

貯水池による水の開発効率と利水安全度に関する2～3の解析

On Reliability in Water Supply and Efficiency of Discharge Control by Reservoirs

近畿大学理工学部 正員 江 藤 剛 治

近畿大学理工学部 正員 川 本 正 身

近畿大学理工学部 正員 中 西 祐 啓

1. はじめに

わが国においては、これまで、河川の利用率、開発効率、利水安全度などの諸指標の相互の関係については、主としてケース・スタディーによる解析が行われてきた。一方で、これらは全て水の貯留・調節に関する諸問題を種々の観点からながめたものにほかならない。よってこれらにある理論的な枠組の中で統一的に捉える、あるいは解釈するよう努力することは、研究者の立場からも魅力があるし、実用上も、問題の整理・見通しをよくするという点で意義がある。その研究方針としては次の2つの方向が考えられる。

① 貯水池の統計理論により、これらの関係を厳密に、数学的に検討する。

② 多くの河川の流況の資料を用いて、貯水池による水の補給運用シミュレーションを行い、帰納的かつ経験的に諸指標の関係を定式化する。さらにこれらの関係における地域特性・経年的変化傾向などを明らかにする。

本論文では基本的には後者の立場を取る。この場合闇雲にデータを整理するのではなく、どのような指標・無次元量等を用いて整理すべきであるかを前もって検討しておく必要がある。本研究の目的は、このような点について基礎的な検討を行うことである。

まず水資源開発の投資効率の経年変化について調べる。布施(1977)¹⁾、中沢(1979)²⁾らと同様に、新規開発水量と開発費用の比を、開発効率、貯水効率、ダム単位体積建設費(の逆数)に分解し、それぞれの因子が経年的にどのように変化したかを調べる。次に上記3要因のうち、開発効率を例として取り上げ、河川の利用率の経年的な上昇と開発効率の低下の理由について検討を加える。同時に河川の利用率の上昇と利水安全度の低下の問題についても検討する。

本論文ではこれらの諸指標間の関係の合理的な整理の方法について検討することを主目的とする。よって以下に示す個々の解析結果がただちに一般的事実、あるいは傾向を示しているわけではない。以下に示す整理の方法に従って、多くの資料を整理することにより、貯水池の貯留調節機能についてより正確な知識が得られる可能性があることを示す。あるいはこのような整理の方法そのものについて再検討することが必要であることを指摘する。

2. 水資源開発における投資効率

2.1 分析の方針

近畿の重力ダムを例として、布施¹⁾、中沢²⁾らの考え方に従って水資源開発における投資効率の経年的変化について検討した。用いた資料は「近畿のダム(建設省近畿地方建設局)³⁾」である。

水資源開発の投資効率を次式のように分解して検討する。^{1) 2)}

$$\begin{aligned} \text{水資源開発の投資効率} &= \frac{\text{新規開発水量}}{\text{開発費用}} = \frac{\text{新規開発水量}}{\text{貯水容量}} \times \frac{\text{貯水容量}}{\text{ダム体積}} \times \frac{\text{ダム体積}}{\text{開発費用}} \\ &= \text{開発効率} \times \text{貯水効率} \times 1/\text{ダム単位体積建設費} \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)では、施設規模の指標として堤体積を取っているが、堤体積はダムの構造ごとに異なるので、貯水効率、ダム建設効率については、ダムの構造ごとに整理を行う必要がある。開発費用については主として

補償および周辺整備を目的とする費用と、直接的な開発費用にわけて考察する必要がある。右辺各項は水資源の投資効率の、水文統計学的側面、地理・地質学的側面、経済学的側面を代表している。

2.2 結果と問題点

近畿の重力ダムについて整理した結果を表-1、図-1に示す。昭和30、40、50年代完成、60年代以後完成予定のダムにわけて整理し、各要因の経年変化を調べた。図-1よりわかるように、データのバラツキに比べて、データの数には十分ではない。よって以下の結論のうち定量的に示した結果については、かなり大きな誤差が含まれている。重力ダム以外のダム型式については、資料が少ないので、このような分析は困難である。

各貯水池の容量は形式的に治水容量、利水容量等に分けられている。水資源開発(水量)に対応する容量は、一応利水容量と考えられるので、開発効率の評価における貯水容量としては、利水容量 V_D を用いた。

この場合本来なら、貯水効率の評価においては分子を利水容量、分母を利水用ダム体積とすべきである。当然のことながらダム本体に、ここまですぐ利水用、ここまですぐ治水用というような区別があるはずはない。よって止むを得ず、貯水効率におけるダム体積としてはダムの全体積を用いた。対応して貯水容量は総貯水容量とした。ダム建設効率の分母の開発費用についても総工事費とした。以上は次のような近似を意味する。

利水容量 / ダム体積の利水分 $\approx$ 総貯水容量 / ダム体積

本研究のようなマクロな分析においては、この程度の近似は許容しうるものと仮定する。

工事費の資料については次のような問題点がある。資料3)において、

- ① 直接の工事費(本体)と、補償・周辺整備関係工事費とを分けて示していない。
- ② どの時点からの調査費が含まれているのかわからない。
- ③ ある基準年価格に換算して比較する必要がある。

このうち②については、調査費は総工事費に対して支配的な割合を占めるとは考えられないので(少なくとも既設ダムについては)、ややあいまいなままで取り扱っても、解析結果に大きな問題点は生じない。③については卸売物価指数、建設デフレーター⁴⁾などを参考にして価格を基準化する方法が考えられる。本研究では、卸売物価指数により総工事費を昭和56年度価格に換算することにした。①については、資料3)を基礎資料とするかぎり対応の方法はない。

図-2に淀川水系の開発効率の変遷の様子を示す(建設省近畿地方建設局で整理したものの引用⁵⁾)。ただし横軸は実調査手年度であると思われる。現在(昭和59年2月)までに完成したものは、昭和45年以

表-1 近畿における水資源投資効率の経年変化(重力ダム)³⁾

項目	記号	単位	S30~39	S40~49	S50~59	S60~
開発水量	Q_D	m^3/sec	1.67	1.27	2.02	1.06
利水容量	V_D	$\times 10^6 m^3$	6.65	5.55	8.46	5.76
総貯水容量	V	$\times 10^6 m^3$	32.70	13.96	20.74	18.23
堤体積	W	$\times 10^6 m^3$	168.35	141.41	245.98	344.55
総工事費	C	$\times 10^4 円$	8.956	8.831	29.631	41.104
開発効率	Q_D/V_D	$\times 10^{-1}/sec$	0.251	0.228	0.239	0.184
貯水効率	V/W	$\times 10^3$	0.194	0.099	0.084	0.053
ダム単位体積コスト	C/W	$\times 10^4 円/m^3$	0.532	0.624	1.205	1.193
投資効率 [*]	Q_D/C_D	$\times 10^{-4} m^3/(sec \cdot 円)$	0.915	0.363	0.167	0.082

- ① Q_D, V_D は上水、工事の合計
- ② 'D' は利水分を表す
- ③ 3) では C_D (利水のための投資額) は与えられていない
よって $Q_D/C_D \approx Q/C$ と仮定する
- ④ $Q/C = (Q/V) \cdot (V/W) \cdot \{1/(C/W)\}$
ここで $Q/V \approx Q_D/V_D$ と仮定する
よって *) は次式により求めた
 $Q_D/C_D \approx (Q_D/V_D) \cdot (V/W) \cdot \{1/(C/W)\}$
- ⑤ 上段5項目はダム1基当りの平均値

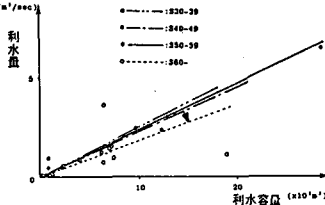


図-1.a 開発効率(利水容量と利水量の関係、近畿の重力ダム、以下の図についても同じ)

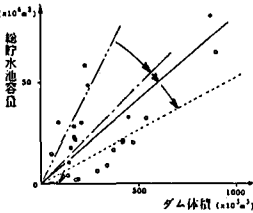


図-1.b 貯水効率(ダム体積と総貯水池容量の関係)

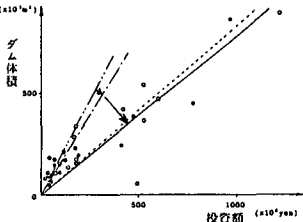


図-1.c 1/ダム単位体積当りの建設費(投資額とダム体積の関係)

前に着手した工事のみである。昭和45年以後着手の日吉・比奈知ダム以下については現在工事中、調査中の工事である。水資源開発方式については、琵琶湖総合開発、猪名川水利用高度化事業など、必ずしもダム建設のみによらない開発方式が含まれている。ダムについても、種々のダム形式による水開発が含まれている。図-2と、表-1、図-1を比較するときは、このような点について注意しておく必要がある。

2.3 結果の検討

表-1について検討する。たとえばダム1基当りの、上水・工水を合計した新規開発水量は、昭和30年代完成の重力ダムでは1.67 m^3/S 、以後昭和40～60年代完成のダムでは、1.27、2.02、

1.06 m^3/S である。とくに明瞭な変化傾向は見られない。利水容量、総貯水容量についても一貫した変化傾向は見られない。堤体積・総工事費については、昭和30年代完成の重力ダムと、昭和40年代完成の重力ダムでは差は見られないが昭和50年代完成、および昭和60年代以後に完成予定の重力ダムでは、急激に大きくなる傾向が見られる。

表-1と図-1より次のようなことがわかる。

- ① 昭和60年度以後に完成あるいは建設予定のダムを除けば、これまでのところ開発効率にはほとんど経年的な変化は見られない（図-1. a、表-1）。
- ② 昭和30年代完成と50年代完成の重力ダムを比較すると、貯水効率は約2/5に減じている（図-1. b）。
- ③ 同様に、重力ダムの建設効率（1/ダム単位体積建設費）も3/4～2/5に減じている（図-1. c）。
- ④ よって、式（1）全体としての投資効率はこの20年間で実質的に1/4～1/5（ $=2/5 \times 3/4 \sim 2/5 \times 2/5$ ）に減じている（表-1）。
- ⑤ 昭和40年代から50年代への移行にともなうダム単位体積建設費の高騰が著しい。

残念ながら資料3)には、補償・周辺整備費用と直接ダム建設に必要な費用とをわけて示していない。直接の建設費はある基準年価格に換算すれば、そう大きく変わっているとは考えられないので、上記のダム単位体積当りの建設費の高騰の原因は、ほとんど補償・周辺整備費関係の高騰によるものと考えられる。

図-1. aでは開発効率には経年的に顕著な変化傾向は見られない。図-2によれば、昭和50年代までに完成したダム（昭和45年以前着手のダム）においても開発効率がやや低下する傾向が見られる。これは上記①と異なる結果である。直観的に考えても、20年間の水資源開発の進展にもかかわらず水の開発効率があまり低下していないという結論には首肯しかねる。①の結論が出た理由としては次のような理由が考えられる。

- ① 開発水系・河川が変わる場合：特定の水系、あるいは河川での水資源開発に引き続いて、他の水系（河川）で、開発効率が落ちない地点・落ちない範囲で（重力ダムで）水資源開発を行う場合。
- ② ダム型式が変わる場合：重力ダムの建設適地が少なくなったとき、開発効率があまり落ちない範囲で他の型式のダムで水資源開発を行う場合。

このような場合には、近畿全域の各水系の水資源開発適地で一とおり水資源開発が終るまでは、急な開発効率の低下は生じない可能性がある。ただし一とおり水資源開発が終った時点では急激な開発効率の低下が生じる可能性がある。

手元の資料が不十分なので、これらの点については今後の検討を必要とする。

2.4 ま と め

近畿の重力ダムのみに限れば、次のような結論が得られた。

従来単位開発水量当りの水資源開発コストの上昇（投資効率の低下）の原因としては、河川の利用率の上

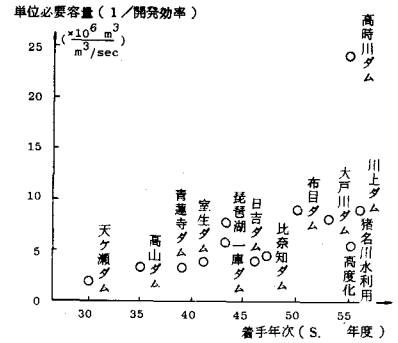


図-2 淀川水系の開発効率の変遷

昇にともなう（水文学的）開発効率の低下，地理・地質学的に見たダム適地の減少にともなう貯水効率の低下，補償・周辺整備費の上昇にともなうダム単位体積当りの建設費の上昇などがあげられてきた。これまでの分析で明らかとなっており，投資効率の低下の主因は，このうち貯水効率の漸減と，ダム単位体積当りの建設費の上昇である。これにより，水資源開発の投資効率はこの20年間に実質1/4～1/5に低下した。今後水資源開発を続けるとすれば，開発効率についても急激に低下することが予想される。

3. 河川の利用率と開発効率・利水安全度の関係

3.1 意義

式（1）の右辺の3要因のうち開発効率を取り上げる。

河川の利用度の上昇（水資源開発の進展）と開発効率の低下の関係の内部機構を説明することを試みる。同時に河川の利用率の上昇と利水安全度の低下の関係についても検討する。河川の利用率は次式で表わされる。⁶⁾

$$\text{利用率} = \text{確保流量} / \text{平均流量} \quad (2)$$

確保流量は基準点下流の取水量と河川維持用水の和である。

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。これらの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。

3.2 等価線形貯留定数⁷⁾

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 $L^3 T^{-1}$ 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 $[L^3] / [L^3 T^{-1}] = [T]$ 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-2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。

$$a = c \cdot V / \sigma \quad (3)$$

貯水池への流入量が定常正規変動時系列のときは，

表-2 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 (特に偶然変動の)	開発効率	貯留水の水質 年周期変動の調節

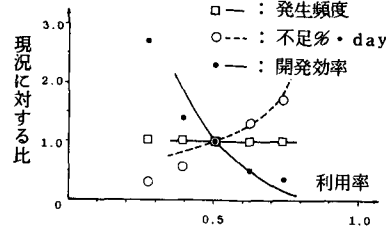


図-3 不足%・day，開発効率のケーススタディーと理論値の比較
(渇水発生頻度一定、利用率40%～70%)

ケーススタディー：大内他1982⁸⁾
理論値：線で示す

$$c = (1/\sqrt{2\pi}) \cdot \exp(-X^2/2), X = (x - \mu)/\sigma$$

ここに、 x は目標放流量、 X はその標準化変量。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、式(3)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、

$$k_2 = k_1 + a \quad (4), \quad \sigma_2^2 = \{k_1 / (a + k_1)\} \sigma_1^2 \quad (5)$$

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 ($V \rightarrow 0$, よって $a \rightarrow 0$) 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、 $V \rightarrow \infty$ 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。

3.3 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、これらを標準化変量になおすと

$$X_1 = (q_1 - \mu) / \sigma_1, \quad X_2 = (q_2 - \mu) / \sigma_2 (< 0)$$

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。

$$q_{D*} = q_D / \{(-X_1) \cdot \sigma_1\}, \quad a_* = c \cdot V / (k_1 \sigma_1)$$

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)。 $0 \leq q_{D*} < 1$, $a_* \geq 0$ 。このとき、

$$q_{D*} = 1 - 1 / \sqrt{a_* + 1} \quad (6)$$

$$a_* = \{1 - (1 - q_{D*})^2\} / (1 - q_{D*})^2 \quad (7)$$

$$da_* / dq_{D*} = 2 / (1 - q_{D*})^3 \quad (8)$$

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(6)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*} は無次元限界開発水量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。

$$[\text{不足}\% \cdot \text{day}] \approx [\text{渇水1回当りの総不足水量}] \approx [\text{渇水の深さ}] \cdot [\text{渇水の平均継続時間}]$$

$$[\text{渇水の平均深さ}] \approx \left\{ \begin{array}{l} \sigma_1^1 \\ \sigma_2 = \sqrt{k_1 / (a + k_1)} \sigma_1 \end{array} \right. \quad [\text{渇水の平均継続時間}] \approx \left\{ \begin{array}{l} k_1 \quad (\text{現状}) \\ a + k_1 \quad (\text{調節後}) \end{array} \right.$$

以上より、

$$[\text{不足}\% \cdot \text{day}] \approx \left\{ \begin{array}{l} k_1 \sigma_1 \\ (a + k_1) \cdot \sqrt{k_1 / (a + k_1)} \sigma_1 \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} (\text{現状}) \\ (\text{調節後}) \end{array} \right.$$

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、

$$r_d = 1 / (1 - q_{D*}) \quad (9)$$

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。

3.4 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。⁸⁾ た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、利用率の増大に反比例して減少する。

以上のうち、①は式(4)などに表現されている。④、⑤は式(6)～(9)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(8)、(9)を比較する(図-3)。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。

3.5 ま と め

以上ごく簡単な理論的考察に基づいて、水の貯留・調節にともなう2～3の問題を整理してみた。このような簡単な考察によっても、これまで経験的にしか知られていなかった重要な性質のいくつかを説明することができることを示した。

4. お わ り に

式(1)を用いて、近畿の重力ダムによる水資源開発の投資効率の経年変化とその理由について分析した。次のような結果が得られた。

- ① 投資効率はここ20年間で実質1/4～1/5に低下した。
- ② これは貯水効率が2/5程度、ダム建設効率(1/ダム単位体積当りの建設費)が3/4～2/5に低下したことによる。これまでのところ開発効率には大きな低下は見られなかった。
- ③ 今後開発を続ければ開発効率も急激に低下することが予想される。

河川の利用率の上昇と開発効率の低下の関係について半理論的な解析を試みた。同様に利用率と利水安全度の関係についても検討した。本論文で示した粗い理論的取り扱いによっても、これまで経験的にしか知られていなかった、水の貯留・調節に関する重要な性質のいくつかをうまく説明することができることを示した。貯水池理論についてはより正統的な方法による多くの研究成果が示されている。これらは実用面のみならず、水資源計画論の体系化においてもおおいに役立つはずである。

〔参考文献〕

- 1) 布施徹志：水のコスト分析からみた価格政策，水資源に関するシンポジウム，PP.99-105，1977.
- 2) 中沢式仁(土木研究所資料)：渇水時の水管理に関する計画学的研究，土研資料第1508号，PP.26-39，1979.
- 3) 建設省近畿地方建設局：近畿のダム。
- 4) 国土庁水資源局：新訂水資源便覧，創造書房，
- 5) 土木学会関西支部：水資源システムの分析・計画・管理および保全に関する最近の技術，P.104，1983.
- 6) 同上，P.74.
- 7) 室田明・江藤剛治：利水を目的とした貯水池の貯留・調節機能に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第222号，PP.57-67，1974.
- 8) 大内忠臣・佐々木元・松下越夫：利水安全度問題に関する2，3の分析と考察，土木技術資料24-1，PP.21-26，1982.