

半球状の凸底面を有する有限垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達*

山田 昭^{*1}, 豊田 香^{*2}, 茂地 徹^{*3}
桃木 悟^{*2}, 金丸 邦康^{*1}, 山口 朝彦^{*1}Film Boiling Heat Transfer around a Vertical Finite-Length Cylinder
with a Convex Hemispherical BottomTakashi YAMADA^{*4}, Kaoru TOYODA, Toru SHIGECHI,
Satoru MOMOKI, Kuniyasu KANEMARU and Tomohiko YAMAGUCHI^{*4} Department of Mechanical Systems Engineering, Nagasaki University,
1-14 Bunkyo-machi, Nagasaki-shi, Nagasaki, 852-8521 Japan

The film boiling heat transfer around a vertical silver cylinder with a convex hemispherical bottom was investigated experimentally for quiescent water at atmospheric pressure. The experiments have been carried out by a quenching method. The diameter and length of test cylinder are 32 mm and 48 mm, respectively. The test cylinder was heated to about 600°C in an electric furnace and then cooled in saturated or subcooled water with the immersion depth of about 100 mm. The degree of liquid subcooling was varied from 0 K to 30 K. The analytical solutions for saturated and subcooled boiling are obtained by applying the two-phase boundary layer theory for the vapor film with the smooth interface. The experimental data can be correlated within $\pm 15\%$ by the present prediction method. Also, the lower limit of film boiling was examined in terms of wall heat flux and degree of superheating.

Key Words: Film Boiling, Vertical Cylinder, Convex Hemispherical Bottom, Quenching, Heat Transfer Correlation, Lower Limit of Film Boiling

1. まえがき

物体まわりの膜沸騰は金属の焼入れ, 材料の製造工程, 原子炉の炉芯の緊急冷却等で生じる. 物体まわりの膜沸騰に関しては, 著者らはこれまでに大気圧下のイオン交換水を用い, 飽和およびサブクール状態で, 円柱の底面と上面が水平な有限垂直円柱まわりの膜沸騰現象の観察と実験データの蓄積を行い, 膜沸騰熱伝達に対して $\pm 15\%$ 以内で相関できる伝熱整理式を作成している^{(1),(2)}.

本研究は原子炉の冷却等に応用が見込まれる半球状の凸底面を有する有限垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達の解明を目的として, 飽和およびサブクール膜沸騰熱伝達に関して焼入れ実験を行うとともに壁面熱流束の測定値を単一面の熱伝達率を総合させて推定する方法を提案する. また, 冷却速度が最小となる膜沸騰下限界点における伝熱面過熱度についても検討を試みたのでその結果についても報告する.

* 原稿受付 2009年2月2日.

^{*1} 正員, 長崎大学工学部(〒852-8521 長崎市文教町1-14).^{*2} 正員, 長崎大学生産科学研究科.^{*3} 正員, フェロー, 長崎大学工学部.

E-mail: tyamada@nagasaki-u.ac.jp

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置 本実験で使用した実験装置は, 著者らの先の研究^{(1),(2)}で使用したものと同じであるので詳細な説明は省略するが, 沸騰槽はステンレス製で, 沸騰槽の側面および底面には現象観察用の窓が設けられている. 液体は大気圧下のイオン交換水で, 沸騰槽内の外側底面に設置されている浸漬型加熱器により昇温される. 水温は温度制御装置によって一定に保たれる.

図1は本実験で使用した供試円柱の断面図で, 供試円柱の直径 D は 32mm, 全長 L_T は 48mm, 垂直面長さ L は 32mm である. 垂直供試円柱の上面は水平面に, 底面は半径 16mm の半球状に加工されており, 材質は純度 99.99% の銀である. 供試円柱は外径 4mm, 内径 3mm のステンレス製支持管に吊り下げられた状態で昇降装置を介して沸騰槽内を昇降する.

2.2 実験方法 実験前の表面条件を一定にするために供試円柱表面をバフ研磨にて鏡面仕上げをし, アルコールで洗浄した. 供試円柱はシリコニット電気炉で約 600 °C まで加熱された後, 静止した大気圧の水面下 100mm の水中まで浸漬され冷却される.

供試円柱の冷却時の温度履歴は、ステンレス製支持管を介して円柱上面より円柱の軸心上の32mmの位置まで挿入されているシース径1mmのK型熱電対より、YHP3852A データ集録/制御ユニット装置で0.25sのサンプリング間隔で測定される。バルク水の温度は70℃から100℃の範囲で設定された。冷却中の円柱まわりの沸騰の様相を目視、高速ビデオおよび写真撮影により観察した。

2・3 伝熱面温度と壁面熱流束の測定 供試円柱の材質に熱伝導率が高い銀を使用しているため、銀円柱の内部は空間的に一様に冷却される(集中定数系近似)と仮定すると、円柱の全表面積平均の壁面熱流束 q は次式によって与えられる。

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

ここに、 ρ 、 c 、 A および V は供試材の密度、比熱、全伝熱面積および体積であり、 dT/dt は冷却速度である。本実験範囲における膜沸騰領域のピオー数は0.04以下と非常に小さいので、式(1)の集中定数系近似が成り立つと考える。式(1)から定まる壁面熱流束の測定値の誤差は最大15%程度と推定される。さらに、供試円柱を支持するステンレス支持管からの熱損失は、サブクール膜沸騰熱伝達時には最大2%程度と推定される。なお、本研究では冷却速度 dT/dt が最小となる点を膜沸騰下限点と定義し、その点の伝熱面過熱度を ΔT_{\min} として評価した。

3. 実験結果および考察

3・1 膜沸騰の様相 円柱の下端部が水面下100mmの位置に固定された直径 $D=32\text{mm}$ 、全長 $L_T=48\text{mm}$ の半球状の凸底面を有する有限垂直円柱まわりに形成される蒸気膜挙動の観察例を飽和膜沸騰に対して図2に、サブクール膜沸騰に対して図3に示す。 τ は冷却経過時間、 ΔT_{sat} は伝熱面過熱度、 ΔT_{sub}

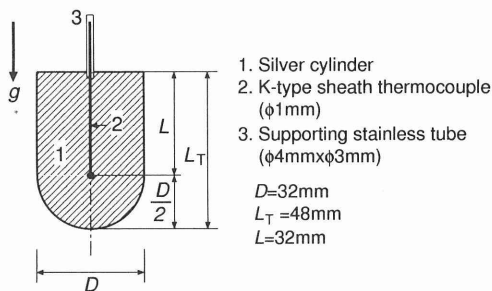
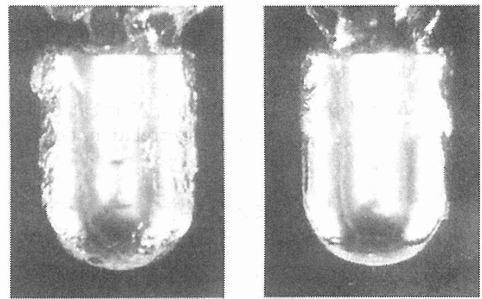


Fig.1 Test cylinder

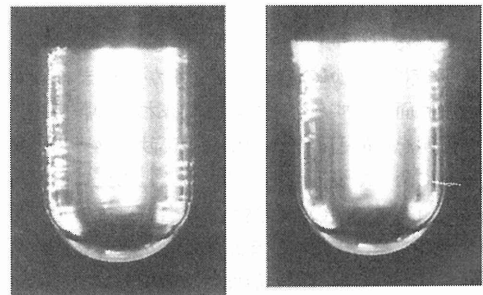
は液体サブクール度である。目視、写真および高速ビデオ撮影による観察結果から飽和膜沸騰($\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$)の場合の蒸気膜の様相は以下のものである。供試円柱を水面下100mmの定位置まで浸漬した直後は激しい沸騰のため円柱全面を覆う蒸気膜は厚く不安定で気液界面は大きな脈動を伴った乱れた状態にある。しかし、図2(a)に示すように、浸漬後約30秒経過すると気液界面の乱れは弱まるが、半球状の凸底面の蒸気膜は波状界面を維持している。図2(b)は伝熱面温度が降下した膜沸騰崩壊直前の様相で、円柱側面の上端側と円柱上面を除いて蒸気膜の界面は概ね平滑となる。その後、蒸気膜は円柱上端部の角から崩壊し遷移沸騰を経て核沸騰に移行する。

一方、サブクール膜沸騰($\Delta T_{\text{sub}}=20\text{K}$)の場合には、浸漬直後の沸騰は飽和膜沸騰の場合と比較して穏やかであり、蒸気膜の気液界面の乱れは小さい。半球状の凸底面および円柱側面垂直部の下端側は安定した薄い蒸気膜に覆われて気液界面は平滑であるが、円柱側面



(a) $\tau=30\text{sec}$, $\Delta T_{\text{sat}} \approx 340\text{K}$ (b) $\tau=95\text{sec}$, $\Delta T_{\text{sat}} \approx 135\text{K}$

Fig.2 Film boiling phenomenon around a vertical cylinder with a convex hemispherical bottom for $\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$.



(a) $\tau=16\text{sec}$, $\Delta T_{\text{sat}} \approx 340\text{K}$ (b) $\tau=30\text{sec}$, $\Delta T_{\text{sat}} \approx 235\text{K}$

Fig.3 Film boiling phenomenon around a vertical cylinder with a convex hemispherical bottom for $\Delta T_{\text{sub}}=20\text{K}$.

側面の上端側および円柱上面の気液界面は波状となっている。図3(a)に示すように、サブクールの条件下では伝熱面過熱度が降下して蒸気膜が薄くなると円柱側面の気液界面上にリング状のしわが約4mmの間隔で形成され、気液界面上を約0.6m/s程度の速度で上昇する。図3(b)は円柱上端部の角の部分から蒸気膜の崩壊が開始した瞬間を捉えたもので、蒸気膜崩壊の起点は飽和膜沸騰の場合と同様である。円柱まわりに形成された蒸気膜は飽和およびサブクール膜沸騰とも同時に全面的に崩壊する。

3・2 冷却曲線および冷却速度曲線 図4は約600℃に加熱された供試円柱を大気圧下で飽和水およびサブクール水へ浸漬冷却した場合の円柱温度 T と冷却経過時間 τ の関係を示した冷却曲線(太線)と冷却速度 $dT/d\tau$ 曲線(細線)の実測値の一例で、図4(a)は飽和($\Delta T_{sub}=0K$)の場合、図4(b)は $\Delta T_{sub}=20K$ の場合である。これらの図中の各曲線上に●印の記号を付しているが、これは冷却速度が最小となる点で、2.3節で述べたように本研究ではこの点を膜沸騰の下限界点と定義している。

図5は冷却曲線を横軸に冷却経過時間 τ 、縦軸に無次元温度 $(T - T_{\infty})/(T_1 - T_{\infty})$ をとって示したもので、 T_1 および T_{∞} はそれぞれ測定開始時の円柱温度およびバルク水温度である。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す。本研究は膜沸騰領域を対象としているので、次節以降では冷却開始($\tau=0$)から●印の記号で示した膜沸騰下限界点までを対象とする。

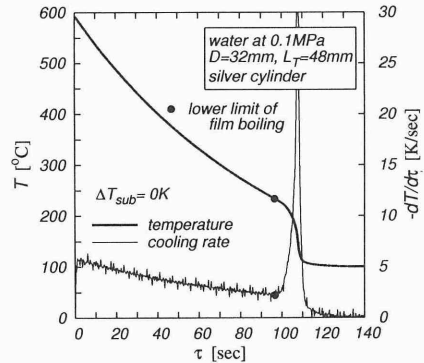
3・3 膜沸騰領域の沸騰特性 図6は図5の冷却曲線に対応する沸騰曲線を液体サブクール度 ΔT_{sub} をパラメータとして示したものである。図より、壁面熱流束 q は液体サブクール度 ΔT_{sub} が大きくなるに従って増大するとともに膜沸騰下限界点での壁面熱流束(●印)は高過熱度側へ移動しており、遷移沸騰領域への遷移は高い壁面熱流束で生じることがわかる。ちなみに、サブクール膜沸騰領域の壁面熱流束は、伝熱面過熱度 $\Delta T_{sat}=300K$ に対して $\Delta T_{sub}=30K$ の場合には飽和の場合より約235%増大し、液体サブクール度が膜沸騰熱伝達に強く影響していることがわかる。

3・4 膜沸騰下限界点における伝熱面過熱度 図7は図6に示した沸騰曲線上の●印点(膜沸騰下限界点)の過熱度 ΔT_{min} を縦軸に、液体サブクール度 ΔT_{sub} を横軸にとり整理したものである。膜沸騰下限界点における ΔT_{min} は ΔT_{sub} に強く依存し、 ΔT_{sub} が大きくなるに従って直線的に増大する。実測値は $0K \leq \Delta T_{sub} \leq 30K$ の範囲で次式によって近似される。

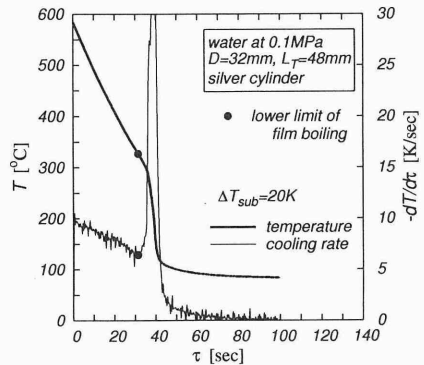
$$\Delta T_{min} = 133 + 4.65\Delta T_{sub} \quad [K] \quad (2)$$

4. 沸騰特性の予測

本章では、前章で示した半球状の凸底面を有する有限垂直円柱に対する飽和およびサブクール



(a) $\Delta T_{sub}=0K$



(b) $\Delta T_{sub}=20K$

Fig. 4 Cooling curve and cooling rate

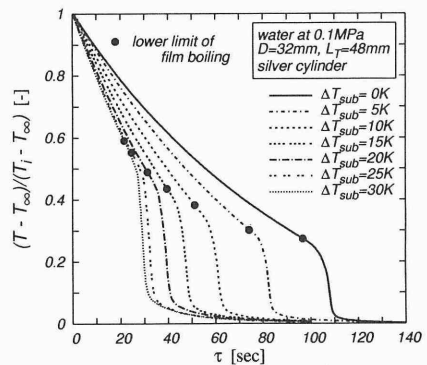


Fig. 5 Cooling curve

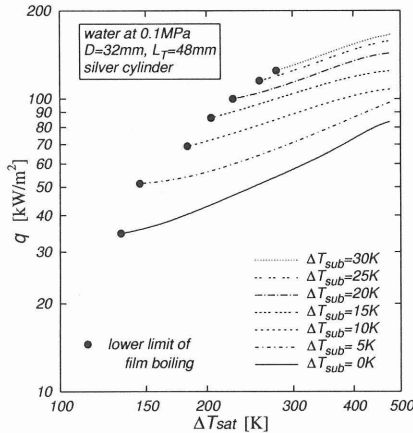


Fig. 6 Boiling curve

膜沸騰の測定値を単一面の熱伝達率を用いて予測する方法を検討し提案する。

4・1 壁面熱流束の推定法 半球状の凸底面を有する有限垂直円柱を円柱まわりに形成される蒸気膜の気液界面の性状より、図8に示すように、凸底面と垂直面下端側に形成される平滑界面領域、西尾・大竹の蒸気膜ユニットモデル⁽³⁾が適用される垂直面上端側の波状界面領域および円柱上面の気液二相の不安定を伴う領域の3領域から構成される系としてモデル化し、円柱全表面からの伝熱量 Q を次式のように平滑界面域(図8のAの部分)からの伝熱量 Q_A 、垂直面の波状界面領域(図8のBの部分)からの伝熱量 Q_B および上面(図8のCの部分)からの伝熱量 Q_C の総和と定義する。

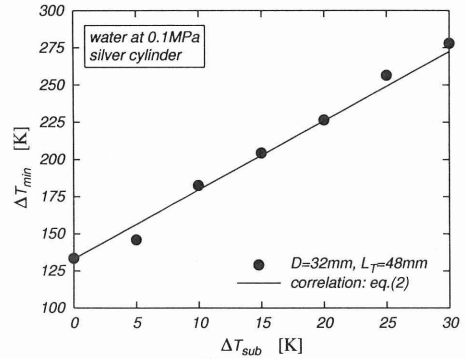
$$Q \equiv Q_A + Q_B + Q_C \quad (3)$$

$$Q_A \equiv \bar{h}_{A1}(T_w - T_{sat})(\pi D^2/2) + \bar{h}_{A2}(T_w - T_{sat})(\pi D L_{A2}) \quad (4)$$

$$Q_B \equiv \bar{h}_B(T_w - T_{sat})\pi D L_B \quad (5)$$

$$Q_C \equiv \bar{h}_C(T_w - T_{sat})(\pi D^2/4) \quad (6)$$

ここに、 \bar{h}_{A1} および \bar{h}_{A2} は凸底面および垂直面下端側の平滑界面(図8のAの部分)からの平均熱伝達率、 \bar{h}_B は垂直面上端側の波状界面(図8のBの部分)からの平均熱伝達率、 \bar{h}_C は上面(図8のCの部分)からの平均熱伝達率である。 L_{A2} は垂直面下端側に形成される平滑界面長さで、 $L_{A2} = P_s - (\pi D/4)$ として与えられる。 P_s は凸面下端部(図8の×印)から曲面に接続する垂直面に沿う平滑界面限界長さである。 L_B は垂直面上端側の波状界面の長さで、 $L_B = L - L_{A2}$ として与えられる。平滑界面における平均熱伝達率は凸

Fig. 7 Relationship between ΔT_{min} and ΔT_{sub}

底面と垂直面下端側の熱伝達から構成され、半球状の凸底面における平均熱伝達率 \bar{h}_{A1} に対しては T_{so} ら⁽⁴⁾が球に対して展開した層流二相境界層理論を、垂直面の平滑界面の平均熱伝達率 \bar{h}_{A2} に対しては西川ら⁽⁵⁾の層流二相境界層理論を適用した解析解でそれぞれ評価する。一方、垂直面上端側の波状界面に対する平均熱伝達率 \bar{h}_B は西尾・大竹の蒸気膜ユニットモデルに基づく整理式⁽³⁾で、上面の平均熱伝達率 \bar{h}_C はHamill-Baumeisterの整理式⁽⁶⁾で評価するが、この二つの熱伝達率に対しては先の報告⁽²⁾において著者らが採用した整理式を適用する。なお、後述するように下向き凸底面の下流側で波状界面が形成される場合には平均熱伝達率の評価として西尾・大竹の蒸気膜ユニットモデルに基づく整理式⁽³⁾を暫定的に適用する。

円柱の凸底面および垂直面下端側に形成される平滑界面限界長さ P_s の大きさは蒸気膜の写真観察から定められるが、液体サブクール度 ΔT_{sub} および伝熱面過熱度 ΔT_{sat} に依存して変化している。5秒間隔で撮影したスティル写真から目視で判定した平滑界面限界長さ P_s の実測値を図9に示すように、 $(\frac{3}{2})\pi\lambda_0$ を除いた無次元長さ $P_s/(\frac{3}{2})\pi\lambda_0$ を縦軸に、横軸に無次元サブクール度 Sc と無次元過熱度 Sp の比 Sc/Sp をとって整理した。 λ_0 は毛管長さである。 $P_s/(\frac{3}{2})\pi\lambda_0$ と Sc/Sp の関係は次式で近似されるがサブクール域($0K < \Delta T_{sub} \leq 30K$)の実測値に対する相関性は $\pm 20\%$ 程度である。

$$\frac{P_s}{(\frac{3}{2})\pi\lambda_0} = 1 + 17.8 \left(\frac{Sc}{Sp} \right) \quad (7)$$

ここに、 Sp 、 Sc および λ_0 は次式によって与えられる。

$$Sp \equiv c_{p,v}\Delta T_{sat}/(Pr_v l) \quad (8)$$

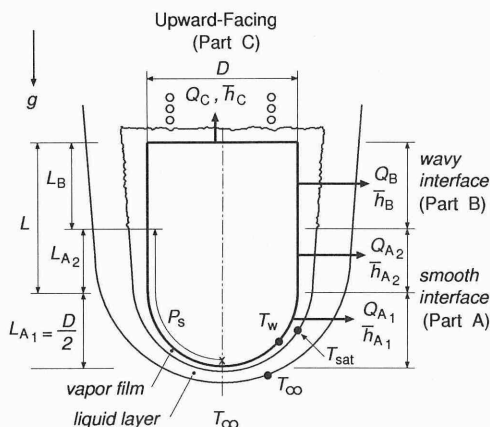


Fig. 8 Physical model and coordinates

$$Sc \equiv c_{pL} \Delta T_{sub} / (Pr_L \ell) \quad (9)$$

$$\lambda_0 = [\sigma / \{g(\rho_{LS} - \rho_{VS})\}]^{1/2} \quad (10)$$

c_p , Pr , ℓ , σ および ρ はそれぞれ定圧比熱, プラントル数, 蒸発潜熱, 表面張力および密度で, 下添字の L は液体, V は蒸気, LS は飽和水, VS は飽和蒸気を表している. 飽和 ($Sc=0$) に対する実測値は図 9 に 4 点 (○印) 示しているように, 無次元過熱度 Sp に依存して $0 \sim 1.7$ ($P_s=0 \sim 20\text{mm}$) の間で変化している. しかし, 飽和の場合の P_s の変化による有限垂直円柱の全表面積で平均した式 (12) の壁面熱流束に対する影響は 1.5% と小さいので, 式 (7) で $Sc/Sp=0$ として定まる 11.8mm を飽和における平均的な平滑界面限界長さ P_s と定め, 無次元過熱度 Sp の変化による依存性は考慮していない.

凸底面を有する有限垂直円柱の全表面積で平均した壁面熱流束 q は式 (3) で得られる全伝熱量 Q を円柱の全伝熱面積 $A [= \pi D(L + \frac{3}{4}D)]$ で除すことにより次式で与えられる.

$$q = \frac{Q}{A} = \left[\frac{\frac{1}{4L} \{ (2\bar{h}_{A1}D + 8\bar{h}_{A2}L_{A2}) + (4\bar{h}_B L_B + \bar{h}_C D) \}}{1 + \frac{3}{4}(\frac{D}{L})} \right] \times \Delta T_{sat} \quad (11)$$

一方, $Sc/Sp < 0.064$ の場合には凸底面の領域内で平滑界面が波状界面に移行するので円柱の全表面積で平均した壁面熱流束 q は次式で計算される.

$$q = \left[\frac{\frac{1}{4L} (4\bar{h}_{A1}L_A + \bar{h}_C D) + 4\bar{h}_B \{L + (D/2 - L_A)\}}{1 + \frac{3}{4}(\frac{D}{L})} \right] \times \Delta T_{sat} \quad (12)$$

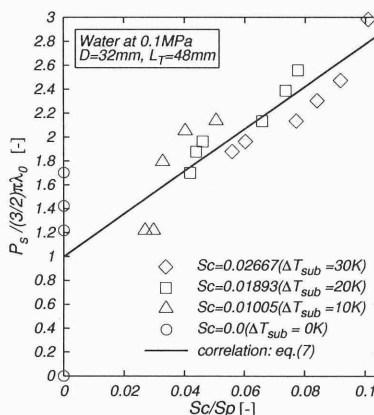


Fig. 9 Relationship between $P_s / (\frac{3}{2})\pi\lambda_0$ and Sc/Sp

ここに, L_A は平滑界面領域の球冠部の高さで, $L_A = D(1 - \cos\phi_s)/2$, $\phi_s = P_s / \{ \frac{D}{2} (\frac{\pi}{180}) \}$ である.

4.2 予測値と測定値の比較 図 10 は壁面熱流束の算定式 [式 (11) または式 (12)] に基づく予測値と本研究で取得した測定値の相関性を示したものである. 図より, 両者の相関性は +15% から -35% 程度であり, サブクール領域の予測値が低く見積もられていることがわかる. そこで, サブクール領域の予測値を測定値に近づけるため次のような検討を試みた.

著者らの先の研究⁽²⁾で, 波状界面の場合には液体サブクール度が壁面熱流束に及ぼす効果は弱いことが明らかになっているので, 凸底面および垂直面下端側に形成される平滑界面からの平均熱伝達率を大きくすることで測定値と予測値の差を小さくすることを試みた.

図 11 は壁面熱流束の予測の検討に基づく予測値と測定値を比較したもので, 予測値は凸底面および垂直面下端側の平滑界面からの平均熱伝達率 \bar{h}_{A1} および \bar{h}_{A2} の解析解に補正係数 1.7 を乗じて算出したものである. 図より, 両者の相関性は $\pm 15\%$ の範囲内で一致していることがわかる. しかし, この補正には供試円柱の直径や長さの寸法効果が含まれていないため, ここでは暫定的にこの補正を凸底面を有する有限垂直円柱まわりの膜沸騰熱伝達に対して提案する. ちなみに, Tso ら⁽⁴⁾は球の解析において, 理論を測定値に合致させるためには解析解に 1.0~2.3 の補正係数を乗じる必要があることを報告し, 層流二相境界層理論の限界を論じている.

5. むすび

高温に加熱された円柱直径 32mm, 全長 48mm, 垂

直面長さ 32mm の半球状の凸底面を有する銀製の供試円柱を垂直の姿勢で大気圧下の静止したイオン交換水中へ浸漬冷却した際の膜沸騰熱伝達特性に及ぼす液体サブクール度の影響について実験を行うとともに平滑界面に対して二相境界層理論を採用してサブクール膜沸騰熱伝達の解析を試み、既存の単一面の平均熱伝達率の評価式を総合する手法で壁面熱流束を推算した。また、推算手法の妥当性を測定値より検証した。以下のことが明らかとなった。

- (1) 飽和膜沸騰の壁面熱流束は伝熱面過熱度の降下とともに約 80kW/m^2 から 34kW/m^2 の範囲で推移し、伝熱面過熱度 300K 、液体サブクール度 30K の場合にサブクール度の効果は約 2 倍以上となる。
- (2) 膜沸騰の下限界点は液体サブクール度が高くなるほど高過熱度側に移動し、遷移沸騰領域への移行は高い壁面熱流束で生じる。
- (3) 解析解に基づく壁面熱流束の予測値は測定値と $+15\%$ から -35% で一致するが、平滑界面に対する解析解に補正係数 1.7 を乗じた場合の予測値は測定値と $\pm 15\%$ で一致する。

文 献

- (1) Yamada, T., Shigechi, T., Momoki, S., Kanemaru, K., and Yamaguchi, T., Film Boiling Heat Transfer around a Vertical Finite-Length Cylinder, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*(in Japanese), Vol.70, No.695(2004), pp.1762-1768.
- (2) Yamada, T., Shigechi, T., Momoki, S., Kanemaru, K., and Yamaguchi, T., Subcooled Film Boiling Heat Transfer around a Vertical Finite-Length Cylinder, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*(in Japanese), Vol.73, No.732(2007), pp.1715-1722.
- (3) Nishio, S. and Ohtake, H., Natural-Convection Film-Boiling Heat Transfer(6th Report, Heat Transfer Correlation of Film Boiling with Wavy Interface), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*(in Japanese), Vol.58, No.554(1992), pp.3161-3166.
- (4) Tso, C. P., Low, H. G., and Ng, S. M., Pool Film Boiling from Spheres to Saturated and Subcooled Liquids of Freon-12 and Freon-22, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.11, No2(1990),

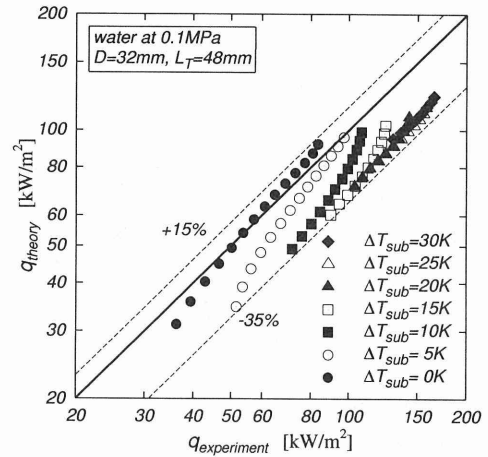


Fig.10 Examination of the present prediction method

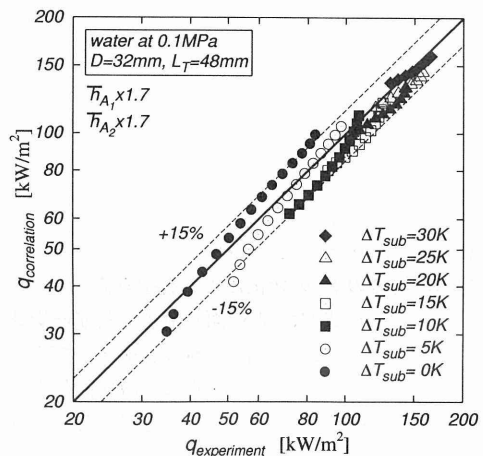


Fig.11 Refinement of heat transfer prediction

- pp.154-159.
- (5) Nishikawa, K., Ito, T., Matsumoto, K., and Kuroki, T., A Correlation of Pool Film Boiling Heat Transfer from a Horizontal Cylinder of Uniform Surface Temperature to Subcooled Liquids, *Technology Reports of Kyushu University*(in Japanese), Vol.48, No.6(1975), pp.815-821.
- (6) Hamill, T.D. and Baumeister, K.J., Effect of Subcooling and Radiation on Film-Boiling Heat Transfer from a Flat Plate, *National Aeronautics and Space Administration*, TN D-3925, (1967), pp.1-39.