

41. エレクトロウエットングによる液滴制御 Control of Liquid Droplet Movement with Electrowetting

B06109 本間 勝治

(研究指導者 田中 耕太郎)

1. 諸言

エレクトロウエットングとは電極上の撥水性誘電膜に置かれた液滴に電圧を加えることにより、液滴の接触角が変化する現象のことである。液体レンズの屈折率制御やマイクロポンプ等への応用や、それらの省電力化が期待されている。

しかし、液滴の挙動については、未だ解明されていないところが多い。そこで、本研究ではエレクトロウエットングを応用した液滴移動装置を作製し、液滴の静的・動的挙動ならびに、その作動条件について明らかにすることを研究目的とした。

具体的には、耐久性及び撥水性の高い誘電膜の選定や、電極の幅、間隔などの違いによる液滴の挙動の違いを調べることに注目した。さらに、スイッチの切り替えタイミングや印加電圧の大きさを制御することにより液滴の動きを観察し、より低電圧で効率よく液滴を制御できる装置の開発につながる条件を報告することを目的とする。

2. エレクトロウエットングの原理

Fig.1にエレクトロウエットングの原理図を示す。誘電膜の上にある液滴の上部、下部の電極に電圧を加えていくと、電極と液滴間で形成されるキャパシタの静電エネルギー分だけ表面エネルギーが減少し、液滴の接触角 θ が減少することが知られている。

接触角を θ 、固気界面エネルギーを γ_{SG} 、気液界面エネルギーを γ_{LG} 、固液界面エネルギーを γ_{SL} とすると、ヤングの式¹⁾より次式の関係がある。

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LG}} \quad (1)$$

Lippmann 式²⁾により固液界面エネルギーは電圧 V の関数として

$$\gamma_{SL}(V) = \gamma_{SL}|_{V=0} - \frac{c}{2} V^2 \quad (2)$$

となる。(1)式に(2)式を代入すると次式が得られる。

$$\cos\theta(V) = \cos\theta_0 + \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{2\gamma_{LG} t} V^2 \quad (3)$$

ここで、 θ_0 は初期接触角、 ϵ_0 は真空の誘電率、 ϵ_r は誘電膜の比誘電率、 t は誘電膜の膜厚である。

式(3)から接触角 θ は、印加電圧の 2 乗に比例し、誘電膜の比誘電率に比例する。また膜厚には反比例する。そのため初期接触角および比誘電率が大きく、膜厚の薄い誘電膜の使用により、接触角を変化させるための印加電圧

を下げることができると考えられる。

液滴の連続的移動方法は、Fig.2 に示すように、電極と絶縁層を交互に配置し、電圧を印加した電極上の接触角を減少させることにより行われる。スイッチを液滴の動的移動特性に合わせて制御することにより、連続的な液滴移動が可能となる。

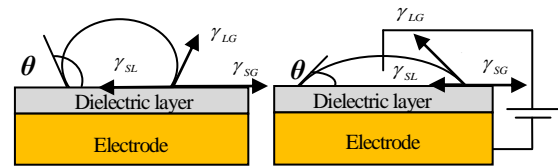


Fig. 1 Principle of electrowetting

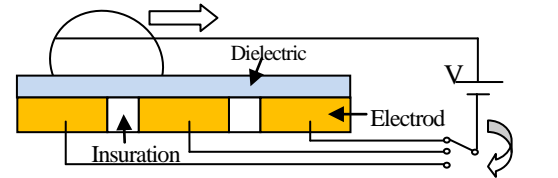


Fig. 2 Divided electrodes for control of liquid droplet movement

3. 実験装置ならびに実験方法

Fig.3 に実験装置図を示す。電極には、誘電膜を成膜した銅板を使用し、その上に所定直径の液滴(イオン交換水)を形成する。高圧直流電源装置(最大電圧 1500V)を用い、正極は銅板へ、負極は針状の電極に接続し、針は液滴の真上より接触させた。電圧は 0V から 10V ずつ増加させ、その際の液滴写真を撮影する。あらかじめ各誘電膜の耐電圧を調べておき、その値に達しないように最大電圧を定めておく。最大電圧に達したら、そこから 10V ずつ 0V まで電圧を減少させ、同様に写真撮影を行う。得られた写真を画像解析することで接触角を決定した。

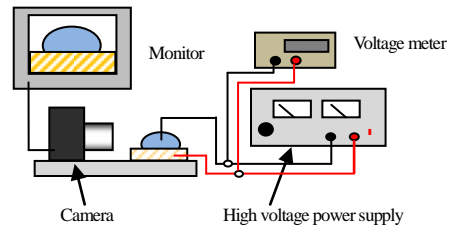


Fig. 3 Experimental arrangement

4. 実験結果ならびに考察

4.1 静的特性と誘電膜の選定に関して

エレクトロウエットングによる液滴の静的特性は、一般的に誘電膜の特性により大きく左右される。誘電膜に求められる条件は、絶縁性および耐久性が高く、膜厚が薄いもので、比誘電率と撥水性が高く、電極との密着

性のよいことである。実際に誘電膜材料を評価するため、4種類の膜に関して印加電圧と接触角の関係の測定を実施した。これらの誘電膜の物性値を Table.1 に示す。また、Fig. 4 に実験結果を示す。図中の実線および点線は式(3)により求めた計算値である。実験値と計算値の値はおおむね一致していると言える。

テフロン単体ならびにテフロン+酸化チタン膜は撥水性が高く、電圧増加時と減少時のヒステリシスの小さいことが測定結果より得られた。フッ素膜(商品名フロロサーフ FG3020)の接触角変化幅は大きい、耐電圧は低く、ヒステリシスもやや大きいといえる。酸化チタン膜は比誘電率が高いため、複合膜とすると膜全体の誘電率は増加することが期待できる。しかし、今回の実験結果においては単体膜との差異は小さかった。これらの結果より本研究では動的挙動のための誘電膜にはテフロン単体膜を用いることとした。

	Permittivity	Thickness(μm)	Contact angle(°)	withstand voltage (V)
Teflon	2	10	95	300
Fluorocarbon polymers(FG3020)	3	8	120	200
TiO ₂	30	0.2	60	10

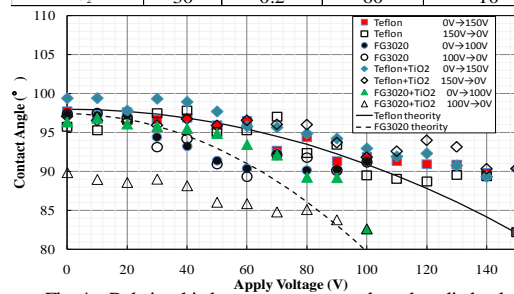


Fig. 4 Relationship between contact angle and applied voltage

4.2 動的挙動に関する検討

液滴の動的挙動は、液滴に働く力と慣性質量に関係する液滴の大きさがその特性に大きく関係することが考えられる。Fig.2 に示した装置の電極幅や間隔を決定する際、液滴との相対的な大きさの情報も重要となる。そこで本研究では、Fig.5 左に示す装置において電圧を印加し、各液滴大きさに対して実際に液滴が動き出すのに必要な電圧値の測定を実施した。Fig.6 は直径 3 mm から 6.5 mm の液滴移動開始の印加電圧の測定結果を示している。一方、解析として Fig.5 右に示すように斜面上に置かれた半径 R の液滴に働く力を考えた。その際の力 F は次式で表わされる⁴⁾。

$$F = 2\gamma_{LG}(\cos \theta_{rec} - \cos \theta_{adv})R \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta_0\right) \quad (4)$$

解析方法として、液滴の接触角の大小関係と移動方向は異なるが、接触角の差と移動開始の関係は相似できると仮定することを考えた。そこで、Fig.5 の条件で移動する直前の接触角を測定し、その時に液滴にかかる力を式(4)により算出した。また、その接触角から式(3)の関

係を利用して液滴を移動させるために必要な電圧値を算出した。計算結果を Fig.6 に測定結果と併に示す。両者の結果はほぼ一致しており、移動開始の条件は、斜面滑りだしの理論を応用できるといえる。

今回の測定結果より、水滴は小さいと動き出す印加電圧は高く、直径 5mm 程度以上で印加電圧値の低下傾向が見られる結果となった。

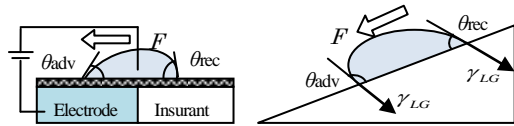


Fig. 5 Hysteresis angles and forces for droplet movement

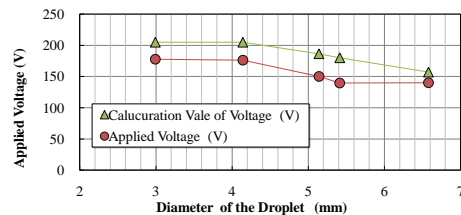


Fig. 6 Required minimum voltage for droplet movement



Fig. 7 Patterned Pt electrode on flat glass (W= 2 mm)

4.3 連続移動装置の特性

本実験では Fig.7 に示すようなパターン電極を作製した。この電極はイオンコーター装置による平板ガラス基板への白金蒸着膜で、パターンは絶縁層に部分マスクングを行うことで形成した。Fig.7 の電極は幅 2mm、電極同士の絶縁間隔は 1mm の例である。液滴を連続的に移動させるためのスイッチング電源は、マイクロコンピュータでリレーを制御する回路を作製して用いた。印加電圧 140V の条件で液滴を連続的に移動に成功した。この条件でスイッチの切り替え(2Hz)に応じて素早く液滴(5.4mm)が追従した。しかし問題点は、誘電膜は時間とともに性能が劣化し、液滴が時間経過と共に動かなくなってしまう現象が測定された。そのため連続移動の条件を定量的に明らかにすることはできなかった。

5. 結言

エレクトロウェットティング現象の、特に液滴の動き出す条件に関して傾斜時と同等の方法で考察できることを明らかにした。液滴の連続移動実験を行うことができた。しかし、経時変化のある結果により定量的評価は難しい結果が得られた。膜厚の場所による変化等も含め、再現性を確保することが今後の課題といえる。

参考文献

- 1) 小野周：表面張力、共立出版(1986).
- 2) Lippmann,G,Ann.Chim.Phys.5(1875),494.
- 3) Joonwo Kim,Wenjiang Shen, Laurent Latorre,Chang-jin Kim, "A micromechanical switch with electrostatically driven liquid metal droplet" Sensor and Actuators, A 141(2008)