

卒業論文要旨

ライデンフロスト状液滴の動特性と表面構造に関する研究

システム工学群

材料革新サステイナブルテクノロジー研究室 1230035 岡田 裕明

1. 背景

現在、世界で深刻な社会問題の一つとして「気候変動」が挙げられる。近年平均気温が上昇する地球温暖化に加え、世界各地で干ばつや熱波、豪雨などの自然災害が多発するようになった。各国では再生可能エネルギーの獲得に向けた技術開発が行われており、日本でも環境に配慮したエネルギーの獲得および再利用が推進されている。しかし国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合技術開発センターの産業分野の排熱実態調査報告書⁽¹⁾によると、年間 743 PJ もの排熱があると推定されており、その 75%(565 PJ)は 200°C 以下で、回生する術無く排出されている状況である。そこで本研究では排熱を利用した動力源開発のためライデンフロスト現象に着目し、排熱の有効活用を目指している。

2. ライデンフロスト現象

ライデンフロスト現象とは、高温に熱した固体表面上に液滴を導入すると固体表面と液滴の間に蒸気膜が形成され、その蒸気膜によって固体表面から液滴への熱伝達が阻害されることで蒸発時間が大幅に増加する現象もしくは効果のことである。図 1 にライデンフロスト効果の模式図を示す。この現象は 1756 年に Johann Gottlob Leidenfrost⁽²⁾が報告したため、この人の名前をとってライデンフロスト現象と呼ばれている。

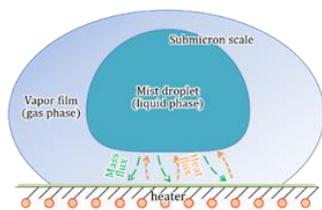


Fig.1 Schematic image of droplet of Leidenfrost state on the substrate at high temperature

ライデンフロスト効果の特性の一つとして表面を鋸歯面状に加工することで、液滴を一定方向に自走させることが可能になる。これは基板と液滴の二物体間に発生した蒸気膜が関係していると考えられるが、厳密な自走のメカニズムは未だに解明されていない。

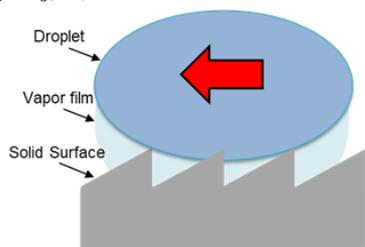


Fig.2 The behavior of a water droplet on the sawtooth substrate at the high temperature

3. 目的

高温鋸歯面上を液滴が自走するメカニズムとして、ライデンフロスト現象が十分に発生しているか否かで、自走に関わる要因が異なると考えられている。低温度帯では蒸気膜が安定しておらず、基板に接触した際の反力を推進力としており、高温度帯になるほど基板形状に沿った蒸気流れに従い液滴が移動するというのが現段階での仮説である。低温度帯における基板との接触によって生じる推進力は液滴の蒸発や分裂を引き起こし、連続利用や効率の面から熱力学エネルギー変換損失が大きく、動力源として活用するには不向きであると考えられる。そこで本研究では蒸気流れを推進力とする高温度域でのライデンフロスト状液滴の利用に注目し、基板表面構造の違いにより液滴挙動がどのように変化するのか、実験と流体シミュレーション両側面から新たな動力源開発の可能性について模索することとした。

4. 液滴移動速度算出プログラムの改良

液滴挙動の変化を観測するにあたり、先行研究⁽³⁾からプログラムによる液滴移動距離の算出に成功しているが、移動速度を算出するためには Excel 内でデータの処理をすることが必要となり、その行程に多くの時間を費やされていた。そこで本研究ではプログラム内で移動速度を算出できるように改良を行った。また移動速度計算方法についても後退差分と中央差分を検討し、精度向上にも努めた。参考までに従来の手法では 15 フレームごとに移動速度の算出が行われていたが、本研究では 15 フレームごとのひとつ前と後の 2 フレームを基準に中央差分を用いて算出している。今回、C1 形状の観測データについては過去に撮影された動画を利用し再解析を行い、B1 形状に関しては再実験を実施し解析を行った。

5. プログラム処理による液滴挙動の観測

5.1 実験方法・条件

ヒーターを設置しデジタル水平器を用いて水平な状態を確認した後、所定の温度まで加熱した。液滴は基板に対して水平に設置した電子ピペットを用いて、所定の液量を滴下した。また、液滴挙動はデジタルカメラを用いて、8 倍スローモーションで撮影し観測した。撮影した動画は前述のプログラムで処理し、液滴移動速度を算出した。観測系の概略を図 3、実験条件を表 1 に示す。

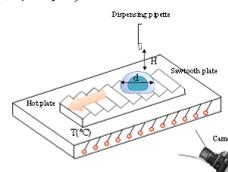


Fig.3 Schematic of experimental equipment observation system of droplet behavior on the heated surface

Table.1 Experimental conditions

Liquid	DI.water
Liquid volume [μL]	33.6
Droplet diameter [mm]	4
Substrate surface temperature [°C]	225~400
Measurement temperature interval [°C]	25
Drip distance [mm]	7
Number of measurements [Times]	5

使用した基板の形状を図4に示す。本実験で採用した鋸歯形状は直角部分が存在し、直角部分が上部および下部にくるB形状とC形状を使用することとした。各基板のパラメータを表2に示す。

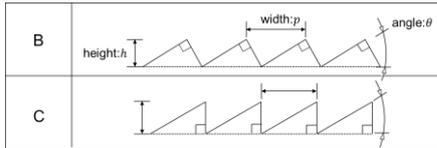


Fig.4 Saw teeth surface shape

Table.2 Saw teeth surface parameters

	θ :angle(°)	p:width(mm)	h:height(mm)
B1	20	1.0	0.364
C1	20	0.5	0.182

5.2 実験結果・考察

B1基板とC1基板における液滴挙動について解析した。ここでは中央差分を用いて移動速度を算出するよう変更したプログラムを用いた結果を図5に示す。速度の変化が大きいC1基板での225~275°Cについて後退差分と中央差分で解析した結果の比較を図6に示す。今回の改良により、プログラムを利用し液滴の移動速度を算出することに成功した。

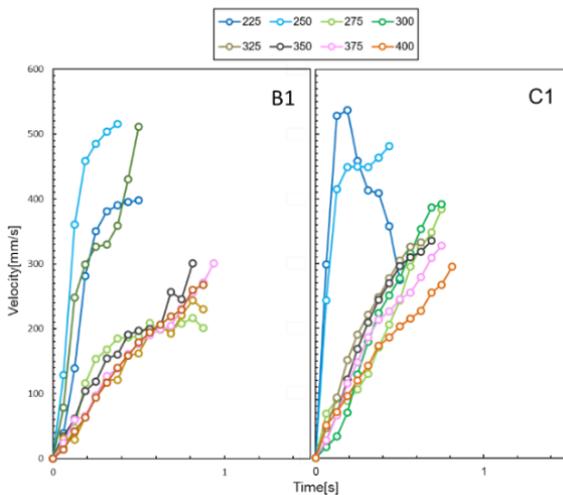


Fig.5 Substrate surface temperature and velocity transition of a droplet traveling on a sawtooth surface (C1, B1)

6. ライデンフロスト現象の解明に向けた流体解析

現状ライデンフロスト液滴が鋸歯面状を移動する原理として基板と液滴の二物体間に発生した蒸気膜が関係していると考えられるが、厳密な自走のメカニズムは解明されていない。そこで本研究ではAnsys Fluentの流体シミュレーションを用いた流体解析を行うこととした。現象解明の手掛かりになるだけでなく、基板上でのライデンフロスト液滴の挙動をシミュレーションすることができれば、基板形状の最適化などの研究につなげていきたい。

実験条件として水・水蒸気・空気の気液混相流で解析を行い、気液界面の認識についてはVOF法を使用している。今回の解析結果を図7に示す。本研究では液滴の蒸発挙動まで確認することができたが、ライデンフロスト現象の再現には至らなかった。再現するためにはライデンフロスト現象に関する蒸発の条件を新たに設定する必要があり、今後の課題として取り組んでいく。

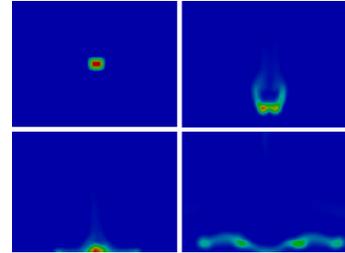


Fig.6 Evaporation behavior of droplets using Ansys

7. 蒸気流れを利用した直線基板作製

蒸気流れを利用した新たな直線状の液滴流動基板としてテスラ構造を取り入れた基板モデルを作成した。作成したモデルを図7に示す。テスラ構造とは主に逆流弁として用いられている構造で、流体が一定方向に流れるよう設計されている。この性質を応用することで、蒸気流れを一定方向に制御し液滴の移動につなげることができるのではないかと提案された。今回作成したモデルは蒸気が流れる流路を基板内部にできるように設計されており、表面の凹凸を少なくすることで基板との接触蒸発が起りにくくなり、より損失することなく、加速することができるように期待されている。

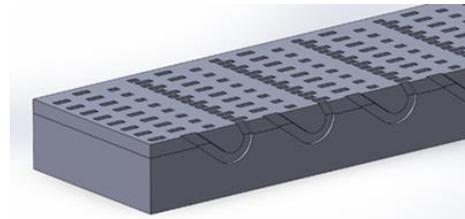


Fig.7 Schematic image of substrate incorporating Tesla structure for droplet transport

8. 結言

本研究では蒸気流れを利用した液滴を流動するための基板の作成にあたり、必要となる環境の構築、基板モデルの作成を行った。高温基板上におけるライデンフロスト状液滴の挙動は未知数な部分もあり、実験だけでは根本的な解明にはつながらない。流体解析はこれらの問題解決に有効であると考えられるため今後も実験と並行し取り組んでいきたいと考えている。

文献

- (1) 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合 技術開発センター “産業分野の排熱実態調査報告書” 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2019)
- (2) J.G. Leidenfrost “De Aquae Communis Nonnullis Qualitatibus Tractatus” translation of portions to appear in Intern J Heat Mass Transfer (1756)
- (3) 宮田 翔生 “高温鋸歯面上におけるライデンフロスト液滴の挙動観測” 高知工科大学 修士論文(2022)
- (4) 小林俊介 “動力源開発に向けたライデンフロスト効果と基板表面状態の関係に関する研究” 高知工科大学 学士論文 (2022)