

下端部に勾配を有する有限垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達の実験

豊田 香¹・岡本 卓也²

要旨：静止した大気圧下の水を用いて、アルミ製の下端部に勾配を有する有限垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達実験を行った。供試円柱の直径および高さは 32mm である。供試円柱を電気炉でおよそ 580℃ に加熱し、飽和水もしくはサブクール水に深さおよそ 100mm まで浸漬し冷却した。液体のサブクール度 ΔT_{sub} は 0K, 5K, 10K および 15K である。液体サブクール度が 15K 増加すると、膜沸騰熱伝達は熱流束で比較した場合およそ 105% 増加する。さらに、アルミ製の下端部に勾配を有する有限垂直円柱と水平の底面と上面を有する垂直円柱とを比較した場合、 $\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$ のとき、 $\Delta T_{\text{sat}}=350\text{K}$ 付近で両方とも同じ値を示すが、 $\Delta T_{\text{sub}}=15\text{K}$ のとき、下端部に勾配を有する有限垂直円柱はおおよそ 30% 高い値を示すことを明らかにした。

キーワード：膜沸騰, 垂直円柱, 勾配, 熱伝達

1. はじめに

三次元物体まわりの膜沸騰は金属の焼入れ、材料の製造工程、原子炉の炉心の緊急冷却等で生じる。液体中で冷却される 3 次元物体まわりの膜沸騰に関して、現象の観察や実験データの蓄積は伝熱のメカニズムを予測するために不可欠である。著者らはこれまでに同じ直径の有限垂直円柱まわりの膜沸騰における底面形状の影響を明らかにするために水平の底面、半球状の底面および円錐状の底面を有する有限垂直円柱の実験結果を比較し、水平の底面を有する有限垂直円柱においては、液体サブクール度が高い場合、円柱側面の下端部における蒸気膜厚さが薄くなり有限垂直円柱全体の伝熱に大きな影響を与えていることを明らかにした¹⁾。

本研究では、円柱側面の下端側の形状が円柱全体の膜沸騰熱伝達に及ぼす影響を調べることを目的に、アルミニウム製の下端部に勾配を有する有限垂直円柱に関して膜沸騰実験を行い、得られた現象写真、冷却曲線および沸騰曲線について報告する。

2. 実験装置および実験方法

Fig.1 は本研究で使用した実験装置の概略図である。装置は沸騰槽、供試円柱加熱装置、昇降装置、温度測定装置および沸騰現象観察装置で構成されている。沸騰槽は鉄製で 320mm(L)×320mm(W)×450mm(H) の大きさを有する容器である。沸騰槽の 2 つの側面および底面の中央部に沸騰現象の目視観察や写真およびビデオ撮影ができるように 3 つの観察窓が設けられている。

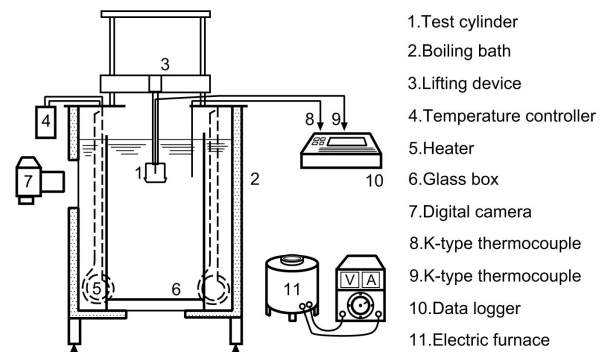


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

沸騰槽の側面にはバルク水 (大気圧下の水) 昇温用として 1kW 容量の加熱器を 2 個設置している。この加熱器で発生する気泡が供試円柱周囲のバルク水を乱さないように、沸騰槽の内側に透明なガラス箱 [200mm(L)×250mm(W)×400mm(H)] を設けて二重水槽にしている。実験中のバルク水の温度は温度制御装置によって一定に保たれている。Fig.2 は本実験で使用した下端部に勾配を有する有限垂直円柱の断面図を示したもので、 D は円柱の直径 ($D=32\text{mm}$)、 H は円柱の高さ ($H=32\text{mm}$)、 D_{TP} は勾配終端部の直径 ($D_{\text{TP}}=33\text{mm}$) および H_{TP} は勾配終端部の高さ ($H_{\text{TP}}=8\text{mm}$) である。供試円柱には、一般的に伝熱実験に使用される銀などに比べて安価で入手しやすいこと、電気炉で加熱中に酸化しにくいことからアルミニウム A5056 を使用した。供試円柱の冷却時の温度履歴は、円柱の中心部に円柱上面より 24mm の位置まで挿入されているシース径 1mm の K 型熱電対で測定される。円柱の温度はデータロガーにより 0.2 秒のサンプリング間隔で計測される。供試円柱は垂

1 舞鶴工業高等専門学校 機械工学科 准教授

2 舞鶴工業高等専門学校 専攻科 学生

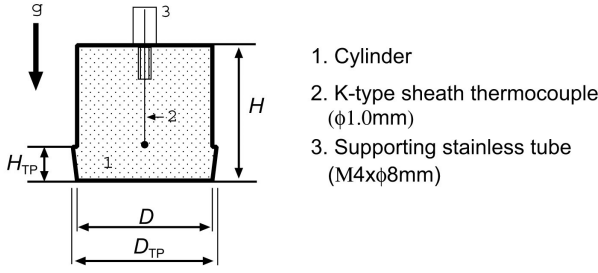


Fig. 2 Test Cylinder

直の姿勢で電気炉によって約 580 °C まで加熱された後、昇降装置を介して静止した大気圧下のバルク水の水面下約 100mm の深さまで浸漬され冷却される。冷却中の円柱まわりの沸騰の様相観察は目視、ビデオおよび写真撮影により行った。また、本実験では比較のために、アルミニウム製の水平の底面と上面を有する垂直円柱（直径 32mm、高さ 32mm）についても実験した。

3. 伝熱面温度と熱流束の測定

供試円柱の材質にはアルミニウムを使用しているが、膜沸騰時のビオー数が飽和膜沸騰では 0.027 以下、サブクール膜沸騰では 0.056 以下と小さいので、集中定数系の仮定は妥当であると考え、全表面平均の壁面熱流束 q は次式で与えられる。

$$q = -\rho c \frac{V}{A} \left(\frac{dT}{d\tau} \right) \quad (1)$$

$$A = \frac{\pi(D + D_{TP})}{2} \left\{ H_{TP}^2 + \left(\frac{D_{TP}}{2} - \frac{D}{2} \right)^2 \right\}^{1/2} + \frac{\pi D^2}{4} + \frac{\pi D_{TP}^2}{4} + \pi D(H - H_{TP}) \quad (2)$$

$$V = \frac{\pi H_{TP} (D^2 + D \cdot D_{TP} + D_{TP}^2)}{12} + \frac{\pi D^2}{4} (H - H_{TP}) \quad (3)$$

ここに、 A 、 V および $dT/d\tau$ はそれぞれ供試円柱の全伝熱面積、体積および冷却速度である。なお、 c は比熱、 ρ は密度であり、文献 2 を参考に温度依存性を考慮している。

本研究では膜沸騰下限界点を冷却速度 $dT/d\tau$ が最小となる点と定め、その時の過熱度 $\Delta T_{\min}$ と熱流束 $q_{\min}$ をそれぞれ次式のように評価する。

$$\Delta T_{\min} = (T - T_{\text{sat}}) \Big|_{\frac{dT}{d\tau} \Big|_{\min}} \quad (4)$$

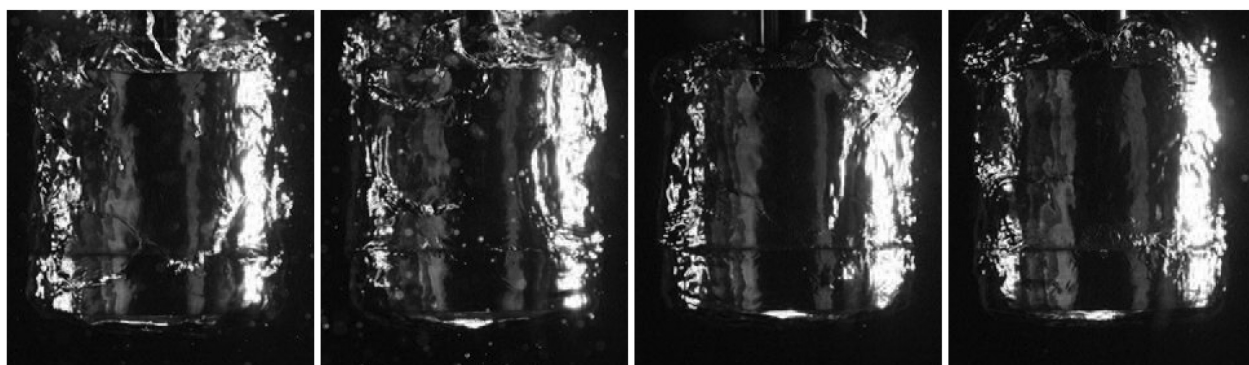
$$q_{\min} = -\rho c \frac{V}{A} \frac{dT}{d\tau} \Big|_{\min} \quad (5)$$

ここに、 T は伝熱面温度、 T_{sat} はバルク水の飽和温度である。

4. 膜沸騰の様相

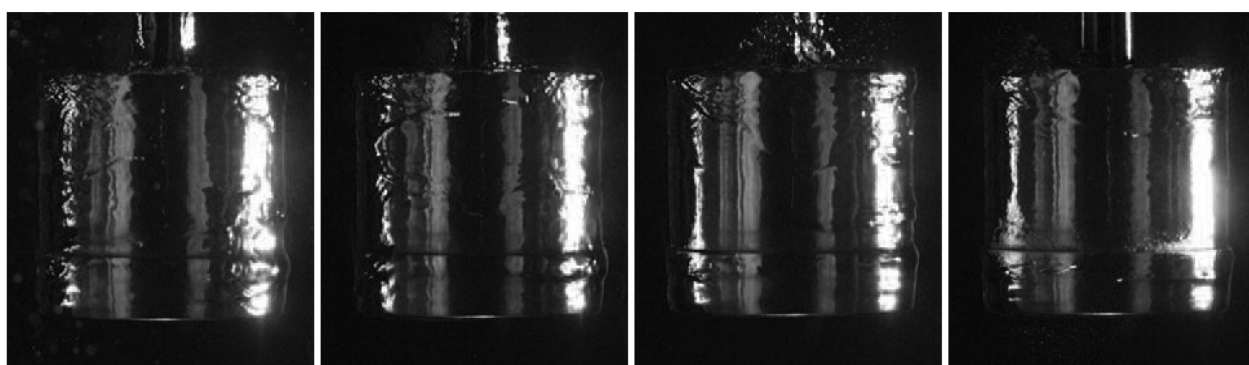
下端部に勾配を有する有限垂直円柱の表面に形成される蒸気膜の形成から崩壊に至る沸騰の様相をそれぞれ Fig.3 および Fig.4 に示す。また比較のために、水平の底面と上面を有する垂直円柱の表面に形成される蒸気膜の形成から崩壊に至る沸騰の様相を Fig.5 および Fig.6 に示す。水平の底面と上面を有する垂直円柱は下端部に勾配を有する有限垂直円柱とおなじアルミニウム製で直径 32mm、高さ 32mm である。Fig.3、Fig.4、Fig.5 および Fig.6 にパラメータとして示す τ は冷却経過時間、 ΔT_{sat} は伝熱面過熱度 (円柱温度 - バルク水の飽和温度) である。Fig.3 と Fig.5 および Fig.4 と Fig.6 はそれぞれバルク水が飽和水 ($\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$) およびバルク水がサブクール水 ($\Delta T_{\text{sub}}=15\text{K}$) の場合であり、これら一連の写真観察結果から以下のことが明らかになった。Fig.3 に示すバルク水が飽和水 ($\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$) の場合、浸漬直後の円柱は激しい沸騰のため円柱全体を覆う蒸気膜は厚く不安定で乱れており、Fig.3(a) のような状態は 10 秒程度持続する。その後安定で平滑な界面を有する蒸気膜に移行する。円柱の底面は安定で平滑な厚い蒸気膜で覆われており、蒸気は底面端部から勾配を有する側面に沿って上昇する。Fig.4 に示す水平の底面と上面を有する垂直円柱と比較した場合、伝熱面過熱度が 450K、350K、200K および蒸気膜崩壊のとき、蒸気膜形状に関して勾配の影響は見られない。蒸気膜の崩壊点に関して、水平の底面と上面を有する垂直円柱の場合は円柱側面の下端側であるが、下端部に勾配を有する有限垂直円柱の場合は勾配部の終端であり、膜の崩壊は円柱全面に斉時的に伝播する。

一方、バルク水がサブクール水 ($\Delta T_{\text{sub}}=15\text{K}$) の場合、Fig.4 に示すように浸漬直後でも円柱まわりの沸騰の様相は Fig.3 に比べて穏やかであり、蒸気膜の界面の乱れも少ない。円柱底面およびそれに接続される円柱側面の勾配部は平滑な界面状態にあり、安定した薄い蒸気膜で覆われている。円柱側面の垂直部分の上端側は安定した薄い蒸気膜で覆われているが、界面は波状になっている。浸漬後 5 秒から 10 秒に至る沸騰の様相に大きな変化は見られず、円柱の底面および勾配部を含む円柱の側面は安定で薄い蒸気膜で覆われ概ね平滑な界面状態にある。Fig.6 に示す水平の底面と上面を有する垂直円柱と比較した場合、伝熱面過熱度が 450K、350K、200K および蒸気膜崩壊のとき蒸気膜が薄い勾配の形状に沿って蒸気膜が形成されていることが確認できる。Fig.4(d) は浸漬後 13 秒の様相で垂直円柱側面の勾配部終端から蒸気膜の崩壊が始まった瞬間を捉えたもので、この後蒸気膜の崩壊は円柱全面に斉時的に伝播する。



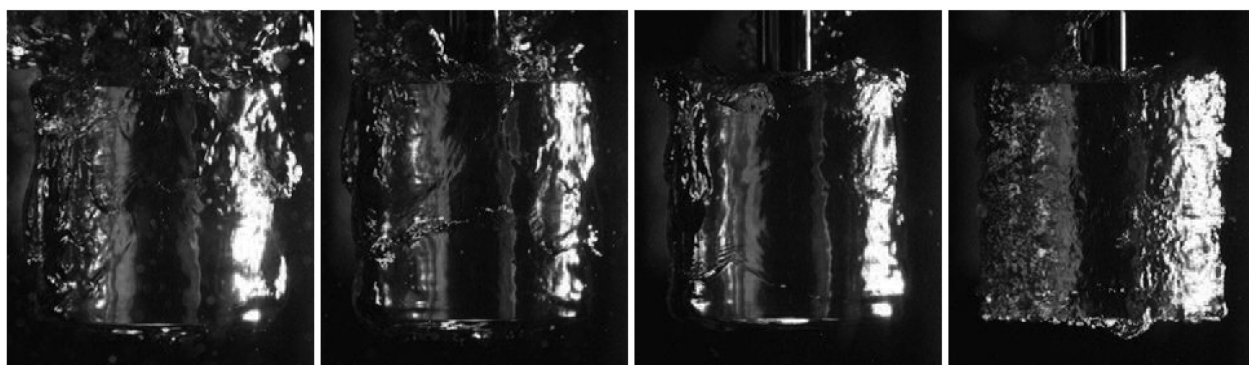
(a) $\tau=0\text{sec}$, $\Delta T_{\text{sat}} \approx 450\text{K}$ (b) $\tau=22\text{sec}$, $\Delta T_{\text{sat}} \approx 350\text{K}$ (c) $\tau=61\text{sec}$, $\Delta T_{\text{sat}} \approx 200\text{K}$ (d) $\tau=63\text{sec}$, $\Delta T_{\text{sat}} \approx 190\text{K}$

Fig. 3 Photographs of film boiling around a vertical cylinder for $\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$ (taper-edge)



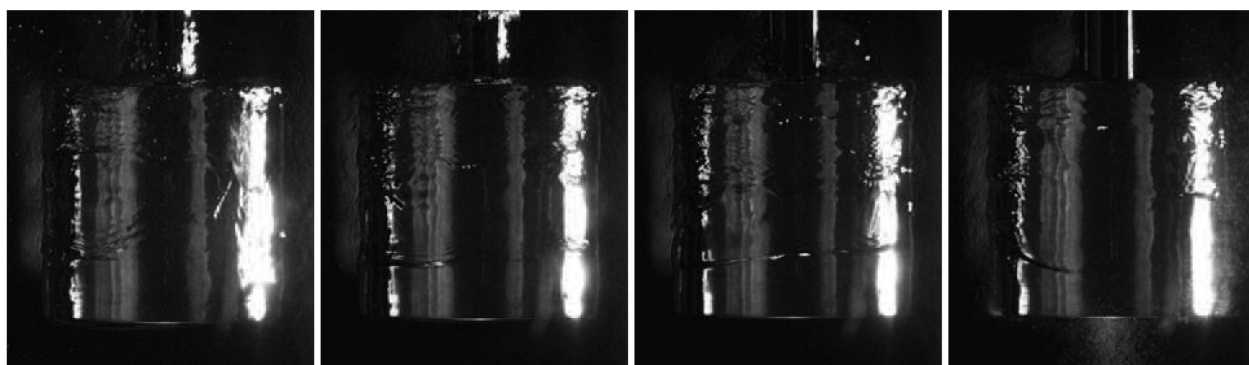
(a) $\tau=0\text{sec}$, $\Delta T_{\text{sat}} \approx 450\text{K}$ (b) $\tau=5\text{sec}$, $\Delta T_{\text{sat}} \approx 400\text{K}$ (c) $\tau=10\text{sec}$, $\Delta T_{\text{sat}} \approx 350\text{K}$ (d) $\tau=13\text{sec}$, $\Delta T_{\text{sat}} \approx 325\text{K}$

Fig. 4 Photographs of film boiling around a vertical cylinder for $\Delta T_{\text{sub}}=15\text{K}$ (taper-edge)



(a) $\tau=0\text{sec}$, $\Delta T_{\text{sat}} \approx 450\text{K}$ (b) $\tau=22\text{sec}$, $\Delta T_{\text{sat}} \approx 350\text{K}$ (c) $\tau=63\text{sec}$, $\Delta T_{\text{sat}} \approx 200\text{K}$ (d) $\tau=75\text{sec}$, $\Delta T_{\text{sat}} \approx 165\text{K}$

Fig. 5 Photographs of film boiling around a vertical cylinder for $\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$ (straight-edge)



(a) $\tau=0\text{sec}$, $\Delta T_{\text{sat}} \approx 450\text{K}$ (b) $\tau=7\text{sec}$, $\Delta T_{\text{sat}} \approx 400\text{K}$ (c) $\tau=14\text{sec}$, $\Delta T_{\text{sat}} \approx 350\text{K}$ (d) $\tau=16\text{sec}$, $\Delta T_{\text{sat}} \approx 335\text{K}$

Fig. 6 Photographs of film boiling around a vertical cylinder for $\Delta T_{\text{sub}}=15\text{K}$ (straight-edge)

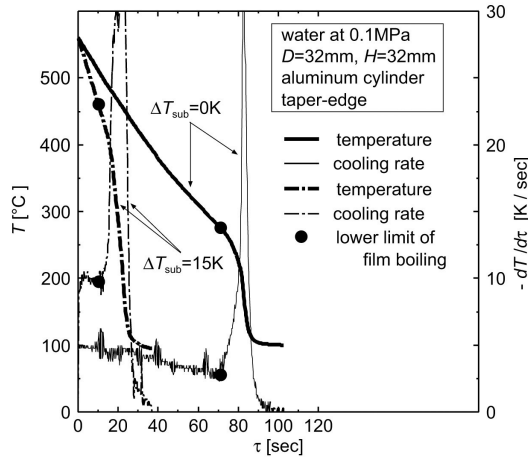


Fig. 7 Cooling curve and cooling rate

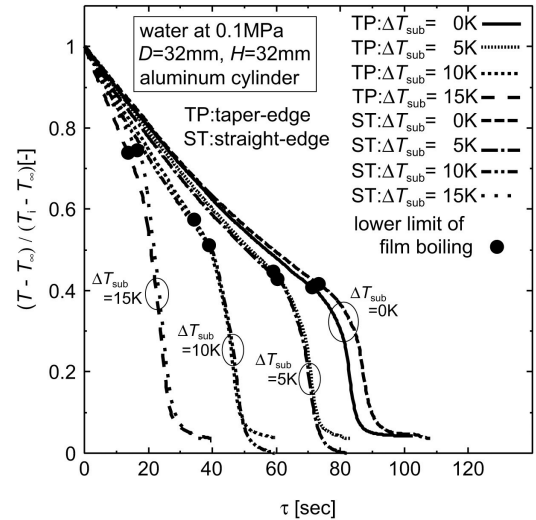


Fig. 8 Cooling curve

5. 結果と考察

5. 1 冷却曲線および冷却速度曲線

Fig.7 は供試円柱を大気圧下で飽和水中およびサブクール水中へ浸漬冷却した場合の円柱の中心部の温度と冷却時間の関係を示した冷却曲線 (太線) と冷却速度曲線 (細線) の実測値の一例である。図中の各曲線上には ● 印の記号が付されているが、これは冷却速度が最小となる点で、3 節で述べたように本研究ではこの点を膜沸騰の下限界と定義している。この図から ● で示す下限界点の時刻で円柱温度と冷却速度は液体サブクール度 ΔT_{sub} が大きくなるほど高くなっていることがわかる。Fig.8 は座標の縦軸を無次元温度 $(T - T_{\infty}) / (T_i - T_{\infty})$ で表した冷却曲線で、座標の横軸は冷却時間 $\tau [s]$ である。ここに、 T は円柱の中心温度、 T_i は測定開始時の円柱中心温度、 T_{∞} は大気圧下のバルク水の温度である。図中の各冷却曲線上の ● 印の記号は膜沸騰の下限界点を示しており、各冷却曲線は供試円柱の中心温度がバルク水温度に到達するまでを描いている。本研究は膜沸騰領域を対象としているので、次節に示す沸騰曲線の考察には供試円柱の冷却開始 ($\tau=0$) から ● 印の記号で示した下限界点までのデータを使用する。

5. 2 膜沸騰領域の沸騰曲線

Fig.9 は膜沸騰領域の沸騰曲線を、液体サブクール度 $\Delta T_{sub}=0K, 5K, 10K$ および $15K$ をパラメータとして示したもので、Fig.8 に示した冷却曲線のデータをもとに式 (1) より求めたものである。この図より、液体サブクール度 ΔT_{sub} が大きくなるに従って熱流束 q は高くなるとともに ● の記号で示した膜沸騰の下限界点での熱流束が高過熱度側へ移動しており、遷移沸騰領域への移行は高い熱流束で生じることがわかる。サブクール膜沸騰熱伝達を評価する上で基準となる飽和膜沸騰熱伝達における熱流束は、下端部に勾配を有する有限垂直円柱に関して、 $450K$ の高過熱度から

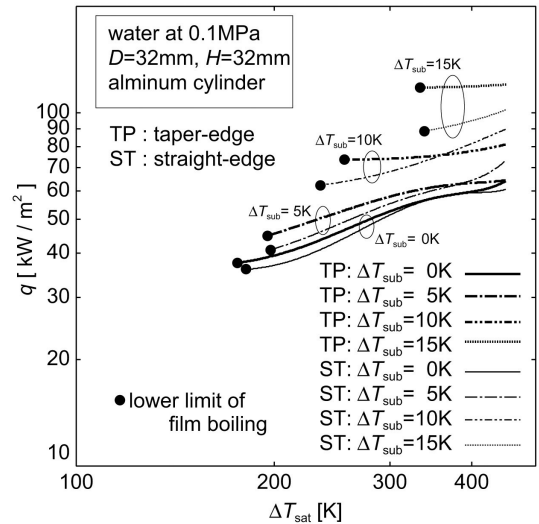


Fig. 9 Boiling curve

$200K$ の低過熱度において約 $64kW/m^2$ から $40kW/m^2$ の値をとり、サブクールされた膜沸騰領域の熱流束は飽和状態の熱流束より、過熱度 $\Delta T_{sat}=350K$ に対して、 $\Delta T_{sub}=5K$ の場合には約 8%, $\Delta T_{sub}=10K$ の場合には約 30%, $\Delta T_{sub}=15K$ の場合には約 105% 増大し、液体サブクール度が膜沸騰熱伝達に強く影響していることがわかる。

下端部に勾配を有する有限垂直円柱と水平の底面と上面を有する垂直円柱とを比較すると、 $\Delta T_{sub}=0K$ のとき、 $\Delta T_{sat}=350K$ 付近で両方とも同じ値を示すが、下端部に勾配を有する有限垂直円柱はおおよそ 5% 程度高い値を示す。 $\Delta T_{sub}=5K$ のとき、おおよそ $\Delta T_{sat}=380K$ より高い範囲では水平の底面と上面を有する垂直円柱が高い値を示すが、おおよそ $\Delta T_{sat}=380K$ より低い範囲では下端部に勾配を有する有限垂直円柱が高い値を示す。その値は $\Delta T_{sat}=200K$ のときおおよそ 10% 高い。 $\Delta T_{sub}=10K$ のとき、おおよそ

よそ $\Delta T_{\text{sat}}=360\text{K}$ より高い範囲では水平の底面と上面を有する垂直円柱が高い値を示すが、おおよそ $\Delta T_{\text{sat}}=380\text{K}$ より低い範囲では、下端部に勾配を有する有限垂直円柱が高い値を示す。その値は $\Delta T_{\text{sat}}=450\text{K}$ のとき水平の底面と上面を有する垂直円柱がおおよそ 10% 高く、 $\Delta T_{\text{sat}}=260\text{K}$ のとき下端部に勾配を有する有限垂直円柱がおおよそ 10% 高い。 $\Delta T_{\text{sub}}=15\text{K}$ のとき、下端部に勾配を有する有限垂直円柱はおおよそ 30% 高い値を示す。

本実験範囲における高過熱度域において、下端部に勾配を有する有限垂直円柱と水平の底面と上面を有する垂直円柱を熱流束に関して比べた場合、 $\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$ のとき下端部に勾配を有する有限垂直円柱が高い値を示すが、 $\Delta T_{\text{sub}}=5\text{K}$ および 10K のとき、水平の底面と上面を有する垂直円柱が高い値を示すことがわかる。半球状の凸底面を有する有限垂直円柱からの膜沸騰熱伝達の実験³⁾に見られるように、蒸気膜厚さが厚くなる、液体サブクール度が小さい条件もしくは伝熱面過熱度が高い条件では、供試円柱の底面と側面がなめらかに接続される形状がより高い熱流束の値を示す。一方、蒸気膜厚さが薄くなる、液体サブクール度が大きい条件もしくは伝熱面過熱度が低い条件では、蒸気膜に伝熱面形状の角が及ぼす効果が大きくなり、供試円柱の底面と側面の接続が角になる形状がより高い熱流束の値を示す³⁾。前述のとおり、蒸気膜の崩壊点は、水平の底面と上面を有する垂直円柱の場合は供試円柱側面の下端部であるが、下端部に勾配を有する有限垂直円柱の場合は勾配部の終端である。蒸気膜が蒸気膜厚さの薄い部分から崩壊すると考えると、下端部に勾配を有する有限垂直円柱において、勾配部の終端付近の蒸気膜厚さは底面と勾配部との接続部における蒸気膜厚さと同等に薄く、供試円柱全体からの熱伝達に大きな効果を与えていると思われる。

本実験では活性炭フィルターで濾過した水道水をバルク水として使用し、供試円柱の伝熱面は製作時に鏡面加工をしただけで実験ごとに鏡面加工を行っていない。これらの実験条件も結果に影響を与えていると考えられるため、バルク水の違いおよび伝熱面表面性状の違いが及ぼす膜沸騰伝熱への影響について調べる必要がある。

6. 結論

下端部に勾配を有する有限垂直円柱を大気圧下の

静止した飽和およびサブクールの水中に浸漬して冷却する方法で膜沸騰熱伝達の伝熱特性を調べた。また、アルミニウム製の水平の底面と上面を有する垂直円柱における伝熱特性とを比較し、実験範囲で以下のことが明らかになった。

- 蒸気膜の崩壊点に関して、水平の底面と上面を有する垂直円柱の場合は円柱側面の下端側であるが、下端部に勾配を有する有限垂直円柱の場合は勾配部の終端であり、蒸気膜の崩壊は円柱全面に齊時的に伝播する。
- 下端部に勾配を有する有限垂直円柱に関して、飽和膜沸騰熱伝達における熱流束は、 450K の高過熱度から 200K の低過熱度において約 64kW/m^2 から 40kW/m^2 の値をとる。
- 膜沸騰領域の熱流束は液体サブクール度が高くなるほど増大し、伝熱面過熱度 $\Delta T_{\text{sat}}=350\text{K}$ で、8% から 105% 程度の増加が得られた。
- 下端部に勾配を有する有限垂直円柱の場合、勾配部の終端付近の蒸気膜厚さが薄くなり供試円柱全体からの熱伝達に大きな効果を与えていると思われる。また、その効果は蒸気膜厚さが薄くなるほど大きい。

謝辞：本研究は舞鶴工業高等専門学校機械工学科奨励研究費の補助を受けて行われた。関係各位に謝意を表する。

参考文献：

- 1) S. Momoki, T. Yamada, T. Shigechi, K. Toyoda, T. Yamaguchi, J. Odgerel: Effect of the bottom configuration on film boiling heat transfer from a vertical finite-length cylinder, 19th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE19-43320, 2011.
- 2) 山田たかし, 荒木憲一, 茂地徹, 豊田香, 桃木悟, 山口朝彦: 半球状の凸底面を有するアルミニウム有限垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達の実験, 長崎大学工学部研究報告, Vol.40(75), pp.8-16, 2010.
- 3) S. Momoki, K. Araki, T. Shigechi, T. Yamada, K. Toyoda, T. Yamaguchi, J. Odgerel: Effect of the bottom and top configurations on pool film boiling around a vertical finite-length cylinder, Proceedings of the ASME/JSME 2011 8th Thermal Engineering Joint Conference, AJTEC2011, March 13-17, 2011, Honolulu, Hawaii, USA, AJTEC2011-44122.

(2012.1.10 受付)

Experiments on Film Boiling Heat Transfer around a Vertical Finite-Length Cylinder with a Stepped Taper-Edge

Kaoru TOYODA and Takuya OKAMOTO

ABSTRACT : The film boiling heat transfer around a vertical aluminum cylinder with a stepped taper-edge was investigated experimentally for quiescent water at atmospheric pressure. The diameter of test cylinder is 32mm and the length is 32mm. The test cylinder was heated to about 580 °C in electric furnace and then cooled in saturated and subcooled water with immersion depth of about 100mm. The degree of liquid subcooling was varied from 0 to 15K. The film boiling heat transfer increased in terms of heat flux by 105% with an increase 15K in liquid subcooling. Further, the experimental results from the vertical aluminum cylinder with a stepped taper-edge were compared with those of a vertical finite-length cylinder and the value of heat flux for the vertical aluminum cylinder with a stepped taper-edge is about 30% higher than that of the vertical finite-length cylinder at the liquid of subcooling of 15K whereas the value of heat flux for the vertical aluminum cylinder with the stepped taper-edge is about 5% higher than that for the vertical finite-length cylinder for saturated water.

Key words : *Film boiling, Vertical cylinder, Stepped taper-edge, Heat transfer*