

京都大学防災研究所 正 員 池淵 周一

京都大学防災研究所 正 員 小尻 利治

京都大学大学院 学生員○飯島 健

1. はじめに かつてはまさに「湯水のごとく」利用できると思われていた水も、水利用の高度化に伴って現在では限りある資源の一つとしていかに有効に扱うかが論じられるようになった。本研究では、利水システムをいくつかの基本ユニットの組合せとして構成するとともに、入力である河川流量を確率分布としてとらえたときの水量・水質両面からみたシステムの安全度を評価する。さらに、多数の代替案より最適解を求めるのに、実験計画法と非線形最適化手法の概念を結合させた2段階の計画手順を提案する。

2. 利水システムの安全度評価手法と最適利水システムの策定

(1) 利水システムの安全度評価手法 空間的に複雑な利水システムを単純化し、安全度評価を合理的に行うために、取水率 a 、還元率 α 、処理率 e 、原単位当りの汚濁負荷量 $\bar{C}$ などの利水パラメータを導入する。これらのパラメータを用いることにより、評価地点 i における水量・汚濁負荷量は、流入前の水量 Q を用いて次のように表現できる。

$$Q_i = k_i(a_n, \alpha_n; n=1, 2, \dots)Q \quad C_i Q_i = h_i(a_n, \alpha_n, e_n, \bar{C}_n; n=1, 2, \dots)Q \quad (1)$$

このように評価値を流入量の線形1次関数で表示することにより、安全度評価を解析的に行うことが可能となる。また、評価地点 i における安全度として、超過確率を考える。つまり、流量においては基準値を下まわらない確率を、汚濁負荷量においては基準値を上まわらない確率を考え、次式のように表現する。

$$R_i^k = 1 - \int_0^{Q_i^*} f_{Q_i}(Q_i) dQ_i \quad R_i^h = 1 - \int_{C_i Q_i^*}^{\infty} f_{C_i Q_i}(C_i Q_i) dC_i Q_i \quad (2)$$

ここに $f_{Q_i}(Q_i)$, $f_{C_i Q_i}(C_i Q_i)$ は評価地点 i における水量・汚濁負荷量の確率密度関数であり、式(1)のような関係があれば、流入前の流量の確率密度関数を用いて表現することができる。本研究では、この流入前の流量はダム通過後の平滑化された流量と考え、確率分布を先鋭化した対数正規分布と仮定している。最後に式(2)により各評価地点の安全度(超過確率)が得られると、それらを統合してシステム全体の安全度を決定するのであるが、今、かりに、いくつかの評価地点において超過確率が同じであったとしても、その評価地点個々がもつ重要度は異なっており、よって、渇水に際して基準値を満足し得ない事態が発生したときの深刻さや被害額といったものも異なってくる。そこで、各評価地点において確保すべき安全度をシステム内の水利用、環境条件、ならびに水文特性などを考慮して定め、それと式(2)で得られた安全度との比を、新たな安全度の指標として定義し、その最小値をもってシステム全体の安全度として採用する。この指標を用いることにより、単に超過確率を指標とした安全度評価では考慮できなかった社会経済活動への影響度合といったものを含有した形の安全度評価が可能となる。また、水量・水質の安全度評価は同等と考え、結局、次式を満足するものをシステム全体の安全度 P として採用することになる。

$$P = \min_{i,j} \left(\frac{R_i^k}{\bar{R}_i^k}, \frac{R_j^h}{\bar{R}_j^h} \right) \quad (3)$$

ここに $\bar{R}_i^k, \bar{R}_j^h$ は、各評価地点(i および j)が確保すべき安全度(超過確率)である。

(2) 実験計画法を用いた利水システムの策定 ここで策定する利水システムの目標を定義すると、「許容危険率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」ことになる。制約条件式は式(1)に表わした k_i, h_i (これらは、さらに数個の a_n, α_n, e_n など利水パラメータが複雑にからみあった関数である)を用いて表示することができる。しかし、利水パラメータが多数存在する複雑な利水システ

ムにおいては、この非線形最適化問題を解くことは不可能に近い。そこで利水システム策定の第1段階として、直交配列表に従う実験計画法を用い、システムの安全度に大きく影響するパラメータ（因子）を抽出する作業を行う。つまり有意性の高い因子のみを変数として制約条件および目的関数内に残し、その他の有意性の低い因子を排除して、最適化問題の単純化をはかるわけである。

（3）非線形最適化手法を用いた利水システムの策定 第2段階で定式化される非線形最適化問題は次式で示される。

目的関数

$$Z = F_1(X_1)+F_2(X_2)+\cdots \longrightarrow \min.$$

(4)

制約条件

$$R_i^k \geq \bar{R}_i^k, \quad R_j^h \geq \bar{R}_j^h$$

(5)

ここに、 X_i は第1段階でシステムの安全度に対し有意性ありと判断された利水パラメータ（因子）であり、 $F_i(X_i)$ はその利水施設の構成・運用費用を表わす費用関数である。本研究では、取水率 a 、処理率 e を、人為的に可変なパラメータと考え、計画の対象とし、どちらも、その値を向上させるためには2次関数的に費用が増大する形の費用関数を用いた。

3．適用例

（1）直列型利水システム（Fig. 1） 実験計画法によって a_2 、 e_1 、 e_2 が有意性因子として抽出された。最下流に位置する利水施設の危険度をおさえるのに有効な因子が抽出されている。また、 a_2 、 e_2 の2因子間には強い交互作用がみられ、一貫した利水と処理の必要性が示唆される。

（2）流域下水道・再利用を含むシステム（Fig. 2） より現実的に即した複雑な系として考察したが、 a_2 、 e_2 、 s_1 、 s_2 が有意性因子として抽出された。再利用の実施は、水量面において安全側、水質面において危険側と2つの側面をもち、必ずしもシステムの安全度を向上させるものではない。本来、再利用施設は、水量が十分であるときには必要なく、水量が低下した非常時において緊急用として用いるべき性格のものであるといえる。また、最適計画においては上流では再利用可能、下流において不可という結果が得られた。下流側における、再利用水の再利用といった、2重・3重の利水はシステムの危険度を増加させ、不可能ということになる。

（3）残流域・他流域を考慮した直列型利水システム（Fig. 3） 残流域の影響を $Q' = mQ + f$ という形で考慮した場合、1次係数 m の増加は水量的には安全側であるが、汚濁負荷量の絶対量の増加という水質面での危険性が増加すること、また定数項 f は確率的な流入分布に依存せず定常的にダム、井戸、地下水などから供給される流量であり、システムの安全度向上に最も有効に働く要素であることがわかる。確率的な河川表流水に比べ、非常に定常的かつ清廉な井戸、地下水を河川表流水と有機的に結合させたこのようなシステムは、今後我々がめざすべき利水システムの1つの姿と考えてよいであろう。

4．おわりに 以上、河川の利用率が高い流域での、より効率的な利水システム策定に関して、安全度評価をベースに、実験計画法と非線形最適化手法を結合させた計画手順とその適用例について述べたが、今後、実データの分析と時系列的要素を考慮した、より実流域に即した研究へと発展させていきたい。

<参考文献> 池淵・小尻・飯島；利水システムの安全度評価とその最適計画への適用，土木学会第38回年次学術講演会講演概要集第2部 pp.155～156

