面電気二重層を形成する。この電気二重層に外部電場を印加すると、固体側の負電荷は壁面との抗力により移動しないのに対し、液体側の正電荷はクーロン力により運動を始める。そして液体の粘性により液体全体が流れ出す。Helmholtz 面の電荷に働くクーロン力と壁面の摩擦応力が釣り合うと流れが定常になる。そのとき、二つの力の釣り合いから電気浸透速度 v_{osm} は次のように導かれる。

$$v_{osm} = \frac{\epsilon E \zeta}{\mu} \quad (1)$$

ここで、 ϵ , μ はそれぞれ流体の誘電率および粘度、 ζ はゼータ電位である。そして、電気浸透速度が断面内に均一分布することにより電気浸透流量 Q_{osm} は

$$Q_{osm} = \frac{\epsilon E \zeta A_c}{\mu} \quad (2)$$

のように得られる。ここで、 A_c はチャネル断面積で

Fig. 1 Electroosmosis of Helmholtz model

ある。式(2)を Helmholtz-Smoluchowski (HS) 式という。

本研究では、図2に示すような距離 h で平行に並んだ二枚のドーナツ状の平板間で形成されるドーナツ型チャネルを用いた。このドーナツ型チャネルにおける HS 理論に基づく電気浸透流量 Q_{osm} は、

$$Q_{osm} = \frac{\epsilon V \zeta}{\mu} \frac{2\pi h}{\ln(R_{out}/R_{in})} \quad (3)$$

と書ける⁽⁴⁾。電気浸透速度は半径位置により変化するため、代表平均半径位置 $r = (R_{out} + R_{in})/2$ にて評価した。電気浸透流量 Q_{osm} と電気浸透速度 v_{osm} の関係は

$$Q_{osm} = 2\pi r h \cdot v_{osm} \quad (4)$$

である。ここで、 V は印加電圧、 R_{out} , R_{in} はドーナツ型チャネルの外半径、内半径である。式(3)は ϵ , V , ζ , μ が一定の条件では平板間距離 h と電気浸透流量 Q_{osm} が正比例することを示す。

2.2 界面電流の測定原理 図1に示すモデルによればマイクロ流路を流れる全電流 I は

$$I = I_b + I_i \quad (5)$$

のようにバルク電流 I_b と界面電流 I_i の和からなる。これまで全電流 I は測定されたことがあるが、電気二重層の厚さ δ が $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 以下のオーダーと極めて薄いことため I_i を I から分離して測定できなかった。一般に、電気二重層厚さ δ は h に比べ極めて薄いことためバルク電流 I_b は流路断面積(二次元流路では断面積は平板間距離 h)に比例するとおける($I_b = ch$)。よって、流路全体を流れる電流 I は

$$I = ch + I_i \quad (6)$$

と表される。ここで、 c は比例係数である。上式は I が切片 I_i をもつ h の一次関数であることを示している。平板間距離 h を連続的に変化させ、 I と h の関係を精密に測定し、式(6)の関係をj得ることにより界面電流 I_i が求められる。

Fig. 2 Doughnut channel

3. 実験装置及び測定方法

図3に実験装置の概略図を示す。ドーナツ型チャネルは平行に並んだ二枚のドーナツ型ガラス平板の隙間により形成される。ガラス平板は光学用ガラスBK7で内径25 mm, 外径50 mm, 厚さ8 mmである。ガラス平板は $1/10\lambda$ のオプティカルフラットでその表面は極めて平坦である。下ガラスは、装置のベースに固定され、上ガラスは、上ガラス支持板に固定されている。上ガラス支持板は三つの精密マイクロメータヘッド(1 μm 直読式)により支えられ、位置を上下に精密に移動できるようになっている。二枚のガラス平板の平行度はナトリウムランプを用いたニュートンフリンジ法によった。マイクロメータヘッドにより上ガラスの傾きを調節し、ニュートンフリンジをほぼ消失させ平板の傾きを 0.0006° 以下に設定した。平板間距離 h はマイクロメータヘッドにより任意の高さ(約3~70 μm の範囲)に自由に設定できる。ガラス平板間距離測定用に電気マイクロメータが上ガラス表面上に三個等間隔に取り付けられている。マイクロメータヘッドにより上ガラス平板の高さを調整し、電気マイクロメータでその変位量を $\pm 0.2\ \mu\text{m}$ の精度で測定した。流体には蒸留水(流路出口測定値、電気伝導度 $C=0.6\sim 0.7\ \mu\text{S}/\text{cm}$, $\text{pH}=5.6\sim 6.2$)を用いた。

ドーナツ型ガラス平板の内外にはそれぞれステンレス製メッシュのリング状電極があり、これによりチャネル内に放射状の電場をかけ電気浸透流を発生させる。流体は、バッファタンク内から縮流部をとおり、チャネルの内側から外側に向かって流れる。流量は圧力損失式流量計を用いて測定する。流れが通過する縮

流部(公称内径 $d=0.5\ \text{mm}$, 長さ $l=30\ \text{mm}$ の毛細管)の両端に発生する圧力差を測定し、縮流部の圧力損失から流量を見積もった。流量と圧力損失の関係は、発達したポアズイユ流を仮定して理論的に得られるが、助走部の影響、管径の正しい値が得られない事等のため基準流量発生器を用いて検定した。作製した基準流量発生器は、断面積が精密に測定されたシリンジをパルスモーターにより一定速度で押し出すことにより $0.1\sim 3.5\ \text{mm}^3/\text{s}$ の流量を $\pm 0.1\%$ 以内の精度で作り出すことができる。この流量計の測定誤差は $0.1\sim 3.5\ \text{mm}^3/\text{s}$ の測定範囲で $\pm 0.3\%$ 以下である。ここで用いた圧力計(バリダイン社 DP 45-14-A-3-S-4-D)の測定分解能は $0.3\ \text{Pa}$ である。また、チャネル内外の圧力差はバッファタンク内の水位を変化させることによって常に零になるように調整した。流路内を流れる流量 Q_{osm} と電流 I を同時に測定した。電流の測定には $0.05\ \mu\text{A}$ 分解能の電流計を用いた。圧力計や流量計に印加電圧の電場がかからないようにステンレス管(Earth tube)によりアースを取っている。

これまでの電気浸透チャネルは、典型的に流路長が $0.1\ \text{mm}$ オーダーの毛細管や基盤にエッチングした流路を用いることが一般的であった⁽¹⁾。流路長 $1\ \text{mm}$ 当りの流路表面積は $0.1\ \text{mm}^2$ のオーダーである。これに対し、本研究では直径 $50\ \text{mm}$ のドーナツ型ガラス平板二枚を平行に高さ h 隔てて流路を形成し、半径方向に電場をかけることで電気浸透流を発生させているため流路長 $1\ \text{mm}$ 当りの表面積は $100\ \text{mm}^2$ のオーダーとなる。これにより表面積が従来の約 1000 倍となっている。このため界面現象に関連する界面電流などの物理量をこれまでより三桁高い精度で測定できる点に本実験装置の第一の特徴がある。さらにこのドーナツ型チャネル流路は平板間距離 h を連続的に広い範囲で変化させることができる第二の特徴がある。これらの特徴より式(6)に示す電流の関係が正確に測定でき、これにより界面電流が求められる。

4. 実験結果及び考察

4.1 平板間距離 本研究では、ドーナツ型ガラス平板間を平行に保ちその距離を正確にかつ自由に設定する必要がある。平板間距離 h の測定には、上ガラス表面にとり付けた三台の電気マイクロメータを用いた。電気マイクロメータの読み h_{em} は上ガラスの相対移動量を表すが、上下ガラスの隙間 h そのものを与えるものではない。よって、 h_{em} と h の関係を以下のように前もって検定しておいた。ガラス平板内外に圧力差 ΔP をかけ、その ΔP により発生したポアズイユ

Fig. 3 Experimental apparatus

流量 Q_{poi} を測定し、 ΔP と Q_{poi} から換算した平板間距離 h_{poi} を求めた。発達したポアズイユ流の関係より h_{poi} は

$$h_{poi} = \sqrt[3]{-\frac{6\mu \ln(R_{out}/R_{in})}{\pi} \frac{Q_{poi}}{\Delta P}} \dots \dots \dots (7)$$

のように求められる。同時に電気マイクロメータの読み h_{em} を測定する。上ガラスをフリーにした状態を $h_{em}=0$ とする。測定された h_{poi} と h_{em} の関係を図4に示す。これより h_{poi} と h_{em} の関係が切片を持つ傾きが1.002の一次の関係となることが分かった。すなわち、 $\Delta h_{poi} = \Delta h_{em}$ であり両者の相対変位量が完全に一致している。このことは、 h_{poi} が精度良く平板間距離 h を測定していることを示している。よって、 $h = h_{poi}$ とおくことができる。切片を持つ原因として、空气中に存在する塵や埃が二枚のガラス平板の間に入ってしまったことが考えられる。得られた h_{em} と h_{poi} の二つの関係から電気マイクロメータヘッドによって測定される h_{em} の値から h_{poi} すなわち平板間距離 h が得られる。

4.2 電気浸透流量

4.2.1 平板間距離に対する電気浸透流量の特性

ドーナツ型流路に蒸留水を用いた場合の電気浸透流量 Q_{osm} と平板間距離 h の関係を調べた。電極間に280 Vの電圧を30分間印加した後目的の電圧にし、印加電圧 V を一定に保ったままガラス平板を $h=3 \mu\text{m}$ から $21 \mu\text{m}$ まで上げながら Q_{osm} を測定した。式(3)により求めたゼータ電位 ζ は100 mVであった。

電気浸透流量 Q_{osm} と平板間距離 h の特性を図5に示す。図5に示すように、 $Q_{osm}-h$ 特性は全ての電圧において正比例の関係となった。これは、式(3)の

HS理論における $Q_{osm}-h$ の関係と一致しており、所要の電気浸透流が実現されていることが分かる。またこのことは、電気浸透速度が断面内で均一であることと平板間距離 h が正確に設定されていることを示している。

4.2.2 印加電圧に対する電気浸透流量の特性

図5に示す $Q_{osm}-h$ 特性において、 h をパラメータとして $Q_{osm}-V$ 特性に換算した結果を図6に示す。 Q_{osm} は V に対しほぼ正比例の関係で増大する。しかし、印加電圧 $V=120 \text{ V}$ を境にその傾きが変化し、 $V > 120 \text{ V}$ では傾きが若干大きくなる。傾きの変化に関しては、繰り返し実験においても同じ結果が得られた。式(3)から、傾きの変化には ζ, ϵ, μ の変化の影響が考えられるが具体的な原因は不明である。後に示

Fig. 5 Relation between Q_{osm} and h

Fig. 4 Relation between h_{poi} and h_{em}

Fig. 6 Relation between Q_{osm} and V

Fig. 7 Relation between I and h

Fig. 8 Relation between I and V

す I - V 特性(図8 参照)や I_i - V 特性(図10 参照)で電流, 界面電流は V に正比例し, Q_{osm} のように途中傾きが変わることはない。と, ε の変化は電流に影響を及ぼすため, Q_{osm} - V の傾きの変化は粘度 μ の変化によるものと推測される。印加電圧が大きくなることによりジュール加熱が大きくなり μ が低下するため Q_{osm} が増大したと考えられる。

4.3 流路を流れる電流 電気浸透流量 Q_{osm} と平板間距離 h の特性と同様にして, 印加電圧 V を一定に保ったままガラス平板を上げながら I を測定した。図7に平板間距離 h に対するチャネルを流れる電流の特性を示す。図7に示すように, I - h 特性は切片を持つ直線関係になることが分かった。図7に示す結果は式(6)に示す線形関係と一致しており, 予想どおり電流 I が h に比例するバルク電流 I_b と界面電流 I_i の和になっていることが確認できた。これより界面電流 I_i を得ることができる。

図7を I - V 特性に換算することにより印加電圧 V に対する電流 I の関係を図8に示す。図8に示すように, 各平板間距離 h に対して, I - V 特性は原点を通る正比例関係になることが分かった。これはこの系において電流 I は印加電圧 V に比例するというオームの法則が成立していることを示している。

バルク電流 I_b は電流 I から界面電流 I_i を引いたものである。図9に図7のデータから得られたバルク電流 I_b と平板間距離 h の特性を示す。実線は実測結果を示す。それ以外の線は蒸留水の電気伝導度から,

$$I_b = \frac{2\pi ChV}{\ln(R_{out}/R_{in})} \dots\dots\dots (8)$$

によって計算したバルク電流である。図9に示すよう

Fig. 9 Relation between I_b and h

に, 各電圧に対して, I_b - h 特性も原点を通る正比例関係になった。しかし, 実測値は計算値に比べ約3.6倍大きくなっている。このことは電気伝導度が3.6倍大きくなったことに対応する。この増大率は実験を行った印加電圧, 平板間距離の範囲内で一定であった。この流路をコールラウシュブリッジに組み込み交流電場を印加すると, 電気伝導度計と同じ伝導度 C が得られた。このことは電極における分極の可能性を示しているが, 通常分極は伝導電流を低下させる。このため分極が原因と考えることができない。電気浸透実験流路とは別の円管(内径 $\phi=5$ mm, 長さ 50 mm, アクリル製円管)の両端に電極を配置し, 蒸留水を封入し直流電場を加えてバルク電流を測定した結果, 同じように高いバルク電流が測定された。現在, 蒸留水に直流

電場を印加するとなぜ大きな電流が流れるか原因が不明である。

4.4 界面電流

4.4.1 印加電圧に対する界面電流の特性 図7から界面電流 I_i を求め、印加電圧 V との関係を図10に示す。界面電流 I_i は印加電圧 V に依存し、 V の増大とともに I_i もほぼ正比例的に増大する。界面電流の値はおよそ $h=5\text{ }\mu\text{m}$ のバルク電流(図9)と同程度である。電気二重層厚さが後に示すように $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 程度であることを考えると、界面電流の電流密度はバルク電流の50倍程度であり、電気二重層内では極めて強い電流が流れていることが分かる。

4.4.2 界面電流と電気浸透速度の関係 界面電流は電気浸透の駆動源として、電気浸透速度 v_{osm} と密接な関係がある。ここでは議論を単純にするため電気二重層に対し Helmholtz の平行平板コンデンサーモデルを用いて両者の間の関係を調べる。図1に示す電気二重層面上に分布しているイオン種は一つと仮定する。単位面積当たりイオンに作用する電気力は流体から受ける抗力及び壁面のせん断応力に等しいので以下の力の釣り合い式が得られる。

$$nzeE = 3\pi\mu d(v_{ion} - v_{osm})n = \mu \frac{v_{osm}}{\delta} \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 n は単位面積当たりイオンの数、 z はイオンの電荷数、 e は電子の電気量、 E は電場、 d はイオンのストークス直径、 v_{ion} はイオン移動速度である。また壁面単位長さ当たりの界面電流 I_s は

$$I_s = nzev_{ion} = nze(uE + v_{osm}) = \frac{I_i}{2\pi r \times 2} \dots\dots\dots (10)$$

ここで u はイオンの単位電場当たりの移動度である。

式(9)、(10)より

$$I_s = u\mu \frac{1}{\delta} v_{osm} + \frac{v_{osm}}{E} \frac{\mu}{\delta} v_{osm} \dots\dots\dots (11)$$

Walden の法則により $u\mu = \text{const}$ なので、式(11)の右辺第一項は δ が一定であれば I_s が v_{osm} に正比例する部分を表す。右辺第二項の v_{osm}/E は、図6に示す $Q_{osm}-V$ の関係と式(4)によりほぼ定数であるため、 μ/δ が一定であれば、この項も I_s と v_{osm} の正比例の関係を与える。結局式(11)は、

$$I_s = \left(u + \frac{v_{osm}}{E}\right) \frac{\mu}{\delta} v_{osm} \dots\dots\dots (11)'$$

のように I_s が v_{osm} に正比例することを表している。 I_s と v_{osm} の関係を実験的に求めた結果を図11に示す。図11に示すように、 I_s-v_{osm} は式(11)'と同様にほぼ正比例関係になっている。

式(11)'から分かるように、 I_s と v_{osm} の間の比例係数は $(u + v_{osm}/E) \cdot (\mu/\delta)$ と与えられるため、 u 、 v_{osm}/E 、 μ が分かれば、平行平板コンデンサーモデルでの電気二重層厚さ δ を求めることが出来る。蒸留水の場合正イオンとして水素イオン H^+ が支配的である。実験を行った水温 16°C では、 H^+ イオン移動度 u_+ は $0.29 \times 10^{-6} \text{ m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ である。また、実験結果より、 $v_{osm}/E = 0.13 \times 10^{-6} \text{ m}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 、水の粘度は $\mu = 1.1 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ である。図11により、 I_s/v_{osm} の傾きは $5.58 \times 10^{-3} \text{ A}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ である。したがって、

$$\delta = \left(u + \frac{v_{osm}}{E}\right) \mu \frac{v_{osm}}{I_s} = 83 \times 10^{-9} [\text{m}] = 83 [\text{nm}] \dots\dots\dots (12)$$

と求められる。得られた二重層厚さを式(9)に適用することにより、壁面せん断応力 τ とイオン濃度 n が

Fig. 10 Relation between I_i and V

Fig. 11 Relation between I_s and v_{osm}

求められる。印加電圧が 240 V の場合これらは

$$\tau = \mu \frac{v_{osm}}{\delta} = 17.2 \text{ [Pa]} \dots\dots\dots (13)$$

$$n = \mu \frac{v_{osm}}{\delta z e E} = 1.1 \times 10^{16} \text{ [m}^{-2}\text{]} \dots\dots\dots (14)$$

となる。これにより、電気浸透流では、流速が小さいにもかかわらず、壁面せん断応力が大きいことが分かる。

5. 結 言

本研究では、流路高さが可変のドーナツ型流路を用いて電気浸透流中を流れる電流から界面電流を分離して定量的に測定する方法を開発した。蒸留水とガラス (BK 7) の場合、界面電流密度はバルク電流密度に比べ 50 倍程度大きいことが示された。電気二重層に対し平行平板コンデンサーモデルを用いて求められた界面電流と電気浸透速度の関係を実験により確かめた。またこの関係より電気二重層や電気浸透流に関連する諸量を得た。これらの量の精密な値を得るには電気二重層に対し拡散モデルに基づいた考察が必要となる。今後測定された界面電流に対し拡散モデルに基づいた考察を進め、電気二重層・電気浸透流の詳細を解明する予定である。

本研究を進めるにあたり、日本学術振興会の科学研究費補助金 17560143, 21560168 の研究助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

文 献

(1) Tsuda, T., *Advances in Capillary Chromatography*,

Chromatography, Vol. 21, No. 1 (2000), pp. 1-10.

- (2) Erickson, D., Sinton, D. and Li, D., Joule Heating and Heat Transfer in Poly (Dimethylsiloxane) Microfluidic Systems, *Lab Chip*, 3 (2003), pp. 141-149.
- (3) Tsuda, T., Electric Field Applications: In *Chromatography, Industrial and Chemical Processes*, (1995), VCH.
- (4) Fujiwara, T. and Kitoh, O., Basic Study for a Micro-Pump Using Electroosmotic Flow, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 68, No. 671 (2002), pp. 2071-2078.
- (5) Kazoe, Y. and Sato, Y., Effect of Ion Motion on Zeta-Potential Distribution at Microchannel Wall Obtained from Nanoscale Laser-Induced Fluorescence, *Analytical Chemistry*, Vol. 79, No. 17 (2007), pp. 6727-6733.
- (6) Kirby, B. J. and Hasselbrink, E. F., Zeta Potential of Microfluidic Substrates: 2. Data for Polymers, *Electrophoresis*, Vol. 25 (2004), pp. 203-213.
- (7) Tatsumi, K., Fukuda, K., Katsumoto, Y. and Nakabe, K., Measurements of Electroosmotic Flow Velocity and Electric Field in Micro-Channels Using PIV, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 75, No. 750 (2009), pp. 251-258.
- (8) Sadr, R., Yoda, M., Zheng, Z. and Conlisk, A. T., An Experimental Study of Electro-Osmotic Flow in Rectangular Microchannels, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 506 (2004), pp. 357-367.
- (9) Chang, M. and Homsy, G. M., Effects of Joule Heating on the Stability of Time-Modulated Electro-Osmotic Flow, *Physics of Fluids*, Vol. 17 (2005), p. 074107-10.
- (10) Osuga, T., Kitagawa, S., Sakamoto, H. and Tsuda, T., Infrared Observations of the Interface Electric Current Along the Methyl Alcohol-Silica Interface, *Journal of Applied Physics*, Vol. 39 (2000), pp. 4143-4147.
- (11) Ogata, S., Kanda, K., Onozuka, T. and Yang, M., Flow Measurements in a Near Wall Flow Using Evanescent Wave Illumination (Effect of Polymer Additive on Flow in a Microchannel), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 74, No. 748 (2008), pp. 2452-2458.