

下水処理水還流システムの 環境調和性に関する研究

三浦浩之¹・和田安彦²・多田律夫³・尾崎 平⁴

¹正会員 博士(工学) 関西大学助手 工学部土木工学科 (〒564-8680 吹田市山手町3-3-35)

²正会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科 (同 上)

³正会員 中央復建コンサルタンツ(株) 第4設計部長 (〒532-0004 大阪市淀川区西宮原1-8-29-35)

⁴学生会員 関西大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

都市内河川の平常時流量増加, 水質改善を目的に下水高度処理水を河川上流に還流するシステムが検討されている. この下水高度処理水還流システムの環境負荷を算出し, 河川環境改善, 親水性向上との比較から, システムの環境調和性を評価した. 都市河川の水質を高度に改善し親水性を高めるには多量の還流水が必要であるが, これは同時に多くの環境負荷を生じさせることになる. したがって, 計画する還流システムによる効果と生じる環境負荷の関係を見定めることが必要である.

Key Words : environmental consciousness, environmental load, advanced wastewater treatment, treated water reuse, LCA, urban water cycle, river environment

1. 緒言

自然環境を保全・創造し, 自然と人間の豊かで豊かなふれあいのある都市づくりが志向されてきており, 価値観の多様化や生活の質的な向上を求める多様なニーズに対応できる快適な都市環境の創造が望まれている. 都市の中の河川は人工物の多い都市環境の中の貴重な自然的環境であり, これを中心としたアメニティの高い, 快適な水環境, 水辺環境創造への要望が高まっている. これに応えるために都市河川の質的レベルの向上が重要な課題となっている.

このような情勢を背景に, 都市計画中央審議会により都市化に伴う水循環システムの改善を目指した①水循環像の構築, ②高度処理の積極的な推進, ③水循環の保全・再生のための施策の実施, 等に関する答申が出された¹⁾(95年7月).

下水道事業では地域レベルの水循環システムの改善のために, 「水循環・再生下水道モデル事業」が創設され, 都市域の河川環境改善を目的に下水処理水を活用した健全な水循環系の構築が行われつつある²⁾. これは, 超高度処理水を河川上流へ還流し, 水質悪化と流量不足の問題等を解決しようとする方策である.

一方, 地球環境問題への対応から「持続可能な発展」の視点が公共事業においても必要になってきており, そのライフサイクル全体における環境への負

荷を少なくすることが必要となっている. 環境を保全・創造する事業においても同様である.

したがって, 処理水還流事業においても, その河川環境(流況, 水質, 親水性)改善効果と当該事業施設の建設, 運用, 維持管理を通じた環境への負荷とを相互比較し, 環境負荷の少ない河川環境改善事業の条件を明らかにすることが必要である.

しかし, 処理水還流事業による河川環境改善効果については, 環境基準点での河川水質改善, 流量変化が検討されているに過ぎない^{3),4)}.

一方, 望ましい河川の景観や流況, 親水性あるいは下水処理水へのイメージ等については, いくつかの研究が報告されており, 水辺の持つ魅力と人々の選好の関係等が明らかにされつつある^{5),9)}.

下水処理水還流システムに関わる環境負荷の算出事例はないが, 下水道システムのライフサイクルアセスメントは行われている. 終末処理場の建設・供用・廃棄段階でのCO₂排出量を明らかにした研究¹⁰⁾や, 特定の都市の下水道システムの建設・供用段階でのエネルギー消費量とCO₂排出量を明らかにした研究¹¹⁾などがある.

本論文では, 処理水還流システムの施設規模をパラメータとし, 各ケースにおける都市河川の水環境変化と, 既往研究のデータを基にした還流システムに必要な施設導入による環境負荷を定量評価した. そして, 水環境改善と環境負荷の両側面から, 処理

水還流システムの環境調和性を評価した。

2. 下水処理水還流システムの環境調和性の評価手法

(1) 下水処理水還流システムの環境調和性評価

社会資本整備は、良好な環境を創造し、人間社会にとって利便性や快適性を促進させ、人々の生活水準を向上させるものである。しかし、この社会資本を整備することが、資源浪費や環境損失を生じさせるという負の効果を生んでいると指摘されることがある。社会資本を整備する場合、トレード・オフの関係にある整備により得られる効果、便益と環境保全の間でどのようにバランスをとるかが重要となる。すなわち、社会資本の環境調和性を評価する必要がある。

そこで、筆者らは、環境を保全・創造するための社会資本整備の一例として下水処理水の還流システムをとりあげ、環境経済学等で行われているコストベネフィットの考え方を参考に、還流システムの環境調和性を評価する。

すなわち、便益（環境質）を得るために要する環境負荷をLCAにより算出し、還流規模の大小（代替案）の違いによる便益と環境負荷の関係を定量的に評価する。環境改善・創造型社会資本整備の環境調和性のイメージを図-1に示す。また下水処理水還流システムによる便益として表-1に示すものを用いた。

(2) 便益の評価方法

a) 流況

処理水還流による流況の変化がもたらす便益には、景観の向上、動植物生息環境の保全、親水行動の促進などがある。ここで、景観の評価は主観的な部分によるところが多く、視点位置や評価者による差が大きいことから、定量的に評価しづらい。動植物生息環境の保全では周辺環境や河川形状などにより得られる便益が大きく異なり、これも定量化が困難である。一方、親水活動の促進については、水際へのアプローチ等も影響するが、流速と流れのイメージの関係⁹⁾や水深、流速と親水活動の関係⁹⁾が明らかにされつつあり、定量的な評価が可能である。そこで、水深と流速による流況改善における還流システムの便益を評価した。また、流量は、処理水還流後の河川流量の現況に対する増加割合より評価した。

b) 水質

河川水質の向上による便益については、生態系の多様化、生息動植物の増加、親水活動の促進、河川

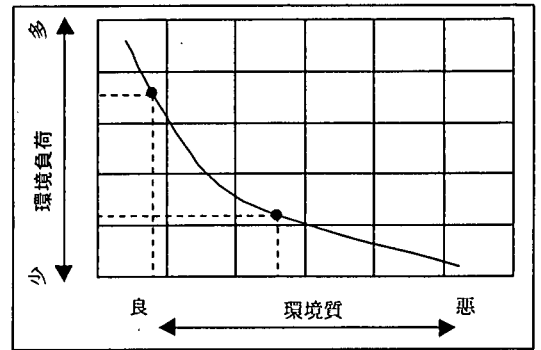


図-1 環境調和性評価のイメージ

表-1 下水処理水還流システム導入による便益

便益の項目	派生項目	評価指標
流況	① 河川流量の回復	還流後河川流量の増加量
	② 親水性	親水活動に適した河川水深、流速
水質	③ 河川水質の向上	環境基準の達成度
親水性	④ 親水活動の増大	親水活動レベルの達成度

に対するイメージの向上等があげられる。これらは水質と直接的な関係があることから、水質値を評価指標とした。すなわち、河川は水質汚濁防止法により生活環境の保全に関する水質基準が定められていることから、BODを評価項目とし、還流実施時の河川水質環境基準の達成状況より評価した。

c) 親水性

親水性の向上による便益には、処理水還流後の流況および水質の変化により生じる人々の河川に行きたい、周辺を散歩したい、あるいは河川で水遊びがしたい等の情動的な変化が考えられる。しかし、先にも述べたように、水際へのアプローチや水のきれいさ、さわやかさ、水温など多くの制約条件を受ける親水活動を定量化することは困難である。そこで、河川流況から見た親水活動の可能条件^{9),10)}より親水性を評価した。

(3) 環境負荷の評価方法

土木建設システム等の社会資本整備は、多くの業界製品やサービスの複合体により構成されている。このため、社会資本整備におけるLCAを用いた環境負荷の算出には、多種多様なデータが必要となる。土木学会では地球環境委員会LCA研究小委員会が、セメントや鉄鋼などの基礎資材に関する、二酸化炭素排出量原単位を作成しており、他の学会などとの比較も行い、妥当性の評価も行っている¹²⁾。また、5つの代表的な土木構造物のライフサイクル環境負荷の試算も行っている¹³⁾。本論文では、社会資本の環境負荷を算出するに当たり、これらの貴重なデー

タを参考とした。

3. 下水処理水還流システムの設定条件

(1) モデル流域・河川の設定

現在、下水処理水還流が実施あるいは計画されている河川の諸元には表-2に示すものがある。下水処理水の還流は自己水源を持たない、生活雑排水を水源とする都市内河川などを対象に下水道整備による河川水量の減少、あるいは生活雑排水による水質汚濁の対策として行われている。

そこでモデル流域・河川は、下水処理水の還流が実施、あるいは計画されている流域・河川を参考に、還流が行われそうな流域・河川を調査し、流域面積約20km²、人口密度約8,000人/km²の住宅密集地域とした。

まず、河川の上・下流端の流量、BOD濃度を設定し、これらをもとに浄化係数や支川流入水量・負荷量等の諸元を設定した。モデル河川の還流先地点の水量は0.25m³/s（低水時）、0.50m³/s（平水時）であり、BOD濃度は30mg/l（低水時）、15mg/l（平水時）である。

流路延長は5kmとし、河床勾配は1/1,000、支川が1kmおきに流入するとした（図-2）。河道断面は流量に対応して5段階設定した。図-3に断面形状を示す。なお、河川流末での流量は1m³/s（低水時）、3m³/s（平水時）であり、各支川からの流入水量、水質はいずれの支川も各時期で同一の値とした。また、河川（本川）の汚濁要因は下水道未整備地域からの生活雑排水であり、支川を通じて本川に流入している。設定したモデル流域、河川の諸元を表-3に示す。

(2) 下水処理水還流システムの施設・規模の設定

a) 高度処理方式の選定

高度処理施設の処理方式は凝集剤併用型循環式硝化脱窒法、処理水BOD濃度は5.8 mg/lと設定した。

b) 高度処理水量・還流水量の設定

高度処理水量と還流水量は同量とし、現況の低水時における下流端流量が還流により現況の平水時下流端流量の①50%、②100%、③150%となる3通りの還流水量を設定した。

還流水量(m ³ /s)	平水時下流端流量に対する比率
0.5 (=43,200m ³ /日)	50%
2.0 (=172,800m ³ /日)	100%
3.5 (=302,400m ³ /日)	150%

表-2 モデル河川の比較

	流域面積(km ²)	河川延長(m)	自流量(m ³ /s)	BOD濃度(mg/l)	
				還流前	還流後
目黒川	45.80	7.80	0.00	7.6	3.1
呑川	17.50	14.42	0.12	10.0	3.2
渋谷川・古川	22.84	7.25	0.07	2.8	2.0
不老川	56.55	16.95	0.45	20	5.0
モデル河川	20.00	5.00	0.25~0.50	15~30	-

目黒川、呑川、渋谷・古川(東京都)は平成7年3月より実施⁹⁾、不老川(埼玉県)は、計画中¹⁰⁾、還流後BOD濃度は目標水質。

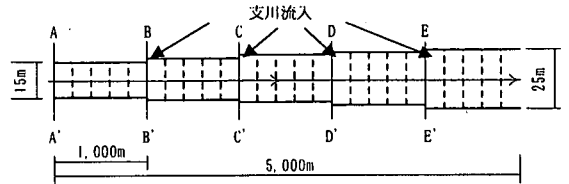


図-2 モデル河川平面図

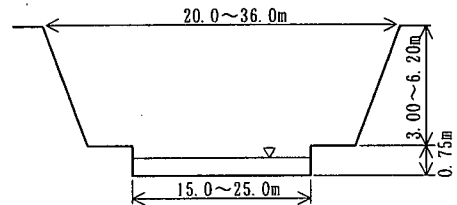


図-3 モデル河川断面図

表-3 モデル河川の設定諸元

		低水時	平水時
流量(m ³ /s)	上流端	0.25	0.50
	下流端	1.00	3.00
水深(m)	上流端	0.075	0.114
	下流端	0.126	0.245
平均流速(m/s)		0.27	0.39
BOD濃度(mg/l)	上流端	30	15
	下流端	36	12
浄化係数(1/日)		0.05	0.30
支川流入(1支川)	水量(m ³ /s)	0.15	0.50
	BOD濃度(mg/l)	48	14
地下水流入		0.15	0.50

c) 還流用ポンプ施設、管きよの設定

還流用ポンプは次の仕様とした⁴⁾。

吐出し口径(mm)	吐出し量(m ³ /s)	出力(kW)	全揚程(m)
500	0.5	360	53

還流用ポンプ施設数は、管きよ内摩擦損失を考慮して設定した。管きよ内摩擦損失をヘーゼン・ウィリアムスの式により算出し、管きよ内摩擦により揚程が5m以下になった時点で中継ポンプを増設するとした。還流距離は①5,000m、②10,000m、③15,000mの3通りを想定した。

還流量と還流延長に応じたポンプ数を次に示す。

還流量(m ³ /s)	ポンプ数		
	L=5,000m	L=10,000m	L=15,000m
0.5	2	3	5
2.0	8	12	20
3.5	14	21	35

還流用管きよ径は、ポンプ吐出し口径と同じ500mmとした。また、管きよ一本の還流量は0.5m³/sとした。

d) 耐用年数

高度処理施設、還流用ポンプ施設、還流用管きよの耐用年数は以下のように設定した。

高度処理施設、還流用ポンプ施設				還流用管きよ
土木	建築	機械	電機	
30年	30年	10年	37.5年(0.8回交換)	30年

4. 下水処理水還流システム導入による河川環境改善予測

(1) 河川環境改善予測シミュレーション

シミュレーションではモデル河川を1区間200mのリーチに区切った。

a) 流量

河川流量は、各リーチ毎に、上流端流量に設定した支川流入量と地下水流入量を加えることにより算出した。計算式を次に示す。

$$Q(n) = Q_0 + \sum_{i=1}^n (Q_i + Q_{oi}) \quad (1)$$

ここで、 $Q(n)$:リーチ n での河川流量(m³/日)、 Q_0 :上流端流量(m³/日)、 Q_i :リーチ i における支川流入量(m³/日)、 Q_{oi} :リーチ i における地下水流入量(m³/日)。

b) 水深、流速

各地点の水深、流速は不等流解析の標準逐次法により算出した。考慮する損失は、摩擦損失、急拡損失、合流損失とした。逐次法の基礎式を以下に示す。

$$\Delta x \cdot I_0 + z_1 + \alpha \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \alpha \frac{V_2^2}{2g} + I_{f,av} \Delta x + h_{se} + h_{en} \quad (2)$$

ここで、添字1, 2はそれぞれ上流断面、下流断面の量を表し、 Δx :上流断面から下流断面までの水路底長さ(m)、 I_0 :水路底の勾配、 z :水深(m)、 α :流速分布に関するエネルギー補正係数(=1.1)、 V :流速(m³/s)、 g :重力加速度(=9.8m/s²)、 $I_{f,av}$:平均エネルギー勾配、 h_{se} :急拡損失(m)、 h_{en} :合流(支川流入)による損失(m)を表す。

c) 流下負荷量と水質

流下負荷量の算出には河川流下過程での自浄作用を考慮して、Streeter-Phelpsの式を導入した次式を用いる¹⁵⁾。

$$L_i = L_1 \cdot e^{-k \cdot t} + L_{ai} \quad (3)$$

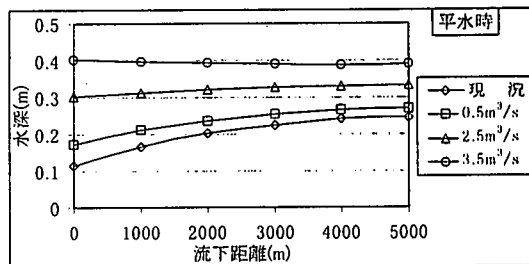
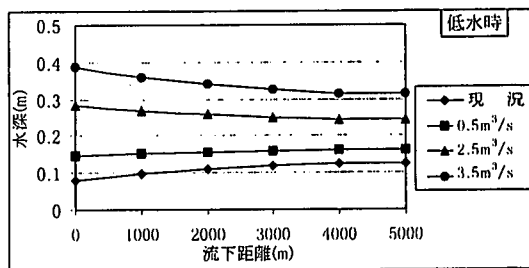


図-4 現況と還流後の水深の比較

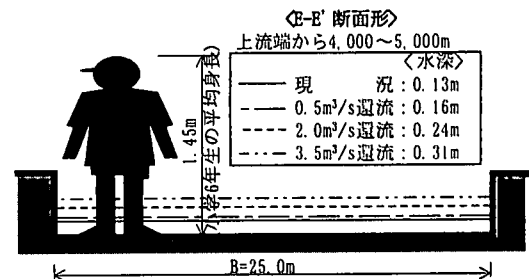


図-5 モデル河川水深模式図(低水時)

ここで、 L_i :地点 i における負荷量(kg/日)、 k :浄化係数(1/日)、 t : i - j 地点から j 地点までの流下時間(日)、 L_{ai} :地点 i における横流入負荷量(kg/日)を表す。なお、下水高度処理水のBOD負荷と支川から流入するBOD負荷では、質的な差が考えられ、その2つの浄化係数には違いがあると予想されるが、下水高度処理水の浄化係数が得られないため、本論文ではこの浄化係数の違いは無視する。

(2) 河川流況変化の予測

a) 水深

流下方向の水深変化を図-4に示す。また、水面の位置を図化して図-5に示す。低水時での現況の水深はどの地点においても10cmほどであったものが、還流により15cm以上の水深を確保できる。また、2.0m³/s以上の還流により低水時においても現況平水時の水深(11~25cm)を維持できる。

b) 流速

流速と人が感じるイメージの関係⁶⁾を表-4に示す。それを指標とした現況と還流後の河川の流速の比較を図-6に示す。現況および0.5m³/sの還流で

表-4 流速と人が感じるイメージの関係⁹⁾

流速(m/s)	イメージ
0.2以下	流れがない
0.2～0.45	流れがわかる
0.45～0.75	流れが良くわかる

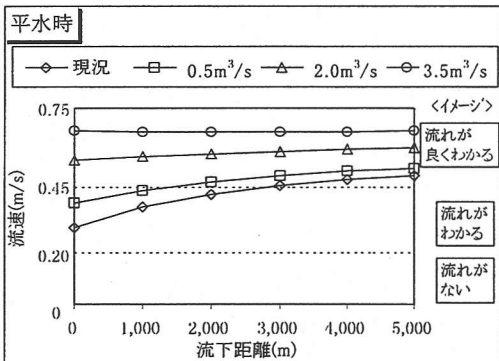
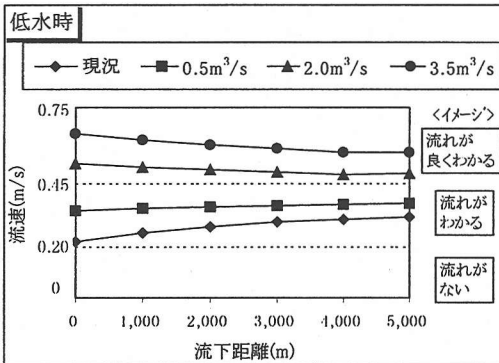


図-6 現況と還流後の流速のイメージ変化

表-5 水深・流速と親水活動の関係⁹⁾

水深(m)	流速(m/s)	親水活動レベル
0.1未満	-	親水活動困難
0.2未満	0.2未満	幼児が遊べる程度
0.4未満	0.5未満	小学生が遊べる程度
0.4以上	0.5以上	親水活動困難

は、低水時の河川流速は0.2～0.4m/sであり、「流れがわかる」というイメージであるが、2.0m³/s以上の還流により、流速は0.50～0.65m/sと速くなり、「流れが良くわかる」というイメージに変化する。

水深、流速と親水活動等の関係⁹⁾を指標とした現況と還流後河川の親水活動レベルを図-7に示す。ここで、親水活動レベルとは表-5に示す幼児、小学生が河川で遊ぶことができる水深と流速を表したものである。現況では低水時の河川上流部の水深が浅いため親水活動は困難であるが、0.5m³/sの還流によりどの地点でも小学生が遊べる程度の水深と流速となる。2.0m³/s以上の還流ではかえって河川流速が速くなり親水活動が困難となる。

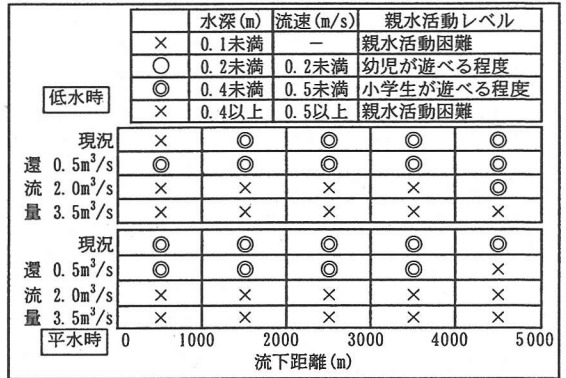


図-7 現況と還流後の親水活動レベルの変化

環境基準	BOD濃度	凡例
AA	1mg/l以下	[Pattern]
A	2mg/l以下	[Pattern]
B	3mg/l以下	[Pattern]
C	5mg/l以下	[Pattern]
D	8mg/l以下	[Pattern]
E	10mg/l以下	[Pattern]
未達成	それ以上	[Pattern]

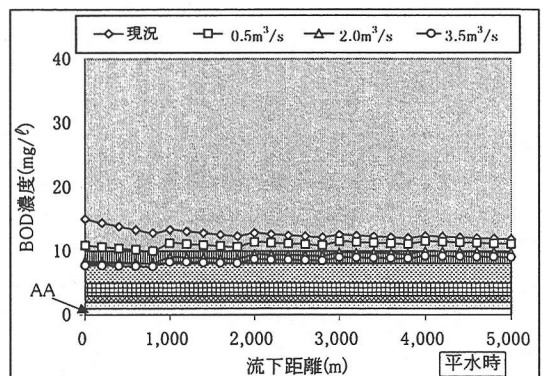
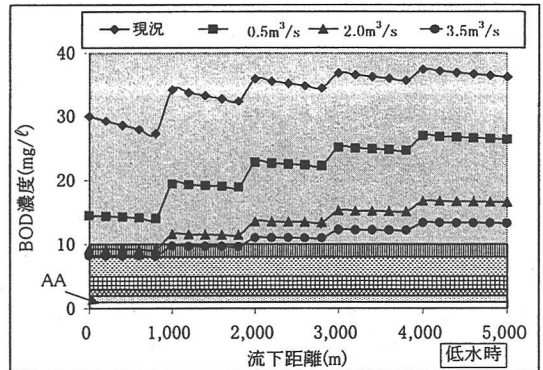


図-8 現況と還流後の河川水質の比較

(3) 河川水質変化の予測

現況と還流後河川水質の予測結果を図-8に示す。低水時では、現況におけるBOD濃度が高いため、0.5m³/sの還流ではどの地点においても環境基準E類型(10mg/l)を満たすことができない。また、2.0m³/s

以上の還流により、上流部においては環境基準E類型を満たすことができるが、中流以降では満たすことができない。

平水時では、現況におけるBOD濃度が11~15mg/lと低水時ほど高くないが、0.5m³/sの還流ではほとんど環境基準E類型を満たすことができない。2.0m³/sおよび3.5m³/sの還流により、環境基準E類型を満たすことができる。

5. 下水処理水還流システムのライフサイクル環境負荷

(1) 環境評価の考え方

下水処理水還流システム導入に伴う施設建設ならびに運用時の環境負荷を評価する。評価する環境負荷項目はCO₂排出量とした。

評価対象は

- ・高度処理施設、還流用ポンプ施設の建設、設備製造時と運用時のCO₂排出量
- ・還流用管きよの敷設時のCO₂排出量

とし、運用期間は30年とした。

下水処理水還流システム導入によるCO₂排出量の算出方法を表-6に示す。

(2) 高度処理施設導入による環境負荷の算出

a) 設定条件

高度処理施設の建設時・運用時のCO₂排出量が定まらなかったため、本論文ではCO₂排出量が費用にほぼ比例すると仮定し、高度処理施設導入により増加する建設時(19~23%)・運用時(16~29%)のコストの比率からCO₂排出量の増加率を二次処理施設の建設時・運用時CO₂排出量の15, 20, 30, 50%と想定した。

b) 二次処理施設の建設コストの算出

二次処理施設の建設時CO₂排出量は、建設コストと建設時CO₂排出量¹⁰⁾の関係から算出するため、二次処理施設の建設コストを算出する必要がある。二次処理施設の建設コストは、流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説(H.8年版)に示されている二次処理施設(標準活性汚泥法)の費用関数¹⁰⁾を用いた。

c) 二次処理施設の環境負荷の算出

二次処理施設の建設時のCO₂排出量は、建設時CO₂排出量¹⁰⁾と先に算出した建設コストの関係から算出した。運用時のCO₂排出量は、運用時CO₂排出量¹⁰⁾と設定した処理水量との関係から算出した(表-7)。

d) 高度処理施設の環境負荷の算出

高度処理施設導入によるCO₂排出量は、二次処理施設の建設時・運用時CO₂排出量の合計に設定した

表-6 CO₂排出量算出方法

建設	高度処理施設	① 現有二次処理施設の建設時CO ₂ 排出量の15%, 20%, 30%, 50%で建設できると想定 ② 二次処理施設の建設コストを処理水量に対する費用関数 ¹⁰⁾ より算出 ③ 建設コストと建設時CO ₂ 排出量 ¹⁰⁾ の関係から、二次処理施設建設時CO ₂ 排出量を算出 ④ 高度処理施設建設時のCO ₂ 排出量を算出
	還流用ポンプ施設	① 設定還流水量を送水できるポンプ施設の建設コストを算出 ② 建設コストと建設時CO ₂ 排出量 ¹¹⁾ の関係から、ポンプ施設建設時CO ₂ 排出量を算出
	還流用管きよ	管きよ径と敷設時CO ₂ 排出量 ¹¹⁾ の関係から管きよ敷設時CO ₂ 排出量を算出
運用	高度処理施設	① 現有二次処理施設の運用時CO ₂ 排出量の15%, 20%, 30%, 50%で運用できると想定 ② 処理水量と運用時CO ₂ 排出量 ¹⁰⁾ の関係から、二次処理施設運用時CO ₂ 排出量を算出 ③ 高度処理施設運用時のCO ₂ 排出量を算出
	還流用ポンプ施設	ポンプの消費電力量より算出

表-7 二次処理施設の建設時・運用CO₂排出量

	処理水量 (m ³ /s)	建設費C (百万円)	CO ₂ 排出量(t-C/30年)		
			建設時	運用時	計
既往研究 ¹⁰⁾	1.2	16,404	20,400	120,700	141,100
本研究	0.5	8,722	10,800	67,000	77,800
	2.0	23,632	29,300	267,400	296,700
	3.5	35,338	43,800	468,000	511,800

表-8 高度処理施設導入によるCO₂排出量

処理水量 (m ³ /s)	二次処理施設 CO ₂ 排出量	高度処理施設導入時CO ₂ 排出量(t-C/30年)			
		15%増	20%増	30%増	50%増
0.5	77,800	11,700	15,600	23,300	38,900
2.0	296,700	44,500	59,300	89,000	148,400
3.5	511,800	76,800	102,400	153,500	255,900

増加率を乗じることにより算出した(表-8)。

(3) 還流用ポンプ施設導入による環境負荷の算出

a) 建設コストの算出

還流用ポンプ施設の建設時CO₂排出量は、建設コストと建設時CO₂排出量¹¹⁾の関係から算出する。建設コストの算出には、流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説に示されているポンプ施設建設の費用関数¹⁰⁾を用いた。

b) 建設時環境負荷の算出

還流用ポンプ施設の建設時のCO₂排出量は、ポンプ施設の建設時CO₂排出量¹¹⁾と先に算出した建設コストの関係から算出した(表-9)。

c) 運用時環境負荷の算出

還流用ポンプ施設の運用時CO₂排出量は、ポンプ消費電力に電気使用量当たりのCO₂排出原単位¹²⁾(=0.129kg-C/kWh)を乗じて算出した(表-9)。

表-9 還流用ポンプ施設導入によるCO₂排出量

還流量 (m ³ /s)	管きよ 延長(m)	ポンプ 施設数	ポンプ 数	ポンプ施設導入時CO ₂ 排出量 (t-C/30年)		
				建設時	運用時	計
				24,900	24,400	49,300
0.5	5,000	2	2	24,900	24,400	49,300
	10,000	3	3	37,400	36,600	74,000
	15,000	5	5	62,300	61,000	123,300
2.0	5,000	2	8	57,000	97,600	154,600
	10,000	3	12	85,500	146,500	232,000
	15,000	5	20	142,500	244,100	386,600
3.5	5,000	2	14	79,800	170,900	250,700
	10,000	3	21	119,800	256,300	376,100
	15,000	5	35	199,600	427,200	626,800

表-10 還流用管きよ敷設によるCO₂排出量

還流量 (m ³ /s)	管きよ 本数	管きよ 延長(m)	CO ₂ 排出量 (t-C/30年)
0.5	1	5,000	230
		10,000	460
		15,000	690
2.0	4	5,000	900
		10,000	1,800
		15,000	2,700
3.5	7	5,000	1,600
		10,000	3,200
		15,000	4,800

(4) 還流用管きよ敷設による環境負荷の算出

管きよ敷設における環境負荷¹¹⁾は管きよ径に比例すると仮定した。これより、還流用管きよ敷設におけるCO₂排出量は、設定した管きよ径、管きよ延長および管きよ本数に応じて算出した(表-10)。

(5) 下水処理水還流システム導入による環境負荷の全体

以上の方法で算出した下水処理水還流システム導入によるCO₂排出量を図-9に示す。

- ① 還流距離が同じ場合、還流量を0.5m³/sから2.0m³/s(4倍)、3.5m³/s(7倍)と多くすると、CO₂排出量は還流量が0.5m³/sの場合の約3.3、5.5倍程度となる。
- ② 還流量が同量の場合、還流距離を5,000mから10,000m(2倍)、15,000m(3倍)と長くすると、CO₂排出量は、還流距離が5,000mの場合の約1.3、2.0倍程度となる。
- ③ 還流用管きよ敷設によるCO₂排出量は、還流延長に関わらず、下水処理水還流システム全体のCO₂排出量の1%未満である。
- ④ 還流距離を5,000mから15,000mと長くすると、システム全体に対する還流用ポンプ施設導入によるCO₂排出量が占める割合が、20%程度高くなる。これは、必要な中継ポンプ施設が1ヶ所から4ヶ所に増加するためである。

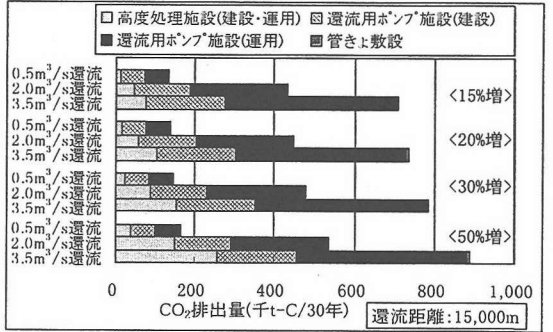
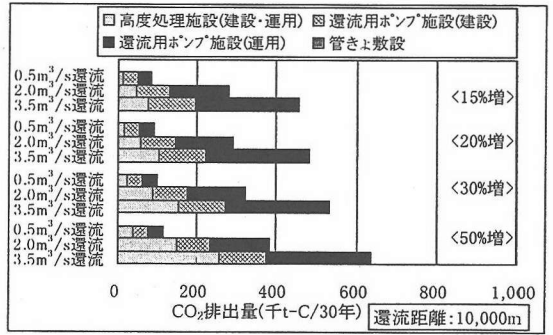
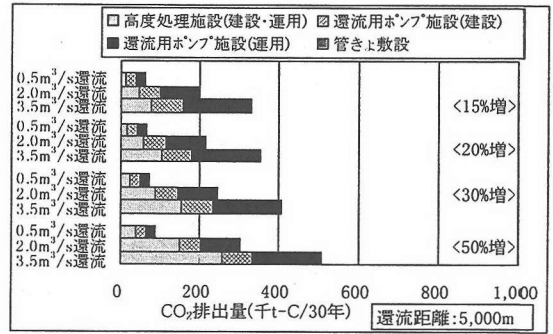


図-9 下水処理水還流システム導入によるCO₂排出量

したがって、CO₂排出量を抑えながら還流システムの規模を拡大するには、中継ポンプ施設を必要としない還流システムにすることも一策である。

6. 下水処理水還流システムの総合評価

(1) 環境改善と環境負荷

a)環境基準達成区間とCO₂排出量

環境基準E類型達成区間距離の割合とCO₂排出量の関係の一例を図-10に示す。

低水時で0.5m³/s還流では、河川の全区間において環境基準E類型を満たすことができないが、2.0m³/s還流では河川全区間の20%(1,000m)において、3.5m³/s還流では40%(2,000m)において環境基準E類型を満たすことができる。環境基準E類型の達成区間距離を20%から40%にするために、CO₂排

出量は1.7倍になる。

b)河川下流端水質とCO₂排出量

河川下流端BOD濃度とCO₂排出量の関係の一例を
図-11に示す。これより以下のことがわかる。

<低水時>

①0.5m³/s還流によるCO₂排出量は、2.0m³/s、
3.5m³/s還流によるCO₂排出量の約30%、18%
と非常に少ないが、0.5m³/s還流時の河川下流
端BOD濃度は26mg/ℓであり、2.0m³/s、3.5m³/s
還流時の濃度(16mg/ℓ、13mg/ℓ)よりかなり高
い。

②還流量を0.5m³/sから2.0m³/sに増加すれば、河
川下流端BOD濃度を10mg/ℓ程低下できるが、
CO₂排出量は約3倍増加する。

③還流量を2.0m³/sから3.5m³/sと増加させても
BODは3mg/ℓしか低下できない。この際にCO₂
排出量は約1.7倍増加する。

<平水時>

①0.5m³/sの還流(下流端流量は現況の1.2倍増)で
は環境基準E類型を満たすことはできない。
2.0m³/s(同1.7倍増)、3.5m³/s(同2.2倍増)の還
流により環境基準E類型を満たすことができる。

②3.5m³/s還流時のCO₂排出量は、2.0m³/s還流時
のCO₂排出量の1.7倍ほどになるが、3.5m³/s還
流しても下流端濃度は8.6mg/ℓであり、2.0m³/s
還流時の濃度(9.4mg/ℓ)と大きな差はない。

今回検討した条件では、0.5m³/s還流時のCO₂排出
量は2.0m³/s、3.5m³/s還流時の30%、18%程度で
あるが、河川環境の質の向上も少ない。3.5m³/sの還
流では、河川環境の質の向上は見込めるが、多くの
CO₂排出量が発生する。2.0m³/sの還流は、3.5m³/s
の還流と同等の水質の向上を見込め、CO₂排出量は
3.5m³/s還流時の60%程度である。

(2) 下水処理水還流システムの環境調和性

下水処理水還流システムの環境創造面での便益は、
流況、水質、親水性の改善、向上である。これらの
便益をもたらすために生じる環境への負荷を小さく
することが、還流システムの環境調和性を高めるこ
とにつながる。そこで、本論文で評価対象としたモ
デル都市河川への下水処理水還流システム導入によ
る各便益と環境負荷の関わりについて考察する。

a) 流況

モデル都市河川の低水時では、還流量が少ない場
合、河川流速のイメージに変化は見られないが、還
流量を多くすると流速のイメージが良くなった。ま
た、平水時では還流量が少ない場合でも中流以降で
は流れのイメージが良くなっている。河川流量は常

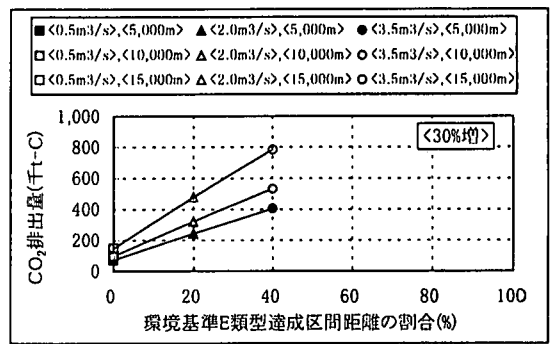


図-10 環境基準E類型達成区間距離の割合とCO₂排出量
の関係(低水時)

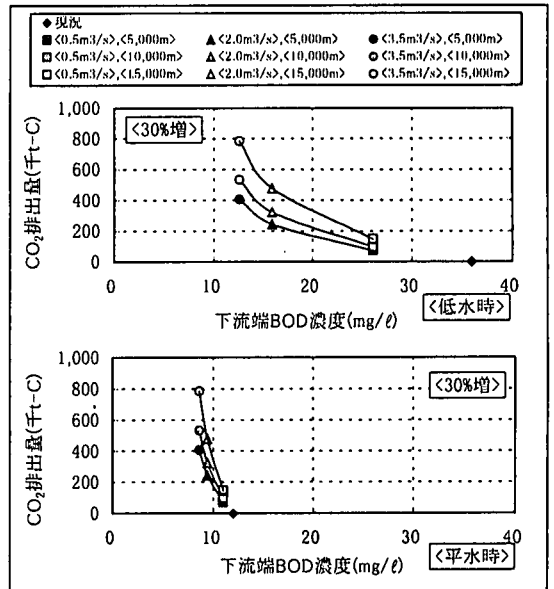


図-11 モデル河川水質とCO₂排出量の関係

に一定ではないため、流況の改善のために多量の処
理水を一定量還流することは過大な便益を生み、環
境負荷は非常に多くなる。また、雨天時の河川流量
の増加を考えれば、一定量の還流は河川氾濫などの
危険を及ぼす可能性もある。したがって、環境負荷
を少なく、河川環境を改善するには河川状況に応じ
て還流量を設定することも一方策である。

b) 水質

モデル都市河川での下水処理水還流システム導入
による水質改善を、環境基準の達成区間割合から評
価すると、還流量の増加に直線的に比例して達成
区間割合が増加しており、同時に下水処理水還流シ
ステム導入に伴うCO₂排出量も増加している。この
場合、還流システム導入による水質面での便益と環
境負荷とは直線的なトレードオフ関係にある。

一方、モデル都市河川の下流端におけるBOD濃
度から当システム導入による水質改善を評価すると、

水質改善を進めることによってCO₂排出量は指数関数的に増加している。すなわち、この場合、還流システム導入による水質面での便益と環境負荷とは曲線で表されるトレードオフ関係にあり、目標とする水質を高いレベルにすると、環境への負荷が飛躍的に増加することになる。

以上のように、水質改善の評価方法によって、下水処理水還流システムの便益と環境負荷の関係は変化し、水質目標の設定によっては多大な環境負荷を生じさせることがある。したがって、目標とする水質レベルの設定には注意が必要であり、水質目標を高くするには、当事業実施に伴う環境負荷を少なくする技術的な工夫、配慮が必要となる。

c) 親水性

本論文で評価対象としたモデル都市河川では、還流量が少ない場合のみ親水性を確保でき、水質改善を考えて還流量を多くすると、親水性の面ではマイナスの影響が生じた。すなわち、下水処理水還流システムを大規模なものとする事により、流況は改善できるものの、河川の親水性はかえって低下させてしまっている。還流量を多くすることは流況、水質改善面ではプラスに作用することを考えると、便益のすべてを高いものとする下水処理水還流システムとするには、互いの関連を良く解析しておくことが必要である。ある便益のみに注目すると、過大な社会資本整備となる可能性があり、これは温室効果ガス排出量等の環境への負荷の面でも問題である。

7. 結言

環境保全・創造のためのインフラ整備が、環境の質的向上をもたらすと同時に、その整備・運用において環境への負荷をかけることから、下水処理水還流システムを対象に、インフラ整備による環境への効用と負荷との関係をモデル都市河川を対象に評価した。この結果、次の事項が明らかになった。

- 1) 少量の下水高度処理水を遠距離還流する場合と、多量の下水高度処理水を短距離還流する場合とを比較すると、前者の方がCO₂排出量は少ない。これは、下水処理水還流システムの中でポンプ施設の建設と運用によるCO₂排出量が最も多いことから、還流距離延長に伴う管きょ敷設時CO₂排出量の増加よりも、還流量増加に対応するポンプ施設規模の拡大によるCO₂排出量の増加の方が大きくなるためである。
- 2) 下水処理水還流システムを導入する場合、河川の水環境の向上とCO₂排出量はトレード・オフの関係にあるが、今回検討した環境基準の達

成区間割合とCO₂排出量のように直線的な関係の場合と、下流端BOD濃度とCO₂排出量のように曲線的な関係の場合がある。

- 3) 還流量を多くすることにより還流先河川の環境の質をより改善できるが、同時に還流システムの整備・運用による環境負荷は増加する。したがって、還流システムの導入には、還流先河川の現状の流量、水質から目標とする流量、水質ならびに還流システムの環境負荷を明らかにし議論することが重要である。
- 4) 還流距離を長くすると中継ポンプ施設の増設が必要となり、システム整備・運用の環境負荷が大きく増加する。このため、中継ポンプを必要としない還流システムとすることが、環境負荷を小さくするひとつの方法である。
- 5) 環境保全・創造のためのインフラ整備を行う場合には、効用に対してCO₂排出量が急激に増加する場合があるので、整備により得られる効用と生じるCO₂排出量の関係を見極めた上でインフラ整備の方法を選択する必要がある。

21世紀に向けて持続可能な社会システムを構築していくことの重要性が広く認識され、持続的循環共生型の社会を作り上げるための社会インフラ整備が行われつつある。下水高度処理水還流システムもその一つであり、水資源消費の節約と自然的環境の創出の面で有効な手段となる。しかし、このシステムを整備・運用するには新たな資源とエネルギーが必要となり、その建設及び運用プロセスにおいて環境への負荷を与える。真に持続可能な社会インフラとするためには、本論文で述べてきたようなインフラ整備によりもたらされる効用と環境負荷とを相互に比較し、インフラ整備がどれだけの環境負荷を生じるのか、また、どのような工夫をすれば所定の効用をもたらしつつ環境負荷の小さなインフラとできるのかを検討する視点が重要である。

謝辞：本研究の遂行に当たり、種々の面からお世話になった方々に心からの謝辞を申し上げます。また、解析・環境負荷の算出に当たっては研究室大学院生、学生諸君の協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 曾小川久貴：総合的水管理における下水道のあり方、月刊下水道、Vol.20, No.6, pp.15-20, 1997.
- 2) 「下水道懇談会審議結果報告」について、下水道協会誌、Vol.35, No.427, pp.29-41, No.428, pp.50-59, 1998.

- 3) 大川昌俊, 藤倉茂起: 下水道整備に伴う市内河川の水質改善効果と処理水還流計画, 第33回下水道研究発表会講演集, pp.52-54, 1996.
- 4) 佐伯謹吾: 下水高度処理水による城南3河川の清流復活事業, 下水道協会誌, Vol.35, No.424, pp.11-16, 1998.
- 5) 島谷幸宏: 河川風景デザイン, 山海堂, pp.54-149, 1994.4.
- 6) 高橋邦夫, 萩原良巳, 清水丞, 酒井彰, 中村彰吾: 都市域における水辺計画の作成プロセスに関する研究, 環境システム研究, Vol.24, pp.1-12, 1996.10.
- 7) 皆川朋子, 島谷幸宏: 河川の自然景観の評価に関する研究—阿賀野川を事例として—, 環境システム研究, Vol.24, pp.12-19, 1996.10.
- 8) 島谷幸宏, 傳田正利, 真下和彦, 小池達夫: 清流のイメージに関する研究—人は清流をどのように捉えるか—, 環境システム研究, Vol.24, pp.20-25, 1996.10.
- 9) 萩原良巳, 萩原消子, 高橋邦夫: 都市環境と水辺計画—システムズ・アナリシスによる—, 勁草書房, pp.62-71, 1998.4.
- 10) 鶴巻峰夫, 藤岡荘介, 内藤弘: 下水道終末処理施設のライフサイクルでの環境負荷の定量化について, 第4回地球環境シンポジウム講演集, pp.57-62, 1996.7.
- 11) 井村秀文, 銭谷賢治, 中嶋芳紀, 森下兼年, 池田秀昭: 下水道システムのライフサイクルアセスメント: LCE及びLC-CO₂による評価, 土木学会論文集, No.552/VII-1, pp.75-84, 1996.1.
- 12) 酒井寛二: 土木建設物の二酸化炭素量原単位の推定, 第4回地球環境シンポジウム講演集, pp.43-48, 1996.7.
- 13) 盛岡通: 土木建設システムにおけるLCAの考え方と事例, 第4回地球環境シンポジウム講演集, pp.29-34, 1996.7.
- 14) 埼玉県荒川右岸下水道事務所: 「不老川水質環境保全対策事業」よみがえれ不老川, パンフレット, 1997.7.
- 15) 國松孝男, 村岡浩爾: 河川汚濁のモデル解析, 技報堂出版, pp.145-150, 1989.4.
- 16) 建設省都市局下水道部: 流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説(平成8年度版), 日本下水道協会, pp.107-112, 1997.

(1998. 9. 16 受付)

ESTIMATION ON ENVIRONMENTAL FRIENDLINESS OF THE TREATED WASTEWATER REUSING SYSTEM FOR THE WATER SHORTING RIVER IN URBAN AREA

Hiroyuki MIURA, Yasuhiko WADA, Ritsuo TADA and Taira OZAKI

It has been investigated that the new reusing system of treated wastewater from the advanced wastewater treatment plant to keep flow and to improve water quality in the flowing water shorting river in urban area. We estimated the environmental loads from the construction and operation of the reusing system, and we simulated water quality of the urban river and easiness of the playing with water. Much quantity of the treated wastewater for the water circulation system is needed to gain dramatically improvement in the water quality and good circumstance of the stream for water playing, but these huge water circulation system brings much environmental loads. We must make sure of the relation between the environmental loads and the effect of the project.