

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

中瀬有祐¹・清水康生²・萩原良巳³・酒井彰⁴

¹正会員 復建調査設計株式会社 防災システム部 (〒732-0052 広島市東区光町 2-10-11)

²正会員 工修 京都大学 防災研究所総合防災研究部門 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³正会員 工博 京都大学 防災研究所総合防災研究部門 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

⁴正会員 工博 流通科学大学 サービス産業学部 (〒651-2188 神戸市西区学園西町 3丁目1番)

本研究では、震災時を想定して大都市域水循環システムを構成する上下水道システムへの直接被害と水環境汚染の双方から総合的に水循環システムの診断を行う。特に、水環境汚染に関しては実態を捉えることが困難であるため、計画論に持ち込むための調査プロセスを提案する。これに基づき GIS を用いてデータベースを作成し、地域診断と取水口の診断を行う。以上より、震災想定時の大都市域水循環システムへの影響を総合的に考察する。

Key words: water cycle system, earthquake disaster, environmental pollution risk, comprehensive diagnosis, risk management

1. はじめに

阪神・淡路大震災は、複数の都市の上下水道システムに大きな被害を及ぼした災害であった。被害範囲は単独の事業体の空間的スケールを超え、単独事業体だけの震災対応の困難さを明らかとした。震災対策はこの広域性を前提として議論する必要がある。他方、震災後にはクリーニング店敷地内の土壌汚染等の環境汚染問題も明るみに出た。

震災後、地方公共団体では地震被害想定調査及び防災計画の見直しを行っている。しかし、これらの多くの調査や計画は上下水道の事業体が個別に対策を検討した内容をまとめている。さらに、震災による水環境汚染(水源汚染)まで総合的に視野に入れた調査・計画ではない。

本研究では、震災時を想定して大都市域水循環システムを構成する上下水道システムへの直接被害と震災に起因する水環境汚染の双方から総合的に同システムの診断を行うものとする。

水環境汚染に関しては平常時の事故であっても実態を捉えることは難しい。このため、広域的な地域を対象とすることを前提とし、計画論に持ち込むための調査プロセスを提案する。このプロセスにより得た情報に基づき GIS を援用して地域診断を行うものとする。さらに、水環境汚染に関して危険な地域及び下流域の水道取水に与える影響を考察する。対象地域は、淀川を水道水源とする大阪府全域と京都府、兵庫県の一部とする。

2. 大都市域水循環システムと震災ハザード

都市域の水の流れを一体的に捉えるために本研究では、河川、水道、都市活動及び下水道の4つの場面をレイヤーとした階層的な大都市域水循環システム¹⁾を枠組みとする。また、震災ハザード²⁾とは、活断層による地震の震度分布である。阪神・淡路大震災において活断層上に位置する施設が甚大な被害を受けたことから、ここでは仮定として震度7想定区域上に位置する施設は機能を停止すると考える。対象とする活断層は、水循環ネットワークに影響を及ぼす花折、西山、有馬高槻、生駒、上町及び六甲の6活断層系³⁾とする。

3. 震災想定時における大都市域水循環システムへの直接的影響³⁾

大都市域水循環システムと震災ハザードより震災想定時における水道レイヤーと下水道レイヤーに含まれる施設の直接被害を把握する。具体的には、GISを用いて震度7想定区域である震災ハザードマップと水道と下水道の施設分布とを重ね合わせるにより破壊される可能性のある施設がわかる。対象施設は、淀川本川から取排水を行っている浄水場(取水施設を含む)と導送水管路、下水処理場と幹線下水管渠である。分析結果の一覧を表-1に示す。花折断層系を対象とした例を図-1に示す。

表-1 震災により機能停止が予想される上下水道施設

活断層系	水道浄水場	水道幹線管路等 (一部)	下水処理場	下水幹線管路等 (一部)
花折	【京都市】新山科, 松ヶ崎, 山ノ内, 蹴上	【京都市】琵琶湖疏水, 各浄水場への全導水管	【京都市】鳥羽, 吉祥院	【京都市】同左幹線
西山	なし	【大阪市】豊野浄水場取水口・導水管	【京都府】洛西浄化センター, 洛南浄化センター【大阪府】渚, 北部(枚方市)	【京都府】同左幹線【大阪府】同左幹線及び渚処理場幹線
有馬高槻	【大阪府】村野, 三島, 中宮(枚方市)【阪神水道企業団】甲山, 鯉池(西宮市)	【大阪市】豊野浄水場取水口・導水管【大阪府】村野浄水場取水口・導水管・送水管(淀川右岸), 枚方市中宮浄水場取水口, 寝屋川市取水口	【京都府】洛西浄化センター, 洛南浄化センター【大阪府】渚, 高槻, 中央, 北部(枚方市), 香里(枚方市), 郡津(交野市), 正雀(吹田市), 池田(池田市)【兵庫県】奥山(芦屋市)【神戸市】鈴蘭台(神戸市)	【京都府】同左幹線【大阪府】同左幹線及び原田処理場幹線【兵庫県】同左幹線【神戸市】同左幹線
生駒	【大阪市】豊野【大阪府】村野, 泉町(門真市), 八尾(八尾市), 香里(寝屋川市), 中宮(枚方市)	【大阪市】豊野浄水場導水管・送水管【大阪府】村野浄水場取水口・導水管・送水管, 中宮浄水場取水口, 寝屋川市取水口	【大阪府】渚, 高槻, 大井, 香里(枚方市), 郡津(交野市)	【大阪府】同左幹線及び湊池処理場幹線
上町	【大阪市】柴島【大阪府】泉(吹田市)	【大阪市】柴島浄水場取水口・送水管等【大阪府】村野・庭窪浄水場からの南部方面送水管【阪神水道企業団】取水口・導水管等	【大阪市】十八条【大阪府】南吹田(吹田市), 川面(吹田市), 今池, 津久野(堺市)	【大阪市】同左幹線及び上町台地沿い全ての幹線【大阪府】同左幹線及び泉北処理場幹線(堺市)
六甲	【阪神水道企業団】甲山, 鯉池(西宮市)	【阪神水道企業団】西宮・芦屋送水管【神戸市】市内東西方向送水管	【神戸市】鈴蘭台, 中部, 西部, 垂水【兵庫県】奥山(芦屋市)	【神戸市】同左幹線及び東灘処理場幹線【トイランド】処理場幹線【兵庫県】同左幹線及び芦屋処理場幹線

(1) 水道システムの診断とその考察

花折断層系の地震により京都市内のすべての浄水場と水源の琵琶湖疏水が被災する。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。有馬高槻断層系では、大阪府営水道の7割以上の処理能力を持つ村野浄水場と大阪市の豊野浄水場の取水施設、導水管等が被災し機能が停止する。生駒断層系により、村野浄水場と豊野浄水場の導送水管が被災する。大阪府は浄水場が北部に偏っているため、給水区域が分断され、大阪府南部において地震自体による被害は少ないが、水道水が供給されなくなる間接的な被害が起きる恐れがある。上町断層系では、柴島浄水場が被災し、大阪市の浄水能力は大きく低下する。地震により市域が分断されるため大阪市の臨海部では断水被害が発生する恐れがある。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、影響が大きい。

また、活断層系による被害の共通部分(共通集合)には、3つの活断層の影響を受けるエリアと2つの活断層の影響を受けるエリアが存在する。木津川・桂川・宇治川の三川合流点から下流の枚方・高槻付近は西山、有馬高槻、生駒という3つの活断層系の影響を受ける危険なエリアである。

(2) 下水道システムの診断とその考察

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する。西山断層系により、下水処理場の集中

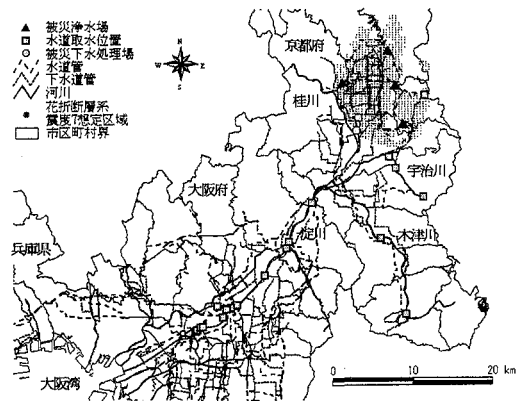


図-1 震災ハザードと水循環ネットワーク(花折断層系)

する淀川の三川合流地区が被災する。ここには、洛南浄化センター、洛西浄化センターといった流域下水道の処理場が集中している。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。また、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。

複数の活断層によって影響される共通集合エリアのうち、3つの活断層から影響を受けるエリアに、淀川左岸流域下水道の渚処理場があり、危険な位置に立地していることがわかった。

4. 震災想定時の水環境汚染への影響⁵⁾

地震が発生し、下水処理場が被災して、未処理污水が河川に流出することを想定すると、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、下水幹線の被災により、合流管渠では、管渠の閉塞により雨水吐から污水が溢水して、河川に流出することが考えられる。下流の水環境汚染をもたらす水道取水に対して影響を及ぼすと考えられる。このような水環境汚染への影響は下水道施設の被災だけに限らない。都市活動レイヤーに含まれる有害物質を扱う施設が被災した時、水環境汚染や下流に位置する水道取水に影響を及ぼす。このような利水障害は、3で述べた直接被害に対して間接被害であると言える。

(1) 水環境汚染の特徴

水環境汚染の特徴として①汚染物質が多様多様である②時間的発生特性(短期、長期)③空間的発生特性(特定、非特定)④取得可能なデータが限られている(技術的要因、社会的要因)点が挙げられる。このような特徴が水環境汚染に関わるリスクマネジメントを困難にしている。

このため、複雑な水環境汚染を捉えるための枠組みとして、大気、降雨、地下水といった水文循環をも含めた水循環システムを考え、汚染発生源から河川へ流入する経路を想定する。想定する経路は、直接河川へ・下水道から河川へ・地下水から河川へ・大気から河川への4つが考えられる。発生源としては、下水処理場、し尿処理場、工場、小規模工場・事業場、生活排水、ゴルフ場、一般・産業廃棄物処理場、一般・産業廃棄物最終処分場、田畑及び畜舎を特定汚染源とし、自動車排ガス、道路・屋根・構造物等、山林を非特定汚染源として考える。汚染物質は有機物、重金属、揮発性有機化合物(VOC)、油類、農薬類、伝染性病原菌、環境ホルモン、有害大気汚染物質を考える。これらの発生源・経路・汚染物質を整理し、それぞれの関係を図-2に示す。

図中の*印を付けている施設は被災により有害物質を流出する可能性のある施設であり、太線で示した経路で河川に流入すると考えられる。同図より1つの発生源からでも数種類の経路を経て河川へ流入する場合があります、それぞれの経路により流出する汚染物質も異なることがわかる。

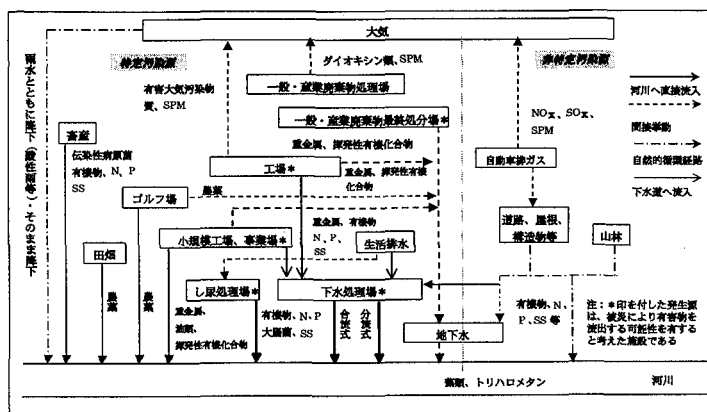


図-2 流域レベルで見た水環境汚染のメカニズム

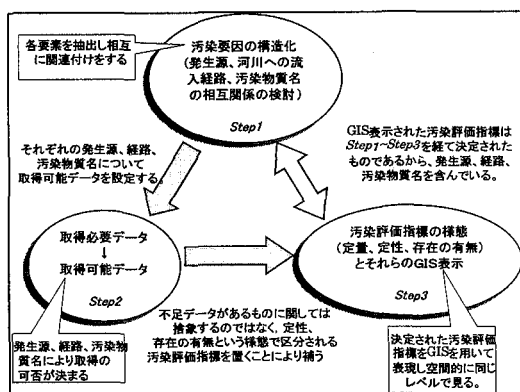


図-3 調査のプロセス

(2) 調査プロセス

複雑な水環境汚染のポテンシャルを調べるために図-3に示す調査プロセスを提案する。まず、発生源・経路・汚染物質という汚染要因を個別に見て相互の関連を想定する。次に、汚染物質名・発生源・経路を定量的に捉えるための取得必要データを設定し、その中で取得可能なデータを把握する。この際、水環境汚染の特徴から取得可能なデータは限られているが、十分なデータが無いものに関しては捨象するのではなく「定量」「定性」「存在の有無」といった様態を持つ汚染評価指標として取り込むこととする（図-4参照）。

この汚染評価指標は、汚染要因を対象地域で空間的に同じレベルで見えるために、GISを用いて表現する指標である。GISの適用により汚染要因の構造を視覚的に捉えることができ、従来の環境基準点などにより個別にしか評価されていなかった事項を総合的に関連付けて解釈することが可能である。

(3) 汚染発生源の分類

どの汚染評価指標であるかは、取得必要データである

汚染物質名、発生源の位置、排出量または浸出量の3つのデータが取得可能か不可能かで決められる。3つとも取得可能であれば「定量的」に捉えることが可能で、GISにより位置と排出量データを入力する。汚染物質名と位置（または面積、数）が取得可能であれば「定性的」に捉えられるとし、GISにより位置、面積、数を入力する。汚染物質名がわからない場合は何が排出されているかわからないが、その存在自体が危険であるということから「存在の有無」として捉えGISにより位置のみを入力する。汚染評価指標のうち「定性」「存在の有無」に関してはGIS上ではポリゴンまたはポイントでしかないが、上記のようなプロセスを経て決定されたものであるから定量的データの有無等の情報を含んでいるものと解釈することができる。GISを援用して、このように作成したデータベースを用いて次の地域診断を行う。

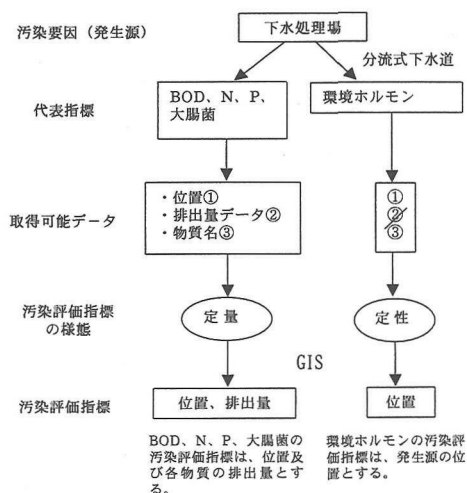


図-4 汚染評価指標の決定プロセス（例）

5. 震災時を想定した水環境汚染に関わる地域診断

(1) 数量化理論による地域診断

ここでは数量化理論Ⅲ類を用いて水環境汚染をもたらす可能性のある地域を総合的な観点から診断する。分析項目は、被災により汚染をもたらす施設（図-2中の*を付した施設）と震災ハザードを表す①下水処理場の有無②尿処理場の有無③工場数の多少④クリーニング店舗数の多少⑤一般・産業廃棄物処分場の有無⑥影響される活断層の有無⑦震度7 想定区域の割合（多少）の7つに絞り込んだ。

対象地域内の102市区町村をサンプルとして解析し、図-5に示す結果を得た（累積寄与率51%）。寄与率の大きさから概略の分類ではあるが、第1軸は汚染発生源となる有害物を扱う施設の多さ、第2軸は活断層の影響の度合いと解釈する。同図より市区町村は3つのグループに分類される。これは活断層の影響度合いが大きく3つに分かれるためである（第1グループは強く、第3グループは弱い）。各グループ内では正の相関が認められ、全体でみても有害物を扱う施設の多い都市で活断層の影響度合いが大きい場所に立地している、という対象地域の特性が現れている。特に淀川沿いの都市（枚方市、茨木市、高槻市等）は、汚染発生源となる施設が多かつ複数の活断層系から地震の影響を受ける都市である。

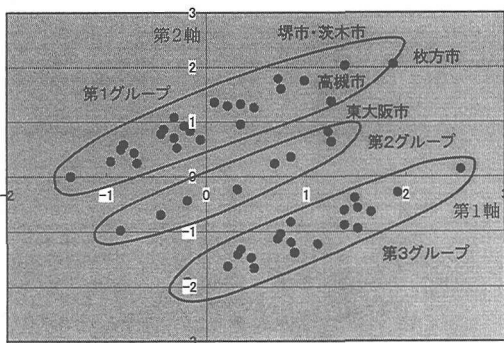


図-5 数量化理論Ⅲ類による地域診断

(2) 流出経路の推定に基づく地域診断

ここでは前節の分析より淀川本川両岸を対象として、汚染水の流出経路を地形図から推計し淀川本川への影響を考慮した地域診断を行う。まず、震災ハザードマップと都市活動レイヤー及び下水道レイヤーに含まれる施設をGISを用いて重ね合わせることで、震災時に起こ

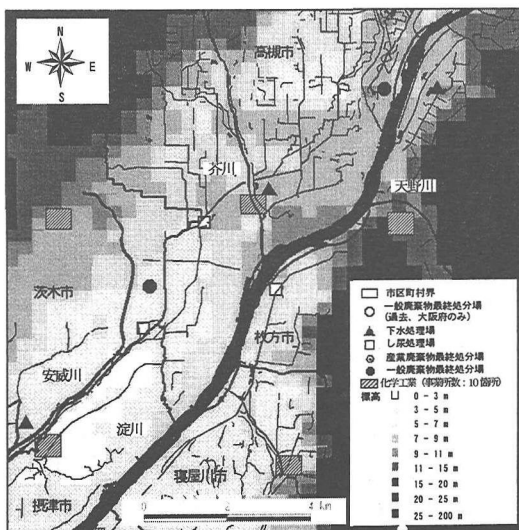


図-6 地形図を用いた流出経路の推定

るであろう現象を考察する。仮定として、各断層系で震度7の地震が起きた時、ハザードマップ上のポイント及びポリゴンで表される施設は被災し、汚染物質を含む水が直接河川へ放流されるか、地下水へ漏出するものとする。表流水の河川への流出経路に関しては、国土地理院作成の250mメッシュ地形図と小河川ラインデータを基に流下方向を把握することとする(図-6参照)。すなわち、淀川本川の支川流域で震度7区域内に立地する施設が被災した時、流出した汚染水が流下する方向として支川流域では

その支川へ、流域から離れている場所では地形図を参考にして高い方から低い方へ流れるとし、その近辺の小流域に流入すると考える。地下水へ漏出する経路に関しては地下水位データをGISを用いて入力したが、表流水のように明確に流出経路を把握することは困難である。しかし、実際に工場や廃棄物最終処分場からの漏出水、浸出水が重大な地下水汚染を引き起こしている事例から考えても、これら施設が被災することによって地下水汚染から井戸水や河川水質へと影響を及ぼす可能性については指摘できる。

工場の分布に関しては、GISで表現した時、行政区単位で4業種(金属製品製造業・機械製造業・鉄鋼業・化学工業)ともに似た分布をしているため、ここでは化学工業で他の業種を代替する。地震時に被災した施設から流出する物質名の特定はできないため、有機物、重金属、揮発性有機化合物、油類といった汚染物質の分類を指標とする。このため、全ての汚染発生源を定性的または存在の有無で捉えることになる。

(3) 地域診断結果

京都府桂川右岸は、西山・有馬高槻断層系により三川合流地点の下水処理場、し尿処理場、一般廃棄物処分場が被災するため有機物汚染や長期にわたる重金属等の汚染が発生し、下流域に影響を及ぼす。京都府桂川左岸・宇治川右岸は、工場や小規模事業場(クリーニング店)が被災し重金属や揮発性有機化合物等の汚染が生じ、下流域にも影響を及ぼす。大阪府(大阪市を除く)淀川右岸は、複数の活断層により被害を受け、破壊される施設も工場、下水処理場、し尿処理場、廃棄物処分場、小規模事業場と様々である。このため有機物、重金属、揮発性有機化合物、油類等、多種類の汚染物質が流出し下流の取水に

表-2 被災した有害物取り扱い施設が取水に与える影響

取水施設	水利権量 (m^3/s)	活断層系					
		花折	西山	生駒	上町	有馬高槻	六甲
上流 ↑ 取水口位置 (事業体) ↓ 下流	1. 楠葉取水口 (大阪市)	下水②	下水② し尿② 一般廃棄物②	影響無し	影響無し	下水② し尿② 一般廃棄物①	影響無し
	2. 磯島取水口 (大阪府)	下水④ し尿③ 一般廃棄物②		下水① 一般廃棄物①		下水④ し尿③ 一般廃棄物③	
	3. 磯島取水口 (枚方市)						
	4. 枚方市大字出口 取水口(寝屋川市)			下水④ し尿② 一般廃棄物①		下水⑦ し尿④ 一般廃棄物③	
	5. 庭窪取水口 (大阪府)						
	6. 庭窪取水口 (大阪府)						
	7. 八雲取水口 (守口市)						
	8. 一津堰取水口 (合同)						
	9. 大道第2取水口 (阪神水道企業団)						
	10. 大道第1取水口 (阪神水道企業団)						
	11. 東淀川区菅原 取水口(吹田市)						
	12. 築島取水口 (尼崎市)						
	13. 築島取水口 (大阪市)						
	14. 築島取水口 (阪神水道企業団)						

【凡例】

下水：下水処理場
し尿：し尿処理場
一般廃棄物：一般廃棄物処分場

注) ○内の数値は施設数を示す

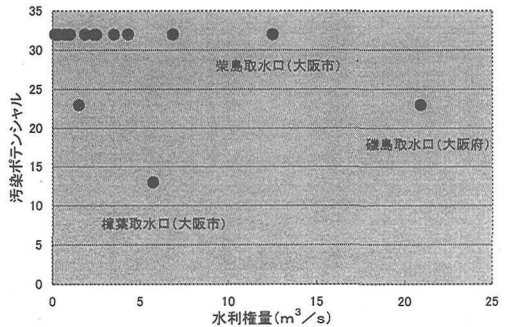


図-7 取水口診断結果

影響を及ぼす。大阪府(大阪市を除く)淀川左岸も複数の活断層の被害を受ける。淀川右岸よりも工場、下水処理場、し尿処理場、処分場の数が多く、これらの破壊により水道システムや水環境汚染への影響は大きい。大阪市淀川右岸と大阪市淀川左岸地域は、下水処理場の被害は受けるが、下流域に取水口がないことから利水障害は予想されない。しかし、河口・大阪湾の生態系への影響が考えられる。

(4) 取水口診断

地域診断を踏まえて、淀川本川に位置する14の取水口について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つから診断する。汚染ポテンシャルとは、6活断層系により各取水口が影響を受ける工場等の有害物を扱う施設の合計数である。ただし、施設数は、下水処理場のような「存在の有無」データと「定性」データがあり数の差が大きいため分けて分析を行った。結果は双方ともに同じ傾向を示したため、ここでは「存在の有無」データの診断結果を表-2と図-7に示す。これ

より、汚染ポテンシャルの観点から取水口が3つのグループに分けられることがわかる。この理由は、淀川左右岸からの流入支川が存在するためである。最も重大な被害を受けるのは磯島取水口(大阪府)である。取水口への影響という観点からは淀川上流に位置し京都府を直撃する花折、西山、有馬高槻活断層系による被害が下流への影響の大きいことがわかった。

6. 震災想定時における大都市域水循環システムの総合的診断と対策に関する考察

(1) 総合的診断

3の上下水道システムの診断、5の都市活動に起因する水環境汚染に関する地域診断及び取水口診断を基に大都市域水循環システムの総合的診断を行う。

震災想定時に震度7想定区域上に位置する上下水道施設は被災するため、震災直後からその機能は停止すると考えられる。このため、浄水能力の低下、水供給区域の分断、下水処理能力の低下及び下水管路途中での流出が予想される。

ここで、被災の影響を①震災直後、②河川汚染が終息した震災数日後及び③地下水汚染が発生する震災後長期間を経た時点、に分けて考察する。

分析結果から震災直後は水道や下水道の施設が重大な被害を受けると共に下水処理場や工場の被災により短期的に河川へ汚染水が流出する可能性がある。この場合、下流域において水道システムが被災していなくても被災した時と同様な利水障害が起る。特に、淀川本川に設置されている取水口の中で最大水利権量を持つ磯島取水口では生駒と有馬高槻断層系により被災し、また花折と西山により水環境汚染の影響を受けるため大阪府全域に利水障害が生じることがわかる。

淀川の対象区間を流下する時間は平時時には2日間程度⁹⁾と推定されるため、数日後には汚染物質が流下し取水が可能になると考えられる。しかし、上下水道システムが復旧したとしても、長期間を経て今度は地下水に浸出した汚染水が河川や井戸水に流出する可能性が高くなるため警戒が必要であると思われる。

(2) 大都市域水循環システムとしての対策

以上のことを考えると、ひとたび阪神・淡路大震災のような大規模な都市直下型地震が淀川流域で発生すると、現在の上下水道システム及び工場等の有害物を扱う施設の立地状況では先の地震被害同様もしくはそれ以上の被害を被ることが容易に想像できる。

これらの被害を軽減するために現在、様々な対策案が考えられている。例えば、震災ハザードの影響を受ける

各水道事業体間が提携し、水を供給し合う水道連絡管の最適設置の構想がある⁷⁾。また、震災時における下水処理水の有効利用の一端として平時時はアメニティ用水として水辺創成用水として利用し、震災時は消防用水、トイレ用水及び防塵用水等に利用するといったことも考えられている⁸⁾。これらの対策案に関しては、本研究により水環境汚染を前提とすることが可能になると考える。

また、水環境汚染に関する地域診断や取水口診断により現存する大都市域水循環システムに関わる施設の配置を再構成することも必要ではないかと思われる。上流の影響を受け、また、施設自体も震災ハザード上に位置する取水量最大の磯島取水口などは設置場所を変えることも一つの案である。また、地域診断において危険地域であると診断された地域の有害物を扱う施設の再配置や淀川本川へ流入経路の変更等も考えられる。

7. おわりに

本研究では、震災時を想定した上下水道システムの診断、水環境汚染に関する地域診断及び水道取水の診断を行い、これらから総合的な大都市域水循環システムの診断を行った。また、その過程において、提案した水環境汚染の調査プロセスの有効性を示すことができた。今後、本研究の内容を踏まえた大都市域水循環システムの総合的な再構成について研究が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 清水康生, 秋山智広, 萩原良巳: 都市域における人工系水循環モデルの構築に関する研究, 土木学会環境システム研究論文集 Vol. 28, pp. 277-284, 2000.
- 2) 清水康生, 萩原良巳, 阪本浩一, 小川安雄, 藤田裕介: 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会, 2001.
- 3) 阪本浩一, 清水康生, 萩原良巳: 震災ハザードに対する都市域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, 2001. (投稿中)
- 4) 京都府総務部消防防災課: 京都府地震被害想定調査報告書, 1998.
- 5) 中瀬有祐, 清水康生, 萩原良巳: 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, 2001. (投稿中)
- 6) 淀川水質協議会資料, 2001.
- 7) 久保宜之, 清水康生, 萩原良巳, 阪本浩一: 震災時を想定した水道事業体の提携に関する考察, 土木学会年次学術講演会, 2001.
- 8) 西村和司, 清水康生, 萩原良巳: 都市域での下水処理

水利用による水辺創成と震災被害の軽減に関する研究,
土木学会環境システム研究, 2001. (投稿中)

COMPREHENSIVE DIAGNOSIS OF WATER CYCLE SYSTEM IN GREAT URBAN AREA CONSIDERING EARTHQUAKE DISASTER

Yusuke NAKASE, Yasuo SHIMIZU, Yoshimi HAGIHARA and Akira SAKAI

In this research, supposing the time of an earthquake disaster, the water cycle system in an urban area is synthetically diagnosed from the both sides of the direct damage to the water supply and sewage system, which constitutes water cycle system, and complicated water environmental pollution. Since it is difficult to catch about water environmental pollution especially, the process of investigation is proposed. Based on this approach, the database is created using GIS, and the local diagnosis and the diagnosis of the intake facility is performed. Finally, the influence of the water cycle system on an earthquake disaster is considered.