

有限垂直円柱まわりのサブクール膜沸騰熱伝達に関する研究 (第2報：伝熱整理式の改良)

山田 たかし^{*1}・茂地 徹^{*1}・桃木 悟^{*2}
金丸 邦康^{*1}・山口 朝彦^{*1}

Study on Subcooled Film Boiling Heat Transfer around a Vertical Finite-Length Cylinder (2nd Report : Refinement of Heat Transfer Correlation)

by

Takashi YAMADA^{*1}, Toru SHIGECHI^{*1}, Satoru MOMOKI^{*2}
Kuniyasu KANEMARU^{*1} and Tomohiko YAMAGUCHI^{*1}

Correlating equations for the film boiling heat transfer from a vertical cylinder of finite-length to subcooled water were refined. 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 and length of test cylinders used in the experiments are, 32mm×16mm, 32mm×32mm, 32mm×64mm, 45mm×45mm, 50mm×16mm, 50mm×32mm and 50mm×64mm. The degree of liquid subcooling was varied from 2 to 30K. All the experimental data for the aspect ratio in $0.16 \leq L/D \leq 2.0$ can be correlated within $\pm 15\%$ by the present prediction method.

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伝熱特性を十分な精度で適切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銀円柱を対象とした飽和膜沸騰熱伝達の伝熱特性に関する研究を行い，ディスク状の円柱(直径100mm，長さ8mm)から細い棒状の円柱(直径8mm，長さ160mm)にいたる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た²⁾．さらに，この伝熱整理式を円柱表面の対流境界条件とする2次元非定常熱伝導解析により，熱伝導率が銀より低いステンレス等の材質の焼入れ時の冷却曲線を推定する方法を測定データとの比較から確立した³⁾．

3次元物体まわりで膜沸騰熱伝達が発生する伝熱機器の設計や安全性等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を把握することが重要である．前報⁴⁾では飽和膜沸騰熱伝達の整理手法をサブクール膜沸騰熱伝達の場合に拡張し，伝熱整理式の検討を試みたところ整理式より計算される平均熱流束の予測値は著者らの過渡膜沸騰実験に基づく測定値を $+15\sim 40\%$ 程度で相関することができた．本報では円柱の垂直部分の対流熱伝達を見なおし，整理式の改良を行っ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，つまり膜沸騰下限界点における極小熱流束と極小熱流束点過熱度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．

記号

A : 円柱の全伝熱面積, [m²]
c_p : 定圧比熱, [J/(kg·K)]
D : 円柱直径, [m]

平成 17年 12月 14日 受理

<http://www.lb.nagasaki-u.ac.jp/reports/kougaku/default.html>

^{*1}機械システム工学科(Department of Mechanical Systems Engineering)

^{*2}生産科学研究科(Graduate School of Science and Technology)

F_{A1}	: 無次元パラメータ, 式(17)
F_{A2}	: 無次元パラメータ, 式(18)
F_{B1}	: 無次元パラメータ, 式(27)
F_{B10}	: 無次元パラメータ, 式(28)
F_{B2}	: 無次元パラメータ, 式(29)
F_{B20}	: 無次元パラメータ, 式(30)
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)]
J_A	: 無次元パラメータ, 式(14)
J_{A0}	: 飽和液に対する J_A , 式(15)
J_B	: 無次元パラメータ, 式(24)
J_{B0}	: 飽和液に対する J_B , 式(25)
k	: 熱伝導率, [W/(m·K)]
ℓ	: 蒸発潜熱, [J/kg]
L	: 円柱長さ, [m]
L_{B1}	: Bromleyモデルが適用できる垂直部分の長さ, 式(5), [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]
m	: 無次元パラメータ, 式(31)
T_w	: 伝熱面表面温度, [K]
T_{sat}	: 飽和温度, [K]
T_∞	: バルク液体温度, [K]
ΔT_{sat}	: 伝熱面過熱度 = $T_w - T_{sat}$, [K]
ΔT_{sub}	: 液体サブクール度 = $T_{sat} - T_\infty$, [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(8), [kW/m ²]
Q	: 円柱全表面からの伝熱量, 式(1), [kW]
R	: $\rho\mu$ 比, 式(19)
Sc	: 無次元サブクール度, 式(7)
Sp	: 無次元過熱度, 式(13)
Sp_N^*	: 修正無次元過熱度, 式(26)
Sp^*	: 修正無次元過熱度, 式(37)
w	: 密度比, 式(32)
α	: 体膨張係数, [1/K]
β	: 無次元パラメータ, 式(16)
λ	: 蒸気膜ユニット長さ, 式(38), [m]
λ_0	: 毛管長さ 式(6), [m]
μ	: 粘性係数, [Pa·s]
ν	: 動粘性係数, [m ² /s]
ρ	: 密度, [kg/m ³]
σ	: 表面張力, [N/m]

添字

A	: 底面
B	: 側面

C	: 上面
L	: 膜温度における液体
LS	: 飽和水
sat	: 飽和状態
V	: 膜温度における蒸気
VS	: 飽和蒸気

2 伝熱整理法

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の整理手法は、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、この手法を本研究のサブクール膜沸騰熱伝達の伝熱整理に適用し、過渡実験で得られた著者らの測定値と比較することで垂直円柱まわりのサブクール膜沸騰熱伝達における伝熱整理法の妥当性を検証する。なお、計算に際して、伝熱整理式で用いられている物性値は膜温度(蒸気の物性値は伝熱面表面温度と飽和温度の平均値、液体の物性値は飽和温度とバルク液体温度の平均値)で与えることとし、各面の平均熱伝達係数を評価し検討を試みる。

2.1 全表面の伝熱量と壁面熱流束の推定

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1のAの部分)からの伝熱量 Q_A 、側面(図1のBの部分)からの伝熱量 Q_B および上面(図1のCの部分)からの伝熱量 Q_C の総和と定義する。

$$Q \equiv Q_A + Q_B + Q_C \quad (1)$$

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

$$Q_B \equiv \bar{h}_{B1}(T_w - T_{sat})(\pi D L_{B1}) + \bar{h}_{B2}(T_w - T_{sat})(\pi D L_{B2}) \quad (3)$$

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

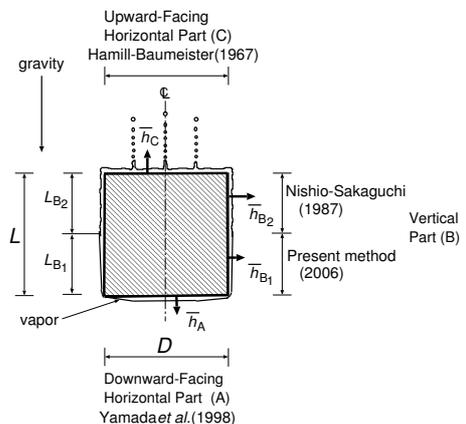


Fig.1 Film boiling model for the prediction

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、 D は円柱直径、 L は円柱長さ、 ΔT_{sat} は伝熱面過熱度である。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、これは側面の気液界面が平滑であるか波状であるかによって異なった熱伝達係数の評価を行うためである。 L_{B_1} は図1に示す円柱側面にBromleyモデル⁵⁾(平滑界面モデル)が適用できる垂直部分の長さであるが、この大きさは液体サブクール度や伝熱面過熱度によって変化すると考えられる。しかし、本報では、蒸気膜の目視観察から得られた図2に示すデータに基づいて液体サブクール度のみ的一次関数として表すことにした。その関係式を次式に示す。

$$L_{B_1}/(\pi\lambda_0) = 1 + 56.3Sc \quad (5)$$

ここに、 λ_0 [m]は毛管長さ、 Sc は無次元サブクール度であり、それぞれ以下のように定義される。

$$\lambda_0 \equiv [\sigma/\{g(\rho_{LS} - \rho_{VS})\}]^{1/2} \quad (6)$$

$$Sc \equiv c_{pL}\Delta T_{\text{sub}}/(Pr_L \ell) \quad (7)$$

ここに、 c_p は定圧比熱、 g は重力加速度、 ℓ は蒸発潜熱、 Pr はプラントル数、 σ は表面張力、 ρ は密度、下添字のLS、VSおよびLは飽和水、飽和蒸気および液体を表している。また、 ΔT_{sub} は液体サブクール度である。ちなみに、大気圧の飽和水($Sc=0$)の場合には、Bromleyモデル⁵⁾が適用できる垂直部分の長さ L_{B_1} は7.85mmとなる。また、 L_{B_2} は西尾・大竹の蒸気膜ユニットモデル⁶⁾が適用できる垂直部分の長さで、 $L_{B_2} = L - L_{B_1}$ として与えられる。ところで、式(5)で与えられる円柱側面に形成される平滑界面の限界長さ L_{B_1} より円柱長さ L が小さい場合、例えば、本研究

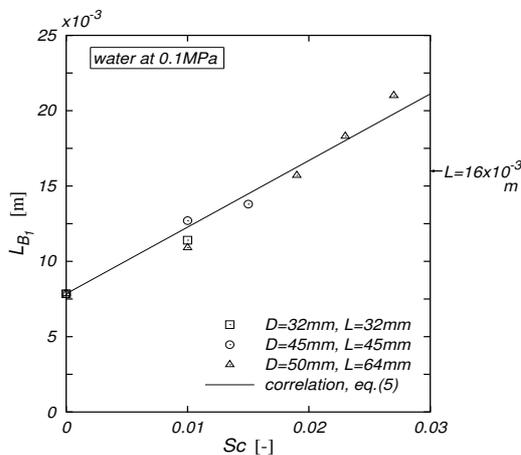


Fig.2 Relationship of L_{B_1} and ΔT_{sub}

の実験で使用されているような円柱長さ L が16mmにおいては、無次元サブクール度 Sc が0.019 ($\Delta T_{\text{sub}} \approx 20\text{K}$)以上では、 L_{B_1} は円柱長さ L より大きくなるので、これより大きい Sc では $L_{B_1}=L$ として取り扱う必要がある。

以下、サブクール膜沸騰熱伝達における円柱底面、側面および上面の各表面の平均熱伝達係数を \bar{h}_A 、 \bar{h}_{B_1} 、 \bar{h}_{B_2} および \bar{h}_C として、円柱底面は著者ら⁷⁾、垂直面の平滑界面は西川ら⁸⁾、垂直面の波状界面は西尾・坂口⁹⁾および円柱上面はHamill-Baumeister¹⁰⁾のそれぞれの整理式を採用して検討を試みる。なお、サブクール膜沸騰熱伝達の評価で基準となる飽和膜沸騰の平均熱伝達係数には、茂地ら¹¹⁾、Bromley⁵⁾、西尾・大竹⁶⁾およびBerenson¹²⁾の各解析モデルのもとで得られた整理式をそれぞれ適用する。

円柱の全表面積で平均した壁面熱流束 q は式(1)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。ただし、円柱長さ L が $L \leq L_{B_1}$ の場合には、前述したように $L_{B_1} = L$ とし、さらに、 $L_{B_2}=0$ として定める必要がある。

$$q = \left[\frac{\bar{h}_A + 4(\bar{h}_{B_1}L_{B_1} + \bar{h}_{B_2}L_{B_2})/D + \bar{h}_C}{2 + 4(L/D)} \right] \Delta T_{\text{sat}} \quad (8)$$

2.2 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 は式(10)で定められる液体サブクール度の効果 Φ_A の関数として作成した次式(9)の著者ら⁷⁾の整理式より評価されるが、基準となる飽和膜沸騰における平均熱伝達係数 $\bar{h}_{A,\text{sat}}$ は式(11)に示す著者ら²⁾の理論式を適用する。

$$\frac{\bar{h}_A}{\bar{h}_{A,\text{sat}}} = 0.699 + 0.411\Phi_A - 0.145\Phi_A^2 + 0.035\Phi_A^3 \quad (9)$$

$$\Phi_A = \left\{ \left(\frac{J_A}{J_{A_0}} \right)^3 \left(\frac{1 + \beta J_{A_0}}{1 + \beta J_A} \right) \right\}^{\frac{1}{5}} \quad (10)$$

$$\bar{h}_{A,\text{sat}} = 1.0327(k_V/D)[Gr_{A,\text{sat}}/Sp]^{1/5} \quad (11)$$

ここに、 k は熱伝導率、 $Gr_{A,\text{sat}}$ は飽和における円柱底面のグラスホフ数、 Sp は無次元過熱度であり、 $Gr_{A,\text{sat}}$ および Sp はそれぞれ次式で定義される。

$$Gr_{A,\text{sat}} \equiv (gD^3/\nu_V^2)[(\rho_{LS}/\rho_V) - 1] \quad (12)$$

$$Sp \equiv c_{pV}\Delta T_{\text{sat}}/(Pr_V \ell) \quad (13)$$

ここに、 ν は動粘性係数であり、下添字Vは蒸気を表している。また、式(10)の J_A 、 J_{A_0} および β はいずれも無次元パラメータで以下のように計算される。

$$J_A \equiv \left(F_{A_1} + \sqrt{F_{A_2}}\right)^{\frac{1}{3}} + \left(F_{A_1} - \sqrt{F_{A_2}}\right)^{\frac{1}{3}} + \frac{1}{3\beta} \left(\frac{Sc}{Sp}\right) \quad (14)$$

$$J_{A_0} = \left\{\frac{1}{2}\left(1 + \sqrt{1 - \frac{256}{27}\beta^3}\right)\right\}^{\frac{1}{3}} + \left\{\frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{1 - \frac{256}{27}\beta^3}\right)\right\}^{\frac{1}{3}} \quad (15)$$

$$\beta \equiv \left(\frac{R^2}{2SpPr_L}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (16)$$

式(14)から式(16)の中で用いられている無次元数は次式で定義される。

$$F_{A_1} \equiv \frac{1}{2} + \frac{2}{3} \left(\frac{Sc}{Sp}\right) + \left\{\frac{1}{3\beta} \left(\frac{Sc}{Sp}\right)\right\}^3 \quad (17)$$

$$F_{A_2} \equiv \frac{1}{4} - \frac{64}{27}\beta^3 + \frac{2}{3} \left(\frac{Sc}{Sp}\right) - \frac{4}{27} \left(\frac{Sc}{Sp}\right)^2 + \left\{\frac{1}{3\beta} \left(\frac{Sc}{Sp}\right)\right\}^3 \quad (18)$$

$$R \equiv \left(\frac{\rho_v \mu_v}{\rho_l \mu_l}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

ここに、 R は $\rho\mu$ 比、 μ は粘性係数である。

図3は式(9)を用いて、 $D=30\text{mm}$ 、 $L=30\text{mm}$ の場合に大気圧水で液体サブクール度 ΔT_{sub} を変化させた円柱底面の平均熱伝達係数 \bar{h}_A の特性を示したものである。この図より、円柱底面の平均熱伝達係数 \bar{h}_A は液体サブクール度 ΔT_{sub} が大きくなると増大するが、伝熱面過熱度 ΔT_{sat} が大きくなると低下する傾向にあることがわかる。

2.3 円柱側面の平均熱伝達係数の評価

2.1節で記述しているように、円柱の長さ L が、式(5)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の界面は平滑界面と波状界面の2つの領

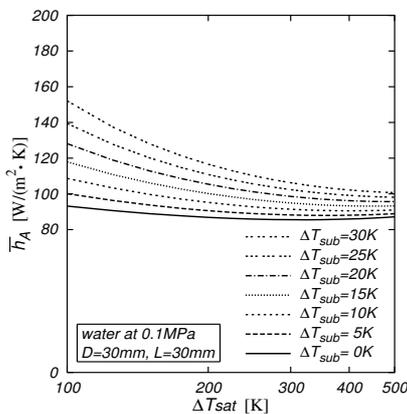


Fig.3 Heat transfer coefficient, \bar{h}_A

域が存在するので、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。そのため、まず円柱側面の平滑界面に適用される平均熱伝達係数の評価法について記述する。

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} は液体サブクール度の効果として作成されている次式(20)に示す西川ら⁸⁾の理論式より評価するが、基準となる平滑界面の飽和膜沸騰における平均熱伝達係数 $\bar{h}_{B_1,\text{sat}}$ は式(21)に示す著者ら²⁾の理論式を適用する。ただし、円柱長さ L が式(5)で計算される L_{B_1} の大きさより小さい場合には、下式に示す式(21)、式(22)および式(23)に使われている L_{B_1} は円柱長さ L に置換する必要がある。

$$\frac{\bar{h}_{B_1}}{\bar{h}_{B_1,\text{sat}}} = \left\{ \left(\frac{J_B}{J_{B_0}}\right)^3 \frac{1 + \left(\frac{J_{B_0}}{Sp_N^* Pr_L}\right)}{1 + \left(\frac{J_B}{Sp_N^* Pr_L}\right)} \right\}^{\frac{1}{4}} \quad (20)$$

$$\bar{h}_{B_1,\text{sat}} = \frac{2}{3} (k_v/L_{B_1}) [(1+B)^{3/4} - B^{3/4}] \times (Gr_{B_1,\text{sat}}/Sp)^{1/4} \quad (21)$$

$$B = 0.28228(D/L_{B_1})^{4/5} (Sp/Gr_{B_1,\text{sat}})^{1/15} \quad (22)$$

$$Gr_{B_1,\text{sat}} \equiv (gL_{B_1}^3/\nu_v^2) [(\rho_{ls}/\rho_v) - 1] \quad (23)$$

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、 $Gr_{B_1,\text{sat}}$ は飽和で平滑界面に適用される円柱側面のグラスホフ数である。また、式(20)の J_B および J_{B_0} は無次元パラメータ、 Sp_N^* は修正無次元過熱度でそれぞれ次式で定義される。

$$J_B \equiv \left(F_{B_1} + m\sqrt{F_{B_2}}\right)^{\frac{1}{3}} + \left(F_{B_1} - m\sqrt{F_{B_2}}\right)^{\frac{1}{3}} + \frac{1}{3} Pr_L Sc \quad (24)$$

$$J_{B_0} \equiv \left(F_{B_{10}} + m\sqrt{F_{B_{20}}}\right)^{\frac{1}{3}} + \left(F_{B_{10}} - m\sqrt{F_{B_{20}}}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (25)$$

$$Sp_N^* \equiv c_{p_v} \Delta T_{\text{sat}} / [Pr_v (\ell + 0.3c_{p_v} \Delta T_{\text{sat}})] \quad (26)$$

式(24)から式(26)の中で用いられている無次元数は次式で定義される。

$$F_{B_1} \equiv \frac{1}{27} Pr_L^3 Sc^3 + \frac{1}{12} R^2 Sp_N^* Pr_L^2 Sc + \frac{1}{16} R^2 Sp_N^{*2} Pr_L^2 \quad (27)$$

$$F_{B_{10}} \equiv \frac{1}{16} R^2 Sp_N^{*2} Pr_L^2 \quad (28)$$

$$F_{B_2} \equiv -\frac{4}{27} Pr_L^2 Sc^2 + \frac{2}{3} Sp_N^* Pr_L^2 Sc - \frac{8}{27} \frac{1}{w} Sp_N^* Pr_L + \frac{1}{4} Sp_N^{*2} Pr_L^2 + \frac{8}{27} \frac{Pr_L^3 Sc^3}{R^2} \quad (29)$$

$$F_{B20} \equiv -\frac{8}{27} \frac{1}{w} S_{PN}^* Pr_L + \frac{1}{4} S_{PN}^{*2} Pr_L^2 \quad (30)$$

$$m \equiv \frac{1}{8} R^2 S_{PN}^* Pr_L \quad (31)$$

$$w \equiv \rho_L / \rho_V \quad (32)$$

ここに、 w は密度比である。なお、式(28)および式(30)に示している F_{B10} および F_{B20} は式(27)と式(29)中の液体サブクール度 Sc を0として定められている。

一方、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}_{B2} は液体サブクール度の効果として表した次式(33)より評価する。この式は西尾・坂口⁹⁾が作成したサブクール膜沸騰熱伝達の整理式であり、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 $\bar{h}_{B2,sat}$ は式(34)に示す西尾・大竹⁶⁾の整理式を適用している。

$$\frac{\bar{h}_{B2}}{\bar{h}_{B2,sat}} = 1 + 0.0905 \left(\frac{c_{pV}}{c_{pL}} \right) \left(\frac{Pr_L}{Pr_V} \right) \left(\frac{Pr_L^2}{R^2} \right)^{0.23} \times \left(\frac{Gr_{B2L} Sp^*}{Gr_{B2,sat}} \right)^{1/4} \left(\frac{\lambda}{LB_2} \right) \left(\frac{Sc}{Sp} \right) \quad (33)$$

$$\bar{h}_{B2,sat} = 0.740 (k_V / \lambda) (Gr_{B2,sat} / Sp^*)^{1/4} \quad (34)$$

ここに、 $Gr_{B2,sat}$ は飽和で波状界面に適用される蒸気膜ユニット長さ λ を代表長さとするグラスホフ数、 Gr_{B2L} は蒸気膜ユニット長さ λ を代表長さとする液相のグラスホフ数である。また、 Sp^* は波状界面に適用される修正無次元過熱度、 λ は蒸気膜ユニット長さであり、それぞれ以下のように定義される。

$$Gr_{B2,sat} \equiv (g \lambda^3 / \nu_V^2) [(\rho_{LS} / \rho_V) - 1] \quad (35)$$

$$Gr_{B2L} \equiv (g \lambda^3 / \nu_L^2) [(\rho_{LB} / \rho_L) - 1] \quad (36)$$

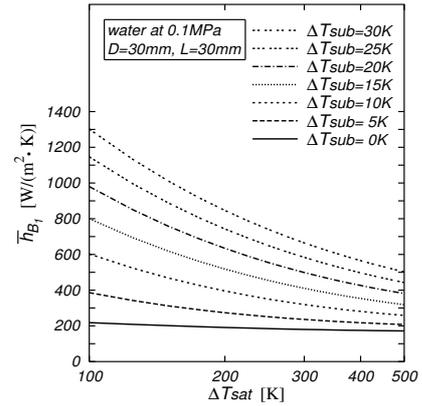
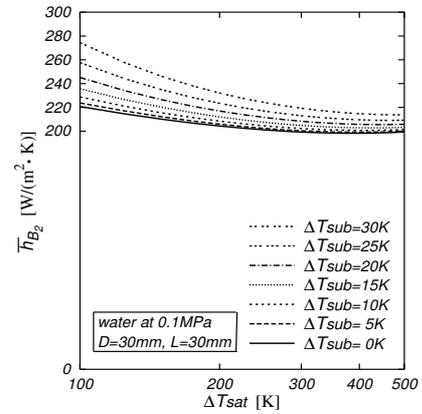
$$Sp^* = c_{pV} \Delta T_{sat} / [Pr_V (\ell + 0.5 c_{pV} \Delta T_{sat})] \quad (37)$$

$$\lambda = 16.2 [1 / (Sp^{*3} Gr_{B\lambda_0,sat})]^{1/11} \lambda_0 \quad (38)$$

ここに、 ρ_{LB} はバルク液体温度における密度である。また、 $Gr_{B\lambda_0,sat}$ は飽和で式(6)より計算される毛管長さ λ_0 を代表長さとするグラスホフ数で、次式のように定義される。

$$Gr_{B\lambda_0,sat} \equiv (g \lambda_0^3 / \nu_V^2) [(\rho_{LS} / \rho_V) - 1] \quad (39)$$

図4および図5は式(20)および式(33)を用いて、 $D=30\text{mm}$ 、 $L=30\text{mm}$ の場合に大気圧水で液体サブクール度 ΔT_{sub} を変化させた円柱側面の平均熱伝達係数 \bar{h}_{B1} および \bar{h}_{B2} の特性を示したものである。図4および図5より、円柱側面の平滑界面における平均熱伝達係数 \bar{h}_{B1} および波状界面における平均熱伝達係数 \bar{h}_{B2} は液体サブクール度 ΔT_{sub} が大きくなると増大し、伝熱面過熱度 ΔT_{sat} が大きくなると低下する傾向

Fig.4 Heat transfer coefficient, \bar{h}_{B1} Fig.5 Heat transfer coefficient, \bar{h}_{B2}

を示すこと、また、液体サブクール度の効果は平滑界面の方が波状界面より大きいこと、がわかる。

2.4 円柱上面の平均熱伝達係数の評価

サブクール膜沸騰における円柱上面の平均熱伝達係数 \bar{h}_C は基準となる飽和膜沸騰における平均熱伝達係数の比で表した次式(40)で評価する。この式はサブクール膜沸騰に対するHamill-Baumeister¹⁰⁾の整理式(放射の項を省略)で、基準となる飽和膜沸騰における熱伝達係数 $\bar{h}_{C,sat}$ は式(41)に示すBerenson¹²⁾の整理式を適用している。

$$\frac{\bar{h}_C}{\bar{h}_{C,sat}} = 1 + 0.0395 \left(\frac{c_{pV}}{c_{pL}} \right) \left(\frac{k_L}{k_V} \right) \left(\frac{Sp}{Gr_{C,sat}} \right)^{1/4} \times \left(\frac{\lambda_0^3 l g \alpha_L Pr_L^2 Sc}{c_{pL} \nu_L^2} \right)^{1/3} \left(\frac{Pr_L}{Pr_V} \right) \left(\frac{Sc}{Sp} \right) \quad (40)$$

$$\bar{h}_{C,sat} = 0.425 (k_V / \lambda_0) (Gr_{C,sat} / Sp)^{1/4} \quad (41)$$

ここに、 $Gr_{C,sat}$ は毛管長さ λ_0 を代表長さとするグラスホフ数で、式(39)に示している $Gr_{B\lambda_0,sat}$ と等価となる。また、 α は体膨張係数である。

図6は式(40)を用いて、 $D=30\text{mm}$ 、 $L=30\text{mm}$ の場

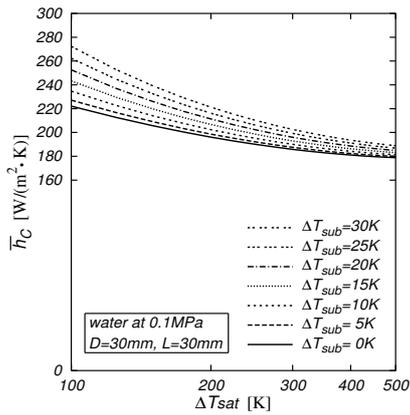


Fig.6 Heat transfer coefficient, \bar{h}_C

合に大気圧水で液体サブクール度 ΔT_{sub} を変化させた円柱上面の平均熱伝達係数 \bar{h}_C の特性を示している。この図より、円柱上面の平均熱伝達係数 \bar{h}_C は液体サブクール度 ΔT_{sub} が大きくなると増大し、伝熱面過熱度 ΔT_{sat} が大きくなると低下する傾向にあることがわかる。

2.5 伝熱整理式に及ぼす放射の影響

式(8)で与えられる壁面熱流束 q は対流のみの熱伝達によって評価されており、伝熱面温度が高い場合には放射による熱伝達の影響についても検討を試みておく必要がある。本研究のような T_w の高温物体が気液界面(飽和温度)によって囲まれる場合、放射熱伝達係数 \bar{h}_r は次式によって計算される。

$$\bar{h}_r = \sigma \epsilon (T_w^4 - T_{sat}^4) / \Delta T_{sat} \tag{42}$$

ここに、 ϵ は伝熱体の放射率、 σ はステファン・ボルツマン定数(= $5.67 \times 10^{-8} [W/(m^2 \cdot K^4)]$) である。

図7は式(8)で与えられる壁面熱流束 q を伝熱面過熱度 ΔT_{sat} で除した対流のみの平均熱伝達係数 \bar{h} と式(42)で与えられる放射熱伝達係数 \bar{h}_r を縦軸に、伝熱面過熱度 ΔT_{sat} を横軸にとり図示したものである。放射熱伝達係数 \bar{h}_r は放射率 ϵ をパラメータとして示しているが、ここでは、放射率 ϵ を 0.1, 0.5 および 1.0 の3種類を与えている。対流のみの平均熱伝達係数は伝熱面過熱度が増加するにつれて減少するのに対して放射による平均熱伝達係数は増大している。膜沸騰が生じるよ

ΔT_{sat} [K]	\bar{h} [W/(m ² ·K)]	\bar{h}_r [W/(m ² ·K)]			\bar{h}_r/\bar{h} [-]		
		$\epsilon=0.1$	$\epsilon=0.5$	$\epsilon=1.0$	$\epsilon=0.1$	$\epsilon=0.5$	$\epsilon=1.0$
500	172.42	6.37	31.86	63.71	0.037	0.185	0.370
250	177.15	2.98	14.90	29.80	0.017	0.084	0.168
100	199.26	1.74	8.71	17.42	0.009	0.049	0.087

うな高温領域で放射伝熱の寄与について検討を試みると、対流熱伝達と放射伝熱を総括することで、伝熱面過熱度 $\Delta T_{sat}=500K$ では放射率 $\epsilon=0.1$ の場合には 3.7%、放射率 $\epsilon=0.5$ の場合には 18.5%、放射率 $\epsilon=1.0$ の場合には 37% 程、対流のみによる熱伝達評価より大きくなることが明らかになった。従って、より精密な伝熱整理式を作成するためには飽和膜沸騰の高過熱度域においては、放射による熱伝達を加味することが望ましいと考える。しかし、サブクール膜沸騰においては、液体サブクール度 $\Delta T_{sub}=20K$ に対して示しているように対流のみによる熱伝達評価が高くなることから伝熱整理式に及ぼす放射の影響はほとんどないものとする。

3 実験

3.1 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で行った。実験装置は飽和膜沸騰熱伝達の実験²⁾で使用したのと同じもので、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、450mm×450mm×750mmの内寸法を有するステンレス製容器である。沸騰槽の側面および底面には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。沸騰槽の底部にバルク液体を昇温させるために2kW容量の浸漬型加熱器を2個設置している。沸騰槽の内側にはガラス製の透明な箱(300mm×300mm×600mm)を設置して加熱器のまわりで発生する気泡がバルク液体を直接乱さないようにして、バルク液体の温度を実験中一定に保っている。バルク液体にはイオン交換水を用いている。

本実験で使用した銀製の供試円柱(直径×長さ)は

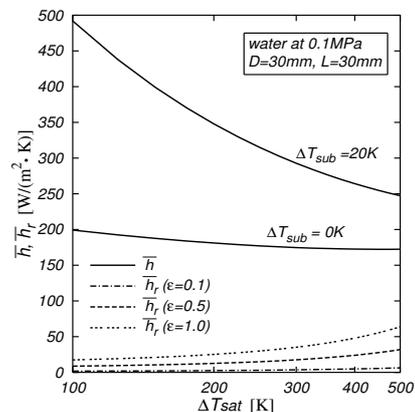


Fig.7 Averaged convection heat transfer coefficient, \bar{h} and averaged radiation heat transfer coefficient, \bar{h}_r

32mm×16mm, 32mm×32mm, 32mm×64mm, 45mm×45mm, 50mm×16mm, 50mm×32mm および 50mm×64mm の7種類である。

供試円柱の冷却時の過渡温度は、外径3mm, 内径2mmのステンレス製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のK型熱電対で測定されるが、データはYHP3852Aデータ集録/制御ユニット装置により0.25secのサンプリング間隔で計測される。

実験前の供試円柱表面は表面条件を一定にするために金属研磨材を塗りバフ研磨にて鏡面仕上げし、アルコールで洗浄され清浄に保たれている。供試円柱は電気炉によって約600℃まで加熱された後、昇降装置を介して大気圧下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。

3.2 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ので、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。

$$q_{exp} = -\rho c \frac{V}{A} \frac{dT}{d\tau} \quad (43)$$

ここに、 c , T , V , ρ , τ および $dT/d\tau$ は比熱、温度、体積、密度、時間および冷却速度である。本研究では膜沸騰下限界点における熱流束 q_{min} を冷却速度 $dT/d\tau$ が最小となる点と定め、そのときの過熱度を ΔT_{min} として、次式のように定義する。

$$q_{min} = -\rho c \frac{V}{A} \frac{dT}{d\tau} \Big|_{min} \quad (44)$$

$$\Delta T_{min} = (T - T_{sat}) \Big|_{\frac{dT}{d\tau} \Big|_{min}} \quad (45)$$

なお、円柱内部の温度分布一様の仮定の妥当性は円筒座標系で2次元の非定常熱伝導計算により確認するとともに本実験における膜沸騰領域でのピオー数が0.06以下と評価できるので、集中定数系近似[式(43)]が成り立つものとする。式(43)に基づいて平均熱流束を算定する場合の相対誤差は約5%である。

3.3 膜沸騰の様相

有限長さの垂直円柱まわりに形成される蒸気膜の観察結果から以下のことが明らかになった。液体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した界面が平滑な薄い蒸気膜で覆われており、円柱底面で発生した蒸気は端面から垂直面に沿って流出上昇する。垂直面を覆っている蒸気の膜厚は液体サブ

クール度が増加するほど薄くなり、平滑界面の領域は拡大する。液体がサブクールされている場合で、液体サブクール度が小さい場合には垂直面の上端部および円柱上面に形成される蒸気膜の界面は常に乱れた様相を呈しているが、液体サブクール度が大きい場合には垂直面の上端部および円柱上面の気液界面は概ね平滑な界面となっている。供試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として交互に離脱して上昇し、その後には新しい蒸気溜が形成されること、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くなること等の様子が観察された。後述する膜沸騰下限界点に関連す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面の角の部分で、齊時的に全面崩壊する。

3.4 冷却曲線および冷却速度曲線の測定値

図8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の時間変化を示した冷却曲線(太線)と冷却速度($dT/d\tau$)曲線(細線)の実測値の一例で、液体が飽和($\Delta T_{sub}=0\text{K}$)の場合と液体サブクール度 $\Delta T_{sub}=10\text{K}$ の場合を示したものである。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、本研究ではこの点を膜沸騰の下限界と定義している。図より、この下限界点の時間での円柱温度、冷却速度を比較してみると、液体が飽和の場合より液体サブクール度 $\Delta T_{sub}=10\text{K}$ の場合がいずれも高いことがわかる。

図9は直径 $D=32\text{mm}$, 長さ $L=32\text{mm}$ の供試円柱に基づく測定値を、横軸に冷却経過時間 τ , 縦軸に無次元温度 $(T-T_{\infty})/(T_i-T_{\infty})$ をとって供試円柱の中心温度がバルク液体温度に到達するまでを描いている。縦軸に示す記号 T , T_i および T_{∞} は円柱中心温度、測定開

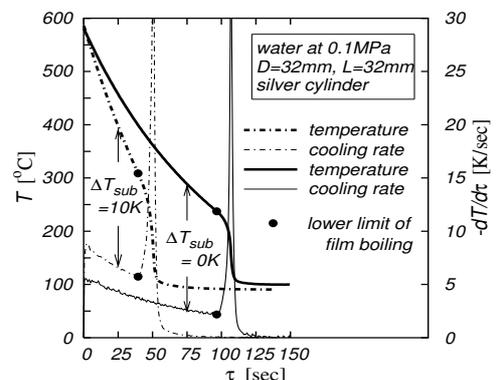


Fig.8 Cooling curve and cooling rate

始時の円柱中心温度およびバルク液体温度である。この円柱における液体サブクール度 ΔT_{sub} の実験範囲は0~20Kである。図のそれぞれの冷却曲線上には図7と同様に膜沸騰の下限界点を表すために●印の記号が付されているが、この●印は概ね一本の曲線の軌跡上に位置するように変化している。本研究は膜沸騰領域を対象としているので、次節に示す沸騰特性は供試円柱の冷却開始($\tau=0$)から●印の記号で示した下限点(極小熱流束点)までのデータに基づいている。

3.5 膜沸騰領域の沸騰特性の測定値

図10は直径 $D=32\text{mm}$ 、長さ $L=32\text{mm}$ の供試円柱に基づく膜沸騰領域の沸騰曲線を、液体サブクール度をパラメータとして示したもので、図9に示した冷却曲線のデータをもとに式(43)より求めたものである。図より、熱流束は液体サブクール度が高くなるに従って大きくなるとともに●印の記号で示した極小熱流束点は高過熱度側へ移動しており、遷移沸騰領域への遷移が早まることわかる。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 $\Delta T_{sat}=300\text{K}$ に対して液体サブクール度が10Kの場合には約77%、液体サブクール度が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。

3.6 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

本研究では膜沸騰下限界点における熱流束を式(44)に示しているように、冷却速度が最小となる点とし、そのときの過熱度を極小熱流束点過熱度と定めている。

図11は極小熱流束点過熱度 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。著者らは垂直円柱に対して飽和膜沸騰における極小熱流束点過熱度の測定値が、円柱の大きさに依存せず概ね136Kであることを報告²⁾しているが、サブクール膜沸騰においても円柱の大きさには依存しないことがわかった。しかし、図より、極小熱流束点過熱度は液体サブクール度に強く依存し、液体サブクール度が高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¹³⁾の整理式に基づく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 $\Delta T_{sub}=5\text{K}$ 以上では水平円柱に対する西尾・上村の値と概ね一致している。しかし、液体サブクール度 ΔT_{sub} が5K以下の飽和膜沸騰近傍の領域では本研究の方が高い値となり、遷移沸騰への移行が早まっている。水平円柱に対する西尾・上村¹³⁾の整理式は次式で表される。

$$\Delta T_{min} = 104 + 8.38\Delta T_{sub} \quad (46)$$

図12は円柱長さ L と円柱直径 D の比で表したアスペクト比 $L/D=1\sim 2$ の4種類の供試円柱に対する極小熱流束 q_{min} の測定値を縦軸に、横軸に液体サブクール度 ΔT_{sub} をとり整理したものである。図より、極小熱流束は液体サブクール度に依存し、液体サブクール度が高くなるに従って増大していることがわかる。図中に示す実線は著者らの測定値を最小二乗法で補間した値、点線は水平円柱に対する西尾・上村¹³⁾の整理式に基づく値を示している。著者らの測定値は水平円柱に

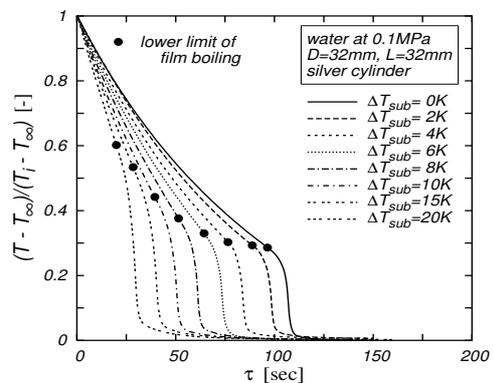


Fig.9 Cooling curve at $D=32\text{mm}$, $L=32\text{mm}$

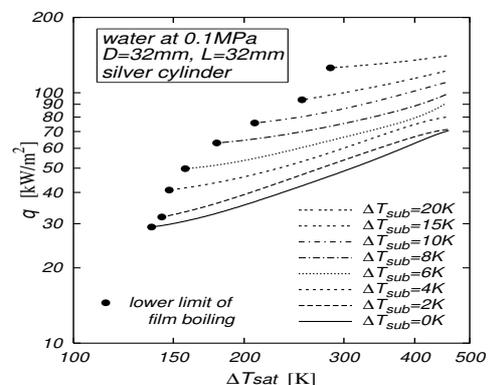


Fig.10 Boiling curve at $D=32\text{mm}$, $L=32\text{mm}$

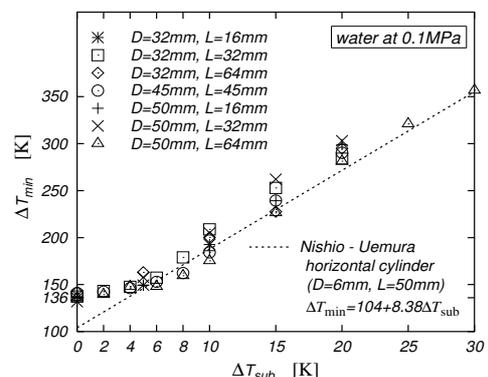


Fig.11 Relationship between ΔT_{min} and ΔT_{sub}

対する西尾・上村の値に比べて低い値となっている。垂直円柱に対して作成した著者らの整理式を次式に示す。

$$q_{\min} = 30 + 3.95\Delta T_{\text{sub}} + 0.03\Delta T_{\text{sub}}^2 \quad (47)$$

4 伝熱整理式の改良

第2章の諸式を用いて各面の平均熱伝達係数を評価し、その値を式(8)に代入して算出される平均熱流束の予測値と7種類の供試円柱に対する著者らの測定値とを比較した結果、伝熱整理式より得られる平均熱流束の予測値と測定値の相関性は+15%から-40%程度⁴⁾であり、先に報告²⁾した飽和膜沸騰熱伝達の整理式の相関性に比べると低いので、予測精度を高めるため再検討を試みる。

液体サブクール度 $\Delta T_{\text{sub}}=20\text{K}$ 、伝熱面過熱度 $\Delta T_{\text{sat}}=300\text{K}$ の条件のもとでは、円柱底面、円柱側面の平滑界面および波状界面それに円柱上面に対して、液体サブクール度の効果(サブクール膜沸騰と飽和膜沸騰の平均熱伝達係数の比)が15%, 280%, 5%, 6%程度であることを受けて、液体サブクール度の効果が顕著に表れる円柱側面の平滑界面に適用する平均熱伝達係数 \bar{h}_{B1} を再検討する。

図13は円柱側面の平滑界面における液体サブクール度の効果 $H(=\bar{h}_{B1}/\bar{h}_{B1,\text{sat}})$ に対する測定値を縦軸に、無次元サブクール度と無次元過熱度の比 Sc/Sp を横軸にとり整理したものである。縦軸に示す飽和膜沸騰の平均熱伝達係数 $\bar{h}_{B1,\text{sat}}$ は式(21)より算出するが、熱流束の測定値に対応するサブクール膜沸騰の平均熱伝達係数 \bar{h}_{B1} は、熱流束の測定値に基づく液体サブクール度と伝熱面過熱度の条件下で円柱底面の平均熱伝達係数 \bar{h}_A 、円柱側面の波状界面に適用する平均熱伝達係数 \bar{h}_{B2} および円柱上面の平均熱伝達係数 \bar{h}_C を式(9)、式(33)および式(40)より算出した後、式(8)の右辺に代入し、さらに、熱流束の測定値を式(8)の左辺に代入することにより算出できる。その後、算出された \bar{h}_{B1} の値を式(21)で与えられる $\bar{h}_{B1,\text{sat}}$ で除すことにより7種類の供試円柱に対して縦軸の液体サブクール度の効果 $H(=\bar{h}_{B1}/\bar{h}_{B1,\text{sat}})$ が定まる。この図は直径 $D=32\text{mm}$ 、長さ $L=32\text{mm}$ の供試円柱を代表例として示したもので、各々の記号は液体サブクール度を表し、細実線は測定値を最小二乗法で相関した値、太実線は式(48)に基づく計算値である。細実線と太実線は $Sc/Sp=0.04$ において約3%程度で一致している。

図14は測定値に基づいて作成した各供試円柱に対する1次関数の傾き c_{B1} [式(48)参照]の値を縦軸に、 $L/(\pi\lambda_0)$ を横軸にとり整理したものである。各供試円

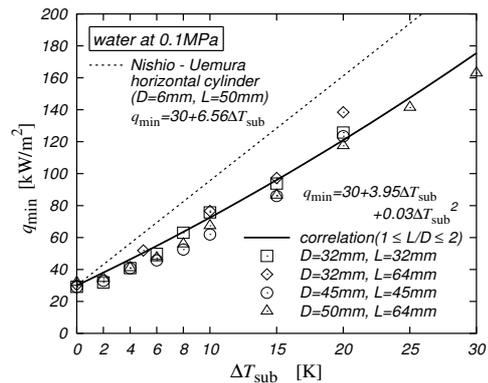


Fig.12 Relationship between q_{\min} and ΔT_{sub}

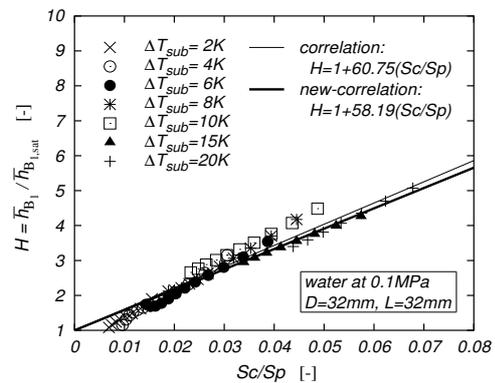


Fig.13 Relationship between $\bar{h}_{B1}/\bar{h}_{B1,\text{sat}}$ and Sc/Sp at $D=32\text{mm}$, $L=32\text{mm}$

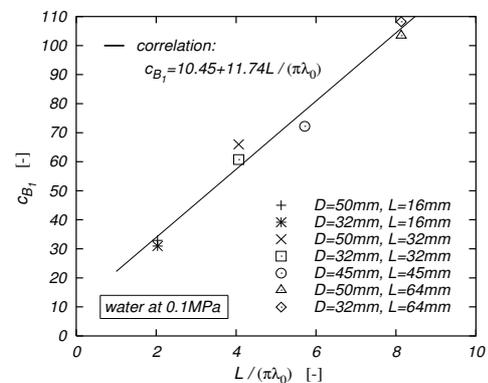


Fig.14 Relationship between c_{B1} and $L/(\pi\lambda_0)$

柱より得られた傾きの値 c_{B1} は $L/(\pi\lambda_0)$ とともに直線的に増大し、次式で整理することができる。式(48)の関数形は式(33)と式(40)を参考にして定めた。

$$\frac{\bar{h}_{B1}}{\bar{h}_{B1,\text{sat}}} = 1 + c_{B1} \left(\frac{Sc}{Sp} \right) \quad (48)$$

$$c_{B1} = 10.45 + 11.74L/(\pi\lambda_0) \quad (49)$$

図15は式(8)の伝熱整理式による予測値を縦軸に、著者らの測定値を横軸にとって比較したものである。熱流束を予測する際の平均熱伝達係数は、円柱側面の平滑界面には式(48)に示す再評価式を、他の平均熱伝

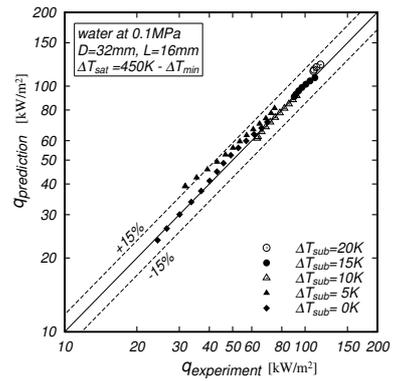
達係数は第2章に示しているそれぞれの評価式を適用して定めている。図15(a)は直径 $D=32\text{mm}$ ，長さ $L=16\text{mm}$ ，(b)は直径 $D=32\text{mm}$ ，長さ $L=32\text{mm}$ ，(c)は直径 $D=45\text{mm}$ ，長さ $L=45\text{mm}$ ，(d)は直径 $D=50\text{mm}$ ，長さ $L=64\text{mm}$ の各円柱に対し，液体サブクール度 ΔT_{sub} をパラメータとして示しており，表示している測定値は450Kまたは475Kの伝熱面過熱度 ΔT_{sat} から膜沸騰下限界点温度 ΔT_{min} までの各沸騰曲線の25K毎の温度きざみで得られた熱流束の値である。実験範囲での液体サブクール度 ΔT_{sub} に対する熱流束の予測値と測定値はすべて $\pm 15\%$ 以内で一致している。

5 結論

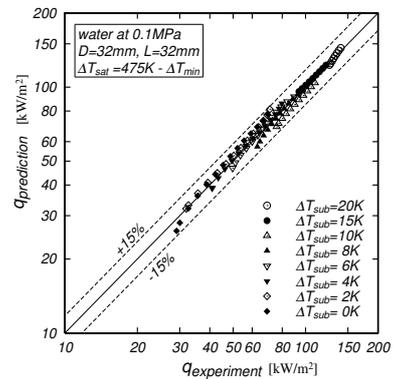
有限長さの垂直円柱をサブクールされた液体中に浸漬した場合の膜沸騰熱伝達について，円柱底面，側面および上面の各表面の液体サブクール度の効果を考慮して総合する手法でサブクール膜沸騰熱伝達の伝熱整理式を作成し，予測法の妥当性を検証するとともに，伝熱整理の予測精度を高めるために，円柱側面の平滑界面における液体サブクール度の効果を式(48)で再評価し，平均熱流束の整理を試みた。その結果，著者らの測定値を $\pm 15\%$ 以内の精度で整理することができた。また，有限垂直円柱に対するサブクール膜沸騰の下限界についての知見を得ることができた。

参考文献

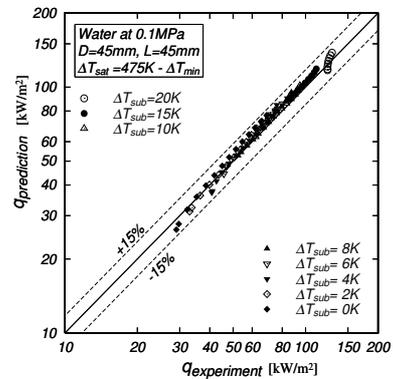
- 1) 日本機械学会編; 沸騰熱伝達と冷却, (1989), 128.
- 2) 山田・他4名; 機論(B編), **70**, 695 (2004), 1762.
- 3) Momoki S. *et al.*; *Proceedings of the 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference*, TED-AJ03-281, (2003).
- 4) 山田・他4名; 長崎大学工学部研究報告, **35**, 64 (2005), 1.
- 5) Bromley L.A.; *Chem. Eng. Prog.*, **46**, 5 (1950), 221.
- 6) 西尾・大竹; 機論(B編), **58**, 554 (1992), 3161.
- 7) 山田・他4名; 機論(B編), **64**, 628 (1998), 4159.
- 8) 西川・他3名; 九大工学集報, **48**, 6 (1975), 815.
- 9) 西尾・坂口; 機論(B編), **53**, 490 (1987), 1781.
- 10) Hamill T.D. and Baumeister K.J.; *NASA Tcch. Note*, D-3925, (1967), 1.
- 11) 茂地・他3名; 機論(B編), **54**, 503 (1988), 1808.
- 12) Berenson P.J.; *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, **83**, 3 (1961), 351.
- 13) 西尾・上村; 熱処理, **23**, 5 (1983), 260.



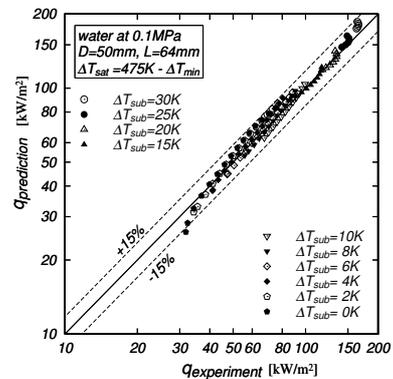
(a) $D=32\text{mm}$, $L=16\text{mm}$



(b) $D=32\text{mm}$, $L=32\text{mm}$



(c) $D=45\text{mm}$, $L=45\text{mm}$



(d) $D=50\text{mm}$, $L=64\text{mm}$

Fig.15 Heat transfer correlation