

確率分布をもった型紙による渇水期貯水池群操作

Drought-Time Multiple-Reservoir Management
with Stochastic Inflow Patterns

株日本水道コンサルタント 正員 〇辻 本 善 博
同 上 正員 萩 原 良 巳
同 上 正員 中 川 芳 一

1. はじめに

近年における都市用水をはじめとした水需要量の急激な増大と、これに対する新規水資源開発の困難性から、河川水のより効率的な利用をはかる貯水池群の統合操作が必要とされてきた。貯水池群の統合操作の目標としては、河川流量の安定供給をはかり、利用可能水量を増大させるとともに、利水システムの安全度の向上、すなわち渇水時の水不足による被害を減少させることが挙げられる。このことから、利水用貯水池群の統合操作の問題は、渇水被害を最小とするような貯水池放流量の空間的・時間的配分を決定する最適制御問題として扱えられる。この問題に対してはDP（ダイナミック・プログラミング）の適用が考えられ、近年では、水資源システムの大規模化に伴う計算上の次元や演算時間の増大に対処するため、DPとLPの合理的融合を図ったDCL手法¹⁾の開発等新しい研究がなされてきている。

ところで、これらの最適化手法を貯水池運用に有効に利用するためには、将来の貯水池流入量の的確な予測・設定が肝要となるが、降水現象や流出現象等の不確定性から、その決定論的な予測は非常に困難である。このため、いくつかの代表的な渇水流況パターンを予測流入量系列として設定する型紙方式²⁾や各期の流入量を確率変数として取り扱い、この確率分布を各期毎に独立に過去のデータより推定する方法³⁾⁴⁾が用いられることが多い。しかし、前者は確率的な変動の考慮がなされていないこと、また、後者は時系列的な取り扱いがないことから、いずれの流入量予測設定法にも問題点が残される。

本稿では、この2つの方法の問題点を解消する1つの方法として、過去の降水量時系列をその時間変化パターンの類似性に注目して分類し、各グループごとに“確率分布をもった型紙”すなわち、貯水池流入量の確率分布系列を設定するという方法を提示する。

また、この確率分布をもった型紙のもとで貯水池群の最適操作（最適目標放流量系列）を決定するモデルは、確率DPにより定式化した。

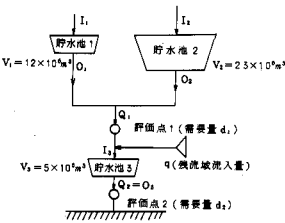
そして、モデル流域で、確率分布をもった型紙を設定し、設定した各型紙のもとで各貯水池の最適操作ルールを決定するとともに、このルールを用いて、大きな渇水を生じた年度の実流入量に対処した運用計算を行ない、これらの結果を検討する。

2. 貯水池群最適操作モデルの確率DPによる定式化

ここでは、まず、貯水池をもつ河川の利水システムのモデル化を行ない、このシステムを貯水池による流況の確率制御システムとして認識する。ついで、渇水の被害を表わす評価関数を設定し、この評価関数のもとでの最適制御過程を決定する問題を、確率制御システムの多段決定過程の取り扱いに適した手法である確率DPにより定式化する。そして、この問題の解法のアロリズムを述べる。

2-1. モデルの定式化；図-1に示すように、貯水池1と貯水池2が並列に位置し、これらと貯水池3が直列の位置関係にある流域を考察の対象とする。また同図に示した評価地点1、2のみで取水するものとする。このモデルを貯水池による流況制御システムとして扱えば、入力変数は貯水池1流入量 $I_1(t)$ 、貯水池2流入量 $I_2(t)$ および残流域流入量 $q(t)$ であり、これらは確率入力変数である。また状態変数は貯水量 $S_1(t)$ 、 $S_2(t)$ 、 $S_3(t)$ 、決定変数は貯水池目標放流量 $G_1(t)$ 、 $G_2(t)$ 、 $G_3(t)$ 、出力変数は貯

図-1 流域モデル



水池実放流量 $O_i(t)$ 、 $O_2(t)$ 、 $O_3(t)$ および評価地点流量 $Q_1(t)$ 、 $Q_2(t)$ となる。

渇水期貯水池運用計画への確率 DP の適用に際しては、貯水池流入量、残流域流入量の確率変動を考慮し第 t 期以後終端までの渇水被害の和の期待値 $f_t(S_1, S_2, S_3)$ を最小化するように第 t 期貯水池目標放流量を決定するものとし、DP の最適性原理より以下の定式化が行なえる。

$$f_t(S_1, S_2, S_3) = \min_{G_i} \sum \{ R(Q(t)) + f_{t+1}(S'_1, S'_2, S'_3) \} P_t(\Pi) \quad (1)$$

$$G(t) = (G_1(t), G_2(t)), Q(t) = (Q_1(t), Q_2(t)), \Pi = (I_1, I_2, q) \quad (2)$$

ここに、 $R(Q(t))$ は第 t 期渇水被害関数値、 $P_t(\Pi)$ は第 t 期における入力変数 Π の確率分布である。

渇水被害関数としては 社会的な渇水被害を示す総合特性値をよく説明していると考えられる⁵⁾ 不足流量の 2 乗和を採用するものとする。

$$R(Q(t)) = \sum_{j=1}^2 (d_j(t) - Q_j(t))^2 \quad (d_j > Q_j \text{ なる } j \text{ についての和}) \quad (3)$$

また、第 t 期貯水量 S_i ($i = 1, 2, 3$) と第 $t+1$ 期貯水量 S'_i ($i = 1, 2, 3$) の関係および貯水池放流ルールは、以下のものを設定している。すなわち、まず貯水池における第 t 期の水量連続式は以下の式である。

$$S'_i = S_i + I_i - O_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (4)$$

つぎに、実放流量 O_i は、貯水量 S_i 、流入量 I_i 、貯水容量 V_i および目標放流量 G_i によって決まるものとし、この放流ルール $O_i = \varphi(S_i, I_i, V_i, G_i)$ を以下のように定式化する。

$$O_i = \begin{cases} G_i & \text{if } 0 \leq \theta_i \leq V_i \\ I_i & \text{if } \theta_i < 0 \\ G_i + (\theta_i - V_i) & \text{if } \theta_i > V_i \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (5)$$

ここで、 θ_i は、目標放流量を実際に放流するときの仮想貯水量であり、以下の式で求められる。

$$\theta_i = S_i + I_i - G_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (6)$$

すなわち、この放流ルールは貯水池が空のときには、放流量 = 流入量、そうでないときには、放流量 = 目標放流量、また満杯のときにはオーバーフローし無効放流が生じるものであり、線形決定ルールと呼ばれる。

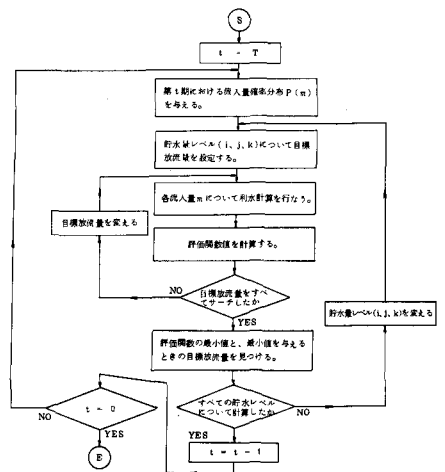
以上が確率 DP によるシステムモデルの定式化であるが、このモデルによると各期において、各貯水状態に応じて最適目標放流量を逐次決定していることとなり、この決定の際には、最終期までの流入量の確率分布および需要水量の情報を用いていることとなる。このことから、ここで定式化したシステムモデルは、流況予測を用いたフィードフォワード制御による確率制御システムであると言えよう。

2-2. 解法のアロリズム；(1)式のような形の関数方程式を解くには、後進型 DP の方法が有効であり、これによると、各変数を離散化し、数値計算により最終期から出発して 1 期ごとに $f_t(S_1, S_2, S_3)$ を計算し、

(1)式の右辺の値を最小とするように目標放流量を決定していくこととなる。変数の離散化の際には、その離散化単位、すなわちここでは単位水量として妥当なもので選ぶ必要がある。単位水量を小さくすれば解の精度は向上するが次元数が増加し、貯水池の数が多い場合には必要な記憶容量や演算時間は飛躍的に増大する。他方、単位水量を大きくしすぎると実用的な解が得られないことも多い。このことから、制御時間単位の大きさも自ずと制約を受け、実用的に見て妥当なものを選ぶ必要がある。なお本稿では時間単位は旬、単位水量は $10^6 m^3$ としている。

つぎに、モデルの解法のアロリズムについては、任意の第 t 期において、貯水池の任意の状態 (S_1, S_2, S_3) における最適目標放流量 (G_1^*, G_2^*, G_3^*) を決定する補給ルール求解の部分を図-2. に示すにとどめる。

図-2. アロリズム



3. 確率分布をもった型紙の設定

ここでは、図-1に示したような貯水池群をもつA川流域をモデル流域として、この流域で大きな渇水が生じやすい7月～9月の渇水期において、確率分布をもった型紙の設定を行なう。利水用貯水池群の運用計算の単位期間としては通常、月、旬、半月などが用いられることが多いが、ここでは対象期間が渇水期であること、および2-2で述べた水量の離散化単位を考慮して、単位期間は旬とする。このため、7月上旬から9月下旬までの9旬を対象として、貯水池流入量の確率分布の系列を設定することとなる。なお、貯水池旬流入量は貯水池上流域の旬降水量より算定されるものと考え、貯水池流入量の確率分布の推定は、旬降水量の確率分布を推定し、これを変換することにより行なった。

3-1 降水量の地域相関分析；モデル流域としたA川流域には、13ヶ所の雨量観測所が存在し、これらの観測所間の旬降水量による相関は、流域が小さい（流域面積約850km²）こともあり、きわめて高い。（相関係数は0.74以上となる。）ところで、2.では、貯水池1、2の流入量 I_1 、 I_2 、および残流域流入量 q は3変数確率分布 $P_1(I_1, I_2, q)$ を形成するものとして貯水池群最適操作モデルの定式化を行なった。しかし、各観測所の旬降水量間の相関がきわめて高いことより、 I_1 、 I_2 、 q の間の相関も高いことが予想される。そこで、確率DPの計算時間を短縮するためもあり、 I_2 、 q は I_1 の回帰式で表わすこととする。過去10年間の各流入量資料を用いて、 I_2 および q を目的変数とし I_1 を説明変数とする回帰分析を毎月（7～9月）ごとに行なった。その結果以下に示す回帰式が得られた。

$$\begin{aligned} 7月 \quad I_2 &= 1.41 I_1 + 0.9 (0.93), \quad q = 1.40 I_1 + 0.9 (0.59) \\ 8月 \quad I_2 &= 1.80 I_1 - 0.8 (0.94), \quad q = 3.20 I_1 - 3.0 (0.85) \\ 9月 \quad I_2 &= 1.20 I_1 + 0.1 (0.96), \quad q = 1.10 I_1 + 1.0 (0.72) \end{aligned} \quad (7)$$

ここに、（ ）内の数値は相関係数である。こうして、(7)式の回帰式を用いることにより、確率入力変数は貯水池1流入量 I_1 のみとなり、その確率分布 $P_1(I_1)$ は3-3で設定することとする。

3-2 旬降水量時系列パターンの分析；ここでは、貯水池1上流域の旬降水量時系列を、その時間変化パターンの類似性に注目して分類する。そのため、各年度の旬降水量時系列をサンプル（サンプル数59）とし、各旬の降水量を特性値（特性値数9）として主成分分析⁶⁾を行なった。

表-1 固有値、寄与率、因子負荷量

項目 \ 主成分	Z_1	Z_2	Z_3
固有値 (2)	1.78	1.32	1.23
累積寄与率	0.200	0.547	0.484
因子負荷量	7月上旬	0.442	0.508
	7月中旬	0.120	-0.217
	7月下旬	0.554	-0.294
	8月上旬	-0.234	0.230
	8月中旬	-0.556	0.007
	8月下旬	-0.583	-0.320
	9月上旬	0.502	-0.285
	9月中旬	0.255	-0.749
	9月下旬	-0.507	-0.555

その結果、表-1に示すような固有値、寄与率、因子負荷量を示す主成分が抽出された。これらの主成分のうち比較的寄与率の大きい第1、第2主成分（ Z_1, Z_2 ）の因子得点の正負によりサンプルをⅠ～Ⅳの4群に分類し、各群の平均旬降水量時系列を図-3に示す。ここに、各群の降水量時系列パターンの特徴は以下のである。

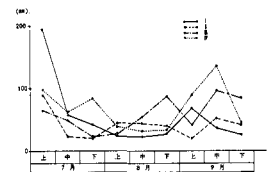
Ⅰ群（ $Z_1 > 0, Z_2 > 0$ ）… 7月上旬の降水量は非常に多いが、8月、9月の降水量は9月上旬を除き少ない。

Ⅱ群（ $Z_1 < 0, Z_2 > 0$ ）… 時間変化が小さく、7月中旬と9月上旬で降水量が少ないのを除き平均的。

Ⅲ群（ $Z_1 < 0, Z_2 < 0$ ）… 7月から8月上旬にかけての降水量は少ないが、8月下旬および9月中、下旬の降水量が多い。

Ⅳ群（ $Z_1 > 0, Z_2 < 0$ ）… 7月と9月上、中旬、とくに9月中旬の降水量が多い。他は平均的。

図-3 平均旬降水量時系列



3-3 旬降水量の確率分布の推定；3-2で分類した4パターン（群）の各パターンに含まれるサンプル（旬降水量時系列）数は、それぞれ16、13、16、14であり、これらのサンプルをもとに、各旬ごとに、降水量の確率分布を推定する。パターンごとに各旬の降水量の頻度分布を描くと、分布形としては、対数正規分布が適合するようであった。そこで、以下では、旬降水量の確率分布を対数正規分布とみなし、各旬ごとに岩井法により定数 b 、 a 、 r_0 を推定した。推定結果を表-2に示す。

なお、bはすべてのパターン、旬で0であった。

ここに、b、a、 r_0 は、旬降水量をrとして、

$$\xi = a \cdot \log(r+b)/(r_0+b) \quad (8)$$

で定義される ξ が、 $N(0, 1)$ の正規分布をずらしたときの変換定数である。

3-4. 確率分布をもった型紙の設定；3-3.で推定したパターンごとの旬降水量確率分布系列を、貯水池流入量の確率分布系列に変換することにより、確率分布をもった型紙を設定することとする。

降水量を入力として流出量（貯水池流入量）を推定する（長期）流出モデルには、タンクモデルをはじめとして種々のものがあるが、ここでは、単位期間が旬ということもあり、流出特性を流出率で代表させることとする。

すなわち、貯水池旬流入量Iは、貯水池上流域旬降水量をrとして、

$$I = A \cdot f \cdot r \quad (9)$$

で与えられるものとした。ここに、A；集水面積、f；流出率である。この(9)式を用いて、表-2にその分布定数を示したパターンごとの各旬降水量の確率分布を貯水池流入量の確率分布 $P(I_1)$ に変換した。こうして、7月上旬から9月下旬までの各旬の貯水池流入量の確率分布の系列が、3-2で分類した4つの各パターンについて得られた。これらを、それぞれ、確率分布をもった型紙I~IVとし、図-4に示す。

4. 最適操作モデルの適用

ここでは、2.で定式化した貯水池群最適操作モデルを、A川流域の3貯水池（図-1参照）に適用し、3.で設定した4種の確率分布をもった型紙（以下、単に型紙と記す）のもとでの各貯水池の最適操作ルールを算定するとともに、平均的実流入量系列および大きな渇水の生じた年度での実流入量系列に対し、この最適操作ルールによる貯水池の運用計算を行ない、それらの結果を検討する。

4-1 演算条件および入力データ；前述したように、モデルの運用期間は7~9月の3ヶ月（9旬）とし、操作の時間単位は旬とする。このため、水量の離散化単位は少なくとも評価地点での旬需要量の最小値程度は必要であり、また、2.で述べたように、貯水池での離散化が大型電算機の容量を越えないことが要求される。以上のことから、ここでは、評価地点の旬需要量および貯水池容量が $V_1 = 1.2 \times 10^6 m^3$ 、 $V_2 = 2.3 \times 10^6 m^3$ 、 $V_3 = 5 \times 10^6 m^3$ であることを考慮して、水量の離散化単位 ΔS を $10^6 m^3$ と設定した。この離散化単位によると、貯水池1、2、3の容量はそれぞれ整数で12、23、5となる。つぎに、各流入量に関しても同一の単位で離散化を行なう。すなわち、旬流入量がI m^3 であったとすると、

$$(m - \frac{1}{2}) \cdot \Delta S < I \leq (m + \frac{1}{2}) \cdot \Delta S \quad (10)$$

を満たす整数mを離散化された流入量とする。

以上の演算条件を表-3にまとめる。 表-4 評価地点需要量（ $\times 10^6 m^3$ ）

また、評価地点1、2における各期の需要量 $d_i(t)$ を表-4に示す。

4-2. 最適操作ルールの決定；2.で定

式化した貯水池群最適操作モデルは、入力すなわち貯水池流入量を確率変数としたため、最終期までの最適目標放流量系列を一意的に定めるものではなく、各期t（ $t = 1, \dots, T$ ）における貯水池群の貯水状態 $S(t) = (S_1(t), S_2(t), S_3(t))$ のそれぞれについて各貯水池の最適目標放流量 $G(t) = (G_1(t), G_2(t), G_3(t))$

表-2 パターン別旬降水量分布定数

パターン	パラメータ	7月			8月			9月		
		上	中	下	上	中	下	上	中	下
I	a	375	082	081	126	126	106	204	117	117
	r_0	1801	205	162	118	116	175	522	208	146
II	a	131	081	080	131	107	246	099	251	143
	r_0	573	78	75	259	216	328	110	439	265
III	a	221	073	077	083	152	185	155	298	189
	r_0	526	173	54	103	355	667	296	836	643
IV	a	146	140	094	214	087	124	192	316	090
	r_0	675	407	360	140	685	202	699	1185	196

図-4 確率分布をもった型紙

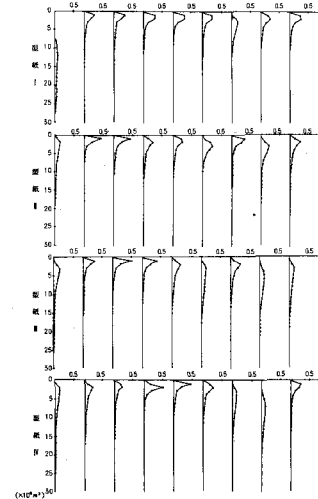


表-3 演算条件

計算条件	値
操作時間単位	旬
水量離散化単位	$100万 m^3$
運用期間	7~9月

を決定するモデルである。すなわち、 t 期の最適目標放流量 $G(t)$ は、その期の各貯水池貯水量 $S(t)$ の全ての組み合わせの各々についてひとつずつ決定されるものである。

貯水池1流入量 I_1 の確率分布 $P_1(I_1)$ を型紙Ⅰ～Ⅳとした場合のそれぞれについて、最適操作ルール、すなわち各期の貯水池群の貯水状態 $S(t)$ に応じた最適目標放流量 $G(t)$ を算定した結果を表-5、図-5、図-6に示す。

表-5(1)(2)には、型紙Ⅰのもとでの8月中旬の貯水池1、表-5 型紙Ⅰのもとでの G_1 、 G_2 （8月中旬）の2の目標放流量 G_1 、 G_2 を、貯水池1、2の各貯水状態について示した。なお貯水池3の貯水量 S_3 は(1)では満水、(2)では0としている。

目標放流量 G_1 、 G_2 は、各貯水池貯水量 S_1 、 S_2 、 S_3 により大きく変わるが、全般的にみて、貯水池容量の大きい貯水池2の目標放流量 G_2 は、貯水池1の目標放流量 G_1 よりも大きい。また、 G_1 は S_1 が大きくなるに従って増加するが、逆に S_2 、 S_3 が大きくなるに伴い小さくなる傾向があり、 G_2 は S_2 が大きくなるに従って増加するが、 S_1 、 S_3 に対してはその増加に伴い減少する傾向がみられる。

目標放流量 G_1 、 G_2 は、各貯水池貯水量 S_1 、 S_2 、 S_3 により大きく変わるが、全般的にみて、貯水池容量の大きい貯水池2の目標放流量 G_2 は、貯水池1の目標放流量 G_1 よりも大きい。また、 G_1 は S_1 が大きくなるに従って増加するが、逆に S_2 、 S_3 が大きくなるに伴い小さくなる傾向があり、 G_2 は S_2 が大きくなるに従って増加するが、 S_1 、 S_3 に対してはその増加に伴い減少する傾向がみられる。

なお、他の旬および型紙についても同様のことが言える。

図-5(1)、(2)には、各型紙のもとでの貯水池1および貯水池3の貯水状態を一定としたときの貯水池2貯水量 S_2 に応じた目標放流量 $G_2(t)$ を示し、また図-6(1)～(4)には、各型紙のもとでの $G_1(t)$ と $G_2(t)$ との和の系列を、4種類の貯水状態について示した。これらの図よの、型紙の違いによる目標放流量の相異を検討する。

目標放流量は、 S_1 、 S_2 、 S_3 が大きい場合は、型紙により大きく異なる。すなわち、 S_1 、 S_2 、 S_3 が全て満水の場合についてみると、 G_1 および G_1+G_2 とも、型紙Ⅰでは、8月および9月中、下旬で大きくなっており、それ以外の旬では0である。また、型紙Ⅱでは、7月中、下旬および8月下旬、9月上旬で、型紙Ⅲでは、7月下旬、8月上旬および9月上旬で、型紙Ⅳでは、8月で、 G_1 ならびに G_1+G_2 が大きい。このような目標放流量系列の変動を、図-4に示す型紙の貯水池流入量の確率分布系列と比較すると、各型紙について、流入量の確率分布が小さい方に偏っている旬の目標放流量が大きくなっている。これは、大きな流入量の期待できるときには、目標放流量を0としても（貯水位が満水のため）オーバーフローにより需要をまかなえるのに対し、小さな流入量しか期待できないときには、目標放流量を大きくして需要に対処する必要があるためと考えられる。一方、 S_1 、 S_2 、 S_3 が小さい場合には、目標放流量の型紙による差異は小さくなるとともに、旬間の変動も小さくなる。すなわち、極端に大きな貯水池流入量が期待でき、オーバーフローにより需要がまかなえる旬（型紙Ⅰの7月上旬、Ⅳの9月中旬）や、逆に、極端に小さな流入量しか期待できず、放流を行なえば以後の貯水池運用に支障をきたすような旬（型紙Ⅱの9月上旬、Ⅳの8月上、中旬）での目標放流量が小さく押えられる以外は、目立った変動がなくなる。このことより、

(1) ($S_3 = V_3$)

G_1	S_1											
	0	2	4	6	8	10	12					
0	0	1	2	2	4	5	5					
2	0	1	2	3	4	5	6					
4	0	1	2	2	2	5	5					
6	0	1	2	2	2	4	6					
8	0	1	1	1	4	5	6					
10	0	1	1	1	5	6	6					
12	0	0	1	1	1	1	6					
14	0	0	0	1	1	1	6					
16	0	0	1	1	1	1	6					
18	0	0	0	0	0	0	6					
20	0	0	0	0	0	0	5					
22	0	0	0	0	0	0	0					

(2) ($S_3 = 0$)

G_1	S_1											
	0	2	4	6	8	10	12					
0	0	0	0	0	0	0	0					
2	1	1	1	1	0	0	0					
4	2	2	2	2	2	2	2					
6	4	4	4	4	4	4	4					
8	4	4	4	4	4	2	2					
10	4	4	4	4	4	4	1					
12	4	4	4	4	4	5	1					
14	6	6	6	6	6	6	1					
16	6	6	6	6	6	6	2					
18	7	7	7	7	7	8	5					
20	7	7	7	7	7	8	5					
22	7	7	7	7	7	8	6					

図-5 貯水池2最適目標放流量

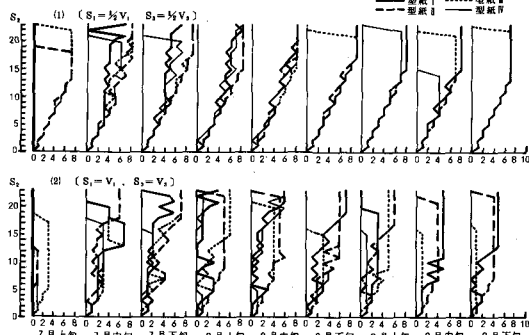
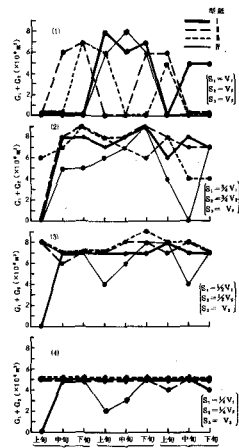


図-6 $G_1 + G_2$ の推移



各旬の流入量の確率分布の変動の小さい型紙Ⅱ、Ⅲでは、目標放流量も各旬間ではほとんど変化しない。

4-3. 貯水池群運用結果とその考察；4-2.で考察したように、貯水池群の最適操作ルールは、流入量の確率分布の系列としてどの型紙を用いるかにより大きく異なる。そこで、ここでは型紙の違いによる貯水池群運用結果の相異を検討するために、各型紙の平均流入量系列を実流入量系列とした場合の運用計算、および実際に大きな渇水を生じた年度の実流入量系列に対する運用計算を行なった。

表-6 評価関数値
(平均流入量系列)

まず、各型紙の平均流入量系列を実流入量系列とした場合の各々について、各型紙のもとでの操作ルールにより貯水池群の運用を行なった結果の評価関数値、すなわち、不足流量の2乗和を表-6に示す。

	操作ルール(型紙)	評価関数値			
		I	II	III	IV
実流入量系列	平均の場	1	5	71	52
	平均の場	22	0	26	50
	平均の場	71	1	40	95
平均の場	平均の場	10	1	0	10
	平均の場	70	2	2	51
平均の場	平均の場	9	80	27	1
	平均の場	58	80	27	1

注) 上段：初期に満水の場合
下段：" 平均位 "

これをみると、貯水池群の運用結果は、どの操作ルールを用いるかによって大きく異なり、実流入量系列と同じ型紙のもとでの操作ルールを用いた場合の評価関数値が、他の型紙のもとでの操作ルールを用いた場合に比べて著しく小さい。

つぎに、表-7に示すような、大きな渇水を生じた年度の実流入量系列

表-7 渇水年実流入量系列
($\times 10^6 \text{ m}^3$)

旬	7月	8月	9月
	上中下	上中下	上中下
流入量	1 0 0	0 0 2	2 4 1

に対して、型紙Ⅰ～Ⅳのもとでの貯水池群運用を行なった結果を、表-8

表-9に示す。表-8には、各貯水池の目標放流量系列および各評価地点

での不足水量を、また、表-9には評価関数値(不足水量2乗和)を示す。

表-8 目標放流量、不足水量
(渇水年実流入量系列)

項目	7月			8月			9月		
	上	中	下	上	中	下	上	中	下
目標放流量	0	0	0	4	1	1	5	4	1
貯水池1	0	0	0	0	4	4	2	3	3
貯水池2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池3	0	0	0	6	0	1	3	0	5
貯水池4	0	0	0	4	7	6	5	5	4
貯水池5	0	4	7	5	4	2	2	2	4
貯水池6	0	0	7	6	4	3	4	1	1
貯水池7	0	0	0	0	8	8	5	4	4
貯水池8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池13	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池14	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池15	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池16	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池17	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池18	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池19	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池21	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池22	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池23	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池25	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池26	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池27	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池28	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池29	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池30	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池31	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池32	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池33	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池34	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池35	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池36	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池37	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池38	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池39	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池40	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池41	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池42	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池43	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池44	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池45	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池46	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池47	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池48	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池49	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池51	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池52	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池53	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池54	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池55	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池56	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池57	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池58	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池59	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池61	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池62	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池63	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池64	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池65	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池66	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池67	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池68	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池69	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池70	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池71	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池72	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池73	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池74	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池75	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池76	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池77	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池78	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池79	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池80	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池81	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池82	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池83	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池84	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池85	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池86	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池87	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池88	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池89	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池90	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池91	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池92	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池93	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池94	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池95	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池96	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池97	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池98	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池99	0	0	0	0	0	0	0	0	0
貯水池100	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表-9 評価関数値
(渇水年実流入量系列)

操作ルール(型紙)	I	II	III	IV
評価関数値	157	86	162	164

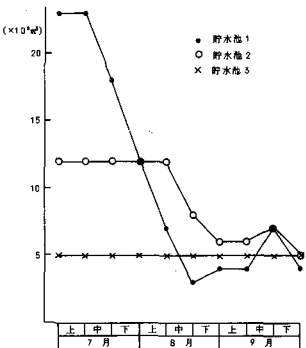
これをみると、実流入量系列は、7月から8月中旬にかけてきわめて小

さいにもかかわらず、型紙Ⅰ、Ⅲ、Ⅳのルールでは、7月の目標放流量が

小さく押えられており、大きな不足水量が生じている。これに対し、この期間に小さな流

図-7 各貯水量の変化
(渇水年実流入量系列)

入量しか期待しない型紙Ⅱのルールでは、目標放流量が大きくとられ、不足水量は小さい。その結果、8月、9月の不足水量は、他の型紙のルールに較べやや大きいものの、不足水量が各旬に分散され、評価関数値ははるかに小さくなっている。



最後に、型紙Ⅱのルールを用いたときの各貯水池貯水量の変化を、図-7に示す。

5. おわりに

渇水時の水不足による被害の減少をはかる貯水池群の統合操作の問題は、評価関数としての渇水被害を最小とするような貯水池放流量の空間的・時間的配分を決定する最適制御問題として扱えられるが、このとき将来の貯水池流入量系列としてどのようなものを予測・設定するかが大きな問題となる。このため、本稿では、確率分布をもった型紙として、時系列特性を考慮した流入量の確率分布系列を設定することを考えた。

まず2.で、渇水期の利水用貯水池群の最適操作ルールを、渇水時の被害の最小化という評価基準のもとで決定するモデルを確率DPにより定式化した。ついで3.では、モデル流域の過去の降水量時系列を、その時間変化パターンの類似性に注目して分類し、各グループごとに各期の降水量の確率分布を推定することにより、確率分布をもった型紙の設定を行ない、4.では、これらの型紙のもとでの最適操作ルールを決定するとともに、実流入量系列に対し、この最適操作ルールによる貯水池群の運用計算を行なった。

この結果、どの型紙を用いるか、すなわち、将来の流入量の確率分布系列をどのようなものとして設定するかにより、操作ルールや運用結果が大きく異なり、将来流入量系列の予測・設定の重要性が確認された。

〔参考文献〕1) 竹内；土木学会論文報告集222号 2) 西原；洪水予報、全日本建設技術協会

3) 中村；土木研究所土木技術資料18-8 4) 萩原・中川・辻本；土木学会第33回年講Ⅱ-37

5) 萩原・中川・森；土木学会第33回年講Ⅳ-140 6) たとえば奥野他；多変量解析法、日科技連