

## 利水システムの安全度評価とその淀川水系への適用に関する研究

池淵 周一・白村 暁

### RELIABILITY ESTIMATION OF WATER RESOURCES SYSTEMS AND ITS APPLICATION TO YODO RIVER BASIN

By *Shuichi* IKEBUCHI and *Satoru* SHIRAMURA

#### Synopsis

In the viewpoint of intake and drainage structures, the water resources systems are composed of the combination of units or components such as user of water, water treatment facility, diverging or covering facility, dam reservoir and so on.

In this paper, the reliability and vulnerability criteria are discussed for evaluating the possible performance of water resources systems. The evaluation and selection of alternative design were investigated through their application to Yodo River Basin.

#### 1. はじめに

流域の社会経済活動を安定的に継続発展させるためには、それを支えるのに必要な水量・水質が安定的に供給されることが強く望まれる。そしてわれわれは自然的であれ、何らかの人為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にあう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実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ことになる。しかも、この利水安全度の問題は、水利用・開発形態の高度化・複雑化にともなって益々重要度を高めてきている。流域には今やダム貯水池を含め堰、浄水場、かんがい施設、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<sup>1)</sup>。

本研究は以上のような見地から、水量・水質両面からみた利水システムの安全度評価を行うものであり、淀川水系を例にこれを適用した上で、望ましい利水システムの構成をさぐるものである。

#### 2. 安全度評価の概念と定式化

利水システムの安全度をどのように評価するかは、システムをどのようにみるか、また、どのような指標を用いるかによって立場を異にする。本研究では、Hashimotoらの提案している安全度評価指標<sup>2)</sup>のうち、信頼度 (Reliability) と深刻度 (Vulnerability) をとりあげる。ただし、彼らは、これらの指標の概念構成に焦点をあて、その適用を単一ダム・単一評価地点という単純なシステムを対象に展開しているが、本研究では、次章で述べるようにより複雑な利水システムへ拡張するとともに、水量・水質両面を

考慮した展開に発展させている。

信頼度と深刻度の説明とその数学的定式化については、すでに参考文献1), 2) で述べているので、ここでは、簡単にふれるにとどめる。なお、以下の定式化にあつては、淀川の低水流量部を一つの対象母集団と考えており、データの存在期間の長さなど、信頼度、深刻度を定める確率が各期ごとに算定できるとは限らないこと、現象としても期間を分割すると、その間では確率値が時間的に変化しない、いわゆる定常と見なすことができる、といった点を考慮し、信頼度、深刻度の算定にあつては、時間軸上の各期で評価せず、定常扱っている。利水システムを計画レベルで評価する場合においては、まずはこうした取扱いで十分であろう。

### 2.1 信頼度 (Reliability)

信頼度は、システムがその要求される機能をどの程度満足できるかを表す指標である。利水システムにおいては、要求される水量・水質の基準値を満足する確率として与えられる。すなわち、信頼度は次式で与えられる。

$$REL = Pr[X \in S] = \sum_{i \in S} P_i \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $X$  はシステムの出力を表す確率変数で離散値をとるとする。 $S$  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  $X$  の集合を表し、 $i$  はそのときのレベルを表す。

### 2.2 深刻度 (Vulnerability)

深刻度は、システムに生じた異常事態の深刻性を、ある深刻性指標で定義し、その期待値をもって評価するものであり、利水システムにおいては、深刻性指標のとり方により、不足%・day や渇水被害関数の期待値を表す。

深刻度  $VUL$  は次式で与えられる。

$$VUL = \sum_{i \in F} v_i \cdot P_i \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $F$  はシステムが危険 (Failure) となる領域を表し、 $i$  はそのときのレベルを表す。また、 $v_i$  はシステムの出力が  $i$  レベルであるときのシステムの深刻性を示す指標であり、要求される出力を  $x^*$  とすると

$$v_i = \left( \frac{x^* - x_i}{x^*} \right)^r \times 100 \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる。なお、指数パラメータ  $r$  が1のとき、式(3)は不足%に相当し、 $r=2$ のときは(不足%)<sup>2</sup>となり、渇水被害関数を代弁するようになる。

このように、安全度評価指標を定式化し、要求する出力レベル、すなわち基準値として、確保流量あるいは環境基準を用いて信頼度、深刻度を求めることになるが、そのためには、水量・水質いずれにおいても、システムの出力  $X$  が  $x_i$  レベルとなる確率  $P_i$ 、いわゆる状態確率を求める必要がある。

## 3. 利水システムの安全度評価

利水システムの中に存在する各施設の操作・運用ルールをインプット・アウトプットの条件付き確率からなる確率マトリックスで表現することにより、システム内の各評価地点における流量、水質レベルでの状態確率は、最上流地点の流量、水質レベルに対する条件付き確率マトリックスを用いて表現することが

可能である。

### 3.1 利水システムの基本構造

今日、流域にはダム貯水池を含む堰、取水口、浄水場、上水道、下水道、下水処理場、排水口、かんがい施設など多くの利水関連施設が張りめぐらされてきている。このような施設を、その取・排水構造から分類すると、①量や質の変化をもたらす水利用施設、②水質の浄化を行う水処理施設、③取水・排水を行う分岐・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、となる。このような基本ユニットが多数かつ複雑に組合わさって、1つの利水システムが構成されている。こうした複雑な構造をもつシステムに対して、安全度評価が行えるようにするためには、各施設のもつ特徴を表現し得る何らかのパラメータを定義する必要がある。池淵らは各種利水パラメータを還元マトリックス、汚濁マトリックスといった施設通過前の水量・水質レベルに対する通過後の水量・水質レベルの条件付き確率マトリックスとして与え、システム内の評価地点における水量・水質レベルを最上流地点の水量レベルの条件付き確率マトリックスで表すことにより、利水システムの安全度評価を展開してきた<sup>3)4)</sup>。

本研究では、仮想系としての利水システムへの適用を積極的に試みることを目指しているため、これら提案された各種利水パラメータを実流域において適用可能なものとしている。

### 3.2 各評価地点での安全度評価

まず、各評価地点における水量レベルの状態確率を求める方法について説明する。

ある評価地点  $n$  を流れる水は、最上流地点からいくつかの分岐・合流・利水・処理施設を経て流入している。いま、最上流地点の水量レベルに対する評価地点  $n$  の水量レベルの条件付き確率マトリックスを  $\bar{Q}_{0-n}$  (以下、水量マトリックス  $\bar{Q}_{0-n}$  と表現する。) とし、これが得られているとする。計算プロセスは、文献1)を参照されたい。

評価地点  $n$  と次の評価地点  $n+1$  との間に利水施設がある場合、評価地点  $n+1$  の水量マトリックス  $\bar{Q}_{0-n+1}$  は、利水マトリックス  $\bar{A}$  と水量マトリックス  $\bar{Q}_{0-n}$  との乗算によって表すことができる。すなわち、

$$\bar{Q}_{0-n+1} = \bar{Q}_{0-n} \cdot \bar{A} \dots\dots\dots (4)$$

である。ここに、利水マトリックス  $\bar{A}$  は、

$$\bar{A} = [A_{ij}], A_{ij} = Pr[Q_a = j \mid Q_b = i] \dots\dots\dots (5)$$

$$\sum_{j=1}^{Q_{max}} A_{ij} = 1; (i=1, 2, \dots, Q_{max}) \dots\dots\dots (6)$$

$Q_b$ : 施設通過前の水量レベル,  $Q_a$ : 施設通過後の水量レベルである。

また、評価地点  $n$  と評価地点  $n+1$  との間に分岐点がある場合は、次の2通りを考える。

評価地点  $n$  に観測施設があれば、利水マトリックスと同様に、評価地点  $n$  の水量レベルに対する評価地点  $n+1$  の水量レベルの条件付き確率マトリックスを与え、これと水量マトリックス  $\bar{Q}_{0-n}$  との乗算によって水量マトリックス  $\bar{Q}_{0-n+1}$  を求める。一方、評価地点  $n$  に観測施設がなければ、水量マトリックス  $\bar{Q}_{0-n+1}$  を与えるものとする。

さらに、合流施設の取扱いについてであるが、いま、合流する2方向の合流直前の地点の水量レベルをそれぞれ  $Q_{n1}$ ,  $Q_{n2}$  ( $n1$ ,  $n2$  は、合流直前の地点のそれぞれの評価地点番号), 合流直後の地点の水量レベルを  $Q_n$  ( $n$  は合流直後の評価地点番号) とすれば、水量マトリックス  $\bar{Q}_{0-n}$  の要素  $q_{ij}^{0-n}$  は、次式のように算定できる。

$$\begin{aligned} q_{ij}^{0-n} &= Pr[Q_n = j \mid Q_0 = i] = Pr[Q_{n1} + Q_{n2} = j \mid Q_0 = i] \\ &= \sum_{k=1}^j Pr[Q_{n1} = k, Q_{n2} = j - k \mid Q_0 = i] \end{aligned}$$

$$= \sum_{k=1}^j Pr[Q_{n1}=k | Q_{n2}=j-k, Q_0=i] \cdot Pr[Q_{n2}=j-k | Q_0=i] \dots\dots\dots (7)$$

このように、一般に評価地点  $n$  の水量マトリックス  $\bar{Q}_{0-n}$  は、最上流地点からスタートして、途中、適当な利水パラメータを添加することにより求めることができる。すなわち、以下のようにである。

水量マトリックス  $\bar{Q}_{0-n}$  は次のような構造をもつ。

$$\bar{Q}_{0-n} = [q_{ij}^{0-n}] \dots\dots\dots (8)$$

$$q_{ij}^{0-n} = Pr[Q_n=j | Q_0=i], \quad \sum_{j=1}^{Q_{max}} q_{ij}^{0-n} = 1 \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $Q_0$  : 最上流地点の水量レベル、 $Q_n$  : 評価地点  $n$  の水量レベルである。

いま、最上流地点の水量レベルの生起確率行ベクトルを次式のように与える。

$$\bar{Q}_0 = [q_1^0, q_2^0, \dots, q_i^0, \dots, q_{Q_{max}}^0] \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 $q_i^0 = Pr [Q_0=i]$  である。(8), (10) 式から、評価地点  $n$  の流量レベルの生起確率行ベクトル  $\bar{Q}_n$  は、次のように算定できる。

$$\bar{Q}_n = \bar{Q}_0 \cdot \bar{Q}_{0-n} = [q_1^n, q_2^n, \dots, q_i^n, \dots, q_{Q_{max}}^n] \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 $q_i^n = Pr [Q_n=i]$  である。

次に、各評価地点における水質レベルの状態確率を求める方法について説明する。なお、ここでいう水質とは BOD などの指標による濃度をとっている。水量が上流の水量にのみ従属的であるのに対して、水質は上流の水量と水質の両方に従属している。この事実を踏まえて各評価地点における水質レベルの状態確率を求めるために、ここでは最上流地点の水量・水質レベルに対する評価地点  $n$  の水量・水質レベルの条件付き確率  $a_{ijkl}^{0-n}$  を次のように定める。

$$a_{ijkl}^{0-n} = Pr[C_n=j, Q_n=l | C_0=i, Q_0=k] \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 $Q_0$  : 最上流地点の水量レベル、 $C_0$  : 最上流地点の水質レベル、 $Q_n$  : 評価地点  $n$  の水量レベル、 $C_n$  : 評価地点  $n$  の水質レベルである。

水量の場合と同様な考え方にに基づき、この条件付き確率  $a_{ijkl}^{0-n}$  も、最上流地点からスタートして、途中、利水パラメータを適当に添加することにより、各評価地点において求めることができる。その具体的な計算については、次章の、淀川水系への適用のところで示す。

さて、(12) 式から次に示す値を用意しておく。

$$a_{ijk}^{0-n} = Pr[C_n=j | C_0=i, Q_0=k] = \sum_{l=1}^{Q_{max}} a_{ijkl}^{0-n} \dots\dots\dots (13)$$

また、最上流地点における、水量レベルに対する水質レベルの条件付き確率  $a_{ki}^0$  は次式で与えられる。

$$a_{ki}^0 = Pr[C_0=i | Q_0=k] \dots\dots\dots (14)$$

したがって、(13), (14) 式から、評価地点  $n$  における、水量レベルに対する水質レベルの条件付き確率  $a_{kj}^n$  は、次のように求められる。

$$\begin{aligned} a_{kj}^n &= Pr[C_n=j | Q_0=k] \\ &= \sum_{i=1}^{C_{max}} Pr[C_n=j, C_0=i | Q_0=k] \\ &= \sum_{i=1}^{C_{max}} Pr[C_n=j | C_0=i, Q_0=k] \cdot Pr[C_0=i | Q_0=k] \end{aligned}$$

$$= \sum_{i=1}^{C_{max}} a_{ijk}^0 \cdot a_{ki}^0 \dots\dots\dots (15)$$

ここで、これまでに示した条件付き確率をマトリックスで表現しておく。 $\bar{A}_0 = [a_{ij}^0]$ ,  $\bar{A}_n = [a_{ij}^n]$ ,  $\bar{C}_0 = [a_{ij}^0]$ ,  $\bar{C}_n = [a_{ij}^n]$  とおき、マトリックス $\bar{A}_0$ ,  $\bar{A}_n$ の第 $k$ 行の行ベクトルを $\bar{A}_0^k$ ,  $\bar{A}_n^k$ とすると、

$$\bar{A}_0^k = [a_{kj}^0], a_{kj}^0 = Pr[C_0=j | Q_0=k] \dots\dots\dots (16)$$

$$\bar{A}_n^k = [a_{kj}^n], a_{kj}^n = Pr[C_n=j | Q_0=k] \dots\dots\dots (17)$$

である。したがって、(15)式は、次式で与えられる。

$$\bar{A}_n^k = \bar{A}_0^k \cdot \bar{C}_{0-n}^k \dots\dots\dots (18)$$

さらに、評価地点 $n$ の水質レベルの生起確率ベクトル $\bar{C}_n$ を、

$$\bar{C}_n = [a_j^n], a_j^n = Pr[C_n=j] \dots\dots\dots (19)$$

とおくと、

$$\begin{aligned} a_j^n &= Pr[C_n=j] = \sum_{k=1}^{C_{max}} Pr[C_n=j, Q_0=k] \\ &= \sum_{k=1}^{C_{max}} Pr[C_n=j | Q_0=k] \cdot Pr[Q_0=k] \\ &= \sum_{k=1}^{C_{max}} a_{kj}^n \cdot q_k^0 \dots\dots\dots (20) \end{aligned}$$

である。以上より、評価地点 $n$ の水質レベルの生起確率ベクトル $\bar{C}_n$ は、 $\bar{Q}_0$ ,  $\bar{A}_n$ を用いて、次式で得られる。

$$\bar{C}_n = \bar{Q}_0 \cdot \bar{A}_n \dots\dots\dots (21)$$

以上のように、各評価地点における水量レベルおよび水質レベルの状態確率が得られると、それぞれの地点での水量・水質に関する安全度評価が可能となる。すなわち、

① 信頼度

各評価地点 $n$ の信頼度は、水量については基準水量レベル $Q_n^*$ を下まわらない確率、水質については基準水質レベル $C_n^*$ を上まわらない確率として定義し、次のように定式化する。

$$REL_Q^n = \sum_{i \geq Q_n^*} q_i^n, \quad REL_C^n = \sum_{i \leq C_n^*} a_i^n \dots\dots\dots (22)$$

② 深刻度

評価地点 $n$ における水量・水質が基準値を満足しないときに、水量であれば基準値に対する不足の割合、水質であれば基準値に対する過剰の割合を考える。さらに、不足の割合あるいは過剰の割合の $r$ 乗をもって、深刻性を表す指標 (Loss Function) とする。つまり、この Loss Function の期待値を深刻度として定義する。式で表すと、次のようになる。

$$VUL_Q^n = \sum_{i < Q_n^*} \{(Q_n^* - i) / Q_n^*\}^r \times 100 \cdot q_i^n \dots\dots\dots (23)$$

$$VUL_C^n = \sum_{i > C_n^*} \{(i - C_n^*) / C_n^*\}^r \times 100 \cdot a_i^n \dots\dots\dots (24)$$

深刻度は、信頼度と同様、安全度評価指標として重要な意味をもつことは明らかである。しかし、深刻

性というものは、量的な過不足で表す比較的定式化しやすい要素ばかりではなく、経済的・社会的な影響、ひいては精神的な苦痛といった要素をも含有するものである。したがって、これらの深刻性をすべて評価することは不可能である。そこで、 $r$ の値を変化させることにより、実際の渇水における深刻の度合を反映しようとしている。

### 3.3 利水システムの安全度評価

各評価地点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の安全度を評価することが必要になる。具体的に、各評価地点での安全度を統合するには、たとえば、次のような事項について考えなければならないであろう。すなわち、①各評価地点における基準値の違いをどのように扱うか、②水の付加価値として、水量としての価値と水質としての価値との捉え方の違いをどのように扱うか、③信頼度と深刻度の捉え方の違い、などである。これらは、システム内の社会的要請に依存するところが大きいと考えられ、したがって、この要請を表す指標を明確にする必要がある。

いま、たとえば、各評価地点における基準値を、水量については確保流量、水質については環境基準とし、流量と水質の安全度評価が等価であると考えるのであれば、各評価地点における水量と水質の信頼度、深刻度を、システム全体で眺め、信頼度についてはその最小値、深刻度についてはその最大値をもってシステムの安全度とすることができよう。定式化すると、システム全体の信頼度と深刻度を、それぞれ  $REL_S$ ,  $VUL_S$  として、次のようになる。

$$REL_S = \min_n \{REL^n\} \dots\dots\dots (25)$$

$$VUL_S = \max_n \{VUL^n\} \dots\dots\dots (26)$$

また、一般に、個々の評価地点がもつ社会的・経済的重要度は異なっているといえる。そこで、渇水に対する深刻性や被害額も異なっていると見なして、各評価地点のもつ重要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、その重み付けによって得られる深刻度の最大値をもって、システム全体の深刻度とする考え方もある。

逆に、望ましい利水システムを探る方向で考えると、①上記  $REL_S$  を上げ、 $VUL_S$  を下げることを目的にしたり、②各評価地点で上位の計画から出される重要度を反映した目標安全度（もちろん、各評価地点とも同一の値を目指してもよい）を設定し、各評価地点ともその値を制約条件として利水システム構成コストを最小にすることを目的としたりして最適化手法を導入することも考えられる。

いずれにしても、計画の新規施設にあっては、その種類、大きさ、位置、操作ルールなどの決定が、既設のものにあっては、ダム貯水池からの放流、処理場からの排水等の操作・運用が、具体的に、各評価地点での安全度評価にどのようにインパクトを与えるのか、それがペースとなって、利水システムの適正な改善策が構成できるものと考えられる。

## 4. 淀川水系の安全度評価

### 4.1 淀川水系の概要と計算の条件設定

本節では、実際に淀川水系の安全度評価を行うための準備段階として、淀川水系の対象流域と、流量、水質のデータの取扱い、さらに、計算を行う際に設けたいくつかの仮定などについて述べる。

#### (1) 対象流域の水循環システムとその簡略化

実流域における利水ネットワークは非常に複雑であり、また、残流域からの河川への流入や、地下水浸透など不明解な要素も多々存在する。したがって、実流域への理論の適用にあたっては、ある程度のシステムの簡略化を施さなければならない。

Fig. 1 は、淀川水系における水循環システムを、3.1 で示した利水システムの基本ユニットに分割し、

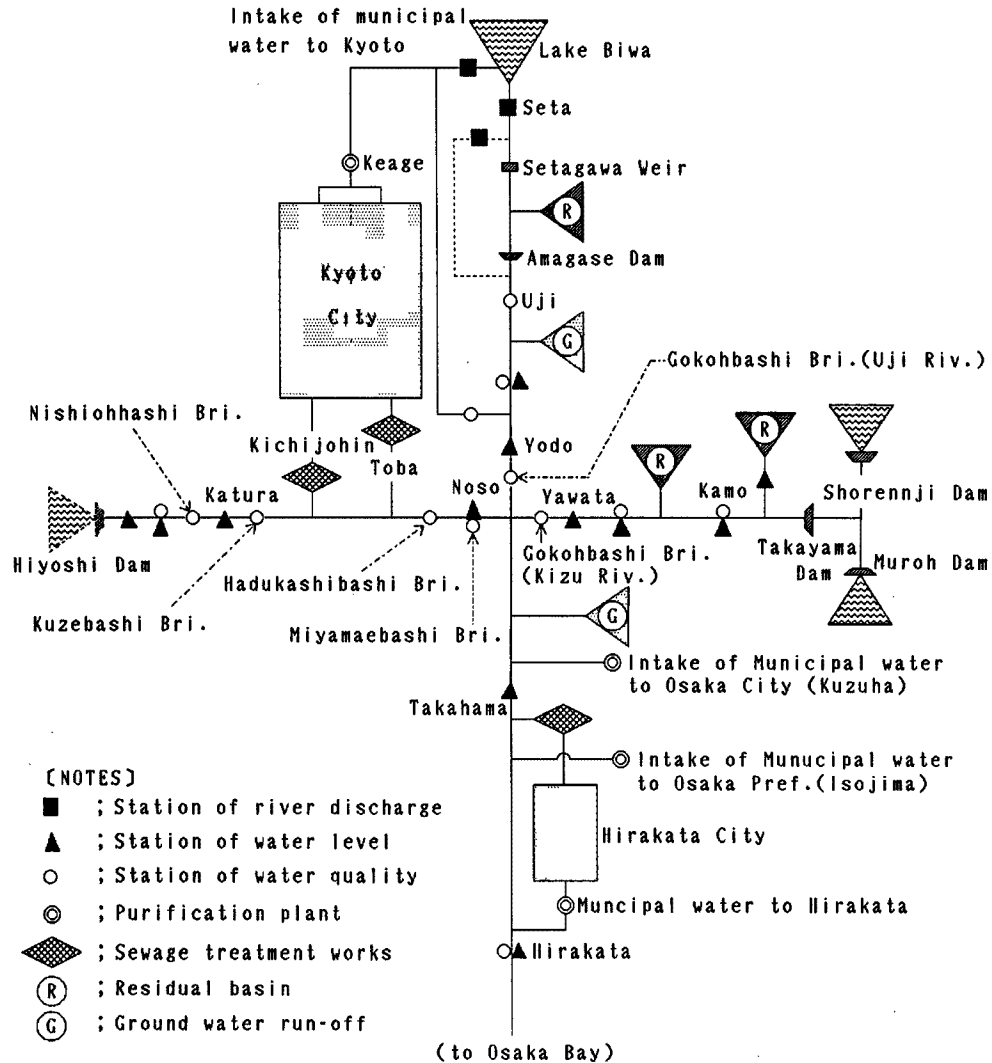


Fig. 1. Water resources system of Yodo River Basin.

設定したものである。

実際の淀川水系への適用にあたっては、まず、京都市からの下水処理水が放流されている桂川を中心に適用を試みることにした。したがって、Fig. 1を基に、流量、水質データの現在の存在状況を踏まえて、さらにFig. 2のように簡略化してシステムを設定した。すなわち、実際の適用はこのFig. 2に対して行うものとする。ここで、最上流地点としては桂を設定した。また、吉祥院、鳥羽の各下水処理場からの下水処理水の排水は、本来、琵琶湖から京都市への取水・利用・排水を追跡することによって求めるべきではあるが、ここでは、琵琶湖流域と桂川流域の水文の関わりを考え、最上流地点である桂での流量と従属性をもつものとして取扱うことにした。さらに、宇治川や木津川における流量についても、本来それぞれの河川の上流から取・排水の追跡により求めるものではあるが、ここでは、処理排水の場合と同様、桂での流量と従属性をもつものとして与えることにした。

## (2) 対象期間

本研究が、低水時を対象としていることを踏まえて、流量、水質とも時間単位を半月(5日間)とした。また、流量や水質の入力データを用いての確率分布特性は、年や季節などによる変化は考慮せず、すなわち、定常なものとして取扱った。また、収集できたデータの期間は、1982年1月から1986年12月まで

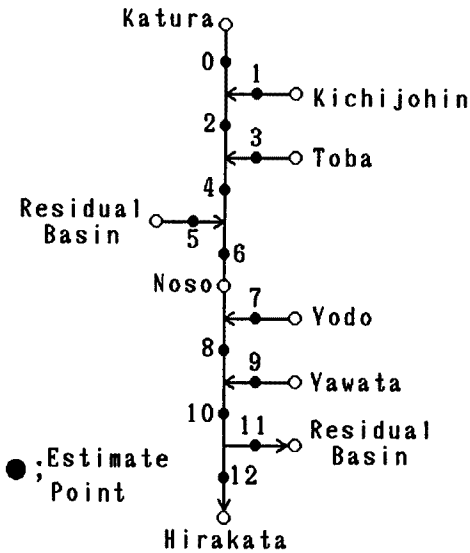


Fig. 2. Simplified water resources system

であり、この期間における半旬データを、確率変数として取り扱った。

### (3) 流量・水質データ

河川流量としてはその観測点として、桂川の最上流地点として設定した桂、また、宇治川、木津川、桂川における、三川合流直前の淀、八幡、納所、さらに、淀川本川における枚方、これら5つの観測点を選び、そこでの流量データを半旬平均流量データとして用いた。

吉祥院、鳥羽の各下水処理場からの排水量のデータは、どちらの処理場においても月最大日平均流量、月最小日平均流量、月平均流量の1ヶ月に3つのデータしか得られなかったため、これら各月3つの排水量データから半旬単位の排水量データに落とし込むために、かなり大胆であるが、次のような仮定を設定して半旬データを作成した。すなわち、処理場からの排水量は、京都市の降雨量に強く依存している、と考え、各下水処理場からの各月3つの日平均排水量と、同一の日における京都市の日降雨量との関係をプ

ロットし、最小2乗近似によって京都市の日降雨量をベースに、処理場からの日平均排水量をすべての日について推定した。さらにこれを5日間で算術平均することにより、半旬平均日排水量データとした。この仮定は、理論的根拠に欠けるところが大きい、将来、毎日の排水量データが得られれば、問題は幾分解決されよう。また、残流域からの流入量は、流入地点前後にある2つの評価地点の流量の差で与えた。

次に、水質データであるが、ここでは、BODを選択する。BODは有機物質すなわち富栄養化の指標であるばかりでなく、河川の汚濁を表す指標としても、一般に広く利用されており、他の基準項目と比べればデータも揃えやすいからである。

河川水質は、その観測点として、流量観測点と対になるように、西大橋、宮前橋、宇治川御幸橋、木津川御幸橋、枚方大橋の5つの地点を選び、そこでのデータを用いたが、いずれの地点においても、毎日の水質データは得られず、1ヶ月に数日程度のものである。そこで、次のようにして半旬単位の水質データを作成した。まず、これらの各水質観測点では、水質と同時に流量の値も観測されているので、各観測点において、流量と水質の関係を両対数紙上にプロットし、両者の関係を最小2乗近似によって求めておく。次に、水質観測点と流量観測点は、ところによっては多少の距離があるものの、同一地点であると仮定し、流量観測点で得られる毎日の流量をベースに、流量と水質の関係から、毎日の水質を推定した。そして、これを5日間で算術平均することにより、半旬平均の水質データとした。

吉祥院、鳥羽の各下水処理場からの排水水質についても河川水質の場合と同様、排水量と排水水質との関係を最小2乗近似で求め、推定値として得られた毎日の排水量をベースに毎日の排水水質を推定した。これら水質データについて設定した仮定も、理論的根拠に欠けるところが大きい。しかし、将来、毎日の水質データが得られれば、問題は幾分解決されよう。また、残流域からの流入水質は、流入地点前後にある2つの評価地点の流量と水質から、完全混合を仮定して作成した。

最後に、本研究が、低水時を対象としていることを踏まえて、枚方での流量が200 (m<sup>3</sup>/s) より大きい半旬に対しては、全ての地点で、その半旬データを削除した。したがって、以下の水質・水量の状態確率の算定にあたっては、枚方流量が200 (m<sup>3</sup>/s) 未満の範囲に限定したものであることを断っておく。

### (4) 流量・水質レベルの分割数と離散幅

さて、以上のように各地点での流量と水質の半旬データが得られたので、次に、これらのデータを流量、水質レベルに落とし込み、確率値を求める必要がある。レベル分割に際しては、分割数と離散幅の違いに



よって、各レベルのとり確率値も大きく変わってくる。そこで、以下の点に留意してこれらを決定した。  
 ①河川流量に比べて、吉祥院や鳥羽からの排水量はかなり小さいが、これらが2～3個のレベルに入り、その変化が現れるようにする。②データの値が最大レベルに集まらないようにする。③確率が0となるレベルができるだけ点でないようにする。

以上の点から、流量レベルについては、分割数を20、離散幅を納所までは2.0 (m<sup>3</sup>/s)、それより下流を10.0 (m<sup>3</sup>/s)とした。また、水質レベルについては、分割数を10、離散幅を2.0 (mg/ℓ)とした。

#### 4.2 各評価地点の流量・水質レベルの確率マトリックスの算定

##### ① 流量レベル

はじめに、以下で用いる変数を一般的な形で示しておく。

$$q_i^m = Pr[Q_m = i] \dots\dots\dots (27)$$

$$q_{ij}^{m-n} = Pr[Q_n = j \mid Q_m = i] \dots\dots\dots (28)$$

ここに、 $Q$  は流量、サフィックス  $m, n$  は地点番号を表す。

(評価地点2)

$$q_{ij}^{1-2} = q_{j-i}^{0-1} \times \frac{q_{j-i}^0}{q_i^1} \dots\dots\dots (29)$$

(評価地点3)

$$q_{ij}^{2-3} = \sum_{k=1}^n q_{i-kj}^{0-3} \times q_{ki}^{1-2} \times \frac{q_k^1}{q_i^2} \dots\dots\dots (30)$$

(評価地点4)

$$q_{ij}^{3-4} = q_{j-i}^{2-3} \times \frac{q_{j-i}^2}{q_i^3} \dots\dots\dots (31)$$

(評価地点5)

$$q_{ij}^{2-5} = \sum_{k=1}^n q_{i-kj}^{0-5} \times \frac{q_k^1}{q_i^2}, q_{ij}^{4-5} = \sum_{k=1}^n q_{i-kj}^{2-5} \times q_{ki}^{3-4} \times \frac{q_k^3}{q_i^4} \dots\dots\dots (32)$$

(評価地点6)

$$q_{ij}^{5-6} = q_{j-i}^{4-5} \times \frac{q_{j-i}^4}{q_i^5} \dots\dots\dots (33)$$

(評価地点7)

$$q_{ij}^{2-7} = \sum_{k=1}^n q_{i-kj}^{0-7} \times q_{ki}^{1-2} \times \frac{q_k^1}{q_i^2}, q_{ij}^{4-7} = \sum_{k=1}^n q_{i-kj}^{2-7} \times q_{ki}^{3-4} \times \frac{q_k^3}{q_i^4}$$

$$q_{ij}^{6-7} = \sum_{k=1}^n q_{i-kj}^{4-7} \times q_{ki}^{5-6} \times \frac{q_k^5}{q_i^6} \dots\dots\dots (34)$$

(評価地点8)

$$q_{ij}^{7-8} = q_{j-i}^{6-7} \times \frac{q_{j-i}^6}{q_i^7} \dots\dots\dots (35)$$

(評価地点9)

$$q_{ij}^{2-9} = \sum_{k=1}^n q_i^{0-9-kj} \times q_{ki}^{1-2} \times \frac{q_k^1}{q_i^2}, q_{ij}^{4-9} = \sum_{k=1}^n q_i^{2-9-kj} \times q_{ki}^{3-4} \times \frac{q_k^3}{q_i^4}$$

$$q_{ij}^{6-9} = \sum_{k=1}^n q_i^{4-9-kj} \times q_{ki}^{5-6} \times \frac{q_k^5}{q_i^6}, q_{ij}^{8-9} = \sum_{k=1}^n q_i^{6-9-kj} \times q_{ki}^{7-8} \times \frac{q_k^7}{q_i^8} \dots\dots\dots (36)$$

(評価地点 10)

$$q_{ij}^{9-10} = q_{j-ii}^8 \times \frac{q_{j-i}^8}{q_i^9} \dots\dots\dots (37)$$

(評価地点 12)

$$q_{ij}^{11-12} = q_{i+ji}^{10-11} \times \frac{q_{i-j}^{10}}{q_i^{11}} \dots\dots\dots (38)$$

② 水質レベル

はじめに、以下で用いる変数を一般的な形で示しておく。

$$b_{ij}^m = Pr[C_m=j, Q_m=i] \dots\dots\dots (39)$$

$$\alpha_{ijkl}^{m-n} = Pr[C_n=j, Q_n=l | C_m=i, Q_m=k] \dots\dots\dots (40)$$

ここに、C は水質濃度、サフィックス m, n は地点番号を表す。

(評価地点 2)

$$\alpha_{ijkl}^{1-2} = \alpha_{rii-kk}^{0-1} \times \frac{b_{i-kr}^0}{b_{ki}^1}, \left( r = \left[ \frac{jl-ik}{l-k} \right] \right) \dots\dots\dots (41)$$

ただし、[ ] は、ガウスの記号を表す。

(評価地点 3)

$$\alpha_{ijkl}^{2-3} = \sum_{g=1}^n \sum_{h=1}^m \alpha_{rig-kl}^{0-3} \times \alpha_{ihkg}^{1-2} \times \frac{b_{gh}^1}{b_{ki}^2}, \left( r = \left[ \frac{ik-hg}{k-g} \right] \right) \dots\dots\dots (42)$$

(評価地点 4)

$$\alpha_{ijkl}^{3-4} = \alpha_{rii-kk}^{2-3} \times \frac{b_{i-kr}^2}{b_{ki}^3} \dots\dots\dots (43)$$

(評価地点 5)

$$\alpha_{ijkl}^{2-5} = \sum_{g=1}^n \sum_{h=1}^m \alpha_{rjk-gl}^{0-5} \times \alpha_{higk}^{1-2} \times \frac{b_{gh}^1}{b_{ki}^2}, \left( r = \left[ \frac{ik-hg}{k-g} \right] \right) \dots\dots\dots (44)$$

$$\alpha_{ijhl}^{4-5} = \sum_{g=1}^n \sum_{h=1}^m \alpha_{rjk-gl}^{2-5} \times \alpha_{higk}^{3-4} \times \frac{b_{gh}^3}{b_{ki}^4}, \left( r = \left[ \frac{ik-hg}{k-g} \right] \right) \dots\dots\dots (45)$$

(評価地点 6)

$$\alpha_{ijkl}^{5-6} = \alpha_{rii-kk}^{4-5} \times \frac{b_{i-kr}^4}{b_{ki}^5}, \left( r = \left[ \frac{jl-ik}{l-k} \right] \right) \dots\dots\dots (46)$$

### 4.3 各評価地点の安全度評価

(3) で示したように、水質関連のデータの存在状況から、かなり無理な仮定を設定してはいるが、各排水施設や残流域からの流入あるいは流出などの半旬データが流量、水質共に得られれば、河川の途中に設定した、実際には観測施設がない評価地点2, 4, 8, 10の半旬データも、その前後の地点の流量と水質の半旬データから、作成することができる。たとえば、評価地点2の流量は、半旬平均を考えて水の流下の遅れを無視すれば、各半旬に対して、桂の流量と吉祥院処理場からの排水量との和で与えられる。このように、安全度評価の対象となるべく評価地点において、流量、水質レベルの状態確率は、データから直接求めたものと、前節で示した条件付き確率を用いた理論計算によって求めたものと2通りが得られることになる。そこで、前者をデータ値、後者を計算値と呼ぶことにする。なお、繰り返していうがここでいう理論計算値は、桂の流量の状態確率、および、桂に対する吉祥院の条件付き確率、桂に対する鳥羽の条件付き確率、桂に対する残流域流入の条件付き確率、桂に対する淀の条件付き確率、桂に対する八幡の条件付き確率、三川合流後に対する残流域流出の条件付き確率、なる条件付き確率のみをインプットとして求めるものである。

ここでは、各評価地点での現況における安全度を評価するにあたり、まず、データ値と計算値とを比較し、その適合性を考察するとともに、各評価地点において基準値を設定することにより安全度を求め、これを評価する。

一例として、評価地点6, 12における各流量レベルの状態確率を示したものがFig. 3(a), 3(b)である。ここで実線はデータ値、破線は計算値である。両者を比べると、程度の差はあるが、どの評価地点においても、計算値の方がレベルの大きい方へややシフトしている。これは、計算値を求める際の条件付き確率の算定において、流量レベルを1から設定しているためである。たとえば合流点において、 $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ と $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$ の水が合流したとする。データ値では合流後の流量を $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$ とし流量レベルを1とするのに対して、計算値は、 $1 + 1 = 2$ と計算する。また、三川合流後は両者の間にそれほど差がないのは、離散幅が $10.0 \text{ m}^3/\text{s}$ となり、値が平均化されるからであろう。次に、両者の形状を見ると、計算値はデータ値の凹凸をよく表しているといえよう。したがって、問題となるのは、レベル分割による値のずれであり、将来、データの数を増やし離散幅をより細かくとれば計算値をよりデータ値に近づけることができるであろう。

Fig. 4は、評価地点2, 4, 6における各水質レベルの状態確率を表している。実線はデータ値、破線は計算値である。両者を比べると、流量レベルの場合と同様、程度の差はあるが、どの評価地点においても、計算値の方がレベルの大きい方へややシフトしている。一般に水質は、上流の水質のみならず流量にも依存していると考えられ、レベル分割による値のずれも、計算値の方がレベルの大きい方へシフトしている1つの要因であると考えられよう。次に、両者の形状の違いを、各評価地点で比較すると、評価地点2と4は、データ値と計算値は、似ているが、評価地点6のそれらは、かなり異なってきたといえよ

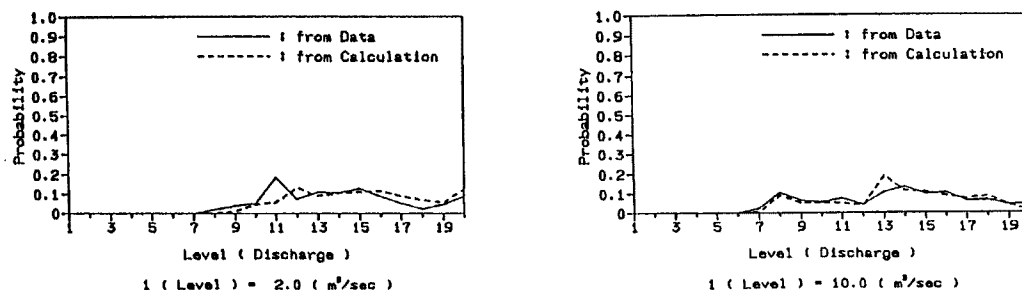


Fig. 3. Comparison between the observed and computed probabilities of discharge.

(a) Estimate Point 6 (b) Estimate Point 12

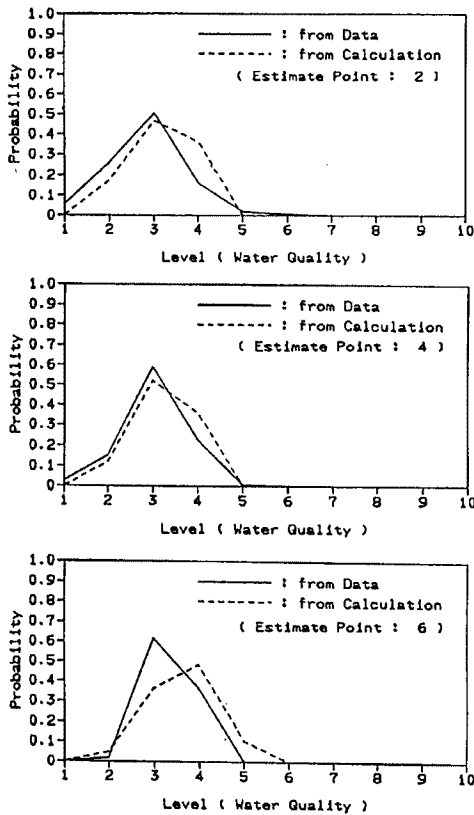


Fig. 4. Comparison between the observed and computed probabilities of water quality.

納所での信頼度を見ると、流量レベルが5上がると信頼度がかかなり低下しており、ここでは、大きな都市開発などによる水需要量の増加があまり望めないことがわかる。これらの傾向は、深刻度からも窺える。

水質に対する安全度評価は、評価地点4と6で行った。また、設定した基準水質レベルは、どちらの評価地点も2と4 (BOD濃度に直すと4.0 mg/lと8.0 mg/l)とした。深刻度の指数パラメータは、流量の場合と同様1.0と2.0とした。

Table 2は、以上の設定を基に求めた安全度である。基準レベル4では、どちらの評価地点もその信頼度は高く、深刻度は低い。したがって、環境基準はクリアしていると考えられるが、枚方辺りの環境基準に相当する基準レベル2では、どちらの評価地点も信頼度が激減しており、この水を都市用水として再利用することはかなり難しい。

4.4 システムとしての安全度評価

評価地点としては、前節同様、流量については評価地点

う。そこで、評価地点2および4と、評価地点6との違いについて考える。評価地点2と4のデータ値を与えるもとの半旬データは、本節のはじめにも述べたが、前の地点での半旬データから、流量についてはその和を求め、水質については完全混合を仮定して、作成したものである。これに対し、評価地点6の半旬データは、納所、宮前橋といった観測点において、実際に観測された値に近いものである。このことから、完全混合の仮定は、データ値と計算値が異なってくる1つの要因であると考えられる。

次に、各評価地点において算出した安全度を示し、その評価を行う。流量に対する安全度評価は、評価地点6と12 (すなわち、納所と枚方)で行った。また、設定した基準流量レベルは、納所では10と15 (流量に直すと20.0 m<sup>3</sup>/sと30.0 m<sup>3</sup>/s)、枚方では40, 50, 75, 85 (流量に直すと80 m<sup>3</sup>/s~170 m<sup>3</sup>/s)とした。ここで、枚方での流量レベルが20より大きいのは、離散幅を2.0 m<sup>3</sup>/sとして分割数を100としているからである。また、深刻度における指数パラメータの値としては、1.0と2.0とした。

Table 1は、以上の設定のもとで求めた安全度である。枚方でのかんがい期の確保流量は、約145 m<sup>3</sup>/sであり、少し安全側をとって基準レベル75の信頼度を見ると、約0.6であり、決して高い値とはいえない。また、基準レベル40に対しては、高い信頼度を示しており、このことから、最近、それほど深刻ではないが、頻繁に渇水が起きている淀川水系の現況をよく表しているといえよう。また、

Table 1. Discharge level at the present state

Estimate Point	Standard Level	Reliability	Vulnerability	
			r=1.0	r=2.0
6	10	0.9671	0.05	0.01
	15	0.6707	4.78	1.08
12	40	0.9446	0.15	0.01
	50	0.8818	1.81	0.35
	75	0.5850	9.11	2.99
	85	0.5330	11.30	3.87

Table 2. Water quality level at the present state

Estimate Point	Standard Level	Reliability	Vulnerability	
			r=1.0	r=2.0
4	2	0.1185	62.12	49.11
	4	1.0	0.0	0.0
6	2	0.0476	82.19	80.85
	4	0.8965	2.59	0.65

6と12、水質については評価地点4と6とする。各評価地点における基準値を流量については確保流量、水質については環境基準とすると、流量の基準レベルは、評価地点6では確保流量が明らかではないのでいま仮に15とし、評価地点12では75となる。また、水質の基準レベルは、評価地点4、6ともに4となる。いま、流量と水質の安全度評価が等価であると考え、システムとしての安全度は、Table 1, 2における各評価地点の安全度に対し、(25)、(26)式から次のように求められる。

(信頼度)

$$\begin{aligned} REL_S &= \min \{0.6707, 0.5850, 1.0000, 0.8965\} \\ &= 0.5850 \end{aligned}$$

(深刻度)

$$\begin{aligned} r=1.0: VUL_S &= \max \{4.78, 9.11, 0.0, 2.59\} \\ &= 9.11 \\ r=2.0: VUL_S &= \max \{1.08, 2.99, 0.0, 0.65\} \\ &= 2.99 \end{aligned}$$

これらの値は、すべて枚方での流量に対する安全度である。したがって、枚方における流量の安全度を向上すれば、システム全体の安全度の向上につながることになる。

## 5. 望ましい利水システムの構成

前章からの適用結果から、計算値はデータ値に対してややプラスの方へシフトするという傾向があるものの、データ値の形状を比較的良好に表現しており、レベル分割の問題を克服すれば、実際に観測施設がない評価地点においても、その状態確率は計算値によって十分表現できることを確認した。これにより任意の評価地点において状態確率が算定できることになる。これを受けて、本章では、入力として与える条件付き確率マトリックスに操作を加え、計算値を求めて安全度評価を試みることにより、望ましい利水システムの構成を探る。

### 5.1 シナリオによる感度分析

入力として与える確率マトリックスは、最上流地点の流況や残流域からの流入といった自然現象の統計的性質を与えるものと、下水処理場からの排水や上流にダム貯水池をもつ河川からの流入といった人為的操作の加わったもの、の2つに分けることができる。したがって、前者は変化させずに後者に手を加えることにより、各評価地点における状態確率の変化を調べ、さらに安全度を求めてその変化について考察する。

まず、流量、水質それぞれに対して設定するシナリオのパターンを示す。

(流量)

1. 将来、上流に日吉ダムなどが完成し、流量の増加が期待できるものとして、桂での流量レベルの状態確率の各要素を、プラスの方へ1レベル (2.0 m<sup>3</sup>/s) シフトする。
2. 鳥羽下水処理場における処理能力がアップした場合を想定して、桂に対する鳥羽の条件付き確率マトリックスの各要素を、プラスの方へ1レベル (2.0 m<sup>3</sup>/s) シフトする。
3. 将来、高時川ダム・大戸川ダムなどが完成し、流量の増加が期待できるものとして、桂に対する淀の条件付き確率マトリックスの各要素を、プラスの方へ1レベル (10.0 m<sup>3</sup>/s) シフトする。
4. 将来、比奈知ダムや川上ダムなどが完成し、流量の増加が期待できるものとして、桂に対する八幡の条件付き確率マトリックスの各要素を、プラスの方へ1レベル (10.0 m<sup>3</sup>/s) シフトする。
5. 上記のすべての地点で1レベル上げる。

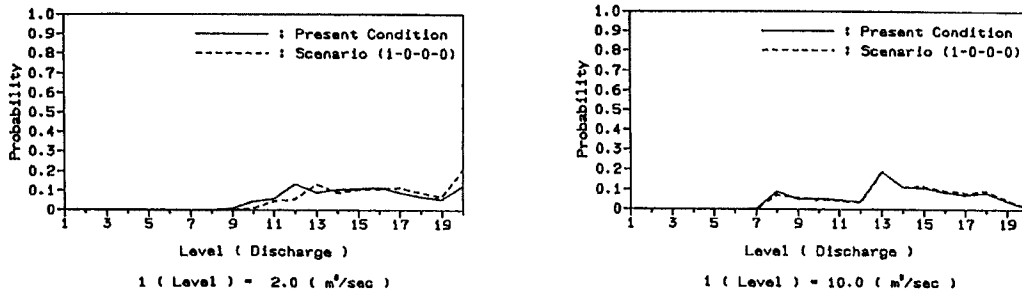


Fig. 5. State of probability of discharge. (Scenario Pattern 1)  
 (a) Estimate Point 6 (b) Estimate Point 12

### (水質)

1. 桂の状態確率を流量と水質の関係を保ちつつ、流量レベルの各要素をプラスの方へ1レベル (2.0 m<sup>3</sup>/s) シフトする。(希釈効果を狙う)
2. 桂に対する鳥羽の条件付き確率マトリックスを流量と水質の関係を保ちつつ、流量レベルの各要素をプラスの方へ1レベル (2.0 m<sup>3</sup>/s) シフトする。(納所での水質が悪化するかどうかを見る)
3. 桂に対する鳥羽の条件付き確率マトリックスを他は固定して、水質レベルの各要素だけマイナスの方へ1レベル (2.0 mg/ℓ) シフトする。(水質改善を期待する)
4. 1と3を同時に操作する。(最もきれいになるかどうかをみる)

以上のようにシナリオを設定し、流量、水質別に各パターンに対して、各評価地点における状態確率を求めた。以下それぞれについて考察する。

一例として、流量のシナリオパターン1における、評価地点6、12での流量レベルの状態確率を示したものがFig. 5(a), 5(b)である。実線は現況の状態確率を示しており、破線はシナリオによって得られた状態確率を示している。これを見ると、評価地点6までは、シナリオによって1レベルプラスの方へシフトしており、評価地点8以降は、ほとんど変化していない。これは、離散幅の違いによる影響も確かにあるが、桂でのこの程度の流量は、桂川の中においては有効であるが、三川合流後は、宇治川などの流量規模の大きい河川の流量に打ち消され、枚方ではその効果がほとんど現れないことを示していると考えられる。

他のシナリオについての結果は図示しないが、以下のような内容を持っている。すなわち、流量のシナリオパターン2については、パターン1と同様、シナリオによる影響が現れているのは、評価地点6までであり、評価地点8以降は、ほとんど一致している。流量のシナリオパターン3、シナリオパターン4については、どこで流入するかという違いはあるものの、どちらのパターンも枚方における流量レベルの状態確率に与える影響は、まったく同じである。ところで、評価地点10と、評価地点12を比べると、評価地点10では、シナリオによる状態確率が、現況の状態確率をプラスの方へ1レベルシフトしたものになっているのに対し、評価地点12では、より現況に近い形状を示している。評価地点10と評価地点12の間には、残流域への流出がある。ここで、三川合流後すなわち評価地点10での流量レベルに対する条件付き確率マトリックスを与えているので、正の相関が強ければ、評価地点10で流量レベルが上がってもその分残流域へ流出することになる。したがって、評価地点12では、評価地点10ほどの現況との違いが現れないものと考えられる。最後に流量のシナリオパターンとして、パターン1からパターン4までを同時に行うもの考えた。この結果をFig. 6(a), 6(b)に示す。各評価地点で、シナリオによる効果が現れているといえよう。

次に水質について考察する。Fig. 7は、水質のシナリオパターン1における各評価地点での水質レベルの状態確率である。水質の場合は、水質レベルが小さい方へその分布が集まればよい。パターン1のシ

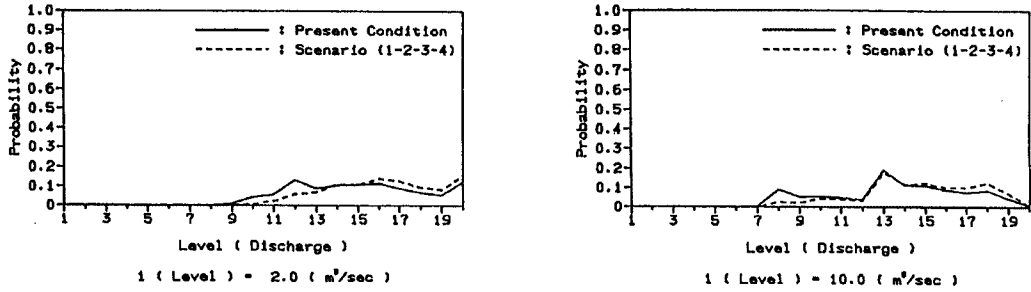


Fig. 6. State of probability of discharge. (Scenario Pattern 5)  
 (a) Estimate Point 6 (b) Estimate Point 12

ナリオによる効果が各評価地点においてよく現れているのがわかる。

適用結果は図示しないが、水質のシナリオパターン2においては、評価地点4で、現況よりも水質悪化の方へずれている。また微妙ではあるが、同じことが評価地点6においても認められる。したがって、下水処理場からの排水量を増加させるには、少なくとも現状よりもきれいな状態にして排水する必要があると考えられる。水質のシナリオパターン3については、評価地点4ではシナリオによる効果が現れていることがわかるが、評価地点6ではほとんど現況と一致してしまっている。つまり下水処理場からの排水水質を1レベル(2.0 mg/ℓ)下げたぐらいでは、評価地点6以降の水質改善にはつながらない。ところで、パターン2とパターン3を見ると、評価地点4では現況との間に違いがあるのに対して、評価地点6にく

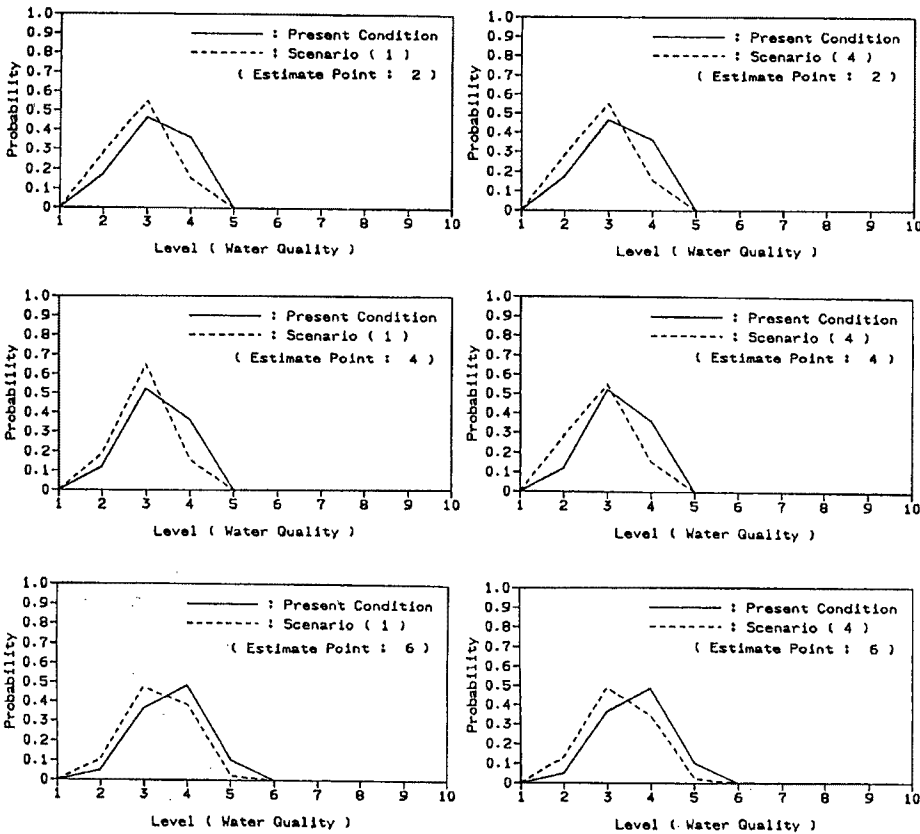


Fig. 7. State of probability of water quality. (Scenario Pattern 1)

Fig. 8. State of probability of water quality. (Scenario Pattern 4)

ると、どちらのパターンもほとんど一致してしまう。評価地点4と評価地点6との間には、残流域からの流入がある。水質の状態確率自体、評価地点4から評価地点6で悪化していることから、この残流域から汚い水が流れ込み、シナリオによる効果を打ち消しているのであろう。

最後にパターン1とパターン3を同時に行った場合として、パターン4の結果を示すと、Fig. 8 のよう

Table 3. Safety indexes of discharge level (Scenario Pattern 5)

Estimate Point	Standard Level	Reliability	Vulnerability	
			r=1.0	r=2.0
6	10	0.9951	0.0	0.0
	15	0.7726	2.25	0.40
12	40	0.9847	0.03	0.0
	50	0.9464	0.60	0.10
	75	0.6563	5.83	1.55
	85	0.5964	7.81	2.19

Table 4. Safety indexes of water quality level (Scenario Pattern 4)

Estimate Point	Standard Level	Reliability	Vulnerability	
			r=1.0	r=2.0
4	2	0.2830	42.90	29.20
	4	0.9860	0.0	0.0
6	2	0.1300	62.36	51.90
	4	0.9628	0.58	0.14

Table 5. Reliability of water resources system for combined scenarios

Scenario Pattern	Water Quality Level				
	1	2	3	4	
Discharge Level	1	0.5899	×	0.5899	0.5899
	2	×	0.5976	×	×
	3	×	×	0.6646	×
	4	×	×	0.6646	×
	5	×	×	×	×

Table 6. Vulnerability of water resources system for combined scenarios (r=1.0)

Scenario Pattern	Water Quality Level				
	1	2	3	4	
Discharge Level	1	8.62	×	8.62	8.62
	2	×	8.58	×	×
	3	×	×	6.16	×
	4	×	×	6.16	×
	5	×	×	×	×

る影響は現れていない。流量レベルのシナリオパターン3, 4は、桂での流量増加を行わない場合であり、したがって、これを満たす水質レベルのシナリオを採用することが、システムの信頼度を最大にすることを表しているといえる。

次に深刻度をみると、指数パラメータ $r$ が1.0, 2.0のどちらにおいても、信頼度の場合と同じパターンの組合せが最小となっており、上で述べた考察がそのまま深刻度についてもいえる。

になる。シナリオによる効果がよく現れており、今までの中で、水質改善に対して一番望ましいパターンといえる。

以上から、水質については、水質改善よりも流量増による希釈効果を期待する方が効果的であるといえよう。

次に、各シナリオパターンにおける安全度を考察するが、ここでは一例として、流量レベルについてはシナリオパターン5を、水質レベルについてはシナリオパターン4の結果のみをそれぞれTable 3, 4に示す。他のシナリオパターンの結果ともあわせて考察すると以下ようになる。

各パターンの評価地点12における信頼度を見ると、基準レベルが40, 50の信頼度を比較すれば、上で述べた状態確率での考察と同じことがいえるが、基準レベルが75の信頼度はパターン3, 4の値が最も高くなっており、これは、宇治川や木津川での水資源開発が枚方における確保流量の信頼度を上げることを意味している。しかし深刻度はパターン5が最も低くなっている。いずれにせよ、枚方での信頼度を上げるには、流量規模の大きい宇治川や木津川での流量増が求められよう。

また、水質については各パターンの基準レベルの厳しい2に対する各評価地点の安全度を比べると、やはり、パターン1とパターン4の信頼度が高くなっており、状態確率のところで考察したように、桂での流量増が最も効果的であることがわかる。

## 5.2 望ましい利水システムの構成

Table 3, 4で示した各評価地点の流量・水質レベルの安全度を統合してシステムの安全度を求めると、信頼度はTable 5, 深刻度の指数パラメータ $r$ を1.0とした場合はTable 6,  $r$ を2.0とした場合はTable 7で示すようになる。表中×は、流量レベルと水質レベルのシナリオの組合せが存在しないことを表している。

まず信頼度をみると、水質レベルのシナリオパターンが3で、流量レベルのシナリオパターンが3または4の場合に、その値が最大になっている。この組合せは、鳥羽処理場からの排水水質を改善し、さらに宇治川あるいは木津川からの流入量を増加させることを意味しているが、実は、Table 5に現れている値は、すべて枚方における流量レベルに対する信頼度の値であり、水質レベルのシナリオによる



Table 7. Vulnerability of water resources system for combine scenarios ( $r=2.0$ )

Scenario Pattern	Water Quality Level				
	1	2	3	4	
Discharge Level	1	2.76	×	2.76	2.76
	2	×	2.76	×	×
	3	×	×	1.81	×
	4	×	×	1.81	×
	5	×	×	×	×

ここでは、ある固定した基準レベルに対する安全度しか示さなかったが、このように、さまざまなシナリオを構成し、それを利水システムへ適用することにより、各評価地点における安全度を求め、さらにそれら各評価地点における安全度を利水システム内で統合して、システムとしての安全度評価を行うことにより、望ましい利水システムの構成を図ることができよう。

## 6. 結 論

本研究は、近年、高度化・複雑化してきた水利用・開発形態を1つのシステムとして捉え、信頼度および深刻度という安全度評価の概念を導入することにより、利水システムの安全度評価を展開した。さらにこれを淀川水系に適用し現況における利水システムの安全度評価を行うとともに、シナリオによる利水システムの安全度評価を行い、望ましい利水システムの構成を試みた。

得られた成果を以下に示す。

- (1) 最上流地点の水量・水質レベルに対する条件付き確率マトリックスを用いることによって、システム内における各評価地点の水量・水質レベルの状態確率が表現できることを示し、各評価地点における安全度評価を理論的に可能にした。
- (2) 利水システムの安全度評価を淀川水系に適用し、各評価地点に対して、現況における流量と水質の安全度を求め、さらにこれを統合することにより、システムとしての安全度評価を行った。
- (3) 入力となる最上流地点での状態確率と最上流地点に対する条件付き確率マトリックスを操作することにより、流量、水質それぞれに対していくつかのシナリオを設定して、理論的な確率演算から各評価地点での状態確率と安全度を求め、各シナリオにおいて求めた安全度を統合することにより、望ましい利水システムの構成を試みた。

また、今後の検討課題として、以下の内容が挙げられよう。

- (1) 流量・水質レベルの離散幅および次元の制約と計画モデルとしての要求精度を関係づけ、理論展開をどこまで精密化するかを考察する。
- (2) 実流域への適用にあたり、水質の日単位のデータが得られ難い現状に鑑み、より実際の形に近い推定方法をモデル展開するとともに、データ提供がスムーズに進められるよう関係機関への働きかけを積極的に行う。
- (3) 本研究では、信頼度、深刻度の算定にあたっては、時間軸上で評価せず定常扱いとしたが、Hashimotoらの提案した回復度についても評価が行えるように、時間的従属性を導入し、その理論と適用を考察する。
- (4) 本研究では、淀川水系への適用として、桂川を中心に最上流地点を桂に設定したが、これを琵琶湖に置き換えて、琵琶湖との水文的従属性をそれぞれ桂川、木津川へ適用し、宇治川や、木津川上流に存在するダム貯水池からの放流を入力とすることにより、淀川水系全体への適用へさらに発展させる。

## 参 考 文 献

- 1) 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-2，1987，pp. 359-375.

- 2) T. Hashimoto, J. R. Stedinger and D. P. Loucks: Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria for Water Resource System Performance Evaluation, WATER RESOURCES RESERCH, Vol. 18, 1982, No. 1, pp. 14 - 20.
- 3) 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に関する研究, 第29回水理講演会論文集, 1985, pp. 323 - 328.
- 4) S. Ikebuchi and T. Kojiri: Optimal Modeling in Water Resources Management Systems Based on Reliability Analysis, Proc. of ROC-Japan Joint Seminar on Water Resources Engineering, 1987, pp. 233 - 243.