

水量と供給信頼度を評価基準とする貯水池の 流量調整機能の解析

ANALYSIS OF FUNCTION OF RESERVOIR ON RIVER FLOW REGULATION
UNDER CONSIDERATION OF RELIABILITY OF WATER SUPPLY

室 田 明*・神 田 徹**

By Akira MUROTA and Tohru KANDA

1. 概 説

貯水池の操作問題 (operational problem) は次の 2 つに大別できる。

A. 貯水池の操作ルール (あるいは放流ルール) を最適化する問題。

B. 放流ルールが与えられている場合に、貯水量および放流量の確率を求める問題。

本研究の対象は B. の問題であり、関連する既往の研究を簡単に review しておく。

この問題は、数学的プログラミングにより最適化された放流ルールに従って貯水池を操作した場合の貯水量の挙動を予測し、放流量の特性を明らかにするものであり、通常は流入量の不確定性のゆえに確率論的な取り扱いがなされる。その取扱いはさらに次の 2 つのカテゴリーに分類できる。

B-1. 貯水池容量を無限大と仮定し、流入量の確率特性と放流ルールを与えて貯水量の確率分布や積率を求める問題。

B-2. 貯水池容量が有限の場合に、流入量特性と放流ルールを与えて貯水量の確率分布、その極限分布、あるいは貯水池が満杯になる確率および空になる確率を求める問題。

B-1 では、時系列から得られる統計量のうち平均値からの偏差の累積和 (partial sum) について、その最大値、最小値および範囲 (range) の分布が研究対象である。この問題に対しては、range に関する Hurst¹⁾ の指摘 (Hurst 現象) 以来、Feller²⁾、Anis and Lloyd³⁾、Yevjevich⁴⁾ らによって研究成果が蓄積せられ、さらに Cruz⁵⁾ によって流入量時系列の非定常性や従属性を導入した理論的研究が報告されている。

B-2 に関しては、Moran⁶⁾ が最初に確率理論を導入し、貯水量の定常確率に関する方程式 (dam equation) を推移確率行列を用いて表示した。その後、Moran⁷⁾、Gani⁸⁾、Kendall⁹⁾ らによって貯水池流入の確率分布を実際河川の流量の分布に近づけたり、放流ルールをより一般的な形で与えた場合の解析解が求められた。工学的観点からは、Langbein¹⁰⁾ が非正規分布の流入量かつ非線形の放流ルールに対する解法 (probability routing) を与えた。また Lloyd は、Moran のモデルで仮定されている流入量時系列の独立性と定常性の制限を取り除いて流入量がマルコフ過程に従う場合¹¹⁾と確率分布が季節的に変化する場合¹²⁾の解法を提示した。

B. の問題に対する手法はこのように拡張されてきたが、B-1 では流入量時系列の定常性が基本的な前提であり、B-2 では時刻 $t \rightarrow \infty$ における定常な貯水量状態が主たる対象である。したがって、一般に流入量の非定常性が強い場合、放流ルールが複雑な場合、あるいは定常に達しない状態での貯水量確率を求める場合は上述の解法には限界がある。このような貯水池システムに対する基礎的アプローチとして室田・江藤¹³⁾は貯水池システムの非線形を除去する等価線形貯留システムを提案し、これによってシステムの諸特性を解析的に導く手法を報告している。今日もっとも多く用いられるのは高度の計算機性能を利用したシステム・シミュレーションの方法である。しかしながら、シミュレーション法はシステムの複雑な諸条件が組み込まれた問題に有力な適用性を持つ反面、ケース・スタディーに終る弱点があり、このために、得られた成果の応用範囲はおのずから限られる。

さて上記 A., B. の問題は貯水池操作問題の両輪であるが、筆者らは流入量特性から水需要の評価に至る貯水池システムの挙動を一貫して把握することを目指して両者の問題への接近を試みている。この見地から、A. に関しては利水用貯水池の最適操作ルールの決定法をすでに論じた¹⁴⁾。問題のモデル化にあたっては、多種の水需要

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 神戸大学助教授 工学部土木工学科

と一般的な流入量時系列への適用性を得るために少数の変数および定数による簡単な関数表現を用い、定数の値には自由度を与えている。このような貯水池システムについて本研究はB.の問題を取り扱う。

貯水池による流量調整は設定した評価関数によって異なった性状を示し、また流入量、貯水池容量等のシステム要素にも依存する。本研究の目的はこれらの評価関数形や貯水池システム要素の条件に対応していかなる流量調整が達成されるかを明らかにすることであり、またその流量調整を行うために放流ルールがいかなる構造を有するかを解析することである。そのためにはシステム要素に一般的な条件を与える必要があるから、前述のような解析的手法はそのまま適用することができない。本研究では各システム要素を代表するパラメーターの値を変化させて貯水池操作のシミュレーションを行い、その変化に対する感度分析から流量調整の一般的性質を明らかにする。

本研究の概要は次の通りである。まず評価関数、流入量特性、貯水池規模に対する感度分析から最適放流ルールの特性を解析する。次にこの放流ルールに基づく貯水池操作のシミュレーションによって、貯水量および放流量の統計的特性を明らかにし、流量調整の機構について考察する。さらに、流量調整に関する指標を選びその計算値から貯水池の流量調整機能を定量的に評価する。これらのシミュレーションと感度分析の結果から、利水上要求される貯水池の流量調整機能がシステム要素のいかなる条件の下で達成されるかを明らかにする。

2. 貯水池最適操作の数値解析

(1) 貯水池操作の最適化手法

まず、対象とする貯水池システムの概要と貯水池操作の最適化の方法を要約しておく。詳細は既報の文献(14)を参照していただきたい。

利水用単一貯水池の1年間の最適操作において、1年を12段階に分けて1か月ごとに操作ルール(放流ルール)を決定する。

(1) 貯水池流入量の時間単位を半月とすると、半月流量時系列モデルは次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} q_{ij}^k &= \bar{q}_{ij} + q' = (1+X)\bar{q}_{ij}, \\ (k=1, 2, \dots, 6; j=1, 2, \dots, 12) \end{aligned} \right\} \dots(1)$$

$$Q_{ij} = \bar{Q}_j + Q', \quad \bar{q}_{ij} = (1/6)Q_{ij}$$

ここに、 q_{ij}^k は i 年 j 月の第 k 半月流量、 \bar{q}_{ij} は i 年 j 月の平均半月流量、 q' は \bar{q}_{ij} のまわりのストカスティック成分、 Q_{ij} は i 年 j 月の月流量、 \bar{Q}_j は j 月の平均月流量、 Q' は \bar{Q}_j のまわりのストカスティック成分で

ある。また、 $X = (q_{ij}^k - \bar{q}_{ij}) / \bar{q}_{ij}$ は各月ごとにパラメーター値の異なる対数正規分布(2-パラメーター型)に従い、その自己相関係数はゼロとみなせる。

(2) t 月の評価関係を次式で表わす。

$$f_t(C_t, M_t) = C_t^a \cdot M_t^b \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 f_t は t 月の評価関数、 $C_t = C_t(z^t)$ は t 月の目標放流量で t 月初期貯水量 z^t の関数として定めるべき決定変数、 $M_t = M_t(C_t)$ は目標放流量 C_t を貯水池から供給可能な確率で、これを供給信頼度とよぶ。

(3) 貯水池最適操作に関する DP の関数方程式は次式で与えられる。

$$F_t(z^t = V_n) = \text{Max}_{C_t} \{ C_t^a \cdot M_t^b + \sum_{m=1}^N p_{mn}^t(V_n) \cdot F_{t+1}(z^{t+1} = V_m) \} \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 $F_t(z^t = V_n)$ は t 月初期貯水量が $z^t = V_n$ であるときの t 月から終端月までの最適総利益、 $p_{mn}^t(V_n)$ は貯水量の推移確率である。

(4) t 月の第 k 半月初期貯水量の確率は次式で与えられる。

$${}^tP^k = [{}^tP(V)]^{k-1} \cdot {}^tP^1 \quad (k=2, 3, \dots, 7) \dots(4)$$

ここに、 ${}^tP^k$ は t 月の第 k 半月初期貯水量の確率ベクトル、 $[{}^tP(V)]^{k-1}$ は t 月の第1半月貯水量から第 k 半月貯水量への推移確率行列である。上式で $k=7$ は $(t+1)$ 月の第1半月を意味するから、第1月の初期貯水量状態を定めれば任意の月の任意の半月初期貯水量の確率が上式から求められる。

式(1)~(3)から貯水池操作の最適解、すなわち最適放流量 $C_t^*(z^t)$ および最大利益 $F_t(z^t = V_j)$ を計算できる。得られた数値解を以下に分析する。

(2) 貯水池システムの諸量

a) 貯水池容量

貯水池容量の基準値を木津川・高山ダムの有効容量を参考にして次の値にとる。

$$\text{Vol. 1} = 4.92 \times 10^7 (\text{m}^3)$$

この貯水池容量を一定値 $4V$ (基準貯水池容量の場合 $2.2738 \text{ m}^3/\text{sec} \cdot \text{day}$) ごとに離散的な50の区間に等分割し、その値を V_1, V_2, \dots, V_{50} とする。貯水量が $[V_m, V_{m+1})$ にあるときその貯水量状態を $z=m$ で表わすことにする。 $z=1$ は空の状態、 $z=50$ は満杯の状態を意味する。

貯水池規模(容量)の影響を調べるために、基準値 Vol. 1 の0.5~2.0倍の容量を考え次の7種とする。

$$\text{Vol. (0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0)}$$

b) 貯水池流入量

流入量変動の影響を調べるために、各月の平均半月流

量は観測流量の値に固定し、半旬流量の標準偏差だけを観測流量の値より増加あるいは減小させた流入量時系列を用いる。このような時系列は次のように与えられる。

任意の月について観測資料に基づく変量を基準変量 X_0 とし、資料の平均値と標準偏差を基準値とする。この基準標準偏差を各月とも p 倍した場合の新たな変量 X_i を考える。すなわち、 $X_i (i=0, 1)$ の平均値、分散をそれぞれ μ_{xi}, σ_{xi}^2 で表わすとき

$$\mu_{x1} = \mu_{x0}, \sigma_{x1} = p \cdot \sigma_{x0} \dots\dots\dots (5)$$

とする。いま、 X_0, X_1 がいずれも 2-パラメーター対数正規分布に従うとき、 $\ln X_i$ についての平均値と分散に関して次式の関係がある。

$$\mu_1 = \mu_0 + (1/2)(\sigma_0^2 - \sigma_1^2) \dots\dots\dots (6)$$

$$\sigma_1^2 = \ln(p^2 \cdot \exp(\sigma_0^2) - p^2 + 1) \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 μ_i, σ_i^2 はそれぞれ $\ln X_i$ についての平均値、分散である ($i=0, 1$)。

基準値 μ_0, σ_0 を与えれば上式から μ_1, σ_1 が得られるので、変量 X_1 の確率密度関数 (2-パラメーター対数正規分布) が次式のように定まる。

$$f(X_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_1 X_1} \exp\left\{-\frac{(\ln X_1 - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right\} \dots\dots\dots (8)$$

半旬流量については前述の通り、 $X' = X + 1 = q_{ij}^k / \bar{q}_{ij}$ が対数正規分布に従う。ゆえに X' の標準偏差を p 倍することは、半旬流量 q_{ij}^k の標準偏差を p 倍することと対応する。

本計算では標準偏差の倍率 p を次の値にとる。

$$p = 0.5, 0.8, 1.0, 1.2$$

なお、基準とした流量時系列の特性値は表-1 (高山ダム地点, 1918~1965 年) の通りである。

c) 評価関数

式 (2) で表わされる評価関数において、定数の値を $a=0.3, 0.5, 0.7, 1.0; b=1, 2, 3$ とする。ただし、 $b=1$ のときには評価関数の極大値が不明瞭なために最適目標放流量は定めがたく、また $b=2\sim 3$ の範囲および $a=0.3\sim 0.7$ の範囲では a, b の値による最適値の差異は無視しうる程度に小さい。この点から b の値としては主として $b=3$ (または 2) を用いる。 $a=1.0$ と $a<1.0$ の場合とは後述するごとく放流ルールが基本的に異なるが、後者の代表値としては $a=0.5$ を用いる。

d) 貯水池操作期間と終端条件

貯水池操作の計画期間を 1 水年と想定するが、本研究ではその始期を

表-1 基準流量時系列の特性値

Month	月流量 ($\frac{m^3}{sec} \cdot day$)		低水半旬流量 ($\times 5 \frac{m^3}{sec} \cdot day$)	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
Jan.	348.1	132.5	11.26	3.07
Feb.	372.1	180.7	12.12	4.03
Mar.	456.3	170.6	14.02	4.74
Apr.	511.4	169.2	16.19	6.16
May.	515.3	246.8	14.76	6.92
June	751.5	414.4	15.41	9.46
July	811.6	437.8	17.97	9.80
Aug.	712.7	561.6	13.14	7.25
Sep.	1120.9	686.5	19.03	7.35
Oct.	861.7	479.1	19.40	7.90
Nov.	507.8	192.0	15.42	5.27
Dec.	383.9	135.3	12.86	4.06

4 月初めとする。つまり 4 月初めから翌年の 3 月終わりまでの 1 水年を計画期間とする。

後進型 DP によって最適決定系列を得るには最終月の貯水量条件を与える必要があるが、ここでは簡単のために、最終月の月末でその貯水量の状態にかかわらず同一の潜在的利益値を与え、1 年間の最適化で計算を打切る。検討結果によれば終端条件の影響がおよぶ期間はせいぜい 3 か月であり、したがってそれ以前の期間では、終端条件を設定せずに endless な計算によって得られる定常解と一致することが明らかになった。よって計画期間の主要な部分では上記の終端条件の影響を無視して解析が可能である。

(3) 最大利益¹⁵⁾

最適解の中、まず最大利益すなわち評価関数の最適値について述べる。

a) 評価関数形の影響

任意の i 月以降最終月 (3 月) までの最大利益および i 月の最適放流量は図-1 のごとく得られる。図において丸印の点の C および F の値がそれぞれ i 月初期貯水

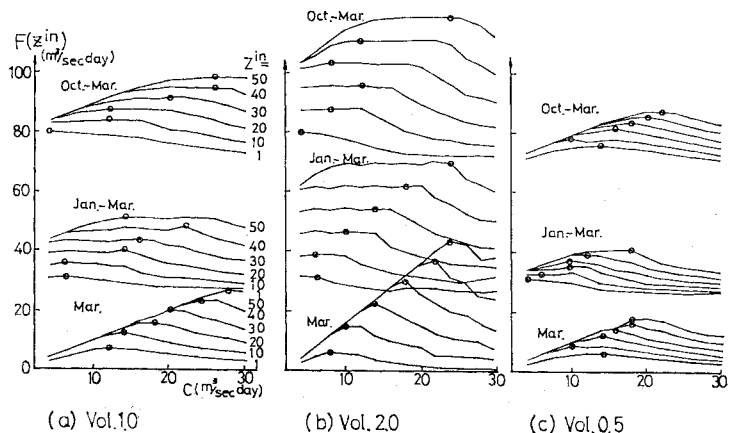


図-1 最適放流量と最大利益

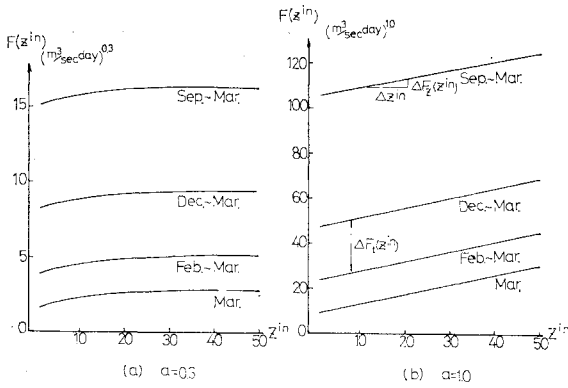


図-2 最大利益の変化

量 z^{in} に対する最適解, $C^*(z^{in})$ および $F(z^{in})$ である。

基準貯水池容量 (Vol. 1) について, $F \sim z^{in}$ の関係を評価関数ごとに示せば 図-2 のごとくである。評価関数の定数が $a=1.0$ の場合には z^{in} に関して F は直線的に増加し, その勾配 $\Delta F_z(z^{in})/\Delta z^{in}$ は初期貯水量を6つの半月流入量に均等に分配したときの勾配 (1/6) に等しい。これは初期貯水量の単位量 Δz^{in} が受けもつ潜在的利益 $\Delta F_z(z^{in})$ が z^{in} の大きさに関係せず, Δz^{in} が完全放流されたときに得られる利益に等しいことを意味する。 $a < 1.0$ の場合は z^{in} の増加とともに勾配, したがって $\Delta F_z(z^{in})$ は徐々に減小する。これは評価関数形に限界効用低減の効果を導入した結果である。

b) 流入量変動の影響

流入量変動の指標である標準偏差と最大利益の関係は 図-3 のごとくである (Vol. 1, $z^{in}=30$)。ここに $\sigma_0(X)$ は基準流入量の標準偏差である。図によれば流入量変動の増加に伴う最大利益の減小が明らかであるが, このような差異を生ぜしめる流量調整機構については次章 3. で検討する。

c) 貯水池規模の影響

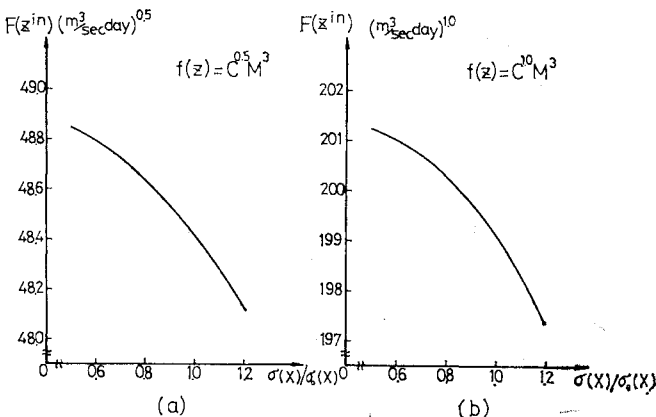


図-3 流入量変動による最大総利益の比較

1年間 (4月から3月まで) の総利益を種々の貯水池容量について比較すれば 図-4 のごとくである。図によれば, 基準貯水池容量以上に容量を増大させても最大総利益はほとんど増加せず (Vol. 1 の F に対する Vol. 2, 3 の F の増加量は約 0.6%), 一方, 基準容量以下では総利益は相当に減小することがわかる。これは基準容量以下の場合には最適目標放流量がやや大きく選ばれ, その結果信頼度 M が減小することによる。このような差異は根本的には無効放流量と関連するのであるが, 最適化手法による計算値からはそれを直接定量化することはできない。流入量変動の影響とともに次章で検討する。少なくとも用いられた流入量等の条件に対しては, 基準貯水池の容量は $a=1.0, b=3$ の場合の評価関数に関してほぼ適正な規模であるといえよう。

ここでは流入量変動, 貯水池規模の個々の影響について調べたが, 文献 13) 等によれば両者の比 σ/V (σ : 流入量標準偏差, V : 貯水池容量) を貯水池の流量調整機能に影響する支配的なパラメーターとして選ぶことが考えられ, 以下に述べる放流ルールおよび 3. の解析ではこれを定性的に裏付ける結果が示される。ただし定量的な検討は今後の課題としたい。

(4) 最適放流ルール

最適放流ルールの基本構造は文献 14) に述べた通り次のように定式化できる。

$$\left. \begin{aligned} C_t^* &= C_z(z_t^{in}, \lambda) + C_q(\bar{q}_t, \lambda) \\ &= \frac{1}{6} \tau z_t^{in} + \beta \bar{q}_t \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

ここに, z_t^{in} は t 月の初期貯水量, \bar{q}_t は t 月の平均半月流量である。 τ は貯水量依存係数, β は流入量依存係数とよぶことができ, それぞれ次の諸量の関数である。

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \tau\{f_t(C_t, M_t), \mu_{tm}(q_t), V\} \\ \beta &= \beta\{f_t(C_t, M_t), \mu_{tm}(q_t), V\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

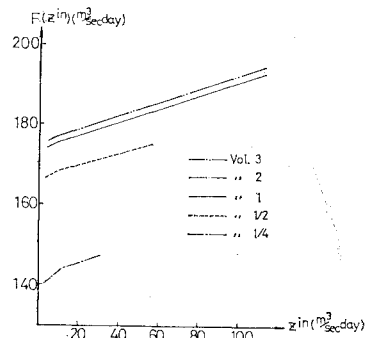


図-4 貯水池規模による年総利益の比較

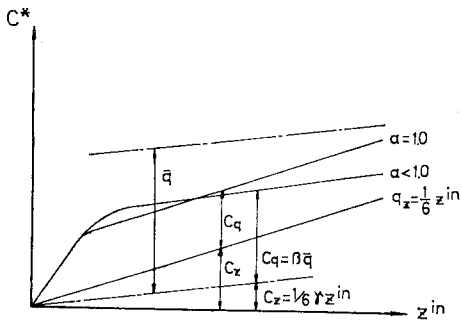


図-5 最適放流ルールの模式図

すなわち、 r, β は評価関数形 f , 流入量の分布特性値 (m 次のモーメント) $\mu_m(q)$, 貯水池規模 V によって異なる特性をもつ量である。

以上の通り最適放流ルールは係数 r, β によって特性づけられるので、以下にこれらの係数の性質を感度分析により調べる¹⁰⁾。

a) 最適放流ルールと評価関数形の関係

評価関数の定数が $a=1.0$ と $a<1.0$ の場合について

最適放流ルールを模式的に示せば 図-5 のごとくである。この図から r は z^{in} に対する C^* の勾配 (の 6 倍), また β は月平均半旬流量 \bar{q} に対する C_q の比率として求められる。 r, β 値の年間変化を 図-6, 7 に示す。この図から r, β の性質を読みとることができる。

(i) r について

評価関数の定数が $a=1.0$ の場合はすべての月で $r=1.0$ であり、一方 $a<1.0$ の場合には終端条件に支配される 3 月を除いて $r<1.0$ である。終端条件の影響は 1 月以降である。また、 a の値が小さいほど r の値は小さい。

(ii) β について

3 月を除いて $a<1.0$ の場合の β 値は $a=1.0$ の場合の β 値より大きい。 $a<1.0$ の場合には終端条件の影響は明らかでない。 $a=1.0$ の場合には 3 月に大きな値をとるが、これは終端条件の影響と考えられる。

以上のような r, β の性質から、最適放流ルールについて次の特性が明らかになった。

貯水池放流量の“水量”に重点を置く評価関数 ($a=1.0$) に対しては、最適放流ルールに支配的に関与する要素は初期貯水量である。一方、供給の“信頼度”に重

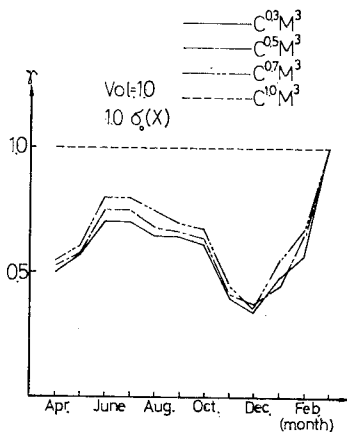


図-6 r の年間変化

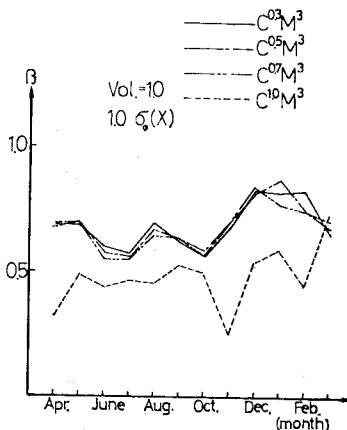


図-7 β の年間変化

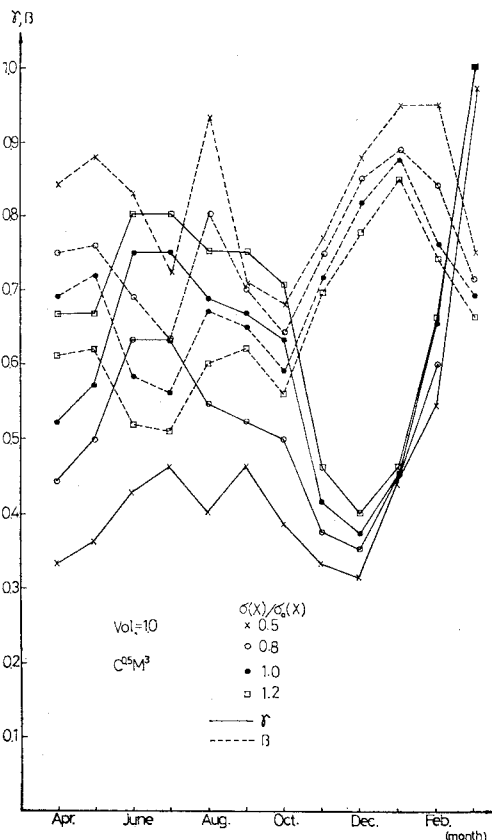


図-8 r, β の年間変化 ($a=0.5$)

点を置く評価関数 ($a < 1.0$) に対しては、最適放流ルールは初期貯水量よりもその月の流入量に依存する度合が相対的に高い。

b) 放流ルールと流入量変動の関係

式 (10) における流入量の分布特性値として、半月流量の標準偏差を採用する。標準偏差が基準値と異なる流量時系列は式 (8) の通り得られる。

(i) $a=0.5$ の場合に 4 種類の流入量時系列に対する r, β の年間変化を 図-8 に示す。次に、標準偏差の倍率 p の値を変化させたときの r 値および異なった月の r 値のすべてを流入量標準偏差の値に対してプロットすれば 図-9 のごとくである。この図によれば、1 月以降を除いて各点はほぼ同一直線上にのるから、月による標準偏差の相違の影響は同一月の流入量標準偏差の変化による影響と同程度と見なせる。 β については、すべての β 値と流入量標準偏差の関係は 図-10 のごとくである。 r と同様に、月による標準偏差の相違の影響と純粋の流入量標準偏差変化による影響はほぼ同程度である。

これらの結果から、 $a < 1.0$ の場合の r, β と流入量標準偏差の関係を次のように要約することができる。

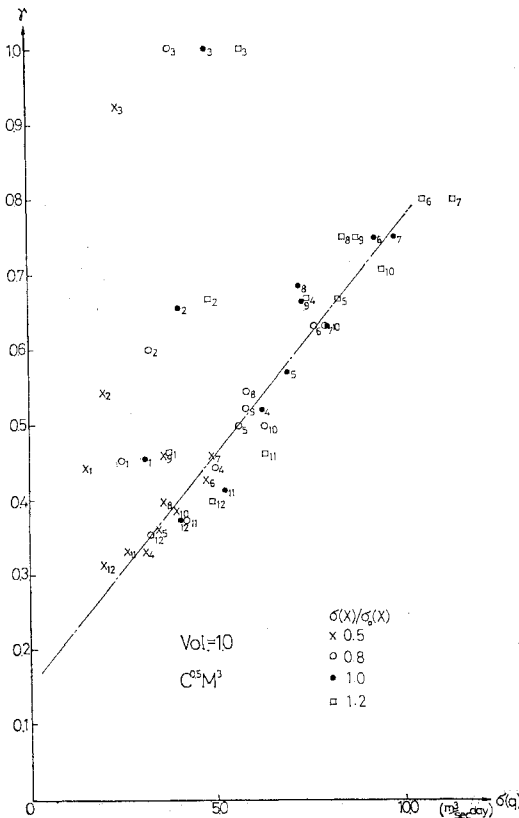


図-9 r と $\sigma(q)$ との関係

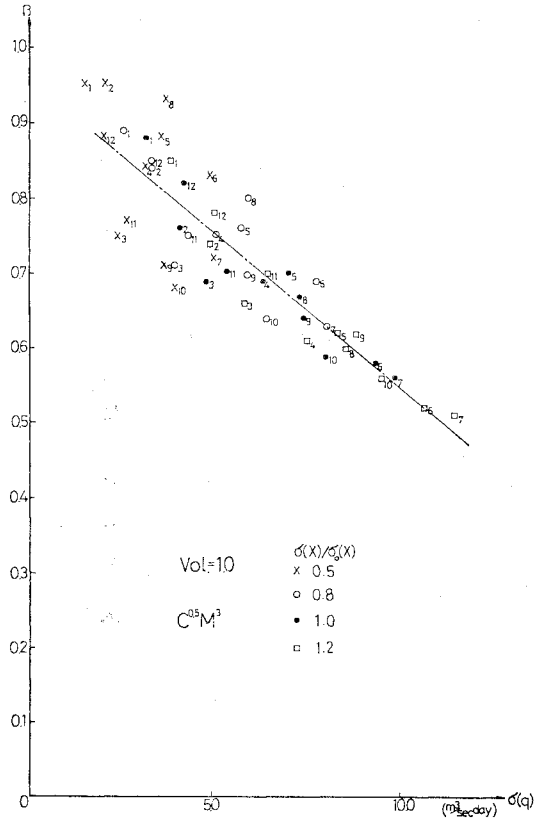


図-10 β と $\sigma(q)$ との関係

(a) r と流入量標準偏差 $\sigma(q)$ の関係、 β と $\sigma(q)$ の関係はともに線形関係で近似でき、その関係式はそれぞれ次式で表わされる。

$$r = 0.153 + 0.062 \sigma(q) \dots\dots\dots (11)$$

$$\beta = 0.957 - 0.042 \sigma(q) \dots\dots\dots (12)$$

ただし上式において、終端条件の影響する 1, 2, 3 月の資料は除いてある。

(b) 終端条件の影響は r 値において顕著であり、その影響期間は 1 月～3 月である。特に 3 月では、 $r=1.0$ である。これは最終月では翌月以降を考慮せずにその月だけの最適化を行えばよく、そのために月初期貯水量の全量が放流されることによる。 β 値には終端条件はほとんど影響しない。3 月における β 値は流入量時系列によって異なり $\beta=0.65 \sim 0.75$ の値をとる。

(ii) $a=1.0$ の場合は r 値は各月ともに $r=1.0$ であるから、 β 値について調べる。 β 値の年間変化を 図-11 に示す。8 月までは β 値の変化は少なく $\beta=0.4 \sim 0.5$ であるが、9 月以降の変化は激しい。前述の通り $a=1.0$ の場合の放流ルールは貯水量への依存度が大きて流入量依存度が小さいために、流入量の変動に対する適応性があり変化が激しくなると考えられる。3 月の β 値

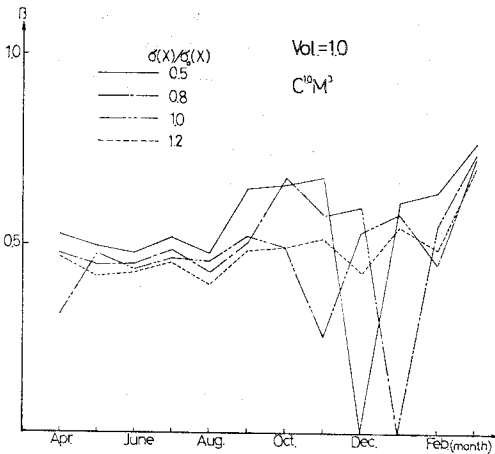


図-11 β の年間変化

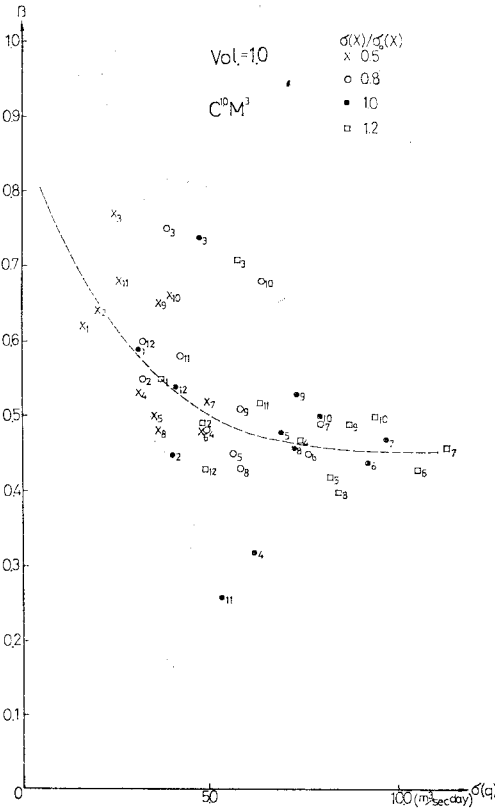


図-12 β と $\sigma(q)$ との関係

はほぼ一定値 $\beta \approx 0.75$ に収斂し、 $a < 1.0$ の場合より大きな値をとる。

次に、 β と流入量標準偏差の関係は 図-12 のごとくであり、終端条件の影響による3月および特異ルールが生ずる4月、11月を除けば β は $\sigma(q)$ の増加とともに指数関数的な減小傾向を示す。

c) 最適放流ルールと貯水池規模の関係

(i) $a < 1.0$ の場合は放流ルールの直線範囲 (C-領域)¹⁴⁾ が規模の減小とともに狭くなり、その直線勾配は規模の減小とともに増加して (1/6) に近づく。この領域での r, β の特性を分析した結果、貯水池規模の影響は次のように要約できる。

(a) r, β と貯水池規模との定性的な関係は、規模の減小とともに r は増加し、 β は減小する。

(b) r の年間変化は貯水池規模が増大すれば平滑化され、1月以降は終端条件の影響を受ける。3月の r 値は規模に関係なく $r=1.0$ である。

(c) β の年間変化は規模の増大とともに大きくなる。

(d) Vol. 0.5 では長期間にわたり $r=1.0$ であり、評価関数の定数が $a=1.0$ の場合に近い。Vol. 1.25 以上になれば r, β の貯水池規模による影響は少なく、その年間変化は r と β で逆のパターンを示す。

(ii) $a=1.0$ の場合は $r=1.0$ であるから、 β 値について述べる。

(a) 規模が小さいほど β の年間変化は少ない。

(b) β の値は規模の増大とともに若干減小し、一定値に漸近する。また1月以降の β は規模に関係なくほぼ一定の値をとる。

(c) $a < 1.0$ の場合と比較すれば、 $a=0.5$ の場合はほとんどの月で $\beta > 0.5$ であるのに対して、 $a=1.0$ の場合は $\beta < 0.6$ である。すなわち、2.(4) a) で述べた評価関数形の影響があらわれている。

3. 貯水池の流量調整機能^{16), 17)}

(1) 流量調整機能の指標

前章のように決定された最適放流ルールに従うことによって、貯水池が評価関数最適化の機能を最大限に発揮することは保証されるのであるが、この最適解からは流量そのものの調整に関する貯水池機能、たとえば流入量変動と放流量変動の関係等は明らかにされない。なぜならば、一般に評価関数は経済的指標を含む種々の価値から構成される複雑な関数であるためである。

貯水池の一般的な水量制御機能を把握するためにはこのような評価関数値によるほかに、貯水池システムに直接付随し、しかも評価関数の主要な構成要素となり得る水文統計量に関して貯水池機能を定量的に評価しておくことが重要である。本章では流量調整機能の指標として次の量を採用する。

- (a) 流入量平均値と放流量平均値との関係。
- (b) 流入量標準偏差と放流量標準偏差との関係。
- (c) 無効放流特性。

貯水池操作の確率論的追跡およびシミュレーションによって上記指標の値を算出し、これによって流量調整機能を定量化するとともに、感度分析からその一般的特性を解明する。

(2) 貯水量の確率分布

a) 貯水量変化の特性

最適放流ルールに基づいて貯水池操作が行われるとき、式(4)から各期間の貯水量の確率分布が求められるが、その分布特性値を調べる前に貯水量変化の基本的特性を述べておく。

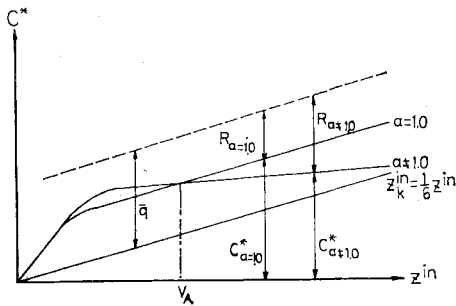


図-13 貯水量変化と放流ルールの関係

最適放流量は月初期貯水量 z^{in} の関数として 図-13 のように与えられるが、 z^{in} は6半旬間の放流に対するポテンシャルであるから各半旬ごとの放流に関する初期貯水量は $z_k^{in} = (1/6)z^{in}$ である。したがって、図-13の放流ルールは半旬初期貯水量 z_k^{in} に対する放流ルールと考えてもよい。このとき z_k^{in} に対する放流の結果、その半旬期末(翌半旬初期)の平均貯水量は次式で与えられる。

$$R = z_k^{in} + \bar{q} - C^* \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 R は半旬期末の平均残留貯水量である。

次に、半旬初期貯水量 z_k^{in} に対する残留貯水量 R の比を貯水量残留率とする。すなわち、

$$r = R/z_k^{in} \dots\dots\dots (14)$$

ここに、 r は平均貯水量残留率である。

貯水量の残留状態を表わす R, r の値は放流ルールに関係し、式(9)から次のように表わされる。

$$R = z_k^{in} + \bar{q} - \{(1/6)r z^{in} + \beta \bar{q}\}$$

$$= (1-r)z_k^{in} + (1-\beta)\bar{q} \dots\dots\dots (15)$$

$$r = 1-r + (1-\beta)(\bar{q}/z_k^{in}) \dots\dots\dots (16)$$

上式の通り R, r は一般には z_k^{in} と \bar{q} の関数である。特別の場合として、

(a) $r=1.0$ とすれば

$$R = (1-\beta)\bar{q}, r = (1-\beta)(\bar{q}/z_k^{in}) \dots\dots\dots (17)$$

(b) $\beta=1.0$ とすれば

$$R = (1-r)z_k^{in}, r = 1-r \dots\dots\dots (18)$$

すなわち、初期貯水量に完全に依存する場合 ($r=1.0$) には初期貯水量にかかわらず半旬後の貯水量は一定の貯水量状態(流入量によって決まる)に収斂する。一方、流入量に完全に依存する場合 ($\beta=1.0$) は r は初期貯水量にかかわらず一定値をとる。つまり、流入量をすべて放流する場合にはどの貯水量状態から放流しても貯水量が残留する割合は変わらない。前者の貯水量変化を残留量一定型、後者を残留率一定型とよぶことにする。貯水量変化がいずれの型に近いかは、係数 r, β の値による。

b) 貯水量分布と評価関数形の関係

半旬流入量は対数正規分布に従うが放流ルールが貯水量に関してほぼ線形的であるため、6半旬後の各月期末貯水量の確率分布は貯水量の両端部を除いて正規分布に漸近する。ゆえに、確率分布の特性値として平均値 \bar{z}^{in} 、標準偏差 $\sigma(z^{in})$ を用いてそれらの年間変化を示せば 図-14, 15のごとくである。これらの図から貯水量分布に対する評価関数形の影響を次のように要約できる。

(i) $a=1.0$ のとき貯水量変化は残留量一定型に近く、 $a<1.0$ のとき残留率一定型に近い。

(ii) 定数 a が小さいほど分布は貯水量の大きい位置にある。したがって、貯水量が満杯になる確率すなわち

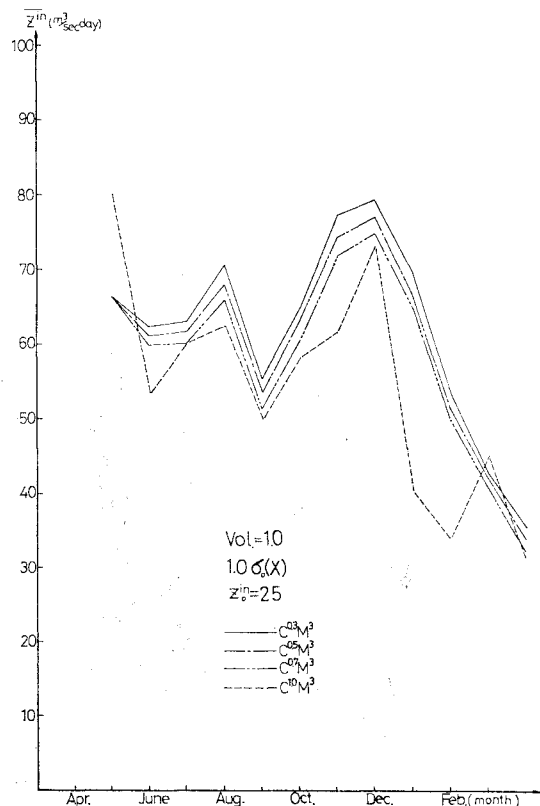


図-14 貯水量平均値の年間変化

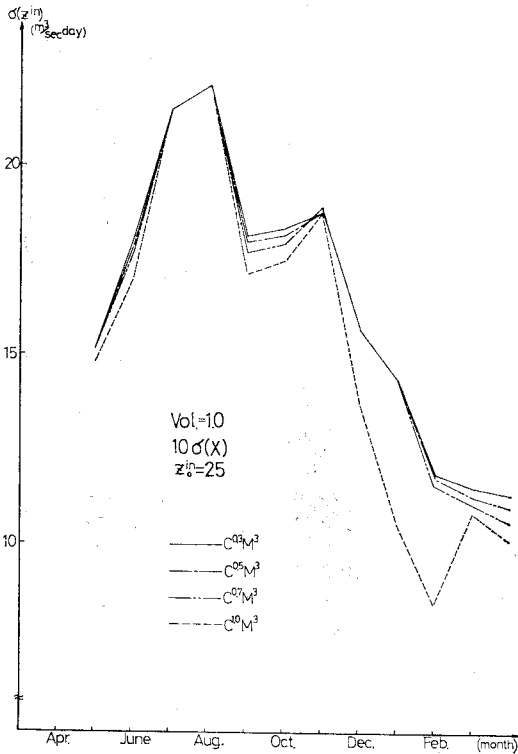


図-15 貯水量標準偏差の年間変化

無効放流の確率は a 値の減少とともに増加する。

(iii) 定数 a の値が小さいほど貯水量分布の分散は僅かながら大きくなる傾向がある。

上記の (i)~(iii) は a) に述べた貯水量変動特性から以下のように説明できる。

図-6, 7 に示した通り, $a=1.0$ の場合には $\tau=1.0$, $a<1.0$ の場合には τ は小さく, β は 1 に近い大きな値をとる。よって, 式 (17), (18) から (i) の性質が生ずる。

次に, $a=a_1, a_2$ に対する平均残留貯水量をそれぞれ R_{a1}, R_{a2} とし, 両者の差を R_a とすれば式 (15) から,

$$R_a = R_{a1} - R_{a2} = (\tau_{a2} - \tau_{a1}) \left(1 + \frac{\beta_{a2} - \beta_{a1}}{\tau_{a2} - \tau_{a1}} \cdot \frac{\bar{q}}{z_k^{in}} \right) z_k^{in} \dots (19)$$

となる。ここに, τ, β の添字 a_1, a_2 はそれぞれ定数 $a = a_1, a_2$ に対する値を示す。

$a_1 > a_2$ とすれば, 前章の結果から

$$\tau_{a2} - \tau_{a1} < 0, \beta_{a2} - \beta_{a1} > 0$$

であり, また z_k^{in} が \bar{q} に比べてある値 (図-13 において V_A 点に対応する) より大きくなれば,

$$1 + \frac{\beta_{a2} - \beta_{a1}}{\tau_{a2} - \tau_{a1}} \cdot \frac{\bar{q}}{z_k^{in}} > 0$$

とみなしてよいから, 結局

$$R_a < 0$$

となる。また, V_A は貯水量の小さい位置にあるため, 残留量は $a=a_1$ の場合が $a=a_2$ の場合より大きい。これらの結果, 貯水量分布の位置は a の値が小さいほど貯水量の大きい方向に移る。

次に貯水量分布の分散については, 初期貯水量 z_k^{in} , $z_k^{in} + \Delta z_k^{in}$ に対する半旬後の貯水量の差を ΔR とすれば, 式 (15) から次式を得る。

$$\Delta R = (1-\tau)(z_k^{in} + \Delta z_k^{in}) + (1-\beta)\bar{q} - (1-\tau)z_k^{in} - (1-\beta)\bar{q} = (1-\tau)\Delta z_k^{in} \dots (20)$$

いま, $a=a_1, a_2$ に対する ΔR をそれぞれ $\Delta R_{a1}, \Delta R_{a2}$ とすれば,

$$\Delta R_{a1} = (1-\tau_{a1})\Delta z_k^{in}, \Delta R_{a2} = (1-\tau_{a2})\Delta z_k^{in}$$

$a_1 > a_2$ とすれば $\tau_{a1} > \tau_{a2}$ であるから,

$$\Delta R_{a2} > \Delta R_{a1}$$

となる。ゆえに, a の値が小さいほど貯水量分布のばらつきは大きくなる。

c) 貯水量分布と流入量変動の関係

貯水量平均値の年間変化 (図-16, 17) から, 流入量変動の影響を次のように指摘できる。

(i) $a=1.0$ の場合は, 特異ルールの影響を除けば変動の小さい流入量時系列ほど貯水量は小さい。これは流入量変動が小さいほど平均放流量が増すことを示唆す

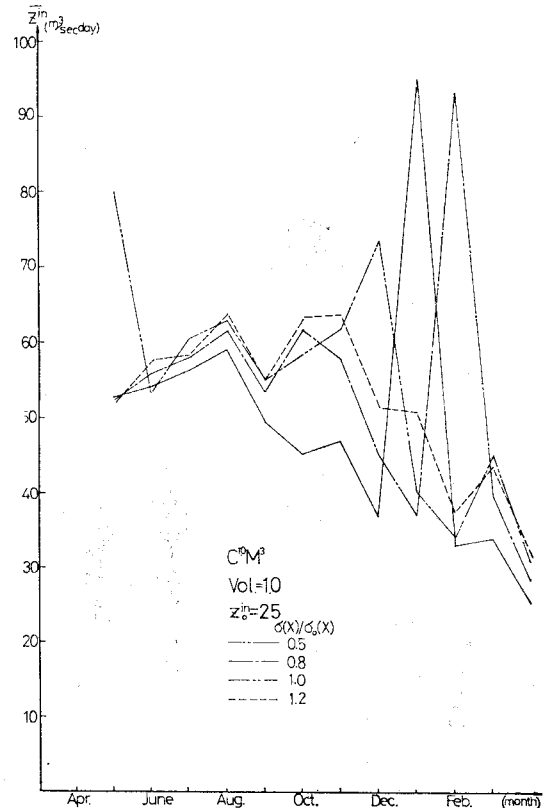
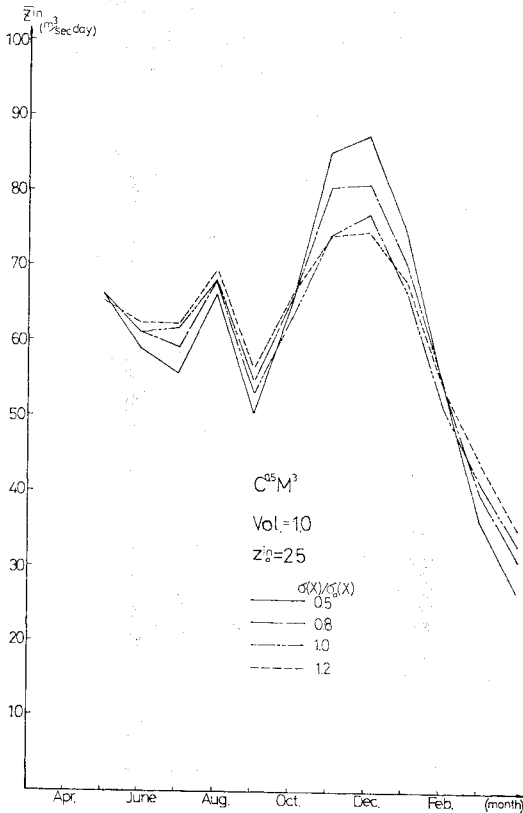


図-16 貯水量平均値の年間変化 ($a=1.0$)



図一七 貯水量平均値の年間変化 ($a=0.5$)

る。

(ii) $a < 1.0$ の場合は、計画期間の前半 (9月まで) は変動の大きい流入量ほど貯水量は大きく、10月から1月まではこれと逆になる。さらに終端期 (2,3月) では再び流入量変動の大きい場合に貯水量が大きくなる。結局、年間を通じでの貯水量変化は、流入量変動が小さいほど貯水量の大きな範囲を利用して貯水池操作が行われている。

この貯水量変化の性状は r, β の特性から次のように説明できる。

$a=1.0$ の場合は $r=1.0$ だから式 (17) より、 $R=(1-\beta)q$ となる。しかるに変動の小さい流入量ほど β 値は大きいので R は小さくなる。

$a=0.5$ の場合は、式 (15) から $\bar{z}_{i+1}^{in} = (1-\gamma)\bar{z}_i^{in} + (1-\beta)6\bar{q}$ となる。ここに、 $\bar{z}_i^{in}, \bar{z}_{i+1}^{in}$ はそれぞれ i 月、 $(i+1)$ 月の初期貯水量の平均値である。また、前述の通り流入量変動の増加とともに r は増加し、 β は減少する。上式において8月までは流入量変動の相

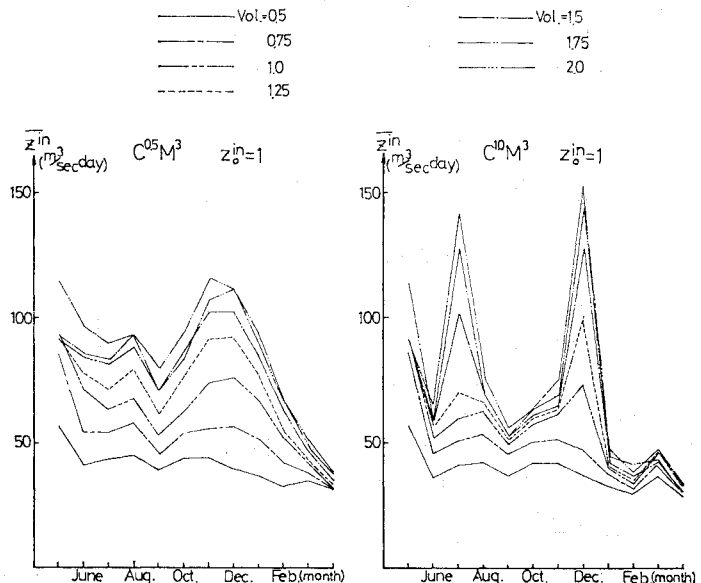
違による β 値の差異が卓越するために、流入量変動が大きいほど貯水量は大きくなる。9月からは r 値の差異が寄与するために流入量変動が大きくなるほど残留貯水量は減小し、その累積結果として10月以降の貯水量状態が逆転する。しかし12月以後は再び r に比べて β がより寄与するために2月以降の貯水量は流入量変動の増加とともに増加すると考えられる。また、 β の値は流入量変動の減小とともに大きくなって1.0に近づくために、変動の小さい流入量に対しては貯水量変化は残留率一定型に近い。

次に、貯水量分布の分散は流入量変動の増加とともに当然増加するが、その関係は放流量の分散との関係と定性的に同じであるので後述する。

d) 貯水量分布と貯水池規模の関係

7種類の貯水池規模について貯水量の平均値と標準偏差の年間変化を求め、評価関数ごとに貯水池規模の影響を比較すれば 図一18, 19のごとくである。ただし、4月の初期貯水量はすべての場合、 $z_0^{in}=1$ (空の状態) である。これらの図から貯水池規模の影響を次のように要約できる。

- (i) 評価関数形に関係なく、貯水池規模の増大とともに貯水量平均値は増加する。
- (ii) すべての貯水池規模について、評価関数の定数 a の値が小さいほど貯水量平均値が大きい。ただし、7月および12月初期に $a=1.0$ の場合の貯水量が大きくなるのは、6月および11月の特異ルールの影響である。
- (iii) 基準貯水池規模 (Vol. 1) 以上の貯水池では貯水量標準偏差が定数 a の減小とともに増加する性質は



図一18 貯水量平均値の規模による比較

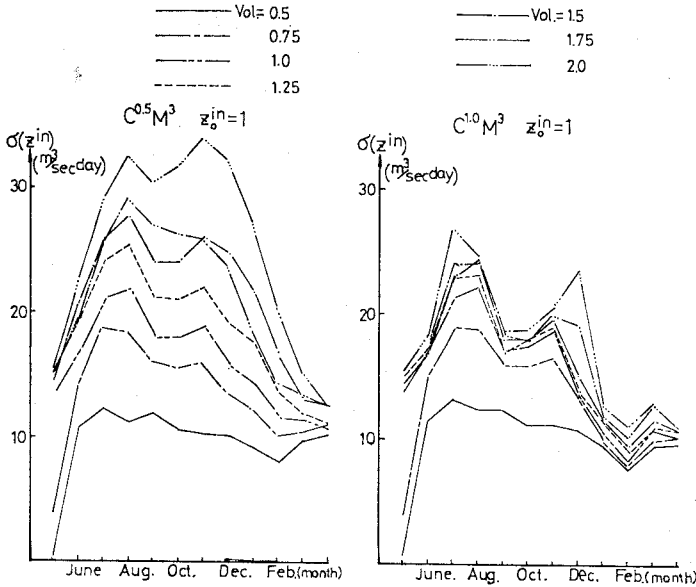


図-19 貯水量標準偏差の規模による比較

3. (2) b) に述べた理由によるが, Vol. 0.5, 0.75 では $a=1.0$ の場合の標準偏差が大きくなる期間が多い. これは $a=0.5$ の場合の貯水位が高く維持されるために, Vol. 1 より小規模の貯水池では満杯状態の頻度が急激に増加することによる.

(iv) 貯水池規模の増加とともに貯水量標準偏差は増加する. $a=1.0$ の場合には, Vol. 1.25 以上では規模による標準偏差の差異は減小の傾向がある.

(3) 流量調整機能

a) 放流量平均値

最適目標放流量は貯水量の主要な範囲 (C-領域) で初期貯水量と線形関係にあり, かつ貯水量の確率分布は正規分布で近似できる. したがって放流量確率分布も正規分布で近似できる.

i 月の平均放流量は i 月の初期貯水量確率分布を用いて次式で与えられる.

$$\bar{C} = \sum_{n=1}^{50} \{P_n \cdot (C^*(z_n^{in}) \cdot M)\} \dots\dots\dots (21 \cdot a)$$

ここに, \bar{C} は i 月の平均放流量, $C^*(z_n^{in})$ は月初期貯水量 $z_n^{in}=n$, ($n=1, 2, \dots, 50$) に対する最適放流量, P_n は貯水量 $z_n^{in}=n$ の確率, M は $C^*(z_n^{in})$ に対する月平均信頼度である. ただし, 上式において貯水池が満杯 ($z_n^{in}=50$) の場合には, 無効放流量すなわち最適放流量を越える放流量は含まれていない.

終端月 (3月) 以外は M の値は 1.0 に近いから, 平均放流量は近似的に次式で与えられる.

$$\bar{C}' \doteq \sum_{n=1}^{50} \{P_n \cdot C^*(z_n^{in})\} \dots\dots\dots (21 \cdot b)$$

(i) 放流量平均値と評価関数の関係

4 種類の評価関数について放流量平均値の年間変化を示せば 図-20 のごとくである. 定数 a の値が小さいほど放流量平均値の年間変化が平滑化されることがわかる. これを前節の貯水量変化と対応させて考えると, a 値が小さい場合には貯水位を平均的に高く保ち, かつ貯水量の変動範囲を大きく利用することが, 年間を通じて安定した水量を放流可能にしている. 一方, a 値が大きい場合には残留量一定型の貯水量変化のために, 放流量の年間変化は流入量に追従する.

次に, 年平均放流量について評価関数形による比較を行えば 表-2 のごとくである. a の値が大きいほど僅かながら放流量が増すことが示されている.

このような流量調整の差異はもともと, 評価関数に占める放流量と信頼度の比重が a の値ごとに変化することに起因するものであり, それらの関係から定性的に予想される特性を計算結果は明確に表現しているといえる.

(ii) 放流量平均値と流入量変動の関係

3 種類の流入量時系列に対する放流量平均値の年間変化を 図-21 に示す.

$a=1.0$ の場合には, 特異ルールによるものを除けば変動の小さい流入量時系列ほど放流量平均値は大き

表-2 年平均放流量と評価関数の関係

評価関数	年平均放流量
$C^{0.5}M^3$	16.3275 ($\frac{m^3}{sec} \cdot day$)
$C^{0.75}M^3$	16.3846
$C^{1.0}M^3$	16.3980
$C^{1.25}M^3$	16.4535

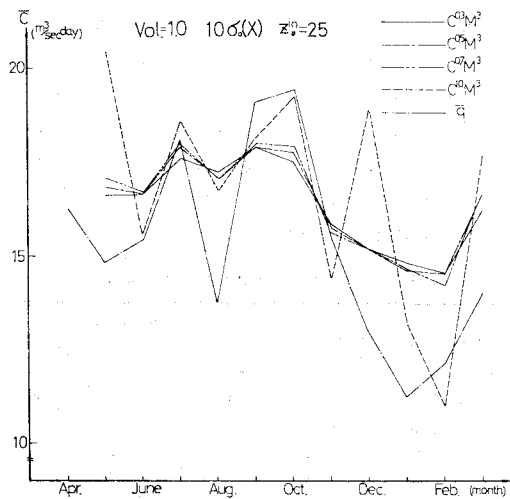


図-20 放流量平均値の年間変化 (評価関数形の影響)

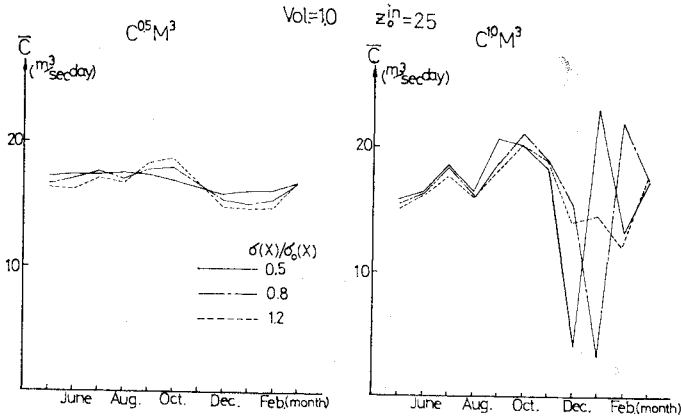


図-21 放流量標準偏差の年間変化 (評価関数形の影響)

い。これは流入量変動が小さいほど貯水位が低く保持されることと対応する。a=0.5 の場合には、流入量変動が小さいほど放流量平均値の年間変化の平滑化の程度が高い。年間変化の過程は前節で述べた貯水量変化の過程と対応する。

年平均放流量と流入量変動との関係は表-3のごとくである。変動の小さい流入量に対する放流量が明らかに大きい。また、どの流入量時系列についても a=1.0 の場合の放流量が大きい。

表-3 年平均放流量と流入量変動の関係

流入量時系列	年平均放流量	
	C ^{0.5} M ³	C ^{1.0} M ³
0.5σ ₀ (X)	15.9997 (m ³ /sec·day)	16.0249 (m ³ /sec·day)
0.8σ ₀ (X)	15.9006	15.9693
1.2σ ₀ (X)	15.6901	15.7999

(iii) 放流量平均値と貯水池規模の関係

7種類の貯水池容量について放流量平均値の年間変化を比較した結果、評価関数の定数 a による年間変化の差異が規模の増大とともに大きくなる。a=1.0 の場合には規模の増大とともに放流量平均値の年間変化は増すが、これは特異ルールの影響による。a<1.0 の場合には、貯水池規模の増大とともに年間変化が平滑化され、かつ月平均放流量は増加する。

表-4 年平均放流量と貯水池規模の関係

貯水池規模	年間平均放流量	
	C ^{0.5} M ³	C ^{1.0} M ³
Vol.=0.5	13.98 (m ³ /sec·day)	14.23 (m ³ /sec·day)
0.75	15.01	15.14
1.0	15.61	15.69
1.25	15.92	15.99
1.5	16.13	16.24
1.75	16.47	16.60
2.0	16.67	16.78

年平均放流量と貯水池規模との関係は表-4のごとくであり、この表から次の事項を指摘できる。(a) 規模の増大とともに放流量は増加する。ただし、基準貯水池以上の貯水池規模に対しては放流量の増加率は減少する。(b) すべての規模について、a=1.0 の場合の放流量が a=0.5 の場合より大きい。(c) 貯水池規模の放流量への影響度は a=0.5 と a=1.0 の場合ではほぼ同程度である。

b) 放流量標準偏差

i 月の放流量標準偏差は、i 月初期貯水量確率により次式で与えられる。

$$\sigma(C)^i = \sum_{n=1}^{50} \{P_n^i \cdot ({}^i C^*(z_n^{in}) \cdot M - \bar{C}^i)^2\}^{1/2}$$

$$\doteq \sum_{n=1}^{50} \{P_n^i \cdot ({}^i C^*(z_n^{in}) - \bar{C}^i)^2\}^{1/2},$$

(M ≡ 1.0).....(22)

ここに、σ(C) は放流量標準偏差、 \bar{C} は平均放流量、添字 i は i 月の諸量を示す。

最適放流ルールと初期貯水量の線形関係が成立する範囲では、上式は次のように書き直すことができる。

$$\sigma(C)^i = \left\{ \sum_{n=1}^{50} P_n^i \cdot \left(\frac{1}{6} r^i z_n^{in} + \beta^i \bar{q} - \frac{1}{6} r^i \bar{z}^{in} - \beta^i \bar{q} \right)^2 \right\}^{1/2} = \frac{1}{6} r^i \left\{ \sum_{n=1}^{50} P_n^i \cdot (z_n^{in} - \bar{z}^{in})^2 \right\}^{1/2}$$

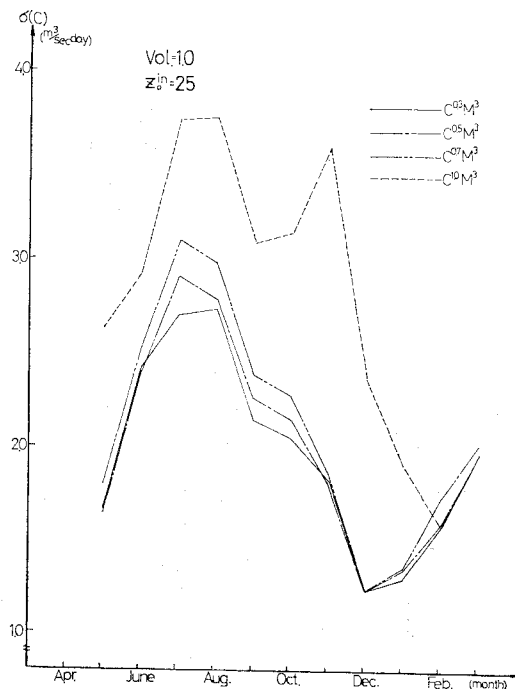


図-22 放流量標準偏差の年間変化 (評価関数形の影響)

$$= \frac{1}{6} r^i \sigma(z^{in})^i \dots\dots\dots(23)$$

ここに、 z^{in} は i 月の平均初期貯水量、 $\sigma(z^{in})^i$ は i 月の初期貯水量の標準偏差である。この式によって放流量の標準偏差と初期貯水量の標準偏差が関係づけられる。

(i) 放流量標準偏差と評価関数形の関係

4 種類の評価関数形に対する放流量標準偏差の年間変化を示せば 図-22 のごとくである。定数 a の値が小さいほど標準偏差は小さくなる。これは貯水量の標準偏差とは逆の傾向である。式 (23) の $\sigma(z^{in})^i$ は 図-15 のごとく a の減少とともに増加するが、 a による差は僅少である。一方、 r は 図-6 のごとく a の減少とともに減少する。放流量標準偏差には後者の放流ルール特性が強く影響するために上記の関係が得られる。

(ii) 放流量標準偏差と流入量変動の関係

式 (23) において、 r^i は i 月の流入量標準偏差 $\sigma(q)^i$ に関係し、 $\sigma(z^{in})^i$ は前月の流入量標準偏差 $\sigma(q)^{i-1}$ と放流ルール特性 r^{i-1} に関する。したがって

$$\begin{aligned} \sigma(C)^i &= r^i (\sigma(q)^i) \cdot g \{r^{i-1}, \sigma(q)^{i-1}\} \\ &= r^i (\sigma(q)^i) \cdot g \{\sigma(q)^{i-1}\} \dots\dots\dots(24) \end{aligned}$$

ここに、 $g\{\sigma(q)^{i-1}\} : \sigma(q)^{i-1}$ の関数、とおくことができ、一般に放流量標準偏差は i 月と $(i-1)$ 月の標準偏差の関数である。計算結果からこの関数形が次のように決定される。

(i) $a=1.0$ の場合

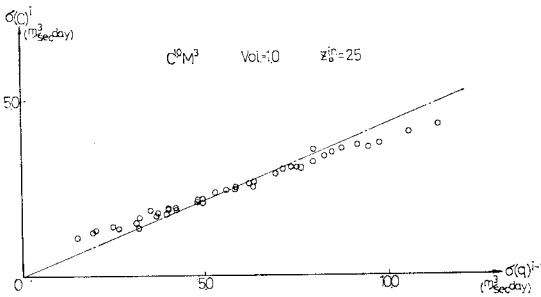


図-23 放流量標準偏差と流入量標準偏差の関係 ($a=1.0$)

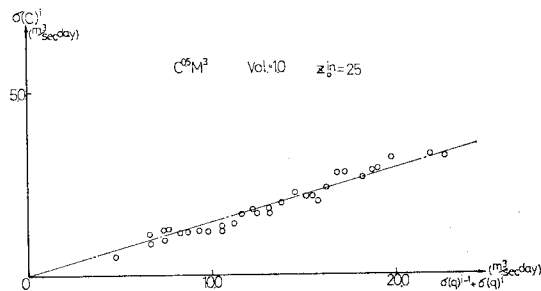


図-24 放流量標準偏差と流入量標準偏差の関係 ($a=0.5$)

式 (24) においてどの月でも $r=1.0$ だから、 $\sigma(C)^i$ は $\sigma(q)^{i-1}$ のみの関数となる。両者の関係を図示すれば 図-23 のごとくであり、次式の線形関係で近似できる。

$$\sigma(C)^i = 0.44 \sigma(q)^{i-1} \dots\dots\dots(25)$$

(ii) $a=0.5$ の場合

$\sigma(C)^i$ は $\sigma(q)^i$ と $\sigma(q)^{i-1}$ の関数である。その関係を $\sigma(C)^i \sim \{\sigma(q)^i + \sigma(q)^{i-1}\}$ と仮定して図示すれば 図-24 のごとくである。この図は終端条件の影響する 1, 2, 3 月を除くすべての月について 4 種類の流入量時系列の値を同時に図示したものである。 $\sigma(C)^i$ と $\{\sigma(q)^i + \sigma(q)^{i-1}\}$ とは有意な相関関係を示し、しかもこの関係は月、流入量時系列特性によって変わらない。この関係は次式で近似することができる。

$$\sigma(C)^i = 0.14 \{\sigma(q)^i + \sigma(q)^{i-1}\} \dots\dots\dots(26)$$

(iii) 放流量標準偏差と貯水池規模の関係

7 種類の貯水池規模に対する放流量標準偏差の年間変化を比較した結果、貯水池規模の影響を次のように要約できる。

- (a) 評価関数の係数 $a=1.0$ の場合には、特異ルールの月を除いて規模の増大とともに放流量標準偏差は増加する。
- (b) $a=0.5$ の場合には、12~3 月を除いて規模の増大とともに放流量標準偏差は減少する。12~3 月では逆に規模の増大とともに増加する。
- (c) したがって、評価関数形による標準偏差の差異は規模の増大とともに増加する。

上記の (a), (b) は、これまでに述べた次の特性から説明することができる。一般に、 r 値は規模の増大とともに減少するので、式 (23) から (b) の結果が得られる。しかし $a=1.0$ の場合には $r=1.0$ であり、式 (23) の貯水量分布の標準偏差が規模の増大とともに増加することから、(a) の結果が得られる。終端条件の影響する 12~3 月では各規模の r 値が接近するので同様に貯水量分布の標準偏差の影響が効く。

(4) 無効放流特性

無効放流の頻度と無効放流量は貯水池の流量調整機能の間接的な指標であるから、これらを定量的に算定するとともに放流量特性値との関係を調べる。

一般に無効放流の頻度 (回数) は貯水量確率分布から算定できるが、放流量は貯水量の確率から直接求めることはできない。本研究では最適放流ルールに基づく 100 年間のシミュレーションによってこれらの値を算定する。シミュレーションの精度は、無効放流の頻度について貯水量確率分布から求めた値とシミュレーションによる値を比較することによって検証した。

a) 無効放流頻度の平均値

4 種類の流入量時系列に対する平均頻度の年間変化は

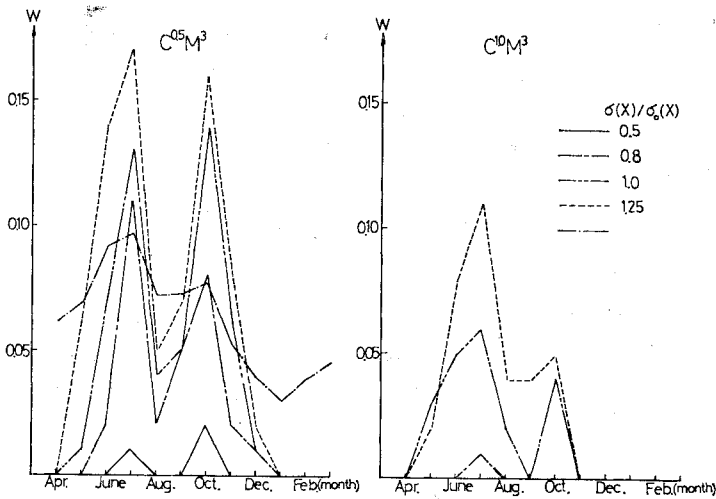


図-25 無効放流頻度の月平均値の年間変化(流入量変動の影響)

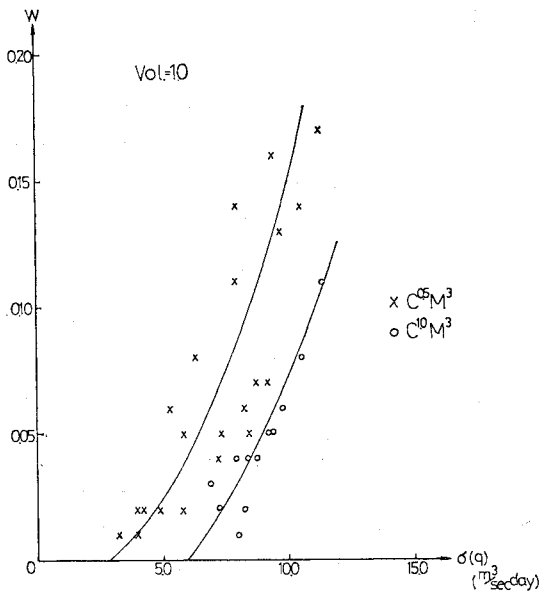


図-26 無効放流頻度の月平均値と流入量標準偏差の関係

表-5 年平均無効放流頻度と流入量変動の関係

流入量時系列	年平均無効放流頻度	
	$C^{0.5}M^3$	$C^{1.0}M^3$
$0.5 \sigma_0(X)$	0.03 (回)	0.00 (回)
$0.8 \sigma_0(X)$	0.31	0.01
$1.0 \sigma_0(X)$	0.52	0.20
$1.2 \sigma_0(X)$	0.75	0.34

図-26のごとく両者に有意な相関が認められる。ただし、終端期に近い月では無効放流が生じないように放流操作が行われていることがわかる。

年平均無効放流頻度と流入量変動の関係は表-5の

ごとくであり、図-26の傾向と同様に流入量時系列変動と無効放流頻度との相関が明らかである。

次に、貯水池規模と年平均無効放流頻度の関係は図-27のごとくである。基準貯水池規模より小さい貯水池で急激に無効放流頻度が増すが、基準規模以上では無効放流は年平均値として1回以下である。また流入量特性や貯水池規模にかかわらず、評価関数の係数 $a=1.0$ の場合が $a=0.5$ の場合に比べて無効放流頻度は少ない。これは貯水量分布特性から予想される通りである。

b) 無効放流量

無効放流量に対する評価関数形、流入量時系列変動、貯水池規模の影響は無効放流頻度の場合と定性的に同様であることはいうまでもない。これらのパラメーターに対する年平均無効放流量の値を表-6.7に示す。

以上の結果から、流量調整機能の指標としての無効放

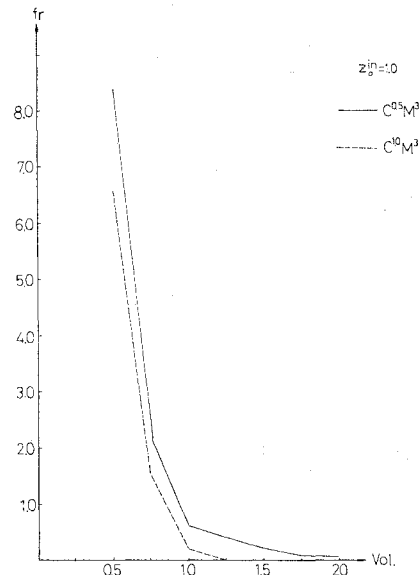


図-27 年平均無効放流頻度と貯水池規模の関係

表-6 年平均無効放流量と流入量変動の関係

流入量時系列	年平均無効放流量	
	$C^{0.5}M^3$	$C^{1.0}M^3$
$0.5 \sigma_0(X)$	0.084 ($\frac{m^3}{sec} \text{ day}$)	0.000 ($\frac{m^3}{sec} \text{ day}$)
$0.8 \sigma_0(X)$	1.218	0.000
$1.0 \sigma_0(X)$	3.342	1.050
$1.2 \sigma_0(X)$	7.584	3.582

表一 年平均無効放流量と貯水池規模の関係

貯水池規模	年平均無効放流量	
	$C^{0.5}M^3$	$C^{1.0}M^3$
Vol.=0.5	70.5 $\left(\frac{m^3}{sec}day\right)$	61.5 $\left(\frac{m^3}{sec}day\right)$
0.75	17.5	15.6
1.0	3.3	1.1
1.25	2.4	0.1
1.5	1.0	0.0
1.75	0.4	0.0
2.0	0.3	0.0

流特性と前述の指標とは次のような関係にあることが明らかになった。

貯水池規模に対する流入量変動の相対比の増加によって放流量変動(標準偏差)が増加し、このために無効放流量が増す。これが年平均放流量を減少させることになる。

4. 結 論

貯水池の流量調整機能を明らかにするために、本研究では評価関数として目標放流量と供給信頼度による関数形を用い、また流入量変動と貯水池規模の影響についても感度分析により検討を行った。得られた成果を要約すれば以下の通りである。

(1) 最適目標放流量は月初期貯水量と月平均流入量、おのおの1次関数の和として統一的に定式化でき、評価関数形(定数 a, b 値の大小)、流入量変動、貯水池規模の影響は各成分に含まれる貯水量依存係数と流入量依存係数によって特性づけられる。初期貯水量と流入量による放流ルール表現は貯水池の制御機能に対する直観的、かつ実用上の把握と符号するうえに、1次関数による定式化はこの放流ルールに基づく流量変換の解析を簡単化するためにきわめて有用な形式である。

(2) 評価基準として目標放流量(水量)に重点を置く場合と供給信頼度に重点を置く場合とで最適放流ルールおよび流量調整の特性が基本的に異なる。すなわち、前者の評価関数に対しては月初期貯水量、後者の評価関数に対してはその月の流入量に依存する割合が相対的に高い。

(3) 流量調整機能の指標として、(i) 流入量の値に対する放流量平均値、(ii) 放流量標準偏差、(iii) 無効放流特性の3種の量を採用した。これら3種の指標は、放流量標準偏差の増加が無効放流の頻度と水量を増加させこの結果が平均放流量を減少させる、という機構で相互に関連する。

各指標におよぼす評価関数形(定数 a 値の大小)の影響は次の通りである。(i) $a=1.0$ に対しては年平均放流量は僅かに大きな値が得られるが、放流量の年間変化は大きい。一方、通常の利水目的からは $a<1.0$ の場合

が重視されるはずであるが、この評価関数に対しては放流量の年間変化が平滑化され、各月の放流量の分散も小さくなる。つまり月内の安定な供給を目指すべく設定された評価関数によって年間にわたる放流量の安定化が達成される。これは、並列貯水池群の放流操作における Space Rule が各期間ごとに流入量特性に基づいた放流量配分を行う結果、計画総期間の流量調整を極めて巧みに行う事実を想起させ、興味ある結果である。(ii) 放流量標準偏差は、 $a=1.0$ の場合は前月の流入量標準偏差と、 $a<1.0$ の場合は前月とその月の流入量標準偏差との和とそれぞれ線形関係がある。(iii) 無効放流の水量および頻度は $a<1.0$ の場合が $a=1.0$ の場合より多い。

(4) 流入量変動と貯水池規模の影響に関しては、流入量標準偏差 σ の増加と貯水池規模 V の減少(またはその逆)は流量調整の諸特性にほぼ同じ性質の影響をおよぼす。したがって両者の比 σ/V が流量調整機能を規定する重要なパラメーターで、定性的には次のような影響を与える。(i) σ/V の増加とともに放流ルールにおける貯水量依存係数の値が大きくなり、流入量依存係数の値が小さな値をとる。(ii) σ/V の減少とともに放流量平均値は増加し、年間変化が平滑化される。ただし、一般に増加率は σ/V のある限界値以下ではゼロとなる。(iii) σ/V の増加とともに無効放流の水量および頻度は増大する。

(5) 貯水量の平均的な変動過程は貯水量依存係数および流入量依存係数の関数で表わされるので、貯水量の変動特性は両係数の諸特性から定性的な推定が可能である。その典型として、残留量一定型と残留率一定型があり、放流量に重点を置く放流ルールによれば前者、信頼度に重点を置く放流ルールによれば後者の型に近い貯水量変化となる。

以上のごとく明らかにされた事項は現実の水資源システムの基本的特性をある程度まで説明すると思われる。また、より定量的な解析手法の確立とその解の一般性を得るためには貯水池システムのモデル化にあたって何らかの仮定や単純化が不可避であるが、ここに得られた知見はそのための基礎資料として役立つものと考えられる。

おわりに、本研究の数値計算に多大のご協力をいただいた大阪大学ならびに神戸大学の学生諸氏に感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- Hurst, H.E. : Long-Term Storage Capacity of Reservoirs, Trans. ASCE, Vol. 116, 1951, pp. 770-807.
- Feller, W. : The Asymptotic Distribution of the Range of Sums of Independent Variables, Ann. Math. Statistics, Vol. 22, 1951, pp. 427-432.

- 3) Anis, A.A., and E.H. Lloyd : On the Range of Partial Sums of a Finite Number of Independent Random Variables, *Biometrika*, Vol. 40, 1953, pp. 35-42.
- 4) Yevjevich, V.M. : The Application of Surplus, Deficit and Range in Hydrology, *Hydrology Paper*, No. 10, Colorado State Univ., Fort Collins, 1965.
- 5) Cruz, J.D.S. : Range Analysis for Storage Problems of Periodic-Stochastic Processes, *Hydrology Paper*, No. 57, Colorado State Univ., 1972.
- 6) Moran, P.A.P. : A Probability Theory of Dams and Storage Systems, *Australian Jour. of Applied Science*, Vol. 5, 1954, pp. 116-124.
- 7) Moran, P.A.P. : A Probability Theory of a Dam with a Continuous Release, *Quart. J. Math.*, (Oxford, 2), Vol. 7, 1956, pp. 130-137.
- 8) Gani, J. : Problems in the Probability Theory of Storage Systems, *Jour. Royal Statist. Soc. Series B*, Vol. 9, No. 2, 1957, pp. 181-206.
- 9) Kendall D.G. : Some Problems in the Theory of Dams, *ibid.*, pp. 207-233.
- 10) Langbein, W.B. : Queuing Theory and Water Storage, *Proc. ASCE*, Vol. 83, HY 5, 1958.
- 11) Lloyd, E.H. : A Probability Theory of Reservoirs with Serial Correlated Inputs, *Journal of Hydrology*, Vol. 1, 1963, pp. 99-128.
- 12) Lloyd, E.H. and S. Odoom : Probability Theory of Reservoirs with Seasonal Input, *ibid.*, Vol. 2, 1964, pp. 1-10.
- 13) 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，No. 222, 1974, pp. 57-67.
- 14) 室田 明・神田 徹：利水用単一貯水池の最適操作計画に関する方法論，土木学会論文報告集，No. 246, 1976, pp. 83-92.
- 15) 室田 明・神田 徹・福岡成悟：貯水池による水供給の信頼性（第3報），第27回土木学会年次学術講演会講演集，昭和47年。
- 16) 神田 徹・工藤明彦・下垣 久：貯水池の流量調整機能と流入量特性の関係，昭和49年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要，昭和49年。
- 17) 室田 明・神田 徹・福岡成悟：貯水池による水供給の信頼性（第4報），第28回土木学会年次学術講演会講演集，昭和48年。

(1975.8.19・受付)