

環境システムのモデリングにおける GMDH*の応用**

藤田真一***・林 秀夫***・厚井弘志****

1. はじめに

大阪府では、昨年、21世紀に向けて定住魅力のある環境創造を目指して環境総合計画（STEP 21）を策定した¹⁾。この計画で強調されていることの一つに、環境施策の推進に際して情動的な支援を行うシステムの必要性がある。すなわち、環境関連の情報を収集整備し、これらの情報にもとづき各種の施策効果や開発の環境に及ぼす影響を予測し、これらについて各種の評価を行うことにより最良の施策を導くための情報支援システムの確立がこれからの環境行政の一つの課題だと言える。

本論では、このような解析・予測のためのシステムの確立を目指して、筆者らが開発した数学モデルの内、とくに GMDH を用いたモデルについてその概要を述べる。

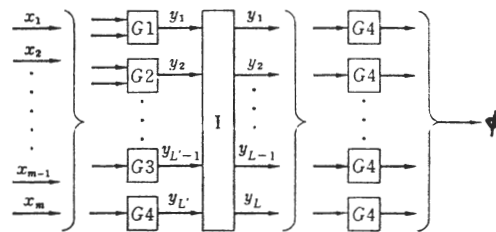
2. GMDH の概要

一般に環境汚染質の挙動は多数の要因が複雑に絡み合っており、その解析には多変量、非線型等の条件を考慮せねばならない場合が多い。

GMDH は A. G. Ivakhnenko²⁾ により開発された入出力データの関係から自己組織的に複雑な系のモデリングを行う手法である。初期の GMDH は、①変数をモデル作成のためのデータとチェックのためのデータとに分割するため、その分割の仕方にモデルが依存する、②部分表現式を層ごとに重ね合わせて完全な表現（モデル）を作成する手法であり、部分表現式の形にモデルが依存する、③各層における中間変数の選択個数にもモデルが依存する、等一般性の点で問題点があり、種々の改良がなされてきた³⁻⁵⁾。

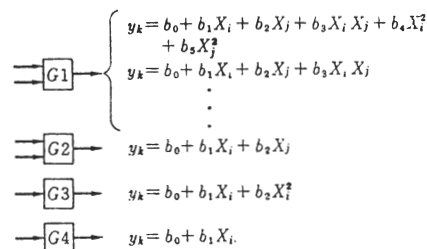
近年、田村らにより提案された最適な部分表現式の自己選択、中間変数の自己選択および多層構造の層の打ち切り等の判定基準に AIC（赤池の情報量規準）または、PSS（予測平方和）を用いる改良型 GMDH^{5,6)}、これらの問題点を可成りの程度克服している。このため本論で紹介するモデルは、すべて田村の改良型 GMDH にその基礎を置いている。

2・1 改良型 GMDH



I : 中間変数の自己選択

(a) ブロック図



(b) 最適な部分表現式の発生器

図1 田村の改良型 GMDH のブロック図⁶⁾

* Group Method of Data Handling の略で、ソ連の A. G. Ivakhnenko らによって開発された入出力データの関係から自己組織的に複雑な系のモデリングを行う手法である。

** Application of GMDH to Environmental System Modeling

*** Shin-ichi FUJITA, Hideo HAYASHI (大阪府公害監視センター) Environmental Pollution Control Center of Osaka Prefectural Government

**** Hiroshi KOI (大阪府生活環境部) Life Environmental Dept. Osaka Prefectural Government

改良型 GMDH のブロック図と部分表現式の発生器の概念図を示す。m 個の入力データより 2 個ずつの組について発生器 G により部分表現式を発生する。発生器 G₁~G_k の内、どの発生器を選択するかは、

$$PSS = \sum_{i=1}^m (\phi_i - \hat{\phi}_i)^2 (I - x_i^T (X^T X)^{-1} x_i)^2 \quad (2.1)$$

または、 $AIC = N \log S_R^2 + 2(k+1) + C \quad (2.2)$

$$S_R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^M (\phi_i - \hat{\phi}_i)^2$$

表 3-1 Items and Categories for Quantification of Wind Data.

Item	W.D. of Seaside Station	W.V. of Seaside Station (m/sec.)	W.D. of Inland Station	W.V. of Inland Station (m/sec.)	W.D. of at 65 m Height	W.V. of at 65 m Height (m/sec.)	W.D. of at 160m Height	W.V. of at 160m Height (m/sec.)
Category	N	< 0.4	N	< 0.4	N	< 0.4	N	< 0.4
	W	0.5-1.4	W	0.5-1.4	W	0.5-1.4	W	0.5-1.4
	S	1.5-2.4	S	1.5-2.4	S	1.5-2.4	S	1.5-2.4
	E	2.5-3.4	E	2.5-3.4	E	2.5-3.4	E	2.5-3.4
		3.5<		3.5<		3.5<		3.5<

表 3-2 Input Variables for Prediction fo Ox Concentration 3 Hours Hence

NO.	Item Name	Time Delay	Unit	Sign
1	Oxidant	no delay	ppb	Ox (t)
2	Temperature	2 hours	10 C.	T (t-2)
3	Humidity	no delay	%	H (t)
4	Solar Radiation	no delay	0.01μjule/m ²	SR(t)
5	Quantified Data	1 hour	ppb	y (t-1)

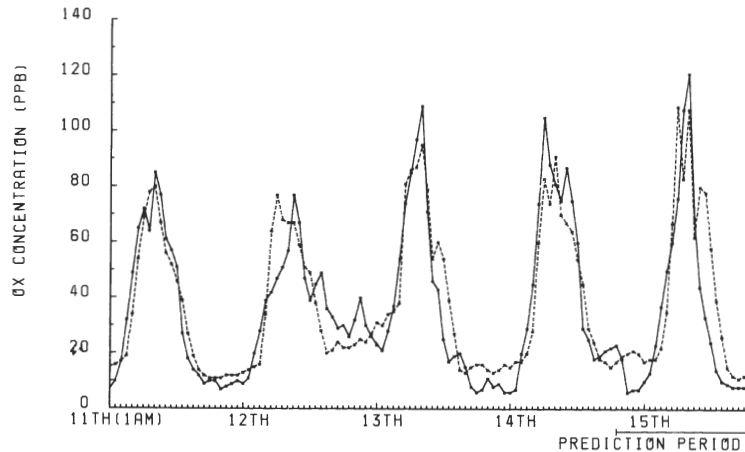


図 2 オキシダント予測結果 (1979年 8月11日~15日)

—— 実測値 - - - - 計算値

k: 変数の個数

を選択基準として決定する。また、ここで中間変数として PSS (または AIC) の値の小さいものから L 個選択する。次には、この L 個の中間変数を入力データとして、次の層へ移って同様の手続をくり返す。部分表現式の発生器として、すべて G_4 が選択された層において計算は打ち切られる。

次に、以下の 3 種の事例に基づいて改良型 GMDH の環境解析における有用性を説明する。

3. オキシダント濃度短期予測モデル⁷⁾

光化学オキシダントの短期予測モデル、反応拡散系のシミュレーションを行う決定論的なモデル⁸⁾と測定データの時系列解析等にもとづく統計的なモデル⁹⁾とがある。前者は、発生源の環境に及ぼす影響がわかるため、発生源規制の効果を予測できる等の長所を持つが、反面計算に膨大な時間を要する等の短所があり、迅速性が要求される緊急時の際の予測に用いるには問題点が多い。そこで実用的な手法として統計的モデルについて考察した。

オキシダントは複雑な光化学反応によって生成される 2 次汚染物質であり、気象条件にも強く依存する。このため、オキシダント濃度予測モデル作成に当っては、モデルの非線形性を考慮するのみならず気象条件の分類等を行うことも重要である。このため、風データの数量化と改良型 GMDH とを併合したモデル (数量化 GMDH モデルと呼ぶ) を作成した。

3.1 数量化 GMDH による予測結果

予測は、光化学スモッグの緊急時業務等の必要性を考慮して 3 時間先の O_x 濃度を予測するものとした。また、予測が迅速にかつ容易に行える様に、大気環境のオンライン常時監視データ (1 時間値) のみを用いた。風データの数量化は表 3-1 に 3 測定局の風向・風速データを用い、目的変数として 3 時間先の O_x 濃度を用いた。数量化 I 類による予測結果は、次のステップである改良型 GMDH による予測計算において入力変数の一つとして用いられる。

府下の内陸部の測定局を例として、表 3-2 に示す項目を用いて予測計算を行った。図 2 に示すように、高濃度域・低濃度域とも実測値と予測値は良く合致しており、相関も 0.92 と良い結果となった。計算に要した時間は大阪府公害監視センターの電子計算機 Acos システム 550 を用いて AIC を基準として用いた場合は約 10 秒、PSS の場合は約 50 秒であった。

なお、他の測定局の種々の期間についても良好な結果が得られている¹⁰⁾。

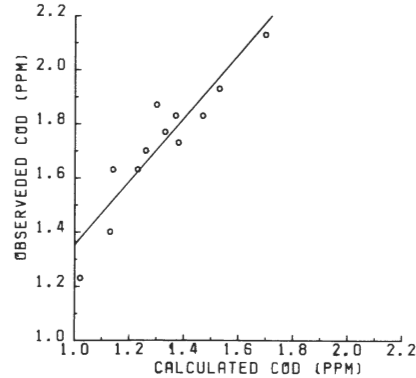


図 3 COD シミュレーション結果

4. 大阪湾における COD 濃度分布予測モデル

大阪湾の水質の代表的な指標は COD 濃度であり、各領域毎に環境基準が定められている。

海域における COD 濃度分布の予測には、COD の反応等による変化を考慮しない保存系の拡散モデルが通常用いられている^{11,12)}。この場合には、①計算値と実測値との回帰式は非常に勾配の大きい値となる (通常 2 ~ 4)、②境界条件として設定された COD の値に結果が強く依存する、等の問題点があり、このため海域における生物・化学的な反応を考慮した非保存系の拡散モデルが幾つか提案されている^{13,14)}。しかし、これらのモデルには反応・拡散・沈降・溶出等に関する情報が必要であり、現時点においては、これらのデータは十分には得られていない。

今回提案するモデルは、保存系の拡散シミュレーションによりろ過 COD 濃度分布の計算を行い、さらに、ろ過 COD 濃度より環境基準が設定されている酸性法による COD 濃度への変換を改良型 GMDH を用いたモデルにより行う複合型のモデルである。

4.1 COD 拡散シミュレーション

COD 拡散計算を行う場合、第一ステップで潮流計算を行い、次のステップで潮流計算結果を用いて COD の拡散計算を行う。次に、モデルの概要について説明する。

(i) 潮流シミュレーション

潮流計算は、ナヴェ・ストークス方程式を 2 次元 2 層に変換したレベルモデルを使用した^{12,15)}。計算は ADI 法を用いて行い良好な結果を得た¹⁶⁾。

(ii) COD 拡散シミュレーション

第一ステップで求めた潮流計算結果を用いて、2 次元 2 層の COD 保存系拡散計算を行った。開放端の境界条件として ($\partial C_i / \partial n = a C_i$, C_i は i 層における濃度, a は希釈係数: 0.99) を用い、また、湾岸よりの COD 流

入負荷量として1976年から1978年の3カ年平均値(約370 t/day)を与えた。

図3に示すように、拡散計算結果とろ過COD実測値(12点における公共用水域測定結果)との相関は0.92と良く、また、回帰式の勾配も1.17と1に近い良い値となった。次に、ろ過COD濃度より酸性法によるCOD濃度への変換モデルについて述べる。

4・2 改良型GMDHによるCOD濃度解析モデル

CODは海域において生物・化学的反応や底質からの溶出等により増加し、また、沈降・浄化等により減少する。このため、COD生成機構を解析するモデルには複雑な生態系モデルが必要であるが、本論では次の点を考慮して、改良型GMDHによるCOD変換モデルの作成を行った。

①予測等が容易に行えるよう、基本的汚濁項目のみを用いる。

②生態系モデルを暗に含められるよう、非線形性を表現できるモデルとする。

モデル作成の例として、大阪湾のC領域(湾岸部)の測定点における1976年より1978年の測定データを用いて変換モデルの作成を行い、また、1979年の測定データを用いてモデルの精度と検証を行った¹⁶⁾。得られた変換式は次のとおりであった。

$$\text{COD} = 0.5 \cdot U_1 + 0.5 \cdot U_2$$

ここで、

$$U_1 = 1.74 + 0.137 Z_3 \cdot Z_5 \quad (4.1)$$

$$U_2 = 1.99 + 0.115 Z_1^2$$

ここで、 $Z_1 = 1.10 + 0.190 Y_3 \cdot Y_4$

$$Z_3 = 0.76 + 0.218 Y_4 \cdot Y_5$$

$$Z_5 = 1.51 + 0.156 Y_2 \cdot Y_3$$

ここで、

$$Y_2 = 2.20 + 0.029 X_1 \cdot X_5 + 0.055 X_2^2$$

$$Y_3 = 4.83 - 0.881 X_2 + 0.142 X_2^2$$

$$Y_4 = 1.44 + 0.017 X_1 \cdot X_3$$

$$Y_5 = 5.93 - 0.039 X_2 \cdot X_5$$

X_1 : 水温(°C), X_2 : 透明度(m), X_3 : DO(ppm),

X_4 : 塩分(%), X_5 : ろ過COD(ppm)

また、誤差($\text{ERR} = \sum |\phi_i - \bar{\phi}_i| / \sum |\phi_i|$, ϕ_i : 出力変数の実測値, $\bar{\phi}_i$: 出力変数の計算値)は12.5%であり、相関は0.89であった。

CODのように、移流拡散しその過程で反応・溶出・沈降等により変化する物質の予測を行う場合、その生成機構がある程度既知であり、それらに関するデータも豊富な際には、反応(非保存系)拡散モデルによりシミュレートするのが最適である。しかし、正確な情報が少ない場合には、今回のように段階的に予測の精度を確めつ

つ、解析を行っていくことが最良の方法であろう。

5. GMDHによるランドサットMSSデータの解析と環境騒音予測モデル

5・1 環境騒音予測モデル¹⁷⁾

環境騒音は、不特定多数の音源(車、工場等)により構成されており、また、建物等の遮へい物により反射回折するため、その予測に際しては音源・地域特性等に関する情報を得る必要がある。

環境騒音の予測モデルはEPAモデル¹⁸⁾にもとづいてすでに筆者らが開発したモデルがある¹⁷⁾。このモデルにおいて騒音の伝播係数は、伝播係数 $m = 145 - 1.33(100 - S)/100$ であり、ここでSは行政管理庁標準4次区画メッシュ(約500m四方)における建物面積率である。

環境騒音予測計算を正確に行うには、建物面積率を適確に把握する必要がある、このため情報が広域的・経常的に得られるランドサットMSSデータを用いて、府域の建物面積率を把握する手法を開発した。

5・2 改良型GMDHによるランドサットMSSデータ解析

ランドサットMSSデータはバンド4(0.5~0.6 μm)、バンド5(0.6~0.7 μm)、バンド6(0.7~0.8 μm)およびバンド7(0.8~1.1 μm)の4つのバンド強度データからなり、分解能は約80m程度である。

4つのバンド強度データとその逆数データを入力変数とし、航空写真より読み取った建物面積率データを出力変数として、AICを評価基準とする改良型GMDHによる解析を行った。(サンプル数42メッシュ)

計算は第一層で打ち切れ、結果として次のような簡単な式が得られた。

$$\begin{aligned} \text{建物面積率(\%)} = & -20.72 \\ & + 64.4 \text{ BAND } 5/\text{BAND } 7 \end{aligned} \quad (5.1)$$

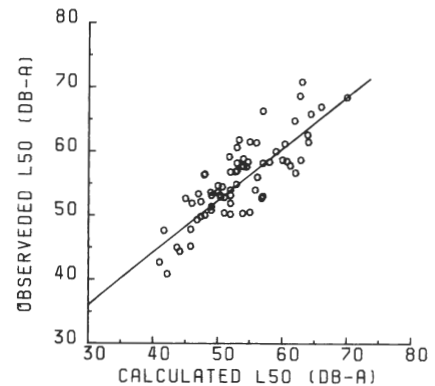


図4 環境騒音予測結果

これは、多段式重回帰モデル等を用いても得ることができる物理的に意味のある式であった。計算値と実測値との相関は0.9であった。

図4に(5.1)式を用いて推定した騒音伝播係数により算出した騒音強度と実測値との関係を示す。

6. おわりに

GMDH のようなブラックボックスモデルの適用については、単なるデータ合せにならないように十分な注意が必要である。ここでは、各々①決定論的なモデルを適用するには計算時間、コスト等の点で適当でない場合、②反応拡散モデル等を適用するには基礎データが十分に得られていない場合、③系の性質そのものが統計的モデルを必要としている場合、等について改良型 GMDH の有用性を実証した。今後環境分野における解析・予測にさらなる活用が期待される。

最後に、本研究推進にあたって有益な助言を賜った大阪大学工学部田村助教に深謝する。

—引用文献—

- 1) 大阪府：大阪府環境総合計画，1982.
- 2) Ivakhnenko A. G. : The group method of data handling, a revival of the method of stochastic approximation. *Sov. Autom. Control*, 1, no. 1, pp. 43-55, 1968.
- 3) Ivakhnenko. A. G. : Grotov G. I. and Visotsky V. N. : Identification of the mathematical model of complex system by the self-organization method. In: E. Halfon (editor), *Theoretical System Ecology*. Academic Press, New York, NY, pp. 325-352.
- 4) Duffy J. J. and Franklin M. A. : A Learning Identification Algorithm and Its Application to Environmental System., *IEEE Trans. syst., Man, Cybern.* SMC-5-2, pp. 226-240, 1975.
- 5) Tamur H. and Kondo T : Larg-Spatial Pattern Identification of Air Pollution by A Combin Model of Source-Receptor Matrix and Revised GMDH. *Proc. IFAC Sympo. on Environmental System Planning and Control*, pp. 373-380, Kyoto, 1977
- 6) 田村坦之, 近藤正: 最近の GMDH の方法論と応用, オペレーションズ・リサーチ, pp. 104-111, 1978年2月号.
- 7) 藤田真一, 葉山幸雄, 正木義則: 大気汚染の短期予測—オキシダントの予測手法を中心として—, 環境技術, Vol. 11, No. 3, 1982.
- 8) 岡本真一他: 多重ボックスモデルによる大気汚染シミュレーション—光化学大気汚染の解析, 大気汚染研究, Vol. 11, No. 1, 1976.
- 9) 横山長之他: 多重回帰モデルによるオキシダント濃度予測の試み, 公害, Vol. 11, No. 6, 1976.
- 10) 正木義則, 藤田真一, 葉山幸雄: 改良型 GMDH 法によるオキシダント濃度の短期的予測, 大気汚染学会講演会要旨集, p. 735, 1982.
- 11) 速水頌一郎他: 瀬戸内海における海水の交流と物質拡散, 第17回海岸工学講演論文集 (土木学会), 1970.
- 12) 堀口孝男他: 三次元モデルによる流れと拡散の数値解法について, 第24回海岸工学講演論文集 (土木学会), 1977.
- 13) 堀口孝男: 非保存系物質拡散の数値解法について, 第19回海岸工学講演論文集 (土木学会), 1972.
- 14) 田畑日出男: 富栄養化水域の水質シミュレーションについて, 環境創造, Vol. 7, No. 7, 1977
- 15) Rand Corporation : A three Dimensional Model for Estualy and Coastal Sea. Vol. 1, Principle of Computation. : No. R-14170 WRR. 1973.
- 16) Fujita S. and Koi H. : Application of GMDH to Environmental System Modelling and Management. In: S. J. Farlow (editor), *Self-Organizing Methods in Modelling : GMDH Type Algorithm*, marcel dekker, inc. (to be pulished).
- 17) 厚井弘志他: 地域騒音防止計画のための総合的な自動車騒音予測システムについて, 全国公害研会誌, Vol. 7, No. 1, pp. 43-52, 1982.
- 18) U. S. Environmental Protection Agency. : Transportation noise and noise from equipmen powered by internal Combution engines, *NTID 300 13*, 1971.