

渇水に対する信頼性評価モデルを用いた貯水池整備問題に関するシステムズアプローチ

鳥取県 正会員 ○中川 浩作
 京都大学防災研究所 正会員 岡田 憲夫
 鳥取大学工学部 正会員 多々納裕一

1. はじめに 生活水準の向上や社会の高度化に伴い、水需要は年々増加しており、いったん渇水が発生したときの被害は甚大なものとなると予想される。したがって、渇水発生時にも有効に対処できるような水利用システムの整備を図り、渇水に対して耐性の高いシステムを構築することが重要となる。本研究では、望ましい施設整備のための方法論を提示し、実証分析を通じてその有効性を検証した。

2. 施設整備計画問題の分析プロセス 本研究では、貯水池の整備を行うとすればどのような規模でどのような操作方式に従うのが望ましいかの評価・決定を行う。具体的には、図1に示すように、まず確率D.P.を用いてある貯水池規模のもとでの望ましい貯水池操作方式を求める(STEP1)。次いでそのときの水利用システムの渇水に対する信頼性を、信頼性評価モデルを用いて評価する(STEP2)。さらにそれが計画安全度を満たすか否かを判断する(STEP3)。計画安全度が満たされていればその貯水池規模および貯水池操作方式を採用し、そうでなければ貯水池規模を拡大し再びSTEP1に戻り、計画安全度が満たされるまで繰り返し計算を行うという方法論に従って分析を行う。

3. 貯水池整備計画代替案の設計・評価モデルの定式化 本研究では、単一ダムによる貯水池整備を行う場合を想定することとし、流域モデルとして図-1に示すようなモデルを想定する。したがって式(1)および式(2)のような連続式が成立する。ここで、 v :ダムの貯水容量、 d :評価地点における必要流量、 I_n :期間 $[n, n+1)$ におけるダム流入量、 U_n :放流量、 R_n :残流域流出量、 Q_n :評価地点における流量、 S_n :時点 n における貯水量、 $A(R_n) \equiv \max(0, d - R_n)$:必要放流量。ただし、これらはすべて非負であり、単位は時間当たりの平均流量(m^3/sec)で統一されている。

$$S_{n+1} = S_n + I_n - U_n \quad (1)$$

$$Q_n = U_n + R_n \quad (2)$$

(1) 確率D.P.モデルの定式化: 貯水池からの補給(放流)は当該期における放流可能量 $S_n + I_n$ および残流域流出量 R_n の状態決定されるものとし、状態ベクトル $X_n \equiv (S_n + I_n, R_n)$ を定義しよう。第 n 期において、状態変数が $X_n = x$ であるときに $U_n = u$ なる操作を行う場合、その期に生じる損失を $L(u)$ 、最小累加期待損失を $v_n(x)$ として表すこととする。すると、一期当たりの期待損失を最小にする貯水池操作 $u = f(x)$ は次の関数方程式の定常解として与えられる。

$$v_n(x) = \min_u \sum_j \{L(u) + v_{n+1}(y)\} \cdot p_{x,y}^u, \quad (3)$$

ここで、ダム流入量 I_n および残流域流出量 R_n の生起確率は、ともに時間的に独立かつ同一の確率分布に従うものとし、それぞれ $\theta(a|b) \equiv \Pr(I_n = a | R_n = b)$ および $\phi(b) \equiv \Pr(R_n = b)$ のように定義すると、状態 $x = (i, r)$ において放流量 $f(x) = k$ をとり状態 $y = (j, m)$ に移移するときの推移確率 $p_{x,y}^k$ は次式で与えられる。

$$p_{x,y}^k = \theta(j - i + k | m) \phi(m) \quad (4)$$

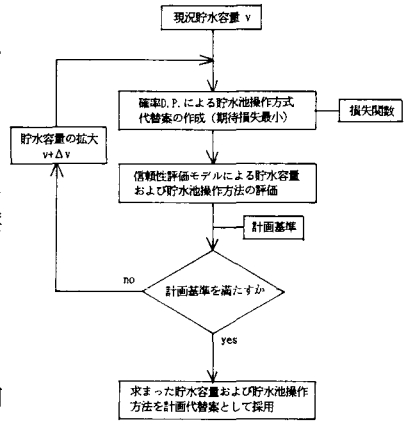


図1 貯水池整備計画問題の分析プロセス

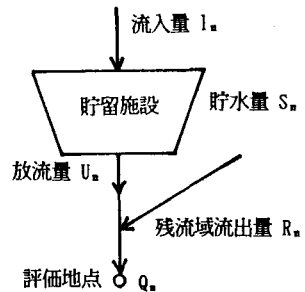


図2 想定した流域モデル

(2)信頼性評価指標の算出方法：いま、当該水利用システムが最適な貯水池操作ルールに従う場合を考える。状態が多数回変化した後、システムが状態 x にある極限状態確率を $\pi(x)$ と定義する。 $\pi(x)$ は式(5)および式(6)で表される連立方程式の解として与えられる。

$$\pi(x) = \sum_{x'} \pi(x') p_{xx'}^{-1}(x), \quad (5)$$

$$\sum_x \pi(x) = 1 \quad (6)$$

ところで、本研究では、水利用システムの渇水に対する信頼性を評価する指標として、多々納らが提案した渇水状態生起確率PF、渇水頻度FR、期待渇水継続期間長EDおよび期待渇水損失ELを用いる¹⁾。したがって、 $\pi(x)$ が求まれば、最適な貯水池ルールに従うときの水利用システムの渇水に対する信頼性を評価するための指標は以下のようにして算出される。ただし、システムの状態は、評価地点で必要流量が満たされていれば「正常状態S」にあり、そうでないとき「渇水状態F」にあるとする。

$$PF = \sum_{x \in F} \pi(x) \quad (7)$$

$$FR = \sum_{y \in S} \sum_{x \in F} \pi(x) \cdot p_{yx}^{-1}(x), \quad (8)$$

$$ED = PF / FR \quad (9)$$

$$EL = \sum_{x \in F} L(f(x)) \cdot \pi(x) \quad (10)$$

ここに、 $L(f(x)) = (A(R_u) - f(x)) \beta$ は渇水被害関数である。

4. 実証分析 ここでは、A流域（流域面積342km²、年平均降水量1,930mm）を対象流域とし実証分析を行った。その際、計算単位期間は半月とした。その結果を図3～図7に示す。これより、正常状態のうちに段階的に放流削減を行い、貯水量をできる限り温存するという放流操作方式が望ましいということがわかる。また、渇水規模の拡大に伴って、期待渇水継続期間長EDを除いてシステムの渇水に対する信頼性は改善されることがわかる。そして、現行の計画安全度（渇水の生起する頻度が10年に1回程度）を満たすような最小の貯水量を推定したところ、 $v=14$ が必要とされ、現貯水量（ $v=10$ ；4,320,000 m³）よりも1,728,000 m³だけ余分な容量が必要であることが推定される。最後に、現行の貯水池操作方式に従ったときと求めた貯水池操作方式に従ったときの期待渇水損失ELを比較すると、求められた貯水池操作方式の場合の方が、現行の方式の場合に比して、期待損失が2～3倍程度改善されることが読み取れる。

[参考文献] 1) 多々納裕一・岡田憲夫・河合一：残流域流出量を考慮した利水用貯留システムの信頼性評価モデル、第12回土木計画学研究発表会・論文集、pp. 99-106、(1989)。

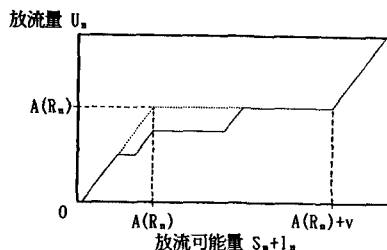


図3 求められた貯水池操作方式（ $\beta=5.0$ ）
（破線は現行貯水池操作方式）

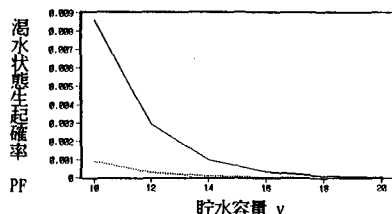


図4 貯水容量 v と渇水状態生起確率PFの関係（ $\beta=5.0$ ）
（破線は現行貯水池操作方式に従った場合）

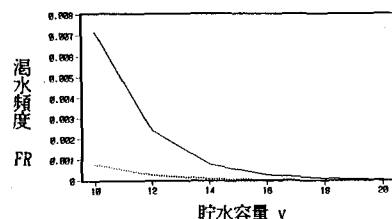


図5 貯水容量 v と渇水頻度FRの関係（ $\beta=5.0$ ）
（破線は現行貯水池操作方式に従った場合）

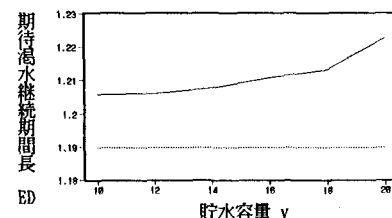


図6 貯水容量 v と期待渇水継続期間長EDの関係（ $\beta=5.0$ ）
（破線は現行貯水池操作方式に従った場合）

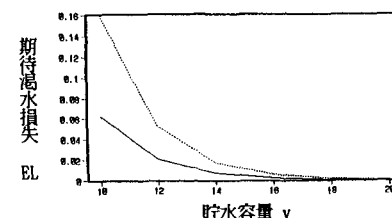


図7 貯水容量 v と期待渇水損失ELの関係（ $\beta=5.0$ ）
（破線は現行貯水池操作方式に従った場合）