

# ダム操作

池淵 周一

## 1. 社会的意義

多くの土木ハードウェアは、時間軸上で計画(Planning)、事業(Project)および実際管理(Operation)・維持管理(Maintenance)というプロセスとサイクルを経ている。とりわけ洪水防御、水資源開発の柱として機能しているダム貯水池にあっては自然現象・水循環という外力に対して、人間活動に適合するように水量・水質を河川管理者自らが制御するという実際管理のウエイトが大きい特徴を有している。しかも高度成長期を経て拡大した都市域への人口・資産の集中は洪水災害ポテンシャルの増加、水需要量および排水量の増加をもたらし、それに対応するために流域にはダム貯水池をはじめ合口堰、河口堰、下水道、処理場など多くの種類の施設が多数張りめぐらされてきている。このことはこれら施設による広域化、高度化とあいまって自然的水循環に加え人工的水循環の側面を高めており、従前以上に実際管理の重要性とその強化を要請してきている[1]。

以下ではダム操作の諸側面をとりあげ、とりわけ計画操作と実時間操作に分けてそれぞれについてOR的手法による接近の現況を述べるとともに、それらが実際管理に活用されていくための条件づくりについて考察してみたい。

## 2. ダム操作の諸側面

ダム操作を現象の流れの中で位置づけると図1のようになる。すなわち、インプットである流入量をダムの貯水状態をふまえながらアウトプットとしての望ましい放流量に変換するシステムである。このシステムをさらに実際問題との対応、研究の発展経緯などを考慮して大胆に分類・整理したものが図2である。すなわち、第1の座標は入力の状態評価で既知の入力情報に対する計画操作から未知入力に対する実時間操作ま

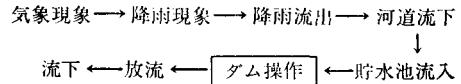


図1 現象システム

でを表わす入力因子である。実用上はさらに制御期間の長短により利水・治水に分けられる。第2は、単一ダムによる基礎的制御系から、複数ダム・複数評価地点系による水系一貫した制御系までを表わすシステム因子である。第3は、洪水や低水時の水量だけを対象とした単一目的でのダム操作から、水量はいうにおよばず、各種水質・環境条件を同時に評価する多目的操作までの目的因子である。もちろん最終的にはこれら各座標の最遠点の組合せをもつシステムでの操作がダム統合管理問題として位置づけられよう。

## 3. 計画操作におけるOR的手法の適用

ダム貯水池の流量調整に関する効果は、基本的には貯水池規模、配置等の関数である建設費用と洪水防御や水資源開発による便益との関係によって決まるが、この両者の関係にはダム貯水池の操作が密接に関係している。たとえば、ある貯水池規模から防御される洪水流量や開発される水量の大きさは、貯水池操作の巧拙に依存して差異が生じることは明らかであり、したがって貯水池操作ルールは流量調整を通じて費用-便益を関係づける役

いけぶち しゅういち 京都大学 防災研究所

〒611 宇治市五ヶ庄

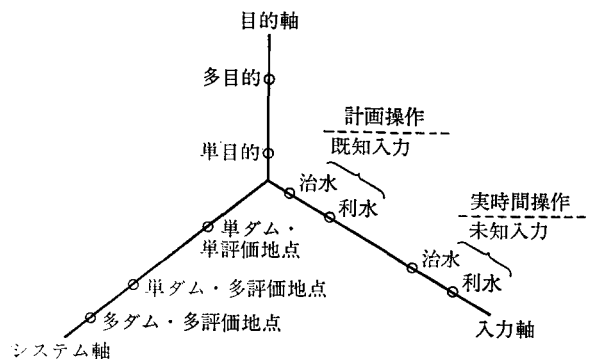


図2 ダム群制御システムの3次元的表现

割を担っている。いま貯水池システムに限ると、その Dynamic な性質から貯水池操作ルールの決定問題には DP を用いる最適化手法の適用が多い[2]。もちろん、ここでは計画操作ということで、過去の実績流入量系列を用いたり、その確率構造を抽出して多くの流入量系列をシミュレーションしたり、あるいは確率年に相当する計画ハイドログラフ(流入量系列)を対象としたりするが、本質的には流入量系列が既知であるとして DP を適用している。モデル構成にあっても図 2 のシステムの拡がりに対応して多ダム・多評価地点系への拡張として、いくつかの基本型からなる小問題に分割し、多次元最適手法を適用したり[3]、空間配分には LP、時間配分には DP を用いる DCL(DP coupled with LP)[4]の開発が、多目的制御系への拡張にはベクトル最適化手法の適用[5]などが検討されている。なお、DP がもつ“次元の呪い”の問題についてもシステムの分割に加え、IDP, DDDP, IDPSA, DDP[6] など多くの手法が提案されている。IDP, DDDP および IDPSA の各手法は、初期解が最適解の近くでなければならないという点、解の最適解への収束までが保障されていないという点、さらに次元の問題を完全に克服していないという点で問題があるが、決定論的な DP 問題の場合は現時点では DDP が最も有効のようである。一方、実操作に限らずとも現実の貯水池システムにあっては不確実性が存在し、その不確かさに対する確率的制御法の適用も研究されている。前述のシミュレーションと確定的 DP を用いたモンテカルロ DP などはこの不確実性を陰の形で扱っているものであるが、流入量がマルコフ連鎖にしたがうと仮定して不確実性を陽に扱った確率 DP [7] さらに、状態量の確率的な制約をも扱った Chance Constraint DP [8] などの適用である。ただ、これらはいずれも小規模なシステムでの適用にとどまっている。

#### 4. 実時間操作における OR 的手法の適用

既設のダムや新たに建設されたダムにあっては、どんな流況にあって計画操作ルールにしたがって運用をはかるのが望ましいが、実際には計画通りの流入量系列ばかりではない。その流量調整による効果が発揮されるよう時々刻々放流量を決定していかなければならない。これが実時間操作である。

実時間操作は基本的には時々刻々得られる観測情報およびインプットの予測情報を有効に利用して逐次最適な放流量を決定していくというものである。洪水であれ渇

水であれ、将来の流況予測がそのリードタイムの増加とともに不確実性が增大するので、ここでも以下のような考え方にもとづいて研究が進められている。すなわち、あらかじめ想定しておいた流況パターンとそれに対する最適操作解(たとえば DP による解)の中から、該当すると予想されるものを各時点で選びながらいく型紙方式[9][10]と、各時点での予測ハイドログラフにもとづいて最適な操作をしていく適応制御方式[11]とである。前者ではどのくらいの型紙流況に対して操作解を求めておけばいいのか、操作解の乗り移りの判断はどうするか、などいくつか問題はあがあるが、理解しやすいという点では実用的である。後者には流出モデルを介して Kalman filtering-prediction theory を適用した流入量予測値とその共分散行列をもとに、確率 DP を適用して放流量期待値を算出し、この手順を逐次進めていくとか[11]、流入量予測値のかわりに多くのシミュレーションを各時点で発生し、確定的 DP で求めた放流量分布のある超過あるいは非超過確率値を放流量とするなどの検討が試みられている。さらに最近では、Wasimi and Kitanidas [12]による計算量の削減法および Georgokakos [13]の考えるによる次元の呪いの解決法をベースとしながらも問題を一部再定式化して確率ベクトルの関数の大域的な近似手法である統計的 2 次近似手法を用いた実時間操作手法も提案されている[14]。すなわち Kalman フィルタリングコントロールの決定、入力予測情報の考慮、予測更進、入力の入手と状態ベクトルの再予測の手順により実時間操作のループを完結している。現時点では、簡単な適用例にとどまっているが、その有効性が確かめられている。

以上、計画操作と実時間操作に分けて OR 的手法の適用に関する研究事例を概観してきた。OR 的手法の適用という視点から共通的な内容になっているが、実際問題での治水・利水問題あるいは平常時、洪水時、低水・渇水時それぞれにおける操作問題およびその移行問題となると、現象そのものの把握・予測の時間単位、操作目的あるいは評価関数、予測のリードタイムなどが異なるので、それぞれに適した内容で具体化がなされていることを断っておく。

#### 5. OR 的手法の実学への回帰に向けて

以上みたようにダム操作問題への OR 的手法の適用は研究レベルにおいては多く提案されてきている。ところが実際のダム操作にあっては平常時は基準点確保流量あ

るいは期別管理水位との比較による放流、貯留操作で対応できるが、洪水時には各ダムで定めた一定量放流方式、一定率・一定量放流方式といった操作ルールに準拠することが多い。また、渇水時にあっては貯水池残量にもとづく補給率（給水制限）操作によっている。いずれも流量や貯水量の観測値にもとづく固定的な操作ルールといわざるをえない。もちろん予備放流方式の採用や、OR的手法から導かれる、いわゆる不定率・不定量放流方式が望ましいものであっても、それはあくまで参考の段階にとどまっているのが一般である。以下ではその採用をはばんでいるいくつかの障壁を考察するとともに、それを克服する方策をさぐってみた。

### (1) 責任・保障の問題

ダムへの流入量および残流域流量の予測が過去の流況を再現するごとく正確に行なわれ得るならば、操作ルールを固定しないでそのつど最適な統合操作を見出しながら操作することもできよう。将来流況の予測技術はわが国の地形・水文環境から勢い降雨の予測が必須である。洪水に関してはレーダ、アメダス情報と気象学的根拠をもったモデルを駆使しながら、現時点では2時間程度までは実用レベルに到達しつつあるが、それ以上のリードタイムになると予測精度は急激に低下する。一方、長期予測に関しては気象庁発表の1、3か月予報をベースにしたり、重回帰や類似法を発展させるなどの努力が払われているが、流域しかもダム流域の空間スケールとなると十分に機能する段階にまでいたっていない。しかも自然の異常性は時には計画をこえるような、あるいは過去に経験したことのないような洪水や渇水をもたらさないと限らない。実際管理にあっては、そのような場合でも甚大な被害が発生しないよう操作していかねばならない。操作は実験を許さず、各場面において1回限りである。シミュレーション、予測技術を駆使しても不確かさがある以上、その意思決定はときには被害をもたらさないと限らない。洪水にあっては被害はときには生命の損傷に結びつくこともある。利水にあっては確保流量を充足できないこともある。ときには裁判でその責任・保障問題が問われることになる。ただ、ここで留意しておかなければならないことは、事前と事後とではその難しさが180°違うことを十分認識しておくべきで、往々にして事後の解釈論で操作不備を指摘するだけでは一方的であろう。この責任・保障問題が往々にしてダム操作を固定的、あるいは保守的な姿勢に結びつけたいも限らない。確率的判断や期待値的な表現では対応しない、100

%か0%、オールオアナッシングの情報にもとづく判断を最優先することにもなる。したがって、自然の異常性はときには計画を上回るような事態があることを十分に認識してもらおうと同時に、実際管理における操作の評価は、それが結果的に最適であったかどうかでなく、決められた操作ルールにしたがって操作したかどうかであり、そのルールを常にレベルアップすべく、努力しているかどうかであり、この努力の推進に研究者レベルと実務者レベルの連携が従前以上に必要であろう。

### (2) 河川管理者と研究者の立場、理解の乖離

研究者にとってはOR的手法を適用するにあっては解の導出のため現実問題を何らかの形で単純化する。それでも複雑・難解な理論的アプローチに価値を見出す。一方、管理者は単純化がすぎるといふもの、理論的アプローチが理解しにくい、操作の容易さに欠けているという。ORは役に立つということを知ってもらうためにもORが使いやすいように、理解しやすいように翻訳するなどしてこの乖離を縮める努力が必要である。そのことによって両者の意志疎通をはかり互いの立場を理解しながらの協力姿勢が生み出されてこよう。ちなみにダム操作に必要な定量的、定性的な情報の処理や意思決定の技術（すでに述べた雨量や流量の予測技術や各種制約下での放流量決定ルールなど。現行の操作規制や洪水・渇水対策会議での調整、合意事項などを含む）を知識ベースとして整理するとともに、雨量や流量・洪水量や取水量などの情報収集システムと結合してのエキスパートシステム、あえていえばエキスパートオペレーショナルシステム[15]の構築が両者の信頼関係のもとで可能ではなかろうか。意思決定あるいは判断のプロセスにあってはオールオアナッシングではなく、あるあいまさを積極的に利用することも考えられる。このあいまいさを定量化して柔軟にそれを導入するファジィ制御理論も準備されており、その概念が河川管理者が過去の操作経験をふまえて類推により操作量を求める手法に近い形をしているからである。

### (3) 評価関数の合意形成

われわれはOR的手法の適用にあっては多くの操作解を考え自分らの課した制約条件を少なくとも満足する許容解を選択し、その中からさらに設定した目的を満足する解を最適解として選択する。すなわち、得られた解は制約条件、目的関数あるいは評価関数に依存している。しかも最適化の評価関数はどの時点で、誰にとって、何に関しての、という少なくとも3つの座標軸からなると

考えねばならない。またそのそれぞれの要素はベクトル量である。すなわちわれわれの価値体系は高次のベクトル空間をなしており、特定の評価関数はその中の一点を指定したものにすぎない。したがってある点に関して最適であるからと言って、他の点に関しては一般に最適にはならない。ちなみに安全性、経済性、社会性、環境保全などはときには相対峙する方向をもっているものもあるが、同時に満足させる要求も課されてきている。

次に操作問題にあっては従来から経済的評価関数を用いるものと、ある設定された水位や流量を上回る、あるいは下回る割合やその確保確率を規準に考えるものがある。経済的評価関数にあっては洪水や濁水にあっては金銭タームですべてを評価することができない側面（均質社会ゆえに何ごと金銭タームで評価することを敬遠するむきもある）や、直接的なもの他に間接的あるいは心理的な被害・便益があり、ある場合にはその占める割合が大きいのではとの指摘もある。もちろん、そうしたものの計量化も鋭意研究されているが、実際の計画や運用面への導入はまだ普遍化していない。一方、後者の評価基準は水位や流量といった一種の物理的指標に準拠しているので理解しやすく、たとえば洪水にあっては各評価地点  $i$  における計画洪水流量  $Q_{id}$  と制御後の評価地点  $i$  を流下する洪水のピーク流量を  $Q_{ip}$  として

$$K \equiv \max \{Q_{ip}/Q_{id}\} \rightarrow \min (i=1, 2, \dots, m; m \text{ は評価地点の総数}) \text{ かつ } K \leq 1$$

と表現したり、利水にあっては評価地点  $i$  における確保流量  $Q_{id}$  と制御後の評価地点  $i$  を流下する流量の最低値を  $Q_{it}$  として、 $P \equiv \min (Q_{it}/Q_{id}) \rightarrow \max$  かつ  $P \geq 1$ 、なる制御目的を満足する評価関数が見出されている[16] この考えはさらに最低給水率がすべての時点で許容水準を上回る確率を最大にするという目標設定にも発展されている。昨今は両者の結合、たとえば、まず物理的指標でシステムの信頼度を評価し、それに経済的指標を付加していくなどのアプローチも考察されている。

また、ORの手法の適用にあっては計量化あるいは数値化の必要性からある集団平均的な形で評価関数を設定せざるをえない。計画段階ではよいとしても実管理になると流域の人々の価値観の多様化ともあいまってどのくらいの規模での平均化特性で議論していいのかニーズの高まりとともに合意形式をむずかしくしてくる。

いずれにしてもORの手法による最適解は必ずしも最善解とはならないわけで、最善解は意思決定プロセスで十分検討を経た上で実施可能なものとして決定されてい

こう。ここに、*analyst* と *decision maker* の役割分割があるわけであるが、操作解の選択に関する情報提供者に甘んじることなく、意思決定者との不断のコミュニケーションを通じて、実際にその解析結果が活用され実施評価されていくよう努力することもOR的手法に精通する者の責務である。

#### (4) 計画操作と実操作のすりあわせ

計画操作の平均的扱いはいわば積分タイプの見方であるのに対して実管理では時々刻々の状況および予測情報をみながらの微分タイプの対処をしている。この大きな視点の違いをすりあわせることが果してできるのか。ここに従来からしばしば指摘されている計画と管理の乖離の原因があるようである。少なくとも計画規模の範囲内にあるのは両者の乖離が少ないことが望ましい。さらに計画をこえるような事態にあっては担当者の精神的重荷を軽減するよう事前に対処法が計画的に定められていることが望ましい。計画操作で得られた放流パターンあるいは期別確保水位を平均的に保持するよう、その上下にある許容される範囲で操作幅が変動するといった形での実現性など両者の整合性をどのように保持すべきか、今後とも検討していくべき課題である。

#### 参考文献

- [1] 池淵周一：ダムによる水量管理の強化に向けて、建設月報 No.466, 昭63
- [2] たとえば(a)Hall, W. A. and N. Buras: The dynamic programming approach to water resources development, J.Geophys. Res., 66(2), 517, 1961  
(b)高棹琢馬・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, 昭50.
- [3] 高棹琢馬・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, 京大・防災年報 No. 21-B, 昭53.
- [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第222号, 昭49.
- [5] 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講演論文集, 昭54.
- [6] Jacobson, D. and D. Mayne: Differential dynamic programming, Elsevier, New York, 1970.
- [7] Yeh, W. W.: State of the art review;

Theories and applications of system analysis techniques to the optimal management and operation of a reservoir system, NCLA-Eng.-82-52, 1982.

- [8] Askew, A. and Marks, D: Chance-constrained dynamic programming and the optimization of water resources systems, W. R. R. vol. 10, No. 6, 1974.
- [9] 高棹琢馬・瀬野邦雄: ダム群による洪水調節に関する研究(1), DPの利用とその問題点, 京大・防災研年報第13号B, 1970.
- [10] 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回土木学会水理講演会論文集, 昭56.
- [11] たとえば S. Ikebuchi, T. Takasao and T. Kojiri: Real-time Operation of reservoir systems including flood, low flow and turbidity controls, Experience in Operation of Hydrosystems, WRP, 1982.
- [12] Wasimi, S. and Kitanidas: Real-time forecasting and daily operation of a multi reservoir system during floods by linear quadratic gaussian control, W. R. R., vol.19, No. 6, 1983.
- [13] Georgakakos, A. P. and D.H. Marks: Real-time control of reservoir systems, Dep. of Civil Eng., M. I. T., TR No.301, 1985.
- [14] 張昇平・児玉好史・椎葉充晴・高棹琢馬: 統計的二次近似によるダム貯水池群の実時間操作, 京大・防災研年報第30号, B-2, 昭62.
- [15] 前出[1]
- [16] 前出[2](b)

▶パーソナルコンピュータ用線形計画法パッケージ◀

# パーソナルLP

実用的な例題を多数収録し、入門者向けに線形計画法をわかりやすく解説!!

開発: 平本 敏(株)電力計算センター)  
 機種: PC-9801  
 定価: 80000円  
 概要: 線形計画法パッケージ。問題入力、単体表の操作、図解法、サポート機能など。(マニュアル添付。)  
 解説書: パソコンパッケージによる  
 例解 線形計画法(定価18000円)  
 問合せ先: 日本電気ソフトウェア(株)  
 営業部 ☎ 03(444)3211

■好評発売中

## ファジイ理論とその応用

水本雅晴著/A5/3200円  
 近年実用面からも注目され始めたファジイ理論について、永年研究を重ねてきた著者が、ファジイ集合とこれを定義づけるメンバーシップ関数、ファジイエントロピー、ファジイシステム等の基本的概念から、応用面全般にわたって解説した決定版。

新時代のコンピュータ総合誌 定価880円

## Computer Today

9月号特集/好評発売中

### ニューロコンピュータ

—第6世代コンピュータへの道—

別冊 プログラム移植 定価1380円

月刊誌

## 数理科学

9月号特集/好評発売中/定価930円

### 情報幾何

情報にひそむ微分幾何的構造

別冊 相対論の座標 定価2000円

## サイエンス社

東京都千代田区神田須田町2-4 安部徳ビル  
 ☎03(256)1091 振替 東京7-2387