

## FTAによる渇水の構造特性

池淵 周一・白村 暁・宮川 裕史

### STUDY ON CHARACTERISTICS OF DROUGHT BY FTA (FAULT TREE ANALYSIS)

By *Shuichi* IKEBUCHI, *Satoru* SHIRAMURA and *Hiroshi* MIYAKAWA

#### Synopsis

Recent years mainly in metropolitan areas drought problem happens frequently, so it constitutes a social problem. But a clear definition of drought has not yet been formed, and various factors which cause drought are liable to be argued sensuously and empirically.

Then in this paper we apply Fault Tree Analysis which is one of safety analysis, to drought event. And according to the causality between drought event and its factors laying stress on the water quantity, we clarify the structural characteristics of drought event.

Concretely, taking Yodo River basin as an example we consider intake cut at Hirakata as a specific defect event (Top event) of the whole system. Firstly FT diagram is drawn according to the retroactivity process of its basic factors (Basic events).

Then with this FT diagram we study quantitatively the causality between events by such indices as structural, probabilistic and critical importances.

#### 1. 序 論

昭和59年の琵琶湖水位低下による淀川渇水のように、近年、首都圏・近畿圏・北九州圏を中心として全国各地で2～3年に1回の割合で渇水問題が頻繁に発生し、大きな社会問題の様相を呈している。特に都市を中心としたいわゆる都市型渇水の増加が大変著しい。これは、人口の都市集中にともなう業務・サービス活動の拡大によって増大した都市用水の需要に対し、水資源開発が常に遅れをとっていることから、渇水時には取水量が制限されるという不安定取水に依存していることにも一理ある<sup>1),2)</sup>。

渇水は、その定義がいまだもって明確に定められていないが、一時的に水資源の需要(水需要量)と供給(降雨量、河川流量など)が不均衡な状態に陥る事象と考えることができる。渇水事象の諸々の原因としては、まず第一に自然的素因である異常気象が考えられる。また、大幅な需要の伸びに対処するための水資源開発手段として多目的ダムなどの利水調整施設の整備が進められているが、これら施設が多数張りめぐらされ、しかもその高度な運用を強いられるにともない、緊急時の故障や施設の操作不備により渇水事象が誘発される場合も考えられる。この他にも、不安定取水への懸念から不法取水が行われることや、年々深刻化している河川水の汚染により渇水事象が発生する可能性もあるであろう。

渇水事象の基本的な要因はこれらに分類できるが、一般に過去の経験などから異常気象が渇水事象の生起の最大の原因と考えられており、他の要因との因果関係などが論じられることは少ない。

本研究では、渇水事象に安全性解析法の一つであるFTAという理論を適用し、主に流量による要因を重視して、渇水事象の持つ構造的な特性を明らかにし、渇水事象とその要因との間の因果関係の解明を目的とする。

渇水事象にFTAを適用するに際しては、渇水事象の持つ不確定性、時系列的性質などのためにいくつかの制約がともなう。しかし、従来渇水という事象が、ともすれば感覚的・経験的に考察されてきたものを、FTAを適用することにより定性・定量両面から論理的な考察が可能となるということは、渇水問題に対する新たな1つのアプローチが加わったことになるであろう。

## 2. FTAの理論

FTAとは、近年複雑化するシステムに対して、設計または運営上でそのシステムにおいて発生することが望ましくない事象の発生要因となる潜在的故障の所在を明かにし、システムの安全性向上のための改善策を探索する方法である。

この手法は、まずFT図と呼ばれる図式を用いることにより、システムの故障が視覚的にとらえられる点で優れた手法である。それと同時に、FT図はいろいろな専門技術分野にわたる情報をその中に網羅しうる柔軟性に富んだシステム的手法でもある。さらに最大の特徴は、FTAが対象システムの危険性や不信頼性に関して確率論的な定量性の議論を可能とする点にある。

本章では、本研究で用いるFT図作成にあたっての基本事項、および作成されたFT図を用いての定性的・定量的な解析方法を説明する<sup>3),4),5)</sup>。

### 2.1 FT図作成の基本事項

FTAは故障論理の一つの図式解析手法であり、解析しようとする欠陥事象(頂上事象(Top Event))の原因となる事象を列挙し、頂上事象とこれらの事象との間の因果関係を論理記号を用いて結合する。次にこれらの1つ1つの事象について、さらにまた原因となる事象をあげ同じように論理記号を用いて結合していき、上から下へ樹木を逆にしたような図形を組み立てていく。そして、全ての事象がもうこれ以上展開できない基本的な事象(基本事象(Basic Event))まで続け、得られた図形をもとに解析を行う。この図形が、フォールトツリー(Fault Tree...FT図)と呼ばれるものである。

FT図においては、ある特定の事象とその原因となる事象との関係を結びつけるために特定の記号を用いる。その主なものをTable 1に示す。

また、作成したFT図を数式で表したり、数学的に等価なFT図へと簡易化するために、通常Boole代数による論理計算方法を用いる。

たとえば、Fig. 1のようなFT図が与えられた場合に、Boole代数則を用いてFT図の簡易化を行う。頂上事象の論理結合式は、

$$\begin{aligned} T &= E_1 \cap E_2 \\ &= (B_1 \cup B_2) \cap (B_1 \cup B_3) \\ &= B_1 \cap B_1 \cup B_1 \cap B_3 \cup B_2 \cap B_1 \cup B_2 \cap B_3 \\ &= B_1 \cup B_1 \cap (B_2 \cup B_3) \cup B_2 \cap B_3 \end{aligned}$$

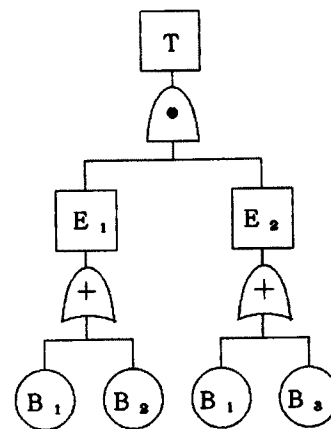
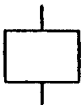

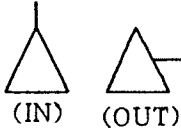


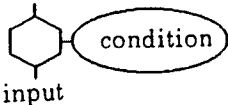


Fig. 1. Example of FT diagram.

Table 1. Principle symbols used in FTA

Classification	Term and Symbol	Description
event symbol	event 	This symbol denotes each event. Commonly it shows event standing for defect. It is used for input or output of logical symbol.
	basic event 	This symbol denotes an elementary event which is no longer developed. It is always used for only input of logical symbol.
	transfer symbol 	This symbol denotes transference or connection to another related part of FT-diagram. The left symbol which has a line segment drawn from top of triangle shows another part transfers to it. The other symbol which has a line segment drawn from lateral edge shows another part transfers from it.
logical symbol	AND gate output  input	Output event results from only coexistence of all input events. (Logical Product)
	OR gate output  input	Output event results from existence of at least one input event. (Logical Sum)
	INHIBIT gate output  input	This gate shows the following ; When event standing for some condition happens with existence of input event, output event happens.

$$=B_1 \cup B_2 \cap B_3 \dots \dots \dots (1)$$

と整理される。式(1)をもとにFT図を描くと Fig. 2のように簡易化することができる。

2.2 FT図の定性的解析

(1) FT図の構造関数

$n$ 個の相異なる基本事象よりなるFT図を考える。いま、基本事象 $i$ の状態を次のように定義する。

$$x_i = \begin{cases} 1 & (\text{基本事象}i\text{が生起している}) \\ 0 & (\text{基本事象}i\text{が生起していない}) \end{cases}$$

同様に、頂上事象の状態 $\Psi$ を、各基本事象の状態を表す $n$ 次元ベクトル $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ の確定的関数として次のように定義する。

$$\Psi(\vec{x}) = \begin{cases} 1 & (\text{頂上事象は発生している}) \\ 0 & (\text{頂上事象は発生していない}) \end{cases}$$

この時の $\Psi$ をFT図の構造関数という。

(2) 基本事象の構造重要度 (Structural Importance)

頂上事象が発生するために、その基本事象がどの程度貢献しているかという情報を数量化表現したものが基本事象の重要度である。ここでは、基本事象の生起確率を問題とせず、FT図の構造のみにより定められる構造重要度をとり上げる。

いま基本事象 $i$ に注目する。他の基本事象の状態は変化しないで、基本事象 $i$ の状態が0から1へ変化したとして、基本事象 $i$ の構造重要度 $SI(i)$ は次のように定義される。

$$SI(i) = \frac{1}{2^{n-1}} n_{si}(i) \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

$$n_{si}(i) = \sum_{\{x \mid x_i=1\}} [\Psi(1_i, \vec{x}) - \Psi(0_i, \vec{x})] \dots\dots\dots (3)$$

であり、

$$(1_i, \vec{x}) \triangleq (x_1, \dots, x_{i-1}, 1, x_{i+1}, \dots, x_n)$$

$$(0_i, \vec{x}) \triangleq (x_1, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_n)$$

である。

2.3 FT図の定量的解析

ここでは、基本事象の生起確率が与えられた場合の頂上事象の発生確率を評価する方法について述べる。まず、FTAの前提に則った計算法を示し、次に基本事象の依存性を考慮した場合の計算法を説明する。また、確率的情報を取り入れた基本事象の重要度についてその概念と計算法を示す。

(1) 頂上事象発生確率の評価法

基本事象の発生確率が既知または推定できるときは、頂上事象の発生確率の評価が可能であるが、この場合原則的には次の2つの仮定が前提となる。

- (a) 各事象は、互いに排反な正常と異常の2つの状態しかとり得ない。
- (b) 基本事象は、相互に独立である。

頂上事象の発生確率 $g$ および基本事象 $i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )の生起確率 $q_i$ は、

$$g \triangleq Pr\{\Psi=1\} (=E\{\Psi\}) \dots\dots\dots (4)$$

$$q_i \triangleq Pr\{x_i=1\} (=E\{x_i\}) \dots\dots\dots (5)$$

で定義される。

厳密な頂上事象の発生確率を計算するには、基本事象の起こりうる全ての $2^n$ 個の組合せについて $\Psi =$

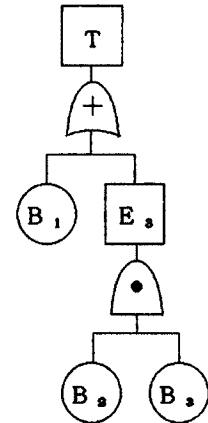


Fig. 2. Simplified FT diagram.

1 となる確率を加えあわせればよい。しかし、基本事象の数  $n$  が大きくなる場合には、この方法は極めて非効率である。

効率のよい  $g$  の評価法として最小カットセット・最小パスセットによる構造関数の表現を利用する方法がある。

最小カットセットとは、これに含まれる全ての基本事象が生起することによって頂上事象を発生させるのに必要かつ十分な基本事象の集合である。また、最小パスセットとは、これに含まれる基本事象が生起しなければ頂上事象が発生しないことを保証する基本事象の最小の集合のことである。以後の説明では、それぞれを単にカットやパスと呼ぶことにする。

すべてのカットを数えあげるとは、考察している FT 図の頂上事象が発生することに対する基本事象の、すべての組合せを与えるものであるという点できわめて重要である。また、カットを調べることにより、システムの中で最も弱い部分を見いだすこともできる。

次に、カットおよびパスによる構造関数の表現方法を示す。考察の対象とする FT 図が  $k$  個のカット  $K_j$  ( $j=1, 2, \dots, k$ ) を持つとする。ここで、カット  $K_j$  にその基本事象の AND 結合である関数

$$\kappa_j(\bar{x}) \triangleq \prod_{i \in K_j} x_i \dots \dots \dots (6)$$

を対応させる。これは、 $K_j$  に属するすべての基本事象が生起したときにのみ  $K_j$  が発生することを示す。これを最小カット AND 構造と呼ぶ。頂上事象が発生するのは、カットの定義により  $k$  個のカットのうち少なくとも 1 つが発生したときであるから、 $k$  個の最小カット AND 構造の OR 結合で表すことができる。すなわち、構造関数は次のように表すことができる。

$$\Psi(\bar{x}) = \prod_{j=1}^k \kappa_j(\bar{x}) = \prod_{j=1}^k \prod_{i \in K_j} x_i \dots \dots \dots (7)$$

同様の考え方を  $p$  個のパス  $P_j$  ( $j=1, 2, \dots, p$ ) に適用すると、最小パス OR 構造は次のように定義される。

$$\rho_j(\bar{x}) \triangleq \prod_{i \in P_j} x_i \dots \dots \dots (8)$$

この  $p$  個の最小パス OR 構造の AND 結合により、構造関数は次のようになる。

$$\Psi(\bar{x}) = \prod_{j=1}^p \rho_j(\bar{x}) = \prod_{j=1}^p \prod_{i \in P_j} x_i \dots \dots \dots (9)$$

したがって、いかに複雑な FT 図でもそのカットとパスがすべて求められれば、最大 2 レベル展開の相異なる論理ゲートをもつ FT 図として等価的に表現できる。この 2 つの FT 図から、頂上事象が発生するかどうかを容易に知ることができ、また次で述べる頂上事象の発生確率を評価する場合にも有効である。

頂上事象の発生確率  $g$  および基本事象の生起確率  $q_i$  は、式 (4)、(5) で与えられるが、ここでは最小カットおよび最小パスを用いた計算法を紹介する。式 (4)、(5) の両辺に期待値操作を施すことにより次の 2 式を得る。

$$g(q_1, q_2, \dots, q_n) = E\left\{ \prod_{s=1}^k \prod_{i \in K_s} x_i \right\} \quad (s=1, 2, \dots, k) \dots \dots \dots (10)$$

$$= E \left\{ \prod_{r=1}^p \prod_{i \in P_r} x_i \right\} \quad (r=1, 2, \dots, p) \dots\dots\dots (11)$$

ただし、この 2 式の期待値操作は、 $x_i^2 = x_i$  を考慮して、 $\{ \}$  の中を展開した後施すことに注意する。

(2) 基本事象が互いに独立でない場合の評価法

FTA では、(1)の(b)で示したように基本事象の独立を前提としている。しかし、実際には、

- (a) 複数個の基本事象が同時に発生する場合
- (b) 1つの故障が他の故障を発生し易くする場合

があり、つまり基本事象は互いに独立ではない。このような場合、基本事象間の依存性を表現する統計的モデルとしてアソシエイトの概念がある。

基本事象がアソシエイトする場合には、頂上事象の発生確率を厳密に評価することはほとんど不可能である。したがって、その上限あるいは下限を評価することができれば、十分有用である。よりよい上限・下限の評価法として各最小パス  $P_j$  の OR 結合の生起する確率の最小値を上限とし、各最小カット  $K_j$  の AND 結合の生起する確率の最大値を下限とする方法が考えられており、これは、次式で表される。

$$\max_{1 \leq j \leq k} \prod_{i \in K_j} q_i \leq g \leq \min_{1 \leq r \leq p} \prod_{i \in P_r} q_i \dots\dots\dots (12)$$

(3) 基本事象の確率重要度 (Probabilistic Importance)

構造重要度が、 $\Psi(1_i, \bar{x}) - \Psi(0_i, \bar{x}) = 1$  となる状態の数で定義したのに対し、確率重要度はその状態の発生確率で定義する。つまり、確率重要度は、FT 図の構造だけでなく基本事象の生起確率という確率的情報も考慮している。

基本事象  $i$  の確率重要度  $PI(i)$  は、次のように定義される。

$$\begin{aligned} PI(i) &= \frac{\partial g}{\partial q_i} \\ &= Pr \{ \Psi(1_i, \bar{x}) - \Psi(0_i, \bar{x}) = 1 \} \\ &= g(1_i, \bar{q}) - g(0_i, \bar{q}) \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

この  $PI(i)$  を用いると、頂上事象の発生確率  $g$  の変化分  $\Delta g$  は、基本事象の生起確率の変化分  $\Delta q_i$  の線形結合として、近似的に次のように表せる。

$$\Delta g \approx \sum_{i=1}^n PI(i) \cdot \Delta q_i \dots\dots\dots (14)$$

(4) 基本事象のクリティカリティ重要度 (Criticality Importance)

確率重要度には、もともと生起確率の小さい基本事象をさらに改善することは、生起確率の大きい基本事象を改善することより困難であるという事実が、反映されていない。したがって、基本事象の生起確率のパーセント変化に対する頂上事象発生確率のパーセント変化の比として重要度を定義したのが、クリティカリティ重要度である。

基本事象  $i$  のクリティカリティ重要度  $CI(i)$  は、次のように定義される。

$$CI(i) = \frac{\partial \ln(g)}{\partial \ln(q_i)} = \frac{q_i}{g} PI(i) \dots\dots\dots (15)$$

以上、FTA の理論を説明した。次章以降では、この理論を漏水事象に適用する。

### 3. 渇水事象（枚方取水点での取水カット）を頂上事象とした FT 図の作成

本章では、前章で示した FTA の理論を、淀川における枚方取水点での取水カットを例とした渇水事象に適用するため、その基本となる FT 図の作成について述べる。また、以後の解析を効率よく行うために、ある程度の FT 図の簡易化も試みる。

#### 3.1 渇水事象の遡及解析

##### (1) 想定領域とその区分

今回の解析においては淀川を例にとり、想定領域を Fig. 3 のようにとる。FT 図作成の都合上、各支川および本川を河川上の各種利水調整施設の設置場所や河川の合流点を境界として区分する。

##### (2) 渇水事象の定義

FTA では、事象は正常か異常かのいずれかの状態にあるとの仮定を前提としており、中間的・過渡的な状態をとる事象や時系列的变化をとる事象を頂上事象とすることは困難である。しかし、解析の対象とする渇水問題は一般に上記の事項を兼ね備えもつ事象と言える。そこで、FT 図作成のための遡及解析、および以後の定性的・定量的解析が無理なく展開できるように、頂上事象となる渇水事象の意味する範囲をある程度限定し、明確な定義を与えておくことが必要となる。本研究において頂上事象として考える枚方取水点での取水カットとは、枚方取水点における計画取水量確保の状態からなんらかの原因により取水量が制限されるもしくは、取水が不可能となること、と定義する。

##### (3) システム故障の基本的要因と FT 図上での表現

取水カットの発生に対する第 1 次要因（サブシステムレベル）として、まず河川の流量が著しく低下していることがあげられる。また、河川水の水質悪化や取水施設そのものの操作不備による故障が起きた場合も取水カットが行われるであろう。

取水カットは、これらの事象のどれか 1 つでも存在すれば発生すると考えられ、頂上事象に対する第 1 次要因の原因事象としてこれらの 3 事象を取り上げ OR ゲートで結合する。(Fig. 4 参照)

次にこれらの 3 つの原因事象のそれぞれに対して、順次同様の方法でさらに遡及解析を進め、FT 図を進展させていく。本研究では、河川流量に重点をおき河川の流量低下を中心に解析を進める。

流量低下の発生の第 1 次要因としては、まず流域内において異常気象が発生し、河川への流入量が低下していることがあげられる。また水供給の不安定さなどによる河川水の過剰取水（不法取水）や、上流にダムなどの利水調整施設がある場合にそれらの施設がさらに上流の流量低下から渇水対策として放流量を

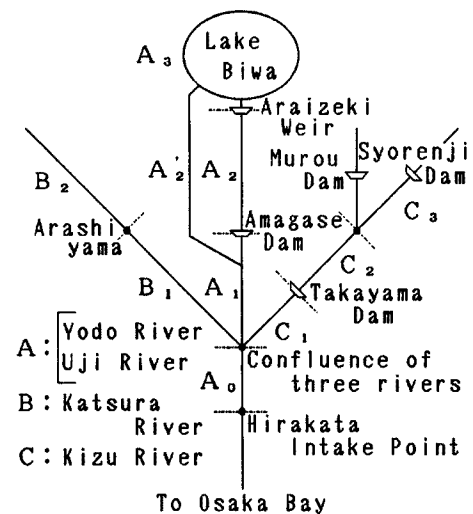


Fig. 3. Imaginary domain.

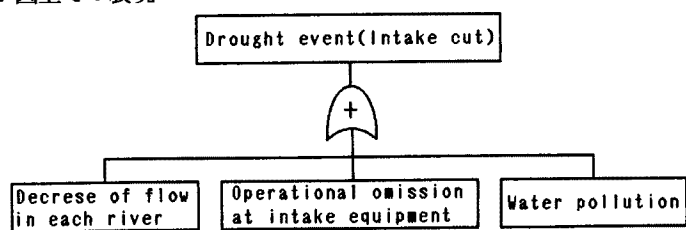


Fig. 4. First-order factors of drought event.

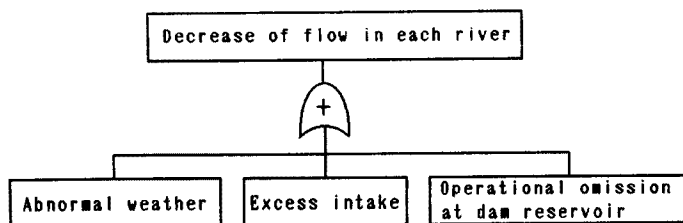


Fig. 5. Primary factors of decrease of flow.

制限していることや操作不備により放流量が低下しているケースも考えられる。以上の事象もどれか1つが生起すれば流量低下が発生するのでORゲートで結合する。(Fig. 5参照)

以上から、渇水事象は大きく分けて、取水施設を含む各種利水調整施設

の操作不備、流域周辺での過剰取水、河川水の水質障害、および異常気象という4つの基本的要因から構成されていることがわかる。

これらの4基本要因をさらに遡及解析して、取水カットというシステム故障を基本事象まで展開し、各基本要因のブロックFT図というものを構成する。以下に、構成に対する基本的な考え方を述べる。

(a) 各種利水調整施設の操作不備

利水調整施設における操作不備は、ヒューマンエラーに属する操作・保全ミスと偶発的な施設の故障に大別できる。ヒューマンエラーは、解析の難しさからこれ以上の展開はせず、また偶発的な故障も施設による用途・規模の違いからくる煩雑さを避けるためこれ以上の解析は行わない。

(Fig. 6参照)

(b) 過剰取水

過剰取水は、はたして現代において起きているかどうかさえ定かではなく、その実態はほとんど解明されていない。したがって、過剰取水は、これをそのまま基本事象として取り扱う。

(c) 水質障害 (水質汚染)

本研究では水質障害の要因は、三川合流点-枚方取水点間 (淀川本川) における水質規制の不備による水質障害を引き起こすような物質の混入という基本事象と、支川上における水質規制の不備とに分ける。さらに、支川上の水質規制の不備は、支川上に存在する下水処理場での操作不備と支川上での不法投棄という事象まで展開を行う。(Fig. 7参照)

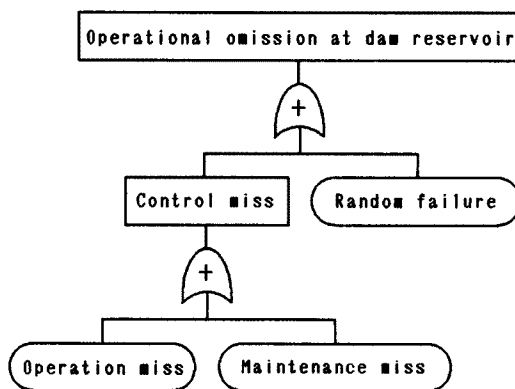


Fig. 6. Factors of operational omission at dam reservoir.

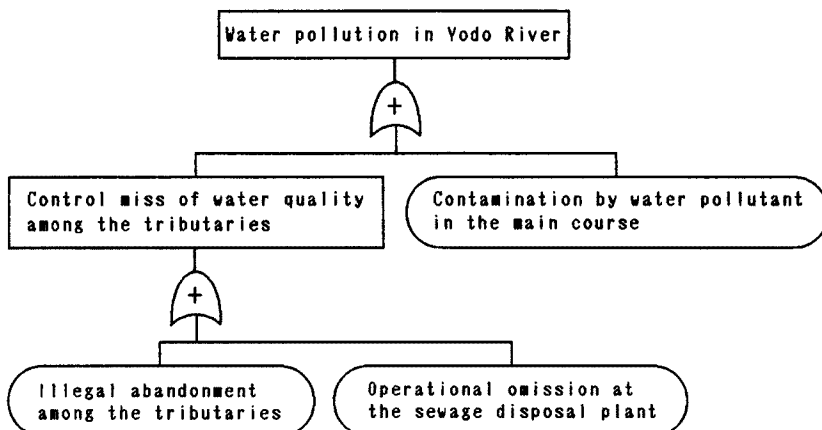


Fig. 7. Factors of water pollution in Yodo River.



## (d) 異常気象

異常気象とは、おもに異常少雨の生起であるが、ときには異常少雨と異常高温との併発も考えられよう。また、琵琶湖のような大湖沼においては、水温と気温との温度差の増加（以下異常高温で代弁）および湖面風速の増大による湖面蒸発量の異常増加も無視できない。（Fig. 8 参照）

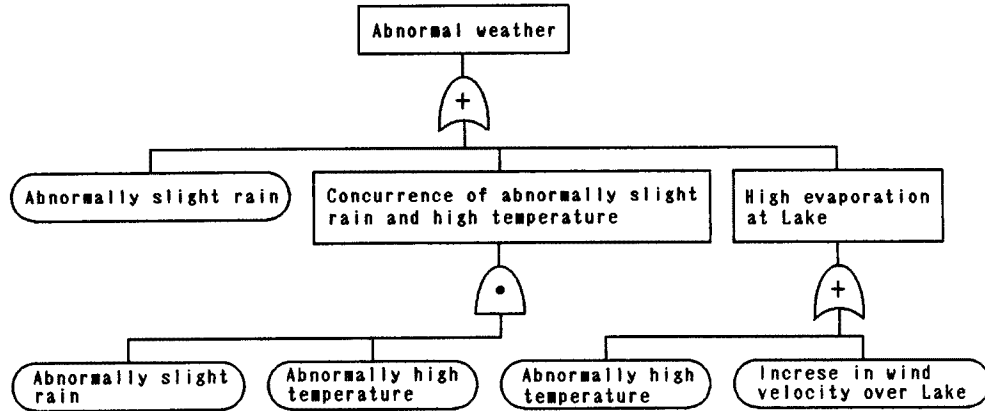


Fig. 8. Factors of abnormal weather.

## (4) 異常少雨を中心とした異常気象関連の基本事象の考え方

ここでは、異常少雨という事象を中心に生起確認にかかる時間や生起確率などの点において通常の他の基本事象とは異なり特別な考え方を必要とする異常気象事象を、FTAにおいて他の基本事象と同様な取扱いで定量解析が行えるように以下のような基本事象として定義する。まず、他の事象と違う特徴を以下に説明し、異常気象関連の事象のもつ意味について考える。

## (a) 生起に要する時間的な違い

異常少雨という現象は、その生起に空間的・時間的な幅を持つ。たとえば、生起開始を瞬時に認識することは不可能であり、その生起が確認されるのには普通数カ月程度の日数を要する。ところが、取水カットという頂上事象は水質障害などにより短時間で生起する場合も考えられ、生起に要する時間の差は現実的には一律ではない。FTAの基礎理論において、頂上事象の発生確率計算をはじめとする一般の確率計算では、事象の生起は便宜上瞬間的に起こると仮定しているため、ある事象の生起が他と比して多大な時間を要する場合、和事象・積事象の計算に大きな誤差が生ずる可能性がある。

## (b) 生起確率のもつ次元の違い

渇水事象の4基本要因のうち、操作不備・水質障害に関する要因における生起確率というものは、Unavailability（要請時に本来の機能や役割を発揮できない確率）を意味し、発生頻度（回/時間）を表わすわけではなく本質的には無次元である。

また、過剰取水に関しても、実態が不明確なため便宜上不法取水対策の不備という観点からみるとその生起確率は一種のUnavailabilityを意味すると考えられる。

これに対し、異常少雨の生起確率は、一般に降雨量データなどにより算出される非超過確率を意味し、その次元は〔1/時間〕である。

しかし、次元の違う事象の和事象や異常少雨どうしの積事象で計算された数値は、確率的に意味を持たない。したがって、異常少雨の生起時間を考慮せず、かつ生起確率が無次元で与えられるように基本事象を定義する方向で検討することが必要となる。

## (c) 異常高温・湖面風速の増大との依存性

2.3の(1)で述べたように、FTAでは基本事象が互いに独立であることが前提条件の一つである。しかし、異常気象に関する事象（異常少雨・異常高温・湖面風速の増大）の事象間に、なんらかの相関があること

は十分考えられる。また、区分領域間での相関性も容易に推測されよう。このように想定領域は異なるが同一の内容を持つ数個の事象において、これらをまったく互いに独立の事象として取り扱うか、それとも完全に同一の事象として取り扱うかでは、FT図の簡易化や発生確率の計算において著しく変わってくる。

本研究ではFTAの前提に則り、同じ異常少雨という事象でも各想定領域間では独立と見なして解析する。そして、一通りの解析が終了したら、2.3の(2)で述べたアソシエイト分析を行い、独立と仮定した場合の発生確率との違いを考察することにより異常気象関連の事象の相互依存性を検討する。

#### (d) 取水カットとの関係

対象とする地域における水需要量・渇水に対する意識・渇水対策システムの充実度などの違いから、同一の降雨量でも取水カットが発生する場合としない場合が考えられる。これは、単に降雨量(供給量)の大小から取水カットを論ずることはできないことを意味する。

以上のことから、本研究でのFTAにおける異常少雨という事象は、現在の淀川水系の水需要構造を踏まえたうえで、今後対象とする期間内に対象領域内の降雨量が取水カットを起こさせる可能性があると思われる降雨量となること、と定義し、その生起確率は無次元で与えられるものとする。

異常高温や湖面風速の増大という事象も同様な考え方で定義される。

#### (5) 各河川別でのFT図の展開

(3)での基本ブロックFT図をもとに各河川別に細部のFT図を作成していく。

まず淀川本川の流量低下は、合流点より上流つまり宇治川・木津川・桂川の流量低下という事象と本川での過剰取水をORゲートで結ぶ。ここで、合流点より上流域での流量低下という事象は、以下の考え方にに基づき3河川それぞれの流量低下の事象の論理結合とする。

琵琶湖をもつ宇治川の重要度を最重視し、以下高山ダムおよび室生・青蓮寺ダムといった利水調整施設を含む木津川、そして桂川の順に河川に優劣を与える。そして、傑出する宇治川の重要度を考慮して、宇治川の流量低下が発生した場合には他の二川の流量低下が発生していなくても合流点における流量低下が生起するとする。木津川・桂川においては、このどちらか一方だけで流量低下が発生している場合は、宇治川での調整(放流増)により合流点での流量低下の生起を回避できるとし、二川が同時に流量低下した場合にのみ、合流点で流量低下が発生すると仮定する。

#### (6) FT図作成上のその他の前提事項

ここでは、いままで述べてきたFT図作成上の前提の他にFT図全体を通して盛り込まれた前提、および各河川別の細かな展開においてその基本とした前提について述べる。

##### I). FT図全体に共通の前提

##### (a) 気象予測の取入れは考慮しない

現在、河川管理者が気象予測を明確に利用するといったシステムがさほど存在していない、という実情を考慮し、今後予測を取り入れる方法・時期・判断基準などが明らかになり予測の取入れという事象が無視できなくなったときに再度FT図への導入を検討するとし、ここでの解析においては予測および予測の取入れに関する事象はFT図からは除いた。

##### (b) 2種類の利水調整施設操作不備を想定する

操作不備の基本要因は(3)(a)で述べたように、操作ミス・保全ミス・偶発的故障の3基本事象からなる。しかし、本研究では同じ操作不備においても2種類の操作不備が存在することを想定する。

1つは通常確保流量を放流すべきところを、確保流量より多い流量を放流していたために貯水量の低下を引き起こすような操作不備(操作不備I)であり、もう一方は通常確保流量を放流すべきところを、確保流量より少ない流量を放流していたために下流において流量低下を引き起こすような操作不備(操作不備II)である。

##### II). 各河川別の前提

##### A: 宇治川

- (a)  $A_3$  流域の降雨量の重要性が  $A_1$ ,  $A_2$  流域のそれに比して大きいので、異常少雨の生起する領域としては、 $A_3$  流域のみを取り扱う。
- (b) 洗堰-天ヶ瀬ダム間の距離が比較的短いので、洗堰における操作不備Ⅱは、もし発生があったとしても天ヶ瀬ダムにおいてすぐに発見され、不備が長期間におよぶことが考えられないのでこれを省略する。
- (c) 天ヶ瀬ダムは貯水量などの面で洗堰と較べた場合その調整能力が小さく、天ヶ瀬ダムにおける操作不備Ⅰは、もし発生したとしても洗堰に到るまでが正常ならば充分この不備を補うことが可能としてこれを省略する。
- (d)  $A_2$  区間（洗堰-天ヶ瀬ダム間）における過剰取水は、洗堰に到るまでが正常ならば、洗堰からの放流増または天ヶ瀬ダムの貯水の利用により補充できるとしてこれを省略する。
- (e) 琵琶湖の貯水量低下により洗堰で放流カットが行われる場合、天ヶ瀬ダムにおいても洗堰との相互調整により放流カットを行うとする。また、天ヶ瀬ダムの単独調整は、これを考慮しない。
- (f) 琵琶湖から宇治川への流入経路は、実際には Fig. 3 に示したような  $A_2$  区間も存在するが、この区間を通る流量は考慮しない。
- (g) 洗堰における放流カットは、事実上枚方取水点での取水カットに通ずる。したがって、琵琶湖の貯水量低下がすぐに洗堰でのカットにつながるわけではなく、琵琶湖の水位が警戒水位をきるまで様子を伺い、その後水利権者および河川管理者らによる渇水対策会議において合意が得られてはじめて河川管理者が放流量制限に入る、という経過をたどる。

#### B: 桂川

A の(a)と同様に異常少雨の生起する領域は、 $B_2$  流域のみ取り扱う。

#### C: 木津川

- (a) 異常少雨の生起する領域は、 $C_2$ ,  $C_3$  流域のみ取り扱う。
- (b) 室生ダムおよび青蓮寺ダムは、1つのダムとして取り扱う。
- (c) 高山ダムと室生・青蓮寺ダムでの放流カットは、基本的には独立して行われるものとする。
- (d)  $C_2$  区間での流量低下は、室生・青蓮寺ダムの貯水量低下による放流カットが発生し、かつ  $C_2$  流域からの流入量低下または  $C_2$  区間内での過剰取水が発生した場合にはじめて発生するとする。

以上、(3)での基本ブロック FT 図をもととし、これに(4)~(6)の事項を考慮すると、宇治川・木津川・桂川の各河川別に FT 図を基本事象に到るまで展開することができ、最後に本川流量低下という事象に連結すると、全体の FT 図が完成する。ここでは紙数の都合により、これら基本事象、中間事象、制約事象および頂上事象をすべて含む全体の FT 図 (FT-I) は省略し、次節で、以後の定性的・定量的解析に直接利用するための簡易化された FT 図の構成をとりあげるにとどめる。

### 3.2 FT 図の簡易化

ここでは、次章で扱う定性的・定量的解析が効率よく行えるように、FT 図を簡易化する手法について述べる。

具体的に提示しなかったが、FT-I には 41 種の基本事象、44 種の中間事象、1 種の制約事象があり、これらには 2ヶ所以上に含まれる同一の基本事象が多々存在する。そこで、まず FT-I において、2.1 で述べた Boole 代数を繰り返し用いて頂上事象から末端の基本事象までの論理演算を行い FT 図を数式化し、頂上事象と基本事象間の論理関係式を整理することにより Boole 代数的に等価な簡易化された FT 図を作成することができる。

また、利水調整施設の操作不備の要因である操作ミス・保全ミス・偶発的故障の 3 事象については、いずれも、生起確率を考えた場合にその値が明確に定めにくく、これらは各利水調整施設の調整操作不備という 1つの基本事象にまとめて、以後の解析へと進んだ方が効率的といえる。同様の理由により、水質障

害という事象もこれを1基本事象として扱い、また琵琶湖の湖面蒸発量の異常増加という事象も、異常高温と湖面風速の増大の相互関係をFT図において考慮していないので、1基本事象として取り扱う。

さらに、FT-I 中の制約事象は、渇水対策会議における放流制限の合意を表しているが、琵琶湖の水位低下が発生した場合、現実的には放流制限の時期の遅れはあるものの、合意に到らないことはほとんど考えられないとして、これを削除する。

以上により、FT-I を簡易化したものが Fig. 9 に示す FT-II である。各事象の事象名は Table 2 のとおりである。実際の解析にはこの FT-II を用いることにする。

#### 4. FTA による渇水事象（枚方取水点での取水カット）の解析

本章では、3.2 で作成した FT 図（FT-II）を用いて、2.2, 2.3 で示した定性的・定量的解析を行い、渇水事象のもつ構造的特性を明らかにする。

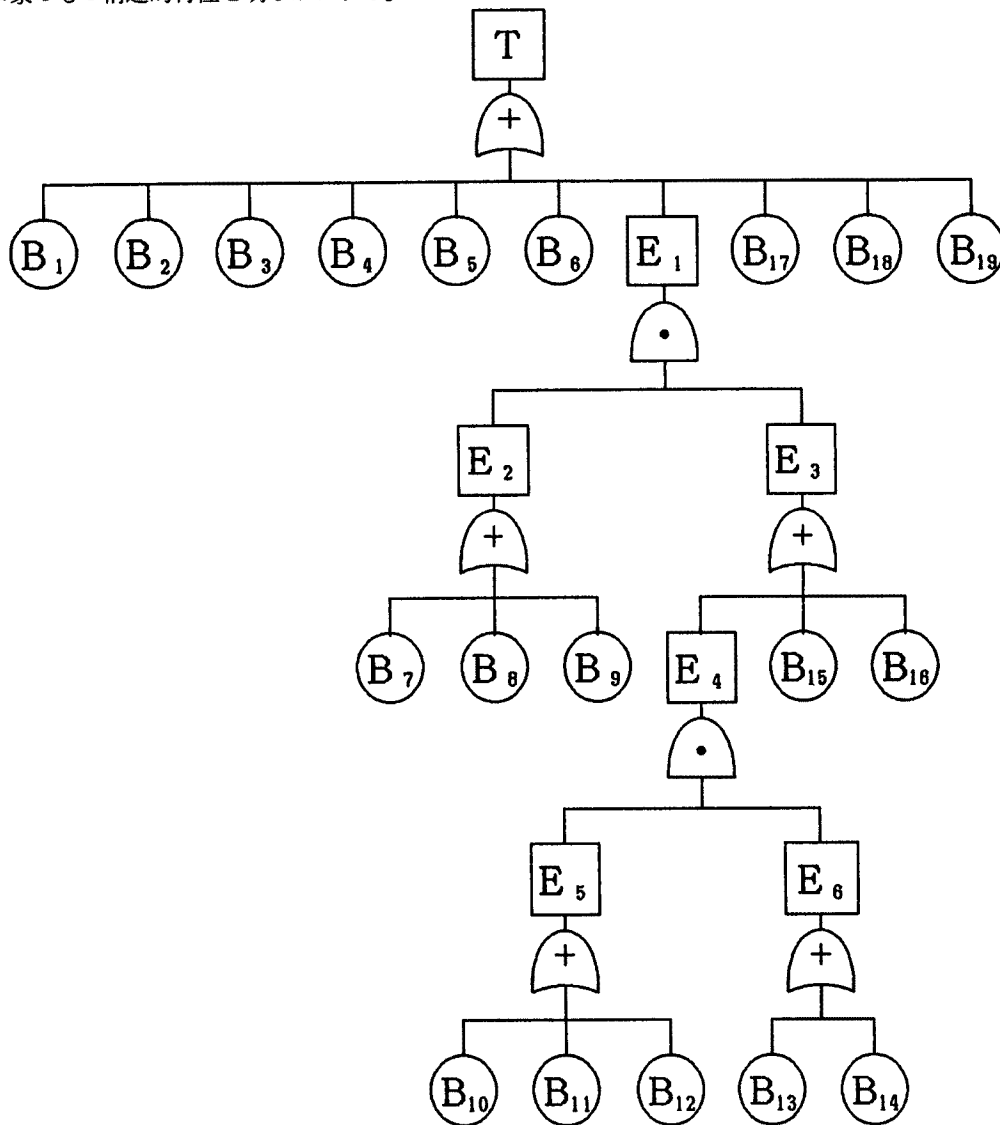


Fig. 9. FT diagram which top event is intake cut at Hirakata.

Table 2. Contents of events in FT diagram

Event No.	Contents
B <sub>1</sub>	Abnormally slight rain in A <sub>3</sub> area
B <sub>2</sub>	Excess intake in Lake Biwa Basin
B <sub>3</sub>	Operational omission at Araizeki Weir
B <sub>4</sub>	High evaporation at Lake Biwa
B <sub>5</sub>	Operational omission at Amagase Dam
B <sub>6</sub>	Excess intake in A <sub>1</sub> section
B <sub>7</sub>	Abnormally slight rain in B <sub>2</sub> area
B <sub>8</sub>	Excess intake in B <sub>2</sub> section
B <sub>9</sub>	Excess intake in B <sub>1</sub> section
B <sub>10</sub>	Abnormally slight rain in C <sub>3</sub> area
B <sub>11</sub>	Excess intake in C <sub>3</sub> section
B <sub>12</sub>	Operational omission at Murou・Syorenji Dams
B <sub>13</sub>	Abnormally slight rain in C <sub>2</sub> area
B <sub>14</sub>	Excess intake in C <sub>2</sub> section
B <sub>15</sub>	Operational omission at Takayama Dam
B <sub>16</sub>	Excess intake in C <sub>1</sub> section
B <sub>17</sub>	Excess intake in A <sub>0</sub> section
B <sub>18</sub>	Operational omission at Hirakata Intake Point
B <sub>19</sub>	Water pollution at Hirakata Intake Point
E <sub>1</sub>	Decrease of inflow from Katsura and Kizu Rivers at confluence point
E <sub>2</sub>	Decrease of inflow from Katsura River
E <sub>3</sub>	Decrease of inflow from Kizu River
E <sub>4</sub>	Concurrence of E <sub>5</sub> and E <sub>6</sub>
E <sub>5</sub>	Decrease of discharge from Murou・Syorenji Dams
E <sub>6</sub>	Decrease of flow in C <sub>2</sub> section
T	Restriction or cut of intake at Hirakata

#### 4.1 定性的解析

ここでは、まず最小カットセットと最小パスセットを用いてシステム全体の定性的な解析を行い、次に構造重要度の値を比較することにより、各基本事象の定性的な検討を行う。

##### (1) 最小カットセットと最小パスセットによる解析

3.2で作成したFT図 (FT-II) から最小カットセットと最小パスセットを求めた結果をTable 3に示す。ここで $K_s$  ( $s=1, \dots, 33$ ),  $P_r$  ( $r=1,2,3$ ) は、それぞれカットセット、パスセットを表している。

Table 3を見ると、カットセットの個数 (33個) がパスセットの個数 (3個) に比べて多いことから、渇水事象を発生させる状況が数多くあるのに対し、その発生を抑制する状況が少ないもしくは効率的に作用していないことがわかる。

また、各カットセットの要素の数が少ない (最大のものでも3個である) のに対して、各パスセットのそれが多い (最小のものでも12個である) ことから、頂上事象が発生するためにすべて生起しなければ

Table 3. Minimal cut sets, Minimal path sets of FT diagram (Fig. 9)

Minimal cut Sets
$K_1=\{B_1\}, K_2=\{B_2\}, K_3=\{B_3\}, K_4=\{B_4\}, K_5=\{B_5\}, K_6=\{B_6\}, K_7=\{B_{17}\}, K_8=\{B_{18}\}, K_9=\{B_{19}\}$
$K_{10}=\{B_7, B_{10}, B_{13}\}, K_{11}=\{B_8, B_{10}, B_{13}\}, K_{12}=\{B_9, B_{10}, B_{13}\}$
$K_{13}=\{B_7, B_{10}, B_{14}\}, K_{14}=\{B_8, B_{10}, B_{14}\}, K_{15}=\{B_9, B_{10}, B_{14}\}$
$K_{16}=\{B_7, B_{11}, B_{13}\}, K_{17}=\{B_8, B_{11}, B_{13}\}, K_{18}=\{B_9, B_{11}, B_{13}\}$
$K_{19}=\{B_7, B_{11}, B_{14}\}, K_{20}=\{B_8, B_{11}, B_{14}\}, K_{21}=\{B_9, B_{11}, B_{14}\}$
$K_{22}=\{B_7, B_{12}, B_{13}\}, K_{23}=\{B_8, B_{12}, B_{13}\}, K_{24}=\{B_9, B_{12}, B_{13}\}$
$K_{25}=\{B_7, B_{12}, B_{14}\}, K_{26}=\{B_8, B_{12}, B_{14}\}, K_{27}=\{B_9, B_{12}, B_{14}\}$
$K_{28}=\{B_7, B_{15}\}, K_{29}=\{B_8, B_{15}\}, K_{30}=\{B_9, B_{15}\}, K_{31}=\{B_7, B_{16}\}, K_{32}=\{B_8, B_{16}\}, K_{33}=\{B_9, B_{16}\}$
Minimal path sets
$P_1=\{B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6, B_{10}, B_{11}, B_{12}, B_{15}, B_{16}, B_{17}, B_{18}, B_{19}\}$
$P_2=\{B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6, B_{13}, B_{14}, B_{15}, B_{16}, B_{17}, B_{18}, B_{19}\}$
$P_3=\{B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6, B_7, B_8, B_9, B_{17}, B_{18}, B_{19}\}$

ならない故障要因の数が少ないのに対し、逆に頂上事象の発生を抑制するために生起してはならない故障要因の数は大変多いことがわかる。

つまり、渇水事象は、定性的にはその発生要因に比して抑制要因の少なさから、発生が十分予想され得ものになっている。

#### (2) 基本事象の構造重要度 (SI) による解析

各基本事象の構造重要度 (SI) を Table 4 に示す。各構造重要度を比較すると、主に琵琶湖-宇治川-淀川というライン上で生起する要因が、構造的に最も重要であることがわかり、Table 3 での各カットセットを構成する基本事象の組合せにおいて、これらの基本事象がいずれも単一事象のカットセットとなっている結果と一致する。つまり、これらの要因は、その発生が取水カットに直接結びつくという致命的要因であるといえる。

また、利水施設のない桂川のほうが木津川より取水カット発生の際の潜在的重要性が高いことも窺える。

## 4.2 定量的解析

### (1) 基本事象の生起確率の設定

ここでは、定量的解析の基となる各基本事象の生起確率を設定する。FTA の前提に従い、各基本事象は独立とする。また、各基本事象とも明確な値を与えにくいことから、ある程度の幅を持たせた確率値を設定する。

#### (a) 異常気象に関する基本事象の生起確率

異常気象に関する基本事象としては、領域別の異常少雨と琵琶湖の湖面蒸発量の異常増加の2種類があり、次のように生起確率を設定する。

現在、河川管理者による渇水対策は10年に1回発生する程度の規模の渇水に相当する年（基準渇水年）に対しては、利水調整施設により対処可能とされていることを踏まえて、ここではより安全側を想定し、各領域における異常少雨の生起確率を、0.1～0.2として設定する。

湖面蒸発量の異常増加は、湖面蒸発の機構が明らかでないこと、および取水カットにつながる可能性が異常少雨に比べ相対的に小さいと考えられることから、その生起確率は、0.001～0.1の範囲にある

Table 4. Structural importance of basic event

basic event No.	structural importance
1, 2, 3, 4, 5, 6, 17, 18, 19	$7.820 \times 10^{-4}$
7, 8, 9	$4.463 \times 10^{-4}$
15, 16	$2.937 \times 10^{-4}$
13, 14	$1.869 \times 10^{-4}$
10, 11, 12	$0.801 \times 10^{-4}$

と設定する。

(b) 利水施設の調整操作不備・過剰取水・水質障害の生起確率

これらの各基本事象の生起確率は、現象として解明されている部分が異常気象関係の基本事象に比べて少なく、生起確率を与える明確な根拠がほとんどないのが実情である。しかし、一般的に異常気象の生起確率よりは相対的にかなり小さいと考えられ、0.0001～0.01の範囲にあると設定する。

(c) 確定基本確率データの設定

実際の解析では、各利水施設における操作不備に関する基本事象をまとめて事象Ⅰ(系)、過剰取水に関する基本事象をまとめて事象Ⅱ(系)とし、これらの生起確率は、施設または領域によらず一律とする。水質障害の基本事象は事象Ⅲ(系)とする。また、異常少雨に関する基本事象を事象Ⅳ(系)とし、実際の解析では事象Ⅰ、Ⅱと同様、領域によらず一律とする。湖面蒸発量の異常増加は事象Ⅴ(系)とする。

また、事象Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅴについては生起確率の最小値と最大値の相乗平均を、事象Ⅳについては相加平均を、それぞれの確定基本確率データ(Basic data)とする。

以上、設定した確率値をまとめて示したのが Table 5 である。

(2) 基本事象の確率重要度とクリティカリティ重要度による考察

各基本事象の確率重要度( $PI$ )とクリティカリティ重要度( $CI$ )を求めるにあたり、各基本事象に与える生起確率として、Table 5 で示した生起確率の範囲の中で、Pattern Ⅰ); すべて最小値, Pattern Ⅱ); すべて最大値, Pattern Ⅲ); 基本確率データ、の3パターンを考える。この時の各基本事象の確率重要度とクリティカリティ重要度を Table 6～8 に示す。

(a) 確率重要度に関する考察

1), 2), 3) いずれのパターンも各基本事象間の確率重要度の相対的な大小関係は等しく、琵琶湖流域での異常少雨および湖面蒸発量の異常増加の2要因が最も重要であることがわかる。さらに、琵琶湖-宇治川-淀川本川上の施設の不備、過剰取水は確率が同一であっても他の桂川・木津川でのこれらの要因と比べかなり重要度が高いことがわかる。また、桂川と木津川の比較では、桂川流域での異常少雨の方が木津川流域での異常少雨より渇水発生に対する寄与度が大きいことがわかる。

(b) クリティカリティ重要度に関する考察

1), 2), 3) の共通点は、琵琶湖流域の異常少雨が他を抜きんでて重要であることと、桂川や木津川での事象Ⅰ・Ⅱ・Ⅲ系に属する要因の重要度が低いことである。しかし、その他の基本事象では大小関係が各パターンでかなり違っている。具体的には、事象Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ系の確率が異常少雨の生起確率と比べて相対的にそれほど小さくない場合、琵琶湖-宇治川-淀川本川上の施設操作不備、過剰取水、水質障害の3要因は、木津川流域の異常少雨と同程度の重要度を持ち、逆に、これらが相対的にかなり小さいときは、宇治川、桂川、木津川の順に各領域の異常少雨と、湖面蒸発量の異常増加が重要要因となる。

Table 5. Assumed probability of primary factors

primary factors	probability	basic probabilistic data
Event I : Operational omission	0.0001～0.01	0.001
Event II : Excess intake	0.0001～0.01	0.001
Event III : Water pollution	0.0001～0.01	0.001
Event IV : Abnormally slight rain at each area	0.1～0.2	0.15
Event V : High evaporation	0.01～0.1	0.01

Table 6. Probabilistic importance and criticality importance in pattern I

basic event No.	probabilistic importance
1	$9.7938 \times 10^{-1}$
4	$8.4089 \times 10^{-1}$
2, 3, 5, 6, 17, 18, 19	$8.3331 \times 10^{-1}$
15, 16	$1.2374 \times 10^{-1}$
7	$0.2071 \times 10^{-1}$
13	$0.1917 \times 10^{-1}$
10	$0.1905 \times 10^{-1}$
8, 9	$0.1762 \times 10^{-1}$
14	$0.1631 \times 10^{-1}$
11, 12	$0.1621 \times 10^{-1}$
basic event No.	criticality importance
1	$8769.5119 \times 10^{-4}$
4	$501.9586 \times 10^{-4}$
7	$185.4664 \times 10^{-4}$
13	$171.6708 \times 10^{-4}$
10	$170.5392 \times 10^{-4}$
2, 3, 5, 6, 17, 18, 19	$49.7436 \times 10^{-4}$
15, 16	$7.3865 \times 10^{-4}$
8, 9	$1.0520 \times 10^{-4}$
14	$0.9738 \times 10^{-4}$
11, 12	$0.9674 \times 10^{-4}$

Table 7. Probabilistic importance and criticality importance in pattern II

basic event No.	probabilistic importance
1	$8.2728 \times 10^{-1}$
4	$7.3536 \times 10^{-1}$
2, 3, 5, 6, 17, 18, 19	$6.6851 \times 10^{-1}$
15, 16	$1.3701 \times 10^{-1}$
7	$0.4204 \times 10^{-1}$
8, 9	$0.3397 \times 10^{-1}$
13	$0.3036 \times 10^{-1}$
10	$0.2895 \times 10^{-1}$
14	$0.2453 \times 10^{-1}$
11, 12	$0.2340 \times 10^{-1}$
basic event No.	criticality importance
1	$489.2629 \times 10^{-3}$
4	$217.4502 \times 10^{-3}$
7	$24.8633 \times 10^{-3}$
2, 3, 5, 6, 17, 18, 19	$19.7682 \times 10^{-3}$
13	$17.9539 \times 10^{-3}$
10	$17.1224 \times 10^{-3}$
15, 16	$4.0514 \times 10^{-3}$
8, 9	$1.0046 \times 10^{-3}$
14	$0.7254 \times 10^{-3}$
11, 12	$0.6918 \times 10^{-3}$

Table 8. Probabilistic importance and criticality importance in pattern III

basic event No.	probabilistic importance
1	$99.7278 \times 10^{-2}$
4	$89.8449 \times 10^{-2}$
2, 3, 5, 6, 17, 18, 19	$89.7640 \times 10^{-2}$
15, 16	$8.9097 \times 10^{-2}$
7	$0.9185 \times 10^{-2}$
13	$0.9014 \times 10^{-2}$
10	$0.9005 \times 10^{-2}$
8, 9	$0.8267 \times 10^{-2}$
14	$0.8114 \times 10^{-2}$
11, 12	$0.8106 \times 10^{-2}$
basic event No.	criticality importance
1	$9734.3384 \times 10^{-4}$
7	$89.6542 \times 10^{-4}$
13	$87.9884 \times 10^{-4}$
10	$87.9006 \times 10^{-4}$
4	$87.6967 \times 10^{-4}$
2, 3, 5, 6, 17, 18, 19	$8.7618 \times 10^{-4}$
15, 16	$0.8697 \times 10^{-4}$
8, 9	$0.0807 \times 10^{-4}$
14	$0.0792 \times 10^{-4}$
11, 12	$0.0791 \times 10^{-4}$

また、湖面蒸発量の異常増加は、その生起確率が異常少雨と比べて相対的にかなり小さい場合以外は、他の桂川・木津川における異常少雨よりも重要度が大きいことがわかる。

(5) アソシエイト分析

これまでの解析では、FTAの前提に則り各基本事象を独立として扱ってきたが、ここでは基本事象間の依存性を考慮した場合の渇水事象の発生確率の評価を行う。Table 3より、最小カットセット、最小パスセットを用いた頂上事象(T)の論理結合式は、それぞれ次のようになる。

(a) 最小カットセットによる頂上事象の論理結合式

$$T = \bigcup_{s=1}^{33} K_s \dots\dots\dots (16)$$

(b) 最小パスセットによる頂上事象の論理結合式

$$T = \bigcap_{r=1}^3 P_r \dots\dots\dots (17)$$

一方、FT図 (FT-II) から求められる論理結合式は、



$$T = B_1 \cup B_2 \cup B_3 \cup B_4 \cup B_5 \cup B_6 \cup B_{17} \cup B_{18} \cup B_{19} \cup (B_7 \cup B_8 \cup B_9) \cap \{(B_{10} \cup B_{11} \cup B_{12}) \cap (B_{13} \cup B_{14}) \cup B_{15} \cup B_{16}\} \dots \dots \dots (18)$$

である。各基本事象に与える生起確率は先に示した3パターンを用い、解析を行った。その結果を Fig. 10 に示す。図中、実線の矢印の範囲が上限と下限の幅を表し、●の位置は、各基本事象を独立とした場合の計算値  $g$  を示している。これより、Pattern I および III では基本事象間に依存性が存在すると、ほとんどの場合で渇水の発生確率が増加する傾向にあることがいえるが、これに対し、Pattern II では、アソシエイトする基本事象の組合せと程度により、渇水の発生確率が増加する場合も減少する場合もあることがわかる。そこで、各パターンの確率値を式 (12) へ代入し、上限値および下限値を計算すると、3パターンとも次式のようになる。

$$\text{下限: } \max_{1 \leq s \leq k} \prod_{i \in K_s} q_i = \Pr(B_1) = q_1 \dots \dots \dots (19)$$

$$\text{上限: } \min_{1 \leq r \leq \rho} \prod_{i \in P_r} q_i = \Pr(B_1 \cup B_2 \cup B_3 \cup B_4 \cup B_5 \cup B_6 \cup B_7 \cup B_8 \cup B_9 \cup B_{17} \cup B_{18} \cup B_{19}) \dots \dots \dots (20)$$

下限値と  $g$  の差は、式 (16) において  $K_1$  を除いた他のカットセットの論理和結合の確率分を表している。また、上限値は式 (18) と式 (20) の比較により、論理結合式  $(B_7 \cup B_8 \cup B_9) \cap \{(B_{10} \cup B_{11} \cup B_{12}) \cap (B_{13} \cup B_{14}) \cup B_{15} \cup B_{16}\}$  を  $(B_7 \cup B_8 \cup B_9)$  として頂上事象の発生確率を求めた場合に相当することがわかる。つまり各基本事象間の依存性を考えると、渇水事象の発生確率は、 $B_1$  (琵琶湖流域での異常少雨) が生起する時には他の全ての基本事象 ( $B_2 \sim B_{19}$ ) も生起する場合に下限値になる。また  $B_7 \sim B_9$  (桂川流域での要因) のいずれかが生起する場合には、 $E_4$  (合流点における木津川からの流入量低下) の発生をもたらす基本事象 ( $B_{10} \sim B_{16}$ ) も生起し、かつこれらの基本事象 ( $B_7 \sim B_{16}$ ) と琵琶湖-宇治川-淀川本川上での要因 ( $B_1 \sim B_6, B_{17} \sim B_{19}$ ) とが独立である場合には上限値になることを意味している。ここで注意することは、このアソシエイト分析による上限・下限という概念では各基本事象中のどの基本事象がアソシエイトしているのかという問題や、各基本事象のアソシエイトがどの程度のものなのかといった問題がまったく考慮されていないという点である。

本研究における淀川水系の渇水事象の FT 図では、琵琶湖、桂川、木津川のそれぞれの領域を区分し (Fig. 3)、気象的素因を表す基本事象として、4 領域での異常少雨 ( $B_1, B_7, B_{10}, B_{13}$ ) と琵琶湖の湖面蒸発量の異常増加 ( $B_4$ ) を取り上げている。アソシエイトの可能性はこれら5つの基本事象間において最もその存在が予想され、他の基本事象は独立と見なしてよいと考えられる。そこで、このように一部の基本事象間だけのアソシエイトが予想される場合における上限・下限の評価について考える。アソシエイトの存在が予想される基本事象 ( $B_1, B_4, B_7, B_{10}, B_{13}$ ) を含むカットセットを取り出し、その中での最大値とこれらに含まれないカットセットとの論理和結合の発生確率を下限とし、同様にこれらを含むパスセットの最小値とこれらを含まないパスセットとの論理積結合の発生確率を上限と考える。この考え方により、先に示した3パターンの生起確率を与え、上限値と下限値の幅を示したものが Fig. 10 の一点鎖線の矢印である。

この場合、下限値は、大小差はあるもののいずれも通常のアソシエイト計算における下限値より大きくなっているが、上限値の方は値が変化していない。これは、式 (16) と式 (17) から下限値の場合はカットセットを分けることができるが、パスセットの場合は3つのパスセットとも上記の5基本事象を含んでおりパスセットを分けることができないからである。しかし、この考え方により、アソシエイトの予想される基本事象が特定できれば、その場合の頂上事象の発生確率を通常のアソシエイト計算と比べてよりよい上限値・下限値で評価できる可能性があるといえる。

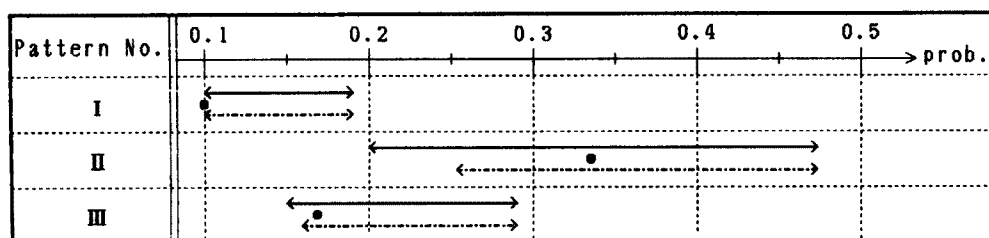


Fig. 10. Upper limit and lower limit of probability of top event by associate analysis.

## 5. 結 論

本研究では、近畿圏の最重要水系である淀川水系を例に、枚方取水点での取水カットを渇水事象と定め、この渇水事象発生の諸々の要因の間に存在する因果関係を考察するために、FTA という安全性解析法を用いて定性・定量的両面から解析を行った。

最後に、FTA による淀川での渇水事象の構造特性に関する考察をまとめる。

1. 淀川における渇水の定性的特徴として、琵琶湖-宇治川-淀川本川というライン上においては、琵琶湖流域における異常気象をはじめ、このライン上に存在する洗堰、天ヶ瀬ダム、枚方取水場の各施設での不備や、本川上での水質障害が、これらの要因の生起がそのまま取水カットに通ずるほどの、致命的要因としてあげられる。
2. 定量的解析では、いずれの設定データにおいても琵琶湖流域での異常少雨が淀川渇水発生の最大の要因であることが認められた。また、琵琶湖の湖面蒸発量の異常増加現象もその生起確率によっては木津川・桂川流域での異常少雨よりも重要な要因となり得ることがわかった。
3. 桂川における異常少雨は、定性的・定量的どちらにおいても木津川における異常少雨と比べ渇水発生に対する寄与度が大きいことがわかった。

このように、本研究によって FTA が渇水事象の特性を論理的に解明する 1 つのアプローチとしての可能性を秘めていることがわかった。また、既存 FT 図において、基本事象の生起確率の増減、あるいは、FT 図自体の修正等を施すことにより、各支川における流量規模の変更や、ダムなどの利水施設の設置に対する新たな渇水への影響を即座に定性的・定量的に把握できるなどの応用性を持っている点においても、FTA は有効な方法といえる。しかし、FTA では本質的には渇水事象のような過渡的・時系列的性質をもつ現象、すなわち操作による時間的配分に依存する性質をもつ現象を頂上事象として取り扱うのは難しい。しかも、本研究における FT 図では図中にはなるべく複雑な論理ゲートを用いず、計算が容易に行えるような方針で FT 図を作成したため、他の代替 FT 図と比較検討した上で選ばれた FT 図ではあるが、実際の渇水事象を正確に表現できているか、という問題がある。また、FTA は操作ミス・勘違いなどのヒューマンエラーも取り扱えるのは大きな特徴であるが、人間の行動というものは、因果関係があいまいで必ずしも AND または OR ゲートで表現できるわけではない。そこで、今後の課題としては、以下のことが考えられよう。

1. 過渡的・時系列的事象を頂上事象とした場合にも、実際の現象をかなり正確に表現できる論理ゲートなどを考案し、その理論を確立する。
2. 同じ頂上事象による複数の異なる FT 図を作成し、これらから得られる結果の比較を行い、偏った解釈にならないようにする。また、実際現場の専門家等との議論を介して FT 図の合意形成に努めることも必要である。
3. 本研究で想定した事象 I、II、III(系)に属する現象について調査することにより、それらの現象が生起する状況やその確率などの詳しい解明に努める。

4. アソシエイト分析において、よりよい範囲での頂上事象発生 of 近似評価式の探求を行う。

5. 気象予測の FT 図への取入れを検討する。

こうした課題を検討することにより、渇水の構造特性をさらに深く解明していきたい。

最後に、本研究を進めるにあたり文部省科学研究費総合 A (課題番号: 61302063 代表: 池淵周一) の補助を受けた。付記して謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 池淵周一: 渇水をめぐる諸問題, 1987 年度 (第 23 回) 水工学に関する夏期研修会講義集 (A-2), 土木学会水理委員会, 1987.
- 2) 池淵周一 (研究代表者): 渇水災害の生起特性と耐渇水方策に関する研究, 昭和 60 年度科学研究費補助金 (自然災害 (2)) 研究成果報告書, 1986.
- 3) 井上威恭監修, 総合安全工学研究所編: FTA 安全工学, 日刊工業新聞社, 1979.
- 4) 井上紘一, 幸田幸久: FTA の基礎理論, 安全工学 Vol. 17, No. 3, 安全工学協会, コロナ社, 1983, pp. 150 - 157.
- 5) 鈴木順二, 牧野鉄治, 石坂茂樹: FMEA・FTA 実施法, 日科技連出版社, 1983.