

卒業論文要旨

動力源開発に向けたライデンフロスト効果と基板表面状態の関係に関する研究

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 1220068 小林 俊介

1. 背景

我々人類は、生活を豊かにするため、産業革命における蒸気機関の発明から今日に至るまでに熱エネルギーを機械の仕事に変換し、利用してきた。しかし、生活の利便性を向上させてきた一方、地球環境の豊かさが損なわれてきた事実も存在する。生活を豊かにすること、そして地球環境の保全を考慮することは双方のバランスを保った上で推し進めていく必要があり、そのために乗り越えるべき壁も多い。例えば、日常生活ではあまり意識されないエネルギーの廃棄という問題がある。たとえば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、200℃未満の排ガス熱量は全体の75%近くを占めることが報告されている。そこで本研究室では、工場排熱を利用した動力源開発のためライデンフロスト現象に着目し、200℃未満の廃熱の有効活用を目指している。

2. ライデンフロスト現象

ライデンフロスト現象とは、液滴が沸点よりも非常に高い温度の物体に接触、または近づくことにより、液滴より発生した蒸気が高温物体の表面との間に蒸気の膜を形成し、この蒸気の膜が液滴を浮遊させ、高温物体と液滴との熱伝達を阻害するため、液滴の蒸発時間が飛躍的に増加する現象のことである。1756年にドイツの医師である Johann Gottlob Leidenfrost⁽²⁾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。

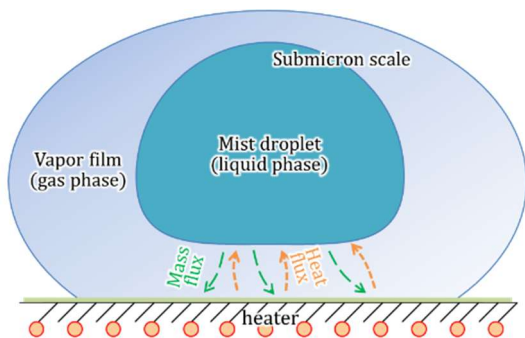


Fig.1 Leidenfrost effect.

ライデンフロスト状態の液滴の蒸発時間を物理的に導出しようと、B.S.Gottfriedらの研究チーム⁽³⁾は液滴形状を球体とみなし、熱収支による基板表面温度と液滴の蒸発時間の関係を表した理論式(1)を導き出した。

$$\tau_e = \left(\frac{12}{5\pi}\right) \left(\frac{4\pi}{3}\right)^{\frac{7}{12}} \left[\frac{9\mu\rho_1^3(\lambda^*)}{8k^3\Delta T^3\rho_v g}\right]^{\frac{1}{4}} V_0^{\frac{5}{12}} \quad (1)$$

しかし、この理論式は実験によって得られた結果とは大きく

異なっており、液滴に関する物性値を基に次元解析により厳密式が導き出された。先行研究ではさらに状態変数を追加し⁽⁴⁾、従来検討されていなかったパラメータを入れたモデル式(2)を導き出した。⁽⁵⁾

$$\tau \sqrt{\frac{g}{r_0}} = 2.09 \left(\frac{k\Delta T}{\rho_v D \lambda}\right)^{-0.338} \left(\frac{\rho_l}{\rho_v}\right)^{0.907} \left(\frac{C_p \mu}{k}\right)^{-0.386} \left(\frac{\mu}{\rho_v D}\right)^{-0.354} \left(\frac{D}{\sqrt{g r_0^3}}\right)^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{k_l C_l \rho_l}{k_s C_s \rho_s}\right)^{0.008} \left(\frac{4\epsilon\sigma T_m^3 \pi r^2}{S_z}\right)^{0.027} \quad (2)$$

3. 目的

ライデンフロスト効果を利用した動力源を実現させるため、200℃未満での液滴の蒸発時間を延長する手段を提案する必要がある。一般には、揮発性が高く沸点の低い溶媒を選定するなど提案されているが、本研究では基板表面の状態を変更させて200℃未満でもライデンフロスト状態を保つことができないか探ることとした。本実験では特に、表面の濡れ性に注目し液滴蒸発挙動の変化を調査した。

4. 実験方法

温度を上昇させたヒーター上に表面を撥水加工したアルミ基板を設置し、電子ピペットにより一定量の液滴を滴下する。基板表面温度を150℃から400℃まで10℃ずつ上昇させ、各温度で5回以上蒸発時間の測定を行った。撥水の効果が消失することが懸念されたため、各温度もしくは、5回測定毎に基板に撥水加工を施した。蒸発時間の振れ幅が大きい温度は測定回数を増やし、液滴が基板表面に接触した瞬間から蒸散し消失するまでを目視で確認し、その時間をストップウォッチで計ることにより計測した。

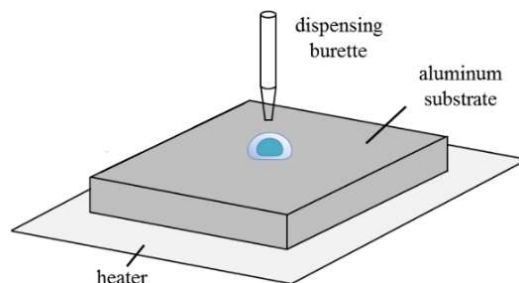


Fig.2 Schematic for evaporation time measurement system.

また、本実験は基板表面の状態が液滴の蒸発時間に与える影響について検証するために、液滴条件を統一し、先行研究⁽⁵⁾の表面に撥水加工を施していない基板の蒸発時間と比較し実験した。表面に撥水加工を施していない基板をC0基板、撥水加工を施した基板をC1基板とする。表1に実験条件の詳細を示す。

Table.1 Experimental conditions.

Liquid type	H ₂ O
Liquid volume (μl)	11.4
Droplet radius (mm)	1.4
Substrate surface temperature (°C)	150 ~ 400
Number of measurements	5 ~ 55
Measurement temperature interval (°C)	10
Top surface of substrate	Water-repellent or not

5. 実験結果

図3に蒸発時間を比較するために撥水加工の有無による液滴の蒸発時間の結果を示す。黄色丸点はC0基板の、青色丸点はC1基板の、灰色の三角点で結ばれたラインはモデル式(2)の蒸発時間を表したものである。

C0基板の蒸発時間の最大は270°Cであったのに対し、C1基板ではデータの取得数は少ないが150°Cで最大となっている。また蒸発時間の最大値はC0基板が約75秒、C1基板が約140秒であり、蒸発時間に65秒ほど差が現れる結果となった。C1基板は200°C付近を境に温度が低くなると蒸発時間にばらつきが生じ、最も蒸発時間のばらつきが大きくなったのが基板温度150°Cで約100秒である。

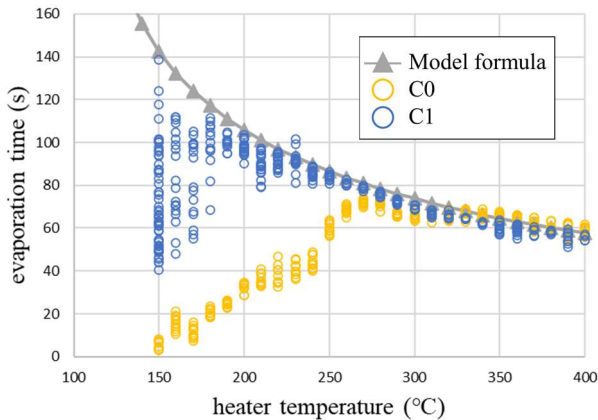


Fig.3 Evaporation time of a water droplet on two different types of substrates.

6. 考察

まず注目すべき点が270°C未満における温度帯での蒸発時間である。特に150°Cから220°Cの間の各温度帯ではC0基板に比べ、C1基板のほうが最低でも40秒蒸発時間が長い。これは一目で撥水加工により液滴の蒸発時間が長くなっているのがわかる。しかし、270°C以上の温度帯では撥水加工の有無に関わらずモデル式(2)の蒸発時間と非常に酷似している。すなわち、撥水加工は270°C以上の温度帯での液滴の蒸発時間に影響を与えない、もしくは、撥水の効果が損なわれていると考えられる。つまり撥水加工は、ライデンフロスト現象の特徴である蒸発時間が飛躍的に増加する温度を、より低温化させることを可能にしている。

次にC1基板の比較的低温帯での蒸発時間が分散する点、また蒸発時間が増加した点について考察する。まず、C1基板の180°C以下の温度帯で急激に蒸発時間が分散していることについて考える。ライデンフロスト状態の液滴は、最も基板に近い下面付近より常に蒸気が発生していると予想することができる。よって液滴の最下点は水の場合沸点であり1気圧の場合100°C付近となる。つまり基板表面温度の違いにより蒸発量に変化し、それに伴い蒸気膜の厚さが変化していることが推察される。実際にライデンフロスト状態の液滴の温度を測定すると、基板温度の違いに関わらず液滴の温度は

100°C付近を示していた。先行研究でも基板温度と蒸気膜の厚さの関係性は報告⁽⁵⁾されており、本実験においても基板表面温度が低くなるにつれ蒸気膜が薄くなり、基板との接触によるおびただしい量の蒸発、またはそれに近い急速な蒸発により液体量が減少し、液滴の分裂が生じ蒸発時間が低下してしまうことが考えられる。

撥水加工により270°C未満の温度帯での蒸発時間の増加理由について考察する。図4にこの時の基板表面とライデンフロスト状態液滴間のイメージ図を示す。上述より、C0基板では270°C未満の温度帯で接触やそれに近い蒸発が起こっていることがわかる。しかしC1基板の場合、撥水加工により、液滴下面と基板の接触面積が減少し、液滴の蒸発時間はモデル式(2)に近くなる。これは外乱である振動や基板の傷や汚れ、液滴の水平移動による蒸気の欠損などの影響を受けにくく、薄い蒸気膜でも接触による蒸発やそれに近い蒸発が発生せず、モデル式(2)の蒸発時間に近づいたと考えられる。つまり液滴のライデンフロスト状態を阻害する因子が少なくなり、150°Cでの蒸発時間が1つ飛びぬけてモデル式(2)に近い値である約140秒に到達しているのも、この考えを強く裏付けている。

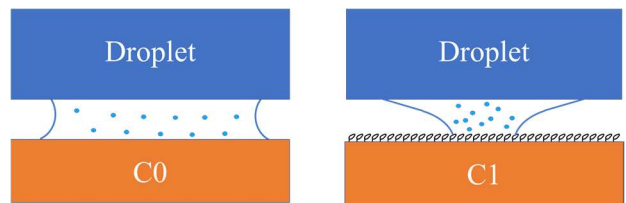


Fig.4 Detailed state of droplet with high substrate surface temperature.

7. 結言

本研究では、基板の表面状態の変化による液滴の蒸発時間の関連性について検討した。その結果、基板表面に撥水効果を施すと、200°C未満でのライデンフロスト現象において蒸発時間を向上させられることが判明した。

しかし、モデル式(2)とC1基板の最大の蒸発時間を比較すると(図3)、160°Cと170°Cで約10~20秒の差が生じている。これは、その温度での理論上の最長蒸発時間を観測できていない。そこで、基板の表面状態の改善をさらに進めることにより、160°Cと170°Cで最長時間の観測、また、より低温帯で液滴のライデンフロスト状態を保つことが可能であると提案することができる。

またライデンフロスト効果による動力源開発のため、鋸歯構造上におけるライデンフロスト状態液滴の挙動に関する研究も必須であり、撥水加工の有無との関係性についてさらなる研究を進めていかなければならない。

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)
- (3) B.S.Gottfried, K.J.Bell “FILM BOILING OF SPHEROIDAL DROPLETS” I & EC Fundamentals 5, 561 (1966)
- (4) 松崎俊祐 “狭差二平板間を走る微小液滴のモデル創出”高知工科大学 修士論文 (2017)
- (5) 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)