

名古屋工業大学 正員 長尾正志, 京都大学大学院 学生員 井上素行

1. 水資源の高率運用と利水用貯水池の目標放流量

近年, 新規水源の開発は次第に困難となり, 既設の利水施設により用済みの資源を最大限有効に利用しなければならない情勢にある。この意味から, 利水用あるいは多目的貯水池の操作にもきめ細かな配慮が要求されるが, 現実には, 流入量の不確定性, 利水効果の評価の困難さなどのために必ずしも満足すべき段階ではない。

もちろん, 水資源開発の最終目標は, 潜在的利水可能量の最大化というより, むしろ経済的などの利益関数の最大化として論ずべきであるが, 価値換算に伴う種々の仮定を避けるために, ここでは単なる水供給の可能性として扱っておく。したがって, 利水上の安全性・危険性は目標放流量の充足・非充足(渇水)の事象の確率として評価され, 供給可能量は, 上述の充足確率・渇水確率を考慮した統計的な放流量期待値として表現される。

われわれは, 利水用貯水池系によるこの種の問題の解明に, 確率在庫モデルとしての定式化が有用であることを提示してきたが, 今回は, 季節的流入量変動に対応した季節別放流量系列の合理的設定と, 年間一定の目標との比較により, 貯水池の効果的運用を, 供給の可能性からみた需要への対応の仕方として考察した結果を報告する。

2. 確率在庫モデルと季節別目標放流量系列の設定

2.1 確率在庫モデルの基礎式 i) 貯水量方程式 s 季のランダム化流入量系列 $X_{s,n}$ により, 貯水量 $Z_{s,n+1}$ ($s = I, II, \dots, L; n = 1, 2, \dots, n_s$) は次式で表現される。 $Z_{s,n+1} = \min[k_s, \{(Z_{s,n} + X_{s,n}) - \min(m_s, Z_{s,n} + X_{s,n})\}]$ (1) ただし m, k は目標放流量, 貯水池容量, 添字 s は季節 s を示す。貯水量系列 $\{Z_{s,n}\}$ はマルコフ連鎖を構成し, 時刻 n での状態確率ベクトル $P_{s,n}$ は, 初期確率ベクトル $P_{s,0}$ および推移確率行列 P_s によって, $P_{s,n} = P_{s,0} \cdot P_s^n$ (2) で計算される。ii) 貯水量の定常分布 s 季の初期および時刻 n での定常分布は次式で表わせる。 $w(s) = w(s) \cdot P_s$, ($P_s = P_s^{n_s} P_s^{n_{s-1}} \dots P_s^1 P_s^0 \dots P_s^{n_s-1}$), $w(s,n) = w(s) \cdot P_s^n$ (3) なお, P_s の計算には, 各季間の m_s, k_s の次元の変化に対応する若干の考慮が要求される。iii) 渇水確率 ここでは, 渇水とは全く取水不能な状態をいうのではなく, 計画上の目標放流量が充足されない状態をさす。貯水量が $Z_{s,n} > 0$ であれば, 期間 $(n-1, n)$ で目標は充足されているから, 対象となる渇水事象は貯水量が $Z_{s,n} = 0$ となる事象に含まれる。この間の放流量を $R_{s,n-1}$ と記すと, 厳密な渇水確率の定義式は $Pr\{R_{s,n-1} < m_s\} = w_{s,n}(0) - w_{s,n}(0)^+$ (4), $w_{s,n}(0)^+ = Pr\{R_{s,n-1} = m_s\}$ (5) である。しかし, 貯水量状態の分割を十分細かく採れば $w_{s,n}(0)^+ \ll w_{s,n}(0)$ が成立し, 結局, 渇水確率は $w_{s,n}(0) = Pr\{Z_{s,n} = 0\}$ (6) の定常分布で近似できる。

2.2 季節別目標放流量系列の設定方針 i) 貯水量の推移確率 s 季の推移確率行列の積 P_s^n の成分を $p_{ij}^{(s,n)}$ ($i, j = 0, 1, \dots, k_s$) と記すと, 初期ベクトル $P_{s,0} = (p_{s,0}(0), p_{s,0}(1), \dots, p_{s,0}(k_s))$ に対する季内時刻 n での状態確率ベクトル $P_{s,n} = (p_{s,n}(0), p_{s,n}(1), \dots, p_{s,n}(k_s))$ の成分 $p_{s,n}(j)$ は, (2) 式により次式で与えられる。 $p_{s,n}(j) = \sum_{i=0}^{k_s} p_{s,0}(i) \cdot p_{ij}^{(s,n)}$ (7) たとえば, 初期空水量または初期満水量ならば, $p_{s,0}(i) = 1$ ($i=0$), 0 ($i \neq 0$) または $p_{s,0}(i) = 1$ ($i=k_s$), 0 ($i \neq k_s$) であるから, それぞれに対応して, $p_{s,n}(0) = p_{0,0}^{(s,n)}$ または $p_{k_s,0}^{(s,n)}$ (8) で渇水確率が求められる。ii) 渇水確率の存在域の収束 推移確率行列積 P_s^n が時の経過とともに定常状態に漸近することを考えると, (8) 式から, 図-1 のように, 初期空水量, 満水量状態に対応する渇水確率の存在域は次第に縮減し, 一定値に収束するように推移する。なお, 季末での渇水確率の存在域は $p_{s,0}(0)^+ = p_{0,0}^{(s,n_s)} - p_{k_s,0}^{(s,n_s)}$ (9) である。たとえば, 夏期豊水期には, 1ヶ月間の計算で上下限は急速に接近し, 初期貯水量状態に拘わらず, 月末の渇水確率はほぼ一定値に収束して終うことが認められる。このことは, 渇水確率を指標として目標放流量を設定する際に有用な根拠となる。一方, 初期貯水量状態が空水量傾向でも満水量傾向でもない場合には, 季末の渇水確率の近似として, 初期貯水量状

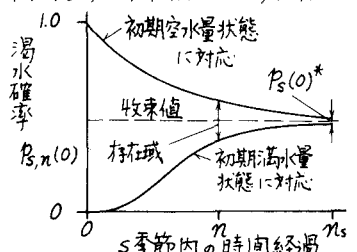


図-1 渇水確率の存在域の収束

態が一様分布に近いとした次式の平均渇水確率 $\bar{y}_s = \sum_{k=0}^{\infty} p_{k,s} / (k_s + 1) \dots (10)$ が目標設定の指標として使える。

iii) 季節別目標放流量系列の設定方針 季末の渇水確率は、季首貯水量状態に係わらずかなり定常値に漸近してくる。そこで季間の渇水確率がどの程度かを概略的に推定するには、季別・目標放流量別の季節間の定常分布を算定すれば、経年平均的な渇水確率の推定が可能となる。それには、準備段階として、季別・目標放流量別の貯水量定常分布の算定と、渇水確率の存在域および平均渇水確率の図示が必要である。

さて、目標渇水確率を年間できるだけ維持するようにした、各季の目標放流量系列の設定の方針を図-2で説明する。まず目標渇水確率 $W(0)$ の値に対する放流量選定の自由度が1か、あるいはそれに最も近い季節を選び、その季節の放流量を設定する。仮に、それを s 季、設定目標放流量を m_s とする。 s 季末の貯水量状態がかなり定常に近づいてくることから、 s 季末すなわち $s+1$ 季の初期貯水量の状態が、前もって種々の m_s に対して計算しておいた s 季の定常分布から推定できる。すなわち、 $s+1$ 季の初期貯水量状態が満水、空水、一様分布の各傾向のどれかを定常分布の特性により判定すれば、 $s+1$ 季の各目標放流量に対する渇水確率の概略値が分かる。その中から、目標値 $W(0)$ に最も近い目標放流量 m_{s+1} を設定する。以下同様に各季節の目標放流量系列の選定を行なっていくのはよい。系列の選定は必ずしも一通りとは限らない。



図-2 季末渇水確率の存在域と平均渇水確率

3. 実河川への適用計算

3.1 対象流域と計算条件

以上を天竜川水系三峰川、美和ダム（流域面積 311 km^2 、有効貯水容量 $25.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ ）に適用した結果を示す。季節を月、月間を5日ステップ、放流量単位を $4 \text{ m}^3/\text{s}$ に採り、流入量分布を対数正規分布で近似している。

3.2 放流量期待値の計算

i) 季節別目標放流量系列の設定例 年間の目標渇水確率を $W(0)=0.1, 0.2$ とした場合の月間の渇水確率 $W_s(0)$ 、設定された目標放流量系列 m_s 、および放流量期待値 $E\{R_s\} = m_s \{1 - W_s(0)\}$ を図-3に示す。このように、目標確率 $W(0)$ を大きくすると、豊水期の期待放流量は増すが、冬期には減少し、年間での変動は激しくなる。

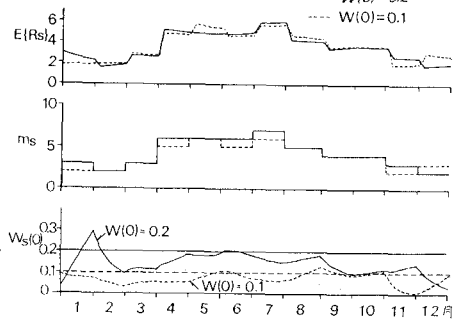


図-3 季節別の渇水確率、目標放流量および期待放流量

ii) 年間一定・季節別目標放流量の比較 年間一定の目標放流量の場合(A)と、年間一定の渇水確率を目標とした季節別放流量系列の場合(B)で、年間期待放流量 $E\{R\} = \sum_{s=1}^{12} E\{R_s\} / L$ の差を、種々の目標放流量 m 、目標渇水確率 $W(0)$ 、および非制限水位、制限水位の区別について、図-4に示す。なお、洪水調節用の制限水位期間は6~9月、その間の有効貯水容量は $14.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ である。これより、Aの場合には非制限水位、制限水位でそれぞれ $m = 4, 5$ 付近に、Bの場合には非制限、制限水位ともに $W(0) = 0.15$ 付近で最大となる。この最大値間の比較では、Bの方の $E\{R\}$ がかなり大きい値となる。（非制限、制限水位ともに約24%増）また、冬期渇水期での $E\{R_s\}$ の減少はAの方が格段と激しい。結局、期待放流量の総量や季節間の安定性などから判断すると、年間渇水確率を一定とするように目標放流量系列を設定する方が、年間で一定目標の放流量を設定するよりも、利水上無理がなく有効な操作方法ということができる。

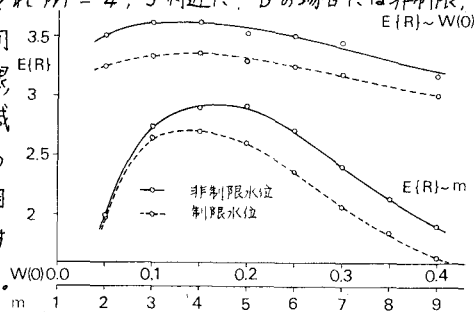


図-4 年間一定の目標放流量と

季節別目標放流量との年間期待放流量

参考文献 長尾正志；貯水池をもつ河川の渇水確率について、京都大学防災研究所年報，第11号B，昭和43年3月，pp.115~129。