

渇水時貯水池操作における意思決定基準の曖昧性と 流量予測精度との相互関係分析モデルの構築

高棹 琢馬・椎葉 充晴・堀 智晴

IMPACTS ASSESMENT MODEL OF PREDICTION ACCURACY AND FUZZINESS OF DECISION CRITERIA ON DROUGHT CONTROL

By *Takuma TAKASAO, Michiharu SHIIBA and Tomoharu HORI*

Synopsis

The aim of this study is to establish an analytical model for the impacts of inflow prediction accuracy and fuzziness of decision criteria on drought control by a dam reservoir. The reservoir operation process under the fuzzy prediction information is modeled as a fuzzy system and the uncertainty of the decision criteria is expressed by the use of fuzzy sets. Fuzzy dynamic programming for a fuzzy system is then introduced to decide the release discharge during drought period. An inflow prediction model is also developed based on a fuzzy linear regression model. The model developed here is applied to a hypothetical reservoir system and it is verified that the fuzziness of decision process depends strongly on the interaction between the reliability of inflow prediction model and the type of decision criteria.

1. 序 論

1994 年は春先から雨が少なくまた記録的な猛暑も重なったために、全国各地で渇水による被害が発生した。淀川水系において琵琶湖の水位が史上最低の - 1.23 m を記録したのをはじめ、吉野川水系の早明浦ダムの枯渇による香川用水の最高 75% カット、福岡市での 1 日 12 時間給水の実施など、1994 年の渇水により上水道のみで 41 都道府県 494 市町村 1562 万人が影響を受けた¹⁾。また過去においても昭和 39 年の東京オリンピック渇水、昭和 48 年の高松渇水、昭和 53 年の福岡渇水など都市化の進展とともに渇水による被害が頻発してきた。このように安定した水供給が断たれると、その影響は個々人の生活だけでなく産業活動・地域経済に及び、ひいては社会不安をもたらす。

このような事情を背景に、安定した水供給や渇水に対する危機管理対策への要請が強まる中、利水に対する、特に渇水時における貯水池操作に関する研究がこれまでに数多くなされてきた。もちろん、渇水時の貯水池操作を考える上では、将来の長期にわたる流入量予測の問題をいかに解決するかが一つの大きな焦点である。例えば、中川²⁾は、降雨量時系列をその時間変化パターン特性に注目して分類し、各々について各期ごとに降水量の確率分布を推定し、流入量の確率分布に変換したもののうち、過去の流入量時系列・気象予報データと照合して生起する可能性の高いものを用いるという方法を提案している。また、小尻ら³⁾は、降水と気温の遷移確率を求め、降雨—蒸発—流出の回帰式より流量の遷移確率を算定する方法を提案している。以上は、いずれも渇水時の貯水池操作の鍵となる流入量予測情報を確率的に与えようと

するものである。

一方、近年では、貯水池への将来の流入量を支配する要因が非常に複雑であることに注目し、確率論的な手法では利用しにくかった様々な形態の実時間情報もできる限り利用しようという視点から、ファジイ推論やニューラルネットワークを用いた予測手法も検討されている。例えば、池淵⁴⁾は、気象庁から発表される週間予報・1ヵ月予報・3ヵ月予報に着目し、これらの情報からファジイ推論過程を経て、貯水池への将来流入量を予測する方法を提案している。この手法は、週間予報の毎日の天気概況と週間予報・1ヵ月予報・3ヵ月予報における降水量の予報を用いて、貯水池への将来流入量を最大・平均・最小の3本の確定的な流入量系列として求める方法である。さらに、池淵⁴⁾は、この予測流入量系列を用いて、現在の貯水池レベル、渇水対策レベルを考慮しつつ放流量をファジイ推論によって決定するシステムを開発している。また、横山・池淵⁵⁾は、高層天気図から翌月の降水量をニューラルネットワークを用いて予測する方法を検討している。

ところで、現実には渇水に見舞われた場合には、渇水調整協議会における関係利水者や河川管理者の協議に基づいて、節水放流や取水制限といった対策が決定されている。この場合、通常期には、クリスプ集合あるいは確定値として与えられていた目標放流量・目標貯水量を緩和する必要が生じてくる。これら操作指標の緩和基準は、各々に対する受忍限度によって変わってくる。ところが、渇水対策の決定過程においては、今後の流入量がどのような形、あるいはどれほどの精度の情報で与えられるかにも大きく影響を受ける。たとえば、貯水池への流入量予測情報の精度が低い場合には、目標放流量や貯水量といった操作指針を厳しく設定したとしても、ある程度緩和した場合と同程度の満足度しか期待できないといったケースも考えられる。言い換えれば、貯水池流入量の精度と、目標放流量や貯水量といった操作指針の意味のある緩和の程度には、一定の均衡点が存在するものと考えられる。したがって、渇水対策のための協議がこの均衡点の存在を意識しないまま行なわれると、意思決定のための情報が不足しているにもかかわらず厳しい意思決定基準で議論を行なったり、その逆のケースが生じることになる。

そこで本研究では、現実の渇水対策の政策決定過程における予測情報の精度と意思決定基準の精度との関係を分析するための意思決定モデルを開発する。具体的には、目標放流量・目標貯水量などの操作指針の緩和を、これら条件を表す集合のファジイ化によって表現し、確率的予測情報あるいはファジイ予測情報が与えられた場合の貯水池状態推移を確率システム・ファジイシステムとしてとらえて表現することを通じて、放流量決定のための意思決定過程をファジイ意思決定問題としてモデル化する。そして、貯水池流入量予測精度と意思決定基準の精度との均衡点を探る第一歩として、開発したモデルを用いて種々の予測精度と意思決定精度の組合せについて適用を行ない、その性能を見ることにする。また、この分析モデルに組み入れるための流入量予測モデルとして、ファジイ回帰モデルによる流入量予測手法を開発する。

2. ファジイシステムによる渇水時貯水池操作のモデル化

渇水時の実時間貯水池操作に際して鍵となる情報は、将来の貯水池への流入量予測情報である。したがって、流入量予測情報が確率的に与えられるのか、ファジイ集合で与えられるのかによって、貯水池の状態推移のモデル化方法が異なってくる。流入量予測情報が確率的に与えられる場合には、貯水池状態推移は確率システムとしてモデル化できる。また、予測情報がファジイ集合で与えられる場合には、ファジイシステムとしての取り扱いが必要になる。確率システムとしての扱いは既に定式化されているので、ここでは、予測情報がファジイ集合で与えられた場合の状態推移を定式化しておく。

いま、単ダム貯水池を考えると、その状態推移は、第 t 期における流入量 v_t および放流量 r_t 、第 t 期期末における貯水量 s_t により記述される。これらの間には、次の連続式が成り立つ。

$$S_t = S_{t-1} + v_t - r_t \quad \dots\dots\dots (1)$$

現在時刻を t 期期首とし、 t 期中の貯水池流入量の予測情報がファジイ集合 V_t で与えられたとすると、第 t 期末 ($t+1$ 期期首) の貯水量状態 S_t の条件付きメンバーシップ関数は式(1) より、

$$\mu_{S_t | S_{t-1}, R_t}(S_t | S_{t-1}, r_t) = \mu_{V_t}(S_t - S_{t-1} + r_t) \quad \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる。したがって、 t 期末の貯水量状態を表すファジイ集合 S_t は、 r_t に対して次のように定義される。

$$\mu_{S_t}(S_t) = \bigvee_{S_{t-1}} [\mu_{S_{t-1}}(S_{t-1}) \wedge \mu_{S_t | S_{t-1}, R_t}(S_t | S_{t-1}, r_t)] \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、記号 $\vee, \wedge$ は、それぞれ、 $\max$ および $\min$ を表す。

なお、以上は連続なメンバーシップ関数を仮定していたが、状態集合 S_t 、入力集合 R_t の取り得る値が有限個の場合には、ファジイ行列を用いて状態推移を記述することができる。例えば、 t 期末の貯水量状態の取り得る値を $\{s_t^1, s_t^2, \dots, s_t^m\}$ と表したとき、放流量 $r_t \in R_t$ に対して $m \times m$ ファジイ行列 $M(r_t)$ が定義できる。すなわち

$$M(r_t) = \begin{bmatrix} \mu_{S_t | S_{t-1}, R_t}(s_t^1 | s_{t-1}^1, r_t) & \mu_{S_t | S_{t-1}, R_t}(s_t^1 | s_{t-1}^2, r_t) & \dots & \mu_{S_t | S_{t-1}, R_t}(s_t^1 | s_{t-1}^m, r_t) \\ \mu_{S_t | S_{t-1}, R_t}(s_t^2 | s_{t-1}^1, r_t) & \mu_{S_t | S_{t-1}, R_t}(s_t^2 | s_{t-1}^2, r_t) & \dots & \mu_{S_t | S_{t-1}, R_t}(s_t^2 | s_{t-1}^m, r_t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{S_t | S_{t-1}, R_t}(s_t^m | s_{t-1}^1, r_t) & \mu_{S_t | S_{t-1}, R_t}(s_t^m | s_{t-1}^2, r_t) & \dots & \mu_{S_t | S_{t-1}, R_t}(s_t^m | s_{t-1}^m, r_t) \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (4)$$

である。また、ファジイ状態 S_t を、次の列ベクトルで表現する。

$$S_t = (\mu_{S_t}(s_t^1), \mu_{S_t}(s_t^2), \dots, \mu_{S_t}(s_t^m))^t \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、記号 t は転置を表す。すると、 t 期末におけるファジイ状態 S_t は、 $t-1$ 期末におけるファジイ状態 S_{t-1} とファジイ行列 $M(r_t)$ を用いて次のように表される。

$$S_t = M(r_t) \circ S_{t-1} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 $\circ$ はファジイ行列の行列積を表し、 S_t の第 i 要素は

$$\mu_{S_t}(s_t^i) = \bigvee_j [\mu_{S_{t-1}}(s_{t-1}^j) \wedge \mu_{S_t | S_{t-1}, R_t}(s_t^i | s_{t-1}^j, r_t)] \quad \dots\dots\dots (7)$$

で表される。

3. ファジイ意思決定手法を用いた放流量の決定

現実社会においては、意思決定を行うための目標や制約が明確に規定されない場面も少なくない。こういった場面では、意思決定者が意識下で目標と制約の間に何らかの関係を仮定していたり、複数の目標を考えつつ目標間に重みを設定して場面によってその重みを変化させながら意思決定をしようとしていたり、制約と考えていた条件をある場面では目標とみなしたりしている状況がある。例えば、渇水時の放流量決定問題の場合には、決定のための指針である目標放流量と目標貯水量も場面によってそれぞれ目標、制約の両側面を持つ。十分に流入量があり、考えている期間末の目標貯水量が確保できる場合には、両条件は決定の下限を示す制約条件的色彩が強いが、流入量が不十分で両条件とも達成できないような場面では

は、両者はトレードオフの関係を持つ目的関数的色彩が強くなる。

このような状況を意思決定の過程に反映させるには、目標および制約をファジイ集合で表現するファジイ意思決定手法が役立つ。この手法では、決定をこれら両条件を表すファジイ集合の交わりと定義することで、制約及び目標を同一のレベルで扱う事を可能にするとともに、両者を特性づけるメンバーシップ関数の形状を変化させる事で条件間の強弱や、「十分条件を満足するとはいえないまでも受け入れられる」といった領域を表現する事ができる点が、上で述べたような状況を考えるのに適している。

そこで、本研究では現在の渇水調整のあり方を念頭におき、貯水池操作基準の緩和形態をファジイ集合で表現し、ファジイ意思決定手法を用いた放流量決定モデルを開発する。なお、将来の流入量が、確率分布で与えられるのか、あるいは確定値やファジイ集合で与えられるのかによって、貯水池の状態推移をモデル化する方法は異なってくる。ただし、確率システムに対するファジイ意思決定手法は既に導かれている⁶⁾ので、ここでは貯水池流入量がファジイ集合で与えられる場合の放流量決定モデルを設計する。

3.1 ファジイ意思決定

通常、意思決定過程は、個々の手段を選ぶ際の制約の集合と、その手段に対して利得（損失）を割り当てる評価関数とに支配される。ファジイ意思決定においては、これらをそれぞれ手段の空間 X におけるファジイ集合 $C_1, \dots, C_m, G_1, \dots, G_m$ で表し、ファジイ制約、ファジイ目標と呼ぶ。そして、ファジイ決定 D を、

$$D = G_1 \cap \dots \cap G_n \cap C_1 \cap \dots \cap C_m \dots \dots \dots (8)$$

で定義する。もちろん、ファジイ決定 D はファジイ集合であり、実際に何らかの決定を実行するためには、 D の一つの要素を選択しなければならない。これには、通常、 D を特性付けるメンバーシップ関数 μ_D の最大値を与える入力を取る（最大決定と呼ばれる）。

さて、最大決定を得る過程は多段決定過程となるが、このアルゴリズムは決定性システムおよび確率システムについて導かれており、決定性システムに関する場合の概要は以下の通りである⁶⁾。

すなわち、時刻 $t(t=1, \dots, N)$ における入力 u_t 、状態 x_t なるシステムがあって、状態の推移が状態推移関数 f によって、

$$x_t = f(x_{t-1}, u_{t-1}) \dots \dots \dots (9)$$

で与えられる場合に、入力 u_t がファジイ制約 C_t によって拘束され、ファジイ目標が時刻 N の状態集合 X_N におけるファジイ集合 G_N で与えられている問題を考える。

このとき、ファジイ決定 D は、式(8)より、以下のように表される。

$$D = C_1 \cap \dots \cap C_{N-1} \cap G_N \dots \dots \dots (10)$$

$$\mu_D(u_1, \dots, u_{N-1}) = \mu_{C_1}(u_1) \wedge \dots \wedge \mu_{C_{N-1}}(u_{N-1}) \wedge \mu_{G_N}(x_N) \dots \dots \dots (11)$$

したがって、最大決定 $u_1^*, \dots, u_{N-1}^*$ は式(11)より、

$$\begin{aligned} \mu_D(u_1^*, \dots, u_{N-1}^*) &= \max_{u_1, \dots, u_{N-1}} \mu_D(u_1, \dots, u_{N-1}) \\ &= \max_{u_1, \dots, u_{N-1}} [\mu_{C_1}(u_1) \wedge \dots \wedge \mu_{C_{N-1}}(u_{N-1}) \wedge \mu_{G_N}(x_N)] \\ &= \max_{u_1, \dots, u_{N-1}} [\mu_{C_1}(u_1) \wedge \dots \wedge \mu_{C_{N-2}}(u_{N-2}) \wedge \mu_{G_{N-1}}(x_{N-1})] \dots \dots \dots (12) \end{aligned}$$

によって得られる。ここに、

$$\mu_{G_{N-1}}(x_{N-1}) = \max_{u_{N-1}} [\mu_{C_{N-1}}(u_{N-1}) \wedge \mu_{G_N}(f(x_{N-1}, u_{N-1}))] \quad \dots\dots\dots (13)$$

である。 G_{N-1} は $t=N-1$ におけるファジイ目標で、式(13) からわかるように、 $t=N$ におけるファジイ目標 G_N から導かれた。したがって、(13) を繰り返すことにより次のような漸化式が得られる。

$$\mu_{G_{N-i}}(x_{N-i}) = \max_{u_{N-i}} [\mu_{C_{N-i}}(u_{N-i}) \wedge \mu_{G_{N-i+1}}(x_{N-i+1})] \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここで

$$x_{N-i+1} = f(x_{N-i}, u_{N-i}) \quad i=1, 2, \dots, N-1 \quad \dots\dots\dots (15)$$

であり、式(15) を繰り返し解くことにより、最大決定 $u_1^*, \dots, u_{N-1}^*$ が得られる。

3.2 ファジイ意思決定問題として見た渇水時貯水池操作

2. で述べた通り、本研究で扱う実時間貯水池操作モデルは、第 t 期の放流量 r_t を非ファジイ入力とし、第 t 期期末の貯水量 s_t を状態変数とするファジイ状態・記憶のあるファジイシステムとして扱うことができる。さらに、現在の期を 1、放流量の決定を考える際の期間数を N とすると、第 N 期末のファジイ目標 G_N は、例えば、「第 N 期期末の貯水量 s_N が、目標貯水量 s_N の近傍にあるか、それより大きいべきである」といったファジイ集合で表現できる。また、 n 期のファジイ制約 C_n は、「第 n 期の放流量は、当該期の目標放流量 $\bar{r}_n$ の近傍にあるか、それより大きいべきである」といったファジイ集合で表される。 G_N, C_n を特性づけるメンバーシップ関数 $\mu_{G_N}(s_N), \mu_{C_n}(r_n)$ の概形は、例えば、Fig. 1 (a), (b) のように与えられる。

以上のように、ファジイ目標 G_N 、ファジイ制約 C_n を定義すれば、渇水時実時間貯水池操作のファジイ意思決定問題は、

$$D = G_N \cap C_1 \cap \dots \cap C_N \quad \dots\dots\dots (16)$$

なるファジイ決定 D を特性づけるメンバーシップ関数 μ_D の最大値を与える放流量系列 $r_1, \dots, r_N$ を求める問題となる。

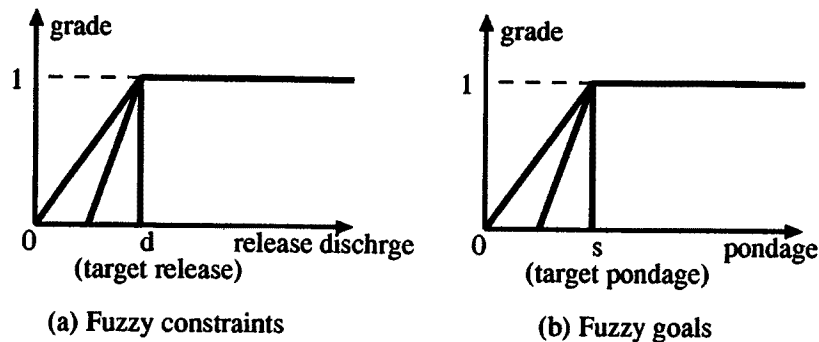


Fig. 1. Flow of the cost allocation process

3.3 ファジイ多段決定法による放流量の最適化

3.2 では、渇水時の貯水池操作をファジイ意思決定問題として定式化した。ところで、実時間貯水池操作システムは、2. で述べたように非ファジイ入力・ファジイ状態・記憶のあるファジイシステムであるから、実際に 3.2 で定式化した放流量決定問題を解くには、ファジイシステムに対する多段階決定を行う必要がある。そこで、ここでその方法を導いておく。

まず、終了時刻における貯水量状態を表す集合 S_N がファジイ目標 G_N を満足する集合 F_N は、 $F_N = G_N \cap$

S_N で定義できる。ファジイ集合の共通集合の定義により, F_N は

$$\mu_{F_N}(S_N) = \mu_{G_N}(S_N) \wedge \mu_{S_N}(S_N) \dots\dots\dots (17)$$

によって特性付けられる。また, 式(3) を代入すると,

$$\mu_{F_N}(S_N) = \mu_{G_N}(S_N) \wedge [\bigvee_{s_{N-1}} \{\mu_{S_{N-1}}(S_{N-1}) \wedge \mu_{S_N | S_{N-1}, R_N}(S_N | S_{N-1}, r_N)\}] \dots\dots\dots (18)$$

となる。 F_N を上のように定義すると, $N-1$ 期末の貯水量状態 S_{N-1} , N 期の放流量 r_N が与えられたときのファジイ目標 F_N を与える条件付メンバーシップ関数 $\mu_{F_N}(S_N | S_{N-1}, r_N)$ は次式で与えられる。

$$\mu_{F_N}(S_N | S_{N-1}, r_N) = \mu_{G_N}(S_N) \wedge \mu_{S_N | S_{N-1}, R_N}(S_N | S_{N-1}, r_N) \dots\dots\dots (19)$$

そこで, F_N の最大グレードを与える s_N^* を最適と考えることとし, そのグレードを,

$$\begin{aligned} \zeta_N(S_{N-1}, r_N) &= \mu_{F_N}(s_N^* | S_{N-1}, r_N) \\ &= \bigvee_{s_N} [\mu_{G_N}(s_N) \wedge \mu_{S_N | S_{N-1}, R_N}(s_N | S_{N-1}, r_N)] \dots\dots\dots (20) \end{aligned}$$

と書くこととする。 $\zeta_N(S_{N-1}, r_N)$ は s_{N-1}, r_N の関数であるから, 入力 r_N を ζ_N の値を最大にするように定める (最大決定を取る) ことにすれば,

$$\mu_{G_{N-1}}(s_{N-1}) = \max_{r_N} [\mu_{C_N}(r_N) \wedge \zeta_N(s_{N-1}, r_N)] \dots\dots\dots (21)$$

のように, $N-1$ 期末のファジイ目標 G_{N-1} が得られる。以下同様に $i=1, \dots, N$ に対して次式が成り立つ。

$$\mu_{G_{N-i}}(s_{N-i}) = \max_{r_{N-i+1}} [\mu_{C_{N-i+1}}(r_{N-i+1}) \wedge \zeta_{N-i+1}(s_{N-i}, r_{N-i+1})] \dots\dots\dots (22)$$

ただし,

$$\zeta_{N-i+1}(s_{N-i}, r_{N-i+1}) = \bigvee_{s_{N-i+1}} [\mu_{G_{N-i+1}}(s_{N-i+1}) \wedge \mu_{S_{N-i+1} | S_{N-i}, R_{N-i+1}}(s_{N-i+1} | s_{N-i}, r_{N-i+1})] \dots\dots\dots (23)$$

である。

以上, ファジイシステムに対する多段階決定の漸化式を導いてきたが, 式(23), (23) で与えられる多段階決定過程は, 3.1 で触れた決定性システムに対するファジイ意思決定を包含した形になっている。以下, このことを証明しておく。

記憶のあるファジイシステムの状態推移は, 条件付きメンバーシップ関数 $\mu_{S_t | S_{t-1}, R_t}(s_t | s_{t-1}, r_t)$ で与えられた。ところが, 決定性システムの場合には, 任意の s_{t-1}, r_t の組み合わせに対して,

$$\mu_{S_t | S_{t-1}, R_t}(s_t | s_{t-1}, r_t) = \begin{cases} 1 & (s_t = s^*) \\ 0 & (s_t \neq s^*) \end{cases}$$

を満足する s^* がただ一つ存在するか, すべての s_t に対して,

$$\mu_{S_t | S_{t-1}, R_t}(s_t | s_{t-1}, r_t) = 0$$

となるかのいずれかが成り立つ。前者の場合には,

$$\begin{aligned}\zeta_i(s_{i-1}, r_i) &= \vee_{s_i} [\mu_{G_i}(s_i) \wedge \mu_{s_i | s_{i-1}, R_i}(s_i | s_{i-1}, r_i)] \\ &= \mu_{G_i}(s_i^*) \wedge 1 \\ &= \mu_{G_i}(s_i^*)\end{aligned}$$

となるが、 s_i^* は決定性システムにおける状態推移関数 $f(s_{i-1}, r_i)$ の値であり、目標更新式は、決定性システムのそれに一致する。また、後者の場合は、 $\zeta_i(s_{i-1}, r_i) = 0$ となるから、この r_i は選択されることがなく、やはり、決定性システムの場合に一致する。

3.4 流入量予測情報の信頼度を考慮したファジイ意思決定手法

3.3 では、渇水時の貯水池操作問題を、ファジイシステムに対するファジイ意思決定問題としてみた時の放流量決定手法を導いた。しかし、3.3 の方法では、仮想ダム貯水池への適用結果において、予測情報の曖昧性が大きい方が最大決定のグレードが大きくなるという一見常識に反した結果が得られた⁷⁾。これは、3.3 の方法では、予測流入量を表すファジイ集合の補集合を考慮していないためと考えられる。そこで本節では、ファジイ目標を流入量予測情報の信頼度と関連づけた放流量決定手法を開発する。

まず、各期 $t=1, \dots, N$ の放流量 r_t に対してファジイ制約 C_t が $\mu_{C_t}(r_t)$ で特性づけられており、 N 期末の貯水量 s_N に対してファジイ目標 G_N が $\mu_{G_N}(s_N)$ で特性づけられているとする。さらに、流入量予測情報として第 t 期における流入量ファジイ集合 V_t とその信頼度指標 p_t が付与されている場合を考える。このとき、 V_t 以外に、 V_t の補集合 $\bar{V}_t$ が信頼度 $1-p_t$ で与えられていると考えることができる。なお、 $p_t (0 \leq p_t \leq 1)$ は、ファジイ予測情報の信頼性を表す指標であり、例えば、4.2 で定義される。

以上のように考えると、 N 期末における貯水量状態を表す条件付メンバーシップ関数 $\mu_{s_N | s_{N-1}, R_N}(s_N | s_{N-1}, r_N)$ は、式(2)より、予測流入量ファジイ集合 $V_N, \bar{V}_N$ それぞれについて、

$$\left. \begin{aligned}\mu'_{s_N | s_{N-1}, R_N}(s_N | s_{N-1}, r_N) &= \mu_{V_N}(s_N - s_{N-1} + r_N) \\ \mu''_{s_N | s_{N-1}, R_N}(s_N | s_{N-1}, r_N) &= \mu_{\bar{V}_N}(s_N - s_{N-1} + r_N)\end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (24)$$

で与えられる。

また、予測流入量 $V_N, \bar{V}_N$ と第 N 期末の貯水量状態との共通集合の最大グレードを、それぞれ $\zeta'_N(s_{N-1}, r_N), \zeta''_N(s_{N-1}, r_N)$ と書く。式(20)より、

$$\left. \begin{aligned}\zeta'_N(s_{N-1}, r_N) &= \vee_{s_N} [\mu_{G_N}(s_N) \wedge \mu'_{s_N | s_{N-1}, R_N}(s_N | s_{N-1}, r_N)] \\ \zeta''_N(s_{N-1}, r_N) &= \vee_{s_N} [\mu_{G_N}(s_N) \wedge \mu''_{s_N | s_{N-1}, R_N}(s_N | s_{N-1}, r_N)]\end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (25)$$

である。 ζ_N, ζ'_N は s_{N-1}, r_N の関数なので放流量 r_N をそれぞれの値を最大にするようにとれば、

$$\left. \begin{aligned}\mu'_{G_{N-1}}(s_{N-1}) &= \max_{r_N} [\mu_{C_N}(r_N) \wedge \zeta'_N(s_{N-1}, r_N)] \\ \mu''_{G_{N-1}}(s_{N-1}) &= \max_{r_N} [\mu_{C_N}(r_N) \wedge \zeta''_N(s_{N-1}, r_N)]\end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (26)$$

のように時刻 $N-1$ のファジイ目標がそれぞれ得られる。また、この時の放流量を、それぞれ r_N^*, r_N^{**} と書くことにする。そして、最大決定 r_N^* として、

$$r_N^* = \begin{cases} r_N^* & p_N \mu'_{G_{N-1}}(s_{N-1}) \geq (1-p_N) \mu''_{G_{N-1}}(s_{N-1}) \text{ のとき} \\ r_N^{**} & p_N \mu'_{G_{N-1}}(s_{N-1}) < (1-p_N) \mu''_{G_{N-1}}(s_{N-1}) \text{ のとき} \end{cases} \dots\dots\dots (27)$$

を選択する。さらに、時刻 $N-1$ のファジイ目標 G_{N-1} を、

$$\mu_{G_{N-1}}(s_{N-1}) = \begin{cases} p_N \mu'_{G_{N-1}}(s_{N-1}) + (1-p_N) \mu''_{G_{N-1}}(s_{N-1} | r_N^{*'}) & (r_N = r_N^{*'}) \text{ のとき} \\ p_N \mu'_{G_{N-1}}(s_{N-1} | r_N^{*''}) + (1-p_N) \mu''_{G_{N-1}}(s_{N-1}) & (r_N = r_N^{*''}) \text{ のとき} \end{cases} \quad (28)$$

で定めることにする。ただし,

$$\left. \begin{aligned} \mu'_{G_{N-1}}(s_{N-1} | r_N^{*''}) &= \mu_{C_N}(r_N^{*''}) \wedge \zeta'_N(s_{N-1}, r_N^{*''}) \\ \mu''_{G_{N-1}}(s_{N-1} | r_N^{*'}) &= \mu_{C_N}(r_N^{*'}) \wedge \zeta'_N(s_{N-1}, r_N^{*'}) \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

である。

式(28)の1行目の右辺第1項は, 予測流入量ファジイ集合 V_N をもとに最大決定を行い, その予測が当たったときに期待しうる利得を表し, 第2項はその予測がはずれたときに期待しうる利得を表す。したがって, 式(28)は放流量として r_N^{*} を選択した場合のファジイ目標の平均値を表していることになる。同様に2行目は, 予測流入量 $\bar{V}_N$ をもとに決定を行ったときの利得の期待値を表していることになる。

以下同様に, $N-i$ ($i=1, \dots, N$) に対して次式のような漸化式が成り立つ。

$$\mu_{G_{N-i}}(s_{N-i}) = \begin{cases} p_{N-i+1} \mu'_{G_{N-i}}(s_{N-i}) + (1-p_{N-i+1}) \mu''_{G_{N-i}}(s_{N-i} | r_{N-i+1}^{*'}) & r_{N-i+1}^{*'} = r_{N-i+1}^{*'} \text{ のとき} \\ p_{N-i+1} \mu'_{G_{N-i}}(s_{N-i} | r_{N-i+1}^{*''}) + (1-p_{N-i+1}) \mu''_{G_{N-i}}(s_{N-i}) & r_{N-i+1}^{*''} = r_{N-i+1}^{*''} \text{ のとき} \end{cases} \quad (30)$$

ここで,

$$r_{N-i+1}^{*} = \begin{cases} r_{N-i+1}^{*'} & p_{N-i+1} \mu'_{G_{N-i}}(s_{N-i}) \geq (1-p_{N-i+1}) \mu''_{G_{N-i}}(s_{N-i}) \text{ のとき} \\ r_{N-i+1}^{*''} & p_{N-i+1} \mu'_{G_{N-i}}(s_{N-i}) < (1-p_{N-i+1}) \mu''_{G_{N-i}}(s_{N-i}) \text{ のとき} \end{cases} \quad (31)$$

$$\left. \begin{aligned} \mu'_{G_{N-i}}(s_{N-i}) &= \max_{r_{N-i+1}} [\mu_{C_{N-i+1}}(r_{N-i+1}) \wedge \zeta'_{N-i+1}(s_{N-i}, r_{N-i+1})] \\ \mu''_{G_{N-i}}(s_{N-i}) &= \max_{r_{N-i+1}} [\mu_{C_{N-i+1}}(r_{N-i+1}) \wedge \zeta''_{N-i+1}(s_{N-i}, r_{N-i+1})] \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

$$\left. \begin{aligned} \mu'_{G_{N-i}}(s_{N-i} | r_{N-i+1}^{*''}) &= \mu_{C_{N-i+1}}(r_{N-i+1}^{*''}) \wedge \zeta'_{N-i+1}(s_{N-i}, r_{N-i+1}^{*''}) \\ \mu''_{G_{N-i}}(s_{N-i} | r_{N-i+1}^{*'}) &= \mu_{C_{N-i+1}}(r_{N-i+1}^{*'}) \wedge \zeta'_{N-i+1}(s_{N-i}, r_{N-i+1}^{*'}) \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

であり,

$$\left. \begin{aligned} &\zeta'_{N-i+1}(s_{N-i}, r_{N-i+1}) \\ &= \bigvee_{s_{N-i+1}} [\mu_{G_{N-i+1}}(s_{N-i+1}) \wedge \mu'_{S_{N-i+1} | S_{N-i} R_{N-i+1}}(s_{N-i+1} | s_{N-i}, r_{N-i+1})] \\ &= \bigvee_{s_{N-i+1}} [\mu_{G_{N-i+1}}(s_{N-i+1}) \wedge \mu_{V_{N-i+1}}(s_{N-i+1} - s_{N-i} + r_{N-i+1})] \\ &\zeta''_{N-i+1}(s_{N-i}, r_{N-i+1}) \\ &= \bigvee_{s_{N-i+1}} [\mu_{G_{N-i+1}}(s_{N-i+1}) \wedge \mu''_{S_{N-i+1} | S_{N-i} R_{N-i+1}}(s_{N-i+1} | s_{N-i}, r_{N-i+1})] \\ &= \bigvee_{s_{N-i+1}} [\mu_{G_{N-i+1}}(s_{N-i+1}) \wedge \mu_{\bar{V}_{N-i+1}}(s_{N-i+1} - s_{N-i} + r_{N-i+1})] \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

である。

したがって、放流量系列の決定手順は次のようになる。すなわち、ファジィ予測情報 $V_i(t=0, \dots, N)$ が与えられたとき、第 N 期より式(31)～(34)により、まず r^* , r^{**} を求め、式(30)で1期前のファジィ目標を求める。この作業を現在時刻0まで繰り返すことにより、第0期～第 N 期の放流量が決定される。

4. ファジィ回帰モデルによる流入量予測

渇水時の貯水池操作においては、将来の長期にわたる貯水池への流入量をできる限り正確に予測することが必要になる。渇水時の貯水池操作において予測流入量が正確な確率分布で与えられたならば、将来起こりうるあらゆるリスクを確率的に評価することが可能となる。しかし貯水池への長期の流入量予測は、長期の降雨予測情報を必要とすることもありなかなか精度向上が難しい。例えば、池淵⁴⁾は、大阪管区気象台発表の1ヵ月予報について昭和48年、49年、56～63年の10年間の的中率を調査しているが、その値は30～45%にとどまっている。このような現状に対し、貯水池流入量予測にできるだけ様々な情報を利用することを念頭におき、代表流況とファジィ推論を用いる方法⁴⁾やニューラルネットワークを用いる方法⁵⁾も検討されている。これらの方法は、手法の差や式の次元数は異なるものの本質的には、入力と出力である予測流入量の間に回帰を考えるものである。

本研究では、流入量予測情報の精度と意思決定基準の緩和形態が放流量決定過程に及ぼす影響を分析することを目的としているので、ここでは近年提案されている方法と基本概念が同じファジィ回帰式を用いた流入量予測モデルを作成し、3.で構築した放流量決定モデルとリンクすることにする。

4.1 ファジィ線形回帰モデル

ファジィ線形回帰モデル⁶⁾は、回帰式による推定値とデータのずれを回帰モデルの曖昧性によるとらえ、その曖昧性を係数の可能性分布として表現しようとする方法である。具体的には、被説明変数 Y を、説明変数 $x_1, \dots, x_N$ を用いて次の式で推定する。

$$Y = A_0 + A_1 x_1 + \dots + A_N x_N \quad (35)$$

ただし、係数 $A_0, \dots, A_N$ はファジィ数であり、(35)式から得られる推定値 Y もファジィ数になる。

データの組 $(y_m, \mathbf{x}_m)$ (ただし、 $\mathbf{x}_m$ は説明変数のベクトル、 $m=1, \dots, M$) が与えられた時、(35)式の係数の同定は、

1. (35)式による推定ファジィ数 Y_m が、それに対する実現値 y_m を、グレード $h(0 \leq h < 1)$ で含む、すなわち、

$$\mu_{Y_m}(y_m) \geq h, \quad (m=1, \dots, M) \quad (36)$$

が成り立つ、

2. 推定ファジィ数 Y_m の幅が最小になるように行なう。いま、簡単のために、ファジィ係数 $A_0, \dots, A_N$ は、正規ファジィ集合とし、すべて中心 α_n 、幅 $2c_n$ の二等辺三角形のメンバーシップ関数で特性づけられているとする。また、 $\mathbf{c} = (c_0, \dots, c_N)^t$, $\boldsymbol{\alpha} = (\alpha_0, \dots, \alpha_N)^t$, $|\mathbf{x}_m| = (|x_{1m}|, \dots, |x_{Nm}|)^t$ とする。なお、 t は転置を表す。このとき、上記条件1は、

$$\left. \begin{aligned} y_m &\leq \mathbf{x}_m^t \boldsymbol{\alpha} + (1-h)\mathbf{c}^t |\mathbf{x}_m| \\ y_m &\geq \mathbf{x}_m^t \boldsymbol{\alpha} - (1-h)\mathbf{c}^t |\mathbf{x}_m| \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

と書き換えられる。また、条件2は、

$$\sum_m \mathbf{c}^t | \mathbf{x}_m | \rightarrow \min. \dots\dots\dots (38)$$

となる。

したがって、ファジイ線形回帰モデルの同定は、次のLP問題を解くことに帰着される。

$$\left. \begin{aligned} \min_{\mathbf{a}, \mathbf{c}} J(\mathbf{c}) &= \sum_m \mathbf{c}^t | \mathbf{x}_m | \\ y_m &\leq \mathbf{x}_m^t \mathbf{a} + (1-h) \mathbf{c}^t | \mathbf{x}_m | \\ y_m &\geq \mathbf{x}_m^t \mathbf{a} - (1-h) \mathbf{c}^t | \mathbf{x}_m | \\ c_n &\geq 0 (n=0, \dots, N) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (39)$$

4.2 ファジイ回帰モデルによる流況予測

ファジイ回帰モデルを用いて流況予測を行なう場合、(35)式の Y は予測したい期の貯水池流入量であり、説明変数には、当該期までの雨量・流入量、あるいは予測したい期までの予測雨量などを用いることができる。しかし、説明変数として、過去の流入量データだけでなく、予測雨量を用いる場合は、説明変数もファジイ数として考える必要がある。本研究では、ファジイ回帰モデルによる貯水池流入量予測の第一段階として、現在期より過去の流入量による回帰を用いて、将来の貯水池流入量を予測するモデルを考えることにする。すなわち、現在期を t_0 とし、 i 期先の予測流入量を表すファジイ数を V_{t_0+i} 、 t_0 より n 期前の流入量を v_{t_0-n} とすると、回帰モデルは、

$$V_{t_0+i} = A_{0i} + A_{1i} v_{t_0-1} + A_{2i} v_{t_0-2} + \dots + A_{Ni} v_{t_0-N} \dots\dots\dots (40)$$

となる。ただし、 $A_{0i}, \dots, A_{Ni}$ はファジイ回帰係数で、 N は説明変数として考える期数である。

なお、各ファジイ係数は年間を通じて一定とする、あるいは、季節別・月別とするなどの方法が考えられる。一般的には、1年をいくつかの期に分割した方が良い結果が得られると考えられるが、本研究では、データ量が少ないことを考慮し、適用に当たっては各係数は年間を通じて一定としている。

さて、予測流入量は、式(40)にデータを代入することによって得られるが、その値はファジイ数なので、的中の度合を表す指標が必要になる。そこで、本研究では、ファジイ回帰モデルの信頼度を、流入量予測ファジイ集合の実流入量におけるグレードの平均値と定義する。すなわち、第 t_0+i 期の流入量の実現値 v_{t_0+i} に対して、 t_0 期に予測した t_0+i 期の予測流入量がファジイ数 V_{t_0+i} であったとき、この予測モデルによる i 期先の予測情報の信頼度 p_i を、

$$p_i = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \mu_{u_{V_{t_0+i}}}(v_{t_0+i, m}) \dots\dots\dots (41)$$

とする。ただし、添字 m は、同定に用いたデータの組を、 M はデータ数を表す。 $u_{V_{t_0+i}}$ は、ファジイ数 V_{t_0+i} を特性づけるメンバーシップ関数である。

5. 適用と考察

5.1 適用条件

(1) 適用ダム貯水池の概要

本研究では、流入量予測情報の不確実性と貯水池操作基準の緩和の程度が放流量決定過程に及ぼす影響

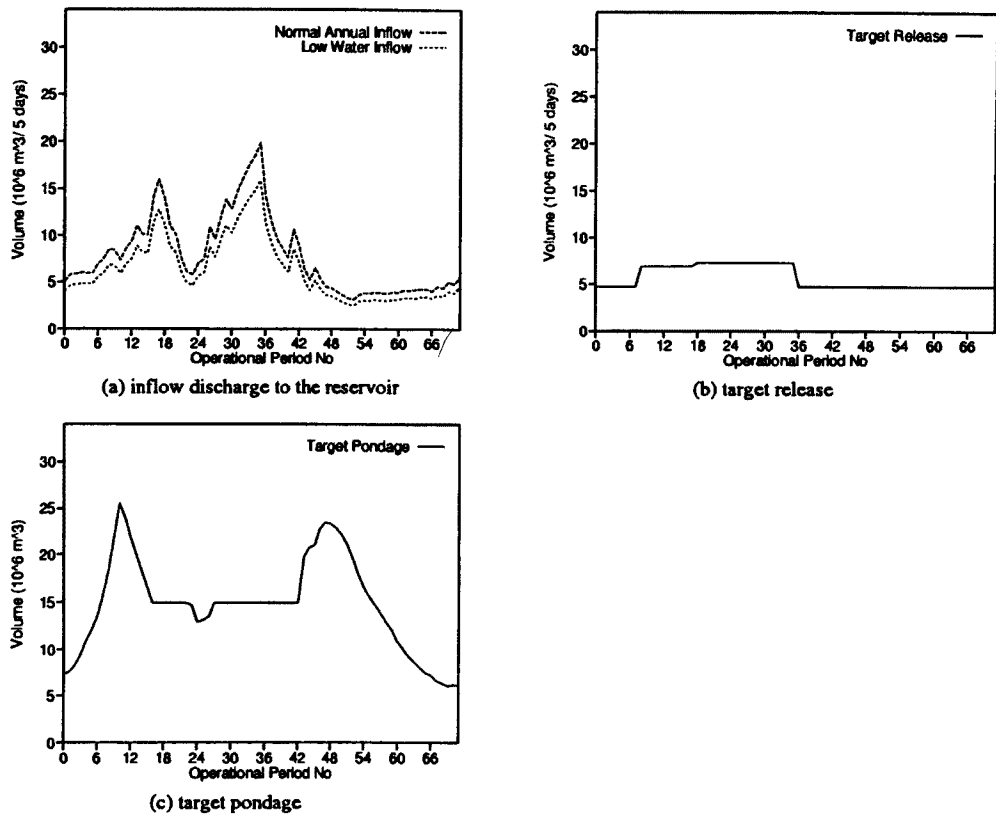


Fig. 2. Applied reservoir system.

を分析するために、意思決定基準と流入量予測情報の信頼度を変化させながら放流量決定計算を行なう。

適用には、池淵ら⁴⁾が使用した仮想ダム貯水池を用いる。対象貯水池における平年流入量・渇水時流入量は Fig. 2 (a) に示す通りである。操作期間は1年で4月1日から翌年の3月31日までとし、放流量は半旬（5日）単位で決定する。また、各期における目標放流量は Fig. 2 (b) に、各期期首における目標貯水量は Fig. 2 (c) に示す通りである。なお、流量計算は離散化して行なうが、渇水時には取水制限が概ね10%単位で実施されていることを考慮して、対象ダム貯水池の第0半旬～第6半旬及び第36半旬～第71半旬における目標放流量の10%程度に相当する $5.0 \times 10^5 \text{ m}^3$ を離散化の単位とする。本研究で用いる仮想ダム貯水池の有効貯水量は $5.0 \times 10^7 \text{ m}^3$ であるが本研究では利水のみを考えるため、有効貯水量のうちの $3.0 \times 10^7 \text{ m}^3$ のみについて考えることにする。したがってダム貯水池の有効貯水量は、60個の貯水量レベルに分割される。

(2) ファジィ回帰モデルによる流入量予測

本研究では貯水池への流入量を予測するために、ファジィ回帰モデルを用いる。初めに1半旬先の流入量を予測するファジィ回帰モデルを構築するために、過去1, 2, 3, 6半旬流量を説明変数とした場合について、それぞれ同定計算を行なった。各条件のもとで得られたファジィ係数 $A_i = (\alpha_i, c_i) (i=0, \dots, 6)$ (但し α_i はファジィ係数の中心値, c_i はファジィ係数の幅を表す) を Table 1 に示す。

Table 1 より、過去6半旬の流入量を説明変数とした場合に、予測誤差を表す $J(c)$ (式(39) 参照) が最も小さくなるので、本研究では過去6半旬の流入量を説明変数とするファジィ回帰モデルを用いることにする。なお、この場合のリードタイム毎の回帰係数および信頼度 (式(41)) は、Table 2 の通りとなった。また、Fig. 3 は、通年にわたって流況を予測した場合の予測結果と実流入量を示したものである。この例

Table 1. Coefficients of fuzzy inflow prediction model

number of predictors	1	2	3	6
(α_0, c_0)	(0.96, 0.03)	(1.10, 0.34)	(1.11, 0.00)	(1.14, 0.00)
(α_1, c_1)	(0.93, 0.36)	(1.14, 0.30)	(1.13, 0.17)	(1.14, 0.04)
(α_2, c_2)	...	(- 0.22, 0.00)	(- 0.14, 0.04)	(- 0.16, 0.14)
(α_3, c_3)	...	...	(- 0.07, 0.14)	(- 0.02, 0.18)
(α_4, c_4)	...	...	...	(0.07, 0.00)
(α_5, c_5)	...	...	...	(- 0.29, 0.00)
(α_6, c_6)	...	...	...	(0.17, 0.00)
fuzziness ($\times 10^6 \text{ m}^3/5 \text{ days}$)	2.29	2.22	2.19	2.15

Table 2. Fuzzy coefficients according to lead time

lead time	1	2	3	4	5	6
(α_0, c_0)	(1.14, 0.00)	(1.98, 0.00)	(2.55, 0.00)	(3.46, 1.66)	(4.31, 1.49)	(4.96, 1.88)
(α_1, c_1)	(1.14, 0.04)	(1.15, 0.40)	(1.08, 0.21)	(1.07, 0.14)	(0.77, 0.33)	(0.82, 0.26)
(α_2, c_2)	(- 0.16, 0.14)	(- 0.18, 0.00)	(- 0.11, 0.19)	(- 0.42, 0.19)	(- 0.09, 0.06)	(- 0.17, 0.11)
(α_3, c_3)	(- 0.02, 0.18)	(0.04, 0.12)	(- 0.27, 0.00)	(0.06, 0.00)	(- 0.06, 0.00)	(- 0.12, 0.00)
(α_4, c_4)	(0.07, 0.00)	(- 0.24, 0.00)	(0.10, 0.00)	(- 0.02, 0.00)	(- 0.10, 0.00)	(0.04, 0.00)
(α_5, c_5)	(- 0.29, 0.00)	(- 0.02, 0.00)	(- 0.10, 0.00)	(- 0.15, 0.00)	(0.01, 0.06)	(- 0.12, 0.11)
(α_6, c_6)	(0.17, 0.00)	(0.00, 0.00)	(- 0.01, 0.16)	(0.06, 0.03)	(- 0.04, 0.00)	(0.01, 0.00)
reliability	0.51	0.53	0.46	0.43	0.41	0.39

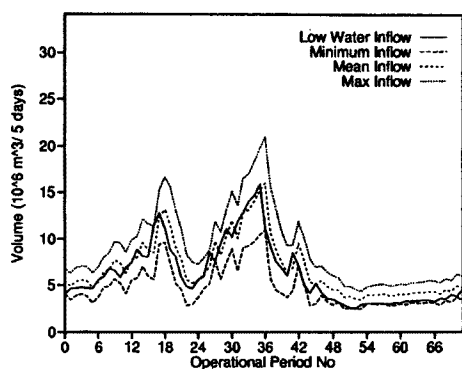


Fig. 3. One period ahead prediction by fuzzy linear regression model.

では、説明変数として過去の流量のみを用い、予測降雨などの情報を用いていないので、予測結果は、実流入量に時間遅れを付けたような形状となっている。このモデルの信頼度は、1期先でも51%と満足できるものではないが、本研究の焦点は、予測モデルの精度と意思決定基準の緩和形状との関係を探ることにあるので、ここではこのモデルをそのまま用いることにする。

(3) 貯水池操作における意思決定基準

貯水池操作における意思決定基準は目標放流量と目標貯水量である。本適用例では意思決定基準の緩和の形態として、基準を全く緩和しない場合 (case 1)、メンバーシップ関数が、目標値におけるグレード1と原点とを結んだ形で特性づけられると考えた場合 (case 2)、目標値 d に対して30%までの不足であれば被害が少ないと考えた場合 (case 3)、目標値 d に対して70%までの不足であれば被害が少ないと考えた場合 (case 4) の4ケースを想定する (Fig. 4)。なお、利水者と供給

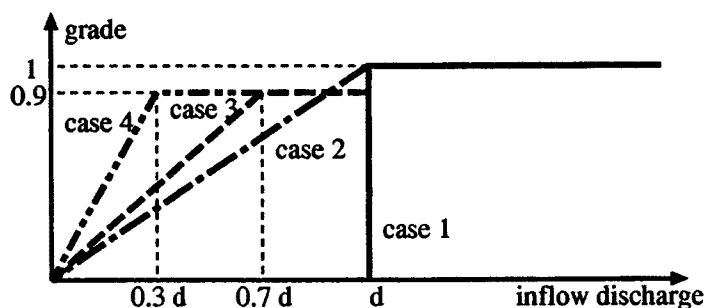


Fig. 4. Types of decision criteria.

者とは意思決定基準の緩和の形態が異なることもあり得るが、本研究では両者とも意思決定基準の緩和の形態が同じであると仮定し、本研究ではファジイ目標とファジイ制約は同一の形状で与えている。

5.2 適用結果と考察

本節では、5.1 で与えられた 4 つの意思決定基準の緩和形態のもとで放流量決定計算を行なう。なお、ここでは放流量決定基準の緩和形態と流入量予測モデルの信頼度とが意思決定機構に及ぼす影響を分析するために、5.1(2) で同定した流入量予測モデル（信頼度 51%）について、仮に信頼度を 51%、60%、70%、80% としたケースを考えて放流量決定計算を行なうことにする。もちろん信頼度を 60%、70%、80% とした場合、流入量予測モデルの能力を過大評価することになる。この影響は適用結果において、例えば決定した放流量を実際には流入量不足のために適用できないケース、あるいはその逆のケースとなって現れる可能性がある。しかし、ここでは信頼度を先に与えてそれを満足する予測モデルを作成するのが困難なこと、適用の目的が実際の放流操作よりも放流基準の緩和形態と流入量予測モデルの精度指標が意思決定過程に及ぼす影響を分析することにあることを考慮し、予測モデルの信頼度の過大評価の問題は適用結果を通じて議論することにする。なお、信頼度を 51%・放流量決定基準の緩和形態を case 2 とし、貯水池を通年で操作した場合、第 44 半旬に貯水池が利水容量一杯の $3.0 \times 10^7 \text{ m}^3$ となり、それ以後渇水期となるため、第 44 半旬を開始時刻として放流量決定計算を行なうことにする。

初めに意思決定基準の緩和の形態を同一とし予測情報の信頼度を変化させて、予測情報の信頼度が意思決定に及ぼす影響を考察する。Table 3、Table 4 は、各計算条件における節水開始時刻と当該時刻の貯水率・貯水量の目標貯水量に対する比率で定義するをまとめたものである。Table 3 より、予測情報の信頼度が向上するほど節水開始時刻が早くなり貯水量に余裕のあるうちから節水が行なわれることがわかる。

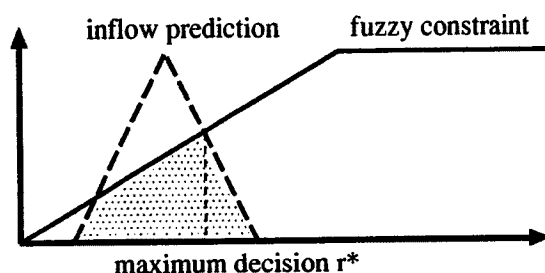
予測情報の信頼度が高くなるほど節水開始時刻が早くなるのは、信頼度が高い場合ファジイ回帰モデルから得られる「流量が少ない」という予測情報をもとに放流量を決定するのに対し、信頼度が低い場合「流量が少ない」という予測が外れて流量が多くなることを期待して放流量を決定するためと考えられる。また信頼度を高く設定するほど節水量が多くなり、そのかわりに終了時刻の貯水量が多くなった。Fig. 5 は、この理由を概念的に

Table 3. Beginning time of release cut

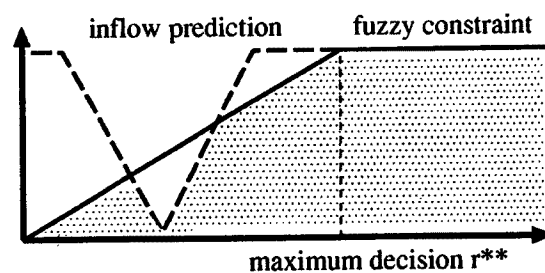
reliability	51%	60%	70%	80%
case 1	64	64	64	64
case 2	64	53	44	44
case 3	64	44	44	44
case 4	64	44	44	44

Table 4. Pondage ratio at the beginning time of release cut (%)

reliability of prediction	51%	60%	70%	80%
case 1	14.8	14.8	14.8	14.8
case 2	14.8	98.5	144.6	144.6
case 3	14.8	144.6	144.6	144.6
case 4	14.8	144.6	144.6	144.6



(a) decision by inflow prediction fuzzy set



(b) decision by complement of inflow prediction

Fig. 5. Schematic representation of the impacts of fuzzy prediction information on the decision process of release discharge.

示したものである。

Fig. 5 では、流入量ファジィ集合の信頼度が 0.5 である場合を概念的に示している。黒点で塗られた部分は、ファジィ制約(目標貯水量)と流入量予測ファジィ集合の共通集合を表す。Fig. 5 より、この場合 (a) の流入量予測ファジィ集合 V_i に対応して決まる最大決定 r_i^* に対するグレードよりも、(b) の $\bar{V}_i$ に対応して決まる最大決定 r_i^{**} に対するグレードが構造的に大きくなることからわかる。したがって、放流量として r_i^{**} が選ばれることになるが、図より $r_i^* < r_i^{**}$ であり、どちらかといえば大きい方の放流量が選ばれることになる。しかし、 V_i の信頼度が 0.5 より大きくなるにつれ、Fig. 5 (a) より r_i^* は大きくなり、それにとともに r_i^* に対するグレードが増加する。一方、(b) より r_i^{**} は減少し、かつそのグレードも小さくなる。そして、 V_i の信頼度がある値を越えると、 r_i^* に対するグレードのほうが r_i^{**} に対するそれよりも大きくなり、 r_i^* が選択されるようになる。そのときの r_i^* は V_i の信頼度が 0.5 であったときの決定放流量よりも小さい。もちろん、 V_i と C_i の位置関係によってこの関係が常に成立するとは限らないが、渇水時にはもともと流入量が小さく、Fig. 5 と似た関係となっているはずである。したがって以上が予測情報の信頼度を高く仮定する方が節水しがちになる理由と考えてよい。

Table 5 は貯水池操作期間中の一半旬あたりの節水量の平均値をまとめたものであり、Table 6 は貯水池操作期間中終了後の貯水量をまとめたものである。Table 6 を見ると、case 2 で予測情報の信頼度を 80% と仮定した場合、case 3 で信頼度を 70, 80% とした場合、case 4 では信頼度 60% 以上で、最終時刻における貯水率が目標貯水量の 2 倍を越えており、過剰節水となっている。これは、本来、51% である流入量予測モデルの信頼度を過大評価したことと、それに対して、貯水池操作基準を不必要に緩和したことによるものと考えられる。また、予測情報の信頼度を 51% としたケースでは、操作基準の緩和形態によらず、最終時刻の貯水率が 0 となっている。これは、Table 3 からわかるように節水開始時期が遅過ぎるためである。Table 4 によれば、これらのケースでは、節水開始が貯水量率 14.8% の時点であり、この程度の信頼性の予測モデルを用いた場合、どちらかといえば確定値である現在の貯水量率を指標にしつつ、かなり高い貯水率の時点から、徐々に節水を行っていく必要があることが伺える。

次に、操作基準の緩和形態および予測情報の信頼度と、ファジィ意思決定による決定放流量の範囲との関係を見てみよう。ファジィ意思決定は一種の多目的最適化手法ともみなすことができ、一般に、最適化条件の持つ曖昧性の程度に応じて同一グレードを与える複数の解が得られることが多い。したがって、その解の範囲の大きさを調べれば、最適化条件間の曖昧性の関係が推定できるはずである。例えば、ファジィ意思決定モデルの解の範囲が非常に大きければ、最適化条件同士がうまくかみあっておらず、何を選択しても大差ないことを示していることになる。Table 7 は、本適用ケースにおける各期の最大決定(放流量)の範囲の平均値をまとめたものである。Table 7 を見ると予測モデルの信頼度が 51% の場合には意思決定基準が case 2 のときに、予測モデルの信頼度が 60, 70, 80% の時には、意思決定基準が case 3 の時に、それぞれ、最大決定の範囲が最も小さくなっている。したがって、予測モデルの精度に

Table 5. Mean ratio of release cut (%)

reliability of prediction model	51%	60%	70%	80%
case 1	5.5	5.5	5.5	5.5
case 2	5.5	6.0	12.9	16.6
case 3	5.5	11.4	22.6	22.6
case 4	5.5	24.0	24.0	24.0

Table 6. Pondage ratio at the terminal period (%)

reliability of prediction model	51%	60%	70%	80%
case 1	0.0	0.0	0.0	0.0
case 2	0.0	10.1	134.6	202.7
case 3	0.0	107.4	310.6	310.6
case 4	0.0	335.7	335.7	335.7

Table 7. Fuzziness of decided release discharge ($1.0 \times 10^6 \text{ m}^3$)

reliability of prediction	51%	60%	70%	80%
case 1	24.0	24.1	24.2	21.7
case 2	14.3	13.5	10.4	10.4
case 3	14.4	3.1	8.7	8.7
case 4	16.1	15.8	15.8	15.8

よって、貯水池操作基準の意味のある緩和形態が異なってくることがわかる。例えば、予測モデルの信頼度を60%と評価したケースでは、目標放流量と放流量0との間で、グレードが直線的に変化する（つまり需要者の要求度が節水率に逆比例する）ような基準（case 2）で、放流政策を議論しても、それは予測モデルの能力とかみあった議論とはいえないことになる。この場合には、case 3のようにまず利用者の不満の少ないレベルを明らかにしておき、そのレベルまでの節水を比較的早期に始めるといった段階的な節水方法が適していることになる。なお、予測情報の信頼度をいずれの値に設定した場合でも、最も放流量決定基準の厳しいcase 1で決定放流量の範囲が広く、徐々に基準を緩和して行くに従い一旦減少した後、再び広くなるという傾向が見られる。このことは、判断の根拠として用いる流入量予測モデルの精度に応じて、最も意思決定機構に曖昧性の残らないような意思決定基準の形態が今回設定したcase 2からcase 4の間に存在することを示している。

以上、本適用例では、渇水調整の際に行なわれる節水率決定の数値モデルとしてファジイ意思決定手法を用いた放流量決定モデルを作成し、意思決定基準の緩和形態と流入量予測モデルの信頼度とが意思決定機構に及ぼす影響を、特に、決定放流量の持つ曖昧性といった視点から分析した。もちろん、目標放流量・目標貯水量といった基準を渇水時にどの程度まで緩和するかという問題は、主に、水利用者の節水被害の受忍限度や被害構造によって決まってくる問題であり、ここで行った分析だけで、放流量決定基準の緩和形態の優劣を論じることはできない。しかし、一方では、現実の渇水調整のあり方を考える上では、使用できる予測情報の精度と意思決定基準の緩和形態との関係によって意思決定過程にどの程度の曖昧性が生じるかといった事実も意識する必要がある、本適用例は、それを定量化する可能性を示したものと考えている。

なお、本研究では、実際に様々な精度を持つ流入量予測モデルを用意できなかったこと、適用ケースが細かく設定できなかったことなどの問題もあり、今後、実流域での適用を通じて、流入量予測モデルの精度とかみあった貯水池操作基準を更に特定する努力をする必要がある。

6. 結 語

本研究では、渇水時貯水池操作における流入量予測情報の精度と意思決定基準の緩和形態とが、放流量決定機構に及ぼす影響を分析するためのモデルを、ファジイ意思決定手法を応用することにより設計した。得られた成果は以下の通りである。

1. 渇水時の貯水池操作基準をファジイ集合で表現し、ファジイ意思決定手法を応用することにより、現在行なわれている渇水調整の形態を表現する数値モデルを設計した。
2. 1.を実現するために、貯水池への流入量予測がファジイ集合で与えられる場合についてその信頼度を定義し、予測情報の精度を考慮したファジイシステムに対する多段決定手法を導いた。
3. 近年、ファジイ推論やニューラルネットワークなど、入出力の応答関係式をもちいた貯水池への長期流入量予測手法が提案されていることを考慮し、その原型であるファジイ回帰式を用いた貯水池流入量予測モデルを作成し、1. 2.で作成した放流量決定モデルとリンクする方法を示した。
4. 開発した流入量予測情報の精度と放流量決定基準の緩和形態との相互関係分析モデルを、仮想貯水池に適用した。その結果、予測情報の精度に応じて、最も曖昧性の小さくなる放流量決定基準が異なることを示した。

また、今後の課題としては、以下のことが挙げられる。

1. 本研究では、一つの予測モデルに対して仮に複数の信頼度を設定して適用を行なったが、今後、実際に様々な予測精度を持つモデルを用いた適用を行なわなければならない。
2. 本研究では、流入量予測モデルの精度と意思決定基準の緩和形態との相互関係によって、放流量決

定過程に生じる曖昧性の程度という視点のみから分析を行なったが、実際には、放流量決定基準の緩和形態は水利用者側の節水被害構造に大きく規定される。したがって、ここで意思決定過程に残す曖昧性が小さいと判断された操作基準について、水利用者の被害構造との関係を探る必要がある。

- 3) 本研究では、現実の渇水調整で行なわれていると考えられる意思決定方式に存在する曖昧性の分析に主眼をおいたが、今後、この結果を踏まえて、実際に渇水時の放流量決定を支援するシステムを構築していかなければならない。

参 考 文 献

- 1) 日本河川協会：河川 11 月号，1994.
- 2) 中川芳一：水資源の開発・配分計画に関するシステム論的研究，京都大学博士論文，pp. 77 - 87, 1984.
- 3) 小尻利治：ダム貯水池群による水量・濁質制御に関するシステム論的研究，京都大学博士論文，1984.
- 4) 池淵周一・小尻利治・宮川裕史：中長期予報を利用したダム実時間に関する研究，京都大学防災研究所年報第 33 号 B-2，pp. 167 - 192, 1991.
- 5) 池淵周一・横山正治：ニューラルネットワークを用いた降水量長期予測とダム貯水池の実時間操作，土木学会第 47 回年次学術講演会講演概要集，pp. 716 - 717, 1992.
- 6) 水本雅晴：ファジイ理論とその応用，サイエンス社，1988.
- 7) 高棹琢馬・椎葉充晴・堀 智晴・杉本 健：ファジイシステムに対するファジイ DP を用いた渇水時貯水池操作，水文・水資源学会 1993 年発表会要旨集，pp. 90 - 91, 1993.
- 8) 寺野寿郎・浅居喜代次・菅野道夫：ファジイシステム入門，オーム社，1987.