

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

清水康生・萩原良巳・秋山智広*

* J R 東日本情報システム（株）

要 旨

都市域の人工系水循環は、河川管理者、水道事業管理者及び下水道事業管理者により個別に管理されている。しかし、渇水リスク、震災リスク及び環境汚染リスクなどの防災や減災を図るためには、個別の対応でなく都市域の水循環を一体として捉える必要がある。本稿では、GISを援用した都市水循環システムモデルを提案し、淀川流域を対象として渇水リスクに関する分析を行った。

キーワード：水循環システムモデル、渇水リスク、GIS、淀川流域

1. はじめに

従来、都市域における水供給に関わるリスクの軽減を考える際にその中心となってきたのは、河川管理者や水道事業管理者あるいは下水道事業管理者であり、彼らの個別の視点に立った施策がほとんどであった。もちろん、ダムや堰建設による新規水資源の開発・上水道事業の広域化・水源の複数化・下水処理の高度化など彼らの対応は、水道水の安定供給に対して大きな役割を果たしてきた。しかしながら現在もなお、都市部において顕在化している水供給に関する諸問題について、抜本的に解決していくためには、関連する個別の組織内部だけでの議論を越えて、河川水や下水処理水そして都市部の水利用者も含めた複雑で広範囲にわたる都市水循環システム全体に視点を置いたリスクの軽減について議論をしていく必要がある。そこで本稿は、これらリスクの軽減に向けた研究の最初のステップであると位置づけ、まず、都市域の水循環をモデル化するために水循環システムモデルを提案し、位置情報の視覚的表現と大量の情報分析に適している地理情報システム（Geographic Information System：以下GIS）を

援用したデータベースを構築する。さらに、GISデータベースの情報を用いて市区町村ごとに水供給に関わるリスクについて考察を行うものとする。

ただし、対象地域全体の水循環すべてを把握することは困難であるため、本研究では河川と上下水道を対象とした水循環について扱うこととし、雨水や地下水または工業用水や農業用水については含めない。また、水供給に関わるリスクについては、「渇水」「震災」及び「環境汚染」の3つのリスクを想定する。対象地域は、都市部を中心とした人工的水循環に着目するため、流域に都市がいくつも縦列し複雑な水循環を見せる淀川流域とする。具体的には、宇治川は天ヶ瀬ダム、木津川は加茂流量観測所、桂川は保津峡流量観測所から下流を対象とする。また、データは原則として年平均ベースで扱うこととし、特に注釈のないものについては1996年度、または1996年のデータを使用する。

まず2章において淀川における水循環の概要について述べる。次に3章において、都市水循環システムのモデル化の考え方を提案し、GISを用いたデータベースの構築を行う。4章では淀川流域の水道ネットワークの特性を水循環の状態と水利用者特性の

視点から考察する。5 章では、水供給のリスクの中から渇水リスクを対象として分析を行う。最後に 6 章で今後の課題について述べる。

2. 淀川流域における水循環の概要

2.1 河川

対象となる天ヶ瀬ダムより下流には上水道取水口が 3 カ所、下水処理水放流口が支流を含めて 4 カ所ある。下水処理水は宇治川周辺地域だけでなく、木津川下流域からの分も放流されていて、もともとの水をたどると淀川水系を水源としたもの以外に、地下水を水源としたものが多く含まれる。宇治川にある上水道取水口は、いずれも下水処理水放流口より上流部に存在するため、この区間だけに限ってみればカスケード型水利用は見られない。

淀川の左支川にあたる木津川には、対象となる加茂流量観測所より下流に上水道取水口は 2 つ、下水処理水放流口は支流を含めて 2 カ所あり、いずれも木津川左岸の市町が利用している。カスケード型水利用の観点から見ると、加茂町で捨てられた水を木津町が使い、さらに木津町が捨てた水を京田辺市が使うという水利用がなされている。

淀川の右支川にあたる桂川は、対象となる保津峡流量観測所より下流において上水道取水口は見られず、下水処理水放流口に関しては支流を含めて 3 カ所が存在する。京都市と乙訓地域の下水処理水が放流されているが、これらの水源をたどるとすべて琵琶湖疏水及び地下水となっている。

宇治川、木津川、桂川の三川合流地点から下流の淀川では、上水道取水口が神崎川も含めて 17 カ所、下水処理水放流口が淀川本川に流入してくる河川の分を含めて 6 カ所ある。枚方市付近において河川と都市との間で循環形態となる水利用が行われている。淀川から取水された水は大阪府下ほとんどの市区町村と兵庫県阪神地域の都市に供給されている反面、放流されている処理水は枚方市、交野市といった淀川中流左岸沿いの一部地域のものだけである。

2.2 上水道事業

対象地域内にあ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、合計 23 カ所から取水を行っている。ここから取水された水は、他水源からの水とも混ざりながら、京阪神地区を中心に約 1,307 万人に利用されている。23 カ所の取水口すべての水利権量を合計すると、約 $89.1\text{m}^3/\text{sec}$ となり、このうち、京都府分が約 $14.9\text{m}^3/\text{sec}$ 、大阪

府分が約 $59.5\text{m}^3/\text{sec}$ 、兵庫県分が約 $14.8\text{m}^3/\text{sec}$ 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合計約 $1.4\text{m}^3/\text{sec}$ の水利権量を持ち、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 カ所に合計約 $25.8\text{m}^3/\text{sec}$ の水利権量を有し、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 2 カ所に合計約 $13.1\text{m}^3/\text{sec}$ の水利権量を持ち、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 の上水道事業体が主に自市向けの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。

2.3 下水道事業

対象となる下水道事業体は流域、公共合わせて 35 事業体あり、約 1,064 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 85.1%、大阪府 74.8%、兵庫県 97.1% で、全体では 81.3% 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 $15.0\text{m}^3/\text{sec}$ で、これは大阪市水道局における淀川からの年間取水量の約 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 $11.5\text{m}^3/\text{sec}$ 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約 $8.4\text{m}^3/\text{sec}$ に高度処理が導入されている。

一方、14 処理場以外の処理場から放流される年間放流量は約 $49.2\text{m}^3/\text{sec}$ である。

2.4 水利用者

本研究において水利用者とは、行政体（市区町村）のことを指す。対象となる行政体は、政令指定都市の行政区を含めて 102 市区町村であり、その人口は合わせて約 1,345 万人、面積にして約 $3,340\text{km}^2$ である。このうち、地下水など淀川水系以外の水源から水道水を得て、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市町も含まれている。

2.5 淀川流域全体の水循環の現状

対象地域における都市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反面、下水道では、一部の処理場において淀川に設置された放流口を、将来淀川以外の都市内河川へと変更する計画があったり、京都府下からの処理水を流水保全水路に流す計画が進行しているなど、今後、流域の下水道整備率が伸びたとしても、淀川本川への処理水流入については減少する可能性が高い。

また、1996年度に完工した琵琶湖総合開発は、淀川の水源である琵琶湖に、湖岸堤の建設や浚渫などを行うことにより、新たに約40m³/secの水資源を開発するものである。この事業の完了に伴い、淀川に水道水を依存する市区町村は渇水に対するリスクが大幅に軽減されている。

3. 都市水循環システムのモデル化

3.1 モデル化の基本的考え方

本研究において都市水循環システムをモデル化する目的は、対象地域をできるだけ広くとることにより、粗くとも河川から水道、水利用者、下水道を経て再び河川、海域に至るまでの水の流れる経路を把握することにある。これは、本研究で考える水供給に対する3つのリスク、「渇水」「震災」「環境汚染」が、供給水量の多少について議論をするよりも、循環経路そのものの工夫について議論をすることの方が減災に結びつきやすいと考えるからである。

本研究で扱う都市水循環システムは、必要最低限の4つの要素、「河川」「水道」「水利用者」及び「下水道」のみでこれを構成する。モデル化においては、これら4つについて各々レイヤーと呼ぶこととする。

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水利用者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を次に記す。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、供給先である水利用者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。市区町村内のミクロな水循環については本研究では議論しない。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場合があるので、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をしている場合は、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。

水利用者レイヤーでは、末端の水利用者一人ひとりをつねるのではなく、あくまでもマクロな視点から行政体を一つの水利用者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の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、カスケード型水利用の観点から水利用者レイヤーの中に含める。

下水道レイヤーでは、水利用者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体の下水道施設、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体の下水道施設である。②水利用者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市区町村内のミクロな水循環については本研究では議論しないため、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（本研究で言う幹線レベルとは、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体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体についてもその管路を捨象する。

各レイヤー間の接点は、河川と水道が「取水口」、水道と水利用者が「水供給位置」、水利用者と下水道が「水排出位置」、下水道と河川が「放流口」になる。これまで述べてきた各レイヤーのモデル化に関する基本的考え方をまとめると Fig.1 となる。

3.2 各レイヤーのデータベース化

本節ではデータベースへの入力情報について述べる。位置情報と属性情報の一覧を Table 1 に示す。

(1) 河川レイヤー

河川データは、前節に述べたモデル化の考え方に基づき、合計 40 の河川を入力した。ラインは、上流端、合流点、分流点、環境観測点、流量観測点、取水位置、排水位置、下流端のいずれかのノードが発生することにより区切られる。環境観測点データには、属性データとして 9 つの指標を年平均値として入力した。この中で塩素イオン濃度は人為的な水利用をしたときのみに出てくる指標であり、下水処理水に多く含まれるものである。従って、カスケー

ド型水利用を繰り返した水はこの値が高くなるため採用した。また、 KMnO_4 消費量については、浄水処理を受けることにより出てくる指標であり、これも人工的な水循環を経て排出された水に含まれやすいため採用した。また、取水口の年間取水量が判明しなかった場合は、取水口に設定された水利権量より算出を行った。年間放流量の資料が下水道事業体によって精度が異なり、これらを統一させるため高級処理分の処理量を放流量とした。高級処理分としたのは合流式下水道の場合、簡易処理のみの処理水には雨水の割合が高いと考えたためである。なお、京田辺市取水口、大阪市庭窪取水口、阪神水道企業団大道取水口、京都市鳥羽処理場放流口は、取排水位置が複数あるが、近接しているもしくは小規模であるため各々 1 カ所にまとめた。

(2) 水道レイヤー

水道レイヤーでは、水道管、浄水場、配水池（浄水池）、ポンプ場の 4 つの位置データを入力した。水道管データは、取水位置、浄水場、配水池、浄水池、ポンプ場、分岐点、口径変更点、水利用者への供給位置のいずれかのノードが発生することにより区切られる。水道管データの属性情報として入力した管材質は、水道事業体によってはかなり細かいスパンで材質が変更されている場合もあったので、区切られたノードとノードとの間において最も卓越する材質のものを、その区間の材質として採用した。

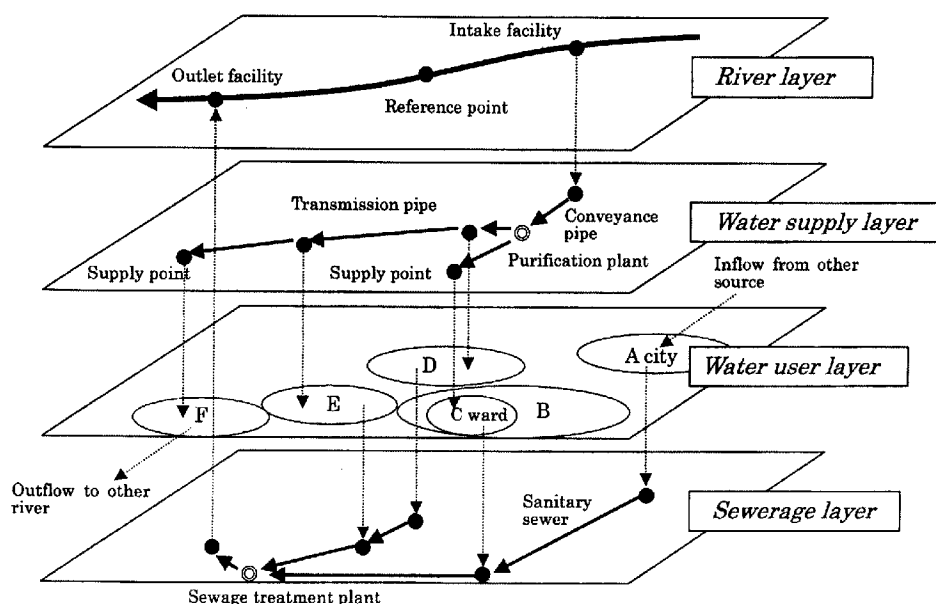


Fig.1 Hierarchical model of the water circulation system

Table 1 Information about location and attribution of urban water circulation system

レイヤー	位置情報		属性情報
河川	河川	線	河川名/ 下水道処理回数履歴
	環境観測点	点	河川名/ 観測所名 水質項目 (pH, BOD, SS, DO, 大腸菌群数, 全リン, 全窒素, 塩素イオン濃度, 過マンガン酸カリウム消費量)
	流量観測点	点	河川名/ 観測所名/ 流域面積/ 平水流量/ 低水流量/ 年総量
	取水位置	点	河川名/ 水道事業体名/ 取水先浄水場名/ 水利権量/ 年間取水量/ 取水方式/ 取水位置
	排水位置	点	河川名/ 下水道事業体名/ 放流元下水処理場名/ 排水位置/ 年間放流量
水道	水道管	線	水道事業体名/ 敷設区間/ 管種類/ 管材質/ 口径/ 延長距離
	浄水場	点	水道事業体名/ 浄水場名/ 年間浄水能力/ 浄水処理対象年間原水量/ 浄水方法 原水, 浄水水質 (pH, 大腸菌群数, 塩素イオン濃度, 過マンガン酸カリウム消費量)
	配水池(浄水池) ポンプ場	点	水道事業体名/ 施設名
水利用者	市区町村域	面	市区町村名/ 人口/ 面積/ 人口密度/ 高齢者割合/ 給水人口/ 水道普及率/ 水道料金/ 年間給水量/ 水道水の原単位使用量/ 淀川依存率/ 淀川水源の給水量/ 淀川への放流 量/ 淀川との水収支/ 下水道整備率/ 各浄水場及び下水処理場との水量的関わり/ 1994 年渇水の給水制限日数及び制限率
	水供給位置	点	市区町村名/ 水道事業体名
	水排出位置	点	市区町村名/ 下水道事業体名
	行政中心点	点	市区町村名
下水道	下水道管	線	下水道事業体名/ 敷設区間/ 処理区名/ 排除方式
	下水処理場	点	下水道事業体名/ 下水処理場名/ 晴天時一日最大処理量/ 年間処理量/ 排除方式/ 処理 方法/ 放流水質 (pH, 大腸菌群数, BOD, COD, SS, 全窒素, 全リン)

(3) 水利用者レイヤー

水利用者レイヤーでは、市区町村域、水供給位置、水排出位置、行政中心点の4つの位置データを入力した。市区町村域データは面情報として、そのほかは点情報として入力を行った。

収集した資料のみでは、どの浄水場がどの市区町村にどれだけの送水をしたか、またはどの下水処理場に汚水がどの市区町村からどれだけ流入しているのかを読みとるのは困難な場合が多い。そこで、これらを示すはっきりとしたデータが存在しない場合には、市町村に関しては人口割で、行政区に関しては配水区、下水処理区の面積割から人口割で水量を推測することとした。ただし、大阪市の各行政区への水配分に関しては、行政区ごとに末端の有収水量が判明したため、これを重みとして配分を行った。

また、市区町村と浄水場及び下水処理場との対応を減らしてシンプルな形にするために、管路が入力されている事業体については取水口(または放流口)を頂点にそれに関連する浄水場(下水処理場)及び市区町村はひとまとめとし、その上でさらに浄水場・下水処理場に対応する市区町村が1カ所である場合は「淀川自己水源」「自己処理分」として処理することとした。

(4) 下水道レイヤー

下水道レイヤーでは、下水道管、下水処理場の2つの位置データを入力した。下水道管データは線情報として、下水処理場データは点情報として入力を行った。

下水道管データは、水利用者からの排出位置、処理場、分岐点、排水位置のいずれかのノードが発生することにより区切られる。本来であれば水質項目の中に塩素イオン濃度及び KMnO_4 消費量を指標として用いたかったが、一部の処理場においてデータが無かったため入力しなかった。また、年間処理量については第1項で述べた理由から、年間高級処理量を年間処理量とした。

3.3 GISによる水循環システムの構築

GISは、様々な事象が持つ情報を、位置情報とそれに付随する属性情報とに分割してデジタル情報としてコンピュータ上で一元管理するシステムである。本研究では、GISアプリケーションとしてESRI社のArcViewGIS Version3.1を使用して、データベースの構築を行った。データベースの基盤図としては国土地理院発行数値地図2,500の京都府、大阪府、兵庫県の刊行分計11枚を使用した。データベースに入力する前に、国土地理院の25,000分の1地形図に位置データを起こし、その後GIS上に位置データと属性データの入力を行った。従って、本データベースの入力精度は25,000分の1である。前節の入力データをレイヤーごとに出力した結果をFig.2からFig.5に示す。

4. 都市水循環システムの特徴

4.1 河川と水循環システム

Fig. 6は、淀川の河川流量に水道用水の取水量及

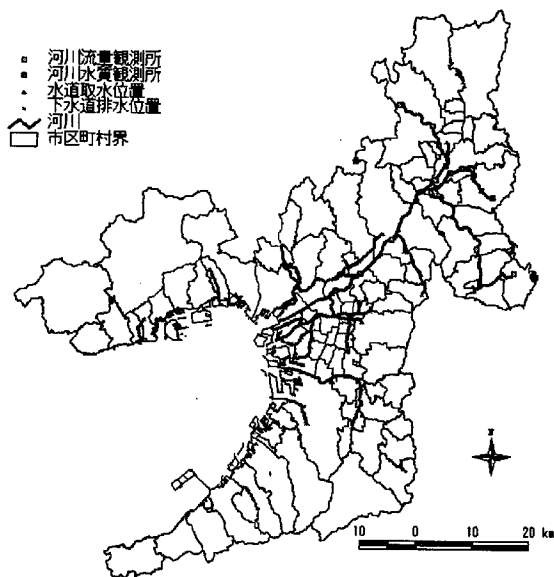


Fig.2 River layer

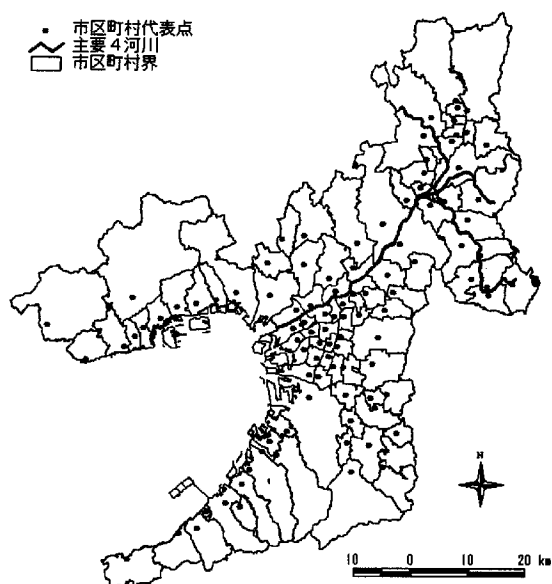


Fig.4 Water user layer

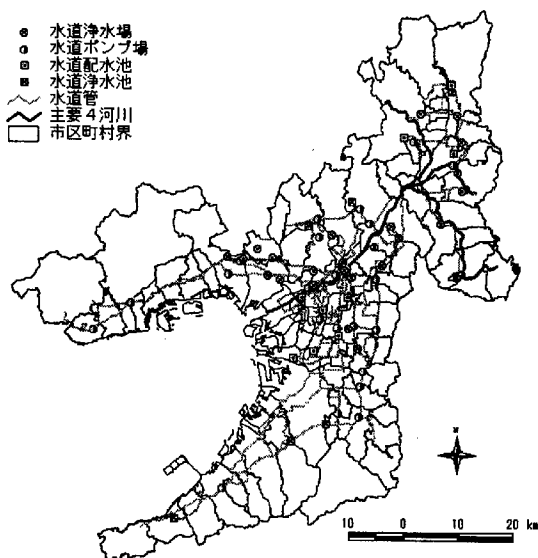


Fig.3 Water supply layer

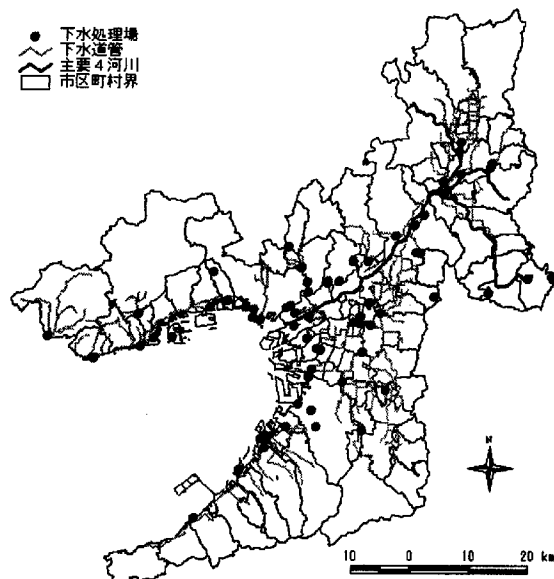


Fig.5 Sewerage layer

び下水処理場からの放流量をプラスまたはマイナスしたものである。1996年度の実績、同実績に取水量を水利権ベースで捉えた場合、同実績に下水処理量が流入しない場合の3パターンを考えた。基となる流量は3川合流直前の各観測所の平水流量である。ここでは残流域からの水の流入については考えていない。対象地域には京都市の琵琶湖疏水による取水が含まれていないため、京都市の4下水処理場からの流入分は河川にとってそのままプラスとなっている。このため京都府下では、桂川を中心として淀川水系から取水するよりも多くの水を淀川水系に放流しているが、府境をまたいで大阪府に入ると下水処

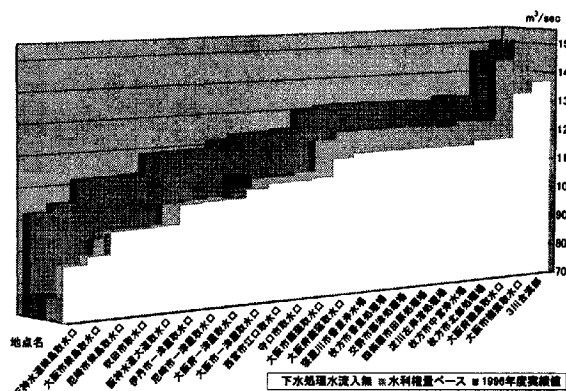


Fig.6 Water budget considering water works intake and sewerage outflow in the Yodo river

理水の流入は減少し、代わって大阪市、大阪府、阪神水道企業団の3者を中心とした大規模な取水が行われている。

これを水利権ベースで見た場合、1996年度の取水実績値よりもさらに約5割多い水量が河川から取水されることとなる。水利権ベースでの検討の意味は、枚方流量観測所の維持流量約 $90\text{m}^3/\text{sec}$ と関わりがある。今回の計算では、水利権ベースで取水されても枚方地点では約 $123\text{m}^3/\text{sec}$ を維持している。しかし、下水処理水が流入しない場合を見ると、河川水量の減少量は毎秒 $15\text{m}^3/\text{sec}$ にも達する。下水処理水は渇水時にも減少しにくいいため、渇水時における枚方流量観測所における維持流量の確保に大きく影響する水量であることがわかる。

4.2 水道ネットワークの特性

Fig.7には給水人口密度の分布を示した。給水人口密度の高いのは、京都市上京区、中京区、下京区や大阪市城東区、東成区、生野区などJR大阪環状線の外側にある地域及びそれに隣接する都市である。これら地域においては、水道管施設も密集している可能性が高く、水道水供給リスクを考える上で重要になると思われる。

また、給水量原単位 ($\text{ℓ}/\text{日}/\text{人}$) の分布を Fig.8に示した。対象地域における給水量原単位は、平均で $429\text{ ℓ}/\text{人}/\text{日}$ である。大阪市の各行政区における給水量原単位が他の市町村に比べて高くなっている。

次に、Fig.9に 20m^3 あたりの1ヶ月の家庭用水道料金の分布を示す。対象地域における水道料金は平均で2,250円となり、京都市、神戸市がそれぞれ平均に近い。大阪市など淀川に古くから独自の水利権を確保している市町村は割安で、大山崎町や島本町、千早赤阪村など最近になって用水供給事業を介して淀川の水を引いてきた、もしくは引く予定の市町村は割高な傾向が見られる。これは、新規の水利権開発に要した費用や水道施設整備の費用が水道料金に反映されているためと思われる。

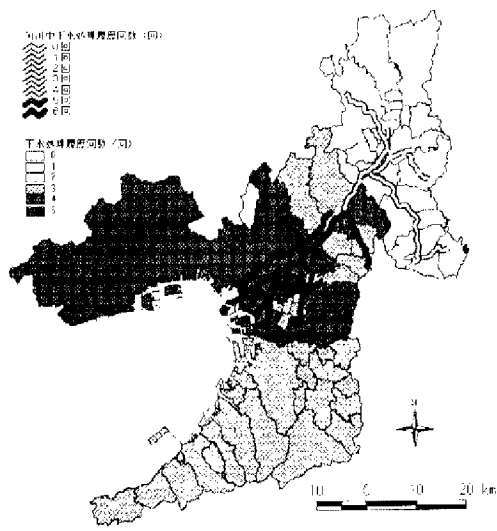
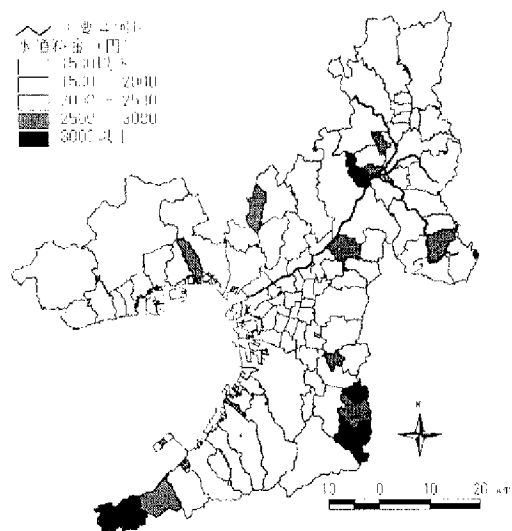
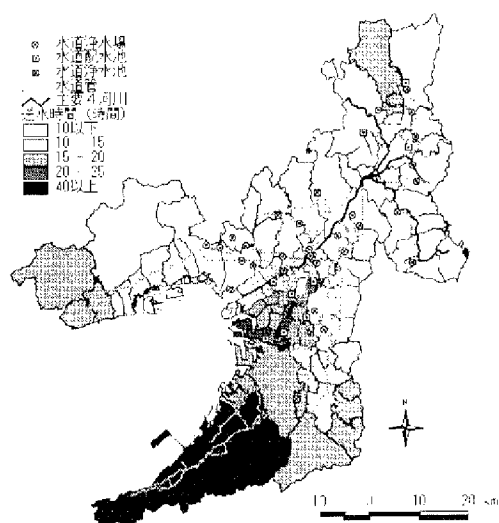
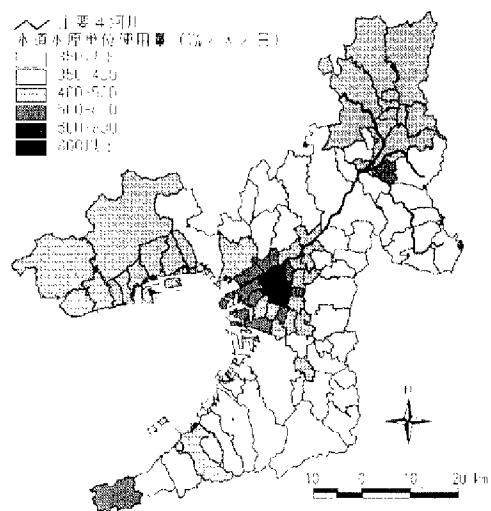
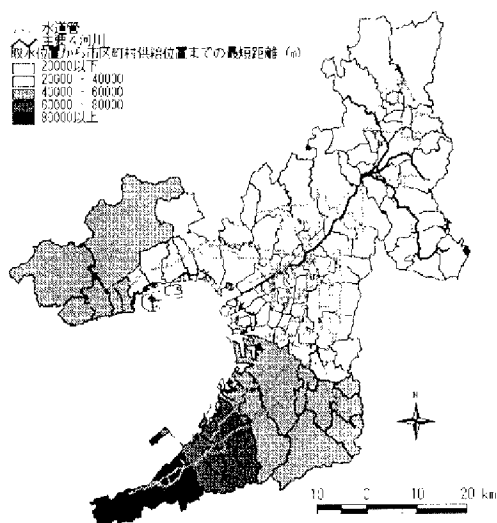
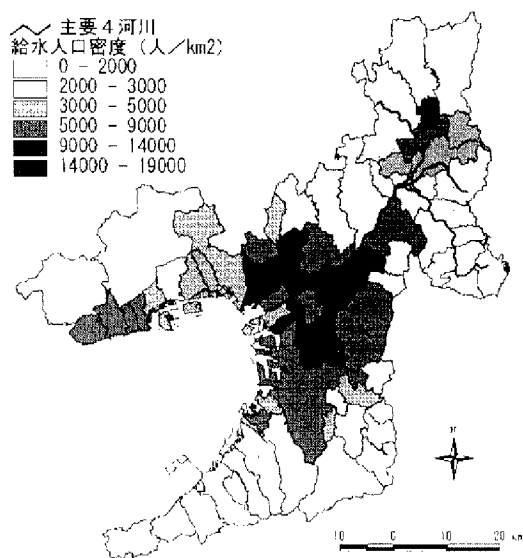
Fig.10に示す取水位置から市区町村水供給位置までの最短距離は、淀川水系から取水された水が水道ネットワークを使用してどの程度の輸送距離で各市区町村まで届けられているかについて表している。大阪府岬町や神戸市西区などの淀川から見て遠隔地となる地域はもちろん長い距離を送水されているが、淀川に近い大阪市東成区などでも枚方市の楠葉取水口から長い距離を要して水が運ばれてきていることがわかる。Fig.11は最短距離に加え、水道管内の流速、浄水場、配水池、浄水池の滞留時間を考慮したものである(管内流速を $1.0\text{m}/\text{sec}$ とし浄水場

3時間、配水池12時間、浄水池5時間の各滞留時間を想定した)。ほぼ上記の最短距離に沿う結果が得られたが、大阪市南部より神戸市の方が到達時間の早いことを見てもわかるとおり、水供給位置までに達する経路上に配水池、浄水池が存在するか否かで到達時間に差が生じている。

4.3 都市内部における水循環システムの特性

Fig.12は各水利用者が、どれだけ下水処理水を再利用しているかを把握するために、淀川水系が水源となっている水道水の下水処理履歴回数を示したものである。京都市下では、独自取水を行っている京田辺市の2回が最高で、宇治川流域地域が0回、木津川左岸流域地域が1回である。大阪府下を見ると、淀川に沿って下流に向かうに従い回数が増加しているが、水道ネットワークの影響により一部地域で例外も見られる。淀川の中流部に位置し、処理履歴回数の少ない大阪府営水道磯島取水口から取水された水は、泉南地域まで送られている。また、前節で触れた大阪市東成区なども、楠葉取水口が大阪府下で最も上流部に位置していることから、周辺市区町村に比べ履歴回数が少ない。兵庫県下は、すべて一津屋及び柴島付近で取水を行っているため、回数は同じとなっている。

次に、都市水循環において、水利用者が人工的水循環をどれだけ利用しているかをみる指標として「人工的都市水循環最短距離／水循環全体距離」を表したものが Fig.13である。人工的都市水循環最短距離とは、取水口を起点として水利用者から下水道を経て放流口までに至る最短距離のことで、水循環全体最短距離とは宇治川もしくは木津川の研究対象上流端から人工的都市水循環最短経路を経て、河川を通じて海域に至るまでの最短距離のことである。木津川から取水を行っている木津町、精華町、京田辺市は木津川の起点(加茂)、それ以外は宇治川の起点(天ヶ瀬)からの最短距離を用いた。これを見ると、淀川沿線地域とそれ以外の地域で大きな差が見られる。これは主に淀川からの水道管の距離が影響しているためで、下水道管の距離は、京都市北部や木津川右岸、南河内地域などを除いてどの水利用者も際だった差は見られない。水道は人工的水循環を使用して遠くからでも水を運ぶ動きが見られるが、下水道に関しては比較的近くの河川及び海域に放流し自然界にある水循環を利用しようという動きのあることがわかる。なお、最も人工的都市水循環最短距離割合の高い岬町は、天ヶ瀬ダムから岬町経由で海域に至るまで、約80%の区間を人工的都市水循環に依存している。



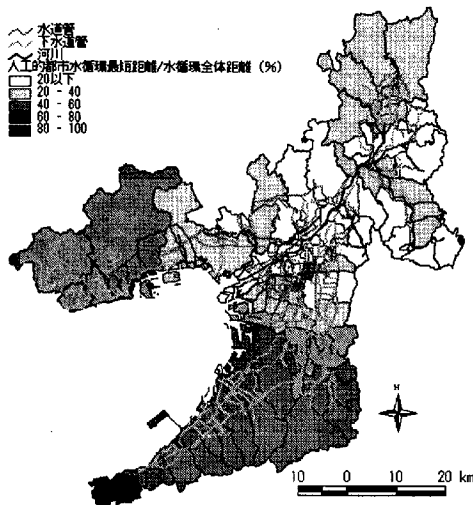


Fig.13 Ratio of artificial conveyance distance and total distance from upstream to sea including artificial flow

5. 渇水リスクの考察と分析

5.1 1994 年渇水から見たリスクの考察

本節では直近の大渇水であった 1994 年渇水を対象として考察を行う。

Fig.14 は、淀川依存率と節水率との相関を表している。ここで言う節水率とは、1994 年渇水の前年もしくは前々年 9 月における最大取水量を記録した日の給水量を基準とした、1994 年渇水で最も取水制限の厳しい最中にある 9 月 13 日の給水量の節水率である。ややバラツキはあるものの、淀川依存率が高いほど節水率も高い傾向が認められる。

節水率は、市区町村ごとの水利形態などによっても変化の仕方が異なると考えられるため断定的なことは言えないが、水源をすべて淀川に依存している市区町村が淀川渇水時にその被害を直接的に受けている反面、地下水など別の自己水源を持つ市区町

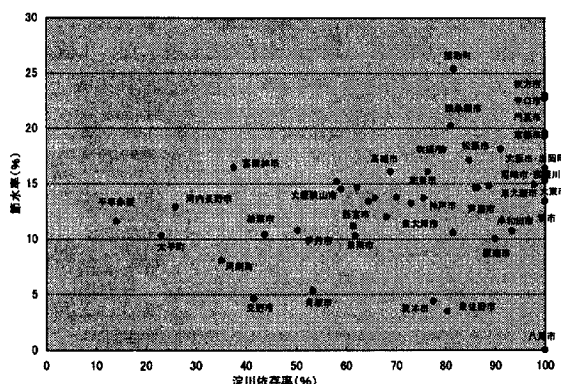


Fig.14 water saving rate and dependence rate of water source for the Yodo river

村では、淀川からの水が減少した分を他水源からの供給を増やすことで対処したと思われる。これにより淀川依存率が高いほど淀川渇水時に被害を受ける可能性が高いという考察が成立するように思われるが、市町村の立場に立てば、自己水源だけでなく複数の水源を持つことにより、様々なリスクの軽減や水量的に安定した水道水を供給できるメリットがある。つまり、淀川水系に依存していなければ更に被害が大きかった可能性があるということである。また、給水量原単位と節水率との関係を分析したが、2つの要素間の明確な相関は認められなかった。

5.2 水道料金から見た考察

Fig.15 は、水道料金と淀川依存率との関係について示したものである。これを見ると、淀川依存率がある一定の水準までは割合が高くなるにつれて水道料金も高くなる傾向が見られるが、淀川依存率が 100% 近くになると一部の都市で水道料金が安くなっていることがわかる。理由として、地下水は安価であるのに対して、河川表流水はダム開発などの水資源開発が伴う場合には割高になるためと思われるが、大阪市などの都市では古くから自流水取水を行い、かつ水道施設の整備が比較的少ないことが理由であると思われる。

一方、千早赤阪村や乙訓地域など新規に淀川水系から水を引いている（もしくは引く予定の）市町村は、淀川依存率が低いのに料金が低い。これは、水資源開発費用や水道施設整備費などの支払いのために水道料金が値上げされているためと考えられる。

次に、給水量原単位と水道料金の関係を Fig.16 に示す。これを見ると水道料金の高い市町村で給水量原単位が少なく、水道料金の安い市町村で給水量原単位が多くなる傾向が認められる。

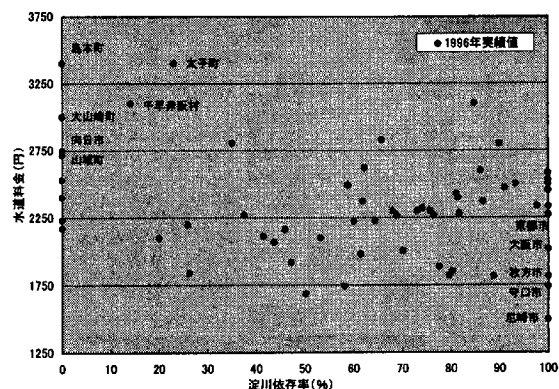


Fig.15 Water charge and dependence rate of water source for the Yodo river

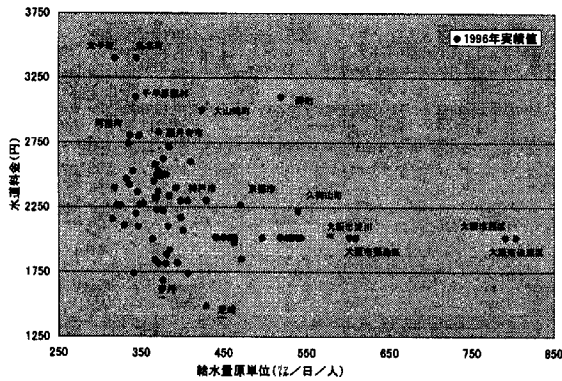


Fig.16 Water charge and ratio of water supply

5.3 水利用者特性からみた考察

Fig.17 は 65 歳以上の高齢者割合と給水量原単位との関係を見たものである。給水量原単位は、1996 年度の実績値と、同実績値から淀川渇水想定時（水源河川において 20%の取水制限を想定し、そのまま給水量の減少に結びつくものと考えた）における淀川からの給水量が減少した場合を重ねて表示した。高齢者の割合を見ると、対象地域の平均で 12.4%と全国平均の約 16%よりも低い値となっている。しかし、地域によってかなりのバラツキがあり、政令指定都市の旧市街地域では 16%前後から 22%と高い値を示しているが、一方で大阪市を取り囲む摂津市、門真市、寝屋川市、大東市などでは 8%から 10%程度の低い値となっている。大阪市中央区、北区、生野区といった地域は人口が多く、人口密度、高齢者割合ともに高い。しかも通常時と渇水想定時との給水量原単位の格差が大きい傾向が見られる。これらの地域は、渇水が発生した場合に人口構造の側面から最も影響を受けやすい地域であると思われる。中央区、北区はショッピング、ビジネス街であることから、各産業への影響も懸念される。また、大阪市のほとんどの行政区と京都市の上京区、中京区、下京区では、人口密度及び高齢者割合がともに高く、

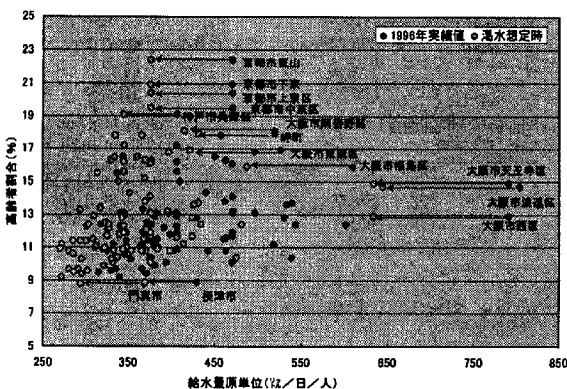


Fig.17 Old age rate and ratio of water supply

通常時と渇水想定時との給水量原単價格差が大きい傾向が見られた。これらの地域に関しても渇水発生時の影響は大きいものと思われる。これら市区町村では、特に高齢者に対する渇水時の断水、出水不良などへのきめ細かな対策を必要としている。

5.4 渇水による減収額と生活不便度の分析

Fig.18 は、給水量原単位から算出した 1 人 1 ヶ月あたりの水道料金と給水量原単位との関係を見たものである。水道料金は 1996 年度の実績値と、渇水想定時に水量が減少した分を差し引いた水道料金とを重ね合わせて表示した。水道料金の減少は、水道事業者から見れば、渇水時の水道水使用量減少に伴う減収額と受け取れるが、ここでは、水利用者からみて本来得られるべき水量が確保できなかったことを示す金銭的損失額であると解釈する。給水量原単位についても 1996 年度の実績値と、同実績値から淀川水系における渇水時を想定して取水制限により淀川水系からの給水量が減少した場合のものを重ねて表示した。

この同図の意味するところは、ベクトルが原点に向かって長く描かれているほど渇水被害が大きい可能性の強いことを示す。また、ベクトルの傾きが緩い場合には、水道水使用量が削られる割に水道料金は変化しないということであり、水道水利用者から見れば不満が高まる可能性が高いとも言える。

大阪市や京都市では他都市と比べ、原点へと向かうベクトルが長い。これは通常時の給水量原単位が多く、また淀川水系に 100%依存しているためである。堺市、岸和田市、八尾市、大東市、門真市、芦屋市などの都市のほか、忠岡町、岬町でもこのような傾向が認められる。さらに、高齢者割合のデータを重ねてみると、大東市、門真市などは割合が低いものの、大阪市、京都市、岬町、芦屋市で割合が高く、高齢者への影響という観点からも被害が大きくなる可能性のあることがわかる。

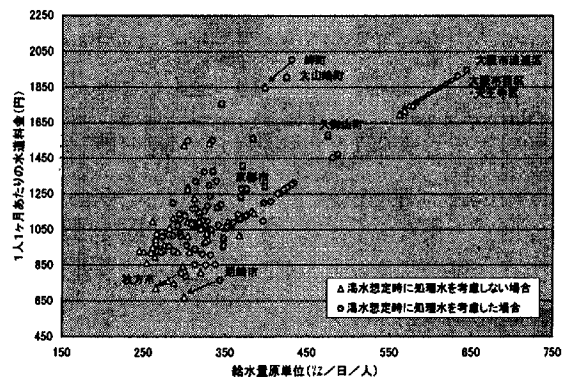


Fig.18 Water charge and ratio of water supply

一方、ベクトルが短く落差が小さかったのは、城陽市、精華町、千早赤阪村、太子町など比較的自己水源比率が高く、給水量原単位の少ないところであった。

5.5 下水処理水を考慮しない場合の渇水による減収額と生活不便度についての分析

前節の方法を用いて、水量に下水処理量を含めない場合について述べる。Fig.19 は、その結果を示したものである。比較したデータは、1996 年度実績値をベースとした淀川渇水想定時と、淀川渇水想定時にさらに下水処理水を考慮しなかった場合である。実際に水道用水として取水されている水の中にどれだけ下水処理水が含まれているのかは分からないため、「下水処理水を差し引いた河川流量／通常時の河川流量」を取水量に乗じることにより水量を求めることとした。

京都府下では下水処理水量に左右されることはほとんどないが、下流の大阪府、兵庫県の市区町村へと向かうに従い、大きく原点方向へとベクトルが向いている。特に大阪市、尼崎市周辺でその傾向がある。下水処理水は前述の通り、渇水時においてもほとんど水量が減少しないことから、この指標は淀川下流域においていかに下水処理水が重要な水資源となっているかを示すものと言える。

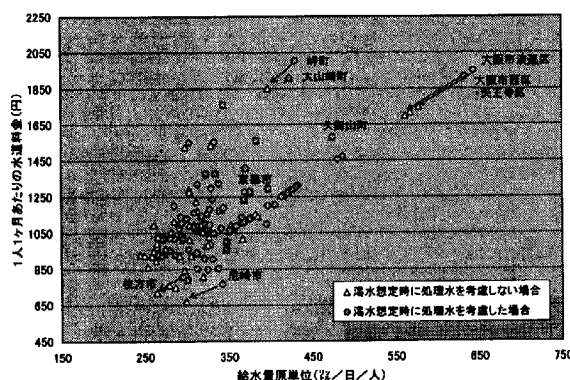


Fig.19 Water charge and ratio of water supply considering wastewater quantity

6. 結論

水道水供給に関わるリスクの軽減を目的として、河川、水道、水利用者及び下水道を総合的に考慮した都市水循環システムの研究は、従来それほど多くなされていない。そこで、本研究では、マクロな視点から水道水供給リスクを軽減していくことを最終的な目標とし、研究の枠組みとなる都市水循環システムモデルの提案を行った。そして、淀川流域を事

例として具体的なモデル化の作業と共に GIS を用いた渇水リスクについての分析を行った。

その結果、水利用者ごとの渇水リスク評価までには至らなかったものの、渇水リスクに対して各市区町村がどのような状況にあるのか、その一断片を見ることができたとともに、渇水リスクを軽減する一つの方法として、下水処理水の存在の大きいことが分かった。

今後の課題としては、まず、本研究では、淀川水系の水源とそれ以外の水源に分け、淀川水系以外の水源は通常通り取水ができると仮定して考察を行ったが、現実には、淀川が渇水であれば他水源も渇水となっている可能性が強く検討を要する。また、淀川流域における都市水循環を考えるならば木津川上流部の奈良県及び三重県を範囲に入れる必要がある。さらに、水利用者データからみた分析については、今回は給水量原単位や水道料金といった基本的なデータしか用いていないが、水使用用途や昼夜人口比などの各市区町村における水利用特性が見えてくるようなデータを盛り込む必要がある。

本研究のこれからの方向性としては、上記のことをふまえた上で、渇水リスクに対する評価や診断について議論すべきであろう。さらに、「震災」「環境汚染」などのリスクについての考察、分析を行っていかねばならない。さらにその先では視点を特定地域に絞り、そこで地下水、雨水、農業用水、工業用水などを含めた、より現実に近い都市水循環システムの研究を進める必要がある。

謝辞

本稿の作成に当たっては、奈良大学文学部地理学科磯井照子教授をはじめ、萩原研究室のメンバー、関係行政機関の方々、都市水循環システム研究会のメンバーから多くの情報と助言を頂戴した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 建設省近畿地方建設局企画部(1986):昭和 59 年度淀川流域春冬渇水調査業務調査報告書。
- 建設省都市局下水道部(1995):平成 6 年度下水処理水の広域循環利用に関する調査報告書。
- 厚生省『水道施設設計指針・解説』(1990)日本水道協会。
- 塩路勝久・清水康生(1997):河川水中の下水処理水割合を指標としたカスケード型広域循環利用に関する考察～淀川流域を対象として～,下水道協会

誌 Vol.34 No409 pp.63-72.

清水康生(1999)：下水処理水の広域循環利用に関する考察,全国上下水道コンサルタント協会,技術報告集,第 13 号,pp.33-40.

萩原良巳・森正幸・西澤常彦・小棚木修(1998)：都市の水道供給における危機管理に関する情報システムについて,京都大学防災研究所年報第 41 号, B-2,pp.45-61.

Water Circulation Model in Urban Area for Risk Analysis

Yasuo SHIMIZU, Yoshimi HAGIHARA, Tomohiro AKIYAMA*

*JR East Japan Information System Company, Tokyo, Japan

Synopsis

In this paper, a hierarchical water circulation model is proposed to deal with how to mitigate the risks of the drought disaster, the earthquake disaster and the environmental 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. In the modeling process, GIS(Geographic Information System) is applied. The ideal composition of water circulation system for the mitigation of these risks is studied. Especially the drought disaster risk in the Yodo river basin is focused.

Keywords: Water circulation system model, Drought risk , GIS , Yodo river basin