

有限長の垂直円柱まわりのサブクール膜沸騰熱伝達*

山田 昭^{*1}, 茂地 徹^{*1}, 桃木 悟^{*1}
金丸 邦康^{*1}, 山口 朝彦^{*1}Subcooled Film Boiling Heat Transfer
Around a Vertical Finite-Length CylinderTakashi YAMADA^{*2}, Toru SHIGECHI, Satoru MOMOKI,
Kuniyasu KANEMARU and Tomohiko YAMAGUCHI^{*2} Department of Mechanical Systems Engineering, Nagasaki University,
1-14 Bunkyo-machi, Nagasaki-shi, Nagasaki, 852-8521 Japan

Correlating equations for the film boiling heat transfer from a vertical cylinder of finite-length to atmospheric subcooled water were examined and proposed. The overall heat transfer rate around the cylinder was determined by taking into account each convective heat transfer on the bottom, side and top surfaces of the cylinder. The present prediction method was compared with the experimental data obtained by quenching method. The diameter (D) and length (L) of the cylinder tested in the experiments are 32 mm×16 mm, 32 mm×32 mm, 32 mm×64 mm, 45 mm×45 mm, 50 mm×16 mm, 50 mm×32 mm and 50 mm×64 mm. The degree of liquid subcooling was varied from 2 to 30 K. All the experimental data for the aspect ratio with $0.32 \leq L/D \leq 2.0$ can be correlated within $\pm 15\%$ by the present prediction method. Also, the lower limit of film boiling was discussed in terms of wall heat flux and degree of superheating.

Key Words: Film Boiling, Finite-Length Vertical Cylinder, Quenching, Heat Transfer Correlation, Lower Limit of Film Boiling

1. まえがき

金属の焼入れ, 材料の製造工程, 緊急冷却時の原子炉等で発生する3次元物体まわりの膜沸騰熱伝達を適切に予測することは実用上重要な課題である. 金属の焼入れの伝熱に関しては多くの沸騰研究⁽¹⁾が発表されているものの現状ではまだ知見が不足しており, 3次元物体まわりの膜沸騰熱伝達特性を十分な精度で定量的に推定することは困難である. 著者らは, 3次元物体として金属の焼入れで用いられる有限長さの垂直円柱まわりの飽和膜沸騰熱伝達に関する研究を行い, 円板状の円柱(直径100mm, 長さ8mm)から細長い棒状の円柱(直径8mm, 長さ160mm)に至る18種類の供試円柱を用いて過渡実験で得られた全ての測定データを $\pm 15\%$ 以内で相関できる伝熱整理式を作成し, 報告している⁽²⁾.

3次元物体まわりに膜沸騰が発生する場合の熱設計や安全性に関して検討を行うためには, さらに, 液体が飽和温度より低くサブクールされた条件下での膜沸騰熱伝達に関する知見が必要である.

本研究では, 70℃から98℃の範囲の大気圧サブク

ール水より得られた測定値を整理するために, 飽和膜沸騰熱伝達の整理法⁽²⁾をサブクール膜沸騰熱伝達の場合に拡張し, 伝熱整理法の検討を試みたのでその結果について報告する. また, 膜沸騰領域と遷移沸騰領域の境界点(膜沸騰下限界点)における過熱度と熱流束についても整理を試みたのでその結果についても報告する.

主な記号

A	: 円柱の全伝熱面積, [m ²]
c_p	: 定圧比熱, [J/(kg·K)]
D	: 円柱直径, [m]
g	: 重力加速度, [m/s ²]
Gr	: グラスホフ数
\bar{h}	: 平均熱伝達係数, [W/(m ² ·K)]
ℓ	: 蒸発潜熱, [J/kg]
L	: 円柱長さ (= $L_{B1} + L_{B2}$), [m]
L_{B1}	: Bromley モデルが適用できる垂直部分の長さ, 式(10), [m]
L_{B2}	: 西尾・大竹の蒸気膜ユニットモデルが適用できる垂直部分の長さ, [m]
T_w	: 伝熱面表面温度, [°C]

* 原稿受付 2006年11月6日.

*1 正員, 長崎大学工学部(〒852-8521 長崎市文教町1-14).

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

- T_{sat} : 飽和温度, [°C]
 T_{∞} : バルク水温度, [°C]
 ΔT_{sat} : 伝熱面過熱度 ($=T_w - T_{\text{sat}}$), [K]
 ΔT_{sub} : 液体サブクール度 ($=T_{\text{sat}} - T_{\infty}$), [K]
 Pr : プラントル数
 q : 全伝熱面積で平均した壁面熱流束, 式 (12), [W/m²]
 Sc : 無次元サブクール度, 式 (5)
 Sp : 無次元過熱度, 式 (15)
 λ_0 : 毛管長さ 式 (11), [m]
 ν : 動粘性係数, [m²/s]
 ρ : 密度, [kg/m³]
 σ : 表面張力, [N/m]

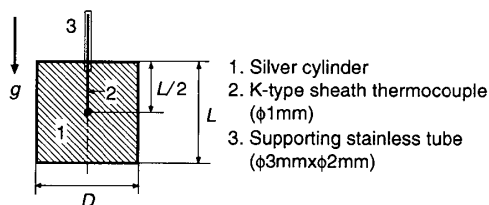
添字

- A : 底面
 B : 側面
 C : 上面
 L : 液体
 LS : 飽和水
 V : 蒸気
 VS : 飽和蒸気

2. 実験

2.1 実験装置および実験方法 サブクール膜沸騰熱伝達の伝熱整理法を検証するために過渡サブクール膜沸騰実験を行った。実験装置は飽和膜沸騰熱伝達の実験⁽²⁾で使用したものと同一のものであり、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から構成されている。沸騰槽はステンレス製で側面および底面のそれぞれ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4つの観察窓が設けられている。沸騰槽内の底面のコーナー付近にバルク水（大気圧下のイオン交換水）昇温用として、2kW容量の浸漬型加熱器を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を設けて二重水槽にしている。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。

図1は本実験で使用した円柱の断面図および実験条件を示している。供試円柱は7種類で、バルク水の温度は大気圧下70°C（液体サブクール度 $\Delta T_{\text{sub}}=30\text{K}$ ）から98°C（液体サブクール度 $\Delta T_{\text{sub}}=2\text{K}$ ）の範囲である。外径3mm、内径2mmのステンレス製支持管で支持されている供試円柱の冷却時の温度履歴は、支持管を介して円柱中心まで挿入されているシース径1mm



cylinder size	water at atmospheric pressure liquid subcooling, ΔT_{sub} [K]
D=32mm, L=16mm	0, 5, 10
D=32mm, L=64mm	
D=50mm, L=16mm	0, 5, 10, 15, 20
D=50mm, L=32mm	
D=32mm, L=32mm	0, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20
D=45mm, L=45mm	
D=50mm, L=64mm	0, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25, 30

Fig.1 Test cylinder and experimental condition

のK型熱電対で測定される。中心温度はYHP3852Aデータ集録/制御ユニット装置により0.25sまたは0.5sのサンプリング間隔で計測される。

実験前の表面条件を一定にするために供試円柱表面に金属研磨材を塗り、バフ研磨にて鏡面仕上げをし、アルコールで洗浄した。供試円柱は電気炉によって約600°Cまで加熱された後、昇降装置に取り付けて大気圧下の水面下100mmのバルク水中で浸漬冷却される。なお、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。

2.2 伝熱面温度と熱流束の測定 供試円柱の材質には熱伝導率が高い銀を使用しているため、円柱の温度は集中定数系近似、つまり、円柱の内部は空間的に一様に冷却されると仮定する。従って、全表面平均の熱流束 q_{exp} は次式によって与えられる。

$$q_{\text{exp}} = -\rho_s c_s \frac{V}{A} \frac{dT}{d\tau} \quad (1)$$

ここに、 ρ_s , c_s , A および V は供試材（銀）の密度、比熱、伝熱面積および体積であり、 $dT/d\tau$ は冷却速度である。なお、円柱内部の温度分布一様の仮定の妥当性は2次元非定常熱伝導計算により確認した。本実験範囲における膜沸騰領域でのピオー数は0.06以下と評価できるので、集中定数系近似[式(1)]が成り立つものとする。式(1)から定まる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については、直径32mm、長さ32mmの供試円柱の場合に支持管表面からバルク水へのサブクール膜沸騰熱伝達は最大2%程度と推定される。

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、そのときの過熱度 ΔT_{\min} と熱流束 q_{\min} をそれぞれ次式のように評価する。

$$\Delta T_{\min} = (T - T_{\text{sat}}) \Big|_{\frac{dT}{d\tau} \Big|_{\min}} \quad (2)$$

$$q_{\min} = -\rho_s c_s \frac{V}{A} \frac{dT}{d\tau} \Big|_{\min} \quad (3)$$

2.3 サブクール膜沸騰の様相

図2は直径 $D=32\text{mm}$ 、長さ $L=32\text{mm}$ の垂直円柱まわりのサブクール膜沸騰の様相を表す静止写真の一例を示したもので、液体サブクール度 $\Delta T_{\text{sub}}=10\text{K}$ 、伝熱面過熱度 $\Delta T_{\text{sub}} \approx 240\text{K}$ の場合である。目視観察や写真および高速ビデオ撮影による観察結果から、有限長さの垂直円柱まわりに形成される蒸気膜挙動は以下のように明らかになった。バルク水がサブクールされている場合の膜沸騰領域での円柱底面は安定で平滑な蒸気膜で覆われており、円柱底面で発生する蒸気は端面から垂直面に沿って流出上昇する。液体サブクール度が小さい場合 ($\Delta T_{\text{sub}}=0\sim 5\text{K}$) には垂直面の下端部領域 (L_{B1} の部分) を除いて蒸気膜の界面は乱れた状態 (L_{B2} の部分) にあり、円柱上面も常に乱れている。この L_{B1} と L_{B2} については3節で詳述する。液体サブクール度が大きくなれば垂直面の気液界面の乱れは抑制され、垂直面で平滑な界面領域が拡大する。円柱上面では伝熱面の大きさにより3~5個の柱状または茸状の蒸気溜が形成され、それぞれの蒸気溜から気泡が交互に離脱し、離脱後には新しい蒸気溜が形成される。また、離脱した上昇気泡の消滅は液体サブクール度の増加によって早まることが観察された。なお、膜沸騰下限界点に密接に関係すると考えられる蒸気膜崩壊の発生場所は、伝熱面上で蒸気膜の厚さが最も薄くなる垂直円柱底面端部の角の部分であり、崩壊は円柱全面に同時に伝播する。

2.4 冷却曲線および冷却速度曲線の測定値

図3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直径 $D=32\text{mm}$ 、長さ $L=32\text{mm}$ の円柱中心での温度 (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、バルク水が飽和 (液体サブクール度 $\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$) の場合と 90°C ($\Delta T_{\text{sub}}=10\text{K}$) の場合を示している。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、2.2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。図より、下限界点の時刻での円柱温度と冷却速度はそれぞれ、 $\Delta T_{\text{sub}}=10\text{K}$ の場合が $\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$ の場合より高いことがわかる。

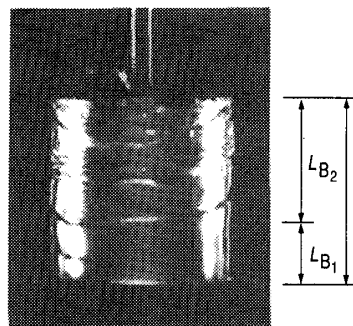


Fig. 2 Film boiling phenomenon around a vertical cylinder ($D=32\text{mm}$, $L=32\text{mm}$) with $\Delta T_{\text{sub}}=10\text{K}$ and $\Delta T_{\text{sat}} \approx 240\text{K}$

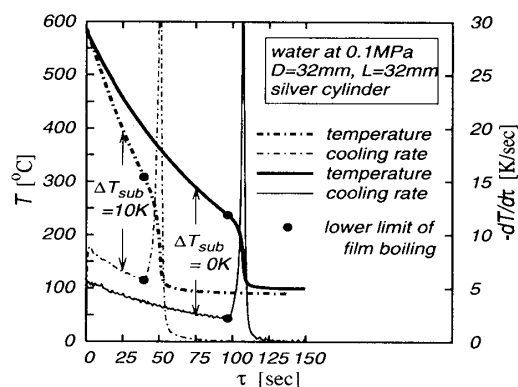


Fig. 3 Cooling curve with cooling rate

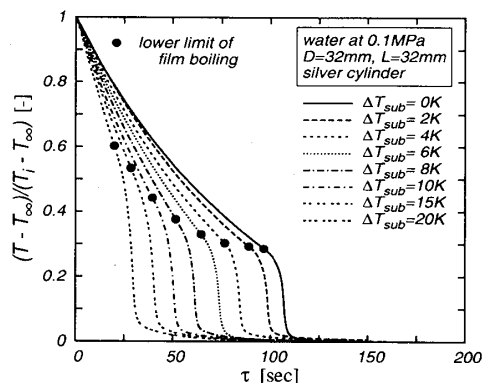


Fig. 4 Cooling curve for $D=32\text{mm}$ and $L=32\text{mm}$

図4は直径 $D=32\text{mm}$ 、長さ $L=32\text{mm}$ の場合の冷却曲線を、横軸に冷却経過時間 τ 、縦軸に無次元温度 $(T - T_{\infty}) / (T_i - T_{\infty})$ をとって示したものである。 T 、 T_i および T_{∞} は円柱中心温度、測定開始時の円柱中心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、次節に示す沸騰特性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。

2.5 膜沸騰領域の沸騰特性の測定値 図5は図4の冷却曲線から、式(1)より定めた膜沸騰領域の沸騰

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、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高くなるとともに膜沸騰の下限界点 (●印の記号) での熱流束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熱流束で生じることがわかる。ちなみに、サブクールされた膜沸騰領域の熱流束は、伝熱面過熱度 $\Delta T_{sat}=300K$ に対して飽和の場合より $\Delta T_{sub}=10K$ の場合には約 77%, $\Delta T_{sub}=20K$ の場合には約 260% 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。

2.6 膜沸騰下限界点における伝熱面過熱度および熱流束の整理 図 6 は式 (2) で定義されている過熱度 ΔT_{min} の測定値を縦軸に、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。著者らは有限長さの垂直円柱に対して、飽和膜沸騰の場合には ΔT_{min} の測定値が実験範囲では概ね 136K であることを報告している (2)。本実験範囲では図 6 に示すように ΔT_{min} に及ぼす円柱寸法の影響は小さく、液体サブクール度に強く依存している。 ΔT_{min} は液体サブクール度が大きくなるに従って増大していることがわかる。図中には水平円柱に対する西尾・上村の整理式 (3) に基づく計算値を点線で示しているが、著者らの測定値は液体サブクール度 $\Delta T_{sub}=5K$ 以上では、西尾・上村の計算値と 5% 以内で一致している。しかし、 $\Delta T_{sub}<4K$ では ΔT_{min} の測定値は、ほぼ一定で飽和膜沸騰下限界点の伝熱面過熱度 136K に漸近している。

図 7 は式 (3) で評価される熱流束 q_{min} の測定値を無次元サブクール度 $Sc=0$ における熱流束 $q_{min,sat}$ の測定値で除した値を縦軸に、横軸に式 (5) で定まる無次元サブクール度 Sc をとり整理したものである。図より、 q_{min} は Sc に強く依存し、無次元サブクール度 Sc が大きくなるに従って増大していることがわかる。図中に示す実線は全測定値を最小二乗法で相関した式 (4) より与えられ、本実験範囲において q_{min} に対する測定値を $\pm 10\%$ 以内で整理できる。

$$\frac{q_{min}}{q_{min,sat}} = 1 + 107Sc + 2374Sc^2 \quad (4)$$

$$Sc \equiv c_{pL}\Delta T_{sub}/(Pr_L \ell) \quad (5)$$

なお、図 7 に示す点線は水平円柱に対する西尾・上村の整理式 (3) に基づく計算値で、無次元サブクール度 $Sc=0.01893(\Delta T_{sub}=20K)$ において比較すると、西尾・上村の水平円柱に対する値が著者らの垂直円柱の値より約 40% 高い。

3. 底面・側面・上面で構成される垂直円柱の伝熱整理法

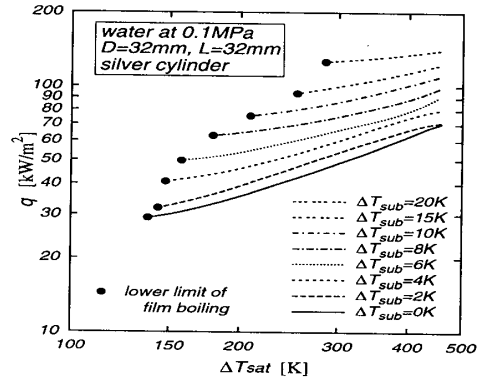


Fig. 5 Boiling curve for $D=32mm$ and $L=32mm$

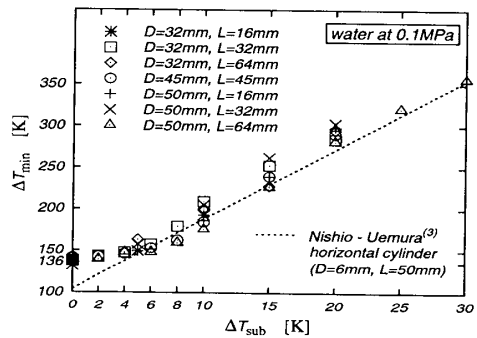


Fig. 6 Relationship between ΔT_{min} and ΔT_{sub}

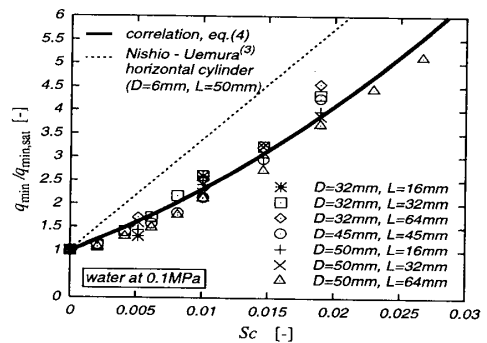


Fig. 7 Relationship between $q_{min}/q_{min,sat}$ and Sc

先に報告 (2) した有限長さの垂直円柱まわりの飽和膜沸騰熱伝達で用いた各面の平均熱伝達係数を基準として、既存および本研究で提案するサブクール膜沸騰熱伝達係数の評価式を適用して液体サブクール度の効果を推定した。なお、整理式で用いられる物性値は膜温度で評価する。

3.1 全表面の伝熱量と壁面熱流束の推定 有限長さの垂直円柱まわりの飽和膜沸騰熱伝達の整理法 (2) は、有限円柱を円柱底面 (下向き水平面)、円柱側面 (垂直面) および円柱上面 (上向き水平面) から構成される系としてモデル化し、各表面の熱伝達係数を評価して総合するものであるが、この方法を本研究のサブクール膜沸騰熱伝達の伝熱整理にも適用する。

円柱体全表面からの伝熱量 Q を次式のように円柱体の底面 (図 8 の A の部分) からの伝熱量 Q_A , 側面 (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. なお, 本研究では, サブクール膜沸騰においては対流熱伝達係数が大きいいため放射伝熱の効果は考慮しない.

$$Q \equiv Q_A + Q_B + Q_C \quad (6)$$

$$Q_A \equiv \bar{h}_A(T_w - T_{\text{sat}})(\pi D^2/4) \quad (7)$$

$$Q_B \equiv \bar{h}_{B_1}(T_w - T_{\text{sat}})(\pi D L_{B_1}) + \bar{h}_{B_2}(T_w - T_{\text{sat}})(\pi D L_{B_2}) \quad (8)$$

$$Q_C \equiv \bar{h}_C(T_w - T_{\text{sat}})(\pi D^2/4) \quad (9)$$

ここに, \bar{h}_A は円柱底面の平均熱伝達係数, \bar{h}_{B_1} および \bar{h}_{B_2} は円柱側面の平均熱伝達係数, \bar{h}_C は円柱上面の平均熱伝達係数である. 本研究では, 円柱側面に対して 2 種類の熱伝達係数を用いているが, これは側面において気液界面が平滑であるか波状であるかによって異なる熱伝達係数の評価を行うためである. 2.3 節の膜沸騰の様相において記述しているように, 蒸気は垂直円柱の側面に沿って上昇する. 垂直円柱の側面においては気液界面の性状が平滑な部分と波状な部分の 2 つがあることが目視観察, 写真および高速ビデオ撮影によって確認されている. 平滑な界面は円柱側面下端部近傍において, 波状な界面は平滑な界面の下流側, つまり, その上方に存在する. この気液界面の性状は熱伝達係数に影響を及ぼす因子と考えられるため, 界面が平滑か波状かにより熱伝達係数の評価を区別した. L_{B_1} は円柱側面の界面が平滑である下端部からの垂直部分の長さであり, L_{B_2} は界面が波状である領域の垂直部分の長さである. 垂直部分の平滑界面においては Bromley モデル (4) を適用し, 波状界面において

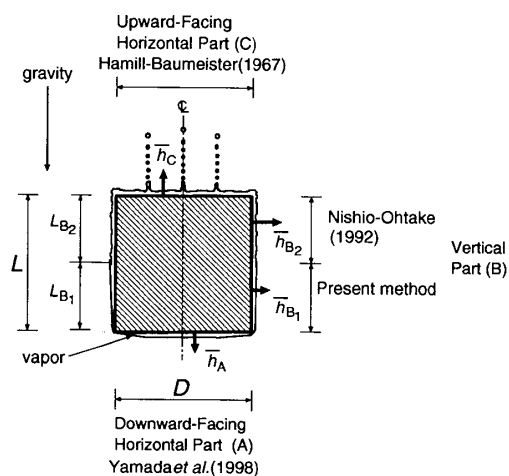


Fig. 8 Film boiling model for the prediction

は西尾・大竹の蒸気膜ユニットモデル (5) を適用する.

円柱側面の下端部付近に形成される平滑界面の長さ L_{B_1} は蒸気膜様相の観察結果, 円柱の大きさ, 伝熱面過熱度および液体サブクール度により変化することが明らかになったが, 特に液体サブクール度の影響が顕著であった.

図 9 は図 2 のような写真に基づいて平滑界面の長さ L_{B_1} を計測し, その計測値を $\pi\lambda_0$ で除した無次元長さ $L_{B_1}/(\pi\lambda_0)$ を縦軸に, 横軸に無次元サブクール度 Sc をとり整理したものである. 無次元長さ $L_{B_1}/(\pi\lambda_0)$ は無次元サブクール度 Sc に対して直線的に変化することから次式 (10) のような整理式を作成した. 図 2 の場合, $L_{B_1}/(\pi\lambda_0) = 1.45$ ($L_{B_1} = 11.4\text{mm}$) である. 図 9 は, 円柱長さ L が小さい 16mm を除くアスペクト比 (L/D) が 1 または 1 に最も近い 3 種類の供試円柱の観察結果である. なお, 飽和膜沸騰 ($Sc=0$) における平滑界面の観察結果に基づく計測値 L_{B_1} は約 8mm で, これは大気圧の飽和水における $\pi\lambda_0 = 7.85\text{mm}$ に相当する長さである.

$$L_{B_1}/(\pi\lambda_0) = 1 + 56.3Sc \quad (10)$$

$$\lambda_0 \equiv [\sigma/\{g(\rho_{Ls} - \rho_{Vs})\}]^{1/2} \quad (11)$$

ここに, λ_0 は毛管長さである.

円柱の全表面積で平均した壁面熱流束 q は式 (6) で得られる全伝熱量を円柱体の全伝熱面積 A で除すことにより次式で与えられるが, 円柱長さ L が式 (10) で与えられる L_{B_1} より小さい場合には $L_{B_1} = L$, $L_{B_2} = 0$ として取り扱う.

$$q = \left[\frac{\bar{h}_A + 4(\bar{h}_{B_1}L_{B_1} + \bar{h}_{B_2}L_{B_2})/D + \bar{h}_C}{2 + 4(L/D)} \right] \Delta T_{\text{sat}} \quad (12)$$

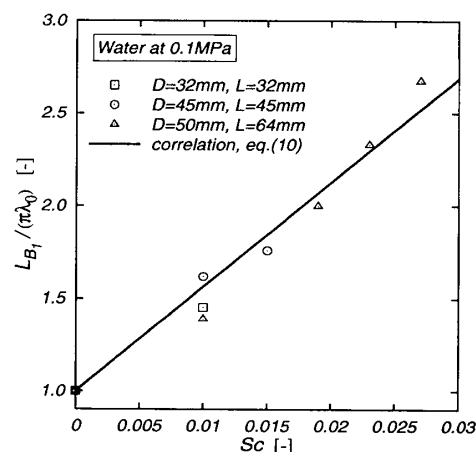


Fig. 9 Relationship between $L_{B_1}/(\pi\lambda_0)$ and Sc

式(12)中の \bar{h}_A , \bar{h}_{B_1} , \bar{h}_{B_2} および \bar{h}_C は以下のように決定される。

3.1.1 円柱底面の平均熱伝達係数の評価 円柱底面のサブクール膜沸騰の平均熱伝達係数 \bar{h}_A は著者らの整理式(6)より評価される。飽和膜沸騰における平均熱伝達係数 $\bar{h}_{A,sat}$ は著者らの理論式(2)を適用する。この両者の比 $\bar{h}_A/\bar{h}_{A,sat}$ は付録Aのように計算される。

3.1.2 円柱上面の平均熱伝達係数の評価 円柱上面のサブクール膜沸騰の平均熱伝達係数 \bar{h}_C は Hamill-Baumeister の方法(放射伝熱を除く)⁽⁷⁾で評価する。一方、飽和膜沸騰の場合の平均熱伝達係数 $\bar{h}_{C,sat}$ は Berenson の整理式⁽⁸⁾を用いている。この両者の比 $\bar{h}_C/\bar{h}_{C,sat}$ は付録Cのように計算される。

3.1.3 円柱側面の平均熱伝達係数の評価 3.1節で記述しているように、円柱の長さ L が、式(10)で計算される L_{B_1} (Bromley モデルが適用できる垂直部分の長さ)より大きい場合には、円柱側面に形成される蒸気膜は界面が平滑な部分と波状な部分の2つの領域で構成されるので、界面性状に対応した平均熱伝達係数の評価を行う必要がある。

3.1.3.1 円柱側面の平滑界面に対する平均熱伝達係数(1) 西川らの整理式による評価

円柱側面の平滑界面に対するサブクール膜沸騰の平均熱伝達係数 \bar{h}_{B_1} に、西川らの一般的な整理式⁽⁹⁾を適用し、円柱底面の平均熱伝達係数 \bar{h}_A [付録の式(A.1)], 円柱側面の波状界面に適用する平均熱伝達係数 \bar{h}_{B_2} [付録の式(B.4)]および円柱上面の平均熱伝達係数 \bar{h}_C [付録の式(C.1)]を式(12)に代入して平均熱流束を予測した。予測値と7種類の供試円柱に対する著者らの測定値の相関性は+15%から-40%となった⁽¹⁰⁾。これは液体サブクール度が大きいところで平均熱流束の予測値が小さく見積られたことによるものである。

(2) 測定値に基づいた整理式による評価

円柱底面の平均熱伝達係数 \bar{h}_A [付録の式(A.1)]は著者らの円柱底面のサブクール膜沸騰熱伝達の測定値に基づいて作成した信頼性の高い整理式であること、および波状界面に適用する垂直面と円柱上面の平均熱伝達係数 \bar{h}_{B_2} [付録の式(B.4)]と \bar{h}_C [付録の式(C.1)]では、液体サブクール度の影響が弱いことを考慮して、 q の測定値を用いて以下のように平滑界面に対する平均熱伝達係数 \bar{h}_{B_1} の推定を試みた。

図10は測定値に基づく円柱側面の平滑界面における液体サブクール度の効果 $H(=\bar{h}_{B_1}/\bar{h}_{B_1,sat})$ を縦軸に、無次元サブクール度 Sc と無次元過熱度 Sp [式(15)]の比 Sc/Sp を横軸にとり整理したもので、円柱直径

32mm, 長さ32mmの場合を代表例として示している。基準となる飽和膜沸騰の平均熱伝達係数 $\bar{h}_{B_1,sat}$ は付録の式(B.1)を適用している。 \bar{h}_{B_1} は熱流束 q の測定値と同じ液体サブクール度および伝熱面過熱度の条件で後述の付録に示す式(A.1), 式(B.4)および式(C.1)から推定した \bar{h}_A , \bar{h}_{B_2} および \bar{h}_C を式(12)に代入することにより逆算して求めた。 H は Sc/Sp に関して直線的に変化する。その傾きを最小二乗法で定めると60.75となる。図中の実線[式(13)]については後述する。

図11は7種類の供試円柱に対して、図10に示すような H と Sc/Sp の関係より定められた傾き c_{B_1} を縦軸に、円柱側面の無次元長さ $L/(\pi\lambda_0)$ を横軸にとり整理したものである。 c_{B_1} と $L/(\pi\lambda_0)$ の関係は直線的で式(14)によって整理することができる。図10に示す実線はこの c_{B_1} と $L/(\pi\lambda_0)$ の関係式[式(14)]を式(13)に代入して得られた計算値で、測定値を±15%程度で相関している。

$$\frac{\bar{h}_{B_1}}{\bar{h}_{B_1,sat}} = 1 + c_{B_1} \left(\frac{Sc}{Sp} \right) \quad (13)$$

$$c_{B_1} = 10.45 + 11.74L/(\pi\lambda_0) \quad (14)$$

$$Sp \equiv c_{p,v} \Delta T_{sat} / (Pr_v \ell) \quad (15)$$

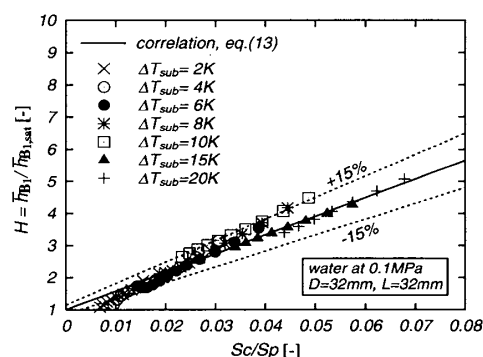


Fig. 10 Relationship between $\bar{h}_{B_1}/\bar{h}_{B_1,sat}$ and Sc/Sp for $D=32\text{mm}$ and $L=32\text{mm}$

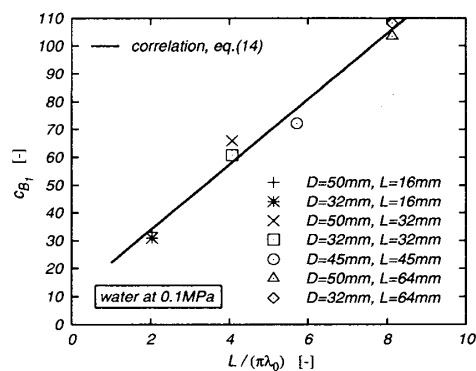


Fig. 11 Relationship between c_{B_1} and $L/(\pi\lambda_0)$

なお、式(13)および式(14)は本実験範囲で得られたものであり大気圧水以外に適用する場合には、バルク液体の物性値依存性等の検討を別に加える必要がある。

3.1.3.2 円柱側面の波状界面に対する平均熱伝達係数

円柱側面の波状界面に対するサブクール膜沸騰の平均熱伝達係数 \bar{h}_{B_2} は付録の式(B.4)より評価する。基準となる波状界面の飽和膜沸騰における平均熱伝達係数 $\bar{h}_{B_2, \text{sat}}$ は付録の式(B.5)を適用する。

3.2 測定値と予測値の比較 図12は付録の式(A.1)、式(13)、付録の式(B.4)および式(C.1)で評価される各面の平均熱伝達係数を式(12)の伝熱整理式に代入することにより定まる予測値を縦軸に、式(1)で計算される著者らの測定値を横軸にとって比較したものである。測定値は450Kまたは475Kの伝熱面過熱度から膜沸騰下限界点温度 ΔT_{min} までの25Kの温度きざみをとっている。図より、予測値と測定値は7種類のいずれの円柱の場合にも $\pm 15\%$ の範囲内で一致している。このことから、本整理法は大気圧水並びに2.6節で記述した膜沸騰下限界までの範囲に対して、直径 $D=32\text{mm}\sim 50\text{mm}$ 、長さ $L=16\text{mm}\sim 64\text{mm}$ の寸法と $0\text{K}\leq \Delta T_{\text{sub}}\leq 30\text{K}$ の液体サブクール度の範囲で有効なものと考えられる。

4. むすび

有限長さの垂直円柱をサブクールされた液体中に浸漬した場合の膜沸騰熱伝達について、円柱底面、側面および上面の各表面の液体サブクール度の効果を考慮して総合する手法でサブクール膜沸騰熱伝達の伝熱整理式を作成し、測定値との比較検討から予測法の妥

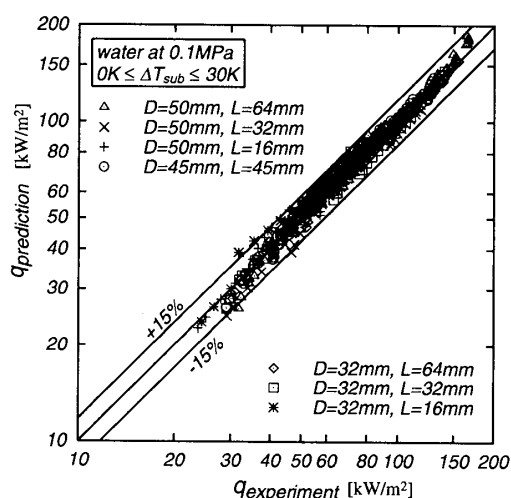


Fig. 12 Heat transfer correlation

当性を検証した。作成した伝熱整理式は直径 $D=32\text{mm}\sim 50\text{mm}$ 、長さ $L=16\text{mm}\sim 64\text{mm}$ の円柱に対して、0K から 30K までの液体サブクール度の実験範囲並びに膜沸騰下限界までの大気圧水の垂直円柱まわりのサブクール膜沸騰熱伝達の整理式として妥当なものである。また、有限垂直円柱に対するサブクール膜沸騰の下限界点における過熱度と熱流束の大きさを本伝熱整理式適用の下限界として、測定値から整理した。

文 献

- (1) The Japan Society of Mechanical Engineers ed., *Boiling Heat Transfer and Cooling*(in Japanese), (1989), pp.128-156.
- (2) Yamada, T. et al., 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.
- (3) Nishio, S. and Uemura, M., Experimental Study on Cooling Power of Pool Water(Effect of Subcooling), *The Heat Treatment*(in Japanese), Vol.23, No.5(1983), pp.260-265.
- (4) Bromley L.A., Heat Transfer in Stable Film Boiling, *Chemical Engineering Progress*, Vol.46, No.5(1950), pp.221-227.
- (5) 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.
- (6) Yamada, T. et al., Effect of Liquid Subcooling on Film Boiling Heat Transfer from Finite-Size Horizontal Surfaces Facing Downward, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*(in Japanese), Vol.64, No.628(1998), pp.4159-4165.
- (7) 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.
- (8) Berenson, P.J., Film-Boiling Heat Transfer from a Horizontal Surface, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 83, No.3(1961), pp.351-358.
- (9) Nishikawa, K. et al., 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.
- (10) Yamada, T. et al., Study on Subcooled Film Boiling Heat Transfer around a Vertical Finite-Length Cylinder (1st Report, Examination of Correlation Equations for Heat Transfer), *Reports of the Faculty of Engineering Nagasaki University*(in Japanese), Vol.35, No.64(2005), pp.1-10.

付 録

A. 円柱底面の平均熱伝達係数の計算式

円柱底面の液体サブクール度の効果式 (A.1) は文献 (2) と文献 (6) の組み合わせに基づいている。

$$\frac{\bar{h}_A}{\bar{h}_{A,\text{sat}}} = 0.699 + 0.411\Phi_A - 0.145\Phi_A^2 + 0.035\Phi_A^3 \quad (\text{A.1})$$

$$\Phi_A = \left\{ \left(\frac{J_A}{J_{A0}} \right)^3 \left(\frac{1 + \beta J_{A0}}{1 + \beta J_A} \right) \right\}^{\frac{1}{5}} \quad (\text{A.2})$$

$$\bar{h}_{A,\text{sat}} = 1.0327(k_V/D)[Gr_{A,\text{sat}}/Sp]^{1/5} \quad (\text{A.3})$$

$$Gr_{A,\text{sat}} \equiv (gD^3/\nu_V^2)[(\rho_{LS}/\rho_V) - 1] \quad (\text{A.4})$$

ここに, k は熱伝導率, Gr はグラスホフ数であり, 式 (A.2) の J_A および β はいずれも無次元パラメータで, J_A および β は以下のように計算される。

$$J_A \equiv \left(F_{A1} + \sqrt{F_{A2}} \right)^{\frac{1}{3}} + \left(F_{A1} - \sqrt{F_{A2}} \right)^{\frac{1}{3}} + \frac{1}{3\beta} \left(\frac{Sc}{Sp} \right) \quad (\text{A.5})$$

$$\beta \equiv \left(\frac{R^2}{2SpPr_L} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{A.6})$$

$$F_{A1} \equiv \frac{1}{2} + \frac{2}{3} \left(\frac{Sc}{Sp} \right) + \left\{ \frac{1}{3\beta} \left(\frac{Sc}{Sp} \right) \right\}^3 \quad (\text{A.7})$$

$$F_{A2} \equiv \frac{1}{4} - \frac{64}{27}\beta^3 + \frac{2}{3} \left(\frac{Sc}{Sp} \right) - \frac{4}{27} \left(\frac{Sc}{Sp} \right)^2 + \left\{ \frac{1}{3\beta} \left(\frac{Sc}{Sp} \right) \right\}^3 \quad (\text{A.8})$$

$$R \equiv \left(\frac{\rho_V \mu_V}{\rho_L \mu_L} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.9})$$

ここに, R は $\rho\mu$ 比, μ は粘性係数であり, 式 (A.2) 中の J_{A0} は式 (A.5), 式 (A.7) および式 (A.8) において $Sc=0$ とおくことにより計算される。

B. 円柱側面の平均熱伝達係数の計算式

(1) 平滑界面に対する平均熱伝達係数の計算式

円柱側面の平滑界面に対する液体サブクール度の効果式 (B.1) は文献 (2) に基づいているが, 円柱長さ L が式 (10) で計算される L_{B1} の大きさより小さい場合には, $L_{B1}=L$ として計算する。

$$\bar{h}_{B1,\text{sat}} = \frac{2}{3}(k_V/L_{B1})[(1+B)^{3/4} - B^{3/4}] \times (Gr_{B1,\text{sat}}/Sp)^{1/4} \quad (\text{B.1})$$

$$B = 0.28228(D/L_{B1})^{4/5} \times (Sp/Gr_{B1,\text{sat}})^{1/15} \quad (\text{B.2})$$

$$Gr_{B1,\text{sat}} \equiv (gL_{B1}^3/\nu_V^2)[(\rho_{LS}/\rho_V) - 1] \quad (\text{B.3})$$

ここに, B は円柱側面と底面が接続される部分での蒸気の質量流量の連続性により決定される無次元量である (2)。

(2) 波状界面に対する平均熱伝達係数の計算式

円柱側面の波状界面に対する液体サブクール度の効果式 (B.4) は文献 (5) に基づいている。

$$\frac{\bar{h}_{B2}}{\bar{h}_{B2,\text{sat}}} = 1 + 0.0905 \left(\frac{c_{pV}}{c_{pL}} \right) \left(\frac{Pr_L}{Pr_V} \right) \left(\frac{Pr_L^2}{R^2} \right)^{0.23} \times \left(\frac{Gr_{B2L} Sp^*}{Gr_{B2,\text{sat}}} \right)^{1/4} \left(\frac{\lambda}{LB_2} \right) \left(\frac{Sc}{Sp} \right) \quad (\text{B.4})$$

$$\bar{h}_{B2,\text{sat}} = 0.740(k_V/\lambda)(Gr_{B2,\text{sat}}/Sp^*)^{1/4} \quad (\text{B.5})$$

$$Gr_{B2,\text{sat}} \equiv (g\lambda^3/\nu_V^2)[(\rho_{LS}/\rho_V) - 1] \quad (\text{B.6})$$

$$Gr_{B2L} \equiv (g\lambda^3/\nu_L^2)[(\rho_{LB}/\rho_L) - 1] \quad (\text{B.7})$$

$$Sp^* = c_{pV}\Delta T_{\text{sat}}/[Pr_V(\ell + 0.5c_{pV}\Delta T_{\text{sat}})] \quad (\text{B.8})$$

$$\lambda = 16.2[1/(Sp^* Gr_{B\lambda_0,\text{sat}})]^{1/11} \lambda_0 \quad (\text{B.9})$$

$$Gr_{B\lambda_0,\text{sat}} \equiv (g\lambda_0^3/\nu_V^2)[(\rho_{LS}/\rho_V) - 1] \quad (\text{B.10})$$

ここに, Sp^* は修正無次元過熱度, ρ_{LB} はバルク液体温度における密度, λ は蒸気膜ユニット長さである。

C. 円柱上面の平均熱伝達係数の計算式

円柱上面の液体サブクール度の効果式 (C.1) は文献 (7) と文献 (8) の組み合わせに基づいている。

$$\frac{\bar{h}_C}{\bar{h}_{C,\text{sat}}} = 1 + 0.0395 \left(\frac{c_{pV}}{c_{pL}} \right) \left(\frac{k_L}{k_V} \right) \left(\frac{Sp}{Gr_{C,\text{sat}}} \right)^{1/4} \times \left(\frac{\lambda_0^3 \ell g \alpha_L Pr_L^2 Sc}{c_{pL} \nu_L^2} \right)^{1/3} \left(\frac{Pr_L}{Pr_V} \right) \left(\frac{Sc}{Sp} \right) \quad (\text{C.1})$$

$$\bar{h}_{C,\text{sat}} = 0.425(k_V/\lambda_0)(Gr_{C,\text{sat}}/Sp)^{1/4} \quad (\text{C.2})$$

ここに, α は体膨張係数である。また, 式 (C.2) 中の $Gr_{C,\text{sat}}$ は式 (B.10) に示す $Gr_{B\lambda_0,\text{sat}}$ と同定義である。