

治水・利水を包含した貯水池操作に関する一考察

高棹 琢馬・池淵 周一・小尻 利治

A STUDY FOR OPTIMAL RESERVOIR OPERATION INCLUDING FLOOD, LOW FLOW AND TURBIDITY CONTROLS

By Takuma TAKASAO, Shuichi IKEBUCHI and Toshiharu KOJIRI

Synopsis

Dam reservoirs must be operated for not only water quantity but also water quality. So, the aim of this study is to establish the optimal operation rule including flood, low flow and turbidity controls.

At first, we propose the long term control policy synthesizing each objective by scalar optimization theory. Secondly, to deal with the increment of computer memory, total control periods are divided into several sub-control periods. Then whole system is controlled through the proposed connection methods such as 2-Step-DP, Iterated Method of DP and non-linear optimization methods among the optimal solutions of sub-control systems. Lastly, we compare above connection methods in point of computer memory, computation time and the characteristics of controlled sequences.

1. 序 論

近年の人口増加や流域の乱開発とともに、上・工水量の不足、河川水質の悪化が恒常的に発生し、水資源計画の再検討が呼ばれている。利用水量の増加には、地下ダムによる地下水貯留あるいは海水の淡水化などいくつかの方法が研究されているが、(i) 施設の建設ならびに管理費用、(ii) 自然や社会へ及ぼす環境評価の面で上記の方法は、まだ、実用化の域に達していない。現在のところ、ダム貯水池による水補給が主要な手段であり、専ら利水容量がその供給源となる。ところが、治水容量は単に下流防災地区の安全のために利用されるだけであって、全貯水量が水資源として活用されているとはいえない。すなわち、目的に応じて貯水容量を画一的に区分しているために、容量の非効率性と水資源の非活用性が問題になる。以上の点より、本研究では治水、利水を連続的にとらえ、貯水容量を最大限に利用したダム操作ルールの確立をはかるものである。また、以下の理論は人力を既知としているが、降雨シミュレーションさらには予測技術との結合によって予備放流の基本方針が明らかになり、実時間操作への応用も可能である。なお、長期間操作である以上、制御は必然的に、(i) 洪水防御、(ii) 低水管理、(iii) 水質向上の3目的をもつ多目的ダム操作となる。

2. 制御目的の統合化

2.1 制 御 目 的

ダム群最適操作の定式化においては、まず、対象とする制御目的を数式化しなければならない。治水、利水時の水量、水質目的は、既に著者らによって定義されているので^{1),2)}、ここで簡単に記述すると以下のようになる。

洪水防御； $K \equiv \max \left\{ \frac{Q_{mp}}{Q_{md}} \right\} \quad (m=1, 2, \dots, M) \longrightarrow \min \dots\dots\dots (1)$

かつ

$$K \leq 1$$

$$\text{低水管理 ; } P \equiv \min \left\{ \frac{Q_{ml}}{\bar{Q}_{md}} \right\} \quad (m=1, 2, \dots, M) \longrightarrow \max \dots\dots\dots (2)$$

かつ

$$P \geq 1$$

$$\text{濁質向上 ; } D \equiv \max \left\{ \frac{C_{max}}{C_{md}} \right\} \quad (m=1, 2, \dots, M) \longrightarrow \min \dots\dots\dots (3)$$

かつ

$$D \leq 1$$

ただし、 Q_{mp} , Q_{ml} , C_{max} はそれぞれ評価地点 m でのピーク流量、最低流量、最高濁度であり、 Q_{md} , $\bar{Q}_{md}$, C_{md} はそれぞれ、高水、低水、濁度の許容値である。上記 3 式の評価は共通の評価地点系として表現しているが、現実には、各目的によって評価地点も異なってくる。しかし、全基準地点の合計を M とおき、不必要な地点の許容量を 0 あるいは ∞ にとればその地点の評価は行われないうことになり、結局、重要地点を対象にした制御解が得られる。

2.2 制御目的の統合化

多目的最適化問題の解法には、ベクトル最適化手法とスカラー最適化手法がある³⁾。前者は、目的間の制御特性を数値で示したり、意志決定者の価値判断を取り入れることができ、極めて合理的な方法といえる。一方、後者は目的の近似化や変換を通じて全目的を同一の基準で表わし、単一目的と同じ扱いをする。変換の方法によっては、もとの目的の一部が重要視され全目的の達成バランスが大きく異なる場合があるが、1 回の計算で最適解が得られる利点がある。

本研究では、ベクトル最適化の重要性は認めた上で、計算上の便宜さを考慮してスカラー最適化法を用いることにする。変換方法としては、濁質制御において著者らが提案した方法²⁾を利用し、相対評価を 1 と定義して全目的を最大化方向で統合する。すなわち、全体目的 J を次式のようにする。

$$J \equiv \min \left\{ \frac{Q_{ml}}{\bar{Q}_{md}}, \frac{Q_{md}}{Q_{mp}}, \frac{C_{md}}{C_{max}} \right\} \quad (m=1, 2, \dots, M) \longrightarrow \max \dots\dots\dots (4)$$

このほか、低水の目的だけ逆数をとる変換方法も考えられるが、上式が高水、濁度を危険側に変換しているのに対して、低水が安全側で評価されることになる。したがって、2 目的を変換するという不都合は残っても、制御の安全性を考慮して、以下では式 (4) を制御目的とする。

2.3 長期間操作の定式化

治水・利水を包含する長期間操作においては、全貯水池容量を用いて最適操作が実施されるべきであろう。だが、貯水池が長時間にわたって空や満杯の状態を継続するのは、ダム本体の安全性や野性生物、リクレーションなどの環境面からも望ましくない。ゆえに、各制御時点でも適当な貯水量範囲の制約を加えるのは妥当であり、次のように表現できる。

$$S_{n, \min}(t) \leq S_n(t) \leq S_{n, \max}(t) \quad (n=1, 2, \dots, N) \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $S_{n, \min}(t)$, $S_{n, \max}(t)$ はダム n (総数 N 個) において時刻 t での許容最小貯水量と許容最大貯水量である。また、評価関数として近似化された目的関数¹⁾を用いると DP による関数漸化式は次のようになる。すなわち、

$$f_i(S_1(t), S_2(t), \dots, S_N(t)) = \max_{\{O_n(t)\}} \left[\min \left\{ \frac{Q_m(t)}{\bar{Q}_{md}}, \frac{Q_{md}}{Q_{mp}(t)}, \frac{C_{md}}{C_m(t)} \right\}, \right. \\ \left. f_{i-1}(S_1(t-1), S_2(t-1), \dots, S_N(t-1)) \right] \dots\dots\dots (6)$$

$$f_1(S_1(1), S_2(1), \dots, S_N(1)) = \min_{\{m\}} \left\{ \frac{Q_m(1)}{\bar{Q}_{md}}, \frac{Q_{md}}{Q_{mp}(1)}, \frac{C_{md}}{C_m(1)} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

3. ダム群の長期間操作手順

3.1 計算単位の整合性

治水、利水時におけるダム貯水池への入力は一時的、量的に相違が大きく、両者を同一の単位で制御できない。時間単位に関しては、通常、治水時が時間、利水時が日あるいは半旬であるから、貯水量の連続式も単位の変化を考慮して

$$S_n(t) - S_n(t-1) = \Delta t (I_n(t) - O_n(t)) \quad (n=1, 2, \dots, N) \quad (8)$$

と表現しなければならない。あるいは、貯水量、貯水容量を制御時点の時間単位 Δt で除して、入出力と同一の単位系としなければならない。ただし、 $I_n(t), O_n(t)$ は時刻 t におけるダム n の平均流入、流出量である。

次に流量単位の取り方であるが、治水時には多量の流量を、利水時には些少の流量を制御対象にしている。DP における決定変数は放流量であり、全期間にわたって同じ流量単位で最適化を行うことは、計算上の問題だけでなく、実際のダム管理の上からも非効率である。そこで、入力状態に応じて高水、低水を指定し、それと同時に放流量単位および時間単位を変えることが必要になる。こうして、計算単位の不整合性をなくした合理的なダム操作解が得られる。

3.2 長期間操作手順

長期間の流況には、Fig. 1 にみられるごとく、いくつもの出水を含んでいる。けれども、すべての出水において治水制御を目的としたダム操作を行う必要はなく、比較的小規模な出水はより粗い時間単位の制御でも、その治水効果は変わらないと考えられる。たとえば、ある出水を日平均流量に押しなべた利水制御と、時間平均流量による治水制御を含めた長期間操作とを比較して、システム全体としての目的関数値が変化しないことである。いいかえると、治水時にもダムの空容量に余裕があり、全出水量を貯留することができたのである。このような小出水を取り除き、真の大出水だけを対象にすることによって、必要かつ効率的な長期間操作の入力分布ができる。ここに、除外すべき出水を、解に影響を及ぼさないものとして無影響出水と名付けるが、その分離手順には次のような方法がある。

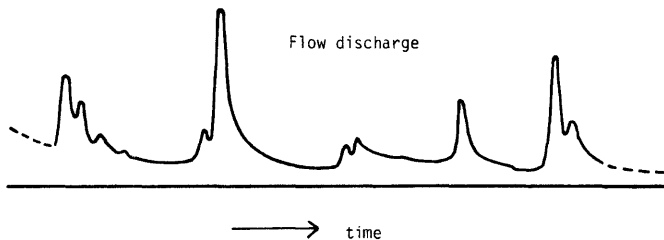


Fig. 1. Hydrograph in the long term control.

(i) まず、全期間を通じて利水問題とし、1日あるいは半旬単位で最適系列を求める。年間計算を行うとしても、半旬単位なら73期間ですみ、通常の DP による最適化が可能である。得られた目的関数値を J^{all} としよう。

(ii) 出水と思われる期間を取り出し、治水制御を行う。その際、仮の治水期間の初期および最終貯水量は、(i) の利水制御での相当する時点の貯水量を用いるか、さもなければ、その時点前後の貯水量より内そうしなければならない。ここで、得られた目的関数値を J^{high} で表わそう。

(iii) もし、 $J^{all} \leq J^{high}$ であれば、その出水は無影響出水として、次の出水を対象に (ii) へもどる。

(iv) $J^{all} > J^{high}$ であれば、その出水に対する制御効果は低く、全放流量系列の変化による目的関数

の改善を要求する。すなわち、治水・利水を包含した長期間操作の対象出水となる。

(v) 全出水に対して (ii)~(iv) を行い、影響度からみた出水の分類を行う。

(vi) 影響出水がなければ、利水制御より全体の制御値が得られたことになる。

(vii) 影響出水がある時は治水制御を含む長期間操作によって全システムの制御解を求め、再び J^{all} とする。

(viii) 放流量系列が変化したのであるから (ii) へもどり、新たな影響出水が発生すれば (v)~(vii) を

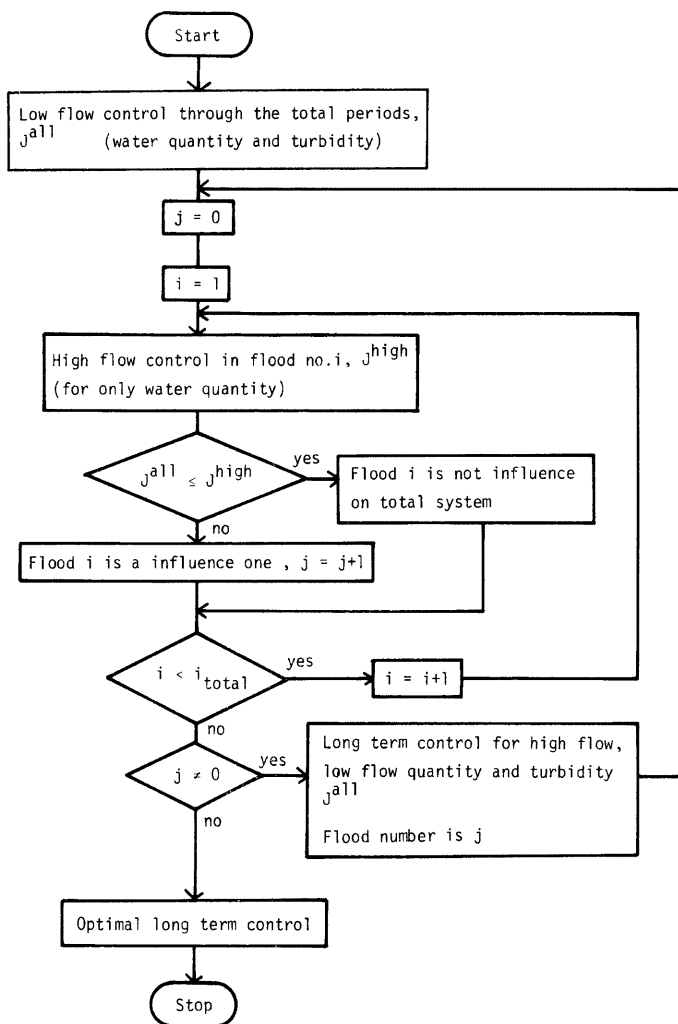


Fig. 2. Flowchart on the long term reservoir operation including flood, low flow and turbidity control.

繰り返す。発生しなければ、最適解に到達したとして計算を終了する。

以上の手順をまとめると、Fig. 2 のようなフローチャートが構成される。さらに、ある治水制御の制御期間長を変えることによって、予備放流や洪水終了後の放流方式が明らかになり、実時間操作へ活用できる。

4. 制御期間の分割と結合手法

DP の定式化を解くことによりダム群の最適放流量系列は求まるわけであるが、制御期間が長くなるにつれて計算機上の諸問題が発生する。ダム群を空間的に分割して計算能力を高める方法は、すでに種々のアプローチを示してきたので、ここでは制御期間を適当に分割し、各期間内で最適操作を行う時間的分割手法について考えよう。ただし、計算方法の概説には、空間的要素の少ない単ダム単評価地点系を取り上げ、Fig. 3 に示すような入力分布と期間分割が与えられているとしよう。図中の第 I および第 III 期間では利水制御、第 II 期間では治水制御が行われる。

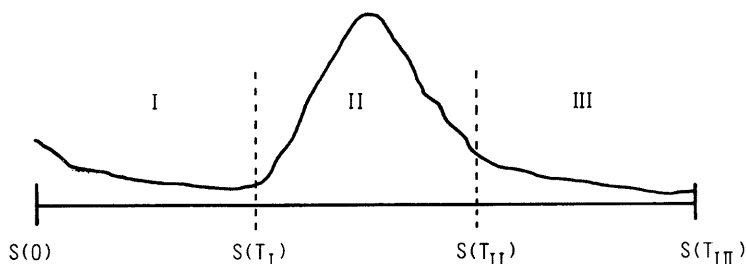


Fig. 3. Representation of inflow hydrograph and division of the control periods.

4.1 2ステップ DP 法 (2SDP)

DP 計算においては、各時刻の貯水量 (状態量) を格子点にとり、格子から格子への最適経路を求めてその経路を記憶している。したがって、格子点数と期間数の増加とともに、記憶容量の問題につながるのである。そこで、本方法は全期間にわたる経路の記憶は行わず、必要時刻だけの格子点を記憶することによって、最適解を得ようとするものである。すなわち、まず、第 I 分割期間の最終時刻における全可能状態量 $S(T_I)$ に対して DP 計算を行い、目的関数の各値 $f'(S(T_I)|S(0))$ を評価値とする。その間の最適系列は記憶しない。つづいて、各状態 $S(T_I)$ を初期値とし、第 II 期間で DP 計算を行い、目的関数値を $f''(S(T_{II})|S(T_I))$ で表わす。ただし、 $f(\cdot|X)$ は X を初期値とする関数値を示している。ここで、ある $S(T_{II})$ に到達する $S(T_I)$ の組み合わせより、最適関数値および前の期間の状態量 $S(T_I)$ を決める。第 II 期間での最適経路は、やはり記憶されない。第 III 期間でも同様にして関数値が与えられ、全制御の最終貯水量が指定されると、各分割期間末期の貯水量が得られることになる (Fig. 4 参照)。最後に、各期間の初期、最終貯水量をもとに DP 計算を行って、最適放流量系列を求めるわけである。以上の手順は Fig. 5 のようなフローチャートで示されるが、DP を 2 段階に分けて用いており、“2 ステップ DP 法”と名付ける。本方法は、全制御期間を通じて DP を行っていることに等しく、計算時間は通常の 2 倍を要する。しかし、記憶容量の減少が著し

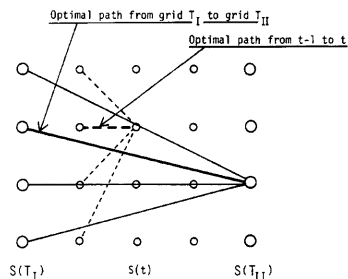


Fig. 4. Schematic representation of optimal path in 2-Step-DP (2SDP) method.

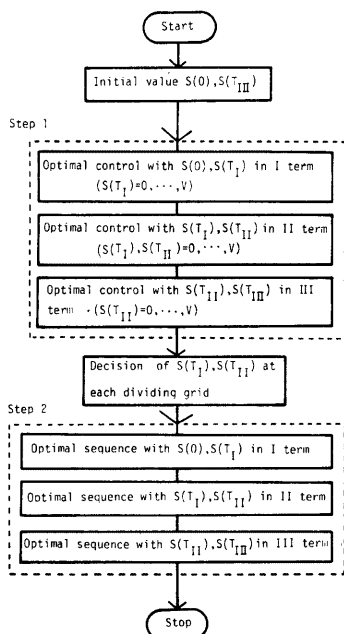


Fig. 5. Flowchart of 2-Step-DP method.

のが最適解となることを意味している。いいかえると、 $S(T_I)$ と $S(T_{II})$ を変数とした場合の解が最適値 $f(S(T_I), S(T_{II}))$ である。もちろん、貯水池内の濁質解析や評価関数の点より、上記の解法は非線形最適化問題となる。こうした解法には、パターン探索法、最急降下法、ニュートン法および共役方向法など多数の反復解法が存在する。本研究ではその適用例として、(i) 局所的に最も急な目的関数の方向（降下方向）に沿って解の改善をはかっていく最急降下法 (SADP) と、(ii) 最適解の近くでは目的関数が 2 次関数で近似できると仮定する共役方向法 (CADP) を用いて、最適解への達成度を検討してみたい。各方法の詳しい理論展開は参考文献⁴⁾に譲るが、後者は関数の微係数が不要であること、また、変数の個数に対応した計算回数で収束することが保証されており、極めて応用範囲の広い方法といえる。ただ、非線形最適化手法は解の単峰性を前提にしているが、利水、治水の多目的性や濁質解析などから多峰性になる可能性があり、局所解をとることが考えられる。そのため、最適化を始める初期値をランダムに数個与えて、真の最適解への到達状況を把握すべきであろう。

4.3 近似反復解法 (IMDP)

4.2 で用いた数値計画法による最適化ではなく、Fig. 6 に示すように部分的な解を繰り返し求めることにより、全体的な最適解に接近させていく反復解法である。すなわち、制御期間を 3 分割する場合には、初期貯水量と第 II 期の最終貯水量 $S(T_{II})$ を固定し、期間 I, II を通じた DP 計算を行って、第 1 次近似系列および時刻 T_I での第 1 次貯水量 $S^1(T_I)$ を求める。つぎに、この値を第 II 期間の初期値として第 II, 第 III 期間を通しての DP 計算を行い、時刻 T_{II} での第 1 次貯水量 $S^1(T_{II})$ を求める。再び、 $S^1(T_{II})$ を第 II 期間の最終貯水量として、第 2 次近似系列および第 2 次貯水量 $S^2(T_I), S^2(T_{II})$ を決定する。この手順を繰り返して近似貯水量を $(S^1(T_I), S^1(T_{II})), (S^2(T_I), S^2(T_{II})) \dots$ と求めていき、目的関数値の向上がみとめ

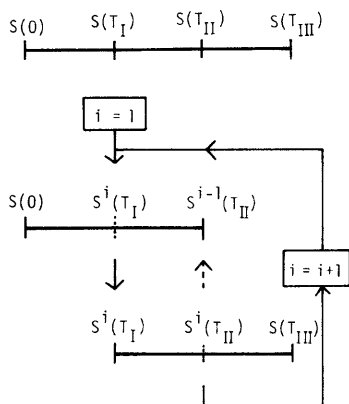


Fig. 6. Schematic representation of Iterated Method of DP (IMDP).

いこと、評価関数形にとらわれずに制御目的に合致した解が得られるなどの利点がある。

4.2 非線形最適化法的应用

制御後の目的関数値を、途中の分割点での貯水量で表わすと、 $f(S(T_I), S(T_{II}))$ と書くことができる。これは、期間 T_I と T_{II} での状態量 $(S(T_I), S(T_{II}))$ のいくつかの組み合わせの中で、制御目的を満たすも

られなくなれば計算終了である。本方法は収束の保証はなく、最適解の近くでの振動が予想されるが、DPの計算方法をそのまま用いることが可能である。さらに、長期間操作のように、洪水終了時点（利水操作の初期時点）の貯水量が比較的与えやすい場合には、解の収束も早いなどの特徴があげられる。

以上、制御期間を分割して最適解を得るための解法をいくつか提案したが、計算量や記憶容量の節減程度および最適系列のとり方が異なり、単純に優劣がつけられない。次に、計算例を通じて、適用面からみた各手法の比較・考察を行おう。

4.4 結合手法の比較

ここでは、前節までに展開した各種結合方法を、計算回数、記憶容量および適用結果の比較によって考察しておく。

(1) 計算回数

単ダムでの DP による最適操作には、離散化された貯水容量を V 、制御期間を T とすると、一般に、 $(V+1) + (V+1)^2 \cdot (T-1)$ 回の計算量を要している。ダムの総数が N のときの計算量 IT_{DP} は

$$IT_{DP} = \prod_{n=1}^N (V_n+1) + (T-1) \cdot \prod_{n=1}^N (V_n+1)^2 \cdots \cdots \cdots (9)$$

となる。いま、分割期間を L 個、各期間の制御期間を T_l とすると、2 ステップ DP における計算量 IT_{2SDP} は

$$IT_{2SDP} = 2 \left\{ \prod_{n=1}^N (V_n+1) + (T_1+T_2+\cdots+T_L-1) \cdot \prod_{n=1}^N (V_n+1)^2 \right\} \cdots \cdots \cdots (10)$$

となる。後述の比較に便利のように

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= T_2 = \cdots = T_L = T \\ V_1 &= V_2 = \cdots = V_N = V \end{aligned} \right\} \cdots \cdots \cdots (11)$$

とおけば、式 (9) は

$$IT_{SDP} = 2 \{ (V+1)^N + (T \cdot L - 1) \cdot (V+1)^{2N} \} \cdots \cdots \cdots (12)$$

と表わすることができる。次に最急降下法の場合であるが、反復回数を W_x 、初期値を適当に与えることによって、各ステップの最適値の算出に $V/2$ 以下の計算量で済むとすれば、計算量 IT_{SADP} は

$$\begin{aligned} IT_{SADP} &\leq \sum_{l=1}^L \left\{ \prod_{n=1}^N (V_n+1) + (T_l-1) \cdot \prod_{n=1}^N (V_n+1)^2 \right\} \cdot L \cdot \frac{N \cdot L + V}{2} \cdot W_x \\ &= \{ (V+1)^N + (T-1) \cdot (V+1)^{2N} \} \cdot L \cdot \frac{N \cdot L + V}{2} \cdot W_x \cdots \cdots \cdots (13) \end{aligned}$$

となる。また、共役方向法での計算量 IT_{CADP} は収束回数が分割点での変数以下におさまるとすると

$$\begin{aligned} IT_{CADP} &\leq \sum_{l=1}^L \left\{ \prod_{n=1}^N (V_n+1) + (T_l-1) \cdot \prod_{n=1}^N (V_n+1)^2 \right\} \frac{L^2 \cdot V \cdot N}{2} \\ &= \{ (V+1)^N + (T-1) \cdot (V+1)^{2N} \} \cdot \frac{L^2 \cdot V \cdot N}{2} \cdots \cdots \cdots (14) \end{aligned}$$

となる。最後に近似反復解法であるが、やはり収束回数を W_x 回とすると計算量 IT_{IMDP} は

$$\begin{aligned} IT_{IMDP} &\leq \sum_{l=1}^{L-1} \left\{ \prod_{n=1}^N (V_n+1) + (T_l+T_{l+1}-1) \cdot \prod_{n=1}^N (V_n+1)^2 \right\} \cdot W_x \\ &= \{ (V+1)^N + (2T-1) \cdot (V+1)^{2N} \} \cdot (L-1) \cdot W_x \cdots \cdots \cdots (15) \end{aligned}$$

となる。非線形最適化法では、1 分割点だけの状態量を変えて、他は固定のまま最適化が行われている。したがって、分割点が進むにつれて、それまでの系列は既に得られた解を用いることができる。式 (13)、(14) の $1/2$ はこうした計算量の減少を意味している。各手法の計算量を比較するため、 $V=49$ 、 $T=20$ 、 $N=3$ 、 $W_x=5$ とおき、分割数 L の関数として表わしたものが Fig. 7 である。各実線は近似的に、

$$IT_{DP} \doteq (20L-1) \cdot 50^6 \cdots \cdots \cdots (16)$$

$$IT_{2SDP} \doteq 2 \cdot (20L-1) \cdot 50^6 \cdots \cdots \cdots (17)$$

$$IT_{SADP} \doteq 47.5 \cdot L \cdot (3L+25) \cdot 50^6 \cdots \cdots \cdots (18)$$

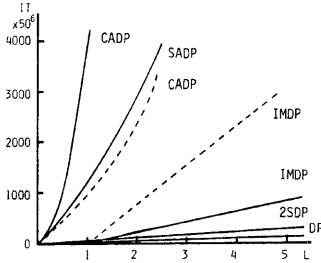


Fig. 7. Comparison of the computation amounts between DP and four proposed methods.

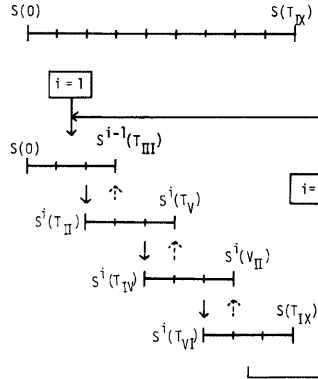


Fig. 8. Schematic representation of revised IMDP.

$$IT_{CADP} \doteq 4189.5 \cdot L^2 \cdot 50^6 \quad (19)$$

$$IT_{IMDP} \doteq 195 \cdot (L-1) \cdot 50^6 \quad (20)$$

とした。図より明らかなように計算量を比較すると、

$$IT_{DP} < IT_{2SDP} < IT_{IMDP} < IT_{SADP} < IT_{CADP} \quad (21)$$

となっている。ただし、近似反復解法では反復回数が20に増加すると点線 IT'_{IMDP} のようになる。また、共役方向法もあるステップでの最適化の計算量を $V+1$ としたが、状態量のとり方によっては大巾な減少が可能になる。点線 IT'_{CADP} は状態量を黄金分割法によって区切り、さらに離散化をはかった結果であり約1/3の計算量で済む。近似反復解法においても、隣り合う2分割期間で制御を行うのではなく、3期間以上をまとめて計算を行い、次の制御には最後の期間だけを重複させて計算を進めると、1回の制御期間は長くなるが、全体の計算量を節減することができよう (Fig. 8 参照)。

(2) 記憶容量

DP の定式化をそのまま用いた場合の記憶容量は、(i) 目的関数用に $2 \cdot \prod_{n=1}^N (V_n + 1)$ 、(ii) 決定変数用に $T \cdot \prod_{n=1}^N (V_n + 1)$ 、(iii) 濁質の状態用に $2 \cdot \prod_{n=1}^N (V_n + 1)$ 、(iv) 放流量、貯水量、濁質系列用に各々 $N \cdot T$ 個が必要である。したがって、計算回数と同様 L 個の分割が行われているとすると、総記憶容量 ME_{DP} は

$$ME_{DP} = 4 \cdot (V+1)^N \cdot L \cdot T \cdot (V+1)^N + 3 \cdot L \cdot T \cdot N \quad (22)$$

となる。2ステップ DP では各期間内の容量のほかに、分割数に対応する状態量加わるから、総記憶容量 ME_{2SDP} は

$$ME_{2SDP} = (V+1)^N \cdot (4+L+T) + 3 \cdot N \cdot T \quad (23)$$

となる。最急降下法、共役方向法では1期間分だけを記憶すればよく、総容量 ME_{SADP} 、 ME_{CADP} はそれぞれ次のようになる。

$$ME_{SADP} = (V+1)^N \cdot (4+T) + 3 \cdot N \cdot T \quad (24)$$

近似反復解法は1度に2分割期間にわたる制御を行うが、分割点の状態を示す変数を追加すれば1期間分だけで済み、総容量 ME_{IMDP} は

$$ME_{IMDP} = (V+1)^N \cdot (5+T) + 3 \cdot N \cdot T \quad (25)$$

となる。Fig. 9 は計算量の場合と同じ条件下での記憶容量を分割数の関数として示したもので、

$$ME_{CADP} = ME_{SADP} < ME_{IMDP} < ME_{2SDP} < ME_{DP} \quad (26)$$

となっている。同図より明らかなように、もとの DP には膨大な記憶容量が必要ことがわかる。縦軸

のスケールが 50^3 と粗いために非線形最適化法による減少効果が十分表われていないが、京都大学大型計算機 (M190) の記憶容量の上限値が通常ジョブで12万語であることから、その有効性が理解できよう。しかし、前述のように計算回数に関連した時間の問題があり、可能な範囲で分割数を少なく、1分割内での制御期間を長くすることが実用的であろう。

(3) 計算結果による比較

単ダム・単評価地点系で各手法を適用し、その制御効果を比較しよう。ダムへの入力は Table 1 に示すとおりであり、支川流入は考えない。ダムの貯水容量、治水許容流量、利水許容流量、濁質許容値は全期間を通じて、それぞれ 35 m^3 , $100 \text{ m}^3/\text{sec}$, $2 \text{ m}^3/\text{sec}$, 200 ppm とする。

Table 1. Input data of an example.

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$I(t)$	4.0	5.0	3.0	2.0	5.0	9.0	15.0	35.0	27.0	20.0	8.0	6.0	4.0	2.0	3.0
$CI(t)$	7.0	11.0	13.0	6.0	4.0	15.0	25.0	30.0	22.0	14.0	7.0	4.0	3.0	2.0	3.0

また、期間分割は時刻1~5, 6~10, 11~15の3分割とし、完全混合モデルを用いて濁質解析を行うことにする。Fig. 10 は貯水量系列, Fig. 11 は放流量系列, Fig. 12 は評価地点の流下濁度系列を表わしたものである。最急降下法においては、初期値を $(0, 0)$ とした場合と $(0, 6)$ からの2ケースで適用した。前者は $(0, 0)$ における目的関数の偏微分値が0となり、解の改善が全く行われなまま計算終了となった。これは、変数を離散量にしていること、あるいは制御目的が最悪値のみで評価され、変数1単位の変化では目的関数値に影響が表われなかったからであろう。 $(0, 6)$ の組み合わせのように、一たん最適化が始まると急速かつ少数の反復で収束している。分割点での最終貯水量は $(0, 28)$ である。

共役方向法でも、やはり、変数の離散化のため判定条件を厳しくすると収束せず、振動する場合もあった。判定条件を一定値に固定するのではなく、系全体の評価値が改善されなくなった時点をも最適解とする柔軟性

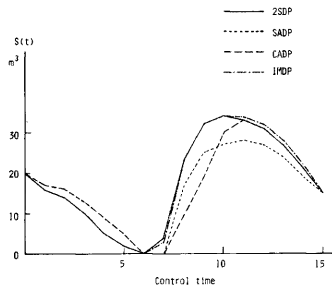


Fig. 10. Comparison of the controlled storage sequences between four proposed methods.

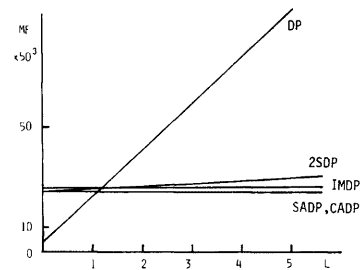


Fig. 9. Comparison of the required amounts of computer memories between DP and four proposed methods.

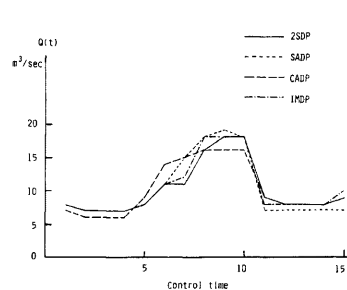


Fig. 11. Comparison of the controlled discharge sequences between four proposed methods.

も必要である。また、計算例では各ステップの最適化の範囲に制限を設けたが、最急降下法と同様少数の反復で収束しており、最終貯水量は (0, 33) である。

一方、近似反復解法においても 2 回の DP 計算で収束して、最終貯水量は (0, 34) であった。計算量が少ないのは貯水容量に余裕のあったこともあげられるが、入力分布に即応した変数の変化を表わしており、計算方法の簡便さと合わせてその有効性が理解できよう。

なお、図から明らかなように、2 ステップ DP の結果を最適系列とすれば、各手法における制御結果は若干異なっている。しかし、評価値はいずれも低水時で同じ値 3.5 を示している。このことは、最適解には多数の系列が存在することを意味し、収束判定条件によって異なる系列となったであろう。もし、解の一意性が保証される評価関数（たとえば被害額の合計）であれば、同一の結果が得られるはずである。

以上のように、簡単な例からではあるが、各手法における最適解への接近は十分信頼することができる。したがって、長期間操作に適用するには、計算上の条件と分割点での変数の特徴に応じて用いる手法を決めればよいであろう。

5. 青蓮寺ダムによる適用

ダム貯水池による長期間操作の適用例として、日単位の長期情報だけでなく、時間単位の短期情報も豊富に整っている青蓮寺ダムを取り上げよう。同ダムの完成後、渇水あるいは越流といった異常事態は発生していないので、特定の期間を用いず、雨季から乾季にまたがる適当な期間を制御対象とする。

5.1 適用条件

制御系はダム直下の名張を評価地点とする単ダム・単評価地点系とし、制御期間は 1974 年の 7 月 7 日から 10 月 31 日までの約 4 カ月である。許容値は、治水時は $300 \text{ m}^3/\text{sec}$ 、利水時は $2 \text{ m}^3/\text{sec}$ 、濁質は 50 ppm とする。また、貯水容量は利水時には予備貯留を設けて $8.64 \times 10^6 \sim 19.1 \times 10^6 \text{ m}^3$ の範囲とし、治水時には洪水調節容量だけでなく、利水容量もオーバーラップして用い $10.0 \times 10^6 \sim 23.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ を治水容量とした。貯水池内の濁質解析には、計算時間と放流形式の容易さより完全混合モデルを用いる。濁質入力には観測データがないので、高樺らによる早明浦ダムでの解析結果⁵⁾より、濁度と流量の関係がほぼ $CI(t) = \sqrt{I(t)}$ ($CI(t)$, $I(t)$ は時刻 t での流入濁度、流入流量である) で表わされていることを用いて、逆算することにした。貯水池内の初期、最終貯水量および初期濁度はそれぞれ $15.3 \times 10^6 \text{ m}^3$, $13.6 \times 10^6 \text{ m}^3$, 7.5 ppm を与えた。計算に際しては、利水時は時間単位に日、放流単位に m^3/sec を、治水時は時間単位に時間、放流単位に m^3/sec を用い、状態量の節減化に DDDP⁶⁾(Discrete Differential Dynamic Programming) を適用して最適化をはかった。

5.2 適用と考察

Fig. 13 は制御期間内における降雨状態と、式 (4) を目的とした制御後の貯留量、評価地点流量、濁度系列である。出水が 7 月 10 日、7 月 23 日、8 月 28 日、9 月 2 日、10 月 3 日に生じているが、最後の出水は時間単位のハイドログラフをみると、ピーク流量が小さく、しかも総流出量も少ない。したがって、日単位の制御で平滑化の可能な無影響出水とみなし、前 4 出水を治水制御の対象として長時間操作を行うことにする。出水 1 は 7 月 9 日 19 時から 10 日 23 時まで、出水 2 は 7 月 23 日 2 時から 23 日 19 時まで、出水 3 は 8 月 28 日 2 時から 28 日 13 時まで、出水 4 は 9 月 2 日 17 時から 3 日 12 時を制御期間とした。治水時の初期および最終貯水量は、治水制御時以外は日平均流量が流入するとして貯水量を算定した。全期間を日単位とした場合の目的関

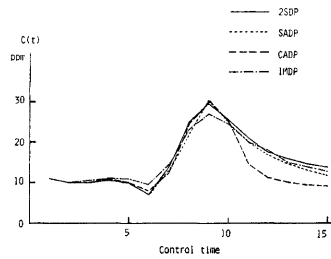


Fig. 12. Comparison of the controlled turbidity sequences between four proposed methods.

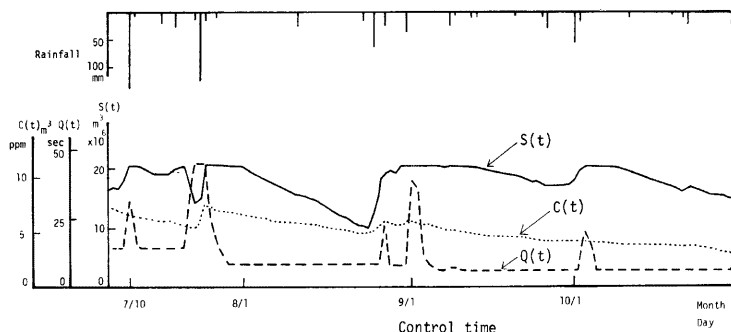


Fig. 13. The controlled long term sequences of storage, discharge and turbidity.

数値は低水時に現われ $J^{all}=3.0$ であり、各出水での関数値は最悪値でも出水1の $J^{high}=4.61$ であった。結局、低水による制御の方が悪く全て無影響出水となり、両者を結合したのが長期間にわたる最適操作といえる。

次に、低水の許容値を $0.95 \text{ m}^3/\text{sec}$ に変えて制御を行った結果が Fig. 14 である。同図の点線は日単位での制御系列であり、目的関数値は低水時の6.32であった。一方、出水時における目的関数値は出水1で4.61と悪化し、治水・利水を含む長期間操作が必要となる。同図における実線は、全出水を対象にした共役方向法による制御結果である。全体の目的関数値は6.32と向上し統合操作の効果が現われているが、最低流量は評価値を変える前の制御と同じである。これは、9月以降はいかなる制御をしても $7 \text{ m}^3/\text{sec}$ を確保するのが限界となるからである。本結果には濁度の影響は少なく、かえって高濃度を放出している。流量に関してはかなりの変動があり、ピーク流量のてい減など分割期間内での平滑化が著しい。Fig. 15 は各出水での制御系列である。図中の点線は統合操作を行う前の初期、最終値を用いての結果であり、実線は統合操作の結果である。ダムの貯水量に十分なゆとりがあり、完全な平滑流量となっている。だが、初期、最終値のとり方を変えることによって大巾な流量の低下が可能となる。さらに、図中の一点鎖線は統合操作前の貯水量系列に対し、制御期間を長くした場合の結果である。どの出水に関しても流量の低下をもたらし、出水の最悪評価値は6.59と統合操作の必要性を認めていない。これは、予備放流によって貯水池水位を下げておくことと長期間の統合操作と同程度の制御が期待でき、予備放流の重要性がわかる。ただ、予備放流を長くすることは時間単位の操作を長期間続けることにはかならず、おのずと適用限界があろう。

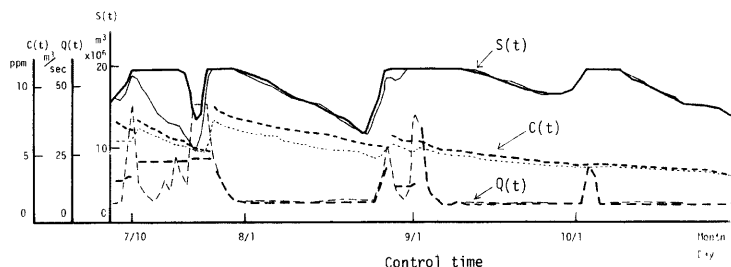


Fig. 14. Comparison of the controlled long term sequences of storage, discharge and turbidity.

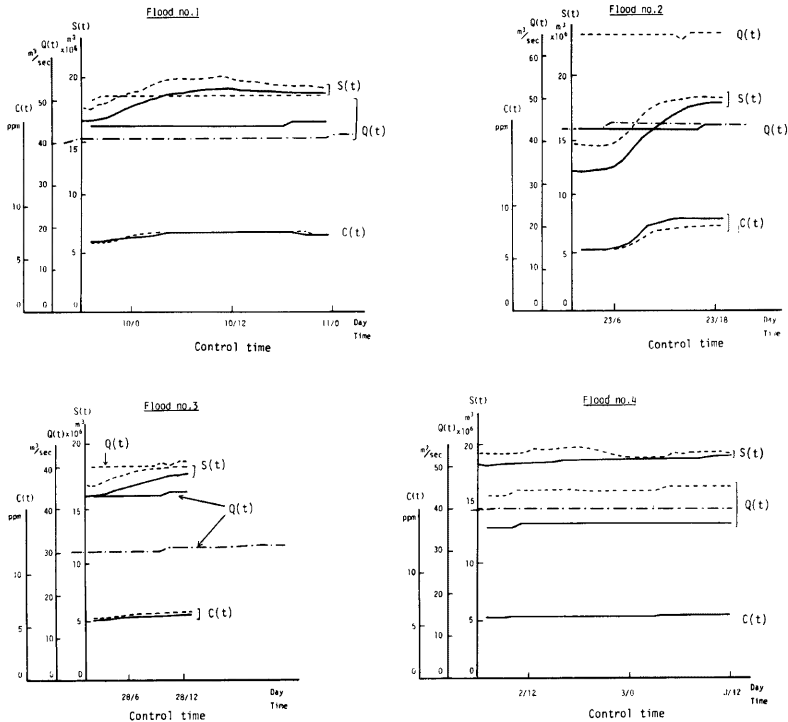


Fig. 15. Comparison of the controlled sequences in each flood.

6. 結 語

本研究では、水資源の有効利用をはかるため、治水・利水を包含した長期間操作手順を明らかにし、その計算手法を考察した。既知入力を対象に適用を進めたが、著者らが提案している実時間での入力予測^{7),8)}を併用することによって、多目的での長時間操作も可能である。ここで得られた成果をまとめると以下のようになる。

- (i) 治水、利水における各目的の相対評価を同一とし、スカラー最適化手法を用いて定式化を行った。
- (ii) 出水を影響出水と無影響出水に分ける長期間操作手順を明らかにし、全期間で制御目的が満足できるようにした。
- (iii) 貯水池の連続式を時間に関する積分形で表現し、治水、利水における制御単位の相違による貯水量の不整合性を解消した。
- (iv) DP による長期間最適化において、DP の段階的利用法、非線形最適化法の応用、近似反復解法などを提案するとともに、各方法の計算上の特性を比較した。
- (v) 適用の結果、予備放流によって水位低下を試みた場合と最終的に同一の評価が得られ、本手順の有効性が確認された。

なお、本統合操作と降雨一流出—濁質解析のシミュレーション法を結合すると、流量平滑化をはかったう

えて最小限必要な貯水容量を得ることができる。たとえば、適用時の青蓮寺ダムでは約 $12.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ の容量で治水、利水を制御することになり、治水、利水容量を画一的に確保した総容量 $23.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ に比べるとかなり小さくなっている。さらに、ダム群の大規模操作法⁹⁾を適用すると、建設費用の減少ならびに長期的管理をふまえたダム群最適配置を決定することができよう。

参 考 文 献

- 1) 高埚琢馬・池淵周一・小尻利治：水量制御からみたダム群のシステム論的研究，土木学会論文報告集，第241号，1975，pp. 141-150.
- 2) 高埚琢馬・池淵周一・小尻利治：濁質水を考慮したダム制御に関する一考察，京都大学防災研究所年報，第22号 B-2，1979，pp. 167-178.
- 3) Cohor, J. L. and Marks, D. H.: A Review and Evaluation of Multi-objective Programming Techniques, Water Resources Research, Vol. 11, No. 2, 1975, pp. 208-220.
- 4) たとえば，Jacoby, S. L. S.・Kowalic, J. S.・Pizzo, J. T. 原著，関根智明 訳：非線形最適化問題の反復解法，培風館，1976.
- 5) 高埚琢馬・小尻利治・阿佐美一郎：水量・濁質制御を目的とした貯水池群の実時間操作，土木学会第34回年次学術講演会講演概要集，1979，pp. 61-62.
- 6) Heidary, M., Chow, V. T., Kototovic, P. V. and Merdith, D. D.: Discrete Differential Dynamic Programming for Approach to Water Resources Systems Optimization, Water Resources Research, Vol. 7, No. 2, 1971, pp. 273-282.
- 7) Takasao, T., Ikebuchi, S. and Kojiri, T.: An Approach to the Adaptive Flood Control by Multi-Reservoir Systems, The Memoirs of the Faculty of Eng., Kyoto Univ., Vol. XXXVIII, Part 3, 1976, pp. 103-116.
- 8) 高埚琢馬・小尻利治・阿佐美一郎：利水時におけるダム貯水池の実時間操作に関する考察，土木学会第35回年次学術講演会講演概要集，投稿中.
- 9) 高埚琢馬・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.