水蒸気-空気混合気の細い鉛直管外面への自由対流凝縮*

藤井 哲^{*1}, 田代光男^{*1}, 眞喜志 治^{*1}Free Convection Condensation of Steam-Air Mixture
on a Vertical Tube of Small DiameterTetsu FUJII^{*2}, Mitsuo TASHIRO and Osamu MAKISHI^{*2} Department of Mechanical Engineering, University of East Asia,
2-1 Ichinomiya-gakuen-cho, Shimono-seki-shi, Yamaguchi, 751-8503 Japan

This paper deals with an experimental study of free convection condensation of steam air mixture on a vertical tube. The experiment is made using two copper tubes of 6 mm and 4 mm in outer diameter. The range of concentration of air is 0.1~0.9. Condensation rate is measured as well as overall heat transfer rate. The convection heat flux is obtained by subtracting the condensation heat flux from the heat flux at the cooling surface. The equations for predicting condensation mass flux, convective heat flux at the liquid vapor interface, and heat flux at the cooling surface are proposed by modifying corresponding equations for a vertical flat surface. The newly proposed equations correlate the respective experimental results within the error of several percents irrespectively of the wettability of the tube surface.

Key Words: Condensation, Heat Transfer, Steam-Air Mixture, Vertical Tube, Free Convection, Experiment and Theory

1. 緒 言

前報⁽¹⁾において、水蒸気-空気混合気が細い鉛直管外面で膜状層流自由対流凝縮する場合に、伝熱面熱流束が鉛直平面上の凝縮の場合に比べて約2.5倍大きくなることを見出した。そしてその理由を自由対流熱伝達からの類推により説明した。本報ではそれを確かめるために、凝縮量の測定を行い、凝縮における物質伝達の性質を明らかにするとともに、凝縮による熱流束と対流による熱流束とを分離して、理論との比較を行う。伝熱面には外径6mmと4mmの銅管を用い、濡れ易い面と濡れにくい面についての比較も行う。

主 な 記 号

 D : 相互拡散係数, m^2/s ℓ : 伝熱面代表長さ (高さ), m $\dot{M}$: 凝縮量, kg/s $\dot{m}$: 凝縮質量流束, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ $(\dot{m}_c)_{\text{corr}}$: 式(4) Nu : ヌセルト数 $p_{V\infty}$: 混合気圧力, Pa q : 熱流束, W/m^2 $(q_{\text{conv}})_{C\text{-corr}}$: 式(9) $(q_{\text{conv}})_{\text{exp A}}$: 式(5) $(q_{\text{conv}})_{\text{exp B}}$: 式(6) $(q_{\text{conv}})_{C-T, \text{corr} Nu}$: エネルギー式から求められる円筒面の対流熱流束の式(8)による修正値, W/m^2 $(q_{\text{conv}})_{C-W, \text{corr} Nu}$: 拡散式から求められる円筒面の対流熱流束の式(8)による修正値, W/m^2 $(q_{\text{conv}})_{C-W, \text{corr} Sh}$: 拡散式から求められる円筒面の対流熱流束の式(3)による修正値, W/m^2 $(q_{\text{conv}})_{P-T}$: エネルギー式から求められる平面の対流熱流束, W/m^2 $(q_{\text{conv}})_{P-W}$: 拡散式から求められる平面の対流熱流束, W/m^2 q_{exp} : 伝熱面熱流束の実験値, W/m^2 r_o : 伝熱面の外半径, m Sh : シャーウッド数 t : 温度, $^{\circ}\text{C}$ $t_{V\infty} = t_{S\infty}$: 混合気のパルクの温度 (飽和蒸気温度), $^{\circ}\text{C}$

* 原稿受付 2001年2月19日。

^{*1} 正員, 東亜大学工学部(〒751-8503 下関市一の宮学園町2-1)。

E-mail: makishi@po.cc.toua-u.ac.jp

t_w : 伝熱面温度, $^{\circ}\text{C}$

$W_{1v\infty}$: 混合気中の空気濃度 (空気の質量分率)

$W_R = W_{1v_i} / W_{1v\infty}$: 濃縮比 (気液界面の空気濃度とバルクの空気濃度との比)

α : 熱伝達係数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Δh_v : 凝縮の潜熱, J/kg

添 字

C : 円筒面に関する理論値

conv : 対流

corr : 式 (3) あるいは式 (8) で修正した理論値

exp : 実験値

P : 平面に関する理論値,

∞ : バルク混合気

2. 実験装置および方法

図 1 に実験装置の略図を示す。前報と異なるところは、凝縮量 $\dot{M}$ の測定ができるように、計量球を取付けたことである。計量球の下端とつながっていて、下部フランジを貫通している管に取り付けてある弁を閉じ、凝縮液が計量球の下目盛から上目盛までの間に溜まる時間を測定した。上下目盛の間に溜まる水

Fig. 1 Schematic view of apparatus

の質量は 30°C で $(3.71 \pm 0.04) \times 10^{-3} \text{ kg}$ であった。測定データのばらつきから判断した測定誤差は凝縮質量流束にして最大 4% 程度であった。

冷却水の混合平均温度測定のために、直列連結の 4 対のシース熱電対を挿入した混合室を新しく作製した。冷却水の入口温度 t_{cin} と出口温度 t_{cout} の差の測定計器の誤差は 0.01K と見積ることができる。しかし、冷水循環装置から供給される冷却水の温度が最大 $\pm 0.05\text{K}$ 程度変動するのが避けられなかったため、 t_{cin} の測定と t_{cout} の測定との時間差の関係で実際の測定誤差は $(t_{\text{cout}} - t_{\text{cin}})$ の $\pm 5\%$ 程度に大きくなることもある。

テスト伝熱管には、前報とほとんど同じ形で、外径 6.00mm 、内径 4.00mm 、伝熱有効長さ 428mm 、代表高さ 205mm の U 字管 (以下 6mm 管と略す) および外径 3.98mm 、内径 2.95mm 、伝熱有効長さ 467mm 、代表高さ 222mm の U 字管 (以下 4mm 管と略す) を用いた。いずれも市販の銅管で作製した。 6mm 管については、親水性皮膜をつけた面について膜状凝縮の実験を行った後、その管を耐水サンドペーパー (粒度 1200) で磨いて、オレイン酸と潤滑油の疎水性混合液を薄く塗布した濡れにくい面について実験を行った。 4mm 管は、単に耐水サンドペーパーで磨いて水洗いした。

その他の装置および計測器類は前報と同じものである。以下にそれを要約する。冷却水流量は浮き子式流量計で測定した。その測定誤差は最大 $\pm 4\%$ である。熱流束 q_{exp} は冷却水流量の測定値と冷却水の温度上昇の測定値から算出した。その最大誤差は $\pm 9\%$ である。伝熱面温度 t_w は管内強制対流熱伝達の式から算出した。 4mm 管については電気抵抗を測定することによって温度を求める方法を併用した。 t_w の測定誤差は最大 -0.3K と見積もることができる。混合気温度 $t_{v\infty}$ はシース熱電対によって測定した。その測定精度は 0.02K であるが、最大の変動幅は $\pm 0.5\text{K}$ であった。なお温度の測定値は 1 秒間隔で 20 回測定したものの平均値とした。混合気圧力 $p_{v\infty}$ は開 U 字水銀柱マノメータとフォルトン気圧計を用いて測定した。その測定誤差は最大 120Pa である。混合気バルクの空気濃度 $W_{1v\infty}$ は、 $t_{v\infty}$ を蒸気分圧に対応する飽和温度として、それと $p_{v\infty}$ より算出した。同じ加熱量および冷却水の同じ流量と同じ入り口温度を設定しても、各測定量の微小の変動は避けられないので、同一条件に設定した 2 ~ 4 回の測定値の算術平均を取って、データ整理をした。

3. 実験結果および考察

6mm 管について、親水性皮膜を塗布した面では全面

Table 1 Experimental results for 6mm hydrophilic surface

Run No.	$t_{v\infty}$ °C	$p_{v\infty}$ kPa	t_w °C	t_{out} °C	t_{in} °C	G kg/s	M kg/s	W_{lv}
							$\times 10^{-5}$	
1	70.33	103.10	31.12	31.29	30.09	0.0133	2.459	0.784
2	61.53	96.35	31.41	30.90	30.13	0.0127	1.343	0.848
3	62.52	25.98	46.33	44.74	41.60	0.0125	6.734	0.270
4	62.92	25.90	46.70	45.11	41.93	0.0125	6.875	0.182
5	56.99	21.09	44.79	43.87	42.24	0.0167	4.699	0.261
6	67.03	42.40	33.55	32.15	30.13	0.0160	5.296	0.469
7	52.64	15.72	36.09	34.40	31.90	0.0166	7.141	0.162
8	61.95	28.77	33.35	31.75	29.51	0.0166	6.245	0.341
9	58.55	29.65	32.66	31.57	30.04	0.0166	4.141	0.488
10	51.55	24.29	31.76	31.07	30.10	0.0166	2.557	0.570
11	72.46	120.40	32.33	31.49	30.15	0.0116	2.276	0.800
12	74.02	147.40	32.54	31.66	30.16	0.0099	2.133	0.828
13	63.45	129.50	31.49	30.98	30.12	0.0099	1.185	0.880
14	68.40	136.20	32.25	31.50	30.14	0.0081	1.573	0.856
15	61.42	127.50	31.61	31.08	30.13	0.0083	1.057	0.889
16	57.08	31.09	32.46	31.49	30.07	0.0150	3.467	0.560
17	49.11	25.03	31.52	30.94	30.10	0.0153	2.029	0.643
18	55.50	23.24	32.94	31.77	30.11	0.0165	4.464	0.416

Table 2 Experimental results for 6mm hydrophobic surface

Run No.	$t_{v\infty}$ °C	$p_{v\infty}$ kPa	t_w °C	t_{out} °C	t_{in} °C	G kg/s	M kg/s	W_{lv}
							$\times 10^{-5}$	
1	76.16	93.06	27.78	26.60	25.10	0.0166	3.033	0.677
2	71.39	60.94	28.27	26.88	25.10	0.0166	3.709	0.576
3	53.78	17.97	30.66	29.04	26.95	0.0183	5.696	0.254
4	55.78	31.57	31.81	31.08	30.09	0.0183	3.709	0.600
5	47.78	14.07	32.51	31.49	30.10	0.0183	3.709	0.306
6	58.22	28.18	32.71	31.61	30.06	0.0166	4.214	0.464
7	55.91	22.06	33.11	31.85	30.07	0.0166	4.964	0.355
8	56.31	26.71	32.43	31.46	30.09	0.0166	3.911	0.489
9	50.01	13.99	33.96	32.36	30.09	0.0166	6.217	0.177
10	59.33	27.93	32.76	31.59	30.05	0.0200	5.217	0.418
11	58.86	22.78	33.97	32.30	30.08	0.0201	7.386	0.249
12	62.31	66.36	31.85	31.16	30.07	0.0116	1.956	0.763
13	60.24	34.95	33.04	31.87	30.08	0.0133	3.970	0.542
14	63.25	47.21	32.66	31.36	30.07	0.0133	3.352	0.627
15	62.00	46.36	27.86	26.69	25.08	0.0134	4.864	0.644
16	58.39	34.69	22.78	21.51	20.05	0.0166	3.986	0.585
17	59.34	35.03	18.07	16.56	15.00	0.0167	4.414	0.567

Run No. 1~3: dropwise. Run No. 11~17: smooth film

Table 3 Experimental results for 4mm surface

Run No.	$t_{v\infty}$ °C	$p_{v\infty}$ kPa	t_w °C	t_{out} °C	t_{in} °C	G kg/s	M kg/s	W_{lv}
							$\times 10^{-5}$	
1	68.17	77.56	22.28	21.50	20.05	0.0124	2.539	0.732
2	48.85	13.13	23.72	22.37	20.08	0.0167	6.191	0.170
3	48.90	13.00	23.46	22.09	19.79	0.0167	6.151	0.154
4	62.98	37.13	22.91	21.88	20.05	0.0149	4.205	0.502
5	53.63	18.33	23.09	21.94	20.04	0.0183	5.457	0.282
6	66.35	60.83	21.85	21.15	19.99	0.0166	2.859	0.675
7	58.00	62.49	21.12	20.71	20.03	0.0166	1.596	0.797
8	56.53	22.81	17.91	16.71	15.03	0.0199	5.178	0.359
9	70.37	88.99	27.16	26.50	25.06	0.0116	2.475	0.745
10	70.47	89.62	27.14	26.48	25.02	0.0116	2.443	0.745
11	67.82	67.85	19.02	18.24	17.01	0.0166	2.816	0.692
12	67.37	68.44	19.71	18.75	17.03	0.0116	2.893	0.702
13	74.11	58.53	26.32	25.19	23.13	0.0166	5.452	0.481
14	72.87	52.63	25.26	24.49	23.10	0.0166	3.506	0.443
15	60.61	30.20	24.05	22.72	19.95	0.0105	4.575	0.433

が一樣に滑らかな液膜で覆われた膜状凝縮であった。日経が経つと面が酸化して黒色になったが、凝縮形態に変化は認められなかった。サンドペーパーで磨き疎水性液を塗布した面では、最初の数日間の実験では、図2の写真の左側の管に見られるように典型的な滴状凝縮であった。その後、同写真の右側の管に4個の比較的大きい滴が縦に並んでいるのが見られるが、そのように落下しにくい滴が比較的長時間面上に留まるようになる。次に、部分的に膜状凝縮が現れるようになる。さらに、膜-滴混合凝縮と滑らかな膜状でも滴状でもない凝縮形態とが混在する形態を経て全面滑ら

Fig. 2 Photo of condensate film

かな膜状になる。しかし、これらのいずれの凝縮形態でも、熱・物質伝達特性はほとんど変化しなかったのので、この章では膜状凝縮の結果について詳細に述べる。濡れにくい面についてのデータは図8と図13にのみ示す。4mm管のデータは6mm管と同じ方法で整理して、共通の結果が得られたので、図13に熱伝達の結果のみ示す。

測定結果を、6mm管の濡れ易い面については表1に、濡れにくい面については表2に、4mm管については表3に示す。図3は $t-W_{lv}$ 線図上にプロットした6mm管の実験状態を示す。図中の実線は参考のために記入した $p_{v\infty}$ の等圧線である。○印が混合気の状態で

Fig. 3 Experimental condition

Fig. 4 α_{exp} vs. $W_{1V\infty}$ and α_p vs. $W_{1V\infty}$

あり、+印は参考のためにプロットした伝熱面温度である。前報に比べて、伝熱面温度がわずかに高い。

この章では、実験値と理論値との比較を行うが、鉛直平面上の凝縮に関する理論値を求める式は付録にまとめた。詳しくは前報参照。

3・1 熱伝達係数 図4は次式で定義された熱伝達係数 α_{exp} を $W_{1V\infty}$ に対してプロットしたものである。

$$\alpha_{exp} = \frac{q_{exp}}{(t_{V\infty} - t_w)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

図中の実線は本実験と類似の条件 ($t_{V\infty} = 60^\circ\text{C}$, $t_w = 30^\circ\text{C}$) に対して計算された平面上の凝縮について

Fig. 5 $\dot{m}_{exp}$ vs. $\dot{m}_c$ Fig. 6 $(\dot{m}_{exp}/\dot{m}_p - 1)/(Sh_c/Sh_p - 1)$ vs. $W_{1V\infty}$ Fig. 7 $\dot{m}_{exp}$ vs. $(\dot{m}_c)_{corr}$

の理論値である ([付録 1] 参照)。前報と同様に、実験値がこの理論値に対して約2.5～3倍大きい。

3・2 凝縮質量流束 図5は前報と同様に平面に関する理論凝縮質量流束 $\dot{m}_p$ から次式を媒介にして算出した円管に関する理論凝縮質量流束 $\dot{m}_c$ 対凝縮質量流束の実験値 $\dot{m}_{exp}$ の関係を示す⁽¹⁾。

$$\frac{Sh_c}{Sh_p} = 1 + 0.43 \left\{ \frac{\ell}{Sh_p r_0} \right\}^{5/6} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに Sh_c は円管の平均物質伝達のシャーウッド数、 Sh_p は平面の場合のシャーウッド数 ([付録 2] 参照)、 ℓ は伝熱管の代表高さ、 r_0 は伝熱管の外半径である。図より $\dot{m}_{exp}$ の値が $\dot{m}_c$ の値より約1.5倍大きいことがわかる。実験値を表す半経験式を求めるために、式(2)の係数0.43を修正することにして、 $((\dot{m}_{exp}/\dot{m}_p) - 1)$

$/(Sh_c/Sh_p)-1$ の値を $W_{1V\infty}$ に対してプロットしたのが図6である。データのばらつきが大きい、平均として $(\dot{m}_{\text{exp}}/\dot{m}_p)-1)/(Sh_c/Sh_p)-1=2.19$ が得られた。したがって係数0.43を $0.43 \times 2.19 \div 0.95$ と修正することにする。すなわち、

$$\frac{(Sh_c)_{\text{corr}}}{Sh_p} = 1 + 0.95 \left\{ \frac{\ell}{Sh_p r_0} \right\}^{5.6} \dots\dots\dots (3)$$

この式の $(Sh_c)_{\text{corr}}$ を次式に代入して算出された凝縮質量流束を $(\dot{m}_c)_{\text{corr}}$ とする。

$$(\dot{m}_c)_{\text{corr}} = \frac{\rho_v D}{\ell} \left(\frac{W_R - 1}{W_R} \right) (Sh_c)_{\text{corr}} \dots\dots\dots (4)$$

ここに ρ_v は混合気密度、 D は相互拡散係数、 $W_R = W_{1V1}/W_{1V\infty}$ は濃縮比すなわち気液界面の空気濃度 W_{1V1} とバルクの空気濃度 $W_{1V\infty}$ との比である。 $(\dot{m}_c)_{\text{corr}}$ と $\dot{m}_{\text{exp}}$ の関係を図7に示す。両者の相関は良好である。

図8は空気濃度の影響を見るために $\dot{m}_{\text{exp}}/(\dot{m}_c)_{\text{corr}}$ と $W_{1V\infty}$ との関係を示す。図中の○印は濡れやすい面のデータ、□印は濡れにくい面のデータであり、その中で全面滴状凝縮のデータに⊗印をつけた。滴状凝縮のデータの一部に小さい値のものがあるが、原因の一つは、落下滴が飛び散って、計量球への捕捉が不完全であったことである。それらを除けば、全般的に○印のデータと□印および⊗印のデータの間には有意な差異は認められない。この事実、本実験の空気濃度の範囲では、現象が液膜の厚さではなく、気相境界層の物質伝達に支配されていることを示すものと考えられる。 $\dot{m}_{\text{exp}}$ と $(\dot{m}_c)_{\text{corr}}$ の差異は $W_{1V\infty}$ に関係なく $\pm 10\%$ 程度である。

3.3 対流熱流束 対流熱流束の実験値 $(q_{\text{conv}})_{\text{exp}}$ には次の2通りの算出法がある。すなわち

$$(q_{\text{conv}})_{\text{exp},A} = q_{\text{exp}} - \Delta h_v (\dot{m}_c)_{\text{corr}} \dots\dots\dots (5)$$

$$(q_{\text{conv}})_{\text{exp},B} = q_{\text{exp}} - \Delta h_v \dot{m}_{\text{exp}} \dots\dots\dots (6)$$

ここに Δh_v は凝縮の潜熱である。 $(q_{\text{conv}})_{\text{exp},A}$ の値と $(q_{\text{conv}})_{\text{exp},B}$ の値の関係を図9に示す。図には算出された対流熱流束が伝熱面熱流束より非常に小さい場合、すなわち $(q_{\text{conv}})_{\text{exp},A}/q_{\text{exp}}$ および $(q_{\text{conv}})_{\text{exp},B}/q_{\text{exp}}$ の値が0.03

Fig.8 $\dot{m}_{\text{exp}}/(\dot{m}_c)_{\text{corr}}$ vs. $W_{1V\infty}$

以下のものは除かれている。図のデータのばらつきは q_{exp} の測定誤差によるものと考えられる。

図10は対流熱流束に関する実験値と理論値との比較である。図中の○印は実験値として $(q_{\text{conv}})_{\text{exp},A}$ をとったもの、×印は $(q_{\text{conv}})_{\text{exp},B}$ をとったものである。理論値 $(q_{\text{conv}})_{C-T,\text{corr}Nu}$ は次式によって求めた。

$$(q_{\text{conv}})_{C-T,\text{corr}Nu} = \frac{(Nu_c)_{\text{corr}}}{Nu_p} (q_{\text{conv}})_p \dots\dots\dots (7)$$

ここに Nu は対流熱伝達のヌセルト数、添字Tはエネルギー式から求められる温度分布から算出したもの、添字corrNuは次に述べる式(8)による修正を意味する。 $(q_{\text{conv}})_p$ の算出については〔付録1〕参照。 Nu_p の算出については〔付録3〕参照。

$$\frac{(Nu_c)_{\text{corr}}}{Nu_p} = 1 + 0.95 \left\{ \frac{\ell}{Nu_p r_0} \right\}^{5.6} \dots\dots\dots (8)$$

この (Nu_c/Nu_p) に対する修正は (Sh_c/Sh_p) に対する修正と同形式とした。実験値の算出法によって、データ点はかなり異なっているが、全体的な傾向として、実験値は理論値の約2倍になっている。

二相境界層方程式を解くと、エネルギー式から得られる温度分布と拡散式から得られる濃度分布に対応する飽和温度分布はわずかに食い違う。後者によって計算された平板の熱流束を $(q_{\text{conv}})_{p-W}$ とし〔付録4〕参照、それを式(3)の $(Sh_c)_{\text{corr}}/Sh_p$ の値および式(8)の

Fig.9 $(q_{\text{conv}})_{\text{exp},A}$ vs. $(q_{\text{conv}})_{\text{exp},B}$

Fig.10 $(q_{\text{conv}})_{\text{exp}}$ vs. $(q_{\text{conv}})_{C-T,\text{corr}Nu}$

Fig. 11 $(q_{\text{conv}})_{\text{exp}}$ vs. $(q_{\text{conv}})_{\text{C-W, corr Sh}}$ Fig. 12 $(q_{\text{conv}})_{\text{exp}}$ vs. $(q_{\text{conv}})_{\text{C-W, corr Nu}}$

$(Nu_c)_{\text{corr}} / Nu_p$ の値で円筒面に変換したものをそれぞれ $(q_{\text{conv}})_{\text{C-W, corr Sh}}$ および $(q_{\text{conv}})_{\text{C-W, corr Nu}}$ とする。 $(q_{\text{conv}})_{\text{C-W, corr Sh}}$ と q_{exp} との比較を図 11 に、 $(q_{\text{conv}})_{\text{C-W, corr Nu}}$ と q_{exp} との比較を図 12 に示す。実験値のとり方およびデータ点の印は図 10 と共通である。図 10 と比較すると、いずれもデータのばらつきが大きく、実験値と理論値が正しい比例関係を示していない。そこで、実験値の整理式としては式(7)の値の 2 倍をとることにする。すなわち、

$$(q_{\text{conv}})_{\text{Ccorr}} = 2 \left\{ 1 + 0.95 \left(\frac{\ell}{Nu_p r_0} \right)^{5/6} \right\} (q_{\text{conv}})_{\text{P-T}} \quad (9)$$

3.4 伝熱面熱流束 本実験の空気濃度の範囲では、液膜が薄いので、凝縮熱流束と対流熱流束の和である気液界面熱流束と伝熱面熱流束とが等しいとみなしてよい。図 13(a)および(b)はそれぞれ、6mm 管と 4mm 管について、次の値

$$q_{\text{exp}} / \{ \Delta h_v (\dot{m}_c)_{\text{corr}} + (q_{\text{conv}})_{\text{Ccorr}} \} \doteq q_{\text{exp}} / q_c \quad (10)$$

を $W_{1V\infty}$ に対してプロットしたものである。 q_{exp} と $\{ \Delta h_v (\dot{m}_c)_{\text{corr}} + (q_{\text{conv}})_{\text{Ccorr}} \}$ は $\pm 5\%$ の誤差で一致している。図中の□印および⊠印は図 8 と同様に濡れにくい面のデータである。凝縮質量流束すなわち物質伝達の場合と同様に、伝熱面熱流束についても、濡れ易い面の膜状凝縮のデータと有意な差は認められない。

4. 結 論

外径 6mm、高さ 205mm および外径 4mm、高さ 222mm の鉛直の銅の U 字管の外表面に、空気濃度の範囲約 0.1～0.9 の水蒸気-空気混合気が凝縮する場合の熱伝達の実験を行った。平面上の凝縮に関する理論解を修正することによって、実験値とよく一致する式を導くことができた。

(1) 凝縮量の測定値から凝縮の物質伝達に関するシャーウッド数の式(3)を求めた。凝縮質量流束 $(\dot{m}_c)_{\text{corr}}$

は式(3)と式(4)から算出することができる。

(2) 伝熱面熱流束から凝縮による熱流束を差し引いて、対流熱流束 $(q_{\text{conv}})_{\text{Ccorr}}$ を求めた。その実験値は式(9)で表される。

(3) 伝熱面熱流束は凝縮による熱流束と対流による熱流束の和すなわち $\{ \Delta h_v (\dot{m}_c)_{\text{corr}} + (q_{\text{conv}})_{\text{Ccorr}} \}$ で精度よく予測することができる。

(4) 濡れにくい面の場合は、滴状凝縮あるいは滴状と膜状の中間の凝縮形態が現れるが、凝縮および熱伝達の特性は滑らかな膜状凝縮の場合と同じ式で表すことができる。

Fig. 13 q_{exp} / q_c vs. $W_{1V\infty}$

【謝辞】 本報の銅管についても(株)日立製作所、機械研究所の畑田敏夫氏に表面の親水性皮膜加工をしていただいた、ここに記してお礼申し上げる。

【付録1】 平板の熱伝達係数 α_p の理論値⁽²⁾.

$$\alpha_p = \frac{q_p}{t_{V\infty} - t_w} = \frac{\Delta h_v \dot{m}_p + (q_{\text{conv}})_{p-T}}{t_{V\infty} - t_w} \quad (\text{A1})$$

ここに Δh_v は凝縮の潜熱, $\dot{m}_p$ は凝縮質量流束, $(q_{\text{conv}})_{p-T}$ は気相境界層内の対流による熱流束である.
 $\dot{m}_p$ と $(q_{\text{conv}})_{p-T}$ はそれぞれ次式であらわされる.

$$\dot{m}_p = \frac{2\sqrt{2}\mu_L}{3\ell} \left(\frac{g\ell^3}{\nu_L^2} \right)^{1/4} \dot{M}_{\text{GL,P}} \quad (\text{A2})$$

$$\dot{M}_{\text{GL,P}} = \frac{0.8\chi_i^{1/4}(W_R - 1)}{Sc^{0.65}R(W_R + 1)^{1/2}W_R^{1-m}} \quad (\text{A3})$$

$$(q_{\text{conv}})_{p-T} = \frac{2\sqrt{2}}{3} \frac{\lambda_v}{\ell} \left(\frac{\nu_L}{\nu_v} \right)^{1/2} (t_{V\infty} - t_i)(-\Theta'_{\text{GV}_i}) Ga^{1/4} \quad (\text{A4})$$

$$-\Theta'_{\text{GV}_i} = \sqrt{2} \times 0.4 \text{Pr}_v^{0.35} (\chi^*)^{1/4} \times \left\{ 1 + k \text{Pr}_v^{0.66} \dot{M}_{\text{GV,P}}^j (1 - 0.85 c_{p12} W_{\text{LV}_i}) \right\} \quad (\text{A5})$$

ここに g : 重力の加速度, t_i : 気液界面温度, W_{LV_i} : 気液界面空気濃度, λ_v : 混合気の熱伝導率, μ_L : 液の粘度, ν_L : 液の動粘度, ν_v : 混合気の動粘度, $Ga = \ell^3 g / \nu_L^2$: ガリレオ数, Pr_v : 混合気のプラントル数, $R = (\rho_L \mu_L / \rho_v \mu_v)^{1/2}$: $\rho\mu$ 比, Sc : 混合気のシュミット数,

$$\chi_i = \omega_w + \omega_T \left(\frac{Sc_v}{\text{Pr}_v} \right)^{1/2} - \omega_w \omega_T: \text{式(A3)の気相の浮力項,}$$

$$\chi^* = \omega_w \left(\frac{\text{Pr}_v}{Sc_v} \right)^{1/2} + \omega_T - \omega_w \omega_T: \text{式(A5)の気相の浮力項,}$$

$$\omega_w = \frac{10.96(W_{\text{LV}_i} - W_{\text{LV}\infty})}{(28.97 - 10.96W_{\text{LV}\infty})}, \quad \omega_T = \frac{T_{V\infty} - T_i}{T_{V\infty}},$$

$$c_{p12} = \frac{c_{p1V} - c_{p2V}}{c_{p1V}W_{\text{LV}_i} + c_{p2V}W_{\text{LV}_i}}: \text{無次元比熱差,}$$

$$\dot{M}_{\text{GV,P}} = \omega_i^{-1/4} R \dot{M}_{\text{GL,P}}: \text{無次元凝縮量,}$$

$$\omega_i = \omega_w + \omega_T - \omega_w \omega_T,$$

$$\dot{M}_{\text{GV,P}} \geq 1 \quad \text{に対して} \quad k = 1.13 \quad \text{および} \quad j = 1.17,$$

$$\dot{M}_{\text{GV,P}} \leq 1 \quad \text{に対して} \quad k = 1.1 \quad \text{および} \quad j = 1.$$

$$m = 0.78 + (1.85 + 3.2 \times 10^{-5} W_{\text{LV}_i}^{1.8}) R^{0.75}$$

【付録2】 平板の理論シャーウッド数 Sh_p ⁽²⁾

$$Sh_p = \frac{2\sqrt{2}}{3} (-\Phi'_{\text{Gi}}) \nu_v^{-1/2} (g\ell^3)^{1/4} \quad (\text{A6})$$

$$-\Phi'_{\text{Gi}} = \sqrt{2} \times 0.4 Sc^{0.35} \chi_i^{1/4} \left(\frac{2}{1+W_R} \right)^{0.5} W_R^m \quad (\text{A7})$$

【付録3】 平板の理論ヌセルト数 Nu_p

$$Nu_p = \frac{(q_{\text{conv}})_{p-T} \ell}{(t_{V\infty} - t_i) \lambda_v}$$

ここに $(q_{\text{conv}})_{p-T}$ は式(A4), 気液界面温度 t_i は冷却面温度で代用してよい.

【付録4】 気液界面近くの気相の温度分布が濃度分布 W_{LV} に対応する飽和温度分布 t_{VS} の場合における熱流束 $(q_{\text{conv}})_{p-W}$ は次式で与えられる.

$$(q_{\text{conv}})_{p-W} = \frac{2\sqrt{2}}{3} \frac{(W_{\text{LV}_i} - W_{\text{LV}\infty})}{W_{\text{LV}_i} \{W_{\text{LV}_i} + (M_1/M_2)W_{\text{LV}_i}\}} \times \frac{\lambda_v R_2 T_i^2}{\Delta h_v} \left(\frac{g}{\nu_v^2 \ell} \right)^{1/4} (-\Phi'_{\text{Gi}}) \quad (\text{A8})$$

ここに, M_1 : 空気の分子量, M_2 : 水蒸気の分子量, R_2 : 水蒸気のガス定数, T_i : 気液界面温度/[K].

文 献

- (1) 藤井 哲, 田代 光男, 眞喜志 治, 水蒸気-空気混合気の細い鉛直管外面への膜状層流自由対流凝縮, 機論, 67-657, B (2001), 1191-1196
- (2) Tetsu Fujii, Theory of Laminar Film Condensation, (1991), Springer-Verlag, New York.