

二成分混合蒸気の凝縮における気相境界層の代表物 性値 : II 層流自由対流凝縮の場合

藤井, 哲
九州大学機能物質科学研究所

李, 鍾鵬
九州大学大学院総合理工学研究科

新里, 寛英
九州大学機能物質科学研究所

渡部, 正治
三菱重工業株式会社

<https://doi.org/10.15017/6605>

出版情報 : 九州大学機能物質科学研究所報告. 5 (2), pp.223-228, 1992-03-31. 九州大学機能物質科学
研究所
バージョン :
権利関係 :



二成分混合蒸気の凝縮における気相境界層の代表物性値

(Ⅱ 層流自由対流凝縮の場合)

藤 井 哲・李 鍾 鵬*・新 里 寛 英
渡 部 正 治**

Representative Physical Properties for the Vapor Boundary Layer in the Case of Laminar Film Condensation of Binary Vapor Mixtures

(Ⅱ) Free-Convection Condensation

Tetsu FUJII, Jong Boong LEE, Kan'ei SHINZATO, and Masaharu WATABE

The numerical analysis is made for free-convection condensation of binary vapor mixtures quite similarly as the case of forced-convection condensation. The physical properties which are evaluated at the arithmetic mean of the mass concentrations at the vapor-liquid interface and the bulk and the corresponding saturation temperature are recommended as the representative ones in the case of the algebraic solution.

1. 緒 言

前報¹⁾は、二成分混合蒸気の平板上の強制対流膜状凝縮について、液膜の物性値は一定で、気相の物性値の濃度と温度の依存性を考慮した数値解析を行い、定物性の場合の代数解を用いて壁面熱流束および気液界面凝縮質量流束を求める場合の気相の代表物性値を評価する際の評価濃度および評価温度について論じた。本報では、鉛直面上の自由対流膜状凝縮について前報と同様な数値解析を行い、気相境界層の代表物性値について検討する。なお、強制対流凝縮の場合と重複する式および記述は、できるだけ省略する。

記 号

c_p : 定圧比熱
 D : 相互拡散率

$F_{GL}(\eta_{GL}), F_{GV}(\eta_{GV})$: 無次元流れ関数, 式(8), (9)

g : 重力加速度

Ga : ガリレオ数, 式(33)

H_i : 相変化数, 式(34)

M : 分子量

$\dot{M}_{GL}$: 無次元凝縮質量流束, 式(32)

$\dot{m}_x$: 局所凝縮質量流束

p : 圧力

Pr : プラントル数 $(= \mu c_p / \lambda)$

q : 熱流束

R : $\rho\mu$ 比 $[=(\rho_L\mu_L/\rho_V\mu_V)^{1/2}]$

Sc : シュミット数 $= \nu_V/D$

T : 温度

T_{lv} : 代表物性値の評価温度

U, V : x および y 方向の速度成分

W : 質量濃度 (質量分率)

W_{lv} : 代表物性値の評価濃度

x : 平板先端から平板に沿って測った距離

y : 平板からその法線方向に測った距離

受理日 平成3年8月27日

*九州大学大学院総合理工学研究科

**三菱重工業株式会社

Δh_V : 凝縮の潜熱

δ : 液膜厚さ

η_{GL}, η_{GV} : 相似変数, 式(6), (7)

$\Theta_{GL}(\eta_{GL}), \Theta_{GV}(\eta_{GV})$: 無次元温度, 式(10), (11)

$\Phi_G(\eta_{GV})$: 規格化された濃度, 式(12)

λ : 熱伝導率

μ : 粘度

ν : 動粘度

ρ : 密度

$\Psi_L(x, y), \Psi_V(x, y)$: 流れ関数, 式(4), (5)

添 字

' : η_{GL} あるいは η_{GV} に関する微分

e : 代数解の値

G : 自由対流凝縮

i : 気液界面での値

L : 液膜の値

V : 気相の値

x : 位置 x での値

w : 伝熱面での値

∞ : 周囲流体の値

1, 2 : 低沸点成分を 1, 高沸点成分を 2 とする.

2. 基礎式, 相似変数および数値解

図 1 に気液二相境界層の物理モデルと座標を示す。バルクの蒸気速度を零とおき, その代わりに重力の

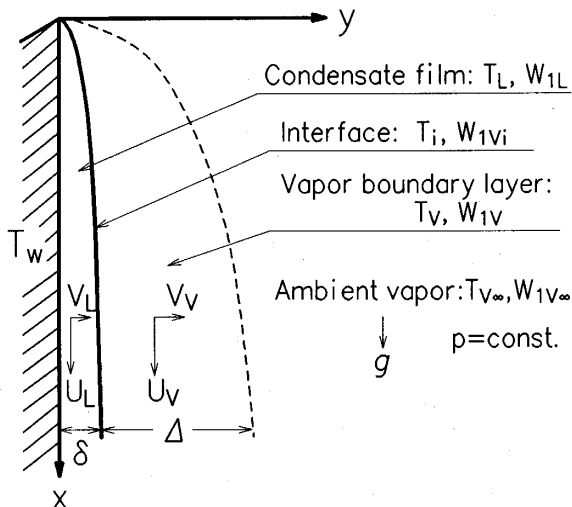


Fig. 1. Physical model and coordinate systems for free-convection laminar film condensation

加速度 g を考慮したほかは強制対流凝縮の場合と同じである。強制対流凝縮の場合と異なる基礎式は, 液膜と気相境界層の運動量の式である。すなわち

$$U_L \frac{\partial U_L}{\partial x} + V_L \frac{\partial U_L}{\partial y} = \nu_L \frac{\partial U_L}{\partial y^2} + g \quad (1)$$

$$\rho_V \left(U_V \frac{\partial U_V}{\partial x} + V_V \frac{\partial U_V}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_V \frac{\partial U_V}{\partial y} \right) + g \left(1 - \frac{\rho_{V\infty}}{\rho_V} \right) \quad (2)$$

強制対流凝縮の場合と異なる境界条件は次式である。

$y \rightarrow \infty$ で

$$U_V = U_{V\infty} = 0 \quad (3)$$

気液界面での適合条件は強制対流凝縮の場合と全く同じである。

液膜および蒸気境界層について, それぞれ次式

$$U_L = \frac{\partial \Psi_L}{\partial y}, \quad V_L = - \frac{\partial \Psi_L}{\partial x} \quad (4a, b)$$

$$U_V = \frac{\rho_{V\infty}}{\rho_V} \frac{\partial \Psi_V}{\partial y}, \quad V_V = - \frac{\rho_{V\infty}}{\rho_V} \frac{\partial \Psi_V}{\partial x} \quad (5a, b)$$

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 $\Theta_{GL}(\eta_{GL})$ および $\Theta_{GV}(\eta_{GV})$, 規格化された濃度 $\Phi_G(\eta_{GV})$ をそれぞれ次のように定義する。

$$\eta_{GL} = y \left(\frac{g}{4 \nu_L^2 x} \right)^{1/4} \quad (6)$$

$$\eta_{GV} = \left(\frac{g}{4 \nu_{V\infty}^2 x} \right)^{1/4} \int_{\delta}^y \frac{\rho_V}{\rho_{V\infty}} dy \quad (7)$$

$$F_{GL}(\eta_{GL}) = \frac{\Psi_L(x, y)}{4 (g \nu_L^2 x^2 / 4)^{1/4}} \quad (8)$$

$$F_{GV}(\eta_{GV}) = \frac{\Psi_V(x, y)}{4 (g \nu_{V\infty}^2 x^3 / 4)^{1/4}} \quad (9)$$

$$\Theta_{GL}(\eta_{GL}) = \frac{T_i - T_L}{T_i - T_w} \quad (10)$$

$$\Theta_{GV}(\eta_{GV}) = \frac{T_i - T_V}{T_{V\infty} - T_i} \quad (11)$$

$$\Phi_G(\eta_{GV}) = \frac{W_{1V} - W_{1V\infty}}{W_{1Vi} - W_{1V\infty}} \quad (12)$$

これらの式を用いて基礎式, 境界条件および適合条

Table 1. Numerical results for free-convection condensation of binary vapors ($p=0.1\text{MPa}$)
—In the case where the physical properties in the boundary layer depend on concentration and temperature—

AW : air-water, EW : ethanol-water, Sa : saturated, Su : superheated

No.	$\frac{T_{V\infty}}{^\circ\text{C}}$	$W_{1V\infty}$	η_{FLi}	$\frac{F''_{FLw}}{10^{-3}}$	F_{FVi}	$\frac{F'_{FVi}}{10^{-3}}$	F''_{FVi}	$-\Phi'_{Fi}$	$-\Theta'_{FLw}$	W_{1Vi}	$\frac{T_i}{^\circ\text{C}}$	$\frac{T_w}{^\circ\text{C}}$	$\frac{q_{wx} x^{1/4}}{\text{Wm}^{-7/4}\times 10^3}$	$\frac{\dot{m}_x x^{1/4}}{\text{kgm}^{-7/4}\text{s}^{-1}\times 10^{-3}}$
AW-1Sa	98.5	0.0625	0.2	2.0108	5.9710	2.022	0.13284	0.5837	5.002	0.6985	76.32	74.18	14.306	6.123
AW-2Sa	98.5	0.0625	0.16	1.6058	2.7157	1.2894	0.09678	0.4478	6.251	0.2924	93.37	92.69	6.415	2.785
EW-1Sa	98.0	0.1451	0.22	2.2070	7.3078	2.436	0.11757	0.9219	4.548	0.5748	89.44	86.24	16.128	7.620
AW-1Su	198.5	0.0625	0.2	2.0149	5.6367	2.030	0.2001	0.6458	5.002	0.6020	82.10	79.99	14.784	5.908
AW-2Su	198.5	0.0625	0.16	1.6124	2.6518	1.2999	0.2157	0.5111	6.251	0.2362	94.79	94.05	7.035	2.779
AW-3Su	198.5	0.0625	0.2049	2.0640	6.2944	2.1302	0.1932	0.6471	4.883	0.6950	76.71	74.18	16.515	6.597
AW-4Su	198.5	0.0625	0.1684	1.6965	3.1141	1.4391	0.2151	0.5451	5.940	0.2834	93.60	92.69	8.228	3.264

件を変換すると、次式が得られる。

$$F'''_{GL} + 3F''_{GL}F_{GL} - 2F'_{GL}{}^2 + 1 = 0 \quad (13)$$

$$\Theta''_{GL} + 3Pr_{VL}F_{GL}\Theta'_{GL} = 0 \quad (14)$$

$$\left(\frac{\rho_V\mu_V}{\rho_{V\infty}\mu_{V\infty}}F''_{GV}\right)' + 3F''_{GV}F_{GV} - 2F'_{FV}{}^2 + \left(1 - \frac{\rho_{V\infty}}{\rho_V}\right) = 0 \quad (15)$$

$$\left(\frac{\rho_V\lambda_V}{\rho_{V\infty}\lambda_{V\infty}}\Theta'_{GV}\right)' + 3Pr_{V\infty}\frac{c_{pV}}{c_{pV\infty}}F_{GV}\Theta'_{GV} = 0 \quad (16)$$

$$\left(\frac{\rho_V^2D}{\rho_{V\infty}^2D_\infty}\Phi'_G\right)' + 3Sc_\infty F_{GV}\Phi'_G = 0 \quad (17)$$

$$\eta_{GL}=0 \text{ で } F_{GLw}=0 \quad (18)$$

$$F'_{GLw}=0 \quad (19)$$

$$\Theta_{GLw}=1 \quad (20)$$

$$\eta_{GL}=\infty \text{ で } F_{GV\infty}=0 \quad (21)$$

$$\Theta_{GV\infty}=0 \quad (22)$$

$$\Phi_{G\infty}=0 \quad (23)$$

$$\eta_{GL}=\eta_{GLi} \text{ または } \eta_{GV}=0 \text{ で } F_{GV\infty}=R_\infty F_{GLi} = \frac{1}{3}R_\infty \dot{M}_{GL} \quad (24)$$

$$F'_{GV\infty}=F'_{GLi} \quad (25)$$

$$F''_{GV\infty}=\left(\frac{\rho_{V\infty}\mu_{V\infty}}{\rho_{Vi}\mu_{Vi}}\right)R_\infty F_{Li} \quad (26)$$

$$\Theta_{GLi}=0 \quad (27)$$

$$\Theta_{GV\infty}=1 \quad (28)$$

$$-\Theta'_{GLi} = \frac{Pr_L \dot{M}_{GL}}{H_i} + \frac{\rho_{Vi}}{\rho_{V\infty}} \frac{\lambda_{Vi}}{\lambda_L} \left(\frac{\nu_L}{\nu_{V\infty}}\right)^{1/2} \times \frac{(T_{V\infty}-T_i)}{(T_i-T_w)} (-\Theta'_{GV\infty}) \quad (29)$$

$$\Phi_{Gi}=1 \quad (30)$$

$$1 - \left(\frac{\rho_{V\infty}^2 D_\infty}{\rho_{Vi}^2 D_i}\right) \frac{R_\infty Sc_\infty \dot{M}_{GL}}{(-\Phi'_{Gi})} = \frac{W_{1V\infty} - W_{1L}}{W_{1Vi} - W_{1L}} \quad (31)$$

ここに

$$\dot{M}_{GL} = \frac{\dot{m}_x x}{\mu_L} \left(\frac{Ga_x}{4}\right)^{-1/4} \quad (32)$$

$$Ga_x = \frac{g x^3}{\nu_L^2} \quad (33)$$

$$H_i = \frac{c_{pL}(T_i - T_w)}{\Delta h_V} \quad (34)$$

数値解から得られる局所熱流束 q_{wx} および凝縮質量流束 $\dot{m}_x$ はそれぞれ次式で求められる。

$$q_{wx} x^{1/4} = \lambda_L \left(\frac{g}{4\nu_L^2}\right)^{1/4} (-\Theta'_{GLw})(T_i - T_w) \quad (35)$$

$$\dot{m}_x x^{1/4} = 3g^{1/4} \left(\frac{\rho_L \mu_L}{2}\right)^{1/2} F_{GLi} = g^{1/4} \left(\frac{\rho_L \mu_L}{2}\right)^{1/2} \dot{M}_{GL} \quad (36)$$

表1は空気-水およびエタノール-水の混合気について得られた数値解の若干例を示す。数値解法は文献2)と同様であり、物性値には文献2)のものをを用いた。

3. 代表物性値

気相の物性値を一定とみなすと、条件 p , $T_{V\infty}$, $W_{1V\infty}$, T_w が与えられた場合に、次の二つの式

$$\begin{aligned} \dot{M}_{GL}^{-1/3} &= \frac{Pr_L \dot{M}_{GL}}{H_i} + \sqrt{2C_G}(Pr_V) \left(\frac{\lambda_V}{\lambda_L} \right) \left(\frac{\nu_L}{\nu_V} \right)^{1/2} \\ &\times \frac{(T_{V\infty} - T_i)}{(T_i - T_w)} (\chi + Pr_V)^{1/4} \\ &\times \left[1 + k Pr_V^{0.66} (\omega^{-1/4} R \dot{M}_{GL})^l \right] \end{aligned} \quad (37)$$

$$\dot{M}_{GL} = \frac{2C_G(Sc)(\chi Sc)^{1/4}}{ScR} \frac{(W_R - 1)}{(W_R - 1)^{0.5} W_R^{0.2}} \quad (38)$$

ここに

$$C_G(Pr_V) = \frac{3}{4} \left(\frac{Pr_V}{2.4 + 4.9\sqrt{Pr_V} + 5Pr_V} \right)^{1/4} \quad (39a)$$

$$C_G(Sc) = \frac{3}{4} \left(\frac{Sc}{2.4 + 4.9\sqrt{Sc} + 5Sc} \right)^{1/4} \quad (39b)$$

$$\chi^+ = \omega_w \left(\frac{Pr_V}{Sc} \right)^{1/2} + \omega_T - \omega_w \omega_T \quad (40)$$

$$\omega = \omega_w + \omega_T - \omega_w \omega_T \quad (41)$$

$$\chi = \omega_w + \omega_T \left(\frac{Pr_V}{Sc} \right)^{1/2} - \omega_w \omega_T \quad (42)$$

$$\omega_w = \Omega_w (W_{1Vi} - W_{1V\infty}) \quad (43)$$

$$\omega_T = \Omega_T (T_{V\infty} - T_i) \quad (44)$$

$$\Omega_w = \frac{M_1 - W_2}{M_1 - (M_1 - M_2) W_{1V\infty}} \quad (45)$$

$$\Omega_T = \frac{1}{T_{V\infty}} \quad (46)$$

$$W_R = \frac{W_{1Vi} - W_{1L}}{W_{1V\infty} - W_{1L}} \quad (47)$$

$$0 \leq \omega^{-1/4} R \dot{M}_{GL} \leq 1 \text{ の場合, } k=1.1, l=1 \quad (48a)$$

$$1 \leq \omega^{-1/4} R \dot{M}_{GL} \leq 10 \text{ の場合, } k=1.13, l=1.17 \quad (48b)$$

と相平衡の関数式の連立代数方程式を解き、 $\dot{M}_{GL}$, T_i

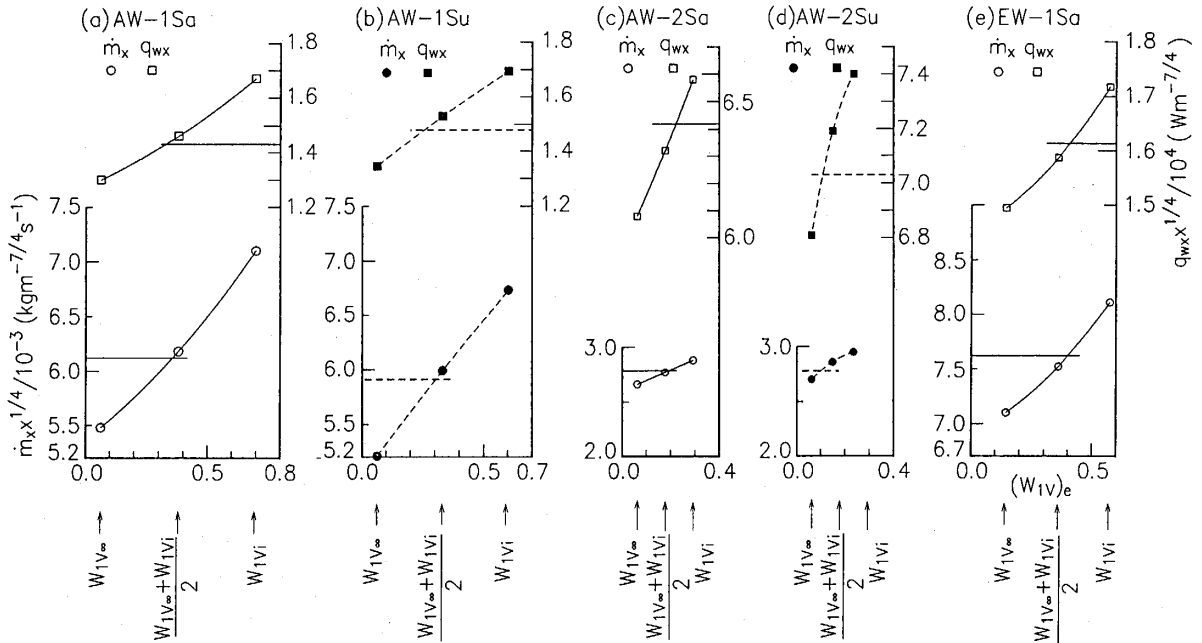


Fig. 2. Comparison of the algebraic solutions ($q_{wx})_e x^{1/4}$ from Eq. (49) ($\square-\square$: saturated, $\blacksquare-\blacksquare$: superheated) and $(\dot{m}_x)_e x^{1/4}$ from Eq. (50) ($\circ-\circ$: saturated, $\bullet-\bullet$: superheated) with the corresponding numerical solutions $q_{wx} x^{1/4}$ from Eq. (35) and $\dot{m}_x x^{1/4}$ from Eq. (36) (—: saturated, - - - -: superheated) in the case of free-convection condensation of binary vapor mixtures.

(a) air-water (AW-1Sa in Table 1), (b) air-water (AW-1Su in Table 1), (c) air-water (AW-2Sa in Table 1), (d) air-water (AW-2Su in Table 1), (e) ethanol-water (EW-1Sa in Table 1).

Table 2. Comparison between similarity solution and algebraic solution in the cases of (I), (II), (III), (IV), and (V).

AW : air-water, EW : ethanol-water, Sa : saturated, Su : superheated

		similarity solution	algebraic solution				
			(I) $W_{1V\infty}$	(II) W_{1Vi}, T_i	(III) mean of the values of (I) and (II)	(IV) $(W_{1Vi} + W_{1V\infty})/2$ and corresponding T_i	(V) $(W_{1Vi} + W_{1V\infty})/2$ and $(T_i + T_{V\infty})/2$
			(T_i)	(T_i)	(T_i)	(T_i)	(T_i)
$\frac{q_{wx} x^{1/4}}{Wm^{-7/4} \times 10^3}$	AW-1Sa	14.31 (76.32)	13.00 (76.06)	16.71 (76.81)	14.86 (76.44)	14.62 (76.38)	13.45 (76.15)
	AW-2Sa	6.42 (93.37)	6.08 (93.32)	6.58 (93.39)	6.33 (93.36)	6.32 (93.36)	6.28 (93.35)
	EW-1Sa	16.13 (89.44)	14.95 (89.18)	17.17 (89.68)	16.06 (89.43)	15.87 (89.39)	15.80 (89.37)
	AW-1Su	14.78 (82.10)	13.46 (81.34)	16.94 (82.53)	15.20 (81.94)	15.28 (82.19)	15.03 (82.15)
	AW-2Su	7.03 (94.79)	6.81 (94.76)	7.40 (94.85)	7.11 (94.81)	7.19 (94.82)	7.08 (94.80)
$\frac{\dot{m}_x x^{1/4}}{kgm^{-7/4}s^{-1} \times 10^{-3}}$	AW-1Sa	6.12	5.48	7.10	6.29	6.18	5.69
	AW-2Sa	2.78	2.66	2.88	2.77	2.77	2.75
	EW-1Sa	7.62	7.10	8.11	7.61	7.52	7.49
	AW-1Su	5.91	5.21	6.73	5.97	5.99	5.90
	AW-2Su	2.78	2.70	2.95	2.83	2.86	2.81

を求め、それを次式に代入すると、壁面熱流束 q_{wx} および凝縮質量流束 $\dot{m}_x$ が得られる。

$$(q_{wx})_e x^{1/4} = \lambda_L \left(\frac{g}{4 \nu_L^2} \right)^{1/4} (\dot{M}_{GL})_e^{-1/3} (T_i - T_w) \quad (49)$$

$$(\dot{m}_x)_e x^{1/4} = g^{1/4} \left(\frac{\rho_L \mu_L}{2} \right)^{1/2} (\dot{M}_{GL})_e \quad (50)$$

式(35)と(49)あるいは式(36)と(50)とを比較することによって、代数解に用いるべき気相の代表物性値の評価濃度 W_{1Vi} および評価音温度 T_{Vi} を求めることができる。

図2(a), (b), (c), (d), (e) はそれぞれ表1のAW1-Sa, AW1-Su, AW2-Sa, AW2-Su およびEW-1Saについて数値解と対応する代数解との比較である。比較の方法および図中の符号は強制対流凝縮の場合(1)と同じである。

表2は表1の相似解の($T_{V\infty}$, $W_{1V\infty}$, T_w)について、物性値の取り方をかえて求めた代数解の $(q_{wx})_e x^{1/4}$ と $(\dot{m}_x)_e x^{1/4}$ の値を示す。(I)は $W_{1V\infty}$, $T_{V\infty}$, (II)は W_{1Vi} , T_i , (III)は(I)と(II)の結果の算術平均, (IV)は $(W_{1Vi} + W_{1V\infty})/2$ とそれに対応する飽和温度, (V)は $(W_{1Vi} + W_{1V\infty})/2$, $(T_i + T_{V\infty})/2$ において評価された物性値の場合である。(I)の物性値の取り方が最も簡単であるが, q_{wx} と $\dot{m}_x$ について最大-12%の誤差がある。AW1-Saの場合

[$W_{1Vi}/W_{1V\infty}$ および $(T_i - T_w)$ が大きい], (V)の欄の q_{wx} と $\dot{m}_x$ の誤差がそれぞれ-6%と-7%。

(III)の欄の q_{wx} 誤差は+4%, 他の場合の誤差は3%以下である。全般的に、誤差が小さいのは(IV)の欄の値である。表2の()の内の数値は T_i を示す。これらの値を用いて算出される $(T_i - T_w)$ に基づく液膜の熱伝達係数は、AW1-Saの(V)の場合の3%およびAW2-Suの(III)と(IV)の場合の2%をのぞき、1%以下の誤差で相似解と一致する。

4. 結 論

二成分混合気の鉛直平板上の自由対流膜状凝縮に関して、液膜の物性値は一定で、気相の物性値の濃度と温度の依存性を考慮した数値解析を空気-水およびエタノール-水の飽和混合蒸気および過熱混合蒸気について行った。得られた数値解を基準にして、数値解、式(49)および式(50)を用いて熱流束および凝縮質量流束を求める際の気相の代表物性値の取り方について検討した。自由対流膜状凝縮の場合の代表物性値のとり方は強制対流凝縮の場合と同様でよいが、一つを選ぶとすれば、バルクと気液界面における濃度の算術平均値とそれに対応する飽和温度に対応する物性値を推奨する。

本数値計算は九州大学大型計算機センターのFACOM N780-20によって行った。

文 献

- 1) 藤井 哲・李 鍾鵬・新里寛英・渡部正治, 二成分混合蒸気の凝縮における気相境界層の代表物性値 (Ⅰ 層流強制対流凝縮の場合), 九州大学機能物質科学研究所報告, 5-2 (1991), 215-221.
- 2) Fujii, T., "Theory of Laminar Film Condensation," Springer-Verlag, New York (1991).