

卒業論文要旨

高温壁面近傍における液滴消滅時間計測のための観測系の構築

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 服部 隼也

1. 背景

高温加熱面上に液滴を滴下すると、ある温度以上において液滴が加熱面に直接接触せず、蒸気膜により浮上した状態で蒸発するライデンフロスト現象が生じる⁽¹⁾。図1にライデンフロスト現象の概略図を示す。

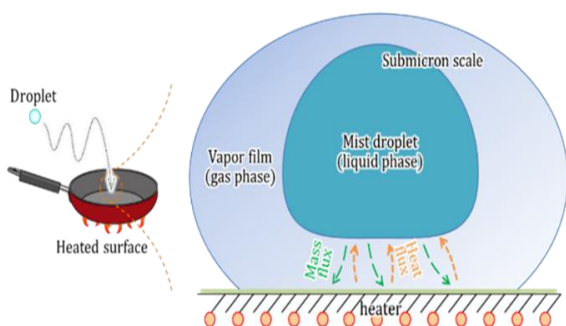


Fig. 1 Leidenfrost effect

この現象は熱伝達制御や冷却技術への応用可能性を有しており、ライデンフロスト現象が生じた際における液滴の蒸発挙動を定量的に理解することは工学的に重要である。ライデンフロスト状態における液滴の蒸発時間は、Gottfried らにより次元解析に基づく厳密式が提案されている⁽²⁾。しかし、この式に含まれる蒸気相物性値の評価条件や適用範囲は必ずしも明確ではなく、実験結果との整合性には課題が残されている。

2. 既存研究と課題

Gottfried らの蒸発時間厳密式は理論的整合性を有する一方で、式に含まれる蒸気相の熱伝導率、密度、比熱、粘性係数などの物性値について、評価温度や取得条件が明示されていない。また我々が厳密式を導出する際においても、参照すべき代表温度や取得ソースの選定基準に統一的な指針が確立されているとは言い難い。そのため、参照する文献等によって採用される値に差異が見受けられ、異なる研究結果との厳密な比較や、予測モデルのより高精度な検証を行う上で、評価基準の再検討が求められる。また、従来の実験では蒸発時間をストップウォッチにより手動計測する方法が主であり、蒸発過程における液滴形状や寸法の時間変化を詳細に評価することは困難であった。このため、蒸発時間という単一指標のみでは、蒸気膜を介した熱伝達や蒸発機構を十分に議論できないという課題が存在する。

3. 目的

前述した課題の解決に加え、ライデンフロスト状態における液滴蒸発挙動をより詳細に理解することを目的として以下の3点について調査した。

- (1) 基礎蒸発実験による蒸発時間の温度依存性の把握
- (2) 既存蒸発時間厳密式に含まれる物性値の妥当性の再検討
- (3) 画像解析を用いた液滴半径の時間変化に基づく新たな評価手法の構築

4. 蒸発時間厳密式の再検討と物性値評価

Gottfried らの次元解析に基づく一般形を基に、先行研究で行われた回帰分析手法を整理した。さらに、蒸発時間厳密式に含まれる蒸気相物性値について、NIST Chemistry WebBookを用いて再評価を行った⁽⁴⁾。当時用いられた物性値と改めた物性値を表1に示す。

Table 1. Physical properties used to derive an exact formula for the evaporation time of a Leidenfrost droplet.

温度 ΔT [°C]		熱伝導率 k [W/mK]	蒸気密度 ρ_v [kg/m ³]	比熱 C_p [J/kgK]
150	変更前	0.03818	0.42112	1989.6
	変更後	0.03834	0.42101	1989.6
200	変更前	0.04343	0.38399	2012.6
	変更後	0.04353	0.38389	2012.6
250	変更前	0.04897	0.35294	2040.0
	変更後	0.04898	0.35285	2040.0
300	変更前	0.05476	0.32658	2069.9
	変更後	0.05465	0.32649	2069.9

その結果、熱伝導率、蒸気密度、比熱などにおいて、先行研究で用いられていた値との差異が確認され、採用する物性値により液滴の蒸発時間の予測にズレが生じてしまう可能性が示唆された。

5. 画像解析による液滴半径の自動取得

従来の手動計測に代わり、高速度カメラで撮影した動画から液滴半径を自動抽出する画像解析手法を構築した。図2に輪郭検出の例を示す。この検出精度を向上させるため、事前に画像アノテーションプラットフォーム「Roboflow」を使用し、多様な温度条件下で撮影された液滴画像に対して手作業でバウンディングボックス（境界枠）を付与した独自データセットを作成・学習させた。YOLOによる液滴検出と輪郭抽出を組み合わせ、円近似により半径を算出することで、液滴半径の時系列データを取得した。さらに、解析結果の統計処理からグラフ描画までを一括で行う自動処理工程を構築した。

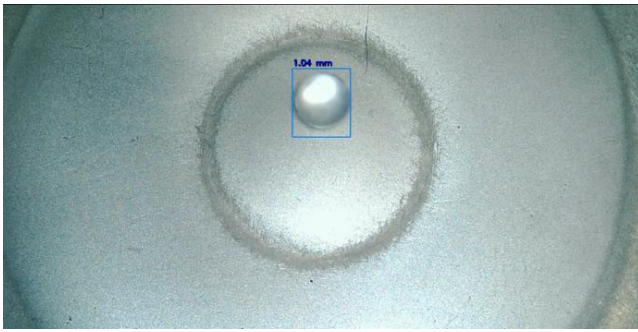


Fig. 2 Architecture of the YOLO (You Only Look Once) neural network for droplet detection.

本解析システムの詳細な処理フローを図3に示す。YOLOにより特定された液滴領域に対し、グレースケール化および二値化処理を施し、抽出された点群に対して最小二乗法による円近似を適用することで、液滴半径 R をピクセル単位で算出する。さらに、得られた半径データの統計処理および時系列グラフの生成を自動実行するスクリプトを構築したことで、人為的なミスを排除し、実験結果の即時的な可視化を可能とした。

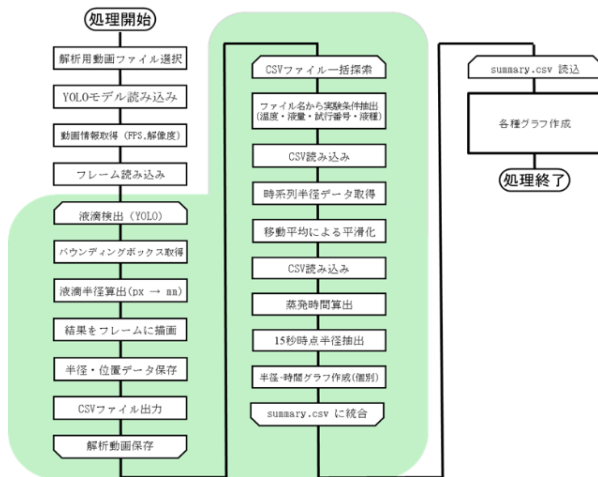


Fig. 3 Flowchart of the image analysis algorithm for droplet radius extraction.

6. 液滴半径変化と R^2 則との整合性

取得した半径データを解析した結果、ライデンフロスト状態の準定常領域において、液滴半径 R が時間に対して極めて高い直線性を持って減少することが確認された。半径と時間の関係のグラフを図4に示す。

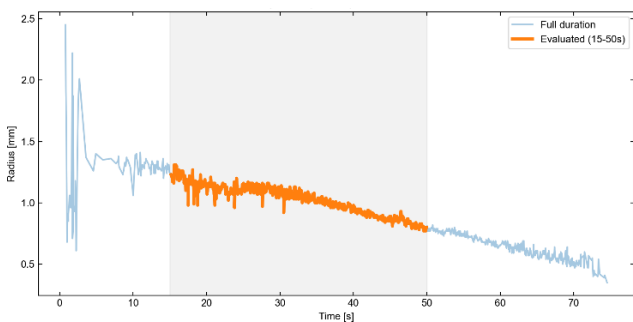


Fig. 4 Temporal evolution of the radius from 15 to 50 seconds.

また、半径の二乗 R^2 も概ね直線的に減少し、古典的な D^2 則と整合する挙動が得られた⁽⁵⁾。しかし、詳細な観察によ

り、 R^2 プロットの最終局面において減少速度が鈍化する「たわみ」が確認された。この挙動について、半径 (1次) に加え面積 (2次) および体積 (3次) の指標を用いた幾何学的モデルによる比較検討を行った。図5に、比較した図を示す。

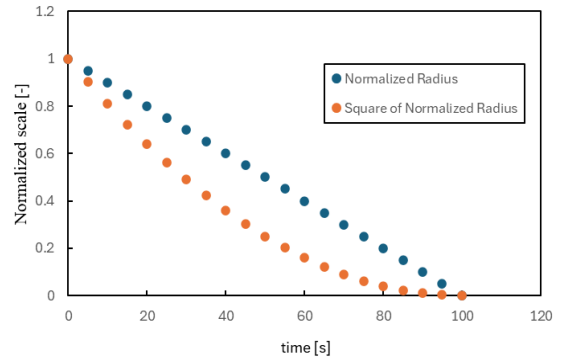


Fig. 5 Comparison of geometric characteristics of radius and its squared value based on the linear radius decay model.

検討の結果、実測データの「たわみ」は、半径 R が時間に対して線形に減少する際に、その高次項である面積 (R^2) や体積 (R^3) において数学的に生じる幾何学的特性と極めて類似していることが判明した。図4に示す通り、規格化した半径 R と R^2 の推移を比較すると、 R^2 プロットは序盤こそ直線的な減少を示すものの、終盤にかけて減少速度が鈍化する「たわみ」が顕著に現れるが、半径が一定の速度で減少するモデル ($\frac{dR}{dt} = const.$) はこの挙動を忠実に再現している。従来のストップウォッチを用いた単一指標 (蒸発時間) のみの計測では、このような過渡的な挙動を捉えることは不可能であった。本研究で構築した画像解析手法により、高頻度かつ連続的な半径データを取得し、幾何学的観点から多角的に解析を行ったことで初めて捉えられた成果といえる。

7. 結言

本研究では、ライデンフロスト状態における液滴蒸発を、蒸発時間という単一指標ではなく、液滴半径の時間変化という連続的な物理量として評価する手法を確立した。これにより、既存の蒸発時間厳密式と実験結果を結び付ける新たな解析視点を提示するとともに、ライデンフロスト蒸発現象の物理的理解を深化させることができた。

8. 参考文献

- (1) J. G. Leidenfrost “De Aquae Communis Nonnullis Qualitatibus Tractatus,” 1756.
- (2) B. S. Gottfried and K. J. Bell “Film Boiling of Spheroidal Droplets,” I&EC Fundamentals, Vol.5, pp.561-568, 1966.
- (3) 荒木徳孝, “加熱面上における液滴量と蒸発時間の関係に関する研究”, 高知工科大学卒業論文 (2022).
- (4) NIST Chemistry WebBook, National Institute of Standards and Technology, <https://webbook.nist.gov/chemistry/>.
- (5) E. S. Pleteneva and P. A. Rebinder “Evaporation of droplets in the film boiling regime,” International Journal of Heat and Mass Transfer, 1967.
- (6) J. C. Burton, A. L. Sharpe, R. C. A. van der Veen, A. Franco and S. R. Nagel, “Geometry of the Vapor Layer Under a Leidenfrost Drop,” Physical Review Letters, 109, 074301 (2012)