

利水安全度を考慮した河川および ダム取水量決定システムの構築

田 尻 要*・神 野 健 二**
河 村 明**・飯 田 英 彦***

Development of a Decision-Making System for River Diversion and Reservoir Management Considering Safety of Water Utility

Kaname TAJIRI, Kenji JINNO, Akira KAWAMURA and Hidehiko IIDA

(Received November 21, 1991)

Abstract: Due to the rapid growth of population in F City, it is hardly predicted that the water resources development can produce the excess capacity for the water demand. Therefore, it is necessary to establish an integrated water resources management system for the effective utilization of the existing facilities. In this study, an optimal deciding method of water intake at the A Purification Plant from multiple water resources is investigated taking into account of the economical operation and water storage in the reservoirs. The following remarks are obtained:

1) Two criteria are introduced: The first criterion considers the cost of pumping up from the M and the N rivers. The second criterion considers the water conservation in the reservoirs in order to prevent the excess release of the stored water that may lead a drought. And this criterion is evaluated as the cost which is a function of water shortage in the reservoirs. A combined index is used as the objective function in the linear programming method.

2) The optimal solutions obtained by this method show that the water intake from the reservoirs is most economical when their water storage is sufficient. This is resulted from that the cost of security against drought is lower than that from the rivers.

3) It is expected that an economical and robust operation for water intake is realized quantitatively through the proposed system.

Keywords: Water resources management, Linear programming method, Optimal method of water intake, Run-off analysis

1. はじめに

近年、水資源の開発は貯水池適地の不足、生態環境保全上の制約から容易に進まない状況にある。水循環サイクルの中の一つとして、水資源の有限性を考えると、今後の水資源の運用においては、流域内の個々の水源地の単独運用よりも、流域の特性に応じて流域を越えた複数の水源地の統合管理が不可欠になるものと言われている。

ところで、このような統合管理を行うためには、基

本となるデータの電子計算機での管理、運用上必要となる貯水池流入量などの状況や河川流況の将来予測、水需要量の予測、現場での日々の運用決定のための判断基準のコード化などが必要となるが、これまでに得られた水資源工学の研究の個々の成果は、実際の運用では必ずしも生かされてはいない。したがって統合管理を合理的に行うためには、個々の課題の解決を行うことが必要であると同時に、これと平行してこれまでに得られた技術と経験とを統合させたシステムを構築することも行わなければならない。そこで本報では、F市を対象にこのようなシステムの構築のための一段階として、各水源からの取水量の決定に有用な情報を提供するモデルについて検討している。

F市の水資源の特性を述べると、水資源の確保を近

平成3年11月21日 受理

* 西松建設㈱技術研究所

** 水工土木学教室

*** 水工土木学専攻修士課程 (現在、東京都水道局)

郊の4つの河川、複数のダム貯水およびT川からの遠距離の導水により行っている。しかしT川を除くいずれも二級河川であり、ダム容量も充分とはいえず、都市の規模に比べ流域内の水資源は量的に余裕が無いのが現状である。また、今後も都市規模の拡大に伴い水の需要量は増加を続けることが予想されるため、それに見合う水資源の確保が急務とされているものの、地理、環境上の問題から新たにダム建設などの大規模な水源開発を行えるだけの余裕はほとんど残されていない厳しい状況下にある。

本報ではF市のA浄水場を例にとり、まず取水や浄水などの運用の現状を考察し、さらに水源から浄水場に至る取水および導水プロセスに着目した取水量決定システムを構築して、河川取水とダム貯水の両者の有効利用を目指した、取水量決定を試みた。その結果、降雨が多かった年では、ダム貯水の温存による安定供給と、河川からの導水コストを少なくする経済運用の両者を満たすことの可能性が示された。

2. A 浄水場における運用状況

図-1にF市のA浄水場に関連するダム・水源地(河川取水口)および取水ルートを示す。A浄水場はM川、N川の2つの水系を取水の対象としており、M川水系では上流のMダムと下流のM水源地の2箇所、またN川水系ではNダムとN水源地の2箇所の計4ルートにより取水が行われている。ここで例として、昭和63年度2月から64年度2月までのF市の総配水量とA浄水場の配水状況を図-2に、A浄水場への

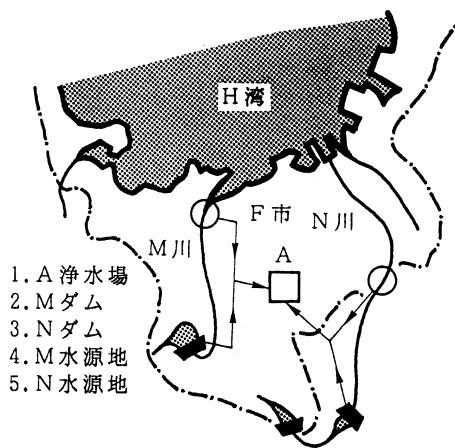


図-1 A 浄水場取水関連施設

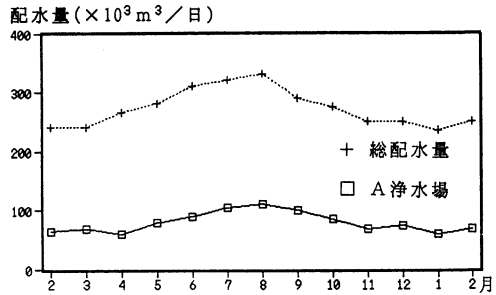


図-2 F市全域およびA浄水場からの配水量

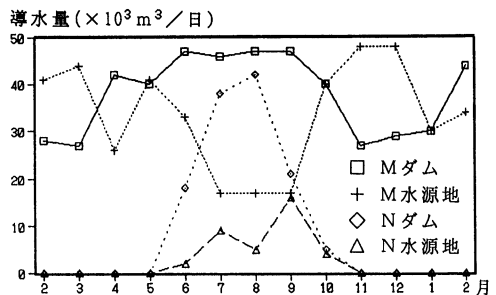


図-3 各ダムおよび河川水源地从A浄水場への導水量

各ルートからの導水量の変化を図-3に、それぞれ各月毎に日平均の単位で示している。

図-2より、A浄水場からの配水割合は年間を通じてほぼ一定であり、この浄水場でF市の総配水量の約3割を分担していることが分かる。また図-3より、A浄水場への導水は主にM川水系(MダムおよびM水源地)から行われているが、6~10月にM水源地の水利権が減少し、MダムおよびN水源地からの取水が行われている。これは、この時期が梅雨期で河川流量は増加するものの、かんがい期であるため農業用の慣行水利権が大きくなり、M水源地における上水の水利権が減少し、これをN川水系からの取水により補っているからである。ここで、取水先がダムもしくは河川に変化することによる水質の変化を見るために、A浄水場でのダムもしくは河川からの導水量と濁度の関係を図-4に示す。水質の指標は濁度以外にBODやCODなどの様々な指標が考えられるが、上水で最も多く処理対象となるのが濁度成分であることから¹⁾、ここでは水質を濁度により代表させた。図-4より、河川からの導水量が多くダムからの導水量が少ない場合には濁度が高く、逆にダムからの導水量が多く河川からの導水量が少ない場合には濁度が低いことが分かる。

すなわち、工業廃水などがほとんど無く水質が比較的良好といわれている M 川であるが、河川水の水質はダム貯水池の水質には劣っている。このため、ダム取水の割合が大きいかんがい期に比べ、河川からの導水が増える非かんがい期では水質管理のために薬品注入などの浄水費用がかさむことになる。

一方、図-5 に M ダムおよび N ダムの有効貯水量の推移を、また図-6 にダムの貯水率(=有効貯水量/有効貯水容量)の変化を示しているが、これらよりダムの運用については、両ダムとも貯水量の変動は僅かで、貯水率は対象とした年については年間を通してほ

とんど 90%以上で温存されていることが分かる。

以上のように、A 浄水場の運用は、ダム貯水に関しては基本的に温存させて専ら河川取水とし、かんがい期など河川取水だけでは需要量に追従できない場合、不足分をダム貯水から補うことになっており、これは徹底して安定供給を目指す F 市における水資源運用の基本方針でもある。つまり、河川取水については、M 川および N 川は二級河川であり、その流況の把握が困難な上に、慣行水利権による制約が大きく影響を与えている一方、ダム取水については、渇水に備えるためその貯水量を常に温存する運用を行わざるを得ない状況にある。

3. 取水水量決定システムの概要

2. における取水運用の考察からも分かるように、現在 F 市における水資源は、安定供給のため第一に水利権分の河川取水を行い、その不足分をダムからの取水によってまかなうという基本方針により運用されている。しかし、水需要が高まってくると、慣行水利権と新規水利権の競合の尖鋭化により、新しい運用ルールのもとで水資源のより合理的な利用が要請される。すなわち、平常時においても常に安定供給のみを目標とすることは、河川からの取水を優先させるため、劣化な河川水質の水処理コストや導水コストなどにかんがりの経済負担を強いられ財政を圧迫することとなる。このため平常時においては、安定供給の他に経済性を考慮した運用も期待されることである。よって、ダム貯水の温存も考慮しながら、河川取水とダム貯水の両者の有効利用を行うことは、利水安全度を確保しながらも、今後の水需要量の増加に伴う経済負担を減じてゆく上で必要であると考えられる。

以上のような観点から、著者らは日々の水需要予測から取水・配水に至る運用策定の支援を目指した、図-7 に示すような水資源管理システムの構築を検討するとともに、A 浄水場に関連する各水源地からの取水水量や導水費用、およびダムの貯水量など基礎的な情報の

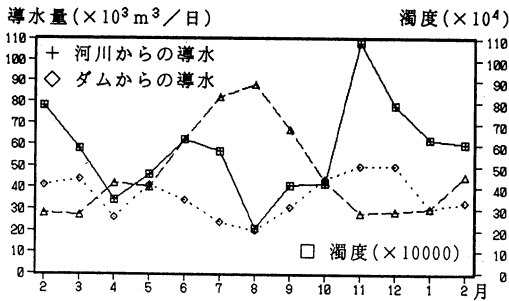


図-4 ダムおよび河川導水量と濁度の関係

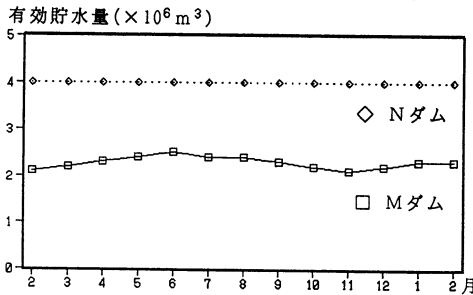


図-5 各ダムにおける有効貯水量の変化

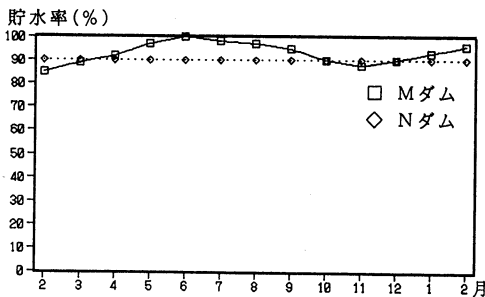


図-6 各ダムにおける貯水率の変化

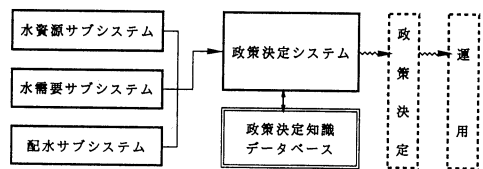


図-7 水管理システム概念図

整理と解析を行ってきた²⁾。本報ではこれらのデータを基に、図-7に示す水資源サブシステムの一環として、以下に示すような3つの機能を持つ取水量決定システムを作成し、河川およびダムからの最適取水を行うための参考となるデータを水管理者に提供することを検討している。すなわち、

(1) データベース部：ダム、河川、浄水場の過去の水文データ（降水量、ダム貯水量、河川の流況、取水実績量など）が蓄積されており、必要に応じて随時その情報が引き出せる。

(2) 流入量推定部：流入量の実態を把握することは運用を行う上で重要な要素となる。本研究ではタンクモデルによる流出解析法を用いて流出機構をモデル化し、未知パラメータの最適値をカルマンフィルタによる逐次同定によって求め流入量推定を行う。ここで昭和63年を例にとり日単位で流入量の解析を試みたものを図-8に示す。タンクモデル法は、流域面積の規模に見合ったタイムステップの降雨データを用いれば流出機構をかなり忠実に表現できる手法と言われている³⁾。しかしながら現状で得られる降雨データが日単位であるため、図-8に見られるように観測流入量に対して推定流入量が追隨していない箇所もある。したがって流況を高い精度で推定するためには、より短い時間単位のデータのオンライン収集が必要であろう。

(3) 数値計算部：データベース部にストックされている過去の実績データや流入量推定部により算出された流入量データなどを用いて、水源の状況に応じた最

適取水配分量を求める部分である。この結果は図-7に示す政策決定システムに送られ、水管理者に参考データとして参照され決定を支援する資料となる。

4. 取水量決定手法の考察

取水量決定の手法として、ここでは線形計画法(LP)の適用を考えた。

まず、各々の河川水源地について取水および導水に要するコストを設定し、ダム取水については貯水に対する安全度を考慮に入れ、水利権などの制約条件のもとで各水源ごとの最適取水量を決定するモデルを作成した。このモデルは、通常の安定供給第一の運用の目標を満たしながら、さらにダム貯水と河川取水の有効利用の可能性を経済運用の立場から目指すもので、本報では過去の取水実績データを用いて試算を行った。

4.1 河川取水コスト

河川から取水する場合のコストについては、導水に要するポンプアップなどの施設電力費、および劣化河川水質のための浄水プロセスにおいて注入される薬品費の2種類のコストがおもに考えられる。しかし、注入される薬品費については、各導水ルートからの水が浄水場に取り込まれた後に一括して薬品注入作業が行われるため、各ルート毎の水に対する薬品費が算出できないことや、ポンプアップのための電力費などに比べてその値が小さいことからここでは考慮しないこととした。図-9に昭和59~63年までの5年間のデータをもとに、M水源地における取水量とその電力費の関

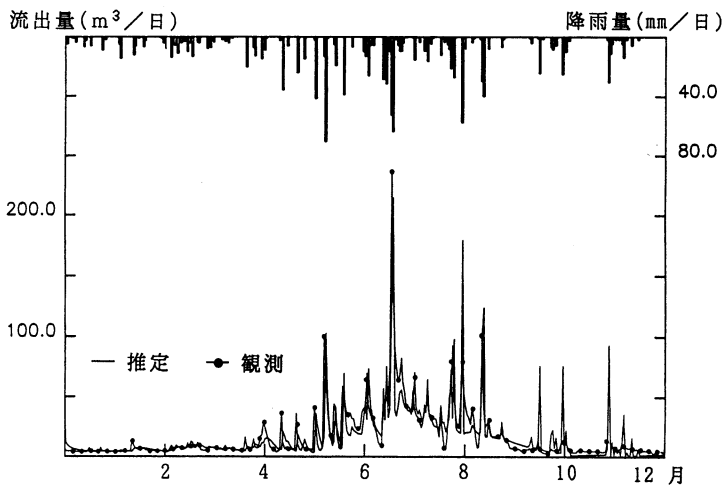


図-8 ダム流入量の推定結果

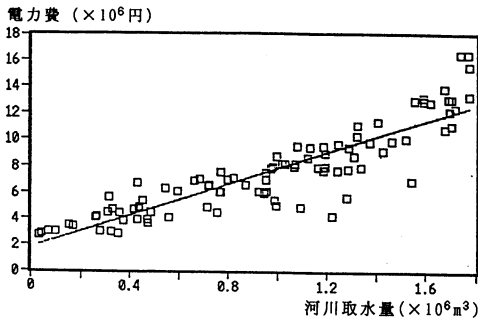


図-9 河川取水における導水コスト

係をプロットしたものを示す。図中には最小二乗法による直線回帰式も示している。この回帰式の傾きにより M 水源地の河川取水コスト C_{rm} (円) は、取水量 X_{rm} (m^3) の関数として、また N 水源地对しても同様のデータより河川取水コスト C_{rn} とその取水量 X_{rn} の関数として、それぞれ以下の回帰式を得た。

$$C_{rm} = 6.0 X_{rm} \quad (1)$$

$$C_{rn} = 8.0 X_{rn} \quad (2)$$

4.2 ダム貯水安全度コスト

ダムからの取水にかかるコストとしては、ダム貯水池からの導水が標高差を利用した自然流下で行われているため導水費用は考慮しない代わりに、貯水に対する利水安全度⁹⁾を考慮することとして渇水被害原単位を適用した。現在のところダムの貯水量に対するコスト面からの評価はあまりなされておらず、また、渇水時の運用方策や渇水に対する評価指標などは数多く研究されているが⁵⁾⁶⁾、平常時の運用についてはあまり議論されていないようである。本報では LP による取水運用モデルのシミュレーションを行うことを目的とし、ここでは昭和 48 年に発生した高松渇水を対象として実施されたヒヤリング調査の結果⁷⁾を用い、需要量に対する水不足率の二次関数として求められる渇水被害原単位を、ダム貯水における空き容量率 $\{ (1 - \text{貯水率}) \}$ に対する渇水被害原単位に等しいものと仮定して経済評価を行うことにした。すなわち、ダムの空き容量率が 0 (満水) の場合のダム貯水量 $1 m^3$ の価値は 0 円であり、ダム貯水量が満水に満たない場合はその空き容量の割合に応じてダム貯水量 $1 m^3$ 当りの価値が二次関数的に増大することとする。この考えは、ダムが満水の時から利水安全度を考慮して、ダムからの取水にペナルティを課することを意味して

り、ダム貯水量温存という F 市の基本方針を考慮しているといえよう。

まず、上水の利用目的ごとに、家庭用水、業務用水、農業用水に分けて渇水被害原単位 (円/ m^3) を推定するため、ここでは次に示す値を用いた⁸⁾。

- ①家庭用水……家事労働の単価を適当に仮定し、家事労働時間の増加や物品購入費などを考慮して、水不足率 50% で 400 (円/ m^3)、80% で 4,000 (円/ m^3) とする二次関数とした。
 - ②業務用水……渇水被害額は営業停止損失額に等しいと考えられ、水不足率 30% で 3,000 (円/ m^3)、80% で 5,000 (円/ m^3) とする二次関数とした。
 - ③農業用水……水稻の被害のみを考え、減水深や 1 ha 当りの収穫高などを考慮して、水不足率 15% で 10 (円/ m^3)、80% で 400 (円/ m^3) とする二次関数とした。
- ①～③のいずれの場合も当然のことながら水不足率 0% で渇水被害原単位は 0 (円/ m^3) である。

なお、F 市における工業用水は専用のルートで取水している上に、需要量も他の用水と比較してかなり少ないことから、ここでは考察の対象から外した。また、F 市のケースに適用する際は水の需要構造や水源の水利権が異なることから、通年を (I) 非かんがい期と (II) かんがい期に分け、非かんがい期では①家庭用水、②業務用水の 2 項目について、かんがい期では③農業用水を加えて計 3 項目について考慮することにした。さらに F 市における使用水量比率は、①家庭用水 : ②業務用水 : ③農業用水 = 7 : 3 : 3.5 であることから⁹⁾、各々の使用水量比率に応じて重み付け平均したものを、F 市における渇水被害原単位 (円/ m^3) として設定した。すなわち、この渇水被害原単位を M ダム、N ダムともダム空き容量率 P (%) の時の貯水量 $1 m^3$ 当りの水の単価として、それぞれのダムのダム貯水安全度コスト C_{dm} 、 C_{dn} (円/ m^3) を次式のように求めた。

$$(I) \text{非かんがい期} \quad C_{dm}, C_{dn} = 6.342P + 0.944P^2 \quad (3)$$

$$(II) \text{かんがい期} \quad C_{dm}, C_{dn} = 17.832P + 2.501P^2 \quad (4)$$

図-10 にこれらの関係を示している。実際の運用において、以上の渇水被害原単位を F 市の状況に適合するように設定し直せば、種々の場合についてダム貯水安全度コストを変化させてシミュレーションが可能である。

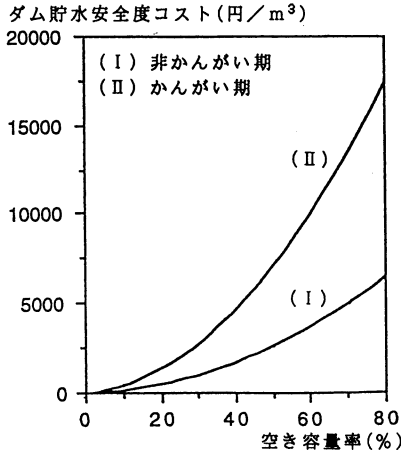


図-10 ダム貯水における安全度コスト

4.3 線形計画法適用のための目的関数と制約条件

貯水状況に応じた水の価値は 4.2 のダム貯水安全度コストにより求められ、このコストと取水に要するコストの和を目的関数 Z_j とし、これを最小にするような各水源からの取水量を最適取水量として、半旬 (5 日) 単位で各半旬の各日の取水配分量の決定を行った。

当該日を j とし、当該日における目的関数 Z_j を以下のように、半旬における各日の取水配分量 X を決定する。

$$Z_j = \sum_{i=0}^4 (C_{dm,j} X_{dm,j+i} + C_{dn,j} X_{dn,j+i} + C_{rm,j} X_{rm,j+i} + C_{rn,j} X_{rn,j+i}) \quad (5)$$

ここに、

i : 各半旬の第 i 日目 ($i=0\sim 4$)

$C_{dm,j}, C_{dn,j}$: 第 j 期の M および N ダムの貯水量 1 m^3 当りのダム貯水安全度コスト (円/ m^3)

$C_{rm,j}, C_{rn,j}$: 第 j 期の M および N 水源地の水 1 m^3 当りの取水に要する河川取水コスト (円/ m^3)

$X_{dm,j+i}, X_{dn,j+i}$: 第 j 期 i 日目の M および N ダムからの取水量 (m^3)

$X_{rm,j+i}, X_{rn,j+i}$: 第 j 期 i 日目の M および N 水源地からの取水量 (m^3)

次に制約条件を以下に示す。各水源毎の 1 日当りの水利権量を (6) 式に、A 浄水場の 1 日の処理可能量を (7) 式に、貯水池の水収支に関する連続式を (8) 式に示

すように考慮し、各ダムおよび水源地からの取水量に対し、(9) 式に示す非負条件を考える。

$$X_{dm,j+i} \leq R_{dm}, X_{dn,j+i} \leq R_{dn}, X_{rm,j+i} \leq R_{rm}, X_{rn,j+i} \leq R_{rn} \quad (6)$$

$$X_{dm,j+i} + X_{dn,j+i} + X_{rm,j+i} + X_{rn,j+i} + A_{j+i} \quad (7)$$

$$S_{dm,j+i} = S_{dm,j} + \sum_{i=0}^4 I_{dm,j+i} - \sum_{i=0}^4 X_{dm,j+i} \leq S_{dm,max} \quad (8)$$

$$S_{dn,j+i} = S_{dn,j} + \sum_{i=0}^4 I_{dn,j+i} - \sum_{i=0}^4 X_{dn,j+i} \leq S_{dn,max}$$

$$X_{dm,j+i} \geq 0, X_{dn,j+i} \geq 0, X_{rm,j+i} \geq 0, X_{rn,j+i} \geq 0 \quad (9)$$

ここに、

$R_{dm}, R_{dn}, R_{rm}, R_{rn}$: M ダム, N ダム, M 水源地, N 水源地の一日当り水利権量 (m^3)

A_{j+i} : 第 j 期 i 日目の A 浄水場の 1 日の処理量 (m^3)

$I_{dm,j+i}, I_{dn,j+i}$: 第 j 期 i 日目の M および N ダムへの流入量 (m^3)

$S_{dm,j+i}, S_{dn,j+i}$: 第 j 期 i 日目の M および N ダムの貯水量 (m^3)

$S_{dm,j}, S_{dn,j}$: 第 j 期の M および N ダムの初期貯水量 (m^3)

$S_{dm,max}, S_{dn,max}$: M および N ダムの最大貯水容量 (m^3)

5. 適用と結果

4.3 に示したモデルで、ダム貯水量の温存による利水安全度の向上、および河川からの導水コストを削減する経済運用の両立という目標を満たす運用が可能であることを、昭和 62 年度および 63 年度の実績データを用いてシミュレーションを行った。

ここで、河川取水のコスト単価 C_{rm}, C_{rn} は導水コストであるので期間 j に関係なく一定で式 (1), (2) で与えるものとし、ダム取水のコスト単価 C_{dm}, C_{dn} は共に、式 (3), (4) で与えられ第 j 期の貯水状況により決定される。式 (5) から分かるように、ダム貯水量が充分あれば、ダム取水のコストが河川取水コストに比べてかからないため、ダムからの取水が優先され、逆にダム貯水量が減少しダム取水のコスト単価が河川取水のコスト単価を上回るようであれば、河川取水が優先され不足分をダム取水で補う運用となる。なお、ダムへの流入量は、降雨の実績値を利用して 3. に示した流入量推定部により算出した推定値を用いている。かんがい期における M ダムについてのシミュレーションの結果として、図-11、図-12 にそれぞれ昭和 62 年、63 年

度の実際の運用および4.3の線形計画法による運用貯水量の推移を示している。また図-13、図-14は各運用によるコストZを示している。

図-11～図-14より62年度については降雨量が多く貯水池への流入量が豊富であったため、ダム取水優先の運用を長期間行った結果、コストを低く抑えることができLPによる経済運用の効果が得られた。なお、図-13でLPによる経済運用によりコストが生じているのは、Nダムの貯水量の低下により、コスト単価 C_{dn} が上昇したためである。63年度は62年度ほど降雨に恵まれてはいなかったためコストの削減効果は

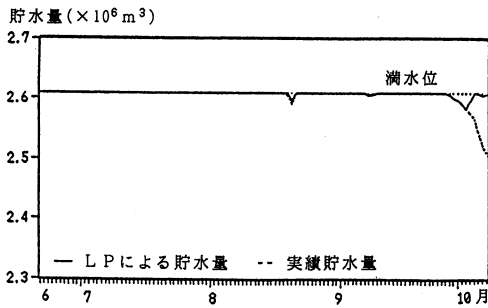


図-11 Mダムにおける貯水量の比較(昭和62年度)

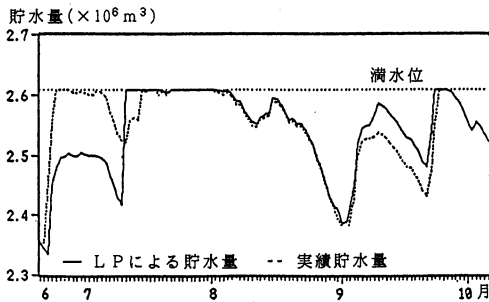


図-12 Mダムにおける貯水量の比較(昭和63年度)

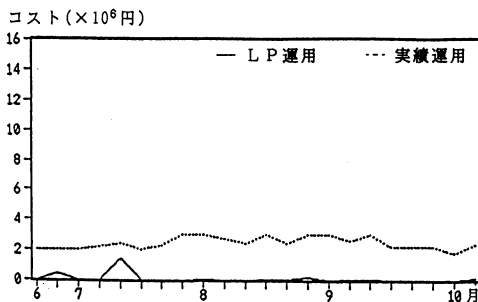


図-13 取水運用コストの比較(昭和62年度)

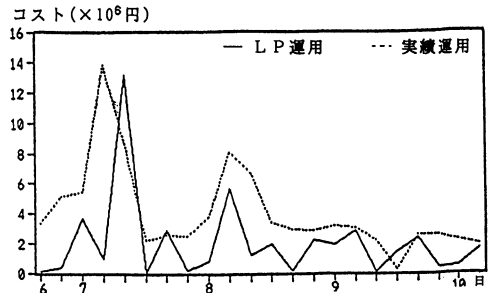


図-14 取水運用コストの比較(昭和63年度)

62年度に比べ小さくなっているが、流入量が多い時期はダム取水が優先され、また流入量が少ない時期には河川取水優先の運用に切り換わっているため、全体としては利水安全度確保のためのダム貯水の温存も考慮しながら、河川取水とダム貯水の両者の有効利用が可能となっている。

6. おわりに

本報では、利水安全度を確保しながら河川取水とダム貯水の両者の有効利用を行うことが、今後の水需要量の増加に伴う経済負担を減じてゆく上で必要であるとの考えから、河川およびダムからの最適取水の可能性を利水安全度のみならず経済運用の効果も考慮した立場から考察した。その結果次の結論が得られた。

- 1) LPを用いた手法により、ダム貯水の温存による安定供給と河川からの導水コストを少なくする経済運用の目標を満たす運用ができた。特に降雨量の多い年は経済運用の効果が得られる。
- 2) コスト評価の指標Zにより運用の状況をより具体的に表現でき運用がより明確になると考える。
- 3) 半旬単位の運用により、貯水状況に応じた合理的な運用が可能である。
- 4) データベースや流入量推定システムの充実により状況に応じた運用が期待できる。

最後に今後の課題として、ダム取水のコスト単価に適用した利水安全度指標の改善、取水水量決定の運用間隔の検討などが挙げられる。

謝 辞

本研究を行うにあたり有益な資料と助言を頂いた水道局開発課ならびに水管理課の方々に深謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 小笠原紘一，丹保憲仁：浄水の技術，1985
 - 2) 飯田英彦，神野健二，河村 明：複数の取水源を持つ浄水場の最適取水，水文・水資源学会 1989 年度研究発表会概要集，1989
 - 3) 菅原正巳：流出解析法，1972
 - 4) 山内 彪：濁水被害の定量的手法について，ダム技術，No. 44，pp. 5-13，1990
 - 5) 藤吉三郎：利水計画の安全度に関する二，三の考察，土木学会誌，Vol. 56，No. 11，pp. 23-29，1971
 - 6) 大内忠臣，佐々木元，松下越夫：利水安全度に関する 2，3 の分析と考察，土木技術資料，Vol. 24，No. 1，pp. 21-26，1982
 - 7) 四国地方建設局：昭和 48 年高松濁水，1977
 - 8) 今村瑞穂，関 正和，中村 昭：濁水の構造分析と流水管理への適用，土木技術資料，Vol. 21，No. 9，pp. 16-24，1979
 - 9) F 県：F 県の水道，1989
- ~~~~~