

論 文

粘性流体中の誘電泳動による液体輸送

伊藤 友仁^{*†}, 軍司昌秀^{**}, 鶴津正夫^{**}, T.B. ジョーンズ^{***}

(2004年8月23日受付; 2004年11月8日受理)

DEP Liquid Actuation in Viscous Fluid

Tomohito ITO^{*†}, Masahide GUNJI^{**}, Masao WASHIZU^{**} and T.B. JONES^{***}

(Received August 23, 2004; Accepted November 8, 2004)

The dielectrophoretic (DEP) force acting on a liquid provides a controllable means for rapid movement and dispensing of small liquid volumes on a substrate. Microliter volume of water deposited on an insulating layer that covers the coplanar electrodes forms a protrusion that runs along the electrode gap when the voltage is applied, and is subdivided into small droplets when the voltage is turned off. It has been reported that the evaporation of water can be avoided by immersing the system into oil, but no quantitative study has been made on the DEP motion in such a viscous medium. In this paper, a two-dimensional model of the liquid protrusion motion is developed first, taking into the viscous drag exerted by the viscous medium. Then experiments are conducted using silicone oil with various viscosities as the medium, and the position of the protrusion front is measured as a function of time. Good agreements between the experimental and the calculated value are observed when the medium viscosity is below 0.1 Pa·s. However, at higher medium viscosity, the speed was found to be smaller than that predicted by the theory. The discrepancy is attributable to the viscous force at the protrusion front, which is not included in the 2D model.

1. はじめに

μ -TAS(Micro Total Analysis System)は化学分析装置や反応装置を小型化して一つの基板上に集積したもので、分析試料の低減、反応時間短縮、装置の携帯化等を可能とする。その応用分野はバイオテクノロジーやファインケミカルなどが考えられ実用化が期待されている。 μ -TASにおいては、液体試料を微小量取り出して目的の場所に輸送することが必要で、多くの手法¹⁾²⁾が検討

キーワード：粘性液体、誘電泳動、フィンガー、伸展速度

*鳥羽商船高等専門学校 商船学科 (517-8501 三重県鳥羽市池上町1-1)

Department of Maritime Technology, Toba National College of Maritime Technology, 1-1, Ikegami-cho, Toba, 517-8501, Japan

**東京大学機械工学専攻 (113-8654 東京都文京区本郷 7-3-1)

Department of mechanical Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8654, Japan

***Department of electrical and computer engineering,

University of Rochester.

Rochester, NY 14627, USA

† itomo@toba-cmt.ac.jp

されている。そのひとつとして、著者等が開発した、誘電泳動 (dielectrophoresis : DEP) を利用して少量の液体を別の場所に輸送する DEP マイクロアクチュエーションがある⁴⁾⁵⁾。これはガラス基板上にパターニングした電極によって得られる不平等電界を利用し、誘電泳動力によって微小液体輸送するものである。

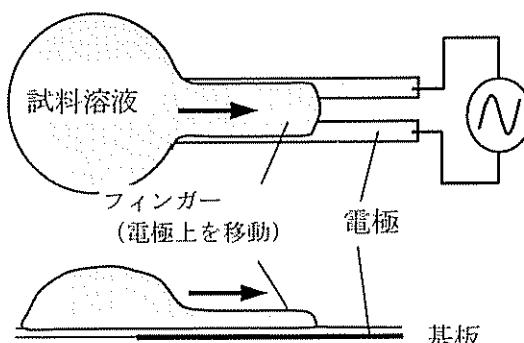
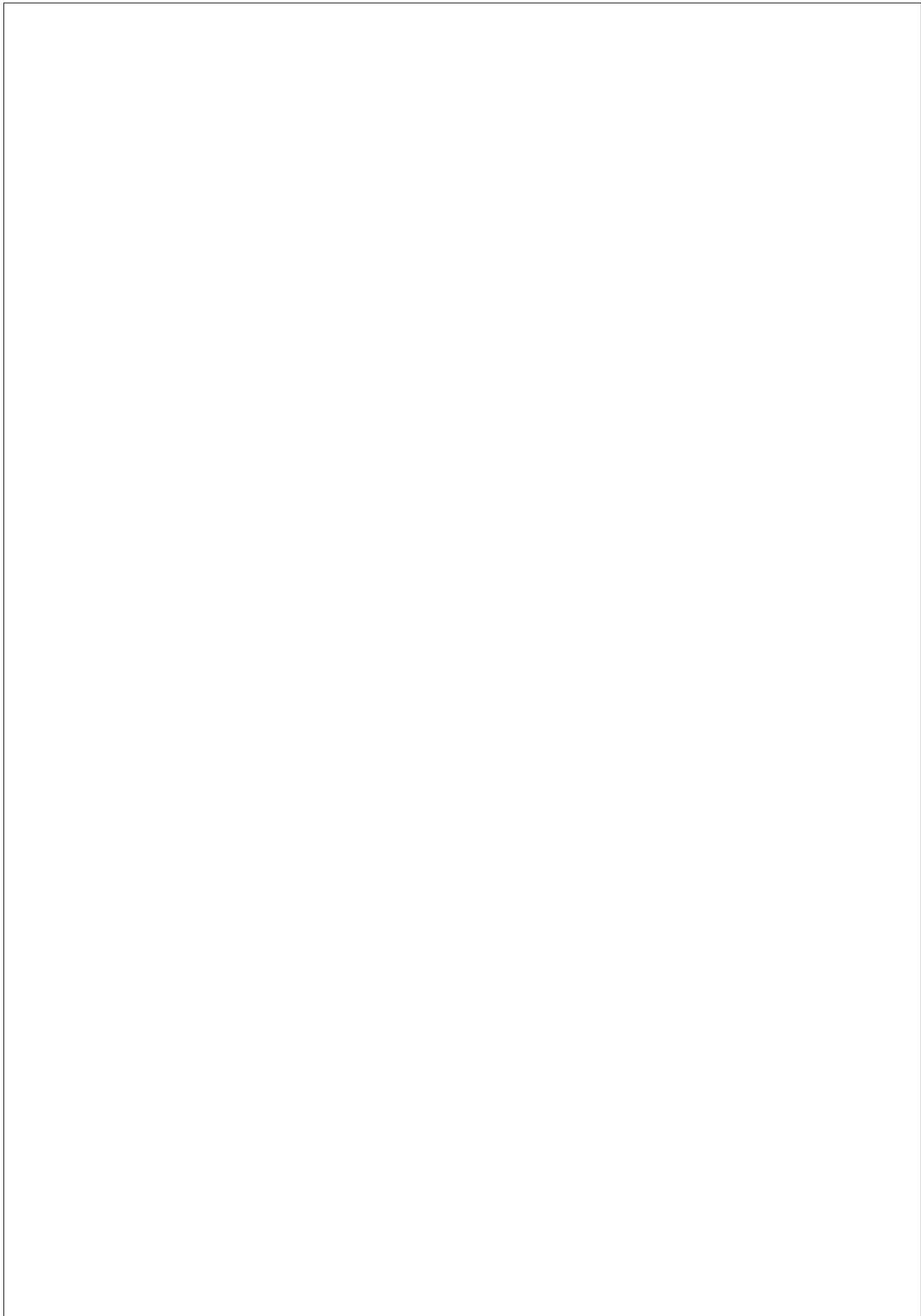
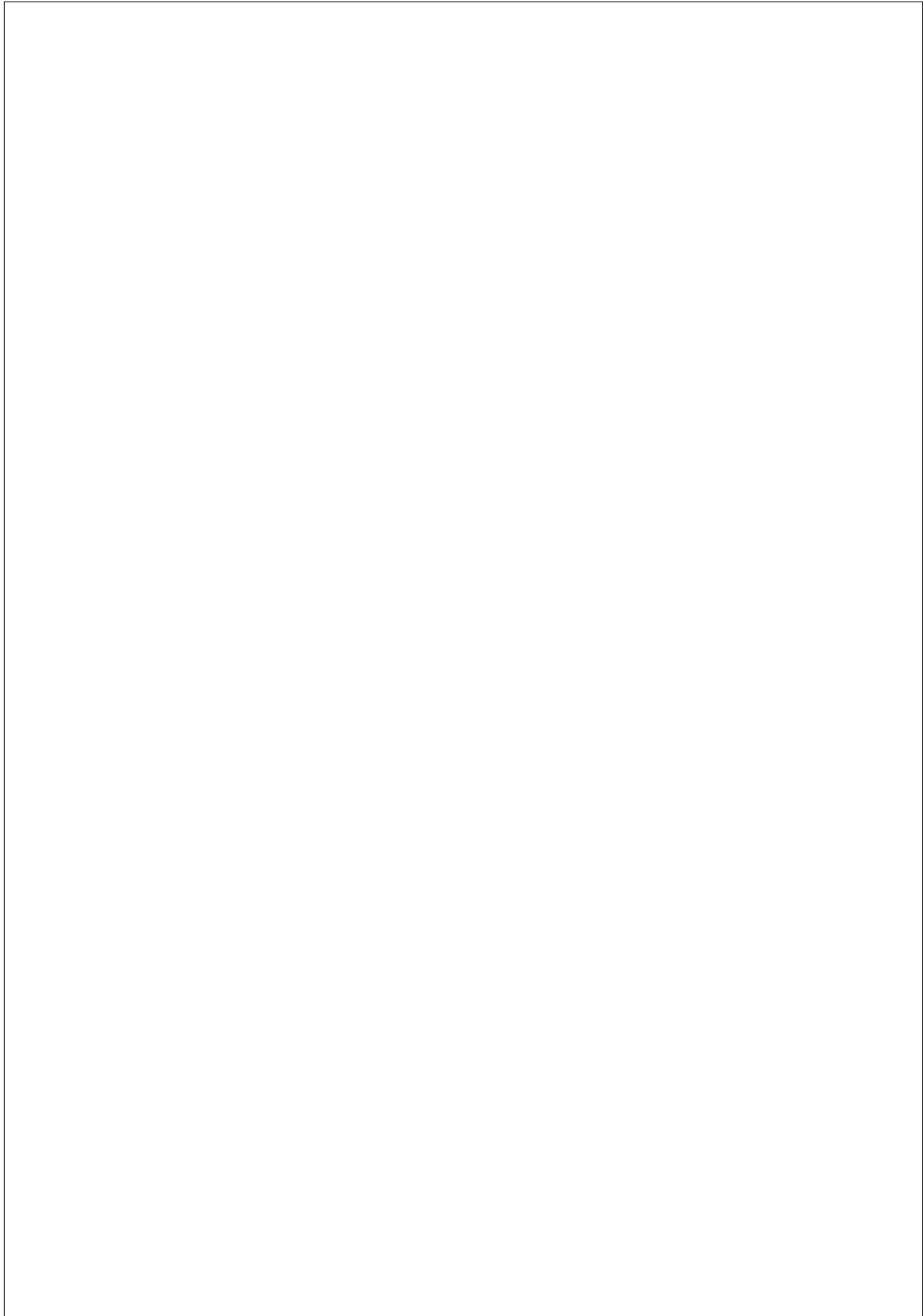


図1 平行平板電極上の液の誘電泳動

Fig 1 DEP liquid actuation on a co-planer electrodes.





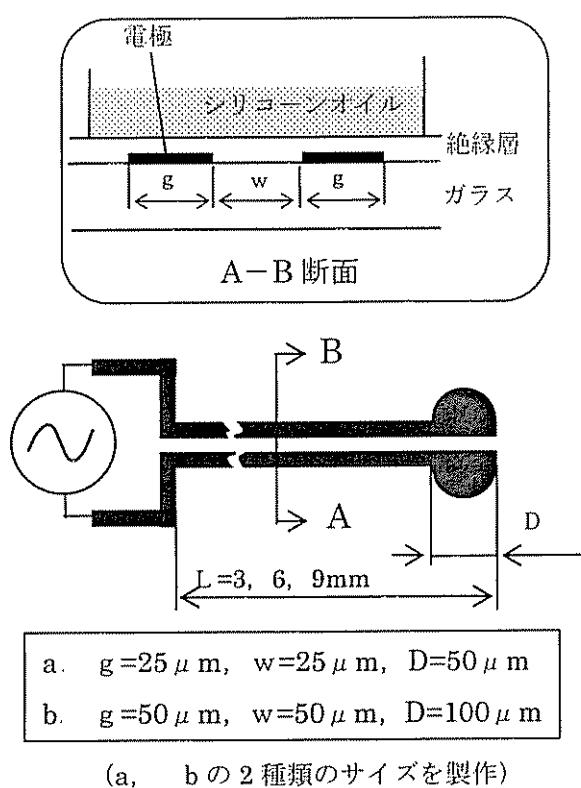


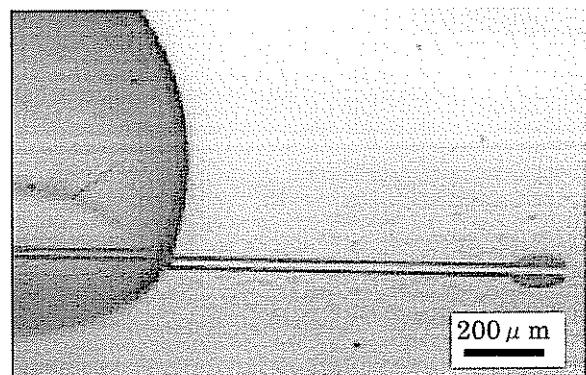
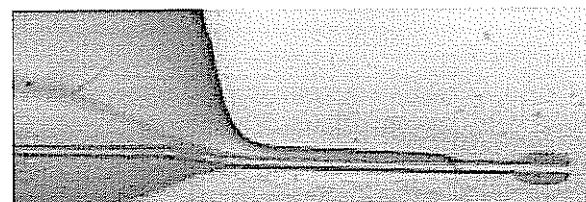
図2 基板に配置した平行平板電極の構造

Fig.2 Co-planer electrodes structure on a substrate.

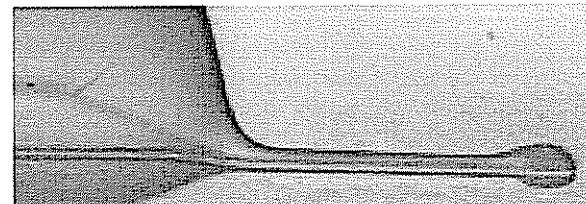
図1に示すように、基板上にある平行平板電極の一端に試料溶液を置き、電極に交流電圧を印加すると、誘電泳動力により電界の強い電極ギャップへと液体が引き込まれる結果、液体は、電極に沿って細長く変形させられ、電極に沿って電極他端まで移動していく。以後、このようにして形成された液柱をフィンガーと呼ぶことにする。その後、電界を取り去ると、キャビラリーインスタビリティにより、液柱はいくつかに分裂し、電極上にnlオーダーの微小な液滴を形成する^{⑤)}。

ところで、水を試料溶液として大気中でこの手法を行う際には、ジュール発熱によるフィンガーの沸騰や、生成した微小液滴が短時間で蒸発し消滅してしまうことなどが問題となっていた^{⑤)}。これらの問題点を解決するために、系全体を絶縁性オイル中に浸漬する方法を考案し、誘電泳動が起こる条件等を実験的に検討して既に報告した^{⑥)}。

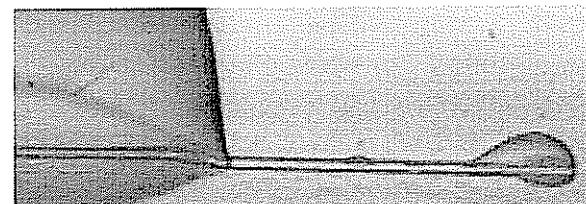
このような系においては、波の移動速度は、周囲のオイルの粘性の影響を受けることになる。しかしながら、粘性媒質中の液体のDEPの定量的評価については、

(a) 電圧印加前 (液滴 $10 \mu\text{l}$)

(b) 電圧印加後 1.0s (電極上を液が移動)



(c) 電圧印加後 1.5s (液が右端に達する)



(d) 電圧除去後 0.03s (右端に微小液滴が形成)

図3 水の誘電泳動と微小水滴の形成

媒質：シリコーンオイル(動粘性係数 1000cs)

400kHz, 700V による駆動

電極 : $g=50 \mu\text{m}$, $w=50 \mu\text{m}$, $D=100 \mu\text{m}$

Fig.3 DEP actuation and nanodroplet formation of water (medium : silicone oil(1000cs)).

 $V=700 \text{ V}(400\text{kHz})$ Electrodes: $g=50 \mu\text{m}$, $w=50 \mu\text{m}$, $D=100 \mu\text{m}$

いまだ報告例がない。そこで、今回研究においては、粘性流体中の液体の誘電泳動、特にフィンガーの進展速度を、実験および解析的に検討した。実験で試料溶液として使用した液は蒸留水で、数種類の

粘性のシリコーンオイル中におけるフィンガーの進展速度を計測した。また、周囲の粘性流体の作る流体抵抗を考えた解析モデルを作り、それと実験結果との比較を行った。

2. オイル中での液体の誘電泳動と微小液滴の形成

2.1 実験方法

試料溶液としては蒸留水を用いた。実験で使用した電極の形状を図2に示す。ガラス基板上にアルミニウムの平行平板電極(厚さ約300nm)をパターニングし、その上に絶縁層として SiO_2 (厚さ約2~5μm)をスペッタリングにより形成し、さらにその上からフォトレジスト(Siprey S-1813の20倍希釈液)をスピンドルコートすることにより厚さ100nm以下の疎水膜を形成した^④。電極先端の半円部は、液滴をトラップし易くするためのものである^⑤。図に示すように、1) 電極の間隔 $g=25\mu\text{m}$ 、幅 $w=25\mu\text{m}$ で先端の半円の直径 $D=50\mu\text{m}$ のものと、2) $g=50\mu\text{m}$ 、 $w=50\mu\text{m}$ 、 $D=100\mu\text{m}$ のものの、2種類を準備した。電極長さは3mm、6mmおよび9mmのものをそれぞれ製作した。

オイル中で実験を行うため、図2に示したように、絶縁層の上にオイルを約2mm程度溜めることができるチャンバーを設けた。オイルとしては、動粘性係数 $\eta=2, 50, 100, 1000, 10000\text{ cs}$ ($\text{cs}=\text{センチストークス}=10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$)の5種類のシリコーンオイル(信越シリコーン製KF-96)を使用した(粘性係数 μ と動粘性係数 η との関係は $\mu=\eta\rho$ なので、オイルの密度 ρ が $8.7\times10^3\sim9.7\times10^3\text{ kg/m}^3$ の間にあり、使用したオイルの粘性係数に換算すると、それぞれ $\mu_{\text{out}}=0.0017, 0.047, 0.097, 0.97$ および $9.8\text{ Pa}\cdot\text{s}$ となる)。電極間に交流電圧が印加され、スイッチでon/offできるようにした。電源は最大電圧1kV、周波数 $f=300\sim700\text{ kHz}$ の交流電源を使用した。

実験では光学顕微鏡に高速度カメラを取り付け、ミラーを使用して横方向から一連の現象を撮影(4500フレーム/秒)した。撮影した画像から、フィンガー先頭の位置を時間の関数として測定した。

2.2 水の誘電泳動と微小液滴の形成

基板上のチャンバーをシリコーンオイルで深さ約2mmに満たして実験を行った。図3にその結果の一例を示す。最初にピペットで水を電極の左端に置き(図3(a))電極間に電圧(700V, 400kHz)を印加すると誘電泳動力により水は電極に沿って流れ(図3(b))右端に到達する(図3(c))。その後電圧を除去すると電極を覆った液が切れ界面張力によって一部は最初の液滴に戻り、

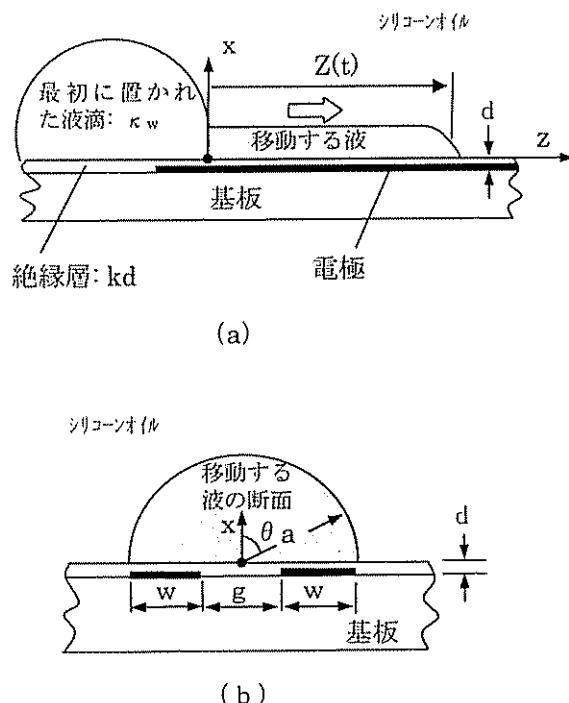


図4 粘性流体中におけるフィンガーの運動のモデル
Fig.4 A model of a liquid finger moving in a viscous medium.

残った水が電極右端付近に集まり微小液滴が形成された(図4(d))。

(b), (c)を比べると、電圧印加直後の水の動きは比較的早く、電極の端に近づくにつれゆっくりとなることがわかる。また、同じ電圧条件の場合、シリコーンオイルの粘性が大きくなるほど液の移動速度は遅くなる傾向が顕著に認められた。

3. 液体の誘電泳動の解析

3.1 液体の誘電泳動の運動方程式

以下では、粘性流体中でのフィンガーの進展速度の解析を行う。

既に報告されている大気中でのフィンガーの進展速度の解析^⑥に基づき、図4に示すように、誘電泳動力によって電極上に半円柱状のフィンガーが形成され、これが電極に沿って進行する2次元モデルを考える。

フィンガーに加わる力は、誘電泳動力 F_e 、液体の界面張力 F_r 、基板表面および周囲の粘性流体から受ける粘性抵抗力 F_μ である。従って液体の運動方程式は、時刻tにおけるフィンガー先頭の位置をzとして、

$$\frac{\pi\rho a^2}{2} \cdot \frac{d}{dt} \left[z \cdot \frac{dz}{dt} \right] = F_e + F_r + F_\mu \quad (1)$$

この測定範囲では、移動速度は媒質の粘性にあまり依存しないはずである。粘性が 1000~10000cs のオイルの場合 $\mu_r = 970 \sim 9800$ で、図 5 での D がほぼ一定の領域にあり、理論計算では進展速度は変わらない結果となる。

この粘性域での実験結果とモデルから予想される結果の不一致の理由は、上記の理論計算の 2 次元モデルにおいては、フィンガー先端の受ける流体抵抗を考慮に入れていないことにあると考えられる。

すなわち、モデルにおいては、フィンガー側面の受ける粘性抗力しか計算に入れていないため、媒質（オイル）の粘性を無限に大きくしても粘性抗力係数 D は無限に大きくはならず、固体壁に対する値に飽和する。一方、フィンガー先端の受ける流体抵抗は、この部分の面積が小さいため、媒質の粘性が小さい場合には問題にならないが、媒質の粘性を増加させるとそれに比例していくらでも大きくなるので、媒質の粘性が大きい場合には、フィンガー側面の抵抗よりも大きくなると考えられる。

従って、粘性の大きい媒質中での運動を記述するためには、フィンガー先端の受ける粘性抗力を考慮に入れる必要がある。現在、このようなモデルの開発を行っている。

4. まとめ

粘性流体媒質中での誘電泳動による液体の移動速度について、実験・理論の両面から検討を加えた。その結果、以下の結論を得た。

- (1) シリコーンオイル中に置かれた平行ストリップ電極を用いて、水を誘電泳動により電極に沿って移動させること（フィンガーの形成）、およびその後に電界を取り去ることにより、電極上に液滴を形成できることを、実験的に確認した。
- (2) さまざまな粘性係数を持つシリコーンオイルを用い、粘性媒質中でのフィンガーの進展速度を計測した。進展速度は、周囲のシリコーンオイルの粘性が大きくなるにしたがって遅くなった。
- (3) 粘性媒質中でのフィンガーの進展につき、媒質の粘性がフィンガー側面に及ぼす流体抗力を考慮に入れた 2 次元モデルを構築し、フィンガー先端位置を時間の関数として表した。

- (4) 上記のモデルによる計算結果と実測値の比較を行い、媒質の粘性係数の小さいところでは両者が比較的よく一致することを見いだした。
- (5) しかしながら、動粘性係数が 100cs を超えるところでは、計算結果からの乖離が見られた。これは、今回の 2 次元モデルにおいてはフィンガー先端の受ける粘性抗力が考慮に入っていないためと思われる。

今後、フィンガー先端の受ける粘性抗力を考慮を入れたモデルを開発し、粘性流体中での誘電泳動現象の正確な記述法を確立していく予定である。

謝辞

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金(課題番号 16-61612)及び、文部科学省科学研究費補助金(基盤研究 A14205037)の助成を受け行われ、電極パターニングのためのマスクは東京大学大規模集積システム設計教育研究センター(VDEC)の EB 描画装置を用いて製作されました。

また、本研究は著者の伊藤が平成 13 年度文部科学省在外研究員として、軍司が米国情報局(USIA)主催交流訪問プログラムの短期奨学生として米国ロチェスター大学に滞在した際に開始されました。関係各署に対し深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) M. Washizu : IEEE Trans. Ind. Appl., 34(4) (1998) 732
- 2) Y. T. Tseng, F. G. Tseng, Y. F. Chen and C. C. Chieng : Sens. Actuators A, 114 (2004) 292
- 3) K. Ichimura, S. K. Oh and M. Nakagawa : Science, 288 (2000) 1624
- 4) T. B. Jones : J. Electrostat. 51-52 (2001) 290
- 5) T. B. Jones, M. Gunji, M. Washizu and M. J. Feldman : J. Appl. Phys. 89 (2001) 1441
- 6) 伊藤友仁, T.B.ジョーンズ : 静電気学会講演論文集'02, p.147, 静電気学会(2002)
- 7) T. B. Jones : Proc. 4th Int'l Conf. Applied Electrostatics, p.1(2001)
- 8) W. C. Reynolds : J. Chem. Soc. 119 (1921) 466