

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

清水 康生¹・秋山 智広²・萩原 良巳³

¹正会員 工修 京都大学助手 防災研究所 (〒611-0013 京都府宇治市五ヶ庄)

²正会員 (株)JR 東日本情報システム (〒114-0014 東京都北区田端6丁目1-1)

³正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0013 京都府宇治市五ヶ庄)

近年、従来の河川管理、水道管理及び下水道管理という個別の枠組みでは捉え切れない震災リスク、環境汚染リスク、渇水リスク等のリスクが顕在化している。このような都市の水供給に係わるリスクを軽減するためには、個別的に行う管理の発想でなく、都市内の水の流れを水循環システムとして捉えたりリスクマネジメントを行うことが必要である。本稿では、防災・減災のために都市の水循環システムのあり方を研究することを目的として、都市水循環システムモデルの概念を提案する。同モデルの意義は、都市の水循環システムに係わる異なった管理主体を同じ土俵にのせて一体のモデルとして分析・評価することができる点である。

Key Words : risk management, water circulation system model, GIS, earthquake disaster risk

1. はじめに

我が国における都市域の水管理は、河川管理者、水道管理者及び下水道管理者によって別々に行われている。これらの個々をみると、特に水道と下水道でその普及率は高く、都市域の上水道普及率は99.1%¹⁾、下水道普及率は97.0%²⁾に達する。

近年、都市域ではこのように個別の管理部門における普及率や整備率が高いにもかかわらず、震災、環境汚染、渇水等に対して個別の管理主体だけでは対応が困難な災害が頻発している。兵庫県南部地震におけるライフライン施設の復旧とそれに伴う長期間の断水、有害物質による水源汚染、平成6年渇水における供給水の確保の問題等である。これらは、様々なレベルにおける水源の量的・水質的な確保という点で共通しているが、この問題は従来の個別管理の整備率をいくら高めても十分に対応できない複数の管理主体に係わる問題である。それゆえに、前述のような災害による被害を防止・軽減する有効な対策を講じる計画作成や事業執行が難しいという構造的な問題が存在している。このような従来の枠組みでは捉え切れないリスクとして先に述べた震災リスク、環境汚染リスク、渇水リスクを挙げることができよう。

このような都市の水供給に係わるリスクを軽減するには、河川、水道、下水道といった個別的な管理の発想でなく、都市内の水の流れを一体とした水循環システムとして捉えたりリスクマネジメントを行うことが必要である。そして、このためには、様々な要素とその情報をどのような枠組みで捉え、都市内の水循環の現象及び関係する意志決定者(管理者・水利用者)をどのようにモデル化するかという切り口を都市水循環システムの概念として明確にしておくことが必要である。その上で、具体的なモデルを構築し、都市の抱える水に関する諸リスクをこの水循環システムの中で分析・評価することにより、水利用者のリスクを軽減するための水循環システムのあり方について研究することが求められているといえよう。

本稿では、防災・減災のために都市の水循環システムのあり方を研究することを目的として、河川管理者、水道管理者、下水道管理者及び水利用者の管理・利用する場面を相互に関連付けて、それらを階層構造として表した都市水循環システムモデルの概念を提案する。このモデルの意義は、都市の水循環システムに係わる異なった管理主体を同じ土俵にのせて現象モデルと併せて社会システムとしても一体のモデルとして分析・評価することができる点である。まず、2章でモデルの基本的な考え

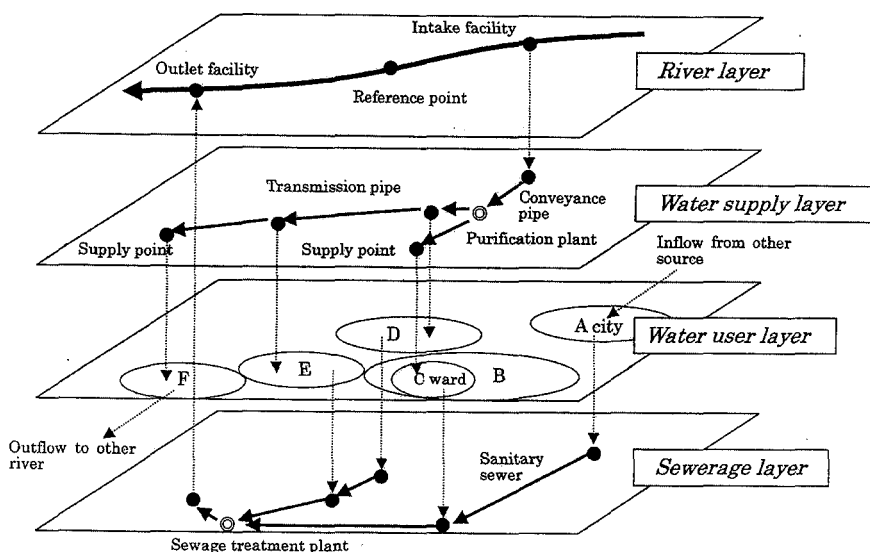


図-1 都市域における水循環システムのモデル化

方とモデル化の手順を述べ、3章で震災リスクを対象としたモデル構築の事例を示す。4章では構築した水循環システムモデルの有効性について考察する。5章では、モデルを適用して都市域の水循環システムのあり方を研究するに際して留意すべき事項について述べる。

2. 水循環システムモデルの概念

(1) モデル化の基本的な考え方

都市水循環システムモデルを構築するにあたっての基本的な考え方は以下のとおりである。

①都市内の水循環の経路を記述できるモデルとする。環境汚染、震災、渇水による被害の及ぶ範囲やその程度を考える場合には、水量規模と同時に水循環の経路が重要である。

②水循環に係わる複数の管理主体や水利用主体から構成されるモデルとする。管理の対象の異なる管理者相互及び管理の対象の同じ管理者相互の提携や競合関係を考慮することがリスク軽減に有効と考える。

③各種の地理情報データと水循環システムに係わるデータを重層化することで、水利用主体のリスクを水循環システムの外的条件と併せて評価できるモデルとする。この点を可能とするために、GIS (Geographic Information System)⁹⁾を活用することが有効である。

本モデルでは、都市域の水循環を記述するために、河川管理者、水道管理者、下水道管理者及び水利用者の管

理・利用する場面を一般的な位置エネルギーの大小関係を考慮した降順の階層構造として考えるものとする。そして各場面には意志決定者が存在するため、GISで用いられる地理情報を構成する主題の意味ではなく、システム論の観点からこれをレイヤーと称する。⁹⁾すなわち、水循環システムモデルは、河川レイヤー(River layer)・水道レイヤー(Water supply layer)・水利用者レイヤー(Water user layer)及び下水道レイヤー(Sewerage layer)から構成される階層構造を有する。農業用水や地下水については、都市域を対象とすること及びこれらの状態を把握する情報を得ることが難しいことから本モデルでは考慮しないこととした。また、水循環システムモデルは、水の循環経路を記述するために、各レイヤーの中の多くの要素によって構成される。これらの構成要素は、“貯留”、“水質変換”及び“水輸送”のいずれかの機能を有している。以上に述べた水循環システムモデルの概念を図-1に示す。さらに、この水循環モデルは、図-2に示すように空間スケールでも階層構造を有する。すなわち、水循環システムの階層は、河川の流れや都市の位置がわかる(言い換えると“川がみえる”)「地域レベル(regional level)」、都市内の様子までわかる(言い換えると“町がみえる”)「都市レベル(urban level)」及び生活している人間の様子までわかる(言い換えると“人がみえる”)「住民レベル(residential level)」の3レベルである。

(2) 水循環システムモデルの構成

リスクに関係する各レベルの要素の状態量は、空間ス

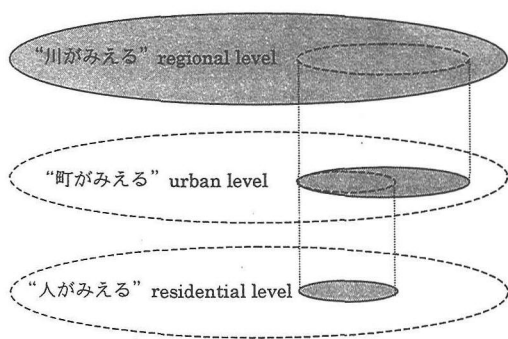


図-2 モデルの階層性

ケールに見合った時間スケールでモデル化される必要がある。例えば、地域レベルの場合、リスクを表現するための各構成要素の状態量は流域全体の変化を記述する時間単位として年間平均値データで捉えて良いであろう。一方、住民レベルでは、日単位や時間単位で現象を見る必要がある。このように、どのようなリスクとその被害内容を対象とするか、また、どのレベルの空間スケール（時間スケール）でモデル化するかによって都市水循環システムモデルの構成要素は異なってくる。例えば同じ震災リスクを対象としても、広域的な水供給が行われている水道用水供給事業までをリスクマネジメントの対象と考える場合には、例えば想定する被害内容の空間スケールが小さい場合であっても水道用水供給事業の管理主体はモデルに内部化しておく必要がある。前述した各要素の位置と属性は、対象とするリスクを考慮して各々選定し、GISによって付与される。以上に述べた水循環システムモデルのフレームワークの手順を図-3に示す。同図に沿って以下では水循環システムモデルの構築とその再現性の確認について事例を通して述べるものとする。

3. 震災リスクを対象とした地域レベルの水循環システムモデルの構築

本稿では震災を想定した場合のレイヤー間の被害及び上下流の影響関係について把握することを目的として、淀川流域を対象とした地域レベルの都市水循環システムモデルの構築事例を示す。前述のように水循環システムは、河川レイヤー、水道レイヤー、水利用者レイヤー及び下水道レイヤーから構成される。まず、水利用者レイヤーを構成する水利用主体は、意志決定主体の存在と区域の人口規模を考慮し、淀川を水源としている市町村または政令指定都市の行政区とする。ただし、これら水利

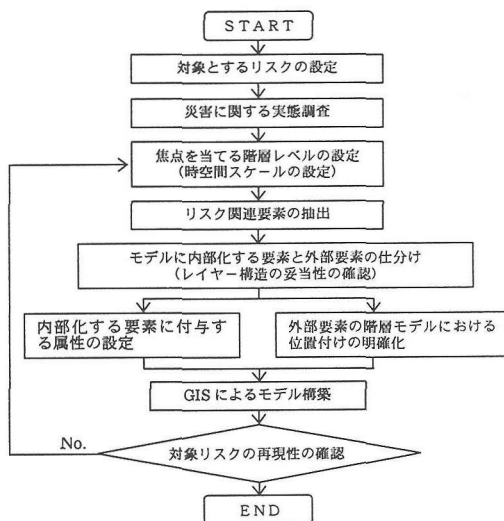


図-3 水循環システムモデルの構成手順

用主体に水を供給する水道用水供給事業が存在するため、これらも水利用主体と考える。また、モデル化にあたっての対象地域全体の空間スケールは、活断層による地震が同時に生じないと思われるスケールを考えた。

(1) 兵庫県南部地震における被害の特色

水循環システムとしてモデルの中で考慮すべき構成要素や要素に付与する属性を決めるために兵庫県南部地震による河川、水道及び下水道への被害内容を調査し、その結果を整理した。以下に、その要旨を示す。カッコ内に記した記号はリスク関連要素として考慮すると判断した事項である。

①河川レイヤー^{②)}

河川構造物としては堤防施設とダムがあるが、ダムはほとんど被害を受けなかった(ア)。河川堤防で最も被害の大きかった箇所は、淀川本川左岸0.2~1.8kmで液状化により高潮堤防の堤体が沈下した。同右岸1.2~2.0kmでも堤体全体の沈下は見られなかったが堤内地側ののり先が側方に流動し堤体の裏半分が沈下した(イ)。また、神崎川の派川中島川の右岸コンクリート製高潮堤防に多くのクラックが生じた。これらの被害箇所は、近世以降の埋め立て地であるという共通点を有している(イ)。神戸市内の河川は、掘り込んで河積を確保しているものが多い。今回の地震では、護岸の局所的な被災は各所にみられたが、大きな延長にわたって崩壊している例はみられなかった(ウ)。ただし、神戸市内の一部の暗渠河川では、目地部周辺のコンクリートが被災したり、塩屋谷川のトンネル部分の覆工コンクリートが被災する等、都市域特有の被災現象もみられた(エ)。また、塩屋谷川放水路で

は、同放水路と断層が交差する地点で被害が生じており、被災に断層の動きが関係した可能性が指摘されている(オ)。また、今回は被害を生じなかったが、水位・水質等の観測施設が被害を受けた場合には、河川管理への影響も考えられる(カ)。

②水道レイヤー^{7,8,9}

水供給のプロセスに沿って被害を述べる。まず、取水施設では、芦屋市水道局の芦屋川からの取水施設が岩石崩壊により全壊した(ア)。阪神水道企業団では2系統(淀川系統と大道系統の計5本の導水管)で淀川から導水しているが、そのうち最も被害の大きかったのは第一期導水管であり、複数の継手で漏水を生じた(イ)。このため、約一ヶ月の復旧期間を要した。3つある浄水施設とポンプ場では、処理施設やポンプ施設の破損・漏水及び場内配管からの多数の漏水が生じた(ウ)。

上水道事業体の被害内容をみると神戸市では、浄水施設・配水池等構造物の被害は比較的少なく、配水管・給水管の管路に被害が集中した点が特色であった(エ)。具体的には、管体の折れ・割れ、継手の離脱、属具の破損等といった被害である。被害件数は、小口径管に多く、被害率(件/km)では、大口径管が平均を上回った(エ)。ただし、大口径管路の比較的少ない他の被災都市も併せて評価すると全体では小口径管の被害率が高くなっている。被害の発生箇所との分布と地形地質との関係を分析した結果、次の場所で被害率が高くなっていた(オ)。

- 液状化を起こしているような臨海部・埋立地・人工島
- 地滑りや道路崩壊を生じている地域、高盛土の造成地
- 断層の影響を受ける大阪群衆の地層、河川周辺の表層

また、被害を受けた都市全体でみると、耐震管路であるか否かなど管種によって被害率に違いが認められた(カ)。さらに、地震動の強さ(加速度)と被害率の高さ及び液状化の程度と被害率の高さについても相関が認められた(キ)。

③水利用者レイヤー^{9,10}

震災後、神戸市では、淀川や武庫川から緊急取水を行っている。水道管理者が河川取水や地下水利用等の水源の複数化を行っていれば、水供給への影響は緩和されると考えられる(ア)。被害の程度は、地域の人口密度・商業集積度や平常時における水利用原単位の大きさ等によっても異なっている(イ)。また、水道管の耐震化等の条件にもよるが、水源から水利用者までの距離(導送配水の距離)が大きいことは水輸送が地震による影響を受けやすいことを示し、給水区域の地盤高の変化の大きさは復旧の難易性に係わる(ウ)。これらは水利用者が受ける被害の程度に影響する要素である。

④下水道レイヤー^{10,12)}

下水道施設は管路施設と処理場・ポンプ場に分けられる。まず、管路施設では、污水管渠と合流管渠の被害率

(スパン数/km)の平均を上回る被害発生管の口径は300mm以上600mm未満の比較的口径の大きな管路であった(ア)。幹線管路の被害形態の特色は、本管部クラック、継手部のズレ・クラック等を生じたものの流下機能に障害を及ぼすことのない軽微な被害であった点である。また、神戸市では地下鉄の上部地盤の陥没による破断(イ)、汚水圧送のための水管橋の落橋被害があり流下不能の状態を生じさせた(ウ)。これらは他のライフラインの被害に関連する被害である。雨水幹線では、石積みの場合の側壁の崩壊やコンクリート施設の倒壊、ボックスカルバートの損壊等が生じ、一部で流下機能が損なわれた。降雨期であれば深刻な問題となった可能性が指摘されている(エ)。これらの被害率は地震動(加速度)、地盤の永久ひずみの大きさとの相関が認められ、埋め立て地を中心とした液状化地域で被害率が高く(オ)、土かぶりの深い管路では被害が小さい傾向が認められた(カ)。また、断層線の近傍に位置している処理場・ポンプ場は非常に大きな加速度の範囲内でもあり被害も甚大であった(キ)。特に液状化現象がみられた処理場では非常に重大な被害を生じ、神戸市東灘処理場では、側方流動に伴う杭の損傷により処理施設の機能が停止し、復旧に長期間を要した。

(2) 淀川流域における水循環システムモデルの構築

以上の調査結果から文章末尾のカッコ内に指摘した各事項(関連根拠)を考慮して水循環システムとしてモデル化する要素を抽出した。また、それらに付与する属性をレイヤーとして内部化する要素とレイヤーに含めない外部要素に分けて表-1に示す。外部要素は、水循環に直接関連しない要素であるが、対象とする震災リスクの危険事象(peril)と危険事情(hazard)を表す要素である。同表より、各レイヤーの構成要素は水循環経路に沿ってレイヤー間で関連付けが可能である。このことからモデルにおける4つのレイヤー構成は妥当であると考ええる。これらの要素から構成される都市水循環システムモデルの概況を図-4に示すと共に、各レイヤーの特色を以下に述べる。

①河川レイヤー

モデルの対象区間は、上水道と下水道の取排水施設が集中する、宇治川の天ヶ瀬ダム、木津川の加茂観測所、桂川の保津峡観測所までの区間とした。一級河川と二級河川を併せた40の河川が対象となった。これらの河川の流程には、少なくとも1つの水道原水の取水施設もしくは下水処理水の排水施設が存在している。淀川の流況としては、平水流量が176.9m³/s(枚方)¹³⁾であり、水質はBOD75%値が1.8mg/l(同)と良好である。¹⁴⁾

②水道レイヤー

水道用水供給事業体と各市町村の水道事業体により構

表-1 震災を対象とした場合に水循環システムとしてモデル化する要素とその属性

レイヤー	要素と付与する属性	関連根拠
河川レイヤー	上流境界・下流境界（海域）～流量、水質 観測施設（基準点）～水位、流量、水質 河川流路（堤防形態）～高規格堤防、自然堤防、特殊堤防、トンネル（暗渠）掘り込み河道 等	①ア ①カ ①ウエ
水道レイヤー	取水施設～取水施設形態 導水管～導水量、口径、管種 浄水施設・ポンプ場・（配水池）～供給能力、浄水方法、供給水質、供給先 送水管（主要配水管）～送水量（配水量）、口径、管種（耐震化の有無等）等	②ア ②イ ②ウ ②エカ
水利用者レイヤー	市町村・行政区の代表点（市役所・区役所）～ 水利用特性：水道普及率、原単位、淀川以外の水源取水量 社会的特性：人口、人口密度、高齢者割合、商業集積度 等 自然的特性：水源からの水輸送距離、地盤高 等	③ア ③アイ ③ウ
下水道レイヤー	下水処理場～流入水量・水質、処理水量・水質（処理機能）、放流量・水質 主要污水管路・合流管路～口径、管種（構造）、土かぶり 主要雨水管路・合流管路～口径、管種（構造）、土かぶり 放流管路（放流口）～施設構造 等	④キ ④アエカ ④アエカ ④エ
外部要素	活断層位置～断層線 液状化要因～臨海部（砂質）・埋め立て地・人工島・高盛土の造成地 水供給とクロスする施設～道路・鉄道・地下鉄・橋 等	①オ②キ④キ ①イ②オ④オ ④イウ

成されている。本モデルで対象となるのは 64 の事業体である。この中の 15 事業体が淀川からの直接取水を行っている。生活用水の取水量は水利権量ベースの合計で約 89.1m³/s（京都府関係 14.9m³/s 大阪府関係 59.4m³/s、兵庫県関係 14.8m³/s）¹⁹であり淀川平水流量の 50.4%を占める。

③水利用者レイヤー

対象となる水利用主体は 102 である（京都府 24、大阪府 65、兵庫県 13）。対象区域内の給水人口は、約 1300 万人で、この内、24 の水利用主体が淀川本川に下水処理水を排水している。残りの 78 の水利用主体は他の河川への排水もしくは大阪湾への直接排水を行っている。

④下水道レイヤー

下水処理施設は 64 施設が対象区域内に存在する。この中の 14 施設が淀川に排水を行い（京都府内 9 施設・大阪府内 5 施設）、他の施設は淀川以外の河川または大阪湾に排水を行っている。淀川に下水処理水を排水している 14 施設の合計放流量は、年間平均で約 15.0 m³/s である。このうち、京都府からの排水は、約 11.5 m³/s で全体の 76.7%を占める。

以上の考察より、淀川流域では、レイヤー間の水移動が水量的に大きく水循環が活発であることがわかる。また、供給水源である淀川の有機汚濁は改善されているが、レイヤー間の水循環が活発ということと考え併せると、ひとたび環境汚染等の事態が発生すると水道水源等へ多大な影響を及ぼす可能性を有していると考えられる。

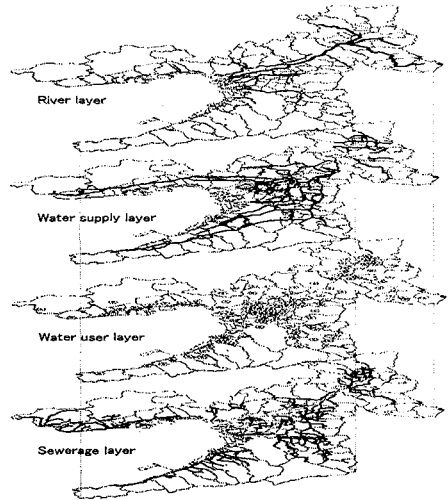


図-4 淀川流域の都市水循環システムの概要

4. 水循環システムモデルによる震災リスクに関する考察

（1）水循環システムを考慮した複合的な被害

兵庫県南部地震は、神戸市等の多くの被災都市が大阪湾に面していたため、河川の流路が短く水循環システムの流末に近いところで生じた震災であった。このため、下流への影響という点では被害が限定されていたと考えられる。3章で述べた被害内容は、各レイヤー内での被害である。しかし、淀川流域全体として眺めた場合には、ある地域におけるレイヤー相互の影響関係だけでなく上

表-2 水循環システムとしてみた場合の震災被害の連鎖構造（流域レベル）

レイヤー	河川	水道	水利用者	下水道
河川	・堤防損傷による治水機能の低下 ・取水施設の被害 ・水域の環境悪化	・水源からの取水困難（水量不足） ・復旧作業の遅れ ・浄水施設の被害 ・貯留施設の被害 ・水道管路の被害	・洪水への不安 ・浸水被害 ・減断水による不便 ・水辺利用への障害 ・減断水の長期化による精神的被害の拡大 ・減断水による不便 ・生活維持困難 ・避難所での生活（疎開、移住）	・雨水放流の困難（堀込み河道の場合も） ※流入水量の減少による復旧の早期化 ・下水道管理者への苦情 ・処理施設の被害 ・污水管路被害 ・雨水管路被害
水道	・代替水利の振り替えを要請			
水利用者	・河川管理者への苦情	・水道管理者への苦情		
下水道	・水域への污水溢出（環境汚染）	・水源からの取水困難（水質悪化）	・道路等への污水溢出 ・トイレ使用不可 ・減断水による不便 ・浸水被害	

注：対角成分は3章で述べた個別のレイヤーにおける被害内容である

下流問題を中心に1次的な被害が他の地域に影響を及ぼす複合的な災害を生じる可能性が高い。この複合的な災害も1次的、2次的と連鎖の構造を有しており、電力・交通など他のライフラインとの影響関係も当然想定される。表-2は、これらを踏まえた水循環システム内の主な影響関係を示したものである。同表は震災リスクに対する診断を可能にすると共に防災・減災計画を考える際の枠組みを示している。

（2）淀川流域における複合的な被害

さて、以上に述べた内容がどの程度、淀川流域で具体的に想定されるのかを前章で構築した水循環システムモデルを適用して検証する。

淀川流域には多くの活断層が存在しているが、ここでは、それらの中から、花折断層系・黄檗断層系・西山断層系・有馬高槻断層系・上町断層系及び生駒断層系の6つの断層系を対象とする。まず、各断層系を断層線としてモデル化し各レイヤーの水循環経路との交点（クロスポイント）を調べた。交点を調べた理由は、3章で述べたように被害が最も顕著に生ずる位置であると考えたためである。

①河川レイヤー

河川と断層線との交点は4箇所あることがわかった（図-5参照）。淀川本川2箇所（高浜観測所付近と淀川大堰下流部）と派川2箇所（神崎川と旧淀川）である。同地域はいずれも液状化を生じる可能性のある地域である。^{19,17)}

②水道レイヤー

交点は全部で22箇所であった（図-6参照）。この中には、京都市の琵琶湖疏水と松ヶ崎浄水場を結ぶ導水管や、阪神水道企業団の大道導水管など各水道事業体にとっての重要管路が含まれるほか、大阪市水道局の要となっている柴島浄水場が、上町断層系の直上に位置している。いずれの断層が動いたとしても、施設や管路の損壊が広い範囲に影響を及ぼすことが予想される。

③下水道レイヤー

下水道施設と活断層線との交点は4箇所（茨木市内と大阪市内に各2箇所）であり、数は比較的少ない（図-7参照）。しかし、京都府内の処理施設の集中する3川合流部近傍に西山断層系・有馬高槻断層系の端部が極めて接近しており、同地震による合流部周辺での液状化現象の発生の可能性が指摘されている。¹⁹⁾

④複合的災害の可能性

以上より、淀川流域には表-2で述べたレイヤー間の被害の連鎖的な構造が存在することが分かる。具体的な例として、3川合流付近について述べる。有馬高槻断層系や西山断層系において地震が発生した場合には、液状化現象により同地区の堤防が損傷し取水施設への被害が生じ、水源からの取水に影響を生じる可能性がある。特に取水施設は大阪府の水道用水供給事業のものであり、影響範囲が府下全域に及ぶ。また、直上流には京都府の下水処理場が集中しており、污水が施設から流出するような事態になれば、淀川本川の直下流の水道水源だけでなく下流取水への広範囲な影響が生じることとなる。特

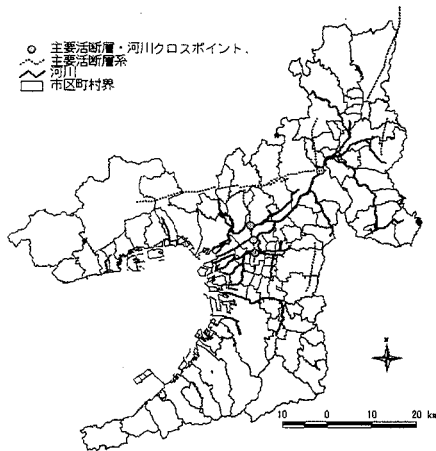


図-5 河川と活断層

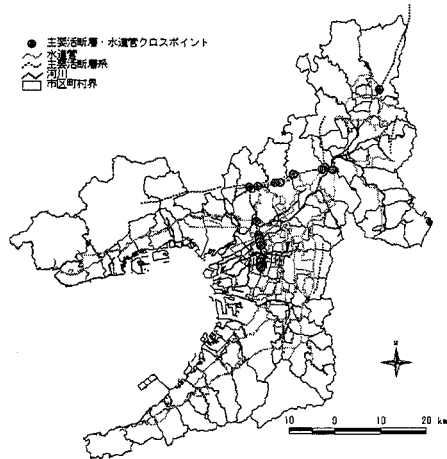


図-6 水道管路と活断層

に、河川流量の少ない時期には深刻な事態となろう。このような上下流問題の可能性も十分に想定しうることがわかった。上述した複合的な被害の具体的な分析やそれら被害を軽減するための対策の評価については、本稿で提案した水循環システムモデルの枠組みの中で議論が可能であり、特に対策の評価においては、モデルに内部化した水利用主体、河川管理者、水道管理者及び下水道管理者による被害軽減のための提携の可能性について検討することが可能である。具体的には、複数の活断層での地震を個別に想定することで管理者の立場が変化するため（非常時の水を供給する側と受ける側等）、これを考慮した提携の可能性について検討することができる。

5. おわりに

本稿では、震災リスク、環境汚染リスク及び渇水リスクに対する防災・減災を目的とした、都市水循環システムモデルの概念を提案し、モデルのフレームワークについて事例をとおして具体的に述べた。同モデルは、都市の水循環を一体として考えているため、従来の行政の枠組みを超えて、対象とするリスクに対する地域の診断を可能とする。さらに、同モデルを適用することにより、防災や減災計画を考える上で、どこまで考えておけば良いかの枠組みを知ることができ、有効な対策（代替案）を講じることが可能となる。

今後は、モデルを適用した被害の分析及びそれらを踏まえた代替案の設計・評価を行う必要がある。その際には、都市水循環システムモデルの特色を活かして以下の観点に留意することが重要である。

管理者間の提携等を検討する際に、例えば震災リスク

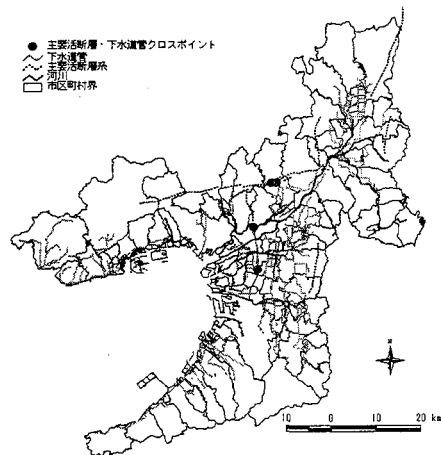


図-7 下水道管路と活断層

の被災場面のみを想定するのではなく、環境汚染リスクや渇水リスク等当該都市域で想定される他のリスクをも同時に考慮し、上下流問題、提携の可能性、トレードオフ等の主体間・目的間の関係を把握する必要がある。それらの内容を総合的に踏まえた分析や評価が必要である。例えば、4章では、震災リスクを対象としてレイヤー間の管理者の提携について述べたが、震災リスクだけを考えた場合には、被害を受ける側とそうでない側が一方的になってしまう場合もあり得る。環境汚染リスクにおける上下流関係や渇水リスクにおける関係でも同様である。このような場合に、複数のリスクを同じ土俵にのせることで提携の可能性が高くなると考える。

次いで、空間スケール（時間スケール）に関しても、今回は震災リスクを対象として淀川流域という地域レベルのみを対象としてモデル化した。都市レベルや住民

レベルといった他の空間スケールでも、表-2に示したと同様の連鎖被害または階層独自の被害が生じるものと考えられる。これら被害構造が階層性を有する点を考慮し、現象面だけでなく階層間の管理者や水利用主体の関係をも考慮して分析や評価を進めることが重要である。

謝辞：査読委員の方々には有益なコメントを頂戴した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) (社)日本水道協会：平成9年度水道統計，施設・業務編，1999.
- 2) (社)日本下水道協会：平成9年下水道統計要覧，1999.
- 3) 亀田弘行，岩井哲，碓井照子，能島暢呂，坪井健次，古藤智子，小川英雄，松下眞，藤田裕介，橋上重弘：阪神・淡路大震災におけるライフラインの復旧過程と生活支障のGIS分析，京都大学防災研究所，総合防災研究報告第6号，1998.
- 4) M.D.Mesarovic,D.Macko,Y.Takahara (研野和人監訳)：階層システム論，共立出版，1974.
- 5) 土木研究所調査団河川班：河川関係の被害，土木技術資料，1995.
- 6) 中尾忠彦：河川構造物の被害と復旧，土木施工36巻9号，1995.
- 7) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会(土木学会・地盤工学会・日本機会学会・日本建築学会・日本地震学会)：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，1997.
- 8) 本水道協会：阪神・淡路大震災における水道管路の被害と分析，水道協会雑誌第65巻第2号，1996.
- 9) 小倉晋：神戸市水道システムの復旧と復興—ライフライン機能向上にむけて—，1997.
- 10) 神戸市水道局：阪神・淡路大震災、水道復旧の記録，1996.
- 11) (社)日本下水道協会：下水道の地震対策についての検討報告書，1997.
- 12) 京才俊則：下水道の被害，土木施工36巻9号，1995.
- 13) 建設省河川局編日本河川協会：平成9年流量年表，1999.
- 14) 環境庁水質保全局監修：平成9年度全国公共用水域水質年鑑，1999.
- 15) 建設省近畿地方建設局：水利権調書，1994.
- 16) 大阪府：大阪府地震被害想定調査報告書，1997.
- 17) 京都府：京都府地震被害想定調査報告書，1998.

MODELING OF ARTIFICIAL WATER CIRCULATION SYSTEM FOR RISK MANEGEMENT IN URBAN AREA

Yasuo SHIMIZU, Tomohiro AKIYAMA and Yoshimi HAGIHARA

In Japan, the water utilization in urban areas is controlled separately by managers of water supply systems, sewer systems and river systems. It is a reason why a total countermeasure is not adopted for various risks. In this paper, these managers are considered in one water circulation system, and a hierarchical water circulation model is proposed to deal with how to mitigate the risks of the earthquake disaster, the environmental disaster and the drought disaster for water supply in urban areas. The model is consists of a river layer, a water supply layer, a water user layer and a sewerage layer, and decision makers of each layers are considered in it. The model is constructed by GIS. The application of this model is expected to provide necessary information to the mitigation plan of the disaster.