

# 排熱回生システムに向けた液滴挙動解析と検討

## Study of droplets for development of exhaust heat recovery system

知能機械工学コース

材料革新サステイナブルテクノロジー研究室 1255003 市川 怜司

### 1 研究背景

我々人類は数多の発明を繰り返すことで便利で豊かな生活が送れるように進化してきた。このような便利で豊かな現代社会を生きていくうえで、エネルギーというものは必要不可欠であり、運動エネルギー、電気エネルギーなどを生成するために様々な方法が取られている。だが、エネルギーを無駄なく使用することは非常に困難であり、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れば、2015年度の第一種エネルギー管理指定工場と第二種エネルギー管理工場の全国推定未利用熱量は1年間で743ペタジュール(PJ/year)だと推定されている<sup>(1)</sup>。本研究室ではこの大量の排熱とライデンフロスト現象を組み合わせることで新たな技術を生み出せないかと研究を行っている。

### 2 ライデンフロスト現象

ライデンフロスト現象とは、高温に熱された固体表面に液滴が接近、接触した際に2物体間に蒸気膜が発生することで熱伝達が阻害され、蒸発時間が飛躍的に伸びる現象のことである。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<sup>(2)</sup>が報告したため、この人の名前からライデンフロスト現象と呼ばれている。

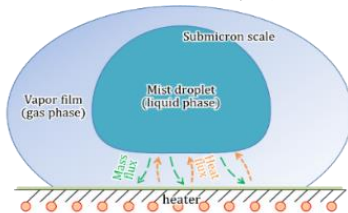


Fig.1 Leidenfrost effect

また、ライデンフロスト現象の特性の一つとして、鋸歯状に加工された高温固体表面に液滴を導入すると液滴が一定方向に自走するといった現象が見られる。この現象においてライデンフロスト現象が発生した際に生じる蒸気膜が大きく関与していると考えられているが、正しいメカニズムは解明されておらず、本研究室においては2種類の仮説が立てられている。まず、第一の仮説として、ライデンフロスト現象で液滴から噴出する蒸気が鋸歯面の斜面を押し、その作用反作用で自走する説。第二の説として蒸気膜が鋸歯面上に蒸気流れを作ることでそれに引きずられて液滴が流れる仮説である。二つの説の概念図を図2に示す。

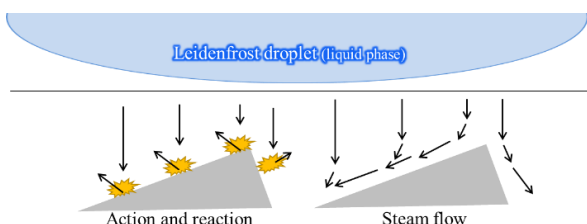


Fig.2 The behavior of a water droplet

### 3 目的

上述の通り、ライデンフロスト現象と排熱を組み合わせた技術の創出が本研究室の最終目標である。そこで先行研究では高温鋸歯面上を自走する液滴の観測実験が行われてきた。しかしながら、高温鋸歯面上で液滴が自走する仕組みや効率についてはまだまだ研究が不十分であり、動力化の早急な実現は困難である。そこで本研究では、新たな実験装置や解析の導入、動力化に向けた第一歩として排熱回生システムにも着手していく。

### 4 先行研究

#### 4.1 実験方法. 実験手順

高温鋸歯面上を自走する液滴の速度を計測するために、20cmの鋸歯基板を用意し、自走する液滴をカメラで撮影した映像の解析を行った。先行研究では過去に行われてきた実験において予期せぬ挙動が見られたため、観測方法を見直して追実験を行った。実験系、実験条件を以下に示す。

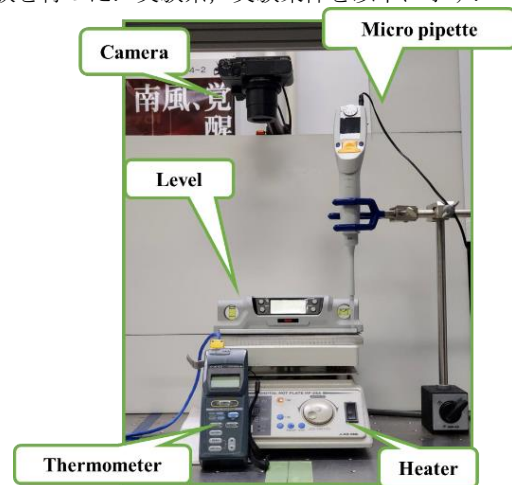


Fig.3 Overall view of the previous research  
Table.1 Experimental conditions of previous research

Liquid type	D.I. water
Liquid volume [ $\mu\text{L}$ ]	34
Droplet diameter [mm]	4
Substrate surface temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ]	300~400
Measurement temperature interval [ $^{\circ}\text{C}$ ]	25
Numbers of measurement [times]	5

図4、表2に使用する基板について示す。本研究室では液滴と接する頂点が直角になっているB基板、底面と側面の縁のなす角が直角になっているC基板を作成しており、鋸歯の横幅 $w$ 、角度 $\theta$ を変化させて実験を行った。

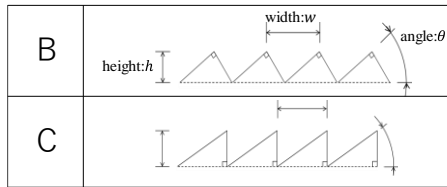


Fig.4 Corrugated sheet shape

Table.2 parameters

	$\theta$ : angle[ $^{\circ}$ ]		$w$ : width[mm]		$h$ : height[mm]	
	B	C	B	C	B	C
1	20	20	0.5	0.5	0.161	0.182
2	20	20	0.75	0.75	0.241	0.28
3	20	20	1	1	0.321	0.364
4	30	30	0.5	0.5	0.217	0.289
5	30	30	0.75	0.75	0.325	0.433
6	30	30	1	1	0.433	0.577

## 4.2 実験結果

先行研究で見られた結果を抜粋して図5に示す。B1基板では時間経過につれて全体的に速度が増加し続けた。C1基板では加速し続ける温度帯に加え、一定時間が経過すると減速する温度帯も見られた。

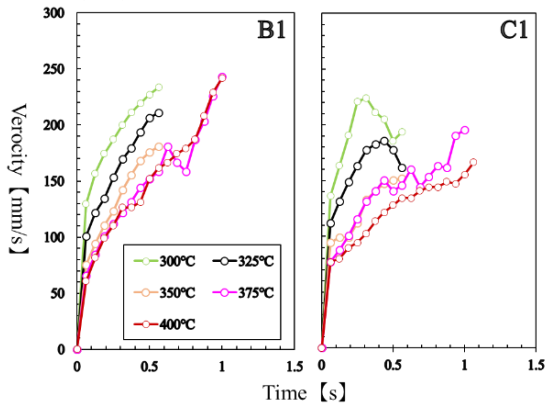


Fig.5 Result of previous research

## 5 新基板での実験

### 5.1 実験方法. 条件

先行研究では20cmという非常に短い基板での実験しか行われておらず、観測時間が1秒前後のデータとなり、液滴の速度が増加中のものや、滴下時の衝撃によるバイアスがかかったものが多く、液滴挙動を解析する上で好ましくない結果であった。そこで、本研究では実験系を一新し、60cm基板による液滴挙動解析を行った。実験系と条件を以下に示す。

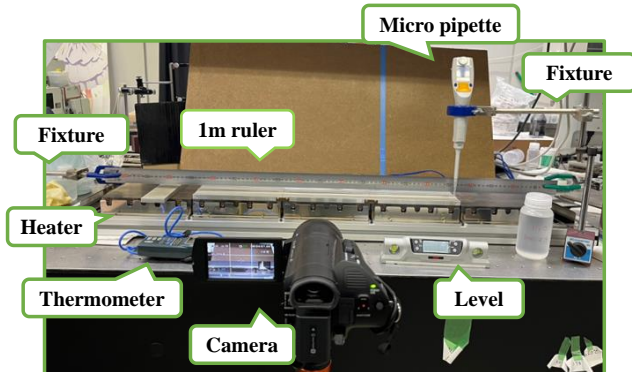


Fig.6 Overall view of experiment

Table.3 Experimental conditions

Liquid type	D.I. water
Liquid volume [ $\mu$ L]	33.6
Droplet diameter [mm]	4
Drip distance [mm]	7
Substrate surface temperature [ $^{\circ}$ C]	200~400
Measurement temperature interval [ $^{\circ}$ C]	25
Numbers of measurement [times]	5

## 5.2 実験結果

B1基板を用いて行った実験結果のみを抜粋し、図7に示す。200 $^{\circ}$ Cを除き、基板が高温になるにつれて速度が小さくなっていくという結果が得られた。200~225 $^{\circ}$ Cでは液滴が進む際に液滴が鋸歯面と接触し、蒸発することでバチバチといった音が発生した。250 $^{\circ}$ Cではその音が小さく細かくなり、275 $^{\circ}$ Cでは滴下直後のみ音が発生し、その後等速運動のような挙動が見られた。300 $^{\circ}$ C以上では200~275 $^{\circ}$ Cのような蒸発時の音は発生せず、滴下直後3秒程した後は等速でスムーズに流れるような挙動が見られた。

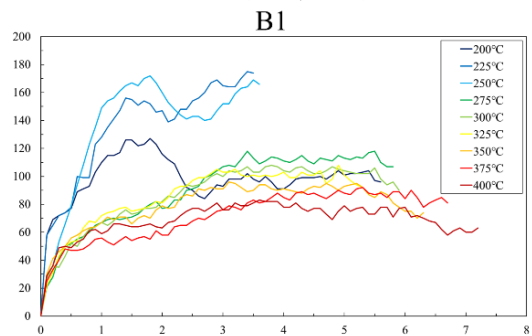


Fig.7 Experimental results of B1

## 5.3 考察

低温度帯で発生していた音は蒸気膜の形成が不十分なため、基板の鋸歯面と液滴が直接当たることで接触蒸発が発生していると考えられる。またそれにより、低温度帯と高温帯で速度の変化が大きく変わったと考えることが出来る。また、超純水 33.6  $\mu$ Lの液滴がライデンフロスト現象となり、蒸発時間が最長になるライデンフロスト点が230~250 $^{\circ}$ C前後にあり、その温度を境に蒸気膜の特性が変化するため、これらの結果から低温度帯では鋸歯面における作用・反作用の影響が支配的であり、高温帯では蒸気流れが大きく影響されていると考えられる。

## 6 結言

本研究ではライデンフロスト現象を用いた動力源の開発を掲げているが、実現のためには効率的な鋸歯構造、温度帯の検討が必要となる。本研究では高温鋸歯面上を自走する液滴を観測する上で装置の改善、新基板の開発により、先行研究では観測することが出来なかった液滴の挙動をとらえ、評価することが出来、動力源開発に対し、有益な結果を得ることが出来た。また、速度を観測する実験だけでなく、より実用的な動力源開発のために排熱再生システムの改良や環式基板の開発等も必要である。

## 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 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)