

# 非平衡ポテンシャル表面上におけるライデンフロスト液滴の挙動解析

材料革新サステイナブルテクノロジー研究室 1170114 西村 一宏

## 1. 緒言

私たちは身の回りの様々な現象と密接して日々生活している. その一つとしてライデンフロスト現象というものがある. 一般的には聞き覚えの無いこの現象であるが, 高温に熱せられたフライパン上に水を垂らしたとき, その水がすぐに蒸発することなく, フライパン上で小さな球体となり, 縦横無尽に動き回る様子を見たことがあるのではないだろうか. ライデンフロスト現象とはこのことを意味している. 私は, このライデンフロスト現象に注目し, 液滴の挙動についてより理解を深めようと考え, 研究テーマとして選定した. ライデンフロスト現象を応用することで実用可能と注目されている技術にタービンブレード摩耗, 水素電池自動車などが挙げられる. このように, 現在ライデンフロスト現象は様々な潜在的用途として各分野からの注目を集めている.

しかし, ライデンフロスト効果について, 平衡ポテンシャルにおけるその挙動については厳密式も立てられており, 多くを知られているが, 非平衡ポテンシャルにおける液滴挙動については, その本質的な解明は未だになされていない. そこで, 非平衡ポテンシャルにおけるライデンフロスト液滴の挙動を解析, 理解することで動力源などの用途として応用できるのではないかと考えた. 先行研究では, 超純水を用いてパラメータの異なる波板をいくつか用意し, 非平衡ポテンシャル上におけるライデンフロスト液滴の挙動について様々な基礎実験を行っていたが, 私は変更するパラメータを波板ではなく, 液滴直径や他液種に注目して研究を進めることにした.

本論文は, まず先行研究で行っていた実験結果を示し, 次に私が変更した液滴直径, 他液種といったパラメータをもとに行った液滴の挙動や規則性について示すことで, その結果をもとに液滴を制御し, 他のデバイスへ応用させることを目的としたものである.

## 2. 平衡ポテンシャルのライデンフロスト効果

ライデンフロストは, 液滴を液下する表面によって異なる挙動を示す. ここでは, その特性の一つである平衡ポテンシャル上での挙動について記述する.

ある液滴がその沸点よりも高温な固体壁面に接触した際, 表面に薄い蒸気膜が形成されることによって, 熱伝達が阻害され, 高温壁面に浮遊したままの状態となり, 液滴の蒸発時間が大幅に上昇する現象であり, 1756年にJ.G.Leidenfrost<sup>[1]</sup>らの論文によって明確に記述されている. ライデンフロスト効果の模式図を図1に示す.

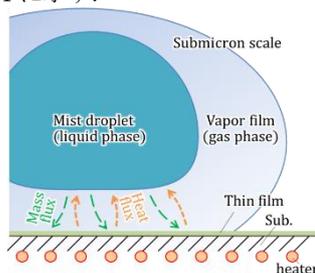


Fig.1 Schematic diagram of Leiden Frost effect

また, ライデンフロスト効果によって液滴の蒸発時間は劇的に変化する. その蒸発時間を計算によって導出しようとする試みが, B.S.Gottfried<sup>[2]</sup>らによって行われている.

観測から得られたプレート温度と液滴蒸発時間などのパラメータから次元解析を行い, 液滴の挙動と一致する計算式である次の厳密式を導出した.

$$\tau_e = 37.8 \sqrt{\frac{r_0}{g}} \left( \frac{k_{vs} \Delta T}{\rho_{vs} D \lambda} \right)^{-0.735} \left( \frac{\rho_l}{\rho_{vs}} \right)^{0.407} \left( \frac{C_{ps} \mu_{vs}}{k_{vs}} \right)^{-0.874} \left( \frac{\mu_{vs}}{\rho_{vs} D} \right)^{0.714} \left( \frac{D}{\sqrt{g r_0^3}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

## 3. 非平衡ポテンシャル表面上における流動解析

B.S.Gottfried<sup>[2]</sup>らの研究結果から平衡ポテンシャル上ではライデンフロスト現象の蒸発時間において, 液体の密度が影響しているとの報告がある. しかし, 私は非平衡ポテンシャル上においては, さらに複雑なパラメータが関わっていると考えた. そこで, 非平衡ポテンシャル表面上におけるライデンフロスト効果の現象解明をするにあたり, 液滴の多種パラメータを変更することによって目的達成へのアプローチをかけた. 挙動解析を行うにあたり, 先行研究にて取り扱っていたパラメータ以外に私が変更したパラメータを以下に示す.

- ◎流体の体積 (液滴直径を変更しての解析)
- ◎流体の粘性 (様々な液種を用いての解析)
- ◎流体の濃度 (液滴濃度を変更しての解析)

## 4. 物理モデルの構築

本研究では実験に先立って, 波板表面上の力の関係を理解することが重要であると考え, 波板表面上に簡易的な物理モデルを提示した. ただし, ライデンフロストのみで液滴が直接壁面へ接触し突沸するような過程を無視するものとする.

その点を踏まえ, 液滴から発生する蒸気が壁面と完全弾性衝突と仮定した場合を想定し, 駆動方向の力を算出することで, 液滴の挙動を推測する. 算出した物理モデルを図2に示す.

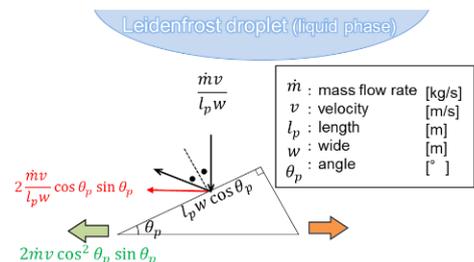


Fig.2 Momentum on the non-equilibrium potential surface

液滴が波板に及ぼす単位面積当たりの運動量から駆動方向の力を算出すると,

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

となる. 逆側(黄矢印)の力も同様に算出し, A形状:  $\theta_p = 45^\circ$ , B形状:  $\theta_p < 45^\circ$ , C形状の左右の力を比較する.

A形状の場合は,

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

左右の力は同じになり液滴は止まると予測される.

B 形状の場合は,

$$2mv \cos^2 \theta_p \sin \theta_p > 2mv \cos \theta_p \sin^2 \theta_p \quad (3)$$

比較すると左方向の力が大きく左方向に動くと考えられる。

C 形状の場合は, 図 3 から右側面には液滴からの運動量が加わらず右方向の力は 0, 左方向に (1) 式の力だけ発生する。つまり, 一方向に動く予想される。

### 5. 観測方法の概要及び実験条件

ヒーターの上に高温に熱した波板を設置し, 電動ピペットにより一定量の液滴を滴下する。ここで波板の側面にはあらかじめ定規を使って 1cm ごとに線を引いておく。デジタルカメラ (Sony, RX100IV) を用いて液滴が一方向に挙動を示す様子を 8 倍スローモーション撮影し, 動画を汎用のムービーメーカーで編集し, 速度を算出する。図 3 に装置の概略を示す。

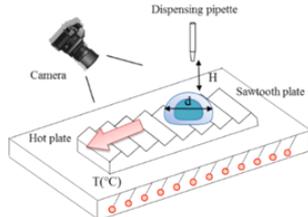


Fig.3 Experimental arrangement

Table 1 Experimental conditions

	Experimental condition①	Experimental condition②	Experimental condition③
Solution	Ultra pure water	Ultra pure water	acetone
Liquid volume[μL]	33.6	13.3	13.3
Droplet diameter[mm]	4	3	3
Wavy plate surface temperature[°C]	175~400	LF Starting temperature~410	LF Starting temperature~410
Dropping distance[mm]	14	13	13
Number of measurements	3	5	5
Corrugated shape	C2	C2	C2

C2 の波板形状パラメータを図 4 に示す。

	Angle(°)	Pitch(mm)	Height(mm)
	20	0.75	0.28

Fig.4 Parameter for sawtooth plate

※実験条件①は先行研究のものである。

※実験条件②③では先行研究よりも温度によるより細かい速度変化を観測するためにライデンフロスト開始温度から 20°C ごとに観測を行った。

### 6. 液滴濃度の違いによるライデンフロスト効果への影響

ここではメタノール濃度を 10%~50%で 10%ずつ変更させた液滴を使用し, その挙動についてライデンフロスト効果にどのような影響を及ぼすか, 観測を行った結果を報告する。

※使用した波板は C2 形状である。

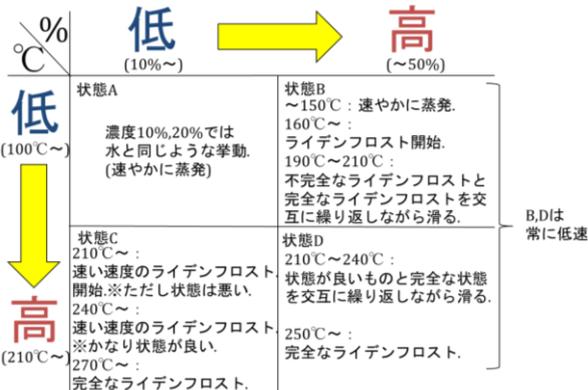


Fig.5 Effect due to difference in droplet concentration

メタノールの沸点は 64.7°C であり, 濃度を徐々に上げていくことで液滴の状態が超純水の挙動からメタノールの挙動へと徐々に変移し, 4 つの状態に分類されることが分かる。

### 7. 液滴の挙動観測

#### 7.1 結果

横軸を時間 (s), 縦軸を速度 (mm/s) でグラフ化し, 温度はその平均値をプロットした。①②③の結果を図 4 に示す。

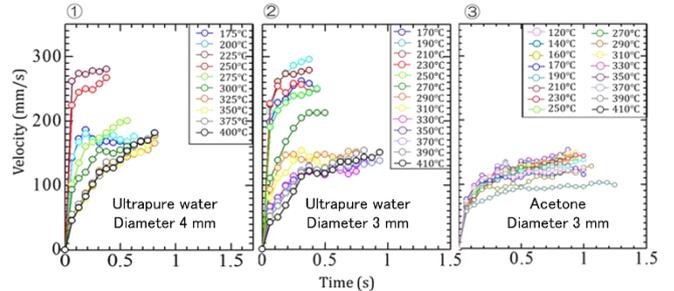


Fig.4 Experimental results

①②のグラフより, 速度の最大値に関しては大きな変化は見られないが, 直径 4mm の方は 225°C で最大, 直径 3mm の方は 190°C で最大を示す結果となり, 速度のピークを示す温度が下がる結果となった。また, 高温領域で見ると 4mm は, まだ速度上昇傾向にあるが, 3mm は上昇が緩やかになる結果となった。

②③のグラフより, アセトンは超純水と異なり, 明らかに全体の速度が遅くなっていることがグラフから読み取れる。また, 超純水では 190°C で速度のピークを示していたが, アセトンでは 190°C において速度が一番遅い結果となった。

#### 7.3 考察

①②の収束速度については, 接触面積, 液滴直径の小さいほうが波板側から熱を受け取る量が少なくなり低温でもライデンフロストするため, 直径 3mm の方が収束速度は下がると思われる。

②③のグラフにおいて, アセトンの速度が全体的に遅い原因として, 液体の粘性が関係していると推測される。液体は常温の状態を観測を行っており, その温度を約 20°C と仮定するとそれぞれの液体の粘度は超純水で 1.01 [mPa·s], アセトンで 0.322 [mPa·s] である。これは液体の粘度が下がるほど液滴から発生する蒸気による, 波板を蹴りだす推進力が弱まり, 波板上での速度も下がるのが考えられる。他の液種の結果や詳細については本文に記載する。

### 8. 結言

本研究では, 先行研究に加え, 別のパラメータを変更することで非平衡ポテンシャルのライデンフロスト効果の現象解明を目指した。そのために私は温度, 液滴の濃度, 直径, 液種の違いによる速度への影響を見出した。しかし, 新たな動力源へ応用させるための現象解明には至らなかった。修士課程では波板の形状だけでなくさらに他の液種で液滴の挙動を観測し, 現象の解明を追及するとともに, 引き続きライデンフロスト効果を用いた動力源の構築も進めていきたいと考えている。

#### 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] B.S. Gottfried Bell, & EC Fundamentals 5,561(1966)