

ダム貯水池における利水時のオンライン・リアルタイム操作

On-line Real Time Operation of Dam Reservoir Systems Including

Low Flow and Turbidity Controls

京都大学工学部 正員 高 棹 琢 馬

京都大学防災研究所 正員 池 淵 周 一

京都大学防災研究所 正員 ○小 尻 利 治

1. はじめに

出水時におけるダム貯水池の治水操作が終了すると、操作基準は、次の出水までの利水操作へと移らなければならない。現行では、長期の天気予報を考慮するとはいえ必要量だけを放出し、被害発生（異常事態）が予測された時点で急遽変更するという即時的なものがほとんどである。これに対して、過去の水文情報だけでなく、現在の観測情報を生かした長期間の気象予測を行い、季節の水需要の変化に合致した合理的なダム操作が望まれることはいうまでもない。本研究はそうした点にかんがみ、出水後の平常時から渇水時までを対象にした利水操作方式の確立をはかろうとするものである。

2. 利水時のダム操作手順

2.1 実時間操作の概要

利水操作は1日あるいは半旬単位で実施されており、最適放流量の決定には時間単位の治水操作に比べてかなり余裕があるように見える。しかし、利水目的を有するダム群は小規模のものまで含めるときわめて多く、最適操作の算定には長大な計画時間を費やすことになる。また、ダムの管理面からすれば、集中豪雨などの突発的な現象にも対処できる柔軟なシステムが望まれる。こうした観点より利水時のダム操作システムを展開すると、次のようになる。

- (i) 現在の貯水池の水量・水質状態を把握し、各々を次時刻での放流量決定における初期値とする。
- (ii) 現在および次時刻の降雨発生を検討し、利水操作から治水操作へ切り換えるか否かを決定する。
- (iii) 利水操作が継続されると、今後の無降雨期間を推定し、それを利水操作期間として設定する。
- (iv) 水量・水質の観測情報をもとに、制御最終時刻までの入力分布を推定する。
- (v) 得られた入力分布に対して最適利水操作を実施し、次時刻の放流量または貯水池水位を決定する。
- (vi) 新しい施設の運用、異常渇水、高濃度の水質悪化による別の操作ルールの適用がない限り、現在の利水操作が続くものとして、次の制御時刻がくると(i)に戻る。

以上が実時間操作ルールの基本項目であるが、(ii)、(iii)は気象観測・処理システム、(i)、(iv)は入力予測システム、(v)はダム操作決定システムと分類することができよう。上記の各部分システムは、時間的推移によるパラメータの修正を通じて有機的に関連し、図-1で示されるトータルシステムを形成している。

2.2 制御目的と評価関数

出水終了後、次の出水までの利水操作においては、水量の安定供給および水質浄化が制御目的となる。こ

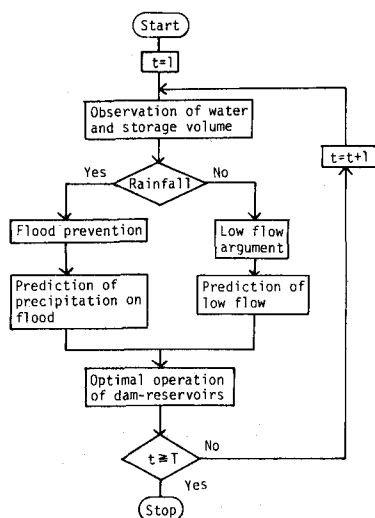


図-1 実時間操作手順

これは、いわゆる多目的問題となり単一目的の場合とは異なってくるが、ここでは、両目的のトレードオフを考慮したベクトル最適化手法の有効性を認めたうえで¹⁾、計算の単純化をはかる意味でスカラー最適化手法を適用する。すなわち、低水、水質（本研究では、特に緊急の問題である濁質をとりあげる）の相対評価を同一におき、制御目的として

$$J \equiv \min \left\{ \frac{Q_{md}}{\bar{Q}_{md}}, \frac{C_{md}}{C_{mdmax}} \right\} (m=1, 2, \dots, M) \rightarrow \max \quad (1)$$

かつ $J \geq 1$

を用いるのである。ただし、 Q_{md} 、 C_{mdmax} は評価地点 m を通過する水量、濁質の最悪値、 $\bar{Q}_{md}$ 、 C_{md} は評価地点 m に付与された水量、濁質の許容限界値、 M は評価地点の総数である。

3. 気象観測・処理システム

基本となる利水期間としては、降水から次の降水までの一連の無降雨期間が相当する。また、貯水池水位は降雨により回復するので、降雨量の算定が必要である。ただし、ある規模以下の降雨は流量・濁質入力に大きな影響を及ぼさないとみなし、利水時の外乱とする。以下では、 R_a (mm/day) の降雨を基準値とし、その基準値以上の降雨の間隔をダム操作期間として、入力システムのパラメータを決定する。

3.1 制御期間と降雨量

ある地点での降雨事象が、互いに独立でポアソン分布に従うとすれば、 R_a 以上の降雨量の無降雨継続時間 t_b は次の確率密度関数 $f_{T_b}(t_b)$ をもっている²⁾。

$$f_{T_b}(t_b) = \beta e^{-\beta t_b} \quad (2)$$

いま、無降雨状態を正常とし、降雨状態を故障とみなす気象システムを考えると、降雨終了 ($t=0$) よりすぐに作動したシステムが、時刻 t において単位時間内にシステムが故障する割合は

$$\frac{1}{\beta e^{-\beta t_b}} \cdot \frac{d(1 - \beta e^{-\beta t_b})}{dt} = \beta \quad (3)$$

で与えられる。上式は、時刻 t での無降雨間隔の期待値が $1/\beta$ となることを表わしており、ダム操作の制御期間 (T_E) も一定値 $T_E = \beta^{-1}$ とすることができる。

一方、1 降雨事象での降雨量 r の確率密度関数 $f_R(r)$ は次のガンマ分布で表わされるものとする。

$$f_R(r) = \frac{\lambda \cdot (\lambda \cdot r)^{\kappa-1} \cdot e^{-\lambda r}}{\Gamma(\kappa)} \quad (4)$$

ここに、 κ 、 λ はガンマ分布のパラメータである。基準値 R_a 以上の降雨を対象とした確率密度関数 $f_{R/R_a}(r)$ は、式(4)に対して $\int_{R_a}^{\infty} f_{R/R_a}(r) dr = 1$ となる操作を行うことになり、 $r' = r - R_a$ とおけば

$$f_{R/R_a}(r) = \frac{\{\lambda(r' + R_a)\}^{\kappa-1} \cdot e^{-\lambda(r' + R_a)}}{\Gamma_0(R_a)} \quad (5)$$

となる。ここに、 $\Gamma_0(R_a)$ は不完全ガンマ関数である。

3.2 ベイズ論によるパラメータ推定

まず、貯水池操作開始後、 NR 回の降雨 $R_{NR} = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{NR})$ を観測し、その間の無降雨期間を $T_{NR} = (t_b^1, t_b^2, \dots, t_b^{NR})$ としよう。パラメータ β に関する尤度 $L(\beta|T_{NR})$ は式(2)より

$$L(\beta|T_{NR}) = \beta^{NR} \cdot e^{-\sum_{nr=1}^{NR} \beta t_b^{nr}} \quad (6)$$

となる。事前確率 $\xi(\beta|T_0)$ は流域の統計資料から与えられ、無降雨期間を $T_0 = (\bar{t}_b^1, \bar{t}_b^2, \dots, \bar{t}_b^{MR})$; MR は統計資料における無降雨事象の総数)と表わせば、

$$\xi(\beta|T_0) = \beta^{MR} \cdot e^{-\sum_{mr=1}^{MR} \beta \bar{t}_b^{mr}} \quad (7)$$

となる。ここで、 $A_t = \sum_{n=1}^{NR} t_b^{nr}$, $B_t = \sum_{m=1}^{MR} \bar{t}_b^{mr}$ とおくと、ベイズの定理による事後確率より β 期待値 $\hat{\beta}_{NR}$ は

$$\hat{\beta}_{NR} = \frac{\hat{\beta}_{NR-1}(MR+NR+1)}{\hat{\beta}_{NR-1} \cdot t_b^{NR} + MR + NR} \quad (8)$$

となり、新たな降雨が観測されるごとに β を推定していくことができる。

降雨量分布についても、同様の推定法を用いることができる。すなわち、 R_{NR} の降雨量系列に対するガンマ分布の尤度は

$$L(\lambda, \kappa | R_{NR}) = \left(\frac{\lambda^{\kappa-1}}{\Gamma_0(R_a)} \right)^{NR} \cdot A_{1r}^{\kappa-1} \cdot e^{-\lambda A_{2r}} \quad (9)$$

となる。ただし、 $A_{1r} = \prod_{n=1}^{NR} (\tau'_{nr} + R_a)$, $A_{2r} = \sum_{n=1}^{NR} (\tau'_{nr} + R_a)$ である。また、統計資料からの降雨量系列を $R_0 = (\bar{\tau}_1, \bar{\tau}_2, \dots, \bar{\tau}_{MR})$ とし、 $B_{1r} = \prod_{m=1}^{MR} (\bar{\tau}'_{mr} + R_a)$, $B_{2r} = \sum_{m=1}^{MR} (\bar{\tau}'_{mr} + R_a)$ とおけば、事前分布 $\xi(\lambda, \kappa | R_0)$ は

$$\xi(\lambda, \kappa | R_0) = \left(\frac{\lambda^{\kappa-1}}{\Gamma(R_a)} \right)^{MR} \cdot B_{1r}^{\kappa-1} \cdot e^{-\lambda B_{2r}} \quad (10)$$

で与えられる。結局、事後分布 $\xi(\lambda, \kappa | R_0, R_{NR})$ は

$$\xi(\lambda, \kappa | R_0, R_{NR}) = \frac{\lambda^{(\kappa-1)(MR+NR)} \cdot (A_{1r} \cdot B_{1r})^{\kappa-1} \cdot e^{-\lambda(A_{2r}+B_{2r})}}{\int_0^\infty \int_0^\infty \lambda^{(\kappa-1)(MR+NR)} \cdot (A_{1r} \cdot B_{1r})^{\kappa-1} \cdot e^{-\lambda(A_{2r}+B_{2r})} d\lambda d\kappa} \quad (11)$$

より求めなければならない。

4. 入力予測システム

4.1 流量予測

入力としての流量が満足すべき条件として、(i)洪水終了時からのハイドログラフを対象に、流量てい減部の予測であること、(ii)設定された制御期間でのハイドログラフを用いるため、量とその形状パターンでの精度が要求されること、があげられる。こうした点を考慮して、長期間流出モデルの一つである自然てい減曲線を用い、それを基礎にした次のような予測モデルを提案する。いま、時刻 t と $t+\tau$ での流量には自然てい減曲線より

$$\ln \{ QI(t+\tau) \} = \ln \{ QI(t) \} - \alpha \cdot \tau \quad (12)$$

の関係がある。ただし、 α はてい減係数、 $QI(t)$ は時刻 t の流出流量である。ここで、 α に関して時刻 t での観測量を $y_q(\tau|t) (= \ln \{ QI(t+\tau) \} - \ln \{ QI(t) \})$ 、状態量を $x_q(\tau|t)$ とすると、状態間の遷移構造を表現する状態方程式として、

$$x_q(\tau|t) = \Phi_{q,t|t-\tau} \cdot x_q(\tau|t-\tau) + w_{q,t}^\tau \quad (13)$$

状態量と観測量との関係を表現する観測方程式として

$$y_q(\tau|t) = \Psi_{q,t}^\tau \cdot x_q(\tau|t) + w_{q,t}^\tau \quad (14)$$

である動的システムが得られる。ただし、 $\Phi_{q,t|t-\tau}$ は遅れ τ の回帰係数、 $\Psi_{q,t}^\tau$ は式(12)の τ に相当する係数、 $w_{q,t}^\tau$, $w_{q,t}^\tau$ はそれぞれ状態誤差、観測誤差である。 $w_{q,t}^\tau$, $w_{q,t}^\tau$ が白色・正規雑音とすれば、パラメータ α の推定にカルマン・フィルターを適用することができ、式(12)の逆変換を通じて、ハイドログラフの形状が予測される。

4.2 濁質予測

河川表流水における流量と濁質の関係は複雑であり、その的確な把握は難しい。しかし、一般に流域からの流出濁度 $CI(t)$ と流出流量 $QI(t)$ との関係は次式で表現されることが多い。すなわち、

$$CI(t) = a \{ QI(t) \}^b \quad (15)$$

である。上式のパラメータ a , b は同一流域にあっても出水ごとに多少変化するが、低水時には比較的安定した値をとっている³⁾。したがって、ある無降雨期間内の濁度がその期間内に特有のパラメータ値をもつとすると、濁

質予測は次のようになる。式(15)の対数変換より、観測量が $y_c(t) (= \ln \{CI_n(t)\})$ 、観測ベクトルが $\Psi_{c,t} (= [1 \ln \{QI(t)\}])$ 、状態ベクトルが $[\ln \{a(t)\} \ln \{b(t)\}]^t$ なる動的システム

$$\begin{bmatrix} \ln \{a(t)\} \\ \ln \{b(t)\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ln \{a(t-1)\} \\ \ln \{b(t-1)\} \end{bmatrix} + u_{c,t} \quad (16)$$

$$y_c(t) = [1 \ln \{QI(t)\}] \begin{bmatrix} \ln \{a(t)\} \\ \ln \{b(t)\} \end{bmatrix} + w_{c,t} \quad (17)$$

として構成される。ここに、 $u_{c,t}$ 、 $w_{c,t}$ はそれぞれ状態誤差行列、観測誤差であり、白色・正規雑音とすれば、やはり、フィルタリング理論の適用によってパラメータ a 、 b が推定されるとともに、予測流量との結合から流入濁度の予測系列が得られる。

5. ダム操作決定システム

各時刻の放流量または貯水池水位は、制御期間内の入力はいうに及ばず、長期的な水供給バランスを保ちながら決定されなければならない。とくに設定された制御期間 (T_E) 内での貯水量系列の最適化を行う場合、制御時点における計算上の最終貯水量 $S(T_E)$ のとり方が重要な要素となる。そこで本操作過程では、まず、簡略化された入力より長期的観点に立つ仮想最終貯水量の決定を行い、ついで当該無降雨期間 (現利水期間) 内において、入力の予測精度に見合った貯水量系列を求め、次時刻の操作情報とする。ただし、説明の簡略化のため、残流域流量を含まない単ダム・単評価地点系で考える。

5.1 仮想最終貯水量の決定

いま、ある制御時刻での仮想最終貯水量 $S(T_E)$ が予測入力系列とある放流量系列より算定される場合、 $S(T_E)$ は以後の降雨による貯水池回復量や無降雨期間の関数でもあるから以後の無降雨期間を t_b^i ($i=1, 2, \dots, \infty$)、回復量を RS^i ($i=1, 2, \dots, \infty$) で表わすと、 $S(T_E|t_b^1, \dots, t_b^\infty, RS^1, \dots, RS^\infty)$ と書くことができる。無降雨期間と回復量が互いに独立で、それぞれ $f_T(t_b)$ 、 $f_C(RS)$ の確率密度関数をもつとすると $S(T_E|\cdot)$ の期待値は次のようになる。

$$E\{S(T_E|\cdot)\} = \int_{t_b^1=1}^{\infty} \int_{t_b^2=1}^{\infty} \dots \int_{t_b^\infty=1}^{\infty} \int_{RS^1=0}^{\infty} \int_{RS^2=0}^{\infty} \dots \int_{RS^\infty=0}^{\infty} S(T_E|\cdot) f_T(t_b^1) f_T(t_b^2) \dots f_T(t_b^\infty) f_C(RS^1) f_C(RS^2) \dots f_C(RS^\infty) dt_b^1 dt_b^2 \dots dt_b^\infty dRS^1 dRS^2 \dots dRS^\infty \quad (18)$$

ここで、上式の積分を実行するために次の条件を導入する。すなわち、

- (i) 翌年の同時刻に現在の貯水量を推持する。
- (ii) 現在の無降雨期間以外は平均値で与えられる降雨、無降雨の繰り返しとする。
- (iii) 貯水池の回復には主として表面流出や早い中間流出のような非線形流出成分が寄与するが、遅い中間流出や地下水流出のような線形流出成分の半分も下流取水地点での補給水とみなし回復量に加える。
- (iv) 現制御期間内の流量は自然で減曲線を与える。
- (v) 水文特性や水需要の季節変化を表わすために、5月から10月までを雨季、11月から翌年の4月までを乾季とする。

以上の仮定をおくと、現時刻が乾季である場合の仮想最終貯水量の期待値は

$$E\{S(T_E)\} = \{S_0 + \frac{QI_0}{\hat{\alpha}} (e^{-\hat{\alpha}} - e^{-\hat{\alpha}T_E})\} (1 - e^{-\hat{\beta}T_E}) - (NC_D - RS_D + NC_W \cdot RS_W + \frac{QI_0}{\hat{\alpha}} e^{-\hat{\alpha}}) \cdot \hat{\beta} e^{(\tau+T_E)\hat{\beta}} \cdot T_E \cdot \int_{\hat{\beta}(T_E+\tau)}^{\infty} \frac{e^{-\tau}}{\tau} d\tau + \frac{T_E \cdot QI_0 \cdot \hat{\beta} e^{-(\hat{\beta}+\hat{\alpha})}}{\hat{\alpha}} \cdot \int_{(\hat{\beta}+\hat{\alpha})(T_E+\tau)}^{\infty} \frac{e^{-\tau}}{\tau} d\tau \quad (19)$$

となる。ただし、 $\tau = NC_D \cdot ET_D + \frac{\bar{Q}_{WD}}{\bar{Q}_{DD}} \cdot NC_W \cdot ET_W$ 、 $\bar{Q}_{WD}$ 、 $\bar{Q}_{DD}$ 、 NC_W 、 NC_D 、 ET_W 、 ET_D はそれぞれ雨季と乾季の需要量、および、平均無降雨期間、平均無降雨回数であり、 S_0 、 QI_0 、 $\hat{\alpha}$ 、 $\hat{\beta}$ は現時刻での貯水量、流入量、推定された流量の減係数と無降雨期間のパラメータである。

5.2 最適貯水量系列の決定

フィルタリングによって予測された流量パラメータおよび濁度パラメータはいずれも最適値であり、その回り

に外乱で生ずる誤差が加わっていることが予測される。流量パラメータに関しては、 $w_{q,t}^{\tau}$ が $N(0, W_{q,t}^{\tau})$ なる正規分布であるとする、予測されるてい減係数の分散 $\bar{\zeta}_t^{\tau}$ は

$$\bar{\zeta}_t^{\tau} = E\{(\hat{y}_q(t) - \hat{y}_q(\tau|t))^2\} = \Phi_{q,t|t-\tau}^{\tau} P_A(\tau|t-\tau) \Phi_{q,t|t-\tau}^{\tau} + W_{q,t}^{\tau} \quad (20)$$

となる。ここに、 $\hat{y}_q(\tau|t)$ 、 $P_A(\tau|t-\tau)$ はカルマン・フィルタでいう時刻 $t-\tau$ からみた時刻 t でのパラメータの観測値および状態誤差の予測分散値であり、 $W_{q,t}^{\tau}$ は外乱の分散である。ゆえに、流量 $QI(t+\tau)$ は対数正規分布に従い確率密度関数は

$$g_{QI}(QI(t+\tau)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \bar{\zeta}_t^{\tau} QI(t+\tau)} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{[\ln\{QI(t+\tau)\} - \ln\{\hat{QI}(t+\tau)\}]^2}{\bar{\zeta}_t^{\tau}}\right] \quad (21)$$

より求められる。ただし、 $\hat{QI}(t+\tau) = QI(t) \exp\{-\hat{y}_q(\tau|t)\}$ である。また、濁質に関しても上式と同様に、 $\hat{CI}(t+\tau) = \hat{a}(t+\tau)(\hat{QI}(t+\tau))^{\hat{b}(t+\tau)}$ で表わされる予測値のまわりに対数正規分布に従う確率密度関数が存在する。そうした入力の変率分布特性に対処しうるダム操作方法として著者らの提案している制御の達成度を考慮した方式⁴⁾(SCRC)があり、以下のようにして適用される。

流量と濁度には式(17)よりわかるように従属関係があるものの、流量が自然てい減部であり $W_{q,t}^{\tau}$ および濁度のパラメータ $b(t)$ の推定値が小さく、その結果として流量と濁度の相関係数が極めて小さくなることから、両者を互いに独立とみなすと状態量が $(S(t), CS(t))$ から $(S(t+1), CS(t+1))$ へ移行できる確率 $P(S(t+1), CS(t+1)|S(t), CS(t))$ は

$$P(S(t+1), CS(t+1)|S(t), CS(t)) = \int_{QI_{\min}(t+1)}^{QI_{\max}(t+1)} g_{QI}(QI(t+1)) dQI \cdot \int_{CI_{\min}(t+1)}^{CI_{\max}(t+1)} g_{CI}(CI(t+1)) dCI \quad (22)$$

と表わすことができる。ここに、 $g_{CI}(\cdot)$ は濁度の確率密度関数であり、 $QI_{\max}(t+1)$ 、 $QI_{\min}(t+1)$ は貯水池の連続式より、その時刻において放流可能領域に対応する流入量の最大値と最小値である。利水時のある放流の結果が、制御目的式(1)のある達成度 j を上回る確率 $P(S(t+1), CS(t+1)|S(t), CS(t))$ は、流入量でみると $[\max\{0, S(t+1) - S(t)\}, \max\{0, S(t+1) - S(t) + j \cdot \bar{Q}_d\}]$ で示す範囲で与えられる。また、時刻 $t+1$ での貯水池内の濁度分布が

$$CS(t+1) = h\{CS(t), S(t), QI(t+1), CI(t+1), S(t+1)\} \quad (23)$$

で表わされると、濁度の範囲は $[0, h^{-1}(C_d/j)]$ となる。こうして、 $S(0)$ を初期値として時刻 $t+1$ で貯水量 $S(t+1)$ をとれば、 j を満たす確率 $\bar{P}(S(t+1), CS(t+1))$ は $t+1$ までのどの時刻においても j を下回らないことが必要であることを考えると、式(22)の積

$$\bar{P}(S(t+1), CS(t+1)) = P(S(1), CS(1)|S(0), CS(0)) \cdots P(S(t+1), CS(t+1)|S(t), CS(t)) \quad (24)$$

でなければならない。水利用からすればこの確率が高い方が望ましいから、ダム操作目的として必要な達成度 j を満足しうる全ての可能な系列の中で、最も確実性の高い系列をとることとすると、数学的には

$$\bar{P}(S(T_E), CS(T_E)) \rightarrow \max \quad (25)$$

と表現される。放流量が実行可能領域の幅で与えられるので前の時刻の貯水量の取り方を決定量とすると、DPの関数漸化式は貯水量および貯水池内の濁度分布と達成度 j を状態量として

$$f_{t+1}(S(t+1), CS(t+1), j) = \max_{\{S(t)\}} \{P^j(S(t+1)|S(t)) \cdot f(S(t), CS(t), j)\} \quad (26)$$

となる(図-2参照)。最終時刻の濁度 $CS(T_E)$ は取りうる可能な値の中で関数値を最大にするものが選ばれる。本方式は、実貯水量を得られた解と同じように変化できれば、最終的に最も高い確率でその値 j が達成できることを表わしている。最適値を求めるという点では確率DPの概念と同じであるが、確率値をそのまま制御目的とすること、および、算定された確率(信頼度)の分布に応じて j 値を変化しうるので、不確実な入力に対する実時間操作にはより有効であろう。もちろん、制御結果が同じ確率をもつ場合に、高い達成度の方を選択することによって、式(1)との整合性もはかることができる。

以上のようにして各制御時刻におけるダム貯水池の操作方法を述べたが、これら各サブシステムは毎制御時刻の新たな観測情報やてい減係数の推定値

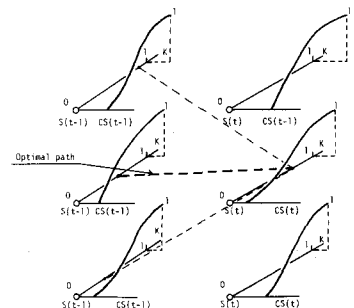


図-2 SCRC の計算過程

が得られるごとに繰り返し算定されることになる。

6. 適用と考察

本実時間操作の適用例としてSダムをとりあげよう。貯水池内の濁質解析には、制御の一般的効果を把握することを目的として、完全混合モデルを用いることにする。また、統計資料としては、11年間の日降雨資料を用いるとともに、その後の2年間を観測情報とした。

6.1 気象観測・処理システム

無降雨期間の算定に必要な基準降雨は、上石流被害の発生しやすい100mm(平均降雨日数を2日として、日降雨量50mm)とする。しかし、乾季では日降雨量が50mmを超えることはほとんどないので、25mm/dayを出水の目安として治水への切り換えを行った。表-1は無降雨日数のパラメータ β の推定値である。制御期間を雨季では20日、乾季では23日としてダム操作を行ってもさしつかえないであろう。一方、1降雨当りの降雨量は、前節で述べた式(11)をそのまま積分することができず、いきおい、数値積分となる。そこで、数値積分による解析精度の低下を避けるためにガンマ分布においてはそのパラメータ κ が1に近いときには、指数分布で近似できることを利用すると、降雨量の事後分布は無降雨期間の場合と同様に表現できる。ここに、降雨量の期待値は $\hat{\kappa}_{NR}^{-1}$ となり、適用結果は表-2に示すとおりである。

6.2 入力予測システム

全ての流量観測値をそのまま適用すると、基準降雨以下の出水であってもい減係数が負となる場合があり、予測流量系列が発散する。しかし、利水時に流量が増加するのは小出水の発生当日だけで、高々1日程度と考えられるので、以後てい減状態にもどるとして増加時にはフィルタリングは行わず、以前の推定値をそのまま用いることにした。また、ハ

イドログラフの形状を求めるには T_E 個のフィルターが必要となるが、各時刻での真のてい減係数は一つとみなせるので、遅れ1の値を真の推定値とすることができる。その結果、フィルターは1次遅れだけを用い、得られた推定状態量に対して T_E 個の帰帰係数 $\phi_{q,t+T_E}$ ($\tau=1, 2, \dots, T_E$)を乗ずることによって、制御期間内の流量および濁質の予測を行った。図-3および図-4は流量と濁質における予測入力の分散と実測残差との比較を行ったものである。流量に関しては、全体的に推定値の方が実測値よりも大きな値をとっている。これは、これは分散の推定に用いる観測誤差の分散がモデルの真値より大きかったためであろう。さらに、濁質に関しては、制御期間内に小出水が表われて予測誤差が増大しており、分散の予測においても、時間の経過とともに必ずしも減少していかないことがわかる。

6.3 ダム操作決定システム

貯水池の水位回復量RSは制御システムのモデル化の仮定(iii)より

$$RS = \theta_r \cdot \tau_a \cdot A_r \quad (RS \leq V : V \text{は貯水容量}) \quad (27)$$

で表わされる。ここに、 τ_a は基準値を超える期待降雨量から、初期損失および線形流出成分の半分を除いた貯水量回復への寄与分、 A_r はダム上流部の流域面積、 θ_r は流出成分のうち、貯水池で貯留される割合を示す係数である。 θ_r は治水時のダム操作によって0~1の値をとるが、ここでは回復量が貯水容量を上回らない間は、全ての流入量を貯留して $\theta_r = 1$ とおく。

図-5は、得られた貯水池回復量、流量てい減係数、予測入力をもとに、制御の達成度を固定した場合の各制御

表-1 制御期間の推定値

Rainfall number	Wet season			Dry season		
	Number of dry days	β	Control periods	Number of dry days	β	Control periods
Prior		0.0460	21.7		0.0505	19.8
1	37	0.0451	22.2	3	0.0509	19.7
2	3	0.0456	21.9	3	0.0513	19.5
3	45	0.0450	22.2	5	0.0517	19.3
4	25	0.0449	22.3	25	0.0516	19.4
5	10	0.0452	22.1	2	0.0520	19.2
6	21	0.0452	22.1	14	0.0521	19.2
7				9	0.0524	19.1
8				4	0.0528	18.9
9				1	0.0533	18.8
10				2	0.0537	18.6
11				3	0.0541	18.5

表-2 降雨量の推定値

Rainfall number	Wet season			Dry season		
	Rainfall depth mm	κ	Recovery rainfall depth mm	Rainfall depth mm	κ	Recovery rainfall depth mm
Prior		0.01139	187.87		0.05160	44.38
1	109.4	0.01165	105.86	51.1	0.05207	44.20
2	151.4	0.01173	104.98	33.9	0.05264	44.00
3	234.9	0.01173	105.24	47.8	0.05307	43.88
4	1497.1	0.01024	197.63	146.9	0.05147	44.43
5	59.3	0.01035	196.40	40.7	0.04999	45.00
6	81.2	0.01044	195.82	43.9	0.05004	44.78
7				175.4	0.04789	45.88
8				48.0	0.04834	45.60
9				51.2	0.04870	45.53
10				47.8	0.04915	45.34
11				26.7	0.04963	45.15

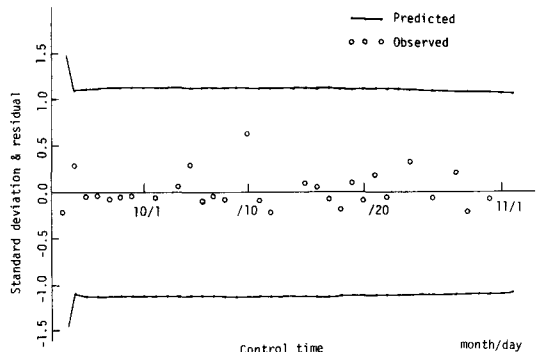


図-3 予測標準偏差と残差の比較、水量

時点における最終制御確率である。 $j = 2.0$ で制御を続けるなら、 $t = 11 \sim 15$ および $t = 28 \sim 40$ にかけて確率（信頼度）が急激に低下し、その達成度をほとんど確保できない。ところが、 $j = 1.7$ では $t = 14 \sim 15$ と $t = 35 \sim 40$ が低確率であり、 $j = 1.5$ では全て確率 1 で達成できる。ゆえに、信頼性の高い操作を行うなら、 $t = 1 \sim 5$ までは $j = 2.0$ の制御系列を用い、 $t = 5 \sim 12$ では $j = 1.7$ とし、 $t = 13 \sim 15$ では $j = 1.5$ 、 $t = 16 \sim 19$ では $j = 1.7$ 、 $t = 20 \sim 22$ では $j = 2.0$ 、 $t = 23 \sim 28$ では $j = 1.7$ 、 $t = 29 \sim 30$ では再び $j = 1.5$ とし、 $t = 31 \sim 35$ では $j = 1.7$ 、 $t = 36 \sim 40$ では $j = 1.5$ の制御系列でもってダム操作を行うことができるなら、全期間にわたって信頼度が 0.9 以上となる。これに対して、いかなる確率においても達成度が 1 より低くなる場合は、渇水あるいは濁質被害の発生とみなし別の操作ルールへの移行をはからなければならないであろう。

7. 結 語

本研究では、利水時を対象に、評価地点流量の平滑化と濁質の軽減を目的としたダム貯水池の実時間操作方式を提案した。ここで得られた成果を要約すると以下ようになる。

(i) 各種の新たな観測資料を入手するごとに、必要とするサブシステムを明確にし、貯水池操作手順の迅速化をはかった。

(ii) 季節的な水需要、水文特性の変化を取り入れ、長期的な水供給バランスを考慮した操作指標としての仮想最終貯水量のとり方を明らかにした。

(iii) 予測入力の確率密度関数を用いて制御の達成確率を向上するダム操作法を提案し、望ましい信頼度を保持した制御解を得ることができた。なお、今後はダム貯水池操作である以上、洪水時から低水、渇水時までの総合的な操作システムの確立をはからなければならない。

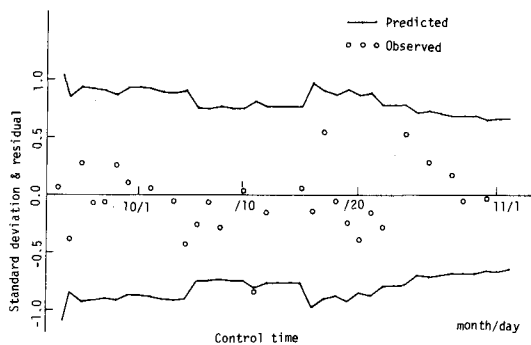


図-4 予測標準偏差と残差の比較、水質

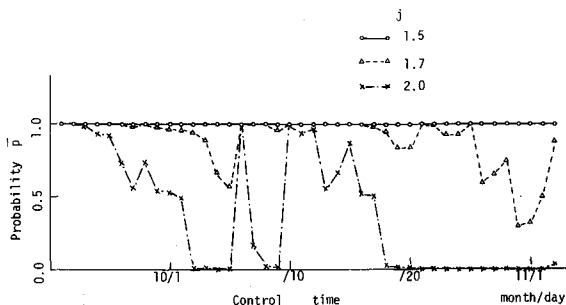


図-5 達成度の相違による制御値の比較

参 考 文 献

- 1) 池淵周一・小尻利治：水量・濁質制御に関するスカラー・ベクトル最適化手法の比較・考察，第16回自然災害科学総合シンポジウム，1979，pp. 199～202.
- 2) Eagleson, P. S. : Climate, Soil and Vegetation 2, The Distribution of Annual Precipitation Derived From Observed Storm Sequences, Water Resources Research, Vol. 14, No. 5, 1978, pp. 713～721.
- 3) 安芸周一・白砂孝夫：貯水池の流動形態のシミュレーション解析——その一発電専用貯水池の流動形態——，発電水力，No. 134, 1975.
- 4) 高埴琢馬・池淵周一・小尻利治：入力の確率分布特性を考慮したダム貯水池操作，京都大学防災研究所年報，第24号B-2, 1981, pp. 109～123.