

中・長期気象予報を利用したダム貯水池の 長期実時間操作に関する研究

池淵 周一・小尻 利治・宮川 裕史

A STUDY OF LONG-TERM AND REAL-TIME RESERVOIR OPERATION BY USING MIDDLE AND LONG-TERM WEATHER FORECAST

By *Shuichi* IKEBUCHI, *Toshiharu* KOJIRI, and *Hiroshi* MIYAKAWA

Synopsis

Recently, We have been suffering from serious drought situation because of the fluctuation of weather condition and the increase of water demand in the metropolitan area. Moreover, the water resources systems have not taken effect for drought control because the accuracies of long-term hyetograph and hydrograph prediction were too low.

In this paper, we will establish the long-term and real-time reservoir operational systems considering the middle and long-term weather forecast provided by the Meteorological Agency. Hyetograph and hydrograph are predicted numerizing the results of weather forecast and introducing the adaptive fuzzy control theory. The release from reservoir is decided through the fuzzy control to consider the uncertainty of prediction and operation, too.

Finally, the proposed system will be applied into the real basin for verification of theories.

Keywords: drought, middle and long-term weather forecast, reservoir operation, fuzzy control

1. 序 論

近年、昭和53年の北部九州における異常渇水をはじめとして、首都圏・近畿圏・中部圏・北九州圏などの大都市圏を中心に、全国各地で渇水問題（いわゆる水不足）が多発している。その一方で、大都市においては、都市圏の拡張と人口の都市圏集中に伴う業務・サービス活動の拡大により都市用水の需要増加が著しい。このような状況下では、渇水の影響圏の長期化・広域化は避けられず、都市部における渇水問題が年々深刻さを増しつつある。

そもそも渇水対応策の立案にあたっては、ロングレンジの低水流況を対象としているため、いかに将来の流入量を予測するかが焦点であった。しかし、従来では精度上の観点より、既往水文資料の時系列特性を解析しその統計的特性値をもとにして予測流入量を設定する方法が多く用いられてきた¹⁾。これらはいずれも過去の時系的変動の長期間にわたる平均的性質として意味を持っており、計画策定時には有効であっても、当該年の操作に必ずしも有効との保証がない。

ところで、従来の実時間操作手法に関する研究²⁾は、(i) 統計的手法により将来流入量を確定値と推定し、Dynamic Programmingなどの最適化手法により操作を行なうもの、(ii) 将来流入量を確率論的に

取り扱い、確率 DP により被害の期待値を最小化するものに大別できよう。前者は各期毎にある確定値として与えられるので、予測が正確であれば、その予測期間内では最適操作が可能である。だが、確定値として与えられる期間には限界があり、しかも予測期間以後の流入量に関する情報が存在しないため、全操作期間となると最適性の保証はない。

後者は、ある確率分布形を与えれば、予報期間を無限に引き延ばすことが可能である。しかもその分布が正確であれば、将来のあらゆる状況を加味した上での最適操作を決定できる特徴を備えている。これはあくまで将来の状況を平均的に捉えた最適化であり、確率分布の極大付近の事象が支配的影響を持つことになる。

このように、従来は最適操作を目指すあまり、対象となる流況を限定し過ぎる傾向にあった。このため、平均的な低水には対処できるが、突発的な異常事態には壊滅的な被害を被る可能性がある。つまり、制御システムに要求されることは、システムが異常な事態に見舞われることがあったら、その予測程度に関わらず、合理的な操作結果が達成できることである。本研究では、このような実時間操作システムを構築するため、最適性を保持しつつもその中枢部に不確定事象に対応しうるモデルを提案するものである。

さらに、渇水の早期対策を行うため、気象庁から得られる中・長期気象予報を導入し、将来の降雨量予測を図っている。中・長期予報の精度は、まだ、満足のいくものではないが²⁾、予報精度に柔軟に対応するファジイ理論を用いることによって、中・長期予報の有効利用を試みるものである。そのために、中・長期予報は 100% 信頼して利用する形式をとり、予報の的中状況に反応する判断機構を取り入れる。判断の際に用いられる操作規則は、容量や流入特性の異なるダムでも適用可能な方向を意識して作成する。また、規則数の増加を避けるため、季節によらず年間を通じてほぼ同一の規則が使用できるようファジイ適応制御理論を導入するものである。

2. 中・長期気象予報を利用したダム貯水池への将来流入量情報

2.1 中・長期気象予報の概要

現在の中・長期気象予報は、中期予報に相当する週間予報、および長期予報に相当する 1 カ月予報、3 カ月予報、暖候期予報、寒候期予報の合計 5 種類である。各予報内容を概略すると、以下のようになる。

(i) 週間予報

発表時期：毎日（昭和 63 年 10 月より、従来の毎週火・金曜日発表から変更）

予報期間：翌日から 7 日間先まで

予報内容：①向こう 1 週間の全般的天気特性、②向こう 1 週間の日天気概況、③向こう 1 週間の日平均気温の 3 段階予報、④向こう 1 週間の総降水量の 3 段階予報

(ii) 1 カ月予報

発表時期：毎月末

予報期間：翌月の各旬

予報内容：①来月の全般的天気特性、②来月の各旬の天気概況、③来月の旬平均気温の 3 段階予報、④来月の旬総降水量の 3 段階予報

(iii) 3 カ月予報

発表時期：毎月 20 日

予報期間：向こう 3 カ月の各月

予報内容：①向こう 3 カ月の全般的天気特性、②向こう 3 カ月の月天気概況、③向こう 3 カ月の月平均気温の 3 段階予報、④向こう 3 カ月の月総降水量の 3 段階予報

(iv) 暖候期予報

発表時期：毎年3月20日

予報期間：4月～9月

予報内容：4月～9月までのおおよその天候特性

(v) 寒候期予報

発表時期：毎年10月20日

予報期間：10月～3月

予報内容：10月～3月までのおおよその天候特性

ただし、中・長期予報は、「少ない（低い）」、「平年並」、「多い（高い）」の3段階予報として発表され、各代表観測所の平年値も同時に提示される。平年値は、WMO（世界気象機関）の規定により30年間の平均値が採用されており、現在は1956年（昭和31年）から1985年（昭和60年）の平均値である。各段階の区分値は、Table 1に示したとおりである。実績によると、旬別の上旬の的中率および予報別の「平年並」の的中率は比較的高い。特に的中率が悪いのは、降水量が「多い」の予報の場合で、「多い」の予報が発表されたときに実際の降水量が正反対の「少ない」に属するケースのほうが予報が的中するケースよりも1.5～2.5倍も多くなっている。

Table 1. Classification of middle and long-term weather forecast

Factor	Unit	Small	Normal	Big
Deviation of Temperature	month	-0.6	-0.5~0.5	0.5~
	ten days	-0.9	-0.8~0.8	0.9~
	five days	-1.1	-1.0~1.0	1.1~
Ratio of precipitation	month	~69	70~119	120~
	ten days	~39	40~139	140~
	five days	~19	20~119	120~
Occurrence probability		30%	40%	30%

2.2 中・長期予報がもたらす将来流入量情報

(1) ダム貯水池の利水運用と中・長期予報との関係

ダム貯水池への長期流入量を決定する気象要素としては、半月程度の期間では、降水量が気温や天候そのものなど他の気象要素より卓越している。しかし、ダム貯水池操作には、操作に関する情報がいかに曖昧であっても、最終的に決定される放流量は確定値となることが望ましい。さらに、天候そのものの予報は、同じ言語表現であっても降水量や気温の予報のように「定量的」な情報を含んでおらず、そのままの形で操作システムに組み込むのはかなり難しいのが現状である。

従って、実用性を考慮して、本研究ではダム操作に利用する予報を中・長期予報における降水量の予報しかも、3段階予報に限定する。但し、例外として週間予報における毎日の天気概況だけは利用する。言い替えると、週間予報の日天気概況と週間予報、1カ月予報、3カ月予報における降水量の予報のみを用いてダム操作に必要な将来流入量情報を作成するものである。ここでは、中・長期予報は“予報を100%信頼する”という考えに立ち、「予報の意味する範囲内で確実に現象が生起する。」とみなして活用を試みる。

(2) ダム貯水池への将来流入量情報

いま、ある操作時点において、週間予報、1カ月予報により月末までの最小・平均（最小値と最大値の平均値）・最大の予測降雨量系列を作成しよう。「多い」との予報があった場合、その最大降水比率は、利水操作における最大想定降水比率を半月では300%、旬では200%とする。次に、それぞれの予測降雨量系列と現在までの降雨量・流入量の実績データをもとに、貯水池への予測流入量系列を求める。3カ月予報については、来月以降の降雨予測値を算出せず、予報そのものから来月以降の降雨量の多寡を表わす将来降雨動向指標といった値に変換する。つまり、

- (i) ある操作期首からその月の月末までの、予報に対応した最小・平均・最大の3種類の予測流入量系列
 (ii) 来月以降の将来降雨動向指標

である。なお、利用する予報は現在有効な予報の中で最新の予報のみとする。また、3カ月予報は、利用する最新の発表のみを採用する。但し、操作単位は暦半旬単位を用い、4月1日から翌年3月31日までの1年間全72期間、4月を第1月とし、翌年3月を第12月と置く。すると、予測手順は以下のようになる。

まず、予測システム RCONV①で、第 n 期期首の前日に発表された週間予報から第 n 期（当半旬）に対する降水量予報が決定される。現在が x 月1日で、昨日発表の週間予報が、次のように与えられたとする。

天気概況 1日: 晴れ時々曇り 2日: 曇り
 3日: 曇り時々雨 4日: 雨
 5日: 晴れ 6日: 曇り
 7日: 晴れ時々曇り

総降水量 平年並 (Normal), 平年値 $a = 32.2$ mm

すると、 x 月第1半旬（第 xx 期）の降水量予報は次の5つのステップを経て求められる。すなわち、

Step 1: 「平年並」の段階区分値は20～120%であるので、降水確率 α は

$$\alpha = 0.5 \times (0.20 + 1.20) = 0.70 \quad \dots\dots\dots (1)$$

となる。

Step 2: 毎日の天気概況 ($W_i, i = 1, 2, \dots, 7$) において、晴れ=0, 曇り=1, 雨=2, 大雨=3を目安にして数量化すると、

$$(P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7) = (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 0, 1.0, 0.5) \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。

Step 3: 1ポイント当りの降雨量 r_u (mm)は、今週の代表降水量が $r = \alpha \times a$ で推定されるので、

$$r_u = 1 / (0.5 + 1.0 + 1.5 + 2.0 + 0 + 1.0 + 0.5) \times (0.70 \times 32.2) = 3.5 \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。

Step 4: x 月第1半旬の代表降水量 r_{xl} (mm)は次のようになる。

$$r_{xl} = 3.5 \times (0.5 + 1.0 + 1.5 + 2.0 + 0) = 17.5 \quad \dots\dots\dots (4)$$

Step 5: 平年降雨量 r_a が13.6 mmであったとすると、代表降水比率 α_t は、

$$\alpha_t = 17.5 / 13.6 = 1.29 = 129(\%) \quad \dots\dots\dots (5)$$

となり、 α_t の属する段階は「多い」となることが判る。

以上の手順で求められた当該操作期（当半旬）の予報を基に、第 xx 期の最小・平均・最大の予測降水比率は、それぞれ120, 210, 300(%)として決定される。当期の平年降水量は13.6 mmであるから、最小・平均・最大の予測降雨量は、16.32, 28.56, 40.80 (mm)となる。

次に、予測システム RCONV②において、RCONV①での結果と1カ月予報から、当月の月末までの半旬単位予測降雨量系列に変換される。いま、第 i 月に対する1カ月予報（第 $(i-1)$ 月の月末発表）による各旬の予報を、 $DF_{ik}(\{\text{Small, Normal, Big}\}, k=1, 2, 3)$ とする。ここで、添え字 k は順に上旬、中旬、下旬を表わす。各半旬での最小・平均・最大の予測降水比率は、 DF_{ik} における予測降水比率をそのまま適用する。現在が第1半旬で、1カ月予報による下旬の予報 DF_{i3} が「平年並」であった場合には、「平年並」の範囲が40～140%であるから、第5半旬、第6半旬の最小・平均・最大の予測降水比率を共に40, 90, 140%とすることである。この予測降水比率に各半旬の平年降雨量を乗じることによって、月末までの各期の予測降雨量系列が得られる。現在期に限っては、1カ月予報を用いずにRCONV①で求められた最小・平均・最大の予測降水比率を用いて予測降雨量を求める。当該半旬が旬の前半の半旬（奇数半旬）の場合には、次の半旬の予測降雨量はその旬の予報に基づいた旬の最小・平均・最大の予測降雨

量から前半旬の対応する予測降雨量を差し引いた値を予測降雨量とする。予測降雨量が負となるならば、旬の予報における予測降水比率をそのまま用いて予測降雨量を算定する。第5半旬で下旬の予報 DF_{13} が「少ない」であり、第5半旬、第6半旬の平年降雨量が共に 20 mm であった場合、下旬の最小・平均・最大の降水比率は、 $0, (0+40)/2 = 20, 40\%$ である。従って、1 カ月予報に対応する下旬の予測降雨量は、

$$(20 \times 2 \times 0, 20 \times 2 \times 0.2, 20 \times 2 \times 0.4) = (0, 8.0, 16.0) (\text{mm}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。第5半旬の RCONV①による予報が「少ない」であつたら、第5半旬の最小・平均・最大の予測降雨量は、

$$(20 \times 0, 20 \times 0.1, 20 \times 0.2) = (0, 2.0, 4.0) (\text{mm}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

となるから、第6半旬の予測降雨量は上の2式の差

$$(0 - 0, 8.0 - 2.0, 16.0 - 4.0) = (0, 6.0, 12.0) (\text{mm}) \quad \dots\dots\dots (8)$$

で得られる。ところが、第5半旬の予報が「平年並」であつたら、予測降雨量は、

$$(20 \times 0.2, 20 \times 0.7, 20 \times 1.2) = (4.0, 14.0, 24.0) (\text{mm}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

となる。この予測降雨量値は RCONV①を用いた予測値より大きいので、第6半旬の予測降雨量は下旬の予測降水比率をそのまま用いて、

$$(20 \times 0, 20 \times 0.2, 20 \times 0.4) = (0, 4.0, 8.0) (\text{mm}) \quad \dots\dots\dots (10)$$

とする。

最後に、予測システム RCONV③によって、3 カ月予報における来月以降の月降水量予報から、来月以降の将来降雨動向指標が算定される。利用する3 カ月予報は、第 i 月の第1～4半旬では前月20日発表3 カ月予報であり、第5、6半旬では当該月20日発表の最新の3 カ月予報を利用する。指標の計算法としては、次のような得点方式とする。すなわち、来月以降の予報に応じて、「少ない」= -1, 「平年並」= 0, 「多い」= +1 とする。更に、来月の予報なら重み 1.0, 2 カ月目では 0.8, 3 カ月目では 0.6 として予報の存在する月までの各月の得点の総和を将来降雨動向指標とする。 x 月第5半旬初日で、前日 ($x-1$ 月20日) 発表の3 カ月予報により $x+1$ 月の降水量予報が「少ない」、 $x+2$ 月が「平年並」、 $x+3$ 月が「多い」であったとすると、この場合の将来降雨動向指標は -0.4 となる。

上記の3つの変換法より、各期首において第 i 月月末までの最小・平均・最大の予測降雨量系列と将来降雨動向指標が算出される。そして、各予測降雨量系列は、実績降雨量および実績流入量などのデータを取り入れて、最小・平均・最大の3本の予測流入量系列へと変換される。

3. 実時間操作システムの基本構成

3.1 渇水対応策の階層構造化

(1) 渇水対応策レベルと貯水量レベル

従来の利水用ダムにおける渇水操作は、放流量を需要量に限定し、渇水被害を (不足量)² / (各期目標放流量) の総和 (もしくは総和の期待値) を対象とする方法がとられていた。現実には、需要量のみではなく下流維持流量を含めたものが放流量であり、しかも、節水率は 10%, 20% といった離散値で実施されることが多い。従って、次のような仮定を設け放流量決定の制約とする。

- (i) 渇水時における取水制限は、各期需要量の 30% 制限までは 10% 刻みで実施し、かつ段階的に移行することとする (制限を緩和する場合も同様である)。
- (ii) 30% より大きな取水制限が必要な場合でも、節水率は連続的に変化する (非常事態)。
- (iii) 維持流量に関しては、目標維持流量 (MD) と確保維持流量 ($MD_{\min}$) を設定し、通常放流時では、目標維持量以下の放流は認めない。
- (iv) 目標維持流量を越える放流量は、来期以降の貯水量において制限貯水量を越える恐れがある場合のみ、

超過分を放流できる。

(v) 取水量を 10% 制限するに先立ち、通常放流時において維持流量を確保維持流量まで下げることができる（渇水警戒体制）。

(vi) 取水制限期間中は、維持流量を確保維持流量とする。

(vii) 貯水量が著しく低下するが、上記の (i)~(vi) の事項を満たせない場合には、例外的措置へ移行する。

具体的には、次の階層構造として渇水操作（渇水対策レベル DL ）として表現される。

レベル 0：通常放流段階（ $QO \geq DD + MD$, $RDD = DD$ ）

↓ ↑

レベル 1：渇水警戒体制（ $QO \geq DD + MD_{min}$, $RDD = DD$ ）

↓ ↑

レベル 2：取水量第 1 次（10%）制限段階（ $QO \geq 0.9 \cdot DD + MD_{min}$, $RDD = 0.9 \cdot DD$ ）

↓ ↑

レベル 3：取水量第 2 次（20%）制限段階（ $QO \geq 0.8 \cdot DD + MD_{min}$, $RDD = 0.8 \cdot DD$ ）

↓ ↑

レベル 4：取水量第 3 次（30%）制限段階（ $QO \geq 0.7 \cdot DD + MD_{min}$, $RDD = 0.7 \cdot DD$ ）

↓ ↑

レベル 5：渇水非常事態（ $QO \geq 0$, $RDD < 0.7 \cdot DD$ ）

ここで、 QO はダムから実際に放流される需要量分 RDD と維持流量分 RMD を合わせたダム放流量（ $QO = RDD + RMD$ ）、 DD は需要量を表わす。

一方、ダム貯水量において次のような階層構造を持つと仮定して議論をすすめる。すなわち、

レベル 0：貯水量が少なくない

レベル 1：貯水量が少し少ない

レベル 2：貯水量が少ない

レベル 3：貯水量がかなり少ない

レベル 4：貯水量が非常に少ない

レベル 5：貯水量が極端に少ない

（2）操作システムの判断手順

本操作システムは、中・長期気象予報を利用して、ある程度の最適性を維持しつつ、渇水時の管理者と需要者の利害関係を解決しようとするものであり、Fig. 1 のような手順になる。RCONV①~③は中・長期予報による流量予測、OPT①、②は制約条件を満たしうる放流量の算定を表わしている。INF①~③はファジイ推論³⁾による放流量決定である。流入量予測情報およびダムの貯水量レベルを基に、現在の渇水対策レベル（ $DL(n-1)$ ）を今期以後 1 レベルの範囲内で維持、強化、緩和のいずれにしたいかの程度を求め、将来の対策とする。さらに、月末までの各期の流入量を想定するとともに、想定流入量のもとで各期の放流量を求めておく。この値を当該期に関しては決定放流量、来月以降を予定放流量とし、1 操作期毎繰り返して 1 年間操作を進めていくことになる。

3. 2 放流量の決定と貯水量レベルの推論

（1）ダム放流量の統合的な最適化

ダム管理者の立場にたった形での最適性を重視する。具体的には、渇水による需要量の被害を最小化するだけでなく、ダム貯水量および維持流量を含めたダム貯水池の統合的な最適化を意識している。

従来の利水目的のダム操作の多くは、需要者の立場にたった形での最適性を重視しており、渇水での最適放流量を需要量に関する被害のみを最小化するように決定していくものであった。このような場合、最も一般的な被害関数は、

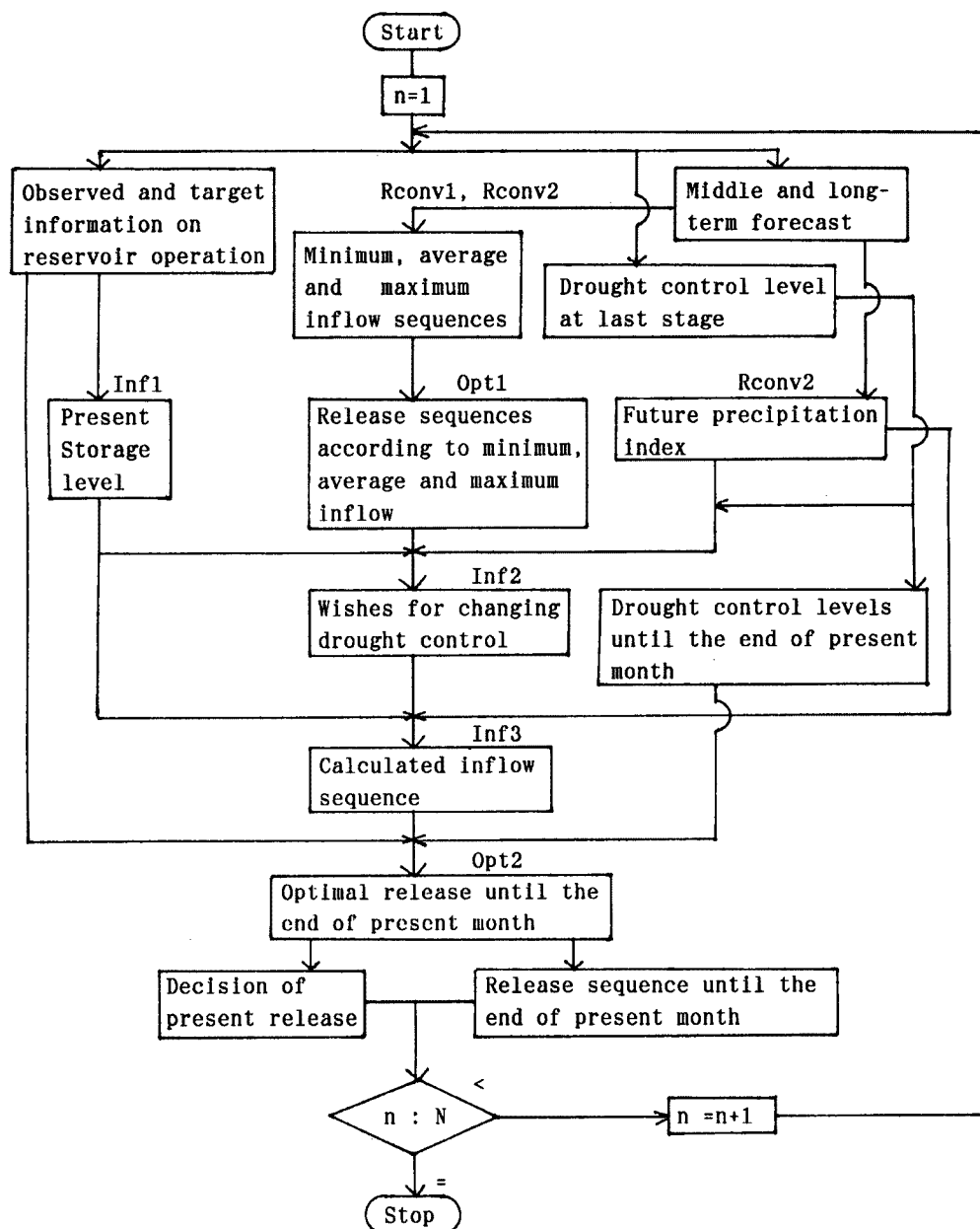


Fig. 1. Flowchart of real-time reservoir operation for drought control.

$$P = \sum_{n=1}^N (DD(n) - RDD(n))^2 / DD(n) \dots\dots\dots (11)$$

と表わすことができる。ここに、 $DD(n)$ は、第 n 期の需要量、 $RDD(n)$ は第 n 期の放流量の内の需要量分、 N は操作期間の総数である。本操作システムでは、渇水対策レベル 4 までの比較的軽度の渇水の場合は、この考え方を維持流量および貯水量に適用して最適放流量を決定する。つまり、維持流量については、目標維持流量からの偏差率×偏差量を維持流量の被害、貯水量については、各期の目標貯水量を定め、この目標貯水量からの偏差率×偏差量を貯水量の被害と考え、これらの被害の和を最小にするように

最適維持流量分を決定する。そして、渇水対策レベルがレベル5（非常事態）となった場合には、需要量および貯水量を考慮して最適需要量分を決定する。

(2) 最適放流量の計算法

渇水対策レベルが0での放流量は、需要量、維持流量をともに満たしており

$$Q0(n) = DD(n) + MD(n) \dots\dots\dots (12)$$

として決定される。渇水対策レベルがレベル1～4まで、つまり取水制限が0～30%のときの場合、各期での放流量の内の需要量分 $RDD(n)$ は、各レベル $DL(n)$ に応じて、

$$RDD(n) = (1 - (DL(n) - 1)/10) \times DD(n) \dots\dots\dots (13)$$

と定められる。すると、残る維持流量分 $RMD(n)$ は、

$$J(n) = J_s(n) + J_n(n) \\ = \frac{\{S_0(n+1) - S(n+1)\}^2}{S_0(n+1)} + \frac{\{MD(n) - RMD(n)\}^2}{MD(n)} \times T(n) \dots\dots\dots (14)$$

を最小とするように決定される。ここで、 $S_0(n+1)$ は来期の目標貯水量、 $S(n+1)$ は来期の実際の貯水量、 $T(n)$ は各期の期間長である。ただし、 $S(n+1)$ はダムの連続式より

$$S(n+1) = S(n) + \{QI(n) - RDD(n) - RMD(n)\} \times T(n) \dots\dots\dots (15)$$

と表現される。なお、 $QI(n)$ は各期の平均流入量である。ここで、 $RMD(n)$ を xx とおくと

$$J(xx) = \{cx \cdot xx - (dx - ax)\}^2 / ax + (bx - xx)^2 / bx \cdot cx \dots\dots\dots (16)$$

となる。但し、 $ax = S_0(n+1)$ 、 $bx = MD(n)$ 、 $cx = T(n)$ 、 $dx = S(n) + \{QI(n) - RDD(n)\} \times T(n)$ である。 $dx \geq 0$ とすると、式(16) が最小の時 RMD は、

$$RMD(n) = \frac{S(n) + \{QI(n) - RDD(n)\} \times T(n)}{S_0(n+1) + MD(n) \times T(n)} \times MD(n) \dots\dots\dots (17)$$

となる。式(17) によると、『維持流量を全く放流しないときの来期期首の貯水量』と『来期期首の目標貯水量と目標維持流量の今期の総量分との和』との比を目標維持流量に乗じればよい。その比が1を越える場合は、仮定(v)より、 $RMD(n) = MD(n)$ となる。さらに、渇水がレベル5の場合、各期での放流量の内の維持流量分 $RMD(n)$ は、需要量の制限率 (> 30%) によらず、

$$RMD(n) = MD_{min}(n) \dots\dots\dots (18)$$

とする。また、各期の最適需要量分は、

$$RDD(n) = \frac{S(n) + \{QI(n) - RMD(n)\} \times T(n)}{S_0(n+1) + 0.7 \times DD(n) \times T(n)} \times 0.7 \times DD(n) \dots\dots\dots (19)$$

となる。これは、『需要量を全く放流しないときの来期期首の貯水量』と『来期期首の目標貯水量と需要量を30%制限した場合のその今期の総量分との和』との比を需要量に乗じたものに等しい。しかし、その比が1を越える場合は、30%制限として、 $RDD(n) = 0.7 \times DD(n)$ とする。

(3) 安全側を考慮した実放流量の設計

実際のダム操作においては、

- (i) 貯水量が著しく低下し、かつ、大きな流入量が望めない場合には、式(17)、(19) が負となる。
- (ii) 貯水量がほとんど0に近い状態で、今期にまとまった降雨が予想される場合、半月の後半にのみ降雨が集中することがあれば、それまでにダムの貯水量が底をつき、放流が不可能となる場合が発生する。そのため、前述の7つの操作制約に以下の3つを加える。すなわち、
- (iii) 渇水対策レベルが5以外の場合で、計算上求められる放流量が負となる時、2段階以上の渇水対策レベルの変更を認める。

(ix) 現在のダム貯水量が求められた最適放流量の1操作期分よりも少ないとき、将来流入量を見込んでの放流は認めない。

(x) 渇水対策レベル5において確保維持流量の放流が不可能なほど貯水量が低下している場合、現在貯水量の1操作期分の放流量を2等分して、需要量および維持流量に均等に分配する。

ゆえに、第 n 期期首において、現在貯水量 $S(n)$ 、月末までの各期の渇水対策レベル $DL(n+k)$ 、月末までの各期の目標貯水量 $S_0(n+k)$ 、月末までの各期の需要量 $DD(n+k)$ 、月末までの各期の維持流量 $MD(n+k)$ 、各期の平均流入量 $QI(n+k)$ 、および、月末までの各期の期間の長さ $T(n+k)$ ($k=0, 1, \dots (6-j)$) が与えられると、上記の計算を逐次繰返すことによって、月末までの放流量系列が得られる。

(4) ファジ理論による貯水量レベルの推定

貯水池レベルは、その境界がきわめて曖昧で、人間の主観によって微妙に異なるものである。そこで、現在の貯水量と現在までの貯水量の遷移状況を貯水量レベルの算定に必要な情報と考え、曖昧事象の処理に有効なファジ理論によって貯水量レベルを表現しよう。つまり、ファジ推論における前件部変数として、

$$x_1 = PSR = S(n)/S_0(n), \quad (0 \leq x_1) \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$x_2 = DSR = S(n)/S_0(n) - S(n-1)/S_0(n-1), \quad (-1 \leq x_2 \leq 1) \quad \dots\dots\dots (21)$$

を用いると後件部は、

$$y = PSL = SL(n), \quad (0 \leq y \leq 5) \quad \dots\dots\dots (22)$$

となる。制御規則としては、例えば『現在の貯水比率自体はかなり少ないけれども、前期と比べて回復している場合には、貯水量レベルは2程度と考えよ。』と書かれる形式である。

3.3 渇水対策レベルの変更希望度

(1) 変更希望度の定式化

制御規則は、前期の渇水対策レベルによらない共通の部分と前期の渇水対策レベルによって異なる部分に分割できよう。共通の渇水対策レベルとは、**Case 1.** 現在の渇水対策レベルと現在の貯水量レベルがほぼ等しい状態が最も好ましいとの立場に立ち、**Case 2.** 現在の渇水対策レベルが現在の貯水量レベルより低い場合は、渇水対策レベルを上げたい（制限強化）と願うことである。また、**Case 3.** 対策が進むにつれて、現在の渇水対策レベルが現在の貯水量レベルより高くなると、渇水対策レベルを下げたい（制限緩和）と願う制御規則である。

しかるに、渇水対策レベル別の規則であるが、予報から得られる将来流入量情報を基にした変数を用いる必要がある。前期の渇水対策レベルを月末まで維持できるとして、最小・平均・最大の将来流入量情報に対応する放流量系列を求め、月末までの貯水量の推移状況を調べることになる。言い替えると、最小・平均・最大の流入量系列を、

$$\{QI_{min}(n), QI_{min}(n+1), \dots, QI_{min}(n+(6-j))\} \quad \dots\dots\dots (23)$$

$$\{QI_{ave}(n), QI_{ave}(n+1), \dots, QI_{ave}(n+(6-j))\} \quad \dots\dots\dots (24)$$

$$\{QI_{max}(n), QI_{max}(n+1), \dots, QI_{max}(n+(6-j))\} \quad \dots\dots\dots (25)$$

と表わし、放流量系列と貯水量系列が、

$$\left. \begin{array}{l} \{QO_{min}(n), QO_{min}(n+1), \dots, QO_{min}(n+k)\} \\ \{S_{min}(n), S_{min}(n+1), \dots, S_{min}(n+k)\} \end{array} \right\} \quad \dots\dots\dots (26)$$

$$\left. \begin{array}{l} \{QO_{ave}(n), QO_{ave}(n+1), \dots, QO_{ave}(n+k)\} \\ \{S_{ave}(n), S_{ave}(n+1), \dots, S_{ave}(n+k)\} \end{array} \right\} \quad \dots\dots\dots (27)$$

$$\left. \begin{array}{l} \{QO_{max}(n), QO_{max}(n+1), \dots, QO_{max}(n+k)\} \\ \{S_{max}(n), S_{max}(n+1), \dots, S_{max}(n+k)\} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (28)$$

となった場合、それぞれの貯水量を前件部変数として用いるものである。なお、上記の式(23)～(28)において、現在が第6半句の場合は、流入量は1つの値(当該期の値)のみなので、対応する放流量および貯水量とも当該期に関する値のみとなる。

更に、3カ月予報からの降雨動向指標をもとにした制御規則も作成される。言語としての制御規則は、『来月以降、降雨が多めとなりそうなら現在の渇水対策レベルを下げることを少し考慮せよ。』といったものとなる。

(2) 変更希望度の解釈

前期の渇水対策レベルに対する変更希望度 $DDL P(n)$ は、例外を除いて、 ± 1 レベルの範囲内で段階的に変更されることより、

$$-1 \leq DDL P(n) \leq 1 \dots\dots\dots (29)$$

と定義できる。 $DDL P(n) < 0$ の場合は制限緩和を、 $0 < DDL P(n)$ の場合は制限強化を表わしている。 $DDL P \geq 0.5$ の場合は、今期から渇水対策レベルを1レベル上げて月末までそのレベルを継続し、 $DDL P \leq -0.5$ の場合は今期から渇水対策レベルを1レベル下げて月末までそのレベルを継続するというものである。また、 $-0.5 < DDL P < 0.5$ の場合には、来期以降から第6半句(月の最終半句)までに、前期の渇水対策レベルを強化ないし緩和を実施し始める半句を決定する。数値的に述べると、 $0 < DDL P < 0.5$ で現在が第 j 半句 ($j < 6$) の場合は、0.5 を月末までの残りの半句数で割った値を aa ($= 0.5 / (7-j)$) とする。すなわち、

$$ba = 7 - [DDL P / aa] \dots\dots\dots (30)$$

により求められる ba よりも小さい半句までは、前期の渇水対策レベルを維持し、 ba 以上の半句から1レベルを上げることとする。なお、式(30)で $[\cdot]$ は、ガウスの記号である。 $ba = 7$ の場合は月末まで前期のレベルを維持する。 $-0.5 < DDL P < 0$ のときは、 $aa = -0.5 / (6-j)$ として ba を求めればよい。ここでは、 ba 以上の半句から前期の渇水対策レベルを1レベル下げることになる。また、 $DDL P = 0$ のときは、月末までレベルの変更をおこなわないものとする。

以上の計算により、月末までの各期の渇水対策レベル、 $DL(n+k)$ ($k=0, 1, \dots, (6-j)$) が求められる。判断は1操作期ごとに逐次更新されていくため、得られた渇水対策レベルは、今期に対しては決定渇水対策レベル、来期以降は予定渇水対策レベルとなる。今期から直ちにレベルを変更するかどうかのしきい値を0.5と定めているが、この値は節水方策に対する需要者の意識が反映されるものであり、適用を増やして、適切な値を決める必要があろう。

3. 4 想定流入量系列の設定と今期決定放流量

さて、貯水池からの今期放流量であるが、予報により求められた最小・平均・最大の流入量系列を基に、ダム管理者から見て妥当と判断される流入量を想定し、意志決定が行われる。この想定流入量系列に対して放流量決定手順 OPT を適用し、今期のもを決定放流量、来期以降のものを予定放流量とすることになる。想定流入量系列は、予測される系列ではなく、ダム管理上の主観的要素による流入量系列である。月末までの渇水対策レベルが求められていることは、各期の最適放流量に関する制約条件が既知であることに等しい。ここで、ダム管理者は、現状に不安感を抱いているなら出来る限り少ない放流量をとり、比較的余裕をもっているなら通常放流に近い放流を望むはずである。

このようなダム管理者の心理を取り入れるため、INF③において、現在貯水量レベル、および、将来降雨動向指標を前件部として、3種類の予測流入量系列の重み付けを行う。すなわち、最小・平均・最大の

流入量系列に対する重み W_{min} , W_{ave} , W_{max} を,

$$W_{min} : W_{ave} : W_{max} = a : b : 0, \quad a + b = 1 \quad \dots\dots\dots (31)$$

とした場合の、最小流入量系列に対する重み $a (=RMIN)$ を後件部とするファジィ制御器を設計することである。推論結果をもとに想定流入量系列を,

$$\begin{aligned} & \{QI_{ima}(n), QI_{ima}(n+1), \dots, QI_{ima}(n+(6-j))\} \\ & = \{a \cdot QI_{min}(n) + b \cdot QI_{ave}(n), a \cdot QI_{min}(n+1) + b \cdot QI_{ave}(n+1), \\ & \quad \dots, a \cdot QI_{min}(n+(6-j)) + b \cdot QI_{ave}(n+(6-j))\} \quad \dots\dots\dots (32) \end{aligned}$$

として求める。さらに、3. 3で求められた $DL(n+k)$ を制約条件として、想定流入量系列 $\{QI_{ima}(n), QI_{ima}(n+1), \dots, QI_{ima}(n+(6-j))\}$ に3. 2の放流量計算を適用し、今期の決定放流量と来期以降の予定放流量が決定される。

4. 仮想ダム貯水池における実時間操作システムの構築

4. 1 仮想ダム貯水池の環境設定

(1) ダム貯水池の諸元

単一ダム貯水池を想定し、渇水操作システムを構築しよう。ダム放流量は、需要量の和に等しくダム残流域からの流入は考慮しない。貯水池の諸元は、淀川水系の名張川最下流に存在する高山ダムを参考に以下のように設定する。

有効貯水量 … 50 ($\times 10^6 \text{ m}^3$)
 洪水調節容量 … 30 ($\times 10^6 \text{ m}^3$)
 利水容量 … 20 ($\times 10^6 \text{ m}^3$)
 水道用水 … 5.0 m^3/s (夏季 (7～9月) のみ 6.0 m^3/s)
 灌漑用水 … 灌漑期 (5月中旬～9月末) のみ 5.0 m^3/s
 下流維持流量 … (i) 目標維持流量 6.0 m^3/s
 (ii) 確保維持流量 4.0 m^3/s
 需 要 量 … 水道用水と灌漑用水分の和

(2) 操作単位および操作期間

中期予報 (週間予報) は1週間単位、1カ月予報は旬単位 (10日間) で発表されるため、貯水池操作単位は半旬単位 (5日間) を採用する。ただし、1カ月予報が30日予報ではなく暦上の1カ月予報であることから、厳密な半旬単位ではなく、暦半旬単位とする。従って、1, 3, 5, 7, 8, 10, 12月の第6半旬は6日間となり、2月の最終半旬は3日間となる。また、操作期間は1年間、4月1日を操作開始、3月31日を操作終了時点とする。

(3) 貯水池流入量の設定

降雨量・流入量とも半旬単位であることを考え、貯水池流入量は、降雨より回帰式で換算する。回帰式は、前期流入量、前期降雨量、今期降雨量の3つを説明変数とし、

$$QI(n) = a_1 \cdot QI(n-1) + a_2 \cdot r(n-1) + a_3 \cdot r(n) + a_4 \quad \dots\dots\dots (33)$$

を用いる。ここに、 $QI(n)$ は第 (n) 期の流入量、 $r(n)$ は降雨量である。Table 2は、得られた回帰式の係数であり、 $a_4 = 0$ とした。算定された流入量と需要量 (水道用水と灌漑用水) および維持流量をもとに、年間の総目標放流量と年平均目標放流量も求めると次のようになる。すなわち、

年間総流入量： 約 574 ($\times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$) (年平均流入量 18.2 m^3/s)

年間総目標放流量： 約 400 ($\times 10^6 \text{ m}^3/\text{y}$) (年平均目標放流量 12.7 m^3/s)

となった、この結果、河川利用率は約 70% と高い利用率になっていることがわかる。

Table 2. Identified coefficients of linear regression functions

Month	$QI(n-1)$ a_1	$r(n-1)$ a_2	$r(n)$ a_3
4	0.5	0.01	0.3
5	0.5	0.01	0.4
6	0.5	0.01	0.4
7	0.4	0.01	0.3
8	0.6	0.01	0.4
9	0.7	0.01	0.4
10	0.5	0.01	0.5
11	0.5	0.01	0.5
12	0.7	0.01	0.3
1	0.9	0.01	0.1
2	0.9	0.01	0.1
3	0.6	0.01	0.3

(4) 目標貯水量と基準渇水年

目標貯水量とは、平年降雨量、つまり平年流入量が期待できるという仮定のもとで、年間を通して目標放流を続けた場合のダム貯水量を表している。Fig. 2 に目標貯水量推移曲線を示す。上段の図における棒グラフは各期の平均流入量、点線は各期の目標放流量、実線は計画上の放流量を表す。下段の図における細い実線は、各期の制限貯水量であり、太い実線が各期の目標貯水量を表わしている。貯水池操作の前提条件として、1カ月前の5月中旬から1カ月間かけて常時満水貯水量から夏季制限貯水量まで貯水量を下げることにしているため、その間の制限貯水量を図のように直線的に減少させてある。この仮想ダムでは、夏季は7月末から8月頭を除いて比較的流入量が多く、夏季制限貯水量のために無効放流が多くなっている。一方、冬季は、流入量が目標放流量を

わずかながら下回る月がかなり続くため、 $600 \times 10^4 m^3$ を少し割るほど貯水量が低下する。従って、本ダムは冬季の少雨に対して弱い構造をもっていると推測できる。

何ら制限なく通年目標放流が可能であるような降雨を想定し、これを基準渇水年と呼ぶ。5月～10月(多雨期)は平年降雨の80%, 11月～4月(少雨期)は平年降雨の97%でもって基準渇水年の降雨とすると、年間の総降雨量は平年時の約85%となる。基準渇水として一般的な、10年に一度生起するような少

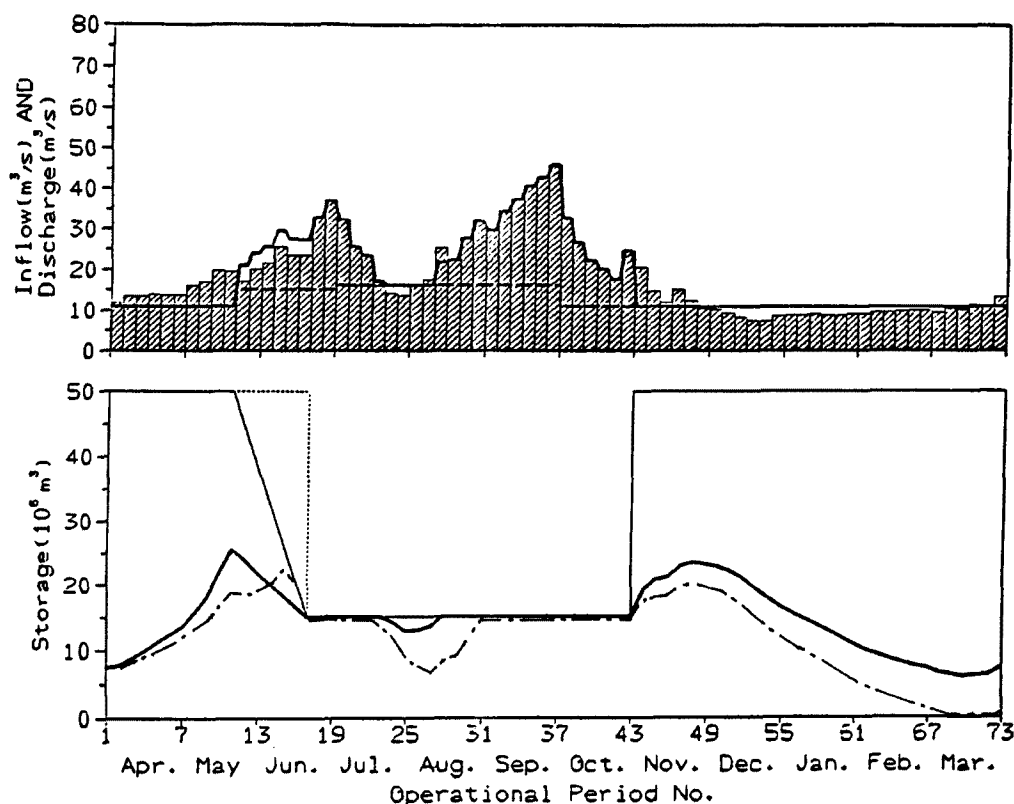


Fig. 2. Target storage and controlled sequences against design drought.

雨の年総降雨量比が 80 ～ 90% 程度であることを考えると、ほぼ妥当な値といえる。**Fig. 2** の一点鎖線は、基準渇水年に対して年間を通じ目標放流を実行した場合の推移を示している。点線は目標貯水量曲線である。図より、第 70 期期首に貯水量が約 $25 \times 10^4 m^3$ とほぼ底をつくことが解る。

4.2 ファジイ制御による貯水量レベルの算定

現在（第 n 期期首）貯水量の目標貯水量に対する比率（現在貯水量比率 PSR ; Present Storage Ratio）および前期（第 $(n-1)$ 期）からの貯水量比率変化量（ DSR ; Difference Storage Ratio）から、現在貯水量レベル（ PSL ; Present Storage Level）を推論するために、ファジイ制御理論³⁾を導入しよう。ファジイ制御における前件部変数および後件部変数は次のようになる。

〈前件部変数〉

$$PSR = S(n)/S_0(n), (0 \leq PSR) \dots\dots\dots (34)$$

$$DSR = S(n)/S_0(n) - S(n-1)/S_0(n-1), (-1 \leq DSR \leq 1) \dots\dots\dots (35)$$

〈後件部変数〉

$$PSL = SL(n), (0 \leq PSL \leq 5) \dots\dots\dots (36)$$

ここで、貯水量比率空間 PSR を次の 6 個のファジイ空間に分割する。すなわち、

- Not S : Not Small (少なくない)
- SS : Slightly Small (少し少ない)
- S : Small (少い)
- PS : Pretty Small (かなり少ない)
- VS : Very Small (とても少ない)
- ES : Extremely Small (極端に少ない)
- Normal : Normal (平年並)

である。また、貯水量変化量 DSR を次の 3 個のファジイ空間に分割する。

- N : Negative
- ZO : Zero
- P : Positive

後件部はファジイ空間を 6 個に分割し、それぞれラベルを「0 ぐらい」、「1 ぐらい」、…、「5 ぐらい」とする。**Table 3** は作成された制御規則である。表中には、現在が平年並の貯水量であっても、前期から比べて減少傾向にあるときはレベル 1 ぐらい、とみなす規則を R_{15} としてつけ加えている。**Fig. 3** は、各ファジイ変数のメンバーシップ関数であり、 PSR は、次のパラメーター p によるファジイ適応制御で更新されていく変数である。

Table 3. Fuzzy control rules on storage level

No.	Control rules
R_1	if PSR is Not S, then PSL is <u>0</u>
R_2	if PSR is SS and DRS is P, then PSL is <u>0</u>
R_3	if PSR is SS and DSR is ZO, then PSL is <u>1</u>
R_4	if PSR is SS and DSR is N, then PSL is <u>2</u>
R_5	if PSR is S and DSR is P, then PSL is <u>1</u>
R_6	if PSR is S and DSR is ZO, then PSL is <u>2</u>
R_7	if PSR is S and DSR is N, then PSL is <u>3</u>
R_8	if PSR is PS and DSR is P, then PSL is <u>2</u>
R_9	if PSR is PS and DSR is ZO, then PSL is <u>3</u>
R_{10}	if PSR is PS and DSR is N, then PSL is <u>4</u>
R_{11}	if PSR is VS and DSR is P, then PSL is <u>3</u>
R_{12}	if PSR is VS and DSR is ZO, then PSL is <u>4</u>
R_{13}	if PSR is VS and DSR is N, then PSL is <u>5</u>
R_{14}	if PSR is ES, then PSL is <u>5</u>
R_{15}	if PSR is Normal and DSR is N, then PSL is <u>1</u>

$$p = \{(0.7 \times DD(n) + MD_{min}) \times T(n)\} / S_0(n) \times 100, \quad (0 < p < 100) \quad (37)$$

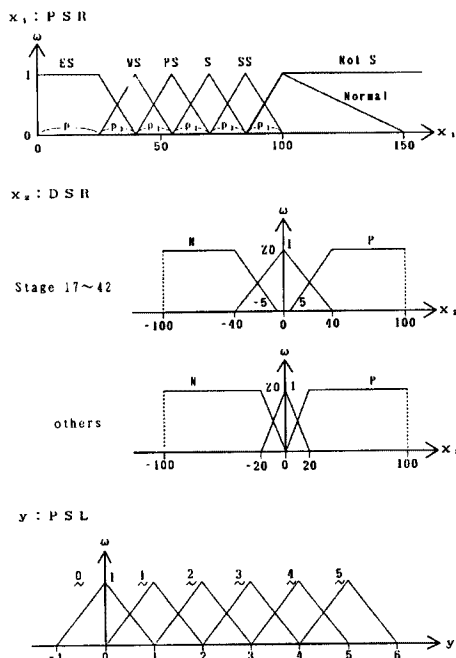


Fig. 3. Membership functions on storage level.

〈後件部変数〉

$DDL P$ (Desirable Drought Level Parameter), $-1.4 \leq DDL P \leq 1.4$

- NB : Negative Big (大きく下げる)
- NM : Negative Medium (中位下げる)
- NS : Negative Small (少し下げる)
- ZO : ZeroPretty Small (変更しない)
- PS : Positive Small (少し上げる)
- PM : Positive Medium (中位上げる)
- PB : Positive Big (大きく上げる)

前件部の第1変数 (x_1) を INF①で算定された現在貯水量レベル PSL と $DL(n-1)$ との差とする。いま、 $DL(n-1)$ を PDL (Present Drought Level) とおくと、

〈共通制御規則の前件部変数〉

$$x_1 = PSL - PDL \quad (-5 \leq x_1 \leq 5) \quad (39)$$

- NB : Negative Big (差が負で大きい)
- NM : Negative Medium (差が負で中程度)
- NS : Negative Small (差が負で小さい)
- ZO : ZeroPretty Small (差がない)
- PS : Positive Small (差が正で小さい)
- PM : Positive Medium (差が正で中程度)
- PB : Positive Big (差が正で大きい)

となる。Table 4 はこのような推論規則である。Fig. 4 は前件部第1変数と後件部変数のメンバーシップ関数である。 x_1 では、早期対策実施にスムーズに移行するため、最も渇水発生の危険が高い夏季およ

ここに、 p は今期の目標貯水量に対する30%制限時の最小放流量比(%)を意味している。但し、30%制限というのは、非常事態の1歩手前の段階である。 p_1 は、 $100-p$ の値を5分割することによってメンバーシップ関数を決定するものである。ラベルが *Normal* のメンバーシップ関数は、貯水比率が100%まではラベル *Not S* と同一とし、100%以上では、150%で「平年並」としての適合度が0となるとしている。7月と8月(19~30期)においては、需要量が多いのに対して流入量が小さいため、安全側をとって $100-p$ を6分割し、 p にこの分割量を加えた値

$$p + (100-p)/6 = (100+5p)/6 \quad (38)$$

を「極端に少ない」レベルに置き換えて追加した。

4.3 渇水対策レベルの変更希望度

後件部変数は渇水対策レベルの変更希望度 $DDL P$ (Desirable Drought Level Parameter) とし、 $[-1.4, 1.4]$ の区間を以下に示すようなラベルを持つ7個のファジイ空間に分割する。

び冬季の期間で、貯水量レベルと渇水対策レベルの差が負である場合の許容範囲を広げたメンバーシップ関数となっている。前期の渇水対策レベル別の規則は、その前件部変数が中・長期予報から得られる将来流入量情報を用い、次のように定めることができる。

〈レベル別制御規則の前件部変数〉

x_2 : AVSR (Average Storage Ratio at the last of this month)

x_3 : MISR (Minimum Storage Ratio at the last of this month)

x_4 : MASR (Maximum Storage Ratio at the last of this month)

x_5 : FPTP (Future Precipitation Trend Parameter)

x_6 : AVCP (Average Critical Storage Parameter of this month)

x_7 : MICP (Minimum Critical Storage Parameter of this month)

$x_2 \sim x_4$ は、前期の渇水対策レベルを月末まで維持した時の、平均・最小・最大の各流入量系列一放流操作に対する月末の貯水量比率である。 x_5 は、3カ月予報による将来降雨動向指標である。 x_6 および x_7 は、ともに「前期の渇水対策レベルを継続した場合に、月末までに最も貯水量が危険な状況となるとき貯水量状態を表わす指標」であり、最大流入量系列を除く2つの予測流入量系列に対して求められる。月末までの各期において、平均流入量系列については、

$$S_{ave}(n+k)/\{(e \cdot DD(n+k) + f \cdot MD_{min}) \times T(n+k)\}, k=0, 1, \dots, (6-j) \dots \dots \dots (40)$$

$$e=1, f=MD/MD_{min} \text{ for } DL(n-1)=0$$

$$e=1, f=1 \text{ for } DL(n-1)=1$$

$$e=0.9, f=1 \text{ for } DL(n-1)=2$$

$$e=0.8, f=1 \text{ for } DL(n-1)=3$$

$$e=0.7, f=1 \text{ for } DL(n-1)=4 \text{ or } 5$$

で求められる。また、最小流入量系列については、

$$S_{min}(n+k)/\{(0.5 \cdot DD(n+k) + MD_{min}) \times T(n+k)\}, k=0, 1, \dots, (6-j) \dots \dots \dots (41)$$

を計算し、その中の最小値をもって、最も危険な場合の貯水量状態を表わす指標とする。 x_6 および x_7 は、目標放流量が月末まで一定かつ各操作期の期間も一定(5日間)ならば、月末までの最小貯水量となる操作期について、上2式を算定すればよい。

Fig. 5 に、これら前件部第2～7変数のメンバーシップ関数を示す。 $x_2 \sim x_4$ では、INF①でのパラメーター p と同様な考えをもって適応制御型とする。具体的には、まず、

$$p' = \{(0.7 \times DD(6 \times i + 1) + MD_{min}) \times T(6 \times i + 1)\} / S_0(6 \times i + 1) \times 100 \dots \dots \dots (42)$$

を計算する。ここで、 i は現在の月(第 i 月)であるから、 p' は来月第1半旬の目標貯水量に対する30%

Table 4. Common rules on wishes of changing level for drought control

No.	Control rule
R ₁	if PSL-PDL is ZO, then DDLP is ZO
R ₂	if PSL-PDL is NS, then DDLP is NS
R ₃	if PSL-PDL is NM, then DDLP is NM
R ₄	if PSL-PDL is NB, then DDLP is NB
R ₅	if PSL-PDL is PS, then DDLP is PS
R ₆	if PSL-PDL is PM, then DDLP is PM
R ₇	if PSL-PDL is PB, then DDLP is PB

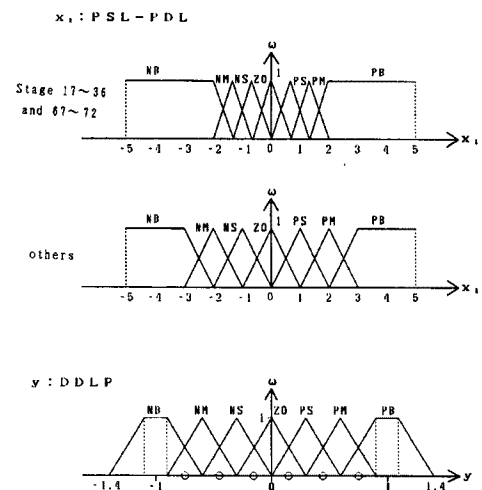


Fig. 4. Membership functions of x_1 and consequent on wishes of changing the control level.

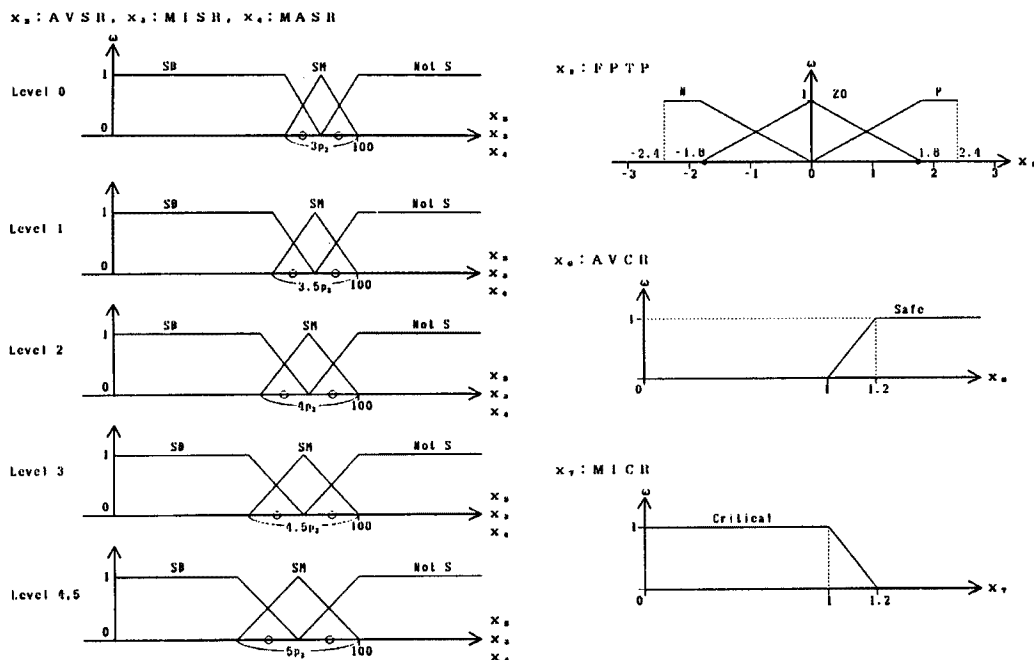


Fig. 5. Membership functions of $x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7$ on wishes of changing the control level.

制限時の最小放流量の来月第1半旬分の比となる。 $100 - p'$ を等分割した値を p_2 とする。分割方法としては、

$$\begin{aligned}
 p_2 &= (100 - p')M: M=4 \text{ for } n=1, 2 \\
 &M=6 \text{ for } n=17 \sim 30 \\
 &M=4 \text{ for } n=63, 64, 65, 66 \\
 &M=3 \text{ for } n=67, 68, 69, 70 \\
 &M=4 \text{ for } n=71, 72 \\
 &M=5 \text{ for 上記以外の操作期} \dots\dots\dots (43)
 \end{aligned}$$

を用いる。 $x_2 \sim x_4$ では、ファジイ空間を「少ない度合いが大きい (SB)」、「少ない度合いが中程度 (SM)」、「少なくない (Not S)」の単純な3個しか分割しないため、1つのファジイ空間で大きな領域をカバーさせる必要がある。そこで、各メンバーシップ関数の形状が、前期の渇水対策レベルによって異なってくることを考慮し、ラベル SM の形状を渇水対策レベルによってラベル SS から PS の間で変化させることにした。Table 5 は前期渇水対策レベルのレベル別規則の一例 (レベル 4) である。

Table 5. Control rules against changing level 4 for drought control

No.	Control rule
R _{8,4}	if AVSR is Not S, AVCP is Safe, then DDLP is NB
R _{9,4}	if AVSR is SM, AVCP is Safe, then DDLP is NB
R _{10,4}	if AVSR is SB, then DDLP is PB
R _{11,4}	if MISR is SB, then DDLP is PM
R _{12,4}	if MASR is Not S, AVCP is Safe, then DDLP is NM
R _{13,4}	if MASR is SM, AVCP is Safe, then DDLP is ZO
R _{14,4}	if MASR is SB, then DDLP is PB
R _{15,4}	if AVSR is SM, FPTP is N, then DDLP is PS
R _{16,4}	if FPTP is ZO, then DDLP is ZO
R _{17,4}	if FPTP is P, then DDLP is NS
R _{18,4}	if MICP is Critical, then DDLP is PB

4.4 ファジィ制御による想定流入量系列の作成

想定流入量は、予想以上の厳しい少雨が生じた場合のことを考えて、予め放流量を少なめにしたいといった基準となる流入量であり、前件部および後件部変数を以下のように定義する。

〈前件部変数〉

PSL (4.2で算定される現在貯水量レベル)

FPTP (3カ月予報による将来降雨動向指標)

〈後件部変数〉

RMIN (Ratio of Minimum Inflow, 最小流入量系列に対する重み)

Fig. 6 は各変数のメンバーシップ関数である。後件部の RMIN は、図のような5個のラベルをもつファジィ空間に分割される。このメンバーシップ関数に対しては、DDL_PとDL(n-1) によるパラメーター p_3 による適応制御を採用している。図中の p_3 は、

$$p_3 = 0.2/5 \times (DL(n-1) + DDL_P) + 1.0$$

..... (44)

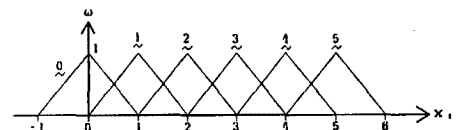
として求められる値であり、前期渇水対策レベルとレベル変更希望度の和が大きいほど（制限強化を希望）各メンバーシップ関数が右側に移動する構造となっている。この場合の最終推論結果は、重心も右側に移動するため、より最小流入量系列に近い値を推定することになる。Table 6 はその制御規則である。推論された値をもとに月末までの想定流入量系列が算定され、放流量解析過程 (OPT②) を適用することによって、今期の決定放流量および来期以降の予定放流量が求められる。

5. 実時間操作システムの適用と考察

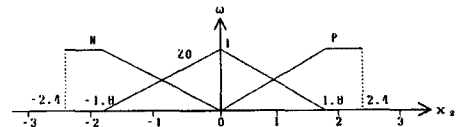
5.1 流域の概要と初期条件

シミュレーションを実施するにあたって、初期条件を以下のように設定する。操作開始時期（第1期）を4月1日（第1月第1半旬）、3月の最終半旬を第0期とした。また、 $r(0) = 21.9(\text{mm})$, $QI(0) = 13.3(\text{m}^3/\text{s})$, $DL(0) = 0$ (通常放流), $S(0) = 6.170(\times$

x_1 : PSL



x_2 : FPTP



y : RMIN

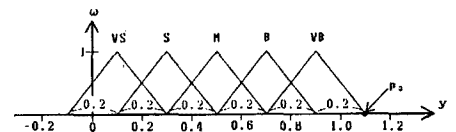


Fig. 6. Membership functions on calculation of inflow sequence.

Table 6. Fuzzy control rules on calculated inflow sequence

No.	Control rule
R ₁	if PSL is 0 and FPTP is P, then RMIN is VS
R ₂	if PSL is 0 and FPTP is ZO, then RMIN is S
R ₃	if PSL is 0 and FPTP is N, then RMIN is M
R ₄	if PSL is 1 and FPTP is P, then RMIN is S
R ₅	if PSL is 1 and FPTP is ZO, then RMIN is M
R ₆	if PSL is 1 and FPTP is N, then RMIN is B
R ₇	if PSL is 2 and FPTP is P, then RMIN is M
R ₈	if PSL is 2 and FPTP is ZO, then RMIN is B
R ₉	if PSL is 2 and FPTP is N, then RMIN is VB
R ₁₀	if PSL is 3 and FPTP is P, then RMIN is M
R ₁₁	if PSL is 3 and FPTP is ZO, then RMIN is B
R ₁₂	if PSL is 3 and FPTP is N, then RMIN is VB
R ₁₃	if PSL is 4 and FPTP is P, then RMIN is M
R ₁₄	if PSL is 4 and FPTP is ZO, then RMIN is B
R ₁₅	if PSL is 4 and FPTP is N, then RMIN is VB
R ₁₆	if PSL is 5 and FPTP is P, then RMIN is M
R ₁₇	if PSL is 5 and FPTP is ZO, then RMIN is B
R ₁₈	if PSL is 5 and FPTP is N, then RMIN is VB

(P, ZO, N)=(Positive, Zero, Negative)

(VS, S, M, B, VB)=(Very Small, Small, Medium, Big, Very Big)

10^6 m^3), $S_0(0) = 6.170(\times 10^6 \text{ m}^3)$, $S(1) = 7.362(\times 10^6 \text{ m}^3)$, $S_0(1) = 7.362(\times 10^6 \text{ m}^3)$, および, 3 カ月
 予報は個別に設定した。各期の需要量, 維持流量, 貯水量の被害は,
 〈需要量被害〉

$$DDAM(n) = \frac{\{DD(n) - RDD(n)\}^2}{DD(n)} \cdot T(n) \cdot \frac{1}{24 \times 3600} \dots\dots\dots (45)$$

〈維持流量被害〉

$$MDAM(n) = \frac{\{MD(n) - RMD(n)\}^2}{MD(n)} \cdot T(n) \cdot \frac{1}{24 \times 3600} \dots\dots\dots (46)$$

〈貯水量被害〉

$$SDAM(n) = \frac{\{S_0(n) - S(n)\}^2}{S_0(n)} \cdot T(n) \cdot \frac{10^6}{24 \times 3600} \dots\dots\dots (47)$$

のように定義した。平常年降雨における操作シミュレーションでは, 年間を通じて渇水対策レベルは0つまり目標放流を確保しており, 他の被害も生じていなかった。また, 制御規則 R_{15} による影響と思われるが, 13 ~ 18 期にかけて若干, 貯水量レベルの上昇が見受けられた。

5.2 基準渇水年での操作シミュレーション

過去に基準渇水年に相当する流況が一度も生起していないので, 予報データは全て「平年並」として与えた。操作結果の比較のため, (i) 安全側にたたない見込み操作で貯水池が空になるまで目標放流を続け, 空になったら, 流入量をそのまま放流する無節水放流形式①, (ii) 将来を考えずに放流し, 現在の貯水量以上の放流を不可能とする無節水放流化式②, (iii) 将来の被害を予期して放流量を制限する節水放流形式③, を同時に適用する。3 方式に共通の条件として,

a) 放流量が目標値を確保できなくなったり, 最大可能放流量 (つまり, 放流可能な最大の放流量であり, 安全側か否かによって異なる。これを $ABLD$ とおく。) が渇水対策レベル2での最低放流量 ($0.9 \times DD + MD_{min}$) よりも大きい時は,

$$RDD = 0.9 \cdot DD, RMD = ABLD - RDD \dots\dots\dots (48)$$

とする。更に, $ABLD$ が $0.9 \times DD + MD_{min}$ より小さくかつ渇水対策レベル3での最低放流量 ($0.8 \times DD + MD_{min}$) よりも大きい時は

$$RDD = 0.8 \cdot DD, RMD = ABLD - RDD \dots\dots\dots (49)$$

とする。また $ABLD$ が $0.8 \times DD + MD_{min}$ より小さくかつ渇水対策レベル4での最低放流量 ($0.7 \times DD + MD_{min}$) よりも大きい時は,

$$RDD = 0.7 \cdot DD, RMD = ABLD - RDD \dots\dots\dots (50)$$

とする。

b) $ABLD$ が渇水対策レベル5に入らざるを得ない場合 ($ABLD < 0.7 \times DD + MD_{min}$) においては, 最大可能貯水量が50%制限時の需要量と確保維持流量の和 ($0.5 \times DD + MD_{min}$) 以上なら,

$$RDD = 0.5 \cdot DD, RMD = ABLD - RDD \dots\dots\dots (51)$$

とし, これ未満で, $ABLD \geq MD_{min}$ なら

$$RMD = MD_{min}, RDD = ABLD - RMD \dots\dots\dots (52)$$

とする。 $ABLD$ が確保維持流量よりも小さい時は

$$RMD = RDD = ABLD/2 \dots\dots\dots (53)$$

とする, などを規定しておく。

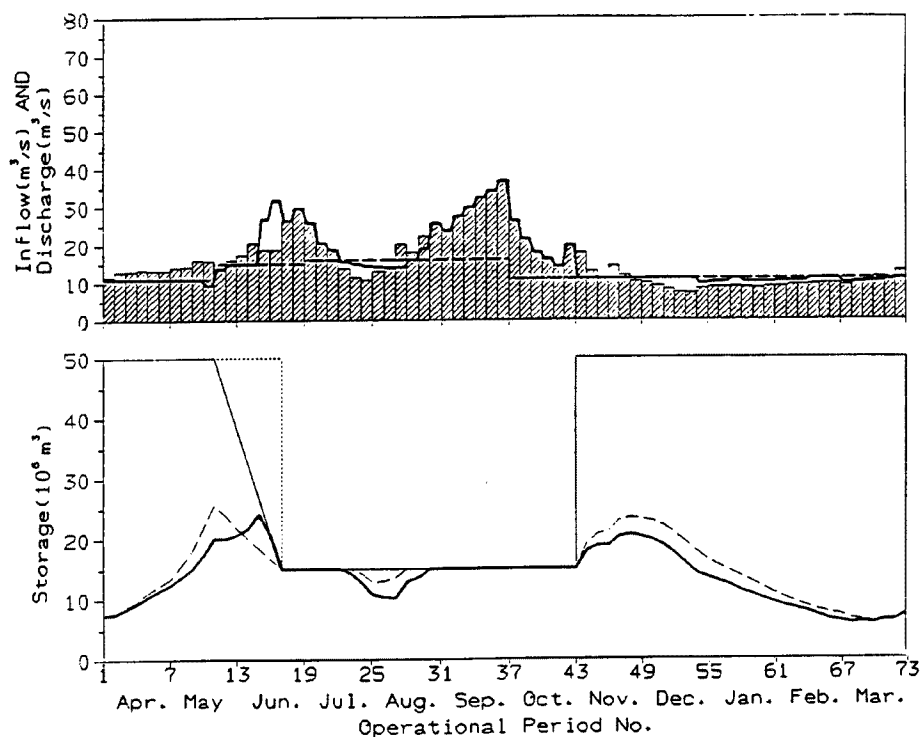


Fig. 7. Controlled sequences of release and storage against the design drought.

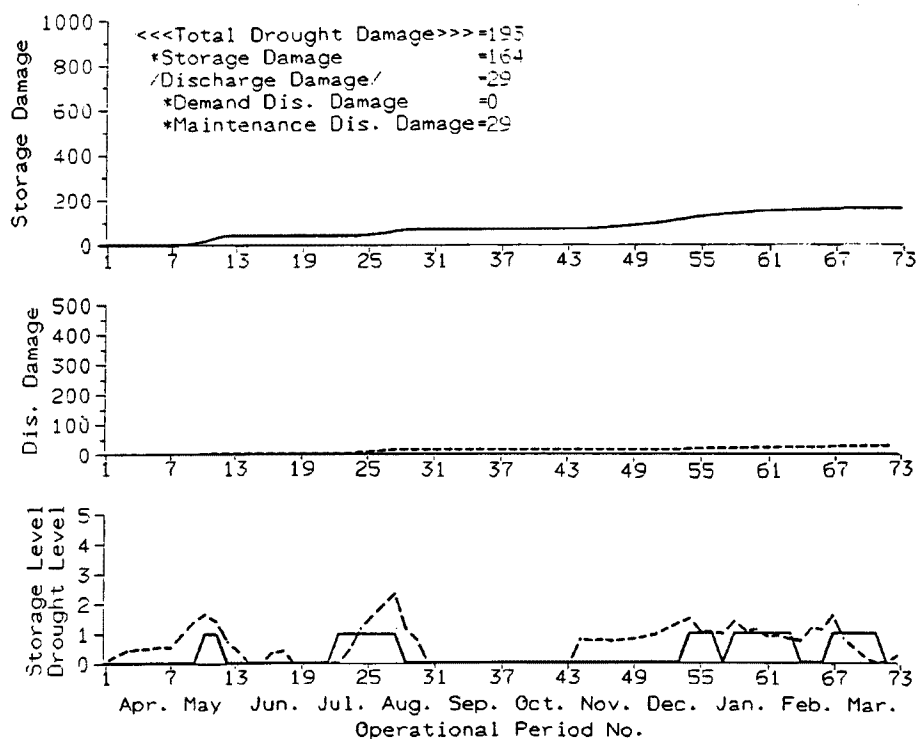


Fig. 8. Accumulated damages of drought control and storage level against the design drought.

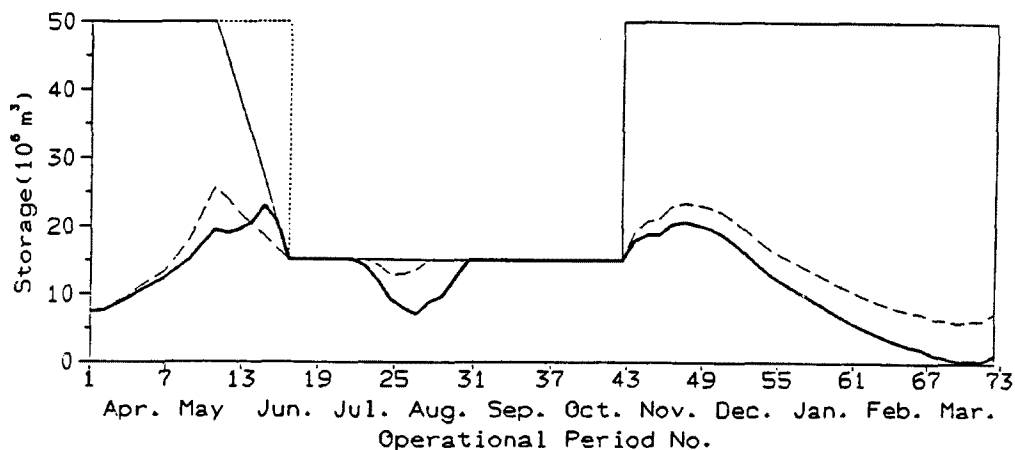


Fig. 9. Controlled sequence of storage volume with non-control ①.

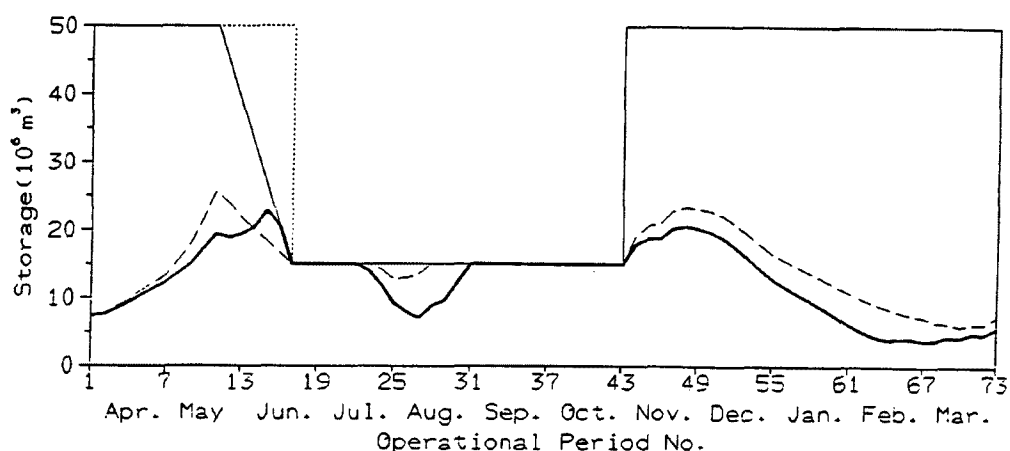


Fig. 10. Controlled sequence of storage volume with non-control ②.

基準渇水年に対する操作結果および渇水対策・貯水量両レベルと各累積被害は Figs. 7, 8 に示すとおりである。操作結果によると、需要者への実被害はないものの、5月と7～8月にかけて、および、冬季のかなりの間で渇水対策レベル1（警戒体制）に入っている。また、貯水量推移曲線・貯水量レベルの推移状況をみてもわかるように、年間を通じて目標貯水量からの大幅な乖離がほとんどみうけられず、操作終了時には目標貯水量を確保している。無節水放流①の場合では、第25期前後（8月頭前後）に貯水量がかなり低下し、更に3月では貯水量がほぼ空になっている（Fig. 9 参照）。一方、無節水放流②では、安全側にたっているために貯水量が低下した2月に入って急に渇水対策実施に踏み切っている（Fig. 10 参照）。しかし、幾分対策開始が遅れたために、第67期（3月第1半旬）のみではあるが、渇水対策レベル2（第1次取水制限段階）となる。3月は、流入量の回復もともなって、操作終了時の貯水量は無節水放流①と比べてかなりの貯水量を貯えている。また、節水放流形式③は、第26, 27期に第1次取水制限に入るものの以後の操作は、本操作システムほど貯水量が滑らかに推移していないものの、安定した操作が実行されている（Fig. 11 参照）。

次に、年間累積被害に関しては、本操作システムおよび節水放流では、放流量被害が比較的少ないのに対し、無節水放流では目標放流を目指す余り、貯水量にかなりの被害が生じ総被害でも圧倒的に大きい値となっている。しかし、本操作システムの総被害より節水放流の被害のほうが小さくなっている。この理由としては、(i) 予報を利用する本操作システムでは、基準渇水年の降雨が目標放流を続けた場合には貯

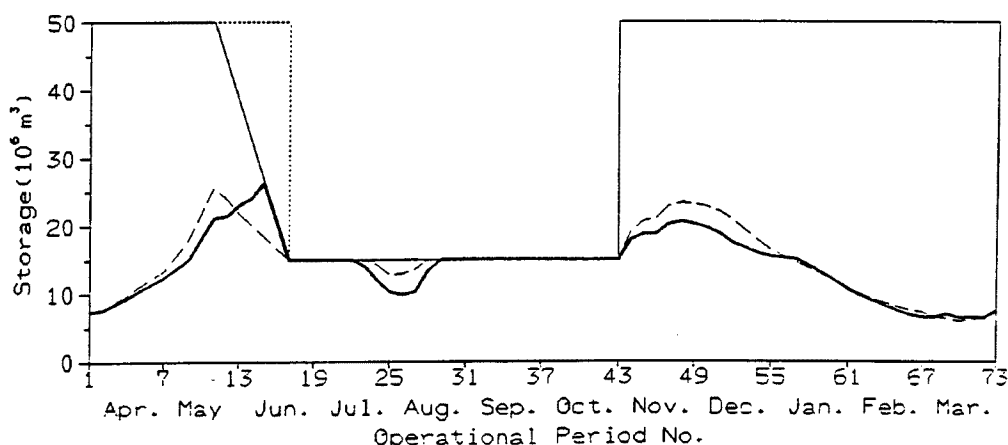


Fig. 11. Controlled sequence of storage volume with drought control ③.

水量が空同然となるような降雨にもかかわらず、予報自体は平年時と同じ全て「平年並」であるため、早期対策の実施に入る判断がなかなか行なわれない。(ii) 貯水量が低下してきた場合では、将来の降雨量が「平年並」と予測されているため、過剰な対策を避けるために対策実施の判断が下されにくい、といった点が挙げられよう。

5.3 代表的渇水年での操作シミュレーション

近畿地方で実際に生じた昭和48、53年の異常渇水について、当時気象庁（大阪管区気象台）より発表された予報を用いた操作を実施しよう。ただし、週間予報は週2回発表の週間予報のデータしかないので、各年の実際の降雨量から予報を逆変換することによって、全て正確な予報として与えている。

(1) 昭和48年渇水の場合

当時の予報は5段階区分で「やや少ない」「かなり多い」というように予報されていたが、「かなり」の予報がだされた例がないことおよび現在が3段階区分であることを考慮し、このような予報を単に、「少ない」と判定した。予報によっては「平年並やや少ない」という予報もあるが、これらは全て極端な予報の方を採用する。

Figs. 12, 13に、実際予報を与えた場合の操作結果および渇水対策・貯水量両レベル、渇水被害を示す。完全予報（実況値から逆変換して全て正確な予報としたもの）の結果と比べて、渇水対策・貯水量レベルは、多少あるレベルに入る時期およびそれを維持する期間数に違いがある程度で、やはりほとんど同一の操作となっている。渇水被害についてもほぼ同程度の結果である。実際の予報が「多い」と予報され実況が全く反対の「少ない」となる渇水発生に対して、最も危険な場合が6月上旬の1回しかなく、たいへん良好な成果が得られている。また、冬季の渇水が非常に厳しかったため、貯水量レベルの低下が常に先行し、完全予報においてでさえ、貯水量レベルの差をなくすような操作が精一杯であったこともあげられる。

(2) 昭和53年渇水の場合

Figs. 14, 15は、昭和53年渇水での操作結果である。貯水量推移曲線をみる限り、次の3つの特徴がわかる。すなわち、

- 1) 4月から5月にかけての貯水量の減少
- 2) 9月中頃の貯水量の極小化
- 3) 1月始め頃から3月頭における目標貯水量曲線との乖離

1) は4月での操作、2) は9月初頭での操作、3) は1月初頭の操作によるものと思われる。第32期（9月第2半旬）の判断事例を Figs. 16, 17, 18に示す。第31期の渇水対策レベルはレベル2の第1次

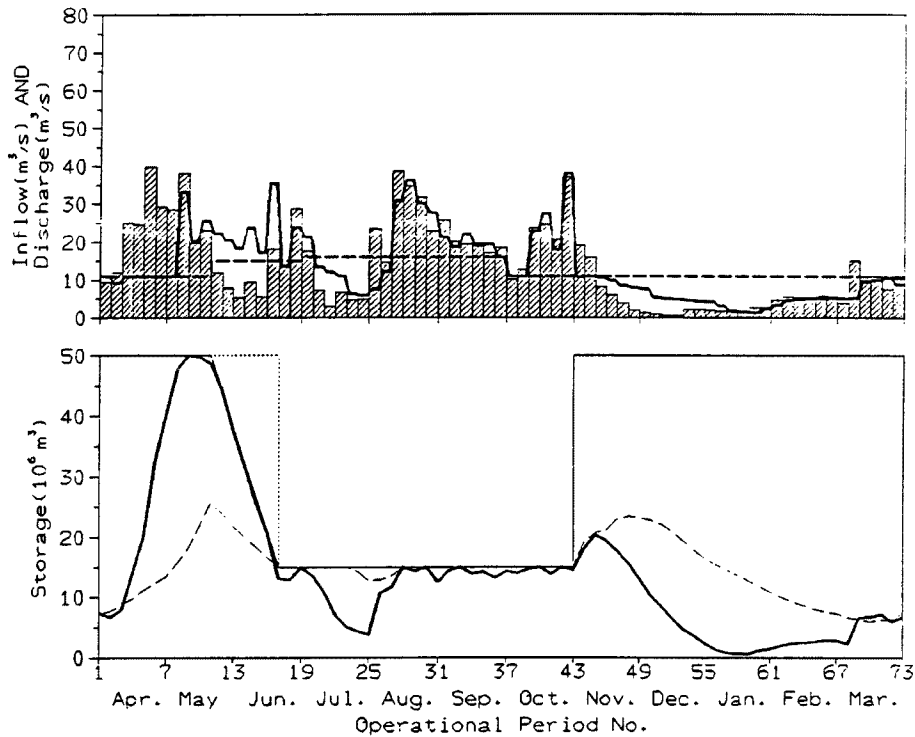


Fig. 12. Controlled results against 1973 drought condition.

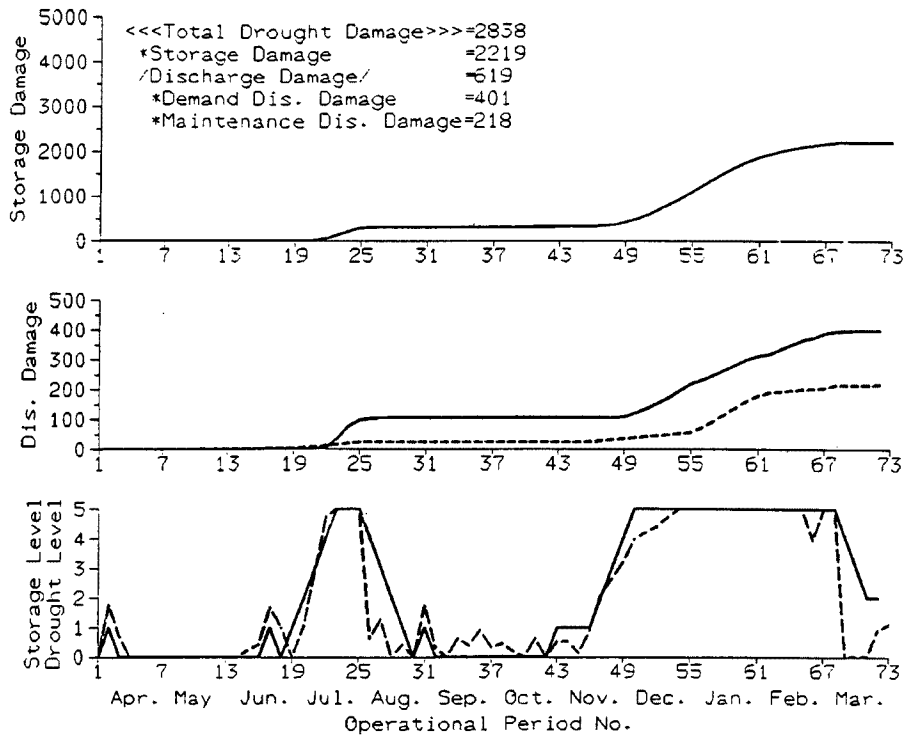


Fig. 13. Accumulated damages of drought control and storage level against 1973 drought condition.

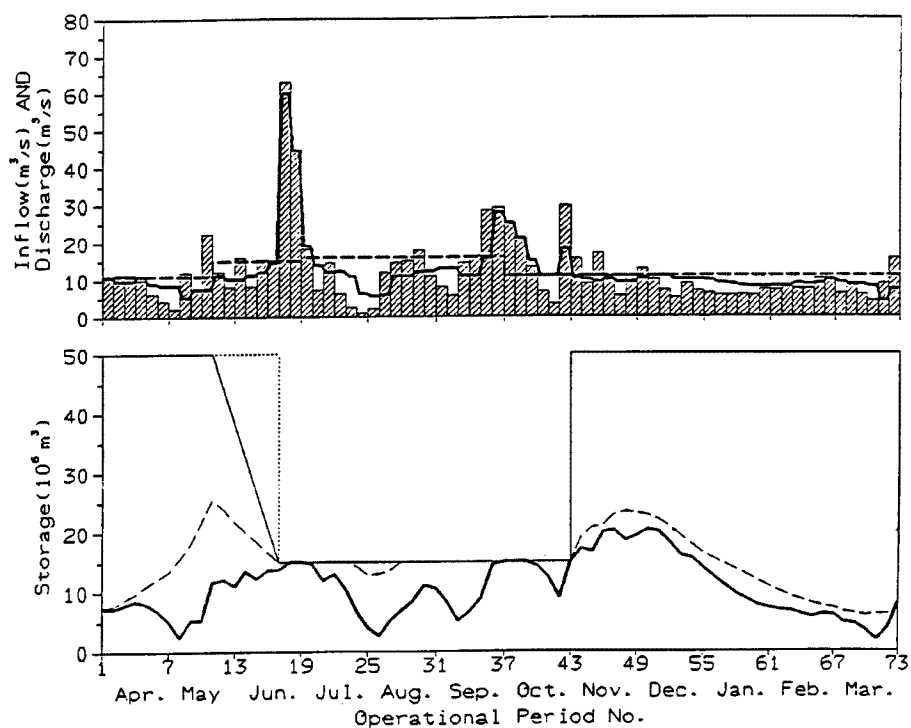


Fig. 14. Controlled results against 1978 drought condition.

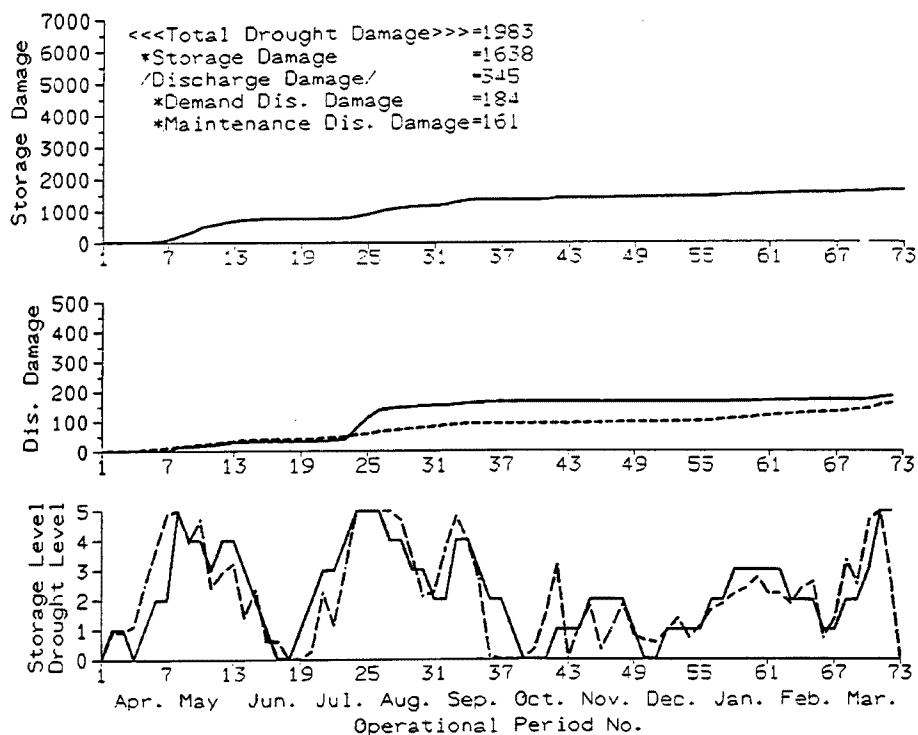


Fig. 15. Accumulated damages of drought control and storage level against 1978 drought condition.

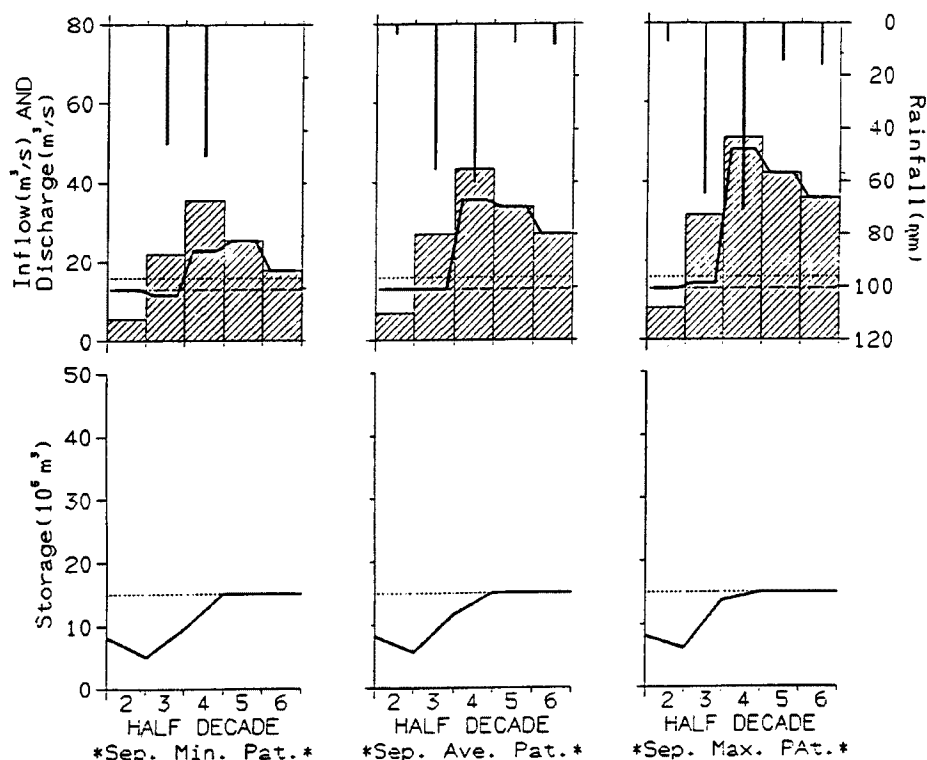


Fig. 16. Optimizing process ① on minimum, average and maximum inflow sequences at 32nd control stage.

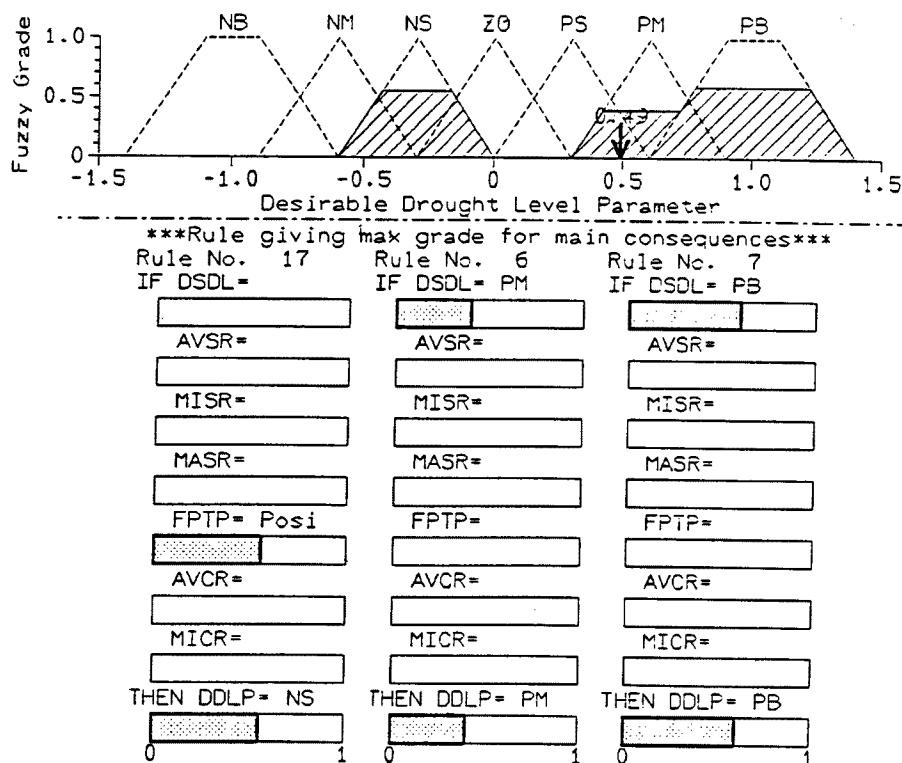


Fig. 17. Fuzzy control ② at 32nd control stage.

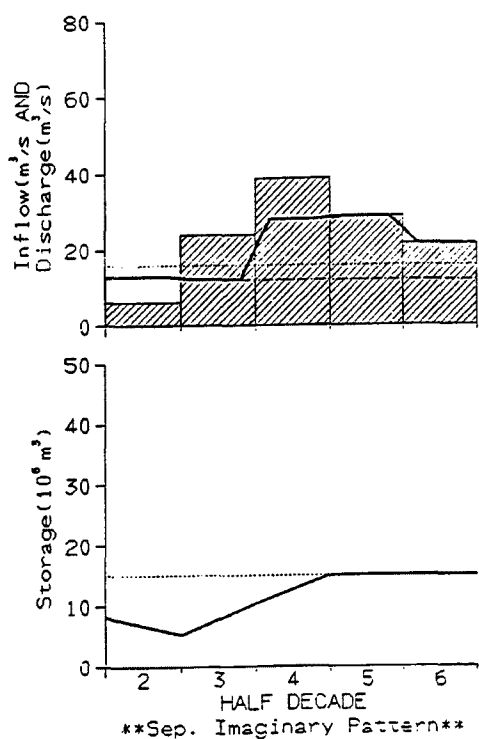


Fig. 18. Optimizing process ② on calculated inflow sequence at 32nd control stage.

取水制限であり、3系列の想定流入量を見ると、9月の1カ月予報における中旬の予報が、実際が「平年並」に対して「多い」となっているため、実際予報では、最小系列でも9月下旬には目標貯水量まで回復できると予測されている。ファジィ推論においては現在の貯水量レベルが5に近いのに対し、前期の渇水対策レベルがレベル2とその差が大きいため、制限を強化するような判断がされたことがわかる。完全予報の場合と比べて、当該期では、決定放流量そのものにはさほど違いはないものの、特に予定放流量系列でかなり異なる値が得られている。貯水量が、わずかながら完全予報より実際予報のほうが少なくなるのは、こうした想定流入量による決定放流量の微妙な違いによるものと思われる。

6. 結 語

本研究では、近年、大きな社会問題となっている渇水問題に対し、ダム管理者からの要求である渇水時の社会的合理性を持った早期対策の実施を検討したものである。気象庁より発表される中・長期予報を用い、ダム貯水池容量の有効利用を達成しうる実時間操作システムを構築した。また、従来の最適性に基づくダム操作方式を考慮

しつつも、将来の降雨に関する不確定な情報に対応を示すため、判断部にファジィ理論を導入した。ここで、本研究で得られた成果を記すと、以下ようになる。

- (1) 精度の不十分さゆえ有効に利用されていない中・長期予報を導入した実時間操作システムを構築した。
- (2) 中・長期予報の曖昧性を考慮するため、ダム操作での主要な判断部にファジィ理論を導入し、予報的・中・非的中に柔軟な対応を示すことができた。
- (3) 適用の普遍性を明らかにするため、任意のダムにおいても構築可能、かつ、単純な制御規則を作成した。

また、今後の課題としては以下のことが挙げられよう。

- (1) メンバシップ関数設定に対し、過去の実績などからパラメーターを同定するなどして、根拠あるメンバシップ関数を設定する必要がある。
- (2) 実管理上、より現実的な前件部および後件部変数の設定を探る。
- (3) 中・長期予報における重複する予報の取扱い方法を考察する。
- (4) ファジィ制御規則作成の際、ある程度専門的な内容を含んだ規則の作成を試みる。そのため、実管理者らとのコミュニケーションをはかるなどして情報の収集に努める。

今後、鋭意研究が継続され検討課題の解決がなされることにより、本研究が渇水発生防止のための1判断情報として実際のダム管理において利用されることを期待して、本研究の結びとする。

参 考 文 献

- 1) 池淵周一：水資源システムにおける安全度概念の定式・定量化と計画論への応用に関する総合的

- 研究, 昭和 61・62 年度科学研究費補助金 (総合研究(A)) 研究成果報告書, 1988, pp. 128 - 136.
- 2) 新井邦夫・丸山信雄: ベイズ決定問題としての渇水予測—長期気象予測の活用—, 第 23 回水理講演会講演論文集, 1972, pp. 269 - 273.
- 3) 菅野道夫: ファジィ制御, 日刊工業新聞社, 1988, pp. 74 - 90.