

ライデンフロスト状液滴を用いた小型動力源開発のための基礎研究

システム工学群

材料革新サステイナブルテクノロジー研究室 1180117 中村 衛典

1. 緒言

近年様々な動力源が普及している。身近な動力源の一つとして自動車について紹介する。従来の動力源として多く利用されているガソリンエンジン、それと電気モーターを併用するハイブリット車、ガソリンエンジンと電気モーターを併用しているが電気モーターを主に利用するプラグインハイブリッド車、電気のみを動力として利用する電気自動車、搭載した電池で酸素と水素が化学反応し発生した電気を動力として利用する燃料電池車^[1]などがある。最近では動力源はより多くのエネルギーを出力するだけではなく、安全性に優れ、環境への悪影響をいかに減らすことができるかが求められている。そこで私は、先行研究として行われていたライデンフロスト現象に着目した。あまり聞き覚えの無い現象ではあるが、目にしたことがある人はかなり多いのではないだろうか。ライデンフロスト現象とは熱したフライパンの上に水を垂らすと、その水はすぐには蒸発せず小さな球体となり、縦横無尽に動き回る現象のことを指す。

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の抑制^[2]、水素電池自動車^[3]などがあげられる。このように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。

私は、このライデンフロスト現象を応用し、新しい動力源を開発できないかと考え、研究テーマとして選定した。先行研究では、超純水を用いてパラメータの異なる直線的な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が行われた。そこで私は円形の波板を新たに作成し研究を進めることにした。

2. 平衡ポテンシャルのライデンフロスト効果

ライデンフロスト効果は、液滴は滴下する表面の形状によって異なった蒸発挙動が見られる。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る。1756年にJ.G.Leidenfrost^[4]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。

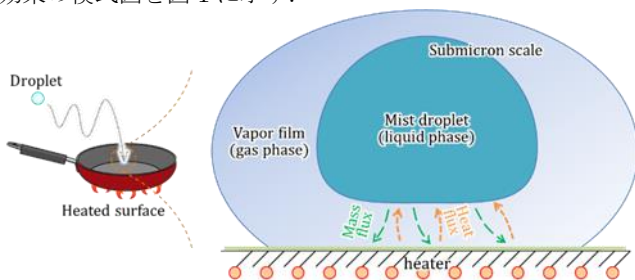


Fig.1 Schematic diagram of Leidenfrost effect

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^[5]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、液滴の挙動を表す計算式である次の厳密式が導出された。

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

3. 円形非平衡ポテンシャルのライデンフロスト効果

次に円形非平衡ポテンシャル構造における液滴のライデンフロスト効果について示す。ライデンフロスト状態の液滴を非平衡ポテンシャル構造をもった加熱表面上に導入すると、液滴が一方方向に移動する現象が知られている。そこで、非平衡ポテンシャルを円形に繋げることで、ライデンフロスト状液滴を円運動させることを思いついた。図2に円形非平衡ポテンシャル構造のモデルを示す。この円形非平衡ポテンシャル構造をもつ構造体を作製し液滴の挙動を観測することで、円形非平衡ポテンシャル上での液滴の挙動を理解し動力源へ応用させることを目的とした。

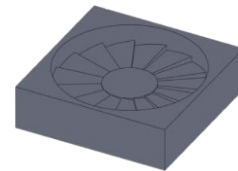


Fig.2 Circular non-equilibrium potential

4. 円形波板の作成

円形の波板を作製するためにまず、CAD を使用し作成する波板の表面形状の設計を行った。尚、CAD のソフトはSOLIDWORKS 2016 を使用した。また、切削の時間などを考慮し、縦横 30mm、高さ 8mm のアルミ板を基板とした。次に CAD で作成したモデルをもとに切削条件を決定し、精密加工室にある MDX-5000R(切削モデリングマシン)を用いて、円形波板を作製した。図3に切削機と実際に作製した波板を示す。また表1にそれぞれの切削条件をまとめる。



Fig.3 MDX-5000R and corrugated sheet

Table.1 Cutting conditions

		①	②
Rough cutting	Endmill diameter	R1.5	R1.5
	Cutting amount	0.1mm	0.1mm
	Path spacing	1.8mm	1.8mm
Finishing	Endmill diameter	R1.0	R0.5
	Cutting amount	0.1mm	0.1mm
	Path spacing	0.1mm	0.1mm

円形波板は荒削りをした後、仕上げで切削をした。図3に示すような円形波板の波数が10枚、15枚、20枚の波板は①の条件を用いて作成した。30枚の波板は②の条件を用いて作成した。

波の高さによる液滴挙動の差を観測するため、10枚、20枚波板は高さを1.6mmで作成し、15枚、30枚波板は高さを1.0mmで作成した。

5. 実験方法及び条件

ヒーターの上に円形波板を設置し、そこに電動ピペットを用いて一定量の液量を滴下した。コンパクトデジタルカメラの8倍スローモーション機能を使用し液滴が一方向に挙動を示す様子を撮影した。その後、動画を汎用のムービーメーカーで編集し、速度を算出した。また、算出した速度から円運動をする液滴が持つ運動エネルギーと液滴にかかる遠心力も算出した。図4に観測装置の概略を示す。

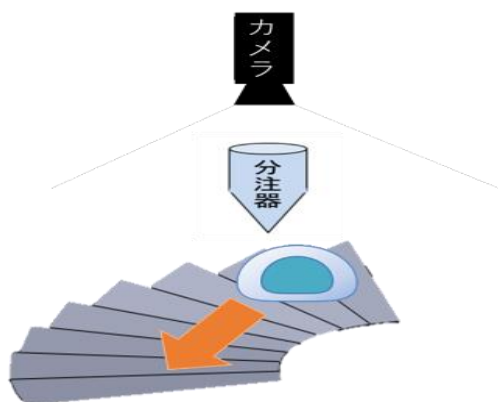


Fig4. Outline of experimental equipment

実験条件を表2に示す。

Table.2 Experimental conditions

Liquid type	D.I.water
Liquid volume	0.538 mL
Heater temperature	300~400°C
Number of experiments	3

※使用波板は10, 15, 20, 30枚波板である。

※温度は表面温度を計測し、25°Cごとに計測を行った。

6. 実験結果

横軸を基板温度(°C)、縦軸を速度(m/s)でグラフ化し、各基板表面温度における平均速度の結果を図5に示す。

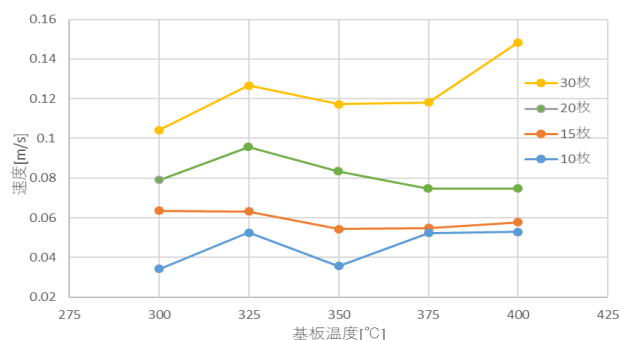


Fig.5 Experimental results

波数が多くなると、より安定した円運動が観測され、図5のグラフより、速度が速くなっていることが明確にわかる。また、ほとんどの波板は325°Cの時に一度速度が上昇し、その後減少傾向にある。その中でも、30枚波板は、400°Cの時に速度が最大値を示す結果になった。この速度をもとに算出した、液滴が持つ運動エネルギー(mJ)と液滴にかかる遠心力(N)については当日発表する。

7. 考察

10枚波板について、各温度における速度の増減傾向が他の波板とは異なっている。これは表面形状から受ける回転方向の力が小さく液滴の円運動が不安定なるためだと考えられる。実験時も、撮影可能時間に収まらないことがあった。

15枚波板について、300°Cの時に最高速度を示し、その後基板温度を昇温させても液滴回転速度は減少傾向であった。そのため300°Cよりも低い温度での観測が必要である。直線型の波板での液滴挙動に類似しているとすれば、300°Cよりも低い温度で最高速度を観測でき、ある速度に収束していると考えられる。また、20枚波板について、325°Cで最高速度を示し、その後、ある速度に収束している。これは直線型の波板での液滴の挙動と類似している。つまり、実験条件や表面形状に関わらず、非平衡ポテンシャルにおけるライデンフロスト現象として共通する原因が存在すると考えられる。

30枚波板について、すべての温度において、安定した円運動が観測され、液滴が小さくなくても、回転運動が長時間、続いた。他の波板よりも長く運動エネルギーが持続していると考えられる。

8. 結言

本研究では、先行研究で行われた、非平衡ポテンシャルのライデンフロスト効果を応用し、新たな動力源開発を目指した。円形の波板を新たに作成し、波数を変化させ、表面形状による速さへの影響を見いだした。しかし、実現にはまだデータ量が少なく、新たな動力源への見通しが立たない。そのため、波板の表面形状のパラメータをさらに改善しつつ実験を繰り返す必要がある。また、非平衡ポテンシャルのライデンフロスト効果との類似点をみつけることにより、新たな動力源へ応用させるための現象解明にも繋がると考えられる。

参考文献

- [1]<http://www.kuruma-sateim.com/eco-car/next-generation-car/>
- [2]http://korin.ishikawa.jp/products/about_turbine.html
- [3]<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%87%83%E6%96%99%E9%9B%BB%E6%B1%A0%E8%87%AA%E5%8B%95%E8%BB%8A>
- [4]J.G. Leidenfrost De Aquae Communis Nonnullis Qualitatibus Tractatus (1756) [in Latin]
- [5] B.S. Gottfried Bell, & EC Fundamentals 5,561(1966)