鉛直面上の体積力対流凝縮*
(第2報, 凝縮液膜の流動と平均熱伝達係数)上原 春男^{*1}, 中岡 勉^{*1}
江頭 真二^{*2}, 田口 雄三^{*2}Body Forced Convection Condensation on a Vertical Smooth Surface
(2nd Report, Flow Patterns of Condensate Film
and Mean Heat Transfer Coefficients)Haruo UEHARA, Tsutomu NAKAOKA,
Shinji EGASHIRA, and Yūzō TAGUCHI

This paper deals with the studies on body forced convection film condensation of pure and single-component vapor on a vertical smooth surface. The flow patterns of condensate film on a vertical smooth surface are classified into ten kinds of flow: L flow (laminar flow), S flow (sine wavy flow), H flow (harmonic wavy flow), T flow (turbulent flow), L-S flow, L-S-H flow, L-S-H-T flow, S-H flow, S-H-T flow and H-T flow. Nondimensional expressions of the mean heat transfer coefficient are obtained for the ten kinds of condensate film flow and compared with the experimental results, respectively.

Key Words: Phase Change, Body Forced Convection Condensation, Pure Vapor Smooth Surface, Mean Heat Transfer Coefficient

1. 緒 言

著者らは、鉛直面上で純蒸気が膜状凝縮する際の実験を行い、凝縮液膜の流動状態は、基本的には、層流(L流, Laminar flow), 正弦波流(S流, Sine wavy flow), 高調波流(H流, Harmonic wavy flow)および乱流(T流, Turbulent flow)の4種類に大別されることを示した。そして第1報では、これらの基本的流れのうち、層流, 正弦波流, 高調波流の局所凝縮熱伝達係数の無次元の経験式を提案した⁽¹⁾。さらに乱流の場合の局所凝縮熱伝達係数については、半理論的经验式を提案した⁽²⁾⁽³⁾。

著者らのこれまでの実験によると、鉛直面上で蒸気が凝縮する際には、凝縮液膜は、凝縮液の流れ方向にL流, S流, H流, T流の四つの基本的流れの単独かこれらの流れの組合わされた状態で流れている。

本報では、これらの流れの状態を10通りに分類し、それぞれの流れの平均凝縮熱伝達係数を、前報の局所凝縮熱伝達係数の経験式を利用して算出した。そして、これらの平均凝縮熱伝達係数と実験値との比較を行っ

たので、ここに報告する。

2. 記 号

c_p : 定圧比熱
 g : 重力加速度
 Gr : グラスホフ数 式(5), (34)
 h : 熱伝達係数
 H : 顕潜熱比 式(7)
 k : 熱伝導率
 l : 伝熱面長さ
 L : 潜熱
 Nu : ヌセルト数
 Pr : プラントル数
 S : 無次元数 式(6)
 T : 温度
 μ : 粘性係数
 ν : 動粘性係数
 ρ : 密度
 σ : 表面張力

添 字

1: L流からS流への遷移点 =LSC
 2: S流からH流への遷移点 =SHC
 3: H流からT流への遷移点 =HTC

* 昭和63年10月19日 第66期全国大会講演会において講演, 原稿受付 昭和63年2月5日。

^{*1} 正員, 佐賀大学理工学部 (〒840 佐賀市本庄町1)。

^{*2} 学生員, 佐賀大学大学院。

C: 冷却水, 遷移点
 CI: 冷却水入口
 H: 高調波流
 H-T: 図1(10)の流れ
 l : 代表長さに l を用いた平均値
 L: 凝縮液, 層流
 L-S: 図1(5)の流れ
 L-S-H: 図1(6)の流れ
 L-S-H-T: 図1(7)の流れ
 m : 平均値
 S: 正弦波流
 S-H: 図1(8)の流れ
 S-H-T: 図1(9)の流れ
 T: 乱流
 V: 蒸気
 W: 壁面
 x : 先端からの長さ x における局所値

3. 凝縮液膜の流動状態と 局所凝縮熱伝達係数の経験式

3.1 局所凝縮熱伝達係数の経験式 後述の平均凝縮熱伝達係数の計算の際に便利のように, 液膜が, 層流, 正弦波流, 高調波流および乱流の場合の局所凝縮熱伝達係数の無次元経験式を列挙しておく。

(1) 層流の場合⁽¹⁾

$$(Nu_x)_L = (h_x)_L x / \lambda_L \\ = 0.707 (Gr_x Pr_L / H)^{1/4} \dots\dots\dots (1)$$

(2) 正弦波流の場合⁽¹⁾

$$(Nu_x)_S = (h_x)_S x / \lambda_L \\ = 0.0568 (H/S)^{0.094} Pr_L^{-0.054} \\ \times (Gr_x Pr_L / H)^{0.37} \dots\dots\dots (2)$$

(3) 高調波流の場合⁽¹⁾

$$(Nu_x)_H = (h_x)_H x / \lambda_L \\ = 3.3 (H/S)^{0.2} Pr_L^{0.13} \\ \times (Gr_x Pr_L / H)^{0.25} \dots\dots\dots (3)$$

(4) 乱流の場合⁽²⁾

$$(Nu_x)_T = (h_x)_T x / \lambda_L \\ = 0.028 H^{1/5} Pr_L^{2/5} Gr_x^{2/5} \dots\dots\dots (4)$$

ここで,

$$Gr_x = (gx^3 / \nu_L^2) (\rho_L - \rho_V) / \rho_L \dots\dots\dots (5)$$

$$S = \{3\sigma^3 / (\rho_L^3 g \nu_L^4)\}^{1/5} \dots\dots\dots (6)$$

$$H = c_{pL} (T_V - T_W) / L \dots\dots\dots (7)$$

3.2 遷移点 凝縮液膜は, 流れ方向に沿って, L 流, S 流, H 流, T 流と発達して流れる。その際, L 流から S 流への遷移点, S 流から H 流への遷移点, H 流から T 流への遷移点は, 次を示す式でほぼ表すこ

とができる。

(1) L 流から S 流への遷移点 L 流から S 流への遷移点は, 式(1)と式(2)が等しいとおくと, 次式で表される。

$$x_1 = 1100 S^{0.26} Pr_L^{-0.183} H^{0.073} \\ \times (\nu_L^2 / g)^{1/3} \dots\dots\dots (8)$$

これを無次元式で表すと次式が得られる。

$$(Gr_x Pr_L / H)_{LSC} = 1.34 \times 10^9 (H/S)^{-0.78} \\ \times Pr_L^{0.45} \dots\dots\dots (9)$$

(2) S 流から H 流への遷移点 S 流から H 流への遷移点は, 式(2)と式(3)が等しいとおくと, 次式で表される。

$$x_2 = 79500 S^{-0.294} Pr_L^{0.178} H^{0.627} \\ \times (\nu_L^2 / g)^{1/3} \dots\dots\dots (10)$$

これを無次元式で表すと次式が得られる。

$$(Gr_x Pr_L / H)_{SHC} = 5.03 \times 10^{14} (H/S)^{0.883} \\ \times Pr_L^{1.53} \dots\dots\dots (11)$$

(3) H 流から T 流への遷移点 H 流から T 流への遷移点は, 式(3)と式(4)が等しいとおくと, 次式で表される。

$$x_3 = 40100 S^{-0.444} Pr_L^{-0.044} H^{-0.556} \\ \times (\nu_L^2 / g)^{1/3} \dots\dots\dots (12)$$

これを無次元式で表すと次式が得られる。

$$(Gr_x Pr_L / H)_{HTC} = 6.44 \times 10^{13} (H/S)^{1.33} \\ \times Pr_L^{0.867} H^{-4} \dots\dots\dots (13)$$

4. 凝縮液膜の流動状態と 平均凝縮熱伝達係数

鉛直面の流れ方向の凝縮液膜の流動状態は, 伝熱面の長さ, 作動流体の種類および冷却条件等によって, 図1のように10通りに分類することができる。図2に図1のうち特に鮮明な現象の写真を示す。

伝熱面全体の平均凝縮熱伝達係数は, 図1に示す流れの状態によって異なっている。前節の局所凝縮熱伝達係数の式を用いると, 各流動状態の平均凝縮熱伝達係数を見積もることができる。次に各流動状態の平均凝縮熱伝達係数の定義式と平均ヌセルト数の無次元表示式を示す。

4.1 伝熱面全体が L 流の場合 図1(1)および図2(1)に示すように伝熱面全体が, L 流の場合, 平均凝縮熱伝達係数は次式で定義する。

$$(h_m)_L = \frac{1}{l} \int_0^l (h_x)_L dx \dots\dots\dots (14)$$

式(1)を式(14)に代入して整理すると, 次式が得られる。

$$(Nu)_L = (h_m)_L l / \lambda_L$$

$$=0.943(Gr_L Pr_L / H)^{1/4} \dots\dots\dots (15)$$

以下同様にして、各状態での平均凝縮熱伝達係数の定義式と平均ヌセルト数の式を示す。

4.2 伝熱面全体がS流の場合 図1(2)および図2(2)に示すように伝熱面全体がS流の場合、平均凝縮熱伝達係数は次式で定義する。

$$(h_m)_s = \frac{1}{l} \int_0^l (h_x)_s dx \dots\dots\dots (16)$$

ここで、 $(h_x)_s$ は式(2)より算出され、平均ヌセルト数 Nu_l は次式で表される。

$$(Nu_l)_s = (h_m)_s l / \lambda_L \\ = 0.0512(H/S)^{0.094} Pr_L^{-0.054} \\ \times (Gr_L Pr_L / H)^{0.37} \dots\dots\dots (17)$$

4.3 伝熱面全体がH流の場合 図1(3)および図2(5)に示すように伝熱面全体がH流の場合、平均凝縮熱伝達係数を次式で定義する。

$$(h_m)_H = \frac{1}{l} \int_0^l (h_x)_H dx \dots\dots\dots (18)$$

ここで、 $(h_x)_H$ は式(3)より算出され、平均ヌセルト数は次式で表される。

$$(Nu_l)_H = (h_m)_H l / \lambda_L \\ = 4.4(H/S)^{0.2} Pr_L^{0.13} (Gr_L Pr_L / H)^{0.25} \dots\dots (19)$$

4.4 伝熱面全体がT流の場合 図1(4)および図2(6)に示すように伝熱面全体がT流の場合、平均凝縮熱伝達係数を次式で定義する。

$$(h_m)_T = \frac{1}{l} \int_0^l (h_x)_T dx \dots\dots\dots (20)$$

ここで、 $(h_x)_T$ は式(4)より算出され、平均ヌセルト数は次式で表される。

$$(Nu_l)_T = (h_m)_T l / \lambda_L \\ = 0.023 H^{1/5} Pr_L^{2/5} Gr_L^{2/5} \dots\dots\dots (21)$$

4.5 伝熱面上でL-S流の場合 図1(5)および図2(3)に示すように伝熱面の上部ではL流で下部ではS流の場合、平均凝縮熱伝達係数を次式で定義する。

$$(h_m)_{L-S} = \frac{1}{l} \left[\int_0^{x_1} (h_x)_L dx + \int_{x_1}^l (h_x)_s dx \right] \dots\dots\dots (22)$$

ここで、 $(h_x)_L$ は、式(1)、 $(h_x)_s$ は式(2)より算出される。また x_1 は、図1(5)に示すようにL流からS流への遷移点で、式(8)で表される。

これらを式(22)に代入すると、平均ヌセルト数は次式で表される。

$$(Nu_l)_{L-S} = (h_m)_{L-S} l / \lambda_L \\ = 0.0512(H/S)^{0.094} Pr_L^{-0.054} \\ \times (Gr_L Pr_L / H)^{0.37} + 58.1(H/S)^{-0.195} \\ \times Pr_L^{0.113} \dots\dots\dots (23)$$

4.6 伝熱面上でL-S-H流の場合 図1(6)および図2(4)に示すように伝熱面の上部ではL流であるが、S流に遷移し下部ではH流となる場合、平均凝縮熱伝達係数を次式で定義する。

$$(h_m)_{L-S-H} = \frac{1}{l} \left[\int_0^{x_1} (h_x)_L dx \right. \\ \left. + \int_{x_1}^{x_2} (h_x)_s dx + \int_{x_2}^l (h_x)_H dx \right] \dots\dots\dots (24)$$

ここで $(h_x)_L$ は式(1)、 $(h_x)_s$ は式(2)、 $(h_x)_H$ は式(3)よりそれぞれ算出される。また、 x_1 は式(8)で表され、 x_2 は、図1(6)に示すようにS流からH流への遷移点で、式(10)で表される。これらを式(24)に代入すると、平均ヌセルト数は次式で表される。

$$(Nu_l)_{L-S-H} = (h_m)_{L-S-H} l / \lambda_L \\ = 4.4(H/S)^{0.2} Pr_L^{0.13} \\ \times (Gr_L Pr_L / H)^{0.25} + 58.1(H/S)^{-0.195} \\ \times Pr_L^{0.113} - 6740(H/S)^{0.421} Pr_L^{0.513} \dots\dots\dots (25)$$

4.7 伝熱面上でL-S-H-T流の場合 図1(7)に示すように、伝熱面の上部でL流であるが、S流、H流に遷移し下部ではT流となる場合、平均凝縮熱伝達係数を次式で定義する。

$$(h_m)_{L-S-H-T} = \frac{1}{l} \left[\int_0^{x_1} (h_x)_L dx \right. \\ \left. + \int_{x_1}^{x_2} (h_x)_s dx + \int_{x_2}^{x_3} (h_x)_H dx + \int_{x_3}^l (h_x)_T dx \right] \dots\dots\dots (26)$$

ここで $(h_x)_L$ は式(1)、 $(h_x)_s$ は式(2)、 $(h_x)_H$ は式(3)、 $(h_x)_T$ は式(4)よりそれぞれ算出される。また x_1 は式(8)、 x_2 は式(10)で表され、 x_3 は図1(7)に示すようにH流からT流への遷移点で、式(12)で表され

図1 凝縮液膜の流動状態の分類

る。これらを式(26)に代入すると、平均ヌセルト数は次式で表される。

$$\begin{aligned} (Nu_l)_{L-S-H-T} &= (h_m)_{L-S-H-T} / \lambda \\ &= 0.023 H^{1/5} Pr_L^{2/5} Gr_L^{2/5} \\ &\quad + 58.1 (H/S)^{-0.195} Pr_L^{0.113} \\ &\quad - 6740 (H/S)^{0.421} Pr_L^{0.513} \\ &\quad + 4790 (H/S)^{0.533} Pr_L^{0.347} H^{-1} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (27)$$

4・8 伝熱面上でS-H流の場合 図1(8)に示すように、伝熱面の上部ではS流で、下部ではH流の場合、平均凝縮熱伝達係数を次式で定義する。

$$(h_m)_{S-H} = \frac{1}{l} \left[\int_0^{x_2} (h_x)_S dx + \int_{x_2}^l (h_x)_H dx \right] \quad \dots\dots\dots (28)$$

ここで、 $(h_x)_S$ は式(2)、 $(h_x)_H$ は式(3)よりそれぞれ算出される。また、 x_2 は式(10)で表される。これらを式(28)に代入すると、平均ヌセルト数は次式で表され

る。

$$\begin{aligned} (Nu_l)_{S-H} &= (h_m)_{S-H} l / \lambda_L \\ &= 4.4 (H/S)^{0.2} Pr_L^{0.13} \cdot (Gr_L Pr_L / H)^{0.25} \\ &\quad - 6740 (H/S)^{0.421} Pr_L^{0.513} \quad \dots\dots\dots (29) \end{aligned}$$

4・9 伝熱面上でS-H-T流の場合 図1(9)に示すように、伝熱面の上部ではS流であるが、H流に移り下部ではT流となる場合、平均凝縮熱伝達係数を次式で定義する。

$$(h_m)_{S-H-T} = \frac{1}{l} \left[\int_0^{x_2} (h_x)_S dx + \int_{x_2}^{x_3} (h_x)_H dx + \int_{x_3}^l (h_x)_T dx \right] \quad \dots\dots\dots (30)$$

ここで $(h_x)_S$ は式(2)、 $(h_x)_H$ は式(3)、 $(h_x)_T$ は式(4)よりそれぞれ算出される。また、 x_2 は式(10)、 x_3 は式(12)でそれぞれ表される。これらを式(30)に代入すると、平均ヌセルト数は次式で表される。

$$(Nu_l)_{S-H-T} = (h_m)_{S-H-T} l / \lambda_L$$

図2 現象写真

$$= 0.023H^{1/5}Pr_L^{2/5}Gr_L^{2/5} - 6740(H/S)^{0.421}Pr_L^{0.513} \\ + 4790(H/S)^{0.533}Pr_L^{0.347}H^{-1} \dots\dots\dots (31)$$

4.10 伝熱面上でH-T流の場合 図1(10)および図2(7)に示すように、伝熱面の上部ではH流で、下部ではT流の場合、平均凝縮熱伝達係数を次式で定義する。

$$(h_m)_{H-T} = \frac{1}{l} \left[\int_0^{x_3} (h_x)_H dx + \int_{x_3}^l (h_x)_T dx \right] \dots\dots\dots (32)$$

ここで、 $(h_x)_H$ は式(3)、 $(h_x)_T$ は式(4)よりそれぞれ算出される。また、 x_3 は式(12)で表される。これらを式(32)に代入すると、平均ヌセルト数は次式で表される。

$$(Nu_l)_{H-T} = (h_m)_{H-T} l / \lambda_L \\ = 0.023H^{1/5}Pr_L^{2/5}Gr_L^{2/5} \\ + 4790(H/S)^{0.533}Pr_L^{0.347}H^{-1} \dots\dots\dots (33)$$

ここで、

$$Gr_L = (gl^3/\nu_L^2)(\rho_L - \rho_V)/\rho_L \dots\dots\dots (34)$$

5. 実験装置

凝縮液膜がL流、S流、H流およびL-S流、L-S-H流、S-H流の場合については、平板を用い、T流を含む場合には、伝熱面長さの長い平滑円管を用いて、平均凝縮熱伝達係数の測定を行った。実験装置および実験方法は、すでに発表したものとほぼ同じであるので省略する⁽¹⁾⁽⁴⁾。表1に、伝熱面の仕様と実験条件を示す。

なお、本報で使用した実験値の詳細については、別報で発表する予定である。

6. 実験値と式との比較

実験では、平均凝縮熱伝達係数の測定と現象の写真撮影を同時に行い、凝縮液膜が図1のいずれかの状態

表1 実験条件

	Plate No.1 (l=160mm W=118mm t=15mm)		
	R11	R113	Ethanol
T_V (°C)	20.76 - 37.97	22.22 - 39.21	41.63 - 62.10
T_{Cl} (°C)	7.62 - 8.03	7.65 - 7.95	15.30 - 15.52
V_c (m/s)	0.21	0.21	0.21
	Plate No.2 (l=91mm W=182mm t=20mm)		
	R11	R113	R114
T_V (°C)	27.14 - 37.69	47.55 - 48.45	24.54 - 33.33
T_{Cl} (°C)	4.06 - 12.90	16.26 - 16.93	11.25 - 16.88
V_c (m/s)	0.45 - 1.00	0.60	0.16 - 0.35
	Smooth Tube (l=1670mm d_o , d_i =25.3, 23.3mm)		
	R11		R113
T_V (°C)	20.62 - 41.50		40.71 - 59.06
T_{Cl} (°C)	3.08 - 11.40		10.49 - 22.38
V_c (m/s)	0.20 - 1.42		0.19 - 1.95

(1) 式(15)-実験値

(2) 式(17)-実験値

(3) 式(19)-実験値

(4) 式(21)-実験値

(5) 式(23)-実験値

(6) 式(25)-実験値

(7) 式(27)-実験値

(8) 式(29)-実験値

(9) 式(31)-実験値

(10) 式(33)-実験値

図3 各流れについて経験式と実験値との比較

に相当するか一枚一枚検討を行った。そして、それぞれの平均凝縮熱伝達係数の実験値を図1の分類に従って整理した。

図3は、実験より求めた平均ヌセルト数 $(Nu_i)_{exp}$ と経験式より求めた平均ヌセルト数 $(Nu_i)_{em}$ との相関を示したものである。

図3(1)は、伝熱面全体が、層流(L流)とみなせる場合について、実験値による平均ヌセルト数と式(15)と比較したものである。実験値と式(15)とはよく一致している。

図3(3)は、伝熱面全体が、高調波流(H流)とみなせる場合の実験値と式(19)との比較を示したものである。この場合にも、実験値は、式(19)とよく一致している。

図3(6)は、伝熱面の上部でL流、中間でS流、下部でH流の場合の実験値と式(24)との比較である。この場合にもよく一致している。

以下同様にいずれの流れについても、実験値と経験式とは、よく一致していることがわかる。このことから、凝縮液膜の流動状態が明らかにされると、伝熱面全体の平均凝縮熱伝達係数は、前節で述べた経験式でほぼ見積もることができる。

7. 経験式の比較と適用範囲

6章で述べた凝縮液膜の流動状態が明らかであると、平均凝縮熱伝達係数をそれぞれの経験式で見積もることができる。しかし、凝縮液膜の流動状態を観察することができない場合には、いずれの経験式を適用すべきか明らかでない。通常、自然対流や強制対流の場合、 Nu_i の大小を比較して支配パラメータの適用範囲を明らかにする。しかし、本報の場合、それぞれの式の支配パラメータが異なるために、すべての式の適用範囲を陽に示すことができない。またすべての式を同一グラフ上で比較することもできない。

作動流体が同一物質で温度がそれほど大きく変化しない場合には、パラメータ Pr , S , H はほぼ同程度の値であるので、 Pr , S , H を固定して、各経験式を $Nu_i \sim (Gr_i Pr_i / H)$ の関係で図示して比較して見る。

図4は、フロン113の特定の条件について、各経験式を比較したものである。 $Gr_i Pr_i / H$ が小さい場合には、式(15)で、 $Gr_i Pr_i / H$ が大きい場合には、式(21)の乱流の式で表される。他の流動様式の式は、これらの二つの式の間に位置する。しかし、図4からも各経験式の適用範囲を陽に代数式で示すことはできない。

図5は、 $Pr_i = 7.65$, $S = 110$, $H = 0.13$ の場合(フロン113の場合)について、L流、S流、H流、T流の経験式を比較したものである。図4と図5とを比較すると、厳密に見ると $(Gr_i Pr_i / H)$ の位置によっては、若干の差異があるが、L流、S流、H流、T流の式を用いると他の流動状態の場合の式を近似的に包含していることがわかる。実用的にはこれらの四つの式を用いても、それほど誤差がないと考えられる。図中の $(Gr_i \cdot Pr_i / H)_{LSC}$, $(Gr_i \cdot Pr_i / H)_{SHC}$, $(Gr_i \cdot Pr_i / H)_{HTC}$ は、それぞれL流からS流、S流からH流、H流からT流の遷移点で次式で表される。

$$(Gr_i \cdot Pr_i / H)_{LSC} = 3.50 \times 10^{10} (H/S)^{-0.78} \cdot Pr_i^{0.45} \quad \dots\dots\dots (35)$$

$$(Gr_i \cdot Pr_i / H)_{SHC} = 1.31 \times 10^{10} (H/S)^{0.883} \cdot Pr_i^{1.53} \quad \dots\dots\dots (36)$$

$$(Gr_i \cdot Pr_i / H)_{HTC} = 1.63 \times 10^{15} (H/S)^{1.33} \cdot H^{-4} \cdot Pr_i^{0.867} \quad \dots\dots\dots (37)$$

また $(Gr_i \cdot Pr_i / H)_{LT}$ は、L流とT流との交点で次式で表される。

$$(Gr_i \cdot Pr_i / H)_{LT} = 5.65 \times 10^{10} H^{-4} \quad \dots\dots\dots (38)$$

これより、実際の設計の際には、 $(Gr_i \cdot Pr_i / H)$ の範囲によって適用する式を次のように用いても差支えないと考えられる。

図4 各経験式の比較

図5 L流、S流、H流、T流の式の比較

(1) $Gr_L \cdot Pr_L / H < (Gr_L \cdot Pr_L / H)_{LSC}$ の場合
式(15)

(2) $(Gr_L \cdot Pr_L / H)_{LSC} < Gr_L \cdot Pr_L / H$
 $< (Gr_L \cdot Pr_L / H)_{SHC}$ の場合
式(17)

(3) $(Gr_L \cdot Pr_L / H)_{SHC} < Gr_L \cdot Pr_L / H$
 $< (Gr_L \cdot Pr_L / H)_{HTC}$ の場合
式(19)

(4) $Gr_L \cdot Pr_L / H > (Gr_L \cdot Pr_L / H)_{HTC}$ の場合
式(21)

8. 結 言

鉛直面上で純蒸気が膜状凝縮する際の凝縮液膜の流動状態を10種類に分類し、それぞれの流れの平均凝縮熱伝達係数を見積もる式を、前報で報告した局所凝縮熱伝達係数の経験式を用いて算出した。そして、これらの経験式と実験値とを比較した。結果は、次のようにまとめられる。

(1) 凝縮液膜の流れの状態が観察されると、各流動状態は、図1の10種類に分類し得る。

(2) 液膜の流動状態が明らかにされると、平均凝縮熱伝達係数は、それぞれ4章で示した式で表される。

(3) 液膜の流動状態が不明の場合には、 $Gr_L \cdot Pr_L / H$ の範囲によって、適用する式が異なるが実用的には、次の式を用いても差支えない。

(1) $Gr_L \cdot Pr_L / H < (Gr_L \cdot Pr_L / H)_{LSC}$ の場合
式(15)

(2) $(Gr_L \cdot Pr_L / H)_{LSC} < Gr_L \cdot Pr_L / H$
 $< (Gr_L \cdot Pr_L / H)_{SHC}$ の場合
式(17)

(3) $(Gr_L \cdot Pr_L / H)_{SHC} < Gr_L \cdot Pr_L / H$
 $< (Gr_L \cdot Pr_L / H)_{HTC}$ の場合
式(19)

(4) $Gr_L \cdot Pr_L / H > (Gr_L \cdot Pr_L / H)_{HTC}$ の場合
式(21)

終わりに、本研究の実験装置の製作および実験には、技官の前田法男氏の協力を受けた。また、本研究には、卒論生の緒方源成君、中田竜一君、石尾博明君が参加した。ここに感謝の意を表す。

文 献

- (1) 上原・ほか3名, 機論, 54-505, B (昭63), 2537.
- (2) 上原・ほか3名, 第23回伝熱シンポ講論, (昭61-5), D111.
- (3) 上原・ほか3名, 機論, 48-435, B(昭57), 2278.
- (4) 上原・ほか2名, 冷凍, 58-668(昭58), 549.

討 論

〔質問〕 棚 沢 一 郎〔東京大学生産技術研究所〕

(1) 3・2節で流れのパターンの遷移点を求める際に、遷移点での局所ヌセルト数を等値している。しかし、このようにして求めた遷移点では、凝縮液流量の連続性は必ずしも保証されないように思えるがいかか。

(2) 図5は、R113の物性値を用いて、流れのパターンごとのヌセルト数の変化を示したものであるが、これから導かれた以下の近似が他の流体の場合でも適用できるということはどうして保証されるのか。

〔回答〕 (1) 3・2節で求めた遷移点を凝縮量をパラメータとした無次元数である局所膜レイノルズ数で示すと、それぞれ次式で示される。

$$\begin{aligned} (Re_x^*)_{LSC} &= 5.30 \cdot 10^{-32} S^{-2.73} Pr_L^{1.11} Gr_x^{3.73} \\ (Re_x^*)_{SHC} &= 4.94 \cdot 10^{-7} S^{0.247} Pr_L^{-0.895} Gr_x^{0.759} \\ (Re_x^*)_{HTC} &= 9.87 \cdot 10^8 S^{-0.962} Pr_L^{0.698} Gr_x^{-0.321} \end{aligned}$$

式からもわかるように遷移点は凝縮量のみではなく物性値や伝熱面の長さに支配されるので、凝縮量の連続性が保たれていないことがある。なお、前報で示した

ように本論文の遷移点の式(9), (11)は、観察によって得られた値とほぼ一致している。また、式(13)も、付図1に示すように、実験値とほぼ一致している。

付図1 式(13)と実験値との比較

付図 2 L 流, S 流, H 流, T 流の式の比較

(2) R11, R114 においても 10 とおりの式を実験での代表的な値をもちいて $Nu_L - (Gr_L Pr_L / H)$ の関係で比較してみると R113 と同様に近似できることがわかった。付図 2(a), (b) には R11, R114 における四

つの式のヌセルト数の比較を示す。付図 2 からわかるように、本論文に示した結論は、他の物性についても同じことが言える。