非線形指数形モデルを同定する改良形 GMDH[†]

近 藤 正*

Revised GMDH Algorithm Identifying Nonlinear Exponential Type Model

Tadashi KONDO*

In this paper, a revised GMDH (Group Method of Data Handling) algorithm, which can identify a nonlinear exponential type model, is developed. In previous GMDH algorithms, it is proposed to use the functions such as polynomial, Bayes function, periodic function and rational function as the complete descriptions of the system. But, for the systems whose output variables variate smoothly and whose characteristics can be described by using the combinations of the exponential function, it is necessary to construct the complete description of the system by using the exponential function. So these systems have not been able to be identified accurately by using the previous GMDH algorithm. The revised GMDH in this paper generates some nonlinear exponential type models, which are constructed by two intermediate variables in each selection layer, and the complete description of the system is constructed by combining these nonlinear exponential type models in multi-layered structure. The revised GMDH algorithm is applied to the identification problem of a furnace heat pattern and the result obtained is compared with those obtained by the previous GMDH algorithms in which the high order nonlinear polynomial is used as a complete description of the system.

Key Words: GMDH, system identification, modeling

1. ま え が き

非線形システムを入出力データから発見的自己組織

化の原理に基づいてモデリングを行う手法として GMDH (Group Method of Data Handling) がある。GMDH は、システムの構造に関する先験的な情報を必要とすることなく、モデル構造の自己選択が可能であり、各種の実システムのモデリングに応用されている¹⁾。従来から提案されている GMDH のアルゴリズムではシステムの完全表現式として、非線形多項式 (Kolmogorov-Gabor の多項式)、Bayes 関数、周期関数、有理関数などを用いることが提案されている。しかしながら、システムの出力変数の変動が比較的なめらかで、その特性が指数関数の組合せで表現できるシステムに対しては、従来の GMDH アルゴリズムでは、十分な同定精度を得ることができなかった。

本論文では、システムの入出力変数間に非線形指数形モデルを想定する改良形 GMDH のアルゴリズムを提案する。このアルゴリズムでは、各選択層において 2 変数の指数形モデルを発生させ、これを多層構造に積み重ねてシステムの完全表現式を構成する。本アルゴリズムを加熱炉ヒートパターン同定問題に適用し、システムの完全表現式に非線形多項式を想定する従来の GMDH によって得られる結果と比較することにより、その有効性を検討する。

2. システムの完全表現式に非線形多項式を想定する GMDH²⁾

システムの完全表現式として、Kolmogorov-Gabor の多項式

$$\hat{\phi} = a_0 + \sum_i a_i x_i + \sum_i \sum_j a_{ij} x_i x_j + \dots \quad (1)$$

を想定する場合、システムの部分表現式として、2 変数の 2 次多項式

$$y_k = b_{0k} + b_{1k} x_i + b_{2k} x_j + b_{3k} x_i x_j + b_{4k} x_i^2 + b_{5k} x_j^2 \quad (2)$$

に対して評価規準 (情報量規準 AIC⁴⁾ または予測平

[†] 第 7 回システムシンポジウムで発表 (昭 56・10)

* (株)東芝府中工場重電技術研究所 府中市東芝町 1

* Heavy Apparatus Engineering Laboratory, Fuchu Works, Toshiba Corp., Fuchu

(Received August 9, 1985)

(Revised July 24, 1986)

は中間変数を表わし、3.1 節で計算した出力変数の対数変換値 ϕ' の回帰推定値である。部分表現式(I)を自己選択する場合、ill-condition を起こす組合せが数多く発生するため、ここでは変数選択法として変数増減法を用いる。(10)式に対応した正規方程式

$$(X^T X) \mathbf{c} = X^T \mathbf{y} \quad (11)$$

から、つぎの (7×13) の行列

$$\begin{array}{c} 6 \left\{ \begin{array}{ccc} \overbrace{X^T X}^6 & \overbrace{X^T \mathbf{y}}^1 & \overbrace{I}^6 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 \left\{ \begin{array}{ccc} \mathbf{y}^T X & \mathbf{y}^T \mathbf{y} & \mathbf{0}^T \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (12)$$

を作る。ただし、 $\mathbf{c} = (c_0, c_1, \dots, c_6)^T$ 、 $\mathbf{y} = (\phi'_1, \phi'_2, \dots, \phi'_N)^T$ 、 N はデータの個数である。行列(12)の7行目は残差平方和 (Residual Sum of Squares, RSS) を計算するためにつけ加えたものである。行列(12)を用いて AIC または PSS を最小にする部分表現式(I)を自己選択する。部分表現式(I)は、従来の GMDH²⁾ の部分表現式と同じ2変数の2次多項式である。このため、部分表現式(I)の自己選択方法は従来の GMDH の部分表現式の自己選択方法と同じ手続きで行うことができる。この自己選択方法の詳細については文献2)を参照されたい。

Fig. 2 に、部分表現式(I)と4種類の間中変数の発生器を示す。中間変数の発生器 G1 と G2 では、二つの変数の組合せが行われ、G1 と G3 では、次数の増加が行われる。G4 は前層と同じ中間変数を発生する。これらの4種類の間中変数の発生器は、従来の GMDH²⁾ に使われている中間変数の発生器と同じ形になる。

3.3 最適な部分表現式(II)の自己選択

3.2 節で自己選択された部分表現式(I)から発生される中間変数を用いて最適な部分表現式(II)を自己選択する。これは、

$$\hat{\phi} = a_0 + a_1 e^{y_1} + a_2 e^{y_2} + \dots + a_P e^{y_P} \quad (13)$$

に対して、評価規準 (AIC または PSS) を用いた変数の逐次選択法を適用し最適な部分表現式(II)を自己選択する。ここで、 $\hat{\phi}$ は出力変数 ϕ のモデルによる推定値を表わし、 $y_1, y_2, \dots, y_P$ は部分表現式(I)により発生した中間変数を表わす。 P は中間変数の発生

個数を表わし、中間変数の自己選択個数 (L) を用いて $L(L-1)/2$ と表わせる。最適な部分表現式(II)を自己選択する際にも、ill-condition を起こす組合せが数多く発生するため、ここでは、部分表現式(I)の自己選択の場合と同様に、変数選択法として変数増減法を適用する。(13)式に対応した正規方程式

$$(Y^T Y) \mathbf{a} = Y^T \hat{\phi} \quad (14)$$

から、つぎの $((P+2) \times (2P+3))$ の行列

$$\begin{array}{c} P+1 \left\{ \begin{array}{ccc} \overbrace{Y^T Y}^{P+1} & \overbrace{Y^T \hat{\phi}}^1 & \overbrace{I}^{P+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 \left\{ \begin{array}{ccc} \hat{\phi}^T Y & \hat{\phi}^T \hat{\phi} & \mathbf{0}^T \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (15)$$

を作成する。ただし、 $\mathbf{a} = (a_0, a_1, \dots, a_P)^T$ 、 $\hat{\phi} = (\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_P)^T$ である。行列(15)の第 $(P+2)$ 行目は残差平方和を計算するためにつけ加えたものである。行列(15)を用いて AIC または PSS を最小にする変数の組合せを文献2)と同じ方法で自己選択し、最適な部分表現式(II)を構成する。

3.4 中間変数の自己選択

自己選択された最適な部分表現式(I)により発生される P 個の中間変数に対して、AIC または PSS の値の小さいものを L 個自己選択する。各選択層では、AIC または PSS の値が減少する中間変数のみを発生しているため、中間変数の自己選択個数 (L) をなるべく大きくすることが、モデル精度の向上のために望ましい。

3.5 多層構造の層の打ち切り

各選択層において自己選択された部分表現式(I)がすべて G4 になったとき、層の積み重ねを打ち切る。これはさらに層を通過させても変数の組合せが行われないためである。

3.6 システムの完全表現式の決定

3.3 節で自己選択した部分表現式(II)の中からシステムの完全表現式を決定する。本アルゴリズムでは、各選択層において部分表現式(II)を自己選択しており、各選択層で部分表現式(II)が構成される。システムの完全表現式は、最終層までに構成された部分表現式(II)の中から AIC または PSS の値が最小になるものを選択する。

以上のアルゴリズム 3.1~3.6 節によって、システムの完全表現式に非線形指数形モデルを想定する改良形 GMDH を構成することができる。本アルゴリズムの特徴は、(6)式の非線形指数形モデルを、少ない計算量でモデルの構造を自己選択することにより精度の良いモデルを同定できることである。(6)式では、パラメータ a_i および b_i が非線形な関係にあるため、通常の線形最小2乗法を適用して直接に(6)式のパラメ

$$\begin{array}{l} \boxed{\text{G1}} \rightarrow \begin{cases} y_k = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_1 + b_3 x_1 x_1 + b_4 x_1^2 + b_5 x_1^2 \\ y_k = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_1 + b_3 x_1 x_1 \end{cases} \\ \vdots \\ \boxed{\text{G2}} \rightarrow y_k = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_1 \\ \boxed{\text{G3}} \rightarrow y_k = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_1^2 \\ \boxed{\text{G4}} \rightarrow y_k = b_0 + b_1 x_1 \end{array}$$

Fig. 2 Generators of the optimal partial description (I)

ータを推定することはできない。また、何種類かのモデル構造を仮定して、各モデルごとに非線形最小 2 乗法を適用してモデルに含まれるパラメータのみを推定する方法が考えられるが、収束計算が必要となるため計算量が増大し、さらに、モデル構造の自己選択ができないため、精度の良いモデルを構成することはできない。

4. 加熱炉ヒートパターン同定問題への適用

製鉄プロセスでは、多くのエネルギーを消費するため、省エネルギー化が重要な課題となっておりその努力が続けられている。特に熱間圧延ラインでは、鋼片（スラブ）を圧延機で圧延可能な抽出目標温度（約 1,200°C 付近）にまで再加熱する連続鋼片加熱炉において省エネルギー化のための努力が行われている。ここでは、鋼片を加熱炉に装入してから抽出するまでの昇温過程（ヒートパターン）を GMDH を用いて統計的に解析することにより数学モデルとしてモデル化する。ここで対象とする加熱炉は、予熱帯、加熱帯、均熱帯のおおの上下部から構成されている 6 帯式連続鋼片加熱炉であり、燃料を噴射するバーナーは各帯についている。

4.1 炉内伝熱機構⁶⁾

炉内の伝熱機構を Fig. 3 に示す。ここで、 θ_g は燃焼ガス温度、 θ_w は炉の内壁温度、 θ_{w0} は炉の外壁温度、 θ_s は鋼片の表面温度、 θ_c は鋼片の中心温度、 q_1 は θ_g から θ_w への放射伝熱量、 q_2 は θ_w から θ_s への放射伝熱量、 q_3 は θ_g から θ_c への放射伝熱量を表わしている。燃料の燃焼により発生した熱は、 θ_g から q_1 と q_2 により θ_s へ伝熱され、さらに、 θ_g から q_3 により直接 θ_c に伝熱される。放射により θ_s に伝熱される熱量 Q_s (kcal/m²・h) は、総括熱吸収率を用いることにより、 θ_g と θ_s の関数として

$$Q_s = 4.88\phi_{CG} \left\{ \left(\frac{\theta_g + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_s + 273}{100} \right)^4 \right\} \quad (16)$$

と表わされる。ここで、 ϕ_{CG} は総括熱吸収率を表わす。 θ_s に伝わる熱量は θ_s から θ_c に伝熱して鋼片自身の昇温に使われる。鋼片内部の伝熱は熱伝導差分方程式

Fig. 3 Mechanism of the heat conduction in the furnace

により逐次計算することができる。鋼片の厚み方向に 6 分割した場合の 1 次元の熱伝導差分方程式は、

$$H_1(t + \Delta t) = H_1(t) + \frac{2k_a \cdot \Delta t}{\rho(\Delta x)^2} \left\{ \phi_2(t) + \frac{Q_{su} \cdot \Delta x}{k_a} - \phi_1(t) \right\} \quad (17a)$$

$$H_2(t + \Delta t) = H_2(t) + \frac{k_a \cdot \Delta t}{\rho(\Delta x)^2} \{ \phi_3(t) + \phi_1(t) - 2\phi_2(t) \} \quad (17b)$$

$$H_3(t + \Delta t) = H_3(t) + \frac{k_a \cdot \Delta t}{\rho(\Delta x)^2} \{ \phi_4(t) + \phi_2(t) - 2\phi_3(t) \} \quad (17c)$$

$$H_4(t + \Delta t) = H_4(t) + \frac{k_a \cdot \Delta t}{\rho(\Delta x)^2} \{ \phi_5(t) + \phi_3(t) - 2\phi_4(t) \} \quad (17d)$$

$$H_5(t + \Delta t) = H_5(t) + \frac{k_a \cdot \Delta t}{\rho(\Delta x)^2} \{ \phi_6(t) + \phi_4(t) - 2\phi_5(t) \} \quad (17e)$$

$$H_6(t + \Delta t) = H_6(t) + \frac{k_a \cdot \Delta t}{\rho(\Delta x)^2} \{ \phi_7(t) + \phi_5(t) - 2\phi_6(t) \} \quad (17f)$$

$$H_7(t + \Delta t) = H_7(t) + \frac{k_a \cdot \Delta t}{\rho(\Delta x)^2} \left\{ \phi_6(t) + \frac{Q_{si} \cdot \Delta x}{k_a} - \phi_7(t) \right\} \quad (17g)$$

と表わされる。ここで、 Δt は分割時間 (h)、 Δx は鋼片の厚み方向の分割距離 (m)、 ρ は比重量 (kg/m³)、 k_a は熱伝導率 (kcal/m・h・°C)、 H は含熱量 (kcal/kg)、 ϕ は変換温度 (°C)、 Q_{su} は鋼片の上表面からの入熱量 (kcal/m²・h)、 Q_{si} は鋼片の下表面からの入熱量 (kcal/m²・h) を表わす。(16)式および(17)式を用いることにより、炉内の鋼片の昇温過程を計算機によりシミュレーションすることができる。

4.2 GMDH によるヒートパターンの同定

GMDH の入力データは、実測値を用いず、4.1 節で述べた物理モデルを組込んだ加熱炉シミュレータから発生するシミュレーションデータを用いる。

シミュレーションデータは、

(1) 装入時の鋼片温度 (θ_{M0})

50°C と 500°C の 2 種類。

(2) 燃焼ガス温度 (θ_g)

上部の燃焼ガス温度と下部の燃焼ガス温度は同じ値

をとるものとし、炉長方向に変化する3種類の温度パターンにより与える。

の条件で発生させ、得られたデータを22分ごとに10点とり、GMDHの入力データとする。GMDHで同定するモデルは

$$\hat{\theta}_M = f(\theta_{M0}, t, \theta_\theta) + \varepsilon \quad (18)$$

と表わすことができる。ここで、 $\hat{\theta}_M$ は(17)式により計算される7個の含熱量から求まる鋼片の平均温度(θ_M)のモデル出力(°C)、 t は在炉時間(h)を表わす。また、 ε は鋼片平均温度の誤差を表わし、シミュレーションでは $N(0, 9)$ の正規性白色雑音とする。GMDHにより同定を行う前に入出力データの前処理を以下のように行う。

$$\theta'_M = \frac{\theta_M}{\bar{\theta}_M} \quad (19)$$

$$\theta'_{M0} = \frac{\theta_{M0}}{\bar{\theta}_{M0}} \quad (20)$$

$$t' = \frac{t}{\bar{t}} \quad (21)$$

$$\theta'_\theta = \frac{\theta_\theta}{\bar{\theta}_\theta} \quad (22)$$

ここで、 $\bar{\theta}_M$ 、 $\bar{\theta}_{M0}$ 、 $\bar{t}$ 、 $\bar{\theta}_\theta$ は各変数の平均値を表わす。以下では、 θ'_M を ϕ で、 θ'_{M0} 、 t' 、 θ'_θ をそれぞれ x_1 、 x_2 、 x_3 で表わす。GMDHの中間変数の選択個数(L)は、入力変数が3変数であるため、 ${}_3C_2(=3)$ 個となり、中間変数の発生個数(P)も3個となる。また、モデル選択の評価規準は、データの個数が60個あり、鋼片の平均温度誤差として正規性白色雑音を加えているのでAICを採用する。GMDHを用いたヒートパターンの同定方法として以下の3通りの方法を試みる。

(同定方法1)

本論文で提案した改良形GMDHを適用して(18)式を同定する。

(同定方法2)

入力変数 $x_i(i=1, 2, 3)$ を

$$x'_i = e^{x_i}, i=1, 2, 3 \quad (23)$$

のように指数変換し、 $x'_i(i=1, 2, 3)$ を新入力変数として、システムの完全表現式に非線形多項式を想定する従来のGMDHを適用して同定する。

(同定方法3)

入力変数 $x_i(i=1, 2, 3)$ をそのまま用いて、従来のGMDHにより(18)式を同定する。

これらの3通りの同定方法によるヒートパターンの同定結果を以下に示す。

4.3 同定方法1による同定結果

改良形GMDHを用いてヒートパターンの同定を行

った。システムの完全表現式として第2層のモデルが選択された。

(同定されたモデル)

(第2層)

$$\hat{\phi} = -0.0025 + 0.5799e^{x_1} + 0.3727e^{x_2} + 0.0501e^{x_3} \quad (\text{AIC} = -515)$$

$$z_1 = 0.0061 + 0.2886y_2 + 0.6902y_3 - 0.7375y_2y_3 - 0.1153y_2^2 + 0.8376y_3^2$$

$$z_2 = -0.0263 + 0.3159y_1 + 0.7601y_3 - 2.570y_1y_3 + 0.8250y_1^2 + 1.666y_3^2$$

$$z_3 = 0.0497 + 0.6286y_1 + 0.1900y_2 - 0.1977y_2^2$$

(第1層)

$$\hat{\phi} = 0.0382 + 0.3587e^{y_1} + 0.2028e^{y_2} + 0.4057e^{y_3} \quad (\text{AIC} = -321)$$

$$y_1 = -5.772 + 8.309x_3 - 1.070x_1x_3 + 0.6431x_1^2 - 2.539x_3^2$$

$$y_2 = -2.144 + 2.682x_2 - 0.4804x_1x_2 + 0.3482x_1^2 - 0.6119x_2^2$$

$$y_3 = -4.698 + 7.239x_3 - 2.539x_3^2$$

Fig. 4とFig. 5に、同定されたモデルによって得ら

Fig. 4 Estimated values by the revised GMDH ($\theta_{M0}=50^\circ\text{C}$)

Fig. 5 Estimated values by the revised GMDH ($\theta_{M0}=500^\circ\text{C}$)

れた推定値を示す。

〈同定精度〉

同定精度は次式により評価した。

$$J = \left(\frac{1}{60} \sum_{\alpha=1}^{60} \left| \frac{\phi_{\alpha} - \hat{\phi}_{\alpha}}{\phi_{\alpha}} \right| \right) \times 100 \quad (\%) \quad (24)$$

$\hat{\phi}_{\alpha}$: モデルによる α 番目の推定値

同定されたモデルの精度は

$$J = 1.382 \quad (\%)$$

となった。

4.4 同定方法 2 による同定結果

(23)式により指数変換して得られた新入力変数 x_i ($i=1, 2, 3$) を用いて, 従来の GMDH により ヒート パターンの同定を行った。

第 4 層でシステムの完全表現式が求まった。

〈同定されたモデル〉

(第 4 層)

$$\hat{\phi} = u_1 \quad (\text{AIC} = -495)$$

(第 3 層)

$$u_1 = -0.0027 + 0.7887z_1 + 0.2140z_3$$

$$u_2 = -0.0015 + 0.7948z_1 + 0.2068z_2$$

$$u_3 = z_2$$

(第 2 層)

$$z_1 = -0.0735 + 1.841y_2 - 0.6737y_3 \\ - 0.7099y_2y_3 - 0.3024y_2^2 + 0.9308y_3^2$$

$$z_2 = -0.0928 + 0.2361y_1 + 0.9855y_2 \\ + 0.2259y_1^2 - 0.3363y_3^2$$

$$z_3 = y_1$$

(第 1 層)

$$y_1 = -2.238 + 1.574e^{x_3} - 0.04935e^{x_1+x_3} \\ + 0.02339e^{2x_1} - 0.1352e^{2x_3}$$

$$y_2 = -0.5289 + 0.6843e^{x_2} - 0.01928e^{x_1+x_2} \\ + 0.01279e^{2x_1} - 0.05166e^{2x_2}$$

$$y_3 = -1.777 + 1.392e^{x_3} - 0.1352e^{2x_3}$$

Fig. 6 と Fig. 7 に, 同定されたモデルによって得られた推定値を示す。

〈同定精度〉

同定精度は (24) 式によって評価し,

$$J = 3.196 \quad (\%)$$

となった。

4.5 同定方法 3 による同定結果

入力変数 x_i ($i=1, 2, 3$) をそのまま用いて, 従来の GMDH により ヒート パターンの同定を行った。第 5 層でシステムの完全表現式が求まった。

〈同定されたモデル〉

(第 5 層)

$$\hat{\phi} = v_1 \quad (\text{AIC} = -427)$$

Fig. 6 Estimated values by the previous GMDH with exponential type input variables ($\theta_{M0} = 50^\circ\text{C}$)

Fig. 7 Estimated values by the previous GMDH with exponential type input variables ($\theta_{M0} = 500^\circ\text{C}$)

(第 4 層)

$$v_1 = u_1$$

$$v_2 = u_1$$

$$v_3 = -0.0005 + 0.5162u_2 + 0.4843u_3$$

(第 3 層)

$$u_1 = -0.0021 + 0.5904z_1 + 0.4117z_3$$

$$u_2 = -0.0019 + 0.5745z_2 + 0.4274z_3$$

$$u_3 = -0.0011 + 0.5479z_1 + 0.4532z_2$$

(第 2 層)

$$z_1 = -0.2939 + 1.444y_1 - 7.080y_1y_3 \\ + 3.162y_1^2 + 3.751y_3^2$$

$$z_2 = -0.0351 + 0.7726y_1 + 0.3108y_2 - 0.0410y_2^2$$

$$z_3 = -0.0045 + 1.459y_2 - 0.4572y_3 \\ - 0.8993y_2y_3 + 0.8975y_3^2$$

(第 1 層)

$$y_1 = -1.1552 + 2.140x_3 - 0.4303x_1x_3 \\ + 0.2669x_1^2$$

$$y_2 = -0.1305 + 0.2987x_1 + 1.147x_2 \\ - 0.1952x_1x_2 - 0.0939x_2^2$$

Fig. 8 Estimated values by the previous GMDH ($\theta_{M0}=50^{\circ}\text{C}$)

Fig. 9 Estimated values by the previous GMDH ($\theta_{M0}=500^{\circ}\text{C}$)

$$\gamma_3 = -0.7096 + 1.710x_3$$

Fig. 8 と Fig. 9 に、同定されたモデルによって得られた推定値を示す。

〈同定精度〉

同定精度は (24) 式によって評価し、

$$J = 6.06 (\%)$$

となった。

4.6 同定結果のまとめ

以上の同定結果をまとめるとつぎのようになる。

- (1) 同定精度は、本論文で提案した改良形 GMDH を用いた同定方法 1 が最も良く、Fig. 4 と Fig. 5 に示されるように、比較的なめらかに変化する鋼片のヒートパターンを精度良く同定することができた。これに対して、従来の GMDH を用いた

同定方法 2 と同定方法 3 では、Fig. 6 から Fig. 9 に示されるように、鋼片のヒートパターンのなめらかな変化に十分追従できず同定精度が悪くなっている。

- (2) 同定方法 1 と同定方法 2 の両方とも指数形モデルを構成しているが、モデル構造は本質的に異なった構造になっている。同定方法 2 により同定されたモデルは、(7) 式の $f_k(x)$ が入力変数 (x_i) の 1 次の項のみとなり、 $f_k(x)$ の係数 (b) も整数になるため十分な同定精度を得ることができなかったものと思われる。しかしながら、対象があまり複雑な構造をしていない問題に対しては、この同定方法でも十分有効であるものと思われる。

5. む す び

システムの入出力変数間に非線形指数形モデルを想定する改良形 GMDH のアルゴリズムを提案した。このアルゴリズムでは、2 種類の部分表現式を用いて、少ない計算量で非線形指数形モデルの構造選択を行っており、あらかじめモデルの構造を仮定してパラメータのみを非線形最小 2 乗法により推定する方法と比較して、精度の良いモデルを作成することができる。本アルゴリズムを、加熱炉ヒートパターン同定問題に適用し、システムの完全表現式に高次の非線形多項式を想定する従来の GMDH によって得られた結果と比較することにより、出力変数が比較的なめらかに変化する指数の組合せにより表現できる問題に対する本アルゴリズムの有効性が確認できた。

参 考 文 献

- 1) S. J. Farlow (Editor): Self-Organizing Methods in Modeling—GMDH Type Algorithms—, Marcel Dekker, Inc. (1984)
- 2) 田村, 近藤: モデル選択の評価規準に予測平方和 (PSS) を用いる改良形 GMDH, 計測自動制御学会論文集, **14**-5, 518/523 (1978)
- 3) 近藤, 江連, 安部: 数量化入力変数を用いる改良形 GMDH とその圧延モデル同定への応用, 計測自動制御学会論文集, **20**-11, 986/992 (1984)
- 4) 赤池弘次: 情報量規準 AIC とは何か, 数理科学, **14**-3, 5/11 (1976)
- 5) 奥野, ほか: 続多変量解析法, 日科技連 (1976)
- 6) 大塚, ほか: 連続鋼片加熱炉における伝熱実験と計算方法, 日本鉄鋼協会 (1970)