

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

Behavior analysis of droplets climbing hill on high temperature giza slope surface for development of generator system in the near future

知能機械システム工学コース

材料革新サステイナブルテクノロジー研究室 1215024 西村 一宏

1. 緒言

私たちは身の回りの様々な現象と密接して日々生活している。その一つとしてライデンフロスト現象というものがある。一般には聞き覚えの無いこの現象であるが、高温に熱せられたフライパン上に水を垂らしたとき、その水がすぐに蒸発することなく、フライパン上で小さな球体となり、縦横無尽に動き回る様子を見たことがあるのではないだろうか。これがまさにライデンフロスト現象である。

ところで後述するが、平衡ポテンシャル基板つまり水平基板上における液滴のライデンフロスト現象に関しては、既に厳密式が立てられており、多くの調査がなされている。一方、水平ギザ面上における挙動、さらには傾斜ギザ面上の挙動については、あまり調査されておらず、ましてやその本質的な解明は未だになされていない状況である。そこで本研究では、水平ギザ面上におけるライデンフロスト液滴の挙動を解析、理解するとともに傾斜ギザ面上での挙動について規則性を見出すことを目標とした。本研究の追及により、現在様々な分野における問題を解決したり、これまで考案されてこなかった全く新しい技術の開発などへの応用が期待される。

本論文は、まず先行研究で行っていた様々な条件下における水平高温ギザ面上液滴挙動実験の結果を示し、その結果をもとに傾斜高温ギザ面上を登坂する液滴について行った実験結果について示す。また、本研究では液滴自身が自らの力で高温傾斜ギザ面を登坂し、液滴が得た位置エネルギーを落下時に水車を回す回転力に変換させることで、新たなエネルギーを生み出すといったイメージを新機構開発の軸とした。最終的な目標として近未来発電機機構に用いる最適な液滴を発見するとともに、様々な状況における液滴挙動の規則性を見出すことに焦点を当て研究を行ったものである。イメージのもととなったエッシャーの『滝』及びそこから得た構想の模式図を図1に示す。

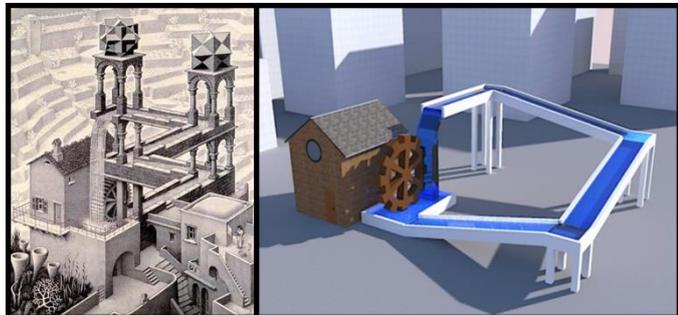


Fig.1 Escher's waterfall and schematic of concept

2. 水平基板上のライデンフロスト効果

液滴は滴下する表面によって異なる挙動を示す。ここでは、水平基板上に滴下した際の挙動について記述する。

ライデンフロスト効果は、液滴がその沸点よりも高温な固

体壁面に近づいたとき、表面に薄い蒸気膜が形成されることによって、熱伝達が阻害され、高温壁面に浮遊したままの状態となることで、液滴の蒸発時間が大幅に上昇する現象である。この現象は、1756年にJ.G.Leidenfrost^[1]によって報告された。ライデンフロスト効果の模式図を図2に示す。

また、ライデンフロスト現象が発現している際の、液滴のその蒸発時間を物理的に明らかにしようとする試みが1966年にB.S.Gottfried^[2]らによって調査された。この時、液滴をヒーター上に滴下し、液滴の体積、密度、熱伝導率、熱容量、拡散係数、ヒーター温度を変化させたときの液滴蒸発時間を調査し、次元解析により、蒸発時間を算出する厳密式が導出された。

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

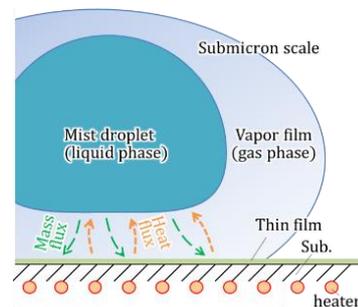


Fig.2 Schematic diagram of Leiden Frost effect

3. 高温ギザ面上における流動解析

さて、B.S.Gottfried^[2]らの研究結果から高温水平基板上でのライデンフロスト現象の蒸発時間は明らかとなったが、非平衡ポテンシャルを持つ表面、つまり高温ギザ面上においては、さらに複雑なパラメータが関わっているのではないかと考えられる。そこで、高温ギザ面上におけるライデンフロスト効果の現象解明を試みた。この現象を追及するために本研究では、先行研究にて取り扱っていたパラメータ以外に、以下のパラメータを変更させて調査した。

◎波板の勾配（ギザ面上を登坂する液滴の解析）

◎流体の粘性（様々な液種を用いての解析）

◎流体の濃度（2種類の液体の混合液を用いての解析）

4. 物理モデルの構築

4.1. ギザ面パラメータ

ギザ面の形状は歯幅 p 、高さ h 、角度 θ のパラメータを変更した。A形状、B形状、C形状の3種類を用意した。本実験にて対象としたギザ面それぞれの形状を表1に、主に実験に用いたC形状のパラメータを表2に示す。

Table 1 Giza surface shape

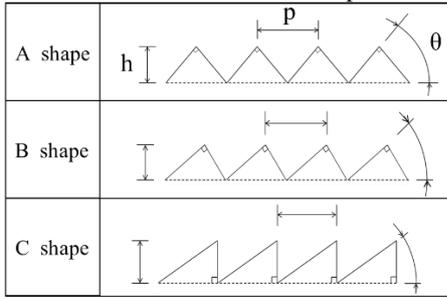


Table 2 Parameters of C shape

	angle(°)	pitch(mm)	height(mm)
C1	20	0.5	0.182
C2	20	0.75	0.28
C3	20	1	0.364

4.2. モデル式の導出

本研究では実験に先立ち、まず水平ギザ面上の力の関係を理解することが重要であると考え、水平ギザ面上に浮遊している液体とギザ面間の熱伝達を考慮するための簡易的な物理モデルを提示した。ただしここではライデンフロストのみを考え、液滴が直接壁面へ接触し突沸するような過程を無視するものとする。モデルでは、液滴から発生する蒸気が壁面と完全弾性衝突を起こし、作用反作用の法則により、周りに存在する流体が移動して、液滴を駆動していると仮定した。その結果液滴に対して、駆動方向へどれだけの力が作用するかを推察した。算出した物理モデルを図3に示す。

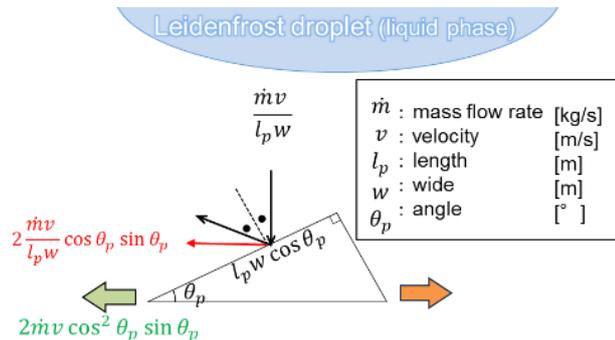


Fig.3 Momentum on the non-equilibrium potential surface

液滴から蒸発した気体が発散せず、ギザ面方向にのみ流動し、単位面積当たりの運動量が周囲に存在する流体をギザ面に対してどれくらい駆動させるかを算出すると、

$$2\dot{m}v \cos^2 \theta_p \sin \theta_p \quad (1)$$

となる。逆側(黄矢印)の力も同様に算出し、A形状: $\theta_p=45^\circ$, B形状: $\theta_p < 45^\circ$, C形状の左右の力を比較する。

A形状の場合は、

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

左右の力は同じになり、理想的には液滴は止まると予測される。

B形状の場合は、

$$2\dot{m}v \cos^2 \theta_p \sin \theta_p > 2\dot{m}v \cos \theta_p \sin^2 \theta_p \quad (3)$$

比較すると左方向の力が大きく左方向に動くと考えられる。

C形状の場合は、図3から右側面には液滴からの運動量が加わらず右方向の力は0となり、左方向に(1)式の力だけ発生する。つまり一方向に動く予想される。

5. 観測方法の概要及び実験条件

ヒーターの上に高温に熱した波板を設置し、電動ピペットにより一定量の液滴を滴下する。ここで波板の側面にはあらかじめ定規を使って0.5cmごとに線を引いておく。デジタルカメラ(Sony, RX100IV)を用いて液滴が動く様子を8倍スローモーション撮影し、動画を汎用のムービーメーカーで編集した後、移動した距離と経過時間から速度を算出する。図4に装置の概略、表3に実験条件を示す。

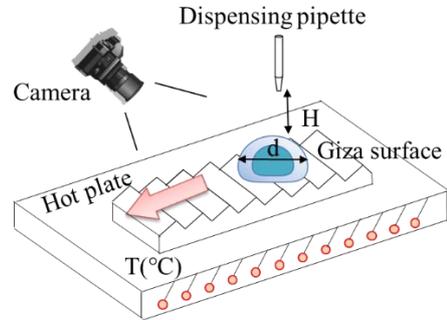


Fig.4 Experimental arrangement

Table 3 Experimental conditions

Solution	Ultra pure water
Liquid volume (μL)	14.1
Droplet diameter (mm)	3
Wavy plate surface temperature (°C)	200~400
Temperature interval (°C)	50
Dropping distance (mm)	13
Number of measurements	5
Giza surface shape	C3

6. 液滴の挙動観測

6.1. 結果

傾斜角を0°, 1°, 2°...と変化させた際の各温度毎の速度変化について、横軸を時間[s], 縦軸を速度[mm/s]でグラフ化したものを図5に示す。取得したデータは測定回数5回の平均速度である。ただし、16 cmの速度算出区間を走り切れなかったものは除外した。

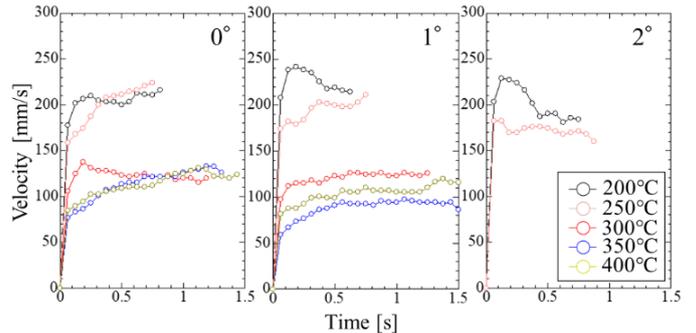


Fig.5 Experimental result

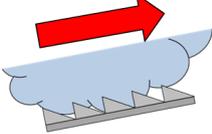
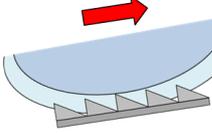
まず、200°C, 250°Cの低温の方が300°C~400°Cの高温よりも最高速度が速く、傾斜角2°では300°C以上の高温領域で登坂不可能なことがわかる。3°以上では、どの温度域でも登坂不可能であった。また、どの角度においても200°C, 250°Cでは初期段階の0.1sまでに大きく加速しており、角度が大きくなるにつれてその後の減速が大きくなっていることが読み取れる。

傾斜角0°の時350°C, 400°Cでは80 mm/sから徐々に加速し、130 mm/s程度に収束するように見えるが、傾斜角1°の時は、300°Cで130 mm/s, 350°Cで110 mm/s, 400°Cで100 mm/sに等速運動しているように見える。

6.2. 考察

上記実験結果から温度域によって加速の仕方や収束する速度域が異なっていることが判明した。そこで、この結果をもとにギザ面上で液滴自身が、どのような状態となり加速、登坂しているか考察した。(表4)

Table 4 Parameters of corrugated sheet

 <p>200°C~250°C</p>	 <p>300°C~400°C</p>
液滴が高温ギザ面上に 触れた瞬間突沸を起こし、 傾斜によってギザ面を 蹴りだしやすくなる	液滴周囲の蒸気膜厚みが十分大 きくなり、ライデンフロスト効 果が安定し、気糸部分で傾斜の ついたギザ面を蹴りだす。
↓	↓
突沸の力で加速力を得る	加速が弱まり等速運動になる

また、傾斜角1°の時300°C~400°Cの条件下において等速で登坂していることから、液滴がギザ面からどれくらいの熱エネルギーを受け取っているかを考察した。

例として、傾斜角1°、300°C、の場合を計算する。液滴が傾斜ギザ面から受け取る全熱エネルギーを Q [J]とすると、蒸発熱 ΔH 、運動量 $\frac{1}{2}m(v_1^2 - v_0^2)$ 、位置エネルギー $mgL \sin \theta$ より、

$$Q = \Delta H + \frac{1}{2}m(v_1^2 - v_0^2) + mgL \sin \theta \quad (4)$$

で求められると仮定する。

- ΔH : 蒸発に必要なエネルギー量
- $\frac{1}{2}m(v_1^2 - v_0^2)$: 運動量の変化量
- $mgL \sin \theta$: 位置エネルギーの変化量
- m : 液滴の質量 [kg]
- v_1 : 液滴の終端速度 [m/s]
- v_0 : 液滴の初速度 [m/s]
- g : 重力加速度 [m/s²]
- L : 速度算出区域終点の距離 [m]
- θ : 傾斜角度 [°]

蒸発熱 ΔH は、

$$\Delta H = \underbrace{mc_p(T_b - T_0)}_{\text{常温} \rightarrow \text{沸点のエネルギー}} + \underbrace{\Delta m \gamma}_{\text{液体} \rightarrow \text{気体のエネルギー}} + \underbrace{\Delta mc'_p(T_h - T_b)}_{\text{沸点} \rightarrow \text{ヒーター温度のエネルギー}}$$

で求められると仮定する。

- m : 液滴の質量[kg]
- Δm : 蒸発した液滴の質量 [kg]
- c_p : 液滴の常温(20°C)~沸点(100°C)までの平均比熱 [J/(kg·K)]
- c'_p : 沸点(100°C)~ヒーター温度(300°C)までの平均比熱 [J/(kg·K)]
- T_b : 液滴の沸点 [°C]
- T_0 : 液滴の常温 [°C] (※20°C)
- T_h : ヒーター温度 [°C]
- γ : 蒸発潜熱 [kJ/kg]

ΔH 常温→沸点のエネルギー項 $mc_p(T_b - T_0)$ について、
 m : 液滴の質量[kg]

$$m = 14.1 \times 10^{-6} \times 10^{-3} \times 981.2 = 1.38 \times 10^{-5} \text{ [kg]}$$

c_p : 液滴の常温(20°C)~沸点(100°C)までの平均比熱 [J/(kg·K)]

$$c_p = 4190 \text{ [J/(kg·K)]}$$

$$\begin{aligned} \therefore mc_p(T_b - T_0) &= 1.38 \times 10^{-5} \times 4190 \times (100 - 20) \\ &= 4.63 \text{ [J/(kg·K)]} \end{aligned}$$

ΔH 液体→気体のエネルギー項 $\Delta m \gamma$ について、液滴が傾斜ギザ面上を登坂している間に蒸発する液滴の質量 Δm [kg]は、ギザ面上の蒸発時間と水平基板上での蒸発時間は同じであるものと仮定し、先行研究^[3]で導出された高温水平基板上の超純水の蒸発時間についての次のモデル式を用いて算出を行った。

$$\tau \sqrt{\frac{g}{r_0}} = 1.76 \left(\frac{k \Delta T}{\rho_v D \lambda} \right)^{-0.325} \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0.936} \left(\frac{C_p \mu}{k} \right)^{-0.501} \left(\frac{\mu}{\rho_v D} \right)^{-0.423} \left(\frac{D}{\sqrt{g r_0^3}} \right)^{-\frac{1}{3}}$$

ヒーター温度300°C、傾斜角度1°、液滴半径1.5 mmの場合、液滴が全て蒸発しきるまでの蒸発時間 t [s] は、

$$t = 79.0 \text{ [s]}$$

と算出される。

従って、液量14.1 μ lの超純水が単位時間当たりに蒸発する質量 $\Delta \dot{m}$ [kg/s] は、

$$\Delta \dot{m} = \frac{14.1 \times 10^{-6} \times 10^{-3} \times 958}{79.0} = 1.71 \times 10^{-7} \text{ [kg/s]}$$

となる。

ΔH 液体→気体のエネルギー項 $\Delta m \gamma$ について、実験データより、液滴は傾斜ギザ面上を1.56 s間登坂しているので、

$$\begin{aligned} \Delta m &= \Delta \dot{m} \times 1.56 \\ \therefore \Delta m &= 2.67 \times 10^{-7} \text{ [kg]} \end{aligned}$$

γ : 蒸発潜熱 [kJ/kg]

$$\gamma = 2250 \times 10^3 \text{ [J/kg]}$$

$$\begin{aligned} \therefore \Delta m \gamma &= 2.67 \times 10^{-7} \times 2250 \times 10^3 \\ &= 0.601 \text{ [J]} \end{aligned}$$

ΔH 沸点→ヒーター温度までのエネルギー項 $\Delta mc'_p(T_h - T_b)$ について、

Δm : 蒸発した液滴の質量[kg]

$$\Delta \dot{m} = \frac{14.1 \times 10^{-6} \times 10^{-3} \times 853}{79.0} = 1.52 \times 10^{-7} \text{ [kg/s]}$$

$$\Delta m = \Delta \dot{m} \times 1.56$$

$$\therefore \Delta m = 2.38 \times 10^{-7} \text{ [kg]}$$

c'_p : 沸点(100°C)~ヒーター温度(300°C)までの平均比熱 [J/(kg·K)]

$$c'_p = 4658 \text{ [J/(kg·K)]}$$

$$\therefore \Delta mc'_p(T_h - T_b) = 2.38 \times 10^{-7} \times 4658 \times (300 - 100)$$

$$= 0.221 \text{ [J]}$$

蒸発に必要なエネルギー量 ΔH [J] は,

$$\begin{aligned} \Delta H &= mc_p(T_b - T_0) + \Delta m\gamma + \Delta mc'_p(T_h - T_b) \\ &= 4.63 + 0.601 + 0.221 \end{aligned}$$

$$\therefore \Delta H = 5.45 \text{ [J]}$$

運動量の変化量について、質量 m [kg]は蒸発量を考慮し、初めの質量から傾斜ギザ面登坂中に蒸発する質量 Δm を差し引き計算する。

実験データの終端速度 $v_1 = 1.15 \times 10^{-1}$ [m/s]、初速度 $v_0 = 0$ [m/s]を代入すると、

$$\frac{1}{2}m(v_1^2 - v_0^2) = 7.92 \times 10^{-7} \text{ [J]}$$

位置エネルギーの変化量について、 L [m]に測定回数5回の移動距離平均値 $L=0.157$ [m]、傾斜角度 $\theta = 1^\circ$ を代入する。液滴の質量 m [kg]は運動量の計算と同様に蒸発を考慮し計算すると、

$$mgL \sin \theta = 3.77 \times 10^{-7} \text{ [J]}$$

$$\therefore Q = \Delta H + \frac{1}{2}m(v_1^2 - v_0^2) + mgL \sin \theta$$

より、

$$\therefore Q = 5.45 \text{ [J]}$$

と算出することができる。

蒸発熱、運動量、位置エネルギーそれぞれの計算結果から、蒸発に必要なエネルギー量に対してその他2つの熱量がはるかに小さいことが分かる。これにより、液滴が滴下されギザ面に接触する瞬間から速度算出区域に到達するまでに、ギザ面から受け取る全熱エネルギー Q [J]は蒸発に必要なエネルギー量に依存し、駆動力のほぼ全てを蒸発熱によって賄っていることが推測できる。

7. 結言

本研究では先行研究に加え、液種、更には波板の勾配を変更することによって水平高温ギザ面上及び傾斜高温ギザ面上でのライデンフロスト効果の現象解明を目指した。そのために温度、液滴の濃度、直径、液種の違い、勾配の有無による速度への影響を調査し、規則性を明らかにした。また、ライデンフロスト液滴の持つ熱エネルギー量に関して先行研究のモデル式を用いることで、想定される熱量の算出を行った。その結果から高温ギザ面上において、液滴駆動に消費されるエネルギーは小さく、液滴蒸発熱に多くのエネルギーが消費されているという見解を得られた。修士課程卒業までに、波板の形状だけでなく、さらに他の液種で液滴の挙動を観測し、現象の解明を迫るとともに、近未来発電機構開発のための構想も進めるべく善処していきたいと考えている。

文献

- [1]J.G.Leidenfrost, “De Aquae Communis Nonnullis Qualitatibus Tractatus translation of portions to appear in Intern J Heat Mass Transfer (1756)
- [2]B.S.Gottfried Bell, & EC Fundamentals 5,561(1966)
- [3]平成 29 年度高知工科大学卒業研究報告 “高温壁近傍における液滴挙動を表すモデル式の再検討” 秦 暦