

II-39

F U Z Z Y制御器を加えた
多次元F U Z Z Y推論法による流出予測

北海道大学工学部 正 員 藤田睦博
北海道大学大学院 学生員 朱 木蘭
北海道開発局 正 員 橋本識秀

1 はじめに

水文分野において、多くの場合にあいまいな要素が数多く含まれている。観測値自身にも誤差があるし、互いの関係式も明確な数学式により表しにくい場合がある。本研究は、あいまいな量を有効に取り扱えるFUZZY理論を用い、実流域における降雨と流出の3、4次元的なFUZZY関係を求め、それぞれリードタイム1、2、3時間の流出を予測するもので、更に予測誤差を補正するため、FUZZY制御器を加え、予測値を修正したものである。

2 FUZZY推論法による流出予測

(1) 基礎理論¹⁾

式(1)は流出系の一般的なシステム方程式を表している。実際の解析では、実流域の特性と予測のリードタイムに応じて、簡略式を用いればよい。本研究で、あるアメリカNEW YORK州のいくつかの流域における観測資料を用いて解析した。式(2)のような3次元的な関係式が考えられた。更に予測精度を比較するため、4次元的な関係式(3)も取り扱った。

$$\Delta Q(t) = f \{R(t-1) \dots R(t-m), \Delta Q(t-1) \dots \Delta Q(t-n)\} \quad (1)$$

$$\Delta Q(t) = f \{R(t-2), \Delta Q(t-1)\} \quad (2)$$

$$\Delta Q(t) = f \{R(t-2), \Delta Q(t-1), \Delta Q(t-2)\} \quad (3)$$

ただし: R:降雨量 Q:流量 $\Delta Q(t-1) = Q(t-1) - Q(t-2)$:流出変化量

FUZZY理論により、上式(2)が以下のような条件付き命題 P_t (t時刻における命題Proposition) に書き直すことができる:

$$\text{IF } R(t-2) \text{ IS } M_{R(t-2)} \text{ AND } \Delta Q(t-1) \text{ IS } M_{\Delta Q(t-1)} \text{ THEN } \Delta Q(t) \text{ IS } M_{\Delta Q(t)} \quad (4)$$

ただし、 M_R 、 $M_{\Delta Q}$ は図-1のようなそれぞれ降雨量、流出量のメンバーシップ関数である。

したがって、(2)に於ける3次元的なFUZZY推論

手法は以下のように考えられる:

まず、上述した条件付き命題 P_t により表した

t時刻における「あいまい関係」を求める:

$$P_t = M_{R(t-2)} \wedge M_{\Delta Q(t-1)} \wedge M_{\Delta Q(t)} \quad (5)$$

ただし $\wedge$: MIN演算

次に、t時刻までに全体の「あいまい関係」を合成する。

$$\Pi_t = P_1 \vee P_2 \vee \dots \vee P_t = \Pi_{t-1} \vee P_t \quad (6)$$

ここで、 $\vee$ は和演算(MAX演算)を示す。又、過去の水文資料がある場合、前回の洪水の終了時刻に得られる Π を Π_{t_0} と表し、これまでの出水の経験として、今回の予測計算の際の初期値とすることができる。

$$\Pi'_t = \Pi_{t_0} \vee \Pi_{t-1} \vee P_t \quad (7)$$

最後、 Π_t の出水経験により、1時間先の流出を予測する。

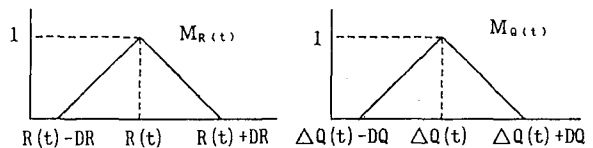


図-1

降雨量と流出量のメンバーシップ関数

$M_{\Delta Q}(t+1) = \Pi_t \diamond M_{R(t-1)} \diamond M_{\Delta Q(t)}$ (8) ここに、演算 $\diamond$ はFUZZY合成(Composition)を意味している。
 同じように、(3)式に応じる4次元なFUZZY推論手法は右式(4)のように考えられる。

$$\left. \begin{aligned} P_t &= M_{R(t-2)} \wedge M_{\Delta Q(t-2)} \wedge M_{\Delta Q(t-1)} \wedge M_{\Delta Q(t)} \\ \Pi_t &= P_1 \vee P_2 \vee \cdots \vee P_t = \Pi_{t-1} \vee P_t \\ (\Pi'_t &= \Pi_t \vee \Pi_{t-1} \vee P_t) \\ M_{\Delta Q}(t+1) &= \Pi_t \diamond M_{R(t-1)} \diamond M_{\Delta Q(t-1)} \diamond M_{\Delta Q(t)} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

本研究は、1時間先の流出を用い、更に2時間先の流出予測も計算した。予測アルゴリズムとは：

3次元の場合

4次元の場合

$$\left. \begin{aligned} \Delta\tilde{Q}(t+1) &= f \{R(t-1), \Delta Q(t)\} \\ \Delta\tilde{Q}(t+2) &= f \{R(t), \Delta\tilde{Q}(t+1)\} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta\tilde{Q}(t+1) &= f \{R(t-1), \Delta Q(t-1), \Delta Q(t)\} \\ \Delta\tilde{Q}(t+2) &= f \{R(t), \Delta Q(t), \Delta\tilde{Q}(t+1)\} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

もし、3時間先の流出予測もしようならば、 $\Delta Q(t+3)$ を予測するため、未知な $R(t+1)$ を使う必要なので、本来の予測精度がよりいい予測方程式 $\Delta\tilde{Q}(t+1) = f \{R(t-1), \Delta Q(t)\}$ 、あるいは $\Delta\tilde{Q}(t+1) = f \{R(t-1), \Delta Q(t-1), \Delta Q(t)\}$ の代わりに、 $\Delta\tilde{Q}(t+1) = f \{R(t-2), \Delta Q(t)\}$ 、又 $\Delta\tilde{Q}(t+1) = f \{R(t-2), \Delta Q(t-1), \Delta Q(t)\}$ を用いる。すなわち、リードタイム2時間の予測ではリードタイム1時間の予測で得られた $\Delta Q(t+1)$ を用い、リードタイム3時間の予測ではリードタイム1,2の予測結果から得られる $\Delta Q(t+1)$ および $\Delta Q(t+2)$ を用いているのが特徴である。

3次元の場合：

4次元の場合：

$$\left. \begin{aligned} \Delta\tilde{Q}(t+1) &= f \{R(t-2), \Delta Q(t)\} \\ \Delta\tilde{Q}(t+2) &= f \{R(t-1), \Delta\tilde{Q}(t+1)\} \\ \Delta\tilde{Q}(t+3) &= f \{R(t), \Delta\tilde{Q}(t+2)\} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta\tilde{Q}(t+1) &= f \{R(t-2), \Delta Q(t-1), \Delta Q(t)\} \\ \Delta\tilde{Q}(t+2) &= f \{R(t-1), \Delta Q(t), \Delta\tilde{Q}(t+1)\} \\ \Delta\tilde{Q}(t+3) &= f \{R(t), \Delta\tilde{Q}(t+1), \Delta\tilde{Q}(t+2)\} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

2 実例の計算と考察：

本計算では、2つのアメリカ流域を対象とし、3、4次元のFUZZY推論手法を用い、それぞれリードタイム1、2、3時間の流出を予測した。

まず、3次元のFUZZY推論手法による計算である。

BUTTERNUT CREEK (流域面積:154.556KM²)について、5つの洪水資料がある。初めの2例の洪水資料(1975.10.17日と1976.10.7日の洪水)を出水経験 Π_t とし、図-1のDR=2(mm/hr), DQ=0.08(mm/hr)の計算条件の下で、次の1976.10.20日と1977.9.26日、1977.10.16日の3つの洪水を予測した。図-2は出水経験として学習した2つの洪水例で、図-3、4、5はリードタイムを1、2、3時間にした時の予測結果である。

これらの図から分かるように、予測の対象とした洪水はその規模、降雨の型などは学習した洪水のボタンと類似している。したがって良好な結果が得られている。また、予測の対象とした洪水は流出変化 ΔQ が緩く、単一の

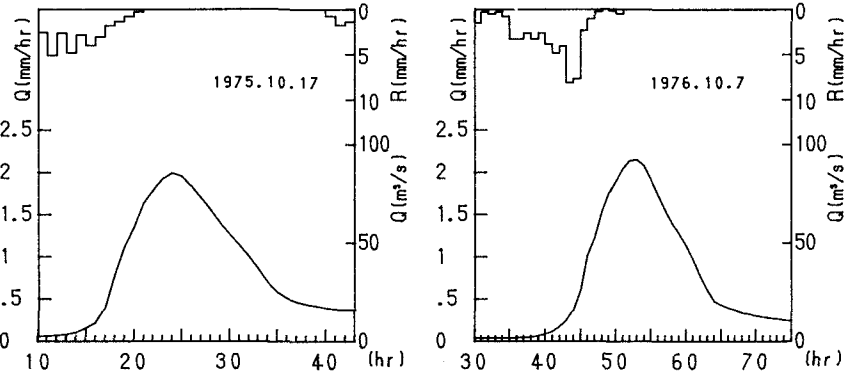


図-2 学習の対象とした出水 (BUTTERNUT CREEK)

ピークの出水で、比較的予測しやすいタイプの洪水である。

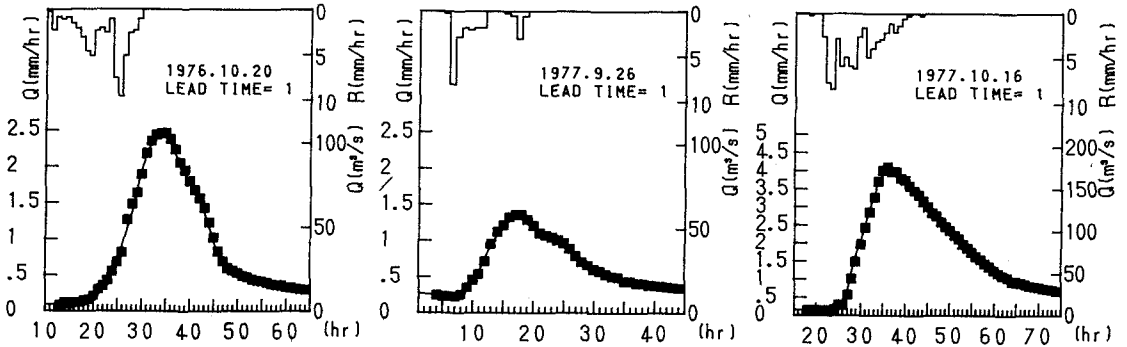


図-3

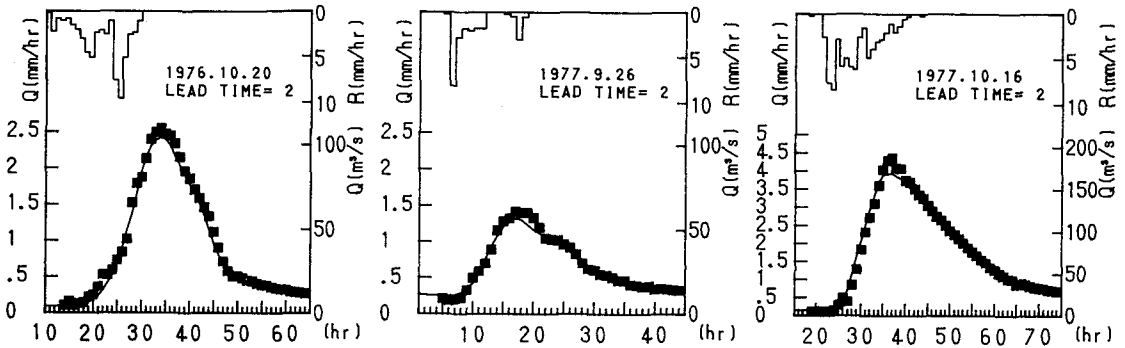


図-4

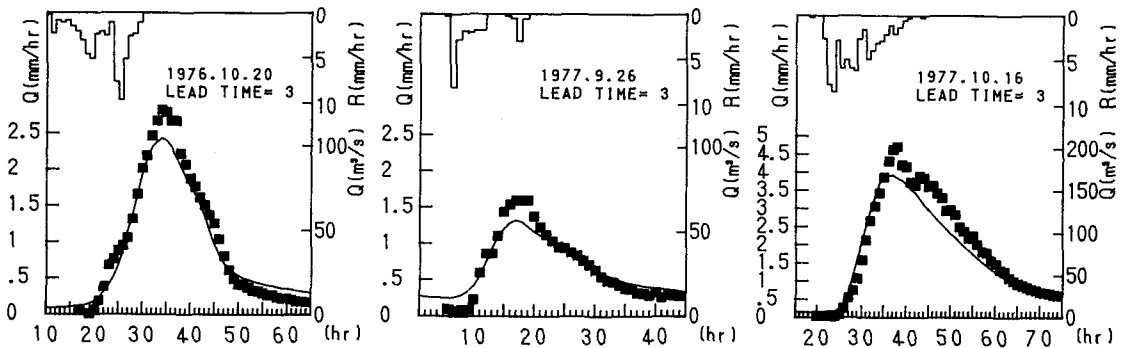


図-5

リードタイム1、2、3時間の予測結果 (BUTTERNUT CREEK)

次に、予測しにくい洪水（ダブルピークをもつ出水、または降雨、流出変化が激しい出水）に対する予測結果を調べるために、他の流域であるNEWTOWN CREEK（流域面積：200.638KM²）について、1976.10.7日と1976.10.7日、1977.9.24日、1977.10.16日の4つの洪水を出水経験とし、 $DR=1(\text{mm/hr})$, $DQ=0.06$ の計算条件で、1977.11.3日と1977.11.7日、1977.11.10日、1979.10.5日、1979.11.26日、1981.10.26日の6例の洪水についてそれぞれリードタイム1、2時間の予測をした。スペースの関係で、3例の洪水の予測結果を図-6、7に示す。他の洪水の予測精度は図-6、7のと同じ程度である。

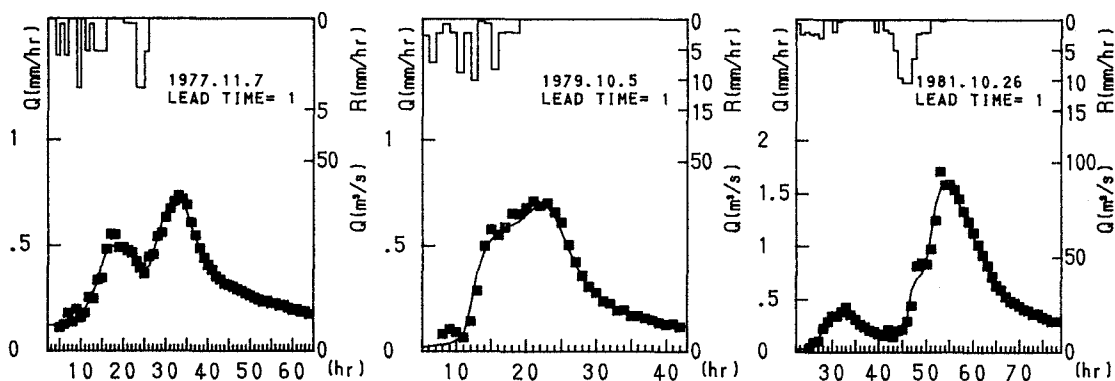


図-6

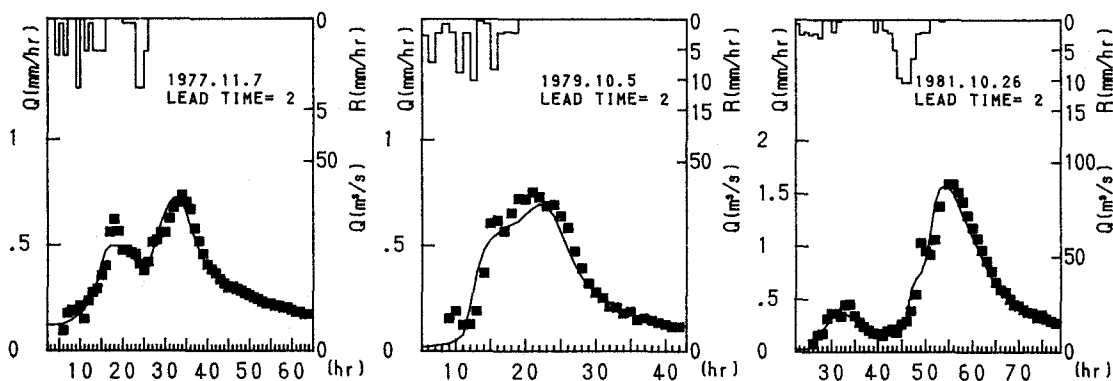


図-7

リードタイム1, 2時間の予測結果 (NEWTOWN CREEK)

学習の対象とした出水については、スペースの関係でここに載せなかったが、予測の対象とした洪水とその規模は類似している。計算結果から分かるように、予測しにくいタイプの洪水に対しても、出水経験の情報が豊富であるならば、予測結果は良好である。

4次元のFUZZY推論手法は、式(13)を用いた。

計算結果を3次元のと比べると、リードタイム1, 2時間に対する予測精度はあまり改良されなかったが、リードタイム3時間の予測について、図-8より分かるように、3次元の場合の予測結果(図-5)と比べると、予測精度が若干改良されている。

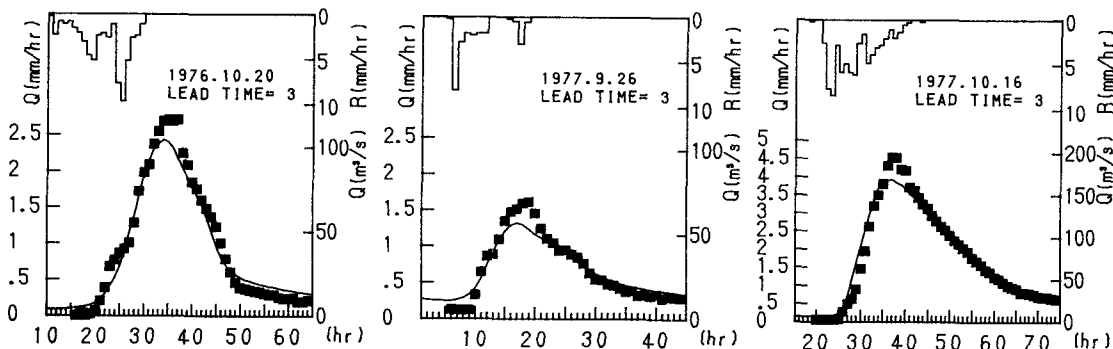


図-8 リードタイムが3時間で4次元の予測結果 (BUTTERNUT CREEK)

3 FUZZY制御による予測値の補正¹⁾

全節で説明したFUZZY推論による予測は、過去の出水の経験と時々刻々入手される降雨量と流出量のデータからリードタイム1,2,3を予測している。予測値と実測値の差、すなわち、予測誤差を補正する機構を考慮していないので、リードタイムの増大にともない予測誤差も増大することになる。ここでは、予測誤差として次に示す二つが考えられる。式(14),(15)において、 $Q(t)$ は実測値を、 $Q'(t)$ はFUZZY推論から得られる予測値を示し、 $Q''(t)$ は $Q'(t)$ を補正した量である。ここでは、 $e'(t), e(t)$ 以外に、式(15),(17)に示すこれらの誤

$$e'(t) = Q'(t) - Q(t) \quad (14) \quad e(t) = Q''(t) - Q(t) \quad (16)$$

$$\Delta e'(t) = e'(t) - e'(t-1) \quad (15) \quad \Delta e(t) = e(t) - e(t-1) \quad (17)$$

差の増分量の正負、大小関係より表-1に示す制御ルールを定めた。表-1の最初表について簡単に説明すると

$$\text{if } e' \text{ is NB and } \Delta e' \text{ is NB and } e \text{ is NB and } \Delta e \text{ is NB then } \Delta C \text{ is PB.} \quad (18)$$

のような条件付き命題が得られる。NB, NM, NSは、Negative Big, Negative medium, Negative Smallを示し、Z0は零、頭文字のPはPositiveを意味している。 ΔC は、制御量の増分を意味している。表-1の全てのルールの組合せは49x49で、これだけの数の式(18)に示すような条件文があることになる。図-10は、これら制御変数の規格化されたメンバーシップ関数を示している。実際の計算にあたっては、先ず、図-9に示すような高周波数成分からなる予測誤差については制御の対象外とし、低周波数成分の予測誤差を制御の対象とした。制御手法について説明すると、スケールパラメータ α, β を用いて、次式に示すように計算している。

$$e', e \rightarrow \alpha e', \alpha e \quad C_t = C_{t-1} + \beta \Delta C_t \quad Q''(t) = Q'(t) + C_t \quad (19)$$

スケールパラメータ α, β については、次の値を用いた。

$$\alpha = 20, \text{ if } |e'| \geq 3.5 \text{ then } \beta = 0.05 \text{ else } \beta = 0.03 \quad (20)$$

図-11は、リードタイム3時間について補正計算を行った結果である。図-5の補正を行わない場合と比較すると、ピーク近傍で補正の効果が現れていることがわかる。

4 まとめ

解析の対象としたBUTTERNUT CREEK, NEWTON CREEKにつてリードタイムが1,2時間のとき、良好な予測値が得られている。しかし、リードタイムが3時間になるとピーク流量近傍で過大に予測することになる。4次元のFUZZY推論による計算は、3次元の場合より、若干の効果が認められたが、計算時間、容量の増大化を考慮すると、FUZZY制御器による補正が有効と考えられる。新しく提案したFUZZY制御器による補正手法によりかなりの程度補正が可能であることを示した。ただし、表-1の制御ルールは人間の直感的思考で作成したもので、人間の直感だけでもこの程度の制御できるFUZZY制御器の利点を示している。しかしながら、表-1のルールが最適であるか否かについては依然として問題が残っている。

本論文で使用した水文資料は、コーネル大学W. Brutsaert教授の好意によるものでここに謝意を表す。

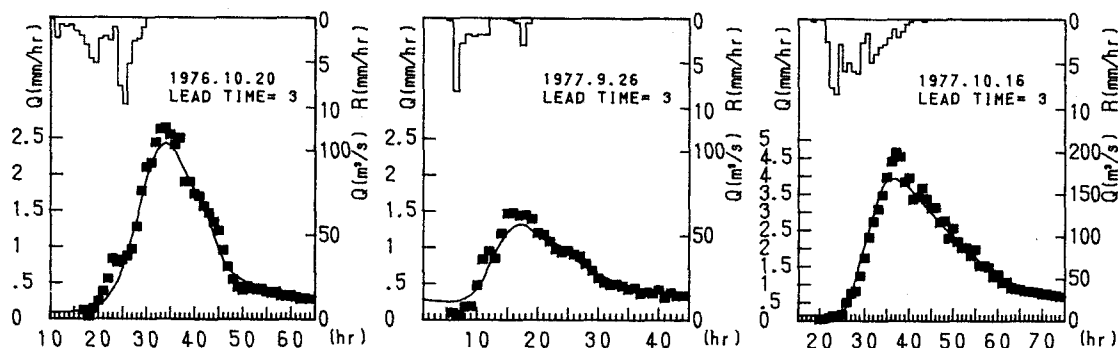


図-1 1 補正を行った予測結果 (BUTTERNUT CREEK, リードタイム3時間)

表-1: 制御ルール

if $e' = \text{NB}$ and $\Delta e' = \text{NB}$

Δe e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB			PB			PB
NM				PB			
NS				PB			
ZO	PB	PB	PB	PB	PB	PM	PS
PS					PM		
PM					PS		
PB	PM			ZO			ZO

if $e' = \text{NM}$ and $\Delta e' = \text{NM}$

Δe e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB			PB			PB
NM				PB			
NS				PB			
ZO	PB	PB	PM	PM	PM	PS	ZO
PS					PS		
PM					ZO		
PB	PS		NS				NS

if $e' = 0$ and $\Delta e' = \text{NB}$

Δe e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB			PB			PM
NM				PB			
NS				PM			
ZO	PB	PM	PS	PS	PS	ZO	NS
PS					ZO		
PM					NS		
PB	ZO		NM				NB

if $e' = \text{PB}$ and $\Delta e' = \text{PB}$

Δe e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	ZO			ZO			NM
NM				NS			
NS				NM			
ZO	NS	NM	NB	NB	NB	NB	NB
PS					NB		
PM					NB		
PB	NB			NB			NB

if $e' = \text{PM}$ and $\Delta e' = \text{PM}$

Δe e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS			PS			NS
NM				ZO			
NS				NS			
ZO	ZO	NS	NM	NM	NM	NB	NB
PS					NB		
PM					NB		
PB	NB			NB			NB

if $e' = 0$ and $\Delta e' = \text{PB}$

Δe e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB			PM			ZO
NM				PS			
NS				ZO			
ZO	PS	ZO	NS	NS	NS	NM	NB
PS					NM		
PM					NB		
PB	NM			NB			NB

その他の e' and $\Delta e'$

Δe e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PM	PS
NM	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZO
NS	PB	PM	PS	PS	PS	ZO	NS
ZO	PM	PS	ZO	ZO	ZO	NS	NM
PS	PS	ZO	NS	NS	NS	NM	NB
PM	ZO	NS	NS	NM	NM	NB	NB
PB	NS	NM	NM	NB	NB	NB	NB

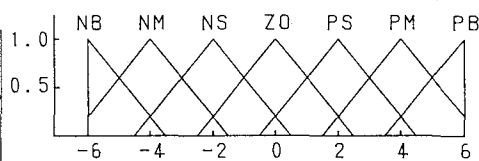


図-10 制御変数のメンバーシップ関数

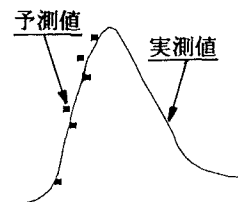


図-9

参考文献:

- 1) 藤田・早川: An Application of Fuzzy Inference to Runoff Prediction, Pacific International Seminal on Water Resources System, Tomamu, 1989, P303~P319
- 2) 藤田・朱: 流出予測におけるファジィ推論手法の比較, 第46回年

次学術講演会, P286~P287

- 3) 藤田・橋本・朱: 流出予測における種々のFUZZY推論手法の比較, 土木学会北海道支部, 第47号, P419~P424
- 4) 水本雅晴: 最近のファジィ制御法, 数理科学 1991.3, P20~P26
- 5) 菅野道夫: ファジィ制御, 日刊工業新聞社, 1988
- 6) 藤田睦博: あいまい推論の流出予測問題への応用, 第31回水理講演会, 1987, P125~P130