

低水時における実時間ダム貯水池操作の システム論的研究

高棹 琢馬・池淵 周一・小尻 利治

SYSTEMS APPROACH TO THE REAL TIME CONTROL OF DAM RESERVOIRS INCLUDING LOW FLOW, STORAGE, TURBIDITY AND DROUGHT CONTROLS

By *Takuma TAKASAO, Shuichi IKEBUCHI and Toshiharu KOJIRI*

Synopsis

The aim of this study is to establish the real time operational policy of dam reservoir system for no rainfall periods between neighbouring floods.

According to the control objectives, dam operational system is divided into four sub-systems, such as i) storage control where the storage volume will be lowered into the volume of low flow control, ii) low flow control arguing the quantity and improving the quality of release discharge, iii) turbidity control preventing the duration days of high concentration turbidity of release discharge from becoming longer, and iv) drought control dealing with the case where there is not enough flow discharge to satisfy the water demand. Then, in each sub-system, we construct the operational procedures and formulate the system equations. Concretely, first part is handling of meteorological information data, second part is prediction of quality and quantity, and third part is decision of release discharge satisfying the control objective.

Lastly, we apply the above methodology to the real river basin.

1. 序 論

水資源の有効利用という点に関しては、水そのものを貯留するダム貯水池は極めて有力な方策であり、現在、建設省においても多数のダムを建設中もしくは建設を計画されている。ところが、その管理・運用面になると、洪水時には一定量あるいは一定率放流方式で代表される固定的なものであり、一方、低水時の操作は過去の実績あるいは需要に追従した形で行われており、ダムのもつ貯水機能が十分に発揮されているとは言えない。

ダム貯水池操作に関しては、Ripple¹⁾ に始まる貯水池機能の評価や Hall²⁾, ReVell³⁾ らの数値シミュレーションによる操作の最適化など、多数の研究がなされている。これらは、いずれも既知入力を対象とした計画操作であり、未知入力を対象とした実時間操作については、近年、竹内⁴⁾、神田⁵⁾ らがを行っているにすぎない。著者らも、確率的方法^{6),7)} を提案しているが、それらは治水、利水に限定したものであり、現実問題への適用にあたっては、両者を統合した連続的な操作手順が要求される。このような観点より、本研究では治水から利水までの一貫した実時間操作が可能なトータルフローの作成と、利水操作を中心として、種々の特殊な入力条件に対する操作方法、具体的には、治水から利水への過渡的操作、渇水対策の操作、水質悪化時の操作について考察しようとするものである。

なお、本文中では、操作システムの相違を明確にするため、低水と利水、渇水という言葉を使い分けている。すなわち、低水とは、治水操作が終了した時点から、次の治水操作が始まる直前までを、利水は、低水

時において流量が規準値（需要量）を下回らない期間であり、渇水は、流量が規準値を下回る期間を表わしている。

2. 操作の概要と目的

2.1 実時間操作の概要

洪水時には、河道の疎通能以下に流量を押え、下流の基準地点での破堤、氾濫を防ぐことが制御目的になるのに対し、洪水終了後の低水時には種々の操作目的が存在している。いいかえると、多目的操作であり、全目的を同一の重みで評価する利水操作と、ある特殊な目的が危険時にあり、その目的を重点的に制御する異常時操作からなっている。ここで、任意の時刻での観測データの入手から、各操作システムでの放流量の決定方法までをまとめ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、次時刻での放流量決定の初期値とする。
- ii) 現在および次時刻での降雨発生・流入ハイドログラフの形状を検討し、治水操作を行うかどうかを判定する。
- iii) 治水操作の場合は、制御期間、制御目的、人力推定法が低水時とは異なるので、前述の治水操作⁹⁾を行うものとして、本研究では取り扱わない。
- iv) 現在の貯水池の容量が利水容量より多くなっているときは、利水操作時とは異なった高水時の流入量予測を行うとともに、ある制御期間に貯水量が利水容量より少なくなならないなら、ある限られた時間内で貯水量を下げる操作を実施する。これを貯水池水位低下操作（略して、水位低下操作）と名付ける。
- v) 現在の貯水量が利水容量内にあるか、短時間で容量内に入ることが予測されたときは、以下の操作に移る。
- vi) 現在の観測流入量が需要水量を下回っているときは、ただちに渇水操作を行う。
- vii) 観測流入量が需要水量を上回っているときは、利水時の流入量予測を行うとともに、放流量計算を行う。ただし、算出された放流量が需要量を下回っているならば、渇水操作に移る。
- viii) 算出された放流量が需要量を上回っており、しかも放流量（本研究では濁質に限定する）が許容値を下回っているならば、先に計算された結果を用いて利水操作を行う。
- ix) 算出された放流濁度が許容値を上回っているときは、高濁度の日数をできるだけ少なくするような操作を行う。これを高濁度日数減少操作（以後、濁質操作）と呼ぶ。
- x) 新しい施設の建設など、上記以外の操作ルールの適用が必要とならない限り、本実時間操作が続くもして、次時刻へ移り、i) へ戻る。

以上が実時間操作ルールの概略であり、各操作システムの有機的関係を示すと、Fig. 1 のフローチャートになる。ただし、図中の $r(t)$ は時刻 t の降雨量、 r_F は計画降雨に相当する降雨量、 V_L はダム貯水池の利水容量、 $\bar{Q}_d$ は基準地点での許容流量（河川維持用水、上水、工業、農業用水等を含む）、 C_d は基準地点での許容濁度、 $QI(t)$ はダム貯水池への流入量、 $CO(t)$ は放流濁度、 $S(t)$ は貯水量、 $S'(t+T)$ は計算時における T ステップ後の予測貯水量、 T_F は制御期間の総数である。

2.2 各操作の制御目的と評価関数

(1) 水位低下操作

多目的なダム貯水池では、通常、その容量は洪水調節用と利水用に区分されており、洪水終了後、次の出水にそなえて早急に利水容量内に貯水量を下げるが必要とされている。しかし、水利用からすれば、できるかぎり多くの水量が保たれていることが望ましい。したがって、豪雨の発生が予想されない期間内（治水時の予測時間に対応する）で、人工洪水を生じることなく、貯水量を利水量に下げることが水位低下操作の目的となる。さらに、異常な流量の減少、高濁度の発生も阻止する必要がある。すなわち、最終貯水量を利水容量に限定すれば、次の制御目的を達成することにほかならない。

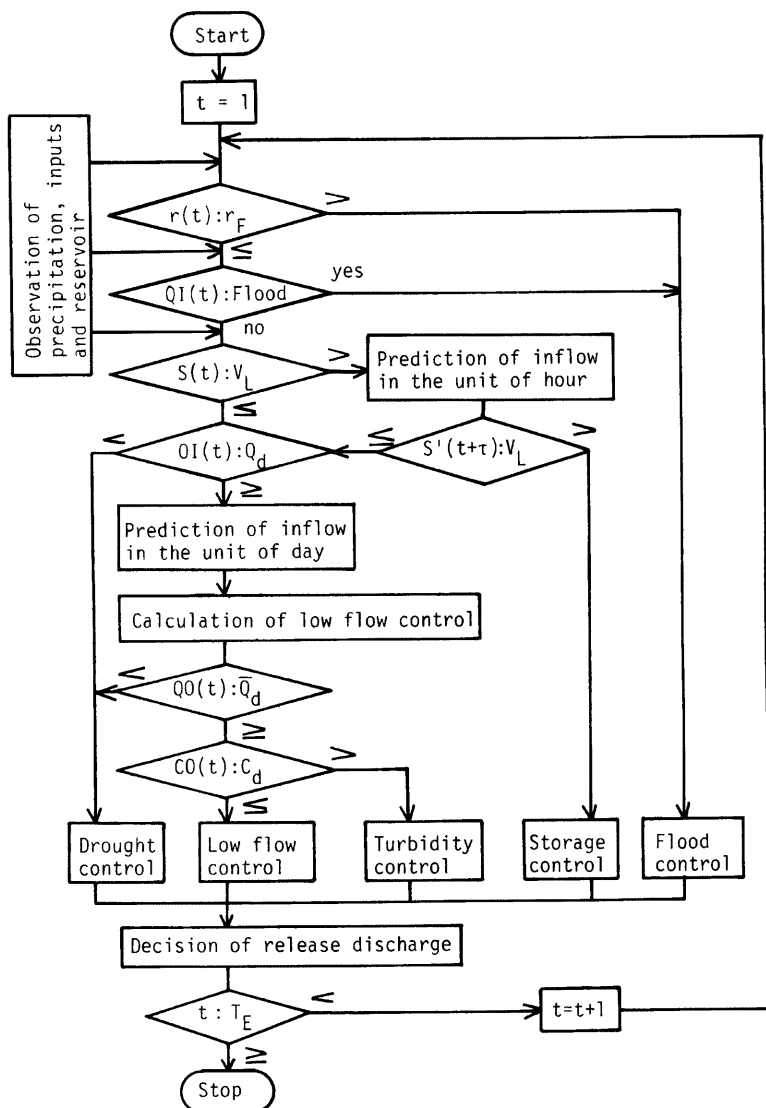


Fig. 1 Total flow of real time operation on dam reservoir system.

i) 洪水防御：

$$K = \max \{Q_{mp}/Q_{md}\} \quad (m=1, 2, \dots, M) \longrightarrow \min \dots \dots \dots (1)$$

かつ、 $K \leq 1$

ii) 低水管理:

$$P = \min \{Q_{mi}/\bar{Q}_{md}\} \quad (m=1, 2, \dots, M) \longrightarrow \max \dots\dots\dots (2)$$

かつ, $P \geq 1$

iii) 濁質管理:

$$D = \max \{C_{m \max}/C_{md}\} \quad (m=1, 2, \dots, M) \longrightarrow \min \dots\dots\dots (3)$$

かつ, $D \leq 1$

ただし, Q_{md} は評価地点 m の許容流量, Q_{mp} , Q_{mi} , $C_{m \max}$ はそれぞれピーク流量, 最低流量, 最悪濁度, M は評価地点の総数を表わしている。式(1), (2), (3)は多目的最適化問題を構成するが, 実時間操作という点を考慮すれば, スカラー最適化手法⁸⁾により目的の統合化をはかり,

$$J_H \equiv \min \{Q_{mi}/\bar{Q}_{md}, Q_{md}/Q_{mp}, C_{md}/C_{m \max}\} \longrightarrow \max \dots\dots\dots (4)$$

かつ, $J_H \geq 1 \quad (m=1, 2, \dots, M)$

を満たすように最適化操作を行うことができよう。

(2) 利水操作

利水時は, 水量の安定供給および水量浄化がダム操作の目的となる。したがって, 水位低下操作で述べた3目的のうち低水管理式(2)と水質管理式(3)が制御目的となる。両目的をスカラー最適化手法で統一すると制御目的 J_L は,

$$J_L \equiv \min \{C_{md}/C_{m \max}, Q_{mi}/\bar{Q}_{md}\} \longrightarrow \max \dots\dots\dots (5)$$

かつ, $J_L \geq 1 \quad (m=1, 2, \dots, M)$

となる。なお, 社会的要望を考慮すれば, 水温, BOD, リン, 窒素など多数の水質も対象とすべきであり, 同様の方法で水質指標の定式化と統合化が可能である。

(3) 濁質操作

洪水終了直後は, 流域内の斜面崩壊, 浸食などによって濁度が異常に高くなり, 利水操作では制御効果を上げるどころか, かえって高濁度を長期化させる恐れがある。また, 河川利用者からすれば, 許容量を越える濁質水は平均化されて長期間継続するよりも, 高濃度時が発生してもいからできるだけ短期間で終了し, 許容範囲内におさまる方が望ましい。こうした点より, 高濃度に対する濁質制御では, 全制御期間内において許容値を上回る濁質日数の最小化を制御目的とする。すなわち, ある制御時刻の濁度が許容値を越える場合, 評価値として1を与える関数を $D_{cm}\{\cdot\}$ で表わすと, 制御目的は $D_{cm}\{\cdot\}$ の和の最小化

$$J_c = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^{TE} D_{cm}\{CO_m(t)\} \longrightarrow \min \dots\dots\dots (6)$$

ただし, $CO_m(t) > C_{md}$ のとき $D_{cm}\{CO_m(t)\} = 1$

$CO_m(t) \leq C_{md}$ のとき $D_{cm}\{CO_m(t)\} = 0$

となる。

(4) 渇水操作

河川水量が水需要量を下回る異常渇水時の制御目的として, 社会の心理的效果を考えると次の2目的があらう。まず第1に, 渇水期間全体にわたって各制御時刻の水足量を最小にしようとする方法である。すなわち, 利水時の水量目的に対して, 制約 $P \geq 1$ をはずしたものに等しく,

$$J_{DL} = \{Q_{mi}/\bar{Q}_{md}\} \quad (m=1, 2, \dots, M) \longrightarrow \max \dots\dots\dots (7)$$

となる。

次に, 水不足が長期にわたるのを避ける方法であり, 数日間の断水に耐えるかわりに, 渇水の日数を減らすとすることである。水需要量を上回る非渇水日を $D_{Dm}\{\cdot\} = 1$ で表わせば, 制御目的は

$$J_{DD} = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^{TE} D_{Dm}\{QO_m(t)\} \longrightarrow \max \dots\dots\dots (8)$$

かつ, $QO_m(t) \geq \bar{Q}_{md}$ のとき $D_{Dm}\{QO_m(t)\} = 1$

$QO_m(t) < \bar{Q}_{md}$ のとき $D_{Dm}\{QO_m(t)\} = 0$

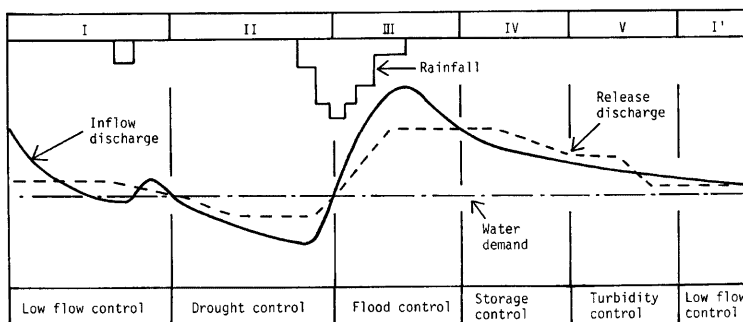


Fig. 2 Dam operation sequence for long term inflow discharge.

となる。式(7)、(8)は目的関数値の表現が全く異なっており、同一基準への変換による統合化が困難である。操作の実施にあたっては、ベクトル最適化での解の特性と各目的でスカラー最適化による解の特性を分析し、多目的の特性をあまり損わない範囲で、単一目的操作として使用可能な目的を用いるべきであろう。

以上のような各操作システムを流入量系列に対応させて適用すると、Fig. 2 のようになる。また、計算手順からすると、現在および将来の気象条件を解析する気象情報・処理システム、貯水池への水量・水質入力を予測する入力予測システム、操作の意志決定を行う放流量決定システムより構成されている。次章からは各サブ操作での具体的な制御方法を考察しよう。

3. 水位低下操作

治水操作の終了から、通常の利水操作への移行にあたっては、突発的な出水に対処できるよう必要な洪水調節容量を確保しておかなければならない。また、現在の豪雨予測精度の低さや実ダムでの水位低下が3～4日以内に行われていることにより、本操作に有効な期間は治水操作終了後48時間とする。48時間後には貯水量は利水容量内に入っているわけである。もっとも、豪雨予測精度の向上や出水の時間遅れ、貯水池の規模によって適切な操作期間を設定すればよい。

3.1 入力予測システム

降雨はないが、表面流、中間流が卓越した流出時の予測として高埽らの確率的方法を導入する⁹⁾。すなわち、システムの状態を $x_H(t)$ で表わすと、流出系には次の微分方程式が成立する。

$$dx_H(t)/dt = \{r(t) - f(x)\} \quad (9)$$

そこで、 $r(t)=0$ 、 $f(t)=\alpha_H \{x_H(t)\}^2$ を代入すると式(9)は

$$x_H(t) = x_H(0) / (\alpha_H \cdot x_H(0) \cdot t + 1) \quad (10)$$

となる。いま、 α_H が時刻によって変動するパラメータとすると、状態方程式、観測方程式がそれぞれ

$$\alpha_H(t) = \alpha_H(t-1) + w_H^1(t) \quad (11)$$

$$y_H(t) = \alpha_H(t) \cdot \{x_H(t)\}^2 + v_H^2(t) \quad (12)$$

となるシステムが構成される。ここに、 $w_H^1(t)$ 、 $v_H^2(t)$ は平均0、分散 $QV_H^1(t)$ 、 $RV_H^2(t)$ の白色正規系列である。

つぎに濁質の予測であるが、基礎式として、流量との一般関係式

$$CI(t) = a_H \{QI(t)\}^{b_H} \quad (13)$$

を用いる。ただし、 $CI(t)$ は時刻 t における流入濁度である。式(13)に流量の観測式を導入すると濁質の観測方程式は、

$$y_H^2(t) = a_H \{x_H(t)\}^{2 \cdot b_H} \{\alpha_H(t)\}^{b_H} + v_H^2(t) \quad (14)$$

となる。ただし、 $v_H^2(t)$ は平均0、分散 $RV_H^2(t)$ の白色正規系列である。結局、式(12)、(14)をマトリクスで

示す観測方程式とすると、カルマン・フィルターを適用することによって、各時刻の流入流量、流入濁度が予測される。

3.2 放流量決定システム

貯水池内の濁質解析としては、完全混合モデル、1次元モデル、2次元モデルが存在するが、ここでは高棹らが行った1次元モデルによる貯水池操作¹⁰⁾を念頭に定式化を進める。制御系は説明の簡略化のために、単ダム・単評価地点とする。

いま、制御期間を T_{EH} 、初期条件として、ダムの初期貯水量を $S(0)$ 、初期濁度を $(CS_j(0), j=1, \dots, J; J$ は1次元モデルによる格子の総数) とすれば、式(4)を満たすDPの定式化は、

$$f^H(S(t), CS(t), \dots, CS_J(t)) = \max_{Q(t)} \left[\min \left\{ \frac{C_d}{CO(t)}, \frac{QO(t)}{Q_d}, \frac{Q_d}{Q(t)} \right\}, f^H_{t-1}(S(t-1), CS_1(t-1), \dots, CS_J(t-1)) \right] \quad (15)$$

となる。この漸化式を解く手がかりとして、制御初期段階の関数値 f^H は次のように一意的に決定される。

$$f^H(S(1), CS_1(1), \dots, CS_J(1)) = \min \left\{ \frac{C_d}{CO(1)}, \frac{QO(1)}{Q_d}, \frac{Q_d}{QO(1)} \right\} \quad (16)$$

式(15)、(16)を用いて時刻 $1 \sim T_{EH}$ まで計算を進め、最終貯水量、すなわち利水容量 $(S(T_{EH}) = V_L)$ を与えて、可能な格子濁度の中で、制御目的の最小値が最適関数値であり、それに至る貯水量が最適貯水量系列となる。

なお、毎時の入力予測が異なると48時間の操作期間で水位の低下が完了しないことが予測される。そうした事態を避けるために、次時刻の入力を現観測における入力と予測入力との最大値と定義し、最適貯水量系列をもとに放流量系列の再計算を行い、その結果により次時刻の決定放流量とすべきであろう。

4. 利水操作

利水期間としては、降雨から次の降雨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と考えるが、ある規模以下の降雨は流量・濁質入力に大きな影響力を及ぼさないとみなし、利水時の外乱とする。高棹らは $R_d(\text{mm/day})$ の降雨を基準値とし、その基準値以上の降雨間隔の推定法として、ベイズの定理を用いた方法を提案しており、次式によって逐次推定されていく⁷⁾。すなわち、制御期間を T_{EL} とすると、

$$T_{EL} = \hat{\beta}_{NR}^{-1} = \{ \hat{\beta}_{NR-1} \cdot t_{NR}^{NR} + (MR + NR) \} / \{ \hat{\beta}_{NR-1} (MR + NR + 1) \} \quad (17)$$

より求められる。ここに、 $\hat{\beta}_{NR}$ は観測回数 NR での指数分布のパラメータ推定値、 t_{NR}^{NR} は NR 回目の無降雨期間、 MR は事前確率を与える無降雨の観測回数である。次にこうした利水時における入力予測、放流量決定について考察しよう。

4.1 入力予測システム

長期流出解析として自然てい減曲線を用いると、時刻 t での流量は次式で表わされる。

$$QI(t) = QI(0)e^{-\alpha_L t} \quad (18)$$

ここに、 α_L はてい減係数である。いま、真の流量を状態量 $x_L(t)$ とすると、状態方程式として次式が得られる。

$$x_L^1(t) = \phi_{1|t-1} x_L^1(t-1) + w_L^1(t) \quad (19)$$

また、見かけの流量を観測量 $y_L(t)$ とすると、観測方程式は、

$$y_L^1(t) = x_L^1(t) + v_L^1(t) \quad (20)$$

となる。ただし、 $\phi_{1|t-1} = e^{-\alpha_L}$ 、 $w_L^1(t)$ 、 $v_L^1(t)$ は平均0、分散 $QV_L^1(t)$ 、 $RV_L^1(t)$ なる白色正規系列である。式(19)、(20)に対し、カルマン・フィルターを適用すると、流入流量を予測することができる。

一方、濁質に関しては、3.と同様に式(13)を用いる。式(13)の $QI(t)$ に式(18)を代入すると、

$$CI(t) = a_L \{ QI(t-1) \}^{b_L} e^{-\alpha_L b_L t} \quad (21)$$

となるので、濁度を状態量 $x_1^i(t)$ にとると、状態方程式、観測方程式は、それぞれ

$$x_1^i(t) = \psi_{i|t-1} x_1^i(t-1) + w_1^i(t) \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$y_1^i(t) = x_1^i(t) + v_1^i(t) \quad \dots\dots\dots (23)$$

となる。ただし、 $\psi_{i|t-1} = e^{-a_L \cdot b_L}$ 、 $w_1^i(t)$ 、 $v_1^i(t)$ は平均 0、分散 $QV_1^i(t)$ 、 $RV_1^i(t)$ の白色正規系列である。式 (19)、(20) に対して、やはりフィルタリングを行うと、流入濁度を予測することができる。

4.2 放流量決定システム

利水時において、次に予想される降雨によって貯水池が満杯になることが確実であれば、その期間内で現在の貯水量を全て利用しても構わないであろう。ところが、次の降雨で貯水池が満杯になる保証はなく、制御期間最後の貯水量を 0 とするのは、水需要から見ても極めて危険である。したがって、将来の降雨による貯水池水位の回復をみこし、全ての利水時において同等の制御目的を達成できるように計算時の最終貯水量（仮想最終貯水量）を決定すべきであろう。濁質に関しても平滑化が要求されるが、濁質は流量の関数であるから、仮想最終貯水量は水量のみ決定し、濁質は当該制御期間内の放流操作によって制御することにする。

制御目的に式 (5) を用いると、DP の関数漸化式は、

$$f_{t-1}^i(S(t), CS(t), \dots, CS_J(t)) = \max_{(Q_0(t))} \left[\min \left\{ \frac{C_d}{CO(t)}, \frac{QO(t)}{Q_d} \right\}, \right. \\ \left. f_{t-1}^i(S(t-1), CS_1(t-1), \dots, CS_J(t-1)) \right] \quad \dots\dots\dots (24)$$

となる。ここで、関数の最終状態を規定する最終貯水量は、将来の水需給量を考慮して、次のように決定される。すなわち、

- i) 翌年の同時刻に現在の貯水量を維持する。
- 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非線形流出成分が寄与するが、線形流出成分の半分も補給水とみなし回復量に加える。
- iv) 現制御期間内の流出は自然てい減曲線と与える。
- 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。

などの仮定をおくと、現時刻が乾季である場合の計算上の最終貯水量（仮想最終貯水量）の期待値は次のようになる。

$$E\{S(T_{EL})\} = \left\{ S(t) + \frac{QI(t)}{\hat{\alpha}_L} (e^{-\hat{\alpha}_L} - e^{-\hat{\alpha}_L T_{EL}}) \right\} (1 - e^{-\hat{\alpha}_L T_{EL}}) - (NC_D - RS_D) \\ + NC_W \cdot RS_W + \frac{QI(t)}{\hat{\alpha}_L} e^{-\hat{\alpha}_L} \cdot \hat{\beta}_L e^{(\gamma + T_{EL}) \hat{\beta}_L} \cdot T_{EL} \cdot \int_{\hat{\beta}_L (T_{EL} + \gamma)}^{\infty} \frac{e^{-\tau}}{\tau} d\tau \\ + \frac{T_{EL} \cdot QI(t) \cdot \hat{\beta}_L e^{-(\hat{\beta}_L + \hat{\alpha}_L)}}{\hat{\alpha}_L} \cdot \int_{(\hat{\beta}_L + \hat{\alpha}_L) (T_{EL} + \gamma)}^{\infty} \frac{e^{-\tau}}{\tau} d\tau \quad \dots\dots\dots (25)$$

ただし、 $\gamma = NC_D \cdot ET_D + \bar{Q}_W \cdot NC_W \cdot ET_W / \bar{Q}_{DD}$ 、 $\bar{Q}_{WD}$ 、 $\bar{Q}_{DD}$ 、 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、 $\hat{\alpha}_L$ 、 $\hat{\beta}_L$ は現時刻で推定された流量のてい減係数と無降雨期間のパラメータである。式 (24)、(25) を用いると、現無降雨期間内において、水量・濁質目的を達成しうる放流量が、毎時刻決定されていく。

5. 特殊な入力条件下での貯水池操作

通常の利水時とは異なる場合、とくに、高濁度の濁質流入が継続し許容量を保持できなくなった場合と、無降雨が長期にわたり、需要水量を確保できなくなった場合を考えよう。

5.1 濁質操作

利水計算により高濁度の放流が予測されると、濁質水による被害を軽減しうするために、オプション操作で

ある濁質操作を実施しなければならない。気象観測、入力予測、仮想最終貯水量に関しては利水時と同様であるので、それぞれ、式(17), (23), (25)を用いることにする。ところが制御目的は式(6)で表わされるように異なっており、新たな関数漸化式が必要になる。いま、取水口位置に対応する格子番号を $IP_j(t)$, ($j=1, \dots, U$; U は取水口の総数) で表わすと、DP の定式化は次のようになる。

$$f_c^j(S(t), CS_1(t), \dots, CS_J(t)) = \min_{\{QO(t) \in IP_j(t)\}} \{D_c[CO(t)] + f_{c-1}^j(S(t-1), CS_1(t-1), \dots, CS_J(t-1))\} \quad (26)$$

ただし、計算が制御期間 $T_{EC}(=T_{EL})$ にわたって行われ最適系列を求める場合には、設定された仮想最終貯水量の他に取水口位置も必要になり、全ての最終取水口位置の組み合わせの中で、目的関数値を最小にする組み合わせが最適状態、対応する系列が最適貯水量系列となる。本定式化は単ダムであっても、状態量が $1+J$ 個、決定量が $1+U$ 個となり、計算時には計算時間と記憶容量の増加が考えられる。その対策として、状態量の減少をはかるダム群および制御期間の分割、状態量の領域を制御して次第に最適解に接近させる DDDP の応用といったアプローチがあげられる。また、多くの計算例より、平均的な貯水池内濁度が初期から単調に減少していく点に着目し、貯水池内濁度分布を当該時刻の貯水量だけの関数とする方法がある。簡単なシミュレーションによると高濁度時が若干増加するだけであるとの結果が得られているので、計算の簡略化をはかる近似解法としては有効であろう。なお、式(15), (24)では取水口を考慮していないが、これは高濁度時は表層取水、深層取水といった位置の変化が重要な要素になるのに対して、平常の利水時には主として表層で取水され、量的制御が中心となるからである。しかし、操作上の要求があれば全ての操作時において、取水口位置を含めた形で放流量の決定をすることは可能である。

5.2 渇水操作

(1) 操作条件

現在の貯水量と将来の流入量予測より需要水量を確保することが不可能となれば、ただちに渇水操作が行われる。渇水期間は、利水時の無降雨期間がそのままではまるのではなく、異常な流量低下が継続している場合に相当する。したがって、自然流量がある規準量以下に対応する無降雨時が渇水期間といえる。Fig. 3 は利水時と渇水時の統計資料の取り扱い方を示したものであり、 t_b^{NR} が渇水時間である。無降雨期間の長

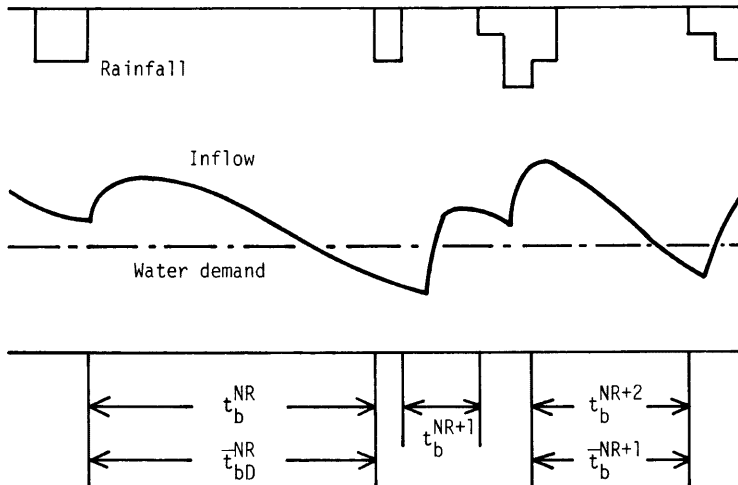


Fig. 3 Comparison of no rainfall periods between low flow control and drought control.

さや降雨パターンによって流出ハイドログラフが異なるが、無降雨期間と渇水期間に 1:1 の対応があると仮定すれば、渇水時の気象観測・処理システム、いいかえると、制御期間 T_{ED} および貯水池水位回復量は利水時と同様に定式化される。

入力予測システムにおいては、濁質を制御対象にしないので水量だけの予測になる。流出モデルには自然てい減曲線を用いると、予測式は式 (19), (20), (22), (23) となる。ただし、制御期間が長いために、観測時間数が少ない渇水初期では外そう的な予測になる傾向にある。降雨発生を含む流量の長期間予測モデルの開発や長期気象予報の導入も必要であろう。

現制御期間の仮想最終貯水量としては、当該無降雨がある基準量、たとえば $1/10$ 以上の異常渇水であるから、利水の条件 i) のような長期的水収支を考慮する必要はなく、全貯水量を使用することができる。その結果、渇水時の仮想最終貯水量の期待値は

$$E\{S^D(T_{ED})\} = S(t) + \frac{QI(t)}{\hat{\alpha}_D} (e^{-\hat{\alpha}_D} - e^{-\hat{\alpha}_D T_{ED}}) - e\left(S(t) + \frac{QI(t)}{\hat{\alpha}_D} e^{-\hat{\alpha}_D}\right) \int_1^\infty \frac{e^{-\tau}}{\tau} d\tau \\ + \frac{QI(t)}{\hat{\alpha}_D} \int_{1+\hat{\alpha}_D T_{ED}}^\infty \frac{e^{-\tau}}{\tau} d\tau \dots\dots\dots (27)$$

となる。ここに、 $\hat{\alpha}_D$ は現時刻における自然てい減曲線のパラメータ推定値である。

(2) 放流量決定システム

2.2 で述べたように制御目的式 (7), (8) をスカラー的に統合することは困難であるので、ここでは次のようなベクトル最適化手法を用いよう。すなわち、両目のより渇水日数および最低流量を座標軸にもつ 2 次元平面に TC (Transformation curve) を描き、目標 (Goal) との最近点を最適解とするのである。TC は最低流量に関して制約を

$$J_{DL} \geq \varepsilon^I \quad (i=1, 2, \dots, I) \dots\dots\dots (28)$$

と与え、渇水日数の最小化をはかることにより得られる。ただし、 I は TC を計算するための制約の総数である。そのときの DP の関数漸化式は

$$f^P(S(t)) = \max_{(QO(t))} [D_D\{QO(t)\} + f^P_{t-1}(S(t-1))] \dots\dots\dots (29)$$

となる。

社会目標は、水量に関しては、全期間にわたって需要量が満たされることが望ましく、 $J_{DL}^0 = 1.0$ とする。渇水日数に関しては、同じく渇水が発生しない方が望ましく、 $J_{DD}^0 = T_{ED}$ とすることができよう。最適点は、目標から IC (Indifference Curve) を描きその接点になる。IC は、水量、日数をそれぞれ 1 目的だけで制御

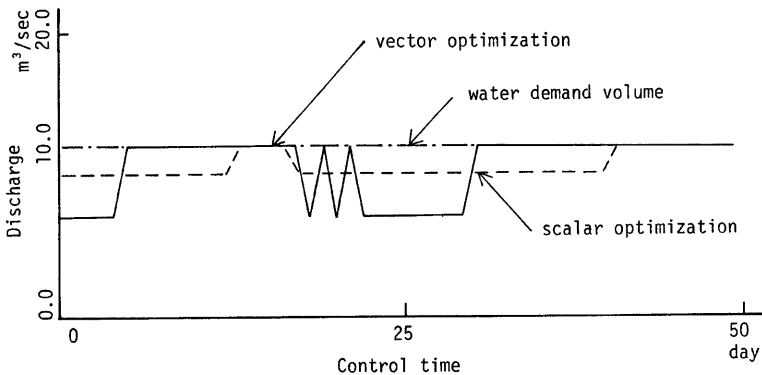


Fig. 4 Comparison of optimal release discharge sequences between scalar and vector optimization.

したときの点と目標との距離が等しくなるように変換された座標軸系において、目標を中心とする同心円が相当する¹¹⁾。なお、両軸の次元を同一にするため、渇水日数軸を制御期間で除して無次元化すべきであろう。結局、変換された新しい TC と同心円との接点が最適解、対応する放流量系列が最適政策となる。Fig. 4 はある時点の予測ハイドログラフに対して、流量の平滑化だけを考えた単一目的での操作 (ϵ は最大値をとる) とベクトル最適化手法の適用例の比較である。制御目的の相違による流量系列の変化が理解できよう。さらに、TC を形成するために制約条件 ϵ' を数多く設けることは計算量の増加を意味しており、実時間操作にあたっては、制約系列の相違を認識した上で、単一目的で計算することも必要であろう。

以上、各操作システムを詳述したが、その根底には多目的操作を行った利水計算があり、異常な人力、制御解が予測されたときだけ特定の目的を対象にしたオプション操作となる。オプション操作を継続しつつ、利水計算により貯水池の水量、水質状態を把握しておくことになる。

6. 実流域への適用と考察

本実時間操作の対象に、崩壊や地すべり発生の素因があり、水量・濁質操作の必要な S ダムを取り上げよう。ダム貯水池の諸元は Table 1 に示すとおりである。ダムの上流域には数個の発電用ダムが存在するが、日単位での各ダムの放流量からみると、それらの操作による影響はほとんどないといえ、S ダムへの流入量を自然流量として取り扱う。

6.1 気象観測・処理システム

統計資料として11年間の日降雨資料を用いるとともに、その後の2年間で観測資料とした。無降雨期間の算定に必要な基準降雨は、利水時においては、土石流被害の発生しやすい 100 mm (平均降雨日数を2日とみなし、日降雨 50 mm) とする。Table 2 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。もちろん、濁質操作にあたっても同じ値を用いている。

一方、渇水時の制御期間、渇水発生回数が少なく、仮定した分布形状の検定が出来ないので、ここでは、算術平均とした。雨季では40日、乾季では50日であった。

Table 2 Estimated value of β by Bayes' theorem.

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

6.2 入力予測システム

(1) 水位低下操作

観測資料の都合により、時間単位の濁質記録が得られなかったので、流量だけで予測を行った。Fig. 5 は制御時刻 $t=2, 12, 23$ における予測流量系列である。総ボリュームと形状を予測するという点からみると、かなりよい結果といえよう。パラメータ α_H は操作期間中に出水があると大きく変化するが、それ以後は急速に安定していき、予測の信頼性が裏付けられる。

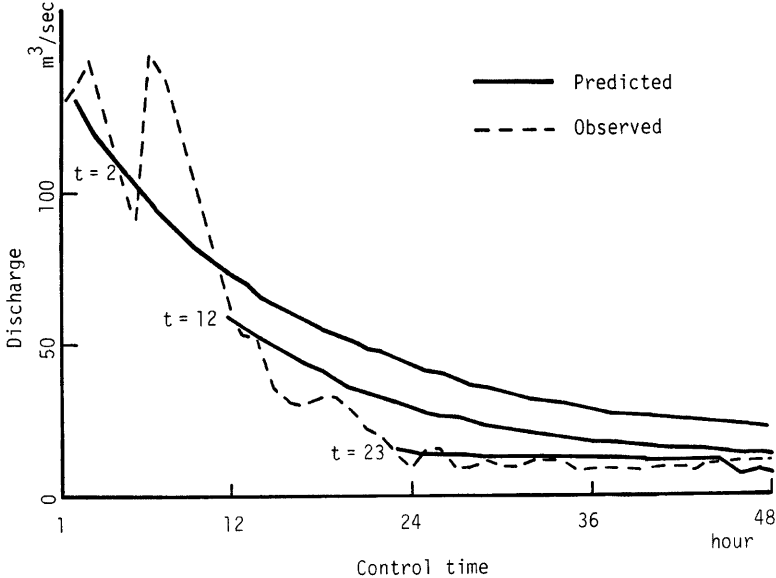


Fig. 5 Predicted inflow sequences at control time $t=2, 12, 23$ (storage control).

(2) 利水操作

流量のパラメータ α_L , および濁質のパラメータ b_L は統計資料より同定し, $\alpha_L=0.095$, $b_L=0.54$ を用いた。Fig. 6 は、制御時刻 $t=4, 15, 27$ における予測流量系列である。系列がほぼてい減形状で予測されており、途中で小出水を完全に予測することはできないが、現時点の放流に直接影響を与える次時刻の予測値は、極めて観測値に近い。さらに、予測誤差の分散も制御初期よりほぼ一定になっていることから、本予測方法の有効性がわかる。

Fig. 7 は同じく制御時刻 $t=4, 15, 27$ における濁度の予測系列である。流入濁度は、明らかに流量に従属して増減しており、流量の予測がつきにくい小出水時は濁度も大きく異なっている。しかし、予測誤差の分散は比較的安定しており、流量と合わせて確率的な安定性を求めることが可能であろう。

なお、高濁質、渇水時の入力予測に関しては、それぞれ、観測値の不備により、適用不可能であったことと利水時での適用結果に類似していたことから、ここでは省略する。

6.3 放流量決定システム

(1) 水位低下操作

操作の初期貯水量は治水容量満杯であり、48時間後には利水容量に入ることとを条件とした。Fig. 8 は各時

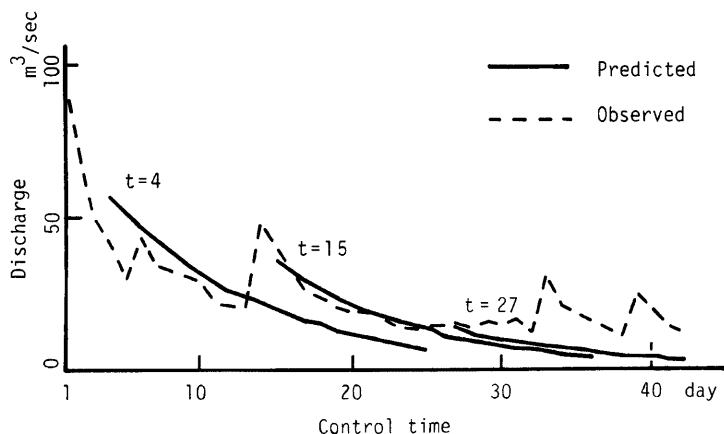


Fig. 6 Predicted inflow sequences at control time $t=4, 15, 27$ (low flow control).

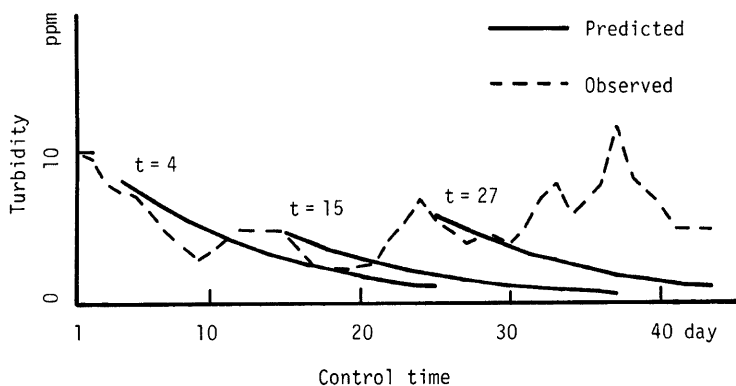


Fig. 7 Predicted turbidity sequences at control time $t=4, 15, 27$ (low flow control).

刻で決定された放流量を連ねた実放流量系列である。操作開始後12時位までは、初期の貯水量が満杯でもあるため放流量も多くなっている。12時以降の放流量は平滑化されており安定性の高い放流といえる。また水位は次第に下がり、48時付近になるとほぼ利水容量まで低下している。こうした点より、流入ハイドログラフがピークを過ぎた時点より一定の放流、つまり最大の放流を行い、貯水量が利水容量になると急激に放流を変える現行の方法に比べ、将来の入力と現在の貯水量より放流を決める本方法は、放流量が漸近的に変化した下流の安定性、安心感を高める上で極めて有効といえよう。

(2) 利水操作

Fig. 9 は気象観測・処理システムからの降雨に関するパラメータ推定値による仮想最終貯水量を用い、毎時、最適放流量を再決定した放流量系列である。仮想最終貯水量は満杯とはいえず、現行のように常に満杯を保つことを第一にしなくても、長期的水収支を考慮した操作が可能であることがわかる。放流量に関しては、入力予測にかなり左右された結果ではあるが、流入量をそのまま放出するのではなく、貯留と放出が繰

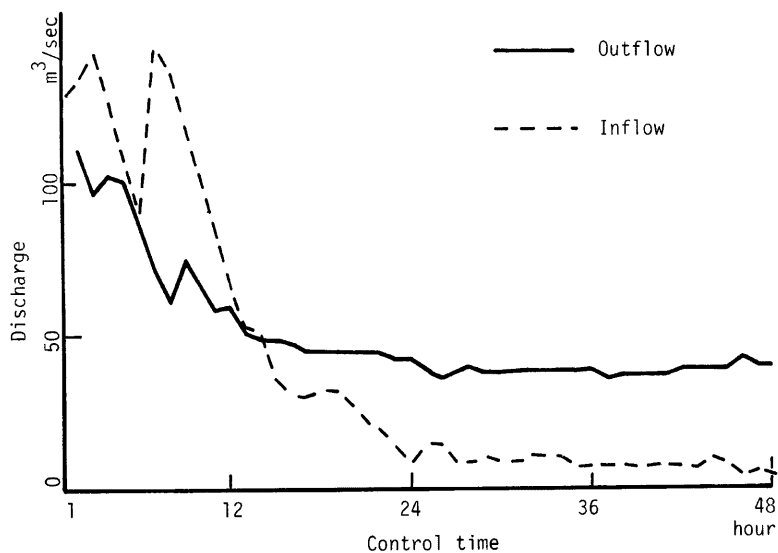


Fig. 8 Release discharge sequence in storage control.

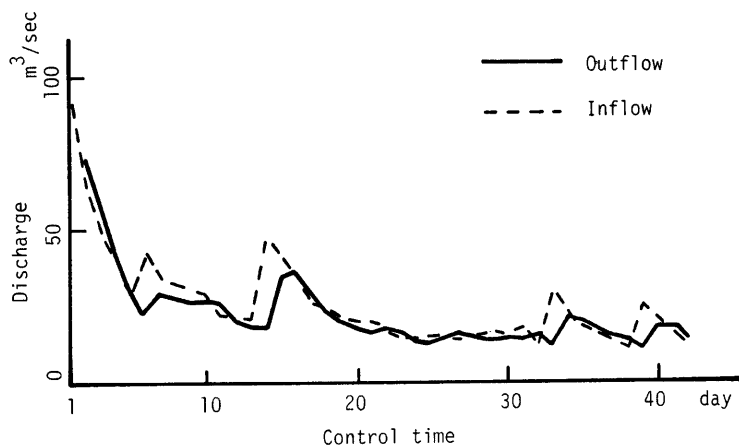


Fig. 9 Release discharge sequence in low flow control.

り返されている。こうした点は、最終貯水量、流入量系列を逐次設定していくことの利点であり、無効放流の減少をはたしているといえる。

(3) 特殊な条件下での操作

まず濁質操作であるが、実時間操ではなく、ある特定の時点での操作結果について考察を行おう。貯水池内の水理解析は計算時間の都合上、完全混合モデルを用いることにする。また、貯水池内の濁質変化を顕著

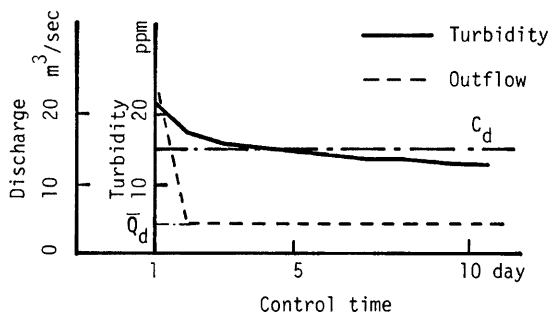


Fig. 10 Comparison of release discharge sequences between vector and scalar optimization.

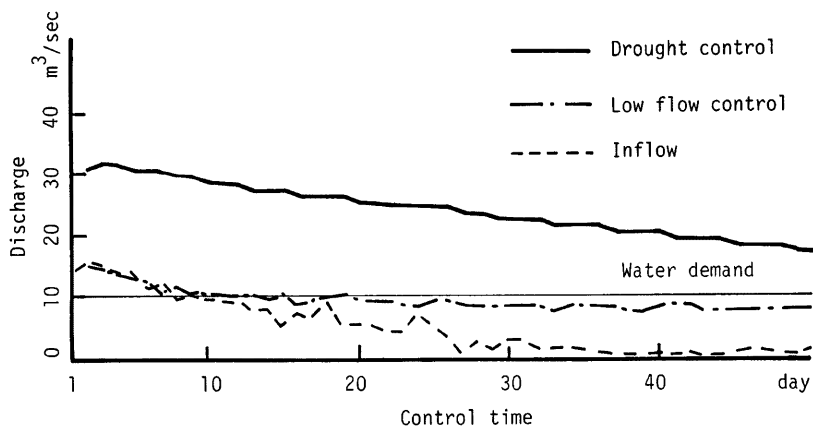


Fig. 11 Release discharge sequence in drought control.

に表わすため、貯水量を $2.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、需要水量を $5 \text{ m}^3/\text{sec}$ 、濁度の許容値を 30 ppm とした。Fig. 10 は放流量、放流濁度である。無操作の状態では放流濁度が許容値を上回る日数は8日であったのに対し、制御初期の段階で大量に放出し高濁度の貯水量を減らしたため、最終的には4日に減少している。実流域での適用にあたって、初期に放流量を大きくすると、以後の放流濁度の低下を期待できるのは明白であり、今後、1次元モデルや2次元モデルを用いて計算の実行をはかりたい。

つぎに渇水操作であるが、Fig. 11 は渇水操作と同時に利水計算を行った結果である。なお、本操作にはベクトル最適化手法は用いず、最低流量を上昇させる制御目的によるスカラー最適手法を用いた。利水計算では渇水の判断が下されている反面、実際の渇水操作ではかなり多量の放流が行われている。これは、渇水の終了時には貯水量が空になることを前提に仮想最終貯水量を決めていることに起因している。放流量の決定にあたっては、渇水操作の指示がでている以上、無効放流をさけることは当然であり、計算上の放流量と需要水量の小さい方を採用すべきであろう。

7. 結 語

本研究は、治水操作終了以後の低水時全般のダム貯水池操作について考察を行ったものである。統計資料

の不足や計算時間の問題があり、実データを用いての連続した適用ができなかったのは残念である。しかし、各操作システムでの適用の有効性は検証されており、得られた成果を挙げると次のようになる。

- i) 水位低下操作によって、治水終了時の高水位から、次の出水に備えつつ利水容量まで下げることができ、操作の切り換えがスムーズになった。
 - ii) 高濁度の日数を減少させる濁質操作では、シミュレーションを通じて適用可能性を確認した。
 - iii) 利水操作中に、観測流入量と計算放流量のどちらかが需要量を割れば、濁水操作へ切り替えて被害の減少をはかる方法が明らかになった。
 - iv) 各操作システムとも制御目的に合致した定式化が行われており、放流量決定の根拠が得られた。
 - v) 低水時実時間操作のトータルフローを構成することによって、現実のダム貯水池操作と比較できるようになった。
- 一方、問題点および今後の課題は以下のとおりである。
- vi) 降雨発生を含むとともに、長期気象予報を導入した流量の予期間予測モデルを開発する必要がある。
 - vii) ダム操作の評価精度を向上するために、高次元の濁質解析を実施しなければならない。
 - viii) 操作システムが多くなると、計算時間、記憶容量などの面から処理しきれなくなるので、シミュレーション結果からの操作のパターン分類による簡便化が要求される。
 - ix) 入力予測にともなう不確実性に対処するため、SCRC の導入も必要であろう。

最後に、本研究を進めるにあたって、方法論の展開や図表の作成で協力していただいた(株)大阪ガスの大下静男氏に謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) Ripple W.: The Capacity of Storage Reservoirs for Water-Supply, Proc. ICE, Vol. 71, 1983, pp. 270-283.
- 2) Hall W.A.: Optimum Design of a Multiple-Purpose Reservoir, Jour. Hydraul. Division, Vol. 90, 1964, pp. 141-149.
- 3) ReVelle C., E. Joeres and W. Kirby: The Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design. 1, Development of the Stochastic Model, Water Resources Research, Vol. 5, No. 4, 1969, pp. 767-777.
- 4) 竹内邦良：貯水量の累加損失係数を用いた貯水池群の最適操作手法，土木学会論文報告集，No. 222, 1974, pp. 93-103.
- 5) 神田 徹・畑 恵介：濁水期間における利水用貯水池の実時間操作方式，第25回水理講演会論文集，1981, pp. 285-292.
- 6) Takasao T., S. Ikebuchi and T. Kojiri: An Approach to the Adaptive Flood Control by Multi-Reservoir Systems, The Memoirs of Fac. Eng., Kyoto Univ., Vol. 38, Part 3, 1976, pp. 103-116.
- 7) 高樺琢馬・池淵周一・小尻利治：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，第26回水理講演会論文集，1982, pp. 379-385.
- 8) 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.
- 9) 高樺琢馬・椎葉充晴・宝 馨：流出系のフィルタリングと予測に関する基礎的研究（第2報），土木学会第35回年次学術講演会講演概要集，1980, pp. II-94-1-II-94-2.
- 10) 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1，発電用貯水池の流動形態，発電水力，No. 134, 1975.
- 11) Cohor, J.L. and D.H. Marks: A Review and Evaluation of Multiobjective Programming Techniques, Water Resources Research, Vol. 11, No. 2, 1975, pp. 208-220.