

表面張力による濡れ促進： 『メニスカス・ポンプ』

東京理科大学 創域理工学部 機械航空宇宙工学科 教授 上野 一郎 うえの いちろう

■ 1. はじめに

固体の表面の上を液体が濡れ広がる現象、いわゆる「濡れ」は大変身近な現象である。幹や葉の表面を移動する雨粒、岩や樹木にぶつかる川や海の水など、液体の水が存在するこの地球上では「濡れ」現象に溢れている。日常的にも、コップに注いだ水を飲む際に、水の先端部がコップの壁沿いに伝わり口に届く、シャワーを浴びる際に水が身体の表面にぶつかったあとに重力の作用により滴り落ちる、など、文字通り「濡れ」を経験せずに過ごすこと自体が稀である。産業的に、この「濡れ」の制御が極めて重要となる。自動車等に搭載されている燃料電池では、反応で生成した水をいかに触媒の外に追い出し、安定的な反応を維持するかが重要な性能となっている。スマートフォンやノート PC から人工衛星に至るまで、発熱部から熱を効率的に除去するために用いられているヒートパイプといった伝熱素子においては、高温部に冷却用の作動流体を供給し、相変化を安定的に実現することが冷却性能を高めるために重要な因子となっている。鉄やガラスなどの材料生成においても、高温の物体に液体をまんべんなく供給することによって冷却し、材料の力学的性質を決定する過程に含まれる。その他、洗浄、塗

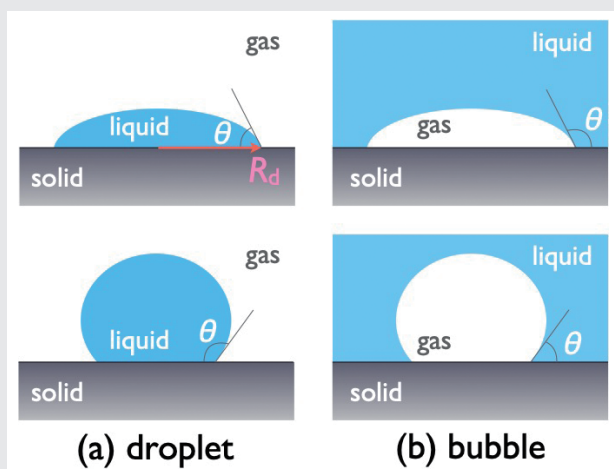
装、コーティングなど、枚挙に^{いとま}遑がない。このように、自然界から日常生活、さらに産業的な機器やプラントなど、固体-液体間相互作用である「濡れ」現象は、目に見えるもの見えないものも含め、気がつかないうちに生活の中に不可避なものとして存在している。

平滑な固体面上を液体が濡れる過程を考えるにあたり、有限の体積を有する液滴が放射状に濡れ広がる系が一般に用いられる【図 1(a)】。これはストローの先に液体を少量保持し、テーブルの上にそっと置く状況に相当する。時間の経過とともに液膜前縁部が前進する。この時、固体表面に接する液膜前縁部（コンタクト・ライン、CL）が固体表面と成す角を前進接触角と呼ぶ。なお、CLが固体表面上を後退する際の接触角を後退接触角と呼び、前者と併せて動的接触角と呼ぶ。動的接触角はCLの移動速度に応じて変化することが知られている。対して、充分時間が経過した後にCLが移動を停止している状態での接触角を、静的接触角と呼ぶ。接触角が小さく、固体面上に液体が広く広がる系を「濡れ性が良い」、逆に、接触角が大きく、固体面上を液滴が濡れ広がらない場合を「濡れ性が悪い」と定性的に区別する。なお、固体基板上に液滴が存在する場合【図 1(a)】と気泡が存在する場合【図 1(b)】では、濡れ性がいい場合【(a)上, (b)下】と悪い場合【(a)下, (b)上】の判別に注意が必要である。

液滴の体積を Ω [m^3] とおくと、時間 t [s] に対し液滴の中心位置から液膜前縁部の位置 R_d が以下の式で記述される¹⁾。

$$R_d = \Omega^{3\alpha} \left(\frac{Ft}{\mu} \right)^\alpha$$

ここで、 F は液滴形状を決定する支配的な力、 μ は液滴の粘度である。小さな液滴、すなわち、液滴の体積が充分小さく、濡れ広がる過程において重力の影響が無視できる（液滴の半径 R_d [m]が毛管長(capillary length) $\kappa^{-1} = (\gamma/\rho g)^{1/2}$ よりも充分小さい）場合には、 $F = \gamma$ 、 $\alpha = 1/10$ となる²⁾。ここで、 γ は表面張力、 ρ は液体の密度、 g は重力加速度である。一方、大きい液滴、すなわち、重力が支配的因子となる場合には、 $F = \rho g$ 、 $\alpha = 1/8$ となる³⁾。この^{べきすう}冪数が、濡れ広がり



【図 1】 固体基板上に存在する (a) 液滴および (b) 気泡の模式図 (θ : 接触角)。固体基板上に存在する液滴前縁部、すなわち、固体(solid)-液体(liquid)-気体(gas)の三相の境界を、三相接触界線(コンタクト・ライン)と呼ぶ。

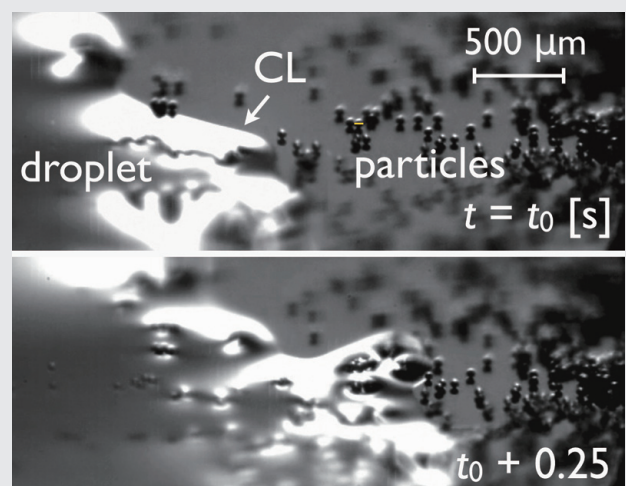
過程の比較的前半と後半において1/10から1/8に変化する様子が実験により明らかにされている¹⁾。このことは、すなわち、「何もしなければ」平滑面上での液滴の濡れ拡がりには時間の冪乗に支配されており、濡れ拡がり速度はそれ以上にもそれ以下にもならないことを示している。液滴の濡れ拡がりを促進または抑制するためには、何らかのエネルギー注入が必要となる。これまで、電位差⁴⁾や音響場⁵⁾などを付与することにより、強制的に濡れを促進し、微量液体を微小な検査領域に搬送する技術が研究されている。微小チップの作成により利用液体の少量化は可能となるが、微小領域内で大きな流動抵抗に抗して液体を搬送する必要があるため、多大なるエネルギーを用いたポンプ駆動を必要としているのが現状であり、装置の小型化や高効率化が困難となっている。一方で、微細加工によって基板上に微細な凹凸構造を付与することにより濡れ拡がりを受動的に制御する試みが続いている⁶⁻¹¹⁾。これは、濡れ性のよい基板では、その基板表面が細かい凹凸を有する場合、すなわち、粗い表面を有する場合にはさらに濡れ性がよくなり、濡れ性が悪い基板ではその逆となること^{12,13)}を基盤としている。従来の研究により、微小構造の形状や大きさ、間隔などをパラメータとして、濡れ拡がり促進条件などが明らかにされている。しかしながら、そのメカニズムとして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^{6,7)}、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かった。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かったため、固体基板や液体の種類や系の大きさといった対象系の変更などに即座に対応・再設計することが困難であった。筆者が主宰する研究グループでは、フランスの研究グループと共に、実験・理論・数値解析を駆使してこの問題に取り組んできた。対象を50 μm の球あるいは円柱を対象とし、これら微小な構造物周りで濡れ拡がる液体との間にどのような相互作用が起きているのか、加速が実現する条件や物理的な機構は何なのか、従来の知見とともに研究成果の一部を紹介したい。

■ 2. メニスカスポンプ機構

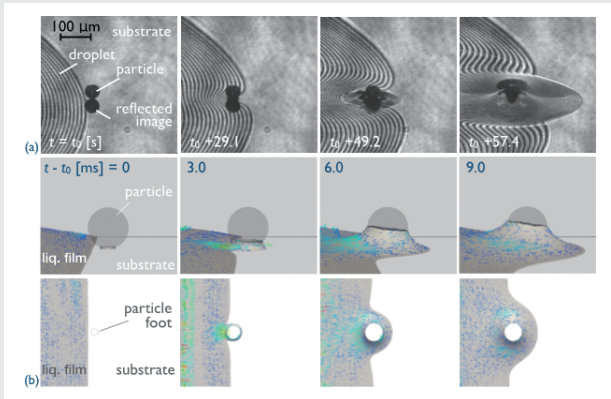
今となっては笑い話になるが、我々の研究グループはもともと「濡れ」の現象に対して関心は持っていたが、このような局所的な加速現象の存在を知らずに、

別の目的で微小な粒子を用いた実験を行っていた。濡れ性が高い場合において、巨視的に確認出来るコンタクト・ラインの前方に、「先行薄膜」と呼ばれる極めて薄い液膜の存在が知られている¹⁴⁾。この先行薄膜と微小な構造物との相互作用の有無を確認するため、brewster 顕微鏡を用いた先行薄膜領域の可視化¹⁵⁾により研究を進めていた。シリコン基板上に球状粒子を1つ静置して実験を行うところ、当時学部4年生の学生さんが卒業研究の一環で行っていた実験中に、(実は結構値段の張る)粒子を基板上に過ってばらまいてしまった。今でも心から素晴らしいと思うと同時に感謝しているが、この学生さんは慌ててここで実験を止めて片付けることをせず、基板上に想定外の複数の微粒子を散布したまま液滴を滴下し、かつ、記録をしていた【図2】。今まで行っていた先行薄膜の可視化実験では、Tanner²⁾が示していた通り、時間の冪乗に比例する形で液膜前縁部が基板上を進む状況ばかり見てきたが、粒子と相互作用をするたびに爆発的に加速する様子を初めて目の当たりにした。これが、これら一連の研究のきっかけとなった。その直前に宇宙環境利用科学に関する国際会議にて知り合ったマイクロ流体力学の理論解析に強いProf. F. Zoueshtiagh (Univ. Lille (当時 Univ. Lille 1))に、「おもしろい現象がある」と紹介したその場で意気投合し共同研究を開始し、現在に至っている。

時間の冪乗に乗らない、この爆発的な加速がどのようなメカニズムで発現しているのか、まずは1つの微小粒子と液膜前縁部との相互作用に注目し、これまでの先行薄膜領域の可視化で用いていたレーザー干渉計をそのまま導入し可視化することから着手した【図



【図2】シリコン基板上に直径50 μm の金コーティングアクリル架橋粒子を散布した系でのシリコンオイルの濡れ拡がりの様子。粒子と液膜前縁部の相互作用により、局所的に爆発的な加速が実現している。



【図3】直径50 μmの単一球状粒子との相互作用による液膜前縁部の局所的加速: (a) 実験, (b) 数値計算. (a) 実験: レーザー干渉計を用いた観察例. 液膜前縁部は画面左から右に流れており, 斜め上方から計測している. (b) 数値計算: Volume of Fluid (VOF) 法および Continuum Surface Force (CSF) 法を適用している¹⁶⁾. 計算負荷の低減のため, 液膜前縁部の移動速度を実験と比較して大きくしているため, 現象の時間スケールが異なっている.

3(a). 特に, 液膜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 $Ca = \mu U_{CL} / \gamma \ll 1$ の条件下での現象を対象とした. ここで, U_{CL} は液膜前縁部の移動速度を表す. Tanner の法則に則って基板上を移動していた液膜前縁部 (1 フレーム目) が粒子周りで顕著に変形し, その前縁部の移動が一時的に阻害される (2 フレーム). その後, 球状粒子の足元から放射状に液膜が発達し (3, 4 フレーム), 球状粒子の下流側において液膜前縁部が加速している. 側方からの高速度可視化により, 球状粒子の周りにメニスカスが自発的に形成することが確認された¹⁷⁾. 同様の挙動は, Navier-Stokes 方程式を支配方程式とし, Volume of Fluid (VOF) 法による界面追跡, および, Continuum Surface Force (CSF) 法による表面張力考慮を適用した数値計算¹⁶⁾により良好に再現できる【図3(b)】. この数値計算により, メニスカスの形状で決定する毛管圧とほぼ同等の圧力場が上流側および下流側において形成され, その圧力差によって液体を微小構造物の下流側に押し出す, すなわち, 自発的に形成するメニスカスがポンプのような作用をすることを見出した. 以降, この機構を『メニスカス・ポンプ』と呼ぶ.

Prof. Zoueshtiagh と共同研究を行っていた理論流体力学を専門とする Prof. H. N. Yoshikawa (Univ. Côte d'Azur (当時 Univ. Nice Sophia Antipolis)) がプロジェクトに加わり, 球状粒子周りの自発的なメニスカスの形成により, 基板上を進む液膜前縁部の移動速度を予測する理論モデルを構築した【図4(a)】. このモデルでは, 基板上および球状構造体表面上において $Cox^{18)}$ の動的濡れが成立し, また, 球状構造体周りに

対称かつ Young & Laplace の式により決定する圧力が0となる形状を有するメニスカスが形成すると仮定をしている. 比較的低速な濡れ拡がり時における球状構造体周りメニスカスの空間的形状【図4(b)】や相互作用による液膜前縁部速度が最大値を迎えた後, 時間 t に対し $t^{-3/4}$ で減衰するという実験結果を良好に予測するモデルとなっている. 一方で, 相互作用後における液膜前縁部加速過程の時間スケール (理論: $O(10^{-6} \text{ s})$ ¹⁹⁾, 実験: $O(1 \text{ s})$) や, $Ca \sim O(10^{-4})$ での非対称性メニスカス形成, さらに, 液膜前縁部加速における液膜前縁部-微小構造体間相互作用直前の速度 (Ca) 依存性²⁰⁾ は再現できていない. また, 円柱や角柱, 翼型柱など, 様々な形状の微小構造物においてメニスカス・ポンプ機構が発現することを明らかにした実験結果²¹⁾において, 球状粒子が最も大きな最大速度を実現するという知見についても検証に至っていない.

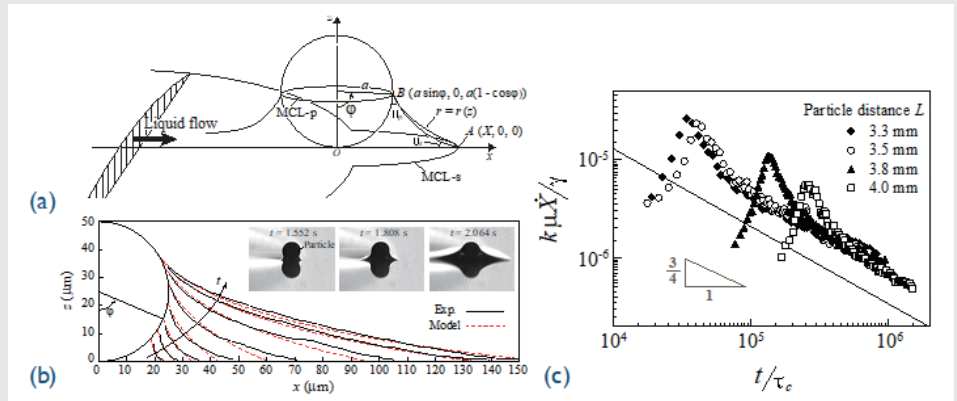
これらの状況を踏まえて, 局所加速にかかる力学を明らかにするため, 前述の数値計算を実施している. ここで, 交流のあった Dr. G. F. Dietze (CNRS/Univ. Paris-Saclay (当時 Univ. Paris-Sud)) がプロジェクトに加わり, 共同研究の体制を強化している. 単一微小構造物と液膜前縁部の相互作用により『メニスカス・ポンプ』機構が発現することを明らかにした上で, 従来の研究⁶⁻¹¹⁾で明らかにしていた複数の微小構造との相互作用による加速現象に注目する. 簡単のために, 移動する液膜前縁部と液滴滴下位置を結ぶ直線と平行に直線状に配列した微小構造を対象とする【図5】. 球状【図5(a)上】あるいは柱状【図5(a)下】微小構造物に対し, 2つ目の微小構造物との相互作用後に液膜前縁部の加速が促進され, 微小構造物に沿った局所的な濡れ拡がりを実現する²³⁾. 同様の現象を良好に再現【図5(b)および(c)】する数値計算により, 2つ目以降の微小構造物周りでの『メニスカス・ポンプ』が作用する際に, 直前の微小構造物周りに形成されたメニスカスが「ポンプ」に加えて「液溜め」の役割を果たし, 単一構造物の場合と比較してより多量の液体を構造物下流側に供給することを示した²²⁾. 『メニスカス・ポンプ』の連続作用を実現する微小構造物最適配置が存在し, その際の液膜前縁部移動速度の増幅を定量化している.

■ 3. $Re \ll 1$ における馬蹄渦形成

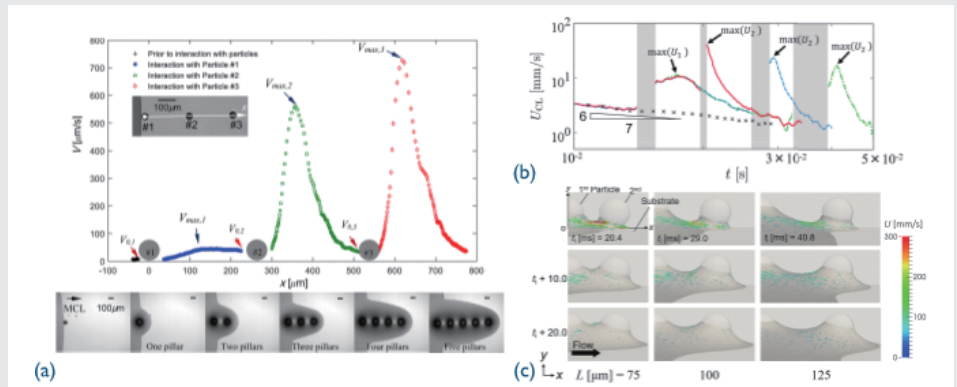
『メニスカス・ポンプ』機構に関する実験【図6

(a) を模擬する数値計算結果の解析により、毛管力支配の条件下で微小構造物周りに自発的に発現する馬蹄渦を含む複雑対流場の形成【図6(b)]を見出した²⁴⁾。本研究で対象とする系は、液滴前縁部の移動速度が小さく、かつ、微小な構造物との相互作用を対象とする毛管力支配となる系、すなわち、対流場の慣性力と粘性力の比を示す Reynolds 数 Re が小さく ($Re = U_{CL}L/\nu \ll 1$, ここで、 L : 系代表長さ、 ν : 試験液体動粘度)、かつ、粘性力と表面張力の比を示す capillary 数 Ca が小さい ($Ca = \mu U_{CL}/\gamma \ll 1$) 系である。馬蹄渦に関する研究は、橋脚や建物など大型構造物の破損・破壊防止および予測を目的として半世紀以上に亘り精力的に行われている^{e.g., 25-27)}。馬蹄渦は慣性力支配 ($Re = UL/\nu \gg 1$, ここで、 U : 代表速度) において、構造物上流側での逆圧力勾配により形成に至ることが示されている。一方、本研究では、基板上を $O(10^{-4} \text{ m/s})$ の速度で濡れ拡がる液滴が、 $O(1 \text{ }\mu\text{m})$ から $O(100 \text{ }\mu\text{m})$

の微小構造物と接触し、自発的に形成されるメニスカス内部の対流場、すなわち、 $Re = O(10^{-4} \sim 10^{-2}) \ll 1$ を対象系としている。当研の大学院生が修士論文にかかる研究でこの現象を発見した 2019 年末から 2020 年初頭の時点において、微小構造物に対し $Re \ll 1$ の条件下での馬蹄渦発現自体が、そもそも知見が蓄積されていないのが現状であった。むしろ、この現象を知り合いの流体力学者に相談したところ、返ってくる答えは決まって、「この小さい空間スケールで馬蹄渦が出来るはずがない」というものであった。また、筆者らがこの特異と思われる現象を発見した直後に共同研究者とともに論文原稿を書き上げて英文学術誌に

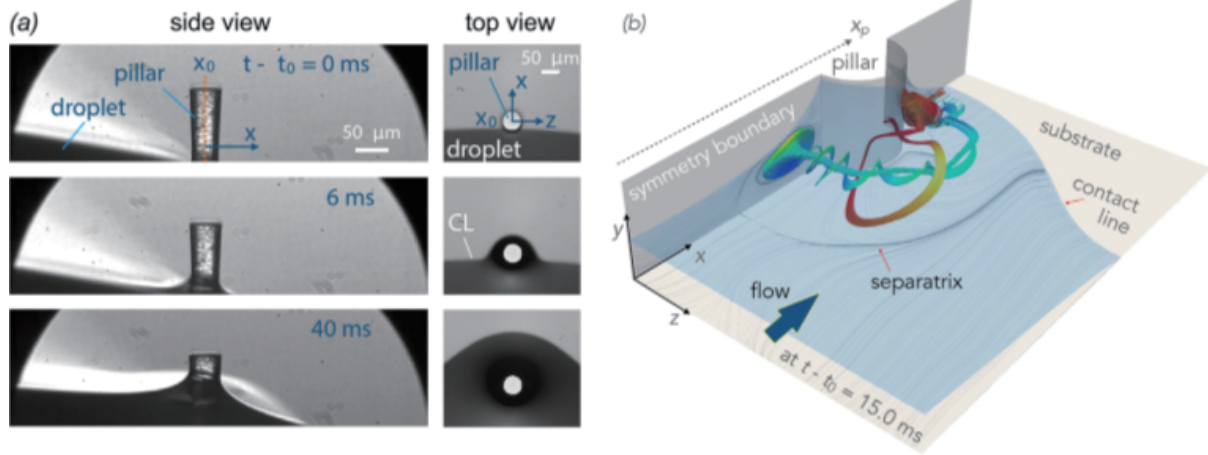


【図4】(a) 球状粒子と液膜前縁部との相互作用後に形成するメニスカス形状モデル。固体基板上および球表面上を濡れ拡がるそれぞれの液膜前縁部 MCL-s および MCL-p を考慮している。(b) 直径 $50 \text{ }\mu\text{m}$ の球状粒子周りに形成する粒子下流側メニスカス形状。実験による異なる時刻における計測結果 (実線) および理論モデルによる予測分布 (破線) との比較をしている。挿入図は当該実験によるメニスカス形成による液膜前縁部局所的加速の時系列データを示す。(c) 球状粒子との相互作用後の液膜前縁部の移動速度 (\dot{X}) の時間 (t) 変化 (L : 液滴滴下位置と粒子重心間距離)。当該モデルが加速した後の減速を良好に再現している。ここで、 μ : 粘度、 γ : 表面張力、 k : メニスカスの代表長さを表す係数、 $\tau_c = (k\mu a/\gamma) = 6.4 \text{ }\mu\text{s}$: 毛管現象を表す代表時間。同じく、 $\gamma/k\mu = 3.9 \text{ m/s}$ は、毛管現象を表す代表速度である。(Frames (a)-(c); Figs. 6, 3, and 7(a) in Ref¹⁷⁾. Reuse permitted by the Cambridge University Press.)



【図5】複数の球状粒子との連続的相互作用による液膜前縁部の加速促進。(a): 球状微小粒子列 (3つ) と液膜前縁部との相互作用による前縁部速度 (V) 変化の例 (上) および柱状微小構造列と液膜前縁部との相互作用による液膜前縁部の局所的変形の上方観察例 (下) (左から 2 フレーム: 単一柱状構造との相互作用前後の液膜前縁部の様子, 3 フレーム目から順に、等間隔に並べられた 2 本, 3 本, 4 本, および 5 本の柱状構造列との相互作用後の液膜前縁部の様子)。(b) および (c): 2 つの球状粒子との連続的相互作用による液膜前縁部速度 (U_{CL})、および、メニスカス形成の時間変化 (L : 2 粒子重心間距離)。いずれの場合も、2 回目以降の相互作用において、液膜前縁部の局所加速がより促進される。実験および数値計算ともに、直径 $50 \text{ }\mu\text{m}$ の球状粒子あるいは柱状構造物を対象としている。(Frame (a): Fig. 4 in Ref²¹⁾. Frames (b) and (c): Figs. 2 (b) and 3 in Ref²²⁾. Reuses permitted by the Elsevier and by the American Chemical Society.)

投稿したが、編集者や査読者からも全く同じ内容のコメントとともに掲載不可の結果が複数続いた。流体力学に関する教科書・専門書、学術論文に至るまで、この分野の専門家の中で「馬蹄渦は $Re \gg 1$ (慣性力支配) で発現する」という共通認識が浸透していたことを顕著に反映している。筆者らが行った数値計算により、 $Re \ll 1$ の条件下での円柱状微小構造物周りにおける馬蹄渦形成に先立ち、メニスカス発達時に逆圧力勾配が発生することを明らかにしていたが、問題は、 $Re \ll 1$ の条件下でいかにこの逆圧力勾配が発生するか、という点であった。残念な査読結果を受け、共同研究を行っている全員が非常にながかりしていたが、誰も



【図6】(a) 直径 $50\ \mu\text{m}$ の柱状構造物と液膜前縁部の相互作用によるメニスカス形成 (実験), および (b) メニスカス内に形成された馬蹄渦可視化図 (数値計算). 数値解析により, 構造物上流側において渦が形成し構造物を囲むように下流側まで伸び, $Re \ll 1$ の条件において馬蹄渦が形成することを示した. (Fig.1 in Ref²⁴: Reuse permitted by the Elsevier.)

この現象が数値計算のエラーによるものと思わず, 絶対におもしろい「真」の現象のはずだと信じていた. 当時は covid19 禍のため遠隔での対話環境が急速に一般に広がった時期でもあり, 平時よりもきわめて高い頻度で徹底的に議論を交わすことが出来た. 計算手法や計算条件を一から見直し, 侃々諤々, ときに全員沈黙しながら出てきたデータを遠隔で共にじっと眺め続けた. しばらくして, メニスカスの3次元形状に注目することになった. これまでは, 毛管圧を検討する際に無意識のうちに, 微小構造物重心位置と液滴落下位置を結ぶ対称面内でのメニスカス形状にのみ注目し圧力評価を行っていた. これは, これまでに我々が行ってきた解析^{16, 17, 21-23})で続けてきたものであった. 3次元形状に注目した結果, 主流方向およびスパン方向のメニスカス界面曲率による圧力場への貢献が, メニスカス形成の時間発展とともにあるタイミングで逆転することを見出した. この逆転現象によって, これまで $Re \gg 1$ の条件下でのみ見られると思われてきた逆圧力勾配が, $Re \ll 1$ の条件下においてもメニスカス内に発生することを明らかにした²⁴). 現象の発見からほぼ3年, きわめて密度の高い議論を経てようやく公表することができたのは望外の喜びである. 現在は, $Re \ll 1$ の環境下で馬蹄渦形成を伴う複雑な対流場を, 熱・物質輸送の高効率化に応用するために研究を継続している. 遠隔での打合せだけでなく, 対面で共にコーヒーやワインを飲みながら議論を深める機会をみなで楽しみにしている.

■ 4. おわりに

本稿では, 固体基板上を濡れ拡がる液膜前縁部と微小構造物との相互作用により, 「濡れ拡がり」を時空間的に制御する研究内容の一部を紹介した. 微小構造物周りに自発的に形成するメニスカスが, ポンプ的な作用をもたらし局所的に液膜前縁部が加速する. さらに, 従来の研究では慣性力支配のもとでのみ実現するとされていた馬蹄渦が『メニスカス・ポンプ』機構発現時にメニスカス内に形成され, 毛管力駆動によりきわめて複雑な対流場が発生する. これらの現象解明により, 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・熱物質輸送技術への応用が期待できる. これら一連の共同研究が一人の学部4年生の「失敗」実験がきっかけとなっていること, また, covid19 禍で対面活動が極めて抑制されている時期に徹底した議論を重ねることによって新たな発見に繋がっていることは, 筆者にとってとても印象的な, また, 示唆に富む研究事例として, 決して小さくない意味を有している. 一見, シンプルでありふれた現象ではあるが, この現象を研究対象として楽しくのめり込むことが出来たのは, 筆者と同じく, また, それ以上に強い関心を持って現象解明に取り組んでくれた学部生・院生ら学生諸君のおかげである. 研究室で行っている研究会において, 当該プロジェクトに直接参画していない学生さん達との議論も, 新たな着眼や理解の深化をもたらしてくれた. 寄稿にあたり, 心から謝意を表す.

本稿執筆現在, 『メニスカス・ポンプ』機構に関する研究活動に加えて, このメニスカスの作用による

微細物除去を目指した研究に取り組んでいる。これまでの研究活動を通じ、ある条件下において液滴前縁部との相互作用によって液膜前縁部の加速が促進されずに微小構造物が液膜側に急速に引き込まれる現象²⁰⁾を見出している。「濡れ」を利用し、基板上に存在するごみ・不純物や、汚染源となるバクテリアなどの微小生物の自発的駆動・除去への応用を目指して、これからも研究を進めていきたい。

本稿で紹介した研究成果は、科学研究費補助金：基盤研究(B)(24360085;19H02083)、国際共同研究B(20KK0085)の助成によるものである。また、本学の重点課題特別研究推進費(若手枠)(2015-2017年度)、国際共同研究支援費(2019-2020年度)によるサポートを受けている。

参考文献

- 1) Cazabat AM, Cohen Stuart MA. Dynamics of wetting: effects of surface roughness. *Journal of Physical Chemistry*. 1986; 90 (22): 5845-5849.
- 2) Tanner LH. The spreading of silicone oil drops on horizontal surfaces. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1979; 12: 1473-1484.
- 3) Lopez J, Miller CA, Ruckenstein E. Spreading kinetics of liquid drops on solids. *Journal of Colloid and Interface Science*. 1976; 56 (3): 460-468.
- 4) Gorbatsova J, Borissova M, Kaljurand M. Electrowetting-on-dielectric actuation of droplets with capillary electrophoretic zones for off-line mass spectrometric analysis. *Journal of Chromatography A*. 2012; 1234: 9-15.
URL <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2011.12.052>
- 5) Miansari M, Friend JR. Acoustic nanofluidics via room-temperature lithium niobate bonding: A platform for actuation and manipulation of nanoconfined fluids and particles. *Advanced Functional Materials*. 2016; 26: 7861-7872.
- 6) Xiao R, Enright R, Wang EN. Prediction and optimization of liquid propagation in micropillar arrays. *Langmuir*. 2010; 26 (19): 15070-15075.
- 7) Wang J, Do-Quang M, Cannon JJ, Yue F, Suzuki Y, Amberg G, Shiomi J. Surface structure determines dynamic wetting. *Scientific Reports*. 2015; 5: 8474.
- 8) Kim J, Moon MW, Kim HY. Dynamics of hemiwicking. *Journal of Fluid Mechanics*. 2016; 800: 57-71.
- 9) Kim S, Moon MW, Kim HY. Liquid spreading along nanostructured superhydrophilic lanes. *Physical Review Fluids*. 2021; 6: 034002.
- 10) Hu X, Wang Z, Hwang DJ, Colosqui CE, Cubaud T. Viscous liquid-liquid wetting and dewetting of textured surfaces. *Soft Matter*. 2021; 17: 879-886.
URL <https://doi.org/10.1039/D0SM01524E>
- 11) Natarajan B, Jaishankar A, King M, Oktasendra F, Avis SJ, Konicek AR, Wadsworth G, Jusufi A, Kusumaatmaja H, Yeganeh MS. Predicting hemiwicking dynamics on textured substrates. *Langmuir*. 2021; 37: 188-195.
URL <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.langmuir.0c02737>.
- 12) Wenzel RN. Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Industrial and Engineering Chemistry*. 1936; 28 (8): 988-994.
- 13) Swain PS, Lipowsky R. Contact angles on heterogeneous surfaces: A new look at Cassie's and Wenzel's laws. *Langmuir*. 1998; 14: 6772-6780.
- 14) Hardy WB. The spreading of fluids on glass. *Philosophical Magazine Series 6*. 1919; 38 (223): 49-55.
- 15) Ueno I, Hirose K, Kizaki Y, Kisara Y, Fukuhara Y. Precursor film formation process ahead macroscopic contact line of spreading droplet on smooth substrate. *Journal of Heat Transfer*. 2012; 134: 051008.
- 16) Nakamura H, Ogawa T, Inoue M, Hori T, Mu L, Yoshikawa HN, Zoueshtiagh F, Dietze G, Tsukahara T, Ueno I. Pumping effect of heterogeneous meniscus formed around spherical particle. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2020; 562: 133-141.
URL <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.12.005>
- 17) Mu L, Kondo D, Inoue M, Kaneko T, Yoshikawa HN, Zoueshtiagh F, Ueno I. Sharp acceleration of a macroscopic contact line induced by a particle. *Journal of Fluid Mechanics*. 2017; 830: R1.
- 18) Cox RG. The dynamics of the spreading of liquids on a solid surface. Part 1. Viscous flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 1986; 168: 169-194.
- 19) Biance AL, Clanet C, Quéré D. First steps in the spreading of a liquid droplet. *Physical Review E*. 2004; 69: 016301.
- 20) Kondo D, Mu L, de Miollis F, Ogawa T, Inoue M, Kaneko T, Tsukahara T, Yoshikawa HN, Zoueshtiagh F, Ueno I. Acceleration of the macroscopic contact line of a droplet spreading on a substrate after interaction with a particle. *International Journal of Microgravity Science and Application*. 2017; 34 (4): 340405.
- 21) Mu L, Yoshikawa HN, Kondo D, Ogawa T, Kiriki M, Zoueshtiagh F, Motosuke M, Kaneko T, Ueno I. Control of local wetting by microscopic particles. *Colloids and Surfaces A*. 2018; 555: 615-620.
- 22) Nakamura H, Delafosse V, Dietze GF, Yoshikawa HN, Zoueshtiagh F, Mu L, Ueno I. Enhancement of meniscus pump by multiple particles. *Langmuir*. 2020; 36: 4447-4453.
URL <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.langmuir.9b03713>
- 23) Mu L, Yoshikawa HN, Zoueshtiagh F, Ogawa T, Motosuke M, Ueno I. Quick liquid propagation on a linear array of micropillars. *Langmuir*. 2019; 35: 9139-9145.
- 24) Ozawa K, Nakamura H, Shimamura K, Dietze GF, Yoshikawa HN, Zoueshtiagh F, Kurose K, Mu L, Ueno I. Capillary-driven horseshoe vortex forming around a micro-pillar. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2023; 642: 227-234.
URL <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.03.039>
- 25) Baker CJ. The laminar horseshoe vortex. *Journal of Fluid Mechanics*. 1979; 95 (2): 347-367.
URL <https://doi.org/10.1017/S0022112079001506>
- 26) Launay G, Mignot E, Riviere N, Perkins R. An experimental investigation of the laminar horseshoe vortex around an emerging obstacle. *Journal of Fluid Mechanics*. 2017; 830: 257-299.
- 27) Gazi AH, Afzal MS. A review on hydrodynamics of horseshoe vortex at a vertical cylinder mounted on a flat bed and its implication to scour at a cylinder. *Acta Geophysica*. 2020; 68: 861-875.
URL <https://doi.org/10.1007/s11600-020-00439-8>