

高温場における微小液滴の蒸発挙動解明に関する研究

Study on evaporation behavior of Microdroplets at high temperatures

知能機械工学コース

材料革新サスティナブルテクノロジー研究室 1255032 草下 圭太

1. 背景

微小液滴の蒸発挙動は過去から現在まで様々な業界で注目されており、今後の技術開発においてもマイクロな分野の詳細解明がカギを握っていると考えられる。微小液滴は、たとえ僅かな外乱であっても大きな影響を受けてしまうため、正確な制御が困難である。そのため様々な分野で活発な研究開発が行われてきた。例えば、インクジェットプリンターではインクミストの挙動分析による印字精度の向上⁽¹⁾や、エンジン内の燃料液滴の蒸発挙動分析による燃費改善⁽²⁾、さらに近年の感染症拡大により空間除菌への注目が高まったことから、ミスト化された消毒液の蒸発挙動分析⁽³⁾が行われている。

2. ミスト CVD 法

本研究室で開発しているミスト化学気相成長（ミスト CVD）法は原料溶液を超音波によって数 μm 程度の液滴とし、霧状となった原料ミストを窒素などの不活性ガスによって搬送し、反応炉で熱等のエネルギーを加えて反応させ、基板上に機能薄膜を成長させる手法である。このミスト CVD 法においても微小液滴の挙動解明が求められている。

3. ライデンフロスト現象

ライデンフロスト現象とは液滴の蒸発挙動の一つである。図 1 に示すように液滴がその液体の沸点よりも高温な壁面に近づく、もしくは接触した際に、壁面と液滴の間に形成された薄い蒸気膜によって、高温壁面上を浮遊した状態になり、壁面から液滴への熱伝達が阻害され、液滴の蒸発時間が大幅に増加する現象である。

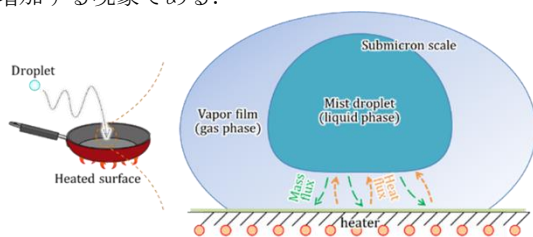


Fig. 1 Schematic image of Leidenfrost droplet

4. 目的

ミスト CVD 法では、微小液滴がどのように成膜に寄与しているのかについては、反応炉内に供給された原料ミストの液滴がライデンフロスト状態となり、その蒸気膜を介して成膜が行われている可能性が挙げられており、過去のそれを裏付ける報告がなされている。⁽⁴⁾しかしながら、反応炉内を直接観測したわけではなく、断定するまでには至っていない。そこで、本研究ではマイクロオーダーの微小液滴の高温場における蒸発挙動を光学観測による直接観測によって解明すべく、先行研究⁽⁵⁾で進められてきた特殊な観測装置の改良と新たな液滴粒径計測プログラムの開発を行い、定常的且つ正確な液滴粒径の計測を実現し、微小液滴蒸発挙動の解明を目指した。

5. 研究内容

本研究では以下の項目について開発、実験を行った。本稿ではIIとIIIの成果について記載する。その他の研究内容の詳細は修士論文にて述べる。

- I. 特殊な観測装置群の改良と新規装置の導入
- II. 深層学習を用いた液滴粒径自動計測プログラムの開発
- III. 微小液滴蒸発挙動の観測と解析

5.1. 深層学習を用いた液滴粒径自動計測プログラム

先行研究にて開発されたプログラムでは、ゴミの誤認識や、撮影装置の被写界深度が非常に浅いため、多くの液滴にピン트가合わず、ボケた液滴を誤認識してしまい、正確な液滴粒径の計測ができていない問題があった。そこで、深層学習を用いて液滴のピンボケ判断を行い、正確な液滴粒径を計測できるプログラムの開発に取り組んだ。

深層学習アルゴリズムはYOLO (You Only Look Once) ver5を使用した。YOLOはこれまでの物体検出アルゴリズムのように検出と識別を順に行うのではなく同時に行うことにより認識速度の向上を実現している。また、画像全体の情報を学習時に利用するため、物体周辺の領域も学習することから背景の誤検出が削減された。本研究では観測環境に合わせた5種類の学習結果を作成したが、本稿では5.2節で後述する解析に用いた学習結果について記載する。

教師データは液滴画像940枚に対し、12230個のタグ付けをしたアノテーションデータを作成し学習を行った。学習結果を図2に示す。また、作成した結果の重みを用いて液滴推論を行った結果を図3に示す。赤色の矩形がピン트의合致した液滴、薄赤色の矩形がボケた液滴である。推論結果より、十分な数の液滴を正確に認識できていることが分かる。また、観測装置群で得られた動画ファイルを画像として書き出し、液滴推論の後、粒径計測まで全自動で行う解析プログラムを開発した。

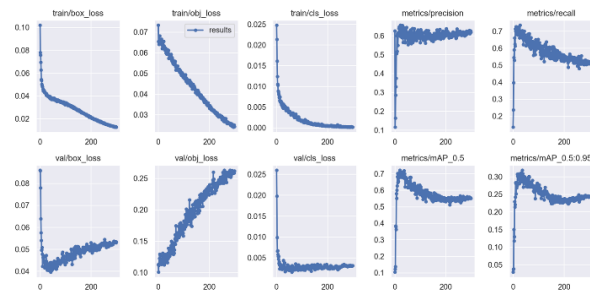


Fig. 2 Learning results

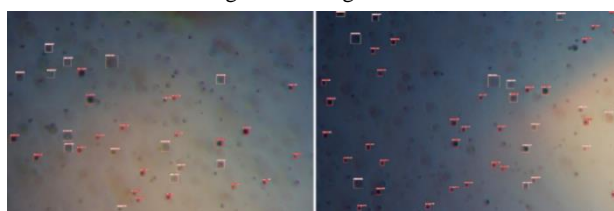


Fig. 3 Detection results

5.2. 微小液滴蒸発挙動の観測と解析

本研究で開発した観測装置群と前述した液滴粒径計測プログラムを用いて超純水における微小液滴蒸発挙動の観測実験を行った。液滴観測から解析までの概要図を図4、実験条件と解析条件をそれぞれ表1、表2に示す。実験は動画を1回につき120秒撮影し、流路下流域では液滴個数が減少するため2回撮影し液滴個数の確保に努めた。

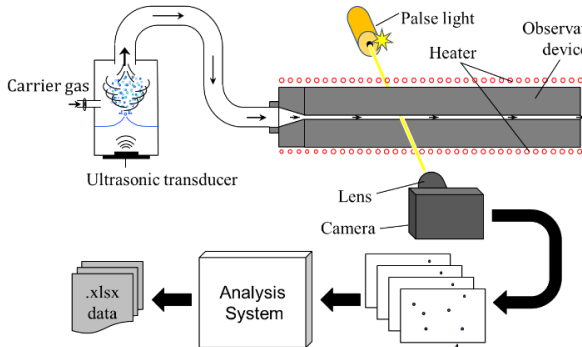


Fig. 4 Schematic image of observation system analysis diagram

Table 1 Experimental conditions

solvent	:	H ₂ O
Temperature [°C]	:	100,150,200,250,300,325
c.g./d.g. [L/min]	:	4.0/0.0
Obs. pos. from inlet [mm]	:	25~500(I-V 25 mm)
Power [V·A]	:	24/0.64
Time [ns]	:	22
Measurement time[s]	:	120,240
ISO sensitivity	:	2000

Table 2 Analysis conditions

YOLO weights	:	Data4.1
Confidence	:	0.3
Image size	:	768

上流側の50~100 mm地点と下流側の450~500 mm地点の代表的な観測画像を図5、同地点における粒径解析結果のヒストグラムを図6に示す。ヒストグラム左肩の数値は上から算術平均粒径、ザウター平均粒径を示す。右肩の数値は上からピント合致の認識個数、ボケた液滴の認識個数、総認識個数を示す。装置改良により先行研究では観測できなかった流路下流域において十分な個数の液滴観測を実現した。また、深層学習を利用した全自動での解析により、計測の精度と効率の向上に成功した。

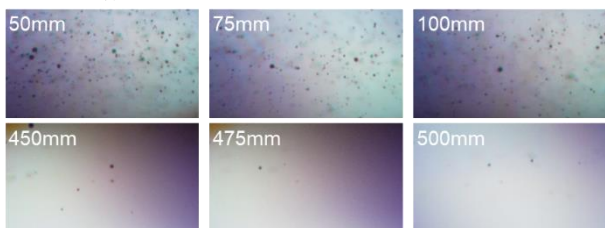


Fig. 5 Droplet images

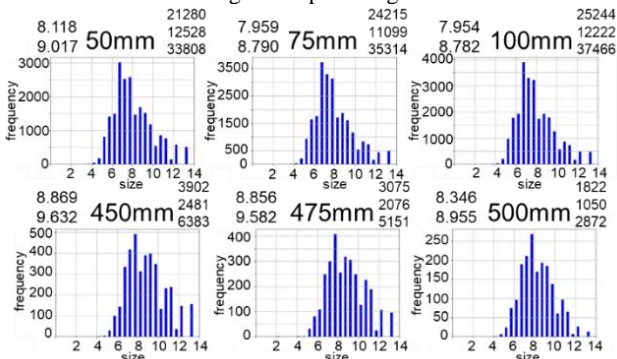


Fig. 6 Histogram

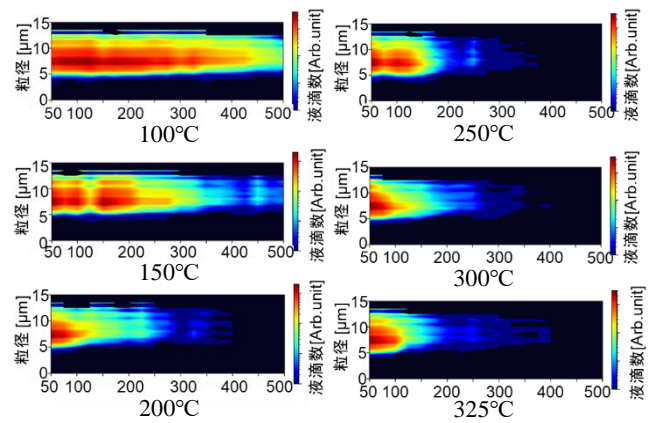


Fig. 7 Contour map

また、横軸に観測距離、縦軸に液滴直径、カラーズケールを液滴個数として示した温度別の等高線図を図7に示す。100°Cでは流路下流域においてある程度の液滴が観測されていることが分かるが、温度上昇に伴い下流域における液滴観測個数が減少した。しかし、250°C以上では液滴観測個数の減少率は小さくなり、150 mm地点付近まである程度の液滴の存在が確認できる。また、325°Cでは300°Cより下流域において僅かに観測個数の増加が確認できた。この結果から、微小液滴でもライデンフロスト現象が発生し、蒸発時間が増加している可能性が考えられる。しかし、各流域、各温度帯におけるサンプル数が統計的にはまだ充分ではないため、サンプル数を増加する必要がある。また、撮影装置の分解能の限度により小さい液滴を明確に撮影できておらず、正確な蒸発挙動を把握できていない。今後、撮影装置と光源装置を最適化することで分解能の向上を行い、小さな液滴の撮像を目指す必要がある。加えて、計測プログラムでは液滴と背景の区別を行う二値化処理や、液滴粒径の計測に用いているハフ変換において、全ての液滴を正確には解析できていない。今後はこの処理内容も修正し、より正確な計測の実現を目指す。

6. 結言

本研究では微小液滴蒸発挙動の解明を目的とした液滴観測装置の開発と、深層学習を用いた液滴粒径計測プログラムの開発を行い、超純水の液滴蒸発挙動解析を行った。新たな装置と計測プログラムの開発により、正確かつ効率的な液滴粒径計測と、流れ場内における液滴蒸発挙動の可視化を実現した。また、高温流れ場内でも、微小液滴がライデンフロスト状態となっていることが示される結果を得ることができた。今後は、装置群とプログラムの改良を行い、統計的に十分なデータを取得することを目指す。

参考文献

- (1) 飯村治雄, “インクジェットプリンター内のインクミスト挙動解析”, リコーテクニカルレポート No. 43
- (2) 嶽間沢秀孝, “高温壁面上における燃料の蒸発特性” 近畿大学工学部研究報告 (No.45,2011年, pp.99-102)
- (3) 安井さおり, “空气中に噴霧された水粒子の挙動分析に関する基礎的研究”, 空気調和・衛生工学会近畿支部論文集(2011.3, pp.173)
- (4) T.Kawaharamura, T Hiraou. "Development and research on the mechanism of novel mist etching method for oxide thin films." JJAP 51 036503 (2012)
- (5) 宮地啓太, “流れ場内の微小液滴挙動の観測とそのシステム開発”, 高知工科大学修士論文(2020)