

卒業論文要旨

高温流れ場内におけるメタノール微小液滴の蒸発挙動に関する研究

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 1230044 梶 亮介

1. 背景

微小液滴は、インクジェットプリンター、エンジンの燃料噴霧、街中のミスト装置などの幅広い分野で活躍している。そのため微小液滴の挙動に関する研究は盛んに行われている。一方ミスト CVD 法において機能薄膜形成メカニズムの解明が取り組まれており、反応炉内を流動するミスト液滴の挙動を厳密に理解するために本研究が派生した。

2. ライデンフロスト現象

ライデンフロスト現象とは、液滴の蒸発挙動の1つである。液滴が液体の沸点以上の高温固体表面上に導入された際に、液滴と固体表面の間に薄い蒸気膜が形成される。この蒸気膜により、固体表面上を浮遊した状態になり、液滴と固体表面の熱伝達が阻害され、液滴の蒸発時間が大幅に増加するという現象である。この現象は1756年に Johann Gottlob Leidenfrost によって報告⁽¹⁾された。図1にライデンフロスト現象の模式図を示す。

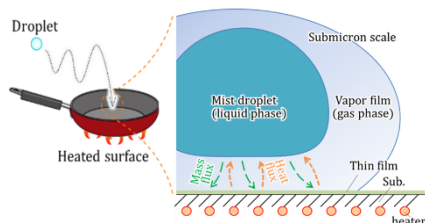


Figure 1. Schematic image of droplet in Leidenfrost state

3. 目的

先行研究⁽²⁾によって、ライデンフロスト状態の液滴に関する蒸発時間のモデル式の修正・導出が行われた。しかしこのモデル式はミリオーダーの液滴で導出されたものであり、マイクロオーダーの微小液滴で適用可能が明らかになっていない。そこで、本研究室では微小液滴の蒸発挙動を観測するために必要な特殊な装置群と計測プログラムの開発が行われており、先行研究⁽³⁾によって定常的で正確な観測が形になってきた。ところで、本研究室では溶液をミスト化し機能性薄膜を形成するミスト CVD 法の開発を行っている。このミスト CVD 法では各種機能薄膜を形成するため多種多様な溶液が採用されている。ところでこれまでの微小液滴観測に関する研究は超純水のみが対象であった。そこで本研究では超純水以外の溶媒として、ミスト CVD 法でも用いられるメタノールを選択し、超純水と比較することでメタノール微小液滴の蒸発挙動の解明を目指した。

4. 研究内容

本研究では、メタノール微小液滴の蒸発挙動を観測するための実験を行った。そのためまず、排気装置の設置、メタノ

ールの蒸発挙動の解析を行った。また、超純水の実験結果と比較し、超純水とメタノール蒸発挙動の違いについて比較した。その他の実験内容については、卒業論文にて記述する。観測装置の概要を図2に示す。

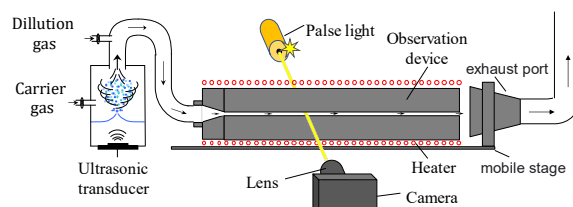


Figure 2. Schematic image of micro size droplet behavior

5. 流量による蒸発挙動の変化

先行研究と同様の条件下で搬送ガス(以下 c.g.)流量が 2.0 L/min で実験を行った際、超純水の結果よりも観測数が少なくなり、統計的な分析に必要なデータ量を取得することは困難であった。そこで c.g.の増加と希釈ガス(以下 d.g.)を変化させて液滴挙動を取得することにした。実験条件を表1に示す。また解析には先行研究⁽³⁾で作成されたプログラムを使用した。解析条件は表2に示す。

Table 1 Experimental conditions

Solvent	MeOH
Flow field width [mm]	5
Temperature [°C]	150
Carrier Gas / Dilution Gas [L/min]	①2.0/0.0,②2.0/1.0,③3.0/0.0
Observe Posi from inlet [mm]	25,50,75~500
Power [V/A]	24 / 0.64
Sampling Time [ns]	22
ISO Sensitivity	ISO 2000
Shooting Time [s]	90

Table 2 Analysis conditions

Weights	Best_221122_L_data4.1
Confidence	0.3
img	768

実験結果を図3①c.g.2.0, ②c.g.2.0 d.g.1.0, ③c.g.3.0に示す。図中の左上の数字は算術平均粒径、左下がザウター平均粒径、中央が観測位置、右上が認識個数である。

①の条件下では、75 mm 地点までしか観測ができず、微小液滴の蒸発挙動を解析するには適さなかった。②の c.g. に加え d.g.を加えた条件下では観測距離は伸び最大観測位置は 250

mm となった。③の条件下では、最大観測位置は 325 mm で②の条件時よりも 75 mm 後方で液滴を確認でき、認識個数もはるかに多いことが分かった。また、d.g.を付加することでミストが渦を巻くように搬送されていく様子が見られた。ところが①、②、③の 50 mm 地点の条件で観測された液滴の平均粒径を比べると、①より②の平均粒径が大きいことが分かる。②は d.g.の追加に伴う流出口直後に発生している渦によりミスト同士の衝突および合体が促進され液滴径が増大したと考えられる。また、③が最も平均粒径が大きいのは c.g.の増加により搬送量が増えたことにより、ミスト密度が大きくなり、上と同様にミスト同士の衝突および合体が促進され液滴径が増大したことが考えられる。c.g.4.0 L/min を超えると噴霧装置上部からミスト流のリークが見られた。

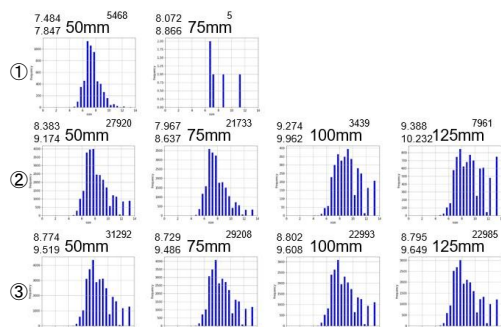


Figure 3. In MeOH solvent. Histogram of droplet diameter observed at each position at the setting temp of 150°C

6. メタノールと超純水の比較

メタノールと超純水の蒸発挙動を比較するために供給液種以外同じ条件下で実験をおこなった。実験条件を表 3 に示す。撮影時間は液滴数が減少してきたら 120 秒ずつ追加し、360 秒を上限とした。解析条件は表 2 と同じである。

Table 3. Experimental conditions

Temperature [°C]	100, 200
Carrier Gas / Dilution Gas [L/min]	4.0 / 0.0
Shooting Time [s]	120~360

先行研究⁽³⁾より得られた超純水の 100 °C, 200 °C の粒径分布図とメタノールの 100 °C, 200 °C の粒径分布図をそれぞれ図 3, 図 4 に示す。また右上の数値を上から、ピントの合致した液滴個数、ピンボケした液滴個数、総認識個数を示す。また、メタノールと超純水のザウター平均粒径の変化を図 6 に示す。25 mm 地点は、観測窓であるガラスが汚れ、正確なデータを取ることができなかった。

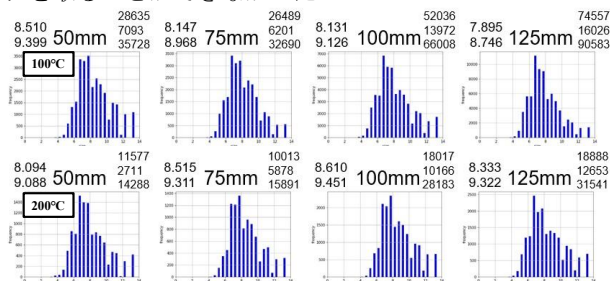


Figure 4. Histogram of droplet diameter observed at each position at the setting temp of 100°C and 200°C in MeOH solvent.

図 4 と図 5 より、超純水よりメタノールのザウター平均粒径が大きくなる傾向が見られた。これは、水の表面張力が 72.7 mN/m, メタノールの表面張力が 22.6 mN/m でメタノールの方の表面張力が小さく液滴同士が衝突した際に合体し

やすいため液滴径が大きくなったことが考えられる。

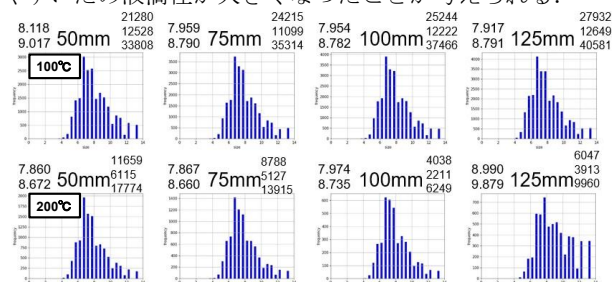


Figure 5. Histogram of droplet diameter observed at each position at the setting temp of 100°C and 200°C in H₂O solvent.

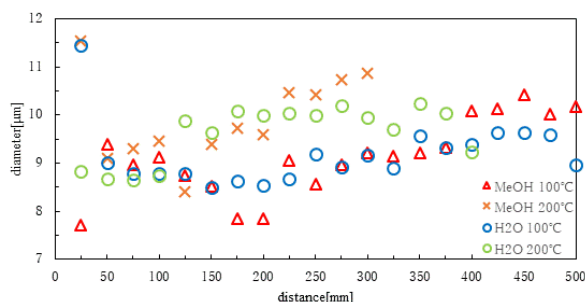


Figure 6. Comparison of Sauter mean droplet size.

図 4 と図 5 より、超純水よりメタノールの方が液滴認識個数の減少が早くなる傾向がみられた。これは、メタノールの沸点が 67.7 °C, 比熱が 2.516 J/kg・K で、水の沸点が 100 °C, 比熱が 4.217 J/kg・K であり、メタノールの沸点が低く、比熱も小さいため、水より先に沸点に到達し、蒸発したため液滴の認識数が減少したことが考えられる。

図 6 より、流路流出方向に近づくにつれてザウター平均粒径が大きくなる傾向がみられ、メタノールの方がその傾向が顕著であった。これについてはいくつかの要因が挙げられる。液滴が大きいことにより蒸発時間が増加した。ライデンフロスト現象が発生し、水よりメタノールのライデンフロスト点が高いことからその影響を受け、蒸発時間が増加した結果、液滴径の増大傾向が顕著になった。ライデンフロスト現象は蒸気膜厚さが流量に依存するため、大きな液滴ほど蒸発時間が伸びて小さな液滴は蒸発して認識できなくなった。プログラムのバグなどで、液滴サイズを 13 μm 以上と誤認識して、大きな液滴の認識割合が増加し平均粒径が増大したと考えられる。

7. 結言

本研究ではメタノール微小液滴の蒸発挙動を解明するため、実験条件の選定、超純水とメタノールの比較を行った。観測位置が後方になるにつれて液滴の認識数が減少し統計的に判断するには不十分なデータ数となった。また、メタノールで実験することで汚れが生じることも判明した。今後は実験装置や、実験方法の改善を行い、高精度のデータを取得し、微小液滴の蒸発挙動の解明を目指したい。

文献

- (1) 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)
- (2) 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)
- (3) 草下圭太”高温場における微小液滴の蒸発挙動解明に関する研究”, 高知工科大学修士論文(2023)