

震災時における淀川水循環圏の安定性と安全性

—水辺環境創生による減災をめざして—

萩原良巳・清水康生*・坂本麻衣子・西村和司**

*(株)日水コン

**日本工営

要 旨

本論文では、大都市域水循環システムの空間的なまとまりをひとつの水循環圏として捉え、個別管理の枠組みを超えたひとつの河川、水道、都市活動、下水道の4つのレイヤーから構成される階層システムを大都市域人工系水循環ネットワークとしてモデル化する方法を示す。次に、水循環ネットワークの震災リスクの評価指標として「安定性指標」と「安全性指標」を提案し、これらを組み合わせて淀川水循環圏の直接的・間接的な震災リスクの地域診断を行う。さらに、大阪府北摂地域を対象に、下水処理水を利用した水辺創生水路を導入した場合の、水循環ネットワークの「安定性」と「安全性」の評価事例を示す。

キーワード：水循環ネットワーク、震災リスク、グラフ理論、水辺創生

1. はじめに

大都市域における上下水道の整備率は高く、都市生活者は蛇口をひねるだけで容易に水が利用できる。更に、汚水による伝染病等の脅威にさらされることもなくなり、都市生活者は（環境ホルモン等の問題は抱えているもののある程度）健康で快適に過ごせる生活空間を手に入れた。しかしながら、このように集中・複雑化した上下水道ネットワークを持つ大都市域は地震に対して脆弱であり、快適な生活空間を得た反面、震災リスクが増大してきた。

1987年に発生した宮城県沖地震は都市型地震災害として知られており、ライフライン施設の被害が多く報告されている。日本では、本地震をきっかけにライフライン地震工学が着目され、様々な研究がはじめられた（高田，1991）。1995年の阪神・淡路大震災では、水道システムが甚大な被害を受けたため、震災直後に消火栓を使用することができず延焼被害が拡大する一因となった（阪神・淡路大震災調査報告編集委員会，1997）。事実、兵庫県の約130万戸で断水し、消火用水の確保困難から多くの家屋が延焼

した。そして、下水道では約1万件の破壊、閉塞により下水が流出し、土壌汚染や水環境汚染を引き起こされ地下水の利用が制限された。

このように広範囲にわたり、水道・下水道施設において深刻な被害が発生した理由には、

①構造的破壊と機能的損傷が異なるという水循環ネットワークの特性を考慮した整備が十分に行われていなかったこと。

②水道、下水道、河川が個別のシステムとして認識されており、全体としての水循環システムのネットワークが認識できていなかったこと。

が考えられる。このため、地震災害に対しては個別施設の構造的強化というハード面だけの対策だけではなく、従来の個別的な水管理の枠組みを超えた広域的かつ河川・水道・下水道システムを統合化した水循環ネットワークの整備とマネジメントというソフト面の減災計画方法論を考える必要がある。

本論文では、大都市域水循環システム（清水ら，2000）の空間的なまとまりをひとつの水循環圏（清水・萩原，2002）として捉えることの重要性を述べる。そして、同システムを構成する施設の構造特性

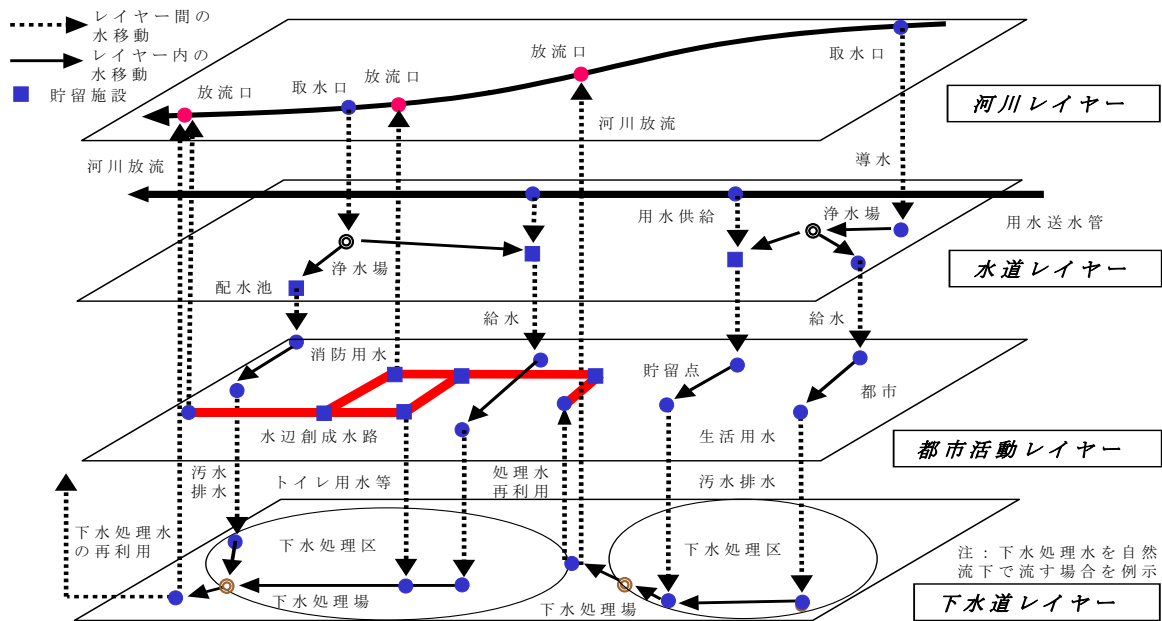


Fig. 1 Hierarchical system model of water circulation in urban area

(ノードかリンクか)に注目し、個別管理の枠組みを超えたひとつの河川、水道、都市活動、下水道の4つのレイヤーから構成される階層システムを(いわゆる河川よりはるかに多い流量を流している)大都市域人工系水循環ネットワークとしてモデル化する方法を示す。

次に、水循環ネットワークの震災リスクの評価指標として「安定性指標」と「安全性指標」を提案する。前者は、グラフ理論を用いてノードやリンクの接続関係等をもとに作成した指標であり、後者は信頼性解析のアナロジーを用いてシステムを構成するユニットの被害率をもとにした指標である。そして、この2つの評価指標を組み合わせると震度7以上の6つの大震災が想定されている淀川水循環圏の直接的・間接的な震災リスクの地域診断を行い、指標の有効性を示す。

最後に、特に神戸と地形的に似ている大阪府北摂地域を対象に、下水処理水を利用した水辺創生水路(西村ら, 2001)を導入した場合の、水循環ネットワークの「安定性」と「安全性」の評価事例を示すことにより、本論文で提案した水循環システムの再構成に関する計画方法論の有用性を実証する。

2. 大都市域における水循環圏の概念

2.1 大都市域水循環システムモデル

大都市域では、河川から取水された水が水道により浄化・配水され、都市生活者の水利用、下水道の処理を経て河川や海域へ放流される。この一連の水の流れを水循環として、河川レイヤー、水道レイヤ

ー、都市活動レイヤー及び下水道レイヤーから構成される階層システムとして表したモデルがFig. 1に示す大都市域水循環システムモデルである。同図には本研究で提案する水循環システムを再構成するための代替案である水辺創生水路の位置付けを都市活動レイヤーに示している。各レイヤーは取水口、浄水場、下水処理場、そして主要な管路・管渠などの要素により構成されており、それらは輸送、水質変換及び貯留のいずれかの機能を有している。

2.2 大都市域における水循環圏の概念

大都市域において河川流域・水道給水区域・下水道処理区域から構成される水循環圏という空間的な概念を提案する。これは従来の河川流域という捉え方をすると、河川管理者には理解し易いものの、人工的な水循環システムを形成している水道や下水道の管理者にとっては管理の対象である給水区域や汚水処理区域が必ずしも水源河川の流域内に存在しないため、自らの管理する部分的な水循環システムが全体の水循環システムにおいてどのような位置付けのものか認識することができない。このことは都市生活者も同様である。結果として大都市域における水循環システムとしての一体的な水管理が阻害されていると考えられる。この問題は、平常時の水資源計画の空間的な不整合をもたらすだけでなく、震災・環境汚染・渇水など、災害時の水確保を困難にし、被害の拡大を招くことになる。

水循環圏は、災害が発生した時に、必要となる水を確保するために対策を講じる空間単位(ユニット)でもあり、そのような空間単位として水資源計画を

Table 1 Matrix of the earthquake disaster damage relationship among layers (清水, 2002)

| | 河川 | 水道 | 都市活動 | 下水道 |
|------|---|---|--|---|
| 河川 | <ul style="list-style-type: none"> 河川構造物の破損 利水,治水機能の低下 | <ul style="list-style-type: none"> 河川構造物の破損による取水の停止 | <ul style="list-style-type: none"> 河川構造物の破損による都市の治水機能の低下 | <ul style="list-style-type: none"> 雨水排除の支障による浸水 |
| 水道 | <ul style="list-style-type: none"> 取水施設破損による河川の利水,治水機能の低下 | <ul style="list-style-type: none"> 水道施設の破損 浄化機能の停止・低下 | <ul style="list-style-type: none"> 水供給の停止 火災の延焼 都市活動の低下 | <ul style="list-style-type: none"> 水利用に伴う汚水流入と、処理機能低下時の汚水の漏洩 |
| 都市活動 | <ul style="list-style-type: none"> 有害物質流出による水環境汚染 | <ul style="list-style-type: none"> 有害物質の流出による取水の停止 | <ul style="list-style-type: none"> 都市構造物破損 火災の発生 有害物質の流出 | <ul style="list-style-type: none"> 有害物質の汚水や雨水への流入 |
| 下水道 | <ul style="list-style-type: none"> 汚水の流出による水環境汚染 雨水排除機能の低下による治水機能低下 | <ul style="list-style-type: none"> 流出汚水の下水道水への混入 | <ul style="list-style-type: none"> 汚水流出による公衆衛生の悪化 汚水管の閉塞が引き起こす環境汚染 | <ul style="list-style-type: none"> 下水道施設の破損・処理機能の停止,低下 |

立案することが必要であろう。具体的には、河川管内図（河川図）、水道給水区域図（配水管網図）、処理区域図（幹線管渠図）といった管理者の図面上に個別に記述されている施設や水循環経路を一連のネットワークとして取り扱うことにより、平常時や災害時の水確保のマネジメントを有効に行なうことができると考える。このような統合的な水管理は、制御可能性の高い大都市域の水循環で有効であると考える。

2.3 水循環システムのリスクと間接被害

大都市域の水循環ネットワークが有するリスクは、大きく分けて

- ①震災リスク、②環境汚染リスク、③生態リスク、④渇水リスク、⑤浸水リスク、の5種類が考えられる（堤・萩原, 2000）。

震災リスクはカストロフ・リスクと呼ばれ、生起頻度は稀少であるが、被害規模が巨大になる危険性を有するリスクである。また、震災リスクが環境汚染リスク、生態リスクを伴う複合災害であり危険性の高いリスクであることが明らかになっている（中瀬ら, 2001）。これらのことから、本論文では都市活動に対する影響がもっとも大きいと考えられる震災リスクとそれに付随して発生する一部の環境リスクについて評価する方法を提案する。

水循環ネットワークの震災リスクには河川・水道・都市活動・下水道レイヤー単独で発生するリスクと、レイヤー間で発生するリスクに分類できる。

河川レイヤーで発生するリスクには、河川への土砂流入による水質の悪化、水質悪化による生態系破壊がある。水道レイヤーで発生するリスクでは、取水口破損による浄水場への送水停止、水道管（給水管、送水管）の損傷、浄水施設（ポンプ場、管渠、処理場）の被災による上水の浄化不能があり、都市活動レイヤーに関わるリスクでは、生活水の不足による生活水準の低下や消火水の不足による消火活動の阻害がある。

そして、下水道レイヤーでは、下水管の損傷による下水の送水停止や排除機能障害、液状化した土砂流入による幹線の閉塞、下水処理場の被災による下水の処理不能がある。

また、レイヤー間で発生するリスクとしては河川構造物の破壊による取水の不能、上流の水環境汚染による河川下流の取水不能、下水漏洩による都市での消化器系伝染病の流行などがあり、それらをまとめたものをTable 1に示す。

分類した震災リスクには、地震を受けた地域で発生する直接被害と、地震を受けていないにも関わらず被害が発生する間接被害がある。間接被害としては、上流側で汚水や環境汚染物質が流出することに

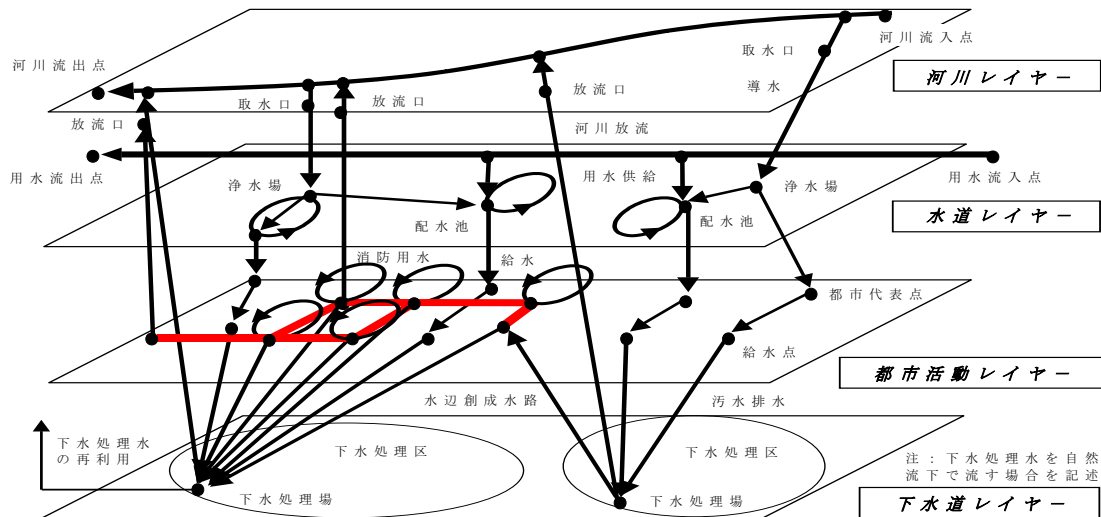


Fig. 2 Hierarchical network model of water circulation in urban area

より発生する下流側の施設の取水停止や、広範囲に構成されるネットワークの途中が破壊する事によるネットワーク末端の機能停止である。

以上のことから明らかなように、巨大震災リスクを考え、その減災計画を作成するためには、とても個別レイヤーや行政体の個別管理では対応ができないことが明白であることがわかる。

3. 水循環システムのネットワーク化

3.1 大都市域水循環ネットワーク

水循環システムの有する構造をノードかリンクかに注目して、グラフ理論(浜田・秋山, 1982)を適用したネットワークとしてモデル化する。この際、水循環の状態量は空間スケールを考慮して年間平均値程度とする。

Fig. 1に示した大都市域水循環システムをネットワークとして表す方法を以下に述べる。

① 水質変換機能を有する施設

浄水場や下水処理場はノードとして記述する。都市生活者の水利用は、水道水(浄水)を汚水に変換するという意味で給水点と称するノードで表す。

② 輸送機能を有する施設

送水管や汚水管渠などの水輸送機能を有する施設はリンクとして記述する。ただし、管路の結節点とシステム境界上にはノードを設けるものとする。

③ 貯留機能を有する施設

配水池や施設内貯留施設、都市内貯留施設といった貯留施設は、グラフ理論のループ(self loop)を用いて表す。すなわち、ループ管に貯留容量に相当する太さ(断面積)と長さを与えて表現する。

④ その他の施設

水道取水口、処理水放流口の表現は、河川横断方

向の中央に基準点を仮定し、堤内地にある取水場と放流施設をノードと考える。

Fig. 1に示した大都市域水循環システムのネットワークは、ノードとそれらを結ぶリンクおよびループから構成される。図中の貯留点とは、水辺創成水路を通じて都市に送られてきた下水処理水を消防用水や生活用水として利用する貯留施設である。

Fig. 1の水循環システムモデルをネットワークモデルとして表すとFig. 2となる。同図において、ノードは河川流入点、基準点、河川流出点、取水口、浄水場、配水池、用水流入点、用水流出点、用水供給点、給水点、貯留点、下水処理場、放流口である。そして、リンクは導水管、送水管、用水供給管、主要配水管、水辺創成水路、汚水管渠である。これらのノードの内、貯留機能を持つ配水池、都市内貯留施設はループにより表している。

3.2 マトリクスによるネットワークの記述

大都市域水循環ネットワークのノードを行と列にとり、各セルに結びつきの有無、水量、距離を示す数値を入力することにより、大都市域水循環ネットワークの経路、管路容量、水の流れる経路の長さを整理することができる。本研究では、このマトリクスを連結行列(connected matrix)と呼ぶ。

Table 2に示す連結行列中のA~Jの各セルは、河川、水道、都市活動及び下水道の各レイヤーの関連を表している。それぞれ、A:浄水場への導水、B:水道施設相互の管路による送水、C:浄水の都市への給水、D:汚水の下水処理場への流入、E:下水処理水の河川への放流、F:下水処理水の再利用、G:水辺創成水路による処理水の送水、H:下水処理場を介さない河川への放流、I:河川間の流況調整等、J:下水道施設相互の管渠による結びつきを表す。

Table 2 Connected Matrix

| | | 受水側 | | | | | | | | | | | | |
|-----|----------|--------|-----|-----|--------|-----|-----|----------|-----|-----|---------|------|------|--|
| | | 河川レイヤー | | | 水道レイヤー | | | 都市活動レイヤー | | | 下水道レイヤー | | | |
| | | 要素1 | 要素2 | 要素3 | 要素4 | 要素5 | 要素6 | 要素7 | 要素8 | 要素9 | 要素10 | 要素11 | 要素12 | |
| 送水側 | 河川レイヤー | 要素1 | | | | | | | | | | | | |
| | | 要素2 | I | | A | | | | | | | | | |
| | | 要素3 | | | | | | | | | | | | |
| | 水道レイヤー | 要素4 | | | | | | | | | | | | |
| | | 要素5 | | | | B | | C | | | | | | |
| | | 要素6 | | | | | | | | | | | | |
| | 都市活動レイヤー | 要素7 | | | | | | | | | | | | |
| | | 要素8 | H | | | | | | G | | D | | | |
| | | 要素9 | | | | | | | | | | | | |
| | 下水道レイヤー | 要素10 | | | | | | | | | | | | |
| | | 要素11 | E | | | | | | F | | J | | | |
| | | 要素12 | | | | | | | | | | | | |

そして、網掛けがなされているセルはレイヤー内のリンクを表し、網掛けがないセルはレイヤー間のリンクを表している。連結行列は大都市域水循環ネットワークの経路、管路容量、流水経路の長さを分かり易く表記するだけでなく、マトリクス表記であるため、数値演算を容易に行なうことができる (Shimizu and Hagihara, 2002)。

4. 水循環ネットワークの安定性 (清水ら, 2002)

4.1 構造安定性と評価指標の提案

水循環ネットワークを評価するにあたり、災害時の都市生活者に対して水供給が基準値以上のレベルで連続して確保されるシステムを安定とする。本論文では、その程度を表す安定性を、ネットワークのノードやリンクの結びつきに着目して構造安定性として定義する。

ノードに着目した場合には、そのノードの数やノードに何本のリンクが結ばれているかにより安定性を考えることができる。また、リンクに着目した場合にはリンクの太さによって安定性を評価することができる。例えば、取水した水を都市生活者に届けるまでを考えた場合には、同じ水量を輸送する場合でも、リンクの数が多くそれらのリンクの太さに偏りが少ない方が、災害の影響を受けにくく安定した水供給が可能である。また、水輸送の経路 (パス: path) に着目した場合には、カスケード型よりもサイクル型の方が水の確保は安定である。このように、ネットワークの安定性を表す指標は、着目する構成要素により複数存在する。

本論文では、ネットワークの構造特性を評価する視点として、ノードに対してはその「数」、リンクに対しては「数」、「長さ」、「容量 (断面積より求めるが、流速を仮定することにより流量とも解釈

する)」、ループにはその「容量」を、さらに、それらを組み合わせた「パス」を考えるものとする。以上の観点から、Table 3に示す14の評価指標を考案した。評価指標を大都市域水循環ネットワークに用いることにより、ネットワークの構造安定性を評価することができる。

4.2 評価指標の関連性

評価指標は、前述の構造特性を表す概念の包含関係によって相互に関連性を持つ。この関連性は、グラフ理論における指標であるで、位数、次数、切断集合、連結度、最大流最小切断の定理、メンガーの定理と関係する (浜田・秋山仁, 1982) (Table 3参照)。例えば、内素なパスの数と連結度の関係はメンガーの定理により与えられる。Fig. 3にISM (Interpretive Structural Modeling) (吉川, 1985) を援用して作成した指標の関連性を示す。同図から、平均離心数は独立した指標であり、点連結度、辺連結度、冗長なパスの数、サイクル比率が基本となる指標であることが分かる。そして、内素なパスの流量のばらつきは複数の指標の特性を包含する指標であることがわかる。

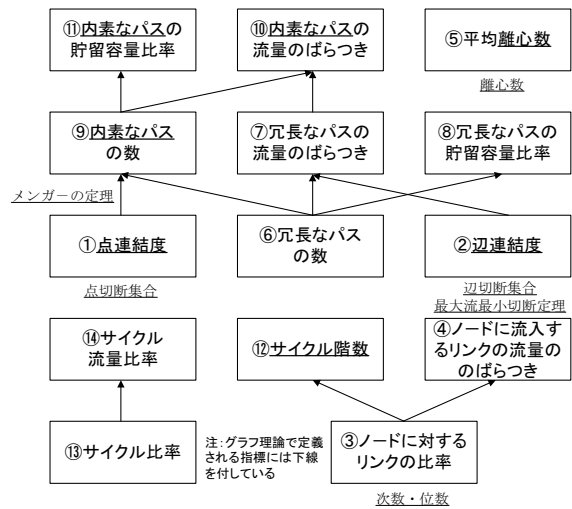


Fig. 3 The relationship of evaluation indices based on graph theory

指標①②③⑤⑥⑬でネットワークの基本的な特性を把握し、総合的に評価を行う場合には上位にある指標④⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑭を適用する。そして、流量の観点から評価する場合には指標②④⑦⑩⑭を用い、接続構造により評価を行う場合にはそれ以外の指標を用いる。

評価指標は、上述のように各々の指標が独自の特性を有するため、複合して適用することで多角的な評価を行うことができる。ただし、ネットワーク境界の定義の仕方や適用する空間スケールの違いにより指標の有効性が異なる点に注意する必要がある。

Table 3 Evaluation of stability indices for water circulation network structure

| 番号 | 指標名 | 式 | 定義 | 解釈 | 指標の対象 | | | |
|----|-----------------------------------|--|---|--|-------|----|----|----|
| | | | | | 数 | 距離 | 容量 | 経路 |
| ① | 点連結度 | $k(N) = \min A $ | ネットワーク N の点集合 V の部分集合 V' が $N-V'$ を非連結とする最小の点切断集合 A における点 (ノード) の個数。 | 点切断集合はネットワークを非連結とする。点連結度が大きいほどネットワークの連結が強く構造が安定となる。 | ○ | | | |
| ② | 辺連結度 | $k_1(N) = \min K $ | ネットワーク N の辺の集合 E の部分集合 E' が $G-E'$ を非連結とする最小の辺切断集合 K の辺 (リンク) の個数。 | 辺連結度が大きいほどネットワークの連結が強く構造が安定となる。なお、辺の数でなく容量でも辺連結度を定義できる。この場合には、最大流最小切断の定理を用いて最小容量を与える切断集合を求めることが可能である。 | ○ | | ○ | |
| ③ | ノードに対するリンクの比率 | $r(N) = \frac{\sum d_x(x)}{ V(N) }$ | ネットワーク N の各ノードに接続するリンクの個数 $d_x(x)$ (次数) の総和を全ノードの数 $ V(N) $ (位数) で除した値。 | ノードに対するリンクの比率が高いほどネットワークは密となり、連結が強く構造が安定となる。 | ○ | | | |
| ④ | ノードに接続するリンクの流量のばらつき ^{注)} | $Vx = \frac{\max(f_x^h) - \min(f_x^h)}{\sum f_x^h}$ | 任意のノード x に流入するリンク h の流量の最大と最小の差をノード x に流入する全水量で除した値。 | ノードに流入するリンクの流量のばらつきが低いほど、複数の水供給経路から同程度の水が送られてくることになり、当該ノードへの水供給は構造的に安定であると考えられる。 | ○ | | ○ | |
| ⑤ | 平均離心数 | $\Sigma e(x) / V(N) $ | ネットワーク N の任意のノード x から測られる最大距離である離心数 $e(x)$ の総和を位数により除した数。 | ノード・リンク数が同じ時、平均離心数が小さいほどネットワークは空間的に相対的な構造が密であり、管路延長密度が高いことを意味する。 | ○ | ○ | | |
| ⑥ | 冗長なパスの数 | $P_r(x, y) = \Sigma(x, y)$ | x, y をネットワーク N 内の隣接しないノードとしたとき、可到達な経路 (x, y) の総数を冗長なパスの数とする。 | 任意のノード x から、他の任意のノード y までの経路を考えたとき、複数の経路 $x-y$ が存在し、その数が多い程、水循環は構造的に安定している。 | ○ | | | ○ |
| ⑦ | 冗長なパスの流量のばらつき ^{注)} | $Vpr = \frac{\max q_p(x, y) - \min q_p(x, y)}{\sum q_p(x, y)}$ | 冗長なパス $p(x, y)$ を流れる水量 $q_p(x, y)$ の最大と最小の差を冗長なパスを流れる全水量で除した値。 | 同程度の流量が流れる冗長なパスが存在する時には、被害が分散されるため水供給は構造的に安定であると考えられる。 | ○ | | ○ | ○ |
| ⑧ | 冗長なパスの貯留容量比率 | $Vrs = \frac{\Sigma S_j(x, y)}{\Sigma q_p(x, y)}$ | 冗長な経路 (x, y) 上にある貯留施設 j の貯留量 S_j の総和を冗長なパスの全容量で除した値。 | パス上のリンクが切断された場合でも、貯留水を利用することにより水供給が可能である。貯留比率が高ければネットワークの構造は安定であると考えられる。 | ○ | | | ○ |
| ⑨ | 内素なパスの数 | $P_p(x, y) = \Sigma(x, y)$ | x, y をネットワーク N 内の隣接しないノードとしたとき、 x, y 以外にノードを共有しない可到達な経路 $p(x, y)$ の総数を内素なパスの数とする。 | 内素なパスが多いことは、水供給システムの独立経路が多いことを意味する。内素なパスの数が多いほど水供給は構造的に安定である。連結度と内素なパスの存在の関係をメンガーの定理を利用して知ることができる。 | ○ | | | ○ |
| ⑩ | 内素なパスの流量のばらつき ^{注)} | $Vpp = \frac{\max q_p(x, y) - \min q_p(x, y)}{\sum q_p(x, y)}$ | 内素なパス $p(x, y)$ の流量 $q_p(x, y)$ の最大と最小の差を内素なパスを流れる全流量で除した値。 | 内素なパスの送水量のばらつきが小さければ被害が分散されるため水供給は構造的に安定であると考えられる。 | ○ | | ○ | ○ |
| ⑪ | 内素なパスの貯留容量比率 | $Vis = \frac{\Sigma S_i(x, y)}{\Sigma q_p(x, y)}$ | 内素な経路 (x, y) 上にある貯留施設 i の貯留量 S_i の総和を内素なパスの全容量で除した値。 | パス上のリンクが切断された場合でも、貯留水を利用することにより水供給が可能である。貯留比率が高ければネットワークの構造は安定であると考えられる。 | ○ | | | ○ |
| ⑫ | サイクル階数 | $Cr(N) = \Sigma d_x(x) - V(N) - 1$ | ネットワーク N において、サイクルが残らないように除去しなければならないリンクの最小数をサイクル階数という。 | サイクル階数が多いほど、当該ノードを中心として水を循環利用していることを意味する。従って、サイクル内を流れる水量を利用することができる。サイクル階数が多いほどネットワークの水供給は構造的に安定であると考えられる。 | ○ | | | ○ |
| ⑬ | サイクル比率 | $\gamma = \Sigma c(x, y) / \Sigma(x, y)$ | 任意のノード x から、他の任意のノード y までの経路数がサイクルを有するパス $c(x, y)$ である比率。 | 水供給が困難となった場合でも、サイクル上のリンクが切断されない限り、サイクル内の貯留水の利用が可能であるため、サイクル比率が高いほど水供給は構造的に安定であると考えられる。 | ○ | | | ○ |
| ⑭ | サイクル流量比率 ^{注)} | $\beta = q_c(x, y) / q_r(x, y)$ | サイクルを有するパスに流れる流量 $q_c(x, y)$ と全経路を流れる流量 $q_r(x, y)$ の比率。 | 水供給が困難となった場合でも、サイクル上のリンクが切断されない限り、サイクル内の貯留水の利用が可能であるため、サイクル形態で供給される流量の割合が高い程、水供給は構造的に安定であると考えられる。 | ○ | | ○ | ○ |

注) ④⑦⑩⑪⑬で用いる流量は断面に流速を仮定することにより与える。

5. 水循環ネットワークの安全性（西村ら，2003）

ネットワークを構成するユニットが破壊することなく水循環ネットワーク全体の機能に影響を及ぼさない状態が安全である。水道ネットワークの機能とは浄水と水供給で、下水道ネットワークの機能とは処理と排除である。

安全性の評価指標は到達可能性と損傷度の2つから成り、想定被害箇所数を用いて定式化する。到達可能性とは震災時においても水(ここでの水とは、河川の表流水・上水・汚水、下水処理水の総称である)が起点から終点へと流れる可能性を評価する指標であり、損傷度とは水が流れる起点から終点への経路上に存在する破壊の程度を評価する指標である。

5.1 想定被害箇所数の算定方法（高田，1991）

被害率とは過去に発生した地震が引き起こした地下埋設管被害を基に算出された1kmあたりの平均破壊箇所数である。この被害率は地震動に対する標準被害率に、地盤の特性による地震動の伝搬の違いや、管種・管径の違いによる耐震性の違いを表す補正係数を乗じることにより求めることができる。被害率を算定する式として、

$$R_{fm} = R_f \cdot C_g \cdot C_p \cdot C_d \quad (1)$$

が提案されている（清水ら，2001）。ただし、

R_f ：標準被害率(箇所/km)

$$R_f = 1.7 \times A^{6.1} \times 10^{-16}$$

A ：地表最大加速度(gal)

R_{fm} ：想定被害箇所数(箇所/km)

C_g ：地盤・液状化係数

C_p ：管種係数

C_d ：管径係数

である。

以下、この想定被害箇所数を用いて安全性の指標である到達可能性と損傷度を定式化する。

5.2 到達可能性と損傷度の考え方とその定式化

まず、到達可能性とは、リンクが破壊することなくネットワークとして機能する可能性を判断する指標である。想定被害箇所数が1より低い値のときには、この数値を管路が破壊する可能性と考える。そして、信頼度の考え方（三根・河合，1984）のアナロジーを用いて到達可能性を定式化することにより、経路の冗長性や複雑さを考慮した指標にする。

以下、この想定被害箇所数を用いて安全性の指標である到達可能性と損傷度を定式化する。

初めに、並列接続された管路に対して次式の計算を行いネットワークの並列部分を縮退させる。

$$R_p = 1 - \prod (1 - R_{fm}^i) \quad (2)$$

ただし、 R_{fm}^i ：管路*i*の想定被害箇所数、 R_p ：並列ネットワーク縮退部分の想定被害箇所数、である。

次に、ネットワークに残った直列接続の管路を、次式を用いて求める。

$$R_s = \prod R_{fm}^i \quad (3)$$

ただし、 R_s ：直列ネットワーク縮退部分の想定被害箇所数、である。なお、並列計算・直列計算では計算が行えないブリッジに対しては、加法定理を用いて計算を行う。

次に、損傷度とは、リンクが損傷することを想定して、その損傷がどの程度の規模であるかを判断する指標である。想定被害箇所数が1以上であれば管路の機能が停止すると考える。そして、その損傷箇所数に管路の能力による重みをつけて累積することで損傷度を以下のように定式化する。

$$D_s = \sum_{i=1}^n w^i R_{fm}^i, \quad w^i = \frac{q^i}{\sum q^i} \quad (4)$$

ただし、 D_s ：終点*s*の損傷度、 w_i ：管路*i*の重み、 q_i ：並列関係にある管路*i*の管路の太さとする。

以上で作成した到達可能性と損傷度の2つの指標は管路の想定被害箇所数を用いて定式化されており、この数値が1以上か、1以下かの判断により水循環ネットワークに適用する指標を使いわけると示す。Fig. 4に水循環ネットワークの安全性を求めるアルゴリズムを示す。

5.3 水道・下水道ネットワークの合成安全評価の方法

水道ネットワークと下水道ネットワークの安全性を、到達可能性と損傷度の指標により評価すると、組み合わせは4通りになる。この組み合わせにより水道・下水道ネットワークの安全性の評価が可能となる。評価の解釈をFig. 5に示す。同図から、下水の流出による水環境汚染の発生により下流の水供給に影響をもたらす間接被害が発生する可能性についても評価できることがわかる。

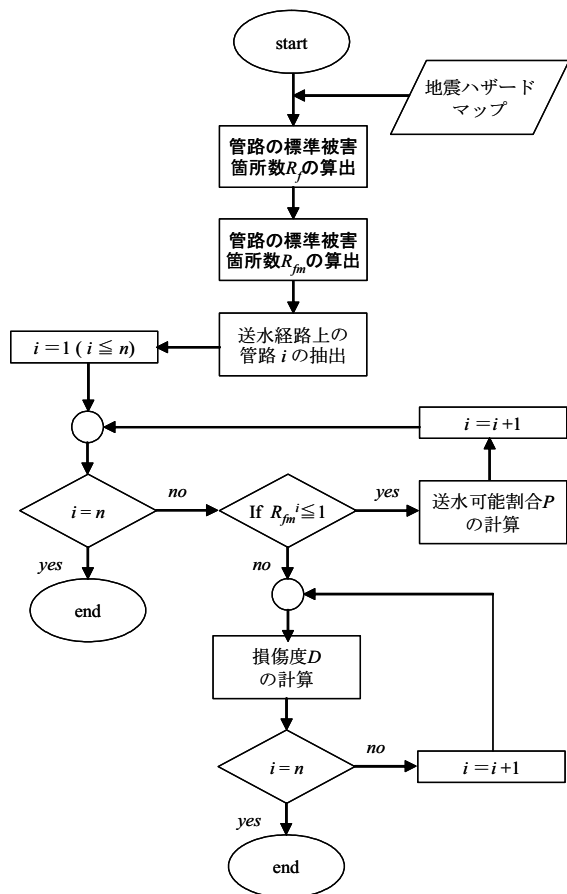


Fig. 4 Algorithm for evaluating reachability and degree of damage

5.4 安定性と安全性による地域の震災リスク評価

4で述べた安定性と安全性の評価指標の値と、震度7以上の面積割合を組み合わせることにより、地域の震災リスクを評価することができる。この結果の組み合わせによる震災リスクの評価イメージをTable 4に示す。⑦、⑧は、震度7の分布が少ないが安全性が低い状態を示しており、このような状態ではネットワークの経路の中間が破壊することにより間接被害が発生していることを表す。

6. 淀川水循環圏における水辺創生による震災リスクの軽減—とくに北摂地域を対象として—

対象地域を淀川水循環圏とする。この地域には6つの活断層系大地震が想定されている。Fig. 6の6つの領域は震度7以上が発生すると想定される地域を表している(清水, 2002)。4と5でモデル化した評価指標を適用して震災リスクを評価する。このとき、「現況の水循環システム」と下水処理水の再利用による(実行可能な)水辺創生を新たにネットワークに組み込んだ「再構成された水循環システム」の震災リスクを評価し、これらと比較することにより、環境創生型の震災軽減計画の必要性と有効性を実証研究する。このとき、従来縦割り社会で見逃されが

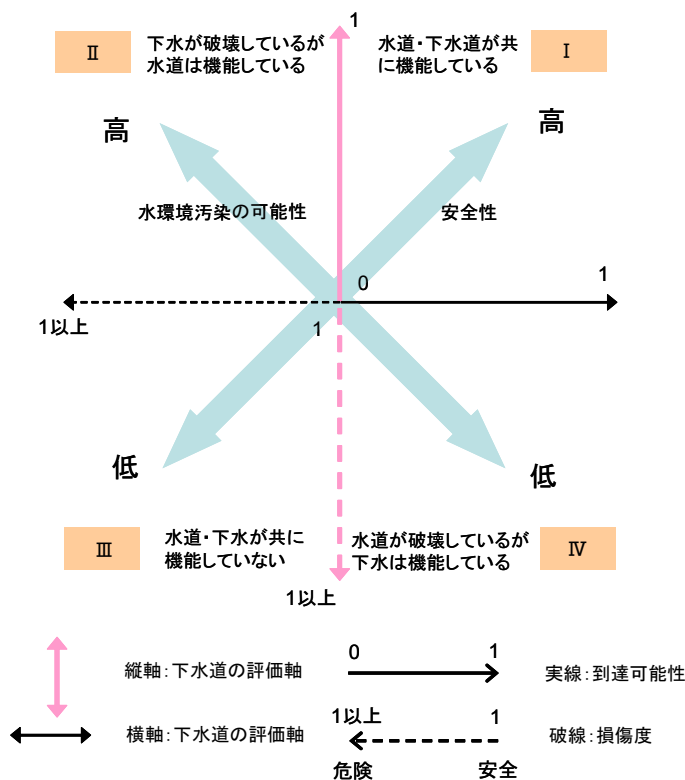


Fig. 5 The concept of synthesized evaluation of safety index

Table 4 Evaluation of regional earthquake risks depending on stability and safety

| 番号 | 震度7以上の分布域 | 安定性 | 安全性 | 評価 |
|----|-----------|-----|-----|---|
| ① | 広い | 高 | 高 | 震災リスクに強い地域 ○ |
| ② | 広い | 低 | 高 | ネットワークの整備をおこなうことで、震災リスクに対してより強くなる地域 △ |
| ③ | 広い | 高 | 低 | 管路の耐震化が必要な地域 × |
| ④ | 広い | 低 | 低 | ネットワークの整備が必要な地域 × |
| ⑤ | 狭い | 高 | 高 | 地震の影響をうけない地域 ◎ |
| ⑥ | 狭い | 低 | 高 | ネットワークの整備が望ましい地域 △ |
| ⑦ | 狭い | 高 | 低 | 間接被害による震災リスク受ける地域 貯留施設等の整備が必要な地域 × |
| ⑧ | 狭い | 低 | 低 | 間接被害による震災リスク受ける地域 ネットワークの特性を考慮した整備が必要な地域 × |

なお、表中の記号は以下のことを意味する。◎：平常時と同様に震災リスクの無い地域 ○：震災リスクが少ない安全な地域 △：震災対策を行うことが望ましいがある地域 ×：震災対策を早急に行う必要性のある地域。

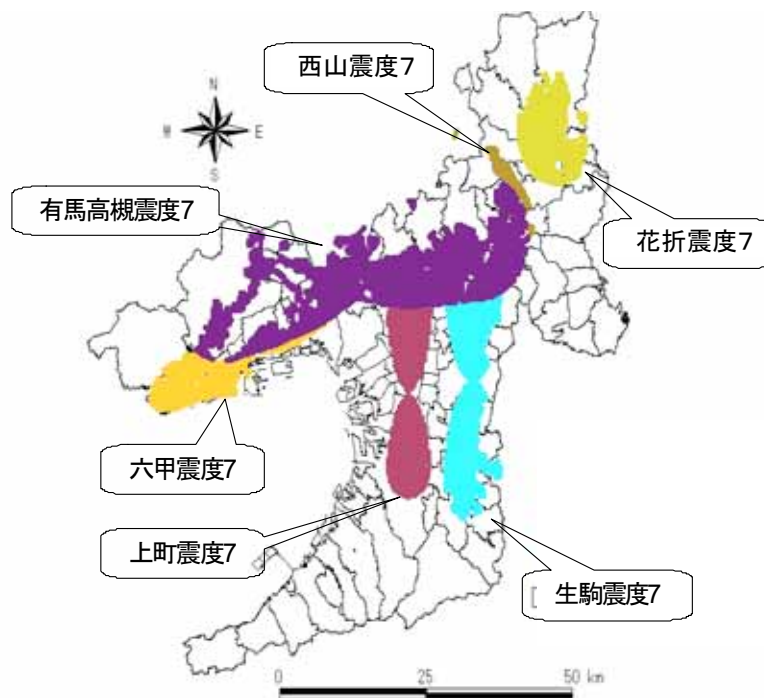


Fig. 6 Calculated 7 seismic intensity distributions in Yodo-river water circulation region

ちな間接被害についても特に着目する。

6.1 下水処理水を利用した水辺創生による水循環ネットワークの再構成 (西村ら, 2001)

ここでは、水循環の再構成の代替案の1つとして数理計画モデルを用いて定式化された水辺創生モデル

による分析結果を要約する。この水辺創生モデルの目的は下水処理水を用いて水辺を創生することで、平常時に憩いの場ややすらぎの場を提供し、震災時にトイレ用水や消火用水を供給することである。

同モデルは、震災時に各市町村が必要とする水に対して下水処理場の処理水を確保し、その水を水辺

創生水路に流して平常時のアメニティが最大になるように市町村に配分することを目的としている。そして、この配分量と震災時の必要水量との乖離が大きなものにならないように、乖離の割合をある範囲に抑えることを制約としている（なお紙面の都合上、数理モデルとそのアルゴリズムの説明は割愛する。（西村ら、2001）参照）。

震災時の必要用水としては、消火用水とトイレ用水を対象とする。消火用水の必要水量は消防水利により定められている1家屋を消火するのに必要な貯留の水40m³とし、トイレ用水の必要水量は、1人当たり1日40lとする。また、火災発生件数の想定は阪神・淡路大震災のデータに基づき、震度7の区域において1km²につき1.8件発生すると仮定する。

以上の想定に基づき、配分する下水処理水量を求める。モデルの適用に際し、誘致距離を500m、調整定数を0.1とした。誘致距離とは、水辺が都市生活者をひきつける距離であり、萩原らにより考えられた物理的距離（萩原ら、1998）を用いる。

事例対象地域として京都市と大阪市の中間に位置する大阪府淀川右岸地域、いわゆる北摂地域を選定する。その理由は、淀川と山地に挟まれ、しかも新幹線や高速道路などの交通施設がこの狭窄部に集中し、人口も集中（約100万人）し、かつ複数の活断層による大地震が想定されている地域であるからである。

なお、北摂地域において、震災リスクが最も大きい有馬高槻断層系地震に対して殆どの下水処理場が機能停止することが想定されるため、次に震災リスクの大きい生駒断層系地震を対象とした水辺創生を考えることとする。このとき、以下の仮定をおく。すなわち、

- ①水辺創生水路は自然流下で送水される、
- ②水辺創生水路は地震時においても断たれることは無い、

③下水処理場から送水される処理水は高度処理が行われ水質レベルは一定である、
である。こうして得た結果、水辺創生水路の計画が可能なベクトルをFig. 7に示す。



Fig. 7 Planned routes for recreated river and/or renewal

水辺創生による下水処理水の利用可能地域は、1)震災時には高槻市、摂津市に、2)環境汚染物質が流出して水道の取水が停止した場合には高槻市、摂津市に加え吹田市である。水辺による配分量はTable 5とTable 6に示す通りである。8市町の内の3市町にしか下水処理水を配分することができない理由は、水辺創生経路を自然流下としたこと、ならびに下水処理場が地盤高の低い河川流末に位置しているためである。

水辺創生の結果、高槻市、摂津市、吹田市においては生駒断層系地震が発生した場合、消火用水量を補うことができるという結果を得た。淀川流域の大都市では消火栓への依存度がきわめて高く、震災により消火栓が使用できない場合に消火活動に著しい

Table 5 The available quantity of water provided by recreated river for fire fighting and amenities in Hokusetu

| 処理場→市町村 | アメニティ効果 (人) | 消火用必要水量 (m ³ /日) | 地震時を想定した場合 | | 平常時を想定した場合 | |
|-----------|-------------|-----------------------------|-------------------------|------|-------------------------|------|
| | | | 送水量 (m ³ /日) | 充足率 | 送水量 (m ³ /日) | 充足率 |
| 正雀処理場→高槻市 | 400,018 | 8,875 | 8,875 | 1.00 | 8,976 | 1.01 |
| 正雀処理場→摂津市 | 159,148 | 1,011 | 1,011 | 1.00 | 910 | 0.90 |

Table 6 The available quantity of water provided by recreated river for the suspension of sanitary water in Hokusetu

| 処理場→市町村 | アメニティ効果 (人) | トイレ用必要水量 (m ³ /日) | 取水停止を想定した場合 | | 平常時を想定した場合 | |
|-----------|-------------|------------------------------|-------------------------|------|-------------------------|------|
| | | | 送水量 (m ³ /日) | 充足率 | 送水量 (m ³ /日) | 充足率 |
| 正雀処理場→高槻市 | 400,018 | 8,875 | 13,467 | 0.93 | 12,445 | 0.86 |
| 正雀処理場→摂津市 | 159,148 | 1,011 | 3,246 | 0.93 | 2,897 | 0.83 |
| 正雀処理場→吹田市 | 453,290 | 13,710 | 6,371 | 0.34 | 7,742 | 0.56 |
| 原田処理場→吹田市 | 408,645 | | 7,340 | 1.00 | 7,340 | 0.54 |

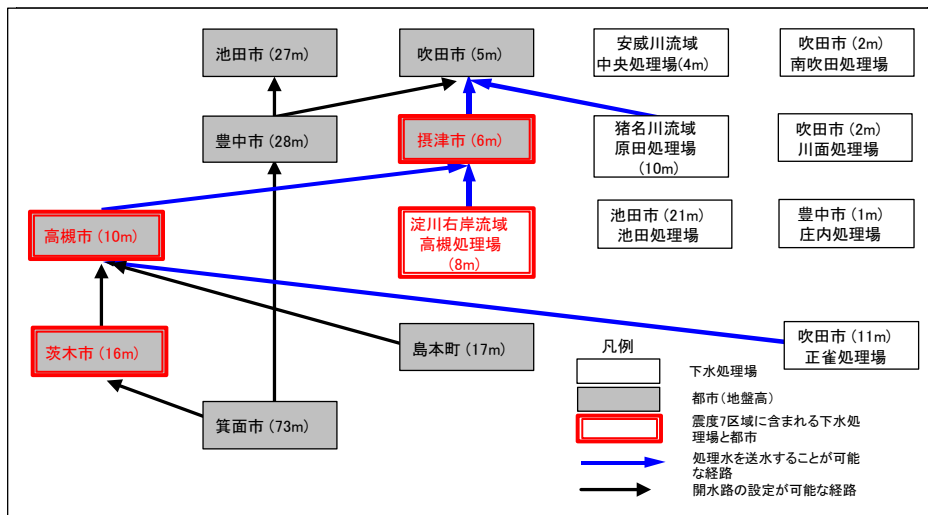


Fig. 8 The paths of circulating treated water through recreated rivers

支障を生じることが予想される。このような状況において、下水処理水を利用した水辺の創生は有効であるといえる。

取水停止時に対してはTable 6に示した通り、充足率が0.93となりトイレ用の必要水量がやや不足するという結果を得た。取水停止時には水辺創生も1つの代替案であるが、これと貯留や水道連絡管といった多様な代替案を同時に考える必要がある。

前述のように、有馬高槻断層系地震が発生した場合には、下水処理場がほとんど機能停止していると想定されるため下水処理水を送ることができない。

そこで、生駒断層系地震を想定して創生した水辺創生水路の水をせき止めることを考える。これにより、水路の水は貯留水とみなすことができる。例えば、正雀処理場から吹田市代表点までの延長24.5kmの水辺創生水路を流速0.5m/sで流れていると考えた時、水路をせきとめることにより1日送水量の3.4倍にあたる約8万 m^3 の水を確保できる。

北摂地域を対象とした場合には、生駒断層系地震を想定して水辺を創生することにより、その他の活断層系地震にもその有効性を発揮できることが明らかとなった。さらに、水路の経路に隣接する公園などのオープンスペースを創生し、その地下に多くの貯留施設を建設すれば、更なる被害の軽減を図ることが可能となる。

6.2 北摂地域の水循環システムの安定性の評価

(1) 現状の水循環システムの安定性評価

ここでは、システムの精度から給水点を都市代表点(市役所)で代表させるものとする。そして、Table 3の基本となる①②③⑤⑥⑬の指標を用いて、総合的なネットワークの構造安定性の評価を行う。ただし、

現状の同地域にはサイクルが存在せず、また、ここでは簡単のためにネットワークの空間スケールの評価を行わない。このため指標⑬⑤は適用除外とする。

対象地域は水道用水供給事業により水供給が行われるため、ネットワークは用水流入点と用水供給点の端点を持ち①②の指標の値は1となる。現状のノードの数は47本で総リンク数は130個であるため、ノードに対するリンクの比率(指標③)は、2.77となる。そして、冗長なパスの数(指標⑥)は、高槻市、摂津市が1、茨木市、吹田市、豊中市、池田市、箕面市が2となる。さらに、内素なパスの数(指標⑨)も同様の結果となる。2経路のパスを有する市町は1経路の市町よりも水供給の構造安定性が高いと言える。

同地域のネットワークは冗長なパスの数(指標⑥)と内素なパスの数(指標⑨)が同じとなっている。このことより、現状の水循環ネットワークは冗長性が少なく、リンクが短絡的に結ばれているといえる。

(2) 現現状と再構成後の構造安定性の比較

すでに6.1で述べたように、高槻市、吹田市、摂津市に、2つの下水処理場の再利用水を利用して水辺創生水路を計画できることが分かっている。ここでは、水辺創生前の現状と創生後の水循環システムの安定性の変化を見ることにより、震災リスクの軽減を評価する。このときの水辺創生水路による下水処理水の送水量をFig. 8に示す。なお、この図からも明らかのように、淀川上流域の大震災による間接被害として本流の水環境汚染を考えた場合には、対象地域の全ての7市1町で処理水を必要としているにも関わらず、3市以外に処理水を送ることができない。これは下水処理場が地盤の低い河川流末に集中しているためである。このため水資源としての下水処理水が日常時も災害時も十分に利用できない水循環システム

になっている。

水辺創生水路を考慮したネットワーク構造安定性の評価結果をみると、ノードの数は現状と変化せず47であるが、総リンク数は130→140に増加する。そのため、ノードに対するリンクの比率（指標③）は2.77→2.98となり現状と比べて0.21増加する。また、冗長なパスの数（指標⑥）の数は高槻市が1→3、吹田市が2→11、摂津市が1→3に増加し、内素なパスの数（指標⑨）は高槻市が1→2、吹田市が2→4経路、摂津市が1→2に増加する。

吹田市における冗長なパスの数が大きく増加しているのは、処理水の水源である原田処理場が流域下水処理場であり、複数の都市からの汚水を処理しているためである。現状と比較して、内素なパスと冗長なパスの両方が増加し、かつ、指標⑥の値が指標⑨の値を上回っている。供給経路の安定性が増大し、冗長性も高まっていると解釈できる。

水辺創生水路を考慮したネットワーク構造安定性の評価結果をみると、ノードの数は現状と変化せず47であるが、総リンク数は130→140に増加する。そのため、ノードに対するリンクの比率（指標③）は2.77→2.98となり現状と比べて0.21増加する。また、冗長なパスの数（指標⑥）の数は高槻市が1→3、吹田市が2→11、摂津市が1→3に増加し、内素なパスの数（指標⑨）は高槻市が1→2、吹田市が2→4経路、摂津市が1→2に増加する。吹田市における冗長なパスの数が大きく増加しているのは、処理水の水源である原田処理場が流域下水処理場であり、複数の都市からの汚水を処理しているためである。現状と比較して、内素なパスと冗長なパスの両方が増加し、かつ、指標⑥の値が指標⑨の値を上回っている。供給経路の安定性が増大し、冗長性も高まっていると解釈できる。

以上の結果より、水辺創生水路を導入することによる水循環ネットワークの構造安定性が向上した効果を定量的に示すことができ、評価指標の有用性が確かめられたと考える。ただし、ここで具体的に示した数値は4.2でも述べたように、ネットワークの空間スケールの捉え方（対象とする管路のレベル）及び境界の取り方によって異なる値を示すものである。結果の解釈に関してはこの点に留意することが必要である。

(3) 淀川水循環圏の水道ネットワークの安定性

淀川水循環圏に含まれる103区町村の水道ネットワークに安定性の指標を適用する。具体的には、平均連結度、点連結度、冗長な道の数を選択した（清水、2002）。

グラフのノードに接続するリンクの個数を、ノード数で除した比率を「平均連結度」とし、グラフにおける最小の関節集合の個数を「点連結度」とする。そして、グラフ内の隣接しないノードの複数の経路の数を「冗長な道の数」とする。

こうして103区町村の評価を行ったが、紙面の都合とわかりやすくするために、ここでは、それらの評価を府県及び市で集計することにしTable 7に示す。

なお、安定性は各々の指標の値を5段階表示し、それらを加算したものである。そして表中のウェーブは、たとえば京都市の場合の「冗長な道の数」が区によって1～14にばらついていることを示している。

Table 7 Result of evaluation safety in Yodo River water circulation region

| | 京都市 | 京都府 | 大阪市 | 大阪府 | 兵庫県 神戸市 |
|--------|------|------|------|--------|------------|
| リンク数 | 114 | 40 | 160 | 574 | 174 |
| ノード数 | 55 | 22 | 83 | 235 | 87 |
| 平均連結度 | 2.07 | 1.82 | 1.93 | 2.44 | 2.00 |
| 点連結度 | 1 | 1 | 1~2 | 1~3 | 1~2 |
| 冗長な道の数 | 1~14 | 1 | 1~8 | 1~4860 | 1~560 |
| 安定性 | 7.3 | 3.0 | 5.9 | 10.3 | 9.9 |

6.3 安全性の震災リスク評価（西村・萩原、2004）

(1) 現状の水循環圏ネットワークの安全性評価

まず、安全性の評価を行うためには、式(1)を用いて北摂地域の想定被害個所数を求めることが必要である。このとき以下の仮定をおいた。すなわち、①水道ネットワークの管種・管径係数は最悪の被害を想定して最も大きい値を用いた。②地盤・液状化係数に関しては地表最大加速度を想定するときに既に考慮されているため式(1)に影響しないような係数である1とした。③下水道ネットワークの管種係数については、データを入力できなかったため同様に1とした。

この結果、想定被害個所数が1を超える水道管は無く、下水道管では1を超える管路が存在した。このため、評価指標として水道ネットワークでは到達可能性を用い、下水道ネットワークでは到達可能性と損傷度を用いて評価を行った。安全性による評価の結果をFig. 9,10に示す。Fig. 9は安全性合成評価を示すFig. 5の第Ⅲ象限、Fig. 10は第Ⅱ象限に位置する。

Fig. 9から、花折、六甲断層系の地震が北摂地域の上下水道ネットワークに与える影響が比較的少ないことが分かる。そして、豊中市はFig. 10にしか示されていないことから6つの活断層系地震に対して北摂地域の中で最も地震の影響を受けない地域であるといえる。また、Fig. 10に示されている市町は下水

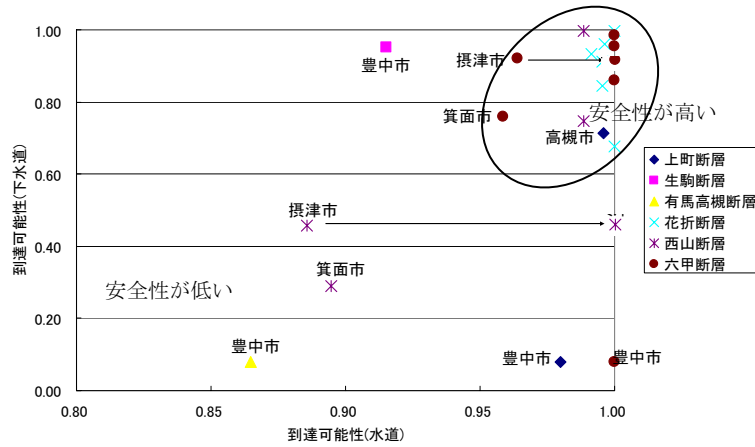


Fig. 9 Safety of water reachability before and after river recreated (1)

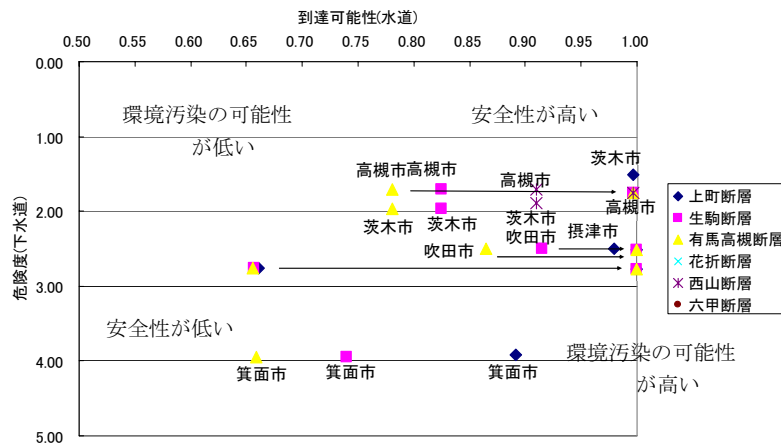


Fig. 10 Safety before and after river recreated (2)

を流出させる恐れがある。特に箕面市は上町, 生駒, 有馬高槻断層系地震に対しての損傷度が高く, 環境汚染に注意する必要がある。

(2) 水循環の再構成後の安全性の評価

水辺創生後の北摂地域の水道ネットワークと下水道ネットワークの安全性はFig. 9,10の矢印で示す位置に変化する。水辺創生により, 消火用水やトイレ用水が確保されるため吹田市, 高槻市, 摂津市の水道ネットワークの安全性は高くなる。しかしながら, 豊中市と箕面市には水辺創生ができず安全性が低位にとどまるため, 他の再構成の代替案を用いて高める必要がある。

次に, Fig. 10から, 水辺創生により水道の安全性が上がる反面, 下水道ネットワークの安全性は増加しないため環境汚染が発生するという新しい問題が生まれることがわかる。このため, 環境汚染を減らすための下水道整備代替案を考える必要がある。

(3) 淀川水循環圏の安全性の評価

淀川水循環圏に含まれる103区町村に安全性の指

標を適用する。生駒断層系地震を対象とした水道ネットワークの評価結果をFig. 11, 下水道ネットワークの評価結果をFig. 12に示す。Fig. 11では, 大阪府南部で安全性が低い値となる。これは南北に敷設されている大阪府の水道ネットワークの中心が破損して間接被害が発生しているためである。

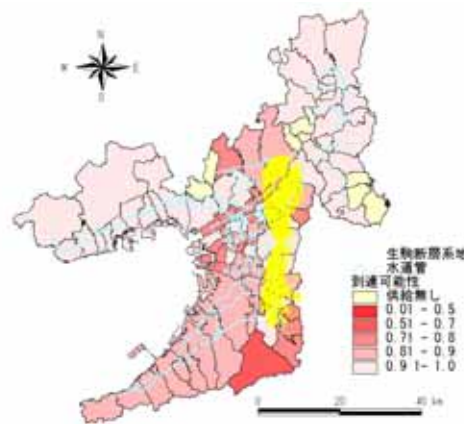


Fig. 11 Safety risk of waterworks network (Earthquake by Ikoma)

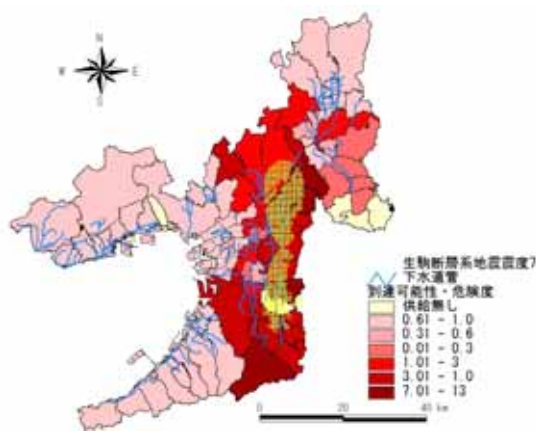


Fig. 12 Safety risk of sewer network
(Earthquake by Ikoma)

6.4 安定性と安全性から見た淀川水循環圏の地域診断 (西村・萩原, 2004)

(1) 府県・政令都市の診断

安定性指標の値を府県及び政令都市でまとめて相対的に表した値と、行政体の震度7以上が想定される面積の占める割合をもとに計算された安全性指標の値を合成した震災リスクをFig. 13に示す。なおこの図では、安定性と安全性の指標の重みは同等という仮定をおいている。横軸は安定性リスクの評価結果を表し、縦軸は安全性リスクの評価結果を表している。○の大きさは震度7以上が占める各行政体の面積割合を表している。

花折断層系地震が発生する場合、京都市では、震

度7が占める割合が市域の7割強となり、大阪府・兵庫県・神戸市と比べて安定性も安全性の評価も低い (Table 4の④の状態)。京都市は、阪神・淡路大震災と同様の大きな被害が発生することが予想される。このため6.1で示したように、明治以降、市電や車の交通のため失われてきた水辺の再生・創造というような水循環ネットワークを冗長化してサイクルを生み出すといった計画を考える必要がある。また、京都市は安定性が低いものの、安全性が高く、震度7の占める割合が少ないことから、震災リスクは小さい。

生駒断層系地震を想定した大阪市では、震度7の占める割合が0に近いにも関わらず安全性が低いTable 4の⑦の状態であり、間接被害が発生することが想定される。このような状況では新たな水供給源からのネットワークを整備することや貯留による水の確保などが重要となる。また大阪市は上町断層系地震が発生した場合、安定性ならびに安全性が極めて低く、壊滅状態になることが想定される。

(2) 区市町村別診断

ここでは安定性と安全性の指標を用いて、水道ネットワークに対する地震の被害の大きさを市区町村別に評価する。ここで、安定とは何らかの外力がネットワークに加わった場合にでも都市生活者に対して水供給が基準値以上のレベルで連続して行われる状態と定義し、安全とは、ネットワークを構成するユニットが破壊することなく水道ネットワークの水供給に影響を及ぼさない状態と定義する。

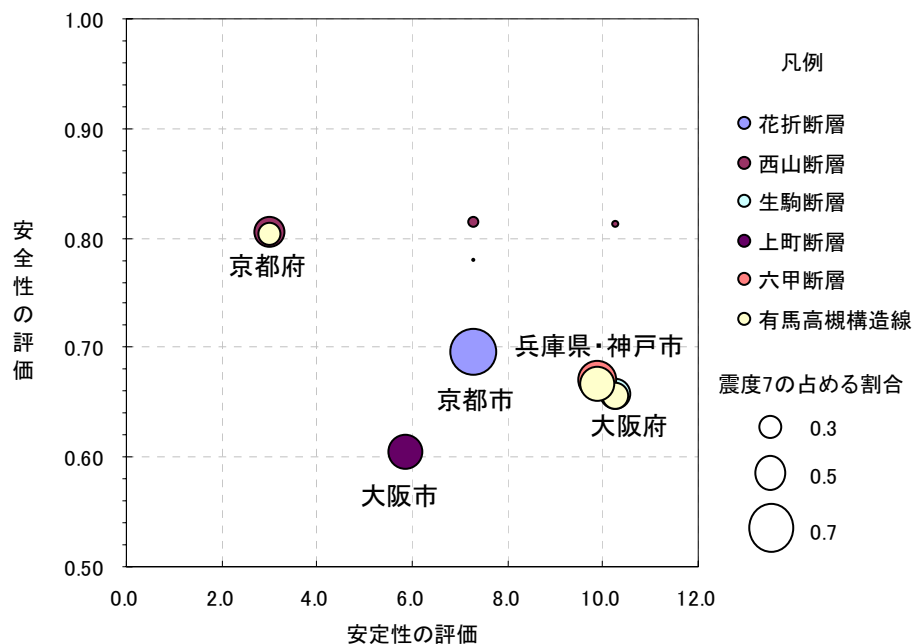


Fig. 13 Diagnosis of earthquake risks for each administrative unit

グラフの縦軸に安全性の評価軸をとり、横軸に安定性の評価軸をとる。そして、対象地域の地震の大きさを表す市区町村に占める震度7の割合を、グラフにプロットした点の大きさに表すことにより、安定性と安全性による評価を行う。ただし、プロットした点が大きいくほど、市区町村に占める震度7の割合が広い事を示す。

また、市区町村に占める震度7の割合が10%以下という狭い範囲の場合にはグラフ上に赤丸でプロットする。市区町村に占める震度7の割合が10%以下であるにも関わらず、安全性が低い値の場合には他の地域で発生した地震が影響していると考えられる。

これらの方法により行った安定性と安全性の評価の一例をFig. 14に示す(評価の内容はTable 4参照)。

a) 京都市

花折断層系地震、西山断層系地震、有馬高槻構造線系地震が発生した場合に、京都市の水道ネットワークの安全性が低くなる。特に花折断層系地震が発生した場合には京都市の広い範囲で震度7となることが想定され、伏見区、南区、下京区、西京区での安全性の評価が低くなる。

花折断層・西山断層・有馬高槻構造線系地震が発生することにより、安定性の評価が低くなる西京区は、水道ネットワークが最も脆弱な地域であるといえる。

b) 京都府

花折断層系地震、西山断層系地震、有馬高槻構造線系地震が発生した場合に、久我山町、城陽市、八幡市の水道ネットワークの安全性が低くなる。京都

府の水供給形態は冗長性を持たないため安定性の評価が低くなっており、安定性の向上が安全性を高くすると考えられる。

c) 大阪市

西山断層系地震、有馬高槻構造線系地震、生駒断層系地震、上町断層系地震が発生した場合に、大阪市の水道ネットワークの安全性が低くなる。西山断層系地震、有馬高槻構造線系地震、生駒断層系地震では全ての区において震度7が発生していないにも関わらず安定性の評価が低くなる。

大阪市では大半の区で水道ネットワークの安全性の評価が低くなるが、その中でも天王寺区、東成区、大正区は安全性の評価が低く、複数の地震により安全性の評価が低くなる、大阪市の中で脆弱な区であるといえる。逆に、北区は全ての地震に対して安全性の評価が高い。

(d) 大阪府

西山断層系地震、有馬高槻構造線系地震、生駒断層系地震、上町断層系地震が発生した場合に、大阪府の水道ネットワークの安全性が低くなる。

西山断層系地震が発生した場合には京都に近い、摂津市、箕面市、交野市、四条畷市で安全性の指標が低く、有馬高槻構造線系地震では淀川左岸の市町を中心に安全性の指標が低い値となる。

上記の4つの地震に対して、摂津市の安全性の指標は低い値となり、その内3つの地震では最も安全性が低い結果となり、大阪府の中で最も脆弱な地域であるといえる。

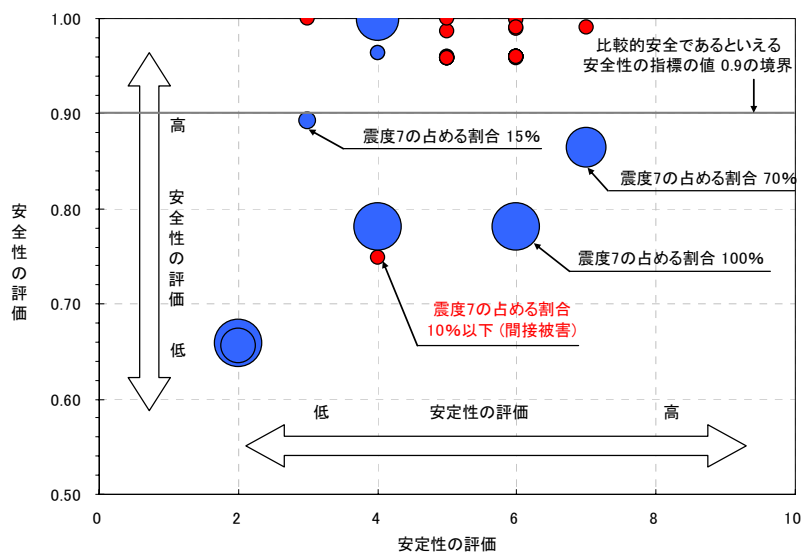


Fig. 14 Evaluation concept with stability and safety indices

e)神戸市

有馬高槻構造線系地震，六甲断層系地震が発生した場合に，東灘区を除いた神戸市の水道ネットワークの安全性が低くなる。

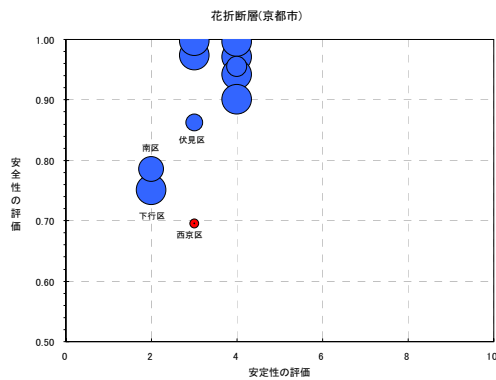


Fig. 15 (a) Diagnosis of each earthquake risk in Kyoto city (Hanaore)

f)兵庫県

有馬高槻構造線系地震が発生した場合に，尼崎市の水道ネットワークの安全性が低くなる。西宮市はどの地震に対しても安全性は低くならない。

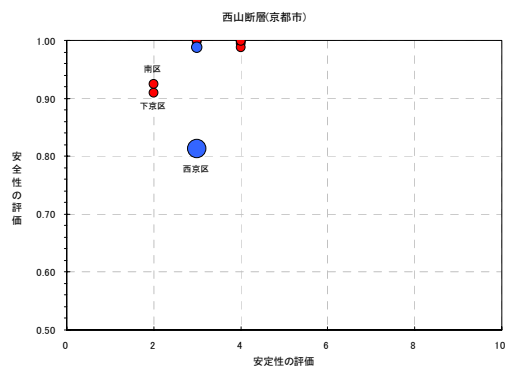


Fig. 15 (b) Diagnosis of each earthquake risk in Kyoto city (Nishiyama)

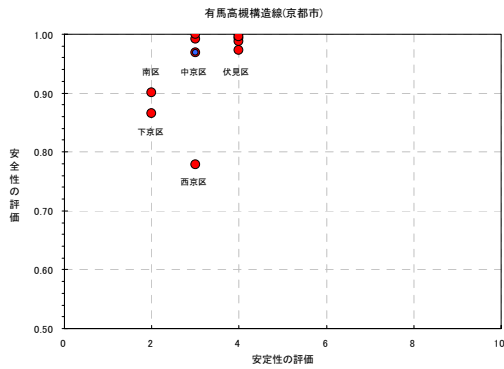


Fig. 15 (c) Diagnosis of each earthquake risk in Kyoto city (Arima-Takatuki)

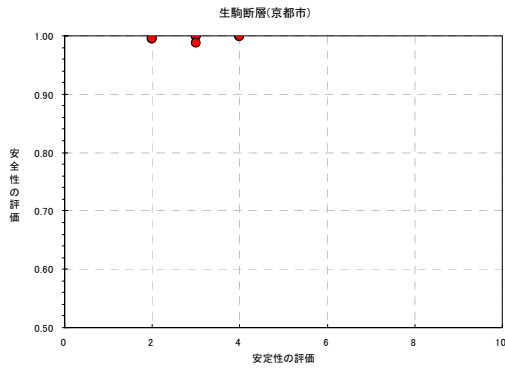


Fig. 15 (d) Diagnosis of each earthquake risk in Kyoto city (Ikoma)

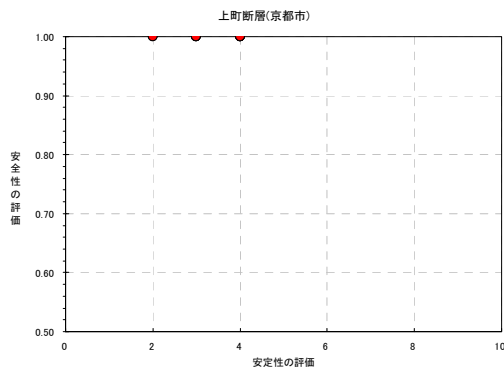


Fig. 15 (e) Diagnosis of each earthquake risk in Kyoto city (Uemachi)

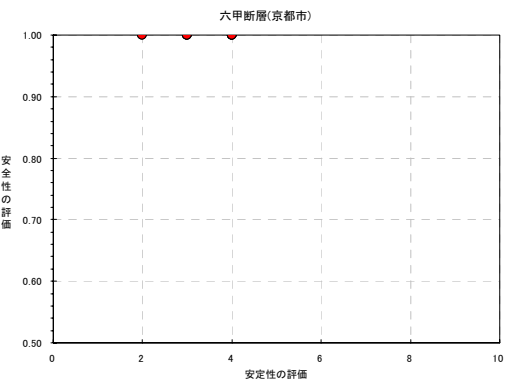


Fig. 15 (f) Diagnosis of each earthquake risk in Kyoto city (Rokko)

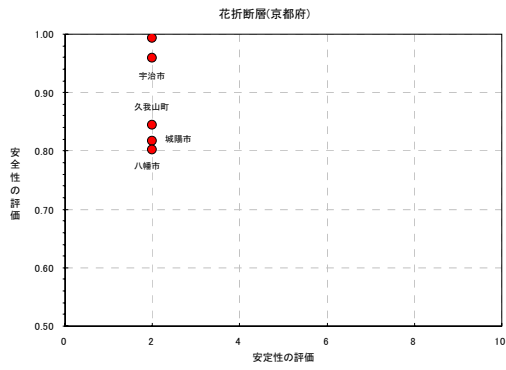


Fig. 16 (a) Diagnosis of each earthquake risk in Kyoto prefecture (Hanaore)

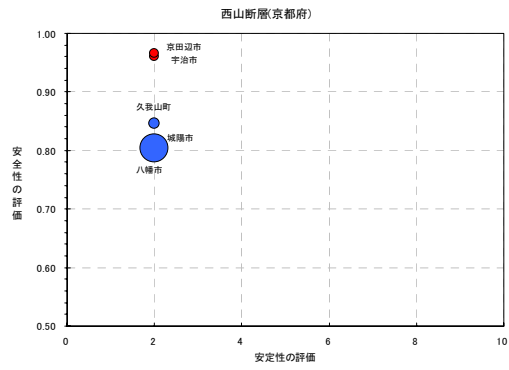


Fig. 16 (b) Diagnosis of each earthquake risk in Kyoto prefecture (Nishiyama)

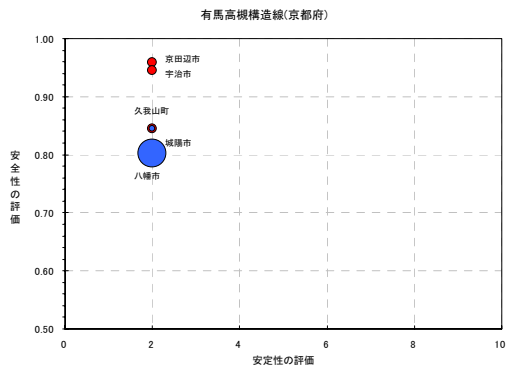


Fig. 16 (c) Diagnosis of each earthquake risk in Kyoto prefecture (Arima-Takutuki)

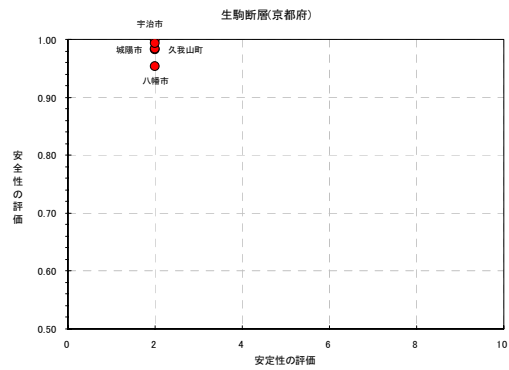


Fig. 16 (d) Diagnosis of each earthquake risk in Kyoto prefecture (Ikoma)

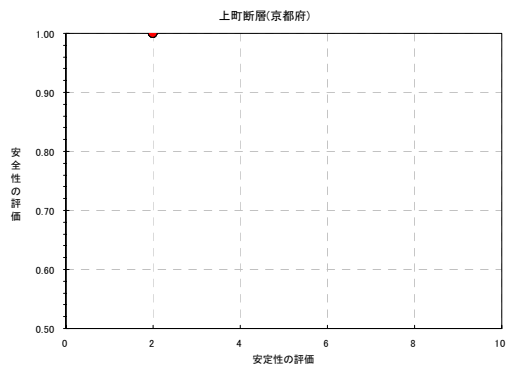


Fig. 16 (e) Diagnosis of each earthquake risk in Kyoto prefecture (Uemachi)

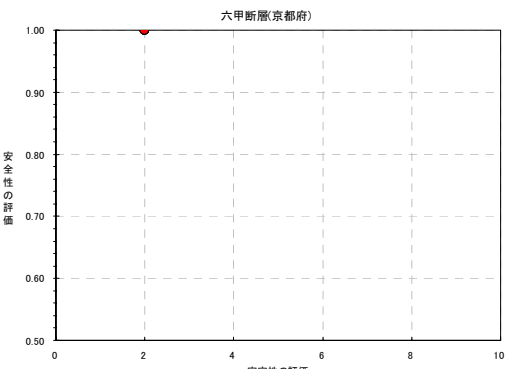


Fig. 16 (f) Diagnosis of each earthquake risk in Kyoto prefecture (Rokko)

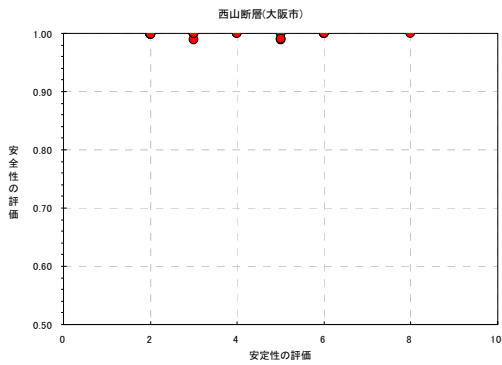


Fig. 17 (a) Diagnosis of each earthquake risk in Osaka city (Hanaore)

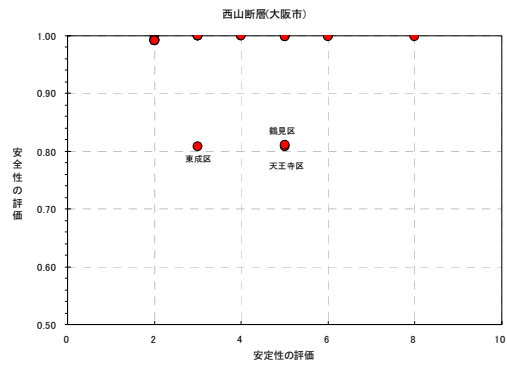


Fig. 17 (b) Diagnosis of each earthquake risk in Osaka city (Nishiyama)

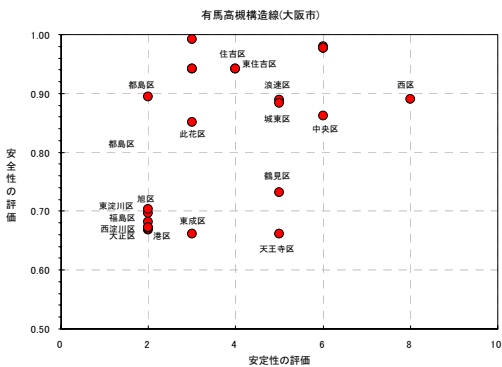


Fig. 17 (c) Diagnosis of each earthquake risk in Osaka city (Arima-Takatuki)

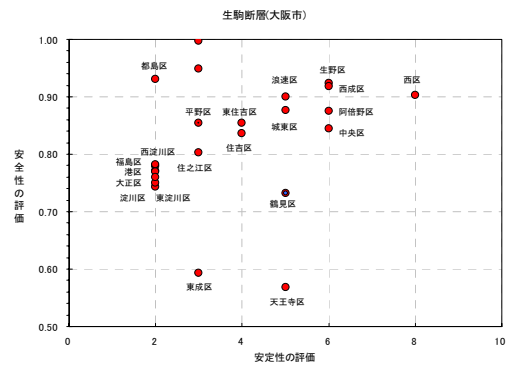


Fig. 17 (d) Diagnosis of each earthquake risk in Osaka city (Ikoma)

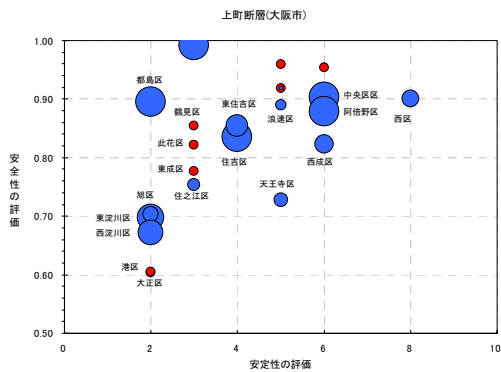


Fig. 17 (e) Diagnosis of each earthquake risk in Osaka city (Uemachi)

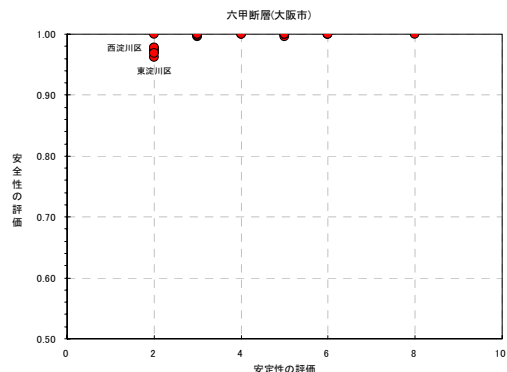


Fig. 17 (f) Diagnosis of each earthquake risk in Osaka city (Rokko)

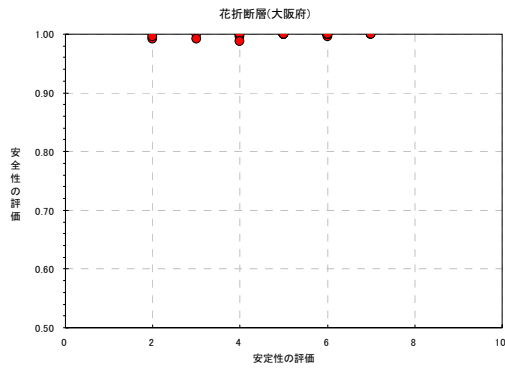


Fig. 18 (a) Diagnosis of each earthquake risk in Osaka prefecture (Hanaore)

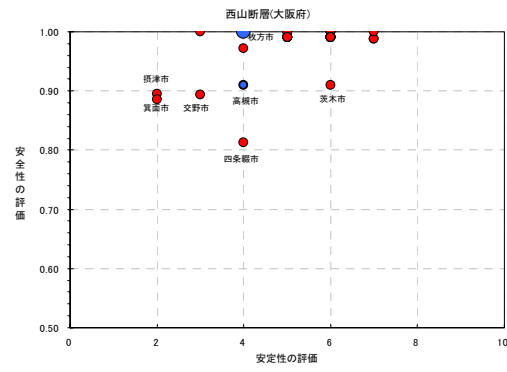


Fig. 18 (b) Diagnosis of each earthquake risk in Osaka prefecture (Nishiyama)

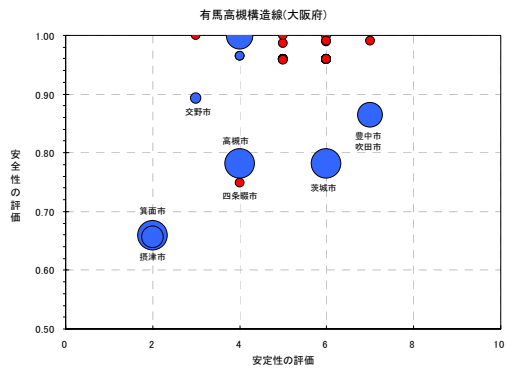


Fig. 18 (c) Diagnosis of each earthquake risk in Osaka prefecture (Arima-Takatuki)

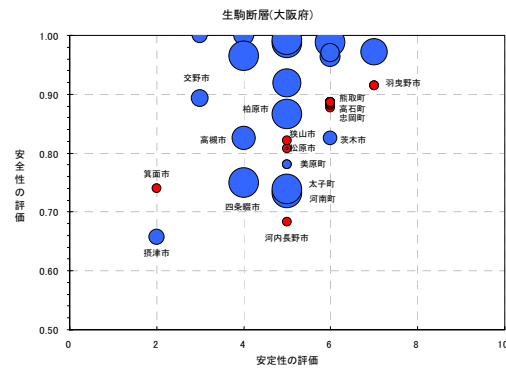


Fig. 18 (d) Diagnosis of each earthquake risk in Osaka prefecture (Ikoma)

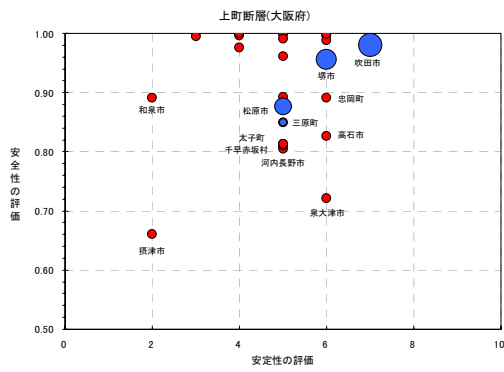


Fig. 18 (e) Diagnosis of each earthquake risk in Osaka prefecture (Uemachi)

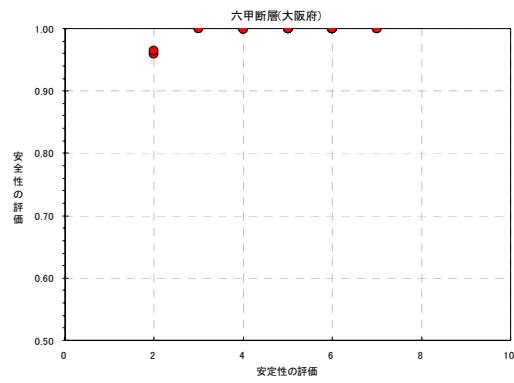


Fig. 18 (f) Diagnosis of each earthquake risk in Osaka prefecture (Rokko)

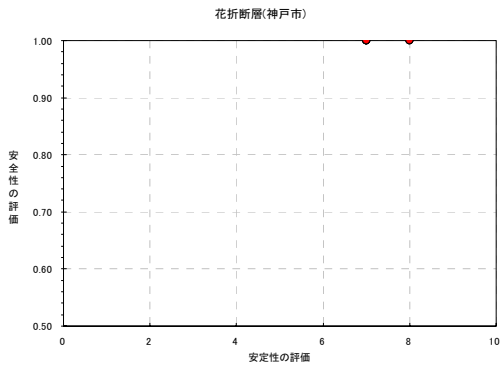


Fig. 19 (a) Diagnosis of each earthquake risk in Kobe city (Hanaore)

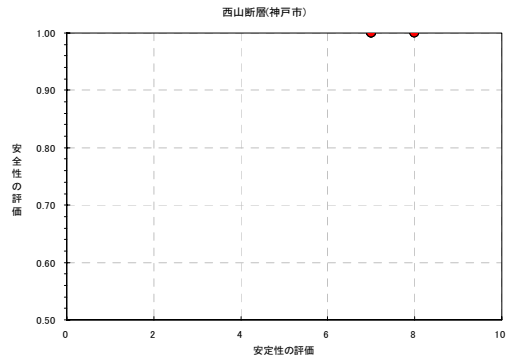


Fig. 19 (b) Diagnosis of each earthquake risk in Kobe city (Nishiyama)

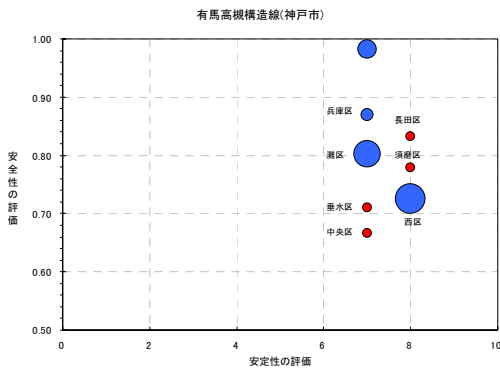


Fig. 19 (c) Diagnosis of each earthquake risk in Kobe city (Arima-Takatuki)

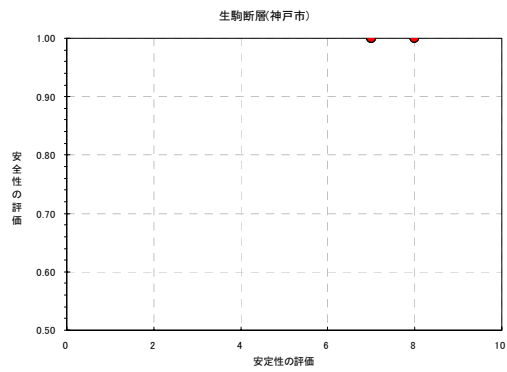


Fig. 19 (d) Diagnosis of each earthquake risk in Kobe city (Ikoma)

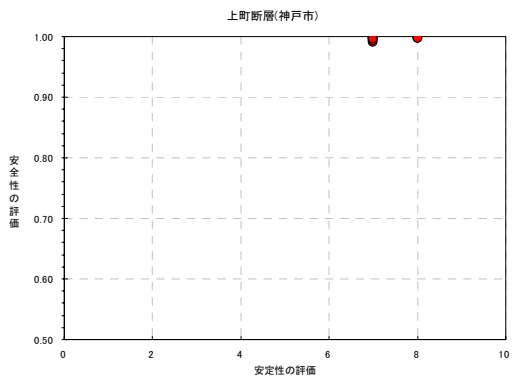


Fig. 19 (e) Diagnosis of each earthquake risk in Kobe city (Uemachi)

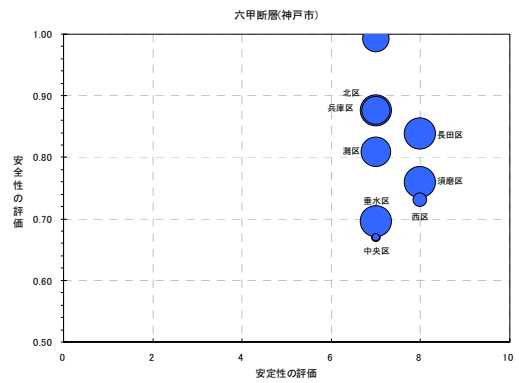


Fig. 19 (f) Diagnosis of each earthquake risk in Kobe city (Rokko)

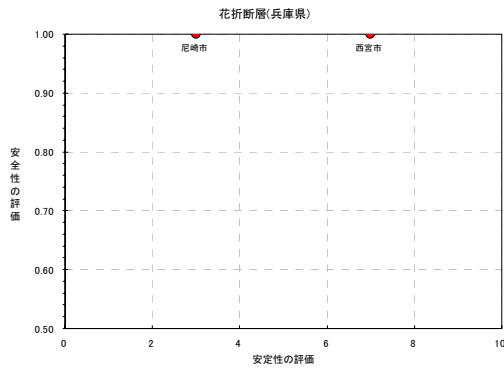


Fig. 20 (a) Diagnosis of each earthquake risk in Hyogo prefecture (Hanaore)

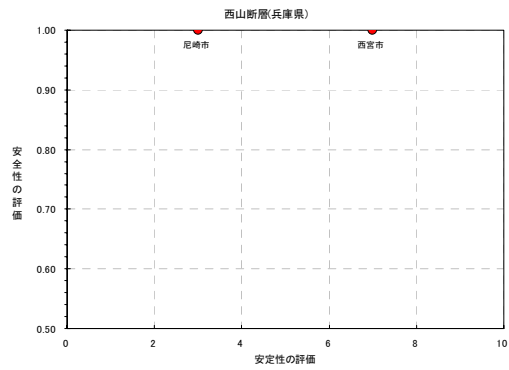


Fig. 20 (b) Diagnosis of each earthquake risk in Hyogo prefecture (Nishiyama)

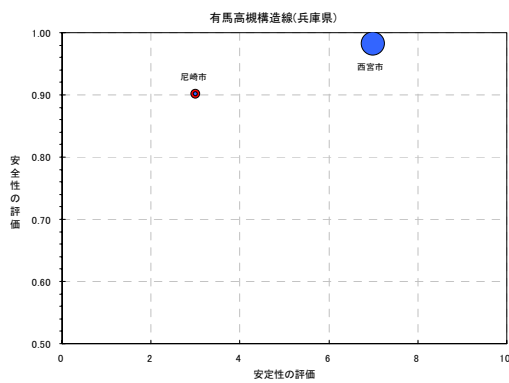


Fig. 20 (c) Diagnosis of each earthquake risk in Hyogo prefecture (Arima-Takatuki)

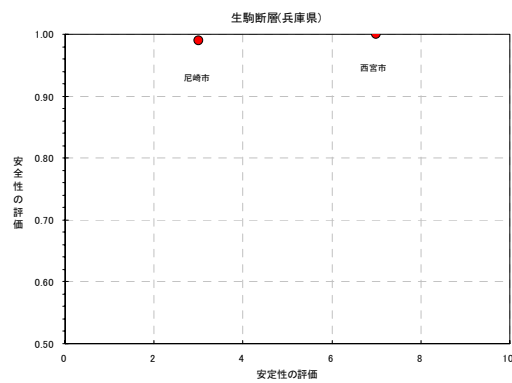


Fig. 20 (d) Diagnosis of each earthquake risk in Hyogo prefecture (Ikoma)

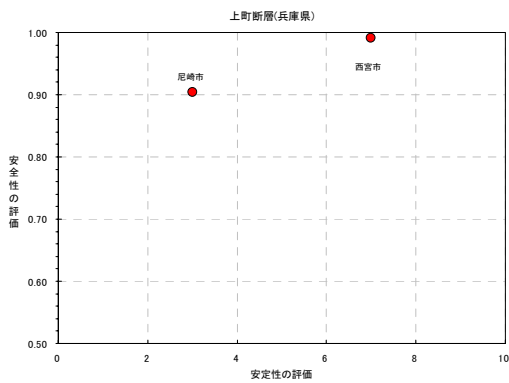


Fig. 20 (e) Diagnosis of each earthquake risk in Hyogo prefecture (Uemachi)

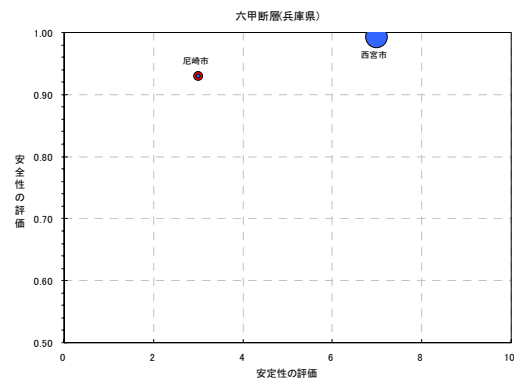


Fig. 20 (f) Diagnosis of each earthquake risk in Hyogo prefecture (Rokko)

7. おわりに

本論文では、まず大都市域における水循環圏としての考え方の必要性を述べ、水循環システムをネットワークとしてとらえるモデル化の方法を示した。次に、水循環ネットワークの安定性を評価するために、グラフ理論を援用した14指標を提案し、それら

の関連性を構造化し適用性に対する考察を行った。同時に、ネットワークの安全性を評価するために信頼性理論のアナロジーでより扱いやすい到達可能性と損傷度の2つからなる安全性の評価指標を作成した。そして、これらの安定性と安全性の指標を合成して震災リスクの評価法(地域診断法)を構築した。

ここで、提案した診断法ならびにそのプロセスの

有効性を実証するため、大阪府淀川右岸地域を事例対象地域として、活断層系による震災を軽減するための水辺創生水路の導入の効果を提案した評価指標により評価し、指標の有用性を検証した。ついで、この震災リスク評価法の有効性を実証するために、これを淀川水循環圏に適用した。

この結果、水道ネットワークの供給経路が破壊することにより発生する水供給の停止や、下水道ネットワークが引き起こす汚水流出による取水停止という「2種類の間接被害が、どの大地震が起こったとき、どこに生じるか」を明らかにし、システム論的な意味で、ここで提案した方法論の有効性を示した。そして、大都市域から失われた水辺を下水処理水の再利用により再生もしくは創生することが震災時には減災効果があり、日常時には地域環境のアメニティ空間としてその価値を評価できることを示した。

なお、当然のことながら、震災は水循環システムだけでなく、エネルギーシステムや交通システムなどの都市インフラストラクチャにも生じ相互作用がある。このため、他のインフラストラクチャとの関連をも考慮した地域の総合的な震災リスク評価法を今後開発する必要がある。

参考文献

清水康生（2002）：震災リスクの軽減を目的とした大都市域における水循環システムの再構成に関する研究,京都大学博士学位論文.

清水康生・秋山智広・萩原良巳（2000）：都市域における人工系水循環システムモデルの構築に関する研究,環境システム研究論文集, Vol.28, pp277-281.

清水康生, 萩原良巳（2002）：水循環システムのネットワークモデルと評価指標, 水資源シンポジウム.

清水康生・萩原良巳・阪本浩一・小川安雄・藤田裕介（2001）：水道システムの診断のための震災ハザードの推定, 土木学会関西支部年次学術講演概要, IV-80.

清水康生・萩原良巳・西村和司（2002）：グラフ理論による大都市域水循環システムの構造安定性の評価環境, 環境システム研究論文集, Vol.30, pp.265-270.

高田至郎（1991）：ライフライン地震工学, 共立出版.

堤武・萩原良巳編著（2000）：都市環境と雨水計画, 勁草書房.

阪神・淡路大震災調査報告編集委員会（1997）：阪神・淡路大震災調査報告 ライフライン施設の被害

と復旧, 土木学会.

中瀬有祐・清水康生・萩原良巳・酒井彰（2001）：震災時を想定した大都市域水循環システムの総合的診断, 環境システム研究論文集, Vol.29, pp.339-345.

西村和司・清水康生・萩原良巳（2001）：大都市域での下水処理水利用による水辺創成と地震害の軽減に関する研究, 環境システム研究論文集, vol.29, pp369-376.

西村和司・萩原良巳（2004）：大都市域水循環ネットワークの震災リスク評価指標に関する研究, 地域学研究, 第34巻, 第1号, pp. 83-96.

西村和司・萩原良巳・清水康生・阪本浩一（2003）：安全性による大都市域水循環システムの震災リスク評価, 環境システム研究論文集, Vol.31, pp.83-89.

萩原良巳・萩原清子・高橋邦夫（1998）：都市環境と水辺計画, 勁草書房.

浜田隆資・秋山仁（1982）：グラフ理論要説, 槇書店.

三根久・河合一（1984）：信頼性・保全性の基礎数理, 日科技連.

吉川和広編著（1985）：土木計画学演習, 森北出版.

SHIMIZU, Y., HAGIHARA, Y. (2002) : Reconstruction of Urban Water Circulation Systems by Considering Water Reuse for Earthquake Disaster Mitigation, Third International Conference on Water Resources and Environment Research (ICWRER).

**Earthquake Risk Diagnosis with Stability and Safety Indices
For Yodo-River Water Circulation Region
-For Disaster Mitigation by Newly Created River with Created Water-**

Yoshimi HAGIHARA, Yasuo SHIMIZU*, Maiko SAKAMOTO and Kazushi NISHIMURA**

*Nissuicon, Co Ltd., Japan

**Nihon Koei

Synopsis

In this paper, water circulation system in urban area is considered as a Hierarchical network model of water circulation which is composed of 4 layers; river, waterworks, human activity, sewer. The modeling process is explained, and this concept helps to consider water circulation system not as individual composition of 4 layers but as one total system. Safety index and security index are proposed, and the diagnosis of direct and indirect earthquake risk in Yodo-river water circulation region is evaluated. Furthermore, a case study is shown to verify the efficiency of the 2 indices. In the case study, it is assumed that rivers with recreated water are newly recreated in Hokusetsu region in Osaka prefecture.

Keywords: Hierarchical network model of water circulation, earthquake risk, graph theory, recreated river