

# 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

## 1. 緒言

現代社会では省エネルギー化が叫ばれており、なかでも工場での排熱を減らすことは重要な課題である。未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合の調査によると、2015年度の全国の推定未利用熱量は743ペタ・ジュール毎年(PJ/year)と推定されている<sup>[1]</sup>。この結果から、多くの熱利用者にとって排熱の再利用が課題であると考えられる。そこで、ライデンフロスト効果を用いた新たな動力源を開発することでこの排熱を再利用できないものかと考えた。

ライデンフロスト効果は1756年にJ.G.Leidenfrost<sup>[2]</sup>が論文で報告したためにこの人の名前がご呼称されている。図1に液滴のライデンフロスト効果の模式図を示す。液体の沸点よりもはるかに高温な固体表面に液滴を垂らすと、その液滴が一瞬で加熱されることで一部が蒸発し、固体表面との間に蒸気膜が形成される。この蒸気膜が液滴を浮遊させ、固体表面からの温度伝達が滞り、蒸発時間が長くなる現象が起こる。この現象によって生じる効果をライデンフロスト効果という。この現象を利用して、鋸歯状の高温固体表面ではライデンフロスト液滴が一方向に動かすことが可能となる。しかし、この特性における液滴挙動の本質的な解明というものは報告されていない。そこで、本研究は鋸歯面上におけるライデンフロスト効果の現象解明をし、動力源として活用できるような物理モデルの構築を目標とする。

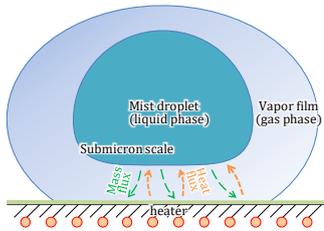


Fig. 1 Schematic diagram of Leiden Frost effect

## 2. 鋸歯面上におけるライデンフロスト液滴の挙動モデル

緒言で述べた高温鋸歯面上をライデンフロスト液滴が一方向に動く現象について、我々は次のように説明している。平面上でのライデンフロスト液滴の場合、蒸気膜は平板に沿って周方向へ流れていくのに対し、鋸歯面上の場合、鋸歯構造による傾斜に沿って液滴まわりの蒸気が一方向に流れ、液滴もその流れに影響され動いていくというものである。

ところで、本研究の実験を行う上で、鋸歯面基板の力の関係を理解することは重要である。液滴から発生する蒸気が壁面と完全弾性衝突すると仮定した場合、駆動方向の力を算出した上で液滴の挙動を推測した。このとき構想したモデル図を図2に示す。ここでは2つのモデルについて例をあげる。

直角が頂点にくる場合を考える。蒸気が左側の斜面に及ぼす単位面積当たりの運動量から駆動力を計算すると、

$$2\dot{m}v \cos^2 \theta_p \sin \theta_p \quad (1)$$

となる。同様に逆側の力を求めると、

$$2\dot{m}v \cos \theta_p \sin^2 \theta_p \quad (2)$$

となる。左右への蒸気の力の大小関係を考えることで液滴の進行方向を予測する。 $\theta_p = 45^\circ$  のとき、

$$2\dot{m}v \cos^2 \theta_p \sin \theta_p = 2\dot{m}v \cos \theta_p \sin^2 \theta_p \quad (3)$$

となり、左右の力が釣り合うため、どちらに進むか見当がつかない。また、 $\theta_p < 45^\circ$  のとき、

$$2\dot{m}v \cos^2 \theta_p \sin \theta_p > 2\dot{m}v \cos \theta_p \sin^2 \theta_p \quad (4)$$

となり、蒸気の力は左方向の方が強くなり液滴は左方向に進むと予測される。

次に直角が底面の右側にくる場合を考える。右側面へ蒸気の運動量は加わらないため、右方向の力は0となり左方向へのみ

$$2\dot{m}v \sin \theta_p \quad (5)$$

の力が加わり、液滴は左方向へ進行すると予測できる。

本稿においてここで推定したモデル通りに進む場合を順方向、逆になる場合を逆方向とする。

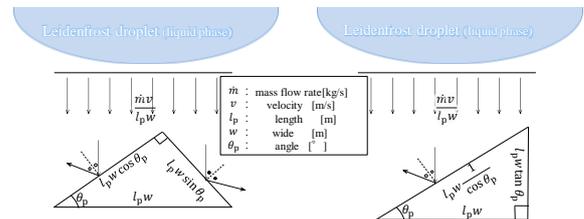


Fig. 2 Momentum on the non-equilibrium potential surface

## 3. 液滴挙動の観測方法・観測条件および鋸歯面構造

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、上述した力が左方向へ働くように鋸歯面の向きを考え、基板をヒーターの上に設置し、加熱した。次に、電子ピペットを基板に対して垂直に設置し、デジタルカメラで液滴の挙動を観測した。液滴の挙動を十分に観察しやすくするために基板の真上から撮影した。また、液滴挙動の撮影はハイフレームレート機能を使い8倍スローモーションで行い、Windows Media Playerで0.0625秒ごとの液滴の移動距離を測り、速度算出を行った。観測系の概略を図3に示す。また、液滴には超純水を使用した。実験条件を表1に示す。

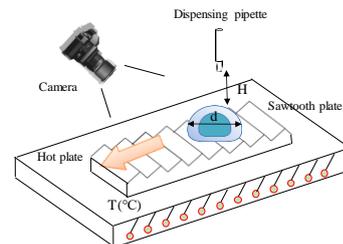


Fig. 3. Outline of experimental equipment

Table 1 Experimental conditions

Liquid type	Ultrapure water
Liquid volume [μL]	33.6
Droplet diameter [mm]	4
Substrate surface temperature[°C]	200~400
Measurement temperature interval[°C]	25
Drip distance[mm]	7
Number of measurements[Times]	5

次に、使用した基板の形状を図 4 に示す。本実験では、頂点が直角の B 形状、底面と右側面のなす角が直角の C 形状を使用した。各基板のパラメータを表 2 に示す。

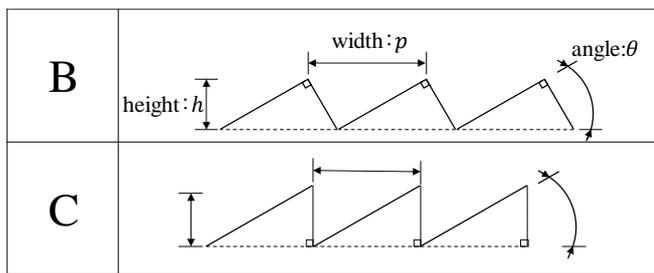


Fig.4 Corrugated sheet shape

Table 2 Corrugated sheet parameters

	$\theta$ : angle(°)	p : width(mm)	h : height(mm)
B4	30	0.5	0.217
B5		0.75	0.325
B6		1	0.433
C4		0.5	0.289
C5		0.75	0.433
C6		1	0.577

#### 4. 液滴の挙動観測

##### 4.1 実験結果

基板形状別に基板温度ごとの液滴速度を調査した。基板形状 B4,B5,B6 の実験結果を図 5a に、基板形状 C4,C5,C6 の実験結果を図 5b に示した。それぞれ横軸に時間(s),縦軸に移動速度(mm/s)をとり、順方向に進んだ液滴を実線、逆方向に進んだ液滴を破線で示した。B4 では基板温度 200°C~275°C, 350°C~400°C, B5 では基板温度が 325°C~, B6 では 350°C~, C4 では基板温度 325°C~, C5 では全温度でそれぞれ逆方向へ進むのが確認されたが、C6 はすべての温度で順方向に進んだ。

3つの B 基板のグラフを見比べると、歯幅が大きくなるにしたがって液滴速度が一定に収束している。また、B5,B6 の基板で右方向に液滴が進んだ場合、移動速度は極端に小さくなったが、B4 ではほとんどの温度帯で右方向へ進んだにもかかわらず、液滴速度が極端に小さくなることはなかった。

次に、3つの C 形状のグラフを見比べると、歯幅が大きくなるにつれて最高速度が小さくなっていることがわかる。

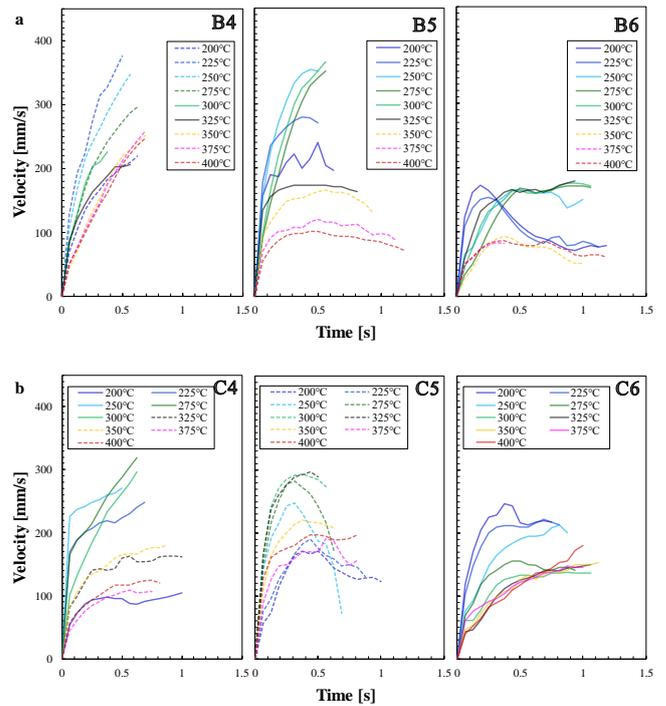


Fig.5 Corrugated sheet droplet moving speed

#### 4.2 考察

本稿では歯幅による液滴移動速度への影響を考察した結果を記載する。これは、ライデンフロストが十分に発達していない低温では液滴の加速につながるのではないかと考えられる。歯幅の増加に伴い歯高も高くなるため、液滴と基板が直接接触する面積が増加し、基板の熱が液滴へと伝わり易くなり蒸気量が増加する。つまり、高温になりライデンフロストが発達すると、液滴が基板からより高い位置に浮遊し、液滴は基板の形状、温度の影響を受けにくくなるため速度が遅くなり一定に収束すると考えられる。

#### 5. 結言

本研究では先行研究<sup>[3]</sup>で観測された液滴挙動に加え、新たな波板での液滴挙動を撮り、速度算出を行った。鋸歯状面上での物理モデル構築のために新たなデータの取得ができたが、今後物理モデルを構築するにあたって液種、液滴径などのパラメータを変更したデータの獲得が必要である。

#### 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