蒸 発 缶 の 動 特 性†

松 本 幸 生

横浜国立大学工業教員養成所 横浜市区南区大岡町

(昭和 43 年 2 月 7 日受付)

Dynamic Analysis of Evaporators

Yukio MATSUMOTO

(Training Institute for Engineering Teachers of Yokohama National University, Yokohama)

(Received February 7, 1968)

Dynamic analysis of natural and forced circulation evaporators is presented in this paper.

Basic differential equations are given which describe the dynamic properties of evaporators by taking into consideration the mass and energy balances of solution, the material balance of solute, etc.. These equations are linearized and Laplace transformed and matrix transfer function is obtained to show dynamic behavior between several inputs and outputs.

As a numerical example, step responses of density, temperature, drum pressure and solution level for condenser flow rate and feed rate variations, etc. are compared in an evaporator of caustic soda.

1. 緒 言

ある濃度の溶液を濃縮して所要の濃度の溶液をうるプロセスは工学プロセスの中で基礎的なものの1つであるが、その自動制御に関連して動特性を検討した論文はきわめて少ない²⁾。筆者は基本となる単一効用缶をとり上げ、まず強制循環式で物質収支、エネルギー収支から基礎方程式を導き、これらを定常状態付近で近似的に線形化して動特性をしらべ³⁾、さらに自然循環式⁴⁾とも比較してみた。動特性は伝達関数で示したが、さらにある数値計算例としてカ性ソーダ濃縮プロセスを例にとり、凝縮器水量、溶液供給量などにステップ変化を与えたときの缶内溶液濃度、温度、缶内蒸気圧力、液位の過渡応答を示した。

2. 記 号

A : 蒸発缶断面積 [m^2], F : 伝熱面積 [m^2], H : 蒸発缶全高さ [m], h_i : 供給溶液エンタルピ [kcal/kg], h_l : 缶内溶液エンタルピ [kcal/kg], h_l' : 熱交換器出口における溶液のエンタルピ [kcal/kg], h_o : 缶内蒸気エンタルピ [kcal/kg], j : 凝縮器水量 [kg/mn], $k_1 \sim k_{14}$: 定常状態付近の微小変化に対する係数, m_i :

供給溶液濃度 [%], m_l : 缶内溶液濃度 [%], m_l' : 熱交換器出口における溶液濃度 [%], p_o : 缶内蒸気圧力 [kg/cm^2], p_{va} : 缶内溶液蒸気圧 [kg/cm^2], q : 加熱量 [kcal/mn], t : 時間 [mn], U_B : 総括伝熱係数 [$\text{kcal/mn m}^2\text{°C}$], w_e : 蒸発量 [kg/mn], w_i : 溶液供給量 [kg/mn], w_o : 溶液取出量 [kg/mn], w_p : 蒸気取出量 [kg/mn], w_r : 溶液循環量 [kg/mn], x : 熱交換器出口における蒸気発生割合, y : 液位 [m], s : ラプラス演算子, θ_h : 加熱蒸気温度 [°C], θ_i : 供給溶液温度 [°C], θ_l : 缶内溶液温度 [°C], ρ_l : 缶内溶液密度 [kg/m^3], ρ_o : 缶内蒸気密度 [kg/m^3]

3. 動 特 性 解 析

蒸発、濃縮の過程は相当複雑であるから解析の便宜上、まづつぎの諸点を仮定する。

- 缶内溶液は完全に攪拌 (かくはん) されている
- 溶液の導管、ポンプなどにおける熱損失はない
- 熱交換器は点熱源とする
- 缶体の熱容量を無視する。また缶体から外部へ熱は逃げないとする
- 蒸気空間に溶質は含まれない

3.1 強制循環の場合

Fig. 1 (a) の強制循環式の蒸発缶について基礎方程式を求めればつぎのようになる。

† 第1回計測自動制御学会講演会で発表 (昭 37・10・17)

(a) forced circulation evaporator
(b) natural circulation evaporator

Fig. 1

溶液の物質収支；

$$\frac{d}{dt}\{Ay\rho_i\} = (1-x)(w_i + w_r) - w_r - w_0 - w_e \quad (1)$$

溶液のエネルギー収支；

$$\frac{d}{dt}\{Ay\rho_i h_i\} = (1-x)(w_i + w_r)h_i' - w_r h_i - w_0 h_i - w_e h_v \quad (2)$$

溶質の物質収支；

$$\frac{d}{dt}\{Ay\rho_i m_i\} = (1-x)(w_i + w_r)m_i' - w_r m_i - w_0 m_i \quad (3)$$

蒸気の物質収支；

$$\frac{d}{dt}\{A(H-y)\rho_v\} = x(w_i + w_r) - w_p + w_e \quad (4)$$

熱交換器におけるエネルギー収支；

$$q = F U_B (\theta_h - \theta_i) = (1-x)(w_i + w_r)h_i' + x(w_i + w_r)h_v - w_i h_i - w_r h_i \quad (5)$$

熱交換器における溶質の物質収支；

$$(1-x)(w_i + w_r)m_i' = w_i m_i + w_r m_i \quad (6)$$

さて定常状態からの微小変化に注目するものとし、(1), ..., (6) 式における各変数の定常値を添字 s をつけて $h_{is}, h_{is}', k_{os}, m_{is}, m_{is}', w_{es}, w_{is}, w_{os}, w_{ps}, w_{rs}, x_s, y_s, \theta_{hs}, \theta_{is}, \rho_{is}, \rho_{vs}$ で示し、微小変化分については各変数に Δ をつけて $\Delta h_i, \Delta h_i'$ のように表わすことにする。また、凝縮器の特性、溶液液面からの蒸発量、溶液および蒸気の状態方程式などについては各種数表から (7)~(9) 式の関係式をうる。

凝縮器の特性；

$$\Delta j = k_1 \Delta \left(\frac{w_p}{p_v} \right) \quad (7)$$

蒸発量；

$$\Delta w_e = k_2 (\Delta p_{va} - \Delta p_v) \quad (8)$$

溶液および蒸気の状態方程式；

$$\left. \begin{aligned} \Delta h_i' &= k_3 \Delta m_i' + k_4 \Delta p_v \\ \Delta h_i &= k_5 \Delta m_i + k_6 \Delta \theta_i \\ \Delta h_i &= k_7 \Delta m_i + k_8 \Delta \theta_i \\ \Delta \rho_i &= k_9 \Delta m_i + k_{10} \Delta \theta_i \\ \Delta h_v &= k_{11} \Delta p_v \\ \Delta \rho_v &= k_{12} \Delta p_v \\ \Delta p_{va} &= k_{13} \Delta m_i + k_{14} \Delta \theta_i \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

以上の諸式を用いて $\Delta h_i, \Delta h_i', \Delta h_v, \Delta m_i', \Delta p_{va}, \Delta w_i, \Delta w_p, \Delta x, \Delta \rho_i, \Delta \rho_v$ の各変数を消去し、 $\Delta j, \Delta m_i, \Delta w_i, \Delta w_0, \Delta w_r, \Delta \theta_i, \Delta \theta_h$ を独立変数、 $\Delta m_i, \Delta p_v, \Delta y, \Delta \theta_i$ を従属変数としてこれら両者の関係をラプラス演算子 s を含む行列の形で求め動特性を表わすことにする。そのためにまず (1), ..., (6) 式を定常状態付近で近似的に線形化し、これらに (7)~(9) 式の関係式を代入したものについて $t / \frac{AH\rho_{is}}{w_{os}} = \tau$ の置換を行ない、さらに各変数については微小変化分を定常値で割って、

$$\frac{\Delta m_i}{m_{is}} = \tilde{m}_i, \frac{\Delta \theta_i}{\theta_{is}} = \tilde{\theta}_i, \frac{\Delta y}{y_s} = \tilde{y}, \frac{\Delta j}{j_s} = \tilde{j}, \frac{\Delta \theta_h}{\theta_{hs}} = \tilde{\theta}_h, \frac{\Delta m_i}{m_{is}} = \tilde{m}_i, \frac{\Delta \theta_i}{\theta_{is}} = \tilde{\theta}_i, \frac{\Delta w_i}{w_{is}} = \tilde{w}_i, \frac{\Delta w_r}{w_{rs}} = \tilde{w}_r, \frac{\Delta w_0}{w_{os}} = \tilde{w}_0$$

で示すことにすれば、これら各変数の間に (10), ..., (13) 式の関係がえられる。

$$\left(a \frac{d}{d\tau} + b \right) \tilde{m}_i + \left(c \frac{d}{d\tau} + e \right) \tilde{\theta}_i + f \tilde{p}_v + g \frac{d}{d\tau} \tilde{y} = \alpha \tilde{\theta}_h + \beta \tilde{m}_i + \gamma \tilde{\theta}_i + \delta \tilde{w}_i + \varepsilon \tilde{w}_r - \tilde{w}_0 \quad (10)$$

$$\left(h \frac{d}{d\tau} + i \right) \tilde{m}_i + \left(k \frac{d}{d\tau} + l \right) \tilde{\theta}_i + m \tilde{p}_v = \zeta \tilde{\theta}_i + \eta \tilde{m}_i + \lambda \tilde{\theta}_i + \mu \tilde{w}_i + \nu \tilde{w}_r \quad (11)$$

$$\left\{ g \frac{d}{d\tau} + (1-b) \right\} \tilde{m}_i - e \tilde{\theta}_i - f \tilde{p}_v = -\alpha \tilde{\theta}_h + (\xi - \beta) \tilde{m}_i - \gamma \tilde{\theta}_i + (\xi - \delta) \tilde{w}_i - \varepsilon \tilde{w}_r \quad (12)$$

$$-b \tilde{m}_i - e \tilde{\theta}_i + \left\{ n \frac{d}{d\tau} + (p-f) \right\} \tilde{p}_v + r \frac{d}{d\tau} \tilde{y} = \tilde{\sigma} j - \alpha \tilde{\theta}_h - \beta \tilde{m}_i - \gamma \tilde{\theta}_i + \varphi \tilde{w}_i - \varepsilon \tilde{w}_r \quad (13)$$

ただし式中の $a, b, c, e, f, g, h, i, k, l, m, n, p, r$ および $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta, \eta, \lambda, \mu, \nu, \xi, \sigma, \varphi$ については Table 1 に示す。

(10), ..., (13) 式について初期値を 0 としてラプラス変換を行なえば、これらをまとめて (14) 式のように表わすことができる。

$$\begin{bmatrix} as+b & cs+e & f & gs \\ hs+i & ks+l & m & 0 \\ gs+(1-b) & -e & -f & 0 \\ -b & -e & ns+(p-f) & rs \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{m}_i \\ \tilde{\theta}_i \\ \tilde{p}_v \\ \tilde{y} \end{bmatrix}$$

	forced circulation	natural circulation
a		$\frac{k_9 m_{1s}}{\rho_{1s}} \frac{y_s}{H}$
b	$\frac{k_2 k_{13} m_{1s}}{w_{0s}} - \frac{w_{rs}}{w_{0s}} \frac{(k_3 - k_5) m_{1s}}{k_3 m_{1s}' + (h_{vs} - h_{1s}')}$	$\frac{k_2 k_{13} m_{1s}}{w_{0s}}$
c		$\frac{k_{10} \theta_{1s}}{\rho_{1s}} \frac{y_s}{H}$
e	$\frac{k_2 k_{14} \theta_{1s}}{w_{0s}} + \frac{w_{rs}/w_{0s} \cdot k_6 \theta_{1s} - FU_B \theta_{1s}/w_{0s}}{k_3 m_{1s}' + (h_{vs} - h_{1s}')}$	$\frac{k_2 k_{14} \theta_{1s}}{w_{0s}}$
f	$-\frac{k_2 p_{vs}}{w_{0s}} - \frac{w_{is} + w_{rs}}{w_{0s}} \frac{\{k_4(1 - x_s) + k_{11} x_s\} p_{vs}}{k_3 m_{1s}' + (h_{vs} - h_{1s}')}$	$-\frac{k_2 p_{vs}}{w_{0s}}$
g		$\frac{y_s}{H}$
h		$\frac{k_5 m_{1s}}{h_{vs}} \frac{y_s}{H}$
i	$\left(1 - \frac{h_{1s}}{h_{vs}}\right) \frac{k_2 k_{13} m_{1s}}{w_{0s}} + \frac{k_5 m_{1s}}{h_{vs}} - \left(1 - \frac{h_{1s}}{h_{vs}}\right) \frac{w_{rs}}{w_{0s}} \frac{(k_3 - k_5) m_{1s}}{k_3 m_{1s}' + (h_{vs} - h_{1s}')}$	$\left(1 - \frac{h_{1s}}{h_{vs}}\right) \frac{k_2 k_{13} m_{1s}}{w_{0s}} + \frac{k_5 m_{1s}}{h_{vs}}$
k		$\frac{k_6 \theta_{1s}}{h_v} \frac{y_s}{H}$
l	$\left(1 - \frac{h_{1s}}{h_{vs}}\right) \frac{k_2 k_{14} \theta_{1s}}{w_{0s}} + \frac{k_6 \theta_{1s}}{h_{vs}} + \left(1 - \frac{h_{1s}}{h_{vs}}\right) \frac{w_{rs}}{w_{0s}} \frac{k_6 \theta_{1s}}{k_3 m_{1s}' + (h_{vs} - h_{1s}')} + \frac{FU_B \theta_{1s}}{w_{0s} h_{vs}} \frac{k_3 m_{1s}' - (h_{1s}' - h_{1s})}{k_3 m_{1s}' + (h_{vs} - h_{1s}')}$	$\left(1 - \frac{h_{1s}}{h_{vs}}\right) \frac{k_2 k_{14} \theta_{1s}}{w_{0s}} + \frac{k_6 \theta_{1s}}{h_{vs}} + \frac{FU_B \theta_{1s}}{w_{0s} h_{vs}}$
m	$-\left(1 - \frac{h_{1s}}{h_{vs}}\right) \frac{k_2 p_{vs}}{w_{0s}} + \frac{w_{is}}{w_{0s}} \frac{k_{11} p_{vs}}{h_{vs}} - \left(1 - \frac{h_{1s}}{h_{vs}}\right) \frac{w_{is} + w_{rs}}{w_{0s}} \frac{(1 - x_s) k_4 p_{vs}}{k_3 m_{1s}' + (h_{vs} - h_{1s}')} + \frac{w_{is} + w_{rs}}{w_{0s}} \frac{x_s k_{11} p_{vs}}{h_{vs}} \frac{k_3 m_{1s}' - (h_{1s}' - h_{1s})}{k_3 m_{1s}' + (h_{vs} - h_{1s}')}$	$-\left(1 - \frac{h_{1s}}{h_{vs}}\right) \frac{k_2 p_{vs}}{w_{0s}} + \frac{w_{is}}{w_{0s}} \frac{k_{11} p_{vs}}{h_{vs}}$
n		$\frac{k_{12} p_{vs}}{\rho_{1s}} \frac{H - y_s}{H}$
p		$\frac{j_s p_{vs}}{k_1 w_{0s}}$
r		$\frac{\rho_{vs}}{\rho_{1s}} \frac{y_s}{H}$
α	$-\frac{FU_B \theta_{1s}/w_{0s}}{k_3 m_{1s}' + (h_{vs} - h_{1s}')}$	0
β	$\frac{w_{is}}{w_{0s}} \frac{(k_3 - k_7) m_{1s}}{k_3 m_{1s}' + (h_{vs} - h_{1s}')}$	0
γ	$\frac{w_{is}}{w_{0s}} \frac{k_8 \theta_{1s}}{k_3 m_{1s}' + (h_{vs} - h_{1s}')}$	0
δ	$\frac{w_{is}}{w_{0s}} \frac{k_3 m_{1s} + (h_{vs} - h_{1s})}{k_3 m_{1s}' + (h_{vs} - h_{1s}')}$	$\frac{w_{is}}{w_{0s}}$
ε	$\frac{w_{rs}}{w_{0s}} \frac{k_3(m_{1s}' - m_{1s}) - (h_{1s}' - h_{1s})}{k_3 m_{1s}' + (h_{vs} - h_{1s}')}$	0
ζ	$\frac{FU_B \theta_{1s}}{w_{0s} h_{vs}} \frac{k_3 m_{1s}' - (h_{1s}' - h_{1s})}{k_3 m_{1s}' + (h_{vs} - h_{1s}')}$	$\frac{FU_B \theta_{1s}}{w_{0s} h_{vs}}$
η	$\frac{w_{is}}{w_{0s}} \frac{(1 - h_{1s}/h_{vs}) k_3 m_{1s} + k_7 m_{1s}/h_{vs} \cdot \{k_3 m_{1s}' - (h_{1s}' - h_{1s})\}}{h_3 m_{1s}' + (h_{vs} - h_{1s}')}$	$\frac{w_{is}}{w_{0s}} \frac{k_7 m_{1s}}{h_{vs}}$
λ	$\frac{w_{is}}{w_{0s}} \frac{k_8 \theta_{1s}}{h_{vs}} \frac{k_3 m_{1s}' - (h_{1s}' - h_{1s})}{k_3 m_{1s}' + (h_{vs} - h_{1s}')}$	$\frac{w_{is}}{w_{0s}} \frac{k_8 \theta_{1s}}{h_{vs}}$
μ	$\frac{w_{is}}{w_{0s}} \frac{(1 - h_{1s}/h_{vs}) k_3 m_{1s} - (1 - h_{1s}/h_{vs}) \{k_3 m_{1s}' - (h_{1s}' - h_{1s})\}}{k_3 m_{1s}' + (h_{vs} - h_{1s}')}$	$\frac{w_{is}}{w_{0s}} \frac{h_{1s} - h_{1s}}{h_{vs}}$
ν	$-\left(1 - \frac{h_{1s}}{h_{vs}}\right) \frac{w_{rs}}{w_{0s}} \frac{k_3(m_{1s}' - m_{1s}) - (h_{1s}' - h_{1s})}{k_3 m_{1s}' + (h_{vs} - h_{1s}')}$	0
ξ		$\frac{w_{is}}{w_{0s}} \frac{m_{1s}}{m_{1s}}$
σ		$-\frac{j_s p_{vs}}{k_1 w_{0s}}$
φ	$\frac{w_{is}}{w_{0s}} \frac{k_3(m_{1s}' - m_{1s}) - (h_{1s}' - h_{1s})}{k_3 m_{1s}' + (h_{vs} - h_{1s}')}$	0

Table 1 Symbol of Matrix Element

	forced circulation	natural circulation
A [m^2]	1.77	
F [m^2]	50	60
H [m]	5	
h_{is} [kcal/kg]	56	75
h_{is} [kcal/kg]	94	120
h_{is}' [kcal/kg]	111	
h_{qs} [kcal/kg]	617	
j_s [kg/mn]	5 000	
m_{is} [%]	37	
m_{is} [%]	50	
m_{is}' [%]	48.4	
p_{vs} [kg/cm^2]	0.1	
U_B [$\text{kcal/mn m}^2\text{C}$]	19.9	
w_{es} [kg/mn]	15	100
w_{is} [kg/mn]	383	
w_{os} [kg/mn]	283	
w_{ps} [kg/mn]	100	
w_{rs} [kg/mn]	166	
x_s	0.154	
y_s [m]	1	
θ_{hs} [$^{\circ}\text{C}$]	120	143
θ_{is} [$^{\circ}\text{C}$]	50	72
θ_{is} [$^{\circ}\text{C}$]	53	87
ρ_{is} [kg/m^3]	1 500	1 480
ρ_{vs} [kg/m^3]	0.067	
k_1 [kg/cm^2]	5	
k_2 [kg/mn/kg/cm^2]	500	
k_3 [$\text{kcal/kg/\%}$]	3	
k_4 [kcal/kg/kg/cm^2]	120	
k_5 [$\text{kcal/kg/\%}$]	3	
k_6 [$\text{kcal/kg/}^{\circ}\text{C}$]	0.76	
k_7 [$\text{kcal/kg/\%}$]	2	
k_8 [$\text{kcal/kg/}^{\circ}\text{C}$]	0.86	

	forced circulation	natural circulation
k_9 [$\text{kg/m}^3/\%$]	9	
k_{10} [$\text{kg/m}^3/^{\circ}\text{C}$]	-0.65	
k_{11} [kcal/kg/kg/cm^2]	89	
k_{12} [$\text{kg/m}^3/\text{kg/cm}^2$]	0.62	
k_{13} [$\text{kg/cm}^2/^{\circ}\text{C}$]	-0.007 4	
k_{14} [$\text{kg/cm}^2/^{\circ}\text{C}$]	0.004 4	
a	0.060	0.061
b	-0.653	
c	-0.005	-0.008
e	0.162	0.676
f	-0.211	-0.176
g	0.200	
h	0.049	
i	-0.310	-0.283
k	0.013	0.021
l	0.504	1.246
m	-0.174	-0.137
n	0.000	
p	0.353	
r	0.000	
α	-0.647	0.000
β^*	0.077	0.000
γ	-0.089	0.000
δ	1.395	1.352
ε	0.020	0.000
ζ	0.134	0.997
η	0.227	1.162
λ	0.019	0.136
μ	-0.047	-0.099
ν	0.017	0.000
ξ	1.000	
σ	-0.353	
φ	0.002	0.000

Table 2 Numerical value of evaporators

4. 数 値 計 算 例

以上の方法をカ性ソーダ溶液濃縮の場合に適用した数値計算例を示す。

まず、定常状態における溶液および蒸気の実特性値、

定常状態からの微小変動分についての状態方程式の係数などを(1)~(6), (16)~(20)の諸式、蒸気表、溶液に関する数表から求め、さらにこれらをTable 1に代入してえられる値を強制循環式、自然循環式のそれぞれについて比較して示し、Table 2とする。ただ

	forced circulation	natural circulation
$\tilde{m}_i/\tilde{j}$	$\frac{20.00}{s^2+43.33s+236.67}$	$\frac{18.00}{s^2+56.00s+314.00}$
$\tilde{\theta}_i/\tilde{j}$	$\frac{-10.00s-53.33}{s^2+43.33s+236.67}$	$\frac{-6.00s-24.00}{s^2+56.00s+314.00}$
$\tilde{p}_v/\tilde{j}$	$\frac{-30.00s-183.33}{s^2+43.33s+236.67}$	$\frac{-44.00s-264.00}{s^2+56.00s+314.00}$
$\tilde{y}/\tilde{j}$	$\frac{-30.00s-93.33}{s(s^2+43.33s+236.67)}$	$\frac{-28.00s-90.00}{s(s^2+56.00s+314.00)}$
$\tilde{m}_i/\tilde{\theta}_h$	$\frac{3.33s+83.33}{s^2+43.33s+236.67}$	$\frac{92.00}{s^2+56.00s+314.00}$
$\tilde{\theta}_i/\tilde{\theta}_h$	$\frac{16.67s+193.33}{s^2+43.33s+236.67}$	$\frac{42.00s+296.00}{s^2+56.00s+314.00}$
$\tilde{p}_v/\tilde{\theta}_h$	$\frac{53.33s+233.33}{s^2+43.33s+236.67}$	$\frac{52.00s+264.00}{s^2+56.00s+314.00}$
$\tilde{y}/\tilde{\theta}_h$	$\frac{-3.33s^2-113.33s-410.00}{s(s^2+43.33s+236.67)}$	$\frac{2.00s^2-110.00s-466.00}{s(s^2+56.00s+314.00)}$
$\tilde{m}_i/\tilde{m}_s$	$\frac{3.33s+170.00}{s^2+43.33s+236.67}$	$\frac{4.00s+242.00}{s^2+56.00s+314.00}$
$\tilde{\theta}_i/\tilde{m}_s$	$\frac{-3.33s+146.67}{s^2+43.33s+236.67}$	$\frac{-4.00s+74.00}{s^2+56.00s+314.00}$
$\tilde{p}_v/\tilde{m}_s$	$\frac{-13.33s-186.67}{s^2+43.33s+236.67}$	$\frac{-10.00s^2-206.00}{s^2+56.00s+314.00}$
$\tilde{y}/\tilde{m}_s$	$\frac{-26.67s+330.00}{s(s^2+43.33s+236.67)}$	$\frac{-2.00s^2-54.00s+362.00}{s(s^2+56.00s+314.00)}$
$\tilde{m}_i/\tilde{\theta}_s$	$\frac{10.00}{s^2+43.33s+236.67}$	$\frac{12.00}{s^2+56.00s+314.00}$
$\tilde{\theta}_i/\tilde{\theta}_s$	$\frac{3.33s+26.67}{s^2+43.33s+236.67}$	$\frac{6.00s+42.00}{s^2+56.00s+314.00}$
$\tilde{p}_v/\tilde{\theta}_s$	$\frac{6.67s+33.33}{s^2+43.33s+236.67}$	$\frac{8.00s+36.00}{s^2+56.00s+314.00}$
$\tilde{y}/\tilde{\theta}_s$	$\frac{-16.67s-56.67}{s(s^2+43.33s+236.67)}$	$\frac{-16.00s-64.00}{s(s^2+56.00s+314.00)}$
$\tilde{m}_i/\tilde{w}_s$	$\frac{-3.33s-70.00}{s^2+43.33s+236.67}$	$\frac{-2.00s-90.00}{s^2+56.00s+314.00}$
$\tilde{\theta}_i/\tilde{w}_s$	$\frac{3.33s-40.00}{s^2+43.33s+236.67}$	$\frac{-38.00}{s^2+56.00s+314.00}$
$\tilde{p}_v/\tilde{w}_s$	$\frac{3.33s+70.00}{s^2+43.33s+236.67}$	$\frac{2.00s+60.00}{s^2+56.00s+314.00}$
$\tilde{y}/\tilde{w}_s$	$\frac{6.67s^2+313.33s+153.00}{s(s^2+43.33s+236.67)}$	$\frac{6.00s^2+406.00s+2020.00}{s(s^2+56.00s+314.00)}$
$\tilde{m}_i/\tilde{w}_0$	$\frac{0}{s^2+43.33s+236.67}$	$\frac{0}{s^2+56.00s+314.00}$
$\tilde{\theta}_i/\tilde{w}_0$	$\frac{0}{s^2+43.33s+236.67}$	$\frac{0}{s^2+56.00s+314.00}$
$\tilde{p}_v/\tilde{w}_0$	$\frac{0}{s^2+43.33s+236.67}$	$\frac{0}{s^2+56.00s+314.00}$
$\tilde{y}/\tilde{w}_0$	$\frac{-3.33s^2-213.33s-1183.33}{s(s^2+43.33s+236.67)}$	$\frac{-4.00s^2-282.00s-1574.00}{s(s^2+56.00s+314.00)}$

Table 3 Comparison of transfer functions of evaporators

しいずれの場合についても、同一の缶内蒸気圧 (p_v) の下で原液 (濃度 m_i) からえられる製品の濃度 (m_i) ならびに生産量を等しくするように定常状態を定めたため、伝熱面積、供給溶液温度、蒸発量、加熱蒸気温

度などは異なる値を示している。

この場合には伝達関数の分母における係数 g^2kn の値がきわめて小さいので s の最高次が省略され、 $\tilde{m}_i$, $\tilde{\theta}_i$, $\tilde{p}_v$ の特性が自己平衡性をもつ 2 次の伝達関数、 $\tilde{y}$ の

(a) Response of density (m_l), temperature (θ_l), steam pressure (p_v) and level (y) for unit step change of condenser flow rate j .

(c) Response of density (m_l), temperature (θ_l), steam pressure (p_v) and level (y) for unit step change of feed solution density m_i .

特性が積分性をもつ3次の伝達関数で表わされる。

以上の数値を(15)ならびに(25)式に代入し凝縮器水量 $\tilde{j}$, 加熱蒸気温度 $\tilde{\theta}_h$, 供給溶液濃度 $\tilde{m}_i$, 供給溶液温度 $\tilde{\theta}_l$, 溶液供給量 $\tilde{w}_i$, 溶液取出量 $\tilde{w}_o$ を入力, 缶内溶液濃度 $\tilde{m}_l$, 温度 θ_l , 缶内蒸気圧力 p_v , 液位 y を出力とする伝達関数を求めれば Table 3 がえられる。

Table 3 からえられる各入力別のステップ応答を

(b) Response of density (m_l), temperature (θ_l), steam pressure (p_v) and level (y) for unit step change of heating temperature θ_h .

(d) Response of density (m_l), temperature (θ_l), steam pressure (p_v) and level (y) for unit step change of feed solution temperature θ_i .

(e) Response of density (m_l), temperature (θ_l), steam pressure (p_v) and level (y) for unit step change of feed rate w_i .

— : forced circulation
- - - : natural circulation

Fig. 3

示せば Fig. 3(a)~(e) となる。ただし実線が強制循環, 破線が自然循環の場合である。

Fig. 3(a) で凝縮器水量 j が増加すれば缶内の真空度は高まり, これが強制循環の場合には加熱器出口における溶液温度に直接影響を与える。これに対して自然循環の場合には液面からの蒸発が行なわれてはじめて溶液温度は変化するので, その変化の大きさは強制循環より小さい。また缶内の真空度が高まれば蒸発も盛んになるので, 時間の経過とともに液位が一定の割合で変化し続け, 濃度がある一定値に近づくことがわかるが, これらについては強制循環と自然循環の間に大きな差は認められない。

Fig. 3(b) については、加熱蒸気温度 θ_n をかえた場合、強制循環式では加熱器出口における蒸気発生割合 α が直接影響を受けるのに対し、自然循環式では缶内溶液温度がまず変化する。したがって強制循環式では自然循環式にくらべて缶内蒸気圧力の変化は大きく、したがって溶液温度の変化は小さくなる。溶液濃度、液位については (a) と同様で強制循環と自然循環の間に大きな差は認めがたい。

Fig. 3(b) におけるこれらの状況が供給溶液温度 θ_i を変化させた (d) の場合に同様な形であらわれることは興味深い。ただし (d) においては (b) の縦軸の寸法を 5 倍に拡大してある。

また供給溶液濃度 m_i をかえた (c) の場合、溶液供給量 w_i をかえた (e) の場合に溶液温度の応答に逆応答があらわれるのも興味ある点である。

以上に示したのはじゃっかの数値計算例であるが、強制循環、自然循環の間に存在する動特性の差を示している。

5. 結 言

以上の解析はもっとも単純化した場合について行なったものであるが、蒸発、濃縮過程の動特性をかなりよく表現しているといえる。今後はさらに複雑な場合や濃縮過程の最適条件などについても考察したい。なおこの研究に際して元徳山ソーダ株式会社古賀永利氏からカ性ソーダ濃縮に関する資料を頂いたことを深謝する。

終わりに、終始熱心なご指導をいただいた横浜国立大学増淵正美教授に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) K. L. Chien, E. I. Ergin, C. Ling and Allyn Lee : Dynamic Analysis of a Boiler, Trans. ASME, 80, pp. 1809/1819 (1958)
- 2) たとえば、梅谷・郭：混合濃縮器をもつ真空濃縮プロセスの特性，自動制御，3-8, pp 266/271 (1964)
- 3) 増淵・松本：蒸発缶の動特性，計測自動制御学会第 1 回講演会前刷（昭 37・10）
- 4) 松本：自然循環式蒸発缶の動特性，日本機械学会第 40 期学術講演会前刷（昭 38・4）