

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：32660

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B)）

研究期間：2020～2023

課題番号：20KK0085

研究課題名（和文）表面上不純物粒子を対象とした動的濡れによる自発的『メニスカス・クリーニング』機構

研究課題名（英文）Surface cleaning through dynamic meniscus wetting of dirt particles

研究代表者

上野 一郎 (Ueno, Ichiro)

東京理科大学・創域理工学部機械航空宇宙工学科・教授

研究者番号：40318209

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,400,000円

研究成果の概要（和文）：特に円柱・球・楕円柱を対象として、実験および数値解析により予備的な解析を行った。円柱および球においては、数値解析により微小構造物に作用する力場の定量化に成功し、メニスカス・クリーニング機構における形状の影響について、基本となる指針を示した。楕円柱については、迎角によってメニスカス形状が異なることを実験・数値解析により実証し、楕円柱近傍の圧力場変化に関する予備解析を行った。共同研究者らと遠隔での研究打合せを定期的の実施し、英文学術論文執筆に向けてもオンラインでの共同執筆環境を用いて分担作業をスムーズに実現した。一方で、COVID-19禍により、現地滞在での共同実験の実施に至らなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

微小構造物を有する基板上を濡れ拡がる液滴の挙動に関する研究は、特に洗浄機構への応用を目指して行われている。マイクロ流体力学の領域では、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がある。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。本研究成果により、メニスカス形成時の微小構造物に作用する力場の定量化を、形状・姿勢・濡れ性の影響を考慮して実現した。

研究成果の概要（英文）：We conducted series of experiments and numerical analysis specifically targeting cylinders, spheres, and ellipsoids as the microstructures with respect to "meniscus cleaning" mechanisms. In the case of the cylinders and the spheres, we successfully quantified the force field acting on microstructures in the process of meniscus formation around the microstructures through numerical analysis, and provided fundamental guidelines regarding the influence of shape in meniscus cleaning mechanisms. For the ellipsoids, we experimentally and numerically demonstrated that the meniscus shape varies with the angle of attack, and conducted preliminary analysis on the pressure field near the ellipsoids. We regularly held remote meetings with international collaborators and smoothly facilitated collaborative work using online environments for writing manuscripts. It must be noted that, due to the COVID-19 pandemic, we were unable to conduct joint experiments on-site.

研究分野：界面熱流体力学

キーワード：界面熱流体力学 メニスカス 表面張力 動的濡れ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

微小構造物を有する基板上を濡れ広がる液滴の挙動に関する研究は、特に洗浄機構への応用を目指して精力的に進められている。生物が有する表面自浄機能にならい、超撥水面を人工的に作成し付着防止機能の実現を目指した研究が実施されている。実際に、これらの超撥水面での液滴と微小構造物との相互作用による除去過程の観察がなされている。また、これらの研究から、液滴前縁部との相互作用に伴う基板上に静置した微小構造物の自己組織化や気泡周りの保護壁形成などの研究にも発展している。マイクロ流体力学の領域では、洗浄を実現するための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あるいは物体を配置した流路や、電位差あるいは音響場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。たとえばコンタクトレンズ表面上や管内壁に付着したバクテリアや油性分などの洗浄に対してその応用が検討はされているが、微小構造物周りの濡れの動力学を考慮した界面流体力学的な理解は進んでいない。バイオ粒子の濡れ性や基板への付着力といった特性の直接的評価は、これまで炭化水素吸着法(MATH)や疎水クロマトグラフィー(HIC)、接触角法などで行われているが、高精度かつ再現性の高い計測がきわめて困難であるのが現状である。そのため、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。

### 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、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微細物除去機構、すなわち本研究で提案する『メニスカス・クリーニング』機構の解明と、汚染源となるバイオ粒子等の高効率除去技術への応用を大目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、『メニスカス・クリーニング』機構の提案を大目的とし、その実現に向けて以下の4目標を掲げ、(I) モデル実験(日本)、バイオ実験(フランス)、(II) 理論(フランス)、(III) 数値解析(日本・フランス)の体制により取り組んできた。マクロからミクロスケールにわたって多重スケールで展開する『動的な濡れ』力学に焦点を当て、液滴前縁部との相互作用による基板上微小構造物の除去機構の解明を目指した。

目標 1: 比較的単純な構造を有する基板上構造物に液滴前縁部が接触した際のメニスカス形成と、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力場の解明

目標 2: 目標 1 における、微小構造物の形状・姿勢・濡れ性の影響に関する定量化

目標 3: 複雑な形状・物性を有するバイオ粒子を用いた高精度計測による現象の定量化、模擬実験・解析モデルへのフィードバック。

目標 4: バイオ粒子除去を模擬しうる解析モデル構築

### 4. 研究成果

2020年度では、COVID-19感染拡大における入構禁止措置等の影響により、主に数値解析による現象解析および実験データに対する解析コード開発を重点的に行った。数値解析による研究では、微小構造物の高さをパラメータとして、基板上を濡れ広がる液膜前縁部が接触した際に自発的に形成するメニスカス内部流動場に関する解析を重点的に行った。また、微小構造物に働く力場の解析コードの開発を行い、剪断場、圧力場、さらに構造物周りを上昇する液膜前縁部に働く表面張力の寄与を明らかにした。これらのデータをベースとして、海外共同研究者グループと定期的に遠隔での打合せを集中的に実施し、当該内容に関する投稿論文原稿を準備した。実験データ解析においては、球状粒子を対象とて、平滑基板上を濡れ広がる液膜前縁部との相互作用によって液膜側に引き込まれる粒子挙動を高精度に追跡することを可能とした。

2021年度では、平滑基板上を濡れ広がる液滴前縁部が、単一球形あるいは柱状構造物と衝突した後に発現する微小構造物の運動、液滴前縁部およびその先に広がる先行薄膜領域の変化をレーザ干渉計・Brewster角顕微鏡を用いて定量化した。実験で得られた知見を、研究分担者および海外共同研究者と共にメニスカス内の圧力場・速度場、さらに微小構造物に働く力場を定量化した。また、主に柱状構造物を対象とし、形状や基板上での姿勢、濡れ性をパラメータとして、目標1と同様の計測により定量化を行った。申請時の計画では、モデル実験および数値解析で得られる結果をもとに当該年度後半に渡仏を予定していたが、COVID-19の世界的感染拡大の状況に鑑み、渡仏を延期した上で、目標3で計画していた内容の前倒し実施を計画した。

2022年度では、微小構造物として異なる濡れ性や高さを有する柱状構造物、および、楕円柱構造物を対象とし、実験・数値解析を行った。特に実験では、構造物周りのメニスカス形状および基板上コンタクトライン位置変化を定量化した。また、さらなる高精度計算を実現する体制を

構築する。共同研究先においても研究実施が断続的に中断せざるを得ない状況に陥っていたため、目標の1つである『複雑な形状・物性を有するバイオ粒子を用いた高精度計測による現象の定量化 模擬実験・解析モデルへのフィードバック』に替えて楕円柱状微小構造物を対象として、実験および数値解析を行い、共同研究者らとのその結果を共有した。定期的に遠隔での打ち合わせを重ね、最新の知見を交換した。

2023年度では、目標の1つである『比較的単純な構造を有する基板上構造物に液滴前縁部が接触した際のメニスカス形成と、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力場の解明』に対して、特に異なる高さを有する円柱状微小構造物を対象とし、数値解析により定量化を実現した。微小構造物の高さによって液膜前縁部の局所的加速挙動が顕著な影響を受けること、微小構造物が十分な高さを有していない場合にはメニスカス内部に馬蹄渦が形成しないことなどを明らかにした。なお、メニスカス形成にかかる形状を実験的に高精度計測し計算の妥当性を示した。また、別の目標の1つである『目標1における微小構造物の形状・姿勢・濡れ性の影響に関する定量化』に対しては、特に球状および柱状微小構造物を対象とし、構造物に作用する力場を濡れ性をパラメータとして数値解析により定量化を行った。微小構造物周りにおけるメニスカス形成初期において、構造が有する曲率の影響により液膜濡れ上がり挙動に顕著な差が生じることを明らかにした。また、構造物濡れ性の影響が、形状によってその発現が異なることを明らかにした。以上の内容を英文学術論文として投稿準備を進めている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名<br>K. Ozawa, H. Nakamura, K. Shimamura, G.F. Dietze, H.N. Yoshikawa, F. Zoueshtiagh, K. Kurose, L. Mu, I. Ueno | 4. 巻<br>Volume 642    |
| 2. 論文標題<br>Capillary-driven horseshoe vortex forming around a micro-pillar  | 5. 発行年<br>2023年       |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Colloid and Interface Science  | 6. 最初と最後の頁<br>227-234 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1016/j.jcis.2023.03.039   | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する          |

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Anna Ipatova, Farzam Zoueshtiagh, Alexis Duchesne, Pascal Mariot, Corenthin Leroy, Ichiro Ueno, Georg F. Dietze, Harunori Yoshikawa |
| 2. 発表標題<br>Adhesion effect of a trapped air bubble under a micro-particle  |
| 3. 学会等名<br>10th Conf. of the International Marangoni Association   |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Kogen Ozawa, Yuta Takase, Kizuku Kurose, Harunori N, Yoshikawa, Georg F, Dietze, Farzam Zoueshtiagh, Lizhong Mu, and Ichiro Ueno |
| 2. 発表標題<br>Local acceleration of liquid film spreading on smooth substrate induced by interaction with a single short pillar                |
| 3. 学会等名<br>Droplets 2021 (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2021年   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                     | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                      | 備考 |
|-------|---|--|----|
| 研究分担者 | 黒瀬 築<br><br>(Kurose Kizuku)<br><br>(30868740) | 東京理科大学・理工学部機械工学科・助教<br><br><br><br>(32660) |    |

6. 研究組織（つづき）

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                           | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                       | 備考 |
|-------|---|---|----|
| 研究分担者 | 塚原 隆裕<br><br>(Tsukahara Takahiro)<br><br>(60516186) | 東京理科大学・理工学部機械工学科・准教授<br><br><br><br>(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 |