

## ぬれにくい傾斜平面上の単一離脱液滴の挙動

中田 敏夫 細川 力\* 熊丸 博滋\*

Behavior of a Departing Drop on an Inclined Un-wettable Flat Plate

Toshio NAKATA, Tsutomu HOSOKAWA and Hiroshige KUMAMARU

On dropwise condensation, it has been well known that the behavior of the condensible droplets on a condensing surface influence the heat transfer considerably. Therefore, it is important the single droplet at rest on a flat plate (teflon plate) is known what behavior of itself. We estimate the diameter of the departing single droplet observed by using CCD camera. As a result, it become clear relationships between the diameter of the droplet and the inclined angle the plate.

## 1. 緒言

近年エネルギー消費の増大により、地球の温暖化や公害が問題になり、国際的にも大変な関心が高まっている。したがって工業上、省エネルギー、省資源の立場より、エネルギー機器の一つである凝縮器、蒸発器などに見られる伝熱面上で、凝縮現象などを伴う熱交換器の性能を高めることは重要な一つの要素である。

工業的な面では、凝縮には膜状凝縮と滴状凝縮がある。膜状凝縮は、凝縮液が冷却面をぬらす場合に、凝縮液が面上に薄膜を形成し、重力や外力により面上から流れ落ちる現象である。一方、滴状凝縮は、凝縮液が冷却面をぬらさない場合に、凝縮液は表面張力によって切り欠きの球状の液滴となり面上に付着し、引き続き起こる凝縮による液滴の成長や、付近の液滴との合体で液滴は大きくなり、ある大きさで外力が付着力よりも大きくなって、面上から落ちる現象である。

滴状凝縮における離脱滴は、下部伝熱面上を落下する際に、伝熱面の掃除による伝熱促進と、伝熱面の被覆による伝熱妨害の2つの相反する作用がある。これらの作用による滴状凝縮熱伝達率は膜状凝縮の場合と比べて高い値を示すことは明らかにされている。滴状凝縮現象は膜状凝縮に比べてそのメカニズムは複雑であるが、その熱伝達に影響を与える因子も今日明らかにされつつある。それらの因子の中で、円管における液滴の挙動については、細川ら<sup>(1)~(3)</sup>や河合ら<sup>(4),(5)</sup>の研究がある。一方、液滴の形状については、大気中における静止滴の2次元

断面形状を対象にした高玉によるぬれの研究<sup>(6)</sup>や筆者らの研究<sup>(7)</sup>がある。しかし、傾斜伝熱面による研究<sup>(8)</sup>はほとんど見あたらない。そこで本研究は、比較的広い伝熱面を対象にして、大気中において、ぬれにくい平板の傾斜角度を変化させて平板上の既知質量の単一液滴の離脱に関して調べる。

## 2. 液滴と表面との間の付着力の関係

図1は、蒸気が水平面上に凝縮している状態を示している。空間内に固相、液相、気相が共存し、これらの中に固相-液相、固相-気相、気相-液相の界面が形成される。いま、固相-液相の界面エネルギーを $\sigma_1$ 、気相-液相の界面エネルギーを $\sigma_2$ 、固相-気相の界面エネルギーを $\sigma_3$ とする。水平面表面がぬれない場合には、次のヤングの式が成り立つ。

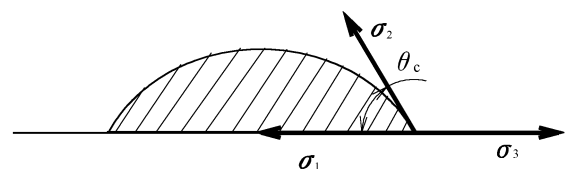


図1 水平面上の界面エネルギー

$$\sigma_3 - \sigma_1 = \sigma_2 \cos \theta_c \quad (1)$$

一方、図2のように液滴と固体平面が接している場合、固相-液相の界面エネルギー $\sigma_1$ が働いている。図3の

ように液滴と平面が離れている場合には、気相-液相の界面エネルギー $\sigma_2$ 、固相-気相の界面エネルギー $\sigma_3$ が働いている。このように考えると、付着力 $F$ は

$$F = \sigma_3 + \sigma_2 - \sigma_1 \tag{2}$$

で表される。この式に式(1)を代入すると、

$$F = \sigma_2(1 + \cos\theta_c) \tag{3}$$

となる。ただし、 $\theta_c$ は接触角である。式(3)より、付着力は表面張力と接触角との関係で表されることがわかる。

### 3. 実験装置および実験方法

図4に実験装置を示す。ぬれにくい固体表面として直径100mm、厚さ15mmのテフロン板④を支持台上に固定した。またこの板上には固体表面上の液滴①の垂直方向と水平方向の映像がCCDカメラ⑦と同時に撮影できるようにミラー③を、液滴の近傍には寸法の基準としてスケールを取り付けている。撮影用の500Wレフランプ⑥に

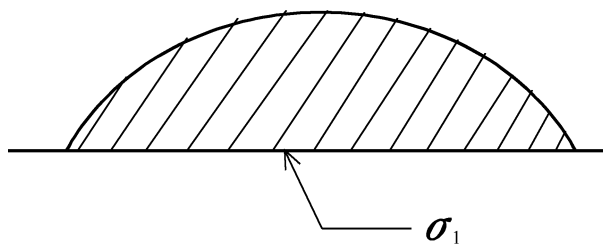


図2 液滴と水平面間の界面エネルギー

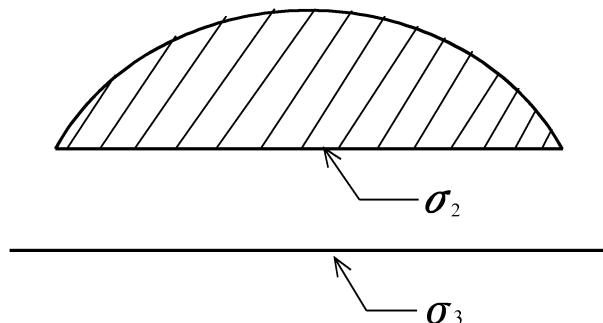


図3 液滴と平面が離れている界面エネルギー

より液滴の温度が上昇し、液滴の表面張力に影響を与えることが考えられるので、液滴の近傍にCA熱電対を取り付け温度の測定も行った。実験中、これによる影響が

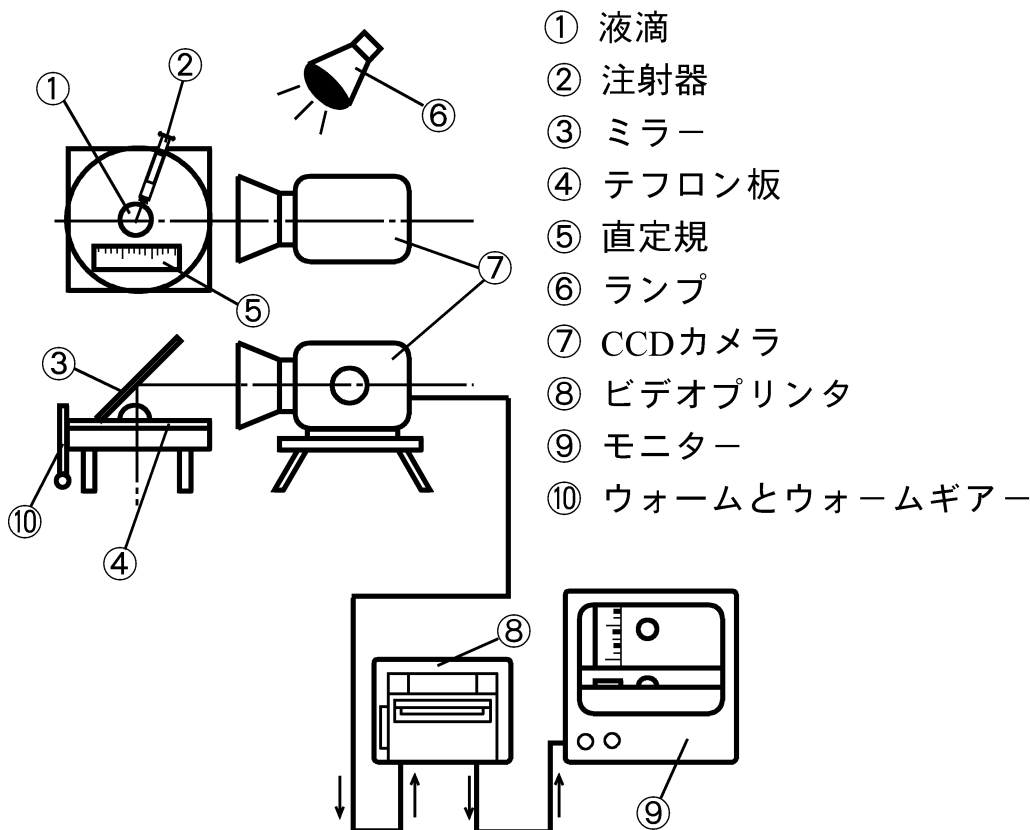


図4 実験装置

ないことを確認した。これらはウォームとウォームホイール⑩によってスムーズに傾斜の角度を変えることができる。テフロン板の傾斜は分度器で測定した。液滴が外気流による影響を受けることを防止するため、テフロン板や支持台などは透明なアクリルのケースで囲った。なお、CCDカメラによる撮影状態はモニタ⑨で確認でき、撮影された映像からビデオプリンタ⑧を用いて各液滴の静止画を取り出せる。

実験は大気中で気温15℃、蒸留水の温度約10℃のもとで行った。水平なテフロン板上に既知質量の液滴を飛散しないように慎重に滴下する。テフロン板をウォームとウォームホイールにより所定の角度まで傾斜させて、液滴が表面より離脱しなければ、テフロン板を水平に戻し、注射器で1滴慎重に滴下し液滴を成長させ、液滴がテフロン板表面より離脱するまで繰り返し行った。離脱した液滴の径すなわち離脱液滴径 $D$ は垂直方向の静止画を中心角45degごとに等分した4カ所の $D$ を測定し、平均値として求めた。

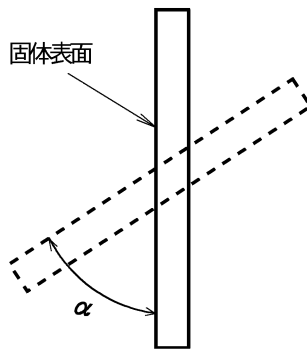


図5 固体表面の傾斜

テフロン板の傾斜角度 $\alpha$ は、図5に示すように固体表面が垂直の状態を $\alpha = 0\text{deg}$ として、それとのなす角度を $\alpha$ とする。

実験は傾斜角度を15deg間隔で0degから75degまで変化させて行った。

注射器から試験面上に滴下させて作られた液滴の質量は、あらかじめ注射器よりの滴下数と質量の関係を、感度0.1mgの直示天秤により求められた。図6は蒸留水における液滴の質量 $M$ と滴下数 $n$ の関係を表している。この結果、正確に滴下し、滴を成長させることが確認できた。

図7はテフロン板の表面を触針式表面粗さ計(サーフコム1400A)で測定して得られた表面粗さの結果を示す。 $L$ は触針の移動距離であり、平均粗さ $R_a$ は $0.465\mu\text{m}$ であった。

蒸留水の表面張力 $\sigma$ はジョリーのバネ秤で測定した

結果、 $72.1\text{mN/m}$ であり、密度 $\rho$ は $0.999\text{g/cm}^3$ 、接触角 $\theta_c$ は $106\text{deg}$ である。

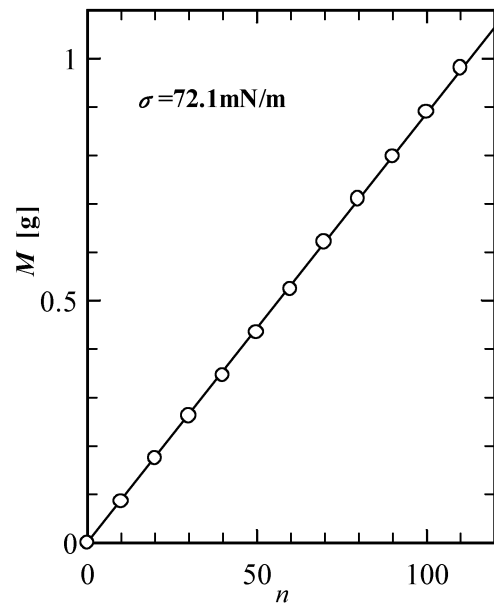


図6 液滴の滴下数と質量の関係

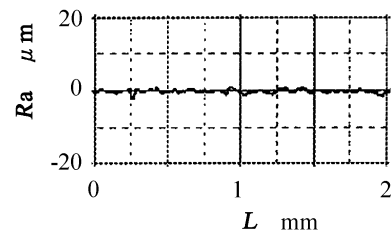


図7 テフロン板の表面粗さ

#### 4 実験結果および考察

図8は離脱液滴径の増加割合 $D/D_0$ と傾斜角 $\alpha$ の関係を示したものである。 $D_0$ はテフロン板を垂直に支持した場合( $\alpha = 0$ )の離脱液滴の直径である。 $\alpha$ が大きくなるとともに $D/D_0$ は増加している。これは $\alpha$ が増すほど、液滴にかかる重力による固定表面に垂直方向の力が大きくなるためであると考えられる。このために、液滴と固体表面間の付着力が増加するために、離脱液滴が大きくなったと考える。

図9はテフロン板の傾斜角度を変化させた場合の離脱を始める液滴の形状について、静止画から固体表面の鉛直方向と水平方向から見た形状をトレースしたものである。傾斜角度 $\alpha$ が大きくなるにしたがって、液滴は大きくなるが、テフロン板との接触角に変化は見られなかった。

図10は離脱液滴の質量 $M/M_0$ と傾斜角 $\alpha$ の関係を示したものである。 $\alpha$ が大きくなるとともに、 $M/M_0$ は液滴径と同様に増加している。

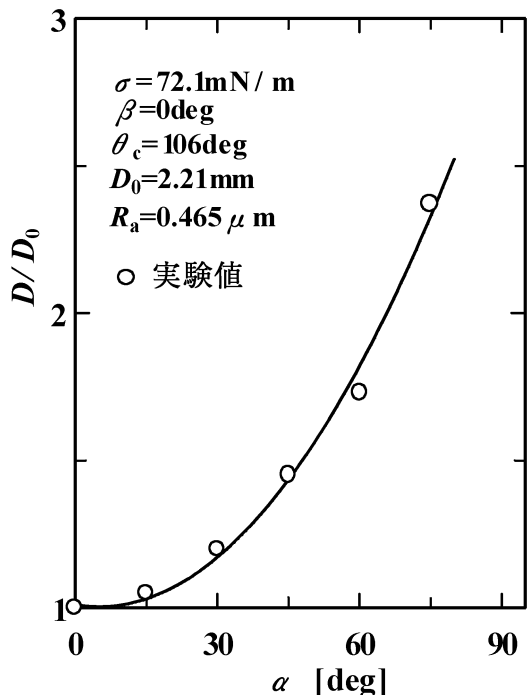


図8 D/D<sub>0</sub>とαの関係

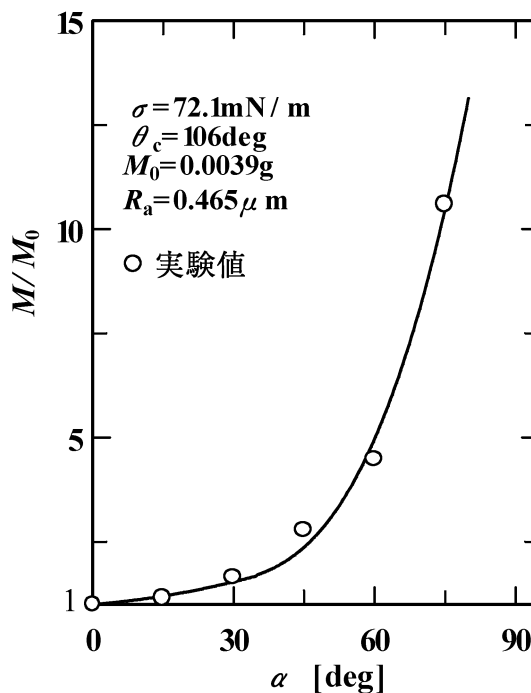


図10 M/M<sub>0</sub>と傾斜角αの関係

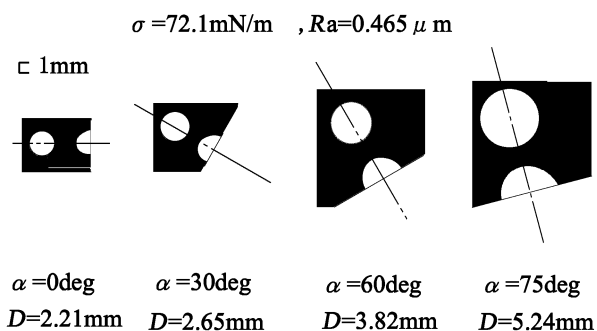


図9 傾斜角度による液滴の形状

参考文献

- 1) 細川ほか2名, 機論, 58-546, B(1992-2), p.535.
- 2) 細川ほか3名, 機論, 53-486, B(1987-2), p.549.
- 3) 細川ほか2名, 機論, 50-456, B(1984-8), p.1981.
- 4) 河合ほか2名, 機論, 31-229, (1965-9), p.1355.
- 5) 河合, 機論, 32-233, (1966-1), p.107.
- 6) 高玉, 機論, 17-60, (1951), p.170.
- 7) 中田ほか3名, 混相流, 10-1 (1996), p.60.
- 8) 勝田, 機械の研究, 21 (1969), p.111.

4. 結 言

本実験範囲において、固体表面の傾斜角が小さく、すなわち固体表面が垂直になるほど、重力による力が液滴とテフロン板との間に働く付着力よりも大きくなり、テフロン板表面から離脱する液滴径は小さくなることがわかった。この結果から、滴状凝縮熱伝達では、凝縮板が垂直になるほど、凝縮板表面から落下する凝縮液滴径は小さくなるとおもわれる。このことから、付着凝縮滴の伝熱面を被覆する面積が小さくなり、伝熱促進を図ることができると考えられる。