超音波振動およびレーザーを用いた固体面上の
液滴の駆動に関する研究*加藤 健司^{*1}, 脇本 辰郎^{*1}, 増田 良平^{*2}A New Method to Actuate a Droplet on a Plate
by Use of Laser and Ultrasonic OscillationKenji KATOH^{*3}, Tatsuro WAKIMOTO and Ryohei MASUDA^{*3} Department of Mechanical Engineering, Osaka City University,
3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka-shi, Osaka, 558-8585 Japan

A new method to actuate a small droplet on a plate was proposed. In order to reduce the resistance to the droplet movement, which is typically represented by the resultant of surface tension acting on the three-phase contact line, i.e., $\sigma (\cos \theta_R - \cos \theta_A)$ (σ : liquid surface tension, θ_R , θ_A : receding and advancing contact angles), a supersonic oscillation was imposed on the plate to suppress the contact angle hysteresis ($\theta_R - \theta_A$). The experimental results using SAMs (Self-Assembled Monolayers) plates showed that the resistance was reduced by 80% due to the oscillation having the frequency of 28 kHz and the amplitude of few micrometers. Then the Laser beam was directed to one end of the droplet. The contact angle was remarkably decreased due to the local heating of SAMs plate and the droplet moved to the end of the Laser beam, since the tangential component of surface tension at the heated end overcomes that on the other. The droplet can be actuated by about 0.6 mm/s by the method combining the oscillation and the local heating by the Laser beam.

Key Words: Interfacial Phenomena, Liquid Droplet, Microfluidics, Laser, Actuation, Surface Tension, Contact Angle, Wettability, Supersonic Oscillation

1. 緒 言

化学・光学機器や医薬関連の分野において、マイクロ流路における伝熱や反応、あるいはマイクロ流体素子など、微小スケールの液体運動を制御する必要性が高まっている。このような問題では、表面張力やぬれ性といった界面現象の影響が重要となる。最近では、温度差、電場、光化学反応あるいはマランゴニ効果などを利用して、局所的に表面張力やぬれ性を変化させ、液滴の運動や分離、あるいは微小流路内の液柱の位置制御や分岐を行う手法について検討が行われている^{(1)~(6)}。

本研究は、固体面上の液滴を運動制御する新たな手法の提案を目的としている。これまで著者らは、外力が液滴に作用する系として、傾斜平板あるいは回転円板上の液滴の移動条件について理論的、実験的に検討を行ってきた^{(7)~(11)}。液滴が移動を開始する力学的な条件を理論的に導き、実際の液滴挙動がよく説明できる

ことを示した。液滴が平板上を運動する際、液滴に作用する表面張力が抵抗となるが、その大きさは液滴の両端に現れる接触角の差(接触角履歴)に大きく依存する。本研究では、液滴運動の抵抗をできる限り小さくするよう、壁面に超音波振動を施して接触角履歴を低減する方法について検討を行う。また、外部からレーザーを液滴の一端に照射して、固体表面のぬれ性の変化を誘起することにより、液滴を駆動する手法を試みる。

ここでは、まず超音波振動の振幅を変化させ、試料平板と供試液体の種々の組み合わせについて、接触角履歴の大きさを測定するとともに、液滴が転落を開始する傾斜角度の測定を行う。得られた測定結果に基づき、振動による抵抗低減効果について検討を行う。ついで、超音波振動を与えた種々の条件の下、レーザー出力を変化させて液滴の駆動実験を行う。液滴が運動を開始するまでの接触角の変化や、液滴を移動させるために必要な超音波振動子の振幅とレーザー出力の関係について実験的に検討を行う。

2. 液滴駆動の方法

* 原稿受付 2010年4月7日。

^{*1} 正員、大阪市立大学大学院工学研究科(〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)。^{*2} 大阪市立大学大学院工学研究科。

E-mail: kato@mech.eng.osaka-cu.ac.jp

2・1 接触角履歴の低減 図1のように、水平な固体面に付着した液滴が外力を受け、図のx方向に移動する場合を考える。液滴が移動する瞬間における固気液3相の接触線(図1のC)のぬれ挙動の考察から、液体の表面張力 σ の液滴周囲に作用する合力 D は、次式により与えられる⁷⁾。

$$D = \sigma(\cos\theta_R - \cos\theta_A)b \quad (1)$$

ここで、 θ_R および θ_A は、接触線上に現れる後退および前進接触角である。また、 b は液滴付着面の最大幅である。式(1)は、任意の付着面形状の液滴について成立する。重力や遠心力などの外力が式(1)の D よりも大きくなると、液滴は移動を開始する。上式より、接触角履歴($\theta_A - \theta_R$)を小さくすることにより、抵抗を低減できることがわかる。

接触角履歴は、固体面上に存在するあらさや化学的な不均質部分などの欠陥の存在により現れるとされている。接触角履歴が現れるメカニズムについて、表面上の欠陥部を接触線が通過する際に必要な仕事量との関連が指摘されている⁽¹²⁾⁽¹³⁾。図2は、巨視的な接触角 θ_R をもち、固体面上の欠陥を通過する接触線の挙動を

Fig 1 Schematic of liquid droplet movement

Fig. 2 Movement of three-phase contact line over a defect on solid surface

模式的に表わしたものである。水平板上の液滴の場合、図2の θ_R の位置が後端の接触線に対応する。局所的に存在する欠陥部に接触線の一部がトラップされる結果、その歪み形成に応じたエネルギーの分だけ抵抗が増加する。巨視的に観察される接触角は、そのエネルギー増加の影響を受け、いわゆる平衡接触角とは異なる角度が接触線の移動方向に依存して現れる。接触角履歴そのものを具体的に求める手法は未だ構築されていないが、図2のモデルにより、そのメカニズムは定性的に説明できると考えられる。

固体面上に振動などの外乱を与えると、接触角はエネルギー最小条件を満足する平衡接触角に近づくことが実験的に示されている⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。図2のモデルに従えば、振動を付加すると、欠陥部を乗り越える際の抵抗が小さくなる。その結果、エネルギー増加量が抑制され、接触角履歴の低減が期待できる。本研究では、液滴が置かれる平板に垂直方向の微小振動を与え、式(1)の抵抗を低減する方法について検討する。図2のモデルより、接触角履歴に影響を与えるのは微小スケールの欠陥であり、振動としてはできる限り高周波のものが望まれる。例えば、表面張力に伴う液体振動周波数の代表値 $f(1/s)$ として、

$$f \sim \sqrt{\sigma / \rho l^3} \quad (\rho: \text{密度}, l: \text{長さスケール})$$

を考えると、液滴のスケールとして、 $l \sim 1\text{mm}$ を考えても $f \sim 100\text{Hz}$ となる。欠陥部のスケールを考えた場合には、より高い周波数の振動が効果的と予想される。また、接触線の歪みのスケールが液滴よりも微小であることを考え、ここでは、高周波かつ微小振幅による振動を与えることとした。本実験では、試みとして数 10kHz で数 μm の振幅をもつ超音波振動子を用いた。

2・2 レーザーによる液滴駆動 従来、温度上昇に伴う表面張力の減少を利用した液滴や液柱の駆動方法が提案されている。固体面上の液滴については、壁面に電極などを埋め込み、通電加熱などにより壁面に温度勾配を与える手法の検討が行われている⁽³⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。低温側の表面張力が高くなる結果、液滴は温度の低い方向に移動する。この方法では、壁面に電極パターンなどの加工が必要になり、またパターンに応じた運動しか得られない不自由さがある。一方、外部から自由に運動制御を行うため、レーザーを液滴に照射し、その加熱による表面張力低減効果を利用した報告が認められる⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。これらの報告では、接触角が 180° に近い特殊な固体面を対象として、レーザーによる液滴の運動について検討が行われている。ここでは、より一般的な 90° 以下の接触角をもつ場合を対象として、上記

壁面振動とレーザー照射を組み合わせ、固体面上の液滴を駆動する新たな手法を提案する。レーザーによれば、スポット的な加熱により局所に高温の状態が実現できるため、ぬれ性の顕著な変化を誘起することが予想できる。すなわち、固液の接触角の温度依存性が顕著な場合、高温下でのぬれ性の変化により液滴が駆動される場合が考えられる。式(1)より、レーザー照射位置の接触角が常温の後退接触角よりも小さくなると、液滴は加熱端の方向に向かって運動する。今回は、次章で示す、自己組織化単分子膜(SAMs)を施した表面を対象として、表面特性が加熱の影響を受けやすい平板上での液滴挙動について検討を行う。

3. 実験装置および方法

3・1 実験装置概略 図3に、本実験で用いた装置の模式図を示す。共振周波数 28kHz の超音波振動子(フジセラミック, FBL 28452HS)の振動面上に試料板を載せ、所定の体積の軸対称液滴をマイクロシリンジで設置する。超音波振動子の共振周波数に合わせながら電圧および電流を変化させ、数種類の振動振幅を設定した。振動させた状態で試料平板を傾け、液滴が転落する瞬間での画像をデジタルカメラにより撮影し、液滴先端(後端)の前進(後退)接触角を測定した。なお、軸対称液滴の接触角を測定する場合、ラプラスの方程式を利用して液滴形状を理論的に算出し、その壁面での勾配より求める手法の精度が高い⁽¹⁸⁾。しかしながら、振動を与えた状況下での液滴形状は、ラプラスの方程式の解とは一致しなかった。ここでは、上述の液滴画像を PC に取り込み、その壁面近傍での形状を多項式近似し、その勾配より接触角を求めた。接触角は、同じ実験条件下で 6 回以上測定し、その平均値を採用した。本実験における接触角の測定精度は、 $\pm 1^\circ$ 程度である。

Fig.3 Schematic diagram of experimental apparatus

る。

式(1)の液滴移動に対する表面張力による抵抗の、超音波振動の付加による変化を見るため、転落が生じる時の傾き角度の測定も合わせて行った。転落角度の測定は、既報と同じ方法により行った⁽⁷⁾⁽⁸⁾。転落角度の測定誤差は $\pm 0.3^\circ$ である。

壁面を超音波振動させた状態で、図4のように、試料平板に対して約 60° の角度から、液滴周端より内側にスポット径約 0.1mm のレーザー光線(Mellesgriot, Model 85-GHS-305)を照射した。レーザー光の波長は 532nm で、出力 W を 10mW から 200mW の範囲で変化させ、接触角ならびに液滴運動の観察を行った。

3・2 壁面振動の振幅測定 超音波振動子壁面の振動振幅を、図5に示すフィゾー干渉計により測定した。ビームエキスパンダーおよびビームスプリッターを通過したレーザー光は、ウェッジプリズムを通過して、振動子表面に設置した試料平板に導かれる。図5右の拡大図のように、プリズム⑧は測定面より隙間 h をもって平行に設置されている。プリズム下端の参照面および測定面からの反射光の重ね合わせにより、干渉縞が形成される。測定面上の干渉縞の明暗は、振動子の変位に応じて時間的に変化する。その信号を図5の光センサー④により受光し、出力電圧がオシロスコープに取り込まれる構造となっている。

図6にオシロスコープ上の電圧波形の一例を示す。振動子表面の変位に伴い、図5右拡大図中の隙間 h が時間変化し、 $2h$ がレーザー光波長 λ ($=632.8\text{nm}$) の整数

Fig. 4 Laser beam directed to droplet on oscillated plate

Fig. 5 Optical system to measure amplitude of supersonic oscillator

Fig. 6 Output from the interference fringe on surface of supersonic oscillator

倍に等しくなったとき、反射光同士が強め合うため、図 6(a)の波形にピークが現れる。振動子の変位速度に対応して、隣り合うピークの時間間隔 Δt は周期的に変化する。 $\lambda/2$ を Δt で除した量は、その時刻の振動子変位速度 U に等しい。各時刻における振動子変位速度を図 6(a)から求めた結果を図 6(b)に示す。振動に応じて速度が正弦波状に変化していることがわかる。振動子変位の半周期として、例えば図 6(a)中の点 P, Q を選べば、その間に入る波の数 M より、振動子の振幅 A を次式より求めることができる。

$$A = \frac{M}{2} \cdot \lambda \quad (2)$$

振動子に与える電圧ごとに 6 回以上の測定を行い、各電圧に対する振幅を求めた。半周期に含まれる波の数 M は、 $1/10$ 波長の精度で測定した。本実験で用いた振動子の場合、振幅の標準偏差は 5%程度であった。なお、振動子の振幅は、試料板上の位置によって必ずしも一定ではないので、液滴は常に振幅が測定された同じ位置に設置して実験を行った。表 1 に、設定電圧 V に対する振幅の測定結果を示す。本実験で用いた振動子の場合、振幅はほぼ電圧の平方根に比例する結果と

Table 1 Amplitude of supersonic oscillator

V (V)	A (μm)
10	2.8
15	3.2
20	3.8
25	4.3

なった。

3・3 試料平板および試料液体 本実験では、試料平板として、日本曹達(株)が開発した浸漬法により Si ウェハ表面に自己組織化単分子膜(Self Assembled Monolayers, 以下 SAMs と記す)を施した固体表面を用いた⁽⁸⁾。SAMs 板は表面の凹凸が 1nm 程度と非常に滑らかであり、分子レベルで秩序的な配向を有するため、接触角履歴が数度と通常の表面よりもかなり小さい⁽⁸⁾。式(1)からわかるように、液滴を駆動するのに必要な外力を小さくすることが期待できる。また、表面が秩序的な構造をもつため、後述するレーザー光によるランダムな熱振動の分子配列に与える影響が大きく、ぬれ性が顕著に変化することが期待できる。

供試液体として、ここではブチルカルビトールアセテート(以下 BCA), α メチルシランダイマー(以下 α MSD), およびグリセリンを用いた。本実験では、液滴にレーザーのエネルギーを効率的に吸収させるため、液滴の移動実験を行った α MSD および BCA については、染料としてズダン III を 2500ppm 加えた。なお、レーザーの波長を変えれば、無色の液体についても熱を吸収させることは可能である⁽¹⁷⁾。

基準温度(20°C)における各供試液体の物性値を表 2 に示す。ここで、密度はボーマの比重計、表面張力は電子天秤を用いた Wilhelmy の吊り板法により測定した。表中には、温度 T による表面張力の変化率($d\sigma/dT$)の測定結果も示してある。なお、表 2 ならびに以下に示す測定値は、すべて染料を含んだ場合の結果を示している。実際には、染料添加による物性値の変化は、測定誤差の範囲内であった。

4. 実験結果および考察

4・1 超音波振動による接触角履歴の変化 図 7 に、各供試液体の SAMs 試料板に対する接触角の、振動振幅 A に対する変化を示す。液滴の体積は、 $1\mu\text{L}(=1\text{mm}^3)$ である。図 7(a)~(c)より、各供試液体とも、振動振幅の増加とともに前進接触角 θ_A は減少し、後退接触角 θ_R はわずかに減少する傾向を示した。その結果、両者の差である接触角履歴は、振動振幅とともに減少した。本実験よりも大振幅で低周波数の振動を与えた場合、前進接触角は減少し、後退接触角が増加して両者の差が小さくなる傾向が示されている⁽¹⁴⁾。本実験で

Table 2 Physical property of test liquids

	ρ (kg/m^3)	σ (N/m)	$d\sigma/dT \times 10^3$
α MSD	990	0.0365	-0.084
BCA	984	0.0304	-0.080
Glycerol	1260	0.0644	—

扱った均質な表面におけるぬれ挙動において、2つの接触角ともに減少する理由については不明であり、今後の検討課題としたい。

振動子を駆動した状態で、電磁場測定器(CUSTOM社製, TFM-60)により試料板回りの電磁場を測定した。その結果、わずかな電場ならびに 4mG 程度の磁場の存在が認められた。しかしながら、振動子を動作させた状態で試料平板をわずかに振動面より離れた場合、

(a) αMSD

(b) BCA

(c) Glycerol

Fig.7 Change of contact angle with the amplitude of supersonic oscillator

Fig. 8 Change of contact angle hysteresis with respect to the amplitude of supersonic oscillator

接触角の測定値は静止状態の値にほぼ一致した。また、試料板近傍に外部から上記よりも大きな電場および磁場を強制的に与えた場合、接触角は振動のないときの値にほぼ一致することが確認できた。図7に示した接触角の測定結果に対し、電場や磁場の影響は小さいと考えられる。

前進・後退接触角の差である接触角履歴の値を図8に示す。接触角履歴($\theta_A - \theta_R$)は振幅とともに減少し、しだいに一定の値に漸近する傾向が認められた。超音波振動を与えることで、静止状態における3~4°の接触角履歴は1°程度にまで低減され、結果として式(1)の抵抗を小さくすることができる。表3は、振幅 $A=3.2\mu\text{m}$ において、αMSD および BCA に対し、液滴体積 V_l を変化させたときの接触角の測定結果を示している。体積によらず、ほぼ同程度の接触角履歴の低減効果が認められた。

1μL の液滴の転落角度を振動振幅ごとに測定した結果を図9に示す。図中には、軸対称液滴を対象とした理論値が比較のため示されている。転落角度の理論値は、次式より算出を行った⁽⁷⁾⁽⁹⁾。

Table 3 Contact angles at various volumes ($A=3.2\mu\text{m}$)

$V_l(\mu\text{L})$	αMSD			BCA		
	θ_A	θ_R	$\theta_A - \theta_R$	θ_A	θ_R	$\theta_A - \theta_R$
1	54.8	54.0	0.8	49.4	47.9	1.5
3	54.0	53.2	0.8	49.5	48.3	1.2
5	53.5	52.7	0.8	49.2	47.5	1.3
7	53.1	52.6	0.5	48.7	47.2	1.5

(a) αMSD

(b) BCA

Fig.9 Inclination angle of oscillated plate at which droplets start to slide

$$D = \sigma(\cos\theta_R - \cos\theta_A)b = \rho g V_l \sin\phi \quad (3)$$

ここで、 ϕ は壁面の傾斜角度である。軸対称液滴を水平板上に設置後、板を傾けた場合、液滴幅は一定に保たれる。上式において、左辺の液滴幅 b に、水平板上の液滴径の測定値を代入して ϕ を算出した。図9より、測定結果は式(3)によりほぼ整理できることがわかる。接触角履歴が小さい結果、接触角の測定誤差に対して式(3)左辺の値が敏感に変化する。理論値と実験値の差は、主に接触角の測定誤差に起因する。図9より、転落角度 ϕ は、振動振幅の増加とともに減少する傾向を示す。本実験における最大の振幅を与えた場合、転落角度は静止状態から約 15° 低減した。式(3)右辺から見積もられる移動抵抗から、本実験で用いた振動子により、 $1\mu\text{L}$ の液滴を移動させるのに要する力を約80%低減することができた。この結果は、接触角履歴の減少に起因するものであり、壁面振動が液滴の移動抵抗低減に効果のあることがわかる。

4・2 レーザーによる液滴駆動 前節で述べた振動を与えた状態で、レーザー光を液滴の一端に照射した。その結果、あるレーザーの出力以上で液滴全体がレーザー照射端の方向に移動することが観察された。このとき、連続して10mm以上液滴が移動することを確認している。

本報告では、レーザー照射による液滴駆動のメカニズムを把握する第一段階として、液滴が移動するまでの接触角の変化ならびにレーザー出力と液滴移動速度の関係に対する測定結果を述べる。より詳細な液滴駆動のメカニズムについては、次報で検討を行う。

図10は、時間 t (s)により変化する液滴の様子を撮影した連続写真の一例である。レーザーは軸対称液滴の右端に照射されている。初期の図10(a)の状態、液滴は図7中の各振幅に対する前進接触角 θ_A で接している。図10(a)の照射開始から時間が経過すると、レーザー照射端の接触角が徐々に減少していく。これは、レーザーによる温度上昇により、固液の親和性が変化し、ぬれ性が向上したことによると考えられる。図10(d)の状

Fig.10 Photograph of droplet behavior when Laser beam is directed on the right end of the droplet (αMSD)

態になると、照射端の接触角 θ_1 が他端の接触角 θ_2 よりもかなり小さくなり、表面張力の作用によって液滴全体が右方向へ移動を開始する。すなわち、高温側の表面張力は小さくなるが、接触角の減少が顕著なため、表面張力の壁面接線方向の合力が右方向に作用する結果、液滴は高温側に向かって移動すると考えられる。

図10のように液滴が移動する条件において、レーザー照射後の接触角の時間変化を測定した。 αMSD に対する測定例を図11に示す。図中の点線は、液滴が移動を開始した時刻を表す。図11(a), (b)などの異なる条件下においても、接触角は類似な挙動を示した。すなわち、照射位置の接触角 θ_1 は、レーザー照射後急激に減少する。その後、減少の度合いは緩やかになり、一定値に落ち着く傾向を示す。1秒程度の時間が経過したのち、液滴は移動を開始する。レーザー出力の大きい図11(a)の方が、移動までに要する時間は短い。照射初期の接触線近傍の急加熱により、 θ_1 は急激に減少する。液滴は、最初 20°C における前進接触角 θ_A で設置されているため、液滴が θ_1 の減少により右方向に引っ張られる結果、他端の θ_2 は θ_A より減少して、後退接触角 θ_R に近づく。接触角が θ_R に達するまでの変形のため、液滴が移動を開始するまでに、やや時間を要すると考えられる。なお、振動子の振幅を0から最大値の $4.3\mu\text{m}$ まで変化させて実験を行った結果、図11と定性的に同じ挙動が認められた。

液滴が移動できる臨界条件について検討を行った。ここでは、レーザーを1分間照射して、液滴が

(a) $A=2.8\mu\text{m}$, output of Laser 48mW

(b) $A=3.8\mu\text{m}$, output of Laser 30mW

Fig. 11 Contact angle change after Laser beam was directed on the droplet (αMSD)

Table 4 Laser power necessary to actuate droplet

A (μm)	Laser output (mW)	
	αMSD	BCA
0	95	76
2.8	33	37
3.2	27	15
3.8	20	10
4.3	20	17

0.05mm/min の速度以上で移動することが確認できたときを臨界条件と見なした. 表 4 は, 種々の振動振幅に対し, $1\mu\text{L}$ の液滴が移動を開始する臨界のレーザー出力を測定した結果を示したものである. 振幅の増加により臨界出力の値は減少し, 一定値に落ち着く傾向を示した. これは接触角履歴(図 8)や液滴が転落する平板の傾斜角度(図 9)と同じ傾向であり, 振動による移動抵抗の低減効果の結果と考えられる.

図 12 は, 臨界条件において, 液滴が移動する瞬間での写真例である. このとき, 両端に作用する表面張力は, 近似的に次式を満足していると考えられる.

$$\sigma_1 \cos \theta_1 = \sigma_2 \cos \theta_2 \quad (4)$$

ここで, σ_1 , σ_2 は, それぞれレーザー照射側ならびに他端の表面張力を示している. 図 12 の移動開始時において, $\theta_1 = 48.4^\circ$, $\theta_2 = 52.6^\circ$ である. 表 1 中の $(d\sigma/dT)$ の値を用い, 式(4)が成立するときの表面張力を見積もると, 液滴の両端で約 40°C の温度差が存在すると見積もられる. なお, 実際の液滴の温度上昇および接触角

Fig. 12 Contact angle at the critical condition when droplet starts to slide (αMSD , $A=3.8\mu\text{m}$, output of Laser=20mW)

Fig.13 Droplet velocity induced by Laser

の温度変化, ならびに液滴が移動する臨界条件については, 次報で詳しく考察する.

今回の実験における最大振幅 $A=4.3\mu\text{m}$ の振動を与えたとき, 各レーザー出力における液滴の移動速度を測定した結果を図 13 に示す. 出力に対し, 移動速度は直線的に増加する. 本実験条件下では, 最大で 0.6mm/s の移動速度を得ることができた.

5. 結 言

超音波振動子により壁面に高周波(28kHz)の振動を与え, 液滴と固体面との接触角履歴の大きさを低減した上で, 液滴をレーザー照射により移動させる手法について実験的に検討を行った. 主な結論を以下に記す.

- (1) 接触角履歴の小さいSAMs板に超音波振動を与えたところ, 3 種類の液体ともに接触角履歴が数° 減少する効果が認められた. 本実験における最大振幅 $4.3\mu\text{m}$ のとき, $1\mu\text{L}$ の液滴の転落角度は約 15° 減少し, 液滴が移動するときの抵抗を約 80%低減できた.
- (2) 超音波振動を与えた状態でレーザーを照射したところ, 照射端の接触角が加熱により顕著に減少する現象が認められた. その結果, 液滴に作用する表面張力の合力が現れ, 液滴はレーザー照射端の方向に移動することが観察された. 本実験範囲では, 液滴を最大 0.6mm/s の速度で移動させることができた.

謝辞 本研究の一部は, 文部科学省科学研究費補助金(課題番号 20560165)の援助を受けた. 謝意を表す.

文 献

- (1) Dahuber, A. A. and Troian, S. M., Principles of Microfluidic Actuation by Modulation of Surface Stresses, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 37(2005), 425-455.
- (2) Daniel, S., Chaudhury, M. K. and de Gennes, P. G., Vibration-actuated drop motion on surfaces for batch microfluidic processes, *Langmuir*, 21(2005), 4240-4248.
- (3) Chen, J. Z., Troian, S. M., Dahuber, A. A. and Wagner, S., Effect of contact angle hysteresis on thermocapillary droplet actuation, *Journal of Applied Physics*, 97(2005), 014906, 1-9.
- (4) Shastry, A., Case, M. J. and Böhringer, K. F., Directing droplets using microstructured surfaces, *Langmuir*, 22(2006), 6161-6167.
- (5) Pratap, V., Moumen, N. and Subramanian, R. S., Thermocapillary motion of a liquid drop on a horizontal solid surface, *Langmuir*, 24(2008), 5185-5193.
- (6) Mettu, S. and Chaudhury, K., Motion of drops on a surface induced by thermal gradient and vibration, *Langmuir*, 24(2008), 10833-10837.
- (7) Katoh, K., Azuma, T., Higashine, M. and Miyamoto, Y., On the sliding down of liquid drops on inclined plates (1st report, critical inclination angles of plates),

- Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, 72(2006), 1287-1294.
- (8) Katoh, K., Higashine, M., Nakamoto, N. and Azuma, T., On the sliding down of liquid drops on inclined plates (2nd report, Sliding angles on SAMs surfaces), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, 73(2007), 1548-1555.
- (9) Katoh, K., Nishida, T. and Higashine, M., On the Sliding down of Liquid Droplets on Inclined Plates (Sliding Volume of Liquid Droplets), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, 75(2009), 1135-1142.
- (10) Nishida, T., Katoh, K. and Wakimoto, T., Critical volume of liquid droplets attached to a vertical cylinder, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, 75(2009), 2273-2279.
- (11) Katoh, K., Higashine, M., Wakimoto, T. and Masuda, R., On the sliding and profile of a liquid droplet on a rotating disk, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, 73(2009), 796-803.
- (12) de Gennes, P. G., Brochard-Wyart, F. and Quéré, F., (Translated by Okumura, K.), *Gouttes, bulles, perles et ondes*, (in Japanese), (2003), 67-84, Yoshioka-Shoten.
- (13) Katoh, K., On the contact angle hysteresis and sliding down of a liquid droplet on inclined surfaces, *Journal of the Heat Transfer Society of Japan*, 46(2007), 20-27.
- (14) Decker, E. L. and Garoff, S., Using vibrational noise to probe energy barriers producing contact angle hysteresis, *Langmuir*, 12(1996), 2100-2110.
- (15) Volpe, C. D., Maniglio, D., Morra, M. and Siboni, S., The determination of a 'stable-equilibrium' contact angle on heterogeneous and rough surfaces, *Colloids and Surfaces, A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 206(2002), 47-67.
- (16) Kotz, K. T., Noble, K. A. and Faris, G. W., Optical microfluidics, *Applied Physics Letters*, 85(2004), 2658-2660.
- (17) Shukla, R. and Kallam, K. A., Effect of liquid transparency laser-induced motion of drops, *Transactions of ASME, Journal of Fluids Engineering*, 131(2009), 081301, 1-7.
- (18) Kalantarian, A., David, R. and Neumann, A. W., Methodology for high accuracy contact angle measurement, *Langmuir*, 25(2009), 14146-14154.