

# 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1報:伝熱整理式の検討)

山田 崚<sup>\*1</sup>・茂地 徹<sup>\*1</sup>・桃木 悟<sup>\*2</sup>  
金丸 邦康<sup>\*1</sup>・山口 朝彦<sup>\*1</sup>

## Study on Subcooled Film Boiling Heat Transfer around a Vertical Finite-Length Cylinder (1st Report: Examination of Correlation Equations for Heat Transfer)

by

Takashi YAMADA<sup>\*1</sup>, Toru SHIGECHI<sup>\*1</sup>, Satoru MOMOKI<sup>\*2</sup>, Kuniyasu KANEMARU<sup>\*1</sup>  
and Tomohiko YAMAGUCHI<sup>\*1</sup>

Correlating equations for the film boiling heat transfer from a vertical cylinder of finite-length to subcooled liquids were examined. 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 experimental data can be correlated within +15% ~ -40% 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<sup>(1)</sup>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)にいたる計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±15%以内で相関できる伝熱整理式を作成し報告した<sup>(2)</sup>. 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<sup>(3)</sup>.

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や膜沸騰領域と遷移沸騰領域の境界点, つまり膜沸騰熱流束の下限界となる極小熱流束点(極小熱流束と極小熱流束点過熱度)を把握することが重要である.

本報では, 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, 伝熱整理法の検討を試みたのでその結果について報告する. なお, 試験液体(イオン交換水)が98℃から最低70℃までの範囲で得られたサブクール膜沸騰熱伝達特性および極小熱流束点に関する実験結果の詳細については次報で報告する.

### 記号

$A$	: 円柱の全伝熱面積, [m <sup>2</sup> ]
$c_p$	: 定圧比熱, [J/(kg·K)]
$D$	: 円柱直径, [m]
$F_{A1}$	: 無次元パラメータ, 式(18)
$F_{A2}$	: 無次元パラメータ, 式(19)
$F_{B1}$	: 無次元パラメータ, 式(29)
$F_{B10}$	: 無次元パラメータ, 式(30)
$F_{B2}$	: 無次元パラメータ, 式(31)
$F_{B20}$	: 無次元パラメータ, 式(32)

平成16年10月21日受理

\*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)

$g$	: 重力加速度, [m/s <sup>2</sup> ]
$Gr$	: グラスホフ数
$\bar{h}$	: 平均熱伝達係数, [W/(m <sup>2</sup> ·K)]
$J_A$	: 無次元パラメータ, 式(15)
$J_{A_0}$	: 飽和液に対する無次元パラメータ, 式(16)
$J_B$	: 無次元パラメータ, 式(26)
$J_{B_0}$	: 飽和液に対する無次元パラメータ, 式(27)
$k$	: 熱伝導率, [W/(m·K)]
$\ell$	: 蒸発潜熱, [J/kg]
$\ell^*$	: 修正蒸発潜熱, 式(33), [J/kg]
$L$	: 円柱長さ, [m]
$L_{B_1}$	: Bromleyモデルが適用できる垂直部分の長さ, 式(5), [m]
$L_{B_2}$	: 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(34)
$T_w$	: 伝熱面表面温度, [K]
$T_{sat}$	: 飽和温度, [K]
$\Delta T_{sat}$	: 伝熱面過熱度, 式(10), [K]
$\Delta T_{sub}$	: 液体サブクール度, 式(7), [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(9), [kW/m <sup>2</sup> ]
$Q$	: 円柱全表面からの伝熱量, 式(1), [kW]
$R$	: $\rho\mu$ 比, 式(20)
$Sc$	: 無次元サブクール度, 式(21)
$Sp$	: 無次元過熱度, 式(13)
$Sp^*$	: 修正無次元過熱度, 式(28)または式(38)
$w$	: 密度比, 式(35)
$\alpha$	: 体膨張係数, [1/K]
$\beta$	: 無次元パラメータ, 式(17)
$\lambda$	: 蒸気膜ユニット長さ, 式(39), [m]
$\lambda_0$	: 毛管長さ 式(6), [m]
$\mu$	: 粘性係数, [Pa·s]
$\nu$	: 動粘性係数, [m <sup>2</sup> /s]
$\rho$	: 密度, [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	: 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 伝熱整理式

### 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。

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

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

$$Q_B \equiv \bar{h}_{B_1}(T_w - T_{sat})(\pi D L_{B_1}) + \bar{h}_{B_2}(T_w - T_{sat})(\pi D L_{B_2}) \quad (3)$$

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

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<sup>(4)</sup>(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の一次関数として表わすことにした。その関係式を次式に示す。

$$L_{B_1} = \pi\lambda_0 + 0.334 \times 10^{-3} \Delta T_{sub} \quad [\text{m}] \quad (5)$$

ここに,  $\lambda_0$ [m]は毛管長さ,  $\Delta T_{sub}$ [K]は液体サブクー

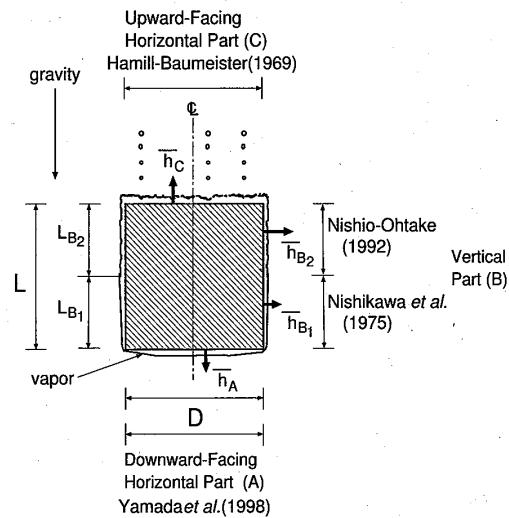


Fig.1 Film boiling model for the prediction

ル度であり, それぞれ以下のように定義される.

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

$$\Delta T_{\text{sub}} = T_{\text{sat}} - T_{\infty} \quad (7)$$

ここに,  $g$ は重力加速度,  $\sigma$ は表面張力,  $\rho$ は密度,  $T_{\text{sat}}$ は飽和温度,  $T_{\infty}$ はバルク液体温度で, 下添字のLSとVSは飽和水と飽和蒸気を表わしている. ちなみに, 大気圧の飽和水の場合には, Bromleyモデル<sup>(4)</sup>が適用できる垂直部分の長さ $L_{B1}$ は7.85mmとなる. また,  $L_{B2}$ は西尾・大竹の蒸気膜ユニットモデル<sup>(5)</sup>が適用できる垂直部分の長さで,  $L_{B2} = L - L_{B1}$ として与えられる.

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 $\bar{h}_A$ ,  $\bar{h}_{B1}$ ,  $\bar{h}_{B2}$ および $\bar{h}_C$ として, 円柱底面は著者ら<sup>(6)</sup>, 垂直面の平滑界面は西川ら<sup>(7)</sup>, 垂直面の波状界面は西尾・大竹<sup>(5)</sup>および円柱上面はHamill・Baumeister<sup>(8)</sup>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<sup>(9)</sup>, Bromley<sup>(4)</sup>, 西尾・大竹<sup>(5)</sup>およびBerenson<sup>(10)</sup>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.

円柱の伝熱面積 $A$ は次式で与えられるから,

$$A \equiv \pi DL + 2(\pi D^2/4) \quad (8)$$

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. ただし, 円柱長さ $L$ が $L \leq L_{B1}$ の場合には,  $L_{B2}=0$ ,  $L_{B1} = L$ として取り扱う必要がある.

$$q \equiv Q/A \\ = \left[ \frac{\bar{h}_A + 4\{\bar{h}_{B1}L_{B1} + \bar{h}_{B2}L_{B2}\}/D + \bar{h}_C}{2 + 4(L/D)} \right] \Delta T_{\text{sat}} \quad (9)$$

ここに,  $\Delta T_{\text{sat}}$ は伝熱面過熱度で, 以下のように定義する.

$$\Delta T_{\text{sat}} = T_w - T_{\text{sat}} \quad (10)$$

## 2.2 円柱底面の平均熱伝達係数の評価

円柱底面の飽和膜沸騰の平均熱伝達係数 $\bar{h}_{A,\text{sat}}$ は著者ら<sup>(2)</sup>が作成した下式の整理式より評価される.

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

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.

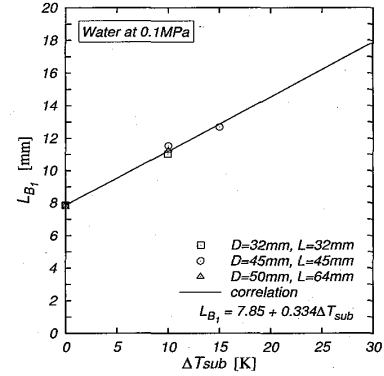


Fig.2 Relationship of  $L_{B1}$  and  $\Delta T_{\text{sub}}$

$$Gr_{A,\text{sat}} \equiv \frac{g D^3}{\nu_v^2} \left( \frac{\rho_{LS}}{\rho_v} - 1 \right) \quad (12)$$

$$Sp \equiv \frac{c_p \Delta T_{\text{sat}}}{Pr_v \ell} \quad (13)$$

ここに,  $c_p$ ,  $g$ ,  $\ell$ ,  $Pr$  および  $\nu$  は定圧比熱, 重力加速度, 蒸発潜熱, プラントル数および動粘性係数であり, 下添字Vは蒸気を表わしている.

円柱底面のサブクール膜沸騰の平均熱伝達係数 $\bar{h}_A$ は飽和膜沸騰における平均熱伝達係数 $\bar{h}_{A,\text{sat}}$ の比として, 著者ら<sup>(6)</sup>が作成した次式に示す無次元パラメータより評価される.

$$\frac{\bar{h}_A}{\bar{h}_{A,\text{sat}}} = \left\{ \left( \frac{J_A}{J_{A0}} \right)^3 \left( \frac{1 + \beta J_{A0}}{1 + \beta J_A} \right) \right\}^{1/5} \quad (14)$$

ここに,  $J_A$ ,  $J_{A0}$  および  $\beta$  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.

$$J_A \equiv \left( F_{A1} + \sqrt{F_{A2}} \right)^{1/3} \\ + \left( F_{A1} - \sqrt{F_{A2}} \right)^{1/3} + \frac{1}{3\beta} \left( \frac{Sc}{Sp} \right) \quad (15)$$

$$J_{A0} = \left\{ \frac{1}{2} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{256}{27} \beta^3} \right) \right\}^{1/3} \\ + \left\{ \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{256}{27} \beta^3} \right) \right\}^{1/3} \quad (16)$$

$$\beta \equiv \left( \frac{R^2}{2SpPr_L} \right)^{1/3} \quad (17)$$

式(15)から式(17)の中で用いられている無次元数は次式で定義される.

$$F_{A1} \equiv \frac{1}{2} + \frac{2}{3} \left( \frac{Sc}{Sp} \right) + \left\{ \frac{1}{3\beta} \left( \frac{Sc}{Sp} \right) \right\}^3 \quad (18)$$

$$F_{A2} \equiv \frac{1}{4} - \frac{64}{27} \beta^3 + \frac{2}{3} \left( \frac{Sc}{Sp} \right) - \frac{4}{27} \left( \frac{Sc}{Sp} \right)^2 \\ + \left\{ \frac{1}{3\beta} \left( \frac{Sc}{Sp} \right) \right\}^3 \quad (19)$$

$$R \equiv \left( \frac{\rho_v \mu_v}{\rho_L \mu_L} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

$$Sc \equiv \frac{c_{pL} \Delta T_{sub}}{Pr_L \ell} \quad (21)$$

ここに、 $R$ は $\rho\mu$ 比、 $Sc$ は無次元サブクール度、 $\mu$ は粘性係数であり、下添字 $L$ は液体を表わしている。

### 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Bromleyモデルが適用できる垂直部分の長さ $L_{B1}$ 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が平滑な領域と波状な領域が存在する。従って、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適用される飽和膜沸騰の平均熱伝達係数 $\bar{h}_{B1,sat}$ は著者ら<sup>(2)</sup>が理論的に導出した次式より計算されるが、円柱長さ $L$ が式(5)で計算される $L_{B1}$ の大きさより小さい場合には、下式に示す式(22)、式(23)および式(24)に使われている $L_{B1}$ は円柱長さ $L$ に置換する必要がある。

$$\bar{h}_{B1,sat} = \frac{2}{3}(k_v/L_{B1})[(1+B)^{3/4} - B^{3/4}] \times (Gr_{B1,sat}/Sp)^{1/4} \quad (22)$$

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、 $Gr_{B1,sat}$ 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それぞれ次式で定義される。

$$B = 0.28228(D/L_{B1})^{4/5} \times (Sp/Gr_{B1,sat})^{1/15} \quad (23)$$

$$Gr_{B1,sat} \equiv (gL_{B1}^3/\nu^2)[(\rho_{L,S}/\rho_v) - 1] \quad (24)$$

サブクール膜沸騰における円柱側面の平滑界面に対する平均熱伝達係数 $\bar{h}_{B1}$ の評価に際しては、式(14)で示した円柱底面のサブクール膜沸騰の平均熱伝達係数の評価式と同様に、サブクール膜沸騰における平均熱伝達係数と飽和膜沸騰における平均熱伝達係数の比で表わした次式の西川<sup>(7)</sup>の無次元パラメータを採用する。なお、円柱側面の平滑界面に適用される平均熱伝達係数 $\bar{h}_{B1}$ の大きさは、式(22)に示した平滑界面の飽和膜沸騰の平均熱伝達係数 $\bar{h}_{B1,sat}$ を用いることにより計算される。

$$\frac{\bar{h}_{B1}}{\bar{h}_{B1,sat}} = \left\{ \left( \frac{J_B}{J_{B0}} \right)^3 \frac{1 + \left( \frac{J_{B0}}{Sp^* Pr_L} \right)}{1 + \left( \frac{J_B}{Sp^* Pr_L} \right)} \right\}^{\frac{1}{4}} \quad (25)$$

ここに、 $J_B$ および $J_{B0}$ は無次元パラメータである。また、 $Sp_N^*$ は修正無次元過熱度でそれぞれ下式のように定義される。

$$J_B \equiv \left( F_{B1} + m\sqrt{F_{B2}} \right)^{\frac{1}{3}} + \left( F_{B1} - m\sqrt{F_{B2}} \right)^{\frac{1}{3}} + \frac{1}{3} Pr_L Sc \quad (26)$$

$$J_{B0} \equiv \left( F_{B10} + m\sqrt{F_{B20}} \right)^{\frac{1}{3}} + \left( F_{B10} - m\sqrt{F_{B20}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (27)$$

$$Sp_N^* \equiv \frac{c_{pV} \Delta T_{sat}}{\ell^* Pr_v} \quad (28)$$

式(26)から式(28)の中で用いられている無次元数は次式で定義される。

$$F_{B1} \equiv \frac{1}{27} Pr_L^3 Sc^3 + \frac{1}{12} R^2 Sp_N^* Pr_L^2 Sc + \frac{1}{16} R^2 Sp_N^{*2} Pr_L^2 \quad (29)$$

$$F_{B10} \equiv \frac{1}{16} R^2 Sp_N^{*2} Pr_L^2 \quad (30)$$

$$F_{B2} \equiv -\frac{4}{27} Pr_L^2 Sc^2 + \frac{2}{3} Sp_N^* Pr_L^2 Sc - \frac{8}{27} \frac{1}{w} Sp_N^* Pr_L + \frac{1}{4} Sp_N^{*2} Pr_L^2 + \frac{8}{27} \frac{Pr_L^3 Sc^3}{R^2} \quad (31)$$

$$F_{B20} \equiv -\frac{8}{27} \frac{1}{w} Sp_N^* Pr_L + \frac{1}{4} Sp_N^{*2} Pr_L^2 \quad (32)$$

$$\ell^* \equiv \ell \left( 1 + \frac{3}{10} \frac{c_{pV} \Delta T_{sat}}{\ell} \right) \quad (33)$$

$$m \equiv \frac{1}{8} R^2 Sp_N^* Pr_L \quad (34)$$

$$w \equiv \rho_L / \rho_v \quad (35)$$

ここに、 $\ell^*$ は修正蒸発潜熱、 $w$ は密度比である。なお、式(30)および式(32)に示している $F_{B10}$ および $F_{B20}$ は式(29)と式(31)の式にある液体サブクール度 $Sc$ を $Sc=0$ として定められている。

次に、円柱側面の波状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。

円柱側面の波状界面に適用される飽和膜沸騰の平均熱伝達係数 $\bar{h}_{B2,sat}$ は蒸気膜ユニットモデルより導出された西尾・大竹<sup>(5)</sup>の式を採用して評価する。次式に西尾・大竹<sup>(5)</sup>の式を示す。

$$\bar{h}_{B2,sat} = 0.740(k_v/\lambda)(Gr_{B2,sat}/Sp^*)^{1/4} \quad (36)$$

ここに、 $Gr_{B2,sat}$ は飽和で波状界面に適用され、蒸気膜ユニット長さ $\lambda$ を代表長さとする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、 $\lambda$ 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。

$$Gr_{B_2, \text{sat}} \equiv (g\lambda^3/\nu_L^2)[(\rho_{LS}/\rho_V) - 1] \quad (37)$$

$$Sp^* = c_{pV}\Delta T_{\text{sat}}/[Pr_V(\ell + 0.5c_{pV}\Delta T_{\text{sat}})] \quad (38)$$

$$\lambda = 16.2[1/(Sp^* Gr_{B_{\lambda_0, \text{sat}}})]^{1/11}\lambda_0 \quad (39)$$

ここに,  $Gr_{B_{\lambda_0, \text{sat}}}$  は飽和で式(6)より計算される毛管長さ $\lambda_0$ 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.

$$Gr_{B_{\lambda_0, \text{sat}}} \equiv (g\lambda_0^3/\nu_L^2)[(\rho_{LS}/\rho_V) - 1] \quad (40)$$

一方, 波状界面のサブクール膜沸騰における平均熱伝達係数 $\bar{h}_{B_2}$ は西尾・大竹<sup>(5)</sup>の整理式を用いて評価する. 西尾・大竹<sup>(5)</sup>の整理式を以下に示す.

$$\bar{h}_{B_2} = \bar{h}_{B_2, \text{sat}} + 0.067 \frac{k_V Gr_{B_2L}^{0.25} Pr_L^{0.46}}{SR^{0.23}} \times \left( \frac{\Delta T_{\text{sub}}}{\Delta T_{\text{sat}}} \right) \quad (41)$$

$$Gr_{B_2L} \equiv (g\lambda^3/\nu_L^2)[(\rho_{LB}/\rho_L) - 1] \quad (42)$$

ここに,  $S$ は代表長さで, 本研究では $S=L_{B_2}$ として取り扱う. また,  $Gr_{B_2L}$ は蒸気膜ユニット長さ $\lambda$ を代表長さとする液相のグラスホフ数で,  $\rho_{LB}$ はバルク液体温度における密度である.

円柱側面で波状界面に対する液体サブクール度の効果は, 式(36)を式(41)に代入し, さらに式(13)と式(21)の関係を用いて整理すると次式で表わされる.

$$\frac{\bar{h}_{B_2}}{\bar{h}_{B_2, \text{sat}}} = 1 + 0.0905 \left( \frac{c_{pV}}{c_{pL}} \right) \left( \frac{Pr_L}{Pr_V} \right) \left( \frac{\lambda}{S} \right) \times \left( \frac{Gr_{B_2L} Sp^*}{Gr_{B_2, \text{sat}}} \right)^{1/4} \left( \frac{Pr_L^2}{R} \right)^{0.23} \left( \frac{Sc}{Sp} \right) \quad (43)$$

## 2.4 円柱上面の平均熱伝達係数の評価

円柱上面に対する飽和膜沸騰の平均熱伝達係数 $\bar{h}_{C, \text{sat}}$ はBerenson<sup>(10)</sup>の整理式を用いて評価する. Berenson<sup>(10)</sup>の整理式を次式に示す.

$$\bar{h}_{C, \text{sat}} = 0.425(k_V/\lambda_0)(Gr_{C, \text{sat}}/Sp)^{1/4} \quad (44)$$

ここに,  $Gr_{C, \text{sat}}$ は飽和で毛管長さ $\lambda_0$ を代表長さとするグラスホフ数で, 式(40)に示している $Gr_{B_{\lambda_0, \text{sat}}}$ と等価である.

一方, サブクール膜沸騰における平均熱伝達係数 $\bar{h}_C$ はHamill-Baumeister<sup>(8)</sup>の整理式を用いて評価する. Hamill-Baumeister<sup>(8)</sup>の整理式を次式に示す.

$$\bar{h}_C = \bar{h}_{C, \text{sat}} + 0.0168 \left( \frac{k_L^3 g \alpha_L \Delta T_{\text{sub}} Pr_L}{\nu_L^2} \right)^{1/3} \times \left( \frac{\Delta T_{\text{sub}}}{\Delta T_{\text{sat}}} \right) + 0.88 \bar{h}_{\text{rad}} \quad (45)$$

ここに,  $\alpha_L$ は体膨張係数である. また, 式(45)中の右边第3項の $\bar{h}_{\text{rad}}$ は放射による平均熱伝達係数であるが, 本研究では対流の寄与のみを考え, この放射による寄与の項を省略する. 円柱上面に対する液体サブクール度の効果は, 式(44)を式(45)に代入し, さらに式(13)と式(21)の関係を用いて整理すると次式で表わされる.

$$\frac{\bar{h}_C}{\bar{h}_{C, \text{sat}}} = 1 + 0.0395 \left( \frac{c_{pV}}{c_{pL}} \right) \left( \frac{k_L}{k_V} \right) \left( \frac{Sp}{Gr_{C, \text{sat}}} \right)^{1/4} \times \left( \frac{\lambda_0^3 g \alpha_L Pr_L^2 Sc}{c_{pL} \nu_L^2} \right)^{1/3} \left( \frac{Pr_L}{Pr_V} \right) \left( \frac{Sc}{Sp} \right) \quad (46)$$

## 3 結果および考察

有限垂直円柱からのサブクール膜沸騰熱伝達に関して円柱底面, 側面および上面における平均熱伝達係数の特性や膜沸騰特性に及ぼす直径と長さの影響について知見を得るため, 本研究で検討した伝熱整理式に対して, 液体を大気圧水として次のような条件で計算を行った.

液体サブクール度: 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30K

円柱直径: 10, 20, 30, 40, 50, 60mm

円柱長さ: 10, 20, 30, 40, 50, 60mm

また, 著者らが行った過渡実験の測定値(詳細は次報で報告)を用いて伝熱整理式の妥当性について検証したのでその結果について考察する. 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で与えることとし, 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液体バルク温度の平均値でそれぞれ評価した.

### 3.1 各伝熱表面の平均熱伝達係数の予測

有限の垂直円柱全表面からの伝熱量を円柱底面, 側面および上面からの伝熱量の総和と定義することで与えられる壁面熱流束 $q$ は円柱底面, 側面および上面からの平均熱伝達係数を予測することにより算出することができる. ここでは, 直径 $D=30\text{mm}$ , 長さ $L=30\text{mm}$ の円柱に対して各伝熱表面の平均熱伝達係数を予測した. 得られた各表面の平均熱伝達係数の特性を図3から図7に示す.

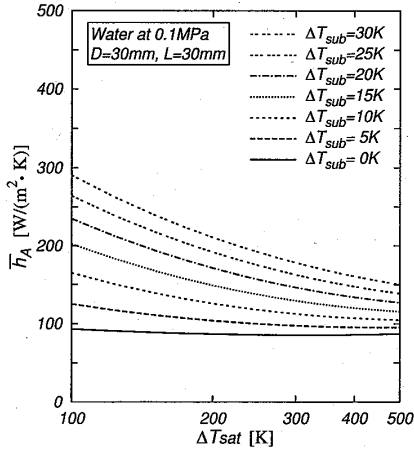
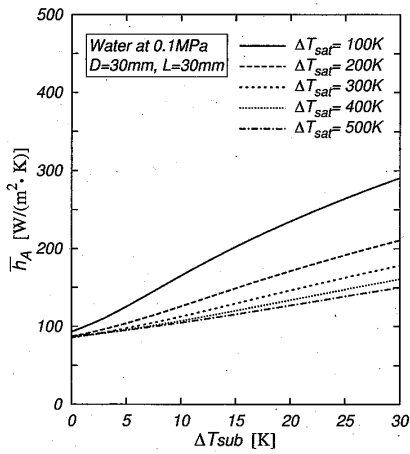
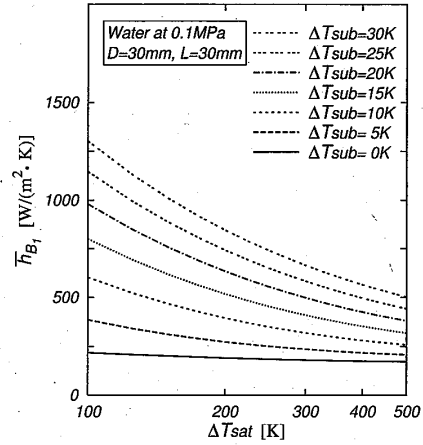
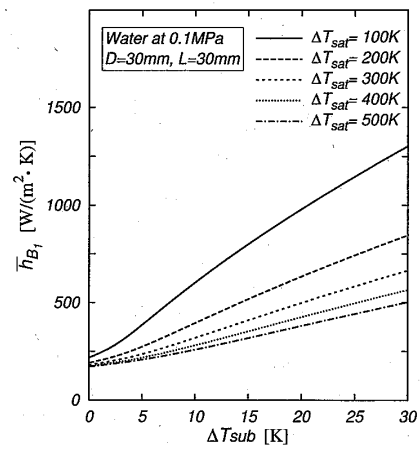
(a) Effect of  $\Delta T_{sub}$ (b) Effect of  $\Delta T_{sat}$ Fig.3 Heat transfer coefficient,  $\bar{h}_A$ 

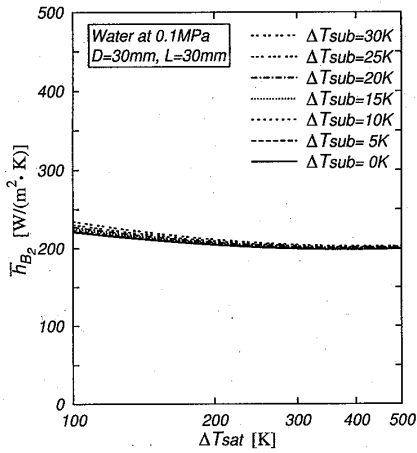
図3は円柱底面の平均熱伝達係数 $\bar{h}_A$ の特性を示したもので、図3(a)は液体サブクール度 $\Delta T_{sub}$ をパラメータとして、図3(b)は伝熱面過熱度 $\Delta T_{sat}$ をパラメータとしている。両図より、円柱底面の平均熱伝達係数 $\bar{h}_A$ は液体サブクール度 $\Delta T_{sub}$ が大きくなると増大し、伝熱面過熱度 $\Delta T_{sat}$ が大きくなると低下する傾向にあることがわかる。ちなみに、液体サブクール度による膜沸騰領域の平均熱伝達係数 $\bar{h}_A$ の増加は、伝熱面過熱 $\Delta T_{sat}=300\text{K}$ 、液体サブクール度 $\Delta T_{sub}=20\text{K}$ に対して約170%程度である。なお、円柱底面の平均熱伝達係数 $\bar{h}_A$ は円柱底面の直径 $D$ が大きくなると低下する傾向を示す。

図4は円柱側面の平滑界面における平均熱伝達係数 $\bar{h}_{B1}$ の特性を示したもので、図4(a)は液体サブクール度 $\Delta T_{sub}$ をパラメータとして、図4(b)は伝熱面過熱度 $\Delta T_{sat}$ をパラメータとしている。両図より、円柱側面の平滑界面における平均熱伝達係数 $\bar{h}_{B1}$ は液体サブクール度 $\Delta T_{sub}$ が大きくなると増大し、伝熱面過熱度

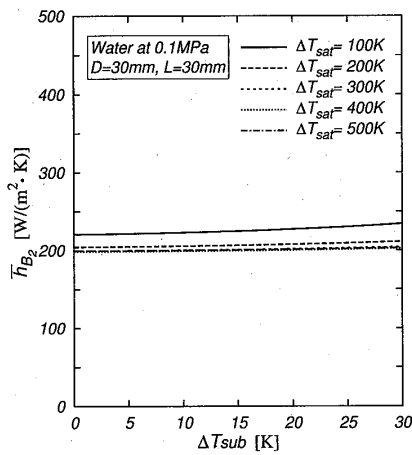
(a) Effect of  $\Delta T_{sub}$ (b) Effect of  $\Delta T_{sat}$ Fig.4 Heat transfer coefficient,  $\bar{h}_{B1}$ 

$\Delta T_{sat}$ が大きくなると低下する傾向にあり、円柱底面の平均熱伝達係数 $\bar{h}_A$ の定性的傾向と一致している。ちなみに、液体サブクール度による膜沸騰領域の平均熱伝達係数 $\bar{h}_{B1}$ の増加は、伝熱面過熱度 $\Delta T_{sat}=300\text{K}$ 、液体サブクール度 $\Delta T_{sub}=20\text{K}$ に対して280%程度である。なお、円柱側面の平滑界面における平均熱伝達係数 $\bar{h}_{B1}$ は円柱側面の長さ $L$ が大きくなると低下する傾向を示す。

図5は円柱側面の波状界面における平均熱伝達係数 $\bar{h}_{B2}$ の特性を示したもので、図5(a)は液体サブクール度 $\Delta T_{sub}$ をパラメータとして、図5(b)は伝熱面過熱度 $\Delta T_{sat}$ をパラメータとしている。両図より、円柱側面の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 $\Delta T_{sub}$ または伝熱面過熱度 $\Delta T_{sat}$ に依存せず約 $200\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 程度で概ね一定であることがわかる。なお、円柱側面の波状界面における平均熱伝達係数 $\bar{h}_{B2}$ は蒸気膜ユニット長さ $\lambda$ を代表長さとして評価されているので円柱長さの大きさには無関係となる。

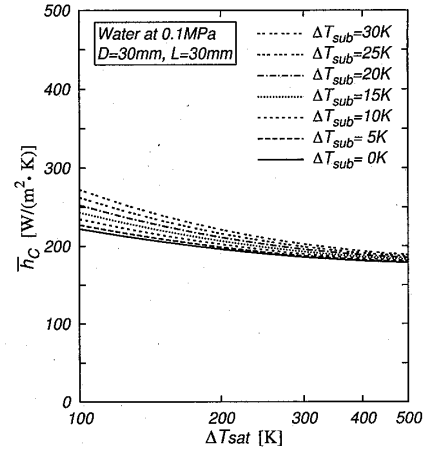


(a) Effect of  $\Delta T_{sub}$

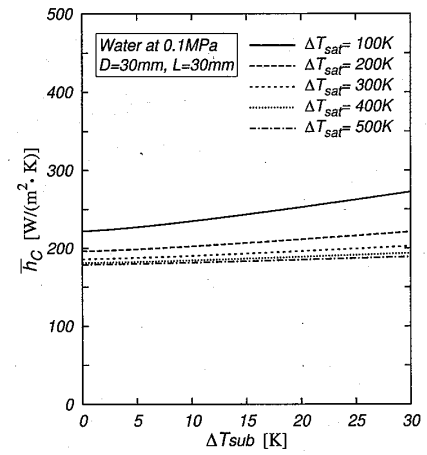


(b) Effect of  $\Delta T_{sat}$

Fig.5 Heat transfer coefficient,  $\bar{h}_{B_2}$



(a) Effect of  $\Delta T_{sub}$



(b) Effect of  $\Delta T_{sat}$

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

図6は円柱上面の平均熱伝達係数 $\bar{h}_C$ の特性を示したもので、図6(a)は液体サブクール度 $\Delta T_{sub}$ をパラメータとして、図6(b)は伝熱面過熱度 $\Delta T_{sat}$ をパラメータとしている。両図より、円柱上面の平均熱伝達係数 $\bar{h}_C$ は液体サブクール度 $\Delta T_{sub}$ が大きくなると増大し、伝熱面過熱度 $\Delta T_{sat}$ が大きくなると低下する傾向にあることがわかる。ちなみに、伝熱面過熱度 $\Delta T_{sat}=300K$ 、液体サブクール度 $\Delta T_{sub}=20K$ では、円柱上面の平均熱伝達係数 $\bar{h}_C$ は6%程度増加する。なお、円柱上面の平均熱伝達係数 $\bar{h}_C$ は毛管長さ $\lambda_0$ を代表長さとして評価されているので円柱直径の大きさには無関係となる。

図7は液体サブクール度 $\Delta T_{sub}=20K$ の場合の各伝熱表面の平均熱伝達係数 $\bar{h}_A$ 、 $\bar{h}_{B_1}$ 、 $\bar{h}_{B_2}$ 、 $\bar{h}_C$ と円柱全表面における平均熱伝達係数 $\bar{h}$ を示したものである。図より、円柱側面の平滑界面における平均熱伝達係数 $\bar{h}_{B_1}$ が最も大きな値を有し、最も小さいのは円柱底面の平均熱伝達係数 $\bar{h}_A$ であることがわかる。一方、円柱側面の波状界面における平均熱伝達係数 $\bar{h}_{B_2}$ と円柱

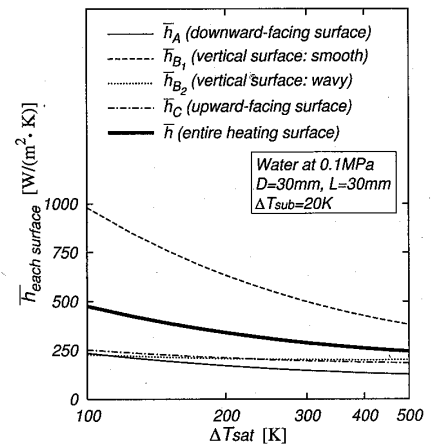


Fig.7 Heat transfer coefficient

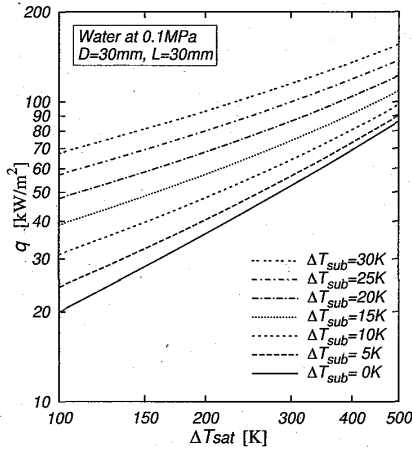
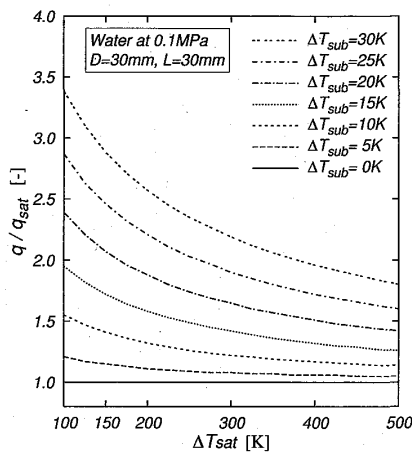
(a)  $q$  vs.  $\Delta T_{\text{sat}}$ (b)  $q/q_{\text{sat}}$  vs.  $\Delta T_{\text{sat}}$ 

Fig.8 Boiling curve

上面の平均熱伝達係数 $\bar{h}_C$ は同程度の値で評価されている。これらのことから、円柱側面の平滑界面における平均熱伝達係数 $\bar{h}_{B1}$ が膜沸騰特性に大きな影響を与えるものと考えられる。また、円柱全表面の平均熱伝達係数 $\bar{h}$ は伝熱面過熱度 $\Delta T_{\text{sat}}=100\text{K}\sim 500\text{K}$ に対し、 $475\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})\sim 245\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ で推移している。

### 3.2 伝熱整理式に基づく壁面熱流束の予測

壁面熱流束は各表面の平均熱伝達係数を、それぞれ式(9)に代入して定めることができる。

図8は円柱直径 $D=30\text{mm}$ 、円柱長さ $L=30\text{mm}$ に対する膜沸騰特性と液体サブクール度に対する熱流束の促進率を示したものである。図8(a)は縦軸に円柱の全表面積で平均した平均熱流束 $q$ 、横軸に伝熱面過熱度 $\Delta T_{\text{sat}}$ をとり、膜沸騰特性に及ぼす液体サブクール度 $\Delta T_{\text{sub}}$ の影響を、図8(b)は縦軸に伝熱特性の促進率 $q/q_{\text{sat}}$ をとって液体サブクール度 $\Delta T_{\text{sub}}$ の影響をそれぞれ示している。図8(a)より、平均熱流束 $q$ は液体サブクール度 $\Delta T_{\text{sub}}$ が大きくなると増大し、伝熱面過熱

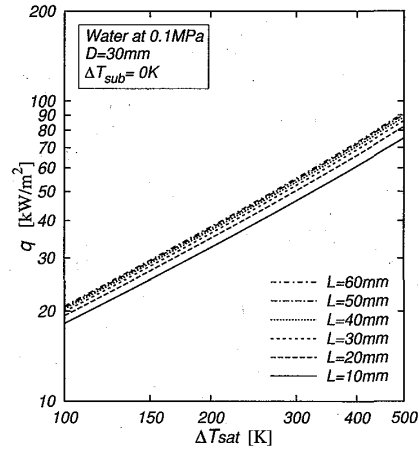
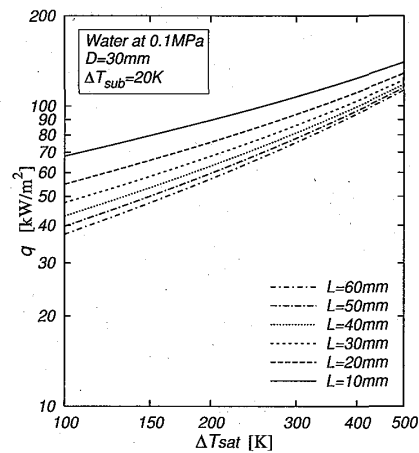
(a)  $\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$ (b)  $\Delta T_{\text{sub}}=20\text{K}$ 

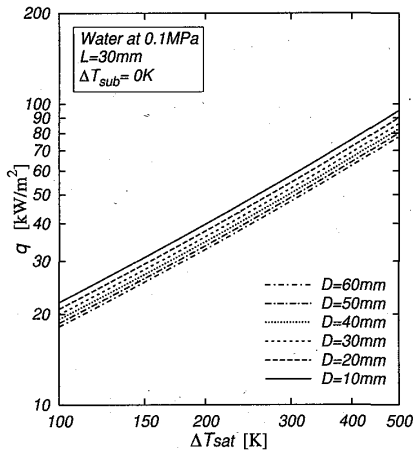
Fig.9 Effect of cylinder length on boiling curve

度 $\Delta T_{\text{sat}}$ が小さくなると低下する傾向にあることがわかる。また、図8(b)より、伝熱面過熱度 $\Delta T_{\text{sat}}=300\text{K}$ 、液体サブクール度 $\Delta T_{\text{sub}}=20\text{K}$ のもとでは約1.65倍の促進率となっており、液体サブクール度が膜沸騰特性に大きな影響を及ぼしていることがわかる。

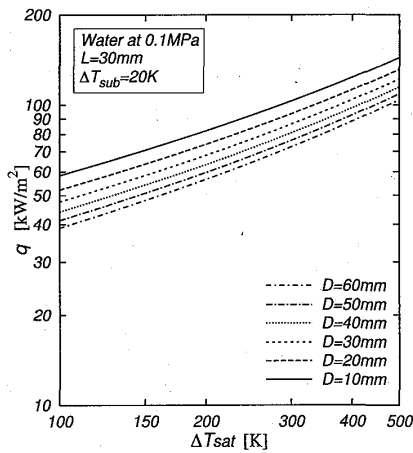
図9は円柱直径を $D=30\text{mm}$ に固定し、長さ $L$ を10mmから60mmまで10mmきざみで変化させ膜沸騰特性に及ぼす円柱の長さの影響を検討したもので、図9(a)は液体サブクール度 $\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$ (飽和)の場合、図9(b)は液体サブクール度 $\Delta T_{\text{sub}}=20\text{K}$ の場合である。両図より、平均熱流束 $q$ の特性は飽和またはサブクールいずれの場合も円柱の長さ $L$ が大きくなると増大し、伝熱面過熱度 $\Delta T_{\text{sat}}$ が小さくなると低下する傾向にあることがわかる。従って、円柱の長さが膜沸騰特性に大きな影響を及ぼしていることがわかる。なお、この伝熱特性の定性的傾向は著者らの過渡実験で得られた測定値の傾向とも一致している。

図10は円柱長さを $L=30\text{mm}$ に固定し、直径 $D$ を10mmから60mmまで10mmきざみで変化させ膜沸騰





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



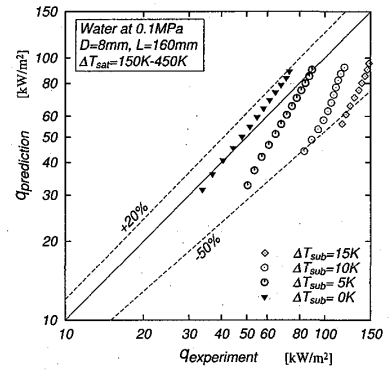
(b)  $\Delta T_{sub}=20K$

Fig.10 Effect of cylinder diameter on boiling curve

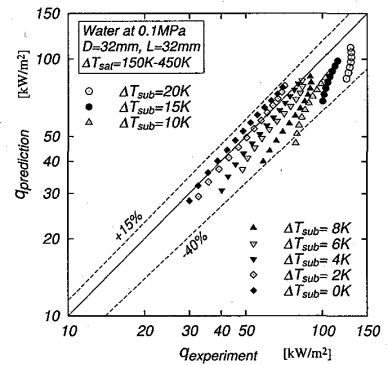
特性に及ぼす円柱の直径の影響を検討したもので、図10(a)は液体サブクール度 $\Delta T_{sub}=0K$ (飽和)の場合、図10(b)は液体サブクール度 $\Delta T_{sub}=20K$ の場合である。両図より、平均熱流束 $q$ の伝熱特性は飽和またはサブクールいずれの場合も円柱の直径 $D$ が大きくなると減少し、伝熱面過熱度 $\Delta T_{sat}$ が小さくなると低下する傾向にあることがわかる。従って、円柱長さの影響と同様に円柱の直径が膜沸騰特性に影響を及ぼしていることがわかる。なお、この伝熱特性の定性的傾向は著者らの過渡実験で得られた測定値の傾向とも一致している。

### 3.3 伝熱整理式と測定値との比較

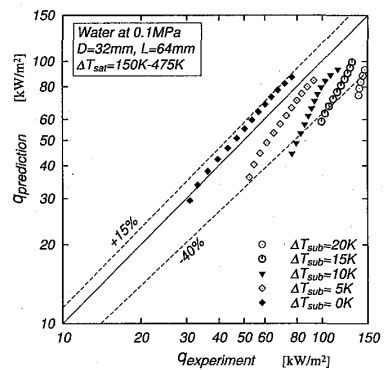
図11は本研究で検討した伝熱整理式に基づく予測値を縦軸に、著者らの測定値を横軸にとって比較したものである。予測値と比較する熱流束の測定値は伝熱面過熱度 $\Delta T_{sat}$ が150Kから450Kまたは475Kまでの範囲における沸騰曲線上の25K温度さぎみの値である。図11より、予測値と測定値は(a)の直径 $D=8mm$ ,



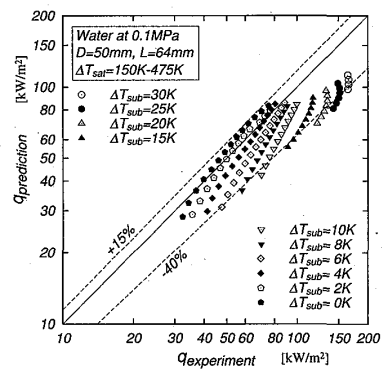
(a)  $D=8mm, L=160mm$



(b)  $D=32mm, L=32mm$



(c)  $D=32mm, L=64mm$



(d)  $D=50mm, L=64mm$

Fig.11 Examination of the present method prediction

長さ $L=160\text{mm}$ のアスペクト比 $L/D=20.0$ の細長い円柱に対しては+20%から-50%, (b)~(d)のアスペクト比 $L/D=1.0\sim 2.0$ の円柱の場合には+15%から-40%の範囲でそれぞれ一致している。しかし、飽和膜沸騰熱伝達を整理する際に作成した伝熱整理式の予測値は18種類の供試円柱に基づく測定値を $\pm 15\%$ で相関できたことに比べると相関性がやや低い状況にあるので、測定値との相関性をさらに高めるため検討を加える必要がある。

#### 4 むすび

有限長さの円柱をサブクールの液体中に垂直に浸漬した場合の膜沸騰熱伝達を、円柱底面、側面および上面の各表面の平均熱伝達係数を個別に評価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検討し、各表面の平均熱伝達係数の特性について精査した。また、伝熱整理式より計算された平均熱流束の予測値と著者らの過渡膜沸騰実験の測定値を比較し、予測法の妥当性を検証した。円柱の直径と長さの比 $L/D=1.0\sim 2.0$ の範囲では+15~40%程度で一致しているが、相関は十分でない。さらに予測法の改良を行うとともに測定値の蓄積を図りながら広範囲に適用できる伝熱整理式を作成する必要がある。

#### 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), 1762-1768. T.Yamada *et al.*; Proceedings of the 4th JSME-KSME Thermal Engineering Conference, **1**, (2000), 427-432.
- (3)S. Momoki *et al.*; Proceedings of the 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, TED-AJ03-281, (2003).
- (4)Bromley L.A.; Chem. Eng. Prog., **46**, 5 (1950), 221-227.
- (5)西尾・大竹；機論(B編), **58**, 554 (1992), 3161-3166.
- (6)山田・他4名；機論(B編), **64**, 628 (1998), 4159-4165.
- (7)西川・他3名；九大工学集報, **48**, 6 (1975), 815-821.
- (8)Hamill T.D. and K.J. Baumeister K.J.; Lewis Research Center, NASA TN D-3925, (1969), 1-39.
- (9)茂地・他3名；機論(B編), **54**, 503 (1988), 1808-1813.
- (10)Berenson P.J.; Trans. ASME, J. Heat Transf., **83**, 3 (1961), 351-358.