J 054071

電気浸透流における界面電流と電気浸透速度の関係に関する実験的研究*

鬼頭修己^{*1}, 張 丹, 牛島達夫^{*1}

Experimental study on relation between interface-current and electroosmotic-velocity

Osami KITO^{*1}, Dan ZHANG and Tatsuo USHJIMA^{*1}^{*1} Nagoya Institute of Tech. Dept. of Mechanical Engineering
Gokisocho Showaku Nagoya, 466-8555 Japan

The interface-current i_i and the electroosmotic velocity v_{osm} have been measured in a specially designed doughnut channel with dilute aqueous solution of NaCl. The measured relation between i_i and v_{osm} was compared with the theoretical one based on the diffuse double layer model which predicts a linear relation between the two. When the applied external electric field is not so intense, the measured i_i - v_{osm} relations coincide quantitatively with the theoretical one. Under high electric field, however, the experimental results deviate from the theoretical linear relation. This deviation is due to the temperature rise of the solution in EDL caused by Joule heating of the interface current.

Key Words : Electroosmotic flow, Interface current, Electric double layer, Diffuse double layer model, Micro channel,

1. 緒 言

電気浸透流は、電気二重層内を流れるイオンの運動、すなわち界面電流により溶液が駆動されることにより生ずる流れである。このため電気浸透速度と界面電流の間には密接な関係がある。この関係が明らかになれば、電気浸透流特性に関するさまざまな情報が得られると予想される。電気二重層のイオン分布に対し拡散二重層モデルを用いることにより電気浸透速度と界面電流の理論的な関係が得られている⁽²⁾。しかし、これまで界面電流の正確な値を計測することが困難であったためこの関係を実験的に調べる事が出来なかった。我々はこれまで独自のドーナツ型マイクロ流路を用いて界面電流測定法を開発しその結果を報告してきた^{(1),(2)}。純水を用いた実験により、定性的に理論と一致する電気浸透速度と界面電流の関係が得られたが、純水ではバルクのイオン濃度が低く正確にこれをコントロールすることが難しかったため定量的な比較ができなかった。ここでは、溶液としてバルクイオン濃度を正確に規定した希薄食塩水を用いた実験をおこない、実験結果を理論と定量的に比較することにより界面電流測定法の妥当性と、電気二重層の特性を考察する。

2. 拡散二重層モデルによる基礎式

電気二重層内のイオンの数密度は、熱拡散の効果考虑したボルツマン分布となる。 n_0 をバルクのイオン密度、 ϕ を電気ポテンシャル、 k をボルツマン定数、 T を絶対温度 Z をイオンの価数、 e を電気素量とすると

$$n_i = n_0 \exp \left(- z_i e \phi / kT \right)$$

と表される。ここでは、簡単のため NaCl のような 1 価の電解質溶液を考える。任意の場所での電荷密度は

$$\rho_e = e(n_+ - n_-)$$

となる。二次元流路（流路半幅を $h_m = h/2$ ）の片側壁面を流れる界面電流は以下のようにかける⁽²⁾。ここで y は

^{*1} 正員, 名古屋工業大学 (〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町)
E-mail: kitoh.osami@nitech.ac.jp

壁からの位置, E は電場, u_{ion} はイオン移動度, v_f は流体速度である.

$$i_i = \int_0^{h_m} \rho_e (Eu_{ion} + v_f) dy \quad (1)$$

上式に電荷密度, 速度分布を代入し積分すると, 以下の結果が得られる⁽²⁾. ここで λ_D はデバイ長さで電気二重層の厚さを与える量である. ζ はゼータ電位, ε は誘電率である.

$$i_i = A \frac{\mu v_{osm}}{\lambda_D} \left(u_{ion} + B \frac{\varepsilon |\zeta|}{\mu} \right) \quad (2)$$

ここで $A = \frac{e^{\alpha/2} - e^{-\alpha/2}}{\alpha}$, $B = \frac{2}{\alpha} \frac{e^{\alpha/2} + e^{-\alpha/2} - 2}{e^{\alpha/2} - e^{-\alpha/2}}$, $\alpha = \frac{e\zeta}{kT}$ である.

上式は, 界面電流と電気浸透速度が正比例関係であることを示している.

3. 実験装置と方法

図 1 に実験装置の概略を示す. マイクロ流路は, 内直径 $D_i = 25$ mm, 外直径 $D_o = 50$ mm の 2 枚の平行ドーナツ型ガラス平板の隙間 ($h = 2h_m$) からなっている. 隙間 h は $3 \mu\text{m} \sim 70 \mu\text{m}$ まで任意の値に設定できる. ドーナツ型流路の内側と外側の電極間に DC 0~300 V の電圧をかけ電気浸透流を発生させた. 作動流体はモル濃度が $(0.56 \sim 1.06) \times 10^{-4}$ [mol/l] の食塩水を用いた. 電気浸透速度 v_{osm} は, 断面内での速度分布が均一なので, 流路を流れる流量 Q_{osm} を圧力差式流量計で測定し, 代表半径 $r_m = (D_i + D_o)/2$ での流速を $v_{osm} = Q_{osm} / (2\pi r_m h)$ として求めた. 流路を流れる電流 I は電流計で測定する. 電流 I は界面電流 I_i とバルク電流 I_b の和であるが, ドーナツ型流路で開発した測定法⁽²⁾により I から界面電流 I_i を分離できる. 代表半径での単位濡れ縁当たりの界面電流を $i_i = I_i / (4\pi r_m)$ と求めた. ゼータ電位 ζ はドーナツ型流路での H-S 理論式

Fig. 1 Experimental apparatus

$$v_{osm} = \frac{\varepsilon|\zeta|}{\mu} \frac{V}{\ln(D_o/D_i)} \frac{1}{r_m} \quad \text{から求めた. ここで } V \text{ は電極間の印加電圧である.}$$

4. 実験結果および考察

図2は3種類の濃度の食塩水に対して測定された界面電流と電気浸透速度の関係である. 図中原点をとおる3本の破線はそれぞれの濃度の食塩水に対して, 式(2)の理論から求められた結果である. 界面電流 i_i が約 $10 [\mu\text{A/m}]$ 以下の範囲では, 実験結果は原点を通る直線分布で, 式(2)と同じである. さらに, その傾きもそれぞれの濃度に対して実験と理論は一致している. このことは, ここでの界面電流, 電気浸透速度が精度よく測定されていること, および拡散二重層モデルに基づく理論が現象を定量的に予測できることを示している. 電極間の印加電圧を増加させ, 界面電流 i_i が約 $10 [\mu\text{A/m}]$ 以上になると, 実験結果は理論で予測された直線分布から下方(速度増加に対し電流増加が小さくなる)へずれる. 実験結果が直線からずれる始める電流値は, バルクイオン濃度 n_0 が大きいほど低い.

Fig. 2 Relation between interface-current and electroosmotic velocity for NaCl solution

実験結果が直線からずれる原因は以下のように考えられる. 界面電流は極めて狭い電気二重層(厚さが数十ナノメートル)を流れるが, その電流密度がバルクでの値に比べ著しく大きく⁽¹⁾ジュール加熱の影響が現れる. これにより流体の温度が電気二重層内で局所的に上昇し, 粘度 μ が低下し, 式(2)より $i_i - v_{osm}$ の直線関係が変化するためである. バルクイオン濃度が大きいほど, 電気二重層厚さ(デバイ長さ λ_D)が薄くなるため, そこでの電流密度が大きくなる. このためバルクイオン濃度が大きいほど小さい電流値において直線分布からのずれが生じる. 図2のデータでは, 最大電流値において温度上昇が 5°C 程度と見積もられた.

5. 結 言

1. 食塩水を用いた電気浸透流において, 界面電流と電気浸透速度の関係を測定した結果は, 電流値が約 $10 [\mu\text{A/m}]$ 以下では拡散二重層モデルに基づく理論と良く一致した. これより, 界面電流が精度良く測定されていることおよび拡散二重層モデルによる理論が有効であることが示された.
2. 界面電流値が約 $10 [\mu\text{A/m}]$ 以上ではジュール加熱による温度上昇が現れる.

文 献

- (1) 張丹, 李輝, 鬼頭修己, 牛島達夫, 岩本吉弘, “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”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 76, No. 762 (2010), pp. 247-253.
- (2) 張丹, 鬼頭修己, 牛島達夫, 岩本吉弘, 平松大輔 “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(拡散二重層モデルによる評価)”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 76, No. 771 (2010), pp. 1841-1848. .