不溶性ガスと吸湿性溶液の接触装置の動特性[†]

川 島 美 勝・増 淵 正 美*

横浜国立大学工学部 横浜市南区大岡 2-31-1

(昭和 43 年 12 月 25 日受付)

Dynamic Analysis of a Dehumidification Process with Gas and Liquid Phase

Yoshikatsu KAWASHIMA and Masami MASUBUCHI

(Faculty of Engineering, Yokohama National University, Yokohama)

(Received December 25, 1968)

This paper presents the dynamic behavior of the dehumidification process which has heat and mass transfer resistances on both gas and liquid sides.

Simplified two lumped systems which assume a gas bulk and a liquid bulk are considered. The double film theory to the distributions of concentration and temperature near the interface is used. Basic differential equations are obtained from the heat- and mass-balance relations. The equations are linearized and non-dimensionalized near the steady state and the block diagram and the transfer matrix are obtained. A numerical example is also shown.

The result shows that there exists an interaction of heat and mass transfer, which depends on the temperature sensitivity of the gas-liquid equilibrium relationship, latent heat of evaporation of water and heat of dilution. The second result is that the over-all mass transfer coefficient is not constant and is shown as a function of transfer frequency when the input temperature of gas and liquid are constant and the humidity of the inlet gas and the concentration of the inlet liquid are variable.

1. は し が き

湿分を含んだ不溶性ガスと吸湿性溶液を接触させると、熱移動の他に湿分の移動すなわち物質移動が起こる。

この性質を利用した気液接触装置は広い応用範囲を持ち、特に空気調和においては、冷却法、圧縮法に比較して必要以上の熱的・機械的エネルギーを浪費せず、また固体吸湿剤と異なり取扱いやすく、かつ、連続操作も可能なので、大量の空気を処理する方法としての優位さが認められ、近年すでに実用の段階にはいっている。

この接触装置を各種プラントに応用するさい、特に制御系の設計においては、静特性はもちろんであるが、動特性の知識が不可欠である。

気液界面における非定常移動現象については、高松¹⁾らの研究があるが、接触装置の動特性に関するものは見あたらない。

本文では、気液両相に熱および物質移動の抵抗が存在する場合の動特性を周波数特性によって理論的に求めた。また熱移動と物質移動の相互干渉の存在を示し、これがどのような形でなされるかを検討し、相互干渉を無視した場合との比較を行ない、総括物質移動係数の新しい理論式を提案し、従来のように一定値とはならず熱移動の影響を受けて、伝達周波数の関数となることを示した。

2. 記 号

a : 界面面積 [m^2]

C_{li} : 流入液濃度 [$\text{kg-H}_2\text{O/kg-solvent}$]

C_l : 流出液濃度 [$\text{kg-H}_2\text{O/kg-solvent}$]

C_i : 界面濃度 [$\text{kg-H}_2\text{O/kg-solvent}$]

[†] 第 9 回自動制御連合講演会 (昭 41・10・11), 機械学会 第 45 期通常総会学術講演会 (昭 43・4・3) で発表。

* (現) 大阪大学工学部

C_{pg} : 気体比熱 [kcal/kg-dry gas·deg]

C_{pl} : 液体比熱 [kcal/kg-solvent·deg]

F_g : 気体流量 [kg-dry gas/h]

F_l : 液体流量 [kg-solvent/h]

H_{gi} : 流入気体湿度 [kg-H₂O/kg-dry gas]

H_g : 流出気体湿度 [kg-H₂O/kg-dry gas]

H_i : 界面湿度 [kg-H₂O/kg-dry gas]

h_g : 気体側境界膜熱移動係数 [kcal/h·m²·deg]

h_l : 液体側境界膜熱移動係数 [kcal/h·m²·deg]

K_g : 気体側境界膜物質移動係数 [kg-H₂O/h·m²·ΔH]

K_l : 液体側境界膜物質移動係数 [kg-H₂O/h·m²·ΔC]

N_i : 界面を通過する物質移動量 [kg-H₂O/h·m²]

Q_i : 界面を通過する熱移動量 [kcal/h·m²]

Q_g : 気体側から気体側境界層にはいる熱移動量 [kcal/h·m²]

V_g : 気体容積 [m³]

V_l : 液体容積 [m³]

γ_g : 気体比重 [kg-dry gas/m³]

γ_l : 液体比重 [kg-solvent/m³]

θ_{gi} : 流入気体温度 [°C]

θ_g : 流出気体温度 [°C]

θ_{li} : 流入液体温度 [°C]

θ_l : 流出液体温度 [°C]

θ_i : 界面温度 [°C]

λ : 凝縮熱 [kcal/kg-H₂O]

$-\Delta H$: 融界および希釈熱 [kcal/kg-H₂O]

t : 時間 [h]

s : 定常状態を示す添字

Δ : 定常状態値からの偏差を示す

S : 無次元時間 t' に関するラプラス演算子

3. 基礎方程式^{3)~5)}

気液接触装置を Fig. 1 のように気相と液相の二集中系として扱い、気液界面付近の温度および濃度分布を Fig. 2 のように考え、さらに次の仮定を設ける。

1. 各流体の物性値、物質移動係数は一定。
2. 各流体の入口流量は一定。
3. 各流体の流動状態は変わらないものとし、気液

Fig. 1 Schematic diagram of the dehumidification process

容積比、界面面積は一定。

4. 物質移動量は入口流量に比較して非常に少ない。
5. 囲壁、充てん物などの熱交換は無視する。

Fig. 2 Concentration and temperature profiles near the inter face

界面の気液は平衡に達していると考えられるから、界面温度 θ_i 、界面濃度 C_i 、界面湿度 H_i の間を次のように表わす。

$$H_i = f(\theta_i, C_i) \quad (1)$$

気体側境界膜を気相から界面へ通過する物質移動量 N_i は気相の湿度 H_g と界面の湿度 H_i との差に比例し、比例定数すなわち気体側境界膜物質移動係数を K_g とすれば、次式が成立つ。

$$N_i = K_g (H_g - H_i) \quad (2)$$

液側境界膜を界面から液相へ通過する物質移動量は、気体側境界膜を通過する量 N_i に等しく、界面の濃度 C_i と液相の濃度 C_l との差に比例し、液体側境界膜物質移動係数を K_l とすれば、次式が成立つ。

$$N_i = K_l (C_i - C_l) \quad (3)$$

気体側境界膜を気相から界面へ通過する熱移動量 Q_g は気相の温度 θ_g と界面の温度 θ_i との差に比例し、気体側境界膜熱移動係数を h_g とすれば、次式が成立つ。

$$Q_g = h_g (\theta_g - \theta_i) \quad (4)$$

液側境界膜を界面から液相へ通過する熱移動量 Q_i は、界面の温度 θ_i と液相の温度 θ_l との差に比例し、液体側境界膜熱移動係数を h_l とすれば、次式が成立つ。

$$Q_i = h_l (\theta_i - \theta_l) \quad (5)$$

水の凝縮熱を λ とすると各移動量の間には次の関係がある。

$$Q_i = Q_g + \lambda N_i \quad (6)$$

気相について、物質収支を考えると、次式が成立つ。

$$V_g \gamma_g \frac{dH_g}{dt} = F_g H_{gi} - F_g H_g - N_i a \quad (7)$$

ここで、右辺の第1項は流入する気体の持込む湿分の量であり、第2項は流出する気体の持出す量であり、第3項は界面を通して液相へ移動する量である。左辺は気相に貯えられる湿分の量を示す。

液相について、物質収支を考えると、

$$V_l \gamma_l \frac{dC_l}{dt} = F_l (C_{li} - C_l) + N_i a \quad (8)$$

同様に、気相、液相についてのおおの熱収支を考えると、

$$C_{pg} V_g \gamma_g \frac{d\theta_g}{dt} = F_g C_{pg} (\theta_{gi} - \theta_g) - Q_g a \quad (9)$$

$$C_{pl} V_l \gamma_l \frac{d\theta_l}{dt} = F_l C_{pl} (\theta_{li} - \theta_l) + Q_i a + (-\Delta H) N_i a \quad (10)$$

(10) 式の右辺の第3項は、気相から液相に移動した水分の溶解および希釈による発熱量である。

以上の(1)～(10)式が、接触装置の基礎方程式であり、定常状態はこれらの微分の項を零と置いた代数式をとくことによって求められる。

4. 基礎方程式の線形化と無次元化

(1) 式の気液平衡関係は非線形ではあるが、定常状態付近では、直線関係にあると考えてよいので、定常状態のまわりで局所線形化して扱うことにする。

$$H_i = m \Delta \theta_i + n \Delta C_i + H_{is} \quad (11)$$

$$\text{ただし、} m = \left(\frac{\partial H_i}{\partial \theta_i} \right), \quad n = \left(\frac{\partial H_i}{\partial C_i} \right)$$

定常状態からの変化分のみを考えるとし次のようにおく。

$$\begin{aligned} \Delta H_i &= H_i - H_{is} & \Delta C_i &= C_i - C_{is} & \Delta \theta_i &= \theta_i - \theta_{is} \\ \Delta N_i &= N_i - N_{is} & \Delta Q_i &= Q_i - Q_{is} & \Delta Q_g &= Q_g - Q_{gs} \\ \Delta H_{gi} &= H_{gi} - H_{gis} & \Delta C_{li} &= C_{li} - C_{lis} & \Delta \theta_{gi} &= \theta_{gi} - \theta_{gis} \\ \Delta \theta_{li} &= \theta_{li} - \theta_{lis} & \Delta H_g &= H_g - H_{gs} & \Delta C_l &= C_l - C_{ls} \\ \Delta \theta_g &= \theta_g - \theta_{gs} & \Delta \theta_i &= \theta_i - \theta_{is} \end{aligned}$$

これらを用いて、(2)～(11)式を書き直すと、

$$\Delta H_i = m \Delta \theta_i + n \Delta C_i \quad (12)$$

$$\Delta N_i = K_g (\Delta H_g - \Delta H_i) \quad (13)$$

$$\Delta N_i = K_l (\Delta C_i - \Delta C_l) \quad (14)$$

$$\Delta Q_g = h_g (\Delta \theta_g - \Delta \theta_i) \quad (15)$$

$$\Delta Q_i = h_i (\Delta \theta_i - \Delta \theta_l) \quad (16)$$

$$\Delta Q_i = \Delta Q_g + \lambda \Delta N_i \quad (17)$$

$$V_g \gamma_g \frac{d \cdot \Delta H_g}{dt} = F_g (\Delta H_{gi} - \Delta H_g) - a \cdot \Delta N_i \quad (18)$$

$$V_l \gamma_l \frac{d \cdot \Delta C_l}{dt} = F_l (\Delta C_{li} - \Delta C_l) + a \cdot \Delta N_i \quad (19)$$

$$C_{pg} V_g \gamma_g \frac{d \cdot \Delta \theta_g}{dt} = F_g C_{pg} (\Delta \theta_{gi} - \Delta \theta_g) - a \cdot \Delta Q_g \quad (20)$$

$$\begin{aligned} C_{pl} V_l \gamma_l \frac{d \cdot \Delta \theta_l}{dt} &= F_l C_{pl} (\Delta \theta_{li} - \Delta \theta_l) + a \cdot \Delta Q_i \\ &+ (-\Delta H) a \cdot \Delta N_i \end{aligned} \quad (21)$$

基礎方程式に一般性を持たせるために、変数およびパラメータを無次元化することとし、無次元化のため

の基準の量として、

$$\begin{aligned} N &= N_{is} & Q &= Q_{gs} & H &= H_{gis} - H_{gs} \\ C &= C_{is} - C_{lis} & \theta &= \theta_{gis} - \theta_{gs} & T &= (V_g \gamma_g) / F_g \end{aligned}$$

を設け、この基準量で対応する各変数を割ったものを無次元変数とし次のように'を付けて表わす。

$$\begin{aligned} H_i' &= \Delta H_i / H & C_i' &= \Delta C_i / C & \theta_i' &= \Delta \theta_i / \theta \\ N_i' &= \Delta N_i / N & Q_i' &= \Delta Q_i / Q & Q_g' &= \Delta Q_g / Q \\ H_{gi}' &= \Delta H_{gi} / H & C_{li}' &= \Delta C_{li} / C & \theta_{gi}' &= \Delta \theta_{gi} / \theta \\ \theta_{li}' &= \Delta \theta_{li} / \theta & H_g' &= \Delta H_g / H & C_l' &= \Delta C_l / C \\ \theta_g' &= \Delta \theta_g / \theta & \theta_l' &= \Delta \theta_l / \theta & t' &= t / T \end{aligned}$$

パラメータも次のように無次元化する。

$$\begin{aligned} m' &= m (\theta / H) & n' &= n (C / H) & K_g' &= K_g (H / N) \\ K_l' &= K_l (C / N) & h_g' &= h_g (\theta / Q) & h_l' &= h_l (\theta / Q) \\ \lambda' &= \lambda (N / Q) & (-\Delta H)' &= (-\Delta H) (N / Q) \\ k &= (V_l \gamma_l) / (F_l T) & k_2 &= (a Q) / (F_l C_{pl} \theta) \end{aligned}$$

これらを用いて、(12)～(21)式を書き換えると、

$$H_i' = m' \theta_i' + n' C_i' \quad (22)$$

$$N_i' = K_g' (H_g' - H_i') \quad (23)$$

$$N_i' = K_l' (C_i' - C_l') \quad (24)$$

$$Q_g' = h_g' (\theta_g' - \theta_i') \quad (25)$$

$$Q_i' = h_l' (\theta_i' - \theta_l') \quad (26)$$

$$Q_i' = Q_g' + \lambda' N_i' \quad (27)$$

$$\frac{dH_g'}{dt'} = (H_{gi}' - H_g') - N_i' \quad (28)$$

$$k \frac{dC_l'}{dt'} = (C_{li}' - C_l') + N_i' \quad (29)$$

$$\frac{d\theta_g'}{dt'} = (\theta_{gi}' - \theta_g') - Q_g' \quad (30)$$

$$k \frac{d\theta_l'}{dt'} = (\theta_{li}' - \theta_l') + k_2 (\theta_i' + (-\Delta H)' N_i') \quad (31)$$

以下、この無次元化した基礎式に基づいて議論を進めるが、無次元変数を意味する'は表現が繁雑になるので省略する。

5. 伝達関数

(22), (23), (24)式より H_i, N_i を消去すると、

$$K_g (H_g - m \theta_i - n C_i) = K_l (C_i - C_l) \quad (32)$$

(25), (26), (27)式より N_i, Q_g, Q_i を消去すると、

$$h_g (\theta_g - \theta_i) + \lambda K_l (C_i - C_l) = h_l (\theta_i - \theta_l) \quad (33)$$

(32), (33)式を θ_i, C_i についてとくと、

$$\begin{aligned} \theta_i &= \frac{\lambda K_l (K_g H_g + K_l C_l)}{\lambda m K_g K_l} \\ &+ \frac{(K_g n + K_l) (h_g \theta_g - \lambda K_l C_l + h_l \theta_l)}{(h_g + h_l) (K_g n + K_l)} \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} C_i &= \frac{-K_g m (h_g \theta_g - \lambda K_l C_l + h_l \theta_l)}{\lambda m K_g K_l} \\ &+ \frac{(h_g + h_l) (K_g H_g + K_l C_l)}{(h_g + h_l) (K_g n + K_l)} \end{aligned} \quad (35)$$

(34) 式を (25) 式に代入すると、

$$Q_g = h_g \frac{\{\lambda m K_g K_l + (h_g + h_l)(K_g n + K_l)\} \theta_g - \lambda K_l (K_g H_g + K_l C_l) - (K_g n + K_l)(h_g \theta_g + \lambda K_l C_l + h_l \theta_l)}{\lambda m K_g K_l + (h_g + h_l)(K_g n + K_l)} \quad (36)$$

(35) 式を (24) 式に代入すると、

$$N_l = K_l \frac{-K_g m (h_g \theta_g - \lambda K_l C_l + h_l \theta_l) + (h_g + h_l)(K_g H_g + K_l C_l) - \{\lambda m K_g K_l + (h_g + h_l)(K_g n + K_l)\} C_l}{\lambda m K_g K_l + (h_g + h_l)(K_g n + K_l)} \quad (37)$$

この (36), (37) を (28)~(31) に代入すると、

$$\frac{dH_g}{dt} = (H_{gt} - H_g) - (b_1 H_g - b_2 \theta_g - b_3 \theta_l - b_4 C_l) \quad (38)$$

$$k \frac{dC_l}{dt} = (C_{lt} - C_l) + (b_1 H_g - b_2 \theta_g - b_3 \theta_l - b_4 C_l) \quad (39)$$

$$\frac{d\theta_g}{dt} = (\theta_{gt} - \theta_g) - (-b_5 H_g + b_6 \theta_g - b_7 \theta_l + b_8 C_l) \quad (40)$$

$$k \frac{d\theta_l}{dt} = (\theta_{lt} - \theta_l) + k_2 (-b_5 H_g + b_6 \theta_g - b_7 \theta_l + b_8 C_l) + k_3 (b_1 H_g - b_2 \theta_g - b_3 \theta_l - b_4 C_l) \quad (41)$$

$$\text{ただし, } k_3 = k_2(\lambda + (-\Delta H)) \quad b_1 = \frac{1}{z} \left(\frac{1}{h_g} + \frac{1}{h_l} \right)$$

$$b_2 = \frac{1}{z} \cdot \frac{n}{h_l} \quad b_3 = \frac{1}{z} \cdot \frac{m}{h_g} \quad b_4 = \frac{1}{z} \left(\frac{1}{h_g} + \frac{1}{h_l} \right) n$$

$$b_5 = \frac{1}{z} \cdot \frac{\lambda}{h_l} \quad b_6 = \frac{1}{z} \left(\frac{\lambda m}{h_l} + \frac{n}{K_l} + \frac{1}{K_g} \right) \quad b_7 = \frac{1}{z} \left(\frac{n}{K_l} + \frac{1}{K_g} \right)$$

$$b_8 = \frac{1}{z} \cdot \frac{\lambda n}{h_l} \quad z = \frac{\lambda m}{h_g h_l} + \left(\frac{1}{h_g} + \frac{1}{h_l} \right) \left(\frac{1}{K_g} + \frac{1}{K_l} \right)$$

(38)~(41) 式をラプラス変換し、初期値をゼロとおきマトリクスで表示すれば、

$$\begin{bmatrix} H_{gt}(s) \\ \theta_{gt}(s) \\ \theta_{lt}(s) \\ C_{lt}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s+1+b_1 & -b_2 & -b_3 & -b_4 \\ -b_5 & s+1+b_6 & -b_7 & b_8 \\ k_2 b_5 - k_3 b_1 & -k_2 b_6 + k_3 b_2 & ks+1+k_2 b_7 + k_3 b_3 & -k_2 b_8 + k_3 b_4 \\ -b_1 & b_2 & b_3 & ks+1+b_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_g(s) \\ \theta_g(s) \\ \theta_l(s) \\ C_l(s) \end{bmatrix} \quad (42)$$

したがって、右辺の係数マトリクスの逆マトリクスを求め、 $\mathbf{G}(s)$ とすれば、

$$\begin{bmatrix} H_g(s) \\ \theta_g(s) \\ \theta_l(s) \\ C_l(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & g_{12}(s) & g_{13}(s) & g_{14}(s) \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) & g_{23}(s) & g_{24}(s) \\ g_{31}(s) & g_{32}(s) & g_{33}(s) & g_{34}(s) \\ g_{41}(s) & g_{42}(s) & g_{43}(s) & g_{44}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{gt}(s) \\ \theta_{gt}(s) \\ \theta_{lt}(s) \\ C_{lt}(s) \end{bmatrix} = \mathbf{G}(s) \begin{bmatrix} H_{gt}(s) \\ \theta_{gt}(s) \\ \theta_{lt}(s) \\ C_{lt}(s) \end{bmatrix} \quad (43)$$

この 4×4 マトリクスが、この系の伝達マトリクスで、 g_{ij} ($i=1, \dots, 4, j=1, \dots, 4$) はその要素を示し、詳細は文末の付録に示す。一般に対角線上に位置する伝達要素は、

$$\frac{e_3 s^3 + e_2 s^2 + e_1 s + e_0}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}$$

の形となり、他の要素は次の形をとる。

$$\frac{e_2 s^2 + e_1 s + e_0}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}$$

Fig. 3 は次の数値例についてアナログ計算機を用

Fig. 3 Step responses of the dehumidification process

いて、ステップ応答を計算したものである。この数値例は、横浜国大冷暖房研究設備として設置されている塩化リチウム脱湿装置について考えたものである。

$m=0.26, n=0.0036, K_g=3.92, K_l=0.305, h_g=4.08, h_l=40.8, \lambda=2.60, (-\Delta H)=0.289, k=43.5, k_2=0.127$

この例では、相互干渉の影響が Fig. 3 (b), (c), (e), (i), (n), (o) に特に顕著に現われている (相互干渉がなければ、これらの出力はゼロになる)。

6. 熱移動と物質移動の相互干渉

気液接触装置の動特性は前述の伝達マトリクスで表わされたが、ここでは動特性の別の表現であるブロック線図を描き、熱移動と物質移動の相互干渉を詳細に検討する。(22)~(31)式を用いてブロック線図を描くと Fig. 4 になる。

この図の上半分は物質移動を示し、下半分は熱移動を示しており、互いに3つの経路によって結ばれている。熱移動の物質移動に対する干渉は、下から上へ向かう経路のパラメータであ

Fig. 4 Block diagram of the dehumidification process. 気液平衡関係の温度依存性 m により、逆に、物質移動の熱移動に対する干渉は上から下へ向かう経路の凝縮熱 λ ，溶解および希釈熱 $(-\Delta H)$ に依存しており、この干渉は一方的でなくて、相互に影響を及ぼしている。

したがって、一般には熱移動と物質移動を分離しては扱い得ず、4 入力-4 出力系として取扱わなければならない。

6.1 熱移動のみに注目するとき

流入流体の湿度および濃度が一定で、温度入力だけが変動する場合を考えよう。 $H_{gi}(t) = C_{ui}(t) = 0$ として、Fig. 4 を等価変換すると、Fig. 5 になり、単なる熱交換とは異なることがわかる。

たとえ、入口の湿度、濃度変化がなくても、熱移動にともなって、物質移動が起こり、これが再度、熱移動に影響を及ぼすのである。

この熱移動にともなって起こる物質移動の存在による影響は、Fig. 5 のブロック線図上で太線によって示してある。

Fig. 5 Influence of mass transfer to heat transfer

Fig. 5 における G_1, A, B, C, D は次式で表わされる。

$$G_1 = \frac{mK_gK_l(h_g+h_l)(s+1)}{[K_l(h_l+h_g) + nK_g(h_l+h_g) + m\lambda K_gK_l]ks^2} \cdot \frac{(ks+1)}{+[K_l(h_l+h_g) + nK_g(h_l+h_g) + m\lambda K_gK_l]}$$

$$+ K_gK_l(h_g+h_l)](k+s) + [K_l(h_l+h_g) + nK_g(h_l+h_g) + m\lambda K_gK_l + 2K_gK_l(h_l+h_g)]$$

$$A = \frac{1/h_g}{1/h_g + 1/h_l}, \quad B = \frac{1/h_l}{1/h_g + 1/h_l}, \quad C = (-\Delta H) + \frac{\lambda/h_g}{1/h_g + 1/h_l}, \quad D = \frac{\lambda/h_l}{1/h_g + 1/h_l}$$

6.2 物質移動のみに注目するとき

流入流体の温度が一定で、湿度および濃度のみが変動する場合を考えよう。 $\theta_{gi}(t) = \theta_{li}(t) = 0$ として、Fig. 4 を整理すると Fig. 6 となり、熱移動による影響は太線で示した G_2 のブロックによって起こる。

$$G_2 = \frac{m[k\lambda s^2 + \{(k+k_h g + k_2 h_l + 1)\lambda + k h_l(-\Delta H)\}s]}{k(h_g+h_l)s^2 + [(k+1)(h_g+h_l) + (k+k_2)h_g h_l]s + (1+h_g)\{\lambda + (-\Delta H)k_2 h_l + \lambda\} + [(h_g+h_l) + (k_2+1)h_g h_l]}$$

Fig. 6 Influence of heat transfer to mass transfer

Fig. 6 をさらに等価変換すると、Fig. 7 となり、総括物質移動係数の形で、熱移動による影響を論ずることができる。

Fig. 7 Influence of heat transfer to mass transfer

Fig. 8 Frequency characteristics of over-all mass transfer

$$\text{総括物質移動係数 } G_k(s) = \frac{1}{1/K_g + n/K_l + G_2(s)}$$

Fig. 8 は前の数値例について、総括物質移動係数を計算したものである。この総括物質移動係数は、定数とはならず、伝達周波数 ω の関数となる。

$1/K_g + n/K_l \gg G_2$ が成立つ周波数帯においてのみ熱移動の影響を無視することが可能になる。

7. ま と め

気液接触装置の基礎式を誘導し、ある平衡状態の近傍での微小変化に対する動特性を検討した。

熱移動と物質移動の相互干渉は、気液平衡関係の温度依存性 m 、水の凝縮熱 λ 、溶解および希釈熱 ($-\Delta H$) によって起こることが明白になった。熱移動の物質移動に対する干渉は、Fig. 4 に示したように m に依存し、逆に物質移動の熱移動に対する干渉は λ と ($-\Delta H$) に依存している。

また、入口温度が一定で、湿度および濃度のみが変動する場合には、総括物質移動係数の形で、干渉を論ずることができ、総括物質移動係数は λ および ($-\Delta$

H) の影響を受けて一定値とはならず、伝達周波数 ω の関数となることがわかった。熱移動の影響を無視しうかどうかの判定にはこれを用いると便利であろう。

しかし、一般には、熱移動と物質移動を切離しては扱い得ず、4 入力-4 出力系として取扱わなければならない。

文 献

- 1) T. Takamatsu, M. Hiraoka, K. Tanaka: "Simultaneous heat and mass transfer between gaseous and liquid phase" Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 7, 621/630 (1964)
- 2) 東畑平一郎・山田豊一・中田常雄・坂垣浩正: "多孔板を用いた塩化リチウム水溶液による減湿について" 化学工学, 28-10, 832/835 (1964)
- 3) Arnold Wexler: "Measurement and Control in science and industry", Reinhold publishing Co., Vol. 1~4 (1964)
- 4) 工業計測技術大系編集委員会編: "湿度水分測定", (1965-日刊工業)
- 5) 吉田文武・森 芳郎編: "詳論化学工学II" 朝倉書店, (1967)

□ 付 録 □

(43) 式の伝達マトリクスの各要素は次のものである。

$$\begin{aligned} g_{11}(s) &= [k^2 s^3 + k \{ (1+b_6)k + (2+k_2b_7+k_3b_3+b_4) \} s^2 + \{ k(2+k_2b_7+k_3b_3+b_4+k_2b_4b_7+k_3b_2b_7-b_2b_8) \\ &\quad + (1+k_2b_7+k_3b_3+b_4+k_2b_4b_7+k_2b_3b_8) \} s + (1+b_6+b_4+b_4b_6+k_2b_7+k_2b_4b_7+k_3b_3+k_3b_3b_6+k_2b_3b_8+k_3b_2b_7 \\ &\quad - b_2b_8)] / |A| \\ g_{12}(s) &= [k^2 b_2 s^2 + k(2b_2+k_2b_2b_7+k_2b_3b_8) s + (b_2+k_2b_2b_7+k_2b_3b_8)] / |A| \\ g_{13}(s) &= [k b_3 s^2 + \{ (b_3+b_2b_7+b_3b_8)k + b_3 \} s + (b_3+b_2b_7+b_3b_8)] / |A| \\ g_{14}(s) &= [k b_4 s^2 + \{ (b_4+b_4b_6-b_2b_8)k + b_4+k_2b_4b_7+k_2b_3b_8 \} s + (b_4+b_4b_6+k_2b_4b_7+k_2b_3b_8-b_2b_8)] / |A| \\ g_{21}(s) &= [k^2 b_5 s^2 + k(2b_5+k_3b_3b_5+b_4b_5+k_3b_1b_7-b_1b_8) s + (b_5+k_3b_3b_5+b_4b_5+k_3b_1b_7-b_1b_8)] / |A| \\ g_{22}(s) &= [k^2 s^3 + k \{ (1+b_1)k + (2+b_4+k_2b_7+k_3b_3) \} s^2 + \{ k(2+2b_1+b_4+k_2b_7+k_3b_3+k_2b_1b_7+k_2b_3b_8) \\ &\quad + (1+k_2b_7+k_3b_3+b_4+k_2b_4b_7+k_2b_3b_8) \} s + (1+k_2b_7+k_3b_3+b_1+k_2b_1b_7+b_4+k_2b_4b_7+k_2b_3b_8+k_2b_3b_5)] / |A| \\ g_{23}(s) &= [k b_7 s^2 + \{ (b_7+b_1b_7+b_3b_8)k + (b_7+b_4b_7+b_3b_8) \} s + (b_7+b_1b_7+b_3b_8+b_4b_7+b_3b_8)] / |A| \\ g_{24}(s) &= [-k b_8 s^2 - \{ (b_8+b_1b_8-b_4b_5) + b_8+k_3b_3b_8+k_3b_4b_7 \} s - (k_3b_4b_7-b_4b_5+b_8+b_1b_8+k_3b_3b_8)] / |A| \\ g_{31}(s) &= [k(k_3b_1-k_2b_5) s^2 + \{ k(k_3b_1-k_3b_1b_6-k_3b_2b_5-k_2b_5) + (k_3b_1-k_2b_5+k_2b_1b_8-k_2b_4b_5) \} s + (k_3b_1-k_2b_5+k_3b_1b_6 \\ &\quad - k_3b_2b_5+k_2b_1b_8-k_2b_4b_5)] / |A| \\ g_{32}(s) &= [k(k_3b_2-k_2b_6) s^2 + \{ (k_2b_6-k_3b_2+k_2b_1b_6-k_2b_2b_5)k + (k_2b_6+k_2b_4b_6-k_3b_2-k_2b_2b_8) \} s + (k_3b_2-k_2b_6+k_2b_2b_5 \\ &\quad - k_2b_1b_6-k_2b_4b_6)] / |A| \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
g_{33}(s) &= [ks^3 + \{k(2+b_1+b_6) + 1 + b_4\}s^2 + \{k(1+b_1+b_6+b_1b_6-b_2b_5) + (2+b_1+b_6+2b_4+b_4b_6-b_2b_8)\}s + (1+b_1 \\
&\quad + b_6+b_1b_6+b_4+b_4b_6-b_2b_8-b_2b_5)]/|A| \\
g_{34}(s) &= [-(-k_2b_8+k_3b_4)s^2 - (-2k_2b_8-k_2b_1b_8+2k_3b_4+k_3b_4b_6-k_3b_2b_8+k_2b_4b_5)s - (-k_2b_8-k_2b_1b_8+k_3b_4+k_3b_4b_6 \\
&\quad -k_3b_2b_8+k_2b_4b_5)]/|A| \\
g_{41}(s) &= [kb_1s^2 + \{(b_1+b_1b_6-b_2b_5)k + (b_1+k_2b_1b_7+k_2b_3b_5)\}s + (b_1+b_1b_6-b_2b_5+k_2b_1b_7+k_2b_3b_5)]/|A| \\
g_{42}(s) &= [-kb_2s^2 - (b_2+k_2b_2b_7+k_2b_3b_6)s - (b_2+k_2b_2b_7+k_2b_3b_6)]/|A| \\
g_{43}(s) &= [-b_3s^2 - (2b_3+b_3b_6+b_2b_7)s - (b_3+b_3b_6+b_2b_7)]/|A| \\
g_{44}(s) &= [ks^3 + \{k(2+b_1+b_6) + (1+k_2b_7+k_3b_3)\}s^2 + \{k(1+b_1+b_6+b_1b_6) + (2+b_1+b_6+2k_2b_7+k_2b_1b_7+2k_3b_3 \\
&\quad + k_3b_3b_6+k_2b_2b_7+k_2b_3b_5)\}s + (1+b_1+b_6+b_1b_6+k_2b_7+k_2b_1b_7+k_3b_3+k_3b_3b_6+k_3b_2b_7-b_2b_5+k_2b_3b_5)]/|A| \\
|A| &= k^2s^4 + [k^2(2+b_1+b_6) + k(2+b_4+k_3b_3+k_2b_7)]s^3 + [k^2(1+b_1+b_6+b_1b_6-b_2b_5) + k\{(2b_3+b_3b_6+b_2b_7)k_3 + (2b_7 \\
&\quad + b_1b_7+b_3b_5)k_2 + (2b_4+b_4b_6+b_2b_8+4+2b_1+2b_6)\} + b_3k_3 + (b_7+b_4b_7-b_3b_8)k_2 + 1 + b_4]s^2 + [k\{(b_3+b_3b_6 \\
&\quad + b_2b_7)k_3 + (b_7+b_1b_7+b_3b_5)k_2 + (b_4+b_4b_6+b_2b_8+2+2b_1+2b_6+2b_1b_6-2b_2b_5)\} + \{(2b_3+b_3b_6+b_2b_7)k_3 \\
&\quad + (2b_7+b_1b_7+b_3b_5+2b_4b_7-2b_3b_8)k_2 + (2b_4+b_4b_6+b_2b_8+2+b_1+b_6)\}]s + [(b_3+b_3b_6+b_2b_7)k_3 + (b_7+b_1b_7 \\
&\quad + b_3b_5+b_4b_7-b_3b_8)k_2 + (b_4+b_4b_6+b_2b_8+1+b_1+b_6+b_1b_6-b_2b_5)]
\end{aligned}$$