

卒業論文要旨

高音基材上での水の蒸発現象における

液量とライデンフロスト点に関する研究

システム工学群

材料革新サステナブルテクノロジー研究室 1240021 宇佐見 忠信

1. 背景

現代では化石燃料等のエネルギー資源の枯渇や地球温暖化といった問題が起きていることから、SDGs やカーボンニュートラル等のように持続可能な社会を意識した技術開発が進められている。また、エネルギーの変換効率を向上させる為に、新しいエネルギー利用法を開発しなければならない。

例えば工場などで発生する排熱は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構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の産業分野の排熱実態調査報告書⁽¹⁾によると、日本全国で年間 743.206PJ も発生している。本研究ではこれらの工場などで発生している未利用排熱に着目し、ライデンフロスト現象を利用した新たなエネルギー利用法を模索している。

2. ライデンフロスト現象について

液滴が沸点よりもはるかに高い温度の物体に接触または接近することで、蒸気が高温物体の表面との間に蒸気の膜が形成される。この蒸気膜が液滴を浮遊させて高温物体表面から液滴への熱伝達を阻害するため、液滴の蒸発時間が非常に長くなるという現象が「ライデンフロスト現象」である。これは 1756 年にドイツの医師 Johann Gottlob Leidenfrost が報告⁽²⁾したことから名付けられているものである。図 1 にライデンフロスト効果の模式図を示す。

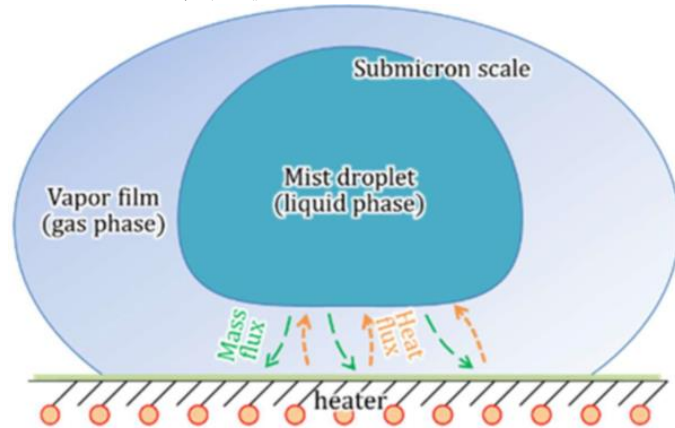


Fig.1 Schematic diagram of the Leidenfrost phenomenon

3. 目的

ライデンフロスト現象については未だに解明されていない部分が多く、そのメカニズムを解明する基礎研究を進める必要がある。本研究ではライデンフロスト現象の動力源利

用において液量が重要であると考え、14.1 μ l, 21.2 μ l, 28.2 μ l の 3 種類の液量で蒸発実験を行っていたが、私は更に液量を細かく区切って実験することでライデンフロスト現象による液滴の最大蒸発時間について観察し、ライデンフロスト現象を利用しやすい条件を探る為の基礎研究を行った。

4. 超純水の液滴蒸発実験

アルミニウム基板を高温状態のヒーター上に設置し、分注器を用いて一定量の液滴を基板上に滴下することで、液滴の蒸発時間を測定した。

本実験では超純水を用い、液量 14.1 μ l (液滴半径 1.5mm) を基準として 1.5 倍、2 倍、2.5 倍、3 倍、3.5 倍、4 倍、4.5 倍の液量である 21.2 μ l, 28.2 μ l, 35.3 μ l, 42.3 μ l, 49.5 μ l, 56.4 μ l, 63.5 μ l の 8 条件で実験を行った。基板表面温度は 300 $^{\circ}$ C から 5 $^{\circ}$ C ずつ低下させ、各温度で 5 回ずつ蒸発時間を計測した。

実験系の概略図を図 2 に、実験条件の詳細を表 1 に示す。

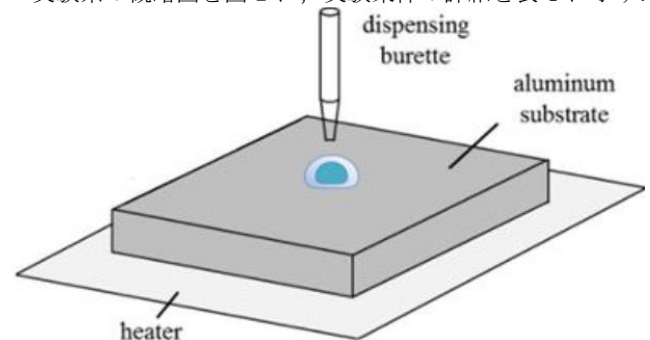


Fig.2 Schematic diagram of the experimental system

Table.1 Experimental conditions

Solvent	H ₂ O			
Liquid volume (μ l)	14.1	21.2	28.2	35.3
	42.3	49.5	56.4	63.5
Substrate surface temperature ($^{\circ}$ C)	235 ~ 300			
Measurement temperature interval ($^{\circ}$ C)	5			
Number of measurements	5			
Substrate material	aluminum			

5. 実験結果・考察

超純水液滴を滴下した際の、基板表面温度に対する液量ごとの平均蒸発時間について図 3 に示す。また、液量ごとのラ

イデンフロスト点を図4に示す。

いずれの液量においても 240～250℃の間で蒸発時間が急激に減少していることが分かる。また、28.2μL でライデンフロスト点の温度は最低となることが分かる。

図1よりライデンフロスト液滴には、液滴を支える蒸気膜の厚さや支えられている液滴の大きさ、蒸気膜と高温固体表面が触れる面積（液滴の底面積）などが関係していることが分かる。但し、液量 28.2μL～63.5μL は液滴半径 1.9mm～2.5 mmなので液滴径の差は非常に小さく、液量を増やしてもライデンフロスト点の温度が上昇し続けるわけではないのは誤差であると考えられる。また、14.1μL～28.2μL の間においては単に蒸気膜が薄く液滴が軽いため、液量の増加に比例して蒸気膜が厚くなり、より低い温度で蒸発せずにライデンフロスト状態を保てるようになったのだと考えられる。

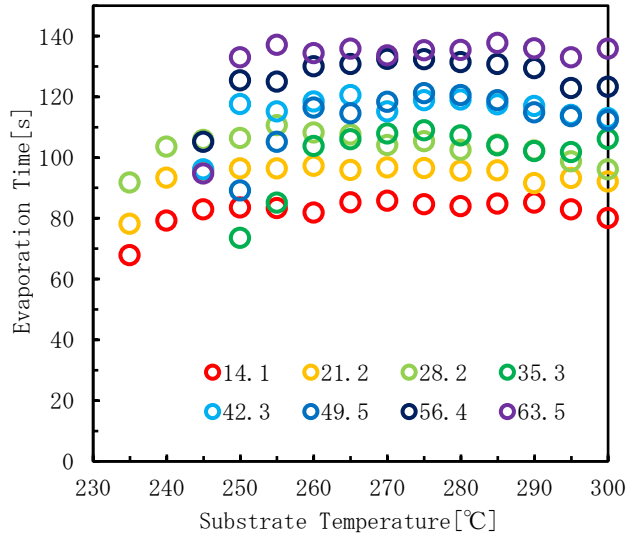


Fig.3 Average evaporation time for each volume of H₂O

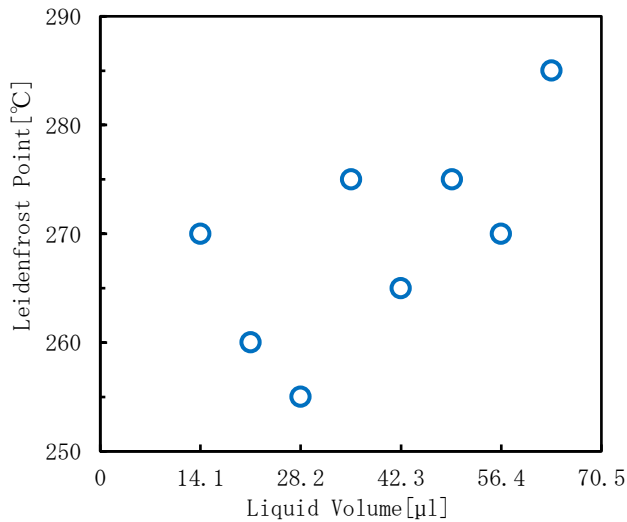


Fig.4 Leidenfrost point per liquid volume

6. ライデンフロスト液滴の R_{neck}

これまで実験を行ってきたライデンフロスト液滴は小さいため、どのようにして蒸発するのかについて詳細を視認することは難しかった。本研究ではライデンフロスト現象を把握する為に、様々な温度における超純水のライデンフロスト液滴の様子、特に底面の半径を観察した。液滴底面の半径を R_{neck} と言い、以後 R_{neck} で表す。

ライトで照らした液滴の蒸発状況をカメラで撮影し、モニ

ターに映った液滴の映像を録画して、 R_{neck} を測定した。

実験では超純水を用い、いずれの温度でも5回ずつ300μL滴下した。300℃から基板表面温度を10℃ずつ下げ、260℃以下では蒸発の様子を更に細かい条件で観察する為に基板表面温度を5℃ずつ下げた。

実験系を図5に、実験条件を表2に示す。

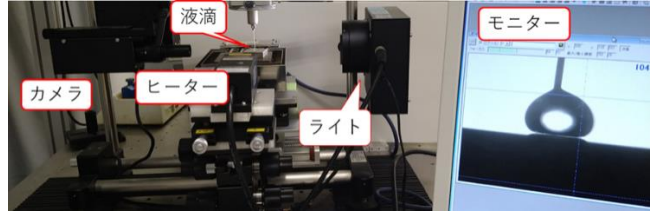


Fig.5 Experimental system

Table.2 Experimental conditions

Solvent	H ₂ O
Liquid volume (μl)	300
Substrate surface temperature (°C)	240 ~ 260 260 ~ 300
Measurement temperature interval (°C)	5 10
Number of measurements	5
Measurement time (s)	60
Substrate material	A5052

7. 実験結果・考察

超純水液滴を滴下した際の、各温度における5秒ごとの平均 R_{neck} を図6に示す。

まず各温度で R_{neck} の推移の仕方が違うことについて、260℃以上ではグラフにおける傾き、すなわち R_{neck} が減少するペースは一定であったが、255℃以下においては緩やかな傾きを見せる場合と急な傾きを見せる場合があった。これは、この温度帯において膜沸騰だけではなく遷移沸騰が起きたことにより、測定している間に蒸発量が大幅に増える瞬間があったのだと考えられる。

次に液滴滴下直後にもかかわらず測定開始時点で R_{neck} が温度によって大きく異なる点について、これは250℃以下において遷移沸騰が起きやすくなっているため、滴下直後においても一気に蒸発が進んだことで測定開始時点での R_{neck} にばらつきが生じたのだと考えられる。これは測定開始時点において、温度を下げるごとに平均 R_{neck} が小さくなっていったことから、遷移沸騰によるものだと考えられる。

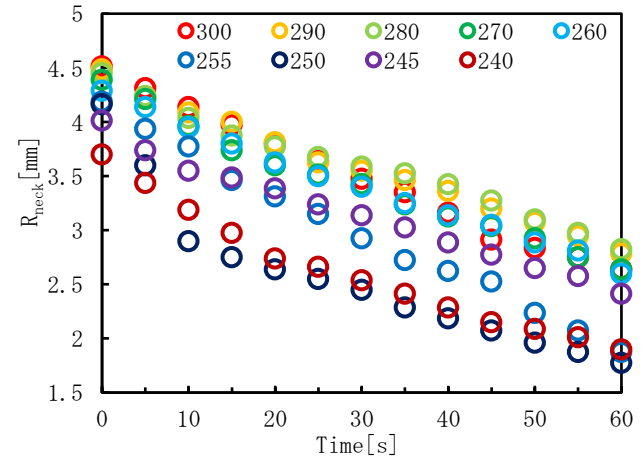


Fig.6 Average R_{neck} at various temperatures

8. 結論

本研究では、液量を変化させた場合における液滴の蒸発挙動について超純水を用いて実験を行った。

本研究より、液滴を利用する場合は 28.2 μ L 前後が少量且つ低温で利用しやすい液滴量であることが分かった。超純水のライデンフロスト液滴を一定量で利用する場合は 260°C 以上が望ましいということが分かった。

今後は超純水以外の、気体となっても安全な溶媒でライデンフロスト現象が利用できるか確かめるとともに、ライデンフロスト現象の継続時間が従来のアルミニウム基板よりも長くなる材質の基板を模索していきたい。

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, ”産業分野の廃熱実態調査報告書“
- (2) J.G. Leidenfrost “De Aquae Communis Nonnullis Qualitatibus Tractatus”, translation of portions to appear in Intern J Heat Mass Transfer (1756)
- (3) 秦暦, “高温壁面近傍における液滴挙動と液滴消滅時間に関する研究, 高知工科大学 修士論文 (2020)