

層流で流下する臭化リチウム水溶液への
水蒸気吸収特性*

(吸収量に及ぼす物性値変化と入口膜厚の影響)

川江 信治^{*1}, 茂地 徹^{*1}
金丸 邦康^{*1}, 山田 昭^{*1}Absorption of Water Vapor into the Laminar Film Flow of a Lithium Bromide-Water Solution
(Influence of Variable Properties and Inlet Film Thickness on Absorption Rate)

Nobuzi KAWAE, Tohru SHIGECHI, Kuniyasu KANEMARU and Takashi YAMADA

Numerical computations were carried out to determine the mass transfer for the absorption of low pressure water vapor into an aqueous lithium bromide film flowing down a constant temperature vertical flat plate. The film is assumed to be laminar and the velocity profile fully developed. In the current study, the selected operating parameters are expected to be present in the absorbent of an absorption refrigerating machine. The results are summarized as follows: (1) The total absorption mass flow rate over a certain length of the plate takes a maximum value at a certain entrance film thickness. (2) With an increase in the system pressure, entrance concentration and Lewis number, the total absorption mass flow rate is augmented. (3) The total absorption mass flow rate under conditions where variations of the solution properties occur is slightly lower than that of the constant properties.

Key Words: Mass Transfer, Laminar Flow, Numerical Analysis, Absorption Refrigerating Machine, Lithium Bromide

1. ま え が き

垂直平板上を流下する臭化リチウム (LiBr) 水溶液による低圧水蒸気の吸収現象に関する研究は、最近多く発表されているが⁽¹⁾、数値解析により吸収機構の解明を行った論文は比較的少ない。Grigorevaら⁽²⁾、Grossman⁽³⁾による方法は解析解を得るために、特殊な前提条件を設定しており、実用的でない。Andbergら⁽⁴⁾は実際の現象に適合した基礎式および境界条件を設定し、数値解析によって、温度および濃度の分布を求め、吸収現象の解明を行っている。本研究は、Andberg法を展開して、吸収冷凍機で使用されている領域で、運転諸因子によるLiBr水溶液への水蒸気の総吸収質量の影響を明らかにしたものである。

記 号

a: 温度伝導率
c: 溶液濃度

c_p : 溶液の比熱
 c_{pf}, c_{pv} : 溶質および溶媒の比熱
D: 拡散係数
h: エンタルピ
M, \dot{m} : 総吸収質量および吸収質量流束
($M = \int_0^x \dot{m}(\xi) d\xi$)
k: 熱伝導率
L: 吸収熱
 L_e : ルイス数 ($L_e = D/a$)
Q, \dot{q} : 総熱量および熱流束
($Q = \int_0^x \dot{q}(\xi) d\xi$)
T: 温度
u: x方向流速
x, y: 座標系 (図1参照)
 δ, δ_0 : 膜厚および入口膜厚
 ρ : 密度
 μ : 粘度
添 字
b: バルク
f: 溶質, または気液界面
v: 溶媒

* 昭和62年7月22日 九州支部久留米地方講演会において講演, 原稿受付 昭和61年9月29日.

*1 正員, 長崎大学工学部 (〒852 長崎市文教町1-14).

w: 壁面状態
0: 入口状態

2. 理論解析

本論文は、垂直平板を流下するLiBr水溶液に吸収される水蒸気の吸収過程を理論解析したものである。図1に示す形態で、LiBr水溶液は垂直平板に入口液膜厚さ δ_0 で流入し、系内の水蒸気を吸収しながら流下する。解析を容易にするために、この系の取り扱いについて、つぎのことを仮定する。

- (1) 液膜内の流れは層流で、十分に発達したものとす。
- (2) 気液界面近傍の蒸気は、低圧のため密度が小さく、液膜に吸収される量が全体的にみてわずかであるので、界面におけるせん断力は無視できる。
- (3) 系の圧力は一定とする。
- (4) 流れ方向の拡散および熱伝導は無視する。
- (5) 液膜厚さ方向の流れはないものとし、物質移動は相互拡散とする。
- (6) 気液界面では平衡関係が成立し、界面での熱流束は物質流束と吸収熱(蒸発潜熱)の積に等しい。
- (7) 垂直平板の壁温は一定とする。

2.1 基礎式および境界条件 上記の仮定のもとに、速度分布式、拡散方程式、エネルギー式を導出すると、つぎようになる。

$$u = \frac{g}{\nu} \left(\delta y - \frac{1}{2} y^2 \right) \quad \text{-----}(1)$$

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad \text{-----}(2)$$

$$\rho c_p u \frac{\partial T}{\partial x} = k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sum_i \rho D_i \frac{\partial C_i}{\partial y} h_i \right) \quad \text{-----}(3)$$

また、式(3)の右辺第2項の希釈熱項に関し、式(4)が成立すると仮定すると、式(3)は式(5)のように簡略化される。

$$\left. \begin{aligned} h_i &= c_{pi} T \\ C_v &= 1 - C_f = 1 - C \\ D_v &= D_f = D \end{aligned} \right\} \text{-----}(4)$$

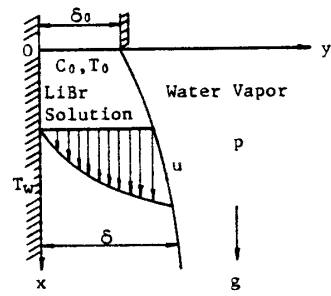


図1 座標系

$$u \frac{\partial T}{\partial x} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \left(\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} T + \frac{\partial C}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \cdot \frac{D(c_{pf} - c_{pv})}{c_p} \quad \text{-----}(5)$$

また、境界条件はつぎのように得られる。

$$x = 0 : T = T_0, C = C_0 \quad \text{-----}(6)$$

$$y = 0 : T = T_w, \partial C / \partial y = 0 \quad \text{-----}(7)$$

気液界面 ($y = \delta$) においては、LiBr水溶液は飽和状態であるとし、LiBr水溶液の温度 T 、濃度 C 、水蒸気の吸収質量流束 \dot{m} 、界面から液膜への熱流束 \dot{q}_f はつぎの関係を満たす。

$$T_f = f(C_f) \quad \text{-----}(8)$$

$$\dot{m} = -\rho D \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_{y=\delta} \quad \text{-----}(9)$$

$$\begin{aligned} \dot{q}_f &= k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=\delta} - (c_{pv} - c_{pf}) T \rho D \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_{y=\delta} \\ &= L \dot{m} \end{aligned} \quad \text{----}(10)$$

LiBr水溶液の液膜は、水蒸気を吸収して流下するにしたがって、わずかながら膜厚を増加する。計算に差分法を用いる場合には、計算領域は長方形のほうが取扱い易いので、次式(11)の座標変換を行い、入口膜厚 δ_0 により決定される一定幅の長方形領域に変換する。 $d\delta/dx$ は微小であるので、この変換により式(2)および(5)に生じる $d\delta/dx$ を係数とする項は省略する。

$$y' = (\delta_0 / \delta) y \quad \text{----}(11)$$

また、速度分布に対しては、吸収による膜厚の増加

が初期膜厚に対して微小であるので、

$$u = \frac{g}{\nu} \left(\delta_0 y' - \frac{1}{2} y'^2 \right) \quad \text{----(12)}$$

とする。

2.2 数値解法 解法には、有限差分法の一つである、クランク・ニコルソン法を用いた。ここでは、 x 方向については前進差分を用い、 y' 方向については新旧のステップの2階微分の差分近似を平均して使用する。 y' 方向には分割数 $n = 20$ の等分割を採用し、きざみは $\Delta y' = \delta_0/n$ となる。 x 方向の格子間隔 Δx は、入口付近では微小な格子間隔にしなければ、解が振動するので、初期値を $\Delta x = 10^{-7} \text{m}$ として、 x の増加とともに、 x 方向の格子間隔を指数関数的に増加させた。計算は、 x の値が最大で10mまで計算した。以上のようにして得られた y' に対する値から逆変換して、 y に対するLiBr水溶液の温度、濃度などの分布を得た。

3. 計算結果の検討

数値計算を行うに際しては、吸収冷凍機で運転されている範囲を対象にし計算パラメータを選び、諸運転条件の水蒸気の吸収特性に及ぼす影響を検討するために、下記の数値（以下、基準条件という）を設定した。

- 系圧力: $p = 1.0$ [kPa]
- 入口濃度: $C_0 = 0.6$ [-]
- 入口温度: $T_0 = 46.5$ [$^{\circ}\text{C}$]
- 壁温: $T_w = 35.0$ [$^{\circ}\text{C}$]
- 膜厚: $\delta_0 = 0.2$ [mm]
- ルイス数: $L_e = 0.01$ [-]
- 膜レイノルズ数: $Re^* = 10.6$ [-]

この基準条件に対するLiBr水溶液の物性値は、つぎのようになる。

- 密度: $\rho = 1.6997 \times 10^3$ [kg/m³]
- 粘度: $\mu = 5.350 \times 10^{-3}$ [Pa·s]
- 熱伝導率: $k = 0.43095$ [W/(m·K)]
- 温度伝導率: $a = 1.6175 \times 10^{-7}$ [m²/s]
- 拡散係数: $D = 1.6175 \times 10^{-9}$ [m²/s]
- LiBr水溶液の比熱: $c_p = 1.5675 \times 10^3$ [J/(kg·K)]
- 無水LiBrの比熱: $c_{pL} = 6.009 \times 10^2$ [J/(kg·K)]
- 水の比熱: $c_{pV} = 4.187 \times 10^3$ [J/(kg·K)]
- 吸収熱: $L = 2.7727 \times 10^3$ [kJ/kg]

以上の条件で計算した結果を図2(a)~(e)に、実線で示す。図2(a),(b)は各流下距離 x におけるLiBr水溶液の温度 T および濃度 C の分布を示す。図2(c)は、流下距離 x に対する水溶液のバルク濃度 C_b 、界面濃度 C_f 、バルク温度 T_b 、および界面温度 T_f を示す。図2(d)は、流下距離に対する水蒸気の吸収質量流束 \dot{m} 、界面および壁面の局所熱流束 \dot{q}_f 、 \dot{q}_w を示し、図2(e)は、水蒸気の総吸収質量 M 、界面および壁面の総熱量 Q_f 、 Q_w を示す。以上の結果はAndbergら⁽⁴⁾の結果と定性的に良好な一致を示している。

3.1 物性値の検討 Andbergら⁽⁴⁾は物性値がプロセス中一定として計算を行っているが、これは濃

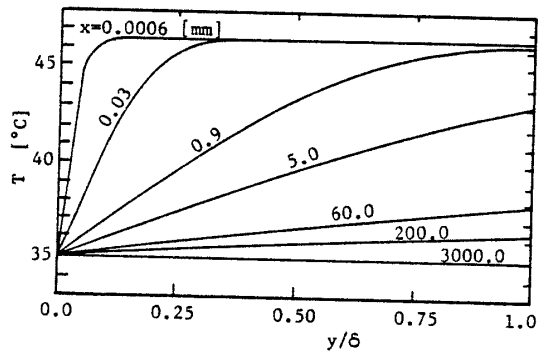


図2(a) 温度分布の変化

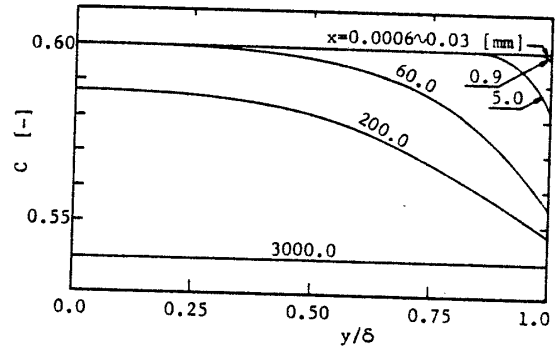


図2(b) 濃度分布の変化

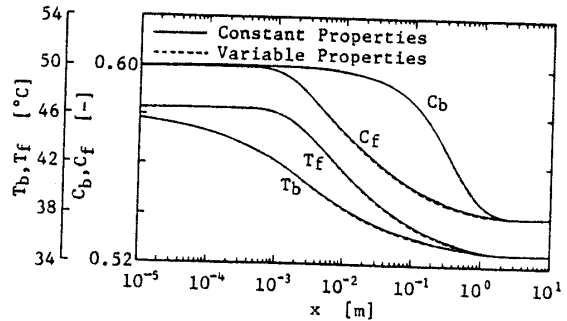


図2(c) 流下距離に対する温度および濃度の変化

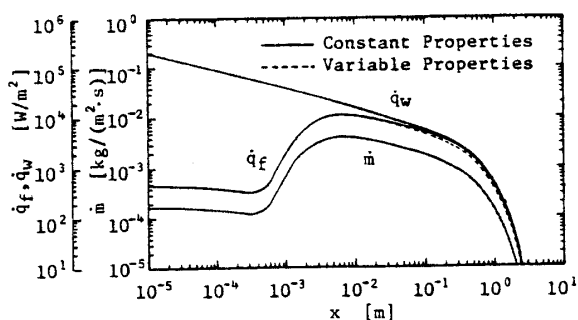


図2(d) 吸収質量流束および熱流束の変化

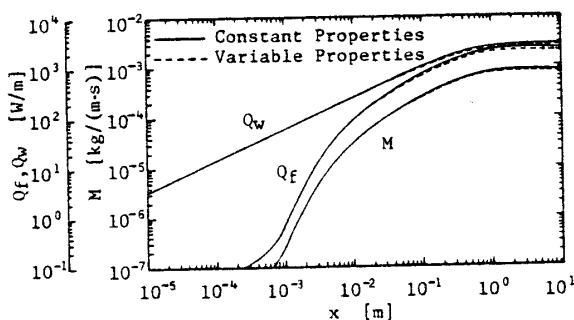


図2(e) 総吸収質量および総熱量の変化

度および温度の関数として式を展開してゆくことが非常に煩雑であるからと思われる。本数値解法においては、各ステップでの物性値を前ステップの濃度および温度より求める簡便な方法で物性値の影響を考慮した。まず、温度、濃度、圧力に対する物性値の変化については、McNeely⁽⁵⁾やUemuraら⁽⁶⁾の報告よりサブルーチンを作成した。手法としては、界面および壁面での物性値は、その前ステップの界面および壁面での濃度と温度より求め、それ以外の液膜内部の計算点での物性値は、前ステップでのバルク濃度とバルク温度より求めた。入口条件を前節と同じにし、得られた計算結果を、図2(c)～(e)に破線で示す。同図より、物性値を変化させると質量流束 \dot{m} 、総吸収質量 M 、界面および壁面での熱流束 \dot{q}_f, \dot{q}_w 、総熱量 Q_f, Q_w は若干小さくなるのがわかる。例えば、流下距離 $x=10\text{m}$ までの水蒸気の総吸収質量 M は、物性値一定の場合、 $M=8.4189 \times 10^{-4} \text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 、物性値変化のある場合、 $M=7.9789 \times 10^{-4} \text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ となり、5.21%ほど減少する。

3.2 諸因子と総吸収質量との関係 運転上の諸因子と総吸収質量の関係を検討するため物性値を一定とし、下記のように入口条件を基準条件のまわりに変化させて数値解析を行った。物性値変化を考慮する

ことによる総吸収質量の変化は、前節で述べたように少ないので、本節は物性値一定として諸因子の総吸収質量への影響を検討した。図3(a)～(f)に、流下距離 x に対する総吸収質量 M の変化を示す。なお、図中に明示したパラメータ以外の諸因子は、系圧力 $p=1.0 \text{ kPa}$ 、入口濃度 $C_0=0.60$ 、入口温度 $T_0=40^\circ\text{C}$ 、壁温 $T_w=30^\circ\text{C}$ 、入口膜厚 $\delta_0=0.2\text{mm}$ 、ルイス数 $Le=0.01$ と設定した。

- 系圧力: $p = 0.8, 0.9, 1.0$ [kPa]
- 入口濃度: $C_0 = 0.58, 0.59, 0.60$ [-]
- 入口温度: $T_0 = 32, 36, 40$ [$^\circ\text{C}$]
- 壁温: $T_w = 30, 34, 38$ [$^\circ\text{C}$]
- 入口膜厚: $\delta_0 = 0.2, 0.3, 0.4$ [mm]
- ルイス数: $Le = 0.001, 0.005, 0.01$ [-]
- 膜レイノルズ数: $Re^* = 4.83 \sim 90.0$ [-]

系圧力 p の変化については、図3(a)に示すように、圧力 p が高いほど、総吸収質量 M は多くなる傾向にある。また、図3(b)に示すように、入口濃度 C_0 が高いほど

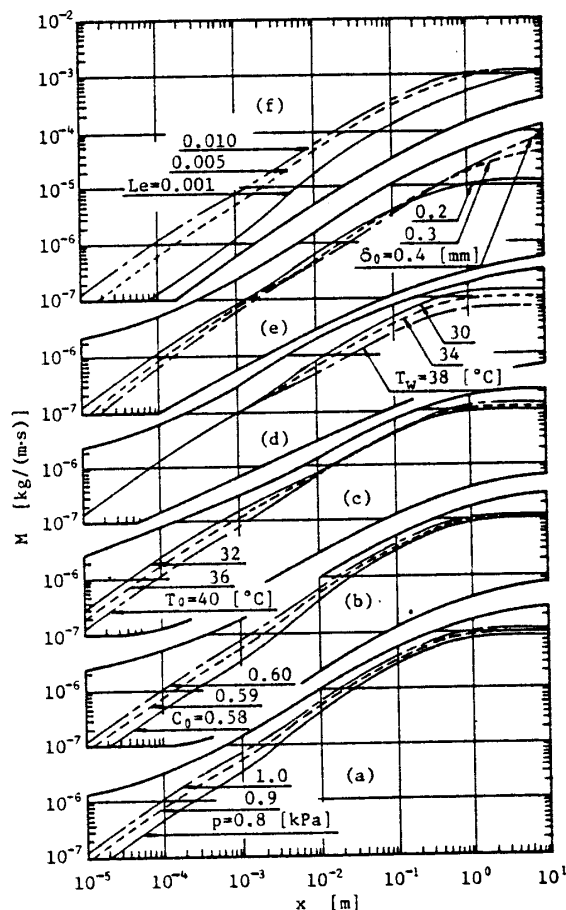
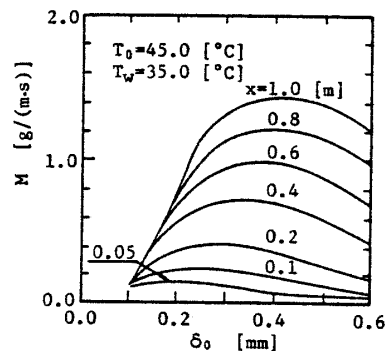
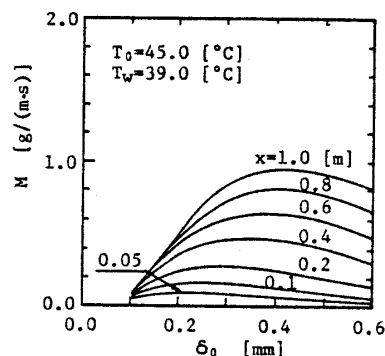
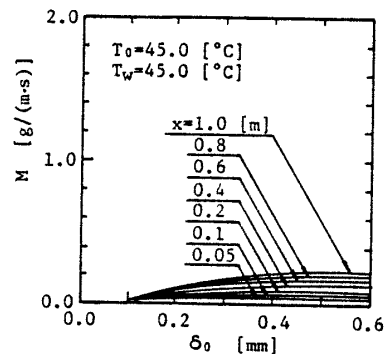
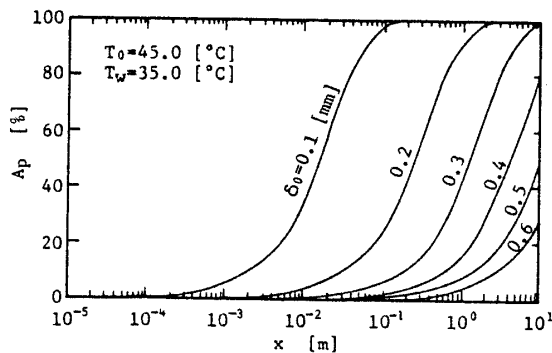


図3 諸因子の総吸収質量に対する影響

総吸収質量 M は大きくなる傾向にある。入口温度 T_0 の変化については、図 3 (c) に示すように、ある流下距離までは入口温度が低いほうが総吸収質量 M が大きい、それ以上の距離では入口温度が高いほうが大きい。本計算では、この遷移点の距離は約 $3.0 \times 10^{-2} \text{ m}$ である。壁温 T_w の変化については、図 3 (d) に示すように壁温 T_w が低いほど総吸収質量 M は大きくなる傾向にある。入口膜厚 δ_0 の変化については、図 3 (e) に示すように、複雑な変化をするので、次節で詳細に検討する。ルイス数 L_e の変化については、図 3 (f) に示すように、ルイス数 L_e が大きいほど総吸収質量 M は大きい。

3.3 入口膜厚と総吸収質量との関係 吸収質量は、熱拡散と物質拡散に大きく影響を受けるため、入口膜厚 δ_0 および入口温度 T_0 と壁温 T_w との差が総吸収質量 M の増減に関係する。このことを明らかにするために、系圧力 $P = 1.0 \text{ kPa}$ 、入口濃度 $C_0 = 0.6$ 、入口温度 $T_0 = 45.0^\circ \text{C}$ の条件のもとで、流下距離 $x = 0.05 \sim 1.0 \text{ m}$ の範囲で、入口膜厚 $\delta_0 = 0.1 \sim 0.6 \text{ mm}$ 、壁温 $T_w = 35.0 \sim 45.0^\circ \text{C}$ の組合せで計算した。その結果を図 4 (a) ~ (c) に示す。入口温度 T_0 と壁温 T_w が等しい場合 ($T_0 = T_w = 45.0^\circ \text{C}$) は、入口膜厚が厚いほど総吸収質量 M は多くなるが、それ以外の場合は一定の流下距離に対して、総吸収質量 M を最大にする入口膜厚が存在することがわかる。このため、膜厚がこの最適の厚さより大きい場合、十分に吸収能力を発揮しないままに流出する。流出するときのバルク濃度を調べるため、吸収率 $A_p = 100(C_0 - C_{\text{out}})/(C_0 - C_w)$ とおいて、流下距離との関係で表したものが図 5 である。ここで、 C_{out} は、流下距離 x でのバルク濃度であり、 C_0 、 C_w は、それぞれ、入口での濃度および壁温に平衡な濃度である。これより、入口膜厚と流下距離との関係で、LiBr 水溶液にどれほど吸収能力の余力があるかがわかる。

つぎに、LiBr 水溶液を流下させる場合、なんらかの工夫により、途中で完全に LiBr 水溶液を混合させた場合の総吸収質量 M を検討する。図 6 において、入口膜厚 $\delta_0 = 0.2 \text{ mm}$ で流入した LiBr 水溶液が流下距離 1 m の間に、全く途中で混合しない場合 (実線で示す)、 0.5 m 流下した後混合し濃度を均一にして、再び 0.5 m 流下する場合 (破線)、 0.2 m 流下するごとに混合し、濃度を均一にして流下する場合 (一点鎖線) について総吸収質量 M が、どの程度増大するかを同図に示した。また、図 7 にこれらの混合を行った場合の総吸収質量 M と入口膜厚 δ_0 の関係を示す。流下距離 $x = 1 \text{ m}$ で考察すると、この手法による混合では、混合回数増加によって総吸収質量 M は増大するが、最適な入口膜厚

図 4 (a) 入口膜厚と総吸収質量の関係 ($T_w = 35.0^\circ \text{C}$)図 4 (b) 入口膜厚と総吸収質量の関係 ($T_w = 39.0^\circ \text{C}$)図 4 (c) 入口膜厚と総吸収質量の関係 ($T_w = 45.0^\circ \text{C}$)図 5 吸収率の流下方向の変化 ($T_w = 35.0^\circ \text{C}$)

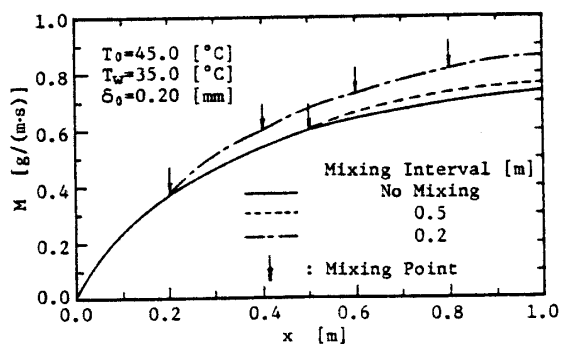


図6 総吸収質量の流下方向の変化(混合の影響)

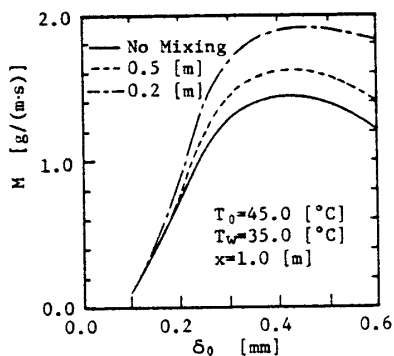


図7 入口膜厚と総吸収質量の関係(混合の影響)

の厚さは混合しない場合とほぼ変わらず、約 $\delta_0 = 0.4$ mmであることがわかる。

4. まとめ

垂直平板上を層流で流下する臭化リチウム水溶液による低圧水蒸気の吸収現象を数値解析し、総吸収質量に及ぼす諸因子の影響について考察し、つぎの結果を得た。

(1) 流下距離を指定すると、同じ入口濃度であっても、入口膜厚によって総吸収質量が異なり、最大吸収質量を得る入口膜厚が存在する。

(2) 物性値変化を考慮した場合の総吸収質量は、物性値を一定にした場合より低い値となる。

(3) 系圧力、入口濃度、ルイス数が増加すると、総吸収質量は増加する傾向を示す。

終わりに本研究に当たって本学卒業生矢野輝昭氏(現マツダ㈱)の協力を受けたことを記し、心底より謝意を表す。

文献

- (1) Grossman, G., *Handbook of Heat and Mass Transfer, Heat and Mass Transfer in Film Absorption*, Chermisinoff, N. P.(Ed.), 211, Gulf Pub. Comp., Houston, (1986), 211.
- (2) Grigoreva, N. I. and Nakoryakov, V. E., *J. Eng. Physics*, 33-5(1978), 1349.
- (3) Grossman, G., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 26-3(1983), 357.
- (4) Andberg, J. W. and Vliet, G. C., *ASME-JSME Thermal Eng. Joint Conf. Proc.*, 2(1983), 423.
- (5) McNeely, L. A., *Trans. ASHRAE*, 85, Pt.1(1977), 413.
- (6) Uemura, T. and Hasada, S., *Technol. Rep. Kansai Univ.*, No.6(1964), 31.