

サブクールされた水道水中における 有限垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達 (第二報: 円柱底面下の蒸気膜)

豊田 香¹・山添 誠人²

要旨：有限垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達の予測式には円柱の底面，垂直側面および上面からの熱伝達を評価することで円柱全体からの熱伝達を得る三面モデルが適用されているため，その精度を向上するには円柱を包む蒸気膜の形状や厚さを計測し，局所における温度や熱伝達特性を考慮する必要がある．本研究では，円柱底面の蒸気膜に焦点をあて，直径および高さがそれぞれ32mmのアルミ製垂直円柱による焼入実験を行い，供試円柱の冷却速度および底面の蒸気膜厚さを計測した．さらに下向き水平面からのサブクール膜沸騰解析の結果と計測値を比較し，円柱底面の蒸気膜厚さが円柱全体の冷却特性に及ぼす影響について検討した．

キーワード：膜沸騰，垂直円柱，蒸気膜厚さ

1. はじめに

膜沸騰は加圧水型原子炉における炉心の緊急冷却，材料の製造工程および金属の焼入れなど高温物体の冷却における初期段階で発生するため多くの技術領域で興味を持たれている．これまで鉛直平板，上向き水平面，水平円柱および球など様々な形状からの膜沸騰熱伝達に関する多くの実験的および解析的研究が報告されているが，これらの結果を用いても三次元物体まわりの膜沸騰熱伝達を予測することはまだ難しい．

有限垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達においては，底面下で蒸気が生成され，垂直側面にそって上昇しながら成長し上面から離脱するため，底面の形状が円柱全体の膜沸騰熱伝達特性に影響を与えることが報告されている¹⁾．特に，水平な底面を有する有限垂直円柱に関しては，水平な底面下の気液界面で安定な蒸気が生成され，蒸気膜内の蒸気は円柱底面中心から円柱底面の端へ半径方向に蒸気と液体との密度差による静圧勾配と流れ方向の蒸気膜厚さの勾配の相乗作用によって流れ，その蒸気は液体との密度差によって側面に沿って流れる²⁾ため円柱底面の蒸気膜厚さは円柱全体の熱伝達に対し重要な役割を果たしていることは明らかである．

筆者らは有限垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達に関する実用的な予測式を提案し，実用的な精度の範囲で成果をあげている^{3),4)}．その予測式には円柱の底

面，垂直側面および上面からの熱伝達を定量的に評価することで円柱全体からの熱伝達を得る三面モデルが適用されているため，予測式の精度を向上するには円柱を包む蒸気膜の形状や厚さを計測し，局所における温度や熱伝達特性を考慮する必要がある．本研究では，水平の上面と底面を有するアルミ製垂直円柱による焼入実験の結果と下向き水平面からのサブクール膜沸騰解析の結果とを比較し，円柱底面の蒸気膜厚さが円柱全体の冷却特性に及ぼす影響について検討する．

2. 実験装置および実験方法

本実験で使用した実験装置は主に沸騰槽，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が，実験装置および実験方法の詳細については本研究の第一報に記述しているので割愛する．Fig.1に本実験で使用した水平の上面と底面を有する有限垂直円柱の図を示す．供試円柱の材料には酸化防止の観点から99.7%純度のアルミニウムを使用した．沸騰の様相観察は目視および動画撮影にて行った．

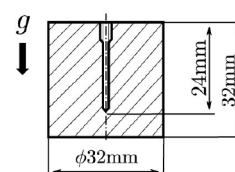


Fig. 1 Test cylinder

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

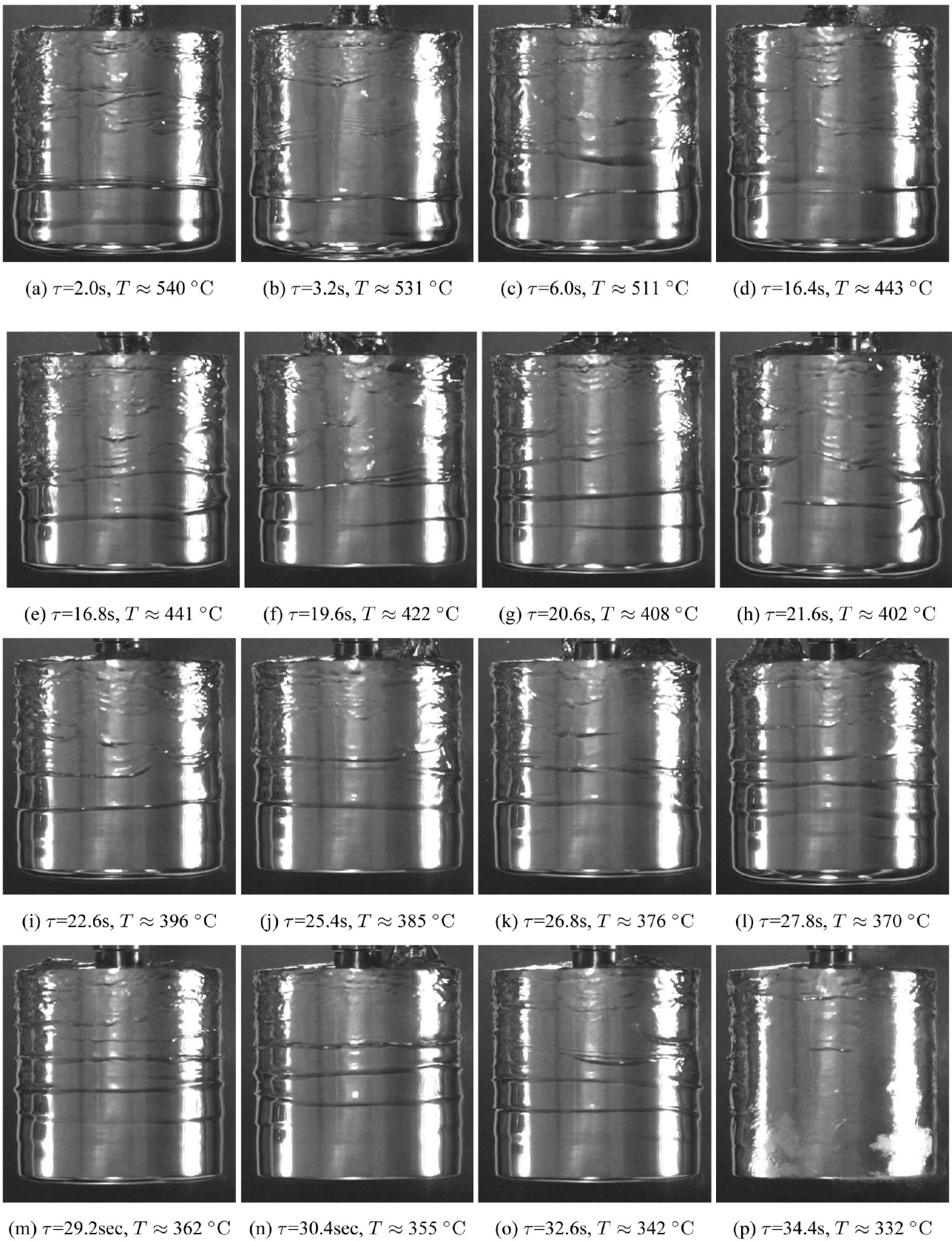


Fig. 2 Photographs of film boiling around a vertical cylinder for $\Delta T_{\text{sub}}=15\text{K}$

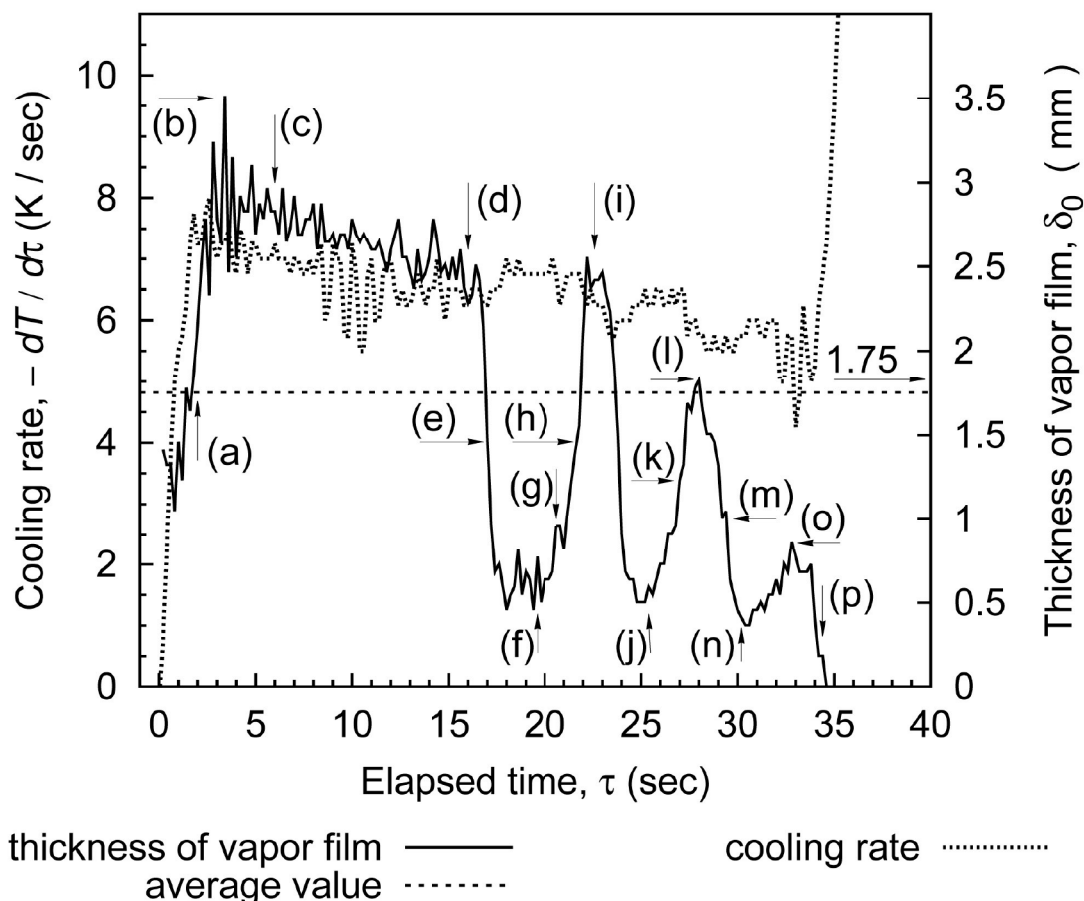


Fig. 3 Cooling rate and vapor film thickness variations

3. 膜沸騰の様相

Fig.2に第一回目の実験における膜沸騰の様相を示す。図中の τ および T はそれぞれ経過時間および供試円柱中心の温度を示している。本実験では冷却速度が急激に増加を始める点を経過時間 τ の開始点とした。浸漬直後から沸騰の様相は穏やかである。円柱全体を覆う蒸気膜は薄い。円柱底面および円柱側面の下端側における蒸気膜は安定で、その気液界面はやや乱れているが概ね平滑である。円柱底面および円柱側面の下端側における蒸気と液体との気液界面には同心のしわが形成されている。円柱側面上端側の蒸気膜は安定であるがその気液界面はやや乱れている。円柱上面の蒸気膜は安定であるが気液界面から気泡が離脱するためやや乱れている。円柱底面における蒸気膜はFig.2(d)からFig.2(p)に示すように、その厚さが厚くなったり薄くなったりを繰り返して蒸気膜の崩壊に至る。この蒸気膜厚さの変動に周期性は見られない。

Fig.2(p)は垂直円柱側面の下端部から蒸気膜の崩壊が始まった瞬間を捉えたもので、局所的な蒸気膜の崩壊は円柱の全表面におよそ5秒で伝播する。

4. 結果と考察

4.1 円柱底面中心の蒸気膜厚さ

Fig.3は冷却速度 $-dT/dt$ および円柱底面中心の蒸気膜厚さ δ_0 と経過時間 τ との関係を示したものである。図中の記号(a)から(p)はFig.2に示した現象写真の記号と対応している。円柱底面中心の蒸気膜厚さは1秒間に30フレームおよび1フレームあたり1/4000秒で撮影された動画から0.2秒ごとの静止面を抽出し、その静止面を二値化して計測された。二値化においては閾値を固定し計測を行ったが、閾値を変化させた場合の誤差は0.1mm以内である。円柱底面中心の蒸気膜厚さは3.2秒経過したときに最大値をとり、時間の経過とともに減少していく傾向がある。蒸気膜厚さの時間平均値はおよそ1.75mmであった。経過時間16秒から34秒において、円柱底面中心の蒸気膜厚さは薄くなる厚くなる動揺を繰り返して、供試円柱側面下端部付近で蒸気膜が崩壊する。また、経過時間16秒から22秒に見られるように、蒸気膜厚さが薄くなる時は冷却速度が増加し、蒸気膜厚さが厚くなる時には冷却速度が減少する。

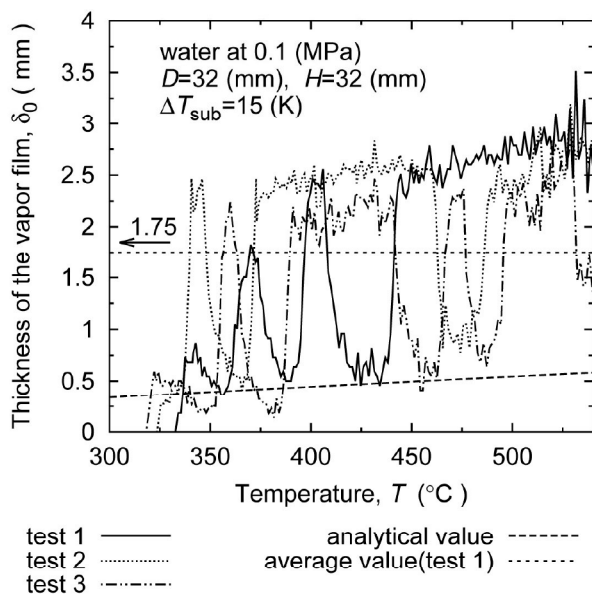


Fig. 4 Vapor film thickness variations at the center of the bottom surface

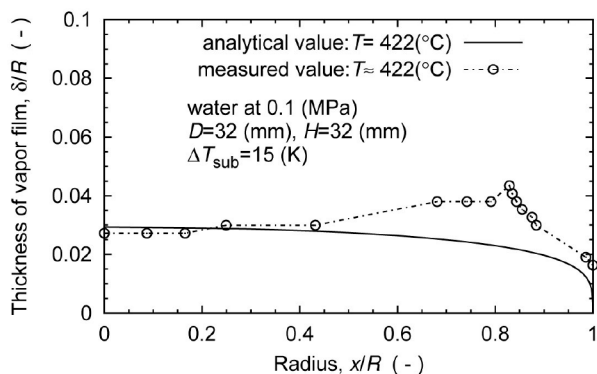


Fig. 5 Vapor film thickness variations at the center of the bottom surface

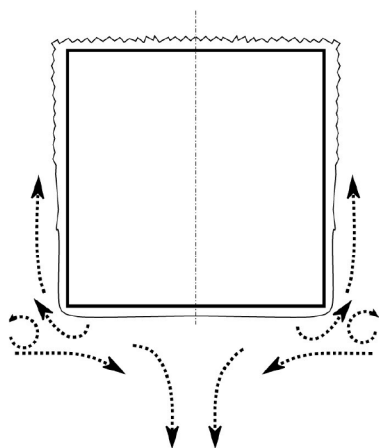


Fig. 6 Flow of the subcooled liquid

Fig.4は円柱底面中心の蒸気膜厚さ δ_0 と供試円柱中心の温度 T との関係を示したものである。また、図中には細い破線および太い破線でそれぞれ第1回目の実験結果から得られた円柱底面中心における蒸気膜厚さの時間平均値および下向き水平面からのサブクール膜沸騰解析⁵⁾から得られた円柱底面中心の蒸気膜厚さを示した。実験結果を比較すると円柱底面中心における蒸気膜厚さの測定値の変化に周期性は見られず、薄くなり始める伝熱面温度にも再現性がない。

蒸気膜厚さの時間平均値と下向き水平面からのサブクール膜沸騰解析から得られた円柱底面中心の蒸気膜厚さの値を比較すると、蒸気膜厚さの時間平均値はおおよそ4倍大きい。飽和膜沸騰において下向き水平面からの膜沸騰熱伝達の解析結果と下向き水平円盤からの膜沸騰熱伝達の解析結果を比較すると、下向き水平円盤からの膜沸騰熱伝達の解析結果がおよそ1.3倍大きくなる²⁾ことが報告されている。この結果を考慮すると下向き水平円盤からの膜沸騰熱伝達の解析によって得られる蒸気膜厚さは下向き水平面からの膜沸騰熱伝達の解析によって得られる蒸気膜厚さと比べて薄くなることが予測されるため、その差はさらに大きくなると予想される。下向き水平面からのサブクール膜沸騰解析においては二相境界層を設定し、蒸気膜と液体境界層内の流れは定常、層流および非圧縮性であり、気液界面は滑らかであると仮定している。また、物性値は一定であると仮定しているため液体側での密度変化も考慮されていない。しかし、実験においては蒸気膜内の流れは飽和膜沸騰に近いほど層流ではなく乱れていると考えられること、現象観察から気液界面は概ね平滑であるが変動していることが確認できることから、これらの効果が相乗してこの差が生じると考えられる。

円柱底面中心における蒸気膜厚さの測定値と下向き水平面からのサブクール膜沸騰解析から得られた円柱底面中心の蒸気膜厚さの値を比較すると、円柱底面中心における蒸気膜厚さが薄くなる時の測定値と下向き水平面からのサブクール膜沸騰解析から得られた円柱底面中心の蒸気膜厚さの値が近いことがわかる。円柱底面中心における蒸気膜厚さが薄くなる時の気液界面は滑らかで乱れが少ないため、解析における仮定と実験条件が近くなりこのような結果が得られたと考える。

4.2 円柱底面における蒸気膜厚さの分布

Fig.5は円柱底面における蒸気膜厚さの測定値と下向き水平面からのサブクール膜沸騰解析から得られた円柱底面における蒸気膜厚さを、蒸気膜厚さが薄くなる Fig.3(f) で示された点において比較したものである。ここで、 R は供試円柱の半径である。

下向き水平面からのサブクール膜沸騰解析における $x/R = 1$ (円柱底面の端)での境界条件は $\delta = |\infty|$ である。解析解は $x/R = 0$ (円柱底面の中心)で最大値をとり, $x/R = 1$ 付近で急に減少する。一方, 測定値は x/R が0から0.8付近までなだらかに増加しその後, 急激に減少する。

4.3 液体の流れ

Fig.6に円柱底面に形成される蒸気膜の厚さが薄くなったときの, 供試円柱まわりの液体の流れの観察結果の例を示す。供試円柱底面と側面の下端側付近の液体の流れは主に次の3つであると思われる。まず, 底面中心付近では, 蒸気膜の変動と液体の密度差による鉛直下向きの流れであり, 次に円柱側面付近では蒸気の流れと液体の密度差による鉛直上向きの流れである。最後に, これらの流れから発生する円柱側面下端側の角付近での回転する流れである。これらの流れの効果と蒸気膜の形状が, 円柱底面端部付近で起こる蒸気膜の崩壊に影響を与えていると考えられる。

5. おわりに

アルミ製垂直円柱による焼入実験の結果と下向き水平面からのサブクール膜沸騰解析の結果とを比較し, 円柱底面の蒸気膜厚さが円柱全体の冷却特性に及ぼす影響について検討し, 以下のことが明らかとなった。

1. 円柱底面中心における蒸気膜厚さの測定値の変化に周期性は見られず, 薄くなり始める伝熱面温度にも再現性がない。
2. 本実験範囲における低伝熱面過熱度域において, 円柱底面に形成される蒸気膜は, 厚くなる薄くなるを繰り返し, 垂直円柱側面の下端部から蒸気膜の崩壊が起こる。
3. 蒸気膜厚さの時間平均値と下向き水平面からのサブクール膜沸騰解析から得られた円柱底面中心の蒸気膜厚さの値を比較すると, 蒸気膜厚さの時間平均値はおおよそ4倍大きい。その理由として, 解析における仮定と実験の条件が一致していないことが挙げられる。

4. 円柱底面中心における蒸気膜厚さが薄くなる時の測定値と下向き水平面からのサブクール膜沸騰解析から得られた円柱底面中心の蒸気膜厚さの値が近い。その理由として, 解析における仮定が実験の条件をよく表していると考えられる。

5. 供試円柱まわりの流体の流れや蒸気膜内の蒸気の流れが, 円柱底面端部付近で起こる蒸気膜の崩壊に影響を与えていると考えられる。

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, K. Araki, T. Shigechi, T. Yamada, K. Toyoda, T. Yamaguchi and 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, AJTEC2011-44122, March 13-17, 2011, Honolulu, Hawaii, USA.
- 2) T. Shigechi, N. Kawabe, Y. Tokita, T. Yamada : Film Boiling Heat Transfer from a Horizontal Circular Plate Facing Downward, JSME International Journal, SeriesII, Vol.32, No.4, pp. 646-651, 1989.
- 3) S. Momoki, K. Toyoda, T. Yamada, T. Shigechi and T. Yamaguchi : Experiments and Analysis on Film Boiling Heat Transfer around a Vertical Finite-Length Cylinder with a Convex Surface Facing Downward, Journal of Power and Energy Systems, Vol.3, No.1, 2009.
- 4) T. Yamada, K. Toyoda, T. Shigechi, S. Momoki, K. Kanemaru and T. Yamaguchi : Film Boiling Heat Transfer around a Vertical Finite - Length Cylinder with a Convex Hemispherical Bottom, Heat Transfer Asian Research, 39(3), pp. 166-177, 2010.
- 5) 山田 たかし, 茂地 徹, 桃木 悟, 金丸 邦康, 山口 朝彦 : 有限の下向き水平面の膜沸騰熱伝達に及ぼす液体サブクール度の影響, 日本機械学会論文集(B編), 64巻, 628号, pp. 4159-4165, 1998.

(2013.12.9受付)

FILM BOILING HEAT TRANSFER AROUND A VERTICAL FINITE-LENGTH CYLINDER TO SUBCOOLED TAP WATER (SECOND REPORT)

Kaoru TOYODA and Masato YAMAZOE

ABSTRACT: Predicting temperature and the amount of heat transferred more accurately by means of the thickness and the shape of the vapor film covering the cylinder are required for improving the accuracy of prediction and obtain local heat flow rate and local temperature on each surface regarding pool film boiling around a vertical finite-length cylinder with a bottom. We focused the vapor film thickness under the bottom since the shape and the thickness of the vapor film covering the cylinder are governed by (1) the vapor generated under the bottom surface, (2) the vapor grows thicker during flowing upward along the vertical lateral surface and (3) the vapor generated on the top surface. Quenching experiments on film boiling around a vertical finite-length aluminum cylinder were carried out to investigate the shape and the thickness of the vapor film under the bottom surface. The diameter and length of the test cylinder are 32 mm and 32 mm, respectively. The test cylinder was heated to about 560 degrees C in an electric furnace and then cooled in subcooled water with a submersion depth of 150mm. The body temperature was measured by a K-type sheath thermocouple placed near the center of the cylinder. The behavior of the vapor film around a vertical finite-length cylinder was observed with video camera. The vapor film thickness at the center of the cylinder is measured by means of binarized images. As a result, the vapor-liquid interface under the bottom surface is turbulent appreciably and varies temporally. However, the minimum value of the vapor film thickness at the center of the bottom surface corresponds to the analytical value derived from two-phase boundary layer model in which the flow is laminar in vapor boundary layer and liquid boundary layer. This result shows that the assumptions of the analysis correspond to experimental condition. The temporal change in vapor film thickness at the center of the bottom surface is elucidated particularly in the paper.

Key Words : *Film boiling, Vertical cylinder, Thickness of the vapor film*