

貯水池群の統合管理へのシミュレーション手法の応用

東京大学工学部 正 員 高 橋 裕

東京大学大学院 学生員 竹 内 邦 良

東京大学大学院 学生員 ○大 熊 孝

1. 概 要

水資源は地域的にも季節的にも偏在しており、毎年洪水に悩まされる反面、水需要の増大にともない水不足が深刻化している。この矛盾を解決するために、水資源計画に関する研究がいくつかなされている。いままでの水資源計画の研究では、経済的目的函数をもち、貯水池の容量を変数とした一種の最適化問題を扱っている研究が主流をなしている。これらの研究の欠陥として、貯水池の操作方法を固定的なものにしていることが挙げられる。水資源計画の最適化問題では、貯水池の操作方法は重要な変数と考えられる。われわれは、所与の水資源システムに対して、流域における洪水ならびに渇水による年平均被害額を最小にする最適操作方法を見出すことを主眼とした。この為、われわれは次の二点に目標を定め研究を行なっている。

- [1] 一流域に建設された複数の貯水池を統合的に連繫操作することによつて、互に独立に操作した場合に比して、洪水ならびに渇水による被害をより小さいものにする。
- [2] 限られた利用可能水量も、各ユーザーに対して、経済的緊急度に応じて配分することにより、渇水による総被害を最小化する。

本研究の結論の運用対象は、既存貯水池群の統合管理ということが第一であるが、そればかりでなく、次のような方法により、水資源システムの建設妥当性が調べられ、計画立案の手段としても用いられる。すなわち、一定貯水池群を想定して、①ユーザーはその水資源システムから水需要の何かが保証されるか。また、②貯水池群が過大であるか過小であるかが、シミュレーションの方法により検討される。

2. 仮定と条件

水資源システムモデルは、手法開発の観点から実用化の条件を探ることを目的として、複雑な利根川システムを若干単純化したFig.-1の如きシステムをモデルとして採用した。複雑なシステムを考慮することにより、見落としてはならない重要なシステム要素を網羅し、精度のバランスを考え、改良すべき点とその改良の方向を明確に認識し、この研究の普遍性を追求しようである。

ここで報告する操作方法は、利水を主眼とした日単位の操作方法である。洪水処理に対する操作は時間単位程度で行なうべきであり、その検討は今後の研究において行なう予定である。利水では

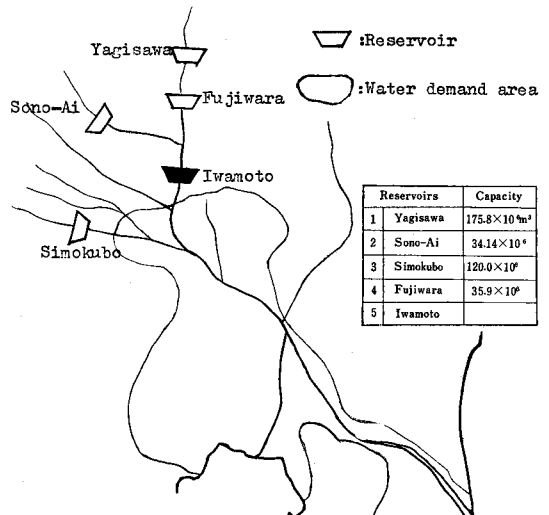


Figure 1. The Simplified TONE River Basin Systems

，農業用水，工業用水，都市上水のみを考慮し，発電や観光用水などは，今後の研究課題として，今回は除外した。流量データは昭和25年～34年の日平均流量記録を用いた。需要量としては，水資源公団推定の季節変化を含む予想需要量を用いた。

3. 基礎理論の開発

多くの流域において，貯水池群は既に建設運営され，その水位操作の規準は一応定められているが，経験的な要因に根ざしている点が多い。しかし，そうした操作の規準も，統合管理に熟達した者の頭の中には，なんらかの形で形成されており，さらに一般化の理論づけが推進されなければならない。

第一に問題となる点は，渇水による被害額を最小にするためには，貯水池群に現在貯水されている総量を「何日」で使い切れればよいのかということである。これは，Harvard Water Programのいわゆるhedging rule⁽¹⁾（分散基準）に相当する問題である。

供給方法として次の二方法が考えられる。

① 水資源システム内に貯水量が存在するかぎり，需要量に合致させて供給する方法。この方法では，渇水が長期にわたった場合，貯水量を使い切ってしまうと，その後は，日々の渇水流量のみの供給しかできなくなる。

② 水資源システムへの流入量を予測し，渇水が長期にわたれば，流入量が需要量を上回るようになる日まで，供給量を制限する方法。

水不足による被害の評価関数が線形であるならば，総被害額において，①の方法は②の方法と変わらないか，あるいは，予測という不確実性がないため良い結果をもたらすであろう。しかし，水不足量が増大するにつれ，農作物の枯死，工業施設の保安不能，人体への影響などの深刻な問題が発生し，被害は急増する。したがって，評価関数は非線形である。評価関数が非線形であるならば，日々の供給量を制限して被害を分散させた方が得

策である。システムへの流入量が需要量を上回るようになる日が予想されたならば，今日という時点からその日まで，現在の総貯水量とその日までの総流入量とを，総被害額が最小となるように分配すればよいことになる。このことをFig-2で説明しよう。座標原点は「今日」という日，二点鎖線は需要量の累積曲線，太い実線は予測流入量の累積曲線である。細い実線は①の方法を示している。②の方法は次の如くなる。需要の累計量と流入の累計量との差が最も大きい日までのS日間の利用可能水量は，S日間の予測総流入量（E）に今日の総貯水量（C）を加えた量（C + E）である。利用可能水量（C + E）がS日間の総需要量より多ければ，需要量に合致させて供給可能である。しかし，

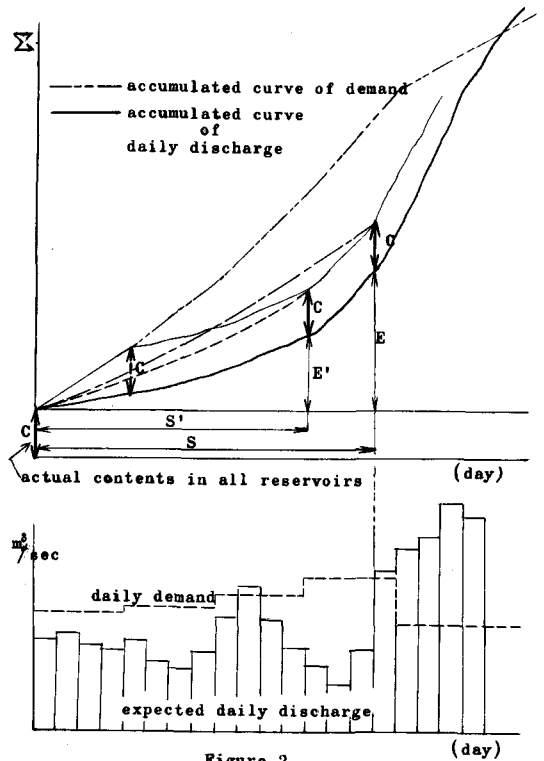


Figure 2.

利用可能水量（ $C + E$ ）が総需要量より少なければ、一点鎖線の如く供給を制限しなければならない。この一点鎖線は、後述する評価関数により、農業用水、工業用水、都市上水それぞれの利水部門に対する供給率を定め、その供給量を累積していくことによつて求められる。また、一点鎖線の供給累積曲線と予測流入累積曲線との差が今日の総貯水量を上回る場合には、その差がもつとも大きくなる S' 日間で（ $C + E'$ ）の利用可能水量を再配分する必要が生じる。貯水池が全部空になつてしまつては、一点鎖線に沿つての供給は不可能となるからである。 S' 日から S 日までの供給量は予測流入累積曲線に沿ひ、破線の勾配より大きくなつてゐる。 S 日以後は、流入累積曲線の勾配の方が需要累積曲線の勾配より急であり、需要量どうり供給可能となるはずである。

②の方法の場合、予測における不確実性がともなうため、日々新たに流入量の予測をたて、供給率を日々決定する方法をとり、不確実性を少しでも除く必要がある。また、流入量の予測方法の妥当性はシミュレーション手法により検討し得る。

第二の問題点は、上述した利用可能水量を各ユーザー（農業部門、工業部門、都市上水部門）にいかにか配分するかという問題である。水資源の管理者側としては、既存の水利権にとらわれず、総合的な意味での経済合理性に合致した配分を行ないたいという意向を常に有している。そこで、経済的目的関数を求める必要がある。経済的目的関数としては、水資源により得られる利益に着目した利益関数を用いるのが一般的方法である。しかし、それに必要な資料が不足していたり、または細部の利益まで追跡するには関数自体についての綿密な検討を要するため、利水問題では渇水時がもつとも問題となることを考慮して、比較的資料の得やすい marginal damage に着目した。marginal とは微分を意味する。したがつて、marginal damage とは水が $1 \text{ m}^3/\text{sec}$ 不足することによる被害額である。Fig-3 が marginal damage に基づく評価関数であり、この形は聞き込み調査を主体として仮定したものである。縦軸の高さは需要量の季節的変動に応じて変化する。

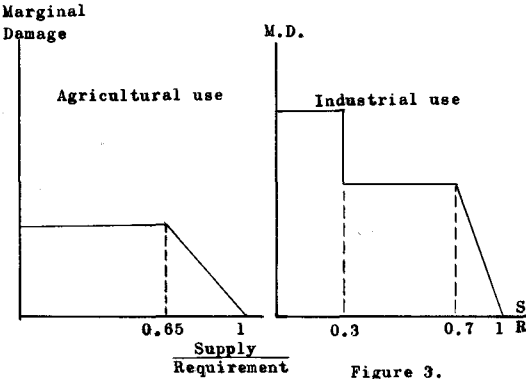


Figure 3.

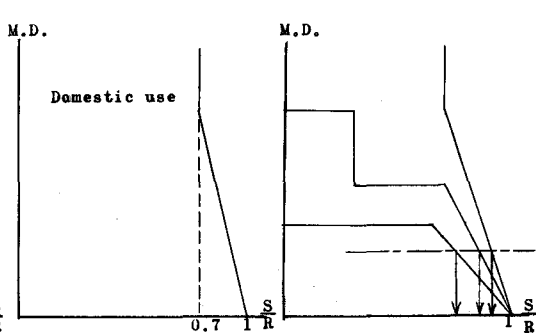


Figure 4.

利用可能水量の配分方法は次のようになる。

- ①利用可能水量が総需要量を上回つてゐる場合は、各ユーザーの需要量を満足させる。
- ②利用可能水量が総需要量を下回つてゐる場合は、Fig-4 の如く、各ユーザーに対し、marginal damage の値が等しくなるように配分を行なう。この配分の方法により、水不足による被害額は最小化させ得る。

水資源計画の政治的経済的側面におけるさまざまな問題点は評価関数に集約される。評価関数の決

定には、自然科学の知識はもとより、社会科学的、歴史的考察が必要である。計画を推進する主体者は、単なる経済合理性にもとづいた評価関数を使用すべきでないと考えられる。Fig-3 の評価関数は、あくまで手法開発という観点から求めたことを付言して置く。したがって、この手法を実用化する段階では、総合的でしかも綿密な検討を加えた上で評価関数を決定すべきである。

第三の問題点は、下流域の水需要に対して、いずれの貯水池からどれだけ放流するかという放流量配分の問題である。貯水池群からの総放流量は、今日供給すべき量から、貯水池群による制御のきかない残流域 (uncontrolled basin) の流量を差し引いた量に等しくなるように定めねばならない。この問題は、Harvard Water Program のいわゆる space rule ⁽²⁾ (空間基準) に相当する。実際上の運営に際しては、複数の貯水池がなんらかの形で各々バランスするよう放流操作を行なっているのであるから、いかなる量をバランスさせるべきかが問題となる。Harvard Water Program では、貯水池群において、ある貯水池の空間 (貯水容量の空の部分) と全貯水池についての空間の緩和との比が、予想されるその貯水池への流入量と全貯水池への流入量の総和との比に、できるだけ等しくなるように、各貯水池から放流を行なうことを、space rule と定義している。この方法は、貯水池からの越流を極小化し、無効放流量を最小とする手段と考えられる。

我々は、後述する Expected Days という概念を導入し、これに基づいて、バランスさせるべき量を求めた。この量を Priority Index と名づけ、いずれの貯水池も同じ Index の値を持つように放流操作を行なうことにした。Expected Days とは次のような内容のもので、 $E(i, T, V)$ で表わす。i 貯水池の T 日における空間を V としたとき、今後の予測流量 $q(i, T)$ をもつてすれば何日間の累計流量に等しいかをみる。すなわち、

$$V = \sum_{t=T+1}^{T+N} q(i, t) \Delta t + \theta q(i, T+N+1) \Delta t \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{但し、} \Delta t = 1 (\text{日}), \quad 0 \leq \theta < 1$$

故に、V に対する Expected Days 表示とは、

$$E(i, T, V) = N + \theta \dots\dots\dots (2)$$

となる。これは地域的、季節的、量的な三次元量をスカラー表示していることになる。

Expected Days に基づいた Priority Index として、何種類か考えられるが、シミュレーション手法により、その優劣性を検討しうる。現在、次のような二種類の Priority Index を検討しているが、その優劣性は判然としていない。

① 貯水量 C ならびに空水量 V の Expected Days 表示をそれぞれ X, Y とし

$$\left. \begin{aligned} X &= E(i, T, C) \\ Y &= E(i, T, V) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$\left. \begin{aligned} X' &= \alpha X \left\{ 1.0 - \exp\left(-\frac{X}{M}\right) \right\} \\ Y' &= \beta Y \left\{ 1.0 - \exp\left(-\frac{Y}{M}\right) \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

$$P I = X' / (X' + Y') \dots\dots\dots (5)$$

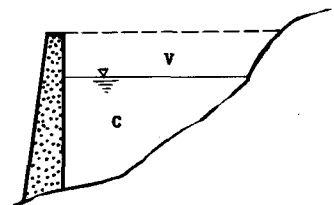


Figure 5.

この P I を第一種の Priority Index とする。(4)式にお

いて、X, Y の指数は次の意味を含ませた。すなわち、予測流入量 $q(i, t)$ は長期的に累計すれば、例えば年流量で考えれば、予測誤差はそれほど大きくないが、短期間の累計を考えれば、その

予測誤差は大きい。この指数の中のMは水文統計学上から定められる。 α は当該貯水池が空になることをさけるためのウェイトであり、 β は溢れることをさけるためのウェイトである。 α 、 β は中間需要地の経済特性から定められる。

②第二の Priority Index として、時間単位である(3)式の $Y = E(i, T, V)$ をそのまま用いる。

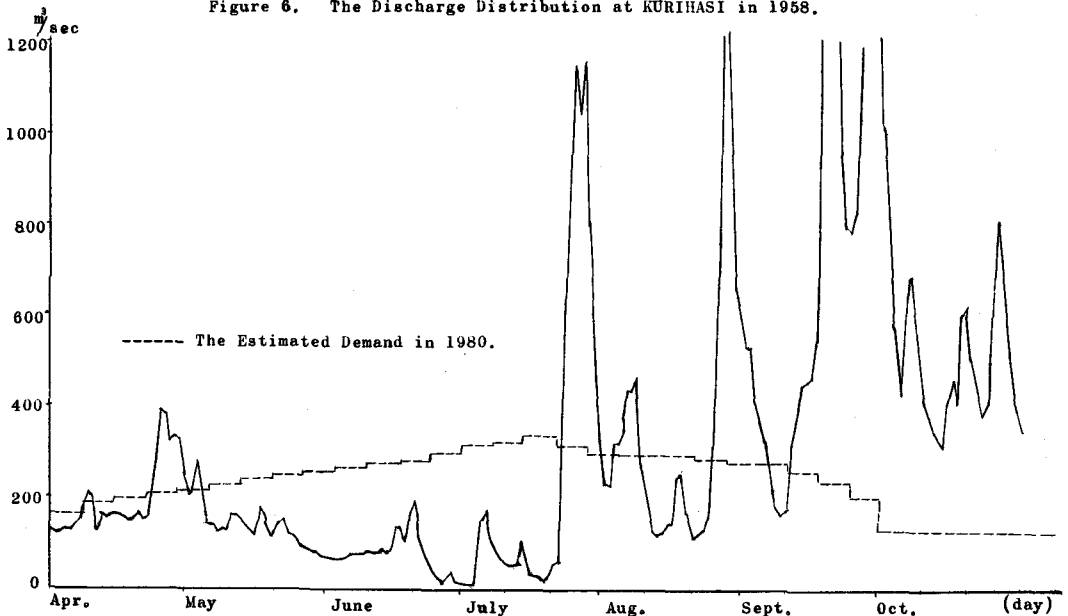
4. シミュレーションの結果と本研究の問題点

Fig-1 に示した利根川上中流域の貯水池群に対し、昭和25年～34年の日流量記録と、水資源公団推定の昭和55年の需要量とを用いてシミュレーションを行なった。①岩本貯水池の容量、②流量の予測方法、③ Priority Index をシミュレーション変数として採用した。

シミュレーションの結果に対しては、主に、渇水のひどかつた昭和33年の流況に対する結果に注目した。Fig-6 に昭和33年の流況と昭和55年の推定需要量を示してある。最適化のチェックは Fig-7, 8 の如き(供給量/需要量)の時系列値で行なった。評価関数を市場調査より求めたため、年平均被害額でチェックすることもできるが、水不足の状況を時系列的にとらえるのに都合のよい前者を用いた。Priority Index の違いによる優劣は明らかでなかつた。岩本貯水池の容量が4億 m^3 以上あれば、予測流量として、上記の10年間の平均日流量を用いようと、流量記録をそのまま予測流量として用いようと、供給率は常に100%を維持できた。Fig-7, 8 は岩本貯水池がない場合である。Fig-7 は予測流量として10年間平均日流量を用いた場合である。平均日流量が需要量とほぼ同じであるため、供給方法①に従って供給した場合と類似している。Fig-8 は予測流量として実流量を用いた場合である。需要量が七月までに増加していることを考慮すれば、Fig-7 と比較して、Fig-8 の方が被害が分散されていることが判る。

以上の如く、ある一定の水資源システムの下で、日々の管理方式、需要充足率、各貯水池の必要性などの議論が総合的にできることは、シミュレーション方式の大きな利点といえる。

Figure 6. The Discharge Distribution at KURIHASI in 1958.



今後、本研究を進めていく過程で克服されねばならない問題点は、

①気象条件までも考慮に入れた流量予測方法の開発、②各利水部門の実態ならびに評価関数に対する根本姿勢、③洪水処理の方法、④発電、観光用水などの考慮、⑤ Priority Index の理論的検討、⑥現実の水資源システムの水収支の実態、などあげられる。

本研究の推進にあたっては、新潟大学教授伊藤 剛博士に多大のご指導を仰ぎ、特にその計算において種々のご便宜にあずかった。ここに厚く謝意を表する。なお本報告は、昭和43年の土木学会年次学術講演会における発表の継続であり、一部の説明に重複のあることをお断りして置く。

(注1, 2) Design of Water-Resource Systems 11章: Harvard Water Program, 1962

Calculated Result of Water Supply for The Estimated Demand in 1980,
under The Discharge Distribution in 1958.

