

地震時を想定した大都市域水循環システムの再構成に関する考察

萩原良巳・清水康生

要 旨

都市活動や都市生活者の水使用への影響を軽減するために河川、水道、下水道の事業管理者は多くの地震対策を講じている。しかし、これら個別対策では限界があり大都市域の水循環システムを総合的に捉えたシステムの再構成が必要である。本研究では、現状の問題点を指摘し、その必要性を述べると共に再構成のコンセプトを示す。また、水循環システムモデルの定式化の方法について提案すると共に再構成の方法について言及する。研究対象は淀川大都市域とする。

キーワード：大都市域水循環システム、システムの再構成、震災、淀川

1. はじめに

本研究は、淀川大都市域（宇治川の水ヶ瀬ダム、木津川の加茂流量観測所及び桂川の保津峡流量観測所から下流で取排水を行っている市町村区）の水循環システムを考察の対象とする。

まず、対象地域における震災時を想定した場合の現状の水循環システムが抱える問題点を明らかにする。地震は何時発生するかわからない。したがって、対策を考えるに際しては、常に平常時との連続性を認識しておく必要がある。水循環システムに関しても震災時を想定した場合だけでなく平常時の問題点についても考慮しておく必要がある。また、問題解決のためには従来の事業者中心の河川・水道・下水道という個別整備の発想でなく、都市に生活する都市生活者の視点から都市の水循環を一体的に捉える水循環システムの再構成が必要である。

本稿ではこの再構成の必要性を論じると共にそのコンセプトを提示する。また、再構成のコンセプトに基づき大都市域水循環システムモデルの定式化の方法を提案すると共に再構成の方法について言及する。

2. 水循環システムの現状

2.1 対象地域における水循環の現状

(1) 水循環の概要

淀川を水道用水の水源とする水道事業体は（琵琶湖を除く）、京都府、大阪府及び兵庫県の2府1県にまたがり、水源としている上水道事業の給水人口は、1317万人に上っている（1992）。これは該当する行政区域内人口の99%に相当している。次に、流域において取排水のいずれかで淀川と係わりを持つ市町村の水源構成を河川水、地下水及びその他の3つに分類すると全水源の91%が河川水であり、8%が地下水を利用している。このように多くの市町村が淀川を水道の主水源としている。一方、淀川下流部では、大阪府や兵庫県が工業用水の水源としても取水している。これらの水利用状況を水利権として府県単位でまとめるとTable 1のとおりである。

同表より、上水道用水、工業用水、農業用水及びその他に分けた水利権の合計は約177 m³/sとなる。淀川の枚方地点における平水流量が198 m³/sであるので（1952～1993年の平均）、ほぼその9割に相当している。このような水量が利用可能となる一つの

Table 1 Water right in the Yodo river (m³/s)

	水道用水	工業用水	農業用水	その他	計
京都府	14.08	-	24.50	2.00	40.58
大阪府	57.92	14.01	15.02	26.98	113.93
兵庫県	14.70	7.33	-	-	22.03
計	86.70	21.34	39.52	28.98	176.54

注1) 平成6年3月現在の値を少数第2位まで示した。

注2) 京都府は京都市の琵琶湖疏水取水を含む。

注3) 建設省近畿地方建設局：水利権調査書, 1994.

理由として、我が国の多くの河川流域がそうであるように上流で利用された水が再び河川に排水され、また取水するというカスケード型の水利用が行われているためである。本研究の対象区間では計5回の下水処理水が水道水として取水され供給されている。

また、水利権の内訳を用水別に見ると、水道用水49%、農業用水22%、工業用水12%及びその他が17%となっており、水道用水としての利用が約5割を占めている。次に、これを府県別に見ると大阪府が65%で最も多く、次いで京都府が23%、兵庫県が12%となっている。淀川流域では、水道用水としての利用が多く、特に下流部に位置する大阪府の取水量が最も大きくなっていることが分かる。ただし、淀川の枚方大橋より少し下流にある寝屋川市浄水場取水口より下流部で取水された水道用水や工業用水は都市内で利用された後、下水処理水として淀川本川には放流されず、直接または大阪市内の河川などを通じて全て海域に放流されている。

水道事業体のうち、水道用水の水源として宇治川、木津川、淀川及び神崎川より直接取水を行っているのは14事業体で、計23カ所から取水を行っている。23カ所の取水口すべての水利権を合計すると、約87m³/sとなり、このうち、京都府分が約14m³/s、大阪府分が約58m³/s、兵庫県分が約15m³/sとなっている。

京都府営水道は、宇治川の天ヶ瀬ダムと木津川左岸に水利権を持ち、2つの浄水場から宇治市、久御山町、城陽市、八幡市、京田辺市、精華町、木津町の各市町に水道水を供給している。大阪府営水道は、淀川の3箇所計約26m³/sの水利権を有し、3つの浄水場から府下41市町村に水道水を供給している。阪神水道企業団は、淀川右岸の3カ所に計約13m³/sの水利権を持ち、3つの浄水場を経て、神戸市、尼崎市、西宮市、芦屋市の4市に水道水を供給している。その他、京都市、大阪市など11の上水道事業体が水道水源として木津川、宇治川、淀川からの取水を行っている。

下水道事業体は流域、公共合わせて35事業体あり、約1千万人分の下水を65の下水処理場で処理してい

る。対象地域内における下水道整備率は、京都府85%、大阪府75%、兵庫県97%で、全体では81%である。このうち、淀川、宇治川、木津川及び桂川に下水処理水が流入するのは、京都府下にある9処理場のすべてと、大阪府下にある5処理場の計14処理場のみである。これ以外の処理場では淀川の利水に直接関係のない都市内河川や海域、もしくは淀川に平行する河川や淀川水系以外の河川に下水処理水を放流している。14処理場の合計放流量は、年間平均約15m³/sで、これは大阪市水道局における淀川からの取水量の82%に相当する量である。このうち、特に京都市の4処理場からの放流量約12m³/sが大きい。また京都市の処理場のうち最大規模である鳥羽処理場からの放流量は全市の約7割を占めている。一方、14処理場以外の処理場から放流される放流量は約49m³/sである。

対象となる行政体は、政令指定都市の行政区を含めて102市区町村である。このうち、地下水など淀川水系以外の水源から取水し、宇治川、木津川、桂川及び淀川に下水処理水を放流しているのは6市区町村で、また、宇治川、木津川、淀川もしくは琵琶湖疏水を水道水源として、宇治川、木津川、桂川、淀川に下水処理水を戻しているのは24市区町村である。残る72市区町村では、淀川から取水を行いながら、淀川に下水処理水を戻していない。この中には、高槻市や寝屋川市、守口市といった淀川に面した都市も含まれている。

農業用水は、我が国全体では水使用量の64%を占め主要な用途と位置付けられている。しかし、本論文の対象地域では水利権ベースでは22%と小さい割合となっている。

地下水は、地下水位や水質については定期的な観測データが存在しているが、対象地域のような広大な範囲での循環経路や賦存量の実態に関する知見は少ない。さらに、対象地域内での水道事業者の地下水利用量は約8%（1993）と小さい。

工業用水は近年、既存施設の配水能力に対する契約率が全国平均で85%程度である。施設稼働率も62%と低くなっている。対象地域における工業用水道は、大阪市や阪神地域を中心に需要者が多いが需要と供給の状況は全国とほぼ同様である。工業用水は特定の事業者を対象として送水され送水経路も限定されているため他のユーザーや用途への転用は考えにくい。

対象地域における水循環システム全体を見ると、淀川水系からの水を利用している市区町村が年々増加している。下水道では、一部の処理場において淀川への放流を、淀川左岸の寝屋川へ変更する計画が

あり、また、京都府下からの処理水を流水保全水路により本川によらずに下流域に流す計画が進行している。

(2) 大都市域における水使用実態

淀川を水源とする京都市、大阪市及び神戸市における都市の水循環システムの概要と水使用実態について説明する。京都市は水道普及率 99.6%、大阪市は同 100.0%、神戸市は同 99.9% の都市である(1997)。

各都市の淀川への依存率は、京都市と大阪市が 100% であるのに対し神戸市は阪神水道企業団を通じて約 75% を依存している状況である。取水位置は、京都市が琵琶湖疏水と宇治川の 2 箇所から、大阪市は枚方市楠葉取水口から大阪市柴島浄水場までの間 4 箇所 で取水している。神戸市は阪神水道企業団の大阪市東淀川区柴島及び大同からの取水を水源としている。各都市の浄水場の数は、京都市が蹴上浄水場、松ヶ崎浄水場、山ノ内浄水場、新山科浄水場の 4 箇所。大阪市は、柴島浄水場、庭窪浄水場、豊野浄水場の 3 箇所。神戸市は、上ヶ原浄水場、千苅浄水場、奥平野浄水場、有馬浄水場、本山浄水場、六甲山浄水場、住吉浄水場の 7 箇所である。神戸市の配水池は 122 箇所 に上る。神戸市の場合は地形的理由から配水池の数が多くなっているのが特色である。

次に 3 都市の水使用実態を家庭用水、業務用水、その他の用途別有収水量の構成比率で考察する(1997)。京都市は、家庭用水が 69.3%、業務用水が 22.3% でその他 8.4% となっている。その他とは工場用水等である。神戸市は、72.4%、14.7%、12.9% の順である。これに対し大阪市は、家庭用水が 55.7%、業務用水が 31.4%、その他が 12.9% と業務用水の割合が他都市よりも高い割合となっている。これら用水の全国平均が 70.8%、17.9%、11.3% であるから、特に大阪で業務用水の割合は高く都市活動が活発なことがわかる。有収水量ベースの原単位の大きさをみると京都市が 390 リットル、大阪市 486、神戸市 367 となっており、大阪市の原単位の高い理由が都市活動の強さに原因があると推察できる。

以上のように使用された水は下水処理場へ取り込まれる。3 都市の下水道普及率(処理区域人口/行政区域人口:1997)は、京都市 98.4%、大阪市 100.0%、神戸市 95.7% であるから、ほぼ全量が処理場へ流入する。下水処理場の数をみると、京都市が 4 箇所、大阪市が 12 箇所、神戸市は 7 箇所である。これら下水処理場からの処理水の放流先は、京都市が鴨川・桂川・宇治川で淀川本川へ繋がる河川へ放流しているのに対し、大阪市は神崎川・寝屋川などの市内河川、神戸市は鈴蘭台処理場を除いて大阪湾に直接放流している点が特色である。

2.2 都市生活者からみた水循環システムの問題点

(1) 大都市域における水辺の減少

従来の都市河川の整備は治水機能の確保が優先され、その結果として急勾配のコンクリート護岸やフラットな河床に代表されるように本来河川の有していた親水性、生物の生息場としての機能が喪失してしまった。また、流域の舗装の進展や下水道の整備により流域の保水、浸透機能が低下し、下水処理水が下流部あるいは海域へバイパス放流されることが原因で平常時の河川流量の減少を生じている。このことは河川形状の単一化と相まって降雨の時以外は水が流れない排水路のような河川を作り出した。

1973 年以降、市街地で多発する浸水問題に対処するため、流域面積 200ha 以下の河川は下水道として管理されることになり、大都市の水路や小河川は埋め立てや地下化(覆蓋化)により、多くの水辺が消えた。また、一部の流域面積 200ha 以上の河川も、市街化を進めるために不要であるという理由からその姿を消した。例えば大阪市では、長堀川が駐車場建設のために、中津川が交通整備のために埋め立てられるなどして、戦後から現在に至るまでに大阪市の水辺の約 40% が失われてしまった。

上述のように都市河川の多くは平常時は水が少ない状態であったりは覆蓋化されていたりする。このことは、都市生活者のアメニティにとって貴重な水辺空間の喪失をも招いてしまったと言える。都市の水辺を復活させることが必要であり、都市生活者にとってはアメニティ向上という意義がある。

(2) 震災時に必要となる用水の不足

阪神・淡路大震災の被災地域では、次のような問題を生じた。震災の際、まず、必要となった用水は火災に対する消火用水である。被災直後はほとんどの地域で水道が使用できなくなったため、消火栓が機能せず消火活動を十分に行うことができなかった。現場では、防火水槽、プール、河川、海などから消火用水を得ようとした。河川水と海水は消火栓が機能しなくなり防火水槽の水も尽きた後に消火用水として主に利用された。しかし、神戸市内を流れる河川の流量は偏在しており総じて少ない。河川整備は洪水を速やかに海に流すよう改修を進めており護岸が高く貯水機能も少ない。結果として消火用水の不足は大規模火災の一因となってしまった。この消火用水の確保が第 1 に重要である。

次に、避難所生活や被災した家での生活を送るのに飲料水やトイレ用水の不足が問題となった。被災者に対するアンケート調査(日本水環境学会:阪神・淡路大震災による水環境への影響と対策,1997)の結果を基に述べる。まず、被災直後は飲料水の不足に

対しては市販水（ペットボトル）を利用し、次いで復旧が進むにつれて給水車からの供給水を利用している。トイレ用水は、震災直後に自宅での生活が可能であった場合には風呂の残り湯などを利用し復旧が進むに従い給水車からの水を利用している。自宅での生活が困難である場合には避難所など自宅外のトイレを利用している。洗濯や風呂は、被災直後はほとんど行われていないが日数が経過するにつれて避難所など自宅外で行われている。自宅に井戸を保有している世帯では飲料水、トイレ用水、風呂・洗濯用水など全ての用途で震災直後から井戸を水源として利用している。このため井戸保有世帯では使用水量が非保有の世帯よりも多い。

上述のように都市生活者がどのような場面でのような水が必要かということは重要である。これらに対して水道、下水道、河川の管理者の誰が水を供給するかは生活者にとって関心事でなく、どれだけ確保できるのかが問題である。

2.3 水循環システムのモデル化

(1) 現状の水循環システムに対する仮説

現状の水循環システムは、河川、水道、下水道の管理者による個別事業の整備は前述のように進んでいる。ここでの整備の目的は、河川であれば治水・利水であり、水道であれば普及率の向上、平常時の安定供給と給水サービスの向上（おいしい水）等、下水道であれば整備の推進による環境改善等というものである。しかし、都市域の現象としての水の流れは水循環を構成しているが、それは水管理者から水循環システムとして認識されていない。このことは、都市アメニティの問題や震災時の用水不足として表出している。

(2) モデルの基本構造

都市水循環システムの基本構造は、現象としての水循環システムを表しかつ2.2で述べた問題点を記述できる枠組みでなければならない。そのためには粗くとも大都市域の水循環経路をネットワークとして一体的に記述する必要がある。これは震災リスクの軽減が、供給水量の多寡についての議論と共に循環経路について認識を持つことが重要であり減災に結びつくと考えるためである。

都市水循環システムは、水を管理する主体としての「河川」「水道」「下水道」と水を利用し都市活動や生活維持を行う「都市活動」の4つのレイヤーから構成されたと考える。各レイヤーを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表す。この理由は、階層間の水循環経路を明確化し水循環をネットワークとして捉えることを可能とするためである。この水循環システムのネットワークは、水の循環経路を記述するだけでなく“水輸送”“水質変換”及び“貯留”のいずれかの機能を有する多くの要素によって構成される。すなわち、河川であれば流路や貯水池、水道であれば水道管、浄水場、配水池など、下水道では下水管渠、下水処理場である。また、各レイヤーには、河川管理者、水道管理者、都市生活者及び下水道管理者という意志決定者が存在する。このため、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らをレイヤーと称している。大都市域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)・都市活動レイヤー(urban activity 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。

なお、農業用水と地下水については、水循環の状態（循環経路、水収支）を把握する情報を得ることが難しく、かつ都市域を対象とするため利用量のウ

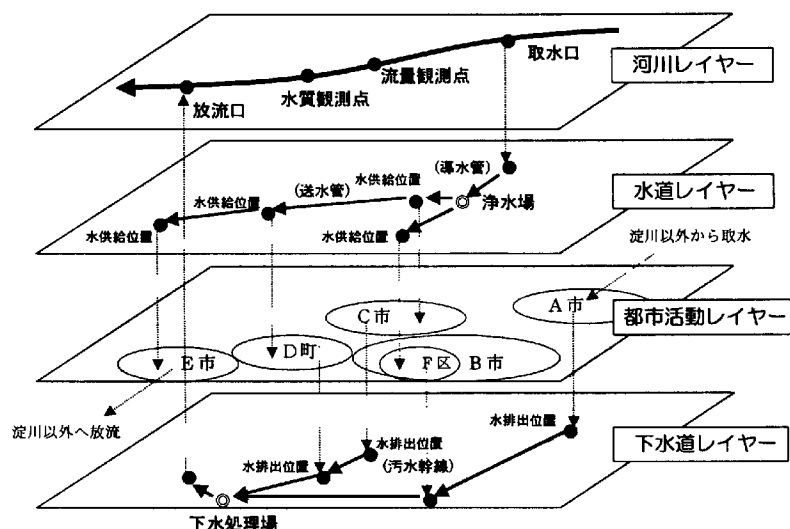


Fig. 1 A water circulation system model in urban area

エイトが低いと考えられる。このため本モデルでは相互の水循環経路や水収支を論じるレイヤー構造としての位置付けはしないこととする。以上に述べた水循環システムモデルの概念を Fig.1 に示す。同図の水循環システムは前述のように現状の水循環システムをモデル化したものである。このため、レイヤー間の水移動は経路が限定され、レイヤー内においても事業体相互の関係は構造化されていない。

この水循環モデルは、Fig.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。

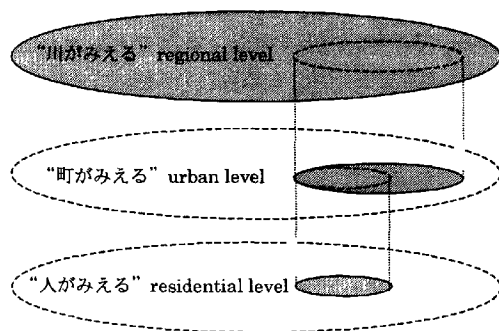


Fig.2 Hierarchy of water circulation system

震災に関係する各レベルの要素の状態量は、空間ス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、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記述される。

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大都市域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マネジメントの対象と考える場合には、たとえ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。

(3) 淀川大都市域を対象とした事例

淀川大都市域を対象とした地域レベルのモデル

化の事例を示す。各レイヤーの水循環構成要素について以下のように考える。河川レイヤーでは、淀川水系のうち、木津川、宇治川、桂川、淀川を水源河川として考える。また、取水された水道用水が人工系水循環を経由して再び下水処理水の形で河川に放流されている場合、その河川について下水処理場の放流口から海域に至るまでの区間も対象とする。

水道レイヤーでは、河川レイヤーで取水された水が、浄水場を経て供給先である都市活動レイヤーに届けられるまでの過程についてモデル化を行う。水道レイヤーをモデル化するに際しての考え方は次のとおりである。①河川レイヤーでモデル化した水源河川から水を得ている水道事業体の水道施設を対象とする。②水道ネットワークについては河川から取水した水が、浄水場を経て、供給先である都市活動レイヤーに届いていることがわかる程度の主要管路（概ね送水レベル）を対象にモデル化する。市区町村内の水循環については本レベルでは議論しない。ただし、政令指定都市で送水管に限定すると全ての行政区まで管が届かない。その場合は行政区に最も重要と思われる幹線配水管レベルまでを対象とする。③政令指定都市以外の上水道事業体が水源河川から水を得て自市に供給している場合は、取水した時点でその市に淀川の水が届いていると見なし、管路については捨象する。なお、上水道事業体から隣接市町村への分水がある場合も管路は捨象する。④琵琶湖疏水は、人工構造物であり震災時に崩壊の恐れもあることから河川レイヤーでは扱わずに導水路として水道レイヤーの中で扱う。ただし、琵琶湖疏水の起点である大津市は対象地域外となるので、疏水が京都市域に入る地点から扱う。よって、データベースにおける琵琶湖疏水の取水位置は、琵琶湖ではなく疏水が京都市域に入る地点である。

都市活動レイヤーでは、末端の事業者や水利用者を捉えるのではなく、行政体を一つの都市活動の場としてモデル化する。対象となる行政体は、水源河川からの水道水の供給を受けている市町村であるが、政令指定都市については、政令指定都市とそれ以外の行政体との人口的大きさを考慮して行政区単位で捉える。また、水供給地域以外の行政体においても、対象地域内の宇治川、木津川、桂川、淀川に下水処理水を放流している都市については、都市活動レイヤーの中に含める。

下水道レイヤーでは、都市活動レイヤーから排出された下水（汚水）が処理場に集められて河川レイヤーまたは海域に放流されるまでの過程についてモデル化を行う。下水道レイヤーのモデル化の考え方を次に記す。①対象となるのは、水源河川である宇

治川、木津川、桂川、淀川に下水処理水を放流している下水道事業者の下水道施設、または、河川レイヤーから水道用水の供給を受けている市区町村からの下水を処理している下水道事業者の下水道施設である。②都市活動レイヤーから排出された下水が処理場に集められ、河川レイヤーに放流されていることがわかる程度の空間レベルとしてモデル化する。③市区町村内の水循環については議論しないため、下水道管は原則として市区町村を跨ぐ幹線レベルとする（幹線レベルとは、流域面積の大きさで定義されるいわゆる幹線とは異なる）。④河川に隣接する政令指定都市以外の公共下水道事業者が自市内から集めた下水を処理して河川レイヤーに放流している場合は、その市の中だけでの水循環となるため管路については捨象する。また隣接市町村からの下水を受け入れている公共下水道事業者についてもその管路を捨象する。

以上より各レイヤー間の接点は、河川と水道が「取水口」、水道と都市活動が「水供給位置」、都市活動と下水道が「水排出位置」、下水道と河川が「放流口」になる。

3. 水循環システムの再構成

3.1 震災ハザードと水管理者の課題

水循環システムの再構成を考えるに当たっては前述の都市生活者の視点からの問題点と共に水循環システムを構成する、河川、水道、下水道の管理者自身が抱える以下のような課題について考慮する必要がある。

(1) 震災ハザードの存在

淀川流域は近畿三角地域と呼ばれる活断層の多数存在する地域に位置している。震災に対する水循環システムを診断するためには、流域レベルの広範な地域を対象とした震度分布推定が必要である。阪神・淡路大震災の後、多くの自治体は、活断層による地震の影響を改めて検討するために防災計画の見直しのための地震被害想定調査を行っている。しかし、これら見直しの内容は、計画を作成する自治体の行政区域内だけを対象とした震度推定結果に基づいており、周辺までを含めた震度の推定は行われていない。また、震度の推定方法や精度も各自治体で異なっている。この点を考慮し清水らは大都市域水循環システムの診断を目的として、活断層による地震の震度推定を行っている。この結果、6つの活断層系（花折断層・西山断層・生駒断層・有馬高槻断層・上町断層・六甲断層）による地震が淀川流域内の水循環システムの施設に影響を及ぼすことが明ら

かとなっている。

(2) 水管理者の課題

① 震災時の水循環システムへの影響

水循環システムへの影響について阪本らの研究を以下に述べる。前述の震災ハザードで震度7の区域に水循環システムの施設が立地している場合には、その施設の機能が停止すると仮定し、その影響について考察している。まず、花折断層系により京都市内の全ての浄水場と水源の琵琶湖疏水が被災する。また、西山断層系により、大阪市の豊野系統の取水施設、導水管が被災する。さらに、有馬高槻断層系により、導水管が被災するため大阪市の豊野浄水場も機能が停止し、生駒断層系により、大阪府営水道の7割以上の処理能力を持つ村野浄水場が被災する。大阪府は浄水場の立地が北部に偏っているため、給水区域が分断され、大阪府南部では施設被害は少ないが、水道水が供給されなくなる間接被害が起きる。上町断層系により、柴島浄水場が被災し、大阪市の浄水能力は大きく低下し、臨海部では間接被害が発生する。神戸市や阪神水道企業団でも取水施設や導水管が被災するため、間接被害が発生する。

下水道施設については、花折断層系により、京都市内の鳥羽処理場、吉祥院処理場が被災し、西山断層系により、洛南浄化センター、洛西浄化センターなど下水処理場の集中する淀川の三川合流地区が被災する。この付近は地盤が軟弱であり危険度も高いと推察される。有馬高槻断層系により京都府南部から兵庫県にかけて多くの施設の被災が想定される。木津川・桂川・宇治川の三川合流点から枚方・高槻付近は3つの活断層の影響を受ける危険な地域であり、ここにも渇下水処理場が立地している。

上流部の下水処理場が被災し、施設から未処理汚水が河川に流出する事態を想定すると、下流部の利水に一定期間、深刻な影響を及ぼすことが予想される。また、下水幹線の被災は、それが合流管渠の場合、管渠の閉塞により雨水吐から汚水が溢水して、河川に流出することが考えられる。やはり下流の水道水の取水に対して影響を及ぼすと考えられる。

活断層による地震を想定した場合、対象地域内の多くの都市では水循環システムが影響を受けることが明らかである。水管理者は、震災ハザードに対する対策を講じる必要がある。

② 震災時の水道水源汚染

震災時を想定した時、その影響は①で述べた水循環システムを構成する施設に限らない。有害物質を取り扱う工場や廃棄物処分場などからの有害物質の水域への流出が考えられる。その影響は、直接の被害対象として人や生態系が考えられ、間接被害とし

て水質悪化による利水障害が挙げられる。水循環システムを考える場合には、この利水障害は重要な問題である。水供給施設への影響が無くとも水源である淀川が汚染されることは水道事業者にとって致命的な事態である。以下この水源汚染について中瀬らの研究を述べる。汚染発生源として想定する都市活動施設は、下水処理場(分流式、合流式)、し尿処理場、工場(化学工業、金属製品製造業、一般機械製品製造業、鉄鋼業)、クリーニング店(代理店を除く)、一般廃棄物最終処分場及び産業廃棄物最終処分場とする。これら施設の配置と震災ハザードマップをGISを用いて重ね合わせ、さらに国土地理院作成の地形図を基にして表流水(汚染)の流れを推定する。この結果、京都府内では破壊される施設自体は少ないが汚染が本川に流入する。下流域に大阪府・大阪市などの水道取水口があることを考えるとその影響は大きい。また、大阪府の淀川左岸及び右岸の地域も被害を受ける地域である。特に、大阪府淀川左岸は、東大阪市に代表されるように工場が多く、し尿処理場や下水処理場も密集しているため、震災時にこれら都市から有害物質が流出することを想定すると周辺地域の生活や下流域に重大な影響を与えることが容易に想像できる。

さらに、淀川本川に位置する14取水口を対象に震災想定時に上流から受ける影響を汚染ポテンシャルと水利権量の2点から診断する。汚染ポテンシャルとは、6断層系により各取水口が影響を受ける都市活動施設(廃棄物処分場、工場等の有害物質を排出する恐れのある施設)の合計数である。これより、汚染ポテンシャルのレベルから取水口が流入河川により3つのグループに分けられる。また、最も重大な影響を受けるのは磯島取水口(大阪府)である。下流の取水口への影響という観点からは京都府を直撃する花折と西山断層系が重要である。

以上より、上流部に位置する工場や産業廃棄物処分場などが被災することにより下流への水道取水への影響が重大であることがわかる。水管理者は、水供給施設への直接被害だけでなく、水源汚染をも考慮した対策が必要である。

③水道施設(浄水場)の稼働率の低下

近年、水資源開発の計画時に想定した水需要が伸び悩んでいる。水道事業体における施設の年間平均稼働率(一日平均給水量/施設能力)は、淀川を水源とする主要3都市でみると京都市が64.1%、大阪市が62.9%、神戸市が57.5%となっている(1997)。最大稼働率(一日最大給水量/施設能力)でも、京都市が80.6%、大阪市が75.9%、神戸市が66.3%である(同年)。水利権を有しかつ浄水施設の能力が

有るにもかかわらず利用されない状態は水道経営にも影響をもたらす。水道管理者にとってこの点は課題である。震災を想定した時、このような水循環システムにおける水質変換機能を有効に利用し、被災した他都市への水供給を図ることが考えられる。

3.2 再構成のコンセプト

以上の考察を踏まえて大都市域水循環システムを再構成するコンセプトを以下のように考える。

(1) 平常時における大都市域の水辺創成

都市河川の多くは平常時に流量が減少していたり、覆蓋化されていることが多い。このような喪失した水辺を大都市域水循環システムという枠組みの中で創成させることが必要である。都市生活者にとっては都市域における貴重なアメニティ向上という意義がある。このための水源として下水処理水を利用し都市に循環させることが考えられる。

(2) 震災時における都市活動と都市生活の維持を可能とする水循環システム

一方、このような大都市域の水辺は震災時に重要な役目を果たす。阪神・淡路大震災では、水道が断水したため、消火栓を利用することができず、消火用水を十分に確保できなかった。必要となる用水は水道水でなくとも河川水または貯留水(水道・下水処理水)でも利用できれば構わない。このような場合に都市内の水辺を利用することが有効であろう。飲料水は、水道水か貯留水(水道)に限られるが、トイレ用水は水道水でなくとも下水処理水や河川水でも構わない。飲料水として有効に水道水を利用するためにはトイレ用水を水道水以外で代替えることも考えられる。また、都市域の事業所の多い地区では家庭用水と共に事業所で使用する業務用水を確保することが都市生活者にとって重要となるが、使用する水量の代替えについては前述の内容と同様のことがいえる。以上の用水は生活維持に必要であるが震災直後からそれら用水が必要とされる時期が推移している点が特色である。生活者の視点から必要な場面に必要な用水を各階層から集約できる水循環システムとしておく必要がある。

大都市域における水辺の創成は、平常時の憩いの場、安らぎの場としてのアメニティの向上を図るだけでなく、地震時にその水を消火用水、トイレ用水、雑用水等として利用することができ被害の軽減に有効である。

(3) 必要な水を確保するために大都市域の水循環システムを一体的に管理

活断層による震災ハザードの空間的広がり、市町村単位を原則とする水道事業者の管理区域(給水

区域)の大きさを遙かに超えている。このためひとたび地震が起これば被害は全市的で広範囲に及び単独の事業者での対応は困難であろう。また、各事業者は何れかの活断層による震災ハザードを有しており、お互いが地震によって被災する可能性のあることを知っている。このため震災時を想定し互助の認識を共有することは可能なはずである。このことは、事業者が広域的に防災・減災計画のために提携し得ることを示唆している。この点を前提とすることにより、複数の都市から構成される大都市域における水循環システムの一体的な管理を指向することができる。河川・水道・下水道の事業者は震災時を想定して協力して対応する必要がある。

3.3 モデルの再構成

都市の水使用実態と供給特性を踏まえ、以上に述べたコンセプトに基づく水循環システムの再構成を考える。このための新たな構成要素をレイヤー毎に示せば以下のとおりである。ただし、施設の耐震化は震災対策として重要であるが、事業体内の対策であり、共通するため、ここでは輸送・貯留及び水質変換に関する対策だけを示す。

(1) 水道レイヤー

① 水道水の施設内貯留

水道水を水道施設内に貯留し、震災時に主に生活用水(飲料水等)として供給する。

② 水道連絡管による水融通

事業体間を耐震化された水道管で連絡し、相互の事業体が水量不足を生じたときに施設能力に余裕がある(浄水場稼働率の低い)事業体が水融通を行う。ただし、震災を想定した時、給水区域内の水道管が被災し連絡管まで水がこないことが考えられる。このため、水道連絡管を想定するために以下の前提を設ける。水道事業者は阪神・淡路大震災の教訓を踏まえて従来の配水ブロック化計画においてその幹線管路の耐震化を推進している。水道連絡管は、このような整備がなされていることを前提として、耐震化された幹線管路へ接続することを考えるものとする。

③ 地下水等の自己水の利用

地下水や淀川以外の河川等の新たな水源を利用する。

(2) 下水道レイヤー

① 下水処理水の利用

高度処理した下水処理水を都市内に循環させ、平常時は都市生活者のための環境創成用水として利用し、失われた水辺の創成を図る。震災時には、消火用水、生活用水(トイレ用水・洗浄用水等)として

利用する。都市内に送水された処理水は、どのように利用されたかにより再び下水処理場に流入する場合もあるが(生活用水として利用)、そのまま河川へ流出する場合もある(流末での河川放流や消火用水として利用された場合)。すなわち、環境創成用水として送水された時点で下水道管理者の手を放れ都市生活者の水になっていると解釈できる。したがって、環境創成用水は都市活動レイヤーに位置付けられる水である。

② 下水処理水の都市内貯留

下水処理水を都市内の公園地下や公共施設地下等に貯留し、震災時に消火用水、生活用水(トイレ用水・洗浄用水等)として利用する。

(3) 河川レイヤー

① 工業用水の転用及び施設の利用

用水が不足した際に工業用水を転用したり、水道の取水施設や導水管路が被災した時に工業用水の取水施設を利用して水道用水の取水を行うことが考えられる。後者の事例として、阪神・淡路大震災の際には神戸市が淀川水系神崎川に位置する工業用水道の取水施設から緊急取水を許可されている。

② 農業用水の転用及び施設の利用

震災時に、農業用水の転用や水道の取水施設が影響を受けたとき農業用水の取水施設を利用して取水し、その水を浄水場へ導水することが考えられる。代掻き期など農業用水を多量に使用する時期を除いて、このような利用を考えることができる。

以上が新たな水循環システムを構成する要素である。再構成された水循環システムの概念図を Fig.2 に示す。震災時には、都市生活者の必要とする用水を確保するために各レイヤーからの水供給は都市活動レイヤーに集約される。ただし、構成要素がどの程度の機能を分担するかは状況によって異なる。この点については後述する。

Fig.1 に示した現状の水循環システムとの違いは、各レイヤー内及びレイヤー間の事業者が提携により水を相互に融通させていること、このため、震災時を想定してもシステム内の水移動が活発となっており、複数の系統から柔軟に都市活動レイヤーに水を集約できる構造となっている点である。

3.4 震災時を想定した水供給シナリオ

水循環システムの新しい構成要素は震災時に全て同時に機能する訳ではない。各々の構成要素が機能しない場面が想定されるためである。例えば、前述のように地震による水源汚染や地下水汚染が予想される。淀川の水源汚染は、流下時間を考慮すれば数日以内で終息することが考えられるが、その間は

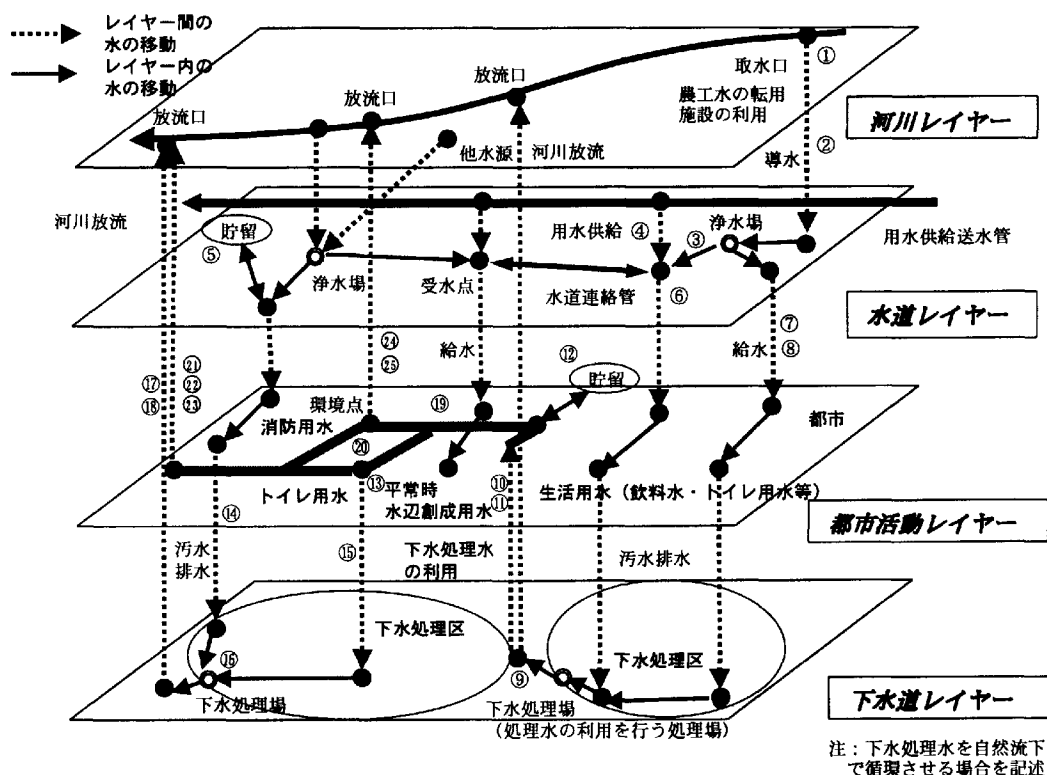


Fig.3 A reconstructed water circulation system in urban area

Table 2 Scenarios of damage, water utility and countermeasures against earthquake disaster

事象分類	想定する要因		地震発生後の時間経過 ^(注)		
			直後 (2-3 日)	短期 (7 日程度)	中期～長期
被害	直接被害	施設被害	○	○	○
	間接被害	河川水汚染 (水源)	○		
		地下水汚染 (水源)			○
必要用水 ^(注)	都市活動レイヤー (事業所・都市生活者)	消火用水	○		
		飲料水	○	○	○
		トイレ用水		○	○
	水道レイヤー	水道復旧用水		○	
対策	河川レイヤー	農工水の転用・施設利用		○	○
	水道レイヤー	施設内貯留 (上水)	○		
		水道連絡管利用		○	○
		他水源の利用		○	○
	都市活動レイヤー	都市内貯留 (処理水)	○		
	下水道レイヤー	下水処理水利用	○	○	○

注：「阪神・淡路大震災による水環境への影響と対策」(日本水環境学会・1997)等を参考に設定。

水源を利用できない。また、地下水汚染は、利水障害の表出までに時間がかかると考えられる。また、都市生活者が必要とする用水も被災直後から前述のように内容が推移することが考えられる。

これらの点を考慮し、被害内容と必要用水及びそれらに対する対策を地震発生後の時間経過に沿って整理すれば Table2 に示すシナリオを想定することができる。表中の○印は各場面にて特に重要となる項目である。これらの想定内容は、震災時の大都市域水循環システムを再構成する時の基本的な設計図と

なるものである。しかし、他の大都市域でこれと同様な想定が当てはまるわけではなく、例えば水源河川が複数であるか否か、取排水が上流からカスケード的であるかなどによって震災に対する対策も変わってくる。Table 2 は、あくまで前述した淀川の現状、震災ハザードの水循環システムへの影響、都市での水使用実態を踏まえて想定したものである。都市生活者への影響を軽減するには、水道システム、下水道システム及び河川システムの全ての対策が関係する。これらの対策により、いつどのように都市生活

者に水供給するかが重要である。

このために、まず、表中の被害内容について知るために震災時を想定した水供給施設への影響を分析する必要がある。震災により水道水源である河川や地下水も有害物質を扱う工場などの被災により水域を汚染する可能性があるためこの点についても分析を行う必要がある。これらの分析により震災想定時の通常の水供給系統からの供給可能量と都市活動、都市生活者にとっての震災時必要水量を算出する。

次に必要水量を確保するための各レイヤーの対策について述べる。水道事業者が可能な行動は、施設の耐震化による水供給ルート確保、水道水の施設内貯留水の確保、水道連絡管による他の事業者からの水融通及び地下水等の淀川以外の自己水の利用である。これらによってどこまで水供給すべきかについては、下水道事業者からの下水処理水利用や処理水の都市貯留水の利用可能量によっても変わってくる。さらに、河川管理者との協議による農業用水や工業用水の転用・取水施設の利用という対策も考えられる。

したがって、水道事業者の対策を検討する際も他の事業者の対策を考慮しておく必要がある。下水道事業者の立場から検討する場合も同様であり、水道事業者の対策、河川管理者の対策を考慮しておく必要がある。

3.5 再構成した水循環システムの定式化

本節では、Fig.2 で表した大都市域水循環システムの再構成を検討するために水循環システムの定式化の方法について述べる。定式化は各レイヤー内にノードを定義することにより、ノードの対応関係として水の輸送を表現することとする。具体的には、河川レイヤーで取水口と放流口、水道レイヤーで浄水場、下水道レイヤーで下水処理場、都市活動レイヤーで水供給点(市町村)と都市内の環境点を考える。環境点とは、水辺創成のために都市に送られてきた下水処理水を消火用水や生活用水として利用するノードである。ただし、水道の施設内貯留や下水処理水の都市内貯留については、期間内に貯留水が利用されることを仮定し、単位を $\text{m}^3/\text{日}$ として定式化する。以下では、下水処理水を大都市域に循環利用(水辺創成)する場合を対象として定式化の例を示す。

(1) 大都市域水循環システムの定式化

次に示す各ノードの対応関係としてレイヤー間の水量的な連続関係を表現する。以下で丸括弧の番号で示した項目の大都市域水循環システムでの位置付けを Fig.2 の中に同じ番号で示した。

- ・河川の取水口 i

($i=1, \dots, a$: a は取水口の数)

- ・水道事業者の浄水場 j

($j=1, \dots, b$: b は浄水場の数)

- ・市町村 k

($k=1, \dots, c$: c は市町村の数)

- ・下水処理場 l

($l=1, \dots, d$: d は下水処理場の数)

- ・放流口 m

($m=1, \dots, e$: e は放流口の数)

- ・環境点 n

($n=1, \dots, f$: f は環境点の数)

- (a) 河川取水位置からの取水量

- ① 河川取水位置からの取水量を表すベクトルを q^1 とする。

$$q^1 = (q_1^1 \quad \dots \quad q_i^1 \quad \dots \quad q_a^1)$$

q_i^1 : 河川取水口 i からの取水量

ただし、

$$q_i^1 \leq q_i^r \quad q_i^r: \text{取水口 } i \text{ の水利権量}$$

- (b) 水道事業者の浄水場の浄水量

- ② 河川取水量を水道浄水場に導水する比率を表すマトリクスを M^1 とする。

$$M^1 = \begin{pmatrix} M_{11}^1 & \dots & \dots & \dots & M_{1b}^1 \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & & M_{ij}^1 & & \vdots \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ M_{a1}^1 & \dots & \dots & \dots & M_{ab}^1 \end{pmatrix}$$

M_{ij}^1 : 取水口での取水量の浄水場 j への導水比率。

- ③ 浄水場の浄水量を表すベクトルを q^2 とする。

$$q^2 = q^1 M^1 = (q_1^2 \quad \dots \quad q_j^2 \quad \dots \quad q_b^2) \quad (1)$$

- (c) 用水供給事業者からの受水量

- ④ 用水供給事業者が浄水場に送る送水量を表すベクトルを q^3 とする。

$$q^3 = (q_1^3 \quad \dots \quad q_j^3 \quad \dots \quad q_c^3)$$

q_j^3 : 浄水場へ送られる用水供給量

- (d) 浄水場のからの全給水量

- ⑤ 水道施設内に貯留されている浄水量を表すベクトルを q^a とする。

$$q^a = (q_1^a \quad \dots \quad q_j^a \quad \dots \quad q_b^a)$$

q_j^a : 水道施設 j 内に貯留されている浄水量

- ⑥ 浄水場の全給水量を表すベクトルを q^4 とする。

$$q^4 = q^2 + q^3 + q^a = (q_1^4 \quad \dots \quad q_j^4 \quad \dots \quad q_b^4) \quad (2)$$

q_j^4 : 浄水場 j の持つ全浄水量

- (e) 浄水場から市町村へ送られる浄水量

- ⑦ 浄水場の持つ浄水を市町村に配分する比率を表すマトリクスを M^2 とする。

$$M^2 = \begin{pmatrix} M_{11}^2 & \cdots & \cdots & \cdots & M_{1c}^2 \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & & M_{jk}^2 & & \vdots \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{b1}^2 & \cdots & \cdots & \cdots & M_{bc}^2 \end{pmatrix}$$

M_{jk}^2 : 浄水場 j の浄水を市町村 k へ配分する比率

⑧ 浄水場 j から市町村 k へ送られる浄水量を表すベクトルを q^5 とする。

$$q^5 = q^4 M^2 = (q_1^5 \quad \cdots \quad q_k^5 \quad \cdots \quad q_c^5) \quad (3)$$

q_k^5 : 市町村 k へ送られる浄水量

(f) 下水処理場から市町村へ配分する下水処理水量

⑨ 下水処理場の下水処理水の利用率を表すマトリクスを X^a とする。

$$X^a = \begin{pmatrix} X_1^a & & & 0 \\ & \ddots & & \\ & & X_l^a & \\ 0 & & & X_d^a \end{pmatrix} \quad 0 \leq X_l^a \leq 1$$

X_l^a : 下水処理場 l の下水処理水の利用率

⑩ 下水処理場の持つ下水処理水を市町村に配分する比率を表すマトリクスを X^b とする。

$$X^b = \begin{pmatrix} X_{11}^b & \cdots & \cdots & \cdots & X_{1c}^b \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & & X_{lk}^b & & \vdots \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{ld}^b & \cdots & \cdots & \cdots & X_{dc}^b \end{pmatrix} \quad \sum_{k=1}^c X_{lk}^b = 1$$

X_{lk}^b : 下水処理場 l で処理された下水処理水の市町村 k への配分比率

⑪ 下水処理場から市町村へ送る下水処理水量を表すベクトルを q^6 とする。

$$q^6 = q^7 X^a X^b = (q_1^6 \quad \cdots \quad q_k^6 \quad \cdots \quad q_c^6) \quad (4)$$

q_k^6 : 市町村 k へ送られる下水処理水量

$$q^7 = (q_1^7 \quad \cdots \quad q_l^7 \quad \cdots \quad q_d^7)$$

q_l^7 : 下水処理場 l の処理水量を表すベクトル

(g) 市町村に貯留されている浄水の貯留量

⑫ 市町村の環境点に貯留されている処理水量を表すベクトルを q^8 とする。

$$q^8 = (q_1^8 \quad \cdots \quad q_n^8 \quad \cdots \quad q_f^8)$$

q_n^8 : 環境点 n に貯留されている下水処理水量

(h) 下水処理場に流入してくる下水水量

⑬ 環境点に送られてきた下水処理水の生活用水への利用率を表すマトリクスを X^y とする。

$$X^y = \begin{pmatrix} X_1^y & & & 0 \\ & \ddots & & \\ & & X_n^y & \\ 0 & & & X_f^y \end{pmatrix} \quad 0 \leq X_n^y \leq 1$$

X_n^y : 環境点 n における下水処理水の利用率

⑭ 市町村で利用した水道水の下水処理場への流入比率を表すマトリクスを M^3 とする。

$$M^3 = \begin{pmatrix} M_{11}^3 & \cdots & \cdots & \cdots & M_{1d}^3 \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & & M_{kl}^3 & & \vdots \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{c1}^3 & \cdots & \cdots & \cdots & M_{cd}^3 \end{pmatrix}$$

M_{kl}^3 : 市区町村 k で使用した水道水の下水処理場 l への流入比率

⑮ 環境点で生活用水として利用した下水処理水の処理場への流入比率を表すマトリクスを M^4 とする。

$$M^4 = \begin{pmatrix} M_{11}^4 & \cdots & \cdots & \cdots & M_{1d}^4 \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & & M_{nl}^4 & & \vdots \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{f1}^4 & \cdots & \cdots & \cdots & M_{fd}^4 \end{pmatrix}$$

M_{nl}^4 : 環境点 n で使用した下水処理水の下水処理場 l への流入比率

⑯ 下水処理場に流入する下水水量（処理水量と等しいと考える）を表すベクトルを q^7 とする。

$$q^7 = q^5 M^3 + (q^9 + q^8) X^y M^4 = (q_1^7 \quad \cdots \quad q_l^7 \quad \cdots \quad q_d^7) \quad (5)$$

q_l^7 : 下水処理場 l の下水処理量

$$q^9 = (q_1^9 \quad \cdots \quad q_n^9 \quad \cdots \quad q_f^9)$$

q_n^9 : 環境点 n へ送られる下水処理水量

(i) 下水処理場から河川へ放流される下水処理水量

⑰ 下水処理場から河川へ放流される処理水量の放流口への放流比率を表すマトリクスを M^5 とする。

$$M^5 = \begin{pmatrix} M_{11}^5 & \cdots & \cdots & \cdots & M_{1e}^5 \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & & M_{lm}^5 & & \vdots \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{d1}^5 & \cdots & \cdots & \cdots & M_{de}^5 \end{pmatrix}$$

M_{lm}^5 : 下水処理場 l への下水処理水の河川の放流口 m への放流割合

⑱ 下水処理場から河川の放流口へ放流される下水処理水量を表すベクトルを q^8 とする。

$$q^8 = [q^7 (E - X^a)] M^5 = (q_1^8 \quad \cdots \quad q_m^8 \quad \cdots \quad q_e^8) \quad (6)$$

q_m^8 : 河川放流口 m から放流される下水処理量

(j) 市町村から環境点へ送られる下水処理水

⑲ 市町村に送られてきた下水処理水の環境点への配分比率を表すマトリクスを M^6 とする。

$$M^6 = \begin{pmatrix} M_{11}^6 & \cdots & \cdots & \cdots & M_{1f}^6 \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & & M_{kn}^6 & & \vdots \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{c1}^6 & \cdots & \cdots & \cdots & M_{cf}^6 \end{pmatrix}$$

M_{kn}^6 : 市区町村 k に送られてきた下水処理水の環境点 n への配分比率

②①市町村から環境点へ送られる下水処理水量を表すベクトルを q^9 とする。

$$q^9 = q^6 M^6 = (q_1^9 \quad \dots \quad q_n^9 \quad \dots \quad q_f^9) \quad (7)$$

q_n^9 : 環境点 n へ送られる下水処理水量

(k) 環境点から河川へ放流される下水処理水量

②②環境点に送られてくる下水処理水の河川への放流割合を表すマトリクスを X^δ とする。

$$X^\delta = \begin{pmatrix} X_1^\delta & & & 0 \\ & \ddots & & \\ & & X_n^\delta & \\ 0 & & & X_f^\delta \end{pmatrix} \quad 0 \leq X_n^\delta \leq 1 - X_n^\gamma$$

X_n^δ : 環境点 n へ送られてきた下水処理水の河川への放流比率

②③環境点に送られてきた下水処理水の河川への直接放流比率を表すマトリクスを M^7 とする。

$$M^7 = \begin{pmatrix} M_{11}^7 & \dots & \dots & \dots & M_{1e}^7 \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & & M_{nm}^6 & & \vdots \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ M_{f1}^7 & \dots & \dots & \dots & M_{fe}^7 \end{pmatrix}$$

M_{nm}^7 : 環境点 n へ送られてきた下水処理水の河川の放流口 m への直接放流比率

②④環境点から河川へ直接放流される下水処理水量を表すベクトルを q^{10} とする。

$$q^{10} = (q^9 + q^6) X^\delta M^7 = (q_1^{10} \quad \dots \quad q_m^{10} \quad \dots \quad q_e^{10}) \quad (8)$$

q_m^{10} : 環境点から放流口 m への直接放流量

(1) 消火用水の河川への流出量

②⑤消火用水として使用した処理水の河川放流口への間接流出比率を表すマトリクスを M^8 とする。

$$M^8 = \begin{pmatrix} M_{11}^8 & \dots & \dots & \dots & M_{1e}^8 \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & & M_{nm}^8 & & \vdots \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ M_{f1}^8 & \dots & \dots & \dots & M_{fe}^8 \end{pmatrix}$$

M_{nm}^8 : 環境点 n からの放流口 m への間接流出比率

②⑥消火用水の河川への間接流出水量を表すベクトルを q^{11} とする。

$$q^{11} = (q^9 + q^6) \{E - X^\gamma - X^\delta\} M^8 = (q_1^{11} \quad \dots \quad q_m^{11} \quad \dots \quad q_e^{11}) \quad (9)$$

q_m^{11} : 消火用水の放流口 m への間接流出量

(2) 連続の式

ここでは大都市域水循環システムの水の流れを記述する。ただし、貯留水を利用する場合とする。

(a) 河川レイヤーへの流入と流出

下水処理場から河川に放流される放流量 q^8 、環境点から河川に直接放流される放流量 q^{10} および消火用水の使用後の河川への間接流出量 q^{11} が河川レイヤーに流入するが、この水量は、水道施設内の浄水貯留量 q^a 、環境点の処理水貯留量 q^b 、河川の取水口から取水した水量 q^1 の和に等しい。

$$\sum_{m=1}^e q_m^8 + \sum_{m=1}^e q_m^{10} + \sum_{m=1}^e q_m^{11} = \sum_{i=1}^a q_i^1 + \sum_{j=1}^b q_j^2 + \sum_{n=1}^f q_n^3 \quad (10)$$

(b) 水道レイヤーへの流入と流出

全浄水量 q^4 と浄水場から市町村へ送られる浄水量 q^5 は等しい。

$$\sum_{j=1}^b q_j^4 = \sum_{k=1}^c q_k^5 \quad (11)$$

(c) 都市活動レイヤーへの流入と流出

浄水場から送られてくる浄水量 q^5 、下水処理場から送られてくる下水処理水量 q^6 及び環境点の処理水貯留量 q^b が都市活動レイヤーに存在し、これらは市町村で利用された浄水と環境点で生活用水として利用された処理水が下水処理場へ流入する量 q^7 、環境点から直接河川に放流される処理水量 q^{10} 、及び環境点で消火用水として使われて河川へ間接流出する水量 q^{11} の和と等しい。

$$\sum_{k=1}^c q_k^5 + \sum_{k=1}^c q_k^6 + \sum_{n=1}^f q_n^b = \sum_{i=1}^d q_i^7 + \sum_{m=1}^e q_m^{10} + \sum_{m=1}^e q_m^{11} \quad (12)$$

(d) 下水道レイヤーへの流入と流出

下水処理場に流入してくる下水水量 q^7 は、下水処理場が河川に放流する下水処理水量 q^8 と市町村に送る下水処理水量 q^6 の和と等しい。

$$\sum_{i=1}^d q_i^7 = \sum_{m=1}^e q_m^8 + \sum_{k=1}^c q_k^6 \quad (13)$$

(e) 河川流量の連続条件

上流の流量基準点 R から下流の $R+1$ の間にある取排水を考え、 $q^1 q^8 q^{10} q^{11}$ を、取水口 i と放流口 m における取排水量とすると次式が成立する。

$$q^{R+1} = q^R - \sum_{i=1}^a q_i^1 + \sum_{m=1}^e q_m^8 + \sum_{m=1}^e q_m^{10} + \sum_{m=1}^e q_m^{11} \quad (14)$$

q^R : 河川の流量基準点 R での流量

(f) 下水処理水の循環の記述

次式で表される q_k^6 を用いて下水処理水の水循環がどのように定式化されるかを説明する。

$$q^6 = \left\{ (q^1 M^1 + q^3 + q^a) M^2 M^3 + (q^6 M^6 + q^b) X^\gamma M^4 \right\} X^a X^b \quad (15)$$

同式は、決定変数 X^a 、 X^b 、 X^γ が掛け合わされた非線形形式となっている。また、 q^6 が両辺に現れてお

り処理水が循環することが表現されている。右辺の第一項は都市活動レイヤーで使用された水が処理場に流入することを示し、第二項は都市内に水辺創成のために循環していた処理水及び貯留水が再び処理場に流入してくることを示している。

水循環システムを定式化した、これはまだノードとノードを対応付けて輸送を表現したに過ぎない。輸送の信頼性やノードの位置関係を評価するためにはノード間の距離を定式化し、大都市域水循環システムをネットワークとして表現する必要がある。

3.6 水循環システムの統合

ここで、水道事業者が連絡管によって広域的な提携を図る場合と、下水道事業者が下水処理水を利用した水辺創成という広域的な水循環を図る場合の条件の相違について確認しておこう。水道の場合には何れの事業者と連絡する場合も圧力管によるため事業費は問題であるが、連絡そのものは何れとも可能である。要は連絡管により水道ネットワークを構成した時に都市生活者の用水の確保の観点から提携の意義が高いか否かである。これに対して下水処理水を利用する場合は、下水処理場が供給する相手は他の下水処理場ではなく、都市活動レイヤーの都市生活者である。送水する方法は水路を通じて水を循環させる。また、自然流下を原則とするならば（ポンプ圧送も不可能ではないがコスト面から現実的でないとする）、自ずと供給可能区域は限定される。したがって問題は、下水処理場が他の都市へ処理水を供給するかどうかではなく、可能な都市に対してどのような水量配分をすることが被災及び都市アメニティの観点から有効かということである。このように前者は提携の可能性について、後者は処理水の配分についての分析が重要である。これら各レイヤーでの分析結果を踏まえて河川レイヤーを含めた大都市域水循環システムの統合のための分析が必要である。以上のように水道レイヤーと下水道レイヤーでの分析のためのアプローチは異なる。以下にこの点について述べる。

(1) 水道レイヤー

水道事業者の可能な水供給はどの程度かについて分析する。想定するシナリオは Table2 に示したとおりである。各場面により震災により想定される被害（水供給施設への被害・河川汚染・地下水汚染）、必要用水の種類（消火用水・飲料水・トイレ用水）は異なる。これら被害は水循環システムのネットワークを踏まえて評価される。次に各レイヤーから対応可能な対策は、水道が施設内貯留（上水）・連絡管・他水源利用、下水道が下水処理水利用・都市内貯留

（処理水）、河川が農業用水・工業用水の水利施設利用である。水道システム内で対応可能な対策によって都市相互が提携することにより必要水量をどの程度確保できるかについて分析する。ここでは下水道と河川からの水供給は無いと仮定される。分析の際の前提として協力する事業者の間にはどのような対策をとるかの合意があると考え、提携形ゲームの概念を適用することができる。具体的な分析の流れとしては、対象地域内の水道事業者の提携の可能性についてまず水量面から分析し、その提携の意義を単に不足水量の解消という観点だけでなく、水使用実態を踏まえて都市生活者の立場からそのレベルを評価する。さらに、提携案を水道事業者の立場であるコスト面から絞り込むことが考えられる。以上より、水道事業者で対応可能な内容を明確にする。

(2) 下水道レイヤー

下水道として対応可能な下水処理水利用と下水処理水の都市内貯留について検討する。下水道レイヤー内でどこまでの不足用水の確保が可能かを分析し、処理水量の都市への配分方法について平常時の都市アメニティの向上の観点をも踏まえて検討する。また、都市内の貯留は下水処理水を都市内に循環させる経路上での貯留（環境点での貯留）を想定する。したがって、処理水を震災時の消火用水・トイレ用水として利用でき、かつ平常時において都市の水辺空間のアメニティを高めるよういかに都市に配分するかが問題となる。Fig.3 に示す水循環システムにおける水の連続式はシステム全体で記述される。都市活動レイヤーで必要となる不足水量の大きさは前述のように水道レイヤーからの水供給量にも依存し、それらを踏まえた下水処理水の配分を行うことが必要である。しかし、まず、ここでは都市活動レイヤーと下水道レイヤー間の連続条件を考え他のレイヤーとの連続条件は与件とする。このような条件の下で目的関数として次の2つを考えることができる。1つは地震時に都市が必要とする用水量と処理場が配分する処理水との乖離を最小とする目的関数であり、もう1つは平常時に開水路に流れている処理水量と水路周辺からの誘致人口が多いほどアメニティが向上すると考えアメニティが最大となるように処理水を配分する目的関数である。これらは水循環を表す式(15)を用いて定式化できる。

(3) 水循環システムの統合

水道レイヤーでパラメータとした要因は下水道レイヤーの分析では決定変数となっている。また、下水道レイヤーの分析でパラメータとした要因は水道レイヤーで決定変数となっている。この両者を河川レイヤーも含め統合したモデル化が必要となる。

4. おわりに

本研究では、淀川流域を対象として大都市域水循環システムの実態を述べ、阪神・淡路大震災などから明らかになった水管理の問題点を指摘した。これらを踏まえて大都市域水循環システムの再構成の必要性を論じると共にそのコンセプトを提示した。さらに、水循環システムの数学的な定式化の方法を示し、再構築をモデル化するため基本的な考え方に言及した。定式化は水循環システムをネットワークとして記述する必要がある、この点は課題である。今後、本稿を踏まえた再構成の具体的な方法論について検討が必要である。

謝辞

本研究に関して、京都大学防災研究所萩原研究室の西村和司氏、久保宜之氏、八千代エンジニアリング(株)阪本浩一氏、復建調査設計(株)中瀬有祐氏、JR東日本情報システム(株)秋山智広氏とは共に議論し、都市水循環システム研究会の(株)日水コン渡辺晴彦氏、流通科学大学酒井彰教授、(株)日水コン西澤常彦氏、同森正幸氏、同碇智氏、名城大学張昇平助教からは貴重な助言を頂戴した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

日本水道協会(1992):水道統計。
建設省近畿地方建設局(1994):水利権調書。
日本河川協会:流量年表。
萩原良巳・清水康生・秋山智広(2000):人工系水循環システムモデルによる渇水リスクに関する考察,京都大学防災研究所年報第43号。
国土庁長官官房水資源部監修(1996):'96水資源便覧。
(財)地方財務協会(2000):地方公営企業経営研究会編・地方公営企業年鑑第46集。
日本水環境学会編(2000):日本の水環境 5 近畿編,技報堂出版。
神戸市消防局編(1995):阪神・淡路大震災における消防活動の記録。
神戸市水道局(1996):阪神・淡路大震災水道復旧の記録。

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。

平成7年度文部省科学研究費(総合研究A)研究成果報告書(1996):平成7年兵庫県南部地震の被害調査に基づいた実証的分析による被害の検証。

法政大学大学院都市問題研究プロジェクト(1997):阪神・淡路大震災に学ぶ・震災時の用水確保方策に関するシンポジウム講演集。

日本水環境学会特別委員会(1997):「阪神・淡路大震災による水環境への影響と対策」報告書。

堤武・萩原良巳編著(2000):都市環境と雨水計画,勁草書房。

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,Vol. 28。

活断層研究会編(1991):新編日本の活断層(分布と資料),東京大学出版会。

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,土木学会関西支部講演会。

西村和司・清水康生・阪本浩一・萩原良巳・吉川和広(2001):都市域での下水処理水利用による水辺創成と震災リスクの軽減に関する一考察。

中瀬有祐・清水康生・萩原良巳(2001):震災時を想定した水環境汚染に関する地域診断と水道取水への影響に関する考察,土木学会年次学術講演会。

阪本浩一・清水康生・萩原良巳(2001):震災ハザードに対する都市水循環システムの診断に関する一考察,土木学会年次学術講演会。

久保宜之・清水康生・萩原良巳・阪本浩一(2001):震災時を想定した水道事業体の提携に関する研究,土木学会年次学術講演会。

中瀬有祐・清水康生・萩原良巳(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。(投稿中)

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被害の軽減に関する研究,環境システム研究。(投稿中)

A Concept of reconstruction for Water Circulation System in Urban Area Against Earthquake Disaster

Yoshimi HAGIHARA, Yasuo SHIMIZU

Synopsis

In Japan, managers of river systems, water supply systems and sewerage systems control the water utilization in urban areas separately. They do many countermeasures against earthquake disaster in order to reduce the damage for the urban activity and daily life of residents. But there are limits in individual countermeasures, because they do not recognize the water system as one water circulation system. This problem has proved by the great Hanshin-Awaji earthquake disaster. The reconstruction of the water circulation system in urban area is necessary. In this paper, the necessity is explained and the concept of reconstruction is showed. And the mathematical model for presenting the water circulation system is proposed to analyze the reconstruction. Finally an approach to synthesize the each water system is referred.

Keywords: Concept of reconstruction, Water circulation system, Earthquake Disaster, the Yodo river