

# 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

西村和司<sup>1</sup>・清水康生<sup>2</sup>・萩原良巳<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 京都大学大学院 工学研究科土木システム工学専攻 (〒611-0011 京都府宇治五ヶ庄)

<sup>2</sup>正会員 工修 京都大学助手 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治五ヶ庄)

<sup>3</sup>正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治五ヶ庄)

水辺は平常時に大都市域のアメニティ空間であり、地震時には消火用水、トイレ用水等の水源となり得る。この2つの側面に着目して、失われた水辺を下水処理水の利用で再び創成することを目指した水辺創成モデルを提案する。大都市域水循環システムの中で同モデルの位置付けを明確にし、定式化を行う。さらに、淀川右岸地域を対象とした適用事例を示す。

**Key Words** : water cycle use, waterfront recreation, amenity, earthquake disaster

## 1. はじめに

我が国では、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することになり、大都市域の水路や小河川は埋め立てや暗渠化された。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姿を消し、大都市域では多くの水辺が失われた<sup>1)2)</sup>。例えば大阪市では、長堀川が駐車場建設のために埋め立てられるなど、戦後から現在に至るまでに大阪市の水辺の約40%が失われている。このように大都市域に住む人々は憩いの場、安らぎの場を奪われ、自然に触れる機会を失った。

一方、このような都市域の水辺は震災時に重要な役割を果たす。阪神・淡路大震災では、地震直後に多くの火災が発生した。しかし、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つた。このような場合には都市内の水辺を利用することが最も有効である。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、地震時の被害の軽減に役立つ。

本研究は、大都市域における下水処理水を利用した水

辺創成と震災被害の軽減について構想計画としての提案を行う。具体的には、大都市域に豊富に存在しているにも関わらず殆ど利用されていない下水処理水を利用し、水辺の創成を目指した水辺創成モデルを提案する。再来間隔の長い地震だけを想定した防災施設投資を行うことは、現在の自治体の財政から考え困難な状況にある。しかし、平常時の利用を考えている水辺創成は地震時だけを想定していないため、有効な震災対策であるといえる。

以下では、まず、本論文の枠組みである大都市域水循環システムについて述べる。次に同システムで位置付けられた水辺創成モデルの定式化を行い、最後に、同モデルの淀川流域への適用事例について述べる。

## 2. 大都市域水循環システム

### (1) 現状の大都市域水循環システム

大都市域における水の流れは、河川から取水された水が水道、都市生活者の水利用、下水道を経て再び河川や海域に放流される。この水循環を一体としてとらえ、河川レイヤー、水道レイヤー、都市活動レイヤー及び下水道レイヤーから構成される階層構造として表したモデルが大都市域水循環システムモデル<sup>3)</sup>である。各レイヤーは取水口や浄水場などの要素により構成されており、そ

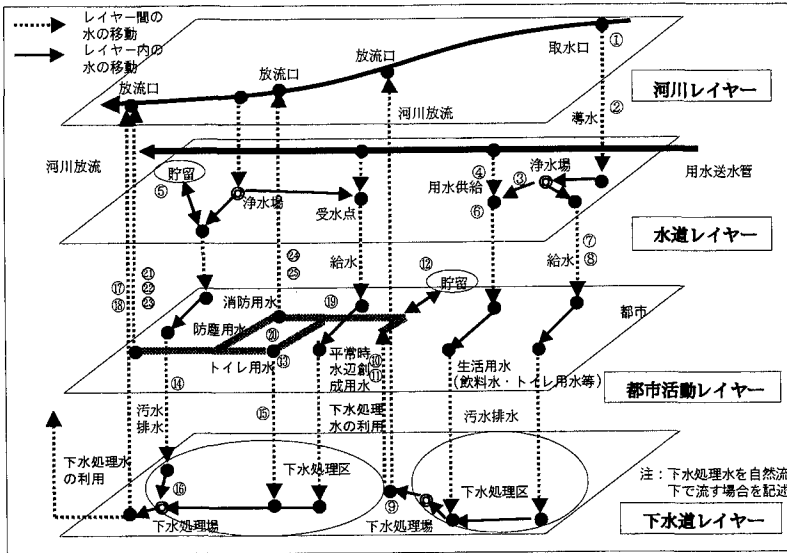


図-1 大都市域水循環システムの再構成

表-1 震災想定時における必要用水と対策

状況		Case1	Case2
		地震後 3日	3日 以降
被害	直接被害(施設)	○	○
	水環境汚染(水源)	○	○
必要用水	消火用水	○	
	飲料水	○	○
	トイレ用水		○
対策	水道レイヤー 施設内貯留(上水)	○	
	都市活動レイヤー 都市内貯留(処理水)	○	
	下水道レイヤー 下水処理水の利用	○	○

これらの構成要素は水の循環を記述するために、貯留、水質変換及び輸送のいずれかの機能を有している。

現状の大都市域水循環システムでは、河川、水道、下水道が個別に整備を進めており、各々の整備率は高い。ここでいう整備の目的は、河川であれば治水、利水、環境であり、水道であれば普及率の向上、安定供給と給水サービスの向上、下水道であれば整備の推進による環境改善というものである。しかし、都市域の現象としての水の流れは循環しているにも関わらず、この事を水管理者が水循環システムとして認識していない。このため、各管理者の行う対策の限界として、アメニティの低下や震災時の用水不足等の問題が表出していると考えられる。

(2) 大都市域水循環システムの再構成

平常時における都市のアメニティ向上のために水辺を創成することを前提とし、地震時のどのような場面で、どのような水辺の利用が可能であるか、阪神・淡路大震災の状況をふまえて以下に述べるものとする。

震災時に都市で必要とされる水量(水質)は地震発生後の時間経過により異なる。すなわち、どのような場面で

どのような水を供給できるかということが重要となる。阪神・淡路大震災では地震直後に発生した大規模な火災に対する消火用水が必要となった<sup>4)</sup>。トイレ用水は火事が収まった後、断水が長期化するにつれてその必要性が高まり、飲料水はこの間常に必要なものであった。また、地震時は水環境汚染の被害が最も顕著に現れる場面である。中瀬ら<sup>6)</sup>の研究により示されるように、地震時に河川上流の工場や廃棄物処分場のような施設が被災した時、有害物質が水道水源へ流入し下流の取水口では取水ができなくなることが予想される。

上記の場面を想定した時に、被害を軽減し水利用を可能とする有効な対策として、水道施設における水道水の施設内貯留、下水処理水の都市内貯留、下水処理場からの下水処理水の利用等が考えられる。被災時の状況における被害、必要用水、対策を阪神・淡路大震災の実態をふまえて整理した結果を表-1に示す。同表では、地震後3日間とそれ以降で状況を分け、時間経過に沿って重要となる項目に○印を付している。阪神・淡路大震災の際の実態から火災が鎮火するのに必要な日数が2日程度であったことから、この期間は消火用水と飲料用水が重要であると考えた。水道施設の被害により水供給が困難となることが想定され、同期間の対策として貯留が重要であると考えた。また、水源汚染は河川流下時間から2日間程度<sup>7)</sup>は続くものと考え、3日目以降については必要水量としてトイレ用水の需要が高まると考える。上述した場面を前提として水辺創成モデルを下水道レイヤーと都市活動レイヤーの対策として位置付けた大都市域水循環システムの再構成の概念を図-1に示す。都市活動レイヤーにおける水辺創成水路は本研究で想定する施設である。

### 3. 水辺創成モデルの定式化

図-1 で示した大都市域水循環システムにおける水の流れを定式化する。同図では下水処理水を自然流下で流す場合を記述しているが、本章での定式化は下水処理水を上流に圧送するサイクル利用も考慮している。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。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等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  $m^3$ /日として定式化する。以上のように大都市域水循環システムを定式化した後、都市活動レイヤーと下水道レイヤーに対象を絞り水辺創成モデルの目的関数と制約条件を記述する。

#### (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を付してあるマトリクス(ベクトル)の大都市域水循環システムでの位置付けを図-1 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。

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

$q_i^1$ : 河川取水口  $i$  からの取水量

$q_i^1 \leq q_i^r$   $q_i^r$ : 取水口  $i$  の取水権量

#### 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。

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

$M_{ij}^1$ : 取水口  $i$  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。

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

c) 用水供給事業者の浄水場に送る用水供給量

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

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

$q_j^3$ : 浄水場へ送られる用水供給量

d) 浄水場からの全給水量

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  $q^4$  とする。

$$q^4 = (q_1^4 \ \dots \ q_j^4 \ \dots \ q_b^4)$$

$q_j^4$ : 水道施設  $j$  内に貯留されている浄水量

⑥浄水場からの全給水量を表すベクトルを  $q^4$  とする。

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

$q_j^4$ : 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。

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

$M_{jk}^2$ : 浄水場  $j$  の持つ浄水量を市町村  $k$  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。

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

$q_k^5$ : 浄水場  $j$  から市町村  $k$  へ送られる浄水量

f) 下水処理場から市町村へ配分される下水処理水量

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。

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

$X_l^a$ : 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。

$$X^{\beta} = \begin{pmatrix} X_{11}^{\beta} & \cdots & \cdots & \cdots & X_{1c}^{\beta} \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ \vdots & & X_{ik}^{\beta} & & \vdots \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ X_{1d}^{\beta} & \cdots & \cdots & \cdots & X_{dc}^{\beta} \end{pmatrix} \quad \sum_{k=1}^c X_{ik}^{\beta} = 1$$

$X_{ik}^{\beta}$ : 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

- ⑩ 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。

$$q^6 = q^7 X^{\alpha} X^{\beta} = (q_1^6 \quad \cdots \quad q_k^6 \quad \cdots \quad q_c^6) \quad (4)$$

$q_k^6$ : 下水処理場  $l$  から市町村  $k$  へ送る下水処理水量

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

$q^7$ : 下水処理場  $l$  の下水処理水量を表すベクトル

- g) 市町村に貯留されている処理水の貯留量

- ⑪ 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  $q^{\beta}$  とする。

$$q^{\beta} = (q_1^{\beta} \quad \cdots \quad q_n^{\beta} \quad \cdots \quad q_f^{\beta})$$

$q_n^{\beta}$ : 市町村  $k$  の環境点  $n$  に貯留されている処理水量

- h) 下水処理場に流入してくる下水量

- ⑫ 環境点に送られてきた下水処理水の生活用水への利用比率を表すマトリクスを  $X^{\gamma}$  とする。

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

$X_n^{\gamma}$ : 環境点  $n$  における下水処理水の利用比率

- ⑬ 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。

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

$M_{ki}^3$ : 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

- ⑭ 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。

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

$M_{ni}^4$ : 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

- ⑮ 下水処理場  $l$  に流入する下水量を表すベクトルを  $q^7$  と

する。

$$q^7 = q^5 M^3 + (q^9 + q^{\beta}) X^{\gamma} M^4 = (q_1^7 \quad \cdots \quad q_i^7 \quad \cdots \quad q_d^7) \quad (5)$$

$q_i^7$ : 下水処理場  $l$  の下水処理水量

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

$q_n^9$ : 市町村  $k$  から環境点  $n$  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

- ⑯ 下水処理場から河川へ放流される下水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。

$$M^5 = \begin{pmatrix} M_{11}^5 & \cdots & \cdots & \cdots & M_{1e}^5 \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ \vdots & & M_{lm}^4 & & \vdots \\ \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ M_{d1}^5 & \cdots & \cdots & \cdots & M_{de}^5 \end{pmatrix}$$

$M_{lm}^5$ : 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

- ⑰ 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。

$$q^8 = \{ q^7 (E - X^{\alpha}) \} M^5 = (q_1^8 \quad \cdots \quad q_m^8 \quad \cdots \quad q_e^8) \quad (6)$$

$q_m^8$ : 下水処理場  $l$  から河川の放流口  $m$  へ放流される下水処理水量

- j) 市町村から環境点へ送られる下水処理水

- ⑰ 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。

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

$M_{kn}^6$ : 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

- ⑱ 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。

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

$q_n^9$ : 市町村  $k$  から環境点  $n$  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

- ⑲ 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  $X^{\delta}$  とする。

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

$X_n^{\delta}$ : 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

- ⑳ 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。

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

$M_{nm}^7$ : 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

㉒ 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。

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

$q_m^{10}$ : 環境点  $n$  へ送られてきた下水処理水の放流口  $m$  への直接放流量

1) 消火用水の河川への流出量

㉓ 消火用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。

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

$M_{nm}^8$ : 消火用水の放流口  $n$  への間接流出比率

㉓ 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。

$$q^{11} = (q^9 + q^8) (E - X^7 - X^8) M^8 = (q_1^{11} \dots q_m^{11} \dots q_e^{11}) \quad (9)$$

$q_m^{11}$ : 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連続の式を記述する。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  $q^9$ 、環境点から河川に直接放流される放流量  $q^8$  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  $q^a$ 、環境点の下水貯留量  $q^b$ 、河川の取水口から取水した水量  $q^1$  の合計に等しい。

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

b) 水道レイヤーへの流入と流出

全浄水量  $q^4$  が水道レイヤーに流入し、浄水場から市町村へ送られる浄水量  $q^5$  が水道レイヤーより流出する。

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

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  $q^6$  及び環境点の下水貯留量  $q^b$  が

都市活動レイヤーに存在し、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した下水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下水処理水量  $q^{10}$ 、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  $q^{11}$  が都市活動レイヤーより流出する。

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

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量  $q^7$  が下水道レイヤーに流入し、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  $q^6$  の和が下水道レイヤーより流出する。

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

e) 河川の流量連続条件

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

ただし、

$q^R$ : 河川の流量基準点  $R$  での流量

とする。

$q^1 q^8 q^{10} q^{11}$  は取水口  $i$ 、排水口  $m$  の位置が上流の  $R$  から下流の  $R+1$  の間にある取配水を考える。

(3) 水辺創成モデルの目的関数と制約条件

a) 平常時の目的関数

開水路に流れている水量と水路周辺の誘致人口が多いほどアメニティが向上すると考え、アメニティが最大になるように処理水を配分することを目的関数として定式化する。

$$\text{maximize } \sum_{k=1}^c (E_k^1 \times q_k^6) \quad (15)$$

ただし

$$E^1 = (E_1^1 \dots E_k^1 \dots E_c^1)$$

$$E_k^1 = R_k + U \times S_k \times T_k : \text{アメニティ効果 (人)}$$

$U$ : 開水路の誘致距離 (km)

$R_k$ : 処理水を配分する都市  $k$  の人口 (人)

$S_k$ : 開水路のルート上の都市  $k$  の人口密度 (人/km<sup>2</sup>)

$T_k$ : 都市  $k$  までの開水路の距離 (km)

$q_k^6$ : 下水処理場  $l$  から市町村  $k$  へ送る下水処理水量とする。

$q_k^6$  を用いて水辺創成モデルにおける水循環の意味を説明しよう。

$q_k^6$  は 3.1 より次式で書くことができる。

$$q^6 = \left\{ (q^1 M^1 + q^3 + q^a) M^2 M^3 + (q^6 M^6 + q^b) X^7 M^4 \right\} X^a X^b \quad (16)$$

同式は、決定変数  $X^a$ 、 $X^b$ 、 $X^7$  が掛け合わされた

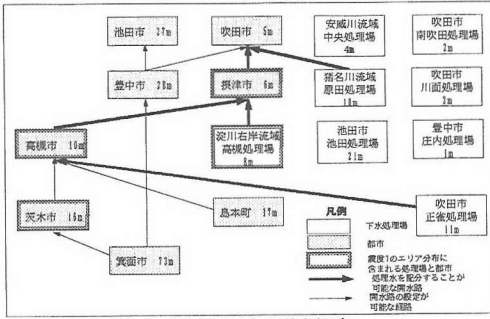


図-2 下水処理水の送水経路

非線型となっている。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。右側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。

b) 平常時の制約式

平常時のアメニティの向上を考えた下水処理水の配分量と震災時の被害の軽減を考えた下水処理水の配分量の差を許容する限度として調整定数を設け次のように制約式とする。

$$\left| \frac{q_k^e - q_k^6}{q_k^d} \right| \leq S \quad (17)$$

ただし

$q_k^e$  : 地震時を想定した時に都市  $k$  に送られる下水処理水量

$q_k^d$  : 地震時に必要な消火用水またはトイレ用水量

$S$  : 調整定数

とする。

c) 地震想定時の目的関数

地震時に都市が必要とする処理水量と、処理場が分担する処理水量との乖離を最小にすることを目的関数として定式化する。

$$\text{minimize } \sum_{k=1}^6 (q_k^d - q_k^6) \quad (18)$$

d) 震災時の制約式

地震時に都市が必要とする水量以上に下水処理水を都市に配分しないことを次のように制約式とする。

$$q_k^e \geq q_k^6 \quad (19)$$

4. 淀川流域におけるモデルの適用事例

(1) 淀川右岸地域への適用条件

a) 適用地域と対象とする活断層系

水辺創成モデルの適用地域を人口が集中し、かつ下水

表-2 必要水量

市区町村名	人口(人)	被災率	想定火災発生件数(件)	消火用必要水量(㎡)	被災人口(人)	トイレ用必要水量(㎡/日)	環境汚染時トイレ用必要水量(㎡)
豊中市	398,908	—	—	—	—	—	15,956
池田市	104,293	—	—	—	—	—	4,172
吹田市	342,760	—	—	—	—	—	13,710
高槻市	362,270	0.61	48.2	69,349	221,878	8,875	14,491
茨木市	258,233	0.23	13.6	19,639	60,538	2,422	10,329
箕面市	127,542	—	—	—	—	—	5,102
摂津市	87,330	0.29	7.0	10,126	25,280	1,011	3,493
島本町	30,339	—	—	—	—	—	1,214
合計	1,711,675	—	68.8	99,114	307,696	12,308	68,467

処理場が多数存在する大阪府淀川右岸(表-2に示す7市1町)とする。同地域は複数の活断層の影響を受ける地域であるが<sup>9)</sup>、ここでは生駒断層系を分析対象とする。また、処理水の循環は自然流下を仮定する。

b) 処理水の送水可能経路の決定

下水処理水は最短経路である直線の開水路を自然流下で下水処理場から隣接する市町村の代表点(市・区役所)へ送水し、その都市から隣接する都市へ順次送水する。この考えに基づき、隣接関係と標高を考慮した関係行列を作成しISM (Interpretive Structural Modeling)の援用により、処理水の送水可能経路を決定する。

c) 震災ハザードを考慮した送水可能都市の選定

淀川右岸地域に生駒断層系による震度7想定区域を重ねる<sup>9)</sup>。阪神・淡路大震災で大きな被害の発生した震度7を都市に多大な影響を与える震度であると考え、水道管路、浄水場、下水管、下水処理場が震度分布に重なった場合、それらは機能しないと仮定し、被災した市町村に処理水を送る経路を決定する。ただし、水辺創成水路は被害にあわないという仮定を置く。図-2に被災していない下水処理場と処理水を必要とする被災都市、それらをつなぐ開水路の経路を示す。

d) 必要水量の算定

表-1に示した地震時に必要な用水の中で、下水処理水で補うことのできる水として消火用水とトイレ用水がある。消防水利の要件として、流水の場合、取水可能量が1㎡/分以上で連続40分以上、貯留の場合では40㎡以上であると定められている<sup>9)</sup>。また、トイレ用水は一人当たり一日40ℓ使用すると考える<sup>9)</sup>。火災発生件数の想定は阪神・淡路大震災のデータを基に震度7の区域で1km<sup>2</sup>につき1.8件発生すると仮定する<sup>9)</sup>。この考えに基づき、生駒断層系が引き起こす地震が発生した場合と、それに伴い淀川の水環境汚染が発生し取水が困難となった場合の淀川右岸で必要となる水量<sup>10)</sup>を表-2に示す。

e) 下水処理場の処理能力

地震が発生したとき震度7の区域にある下水道施設は機能しなくなり下水は下水処理場に流入しないと仮定する。ただし、今回のモデル適用地域にある正雀処理場(一日平均下水処理水量:23,084㎡)と原田処理場(同:139,874㎡)に関しては被害を受けず下水流入量の減少はない。

表-3 消火用水を対象とした (Case1)

処理場→市町村	アメニティ効果(人)	消火用必要水量(m <sup>3</sup> /日)	地震時を想定した場合			平常時を想定した場合				
			下水処理水送水量(m <sup>3</sup> /日)	X <sup>a</sup> の値	X <sup>b</sup> の値(初期値)	充足率	下水処理水送水量(m <sup>3</sup> /日)	X <sup>a</sup> の値	X <sup>b</sup> の値(決定値)	充足率
正雀処理場→高槻市	400,018	69,349	20,143	1.00	0.87	0.29	21,155	1.00	0.92	0.31
正雀処理場→摂津市	121,399	10,126	2,941		0.13	0.29	1,929		0.08	0.19
合計	-	79,475	23,084	-	1.00	-	23,084	-	1.00	-

表-4 トイレ用水を対象とした分析 (Case2)

処理場→市町村	アメニティ効果(人)	トイレ用必要水量(m <sup>3</sup> /日)	地震時を想定した場合			平常時を想定した場合				
			下水処理水送水量(m <sup>3</sup> /日)	X <sup>a</sup> の値	X <sup>b</sup> の値(初期値)	充足率	下水処理水送水量(m <sup>3</sup> /日)	X <sup>a</sup> の値	X <sup>b</sup> の値(決定値)	充足率
正雀処理場→高槻市	400,018	8,875	8,875	0.43	0.90	1.00	8,976	0.43	0.91	1.01
正雀処理場→摂津市	121,399	1,011	1,011		0.10	1.00	910		0.09	0.90
合計	-	9,886	23,084	-	1.00	-	9,886	-	1.00	-

表-5 環境汚染時を考慮した分析 (Case2)

処理場→市町村	アメニティ効果(人)	トイレ用必要水量(m <sup>3</sup> /日)	地震時を想定した場合			平常時を想定した場合				
			下水処理水送水量(m <sup>3</sup> /日)	X <sup>a</sup> の値	X <sup>b</sup> の値(初期値)	充足率	下水処理水送水量(m <sup>3</sup> /日)	X <sup>a</sup> の値	X <sup>b</sup> の値(決定値)	充足率
正雀処理場→高槻市	400,018	14,491	13,467	1.00	0.58	0.93	14,916	1.00	0.65	1.03
正雀処理場→摂津市	121,399	3,493	3,246		0.14	0.93	2,897		0.13	0.83
正雀処理場→吹田市	38,712	13,710	6,371		0.28	0.46	5,271		0.23	0.38
原田処理場→吹田市	408,645	13,710	7,340		0.05	1.00	7,340		1.00	0.05
合計	-	31,694	30,424	-	-	-	30,424	-	-	-

f) 水辺創成モデルの解法

水辺創成モデルを解くに際し、利用する下水処理水は自然流下を仮定するため、カスケード型利用となる。さらに、目的関数と制約条件は共に非線形であるため求解の困難さを考慮して、モデルを線形化し多段的に解を求める。この解法は式(18)、式(19)を用いて地震時に使う下水処理場の下水処理水の割合  $X^a$  を  $X^b$  (初期値) を仮定して決定する。次にその結果を与件とし式(15)、式(17)を用いて、地震時の必要水量との乖離を少なく、平常時のアメニティをできるだけ高くする処理水の配分比率  $X^b$  (決定値) を決定する。本事例では簡単のため、下水処理水を消火用水に利用した場合にはその水は河川に流出し、トイレ用水として利用した場合にも被災のため下水処理場に流入しないと考え  $M^d = 0$  とする。すなわち、全量河川に流入すると考える。都市  $k$  のアメニティの効果  $E_k^1$  は、開水路の延長  $L_k$ 、開水路沿線の都市の人口密度  $S_k$  及び誘致距離  $U$  を乗じた結果に下水処理水の送り先の都市の人口  $R_k$  を加えた値である。今回の事例研究の誘致距離は 500m とする<sup>11)</sup>。なお、調整定数は 0.1 とした。

(2) 水辺創成モデルの適用結果と考察

a) 消火用水を対象とした分析結果

表-1 の Case1 の地震後 3 日以内で施設の直接被害が起った場合を想定し、この時に必要となる消火用の下水処理水量を確保し、アメニティ効果をできるだけ高くする下水処理水の最適配分を求める。この際、 $X^a$  を求める時の  $X^b$  (初期値) は各市毎の火災の発生件数の比に

より決定した(表-3 参照)。分析の結果、正雀処理場の処理水が少ないことから火災が発生した場合、消火活動を十分に行うだけの処理水を配分することができないことが分かった。平常時のアメニティの向上を考えた時、摂津市の充足率は 0.29 から 0.19 に減少したが、高槻市の充足率は 0.29 から 0.31 とあまり変化がなかった。その理由としては、高槻市の火災発生件数が摂津市の約 7 倍という大きな値となったためであると考えられる。

b) トイレ用水を対象とした分析結果

Case2 の地震発生より 2 日以降で施設の直接被害が起った場合を想定し、この時に必要となるトイレ用水を対象とした下水処理水の最適配分を求める。この時の  $X^b$  (初期値) は各市毎の被災人口の比により決定する(表-4 参照)。トイレ用水の必要水量は消火用水に比べ少ないため正雀処理場の下水処理水の利用だけで、必要水量を満たすことができる。アメニティを考えた時には、a) と同様に高槻市に多くの処理水をおくこととなり、必要水量の差により高槻市の充足率は 1.00 から 1.01 と少ない増加で、摂津市の充足率は 1.00 から 0.90 への減少となった。また、開水路の経路の途中で消火用の都市内貯留施設を設けておけば、トイレ用必要水量だけを考えた下水処理水の配分で消火用水を確保することが可能である。この点は留意する必要がある。

c) 水環境汚染を考慮した分析結果

Case2 の震災が発生した時に水源の水環境汚染を伴った場合を想定する。2(2) で述べたように地震発生後に水環境汚染が起った場合、河川からの取水が不可能となるため、地震の直接被害を受けていない地域でも多くの

水不足が発生する。このため、生活用水の一部であるトイレ用水を下水処理水で賄うことを考えた場合の下水処理水の最適配分を求めた(表-5参照)。

水環境汚染を考えた場合、下水処理水の送水が可能で必要水量が発生する市として吹田市が加わる。この時、正雀処理場の処理水量だけでは必要水量を賄うことはできないが、原田処理場が吹田市に下水処理水の送水が可能であるため、充足率は高い値となった。吹田市、高槻市、摂津市の順に人口集積度が高いため、アメニティを考えると処理水の配分を行った時には、吹田市の充足度が1.00から1.10に、高槻市の充足度が0.93から0.86に、摂津市の充足度が0.93から0.83となる。

水環境汚染を考えた場合には、対象地域の7市1町全ての市町村で処理水を必要としているにも関わらず、3市以外に処理水を送ることができない。これは、下水処理場が地盤の低い河川流末に集中している事が原因であると考えられる。処理場が下水を排除するという、これまでの下水道の政策から考えれば効率のよい施設配置ではあるが、下水を河川に放流するだけではなく、利用するという観点からみた場合には、適切な配置ではないと言える。

## 5. おわりに

本研究では、大都市域における水循環システムをモデル化し、平常時のアメニティの向上と地震時の用水確保を目的とした水辺創成モデルを提案した。また、同モデルを淀川右岸地域に適用し下水処理水の最適な配分についての考察を行った。

今後の課題として、本モデルでは水循環の輸送関係をノードとノードとの対応関係として表現したが、システムのネットワークとしての情報(ノード間の距離)が含まれておらず、この点を考慮したモデル化が必要である。このことによりシステムの構造の信頼性、安定性の考察が可能となる。また、震災対策として、水道事業者間の

連絡管や下水処理場間(処理区域間)の下水連絡管、さらに他水源からの取水についても考慮する必要がある。そして、水辺創成モデルの環境点については学校や公園といった地域特性を考慮した処理水の配分を検討していかなければならない。

**謝辞:** 本研究の遂行するにあたり、適切なお助言を頂いた都市水循環システム研究会の渡辺晴彦氏、西澤常彦氏、酒井彰氏、本研究を通して惜しまぬご協力を頂いた八千代エンジニアリング 阪本浩一氏、京都大学大学院 久保宜之氏に厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 堤武、萩原良巳編著:都市環境と雨水計画、勁草書房、2000。
- 2) 大阪市:大阪の町づくりーきのう・今日・あす、1991。
- 3) 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システムモデルの構築に関する研究、環境システム研究論文集 Vol.28, pp277-281, 2000。
- 4) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会: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、土木学会、1997。
- 5) 神戸市消防局:阪神淡路大震災における消防活動の記録[神戸市域]、財団法人神戸市防災安全公社、1995。
- 6) 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、環境システム研究論文集 vol.29, 2001。(投稿中)。
- 7) 淀川水質協議会資料、2001
- 8) 関西水道事業研究会:消火用水確保の観点から見た都市の安全と水道のあり方に関する一考察、1997。
- 9) 土木学会編:土木工学ハンドブック 第63編3章 水資源システム、技報堂、P.2562, 1999。
- 10) 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者の提携に関する考察、土木学会年次学術講演会、2001。(投稿中)。
- 11) 萩原良巳、萩原清子、高橋邦夫:都市環境と水辺計画、勁草書房、1998。

## A STUDY OF WATERFRONT RECREATION AND EARTHQUAKE DISASTER MITIGATION UTILIZING OF RECLAIMED WATER IN URBAN AREA

Kazushi NISHIMURA, Yasuo SHIMIZU and Yoshimi HAGIHARA

A waterfront is amenity space in normal and becomes important place to get hydrant water and toilet water in time of an earthquake disaster occurred. In this paper, a concept of waterfront recreation model utilizing of reclaimed water in sewage treatment plant is proposed considering both aspect. The formulation of this model is showed and the model is applied to right area of the Yodo river as a case study.