

2019（令和元）年度 修士学位論文

流れ場内の微小液滴挙動の観測と そのシステム開発

Development of a experimental system and
direct observation of micro droplets behavior in flow field

2020年3月9日

高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻
知能機械システム工学コース

1225053 宮地啓太

指導教員 川原村敏幸 教授

目次

第1章 緒言

1.1 研究背景	.....1
1.2 ライデンフロスト現象	.....2
1.3 研究目的	.....4
1.4 論文構成	.....4

第2章 微小液滴の挙動観測実験

2.1 概要	.....5
2.2 従来の実験装置	.....5
2.2.1 噴霧装置	.....7
2.2.2 流路装置	.....8
2.2.3 撮影装置	.....8
2.2.4 光源装置	.....9
2.3 従来 of 観測装置での問題点	.....10
2.4 本研究での実験装置群	.....10
2.4.1 新流路装置	.....11
2.5 微小液滴の観測実験	.....15
2.5.1 実験条件	.....15
2.5.2 実験結果	.....15
2.5.3 実験結果の比較・考察	.....18
2.6 今後に向けての改良点	.....19

第3章 液滴径測定プログラムの開発

3.1 概要	.....21
3.2 MATLAB による液滴径測定プログラムの開発	.....21
3.2.1 MATLAB での開発について	.....21
3.2.2 測定方法	.....22
3.2.3 測定結果	.....27
3.2.4 測定プログラムの改良	.....27
3.2.5 改良後の測定結果	.....29

3.2.6 測定結果の比較と考察	・ ・ ・ ・ ・ 30
3.2.7 今後に向けた改良点の検討	・ ・ ・ ・ ・ 31
第4章 微小液滴の蒸発時間予測	
4.1 概要	・ ・ ・ ・ ・ 32
4.1.1 実験条件	・ ・ ・ ・ ・ 32
4.1.2 測定結果の比較と考察	・ ・ ・ ・ ・ 34
第5章 結言	
5.1 今後の展望	・ ・ ・ ・ ・ 41
5.1.1 微小液滴の挙動観測実験	・ ・ ・ ・ ・ 41
5.1.2 液滴径測定プログラムの開発	・ ・ ・ ・ ・ 41
5.1.3 微小液滴の蒸発時間予測	・ ・ ・ ・ ・ 41
5.2 まとめ	・ ・ ・ ・ ・ 42
5.2.1 微小液滴の挙動観測実験	・ ・ ・ ・ ・ 42
5.2.2 液滴径測定プログラムの開発	・ ・ ・ ・ ・ 42
5.2.3 微小液滴の蒸発時間予測	・ ・ ・ ・ ・ 42
参考文献	・ ・ ・ ・ ・ 44
謝辞	・ ・ ・ ・ ・ 48

第 1 章 緒言

1.1 研究背景

私たちは、何気なく「モノ」を適材適所で用いることで豊かに日々の生活を過ごしている。その「モノ」の多くは工業製品であり、日夜各国で開発・生産されている。日本における工業製品の生産額は 1955 年から 2012 年にかけて約 50 倍増加しており⁽¹⁾、工業製品は戦後の復興を支えた源泉であると共に人々の生活をより便利にしてきたと言っても過言ではないだろう。その開発・生産には、様々な分野における研究から得られた知見が数多く生かされており、その知見が形になったとき、新しい技術として世の中に広まり私たちがその恩恵を受けている。その最たる例がコンピュータの一種であるスマートフォンである。初期のコンピュータとして有名な ENIAC は面積が 167 m²、消費電力が 150 kW の巨大マシンであったが、現代のスマートフォンは手のひらサイズで消費電力も 5 W 程度である。1 W あたりの演算性能は約 2 兆倍改善されており、約 70 年で著しい進歩を遂げている⁽²⁾。

そんな工業製品の開発・生産を行うに際し、液体の形態の一つである液滴に関わる場合がある。その内、マイクロサイズオーダー程度の微小液滴に関する研究が近年の技術向上の成果もあり、盛んになってきつつある。

例えば、燃焼機関における液体燃料の噴霧燃焼時の現象解明に関する研究⁽³⁾や家庭用プリンタでも大いに利用されているインクジェット技術に関する研究⁽⁴⁾も、微小液滴に関わる研究がなされている。

このように、日常生活で身近に長年使用される工業製品は、社会から求められる高性能化という要求に対して技術の進歩で応えてきた。その中で私たちが肉眼では確認出来ないマイクロな世界の挙動解明にも力が注がれるようになった。マイクロな世界の挙動観測が世の中の工業製品の技術進歩に役立てられる可能性を秘めている。

1.2 ライデンフロスト現象

液滴が高温壁面に接触した時、液滴挙動は3つの領域に分けられる。第一の領域は、固体表面の温度が液体の沸点よりも低い場合、第二の領域は、固体表面の温度が液体の沸点より高い場合（液滴内部での沸騰（核沸騰）と液滴表面での沸騰（膜沸騰）が発生し、固体表面に濡れ面と乾き面が混在する遷移沸騰領域も含む）、第三の領域は、固体表面の温度が液滴の沸点よりもはるかに高い、ある一定の温度を超えた場合である。この内、第三の領域では、液滴と高温壁面の間で蒸気膜を形成され、その蒸気膜により高温壁面から液滴への熱エネルギーの移動が阻害される。その結果、液滴が浮遊すると共に液滴の蒸発時間が長くなる現象はライデンフロスト現象⁽⁵⁾と呼ばれる。この現象は、1756年にJ.G.Leidenfrostによって報告⁽⁶⁾され、現在、具体的な挙動を解明する研究が多くの研究者から報告がなされている^{(7)~(26)}。

この現象が工業製品において影響をもたらす例として、内燃機関とガスタービンの燃焼における燃料油粒と燃焼室壁間の相互作用についての研究⁽²⁷⁾や、自動車エンジンのシリンダーブロックの製造手法である、ダイカスト工程でのダイカスト離型剤の油膜形成に関する研究⁽²⁸⁾が挙げられる。

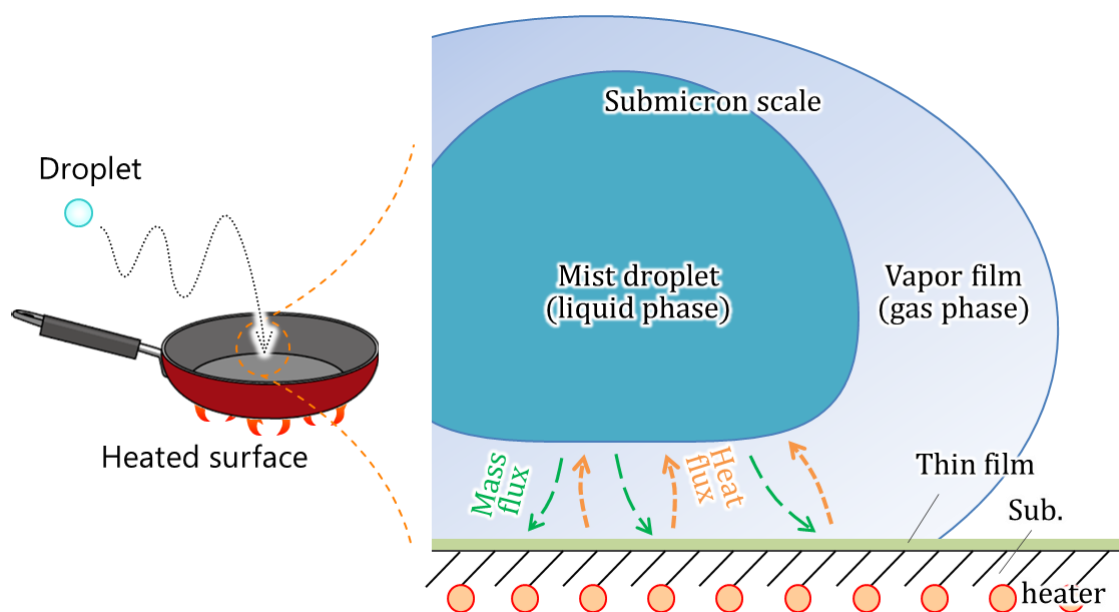


図 1.1 ライデンフロスト効果の模式図

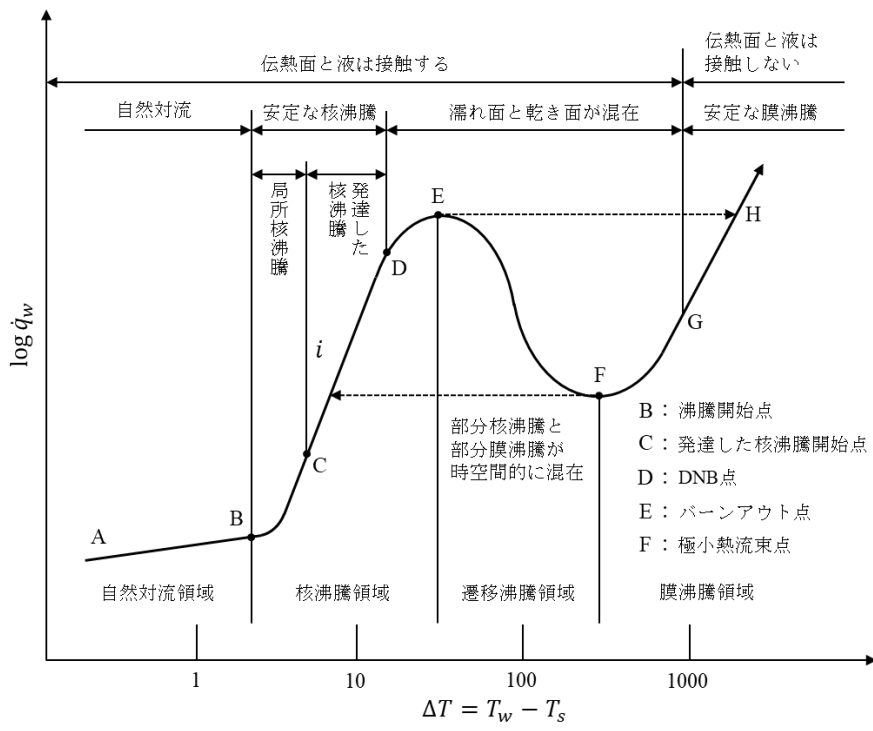


図 1.2 典型的な沸騰曲線(温度 - 熱流束)⁽²⁹⁾

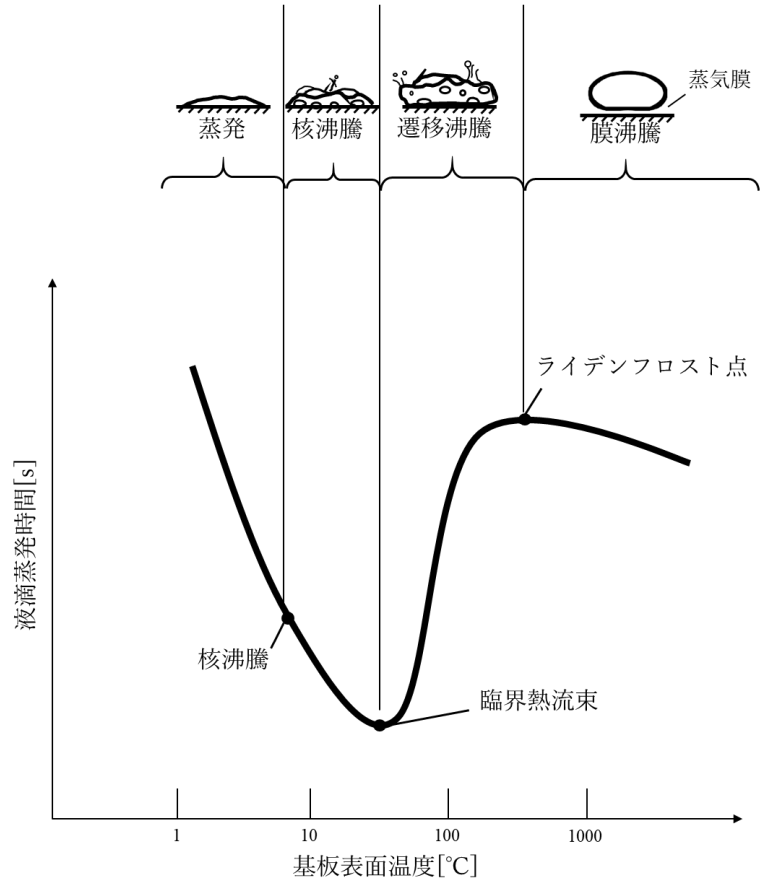


図 1.3 典型的な沸騰曲線(温度 - 蒸発時間)⁽³⁰⁾

1.3 研究目的

上記に述べた今日までにおける微小液滴の挙動を解明に関する研究では、レーザー光を用いた光学系により噴霧流を観測しているものが多い⁽³¹⁾。しかし、液滴一滴に注目した観測例は少なく、微小液滴挙動の完全解明がなされているとは言い難い。

当研究室ではその挙動解明の一翼を担うため、ライデンフロスト状態の微小液滴挙動を明瞭かつ顕微鏡で観察した状態での観測の実現を目指して研究を行ってきた^{(22)~(26)}。しかし、微小液滴を観測するには特殊な装置が必要であり、その観測結果の取り扱い方も統計を用いた定量的なデータ整理方法の確立が必要であるが、どちらも過去の研究時間内には達成できなかった。

そこで本研究では、先行研究で使用した実験装置の改良と観測結果を定量的に評価する測定プログラムの開発を行い、それらの結果から得たデータを用いて簡易的に微小液滴の挙動を解明することで、観測からデータ評価までの一連の流れのシステム開発を目指す。

1.4 論文構成

本論文の構成は以下の通りとなっている。

第1章 今回報告する研究を行うに至った背景と注目したライデンフロスト現象に関する説明を行った。

第2章 微小液滴の挙動観測実験に関する結果と考察、今後の方針について述べる。

第3章 液滴径測定プログラムの開発に関する結果と考察、今後の方針について述べる。

第4章 微小液滴の簡易的な蒸発時間の予測に関する結果と考察について述べる。

第5章 本研究で行った内容をまとめ、最終的に得られた研究成果、知見について述べる。

第2章 微小液滴の挙動観測実験

2.1 概要

ライデンフロスト状態となった液滴の挙動観測は、これまでも行われてきた。代表例として、1966年のB.S.Gottfriedらの研究が挙げられる。そこではライデンフロスト状態の液滴蒸発時間に関する式が提唱されており、その観測実験にて取り扱われていた液滴径は直径4 mm程度のものであった⁽⁵⁾。しかし、本研究ではマイクロサイズオーダーの液滴を対象としており、その式が数 μm サイズの微小液滴でも適用可能かは明らかにされていない。そこで当研究室では数 μm サイズの微小液滴の高温壁面近傍における挙動を直接観測し、理論化を目指してきた。過去に狭差二平板を用いて流れを整流し、特殊な観測装置を構築し微小液滴の観測を行っていた。しかし、使用された観測装置には多くの問題点があった⁽²²⁾⁽²³⁾。そこで、学士論文時には先行研究で得られた問題点の一部の改良を行い、一定の改良成果は見られた。しかし、その他の問題点は未改良のままであった⁽²⁵⁾。

本章では先行研究時点での実験装置群と液滴の挙動観測結果、その時点で挙げられる問題点について述べる。次に問題点を改良するために行った装置の改良部分を示し、改良後の新たな実験装置群にて液滴の挙動観測を行う。その後、新たな結果と以前の結果を比較すると共に改良後に考えられる問題点を述べ、今後に向けたさらなる観測装置改良の提案を行う。

2.2 従来の実験装置

微小液滴の挙動観測を行うに際し、観測装置、撮影機器、光源装置、噴霧装置を組み合わせた装置群を用いた。観測装置群を図2.1、その概略図を図2.2に示す。このような装置群が必要な理由は、普通の顕微鏡では視野角が狭く、空中の微小な外乱で容易に動いてしまい、観測が困難であるためである。

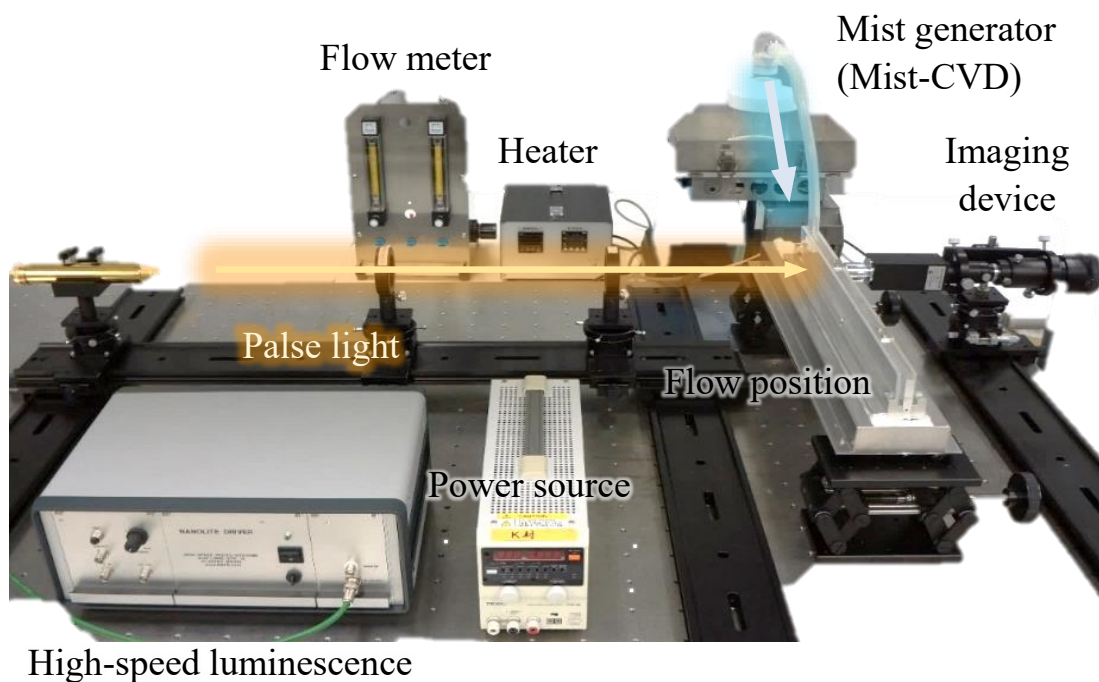


図 2.1 微小液滴の観測装置群

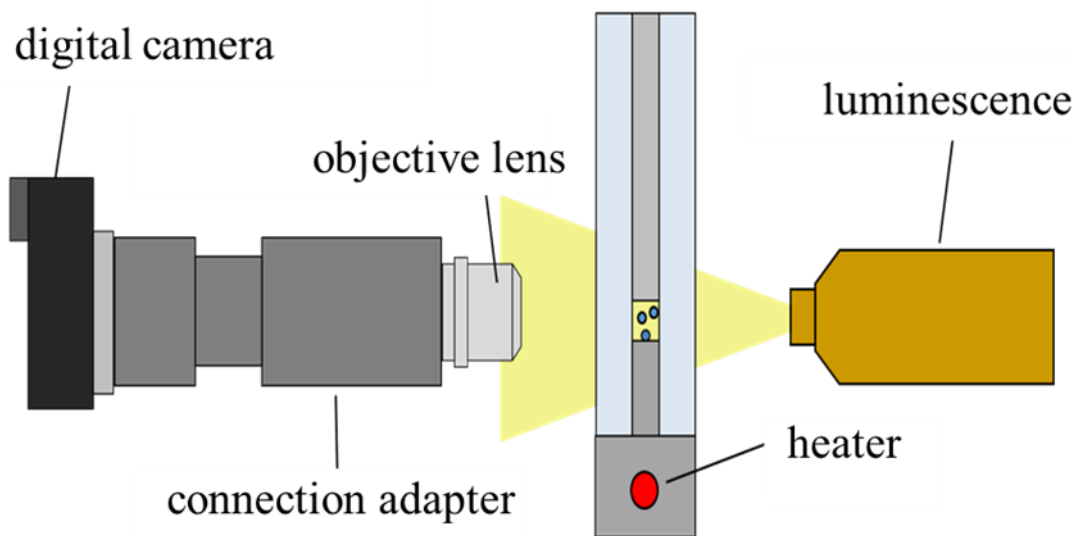


図 2.2 観測装置の概略図

2.2.1 噴霧装置

微小液滴を観測するために液体を噴霧させ、微小液滴を発生させる必要がある。そこで、本研究室で機能薄膜作製の際に使用されるミスト CVD システムに用いられる超音波噴霧装置を使用した。その図を図 2.3 に示す。この超音波噴霧装置は3つの超音波振動子と噴霧器、噴霧器に超音波を確実に伝達させる媒質として水を使用している。噴霧原理として、3つの超音波振動子から水を通して噴霧器内部の液体を超音波振動させる。その振動エネルギーが液体液面の表面張力を越えることで、液体が分裂して微小液滴を形成し、噴霧状態となる^{(32)~(35)}。形成された各微小液滴のサイズは数 μm で、発生量は電源装置の出力調整によって可能である。さらに、液状とガス状の両性質を持ち合わせており、搬送させる際も同様に扱うことが出来る⁽³⁶⁾。よって、形成した微小液滴を気相中に浮遊させ、搬送ガスによって制御可能なミスト流となる。搬送ガスにはコンプレッサーから供給する不活性ガスを使用し、流量計でガスの流量調整を行っている。また、搬送を行う際に希釈ガスを流入することが出来るようになっており、気相中の微小液滴濃度等が調整可能である。

噴霧状態の微小液滴は、噴霧器と流路装置をシリコンチューブで繋ぎ流路装置へ供給される。

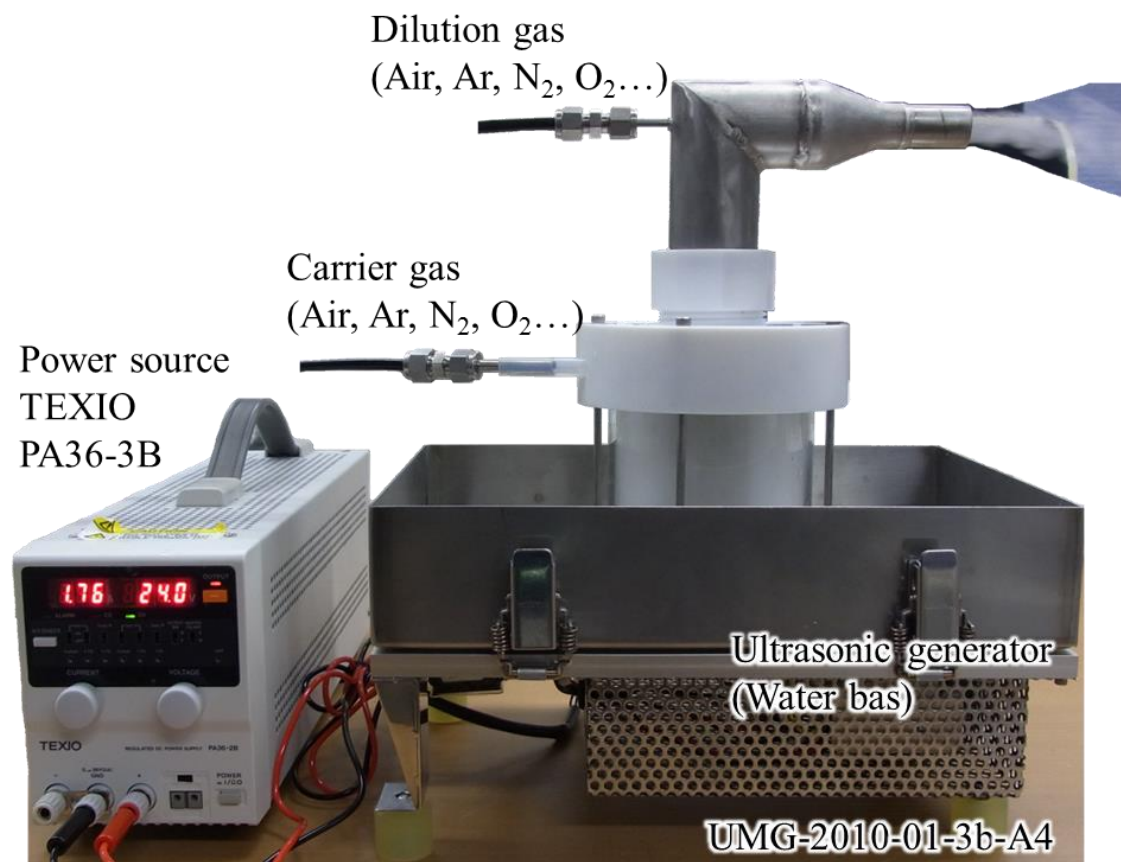


図 2.3 噴霧装置

2.2.2 流路装置

上下に 1 mm 厚のアルミ合金プレート，左右に 5 mm 厚の石英ガラス 2 枚を設置し，装置内の流れ場を形成している．流れ場は全長 512 mm，幅 1 mm，高さ 1 mm の狭差二平板構造とした．加熱状態では一般に熱対流が発生する狭差二平板構造は，その熱対流を防ぎ，流れ場の熱分布を均一にするための工夫である．装置下部にはヒーターを設置しており，その熱は均熱プレートを介して流れ場に伝わる．2 つの熱電対でフィードバック制御を行い，装置の温度がヒーター設定温度を維持するようにしている⁽²³⁾．

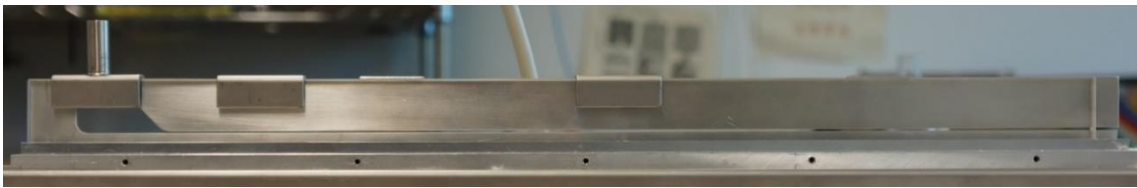


図 2.4 流路装置

2.2.3 撮影装置

使用した撮影機器を図 2.5 に示す．この撮影機器は主に 4 つの製品で構成している．

顕微鏡用長作動対物レンズ(Nikon 製 CF IC EPI Plan SLWD 50×A)

ビデオ・マイクロ스코プ鏡筒(メイジテクノ製 VM-1V)

一眼レフカメラ用アダプター(メイジテクノ製 T2-11)

レンズ交換式ミラーレス一眼レフカメラ(SONY 製 NEX-7)

ビデオ・マイクロ스코プ鏡筒に対物レンズと一眼レフカメラ用アダプターを介してレンズ交換式ミラーレス一眼レフカメラを接続し撮影する．

撮影された画像は，横 6000 pixel，縦 4000 pixel の解像度で上下左右が反転した状態で記録される．上下左右が反転するのは光学系の仕様によるものである．顕微鏡用長作動対物レンズを用いると，撮影範囲は横幅 250 μm ，縦幅 166 μm となるため，1 pixel が約 41.7 nm に対応することが分かっている⁽²³⁾．

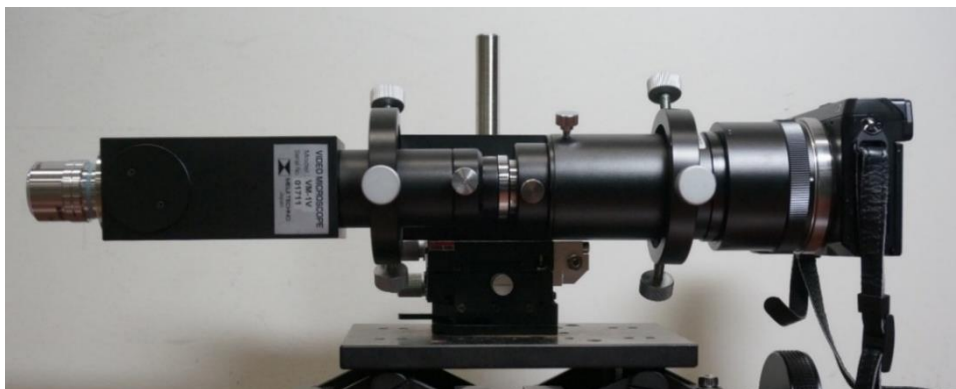


図 2.5 撮影装置

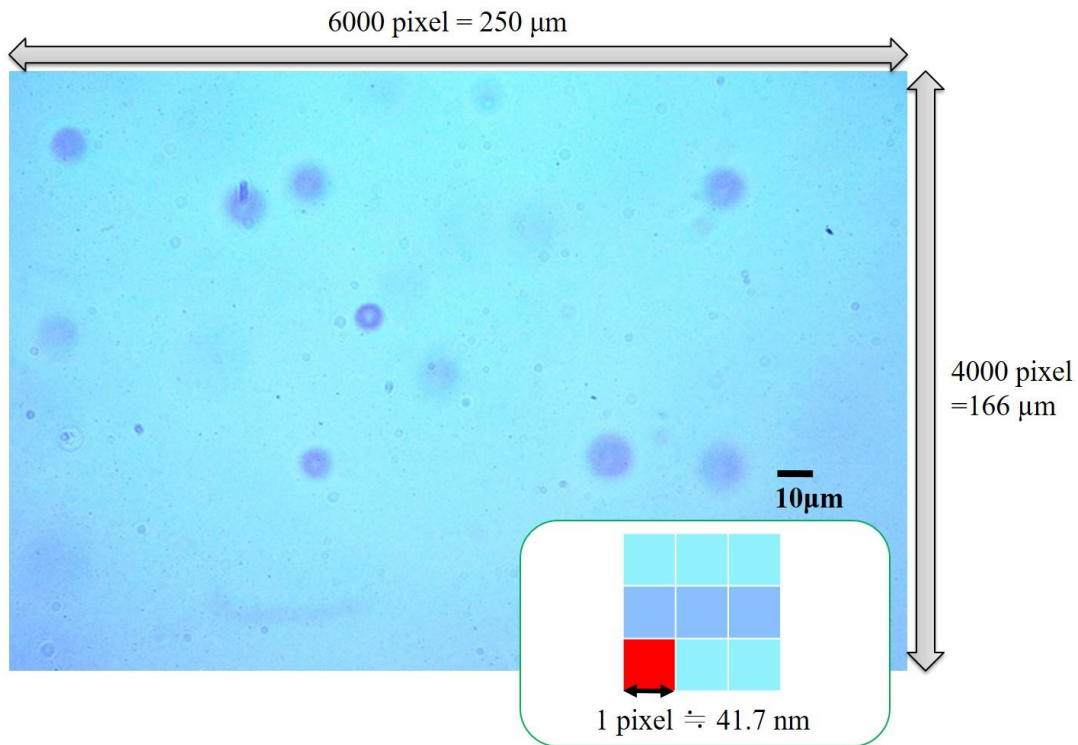


図 2.6 観測される画像データ⁽²³⁾

2.2.4 光源装置

今回使用した光源装置(HIGH-SPEED PHOTO-SYSTEM 製 NANOLITE KL-L)を図 3.6 に示す。この光源装置は一回の発光時間が 18 ns、発光エネルギーが 25 mJ のスパーク発光を、0~50 Hz の間隔で行う。

この光源装置を使用する理由として、撮影装置内の一眼レフカメラの最大シャッタースピードを超える速さで撮影を行う必要があるためである。一眼レフカメラで設定可能な最大シャッタースピードは 1/4000 秒である。流れ場の断面積が 1 mm²、観測地点での流速が 1 m/s のとき、流れる微小液滴を最大シャッタースピードで撮影したとする。この時、微小液滴は 1/4000 秒で流路内を 250 μm 程度移動する。前述した観測装置で撮影される画像サイズの横幅は 250 μm であるため、微小液滴像は画像データ内で尾を引いたように写ってしまうことが容易に想定される。そこで、カメラのシャッターが開いた状態の撮影素子に今回の光源装置の光を差し込むことで、カメラの性能を超えるシャッタースピードを実現した。前述の条件下で微小液滴は流路内を 0.018 μm 移動する。先行研究において本研究で取り扱われる微小液滴は 10 μm 程度と判明している。これは液滴径の約 1/500 の長さ程度であり、微小液滴がほぼ静止している状態で捉えることが可能である⁽²³⁾。



図 2.7 高速光源装置

2.3 従来の観測装置での問題点

2.2 で述べた観測装置群には、これまで以下の問題点が判明している。

撮影装置についての問題点として、撮影装置の被写界深度が浅いこと、撮影装置内にゴミが入っていることが挙げられる。この内、被写界深度に関して、現装置の被写界深度は $1.36 \mu\text{m}$ であるとされている。しかし、観測装置の流路幅は被写界深度の約 730 倍である 1 mm である。そのため、流路内の多くの液滴像を捉えることが出来ておらず、流路幅を狭くする方向に改善する必要があると考えている。しかし、観測装置で一度に捉える微小液滴の密度が高すぎる場合、取得できる画像データの照度が全体的に低くなり、鮮明に微小液滴を捉えるのが難しくなることも考えられる。そのため最適な流路幅を模索する必要がある。

また、流路装置についての問題点として、流路部分の密閉が不完全なこと、流路装置が撮影装置のレンズ面に対し、平行設置が出来ていないことが挙げられる⁽²⁵⁾。

2.4 本研究での実験装置群

本来であれば、全ての問題の解決に取り組むべきだが、時間的、人的、金銭的事情から断念せざるを得なかった。そこで本研究では前述した問題点の内、「流路内流れ場の不完全密閉」の解決に取り組んだ。この問題は定常観測可能な装置の実現にあたり最も早急に改善しなければならないものだと考える。今回、2.2 で紹介した観測装置群の内、2.2.2 の流路装置を新たなものに改良し、流路内流れ場の完全密閉し定常観測可能な装置の実現により近づけることを目指した。

・流入口部品

流入口部品を図 2.11, その図面を図 2.12 に示す. $20 \times 31 \times 55$ mm のアルミ合金ブロックに外径 10 mm, 内径 8 mm の中抜き円筒と外径 3 mm, 内径 1 mm の中抜き円筒をそれぞれ対面で同心円中心軸が一致するように, 内径同士が接続された貫通穴になるように配置し流入口の流れ場を形成している. この部品の全体サイズが実際の流れ場より大きく設計されているのは, 熱容量を確保するためである. その結果, 微小液滴が観測位置に到達するまでに十分に流路装置のヒーター温度まで温められるように出来るのではないかと考えた.

流路装置の流れ場のサイズは本来ミスト流を取り扱っている流路装置のサイズを参照して設計すべきであるが, 顕微鏡の焦点距離, 熱伝導度を考えて小さく設計した. 一方, あまりにも流れ場を小さくすると大きな圧力損失がかかるため, 奥行き方向に少し大きくした.



図 2.11 流入口部品

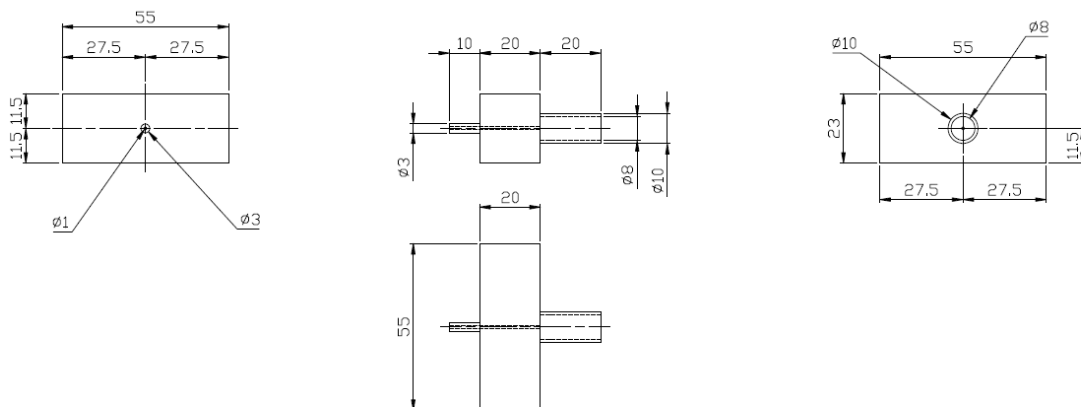


図 2.12 流入口部品 (図面)

・アルミ合金プレート

アルミ合金プレートを図 2.13, その図面を図 2.14 に示す. 全長 520 mm, 全幅 11 mm (凸断面: 4-3-4 mm), 全高 27 mm (ガラス溝部: 19.5 mm) である. 流入口部品と接触する部分は, 直径 3 mm の半円状で長さ 10 mm の溝が彫ってある. この部品は上下反転すると対称になるように設計しており, 今回の流路装置組み立て時にはそのように利用した.

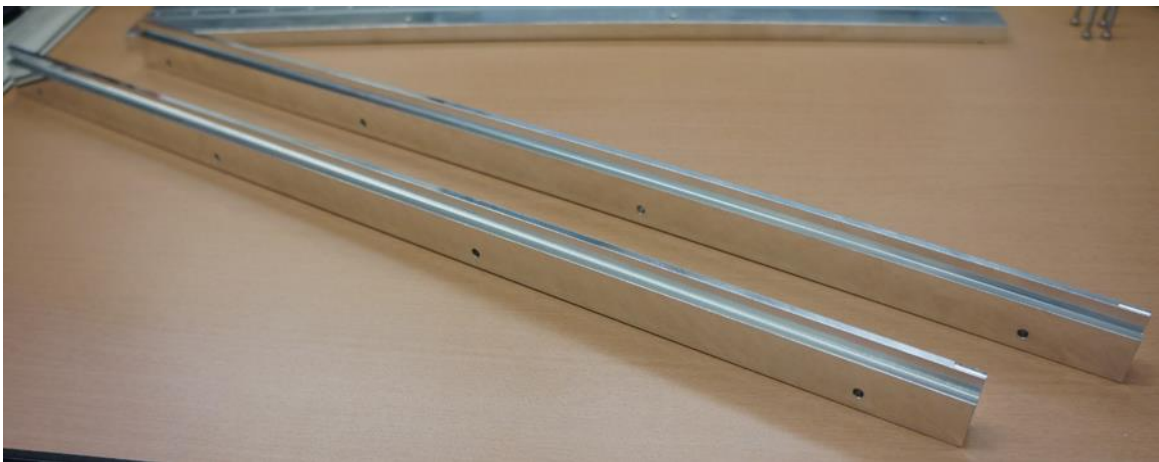


図 2.13 アルミ合金プレート

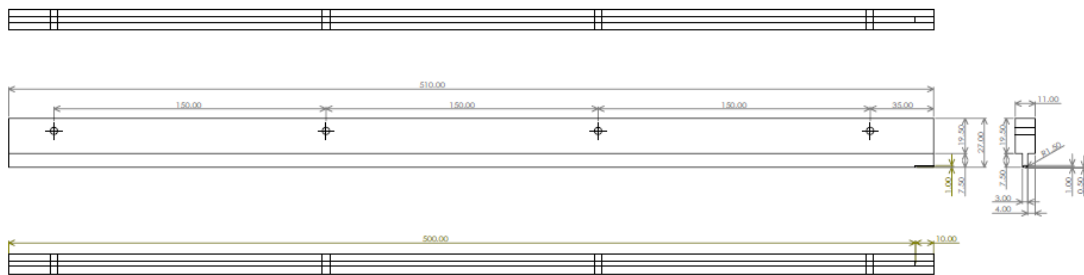


図 2.14 アルミ合金プレート (図面)

・石英ガラス 2 枚

大きさは全長 510 mm (± 0.8 mm), 全幅 16 mm (-0.4 mm), 板厚 4 mm (± 0.1 mm) である. ヒーターによる流路装置の加熱により熱膨張することが考えられたため, 公差を指定し熱膨張による石英ガラスの破損が無いように考慮した.

・アルミカバー

アルミカバーを図 2.15, その図面を図 2.16 に示す. アルミカバー外側は, 直径 3 mm の観測窓と直径 28 mm の円形のザグリの加工を施している. 観測窓は, 熱を伝達しやすくすることを目的に出来るだけ小さい穴をあけたことと観測位置の流入口からの距離を容易に特定することを目的としている. また, 円形のザグリは対物レンズの直径とサイズを合わせ, 撮影時の撮影装置の位置合わせを容易にすることを目的としている. アルミカバー内側には, より強固な流れ場の密閉と金属とガラスの直接接触による破損を防ぐ緩衝材の 2 つの役割を持つニトリルゴムを設置するための溝が 2 本彫られている. この部品は石英ガラスの外側に設置され, 2 つで左右対称になるように設計している. ただし, ボルト締結用の穴部に関しては, 片方はネジ切り穴, もう片方はボルト頭を隠すザグリ穴としている.



図 2.15 アルミカバー

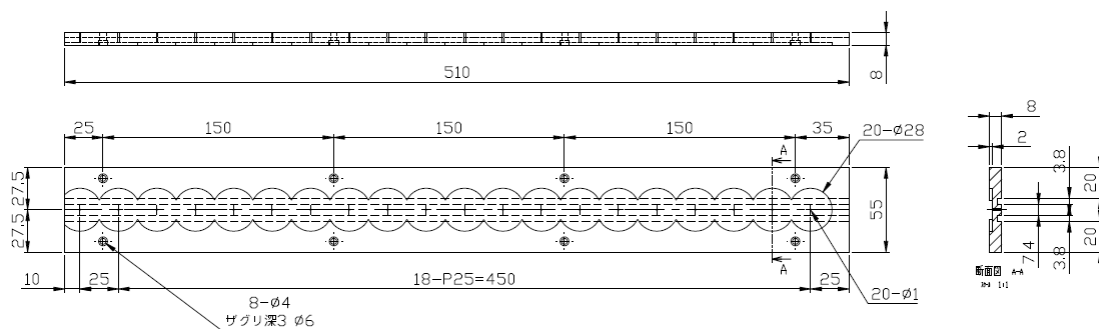


図 2.16 アルミカバー (図面)

本研究の観測実験においては, これまで紹介した新流路装置を 2.2.2 の流路装置と取り換えた状態の実験装置群を用いて行った.

2.5 微小液滴の観測実験

2.4で述べた新流路装置を組み込んだ新たな観測装置群で、微小液滴の観測実験を行った。温度変化・観測位置の変化が流れ場を流れる微小液滴にどのような変化をもたらすかを確認した。

2.5.1 実験条件

本研究で行った観測実験の実験条件を表 2.1 に示す。また、各観測地点の位置を図 2.17 に示す。流路装置を加熱するためのヒーターの設定温度を 80 °Cとし、流入口からの距離が 25 mm~100 mm の位置で観測を行った。

表 2.1 実験条件

Substate temperature [°C]	80	Flow late [L/min]	2.0
Width of flow area [mm]	3	Power [V:A]	24:1.8
Height of flow area [mm]	1	Sampling time [ns]	18
Observ.Posi.from inlet [mm]	25,50,75,100	ISO sensitivity	12800
Solvent	Deionized(D.I) water		



図 2.17 観測装置における流入口・流出口・観測位置(上流・下流)

2.5.2 実験結果

各観測位置での微小液滴の代表的な撮影像を各温度でまとめて図 2.18~図 2.21 に示す。

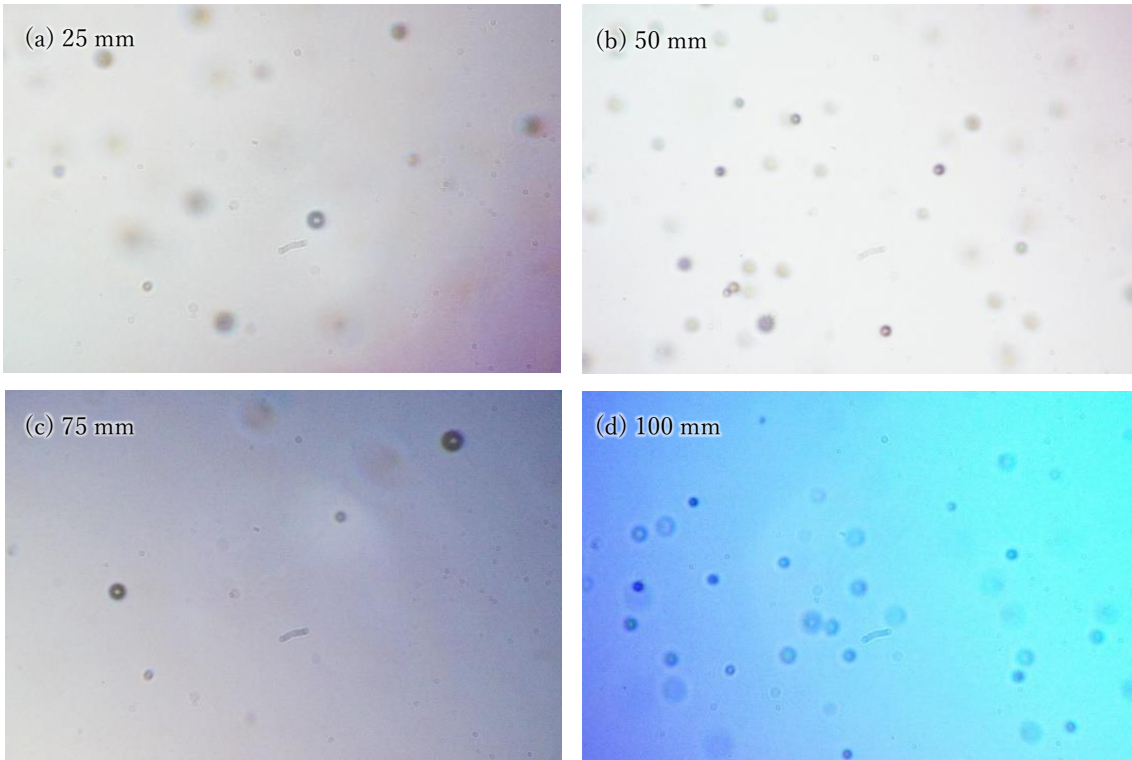


図 2.18 観測結果 (80 °C)

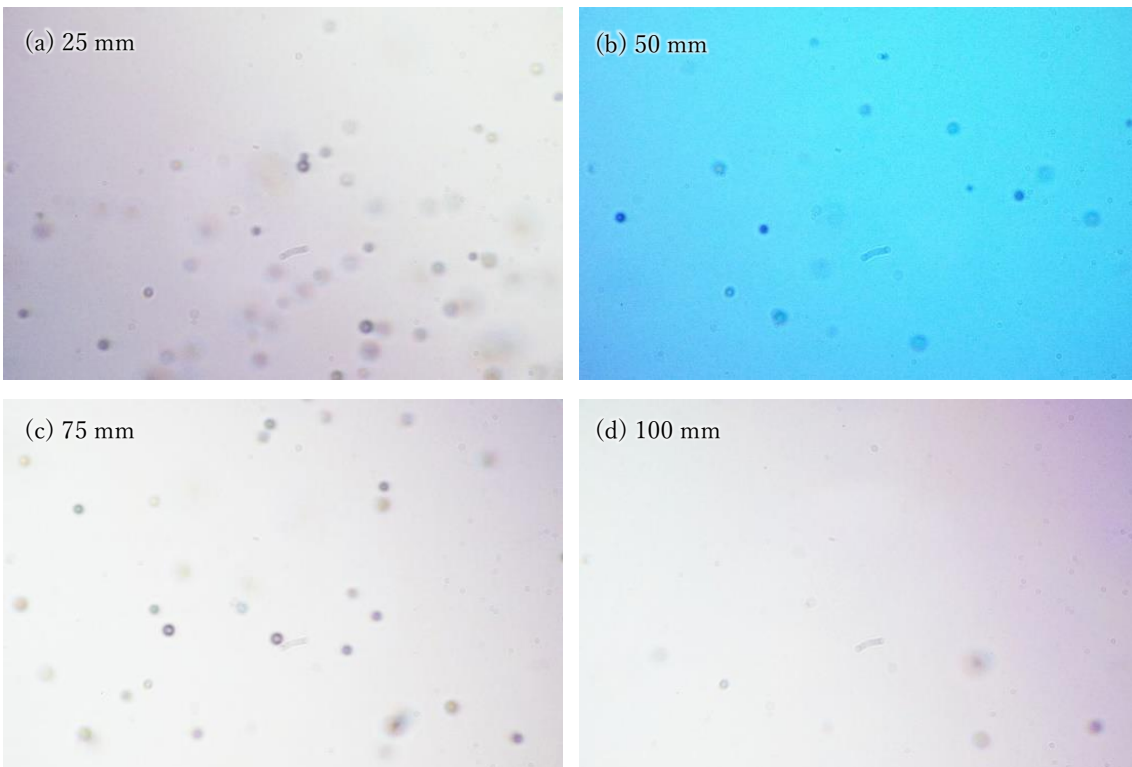


図 2.19 観測結果 (130 °C)

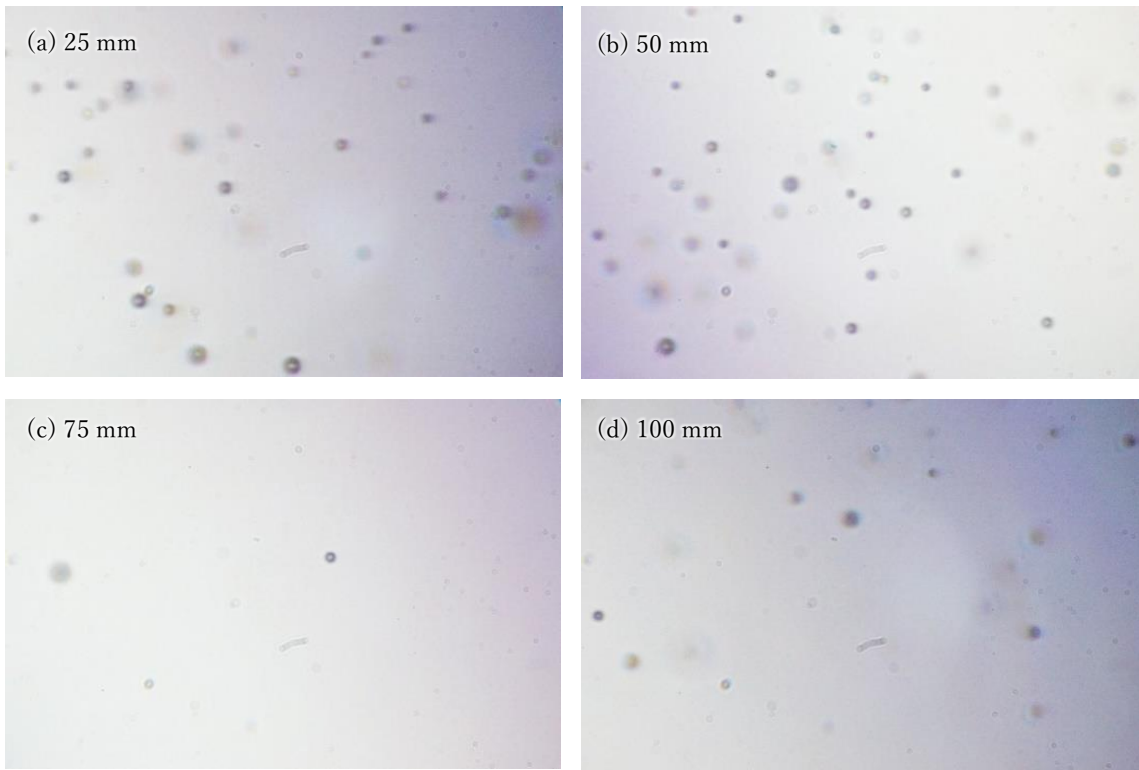


図 2.20 観測結果 (180 °C)

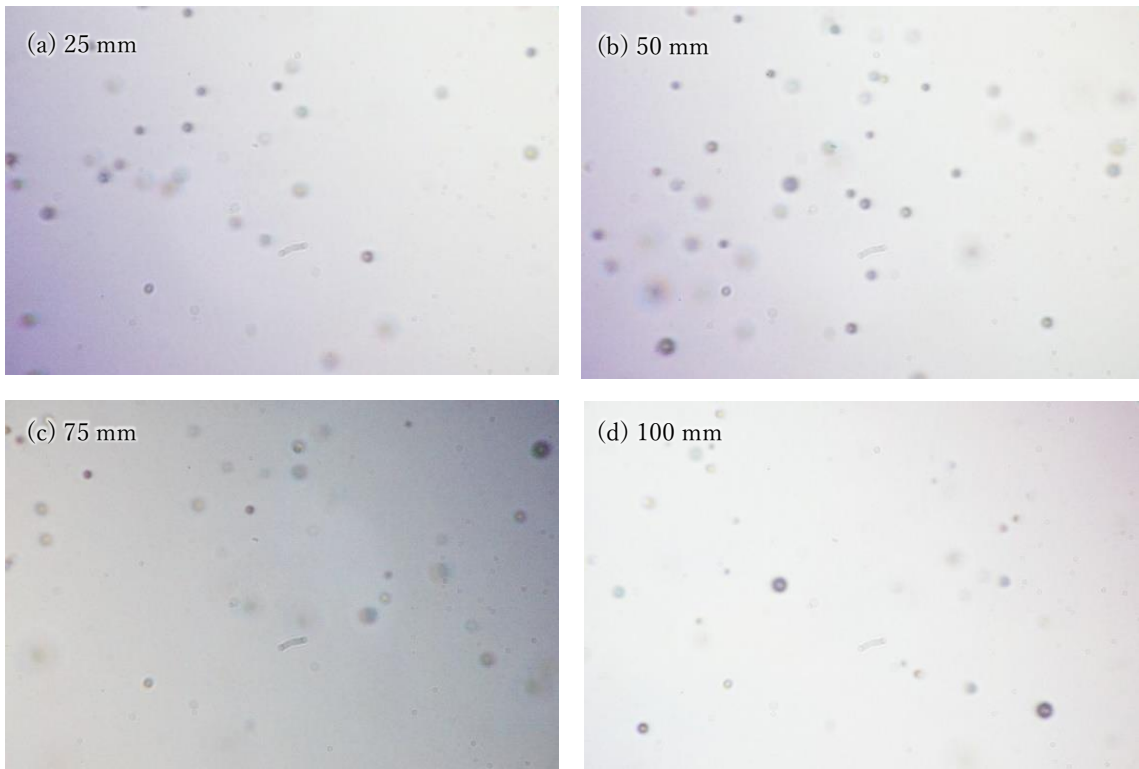


図 2.21 観測結果 (200 °C)

2.5.3 実験結果の比較・考察

各温度、各観測位置において流れ場からの漏れを確認することなく観測を行うことに成功した。先行研究時の観測データと比べ、写っている液滴像が小さくなっているように感じる。これは従来の流路装置に比べてアルミ合金が占める容積が増加し、その結果、装置全体が持つ熱容量が大きくなったことで流れ場への熱伝達が向上したこと、流れ場内の密閉による圧力の上昇が要因だと考えられる。もう一つは、従来のものは幅 1 mm×高さ 1 mm であったが幅 3 mm×高さ 1 mm となったのでレンズ焦点の手前奥方向に液滴が分散していることが考えられる。

しかし、新流路装置で観測実験を行う中で問題点も判明している。1つ目は流路装置を加熱した際に流路装置で温度分布が生じていることである。80 °C時で約 5 °C、130 °C時で約 10 °Cの差が生じている。そのため、ヒーター設定温度と流れ場の温度が一致していないことが考えられる。この問題を解決するには、例えば流路装置上部へのヒーターの増設が望ましい。流路装置と空気の間では温度差があるため、熱平衡状態に近づこうとする。現状流路装置下部のみにヒーターが存在し、それ以外の部分は空気に触れた状態のため、流路装置とヒーターの接する装置の面積や体積を増やすことで熱分布に関する問題の解決が計れる。

2つ目は流出口がΦ1 mm 程度と細く、圧力損失が大きいため 2 L/min 以上のガスを流すことができないことである。噴霧装置の霧化器への流入ガス量に比べ新流路装置への流出ガス量が極端に少なくなり、霧化器内の圧力が高くなり、超音波伝播のために利用している PE フィルム部が耐え切れず膨らんだ。結果として 2 L/min 以上のガスを流した場合の流路全体の密閉が不可能であった。要因として流入口部品の形状があげられる。本来であれば、流路内流れ場の断面形状に向かってなだらかに変化していく形状としたかったのだが、今回お願いした加工業者の技術では対応が不可能であったため、図 2.11 と図 2.12 に示すようなΦ8 mm からΦ1 mm に急激に穴径が変化するような作製を行わざるを得なかった。

また、実は流路装置下流域で観測することができなかった。これは上記不完全密閉によって、流路装置内を流れる微小液滴の全体量が減少したために起こったのではないかと推測できる。しかし、流量をあげることができれば、先に述べた下流域での撮影が容易になると考えられるため、今後流入口形状の変更が必要である。



図 2.22 新流路装置の上部と下部

2.6 今後に向けての改良点

今後、微小液滴の観測実験を行う上で、より良い実験結果を得るために改良すべき点について述べる。

まず、2.3でも述べた問題点では、撮影装置の被写界深度が浅いこと、撮影装置内にゴミが入っていることが挙げられる。特に被写界深度に関して、今回使用した流路装置は流路幅が3 mmとなっている。使用する撮影装置の被写界深度は1.36 μm であり、流路幅は被写界深度の約2200倍である。これまで使用していた流路装置と比べると約3倍になっている。よって相当数の微小液滴を捉えることが出来なくなっていると考えられる。また、依然として流路装置が撮影装置のレンズ面に対し、平行に設置されていないことが挙げられる。流路装置を撮影装置と位置合わせして固定できるようにできれば、先ほどは改良点として扱ったが、被写界深度が浅いことを利用して対物レンズの位置を調整することで流路装置に対し奥行き方向の詳細な液滴数の分布なども取得できるのではないかと考えられる。

さらに、使用している光源は雷放電によって発光している。そのため、発光位置が厳密には毎回異なってしまう。図2.23に示すように連続撮影した2枚の撮影画像を用いて照度を比較すると、光の広がり方が同じではないことが分かる。また、光源から照射される光は可視光のため撮影装置として持つ分解能がカメラの1 pixelである41.7 nmには達していない。今回使用した対物レンズの開口数は0.45である。可視光線が持つ波長の範囲は390 nm～770 nmの範囲であるため、考えられる分解能の範囲はおおよそ、0.529 μm ～1.04 μm である。よって、液滴像の縁が明瞭に写っているとは言い難い。可視光線での分解能の限界は約0.2 μm であることが知られているため⁽³⁷⁾、今後、光源装置の変更など検討してもよいかもしれない。

※撮影範囲について

今回の報告では1 pixelあたり約41.7 nmとしているが分解能の確認を行った際に再計算を行ったところ、若干の誤差があることが判明したのでここで報告する。対物レンズとカメラに結像するためのアダプターを使用した場合の撮影実視野は、

$$\text{撮影実視野} = \frac{\text{イメージセンサーのサイズ}}{\text{対物レンズ倍率} \times \text{アダプター倍率}}$$

で求まる⁽³⁸⁾。今回使用するカメラのイメージセンサーのサイズは、横方向23.5 mm、縦方向15.6 mmである。また、対物レンズ倍率は50倍、アダプター倍率は1.9倍である。よって、撮影実視野の縦寸法と横寸法は、

$$\text{横寸法} = \frac{23.5}{50 \times 1.9} \approx 247.3[\mu\text{m}]$$

$$\text{縦寸法} = \frac{15.6}{50 \times 1.9} \approx 164.2[\mu\text{m}]$$

と求まる．記録される画像データのピクセル数は，横方向 6000 pixel，縦方向 4000 pixel であるため，それぞれ 1 pixel あたりの大きさを計算すると，横方向は約 41.2 μm ，縦方向は約 41.1 μm となった．

今後はこちらの計算から求められた値を使うことが望ましい．

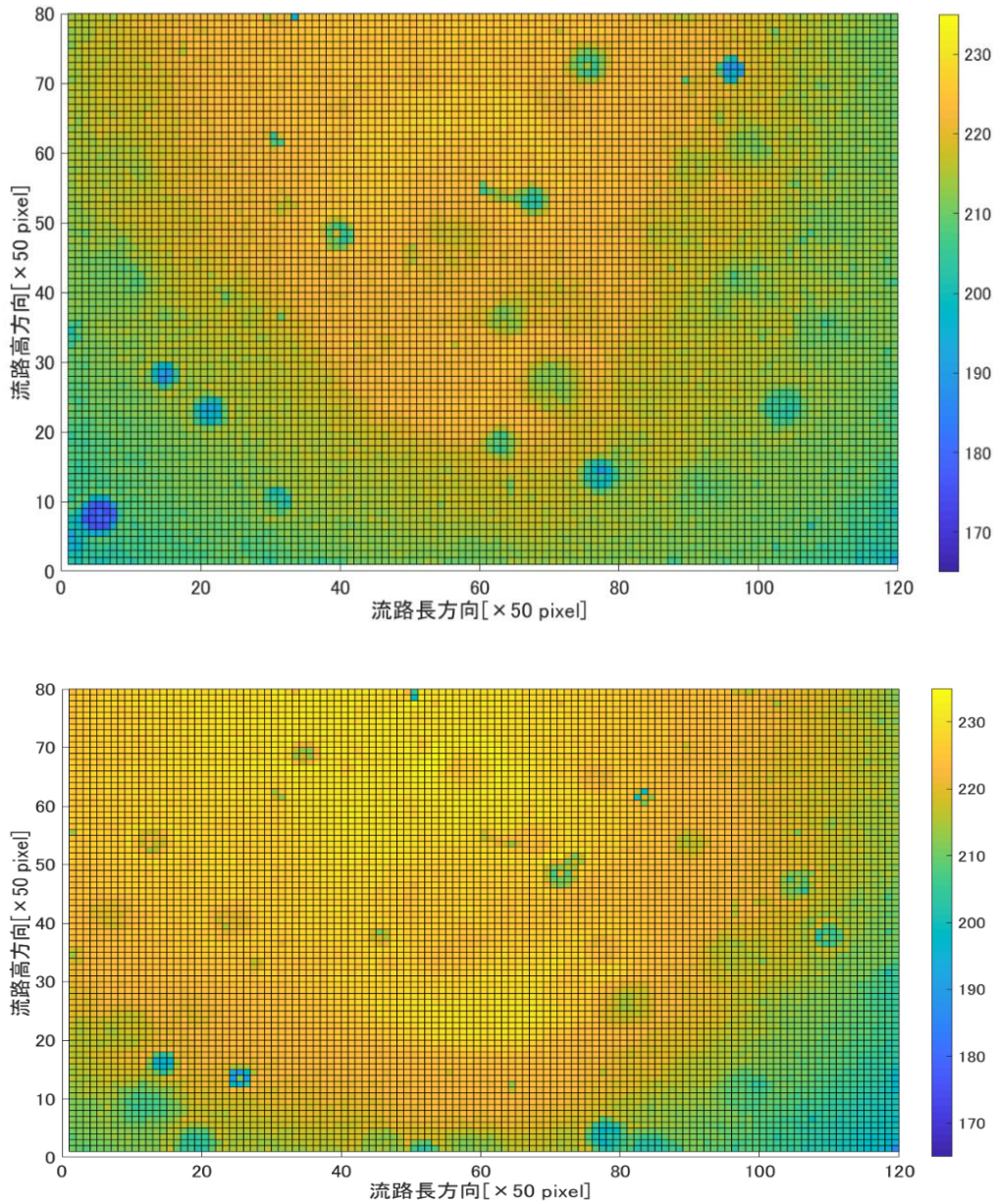


図 2.23 連続撮影された画像データの照度⁽²⁵⁾

第3章 液滴径測定プログラムの開発

3.1 概要

第2章での流路内流れ場における微小液滴の観測実験で示したように、一枚の画像には多いときには数十個程度の液滴像が移りこむ。過去、実験データを評価する際にはWindowsの標準ソフトであるペイントソフトを用いて、手作業による液滴像の選択を行うことで液滴径変化の評価を行っていた⁽²³⁾。しかし、手作業での評価は測定毎に液滴像の選択誤差が生じる恐れがある。また、各実験条件において最低でも100枚の画像データを取得している。そのため、数十個の液滴像を選択する作業を1つの実験条件に対し100枚分行う必要がある。仮に1枚に10個の液滴像が移りこんでいる画像データが100枚あるとする。1つの液滴像を選択し液滴径を記録するまでに約2分かかるとすると、約33時間で全てのデータの液滴径を測定することになる。今後も微小液滴の評価を行うにあたり、先行研究においても提案されてきた液滴径のヒストグラムの取得を考えている⁽²⁵⁾。そのためには、より数多くの液滴像を撮影する必要がある。よって1条件の評価にこれだけの時間を費やすのは実用性に欠ける。先行研究では液滴像の定常的な観測結果の取り扱いを実現するため、2つのソフトを用いて液滴径測定プログラムの開発を行った。ImageJによる測定では、一定の測定方法を示したが手作業による作業を自動化することは出来なかった。また、MATLABによる測定では、液滴像から液滴径を取得させるまでには至らなかった⁽²⁵⁾。本章では、液滴径の高精度測定プログラムの開発に取り組み、各実験結果から液滴像の平均径を算出から測定データを記録する一連の流れを作り上げることに挑戦した。

3.2 MATLABによる液滴径測定プログラムの開発

3.2.1 MATLABでの開発について

今回、液滴径の高精度測定プログラムを開発するにあたり、MATLAB (Mathworks 社) を使用して行った。先行研究ではImageJ (NIH) による開発も行っていたが⁽²⁵⁾、その時点ではマウス操作による液滴像の選択による測定だった。ImageJによる自動測定を実現することも可能であることは承知している。しかし、今回開発を行うにあたり、プログラムの最終目標として思い描いているのは、測定者がデータの取り込みから測定結果の整理までの一連の流れを容易に行えるアプリケーションのようなシステムを作り上げることである。将来的に開発者が変わり、様々な機能をいざ追加するとした場合、その開発者はプログラムを記述する言語について知る必要がある。また、本研究で取り扱うデータは最終的に蓄積し、ヒストグラムを取得して統計的に扱う必要があると考えている。それら全ての自動化を行うことを考えた場合、MATLABは本学の機械系学生が一度は授業で触れたことがあり、画

像処理から統計的処理まで幅広く行うことが可能である。そのため将来的な機能追加の際、たとえ開発者が変わっていてもプログラムの記述に必要な知識の習得に関して、少しでも負担の軽減が図れると考えられる。また、時を同じくして同じ研究室で行われている他の研究においても MATLAB を用いた評価プログラムを用いていることから、MATLAB に対する理解がより一層深めやすい環境が形成され、今後の開発スピード向上が期待される。

3.2.2 測定方法

先行研究で提案した画像処理方法では各画像データの照度によって測定可能か不可能か影響を受けてしまっていた。しかし、図 2.23 に示すように連続撮影されていても発光位置が毎回異なる画像データを扱っている⁽²⁵⁾。そのため照度によらない画像処理方法を確立する必要があると考え、根本から見直してプログラムの構築に取り組んだ。今回の測定を行う際に考案した画像処理の手順を、図 3.1 に示す。

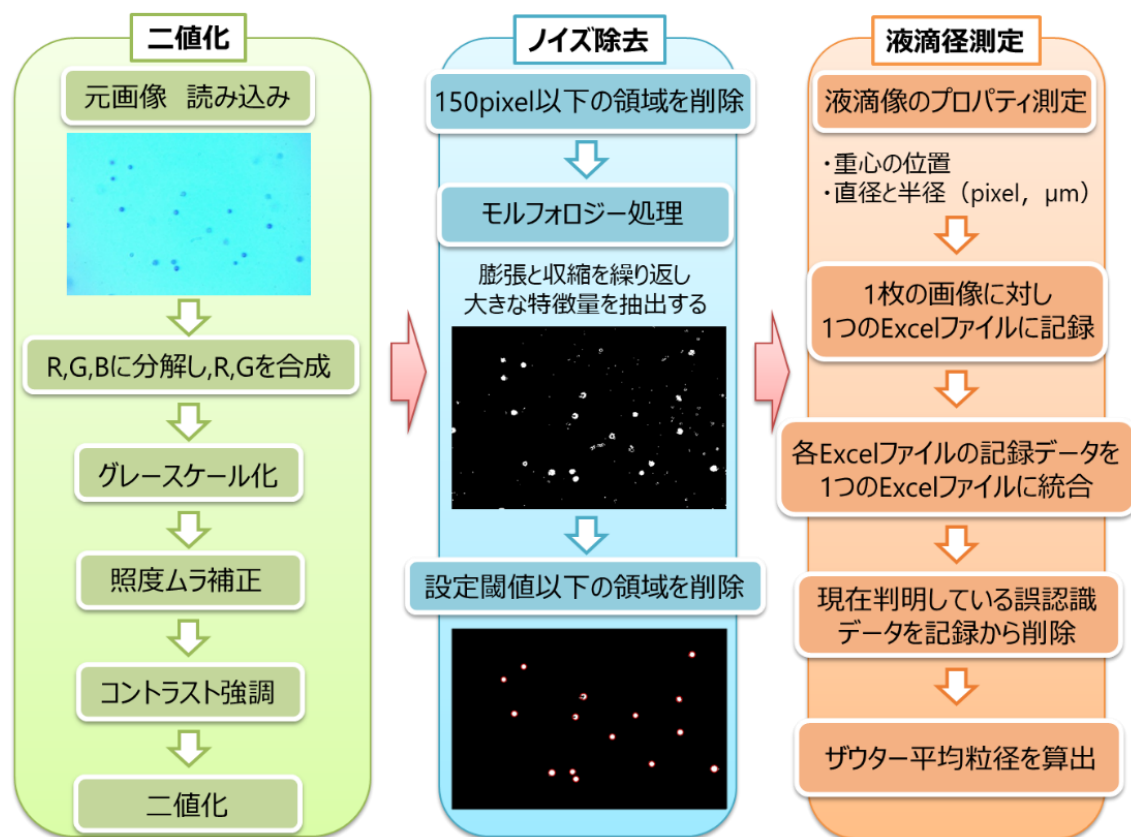


図 3.1 観測プログラムの処理フロー

ここからは各処理について説明を行う。まずは、観測された画像データを取り込む。取り込んだ画像を赤 (R)、緑 (G)、青 (B) のそれぞれのチャンネルに分解する。その内、青のチャンネルのデータを除き赤と緑のチャンネルだけを合成した。この処理は、液滴像と背景の区別をつけやすくするために行った。次に MATLAB 内でさまざまな画像処理を行うた

めに、白黒の濃淡で画像を表現するグレースケール画像に変換した。全てのピクセルが0~255の値のみで表現されている状態となっており、カラー画像の状態よりシンプルに画像内の特徴が表現されている。グレースケール画像の様子を図3.2に示す。次に画像全体の照度ムラをなるべく均一にするための補正を行った。これにより背景部分の照度の偏りが抑えられ、液滴像と背景部分との差をつけることができた。照度を均一にした様子を図3.3に示す。さらに、その差をつけるためにコントラストの強調を行った。この状態で画像データの二値化を行い、液滴像を検知しやすいようにした。二値化状態の様子を図3.4に示す。

次にノイズ除去部分の処理として、まず150 pixel以下の領域を削除した。第3章でも述べたが1 pixelが約41.7 nmなので、直径0.56 μm 以下の領域を削除していることになる。今回観測している超音波噴霧の液滴径として想定されていない大きさのため、ノイズ処理としては適切であると考えられる。次にモルフォロジー処理を行った。膨張と収縮を繰り返すことで大きな特徴量の抽出が可能になっている。そして、確実に液滴像を捕えさせるため直径4 μm 以下に相当する9000 pixel以下のサイズの領域の場合、液滴として認識させないように工夫するため、該当領域を削除した。理由として画像データ内に写りこむゴミを誤認識させない為である。図3.5に示すのは液滴像が写りこんでいない画像データを測定プログラムにかけた様子である。本来は閾値による領域削除を行わないことが望ましいが、開発を進める都合上、閾値を設定しノイズ除去を行った。なお、9000 pixel以下に設定した理由としては先行研究までのデータで液滴径が約10 μm だと判明しているため、あまり影響がないと考えたからである。

ここからは、いよいよ液滴径の測定に移る。まず液滴像に関するプロパティを取得する。取得したプロパティは、領域の重心の縦横位置 [pixel]と、直径と半径 [pixel, μm]である。これらは画像データ1枚ごとにExcelファイル形式で記録するようにした。その後、実験条件ごとに各Excelファイルから取得プロパティを1つのファイルにまとめた。なお、取得プロパティはExcelに付帯しているワークエリという機能を用いた。

また、開発を行う途中に画像データ内に写りこむゴミを主に2つ誤認識していることが判明した。その位置を図3.6に示す。1つにまとめたExcelファイル上で該当する記録を削除した。その上でザウター平均粒径を計算し、測定した微小液滴の平均径とした。

また、今回のプログラムを検証するにあたり使用した実験データの実験条件を表3.1に示す。これは2.5での実験条件と一緒である。ただし、今回はプログラムが適当であるかを確認することを優先するため50 mmの位置のみのデータを取得した。

表 3.1 実験条件

Substate temperature [°C]	80	Flow late [L/min]	2.0
Width of flow area [mm]	3	Power [V:A]	24:1.8
Height of flow area [mm]	1	Sampling time [ns]	18
Observ.Posi.from inlet [mm]	50	ISO sensitivity	12800
Solvent	D.I. water		

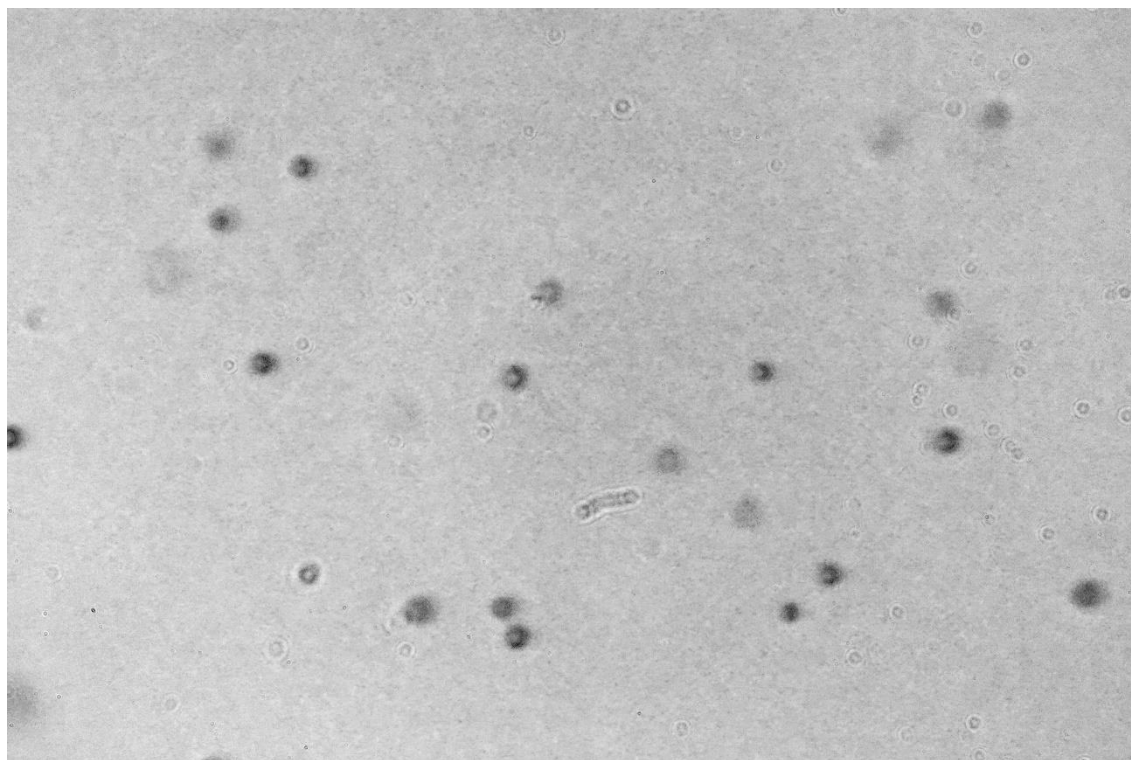


図 3.2 グレースケール画像

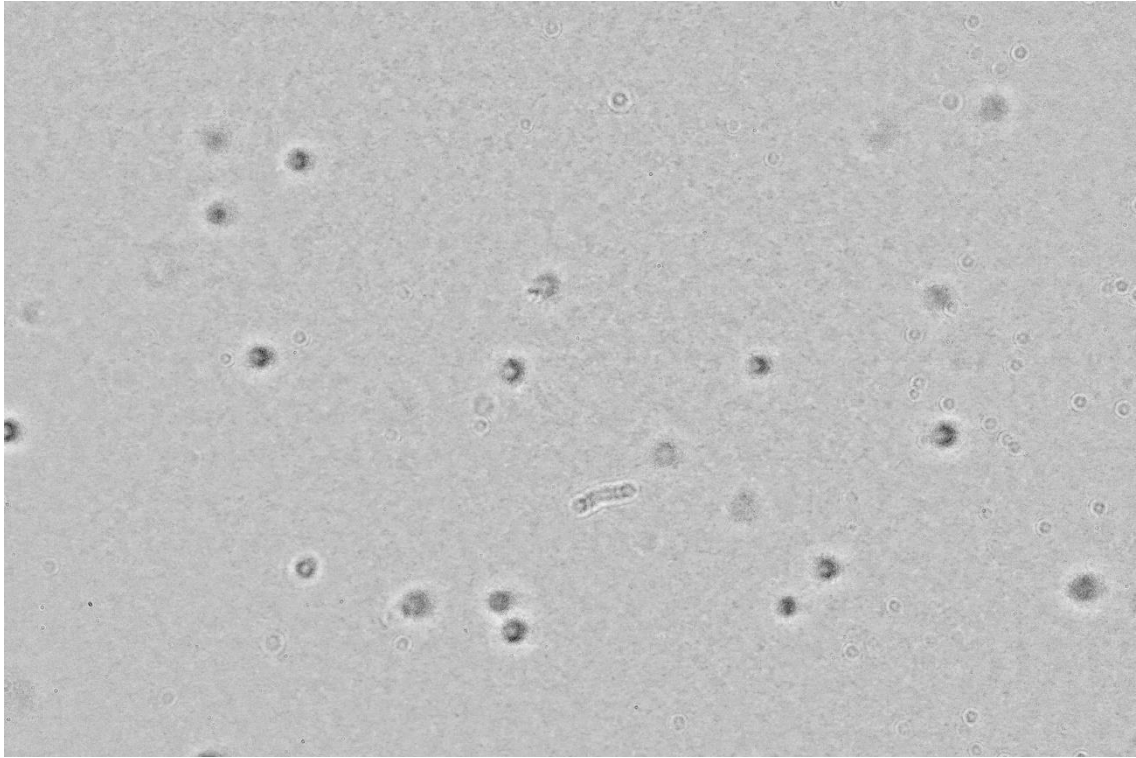


図 3.3 照度を均一にしたグレースケール画像

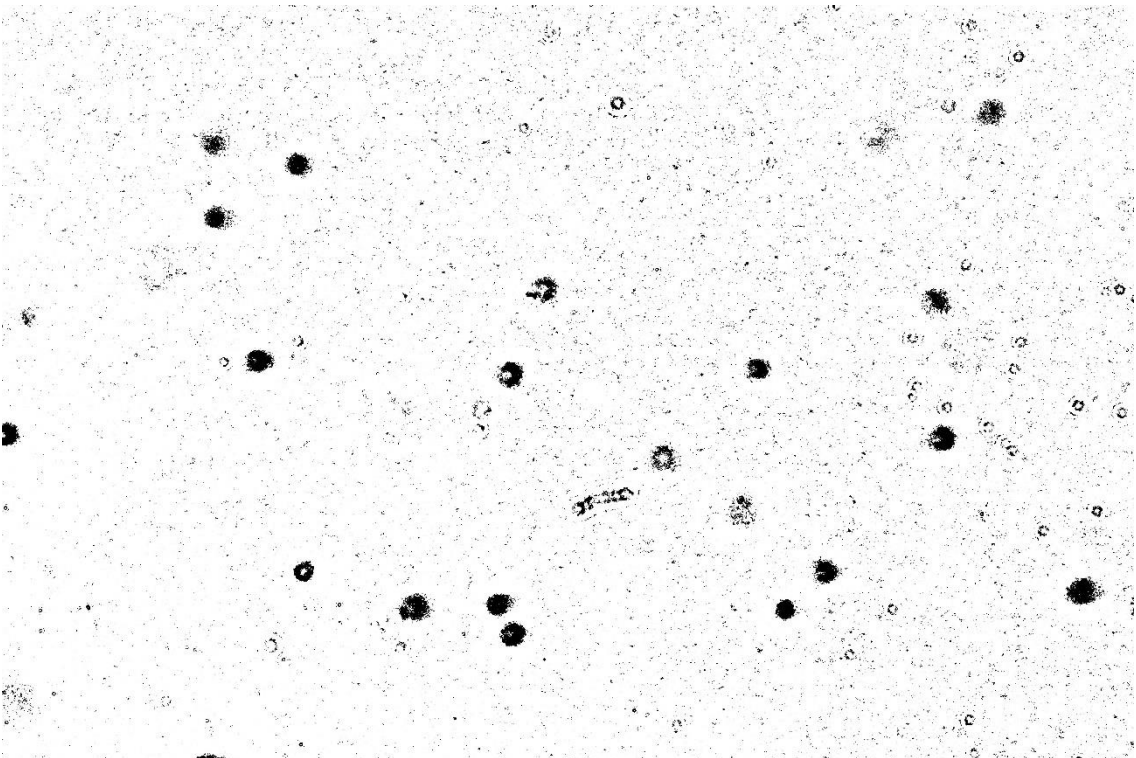


図 3.4 二値化された画像データ

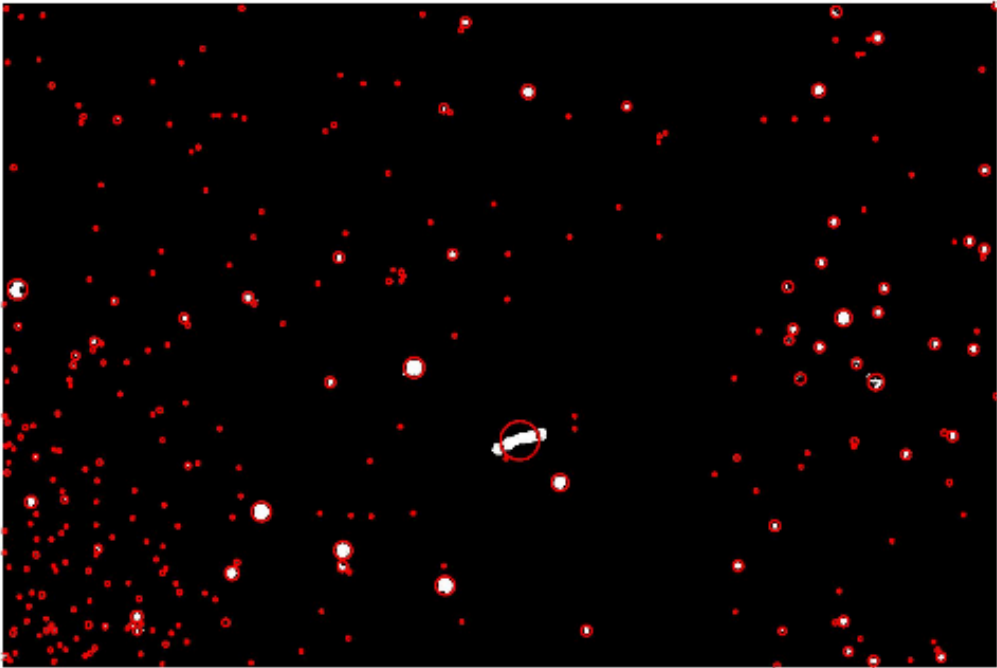


図 3.5 画像データ内のゴミ

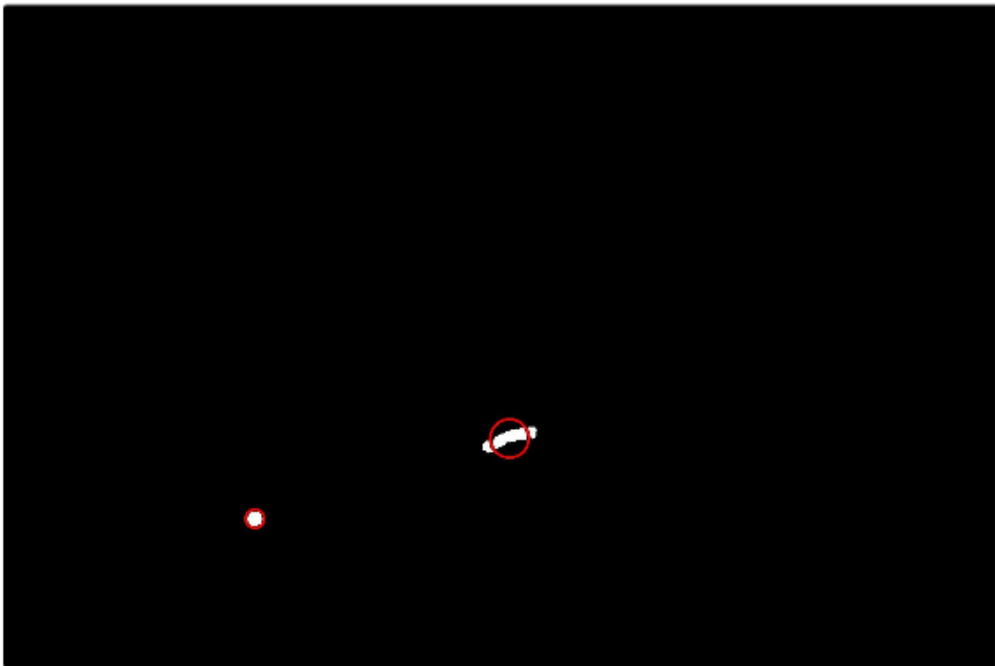


図 3.6 閾値 9000 pixel 時の誤認識データ

3.2.3 測定結果

今回の測定プログラムで測定できたデータを表 3.2 に示す。また、粒径分布を図 3.7 に示す。

表 3.2 測定データ

	80 °C 50 mm
液滴個数	1720
平均径[μm]	6.60

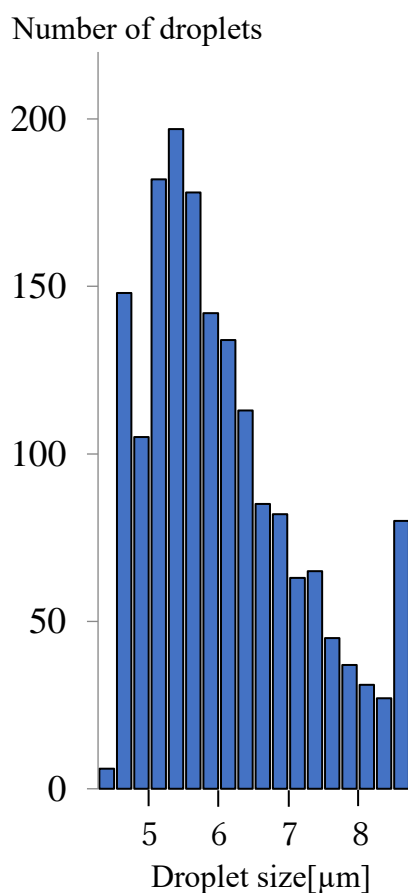


図 3.7 粒径分布

3.2.4 測定プログラムの改良

前項目で粒径分布を示したが、見ての通り分布のピークが端に近い位置にあるため、今回の測定プログラムよりも小さい粒径を測定可能にする必要がある。そこで、領域を削除する際の閾値を 7220 pixel (直径 4.06 μm に相当) 以下に変更し測定を行った。測定に使用した画像データは前項で使用したものに加え、噴霧直後の位置に近い N1 地点で観測されたデータも利用した。この地点を追加した理由は、他研究室が所有している Spraytec

(Malvern 社) で過去に測定した液滴径に関する参考データがあるからだ。Spraytec はレーザーを用いた Mie 散乱と Fraunhofer 散乱の回折パターンを解析することで液滴径を算出する機器である。特許取得済みの多重散乱補正機能も使用した結果であることから⁽³⁹⁾、計測結果が信頼できる。よって、本研究で提案する測定プログラムがどの程度の信頼性を持つのか、計測結果の比較を行うために追加した。

また、第3章でも述べたように画像データ内には液滴像以外のゴミが写りこんでいる。撮影した画像によっては、そのゴミを誤って測定してしまうこともある。そこで、どの位置のゴミが誤認識されているのかを確認するために、液滴像が写りこんでいない観測データをプログラムにかけてみた。その結果、7つの位置のゴミが誤って記録されていることが分かった。その位置が分かるものを図3.8に示す。

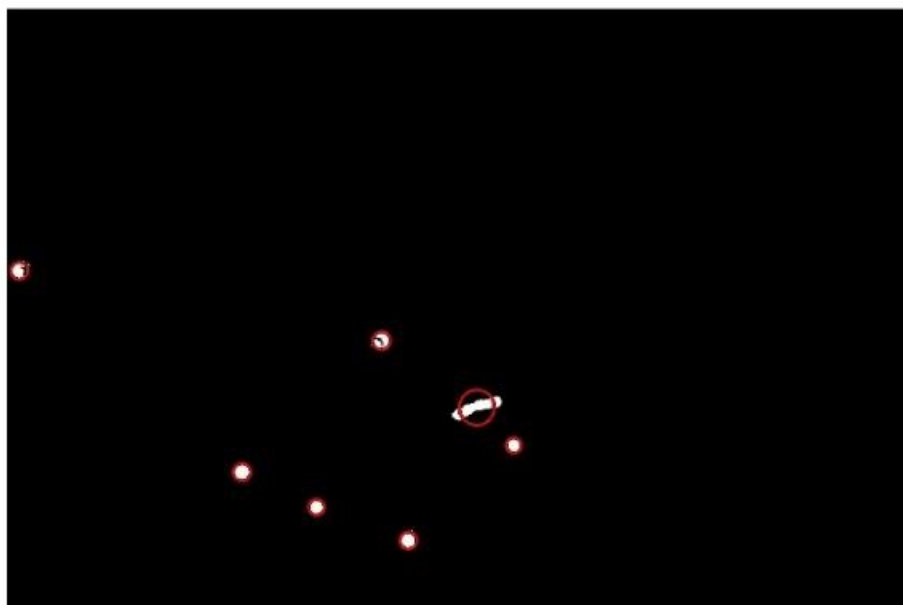


図 3.8 誤認識を受けるゴミの位置

このデータからゴミに相当するものの重心位置と直径が分かるので他の取得データからそのデータを除くことでゴミを含まないデータを取得することが出来る。これらのゴミを除いた測定データを取得するために、Excel データで観測結果をまとめる時にゴミの位置に該当する記録を削除して平均径の算出と粒径分布の作成を行った。今回使用した画像データの実験条件を表3.3に示す。基本的には2.5の実験条件と同様であるが、測定位置は流路装置50mmのところとN1である。なお、N1での観測に関する情報は第4章にて後述している。

表 3.3 実験条件

Substate temperature [°C]	80	Flow late [L/min]	1.0
Width of flow area [mm]	3	Power [V:A]	24:1.8
Height of flow area [mm]	1	Sampling time [ns]	18
Observ.Posi.from inlet [mm]	N1,50	ISO sensitivity	12800
Solvent	D.I. water		

3.2.5 改良後の測定結果

改良後の測定から測定できたデータを表 3.4 に示す。また、粒径分布を図 3.9 に示す。

表 3.4 測定データ

	80 °C 50 mm	N1
液滴個数	1721	459
平均径[μm]	6.57	6.74

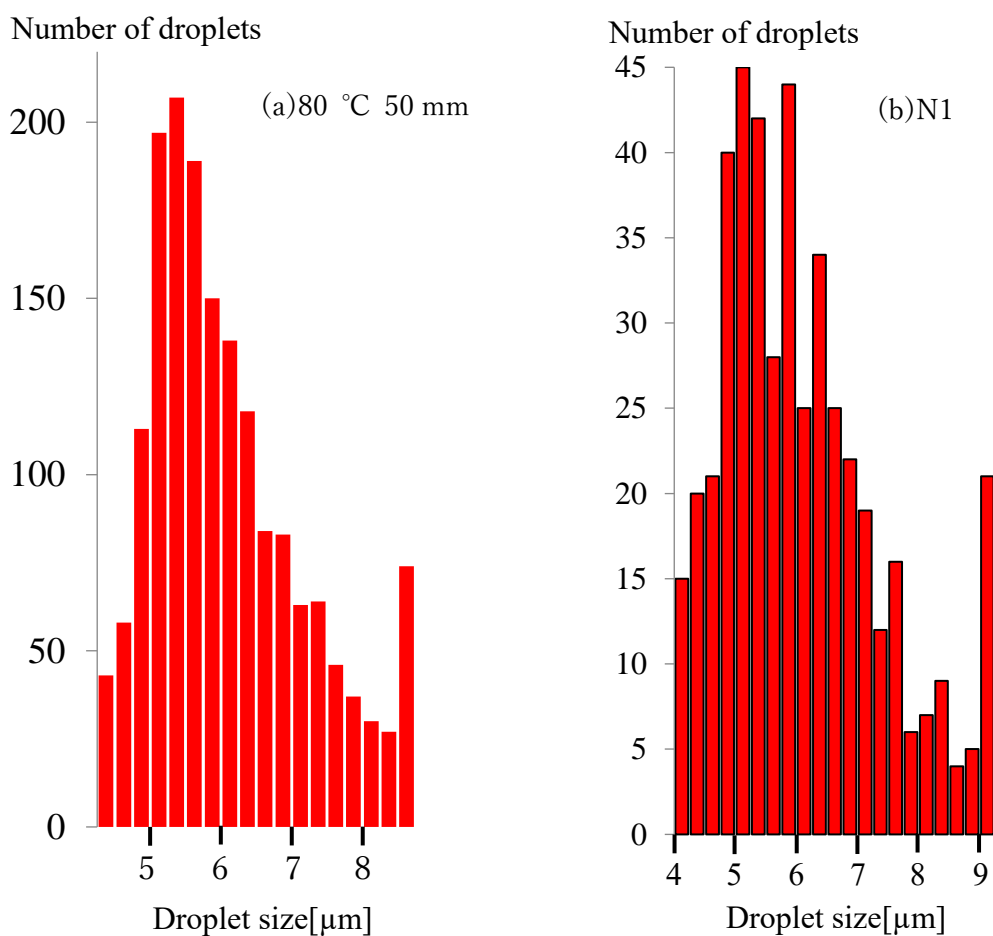


図 3.9 粒径分布

3.2.6 測定結果の比較と考察

3.2.3 と 3.2.5 で報告した測定プログラムで得られた結果の比較と考察を行う。ここでは、観測温度 80 °C，観測位置 50 mm の結果で比較する。それぞれのプログラムで得られた粒径分布を重ねたものを図 3.10 に示す。

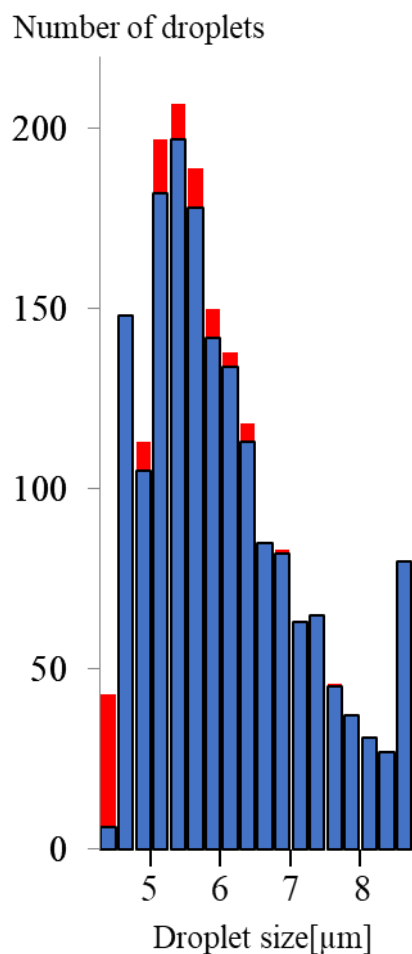


図 3.10 改良前と改良後の結果比較 (80 °C 50 mm)

閾値を変更したことにより、4.5 μm 以下の液滴数が大幅に増加していることが分かる。しかし、変化のあるはずがない 4.5 μm 以上、6.0 μm 以下の測定結果にも多少の差が出ていることも分かる。だが、全体の液滴個数は過去のプログラム 1720 個，修正プログラム 1721 個と 1 個しか変化がない。また、それぞれのザウター平均粒径は 6.60 μm，6.57 μm であり誤差は少なかった。さらに信頼度があるかを検証するために、Spraytec でも計測したことのある N1 地点でのデータをプログラムで測定した。その結果，得られた粒径分布を図 3.9(b) に示す。

この粒径分布から得られたザウター平均粒径は，6.74 μm であった。以前，Spraytec で

測定した際に得られた平均径は $6.71 \mu\text{m}$ である。よって、誤差は $0.03 \mu\text{m}$ の精度で測定できていることが分かり、今回の測定プログラムの信頼性の高さが一定の基準で証明できたとと言える。

3.2.7 今後に向けた改良点の検討

今回提案したプログラムは $4.06 \mu\text{m}$ 以下の領域は削除して測定を行っている。今後下流域の観測や高温下での観測を行っていくにつれて液滴からの蒸発に伴って液滴サイズが小さくなると考えられるため、その傾向はどんどん顕著になっていくことが想定される。また、今回使用している噴霧装置群で発生していると考えられる液滴径の理論値は約 $2 \mu\text{m}$ と考えられている。そのため、測定可能な液滴径に制限を加えないように測定が行える必要がある。しかし、画像データに移りこんでいるゴミの大きさは現在測定可能な液滴径以下のサイズのものが多く、よって測定可能範囲を拡大すると 3.2.4 で示したゴミの数より増えてしまうことが考えられる。現在誤認識データを Excel データにて削除を行っているが、MATLAB での画像処理を行う時点で削除を行うようにすることが望ましい。方法としては誤認識する可能性のあるゴミだけを測定し、そのゴミだけの画像データの背景部分を透明化し、全ての画像データから減算処理を行うとうまくいくのではないかと想定する。ただし、この方法ではゴミの位置と重複した液滴像は測定できなくなるため、前章で述べた実験の時点で、装置の各所に付着しているゴミを取り除く、もしくは装置そのものを新調するなどして極力ゴミの写りこまない画像データを取得することが、結果的に今回の測定プログラムの簡略化と精度向上に結び付くと言える。

第 4 章 微小液滴の蒸発時間予測

4.1 概要

これまで第 3 章で微小液滴の観測実験について、第 4 章で液滴径の高精度測定プログラムについて紹介した。本章では、それぞれの章から示された結果を元に微小液滴の蒸発時間の予測を行った結果について報告する。

4.1.1 実験条件

今回、微小液滴の蒸発時間予測を行うにあたり、液滴径の経時的变化を見るためには微小液滴が形成された地点、つまり噴霧装置内部からの変化を確認する必要がある。そこで第 3 章で示した流路装置での実験データ、第 4 章での検証にも使用した N1 のデータに加え、噴霧直後の位置に近い N0 のデータを観測実験から取得し、それぞれの液滴径の測定を行った。そして、各データを第 4 章において開発した測定プログラムを用いて平均径を求め、そこから得られたデータを基に蒸発時間の予測を行った。各データの実験条件をまとめたものを表 4.1 に示す。基本的には 2.5 の実験条件と同様であるが、測定位置に N0 と N1 を追加している。

ここで観測位置 N0 と N1 での微小液滴の実験方法を紹介する。まず観測位置の詳細について述べる。N0 は噴霧装置の霧化器に取り付けられているガラス管の流出口付近、N1 はその流出口に約 10 cm のシリコンチューブを繋げた状態の位置である。それぞれの様子を図 4.1 に示す。2.5 で行った観測実験では霧化器のガラス管から流路装置の流入口を繋げるのに、約 50 cm のシリコンチューブを用いている。よって N0 と N1 と流路装置の観測位置である 25 mm 地点の間はそれぞれ、約 50.25 cm、約 40.25 cm 離れたところに位置する。その様子を図 4.2 に示す。

観測方法は、図 2.1 の実験装置群から流路装置を取り除き、撮影装置の対物レンズの前をミスト流が通過するように位置を合わせ、観測を行った。N1 で微小液滴の観測を行っている様子を図 4.3 に示す。

表 4.1 実験条件

Substrate temperature [°C]	80,130,180,200	Flow rate [L/min]	2.0
Width of flow area [mm]	3	Power [V:A]	24:1.8
Height of flow area [mm]	1	Sampling time [ns]	18
Observ.Posi.from inlet [mm]	N0,N1,25,50,75,100	ISO sensitivity	12800
Solvent	D.I. water		

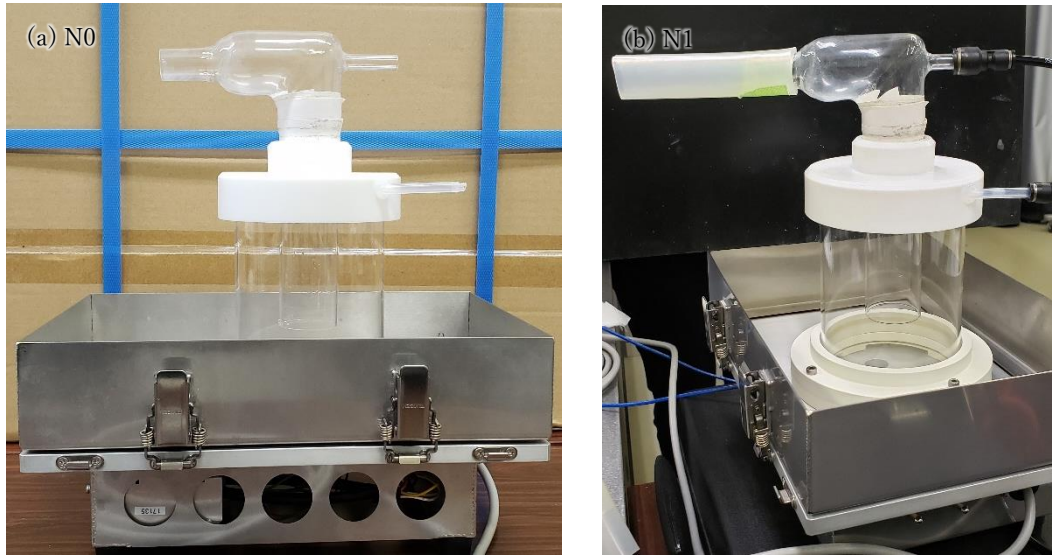


図 4.1 観測位置 N0, N1 の様子



図 4.2 N0, N1 と流路装置との位置関係

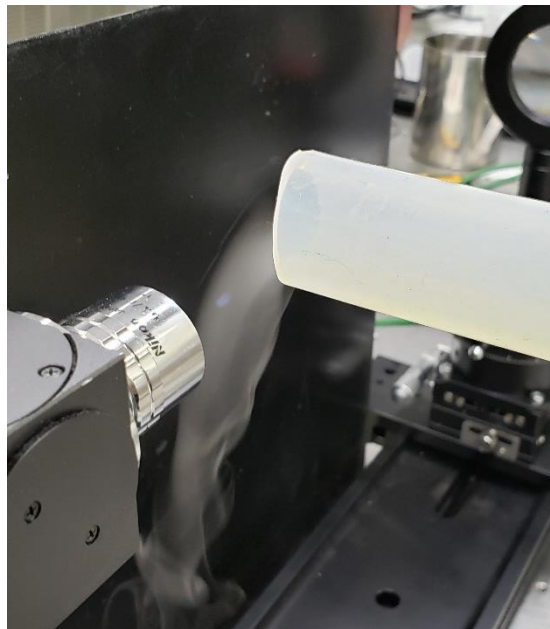


図 4.3 微小液滴の観測風景 (N1)

4.1.2 測定結果の比較と考察

今回第 2 章で行った観測実験に加えて観測した N0, N1 における微小液滴の代表的な撮
影像を図 4.4 に示す. また, 各温度・観測地点から得られた微小液滴の粒径分布を図 4.5~
図 4.9, 微小液滴の平均径の結果を表 4.2, その結果をグラフにプロットしたものを図 4.10
に示す.

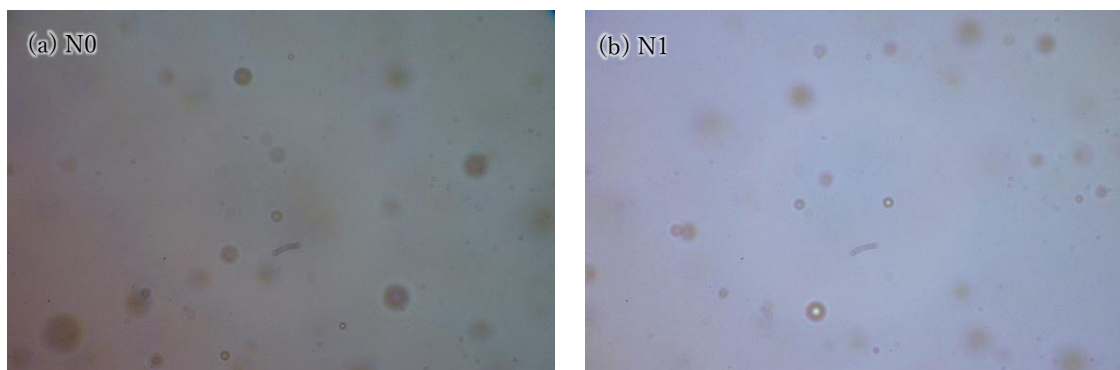


図 4.4 観測結果 (N0, N1)

表 4.2 平均径測定結果[単位: μm]

	N0	N1	25[mm]	50[mm]	75[mm]	100[mm]
80°C			6.85	6.49	6.63	6.35
130°C			6.17	6.45	5.81	6.29
180°C	7.33	6.74	5.73	5.74	5.91	5.67
200°C			5.75	5.67	5.84	5.64

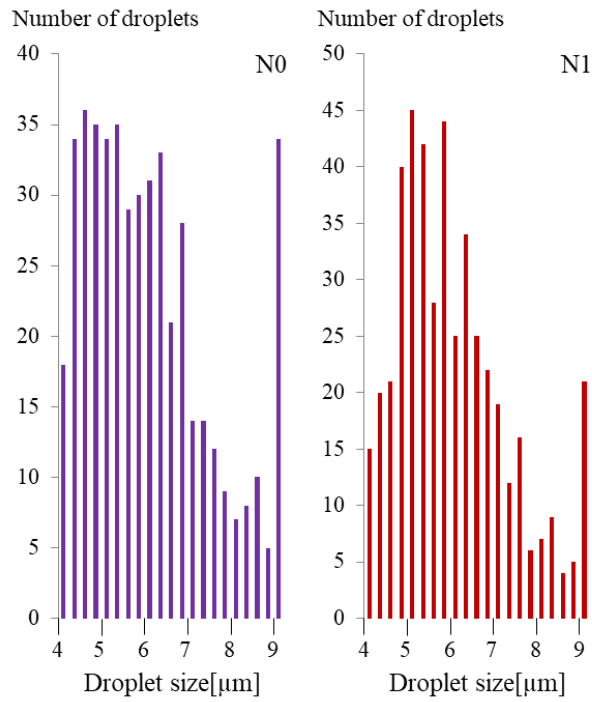


图 4.5 粒径分布 (N0, N1)

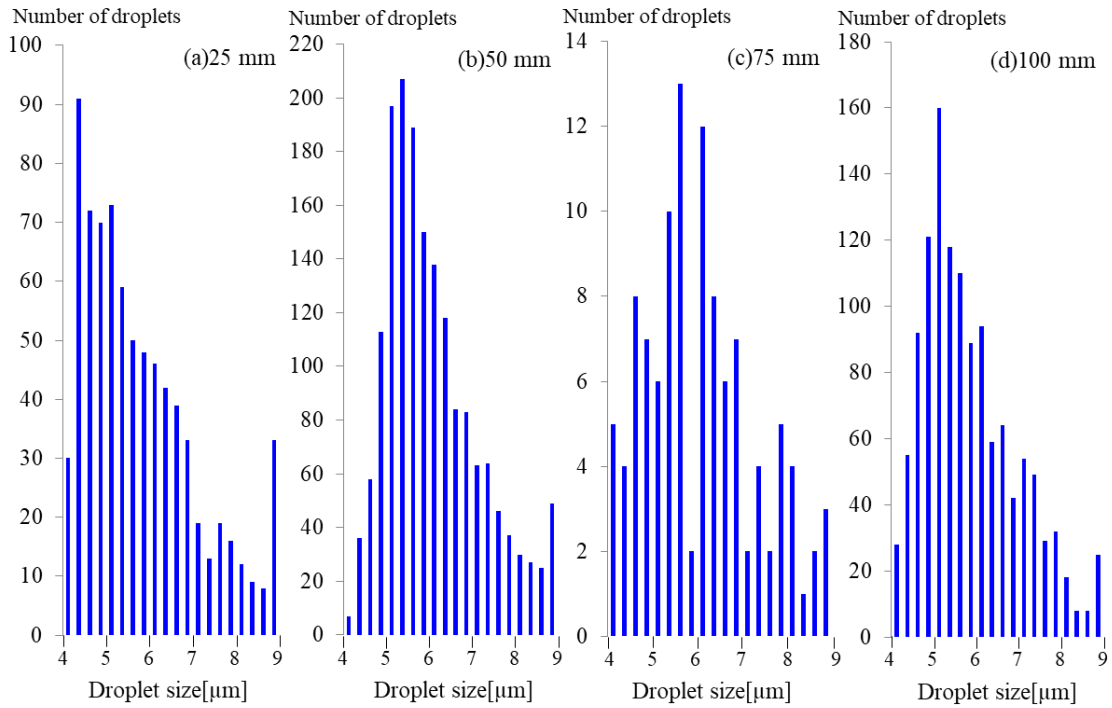


图 4.6 粒径分布 (80 °C)

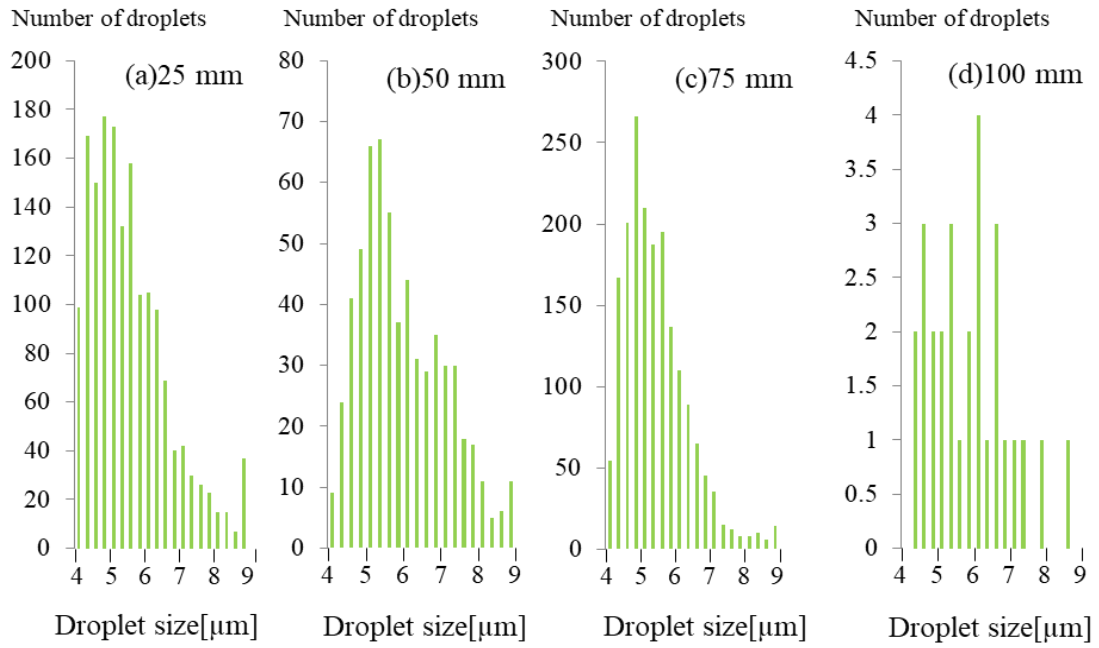


图 4.7 粒径分布 (130 °C)

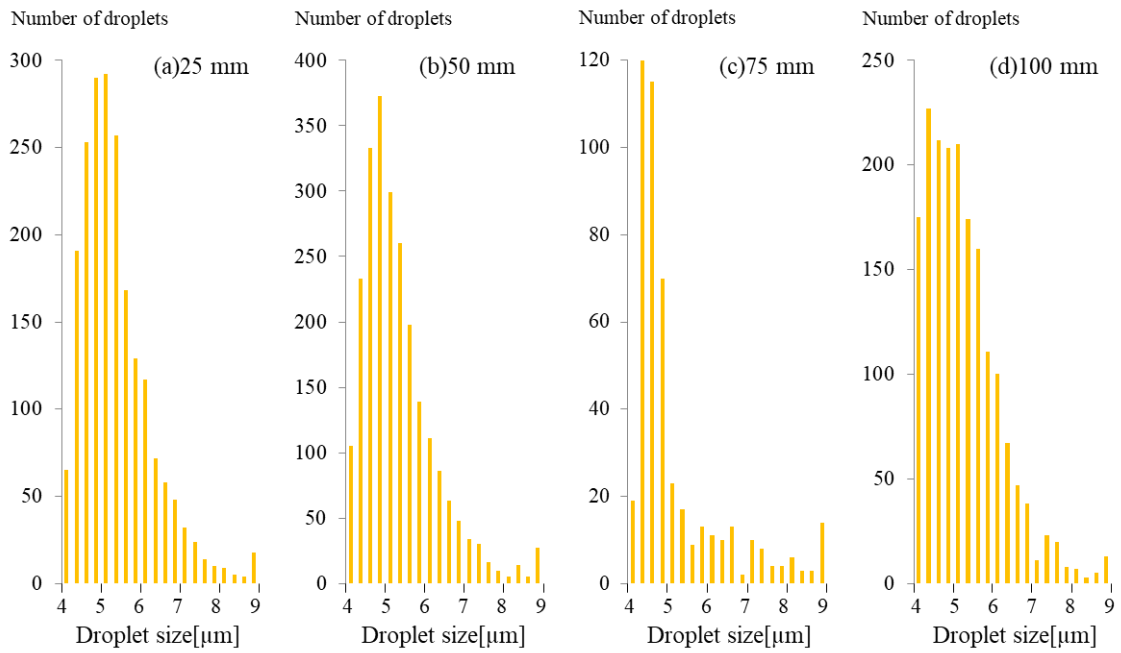


图 4.8 粒径分布 (180 °C)

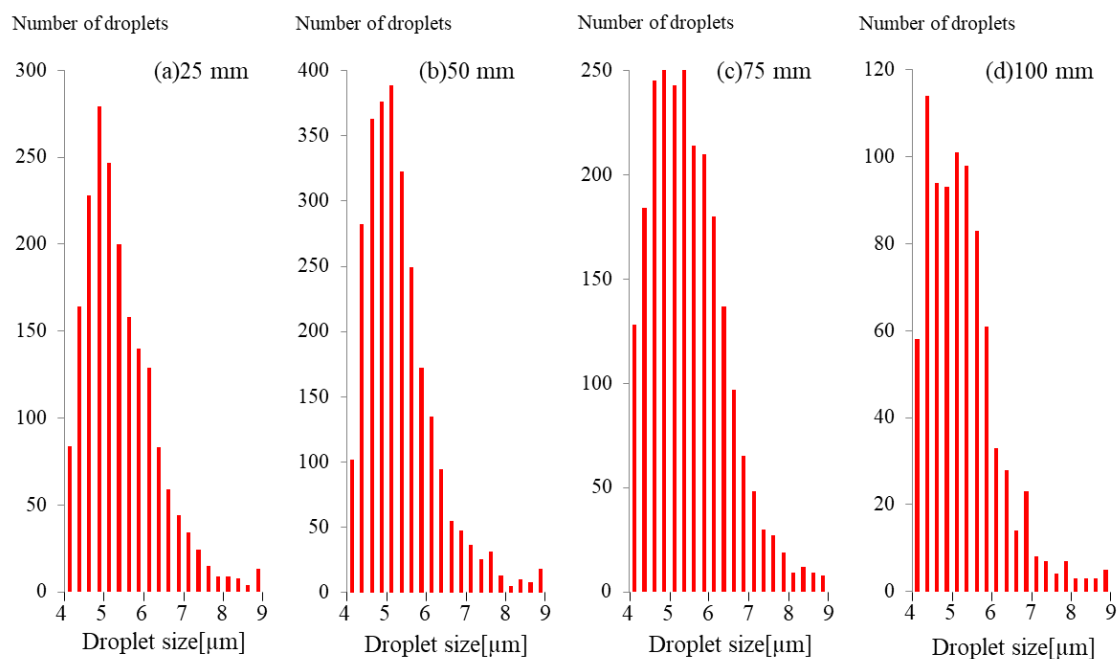


図 4.9 粒径分布 (200 °C)

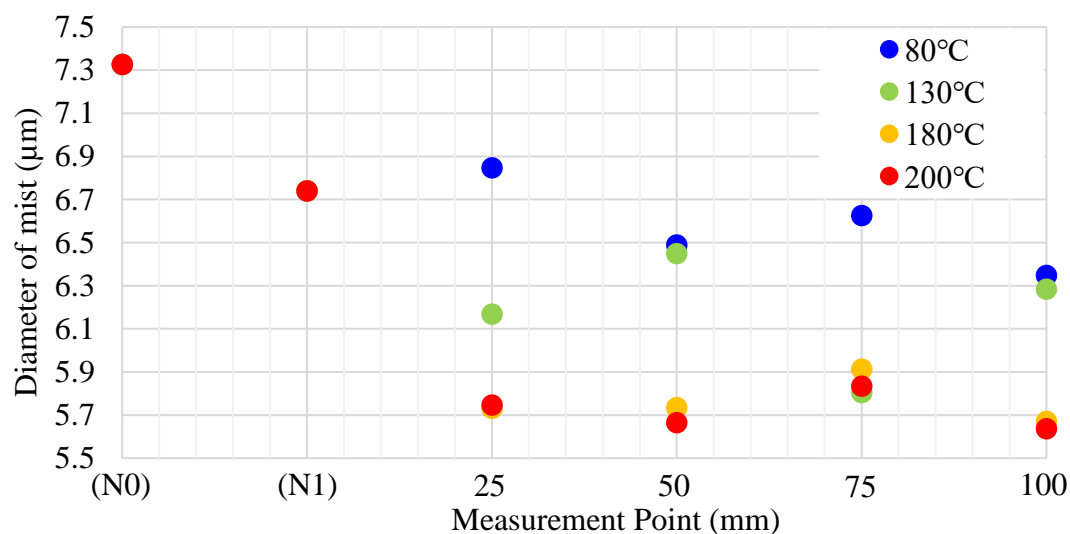


図 4.10 温度別各観測地点での平均粒径の推移

表 4.2, 図 4.5~図 4.10 を確認すると温度が上昇するにつれて, 平均粒径が減少していることが分かる. また, 観測位置が上流から下流に向かうにつれても減少していることが分かる. しかし, 各温度でその傾向にバラつきが見られる部分も確認できる. そこで微小液滴の蒸発時間がどのように推移していくのか検討を行うために, 隣り合う 2 つの測定値の中心差分を求め, 近似を行った. その結果得た各温度の近似線と図 4.10 でも示した実測値から得られた結果をグラフにプロットしたものを図 4.11 に示す.

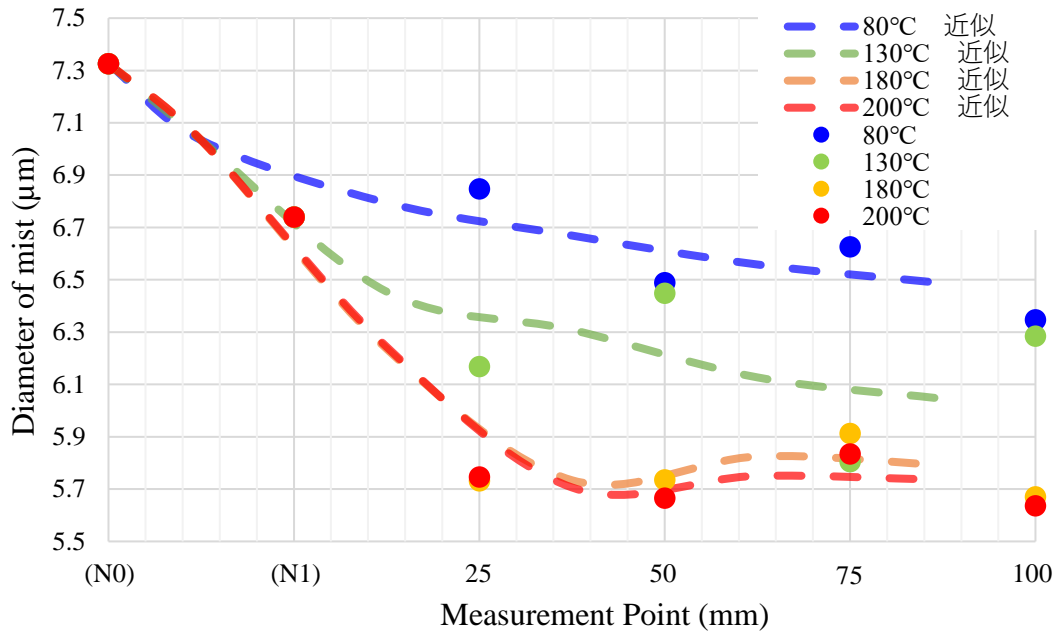


図 4.11 温度別各観測地点での平均粒径の推移（近似線）

図 4.11 に示すように、80 °C と 130 °C の近似線は観測位置が推移していくにつれて徐々に緩やかになっている。また、180 °C と 200 °C の近似線は 50 mm 付近でそれまでの傾きが緩やかになり、粒径変化が小さくなっているように見える。

最後にこれらのデータを用いて、簡易的ではあるが微小液滴の蒸発時間の予測を試みる。微小液滴の体積は、

$$V = \frac{4\pi r^3}{3} [\mu\text{l}]$$

で求まる。表 4.2 より、N0 地点の微小液滴体積は、

$$V = \frac{4\pi r^3}{3} = 0.2059 \times 10^{-15} [\text{m}^3] = 2.059 \times 10^{-7} [\mu\text{l}]$$

で求まる。表 4.2 より、25 mm 地点の微小液滴体積は、

$$V = \frac{4\pi r^3}{3} = 0.1681 \times 10^{-15} [\text{m}^3] = 1.681 \times 10^{-7} [\mu\text{l}]$$

表 4.2 より、100 mm 地点の微小液滴体積は、

$$V = \frac{4\pi r^3}{3} = 0.1339 \times 10^{-15} [\text{m}^3] = 1.339 \times 10^{-7} [\mu\text{l}]$$

となる。よって、175 mm の流路を通過する際に、およそ $0.7198 \times 10^{-7} \mu\text{l}$ の液滴が消失していることが分かる。また、ある地点の流路をある流量 Q 、流れる時の流速 v 、流れる時の流速 s とすると、

$$v = \frac{Q}{S} [\text{m/s}]$$

で求まる。参考までに、今回の流路を走り抜けていく微小液滴の流速は、

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{2 \times 10^{-3}/60}{3 \times 10^{-6}} = 11.11 [\text{m/s}]$$

となる。つまり、微小液滴が観測窓から次の観測窓までの間（25 mm）を、2.25 ms で移動する。

これらの情報から推測される、流路装置を流れる微小液滴の予測蒸発時間の推移を図 4.12 に示す。また、実測値の最終区間の傾きをそのまま用いて、体積が 0 になるまで予想線を延長したものを図 4.13 に示す。どちらも原点に使用しているのは N1 の平均径結果から得られた体積値となっている。

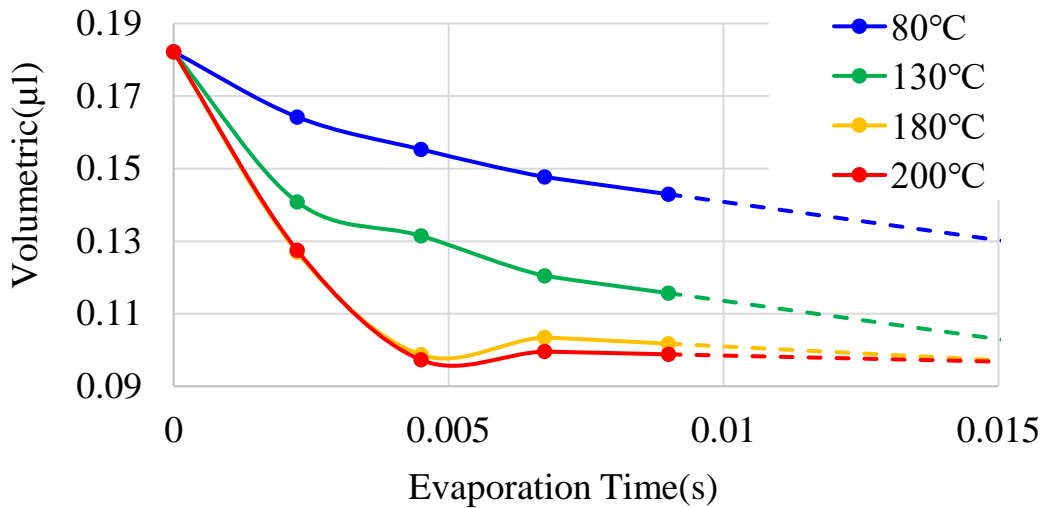


図 4.12 微小液滴の予測蒸発時間（先行研究との比較）

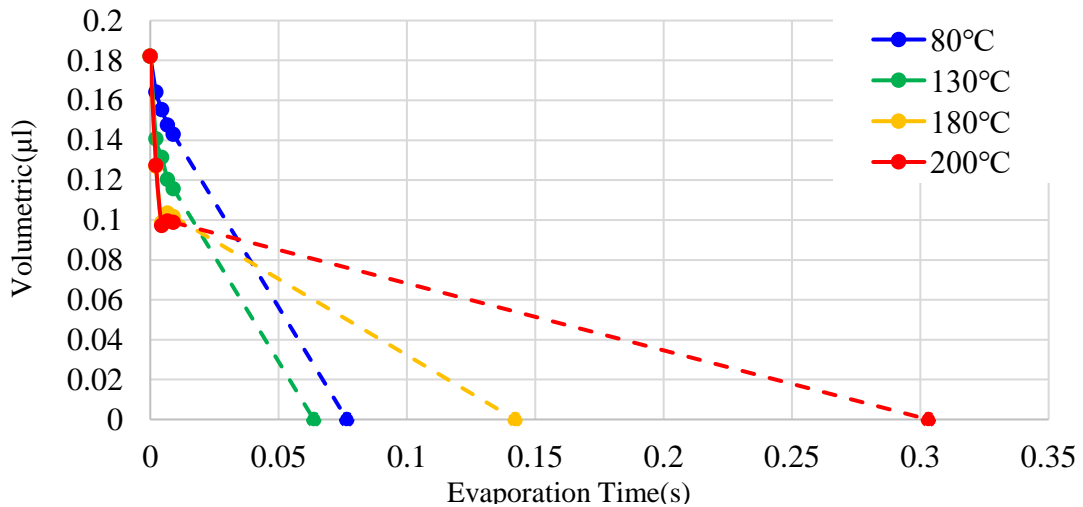


図 4.13 微小液滴の予測蒸発時間（今回の温度別比較）

図 4.12 と図 4.13 から分かる結果について考察していく。まずは図 4.11 の結果を確認する。80 °Cと 130 °Cのデータでは上流から下流にかけて順当に蒸発している様子が読み取れる。超純水のライデンフロスト温度より高い 180 °Cと 200 °Cのデータでもその様子が見受けられるが、途中から傾きが急に緩やかになっている。

次に図 4.12 の結果を確認する。体積が 0 になっている地点を確認すると、80 °Cと 130 °Cでは 130 °Cの蒸発時間の方が短くなる予測を示している。一方、超純水のライデンフロスト温度より高い 180 °Cと 200 °Cでは 130 °Cの結果よりも蒸発時間が長くなる予測を示す。さらに、その 180 °Cと 200 °Cの二つの結果を比較すると 200 °Cの蒸発時間の方が長くなる予測を示す。

ここで、当研究室で兼ねてより B.S.Gottfried らが提唱するライデンフロスト状態の液滴蒸発時間に関する式の改良を続けているミリサイズ液滴の研究で行われた⁽²⁶⁾、超純水液滴の蒸発時間の実測結果と比較を行う。その結果を図 4.14 に示す。

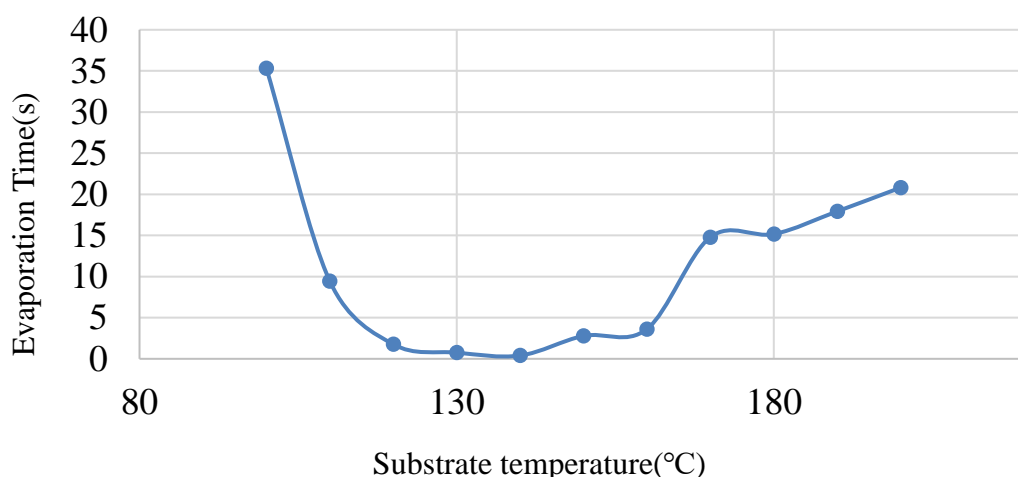


図 4.14 ミリサイズ液滴(超純水)の蒸発時間

図 4.14 と図 4.13 に示した本実験結果を比べると、示す結果の傾向が一致していることが分かる。よって、簡易的な予測ではあったが、これまで行ってきた微小液滴の観測実験と液滴径の測定プログラムから得られた結果から、微小液滴であってもライデンフロスト現象が発生し蒸発時間の伸びが見られているのではないかという実験結果を得られた。

しかし、今回の蒸発時間の予測はあくまで簡易的なものである。よって今後、より精度の高い蒸発時間の予測を行うためには、観測実験における 125 mm から 510 mm までの下流域での実験と、各観測地点のデータ蓄積をさらに行う事が重要である。また、B.S.Gottfried ら⁽⁵⁾やミリサイズ液滴の研究⁽²⁶⁾で得られている液滴蒸発時間の式に各種パラメータを代入し、比較検討を行うことも重要である。

第5章 結言

5.1 今後の展望

5.1.1 微小液滴の挙動観測実験

微小液滴の挙動観測実験において、今後行う必要のあることをここに記す。

- 液滴観測位置の増加
- 噴霧する液種の変更
- 分解能の向上
- 装置などの洗浄・新調

今回報告した挙動観測実験では、液滴観測位置が流路装置上流側に偏っている。しかし、より詳細な液滴挙動の推移を観測するには、流路装置下流域におけるデータの取得が必要である。また、液種は超純水による実験のみ行った。工業製品と微小液滴との関連性を正確に把握するためには、他の液種を用いた実験が必要である。そして、分解能の向上については、実験から得られる画像データをより精度の高くするためにも最も重要な項目である。

5.1.2 液滴径測定プログラムの開発

液滴径測定プログラムの開発において、今後行う必要のあることをここに示す。

- 閾値設定なしの測定の実現

今回提案したプログラムは $4.06\ \mu\text{m}$ 以下の領域は削除して測定を行っているが、各粒径分布の一番多い棒が徐々に左側に推移しているのが分かる。よって、測定可能な液滴径に制限を加えないように測定が行える必要がある。

5.1.3 微小液滴の蒸発時間予測

微小液滴の蒸発時間予測において、今後行う必要のあることをここに示す。

- 下流域データの取得
- 各観測データの蓄積
- 他研究⁽⁵⁾⁽²⁶⁾の蒸発時間の予測式の結果との比較

今後、より精度の高い蒸発時間の予測を行うことが必要である。よって、観測実験における 125 mm から 510 mm までの下流域での実験と、各観測地点のデータ蓄積、B.S.Gottfriedら⁽⁵⁾やミリサイズ液滴の研究⁽²⁶⁾で得られている液滴蒸発時間の式から得られる結果と、比較検討を行うことも重要である。

5.2 まとめ

本研究では、微小液滴挙動の観測を問題なく行うための実験装置群の改良とその結果を高精度かつ自動に測定するためのプログラム開発を行い、実験から結果取得までを円滑に行えるシステムの開発を行い、下記に示すように大きく分けて3つのことを行った。

5.2.1 微小液滴の挙動観測実験

新流路装置を開発し、微小液滴の観測実験を行った。各温度、各観測位置において流れ場からの漏れを確認することなく観測を行うことに成功した。その他の効果として従来の流路装置に比べてアルミ合金が占める容積が増加し、装置全体が持つ熱容量が大きくなったことで流れ場への熱伝達が向上していると考えられる。

しかし、新流路装置を導入したことで、新たな問題も発生した。1つ目は流路装置加熱時の温度ムラの発生、2つ目は流出口が $\Phi 1$ mm 程度と細く、圧力損失が大きいため 2 L/min 以上のガスを流すことができなかったことである。そのため、流れる微小液滴の全体量が減少したと考えられ現状、流路装置下流域での観測を行うことができなかった。

5.2.2 液滴径測定プログラムの開発

MATLAB による液滴径の高精度測定プログラムの開発に取り組み、液滴像の平均径の算出から測定データを記録する一連の流れの自動化に挑戦した。市販の観測装置で測定し得られた結果と同条件の実験データをプログラムで測定した結果、ザウター平均粒径の誤差が $0.03 \mu\text{m}$ の精度で測定できていることが分かった。よって今回の測定プログラムの信頼性の高さがある程度証明できたと言える。

5.2.3 微小液滴の蒸発時間予測

現在のシステムで得られた結果から微小液滴の蒸発時間に関する予測を行った。ライデンフロスト温度を超えると蒸発時間が伸びるような予測を示した。図 4.13 の体積が 0 になっている地点を確認すると、 80°C と 130°C では 130°C の蒸発時間の方が短くなる予測を示すこと、超純水のライデンフロスト温度より高い 180°C と 200°C では 130°C の結果よりも蒸発時間が長くなる予測を示すこと、さらにその 180°C と 200°C の結果を比較すると 200°C の蒸発時間の方が長くなる予測を示すことが分かった。その結果をミリサイズの超

純水液滴の蒸発時間の実測結果と比較したところ⁽²⁶⁾，ライデンフロスト現象の存在を示す可能性のある結果を得た。

参考文献

- (1) 「統計から見る日本の工業」工業製品のいま，昔 | 経済産業省
<https://www.meti.go.jp/statistics/toppage/topics/kids/industry/comparison.html>
- (2) その差，“2兆”倍 (!?) 1W あたりの演算性能の向上とは？—ENIAC とスマートフォン：新刊ピックアップ | 技術評論社 <https://gihyo.jp/book/pickup/2014/0045>
- (3) 東海林 豊, 渡部 弘達, 岡崎 健, ”N₂ 雰囲気におけるエマルジョン燃料噴霧流の二次微粒化挙動と粒径分布”, 日本機械学会論文集, Vol.81, No.827 (2015)
- (4) 廣岡 信行, 小野 吉彦, 中山 信行, ”インクジェット印字ノズルまわりの微小液滴挙動の PIV 計測”, 可視化情報学会誌, Suppl, vol.23, No.1, pp229-232 (2003)
- (5) B.S.Gottfried, K.J.Bell“FILM BOILING OF SPHEROIDAL DROPLETS”I & EC Fundamentals 5, 561 (1966)
- (6) 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)
- (7) 西尾 茂文, 平田 賢, “ライデンフロスト温度に関する研究(第1報, ライデンフロスト温度の基本的性格に関する実験的検討)“, 日本機械学会論文集(第2部), 43 卷 374 号 (1977)
- (8) 西尾 茂文, 平田 賢, “ライデンフロスト温度に関する研究(第2報, 固液接触面の挙動とライデンフロスト温度)“, 日本機械学会論文集(第2部), 44 卷 380 号 (1978)
- (9) Y. Ding, J. Liu, “Dynamic interactions of Leidenfrost droplets on liquid metal surface“, Appl. Phys. Lett. 109, 121904 (2016)
- (10) H.M. Kwon, J.C. Bird, K.K. Varanasi, “Increasing Leidenfrost point using micro-nano hierarchical surface structures“, Appl. Phys. Lett. 103, 201601 (2013)
- (11) J. Cordeiro, S. Desai, “The Leidenfrost Effect at the Nanoscale“, The American Society of Mechanical Engineers, 49897, Vol.1 (2016)

- (12) B.S.Gottfried, C.J.Lee, K.J.Bell, “The Leidenfrost Phenomenon: Film Boiling of Liquid Droplets on a Flat Plate“, Intern J Heat Mass Transfer, in press (1965)
- (13) N.A.Pleteneva, P.A.Rebinder, “Certain Facts Concerning Evaporation of Liquid in the Spheroidal State“, Phys Chem pp961-973 (1946) ; Bull USSR Acad Sci, Div Tech Sci 12 (1946)
- (14) V.M.Borishansky, “Heat Transfer to a Liquid Freely Flowing over a Surface Heated to a Temperature above the Boiling Point“, U.S. At.Energy Comm Translation Series, AEC-tr-3405, Problems of Heat Transfer during a Change of State (U.S.S.R.) : A Collection of Articles, ed., pp109-144, by S.S.Kutateladze, ed. (1953)
- (15) B.S.Gottfried, “The Evaporation of Small Drops on a Flat Plate in the Film Boiling Regime“, Ph.D thesis, Case Institute of Technology (1962)
- (16) K.J.Baumeister, “Heat Transfer to Water Droplets on a Flat Plate in the Film Boiling Regime“, Ph.D thesis, University of Florida (1964)
- (17) K.J.Baumeister , T.D.Hamill , “Creeping Flow Solution of the Leidenfrost Phenomenon“, Natl Aeron Space Admin, NASA TND-3133 (1965)
- (18) K.J.Baumeister, T.D.Hamill, F.L.Schwartz, G.J.Schoessow, “Film Boiling Heat Transfer to Water Droplets on a Flat Plate“, NASA TMX-52103 (1965)
- (19) B.M.Patel, K.J.Bell, “The Leidenfrost Phenomenon for Extended Liquid Masses“, 8th National Heat Transfer Conference, Los Angeles (1965)
- (20) E.S.Godleski, K.J.Bell, “The Leidenfrost Phenomenon for Binary Liquid Solutions“, Proceedings of 3rd International Heat Transfer Conference, Vol IV, Chicago (1966)
- (21) C.J.Lee , “A Theoretical and Experimental Investigation of the Leidenfrost Phenomenon for Small Droplets“, Ph.D thesis, Oklahoma State University (1965)
- (22) 太田垣 知輝, “高温環境下にある微小液滴に対するライデンフロスト効果の観測”, 高知工科大学大学院 知能機械システム工学コース 修士論文 (2016)

- (23) 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)
- (24) 秦 暦, "高温壁近傍における液滴挙動を表すモデル式の再検討", 高知工科大学学士論文(2018)
- (25) 宮地 啓太, "気相中を流動する微小液滴の挙動観測", 高知工科大学学士論文(2018)
- (26) 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", 高知工科大学学士論文(2020)
- (27) 田村 善助, 日立評論, 第 42 卷 第 5 号, pp75-80 (1960)
- (28) 大平 博文, 清水 俊明, "ライデンフロスト現象がもたらすダイカスト離型剤の油膜形成への影響", (株)青木科学研究所, SOKEIZAI Vol.52 No.9 (2011)
- (29) 望月 貞成, 村田 章, "伝熱工学の基礎", 日新出版株式会社 (1994)
- (30) Bernardin and Mudawar, "A Cavity Activation and Bubble Growth Model of the Leidenfrost Point, " Transactions of the ASME, (Vol. 124, Oct. 2002)
- (31) 石川 宗晴, 村上 昭年, "レーザーによる噴霧流の画像計測", 日本航空宇宙学会誌, 第 30 卷 第 342 号, pp21-26 (1982)
- (32) W.R. Wood, A.L. Loomis, "The Physical and Biological Effects of High Frequency Sound Wave of Great Intensity", Philos. Mag., pp417-437 (1927)
- (33) K. Okuyama, I.W. Lenggoro, "Preparation of nanoparticles via spray route", Chemical Engineering Science, Vol.58, pp537-547 (2003)
- (34) M. Kerker, "LABORATORY GENERATION OF AEROSOLS", Advances in Colloid and Interface Science, Vol.5, pp105-172(1976)
- (35) 千葉 近, "超音波噴霧", 株式会社山海堂 (1990)

- (36) T. Kawaharamura, “Physics on development of open-air atmospheric pressure thin film fabrication technique”, Japanese Journal of Applied Physics 53, 05FF08 (2014)
- (37) 顕微鏡の能力 その 1 ～分解能と倍率～ | オリンパス ライフサイエンス
<https://www.olympus-lifescience.com/ja/support/learn/03/045/>
- (38) 顕微鏡の構成と仕様 その 2 ～観察系 (接眼レンズ・撮影レンズ)～ | オリンパス ライフサイエンス
<https://www.olympus-lifescience.com/ja/support/learn/03/048/#an01>
- (39) スプレーテック スプレー液滴径測定システム | Malvern Panlytical
<https://www.malvernpanalytical.com/jp/products/product-range/spraytec/>

謝辞

本修士論文は、高知工科大学 大学院工学研究科基盤工学専攻 知能機械システム工学コース在学中に、材料革新サステナブルテクノロジー研究室にて行った研究についてまとめたものです。

川原村 敏幸 教授 には、私が当研究室に配属されて以来、数々の成長機会を通して多くの学びをご教授くださいました。日々の研究会、勉強会での議論や1対1での議論を通して、論理的思考力の成長と多方向から物事を見る視点を養っていただきました。また、研究活動を通して、新規装置開発等の諸連絡も未熟ながら経験させていただくことができました。本修士論文を執筆するにあたり充実した情報量を用意できたのも、不自由なく研究を進める環境を整えて頂いた結果であると実感します。日々お忙しい中、未熟な私をここまでご指導していただきましたこと、心より深く感謝申し上げます。

当研究室の卒業生にあたる、松崎 俊祐さんには、本研究を進めていく上で重要となる実験装置の扱い方や理解する必要のある知見に関して、在学中、非常に緻密かつ親切にご指導してくださいました。また、卒業後も研究室にお見えになられた時には、研究の進捗状況や成果に耳を傾けて頂くと共に、今後に向けて鋭いご指摘をしていただきました。さらに就職活動中にも私が不安に思っていることに対する情報やアドバイスを享受していただきました。これまで見せてくださった松崎さんの冷静かつ正確な姿や熱い人柄は、私が日々の生活を送る上での模範です。心より深く感謝申し上げます。

当研究室所属の Dang Thai Giang さん、劉 麗さんには、私の拙い英語によるコミュニケーションを温かく見守って頂くと共に、最近では積極的に日本語でもコミュニケーションを図ってくださりました。心より深く感謝申し上げます。

当研究室の先輩である、佐藤 翔太さんには、研究を行う上で必要な姿勢や知識、研究やその他の熱い議論を通して、研究ならびに研究室活動に対するモチベーションを常に高めて頂きました。お忙しい時間の少しの合間にも関わらず、常に意見を受け止めてくださると同時に丁寧かつ的確なお言葉を頂戴し、各種ご対応して頂きました。その分至る所でご迷惑をお掛けしたこと大変申し訳なく思っております。しかし、私はその懐の深さに救われていました。心より深く感謝申し上げます。

当研究室の同期である、上田 真理子さん、岡田 雄哉君、狩野 大輝君、鈴鹿 紅音さん、秦 暦君、田頭 侑貴君には、日々楽しく研究室での時間を過ごしながらも、お互いの研究内容に関する熱い議論を交わす仲間として、良い刺激を頂きました。心より深くお礼申し上げます。

ます。4月からはそれぞれの道に進むこととなりましたが、またどこかでお会いできることを楽しみにしております。

当研究室の後輩である、石井 和磨君、尾崎 珠子さん、安岡 龍哉君、和仁原 季也君、朝子 幹太君、石川 祐奈さん、福江 雅さん、松坂 康永君、宮田 翔生君、市川 怜司君、亀岡 正樹君、川西 善郎君、草下 圭太君、高井 友輝君、須佐美 大夢君には、研究会や勉強会を通し、研究内容に理解を示して頂くと共に、熱い議論の雰囲気味わって頂きました。深く感謝すると共に今後の成長に期待しております。特に宮田 翔生君、市川 怜司君、草下 圭太君は私と同じく液滴に関する研究をされるとのことなので、宮田君を筆頭に楽しく、時には厳しく、無理のない程度で研究に取り組んでいただき、よりよい結果を得られるよう遠くから応援しております。

最後になりましたが、6年前、本大学に入学してから、遠くながらも常に応援して頂きました、両親、妹、祖母に心を込めて感謝いたします。特に私たち家族にとって、私が大学院に進学した2年間には大きな変化が訪れたこともあり、大変密度の濃い時間でした。そんな中、私はこれまでよりもさらに遠い場所で新たな道を選ぶことに決めました。その決断をやさしく受け入れて頂いたこと、とても感謝しています。これからは、一社会人として旅立つこととなりますが、これまでと変わらぬご声援をどうぞよろしく申し上げます。