

大都市域水循環圏の水管理に関する考察

A Study on Integrated Water Management System in Water Circulation Sphere

清水康生¹ 萩原良巳² 渡辺晴彦¹

Yasuo SHIMIZU Yoshimi HAGIHARA Haruhiko WATANABE

ABSTRACT: In this paper, to regard a water circulation system as a network, a concept of water circulation sphere that consists of river basin, water supply area and sewage treatment area is proposed. In the sphere, an integrated water management will be needed. Having such a concept and taking many countermeasures solve many subjects about an urban water management problem. This paper explained some concrete contents and pointed out about the concrete usefulness. Furthermore, it proved about the necessity for integrated water management by showing a Yodogawa water circulation sphere into an example.

KEYWORD; Water Circulation Sphere, Water Circulation System, Integrated Water Management, Fluctuations in River Discharge

1. はじめに

大都市域における水管理は、河川管理者、下水道管理者、水道管理者により個別に行われている。この理由は高度経済成長期に効率的な社会資本整備を図ることを優先したという背景がある。しかし、各々の整備率が向上している現在では、整備の効率化よりも管理の適正化がより重要となっている。管理の目的には、地震・渇水などの災害に対して強いものとするだけでなく、都市域における水環境の創造も含まれる。大都市域における人工系水循環システム（a water circulation system）の概念¹⁾については既に提案されているが、これに対応した一元的な水管理（an integrated water management）を行うためには、都市域の水循環を一体のネットワークとして認識することが求められる。このネットワークの構造安定性²⁾については整理が試みられたが、水循環圏の概念の有用性について実務的な観点から考察する必要がある。本研究は、この点に留意して、水管理を行う空間的なまとまりとして大都市域における水循環圏の概念（concept of a water circulation sphere）を提示する。そして、水管理を行うに際しての評価事項として、従来の水量管理・水質管理に加えて河川流量の変動という観点を加えるべきことを提案する。これらについては、河川、下水道などの個別の立場で論じられてきたため本研究では、それらを水循環圏の概念に基づいて位置付けを行った。最後に水循環圏として捉えることの有効性について淀川大都市域水循環圏を事例として考察する。

2. 大都市域における水循環圏の概念

2.1 水循環圏とは

管理の分担は大都市域における水循環システムとしての一元的な水管理を阻害し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

¹ ㈱日水コン Nihon Suido Consultants Co.,ltd.

² 京都大学防災研究所 Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

時の水確保を困難とし被害の拡大を招くことになる。また、空間的な広がりを認識する時、従来の河川流域という捉え方では、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污水处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でどのような位置付けであるか認識することができない（図1参照）。このことは都市生活者も同様である。家庭の蛇口から出る水道水の水源は、生活の場が属する河川流域の水源とは必ずしも一致していない。飲料水などの身近な生活用水の水源からその水循環圏を決定し、都市生活者にとって従来の流域管理という概念でなく、水循環圏の概念から渇水、環境汚染、洪水などの問題を認識する方が問題を理解し易い。このような河川流域・水道給水区域・下水道処理区域から構成されるのが図1に示す大都市域水循環圏という空間的な概念である。

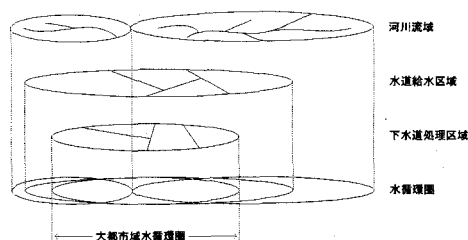


図1 水循環圏の空間的な概念

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）として捉えることができる。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（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水循環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ためである。このような一元的な水管理は、制御可能性の高い大都市域水循環圏で有効であると考ええる。

2.2 水循環の評価

水循環の状態に関しては、従来から生命・財産を守るための治水と水資源を利用するという利水の観点から「水量」と「水質」に着目した評価がなされている。この点からは、河川、水道、下水道における一元的な水量と水質の管理が求められる。本稿では、さらに、水循環の意義を環境創成という観点から捉え、水循環の基本的な要件として「流量の自然な変動」（fluctuations in river discharge）の維持という観点が重要になることを提案する。この流量変動は、河川に関わる生態系の維持・形成にとって重要であり、生活環境の創成にもつながるものである。水の資源としての価値は、水輸送の変動状態までを考慮した水循環システムを形成することにより、より高まるものとする。今後の水循環の評価は水量、水質及び流量変動の3つの観点から行う必要がある。これらの観点から水循環に関する情報の共有化や制御の効率化など大都市域水循環圏として水循環システムの一元的な管理を行うことの利点を整理すれば以下のとおりである。

- ①平常時の水資源の有効利用や震災・渇水など災害に備えた複数の水確保の代替案を考え得る。
- ②河川計画、水道計画及び下水道計画で位置付けられる計画値の整合を図り、計画の実効性を高める。
- ③ネットワークとしての施設配置や維持管理を行うことにより経済性を高める可能性がある。
- ④水循環圏における人間活動の維持と生態系の維持形成というトレードオフの関係を議論することができる。
- ⑤都市生活者は“水循環圏”という言葉を通じて相互関係の認識を共有することができる。

3. 水循環圏における水管理

水循環圏では、従来の個別管理ではなく一体の水循環ネットワークを対象とした計画・管理を行うことに

なる。前述の利点で指摘したように、このことは情報の共有、制御の一貫性、計画・管理の整合性の観点など、従来の水管理・計画の狭間であって手の付けられることの少なかった次の具体的な問題の解決に対して有効である。

3.1 水量

(1) 災害時の水確保

災害に備えた水確保の代替案は水道水供給の安全性を高めることだけが優先されがちである。しかし、阪神・淡路大震災のような個別事業体の管理区域を越えた広域的な災害の際には、水道水だけの対応では不可能である。水源としては、河川水や下水処理水も考えるべきであろう。しかし、河川の覆蓋化は取水を困難とし、下水処理水の下流部や海域へのバイパス放流は再利用を困難としている。河川水や下水処理水など複数の水源からの水確保の代替案を地域の特性を考慮して一元的に管理することが必要である。

(2) 渇水時の水管理

ダム運用は河川管理者が、給水制限は水道管理者が行っている。管理の中間に位置する取水制限については渇水調整が行われているが、その方法は曖昧なことが多い。水源から末端までの一元的な水管理を行い、需要者の節水可能量や水道事業体が有する地下水源や下水処理水の再利用可能量などの情報を共有し、ダム運用、取水制限、給水制限の合理化を図ることが必要である。

(3) 需給計画の計画諸元

水資源開発基本計画など開発を前提とした河川計画における水需要量の予測と広域的水道整備計画など経営安定化をも目指す法定水道計画では需要量の見通しの立て方が異なることがある。水循環圏としての一体性を認識し、河川計画、水道計画さらには流域別下水道整備総合計画など下水道計画をも含めて人口フレームや原単位などの基本的な計画諸元情報の共有化を図り、計画の整合性を高める必要がある。

(4) 下水処理水の都市内循環

都市域の水管理は、原則として流域面積により河川と下水道で分担されている。このため下水処理水を前述のような災害時に備えた非常用水や都市環境の再生のための用水として都市内を循環利用しようとしてもその流路の位置付けが曖昧になり、計画主体が定まらないことがある。このことが都市域における水の循環利用を阻害している側面がある。この下水処理水量は水道用水の使用量に規定されている。河川、水道、下水道の一元的な管理により都市域における水循環の形態に柔軟性をもたせる必要がある。

(5) 河川計画と下水道計画の安全度の整合性

都市域の中小河川では河川整備と下水道整備において洪水防御や雨水排除の計画安全度の整合が図られていないことがある。事業の進捗の違いという面もあるが計画においても異なることがあり、出水時には下水道の雨水排水ポンプ場が稼動し内水氾濫に対応しようとしても放流先の河川では整合の取れた整備が行われていないという問題が生じている。

(6) 都市域における水循環の実態と農業用水

主要河川では、流量観測所が整備され、水道用水が取水されている場合には水道管理者により取水量が時間単位で把握されている。下水処理水も放流量が記録されている。水道用水の取水位置や下水処理水の放流位置を把握しておけば、これら観測情報から都市域の水循環の概要を把握することができる。一方、用排水分離などの整備が進んでいる都市域でも、農業用水の取水量や還元量を観測することは現実には困難である。上述のような農業用水以外の取排水状態を把握することにより、農業用水の取水量と還元量を有る程度逆算推定できる可能性がある。

3.2 水質

(1) 有害物質の発生源情報の共有

河川流域では人間活動に伴って様々な有害物質が使用され、水域に排出されている。これら物質は水循環圏全体を循環することになる。平成 12 年からは PRTR (Pollutant Release and Transfer Register : 環境

汚染物質排出移動登録）制度による化学物質の発生源と移動に関する情報の集約化が進められている。これらの情報は、取水位置から上流にどのような危険物質を扱う施設が存在するかという潜在的な危険度を把握することができる重要な情報であり、下水処理場への有害物質の流入に対しても事前にモニターの対象を絞ることが可能となる有効な情報である。これら情報を共有化し水循環の一元的な管理を進める必要がある。

(2) 有害物質の制御

前述のような情報に基づき水循環圏における水質管理を行うに際しては、水質変換を誰が行うかという役割分担が重要となる。従来は河川管理者が河川を水道管理者が取水後の河川水を下水道管理者が処理場に流入する汚水というように分かれていたが、効率的・経済的に有害物質の危険に対応するための取水位置や処理水の放流位置の変更を含めて管理の方法を見直す必要がある。

3.3 流量変動

生態系を中心とした河川環境の維持形成と河川流量の変動の関係については多くの課題³⁾が残されているものの河川や水路に同じ流量を流すのであれば、用水路のように一定流量で流すよりも自然な変動状態のもとで流下させることが生態系の保全など河川環境の維持形成には有効である⁴⁾。例えば扇状地河川では図2に示すような関連⁵⁾を作業仮説として示すことができる。流量変動を確保することにより冠水頻度が自然に近くなり高水敷や河床材料の更新が図られ、生物の生息サイクルを維持することができる。

水循環圏の観点から言えば、河川に限らず開水路での流量変動の確保は循環の付加価値を一層高めるものであると言える。ただし、洪水時の治水や平常時の水道取水・水辺利用・下水処理水の放流の影響などを考慮した上で河川流量の変動を維持することが必要である。

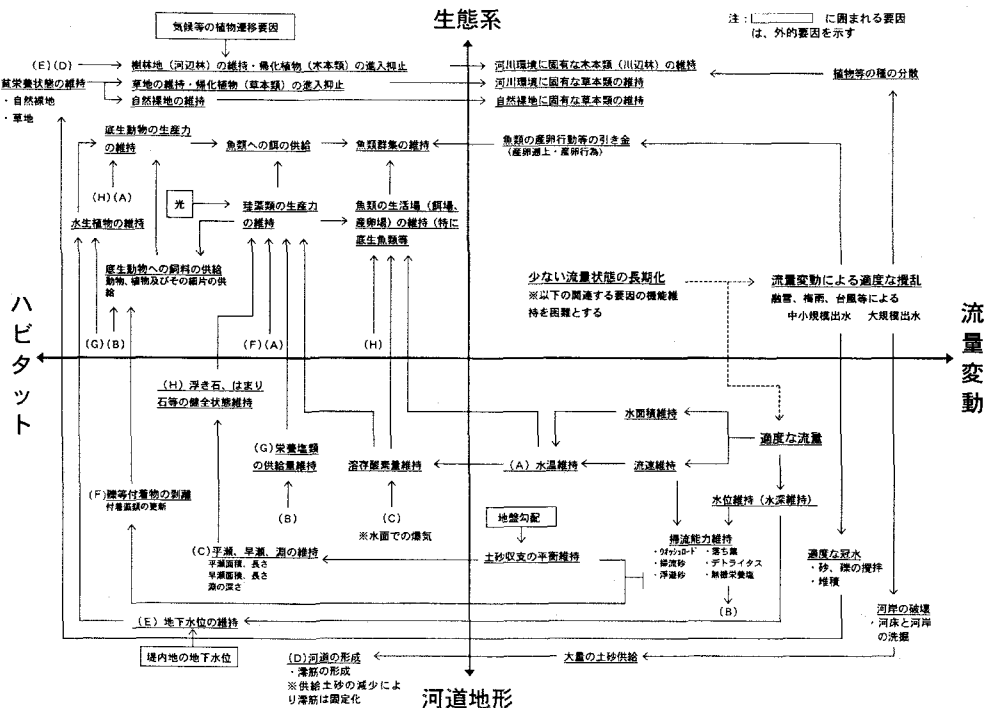


図2 河川の流量変動と河川環境の維持形成

4. 水循環圏として捉えることの有用性に関する考察（淀川大都市域水循環圏を事例として）

4.1 淀川大都市域水循環圏

一体と考える淀川の水循環圏は滋賀県、三重県、奈良県、京都府、大阪府及び兵庫県にまたがる範囲となる。この中で大都市域水循環圏と考える主要部分の取排水系統を図3に示す。

4.2 淀川流量の経年変化

水循環の要である淀川の流量は循環圏の取水や下水処理水の放流の影響で流量が経年的に変化していることが想定される。この点を調べるために過去50年間の日単位流量の傾向分析を行った。図4は、豊水流量、平水流量、低水流量、渇水流量の変化及び日単位流量の10年間の移動標準偏差を示したものである。同図より豊水流量と渇水流量の差は小さくなる傾向があり（変動幅の減少）、流量も減少傾向を示している。この理由としては、以下の事項が考えられる。

- ①ダム等の建設による下流放流量の平滑化
- ②水道取水量の増大
- ③下水処理水の下流・海域へのバイパス放流

図4に示すように1960年以降にダム・堰の建設がなされている。治水・利水の機能を有するこれら施設により下流流量は平滑化されている。図3に示す水道取水の中で大口である大阪府と大阪市の取水量は、昭和30年代後半から40年代に取水が開始され現在では $26.6\text{m}^3/\text{s}$ の水利権を有している。これら水道用水の取水は河川流量に影響していると思われる。また、同図に示すように下水処理水の放流先は水道用水の水源にも影響していると推察される。なお、降水量の減少ということが考えられるが、この点については西日本における長期の減少傾向は指摘されていない⁶⁾。

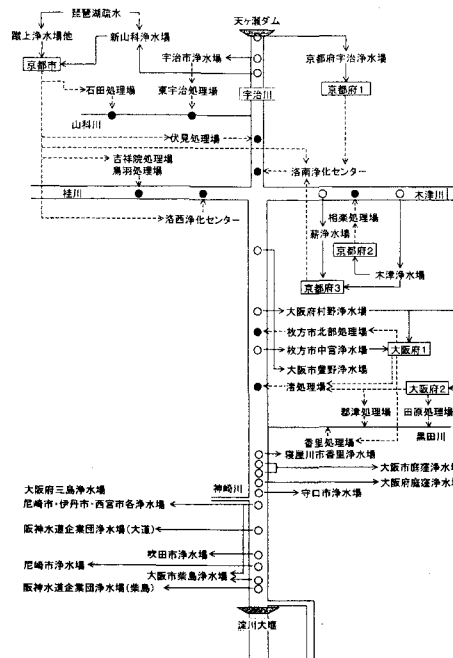


図3 淀川の水取排水系統

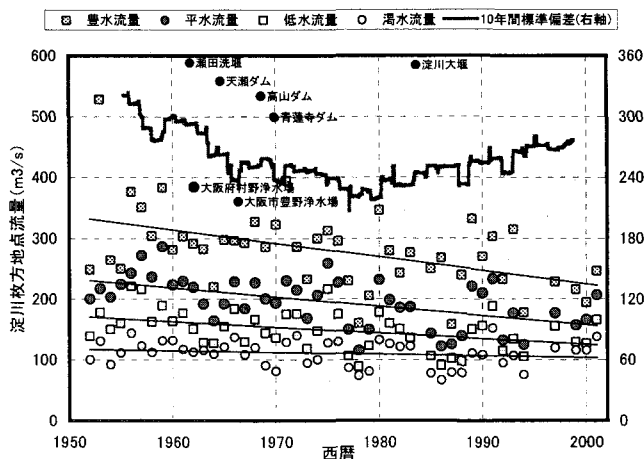


図4 淀川流量の経年変化

次に河川流量の変動を移動標準偏差で見ると 1960 年から 1983 年頃まで減少傾向であるが以後は増傾向に転じている。この理由として淀川大堰の運用開始の影響が考えられる。流量の減少と併せて流量変動の減少は図 3 に示したように川岸（エコトーン）における冠水頻度を低下させるなど生息場の維持を困難とししてしまう可能性がある。

以上のように淀川の流況はダム等の建設だけでなく利水者の需要動向（取水量）や下水道の整備の影響を大きく受けている。これらを水循環圏の概念のもと同じ土俵でトレードオフ問題として議論する必要がある。

4.3 河川水中に占める下水処理水の割合

図 3 に示すよう淀川は上流から取排水を繰り返して流下している。下流部では水道の取水施設が集中しているため、流域からの下水処理水の流入や事業所からの排水の流入が水源水質を汚染することが考えられる。以下では本川における取排水の状態をモデル化し、下水処理水を対象として水道取水と処理・放流が繰り返して行われている実態を検証し、水循環圏としての一元的な管理の必要性を示す。

(1) 取排水モデル⁷⁾

農業用水の取排水、残流域からの流出、河川における伏没などを考慮した水収支モデルを作成することは難しいため、基準点の観測流量、上水道取水量（河川水、地下水）及び下水処理場からの放流量について水収支を考える。すなわち、浄水場 i と下水処理場 j があり、浄水場 i は水源として河川水 (u_i^1)、地下水 (g_i^1) や s 水道事業体からの受水 (a_i^1) の各 1 つずつ計 3 系統の水源を持っているものとする。(d_i^1) は浄水場 i から他水道 t への供給量である。また、下水処理場 j には汚水と雨水が流入するが、下水道普及率 (λ_j) が 100% ではない地域があるため、下水処理場 j へは $(u_i + g_i + a_i^1 - d_i^1) \cdot \lambda_j$ が汚水として流入し、それ以外は未処理のまま河川へ流出すると考える。

(2) 下水処理水割合の求め方

前述のモデルを基に河川水量に占める処理回数別の下水処理水割合の求め方について述べる。 k_i を取水地点 i より上流にある処理場を対象として最も処理回数が多い経路を取った時の処理回数（最大処理回数）、 r_i^k を取水地点 i における k 回処理水の割合とすれば、取水地点 i における河川水量に下水処理水が占める割合 r_i は次式で定義される。

$$r_i = \sum_{k=1}^{k_i} r_i^k \quad (1)$$

r_i^k : 取水地点 i における k 回処理水の割合

k_i : 取水地点 i より上流にある処理場を対象として最も処理回数が多い経路を取った時の処理回数（最大処理回数）

また、下水処理場 j の放流地点直下流における k 回処理水の割合は以下のように表される。

$$r_j^k = \{ (Q_i - u_i) r_i^k + w_j^k \} / Q_j \quad (2)$$

$$w_j^k = \lambda_j \{ (u_i - d_i^1) r_i^k + a_i^1 \cdot r_i^k \} \quad (3)$$

w_j^k : 下水処理場 j の放流量のうち k 回処理水量

式(2)右辺の分子の第 1 項は取水地点 i において取水されず、そのまま河川を流下する k 回処理水量を表し、同第 2 項は処理場を経由した k 回処理水量を表す。式(3)の右辺第 1 項は河川から取水したうちの k 回処理水量、第 2 項は受水したうちの k 回処理水量をそれぞれ示す。以上から、下水処理水の割合は以下のように書くことができる。

$k \neq 1$ の時、

$$r_i^k = [(Q_i - u_i) r_i^k + \lambda_j \{ (u_i - d_i^1) r_i^k + a_i^1 \cdot r_i^k \}] / Q_i \quad (4)$$

$k = 1$ の時、

$$r_i^1 = [(Q_i - u_i) r_i^1 + \lambda_j \{ (u_i - d_i^1) r_i^0 + g_i^1 + a_i^1 \cdot r_i^0 \} + R_i] / Q_i \quad (5)$$

ここに、 $r_i^0 = 1 - r_i^1$ で、河川水量のうち下水処理場で 1 度も処理されていない水量の比率（未使用率）を表

している。式(4)(5)より、各取排水地点の河川水量に占める下水処理水の割合を求めることができる。

(3) 計算結果とその解釈

図4より、平成6年の濁水流量はおよそ3/50の規模である。上式により、この平成6年の8～10月の3ヶ月間について、淀川に位置する上水道取水口での下水処理水割合を推定した(3ヶ月平均と日単位で推計)。その結果を主要取水口で縦断的に整理した結果(3ヶ月平均)を図5に示す。

①下水処理水の処理回数は、枚方大橋地点で最大6回の下水処理水を含んでいる。この処理水は木津川上流部の宇陀川浄化センターの放流下水である。これより下流で取水された水は(例えば、寝屋川市の香里浄水場)、海域に至るまでに、もう一度下水処理されるので、海域へ流入する時には全7回の処理履歴を持つ下水が放流されることとなる。このようにカスケード型の循環利用がなされている。

②枚方地点の処理回数別の処理水割合を見ると、全体で10.5%である。1回処理水の割合は10.3%で処理水全体の98%を占め非常に大きく、2回以下は0.2%と小さくなっている。下水処理水の割合は日単位の計算では最大で25%(枚方)となった。

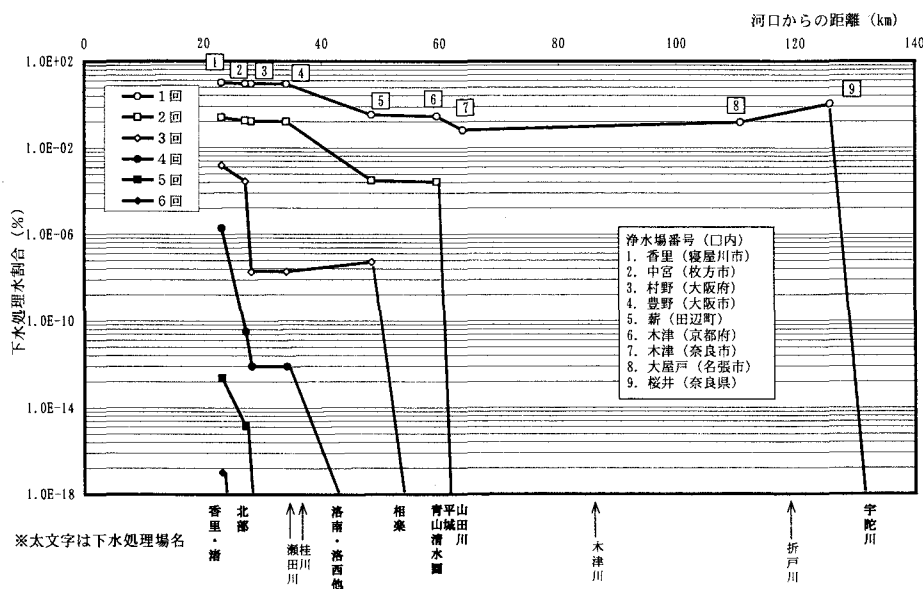


図5 河川水中の下水処理水の割合(淀川)

以上より、下水道管理者の立場で言えば、下水処理水が水資源として有効であること、水循環の重要な構成要素であることを示している。しかし、水循環圏として見たときの意義はそれだけでない。処理回数2回以下が0.2%と一見低い値と考えがちであるが、化学物質の監視水準のオーダーがナノ(10⁻⁹:10億分の1)のレベルにも至ることを鑑みると放流処理水中にわずかに残留していても下流の水道水源では決して無視できない大きさであることを意味している。処理水でなく事業所の有害物質が河川へ直接流入した場合には下流の水道取水や下水処理に対して深刻な影響が懸念される。特に淀川ではカスケード型の水利用が行われており、ひとたび水質事故が発生するとその影響は連鎖的に下流に拡大することが予想される。水質管理や事故対策について発生源情報と取排水の位置を考慮した河川、水道、下水道の一元的な管理が必要である。

4.4 有害物質の取り扱い施設

有害物質の循環について述べたが、それらの発生源となり得る事業所は淀川流域に多数存在している⁸⁾。人の健康を損なうおそれのある化学物質を取り扱う事業所の所在地、排出量についてはPRTR調査により

把握されている。取水口の上流に存在している滋賀県と京都府の事業所数は調査結果（2002 年）より、滋賀県（508 箇所）、京都府（523 箇所）である。これに下流部の大阪府を加えると全体で 2671 箇所にもなる。これら事業所から河川への化学物質の流入が生じた場合、前節で述べたようなカスケード的な循環をとおして影響が水循環圏に拡大する可能性がある。これら事業所における有害物質の存在の有無や存在量について、河川管理者、水道管理者、下水道管理者が情報を共有して対策を講じることが求められる。

5. おわりに

本研究では、大都市域における水循環圏としての概念を説明し、水循環ネットワークとしての一元的な管理の有用性について考察した。また、淀川大都市域水循環圏を事例として、水循環圏として管理することの意義について検証した。最後に大都市域水循環圏としての水管理を進めるに際して次の点は重要である。

大都市域水循環圏という共通認識のもとで様々な課題が議論された時、従来の個別問題は全体の中で関係者の利害得失（例えば経済性）を踏まえて新たな位置付けを有することになる。このためには問題に対する議論に関係者が積極的に参加することが重要であり、この点が可能となつてはじめて水循環圏という新たな概念の意義がある。今後の課題を以下に示す。

- ①水循環圏という単位で水循環を議論すると水管理主体が多数となる。また、水に直接関係しない環境部局の参加も必要となる。これら複数の主体によるリスクマネジメントを行う必要があるが、そのためのモデル化や方法論の構築が求められる。
- ②従来の治水・利水・環境という計画・管理の枠組みを水循環圏の中でどのように位置付けるかが大きな課題である。この際、関係者の主体・客体としての認識が重要であり、また、トレードオフや上下流問題などとして新たな課題が明確になることが予想される。
- ③本研究では、大都市域を対象としたが、都市化されていない地域を含めた水循環圏における水循環システムのモデル化が必要である。そこでのマネジメントの方法論の構築も求められる。さらに、大都市域水循環圏と水循環圏、水循環圏相互の関係のあり方について考察を進める必要がある。

【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，環境システム研究，Vol. 28，pp. 277-284，2000.
- 2) 清水康生・萩原良巳・西村和司：グラフ理論による大都市域水循環圏ネットワークの構造安定性の評価，環境システム研究，Vol. 30，pp. 265-270，2002.
- 3) 安田実・清水康生・竹本隆之：流量変動が河川環境の維持形成に果たす役割に関する研究，第 26 回環境システム研究，pp. 77-84，1998.
- 4) 皆川朋子，清水高男，島谷幸宏：流量変動が生物に及ぼす影響に関する実験的検討，土木学会河川部会河川技術に関する論文集，第 6 巻，pp. 191，2000.
- 5) 清水康生：流量変動が河川環境の維持形成に果たす役割に関する研究，RIVER FRONT，VOL. 34，pp. 19-25，1999.
- 6) 気象庁：異常気象レポート'94，1994.
- 7) 塩路勝久・清水康生：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，NO. 409，VOL. 34，pp. 63-72，1997.
- 8) 中瀬有祐・清水康生・萩原良巳・酒井彰：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，Vol. 29，pp. 339-345，2001.