

利水システムの安全度評価に関する研究

A STUDY ON RELIABILITY ANALYSIS FOR WATER RESOURCES SYSTEMS

小尻利治*・池淵周一**・飯島 健***

By Toshiharu KOJIRI, Shuichi IKEBUCHI and Takeshi IJIMA

Recently, it becomes serious problem to keep the balance in water resources between water supply and demand to prevent for shortness of water. There are several approaches, such as the construction of dam reservoirs, the reduction of water use, the reuse of wastewater, and the conjugative use between groundwater and surface water. However, it is difficult to estimate the safety of water resources system with necessary accuracy because of uncertainty in water quantity and quality. So, in this paper, we try to establish the comprehensive estimation procedure by using the three criteria, such as reliability, resiliency and vulnerability. Then, they are evaluated under the condition of conditional input data in time and space. Moreover, water resources system is optimized on the basis of their criteria.

Keywords: water resources system, reliability analysis, probability matrix, dam operation and orthogonal layout

1. ま え が き

水資源の有効利用は、水を媒介として社会生活を営む人間にとって避けることのできない課題である。その解決には、次の2つのアプローチをとらねばならない。まず第1は、新規水資源の開発を行うことであり、ダム建設、他水系からの導水、などの方策である。第2は、水需給構造の合理化であり、節水、排水の再利用、地下水の適正な保全と利用、循環的水利用の促進、各種用水の活用、といった水利用形態の改善策である。現在の水資源問題の解決策としては前者を扱う場合が多く、後者を含んだきめ細かい分析を重視していないきらいがある。その結果として、都市用水の大量消費・浪費構造が発生したと考えられる。さらに、水質汚濁の側面からしても、水利用形態が、ますます、高度化・複雑化していく将来において、両者を含んだ水資源計画・運用を実施する必要があるのは明らかである。

一方、水資源賦存量、流出汚濁負荷量などの入力是不

確定要素が大きく、計画濁水として定義される流況ではシステムの安全度を十分な精度で把握することができない。いいかえると、水文現象の不確定さと水利用形態の複雑さを結合したシステムの表現が要求されるのである。

本研究は、以上のような見地から、時・空間的に相関構造を有する確率的入力を対象として、モデル化された利水システムの安全度を評価しようとするものである。特に、水量のみならず、水質を含んだ安全度評価の明確化をはかっている。加えて、そうした指標をもとにして、最適な利水システムを策定しようとするものである。

2. 安全度評価の意義と定式化

(1) 安全度評価の概念

信頼性工学の分野では、安全度を確率値としてとらえ、システムの管理・保全に関する指標としている。そこで、用いられる主要な要件¹⁾を水供給主体のレベルでとらえた水資源問題にあてはめると次のようになろう。

i) 対象：河川表流水、地下水などの水循環系、農業、工業、都市などの利用系、および、ダム貯水池、取・排水などの管理系からなる水資源システムをさす。ただし、降雨の都市内貯留、海水の淡水化といった研究段階のものは、現在のところ考えない。

* 正会員 工博 岐阜大学助教授 工学部建設工学科
(〒501-11 岐阜市柳戸1-1)

** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所
(〒615 宇治市五ヶ庄)

*** 正会員 工修 前田建設工業 土木設計部
(〒102 千代田区富士見町2-10-26)

ii) 適正な機能：システムの適正な機能とは、種々の利水施設に対して、その使用目的・効果に合致した水供給が行われることである。今日では、環境にまつわる状態も重要視されており、取水や排水後の水質も基準値を満たさねばならない。

iii) 規定の使用環境：規定、すなわち、あるコストの制限下でのシステムの活動に対する条件を示す。ここでは、自然現象の不確実性を考慮した確率的な水量・水質分布と確定的な利水量、水質基準である。特に、入・出力の時・空間的構造の取り扱いが問題となる。

iv) 規定の時間：あるコストの制限下において、システムが満足する状態にある時間を示し、施設の耐用年数、季節性によっても異なる。また、時間単位の取り方によっても変化する。ここでは、時間単位を半旬とし、年間を通しての挙動を考察するため解析対象期間を1年とする。

(2) 安全度評価指標

渇水現象は、「頻度」,「期間」,「規模」,「深刻さ」などで表現されることが多く、利水安全度に関しても同じである。すなわち、降水量、不足 % day から渇水被害額、社会経済活動への影響度²⁾が挙げられる。ただし、システムの評価は、シミュレーション解析により行われ、入力の不確定さを直接取り込んだものではない。そうした点に鑑み、本研究では、Hashimotoらの提案している次のような指標³⁾を導入し、安全度評価を明らかにするものである。なお、以下の評価指標は、著者らが日本語で再定義したものである。

a) 信頼度 (Reliability) 利水システムが、必要な水量・水質の基準値を満たす確率である。いま、 t 期におけるシステムの出力を $X(t)$ とし、出力が x_i レベルとなる確率を

$$e(t, i) = \text{pr}[X(t) = x_i] \dots\dots\dots (1)$$

$$(i=1, 2, \dots, I; t=1, 2, \dots, T)$$

とする。ここに、 I は確率変数の離散化数、 T は解析対象期間である。したがって、 t 期におけるシステムの信頼度は

$$\text{REL}(t) = \text{pr}[X(t) \in S] = \sum_{i \in S} e(t, i) \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 S はシステムが安全 (Success), すなわち、基準値を満たす状態になり得る出力 $X(t)$ の集合を表わす。

b) 回復度 (Resiliency) 渇水の継続性や立ち直りの早さを表わし、次式によって定義される。

$$\text{RES}(t) = \text{pr}[X(t+1) \in S | X(t) \in F]$$

$$= \sum_{i \in S} \text{pr}[X(t+1) = x_i, X(t) = x_j] /$$

$$\sum_{j \in F} \text{pr}[X(t) = x_j] \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 F はシステムが故障 (Failure), すなわち、

基準値を満たさなくなる出力の集合を表わす。

c) 深刻度 (Vulnerability) 故障の深刻さの度合を示す指標であり、渇水の強度を次のように定義する。すなわち、

$$\text{VUL}(t) = \sum_{i \in F} v_i \cdot e(t, i) \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 v_i はシステムの出力が i レベルであるときの深刻さを表わし、要求される出力を x_{opt} とすると

$$v_i = \left(\frac{x_{\text{opt}} - x_i}{x_{\text{opt}}} \right)^\beta \quad (x_i \leq x_{\text{opt}}) \dots\dots\dots (5)$$

で与えられる。なお、 $\beta=1$ のとき式 (5) は不足 % に相当する。

3. 利水システムのモデル化

(1) 利水システムの基本構造

空間的に複雑な利水システムをその取・排水特性より数個の基本ユニットに分類すると次のようになる。

- i) 量や質の変化をもたらす水利用施設 (その背後には水利用者がいる)
- ii) 水質の浄化を行う水処理施設
- iii) 取水・放流を行う分岐・合流施設
- iv) 河川表流水の流れを変えるダム貯水池・導水路

つづいて、各ユニットのモデル化が必要となるが、システムの時・空間的従属性を表現するため、条件付確率行列の概念を用いて展開する。

a) 水利用施設 (水利用者) 都市、工場などの利水施設を表わすパラメーターとして、水量については還元行列 A , 水質については汚濁行列 \bar{C} を導入する⁴⁾。行列 A は利用された水のうち、再びシステム内に返却される割合を α , 消費される割合を $(1-\alpha)$ としてとらえたものである。 \bar{C} は利水施設 (いわゆる水利用者) による水の悪化を示し、 \bar{C} は最低限加わる濃度である。 A, \bar{C} の変換行列は Fig. 1 によって示される。したがって、利水施設通過前の水量・水質の生起確率ベクトルを Q_1, C_1 とすると、通過後の生起確率ベクトルは

$$Q_2 = Q_1 \cdot A \dots\dots\dots (6)$$

$$C_2 = C_1 \cdot \bar{C} \dots\dots\dots (7)$$

となる。ただし、 Q_1, C_1 は、流量および水質濃度が離散値 i のときに生起確率 q_i, c_i ($\sum_{i=1}^I q_i = 1, \sum_{i=1}^I C_i = 1; I,$

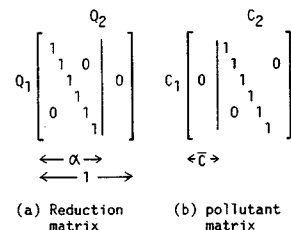


Fig. 1 Examples of transformation matrices.

IIはそれぞれの要素の総数)をとるベクトルである。もちろん、変換行列をある確率分布をもつ成分とすることも可能であるが、ここでは、水利用過程を明確にするため、I成分として扱っている。

b) 処理施設 処理施設として、浄水と下水の2種類が存在するが、いずれも、処理行列 B によって汚濁濃度ベクトル C_1 が C_2 に変換されるとする。すなわち、

$$C_2 = C_1 \cdot B \dots\dots\dots (8)$$

c) 分岐施設 分岐される2方向の水の流れのうち、河川から利水施設への取水を取水行列 R で表わそう。取水行列 R は、取水前の水量 QR_1 に対する取水後の水量 QR_2 を行列表示したものであり、取水量に相当する成分が1である。したがって、取水されない流量行列 \bar{R} は、単位行列 (流量 QR_1 を表わす) の第 (i, i) 成分と同じ i 行において、取水行列の値が1である第 (i, j) 成分を取り出し、第 $(i, i-j+1)$ 成分の値を1とおくことにより得られる。ただし、分岐による水質変化は起こらないものとする。この取水行列 R を用いると、必要以上の取水を禁止するなど、異常渇水時の節水ルールに応じた形態をとることができる。

d) 合流施設 下水処理場から河川への排水、下流側利水施設への本川直接取水と再利用の合流は、次のような合流行列の変換によりモデル化できる。

合流地点に至るまでの水の挙動は、今までの計算方法より、各変換行列の結合として表現できる。具体的には、まず、分岐施設によって取水流量は最上流流量の条件付確率行列 (確率1での) となる。さらに、取水後に浄水、処理施設があれば、式(6)~(8)の生起確率ベクトルを条件付確率行列と読み直すと施設通過後の確率行列が求められる。ところで、合流前の流量を QD_1, QD_2 とすると、合流後の流量 QD_3 は

$$QD_3 = QD_1 + QD_2 \dots\dots\dots (9)$$

である。したがって、最上流流量 Q_0 に対する合流前の条件付確率行列をそれぞれ QD_{0-1}, QD_{0-2} とすると、式(9)の流量変化を参考にすれば、 QD_{0-1} 行列の第 i 行で1になる成分 (i, j) と QD_{0-2} 行列で同じ i 行上の値が1である成分 (i, j') を取り出し、第 $(i, j+j'-1)$ 成分を1とおくことにより合流流量の条件付確率を得ることができる。

(2) 水量・水質の空間的従属性

任意の評価地点 n の水量は、最上流地点からいくつかの分岐・合流・利水施設により増減している。いま、最上流流量が与えられると、最上流評価地点流量そのものの条件付確率行列は、単位行列 E で与えられる。つづいて、取水行列 R 、利水行列 A の行列乗算、あるいは、分岐・合流の行列変換を行うことにより、最上流流量

Q_0 に対する評価地点 n の流量 Q_n の条件付確率行列 Q_{0-n} を得ることができる。ここに、 Q_{0-n} の i 行 j 列の要素 a_{ij} は

$$a_{ij} = \text{pr}[Q_n = j | Q_0 = i] \dots\dots\dots (10)$$

で表わす条件付確率値をもっている。また、 a_{ij} が0か1しか取らないとき、取水ルールが設定されていると、システム内の流量は一意的に決定されることになる。

水質に関しては、分岐の場合は変化しないが、合流時には流入条件により変化が生ずる。ここでは、完全混合で評価し得ると仮定すると、合流後の水質濃度 CD_3 は式(9)を用い

$$CD_3 = \frac{CD_1 \cdot QD_1 + CD_2 \cdot QD_2}{QD_1 + QD_2} \dots\dots\dots (11)$$

となる。式(11)より CD_3 は必ずしも適切な離散値を取るとは限らない。しかし、前後の基準地点と比較して非常に異なる値を取るとは考えられないので、その近傍の離散値を合流濃度としても水質の連続性は成立するであろう。合流前の水量・水質は最上流地点の水量・水質に従属していることが得られたから、合流後の水質も、また、一意的に決定することができる。すなわち、最上流地点の流量 Q_0 および水質 C_0 に対する評価地点 n の水質 C_n は、条件付確率行列 C_{0-n} なる三次元行列として求められる。ここに、 C_{0-n} の要素は

$$a_{ijk} = \text{pr}[C_n = j | C_0 = i, Q_0 = k] \dots\dots\dots (12)$$

で表わされる。すべての評価地点における水質行列が明らかになれば、最上流流量に対する最上流水質の条件付確率行列 QC_0 ($a_{ij} = \text{pr}[C_0 = j | Q_0 = i]$) を用いて、水質 C_0 に関する QC_0 と C_{0-n} の行列積を実行する。得られた行列 QC_{0-n} の要素は、

$$a_{ij} = \sum_k \text{pr}[C_0 = k | Q_0 = i] \cdot \text{pr}[C_n = j | C_0 = k, Q_0 = i] \\ = \text{pr}[C_n = j | Q_0 = i] \dots\dots\dots (13)$$

となり、これは最上流流量に対する評価地点 n の水質の条件付確率を意味している。結局、水量・水質とも同様の表現が可能となる。

(3) 貯水池による水量の時間的従属性

上流側にダム貯水池が存在する場合、ダム下流の河川流量はダムへの流入量そのものの特性やダム操作の変換を受け、時間的に独立とはいいがたく、特に解析時間単位が小さいほどその傾向は著しい。ここでは、貯水池流入量を単純マルコフ過程に従うと仮定⁵⁾して展開を続ける。具体的には、流入量は次のような要素より成る推移確率行列 $PQ(t)$ で定義される。

$$a_{ij}(t) = \text{pr}[Q(t+1) = j | Q(t) = i] \dots\dots\dots (14)$$

ここに、 $a_{ij}(t)$ は t 期の流入量が i レベルであるとき、 $t+1$ 期の流入量が j レベルになる確率を表わしている。

さて、 t 期におけるダム貯水池の流入量を $Q(t)$ 、放

流量を $O(t)$ 、初期貯水量を $S(t)$ とすると、流量の連続式として

$$S(t+1) = S(t) + Q(t) - C(t) \dots\dots\dots (15)$$

が成立する。ただし、貯水量と流量は時間単位での換算が加えられ、単位の整合性がはかられているものとする。また、ダム操作ルールは、当該期の流入量予測を行わず、 t 期の初期貯水量より決定されるとすれば、

$$O(t) = f(S(t)) \dots\dots\dots (16)$$

なる関数形で与えられる。式 (15)、(16) より、ダム貯水池による流量変換は、貯水量に対して $f(S(t))$ なる分流と流入量 $Q(t)$ なる合流が行われていることに等しく、前述の行列変換を用いることができる。

まず、完全放流方式の場合、関数 $f(\cdot)$ を次のように定義する。

$$\left. \begin{array}{l} S(t) \geq QD^* \text{ のとき } O(t) = QD^* \\ S(t) < QD^* \text{ のとき } O(t) = 0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (17)$$

ここに、 QD^* は、ダム直下の評価地点における t 期の必要流量（あるいは換算後の貯水量）である。式 (17) を要素とする放流量行列を DA とすると、貯水池に残存する貯水量 $S'(t) (= S(t) - O(t))$ は、単位行列より放流量行列を分岐させた形の貯水池残存行列 DA' となる。したがって、 $S(t+1)$ は $S(t)$ と $Q(t)$ の両者に依存することから、 $S(t+1)$ の貯水量行列は三次元となり、その行列要素は

$$a_{ijk}(t) = u[S(t+1)=j | S(t)=i, Q(t)=k] \dots\dots\dots (18)$$

となる。ここに、 $u(\cdot)$ は 0, 1 要素を示す。次に式 (18) の見方を変えて、各流量ごとの行列ととらえると、 t 期の初期貯水量が i レベル、 $t+1$ 期の貯水量が j レベルとなる推移行列 DT とよぶことができる。ここで、 t 期における貯水量と流入量の同時確率行列 $SQ(t)$ が既知であるとき、その転置行列 $SQ(t)^t$ の第 k 行と三次元行列 DT の第 k 段目との行列積より行列 $\overline{SQ}(t)$ が得られる。その要素 $\overline{a}_{ij}(t)$ は

$$\begin{aligned} \overline{a}_{ij}(t) &= \sum_k \text{pr}[Q(t)=i, S(t)=k] \cdot u[S(t+1)=j | \\ &\quad S(t)=k, Q(t)=i] \\ &= \text{pr}[Q(t)=i, S(t+1)=j] \dots\dots\dots (19) \end{aligned}$$

で表わされ、 $\overline{SQ}(t)$ が $Q(t)$ と $S(t+1)$ の同時確率となる。さらに、 $\overline{SQ}(t)$ の転置行列に流入量推移確率行列 $PQ(t)$ を乗ずると、 $t+1$ 期の貯水量と流入量の同時確率行列 $SQ(t+1)$ が得られる。以上の手順により、 t 期の貯水量と流入量の同時確率行列が逐次求められることになる。

また、ダムからの放流量の同時確率行列 $DQ(t)$ は、次のようにして求めることができる。まず、行列 DT と $SQ(t)$ を流量 $Q(t)$ に関して乗ずると、次のような貯水量の同時確率行列 $SS(t)$ が得られる。その要素は

$$a_{ij} = \sum_k \text{pr}[S(t)=i, Q(t)=k] \cdot \text{pr}[S(t+1)=j]$$

$$\begin{aligned} Q(t) &= k, S(t) = i \\ &= \text{pr}[S(t)=i, S(t+1)=j] \dots\dots\dots (20) \end{aligned}$$

となる。したがって、行列 $SS(t)$ に放流行列 DA による変換を施すと、 t 期と $t+1$ 期の放流量の同時確率行列となる。ダムへの初期流入量生起確率と初期貯水量生起確率が与えられれば、流入量の時間的従属性とダム貯水池の貯留効果を包含した放流量の確率行列が明らかになる。

ただし、水質に関しては、ダムが上流域に配置されていること、利水時を対象にした長期間（半旬単位）評価を目標にしているため、人為作用による汚濁濃度の急激な変化はないものとして、放流量の条件付確率として取り扱っている。なお、本章で展開した行列演算は、分岐・合流過程で示したように、常に線型代数学で用いる方法で行ってはならず、河川水の移動現象に適合した形を取っている。

4. 利水システムの安全度評価手順

(1) 評価地点での安全度

t 期における最上流流量の生起確率として、 $Q_0(t)$ なる行ベクトルで与えられ、評価地点 n における流量の生起確率 $Q_n(t)$ は

$$Q_n(t) = Q_0(t) \cdot Q_{0-n} \dots\dots\dots (21)$$

となる。水質に関しても同様に、次の生起確率行ベクトルで表わされる。

$$C_n(t) = Q_0(t) \cdot QC_{0-n} \dots\dots\dots (22)$$

各評価地点の信頼度は、水量においては基準値 Q_n^* を下回らない確率、水質においては基準値 C_n^* を上回らない確率と定義すると、次のようになる。

$$\text{REL}_{qn}(t) = \sum_{i < Q_n^*} p_i^n(t) \dots\dots\dots (23)$$

$$\text{REL}_{cn}(t) = \sum_{i > C_n^*} q_i^n(t) \dots\dots\dots (24)$$

ここに、 $p_i^n(t)$ と $q_i^n(t)$ は行列 $Q_n(t)$ 、 $C_n(t)$ の第 i 要素である。

t 期と $t+1$ 期における最上流流量の同時確率行列 $\hat{Q}_0(t)$ が与えられると、次式より t 期と $t+1$ 期の地点 n での流量の同時確率行列が得られる。

$$\hat{Q}_n(t) = (\hat{Q}_0(t))^t \cdot Q_{0-n}^t \cdot Q_{0-n} \dots\dots\dots (25)$$

水質に関しても、同様にして、同時確率行列 $\hat{C}_n(t)$ が得られる。

$$\hat{C}_n(t) = (\hat{Q}_0(t))^t \cdot QC_{0-n}^t \cdot QC_{0-n} \dots\dots\dots (26)$$

ゆえに、評価地点 n の回復度は、それぞれ

$$\text{RES}_{qn}(t) = \sum_{\substack{i < Q_n^* \\ j \geq Q_n^*}} p_{ij}^n(t) / \sum_{i < Q_n^*} p_i^n(t) \dots\dots\dots (27)$$

$$\text{RES}_{cn}(t) = \sum_{\substack{i > C_n^* \\ j \leq C_n^*}} q_{ij}^n(t) / \sum_{i > C_n^*} q_i^n(t) \dots\dots\dots (28)$$

となる。ここに、 $p_{ij}^n(t)$ と $q_{ij}^n(t)$ は行列 $\hat{Q}_n(t)$ 、 $\hat{C}_n(t)$ の

第 i 行 j 列要素である。最後に、深刻度を式 (7) の期待値と定義すると、

$$VUL_{on}(t) = \sum_{i < Q_n^*} \left(\frac{Q_n^* - i}{Q_n^*} \right)^{\beta} p_i^n(t) \dots \dots \dots (29)$$

$$VUL_{cn}(t) = \sum_{i > C_n^*} \left(\frac{i - C_n^*}{C_n^*} \right)^{\beta} q_i^n(t) \dots \dots \dots (30)$$

となる。

(2) 安全度評価の統合化

各基準地点、各時刻での安全度が算定されると、次に、それらの統合化を行いシステム全体を評価することが必要になる。確かに、社会的目標等の指標が明確になれば、多目的最適化手法を導入して統合化をはかることができる。ここでは、利水問題に対する社会的目標が確立されていないとみなし、安全度指標間の統合化は行わず、複数基準地点系におけるシステム全体の安全度をその最悪値として算定するにとどめる。すなわち、各基準地点のもつ重みは同一として、信頼度、回復度、深刻度を次式より決定する。

$$\text{信頼度: REL.} = \min_{(n,t)} \{ \text{REL.}_n(t) \} \dots \dots \dots (31)$$

$$\text{回復度: RES.} = \min_{(n,t)} \{ \text{RES.}_n(t) \} \dots \dots \dots (32)$$

$$\text{深刻度: VUL.} = \max_{(n,t)} \{ \text{VUL.}_n(t) \} \dots \dots \dots (33)$$

$$(n=1, 2, \dots, N; t=1, 2, \dots, T)$$

(3) 開放循環型利水システムでの必要流量の算定
基準地点の必要水量を算定する例として、Fig. 2 に示

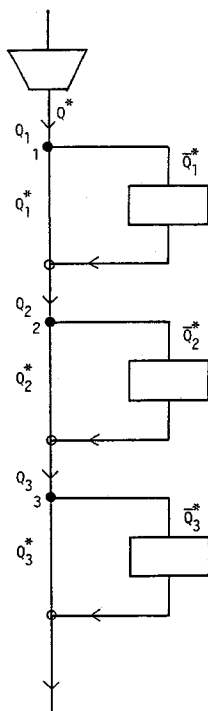


Fig. 2 Schematic representation of basin model.

す開放循環型のシステムを考えよう。各基準地点の許容値は、必要最低流量とする。システム内を流下する流量は、最上流流量により一義的に決定されるので、逆算すれば各基準地点での許容量を確保し得る最上流流量が求められる。たとえば、取水流量（許容値）を Q_n^* 、本川流量を $Q_n^*(t)$ とすると、各取水（分岐）地点での流量は両者の和 $Q_{on}(t)$ となる。ゆえに、対応する最上流流量を $Q_{on}(t)$ と書くと、必要流量 $Q_n^*(t)$ は

$$Q_n^*(n) = \max_n \{ Q_{on}(t) \} \dots \dots \dots (34)$$

である。 $Q_n^*(t)$ をダム放流の基準値（式 (17) の QD^* に相当）とすると、この基準値を上回る放流をする限り、システムは安全といえる。また、水質に関しても、同様の安全度の定式化が行われると、式 (34) に基づく放流ルール化での安全度が算定できる。さらに、図のような開放循環型に限らず、流域下水道・再利用型など任意のシステムに本理論が適用できることはいうまでもない。

5. 実験計画法を用いた利水システムの策定

(1) 実験計画法による上位解の探索

与えられた利水システムに対する安全度評価が可能になったので、つづいて、施設の最適配置計画、操作問題を考えよう。ところが、複雑な利水システムを対象とする場合、決定変数である利水パラメーターが多数存在し、定式化はできるもの実際の計算は不可能になる。こうした大規模問題を扱う有力な手法の1つに実験計画法⁶⁾がある。吉川らは、治水システムにおける施設規模と被害額の関係式を求めるために実験計画法の適用をはかっている⁷⁾。しかし、決定すべきパラメーターと本システムの評価値の関係を簡単な関数形で定義することは、パラメーターの相互作用からみても非常に困難であると思われる。ここでは、上位解（代替案となり得る解集合のなかで、計画目的に合致する最適解およびそれに準ずる解を示す）の抽出とシステムの応答特性を得るために実験計画法を用いることにする。

実験計画法とは、因子 (factor) とその水準 (level) に応じた直交配列 (orthogonal layout; ある規則に従って選ばれる因子一水準より成る多数のシステムモデル) を作成するとともに、おのおののケースでシステムの実験 (評価) を行って、その測定値をもとに各因子の効果を F -検定で判定するものである。利水システム策定における因子は、人為的に変更可能なパラメーター (ダム放流量行列, 取水行列, 処理行列) が相当する。利水行列, 汚濁行列は変更が困難なパラメーターで、決定因子とはできないであろう。一般に、因子水準の数は3として使われており、因子数が約10のシステムでは27組の異なる因子一水準の組合せ (Table 1 参照) に対して因

Table 1 Orthogonal layout in design method, $H_{3,27}$.

Factor	Simulation													Evaluated value
Simulation	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	F1
2	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	F2
3	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	F3
4	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	F4
5	0	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	0	0	F5
6	0	1	1	1	2	2	2	0	0	0	1	1	1	F6
7	0	2	2	2	0	0	0	2	2	2	1	1	1	F7
8	0	2	2	2	1	1	0	0	0	2	2	0	1	F8
9	0	2	2	2	2	2	2	1	1	0	0	0	0	F9
10	1	0	1	2	0	1	2	0	1	2	0	1	2	F10
11	1	0	1	2	1	2	0	1	2	0	1	2	0	F11
12	1	0	1	2	0	0	1	2	0	1	2	0	1	F12
13	1	1	2	0	0	1	2	0	1	2	0	1	2	F13
14	1	1	2	0	1	2	0	2	0	1	0	1	2	F14
15	1	1	2	0	2	0	1	2	0	1	2	1	2	F15
16	1	2	0	1	0	1	2	0	1	1	2	0	0	F16
17	1	2	0	1	1	2	0	0	1	2	2	0	1	F17
18	1	2	0	1	2	0	1	1	2	0	0	1	2	F18
19	2	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	F19
20	2	0	2	1	1	0	2	1	0	2	1	0	2	F20
21	2	0	2	1	2	1	0	2	1	0	2	1	0	F21
22	2	1	0	2	0	2	1	1	0	2	2	1	0	F22
23	2	1	0	2	1	0	2	2	1	0	0	2	1	F23
24	2	1	0	2	2	1	0	0	2	1	1	0	2	F24
25	2	2	1	0	0	2	1	2	1	0	1	0	2	F25
26	2	2	1	0	1	0	2	0	2	1	2	1	0	F26
27	2	2	1	0	2	1	0	1	0	2	0	2	1	F27

子の主効果を求めることができる。表よりも因子が少ないときは、その列を空白にしておけばよい。したがって、まず、実験計画法によって、システムの安全度を大きく左右する因子（有意性因子）を抽出することになる。その結果をもとに、重視すべき因子（有意性因子を対象として望ましいシステム構成（最適化）を行うわけである。

適用時には、3水準27実験の直交配列表 $H_{3,27}$ に対応する代替案を用いる。具体的には、取水施設、浄水・処理施設、再利用水還元施設を採用している。一方、システムの安全度に重大な影響を及ぼすダム貯水池については、特定の因子とせず、個別の取り扱いをすべきであろう。また、27回の実験より評価された安全度の高い代替案は、最適解ではないが、ある程度の保障を有する上位解である。その結果、この上位解の近傍に最適解が存在する可能性は高く、最適解探索の収束時間を短縮するためにも、この上位解を初期値として利用することは有効であろう。

(2) 最適計画へのアプローチ

安全度評価をベースとした利水システムの策定目標を“規定された安全度の範囲内という制約条件のもとで、システムの運用費用を最小にすること”と定義しよう。実験計画法による有意性因子の抽出作業を最適計画の準備段階と考え、有意性の高い因子のみを決定変数にもつ簡略化された最適化問題を構成するわけである。すなわち、定式化は次のようになる。

目的関数：

$$Z = \sum_m F_m(X_m) \rightarrow \min \dots\dots\dots (35)$$

制約条件：

$$RE \geq \overline{RE} \dots\dots\dots (36)$$

ここに、 X_m は有意性因子として抽出された利水パラメーター、 m は施設番号、 F_m はそれにかかわる建設・運転費用関数、 RE はシステムの安定度のベクトル表示、

\overline{RE} は必要とされる安全度のベクトルである。運転費用は、施設の効率を表す水準の関数であれば、任意の形が可能であるが、現在のところ、水準の2次関数として

6. 適用と考察

(1) ダム貯水池のモデル化

ダム貯水池による安全度の変動特性を把握するため、単一ダム・単一流域での適用を行おう。貯水池による流量調節を実施するに際して、想定する計画期間と水量制御を行う時間単位を制御目的に合致するように選ぶ必要がある。大容量貯水池で数十年に及ぶ期間が対象になる場合は、時間単位を1年にすることもできよう。逆に、小容量なら、時間単位を日～月に選ぶことも妥当である。

わが国の貯水池の大部分は年単位の流量調整をし得る容量をもたないこと、降水量の季節変動が激しく、渇水の要因がそこにみられることを考慮して、ここでは、計画期間を1年、操作の時間単位を半月とした。貯水池容量は小規模な150万 m^3 とする。流入量も半月を時間単位とし、半月総流入量で扱う。計画期間に関しては、資料数が少ないので、降雨の季節変動をもとに夏季（6月～9月）と冬季（10月～5月）を設定した。Table 2は、ある流域の15年間の流量資料より、夏季、冬季の2パターンの半月流量遷移確率行列である。離散幅は5万 m^3 で15段階とした。この値は、約0.1 m^3/s に換算され、渇水という異常低水時の安全度評価議論に十分耐えるものと思われる。表より、半月流量の変動特性は夏季と冬季で非常に異なっていることがわかる。冬季における流量確率が平均値のまわりに集中しているのに対し、夏季では、大きな流量が偶発的に生じている。台風、梅雨、集中豪雨などがその要因であろう。

次に、ダムからの放流をその半月の間一定と仮定し、半月総放流量に対する離散幅を流入量、貯水量と同じく5万 m^3 、半月最大放流量を50万 m^3 とした。ダム放流行列は、Fig. 3に示すように、(a) 流入量がある値に達するまではそのまま放流し、ある値以上になると一定量放流とする場合（オペレーション1）、(b) ある基準値まではすべて貯留する極端な場合（オペレーション2）、および、(c) その中間（オペレーション3）の3種類のパターンを対象とする。図中の Q^* は下流基準地点での需要流量の半月にわたる積分値であり、 V^* は Q^* に相当する貯水量を示している。初期値としては、利水用と考えているので梅雨期の雨を期待し、6月初頭のダム貯水量はなく、半月流量20万 m^3 を与える。Table 3は、各操作パターン（a）での放流量の半月番号36に相当する同時確率行列である。操作パターン（b）では、確率値をもつ要素が四隅に集中し、極端な行列に

Table 2 Conditional probability matrixes of water quantity.

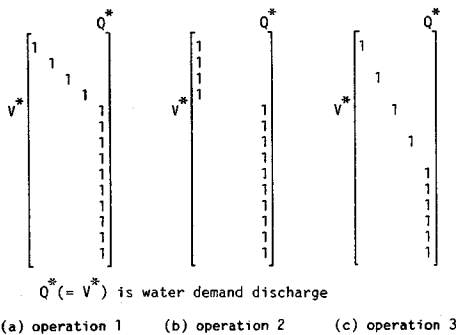
Transition probability matrix (winter)

0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.071	0.571	0.0	0.286	0.071	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.267	0.400	0.0	0.200	0.067	0.0	0.0	0.067	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.177	0.177	0.353	0.118	0.059	0.059	0.059	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.064	0.128	0.362	0.149	0.043	0.085	0.043	0.021	0.064	0.0	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021
0.0	0.0	0.0	0.019	0.056	0.093	0.241	0.222	0.093	0.056	0.093	0.037	0.019	0.037	0.019	0.037	0.019	0.037	0.019	0.037
0.0	0.0	0.0	0.0	0.020	0.061	0.225	0.306	0.102	0.102	0.061	0.02	0.082	0.020	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.023	0.023	0.046	0.136	0.318	0.205	0.068	0.023	0.068	0.046	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.046
0.0	0.0	0.0	0.035	0.035	0.069	0.172	0.241	0.103	0.103	0.035	0.069	0.035	0.069	0.035	0.069	0.035	0.069	0.035	0.069
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.059	0.235	0.118	0.177	0.118	0.118	0.118	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.059
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.111	0.111	0.222	0.296	0.074	0.111	0.037	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.037
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.059	0.118	0.059	0.294	0.118	0.059	0.059	0.118	0.118	0.0	0.0	0.0	0.0	0.059
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.125	0.0	0.625	0.0	0.125	0.0	0.0	0.125	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.125
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.111	0.0	0.111	0.333	0.111	0.0	0.222	0.0	0.111	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.111

Transition probability matrix (summer)

0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.500	0.167	0.083	0.083	0.0	0.083	0.0	0.0	0.083	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.214	0.143	0.214	0.071	0.071	0.071	0.0	0.0	0.071	0.0	0.071	0.0	0.071	0.0	0.071	0.0	0.071	0.0	0.071
0.0	0.143	0.286	0.286	0.0	0.143	0.0	0.0	0.0	0.143	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.111	0.111	0.222	0.0	0.222	0.0	0.111	0.0	0.0	0.0	0.222	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.091	0.273	0.091	0.091	0.0	0.091	0.0	0.091	0.182	0.091	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.200	0.0	0.0	0.200	0.0	0.0	0.400	0.200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.143	0.0	0.0	0.143	0.143	0.143	0.0	0.0	0.143	0.0	0.0	0.286	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.143	0.0	0.286	0.0	0.143	0.0	0.0	0.0	0.143	0.0	0.143	0.0	0.143	0.0	0.143	0.0	0.143	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.083	0.0	0.167	0.0	0.250	0.083	0.167	0.250	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.182	0.0	0.182	0.091	0.0	0.091	0.182	0.091	0.091	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.091
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.600	0.200	0.200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.167	0.0	0.167	0.0	0.167	0.167	0.0	0.0	0.0	0.0	0.167	0.0	0.0	0.0	0.167	0.0	0.167	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.250	0.0	0.250	0.0	0.0	0.500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

where, $a_{ij} = \text{pr} [Q(t+1)=j | Q(t)=i]$; $\frac{Q(t+1)}{Q(t)} [a_{ij}]$ and one unit is $5.0 \times 10^4 \text{ m}^3$.



(a) operation 1 (b) operation 2 (c) operation 3
Fig. 3 Dam operation matrixes.

なる。一方、操作パターン(c)は(a)と同じような分布をしており、ダム操作に柔軟性を与えた方が平均的な流量分布が得られることがわかる。

(2) 下流域水利用システムのモデル化

実験計画法を適用する事前要件として、利水システムのパラメーターを次のように設定する。すなわち、取水・分岐の水量調節は、ダムと同じく3種類のパターンとした。具体的には、(i)利水優先、(ii)本川の維持用水優先、(iii)中間ルールである。また、浄水・下水の水処理施設は、(i)低レベル、(ii)中レベル、(iii)高レベルの3水準を用意する。利水行列、汚濁行列は人為的に変更することが困難なパラメーターとして、水量については還元率を80%、水質については原単位当たりの汚濁濃度を20ppmとする。なお、行列作成時の離散

Table 3 Joint probability matrix of release discharge.

At time stage 36

0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.005	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.004	0.034	0.0	0.017	0.0	0.004	0.0	0.0	0.004	0.0	0.0	0.004	0.0	0.0	0.004	0.0	0.0	0.0	0.004
0.0	0.0	0.015	0.023	0.001	0.011	0.004	0.0	0.0	0.004	0.0	0.0	0.004	0.0	0.0	0.004	0.0	0.0	0.0	0.004
0.0	0.0	0.001	0.012	0.012	0.024	0.008	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
0.0	0.0	0.001	0.009	0.017	0.049	0.020	0.006	0.011	0.023	0.006	0.011	0.023	0.006	0.011	0.023	0.006	0.011	0.023	0.006
0.0	0.0	0.002	0.007	0.010	0.027	0.024	0.010	0.006	0.024	0.010	0.006	0.024	0.010	0.006	0.024	0.010	0.006	0.024	0.010
0.0	0.0	0.001	0.001	0.003	0.008	0.020	0.026	0.009	0.025	0.009	0.025	0.009	0.025	0.009	0.025	0.009	0.025	0.009	0.025
0.0	0.0	0.001	0.002	0.003	0.006	0.012	0.020	0.012	0.018	0.012	0.018	0.012	0.018	0.012	0.018	0.012	0.018	0.012	0.018
0.0	0.0	0.001	0.003	0.004	0.009	0.019	0.028	0.031	0.036	0.031	0.036	0.031	0.036	0.031	0.036	0.031	0.036	0.031	0.036

where, $a_{ij} = \text{pr} [Q(t)=i, Q(t-1)=j]$; $\frac{Q(t)}{Q(t-1)} [a_{ij}]$ and one unit is $5.0 \times 10^4 \text{ m}^3$.

		C			
		1	2	3	4
Q	0	0.2	0.2	0.3	0.3
	1	0.2	0.3	0.3	0.2
	2	0.3	0.3	0.2	0.2
	3	0.3	0.3	0.2	0.2
	4	0.3	0.3	0.2	0.2
	5	0.4	0.3	0.2	0.1
	6	0.4	0.3	0.2	0.1
	7	0.4	0.4	0.1	0.1
	8	0.4	0.4	0.1	0.1
9	0.5	0.3	0.1	0.1	

Fig. 4 Conditional probability matrix between water quality and quantity.

幅は、水量では5万m³で10段階、水質では5ppmで4段階とする。

最上流の水質情報は、水量、水質の相関関係よりFig. 4の条件付確率で与える。

(3) 有意性因子と上位解の探索

複雑な利水システムの一例として、Fig. 5 に示すシステムを対象とした安全度評価を算定しよう。適用に際しては、この基本システムより派生した3つのシステム(直列型, 流域下水道型, 再利用型)を用いる。なお、各システム図は省略する。

a) 直列型システム 3か所の利水者(U)を中心に、取水、浄水、下水処理施設より成る部分システムの連続で、水は利用後、いったん本川に戻って次の利水者に取水される。再処理など部分システム間の結合(R1, R2, R4を通る経路)は存在しない。評価項目は、利水者の水量・水質、および、本川水質である。直交配列 $H_{3,27}$ の27個の水準の組合せで安全度を算定し、その後、F検定で有意性ありと判定された因子をTable 4に示す。有意性とは、その因子の変化に対するシステムの応答が強いことを意味している。最適システムを決定するには、必ずしも有意性因子だけで制約を満たす結果にならないが、非有意性因子は固定的な既知情報として扱い、有意性因子を最適化変数とすると効率的なシステム設計が可能となろう。水量の深刻度(VULQ)、水質の信頼度(RELC)は、ともに取水施設(I1, I2, I3)に左右されていることがわかる。水量の深刻度に関する要因の1つの浄水施設(C1)は、その単独効果ではなく、取水操作との交互作用が顕著なために有意性があったのであろう。一方、回復度(RESC)からみると、最下流部分システムの浄水、下水処理施設の影響が強くなる。直列型のように処理水を公共水域に戻す形態では、下流側の安全度がしだいに低下していき、それに応じて高度処理を求められていることがわかる。このように、有意性因子の抽出によって、水量・水質の安全度の改善に鋭敏な因子が明らかにされ、利水システム策定のスクリーニング情報となろう。

b) 流域下水道型システム 利水者が使った水は、

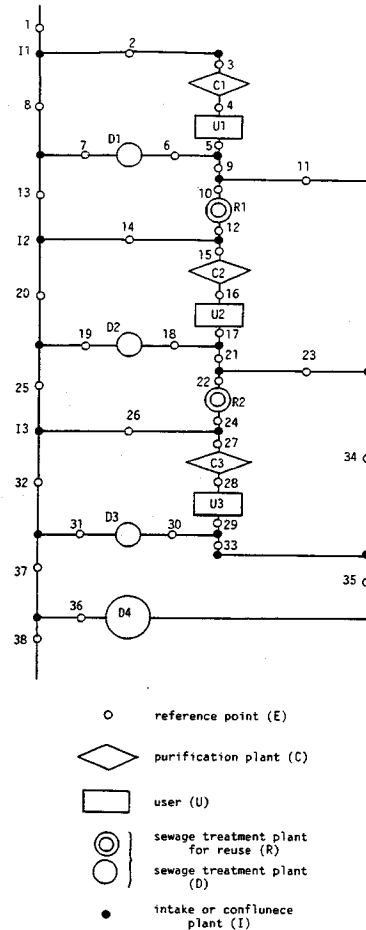


Fig. 5 Applied water resources systems.

下水処理場(D1, D2, D3)を通らずに流域下水道(D4)を経て本川へ還元される。すなわち、Fig. 5において、基準地点間の経路6-7, 18-19, 20-24, 30-31が存在せず、また、a)と同じく再処理施設も存在しない。排水は、

Table 4 Extracted significant factors.

		RELQ	RESQ	VULQ	RELC	RESC	VULC
serial type	operation 1	x	x	11, 12, 13 C1	11, 12, 13 C1	12 C3, D3	x
	operation 2	x	x	x C3, D3	x	12	x
	operation 3	x	x	11, 12, 13 C1	11, 12, 13 C1	12 D3	x
lumped type	operation 1		I1	I1	x	I1	
	operation 2	x	x	x	x	I1	x
	operation 3		x	x	I1		
reuse type	operation 1				x	C2	
	operation 2	x		x	x		x
	operation 3					C2	

"x" denotes the estimation value of error variance is zero

直接、流域下水道に入っていく。抽出された有意性因子は、最上流の取水施設のみであった。下流側の利用者にとって、供給されるものは、取水後の本川流量であり、浄水施設での水質は本川水質そのものである。ゆえに、浄水、処理水準を変化させてもシステム全体の安全度に与える影響は少なく、取水量の方が大きいことがわかる。システムの策定にあたっては、浄水、処理施設を大まかに定め、取水量について最適化をはかればよい。制約としての安全度が達成できないときは、浄水、処理水準を変えることになる。こうした一過性の水利形態は公共水域への還元を考慮する必要がないことや、管理する施設が1つですむことなどから、今後、増加していくことが予想され、そのときの指標となるであろう。

c) 再利用型システム b)と同様に、下水処理施設 (D1, D2, D3) は存在せず、そのかわり、再処理施設 (R1, R2, D4) により構成されるシステムである。排水は、再利用のために処理されるか、あるいは直接流域下水道に行って処理される。有意性因子としては、Table 4からもわかるように、2番目の浄水場 (C2) が抽出された。上流側利用者からの還元水の再利用と下流へ還元水を送る中継点としての役割が、システムの安全度に大きな影響を与えていると思われる。また、有意性因子決定の F 検定において、誤差分散の推定値が0になるケースが多い。他の因子は、27通りの水準の組合せでは結果に差がないことを表わし、入力条件を規定するダム貯水池操作の方が応答が鋭いことになる。システムの設計としては、2番目の浄水場以外は、上流より各施設とその直下の基準地点で独立な部分システムを構成し、制約を満たすような規模・操作を求めればよい。

Table 5 は最良の安全度を有する施設群とその水準を示したものである。水準の分割数が少ないことや水量・水質の応答特性が鈍いことより、複数の最良施設群が得られている場合が多い。

d) ダム操作ルールと深刻度 ダム直下の基準地点流量の深刻度が、式 (5) の損失関数、および、操作ルールとどのような相関構造であるか考察しておこう。ただし、評価は紙数の関係で第 72 期のみで行うとする。Table 6 は、式 (5) の β を 0, 0.5, 1, 2, 3 の 5 水準に分け、前出の 3 パターンでのダム操作結果である。最も深刻度の小さいダム操作は、 $\beta=0$ と 0.5 においてはダム操作 2 に、 $\beta=1$ においては操作 1 に、 $\beta=2$ と 3 においては操作 3 であった。 $\beta=0\sim 0.5$ の場合、完全放流が不可能であれば、基準値以下の放流を行う価値が認められないという特性がある。特に、 $\beta=0$ では深刻度と信頼度の和が 1 になり、深刻度は危険度と解釈することができる。一方、 $\beta=2, 3, \dots$ を考えると、損失関数はゼロ放流を最悪とし、放流が少しでもあれば被害を減少

Table 5 Superior alternatives in experimental design method.

unit number		level									
		I1	I2	I3	C1	C2	C3	D1	D2	D3	D4
serial type	operation 1	1	0	1	1	1	2	0	1	2	-
	operation 2	0	0	0	0	2	2	2	2	2	-
	operation 3	1	0	1	1	1	2	0	1	2	-
lumped type	operation 1	0	1	1	1	1	2	-	-	-	2
	operation 2	2	2	1	0	1	0	-	-	-	2
	operation 3	0	1	1	1	1	2	-	-	-	-
reuse type	operation 1	0	2	2	2	2	2	-	-	-	2
	operation 2	2	0	2	1	0	2	-	-	-	2
	operation 3	0	2	2	2	2	2	-	-	-	2

"-" denotes that the unit is not considered in this case

Table 6 Relationship between dam operation and vulnerability.

β	0	0.5	1	2	3
operation 1	0.583	0.361	0.239	0.122	0.071
operation 2	0.240	0.240	0.240	0.240	0.240
operation 3	0.691	0.392	0.240	0.108	0.057

させたいと判断している。いいかえると、貯水量をできる限り満杯に近づけようとするため、常に漏水にそなえたシビアな操作になろう。

e) 濁水の継続性の検討 濁水の継続性を評価するため、システムが t 期から T 期まで続けて安全 (非濁水状態) である確率を算定しよう。濁水事象が 1 次マルコフとして表現できるとき、その確率 $REL_d(T|t)$ は次のようになる。すなわち、

$$\begin{aligned}
 REL_d(T|t) &= \text{pr}[Q(t) \in S] \text{pr}[Q(t+1) \in S | Q(t) \in S] \cdots \text{pr}[Q(T) \in S | Q(t) \in S, \dots, Q(T-1) \in S] \\
 &= \text{pr}[Q(t) \in S] \cdot \text{pr}[Q(t+1) \in S | Q(t) \in S] \cdots \text{pr}[Q(T) \in S | Q(T-1) \in S] \cdots \cdots \cdots (37)
 \end{aligned}$$

また、同様の仮定より、システムが t 期から T 期まで続けて危険である確率 $UNREL_d(T|t)$ は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 UNREL_d(T|t) &= \text{pr}[Q(t) \in F] \cdot \text{pr}[Q(t+1) \in F | Q(t) \in F] \cdots \text{pr}[Q(T) \in F | Q(T-1) \in F] \cdots \cdots \cdots (38)
 \end{aligned}$$

Fig. 6 は、前節で用いた初期状態より始まる安全期間、危険期間の連続的変化を示したものである。ここには載せていないが、ダム操作 3 はダム操作 1 と同じ結果になり、ダム操作 2 は連続する危険性がもう少し減少している。操作 2 は完全放流かゼロ放流かを選択するものであり、濁水期における深刻性が大きくなるものの継続期間

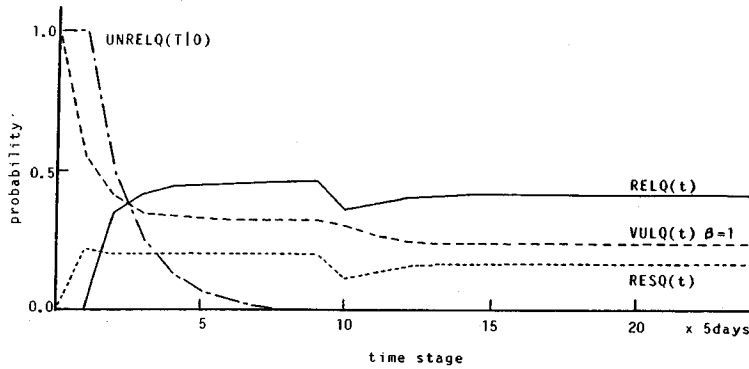


Fig. 6 Time sequences of safety ratios.

は短くなるのであろう。

7. 結 語

本研究は、高度化・複雑化する水利用形態を分析し、将来の水資源問題に対処するため、利水システムの安全度評価手法を提案したものである。さらに、その安全度評価をベースとした利水システムの策定手順を明らかにした。ここで、得られた成果を要約すると以下のようになる。

i) 流域内の任意の基準地点において、信頼度、回復度、深刻度といった安全度指標を明確にし、系全体としての評価を可能にした。

ii) マルコフ性を考慮した形でダム貯水池への流入量を扱い、単ダムではあるが、その放流量、貯水量を時間的な条件付確率行列で表わした。

iii) 下流域での利水システムとして、点在する水管理・変換システムを行列表示でパラメーター化し、任意のモデル構成を可能にした。

iv) ダム貯水池と下流利水システムを統合し、水量・水質両面における安全度評価を行った。

v) 第1段階では実験計画法、第2段階では最適化手法を用いた利水システムの策定手順を示した。

vi) 3種類のダム操作によって深刻度を分析し、渇水事象に対応するダム操作特性が把握できた。

また、今後の課題として

- i) 行列演算時における離散幅の設定法、および、次元の節減化
- ii) 複数ダム・複数流域への適用範囲の拡大が挙げられよう。

参 考 文 献

- 1) たとえば、塩見 弘：信頼性工学入門，丸善株式会社，pp. 2~5，1979.
- 2) 今村瑞穂・大内忠臣：水資源における利水安全度，第2回水資源に関するシンポジウム論文集，pp. 503~508，1982.
- 3) Hashimoto, T., Stedinger, J.R. and Loucks, D.P. : Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria For Water Resource System Performance Evaluation, Water Resources Research, Vol. 18, No. 1, pp. 14~20, 1982.
- 4) 小尻利治・池淵周一・飯島 健：安全度評価をベースにした最適な水利用システムの構成，第29回水理講演会論文集，pp. 323~328，1985.
- 5) 神田 徹：水資源計画における貯水池最適操作に関する研究，大阪大学博士論文，1975.
- 6) たとえば、田口玄一：実験計画法 上，丸善株式会社，1977.
- 7) 吉川和広・春名 攻・井山 聡・松原 裕：都市化流域における総合治水問題へのシステムズアプローチ，土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集，pp. IV-7-1~IV-7-2，1983.

(1986. 5. 2・受付)