

卒業論文要旨

高温流れ場における微小液滴の蒸発挙動を観測するための装置の開発

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 早川 樹

1. 緒言

近年、インクジェット印刷技術や電子機器の冷却技術、および、エンジン内の燃料噴射技術などをはじめとして、微小液滴の精密な制御技術は多くの分野において重要性を増している。例えば、エンジン内部に噴霧される燃料は微小液滴として挙動し、高温面との接触によりライデンフロスト現象を呈することが知られており、その解析に基づく最適設計は燃焼効率の向上に寄与している⁽¹⁾。また、生成AIが普及した現代において、データセンターで発生する熱が問題となっており、解決策としてミストを利用した冷却方法も研究されている⁽²⁾。

当研究室では、機能性薄膜の作製法であるミストCVD法の開発⁽³⁾を進めており、大気圧下での均質膜形成のためにライデンフロスト現象を積極的に利用する方法を検証している。加えて、閉鎖系内で流体の状態を操作する装置の開発⁽⁴⁾や、工場排熱などの未利用熱エネルギーを利用して加熱した液滴を動力源とするエネルギー回収技術の研究⁽⁵⁾も進めている。

ミリオーダーの液滴はB.S.Gottfriedらの研究チーム⁽⁶⁾によって、ライデンフロスト液滴の蒸発時間を表した厳密式が導出されているが、マイクロオーダーの液滴にも成り立つのかは不明である。本研究では、超純水およびメタノールの観測実験の再実施によるデータ数の拡充、ならびに観測装置系の改良によって、光学的な観測によるライデンフロスト現象の証明および定式化を目指す。

2. ライデンフロスト現象

ライデンフロスト現象とは、液体がその液体の沸点より十分に高温な固体表面に接触もしくは近接させた際に、固液間に蒸気膜が形成され液体が固体表面から乖離、熱伝達が阻害されることで蒸発時間が大幅に増加する現象である。1756年にJohann Gottlob Leidenfrost⁽⁷⁾により報告されたためライデンフロスト現象と呼ばれている。図1にライデンフロスト現象の概略を示す。B.S.Gottfriedらの研究チームによって導出されたライデンフロスト液滴の蒸発時間を表した厳密式(1)を以下に示す。

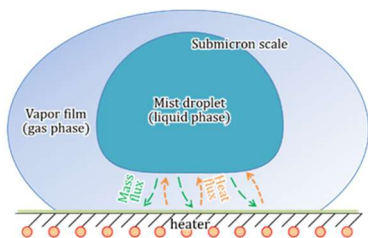


Fig.1 The schematic image of Leidenfrost effect.

$$\tau \sqrt{\frac{g}{r_0}} = 37.8 \left(\frac{k\Delta T}{\rho_v D \lambda} \right)^{-0.735} \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0.407} \left(\frac{C_p \mu}{k} \right)^{-0.874} \left(\frac{\mu}{\rho_v D} \right)^{0.714} \left(\frac{D}{\sqrt{g r_0^3}} \right)^{-1/3} \quad (1)$$

3. 旧観測装置群の詳細

現在使用している観測装置系は、流路装置、加熱装置、噴霧装置、光源装置、撮影装置、排気装置で構成されている。装置系の全体像を図2に示す。流路装置は流路(高さ1mm、幅5mm)を石英ガラス板で挟み、それらをアルミ合金A7075製のカバーで覆う構造となっている。流路装置の概略図を図3に示す。加熱装置は流路を高温かつ均一に保つためにカートリッジヒータと制御装置(ミスミ製MTCD)を使用した。噴霧装置は本多電子株式会社製HM2412を使用した。光源装置はHSPS製NANOLITE KL-L(フラッシュ持続時間18ns)とNANOLITE DRIVERを使用した。撮影装置はSONY製α7RV(ILCE-7RM5)を使用している。排気装置は、メタノールをはじめとした人体に有害な溶媒を用いて実験する際に使用した。

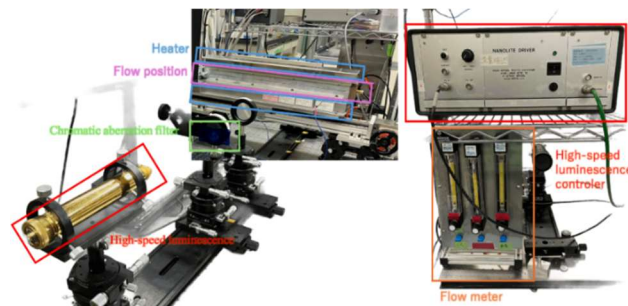


Fig.2 General view of observation equipment

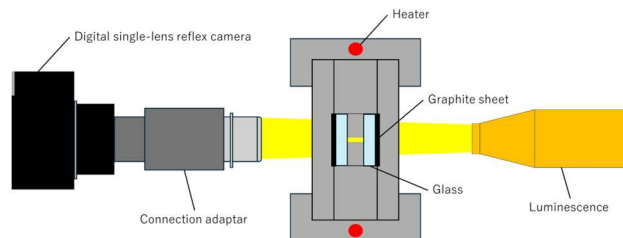


Fig.3 Flow path device diagram.

4. 液滴径計測プログラム

液滴径を評価するためには、流路内を飛翔する液滴をカメラで撮影し、得られた画像から液滴を認識して個数や液滴径を計測する必要がある。統計的に信頼性の高いデータを取得するためには大量の画像が必要となる。そこで、撮影した写真から自動的に液滴を認識し、液滴径を計測するプログラムが開発された。本プログラムは、画像内の液滴の認識に深層

学習を利用して、焦点の合致している液滴のみを YOLOv5 で認識し、液滴の粒径を計測することが出来る。計測された粒径から、算術平均粒径およびザウター平均粒径を求めることが出来る。

5. 観測装置系の課題および改良

流路装置の気密性向上にあたり、ガスケットシートに経年劣化による亀裂が確認された。この問題に対し、新たに黒鉛ガスケットシートを取り付けることで解決を図った。さらに、撮影装置を先行研究時よりも流路装置に近づけることが出来るように流路側面の厚みを薄くして、旧流路装置同様の流路温度を得るため、材質をアルミニウム合金 A7075 から、A5052 に変更した。先行研究では流路装置の最高到達温度を重視したが、本研究においては流路内部の状態を安定させることを重視し、新流路装置を設計した。また、現在使用している光源装置はスパークフラッシュを使用しており、雷放電を起こすことによってフラッシュを発生させている。この方法では、ランプ内のどの位置で放電が起こるかが不明であるため、照度および発光位置を一定にできない。そのため、撮影した画像内の明るさ分布が一樣でなく、同様に撮影した画像ごとに明るさが異なってしまい、液滴の認識が難しいという問題がある。図 4 にスパークフラッシュ光源内部のイメージ図および実際に撮影された画像を示す。

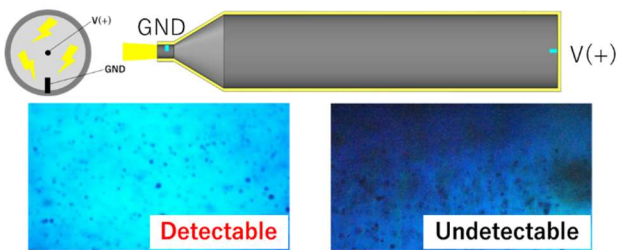


Fig.4 Front view of luminescence and detectability of microdroplets

この問題の解決のために、新たな光源装置として LED に複数個のコンデンサを接続し交互に充放電を行う回路を制作した。この回路は、コンデンサの時定数を利用して発光時間を制御することを目的として設計しており、すでに回路の試作を終え 1ms 程度での時間での発光を確認できた。例として、時定数を 1 秒とした時のコンデンサへの 4 秒間の充電および LED への放電時の電圧変化の様子および実際の回路基板の写真を図 5、図 6 に示す。一方、現行回路では充電初期、コンデンサの入力インピーダンスが 0Ω であるため大きな電流が流れ、その際、コンデンサの接続を切り替えるスイッチング素子にも漏れ電流が流れてしまうことという課題がある。すなわち、実際に流れる漏れ電流の値よりもスイッチング素子の最大定格電流が小さいため、過電流によって破損してしまい、実際にフラッシュ光源として使用できないことが判明した。また、LED ではナノ秒の発光時間の実現が難しいと判断し、新たな光源としてレーザーを用いることを検討している。しかし、当研究室の梶の先行研究において、レーザーを光源として利用した実験はなされているが、レーザー光源の高いコヒーレント性により、スペckルノイズと呼ばれる干渉縞が発生していた⁽⁸⁾。その結果、干渉縞と重なった部分の液滴認識が出来ず、レーザー光源での実験は中断されていた。この問題の解決のために、スペckルリデューサーの導入を検討している。

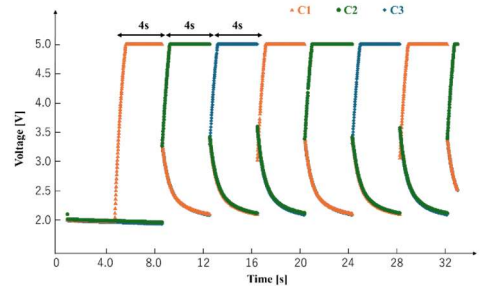


Fig.5 Voltage of each condenser.

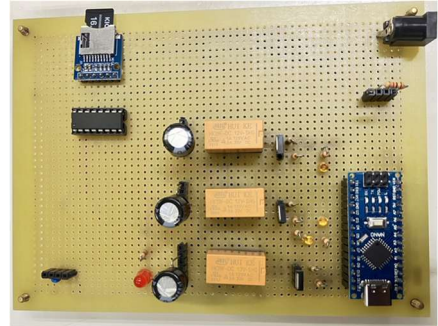


Fig.6 Image of circuit board

6. 結言

本研究では、流路装置の気密性向上のため、流路装置のガス漏れを黒鉛ガスケットシートの装着で解決した。また、流路装置の構造および材質を変更することにより、流路内部の温度安定性向上を実現した。さらに、従来のスパークフラッシュは発光位置や照度が不安定で、画像の明るさ分布が一樣でなく液滴の認識が難しいという問題があった。そこで、LED と複数のコンデンサを用いた新たな光源装置を検討したが、充電初期の大電流によりスイッチング素子に過電流が流れる恐れがある。現在はこの課題を解決すべく、適切な素子の選定を進めると同時にレーザーの光源への利用を考えている。

文献

- (1) 獄間 沢秀孝, “高温壁面上における燃料の蒸発寿命時間と蒸発特性”, 近畿大学工学部研究報告, No.45, (2011), pp.99-102.
- (2) Ning Gao, Syed Mughees Ali, Tim persons, “On the Numerical Investigation of Two-Phase Evaporative Spray Cooking Technology for Data Centre Applications”, International Journal of Thermal Sciences, Vol.208, (2024)
- (3) 川原村 敏幸, “ミスト CVD 法とその酸化亜鉛薄膜成長への応用に関する研究”, 京都大学大学院工学研究科博士論文, (2008)
- (4) 中村 祐輔, “空間内の流体の状態を変化させる制御装置の開発”, 高知工科大学学士論文, (2024)
- (5) 岡田裕明, “低温熱源を利用した熱エネルギー回生システムの機構設計に関する研究”, 高知工科大学修士論文, (2024)
- (6) B.S.Gottfried, K.J.Bell, “FILM BOILING OF SPHEROIDAL DROPLETS”, I & EC Fundamentals 5, 561, (1966)
- (7) J.G.Leidenfrost, “De Aquae Communis Nonnullis Qualitatibus Tractatus”, (A Tract about Some Qualities of Common Water), translation of portions to appear in Intern J Heat Mass Transfer, (1756)
- (8) 梶 亮介, “高温流れ場における微小液滴の蒸発挙動に関する研究”, 高知工科大学修士論文, (2024)