鉛直細管外面における水蒸気の凝縮現象の観測*

宇高 義郎^{*1} 根上 智幸^{*2}, 園田 英之^{*3}

Observation of Steam Condensation on Thin Vertical Tubes

Yoshio UTAKA^{*4}, Tomoyuki NEGAMI and Hideyuki SONODA^{**} Division of Systems Research, Yokohama National University,
79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 240-8501 Japan

The observation and the measurement of the steam condensation phenomena on the wetted outer surface of the thin tubes arranged vertically were carried out. It was clarified that the condensate modes were affected by the surface tension of the condensate and the wavy shape of the condensate surface appeared due to the surface tension instability for thin tubes. That is, while the smooth surfaces of condensate with uniform thickness were observed for the tube of 1 mm in outer diameter, the wavy shape with non-uniform thickness appeared for 0.5 and 0.4 mm in diameter. The wavy shape became remarkable with decrease of the tube diameter. Although the wave lengths of the instability under low condensation rate almost coincided with the analysis of Rayleigh for free liquid jet, they increased with increases of the condensation rate and the axial length from the top.

Key Words: Surface Tension, Rayleigh Instability, Wave Length, Phase Change, Condensation, Condensate Mode, Heat Transfer, Steam

1. はじめに

本研究は表面張力効果が顕著に作用する系である極細管外面における蒸気の膜状凝縮現象について実験的に検討することを目的としている。近年、比較的微細な構造の機器の利用が重要になってきているが、管直径の小さい系における凝縮液形態およびそれに伴う熱の移動特性などは十分に明らかにされていない。一般に、蒸気の凝縮など液膜が主要な役割をもつ現象においては、伝熱面の形状および寸法の微細化に依存して表面張力効果が増大し、通常重力場においては表面張力と重力の双方の影響を受けることになる。従来より Rayleigh による液体のジェットの解析⁽¹⁾で知られるように、自由液面をもつ円柱状の液体は形状的に安定ではなく、表面形状が軸方向に三角関数状の凹凸を有する形状に変化し、また条件により液滴に分裂する。それらは直径に比例する波長を有することが明らかにされている。また、高松ら⁽²⁾により、微小重力場における管内液膜挙動の実験と解析が行われており、Rayleigh の解析と類似した不安定波長に関する結果が得られている。Goren⁽³⁾は管の内外面上の液膜の不安

定について、液体の物性あるいは初期液膜厚さ等の影響について理論および実験的な研究を行っている。また、Nozaki et al.⁽⁴⁾は、シリコン油を用いて懸垂ワイヤに沿う液体の流下および伝熱特性に関する実験を行った。ワイヤ直径と液体流量を変化させて測定を行い、液体の流下挙動パターンなどについて検討している。

本研究の対象とする鉛直に配置された管外凝縮現象においては、管直径が減少することに伴って半径方向に作用する表面張力の影響が強まり、凝縮液表面で生じる表面張力不安定により凝縮液の形態の変化が予想される。一方、凝縮を伴うことにより、伝熱速度にほぼ比例した凝縮液量の変化が生じ、さらに、流下方向に凝縮液の流下量が增大してゆくことになる。本研究では、このような凝縮を伴う熱伝達系の微細寸法化に伴う凝縮液形態に関する基礎的な知見を得ることを目的とし、ステンレススチール製の極細管(外直径 1.0 mm, 0.6 mm, 0.5 mm および 0.4 mm)内に冷却水を通すことにより、管外表面に周囲の水蒸気を凝縮させる。特に、表面張力による不安定により生じる凝縮液の形状特性およびその変化速度に影響する要因として、熱流束により決められる凝縮速度、および管軸下方への凝縮液流下方向距離の影響に関する実験的な検討を行う。

2. 実験装置および方法

図 1 (a) (b) に凝縮用実験系全体および凝縮室の概略

* 原稿受付 2003 年 5 月 14 日。

^{*1} 正員、横浜国立大学大学院工学研究院(〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)。

^{*2} 日本ヒューレットパッカード(〒102-0076 東京都千代田区五番町 7)。

^{*3} (株)日立ホーム & ライフソリューション(〒329-4493 栃木県下都賀郡大平町富田 800)。

E-mail: utaka@ynu.ac.jp

図を示した。実験の主要部分は内直径 64 mm、内高さ 30 mm の黄銅製の凝縮室からなる。凝縮室上下底面の中央部分に渡された外径 1.0, 0.6, 0.5 または 0.4 mm の水蒸気の凝縮用のステンレス製細管が鉛直に取り付けられ、細管の上部と下部が、冷却水の入り口および出口にそれぞれ接続されている。冷却には水道水を用い、タンク内および冷却水入り口部に設けられた加熱器により水温調節されることによって熱流束を変化させる。精密ポンプにより加圧され、細管内を上方から下方へ流れる。冷却水の出入口に示差熱電対を取り付け、冷却水の温度上昇を求めるとともに、出口側で冷却水流量を測定した。なお、冷却水流量が少ないことから、細管出入口付近の水温変化が大きかった。水温上昇の測定精度を高めるため、熱電対接点を管出入口側から管内に挿入し測温するようにした。それらから、細管外面を通過する平均熱流束を求めた。凝縮用の蒸気には水蒸気を用いた。電熱ヒーター加熱により蒸気発生器から供給される水蒸気は、凝縮室上底面の端部付近の流入口から鉛直下向きに流入し、下底面の流出口を経て、凝縮器にて凝縮する構造となっており、凝縮用細管に蒸気の流れが直接当たりにくいように配慮した。凝縮器出口側は大気に開放されており、

実験はほぼ大気圧状態で行われた。なお、長時間水蒸気を凝縮室に流入させ続けることにより不凝縮気体を追い出すようにした。

水の表面張力が比較的大きいため一般に金属面上における水蒸気の凝縮実験においては完全な膜状状態にはなりにくく、液体にぬれる面を実現することが難しい場合が多い。本研究においては、細管に酸化チタンの超親水性コート剤を塗布し、表面のぬれ性を増大させ膜状凝縮の生起する条件を実現した。

凝縮室側面には 4 カ所のガラス窓が設置されており、それらを観察用および照明光入射用に使い分けた。凝縮様相の観測には、作動距離の大きい実体顕微鏡を通して CCD カメラあるいは高速デジタルカメラによる撮影を用いた。

3. 結果および考察

3. 1 ぬれ面を実現するための表面処理

図 2(a) (b) に外径が 1.0 mm のステンレス細管における表面の処理を行っていない場合と処理表面の場合を比較して示した。図 2(a) の細管に表面処理を行っていない場合の凝縮の様子では、凝縮水が滴と膜の混合凝縮状態を示していることがわかる。このように、水蒸気の膜状凝縮実験の行う場合には、表面のぬれ性に注意する必要があることが確認される。図 2(b) は、細管に酸化チタン製の超親水コート剤を塗布した場合の凝縮様相を示しており平滑な液膜を持つ膜状凝縮が実現されていることがわかる。なお、本実験で用いたコート剤は紫外線を照射することにより親水性が得られるため、実験前にコート剤に十分紫外線を当てた後に測定を行うようにした。他の、ステンレス細管についても同様の処理をして用いた。

3. 2 凝縮様相の観察結果 (管直径の影響)

図 3, 4 および 5 は、管外径 D がそれぞれ 0.4, 0.5 お

(a) Experimental system

Fig.1 Experimental apparatus

(a) Non-treated surface (b) Treated surface

Fig.2 Aspect of condensate for $D = 1.0$ mm

よび 0.6 mm における凝縮液の様子を示している。それぞれの図において、図の (a) および (b) は異なる熱流束の場合であり、それぞれ測定範囲の低熱流束と高熱流束に対応している。図 2(b) に示した $D = 1.0$ mm の場合には一様な厚さの平滑な液膜が形成されたのに対して、これらのいずれの場合にも、凝縮液形状は軸方向にほぼ周期的な凹凸を持つなめらかなこぶ状の波形を描いていることが確認される。なお、管外径 $D = 1.0$ mm のときは、熱流束を変化させても凝縮液形態は変化せず、凝縮液膜は図 2(b) と同様の平滑形状を示した。また、それぞれ図 3～5 のそれぞれの (a) と (b) の比較からみられるように、熱流束の増大によりこぶ状の液膜部分の厚さが増大するとともに、波の間隔が増大していることがわかる。

図 6 は管軸方向の変化をみるために、 $D = 0.5$ mm のときの比較的長い部分の全体的な凝縮の様子を示している。画像の上端が軸方向位置 $z = 10$ mm、下端が 20 mm を示している。このような凝縮を伴う系においては軸方向位置の増大にともなってこぶ間隔すなわち液膜の波長が増加してゆくことがわかる。

3・3 凝縮特性

前述のように、細管直径が 1.0 mm の場合には、熱流束の大きさに関わらず、本実験範囲では厚さの一定な液膜が得られたのに対して、0.6 ～ 0.4 mm の場合には液膜厚さが周期的な波状を示した。ここでは、それらの凝縮を伴う細管上の凝縮液形態に関する特性を

知るため、以上に示した画像例などから特性値を読みとった。はじめに、凝縮液特性を表す諸量に関する定義を図 7 に示した。ここで、 λ を波長（こぶ間隔）、 $a_{\max}$ を管中心からの極大液膜半径、 $a_{\min}$ を管中心からの極小液膜半径、 a をそれらの平均液膜半径、 δ を液膜厚さとし、また管の上端からの軸方向位置を z とする。

3・3・1 熱流束変化に対する諸量の特性

図 8～図 10 に熱流束の変化に対する諸特性量の変化を示した。 $D = 0.6, 0.5, 0.4$ mm の 3 種類の管直径の場合について、細管長さ 30 mm のほぼ中央 $z = 15$ mm における値を中心に測定し、さらに上流側の特性との比較のため管直径 $D = 0.5$ mm について $z = 7$ mm の値を測定した。

図 8 は、凝縮液膜の軸方向厚さ変化の無次元波長 $\lambda/2a$ の熱流束に対する変化を表している。図中の実線および波線はそれぞれ、式(1)で表される Rayleigh⁽¹⁾ の解析値と式(2)の高松ら⁽²⁾ の不安定波長に関する解析値を表している。ただし、これらは横軸の値とは無関係である。

$$\lambda/(2a) = 4.51 \quad (1)$$

$$\lambda/(2a) = 4.45 \quad (2)$$

本研究の凝縮液膜の流下する系では細管に沿う液膜流が形成されるため、重力場における Rayleigh の液体ジェット系、あるいは高松らの無重力場における管内面に付着した液膜の不安定波長に関する系と類似し

ているものと考えられる。 $z = 15 \text{ mm}$ の場合には、管直径に関わらず、熱流束の低い領域においてはこれらの解析値に値が接近してゆき、細管直径が大きくなるほど、両者の値に近いことがわかる。さらに、 $z = 7 \text{ mm}$ では、低熱流束領域で Rayleigh の値にほとんど一致した。いずれの管直径および軸方向位置においても、熱流束の増加にしたがって類似な傾向を示し、波長は単調に増大した。本測定最大の熱流束付近 ($150 \sim 200 \text{ kW/m}^2$) では、波長が約 2 倍まで増大した。後述のように、熱流束（凝縮液量）の増加に従って波の流下速度は増大し、その結果として、凹凸の間隔が広がってゆくことになる。

図 9 は、細管半径で規格化した液膜の最大厚さの熱流束に対する変化を表している。いずれの管直径においても、低熱流束領域では厚さの増加割合は大きい。例えば $z = 15 \text{ mm}$ における $D = 0.4 \text{ mm}$ の場合、熱流束が 50 kW/m^2 前後で勾配が変化しており、熱流束値がある程度より大きい領域では熱流束の増加に伴って最大液膜厚さの増加率は鈍化していることがわかる。ま

た、 $D = 0.5$ における $z = 7 \text{ mm}$ と $z = 15 \text{ mm}$ ($\diamond$ と $\triangle$) の比較から、上流側ほど最大液膜厚さの小さいことが確認される。これらをまとめて、液膜厚さの小さい条件になるほど、低熱流束領域の急速な液膜厚さの増加がみられなくなり、直線的な新增傾向を示すことがわかる。

図 10 は、波の移動速度の熱流束に対する変化を示している。ここで、波の速度としては液膜のこぶの位置変化を測定したものである。いずれの細管直径においても、熱流束の増加にともなって波の流下速度は増大しているが、これは熱流束の増加に伴う液膜厚さの増大によって流下速度が大きくなったものと考えられる。しかし、その変化傾向は 2 種類に大別することができる。第 1 のグループは、管直径が小さくかつ位置の大きい場合であり、 $D = 0.5, 0.4$ の $z = 15 \text{ mm}$ が相当する。この場合には、比較的熱流束の低い領域では増加率が大きく徐々に熱流束の増加とともに増加率が小さくなっていく傾向を示している。 $D = 0.6 \text{ mm}$, $z = 15 \text{ mm}$ および $D = 0.5 \text{ mm}$, $z = 7 \text{ mm}$ の第 2 のグループ

Fig. 7 Definition of physical quantities

Fig. 9 Maximum film thickness and heat flux

Fig. 8 Wavelength and heat flux

Fig. 10 Wave velocity and heat flux

においては、熱流束に対して直線的な変化傾向を持っている。これらの傾向は、図9の液膜厚さ変化と対応しており、液膜厚さの小さい場合には波の移動速度およびその変化率が低く、逆に波高が増加すると重力により加速され流下速度の増加率が高まるが、その増加割合には限度があることを示している。

なお、図8において、管径および位置の増加に対して波長が増大することは、図9の液膜厚さおよび図10の流下速度の増加に対応していることがわかる。

3. 3. 2 軸方向位置に対する諸量の変化特性

図11～図13に軸方向位置の変化に対する諸特性量の変化を示した。

図11は軸方向位置変化に対する波長の変化を、 $D = 0.5 \text{ mm}$ の本実験範囲における中程度の熱流束より低い領域について画像から読みとったものである。いずれの熱流束においても、熱流束の増大とともに波長は増大していくが、特に熱流束の低い $q = 31 \text{ kW/m}^2$ の場合には位置にほとんど関係なく一定の値となっている。また、 $z = 7 \text{ mm}$ 前後の上流域ではいずれの熱流束でも、Rayleighの値にほとんど一致していることがわかる。ほぼこれらの傾向は、図8において示した

Fig.11 Wavelength and position

Fig.12 Maximum condensate thickness and position

ように、低熱流束・小流下方向位置では凝縮量が低いため液流下の影響が小さいためと考えられる。

図12は無次元液膜厚さの位置変化を示している。いずれの熱流束においても、位置の減少にともなって液膜厚さは直線的に減少した。各熱流束ごとに当てはめた実線で示されている最小自乗法による直線はほぼ原点に向かっており、膜状凝縮の上流端部の液膜厚さが理論上ゼロであることと類似しているが、本研究の

(a) $D = 0.6 \text{ mm}$

(b) $D = 0.5 \text{ mm}$

(c) $D = 0.4 \text{ mm}$

Fig.13 Wave velocity and position

測定では詳細な議論は難しくさらに検討を必要とする。

図 13 (a) (b) (c) はそれぞれ細管直径 D が 0.6, 0.5 および 0.4 mm における波の移動速度を示している。図 13 (b) の $D = 0.5$ mm の場合には、特に流下方向の上流端付近まで測定している。熱流束の増加に伴い流下速度の増加がみられるとともに、いずれの熱流束においても位置の増加にしたがって流下速度は直線的に大きくなっていく様子が分かる。また、これらの測定点は概ね原点に向かっており、位置の減少に伴って速度がゼロに近づいていくことがわかる。それらの傾向は、図 9 および図 10 の結果と密接な関係をもっている。すなわち、熱流束あるいは頂部からの位置の増加により波の振幅部分にあたる最大液膜厚さが増加することによって流下速度は増大する。そのため、図 10 に示されるように熱流束の増加によって流下速度の増大がみられ、その結果、図 8 に示された熱流束の増加に伴う波長の増加傾向が現れる。また、位置の増大によるそれも同時に現れていることになる。

以上から極細管外面の凝縮系においては、低凝縮速度に現れる Rayleigh 不安定が、凝縮速度の増加あるいは位置の増大による流下流量の増加に起因して、最大液膜厚さおよびその波長が増大することがわかった。

4. 結 論

凝縮を伴う熱伝達系の微細寸法化に伴う凝縮現象に関する基礎的な知見を得ることを目的とし、ステンレススチール製の極細管（外径 1.0, 0.6, 0.5 および 0.4 mm）の外表面に水蒸気を凝縮させるときの凝縮液の形態変化について検討した。特に表面張力による不安定に起因する凝縮液の形状およびその変化速度に影響する要因として、凝縮速度および流下方向位置の影響について実験的な検討を行い、以下の結果を得た。

- (1) 本研究の管直径のうち、1.0 mm の場合には、通常の平滑な表面を持つ膜状凝縮がみられたが、0.6 mm 以下では、表面張力不安定による凝縮液

膜厚さの不均一が生じ、こぶ状の凸部を有する波状の凝縮液形状が現れた。

- (2) 熱流束の小さい低凝縮速度の条件において、液膜の凹凸の波長は Rayleigh 不安定波長とほぼ一致した。熱流束の増大とともに波の振幅部分に相当する最大液膜厚さ、および波の移動速度は増加傾向を示した。
- (3) 上流端からの位置の影響については、上記の低熱流束の場合と類似して、上流付近位置では、不安定により生じた液膜の波長は Rayleigh 不安定波長とほぼ一致した。また、位置の増大とともに最大液膜厚さ、および波の移動速度は増加傾向を示した。
- (4) 上記 (3) および (4) の結果から、極細管外面の凝縮系においては、低凝縮速度に現れる Rayleigh 不安定から、凝縮速度の増加あるいは位置の増大による流下流量の増加に起因して、最大液膜厚さおよびその波長の増大への変化が生じることがわかった。

最後に、親水面を実現するための超親水性コート剤を提供いただいた東陶機器（株）に謝意を表する。また、実験に協力した元横浜国立大学学生諸江哲也君に謝意を表する。

文 献

- (1) Rayleigh, Lord, On the Instability of Jets, Proc. London Math. Soc., Vol. 10 (1878), pp. 4-13.
- (2) 高松洋, 藤井丕夫, 本田博司, 内山弘規, 微小重力下における環状液膜の安定性, 機論(B), Vol. 64, No. 619, (1998), pp. 904-909.
- (3) Goren, S.L., The Instability of an Annular Thread of Fluid, J. Fluid Mech., Vol. 12 (1962) pp. 309-319.
- (4) Nozaki, T., Kaji, N. and Mori, Y.H., Heat Transfer to a Liquid Flowing Down Vertical Wires Hanging in a Hot Gas Stream: an Experimental Study of a New Means of Thermal Energy Recovery, Proc. Eleventh Int. Heat Transfer Conf., Vol. 6, (1998) pp. 63-68.