土木学会第47回年次学術講演会（平成4年9月）

IV-15　渇水のリスクを考慮した貯留施設整備代替案設計モデル

鳥取大学大学院　学生員　○大石　哲司
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　小林　潔司

1.研究のねらいと概要

渇水対策を目的とする貯留施設は、流況の安定化を通じて渇水頻度を減少させ、渇水による社会経済的な被害を軽減するという機能を有する。ライフスタイルの変化や技術革新の進展は、渇水に対する社会経済的影響を以前にも増して深刻にしている考えられる。しかしながら、現行の利水計画では対象とした流況以上に厳しい渇水流況(異常渇水)を計画上考慮していない。本研究は、渇水のリスクを考慮して異常渇水への対応を前提とした利水用貯留施設整備代替案の設計を目的とする数理計画モデルを構築する。さらに、数値実験を通じて本モデルの特性について考察する。

2.本研究の枠組み

従来、利水用貯留施設の整備は10年に1位相当の渇水流況を設定し、設定した流況に対応し得るような最小の貯水容量を定めるという方法(マスカーブ法)を用いてきた。この場合、所与とされる操作ルールは、渇水時に貯水池を空にして放流する操作ルール(線形操作ルール)である。従って、対象とした流況以上に厳しい渇水流況(異常渇水)は計画上は考慮されていない。本研究は、このような異常渇水への対応を前提とした利水用貯留施設の整備代替案設計モデルの構築を目的とする。

渇水対策を目的とする利水用貯留施設は、流況の安定化を通じて渇水のリスクを軽減するという機能を有する。流況の安定性は貯水容量と操作ルールによって規定される。利水用貯留施設整備に伴う貯水容量の拡大や操作ルールの改善は、渇水の生起確率分布(渇水リスク)を変化させる。従って、渇水対策を目的とする利水用貯留施設整備代替案を設計・評価する際には、貯水容量と操作ルールを同時に考慮する必要がある。

渇水対策の効果は、流況の安定化を通じて、渇水の頻度等の渇水に対する信頼性の改善、地域住民の厚生水準の向上といった形で表れる。そこで本研究は、所与の信頼性の水準を満たす範囲内で最も効率よく、地域住民である家計の厚生を高めることを目的として、代替案設計モデルの定式化を行う。

この際、家計の厚生の計量化にあたっては整備の望ましさを経済評価することが必要となる。等価的option priceは、渇水対策によってもたらされる渇水リスクの変化に対する最大の支払意志額を与え、期待効用による評価と整合的な評価を与える指標である。そこで、本研究では、このような性質を有する等価的option priceを用いた代替案設計モデルを提案する。

3.モデルの定式化

本研究では、単一貯水池の規模拡張問題を考える。容量はv_0で、操作ルールr_0に従って操作がなされているとする。いま、貯水容量をvに拡大し、操作ルールrに改善するという計画問題を考える。流域には等質なN戸の家計のみが存在し、整備によって移動は生じないと仮定する。便益を等価的option price指標で評価すると、貯留施設整備計画問題は操作ルール設計問題を部分問題として内包する渇水頻度FR制約下での貯水容量最小化問題として以下のように定式化される。

$$\begin{aligned} &\min_{v} \quad v \\ &\text{subject to} \quad r^*(x;v) = \arg\{\max_{r} N\cdot OP_e(r,v;r_0,v_0)\} \\ &\qquad\qquad\quad FR(r^*,v) \le \overline{FR} \end{aligned} \tag{1}$$

等価的option price指標$OP_e(r,v;r_0,v_0)$は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} &E[V(\tau(x;r_0,v_0),Y+OP_e)\,|\,(r_0,v_0)] \\ =\ &E[V(\tau(x;r,v),Y)\,|\,(r,v)] \end{aligned} \tag{2}$$

ここで、$V(\tau(x;r,v),Y)$は間接効用関数であり、τは単位水量あたりの獲得所要時間、xは放流可能量である。

本モデルは、操作ルール設計モデルと貯水容量設計モデルの2階層のモデルに書き直すことができる。

(1) 操作ルール設計モデル

$$\max_{r} N\cdot OP_e(r,v;r_0,v_0) \tag{3}$$

OP_eによる評価は期待効用による評価と整合性を持っ

ている。ここで、流入量が独立かつ同一の確率分布に従うと仮定すれば、放流可能量の推移確率$P_{xy}^{r(x;v)}$がマルコフ連鎖をなす。従って、マルコフ決定過程(Markov Decision Process)に従い、問題(3)を以下の期待効用最大化問題として表すことができる。

$$u(x)+\gamma=\max_{r\in\Omega(x;v)} V(r(x;r,v),Y)+\sum_y u(y)p_{xy}^{r(x;v)} \tag{4}$$

ここで$u(x)$は政策の相対値であり、γは期待効用の最大値を与える。また、$\Omega(x;v)$は放流量の取りうる範囲を与える。

$$\Omega(x;v)=\{r \mid \max(0,v-x)\leq r\leq x\} \tag{5}$$

(2) 貯水容量設計モデル

貯水容量設計モデルは渇水頻度FRを制約とした貯水容量最小化問題として、以下のように定式化される。

$$\begin{aligned} &\min_v \quad v \\ &\text{subject to} \quad FR(r^*,v)\leq \overline{FR} \end{aligned} \tag{6}$$

なお、$r^*(x;v)=\arg\{\max_r N\cdot OP_e(r,v;r_0,v_0)\}$は貯水容量$v$における最適操作ルールであり、問題(3)の解である。

また、「渇水状態F」が生じてから次に「正常状態S」に戻るまでの期間をひと続きの「渇水」と見れば、渇水頻度FRはこのひと続きの渇水が生起する確率として次式のように定義される。

$$FR(r,v)=\sum_{x\in S}\sum_{y\in F}\phi(x\mid(r,v))P_{xy}^{r(x;v)} \tag{7}$$

ここで、$\phi(x\mid(r,v))$は放流可能量の定常生起確率を表す。また、「正常状態S」及び「渇水状態F」は必要流量Dを用いて以下のように定める。

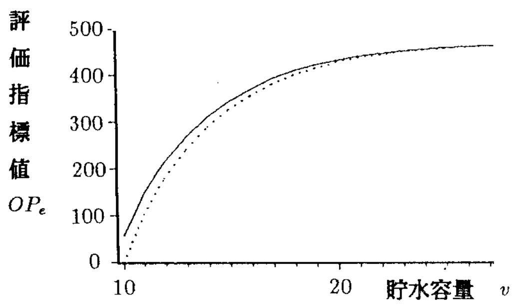
$$\begin{cases} S=\{x\mid r(x;v)\geq D\} \\ F=\{x\mid r(x;v)<D\} \end{cases} \tag{8}$$

定常生起確率$\phi(x\mid(r,v))$は以下の連立方程式の解として定義される。

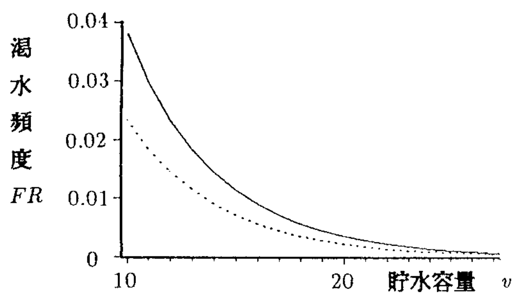
$$\begin{aligned} &\phi(x\mid(r,v))=\sum_x P_{xy}^{r(x;v)}\phi(x\mid(r,v)) \\ &\sum_x \phi(x\mid(r,v))=1 \end{aligned} \tag{9}$$

4. 数値実験結果

数値実験を行う際に、現行の利水計画に従って渇水頻度が10年に1位相当($\overline{FR}=0.00137$)となるように制約を設けた。図－1は等価的option priceと貯水容量の関係を示したものである。等価的option priceは、貯水容量の拡大にともない、単調に増加しているが、増加率は逓減している。また、線形操作ルールを仮定した場合と操作ルールと貯水容量を同時に考慮して最適設計した場合の等価的option priceの比較をすると、等価的option priceの値に差が生じている。指標値の差は、計画段階から操作ルールの最適化を考慮することにより得られる家計の享受する便益を表している。図－2は渇水頻度FRと貯水容量の関係を示したものである。本モデルにより設計された操作ルールは線形操作ルールよりも節水型の操作ルールになる。このため、線形操作ルールを用いる場合に比べて、本モデルによって設計された操作ルールを用いると、同一の貯水容量に対しては渇水頻度FRが大きくなることがわかる。このことは、同じ水準の安全度を保障しようとすると、本モデルで設計される貯水容量は線形操作ルールを用いた場合に定まる貯水容量に比べて大きくなることを示している。この貯水容量の違いは、異常渇水への対応を行うために用いられる容量を示しており、現行の利水計画で求められる貯水容量以上の容量が必要となることが確認できる。



図－１　貯水容量と評価指標値の関係
(破線は線形操作ルールを用いた場合)



図－２　貯水容量と渇水頻度の関係
(破線は線形操作ルールを用いた場合)