

特別セッション | 特別セッション (OS-05: 複雑流体・ソフトマターのダイナミクス)

2026年5月17日(日) 10:35 ~ 11:50 | E会場(環境棟: 6階講義室)

OS-05 (2)

座長: 大槻 道夫(島根大学)

10:35 ~ 10:50

[25006] 泡沫の毛管上昇の時間発展と物理的考察

*塩野 宏太¹、栗田 玲¹ (1. 東京都立大)

10:50 ~ 11:05

[25007] 泡沫構造の動的応答が制御する液体浸透挙動

*玉木 健登¹、柳沢 直也²、栗田 玲¹ (1. 東京都立大学、2. 東京大学)

11:05 ~ 11:20

[25008] ジャミングした気泡間隙の流体輸送の定量化

*王 鈺博¹、足立 友哉²、大家 広平¹、鈴木 洋²、玲 栗田³、石神 徹⁴、日出間 るり¹ (1. 名古屋大学、2. 神戸大学、3. 東京都立大学、4. 広島大学)

11:20 ~ 11:35

[25009] ジェット挙動に基づく粉体流動性評価および初期形状依存性

*小玉 凜空¹、神保 孔明¹、武藤 真和²、栗田 玲³、小林 和也¹ (1. 日本工業大学、2. 名古屋工業大学、3. 東京都立大学)

11:35 ~ 11:50

[25010] 位相シフトエリブソメトリ計測とスパースモデリングによるナノフルイド超拡張濡れの物理因子抽出

*庄司 衛太¹、深見 開¹ (1. 東北大学)

泡沫の毛管上昇の時間発展と物理的考察 Time Evolution and Physical Analysis of Capillary Rise in Foams

塩野 宏太（都立大・理）、栗田 玲（都立大・理）

Kota Shiono, Tokyo Metropolitan University

Rei Kurita, Tokyo Metropolitan University

E-mail: kota9271@gmail.com

本研究では泡沫の毛管上昇における上昇高さの時間発展を観察し、メカニズムの解明と一般的条件下での挙動を評価した。実験では、容器内に充填した泡沫に対して中空円筒を一定周期で抜き差しし、各周期における上昇量を測定した。得られた上昇挙動を解析した結果、上昇過程には異なる二つのメカニズムが存在することが明らかとなった。

（参考文献）

- 1) I.Cantat 『ムースの物理学：構造とダイナミクス』 吉岡書店 (2016) p. 10
- 2) 遠田幸斗, 『泡沫の毛管上昇を誘起するピンチオフダイナミクス』 修士論文, 東京都立大学大学院理学研究科物理学専攻, 2025

液体中に気泡が発生し、それらが安定化されることで泡沫が形成される。泡沫は気泡を主成分とするため、液体や気体の透過率および熱伝導率が低いという特徴をもつ。そのため、食品製造や化学産業など多様な生産プロセスにおいて発生しやすく、生産効率の低下を引き起こす要因となっている。泡沫は準安定に残留するため、現在は脱泡剤による対策が一般的であるが、純度や品質の低下といった課題が残されている。このことから、脱泡剤に依存しない物理的脱泡技術の確立が強く求められている。

泡沫を破壊するためには、泡沫中の液体分率を低下させることが不可欠であり、単位面積あたりの高さを増加させることが重要となる。そこで本研究では、泡沫の**毛管上昇現象**に着目した。泡沫は単純液体とは異なり、毛管を挿入するだけでは上昇しないが、毛管の抜き差しを周期的に繰り返すことで、毛管内を泡沫が上昇する現象が我々の研究室により発見されている²⁾。本研究では、この毛管上昇のメカニズム解明と、液相を含むより一般的な条件下での挙動の観察を目的とした。

実験では、容器内に充填した泡沫に対して中空円筒を一定周期で抜き差しし、周期ごとの上昇量を測定した。

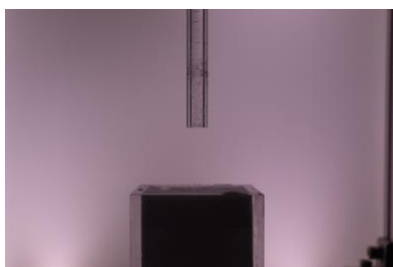


Figure. 1 Experimental setup for foam capillary rise.

その結果、毛管上昇には二つの異なるメカニズムが存在することが明らかになった。一つは円筒内への**詰め込み効果**であり、もう一つは円筒引き抜き後に管下部に形成される円錐状構造が管内部へ流入する現象である。前者は管内部に泡沫を保持する役割を果たし、後者は管内部への注入量を増加させる役割を担っていることが分かった。これらの挙動には、泡沫の弾性的性質と流動的性質の両方が深く関与していることが示唆された。さらに、液相を含む条件下においても、同様のメカニズムにより毛管上昇が生じることが確認された。

泡沫構造の動的応答が制御する液体浸透挙動 Imbibition dynamics controlled by dynamical coupling of foam structure

玉木 健登 (都立大・理) 栗田 玲 (都立大・理)

Kento Tamaki, Tokyo Metropolitan University

Rei Kurita, Tokyo Metropolitan University

E-mail: Takami-kento@ed.tmu.ac.jp

泡沫は気体が高密度に詰まったソフトジャミング系であり、負の浸透圧により液体や微粒子を取り込む機能をもつ。従来、泡沫内の液体浸透は固定多孔質中の毛管現象として理解されてきたが、実験的にはその理論からのずれが報告されている。本研究では、開放・半開放・密閉の三種の境界条件下で浸透と気泡変位を同時測定し、構造変化が浸透ダイナミクスを修正する隠れた機構を明らかにした。

1. はじめに

泡沫とは、液体中に気体が高密度に詰まった状態のものを指す。泡沫は気体と液体で構成されているのにも関わらず、固体としても液体としても振る舞うことが知られており、遮断性、衝撃抑制、軽量性などといった多くの機能を持つ。中でも泡沫は負の浸透圧を持つため、油や微粒子を泡沫内部に取り込むことができる。この性質を利用して、日常的に使われる化粧品や洗浄剤から、浮遊選鉱の産業用途まで、泡沫は多くの場面で活用されている。

コロイドや乳濁液などのソフトジャミング系における液体の浸透に関しては、従来、固定された多孔質構造内を流体が移動する純粋な毛管現象 (Lucas-Washburn 則) として理解されてきた。特に泡沫のジャミングが強い状態においては構造の再配置が抑制され、この考え方は妥当と考えられてきた。しかし実際の浸透ではこの従来の理論からのずれや浸透の減速現象が報告されているが、その物理的起源については十分に解明されていない。

本研究では、泡沫を上下からアクリル板で挟み、端から液体をゆっくり注入し、液体が泡沫に浸透していく様子を観察した。今回、開放・半開放・密閉の3種類の境界条件下における液体浸透と気泡変位を測定することで、泡沫内における構造の変化が浸透に与える影響を調べ、浸透ダイナミクスを支配する隠れたメカニズムを明らかにした¹⁾。

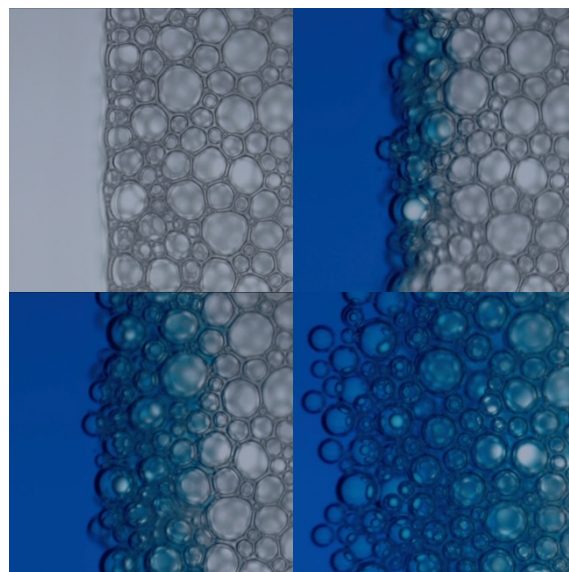


Fig. 1 Time evolution of liquid imbibition to the foam.

参考文献

- 1) Kento Tamaki, Naoya Yanagisawa, Rei Kurita, submitted.

ジャミングした気泡間隙の流体輸送の定量化 Quantification of fluid transport in jammed bubble gaps

王鈺博 (名大院工), 足立友哉 (神戸大院工), 大家広平 (名大院工), 鈴木洋 (神戸大院工),
栗田玲 (首都大理), 石神徹 (広島大院工), 日出間るり* (名大院工)

Yubo WANG, Nagoya University
Tomoya ADACHI, Kobe University
Kohei OHIE, Nagoya University
Hiroshi SUZUKI, Kobe University
Rei KURITA, Tokyo Metropolitan University
Toru ISHIGAMI, Hiroshima University
Ruri HIDEIMA*, Nagoya University
E-mail: hidema@nagoya-u.jp

In microfluidic systems, the jamming of deformable particles such as bubbles strongly influences fluid transport through channels. Conventional permeability models, including Darcy's law, generally assume rigid and static porous structures and therefore do not account for particle deformability. In this study, fluid transport through jammed bubble gaps in a microchannel is experimentally investigated. The pressure drops across the jammed region, and the interstitial flow velocity are measured to evaluate the effective permeability of the deformable system.

1. はじめに

泡（気泡が水に分散した系）やエマルション（油滴が水に分散した系、またはその逆）は、微生物を使った物質生成プロセスや、原油回収精製プラントなど、多くの化学プロセスのタンク中に発生する。この際、タンクの中でジャミングしがちな泡やエマルションの隙間を、流体が効率よく流れれば、生成した物質の効率的な回収や、原油の効率的な分離が可能となる (Fig.1)。堅い粒子間隙の流体輸送は、これまで、土木や粉体工学の分野で定式化されてきた¹⁾。一方、泡やエマルションなど柔らかい粒子の間隙の流体輸送は、定式化されてこなかった。柔らかい粒子は時間とともに変形する。この変形の度合いは、粒子の弾性に依存する。本研究は、粒子の変形能、流体との相互作用の観点から、柔らかい粒子間隙の流体輸送を定量化することを目的とする。本研究ではまず、泡に着目する。

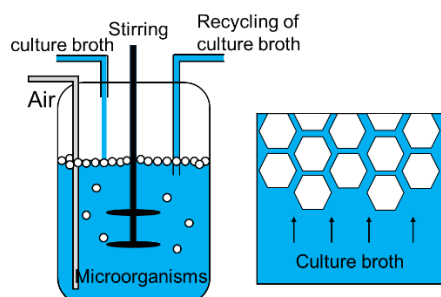


Fig. 1 Schematic of a bioreactor and bubbles jammed in the tank.

2. 試料と実験

2つの入口を持つマイクロ流路に、ドデシルベンゼンスルホン酸ナトリウム (Sodium dodecylbenzenesulfonate, SDBS) 2wt%水溶液と、空気を注入し、流路内で気泡を発生させた。気泡のサイズは直径約 120 μm であった。SDBS 水溶液の界面張力 γ [N/m] は 28 mN/m、流路内での気泡の変形しやすさを表すキャピラリー数 Ca は約 3.08×10^{-4} であった²⁾。 Ca は以下の式から計算し、ここで、 μ , u , γ はそれぞれ、SDBS 水溶液の粘度、平均流速、表面張力である。

$$Ca = \frac{\mu u}{\gamma} \quad (1)$$

さらに、気泡がジャミングした流路の圧力損失を測定し、堅い粒子がジャミングした場合との圧力損失を比較した。

3. 結果と考察

Fig.2 は流路内でジャミングした気泡の画像を示す。流路内には、気泡を閉じ込めるバスケットがあり、気泡の間を流れた流体は、下流の隙間から出口へと排出される。

顕微鏡観察の結果、溶液の流動に伴い、バスケット内において気泡が変形する様子が確認された。特に出口付近の気泡が優先的に変形する傾向が見られた。さらに、時間の経過とともに、出口付近の気泡は徐々に合一し、より大きな気泡へと成長する様子が観察された。ジャミング状態では流路の有効断面積が減少するため、流動抵抗が増大した。この時の圧力損失を計測すると、ジャミングの進行とともに圧力の上昇が確認された。



Fig. 2 Bubble jammed in the microchannel.

参考文献

- 1) Julián Montero; Luis A. Pugnaloni; Ryan Kozlowski. Dimensional analysis for clogging of grains in two and three dimensions. *Phys. Review. E*. 112, 065411, 2025
- 2) Brian Dincau; Emilie Dressaire; Alban Sauret. Clogging: The self-sabotage of suspensions. *Physics Today*. 76(2), pp.24-30, 2023.

謝辞

本研究の一部は、JST 創発的研究支援事業、JPFMR2030 の支援を受けたものである。

ジェット挙動に基づく粉体流動性評価および初期形状依存性 Jet-Based Evaluation of Powder Flowability and Dependence on Initial Surface Geometry

小玉 凜空 (日工大・工) 神保 孔明 (日工大・工) 武藤 真和 (名工大・工)

栗田 玲 (都立大・理) 小林 和也 (日工大・工)

Riku KODAMA, Nippon Institute of Technology

Komei JINBO, Nippon Institute of Technology

Masakazu MUTO, Nagoya Institute of Technology

Rei KURITA, Tokyo Metropolitan University

Kazuya U. KOBAYASHI, Nippon Institute of Technology

E-mail: kobayashi.kazuya@nit.ac.jp

The dynamic behavior of powder jets generated by impact is strongly influenced by particle adhesion and flowability, particularly under high-humidity conditions. In this study, powders under relative humidity conditions of 70–90% were investigated to clarify how particle adhesion and agglomeration affect the dynamic behavior of impact-induced powder jets. Specifically, by independently controlling the humidity conditions and the initial concave radius of the powder bed surface, variations in jet velocity, maximum jet height, and jet diameter were analyzed in detail. The results show that, regardless of the concave radius, both the jet velocity and the maximum jet height decrease significantly with increasing relative humidity. This behavior is attributed to the increase in interparticle adhesion and agglomeration caused by moisture absorption, which reduces the flowability of the powder. Furthermore, it was found that an increase in the concave radius leads to a larger jet diameter, accompanied by decreases in both the jet velocity and the maximum jet height. These results suggest that the initial concave geometry is related to the amount of energy dissipation associated with surface flow of the powder during jet formation.

1. 緒言

粉体は、医薬品や化粧品などをはじめ、様々な分野で利用されており、重要な材料系として広く位置付けられている。特に微粒子材料を扱う際には、粉体の流動性を理解することは、原料の供給、混合、成形、充填といった各工程の安定性を制御する上で重要である。そのため、粉体の流動性制御に関する研究も活発に行われており、粒径や形状、粉体間の相互作用が粉体の性質を大きく左右することが明らかにされている¹⁾。

粉体の相互作用は、ファンデルワールス力、静電気力、液架橋力などによって支配される。特に高湿度環境下では、吸湿により付着性が増大し、不均一な凝集が生じやすくなることが知られている。また粉体の材料特性によっても挙動は大きく異なり、特に粉体の凝集・付着性は環境変化に対して即時に均一化せず、材料特性に応じた緩和時間を伴う²⁾。そのため、粉体粒子の吸湿状態に関する周辺環境への適応有無については、個別的なその場評価が重要になると考えられる。粉体の凝集・付着性の評価には、走査型電子顕微鏡 (SEM) や原子間力顕微鏡 (AFM)、粉体レオメータ (FT4) などの精密測定装置が用いられてきた^{3,4)}。これらは高い測定結果を有するが、大型でありその場観察に適した手法とは呼べない。また、砂山の角度から評価を行う安息角手法⁵⁾は、簡易的ではあるが、高湿度であるほど測定誤差が大きく、また多量の試料を必要とするため、少量粉体の評価には不向きである。このことから、多量の試料粉体を必要とせず、粉体の吸湿状態を高精度にその場評価が可能な手法の検討が必要である。

本研究では、撃力によって粉体をジェットとして射出する手法に着目し、その挙動の変化を通した粉体の流動性評価手法の確立に向けた検討を行った。本手法は充填した粉体を金属床材に自由落下させ、その衝撃力によって、ジェットを射出させるものである。これまでに、この手法を用いて粉体をジェットとして射出可能であることを報告し、生成されるジェットの再現性および制御性が高いことを示

した⁶⁾。本研究では上記手法を用いて、特に湿度環境変化および初期表面形状変化に対するジェット挙動を、ジェットの形状や速度、到達高さなどを指標に評価を行い、初期の凹面形状とエネルギー散逸量についても検討を行った結果について報告する。

2. 実験方法・解析

本実験における実験の模式図を Fig. 1 に示す。実験はホウケイ酸ガラス製の試験管 (外径 30 mm, 内径 27 mm) を用いて内部の粉体挙動を詳細に観察できるようにした。試験管は金属フックを取り付けたシリコンキャップで密閉し、電磁石を用いて試験管全体を静止させる。その後、電磁石を切ることによって試験管を自由落下させ、金属床材に衝突させることで撃力を付与した。試験管の落下高さ H は 10 mm – 110 mm の範囲で制御した。試験管内には粉体を試験管底部から高さ $L = 25$ mm まで充填し、粉体の初期充填率が変わらないように、実験開始前に試験管を複数回タッピングし、粉体層の高さが常に一定になるように調整した。

本手法でジェットを生成するには粉体表面に予め凹面形状を付与することが必要であり、表面が平らな場合ではジェットが生成されない。そのため、凹面形状は半径 $r = 5$ mm, 7.5 mm, 10.5 mm, 12 mm の半球形状とし、粉体表面から凹面深さ h は $r/h = 1$ となるように調整した。

ジェット生成過程は高速度カメラ (FASTCAM SA5, Photron Co.) を用い、撮影速度 30,000fps で記録した。各実験条件について 5 回測定を行い、得られたデータの平均値および標準偏差を代表値およびエラーバーとして用いた。

本研究では粉体粒子および実験環境の湿度条件を制御した。粉体は目標湿度と水分平衡に達するように、実験開始の 24 時間前から相対湿度 70 %, 80 %, 90 % に制御した湿度制御庫内に静置した。粉体質量を設定した相対湿度条件下で定期的に測定した結果、全ての条件において粉体の質量変化 Δm が 24 時間以上にわたり $\Delta m < 0.001$ g の条件に収束したことから、24 時間の静置で十分に平衡状態に達したと判断した。温度環境は 23°C で統一した。

本研究で用いる粉体は、形状が均一で表面特性が制御しやすい球形のガラスビーズ (Fuji Manufacturing Co.) を用いた。本実験ではメーカーカタログ値を参考に粒径範囲 38～53 μm (本文中では平均値として 45 μm として表記) のガラスビーズ (密度 2.5 g/cm³) を採用した。これによって湿度変化による繊細な粒子間付着性の影響を評価した。

実験結果の解析にあたり、本研究では、試験管が金属床材に衝突した時刻 (0 ms) における粉体表面を基準位置とし、衝突後 $\Delta t = 10$ ms までに飛翔したジェット先端と基準位置との距離 L_{jet} , ならびに衝突に伴って跳ね上がった試験管底部と金属床材との距離 ΔH を計測した。これらを用いて、平均ジェット速度 $V_{\text{jet}} = (L_{\text{jet}} - \Delta H) / \Delta t$ と定義することで評価を行った。

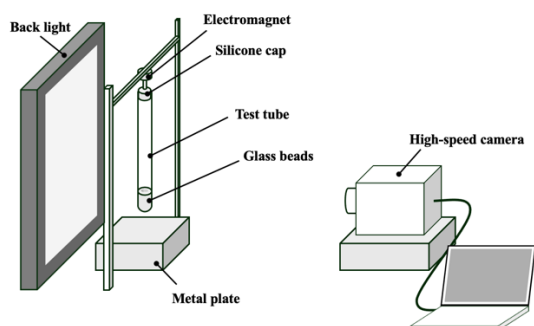


Fig. 1 Schematic diagrams of the experimental setup.

3. 実験結果

粉体ジェットの射出挙動を Fig. 2 およびジェット速度解析結果を Fig. 3(a) に示す (ここで例として、凹面形状半径は $r = 12$ mm に関して示している)。Fig. 2 (a)～(c) の各湿度変化に対してジェット速度や到達距離に依存性が見られることがわかる。これは、吸湿による付着力および凝集性の増大により、粉体の流動性が低下し、与えられたエネルギーの散逸が増大するためでもありと考えられる。さらに、湿度条件 70 % における凹面形状変化に対するジェット速度の変化を Fig. 3(b) に示す。同湿度条件であることから、粉体の流動性は同一であるが、凹面形状が変化することによって、生成されるジェット速度も変化することが明らかとなった。また、ジェット径は凹面半径が増加することで太くなり、ジェット速度と最大到達距離は次第に低下することも明らかになった。湿度増加に対しても、いずれの凹面半径形状においても、Fig. 3(a) と同様にジェット速度および最高到達距離が顕著に低下することが明らかになった。これらの結果より、初期の凹面形状がジェット生成時に粉体の表面流動において発生するエネルギー散逸量に関連していることが示唆された。

4. おわりに

本研究では、相対湿度 70–90 % の環境下において、粒子の付着・凝集性および初期凹面形状が粉体ジェットの動的挙動に及ぼす影響を調査した。その結果、いずれの凹面半径においても、相対湿度の上昇に伴いジェット速度と最高飛翔距離が低下した。これは吸湿により粒子間付着力と凝集性が増大し、粉体の流動性低下とエネルギー散逸の増大を引き起こすためと考えられる。さらに、同一撃力条件下でも凹面半径の増加によりジェット速度と最高飛翔距離が低下することが示され、崩壊・流動に関与する粉体量の増加に伴う粒子間衝突・摩擦によるエネルギー散逸の増大が示唆された。

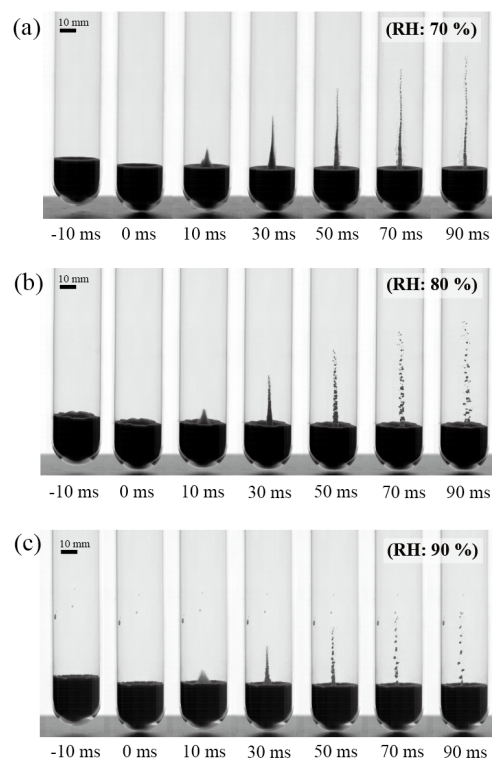


Fig. 2 Representative jetting behaviors for $r = 12$ mm under relative humidities of 70–90 %.

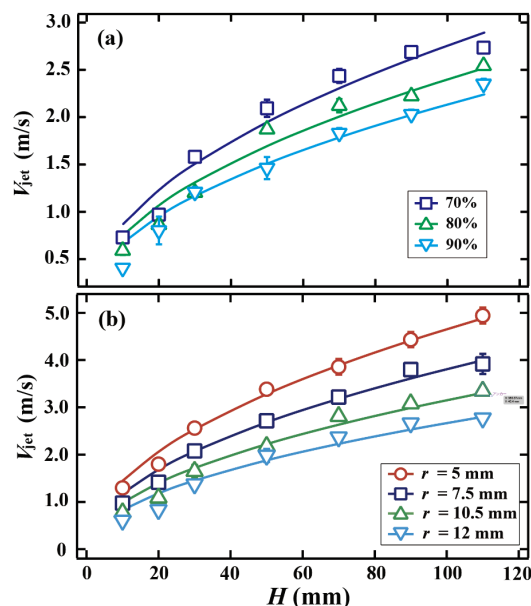


Fig. 3 Jet velocity as a function of drop height H : (a) for $r = 12$ mm at relative humidities of 70%, 80%, and 90%; (b) for different concave radii at 70% relative humidity.

参考文献

- 1) J. Duran, "Sands, Powders and Grains", Springer Science & Business Media (2012).
- 2) F. Podczec, J. M. Newton, *et al.*, *Int. J. Pharm.* **149**, 2 (1997).
- 3) C. Hare, U. Zafar, *et al.*, *Powder Technol.*, **285** (2015).
- 4) M. Paajanen, J. Katainen, *et al.*, *J. Colloid Interface Sci.* **304**, 2 (2006).
- 5) H. M. B. Al-Hashemi and O. S. B. Al-Amoudi, *Powder Technol.* **330** (2018).
- 6) K. U. Kobayashi, K. Jinbo, *et al.*, *Mater. Des.*, **260**, 114951 (2025).

位相シフトエリプソメトリ計測とスパースモデリングによる ナノフルイド超拡張濡れの物理因子抽出 Extraction of physical factors in nanofluid superspreading wetting via phase-shifting ellipsometry and sparse modeling

庄司 衛太 (東北大・工) 深見 開 (東北大・工)
Eita SHOJI, Tohoku University
Kai FUKAMI, Tohoku University
E-mail: eita.shoji@tohoku.ac.jp

Superspreading wetting of surfactant-free nanofluids defies standard theoretical explanations. This study employs a data-driven sparse modeling approach, PDE-FIND, to identify the governing equations of droplet dynamics directly from nanometer-scale spatiotemporal film-thickness profiles measured by phase-shifting ellipsometry. While the identified equation for a pure solvent recovers classical lubrication physics, the nanofluid dynamics necessitates a unique transport term. Our findings suggest that this term represents nanoparticle-induced capillary wicking, providing a mathematical signature for superspreading behavior.

1. はじめに

固体表面上の液滴の濡れ現象は、塗装、コーティング、潤滑、洗浄、相変化伝熱など、多岐にわたる工学プロセスにおいて重要な物理現象である。一般に、液滴の接触半径 R の時間変化 t は $R \propto t^{0.1}$ に従うことが知られており、これは Tanner 則¹⁾と呼ばれる。しかし、特定の液滴においては、この時間指数が 0.1 を上回り拡張する超拡張濡れ現象が報告されている。界面活性剤水溶液で初めて観測²⁾されたこの濡れ現象は、その発見から半世紀以上が経過しているが、そのメカニズム、特に気液界面の表面張力勾配 (マランゴニ効果) や液滴内の溶質ナノ構造がどのように寄与しているかについては、依然として議論が続いている³⁾。

さらに著者らは、界面活性剤を含まないナノ粒子分散系 (ナノフルイド) においても、超拡張濡れが発生することを見出した⁴⁾。ナノフルイドの特性評価の結果、この現象は界面活性剤水溶液で議論されてきた従来メカニズムだけでなく、接触線近傍液膜内での構造的分離圧、あるいは液体の非ニュートン特性でも説明できないことが示された。この未解明ダイナミクスを解明するため、本研究ではナノメートルからマイクロメートルの厚さスケールで計測された高精度な時空間膜厚プロファイルに対し、データ駆動型スパースモデリング (PDE-FIND⁵⁾) を適用した。これにより、ナノフルイドの超拡張濡れを支配する未知の支配方程式を抽出し、その物理的解釈を試みることを目的とする⁶⁾。

2. 実験および解析手法

Figure 1 に本研究の概要を示す。本アプローチでは、計測された膜厚分布に対し PDE-FIND を適用することで、支配方程式の同定とその右辺各項の寄与を分解して評価することが可能である。本稿では、同定された方程式とその係数の物理的妥当性の検証に焦点を絞り、各項の時空間分布の詳細な議論については割愛する。

試料には、純液体としてノルマルヘプタン、およびナノフルイドとしてノルマルヘプタン中にデカン酸修飾 CeO_2 ナノ粒子 (平均粒径 5.8 nm)⁷⁾ を 5 wt% 分散させた液体を用いた。当該ナノ粒子は表面が高密度の有機分子で修飾されており、界面活性剤なしで安定分散する。これにより、界面活性剤の影響を排除し、流動や濡れへのナノ粒子そのものの寄与を純粋な評価が可能となる。

Figure 2 に実験系の概略を示す。基板上に滴下された各液滴の液膜厚さの時空間分布 $h(r, t)$ は、位相シフトエリプソメータ⁸⁾を用いてナノメートルオーダーの分解能で計測した。基板には平滑 Si 基板を用いた。また、大気開放環境下では、ノルマルヘプタンは容易に蒸発し、毛管流やマランゴニ対流といった液滴内流動が生じる⁹⁾。純粋な濡れ現象を観測するために、ベース液体で飽和させた密閉セル内で計測を行うことで、液体蒸発の影響を最小限とした。

膜厚の時空間分布データ $h(r, t)$ から支配方程式を抽出するため、スパースモデリングアルゴリズムである PDE-FIND を適用した。先行研究^{4,9)}において、接触線近傍のナ

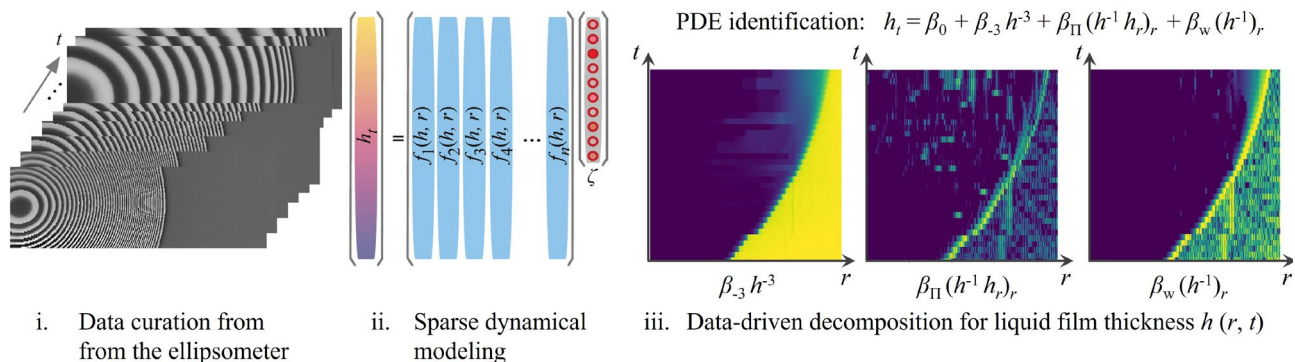


Fig. 1 Overview of the present analysis.

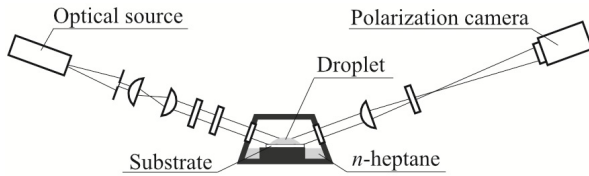


Fig. 2 Experimental setup.

ノメートル厚さ領域の挙動の重要性が示されたため、本研究では当該領域について解析を行った。具体的には、ライブラリ行列 $\Theta(h)$ には、従来の潤滑理論に基づく表面張力項 hh_{rr} や分離圧項 $(h^{-1}h_r)_r$ 、蒸発項に加え、ナノ粒子輸送の影響を想定した h の項 $(h^{-1}_r, h^{-2}_r, \dots)$ を広く含めた。結果として得られるライブラリ行列は次で表される。

$$\Theta(h) = [1, h^{-3}, (h^{-1}h_r)_r, (h^{-1})_r, (h^{-2})_r, \dots, h^{-1}h_r] \quad (1)$$

ライブラリ行列が定義されると、反復最適化を通じてライブラリ内の各項目の係数が求められる。

$$\beta^* = \operatorname{argmin}_{\beta} \|\Theta\beta - H_t\|_2 + \alpha \|\beta\|_1 \quad (2)$$

ここで $(\cdot)^*$ は最適化された変数を表す。係数の決定には、計算負荷を抑えつつスパースな解を効率的に探索可能な逐次しきい値最小二乗法¹⁰⁾を用い、候補項の中から実験データを記述する支配的な項のみを抽出した。

3. 結果および考察

抽出された支配方程式の妥当性を検証するため、比較対象となる標準的な薄膜潤滑理論の式を定義する。平面状の薄膜流体における高さの時間変化 h_t は、以下で表される。

$$h_t = -\frac{1}{\rho_l}(j_0 + \Lambda p) + \left(\frac{h^3}{3\mu}p_r\right)_r \quad (3)$$

ρ_l は液体の密度、 μ は粘度、 j_0 は一樣な蒸発流束、 p は圧力、 Λ は圧力依存の蒸発係数である。圧力 p には、分離圧 $\Pi(h) = -A/(6\pi h^3)$ と毛管圧 σh_{rr} を考える(A : Hamaker 定数、 σ : 表面張力)。ただし、本研究の解析対象であるナノメートルスケールの液膜領域では、毛管圧 σh_{rr} よりも分離圧 $\Pi(h)$ が支配的となる。

純液体およびナノフルイドのそれぞれについて、PDE-FINDにより同定された支配方程式を以下に示す。

・純液体

$$h_t = -4.29 \times 10^{-16} - 5.18 \times 10^{-31}h^{-3} - 2.68 \times 10^{-19}(h^{-1}h_r)_r \quad (4)$$

・ナノフルイド

$$h_t = -8.23 \times 10^{-16} - 1.17 \times 10^{-31}h^{-3} - 7.26 \times 10^{-19}(h^{-1}h_r)_r + 2.63 \times 10^{-19}(h^{-1})_r \quad (5)$$

純液体およびナノフルイドの両方程式において、従来の潤滑理論と整合する各項、すなわち定数蒸発項 β_0 、圧力由来の蒸発項 $\beta_3 h^{-3}$ および分離圧流束項 $\beta_{\Pi}(h^{-1}h_r)_r$ が同定された。一方、ナノフルイドにおいては、これらに加えて新しい輸送項 $\beta_w(h^{-1})_r$ が抽出された。次に、これら係数 β が物理的に妥当なオーダーであるかを検証する。

・定数蒸発項 β_0

蒸発による一樣な膜厚減少 $-j_0/\rho_l$ に対応する。 $O(10^{-16})$ m/s は実験時間 10^4 sを通して膜厚変化が 10^{-12} m程度であることを意味する。本系では蒸発抑制環境としていることから、妥当なオーダーであると考えられる。

・ $\beta_3 h^{-3}$ 項

分離圧による局所的な蒸発効果を表す。係数 β^3 に対して、Hertz-Knudsenの式¹¹⁾から見積った有効凝縮係数は $\alpha \sim 10^{-2}$ であった。これは蒸気拡散抵抗や粒子による表面被覆を考慮すると、妥当なオーダーである。

・ $\beta_{\Pi}(h^{-1}h_r)_r$ 項

分離圧勾配を駆動力とする輸送を表す。同定された係数 β_{Π} は、ノルマルヘプタンの粘度 μ およびLifshitz理論によるHamaker定数 $A \sim 10^{-21} - 10^{-20}$ Jから見積られる理論範囲 $O(10^{-19} - 10^{-18})$ m³/sと良好に一致しており、本項についても物理的妥当性が裏付けられた。

・ $\beta_w(h^{-1})_r$ 項

ナノフルイドにおいてのみ抽出された本項は、粒子存在下でのみ発現する特有の輸送メカニズムを示唆する。一つの物理的解釈として、接触線近傍の粒子堆積層によるウィック作用を想定すると、ダルシーの法則から理論吸引量 $O(10^{-19} - 10^{-16})$ m³/sが見積られる。同定された係数は同オーダーであり、粒子誘起の構造的効果が超拡張濡れの駆動源である可能性を示す結果となった。

4. おわりに

本研究では、時空間膜厚分布の高精度データとデータ駆動型アプローチを組み合わせることで、ナノフルイドの超拡張濡れを記述する支配方程式の導出を試みた。結果、純溶媒では従来の潤滑理論と整合する項が同定され、手法の物理的妥当性が確認された。さらにナノフルイドにおいては、超拡張を駆動する要因として、新たな輸送項が特定された。これら成果は、複雑流体の未知の濡れダイナミクス解明における本アプローチの有効性を実証するものである。

参考文献

1. L. H. Tanner: The spreading of silicone oil drops on horizontal surfaces. J. Phys. D: Appl. Phys., 12, pp.1473, 1979.
2. E. G. Schwarz, W. G. Reid: Surface-active agents-their behavior and industrial use. Ind. Eng. Chem., 56, pp.26-31, 1964.
3. J. Venzmer: Superspreading – Has the mystery been unraveled? Adv. Colloid Interface Sci., 288, pp.102343-102343, 2021.
4. E. Shoji, A. Hoshino, T. Biwa, M. Kubo, T. Tsukada, T. Tomai, T. Adschiri: Superspreading wetting of nanofluid droplet laden with highly dispersed nanoparticles. Langmuir, 40, pp.26509-26516, 2024.
5. S. H. Rudy, S. L. Brunton, J. L. Proctor, J. N. Kutz: Data-driven discovery of partial differential equations. Science Advances, 3, pp.e1602614, 2017.
6. K. Fukami, E. Shoji: Data-driven sparse modeling and decomposition for superspreading-wetting dynamics of a droplet. arXiv preprint arXiv:2601.01776, 2026.
7. A. Yoko, Y. Omura, K. Ninomiya, M. Nishibori, T. Fujita, H. Kasai, E. Nishibori, N. Chiba, G. Seong, T. Tomai, T. Adschiri: Fusion Growth and Extraordinary Distortion of Ultrasmall Metal Oxide Nanoparticles. Journal of the American Chemical Society, 146, pp.16324-16331, 2024.
8. E. Shoji, A. Komiya, J. Okajima, M. Kubo, T. Tsukada: Three-step phase-shifting imaging ellipsometry to measure nanofilm thickness profiles. Opt. Lasers Eng., 112, pp.145-150, 2019.
9. E. Shoji, T. Saito, T. Biwa, M. Kubo, T. Tsukada, T. Tomai, T. Adschiri: Transitions in intra-droplet flow and wetting governing nanoparticle deposition patterns in inkjet-printed nanofluids. J. Colloid Interface Sci., 699, pp.138246, 2025.
10. S. L. Brunton, J. L. Proctor, J. N. Kutz: Discovering governing equations from data by sparse identification of nonlinear dynamical systems. Proceedings of the National Academy of Sciences, 113, pp.3932-3937, 2016.
11. A. Oron, S. H. Davis, S. G. Bankoff: Long-scale evolution of thin liquid films. Rev. Mod. Phys., 69, pp.931-980, 1997.