九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

自由対流層流膜状凝縮における液膜の物性値の評価温度

新里，寛英
九州大学機能物質科学研究所

李，鍾鵬
慶南大学校

藤井，哲
九州大学機能物質科学研究所

https://doi.org/10.15017/6606

出版情報：九州大学機能物質科学研究所報告. 6 (1), pp.1-9, 1992-11-30. 九州大学機能物質科学研究所
バージョン：
権利関係：

機能物質科学研究所
報告 第6巻 第1号
pp. 1～9 (1992)

自由対流層流膜状凝縮における液膜の物性値の評価温度

新里寛英・李 鍾鵬*・藤井 哲

Reference Temperature for Evaluating Physical Properties of Condensate Film in the case of Free-Convection Laminar Film Condensation

Kan'ei SHINZATO, Jong Boong LEE and Tetsu FUJII

The boundary layer equations for free-convection laminar film condensation of pure vapors of water, ethanol and propane on a vertical surface are numerically solved for the cases of constant properties, variable viscosity and variable relevant physical properties. The conclusions are as follows:

(1) The ratio of the heat flux at the vapor-liquid interface to that at the cooling surface is expressed by

$$\frac{-\theta'_{GLi}}{-\theta'_{GLw}} = (1+0.375\,H)^{-1}$$

(2) The correction for Nusselt's equation due to the thermal convection effect is roughly estimated by

$$\frac{Nu_{wx}}{Nu_{wx}{}^{N}} = (1+0.375\,H)^{1/4}$$

(3) The dimensionless reference temperature r_T derived from Fujii's aproximate analysis has been confirmed by the numerical results for the case of variable viscosity.

(4) The Nusselt's equation evaluated by the physical properties at $r_T=1/4$ predicts heat flux at the cooling surface within an error of two per cent.

1. 緒 言

凝縮熱伝達の実験データを無次元整理する際に，凝縮液膜の物性値の評価のために無次元評価温度 $r_T[=(T_r-T_w)/(T_s-T_w)]$の取り方が必要である。飽和純蒸気の強制対流凝縮の場合には藤井[1]および藤井ら[2]が$r_T=1/3$ としてよいことを確認している。

自由対流凝縮の場合には，Nusslt[3] の式を適用する場合の無次元評価温度として，Minkowycz と Sparrow[4]は，水蒸気の凝縮における液膜の物性値の温度依存性を考慮した数値解析結果から，$r_T=0.31$を推奨している。Poots と Miles[5] は373.15Kの飽和水蒸気の場合について同様な数値解析を行い，r_Tを蒸気と冷却壁面の温度差（T_s-T_w）の関数で表している。それによるとr_Tは温度差が0～60Kの範囲で約0.25から0.31まで変化する。藤井[6]は，粘度のみの温度依存性を考慮し，他の物性値は一定である場合について近似解を求め，$r_T=1/4$ を得ている。それは Drew[7] の結果と一致する。以上のように自由対流凝縮の場合のr_Tの値は確定的でない。

本報の目的は，飽和蒸気の鉛直平板上における自由対流層流膜状凝縮に関し，水，エタノールおよびプロパンについて数値解を求め，上記の問題点を明らかにすることである。液膜内の物性値の変化の影響を数値計算により明らかにするためには，蒸気と冷却面との温度差が実際の範囲よりも大きい場合について検討する必要がある。その際にはエネルギー式の対流項の影

受理日 平成4年1月22日
* 慶南大学校，韓国

響が現れるので，まず定物性値の解を再検討する。次に液膜の物性値の無次元評価温度を検討するために，粘度のみの温度依存性を考慮した場合および全物性値の温度依存性を考慮する場合について基礎方程式を解き，定物性値の式の値と比較する。

主な記号

c_{pL} ：定圧比熱
F_{GL}, F_{GV} ：無次元流れ関数,式(19), (20)
Ga_x ：Galileo 数$=gx^3/\nu_L^2$
g ：重力加速度
H ：相変化数$=c_{pL}(T_s-T_w)/\triangle h_v$
$\dot{M}_{GL}$ ：無次元凝縮質量流束,式(36)
$\dot{m}$ ：凝縮質量流束
Pr_L ：プラントル数 $= c_{pL}\mu_L/\lambda_L$
q ：熱流束
R ：$\rho\mu$比 $= (\rho_L\mu_L/\rho_V\mu_V)^{1/2}$
r_T ：代表物性値の無次元評価温度 $=(T_r-T_w)/(T_s-T_w)$
T ：温度
T_r ：代表物性値の評価温度
x ：冷却面先端から平板に沿って測った距離
y ：冷却面からその法線方向に測った距離
$\triangle h_V$ ：凝縮潜熱
$\triangle T$ ：温度差 $= T_s-T_w$
δ ：液膜の厚さ
$\triangle$ ：気相境界層の厚さ
θ_{GL} ：無次元温度，式(21)
η_{GL}，η_{GV} ：それぞれ液膜および気相の相似変数，式(17), (18)
λ ：熱伝導率
μ ：粘度
ν ：動粘度
ρ ：密度

添　字

$'$ ：相似変数ηに関する微分
cal ：物性値を$r_T=1/4$で評価した値
e ：T_wからT_sの間の温度における値
i ：気液界面での値
G ：自由対流凝縮
L ：液膜の値，液膜の物性値
r ：T_rにおける代表値
s ：飽和状態の値
sim ：相似解をもとにした値
V ：気相境界層の値,気相の物性値
x ：位置xでの値
w ：伝熱面での値
∞ ：周囲蒸気の値

2．基礎式および数値解

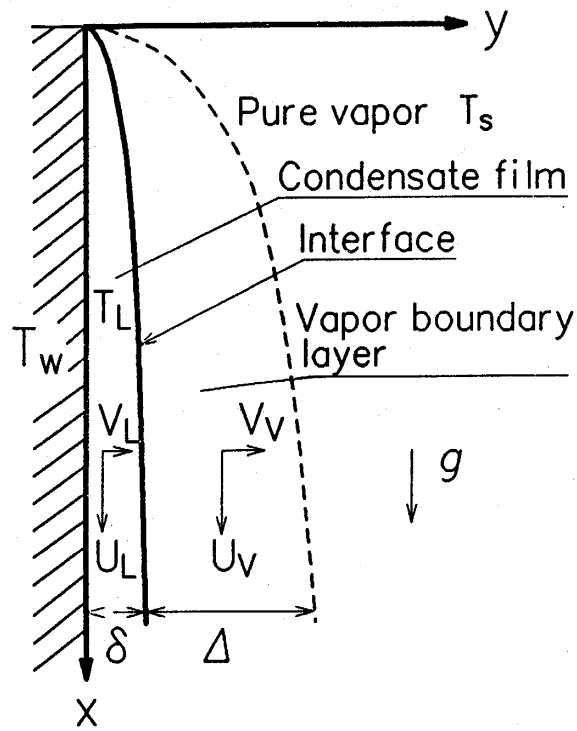

Fig.1 Physical model and coordinate system.

図1に物理モデルと座標系を示す。解析に際して用いた主な仮定は次のとおりである。(1) 壁温T_wおよび飽和蒸気温度T_sは一様，すなわち壁面に沿う座標xに無関係である。(2) 凝縮液膜および気相境界層は冷却面の先端から発達する。(3) 蒸気の密度は凝縮液の密度に対して無視できる。この場合の二相境界層方程式は次のように書かれる。

凝縮液膜について

$$\frac{\partial(\rho_L U_L)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho_L V_L)}{\partial y}=0, \qquad (1)$$

$$\rho_L\left(U_L\frac{\partial U_L}{\partial x}+V_L\frac{\partial U_L}{\partial y}\right)=\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_L\frac{\partial U_L}{\partial y}\right)+g\rho_L, \qquad (2)$$

$$\rho_L c_{pL}\left(U_L\frac{\partial T_L}{\partial x}+V_L\frac{\partial T_L}{\partial y}\right)=\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_L\frac{\partial T_L}{\partial y}\right), \qquad (3)$$

気相境界層について，

$$\frac{\partial U_V}{\partial x}+\frac{\partial V_V}{\partial y}=0, \tag{4}$$

$$U_V\frac{\partial U_V}{\partial x}+V_V\frac{\partial U_V}{\partial y}=\nu_V\frac{\partial^2 U_V}{\partial y^2}. \tag{5}$$

境界条件は次式で表される。

$y=0$ で　$U_L=0$, (6)

$V_L=0$, (7)

$T_L=T_w$, (8)

$y\to\infty$ で　$U_V=0$. (9)

気液界面での適合条件は次式で表される。

$y=\delta$ で　$U_{Li}=U_{Vi}=U_i$, (10)

$$\left(\mu_L\frac{\partial U_L}{\partial y}\right)_i=\left(\mu_V\frac{\partial U_V}{\partial y}\right)_i, \tag{11}$$

$$\left[\rho_L\left(U_L\frac{d\delta}{dx}-V_L\right)\right]_i=\left[\rho_V\left(U_V\frac{d\delta}{dx}-V_V\right)\right]_i=\dot{m}_x, \tag{12}$$

$$T_{Li}=T_s, \tag{13}$$

$$\left(\lambda_L\frac{\partial T_L}{\partial y}\right)_i=\Delta h_V\dot{m}_x=q_{ix} \tag{14}$$

液膜および気相境界層について，それぞれ次式

$$U_L=\frac{\rho_{Ls}}{\rho_L}\frac{\partial\Psi_L}{\partial y},\ V_L=-\frac{\rho_{Ls}}{\rho_L}\frac{\partial\Psi_L}{\partial x}, \tag{15a,b}$$

$$U_V=\frac{\partial\Psi_V}{\partial y},\ V_V=-\frac{\partial\Psi_V}{\partial x} \tag{16a,b}$$

で定義される流れ関数$\Psi_L(x,y)$および$\Psi_V(x,y)$を導入し，相似変数η_{GL}およびη_{GV}，無次元流れ関数$F_{GL}(\eta_{GL})$および$F_{GV}(\eta_{GV})$，無次元温度$\theta_{GL}(\eta_{GL})$をそれぞれ次のように定義する。

$$\eta_{GL}=\left(\frac{g}{4\nu_{Ls}^2x}\right)^{1/4}\int_0^y\frac{\rho_L}{\rho_{Ls}}dy, \tag{17}$$

$$\eta_{GV}=(y-\delta)\left(\frac{g}{4\nu_V^2x}\right)^{1/4}, \tag{18}$$

$$F_{GL}(\eta_{GL})=\frac{\Psi_L(x,y)}{2\sqrt{2}(g\nu_{Ls}^2x^3)^{1/4}}, \tag{19}$$

$$F_{GV}(\eta_{GV})=\frac{\Psi_V(x,y)}{2\sqrt{2}(g\nu_V^2x^3)^{1/4}}, \tag{20}$$

$$\theta_{GL}(\eta_{GL})=\frac{T_s-T_L}{T_s-T_w}. \tag{21}$$

これらの式を用いて基礎式（2），（3）および（5）を変換すると，次の連立常微分方程式が得られる。

$$\left(\frac{\rho_L\mu_L}{\rho_{Ls}\mu_{Ls}}F''_{GL}\right)'+3F_{GL}F''_{GL}-2F'^2_{GL}+1=0, \tag{22}$$

$$\left(\frac{\lambda_L\rho_L}{\lambda_{Ls}\rho_{Ls}}\theta'_{GL}\right)'+3Pr_{Ls}\frac{c_{PL}}{c_{PLs}}F_{GL}\theta'_{GL}=0, \tag{23}$$

$$F'''_{GV}+3F''_{GV}F_{GV}-2F'^2_{GV}=0. \tag{24}$$

境界条件は

$\eta_{GL}=0$ で

$F_{GL}=0$, (25)

$F'_{GL}=0$, (26)

$\theta_{GL}=1$, (27)

$\eta_{GV}\to\infty$ で

$F'_{GL}=0$. (28)

気液界面における適合条件は

$\eta_{GL}=\eta_{GLi}$あるいは$\eta_{GV}=0$で

$F_{GVi}=R_sF_{GLi}$, (29)

$F'_{GVi}=F'_{GLi}$, (30)

$F''_{GVi}=R_sF''_{GLi}$, (31)

$\theta_{GLi}=0$, (32)

$$-\theta'_{GLi}=\frac{Pr_{Ls}}{H}\dot{M}_{GLs}, \tag{33}$$

ここに

$$R_s=\left(\frac{\rho_{Ls}\mu_{Ls}}{\rho_{Vs}\mu_{Vs}}\right)^{1/2}, \tag{34}$$

$$H=\frac{C_{pLs}(T_s-T_w)}{\Delta h_V}, \tag{35}$$

$$\dot{M}_{GLs}=\frac{\dot{m}_x x}{\mu_{Ls}\left(\frac{Ga_{xs}}{4}\right)^{1/4}}=3F_{GLi}, \tag{36}$$

式（22），（23）および（24）を条件（25）～（33）の下に数値的に解く。解法は文献1）と同様であるので説明を省略する。

数値計算は，水，エタノールおよびプロパンの飽和蒸気について，（a）物性値一定とみなす場合［$T_w+(T_s-T_w)/4$］における値を与える，（b）μ_Lのみの温度依存性を考慮する場合［その他の物性値には$T_w+(T_s-T_w)/2$における値を与える］，および（c）すべての物性値の温度依存性を考慮する場合，について行った。物性値の算出には文献1）の飽和液および飽和蒸気についての近似式を用いた（常圧過冷液の物性値は同じ温度の飽和液の物性値と等しい）。計算条件，

冷却壁面および気液界面における境界値，およびその他のパラメータを，上述の各場合についてそれぞれ表1（a），（b）および（c）に示す。

(a) the case of constant physical properties

No.	$\frac{T_s}{℃}$	η_{GLi}	$\frac{T_w}{℃}$	F''_{GLw}	$\frac{F_{GLi}}{10^{-2}}$	F'_{GLi}	$\frac{F''_{GLi}}{10^{-2}}$	$-\Theta'_{GLw}$	$-\Theta'_{GLi}$	H	$\frac{-\Theta'_{GLi}}{-\Theta'_{GLw}}$	Pr_L
WC-1	100	0.30	91.90	0.2984	0.893	0.0446	-0.1198	3.338	3.320	0.01501	0.994	1.86
WC-2	100	0.40	66.77	0.3935	2.083	0.0776	-0.4853	2.515	2.460	0.06007	0.978	2.36
WC-3	100	0.425	50.88	0.4118	2.399	0.0850	-0.6120	2.401	2.325	0.08755	0.968	2.83
EC-1	80	0.290	57.96	0.2887	0.807	0.0417	-0.1017	3.473	3.382	0.07188	0.974	10.04
EC-2	80	0.320	37.06	0.3178	1.081	0.0506	-0.1645	3.164	3.020	0.1286	0.954	11.97
EC-3	80	0.325	29.17	0.3227	1.132	0.0521	-0.1775	3.121	2.959	0.1476	0.948	12.86
PC-1	70	0.500	56.31	0.4819	3.923	0.1152	-1.887	2.033	1.911	0.1720	0.940	2.79
PC-2	70	0.550	47.54	0.5251	5.135	0.1361	-2.655	1.862	1.703	0.2512	0.915	2.78
PC-3	70	0.600	31.79	0.5674	6.544	0.1577	-3.622	1.722	1.521	0.3595	0.883	2.78
PC-4	70	0.650	-8.04	0.6113	8.188	0.1803	-4.808	1.614	1.343	0.5522	0.832	3.02

WC: water, EC: ethanol, PC: propane.

(b) the case of variable viscosity

No.	$\frac{T_s}{℃}$	η_{GLi}	$\frac{T_w}{℃}$	F''_{GLw}	$\frac{F_{GLi}}{10^{-2}}$	F'_{GLi}	$\frac{F''_{GLi}}{10^{-2}}$	$-\Theta'_{GLw}$	$-\Theta'_{GLi}$	H	$\frac{-\Theta'_{GLi}}{-\Theta'_{GLw}}$	Pr_L
WM-1	100	0.4	79.82	0.3114	1.757	0.06687	-0.3517	2.509	2.475	0.0371	0.986	2.07
WM-2	100	0.5	59.09	0.2879	2.764	0.08604	-0.7082	2.014	1.961	0.0743	0.974	2.57
WM-3	100	0.6	34.16	0.2203	3.566	0.09633	-1.020	1.684	1.617	0.1177	0.960	3.51
WM-4	100	0.65	21.49	0.1803	3.846	0.09860	-1.125	1.557	1.485	0.1394	0.954	4.22
EM-1	80	0.3	64.01	0.2309	0.738	0.03762	-0.0837	3.351	3.285	0.0539	0.980	9.57
EM-2	80	0.4	41.34	0.2071	1.310	0.05180	-0.2021	2.528	2.421	0.1196	0.957	11.53
EM-3	80	0.5	13.46	0.1514	1.770	0.05896	-0.3078	2.034	1.903	0.1864	0.936	14.96
EM-4	80	0.54	2.02	0.1289	1.909	0.06036	-0.3386	1.886	1.752	0.2101	0.929	16.83

WM: water, EM: ethanol.

(c) the case of variable physical properties

No.	$\frac{T_s}{℃}$	η_{GLi}	$\frac{T_w}{℃}$	F''_{GLw}	$\frac{F_{GLi}}{10^{-2}}$	F'_{GLi}	$\frac{F''_{GLi}}{10^{-2}}$	$-\Theta'_{GLw}$	$-\Theta'_{GLi}$	H	$\frac{-\Theta'_{GLi}}{-\Theta'_{GLw}}$	$\frac{q_{ix}}{q_{wx}}$	Pr_L
WV-1	100	0.45	70.98	0.3071	2.276	0.0778	-0.5317	2.246	2.187	0.0540	0.974	0.981	2.26
WV-2	100	0.50	60.26	0.2898	2.784	0.0867	-0.7245	2.037	1.954	0.0738	0.959	0.974	2.54
WV-3	100	0.60	36.24	0.2263	3.647	0.0984	-1.077	1.743	1.595	0.1183	0.915	0.960	3.41
WV-4	100	0.65	23.85	0.1876	3.972	0.1015	-1.210	1.639	1.454	0.1412	0.887	0.954	4.07
EV-1	80	0.45	30.53	0.1850	1.584	0.0570	-0.2719	2.114	2.272	0.1538	1.075	0.942	12.70
EV-2	80	0.50	17.51	0.1584	1.813	0.0603	-0.3287	1.878	2.059	0.1874	1.096	0.930	14.37
EV-3	80	0.55	4.51	0.1325	2.005	0.0624	-0.3762	1.685	1.885	0.2187	1.119	0.918	16.39
EV-4	40	0.30	14.76	0.1818	0.621	0.0324	-0.0605	3.250	3.378	0.0678	1.040	0.975	16.93
EV-5	40	0.34	4.57	0.1659	0.774	0.0364	-0.0845	2.838	2.999	0.0928	1.057	0.965	18.94

WV: water, EV: ethanol.

Table 1. Similarity solution

3．液膜における対流伝熱の影響

3．1．定物性値の場合

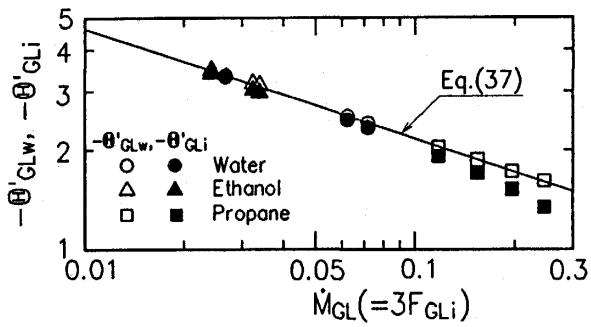

Fig.2 Correlation of $-\theta'_{GLw}$ and $-\theta'_{GLi}$ versus $\dot{M}_{GL}$ $(=3F_{GLi})$in the case of constant physical properties.

図2は表1（a）に示された冷却面における無次元温度勾配$-\theta'_{GLw}$および気液界面における無次元温度勾配$-\theta'_{GLi}$と無次元凝縮質量流束$\dot{M}_{GL}$（$=3F_{GLi}$）との関係を示す。白ぬきおよび黒ぬりのシンボルはそれぞれ$-\theta'_{GLw}$および$-\theta'_{GLi}$を表す。$-\theta'_{GLw}$に関しては，$\dot{M}_{GL}\lesssim 0.3$ の範囲で次の関係が成立する。

$$-\theta'_{GLw}=\dot{M}_{GL}^{-1/3} \qquad (37)$$

しかし，$-\theta'_{GLi}$は，液膜内の対流伝熱の影響のため，$\dot{M}_{GL}$の増加とともに$-\theta'_{GLw}$より小さくなる。

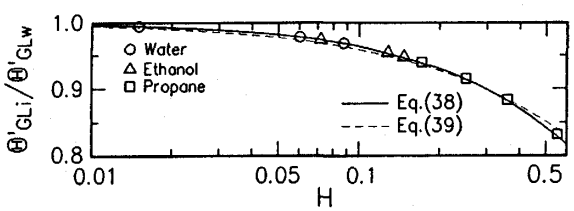

Fig.3 Correlation of $(-\theta'_{GLi})/(-\theta'_{GLw})$ versus H in the case of constant physical properties.

図3は$(-\theta'_{GLi})$／$(-\theta'_{GLw})$とHとの関係を示す。○，△，□印はそれぞれ水，エタノールおよびプロパンの場合を示す。いずれのデータも1％以内の誤差で図3の実線で示す次式で近似できる。

$$\frac{-\theta'_{GLi}}{-\theta'_{GLw}}=(1+0.375\,H)^{-1} \qquad (38)$$

この式は壁面熱流束から凝縮質量流束を算出するときに用いられる。図3の破線は強制対流凝縮の場合[1]の次式

$$\frac{-\theta'_{FLi}}{-\theta'_{FLw}}=(1+0.320\,H^{0.87})^{-1} \qquad (39)$$

を示す。$H\lesssim 0.5$ では式（38）と式（39）との差は小さい。

冷却壁面におけるヌセルト数Nu_{wx}は境界値$-\theta'_{GLw}$を用いて次式で表される。

$$Nu_{wx}=\frac{q_{wx}x}{(T_s-T_w)\lambda_{Lw}}=\frac{1}{\sqrt{2}}\left(-\theta'_{GLw}\right)Ga_x^{1/4} \qquad (40)$$

気液界面の適合条件(33)，式(37)および式(38)から次式が得られる。

$$-\theta'_{GLw}=\left[\frac{Pr_L}{H}(1+0.375H)\right]^{1/4} \qquad (41)$$

これを式（40）に代入すれば次式が得られる。

$$Nu_{wx}=\frac{1}{\sqrt{2}}\left(\frac{Pr_L}{H}Ga_x\right)^{1/4}(1+0.375H)^{1/4} \qquad (42)$$

液膜における対流伝熱を無視すれば（$H\lesssim 0.01$），次のNusseltの式となる。

$$Nu_{wx}^N=\frac{1}{\sqrt{2}}\left(\frac{Pr_L}{H}Ga_x\right)^{1/4} \qquad (43)$$

すなわち，式（42）は液膜内の対流伝熱の影響を考慮して Nusselt の式を修正したことになっている。式（42）と式（43）との比は次式で表される。

$$\frac{Nu_{wx}}{Nu_{wx}^N}=(1+0.375\,H)^{1/4} \qquad (44)$$

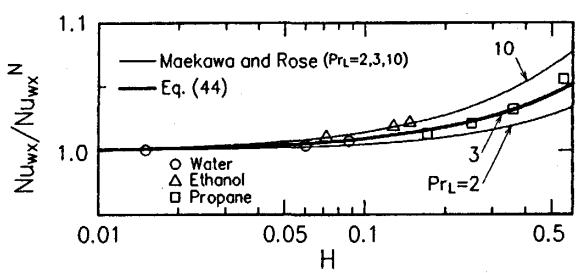

Fig.4 Correlation of Nu_{wx}/Nu_{wx}^N versus H in the case of constant physical properties.

図4は表1（a）のデータをNu_{wx}/Nu_{wx}^NとHの関係で示したものである。図中の太い実線は式（44）を表す。Nusselt の式の修正については，Rohsenow[8], Sparrow と Gregg[9], Koh ら[10], Chen[11] および Maekawa と Rose[12] の研究がある。図中にはもっとも精度が高いと考えられる Maekawa－Rose の式から$Pr_L=2$，3および10（それぞれ水，プロパンおよびエタノールに相当）の値を求め，細線で示してある（$Pr_L=3$の線は式（44）の太い線と一致）。これらの値と本計算値との一致はよい。図4に示されているように，Nu_{wx}/Nu_{wx}^NはHとPr_Lの関数である。一方，式（44）はHのみの関数である。それは，式（44）の導出の過程で用いられた式（37）の精度によるものである。プロパンのように$c_{pL}/\Delta h_V$が大きい物質については，熱流束および凝縮質量流束に及ぼす対流伝熱の影響に注意すべきである。

3．2　変物性値の場合

物性値の温度依存性を考慮した場合の冷却面の熱流束q_{wx}および気液界面の熱流束q_{ix}はそれぞれ次式で算出できる。

$$q_{wx}=(-\theta'_{GLw})\ \lambda_{Lw}\frac{\rho_{Lw}}{\rho_{Ls}}\left(\frac{g}{4\nu_{Ls}^2x}\right)^{1/4}(T_s-T_w), \tag{45}$$

$$q_{ix}=(-\theta'_{GLi})\ \lambda_{Ls}\left(\frac{g}{4\nu_{Ls}^2x}\right)^{1/4}(T_s-T_w). \tag{46}$$

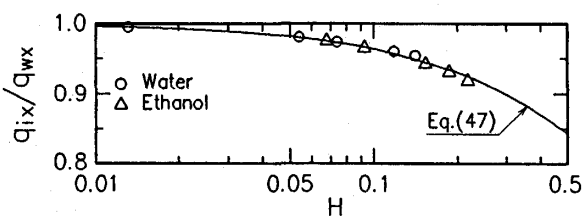

Fig.5 Correlation of q_{ix}/q_{wx} versus H in the case of variable physical properties.

図5は表1（c）のq_{ix}/q_{wx}とHとの関係を示す。データは実線の次式でよくまとまる。

$$\frac{q_{ix}}{q_{wx}}=(1+0.375H)^{-1}. \tag{47}$$

式（38）と式（47）とを比較すると，q_{ix}/q_{wx}とHとの関係は物性値の温度依存性の有無に関係なく成り立つことがわかる。

4．物性値の評価温度

Nusselt の式（43）およびそれを修正した式（42）を用いる場合の物性値の評価温度について検討する。式（43）および式（42）から算出されるq_{wx}はそれぞれ次式で表される。

$$q_{wx}=\frac{1}{\sqrt{2}}\left(\frac{\lambda_L^3\rho_L^2}{\mu_L}\right)_e^{1/4}\left(\frac{\Delta h_V g}{x}\right)^{1/4}(T_s-T_w)^{3/4}, \tag{48}$$

$$q_{wx}=\frac{1}{\sqrt{2}}\left(\frac{\lambda_L^3\rho_L^2}{\mu_L}\right)_e^{1/4}\left(\frac{\Delta h_V g}{x}\right)^{1/4}(T_s-T_w)^{3/4}(1+0.375H)^{1/4} \tag{49}$$

ここに添字eはT_wからT_sの間の温度における物性値をとることを示す。式（48）あるいは式（49）の値が式（45）の値と等しくなるような温度が物性値評価温度T_rである。それを次のように無次元化し，

$$r_T=\frac{T_r-T_w}{T_s-T_w} \tag{50}$$

r_Tを物性値の無次元評価温度といい，実用的に一定値とみなされるようになることが期待される。

4．1　粘度のみの温度依存性を考慮した場合

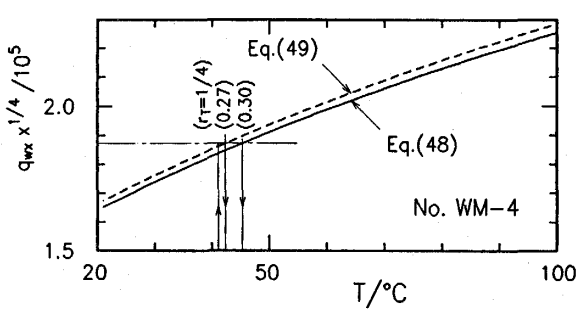

Fig.6 Comparison between the value of $q_{wx}x^{1/4}$ in the case of No. WM-4 and the values evaluated from Eq. (48) and (49).

表1（b）のWM-4の場合を例としてr_Tを求める手順を示す。図6は$q_{wx}x^{1/4}$とT_wとT_sの間の温度Tとの関係を示す。実線および破線はそれぞれ式（48）および（49）を示し，一点鎖線は相似解を用いて式（45）で算出した値［$=1.871\times10^5$ (W/m$^{7/4}$)］を示す。一点鎖線とそれぞれの線との交点の温度T_rはそれぞれ45.29 ℃，42.36 ℃であり，r_Tはそれぞれ0.30，0.27である。また図6には$r_T=1/4$の場合の温度を示

す細い縦線も示してあり，その線と式（48），（49）との交点における $(q_{wx}x^{1/4})_{cal}$ の値の式（45）の値 $(q_{wx}x^{1/4})_{sim}$ に対する相対誤差はそれぞれ－2％，－1％である。

No.	T_s ℃	T_w ℃	$(q_{wx}x^{1/4})_{sim}$ / 10^5 Wm$^{-7/4}$	Eq. (48) r_T	Eq. (48) $r_T=1/4$ $\frac{(q_{wx})_{cal}}{(q_{wx})_{sim}}-1$	Eq. (49) r_T	Eq. (49) $r_T=1/4$ $\frac{(q_{wx})_{cal}}{(q_{wx})_{sim}}-1$
WM-1	100	79.82	0.7941	0.28	-0.00	0.22	0.00
WM-2	100	59.09	1.2844	0.29	-0.01	0.24	0.00
WM-3	100	34.16	1.7099	0.30	-0.01	0.26	-0.00
WM-4	100	21.49	1.8714	0.30	-0.02	0.27	-0.01
EM-1	80	64.01	0.1368	0.34	-0.01	0.26	-0.00
EM-2	80	41.34	0.2555	0.36	-0.02	0.29	-0.01
EM-3	80	13.46	0.3640	0.36	-0.03	0.30	-0.01
EM-4	80	2.02	0.4003	0.36	-0.04	0.30	-0.02

WM: water, EM: ethanol.
sim: obtained from similarity solution,
cal: calculated by Eq. (48) or Eq. (49) with r_T=1/4.

Table2. The values of r_T in the case of variable viscosity

表2に表1（b）のデータについて得られたr_Tの値および式（45）の値 $(q_{wx})_{sim}$ に対するr_T=1/4とした場合の式（48），（49）の値 $(q_{wx})_{cal}$ の相対誤差を示す。WM-1～4 の水のデータについて，対流伝熱の補正を含む式（49）に対するr_Tの値は藤井[6]の理論値r_T=1/4とほぼ一致している。EM-1～4 のエタノールの場合，式（49）に対するr_Tの値は式（48）に対するr_Tの値より1/4に近いが，それより若干高い。その原因は$\mu_L(T)$の関数形の違いによると考えられる（藤井の解はμ^{-1}が温度の直線的関数であると仮定している）。r_Tの値は対流伝熱の補正によって影響を受けるが，Nusselt の式にr_T=1/4の物性値を用いて算出した壁面熱流束は相似解による値に対して高々4％（EM-4, $T_s-T_w\approx 80$℃の場合）の誤差である。

4．2　すべての物性値の温度依存性を考慮した場合

前節と同様にして表1（c）のデータについて求めたr_Tの値および式（45）の値 $(q_{wx})_{sim}$ に対するr_T=1/4とした場合の式（48），（49）の値 $(q_{wx})_{cal}$ の相対誤差を表3に示す。WV-1～4の水についてのr_Tのデータは表2の場合とほとんど変わらず，粘度以外の物性値の温度依存性の影響が小さいことがわかる。図7はこれらのr_Tのデータを（T_s-T_w）に対してプロットしたものであり，図中の▲および●印はそれぞれ式（48），（49）によって得られたr_Tの値を示す。実線は Poots－Miles[5] の式を示す。これは Nusselt の式を基準にしたものであり，実線と▲のデータとの一致はよい。また●のデータはr_T=1/4（一点鎖線）とほぼ一致している。

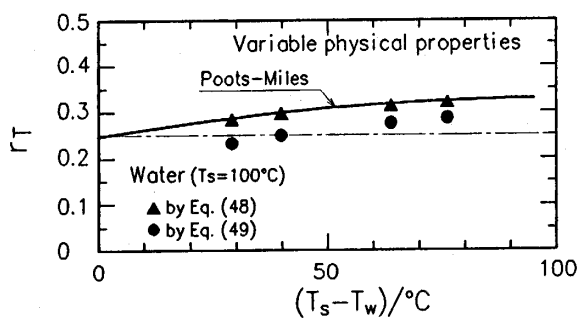

Fig.7 The values of r_T in the case of variable physical properties for water.

No.	T_s ℃	T_w ℃	$(q_{wx}x^{1/4})_{sim}$ / 10^5 Wm$^{-7/4}$	Eq. (48) r_T	Eq. (48) $r_T=1/4$ $\frac{(q_{wx})_{cal}}{(q_{wx})_{sim}}-1$	Eq. (49) r_T	Eq. (49) $r_T=1/4$ $\frac{(q_{wx})_{cal}}{(q_{wx})_{sim}}-1$
WV-1	100	70.98	1.0189	0.28	-0.00	0.23	0.00
WV-2	100	60.26	1.2548	0.29	-0.01	0.25	0.00
WV-3	100	36.24	1.6672	0.31	-0.02	0.28	-0.01
WV-4	100	23.85	1.8274	0.32	-0.03	0.29	-0.02
EV-1	80	30.53	0.2994	0.22	0.00	0.12	0.02
EV-2	80	17.51	0.3474	0.23	0.00	0.14	0.02
EV-3	80	4.51	0.3891	0.24	0.00	0.16	0.02
EV-4	40	14.76	0.1724	0.25	0.00	0.17	0.01
EV-5	40	4.57	0.2168	0.25	0.00	0.18	0.01

WV: water, EV: ethanol.
sim: obtained from similarity solution,
cal: calculated by Eq. (48) or Eq. (49) with r_T=1/4.

Table 3. The values of r_T in the case of variable physical properties

表3のEV-1～5のエタノールのデータは式（48）に対するr_Tの値が1/4に近く，式（49）に対するr_Tの値は1/4よりかなり小さい。また表2の値と比較すると，粘度以外の物性値の温度依存性の影響（熱伝導率の変化の傾向が水の場合と逆）があることがわかる。またEV-1～3はT_s=80℃，EV-4,5はT_s=40℃，の場合であるが，T_sによる差違はほとんどない。いずれの場合についてもr_T=1/4で物性値を評価した場合の相似解との差は最大2％である。

5．結　論

水，エタノールおよびプロパンの飽和蒸気が鉛直平板上で自由対流層流膜状凝縮する場合について数値解析を行い，次の結論を得た。

(1) すべての物性値の温度依存性を考慮した場合においても，定物性値の場合においても，気液界面熱流束（凝縮質量流束に比例）と壁面熱流束との比は式（38）で表される。

(2) 液膜内の対流伝熱による Nusselt の式の補正に関し，定物性値の解によるものが Maekawa-Rose の式と一致することを確認するとともに，簡単な式（44）を提案した。プロパンのように相変化数Hが大きくなる物質についてはこの補正は有効である。

(3) 粘度のみの温度依存性を考慮した解析によって，藤井の近似解による無次元評価温度r_T=1/4が妥当であることを確認した。

(4) すべての物性値の温度依存性を考慮した場合にも，Nusselt の式にr_T=1/4における物性値を採用すれば，実用的には約2％以下の誤差で壁面熱流束を予測できる。

文　献

1) Fujii, T., "Theory of Laminar Film Condensation," Springer-Verlag, New York (1991).

2) 藤井哲・李鍾鵬・新里寛英，純蒸気の強制対流凝縮における凝縮液の粘度の代表値，九州大学機能物質科学研究所報告，5,2 (1991) 201－207.

3) Nusselt, W., Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes, *Zeit. VDI*, **60**-27(1916), 541-546, & Ibid., **60**-28, 569-575.

4) Minkowycz, W. J. and Sparrow, E. M. Condensation Heat Transfer in the Presence of Noncondensables, Interfacial Resistance, Superheating, Variable Properties, and Diffusion *Int. J. Heat Mass Transfer*, **9** (1966), 1125-1144.

5) Poots, G. and Miles, R. G., Effects of Variable Physical Properties of Laminar Film Condensation of Saturated Steam of a Vertical Flat Plate, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **10(1967), 1677-16-92.**

6) 藤井哲，純蒸気の強制対流凝縮熱伝達の式における物性値の評価温度について，日本機械学会論文集(B), -(1992), 58, 547(1992) 820-823.

7) McAdams, "Heat Transmission (3rd. ed.)," McGraw Hill, New York(1953).

8) Rohsenow, W. M., Heat Transfer and Temperature Distribution in Laminar Film Condensation, *Trans. ASME*, **78**(1956), 1645-1648.

9) Sparrow, E. M. and Gregg, J. L., A Boundary--Layer Treatment of Laminar-Film Condensation, *J. Heat Transfer*, **81**(1959), 13-18.

10) Koh, J. C. Y., Sparrow, E. M. and Hartnett, J. P., The Two Phase Boundary Layer in Laminar Film Condensation, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **2**(1961), 69-82.

11) Chen, M. M., An Analytical Study of Laminar Film Condensation: Part 1-Flat Plates, *J. Heat Transfer*, **83**(1961), 48-54.

12) Rose, J. W., Fundamentals of Condensation Heat Transfer: Laminar Film Condensation, *JSME International Journal*, Ser. Ⅱ, **10**-3(1988), 357-375.