

平成21年6月13日現在

研究種目：基盤研究（C）  
研究期間：2007～2008  
課題番号：19510131  
研究課題名（和文） 液滴の表面張力を利用した微小物体のマニピュレーションに関する研究  
研究課題名（英文） Study on manipulation of micro objects using surface tension of liquid droplets.  
研究代表者  
鈴木 健司（SUZUKI KENJI）  
工学院大学・工学部機械システム工学科・准教授  
研究者番号：50251351

## 研究成果の概要：

本研究は、電界により基板表面の濡れ性を制御して液滴を輸送する EWOD (Electrowetting on Dielectric) 技術と、撥水面上の液滴の表面張力による荷重支持を組み合わせ、液滴による微小物体の搬送技術を確認することを目的としている。平成19年度には、EWODによる液滴輸送の信頼性を向上するため、加工条件、電極の形状と配置、電圧の印加方法などの最適化を行った。また、液滴により微小物体を回転駆動するモータを製作し、質量7.7mg、直径5mmのロータを最大320rpmで回転させることに成功した。さらにEWODを用いて大きな液滴から小さい液滴を分離する技術を開発した。平成20年度は、輸送中の液滴の挙動を高速度カメラにより撮影し、液滴の変形と印加電圧、切り替え周波数などの関係を明らかにした。また、0度～360度までの傾斜面での液滴輸送に成功し、液滴の3次元輸送技術を確認した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成19年度	2,100,000	630,000	2,730,000
平成20年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学，マイクロ・ナノデバイス

キーワード：MEMS，表面張力，エレクトロウエットィング，液滴，物体搬送

## 1. 研究開始当初の背景

近年、微細加工技術を用いたマイクロデバイスが化学、医療、バイオなどの分野で盛んに研究されている。化学分野においては、 $\mu$ TASあるいはLab-on-a-Chipとよばれるマイクロ化学システムが構築され、試料の微量化、

検出時間の短縮化などを実現している。また、DNAやタンパク質等の計測・分析技術分野においては、バイオチップと呼ばれるデバイスが用いられており、生体分子情報を大量かつ同時並行的に解析することが可能になった。しかしながら、デバイスの微細化とそれ

に伴うデバイスの脆弱化により、マイクロデバイスのハンドリングに問題が生じている。デバイスの表面には、静電気力、ファン・デル・ワールス力、介在する水の表面張力などにより吸着現象が生じるため、ハンドリングの際の貼り付きが問題となる。また、同時に、操作針等による破損、損傷のリスクが生じる。マイクロデバイスの普及には、これらの問題を解決する新規なハンドリング技術が求められている。

一方で、近年、上述したマイクロ化学システムの分野において、Electrowetting On Dielectric (以下 EWOD) を利用した液滴のマニピュレーション技術が種々研究されている。EWOD は、撥水性の基板に埋め込まれた多数の電極に電圧を順次印加することにより、基板上の液滴の濡れ性を局所的に変化させて液滴を駆動するものであり、流路やポンプ等の装置を必要とせず液滴の位置、速度、流量などの制御性が高いことが特長である。また、撥水性表面上の液滴は、球形に近い形状をとり、内部に圧力が発生するため、平行な2枚の撥液性平面間に液滴を挟むことにより、荷重を支持し、低摩擦で相対運動を実現できることが示されている。

このような背景から、EWOD による液滴輸送と、液滴の表面張力による荷重支持を君合わせ、EWOD により駆動される液滴の上に微小物体を支持して搬送すれば、微小物体に直接接触することなく、低摩擦で制御性の高いハンドリングが実現できると予想され、本研究の着想に至った。

## 2. 研究の目的

(1) 撥水性の基板上で液滴を EWODを利用して駆動し、その液滴上に微小物体を支持して搬送、回転、位置決めなどを行う技術を確認する。

(2) 液滴内部の流れ、液滴の変形挙動を解析することにより液滴および物体の輸送現象を解明し、駆動条件の最適化、デバイスの性能向上、液滴の3次元輸送などを実現する。

## 3. 研究の方法

### (1) 液滴輸送デバイスの製作と液滴の挙動解析

液滴の輸送デバイスは、学内にあるクリーンルームとマイクロ加工設備を利用し、MEMS 技術を用いて製作した。図1にデバイスの構造を示す。ガラスウェーハ上に厚さ  $0.3 \mu\text{m}$  のクロム膜をスパッタリングにより形成し、フォトリソグラフィ、エッチングにより電極形状のパターニングを行った。その上にパリレンCによる絶縁層、Teflon AF 2400 (三井デュポンフロケミカル(株))による撥水層をコーティングした。

液滴の輸送実験のための装置構成を図2に示す。図では18の電極を円形に並べた回転駆動の場合が示されているが、24の電極を直線状に並べたリニア駆動の実験も行った。制御信号は、ファンクションジェネレータからの矩形波をPICにより変換し、FETにより100V程度に増圧してデバイスに供給した。隣り合う3つの電極が同時に on になるような電圧パターンをPICにより生成し、電圧印加電極を一定の周期で一つずつシフトしていくことで液滴を駆動した。液体には純水を使用した。液体が移動する様子を高速度カメラで撮影し、液滴の変形挙動の解析を行った。

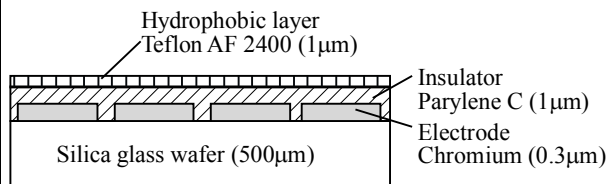


図1 液滴輸送デバイスの構

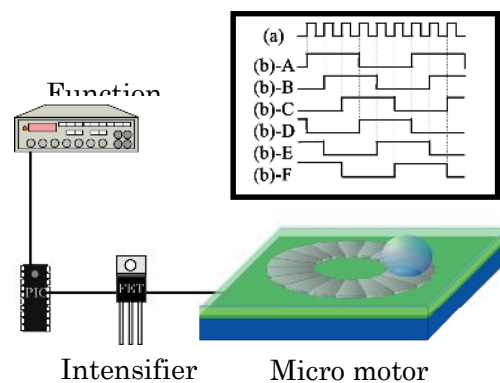


図2 液滴の輸送実験

## (2) 水滴による物体搬送

EWODにより回転駆動される3つの水滴の上に撥水性のロータを支持して回転させるマイクロモータを製作した。図3にマイクロモータの構造を示す。下部基板は図1の構造と同じであり、電極は18極、外径5mm、内径2mmで、6極につき一つの水滴を駆動する。水滴の直径は約1mmである。ロータはシリコンゴム的一种であるPDMSの表面に凹凸加工を施し、撥水剤のTeflon AF 2400をコーティングして、直径5mmの円形に切り取ったものを使用した。凹凸加工を行わないものや撥水剤を変えたロータも作成し、性能の比較を行った。また、直線上に並べた24極の電極の上に4個の水滴を配置し、PDMSのパッドとおもりを載せて、直線搬送する実験も行った。

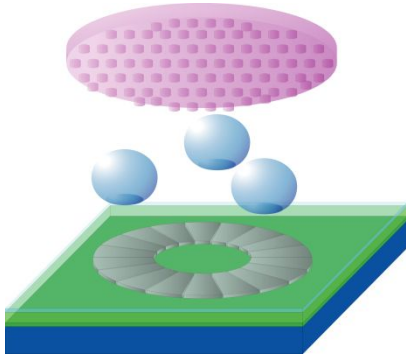


図3 マイクロモータの構造

## (3) 水滴の分離

微小物体の搬送デバイスでは、微小な液滴の生成方法や、液体の蒸発が問題となる。これらの問題を解決するためには、液滴を自動的に生成し、供給するシステムが必要である。そのための基礎実験として、比較的大きな液滴から一定量の微小な液滴を分離する実験を行った。液滴の分離には、液滴の両端の内圧を高めて中央部にくびれをつくる必要があるため、液滴を上下の板で挟みこむことが有効である。このため図4のように2枚の基板を配置し、液滴の両側の電極に電圧を印加することにより液滴の分離を行った。

## (4) 斜面上の液滴の輸送

液滴を水平な平面だけではなく、斜面、垂直面、曲面など3次元空間内で輸送させるこ

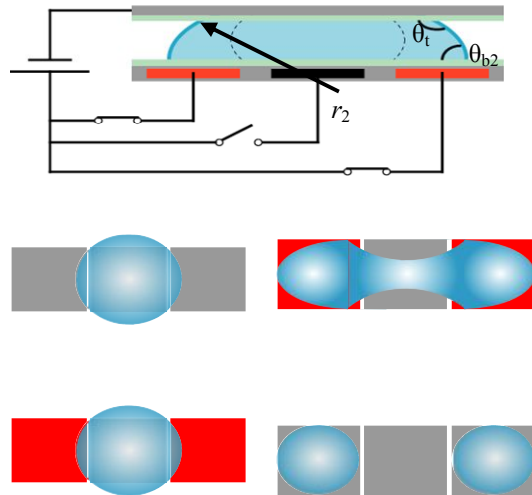


図4 液滴の分離

とができれば、応用の幅が広がると考えられる。そこで、デバイスを水平面から10度刻みで360度まで傾けて、斜面上での液滴輸送実験を行った。液滴の斜面輸送では、重力の影響を受けるため、駆動力をより大きくする必要がある。このため絶縁層の厚さを $0.5\mu\text{m}$ に薄くし、電極間の溝をスムーズに移動させるため、電極をのこぎり歯の形状に変更した。

## 4. 研究成果

### (1) 液滴輸送デバイスの製作と液滴の挙動解析

#### ① 電圧を印加する電極と水滴位置の関係

液滴が移動する際の電圧を印加する電極と水滴の位置の関係を調べたところ、図5に示すように、水滴が電圧を印加した電極の後ろ側を移動する場合と、前側を移動する場合

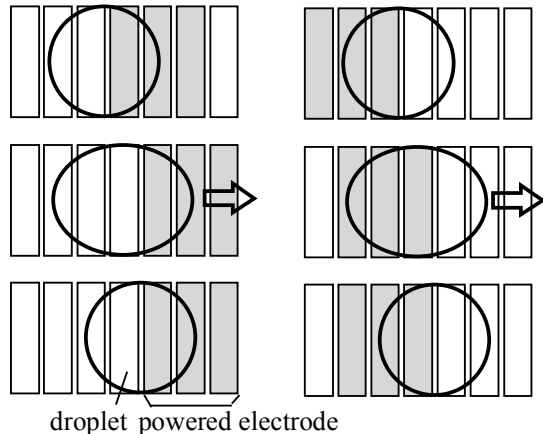
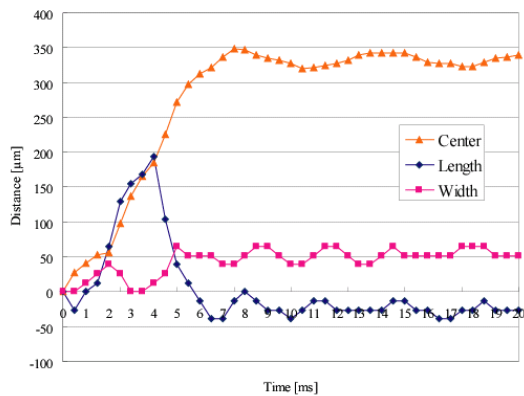


図5 電圧を印加する電極と液滴の関係

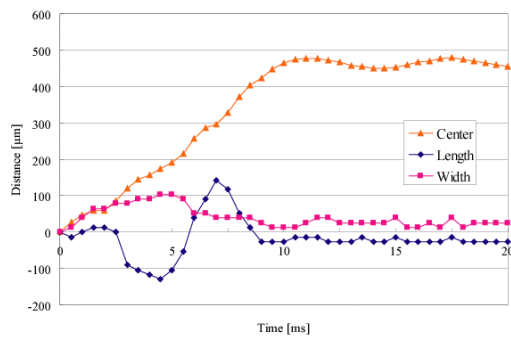
の2通りがあることがわかった。このことから、水滴は電圧の高い側に移動するのではなく、水滴の中心が、電位差のある2つの電極の中間に位置するように移動することが確認された。

### ②移動中の液滴の変形挙動

液滴は、印加パターンが切り替わった直後に変形しながら移動し、静止する。図6は、移動中の液滴の時間に対する中心位置、長さ、幅の変化をプロットしたものである。多くの場合、図6(a)のように、液滴はまず引きのばされ、その後縮みながら移動し、1ステップ移動したときに元の形状に戻る。一方、液滴の前縁が電極間の段差に引っかかるピン止め現象も観察された。この場合には、図6(b)のように、液滴の後ろ側が先に縮み、最も縮んだときにピン止めがはずれて前縁が伸びながら移動することが確認された。液滴の幅は移動中ほとんど変化しなかった。



(a) Elongation of a droplet



(b) Shrinkage of a droplet

図6 移動中の液滴の変形

### ③液滴量の影響

液滴量が増加すると1ステップの移動時間が増加する。また、液滴の1回の伸長量が電極のピッチにほぼ等しくなる最適な液滴量が存在し、その条件で1ステップの移動距離のばらつきが最小となることがわかった。電極ピッチが0.4mmのとき液滴量の最適値は1.5 $\mu$ Lであった。また液滴量が2 $\mu$ L以上になると1ステップの移動距離が安定せず、電圧の印加位置に追従しなくなった。

### ④印加電圧の影響

印加電圧を増加させると、液滴の伸長量が増加した。電圧が125Vのとき、液滴の伸長量が電極ピッチにほぼ一致し、移動距離、移動時間のばらつきが最小になった。電圧が75V~125Vの場合には、1ステップの移動距離の平均は電極ピッチに等しくなるが、150V以上では、移動しない場合や1度に2ステップ分移動する場合などが観察され、安定した移動が行えなかった。以上より印加電圧にも最適値があることが確認された。

### ⑤電圧の切り替え周波数の影響

図7は電圧の切り替え周波数が液滴の挙動に与える影響を示している。1ステップの移動時間、移動速度は、切り替え周波数によらず一定であり、切り替え周波数が低い場合には、移動後の静止時間が長くなることがわかる。周波数を高くしていくと、静止時間がゼロになるときに液滴の移動速度が最大になり、200Hz以上の周波数では液滴が電圧変化に追従できなかった。

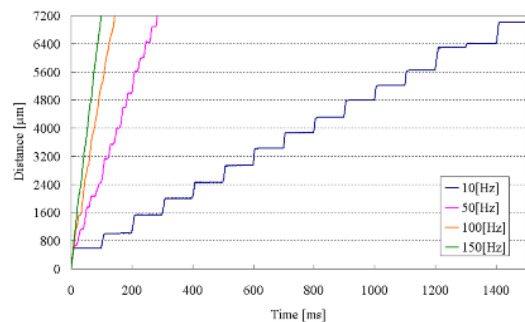


図7 切り替え周波数の影響

## (2) 水滴による物体搬送

円形の 18 極の電極上で 3 個の水滴を配置し、その上に PDMS で作成したロータを載せて回転型アクチュエータの駆動実験を行った。ロータの表面には撥水性を高めるために凹凸加工を行い、撥水膜としてテフロン AF を塗布した。回転モータの写真を図 8 に示す。質量 7.7 mg、直径 5 mm のロータを載せた状態で 320 rpm (切り替え周波数 96Hz、水滴速度 0.08 m/s) でマイクロモータを駆動させることに成功した。ロータ表面に凹凸加工を行わない場合は、水滴とロータの間の摩擦が増加し、水滴が動きにくくなるため回転させることができなかった。また、より接触角の大きい撥水剤 HIREC1450 を用いた場合には液滴と搬送台が滑る傾向が見られ、搬送台が回転しにくくなった。

回転モータと同様な方法で、直線上での物体搬送実験をおこなった。写真を図 9 に示す。4 つの水滴に支持された PDMS の搬送台の上に 4 種類の質量のおもりを載せて搬送を行った。搬送台の表面には凹凸加工を施し、Teflon AF を成膜した。実験の結果、印加電圧は 150V で、積載量 85mg までの物体搬送に成功した。この時の移動速度は 6.0 mm/s であった。搬送物の質量が増加するにつれ、搬送に必要な電圧が増加し、移動速度が減少することがわかった。

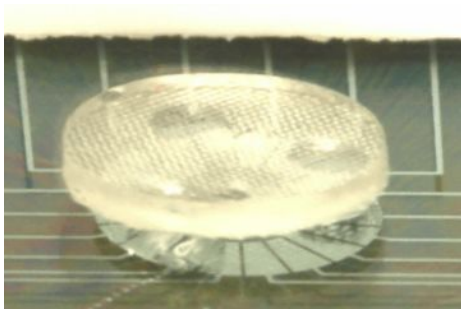


図 8 水滴による回転モータ

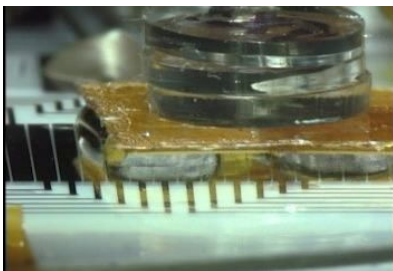


図 9 リニアアクチュエータによる搬送

## (3) 液滴の分離

2  $\mu$ l の水滴をギャップ 0.165mm の 2 平面間に挟み、70V の電圧を印加することにより、水滴を分離することができた。分離時間は最短で 1.3 秒であった。水滴の一端の電圧印加位置を固定し、他端の印加位置を移動させて水滴を引っ張って分離したところ、分離後の水滴はつねに引っ張る側の方が大きくなった。

液滴分離技術は、今後物体搬送デバイスへの液滴供給に応用可能であると考えられる。

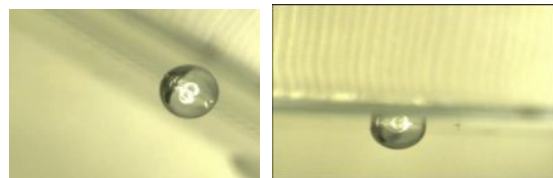
## (4) 斜面上の液滴の輸送

斜面上での水滴輸送実験を行った結果、10 度から 360 度のすべての傾斜面上での輸送が可能であった。輸送の様子を図 10 に示す。最も重力の影響が大きくなるのは垂直な壁面であり、電圧の印加をやめると液滴は滑落するが、電圧を印加すれば、上方に移動することを確認した。また、逆さ面でも液滴は落下せずに基板に付着しながら移動可能であった。電極の形状をのこぎり歯状にすることは、液滴の輸送抵抗を低減するために有効であった。また、垂直な壁面上で液滴を水平方向に輸送させる実験を行った結果、液滴は電極の最下端まで滑落するが、下端の境界に沿って水平に輸送された。これは電極と水滴の間に、電極との重なりが大きくなる方向に静電力が働くためと考えられる。



(a)60°

(b)90°



(c)150°

(d) 180°

図 10 斜面上の液滴の輸送

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- (1) 鈴木健司, 小池裕之, 高信英明, 三浦宏文, 表面張力を利用した水面移動ロボットの研究, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.75, No.751, 2009/3, pp.656-665.
- (2) 鈴木健司, マイクロメカニズムにおける摩擦と潤滑, 精密工学会誌, Vol. 74, No.9, 2008, pp.901-904.
- (3) 鈴木健司, 工学院大学におけるマイクロマシン研究の取り組み, 日本機械学会誌, Topics, Vol.111, No.1078, 2008/9, p.59.

[学会発表] (計 11 件)

- (1) 小池裕之, 鈴木健司, 高信英明, 三浦宏文, “表面張力を利用した水面移動ロボットの研究 (折り紙構造による機構の一体化),” 第 14 回ロボティクスシンポジウム, 登別, 2009/3/16, pp. 47-52.
- (2) 鈴木健司, 小池裕之, 高信英明, 三浦宏文, MEMS 技術を応用した水面移動ロボット, 日本機械学会 2008 年度年次大会講演論文集 (8), 横浜, 2008/8/6, pp. 285-286.
- (3) 本間裕章, 鈴木健司, 村山達哉, 高信英明, 三浦宏文, エレクトロウエッティングを用いた微小物体の搬送, 日本機械学会 2008 年度年次大会講演論文集 (8), 横浜, 2008/8/4, pp. 121-122.
- (4) 村山達哉, 鈴木健司, 高信英明, 三浦宏文, 表面張力を利用した液滴分離の研究, 日本 IFToMM 会議シンポジウム前刷集 (第 14 回), 東京, 2008/7/12, pp. 87-90.
- (5) 梶原周, 鈴木健司, 三浦宏文, 高信英明, 液滴の表面張力を利用した微小物体の多自由度アクチュエーションに関する研究, 日本機械学会 [No. 08-3] IIP2008 情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集, 東京, 2008/3/17-18, pp. 349-352.
- (6) 根元秀輔, 鈴木健司, 三浦宏文, 高信英明, メニスカス力を利用した壁面歩行ロボットの研究, 日本機械学会 [No. 08-3] IIP2008 情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集, 東京, 2008/3/17-18, pp. 345-348.
- (7) 小池裕之, 鈴木健司, 三浦宏文, 高信英明, 振動を利用した水面移動ロボットに関する研究, 日本機械学会 [No. 08-3] IIP2008 情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集, 東京, 2008/3/17-18, pp. 353-357.
- (8) Kenji Suzuki, Hideaki Takanobu, Kota Noya, Hiroyuki Koike, and Hirofumi

Miura, Water Strider Robots with Microfabricated Hydrophobic Legs,” Proc.the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS07), San Diego, USA, Oct 29 - Nov 2, 2007, pp.590-595.

- (9) 鈴木健司, 小池裕之, 野谷耕太, 高信英明, 三浦宏文, マイクロ加工表面を有する水面移動ロボットの研究, 日本機械学会 2007 年度年次大会講演論文集, No. 07-1, Vol. 7, 吹田市, 2007/9/11, pp. 311-312.
- (10) 根元秀輔, 鈴木健司, 三浦宏文, 高信英明, 表面張力を利用した壁面歩行ロボットの研究, [No. 07-2] Proceedings of the 2007 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Akita, Japan, May 10-12, 2007, 1P1-005 (1)-(4).
- (11) 小池裕之, 鈴木健司, 三浦宏文, 高信英明, 表面張力を利用した水面移動ロボットの研究, [No. 07-2] Proceedings of the 2007 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Akita, Japan, May 10-12, 2007, 1P1-006 (1)-(4).

[その他] ホームページ等

研究室ホームページ

<http://www.ns.kogakuin.ac.jp/~wwa1041/>  
研究内容の報道

(1) 爆笑問題の日本の教養, FILE063「ロボットの虫」三浦宏文, NHK 総合, 2009/2/24, 11:00-11:30.

<http://www.nhk.or.jp/bakumon/previous/20090224.html>

(2) 未来をひらく昆虫テクノロジー (12) 昆虫をまねて作るハイテックロボットサイエンスチャンネル 2008/9/5 17:00-17:30, 9/12 16:00-16:30.

[http://sc-smn.jst.go.jp/8/bangumi.asp?i\\_series\\_code=A070620&i\\_renban\\_code=012](http://sc-smn.jst.go.jp/8/bangumi.asp?i_series_code=A070620&i_renban_code=012)

(3) キャンパる: 動物ロボ 自由自在 12 本足 アメンボ, 毎日新聞 2007 年 10 月 26 日, 夕刊, p. 6,

<http://mainichi.jp/life/edu/news/20071026dde012070033000c.html>.

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 健司 (SUZUKI KENJI)

工学院大学・工学部機械システム工学科・准教授

研究者番号: 50251351

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし