

渇水流況の分類 — 利水用貯水池の管理を対象として —

Classification of Low Flow Sequences for Management of Reservoir

神戸大学工学部 正 員 神 田 徹
銭 高 組(株) 正 員 岡 本 剛 士

1. ま え が き

利水用貯水池の管理において、貯水池流入量としての降水量あるいは流量に関する長期予測の精度向上が望まれることは言うまでもないが、それには今後の予測技術の進歩をもってしてもおのずと限界があろう。そこで、過去の水文資料を有効利用する一方法として、本研究では貯水池管理の対象となる渇水流況をいくつかのグループに分類し、その分類と将来の水文情報をもとにして貯水池操作方式を定める方法について基礎的検討を行った。すなわち、次のような貯水池管理を考える。

①過去の複数組の渇水流況を、時系列特性量の大きさによっていくつかの群（クラス）に分ける。

②将来流況に関する情報として時系列特性量が予知し得たとき、その将来流況は①で分類したいずれのクラスに属するかを定める。

③そのクラス（の流況）に対して最適な操作方式を以後の貯水池管理に適用する。

つまり、将来流況に関する詳細な予測は困難であるが、代表的な時系列特性量についてはかなりの精度で予測可能であることを前提として、そのような情報を生かすには過去の渇水流況をいくつかのクラスに分類しておく方が実用上有効であろうという考え方に立っている。本研究はこの立場から、上記①の事項に関して渇水流況の分類法を示すとともに、その分類が貯水池操作に対して有効であるための特性量の種類、クラス分けの数などを明らかにしようとするものである。

2. 貯水池システムの諸元

対象とした貯水池システムは利水を目的とした単一貯水池で、その諸元は次の通りである。

貯水池操作期間：有限な一定期間の貯水池操作とし、以下のシミュレーションでは総期間は36期間である。操作期間初めの貯水量（初期貯水量）は満杯状態とする。

貯水池流入量：1次の自己回帰過程（平均値 $\mu=10.0$ 、標準偏差 $\sigma=4.0$ 、自己相関係数 $\rho=0.7$ の正規分布）に従う流量時系列である。ただし、ここで用いたのは、全期間を通じて目標放流量を完全に放流することが可能でないような流量時系列（以下、渇水流況とよぶ）780組である。

貯水池放流量：以下のシミュレーションでは幾通りかの放流の仕方をを用いるが、最も基本となる放流方式は、各渇水流況に対して下記の目的関数（渇水被害関数） P を最小にするような放流方式である^{1),2)}。この方式による放流量系列を最適放流ルールとよぶことにする。

$$P = \sum_{t=1}^M [R_c - \min(R_c, R_t)]^2 / R_c \rightarrow \min \quad (1)$$

ここに、 R_t は第 t 期間の放流量、 R_c は全期間にわたり一定の目標放流量： $R_c=9.0$ 、 $M=36$ 。一方、貯水池が空になり放流不能にならない限り、目標放流量を継続する方式を無節水放流方式とよぶ。

貯水池容量： $V=45.0$

3. 渇水流況の特性量

渇水流況を分類するために用いる時系列特性量として、表-1に示す8種類の量を選んだ。ここに、渇水終了時期、渇水開始時期、渇水継続期間および最大累加不足水量は次のように定めた量である。

渇水終了時期（ t_d ）：渇水流況に対して貯水池満杯状態から無節水放流を行って貯水池が空になった

後、再び貯水量が回復を始める時点を渇水終了時期とする。

渇水開始時期 (t_0) : 同様に無節水放流を行って貯水池が空である時期から前の時刻へ戻り、満杯状態の直後の時期を渇水開始時期とする。

渇水継続時期 (d) : $t_0 \sim t_d$ の間の期間である (critical period³⁾ にほぼ相当する)。

最大累加不足水量 (V_d) : 空になることのない半無限容量をもつ貯水池を考え、初期貯水量を満杯状態として無節水放流を行った場合、全期間中で最も水位が低下したときの (満杯状態からの) 貯水量変化である。

図-1 に、この方法で t_d , t_0 , d を決定

した例を示す。上段の図は流入量 (実線) と目標放流量 (破線) を示し、下段は貯水量変化を示す。右の図では第36期でも貯水池は空であり、それから操作開始時期に戻るまで満杯状態があらわれないので全期間が渇水継続期間となる。

4. 渇水流況の分類法

上記の特性量, 例えば渇水継続期間の長さを数段階に区分し, そのいずれのクラスに属するかによって渇水流況を数グループに分ける。継続期間の区分数によって当然クラスの構成が相異し, また特性量の種類を変えることによって渇水流況のクラス構成は変化する。本研究では各特性量につき区分数を 3 ~ 9 の範囲で変え, また特性

量 1 種類による分類 (1 次元分類) の他に 2 ~ 4 種類の特性量を組合せた分類 (多次元分類) について検討した。

このように時系列特性量の種類および全区分で異なるクラス分けのうちいずれが適切な分類であるかを判定するために, 以下の適切度評価法を用いる。基本的な考え方は, 1 つのクラスに属する流況群が貯水池操作に関して同類性を有するか否かによってクラス分けの適切度を判定することである。つまり, 1 つの流況に対して最適な放流ルールを, 同じクラスに属する他のいずれの流況に適用しても貯水池操作がうまくいくかどうかを判定のための指標に用いる。その手順を以下に示す。

(1) 渇水流況群をある特性量 (1 個または複数個) の値によって n 個のクラス (全区分 n) に区分したとき, 第 j クラスに属する渇水流況が m 組あるとする。この渇水流況を I_k^j で表わす ($j=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, m$)。

(2) 流入量 I_k^j に対して無節水放流を行った場合の渇水被害を P_k^j とする。

(3) I_k^j に対して (1) 式の渇水被害関数を最小化するような最適放流量系列を求め (DP で容易に計算できる), これを最適放流ルール Q_k^j とする。この Q_k^j を I_k^j に適用したときの渇水被害を P_{kk}^j とする ($\ell=k$ のとき, すなわち P_{kk}^j が最適放流ルールによる最小渇水被害である)。

P_k^j と P_{kk}^j を用いて次の 2 つの指標 α, β を設定した。

表-1 特性量の種類

特性量	記号
渇水終了時期	t_d
渇水開始時期	t_0
渇水継続期間	d
渇水期間の流入量平均	$\bar{Q}_d$
全期間の流入量平均	$\bar{Q}_a$
最大累加不足水量	V_d
渇水継続期間の流入量に対する $\bar{Q}_d$ からの分散	E_d
全期間の流入量に対する $\bar{Q}_a$ からの分散	E_a

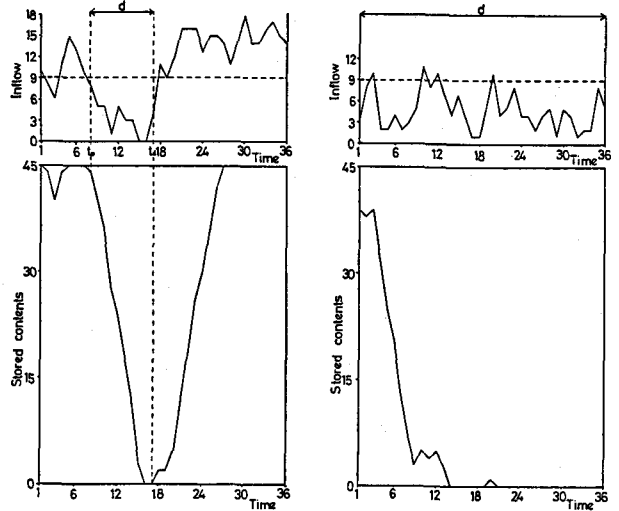


図-1 t_0 , t_d , d の決定法

$$\alpha = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m \alpha_k^j \quad (2)$$

ここに,

$$\alpha_k^j = a_k^j / (m-1) \quad (k = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

$$a_k^j: p_{k\ell}^j - p_{\ell k}^j \leq 0 \quad \text{となるケースの数} (\ell = 1, 2, \dots, m, \text{ただし}, \ell \neq k)$$

N: 渇水流況の全組数

$$\beta = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m \beta_k^j \quad (4)$$

ここに,

$$\beta_k^j = \frac{1}{m-1} \sum_{\substack{\ell=1 \\ (\ell \neq k)}}^m \left\{ \frac{p_{k\ell}^j - p_{\ell k}^j}{p_{k\ell}^j - p_{\ell k}^j} \right\} \quad (5)$$

すなわち、指標 α は、任意の渇水流況に対する最適放流ルールを同じクラスの他の渇水流況に適用したとき、その渇水被害が無節水放流による被害よりも大きくならないケースが、平均的に何回の割合で起こるかを表わしている。一方、 β は、同様に最適放流ルールを同じクラスの他の流況に適用した場合、流量調整効果が無節水放流に比べて劣らないかどうかを渇水被害の値の差（最適放流ルールによる被害で無次元化）で表わしたものである。

したがって、 α 、 β ともに貯水池操作に有効なクラス分けが行われているほど値は大きくなり、上限値（理想的な分類に対応する）はいずれも1.0（100%）である。また、適切度判定のための第1次的な基準値（無節水放流が基準）は、 $\alpha = 0.5$ （50%）、 $\beta = \pm 0$ である。

5. 指標 α 、 β の計算結果

5.1 特性量の種類および次元数によるクラス分け適切度の相異

図-2は1次元分類と2次元分類で全区分数が $n=9$ （2次元分類の場合は 3×3 区分）に対して指標 α と β を、図-3は2次元分類と3次元分類で $n=36$ 、図-4は2次元分類と4次元分類で $n=81$ に対して指標 β を値の順に並べたものである。特性量欄の最下段のRANDOMは、どの特性量の値にも無関係にクラス分けをした場合で、最も不適切なクラス分けに相当するものである。これらの図からわかる事は次の通りである。

(1) α と β を比べると、両者の定義が異なるので値の比較はできないが、特性量の順位についてはいずれの指標でもほぼ同じ結果が得られている。

(2) 図-2の1次元分類では t_d 、 t_0 の順位が高く、図-2、3、4の多次元分類でもこの t_d 、 t_0 と $\bar{Q}_d$ 、 V_d を組合せたものの順位が高い。特に、 α は t_d 、 t_0 を含む組合せと含まない組合せで値に段差がついている。

(3) 1次元分類で E_a 、 E_d に対する α 、 β の値はRANDOMの値と殆ど変わらず、これらを含んだ2次元分類も値は小さい。つまり、 E_a 、 E_d によるクラス分けは効果がなく、分類に際してこれらの特性量を考慮するのは殆ど意味がないといえる。

(上記(2)、(3)より、3次元分類、4次元分類では E_a 、 E_d は対象とせず、 t_0 、 t_d 、 V_d 、 $\bar{Q}_d$ を主体にした組合せを検討した。)

(4) 図-2において、 (t_0, t_d) の組合せによる2次元分類よりも (t_0, V_d) の組合せの方が上位であり、 (t_0, t_d) と t_0 あるいは t_d の1次元分類は順位にそれほど差はない。また、1次元分類で下位の方にある $\bar{Q}_d$ は t_d との組合せで指標値が大幅に増大するが、 t_0 との組合せでは1次元分類の

および (t_0, V_d) の組合せは、全区分数が 81 (9×9 区分) 程度まで β 値は増大しており、同じ区分数の 3 次元分類とはほぼ同じ値をとる。それを超える区分数では、3 次元分類の方が β 値は大きくなる。

この結果が示すように、区分数がある数になるまでは次元数の効果は小さく、同じ区分数に対して 2 次元よりも 1 次元、また 3 次元よりも 2 次元分類の方がむしろ β 値が大きい場合もあるが、その区分数を超えると次元数を増すことの効果が生ずる。渇水流況の分類にあたって、適切な特性量の種類を選定し、区分数を決定するには、これらの関係を考慮しなければならない。

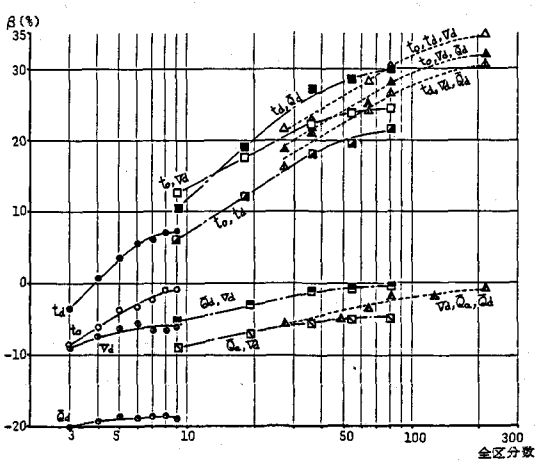


図-6 全区分数の増加による分類の効果

6. 渇水流況のパターンと貯水池操作方式

指標 α, β に関する以上の結果から貯水池操作にとって適切であると判定された分類が、具体的にはどのようなクラス分けになっているかを以下に示す。

図-7 は、最も有効な組合せの 1 つとされた (t_0, V_d) によって渇水流況群を分類したときの各クラスの平均的パターン、すなわち各時刻の平均値からなる渇水流況である (全区分数 $n = 9$)。 t_0 と V_d という特性量で規定される流況であるためか、経時変化のパターンはきわめて単純で、各クラスごとのパターンの差異もかなり明確である。

前節において貯水池操作に関して適切とされた分類が、このように単純なパターンによるクラス分けをその内容としていることは実用上、好都合である。まず、渇水流況が $(t_0, V_d), (t_d, \bar{Q}_d)$ あるいは (t_0, t_d) によって適切に分類されるということは、貯水量変化についていえば貯水位が最も低下したときの水位高、あるいはその生起時期によって渇水記録を分類すべきであることを意味する。直観的に、

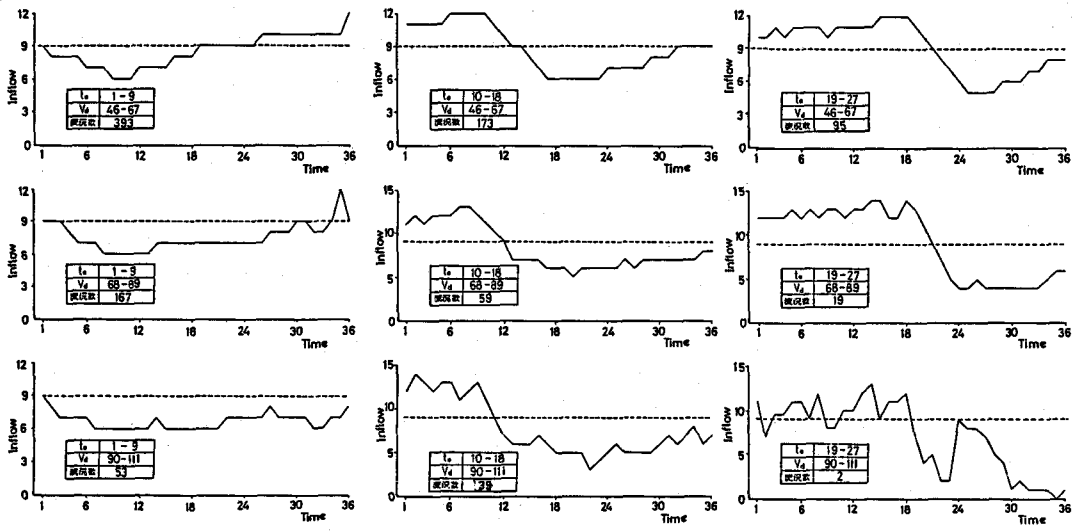


図-7 各クラスの平均渇水流況

あるいは経験上からもこれと同様な分類が予想されるが、本計算ではそのような分類の妥当性を裏付ける結果が得られた。つぎに、図-7によれば、各流況パターンは近似的に一種の型紙渇水流況と見なすことができる。貯水池管理において将来流況がその特性量についての情報からあるクラスに属すると予測できる場合、操作方式を定めるための対象流況としてはそのクラス内の特定の（例えば最も厳しい）渇水流況とするほかに、そのクラスに対応する型紙渇水流況を考慮に入れるべきである。型紙流況に対する最適操作方式の決定と渇水被害の算定は比較的容易であるから、各型紙についてそれらを予め計算し内容を吟味しておけば、その結果は渇水時の貯水池操作に有効に利用し得ると考えられる。

7. ま と め

本研究で得られた結果を要約すると次の通りである。

- (1) 渇水流況の分類法を提示した。すなわち、一定の方式で貯水池を操作した結果生ずる渇水被害を指標として分類の適切度を評価し、最も有効なクラス分けを見出す方法を示した。
- (2) 次の特性量によるクラス分けによって、渇水流況の適切な分類を行うことができる。1次元分類——渇水終了時期および渇水開始時期、2次元以上の分類——渇水の時期（特に終了時期）と渇水期間内の平均流入量または最大累加不足水量の組合せ。
- (3) 全区分数が同じであれば、特性量の次元数を増しても分類の適切度は必ずしも高くなり、むしろ次元数の効果は特性量の組合せ方に大きく依存する。
- (4) 区分数を増すことの効果は、1次元分類（特性量： t_d , t_0 ）では区分数が9程度までであり、2次元分類（ t_d , t_0 を含む特性量の組合せ）では全区分数が81（ $=9 \times 9$ ）程度までである。それを超える区分数ではそれぞれ、2次元分類、3次元分類の方が有効である（次元数を増すことの効果が発揮される）。ただし、これらの区分数は、取扱う流況資料数によって変化すると考えられる。
- (5) 適切な分類がなされた結果の各クラスの平均的流況は単純なパターンの経時変化を示し、それは一種の型紙渇水流況と見なすことができる。この平均流況パターンを渇水時の貯水池操作に役立てることが可能と考えられる。

本研究では、将来流況の特性量（渇水終了時期、渇水期間内の平均流入量など）に関して確度の高い情報が利用可能という前提のもとに、この情報を貯水池管理に生かす方策の1つとして過去の渇水流況の分類に着目し、その方法の提示と適用結果の検討を行った。現実には、この前提自体が大きな課題であることはいうまでもないが、敢えてそれを仮定することによってこの情報の価値⁴⁾、有用性を明らかにすることを意図したものである。また、本研究で対象とした流況は確率モデルによる模擬流量時系列であるので、実際の流量資料および貯水池システムに対してはさらに検討を加えたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 神田 徹・畑 恵介：渇水期間における利水用貯水池の実時間操作方式，第25回水理講演会論文集，1981。
- 2) 土木学会関西支部：水資源システムの分析・計画・管理および保全に関する最近の技術，第4編ダム貯水池の効率的な操作・運用，昭和58年度講習会テキスト，1983。
- 3) McMahon, T.A. and Mein, R.G.: Reservoir Capacity and Yield, Development in Water Science, 9, Elsevier, 1978。
- 4) 神田 徹・森田哲也：利水用貯水池操作における流入量情報の価値，第28回水理講演会論文集，1984。