

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02083

研究課題名（和文）動的濡れを駆使した自発的『メニスカス・ポンプ』機構の解明と最適化

研究課題名（英文）"Meniscus pump" induced by spontaneous formation of meniscus around micro obstacle(s)

研究代表者

上野 一郎 (UENO, ICHIRO)

東京理科大学・理工学部機械工学科・教授

研究者番号：40318209

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、『動的な濡れ』力学を駆使した『メニスカス・ポンプ』機構，すなわち，系外からの新たなエネルギー注入を必要としない超高効率液滴搬送機構の解明を目的として取り組んできた．平滑基板上を濡れ広がる薄液膜前縁部との相互作用によって自発的に形成するメニスカス内部を解析対象とし，複雑な渦場が形成する過程を見出した．本研究では慣性力の影響が小さい（無次元数 $Re \ll 1$ ）条件下の対流場でありながら毛管力駆動による渦場形成であると導き出した．また，当研究グループで実験的に見出してきた複数の柱状微小構造物を有する系でのメニスカス・ポンプ機構の促進について，その定量的評価を実現した．

研究成果の学術的意義や社会的意義

動的な濡れを含む界面熱流体力学を駆使し，極めて小さいエネルギー注入によって液体駆動を実現する超高効率液滴搬送機構，すなわち『メニスカス・ポンプ』機構の解明を実現する．少ないエネルギー注入による濡れや反応の制御、また、効率的な液体輸送技術により廃液量の減少により環境負荷の低減を実現する。

研究成果の概要（英文）：Our research group indicated that a disturbance such as a microparticle on the pathway of a spreading droplet has shown the tremendous ability to accelerate locally the motion of the macroscopic contact line. To better understand the mechanisms behind the particle-liquid interaction, we numerically investigate the pressure and velocity fields in the liquid film. The results are compared to experiments assessing the temporal shape variation of the liquid-film meniscus from which pressure difference around the particle is evaluated. The flow structure within the liquid meniscus forming at the foot of the micro-pillar evinces a horseshoe vortex wrapping around the obstacle, notwithstanding that the Reynolds number in our system is extremely low. Here, the adverse pressure gradient driving flow reversal near the bounding wall is caused by capillarity instead of inertia. The horseshoe vortex is entangled with other vortical structures, leading to an intricate flow system.

研究分野：界面熱流体力学

キーワード：動的濡れ メニスカス 表面張力 液滴搬送 メニスカス・ポンプ

1. 研究開始当初の背景

本プロジェクトでは、単一あるいは複数の微小構造物を有する固体基板上における、固液気3相境界線の移動を伴う『動的な濡れ』現象を研究対象とする。特に、研究代表者らが Mu et al.^(1,2)によって実験的に明らかにした、基板上に静置した単一微小粒子との相互作用により、濡れ広がる液滴前縁部の速度が局所的に数～約10倍に爆発的に増加する現象、さらに、複数の微小構造物との連続的相互作用によってより効率的に液体を搬送する現象⁽²⁾の機構解明とその制御を目指す。

従来の研究により、基板上での液体の濡れ拡がり、基板粗さによりその特性が変わることが知られている^(3,4)。近年のマイクロ加工技術の発達により、任意の形状・間隔を持った基板上微細構造を実現し、動的な濡れ特性に関する知見が蓄積されている⁽⁵⁻⁷⁾。また、基板上に作成した微小構造との相互作用を伴う液体の流動系に関する数値計算⁽⁶⁾や、微小構造を流路内に設けることで液滴搬送の高効率化を目指す研究⁽⁸⁾が始まっている。しかし、従来の関連研究では主に、濡れ領域の変化による界面エネルギーの増加によって濡れの促進について議論をしており^(5,6)、動的濡れが発達する過程での圧力場・速度場の記述を可能とする力学的議論は行われていない。すなわち、動的濡れ促進の駆動メカニズム・力学的機構に関する知見はほとんど蓄積されていないため、対象系の変更などに即座に対応・再設計することが難しいのが現状である。

マイクロ流体力学の領域では、液滴搬送技術の開発に向けて、基板上に濡れ性の異なる化学的修飾⁽⁹⁾、あるいは物体を配置⁽¹⁰⁾した流路や、電位差⁽¹¹⁾あるいは音響場⁽¹²⁾等を設けて微量液体を微小な検査領域に搬送する技術が研究されている。微小チップの作成により利用液体の少量化は出来るが、微小領域内で大きな流動抵抗に抗して液体を搬送する必要がある。そのため、多大なるエネルギーを用いたポンプ駆動や、化学的・光学的処理を施し、任意の形状・間隔を持った親水性パターンを形成する必要⁽¹³⁾があり、対象とする液体の必要量は微小ながらも、システムとして稼働するためのエネルギー消費・排出が甚大となっている。

研究代表者らは、液滴前縁部の移動速度が小さい系、すなわち、低キャピラリー数 $Ca = \mu U_{CL} / \gamma \ll 1$ (μ : 粘度, U_{CL} : 液滴前縁部 (コンタクトライン, CL) 速度, γ : 表面張力) 条件下において、単一球状あるいは柱状構造体を静置した基板上での動的濡れに関する実験を行い、表面エネルギー駆動により微小粒子周りを液膜が濡れ上がりメニスカスを形成すること、メニスカスがポンプ的役割を自発的に担い、微小構造体の前方に液体を供給することによって局所的な加速を実現すること、などを明らかにしている^(1,2)。さらに、巨視的な固液気3相境界線前方に存在する『先行薄膜』⁽¹⁴⁻¹⁷⁾と呼ばれる微視的な動的濡れ機構⁽¹⁸⁾を考慮した理論モデルを展開し、加速現象を再現出来つつある。しかしながら、なぜ爆発的加速が実現するのか、何が加速の度合いを決定するのか、という点が未解明の状態である。さらに、高効率な液滴搬送機構を実現するためには、研究代表者らが実験により示した連続的な加速現象⁽²⁾を実現する必要があるが、現象の力学的な理解が進んでいないため、加速を持続させるための最適な微小構造配置の指標が不明である。

2. 研究の目的

動的な濡れを含む界面熱流体力学を駆使し、極めて小さいエネルギー注入によって液体駆動を実現する超高効率液滴搬送機構、すなわち『メニスカス・ポンプ』機構の解明を大目的とする。この大目的の実現に向け、基板上のシンプルな形状を有する微小構造物と液滴前縁部の相互作用時に発現する以下の学術的課題の解明を目的とする。

- [1] 液滴前縁部が基板上構造物に接触した際のコンタクトライン移動・メニスカス形成と、それに伴う液膜内速度場・圧力場計測を通じた構造物周りの加速・減速機構の解明
- [2] 複数の基板上微小構造との相互作用時の『先行薄膜』領域の実験的定量化、および、分子動力学によるその応力場解析
- [3] 先行薄膜の過渡的形成過程を含むミクروسケール動的濡れ効果を導入した理論モデルの構築
- [4] 液滴前縁部の駆動を連続的かつ効率的に実現する微小構造物群最適設計の体系化

3. 研究の方法

本研究では、液滴前縁部が基板上構造物に接触した際のコンタクトライン移動・メニスカス形成と、それに伴う液膜内速度場・圧力場計測を通じた、構造物周りの加速・減速機構の解明を目指した。実験的アプローチでは、単一あるいは複数の球形もしくは柱状構造物を基板上に配置したチップを用意し、その上を濡れ広がる液滴前縁部が構造物と衝突しその裏側に回り込む過程の液滴前縁部近傍流体の光学的可視化計測を行った。液滴前縁部の光学計測により、各微小構造との相互作用と連続的加速現象の関係を定量化した。数値解析においては、Navier-Stokes方程式およびVolume of fluid(vof)法による界面追跡を用いて現象を再現し、実験で計測が困難である動的濡れ加速時の圧力場・速度場を定量化した。さらに、固液気3相境界線近傍の力場を計測し、液滴前縁部の速度変化・最大速度実現時刻との関係を各メニスカス内部の圧力場・速度場変化をもとに構造物間距離や構造物サイズの相関を定量化した。

4. 研究成果

研究代表者らが実験的に明らかにしてきた、基板上に静置した単一微小粒子との相互作用による液滴前縁部の局所的加速過程^(1,2)に対し、現象を再現する数値解析モデルの構築に成功した(図1)。Nakamura et al.⁽¹⁹⁾により、液滴前縁部との相互作用により単一球状粒子周りに自発的に形成するメニスカスを再現し、メニスカスの曲率に対応してその上下流域に有意な圧力差が実現し、液体を球状粒子下流側に供給する『メニスカス・ポンプ』機構を明らかにした(図2)。さらに、Nakamura et al.⁽²⁰⁾により、複数の球状粒子周りにおける連続的なメニスカス形成により『メニスカス・ポンプ』機構が促進すること、促進を最適化する2粒子間距離が存在することを明らかにした。また、Yoshihara et al.⁽²¹⁾によって、複雑流路内におけるコンタクトラインの加速現象に対する濡れ性の影響を実験および数値解析により示した。これら一連の研究活動を通じて新たに、毛管力支配の当該現象下において円柱状微小構造物周りに馬蹄渦が形成⁽²²⁾(図3)することを見出した。馬蹄渦が形成するとされてきた慣性力支配(レイノルズ数 $Re = U_{CL}L/\nu \gg 1$) (L : 代表長さ, ν : 動粘度)となる系で見られるような逆圧力勾配が、 $Re \ll 1$ となる本系でも微小構造物上流部に形成するメニスカス内部においても発生していること、その逆圧力勾配が微小構造物上流側メニスカスの主流方向およびスパン方向の曲率差による毛管圧で発現することを明らかにした。

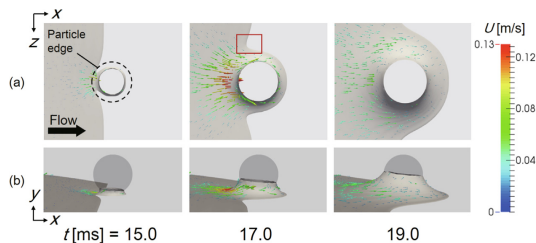


図1 平滑面上に固定した球状粒子(直径 $50 \mu\text{m}$)周りでのメニスカス形成および液滴前縁部局所加速を再現する数値解析⁽¹⁹⁾($Re = 7.9 \times 10^{-2}$, $Ca = 3.0 \times 10^{-4}$)。

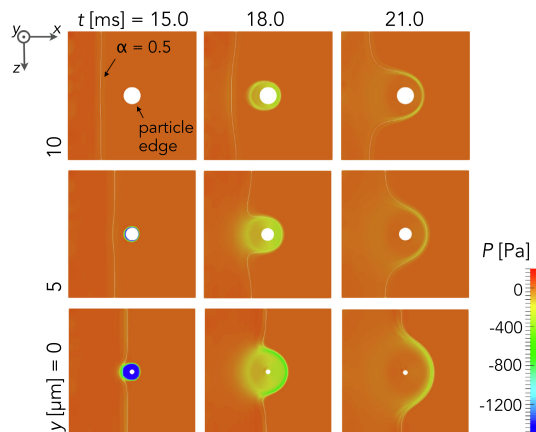


図2 平滑面上に固定した球状粒子周りに形成するメニスカス内圧力分布(条件: 図1と同じ)。

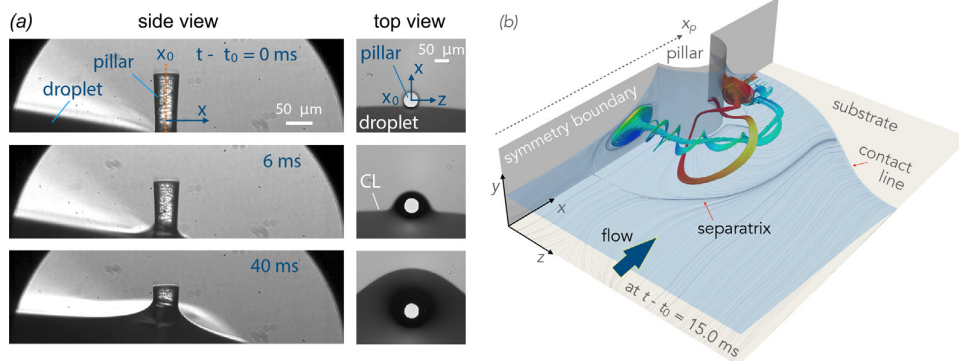


図3 平滑面上に固定した円柱状微小構造体(直径 $50 \mu\text{m}$)周りに形成するメニスカス((a)実験, (b)数値解析)⁽²²⁾. $Re \ll 1$ の条件において馬蹄渦が発現する(右)。

参考文献

- (1) L. Mu, D. Kondo, M. Inoue, T. Kaneko, H.N. Yoshikawa, F. Zoueshtiagh & I. Ueno, Sharp acceleration of a macroscopic contact line induced by a particle, *J. Fluid Mech.* 830, R1, 2017.
- (2) L. Mu, H.N. Yoshikawa, D. Kondo, T. Ogawa, M. Kiriki, F. Zoueshtiagh, M. Motosuke, T. Kaneko & I. Ueno, Control of local wetting by microscopic particles, *Colloids & Surfaces A* 555, 615-620, 2018.
- (3) R.N. Wenzel, Resistance of solid surfaces to wetting by water, *Ind. Eng. Chem.* 28, 988-994, 1936.
- (4) P.S. Swain & R. Lipowsky, Contact angles on heterogeneous surfaces: A new look at Cassie's and Wenzel's laws, *Langmuir* 14, 6772-6780, 1998.
- (5) R. Xiao, R. Enright & E.N. Wang, Prediction and optimization of liquid propagation in micropillar arrays, *Langmuir* 26, 15070-15075, 2010.

- (6) J. Wang, M. Do-Quang, J.J. Cannon, F. Yue, Y. Suzuki, G. Amberg & J. Shiomi, Surface structure determines dynamic wetting, *Sci. Rep.* 5, 8474, 2015.
- (7) J. Kim, M.-W. Moon & H.-Y. Kim, Dynamics of hemiwicking, *J. Fluid Mech.* 800, 57-71, 2016.
- (8) X. Tang, P. Zhu, Y. Tian, X. Zhou, T. Kong & L. Wang, Mechano-regulated surface for manipulating liquid droplets, *Nature Commun.* 8, 14831, 2017.
- (9) D.E. Kataoka & S.M. Troian, Patterning liquid flow on the microscopic scale, *Nature* 402, 794-797, 1999.
- (10) K.M. Ang, L.Y. Yeo, Y.M. Hung & M.K. Tan, Graphene-mediated microfluidic transport and nebulization via high frequency Rayleigh wave substrate excitation, *Lab on a Chip* 16, 3503-3514, 2016.
- (11) J. Gorbatoeva, M. Borissova & M. Kaljurand, Electrowetting-on-dielectric actuation of droplets with capillary electrophoretic zones for off-line mass spectrometric analysis, *J. Chromatogr. A* 1234, 9-15, 2012.
- (12) M. Miansari & J.R. Friend, Acoustic nanofluidics via room-temperature lithium niobate bonding: A platform for actuation and manipulation of nanoconfined fluids and particles, *Adv. Func. Mater.* 26, 7861-7872, 2016.
- (13) H.A. Stone, A.D. Stroock & A. Ajdari, Microfluidics toward a lab-on-a-chip, *Ann. Rev. Fluid Mech.* 36, 381-411, 2004.
- (14) W.B. Hardy, The spreading of fluids on glass, *Phil. Mag. Ser. 6*, 38, 49-55, 1919.
- (15) P.G. de Gennes, Wetting: statics & dynamics, *Rev. Mod. Phys.* 57, 827-863, 1985.
- (16) I. Ueno, K. Hirose, Y. Kizaki, Y. Kisara & Y. Fukuhara, Precursor film formation process ahead macroscopic contact line of spreading droplet on smooth substrate, *Trans. ASME, J. Heat Transfer* 134, 051008, 2012.
- (17) S. Hashimoto, C. Hong & I. Ueno, Transient growth process of precursor film at early stage of droplet spreading, *J. Thermal Sci. & Technol.* 7, 487-496, 2012.
- (18) R.G. Cox, The dynamics of the spreading of liquids on a solid surface. Part 1. Viscous flow, *J. Fluid Mech.* 168, 169-194, 1986.
- (19) H. Nakamura, T. Ogawa, M. Inoue, T. Hori, L. Mu, H.N. Yoshikawa, F. Zoueshtiagh, G.F. Dietze, T. Tsukahara & I. Ueno, Pumping effect of heterogeneous meniscus formed around spherical particle, *J. Colloid Interface Sci.* 562, 133-141, 2020.
- (20) H. Nakamura, V. Delafosse, G.F. Dietze, H.N. Yoshikawa, F. Zoueshtiagh, L. Mu, T. Tsukahara & I. Ueno, Enhancement of meniscus pump by multiple particles, *Langmuir* 36, 4447-4453, 2020.
- (21) K. Yoshihara, Y. Kamei, A. Mizuno, H. Ohgaki, T. Hori & I. Ueno, Effect of wettability on viscous fluid impregnation in single-layer woven-fibre bundles driven by pressure difference, *Composites Part A* 138, 106049, 2020.
- (22) K. Ozawa, H. Nakamura, K. Shimamura, G.F. Dietze, H.N. Yoshikawa, F. Zoueshtiagh, K. Kurose, L. Mu & I. Ueno, Capillary-driven horseshoe vortex forming around a micro-pillar, *J. Colloid Interface Sci.* 642, 227-234, 2023.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Hayate Nakamura, Victor Delafosse, Georg F. Dietze, Harunori N. Yoshikawa, Farzam Zoueshtiagh, Lizhong Mu, Takahiro Tsukahara and Ichiro Ueno	4. 巻 36
2. 論文標題 Enhancement of meniscus pump by multiple particles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 LANGMUIR	6. 最初と最後の頁 4447 - 4453
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.langmuir.9b03713	査読の有無 有
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 該当する
1. 著者名 Hayate Nakamura, Tetsuya Ogawa, Motochika Inoue, Takuma Hori, Lizhong Mu, Harunori N. Yoshikawa, Farzam Zoueshtiagh, Georg F. Dietze, Takahiro Tsukahara and Ichiro Ueno	4. 巻 562
2. 論文標題 Pumping effect of heterogeneous meniscus formed around spherical particle	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J COLLOID INTERF SCI	6. 最初と最後の頁 133 - 141
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcis.2019.12.005	査読の有無 有
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 該当する
1. 著者名 Ken Yamamoto, Ryosuke Sakurai and Masahiro Motosuke	4. 巻 14, No.2
2. 論文標題 Fully-automatic blood-typing chip exploiting bubbles for quick dilution and detection	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Biomicrofluidics	6. 最初と最後の頁 24111
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0006264	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ryosuke Sakurai, Ken Yamamoto and Masahiro Motosuke	4. 巻 144
2. 論文標題 Concentration-adjustable micromixer using droplet injection into a microchannel	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Analyst	6. 最初と最後の頁 2780-2787
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8AN02310G	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Ichiro Ueno
2. 発表標題 Enhancement of local dynamic wetting induced by interaction with tiny obstacle(s) on smooth substrate
3. 学会等名 2020 Dalian University of Technology-Overseas Partner Universities Series Online Exchange Conference (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ichiro Ueno
2. 発表標題 Meniscus pump - local acceleration of contact line after interaction with tiny obstacle(s)
3. 学会等名 FAST-LIMS1 Seminar of mechanics (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小澤 航元
2. 発表標題 Numerical analysis on local acceleration of liquid film spreading on smooth substrate induced by interaction with a single short pillar
3. 学会等名 第32回日本マイクロ重力応用学会学術講演会(JASMAC32)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤村 俊介
2. 発表標題 局所加熱条件下マイクロスケールバブルにおける温度差マランゴニ対流の3次元数値解析
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川津 晃貴
2. 発表標題 矩形自由液膜内温度差マランゴニ対流における多様な基本定常流
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sorachi Fujimoto
2. 発表標題 Effect of heat loss on hydrothermal wave instability in half-zone liquid bridges of high Prandtl number fluid
3. 学会等名 8th International Symposium on Bifurcations and Instabilities in Fluid Dynamics (BIFD2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kota Yoshihara
2. 発表標題 Effect of wettability on macrovoid formation in viscous-fluid impregnation to woven fiber bundles
3. 学会等名 22nd International Conference on Composite Materials (ICCM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsuki Mizuno
2. 発表標題 Effect of wettability on impregnation process of viscous fluid to woven fiber bundles
3. 学会等名 22nd International Conference on Composite Materials (ICCM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hayate Nakamura
2. 発表標題 Numerical simulation of spreading liquid film subject to interaction with two spherical particles on horizontal smooth substrate
3. 学会等名 microfluidics 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuta Takase
2. 発表標題 Successive acceleration of macroscopic contact line of droplet induced by interaction with multiple pillars
3. 学会等名 microfluidics 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiro Motosuke
2. 発表標題 Microfluidic handling and evaluation of nanoparticles in water
3. 学会等名 International Workshop on Environmental Engineering 2019 (IWEE2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ken Yamamoto
2. 発表標題 Fully-automated sensitive blood-typing chip
3. 学会等名 23rd International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Science (micro-TAS) (国際学会)
4. 発表年 2019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
研究分担者	堀 琢磨 (HORI TAKUMA) (50791513)	東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授 (12605)	
研究分担者	元祐 昌廣 (MOTOSUKE MASAHIRO) (80434033)	東京理科大学・工学部機械工学科・教授 (32660)	

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			
フランス	Univ. Lille	Univ. Paris-Saclay	Univ. Cote d'Azur	