

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

Study on the behavior of Leidenfrost droplets on high temperature sawtooth surfaces

知能機械工学コース

材料革新サステナブルテクノロジー研究室 1245028 宮田 翔生

1. 緒言

今日では火力発電によるエネルギーの獲得で環境破壊が拡大しており、世界中で問題視されるようになった。日本でも地球環境に配慮したエネルギーの獲得およびエネルギーの再利用が推進されているが、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の調査によると 2015 年度第一種・第二種エネルギー管理工場の全国推定未利用熱量は 743 PJ/year と報告されており^[1]、工場排熱の中では 200 °C以下の比較的低温な排熱の再利用が課題となっている。そこで本研究では工場によく捨てられる”熱”と”水”を利用した新動力源の開発に注目している。

その動力源開発に用いるのがライデンフロスト現象^[2]である。液滴のライデンフロスト現象の概略を図 1 に示す。液滴を液体の沸点よりもはるかに高温に熱した固体壁面上へ導入したとき、液滴接触面が急激に熱されることで蒸気膜が液滴の周りに形成され、壁面上から液滴が浮遊する。また、液滴は高温壁面から直接ではなく蒸気膜を介して熱を受け取るため、蒸発時間は増加する。

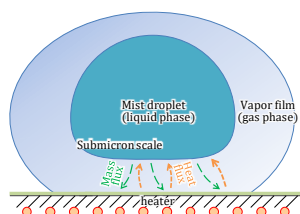


Fig.1 Schematic diagram of Leidenfrost effect

2. 研究目的

高温鋸歯面上に液滴を導入すると、ライデンフロスト液滴が一方向に移動することが知られている^[3]。これは、平面上でのライデンフロスト液滴の場合、液滴から噴出する蒸気は平板に沿って液滴周方向に流れるのに対し、鋸歯面上では、蒸気は鋸歯構造による傾斜に沿って液滴進行方向へ多く流れ、液滴はこの蒸気の流れに影響されて蒸気と共に進行していくためであると考えられている。しかし、この液滴挙動は厳密には解明されておらず、動力源として用いるためには鋸歯面上における液滴の動作メカニズムの解明が不可欠である。そこで本研究では、鋸歯面上でのライデンフロスト液滴挙動を観測し、その動作メカニズムの解明を目指した基礎研究を行うこととした。

3. 液滴移動速度算出プログラムの開発

これまでに我々は多くの液滴移動速度を測定してきたが、先行研究^[3]の結果を比較していくと実験者によって異なる速度になってしまっていた。これは、実験の際に行う手動の作業に差が出てしまっていることが考えられ、例えばカメラの画角やある時刻におけるビデオの液滴位置から速度を導出するときには人の手が介入している。このような状況のため、実験者によって異なる値が取得されてしまい、厳密なデータ解析が困難であった。そこで実験者による誤差の生まれないような環境を整えるため、液滴移動速度算出プログラムの開

発を行うこととした。

速度算出プログラムを開発するにあたり、使用する環境を検討した。本研究では、オープンソースで画像処理に必要なライブラリを多く備えている OPENCV を採用し、言語には本研究室でもよく用いられており、オープンソースである Python を採用した。以下に、速度算出プログラムの流れを簡単に説明する。

液滴が鋸歯面上を移動している動画から 1 コマずつの画像を切り取り、切り取った画像に対して、①背景差分により画像内での液滴箇所を抽出、②メディアンフィルタによる平滑化で背景差分後の画像からノイズの除去、③moments 関数による液滴重心位置の検出、の処理を行い、観測動画から液滴の重心座標を取得することに成功した。開発したプログラムの流れを図 2 に示す。

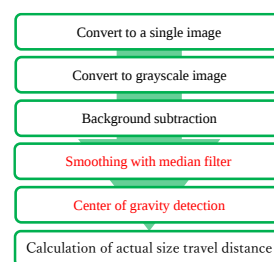


Fig.2 Program flow

4. プログラム処理による液滴挙動の観測

4.1 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、基板をヒーターの上に設置し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ビペットを用いて、所定の液量を滴下した。また、液滴挙動は基板と水平に設置したデジタルカメラを用いて、8 倍速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。

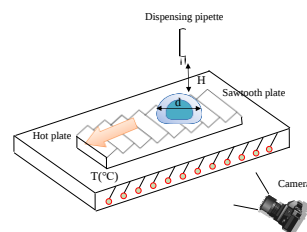


Fig.3 Outline of experimental equipment

Table.1 Experimental conditions

Liquid type	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。本実験では、鋸歯形状の直角が上部および下部にくる B 形状、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。

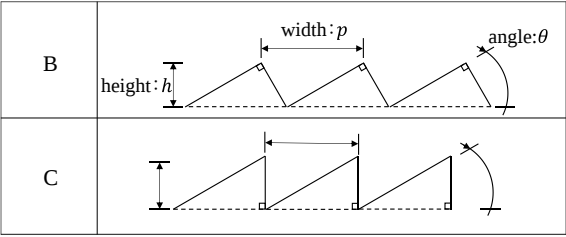


Fig.4 Saw teeth surface shape

Table.2 Saw teeth surface parameters

	θ :angle($^{\circ}$)	p:width(mm)	h:height(mm)
B1	20	0.5	0.161
C3	20	1	0.364

4.2 実験結果・考察

B1, C3 形状で実験を行い、開発したプログラムで液滴の移動速度を算出した。実験結果を図 5 に示す。B1 と C3 の結果を比較すると B1 では 300 $^{\circ}\text{C}$ 、C3 では 325 $^{\circ}\text{C}$ を境に移動速度の傾きが変化している。ここでは速度の速いグループを 1、遅いグループを 2 とする。ライデンフロスト液滴は蒸発時間の最も長くなる温度であるライデンフロスト点を境に状態が遷移する。ライデンフロスト点以上の温度では、液滴が蒸気膜によって基板から隔絶される膜沸騰状態、ライデンフロスト点未満では、液滴の内部から蒸発していく核沸騰状態と膜沸騰状態の混在する遷移沸騰状態となる。膜沸騰状態の液滴は、我々の予想通り蒸気の流れによって進行していると考えられる（グループ 2）。遷移沸騰状態の液滴では、蒸気の流れに加え、液滴が鋸歯面に接触することで起こる沸騰（以降接触沸騰）から推進力を得ていると考えられる（グループ 1）。現に膜沸騰状態の移動速度よりも遷移沸騰状態の移動速度の方が速くなっている。そのため、移動速度の傾きが変化する温度付近で液滴はそれぞれの基板上でのライデンフロスト点を迎えているのではないかと推察される。なお、基板形状によって速度の傾きがグループ 1 から 2 へと変化する温度に差があるのは、液滴と基板の接触面積が B1 形状の方が大きく、液滴に熱が伝わりやすくなるためライデンフロスト点が低い温度で観測されているからだと考えられる。図 6 に遷移沸騰、膜沸騰状態の液滴の概略を示す。

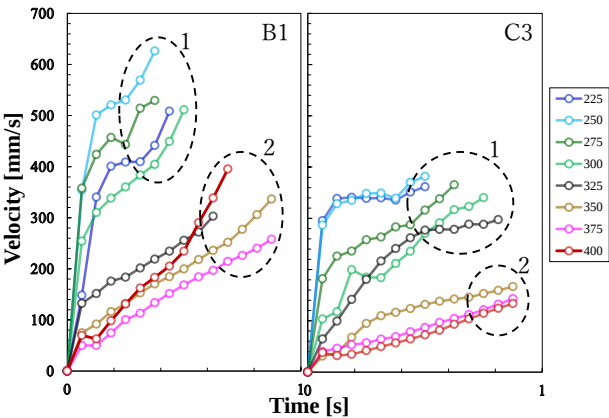


Fig.5 Comparison of droplet moving speed (B1, C3)

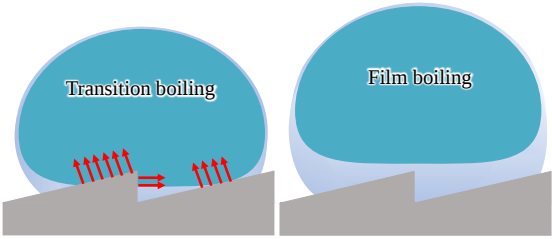


Fig.6 Boiling state of Leidenfrost droplet

5. エネルギー効率の導出

ライデンフロスト液滴は基板上で膜沸騰や核沸騰を起こしながら蒸発し、移動速度を得ている。そこで、液滴の滴下から進行終了までに受け取った熱エネルギーはどの程度運動エネルギーに変換されているか算出した。液滴は蒸気を発しながら基板上を進行することから、受け取った熱エネルギーは運動エネルギーと蒸発に必要なエネルギーに変換されていると考えられる。液滴の蒸発量は、滴下した液量を基準として滴下直後と滴下地点から加速し 12 cm 地点に到達した時の撮影画像から液滴の高さおよび幅を比較し推定した。液滴進行における温度別の運動エネルギーへの変換効率を図 6 に示す。

液滴が受け取った熱エネルギーは 1~3 割が運動エネルギーとして消費されていることが見て取れる。B1 と C3 の結果を比較したが、どちらの基板が効率よく熱を運動に変換しているのかは判明しなかった。本研究では使用するカメラの解像度が低く、正確な蒸発量が算出できないため、今後は実験環境の整備および他条件で効率を算出するなどしてエネルギー変換のメカニズムが解明されることを期待したい。

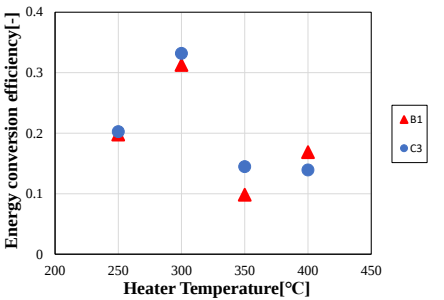


Fig.6 Energy conversion efficiency by temperature difference

6. 結言

本研究ではプログラム処理によって液滴移動速度を算出し、液滴移動速度と液滴の状態遷移の関係を見出した。また、鋸歯基板上におけるライデンフロスト液滴の運動エネルギー変換効率の算出に成功した。今後は、液滴が運動エネルギーをさらに効率よく生み出すことのできる条件を見出す必要がある。また、液滴の蒸発量は現在の開発プログラムでは正確に算出することができておらず、手動処理で計測を行った。そのため、蒸発量を自動で算出できるプログラムの開発を行う必要がある。

参考文献

[1] 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合 “産業分野の排熱実態調査” 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 年

[2] J.G.Leidenfrost “De Aquae Communis Nonnullis Qualitatibus Tractatus “translation of portions to appear in Intern J Heat Mass Transfer (1756)

[3] 高木 耕平 “ライデンフロスト効果を用いた動力源の開発に関する基礎研究” 高知工科大学 修士論文 (2017)