

貯水池操作システムへのファジイ制御理論の適用に関する研究 (II)

池淵 周一・宮川 裕史・河端伸一郎

A STUDY ON APPLYING FUZZY CONTROL THEORY TO DAM OPERATION SYSTEM

By *Shuichi* IKEBUCHI, *Hiroshi* MIYAKAWA and *Shin-ichiro* KAWABATA

Synopsis

In real-time operation of a dam reservoir at flood period, we propose the application of fuzzy control theory to dam control method using a combination of hydrologic prediction system and information based on actual experience of dam operator.

Firstly, in this paper we treat input-output relation as fuzzy relation, and decide release discharge by 'FUZZY INFERENCE (1)'.

Secondly, we introduce expected value and variance for error of predicted inflow, calculated by Kalman filtering-prediction theory, into one of elements for fuzzy antecedent.

Then we study that simulation by fuzzy control is very similar to that by thought of dam operator.

1. はじめに

ダムは、建設後にあってはそれぞれの目的を満足するように運営されなければならない。その一つの大きな柱が、ダムの貯水機能を活用し、時々刻々ダムからの放流量を定めるための意志決定問題、いわゆるダム貯水池の実時間操作の問題がある。現行のダム貯水池操作、とりわけ本研究で対象とする洪水時の実時間操作においては、定量放流方式や定率・定量方式などが採用されているが、流量予測の精度が低いことに加えて、洪水の程度により調節効果が小さかったり、人工洪水を誘引する可能性を含んでいる。特に、ダムへの流入量が大きく、貯水位がサーチャージ水位を越える場合には、超過洪水に対する操作として「ただし書き操作」が行われるが、実際上は、その開始条件を含め判断の難しい領域の操作が要求される。さらに多目的ダムにおいては、安全度の面で治水側と利水側との利害が競合する。このため治水・利水両面での被害を最小にするための「線引き」をしたうえで、多目的ダムの効率よい運用を図ることが必要である¹⁾。

幸いにも近年、気象・水文予測システムの整備や kalman 流の filtering 予測理論を適用させた流出予測技術の研究がなされており²⁾、本研究では、こうした観測・予測技術の成果を織り込むとともに、実際のダム操作を担当するオペレーターの実績や経験を踏まえての判断情報(定性的・言語的表現も含めたもの)を併合した制御方法を探りたい。

ファジイ制御法は、熟練オペレーターが過去の経験を踏まえて類推により操作量を求めるというプロセスに似ており、通常人間が行っている柔軟で適応性の高い操作方法をモデル化できる可能性がある。また将来、オペレーターの知識や経験を制御規則に論理化し、その結果に不都合があれば、その制御規則の設

定を一部変更することによって、よりよいシステム構成が可能になる。

こうした特徴を生かす形で、池淵らはその第一ステップとして単一ダムの実時間操作にファジィ制御理論を適用している³⁾。そこでは、ファジィ制御規則の前件部要因の一つに予測総降雨量を取りあげ、その予測に当該台風と類似した過去の台風を抽出する部分に適合度概念を導入したり、後件部の出力推定に関数の重み付平均を用いるなどの試みがなされた。

本研究では、こうしたアプローチをさらに発展させるべく、前件部要因の一つに流入量予測とその予測誤差分散を導入するとともに、後件部もファジィ集合で表現し、ファジィ制御理論における推論法 1⁴⁾によって、出力である放流量を時々刻々決定する方法を提案する。

2. ファジィ制御と推論法

ファジィ制御とは、人間の判断などあいまいさを含む制御アルゴリズムを if-then 形式で表現し、ファジィ推論を用いて計算機に実行させ、算出された推論値をもとに制御を行う方法である。

2.1 ファジィ制御の構造⁴⁾

ここでいう構造とは、ファジィ制御で使われるファジィ制御規則と、これに基づく推論の形式である。

ダム制御に必要なダムの状態に関する情報を x_1 , x_2 , ダムへの入力を y とすると、ファジィ制御規則とは if [A] then [B] 型で表される規則である。たとえば、

$$\left. \begin{array}{l} \text{if } x_1 \text{ is small and } x_2 \text{ is big then } y \text{ is medium} \\ \text{if } x_1 \text{ is big and } x_2 \text{ is medium then } y \text{ is big} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、[A] は前件部、[B] は後件部と呼ばれる。

ファジィ制御規則 R を一般的に表すと、

$$R_i: \text{if } x_1 \text{ is } A_{i1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{i2} \text{ then } y \text{ is } B_i \dots\dots\dots (2)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n)$$

ここで i は制御規則の番号、 x_1 , x_2 は前件部変数、 y は後件部変数と呼ばれる。

2.2 ファジィ制御器

ファジィ制御器は複数のファジィ制御規則の集合体と、ファジィ推論部から構成される。

ファジィ制御規則において、前節で述べた前件部変数を入力、後件部変数を出力と呼ぶ。ファジィ推論部では、実際の入力が与えられたとき、適用可能な複数の制御規則を用いてファジィ推論を行うことにより出力を計算する。

ファジィ制御器の形式は、前件部・後件部の形式、ファジィ変数の型、推論法の三点から構成され、これらは相互に関連性がある。

2.3 ファジィ推論

ファジィ推論にもいくつかの方法があるが、本研究で用いるものは推論法 1⁴⁾で、それはファジィ関係の合成則に基づくものである。以下にその方法を概述しておく。

ファジィ変数は連続型と離散型があり、連続型の場合、そのメンバーシップ関数の形状により、釣鐘型と三角形型に分かれる。最近では、計算の簡便化や結果に大差がみられないことを考慮し、三角形型が用いられており、本研究においても後述するように三角形型を用いることにする。

いま、前件部変数が 2 個、ファジィ制御規則が n 個であり、それらが互いに or 結合されているものとする。

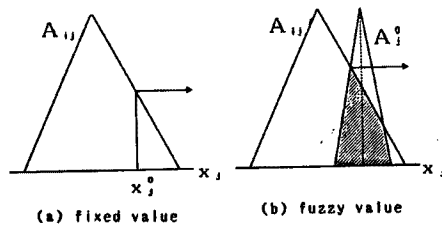
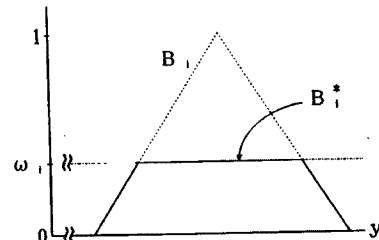


Fig. 1. Method to determine the fuzzy grade.

Fig. 2. Fuzzy subset B_1 and B_1^* .

$$\left. \begin{array}{l} R_1 : \text{if } x_1 \text{ is } A_{11} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{12} \text{ then } y \text{ is } B_1 \\ \vdots \\ R_i : \text{if } x_1 \text{ is } A_{i1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{i2} \text{ then } y \text{ is } B_i \\ \vdots \\ R_n : \text{if } x_1 \text{ is } A_{n1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{n2} \text{ then } y \text{ is } B_n \end{array} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

いま、前提（あるいは状態） x_1^0, x_2^0 を与えると、 i 番目の規則での x_1^0, x_2^0 に対するグレードが定まる。これを $A_{i1}(x_1^0), A_{i2}(x_2^0)$ と表す。もし前提が不確定さによるファジイ値として解釈すべき時は、前提を $x_j^0 = A_j^0$ として、このときのグレードを、

$$A_{ij}(x_j^0) = \max[A_{ij}(x_j) \wedge A_j^0(x_j)], (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2) \dots\dots\dots (4)$$

とする。ここに、 $\wedge$ はminを意味する。(Fig. 1)

次にこれらの前提が i 番目の規則にどの程度適合しているかを、適合度として次のように表す。

$$\omega_i = A_{i1}(x_1^0) \wedge A_{i2}(x_2^0), (i=1, 2, \dots, n) \dots\dots\dots (5)$$

このようにして求めた適合度をもとに i 番目の推論結果 B_i^* を求める。(Fig. 2)

$$B_i^*(y) = \omega_i \wedge B_i(y), (i=1, 2, \dots, n) \dots\dots\dots (6)$$

これらの結果を総合し、これを B^0 とすればこれが推論結果となる。

$$B^0(y) = B_1^*(y) \cup B_2^*(y) \cup \dots \cup B_n^*(y) \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $\cup$ は、和集合を表す。

ダムを含めたプラント制御の場合、このようなファジイ集合を出力として与えるのではなく、ある数値に変換する必要がある。このため、 B^0 の重み付平均すなわち $B^0(y)$ の重心座標を与えることにより解釈を行う。

$$y_0 = \frac{\int B^0(y)y dy}{\int B^0(y) dy} \dots\dots\dots (8)$$

以上の推論プロセスを制御規則が2個の場合の例で示すと、Fig. 3のようになる。

なお、この推論法では式(4)～(6)において、 $\wedge$ (min)演算を用いているが、 $\wedge$ の代わりに乗算を用いることもある。

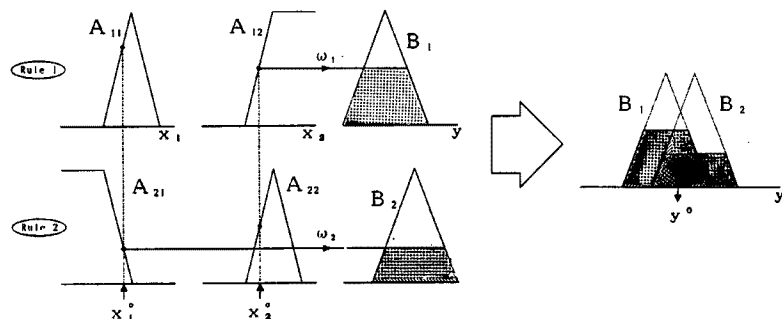


Fig. 3. Fuzzy inference (1).

いずれにしろ、この推論法の利点は、制御規則の前件部・後件部とも言葉に対応させることができ、定性的に分かりやすいということにある。推論のプロセスも図示すればグラフィック表現できるので、たとえば現場オペレーターにもファジィ制御器がいま何をしているかが容易に理解できる。一方、欠点は制御規則の数が多くなりがちになることである。これについては後述するが、実際には全ての組合せによる規則は不必要で、必要な規則だけに低減することもできる。

3. ダム貯水池操作へのファジィ制御理論の導入

3.1 ダム貯水池系の諸元

本研究では、単一水系・単一ダムを想定し、その諸元については次の通りとする。

(1) 貯水池について (単位: m^3)

サーチャージ水位での貯水可能容量	10,000,000
ただし書き操作開始水位での貯水可能容量	7,500,000
制限水位での貯水可能容量	5,000,000
確保水位での貯水可能容量	2,500,000

(2) 流量について (単位: m^3/sec)

計画流入量(ここではダム地点での計画高水流量をとる)	2,800
洪水流量	700
計画最大放流量	2,000

3.2 ファジィ前件部・後件部の構成要因

ダム操作に必要な情報、すなわち前件部変数としては、ある時刻での貯水位、流入量といった実測値のほかに、予測流入量や予測総降雨量にみられるような不確定情報が含まれる。本研究では、これら前件部変数のうち、操作時点以降の降雨量については、降雨予測システムが存在しており、これら降雨予測と確率過程的状态空間型流出モデルに kalman 流の filtering・予測手法を用いると、ダムへの予測流入量が算出される、と仮定している。本研究で用いる前件部変数は以下に示す 4 種である。

① 貯水位 $S(t)$ (単位: m^3)

時刻 t での貯水位。制御の際には、貯水位を貯留量に換算している。

② 流入量 $QI(t)$

時刻 t で、ダム貯水池に流入する水量。

③ 流入量増加率 $\Delta QI(t)$

時刻 $(t-\Delta t)$ と、時刻 t の各々で観測される流入量の増分。

④ 予測流入量増加率 $\Delta QI(t+\Delta t)$

時刻 t で観測される流入量と、時刻 $(t+\Delta t)$ での予測流入量の平均値との増分。

なお、予測流入量については、時々刻々 $(t+\Delta t)$ 時間後の流入量が平均値と分散で与えられるとしており、その値は、本研究では前もっていくつかの異なる流入量系列として与えている。また、②～④の単位は、秒単位の流量を時間単位に換算して推論をしているため、 m^3/h を用いた。

出力、すなわち後件部変数はダム操作の場合、放流量であり、本研究でもこれを用いた。以下、放流量は $QO(t)$ と表記する。

以上の入出力を用いると、ダムの連続式は

$$S(t+\Delta t) = S(t) + QI(t) - QO(t) \dots\dots\dots (9)$$

となり、次時刻の貯水位 $S(t+\Delta t)$ をもとに、同じ手順で繰り返される。

3.3 ファジイ空間の分割

各変数のファジイ空間分割については、これをもとに作成される制御規則があまり多くなならないよう考慮する必要がある。

① $S(t)$ について

3.1 で示したダム諸元をもとに、5 個の空間に分割した。

サーチャージ水位	S_1 : very large scope
ただし書き操作開始水位	S_2 : large scope
制限水位	S_3 : medium scope
確保水位	S_4 : small scope
最低水位	S_5 : very small scope

② $QI(t)$ について

特に洪水時での的確な判断を要するため、洪水流量以上での空間分割を細かくした。これにより、5 個の空間に分割した。

計画流入量	QI_1 : extreme large
計画流入量の75%	QI_2 : very large
計画流入量の50%	QI_3 : large
洪水流量	QI_4 : more or less large
非洪水時の平均流量	QI_5 : small

③ $\Delta QI(t)$, $\Delta QI(t + \Delta t)$ について

規則数の低減を図るために、3 個の空間に分割し、増加・減少の程度はメンバーシップ関数の与え方により表現することにした。

増加傾向	ΔQI_1 : increasing
変化なし	ΔQI_2 : constant
減少傾向	ΔQI_3 : decreasing

④ $QO(t)$ について

最小の分割数で、スムーズな洪水調節を行うことを目的として検討した結果、6 個の空間に分割した。

放流能力の最大量	QO_1 : maximum
計画最大放流量	QO_2 : nearly maximum
計画最大放流量の75%	QO_3 : very large
計画最大放流量の50%	QO_4 : large
洪水流量時の放流量	QO_5 : small
常時放流量	QO_6 : minimum

3.4 メンバーシップ関数の決定

前節で定めたファジイ空間分割にしたがって、各々のメンバーシップ関数を決定する。本研究では、Fig. 4, Fig. 5 に示すように三角形型のメンバーシップ関数を用いた。同時に各々のメンバーシップ関数の式を Table 1 に示す。

3.5 制御規則

制御規則は、実時間操作で達成されるべき目的にしたがって作成される。ダム貯水池での洪水調節では、ダムの上・下流部双方での洪水による被害の最小化を前提とした上で、ピーク流入量を放流段階で、できるだけ計画最大放流量程度に抑えて流下させること、かつ、流下流量の急激な増減を防ぐことが第一義的

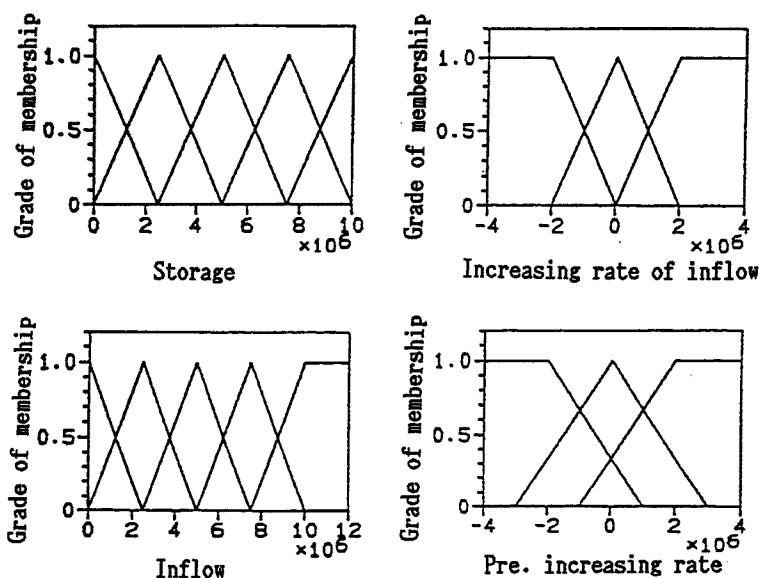
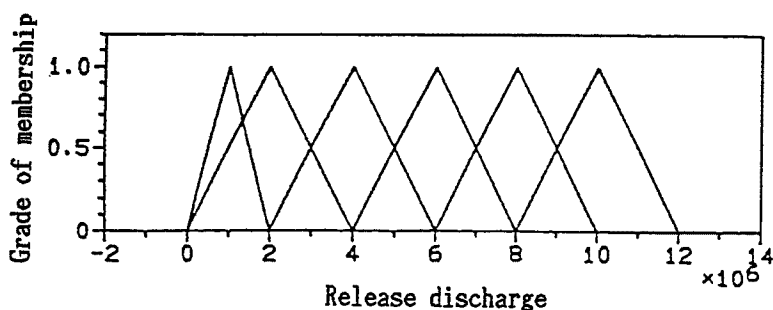


Fig. 4. Membership function for antecedent.

Fig. 5. Membership function for consequent.
(release discharge)

には重要であると考え、それをもとに制御規則を定めた。前件部変数の分割空間の関係上、規則数は本来ならば $5 \times 5 \times 3 \times 3 = 225$ 通りに及ぶが、前提条件が異なっても、後件部のファジイ空間が同一の場合があり、これにより規則数のランプ化を図ることができる。検討の結果、実際には Table 2 に示すように、44 個の制御則で推論を行うことにした。表中の Any とある箇所は常にメンバーシップ値を 1 とする。

4. 仮想ダム貯水池への適用と考察

本章では、前章で定めた仮定に基づき、仮想ダム貯水池における、異なる流入量系列に対するファジイ制御結果を示し、考察を加える。

4.1 対象とする流入量系列について

本研究では、降雨・流出の遅れ時間の有無にかかわらず、1 時間先の流入量が時々刻々予測されると仮定し、その平均値パターンとして、中規模洪水だけでなく、計画規模を超える洪水も含めて、以下に示す 3 種の流入量系列を与え、比較検討を行った。

Table 1. Equations of membership function

Fuzzy Variable	Membership Function
$S(t)$	$F(S(t)) = \frac{1}{2.5} \times (2.5 - S(t) - S_i)$ for $i=1, 2, 3, 4, 5$
$QI(t)$	$F(QI(t)) = \frac{1}{2.5} \times (2.5 - QI(t) - QI_j)$ for $j=1, 2, 3, 4, 5$
$\Delta QI(t)$	$F(\Delta QI(t)) = \frac{1}{2.0} \times (2.0 - \Delta QI(t) - \Delta QI_k)$ for $k=1, 2, 3$
$\Delta QI(t + \Delta t)$	$F(\Delta QI(t + \Delta t))$ $= \frac{1}{d} \times (d - \Delta QI(t + \Delta t) - \Delta QI_l)$ for $l=1, 2, 3$
$QO(t)$	$F(QO(t)) = \frac{1}{y} \times (y - QO(t) - QO_m)$ for $m=1, 2, 3, 4, 5, 6$

where,

$$\begin{aligned}
 S_i &= \{10.0, 7.5, 5.0, 2.5, 0.0 (\times 10^6 \text{ m}^3)\} \\
 QI_j &= \{10.0, 7.5, 5.0, 2.5, 0.0 (\times 10^6 \text{ m}^3/\text{h})\} \\
 \Delta QI_k &= \{2.0, 0.0, -2.0 (\times 10^6 \text{ m}^3/\text{h})\} \\
 \Delta QI_l &= \{2.0, 0.0, -2.0 (\times 10^6 \text{ m}^3/\text{h})\} \\
 QO_m &= \{10.0, 8.0, 6.0, 4.0, 2.0, 1.0, 0 (\times 10^6 \text{ m}^3/\text{h})\} \\
 y &= \begin{cases} 1.0 & (m=1) \\ 2.0 & (m \neq 1) \end{cases}
 \end{aligned}$$

《Notes》

- * ; $F(QI(t)) = 1.0, QI(t) > 10.0 (\times 10^6 \text{ m}^3/\text{h})$
- ** ; $F(\Delta QI(t)) = 1.0, |\Delta QI(t)| > 2.0 (\times 10^6 \text{ m}^3/\text{h})$
- *** ; $F(\Delta QI(t + \Delta t)) = 1.0, |\Delta QI(t + \Delta t)| > 2.0 (\times 10^6 \text{ m}^3/\text{h})$
- **** ; $F(QO(t)) = 1.0, QO(t) > 10.0 (\times 10^6 \text{ m}^3/\text{h})$

<Case 1> (Fig. 6(a))

ピーク流入量が計画流入量の80%となる場合。これは既往洪水のうち中規模の場合といえる。

<Case 2> (Fig. 6(b))

ピーク流入量が計画流入量の2割増の場合。これは計画規模を超える場合と考えられる。

<Case 3> (Fig. 6(c))

流入量のピークが短時間のあいだに複数回認められる場合。本研究で用いたケースとして、最初のピークが計画流入量の80%、2回目のピークが計画流入量とほぼ同じ流量の場合で、各々のピーク時の間隔を4時間としている。

4.2 予測流入量を確定値として導入した場合

流出予測により得られる予測流入量には予測誤差分散が伴うが、本節では予測流入量がほぼ実現値であるとみなした場合、すなわち分散が0であると仮定した場合について述べる。(以下、この場合を<Type A>とする) この場合の制御結果をFig. 7～Fig. 9に示す。

これらの結果から得られる結論として、

- ① 流入量ピークの軽減効果は、どの流入量系列をとってもよい方向に働いている。具体的には、<Case 1>と<Case 3>の場合、最大放流量がいずれも2,240 (m³/sec)であり、計画最大放流量を

Table 2. Fuzzy control rules

Rule	Antecedent				Consequent
	$S(t)$	$QI(t)$	$\Delta QI(t)$	$\Delta QI(t+\Delta t)$	$QO(t)$
R ₁	VL	EL	ANY	IN	MA
R ₂	VL	EL	IN	CO, DE	MA
R ₃	VL	EL	CO, DE	CO, DE	NM
R ₄	VL	VL	ANY	ANY	NM
R ₅	VL	LA	IN	ANY	NM
R ₆	VL	LA	CO	IN	NM
R ₇	VL	LA	CO	CO, DE	VL
R ₈	VL	LA	DE	ANY	VL
R ₉	VL	ML	IN	IN, CO	VL
R ₁₀	VL	ML	IN	DE	LA
R ₁₁	VL	ML	CO	IN	VL
R ₁₂	VL	ML	CO	CO, DE	LA
R ₁₃	VL	ML	DE	ANY	LA
R ₁₄	VL	SM	IN	IN, CO	LA
R ₁₅	VL	SM	IN	DE	NM
R ₁₆	VL	SM	CO, DE	ANY	NM
R ₁₇	LA	ES	ANY	IN	MA
R ₁₈	LA	EL	ANY	CO, DE	NM
R ₁₉	LA	VL	ANY	ANY	NM
R ₂₀	LA	LA	ANY	ANY	VL
R ₂₁	LA	ML	ANY	ANY	LA
R ₂₂	LA	SM	ANY	ANY	SM
R ₂₃	ME	EL	ANY	ANY	NM
R ₂₄	ME	VL	IN	IN	NM
R ₂₅	ME	VL	IN	CO, DE	VL
R ₂₆	ME	VL	CO, DE	ANY	VL
R ₂₇	ME	LA	IN	IN	VL
R ₂₈	ME	LA	IN	CO, DE	LA
R ₂₉	ME	LA	CO, DE	ANY	LA
R ₃₀	ME	ML	ANY	ANY	SM
R ₃₁	ME	SM	ANY	ANY	MI
R ₃₂	SM	EL	IN	IN	NM
R ₃₃	SM	EL	IN	CO, DE	VL
R ₃₄	SM	EL	CO, DE	ANY	VL
R ₃₅	SM	VL	IN	IN, DE	VL
R ₃₆	SM	VL	IN	CO	LA
R ₃₇	SM	VL	CO, DE	ANY	LA
R ₃₈	SM	LA	IN	IN, DE	LA
R ₃₉	SM	LA	IN	CO	SM
R ₄₀	SM	LA	CO, DE	ANY	SM
R ₄₁	SM	SM, ML	ANY	ANY	MI
R ₄₂	VS	EL	ANY	ANY	LA
R ₄₃	VS	VL	ANY	ANY	SM
R ₄₄	VS	SM, ML, LA	ANY	ANY	MI

《Explanatory Notes》

Divisions of fuzzy variables;

〈Antecedent〉

 $S(t)$: (VL, LA, ME, SM, VS)

≡ (Very Large, Large, Medium, Small, Very Small)

 $QI(t)$: (EL, VL, LA, ML, SM)

≡ (Extreme Large, Very Large, Large, More or Less Large, Small)

 $\Delta QI(t)$, $\Delta QI(t+\Delta t)$: (IN, CO, DE) ≡ (Increasing, Constant, Decreasing)

〈Consequent〉

 $QO(t)$: (MA, NM, VL, LA, SM, MI)

≡ (Maximum, Nearly Maximum, Very Large, Small, Minimum)

あったと判断してよい。

- ③ 事後操作についても、流入量ピーク後2～3時間で、放流量が流入量を上回っており、特に< Case 2 >においては、23時間後以降の貯水量が確保水位に相当する貯水量を保持している。

4.3 予測流入量の分散を含めて制御した場合

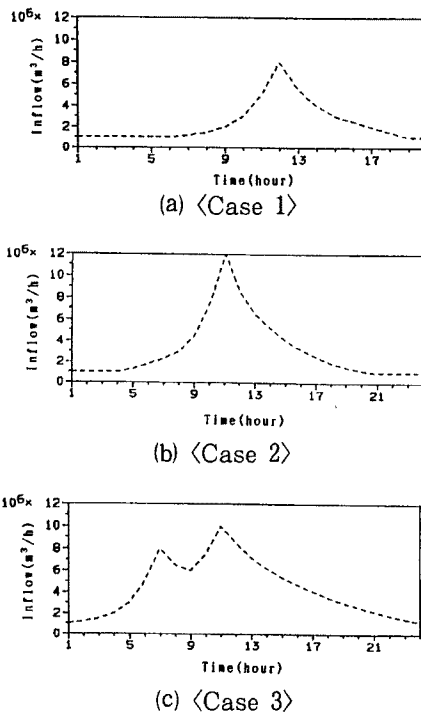


Fig. 6. Modeling hydrograph.

上回っているが、流入量ピークの近傍での貯水位の高さから、ただし書き操作を行ったと判断してよい。

- ② 貯水位の時間推移をみると、どのケースについても、最大貯留量がサーチャージ水位を下回っており、ダム貯水池としての貯留効果は確実に現れている。< Case 2 >の場合、10時間後からの1時間で貯水量が2倍以上になり、ダム堤体への影響が生じることは否めないにしても、貯留機能の維持とピークカットを重視する超過洪水の場合、今回のような結果でも、ファジィ制御を導入した効果が

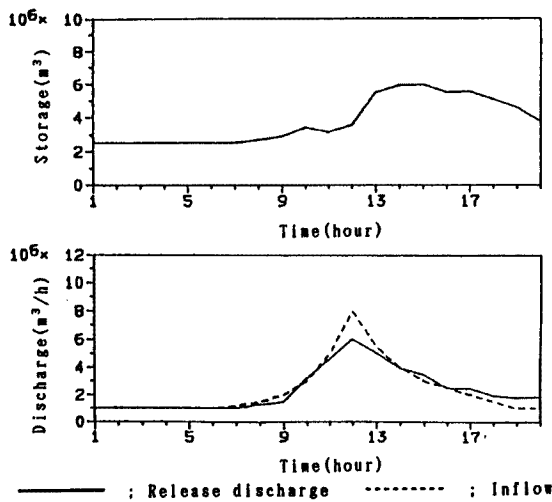


Fig. 7. Sequences of storage level, inflow and release discharge.
(Type A) and (Case 1))

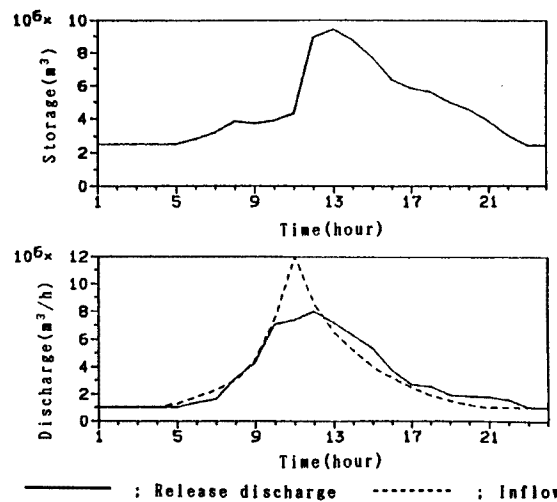


Fig. 8. Sequences of storage level, inflow and release discharge.
(Type A) and (Case 2))

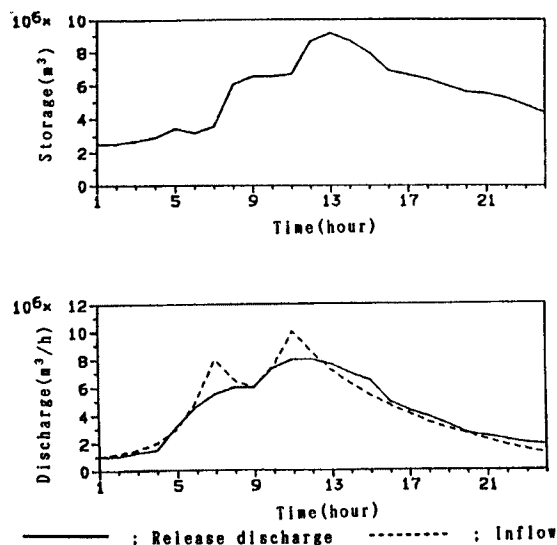


Fig. 9. Sequences of storage level, inflow and release discharge.
(Type A) and (Case 3))

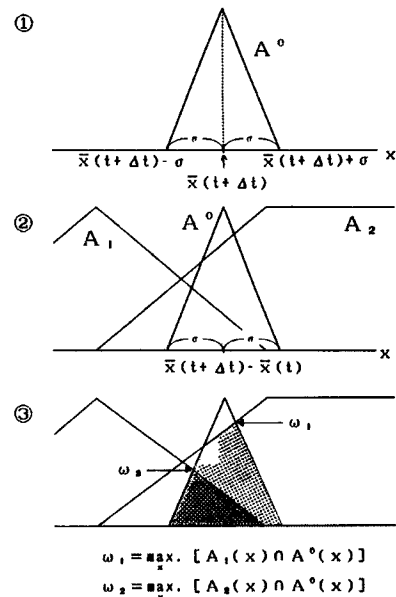


Fig. 10. Method of introducing variance.

次に、予測流入量の扱い方で前節で挙げた平均値に加えて kalman 流の filtering・予測により得られる分散を取り込んだ場合の制御について示す。このように分散を導入する背景として、短時間流出予測で得られる流入量の値には、ある程度のあいまいさが含まれている。また将来、実際に流入してくる実測値としての流入量が予測値に比べて大きい場合に、人工洪水を引き起こし、かえって被害を増大させることにもなりかねない。つまり、オペレーターとしては、あいまいさを含む予測値に、ある程度の幅をもたせた形にして、それを制御の際の条件に取り込むことがよいと考えられる。

実際に本研究では次のような方法で、分散の導入をはかっている。(Fig. 10 参照)

① 与えられた予測流入量 $x(t+\Delta t)$ とその分散 σ^2 あるいは標準偏差 σ をもとに、ファジィ集合 A_0 を

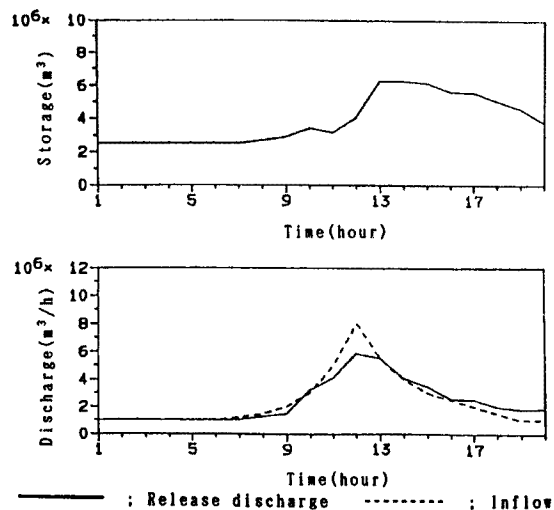


Fig. 11. Sequences of storage level, inflow and release discharge.
(Type B) and (Case 1))

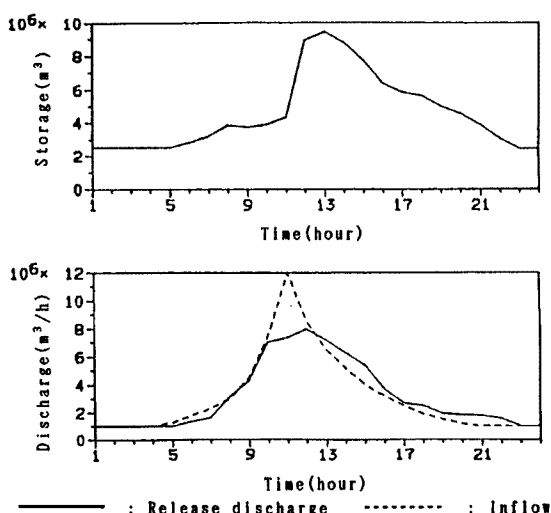


Fig. 12. Sequences of storage level, inflow and release discharge.
(Type B) and (Case 2))

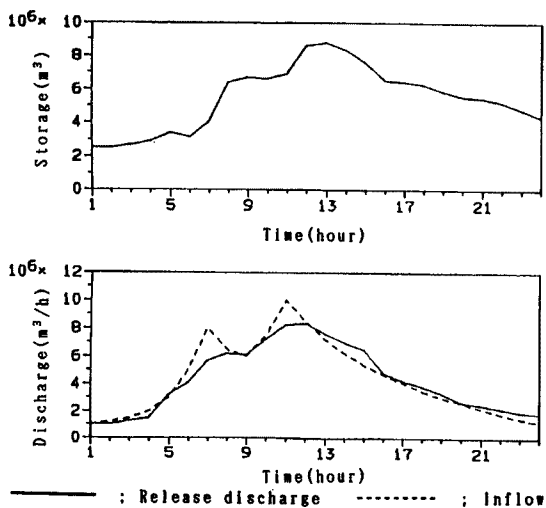


Fig. 13. Sequences of storage level, inflow and release discharge.
(Type B) and (Case 3))

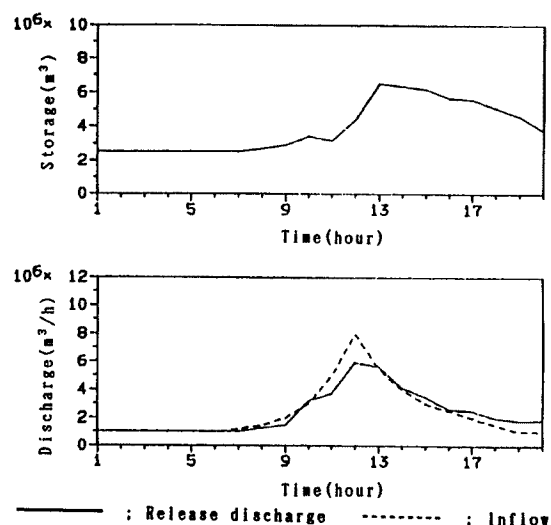


Fig. 14. Sequences of storage level, inflow and release discharge.
(Type C) and (Case 1))

作成する。この集合 A_0 は、中央値を $x(t+\Delta t)$ 、幅を σ としている。

② A^0 を、予測流入量増加率のファジイ集合に重ねる。 A^0 の中央値は $x(t+\Delta t) - x(t)$ となるようにする。

③ 式 (8) を用いて適合度を決定する。

本研究では、あいまいさの指標として変動係数を用いている。

$$\rho = \sigma / x \quad \dots \dots \dots (10)$$

この場合の制御結果を Fig. 11 ~ Fig. 16 に示す。Fig. 11 ~ Fig. 13 は、変動係数が 0.1、すなわち予測値がほぼ確かな値であるとした場合（以下、<Type B>とする）で、Fig. 14 ~ Fig. 16 は、変動係数が 0.3、すなわち予測値にかなりのあいまいさが含まれていると考えた場合（以下、<Type C>とする）で

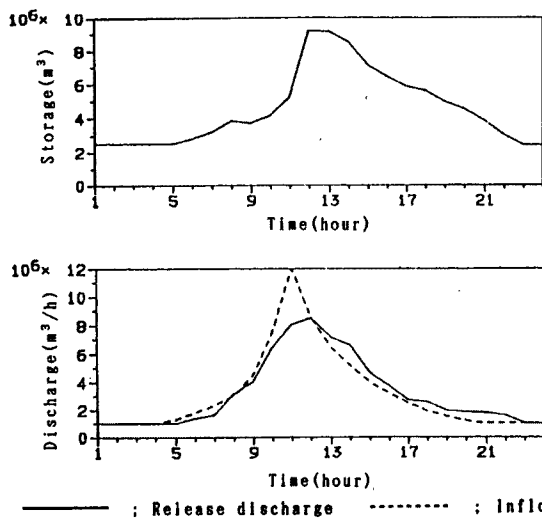


Fig. 15. Sequences of storage level, inflow and release discharge.
(Type C) and (Case 2)

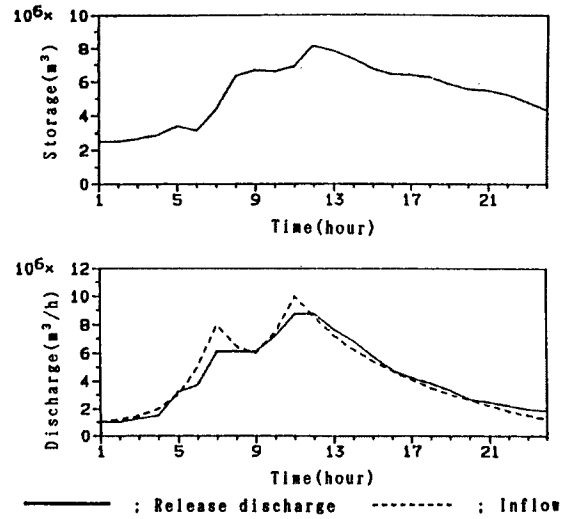


Fig. 16. Sequences of storage level, inflow and release discharge.
(Type C) and (Case 3)

ある。

まず<Case 1>について、Fig. 7, Fig. 11, Fig. 14を比較してわかるように、あいまいさを大きくとるほど、放流量の推移が定率・定量放流方式に似た波形になり、なおかつ変化量の少ない平滑な放流量系列を呈している。そのため逆に貯水位の最大値は、どちらのケースも<Case A>より $0.2 \sim 0.6$ ($\times 10^6$ m³) ほど高いが、いずれの場合も貯留量に余裕があり、操作上、支障はほとんどないといえる。

次に<Case 2>についての結果を Fig. 8, Fig. 12, Fig. 15に示す。このケースでは<Type A>と<Type B>でほぼ同一の結果が得られた。これは、 A^0 を導入しても、流入量の変化が大きければ $\Delta QI(t + \Delta t)$ の3つの分割空間のうち、ただ一つの空間しか考慮しないことによる。これに対し、<Type C>では、放流量の最大値が他のタイプに比べてやや大きいものの、最大貯水位を低く抑え、なおかつ貯水位の急激な増加も抑えられている。

さらに、<Case 3>の場合、Fig. 9, Fig. 13, Fig. 16に示すように、いずれも定率・定量放流の形となっているが、2回目のピーク時に、各タイプでの放流量に差異がみられる。すなわち、予測値に含めるあいまいさのとり方が大きくなるにつれて、このときの放流量が大きくなっている。これは、ピークが短時間に連続して生起するために、1回目のピーク後の事後操作が出来ずに水量を貯留してしまうことや、放流量を最大にする規則に組み込まれるケースが考えられる。したがって、<Type C>の場合、貯留機能を余り果たさず、下流への影響は少なからず大きくなる傾向がみられる。

以上、3つのケースを総合し検討した結果、

- ① 洪水時の操作として、概して定率・定量放流の形をとり、特に<Type B>でその傾向が顕著に現れている。
- ② <Type C>は他のタイプに比べて、ピークカットよりも、貯水位の低減に重点を置いている。これは、あいまいさを大きくとることにより、既往洪水の範囲内であっても、超過洪水であると判断する場合があるためである。
- ③ 事後操作は、流入量と放流量との差に差異があるものの、定常状態に達するまでに長い時間を要している。

5. おわりに

本研究は、多目的ダムにおける洪水時の実時間操作に、ファジィ制御理論を導入する方法を展開し、仮想の単一ダム・単一評価地点系に適用させた場合の制御結果を示してきた。最後に、得られた成果を要約すると以下の通りである。

- ① 実際に計画規模に近い洪水やそれを超えるような洪水が生起する場合はごくまれで、多くの洪水は流量が洪水流量に満たない小規模なものや、計画高水流量を大幅に下回る洪水である。しかし、ファジィ制御を用いると大規模な洪水に対して熟練オペレーターの行う判断に沿う結果が得られ、また中小洪水に対しても、定率・定量放流方式に基づいた結果を得ることができた。
- ② 本研究では、ファジィ推論法 1 を採用した。つまり、ダムへの入力と放流量とのあいだに一つの関数関係を見いだすのではなく、局所的な場合についての複数の規則を作成し、それらを集合体として扱う方法をとった。その結果、ダム操作の目的を十分に果たすような制御規則を適当に与えれば、大規模洪水にも対処しうる操作結果が得られることが、適用結果からうかがうことができる。

さらに今後、検討すべき課題としては以下の事項を指摘することができる。

- ① ダムへの入力情報として、数時間先までの予測流入量や予測降雨量が得られる場合の、ファジィ制御への導入のしかたや、その場合に乗算的に増加していくと考えられる制御規則のランプ化について、検討すべきである。
- ② 前件部・後件部のファジィ変数について、その空間分割や、メンバーシップ関数の定め方などを、ファジィ理論の発展成果などを踏まえ、検討していく必要がある。
- ③ 実流域で実際に降雨予測・流入量予測も包含した一連のダム操作手法を適用し、本手法の有効性、問題点を探るとともに、実際問題との整合性をみる意味で、ダム管理者との情報・意見交換を図る必要がある。

参 考 文 献

- 1) 建設省河川開発課：日本のダム事業，(財)ダム技術センター，1984.
- 2) 高棹琢馬・椎葉充晴・宝馨：貯留モデルによる実時間流出予測に関する基礎的研究，京大防災研年報，第 25 号 B-2，1987，pp. 245-267.
- 3) 小尻利治・池淵周一・十合貴弘：ファジィ制御によるダム貯水池の実時間操作に関する研究，京大防災研年報，第 30 号 B-2，1982，pp. 323-339.
- 4) 菅野道夫：ファジィ制御，日刊工業新聞社，1988.