

# 液滴のライデンフロスト挙動を利用した新動力源の開発に関する基礎研究

## Basic study on the development of a new power source using the Leidenfrost behavior of droplets

知能機械システム工学コース

材料革新サステイナブルテクノロジー研究室 1225009 岡田 雄哉

### 1 緒言

全人類の生活において欠かせないものが「エネルギー」である。世の中の発展は常にエネルギー利用の多様化・高度化と共にある。それに伴い、エネルギーの消費量も拡大し、現在は主として化石燃料(石油, 石炭, 天然ガス)が世界のエネルギー事情を支えている。しかし、この化石燃料は有限であり、再生速度に対し消費速度が速すぎるため、いつの日か枯渇してしまう。今日、世界人口は増え続けており、必要とされるエネルギー量はさらに増加することが想定される。

現在エネルギーは、「電気」という形で我々の生活の中にある。朝起きて、まず一日の予定を確認するために手に持ったスマートフォン。朝食を食べるために調理をしようとした時、食材を保管しておいた冷蔵庫。この食材が私たちの手元に届くまでの物流。歯を磨きに行こうと点けた廊下の電気。家を出る前に着替えた衣類を作るため稼働している工場。今日の我々の生活のほんの一部を見ただけでも、「電気」があるからこそ快適な生活が送れているのである。したがって、エネルギー供給の安定性や持続性が非常に重要なのである。

我々の生活にこれほど重要なエネルギーであるが、作り出されたエネルギーが100%使用されることなく、無駄になっている部分があるのもまた事実である。中でも工場等から排出される「廃熱」はまだ利用できる可能性がある。現在、無駄なものとして処理されているが、水の特殊な状態を利用して熱を運動エネルギーに変換し回収することが出来るかもしれない。この特殊な状態とは「ライデンフロスト効果」である。ライデンフロスト効果(以下 LF 効果)とは、1756 年に J.G.Leidenfrost<sup>[1]</sup>によって報告され、液滴がその沸点よりも高温な固体壁面に近づいた時、液滴表面に薄い蒸気膜が形成されることによって浮遊、そして熱伝達が阻害されることで、液滴の蒸発時間が大幅に上昇する現象である。この効果を応用し工場の廃熱を利用することで、液体を動かし発電機構等に繋げていけるのではないかと考えた。

参考までに、工場には廃熱の他に、鉄鋼系の工場施設だと排水が出る。LF 効果に必要な「熱」と「水」が揃っており、工場に対して LF 液滴を用いた動力源を開発して導入することは相性が良い。一方、この現象をよく観察すると液滴が無秩序に移動している様子が見られた。もしこの液滴の移動を一方に制御することが出来るのなら、熱から返還された運動エネルギーをさらに電気へと効率よく変換させることが出来るのではないかと考えられる。しかし、LF 効果の詳細についてはまだまだ未知な部分が多く、現象解明にはほど遠いのが今日の現状である。したがって、本論では、LF 効果の現象解明に向けた LF 液滴の挙動の本質に迫っていく。

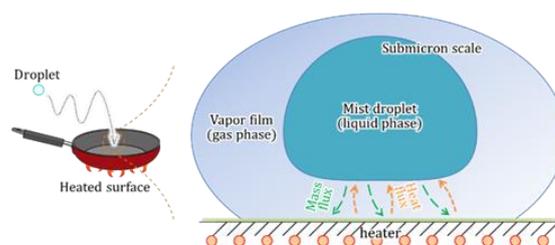


Fig.1 Leidenfrost effect

### 2 非平衡ポテンシャルにおける LF 液滴の理論式

一般に加熱した平面基板に対し、液滴が滴下された時、LF 状になった液滴は無秩序な挙動をする。これは液滴に対して平面基板のポテンシャルが一定であるため、発生した蒸気があらゆる方向に無秩序に吹き出すためだと考えられる。そこで液滴下面に対してポテンシャルが非平衡な鋸歯面状を有する板を利用することにより、蒸発時に発生する蒸気の方角を誘導することによって、液滴の進行方向を制御できるのではないかと想定した。さて、ノコギリ歯状の非平衡ポテンシャルの場合、液滴の周りに形成された蒸気膜が斜面方向に向かって流れ込むことにより、それに沿う形で液体部分が流動し液滴本体を動かすことが可能となる。非平衡ポテンシャルにおける液滴の挙動をライデンフロスト効果(以下 LF 効果)の表面上の運動量の関係性などから導出した理論<sup>[2]</sup>を以下に示す。

まず、B 形状(直角が最も近くにある)について、滴下された液滴が波板表面に及ぼす単位面積当たりの運動量を、質量流量、速度などから算出すると、

$$\frac{\dot{m}v}{l_p w} \quad (1)$$

となる。LF 液滴の周りに形成される蒸気膜が非平衡ポテンシャル構造の高温壁面に完全弾性衝突を起こすと仮定した場合、ここで液滴に作用する左向き水平方向の最大の力は、

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

となる。一方で、逆水平方向にも同様に計算を行い水平方向の最大の力を算出すると、

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

となる。そして、左右の力の大きさを比較する。

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

となり、接触面積が大きな左水平方向への力の方が大きくなり、左方向へ LF 液滴が進むと考えられる。

次に、C 形状(直角が底面の右側)については、左向きに、

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

のみとなり、右方向は壁面が垂直であることから力が 0 であり、左方向にのみ力が働く。これにより、一方向(斜面方向)にのみ動かすことが出来ると考えられる。

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。

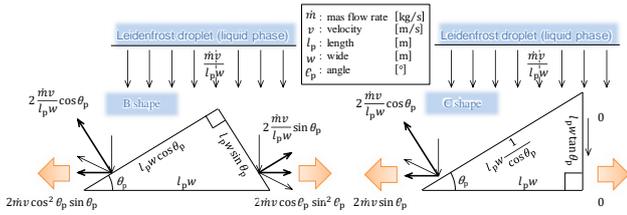


Fig.2 Momentum on the non-equilibrium potential surface

### 3 非平衡ポテンシャル構造を持つ波板基板構造

本実験では、前述した2つのタイプの基板を用いた。それぞれの形状に対し、角度、ピッチを変更した基板を用意した。各基板のパラメータを表1に示す。

Table 1 Experimental conditions

	pitch [mm]	height [mm]	angle [°]
B1	0.50	0.161	20
B2	0.75	0.241	20
B3	1.0	0.321	20
B4	0.50	0.217	30
B5	0.75	0.325	30
B6	1.0	0.433	30
C1	0.50	0.182	20
C2	0.75	0.273	20
C3	1.0	0.364	20
C4	0.50	0.289	30
C5	0.75	0.433	30
C6	1.0	0.577	30

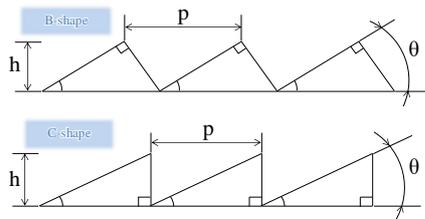


Fig.3 Corrugated sheet shape

## 4 LF 液滴の挙動観測～水平～

### 4.1 観測条件・方法

まず、ヒーターの上に基板をセットし、指定温度に加熱。次に、電子ピペットを基板に対して垂直にセットし適量を滴下。基板上を走る LF 液滴の様子をデジタルカメラのハイフレームレートモード(8 倍スローモーション)で撮影。撮影したデータを、Windows media player を用いて 0.0625 s ごとの移動距離を測定し速度の算出を行った。液種は水とメタノールについて調査した。本稿では水について報告する。実験系の概略を図4に示し、実験条件を表2に示す。

Table 2 Experimental conditions

Base type	B1~6, C1~6
Liquid type	D.I.water or methanol
Liquid volume [μl]	33.6 or 14.1
Droplet diameter [mm]	4 or 3
Surface temperature [°C]	200~400
Measurement temperature interval [°C]	25
Drip distance [mm]	10
Number of measurements [times]	5 (D.I.water 14.1 μl & methanol : 3)

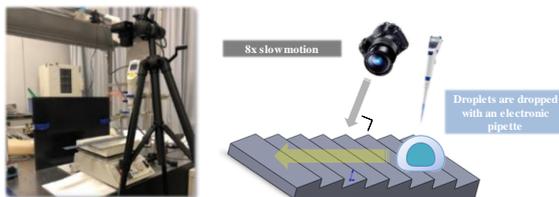


Fig.4 Experimental system

## 4.2 観測結果・考察

直径 4 mm の超純水の液滴について、順方向へ進んだ時の実験結果を B 形状は図 5, C 形状は図 6 に示す。グラフの縦軸は速度[m/s]、横軸は時間[s]である。逆方向については本論で述べる。まず低温域について、初期加速が強く速度が速くなっている。一般には、高温ほど熱伝導が大きくなり熱から運動エネルギーへの変換が大きくなるものと想定されるが、本結果から単純にそのような説明ではないことが分かる。これについては既に過去に説明されているが、低温域では LF が未完成で蒸気膜が薄く、液滴の液体部分と基板表面が接触し突沸と呼ばれる液体の過熱現象が起こっていることが考えられる。一方高温域では、速度が落ち着いている。これは、LF が完成し蒸気膜が厚く形成されることにより高位置に液滴が浮遊することで突沸の影響が減少。加えて、蒸発した蒸気の粘性をかいして液滴へ運動エネルギーが移行していることから、低温時の加速に比べ加速力が小さいことが考えられる。

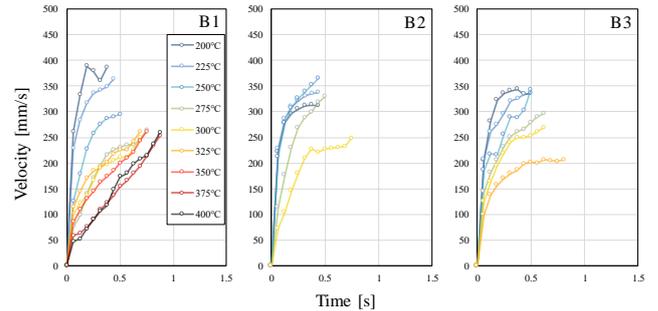


Fig.5 Corrugated sheet droplet moving speed (B-shape)

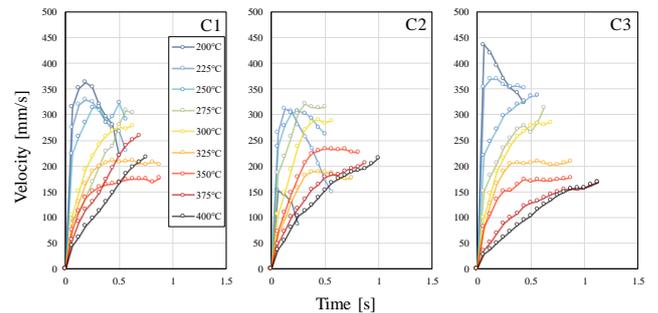


Fig.6 Corrugated sheet droplet moving speed (C-shape)

## 5 LF 液滴の挙動観測～傾斜込み～

### 5.1 観測条件・方法

基本的な観測方法は水平時と同様とし、実験系本体にデジタル角度計を用いて指定角度をつけ、LF 液滴の登坂可能角度、登坂速度などの検証を行った。超純水とメタノールについて調査したが、メタノールは登坂不可だったため、超純水に限定し実験を行った。詳細な実験条件を表3に示す。

Table 3 Experimental conditions

Base type	B1~6, C1~6
Liquid type	D.I.water
Liquid volume [μl]	33.6
Droplet diameter [mm]	4
Surface temperature [°C]	200~375
Measurement temperature interval [°C]	25
Drip distance [mm]	10
Number of measurements [times]	5
Corrugated board angle [°]	1~3 (C3:1~6)

## 5.2 観測結果・考察

本稿では C3 のみについて述べ、残りは本論文中で述べる。まず本条件では 6° が登坂限界であり、傾斜角がある分速度が遅くなる結果となった。高温域で登坂可能だったのは 2° までであった。これは先と同様、蒸気膜が厚く完全に浮遊しているため、傾斜に対して滑り落ちてしまっていることが考えられる。また、全体的に特にしっかりと登坂していたのは中温度域の 275°C の場合であり、6° では登坂出来なかったものの、突沸の影響が少ないながら登坂していた。つまり、低温域でみられるような液滴が基板に接触して突沸し登坂するようなことはなく、この温度付近が最も LF 効果の影響のみで登坂出来るのではないかと考えられる。

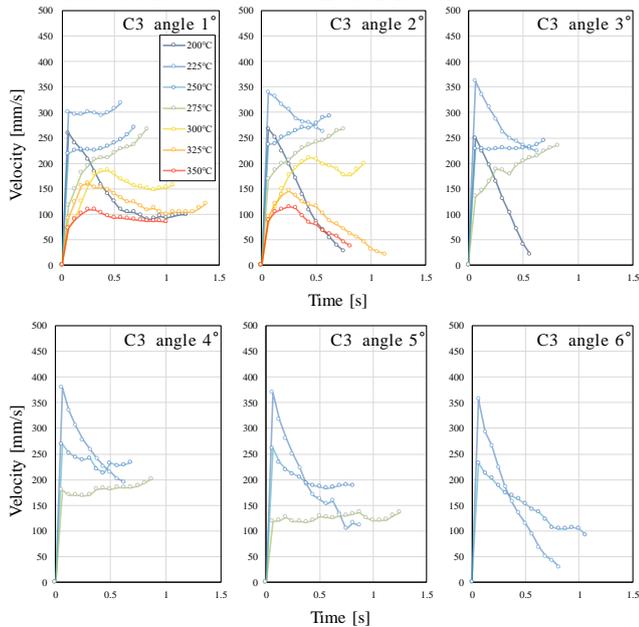


Fig.7 Droplet moving speed by angle (C3-shape)

## 6 基板上を走る LF 液滴と基板間の様子の観測

### 6.1 観測条件・方法

前述した推測が本当であるのか確かめるため、液滴下面と基板間の状態を観測した。接触角計上にヒーターと基板をセットし、LF 液滴を滴下し基板上を走らせる。この時、基板側面からの映像を取得し、基板上を走る LF 液滴の様子を観測する。実験条件を表 4、実験系を図 8 に示す。

Table 4 Experimental conditions

Base type	C3
Liquid type	D.I.water
Liquid volume [μl]	33.6
Droplet diameter [mm]	4
Surface temperature [°C]	200~400
Measurement temperature interval [°C]	50 or 25

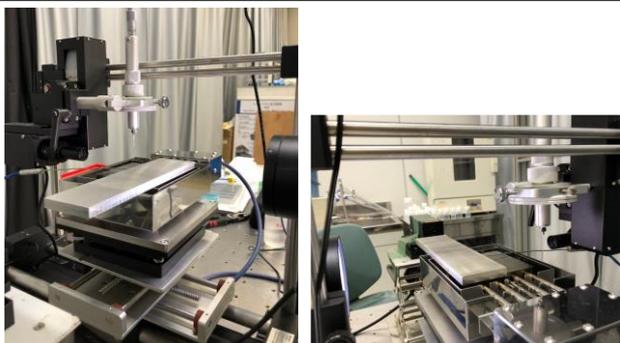


Fig.8 Experimental system

## 6.2 結果・考察

まず、低温時は液滴の形状は基板の鋸歯面に液体が入り込むように変形していることが分かる。つまり、液滴の液体部と基板との接触面積が大きく、熱の伝熱量が多いため突沸が起こり、多くの熱が液滴を加速するために液滴が挙動していると考えられる。次に、高温時の液滴は比較的丸い形状を保ったまま基板上を走っていることが分かる。液滴が浮遊しており、基板との接触部分も少なく、熱の伝熱量は低温時より少なくなり加速も小さくなることが想定される。

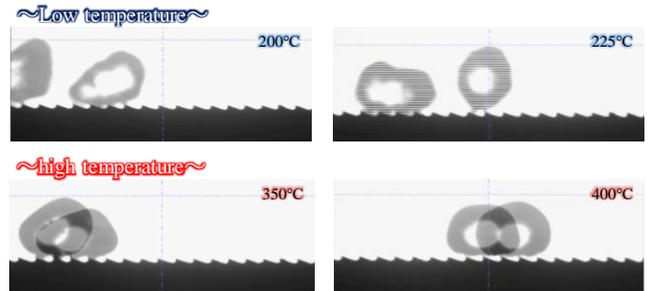


Fig.9 Behavior of LF droplet on substrate

## 7 波板基板上の LF 液滴の理論式(非平衡ポテンシャル上)

### 7.1 滴下した液滴挙動の分類

ここまで実験結果を踏まえると、液滴の速度は、大きく分けて 4 つのパターンで変化することが分かった。式化するにあたって、温度変化に同調した速度変化が見られた結果を抽出して式化を行った。

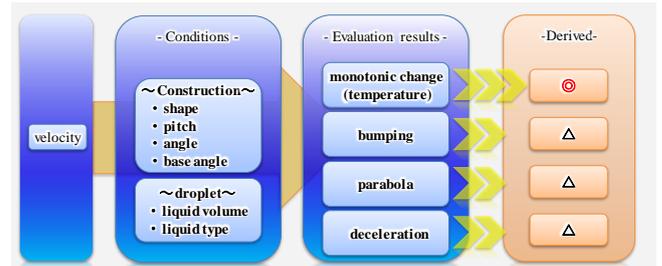


Fig.10 Classification of droplet behavior

### 7.2 式の導出

式の導出に際し、物理モデルを立て導出しようと試みたが、あまりにも複雑になると考えられたので、LF 状液滴の寿命を導出した例に倣い、次元解析によって導出を試みた。この時、以下の関係性の高いパラメータを 9 つ挙げ、これらの操作変数を次元解析することによって相関関数を構築し式を導出した。導出した式の定数と冪指数は、実験での LF 液滴の速度と液滴の各パラメータを加味して回帰分析によって算出した。

$$v = v(T_b, \rho_v, \rho_l, g, \lambda, \Delta T, C_p, k, \mu, t)$$

### 7.3 考察

本稿では、温度変化に最も対応している C3 形状についての式の導出を試みた。導出した式を以下に示す。本式では、突沸の影響を加味していないため、突沸の影響が少なくなってくる LF 温度領域以降に対して速度の導出が可能となっている。図 10 にメタノールと超純水の実験値と理論値の比較を示す。本来は全種の基板に対応したものが理想ではあるが、本式に基板のパラメータを含めただけでは導出までには至れなかった。よって、全基板対応にさせるためには、突沸等さらに他のパラメータを含めた検討を行う必要がある。また、実験系の関係で測定可能距離に制限があるため、液滴の蒸発等も考慮出来ていない。したがって、今後さらに長い距離での測定データの収集をしていく必要があると考える。

$$\left(\frac{v\rho_v r}{\mu}\right) = 4.30 \times 10^{17} \left(\frac{\rho_l}{\rho_v}\right)^{-4.37} \left(\frac{gr^3}{\mu^2 \rho_l^2}\right)^{0.988} \left(\frac{\Delta T \lambda}{k\mu}\right)^{2.42} \left(\frac{c_p \mu}{\lambda}\right)^{64.9} \left(\frac{t\mu}{\rho_v r^2}\right)^{0.458} \quad (6)$$

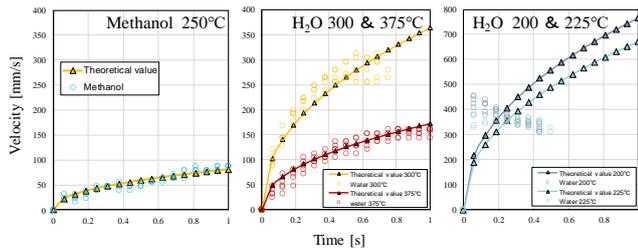


Fig.11 Comparison between theoretical and experimental velocities of LF droplets on non-equilibrium potential

## 8 LF 液滴を用いた回転動力源の試作

### 8.1 作製方法

作製はまず、SOLIDWORKS で 3D モデルを作製。このモデルを元に耐熱石膏で型を取り金型を作製。550°Cに熱した電気炉で金属(今回はZnを使用)を溶解し、この金型に流し込むことで LF 液滴を回転させるための基板を作製した。基板は B 形状と C 形状で、それぞれ角度 21°と 35°のピッチ 1 mm、歯数 60 で作製。中心を凹ましたコンケーブ形状とした。

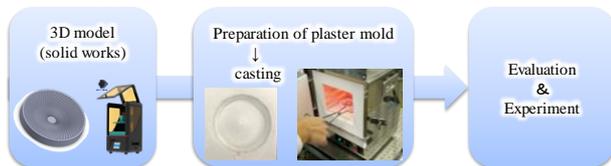


Fig.12 Manufacturing procedure

### 8.2 結果・考察

275°Cの条件で液滴の回転や、液滴上に 30×30×0.3 mm のアルミ板を載せて回転させることに成功した(回転速度: 60 rpm)。一方、B 形状で液滴の回転方向が反対であるなど、想定とは異なる現象が見られるなどした。しかしこの結果は、作製した基板表面が荒く、この形状や角度が影響していると断定することは困難である。表面形状が綺麗になるように条件模索し基板を用意する必要がある。



Fig.13 Prototype rotating power source

## 9 結言

本研究では、鋸歯面状非平衡ポテンシャル構造上の LF 液滴の登坂可能限界角度や速度の算出等を行った。加えて、これらのデータを元に、基板上を走る LF 液滴の理論式の導出を行った。また、高効率な動力源開発のために装置を鋳造し、その可能性を示した。今後は、突沸の影響度合いを検討していくことや、H<sub>2</sub>O や Methanol 以外の液種や液量を変更したデータ収集を行うことで、さらなる現象解明や法則性を導き出してしていきたい。そして、LF 動力源の開発も進めて行けたらと考えている。

## 参考文献

- [1] J.G.Leidenfrost, "De Aquae Communis Nonnullis Qualitatibus Tractatus translation of portions to appear in Intern J Heat Mass Transfer (1756)
- [2] 高木 耕平, "ライデンフロスト効果を用いた動力源技術の開発に関する基礎研究", 高知工科大学大学院 工学研究科 基板工学専攻 知能機械システム工学コース 修士論文 (2017)