

## Type-2 ファジイ集合を用いた渇水時貯水池操作意思決定機構の 不確実性分析モデル

堀 智晴\*・椎葉充晴\*

\* 京都大学大学院工学研究科

### 要 旨

渇水時の貯水池操作は、曖昧な予測情報下で曖昧な基準による意思決定を行なわなければならない問題ととらえることができる。この場合、予測情報の持つ精度と意思決定基準の持つ曖昧性との相互関係が、決定結果の持つ信頼性に大きく影響する。この関係を分析するため、意思決定基準の持つ曖昧性を Type-2 ファジイ集合を用いることで陽に表現した貯水池操作モデルを構築し、その解法アルゴリズムを導いた。

キーワード：貯水池操作，渇水，ファジイ集合，不確実性

### 1. 序論

渇水時の貯水池操作においては、現在の貯水量および考える期間に将来流入してくるであろう水量を、どのように時間配分するかが重要な問題となる。この際、貯水池への将来流入量の予測情報とその精度が意思決定のための重要な鍵となることは言うまでもない。従来提案されてきた確率 DP を中心とする様々な最適操作手法 ((Yeh(1985) に詳しい) では、いかに将来の流入量を精度よく予測するか、あるいはその情報のもつ不確実性を放流量の決定過程においてどのように扱うかといった点に重点が置かれて来たと言っても過言ではない。また、DDC ルールカーブの考え方 (竹内ら, 1984) や確率確保容量曲線を用いた操作手法 (許士・下田, 1995) も、貯水池への流入量の予測が極めて困難であるということを強く意識した方法であると考えることができる。

一方、近年検討されているファジイ理論を用いた手法も、主として予測情報のもつ不確実性をファジイ集合で表現することにより、従来の確率的なアルゴリズムでは利用しにくかった情報を活用しようとするところに力点が置かれている。例えば、池淵ら (1991) は、気象庁による週間、1ヶ月、3ヶ月予測

における降水量予測を用いて、貯水池への将来流入量系列を最大、平均、最小の3本求め、これと現在の貯水池レベル、渇水対策レベルを考慮しつつファジイ推論により放流量を決定するシステムを開発している。また、小尻ら (1994) は、長期気象予報と過去の類似流況とを組み合わせることで、流況予測を行う方法を提案している。中山ら (1994) はダム補給量を実際に決定している専門家へのインタビューをもとに、天気予報など数値化しにくい情報を活用する節水時ダム補給量決定ルールを作成している。

以上述べたように、渇水時貯水池操作においては、将来の流況予測が非常に重要な要素であるが、これに加えて、供給水量の不足がもたらす被害の構造も意思決定の重要な要素となる。水不足による被害を金銭尺度で表す指標も提案されているが、実際の貯水池管理においてこれらの尺度を基準にした操作が行われるには至っていない。渇水被害がさまざまな要素からなる複雑な構造をしており、その中には貨幣価値で置き換えにくいものもあり、その結果、被害の計測に不確実性が存在することになるというのがその一つの原因である。

一方、社会システムの変化は水需要構造にも影響しつつある。例えば都市内の農業用地の減少は、確

実に農業用水の需要構造を変化させていると考えられる。実際、1984年に日本各地を襲った渇水では、農水の上水への転用などが試みられた(池淵, 1985)。また、この事例を契機として水利権の見直しなどに関する議論も高まって来つつある。この事実、水資源の配分基準が現在かなり大きな不確実性下にあるということを示している。

以上のように考えると、現実問題としての渇水時貯水池操作は、曖昧な意思決定基準に基づき、不確実性を含む流入量予測情報を用いて意思決定を行わなければならない問題であるということができる。この場合、予測情報の持つ精度と意思決定基準の持つ曖昧性ととの相互関係が、決定結果の持つ信頼性に大きく影響する。例えば、予測情報の信頼性が低い状態で厳しい基準に固執した議論をしても、意味のないことは容易に想像できる。筆者らは、これらの点を分析するために、貯水池に与えられた目標放流量および貯水量をファジイ集合で表現することにより、渇水調整問題をファジイ意思決定問題としてモデル化する方法を提案した(高埴ら, 1995)。この手法は、放流量や貯水量が目標値を下回った際の満足度をメンバーシップ関数で表現し、その形状の違いによって間接的に意思決定基準の曖昧性を表現したものである。意思決定基準のもつ不確実性とは、この決定基準すなわちメンバーシップ関数の形状を確定的に表現しにくいことに対応する。したがって、さまざまな形状について操作シミュレーションを行えば、意思決定基準のもつ不確実性と操作結果の関係を分析することができる。

しかし、予測情報の精度と意思決定基準の持つ曖昧性が、意思決定過程に及ぼす影響を分析するためには、その曖昧性を陽に表現できるモデルの方が望ましい。そこで、本研究ではメンバーシップ関数の値をファジイ数で表現することにより、意思決定基準の不確実性を表現することにする。この結果、貯水池操作問題は、制約および目標が type-2 ファジイ集合で与えられたファジイ意思決定問題となる。本研究では、type-2 ファジイ意思決定問題として表現された貯水池操作問題の解法アルゴリズムを提案する。

## 2. Type-2 ファジイ意思決定問題としてみた渇水時貯水池操作モデル

渇水時の貯水池操作における意思決定基準は、その貯水池の計画時に定められた目標貯水量と目標放流量である。利水の観点からすれば、放流量がその

目標値を上回っており、貯水量も目標値以上確保されているということが、システムが健全かどうかの判断基準となる。そこで、貯水池システムが健全に運用されているかどうかを  $0 \sim 1$  の実数で表し、満足度と呼ぶことにする。放流量に関しての満足度は、放流量が目標値以上であれば 1 であり、それ以外は 1 未満とする。貯水量における満足度も同様に定義できる。したがって、貯水池操作の意思決定基準はファジイ集合を用いて Fig-1(a) のように表すことができる。また、貯水池操作問題は、

$$D = C_1 \cap C_2 \cap \dots \cap C_{N-1} \cap G_N \quad (1)$$

と表される。ただし、 $C_n$  は第  $n$  期 ( $n = 1, \dots, N$ ) の放流量に関する条件を表すファジイ制約、 $G_N$  は  $N$  期期首における貯水量に関する条件を表すファジイ目標であり、 $D$  はファジイ決定である。

ファジイ制約  $C_n$  を特性付けるメンバーシップ関数の形状(特に放流量が目標値以下の領域での形状)が、被害関数に対応する。しかし、実際にはこの形状を明確に定義することは難しく、多分に曖昧性を含んだものとするのが適当である。したがって、 $C_n$  および  $G_N$  を特性付けるメンバーシップ関数として様々な形状のものを考え、それらに対して式(1)を解くことで、意思決定基準の曖昧性が放流量の決定過程に及ぼす影響を分析することができる。筆者らは、既に、同一の満足度を与える放流量の範囲を意思決定過程のもつ曖昧性を表す指標と定義し、種々のメンバーシップ関数のもつ式(1)に基づく放流量の決定計算を行い、意思決定基準の曖昧性と予測情報の不確実性が放流量決定過程をどの程度曖昧なものにするかということを分析した(高埴ら, 1995)。

しかし、このような分析をするに当たっては、意思決定基準のもつ曖昧性を直接表現できることが望ましい。そこで本研究では、Fig-1(b) のように、 $C_n$ ,  $G_N$  を特性づけるメンバーシップ関数  $\mu_{C_n(x)}$  および  $\mu_{G_N(x)}$  の値をファジイ数で表現することにより、意思決定基準の曖昧性を表現することを考える。この結果、ファジイ制約  $C_n$  およびファジイ目標  $G_N$  は Type-2 ファジイ集合で与えられることになり、貯水池操作問題は、これら Type-2 ファジイ目標  $C_n$  および  $G_N$  のもつ、(1) 式を満足する放流量系列を求める問題となる。

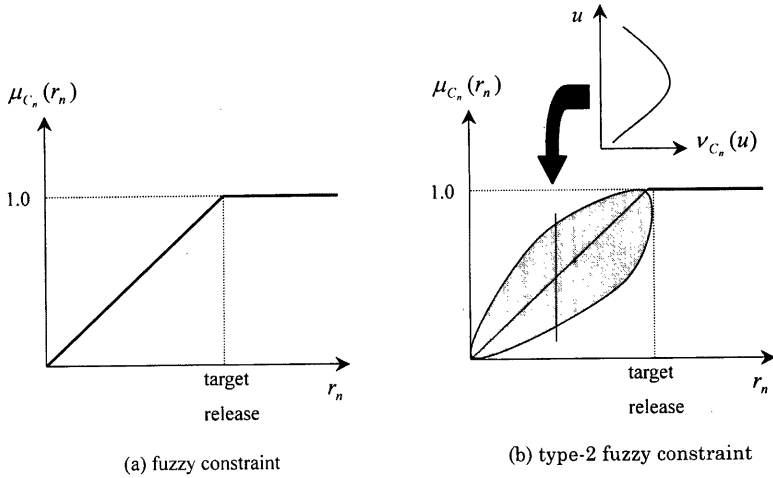


Fig. 1 Expression of the constraints on target discharge by fuzzy set and type-2 fuzzy set

### 3. ファジシステムとしてみた渇水時貯水池システム

貯水池への流入量予測情報は、貯水池操作の信頼性を左右する重要な要素である。利水の観点からは、長期の流入量予測情報が必要になるが、1ヶ月あるいはそれ以上の期間の流入量を正確に予測するのは困難である。そこで、本研究では、近年ファジ理論を用いた流入量予測手法が盛んに検討されていることを踏まえ、流入量予測情報の持つ不確実性をファジ集合で表現することにする。

さて、期間  $n$  中の貯水池への流入量予測情報が流量上のファジ集合  $V_n$  で与えらるとすると、貯水池の状態推移はファジシステムとしてとらえることができる。いま、単一貯水池を考え、 $n$  期期首の貯水量  $s_n$ 、 $n$  期中の放流量を  $r_n$ 、流入量を  $v_n$  とすると、貯水池の連続式は、

$$s_{n+1} = s_n + v_n - r_n \quad (2)$$

で与えられる。したがって、 $n$  期の流入量予測情報がファジ集合  $V_n$  で与えられると、 $n+1$  期期首の貯水量は、次の条件付きメンバーシップ関数で特性づけられるファジ集合となる。

$$\begin{aligned} \mu_{S_{n+1}|S_n, R_n}(s_{n+1}|s_n, r_n) \\ = \mu_{V_n}(s_{n+1} - s_n + r_n) \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、 $\mu_{V_n}$  は流入量予測情報  $V_n$  を特性づけるメンバーシップ関数である。ここで放流量  $r_n$  を特定の値に固定すると、その放流量に対応する  $n+1$  期期首の貯水量状態は、次のメンバーシップ関数で特性づけられるファジ集合  $S_{n+1}$  となる。

$$\begin{aligned} \mu_{S_{n+1}}(s_{n+1}) \\ = \bigvee_{s_n} [\mu_{S_n}(s_n) \wedge \mu_{V_n}(s_{n+1} - s_n + r_n)] \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 $\vee, \wedge$  は、それぞれ最大、最小値をとる操作をあらわしている。

### 4. 放流量決定アルゴリズム

式(1)で与えられる決定  $D$  は、制約  $C_n$  および目標  $G_N$  がファジ集合で与えられる時にはファジ集合となる。貯水池の状態推移を3章で述べたようにファジシステムととらえた場合に、決定  $D$  の最も高いグレードを与える放流量系列(最大決定)は、ファジダイナミックプログラミングと呼ばれる方法で求めることができる(例えば、水本, 1988))。しかし、本研究では意思決定基準のもつ曖昧性を陽に考慮するため、制約  $C_n$  および目標  $G_N$  を type-2 ファジ集合で表現した。そこで本章では、貯水池の状態推移がファジシステムで表現され、式(1)で目標および制約が type-2 ファジ集合で与えら

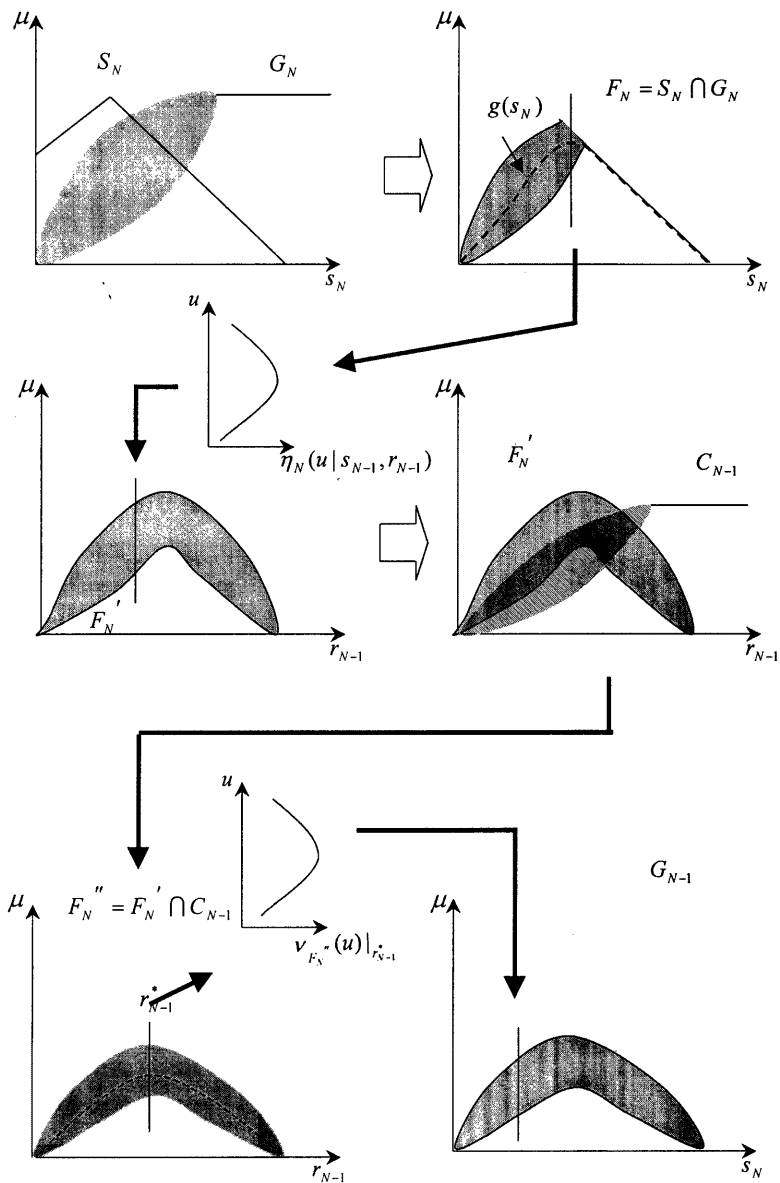


Fig. 2 Schematic representation of the algorithm to determine the release policy

れる場合に、決定  $D$  のグレードを最大化する放流量系列を求めるアルゴリズムを導く。なお、以下で誘導するアルゴリズムを Fig. 2 に図示しておく。

今、考慮する期間数を  $N$  とし、 $N-1$  期期首の貯水量  $s_{N-1}$  を固定する。この時、 $N-1$  期中の放流量  $r_{N-1}$  の値に応じて、 $N$  期期首の貯水量状態を表すファジイ集合  $S_N$  が、 $N-1$  期中の流入量予測情報  $V_{N-1}$  から (4) 式で求められる。さて、 $N$  期期首の貯水量状態はファジイ目標  $G_N$  によって規定されているから、これを満足する貯水量の範囲をあらわすファジイ集合  $F_N$  は、

$$F_N = S_N \cap G_N \quad (5)$$

で与えられる。 $F_N$  の最大グレードを与える貯水量  $s_N^*$  が、与えられた  $s_{N-1}$  に対し、 $r_{N-1}$  なる放流を行った際に  $N-1$  期期首にとりうる貯水量の中で、もっとも高い満足度を与える値ということになる。

ところで、 $G_N$  は type-2 ファジイ集合なので、(5) 式で与えられる  $F_N$  もまた type-2 ファジイ集合であり、 $F_N$  を特性づけるメンバーシップ関数  $\mu_{F_N}(s_N)$  の個々の  $s_N$  に対する値は、満足度  $u \in [0, 1]$  上のファジイ集合(ファジイ数)になる。個々の  $s_N$  に対する  $\mu_{F_N}(s_N)$  の値 ((ファジイ集合)を与えるメンバーシップ関数を  $\nu_{F_N}(u)$  と書くことにする。 $\mu_{F_N}(s_N)$  の持つ曖昧性を考慮に入れた上で  $s_N^*$  を決めるために、 $s_N$  の各値に対して、 $\nu_{F_N}(u)$  と  $u$  軸で囲まれる領域の重心を考えることにし、この  $u$  座標の値を  $g(s_N)$  と表わす。すなわち、

$$g(s_N) = \frac{\int_0^1 u \nu_{F_N}(u) du}{\int_0^1 \nu_{F_N}(u) du} \quad (6)$$

である。 $g(s_N)$  は、 $s_N$  の各値が type-2 ファジイ目標  $G_N$  を満足する平均的なグレードを与えている。したがって、 $s_N^*$  は、 $g(s_N)$  の最大値を与える  $s_N$  と定義することができる。

$$\zeta_N(s_{N-1}, r_{N-1}) = g(s_N^*) = \max_{s_N} [g(s_N)] \quad (7)$$

ここに、 $\zeta_N$  は、 $g(s_N)$  の最大値であり、 $s_{N-1}$  および  $r_{N-1}$  の関数である。さらに、 $\eta_N(u|s_{N-1}, r_{N-1})$  を、

$$\eta_N(u|s_{N-1}, r_{N-1}) = \nu_{F_N}(u) |_{s_N=s_N^*} \quad (8)$$

で定義する。 $\eta_N(u|s_{N-1}, r_{N-1})$  は、 $N-1$  期期首の貯水量  $s_{N-1}$  を固定し、 $N-1$  期中の放流量  $r_{N-1}$  の値を選んだとき、その放流によって生じる  $N$  期期首の貯水量状態がファジイ目標  $G_N$  を満足する程度を表わすメンバーシップ関数である。

上述の手順を  $N-1$  期期首の貯水量  $s_{N-1}$  を固定し、放流量  $r_{N-1}$  のすべての値に対して繰り返せば、放流量  $r_{N-1}$  上の type-2 ファジイ集合  $F_{N-1}^*$  を得る。 $F_{N-1}^*$  は、固定された  $s_{N-1}$  の値に対し、可能なあらゆる放流量を取った際に、その結果として決まる  $N-1$  期期首の貯水量状態がファジイ目標(貯水量に関する条件)を満足する程度を表わす type-2 ファジイ集合である。 $F_{N-1}^*$  を特性づけるメンバーシップ関数を  $\mu_{F_{N-1}^*}$  とすると、

$$\mu_{F_{N-1}^*}(r_{N-1}|s_{N-1}) = \eta_N(u|s_{N-1}, r_{N-1}) \quad (9)$$

である。

ところで、 $N-1$  期の放流量  $r_{N-1}$  はファジイ制約  $C_{N-1}$  によって規定されているから、ファジイ目標およびファジイ制約の両方を満足する放流量の範囲を表わす type-2 ファジイ集合  $F_{N-1}''$  は、

$$F_{N-1}'' = F_{N-1}' \cap C_{N-1} \quad (10)$$

で定義される。 $F_{N-1}''$  において最大のグレードを与える放流量の値  $r_{N-1}^*$  が、固定した  $N-1$  期期首の貯水量  $s_{N-1}$  に対する最適放流量である。ここでは、 $F_{N-1}''$  は type-2 ファジイ集合であるから、上記と同様に重心を考えることにより、 $h(r_{N-1})$  を求める。

$$h(r_{N-1}) = \frac{\int_0^1 u \nu_{F_{N-1}''}(u) du}{\int_0^1 \nu_{F_{N-1}''}(u) du} \quad (11)$$

ただし、 $\nu_{F_{N-1}''}(u)$  は、 $F_{N-1}''$  において  $r_{N-1}$  の各値に対するファジイグレードを特性づける  $u \in [0, 1]$  上のメンバーシップ関数であり、 $h(r_{N-1})$  は  $r_{N-1}$  の各値に対する平均的な満足度を表わしている。

したがって、 $N-1$  期期首の放流量  $s_{N-1}$  の固定した値に対する最適放流量  $r_{N-1}^*$  は、 $h(r_{N-1})$  を最大化する  $r_{N-1}$  の値ということになる。すなわち、

$$h(r_{N-1}^*) = \max_{r_{N-1}} [h(r_{N-1})] \quad (12)$$

である。 $h(r_{N-1}^*)$  は、時刻  $N-1$  期期首の貯水量レベルが  $s_{N-1}$  であるとき、最適放流量  $r_{N-1}^*$  をとった場合の操作の満足度を表わす非ファジイ指標であり、 $\nu_{F_{N-1}''}(u)|_{r_{N-1}=r_{N-1}^*}$  がファジイ指標であるということになる。

以上の手順を  $N-1$  期期首の貯水量  $s_{N-1}$  のすべての可能な値に対して行くと、 $N-1$  期期首のファジイ目標を表わす  $s_{N-1}$  上の type-2 ファジイ集合  $G_{N-1}$  が得られる。すなわち、

$$G_{N-1} = \int \mu_{G_{N-1}}(s_{N-1}) / s_{N-1} \quad (13)$$

ただし、

$$\mu_{G_{N-1}}(s_{N-1}) = \int \nu_{F_{N-1}''}(u)|_{r_{N-1}=r_{N-1}^*}, \quad u \in [0, 1]$$

である。ここに、 $\nu_{F_{N-1}}(u)$  は、 $F''_{N-1}$  を特性づけるファジイグレードのメンバーシップ関数であり、記号  $\int$  は、zadeh(1972) によるファジイ集合の定義記号である。

以上で、貯水量に関するファジイ目標  $G_N$  から、放流量に関するファジイ制約  $C_{N-1}$  を考慮した上で、 $N-1$  期期首の貯水量に関するファジイ目標  $G_{N-1}$  が最適放流政策 ( $r_{N-1}, s_{N-1}$  とともに得られたことになる。この操作を、 $N$  期期首から第 1 期期首 (現在時刻) まで繰り返すことにより、考慮期間  $N$  中の最適放流量系列が得られることになる。

## 5. 適用と考察

ここでは、4. で導いたアルゴリズムの確認および流入量予測情報の不確実性と意思決定基準の曖昧性との相互関係が意思決定過程に与える影響を見るために、単一の仮想貯水池の操作を例にとって理論の適用を行う。ところで、意思決定基準のもつ不確実性の程度と予測情報の精度とのバランスが崩れると、その結果放流量決定過程に混乱が生じることは容易に想像できる。例えば、予測情報の精度が非常に低いの厳しい基準に基づいて放流量の決定を行おうとすれば、決定不能状態、すなわち、どの放流量を選択しても、決定に対する満足度は同じという状態になる。そこで、ここでは、放流量決定過程に生じた曖昧性の指標として、同一の満足度を与える放流量の範囲を採用することにする。

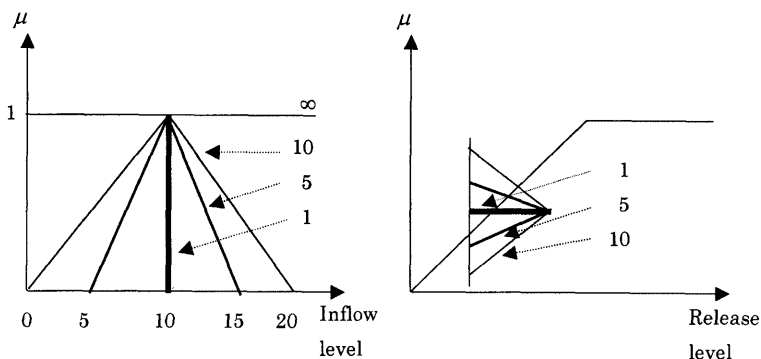
さて、適用貯水池としてその貯水量および放流量がそれぞれ 20 のレベルに分割されたものを考える。目標放流量と目標貯水量はいずれも全期間を通じてレベル 10 であるとする。このような貯水池に対して、Fig. 3 に示すような 4 種類の曖昧性レベルを持つ流入量予測情報と、3 種類の曖昧性レベルを持つ意思決定基準を考える。また、放流量を決定する際の考慮期間を 5 期とする。流入量予測情報については、Fig. 3(a) 中、曖昧性レベル 1 のものはレベル 10 の流入量があることを確定的に予測する情報であり、曖昧性レベル 5, 10 の予測情報は、レベル 10 の流入量の確度が高いものそれぞれこの値を中心に上下 5 および 10 レベルの範囲を想定した情報である。曖昧性レベル無限大の情報はレベル 1 から 20 までどの流入量があるかまったく分からないという状況を表わすものである。なお、いずれの場合も考慮期間中の各期に同一の予測情報が与えられるものとしている。また、Fig. 3(b) に示される意思決定基準 (ファジイ目標および制約) についても、予測

情報と同様な考え方で 3 種類の曖昧性レベルを与えている。曖昧性レベル 1 の意思決定基準は、目標値以下の放流量または貯水量に関し、一意の満足度を定義するもので、この場合、ファジイ目標および制約は通常のファジイ集合で表現されたものとまったく同じになる。曖昧性レベル 1 および 5 の意思決定基準は目標値以下の放流量 (貯水量) に対して与えられる満足度を、それぞれ底辺の幅 2 および 10 レベルの三角形のメンバーシップ関数で特性づけられるファジイ数で与えたものである。なお、以下の計算は、ファジイ目標とファジイ制約の曖昧性レベルが同一のケースに限っている。

以上の条件の下で、意思決定基準と予測情報のタイプの組み合わせ合計 60 通りに対して放流量決定計算を行い、意思決定過程の曖昧性指標を求めた。そのうち、典型的な結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4(a) ~ (d) とともに、水平軸として現在時刻の貯水量レベルをとり、それに対する第 1 期の最適放流量の持つ曖昧性レベル (最適放流量と同一の満足度を持つ放流量の範囲) を縦軸に表わしたものである。各グラフとも実線、破線、点線がそれぞれ意思決定基準の曖昧性レベル 1, 5, 10 の場合のものを表わしている。

Fig. 4(a) および (d) から、予測情報が確定的に与えられた場合およびまったく不確

実な場合、放流量決定過程に生じる曖昧性は、意思決定基準の曖昧性のレベルにまったく依存しないことがわかる。Fig. 4(a) は、予測情報が確定的に与えられた場合の結果であるが、意思決定基準の曖昧性レベルが 1, 5, 10 いずれの場合にも同一の結果 (放流量決定の曖昧性) を与えている。したがって、ここで得られた放流量決定の曖昧性は、予測値と被害関数 (ファジイ制約および目標) の形状との関係で生じたものと理解することができる。現在の貯水量レベルが目標値の 10 の場合には明確な決定を行っているのに対し、目標値を 1 レベル下回る際には決定の曖昧性が最大となり、目標値を下回るレベルが大きくなるに連れて決定の曖昧性は減少している。このことは、放流量決定過程において、貯水量の不足レベルが小さいときには放流量の目標値通りに放流するか、あるいは節水放流を始めるかという迷いが強いことを表わし、不足レベルが大きくなっていくに連れその迷いの程度が小さくなり節水に踏み切るといふ様子を表わしていると考えられる。なお、本適用結果では、貯水量レベル 5 を中心として放流量決定過程の曖昧性が対称な形状を示しているが、この原因については今後さらに適用例を増やして考察する必要がある。一方、Fig. 4(d) すなわち流入

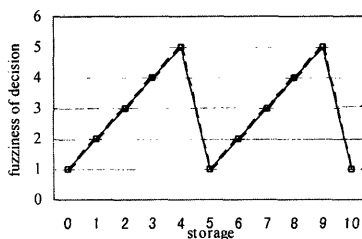


(a) fuzziness of inflow prediction

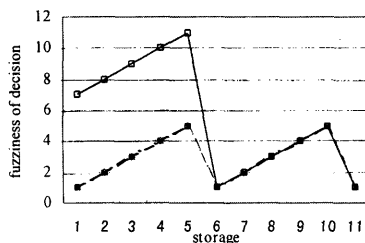
(b) fuzziness of decision criteria

Fig. 3 Selected types of fuzziness of inflow prediction and decision criteria for application

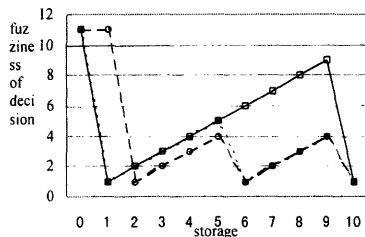
(a) inflow uncertainty level is 1



(b) inflow uncertainty level is 5



(c) inflow uncertainty level is 10



(d) inflow uncertainty level is maximum

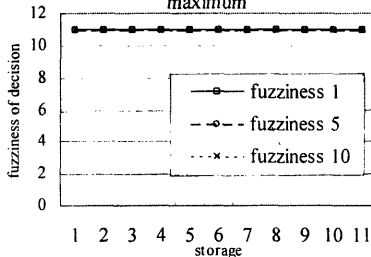


Fig. 4 Fuzziness of the Decision when the reference time is 5 periods

量予測情報の曖昧性レベルが最大のときには、意思決定基準の曖昧性レベルに関係なく放流量決定過程の曖昧性は最大となっている。これは、将来の流入

量がまったく分からない場合には、放流量を決定することが不可能であることを表わしている。

Fig. 4(b) および (c) から、意思決定基準の曖昧性

レベルと予測情報の曖昧性レベルとの差が大きいと、放流量決定過程の曖昧性が增大する傾向があることが伺える。例えば、意思決定基準の曖昧性レベルが1の場合(図中実線で表わされるケース)に着目すると、現在の貯水量レベルが目標値を少し下回るレベル9の際に、明確な予測情報に基づいて放流量の決定を行う際の曖昧性指標がレベル5(Fig. 4(a))であるのに対し、予測情報の曖昧性レベルが5のときにはレベル4となり(Fig. 4(b))、情報の曖昧性レベルが10になると放流量決定過程の曖昧性指標はレベル9と上昇している。この傾向は、現在の貯水量レベルが8, 7, 6の場合にも見られる。このことは、意思決定基準および予測情報の一方のみが明確であっても、放流量決定過程に存在する曖昧性が減少するとは限らず、両者の持つ不確実性の相対的な関係が重要であることを示している。

## 6. 結語

本研究では、渇水時の貯水池操作問題に関して、予測情報の持つ不確実性と意思決定基準の持つ曖昧性との相互関係が、放流量決定過程に及ぼす影響を分析するための数学モデルを提案した。具体的には、意思決定基準の持つ曖昧性を陽に考慮するため、これら基準を type-2 ファジイ集合で表現することを提案し、貯水池操作問題をファジイシステムに対する type-2 ファジイ意思決定問題として定式化した。ついで、放流量を決定するためのアルゴリズムを導くとともに、仮想単一貯水池の操作に適用し、アルゴリズムの検証と予測情報および意思決定基準の持つ曖昧性がどのように放流量決定過程に影響するかを分析を行った。

なお、本研究では、意思決定基準の曖昧性を type-2 ファジイ集合を用いて陽に表現した場合の放流量決定のための理論展開に重点を置いたが、今後、以下の課題について研究を進めていくつもりである。

1. 実際の貯水池操作においては、渇水時または渇水が予想されるような状態において、どの貯水量レベルに達したときから放流制限を開始するかといったという点が、貯水池によって、また、事例によって異なっている。この事実には、得られる貯水池流入量予測情報の精度とともに、意思決定基準に内在する曖昧性が関係していると考えられる。したがって、具体的な貯水池に関してこれらの曖昧性が意思決定過程に及ぼしている影響を本モデルを用いて定量的に明らかにする必要がある。

2. 貯水池流入量の予測情報のもつ曖昧性を、本研究では予測情報の形態、具体的には確定値で与えるか、ある程度の幅を持って与えるのかといった視点から定義した。しかし、実際には確定値で与える際には的中確率が低くなり、ある程度の幅を持って予測情報を与えた場合には的中確率は高くなるものの意思決定の情報としては扱いにくいといった問題が存在する。この点を考慮に入れた予測情報の不確実性指標を定義し、これと今回定義した意思決定基準の不確実性との関係が放流量決定過程に与える影響を分析する。

## 謝辞

本研究の遂行に当たって、数値計算等に、当時京都大学工学部土木工学科の学生であった佐々木要氏、柴田憲一氏の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 池淵周一・小尻利治・宮川裕史(1991): 中・長期予測報を利用したダム貯水池の長時間実時間操作に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第33号 B-2, pp.167-192.
- 池淵周一(1995): 平成6年度全国的代渇水の気象水文特性と被害対策の地域別比較調査研究、文部省科学研究費補助金(総合研究(A))研究成果報告書.
- 許士達広・下田明(1995): 確率曲線を用いたダム利水運用および計画の最適化(1) - 確率を考慮した確保容量曲線の適用 -, 水文学資源学会誌, Vol. 8, No. 3, pp. 285-296.
- 高埴琢馬・椎葉充晴・堀智晴(1995): 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, 京都大学防災研究所年報第38号 B-2, pp. 365-380.
- 竹内邦良・富田茂・伊藤幸義(1984): 給水用貯水池のためのDDCルールカーブ, 水理講演会論文集, 第23巻, pp. 21-26.
- 中山修・小宮朋弓・秋葉務・池淵周一(1994): 低水時のダム補給量決定へのファジイ理論の適用、水文・水資源学会誌, Vol. 7, No. 6, pp.277-284.
- 水本雅晴(1988): ファジイ理論とその応用, サイエンス社.
- Kojiri, T., K. Tomosugi and C.V. Galvao (1994): Knowledge-based Decision Support System of



- Real-Time Reservoir Operation for Drought Control, Journal of Japan Society of Hydrology & Water Resources, Vol 7, No 6, pp. 188-195.
- Yeh, W-G. William (1985): Reservoir Management and Operations Models: A State-of-the-Art Review, Water Resources Research, Vol. 21, No. 12, pp. 1797-1818.
- Zadeh, L.A. (1972): A Fuzzy Set theoretic interpretation of linguistic hedges, Journal of Cybern., Vol. 2, No. 3, pp. 4-34.

### **Uncertainty Analyses Model of Decision Making in Drought Control using Type-2 Fuzzy Set**

Tomoharu HORI\* and Michiharu SHIIBA\*  
\*Graduate School of Engineering, Kyoto University

#### **Synopsis**

A mathematical model is developed to analyze the impact of the relation between the uncertainty of inflow prediction and the fuzziness of decision criteria on the decision making process of reservoir operation. Type-2 fuzzy sets are introduced to express the fuzziness of decision criteria and the reservoir control problem is formulated as a fuzzy decision making problem with type-2 fuzzy constraints and goal. Then the algorithm to determine the release policies are derived using fuzzy dynamic programming scheme. The reservoir operation model is applied to a hypothetical reservoir system for the verification of the theory.

**Keywords:** reservoir control, drought, fuzzy theory, uncertainty