

令和元年5月22日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14602

研究課題名(和文) 磁力で変形するマイクロ構造を用いた液滴の動きやすさの自在制御

研究課題名(英文) Droplet mobility control using the microstructure modified by magnetism

研究代表者

山田 寛 (Yamada, Yutaka)

岡山大学・自然科学研究科・講師

研究者番号：60758481

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：液滴の動きやすさは、凝縮器における液滴の除去やマイクロ流体デバイスでの流体輸送など、様々な場面で重要となる。そこで本研究では、表面構造を作製後に非接触で液滴輸送性能を変更できる面を作製した。具体的には、磁力によって変形する構造をPDMSに磁性体粒子を混合することで作製し、液滴を乗せた状態で磁場を印加することで液滴の輸送を制御できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の活用を特に想定している分野は凝縮器である。ここでは、固体面に液膜を形成する膜状凝縮から液滴を形成する滴状凝縮とすることで、その熱輸送性能が1桁程度上昇することが知られている。また、滴状凝縮における液滴離脱は重力によるが、凝縮面の構造を操作して素早く液滴を除去することで、さらなる性能向上が見込まれる。

研究成果の概要(英文)：Droplet mobility is an important issue to remove condensed droplets on the condenser and to transfer the droplet in the microfluidic devices. In the present study, we developed the structured surface to change the droplet mobility after surface fabrication. In particular, flexible structure which can deform with external magnetic force was developed using Fe304 nanoparticles and polydimethylsiloxane (PDMS). Mobility change with and without magnetic force was investigated and droplet motion was confirmed.

研究分野：熱工学

キーワード：濡れ性 柔軟構造 液滴輸送

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

発電設備や空調機器の構成要素である凝縮器は凝縮形態を液膜が固体面に広がる膜状凝縮から液滴ができる滴状凝縮に変化させることで、10 倍程度その熱輸送性能を改善できることが知られている。しかしながら、これを実現するためには、「凝縮現象」と液滴が離脱する際の「液滴の動きやすさ」の理解が必要である。前者においては近年研究が盛んに行われており、超撥水面の利用などにより多くの成果が得られている。後者は、固体面に置かれた液滴の移動という日常でも見られる現象であり、固気液の境界が移動するときの前進接触角 $\theta_a$ と後退接触角 $\theta_r$ で評価されている(図 1)。この両者の差が小さくなるほど液滴は動きやすくなるとされており、平面や構造面上で液滴がどのように振る舞うかについて研究が進められている。

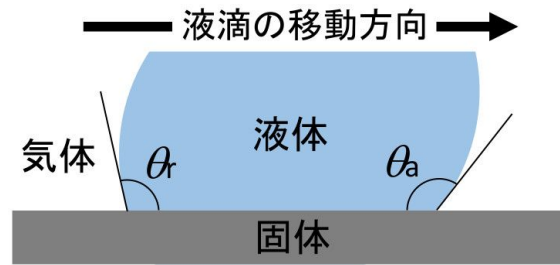


図 1 固体面上の液滴移動

一方、過去の研究において液滴の動きやすさを変えるためには、面を作製する段階で表面形状を変化させる方法が一般的であった。しかし、凝縮や沸騰熱伝達の出力調整、マイクロ流体デバイスなどの効率的な運用には、液滴の動きやすさをその場で制御できることが必須である。そのため、光や熱的な刺激を利用して静的濡れに関する固体面の表面エネルギーを変化させると同時に液滴の動きやすさを変化させる手法が考案されているものの、静的な濡れ性を変化させずに液滴の動きやすさのみを変化させる方法は柔軟な構造面を機械的に伸縮させる方法に限られている[1]。さらに、表面を作製した後にこの性質を非接触かつ高速応答で可逆的に実現する手法は確立されていない。

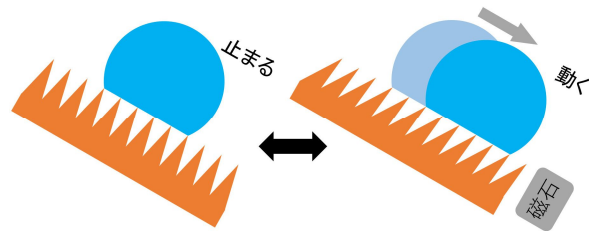


図 2 磁力を用いた非接触での液滴移動の制御の概念図

### 2. 研究の目的

上記の背景から、固体面に直接接触することなく液滴の動きやすさを自在にチューニングできる面の実現を目的とする。具体的には、非接触で応答の速い手法の確立を目指すため、図 2 に示すように外部からの磁力に応じて可逆的に変形し、液滴が動きやすい撥水面となるマイクロ構造面の作製に挑戦した。

### 3. 研究の方法

本研究では、磁力に反応して変形する柔軟な構造の作製法を確立するため、3 種類の方法を用いて型を作製し、そこに磁性を持つ  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ナノ粒子を混合したポリジメチルシロキサン (PDMS) を流し込むことで構造を成形した。具体的な方法は以下に述べるものである。

#### 3.1 Breath figure 法による作製

当初の計画では、磁力に反応して変形するマイクロ構造を持つ表面の作製を目標としていたため、規則的に並んだ細孔を形成できる Breath figure 法で型に用いるポリマー膜を作製することを検討した。この手法はポリマーなどを溶かした揮発性溶剤に凝縮した水滴が自己組織化することで規則的に並んだ細孔を形成する手法である(図 3)。作製した細孔に質量比 1:1 で混合した  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ナノ粒子と PDMS を流し込んだ後、真空引きをすることで PDMS を細孔内に充填し、90 で 2 時間加熱することで PDMS を硬化させた。最後にポリマー膜を除去することでマイクロ構造面を得た。作製した試料はガラススライド上に固定し、磁石(表面磁束密度 400 mT)を近づけることで、磁石に反応して変形するかを確かめた。

#### 3.2 ミリメートルスケールの針状構造

磁力による構造の変形を用いて液滴を輸送するため、ミリメートルスケールの構造を作製して当初のコンセプトが実現できるかを確かめた。具体的な方法としては、直径 1 mm の金属針を溶かしたゼラチンに最密充填構造を模擬した形状で突き刺し、冷却することで硬化させる。その後、金属針を抜き取り、PDMS と  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ナノ粒子の混合液を流し込み、脱気後に硬化させた。硬化後は加熱することでゼラチンを溶かし、超音波洗浄することで構造面を得た。

#### 3.3 サブミリスケール構造

前述のものよりスケールの小さい構造を作製するため、高さの異なる金属の薄板を複数枚積層することで型を作製し、PDMS の成形を行った。具体的には、薄板の厚さおよび薄板同士の間隔をそれぞれ 0.1 ~ 0.5mm の間で変化させて構造を作製した。また、PDMS と磁性粒子の質量割合を変更することで変形性の向上を目指した。さらに、PDMS 構造の撥水性を向上させて構造上

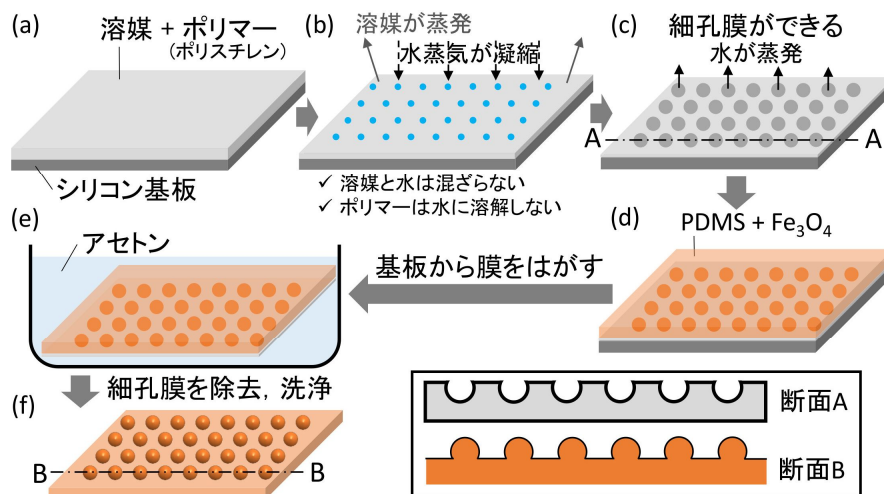


図3 Breath figure 法による細孔膜作製法

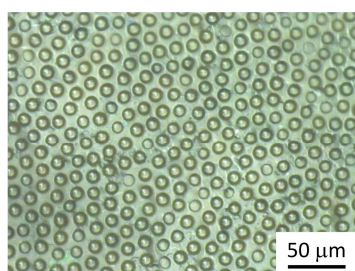


図4 Breath figure 法で作製した細孔膜を用いて転写したPDMS

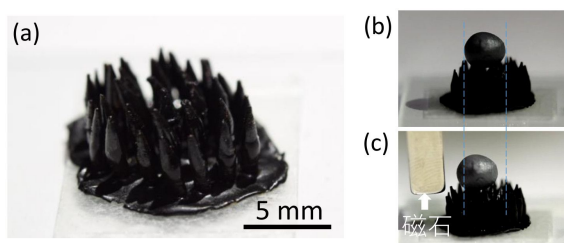


図5 (a)金属針を型として作製したPDMS構造 (b)磁石を近づけることで構造が変形した様子

で液滴を動きやすくするため、テフロンコーティングを表面に施した。

#### 4. 研究成果

##### 4.1 Breath figure 法により作製した表面構造の評価

図4にBreath figure法で作製した構造面の光学顕微鏡像を示す。直径10 μm程度の構造が面上にできていることが確認でき、レーザー顕微鏡による観察結果から構造の高さは5 μm程度と得られた。しかしながら、液滴を乗せた状態で磁石を近づけた評価において液滴が動く様子は観察されなかった。これは構造がマイクロスケールと小さく球形であったため、構造が変化しなかったと考えられる。

##### 4.2 ミリメートルスケールの構造による評価

図5に金属針を型として作製した構造を示す。図5(a)は取り出したPDMS構造を示しており、高さ3 mm程度の針状の構造ができていることがわかる。図5(b)は、この構造に直径5 mm程度の粘土を乗せた状態を示しており、この状態では大きく変形していないことがわかる。その後、図5(c)に示すように、磁石を近づけることで針状構造が変形し、粘土の球の位置がずれていることがわかる。これにより、本研究目的のコンセプトを実証することができたと言える。しかしながら、本来の目的である液滴の輸送には構造が大きすぎるため、さらなる微細化が必要であることがわかった。

##### 4.3 薄板構造での評価

図6(a)に薄板厚さ0.2 mm、薄板同士の間隔0.5 mmで作製した構造に10 μlの液滴を滴下した際の画像を示す。テフロンをコーティングすることにより

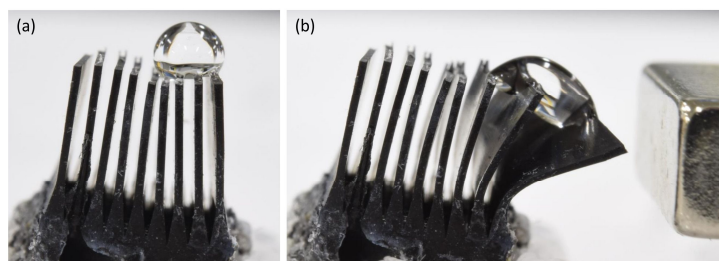


図6 (a)薄板構造の滴下した液滴と(b)磁石を知被けた際の様子

PDMS がより撥水になったため、液滴が構造内に入り込まず、構造上で球形を保っていることがわかる。図 6(b)に磁石を接近させたときの画像を示す。薄板構造が大きく変形しているものの、磁石から遠くなるほど磁力が弱くなるため変形量が低下していることがわかる。そのため、薄板同士の間隔が広がり、液滴が入り込んでしまう様子が観察された。この欠点を解消し、遠くの構造まで変形しやすくするため、薄板構造の厚さを 0.1 mm に変更した結果を図 7 に示している。斜面に設置した構造上に滴下された液滴は静止しているが、磁石を徐々に近づけたところ液滴が落下する様子が見られた。これより、磁力によって可逆的に変形する構造で液滴の移動を制御することができると言える。しかしながら、ここで作製した構造は薄板状であるため、1 方向での液滴輸送のみ実現できる状況にある。そのため今後は 2 方向で液滴輸送できる柱状構造の作製に取り組む必要がある。

< 引用文献 >

[1] X. Yao, Y. Hu, A. Grinthal, T.-S. Wong, L. Mahadevan, K. Aizenberg, Adaptive fluid-infused porous films with tunable transparency and wettability, Nature Mater., 2013, 529-534

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 1 件)

山田寛, 堀部明彦, 花房湧紀, 磁力で変形する構造を用いた液滴輸送に関する研究, 日本機械学会中国四国支部第 56 期講演会, 徳島, 2018.3

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://heat6.mech.okayama-u.ac.jp/dennetu/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

なし

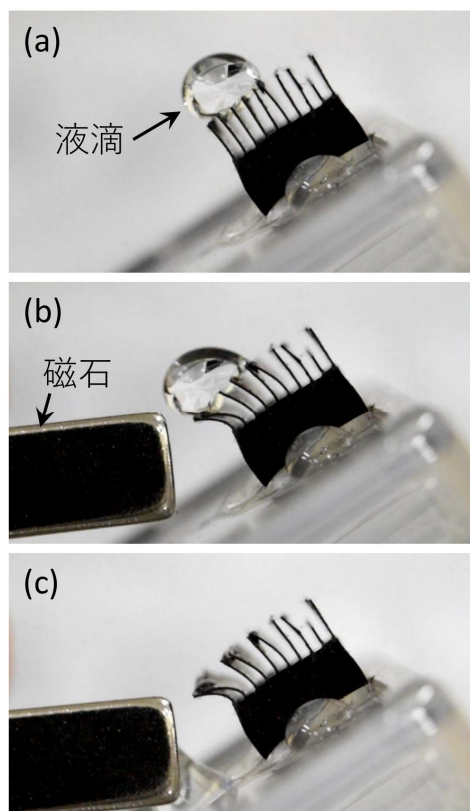


図 7 (a)斜面に置いた薄板構造に滴下した液滴と(b)磁石を近づけた際の様子 (c)液滴が落下した後の様子

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。