

ファジィ重回帰モデルによるアーチダムの安全管理

SAFETY CONTROL OF ARCH DAMS

BY USING FUZZY MULTIVARIATE REGRESSION MODELS

小林一郎*・三池亮次**・伊東多聞***

by Ichiro KOBAYASHI, Ryoji MIIKE and Tamon ITOH

In the safety control of arch dams the control chart method has been presented by the authors using the multivariate regression model; its control limits can be decided on the assumption that the random errors are distributed normally in the regression model. Even though the random errors are not distributed normally, any predicted variables tend still to the normal distribution due to the central limit theorem, if the sample size is sufficiently large.

But if the sample size is not so large, we cannot accept this assumption about the random errors. To overcome these difficulties by using the probability model, this paper presents the fuzzy multivariate regression analysis (i.e. the possibility model) for the safety control of arch dams.

The examples show that (1) the possibility model is as reliable as the probability model, (2) the possibility model is easier to process the data and faster to predict the safety of arch dams.

1. まえがき

発電、灌漑、工業用水の確保、あるいは洪水調節等を目的として、多くのアーチダムが建設されている。これらの中には、ダムにとって必ずしも良好とは言えない地質条件の地点に建設されたもの、建設後非常に長い期間を経て老朽化したものもある。もし、これらのダムが何らかの原因で崩壊するようなことになれば、それが人命、社会資本に及ぼす影響は甚大である。従って、ダムの力学的挙動を常時観察し、安全管理を行なうことは必要不可欠なことである。一般にアーチダムは初期湛水時において、新たな荷重条件に対応するように非弾性的変形を行う。湛水開始から数年を経てダム変形の挙動は安定するが、やがて漸次劣化していく。とくに地震が発生したとき、その前後においてダム変形の挙動に異常が発生したかどうかを検出することはダムの安全管理上重要である。

筆者らはこれまで、第1に区間推定、第2に重回帰差の検定などの確率論に基づく管理図法に従って、たとえば、地震発生前後のアーチダムの挙動に異常があるかどうかの管理を行なう研究^{1),2)}を続けてきた。ところで、ある現象とその要因間に確率論に基づいた重回帰モデルを設定し、管理図の管理限界を定め、前記第1の区間推定によってその挙動が安定したものかどうかを予測する時、実データと真値のずれ、すなわち回帰偏差は正規

* 工博 熊本大学助教授 工学部土木環境工学科 (〒860 熊本市黒髪2丁目)

** 工博 熊本大学教授 同 上

*** 前田建設工業(株) 埼玉県草加市瀬崎町1331-1

分布に従うと仮定している。しかし、この仮定が成立し得ないとき確率モデルによる区間推定は論理的に不確実なものとなる。回帰偏差が厳密に正規分布に従わなくても、回帰係数や従属変量等の回帰推定値はデータサイズが十分に大きいときは中心極限定理に従って正規分布に漸近する³⁾。前記第2の差の検定に基づく管理図法とは、ある期間の観測値のグループを予備データ、他の期間の観測値のグループを管理データとし、両グループの回帰推定値に差があるかどうかを検定するものであるが、データサイズが十分に大きいとき正規性が保証され管理限界の検定は信頼性のあるものとなる。筆者らは、先に、第2の差の検定による手法において回帰偏差が極端に非対称な指数分布に従うとき数10個のデータサイズがないと回帰偏差は正規分布に収斂しないことをブートストラップ法を用いた数値実験により確認した²⁾。しかしながら、回帰偏差が正規分布に従わずデータサイズがそれ程大きくなくても第2の確率モデルによる場合の管理図法は信頼性が高く実用上有効であることも指摘した。このように第2の確率モデルによる管理図法は実用上有効であるが、相当数のデータが用意され、かつ管理データを規準化して管理図にプロットするのに煩雑な計算を要するなど、リアルタイムな管理に向かない短所を持つ。これに対して、第1の区間推定に基づく場合リアルタイムな管理は可能であるが正規性に関して論理的な厳密性を欠くことになる。

ファジィ重回帰分析^{4),5)}では回帰偏差は回帰モデルのもつ「あいまいさ」に起因すると考え、システム自体がゆらいでいるとみなした可能性モデルによる区間推定を行なうので、正規性の仮定は必要でない。ファジィ重回帰分析の土木関係への応用に関する研究としては、斜張橋の張力の調整⁶⁾や架設時の張力管理⁷⁾への適用、岩盤の分類法への適用⁸⁾の例がある。本研究においては、ファジィ重回帰分析のアーチダム安全管理への適用の可能性を検討し、従来の重回帰分析手法(確率モデル)による安全管理との比較を行なう。2. では第1の確率モデル区間推定と可能性モデル区間推定による重回帰管理限界設定の基礎理論を記し、両理論を対比しつつ安全管理への適用の方法について述べる。3. では実際のアーチダムの安全管理への本法の適用の結果を示し、4. で結論をまとめる。

2. 基礎理論

用語の説明をかねて第1の確率モデルと可能性モデルによる安全管理の基礎式の概要を示す。第2の確率モデルによる手法の紹介は省略する。

2. 1 確率モデルによる安全管理の基礎式

今、従属変量 y_i と説明変数 $x_i = \{x_{ij}\}$, $j = 1, 2, \dots, p$ のデータの組が n 組得られたとする(すなわち、 $i = 1, 2, \dots, n$)。確率モデルによる重回帰分析ではこれらの変数間に、

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_p x_{ip} + e_i \quad (1)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \mathbf{e} \quad (2)$$

の関係が成立すると仮定する。ただし、 e_i は回帰偏差で正規分布に従うものとする。したがって、 y_i も正規分布に従う。また $\mathbf{X}^T = [\mathbf{x}_1 \ \mathbf{x}_2 \ \dots \ \mathbf{x}_n]$ 、回帰係数 $\boldsymbol{\beta} = \{\beta_\alpha\}$ の推定値を $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ とすると、この値は残差 $\mathbf{v} = \mathbf{y} - \mathbf{X}\hat{\boldsymbol{\beta}}$ の2乗和を最小にすることによって次式のように得られる。添字Tは転置記号である。

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = \mathbf{S}_q^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{y} \quad (3)$$

ここに

$$\mathbf{S}_q = \mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} \quad (4)$$

であり、 $\mathbf{Q}$ は n 組の各観測の重さの対角マトリクスである。回帰関数 $\mathbf{y}$ の真の値は

$$\boldsymbol{\mu} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} \quad (5)$$

であり、その推定値 $\hat{\mu}$ は

$$\hat{\mu} = \mathbf{X}\hat{\beta} \quad (6)$$

で与えられる。 $t(n-p'; 0.05)$ を自由度が $(n-p')$ 、 $p' = p+1$ の t 分布の両側 5 % の点の値とし、 y_i と $\hat{\mu}_i$ が正規分布に従うとすれば、 $\mathbf{y}$ の信頼係数 95 % の信頼区間は次式で与えられる⁹⁾。

$$\hat{\mu}_i - t(n-p'; 0.05)\sqrt{\left(\frac{1}{q_i} - D_{ii}\right)V} \leq y_i \leq \hat{\mu}_i + t(n-p'; 0.05)\sqrt{\left(\frac{1}{q_i} - D_{ii}\right)V} \quad (7)$$

ここに、 y_i 、 $\hat{\mu}_i$ は $\mathbf{y}$ 、 $\boldsymbol{\mu}$ の i 番目に要素である。 q_i 、 D_{ii} は $\mathbf{Q}$ 、 $\mathbf{D} = \mathbf{X}\mathbf{S}_q^{-1}\mathbf{X}^T$ の i 行 i 列要素である。 $V = S_E/(n-p')$ は不偏分散、 S_E は残差平方和である。また、上式を無次元化すると次式となる。

$$-t(n-p'; 0.05) \leq \frac{y_i - \hat{\mu}_i}{\sqrt{\left(\frac{1}{q_i} - D_{ii}\right)V}} \leq t(n-p'; 0.05) \quad (8)$$

式 (7) は y_i の上下限値を設定しているので、信頼区間の物理的意味は明確であり時系列変化を見る場合にはこの式を用いると分かりやすい。ただし、区間幅が変動するため、実際の安全管理を行う場合管理はずれデータを検出にくいという難点がある。これに対して式 (8) においては、無次元化してあるため物理的意味ははっきりしないが、上下限管理限界の値は $\pm t(n-p'; 0.05)$ という定数であり、この式に従って管理図を描くと極めて容易に管理はずれのデータを検出できる。

筆者らが行った区間推定の手法のダムの安全管理への応用は、次のような考え方に基づくものである¹⁾。

- (i) 湛水初期の非弾性的挙動が顕著な区間は除き、その後のダムの挙動が安定した、1 年以上の期間のデータを予備データとする。
- (ii) この予備データに対して回帰モデルと信頼区間を設定する。
- (iii) 管理を行おうとする期間のデータの回帰構造が予備期間の信頼区間から頻繁に逸脱する場合には、異常があると推定する。

回帰偏差が正規分布に従わないとき、 y_i が正規分布に従わないから管理データの y_i と予備データからつくられた回帰推定値 $\hat{\mu}_i$ に対する残差の正規性も保証されない。したがって、上記の信頼区間の意義が不明確となる。ただし、十分に大きいデータサイズをもった管理データから推定される回帰推定値は、中心極限定理に従って、正規分布に漸近する。この性質を用いて筆者らは回帰モデルの間の差の検定手法に従って、安全管理を行う手法も提案している^{1), 2), 3)}。

2. 2 可能性モデルによる重回帰分析

予備データから得られた回帰推定値 $\hat{\mu}_i$ と管理データ y_i との残差の正規性が保証されないなら、確率モデルによる区間推定が論理的に不確実となるであろう。このため、ファジィ重回帰を用いた可能性回帰モデルによる安全管理の有効性を検討することは意義のあることに思われる。

L-R ファジィ数のうち特に対称なものを L-L ファジィ数⁴⁾と呼び、慣用的に下付き添え字 L をつけて表記するようである。ここでも対称なファジィ数 $\tilde{A}$ を $\tilde{A} = (\alpha, c)_L$ と表現し、その帰属度関数 μ_A を、次のように定義する。

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 - |x - \alpha| / c & c > 0 \\ 1 & x = \alpha ; c = 0 \\ 0 & x \neq \alpha ; c = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式 (9) の定義によってファジィ数 $\tilde{A}$ は図-1 のような三角形のファジィ数になる。図において α は可能性分布の中心を、 c は拡がりを表わし、 μ_A は「 x は α である」という可能性を表す。次に、対称ファジィ数 $\tilde{A}_j = (\alpha_j, c_j)_L$ によって可能性線形システムを

$$\tilde{Y}_i = \tilde{A}_0 + \tilde{A}_1 x_{i1} + \tilde{A}_2 x_{i2} + \cdots + \tilde{A}_p x_{ip} \quad (10)$$

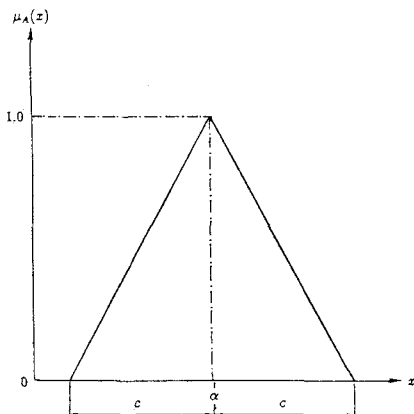


図-1 $\tilde{A} = (\alpha, c)_L$ の帰属度関数

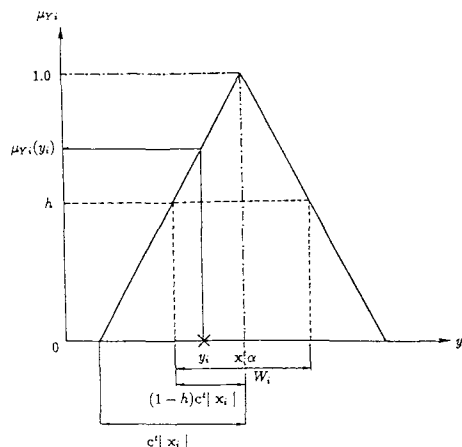


図-2 $\tilde{Y}_i$ の帰属度関数

と表現する。ただし、 $\tilde{Y}_i$ はファジィ出力で、実データ y_i のファジィ推定値である。ファジィ理論の拡張原理⁵⁾によって次のような対称ファジィ数となる（図-2 参照）。

$$\tilde{Y} = (\alpha_1, c_1)_L x_1 + \cdots + (\alpha_p, c_p)_L x_p = (\mathbf{x}^T \boldsymbol{\alpha}, c^T |\mathbf{x}|)_L \quad (11)$$

ファジィ重回帰分析では回帰モデルを得るために以下の手順に従う。

(i) 式(10)の可能性線形システムをモデルとする。

(ii) 実データ y_i がファジィ推定値 $\tilde{Y}_i$ の帰属度関数にある可能性の度合い h 以上で含まれるようにファジィ係数 $\tilde{A}_j$ を決める。すなわち、

$$\mu_{Y_i}(y_i) \geq h \quad (12)$$

ただし、 μ_{Y_i} は $\tilde{Y}_i$ の帰属度関数である。

(iii) ファジィ係数 $\tilde{A}_j$ を決定するには、ファジィ推定値 $\tilde{Y}_i$ の幅の合計を最小にするという規準を用いる。

$$J(c) = \sum_{i=1}^n c^T |\mathbf{x}_i| \rightarrow \min. \quad (13)$$

ただし、 $c^T |\mathbf{x}_i|$ は $\tilde{Y}_i$ の幅を表わす。 $J(c)$ はファジィ推定値のあいまいさの合計である。

以上、(i),(ii),(iii)の下で回帰モデルを得る問題は、次のLP問題に帰着される。

目的関数：

$$\sum_{i=1}^n c^T |\mathbf{x}_i| \rightarrow \min. \quad (14)$$

制約条件：

$$\mathbf{x}_i^T \boldsymbol{\alpha} - (1-h)c^T |\mathbf{x}_i| \leq y_i \quad (15)$$

$$\mathbf{x}_i^T \boldsymbol{\alpha} + (1-h)c^T |\mathbf{x}_i| \geq y_i \quad (16)$$

$$c \geq 0 \quad (17)$$

上式(15)、(16)の制約条件は、実データ y_i がファジィ推定値 $\tilde{Y}_i$ に適合度基準 h ($0 \leq h < 1$) 以上で含まれることを保証するものであり、 y_i の存在範囲として適合度基準 h で区切られる区間の幅 W_i が

$$W_i(h) = 2(1-h)c^T |\mathbf{x}_i| \quad (18)$$

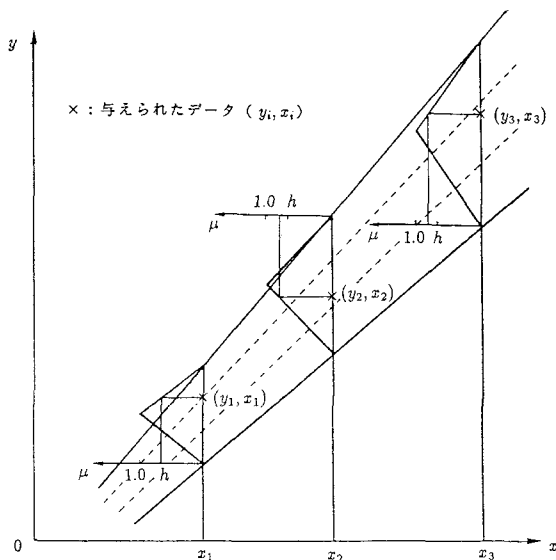


図-3 単回帰における区間推定の概念図

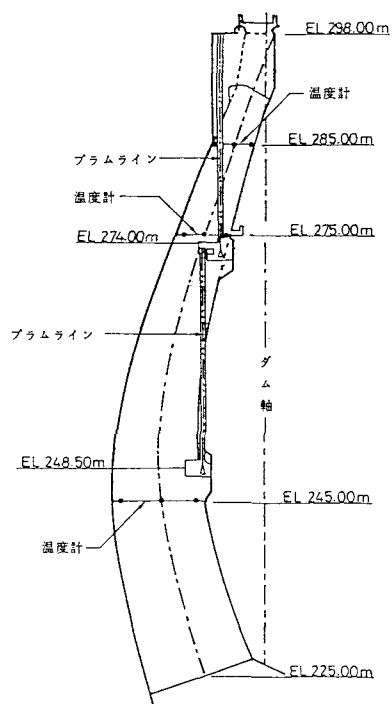


図-4 Aアーチダムのクラウンカンティレバー計器埋設図

で与えられる。これによって、確率モデルにおける区間推定と同様のことがLP問題を解くことによって行なえることとなる。ただし、 h を大きくすると幅 $W_i(h)$ が小さくなり安全管理としては厳しい管理をすることになると思われるが、実際には逆であり、厳しい管理をするには h をより小さく取らなければならない。図-3の単回帰による概念図を例に上記の関係を説明する。図-3において2本の実線が $\mathbf{x}_i^T \boldsymbol{\alpha} \pm c^T |\mathbf{x}_i|$ の点を結んだものであり、2本の点線が $\mathbf{x}_i^T \boldsymbol{\alpha} \pm (1-h)c^T |\mathbf{x}_i|$ の値を結んだものとなる。この2本の点線の幅が式(18)の $W_i(h)$ となり、式(15)、(16)の下で $\mathbf{y}$ のすべてのデータは両点線の間に入っていなければならないこととなる。いま、 $\hat{\mathbf{y}}_i$ の中心の値 $\mathbf{x}_i^T \boldsymbol{\alpha}$ と y_i の差を次のように定める。

$$\ell_i = \mathbf{x}_i^T \boldsymbol{\alpha} - y_i \quad (19)$$

ℓ_i のうち最も大きいもの(図-3では $i=1$ のときの値)を ℓ_U 、最も小さいもの(負で最大のもので、図-3では $i=2$ の時の値)を $-\ell_L$ とする。 ℓ_U 、 $-\ell_L$ の値は $\mathbf{y}$ 、 $\mathbf{x}_i$ のデータが得られたら一定の値として求められる。これに対して、式(18)で定義した $W_i(h)$ の値は式(15)、(16)の制約条件の下で、常に

$$\max(\ell_U, \ell_L) \leq \frac{W_i(h)}{2} \quad (20)$$

でなければならない。従って、上式と式(14)を満足するように $W_i(h)$ の値を定めるには、式(18)で h を大きくすると、その分 $c^T |\mathbf{x}|$ の値を大きくしなければならなくなる。この結果図-3の実線の幅は大きくなり、緩やかな管理を行うこととなる。

2.3 可能性モデルによる区間推定

可能性モデルを用いて確率モデルと同様の区間推定を行うことを試みる。式(15)、(16)の制約条件式を変形すると

$$\mathbf{x}_i^T \boldsymbol{\alpha} - (1-h)c^T |\mathbf{x}_i| \leq y_i \leq \mathbf{x}_i^T \boldsymbol{\alpha} + (1-h)c^T |\mathbf{x}_i| \quad (21)$$

となる。さらに上式を無次元化すると次式を得る。

$$-(1-h) \leq \frac{y_i - \mathbf{x}_i^T \boldsymbol{\alpha}}{\mathbf{c}^T \mathbf{x}_i} \leq (1-h) \quad (22)$$

上記の2式が可能性モデルによる上下方管理限界を与える式であり、確率モデルにおける式(7)、(8)に対応するものである。式(7)、(21)によって描かれる管理図を「管理図1」、式(8)、(22)によるものを「管理図2」と呼ぶこととする。

たわみによってアーチダムの安全管理を実施する場合、たわみの要因としてどのようなものを取り上げ、どのような回帰モデルを設定するかということが問題となる。アーチダムの変形の要因は、過去の研究^{1),10)}にみられるように、水圧荷重を与える水位 H の条件、温度条件としてアーチクラウンに沿う断面における堤体平均温度 t_j と温度勾配 g_j を用いる。図-4はAアーチダムのアーチクラウン断面におけるたわみ計測のためのブラムラインと温度計の埋設の状況が示されている。

前述のように区間推定によって安全管理を行なうには、予備期間のアーチダムの挙動に関するデータを収集する必要がある。このデータを解析して予備期間におけるたわみの管理限界を設定し、予備期間以外の管理期間においてこれから大きく外れるようなたわみのデータがあれば、なんらかの異常を反映すると考えて、水位の抑制や、漏水量のチェック等の判断材料とする。

本研究においては区間推定にファジィ重回帰分析を用いるが、この場合、次のような手順をとる。

- (i) 予備期間のデータについて、式(14)～(16)によるLP計算を行ない、可能性線形回帰モデルの回帰係数を決定する。
- (ii) 管理期間のデータを(i)で求めた回帰式に代入し、たわみの実測値に対するたわみのファジィ推定値を求める。
ただし、予備期間のたわみの実測データは、式(21)を満足しなければならない。
- (iii) もし、予備期間と管理期間のデータが同じ母集団に属するならば、管理期間のたわみ実測値は(ii)で求めたファジィ推定値のある幅の中に含まれている可能性が極めて高いと考えると安全管理を行う。

3. アーチダムの安全管理

3.1 アーチダムの概要

本研究における解析は、実測データを用いて行なった。Aアーチダムは基底標高221m、高さ75m、堤頂長174m、底部厚さ13m、の薄肉ドーム型アーチダムで、洪水調節、灌漑および発電を目的とする多目的ダムである。ブラムラインは二段に入り、下段の計測点はEL 248.3mである。また、解析温度計測断面は、1:EL 245m、2:EL 275m、3:EL 285mである。ダムのたわみはEL 248.3mに対する相対たわみとして観測される。ここでは、EL 298mのEL 248.3mに対する相対たわみ δ_{298} を用いた。また、温度条件としては、解析温度計測断面の実測温度および実測温度から計算された平均温度、温度勾配を用いた。なお、湛水開始日は昭和35年4月2日である。

3.2 可能性モデルによるアーチダムの安全管理

実際の解析では、重回帰分析において、有意な要因のみについて回帰式を立てる。この場合、「有意でない」ということの意味は、要因相互の相関が顕著であって、いづれかの要因を除去してもたわみを十分に説明し得るということであり、これは過去の研究^{1),11)}によって明らかにされている。とくに堤体温度については、相互に顕著な相関があるため、いたずらに多くの堤体温度を要因として用いるのは得策でない。可能性モデルに基づく本研究でも、確率モデルによる解析結果との比較を行なうために確率モデルと同じ要因について回帰係数を求め、アーチダムの安全性を検討する。

3. 2. 1 温度条件として平均温度、温度勾配を用いる場合 - MODEL A

回帰式は、たわみを δ として次のように設定した。

$$\hat{\delta} = \hat{K} + \sum_{j=1}^3 \hat{A}_j(t_j - t_{0j}) + \sum_{j=1}^3 \hat{B}_j(g_j - g_{0j}) + \hat{C}(H - H_0)^2 \quad (23)$$

ここに、 $\hat{K}$, $\hat{A}_j$, $\hat{B}_j$, $\hat{C}$ はファジィ回帰係数 ($j = 1, 2, 3$)、 t_j , g_j , t_{0j} , g_{0j} は計測断面 1, 2, 3 の堤体平均温度、温度勾配とその初期値、 H_0 は基底標高で、 $H - H_0$ は水深である。ただし、前記のように温度条件については、有意な堤体平均温度と温度勾配のみについて $j = 1 \sim 3$ の和をとり回帰モデルを組み立てる。

3. 2. 2 温度条件として堤体温度を用いる場合 - MODEL B

回帰式は、次のように設定した。

$$\hat{\delta} = \hat{L} + \hat{D}_1 t_{11} + \hat{D}_2 t_{12} + \cdots + \hat{D}_9 t_{33} + \hat{E}(H - H_0)^2 \quad (24)$$

ここに、 $\hat{L}$, $\hat{D}_i$, $\hat{E}$ はファジィ回帰係数 ($i = 1, \dots, 9$)、 t_{jk} ($j = 1, 2, 3; k = 1, 2, 3$) は第 j 番目の計測断面における第 k 番目の計測点の堤体温度であり、図-4 の計器埋設図において・印で示されている。また、 H_0 は基底標高、 $H - H_0$ は水深である。

3. 3 計算結果

ここでは、2. 3 で述べた可能性モデルに基づく 2 つの「管理図」を用いて安全性を検討する。管理図は縦軸にたわみまたは無次元化されたたわみを、横軸には時間を取っている。管理図 1 においては、たわみの実測値を点で、上下方管理限界線を実線で示している。この線の間に点が入らない場合は「管理外れ」となる。管理図 2 では、縦軸は無次元化されたたわみであり、外側の管理限界は ± 1 の平行線で $h = 0$ に対応する管理限界である。*印は無次元化されたたわみの実測値を示している。なお、内側の平行線は式 (22) の上下方管理限界値 $\pm(1 - h)$ であり、予備期間のたわみの実測値はすべてこの間に入る。

解析には予備期間のとり方の異なる 14 個のケースを設定した。これは過去の研究¹⁾に準ずるもので、予備期間のとり方および有意な要因の個数 p は、表-1 に示すとおりである。前述のように、一般にダムは湛水初期に非弾性的挙動を行うため湛水初期のたわみのデータを予備データとするのは実際の安全管理を行う上では適当でないが、ここではアーチダムの安全管理への可能性モデルの適用性と確率モデルによる解析結果との比較が目的であるので、あえてこれらのデータについての解析も行った。なお、とくに記していないときには適合度基準は $h = 0.5$ とした。また、以下の計算で MODEL A の i 番目の解析結果を単に CASE A- i と呼ぶこととする。

表-1 可能性モデルにおける予備期間、データサイズ、および要因数

CASE	予備期間	予備データのサイズ	有意な要因数	
			MODEL A	MODEL B
1	35. 4/2 ~ 35. 5/30	12	1	1
2	35. 4/2 ~ 35. 6/27	17	2	2
3	35. 4/2 ~ 35. 7/26	20	3	5
4	35. 4/2 ~ 35. 8/30	25	5	4
5	35. 4/2 ~ 35. 9/27	29	6	6
6	35. 4/2 ~ 35.10/25	33	5	6
7	35. 4/2 ~ 35.11/24	36	5	4
8	35. 4/2 ~ 35.12/27	40	5	4
9	35.10/4 ~ 36. 3/28	22	4	5
10	35.10/4 ~ 36. 6/27	31	4	4
11	35.10/4 ~ 36. 9/19	39	5	6
12	36. 1/3 ~ 36. 6/27	20	4	5
13	36. 1/3 ~ 36. 9/19	28	4	3
14	36. 1/3 ~ 36.12/26	17	5	5

3. 3. 1 可能性モデルによる安全管理

表-2 は式 (23) で示した MODEL A のファジィ回帰係数の値である。表中にはそれぞれのファジィ数について中心 α と幅 c を (α , c) のように併記し、ブランクは、その要因が有意でないことを表わしている。結果をみると幅 c の値がゼロのものがかなりあり、結果的に回帰係数のうちファジィ数にならないものがあることがわか

表－２ モデル A のファジィ数の推定値

CASE	$\hat{K}$	$\hat{A}_1$	$\hat{A}_2$	$\hat{A}_3$	$\hat{B}_1$	$\hat{B}_2$	$\hat{B}_3$	$\hat{C}$
1	(-4.595, 0.490)		(-1.765, 0.470)					
2	(-4.572, 0.747)	(1.628, 0.000)	(-1.829, 0.221)					
3	(-4.359, 1.289)	(1.731, 0.000)	(-1.095, 0.070)	(-7.966, 0.000)				
4	(-4.813, 1.657)	(2.247, 0.000)	(-0.857, 0.000)	(-11.890, 0.000)	(-1.604, 0.000)			
5	(-5.403, 1.719)	(1.991, 0.000)	(-1.169, 0.000)		(-7.955, 0.000)	(-2.511, 0.000)	(0.014, 0.000)	(0.001, 0.000)
6	(-5.369, 1.645)	(2.014, 0.000)	(-1.164, 0.000)		(-8.121, 0.108)	(-2.534, 0.000)		(0.001, 0.000)
7	(-5.382, 1.623)	(2.063, 0.000)	(-1.213, 0.000)		(-7.936, 0.185)	(-2.727, 0.000)		(0.001, 0.000)
8	(-5.311, 1.511)	(2.072, 0.000)	(-1.173, 0.025)		(-8.306, 0.083)	(-2.640, 0.000)		(0.001, 0.000)
9	(-8.682, 0.176)	(1.681, 0.000)	(-1.950, 0.003)			(-4.415, 0.226)		(0.002, 0.000)
10	(-5.797, 2.243)	(1.256, 0.000)	(-1.584, 0.000)			(-5.072, 0.482)		(0.001, 0.000)
11	(-3.915, 0.681)	(1.249, 0.209)	(-1.478, 0.000)		(-1.784, 1.749)	(-4.072, 0.000)		(0.001, 0.000)
12	(-7.458, 0.127)	(1.782, 0.266)	(-1.620, 0.382)		(-4.178, 0.000)			(0.002, 0.001)
13	(-2.669, 1.502)	(1.455, 0.614)	(-1.780, 0.000)			(-2.491, 0.000)		(0.001, 0.000)
14	(-3.385, 0.912)	(0.868, 0.848)	(-1.337, 0.000)		(-3.008, 0.000)	(-3.043, 0.000)		(0.001, 0.000)

る。これは、2. で示したようなLP問題を設定すると、すべての回帰係数に幅をもたすよりも一部の回帰係数のみをファジィ数とした方が目的関数である式(14)の値を小さくすることができるためである。

予備期間として非弾性挙動が顕著な湛水初期のデータを含むCASE 1～8においては水位の効果が十分に現れない。Aダムのような中規模の薄肉アーチダムでは、一般に温度によるたわみに比し、水圧によるたわみが小さく、しかも回帰モデル中に非弾性変形を含むと、水圧によるたわみ効果は検出され難い。温度勾配の効果についても同様である。

以下に代表的なケースについての結果を示す。なお、以下に示す「管理図2」においてUCL、LCLは上方および下方の管理限界線である。図－5はCASE A-8の結果である。これは湛水初期の8カ月にわたるデータを予備データとして用いた例で、実際の安全管理の問題としては適当でない。ダムが安定期に入った管理期間においてはダムの挙動は安定しているはずにもかかわらず、管理期間のすべてのデータが管理はずれとなる。

図－6はCASE A-11の管理図である。湛水開始から半年経過し安定期に入ってから期間を予備データとして採用し、その後のデータについての安全管理を行なった例である。「管理図2」において右端の管理期間のデータの管理外れの度合いが大きくなっているのが判るが、このことから、予備期間と管理期間のダムの挙動の回帰構造に何らかの変化があったと判断できる。前記第2の重回帰差の検定による手法と異なり、確率モデルと可能性モデルとを問わず、このようにリアルタイムで変化を検討できるのが区間推定手法の特徴である。湛水初期においても管理はずれが見られるが、これは非弾性変形に基づくものである。このことは重畳対数曲線で経時変化を与えれば検出可能である^{11),12)}。ただし、予備期間と管理期間のデータの回帰構造が完全に異なるものであると断定するには、より長期の予備期間について、たとえば差の検定¹⁾等の手法で検証しなければならない。

図－7はCASE A-12の管理図である。CASE A-11が予備データとして1年間のデータを用いているのに対して、ここでは半年のデータで安全管理を行っている。図－6と7を比較すると、「管理図1」の上下方管理限界の幅は図－7の方が大きい、「管理図2」では図－7の方が管理はずれのデータが多くなっている。つまり、管理期間のとり方が適当でないときには、区間推定の幅が広くても、回帰式自体がアーチダムの回帰構造を適正に推定できないことがわかる。このことから可能性モデルによるアーチダムの安全管理においても、予備期間としては少なくとも一年間のデータを用いるべきであることがわかる。

図－8はCASE B-11の管理図である。MODEL Aが温度条件として式(23)で示したように堤体平均温度と温度勾配を用いたのに対して式(24)のMODEL Bでは堤体温度を用いている。図－6のCASE A-11と比較すると、管理はずれとなるデータの傾向はほぼ同じであることがわかる。物理的には生の堤体温度から堤体平均温度と温度勾配を計算し、これをパラメータとしてたわみとの回帰式を求める方が望ましいが、可能性回帰推定においては、先の堤体温度をパラメータとして与えても、ダムの安全管理上支障のないことがわかる。

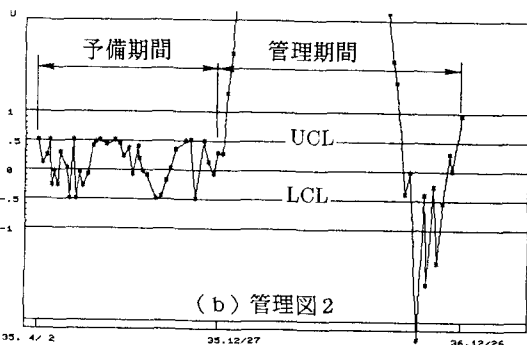
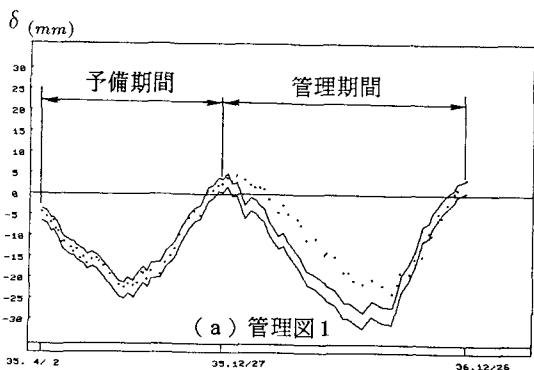


図-5 可能性モデルによる管理図 (CASE A-8)

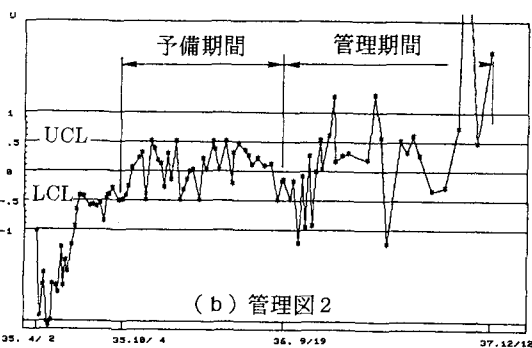
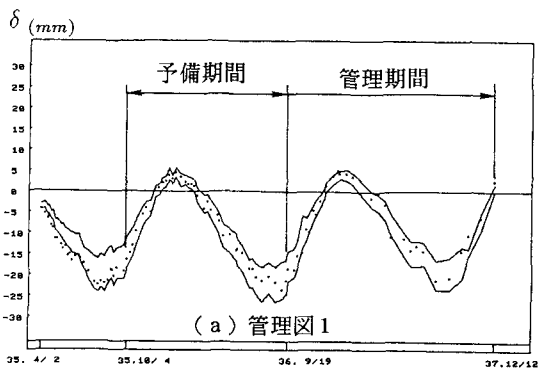


図-6 可能性モデルによる管理図 (CASE A-11)

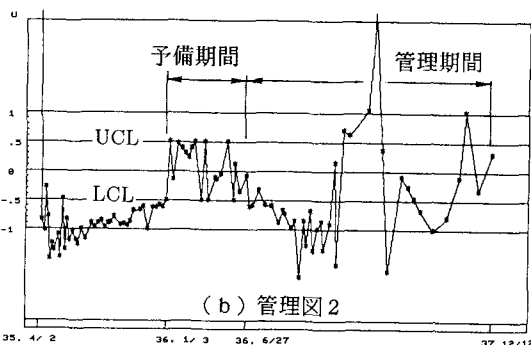
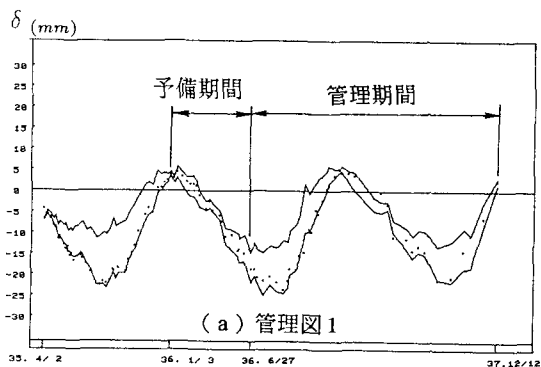


図-7 可能性モデルによる管理図 (CASE A-12)

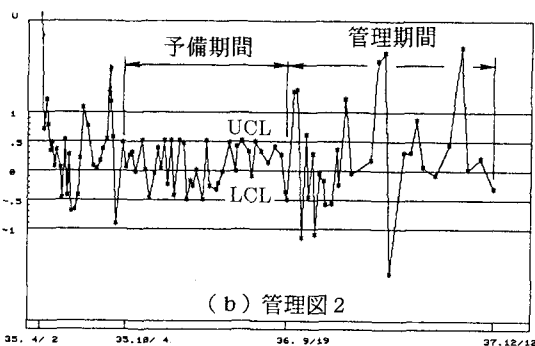
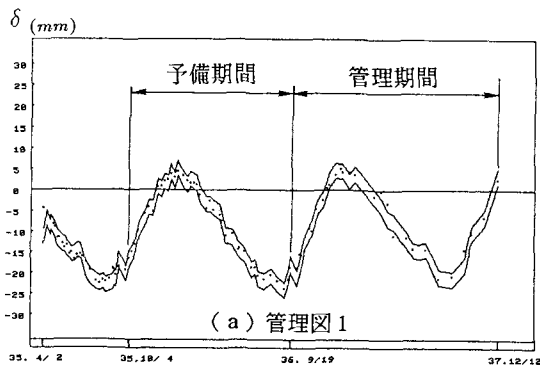


図-8 可能性モデルによる管理図 (CASE B-11)

3. 3. 2 適合度基準 h と区間幅の関係

ファジィ重回帰においては、パラメータ h を変化させることによって区間推定の幅を増減させることができる。いずれのモデルにおいても傾向としては同じことが言えるので図-6で示した CASE A-11 を解析例として述べるに留める。 h を 0.1 と 0.8 に変化させたときの管理図 1 の変化を図-9に示す。2. 2 で述べたように、 h を大きくとるに従って、管理区間幅が大きくなり、管理外れのデータが少なくなっていくのが判る。

$h = h$ のときの各ファジィ回帰係数の幅の値を c 、 $h = h'$ のときの値を c' とすると $c' = c(1-h)/(1-h')$ の関係がある。また、ファジィ回帰係数中心の値は h が変化しても変わらない。したがって、一度 LP 計算によって c が求めれば、直ちに c' を求めることができ、容易に適合度基準 h が変化した場合の上下方管理限界線に関する

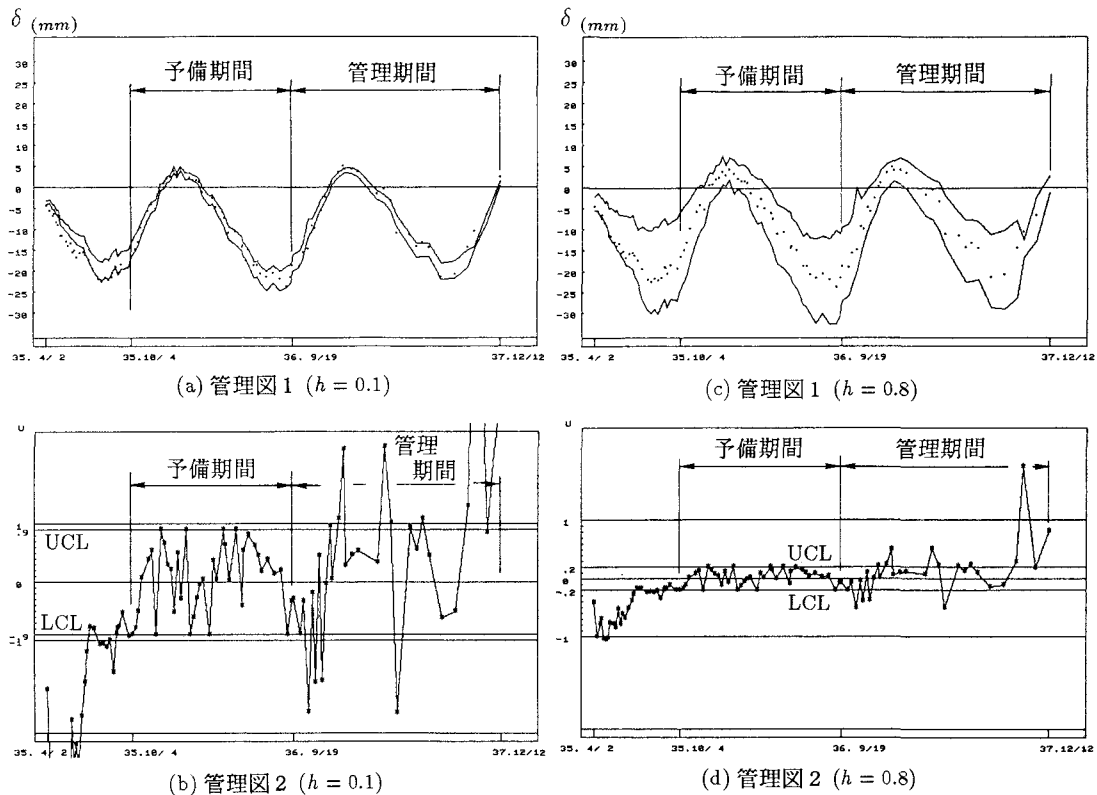


図-9 適合度基準 h と区間幅の関係

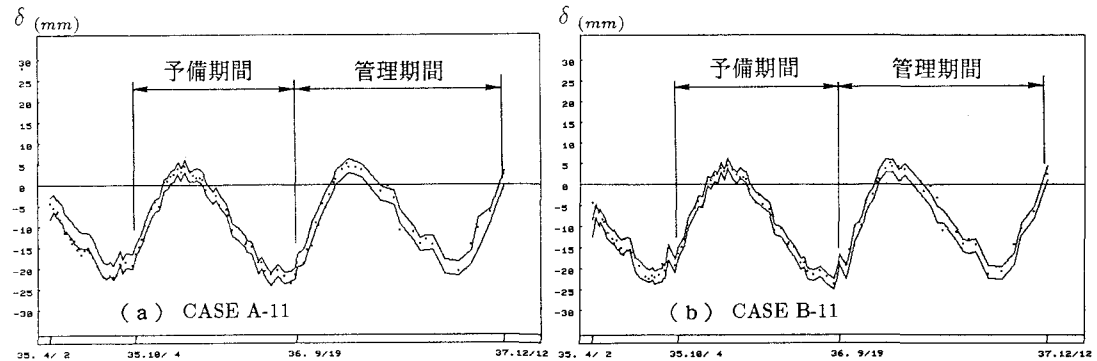


図-10 確率モデルによる管理図

パラメータ解析を行うことができる。

たとえば、図-6 (a) ($h=0.5$) において管理外れが生じた時点でダムの総点検を行い、異常が発見されないとき、あるいは安全が確認されたときには、管理外れのデータが区間幅内におさまるように h をより大きな値 (たとえば、 $h=0.8$) に変更してそれ以降の安全管理を行なうことも可能であろう。

本管理図法は、もし予備期間において安定した挙動をしており、かつ、予備期間と管理期間が同じ母集団に属するなら、管理期間においてもダムは安定であると推定する。実測値がそのように定められた管理限界を超え、ダムが管理期間において予備期間と異なった挙動を示したと推定されるとき警戒する。しかし、それが直ちに危険であるということにはならない。適当な実用上の管理限界すなわち h を設定するには、たわみ以外の破壊の力学、クラックとか漏水の状況変化等の管理、社会科学のもつあいまいさをも考慮したダム管理者等のエクスパートの経験から決定されるべきものと思われる。

3. 3. 3 可能性モデルと確率モデルの比較

確率モデルによる区間推定の解析結果¹⁾ (「管理図1」) を図-10に示す。確率モデルにおいては式(7)に示したように信頼係数95%の値に対して信頼区間が設定されている。これは図-6、8(a)で示したCASE A-11、B-11の可能性モデルの結果に対応するもので、図より可能性モデルによる安全管理が確率モデルによるものと同じ程度の精度で行われることがわかる。信頼区間の幅は確率モデルによる方が小さいが、これは可能性モデルにおける適合度基準を $h=0.5$ としたためであり、3. 3. 2で述べたように h の値をより小さくすれば確率モデルと同じ程度の信頼区間の幅を得ることは容易である。ここでは、2例についての結果しか示していないが、28ケースすべての結果から、確率モデルによる95%信頼区間を用いた区間推定における上下方限界間の幅と同程度の幅となるようにするには、可能性モデルにおいては適合度基準 h を0.2から0.5の範囲に設定すればよいことになる。

アーチダムの安全は、単にダム本体の力学的問題にとどまらず、地域社会の問題である。このため安全管理において、確率モデルの区間推定における信頼係数や可能性モデルにおける適合度基準といった「しきい値」の設定は、力学的、数学的根拠だけでなく社会心理学的な検討も必要であり、ある程度幅のある値となるものと考えられる。このような点を考慮すると、アーチダムの安全管理には数学的に精緻な理論が構築されている確率モデルを用いるよりも、システム自体のあいまいさをモデル化した可能性モデルの方が適用の発展性が高いと思われる。

4. 結論

ファジィ重回帰分析における区間推定の手法を、アーチダムの安全管理へ適用し、数値解析を行なった。ここでは、本研究の手法を可能性モデルによる手法、従来の確率論に基づくものを確率モデルによる手法と呼び両者の安全管理の結果の比較も行なった。この結果は以下のようにまとめられる。

- 1) アーチダムのたわみは、可能性モデルによる区間推定の手法を用いて、従来の確率モデルによる区間推定と同程度の高い精度で、推定することが可能である。
- 2) 可能性モデルによる安全管理では、確率モデルを用いる区間推定の場合のように回帰偏差の確率分布の正規性を理論的根拠としない。確率モデルでは正規性を保証するため回帰推定値をパラメータとして使用し、データサイズを大きくして、中心極限定理を期待するが、可能性モデルでは、このような論理的な煩雑さを避けることができる。また、区間推定によるのでリアルタイムな安全管理が可能となる。ただし、可能性モデルであっても、対象とするダムのたわみの回帰構造を適正に推定するためには、予備期間のデータは安定期間において多くある程良い。本研究のように水位や温度という要因が1年を周期として変動するようなアーチダムに関しては少なくとも月に1ないし2回の観測で1年間のデータが必要であることが解析の結果確認された。

- 3) ファジィ重回帰分析における区間推定では、適合度基準 λ を変えることで、区間幅を容易に増減させることができ、区間推定に専門家の意思を反映させる余地を残すことができる。このため、アーチダムのように力学的な面だけでなく、社会的な側面からも安全性の判断をしなければならない場合には、確率モデルよりも社会科学の持つあいまいさをも包含するような可能性モデルの方が安全管理の体系を確立するのに適していると考えられる。

なお、今後さらに検討すべき問題点として、以下のものが挙げられる。

- 1) 上記の安全管理の理論的な根拠は予備期間において、アーチダムの挙動が安定したものであることが既知であるとき、予備区間と管理区間において、管理限界からはずれが顕著で回帰構造が異なる場合は、何らかの異常原因ありと判断することにある。しかし、このような異常原因があっても、それが直接アーチダムの崩壊につながるものではないかもしれない。ダムが危険であることを警告する管理限界とか維持補修工事を行うべき管理限界をどのように設定するべきかは、今後の課題である。
- 2) ファジィ回帰係数を決定する際に、LP問題を設定するが、可能性モデルにも本研究で採用したものの他に、すべてのファジィ回帰係数の幅が値を持つようにするものや、回帰係数だけでなくその要因となる観測データもすべてファジィ数と考えるもの等いくつかのモデル化が提案されている¹³⁾。アーチダムの安全管理には、どのようなモデル化が適当であるかの比較検討を行う必要がある。

これらについては、実測データの解析だけでなくシミュレーション解析も含めて、より詳細な解析データおよび管理図の検討を行う予定である。

謝辞

本研究に対して京都大学工学部古田 均助教授から貴重なご意見を戴きました。また、Aダムの実測資料については宮崎県企業局から提供を受けました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Miike, R., Kobayashi, I. : Safety Control of Dams by Multivariate Regression Model, Proc. of 4th Int. Conf. on Structural Safety and Reliability, Vol III, pp.383-392, 1985.
- 2) Miike, R., Kobayashi, I. : Safety Control of Arch Dams by Regression Model, Proc. of 2nd Int. Sympto. on Design of Hydraulic Structures 89, Balkema, pp.91-96, 1989.
- 3) 三池亮次、小林一郎：重回帰安全管理へのブートストラップ手法の適用、第1回構造物の安全性と信頼性に関する国内シンポジウム、pp.65-70, 1987.
- 4) 田中英夫：可能性モデルとその応用、システムと制御 Vol.28, No.7, pp.447-451, 1984.
- 5) たとえば、寺野寿郎他編：ファジィシステム入門、オーム社、pp.67-81, 1987.
- 6) 古田 均、亀井正博、金吉正勝、田中 洋：ファジィ理論を応用したケーブル張力の最適調整法、システム最適化に関するシンポジウム講演論文集、pp.147-154, 1989.
- 7) 古田 均、亀井正博、金吉正勝、田中 洋：斜張橋の架設管理へのSI法とファジィSI法の適用、構造工学論文集、Vol.36A, pp.459-467, 1990.
- 8) 鈴木昌次、古川浩平、井上洋司、中川浩二：ファジィ回帰モデルに基づくトンネル岩盤分類法の提案、土木学会論文集 第418/III-13, pp.181-190, 1990.
- 9) Draper, N.R. and Smith, H. : Applied Regression Analysis, John Wiley & Sons., 1967.
- 10) Rocha, M., Serafim, J.L. and Da Silveira, A.F. : A Method of Quantitative Interpretation of the Results Obtained in the Observation of Dam, Transaction of the 6th International Congress on Large Dams, New York, pp.371-369, 1958.
- 11) Nakamura, K., Iida, R. and Miike, R. : Analysis on Behavior of Arch Dams by Multivariate Analytical Method, Transaction of the 8th International Congress on Large Dams, Vol.4, Edinburgh, Great Britain, pp.753-781, 1964.
- 12) 水野光章、大槻光雄、永山功：コンクリートダムの挙動(II) -変形・応力-、大ダム、No.100、日本大ダム会議、pp.17-31, 1982.
- 13) たとえば、坂和正敏：ファジィ理論の基礎と応用、森北出版、pp.84-105, 1989.

(1990年10月12日受付)