

二成分混合気の平板上での層流強制対流膜状凝縮の場合の気液界面における気相の濃度勾配の新しい式の提案

藤井, 哲

九州大学大学院総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻

新里, 寛英

九州大学大学院総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻

李, 鐘鵬

九州大学大学院総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻

<https://doi.org/10.15017/17238>

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 13 (3), pp.293-296, 1991-12-01. 九州大学大学院総合理工学研究科

バージョン :

権利関係 :

二成分混合気の平板上での層流強制対流膜状凝縮の場合の 気液界面における気相の濃度勾配の新しい式の提案

藤井 哲*・新里 寛英*・李 鍾鵬**

(平成3年8月26日 受理)

A proposal of a new equation for the mass concentration gradient at the vapor-liquid interface in the case of forced-convection laminar film condensation of a binary vapor mixture on a flat surface

Tetsu FUJII, Kan'ei SHINZATO and Jong Boong LEE

A simple correlation equation for the mass concentration gradient in the vapor phase at the vapor-liquid interface in the case of forced-convection laminar film condensation of a binary vapor mixture on a flat surface is presented as:

$$\frac{-\Phi'_{Fi}}{C_F(Sc)} = \left(\frac{2.5}{1.5 + W_R} \right)^m W_R$$
$$m = 0.5 + 0.05Sc - \frac{0.2}{\sqrt{R}}$$

in the range of $1 \leq W_R < 15$, $0.2 \leq Sc \leq 1$, and $20 \leq R \leq 500$.

1. 緒 言

筆者ら¹⁾²⁾は、二成分混合気が平板上で層流膜状強制対流凝縮する場合に、局所熱流束および局所凝縮質量流束を算出するのに、個々の条件に対して複雑な微分方程式を解くのではなく、より簡便に、連立代数方程式を解く方法を見いだした。この連立代数方程式は気液界面における液膜と気相の温度勾配の式、気相の濃度勾配の式および気液界面条件から導出される。これらの式は相似変換された常微分方程式の数値解の境界値を近似したものであるが、気相の濃度勾配の式についてはこれまで6種類のもの提案されている。しかし精度の向上と複雑さ、式を用いる演算の容易さ等のかね合いで、どの式が最良のものであるかまだ判断できない。

本報では、これまでの発展の経過をたどり、それぞれの特徴と適応範囲を示すとともに文献1)に示した式の導出の根拠を示し、さらにそれを若干修正する。

主 な 記 号

- $C_F(Sc)$: 強制対流凝縮における Sc の関数, 式(5b)
 m : 式(7), (8)の指数
 \dot{m}_x : 局所凝縮質量流束
 R : $\rho\mu$ 比 = $(\rho_L\mu_L/\rho_V\mu_V)^{1/2}$
 Re_V : レイノルズ数 = $U_{V\infty}x/\nu_V$
 Sc : シュミット数
 $U_{V\infty}$: バルクの流速
 W_R : 濃縮度, 式(3)および式(6b)
 W_1 : 低沸点成分の質量濃度(質量分率)
 x : 冷却面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
 $Y(m)$: 相対誤差, 式(9)
 δ : 液膜の厚さ
 η_V : 相似変数 = $(y - \delta)(U_{V\infty}/\nu_V x)^{1/2}$ (気相側)
 μ : 粘度
 ν : 動粘度
 ρ : 密度
 Φ : 規格化された濃度 = $(W_{1V} - W_{1V\infty}) / (W_{1V_i} - W_{1V\infty})$

*熱エネルギーシステム工学専攻

**熱エネルギーシステム工学専攻博士課程

添 字

' : 相似変数 η_V に関する微分

i : 気液界面での値

F : 強制対流凝縮

L : 液膜の値, 液膜の物性値

V : 気相境界層の値, 気相の物性値

∞ : 周囲蒸気の値

2. 気相の濃度勾配を表す従来の式

藤井ら²⁾(1977)は不凝縮ガスと蒸気の仮想混合気の凝縮に関する数値解から次の二つの式を提案した.

$$-\Phi'_{Fi} = 0.470Sc^{1/3} \frac{W_R}{(1+W_R)^{1/2}} \quad (1)$$

$$-\Phi'_{Fi} = 0.460Sc^{0.32} \frac{W_R}{(1+W_R)^{0.48}} \quad (2)$$

ここに, $-\Phi'_{Fi}$ は規格化された濃度の気液界面における勾配であり, 相似変換された常微分方程式の境界値として求められたものである. また,

$$W_R = \frac{W_{1Vi}}{W_{1F\infty}} \quad (3)$$

適用範囲は, $1 \leq W_R < 200$, $0.2 \leq Sc \leq 1.5$, および $100 \leq R \leq 1000$ である.

藤井・三原³⁾(1980)はより精密な解を用いて式(2)を次のように修正した.

$$-\Phi'_{Fi} = a \left(1 + \frac{1}{W_R}\right)^b W_R^c \exp \frac{d}{W_R} \quad (4)$$

ここに,

$$a = 0.4562 \left(\frac{100}{R}\right)^{-0.005} \left\{1 + \frac{0.2(Sc-1)}{4(Sc-1)^2+1}\right\}^{-1} Sc^{1/3}, \quad (4a)$$

$$b = -0.470 \left(\frac{100}{R}\right)^{-0.0109} \quad (4b)$$

$$c = 0.53 \left(\frac{100}{R}\right)^{0.0108} Sc^{0.018}, \quad (4c)$$

$$d = \frac{Sc-1}{-2Sc+11} \quad (4d)$$

適用範囲は, $1 \leq W_R < 100$, $0.2 \leq Sc \leq 1.5$, および $100 \leq R \leq 1000$ である. 精度は $-1 \sim +2\%$ であるが,

複雑で実用的でない.

Rose⁴⁾(1980)は熱と物質の同時移動の解より, 無次元凝縮質量流速 \dot{M}_{FV} の極限の特性を考慮して, 次式を提案した.

$$-\Phi'_{Fi} = \frac{C_F(Sc)}{1+0.941\dot{M}_{FV}^{1.14} Sc^{0.93}} + \dot{M}_{FV} Sc \quad (5)$$

ここに,

$$\dot{M}_{FV} = \frac{\dot{m}_x x}{\mu_t Re_{Vx}^{1/2}}, \quad (5a)$$

$$C_F(Sc) = \frac{Sc^{1/2}}{(27.8+75.9Sc^{0.306}+657Sc)^{1/6}} \quad (5b)$$

この式は $\dot{M}_{FV} \rightarrow 0$ の場合に単相の強制対流物質伝達の式と正確に一致する. 他の特徴については文献5)参照.

藤井ら⁶⁾(1987)は二成分とも凝縮する場合の解より式(2)を参考にして, 次式を提案した.

$$-\Phi'_{Fi} = (1+f) C_F(Sc) \left(\frac{2}{1+W_R}\right)^{0.48} W_R \quad (6)$$

ここに,

$$f = 0.1 \left(0.87 - Sc^{3/4} + \frac{0.0015}{Sc^3} + \frac{13}{R}\right) \left(1 - \frac{1}{W_R}\right)^{0.8} \quad (6a)$$

$$W_R = \frac{W_{1Vi} - W_{1L}}{W_{1F\infty} - W_{1L}} \quad (6b)$$

適用範囲は, $1 \leq W_R < 30$, $0.1 \leq Sc \leq 2.5$, および $10 \leq R \leq 1000$ であり, 精度は $\pm 3\%$ である.

最近の藤井¹⁾の著書(1991)にはより正確な数値解に基づいた次式があげられている.

$$-\Phi'_{Fi} = C_F(Sc) \left(\frac{2.5}{1.5+W_R}\right)^m W_R \quad (7)$$

ここに,

$$m = 0.425 + 0.050Sc + 0.011 \ln R \quad (7a)$$

適用範囲は, $1 \leq W_R \leq 10$, $0.3 \leq Sc \leq 1$, および $20 \leq R \leq 500$ であり, 精度は $\pm 2\%$ である.

式(6)は係数を Sc , R および W_R の関数としたのに対して, 式(7)は指数を Sc と R の関数で表したものである.

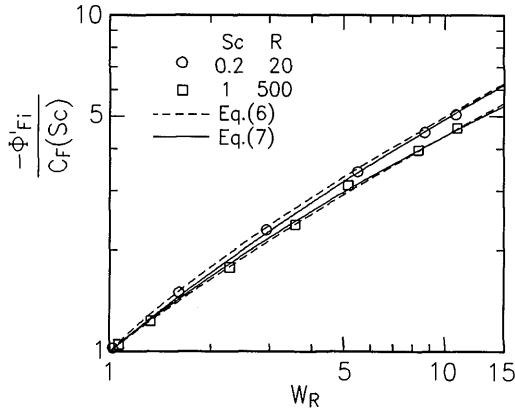


Fig. 1 $-\Phi'_{Fi}/C_F(Sc)$ calculated from similarity solution versus the concentration ratio W_R .

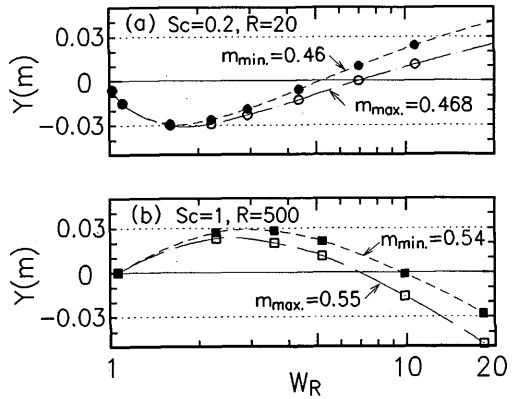


Fig. 3 The values of $Y(m)$ in Eq. (9) versus the concentration ratio W_R .

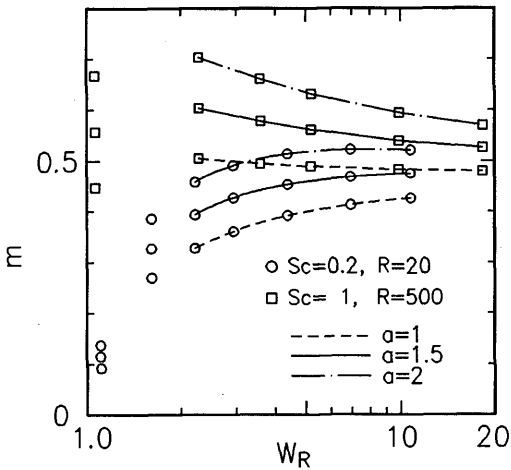


Fig. 2 The power index m versus the concentration ratio W_R .

3. 新しい式の提案

前節の式(7)の導出のプロセスを示し、さらにそれを若干修正する。Fig. 1 は、相似解 $-\Phi'_{Fi}/C_F(Sc)$ と W_R との関係を、 Sc と R の組合せが $(Sc, R) = (0.2, 20)$ と $(Sc, R) = (1, 500)$ の場合についてそれぞれ○印および□印で例示したものである。図中の破線は式(6)、実線は式(7)を示す。通常の凝縮では $Sc=0.2\sim 0.8$, $R=25\sim 300$ 程度であるので、上記の組合せはパラメータの変化の範囲の二つの限界を代表しているものとみなしてよい。Fig. 1 のデータから明らかなよう

に $-\Phi'_{Fi}/C_F(Sc)$ は W_R の強い関数で、 Sc と R の弱い関数であるので次の形

$$\frac{-\Phi'_{Fi}}{C_F(Sc)} = \left(\frac{a+1}{a+W_R}\right)^m W_R \tag{8}$$

を仮定し、 a を定数とし、 m を Sc と R の関数で表すことを試みる。

Fig. 2 は、 $(Sc, R) = (0.2, 20)$ と $(Sc, R) = (1, 500)$ の場合の数値解について、式(8)から算出した指数 m と W_R の関係を示す。破線、実線および一点鎖線それぞれ $a=1, 1.5$ および 2 の場合の値を結んだものである。いずれの場合も W_R が大きくなると○印を結んだ線は増加し、□印を結んだ線は減少し、一定値に近づく傾向がある。 $a=1, 1.5$ および 2 のそれぞれの一定値に対し、 $2 \leq W_R \leq 10$ の範囲における○印のデータと□印のデータとの差が正負ほぼ相殺する場合を選ぶという観点より、 $a=1.5$ を確定する。

次に、 $a=1.5$ とした場合の式(8)の右辺の値の相似解に対する相対誤差 $Y(m)$ 、

$$\frac{\left(\frac{2.5}{1.5+W_R}\right)^m W_R - \frac{-\Phi'_{Fi}}{C_F(Sc)}}{\frac{-\Phi'_{Fi}}{C_F(Sc)}} = Y(m) \tag{9}$$

を考える。Fig. 3 (a), (b) はそれぞれ $(Sc, R) = (0.2, 20)$ および $(1, 500)$ の場合について $Y(m)$ と W_R との関係を示す。図中でパラメータ m は次のようにして選んである。実際の場合を考慮して適用範囲を $1 \leq W_R$

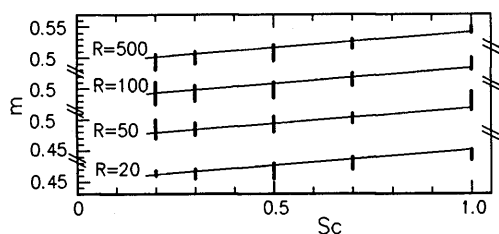


Fig. 4 The ranges of $(m)_{min}$ and $(m)_{max}$ versus the Schmidt number Sc .

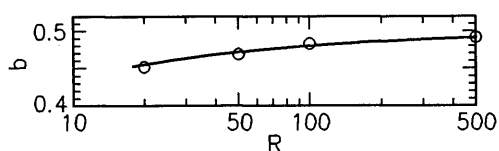


Fig. 5 The values of b in Eq. (10) versus the $\rho\mu$ -ratio R .

≤ 15 とし、その間で $Y(m)$ が $-0.03 \sim 0.03$ の間に入るような m の値で最小値および最大値をそれぞれ $(m)_{min}$ および $(m)_{max}$ とする。すなわち、これらの値の中間の m の値をとれば、 $\pm 3\%$ 以内の誤差で、式 (8) の左辺の値が同右辺の式で表されることになる。このような $(m)_{min}$ と $(m)_{max}$ の範囲を Sc と R の種々の組み合わせについて求め、 R をパラメータとして Sc との関係で表したのが Fig. 4 である。各 R について、 $(m)_{min}$ と $(m)_{max}$ を結んだ縦棒線のすべてと交さし、かつ共通の勾配を持つ一次式を求めると次のようになる。

$$m = 0.05Sc + b(R). \tag{10}$$

Fig. 5 は、Fig. 4 における $Sc \rightarrow 0$ の外挿値 b と R の関係を示す。このデータは次式で近似できる (図中の実線)。

$$b = 0.5 - \frac{0.2}{\sqrt{R}}. \tag{11}$$

結局、式 (8) の右辺に $a=1.5$ 、式 (10)、(11) を代入すると、次式が得られる。

$$\frac{-\Phi'_{Fi}}{C_F(Sc)} = \left(\frac{2.5}{1.5 + W_R} \right)^m W_R. \tag{12}$$

$$m = 0.5 + 0.05Sc - \frac{0.2}{\sqrt{R}}. \tag{12a}$$

この式の適用範囲は、 $1 \leq W_R < 15$ 、 $0.2 \leq Sc \leq 1$ 、および $20 \leq R \leq 500$ である。この式は $\pm 3\%$ の誤差を許容すると仮定して導いたものであるが、 Sc と R の組み合わせによっては、それより高精度となる。また式 (7) と式 (12) とは、指数 m の関数形が若干異なるが、精度については同程度と見なしてよい。

4. ま と め

二成分混合気が平板上で層流膜状強制対流凝縮する場合における気相の濃度勾配の式に関し、従来の諸式を検討し、高精度の数値解を用いて比較的簡単な形であつた実用的には十分な精度の新しい式を作成した。

文 献

- 1) Fujii, T., "Theory of Laminar Film Condensation", Springer-Verlag, New York (1991).
- 2) 藤井 哲, 上原 春男, 三原 一正, 加藤 泰生, 不凝縮ガスを含む蒸気の層流強制対流凝縮に関する理論的解析, 九州大学生産科学研究所報告, **66**(1977), 53-80.
- 3) 藤井 哲, 三原 一正, 不凝縮ガスを含む蒸気の層流強制対流凝縮に関する理論的解析(読報)より高い精度の境界値の提案, 九州大学生産科学研究所報告, **71**(1980), 29-35.
- 4) Rose, J. W., Approximate Equations for Forced-Convection Condensation in the Presence of a Non-Condensing Gas on a Flat Plate and Horizontal Tube, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **22**(1980), 539-546.
- 5) 藤井 哲, 新里 寛英, 李 鍾鵬, 二成分混合気の層流膜状凝縮の際の気相境界層における対流物質伝達と対流熱伝達の式の表現形式と精度について, 日本機械学会論文集, **57**-541, B(1991), 3155-3160.
- 6) 藤井 哲, 小山 繁, 渡部 正治, 二成分混合気の平板上での層流強制対流膜状凝縮, 日本機械学会論文集, **53**-486, B(1987), 541-548.