

濁質水を考慮したダム制御に関する一考察

高 棹 琢 馬・池 淵 周 一・小 尻 利 治

A STUDY FOR THE WATER QUANTITY AND TURBIDITY CONTROL BY MULTI-DAM RESERVOIRS SYSTEM

By Takuma TAKASAO, Shuichi IKEBUCHI and Toshiharu KOJIRI

Synopsis

Flood flow is accompanied with the high density of turbidity which is generated by landslip, collapse and so on. Moreover, its protracting phenomena is accelerated through the dam reservoirs, and in downstream there are much damage in agriculture or fishery.

Therefore, in this paper, we try to establish the optimal control system with multi-dam reservoirs for water quantity and turbidity. Firstly, we combine two different control objectives that are regulating the water discharge and reducing the turbidity. Secondly, three optimal intake policies are formulated according to the intake conditions of quantity and position. Lastly, those approaches are applied to the real dam reservoir and real data for verification of theory.

1. 序 論

戦後の日本経済の著しい成長は、流域の開発と都市機能の急膨張をもたらした。それとともに水を取り巻く環境も変化し、新たな洪水、渇水問題が生じてきた。すなわち、異常出水時の氾濫防御レベルと渇水時の水供給レベルが、当該地域における産業、都市および文化の発展の上で重要な役割を演じるようになった。いいかえれば、水は自然からのプレゼントとして存在するのではなく、効率的に利用すべき資源として認識されるようになった。ここに、河川表流水を一時的に貯留し、緊急時に放流を行うダム貯水池の有効性が認められ、多数のダム建設が要求されることになった。

ところが、人為工作物による水循環システムの変化は河川表流水の利用率増加だけでなく、自然環境へも大きな影響を与えている。たとえば、地下水水位の上昇、下流側流量の低下、流量の流下遅れ、およびそれらが及ぼす野生生物の生態系の変化である。また、貯水池内水理に関しても、いわゆる密度流となって流動部と停滞部が生じ、成層化が進んでいく。その結果、温水、富栄養化物質や洪水時の濁質水が貯水池に滞流することになり、下流での農業・漁業の被害が長期にわたって持続しつつある。

一方、ダム貯水池の運営は流入量予測の困難にも起因するが、実績方式に代表されるごとく、既得の必要水量だけを放流する極めて固定的なものである。しかも、貯水池内の質的挙動はほとんど考慮されていない。最近、取水方法として中間取水と表層取水の併用、あるいは選択取水の必要性が叫ばれているが、いずれも貯水池内水理解析のシミュレーションに重点が置かれ、実際のダム操作・運用面については経験的段階にあるといわざるを得ない。

以上の点を考慮して、本研究は利水操作に限定した上で、従来より高樺らによって進められてきた水量に関するダム群最適操作方式¹⁾と、貯水池内水理解析との結合をはかり、水量・水質両者を考慮した適切な放流方式の決定法を展開したものである。本研究での制御対象には、現在解決の迫られている濁質濃度の低下と流況の平滑化による利用可能水量の増加を用いているが、水温や富栄養化を組み込んだ多変量制御への拡張も可能である。

なお、本理論展開の有効性を実証するため、実流域への適用をはかり、そのシミュレーション結果を提示

した。

2. 濁質制御の目的と評価関数

ダム群の最適操作は明らかに多段決定過程であり、LP や DP などの最適化手法によって放流量系列を決定することができる。ただし、そうしたアルゴリズムを用いるには、制御目的とそれに適合した評価関数の設定が不可欠である。本研究は前章でも述べたように、異常出水後の濁質と低水流量の管理を目的としたものであるから、まず、量と質に分けて制御目的を定義し、ついで、計算時に用いる評価関数の提案を行う。

(1) 水量に関する制御目的

異常出水後の流量でい減部は利水操作の対象であり、その目的は次のようになろう。すなわち、流域内に設けられたいくつかの評価地点（基準地点）で、ある期間（渇水期あるいは次の異常出水までの期間）、常に農業、漁業、工業、上下水道、河川維持、などの需要量を満足する流量を流し、それを下回らないように制御することである。具体的には、

$$P \equiv \min_{\{m\}} \left\{ \frac{Q_{m1}}{Q_{md}} \right\} \rightarrow \max \quad \dots\dots\dots (1)$$

かつ

$$P \geq 1$$

と表現することができよう。ここに、 Q_{m1} は制御後の評価地点 m ($m=1, 2, \dots, M$) を流下する流量の最小値、 Q_{md} は評価地点 m における確保流量、すなわち需要量であり、 M は評価地点の総数である。さらに、水利用の面からすれば、最低流量の継続時間はできるだけ短く、しかも流況変動の少ない方が望ましい。

(2) 濁質に関する制御目的

一般の水質は「公害対策基本法」や「水道法」によって水質基準が定められ、法によって守られている。濁質に関しても漁業の関連基準として、ある濁度以下に保つことが望まれている。したがって、濁度の低下が制御目的になり、水量と同様に次のように定義できる。すなわち、いくつかの評価地点で、ある期間、常にある濁度の上限値を上回らず、できる限り低くすることである。数学的には、

$$D \equiv \max_{\{m\}} \left\{ \frac{C_{m \max}}{C_{md}} \right\} \rightarrow \min \quad \dots\dots\dots (2)$$

かつ

$$D \leq 1$$

と表現できよう。ここに、 $C_{m \max}$ は制御後の評価地点 m を流下する濁度の最大値であり、 C_{md} は評価地点 m での濁度の上限値、いいかえると利水に使用しうる許容限界値である。出水直後でいかなる制御を行っても $D > 1$ となる場合には、取水を中止したり、養殖いかだを移動するなど別の対策が必要である。評価地点では必ずしも濁質だけでなく、水温、BOD、COD など各種の水質が制御対象になることもあるが、式(1)、(2)のような基準値との比で表わすことによって、これらの評価基準も容易に設定できる。

2. 2 評価関数

前節で定義された制御目的を最適化手法を用いて達成するには、評価地点に付与すべき評価関数形を明らかにしなければならない。ところが、水量、濁質の各制御目的は **Fig. 1** で示すように 1 を境として反対の

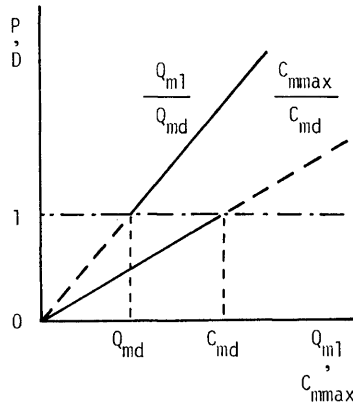


Fig. 1. Conceptual representation for the decision region of each control object.

領域内にある。また、方向も最大化と最小化といった逆向で、式(1)、(2)をそのまま定式化に用いることができない。つまり、目的相互間のバランスのとれた改善をはかる多目的問題として取扱わなければならない。その解法としては、i) 同一の判定領域で、統一化された単一目的の最大化（あるいは最小化）を行うスカラー最適化法と、ii) 各目的を別々に評価しその変動によって最適値を決めるベクトル最適化法が存在する。確かに、後者、なかでも SWT 法²⁹⁾や Weighted and Constraint Method³⁰⁾は合理的な解を得るという点では優れているが、意志決定者や社会の判定基準を明らかにしておく必要がある。しかも多数の計算回数を要している。また、目的の順序付に従って、選好順に最適化をはかる方法や、一方の目的を制約式のなかに組み込んで、制約を満たす範囲内ではその目的は同じ値とみなす方法もあるが、順序付けの定義や制約条件の構成に一定の基準がなく、現時点での適用は困難である。

本研究では計算の実行を高めることに重点を置き、制御目的を妥当な範囲内で近似化し、各目的を同一基準で判定する、いわゆるスカラー最適化法を用いた。制御目的式(1)、(2)からわかるように、水量と濁質の評価値の変動範囲は、それぞれ $1 \sim \infty$ と $0 \sim 1$ である。いま、判断領域と最適化の方向を同一にするため、濁質の評価として式(2)の逆数

$$D' \equiv \min_{\{m\}} \left\{ \frac{C_{md}}{C_{m \max}} \right\} \rightarrow \max \quad \dots\dots (3)$$

かつ

$$D' \geq 1$$

をとると、両制御目的は、Fig. 2 で示す同一領域での最大化問題となる。結局、全体の評価値 J としては、式(1)、(3)の単純結合による

$$J = \min_{\{m\}} \left\{ \frac{C_{md}}{C_{m \max}}, \frac{Q_{ml}}{Q_{md}} \right\} \rightarrow \max \quad \dots (4) \\ (m=1, 2, \dots, M)$$

かつ

$$J \geq 1$$

を用いることができる。なお、式(3)の近似精度であるが、単位変化当りの評価値の変化は式(2)では一定であるのに対し、式(3)になると $-C_{md}/C_{m \max}^2$ で示されるように $C_{m \max}$ に応じて単調変化する。そのため濁度が C_{md} に近い間は濁質改善の評価は低く、0 に近づくにつれて急激に高くなる傾向にある。ただ、こうした評価はいつも安全側で行われており、濁質制御を若干重視していると考えれば、式(4)による統合評価は十分許容できるであろう。

3. 水量・濁質制御の定式化

濁質を考慮したダム群操作の定式化には、取水口の設計条件に応じて次の3種類の方法が考えられる。すなわち、(i) 放流量は現行の固定的な操作ルールで決定し、放流濁度を低下するように取水口の位置だけを変化させる固定放流—選択取水、(ii) 取水口の位置を変化させ、さらに放流量を調節して制御目的を達成する可変放流—選択取水、(iii) 可変放流で、かつ、複数の取水口を同時に作動させる可変放流—複数取水、の場合である。以下では、それぞれの状態に適した形で定式化をはかる。ただし、貯水池内濁質における入出力間の非線形性、評価関数の非線形性、あるいはダム操作における計算時の有効性を考慮して DP を用いて定式化を行う。

3. 1 貯水池内濁質解析

上記の各操作方法の定式化においては濁質評価が不可欠であるので、まず、貯水池内濁質解析を概述して

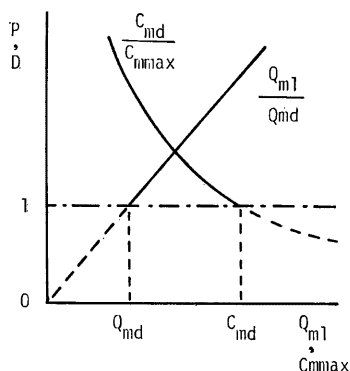


Fig. 2. Conceptual representation for the combined decision region of each control object.

おく。貯水池内の濁質解析には、従来より多数の研究が進められており、代表的なものに完全混合モデル、1次元モデル⁴⁾、2次元モデル⁵⁾がある。完全混合モデルは、貯水池内の水質は常に一様であるとみなし、貯留状態と入出力の間で平均化を行ったものである。成層化が進むという事実からすれば、あまり有効な手法とは言えないが、計算時間は他の方法より極めて少ない。後2者は貯水池を空間的にとらえて幾つかに細分化し、各ボリューム間で水理変動を解析しようとするものである。本質的な考え方は同一であるから、本節では適用時に用いる1次元モデルについて述べる。

本モデルにおいては、異常出水によって貯水池内の濁質、水温は均一化し、洪水後の流入、流出水による清水化過程は水平方向にほぼ一様とみなすのである。具体的にいえば、鉛直一次元モデルに基づく貯水池流動、濁度および熱収支モデルを構成するわけである。ここで、ダムへの入出力がFig. 3のように表わされるとしよう。図中の $S_n(t)$, $\{CS_n(t)\}$, $\{TS_n(t)\}$ は時刻 t におけるダム n ($n=1, 2, \dots, N$; N はダムの総数) の貯留水量、濁度分布、水温分布であり、 $QI_n(t)$, $CI_n(t)$, $TI_n(t)$, $QO_n(t)$, $TO_n(t)$ はそれぞれ流入流量、流入濁度、流入水温、流出流量、流出濁度、流出水温である。また、 $Q_m(t)$, $C_m(t)$ は時刻 t において評価地点 m を流下する流量と濁度、 V_n はダム n の有効利水容量である。したがって、貯水池を厚さ Δy の水平層に分割すると、各層での濁度および熱保存方程式は次のようになる。すなわち、

$$\begin{aligned} \frac{\partial CS_n^y(t)}{\partial t} = & \frac{(\alpha + D)}{A_n^y} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left(A_n^y \frac{\partial CS_n^y(t)}{\partial y} \right) - \frac{1}{A_n^y} \cdot \frac{\partial}{\partial y} (v_n^y(t) A_n^y CS_n^y(t)) \\ & + \frac{1}{A_n^y} (ui_n^y(t) B_n^y uo_n^y(t) - uo_n^y(t) B_n^y CS_n^y(t)) + \frac{1}{A_n^y} \cdot \frac{\partial}{\partial y} (w_0 A_n^y CS_n^y(t)) \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial TS_n^y(t)}{\partial t} = & \frac{(\alpha + D)}{A_n^y} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left(A_n^y \frac{\partial TS_n^y(t)}{\partial y} \right) - \frac{1}{\rho C A_n^y} \frac{\partial}{\partial y} (A_n^y \phi_n^y(t)) \\ & - \frac{1}{A_n^y} \cdot \frac{\partial}{\partial y} (v_n^y(t) A_n^y TS_n^y(t)) + \frac{1}{A_n^y} (ui_n^y(t) B_n^y TI_n^y(t) - uo_n^y(t) A_n^y TS_n^y(t)) \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

である。ただし、 $S_n^y(t)$, $TS_n^y(t)$ はダム n において時刻 t での標高 y の濁度および水温、 $ui_n^y(t)$, $uo_n^y(t)$ は流入水および流出水の水平方向流速、 $v_n^y(t)$ は鉛直方向流速、 w_0 は懸濁粒子の沈降速度、 A_n^y , B_n^y はダム n における標高 y での水平断面積および平均幅、 $CI_n^y(t)$, $TI_n^y(t)$ は連行後流入濁度および流入水温、 $\phi_n^y(t)$, α , D , ρ , C はそれぞれ標高 y に達する輻射熱、分子拡散係数、渦動拡散係数、水の密度および比重である。上2式を差分化し流入および取水条件を与えると、各制御時刻末期の濁度分布が得られるわけである。

3. 2 固定放流—選択取水

放流量は事前の操作基準に固定され、取水口位置の決定を行うだけであるから、取水口の位置が決定変数になる。各時刻での評価も取水口位置の関係となり、しかも、時刻毎の位置の間には何ら関係がないから、取水口の位置がそのまま状態変数となる。いま、各ダムにおける取水口をFig. 4のように仮定しよう。ダム n の取水口の総数は U^n で、 $GO_n^u(t)$ は時刻 t におけ

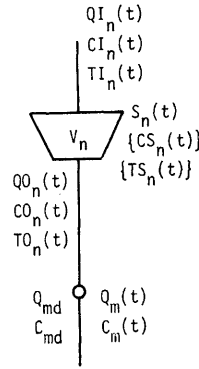


Fig. 3. Relationship between input and output in the dam reservoir.

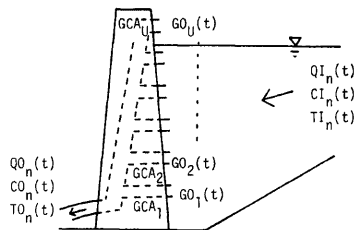


Fig. 4. Schematic representation of the dam reservoir and its intakes.

る取水口 u での取水量, GCA_u^* は取水口 u の最大可能取水量である。ゆえに、濁質だけの評価関数として式(2)を用い、時刻 t , ダム n での取水口の位置を $IP_u^n(t)$ ($u=1, 2, \dots, U^n$) で表わすと、DP による定式化は次のようになる。

$$f_i(IP_u^n(t), \dots, IP_u^N(t)) = \min_{\{IP_u^n(t-1)\} \{m\}} \left[\max_{\{C_{md}^m\}} \left\{ \frac{C_m(t)}{C_{md}^m}, f_{i-1}(IP_u^n(t-1), \dots, IP_u^N(t-1)) \right\} \right] \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$f_i(IP_u^n(1), \dots, IP_u^N(1)) = \max_{\{m\}} \left\{ \frac{C_m(1)}{C_{md}^m} \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

これに加えて、貯留量の連続式として

$$S_n(t) = S_n(t-1) + I_n(t) - O_n(t) \quad \dots\dots\dots (9)$$

があり、制約条件として

$$EL(IP_u^n(t)) \leq EL(S_n(t)) \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$0 \leq S_n(t) \leq V_n$$

が成立する。ここに $EL(\cdot)$ は標高を表わしており、式(10)はある時刻の使用可能取水口の高さは、その時刻末期の貯水池の水位よりも低いことを意味している。式(7), (8)の漸化式に従って、評価値 $f_1, f_2, \dots, f_T$ (T は制御期間の総数) が求まると、最適評価値 f_T^{opt} は次式より決定される。

$$f_T^{opt} = \max_{\{IP_u^n(T)\}} \{f_T(IP_u^n(T), \dots, IP_u^N(T))\} \quad \dots\dots\dots (12)$$

換言すると、 f_T^{opt} を与える $IP_u^n(T)$ が最終時刻の最適取水口位置である。これをもとに $T, T-1, \dots, 2, 1$ の順序で各時刻の取水口位置を拾い出していくと、制御目的に合致した取水口位置系列が得られる。

3. 3 可変放流—選択取水

次に、放流量を調節してより低い濁度にするとともに、同時に流況の平滑化をはかり水利利用率を高める最適放流方式を考えよう。水量と濁質の両者が制御対象であるから、式(4)を統一化された評価関数として用いる。また、水量制御を行うため、取水口の位置だけでなく取水量（あるいは放流量）も決定変数になる。状態変数に関してもダムの貯留量に加わることにより、結局、DP の漸化式は次のようになる。

$$f_i(S_i(t), \dots, S_N(t), IP_u^1(t), \dots, IP_u^N(t)) = \max_{\{O_n(t)\}, \{IP_u^n(t-1)\} \{m\}} \left[\min_{\{C_{md}^m\}} \left\{ \frac{C_m(t)}{C_{md}^m}, f_{i-1}(S_i(t-1), \dots, S_N(t-1), IP_u^1(t-1), \dots, IP_u^N(t-1)) \right\} \right] \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$f_1(S_1(1), \dots, S_N(1), IP_u^1(1), \dots, IP_u^N(1)) = \min_{\{m\}} \left\{ \frac{C_m(1)}{C_{md}^m}, \frac{Q_m(1)}{Q_{md}^m} \right\} \quad \dots\dots\dots (14)$$

制約条件としては、式(10), (11)のほかには取水能力を表わす式

$$0 \leq GO_u^n(t) \leq GCA_u^* \quad \dots\dots\dots (15)$$

が加わる。ここに放流量 $O_n(t)$ には取水量 $GO_u^n(t)$ が相当する。最適放流量系列の決定に際しては、最終時刻における貯水池の必要貯留量 ($S_0^*, S_1^*, \dots, S_N^*$) を与え、3. 2 と同じようにして最終時刻の最適取水位置を決めなければならない。すなわち、

$$f_T^{opt} = \max_{\{IP_u^n(T)\}} \{f_T(S_0^*, \dots, S_N^*, IP_u^1(T), \dots, IP_u^N(T))\} \quad \dots\dots\dots (16)$$

より最適関数値が与えられる。式(16)の最終貯留量を変化させることによって、濁質を考慮した適切な貯留量の決定、貯留量変動による感度分析も行うことができる。また、式(13), (14)からもわかるように、多次元であり、計算時には記憶容量や計算時間の点で新たな問題が生ずることが予想される。濁質解析法が1次元から2次元へ進むとその傾向は一層強くなるであろう。

こうした問題に対する一つの解決策として、DDDP による状態量の減少が掲げられる¹⁾。取水口の間には相関性はないが、ダム貯留量の変動巾を制御すると取水口位置の上限もおのずと制限され、かなりの状態量

を減少することができる。ほかに分解原理によるダム群の分割⁶⁾もあるが、貯水池内の濁質解析が非線形であることを考えると、ダムの配置によってはLPでダム操作を決定する分解原理はあまり有効な手段とはいえない。ただ、河道の自浄作用により、ダム操作を通じての濁質制御可能範囲もある程度限定されるはずであり、必ずしも全てのダムを統合管理することはないであろう。ダム操作の時間的分割とも合わせて、現在検討中である。

3. 4 可変放流—複数取水

取水口がFig. 3のように独立して存在する場合には、同時に多数の取水口を開閉することによって、貯水池内の濁度をより低くして被害の発生を防ぐことが可能であろう。この方法では、各取水口の取水量によって濁度の評価値が異なり、前述のように取水口の位置だけを状態変数、決定変数とすることができない。ある濁質水を与える全ての可能性、つまり、貯留量と取水口の組み合わせが状態変数、放流量と取水口の組み合わせが決定変数となる。ところが、各時刻の貯留量は初期値と当該時刻の放流量より算定できるので、各ダムの取水口の位置とその取水量が状態変数であり、同時に決定変数となる。たとえば、単ダムの場合、取水口が5個、各取水規模が5, 6, 7, 8, 9とすると $5 \times 6 \times 7 \times 8 \times 9 = 15,120$ 個の状態変数となる。もちろん、放流量は各取水口での取水量の和で算定される。ゆえに、ダム n における状態変数を $IG_n^g(t)$ ($g=1, 2, \dots, G$; G は取水口とその取水量から得られる組み合わせの総数) で表わせば、DPの漸化式は次のようになる。

$$f_i(IG_n^g(t), \dots, IG_n^G(t)) = \max_{\{IG_n^g(t-1)\}} \left[\min_{\{m\}} \left\{ \frac{C_{md}}{C_m(t)}, \frac{Q_m(t)}{Q_{md}} \right\} \right] \dots \dots \dots (17)$$

$$f_1(IG_n^g(1), \dots, IG_n^G(1)) = \min_{\{m\}} \left\{ \frac{C_{md}}{C_m(1)}, \frac{Q_m(1)}{Q_{md}} \right\} \dots \dots \dots (18)$$

ここに、最適系列の決定に際しては、前出の2方法と同様に、

$$f_n^{opt} = \max_{\{IG_n^g(T)\}} \{f_T(IG_n^g(T), \dots, IG_n^G(T))\} \dots \dots \dots (19)$$

より、最終時刻の最適評価値を求め、最適組み合わせ系列を逆算しなければならない。放流量は各組み合わせ番号における各取水口の取水量を $GO_n^g(IG_n^g(t))$ とすれば、

$$O_n(t) = GO_n^1(IG_n^1(t)) + GO_n^2(IG_n^2(t)) + \dots + GO_n^G(IG_n^G(t)) \dots \dots \dots (20)$$

となる。式(17), (18)は貯留量よりも放流量を重視して定式化されているので、当初より目標としていた最終貯留量に到達できるとは限らない。そのような時には式(19)より最適関数値を決定せず、全ての $IG_n^g(T)$ の組み合わせに対して、目標貯留量に最も近い解を近似系列とすればよいであろう。

4. 適用と考察

本理論の適用例として、四国吉野川水系の早明浦ダムを取り上げよう。同地方は地形が急峻で、しかも地層が深部まで破砕され崩壊や地すべり発生の素因をもっている。そのため洪水時には高濃度の濁質水が流出し、ダム貯水池による濁質長期化現象が社会問題になっている。本章では、3章での理論を適用し、出水後の放流方式と制御可能濁度を明らかにして実操作でのダム管理基準を得ようとするものである。

4. 1 適用時の仮定

計算の実行にあたっては大型電子計算機を利用するが、記憶容量と計算時間の制約より、適用時の濁質解析には3.1で述べた安芸らによる1次元モデルを用いた。なお、濁質解析とDPの結合に際してはいくつかの特徴があり、次にそれらを挙げて適用方法を述べる。

(1) 評価する濁度分布とその解析時刻

ダム制御と濁質解析の時間単位が異なると、各制御時刻の初期濁度分布をもとに評価を与えても、その期

間に濁質が変化し、実評価はもっと悪くなる場合が想定される。一般には、前期末の濁度分布を初期値として、濁質解析を行いながら同時に評価を加えていくのが妥当であろう。しかし、この方法では前期までの評価が当該時刻の評価値に入れられ、制御期間の独立性が失われる。具体的には、式(7)は

$$f_i(IP_u^a(t), \dots, IP_u^N(t)) = \min_{\{IP_u^a(t-1)\}} \left[\max_{\{m\}} \left\{ \frac{C_m(IP_u^a(t-1), \dots, IP_u^N(t-1); t)}{C_{md}} \right\} \right] \dots\dots\dots (21)$$

となる。上式は現在の関数値が過去の履歴の関数であることを示しており、DP の“最適性の原理”は成立しない。したがって、計算時の評価は前期末の濁度分布より行い、当該期間内の濁質変動からは何ら影響を受けないとすべきである。もし、制御と解析の時間単位が一致するときには、当該期間中に濁度分布は変化せず、期末になって瞬間的に変動すると解釈できる。

(2) 可能取水口の位置と量

(1)と同様に当該期間中の取水量は一定とする。一方、貯水池には流入・流出があり、初期貯水位によって取水口の位置を決めると、期間内に貯水位が取水口位置より低くなる可能性がある。その対策として、各制御期間内の水位は初期のまま変わらないとし、可能取水口は流入・流出の完了後の水位（制御と解析の時間単位が異なる場合には期間内の最低水位）以下を対象とすべきであろう。

(3) Travel Time の同一化

たとえ同一期間でも、取水量が変化すると密度分布も変わり、貯水池流入時刻と濁質混合完了の推定時刻に差（Travel Time）が生じる。DP では各制御期間の長さを変えることは可能であるが、同一時刻における取水規模に応じて当該期間長を変えることはできない。期間長も従属変数となり、最適性の原理が成立しないからである。そこで取水量によって Travel Time が変化しないとして同一化するか、同一期間内のあらゆる取水量に対応する Travel Time のうちで、最も長いものを代表値として制御期間長の安定をはからねばならない。

(4) 河道流下および合流

河道内の貯留効果は無視し、時間遅れだけを考える。もちろん、貯留関数法と(1)、(2)、(3)の条件を入れた解析モデルの導入によって、下流地点の水量、水質評価を与えることはできるが、制御の本質は変わらない

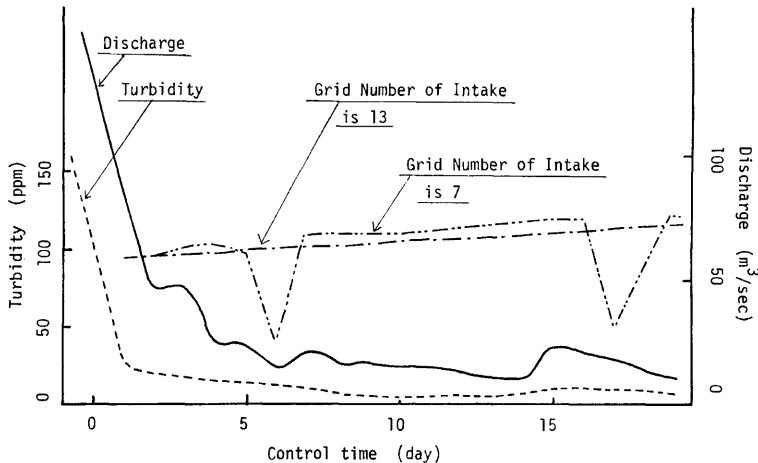


Fig. 5. Comparison between the natural input data and the controlled turbidity by the fixed operation.

のでここでは省略する。また、濁質の流入や流出時の支川合流現象は、完全混合モデルとして簡便に取り扱う。

4. 2 適用と考察

計算条件として、濁質解析と制御単位はいずれも1日、総制御期間数は20、貯水池の格子間隔は4m、対象取水口は9個（格子番号3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19）、許容流量は5 t/sec、許容濁度は100 ppmである。評価地点は Fig. 3 のようにダム直下流とし、支川流入は含まれない。また、貯水池内解析に際しては水温分布も同時に計算されるが、制御対象ではないので結果は表示しない。制御の初期値は濁度、水温とも一様でそれぞれ 95 ppm, 22℃とする。流入流量、流入濁度の時間分布は Fig. 5 に示すとおりである。同図の取水口位置（格子番号）7と13の分布は、各々の位置に1個だけ取水口が存在し、事前の操作基準に基づく固定放流が行われたときの評価地点濁度分布である。制御開始後15日をすぎても濁度があまり減少する気配がなく、長期化傾向になるのがうかがえる。取水口位置7の分布がなめらかでないのは、貯水池低部での濁質解析の粗さが原因であろう。しかし、上部取水口より低部取水口の方が次第に高くなる濁度分布をとっており、取水口切り換えの必要性は理解できよう。

Table 1 は式 (7), (8) による固定放流—選択取水の制御結果であり、Fig. 6 の実線は制御開始後1, 5, 10, 15, 20日末期の濁度分布である。図中の点線は前出の取水口位置7のときの濁度分布で、時間的な変化を比較したものである (Fig. 8, 9 の点線も同じ値を示している)。各制御日の分布は1取水口での固定操作の場合より高濃度分布が広く、貯水池内部の性状

Table 1. Computed solution by the fixed outflow discharge and selected intake method.

Control Time (day)	Grid Number of Water Intake	Water Intake Discharge
t	17	260.7 m ³ /sec
1	7	113.3
2	15	67.2
3	19	58.0
4	19	55.5
5	19	55.0
6	19	50.6
7	19	50.6
8	19	50.6
9	19	50.6
10	19	51.2
11	19	51.2
12	19	5.12
13	19	51.0
14	19	40.0
15	19	35.0
16	19	35.0
17	19	35.0
18	19	30.0
19	19	30.0
20	19	30.0

Estimated Value=1.022

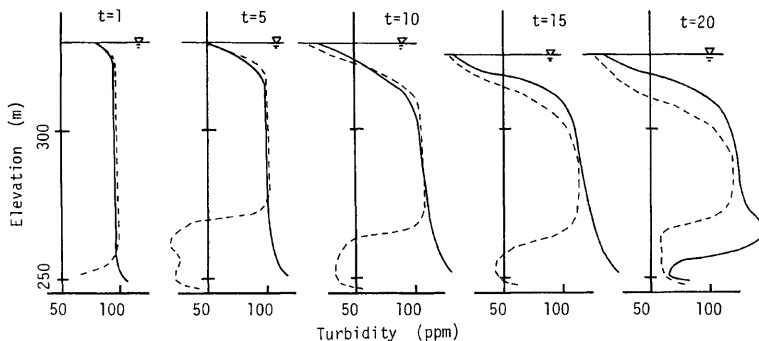


Fig. 6. Distributions of the controlled turbidity by the fixed outflow discharge and selected intake method.

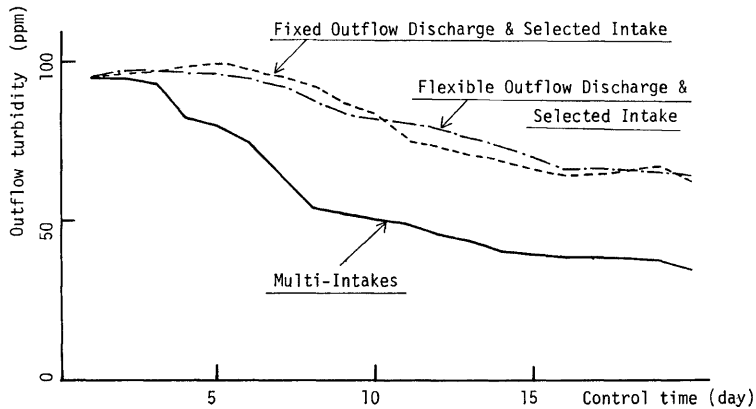


Fig. 7. Comparison between the controlled turbidity sequences by three methods.

からみればあまりよい結果とはいえない。ところが、取水口を適当に上下することによって、取水濁度の時間分布はほぼ2週間で顕著なてい減をみせている (Fig. 7 参照)。多くの例でも同様の結果がみられることより、中間取水あるいは低層取水から表層取水への変換の有効性が衰付けられよう。また、最終評価値が1.022となっているのは、他の方法での制御結果に合わせるために、 $C_{md}/C_{m\ max}$ で表わしたものであり、式(2)による濁質評価の真値は0.978である。

Table 2, Fig. 8 は式(3), (4)による可変放流一選択取水の結果である。計算時には記憶容量の減少のため、放流量を試系列とする DDDP を採用した。Corridor の巾は5単位である。収束回数が2で終わっているが、これは収束判定条件を最終評価値の変化量で0.01とゆるくしたからであろう。その最終評価値は水量が7.2、濁度が1.023であり、濁度に比べ水量の満足度はかなり高い。また、Fig. 7 の一点鎖線を見てもわかるようにあまり制御効果が出ていないのは、最高濃度が3日目に表われており、3日程度の制御では取水量の調節よりも初期分布の影響の方が大きいからであろう。なお、Fig. 8 において10日目以降の貯水位が、点線で示した取水口位置・量を固定した放流放式の場合より低くなっているのは、なるべく早い時期に高濃度の濁質水を多量に放出

Table 2. Computed solution by the flexible outflow discharge and selected intake method.

Control Time (day)	Grid Number of Water Intake	Water Intake Discharge
1	14	259.2 m ³ /sec
2	5	119.3
3	13	73.2
4	19	64.0
5	19	61.5
6	19	61.0
7	19	56.6
8	19	56.6
9	19	56.6
10	19	56.6
11	19	57.1
12	19	57.1
13	19	57.1
14	19	57.0
15	19	46.0
16	19	41.0
17	19	41.0
18	19	36.0
19	19	36.0
20	19	36.0

Estimated Value=1.023

し、貯水池内の濁質総量を減らしておくことの重要性を表わしている。さらに、Corridor における放流量変化単位を 5 t/sec から 2 t/sec に減少しても、流量てい減時の濁度分布が若干変化するものの、系全体として

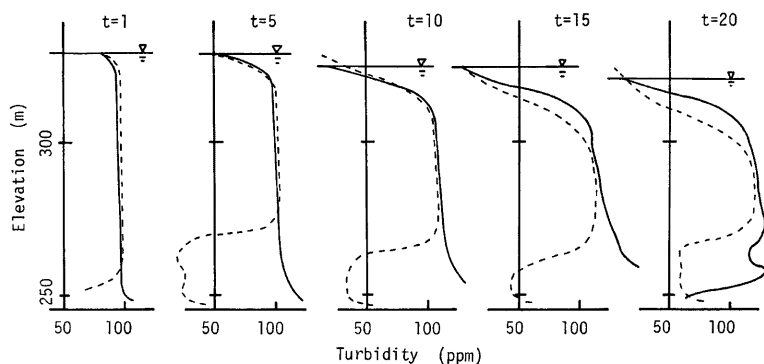


Fig. 8. Distributions of the controlled turbidity by the flexible outflow discharge and selected intake method.

Table 3. Computed solution by the flexible outflow discharge and multi-intakes method.

Control Time (day)	Water Intake Discharge (m ³ /sec)			
	Grid Number of Water Intake			
	3	7	15	19
1	1.0	2.0	2.0	260.7
2	1.0	115.3	2.0	2.0
3	2.0	2.0	67.2	2.0
4	2.0	2.0	2.0	60.0
5	2.0	2.0	2.0	57.5
6	2.0	2.0	2.0	57.0
7	2.0	2.0	2.0	52.6
8	2.0	2.0	2.0	52.6
9	2.0	2.0	2.0	52.6
10	2.0	2.0	2.0	52.6
11	2.0	2.0	2.0	53.2
12	2.0	2.0	2.0	53.2
13	2.0	2.0	2.0	53.2
14	2.0	2.0	2.0	53.0
15	2.0	2.0	2.0	42.0
16	2.0	2.0	2.0	37.0
17	2.0	2.0	2.0	37.0
18	2.0	2.0	2.0	32.0
19	2.0	2.0	2.0	32.0
20	2.0	2.0	2.0	32.0

Estimated Value=1.041

の評価値は変わらない。この点からも、水量・水質操作における DDDP の適用効果が理解できよう。

Table 3 Fig. 9 は式 (17), (18) による可変放流—複数取水の結果であり、計算実行時にはやはり DDDP を

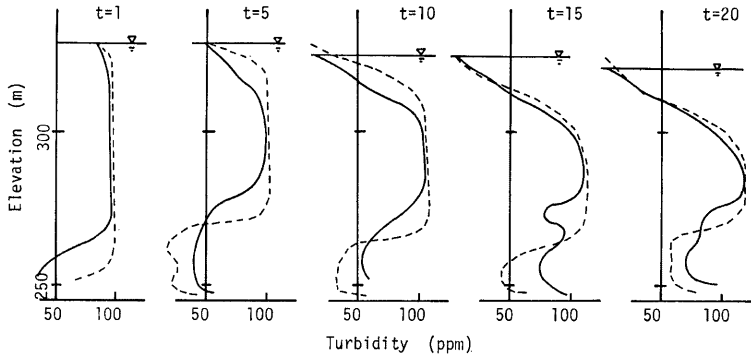


Fig. 9. Distributions of the turbidity controlled by the flexible outflow discharge and multi-intakes method.

用いている。取水口は4個、各取水口の取水変化は3単位、すなわち、 $3 \times 3 \times 3 \times 3 = 81$ の組み合わせからなる状態変数である。最高濃度が2日目に表われており、前2方法より大巾な改良は行えなかった。水量に関しても、最終評価値は7.2と高くて放流量系列はほとんど変わっていない。一方、取水量は各取水口になるべく開けておく傾向にある。したがって、取水口の数が少ないにもかかわらず濁度のてい減は著しく、15日以降には制御開始時の半分以下の濃度になっている。貯水池内の濁質分布に関しても、固定操作と比較してかなり改善されており、環境面からも望ましい結果といえよう。

以上のような計算結果から明らかなように、濁質制御においては取水口の位置はもちろんのこと、互いに関連し合った取水量の取り方も大きな制御能力があることがわかる。ただ、いずれの制御においても初期濃度が高く濁質の方が危険側になる結果に終わったが、許容流量、許容濁度の与え方を変えたり、あるいは、濁度の低下が進んでからの新たな制御では、式(14)の2目的操作の特徴が表われたであろう。なお、他の制御結果と比べて Fig. 9 の $t=15, 20$ の分布に凹凸ができてるのは、低層、中層の取水口も同時に開いているために、濁質水が局所的に大きく減少したからであろう。今後、計算例をふやしてこうした制御特性の把握に努めたい。

5. 結 語

本研究は河川表流水の利用効率を高めるため、水量、濁質を対象としたダム群最適操作ルールの確立をはかったものである。ダム操作としては、従来より明らかにされてきた水量制御での有効性と貯水池内の濁質変動の非線形性より、DP によって定式化を行った。また、水量、濁質という2目的の評価方法や取水口の位置および取水量の決め方を検討し、より社会的要求に対処できる方法を考察した。ここで、得られた成果ならびに今後の課題を要約すると以下ようになる。

まず、ダム操作の定式化と計算手順に関しては次の点が指摘できる。

i) 互いに独立で排他性を有する2目的を、一方を近似関数で表現することによって目的の統合化をはかった。その結果、計算量は単一目的の場合よりあまり増加せず、多ダム・多評価地点系への適用可能性を高めた。

ii) 取水口と取水規模の可変性を取り入れることにより3種類の制御方式に分類でき、ダムの機能特性に応じた操作を提案した。

iii) 適用例では制御期間と貯水池内変動解析の単位が同一であるが、利水時には制御期間を半旬単位とし

た数ヶ月に及ぶ長期操作も多く、計算単位の柔軟性も必要であろう。

iv) 評価の正確さからすると濁質解析に2次元モデルを用いるべきであろうが、評価時には少なくとも取水口付近の濁質を把握できればよく、簡便かつ必要精度を満足しうる解析法の開発が望まれる。

v) 多ダム・多評価地点系の場合には、河道の流下・合流機構を含んだ形で定式化をはからねばならず、次の増加による計算実行性の減少が予想される。しかし、ダムによる制御効果も、支川流入、河道貯留によっておのずと限られているはずであり、地形や制御特性をもとにしたダム群の分割操作も可能であろう。つぎに、取水基準に関しては以下の点が指摘できる。

vi) 制御初期には中間取水ないしは低層取水とし、7日を1つの目安として表層取水へ転換すべきであろう。これは入力分布や初期条件、取水方法でも異なっており、今後多くのシミュレーションを通じてその基準を確立していきたい。

vii) 取水量としては、初期に高濃度の流量を可能な限り放出すべきである。評価地点までに多数の支川流入があり、各流量、濁度分布が大きく異なる場合には、合流による希釈、濃縮作用を考慮したきめ細かい操作をしなければならない。

viii) 長期間の制御を対象にすると、初期での高濃度が制御最終評価値となり、流量でい減時の制御効果は少ない。そうした時間的不合理性を解消するため、高濃度時と低濃度時を別々に制御し、しかも全体としての制御目的を達成できる時間的分割操作法が要求される。

さらに、実時間操作問題に関しては次のように考えている。

ix) 入力の時間的分布の推定が不可欠で、降雨あるいは流量の長期予測が必要である。この点に関しては、現在のところかなり困難といわざるを得ない。本研究で行った入力既知の状態から、将来、より精度が高くなるであろう長期予測の状態までの橋渡しとして、過去のデータ解析を通じて降雨や流量の確率構造を分析・総合するとともに、統計的予測手法の導入をはかっていきたい。

x) 濁質分布の推定にあたっては、降雨一流出にともなう濁質水の発生・流下過程を解明しなければならない。土砂生産・流送過程の分野で鋭意とり組まれている研究成果を大いに取り入れ、入力推定のトータルシステムを構成すべきであろう。

xi) 推定入力に対する最適制御をもとに、予測精度を考慮した取水量の決定基準を確立しなければならない。この問題については、情報・確率制御理論の導入をはかり、不確実性のもとでの意志決定機構を確立したい。

以上のように、まだ多くの問題点が存在するが、今後、ダム貯水池群の水量・濁質制御に関して改良を加え、計画操作から実時間操作へと進めていきたい。

最後に、本研究を行うにあたって、方法論の展開や図表の作成で協力していただいた京都大学大学院生の阿佐美一郎君に謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 高樺琢馬・池淵周一・小尻利治：水量制御からみたダム群のシステム設計に関する DP 論的研究，土木学会論文報告集，第241号，1975，pp. 39～50.
- 2) Haimes Y.Y.・Hall W.A.・Freedman H.T.: Multiojective Optimization Water Resources Systems, Elsevier Scientific Publishing Company, 1975, pp 127-154.
- 3) Cohon L.L.・Marks D.H.: Multiobjective Screening Models and Water Resource Investment, Water Resources Research, Vol. 9, No. 4, 1973, pp. 826-836.
- 4) 安芸周一・白砂孝夫：貯水池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.
- 5) 綾 史郎・岩佐義朗・松尾直規：濁質の流送過程について，第22回水理講演会論文集，1978，pp. 131～138.
- 6) 高樺琢馬・池淵周一・小尻利治：多ダム・多評価地点系の最適操作に関する研究，京都大学防災研究所年報，第21号 B-2, 1978, pp. 193～206.