840. パルサーフィーダー型パルスカラムにおける 軸方向ホールドアップ, (II)

GMDHによるモデル化と分析

池田秀松*, 鈴木篤之**, 清瀬量平**

(1985年 6月3日 受理)

(1985年 12月6日 再受理)

*Axial Holdup in Pulsed Perforated-Plate Column
of Pulser Feeder Type, (II)*

Modelling and Synthesis by GMDH

By Hidematsu IKEDA,
Atsuyuki SUZUKI and Ryohei KIYOSE

In mathematical models for a pulsed perforated-plate column, the dispersed phase holdup has been considered to be uniform throughout the length of the column, but fairly recently it is treated as being nonuniform.

In the previous paper, the axial holdup data were obtained in the dispersed aqueous and the dispersed organic modes. Experimental results showed that the axial holdup data become non-uniform throughout the column. It was also found that both of the plate type and the operation mode affected the axial holdup distribution.

The present work is an attempt to formulate the axial holdup by means of a heuristic self-organization method that provides a nonlinear prediction model of complex system, since the holdup data did not directly show so significant trend as to formulate the axial holdup. The Group Method of Data Handling (GMDH) is used for this purpose. The GMDH can be used for selection and synthesis of input variables concerned with the axial holdup for the pulsed perforated-plate column. The axial holdup data have been successfully correlated and the identification models could be useful in discussing mathematical models.

KEYWORDS: *axial holdup, GMDH, heuristic self-organization method, model, nozzle plate, plate type, pulsed perforated-plate column, sieve plate*

I. 緒 言

前報^①では、物性値との連関では TBP 濃度を、カラム形状との連関では多孔板タイプと多孔板間隔を、また操作条件との連関ではパルス条件、両相の流量比および全流量を変え、分散相を水相とする抽出モードと有機相とする逆抽出モードのミキサセトラ域での両運転モードにおける軸方向ホールドアップの測定結果について報告した。実験で得られたデータは、いずれもパルスカラムのホールドアップは軸方向に分布をも

ち、カラム内で非一様であることが確認されたが、その非線形なふるまいからは軸方向ホールドアップのモデルを同定するには至らなかった。

本報では、前報で得られたデータに複雑な非線形システムを取り扱う場合に有効な発見的自己組織化法を適用して、軸方向ホールドアップのモデルを同定する

* 東京大学 原子力研究総合センター (Res. Center for Nucl. Sci. Technol., Univ. of Tokyo)

** 東京大学 工学部原子力工学科 (Dept. of Nucl. Eng., Fac. of Eng., Univ. of Tokyo)

方法と同定結果について報告する。発見的自己組織化法のアルゴリズムとしては、Ivakhnenko によって提唱された基本的な GMDH (Group Method of Data Handling)⁽²⁾⁽³⁾を使用した。

II. 計算方法および手順

1. 計算方法

パルスカラムにおける軸方向ホールドアップの非一様性は、カラム形状、パルス条件、両相の流量比、全流量、線流速、物性値、多孔板タイプ、運転モードなどの関係で表現できると思われるが、実験結果の非線形なふるまいからはこれらの変数を最適な構造に組み合わせる指針を得るのは困難である。

そこで、本研究ではパルスカラムの軸方向ホールドアップは多変数で構造未知の非線形系とし、実験で得られたデータの入出力関係からモデルの同定を行うことにする。すなわち、あらかじめモデルの構造を決めてそのパラメータを実験データから推定するのではなく、実験データの入出力関係から発見的にモデルの構

造とパラメータの最適な組合わせを GMDH を用いて自己組織化していく計算方法をとることにした。

GMDH は、多変数で物理的・統計的・現象論的な意味において系の構造が不明確かつ非線形であるようなシステムに対し、モデルの同定・予測を行う上で有効な方法のひとつと思われる。この GMDH は“品種改良の仮説”と Rosenblatt のパーセプトロン形の多層構造を特徴として組立てられていて、各層ごとにそれぞれ入出力関係を部分表現としての中間多項式で決定し、発見的規範を用いて次の層への入力を閾値的に自己選択する。層を重ねて計算していくと、品種改良における退化現象と同じく、発見的規範が前層よりも悪くなる層が出てくる。このとき計算を停止し、前層までに計算された中間多項式を最初の層まで次々と遡って代入していくことにより、求めるモデルの完全表現式が得られる。

GMDH を用いてホールドアップを同定する計算アルゴリズムの構造は、以上のことをまとめて Fig. 1 のように構成される。

Fig. 1 Structure of GMDH for determining of axial holdup

本研究で扱うデータでは最も複雑な場合でも第5層で退化したことから、Fig. 1 では第4層までの計算で完全表現式が得られる構造となっている。GMDH の応用例はいくつかあり⁽⁴⁾⁽⁵⁾、また対象とする問題に応じて改訂されてもいる⁽⁶⁾が、ここでは Ivakhnenko による基本的な GMDH を用いた。基本的な GMDH のアルゴリズムの詳細は各文献に譲る。

2. 計算手順

各カラム分率高さにおけるホールドアップ(以下、ローカルホールドアップ)および軸方向ホールドアップのモデル同定は Fig. 1 に従って次の手順で行う。

(1) 入出力関係の表現

a. ローカルホールドアップ同定

$$e_d = F(A, O, u_A, u_O, a, f, \mu, \rho, \sigma, L_0, D_T, \gamma) \quad (1)$$

b. 軸方向ホールドアップ同定

$$\varepsilon_d = F(A, O, u_d, u_o, a, f, \mu, \rho, \sigma, L_o, d, D_r, \gamma, Z) \quad (1')$$

- (2) 入力変数の選択: 第1層への入力変数は(1)式の変数を任意に組合わせた次の15個とする。

$$\begin{aligned} & \frac{A}{O}, \frac{u_d}{af}, \frac{af}{u_c + u_d}, \frac{u_d}{u_c + u_d}, \frac{\Delta\mu}{\mu_d}, \frac{\mu_d}{\mu_c}, \\ & \frac{\Delta\rho}{\rho_d}, \frac{\rho_d}{\rho_c}, \frac{\mu_d^2}{\sigma\Delta\rho L_o}, \frac{\sigma}{\mu_d(u_c + u_d)}, \frac{\sigma}{\mu_d u_d}, \\ & \frac{L_o}{d}, \frac{L_o}{D_r}, \frac{D_r}{d}, \gamma \end{aligned} \quad (2)$$

- (3) 原データの分割: モデルの構造を学習するためのトレーニングデータと、最適な構造を選択するためのチェックングデータとに分ける。ローカルホールドアップ同定では、同定する高さのデータのみを用いて奇数番目をトレーニングデータに、偶数番目をチェックングデータとする。軸方向ホールドアップ同定では、軸方向の10個のデータを1組として使用することから奇数番目の組をトレーニングデータに、偶数番目の組をチェックングデータとする。
- (4) 完全表現式と初等関数の選択: 完全表現式は非線形な定常確率過程の一般的な表現として用いられるボルテラ級数を時間的に離散化した次のKolmogorov-Gaborの多項式を用いる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_d = & a_0 + \sum_i a_{1i} r_i + \sum_j a_{1j} r_j r_j \\ & + \sum_i \sum_j \sum_k a_{1ijk} r_i r_j r_k + \dots \end{aligned} \quad (3)$$

このとき、初等関数は次の2次多項式とする。

a. ローカルホールドアップ同定

$$q_m = a_0 + a_1 r_i + a_2 r_j + a_3 r_i r_j \quad (4)$$

b. 軸方向ホールドアップ同定

$$q_m = a_0 + a_1 r_i Z + a_2 r_j + a_3 r_i r_j Z \quad (4')$$

または、

$$q_m = a_0 + a_1 r_i Z + a_2 r_j Z + a_3 r_i r_j Z^2 \quad (4'')$$

ここに、 $r_i, r_j (i \neq j)$ は入力変数 $r_m (m=1, 2, 3, \dots, 15)$ の任意の2変数の組合せである。また、初等関数の構造は各層における中間多項式の基本的な構造となる。

- (5) 中間多項式の係数決定: 各層における中間多項式の係数、すなわち(4)式右辺の係数 $a_l (l=0, 1, 2, 3)$ はトレーニングデータに基づく2乗平均誤差を最小とするように決定する。第1層においては(5)式を最小とする係数を決定することになる。

$$E_m^2 = (\varepsilon_d - q_m^T)^2, \quad m=1, 2, \dots, 15C_2 \quad (5)$$

計算には最小2乗法を適用した。なお、(5)式における——はサンプル値平均を意味する。

- (6) 中間多項式の選択: ステップ(5)でトレーニングデータに基づいて決定された係数を用いて、チェックングデータに対する中間多項式 q_m^c を作り、予測誤差を計算する。第1層においては

$$PE_m = \{(\varepsilon_d - q_m^c)^2\}^{1/2} \quad (6)$$

を計算することになる。この予測誤差のうち小さい方から順に M 個の中間多項式を採用し、残りは捨てる。本実験によるデータでは最も複雑な場合でも第5層で退化したことから、第1層では $M=10$ 、第2層では $M=3$ 、第3層では $M=2$ 、第4層では $M=1$ とした。

- (7) 計算の繰返し: M 個の予測誤差のうち最小のものが前層の予測誤差より大きくなった場合、すなわち退化したときはステップ(8)へ行く。そうでないときは、採用された M 個の中間多項式を次の層への入力変数とする。

以下ステップ(4)~(7)を繰り返す。

- (8) 計算停止と完全表現式: 計算を停止するとともに、前層までに計算された中間多項式を順次、層を遡って代入することにより、求めるモデルの完全表現式が得られる。

3. モデルの設定

モデルⅠ(ローカルホールドアップ同定): 同定する高さにおけるデータのみを用いて、その高さにのみ適用できるローカルホールドアップのモデル化を行う。入出力関係は(1)式、初等関数は(4)式とする。

モデルⅡ(軸方向ホールドアップ同定): すべてのデータを用いて、任意の高さに適用できる軸方向ホールドアップのモデル化を行う。入出力関係は(1')式、初等関数は(4')式とする。

モデルⅢ(軸方向ホールドアップ同定): モデルⅡに高さの影響をより大きくしたとき。入出力関係は(1'')式、初等関数は(4'')式とする。

Ⅲ. 計算結果および考察

1. モデルの選択

モデルⅠではローカルホールドアップを、モデルⅡとⅢでは軸方向ホールドアップをそれぞれ同定したが、得られた結果からは同一の構造はひとつもないことがわかった。これは、多孔板タイプと運転モードによる流動状態の差異がモデルの構造に大きく効いていることと、ホールドアップの非一様性はカラム位置の

影響をうけることを表わしているといえる。したがって、モデルⅠを用いた方が同定精度の良いことが期待できるし、同定結果もそのことを示しているが、モデルの構造が大きくなることを考慮して、本報ではモデルⅡとⅢのうち、同定精度の良い方を選択してその式とパラメータのみを記述し、他のモデルについては同定結果を示すにとどめる。シーブプレートを用いた抽出モード以外の場合では、モデルⅡとⅢのいずれか同定精度の良い方、すなわち予測誤差の小さい方で十分な追従性が得られている。

モデルの大きさは、第 k 層の構造が採用された($k+1$ 層で退化したとき)とすると、 (2^k-1) 本の式と 2^k 個のパラメータをもつが、重複する部分があるとその分だけ短縮される。

2. ノズルプレート

(1) ノズルダウン

前報で得られた27ケースのデータ⁽⁶⁾を用いて同定した。結果をTable 1とFig. 2(a)~(d)に示す。これらか

らモデルⅢを選択する。モデルⅢは第4層で退化して、

$$\varepsilon_d = F(\mu, \rho, d, D_T, \gamma, Z) \quad (7)$$

が得られた。(7)式を完全表現式で書き直すと、

$$\varepsilon_d = a_{11} + a_{12}p_1^0Z + a_{13}p_2^0Z + a_{14}p_1^0p_2^0Z^2 \quad (8)$$

ここに、

$$p_1^0 = a_{21} + a_{22}q_1^0Z + a_{23}q_2^0Z + a_{24}q_1^0q_2^0Z^2$$

$$p_2^0 = a_{31} + a_{32}q_3^0Z + a_{33}q_4^0Z + a_{34}q_3^0q_4^0Z^2$$

$$q_1^0 = a_{41} + a_{42}r_1^0Z + a_{43}r_2^0Z + a_{44}r_1^0r_2^0Z^2$$

$$q_2^0 = a_{51} + a_{52}r_3^0Z + a_{53}r_1^0Z + a_{54}r_3^0r_1^0Z^2$$

$$q_3^0 = a_{61} + a_{62}r_1^0Z + a_{63}r_4^0Z + a_{64}r_1^0r_4^0Z^2$$

$$q_4^0 = a_{71} + a_{72}r_3^0Z + a_{73}r_4^0Z + a_{74}r_3^0r_4^0Z^2$$

$A =$	8.9389	2.7694	-2.4552	0.0079
	12.3336	-0.9838	0.0291	0.0390
	12.3080	-1.0786	0.1406	0.0384
	31.8916	-175.8188	377.0583	660.5977
	30.5510	-349.9961	60.7676	216.2874
	31.8921	-175.7168	4.5233	7.9272
	31.0354	-254.6621	0.9318	16.0239

Table 1 Selection of arguments for nozzle down

Selection of arguments	Final layer	Prediction error
Model I		
$\varepsilon_d^{0.1} = F\left(\frac{A}{O}, \frac{\Delta\rho}{\rho_A}, \frac{\mu_A}{\mu_o}, \frac{L_o}{D_T}, \frac{D_T}{d}, \frac{u_A}{af}\right)$	3 rd	0.84
$\varepsilon_d^{0.2} = F\left(\frac{\Delta\rho}{\rho_A}, \frac{\sigma}{\mu_A u_A}, \frac{u_A}{u_A + u_o}, \frac{\Delta\mu}{\mu_A}, \frac{\mu_A}{\mu_o}\right)$	3 rd	0.48
$\varepsilon_d^{0.3} = F\left(\frac{u_A}{u_A + u_o}, \frac{\mu_A}{\mu_o}, \frac{A}{O}, \frac{\Delta\rho}{\rho_A}, \frac{\rho_A}{\rho_o}\right)$	3 rd	0.45
$\varepsilon_d^{0.4} = F\left(\frac{\mu_A}{\mu_o}, \frac{D_T}{d}, \frac{\sigma}{\mu_A(u_A + u_o)}\right)$	2 nd	0.23
$\varepsilon_d^{0.5} = F\left(\frac{u_A}{u_A + u_o}, \frac{\Delta\mu}{\mu_A}, \frac{\Delta\rho}{\rho_A}, \frac{\mu_A}{\mu_o}\right)$	3 rd	0.31
$\varepsilon_d^{0.6} = F\left(\frac{A}{O}, \frac{\Delta\mu}{\mu_A}, \frac{\mu_A}{\mu_o}\right)$	2 nd	0.49
$\varepsilon_d^{0.7} = F\left(\frac{\sigma}{\mu_A(u_A + u_o)}, \gamma, \frac{\mu_A^2}{\sigma \Delta\rho L_o}, \frac{L_o}{D_T}\right)$	3 rd	1.07
$\varepsilon_d^{0.8} = F\left(\frac{\mu_A}{\rho_o}, \frac{\mu_A^2}{\sigma \Delta\rho L_o}, \frac{L_o}{d}\right)$	2 nd	0.39
$\varepsilon_d^{0.9} = F\left(\frac{A}{O}, \frac{L_o}{d}\right)$	1 st	1.37
$\varepsilon_d^{1.0} = F\left(\frac{\rho_A}{\rho_o}, \frac{\sigma}{\mu_A(u_A + u_o)}, \frac{\mu_A}{\mu_o}, \frac{\Delta\mu}{\Delta A}\right)$	3 rd	1.39
Model II		
$\varepsilon_d = F\left(\frac{\mu_A}{\mu_o}, \frac{\sigma}{\mu_A(u_A + u_o)}, \frac{\Delta\rho}{\rho_A}, \frac{\rho_A}{\rho_o}, Z\right)$	3 rd	2.80
Model III		
$\varepsilon_d = F\left(\frac{\rho_A}{\rho_o}, \gamma, \frac{\mu_A}{\mu_o}, \frac{D_T}{d}, Z\right)$	3 rd	2.36
$Z = 0.1, 0.2, \dots, 1.0$

(a) ND5

(b) ND15

(c) ND30

(d) ND30L

Fig. 2(a)~(d) Prediction for nozzle down

$$r^0 = \left[\frac{\rho_A}{\rho_o}, \gamma, \frac{\mu_A}{\mu_o}, \frac{D_T}{d} \right]$$

(2) ノズルアップ

前報で得られた16ケースのデータ⁽¹⁾を用いて同定した。結果をTable 2とFig. 3(a), (b)に示す。これらからモデルⅢを選択する。モデルⅢは第2層で退化して、

$$\varepsilon_d = F(u_o, \mu, \sigma, \gamma, Z) \quad (9)$$

が得られた。(9)式を完全表現式で書き直すと、

$$\varepsilon_d = b_{11} + b_{12}r_1^0Z + b_{13}r_2^0Z + b_{14}r_1^0r_2^0Z^2 \quad (10)$$

ここに、

$$b = [22.1151 \quad -0.0027 \quad -67.0813 \quad 0.0146]$$

$$r^0 = \left[\frac{\sigma}{\mu_o u_o}, \gamma \right]$$

3. シーブプレート

(1) 抽出モード

前報で得られた14ケースのデータ⁽¹⁾を用いて同定し

た。結果をTable 3とFig. 4(a), (b)に示す。

これらからモデルⅡを選択する。モデルⅡは第5層で退化して、

$$\varepsilon_d = F(\rho, L_o, d, D_T, Z) \quad (11)$$

が得られた。(11)式を完全表現式で書き直すと、

$$\varepsilon_d = c_{11} + c_{12}g_1^0Z + c_{13}g_2^0 + c_{14}g_1^0g_2^0Z \quad (12)$$

ここに、

$$g_1^0 = c_{21} + c_{22}p_1^0Z + c_{23}p_2^0 + c_{24}p_1^0p_2^0Z$$

$$g_2^0 = c_{31} + c_{32}p_3^0Z + c_{33}p_4^0 + c_{34}p_3^0p_4^0Z$$

$$p_1^0 = c_{41} + c_{42}q_1^0Z + c_{43}q_2^0 + c_{44}q_1^0q_2^0Z$$

$$p_2^0 = c_{51} + c_{52}q_3^0Z + c_{53}q_4^0 + c_{54}q_3^0q_4^0Z$$

$$p_3^0 = c_{61} + c_{62}q_5^0Z + c_{63}q_6^0 + c_{64}q_5^0q_6^0Z$$

$$p_4^0 = p_1^0$$

$$q_1^0 = c_{71} + c_{72}r_1^0Z + c_{73}r_2^0 + c_{74}r_1^0r_2^0Z$$

$$q_2^0 = c_{81} + c_{82}r_3^0Z + c_{83}r_4^0 + c_{84}r_3^0r_4^0Z$$

$$q_3^0 = c_{91} + c_{92}r_4^0Z + c_{93}r_5^0 + c_{94}r_4^0r_5^0Z$$

Table 2 Selection of arguments for nozzle up

Selection of arguments	Final layer	Prediction error
Model I		
$\varepsilon_d^{0.1} = F\left(\frac{u_o}{u_A + u_o}, \frac{L_0}{D_r}, \frac{\sigma}{\mu_o(u_A + u_o)}, \frac{\sigma}{\mu_o u_o}\right)$	2 nd	1.66
$\varepsilon_d^{0.2} = F\left(\frac{A}{O}, \frac{af}{u_A + u_o}, \frac{L_0}{D_r}, \frac{u_o}{u_A + u_o}, \frac{L_0}{d}\right)$	4 th	0.38
$\varepsilon_d^{0.3} = F\left(\frac{af}{u_A + u_o}, \frac{\sigma}{\mu_o(u_A + u_o)}, \frac{\sigma}{\mu_o u_o}, \frac{L_0}{d}\right)$	2 nd	0.67
$\varepsilon_d^{0.4} = F\left(\frac{af}{u_A + u_o}, \frac{\sigma}{\mu_o(u_A + u_o)}, \frac{\mu_o^2}{\sigma \Delta \rho L_0}, \frac{\sigma}{\mu_o u_o}\right)$	2 nd	0.39
$\varepsilon_d^{0.5} = F\left(\frac{af}{u_A + u_o}, \frac{\sigma}{\mu_o(u_A + u_o)}, \frac{\mu_o^2}{\sigma \Delta \rho L_0}, \frac{\sigma}{\mu_o u_o}, \frac{A}{O}, \frac{u_o}{u_A + u_o}\right)$	4 th	0.44
$\varepsilon_d^{0.6} = F\left(\frac{\sigma}{\mu_o u_o}, \frac{L_0}{d}, \frac{L_0}{D_r}\right)$	2 nd	1.18
$\varepsilon_d^{0.7} = F\left(\frac{A}{O}, \frac{\sigma}{\mu_o u_o}, \frac{\mu_o^2}{\sigma \Delta \rho L_0}, \frac{af}{u_A + u_o}, \frac{\sigma}{\mu_o(u_A + u_o)}\right)$	3 rd	0.34
$\varepsilon_d^{0.8} = F\left(\frac{\sigma}{\mu_o u_o}, \frac{L_0}{d}, \frac{\sigma}{\mu_o(u_A + u_o)}, \gamma, \frac{L_0}{D_r}\right)$	3 rd	1.24
$\varepsilon_d^{0.9} = F\left(\frac{\mu_o^2}{\sigma \Delta \rho L_0}, \frac{\sigma}{\mu_o(u_A + u_o)}, \frac{A}{O}, \frac{L_0}{D_r}\right)$	2 nd	2.08
$\varepsilon_d^{1.0} = F\left(\frac{af}{u_A + u_o}, \frac{\sigma}{\mu_o(u_A + u_o)}, \frac{\Delta \rho}{\rho_o}, \frac{\sigma}{\mu_o u_o}\right)$	2 nd	0.88
Model II		
$\varepsilon_d = F\left(\frac{D_r}{d}, \gamma, \frac{\Delta \mu}{\mu_o}, \frac{\Delta \rho}{\rho_o}, \frac{af}{u_A + u_o}, \frac{u_o}{u_A + u_o}, \frac{u_o}{af}, Z\right)$	3 rd	1.97
Model III		
$\varepsilon_d = F\left(\frac{\sigma}{\mu_o u_o}, \gamma, Z\right)$	1 st	1.96
$Z=0.1, 0.2, \dots, 1.0$

(a) NU30

(b) NU30L

Fig. 3 (a), (b) Prediction for nozzle up

Table 3 Selection of arguments of sieve plate for extraction mode

Selection of arguments	Final layer	Prediction error
Model I		
$\varepsilon_d^{0.1} = F\left(\frac{\sigma}{\mu_A(u_A+u_o)}, \frac{L_0}{d}, \frac{\mu_A^2}{\sigma \Delta \rho L_0}\right)$	2 nd	0.52
$\varepsilon_d^{0.2} = F\left(\frac{\sigma}{\mu_A(u_A+u_o)}, \frac{L_0}{d}, \frac{A}{O}, \frac{L_0}{D_T}\right)$	2 nd	0.62
$\varepsilon_d^{0.3} = F\left(\frac{af}{u_A+u_o}, \frac{L_0}{D_T}, \frac{\mu_A^2}{\sigma \Delta \rho L_0}, \frac{\sigma}{\mu_A u_A}\right)$	2 nd	0.45
$\varepsilon_d^{0.4} = F\left(\frac{\mu_A}{u_A+u_o}, \frac{L_0}{d}, \frac{\mu_A^2}{\sigma \Delta \rho L_0}, \frac{L_0}{D_T}\right)$	2 nd	4.98
$\varepsilon_d^{0.5} = F\left(\frac{\mu_A}{u_A+u_o}, \frac{L_0}{D_T}, \frac{A}{O}\right)$	2 nd	1.96
$\varepsilon_d^{0.6} = F\left(\frac{\sigma}{\mu_A(u_A+u_o)}, \frac{L_0}{D_T}\right)$	1 st	2.02
$\varepsilon_d^{0.7} = F\left(\frac{\sigma}{\mu_A u_A}, \frac{L_0}{d}, \frac{\Delta \mu}{\mu_A}, \frac{\mu_A}{\mu_o}\right)$	2 nd	3.87
$\varepsilon_d^{0.8} = F\left(\frac{\Delta \rho}{\rho_A}, \frac{\mu_A^2}{\sigma \Delta \rho L_0}, \frac{D_T}{d}\right)$	2 nd	0.94
$\varepsilon_d^{0.9} = F\left(\frac{A}{O}, \frac{\sigma}{\mu_A u_A}, \frac{\mu_A^2}{\sigma \Delta \rho L_0}\right)$	2 nd	1.23
$\varepsilon_d^{1.0} = F\left(\frac{A}{O}, \frac{L_0}{d}, \frac{\sigma}{\mu_A(u_A+u_o)}\right)$	2 nd	8.12
Model II		
$\varepsilon_d = F\left(\frac{\rho_A}{\rho_o}, \frac{L_0}{D_T}, \frac{L_0}{d}, \frac{\Delta \rho}{\rho_A}, Z\right)$	4 th	6.49
Model III		
$\varepsilon_d = F\left(\frac{L_0}{D_T}, \frac{D_T}{d}, \frac{L_0}{d}, \frac{\mu_A}{\mu_o}, \frac{\rho_A}{\rho_o}, r, Z\right)$	4 th	6.64
$Z=0.1, 0.2, \dots, 1.0$

(a) SE30

(b) SE30L

Fig. 4 (a), (b) Prediction of sieve plate for extraction mode

$$\begin{aligned}
q_4^0 &= q_2^0 \\
q_5^0 &= c_{101} + c_{102}r_1^0 Z + c_{103}r_3^0 + c_{104}r_1^0 r_3^0 Z \\
q_6^0 &= q_2^0 \\
c &= \begin{bmatrix} 70.9285 & 2.3606 & -4.3474 & 0.0302 \\ 25.9722 & 0.4671 & -0.9086 & 0.0208 \\ 25.9739 & 0.4675 & -0.9088 & 0.0208 \\ 7.9241 & -2.3024 & 0.9180 & 0.0600 \\ 7.9245 & -2.3020 & 0.9179 & 0.0600 \\ 7.9226 & -2.3026 & 0.9182 & 0.0600 \\ 15.3850 & 27.2261 & -9.5051 & 2.8462 \\ 15.3870 & 3.8474 & -9.5066 & -1.5183 \\ 15.3840 & 203.1172 & -0.5703 & 1.2737 \\ 15.3833 & 27.2305 & -0.5703 & 0.1707 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

$$r^0 = \left| \frac{\rho_A}{\rho_0} \quad \frac{L_0}{D_T} \quad \frac{L_0}{d} \quad \frac{\Delta\rho}{\rho_A} \right|$$

(2) 逆抽出モード

前報で得られた16ケースのデータ⁽¹⁾を用いて同定した。結果をTable 4とFig. 5(a), (b)に示す。これからモデルⅡを選択する。モデルⅡは第2層で退化して、

$$\varepsilon_d = F(u_A, u_0, L_0, D_T, Z) \quad (13)$$

が得られた。(13)式を完全表現式で書き直すと、

$$\varepsilon_d = d_{11} + d_{12}r_1^0 Z + d_{13}r_2^0 + d_{14}r_1^0 r_2^0 Z \quad (14)$$

ここに、

$$d = \begin{bmatrix} 18.3020 & -92.5437 & -9.5552 & 114.8142 \end{bmatrix}$$

$$r^0 = \left| \frac{u_0}{u_A + u_0} \quad \frac{L_0}{D_T} \right|$$

Table 4 Selection of arguments of sieve plate for reextraction mode

Selection of arguments		Final layer	Prediction error
Model I			
$\varepsilon_d^{0.1} = F\left(\frac{A}{O}, \frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right)$		1 st	4.63
$\varepsilon_d^{0.2} = F\left(\frac{\sigma}{\mu_0(u_A + u_0)}, \frac{L_0}{D_T}, \frac{\Delta\mu}{\mu_0}, \frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right)$		2 nd	2.02
$\varepsilon_d^{0.3} = F\left(\frac{\mu_0^2}{\sigma\Delta\rho L_0}, \frac{\sigma}{\mu_0 u_0}, \frac{\mu_0}{\mu_A}, \frac{\sigma}{\mu_0(u_A + u_0)}, \frac{L_0}{d}\right)$		3 rd	0.73
$\varepsilon_d^{0.4} = F\left(\frac{u_0}{u_A + u_0}, \frac{L_0}{D_T}, \frac{\mu_0^2}{\sigma\Delta\rho L_0}, \frac{\sigma}{\mu_0 u_0}, \frac{L_0}{d}\right)$		3 rd	2.85
$\varepsilon_d^{0.5} = F\left(\frac{\sigma}{\mu_0(u_A + u_0)}, \frac{L_0}{d}, \frac{L_0}{D_T}\right)$		2 nd	5.44
$\varepsilon_d^{0.6} = F\left(\frac{af}{u_A + u_0}, \frac{L_0}{d}, \frac{u_0}{u_A + u_0}, \frac{\sigma}{\mu_0(u_A + u_0)}\right)$		2 nd	1.79
$\varepsilon_d^{0.7} = F\left(\frac{af}{u_A + u_0}, \frac{L_0}{d}, \frac{u_0}{u_A + u_0}, \frac{L_0}{D_T}, \frac{\mu_0^2}{\sigma\Delta\rho L_0}, \frac{\sigma}{\mu_0 u_0}\right)$		3 rd	1.95
$\varepsilon_d^{0.8} = F\left(\frac{u_0}{u_A + u_0}, \frac{L_0}{D_T}, \frac{A}{O}\right)$		2 nd	3.22
$\varepsilon_d^{0.9} = F\left(\frac{u_0}{u_A + u_0}, \frac{L_0}{D_T}, \frac{A}{O}, \frac{L_0}{d}\right)$		2 nd	2.16
$\varepsilon_d^{1.0} = F\left(\frac{af}{u_A + u_0}, \frac{\sigma}{\mu_0(u_A + u_0)}, \frac{\mu_0^2}{\sigma\Delta\rho L_0}, \frac{\sigma}{\mu_0 u_0}\right)$		2 nd	0.30
Model II			
$\varepsilon_d = F\left(\frac{u_0}{u_A + u_0}, \frac{L_0}{D_T}, Z\right)$		1 st	5.55
Model III			
$\varepsilon_d = F\left(\frac{L_0}{d}, \gamma, Z\right)$		1 st	5.89
$Z=0.1, 0.2, \dots, 1.0$			

4. 入力変数の被選択率と順位

Table 1と2, Table 3と4, Table 1と3, Table 2と4をそれぞれ比較検討すると、同一の構造はひとつもないが部分的には同じ変数が選択されているものもある

ことがわかる。モデルⅠ～Ⅲを通じてどのような入力変数が選択されたかを調べることから、ホールドアップに寄与する入力変数の重み付けを行うことにする。モデル同定に際しては(2)式の変換された変数を用い

(a) SS30

(b) SS30L

Fig. 5(a), (b) Prediction of sieve plate for reextraction mode

ているので、基本的な入力変数としては(1)式のどれが選択されているのかを被選択率として分析した結果を Table 5 に示す。また、被選択順位を Table 6 に示す。運転モードと多孔板タイプによって選択される変数に差のあることがわかる。

逆抽出モードでは上位 5 位に入る変数は順位を問わなければ共通であるが、抽出モードでは μ と u_d のみが

上位 5 位のうちで共通要因として選択されたにすぎない。これらの相異はあるが概略的に判断するならば、パルサーフィーダー型パルスカラムのミキサセトラ域で行なった本実験条件においては、両相の空塔線流速、物性値および多孔板間隔が上位に選択されたのに対して、パルス条件と A/O 比の被選択率は大きくないといえる。

Table 5 Selected ratio of input variables

(%)

Mode		A/O	u_A	u_o	af	μ	ρ	σ	L_0	d	D_T	γ
Extraction	ND	4.7	16.3	14.7	0.8	24.8	12.4	9.3	3.1	4.7	3.9	0.8
	SE	2.9	8.6	5.7	0.7	12.9	7.9	7.1	24.3	13.6	12.9	0.7
	Total	3.7	12.3	10.0	0.7	18.6	10.0	8.2	12.6	7.1	6.7	0.4
Reextraction	NU	3.2	14.5	21.7	6.8	16.3	4.1	14.5	8.1	2.3	3.6	1.8
	SS	2.3	15.6	18.8	3.1	15.6	4.7	8.6	15.6	6.3	6.3	0.8
	Total	2.9	14.9	20.6	5.4	16.0	4.3	12.3	10.9	3.7	4.6	1.4
Total		3.2	13.8	16.0	3.4	17.2	6.8	10.5	12.3	6.1	6.3	1.1

Note ND: Nozzle down (27 cases), SE: Sieve plate (14 cases), NU: Nozzle up (16 cases), SS: Sieve plate (16 cases)

Table 6 Selection of variables in order of selected ratio

Mode		Selecting order										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Extraction	ND	μ	u_d	u_c	ρ	σ	A/O	d	D_T	L_0	af	γ
	SE	L_0	d	D_T	μ	u_d	ρ	σ	u_c	A/O	af	γ
	Total	μ	L_0	u_d	u_c	ρ	d	D_T	σ	A/O	af	γ
Reextraction	NU	u_d	μ	u_c	σ	L_0	af	ρ	D_T	A/O	d	γ
	SS	u_d	u_c	μ	L_0	σ	d	D_T	ρ	af	A/O	γ
	Total	u_d	μ	u_c	σ	L_0	af	D_T	ρ	d	A/O	γ
Total		μ	u_o	u_A	L_0	σ	ρ	D_T	d	af	A/O	γ

IV. 結 言

本研究では、パルサーフィーダー型パルスカラムの

ミキサセトラ域における軸方向ホールドアップは多変数で構造未知の非線形系として取り扱い、実験データの入出力関係からモデルの構造とパラメータの最適な

組合せをGMDHを用いて発見的に自己組織化していく計算アルゴリズムを構成し、モデルの同定とホールドアップに寄与する変数の分析を行なった。本研究で得られた結果は次の通りである。

- (1) GMDHを用いてホールドアップを同定する計算アルゴリズムを構成した。本方法を用いると、入力変数と初等関数を決めるだけであとは計算手順に従って自動的に入力変数の取捨選択と、モデルの構造決定を行うことができる。
- (2) 実験データを用いて軸方向ホールドアップのモデル同定を行なった。モデルは、ノズルプレート of 抽出と逆抽出モード、シーププレートの抽出と逆抽出モードのそれぞれについて別個に求めた。
- (3) 計算結果から、同一の構造はひとつもないことがわかった。これは、多孔板タイプと運転モードによる流動状態の差異がモデルの構造に大きく効いていることと、ホールドアップの非一様性はカラム位置の影響をうけることを表わしているといえる。
- (4) ホールドアップに寄与する入力変数の重みを被選択率として分析したところ、両相の空塔線流速と物性値および多孔板間隔が上位に選択された。GMDHで得られたモデルは入出力データに依存した定量的なモデルであり、必ずしも系の物理的構造を説明するものではないが、物理モデルを導く上で必要な因子の選択に関する指針を与えてくれるものと思われる。
- (5) 今後の予定としては、まず抽出実験を行なってモデルの妥当性に関する検討を行い、ついでより多くのデータを用いることでモデルの精度と適用範囲の拡大を目指すとともに、物理モデルに関する検討を加えていきたい。

モデルの同定には、東京大学大型計算機センターのM-280Hを使用した。このときの計算時間は最も複雑な第5層で退化したときで約5sであった。

【記号】

A: 水相流量 (l/h)
 A: 選択されたパラメータ ($=a_{ij}$)
 a: パルス振幅 (cm)

af: パルス伝達速度 (cm/s)
 b: 選択されたパラメータ ($=b_i$)
 C: 選択されたパラメータ ($=c_{ij}$)
 c_{ij} : j 個のものから i 個との組合せ
 D_T : カラム内径 (cm)
 d: 選択されたパラメータ ($=d_i$)
 d: 多孔板孔径 (cm)
 f: パルス振動数 (cycle/s)
 g_i : 第3層で発生した中間多項式, $i=1\sim3$
 L: カラム実効高さ (cm), L_0 : 多孔板間隔 (cm)
 O: 有機相流量 (l/h)
 p_i : 第1層で発生した中間多項式, $i=1\sim_{15}c_2$
 q_i : 第2層で発生した中間多項式, $i=1\sim_{10}c_2$
 r_i : 入力変数, $i=1\sim15$
 r: 選択された入力変数 ($=r_i^0$)
 s: 第4層で発生した中間多項式
 u: 空塔線流速 (cm/s)
 Z: カラム分率高さ ($=z/L$)
 z: カラム底部から測定点までの高さ (cm)
 γ : 多孔板の開口率, ε : ホールドアップ
 θ_i : 第 i 層における閾値, $i=1\sim4$
 μ : 粘度 (g/s $\cdot$ cm)
 $\Delta\mu$: 両相の粘度差 ($=|\mu_A-\mu_o|$)
 ρ : 密度 (g/cm 3)
 $\Delta\rho$: 両相の密度差 ($=|\rho_A-\rho_o|$)
 σ : 界面張力 (g/s 2)

(肩添字)

c: チェッキングデータ
 o: GMDHにより選択されたもの
 T: トレーニングデータ

(添字)

A: 水相, c: 連続相, d: 分散相, O: 有機相

本研究を進める上でご配慮を頂いた東京大学原子力研究総合センター長および共用設備管理部門主任に感謝します。また、研究を進めるに際して種々のご討論を頂いた藤堂勇雄横浜国立大学教授に深く感謝します。

—参考文献—

- (1) 池田秀松, 鈴木篤之, 清瀬量平: 原子力誌, 29[1], 72 (1987).
- (2) IVAKHNENKO, A.G.: *Sov. Automatic Contr.*, 13[3], 43 (1968).
- (3) *idem*: *ibid.*, 14[5], 57 (1969).
- (4) IKEDA, H., KIIYOSE, R.: *J. Nucl. Sci. Technol.*, 18[7], 558 (1981).
- (5) 秋月影雄, 大野弘司, 重政 隆: 計測自動制御学会論文集, 17[6], 696 (1981).
- (6) 池田三郎, 落合美紀子, 樺木義一: 同上, 12[2], 209 (1976).

正誤表 (Errata)

Vol. 29, No. 1 (1987)

誤

正

p. 73	右段下から7行目	径0.3cm, 開口率20%……	を	径0.3cm ⁽¹⁰⁾ , 開口率20%……
p. 80	右段上から18行目	総合センター長および共用設備	を	研究総合センター長および共用設備