

2022（令和4）年度 修士学位論文

排熱回生システムに向けた液滴挙動解析と検討

Study of droplets for development of exhaust heat recovery system

2023年2月14日

高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻
知能機械工学コース

1245300 市川 怜司

指導教員 川原村 敏幸

目次

第一章 序論	1
1.1 はじめに.....	1
1.2 背景.....	2
1.3 目的.....	3
1.4 論文構成.....	4
第二章 ライデンフロスト現象について.....	5
2.1 ライデンフロスト現象の仕組み.....	5
2.2 液滴の遷移状態.....	6
2.3 ライデンフロスト点.....	7
2.4 ライデンフロスト液滴蒸発時間の厳密式.....	7
2.5 鋸歯面上におけるライデンフロスト現象.....	9
2.6 自走するメカニズム.....	9
2.6.1 作用・反作用を用いる説.....	10
2.6.2 蒸気流れを用いる説.....	12
2.7 液滴自走における順方向・逆方向.....	13
第三章 先行研究	14
3.1 はじめに.....	14
3.2 先行研究①②の違い.....	14
3.3 実験手順と実験機器（先行研究）.....	16
3.4 実験条件.....	23
3.6 実験結果（先行研究①）.....	25
3.7 実験結果（先行研究②）.....	26
3.8 先行研究から今後の研究へ.....	27
第四章 蒸気流出速度の測定.....	28
4.1 はじめに（蒸気流出速度の測定）.....	28
4.2 実験概要（蒸気流出速度の測定）.....	28
4.3 Rneck 計測実験における計測のための実験手順と実験機器.....	29
4.4 実験結果(蒸気流出速度の測定).....	32
4.5 考察（蒸気流出速度の測定）.....	32
4.6 物質収支の式.....	33
4.7 液滴下面から流出する蒸気の数値 v_1 、 v_2 の測定.....	36
第五章 流体解析	37
5.1 流体解析をするにあたり.....	37

5.2	流体解析の手順.....	37
5.3	解析結果.....	40
5.4	考察（流体解析）.....	41
第6章	2022 基板実験.....	42
6.1	はじめに（2022 基板実験）.....	42
6.2	2022 基板について.....	42
6.3	実験手順と実験機器（2022 基板実験）.....	44
6.4	実験条件（2022 基板実験）.....	46
6.5	実験結果（2022 基板実験）.....	47
6.6	考察（2022 基板実験）.....	50
6.7	効率.....	52
6.8	動力化に向けた効率化.....	55
第7章	排熱回生システム.....	56
7.1	排熱回生システムの概要.....	56
7.2	排熱回生システム1号機.....	56
7.3	排熱回生システムの作成.....	57
7.4	タービンの作成.....	58
7.5	排熱回生システムの試行.....	59
第8章	結言.....	60
8.1	まとめ.....	60
8.2	展望.....	61
参考文献	62
謝辞	64

第一章 序論

1.1 はじめに

我々人類は様々なものを発見、発明し、進化を続けてきた。人類が初めて火を発見することで、食料豊かに生活ができ、暖を取ることができ、宿敵から身を守れるようになり、人類にとって大きな進歩となった。また、この火の発見を皮切りに石、金属などの素材から石器や青銅器などの道具を発明することで生活を向上させ、紙や文字を発明することでコミュニケーションを図ってきた。このような発見、発明は昔の時代だけに留まらず、近代ではエネルギーに関する発明が多くなり、ワットが蒸気機関を、ファラデーが発電機を、オットーが4サイクルエンジンを発明している。このようにいつの時代も発見、発明といったものは絶えずこの世界のどこかで行われており、常に進化を続けている。世界中様々な場所で行われている発明であるが、全てのものがこの世界に存在する原料を用いて、物理現象に従って行われており、この美しい地球が有する自然の摂理無しには成し遂げられなかった。もちろん、この世界にはまだまだ解明されていない現象、発見されていない現象がたくさん存在しており、今もなお人類は発展途上といえる。

新たな発見、発明は人類に大きなメリットを与えてきたが、やはりデメリットも存在する。移動手段や動的エネルギーを目的に発明されたエンジンだが、ガソリン系エンジンの燃料は有限であるため持続的に使えないと言われており、ガソリン系エンジンから排出されるガスも現代では環境汚染として問題視されている。さらに、近い話では現代の人間が生活するうえで切り離せない電気エネルギーを生産する原子力発電所が津波の影響で爆発してしまい、人類はおろか自然にまで多大な悪影響を与えてしまった。人類の発展のため発明していくことは大切だが、我々が住んでいる地球の自然から恩恵を受けていることを決して忘れてはいけない。ましてや、人類の都合で自然を破壊してしまっただけではこのまま地球に住むことが出来なくなり、本末転倒である。

そこで現代では人類の存続のため、エネルギー開発を理由に地球環境をおろそかにするのではなく、人類の発展と地球環境の維持や改善を目標に持続可能な開発目標（Sustainable Development Goals : SDGs）が設定されている。特に7番目の目標である「エネルギーをみんなにそしてクリーンに」、9番目の目標である「産業と技術革新の基盤を作ろう」は人類がこれまで発明してきたエネルギーに大きく関わってくることになる。このようなことが指摘されている今、これまでの生活や技術を見直し、環境に対しクリーンな発明や、エネルギー効率の改善がますます重要になってきている。

1.2 背景

便利で快適な社会を求めた結果、熱エネルギーを使用し高速で移動が出来る自動車というものを開発したり、電気エネルギーを使用することで不特定多数と通信が出来るスマートフォンを開発したりして、現代社会で無くてはならない技術及び生活必需品を開発してきた。もちろん、それら生活必需品を動かすためにはエネルギーというものが必要であり、快適な生活をするには必然的に「エネルギーを生み出す」といった行動が取られている。ところがエネルギーの生産過程ではロスが発生し、またエネルギーを使う際にも無駄なく使われることはないため、多くのエネルギーが有効活用されていないのが現状である。

図 1.1 に温度別排ガス熱量のグラフを示す。国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の調査⁽¹⁾によれば、2015年度の第一種エネルギー管理指定工場と第二種エネルギー管理工場の全国推定未利用熱量は1年間で743ペタジュール(PJ/year)だと推定されている^[1]。特に200°Cまでの低温度帯の排熱は75%を占めており、低温度帯故に有効活用できていないのが現状である。対し本研究室では液体と高温表面のある様々な場所や技術分野で発生しているライデンフロスト現象について研究を行っており、無駄になっている大量の排熱とライデンフロスト現象を組み合わせることでもなにか新たな技術を生み出せないかと様々なアプローチで研究を行っている。

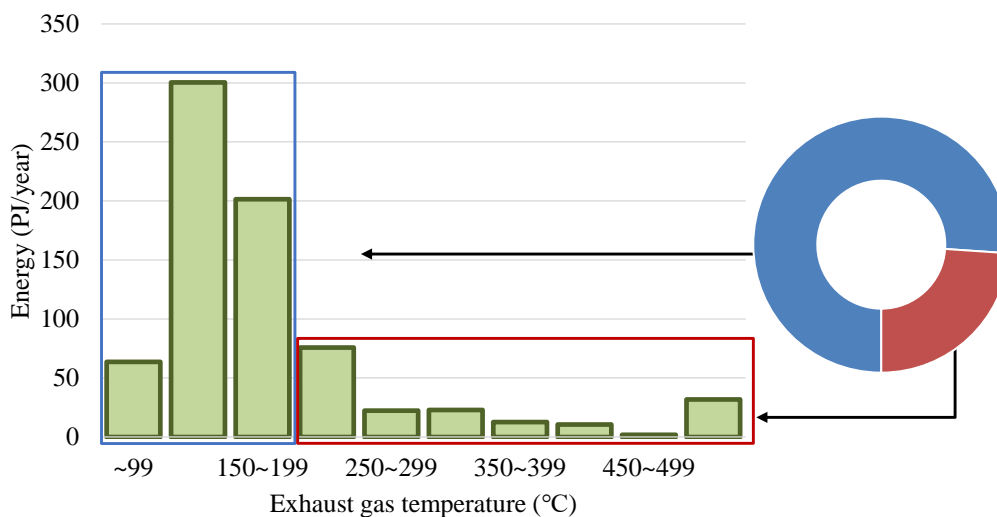
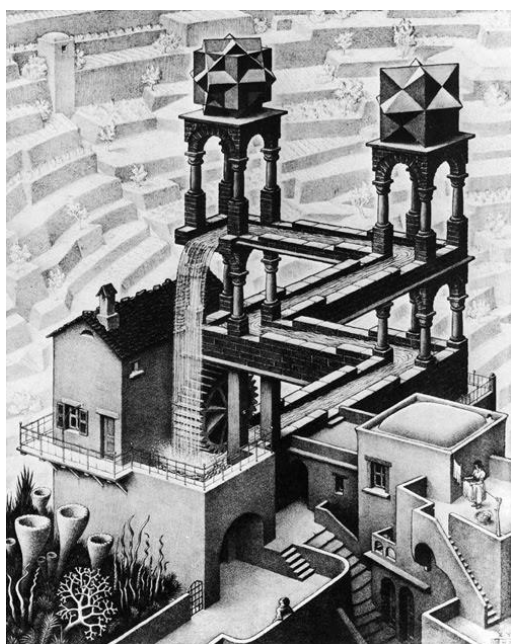


図 1.1 温度別排ガス熱量のグラフ

1.3 目的

上述の通り、本研究室の大きな目標はライデンフロスト現象と排熱を組み合わせた新たな技術を生み出すことである。後にも述べるが、鋸歯構造を持つ高温固体表面に液滴を導入すると、自走するといった現象が存在する。この物理現象を用いることで、具体的には図 1.2 に示すようなエッシャーの滝や、タービン構造を用いた回転体などの動力源が作れないかと模索している。ところが、液滴が高温鋸歯面上を自走する仕組みや効率については研究が不十分であり、動力化の早急な実現は困難である。そこで本研究ではこれまで行われてきた基礎研究をもう一度見直し、動力化という大きな目標により近付けるため、実験装置の改善、今まで行われてこなかった実験、解析ソフトを使った微視的な研究を行うことにした。最終的には、このような基礎実験だけでなく動力化に向けた第一歩として排熱回生システムにも着手することを目指した。

エッシャーの滝



鋸歯構造のタービン

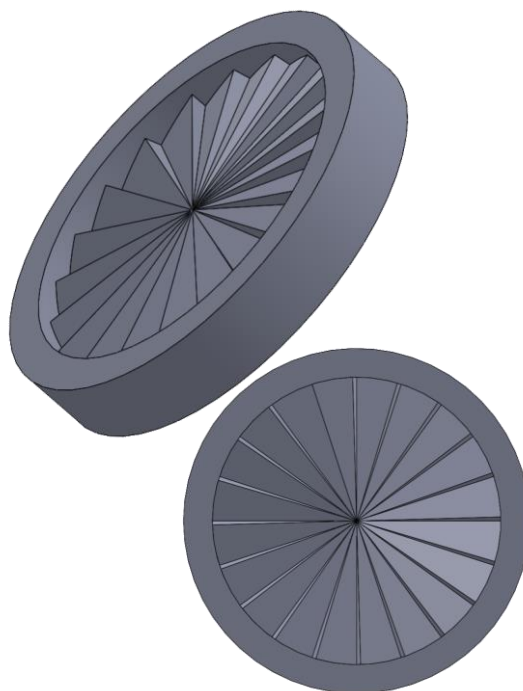


図 1.2 動力化に向けた具体例

1.4 論文構成

本論文の構成は以下の通りである。

第1章 本研究に至った経緯と目的について述べた。

第2章 ライデンフロスト現象の仕組みとその他ライデンフロスト現象が引き起こす物理特性について述べた。

第3章 本研究を行うに至った先行研究について述べる。

第4章 流体解析に向けた準備実験について述べる。

第5章 流体解析の手法、結果について述べた

第6章 新しく行う実験「2022 基板実験」について述べる。

第7章 排熱回生システムについて述べる。

第8章 本研究のまとめ、展望について述べる。

第2章 ライデンフロスト現象について

2.1 ライデンフロスト現象の仕組み

ライデンフロスト現象とは蒸発、昇華を伴う媒体を温度差のある物体に近づけた際に発生する物理現象のことである。この現象は日常生活でも観測することができる。例えば、高温に熱したフライパンに水滴を落とすとすぐに蒸発せず、フライパンの面上をコロコロと転がる現象や、液体窒素に手を数秒間入れても無事である現象もライデンフロスト現象の一種である。ライデンフロスト現象は、液体の沸点よりも更に高温に熱された物体に液体が接触、または近づくことにより液滴から蒸気が発生し、二つの物体間に蒸気の膜が形成され、この蒸気膜が液滴への熱伝達を阻害するため蒸発時間が非常に長くなる現象である。上述したフライパンで見られる現象もこのライデンフロスト現象により発生した蒸気膜が液滴を浮遊させることで起こっている。なお、この現象は1756年にドイツの医師である Johann Gottlob Leidenfrost が報告⁽²⁾したためこの人の名前で呼称されている。図2.1にライデンフロスト現象の概略を示す。

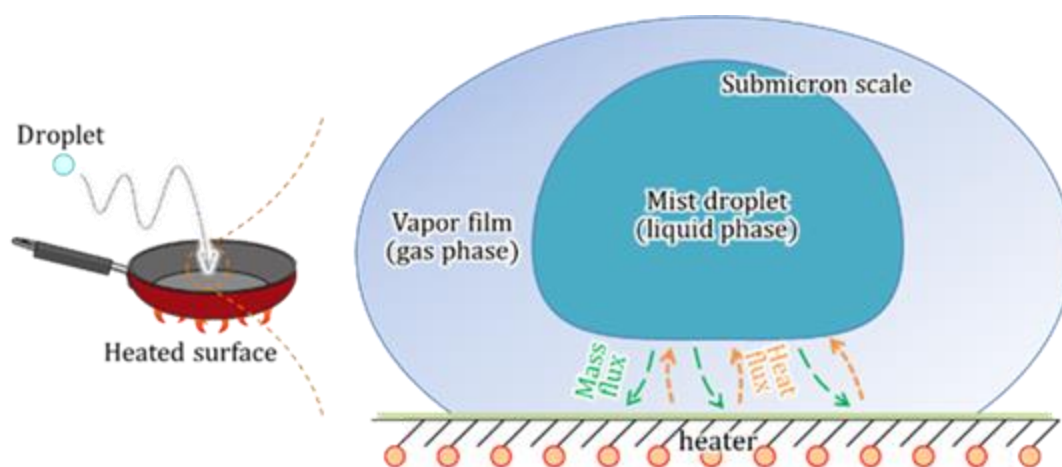


図 2.1 ライデンフロスト現象の概略図

ところで、ライデンフロスト現象は日常的なシーンに限らず、「液体」や「温度差」のようなものが介入してくる化学や工学の分野においても関与してくることが多く、熱効率や仕事率を上げることもあれば、下げることもあり、はたまたその技術の握っている可能性もある。よってライデンフロスト現象を理解、解明することは非常に重要である。

2.2 液滴の遷移状態

基板に液滴を滴下した時の基板表面温度に伴う液滴の状態変化は図 2.1 に示されるように 4 つに分けられる。第 1 は液滴の沸点よりも低い温度の状態が発生し、液滴が表面から気化していく領域である。第 2 の領域は主に液滴内に気泡が発生するが、液滴が過熱面と接触し、すぐに蒸散する領域、第 3 は液滴が固体表面に衝突した瞬間にあらゆる方向に気泡が発生しバチバチと音を立てながら蒸散する領域、第 4 は固体壁面が比較的高温で液滴が安定して壁面上に浮遊し、比較的長い時間をかけて蒸散していく領域である。

第 1 から第 2 領域へと液滴の沸点に近づくにつれて、蒸発時間が短くなっていくが、第 2 の領域になるにつれて液滴に伝わる熱流束の値が大きくなり核沸騰と呼ばれる液滴内部から気泡が発生する現象が見られ、液滴外部から蒸発するだけでなく、内部からも蒸発するようになる。なお、この領域は熱流束が最大となる臨界熱流束に達するまで続く。第 3 の領域では液滴が高温表面と接触する際に時間あたりに発生する蒸気量が增多することにより衝撃が発生し、結果として液滴と高温表面との接触面積が小さくなるため第 2 の領域よりも蒸発時間が延びていく。この領域は第 2 の領域で見られる核沸騰と第 4 の領域で見られる膜沸騰が混在する遷移沸騰領域であり、固体表面においても濡れ面と乾き面が混在する。最後の第 4 の領域が所謂ライデンフロスト現象を伴った液滴の状態である。液滴が蒸気膜によって固体表面と断絶され、高温壁面に浮遊したままの状態となり、一方気体の熱伝導率は液体の熱伝導率に比べてはるかに小さいため、熱伝達が阻害され液滴の蒸発時間が大幅に増加する。またこの領域は、膜沸騰領域と呼ばれる。

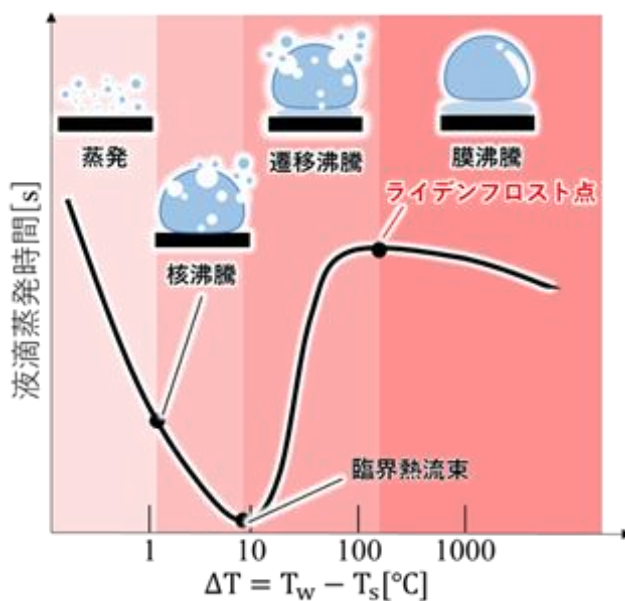


図 2.1 液滴の遷移状態

2.3 ライデンフロスト点

上述の図 2.1 で第 4 の領域である膜沸騰に変化する点、ライデンフロスト現象が観測できる状態で蒸発時間が最大になる点をライデンフロスト点と呼ぶ。なお、ライデンフロスト点は当然ながら液種によって変化するが、液量や基板の表面加工等によっても変化することが先行研究⁽³⁾⁽⁴⁾で確認されている。図 2.2 に加熱された基板表面に滴下した液滴の蒸発時間の関係を示すが、基板表面温度と滴下した液量によりライデンフロスト点が変動していることが分かる。

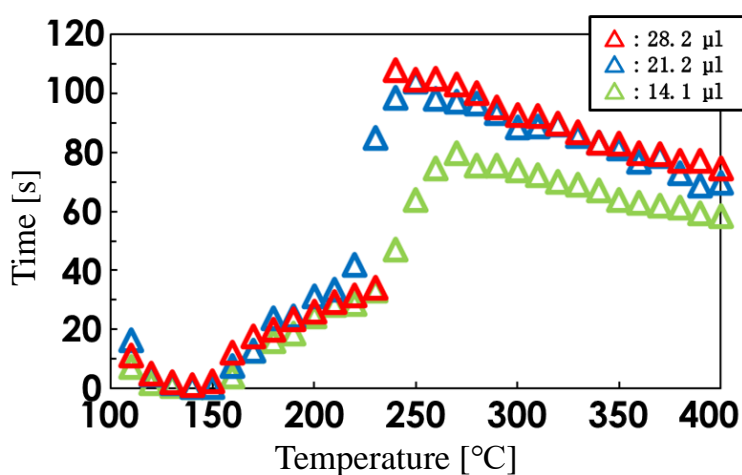


図 2.2 加熱された基板表面に滴下した液滴の蒸発時間の関係

2.4 ライデンフロスト液滴蒸発時間の厳密式

ライデンフロスト現象によって液滴の蒸発時間は飛躍的に増加する。この蒸発時間の導出を 1966 年に B.S.Gottfried らの研究チームが行った⁽⁵⁾。B.S.Gottfried が記したライデンフロストを伴う液滴の概略図を図 2.3 に示す。

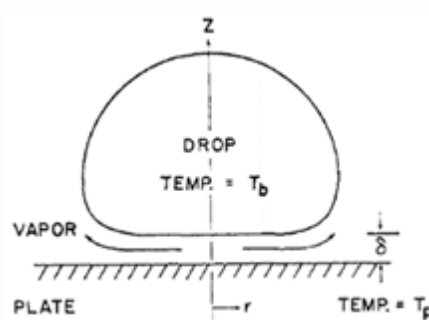


図 2.3 ライデンフロスト現象を伴う液滴の概略図

Gottfried は、液滴がライデンフロスト現象を伴う際に関係する物性値をもとに次元解析を行い、実験データを基に厳密式を導出した。この次元解析の際に考慮されたパラメータを表 2.1 に示す。基板表面温度、液種、滴下液量を変化させ液滴の蒸発時間を測り、その測定データを用いて次元解析を行い、以下に示す式の液滴の蒸発時間 τ_e を導き出した。

$$\tau_e = 37.8 \sqrt{\frac{r_0}{g}} \left(\frac{k_{vs} \Delta T}{\rho_{vs} D \lambda} \right)^{-0.735} \left(\frac{\rho_l}{\rho_{vs}} \right)^{0.407} \left(\frac{C_{ps} \mu_{vs}}{k_{vs}} \right)^{-0.874} \left(\frac{\mu_{vs}}{\rho_{vs} D} \right)^{0.714} \left(\frac{D}{\sqrt{g r_0^3}} \right)^{-\frac{1}{3}} \quad (2.1)$$

表 2.1 ライデンフロスト状態の液滴に関係する物性値パラメータ

熱伝導率(蒸気)	k_{vs}	[W/(m·K)]
密度(液)	ρ_l	[kg/m ³]
密度(蒸気)	ρ_{vs}	[kg/m ³]
動粘度(蒸気)	μ_{vs}	[kg/(m·s)]
気化熱	λ	[J/kg]
比熱(蒸気)	C_{ps}	[J/(kg·K)]
重力	g	[m/s ²]
拡散係数	D	[m ² /s]
沸点	T_b	[K]
プレート温度	T_p	[K]
プレート温度と液滴蒸発温度の温度差	ΔT	[K]

2.5 鋸歯面上におけるライデンフロスト現象

高温に熱された鋸歯面上に液滴を導入すると、その液滴が一定方向に移動する現象が見られる。この現象には液滴の蒸発現象が深く関与している。フライパン等平らな面を持つ高温固体表面に液滴を導入しても液滴から発生した蒸気は四方八方に噴射されるため、液滴は表面を秩序なく移動する。だが、鋸歯構造のような一定の秩序をもつが対称ではない形状をしている表面に液滴を導入すると、液滴から発生した蒸気膜の流出方向を操作することができるため一定方向に移動するようになる。

実際に本研究室で試作した鋸歯基板について図 2.4 に示す。B 基板と C 基板の 2 タイプを扱っており、どちらも基板表面に三角形の凹凸状の加工が施されている。B 基板は直角三角形の直角部分が表面側に来るように設計されており、このへりと液滴が近接するような仕様となっている。C 基板は直角三角形の直角部分が下部側に来るように設計されており、この縁面と液滴が近接するような仕様になっている。

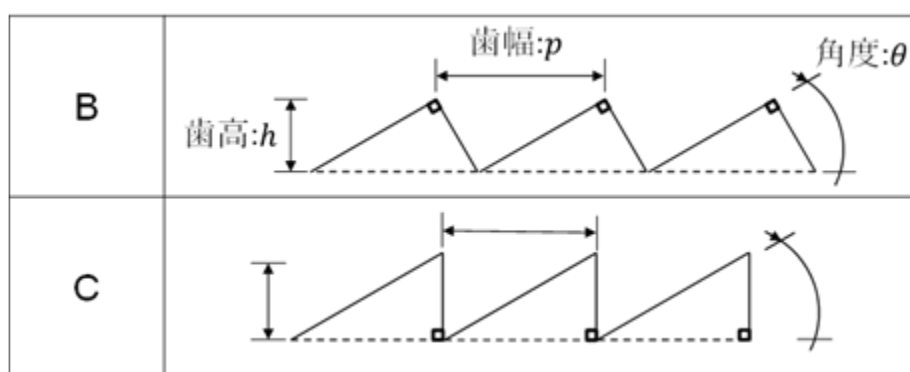


図 2.4 本研究室で試作した鋸歯基板の形状

高温鋸歯面上を液滴が自走する現象について蒸気が影響していることは自明であるが、そのメカニズムは完全には解明されておらず、様々な議論が展開されている。本研究室では主に 2 種類の仮説に基づいて研究を行っている。1 つ目は作用・反作用を用いた説、2 つ目は蒸気流れを用いた説である。

2.6 自走するメカニズム

本節では高温固体表面上を液滴が自走するメカニズムについて説明する。前節で述べたように、蒸気がどのように作用しているかは未だ解明されておらず、仕組みについて考えることは重要である。本研究では 1 つ目の仮説を「作用・反作用を用いる説」、2 つ目を「蒸気流れを用いる説」と名づけた。

2.6.1 作用・反作用を用いる説

第 1 の仮説は液滴から発生した蒸気が壁面と完全弾性衝突し、その前後の過程で邪魔されることがないと仮定した場合、蒸気の流出力と壁面などからうける作用反作用により、流動し液滴を押し出す力になるという仮説である。以下にこの説のモデルを簡単に記載する。まず、直角な角を頂点とする鋸歯基板上 (B 基板) と液滴のモデルを図 2.5 に示す。

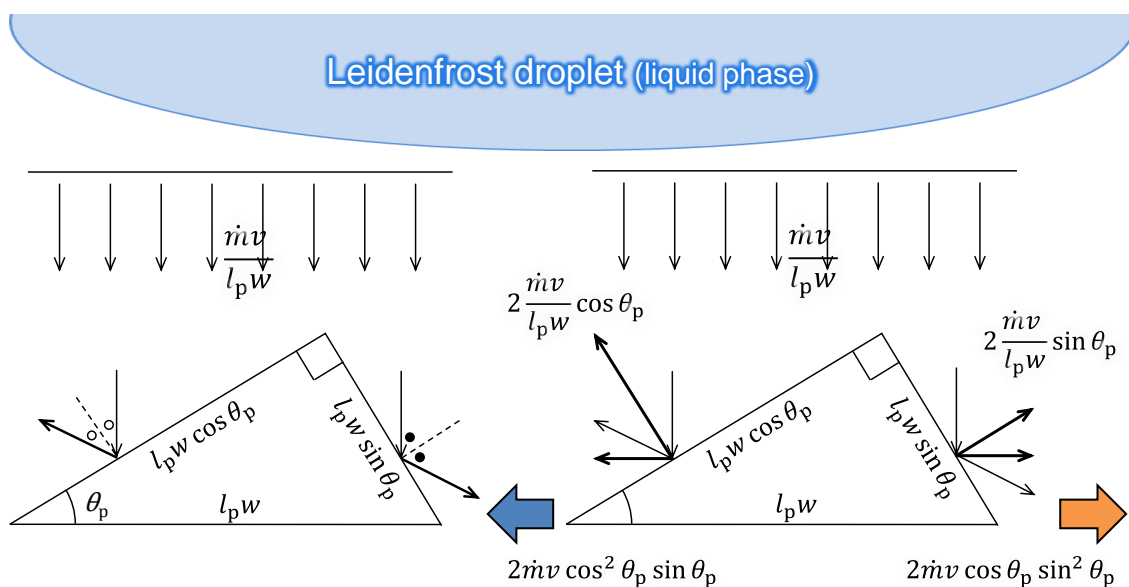


図 2.5 B 基板における作用・反作用モデル

液滴下面から発生する蒸気の単位面積当たりの運動量として

$$\frac{\dot{m}v}{l_p w} \quad (2.2)$$

その蒸気が鋸歯基板に当たり、図 2.5 の左側斜面から受け取る運動量は

$$2\dot{m}v \cos \theta_p \sin^2 \theta_p \quad (2.3)$$

となり、同じく右側斜面から受け取る運動量は

$$2\dot{m}v \cos \theta_p \sin^2 \theta_p \quad (2.4)$$

となる。蒸気の挙動を左右の斜面から受け取る運動量から考えると、 $\theta_p < 45^\circ$ のとき

$$2\dot{m}v \cos^2 \theta_p \sin \theta_p > 2\dot{m}v \cos \theta_p \sin^2 \theta_p \quad (2.5)$$

という関係になる。つまり、この条件下では蒸気は図 2.5 の左方向に進むと考えられる。一方左右の角度が等しく、 $\theta_p = 45^\circ$ の場合

$$2\dot{m}v \cos^2 \theta_p \sin \theta_p = 2\dot{m}v \cos \theta_p \sin^2 \theta_p \quad (2.6)$$

となり、左右方向への力が等しくなるためどちら側にも進まないと予想される。

次に液滴と接する部分が鋭角になっている基板（C 基板）に液滴を導入した際のモデル図を図 2.6 に示す。

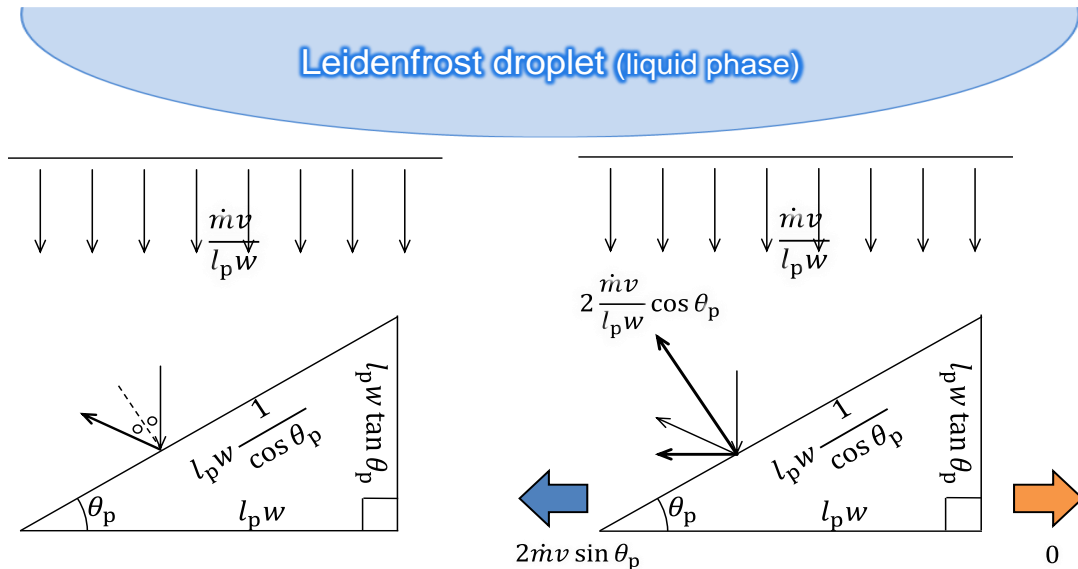


図 2.6 C 基板における作用・反作用モデル

C 基板においては液滴下面から流れ出る蒸気は図 2.6 において鋸歯面右側からは蒸気の流れ出る向きと平行となっているため、影響を受けないと考えられる。そのため、基板左側からの影響のみが液滴に働くため、蒸気は左側への流動が支配的になると考えられる。蒸気の運動量は、

$$2\dot{m}v \sin \theta_p \quad (2.7)$$

となる。このように液滴から流出される蒸気とそれを受け取る基板斜面の作用反作用の関係から、液滴は基本的に斜辺長手方向に進んでいくと考えられる。

2.6.2 蒸気流れを用いる説

第 2 の仮説として蒸気流れによるせん断応力により液滴が移動するモデルが挙げられている。簡単なモデルを図 2.7 に示す。液滴から発生する蒸気が鋸歯基板の斜面上で渦を巻き蒸気の流れ場が発生する。この発生した蒸気流れが持つ粘性により、液滴下面との間にせん断応力が発生し、液滴を引き連れていくことで液滴が移動すると考えられる。

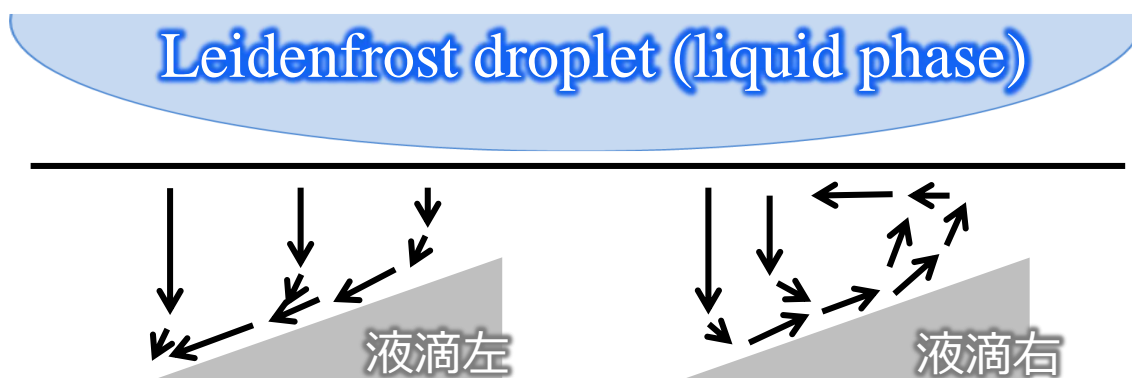


図 2.7 鋸歯基板における蒸気流れモデル

液滴から発生した蒸気が鉛直方向に流出し基板表面に当たると、液滴左側はその斜面に沿って蒸気が流れていき、その蒸気流れが液滴との間にせん断応力が発生し、液滴を運んでいくと予想できる。一方液滴右側は、液滴下面から流出した蒸気流れが鋸歯基板と液滴の間に渦を作り、図左側に液滴を運ぶと予想される。

2.7 液滴自走における順方向・逆方向

これまでの実験結果および先述した二つの仮説を踏まえれば、高温鋸歯面上を液滴は斜辺長手方向へ流動すると考えられる。そこで本研究において液滴が予想通り斜辺長手方向に進行した時に液滴は「順方向」に進んだと定義し、その逆方向である、斜辺短辺方向へ進行した場合は「逆方向」へ進んだと定義する。

ところで先行研究では温度や基板の種類によって逆方向へ進む現象も多く確認されている。その原因として基板表面の精度があまり良くない点や、液滴が基板と直接ぶつかった際に生じた突沸に伴う衝撃の発生によるものなど、様々な原因が挙げられているが完全にはわかっていない。そこで本研究ではこういったことも含め、高温鋸歯面上を進む液滴の挙動を明らかにすることに挑戦した。

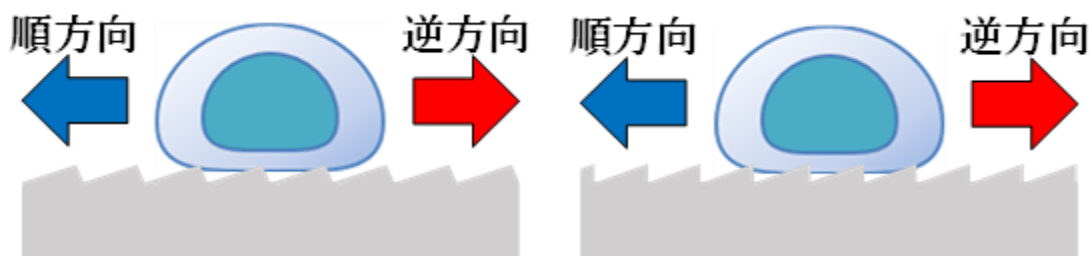


図 2.8 鋸歯基板上における順方向・逆方向

第3章 先行研究

3.1 はじめに

本研究室では高温鋸歯面上に滴下した液滴の挙動に関して基板形状、液種、温度などの条件を変更して実験を行っている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。そこで、本章では過去に本研究室で行われてきた先行研究を比較し、本研究における実験の指針についてまとめる。なお、先行研究は改良が重ねられているため、実験方法が変更されているものもある。そこで実験方法が変更される前の実験を先行研究①⁽⁸⁾とし、変更後の実験を先行研究②⁽⁹⁾とする。

3.2 先行研究①②の違い

先行研究①と先行研究②の違いについて説明する。先行研究①および②は高温鋸歯面上に滴下した液滴が自走する現象を解明すべく行われた。先行研究①では過去に行われていた研究において、測定回数が少ない実験条件や不確かな結果について実験を行った。しかしながら、やはり液滴が基板に接触した瞬間にみられる突発的な加速や、ある基板や温度帯に至っては逆方向に液滴が自走するといった現象が見られ、液滴が自走するメカニズムで説明を試みようとしても一貫した理屈が通らない現象が見られたため、実験の再現性を確かめるべく追実験を行った。その結果を図3.1に示す。

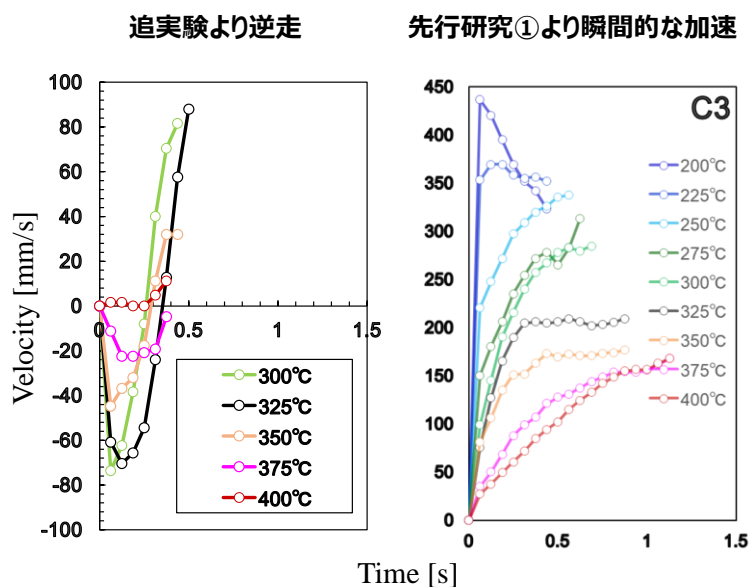


図 3.1 先行研究で見られた問題点

そこで先行研究②ではまず、先行研究①で見られた高温鋸歯面上に滴下した液滴が逆方向へ移動してしまうという、予想される結果とは逆の結果になってしまう要因を探るため、液滴の進行方向に影響しそうな項目をひとつひとつ検証しながら問題の特定を行った。検証の内容などを図 3.2 にまとめる。

先行研究①で見られた現象を再現すべく追実験を行ったところ、「基板に温度分布が生じている」「基板が熱で変形した」「加工精度が悪い」等が逆方向へ移動する要因としても考えられたが、「突沸の衝撃」「蒸気膜の薄さ」がその要因として最も疑わしく、この2項目に着目して検証を行った。すると、やはり滴下の際に高温基板と接触し、生じた突沸に伴う衝撃が発生していること、滴下直後は蒸気膜が十分に発展していないことが高温鋸歯面上に滴下した液滴が逆方向へ移動してしまった要因であると判明した。この問題を避けるため離れたところから液滴を滴下せず、高温基板上にピペットを近づけ、その場で液滴を作成し、ピペット先端に液滴をつけたままライデンフロスト現象が安定するまで待ち、その後ピペットから液滴を離れたところ、液滴は正方向に移動することが判明した。

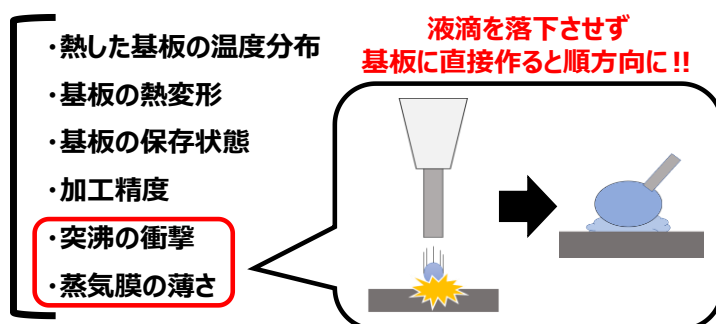


図 3.2 先行研究②で行った検証内容および高温鋸歯面に滴下した液滴が逆方向に進行する理由

つまり従来の研究方法では鋸歯面の構造や液滴の蒸発以外の外乱が入っていることが分かった。そこで外乱を除いたデータを新たに取得すべく、実験系を見直した先行研究②が行われた。先行研究②における液滴の滴下方法を図 3.3 に示す。

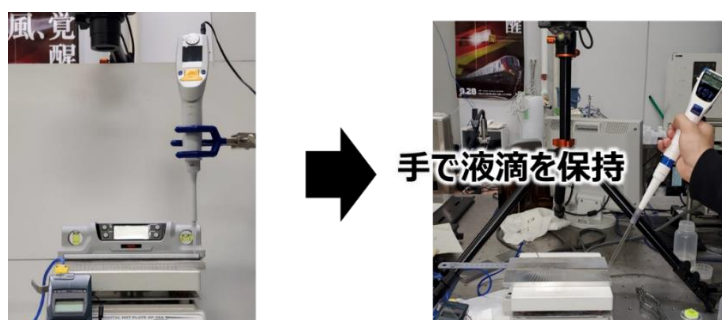


図 3.3 先行研究②における滴下方法

3.3 実験手順と実験機器（先行研究）

図 3.4 に実験系を示す。以下に実験手順を示していく。



図 3.4 先行研究の実験系

- ① ヒーター上に実験対象となるアルミ製鋸歯基板、温度計測や定規設置用の治具（通称：ザコ板）をくっつけて並べ、ザコ板上にデジタル角度計を乗せヒーターの土台を調整し、鋸歯基板表面の水平性を獲得した。温度の計測はザコ板側面に開けてある穴に熱電対を差し込み計測した。鉄製の定規をザコ板に基板と平行になるように乗せた。その後ヒーターの電源を入れ、温度を設定し、測定温度まで昇温させた。

- ② 電子ピペットを起動し、先端に専用のチップを取り付けて、ボタンを押すごとに 33.6 μL の液滴が排出されるように設定した。実験に先立ち、実験で使う試液（今回は超純水）を使い実際に排液されるかどうかを確認した。
- ③ 先行研究①
専用のチップがプラスチック製であるため熱で変形するなど悪影響が出ない高さ（今回の実験では 7 mm）にベースストッパーを使い、基板右端に固定した。
- 先行研究②
高温になっている基板と電子ピペット先端を接触させて実験を行う必要があるためガラスチップが使用できる電子ピペットを採用した。今回はベースストッパーを使わず手動で液滴を滴下した。
- ④ デジタルカメラは液滴挙動を上から撮影できるように三脚を用いて設置し、HFR（ハイフレームレート）に設定し、8 倍スローモーションで撮影した。
- ⑤ 撮影は各温度 5 回ずつ行い、Windows media player のコマ送り機能を使い 15 フレーム（0.0625 秒）ごとの移動距離を、映像上の定規の値を読み取り Excel へ入力、中央差分法を使って速度を算出した。

表 3.1 先行研究で使用した実験機器

	先行研究①	先行研究②
分注機	Eppendorf explorer	BM-MPA
三脚	Velbon EX440	K & F Concept
水準器	MYZOX TX-10	
温度計	デジタル温度計(YOKOGAWA TX10)	
ホットプレート	アズワン HP-2SA	
カメラ	SONY、DSC-RX100M4	
基板	B 基板 C 基板	

次に実験に用いた機器とそれらの使用方法について示す。表 3.1 に使用した実験機器を示す。

使用した電子ピペットを図 3.5 に示す。先行研究①では Eppendorf explorer を使用した。分注量を $0.2\ \mu\text{L}$ ごとに変更することができ、本実験では滴下する液滴の量を主に直径 $4\ \text{mm}$ に相当する $33.6\ \mu\text{L}$ に設定した。その後、治具を使い設定が終わった電子ピペットを基板からチップ先端までの距離を $7\ \text{mm}$ となるよう設置した。先行研究②では BM-MPA を使用した。こちらの研究では高温基板上に電子ピペット先端を直接くっつけ液滴を作り、ライデンフロスト現象を安定させてから挙動を確認するためガラスチップを利用することができる BM-MPA を採用した。また、こちらの電子ピペットは分解能がそこまで高くなく、 $0.5\ \mu\text{L}$ ごとであったので滴下する液滴の量は $34\ \mu\text{L}$ と設定した。



図 3.5 先行研究で使用した電子ピペット

使用した三脚を図 3.6 に示す。先行研究①では Velbon EX440 を使用した。実験系を斜め上から観測できる大きさのものを採用した。先行研究①で三脚の都合上斜めからの撮影を余儀なくされていたため、先行研究②では上から見下ろすことが可能な K&F Concept を採用した。



図 3.6 先行研究で使用した三脚

使用した水準器と使用方法を図 3.7 に示す。基板表面が傾いていると浮遊している物体は重力に引き寄せられ加速しだす。そこで基板が傾いていないかを確認し、基板表面の水平性を調整するために使用した。基板表面が傾いていた場合、A4 用紙をヒーター下に重ねて敷いて水準器の角度を 0° になるように調整した。

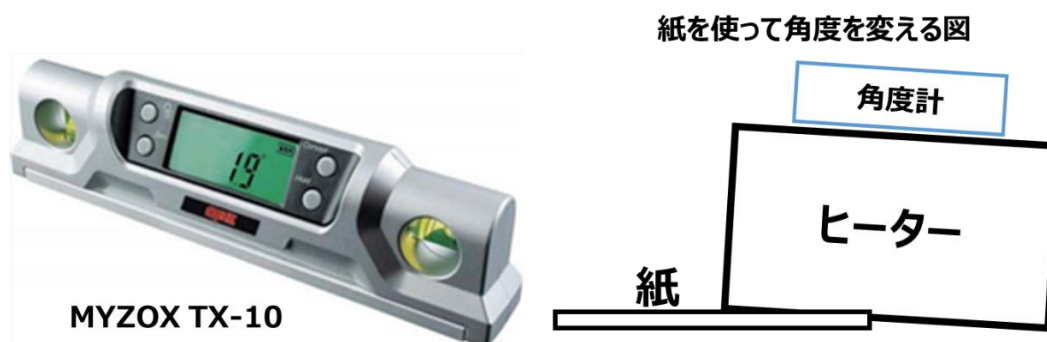


図 3.7 先行研究で使用した水平計

使用した温度計と熱電対を図 3.8 に示す。基板の温度を正確に測るため、ホットプレー

トの表示温度とは別にデジタル温度計を使用した。温度計を使用するには液滴を走らせる基板とは別にザコ板を用意し、測定用基板とくっつける様に設置し、側面から温度計の熱電対を差し込み、温度を計測した。



図 3.8 先行研究で使用した温度計と熱電対

使用したホットプレートについて図 3.9 に示す。アズワン プログラムホットプレート HP-2SA を使用した。基板を 400 °C 前後まで加熱して測定を行いたかったため、430 °C まで加熱可能な本ヒーターを採用した。



図 3.9 先行研究で使用したヒーター

使用したカメラについて図 3.11 に示す。本カメラに搭載されているハイフレームレート機能を使用した。30 fps の動画を 240 fps で撮影することで 8 倍スローの動画を作成した。また撮影する際には、基板にピントが合うように調整し、基板全体がはっきり見えるように注意した。



図 3.11 先行研究で使用したカメラ

使用基板について図 3.12 に示す。アルミでできた 20 cm × 5 cm × 1 cm の基板であり、面積が最も大きい表面片側に鋸歯構造が加工されている。鋸歯面の形状、サイズは複数用意されており、それらの詳細は次頁に記す。



図 3.12 先行研究で使用した基板

先行研究では B 基板と C 基板を使用した。実験で使用した基板のパラメータを図 3.13、表 3.2、表 3.3 に示す。

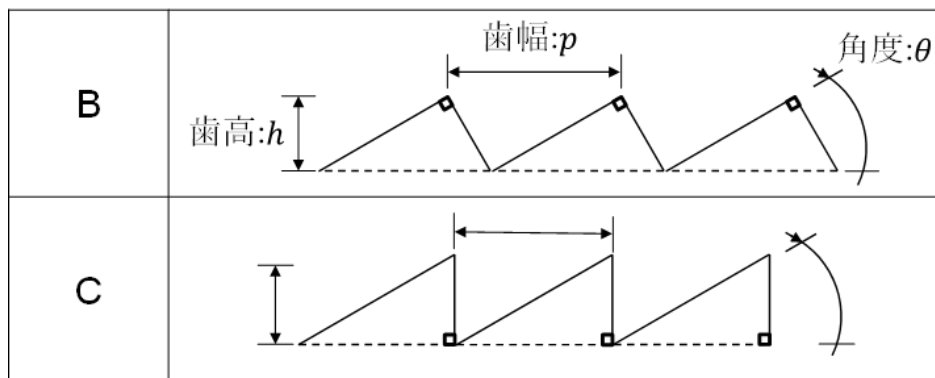


図 3.13 基板形状

表 3.2 B 基板のパラメータ

波板	θ :角度($^{\circ}$)	p:幅(mm)	h:高さ(mm)
B1	20	0.5	0.161
B2		0.75	0.241
B3		1	0.321
B4	30	0.5	0.217
B5		0.75	0.325
B6		1	0.433

表 3.3 C 基板のパラメータ

波板	θ :角度($^{\circ}$)	p:幅(mm)	h:高さ(mm)
C1	20	0.5	0.182
C2		0.75	0.28
C3		1	0.364
C4	30	0.5	0.289
C5		0.75	0.433
C6		1	0.577

3.4 実験条件

先行研究①について表 3.4 に実験条件を示す。使用した基板は B1~B6、C1~C6 と 12 種類の基板で行った。基本的に順方向へ移動するため、図 3.14 に示すように基板右端から実験を行ったが、逆走が観測された場合のみ左端から計測を行った。

表 3.4 先行研究①の実験条件

液種	超純水
液量 [μL]	33.6
液滴径 [mm]	4
基板種	B1~B6、C1~C6
基板表面温度 [°C]	200~400
測定温度間隔 [°C]	25
滴下距離 [mm]	7
測定回数 [回]	5



図 3.14 先行研究の液滴滴下位置

先行研究②について実験条件を表 3.5 に示す。使用した基板は B1~B6 基板と C5 基板を除いた C1~C6 基板であり、C5 基板については図 3.15 に示すように A 部分、B 部分と加工具合の違いが見られ、実験を行う際にも加工ミスがある部分で逆走、止まってしまう等のイレギュラーな挙動が見られたため排除した。また、先行研究②では液滴を高温な基板に設置する必要があり 300 °C未満の温度域では液滴を基板表面で作成しようとして電子ピペットから液体を出しても液滴の状態を保てず蒸発してしまったため、300~400 °Cのみの実験となった。

表 3.5 先行研究②における実験条件

液種	超純水
液量 [μL]	34
液滴径 [mm]	4
基板種	B1~B6、C1~C4、C6
基板表面温度 [$^{\circ}\text{C}$]	300~400
測定温度間隔 [$^{\circ}\text{C}$]	25
測定回数 [回]	5



図 3.15 C5 基板の加工ミス

3.6 実験結果（先行研究①）

先行研究①の実験結果を一部抜粋し B1、C1 基板の結果を図 3.16 に示す。B1 基板、C1 基板ともに順方向のみに進むという結果が得られた。また、どちらにも見られる現象として基板温度が低いほど最高速度が速くなるという結果が得られた。また、高温帯では速度上昇が緩やかであるのに対し、低温帯では滴下して瞬時に最高速度に達した後、速度の減速が見られた。次に B1 基板、C1 基板を比較して見られた相違点として B1 基板ほどの温度帯でも時間経過と共に速度が速くなっているのに対し、C1 基板の低温帯域においてで速度が遅くなる現象が見られた。

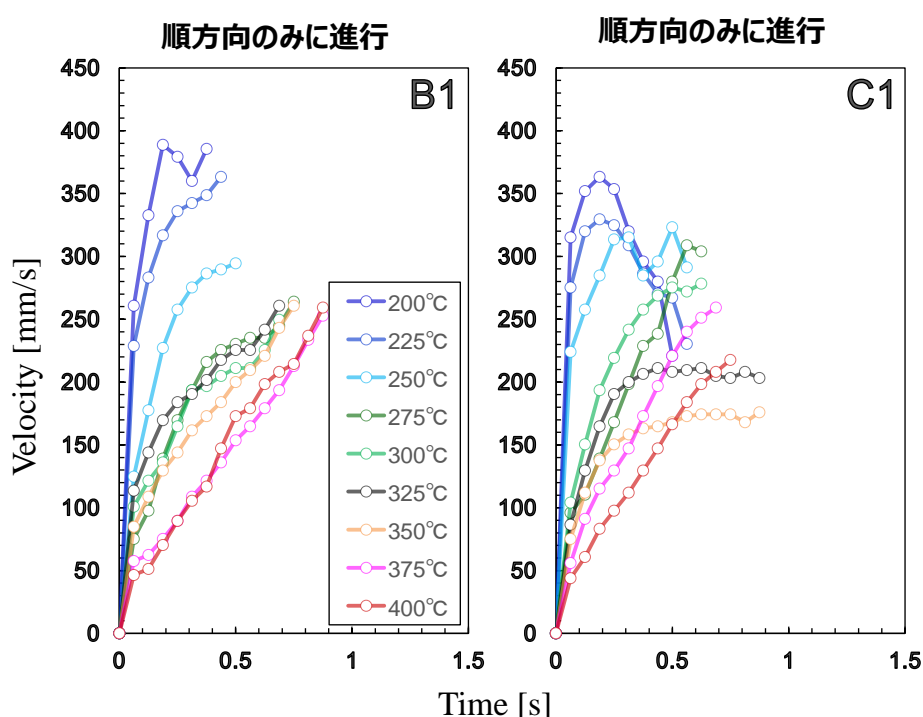


図 3.16 先行研究①における B1,C1 基板の結果

また、B4、C4 基板の結果を図 3.17 に示す。B4 基板では 300、325 °Cで、C4 基板では 325 °C以上で液滴が逆方向へ移動する（逆走する）現象が見られた。C4 基板の 200 °Cでは例外であるが、両基板とも低温帯での速度が速く、高温帯になるにつれて遅くなる現象が見られた。また、上述の B1,C1 基板と同じく B4 基板では最後まで速度が速くなり続け、C4 基板でも高温帯において速度変化が小さくなるという結果が得られた。

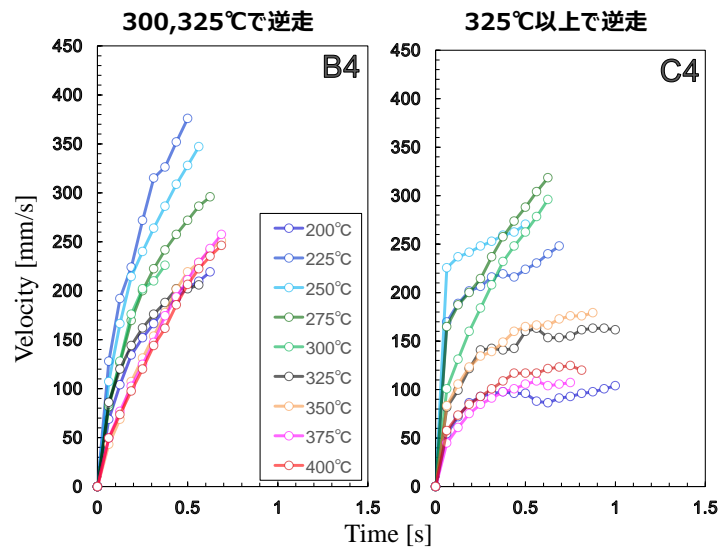


図 3.17 先行研究①における B4,C4 基板の結果

3.7 実験結果（先行研究②）

先行研究②の実験結果を一部抜粋し B1、C1 基板のグラフを図 3.18 に、示す。先行研究②は電子ピペットの先端を基板表面に設置させて液滴を基板表面で作成する必要があるため、300~400°Cでしか行われていない。一方、先行研究①で見られた液滴の逆走は見られず、すべて順方向に進んでいる。先行研究①と同じく、温度が高くなるにつれて最高速度が遅くなっていく傾向が見られた。C1 基板も先行研究①と同じく時間が経過するにつれて速度上昇量が小さく、または速度が遅くなる結果が得られた。最後に先行研究①との相違点として C4 基板では温度による速度変化はあまり見られず、C 基板特有の速度の落ち込みも見られなかった。

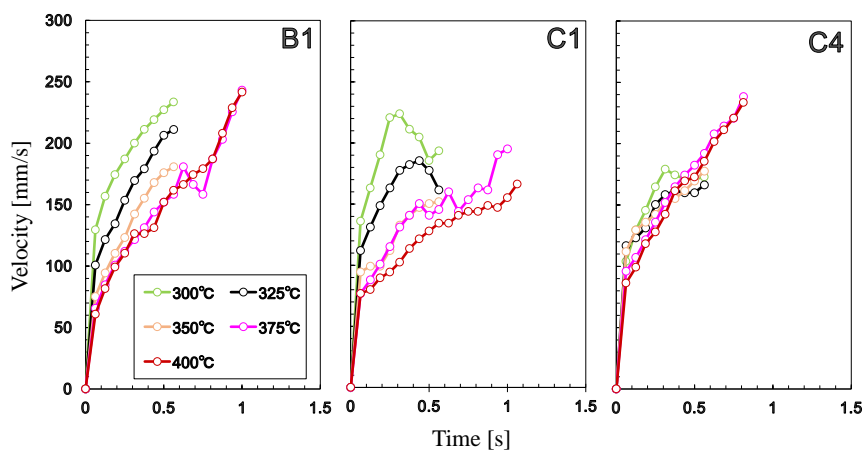


図 3.18 先行研究②における実験結果

3.8 先行研究から今後の研究へ

先行研究では鋸歯基板の長さが短いため、滴下時の液滴が基板表面と接触することで生じた突沸に伴う滴下直後の衝撃による急加速などの影響が非常に大きく、液滴がライデンフロスト現象のみの力で自走する様子を観測することが出来なかった。また、高温度帯で見られた温度上昇に伴う速度減少や、液滴が等速運動をし始めているように見える結果も、あくまでこの基板で見受けられる現象である。液滴の定常的な挙動を観測するために十分な長さをもたないこの基板での評価、基板加工精度に不安のあるこの基板を用いて評価をしても半永続的に液滴を自走させる際に液滴の挙動を推測できるかどうか疑わしい。

そのため、本研究では動力源の開発に向けて、今までに使われていた実験器具や実験基板を改善し、新たなデータの入手と、流体解析ソフトによる液滴挙動のシミュレーションを行うという2方面からのアプローチで液滴挙動解析につとめることとした。

第4章 蒸気流出速度の測定

4.1 はじめに（蒸気流出速度の測定）

高温鋸歯面上における液滴の挙動を解析するにあたり、これまでの先行研究でさまざまな実験が行われてきた。先行研究⁽¹⁰⁾では高温平面基板上での液滴の蒸発時間を計測する研究、ライデンフロスト現象が発生している際に発生する蒸気膜の厚さを計測する実験などが行われており、それぞれの理論式の導出が試みられた。特に、液滴の蒸発時間に関しては Godfried らが導出したモデル式を修正した理論式を導出するまでに至っている。本実験では液滴下面から流出する蒸気の流れの速度の算出に関わる実験を行った。

4.2 実験概要（蒸気流出速度の測定）

液滴下面からの蒸気流出速度を算出するにあたって、蒸気膜厚が μm 程度のサイズであり現行技術では流出速度を直接計測することができるような術が見当たらなかった。そのため、先行研究において蒸気膜厚を推定する際に用いた物質収支の考えからおおよその流出速度の概算を行うこととした。その前段階の実験として、ライデンフロスト状液滴の下面の半径（通称： R_{neck} ）の計測を行った。 R_{neck} の概略図を図に示す。

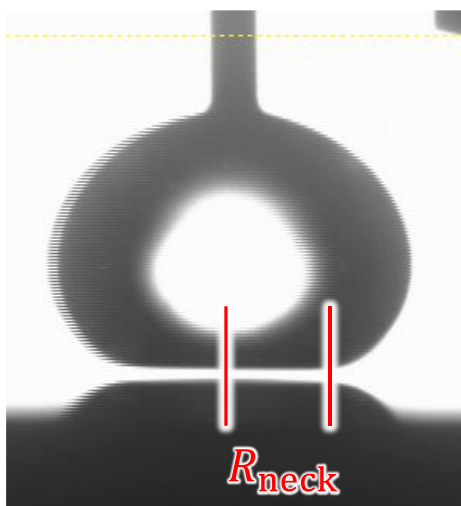


図 4.1 R_{neck} の概略図

4.3 R_{neck} 計測実験における計測のための実験手順と実験機器

図 4.2 に実験風景を示す。以下に実験手順と機器の説明を述べる。

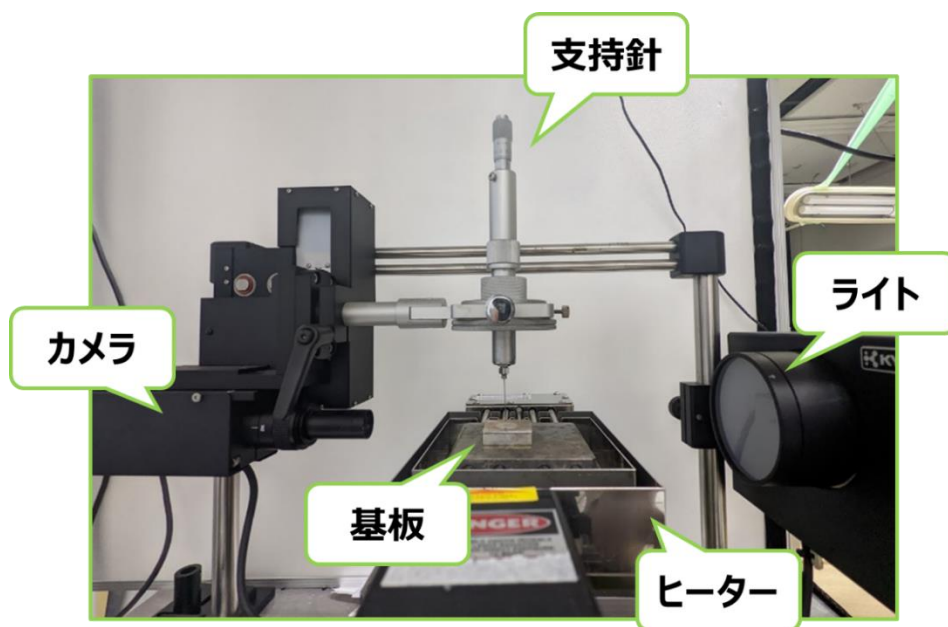


図 4.2 R_{neck} 計測実験の実験系

- ① 図 4.3 に示すように電子ヒーターの上に $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ の四角形にカットされたアルミニウム基板を設置し、撮影時に必要な光源の電源を入れた。その後、アルミ基板の上面中心部に液滴を固定するための支持針を上から設置した。なお、液滴は後から電子ピペットを用いて作成するため、この時は支持針に液滴がない状態である。

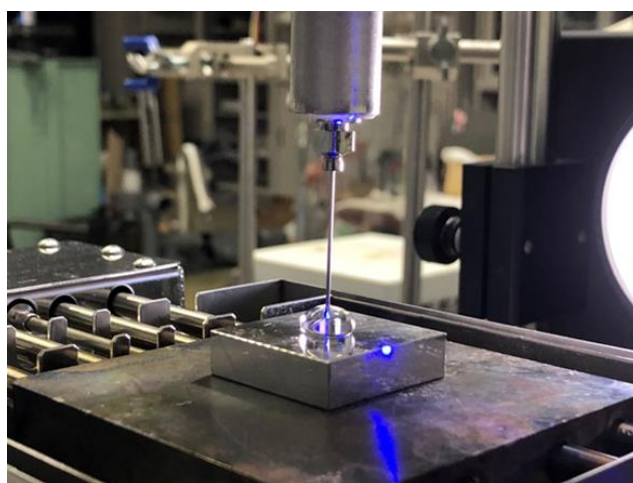


図 4.3 支持針を用いた液滴固定

- ② 今回使用した撮影ソフトにおける1ピクセルの大きさを測るため、液滴を乗せるアルミニウム基板をノギスで計測し、液滴を留めておく支持針に密接した状態で角度に注意し撮影、その後アルミニウム基板のピクセル数を計測するという工程を5回繰り返し、平均をとり、液滴を留めておく支持針の位置における1ピクセルの大きさを算出した。1ピクセルの大きさを計測する工程の概略図を図4.4に示す。

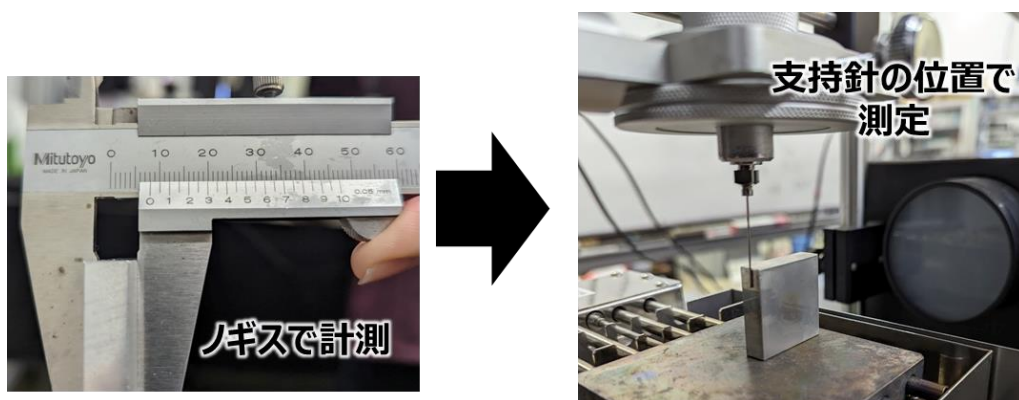


図4.4 ピクセルの測定

- ③ ヒーター上に設置したアルミニウム基板を温めるためにヒーター温度を設定し、加熱した。なお、実験の温度はヒーター設定温度ではなく、基板表面温度とした。基板表面温度を測定する際に第3章図3.8で示した温度計を使用し、図4.5に示すような方法で測定した。



図4.5 R_{neck} 計測実験の基板温度計測

- ④ 第3章図3.5で示した電子ピペット（Eppendorf explorer）を使用し、適量の液滴を支持針にくっつける様に滴下し、液滴をライデンフロスト状態にして保持させた。図4.2右側からライトで液滴を照らし、その影を図4.2左側にあるカメラで撮影したものを計測ソフトに取り込んだ。PCソフトFAMASに取り込むとカメラで撮影している画像を一時停止することができ、この機能を使用して、蒸発があまり進んでいない滴下直後の液滴の状態を撮影した。なお、撮影時にブレが生じてしまったものは排除した。
- ⑤ ソフトに取り込んだ液滴の画像に対しピクセル数計測機能を用いて、 R_{neck} のピクセル数を求めmmに換算した。なお、計測回数は各温度につき10回行った。計測時の概略図を図4.6に示す。

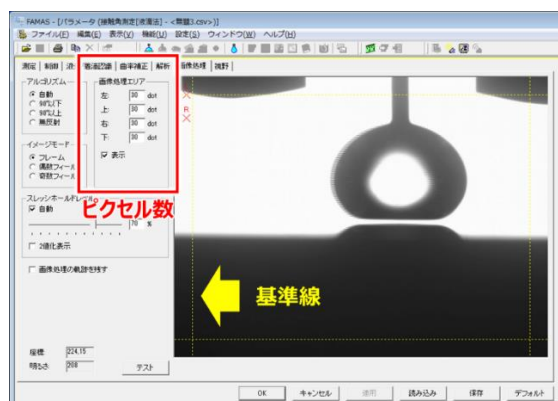


図 4.6 R_{neck} 計測時の概略図

次に実験条件について表4.1に示す。液種、液量は先行研究と統一するために超純水、33.6 μL とした。基板表面温度は液滴がライデンフロスト状態となり、液滴が激しく動き回ることなく観測することが可能であった250 $^{\circ}\text{C}$ から500 $^{\circ}\text{C}$ までとし、温度毎に10回観測を行い、その平均をとった。

表 4.1 R_{neck} 計測実験の実験条件

液種	超純水
液量 [μL]	33.6
液滴径 [mm]	4
基板表面温度 [$^{\circ}\text{C}$]	250~500
測定温度間隔 [$^{\circ}\text{C}$]	10
滴下回数 [回]	10

4.4 実験結果(蒸気流出速度の測定)

実験結果を図 4.7 に示す。最大値をとったのは 280 °C の時であり、その R_{neck} は 1.211 mm であった。また、最小値をとったのは 480 °C の時で R_{neck} は 1.037 mm となった。温度変化によって結果が上下する等の誤差が見受けられたが、250~280 °C までは R_{neck} は大きくなり、その後温度が上昇するにつれて基本的には小さくなっていく傾向が見られた。

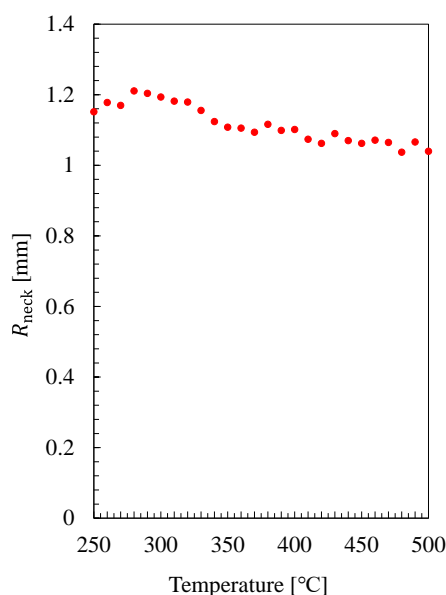


図 4.7 R_{neck} 計測実験の結果

4.5 考察 (蒸気流出速度の測定)

温度が上昇するにつれて基本的にはライデンフロスト状液滴の R_{neck} が小さくなっていく傾向が得られたことについて考察する。本研究室の先行研究で基板温度が上昇するとライデンフロスト現象を伴う液滴の蒸気膜厚が厚くなるという実験結果が報告されている⁽¹⁰⁾。つまり、温度と比例し液滴を浮上させる力が大きくなることで R_{neck} は小さくなるのではないかと推察できる。

また、最大値をとったのは 280 °C の時の R_{neck} 1.211 mm であるのは、ライデンフロスト点と関連しているのではないかとと思われる。低温になると蒸発速度が遅くなり、液滴を浮かばせる力が弱まり、 R_{neck} が大きくなるが、ライデンフロスト状態を保てなくなると液滴下面が崩れ出しその分 R_{neck} が小さくなっていくのではないかと考えられる。一方本結果を踏まえると、ライデンフロスト点付近の温度帯では液滴の蒸発時間が最も長く、さらに液滴下面の面積が最大になり、基板表面の影響を受けやすくなると考えられるため、ライデンフロスト点付近の液滴は動力源開発にあたり最も活用できる可能性が感じられた。

4.6 物質収支の式

高温基板上に滴下された液滴下面から流出する蒸気の流出速度を推定するため、先行研究でも用いられた物質収支の考え方に着目した。

蒸発した蒸気すべてが液滴下面から流出されると仮定する。さらに、液滴下部に円柱状の蒸気膜が発生しその円周面から蒸気が流出していると仮定する。この時の概念図を図 4.8 に示す。この円柱状蒸気膜の円周は

$$2\pi R_{\text{neck}} \quad (4.1)$$

と表すことができ、蒸気膜厚 δ を掛けることで円周面の面積

$$2\pi R_{\text{neck}}\delta \quad (4.2)$$

が求まる。それに対し、円周面から流出する蒸気の数 v を掛けることにより時間あたりに流出する体積流量

$$2\pi R_{\text{neck}}\delta v \quad (4.3)$$

が導出できる。さらに水蒸気の密度 ρ' を掛けることで時間あたりに流出する質量流量

$$2\pi R_{\text{neck}}\delta v \rho' \quad (4.4)$$

が導出される。これが液滴下面から流出する時間あたりの蒸気の質量流量 \dot{m} と釣り合い

$$\dot{m} = 2\pi R_{\text{neck}}\delta v \rho \quad (4.5)$$

が求まる。



図 4.8 物質収支の式の概要

つまり

$$v = \frac{\dot{m}}{2\pi R_{neck} \delta \rho'} \quad (4.6)$$

となる。この式から①毎秒当たり出る水蒸気の重さ(水) \dot{m} ②蒸気が流出するころの半径 R_{neck} ③水蒸気の密度 ρ' ④水蒸気の膜厚 δ を代入することで円周面から流出する蒸気の数 v を算出した。

今回は 300 °C の時の高温基板上に滴下された液滴下面から流出する蒸気の数 v の推定をすることとした。

毎秒当りに流出する水蒸気の数 \dot{m} を先行研究で導出されているライデンフロスト状液滴の蒸発時間モデル式からここでは 33.6 μL の液滴を対象とした蒸発速度を中央差分法で算出した。液量 33.7 μL と 33.5 μL の液滴が 300 °C に設定された基板上に滴下された液滴の蒸発時間はそれぞれ

$$\text{基板表面温度 } 300 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{液量 } 33.7 \text{ } \mu\text{L} \text{ の蒸発時間} \rightarrow 44.741 \text{ s}$$

$$\text{基板表面温度 } 300 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{液量 } 33.5 \text{ } \mu\text{L} \text{ の蒸発時間} \rightarrow 44.612 \text{ s}$$

であり、33.7 μL の液滴から水が蒸発し、33.5 μL の液滴になるまで、つまり 0.2 μL の液滴が蒸発するのに 0.129 s かかる。つまり、基板表面温度 300 °C ・液量 33.6 μL のから蒸発する蒸気の数あたりの体積流量は 1.539 [$\mu\text{L}/\text{s}$] となる。質量流量 \dot{m} に変換すると

$$\dot{m}' = 1.539 \times 10^{-6} \text{ [kg/s]} \quad (4.7)$$

となる。次に R_{neck} に関しては先 4.4 節で計測した結果から基板表面温度 300 °C における値

$$R_{neck} = 1.193 \text{ [mm]} \quad (4.8)$$

を採用した。

水蒸気の密度は NIST Chemical Webbook から読み取り

$$\rho' = 0.384 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (4.9)$$

を用いた。

水蒸気の膜厚 δ は先行研究において、280、320、360、400 °Cにおける各液量での値がそ
くいていされているため、そのデータから 300 °C、半径 2 mm の蒸気膜厚

$$\delta = 30 [\mu\text{m}] \quad (4.10)$$

とした。参照したデータを図 4.9 に示す。

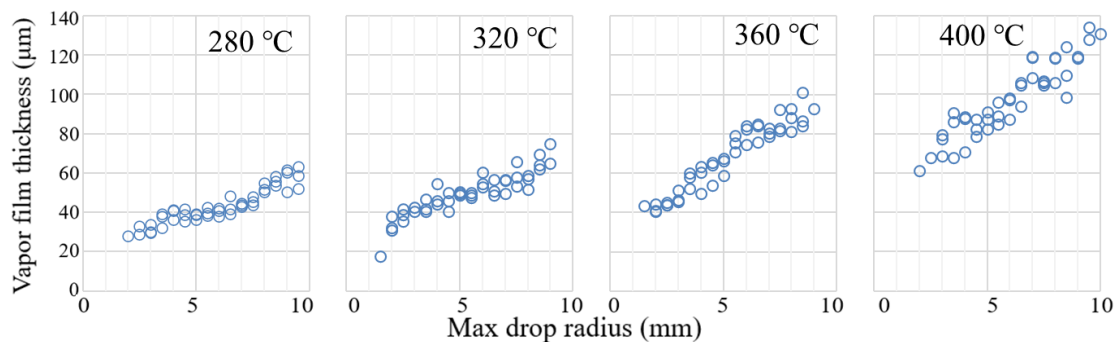


図 4.9 各温度帯、液量による超純水の蒸気膜厚さ

図 4.10 に概略を示す。この円周側面から流出する蒸気 v_1 から液滴下面から流出する
蒸気 v_2 を求める。この時の概念図を図 4.10 に概略を示す。

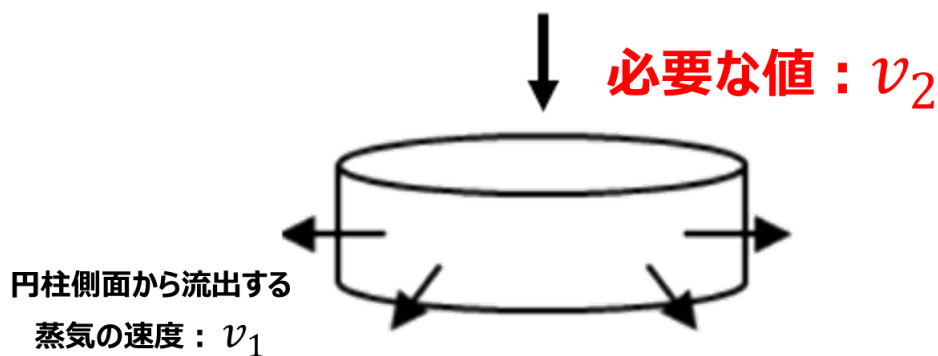


図 4.10 液滴下面から流出する蒸気と円周側面から流出する蒸気

液滴下面にあると仮定した円柱状蒸気膜の上面部の面積は

$$\pi R_{\text{neck}}^2 \quad (4.11)$$

となる。同接した液滴下面にある円柱状の蒸気膜の円周面の面積は

$$2\pi R_{\text{neck}}\delta \quad (4.12)$$

となり、この二つの面への流入と流出が釣り合うはずであることから

$$2v_1\pi R_{\text{neck}}\delta = v_2\pi R_{\text{neck}}^2 \quad (4.13)$$

という関係式が成り立つ。つまり

$$v_2 = \frac{v_1 2\pi R_{\text{neck}}\delta}{\pi R_{\text{neck}}^2} \quad (4.14)$$

となる。

4.7 液滴下面から流出する蒸気の速度 v_1 、 v_2 の測定

これらの値を代入すると

$$v_1 = 17.82 \text{ m/s} \quad (4.15)$$

$$v_2 = 0.896 \text{ m/s} \quad (4.16)$$

となった。

第5章 流体解析

5.1 流体解析をするにあたり

高温鋸歯面上に滴下した液滴が自走する仕組みを解明するために第4節では高温平面上に滴下した液滴に関するパラメータを算出した。そのパラメータと解析ソフトを使うことで液滴が自走する際の各種液滴及び蒸気膜の状態の解明を、本節では流体シミュレーションを用いて着手することとした。

今回解析するにあたり使用したソフトは有限要素法 CAE を中心とした解析ソフト群である ANSYS であり、その中でも流体シミュレーションを行う Fluent を使用した。



図 5.1 ANSYS Fluent

5.2 流体解析の手順

今回は流体シミュレーションを用いて高温鋸歯面上に滴下した液滴の状態を解析するための第一歩として、C1 基板、300 °C を想定し、鋸歯面を自走する状態の解析をすることとした。本節では簡単のため 2D でモデル化した。

以下に解析の手順を示す。

- ① モデル構築は ANSYS に搭載されているジオメトリの Design Modeler を使用した。高温鋸歯面上に液滴が浮かんでいる状態を想定し、モデルのスケッチを行った。蒸気膜厚さ δ やライデンフロスト状液滴の下面半径 R_{neck} は先行研究と第4章の実験値を参照した。図 5.2 にモデル図を示す。

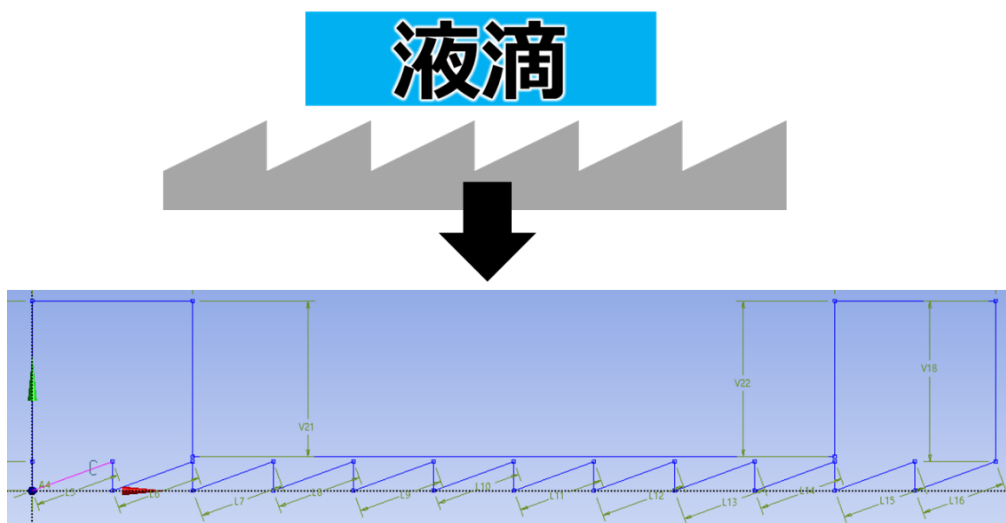


図 5.2 C1 基板 300 °Cでのモデル図

- ② スケッチを行った後、二次元モデルにするために、サーフェイスボディに変更した。ANSYS Fluent の解析の際には流体が流れる空間を作成する必要があるため、サーフェイスボディをソリッドから流体へ変更したのちに、図 5.3 に示すように、蒸気が流入する inlet と流出する outlet の選択、基板表面部分に当たる wall を選択、サーフェイス表面を symmetry (直線対象) とした。

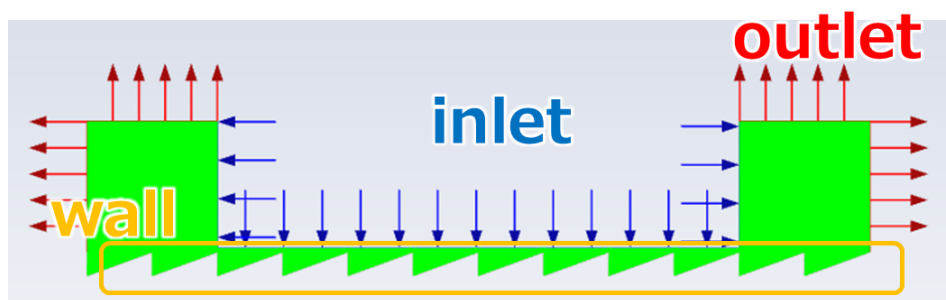


図 5.3 スケッチにおける名称選択

- ③ ジオメトリでサーフェイスボディを作成した後にサーフェイスボディをメッシュで切った。メッシュとは計算対象をコンピュータ上で計算するために、小さな要素に区切ったものである。計算の精度を向上するにはメッシュの品質は非常に重要であり、特に歪度を小さくしていくことが重要である。メッシュ数は 10 万個を基準にし、今回の解析は 107528 個で行った。メッシュを切ったモデル図を図 5.4 に、歪度の要素指数を図 5.5 に示す。

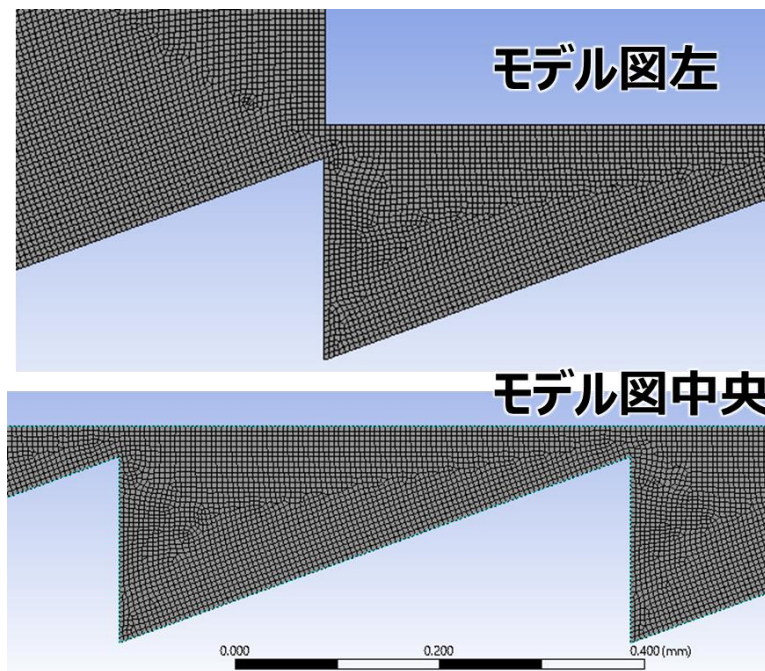


図 5.4 メッシュを切ったモデル図

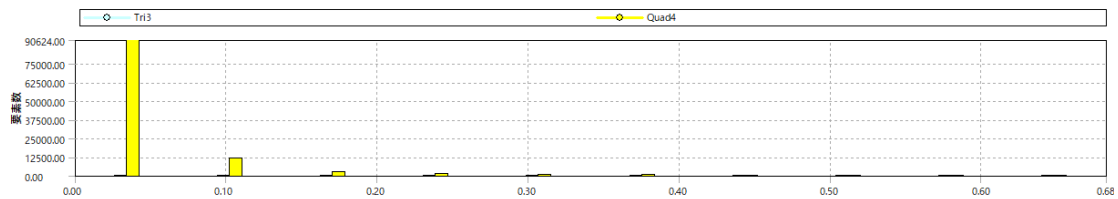


図 5.5 モデル図の歪度

- ④ メッシュが完成したサーフェイボディを解析にかけた。実際に実験を行っている状態と同じ条件で解析が行われるように物性値、測定値を入力した。解析に使用した値を表 5.1 に示す。ここで重力方向は斜面下向き (y 軸方向) にかかっている。また、inlet からの流量は液滴下面からの蒸気流出速度 v_2 (4.22) を、温度は 300 °C (573.15 K) を用いた。

表 5.1 解析に使用した値

時間 [s]	定常
重力 [m/s^2]	-9.80665
エネルギー方程式	ON
inlet の流速 [m/s]	0.864m/s
wall [K]	573.15K

5.3 解析結果

図 5.6 に圧力の解析結果を示す。液滴下面中心部に圧力が高くなる部分が発生していることが判明した。液滴下面中心部から外側に向けて蒸気が抜けていくにつれて、圧力が低くなり、液滴下面から抜け出した後は圧力差が 0 Pa に近くなっていた。特徴的な結果が見られたのは液滴下部右側で、鋸歯面の表面に部分的な高圧力部が見られた。

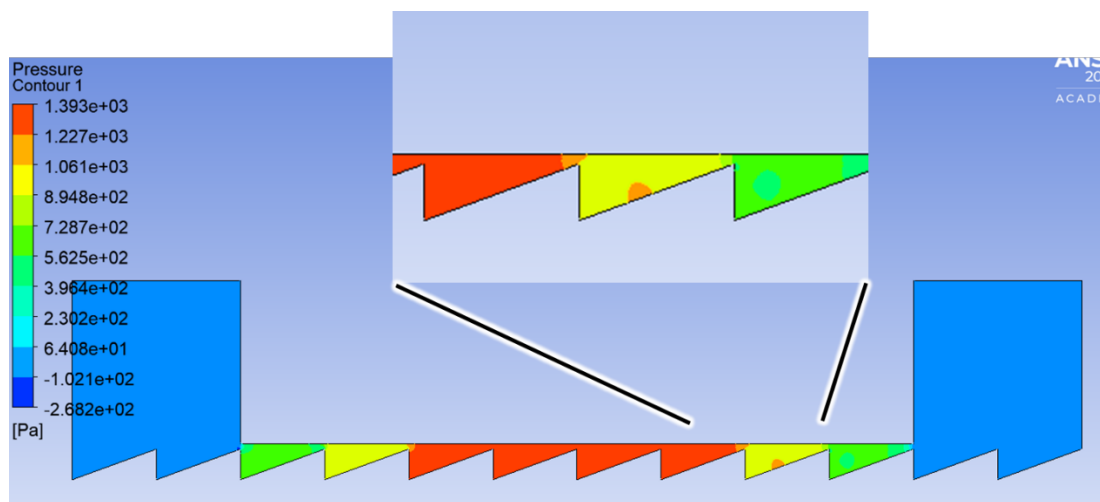


図 5.6 解析結果（圧力）

図 5.7 に蒸気速度の全体解析結果を示す。液滴下面中心部は整った蒸気流れは見られず、低速度の蒸気が乱雑に流れている様子がみられる。一方、中心部分から液滴外側に向かっていくにつれて蒸気流れが発生し、前後ともに基板に沿って流れていくような現象が見られた。最大速度を示したのは左右ともに蒸気が液滴下部から抜け出す時であり最大で 45 m/s を示した。

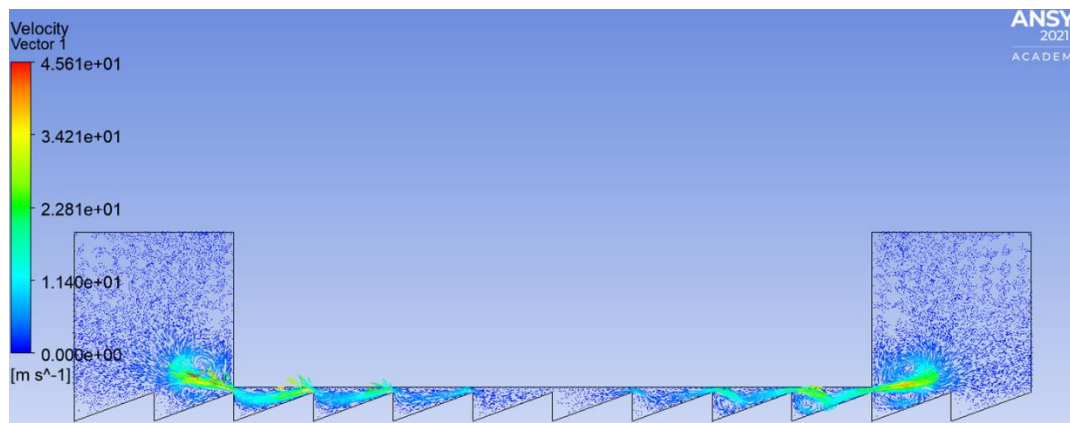


図 5.7 全体解析結果（蒸気速度）

次に解析結果をより詳細に比べた図を図 5.8 に示す。モデル図左側の蒸気流れは鋸歯面をまたぐ際に上向きの流れが生じていた。対照的に、モデル図右側の蒸気流れは下向きに流れていき、鋸歯面長辺部分にぶつかるようにして流動し、ぶつかった後は鋸歯の奥へ回転してもぐりこむような蒸気流れが発生していた。

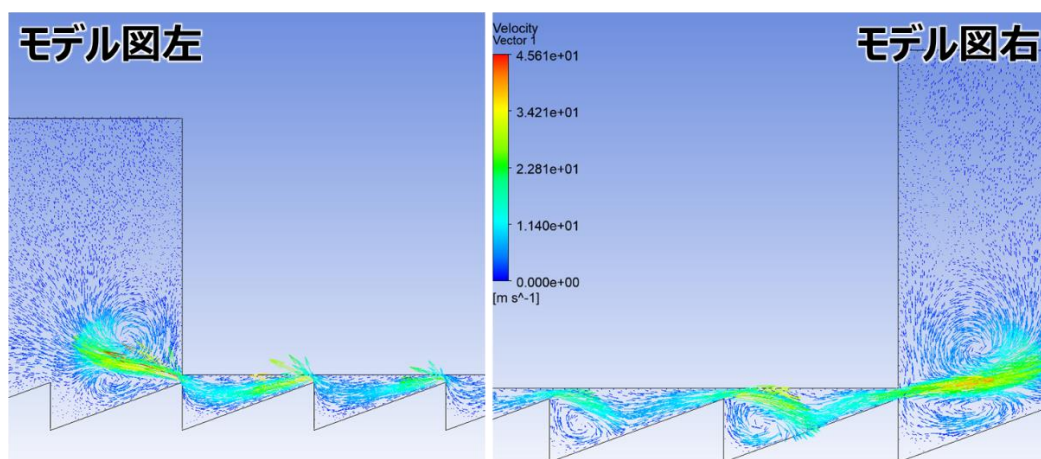


図 5.8 左右の解析の詳細結果（蒸気速度）

5.4 考察（流体解析）

圧力の解析結果に見られた部分的な圧力上昇（図 5.6）について考察する。蒸気速度の解析結果を見ると、モデル図右側で蒸気流れが鋸歯側面にぶつかり回転流れが出来ている様子がみられる。この蒸気流れが鋸歯側面にぶつかったことで、モデル図右側の鋸歯面上で部分的な圧力上昇が見られたと予想される。

本解析結果を踏まえて液滴の挙動について予想を試みた。圧力の解析結果から、解析図右側の圧力が高くなり、左右に圧力差が生じていることが分かる。次また、蒸気速度の解析結果から、解析図左側は鋸歯面に沿って蒸気が流れ、鋸歯をまたぐ際に上向きに流れが生じることから、液滴を押し上げるような現象が発生していると推察できる。一方、右側の蒸気流れは下向きに流れていき、鋸歯面に当たることから蒸気流れが相殺されているため、モデル図右側に液滴を運ぶ蒸気流れは弱まっていると考えられる。このことから液滴は解析図左側（順方向）に進んでいくと考えられる。

第 6 章 2022 基板実験

6.1 はじめに（2022 基板実験）

これまでの先行研究で数々の直線型鋸歯基板を用いた実験が行われてきたが、今まで同じものが使われており、汚れやさびなどが表面に付着している可能性がある。また、長さ 20 cm であり、滴下した液滴が加速して等速になるまでを観測することが出来ず、基板表面形状によってどのような差異があるのか比較しづらかった。動力源開発のためにはより定常的な液滴の挙動を見る必要があり、長い観測領域での実験が必要となってくる。つまり、これまで利用していた直線型鋸歯基板では、液滴挙動を検討するうえであまり適していなかった。そこで本研究では 2015 年に試作した直線型の基板をもとに、連結させて長さを拡張することができる基板（2022 基板）を作成して実験を行うこととした。本実験を行うにあたり、実験系も微調整した。2022 基板と 2015 基板の比較を図 6.1 に示す。

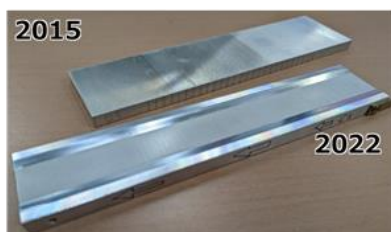


図 6.1 2015 基板と 2022 基板

6.2 2022 基板について

本実験はこれまでの先行研究では観測することが出来なかった 20 cm 以降の挙動を観測するために行った。本実験に使用する大型基板はこれまで実験で使われてきた 20 cm 基板と鋸歯表面のサイズは全く同じものを採用している。しかしながらこれまでの実験で得られた知見をもとに機構を見直し、仕様変更を加えたため、加工方法が少々変わっている。そのため、全く同じような結果がでるとは限らない。そこで、今回の実験では本実験を行う前に液滴の挙動がどのようになるのか確認し、また基板表面の状態の確認を行った。基板表面状態の確認のために用いた顕微鏡（KEYENCE VHX-900）を図 6.2 に示す



図 6.2 KEYENCE VHX-900

2022 基板は液滴が落ちないように基板の両端にガードレールを付ける等、2015 基板と仕様が異なるため変更点があるため加工方法が当時とは少々変更されているようで、特に鋸歯頂点部分の加工が甘く、頂点が舐めた状態になっているものが存在した。図 6.3 に加工精度の悪かった 2022C1 基板を示す。このように加工に不備があった基板は実験から排除した。



図 6.3 加工精度の悪い 2022C1 基板

実験に先立ち基板の精度を確かめるため、基板を顕微鏡で観察したり、試しに実験を行ったりしてみた。その結果作成した C1 基板 5 枚中 2 枚の状態が良くないことが判明した。最終的に図 6.4 に示すように 2022 基板を 3 つ繋げた 60 cm 基板での実験を行うこととした。



図 6.4 今回の実験に使用する 2022 基板

6.3 実験手順と実験機器（2022 基板実験）

図 6.5 に実験風景を示す。以下に実験手順を示していく。

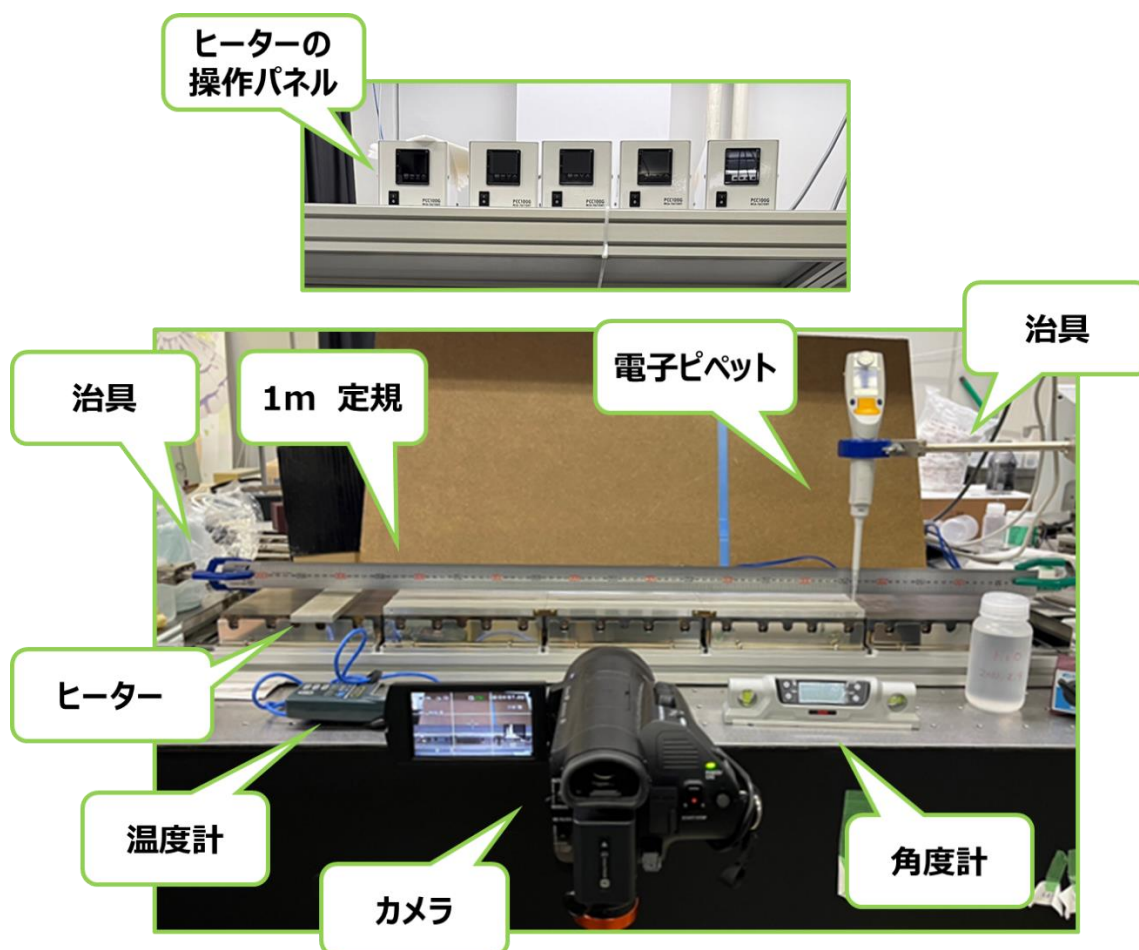


図 6.5 2022 基板実験の実験系

- ① ヒーター上に連結した 2022 基板と、温度計測のための基板（通称：ザコ板）をくっつけて並べ、治具 2 つを使い、1 m 定規と基板が平行になるように設置した。実験器具全体の角度を水平にするためザコ板上にデジタル水準器を乗せ、基板表面が水平になるようにヒーター下部の土台を調整した。
- ② ヒーターの電源をつけ、実験条件に適した温度に設定した。基板表面の温度は先行研究と同じくヒーターの表示温度を基準にせず、熱電対をザコ板の所定の穴に差し込みその部分で計測した温度を測定温度とした。電子ピペットを起動し、先端に専用のチップを取り付けて、分注量を 33.6 μL に設定した。また、電子ピペットは基板表面から離れた位置にベースストッパーで固定した。

- ③ 実験系の真横から水平に撮影できるように三脚を使ってカメラを設置した。
- ④ 電子ピペットに試薬を吸い上げ、排液ができるかどうかを確認し、基板端から液滴を滴下、自走する現象をカメラの 4K 動画で撮影した。撮影は各温度 5 回ずつ行った。
- ⑤ 撮影した映像をパソコンに取り込み、Windows media player のコマ送り機能を使い 3 フレーム (0.1 秒) ごとの移動距離を映像上の定規の値を読み取り Excel へ出力、中央差分法を使って速度を算出した。

次に実験機器について説明する。表 6.1 に使用した実験機器を示す。

表 6.1 2022 基板実験の実験条件

電子ピペット	Eppendorf explorer
三脚	K & F Concept
水平計	MYZOX TX-10
温度計	デジタル温度計(YOKOGAWA TX10)
ホットプレート	特注 1 m ホットプレート
カメラ	SONY FDR-AX700
基板	2022B1 基板 2022C1 基板

先行研究から変更した使用機器とそれぞれの使用方法を示す。

使用したカメラについて図 6.6 に示す。本実験では SONY 製の FDR-AX700 を使用した。先行研究から撮影機材を変更した理由として液滴が流動する時間が長くなってしまったためである。従来用いていたカメラではハイフレームレートで撮影できる時間は 2 秒程度であったが、本カメラは数時間でも撮影が出来る仕様であるので採用した。撮影時には 4K 解像度を 30 fps で撮影した。



4K	スロー&クイックモーション記録設定					
	1fps	2fps	4fps	8fps	15fps	30fps
24P	24倍クイック	12倍クイック	6倍クイック	3倍クイック	1.6倍クイック	1.25倍スロー
30P	30倍クイック	15倍クイック	7.5倍クイック	3.75倍クイック	2倍クイック	通常の再生速度

図 6.6 2022 基板実験で使用したカメラ

またホットプレート（図 6.7）も変更した。に最大 1 m の基板を温められるように 20 cm 四方のホットプレートを 5 つ連結させた特注品である。なお、温度は最大 600 °C まで昇温させることが可能である。



図 6.7 特注 1m ホットプレート

6.4 実験条件（2022 基板実験）

本実験の実験条件を表 6.2 に示す。先行研究①と比較するため基本的な実験条件は先行研究①を基準に設定した。なお、液滴が止まった、基板の壁面に何度も当たってしまった等、イレギュラーな挙動が見られた場合は測定結果から排除し、外乱を含まない理想的な測定結果のみを採用した。

表 6.2 2022 基板実験の実験条件

液種	超純水
液量 [μL]	33.6
液滴径 [mm]	4
基板種	B1、C1
基板表面温度 [$^{\circ}\text{C}$]	200~400
測定温度間隔 [$^{\circ}\text{C}$]	25
滴下距離 [mm]	7
測定回数 [回]	5

6.5 実験結果（2022 基板実験）

2022B1 基板の結果を図 6.8 に示す。低温度帯（200 °C～250 °C）での挙動と高温帯（275 °C～400 °C）での挙動が大きく違った。液滴の速度は 225 °C で最高速度を記録し、400 °C で最低速度を記録した。200 °C では液滴が鋸歯面に直接当たり、バチバチという蒸発音が発生していた。さらに液滴が基板を走り切るころには、液滴はおおよそ 3 分の 2 程度のサイズにまで小さくなっていった。225 °C と 250 °C の時は 200 °C の時と同様、滴下直後 1～2 秒あたりまではバチバチという音が発生し、加速し続けた。基板連結部に到達した際には連結部における段差の影響を受け、速度が落ち込むこともあったが、それ以外の個所ではおおよそ速度が速くなっていく傾向が見られた。また、液滴のサイズは 200 °C に比べあまり小さくならなかった。高温帯では低温度帯で聞こえたバチバチといった音は発生せず、温度が上昇するにつれて速度が遅くなっていく現象が見られた。さらに滴下してから 3 秒程たつと速度が一定になり、液滴が等速運動する様子が見られた。

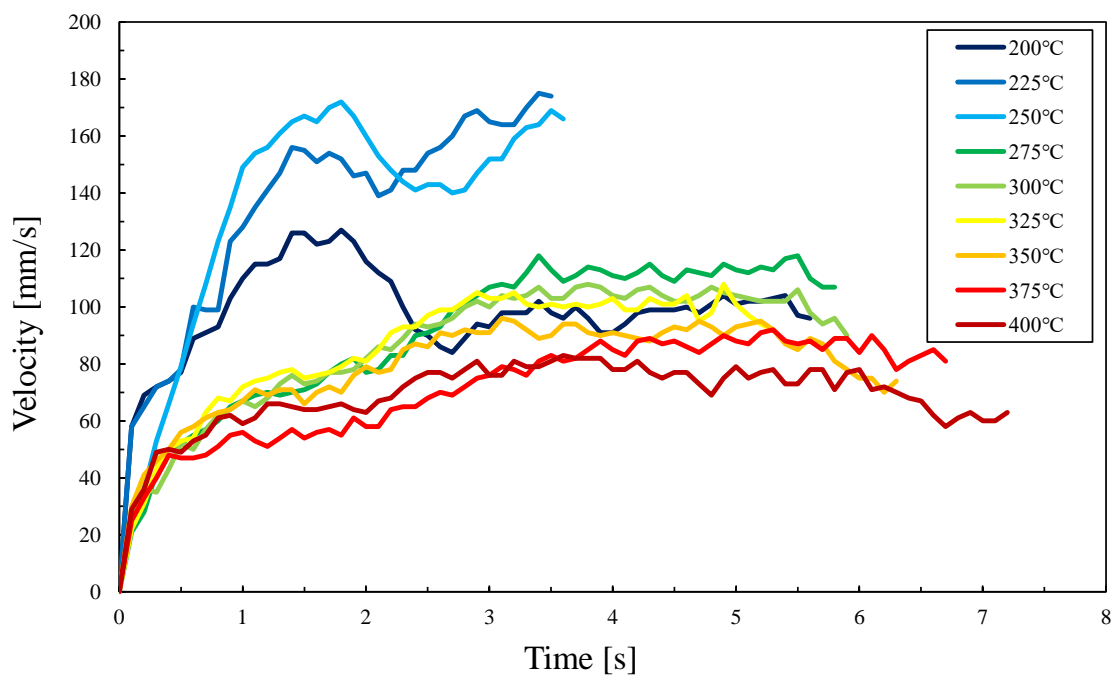


図 6.8 2022B1 基板の実験結果

2022C1 基板の結果を図 6.9 に示す。最高速度は、225 °Cで記録した。2022C1 基板は 2022B1 基板と比較して急激な減速、速度が温度に依存しない等、綺麗な結果が得られなかった。2022B1 基板と同じく 200 °Cではバチバチという蒸発音を発し、液滴が基板を走り切るころには液滴が半分ほどの大きさになっていた。また、2022B1 基板と同じく低温度帯では高温度帯で全く違う挙動が見られた。225~250 °Cのような低温度帯では液滴を滴下した直後からバチバチという音を 1~2 秒ほど発して加速し、基板連結部で速度停滞や、減速するなどの挙動も見られたが、おおむね時間経過と共に速度が速くなっていくという結果が得られた。275°C以上の高温度帯は基板表面設定温度によらず、よく似た挙動が見られた。また高温度帯ではどの基板表面設定温度であっても、液滴が自走する際に直線的な挙動をとらず、ガードレールに当たり、左右にフラフラと蛇行しながら進んでいく挙動が見られた。

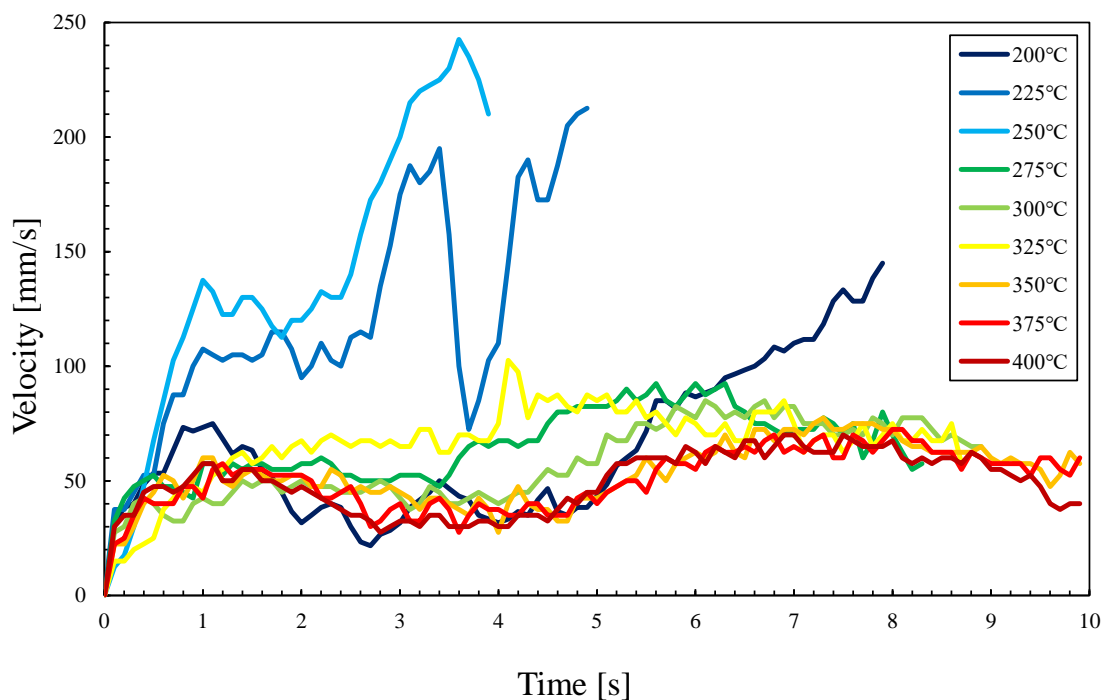


図 6.9 2022C1 基板の実験結果

次に比較的綺麗な結果が得られた B1 基板について 2022 基板と 2015 基板の結果を比較する。(図 6.10) 全体的な速度は 2015 基板の方が速いが、温度上昇とともに速度が遅くなっていった点はどちらともに見られた。200 °C においては 2015 基板で滴下時の衝撃による加速が大きく、2015 基板では最高速度を示している。一方 200 °C において 2022 基板では瞬間的な加速は見られたものの、加速後の蒸発による衝撃が抵抗になり、速度が減速していき、等速になっていった。低温度帯では 2015 基板では加速途中で測定が終わってしまっているが 2022 基板ではその後の速度上昇が見られている。つまり高温帯では 2015 基板では基板が短かったため、見られなかった液滴の速度変化のつづきを 2022 基板では見られるようになった。

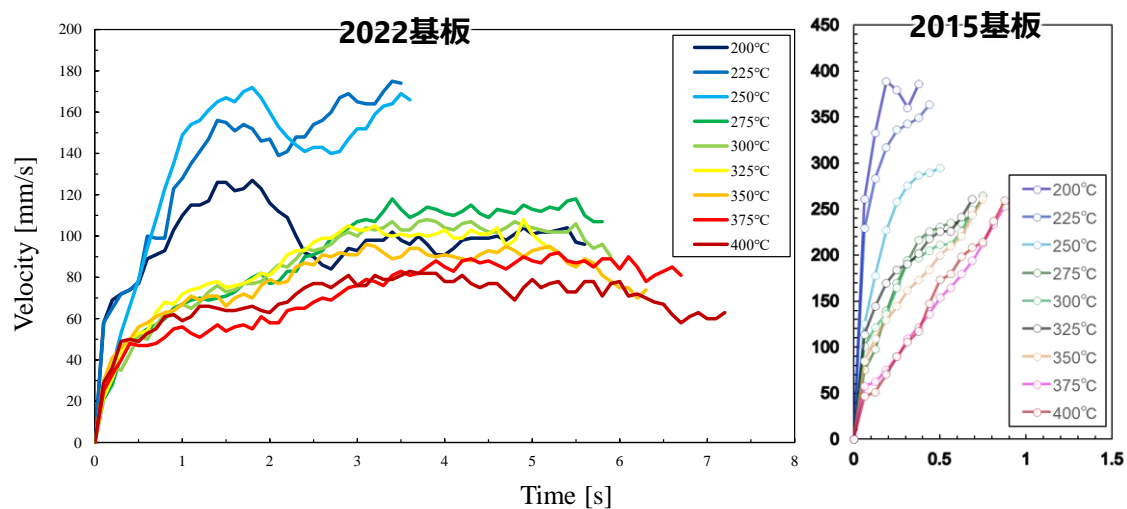


図 6.10 2022B1 基板と 2015B1 基板の比較

6.6 考察（2022 基板実験）

200℃で液滴がバチバチと蒸発し、途中から液滴の移動速度が遅くなっていった点について考察する。超純水のライデンフロスト点はおおよそ 220℃～270℃にあるため、基板温度が 200℃では滴下された液滴は遷移沸騰の状態になっていたと予測できる。そのため、ライデンフロスト現象が起こるような十分な蒸気膜が発生せず、基板表面との接触によって生じた突沸に伴う衝撃の力、いわゆる蒸気発生時の作用・反作用で液滴が自走したと推察できる。液滴が明らかに小さくなっていったのは、突沸に伴う衝撃などで多量の液体が蒸発したことを裏付けている。

次に 225～250℃の低温度帯で最高速度を計測した点について考察する。225～250℃の低温度帯は水のライデンフロスト点に近く、膜沸騰となり、蒸気膜がそれなりに発展していたことが予想される。しかしながら、滴下直後にバチバチという蒸発音も発生していたことから、基板表面の鋸歯構造を上まわるほど蒸気膜厚は厚くなく、結局突沸に伴う衝撃により、作用・反作用の力も強く受け、速度が速くなったと考えられる。

次に 275℃以上の高温度帯で速度が低下していった点、速度が一定になっていった点について考察する。高温度帯の液滴はライデンフロスト点を超え、十分な蒸気膜が出来ることが推察される。また、液滴を滴下した際に低温度帯で聞こえていたバチバチという蒸発音もこの温度帯では発生しなかった。つまり、この温度帯では液滴の自走は蒸気流れによる影響が支配的になり、作用・反作用の力はほぼ受けなくなっていたと考えられる。また、温度が上昇するにしたがって液滴の移動速度の減少が見られたのは、温度上昇に伴い蒸気膜厚が厚くなり、蒸気流れの影響も受けづらくなったからだということが容易に想像できる。また、液滴が自走する際に液滴にかかる空気抵抗と蒸気流れが液滴にもたらす駆動力が釣り合った状態になったため、液滴が一定速度に収束していったと考えられる。

最後に 2022C1 基板の結果が綺麗にならなかった点や 2015 基板と比較した際に速度の伸びが悪かった点について考察する。最初この実験を行ったところ、2015 基板と 2022 基板で同じ構造を用いているにも関わらず、あまり相関のないデータが得られたので、それらの基板の表面を電子顕微鏡で観察した。2015 基板と 2022 基板表面の比較を図 6.11 に示す。

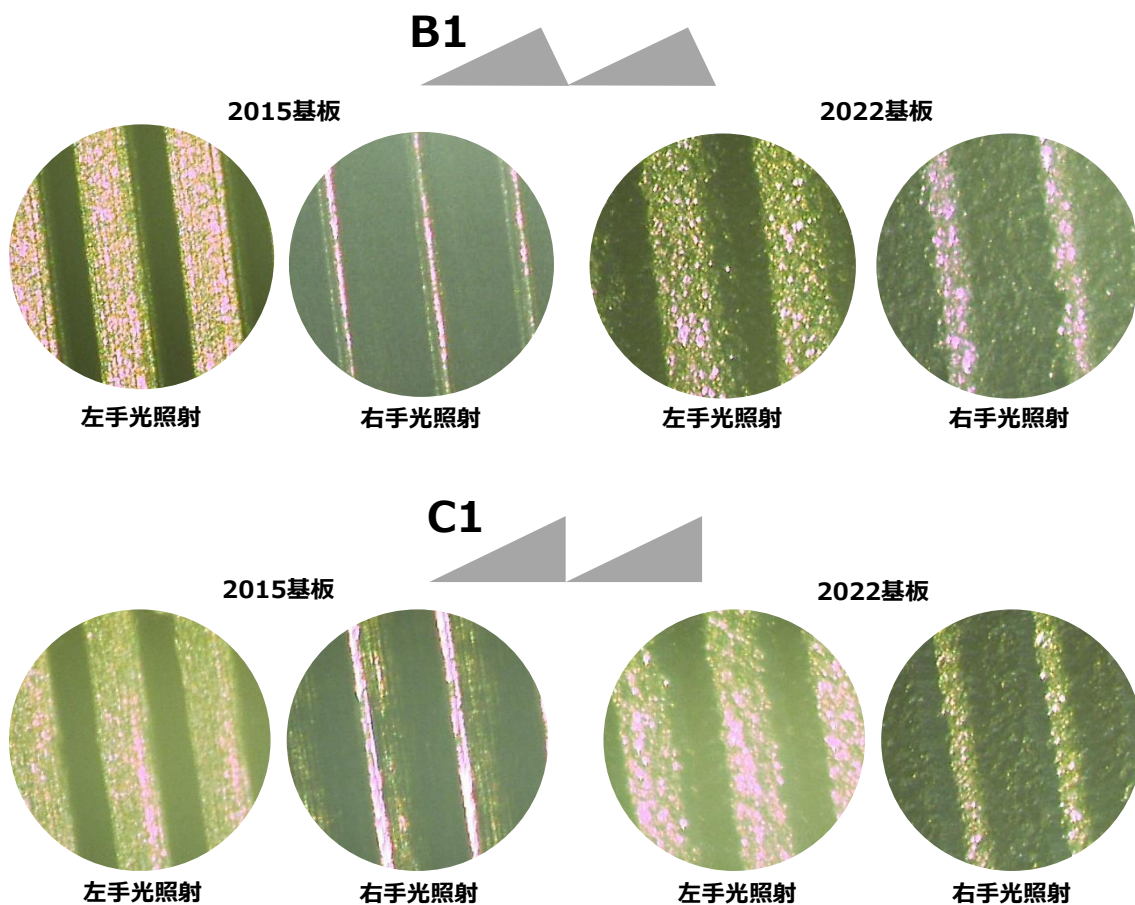


図 6.11 2015 基板と 2022 基板の表面比較

B1 基板 C1 基板ともに 2015 基板の方が表面も縁部分も綺麗に加工されていることがわかる。特に右手光照射時に光が反射して明るく現れる鋸歯面の縁部分が 2015 基板では細く、鋭く尖っているように見えるのに対し、2022 基板では太く縁部分が舐めているのが分かる。つまり 2015 基板の方が形状が整っており、液滴の蒸発によって発生する力を分散させることなく一方向へ伝えやすいことが予想される。また、2022C1 基板において滴下した液滴が蛇行しながら進んでいく現象も、鋸歯面の縁が舐めているために生じた現象であると考えられる。

6.7 効率

今回の実験で 275 °C以上の高温帯では液滴が一定速度に収束してくことが明らかになった。275 °C以上の高温帯では滴下された液滴から発生した蒸気膜は鋸歯構造を十分超えるだけの厚さを有しており、蒸気流れによるせん断応力により液滴が加速していることが予想される。一方液滴の自走が等速になったということはこの蒸気流れによるせん断応力と何かが釣り合っていることを示しており、我々は単純に空気抵抗と釣り合っていると仮定することとした。

今回の実験では半径 2 mm の液滴が 0.1 m/s の速さで移動するので液滴周りのレイノルズ数は

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \approx 8 \quad (6.1)$$

となり、いわゆる層流化で移動していることが分かる。このとき液滴下部を流れる蒸気流れのせん断応力 τA は蒸気の粘性 μ 、液滴下部の面積 A_{ba} を用いて

$$F = \tau A = \mu \frac{du}{dy} A_{ba} \quad (6.2)$$

となり、液滴が走る際に受ける空気抵抗 F_d を抗力係数 C_d 、空気の密度 ρ_{air} 、液滴側面方向の面積 A_d を用いて

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho_{air} v^2 A_d \quad (6.3)$$

とおける。概略図を図 6.12 に示す。

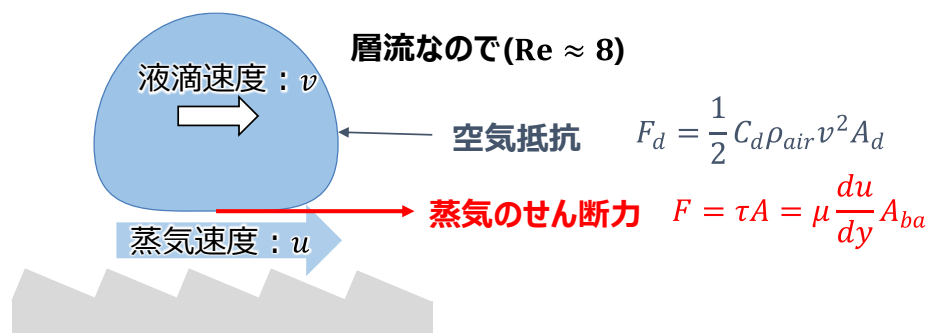


図 6.12 空気抵抗と蒸気せん断力のつり合い

つまり蒸気流れによるせん断応力と空気抵抗が釣り合うという仮定では

$$F_d = \mu \frac{du}{dy} A_{ba} \quad (6.4)$$

という関係が求まる。

ところで、液滴と鋸歯面に流れる蒸気流れの速度分布を図 6.13 のよう仮定する。 $h(r)$ は蒸気膜厚さで v は液滴の移動速度、 u_{max} は液滴と鋸歯面に流れる蒸気の最大速度である。液滴の速度はどこでも一定と仮定し、液滴直下の蒸気の数値と同一であると仮定したモデルである。

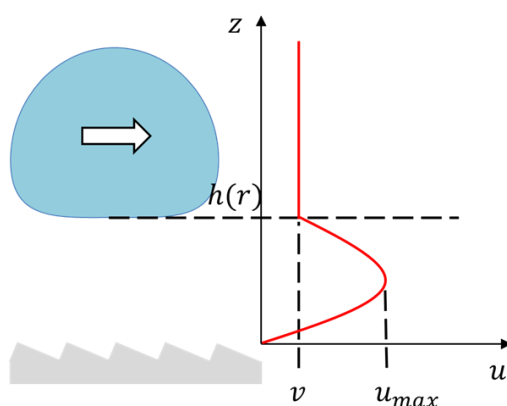


図 6.13 蒸気流れの速度分布①

u_{max} が蒸気流れの中心部分で生じていると仮定し、計算の簡略化のために速度分布の簡略化を図 6.14 のように行った。

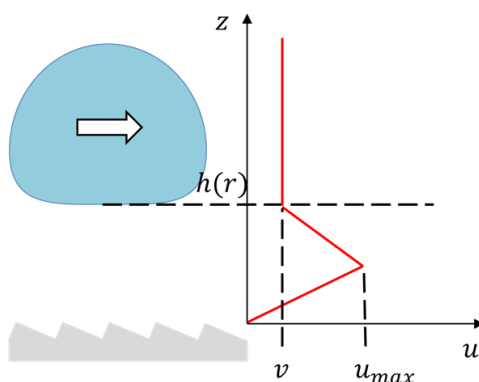


図 6.14 蒸気流れの速度分布②

この時、(6.4) 式に代入すると

$$\mu \frac{u_{max} - v}{\frac{1}{2}h(r)} A_{ba} = F_d \quad (6.5)$$

となり、 u_{max} の値は

$$u_{max} = \frac{1}{2} \frac{h}{\mu} A_{ba} F_d + v \quad (6.6)$$

であることが分かる。ちなみに液滴を側面方向から見ると図 6.14 のように見えるので、 $A_d = \frac{3}{4}\pi r^2$ などと仮定でき、また $A_{ba} = \pi R_{neck}^2$ である。 A_d 、 A_{ba} ともに $1 \times 10^{-5} m^2$ 程度となる。また、4.6 節でも述べたように蒸気膜厚さは先行研究により求められており、本条件下では $h(r)$ は $30 \mu m$ 程度である。よって、

$$\frac{1}{2} \frac{h}{\mu} F_d = 0.08 \quad (6.7)$$

ほどとなる。つまり、 u_{max} の値は v の約 2 倍の値となる。

このように、蒸気速度は液滴速度より多少大きい程度であることが分かった。つまり液滴下部の蒸気速度の分布を簡単に示すなら図 6.15 のようになっていることが予想された。

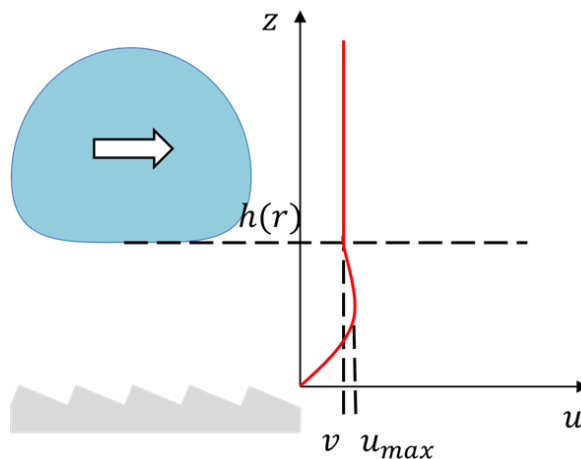


図 6.15 蒸気流れの速度分布③

ここで第4章で高温平板上に滴下した液滴から流出する蒸気の流出速度(4.10)式と比較した。

例えば300℃の時、全方位に流出する蒸気流出速度は17.82 m/sと算出された。しかしながら、本章で行った高温鋸歯面上を自走する液滴から自走する方向へ流出する蒸気速度は10%ほどの誤差と考えると、おおよそ0.1 m/sとなっている。平板時と鋸歯面上で蒸発過程が同じだと仮定すると液滴進行方向に流出する蒸気速度は平板時のおおよそ1/170程度しかないことが分かる。要するに図6.16に示す様に液滴進行方向への蒸気流出はとても小さく、進行には関係ない方向への蒸気流出が主になってしまっていることが考えられる。

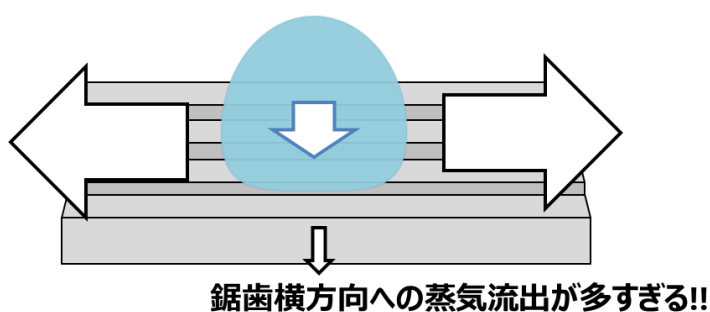


図 6.16 液滴下面の蒸気流れ割合

6.8 動力化に向けた効率化

上述の通り、ライデンフロスト点を超えた高温帯でライデンフロスト現象を伴う液滴を自走させる際に鋸歯面の利用は効率はかなり悪いこと分かる。動力源開発を目指すにあたり熱エネルギーから力学的エネルギーへの変換効率の高効率化は必須であり、蒸気流れに伴うせん断応力をもっと効率的に利用することができる基板開発が重要になってくる。

これに対し、本研究室では、テスラバルブ構造を用いた基板の開発⁽¹¹⁾に着手している。

第7章 排熱回生システム

7.1 排熱回生システムの概要

材料革新サステナブルテクノロジー研究室ミリオーダー液滴班はライデンフロスト現象を有効活用した動力源の開発を目標に研究を進めている。高温基板上における液滴の蒸発時間観測実験、高温鋸歯面上における液滴の蒸発挙動観測実験、環式の基板を作り液滴を回転させる実験等を行ってきた⁽¹²⁾。だが、このような基礎的な実験を行い続けてきただけでは、ライデンフロスト現象を利用した動力源の開発にこぎつけられない。そこで、実際に排熱回生システムに着手した。

7.2 排熱回生システム 1号機

今回排熱回生システム1号機として図7.1に示すようなものを検討した。1号機は環式基板上で液滴が回転する力を円形プレートで受け取り、シャフトを回転させることで動力を取り出すといった仕組みである。部品をミスミで発注し、液滴から動力を取り出す軸部分を試作した。

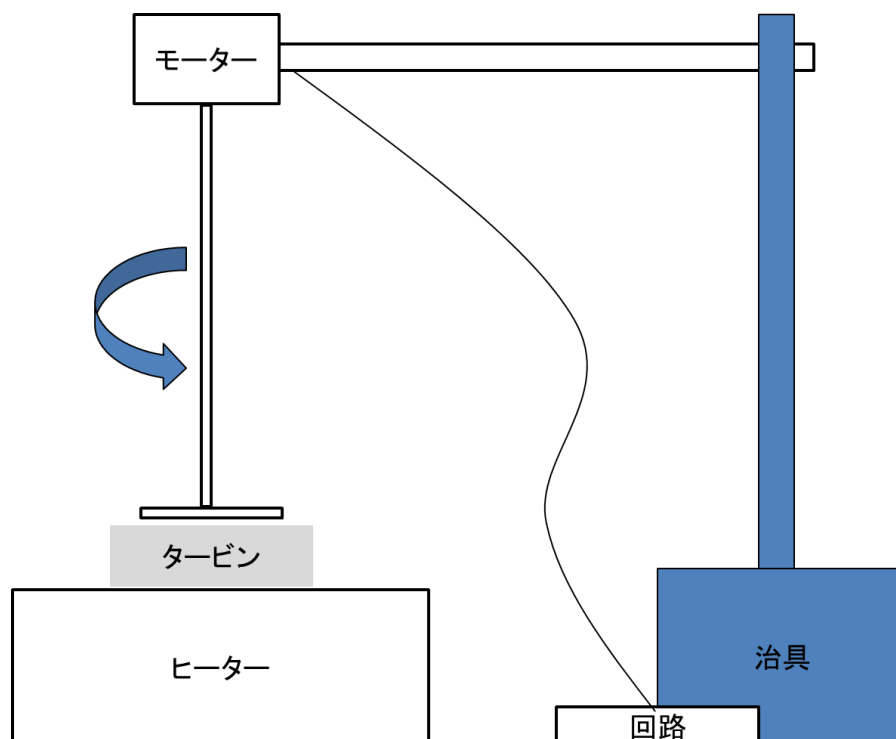


図 7.1 排熱回生システム 1号機初期案

7.3 排熱回生システムの作成

制作するにあたり使用した部品を表 7.1 に示す。

表 7.1 排熱回生システム 1 号機に用いた部品

回転軸	SSFHRT10-100-M3
円形プレート	BFHBN-SUD-A30-T1-D3
歯車	S1DB30B+1010
ベアリング	TB6000ZZ

図 7.2 に排熱回生システム 1 号機に使用した部品を示す。回転軸の部分は、熱に耐えられるよう、金属製の軸を用いた。軸は軽量化のため、ベアリングと歯車の寸法との兼ね合いや、円形プレートのねじ取り付けが可能であるという制約を満たすものの中から出来るだけ細いものを採用した。

円形プレートはタービン部分と同じ大きさになるように、直径 30 mm のものを使用した。また、ねじで固定出来るように中止部に穴をあけた。

歯車は変速することを考慮し、取り付けた。イモネジを使い容易に回転軸に固定できるものを採用した。

ベアリングは治具で固定することを考慮し、イモネジを使い容易に回転軸に固定できるものを採用した。



図 7.2 排熱回生システム 1 号機に使用した部品

以上のパーツを組み込み完成した排熱回生システムの軸部分を図 7.3 に示す。



図 7.3 完成した排熱回生システムの軸部分

7.4 タービンの作成

次に液滴にライデンフロスト現象を発生させ、回転運動を発生させるタービンを先行研究⁽¹²⁾に基づき試作した。以下に作製の手順を示す。

- ① 铸造用の型を取るため、図 7.4 に示す、先行研究で設計されたタービンの 3D モデルを用意し、型を取った



図 7.4 タービンの 3D モデル

- ② 型の乾燥後、図 7.5 に示すように、卓上小型電気炉(NHK-170 型)を用いて細かくしたアルミを溶かし、型に流し込むことでタービンを作製した。



図 7.5 卓上小型電気炉(NHK-170 型)と試作したタービン

7.5 排熱回生システムの試行

試作したタービン（環式基板）を用いて排熱を回生することができるか試してみることにした。実験系を図 7.6 に示す。ホットプレートの上に本研究室で作製した様々な環式基板を乗せ、熱した。その上から治具を使って排熱回生システムの回転軸を吊るし、液滴が流入できるような隙間を作り、スポイトで超純水を流入させた。

残念ながらぐるぐると回転するようなことはなかったが、様々な条件が噛み合うことで、微々たる動きではあるが、液滴につられ回転軸が回転する様子を確認した。

しかしながら、この回転したという事実は排熱回生システムの開発において大きな一歩である。



図 7.6 試作したタービンを用いて排熱の回生に挑戦する際に用いた実験系

第8章 結言

8.1 まとめ

本研究では本研究室の大きな目標であるライデンフロスト現象を用いた動力源開発のため、今までに測定されていなかった R_{neck} 、蒸気流出速度などのパラメータの算出、実験器具の改善やその実験、流体シミュレーションソフトを使用した液滴自走時の液滴と鋸歯面間の流体解析、さらには動力源化に向けた排熱回生システムの開発に着手した。

第4章では高温平板上に液滴を滴下し、液滴の R_{neck} 計測を行い、温度上昇とともに R_{neck} は小さくなっていくことが分かった。そしてその値から先行研究で導出されていた物質収支の式を使うことで液滴下面から流出する蒸気の流れ速度を算出した。

第5章では解析ソフト ANSYS Fluent を使い流体シミュレーション解析を行った。液滴と基板の間にかかる圧力の分布や蒸気の流れ方や速度を目で見えるように解析したが、まだまだ実現象のような状態を再現することが困難であり、正確な値を出すことが出来なかった。

第6章では先行研究の改善を行い、先行研究では見ることはできなかった液滴挙動を観測した。ライデンフロスト点に満たない温度では遷移沸騰であるため、綺麗な液滴挙動が見られず、低温度帯では加速力が高く、最高速度もこの温度帯で計測された。高温帯になると温度上昇とともに速度が落ちていき、液滴が等速運動をすることが分かった。そして高温帯では蒸気流れによる液滴自走が支配的となることが分かった。また、高温帯における液滴の等速運動から蒸気流れがもたらす、液滴の駆動力について効率を求めた。自走する液滴が等速運動をする際に、液滴下面を流れる蒸気流れのせん断力と液滴そのものが受ける空気抵抗が釣り合っていると仮定すると、液滴そのものの速度と蒸気流れの速度に10%程の差しかないことが分かった。このことから、液滴自走の際に鋸歯面を用いるとかなり、効率が悪く、これからは動力源開発に向けて、蒸気流れに重きを置いた基板開発に注力していく重要ということが分かった。

第7章では本研究室の大きな目標である動力化のために、排熱回生システム一号機の開発に着手した。大きな成果は得られなかったが、微小ながら回転運動をするという、排熱回生システムの開発において大きな一歩を歩みだすことが出来た。

8.2 展望

本研究はライドンフロスト現象を用いた動力源の開発に向けてさまざまな実験及び、装置開発に貢献することができたが、これまで利用してきた鋸歯基板は非常に効率が悪く改善や全く新しいものの開発が必要であり、基板開発を行う際には蒸気流れに着目していく必要がある。今回は簡易的に液滴自走の効率を算出したが、より精密な効率、精密な流体シミュレーション、液滴自走の理論式を算出することなどに向けてライドンフロスト現象を伴う液滴の多種多様なパラメータを測定する必要がある。最後に本研究では排熱回生システムの一号機の開発に着手したが、大きな成果を得ることができなかった。一方、実験を行い、改善すべき項目を洗い出すことができた。本研究室の大きな目標を達成するため、さまざまな改良を行い、開発を続けて欲しい。

参考文献

- (1) 未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合 “産業分野の排熱実態調査”
国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2019)
- (2) J.G. Leidenfrost “ De Aquae Communis Nonnullis Qualitatibus Tractatus “
translation of portions to appear in Intern J Heat Mass Transfer (1756)
- (3) 荒木穂孝 “加熱面上における液滴量と蒸発時間に関する研究”
高知工科大学 卒業論文 (2023)
- (4) 小林俊介 “動力源開発に向けたライデンフロスト効果と基板表面状態の関
係に関する研究” 高知工科大学 卒業論文(2022)
- (5) B.S. Gottfried, K.J. Bell, “FILM BOILING OF SPHEROIDAL DROPLETS”, I & EC
Fundamentals 5, 561 (1966)
- (6) 高木耕平 “ライデンフロスト効果を用いた動力源の開発に関する基礎研究”
高知工科大学 修士論文 (2017)
- (7) 西村一宏 “近未来発電機機構開発のための傾斜高温ギザ面上を登坂する液滴の挙
動解析” 高知工科大学 修士論文 (2019)
- (8) 市川怜司 “高温鋸歯面上におけるライデンフロスト液滴の移動性能についての
検討” 高知工科大学 卒業論文 (2021)
- (9) 宮田翔生 “高温鋸歯面上におけるライデンフロスト液滴の挙動観測”
高知工科大学 卒業論文 (2020)
- (10) 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)
- (11) 岡田裕明 “ライデンフロスト上液滴の動特性と表面構造に関する研究”
高知工科大学 卒業論文 (2023)

- (12) 岡田雄哉 “液滴のライデンフロスト挙動を利用した新動力源の開発に関する基礎研究” 高知工科大学 修士論文 (2020)

謝辞

本研究は、高知工科大学システム工学群知能機械専攻材料革新サステナブルテクノロジー研究室において、川原村敏幸教授の下で行われたものです。

川原村敏幸教授には本研究を行うにあたり、誰しものが意見を言いやすい風通しの良い恵まれた環境を用意していただき大変感謝しています。また、研究のみならず就職活動や普段の生活でも気兼ねなく接していただくことで支えていただきました。心より深く感謝申し上げます。当研究室に所属する本学博士課程の安岡龍哉さんには、研究テーマで直接的なかわりはないもの、研究会や実験ではアイデアをたくさん下さり、また修論発表の際には大変お世話になりました。また、留学生である劉麗さん、劉小嬌さんは自分の未熟な英語でも親切に接していただき、国境を超えたコミュニケーションをとることが出来ました。直属の先輩である宮田翔生さんは直接研究で関わる機会が多く、自分が困っている時など多くの場面で助けていただきました。同期である草下圭太君、高井友輝君はお互いに切磋琢磨し、日々の研究室生活のみならず楽しい学生生活を送ることが出来ました。研究室の後輩である修士一回生の小松正彦君、小林俊介君、澤田陸斗君、須佐美大夢君は一つ下の学年として長い間ともに過ごしてきました。研究会では活発に意見を交流する機会もたくさんあり研究を行う際にもアシストしていただきました。特に小林俊介君には研究テーマが同じということもあり、実験を行う際に相談に乗ってもらうともありました。学部4年生である荒木穂孝君、梶亮介君、岡田裕明君、宮崎晃大君も上の学年に負けず、研究会などでは活発な議論が出来ました。特に荒木君、岡田君は同じ液滴ミリ班として実験ではたくさんアシストしていただきました。特に4年生は卒業するタイミングが同じということもあり一緒に実験に取り組んできました。

学部三年生の宇佐美忠信君、岡田達樹君、大川我覚君、田上遼君、学部二年生の大橋亮介君には短い間でしたが様々なコミュニケーションを交わし、研究室生活を豊かにしてくれました。

最後にこの六年間関わっていただいた高知工科大学の皆さん、アルバイト仲間や店長、音楽活動をする上で関わっていただいたメンバーやサークルの皆さん、ともに音を奏でたバンドマンの方たち、支えていただいた全国のライブハウスのスタッフの皆さん、そして高知工科大学へ通わせていただき、遠くから支えていただいた家族の皆様、本当にお世話人になりました。自分にとってこの六年間は絶対忘れられない大切な時間です。本当に今までありがとうございます。そしてこれからもよろしく申し上げます。

以上の感謝の意を表して謝辞とさせていただきます。