

高温ラチェット面上の液滴の運動

高島 武雄^{*1}, 杉本 拓哉^{*2}

Movement of Droplets on Hot Surfaces with Ratchet Geometry

TAKASHIMA Takeo, SUGIMOTO Takuya

Self-propulsion of a liquid droplet on a hot aluminum surface with ratchet geometry was investigated experimentally. The top of the heated metal surface is brought to a level. A water droplet in Leidenfrost film boiling dispensed on the ratchet surface starts moving perpendicular to the ratchet features at speeds of as high as 0.2m/s. To analyze the displacement and velocity of the droplet for water, ethanol and acetone, a series of observations were made using a high-speed camera. The effects of surface temperature and diameter of droplet to a terminal velocity of droplet were investigated. We propose a physical model of propulsion and the calculated results of terminal velocity are compared to the experimental results.

KEYWORDS : Droplet, Leidenfrost Film Boiling, Asymmetric, Ratchet Geometry

1. はじめに

近年、マイクロケミストリーの分野では、ポンプやパイプなどを用いることなく微小の液滴を輸送する方法の開発研究が行われている。このような分野における液滴の輸送法には、進行方向に温度勾配を付けて生じる表面張力の不均一によって発生するマランゴニ対流を利用する方法、2本の電極間の電場に生じるマクスウェル応力などの電磁力を利用する方法などが提案されている⁽¹⁾。前者の方法では、液滴の移動速度が 1mm/s 程度の低速度しか実現できていない⁽²⁾。一方、後者の方法では、100mm/s 程度の移動速度が実現できるものの、電極の製作や電場の制御が難しいなどの問題点がある⁽²⁾。

これに対して、H.Linke et al.⁽³⁾は、2006年に上記の方法と異なる、ライデンフロスト現象を応

用した、新しい液滴輸送方法を提案した。この方法は、通常のポンプのような機械的駆動部のない、熱エネルギーを直接液滴の運動エネルギーに変換するものである。すなわち、伝熱面表面を非対称形のノコギリ刃面状にして、液体のライデンフロスト温度以上に加熱して、液滴を滴下することで膜沸騰状態で、液滴を移動するというものである。マイクロポンプへの応用を提案している。

H.Linke et al.⁽³⁾は、液滴が移動するメカニズムに関しては、蒸気層の流動によって生じる粘性力に起因するというモデルを提案して、実験結果と比較している。しかしながら、液滴輸送では、定常時の移動速度（終端速度）が重要と思われるが、実験的にも解析的にも検討が十分とは思われない。

そこで、本研究では、終端速度におよぼす液体の種類やラチェット面の温度、液滴の大きさの影

^{*1} 機械工学科 (Dept. of Mechanical Engineering), E-mail: takasima@oyama-ct.ac.jp

^{*2} 株式会社 共伸 (Kyoshin Co., Ltd., 2009 年度小山高専専攻科修了)

響について実験を行った。さらに、ラチェット面を1次元の平行平板流路と考え、蒸発を考慮した蒸気膜の圧力分布を求めた移動モデルを考案して実験結果と比較した。

2. 実験装置と方法

図1に実験装置を示す。ラチェット加熱面を、ヒータに水平になるように設置する。加熱面の表面近くの中央部に、外径1mmのK型ース熱電対を挿入して加熱面の温度を測定した。液滴を高さ10mm程度から加熱面上に滴下すると、ライデンフロスト温度以上の膜沸騰域温度では、蒸気層を介して、伝熱面に浮遊しながら、一方向へ移動する。この間の様相を高速度ビデオカメラで撮影した。液滴の位置、速度の変化は撮影した映像から求めた。

実験には水、エタノール、アセトンを使用した。伝熱面温度と液滴の大きさが、終端速度におよぼす影響について実験的に測定した。

図2にラチェット面の断面詳細を示す。ラチェット面は長さ150mm、幅50mm、厚さ5mmのアルミニウム平板に機械加工を施して作製した。ピッチ $L=1.5$ mm、高さ $H=0.3$ mmとしたので、傾きは $\theta=11.3^\circ$ となった。加工面の長さは約150mmである。

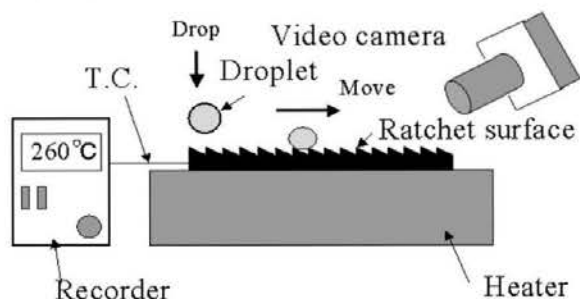


Fig.1 Schematic of experimental apparatus

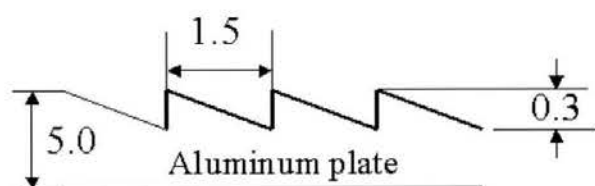


Fig.2 Diagrams of ratchet

3. 実験結果

3.1 液滴挙動の観察

図3はラチェット面上に滴下されたのエタノール液滴の、速度がほぼ一定の状態の挙動を、高速度カメラで透過光を用いて、毎秒1000コマで撮影した結果の代表的なフレームを選んだものである。加熱面温度 $T_w=161^\circ\text{C}$ である。液滴形状を変えながら右から左へと、1方向に移動する様子を示している。

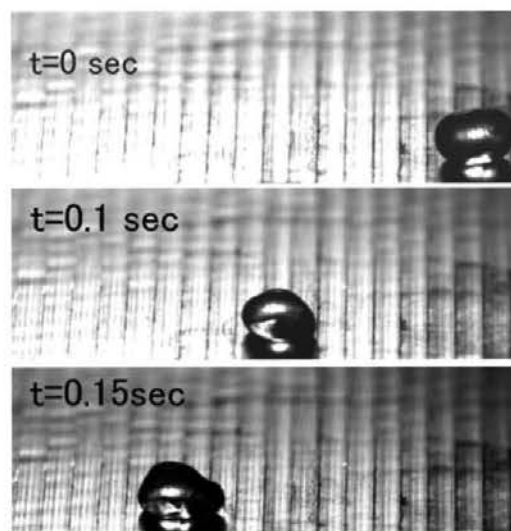


Fig.3 Displacement histories of a droplet of ethanol

3.2 液滴の移動距離および速度

図4はエタノールとアセトン液滴の位置の時間変化を示したものである。加熱面に到達した時間をゼロとした。滴下高さや落下位置の状態にもよるが、通常、0.1 sまでの位置の変動は滴下時の液滴の変形によるもので、0.2 s付近でほぼ回復する。温度とともに速度が遅くなる傾向が見られるが、高速と低速のデータに分けられる。

アセトンでは $T_w=311^\circ\text{C}$ の場合は0.8 secあたりで位置の変化がゼロになり、動かなくなる加熱面温度の上限があることがわかる。

図5は水滴の移動速度の測定値である。300℃以上では、滴下後約0.5秒で速度が一定となっている。

図6は終端速度におよぼす液滴径の影響を示したものである。遷移沸騰域(平板: 200～250℃)のデータ(○印)はばらついていて膜沸騰域(ライデンフロスト温度(約250℃)以上)では液滴

滴径の影響は認められない。

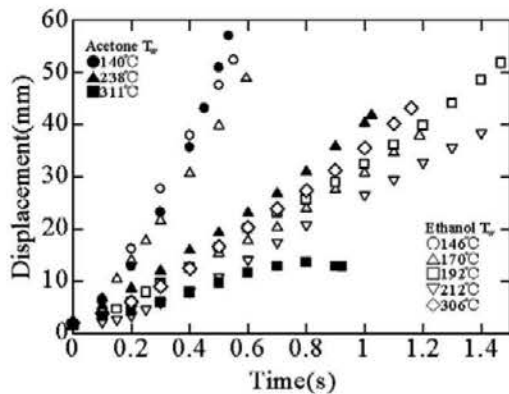


Fig.4 Displacement change of ethanol and acetone droplets with different temperature

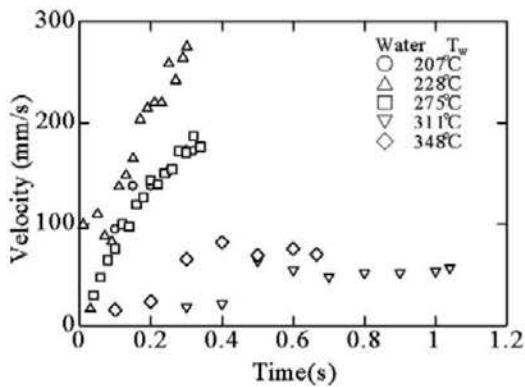


Fig.5 Velocity change of water droplets with different temperature

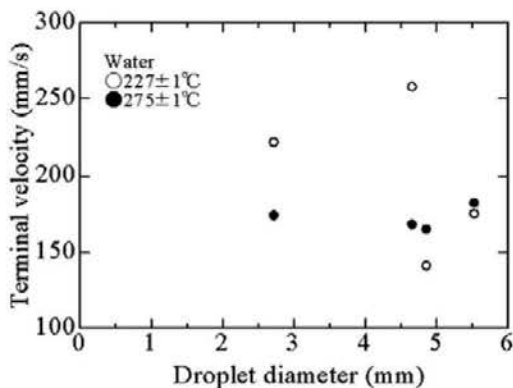


Fig.6 Terminal velocity of water droplets for different diameter

4. 移動モデル

4.1 接触長さを定数としたモデル

H.Linke et al.⁽³⁾は、非対称面上でのライデンフロスト液滴を移動させる駆動力として、液滴と伝熱面間に形成される蒸気膜内の圧力差に起因する蒸気の流動に伴う粘性力であるとし、液滴底部の曲率から推定している。また、蒸気膜厚さは写真から実験的に求めている。

これに対して、本モデルでは、蒸発を考慮して蒸気膜内の圧力分布を求め、蒸気膜厚さ δ は一樣と仮定し Biance ら⁽⁵⁾の式または Wachters ら⁽⁶⁾の式から計算した。

解析にあたっては以下の仮定を設けた。

- (1) 液滴底面と向かい合うラチェット面間に形成される蒸気膜厚さは一樣とする。
- (2) 蒸気膜内の蒸気の流れは液滴の進行方向のみの1次元とする。
- (3) 蒸気膜内の流れは層流で、蒸気の慣性項は省略する。
- (4) 液滴の温度は飽和温度 T_{sat} とし、蒸気の物性値はラチェット面温度 T_w との平均温度における値とする。
- (5) ラチェット面からの伝熱は蒸気膜を通しての熱伝導のみとして、底面以外からの蒸発は考えない。

液滴底部と向かい合うラチェット面間に形成される蒸気流の運動量の式、連続の式、エネルギー式は、それぞれ式(1)～(3)となり、境界条件は式(4)

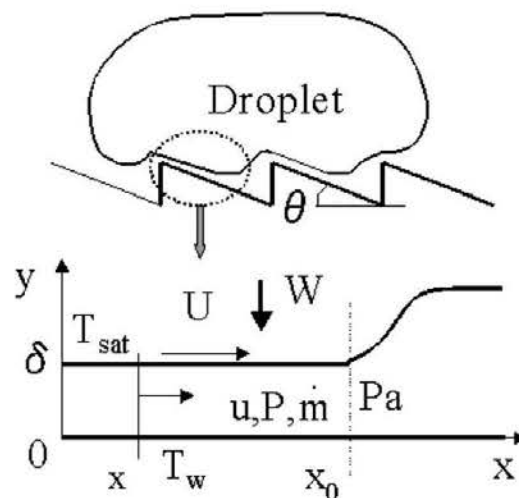


Fig.7 Analytical model

$$\frac{d^2u}{dx^2} = \frac{1}{\mu} \frac{dP}{dx} \quad (1)$$

$$\dot{m} = \rho_v \int_0^\delta u dy \quad (2)$$

$$q = \frac{k}{\delta} (T_w - T_{sat}) \quad (3)$$

$$y=0 \quad u=0 \quad T=T_w \quad (4)$$

$$y=\delta \quad u=U \quad T=T_{sat} \quad (5)$$

$$x=x_0 \quad P=P_a \quad (6)$$

～(6)とする．図7に移動モデルを示す．

式中の $\dot{m}$ は蒸気流量， P_a は大気圧， ρ_v ， μ ， k は，それぞれ，蒸気の密度，粘性係数，熱伝導率， x_0 は接触長さである．以上の式から，蒸気膜内の速度分布，蒸気膜内の圧力分布は式(7)，(8)となる．

さらに，液滴重力 W の釣り合い式と液滴底部の気液界面でのエネルギーの釣り合い式から，移動速度 U は式(9)となる．

$$u = \frac{U(\delta-y)}{\delta} - \frac{y(\delta-y)}{2\mu_v} \frac{dp}{dx} \quad (7)$$

$$P - P_a = \frac{6\mu_v}{\delta^2} (x - x_0) \left\{ U - \frac{\omega}{\delta} (x + x_0) \right\} \quad (8)$$

$$U = \frac{4x_0 k (T_w - T_{sat})}{3\delta^2 \rho_v h_{fg}} - \frac{W}{3\mu} \left(\frac{\delta}{x_0} \right)^2 \quad (9)$$

図8に計算例を実験値とあわせて示す．各液体の x_0 は，温度によらず一定とし，水，エタノール，アセトンで，それぞれ 0.695, 0.775, 0.985mm とした．

終端速度の実験値は，ライデンフロスト温度付近でもっとも大きい．最高速度は，水で約250mm/s，エタノールとアセトンは，水より遅く200mm/sに達しないことが分かる．安定な膜沸騰域では，終端速度の計算値と実験値の大きさは，概ね一致していると見なせる．しかし，実験値は加熱面温度の増加に対して，減少する傾向がある．一方，計

算値では，温度ともに増加する傾向を示し，両者の傾向は一致していない．このことから， x_0 は加熱面温度とも変化すると推定される．

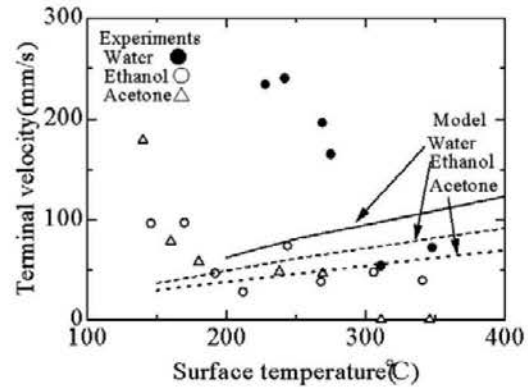


Fig.8 Measured and calculated terminal velocity of liquid droplets

4.2 接触長さを解析したモデル

次に，接触長さを計算したモデルを作成した．

接触長さ x_0 は図9を用いて説明する． x_0 から L' の範囲において y 方向の力の釣り合いを考えると，表面張力＝液滴にかかる重力となる．

$$\sigma \sin \beta = (L' - x_0) \rho_l g \left(\frac{H'}{2} + \frac{t}{\cos \theta} \right) \quad (10)$$

x_0 について解くと次式となる．

$$x_0 = L' - \frac{\sigma \sin \beta}{\left(\frac{H'}{2} + \frac{t}{\cos \theta} \right) \rho_l g} \quad (11)$$

ここで，角度 β (図9参照) は次式で表せる．

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{H'}{L' - x_0} \right) \quad (12)$$

接触長さ x_0 は滑らかに推移していくため，実際に適用するためには，補正について考える必要がある．

本報告では，次式と仮定する．

$$\dot{x}_0 = C x_0 \quad (13)$$

ここで, C は液滴の曲線部を考慮した補正係数で, 本計算では $C=0.85$ とした.

このモデルに基づいた計算結果をエタノールの場合について, 実験結果とともに図10に示した. 終端速度の値は実験値の範囲であるが, 計算結果の温度に対する傾向に変化はみられない. 定量的な原因の究明はできていないが, 解析に当たっての仮定に無理があることが予想される. 特に, 1次元の流れの仮定にたいして, 2次元の流れによる解析が望まれるが, 今後の課題である.

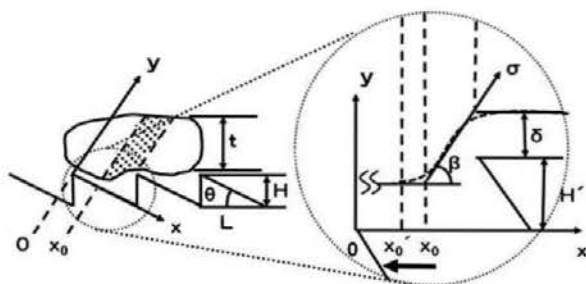


Fig.9 Analytical model to calculate contact length

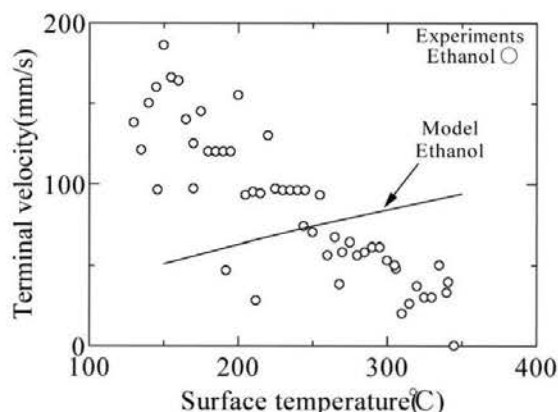


Fig.10 Modified calculated terminal velocity for Ethanol droplet compare to experimental results

5. まとめ

ノコギリ刃状の表面形状の加工を施した金属面を加熱し, ライデンフロスト温度以上の高温面に液滴を滴下し, 1方向にのみ運動する液滴の挙動の観察を行った. さらに, 移動モデルを提案して実験値と比較して以下の結果を得た.

- (1) 滴下された液滴は形状を変えながら1方向に移動する.
- (2) 安定した膜沸騰領域では水, アセトン, エタノールの終端速度に, 顕著な差は見られない.
- (3) ライデンフロスト点近くで終端速度が最も大きくなり, 加熱面温度の増加とともに終端速度が減少する.
- (4) 提案した移動モデルの計算値は蒸気膜厚さと接触長さに強く依存し, あらかじめ計算して求めた蒸気膜厚さを用い, 接触長さ一定とした場合, 接触長さを解析した場合とも, 計算値は実験値と温度に対して逆の傾向となり, さらなるモデルの改良が必要である.

参考文献

- (1) 山田 亮: 単分子膜の電気化学反応によるぬれ制御と液滴輸送, 表面技術, 58-12(2007),785.
- (2) Y.T.Tseng, F.G. Tseng, Y.F. Chen, and C.C. Chieng: Fundamental studies on micro-droplet movement by Marangoni and capillary effects, Sensors and Actuators A 114(2004) 292-301.
- (3) H. Linke, B.J. Alemán, L.D. Melling, M.J. Taormina, M.J. Francis, C.C. Dow-Hygelund, V. Narayanan, R.P. Taylor, and A.Stout: Self-Propelled Leidenfrost Droplets, Physical Review Letters,96,154502(2006).
- (4) M.Gunji and M.Washizu: Self-propulsion of a water droplet in an electric field, Journal of Physics D: Applied Physics.38(2005)2417-2423.
- (5) A.L.Biance, C. Clanet, and D. Quéré: Leidenfrost drops, Physics of Fluids,15-6(2003) 1632.
- (6) L.H. Wachters and N.A.J. Westerling: The heat transfer from a hot wall to impinging water drops in the spheroidal state, Chemical Engineering Science. 21 (1966), 923.

[受理年月日 2010年9月22日]

