

(57) TOXPに関する水源保全策と高度浄水技術のトレードオフ解析

THE TRADE-OFF ANALYSIS OF TOXP BETWEEN SOURCES CONTROL AND
ADVANCED WATER TREATMENT

斉藤 方正*
Shigeakira SAITO

ABSTRACT: This paper deals with the trade-off analysis between water treatment processes and sources control measure in the Yodo River Basin, with a view to reducing Total Organic-halogen Precursor(TOXP) for the safety of drinking water. First, by the simulation model developed for estimating pollution loads from non-point and point sources, the domestic waste and the direct run-off from penetrative surface contributed 49% and 30% to intaken water, respectively. Next, it was clarified that the complete service of secondary sewage treatment for domestic waste is the most effective measure among nine ones, by which raw water concentration is reduced by 34%. At last, the trade-off between advanced water treatment and sources control was formed where a water quality standard was set under the highest value of three critical standards.

KEYWORDS: trade-off, Total Organic-halogen Precursor(TOXP), advanced water treatment, sources control, non-point source, point source, critical water standard

1. はじめに

昨今、流域活動度の高い水道水源ではかび臭、トリハロメタンあるいは農薬など、微量な有機化学物質による水系汚染問題が顕在化している。この種の物質に関わる飲料水の安全性確保を考える場合には、基本的に、水系全体を視野に据えた種々の代替施策の選択的運用が必要であり^{1), 2)}、代替施策として浄水処理技術の高度化や下水処理施設の普及、その高度化などの点源施策あるいは雨水の浸透処理などの非点源施策等々を挙げることができる。

本稿の目的は、有機塩素化合物前駆体(以下TOXP; 難生物分解性の中・高分子有機物の集合体)を対象として種々の水源保全案の実施効果を解析しうる水質シミュレーションモデルを開発し、水源保全施策と浄水技術の選択的な運用の可能性を提示することにある。本稿では近畿の主要水源である琵琶湖・淀川水系を事例として取り上げ、浄水処理点に淀川3川(木津川、宇治川、桂川)合流部約8km下流の左岸に位置する磯島(以下I取水点)を選ん

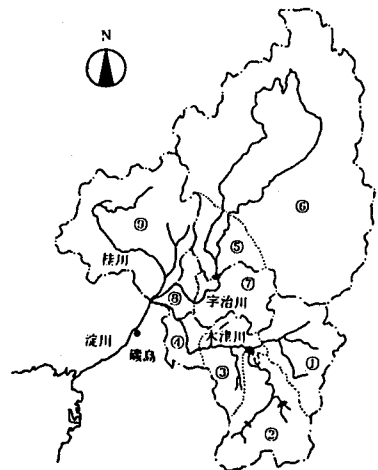


図1 琵琶湖・淀川水系の分割

* 大阪府水道部三島浄水場、Mishima Water Treatment Plant, Osaka Pref. Waterworks

だ。なおモデルの開発と解析にはデータの整備状況等を勘案してTOXP濃度と強相関性を有する KMnO_4 消費量 (以下 KMnO_4 ; $\text{KMnO}_4 = 31 \times \text{TOXP} + 0.56$; $R=0.85$, $n=52^{(3)}$) を代替的に用いた。

2. 水質シミュレーションモデルの開発

2.1 モデルの構造

(A) 流域の分割 モデルでは琵琶湖・淀川水系を計9の流域ブロックに分割した(図1、2)。各ブロックでの発生負荷は分解、沈澱などの流下作用を経て3川合流部へ流下するものとし(式(1))、I取水点の濃度Cは流量混合率(m_i)⁽⁴⁾を用いて式(2)で表現した。ここにiは淀川3川(1:木津川、2:宇治川、3:桂川)を表わす添字、jは河川iに流入する流域ブロックである。

(B) 負荷発生過程の記述 単位発生源として雨(wf)、路面(rd)、不透透性面(rf;路面除く)、浸透性面表層(ps;主として林地表層)浸透性面深層(pd;主として林地深層)の7面源および生活雑排水(d;下水処理、下水未処理)、産業系排水(in)の2点源を考慮した。路面、不透透性面への負荷供給源は車両およびdry falloutである。また浸透性面表層からの流出は雨天時の直接流出、浸透性面深層からの流出は非雨天時の間接流出とし、雨水負荷は不透透性面、路面、土壌表層の3面源を直接經由して河川に供給されるものとした。下水処理による負荷の除去率は一定とし、産業系点源では業種の区分せず排出濃度を一定とした。なお琵琶湖南湖からの負荷の流出は南湖の月平均湖水濃度に瀬田川洗堰とK電力発電所の日単位放流水量の合計を乗じた。各流域ブロックでの発生負荷($L_{i,j}$)は単位発生源での発生負荷の総和として式(3)で記述し、河川iへの流出負荷($L_{i,j}'$)は式(4)で表現した。

$$L_i = \sum L_{i,j} \cdot \exp(-k_s \cdot y_j) \quad (1)$$

$$C = \sum m_i \cdot (L_i / \sum Q_{i,j}) = \sum \gamma_i \quad (2)$$

L_i : 3川合流部における河川iの流下負荷量(kg/day)

$L_{i,j}'$: i河川-流域ブロックjの流出負荷量(kg/day)

k_s : 流下係数(1/km)

y_j : 流域ブロックjの合流部への流長(km)

C : I取水点濃度(mg/l)

m_i : 流量混合率(-)

$$L_{i,j} = L_{a,j} + L_{s,j} + S_j \cdot (X_{r,i,j} \cdot q_{r,i,j} + X_{ps,i,j} \cdot q_{ps,i,j} + X_{pd,i,j} \cdot q_{pd,i,j} + X_{d,i,j} \cdot q_{d,i,j} + X_{in,i,j} \cdot q_{in,i,j}) + S_j \cdot (X_{rf,i,j} + X_{rd,i,j}) \cdot l_{v,i,j} \quad (3)$$

$$L_{i,j}' = L_{i,j} \cdot \exp[-k_s \cdot (S_j)^{1/2}] \quad (4)$$

S_j : 流域ブロック面積(10^4 m^2)

$X_{a,j}$: 面積率(-)

k_s : 流出係数(-)

$$Q_{i,j} = Q_{a,j} + Q_{s,j} + S_j \cdot (X_{r,i,j} \cdot q_{r,i,j} + X_{ps,i,j} \cdot q_{ps,i,j} + X_{pd,i,j} \cdot q_{pd,i,j} + X_{d,i,j} \cdot q_{d,i,j} + X_{in,i,j} \cdot q_{in,i,j}) \quad (5)$$

$Q_{a,j}$: 生活系、産業系点源流量(m^3/day)

$q_{a,j}$: 流出高(mm/day)

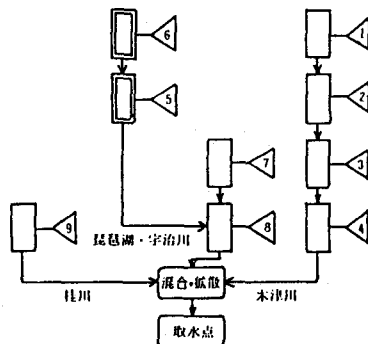


図2 流域ブロックの配列

雨、不透透性および路面^(1,2)

$$l_j = l_{o,j} \cdot [1 - \exp(-k_s \cdot q_j)]$$

l_j : 発生負荷量(kg/km²・day)

$l_{o,j}$: 堆積(蓄積)負荷密度(kg/km²)

k_s : 面源負荷発生係数(1/mm)

q_j : 流出高(雨水の場合は降雨強度(mm/day))

$$l_{o,j} = w_p \cdot (PD_j / PD_o) \cdot D$$

w_p : 標準堆積係数(kg/km²・day)

PD_j, PD_o : 人口密度(人/km²)

D : 堆積日数(day)

浸透性面表層、浸透性面深層⁽¹⁾

$$l_j = C \cdot q_j$$

C : 平均流出水濃度(kg/mm)

q_j : 流出高(mm)

生活系点源

$$L_{a,j} = C_a \cdot (1 - S_{u,j} - S_{t,j}) \cdot Q_{a,j}$$

C_a : 生活系雑排水の平均的濃度(kg/m³)

$S_{u,j}$: 下水処理(標準活性汚泥法)除去率(-)

$S_{t,j}$: 下水処理人口普及率(-)

産業系点源での負荷発生

$$l_{i,j} = C \cdot q_{i,j}$$

$C_{i,j}$: 産業系排水の平均的濃度(kg/m³)

琵琶湖流域からの流出量⁽¹⁾

$$P_i = P_{i,s} \cdot (1 - R_i)$$

$$R_i = (1 + h/v \cdot T_w)^{-1}$$

R_i : 蓄積率(-)

h : 平均水深(m)

v : 見かけの沈降速度(m/year)

T_w : 湖水の滞留時間(year)

C : 月単位の湖水濃度(mg/l) = $P_i + \Delta C \cdot \sin(\pi \cdot t/6)$

ΔC : 内部生産量(kg/m³・年平均濃度と年最小濃度の差)

H : 経過月数(4月を起算月)

一方、面源での流量発生過程は図3のように不浸透面、路面については1個、浸透面については3個の直列タンクで表現した。雨水は一定の有効降雨率で第1段タンクに入力され、浸透性面表層からの流出は上段タンクの出口、浸透性面深層からの流出は中段および下段タンクの出口からの流出の合計とした。また2種の点源からの流量(排水量)は一定とし、生活系点源には給水原単位($m^3/day \cdot$ 人)と流域ブロック内人口の積、産業系点源には届出排水量⁵⁾を用いた。最終的に各流域ブロックでの流量($Q_{i,j}$)を式(5)で表現した。

2.2 モデルの検定

検定に用いたデータは1984年4月1日～1985年3月31日の観測・実測値である(流量モデル; AMeDAS雨量(mm/day)¹¹⁾ および淀川3川合流部流量-負荷発生・流出・流下モデル; 瀬田大橋および淀川3川合流部での月単位観測値($n=12$)、I取水点における日単位観測値($n=365$)²⁾)。Trial and Error により決定したパラメーターを表1、2に、検定結果の一例を図4、5に示す。流量タンクモデルによる計算値の非超過確率分布は観測値とよく一致し観測値をほぼ再現できた。濃度計算値は実測値のほぼ±15%に収まった。

2.3 取水点における単位発生源の寄与度

図6は流域ブロック別に発生源の寄与度(年間期待値)をまとめたものである。発生源別にみると生活系点源の寄与が49%と高く、次いで土壌表層からの直接流出の寄与が30%を占めていた。流域ブロック別では流域⑧(琵琶湖北湖)の土壌表層の寄与が15%と高く、流域⑨(宇治川下流域)の生活系点源が13

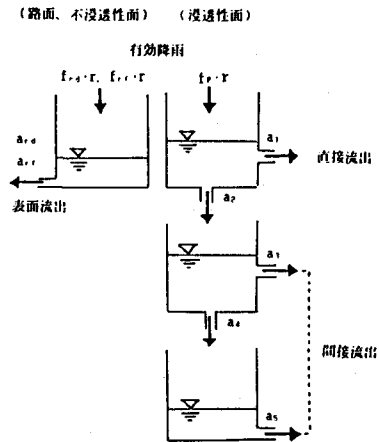


図3 流量タンクモデルの構成

表2 モデルのパラメーター^{6), 7), 9), 12)}

W_{or}	不浸透性面堆積係数	$kg/km^2 \cdot day$	43
W_{ro}	路面堆積係数	$kg/km^2 \cdot day$	232
W_{of}	大気内塵積係数	$kg/km^2 \cdot day$	22
k_{r1}	不浸透性面発生係数	$1/mm$	0.15
k_{r2}	路面発生係数	$1/mm$	0.12
k_{rf}	雨水発生係数	$1/mm$	0.08
k_1	流出係数	$1/km$	0.012
k_2	流下係数	$1/km$	0.016
S_r	下水処理除去率		0.80
C_{os}	直接流出水濃度	kg/m^3	0.070
C_{of}	間接流出水濃度	kg/m^3	0.002
C_o	生活雑排水濃度	kg/m^3	0.150
C_{pn}	事業所排水濃度	kg/m^3	0.028
v	見かけの沈降速度	$m/year$	10
$T_{r,n}$	湖水滞留時間(北湖)	year	5
$T_{r,s}$	湖水滞留時間(南湖)	year	0.04
h_n	平均水深(北湖)	m	44
h_s	平均水深(南湖)	m	3.5

表1 流量タンクモデルのパラメーター

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_{r1}	a_{r2}	f_{r1}	f_{r2}	f_o
木津川	0.30	0.70	0.08	0.60	0.01	0.30	0.30	0.90	0.65	0.55
琵琶湖流域 (0.10)			(0.08)	(0.60)						
宇治川流域	0.30	0.70	0.08	0.60	0.01	0.30	0.30	0.90	0.70	0.60
	(0.10)		(0.08)	(0.60)						
桂川流域	0.40	0.50	0.20	0.20	0.015	0.40	0.40	0.90	0.65	0.55
	(0.15)		(0.10)	(0.30)						

*) () 内の値は起算日(4月1日)より181日目以降の値

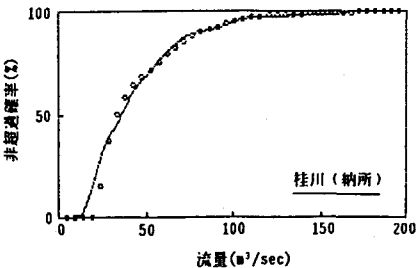


図4 流量モデルの検定結果

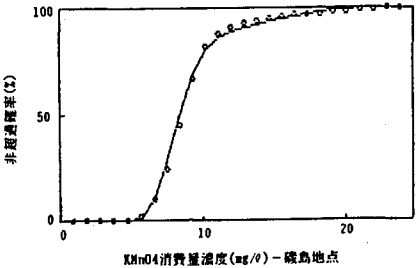


図5 水質シミュレーションモデルの検定結果

%、流域④（木津川下流域）が8%であった。宇治川下流域や木津川下流域の生活系点源の寄与度が高い一因は下水道普及率の低さにあると考えられる。

3. 水源保全策と浄水技術の選択運用に関する考察

以下でいう浄水技術は①凝集沈殿－急速砂ろ過プロセス（第1プロセス）と②オゾン分解－粒状活性炭吸着プロセス

（第2プロセス；高度浄水技術）の2種である。第1プロセスによるTOXPの除去率は44%、第2プロセス付加による除去率は93%とする²⁾。

3. 1 水源保全策の実施効果

水源保全案として表3の9案を考え、上記モデル中の人為操作可能なパラメーターをケース毎に変化させI取水点での原水濃度をシミュレートした（表4）。濃度は年間の算術平均値である。シミュレーションによると最も効果の大きかった策は生活雑排水下水処理の完全普及（原水濃度低減率：34%）、次いで家庭雑排水対策（17%）、不透水性面排水の浸透処理（8%）であった。家庭雑排水対策で流域ブロック毎の実施効果の高かった流域は流域⑧（宇治川下流域）（13%）、流域④（木津川下流域）（10%）、流域⑤（琵琶湖南湖）（8%）であった。下流域の効果が高いのは流域内人口が多く、しかも流下距離が短いためと考えられる。ただ桂川流域については下水道普及率が既に高く取水点と遠い位置関係にあることから効果は低かった（6%）。

3. 2 水源保全策と浄水技術の選択運用

原水濃度が任意の値（以下 C_r ；第2プロセス稼働濃度）を超過する場合に第2プロセスを稼働する処理形態を想定し、 C_r をvariableなものととらえ、第2プロセス運用と水源保全策の選択運用性が生じてくる。

図7上図はNon（保全策なし）、Case2およびCase3について、 C_r を変化させた時の処理水平平均濃度の変化をみたもの、また図7中、下図は第2プロセス休止日数v.s.処理水平平均濃度および第2プロセス休止日数v.s. C_r をNonとCase2についてみたものである。中図は第2プロセス運用の観点から（I）稼働休止、（II）間欠稼働、（III）常時稼働の3フェーズに区分し得る。フェーズ（II）における区間日数（A）～（B）および（C）～（D）は保全策を施すことによって短縮される第2プロセスの稼働日数を意味している。ここで C_r を定めれば第2プロセス休止日数と処理水平平均濃度（年間算術

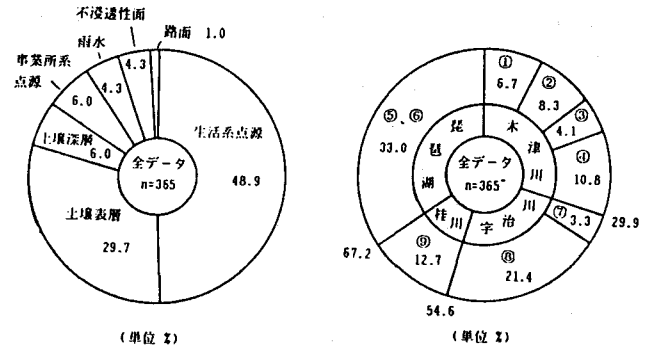


図6 I取水点における流域ブロック、発生源の寄与度

表3 水源保全案

Case 1—土壌表層での直接流出対策	植林による保水能力の向上や滞水池の設置による直接流出成分の浸透化。浸透面3段タンクモデルの上段の流出係数(a_1)を3/4にし、直接流出流量を低下させる。
Case 2—生活雑排水対策（その1）	2次下水処理施設の整備。 単位流域の下水道人口普及率(S_u)を100%とする。
Case 3—生活雑排水対策（その2）	ストレーナー、ろ紙、食器の油拭きなど家庭雑排水対策のPR。 文献 ¹⁾ より生活雑排水濃度(C_d)を現状の0.7倍とする。
Case 4—事業所排水対策	事業所排水濃度の規制。 事業所排水濃度(C_{s1})を0.020mg/lとする。
Case 5—路面排水対策（その1）	透水性舗装などによる排水の浸透化。 路面排水濃度に0.002mg/lを適用する
Case 6—路面排水対策（その2）	路面排水の下水処理（標準活性汚泥法）。 便宜上、路面堆積係数(w_{s1})を0.2に減ずる。
Case 7—屋根など不透水面対策（その1）	浸透性トレンチなどによる排水の地下浸透化。 排水濃度に0.002mg/lを適用する。
Case 8—屋根など不透水面対策（その2）	不透水面排水の下水処理（活性汚泥法）。 便宜上、不透水性面堆積係数(w_{s1})を0.2に減ずる。
Case 9—雨水対策	事業所、車両排気規制による大気内蓄積負荷の削減。 大気内蓄積係数を0.5に減ずる。

表4 水源保全案の実施効果

Case	制御対象	水質保全案	原水濃度
1	直接流出（浸透面）	保水向上：植林	8.1 mg/l
2	生活雑排水	下水道整備	5.7
3		家庭雑排水対策	7.3
4	事業所排水	排水濃度規制	8.2
5	路面対策	透水性化	8.3
6		排水処理	8.4
7	不透水性面	排水の浸透化	8.0
8		排水処理	8.1
9	雨水	大気内負荷削減	8.3
Non	施策なし	—	8.8

平均値) がほぼ一義的に定まる。逆に処理水の水質目標を定めれば、第2プロセスの運用体制 (C_x ならびに第2プロセス休止日数) が定まる。たとえばCase 2の場合、処理水の水質目標を仮に 2.0mg/l に設定すると第2プロセスの休止日数は点(E) に対応し、区間 (C)~(D) に相当する第2プロセスの稼働日数が減少する。そして C_x は下図の(F) 点に設定される。

このように図7中図を用いることによって水源保全策実施に要する費用と策実施によって生じる浄水処理費用の減少分(以下、可換的費用という)のトレードオフ解析が可能となる。図8は第2プロセスの費用関数(建設費および維持管理費)¹⁶⁾をもとに、Case 2、Case 2-⑧およびCase 3について処理水水質濃度と可換的費用の関係を図化したものである。ここで浄水処理量は日量 $2.0 \times 10^6 \text{m}^3$ とし、建設費については耐用年数30年として単年当りの費用を適用している。図によれば、処理水水質目標の設定値(C_{wc})によって第2プロセスの運用と水源保全策の関係が3種の臨界水質値(C_1, C_2, C_3)を境に以下の4フェーズに区分される。

- ・フェーズ(0) : $C_{wc} > C_1$
 水源保全策を実施しなくとも第2プロセス運転の必要性がない。浄水処理と水源保全にトレードオフ関係が存在しないフェーズ。
- ・フェーズ(I) : $C_1 \geq C_{wc} > C_2$
 水源保全を行わない場合、処理水水質目標が C_1 に下げられた時点で、第2プロセス運転が必要。しかし水源保全策を実施することによって第2プロセスは休止し可換的費用が生じる。
- ・フェーズ(II) : $C_2 \geq C_{wc} > C_3$
 水源保全を行っても第2プロセス運転が必要である。ただ水源保全策実施によって稼働日数が減少するため可換的費用が生じる。
- ・フェーズ(III) : $C_3 \geq C_{wc}$
 水源保全を行っても第2プロセスの常時運転が必要である。したがって可換的費用が生じない。浄水処理と水源保全のトレードオフ関係は消滅する。

表5に各Caseの C_1, C_2 まとめた。Case 2で浄水処理と水源保全の選択運用の可能性が生じるのは処理水水質目標が TOX (有機塩素化合物) で 0.14mg/l 以下に定められた場合である。この場合、浄水処理とのトレードオフ関係から下水処理の全流域普及の促進、あるいは取水点での寄与度が高い流域ブロックを優先的、選択的に下水整備するといった施策、さらに一般家庭向けの保全PRや補助による家庭雑排水対策の誘導などが浮上してくる。

表5 臨界水質値 (C_1, C_2 ; 単位 mg/l)

	Case 2		Case 2-⑧		Case 3	
	C_1'	C_2'	C_1'	C_2'	C_1'	C_2'
KNnO4消費量	4.90	3.22	4.90	4.25	4.90	4.06
TOXP	0.140	0.086	0.140	0.119	0.140	0.113

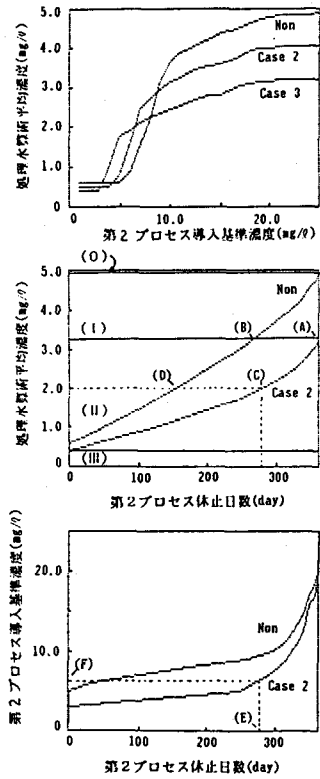


図7 水源保全案実施と浄水処理の関係

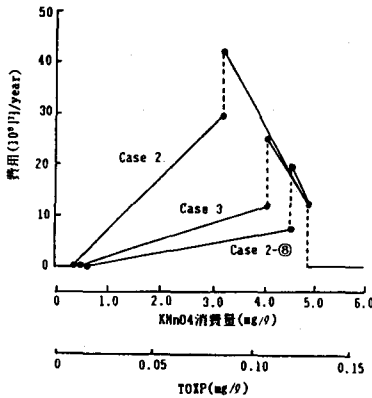


図8 水源保全案実施による可換的費用の一試算

4. まとめ

本稿は、琵琶湖・淀川水系における有機塩素化合物前駆体を事例として、種々の水源保全案の実施効果を解析しうる水質シミュレーションモデルを開発し、水源保全施策と浄水技術の選択運用の可能性を提示したものである

まず淀川3川（木津川、宇治川、桂川）合流点下流にある磯島取水点での濃度シミュレーションモデルを開発した。モデルは琵琶湖・淀川水系を9ブロックに分割し、各ブロックでの流量発生過程と負荷発生過程を5種の面源（雨水、不浸透性面、路面、浸透性面表層、不浸透性面深層）と2種の点源（産業および生活系）を単位に定式化した。シミュレーションにより、取水点における発生源の寄与度（年間期待値）として生活系点源：49%、直接流出（土壌表層）：30%、雨水および不浸透性面：4%、ブロック別では琵琶湖北湖の土壌表層：15%、宇治川下流域生活系点源：13%等々の結果が得られた

次に9種の水源保全案（土壌表層の流出対策、下水道整備と家庭雑排水対策、事業所排水対策、路面排水対策、不浸透性面排水対策、雨水対策）の実施効果をシミュレートし、たとえば生活雑排水下水処理の完全普及：34%、家庭雑排水対策：17%、雨水の浸透処理：8%等々の結果を得た。

最後に間欠運転を主とする高度浄水技術の柔軟な運用方式のもとで水源保全策と浄水処理の関係性を考察し、両者の選択様式が3種の臨界水質値(C_1 , C_2 , C_3)を境に4フェーズに分類され、処理水水質目標が C_1 以下で設定されると両者にトレードオフ関係が生じ、浄水処理と水源保全に選択運用の可能性が生じることを明らかにした。

文献

- 1) 末石富太郎：環境問題と経営問題からみた水道、第35回全国水道研究発表会(1984)ならびに水道協会雑誌、Vol. 54, No. 1, pp. 30-43(1985)。
- 2) 斉藤方正：浄水処理からみた微量有機汚濁発生源の監視と制御に関する研究、大阪大学学位論文(1990)。
- 3) 大阪府水質試験所水質試験成績並びに調査報告（昭和59年度）。
- 4) 李 適宇：河川上下流域の水質負荷配分計画に関する研究、大阪大学学位論文(1988)。
- 5) 淀川水質汚濁防止連絡協議会：工場排水の規制状況、下水道整備状況と将来計画について(1983)。
- 6) 斉藤方正、服部和夫、井上嘉高、奥村俊彦：淀川流域を対象とした有機ハロゲン化合物前駆体の発生源構造の解析、水質汚濁研究、Vol. 12, No. 11, pp. 715-723(1989)。
- 7) S. Saito, K. Hattori and T. Okumura: Outflows of Organic Halides Precursors from Forest Regions, Wat. Sci. Tech, Vol. 21, pp. 1877-1880(1989)。
- 8) 浦野紘平、武政隆夫、伊藤新治、陸 嘉稜：水の有機ハロゲン化合物生成ポテンシャル、水道協会雑誌、Vol. 56, No. 5, pp. 37-47(1987)。
- 9) 國松孝雄、村岡浩爾：河川汚濁のモデル解析、技報堂出版(1989)。
- 10) Vollenweider, R.A.: Advances in Defining Critical Loading Levels for Phosphorus in Lake Eutrophication, Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiologia, Vol. 33, pp. 53-83(1976)。
- 11) (財)日本気象協会関西本部：AMeDAS気象年報（昭和59年度）。
- 12) 日本下水道協会：流総指針（昭和55年）。
- 13) 各府県統計書（昭和55年度～昭和59年度）。
- 14) 通産大臣官房調査統計部：工業統計表（昭和55年度）、（昭和59年度）。
- 15) 細見正明、原沢英夫、須藤隆一：生活雑排水の汚濁負荷原単位と発生源対策、用水と廃水、Vol. 30, No. 6, pp. 23-29(1988)。
- 16) 日本水道協会：高度浄水施設導入ガイドライン(1988)。