II-79　利水を目的とした貯水池の貯留調節機能に関するマクロな解析

近畿大学理工学部　正員　江藤 剛治

1．はじめに

水資源開発の効率・利水安全度などについて多くの検討例がある．これらのほとんどはケース・スタディー，あるいは過去の資料の分析に基づく検討である．これらをある理論的な枠組の中で統一的に把える，あるいは解釈を加えるよう努力することは，研究上重要であるし，実用上も，問題の整理・見通しをよくするという点で意義のあることである．Moran以来，最近の長尾の研究に至る貯水池理論の研究の主たる意図も，この点にあると考えられる．一方貯水池理論は，ごくわずかの一般化により非常に難解あるいは解析不可能となる．よって現状では，純理論というよりは，次元解析のような半理論的な方法で現象をややマクロ，しかし一般的に説明することを試みるのも重要な行き方であろう．

筆者らは以前，「等価線形貯水池」という概念を呈示し，これにより利水用貯水池の貯留調節機能を大略表現しうることを示した．本報告では，等価線形貯水池の考え方に基づいて，水の利用率の上昇と開発効率の低下の関係，利水安全度の指標としての渇水頻度と総不足水量（あるいは，不足%・day）の関係などを半理論的かつ一般的に検討することを試みる．

2．等価線形貯留定数[1)]

貯水池の規模は容量で表わされる．すなわちL^3の次元を持つ．実際に我々が問題にするのは流量である．これはL^3T^{-1}の次元を持つ．一般に貯留システムと流れのシステムを同レベルで考える場合にはこの次元の相違，すなわち$[L^3]/[L^3T^{-1}]=[T]$の次元を持つある量が支配的な役割を演ずるはずである．貯水池の機能に関係する，時間の次元を持つ諸指標を表-1に示す．これまでよく用いられてきた指標はV/μである．これは貯水池の貯留調節機能の指標としては必ずしも適当でない．たとえば，平均流量が同一であって，年を通じてほぼ一定の流量が流れる川と，時間的に流量が大きく変動する川を考える．前者ではいくらVを大きくしても一滴の水も開発できない．後者ではVが大きいほど開発水量は大きい．直観的に，分母をμのかわりに流量のバラツキの指標，すなわち標準偏差σにとるほうがよさそうであることがわかる．筆者らは半理論的に次のような指標を導き，これを「等価線型貯留定数」と名付けた．

表-1　貯水池の機能に関係する，時間[T]の次元を持つ諸指標
V：貯水池容量　，q：開発水量
μ，σ：流入量の平均，標準偏差

名　称	等価線形貯留定数	限界貯水池容量	1／回転率
定　義	$c\cdot V/\sigma$	dV/dq	V/μ
関係の深い貯水池の機能	貯留・調節機能（特に偶然変動）	開発効率	貯留水の水質 年周期変動の調節

$$a=c\cdot V/\sigma \qquad (1)$$

貯水池への流入量が定常正規変動時系列のときは，$c=(1/\sqrt{2\pi})\cdot\exp(-X^2/2)$，$X=(x-\mu)/\sigma$

ここに，xは目標放流量，Xはその規準化変量．すなわち，流入量時系列のバラツキσにくらべて貯水池容量が大きいほど，また目標放流量が平均流量に近いほど，貯水池の貯留調節機能の指標aは大きくなる．その後の検討で，実用的な範囲では，（1）式中のcは，V/σにくらべてそれほど大きく変化しないことがわかった．すなわち，$c\approx 0.2\sim 0.4$．ただしこの値は半理論的な検討に基づく予想であるので，実際の多くの貯水池の操作記録に基づいて，cの値を検討する必要がある．

貯水池への流入量時系列の時定数，標準偏差をk_1，σ_1，貯留調節後の放流量のそれをk_2，σ_2とする．等価線形貯水池の仮定より，

$$k_2=k_1+a \quad (2),\qquad \sigma_2^2=\{k_1/(a+k_1)\}\sigma_1^2 \quad (3)$$

すなわち流量時系列の持続性はk_1からさらにaだけ長くなる．渇水生起時期はaだけ遅れる．流量のバラツキは，貯水池が小さいとき（$V\doteqdot 0$，よって$a\doteqdot 0$）では，もとの標準偏差σ_1に等しいが，aが大きくなると小さくなり，$V\to\infty$では$\sigma_2=0$となる．バラツキが小さくなる分が新規開発水量に比例する．

3．水の利用率と利水安全度・開発効率の関係

新規貯水池建設による調節前後の取水量を q_1，q_2 とし，これらを規準化変量になおすと

$X_1=(q_1-\mu)/\sigma_1$，$X_2=(q_2-\mu)/\sigma_2$ （<0）開発前後で渇水の生起頻度を一定に保つとすれば，$X_1=X_2$ （<0）．ただし定常正規変動入力等を仮定している．このとき新規開発水量 q_D は，

$q_D=q_2-q_1=(\sigma_2-\sigma_1)\cdot X_1=\{1-\sqrt{k_1/(a+k_1)}\}(-X_1)\cdot\sigma_1$ これを無次元化する．

$q_{D*}=q_D/\{(-X_1)\cdot\sigma_1\}$，$a_*=C\cdot V/(k_1\sigma_1)$ すなわち，q_{D*} は無次元新規開発水量，a_* は無次元等価線形貯留定数（無次元貯水池容量 $V/(k_1\sigma_1)$ とほぼ同一のもの）．$0\leqq q_{D*}<1$，$a_*\geqq 0$．このとき，$q_{D*}=1-1/\sqrt{a_*+1}$ （4），$a_*=\{1-(1-q_{D*})^2\}/(1-q_{D*})^2$ （5），$da_*/dq_{D*}=2/(1-q_{D*})^3$ （6）．これらの式は，開発水量 q_{D*}，貯水池容量 a_*，限界貯水池容量 da_*/dq_{D*} の関係を簡潔に表示している．たとえば式（4）より，a_* が0の時は開発水量 q_{D*} も0，a_* が大きくなると q_{D*} は無次元限界開発流量1に漸近する．

次に不足%・day と水の利用率（開発レベル）の関係を考察する．渇水の生起確率は一定であるから，渇水1回当りの不足%・day を考える．あるいは渇水1回当りの総不足水量を考えてもよい．無次元化すれば同一のものとなる．［不足%・day］≈［渇水1回当りの総不足水量］≈［渇水の深さ］・［渇水の平均継続時間］

［渇水の平均深さ］$\approx\begin{cases}\sigma_1 \\ \sigma_2=\sqrt{k_1/(a+k_1)}\,\sigma_1\end{cases}$ ［渇水の平均継続時間］$\approx\begin{cases}k_1 & \text{（現状）} \\ a+k_1 & \text{（調節後）}\end{cases}$

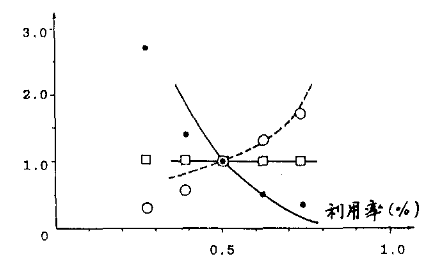
以上より，［不足%・day］$\approx\begin{cases}k_1\sigma_1 & \text{（現状）} \\ (a+k_1)\cdot\sqrt{k_1/(a+k_1)}\,\sigma_1 & \text{（調節後）}\end{cases}$

よって，渇水頻度一定の条件のもとでは，現状の不足%・day に対する，調節後の不足%・day の比 r_d は，

$r_d=\sqrt{k_1/(a+k_1)}$．これを無次元新規開発水量 q_{D*} で表わすと，$r_d=1/(1-q_{D*})$ （7）．すなわち，渇水の生起頻度一定の条件のもとに，新規開発水量 q_{D*} をその限界値1に近づけると，不足%・day は急激に大きくなる．

4．ケース・スタディーとの比較

渇水の安全度の指標として「頻度」を取り，これを1/10（回/年）に固定することに大きな問題があることは，以前から指摘されていた．大内・佐々木・松下は実流域における簡単なケース・スタディーで，この点をわかりやすく示している.[2] たとえば次のような点が指摘されている．河川の利用率が高くなると，① 渇水の終了時期は遅れ，長期化する． ② 冬期にも渇水が生起する可能性が強くなる．③ 河川の利用率がさらに増大すると経年型の貯水池，渇水となる．④ 渇水頻度一定の条件で利用率を上げると，不足%・day，渇水被害関数，渇水被害可能額等は（一定とならず）急増する． ⑤ 同じ条件下で開発効率は，利用率の増大に反比例して減少する．



図－1 不足%・day，開発効率のケース・スタディーと理論値の比較 （渇水発生頻度一定，利用率≒40～70%）
ケース・スタディー：大内他 1982[2]，・□○で示す．
理論値：線で示す．
□―：発生頻度
○---：不足%・day，(7)式
・―：開発効率，(6)を変形したもの

以上のうち，① は式（2）などに表現されている．④，⑤ は式（4）～（7）などに表現されている．適当な条件下で，大内らのケース・スタディーの結果と，式（6），（7）を比較する（図－1）．両者はかなりよく一致しているといえよう．開発効率（限界貯水池容量の逆数）については理論値がやや急勾配に，不足%・day についてはやや緩勾配になっている．これらは年周期性などの導入により改善されるものと考えられる．

以上，これまでケース・スタディー的に知られていた，貯水池の貯留調節機能にかかわる諸現象を，マクロにではあるが統一的に論じうる可能性があることを示した．

［参考文献］ 1）室田・江藤，論文集222号，1974．2）大内・佐々木・松下，土木技術資料24－1，1982．