

大阪大学工学部 正員 室田 明
神戸大学工学部 正員 神田 徹

1. まえがき

水資源の利用が広域化するとともに、既設の、あるいは今後建設される貯水池の運用には、複数の貯水池による“群”としての機能が有効に発揮されることを要求される。貯水池群の最適操作については、システム・シミュレーションを含めてOR手法を応用したいくつかの手法が提案されている。これらの手法の目指す一つの方向は、複数の貯水池をこれと等価な機能をもつ単一の貯水池に置き換えることによって“群”としての機能を把握すると同時に、さらに複雑なシステムへの展開を可能にしようとするところである¹⁾。この場合、複数の貯水池群の単一貯水池への置換に際して総放流量および各貯水池からの放流量配分率の決定問題が生ずる。本研究では後者、すなわち放流量の最適配分問題に限定する。

一般に、貯水池群をこれらの貯水池容量、流入量、初期貯水量のそれぞれ合計と等しい単一貯水池に置き換えるとき、貯水池群から有効に放流できる放流量の総量は単一貯水池の場合より少ないか等しいかという点である。そこで、貯水池群に対する目標放流量が定められたときに、その機能を単一貯水池にできるだけ等しくする操作ルールとして、いわゆるSPACE RULEが提案された。このルールは理論的根拠に問題を残している他に、実際の適用上にも問題点を含んでいる。すなわち、貯水池流入量の将来予測の不確実性及びSPACE RULEの有効性に関係するはずである。また、流入量の統計的特性とSPACE RULEによる放流量配分特性の関係を明らかにすることも必要である。

本研究は貯水池群の最適操作に関する基礎的考察の一環として、以上の観点からSPACE RULEの特性を明らかにし、また他のRigid Ruleとの比較によりその有効性を検討したものである。

2. 貯水池群操作のシミュレーションの方法

(1) 並列貯水池系の諸量

a) 貯水池容量：貯水池系は図-1のI)な並列貯水池系を考へる。貯水池容量は $V = V_1 + V_2 = 113.69 (\text{M}^3/\text{sec} \cdot \text{day})$ 。

b) 貯水池流入量：流入量は平均流量を用い、各貯水池への流入量 Q_1, Q_2 の統計的性質は次の通りである。平均流量時系列の頻度分布は対数正規分布に似合う：

$$f(z) = (1/\sqrt{2\pi}\sigma(z)) \exp\left\{-\frac{(z - \mu(z))^2}{2\sigma^2(z)}\right\}, \quad (1)$$

ここに、 $z = \ln X = \ln(Y+1)$, $Y = (Q_{ij}^k - \bar{Q}_{ij})/\bar{Q}_{ij}$, Q_{ij}^k : i 年 j 月 k 日平均流量, $\bar{Q}_{ij}$: i 年 j 月の平均平均流量, $\mu(z)$, $\sigma^2(z)$: z の平均値, 分散。 X_1 と X_2 の和, $X = X_1 + X_2$ の平均値, 分散を $E(X)$, $\sigma^2(X)$ とし, X_1 と X_2 の間に次の関係を仮定する。

$$E(X_1) = p \cdot E(X), \quad \sqrt{\sigma^2(X_1)/E(X_1)} = \sqrt{\sigma^2(X_2)/E(X_2)}. \quad (2)$$

上式中の p (定数) と X_1, X_2 の相関係数 ρ を与えると, $E(X)$, $\sigma^2(X)$ に対し,

$E(X_1)$, $\sigma^2(X_1)$, $E(X_2)$, $\sigma^2(X_2)$ が定まる。対数正規分布に似合う X_1, X_2 の和 X の分布も対数正規で近似できる。

各貯水池への流入量時系列 $\{Q_{1,ij}^k\}$, $\{Q_{2,ij}^k\}$ は次式によって発生させる。

$$Q_{m,ij}^k = \bar{Q}_{m,ij} \cdot \exp\{\mu_m(z) + \sigma_m(z) t_m\}, \quad m=1, 2 \quad (3)$$

ここに、 $\mu_m(z)$, $\sigma_m(z)$ は、上で求めた $E(X_1)$, $\sigma^2(X_1)$, $E(X_2)$, $\sigma^2(X_2)$ からの関係式, $E(X) = \exp\{\mu(z) + \sigma^2(z)/2\}$, $\sigma^2(X) = E^2(X)(\exp\{\sigma^2(z)\} - 1)$ を用いて求められる。 t_1, t_2 : 相互相関係数の値, ρ をもつ正規標準化変量。上式から得られる $Q_{1,ij}^k$, $Q_{2,ij}^k$ を各貯水池への流入量とする。計算ケースは $E(Q_1)/E(Q_2) = 3/1$, $\rho = 1.0 \sim -1.0$ とする。

c) 貯水池放流量：次の2通りを設定する。(i) 年間一定放流量——流入量の平均値(約15 m³/sec)に近い一定値を平均を通じて放流する。(ii) 年間変化放流量——月平均流入量の変化に对应してその値と逆比例する水量を放流する。

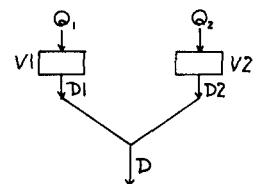


図-1. 貯水池系

(2) 放流量配分ルール

a) SPACE RULE: 放流の配分は用種の通り、次式を満足するように定められる。

$$(nV - nS_i - nQ_i + nD_i) / \left\{ \sum_{i=1}^N (nV - nS_i - nQ_i) + \sum_{i=1}^N nD_i \right\} = \left(\sum_{i=1}^T nQ_i \right) / \left(\sum_{i=1}^T \sum_{n=1}^N nQ_i \right), \quad (4)$$

ここに、 V : 野水池容量、 S : 期首野水量、 Q : 流入量、 D : 放流量、添字 n : n 野水池、 i : i 期間を表わす。(i) 流入量が予測可能である場合—式(4)は i 期間以後、 T 期間($T=i, i+1, \dots$)までの流量が予測可能であることを前提としている。(ii) 流入量が予測困難である場合— i 期間以後の流入量が確定的でない場合は、 i 期間を含めた将来流入量として各野水池への平均流入量(月平均流入量)を採用する。このとき、式(4)において、 $nQ_i \rightarrow \bar{nQ}_i$ 、 $\sum_{i=1}^T nQ_i \rightarrow \sum_{i=1}^T \bar{nQ}_i$ となる。

b) 放流量配分率一定ルール: SPACE RULE に替えて、代表的な Rigid Rule として放流量配分率一定ルールを用いる。すなわち、放流量比を平均流入量比とする方式である。

$$nD_i / \sum_{n=1}^N nD_i = \bar{nQ}_i / \sum_{n=1}^N \bar{nQ}_i \quad (5)$$

以上の条件の組合せについて、それぞれ20年間の野水池操作のシミュレーションを行なった。

3. シミュレーションの結果

シミュレーションの結果から、放流量配分の特性と2. に記した諸条件との関係は次のように要約できる。

(1) 流入量の予測期間と精度について

a) SPACE RULE において、年間総有効放流量と年間総無効放流量は予測期間に関係せず(3半期先まで)、等しい値をとる。b) 流入量予測が不十分で月平均流量を用いても、年間総無効放流量の増加は僅少である。

以上の結果から、流入量予測に図2は SPACE RULE を適用する限り流量変動の影響は少なく、したがって、総有効放流量または無効放流量の算定には月平均流入量を用いても充分の精度が得られる。

(2) 流入量の相互相関性の影響について

a) 図-2に示すごとく、放流量配分率 $R = D_i / (Q_i + D_i)$ の平均値は流入量比率(0.75)と等しく、変動率は ρ の減少とともに増加する。 R の標準偏差 $\sigma(R)$ と ρ との関係は1年ごと(5年間)に示せば図-3のごとくである。目標放流量が小さい場合には $\sigma(R)$ は年間総流入量と逆比例の関係にあるが、目標放流量の増加とともに流入量による差は減少する。b) 無効放流量率 $R' = W_1 / (W_1 + W_2)$ は ρ の減少とともに増加する傾向がある。

以上の結果から、SPACE RULE は流入量間の相互相関性に対応した柔軟な操作を要求するルールであることがわかる。

(3) 放流量配分ルールについて

a) 20年間のうち、17年間にあって SPACE RULE と Rigid Rule による有効放流量(あるいは無効放流量)の間に差が生じた。差の大きな年度の値は年間総有効放流量の約4%の程度である。

b) 放流量配分率一定ルールの場合の無効放流は流入量の大きな野水池に生ずる。

c) 野水池容量比が平均流入量比に等しい場合には、SPACE RULE と Rigid Rule による結果の差は無視できる程度に減少する。

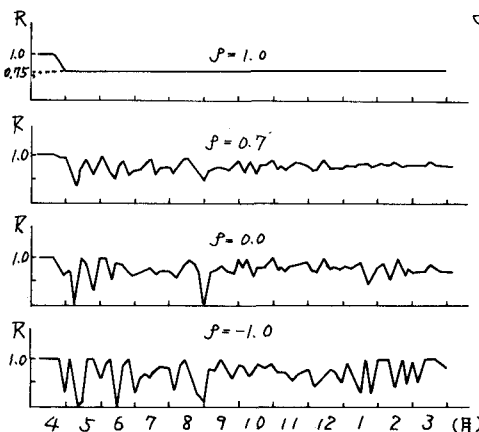


図2. 放流量配分率と相互相関係数の関係

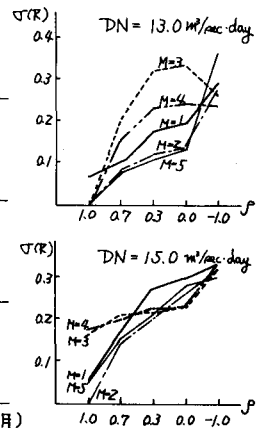


図3. 放流量配分率の標準偏差

4. SPACE RULEによる貯水量変動の特性

(1) 貯水量変動パターン分類

貯水量変動パターンは一般に次の4領域に区分できる(図-4)。

(i) 立ち上り部(U), (ii) 上昇期(U), (iii) 下降初期(D), (iv) 下降期(D)

各領域において、SPACE RULE および Rigid Rule による貯水量変動機構を解析することによって SPACE RULE の有効性を検討する。まず、SPACE RULE (略して SR), Rigid Rule (RR, 本研究では放流量配分率一定ルール) に適用した場合、各領域における貯水量変動曲線パターン分類すれば、図-5のごとくである。図は並列2貯水池の総貯水量を表わし、実線は SR、破線は RR の場合である。

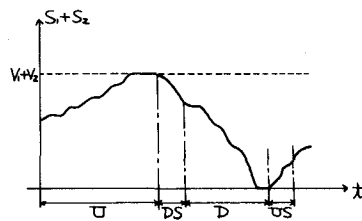


図-4. 貯水量変動の領域区分

(2) SPACE RULEの有効性について

設定された目標放流量を充足させることを利水上の目的とする貯水池操作に関する限り、SR と RR による結果に差異を生ずるのは DD2, DD3-type においてである。すなわち、総貯水量が一定である期間を要するために目標放流量の充足度に差を生ずる。このように、SR 比 RR よりも有効となる貯水量状態を生じさせる要因は勿論、総貯水量の差であり、結局、貯水池操作の過程における無効放流量の差に起因する。

そこで、SR, RR による無効放流量に差を生ずる場合および差を生じない場合のパターンを図-6に示す。図中の (t_{U1}, t_{U2}) , (t_{D1}, t_{D2}) は貯水池1, 2 からの無効放流量期間のそれぞれ始期、終期を表わす。図-6(a)の U2-type では SR の満杯時刻は両貯水池で一致するから $(t_{U1}^{SR} = t_{U2}^{SR} = t_U^{SR})$, RR では $t_{U1}^{RR} (< t_U^{SR})$ で貯水池1から無効放流量が始まり貯水量曲線は低下する。以後は両ルールとも貯水量は減少するのでこの type では SR が有効となる。これに対して U3-type では、豊水期の継続によって RR においても両貯水池が満杯に達する。この時刻 (t_U^{RR}) で貯水量状態は SR, RR ともに同一となり SR の有効性は失われる。図-6(b)の DS2-type では $t_{D2}^{RR} < t_{D1}^{SR} \leq t_{D1}^{RR}$ となり、RR による満杯状態の終了時刻が SR の場合よりも早い。したがって、総貯水量に差を生ずるので SR が有効となる。これに対して DS1-type では $t_{D1}^{RR} = t_{D2}^{RR} = t_{D1}^{SR}$ であり、両貯水池の満杯状態の終了時刻が SR, RR ともに一致し総貯水量に差を生じずに下降する。すなわち、SR が有効とはならない。

以上のように、無効放流量が SR と RR 方式とで差異を不す type を抽出することから、このようなケースを生じさせる要素として次のような量を挙げることもできる。(i) 流入量変動特性、すなわち、相関係数、分散など。(ii) 貯水池容量と流入量との比。

参考文献: 1) 皇田晴, 神田徹他, “並列貯水池の放流量配分について”, 昭和49年水資源学会関西支部第27回学術講演会, 昭和49.5

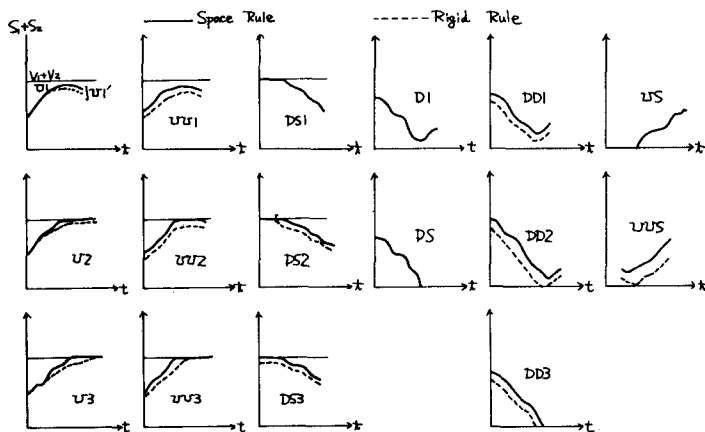


図-5. 貯水量変動のパターン分類

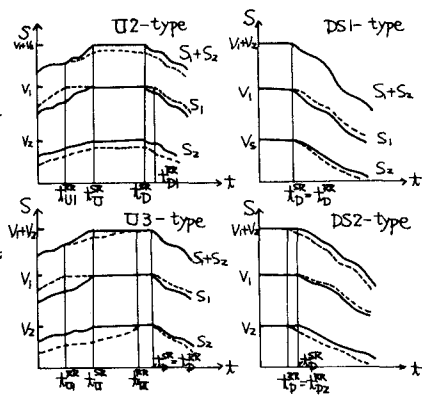


図-6. SR と RR の比較