

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

小尻 利治・池淵 周一・十合 貴弘

A STUDY OF REAL-TIME DAM OPERATION USING FUZZY CONTROL THEORY

By Toshiharu KOJIRI, Shuichi IKEBUCHI and Takahiro SOGO

Synopsis

In real-time dam operation, there are many uncertain events, such as the prediction of hydrograph and the observation of the storage conditions. Therefore we try to establish the real-time operation rule of dam reservoir introducing Fuzzy Control Theory.

Firstly, the similarities of sample typhoons are calculated for the typhoon position (latitude and longitude), the pressure degree, the passing direction and the velocity. Then, the total rainfall is predicted by using Fuzzy Inference (1).

Secondly, the dam operation rule is assumed to be composed of four fuzzy spaces, such as the storage level, the inflow discharge, the increasing rate of inflow and the predicted total rainfall. The release discharge is decided by using Fuzzy Inference (2).

Lastly, we apply these proposed procedure to the model dam reservoir and the real dam basin for their verification.

1. 序 論

我が国は狭い国土面積の大部分が山地・丘陵・台地であり、平地は全国土面積の13%を占めるのみである。さらに平地は、河川の氾濫により形成された沖積平野や洪積平野が多く、その特定の地域に人口・産業・資産の大部分が集中している。しかも温帯モンスーン気候帯に属する我が国は世界でも有数の多雨地帯であり、夏期から秋期にかけて台風性降雨により大規模な降雨がもたらされている。降雨の大部分は、急峻な地形により、短期間のうちに河川に流出し、河道を流下する。近年の流域開発、都市化によりこの傾向はさらに増大している。また、河川上流の流域開発は、洪水流出とともに土砂を流出させ、下流河川の河床を上昇させて天井川を作り、堤防の危険性を増大させている。このような状況において、ひとたび河川が氾濫すれば、当該地域内における人命・資産の損失といった直接的な被害はもとより、政治的・経済的・心理的な間接被害を含めると洪水による影響は甚大なものとなる。しかし、河道の拡幅やスーパー堤防の建設による治水安全度の向上は、高度な土地利用の行われている現状では、次第に困難になりつつある。したがって、構造物によるハードな側面から施設の効率的運用によるソフトな側面、例えば、ダム貯水池による洪水制御が重要視されてきた。

さて、現行のダム貯水池操作は、流入量の予測精度の低さとも相まって一定量放流方式や一定率一定量方式などの固定的な方法がとられている。いずれも入力予測を行わない即時的な方法で流入量が計画高水量と異なる場合には十分な制御効果が上げられない。たとえば、中小洪水に対しては調節効果が小さかったり、大洪水に対しては、制御初期に満杯となり、人工洪水を引き起こす可能性がある。

以上のことを考慮し、本研究では台風性降雨時におけるダム貯水池操作を対象に、その実時間操作について検討する。特に、台風情報からダム操作および操作結果までの間に発生する曖昧性に対処するため、ファジイ制御理論を導入してシステムの構成を図る。予測総雨量については、当該台風と類似した過去の台風を抽出して、それらを基に降雨量を推測する。また、貯水池の操作法としては、現状の操作規則を踏まえた上で、ファジイ推論法を適用する。最後に、実流域での適用を通じて理論の検証を行うものである。

2. ファジイ制御の概要

2.1 ファジイ制御

ファジイ理論の詳細は参考文献に譲るとして^{1),2)}、ここでは、本研究で用いるファジイ制御について概説しよう。ファジイ制御とはプロセスの制御アルゴリズムを、制御プロセスの状態量と操作量とのあいまいな関係として記述するものである。例えば、

if x is small and y is big, then z is medium

if x is big and y is medium, then z is big

のように制御アルゴリズムは *if-then* 形式のファジイ制御規則と呼ばれるもので表される。規則の *if...* の部分は前件部、*then...* の部分は後件部と呼ばれる。 x, y は入力、 z は出力と呼ばれる。*small, big* などは x, y などがとるファジイ値でファジイ集合によって表される。ファジイ制御器はこれらのファジイ制御規則の集合体であり、実際に入力を与えられた時の出力はファジイ推論法により計算される。

2.2 ファジイ推論 (1)

n 個の *if-then* 形式より成るファジイ規則の集合体を考えよう。

$$\begin{aligned} R_1: & \text{if } x_1 \text{ is } A_{11}, x_2 \text{ is } A_{12}, \dots, x_m \text{ is } A_{1m}, \text{ then } y \text{ is } B_1 \\ R_2: & \text{if } x_1 \text{ is } A_{21}, x_2 \text{ is } A_{22}, \dots, x_m \text{ is } A_{2m}, \text{ then } y \text{ is } B_2 \\ & \vdots \\ R_i: & \text{if } x_1 \text{ is } A_{i1}, x_2 \text{ is } A_{i2}, \dots, x_m \text{ is } A_{im}, \text{ then } y \text{ is } B_i \\ & \vdots \\ R_n: & \text{if } x_1 \text{ is } A_{n1}, x_2 \text{ is } A_{n2}, \dots, x_m \text{ is } A_{nm}, \text{ then } y \text{ is } B_n \end{aligned} \quad (1)$$

すると、 i 番目の規則の前件部の適合度は

$$\omega_i = A_{i1}(x_1) * A_{i2}(x_2) * \dots * A_{im}(x_m) \quad (i=1, \dots, n) \quad (2)$$

となる。ここに、 $A_{im}(x_m)$ はファジイ集合 A の x におけるメンバーシップ値とする。 $*$ は $\min$ または乗算である。 i 番目の制御規則の適合度 ω_i が求められると、後件部命題のメンバーシップ関数を ω_i 倍して i 番目の規則による推論結果とする。すなわち、

$$\omega_i \cdot B_i(y) \quad (3)$$

である。 n 個の規則による全体の推論結果は、次に示す $B'(y)$ をつくり $B'(y)$ のメンバーシップ関数の重心として求める。

$$B'(y) = \omega_1 B_1 U \omega_2 B_2 U \dots U \omega_n B_n \quad (4)$$

故に、重心は

$$y^\circ = \int B'(y) \cdot y \, dy / \int B'(y) \, dy \quad (5)$$

となる。

2.3 ファジイ推論 (2)

この方法で使われる規則は前件部に関しては推論法 (1) と同様であるが、後件部が入力変数によって決定

される関数形になるものである。一般に次の規則を考える。

$$\begin{aligned}
 R_1: & \text{if } x_1 \text{ is } A_{11}, x_2 \text{ is } A_{12}, \dots, x_m \text{ is } A_{1m}, \text{ then } y \text{ is } f_1(x_1, x_2, \dots, x_m) \\
 R_2: & \text{if } x_1 \text{ is } A_{21}, x_2 \text{ is } A_{22}, \dots, x_m \text{ is } A_{2m}, \text{ then } y \text{ is } f_2(x_1, x_2, \dots, x_m) \\
 & \vdots \\
 R_i: & \text{if } x_1 \text{ is } A_{i1}, x_2 \text{ is } A_{i2}, \dots, x_m \text{ is } A_{im}, \text{ then } y \text{ is } f_i(x_1, x_2, \dots, x_m) \\
 & \vdots \\
 R_n: & \text{if } x_1 \text{ is } A_{n1}, x_2 \text{ is } A_{n2}, \dots, x_m \text{ is } A_{nm}, \text{ then } y \text{ is } f_n(x_1, x_2, \dots, x_m) \dots \dots \dots (6)
 \end{aligned}$$

ここで、 $x_1=\alpha_1, x_2=\alpha_2, \dots, x_m=\alpha_m$ という入力を与えられたときの各規則の適合度は

$$\omega_i = A_{i1}(\alpha_1) * A_{i2}(\alpha_2) * \dots * A_{im}(\alpha_m) \dots \dots \dots (7)$$

となる。これらの適合度と各規則の後件の関数形より決定される全体の推論結果は次のようになる。

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \cdot f_i(x_1, x_2, \dots, x_m)}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \dots \dots \dots (8)$$

3. 類似台風の抽出

3.1 当該台風と過去の台風との類似度の算定

ファジイ理論をダム貯水池制御に適用するに際し、その入力となる台風性降雨の予測が必要である。本章では、過去の類似台風の抽出に降雨量予測を結合させて、ファジイ推論によって展開しよう。なお、洪水防御地点としては淀川水系の上流部を対象にしている。ある台風を特性づける要因として、以下の4つの物理量を取り上げる。

$$\begin{aligned}
 x_{ni} &: \text{東経} \\
 y_{ni} &: \text{北緯} \\
 r_{ni} &: \text{方向 (8タイプ)} \dots \dots \dots (9) \\
 z_{ni} &: \text{中心示度}
 \end{aligned}$$

ここに、各記号は、ファジイ推論で定義したものと異なり、新たに再定義されている。対象とする領域は、東経122度から145度まで、北緯が20度から39度までとする。台風の進行とともに変わる水文諸量はメッシュ単位（1度×1度）で得られている。 ni は台風番号 n 番の i ステップ目のメッシュに滞在しているときの状態を表す。なお、方向は Fig. 1 に示す7タイプの進行方向とそれ以外の計8タイプで表現する⁵⁾。ある台風について過去の台風との類似度を求めるに際し、時刻 t における状態を次のように表現する。

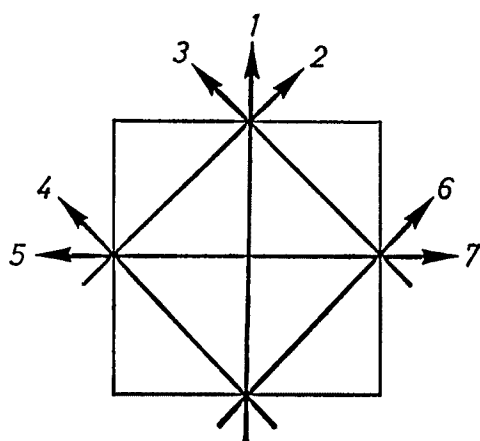


Fig. 1 Direction type in a mesh.

Table 1 Membership values according to typhoon direction

direction type	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.0	0.5	0.5	0.5	0.2	0.5	0.2	0.0
2	0.5	1.0	0.2	0.2	0.1	1.0	0.5	0.0
3	0.5	0.2	1.0	1.0	0.5	0.2	0.1	0.0
4	0.5	0.2	1.0	1.0	0.5	0.2	0.1	0.0
5	0.2	0.1	0.5	0.5	1.0	0.1	0.0	0.0
6	0.5	1.0	0.2	0.2	0.1	1.0	0.5	0.0
7	0.2	0.5	0.1	0.1	0.0	0.5	1.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

$$A_{0t} = (x_{0t}, y_{0t}, r_{0t}, z_{0t}) \dots \dots \dots (10)$$

ただし, A_{0t} と $A_{ni} = (x_{ni}, y_{ni}, r_{ni}, z_{ni})$ との各々の要因についての類似性を次のようなメンバーシップ関数で表現する。

$$m1(x_{ni}, x_{0t}) = 1/\alpha_1^{k_1|x_{ni}-x_{0t}|} \dots \dots \dots (11)$$

$$m2(y_{ni}, y_{0t}) = 1/\alpha_2^{k_2|y_{ni}-y_{0t}|} \dots \dots \dots (12)$$

$$m3(z_{ni}, z_{0t}) = 1/\alpha_3^{k_3|z_{ni}-z_{0t}|} \dots \dots \dots (13)$$

$$m4(r_{ni}, r_{0t}) : \text{Table 1}$$

ここに, $k_1, k_2, k_3, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ は各々の要因についての定数であり, k_i を大きくするとその要因について厳しい制約となり, 他の要因よりも重視するようになる。なお, 方向についてのメンバーシップ関数は **Table 1** のように設定した。これは, 方向ベクトルの角度差 θ により場合分けしたものである。つづいて, 類似度を総合評価する方法として, $\max \cdot \min$ 演算法と相加平均法の2種類の方法で比較・検討しよう。

3.2 類似台風の選択

$\max \cdot \min$ 演算法では, $A_{0t} = (x_{0t}, y_{0t}, r_{0t}, z_{0t})$ と $A_{ni} = (x_{ni}, y_{ni}, r_{ni}, z_{ni})$ より求めたメンバーシップ関数 $m1(x_{ni}, x_{0t}) \sim m4(r_{ni}, r_{0t})$ を用い, そのうち最小のものを, 時刻 t における台風 A_{0t} と A_{ni} との類似度とする。すなわち,

$$D(A_{0t}, A_{ni}) = \min\{m1(x_{ni}, x_{0t}), m2(y_{ni}, y_{0t}), m3(z_{ni}, z_{0t}), m4(r_{ni}, r_{0t})\} \dots \dots \dots (14)$$

である。また, 探索すべき台風は, その全てのステップのうち最も類似度の高いものを取ればよいから, 台風 A_{0t} と A_n との類似度は

$$DD(A_{0t}, A_n) = \max(D(A_{0t}, A_{ni})) \dots \dots \dots (15)$$

となる。次に, 時刻 $t=1, \dots, TE$ についても最小化を図ると

$$DDD(A_0, A_n) = \min_i (DD(A_{01}, A_n), \dots, DD(A_{0TE}, A_n)) \dots \dots \dots (16)$$

となる。ここに, TE は当該制御時刻を意味している。結局, $DDD(A_0, A_n)$ が当該台風 A_0 と過去の台風 A_n との類似度となり,

$$DDD(A_0, A_n) \xrightarrow{n} \max \dots \dots \dots (17)$$

より類似台風が抽出される。ところで, 本研究のようにデータが離散的な場合には, $\min \cdot \max$ の方法では類似度が全く一致する場合が出現し, 判別が不可能になることがある。そこで, 相加平均を用いると比較的判別が容易になる。具体的には,

$$D(A_{0t}, A_{ni}) = \{m1(x_{ni}, x_{0t}) + m2(y_{ni}, y_{0t}) + m3(z_{ni}, z_{0t}) + m4(r_{ni}, r_{0t})\} / 4 \dots \dots \dots (18)$$

で置き換えられた類似度を基に, 式(15)~(17)に対応した手順で台風の抽出を行うのである。

3.3 進行速度を考慮した類似度の算定

類似性の判断をより明確にするため, 台風の位置, 中心示度, 進行方向だけでなく, 総降雨の開始時刻に影響を及ぼす台風の接近速度も物理要因として加えよう。当該台風の時刻 t における速度を v_{0t} , 過去の台風 n の i ステップ目の速度を v_{ni} とすると, 類似性は次式より計算される。

$$m5(v_{ni}, v_{0t}) = 1/\alpha_5^{k_5|v_{ni}-v_{0t}|} \dots \dots \dots (19)$$

したがって, 時刻 t での類似度は

$$D(A_{0t}, A_{ni}) = \min\{m1(x_{ni}, x_{0t}), m2(y_{ni}, y_{0t}), m3(z_{ni}, z_{0t}), m4(r_{ni}, r_{0t}), m5(v_{ni}, v_{0t})\} \dots \dots \dots (20)$$

となり、以後、同じ手順で類似台風を決定することができる。

4. 降雨量の予測

4.1 降雨パターンおよび総降雨量予測

統計資料より、類似台風が位置 (x_i, y_i) にあるとき、非超過確率 Pr, c を有する降雨強度 $Zc(i, j)$ がもたらされるとしよう。また、類似台風の座標滞在時間を $TA(i, j)$ とすれば、その時の総降雨量は次式で表される。

$$\sum_{ij} Zc(i, j) TA(i, j) \dots\dots\dots (21)$$

ここで、 i, j はそれぞれ、当該制御時刻以降の類似台風の通過したメッシュの東経と北緯を表している。同様に、平均降雨強度によっても総降雨量が計算できる。さらに、5つの要因によって求められた類似度を前件部の適合度と見なし、抽出された過去の台風の雨量から総降雨量を求めるわけである。ゆえに、平均雨量強度のように座標によってのみ評価するのではなく、類似抽出した台風のデータを考慮した総合的な予測を行っていることになる。ここでは、後件部の関数形を仮定しなくてもよい推論法(1)を用いる。すなわち、

$$SUR(A_0) = \frac{\sum_n DDD(A_0, A_n) \cdot SUR(A_n)}{\sum_n DDD(A_0, A_n)} \dots\dots\dots (22)$$

ここに、 $SUR(A_0)$ は当該台風 A_0 の予測総雨量、 $SUR(A_n)$ は、当該制御時刻以降の類似台風 A_n の実績総雨量である。

5. ファジイ制御則によるダム貯水池操作

5.1 前件部の構成要因

現行の多目的ダム操作規則によれば、洪水の予測は不可欠で、最大流量、洪水総量、洪水継続時間及び流入量の時間変化を予測し、その後入手可能な気象情報等により漸次修正していくことになる。洪水の規模を事前に予測することは非常に困難であるが、必要な洪水調節容量を確保するためには、必ず何らかの形で、洪水規模を予測しなければならない。故に、次のような仮定を基に降雨予測をすることは妥当な方法と考えられる。

- i) 最大流量は総雨量により推定できる。
- ii) 洪水の継続時間は総雨量により推定できる。
- iii) 流入量の時間変化は最大流量を頂点とする三角形とする。

数式に書き直すと、

- i) $QI \max = f_1(R)$
- ii) $TL = f_2(R)$
- iii) $R = TL * QI \max / 2$

となる。ここに、 $QI \max$ は最大流量、 $f_1(R)$ は総雨量を変数とする最大流量の関数、 TL は洪水の継続時間、 $f_2(R)$ は総雨量を変数とする継続時間の関数、および R は総雨量、である。そこで、操作量を推論するためのファジイ制御器への入力として、 $S(t)$ (時刻 t における貯水池の期末貯水量)、 $QI(t)$ (時刻 t における貯水池への流入量)、 $\Delta QI(t)$ (時刻 t における貯水池への流入量の増加率)、および $R(t)$ (予測総雨量) の4つの要因を採用する。

5.2 ファジイ空間の分割

オペレータが操作する時その操作量は、環境状況に応じて変化しなければならないことはいうまでもない。

その状況を前件部の入力情報としてファジィ分割すれば、各要因に関して次のようになる。

i) 貯 水 位

常時満水位 (サーチャージ水位)

A1: *very small scope*

ただし書き操作開始水位

A2: *small scope*

制限水位 (季節により変動)

A3: *more or less small scope*

確保水位 (or 予備放流水位)

A4: *more or less large scope*

最低水位

A5: *large scope*

ii) 流 入 量

計画高水流量 B1: *extremely large*

計画高水流量の75%程度 B2: *very large*

計画高水流量の50%程度 B3: *large*

洪水流量 B4: *more or less large*

流量 0 ~ 洪水流量 B5: *more or less small*

iii) 流入量増加率

増加傾向 C1: *increasing*

一定流量 C2: *constant*

減少傾向 C3: *decreasing*

iv) 予測総雨量

総雨量 150 mm 程度 D1: *very large*

総雨量 100 mm 程度 D2: *large*

総雨量 60 mm 程度 D3: *more or less large*

総雨量 40 mm 程度 D4: *more or less small*

総雨量 20 mm 程度 D5: *small*

5.3 制御規則と制御アルゴリズム

制御規則の具体的な設定については現場技術者、オペレータなどの経験を十分に反映する必要があるが、ここでは大胆に以下のように定めた。前件部については 5.2 に述べたように貯水量、現在流入量、流量増加率、予測総雨量の 4 つを入力情報とし、後件部の出力 (放流量) はファジィ集合ではなく、確定値とする。たとえば、

if (貯水量) = 制限水位 (いづらか余裕がある),

(現在流入量) = 洪水流量,

(流量増加率) = 一定,

(予測総雨量) = 40 mm 程度 (いづらか小さい),

then (放流量) = 流入量と同じだけ放流する

として表記する。つまり分割された空間数は、貯水量については 5 個、現在流入量については 5 個、流量増加率については 3 個、予測総雨量については 5 個であるから、規則数は、 $5 \times 5 \times 3 \times 5 = 375$ 通りになる (一例として Table 2 参照)。貯水量については、最低水位から満水位までを 0 から 10 までの実数値で表すものである。流入量、放流量についても同様に、流量 0 から計画高水流量までの流量は 0 から 10 までの実数

Table 2 Control rules of dam reservoir

rule number	storage volume	inflow discharge	increasing rate	total rainfall	release discharge
76	2.5	0.0	2.0	20.0	0.0
77	2.5	0.0	2.0	40.0	0.0
78	2.5	0.0	2.0	60.0	0.0
79	2.5	0.0	2.0	100.0	0.5
80	2.5	0.0	2.0	150.0	1.0
81	2.5	0.0	0.0	20.0	0.0
82	2.5	0.0	0.0	40.0	0.0
83	2.5	0.0	0.0	60.0	0.0
84	2.5	0.0	0.0	100.0	0.0
85	2.5	0.0	0.0	150.0	0.0
86	2.5	0.0	-2.0	20.0	0.0
87	2.5	0.0	-2.0	40.0	0.0
88	2.5	0.0	-2.0	60.0	0.0
89	2.5	0.0	-2.0	100.0	0.0
90	2.5	0.0	-2.0	150.0	0.0
91	2.5	2.5	2.0	20.0	2.5
92	2.5	2.5	2.0	40.0	2.5
93	2.5	2.5	2.0	60.0	2.5
94	2.5	2.5	2.0	100.0	3.0
95	2.5	2.5	2.0	150.0	3.0

値で表したものである。流量増加率は0から10までで表した流量の単位時間あたりの増加率である。予測総雨量に関しては、単位は mm とする。

一方、制御アルゴリズムは、ファジイ推論 (2) をもちいると

$$\begin{aligned} & \text{if } S(t) \text{ is } A_i, QI(t) \text{ is } B_j, \Delta QI(t) \text{ is } C_k, R(t) \text{ is } D_l, \\ & \text{then } QO(t) = z_{ijkl} \end{aligned} \quad (23)$$

となる。ここに、 $\Delta QI(t) = QI(t) - QI(t-1)$ 、 $QO(t)$ は放流流量、 A_i は、貯水量に関するファジイ集合、 B_j は流入量に関するファジイ集合、 C_k は流量増加率に関するファジイ集合、および D_l は予測総雨量に関するファジイ集合である。また、メンバーシップ関数は次式より求める。

$$A_i(S(t)) = 1/\exp\{a_i(S(t) - S_i)^2\} \quad (i=1, 2, 3, 4, 5) \quad (24)$$

$$B_j(QI(t)) = 1/\exp\{b_j(QI(t) - QI_j)^2\} \quad (j=1, 2, 3, 4, 5) \quad (25)$$

$$C_k(\Delta QI(t)) = 1/\exp\{c_k(\Delta QI(t) - \Delta QI_k)^2\} \quad (k=1, 2, 3) \quad (26)$$

$$D_l(R(t)) = 1/\exp\{d_l(R(t) - R_l)^2\} \quad (l=1, 2, 3, 4, 5) \quad (27)$$

ただし、 a_i, b_j, c_k, d_l は各々の段階における定数である。もし、 $S(t)=s, QI(t)=q, \Delta QI(t)=dq, R(t)=r$ の情報が得られた時、放流量は以下のようにして決定される。

i) 各規則の各要因について、次のメンバーシップ値を求める。

$$A_i(s), B_j(q), C_k(dq), D_l(r) \quad (28)$$

ii) 前件部の適合度を求める。

$$\omega_{ijhl} = \min\{A_i(s), B_j(q), C_h(dq), D_l(r)\} \dots\dots\dots (29)$$

iii) 推論値を求める。

$$QO(t) = \frac{\sum_{ijkl} \omega_{ijhl} \cdot z_{ijhl}}{\sum_{ijkl} \omega_{ijhl}} \dots\dots\dots (30)$$

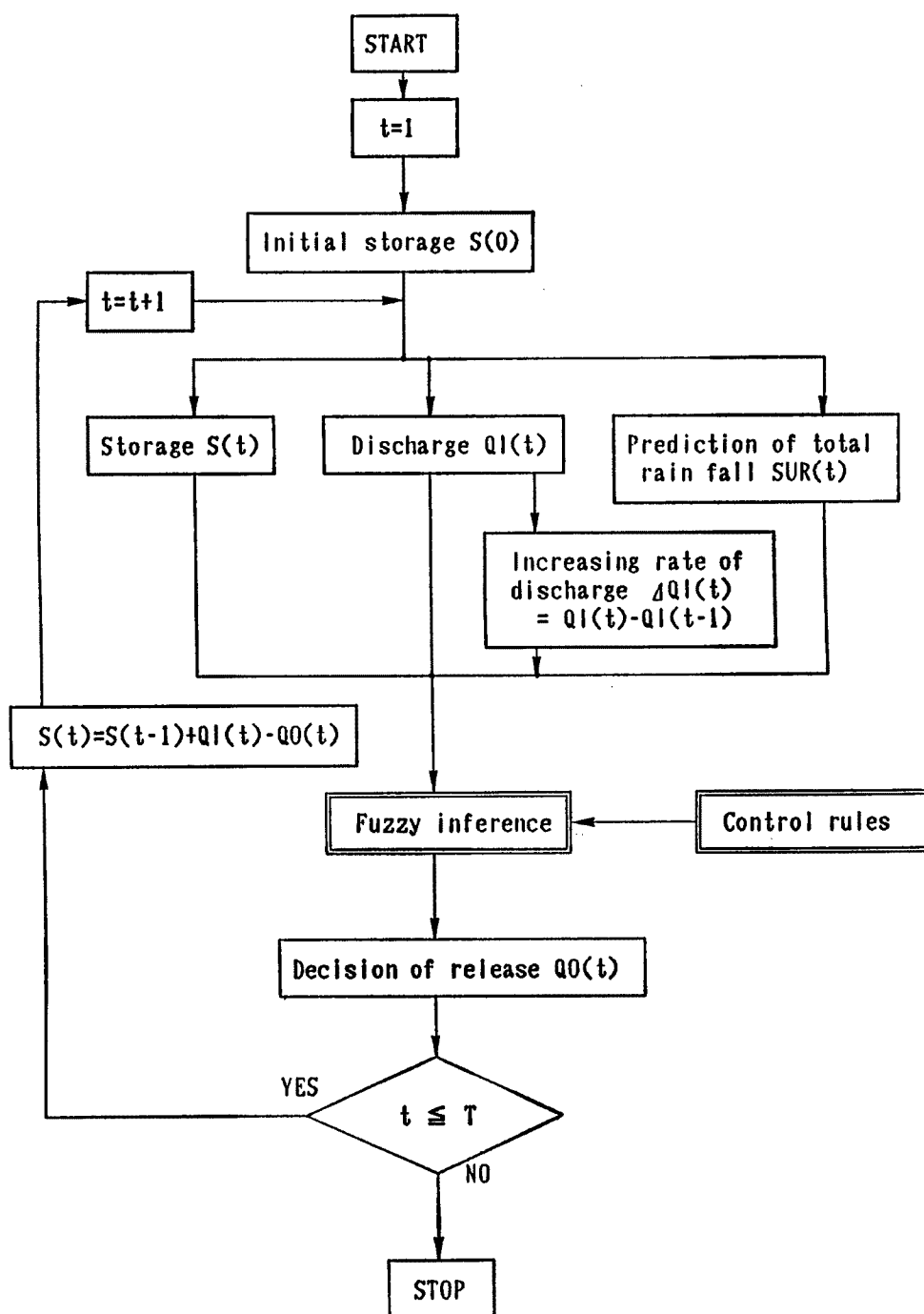


Fig. 2 Flowchart of dam operation.

式(30)の $QO(t)$ が時刻 t における放流量となる。以上の操作手順をまとめると、**Fig. 2** のフローチャートとなる。

6. 適用と考察

6.1 類似台風の抽出

当該制御時刻において、ダム貯水池の操作に必要な情報のひとつである予測総雨量を求めるにあたり、対象とする台風と類似した台風を抽出することが必要となる。ここで、東経、北緯、中心示度、方向タイプの4つの要因を用いた抽出法で適用してみよう。パラメータの値は、 $\alpha_1=\alpha_2=\alpha_3=2.0$ 、 $k_1=k_2=0.25$ 、 $k_3=0.025$ とした。各値は主観的に決定したものであり、入力変数がほぼ $(0, 1)$ に規格化されている。ある要因に注目して抽出したいときは、その係数を大きくとればよい。

適用対象とする台風として台風番号6707を用いる。この台風が、方向タイプが2、すなわち北東に進み、北緯30度、東経27度のメッシュに達した場合について、過去12ステップのメッシュに関して類似抽出した。

Table 3 Similar typhoons extracted by max-min method

step No.	latitude	longitude	type	pressure (mb)	count	order	typhoon name	similarity
1	22	126	1	981.0	355	1	6707	1.00000
2	23	126	4	983.0	216	2	1010	0.91403
3	23	125	3	983.0	189	3	1810	0.90963
4	24	125	1	985.0	177	4	5609	0.89812
5	25	125	1	987.5	167	5	1101	0.89693
6	26	125	1	990.0	155	6	6515	0.88960
7	27	125	6	993.0	106	7	5404	0.88764
8	27	126	2	993.0	100	8	3513	0.88394
9	28	126	1	996.0	95	9	3503	0.88305
10	29	126	1	995.5	84	10	6213	0.87848
11	30	126	6	995.0	78			
12	30	127	2	995.0	75			

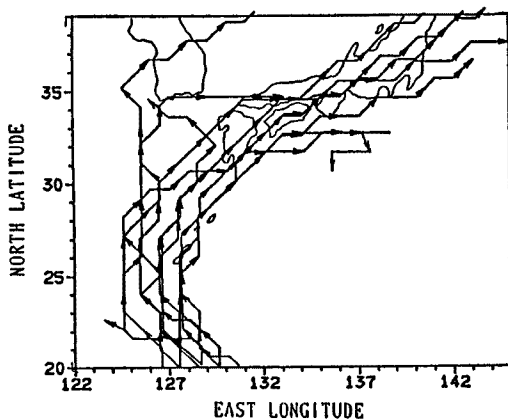


Fig. 3 Similar typhoon courses extracted by max-min method.

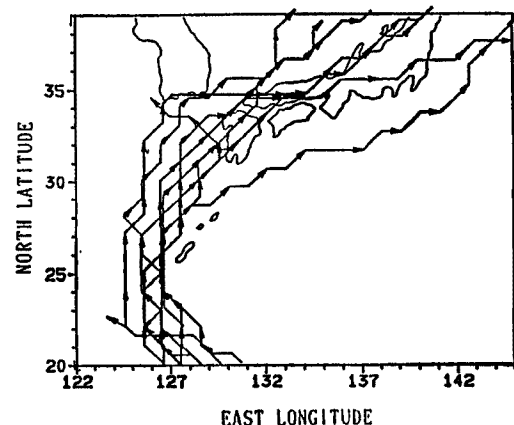


Fig. 4 Similar typhoon courses extracted by arithmetic mean method.

Table 4 Similar typhoons extracted by arithmetic mean method

step No.	latitude	longitude	type	pressure (mb)	count	order	typhoon name	similarity
1	22	26	1	981.0	81	1	6707	1.00000
2	23	26	4	983.0	26	2	1101	0.84090
3	23	25	3	983.0	23	3	1010	0.84090
4	24	25	1	985.0	12	4	2910	0.70711
5	25	25	1	987.5	10	5	3110	0.70711
6	26	25	1	990.0	9	6	3204	0.70711
7	27	25	6	993.0	6	7	3503	0.70711
8	27	26	2	993.0	6	8	3809	0.70711
9	28	26	1	996.0	3	9	3911	0.70711
10	29	26	1	995.5	3	10	4704	0.70711
11	30	26	6	995.5	3			
12	30	27	2	995.0	3			

その場合、相加平均方式については Table 3 と Fig. 3, max・min 演算については Table 4 と Fig. 4 の様な結果になった。各 Table の step No. は解析対象期間のステップ数で、type は 3.1 で述べた方向タイプを表す。count はステップ数の増加とともに、類似度が0.8以上と算定された台風が、どれだけあるかを示したもので、当然減少していくことになる。typhoon name は類似抽出された上位10個の台風名で、similarity は各々の方法で求められた対象台風との類似度である。この場合、実際に存在した台風について調べたので、類似度が1.0となって抽出される。Table 3 と Table 4 を比較すると、メンバーシップ関数に同じパラメータを用いても、max・min の方が相加平均によるものに比べて、類似度は0.8以上になるものがかなり少ないことがわかる。これは単に類似台風の順位づけという点で考えれば問題はない。しかし、入力変数のうち東経、北緯、方向が整数値という離散的な量のために、similarity が完全に一致し順位づけができない場合が、多数発生する。この点を考慮すると、相加平均のほうが実用には優れていると考えられる。したがって、以下の適用においては、相加平均による類似度を用いることにする。

進行速度も考慮した類似台風の抽出については、次のようにして決定する。すなわち、 TI_i を i ステップ目のメッシュにおける滞在時間、 LE_i を i ステップ目のメッシュを台風が通過する距離とすると、 i ステップ目の進行速度 V_i は

$$V_i = LE_i / TI_i \dots\dots\dots (31)$$

で表される。ここで TI_i はデータより直接得られるが、 LE_i に関しては方向タイプから求めるしかないもので、次のような仮定をおき、近似的に計算した。

- i) メッシュは一辺が100 km の正方形とする。
- ii) 方向タイプ1, 5, 7については、そのメッシュに垂直に進入し、垂直に出ていく。
- iii) 方向タイプ2, 3, 4, 6については、45度の角度で進入し、45度の角度で出ていく。
- iv) 方向タイプ2, 3, 4, 6についての台風の進入点は各辺の中点とする。
- v) 台風はメッシュ内では直進する。

以上のことより、進行距離 LE_i は方向タイプ1, 5, 7については100 km, 方向タイプ2, 3, 4, 6については $100 \times \sqrt{2}/2 \approx 70$ km となる。もちろん、一つのメッシュに着目して上のような仮定で進行速度を計算しては誤差が大きくなる。それは、方向タイプ2, 3, 4, 6については台風がメッシュ内で直進すると仮定しても、 $0 < LE_i < 140$ となるものがすべて含まれるからである。進行速度の類似度に関しては、複数個のステップ数を取り、その平均として進行速度を求めることとした。

6.2 降雨量の予測

台風9202について進行速度を考慮したものとししないものについて、北緯30度、東経33度のメッシュから過去4ステップにさかのぼって類似抽出したのが、Table 5, Table 6. である。Fig. 5, Fig. 6. はそれぞれ進行速度を考慮したものとししないものの、平均降雨強度の予測ハyetグラフである。いずれも、類似度の順位別に台風進路を決定した場合での予測値を示してある。左上が類似順位一番で、左下へ、そして右の列へと順位が下がっている。Fig. 5 は進行速度を考慮したものであるが、10時間以内に降雨ピークがくることがわかる。Fig. 6 では、1508（6番目）や7912（10番目）のように軌跡はにているが降雨パターンが違うものが含まれる。このことにより類似度算定の要因として、近似値ながらも進行速度を含めた方が良い結果になると考えられる。

Table 7 は台風6707について、北緯27度、東経25度から、北緯29度、東経26度までの4ステップについて類似抽出し、最終ステップ時刻以降の類似台風の実績総雨量（rainfall）と総雨量の推論値を求めたもので

Table 5 Predicted total rainfall not using typhoon velocity

order	typhoon name	similarity	rainfall
1	9202	1.00000	27.3
2	2009	0.95005	0.5
3	2607	0.93406	0.4
4	4328	0.93360	14.0
5	1812	0.93060	14.9
6	6303	0.92870	38.3
7	5916	0.92507	18.1
8	803	0.91235	30.4
9	2908	0.91069	7.2
10	1713	0.90991	21.6

predicted total rainfall=16.082mm

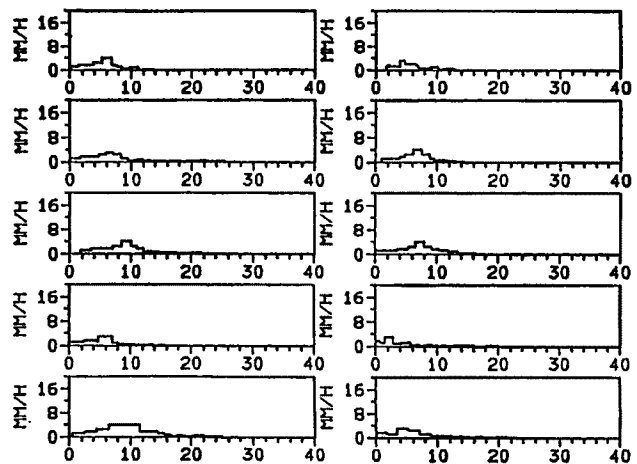


Fig. 5 Predicted hyetographs not using typhoon velocity.

Table 6 Predicted total rainfall using typhoon velocity

order	typhoon name	similarity	rainfall
1	9202	1.00000	27.3
2	2009	0.98651	0.5
3	2607	0.95590	0.4
4	1812	0.95339	14.9
5	803	0.92191	30.4
6	1508	0.92074	33.7
7	4328	0.92045	14.0
8	1713	0.91994	21.6
9	5916	0.91994	18.1
10	7912	0.91927	13.0

predicted total rainfall=16.096mm

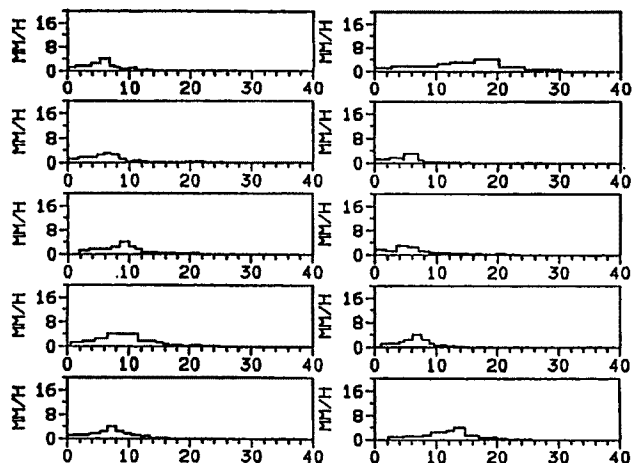


Fig. 6 Predicted hyetographs using typhoon velocity.

Table 7 Predicted total rainfall using 4 steps for similarity

order	typhoon name	similarity	rainfall
1	6707	1.00000	190.8
2	7803	0.94714	13.0
3	6612	0.92775	0.0
4	2312	0.92459	45.4
5	3503	0.92102	0.0
6	3006	0.91577	0.0
7	1010	0.91102	103.5
8	1701	0.89418	29.2
9	4704	0.89234	52.9
10	1012	0.88832	38.4

predicted total rainfall=31.136mm

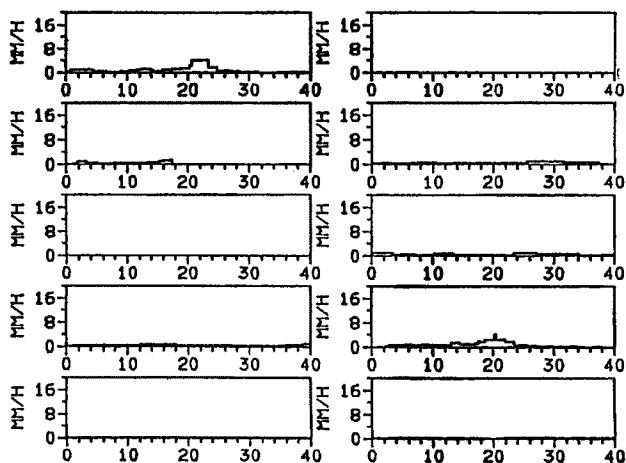


Fig. 7 Predicted hyetographs using 4 steps for similarity.

Table 8 Predicted total rainfall using 8 steps for similarity

order	typhoon name	similarity	rainfall
1	6707	1.00000	178.9
2	7803	0.94621	13.0
3	1010	0.91843	63.3
4	2312	0.91489	45.4
5	1701	0.89883	28.5
6	4704	0.89396	52.7
7	1007	0.88011	40.7
8	1004	0.87739	0.0
9	1711	0.87569	63.9
10	3503	0.87460	0.0

predicted total rainfall=34.217mm

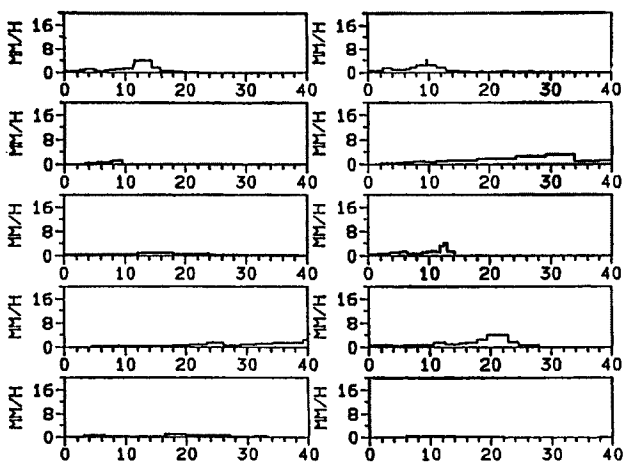


Fig. 8 Predicted hyetographs using 8 steps for similarity.

である。Fig. 7 は、その平均予測ハイトグラフである。Table 8, Fig. 8 は、北緯27度、東経25度から北緯31度、東経28度までの8ステップについて求めたものである。台風6707は総雨量が約190mm でかなり大きなものであるが、Table 7 では降雨量が0のものも抽出された。それらは、大体、朝鮮半島方面に向かうものであった。Table 8 でも同じように降雨量が0のものが抽出されたが、4ステップのものにくらべ抽出台風の軌跡は集まっているように見える。一般には、ステップ数が多くなるにつれて、よく似た台風が抽出されることがわかる。

6.3 ファジィ制御則による貯水池操作

制御規則の設定については、現場技術者の経験を取り入れることが必要であり、ここでは架空のダム貯水池系を設定して、各ファジィ空間を設定した。

- i) 水位が低く、予測総雨量が小さいときは、貯水位を上げる。

- ii) 水位が高く、予測総雨量が大きいときは、貯水位を下げて出水に備える。
- iii) 水位が低く、予測総雨量が大きいときは、i)ほどは貯水位を上げない。
- iv) 水位が高く、予測総雨量が小さいときは、ii)よりゆっくりと貯水位を下げる。

なお、水位については特に確保水位を重視し、何もなければこの水位を維持するように仮定した。また、ダム貯水池系に関しては次の通りである。

貯水池の容量	$10 \times 10^6 (\text{m}^3)$
ただし書き操作開始水位での貯水可能容量	$2.5 \times 10^6 (\text{m}^3)$
制限水位での貯水可能容量	$5.0 \times 10^6 (\text{m}^3)$
確保水位での貯水可能容量	$7.5 \times 10^6 (\text{m}^3)$
計画高水流量	$2800 (\text{m}^3/\text{s})$
洪水流量	$700 (\text{m}^3/\text{s})$

総雨量と最大流量の関係、 $QI \max = f_1(R)$ は、 $R=100\text{mm}$ のときに $QI \max = 2800 (\text{m}^3/\text{s})$ となる線形関数とした。ただし、 $a_1=a_2=a_3=a_4=a_5=0.04$, $b_1=b_2=b_3=b_4=b_5=0.04$, $c_1=c_2=c_3=0.69$, $d_1=d_2=d_3=0.69 \times 10^{-2}$, $d_4=d_5=1.11 \times 10^{-3}$ である。

Fig. 9 は初期貯水量が0で流量が、計画高水流量の10分の1である $280 \text{m}^3/\text{s}$ で一定の場合に放流量と貯水位がどうなるかを調べたものである。放流量は流入量をわずかに下回り、徐々に確保水位に近づいていくことがわかる。Fig. 10 は Fig. 9 と同様の流入量系列で初期貯水位が満水位の時のものである。約14時間のところまで放流量は流入量をわずかに上回り、貯水位はやはり確保水位に漸近していく。これらのことは設定した規則から考えれば当然であり、確保水位をもう少し上げたい時は制御規則における、貯水位の確保水位のファジィ空間 A_4 を大きくとればよい。

Fig. 11 は、初期貯水位が0で、点線のような流入量系列をとるときの放流量系列と貯水位系列である。

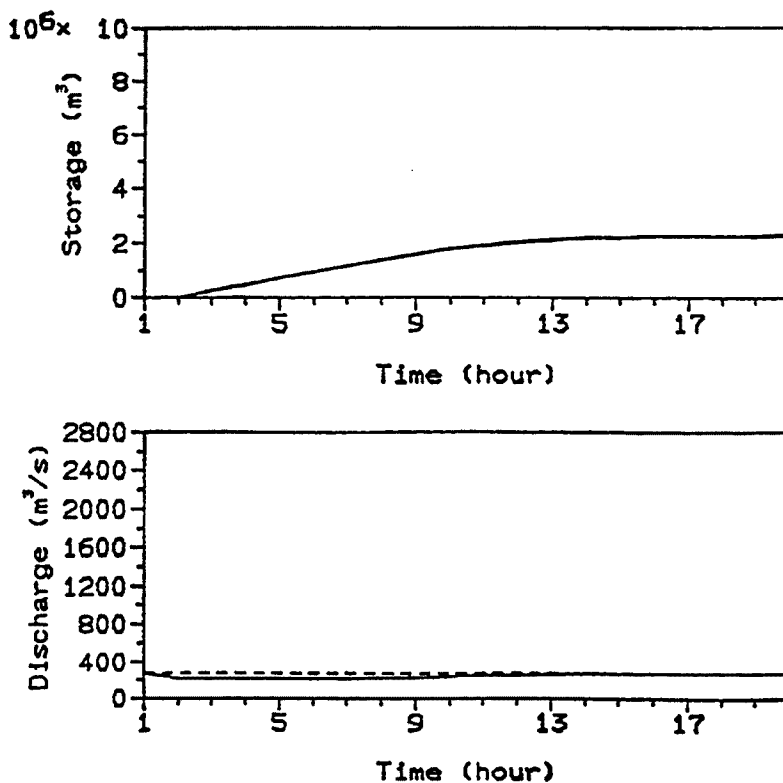


Fig. 9 Simulated results in the case that the initial storage volume is empty.

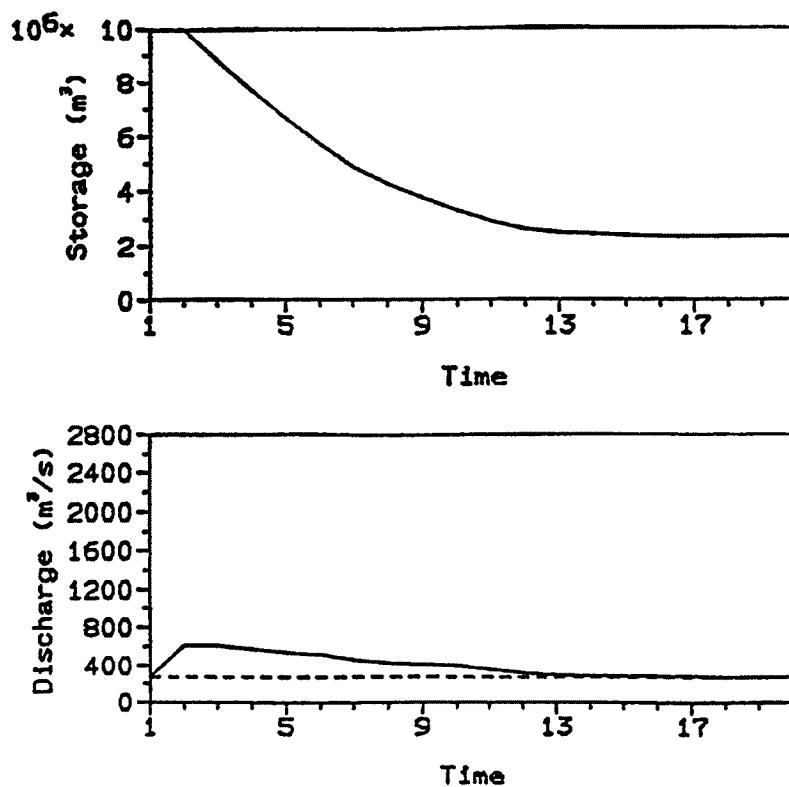


Fig. 10 Simulated results in the case that the initial storage volume is full.

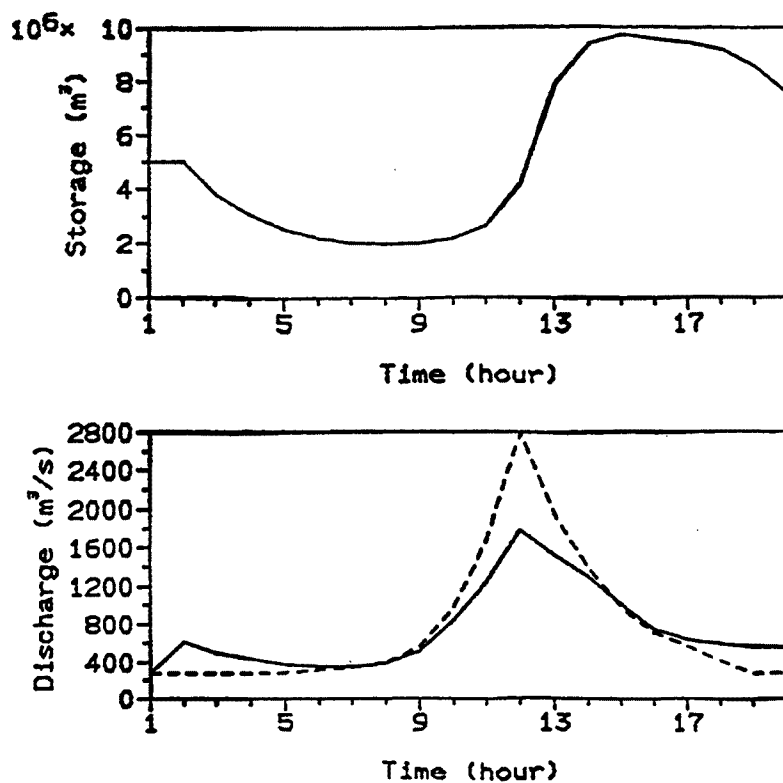


Fig. 11 Simulated results in the case of shaped hydrograph (N type).

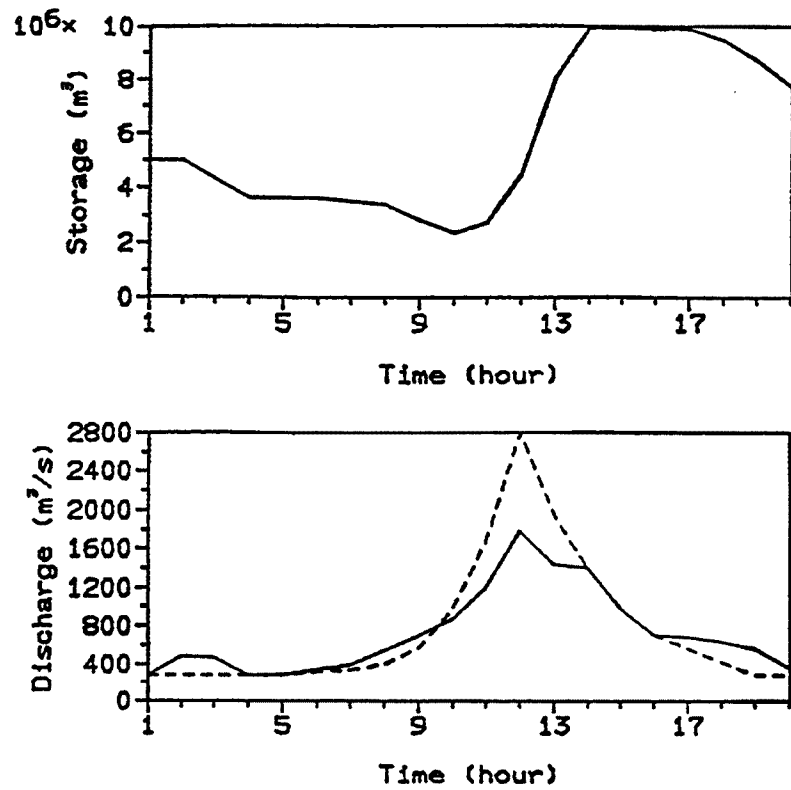


Fig. 12 Simulated results using tight membership function (T type).

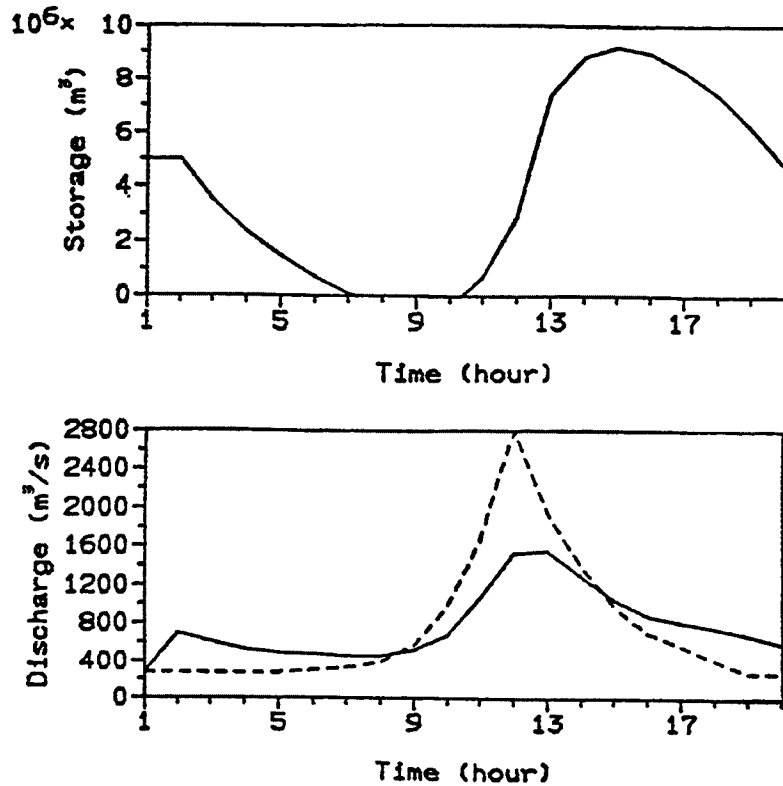


Fig. 13 Simulated results using loose membership function (L type).

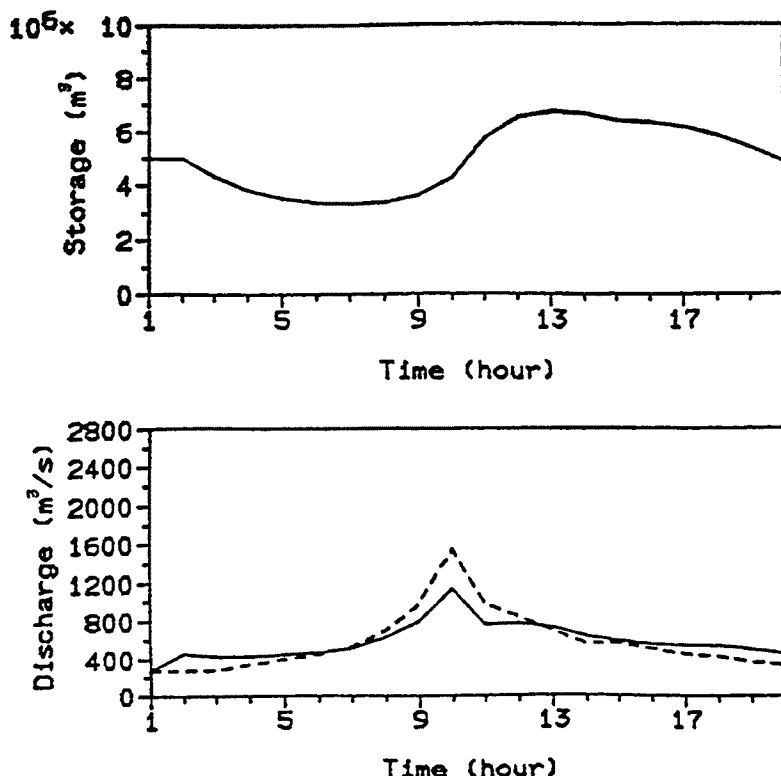


Fig. 14 Simulated results in the case of real time operation.

予測総雨量は、最大値が100 mm、制御後半は10mmとなり、ピークが制御初期より約9～10時間後になるものをとった。流量のピーク時に貯水位が急激に上昇し、ピークカットの効果がみられる。約16時間のところで放流量が流入量を上回り、貯水位を下げる働きをし、いわゆる洪水処理を行っているのがわかる。

メンバーシップ関数の相違による制御の変化を見るために、前述の関数(Nタイプ)のほかに、Tタイプ($a_1=a_2=a_3=a_4=a_5=1.5$, $b_1=b_2=b_3=b_4=b_5=1.5$, $c_1=c_2=c_3=3.0$, $d_1=d_2=d_3=3.0 \times 10^{-2}$, $d_4=d_5=6.0 \times 10^{-3}$)とLタイプ($a_1=a_2=a_3=a_4=a_5=0.1$, $b_1=b_2=b_3=b_4=b_5=0.1$, $c_1=c_2=c_3=0.1$, $d_1=d_2=d_3=0.05 \times 10^{-2}$, $d_4=d_5=0.3 \times 10^{-3}$)の2種類を設定した。

Tタイプは、操作開始後1時間から3時間まで放流し、その後もピーク流量に達するまでに徐々に水位を下けている(Fig. 12 参照)。しかし、貯水位は操作開始後14時間のところで満水位になっており、その状態が3時間継続している。その後は、放流量が流入量を上回り、貯水位を下けている。14から16時間のところでは放流量と流入量が一致し、流量をとにかく下げようとする効果が現れている。Lタイプは他の2つのタイプと比べて、著しい差異がみられる。すなわち、放流量と流入量の差が大きく、したがって水位の変化も激しい(Fig. 13 参照)。これは、各ファジィ集合のメンバーシップ関数の勾配が非常に緩やかなので、ある入力についてどの集合に属するか計算するときに、各メンバーシップ値が大きい値をとるため、計算時に過敏な反応を示すためである。

最後に、台風5906の予測総雨量を用いて、本研究で設定したダム貯水池についての操作の適用例を示す。ある制御時刻における総雨量は、その時刻に最も近い予測総雨量を用いることにする。Fig. 14 はNタイプのメンバーシップ関数を用いたときの貯水位と放流量系列である。初期貯水量を制限水位としたものであるが、予備放流、洪水調節(ピークカット)、洪水処理の各作業を行っているのがわかる。ここでは、例示していないが、やはりLタイプは貯水位の変動が激しかった。また、TタイプはNタイプと比べて、貯水位系列がなめらかではない。これはTタイプのメンバーシップ関数の勾配が大きいため、入力変数のファジィ空

間が分裂し複数個の制御規則を使って総合判断し難いためであるからと考えられる。

7. 結 論

本研究では、台風性降雨を対象とした洪水対策として類似台風の抽出による降雨量予測と結合したダム貯水池制御法を提案した。ファジィ制御法は熟練したオペレータ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したものと言える。オペレータ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れば、より良いシステム構成が可能となろう。ここで、得られた成果についてまとめると、次のようになる。ファジィ制御理論の導入については、

- i) *if-then* 形式で制御アルゴリズムを自由に表現できた。
- ii) 複数個の制御規則により、異なる論理による制御を同時に記述することができた。
- iii) 台風情報、貯水池操作と言うあいまいな事柄であっても、言語変数を導入することにより制御アルゴリズムを構成できた。

また、台風性降雨予測に関しては、

- i) 近畿地方に接近した台風についてはある程度、同規模のものが抽出された。
- ii) 北東に進路をとりながら接近する台風については、抽出した台風の進路に類似性が認められた。
- iii) 逆に、北西に進路をとりながら接近する台風については、転向するものや日本列島を横断するものや迷走するものなどで、進路予測がしにくい。北東に進む台風が、偏西風の影響を受けるためであると考えられる。
- iv) 進行速度を考慮にいれることにより、降雨のピーク時間の予測精度が向上する。

さらに、貯水池操作に関しては、

- i) 基本的に貯水池は確保水位を保つことができた。
- ii) 流入量が洪水流量をこえれば、放流量は流入量を下回り貯留を開始することが確認できた。しかし、予測雨量が非常に大きければ、予測雨量が小さいときよりも放流量は大きくなり、貯水可能容量を残すことができる。
- iii) 貯水位が確保水位を上回り、予測雨量が大きいとき、予備放流が顕著であった。
- iv) 流入量がピークになるときに、放流量もピーク値を取る結果となっている。
- v) 流量増加率で、予測雨量が小さければ、放流で貯水池水位が下がり、洪水処理の体制になる。

という見解が得られ、今後、実時間での操作形態を分析し、貯水池操作のエキスパートシステムを作成していきたい。

最後に、本研究を進めるにあたって、貴重な水文資料を提供していただいた建設省淀川工事事務所に衷心よりお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) たとえば, Kaufmann, A: Introduction to the Theory of Fuzzy Subsets, Volume 1, Academic Press, inc. 1975.
- 2) たとえば, 浅居喜代治・田中英夫・奥田徹夫・Negoita, C., V.・Ralescu, D., A.: あいまい制御理論入門, オーム社, 1978.
- 3) 菅野道夫: ファジィ制御, 第2回ファジィシステムシンポジウム, 1986, pp.1-8.
- 4) 前田幹夫: ファジィコントローラ的设计, 第2回ファジィシステムシンポジウム, 1986, pp.38-43.
- 5) 望月邦夫: 淀川の治水計画とそのシステム工学的研究, 京都大学博士論文, 1970.