

水工学シリーズ 00-A-8

流域水循環と水利用・水資源開発

京都大学防災研究所教授

池 淵 周 一

土 木 学 会
水 理 委 員 会 ・ 海 岸 工 学 委 員 会
2000 年 8 月

流域水循環と水利用・水資源開発

Watershed Hydrology and Water Resources Development

池 淵 周 一

Shuichi IKEBUCHI

1. はじめに

水は太陽エネルギーと重力エネルギーによって絶えず地球上を巡っている。これを水の循環といい、海や陸から蒸発した水は雲となり、これが雨や雪となって陸上に降り、一部は蒸発するが残りは河川水や地下水となってやがてまた海に戻る。

われわれはこの循環の中で雨水が地表に達してから海に至るまでの間に、流域にさまざまな形で存在している水を資源として生活・産業などに一時的に利用し、水の質を変化させ、排水をこの循環に戻すことにより生活をしている。この水の循環と流動のプロセスを扱うのが水文学であり、水循環をベースにした水利用である以上、水文学の知見は水資源工学上重要である。

それ以上に水資源工学は、時間的・空間的に変動する自然の水循環を、ダム等の貯留・調節・処理構造物の建設・運用により、人間の生活・生産活動が要求する時間的・空間的かつ量的・質的水需要を満たすような方策を見出す工学的手法を扱うものといえる。

ここでは水資源の量的側面とその確保に焦点をあて、しかも水需要としては都市用水を主対象に、ダム等の水資源開発施設の規模・配置計画およびその運用管理を中心にとりあげる。もちろん、これら施設計画・管理をどのような手順で代替案の中から選択するかについては、システムの性格をふまえシステムズアナリシスや最適化手法等の計画技術の導入をはかっている。

2. 水資源問題の基本認識

水資源、とりわけわが国のそれを考えるとき、以下のような基本認識が必要である¹⁾。

2. 1 水循環と循環資源

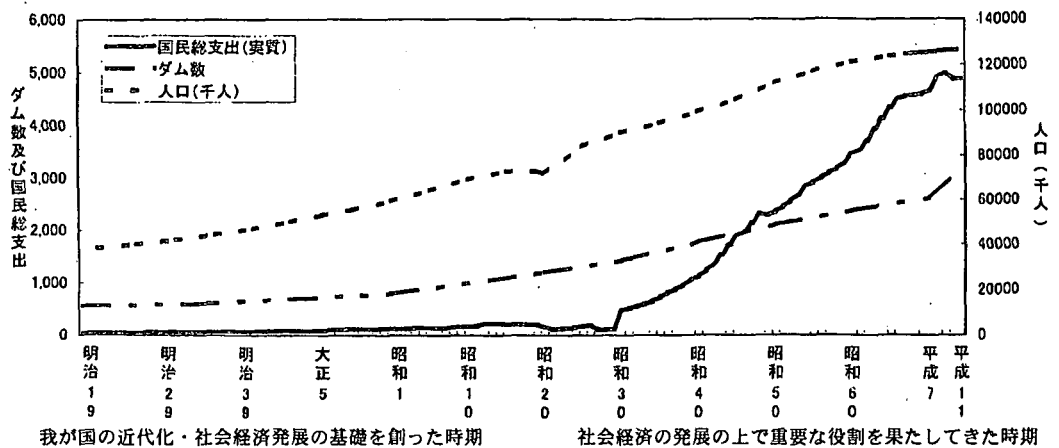
水の循環と流動のプロセスを水量、水質あわせて把握・予測する学問として水文学 (Hydrology) があり、わが国の研究水準はきわめて高い。もとより、水は循環資源であるがゆえに、一定期間内に利用できる量には限りがあるが、最も大量にかつ長期間にわたって利用されている資源であり利用のいかんによっては永続的な循環のもとに、容易にかつ比較的安価に利用できるという特性を併せもっている。

実際、農業用水を主体とした河川の自流量を利用していた段階では、水循環にのっとり上流から下流に河川を取水・利用・排水のプロセスを繰り返して反復利用する形態でいけたが、都市を中心とする水需要の増大は新規水需要の確保を要請した。そのため既得権益を遵守しながらダム等を主とする水資源開発を進めるにつれて、人工的な水循環系が加わることになり、その占める割合が大きくなるにつれ、反復水利用の形態が複雑になるとともに、時間的・空間的な調整機能も大きくなってきた。しかも水量はもとより水質、環境基準が厳しくなる傾向にある。

2. 2 時代性と水利秩序

水の需要は水に対する価値観により推移し、水の供給は水循環の変動を平滑化する技術水準の推移に依存するので、水利用の問題は時代の社会経済の状況に依存する時代性をもっている。アジアモンスーン地域では米作が河川流域の特性を大きく支配している。わが国にあっても例外ではなく、平時の豊かな川の水を利用して低平地に稲作を主軸として発展してきた。しかも米作は大量の水を必要とすることから灌漑用水の確保が営々となされてきた。このことは明治以前に既に渇水時においても利用可能な水量は農業水利によって専用され、利用者間の長い相剋と調整の過程できわめて高度かつ合理的な水利秩序が形成されていた。

明治初期に約 3,000 万人であった人口は昭和初期には約 6,000 万人、現在では約 1 億 2,000 万人へと推移した。またエネルギー需要、一人当たり水使用原単位が急増したことにより、既存の農業用水に加えて初期には発電用水、さらに都市用水の急増に対処するために、今日まで恒常的な水資源の開発と水利調整が進められてきた。すなわち、水利権構造を遵守しながら新規水需要の確保にあつては、ダム等のプロジェクト開発・整備により動的な解決を図ってきたといえよう（図-1）。



たヒエラルキー構造があり、最終需要者はそれより上位の管理運営に連動することになり、とりわけ渇水等の非日常時にあってはその調整機能に大きく依存することになる。

排水・水質管理まで入れると下水道網、終末処理場といった施設の建設や運用、排水基準・環境基準などの法的整備など関連する省庁・機関がさらに加わる。

2. 4 水管理の多元性とあいまいさ・対立

流域には土地利用として森林、農地、都市などがあり、その土地利用管理はある程度判然としているものの、水の管理はいくぶんブラックボックス的であるといわれている。流域の土地利用もふまえて水の循環・流動に関しては先に述べた水文学の発展によりかなり明確になってきているが、水利用・水管理にあっての表流水・地下水・還元水にあっては流域ベースで、その三次元的把握となるとまだ十分とはいえない。

科学的アプローチとしては水の循環・流動の物理的・化学的法則を明らかにするため、厳しく対象を定め、境界を設定し、その中で明確な区分け、システム分割をはかりシステム間の相互関係もとりこみながら分析・総合する立場をとるが、管理となると物理現象系の解明のように“現象は・・・である”と記述するようにはいかず“現象を・・・する（ことを旨とする）”と規定するタイプになってき、何を管理するのか、管理主体を誰にするか、管理内容は、目標は、水準はとなるとその決定・合意は容易ではないところがある。管理しやすいように往々にして対象やエリアを区分け、分割するが、水が連動していることを考えるとシステム間の相互関係をも扱う必要があり、その部分は管理面においてブラックボックス的といわざるをえない。資源の有限性、時間や情報の不足・制限などのもとで、従前の融通と調整のプロセスにとどまらず対立あるいはコンフリクトの存在としてあいまい部分にエネルギーを傾注して対応する場面が予想される。さらに昨今は、こうした水量管理にとどまらず、水質、生態、アメニティ管理も加わり、多元管理の方向が強くてきている。それらが相互に関係しているが、概念そのもののあいまいさ、扱う範囲・境界の設定のあいまいさ、定量化のむずかしさ、管理目標の設定のむずかしさなどが加わり課題は多い。

2. 5 水源別水利用

水資源は自流水を利用するのがもっとも安定でかつ安価であるが、それ以上に需要がある以上何らかの開発手段を講じて生み出さなければならない。開発はダム貯水池等による同一水系内の時間的流況調整によるもの、流況調整河川や流域変更による複数水系間の空間的流況調整によっておこなわれる他、地下水利用によるもの、高度利用としての再利用や合理化、雨水利用や海水淡水化などの未利用水資源の活用など多岐にわたる。現状使用量では灌漑が主要水源とする河川自流水が 633 億 m^3 /年と圧倒しており、ついでダム、堰等による河川開発水 140 億 m^3 /年と地下水 129 億 m^3 /年が多く、再利用水（1.64 億 m^3 /年）やその他未利用資源の活用は現況ではまだ少ない。水資源賦存量とこれら水資源開発による水利用量を渇水年でみると水資源賦存量約 2,800 億 m^3 /年に対し、河川水、地下水などを通じて農業用水、生活用水、工業用水（淡水補給量）として平成 7 年の値で約 900 億 m^3 /年の水を使用している²⁾。

2. 6 水資源問題のシステムの性格

降水から流出にいたる水循環プロセス、水資源問題の時代性・形成過程、水需要を求める多くのユーザーの存在、水資源行政を担う複数の管理主体の存在、多くの法制度、流域に張り巡らされている多くの多様な施設群、これらいずれの側面においても水資源問題を取りまく環境は広汎・多岐・複雑化の様相を呈している。広汎・多岐・複雑な対象に対して、ものごとを個々に捉えるのではなく、全体の一部として総合的に、かつ合理的にとらえようとする思考が、システムの思考ということであろう。

戦後の産業構造の変化は、都市への人口および施設の集中をもたらした。都市構造の変化を引き起こした。そして都市は水の大量消費型に変質し、上水や工業用水の使用量が増加し、それが大量の都市排水を生み、水質汚濁を引き起こすこととなった。これら上水や工業用水の使用増加は地盤沈下に伴う地下水規制、過疎問題とも関連した水源対策、環境問題に伴う水源開発の遅れ・開発コストの高騰などと相まって、水不足という量的問題を、また大量の都市排水は下水道の整備の遅れ、排出規制の不明確さに助長され、水質汚濁という質的問題を顕在化させた。しかも公共用水域の水質汚濁は水源機能を低下させ、浄化処理コストを高騰させるとともに、水不足の遠因にもなった。

こうした事実は、最近でこそインフラ整備水準の向上や社会経済状況の変化等に伴い、幾分緩和されているものの、新たな質的变化が追求される傾向にもあり、もはや水問題は需要・供給・排水汚濁などの個々独立にとらえることはできず、それらの有機的な関連構造を量・質・コストなどを包含した形で総合的にとらえなければならないことを意味している。われわれは水需給構造一つとっても一つの社会システムとして体系的にとらえるべきであり、しかもそれらシステムの階層的フィードバック構造を正しく認識しなければならない。

2. 7 リスクマネジメントと経済的評価

水文循環を対象とする以上、ときには自然の異常性に見舞われ、一時的な水需給バランス、いわゆる渇水が生じる。水供給を前提とした都市活動にあっては渇水時の被害は深刻になりつつある。詳しくは後述するが現行の利水計画にあっては概ね 10 年に一度発生が予想されるような流況の悪い年を計画の基準年と定め水需要に見合う水供給計画が作成されているが、異常少雨、不安定取水の存在などから計画の範囲内にあっても渇水が、さらには計画を上回る異常渇水が発生しうる。こうしたことから水資源の開発・配分計画や管理にあっては、リスクを考慮した意志決定を図ることが求められている。

さらに治水事業に比べて利水事業とりわけダム等による水資源開発は目標年次において水不足が生じない計画、いわゆる先行投資が基本であり、その投資回収には利水者負担の原則がある。多目的ダムにおける各目的別容量配分がなされた後の、目的別コストアロケーション（費用割振）問題にあっては分離費用身替り妥当支出法といった方法がとられているが、そこでは費用・便益分析が重要である。また、ダム等水資源開発施設の建設は施設完成までの期間が長いことから、その間の社会経済状況の変化等にもともなう不確実さの存在はいなめず、水需要予測をはじめ、そのリスクもふまえながらの受益者負担原則であり、最終的には水道料金の設定にまでかかわってくる。利水経済調査を含め費用・便益関係の計量化が重要であり、それだけ経済的評価のウエイトが高い。

以上のような基本認識を考えると、水資源問題の構成とその解決方法は極めて困難といわざるを得ないが、ここでは現行の水資源問題への対応をふまえて、問題をときには分割し、また単純化し、工学的アプローチに焦点をあてながら、問題解決にあたってきた内容を概述する。

3. 流出システムから水資源システムへの情報提供

いま、水資源システムが水調節施設と環境構成要素との組み合わせせからなるとすると、ランダムな水文循環をベースにシステムの計画・管理がなされるともいえる。土木工学においては、こうした循環過程のうち、河川流域を中心とした降水とその流出の過程を主対象としており、河川に関連した治水、利水、水環境上の問題に対応しようとしている。その意味で河川水文学（River Hydrology）あるいは流域水文学（Watershed Hydrology）とでもよぶべきであろうか。

水文学にあっては、水循環と人間活動との関連が強くなるにつれ、現象のモデリングにあっても、コンピュータ技術の発達ともあいまって 1) メソ降水系の解明とモデル開発、2) 流域全体の応答に関する研究から各水文要素モデルの研究へ、3) 集中型モデルから分布型モデルへ、4) 地理的情報やリモートセンシング

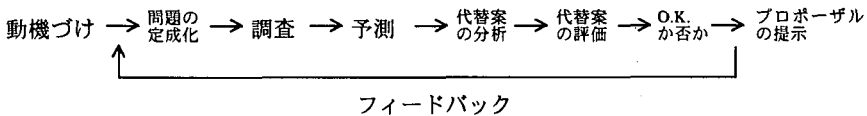
データの利活用、5) 気象・水文モデルの結合とマクロ水文学モデルの構築、といった研究シフトが見られる。ここでは、特に河川水文学が水資源システムの計画や管理にリンクして活用される場面を情報側面として確率分布特性、時系列特性に求め、そのための具体的内容として水文統計、時系列解析、シミュレーション技法、流出解析、予測技法などがあること、こうして加工された情報をインプットし、実用サイドの側面としての計画、設計、計画操作、実時間操作に実用可能なものにする、あるいは両者を結びつけるものに意志決定モデルが介在しているという構図を言うにとどめる。

ただ、水資源システムの多くの代替案を選択する場合、生じうる流量時系列を大量に用意して、シミュレーションに基づく信頼度も考慮した評価も重要となっており、この場合には降水データの確率統計構造を抽出し、それを保存する形での模擬発生系列を大量に発生させ、流出モデルを介して長期の流量時系列を発生させ、水資源システム代替案を介したシミュレーションを実行し、アウトプットとして設定した評価指標の信頼度をふまえた代替案選択をする場面もある³⁾。その場合には、降水時系列の多地点シミュレーション法、分布型流出モデル、地下水流動モデルなどが採用される。

4. 水資源開発・配分計画

流域に張り巡らされる水資源関連施設は時間軸上では計画（planning）、事業（project）、および管理（management）のプロセスとサイクルを経ている。わが国では管理という言葉は計画（planning）と管理（operation maintenance and repair, OMR）という場合の狭義の管理だけでなく、計画・管理（狭義）の総体をさして用いられることがよくある。このような広義の管理は水資源管理（water resources management）とよんで管理（OMR）と区別するのが普通である。さらにわが国では狭義の管理と実管理ということもある。これは実時間管理（real-time operation）と同義である場合が多く、管理の時間スケールが比較的短い場合を対象としている。実管理といえば実時間管理も含めてさらに時間スケールの長い管理も合わせて意味していると考えられるが、洪水時や渇水時のダム貯水池操作など、実用上、実時間管理に関心がある。後述の実時間操作と計画設計上の計画操作がこの間の事情を表している。

つぎに、問題の複雑さを考えるとき、それをシステムとして構造化するとともに、問題解決のプロセスをできるだけ科学的情報処理として描く必要もある。そのプロセスは



のようになる。代替案の評価いかんによってこのプロセスはフィードバックされ繰り返されることになる。ただ問題解決のプロセスが選択問題と深く関係している以上、価値判断とも無関係でなく、上記情報処理プロセスの役割・意義はこのプロセスの結果を利用し、意志決定者および実行主体が価値判断をする科学的支援情報を提供することである。この選択の科学的領域の一つが数理計画手法をベースにした最適化手法である⁴⁾。

水資源開発・配分計画にあっても、こうしたシステム論的アプローチをベースにした代替案選択問題に帰着するところが大きく、以下では計画策定の基本フレームをふまえ、モデル構成を展開する。なお、繰り返し述べているように、新規水需要の大半が都市用水（生活用水、工業用水）に向けられていること、その開発・配分にあっても農業用水等の既得権益を遵守する立場でプロジェクト等による動的解決を図ってきていることを考え、ここでの内容はこうした側面に焦点をあてていることを断っておく。

4. 1 水資源計画の基本フレーム

水循環に支配されている水資源の存在状態と人間サイドの水需要を知って、量・質・経済性等の側面から需要に見合う水を安定的に供給し、利用するための計画が水資源計画である。ここでは水資源の開発・配分計画を取りあげ、狭義の管理としての実管理については次節で展開する。

わが国では水資源の大半は河川水に負うところが多く、しかも新規の水需要はそのほとんどを河川水に水源を求めているので、河川水を中心とした水資源システムを取りあげる。

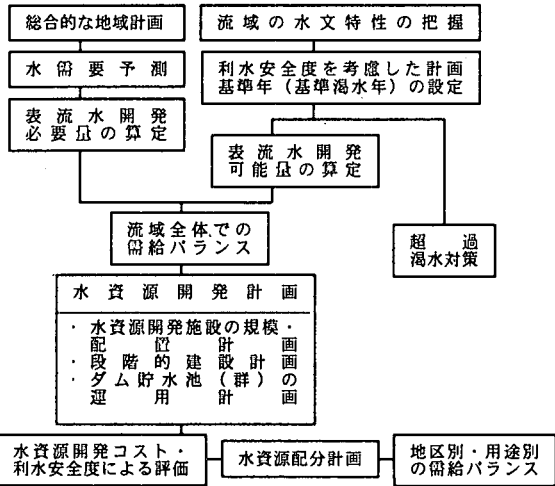


図-2 水資源システムの計画・管理策定プロセス

流域全体での水需給計画ができると、より具体的に水資源開発施設の規模・配置計画（ダム等の施設をいくつ、それぞれをどのくらいの規模で、どこに配置するか）、ダム貯水池群の運用計画、段階的施設建設計画等が策定され、これに基づいて再度安全度の評価や経済的評価を行う。さらに、排水の反復再利用、河川・湖沼・河口や海域の水質への影響を考慮した水資源配分計画をたて、地区別・用途別の需給バランスを図った後、水道事業者等による水供給計画へと受け継がれる。この間、量的バランスに加え、経済的バランスとしての便益費用分析、さらに水質へのインパクトを考慮した下水道、環境整備計画とも整合がとれた水資源開発・配分計画となるよう留意する。

4. 2 水需要予測

水需要予測では、通常、現時点までの種々のデータ、知識、経験などを駆使して将来時点での需要水量を推定している。すなわち、まず現時点までに収集・整備された統計データやアンケート調査データなどに基づいて、水需要構造における支配的な要因と、それらの間の関連関係を抽出し、水需要構造モデルを構成する。ついで、地域の社会・経済動向や将来計画を、人口、産業構造および水の使用形態などの基本フレームに変換し、これら外部要因の将来推計値を水需要構造モデルにインプットして推計操作している。

この際、予測の時・空間スケールによって分析方法が異なることがある。たとえば、需要者レベルでの分析に適したアンケート調査データに数量化理論を適用した分析、市町村などのレベルでの分析に適した統計データに多変量解析を適用した分析、時・空間スケールが広がり水需要構造が複雑、多岐な場合に適用される経済分析モデルやシステムダイナミックスモデル³⁾などである。

通常は原単位法がよく用いられる。原単位法は水需要量を基本フレームと原単位の積で表し、将来の基本フレームと原単位を予測することにより水需要量を予測しようとする方法である。

4. 3 開発水量の算定

わが国では明治以前にすでに洪水時においても利用可能な水量は農業水利によって専用され、利水者間の

長い相剋と調整の過程できわめて高度かつ合理的な水利秩序が形成されていた。長い歴史の上に培われた水利慣行が根強く定着しており、水利権調整においても慣行的な水利権を優先せざるを得ない背景がある。

こうした背景をふまえ新規開発水量を算定する際、現行の計画では正常流量を満たした上で新規開発水量を確保する施設計画で実施されている。すなわち、正常流量は維持流量に既得の水利流量、すなわち下流における流水の占用のために必要な流量を加えたものである。ここに維持流量は、河川のもつ正常な機能を維持するために必要な流量であり、舟運、漁業、景観、塩害の防止、河口閉塞の防止、河川管理施設の保護、地下水位の維持、動植物の保存、流水の清潔の保持等を総合的に考慮し、渇水時において維持できるよう定めるものであるが、その算定は容易でなく明確ではない。一方、既得の水利流量は許可水利権および慣行水利権をその実態を十分に調査し、目的、水量、取水期間等を明らかにして算定されなければならない。そして水資源開発施設の建設によって新たに河川から取水することが可能となる流量を新規開発水量といい、基準点で正常流量を確保した後に確保することになる。利水計画ではこれらをあわせて確保流量といっている。

4. 4 現行の利水計画

河川表流水の水資源開発は流量変動を吸収して平準化する貯留施設の建設を中心になされてきた。その代表がダム貯水池であり、図-3 に示すようにダムの建設によって流量が多い時期にダムに貯めた水量を

流量が少ない時期に自然の流量に上乗せして放流することにより、安定して取水できる水量を増加させることによって開発されてきた。

まず、計画基準点が選定される。すなわち、既往の水文資料とりわけ流量データが十分に得られ、しかも低水に関する計画に密接な関係のある地点が選定される。つぎに開発水量の算定は、この基準点で図-3 にあるように①+②の目標流量を確保するとしたときの貯留施設での水収支計算によって行われる。

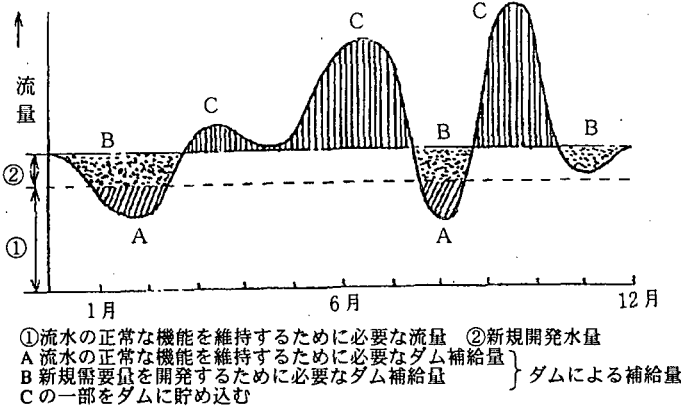


図-3 ダムによる水資源開発の概念

新たにダムを計画する場合、もっとも基本となる単一ダム、単一基準点の場合について具体的に計算手法を述べると以下になる。なお、計算は、通常半旬（5 日）単位で行われる。いま、ダム流入量； Q_1 、基準点流量； Q_2 、確保流量； Q_k 、必要容量； V （ただし初期値 = 0.0 msd ($\text{m}^3/\text{s}/\text{day}$)）とすると、

基準点不足流量 $Q_3 = Q_k - Q_2 \geq 0.0$

基準点余剰流量 $Q_4 = Q_2 - Q_k \geq 0.0$

ダム必要補給量 $Q_5 = Q_3$

ダム貯留可能量 $Q_6 = Q_4$ と Q_1 のどちらか小さい方（なぜなら、貯留可能な流量は、基準点の余剰流量に制約されるとともに、ダム流入量の範囲内という制約をうけるからである。）

として ダム必要容量 $V = VB + (Q_5 - Q_6) \times N \geq 0$

ここに、 VB は前半旬の必要容量、 N は半旬の日数、必要容量の単位は msd であり、これに 86,400 秒をかけると「 m^3 」単位となる。

以上の水収支計算式に従って計算を実施し、計算対象期間が 10 ヶ年であれば第 1 位の必要容量を、20 ヶ年であれば第 2 位の必要容量をもってダム容量（利水容量）を決定する。なお、既設ダム（あるいは既設計画ダム）に新規ダムを計画する場合、そのダム容量の決定はいくぶん複雑になるが、基本的にはその算定手

順に大きな差はない。

4. 5 数理計画問題としてのモデル構成とその最適化手法

一般に、最適化問題は次式のように目的関数および制約条件から構成されている。

$$\text{目的関数：} \quad \max_x f(x) \quad (1)$$

$$\text{制約条件：} \quad g_i(x) = b_i, i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

ここに $x^T = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ は決定変数ベクトルである。最適化問題の解、いわゆる最適解 (optimal solution) を見出す方法を最適化手法とよんでいる。

こうした最適化手法は、大きくはモデル構成が線形か非線形か、確定的 (決定論的) か確率論的か、静的か動的か、集中型パラメーター系か分布型パラメータ系か、に分類されるが問題によってはこれらの組み合わせで展開されるので、それに応じた適当な最適化手法を選択することになる。たとえば、空間的な配置計画、すなわち施設の位置、規模・位置あるいは施設の種類・規模・位置を決める問題には線形計画法 (LP; Linear Programming) がかなり有効であり、やや複雑な場合にあっては非線形関数の線形近似で定式化し、混合整数計画法で解くことができる場合が多い。さらに決定変数として時期が加わる施設の拡張や段階計画になると、規模の経済性その他非線形効果が大きくなり、LP は無力となり、この場合には動的計画法 (DP; Dynamic Programming) などが適用されることが多い。以下では水資源開発・配分計画のいくつかのモデル構成と最適化手法の選択さらにはその適用例を示すにとどめる。

(1) 複数ダム・取水施設の規模・配置計画

一般に、ダムサイト候補地がいくつか与えられた場合、基本的に以下の2つの条件が課せられるため、これらを考慮した代替案の抽出が必要となる。

①ダムの開発水量が、当該ダムの貯水池容量のみならず他のダム (とりわけ上流部) の貯水池容量の大小に影響をうける。

②ダム建設は大規模土木工事であり、規模の経済性が作用する。また、小規模ダムの建設は、技術的経済的に不利であり見送られるため、つくるとすれば最低の規模というものが与えられる。

以上のことは、本質的にはダムをつくる・つくらないという状態により、そのダムの建設に関する条件が大きく異なることを意味する。従って、このつくるとつくらないの決定は、ダム建設問題において重要な位置を占め、一種の組み合わせ問題を形成する。

この問題に関して、目標最終年度における需要を充足し、経済的に有利な利水施設の組合せパターン選択のための数理計画モデルが定式化されている。この際、対象とする利水施設はダムと取水施設であるものとし、 M 個のダムサイト、 N 個の取水施設を通し、 L 個の需要地への水供給を行う場合を想定している。すると、この問題は各施設をつくる・つくらないの判断を表す 0-1 整数変数を含めた混合整数計画問題として定式化できる。その具体的内容は文献⁶⁾を参照されたい。

(2) ダム貯水池群による水量制御

ダム貯水池群 (ダム数 N) による水量制御系においては、決定変数にあたるものは各ダムの放流流量 $O_k(t)$ ($k=1, 2, \dots, N; t=1, 2, \dots, T$)、状態変数にあたるものは各ダムの貯水量 $S_k(t)$ ($k=1, 2, \dots, N; t=1, 2, \dots, T$)、合成変数に相当するものはダム下流の沿川に設けられた評価地点 i を通過する流量 $Q_i(t)$ ($i=1, 2, \dots, m; t=1, 2, \dots, T$)、外乱に相当するのは各ダムへの流入流量 $I_k(t)$ ($k=1, 2, \dots, N; t=1, 2, \dots, T$) およびダム残流域流量 $q_j(t)$ ($j=1, 2, \dots, n; t=1, 2, \dots, T$) である。したがって、系の性状を表現する方程式は各ダムにおいて成立する連続式

$$S_k(t+1) = S_k(t) + I_k(t) - O_k(t) \quad (3)$$

であり、拘束条件として各時点における放流能力の制限、

$$O_k(t+1) \leq g_k(S_k(t) + I_k(t)) \quad (4)$$

が考えられる。

ここに、 g_k はダム k に固有のもので貯水量の関数である。このとき、各ダムの初期貯水量（あるいは最終貯水量）を $S_k(0) = C_{0k}$ （あるいは $S_k(T+1) = C_{Tk}$ ）
として、目的関数

$$J = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^m D_i(Q_i(t)) \quad (6)$$

を最大とする各ダムの放流量系列 $\{O_k(t)\}$ を決定するのが、ダム貯水池群による最適水量制御の問題となる。ここに、 D_i は評価地点 i ($i=1, 2, \dots, m$) に付与する評価関数である。

$$Q_i(t) = \sum_{(k)_i} O_k(t) + \sum_{(j)_i} q_j(t) \quad (7)$$

いま、この問題を DP 後進型計算法で展開すると、任意の期間 t から最終期間 T までの最適放流量系列 $\{Q_k(t)\}$ ($t=t, t+1, \dots, T; k=1, 2, \dots, N$) による目的関数の最大値（これは期間 t の期首の各ダムの貯水量 $S_k(t)$ ($k=1, 2, \dots, N$) の関数である）を $f_t(S_1, S_2, \dots, S_N)$ としたとき、(6) 式の構造と最適性の原理により、つぎの関数漸化式が成立する。

$$f_t(S_1, S_2, \dots, S_N) = \max_{\substack{0 \leq S_k \leq V_k \\ (k=1, 2, \dots, N)}} \left\{ \sum_{i=1}^m D_i(Q_i(t)) + f_{t+1}(S_1, S_2, \dots, S_N) \right\} \quad (8)$$

ここに、 V_k はダム k の有効貯水量、は期間 $t+1$ の期首の各ダムの貯水量 $S_k(t+1)$ ($k=1, 2, \dots, N$) の関数であるから、(3) 式を考慮して上式を詳しく書けば次のようになる。

$$f_t(S_1, S_2, \dots, S_N) = \max_{\substack{0 \leq S_k \leq V_k \\ (k=1, 2, \dots, N)}} \left\{ \sum_{i=1}^m D_i \left(\sum_{(k)_i} O_k(t) + \sum_{(j)_i} q_j(t) \right) + f_{t+1}(S_1(t)+I_1(t)-O_1(t), S_2(t)+I_2(t)-O_2(t), \dots, S_N(t)+I_N(t)-O_N(t)) \right\} \quad (9)$$

この漸化式を解く手がかりとして、制御最終段階の決定 $O_k(T)$ ($k=1, 2, \dots, N$) による目的関数値 $f_T(S_1, S_2, \dots, S_N)$ が必要であり、それは (6) 式と (3)、(5) 式を考慮することによって次のようになる。

$$f_T(S_1, S_2, \dots, S_N) = \sum_{i=1}^m D_i(Q_i(T)) = \sum_{i=1}^m D_i \left(\sum_{(k)_i} (S_k(T) + I_k(T) - C_{Tk}) + \sum_{(j)_i} q_j(T) \right) \quad (10)$$

以上に示した (9) および (10) 式がダム貯水池群による最適水量制御の DP による定式化であり、これを解く、すなわち最適放流量系列 $\{O_k(t)\}$ ($t=1, 2, \dots, T; k=1, 2, \dots, N$) を求めるためには、ダム流域およびダム残流域のハイドログラフ $\{I_k(t)\}$ ($t=1, 2, \dots, T; k=1, 2, \dots, N$) および $\{q_j(t)\}$ ($t=1, 2, \dots, T; j=1, 2, \dots, n$) を与えるとともに、全期間における制御最終値、ここでは制御期間の初期貯水量状態を $(S_1(1), S_2(1), \dots, S_M(1)) = (S_1(1)^0, S_2(1)^0, \dots, S_M(1)^0)$ と与えれば、 $f_t(S_1(1)^0, S_2(1)^0, \dots, S_N(1)^0)$ が求める最適制御解となる。

こうした DP による水量制御はダム貯水池容量と評価関数とを与件として多くの流入量系列に適用すると、それぞれの流入量系列に対応する最適放流量が算出される。このことは、それぞれをサンプルとみて最適放流量系列と貯水量系列および流入量系列との間で、相関構造分析や確率分布構造分析を展開すれば、一つの最適な計画上の放流量方式を見出すことができる。逆に、ダム貯水池容量を可変にして計算をすれば、ダム制御からみたダム容量の最適設計にも結びつけられる。

なお、評価関数の設定や、計算例と次元の節減化など詳細な内容は文献⁷⁾を参照されたい。

(3) 時間選好を考慮した水資源開発施設の建設時期・順序計画

広域利水問題は、時間選好を考慮した動的モデルであり、シーケンシャル段階のモデル構成およびその解放には 0-1 全整数計画、混合整数計画および DP が多用されている。

時間に沿って総費用の現在価値を最小にするように水源開発、導水路建設を行っていく問題は、外乱としての各水系の需要量に対して系の状態を変化させる決定の選択が多段にわたって行われる過程、つまり多段決定過程と考えると、DPによるモデル化が可能である。

(4) ダム貯水池による水量・水質制御

ダム貯水池の運用ルールの設定は従来、下流評価地点の流況調整に重点を置いておけばよかったが、異常出水後の濁質問題はダム貯留により長期化し、下流の農業、漁業などに被害をもたらす、時には貯水池の水温成層化が自然状態の水温をもたらさず被害を発生することもあり、こうした水質制御も必要としている。多目的問題として構成する必要性の高まりである。

多目的問題の最適化手法として多目的計画法があるが、その計算方法についても多くの方法が提案されている。いずれにしても多目的最適化問題はベクトル最適化問題であり（これに対して従来の単一目的に対する問題はスカラー最適化問題といえよう）、その不完全な順序づけ（ordering）に対して何らかの価値判断を導入し、完全な順序づけをはかることが必要である。ダム貯水池による水量、濁質の2目的制御問題に制約法（Constraint method）を適用した例⁸⁾がある。

(5) 多層最適化手法と河川水・地下水連結運用モデル

多層最適化手法（multi-level optimization technique）にもいくつかの方法があるが、目標調整法（Goal coordination method）を用いて、ダムー表流水システムと単一セルの地下水システムより成る代表的な流域水資源システムを考え、最適運用モデルを構成し、それを解いた例がある⁹⁾。

(6) 確率的最適化手法

以上展開してきた数理計画モデルの構成とその最適化手法は、いずれも何らかの意味で目的関数、制約条件はもとより、それらを構成する入力、主として水文時系列に観測値あるいはその平均値という既知の確定値を設定したものである。シミュレーションを介した場合も、発生させた多数の水文時系列は結果的には確定値としての扱いになる。

一方、水文現象の確率分布あるいは確率過程を直接導入した形での最適化手法がある。ただ、この場合においては適用は多変数分布やその確率過程を扱うまでには至っておらず、かなり単純化されたものに限られる。その制限があるものの確率的最適化手法（Stochastic optimization technique）として確率LP、確率DPがあること、最適化問題の制約条件式（2）の右辺の値 b_i がランダムである場合には確率的制約法（Chance constraint method）の適用¹⁰⁾があることをふれておく。

5. 渇水と利水安全度

われわれは自然的であれ、何らかに人工的操作が入ったものであれ、これら変動するインプットを、社会が要求するそれぞれの水準あるいはアウトプットを満たすように何らかの変換システムを構成しているわけである。ところが往々にして、これらインプットは大なり小なり不確定性に見舞われており、時には要求を満たすことができない。ここに、利水安全度の概念が存在する。

ところでこの利水安全度の問題は河川水の開発にあっては前節 4.4 で見たように、資料期間の長短はあるものの、渇水の頻度として 1/10（回/年）を一応の利水安全度ととらえ開発水量ならびに貯水池容量を設定する形で描かれていたが、昨今は水利用・開発形態の高度化・複雑化ともあいまってますます広汎、多岐かつ重要な概念になってきている。この利水安全度の問題は渇水状態をどのように定義し、それをどのように確率評価するか、という問題に帰着するところが大きい。

5. 1 渇水とは

水が恒常的に足りない状態を水不足というのに対して、渇水は水需給が一時的にアンバランスする状態をいっているようである。

渇水は供給が需要を下回る出来事であり、そのアンバランスが大きく、長く続けば続くほど事態が深刻になる性質をもつ。近代の都市の営みは確実に水需要を増大させるとともに、自然、とりわけ水循環のリズムと必ずしもマッチしない宿命をもって発展してきた。このことがますますそのズレを大きくしてきた。需給ピークのズレと需要の増大に対処するため人工のダムが不可欠となってきた。その結果、戦後、数多くのダムが造られ寸刻も休まず使われ今日にいたっていることはすでにみてきたところである。

5. 2 多発する渇水

48 年高松渇水、53 年福岡渇水、56 年沖縄渇水、59 年秋冬渇水、平成 6～7 年渇水と、近年各地で渇水が頻発している。昭和 39 年東京オリンピック渇水ではじめて新聞紙上に渇水という言葉が登場したが、昭和 53 年の福岡渇水では 287 日もの給水制限期間に加え、最大制限時には 1 日のうち 19 時間も断水するという事態となり、国民生活および経済社会活動に多大な影響を与えた。また、昭和 59 年秋冬渇水は都市用水中心の水利用形態の変化に対して年間を通じて渇水発生の危険性を警告する本格的な冬渇水の到来であった。さらに、昭和 61 年にも同様に秋冬渇水が中部地方以西の木曽川、淀川水系等で起こり、取水制限・給水制限をせざるをえなかった。そして平成 6 年は春先からの全国的な異常高温・少雨により、中部、四国地方から渇水に見舞われ、その後、関東、東海、中国、九州等を中心に厳しい渇水状況になり、また、関西にあって琵琶湖水位が 9 月 15 日マイナス 123 cm と史上最低を記録し、京阪神 1,400 万人にとって厳しい渇水が予想されるまでに至った。その後、低気圧や台風の通過によりほとんどの地域で制限が解除されたが、九州の一部や近畿の一部では給水制限が越年した。その意味で平成 6～7 年渇水は平成の大渇水、列島大渇水とよばれるゆえんである。

いずれにしても渇水は洪水などと違って時間的に長期にわたる積分型の被害形態をもち、その期間が長くなればなるほど心理的にも社会経済的にも厳しさを増す性質をもつと同時に、その被害の計量化がむずかしい、いやらしい災害といえよう。

5. 3 渇水をもたらす諸原因

もちろん、こうした渇水的主要原因として、まず少雨化と降水変動の大きさとといった気象条件があげられるが、人口の都市集中およびそれに伴う業務・サービス活動の拡大等により増大した都市用水の需要増、その需要を水源手当ての遅れを待てず、渇水時には取水できない不安定取水に依存するといった、本質的に渇水の影響を受け易い水利構造を惹起してきたことにも原因がある。また、利水計画における資料期間のとり方による基準流況の設定問題や、実管理にあつての気象・水文予測の不確かさもある。

5. 4 利水安全度とその指標

利水安全度の問題は渇水あるいは渇水状態をどのように定義し、それをどのように確率評価するかという問題に帰着するところが大きいことはすでに述べたが、利水安全度もいくつかの段階あるいは階層で描かれることになる。すなわち、水源段階での個々の水源に不足水量が生じる段階があるし、供給段階でも取水段階、いわゆる供給施設の取水不足量が生じる段階から、給配水段階いわゆる利用者への給水不足量が生じる段階であり、さらに利用者段階では利用者への渇水被害が生じる段階、それぞれについて利水安全度が考えられる。それぞれは自然的であれ、人為的であれ変動するインプットに何をとり、確保水準との不足をどうとらえるかの違いでもある。

渇水の強度特性として平均不足量（不足総量／不足期間）、不足総量、不足期間が考えられる。また、その空間的広がりを見ると不足地域が、さらに対象期間を広げると、その生起頻度がでてくる。さらに、これらどちらかという物理的な水量特性としての指標にとどまらず、水質指標も加え、それらの不足がもたらす社会・経済的さらには心理的特性としての影響あるいは被害にまで換算する方向での指標も考えられる。

わが国では先にも見てきたように、現行の利水計画の策定基準の中で、貯水池必要量の 10 年間最大値をとる方式がとられる。この非超過確率 1/10 を固定することについては資料期間のとり方や河川水利用水準の上昇に伴い問題があることはすでに指摘しているところであるが、行政慣習上、その変更は水利秩序を遵守する意味から容易でないところがある。

渇水の頻度の他に、しばしば用いられる不足%・day は不足総量に相当するもので、渇水の大きさあるいは規模を代弁するものであるが、その対象レベルで取水制限%・day、給水制限%・day が考えられる。社会・経済的影響の大きさ、厳しさ、深刻さをより反映するものとして渇水被害関数や渇水被害額などが用いられる。物理被害額だけでなく、心理的損失をも含めた被害額の計量化に向けて、WP (Willingness to Pay : 支払意志額) 法による被害の計測や、渇水時の家計の水消費行動のモデル¹¹⁾などの試みがなされている。

5. 5 利水システムの安全度評価

単一のダム貯水池とその下流にある単一の取水地点を対象とした系についての利水安全度に加えて、流域にはいまやダム貯水池を含め堰、浄水場、灌漑施設、下水道、終末処理場など多くの利水関連施設が張り巡らされてきており、多くの取水・排水地点で水量、水質両者を含めた評価とその安全度評価が必要になってきている。すなわち、各コンポーネントを対象とするだけでなく、利水システムとしての対応が重要になってきている。このことは、利水安全度に影響を及ぼす要因として重視されている利用排水の河川への還元水、ダム貯水池相互の有機機運用、複数水源の存在、残流域流量などの効果を分析するのに重要であることはもちろん、従来ややもすれば確保あるいは需要サイドの確保流量が灌漑期、非灌漑期の違いは導入しているものの、ほとんど一定の確定量としての扱いに終始しがちであるが、今後はこの需要サイドの不確定性も自然流量の不確定さとあわせ安全度評価に重要になってこよう。

こうした立場から、利水システムという水系一貫した、少なくとも水量、水質両者を考慮した安全度評価を展開した研究がある。たとえば、橋本らの提示した信頼性理論にもとづく安全度概念、reliability, resiliency, vulnerability をそれぞれ信頼度、回復度、深刻度と再定義し、空間的に複雑な利水システムをその取・排水構造から

- 1) 量や質の変化をもたらす利水用施設（その背後に水需要者がある）
- 2) 水質の浄化を行う水処理施設
- 3) 取水・放流を行う分岐・合流施設
- 4) 河川表流水の流れを変えるダム貯水池・導水路

といったパートから構成されており、実際にはそれらが多数組み合わせられているとの認識に立った展開である。詳細は文献¹²⁾にゆだねるが、いったん最上流地点の水量レベルに対する各評価地点の水量レベルの条件付確率マトリックス（水量マトリックス）と、同じく、最上流地点の水量レベルに対する各評価地点の水質レベルの条件付確率マトリックス（水質マトリックス）が、ある利水ルール上でのシステムの特性値として得られると、最上流地点の水量レベルの生起確率と最上流地点の水量レベルの確率的時間従属性を与えることにより、各評価地点の水量・水質に関する信頼度・回復度・深刻度の安全度評価が可能となる。上流に並列2ダムからなる貯水池システムを包含する利水システムへの拡張もなされている。

したがって、これら算定プロセスにでてくる多くの変換マトリックスや確率マトリックスにはじめに述べた利水安全度に影響を及ぼすいくつかの要因を組み込むことによって、それらの効果を表現することができるし、また、たとえば安全度評価をベースとした利水システム策定目標を「規定の安全度の範囲内という制約条件のもとで、システムの構成・運用費用を最小にすること」として一つの最適化問題が構成される。

6. 水資源システムの運用管理

6. 1 ダム貯水池操作

水需給の時間的・空間的アンバランスに対応すべく水資源開発・配分施設の規模、配置等が計画され新規に建設されると、既施設群を含めてそれら施設の運用管理、とりわけ操作ルールの設定が重要となる。新たな施設の建設適地が少なくなっていることを含め、厳しい環境下にあっては施設群の効率的な運用管理が益々重要になってくる。

なかでもダム貯水池による流量調節は、水資源の開発と有効利用のための種々の方策の中でもその効果が大きい。流量調整に関する効果は貯水池規模や配置等の関数である建設コストと、水資源開発・利用による便益・効用との関係で決まるところが大きく、この関係にはダム貯水池操作がかかわってくる。このことは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割も担っており、システム設計要素の一つである計画操作ルールの策定である。

こうした計画上の目標を達成すべく操作運用するわけであるが、実際上は計画どおりの流況であるはずがなく、種々の流況、しかも不確かな将来流況を予測しながらの操作運用が実管理そのものとなる。

これらのことを考え、以下ではまず現行の操作ルールの設定方法を取りあげ説明するとともに、理論的枠組みでの計画操作ルールの設定として最適化手法の導入法および最近、実用レベルへの接近を意図して展開されつつある AI（人工知能）技術を駆使した実時間操作方法について述べる。

ところで、ダム操作を現象の流れの中で位置づけるとインプットである流入量をダム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「変換する制御システム」といえる。なお、河川水の高度利用という点では洪水を水資源としてとらえ、洪水調節と低水管理を一貫としたダム貯水池操作問題も重要であるが、ここでは主として低水流量を対象とした低水管理に問題を絞っている。

6. 2 現行の低水管理と取水制限ルールの設定

最も効果的な操作は、水系によって異なるが、多くの場合、ダム貯水池容量を最大限に活用し、無効放流を最小限にして安定的に用水補給するとともに、渇水時には予めその規模を確実に予測して適正な用水補給（取水制限）を行い、渇水の被害を最小限に止めることである。このような最適操作は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われ得るならば操作ルールを固定せずに、その都度最適な統合操作も可能であろう。

実際はそうではない。そこで現行では過去の流量時系列という確定値を用いた利水計算を時系列的に逆向きに展開する逆マスカーブを適用する方法や、最適化手法の適用、さらには貯水池運用シミュレーション計算の実行とその結果から最適化をはかる方法など、いくつかの方法がとられている。

ところで最適操作の一つの評価として、無効放流をいかに少なくするかがある。貯水池の運用において無効放流を少なくする方法としてダム配置からいえることは、

- 1) 直列ダムでは下流側から優先的に使用する、
- 2) 並列ダムでは貯水効率のよいダム（貯水容量に比べて流域面積および降水量の大きいダム）から

優先的に使用する。また、基準地点に近いダムを微調整に使用する、がある。

実際には、これらダム群が混在しており、また、ダムの規模、内容等も多様であるので、この運用は単純ではないが、渇水時の流量制限方式との組合せで実用化の程度があがる。いずれにしても渇水時の流量制限方式あるいは節水ルールを考える場合、渇水の程度、渇水被害の程度を考慮する必要があるが、実際上は供給サイドにあっては渇水の程度を渇水コントロールが比較的容易であり、かつ判りやすい指標として描ける貯水池水位あるいは容量を介して評価するのが適当である。

こうした事情から、通常、平常時においては計画上の確保流量を満足するような操作を行っているが、低水管理にあってはダム貯水池による渇水調整が取水制限ルールあるいは節水ルールの作成として以下の方

な手順で検討されている。すなわち、利水計算については現行の利水計画における利水容量設定のところですでに述べたが、ここではこの方法を時系列的に逆向きの形で展開する逆マスカーブによる確保容量曲線の作成という形になる。これはダムからの放流量マイナスダムへの流入量を時点をさかのぼって累加するもので、累加値が負になった時点で累加値を 0 におきかえて累加していき、ダムが枯渇しないために前もって貯留しておかなくてはならない各時点の貯水量を示すもので、既往の各年の実績流量データをもとに、おのこの 1 本の確保容量曲線が求められる。これを別途、各時点ごとに各年の確保容量を順序統計的に並べかえ、同じ確率値をもつ点を一年にわたって結べば一定の確率をもった確保容量曲線が得られるというものである。

逆マスカーブ法をベースにした確率確保容量曲線による節水ルール策定法は、単一ダム単一基準地点の場合はその基礎となる利水計算そのものが単純であるが、複数ダム複数基準地点の場合や多目的ダムの場合などにはどうであろうか。利水計算が複雑になるとともに、ダム間の配分ルール、いわゆるスペースルールの採用などが入ってくるが、基本的にはその算定手順に大きな差はないと思われる。

こうした統合管理にあっての実操作は流況に再現性がなく管理上、将来の流況を予測できないことから低水管理上、永遠の課題ともいえるが、補給時は各施設の貯水量比率で必要補給量を配分し、貯留時は空容量比率で貯留可能量を配分、というルールを基本としながらも、現状では将来の流況として無降雨状態や過去の渇水時の降雨をもとにした流況シミュレーションを実施し、それに節水運用シミュレーションをした結果などを支援情報として総合的に判断するということになる。

これらのルールはいずれも過去の流量時系列やシナリオ時系列を用いて、ダム容量がどのようになるかといった指標をベースに定められていることがほとんどであり、渇水被害の状況がどうか（取水制限率で代弁している）、今後の降雨状況はどうか、取水者の調整はどうか、といった複雑な情報について加味されたルールではない。ルール自体の変更、改善、改良には利水者間の調整、上下流問題等も加わってくるので利水者、河川管理者、ダム管理者があらかじめ協議し、渇水調整会議等でのソフト的な調整をふまえルール化を図っていく必要がある。

6. 3 ダム貯水池操作への最適化手法の適用

(1) 計画操作

モデル構成にあってはシステムの拡がりと呼応して多ダム・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、多層最適化手法を適用したり、空間配分には LP、時間配分には DP を用いる DCL (DP coupled with LP) の開発が、多目的制御への拡張にはベクトル最適化手法の適用などが検討されている。

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。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従うと仮定して不確実性を陽に扱った確率 DP さらに、状態量の確率的な制約をも扱った確率制約 DP (Chance Constraint DP) 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。

(2) 実時間操作

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と、各時点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とである。

このようにダム操作問題への最適化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

で、実際のダム操作にあっては、平常時は基準地点確保流量あるいは期待管理水位との比較による放流、貯留操作で対応できるが、渇水時にあっては渇水調整会議等での協議をふまえ、あらかじめ設定しておいた取水制限ルールや貯水池残量にもとづく取水制限・給水制限操作を行っている。そこには流況予測の程度や流況実態の把握精度、さらには利水者間の補給量配分の調整合意など総合的判断を要する内容があり、実管理にあっては数量化、モデル化できない、あるいはルール化にまでいたらない状況があることも事実である。

研究者レベルにあっては、最適化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の、理論的アプローチが理解しにくい、操作の容易性に欠けるといふ。最適化手法が実態に整合するよう、また使いやすいように、理解しやすいように翻訳するなどして、あくまで意志決定のための科学的根拠のある支援情報として高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働姿勢が生み出される。

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志決定の技術を知識ベースとして整理するとともに、雨量や流量、取水量などの情報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ンシステムの構築が両者の共同研究のもとではじまっている。意志決定あるいは判断プロセスにあっては、あるあいまい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推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る操作量を求める手法に近い形をしているからである。一例としてダムの実態管理と整合を図るべく低水時におけるダム補給量の決定にファジィ推論を適用した研究がある¹³⁾。

6. 4 低水時のダム補給量決定へのファジィ推論の適用

そこでは図4に示す低水管理フローに従って対象河川のダム補給量は、基準地点の確保目標量と流水到達時間後の流量との不足分をダムから補給するものであり、現在のダム放流量を増加・減少させて補給することとしている。基準地点の予測流量は、ダムからの流水到達時間が30時間程度であるため、上流地点の流量や気温、天気、支川からの流出量等を勘案して、担当者の経験に基づいた流量の推定が行われている。また、ダム補給量決定は、貯水池への流入量と貯水池の空容量の比率（以下、空容量化）が一定になることを基本に、日々の流水状況や長期間の降水量傾向、貯水量の実態等を勘案して決定している。このように、管理者は流域の情報を経験等で得たルールに基づいて空間的、時間的な状況を把握した上でダム放流量を意志決定している。専門家の意志決定過程を表現するためには、明確に定義できない名指標をそれぞれグレード

化し、グレード値の値により判断しているものと推測している。詳しくは文献を参照されたい。

ダム貯水池の実時間操作においてはファジィ推論にとどまらず、ニューラルネット駆動型ファジィ推論の適用もなされている。このニューラルネットワーク駆動型ファジィ推論はニューラルネットワークを用いて推論結果が最適になるように推論過程を微調整する自動チューニングを行う推論法で、ニューラルネットワークの学習機能、非線形を用いてメンバーシップ関数を決定し、ファジィ推論ルールを構築するというもので、琵琶湖を含む淀川水系への適用も試みられている。

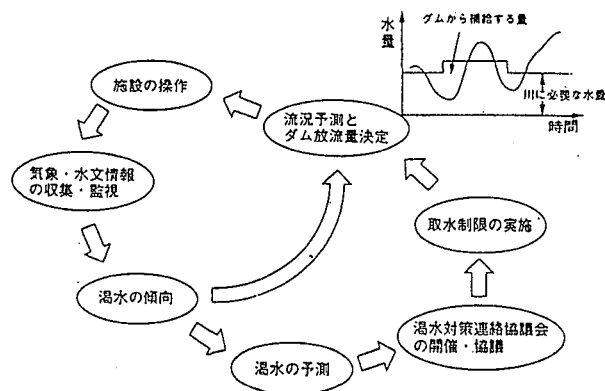


図4 ダム管理者の対応とダム放流量決定までの流れ

ファジィ概念がわが国の中庸精神を尊ぶ風土環境にあることや、ファジィ推論が大きな間違いをおかさない非線形な判断推論に結びつくことから、これらアプローチが今後とも実務者レベルとの連携により実用レベルに高揚することを期待したい。と同時に、現行ルール以上に最適なルールがあるとすれば、それに向けて最適化手法の枠組み拡大やその試行実験、さらには関係者間での合意形成にもエネルギーを傾注したい。わが国における低水管理は、高度化した水利用に伴い、いかに効率的に用水補給を行うかが求められており、そのためのダム操作には最新のソフト技術と設備の導入がはかられ、利水者間の調整とあわせきめ細かな水管理に答えていかなければならないからである。

7. 新たな水資源環境と対応

最近、発表された新しい全国総合水資源計画（ウォータープラン 21）¹⁴⁾ では、持続的水利用システムの構築に向けた施策の展開をはかるべく、水利用の安定性の評価とその確保の見直しを目標年次平成 22 年～27 年、全国及び 14 ブロック単位で検討している。それによれば、都市用水の取水量ベースでみれば先行開発水量を供給量に含めた場合、「通常の年」（昭和 31 年から昭和 50 年までの 20 年間で 2 番目の少雨の年を想定）においては、関東臨海等一部のブロックでは、安定的な供給可能性が需要量を下回り、不安定な供給に依存することになるものの、全国計では安定的な供給可能性が需要量をおおむね上回るが、「水不足の年」

（昭和 51 年から平成 7 年までの 20 年間で 2 番目の少雨に相当）、「戦後最大級渇水の年」では安定的な供給可能性が需要量を下回り、不安定な供給に依存するブロックが多くなると見ている。加えて、ウォータープラン 21 では全国を 14 ブロックに分割し、マクロでの推計を行ったもので、各ブロックごとの大筋での傾向や方向性を示したものであり、水の有する時間的及び地域的偏在の大きさを考えると、今後、各地域がその特性や実状等を踏まえた上で、達成すべき目標を設定し、個別に詳細な計画を検討することが特に重要であるとの指摘もある。

さらに水資源を取り巻く状況が地球環境時代を迎え、地球規模にあっても人口の増加予測とともに水の有限性や開発適地の減少、水質悪化等の環境問題が顕在化していることが特徴になってきている。わが国にあっても依然として生活用水などの需要は漸増傾向にあるものの、経済成長の鈍化や工業用水の回収率の向上、耕地面積の減少、人口増加率の低下等により、かつてのような水需要の急激な伸びはみられなくなってきている。とはいえ、平成 6 年の列島渇水に見られるように全国規模で極端な少雨による異常渇水で発生したり、少雨の年と多雨の年との年降水量の差が大きくなるなど変動要因が大きくなった分安定供給を目指して開発されてきた水資源開発施設が本来の機能を発揮できない事態も招いてきている。

量的な水需給バランスがマクロ的にはおおむね達成されつつあるとはいえ、利水安全度の向上は依然として大きなテーマである。しかも水需給バランスの早期達成を目標とする全国計画ではいいえても、個別水系単位に目を向けると、水需給アンバランスは依然としてある。

7. 1 渇水発生と利水安全度の再評価

わが国では、水資源開発施設の多くが、利水基準年（原則として 10 年に 1 度程度発生する渇水年）における流況を前提に計画されているため、少雨により利水基準年の流況を下回るような年においては、水資源開発施設の計画上の供給能力を発揮することができなくなる。この利水基準年は建設省所管の直轄管理ダム及び水資源開発公団の管理ダムでみると、その多くが昭和 31 年から昭和 50 年までのいずれかの年として設定されており、昭和 51 年以降は全体のわずか 2%である。より具体的に利水安全度を把握するために水系あるいは流域ごとに河川流況をもとに利水基準点における確保流量に対する貯水池よりの補給運用を試行した結果がある。そこでは水需要として平成 4 年から 6 年度の都市用水の実績取水量または水利権量の値を用い、最近の少雨傾向のデータを追加して、これまでに建設されたダム等の水資源開発施設が実質どれだけの安定供給能力を有しているかを示したものである。ほとんどの水系で利水安全度が 10 年に 1 度発生する規

模の渇水に十分に対応できていない。

このように多くの水資源開発施設の利水基準年等が設定されている昭和 50 年以前と比較し、昭和 50 年以降の 20 ヶ年では少雨の発生やそれに伴う河川流量の減少等のため、概ね 10 年に 1 回程度発生する渇水以上の渇水が頻発しており、当時の利水基準年で設定したダム容量では不足するため利水安全度が低下している。

7. 2 利水安全度向上策

(1) 通常の水資源開発

各水系とも都市用水については現在実施中のダムで水需給バランスがほぼ達成されとの見通しであるが、昭和 31 年から 50 年までの 20 年間で 2 番目の少雨の年を通常年と想定しての見通しであり、昭和 51 年から平成 7 年までの 20 年間で 2 番目の少雨の年「水不足の年」が今後はもっぱら通常年ともなりうるわけで、そうなるとむしろ安全度を高めるための方策としてまだまだ貯水容量アップをはかる水資源開発が必要である。水系ごとに需要の詳細積み上げを検討し、長期的水需給計画を見直すことが必要であるが利水安全度の向上をはかる以上、新規水資源開発施設等の導入場面がでてこよう。少なくともスポット的な需要や新規不特定容量の確保などに対応する新規水資源開発がでてくる。

また、先に述べた先行開発水量は利用のための施設が整備されていない場合など、現状の供給量として見込めない場合もあるが、渇水時等において利用可能な場合があり、例えば「水不足の年」等であっても、実際には、先行開発のための貯水容量等を活用することにより、水利用の安定性を高める効果を有する場合があるので利用のための施設整備や後述の用途間の水利権転用等を図りたい。

(2) 水資源開発以外の施策の展開

1) ダム群統合運用による既施設の有効活用

現在、利根川・荒川水系において、河川管理者と個別ダムにおいて協定を結び、利根川ダム統合管理事務所の指示に基づきダム統合管理が実施されている。また、琵琶湖・淀川水系においても、利水計画ルールによる運用と統合操作による運用計算を比較するとおおむね利水安全度が向上する結果を得ている。

2) ダム群のネットワーク化

ダム群の連携事業は隣接する既設ダム群を連絡水路で連結し、無効放流を他のダムに貯留することにより既設ダム容量の有効利用を行うものである。とくに貯水池の回復が早いダムから回復の遅いダムへ無効放流分を導水することによって、回復の遅いダムの回転効率を高めることによって利水安全度の向上に資するとともに、流域全体として無効流量を少なくすることによって水資源の有効利用がはかれる。また、回転率が向上することによって、ダム湖内の水循環がよくなることによる水質浄化機能も期待されよう。今後、ダム群の高低差等をふまえ、ダム間導水のメリットを活かしたい。

3) 用途間の水利権の転用

用途間の水利権の転用は、これまでも地域の実状に応じ、需要量の増加に対して安定的な供給可能量を確保する手段として、関係者相互の理解と合意のもと実施されてきている。用途間の水利権転用は、新規水資源開発施設をともしない水需給調整策であり、安定的な供給可能量を生み出すことから、転用要望も大きく出てくる。もちろん用途間の水利権の転用にあつては、用途によって期別の取水量パターンと需要パターンに変化がでてきたり、かい離する場合があるので期別の需要パターン等の水利用の実態や、水利権の転用による水循環系への影響を把握するとともに、転用元、転用先間の合意形成の円滑化、迅速化を進めるための関連法の整備や転用ルールの検討が一層望まれる。

7. 3 多様な水源確保と高度化事業

流況の平滑化により利用可能水量を増加させるのが水資源確保標準手段であるが、地域によっては水源特性により、また都市域の水需給の逼迫に応じて、それ以外の種々の方法の導入により合理化・高度化が図ら

れており、今後の総合利水に向けての水資源開発の高度化事業として以下にいくつか項目だけをとりあげておく。ただ、いずれの方法も現時点の開発水量あたりのコストは割高になっている。

(1) 水資源開発の高度化

1) 水利用高度化事業 2) 流況調整河川 3) 既存ダムの再開発・再編成

(2) 地下水の高度利用

1) 地下ダム 2) 表流水と地下水の連結利用

(3) 下水処理水の再利用

1) 雑用水利用 2) 下水処理水による水循環改善

(4) 海水の淡水化

7. 4 ダム開発と自然環境・生物生態との共存

社会資本の整備とあわせ豊かな生活実感の充足感を求め、自然を大切にしたいとの思いが強くでてきている。物から心の豊かさを求め、アメニティ、レクリエーション機能を水辺や森に求めている。動植物の生息場としての河川、水辺、河畔林、森林を大切に自然環境の保全、生態環境との共存などが求められている。

発電ダム下流の減水区間の流況改善がすでにはかられており、河川法にあっては治水・利水に加えて水環境の保全、整備が内部目的化され、多自然型川づくりやダム放流にあっては流況の再自然化に向けた取り組みを模索しはじめている。ダムづくりにあってはダムを核とした多種多様な地域振興策、上下交流策が講じられるとともに、事前・事中・事後のダム・周辺域の影響評価、生物生態調査の実施や自然の再生・回復技術の行使が厳しく求められている。

(1) ダム下流域の減水区間の改善

現状では河川管理者と電気事業者の間で清流回復の取り組みがなされている。すなわち、水路式かダム水路式の水力発電で、取水ダム下流の河川に減水区間が生じることから、両者が発電水利権の更新時に取水地点から一定の流水、いわゆる河川維持流量を放流し、潤いのある河川環境をとり戻す取り組みである。これまでこのような形で約 2,200 km の減水区間が解消され、約 140 m³/s の河川流量の回復、すなわち確保した河川維持流量があり、清流が回復している。

(2) ダムの弾力的管理運用の試み

さらに清流回復等への社会的要望はあるものの、新たなダム建設の困難さともあいまって既存ダムの一層の有効活用を図ることを目指し、洪水時、夏期制限水位まで空容量となっているダムの洪水調節容量の一部を安全性を十分に確保した上で活用し、渇水補給、清流回復（維持流量の増大）、河川清潔の保持（フラッシング）等をはかるダムの弾力的管理運用が検討されている。

(3) 河川の生物・生態環境との共存をも意識したダム管理運用の調査研究

自然河川においては、大小さまざまな流況変動がおこるが、それらのうち適度な規模の変動は河川の瀬・淵の形成を促し、河川環境の多様性を維持していると考えられる。しかし、ダム下流部においてはダムの貯水により洪水が低減され、維持流量として一定の水量を放流するため、河川環境が単調になり生物多様性も低くなるとの指摘もある。治水・利水機能を確保し、生物・生態環境にも配慮した河川管理の適切な方法を見出すためには、河川の流水環境と生物との係わりを定量的に把握することが必要である。

7. 5 地球環境時代の水資源

地球環境問題とされている地球環境の変化として、地球温暖化、砂漠化、森林の減少・劣化、オゾン層の破壊、酸性雨・酸性雪、生物多様性の減少、海洋環境の劣化等が考えられる。このうち、地球温暖化による水資源への影響として気温の変化、降水量の変化、海面水位の変化等による影響が考えられるが、水資源の量的側面への影響という点からみると降水量の変化と気温の変化による蒸発散量の変化である。とはいえ、

気温および降水量の影響については、その影響がどの程度のものか十分にはわかっていないのが現状であり、シナリオにもとづくシミュレーション分析が行われているにすぎないが、それらの結果から総じて言えることは¹⁵⁾、

- 1) 地球温暖化による気温上昇がもたらす蒸発散量の変化が水資源に及ぼす影響が大きい。
- 2) 地球温暖化による気温上昇により降雪が降雨形態にシフトし、積雪・融雪期の流量が増加するとともに、春から夏にかけて土壌水分不足ひいては流量減が進む。
- 3) それに呼応して渇水の諸指標がいずれも増大する。
- 4) 気温の上昇とともに 1/10 利水安全度確保のための必要容量は増加する。

これらはあくまでシナリオ分析による水文応答とそれをベースにした水資源応答であるが、降水変動が大きくなる傾向、それが流量変動にはねかえり、さらにそれら変動を吸収するために調節容量が大きくなる図式を物語っており、利水安全度の確保のためには、今後とも水資源施設の容量増等の整備の必要性がある。

一方、地球温暖化が水利用にもたらす影響としては、生活用水については需要量が一般に気候状況に左右されやすいことから、気温の上昇により水需要量が増加することが考えられ、平均気温が3℃上昇した場合、需要量が1.2～3.2%上昇するとの試算もある。

地球環境資源の有限性は水資源においてもしかりであり、人口増加、食糧増産、水質汚染の拡大は水資源の有限性をさらに顕在化させてきており、国際河川での水紛争とあわせ 21 世紀は水危機の世紀になるとの警告もある。

わが国は経済発展をとげ、自国の水資源を使って自動車や電気・電子機器等の工業製品や米をベースとした農産物を輸出する一方、諸外国から大量の農林産物、鉱工業製品を輸入している。大豆、大麦、小麦、とうもろこしは大半輸入しており、外材は供給の8割を占めている。木材を除く輸入農産物量を仮にわが国で生産するとするとそれに必要な水の量は年間約 52 億m³になるとの試算もあり、木材、鉱工業製品の輸入量を水換算するとその量はさらに大きなものとなる。

このように考えるとわが国の経済社会は自国の水資源はもとより、これら諸外国における水の使用によって一部成り立っているともいえる。WTO（世界貿易機関）加盟国として自由貿易国である以上、水の輸出入は当然であるが、世界の水資源問題の高まりとともに、わが国で唯一ともいえる国産資源、水資源の国内自給率 100% を持続していく責務がある。

8. おわりに

水は人間をはじめ地球上のすべての生物にとって必要不可欠な存在である。この水は絶えず循環しており、われわれに恵みをもたらすこともあるが、ときには災厄をもたらすこともある。そして水の活用の仕方は、それぞれの時代の要請や価値観、技術水準等によって大きく変遷してきた。

前節で見たように水資源を取り巻く環境も変化しつつある。本格的な地球時代の到来とともに、地球資源の有限性を意識する一方、地球温暖化を反映してわが国に限っていても少雨化の傾向と降雨変動の大きさ、工業用水の再利用や産業構造の転換等による水需要の伸びの鈍化があるものの、渇水の多発と利水安全度が計画ベースを下回ってきている。さらに、少子・高齢化の時代の到来などにより、水需要予測のむずかしさがある一方、人々の価値観、生活様式の変化などに伴い、生活の質を高める水確保の信頼性の要請などがある。

こうした環境変化に対応するも、今後、持続的発展が可能な社会を構築していくためには、地球資源を有限であると認識した上で、資源の採取量を可能な限り少なくし、資源・エネルギーを循環的・効率的に使い、廃棄物の排出量を少なくするなど、「循環型社会」を目指すことが求められる。このことは水資源に関しても循環資源であることをふまえ、安全で快適な生活および健全な産業活動を実現し、同時に自然環境・生態系の保持に果たす水の有する多面的な機能を損なわないようにすることを求めていることでもある。そのた

めにも、河川流域を中心とした水循環の場において、利水と治水に対する国民の要望を充足させ、同時に自然環境・生態系の保全に果たす水の機能を損なわない、水循環における種々のバランスと持続可能性を保つ状態、いわゆる健全な水循環系の創造がはかられ、もって持続的発展が可能な水利用社会の構築が望まれる。流域をベースにさまざまな主体において多面的な取り組みが必要である。意志決定支援システムとシステムズアナリシス、モデルの導入にあっても、システム境界や評価関数設定、変数の特定やモデル構造の定量化など、まだまだ現実の世界とのモデル乖離が問題とされるところがあるが、ここでとりあげた最適化手法の他にもゲーム理論やコンフリクトアナリシス¹⁶⁾など新たなツールも用意されてきており、現実の水資源問題に対しても、今後想定される問題に対しても、単純化のプロセスはあるものの問題の本質をふまえたシステムアナリシスやモデルの導入は意志決定支援システムの構築にあって、その科学的合理性や説明力を高めるツールとして不可欠であることはいうまでもない。持続的管理をはかる意味でも科学的支援情報を活かした最適化手法等の活用が望まれる。

参考文献

- 1) 池淵周一：水資源のより安定な供給に向けて－水危機管理と持続可能な水資源管理，水利科学 No. 242，頁 1-7，1998.
- 2) 国土庁長官官房水資源部：平成 10 年度版日本の水資源（水資源白書），頁 57，1998.
- 3) 小尻利治・東海明宏・木内陽一：シミュレーションモデルでの流域環境評価手順の開発，京都大学防災研究所年報第 41 号 B-2，頁 119-134，1998.
- 4) 岡田憲夫：水文・水資源ハンドブック第 10 章水資源計画・管理のシステム，朝倉書店，頁 299-300，1997.
- 5) 高棹琢馬・池淵周一：水の需給構造に関するシステムダイナミックス論的研究，土木学会論文報告集，No. 259，頁 55-70，1977.
- 6) 萩原良巳・中川芳一・渡辺晴彦：ダム建設計画に関する一考察，第 2 回土木計画学研究発表会，1980.
- 7) 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 No. 241，1975.
- 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講演論文集，頁 199-202，1979.
- 9) 池淵周一・小尻利治・山本 浩：地下水システムのモデル同定とその最適運用に関する研究，京都大学防災研究所年報第 26 号 B-2，頁 273-286，1983.
- 10) Takeuchi, K: Chance - constrained model for real-time reservoir operation using drought duration curve, W. R. R., vol. 22, No. 4, pp. 551-558, 1986.
- 11) 岡田憲夫・多々納裕一他：渇水時の水消費行動のモデル分析，京都大学防災研究所年報第 34 号 B-2，頁 127-144，1991.
- 12) 池淵周一・小尻利治・武村彰文：確率マトリックス演算による利水システムの安全度評価に関する研究，京都大学防災研究所年報第 30 号 B-2，頁 359-375，1987.
- 13) 中山 修・小宮朋弓・秋葉 努・池淵周一：低水時のダム補給量決定へのファジィ推論の適用，水文・水資源学会誌，vol. 7, No. 4，頁 277-284，1994.
- 14) 国土庁編：新しい全国総合水資源計画（ウォータープラン 21），1999.
- 15) 寶 馨：地球温暖化シナリオのもとでの河川流況の解析，文部省科学研究費補助金（総合 A）成果報告書，1992.
- 16) 岡田憲夫，キース.W. ハイブル他：コンフリクトの数理，現代数学者，1988.