

令和 4 年 4 月 29 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14672

研究課題名（和文）長距離界面張力とElectrowettingによる液滴の超低電圧駆動

研究課題名（英文）Droplet manipulation using interfacial tension and electrowetting

研究代表者

山本 憲（YAMAMOTO, KEN）

大阪大学・理学研究科・助教

研究者番号：70749100

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：電気的な力で液滴を操作するElectrowetting-on-dielectric (EWOD) と呼ばれる技術を発展させ、従来は数十～数百ボルトが必要とされていた印加電圧を5ボルトにまで低減させた。従来のEWODでは液滴と電極の間に誘電体の固体層が挿入されるが、本研究ではこれを液体誘電体で置換することにより低電圧化を達成した。本技術をElectrowetting-on-liquid-dielectric (EWOLD) と命名した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、EWOLDのコンセプトを示すだけでなく物理モデルも構築している。その結果、液滴移動速度がデバイス形状・印加電圧などから予測可能であることを示したほか、従来のEWODでは駆動力の低下に直結していた誘電体層の厚さがEWOLDでは駆動力に影響しないことを示した。さらに、液滴を4本の単三電池で駆動するデモンストレーションを行った。この駆動電圧はスマートフォンから出力可能な程度の電圧であることから、本発明がスマートフォンによる液滴駆動など、電気的な液滴駆動の新たな応用可能性を拓くものであることを示した。

研究成果の概要（英文）：Based on a droplet manipulation technique called Electrowetting-on-dielectric (EWOD) an advanced technique with which one can manipulate a droplet with 5 volts (whereas conventional techniques require tens or hundreds of volts) has been developed. The novel technique has been named Electrowetting-on-liquid-dielectric (EWOLD). The technique achieves low energy consumption by replacing a solid dielectric layer, which is placed in between the droplet and electrodes and is used for the conventional EWOD devices, with liquid dielectric.

研究分野：ソフトマター物理学

キーワード：エレクトロウェットティング 界面 濡れ 液滴

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

生化学分析の全プロセスを1つのチップ上で行うマイクロ TAS デバイスにより、様々な分析の高速化・高感度化が実現されている。一方で、これらのシステムの多くはポンプ、顕微鏡やレーザーなどの周辺機器を必要とし、またチューブの接続なども含めたデバイスの操作が煩雑であることから、分析には研究室のような整った環境と専門の人員を用意せねばならず、分析にかかるコストを高止まりさせる要因となっている。

マイクロチップが周辺機器から独立しシンプルな操作で分析できるようになることは、単なる経済的・人的コスト削減だけでなく、チップのポータビリティを著しく向上させることを意味する。このようなチップを開発する上で障害となるのは、複雑なシステムの構築や、十分な検出感度を得ることが困難なことである (Chin *et al.*, *Lab Chip*, 2012)。これらの課題を解決する手法として近年、ディスク状のチップの回転による遠心力 (Kim *et al.*, *Anal. Chem.*, 2017) や電気的な力 (Wang *et al.*, *Front. Mech. Eng.*, 2017) により流体の駆動や混合を制御する手法が注目されている。特に、電気的な流体駆動手法の一つである electrowetting-on-dielectric (EWOD) は、基板上の微小な液滴に電場を印加することで液滴を駆動する手法であり、液滴をデジタル的に制御できるため、専門知識を持たない人であっても、制御プログラムを介した自由度の高い液滴操作を行うことができるという特徴を持つ。一方で、液滴の駆動には 10^1 – 10^2 V の駆動電圧を必要とする。したがって、EWOD を利用したマイクロ TAS チップは高圧電源に接続しなければならず、この点がチップの汎用性を著しく損なう原因となっている。

2. 研究の目的

本研究では、スマートフォン上に置くだけで生化学分析が自動で完了するポータブルマイクロ TAS システムを開発することを最終的な目的とした。その具体的な手法として誘電体 electrowetting および光電効果に着目し、液滴状の試料を (スマートフォンのディスプレイの光を変換した) 電気によって駆動する手法の開発を目指した。この際に障害となるのが、electrowetting による液滴の駆動には一般的に数十ボルト～百ボルト超の電圧が必要とされている点である。この課題の解決策として、本研究では液滴と電極の間に (基板最表面として) 挿入される誘電体を従来の固体から液体に変更し、固体と液滴の間で生じる摩擦を大幅に低減させる手法を提案した。

3. 研究の方法

本研究では、本手法において種々の生化学分析プロセスで想定される液滴操作が可能なことを示すために、(1) 電圧印加による液膜界面形状変化の計測、(2) 液滴周囲の液膜における粘性抵抗の計測、(3) 電圧印加による液滴の駆動と結合、の3点を実施し、新たな液滴操作手法を提案することとした。

(1) については、誘電体液膜の動的特性や液滴に電圧を印加した場合における液滴および液膜の挙動を実験的に明らかにした。(2) については、液滴移動に必要な駆動力を理論および実験の両面から 10^0 nN 程度であることを明らかにした。この駆動力は固体上の液滴に必要な駆動力と比較して 2 オーダーほど小さいことから、本研究の提案の概念的な有効性が示されたといえる。(3) については、様々な条件における液滴駆動実験と物理モデル構築を行い、液滴駆動メカニズムの解明およびデバイスの最適化手法を提案した。

4. 研究成果

本研究ではまず、従来の EWOD デバイスの固体誘電体層を液体に置換することで駆動電圧を大幅に減少させることが可能であることを示した。エレクトロウェットングとは本質的には基板に対する液滴の濡れ具合を変化させる技術であるが、本研究で提案する手法では 0.1 V の印加電圧で濡れ具合を変化させられることを示した。なお、従来の技術ではこのような変化を起こすために少なくとも数十ボルトを要している。研究代表者らはこの技術を Electrowetting-on-liquid-dielectric (EWOLD) と命名した。

さらに、研究代表者らは EWOLD のコンセプトを拡張し、図 1 に示すデバイスを用いることによって液滴の濡れ具合の制御だけではなく液滴そのものを移動させる手法を開発した。この手法を用いることで、液滴を 5 V という低電圧で駆動可能であることを示した（従来の EWOD 技術では数十～数百ボルトを要する）。この成果は、液滴の電氣的駆動という手法をポータブルデバイスに応用できることを示唆するものであり、例えばスマートフォンが供給する電力で液滴を操作し、その場で生化学分析などを行うシステムへの応用が考えられる。このような「その場分析」は英語では Point-of-care (POC) と呼ばれ、世界的に活発な研究開発が行われている。

本研究では、EWOLD のコンセプト提示に留まらず、EWOLD による液滴の駆動メカニズムの解明も行った。メカニズムの解明には実験観察（図 2）と理論の両面からアプローチし、液滴の移動速度を予測する理論式を導出した。導出した理論式は実験結果をよく表現することを確認し、さらに、デバイスを最適化するために重要なパラメータの抽出にも利用できることが明らかになった。その結果、従来の EWOD 技術ではデバイス効率に大きく影響していた誘電体層の厚さが EWOLD の場合には影響しないことが明らかになった。これは EWOLD の誘電体層が液体であることに由来しており、この液体誘電体層が電氣的絶縁だけでなく潤滑効果ももたらすために付与された効果である。

以上で述べたように、EWOLD は従来の EWOD と比較して電力を 93%削減可能であり、また、誘電体層の厚さに関して要求条件が厳しくないという特徴を持つため、今後は POC デバイスなどへの応用が見込まれる技術であるといえる。

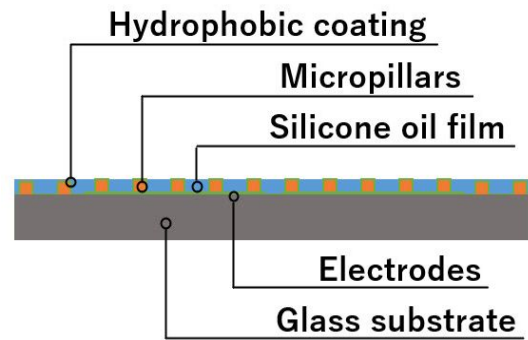


図 1. 液滴操作のための EWOLD デバイス

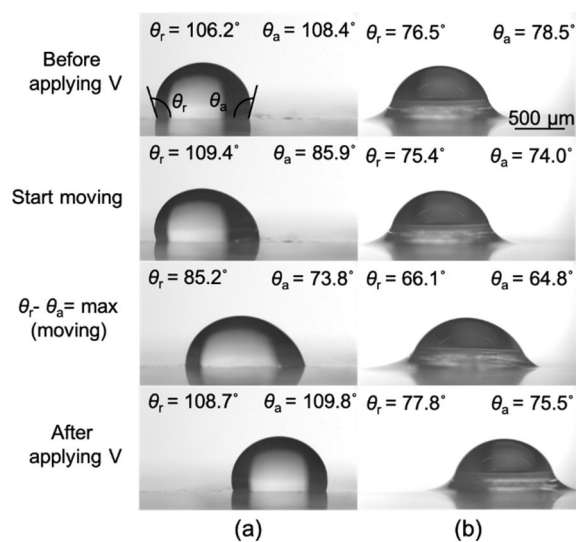


図 2. EWOD (左) と EWOLD (右) による液滴駆動

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ken Yamamoto, Shimpei Takagi, Yoshiyasu Ichikawa, Masahiro Motosuke	4. 巻 arXiv:2201
2. 論文標題 Electrowetting-on-liquid-dielectric (EWOLD) enables droplet manipulation with a few volts	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 9496
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.48550/arXiv.2201.09496	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高木森平, 山本憲, 市川賀康, 元祐昌廣
2. 発表標題 液膜上エレクトロウェットティング (EWOLF) における液滴内部流動の可視化
3. 学会等名 第49回可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	高木 森平 (Takagi Shimpei)		
研究協力者	元祐 昌廣 (Motosuke Masahiro)		
研究協力者	市川 賀康 (Ichikawa Yoshiyasu)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------