鉛直面上の体積力対流凝縮*
(第1報, 流動状態と局所熱伝達係数)上原 春男^{*1}, 中岡 勉^{*1}
村田 和博^{*1}, 江頭 真二^{*1}Body Forced Convection Condensation on a Vertical Smooth Surface
(1st Report, Flow Pattern of Condensate Film
and Local Heat Transfer Coefficient)Haruo UEHARA, Tsutomu NAKAOKA,
Kazuhiro MURATA, and Shinji EGASHIRA

This paper deals with the experimental studies on body forced convection film condensation of pure single, component vapor on a vertical smooth surface. A vertical plate and a smooth tube are used in test section. R-11, R 113, R 114 and ethanol is used as the working fluid. The flow patterns of condensate film are classified into laminar flow, sine wavy flow and harmonic wavy flow. Nondimensional expressions of the local heat transfer coefficient are obtained for laminar flow, sine wavy flow and harmonic wavy flow, respectively.

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

1. 緒 言

鉛直な平滑面上で純粋な単一成分の流速がほとんどない蒸気が膜状凝縮する際の熱伝達は、膜状凝縮熱伝達の基本的なもので、工学的にも、工業的にも重要な課題である。この問題については、1916年のNusselt⁽¹⁾の理論的研究以来、数多くの研究がなされている⁽²⁾⁽³⁾。

上原ら⁽³⁾⁽⁴⁾の鉛直平板上および円管上の凝縮液膜の流れの観察によると、凝縮液膜状態は、層流、正弦波流、高調波流、乱流の4種類に大別することができる。

これまでの膜状凝縮の理論的研究は、これらのうち、いずれかの液膜流れを対象に行われている。層流膜状凝縮については、Nusselt 以来、数多くの研究者が解析を行っているが、いずれも Nusselt の式でほぼ近似できることが明らかにされている⁽⁵⁾。

Sofrata⁽⁶⁾⁽⁷⁾、上原ら⁽⁸⁾、Hirshburg ら⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾が、正弦波流について、Hirshburg ら⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾、上原ら⁽¹¹⁾が高調波流について、Colburn⁽¹²⁾、Dukler⁽¹³⁾、上原ら⁽¹⁴⁾が乱流について理論解析を行っている。

一方、鉛直な平滑面上での膜状凝縮熱伝達に関する実験的研究も、多数行われている。しかし、これらの実験のほとんどが伝熱面全体の平均熱伝達係数に関するもので、局所熱伝達係数に関する実験は、Shea ら⁽¹⁵⁾のもののみである。

これまでの研究の多くは、平均熱伝達係数に関する実験データと理論解との比較を行うことによって議論を行っている⁽³⁾。

これらの結果によると、伝熱面全体が層流の場合については、通常の場合、実験値は、Nusselt の理論式とよく一致している。

このことより、凝縮液膜が層流については、ほぼ解決されていると言える。

凝縮液膜が正弦波流、高調波流、乱流についても、理論解と実験値との比較が、平均熱伝達係数についてなされているが、必ずしも一致しているとは言えない。また、液膜が、正弦波流、高調波流、乱流の場合に対して、実験データを用いて、いくつかの経験式が提案されているが、経験式相互の差異は大きい。したがって、液膜が正弦波流、高調波流、乱流の場合についての、一般的な経験式はまだ確立されているとは言えない⁽⁸⁾⁽¹⁴⁾。

この原因としては、実験値と凝縮液膜の流動状態と

* 昭和63年3月18日 関西支部第63期定時総会講演会において講演、原稿受付 昭和62年5月22日。

^{*1} 正員、佐賀大学理工学部 (〒840 佐賀市本庄町1)。

の対応が正確でないことと理論解析に用いたモデルが現象に十分対応していないことが考えられる。著者のこれまでの観察によると、凝縮液膜は、条件によって、図1のように分類することができる。これまでの実験によって得られた平均熱伝達係数の値は、図1のいずれかの状態に相当しているものと考えられる。しかし、これまでの研究は、図1の(1)、(4)の層流と乱流のみか、図1の(1)、(2)、(4)の層流、正弦波流、乱流のみに分類して議論を進めている場合が多い。

したがって、液膜が正弦波流、高調波流および乱流の場合の理論的研究をより厳密に行うためには、また図1に示した流動状態の平均熱伝達係数を正確に見積もるためにも、それぞれの液膜の流動状態の局所熱伝達係数のより正確なデータを得るとともに、一般的な経験式を得る必要がある。さらに、層流から正弦波流、正弦波流から高調波流、高調波流から乱流への遷移点をより正確に見積もる必要がある。それで、著者らは鉛直面上の膜状凝縮の局所熱伝達係数を測定し、同時に液膜の流動状態を観察し得る実験装置を製作して実験を行った。本報は、層流、正弦波流、高調波流についての研究結果について述べたものである。

2. 記 号

A : 伝熱面積

c_p : 定圧比熱

g : 重力の加速度

Gr : グラスホフ数 式(4)

H : 顕潜熱比 式(5)

L : 潜熱

Nu : ヌッセルト数 式(3)

Nu^* : 凝縮数 $= \alpha_x (\nu_L^2 / g)^{1/3} / \lambda_L$

Pr : プラントル数

q : 熱流束

Q : 熱流量

Re^* : 膜レイノルズ数 $= (4q_x X) / (\mu_L L)$

S : 無次元数 $= (3\sigma^3 / \rho_L^2 g \nu_L^4)^{1/5}$

T : 温度

X : 長さ

α : 熱伝達係数

λ : 熱伝導率

μ : 動粘性係数

ν : 粘性係数

ρ : 密度

σ : 表面張力

添 字

c : 冷水、遷移点

図1 凝縮液膜の流動状態の分類

図2 伝熱面 NO.1

図3 伝熱面 NO.2

表 1 実験条件

	Plate No.1			Plate No.2		
	R11	R113	ETHANOL	R11	R113	R114
T_v (°C)	37.97 - 20.76	39.21 - 22.22	62.10 - 41.63	37.69 - 27.14	48.45 - 47.55	33.33 - 24.54
V_v (m/s)	0.06 - 0.03	0.06 - 0.03	0.08 - 0.04	0.48 - 0.14	0.52 - 0.16	0.21 - 0.01
T_{ci} (°C)	8.03 - 7.62	7.95 - 7.65	15.52 - 15.30	12.90 - 4.06	16.93 - 16.26	16.88 - 11.25
V_c (m/s)	0.21	0.21	0.21	1.00 - 0.45	0.60	0.35 - 0.16

図 4 伝熱面 NO.1 のテストセクション

図 5 伝熱面 NO.2 のテストセクション

H: 高調波

I: 内側 (伝熱面の冷却水側)

L: 液体の物性値, 層流

O: 外側 (伝熱面の蒸気側)

S: 正弦波

V: 蒸気, 蒸気の物性値

W: 壁面

X: 局所 (伝熱面上端面からの X_m の値)

T: 乱流

3. 実験装置

伝熱面は、有効長さ 160 mm, 有効幅 118 mm, 厚さ 15 mm の伝熱面 NO. 1 と、有効長さ 911 mm, 有効幅 153 mm, 厚さ 20 mm の伝熱面 NO. 2 を用いた。図 2 に伝熱面 NO. 1, 図 3 に伝熱面 NO. 2 の寸法と伝熱面温度および、熱流束測定用の熱電対の位置を示す。伝熱面の材質は NO. 1 が 7/3 黄銅製で、NO. 2 が 6/4 黄

銅製である。伝熱面 NO. 1 には、銅-コンスタンタン熱電対が、長さ方向に 3 箇所 (厚さ方向に各 3 本) 挿入されている。また、伝熱面上端から熱電対までの距離は、それぞれ 49.6, 90.9, 140 mm である。3 組の熱電対は、伝熱面の上方から、それぞれ NO. 1, NO. 2, NO. 3 と呼ぶことにする。これらの熱電対は、直径 1.5 mm のきりで孔を開けた後に挿入したため、実験終了後、伝熱面を切り開いて、熱電対の位置を正確に測定した。

伝熱面 NO. 2 には、長さ方向に 5 箇所 (NO. 1~5), 厚さ方向に各 2 本の熱電対が埋め込まれている。これらの熱電対は、1 mm の溝をエンドミルで作った後、0.5 mm 径のシース熱電対を銀ろうで埋め込んだ。その後、表面をサンドペーパーでなめらかに仕上げ、さらにコンパウンドで鏡面に仕上げた。伝熱面 NO. 1 は、図 4 に示すように箱形のテストセクションに取付けられている。冷却水は、下方から入り、熱交換を行った後に上方より出る。蒸気は、テストセクションの横から入る。伝熱面に直接当たらないように、板を取付けてある。また、正面には、凝縮現象を写真撮影するために、強化ガラス製の窓が取付けられている。蒸気温度は、蒸気入口の反対側の面に取付けられている 2 本の熱電対によって測定されている。伝熱面 NO. 2 は、図 5 に示すテストセクションに取付けられている。蒸気は、流入の際の衝突の影響を避けるために、凝縮面の後方より流入するよう工夫されている。蒸気温度は長さ方向に 3 箇所測定されている。実験装置のフロー線図、実験方法については、文献(3), (16)に述べているのでここでは省略する。

4. 実験結果および考察

4.1 実験条件 表 1 に実験条件を示す。伝熱面 NO. 1 の実験では、作動流体として、フロン 11, 113, エタノールを用い、伝熱面 NO. 2 の実験では、フロン 11, 113, 114 を用いた。

4.2 液膜の流動状態 図 6(a) に伝熱面 NO. 1 でのフロン 113 の液膜の流動状態を 35 mm フィルム (Kodack-Tri-X Pan f5.6, シャッタースピード 1/500) を用いて写真撮影したものを示す。図 6 から明ら

かなように、液膜は、伝熱面の上端部では層流であるが、50～100 mm の所で波が発生している（このように波が発生している液膜の領域を波流域と呼ぶ）。図6(b)に図6(a)の状態での伝熱面温度 T_{wix} , T_{wox} と熱流束 q_x の分布を示す。図7(a)に、伝熱面 NO.2 でのフロン 113 の液膜の状態を示す。図7(a)に示すように、伝熱面全体にわたって波流域である。図7(b)には、この場合の温度と熱流束の分布を示す。この場合には、温度差は、ほぼ一定であるが、熱流束はかなり変化している。

4・3 局所熱伝達係数 局所熱伝達係数 α_x は、次式で定義する。

$$\alpha_x = q_x / (T_v - T_{wox}) \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、 q_x は、局所の熱流束で、伝熱面の厚さ方向の温度こう配と伝熱面の熱伝導率 ($\lambda = 99 \text{ W/mK}$) か

ら求めたものである。 T_{wox} は、伝熱面の蒸気側温度に対応するように、測定値を外挿して求めた。 T_v は、長さ方向には、ほとんど変化していない。データ整理に当たっては、冷却水の温度上昇より求めた全熱量 Q_c 、凝縮量より求めた全熱量 Q_f 、局所の熱流束を積分して得た全熱量 Q_w との差異が、 $\pm 10\%$ 以内の実験値のみを採用した。

図8に、局所ヌッセルト数 Nu_x と $Gr_x \cdot Pr_L / H$ との関係を示す。図8中に示した実線はヌッセルトの層流液膜に対する次式を示している。

図6 凝縮液膜の流動状態と温度分布および熱流束分布の例 (伝熱面 NO. 1)

図7 凝縮液膜の流動状態と温度分布および熱流束分布の例 (伝熱面 NO. 2)

図8 局所ヌッセルト数 Nu_x と $Gr_x Pr_L / H$ との関係

$$Nu_x = 0.707(Gr_x \cdot Pr_L / H)^{1/4} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで

$$Nu_x = \alpha_x \cdot X / \lambda_L \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$Gr_x = (gX^3 / \nu_L^2) \{ (\rho_L - \rho_V) / \rho_L \} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$H = c_{pL} \Delta T / L \quad \dots\dots\dots (5)$$

また、図8中には、 $Gr_x \cdot Pr_L / H$ の代表的な値での凝縮液膜の流れの状態の写真を示している。図8から明らかにように $Gr_x \cdot Pr_L / H$ が 3×10^{11} の(a)点では液膜表面は鏡面で波は観察されなかった。この状態は層流 (Laminar flow: L 流) とよばれている。液膜表面が(a)のような状態ではいずれの流体の場合でも、実験値の Nu_x は式(2)とよく一致している。したがって、層流の場合には境界層理論による解析が有用である。また、実験値が、式(2)で表されることから、本報での局所熱伝達係数の測定法は、ほぼ妥当なものと考えられる。 $Gr_x \cdot Pr_L / H$ の増大とともに、液膜表面に波立が観察されるようになる。波高は、最初は低いが徐々に高くなっていく。波高が低い(b)点では、熱伝達係数は、層流の場合とそれほど差は認められない。しかし、波高が高くなるとともに熱伝達係数は大きくなり、次第に式(2)より大きくなっていく。

(b), (c)点の液膜表面には、(d)点で観察される低い波高の波が観察されていない。この状態は So-

frata や上原らが、理論解析の際仮定した正弦波流れの状態と考えられる。この状態の流れを、正弦波流 (Sine wavy flow: S 流) と呼ぶことにする。 $Gr_x \cdot Pr_L / H$ が 10^{14} の(d)点では、高い波高の波と波の間にさらに小さい波高の波が観察される。この状態の流れを高調波流 (Harmonic wavy flow: H 流) と呼ぶことにする。このような液膜流の場合には、 Nu_x は層流の式よりもかなり大きくなり、この状態では $Nu_x \sim Gr_x \cdot Pr_L / H$ のみでは、実験値を整理できないことがわかる。このような状態は、さらに $Gr_x \cdot Pr_L / H$ が大きい状態まで続く。

5. 波流域の整理式

5.1 $Nu_x \sim Gr_x \cdot Pr_L / H$ による整理

5.1.1 正弦波域 上原ら⁽⁸⁾は、正弦波について解析を行い、局所ヌッセルト数は、次の関数で表されることを示している。

$$Nu_x = f(H, S, Pr_L, Gr_x) \quad \dots\dots\dots (6)$$

図9に、写真より明らかに正弦波流と考えられるデータを取り出して式(6)のパラメータを用いて、最小二乗法を用いて整理した結果を示す。図9中の実線は、最小二乗法で得られた次式を表している。

$$Nu_x = 0.0568 (H/S)^{0.094} Pr_L^{-0.054} (Gr_x Pr_L / H)^{0.37} \quad \dots\dots\dots (7)$$

実験値は式(7)とよく一致している。

式(2)と式(7)の Nu_x が等しい点を層流から正弦波流の遷移点とすると

$$(Gr_x Pr_L / H)_{LSC} = 1.34 \times 10^9 (H/S)^{-0.78} Pr_L^{0.45} \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる。図10に式(8)と実験値との比較を示す。実験値は、測定ごとに撮影した図6(a)のような写真からL流からS流への遷移点を測定し、その点の温度差と物性値を用いて算出した。式(8)と実験値はほぼ一致している。

図9 式(7)と実験値との比較 (正弦波流)

図10 式(8)と実験値との比較

図11 式(9)と実験値との比較

図 12 式(10)と実験値との比較

図 14 式(12)と実験値との比較

図 13 Nu_x^* と Re_x^* との関係

図 15 式(14)と実験値との比較

5.1.2 高調波流 高調波流の Nu_x は、正弦波流のパラメータで整理できることが、上原ら⁽¹¹⁾の理論解析で示されている。図 11 は、撮影した写真より、液膜が明らかに高調波流と考えられるデータを取り出してプロットしたものである。

図 11 より次の経験式が得られる。

$$Nu_x = 3.3(H/S Pr_L)^{0.2} (Gr_x Pr_L / H)^{0.25} Pr_L^{0.33} \quad (9)$$

実験値は、式(9)の $\pm 10\%$ 以内に入っている。式(7)と式(9)の Nu_x が等しいところが正弦波流から高調波流への遷移点とすると次式が得られる。

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

図 12 に式(10)と実験値との比較を示す。実験値は式(10)とかなり差異があるが、実験値を写真より測定したために正弦波流と高調波流の区別が明確につけにくいためと考えられる。この点についてはさらに研究の余地がある。

5.2 $Nu_x^* \sim Re_x^*$ による整理 5.1 節では、伝熱面温度一様の場合に現れるパラメータによる整理を行ったが本節では熱流束一様⁽¹⁷⁾の場合に現れるパラメータを用いて議論をする。

図 13 は、図 8 のデータを Nu_x^* と Re_x^* との関係で示

したものである。図 8 での特徴は、図 13 でも現れている。すなわち、液膜が層流の場合は、式(2)を変形して得られる式(11)とよく一致している。

$$Nu_x^* = 1.0 Re_x^{*-1/3} \quad (11)$$

しかし、正弦波流域と高調波流域では、式(11)より大きい。図 13 から正弦波流と高調波流では、特性が異なることがわかる。Hirshburg らの R113 の場合の理論解を比較のため入れている。実験値は、彼らの理論解とほぼ一致している。彼らの結果は、他の実験条件について示されていないので、彼らのモデルが正しいかどうかの判断はしにくい。

正弦波流に対する式(7)を変形すると次式が得られる。

$$Nu_x^* = 0.0323 S^{-0.13} Pr_L^{0.0553} Re_x^{*-0.381} Gr_x^{0.178} \quad (12)$$

図 14 に式(12)と実験値の比較を示す。式(12)は実験値とよく一致している。

式(11)と式(12)の Nu_x^* が等しいとすると、遷移膜レイノルズ数は、次式で表される。

$$(Re_x^*)_{LSC} = 5.30 \times 10^{-32} S^{-2.73} Pr_L^{1.11} Gr_x^{3.73} \quad (13)$$

高調波流に対する式(9)を変形すると次式が得られる。

$$Nu_x^* = 3.78 S^{-0.211} Pr_L^{0.347} Re_x^{*-0.553} Gr_x^{0.071} \quad (14)$$

図15は式(14)とデータとを比較したものである。この場合もよく一致している。

式(12)と式(14)の Nu_x が等しいとすると、正弦波流から高調波流への遷移膜レイノルズ数は次式で表される。

$$(Re_x)_{SHC} = 4.94 \times 10^{-7} S^{0.247} Pr_L^{-0.895} Gr_x^{0.759} \dots (15)$$

6. 結 論

鉛直平板上で純蒸気が凝縮する場合の局所熱伝達係数を測定し、次の結果を得た。

- (1) 液膜が層流の場合には、局所ヌッセルト数は、式(2)または式(11)で表される。
- (2) 液膜が正弦波流の場合には、局所ヌッセルト数は、式(7)または式(12)で表される。
- (3) 液膜が高調波流の場合には、局所ヌッセルト数は、式(9)または式(14)で表される。
- (4) 層流から正弦波流への遷移点は、式(8)または式(13)で表される。
- (5) 正弦波流から高調波流への遷移点は、式(10)または式(15)で表される。

文 献

- (1) Nusselt, W., *Z-VID*, 60 (1916), 541.
- (2) 藤井・ほか3名, 伝熱工学の進展 1, (昭48), 1, 養賢堂.
- (3) 上原・ほか3名, 機論, 49-439, B (昭58), 666.
- (4) 上原・ほか2名, 第22回伝熱シンポジウム講論集, (昭60), 326.
- (5) Fujii, T. and Uehara, H., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 15-2 (1972), 217.
- (6) Sforata, H., *Wärme Stoffübertrag.*, 14 (1980), 201.
- (7) Sforata, H., *Wärme Stoffübertrag.*, 15 (1981), 15.
- (8) 上原・ほか3名, 機論, 48-433, B (昭57), 1751.
- (9) Hirshburg, R. I. and Florshuetz, L. W., *Trans. ASME-C104* (1982), 452.
- (10) Hirshburg, R. I. and Florshuetz, L. W., *Trans. ASME-C104* (1982), 459.
- (11) 上原・ほか2名, 佐賀大理工学集報, (12) (昭59), 89.
- (12) Colburn, A. P., *Trans. Am. Inst. Chem. Eng.*, 30 (1933/34), 187.
- (13) Dukler, A. E., *Chem. Eng. Prog., Symp. Ser.*, 56-30 (1960), 1.
- (14) 上原・ほか3名, 機論, 48-435, B (昭57), 2278.
- (15) Shea, F. L. and Krase, N. W., *Trans. Am. Inst. Chem. Eng.*, 36 (1940), 463.
- (16) 上原・ほか2名, 冷凍, 58-668, (昭58), 549.
- (17) Fujii, T. and Uehara, H., *Heat Transf. Jpn. Res.*, (1973), 76.

討 論

〔質問〕 細 川 力〔姫路工業大学〕

(1) 測定値の誤差に関して、 q_x を求めるための温度測定値の一例を、伝熱面 No. 1, 2 について同じ作動流体の場合で示していただきたい。

(2) (1)に関連して、図6(b)と図7(b)中の x

の増加に対する q_x の傾向は貴実験条件の場合にのみ見られるものなのかどうか。

(3) 各流れの状態は伝熱面および液面の表面エネルギーに影響されると思われるがそれらの考慮に関してはいかがか。表面張力が無次元数 s に含まれている

付図1 伝熱面 No. 1 の厚さ方向温度分布

付図2 伝熱面 No. 2 の厚さ方向温度分布

が、フィルム数などの使用も一般的であると思われるが、 s の表示で十分なのか。

〔回答〕 (1) 付図1と付図2に、フロン113の場合について、熱流束 q_x を求めるための伝熱面の温度こう配を示す。伝熱面 No. 1, 2 の両方とも温度差は、約 $2\sim 3^\circ\text{C}$ であった。したがって、 q_x の測定誤差は、約 10% と考えている。なお、伝熱面 No. 1 では、3 点の温度を最小二乗法により一次式に近似し、温度こう配を求めた。その結果、両端の 2 点を用いて算出した温度差とほとんど差異がなかったため、伝熱面 No. 2 では、両端の 2 点のみを測定し、温度差を求めた。

(2) 熱流束 q_x は、液膜の流れの状態によって異なる。伝熱面全体が層流のときには、 q_x は、 X とともに減少する。付図3に、作動流体が異なった場合の例を示す。

(3) 本論文に用いた無次元数 S は、Sofrata⁽⁶⁾ の論文に示されていたものを借用したもので、 S は、フィルム数 Fi を用いると、 $S=(3\cdot Fi)^{1/5}$ で表すことができる。本論文で、フィルム数を用いることも考え

付図3 異なった作動流体における熱流束および温度差の鉛直方向分布 (伝熱面 No. 1)

たが、フィルム数を用いると値が大きくなるので S を用いた。したがって、 S はフィルム数と同等で、表面エネルギーの影響を示す無次元数である。