

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：11101

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K21926

研究課題名（和文）液滴自己推進を利用したパッシブ冷却の性能評価

研究課題名（英文）Evaluation of passive cooling driven by self-propelled drops

研究代表者

城田 農（Shirota, Minori）

弘前大学・理工学研究科・教授

研究者番号：40423537

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：撥水領域と親水領域を併せ持つ複合濡れ性ラチェット上の液滴推進特性を実験的に調べ、液滴径が小さいほど加速度が増加することを示した。また、ラチェット温度150℃で加速度および登坂可能傾斜角度が最大となることを明らかにした。最大登坂可能角度を予測するモデル解析結果と実験結果が概ね一致したことから、核沸騰による推進力がピンング力と重力に勝ることで液滴が登坂することを示した。核沸騰による液滴推進では加熱面が非対称な濡れ性を持つことが重要であることがわかった。ハイブリッド濡れ性ラチェットにおける液滴推進力は、親水領域に形成される気泡の膨張・収縮運動が誘起する液滴内部流動が作りだすことを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した複合濡れ性を加熱面へ付与することで、加熱面が飽和温度以上になると液滴を自動的に推進させることが可能となる。推進する液滴の最新登坂角度は75°であり、ほぼ垂直な壁面であっても液滴を輸送可能である。また、液滴は沸騰を伴いながら推進するため、液滴が進行する加熱面から短時間で熱を奪うことが可能となる。これらの特徴は、新しいパッシブ冷却技術の開発を導く。このパッシブ冷却技術は、センサーやアクチュエーターを必要としないため、電源を喪失したような緊急時であっても、加熱による機器の暴走や過剰な発熱を抑制することができ、工学的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：We conducted experimental investigations on the drop propulsion characteristics on a composite wettability ratchet that combines superhydrophobic and superhydrophilic regions. The results showed that as the drop size decreases, the acceleration increases. Additionally, we found that the maximum acceleration and the maximum uphill angle occur at a ratchet temperature of 150℃. The model predictions and experimental findings were generally consistent, revealing that drops can climb due to the propulsive force generated by nucleate boiling, surpassing the pinning force and gravity. We also discovered the importance of an asymmetric wetting property on the heating surface for drop propulsion through nucleate boiling. In the hybrid wettability ratchet, we revealed that the propulsive force is generated by the internal flow induced by the expansion and contraction of bubbles formed in the superhydrophilic region.

研究分野：流体工学

キーワード：液滴 沸騰 自己推進 冷却 登坂

1. 研究開始当初の背景

本研究の最終的なゴールは、対象とする固体がある温度以上に加熱されると、冷却液体である水が液滴として貯水チャンバーから吸い上げられ、固体表面上を走り、水滴の顕熱と潜熱によって高温部から熱を奪うという、新しいパッシブ冷却技術を開発することである。パッシブ冷却とは、温度センサやポンプ等の外部装置、さらには電力を一切必要としない冷却技術を指す。

この技術の鍵は、高温固体表面上を決められた方向へ液滴が推進する「ライデンフロスト液滴自己推進」(Linke et al., Phys. Rev. Lett., 2006) である。ライデンフロスト液滴は固体表面が水平である場合、自身の蒸気の上に浮遊した状態でその場に留まるだけであるが、固体表面が何らかの非対称性を持つ場合、液滴から生成される蒸気の流れも前後非対称となる。その結果、蒸気が流れやすい方向へ、蒸気からより大きなせん断力が働き、それに引きずられて液滴が一方向に動いて行く、というわけである。加熱固体として当該分野でよく用いられるのは、前後非対称な鋸歯状の凹凸をつけた、いわゆるラチェット形状である。

液滴が蒸気によってホバリングすることによって、固体との摩擦や熱輸送、液体への不純物の混入や固体表面の汚染を抑制することができるため、液体試料の輸送技術としては非常に望ましい。そのため、これまでの研究では、高温状態あるいは撥水ラチェット上の液滴移動メカニズムについて重点的に研究されてきた。

これに対して私は、本手法を冷却技術へ応用できるのではないかと考え、低温度領域(沸点より数十度高い程度の温度)での液滴挙動を積極的に調べてきた。低温度においては、液滴の一部がラチェットと直接触れるため、液滴はむしろ激しく沸騰する。その結果、顕熱および潜熱輸送が促進され、かつ液滴も高速で広範囲に移動するため、冷却用途にはうってつけである。

そこで本研究では、さらに高い液滴推進力と冷却能力の両立を目的として、ハイブリッド濡れ性ラチェットを開発した。このラチェットは、頭頂部のみ親水性で、それ以外は撥水性となっている。そのため、液滴との接触による推進抵抗を極力抑えることができ、かつ、ラチェット頭頂部にて局所的に激しい核沸騰領域を発生させ、固体からの熱輸送を促進することができる。液滴推進速度が従来の10倍程度と極めて速いことが特徴であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ハイブリッド濡れ性ラチェット上の液滴自己推進によるパッシブ冷却の伝熱特性と液滴推進・蒸発挙動を計測することで、本手法の冷却性能を定量的に検証し、また将来的に各種機器の冷却技術へ適用した際の妥当性について検討することである。より具体的には、液滴推進に適したラチェット形状・ラチェット表面濡れ性を見出すこと、さらに液滴変形や液滴内の液流動や温度分布を計測することで、ハイブリッド濡れ性ラチェット上を液滴が推進するメカニズムを解明することである。

3. 研究の方法

まず予備実験として、より高い液滴推進性能を得るためにラチェットに求められる条件を実験的に調べた。ここで、液滴推進性能の評価指標として、液滴の予熱時間、最大加速度、終端速度、登坂限界角度を用いた。また、ラチェットの形状やラチェットへ濡れ性変化を付与する方法、付与された濡れ性の耐久性について実験的に調べた。ラチェット形状としては、当該分野で一般的に用いられる緩斜面 10° - 急斜面 80° のものに加えて、緩斜面 20° - 急斜面 70° 、緩斜面 30° - 急斜面 60° 、緩斜面 40° - 急斜面 50° そして緩斜面 45° - 急斜面 45° の左右対称形状についても調べた。濡れ性を付与する方法として、撥水コーティング剤の変化、親水領域の大きさ、親水性の付与の方法(撥水剤を剥離し硬水を高温で付加する方法と、マスキングをした状態でプラズマ処理する方法)、および付与した濡れ性の耐久性について調べた。

本実験では、各種ラチェットおよび液滴条件における、液滴推進特性を高速度カメラおよびIRカメラを用いて計測した。推進速度、加速度、登坂特性を調べる実験では、ラチェット全体を撮影領域として、撮影速度を1,000 fps程度とした。また、液滴の沸騰特性を観察するための実験では、撮影速度を10,000~100,000 fpsとした。沸騰特性を計測する実験では、液滴内部の気泡運動やそれに伴う流れ場を計測することを目的として、奥行き方向の幅を狭めた薄板ラチェットを作製した。これを、スライドガラスで両側から挟むことで、液滴内部流動のPIV計測を可能とした。

4. 研究成果

水平に設置したハイブリッド濡れ性ラチェット上の液滴推進最大加速度を画像処理から算出した結果を図1に示す。左のグラフに示す液滴径の影響に着目すると、液滴径が小さいほど基本的には加速度が増加する傾向にあることがわかる。次に同じデータを用いてラチェット温度を横軸に取って整理した右のグラフを見ると、どの液滴径の場合もラチェット温度が 150°C の条件において加速度が最大となることがわかる。最大加速度の大きさは、 8.5 m/s^2 もあり、ほぼ重力加速度と同じ大きさであった。

次にラチェット板を傾斜させ、液滴の登坂特性を調べた結果を図2に示す。種々の液滴径を用

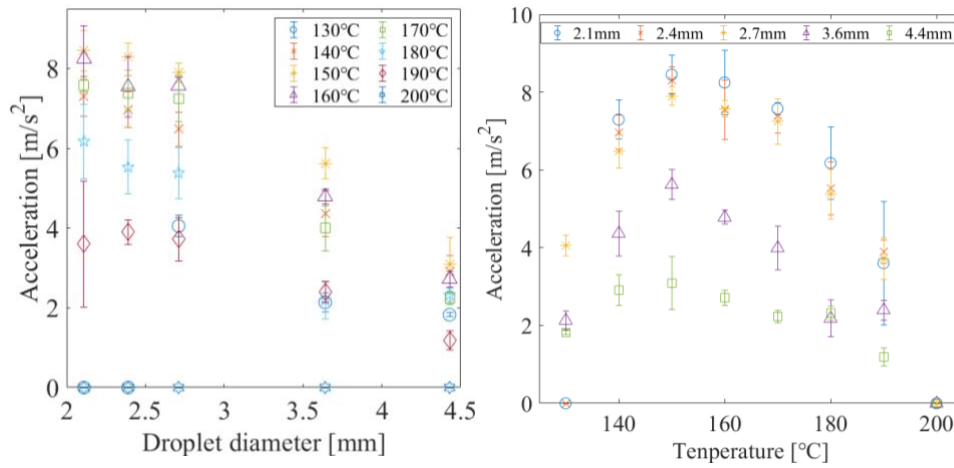


図1 ハイブリッド濡れ性ラチェット上の液滴推進最大加速度

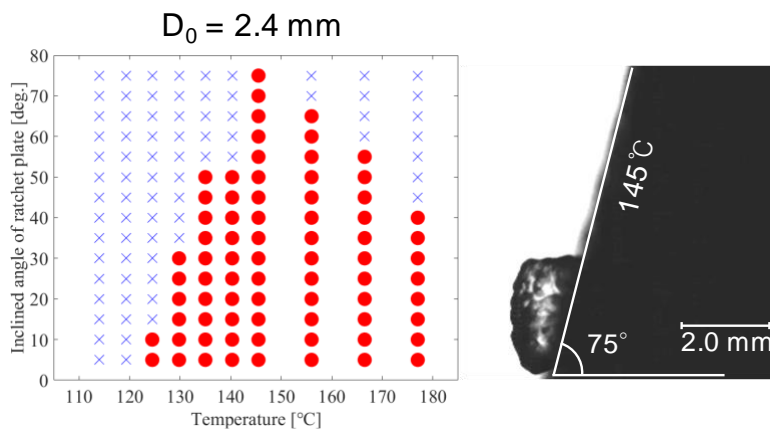


図2 液滴登坂性能

いて計測を行なったが、ここでは代表として液滴径（体積等価直径）が 2.4 mm の場合を示す。図2において、●のプロットは登坂成功を表し、×は滑落するあるいは留まる場合を表す。図2からわかるように、水平設置において最大加速度となるラチェット温度 150 °C 付近において、登坂可能角度も最大となった。本実験条件では、最大登坂角度は 75° であった。

以上の結果を踏まえて、単純な質点モデルによる説明を試みる。運動方程式を、

$$ma = F_{prop} + F_{pin} = G(T)$$

とおく。ここで、 F_{prop} は沸騰による液滴推進力、 F_{pin} は表面張力によるピンギング力である。ラチェットを傾斜させたときと水平に置いたときでこれらの合力 G の大きさは変化しないと仮定した。そして、合力は基板温度のみの関数 $G(T)$ であると仮定した。 $G(T)$ の大きさは、水平においた実験の液滴質量と加速度の積と等しいため、実験的に計測可能である。

水平設置したラチェット上の液滴運動から求めた $G(T)$ から、ラチェットを θ° 傾斜させた場合に働く重力の大きさを引いた値を、ラチェット温度に対して整理した結果を図3に示す。図3のシンボルはラチェット板の傾斜角度の違いを表す。上述の仮定が正しいとすれば、図3の縦軸が正の領域では推進力が勝るため液滴は登坂し、負の領域では重力が勝り滑落することになる。そのため、ちょうど 0 となる傾斜角度が、その温度における液滴の最大登坂角度となる。

以上のモデル解析から求められる最大登坂角度の予測値と、実験的に得られた最大登坂角を比較した結果を図4に示す。両者は概ね等しいことから、上述の仮定は妥当であると考えられる。

次に、液滴推進力 F_{prop} の発生メカニズムについて考察する。推進時の液滴変形を詳細に観察すると、液滴はまず頭部が前進することで全体が伸長する。その後、尾部のピンギングが解除されることで、尾部が進行方向へ移動する。このような伸長・収縮運動を繰り返すことで、液滴は推進する。また、頭部は比較的連続的に進行方向へ進んでいるのに対して、尾部はちょうどラチェットのピッチに等しい 1.5 mm おきのステップ変化を繰り返す。以上の計測結果から、推進力は頭部の伸長に起因することがわかる。

このような頭部へ向かう流れは、どのようにして作られるのか。この問いに答えるために、薄板ラチェットを用いて液滴底部の沸騰気泡運動および液滴内部流動を可視化した。その結果、ラチェットの親水領域に発生した蒸気気泡が膨張・収縮する際に、激しく液が流動することが観察された。ここで、親水領域はラチェット緩斜面頂上近傍にあるため、気泡は緩斜面上に生成され崩壊し、気泡運動1周期の正味として一方向の流れが生じる。これが、頭部へ向かう流れの駆動源であると考えられる。なお、PIV 計測の結果、沸騰気泡近傍に生じる流れの最大速度は 0.5 m/s 程度であった。

以上、得られた結論を以下にまとめる。(1) ハイブリッド濡れ性ラチェットにおいては推進力がピンング力と重力に勝ることで液滴は登坂する。(2) 加熱によって生じる対流が頭部を連続的に伸長させ、尾部はラチェットとのピンングが解除されることで間欠的に収縮する。(3) 液滴頭部を伸長させる対流は、加熱部の親水領域に形成される沸騰気泡の膨張・収縮運動である。

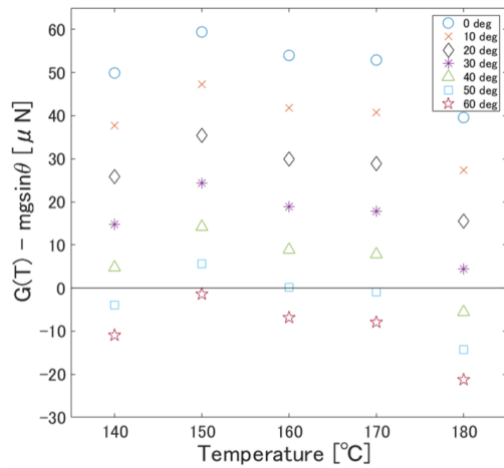


図3 液滴に働く合力の推定

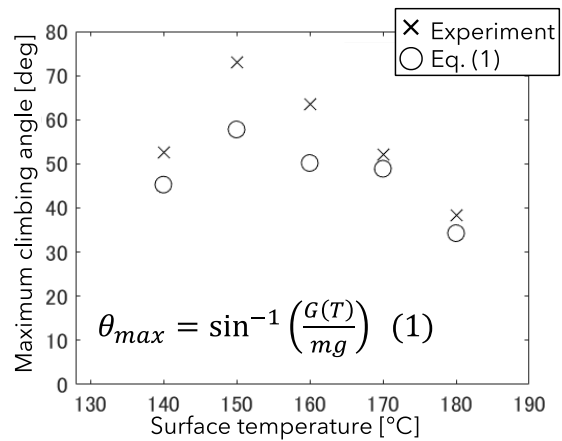


図4 液滴最大登坂角度

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 白濱 智礼, 成田 海斗, 岡部 孝裕, 城田 農	4. 巻 36
2. 論文標題 加熱面の濡れ性が液滴推進に及ぼす影響の定量評価	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 混相流	6. 最初と最後の頁 212-219
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3811/jjmf.2022.016	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 -
1. 著者名 白濱 智礼, 成田 海斗, 岡部 孝裕, 城田 農	4. 巻 -
2. 論文標題 加熱面の濡れ性が液滴推進に及ぼす影響の定量評価	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 混相流シンポジウム2021講演予稿集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Y. Akiyama, T. Okabe, M. Shirota, M. Daikoku, Y. Sato, Y. Matsushita, H. Aoki, J. Fukuno	4. 巻 -
2. 論文標題 Quantitative Evaluation of Contact Line Instability of Impacting Drops	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of Seventeenth International Conference on Flow Dynamics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Y. Fuchisawa, T. Okawa, M. Shirota	4. 巻 -
2. 論文標題 Spreading and Wetting Diameters of Impacting Drops on Flat Surfaces	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of Seventeenth International Conference on Flow Dynamics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 T. Okabe, Y. Akiyama, J. Okajima, M. Shirota	4. 巻 -
2. 論文標題 Study of Hydrothermal Behaviors of Impinging Droplets on a Heated Wall	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of Seventeenth International Conference on Flow Dynamics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Y. Konno, K. Narita, M. Kato, T. Okabe, M. Shirota	4. 巻 -
2. 論文標題 Behavior of Self-propelled Drops on Hot Surfaces with Asymmetric Wettability in Low Temperature Regime.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the Sixteenth International Conference on Flow Dynamics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 成田海斗, 今野嘉友, 加藤将起, 岡部孝裕, 城田農	4. 巻 -
2. 論文標題 加熱面との接触を伴う液滴自己推進	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 混相流シンポジウム2019講演予稿集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Tomomichi Shirahama, Takahiro Okabe, Minori Shirota	4. 巻 -
2. 論文標題 Hill Climbing Characteristics of Self-propelling Drops on Heated Ratchets with Hybrid Wettability Surfaces.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 19th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2022)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Minori Shirota, Tomomichi Shirahama, Ryota Ato, Takahiro Okabe	4. 巻 -
2. 論文標題 Climbing mechanism of self-propelled drops on a ratchet with hybrid wettability in the low-temperature regime	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 11th International Conference on Multiphase Flow (ICMF2023)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 9件)

1. 発表者名 白濱 智礼, 成田 海斗, 岡部 孝裕, 城田 農
2. 発表標題 加熱面の濡れ性が液滴推進に及ぼす影響の定量評価
3. 学会等名 混相流シンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Shirota, M. Kato
2. 発表標題 Sub-cooled flow boiling in impacting drops on hot surfaces
3. 学会等名 73rd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Akiyama, T. Okabe, M. Shirota
2. 発表標題 Instabilities of spreading and wetting fronts of impacting drops
3. 学会等名 73rd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Fuchisawa, T. Okawa, M. Shirota
2. 発表標題 Spreading and Wetting Diameters of Impacting Drops on Flat Surfaces
3. 学会等名 Seventeenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Akiyama, T. Okabe, M. Shirota, M. Daikoku, Y. Sato, Y. Matsushita, H. Aoki, J. Fukuno
2. 発表標題 Quantitative Evaluation of Contact Line Instability of Impacting Drops
3. 学会等名 Seventeenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Okabe, Y. Akiyama, J. Okajima, M. Shirota
2. 発表標題 Study of Hydrothermal Behaviors of Impinging Droplets on a Heated Wall
3. 学会等名 Seventeenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Shirota
2. 発表標題 Measurement and modeling of subcooled boiling in an impacting drop
3. 学会等名 The 6th Symposium on Theoretical and Applied Mechanics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 城田農
2. 発表標題 衝突液滴内の沸騰現象の高速度撮影とモデリング
3. 学会等名 第8.5 回相変化界面研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Konno, K. Narita, M. Kato, T. Okabe, M. Shirota
2. 発表標題 Behavior of Self-propelled Drops on Hot Surfaces with Asymmetric Wettability in Low Temperature Regime.
3. 学会等名 Sixteenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 成田海斗, 今野嘉友, 加藤将起, 岡部孝裕, 城田農
2. 発表標題 加熱面との接触を伴う液滴自己推進
3. 学会等名 混相流シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomomichi Shirahama, Takahiro Okabe, Minori Shirota
2. 発表標題 Hill Climbing Characteristics of Self-propelling Drops on Heated Ratchets with Hybrid Wettability Surfaces.
3. 学会等名 The 19th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Minori Shirota, Tomomichi Shirahama, Ryota Ato, Takahiro Okabe
2. 発表標題 Climbing mechanism of self-propelled drops on a ratchet with hybrid wettability in the low-temperature regime
3. 学会等名 The 11th International Conference on Multiphase Flow (ICMF2023) (国際学会)
4. 発表年 2023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

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