渇水調節ルール設計のための信頼性評価モデル

鳥取大学工学部　学生員 ○中川　浩作　　ダイセル化学工業　　平山　真治
鳥取大学工学部　正会員　多々納裕一　　鳥取大学工学部　正会員　岡田　憲夫

1.はじめに

水多消費型社会となった今日において、渇水対策は重要な問題である。渇水対策を考える場合、渇水時における取水制限等の実施方法に関するルール設定は、渇水被害の大きさを左右するために非常に重要な検討事項である。本研究では、信頼性分析の見地から貯水池操作に渇水調節をとりいれた評価モデルを構築し、適切な渇水調節開始容量を決定するための計画問題の検討を行った。

2.渇水調節を考慮した貯水池操作

本研究では図-1に示すような流域モデルを想定し、貯水池操作に渇水調節を取り入れた信頼性評価モデルを構築した。この貯水池操作を図-2に示す。従って、このモデルでは、連続式として(1)式が、放流量及び貯水量方程式として(2)式及び(3)式が成立する。

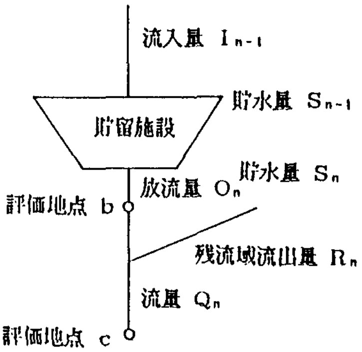

図-1　想定した流域モデル

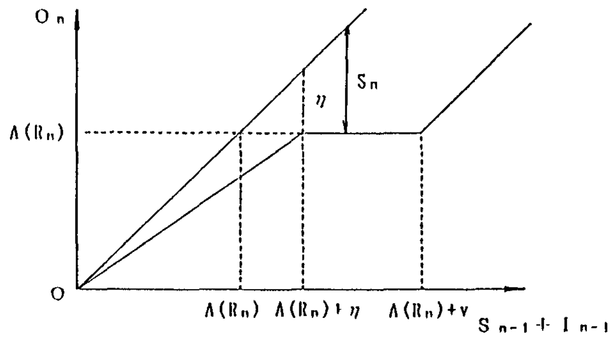

図-2　想定した貯水池操作

$$S_{n-1}+I_{n-1}=O_n+S_n \tag{1}$$

$$O_n=\chi(0\leqq S_{n-1}+I_{n-1}\leqq A(R_n)+\eta)\frac{A(R_n)}{A(R_n)+\eta}(S_n-1+I_{n-1})$$
$$+\chi(A(Rn)+\eta<S_{n-1}+I_{n-1}\leqq V+A(R_n))\cdot A(R_n)+\chi(V+A(R_n)<S_{n-1}+I_{n-1})\cdot(S_{n-1}+I_{n-1}-V) \tag{2}$$

$$S_n\doteq\chi(0\leqq S_{n-1}+I_{n-1}\leqq A(R_n)+\eta)\frac{\eta}{A(R_n)+\eta}(S_{n-1}+I_{n-1})$$
$$+\chi(A(R_n)+\eta<S_{n-1}+I_{n-1}\leqq V+A(R_n))\cdot(S_{n-1}+I_{n-1}-A(R_n))+\chi(V+A(R_n)<S_{n-1}+I_{n-1})\cdot V \tag{3}$$

ここにI_{n-1}:期間[n-1,n)においての貯水池への流入量、S_n:時点[n]における貯水量、On:期間[n-1,n)においての放流量、R_n:期間[n-1,n)の残流域流出量、Q_n:期間[n-1,n)の地点Cにおける流量、V:貯水池の利水容量、d_b:評価地点bでの必要流量、d_c:評価地点Cでの必要流量(単位は単位時間当りの平均流量)、をそれぞれ表す。

3.信頼性評価指標の定式化

信頼性評価指標の定式化にあたり、まず、「渇水状態Ｆ」及び「正常状態Ｓ」を定義しておく。すなわち、図-1の水利用システムにおいて、放流量Onが必要放流量A(Rn)を上回る状態にあるとき、当該水利用システムは正常状態Ｓであると定義する。一方、放流量Onが必要放流量A(Rn)を下回る状態にあるとき、当該水利用システムは渇水状態Ｆであると定義する。

このような考え方に基づいて以下のように信頼性評価指標を定義した。なお、各水文量の値は連続で流入量及び残流域流出量は時間的に独立でかつどの時点においても同一の確率分布に従うものと仮定した。ここ

で、$\Theta(i\mid r)$及び$\Phi(r)$は、流入量及び残流域流出量の確率分布を表し、いずれも時点によらず同一の分布を持つことから、$\Theta(i\mid r)=\Pr(I_{n-1}<i\mid R_n=r)$, $\Phi(r)=\Pr(R_n<r)$と定義した。

(1)期待渇水損失 EL(β, η)

渇水損失EL(β, η)を単位期間内の渇水による損失$(X/A(R_n))^{\beta}$の期待値として、次式のように定義した。

$$EL(\beta,\eta)\equiv\lim_{n\to\infty}\int_0^{\infty}\int_0^{A(r)}(x/A(r))^{\beta}\cdot\Pr(O_n=A(r),R_n=r)\,dx\,dr=\int_0^{\infty}(1-s/\eta)^{\beta}\,d\Pi(s) \tag{4}$$

ここでΠ(s)は、貯水量状態の定常分布を表し、次式のように定義した。

$$\Pi(s)\equiv\lim_{n\to\infty}\Pr(S_n<s) \tag{5}$$

(2)渇水状態生起確率 PF(η)

水利用システムが渇水状態Fにある確率を示し、次式のように定義される。

$$PF(\eta)\equiv\lim_{n\to\infty}\Pr(O_n\in F)=\Pi(\eta) \tag{6}$$

(3)渇水頻度 FR(η)

渇水の発生頻度を示す。この指標は次式で定義される。

$$FR(\eta)\equiv\lim_{n\to\infty}\Pr(O_n\in S,O_{n-1}\in F)=\Pi(\eta)-\int_0^{\eta}\int_0^{\infty}\Theta(A(r)+\eta-z\mid r)\,d\Phi(r)\,d\Pi(z) \tag{7}$$

(4)期待渇水継続期間長 ED(η)

渇水状態が継続する期間の期待値を表す。従って、次式のように定義される。

$$ED(\eta)\equiv\lim_{n\to\infty}\frac{\sum_{t=0}^{\infty}\int_S\int_F t\,f_n(t\mid x)\cdot\Pr(O_n=x,O_{n-1}=y)\,dx\,dy}{\int_S\int_F\Pr(O_n=x,O_{n-1}=y)\,dx\,dy}$$

$$=\Pi(\eta)\left\{\Pi(\eta)-\int_0^{\eta}\int_0^{\infty}\Theta(A(r)+\eta-z\mid r)\,d\Phi(r)\,d\Pi(z)\right\}^{-1}$$

ここで、$f_n(t\mid x)$は、渇水状態$O_n=X\in F$にあるとき、その後t期間渇水状態が継続したのちに正常状態に戻る確率を表わしている。

4.実証分析

ここでは、貯水池操作に渇水調節をとりいれた場合の最適な渇水調節開始容量η^*を求めるための計画問題を定式化し、実流域である小瀬川流域の実証分析を行う。そこで、渇水調節開始容量ηの決定問題を(10)式に示すような計画問題として定式化した。すなわち、渇水頻度FRが許容水準α以下となるようなηの領域内で期待渇水損失EL(β, η)が最小となるη^*を求めることとした。

$$\min_{\eta}\ EL(\beta,\eta) \tag{10}$$

subject to $FR(\eta)\leqq\alpha$

具体的には、渇水頻度の許容水準αを10年に1度、8年に一度、6年に一度程度の値とした場合について、本評価モデルを用いて数値実験を行い、本計画問題の解である最適な渇水調節開始容量η^*を求めた。この結果を図-3に示す。

なお、紙面の都合上、他の信頼性評価指標との関係については割愛する。

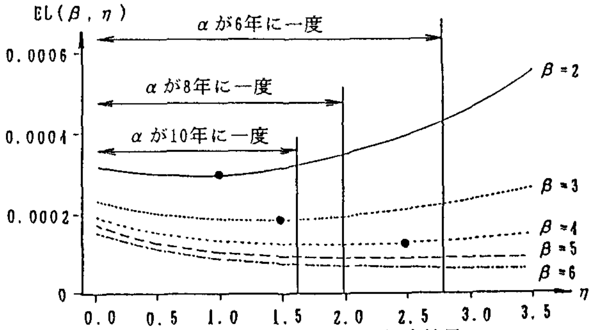

図-3　最適渇水調節開始容量η^*の算定結果

●：最適渇水調節開始容量η^*