

都市流末水域の水環境に着目した 水循環再生の評価

EVALUATION OF HYDROLOGIC CYCLE RESTORATION BASED ON
WATER ENVIRONMENT OF WATERS FLOWING FROM URBAN AREA

杉原幸樹¹・中津川誠²・清治真人³
Kouki Sugihara, Makoto Nakatsugawa, Masato Seiji

¹正会員 理修 (株) 福田水文センター (〒001-0024 北海道札幌市北区北24条西15丁目2-5)

²正会員 工博 室蘭工業大学 建設システム工学科 (〒050-8585 北海道室蘭市水元町27-1)

³正会員 北海道科学技術総合振興センター 東京出張所 (〒100-0005 東京都千代田区丸の内3-2-2)

Sapporo City generates the water quality load mainly from the living drainage, and it has constructed the water circulatory system that distributes the load to three areas. Especially, the environmental impact has been concentrated to the Barato River with stagnated waters which is in the end of this circulatory system. This paper deals with the improvement of water environment of waters flowing from urban area from the view point of hydrologic cycle restoration. It was clarified that the transition of the load by the city drain has exerted influence on the water quality in the Barato River. Then the ecosystem model was developed to evaluate the influence of water circulatory in urban area on water environment of the Barato River. As a result, it was verified that the amount of the water circulation is effective in the environmental improvement of the Barato River. Based on the analysis, introducing water to the stagnant water area was proposed as an effective measure for improving water quality.

Key Words : water circulatory, urban area, water quality, ecosystem model, Barato River

1. はじめに

1990年代に入って都市化による水環境問題の対策として流域の利水、治水、環境保全・回復のバランスをとりつつ、水循環を持続性のあるものにするという流域を単位とした総合的水マネジメントが鶴見川や印旛沼で行われている¹⁾。こうした自然共生型流域圏の問題においては東京湾²⁾、大阪湾³⁾など高度に都市化した流域の末端に位置する内湾域、あるいは伊勢湾⁴⁾のように都市と農地の末端に位置する内湾域を流域圏水環境の鏡として水質改善策による流域圏の再生が模索されている。多くの事例で環境影響の主要因となっているのは水質悪化であり⁵⁾、水環境の健全化には流入負荷の削減が効果的である。一方、内水面では手賀沼⁶⁾や印旛沼⁷⁾などで浄化用水の導水による水質改善も報告されている。

本研究は富栄養化した停滞性水域である茨戸川が末端水域となっている札幌市に注目し、茨戸川を水環境の鏡として、札幌市の水循環再生の要因を分析評価することを目的とした。札幌市は人工的な水循環系の起結として茨戸川の水質悪化が顕著となっており、水質を改善するため浄化用水の導水が検討されてきた。本研究では、これら札幌市の水循環と茨戸川の水環境の変遷をまとめ、茨

戸川の水環境を再現できるモデルの構築を行った。さらに構築したモデルを用い、導水などによる都市水循環系の再構築によって茨戸川の水質がどのように改善できるかについて考察した。

2. 対象流域

札幌市は図-1に示すように、北海道中部に位置し、豊平川扇状地に形成されている。1866年(慶応2年)に創成川が農業用取水や運河として開削され、1887年(明治20年)に排水水路、運河として新川が開削された。また、1931年(昭

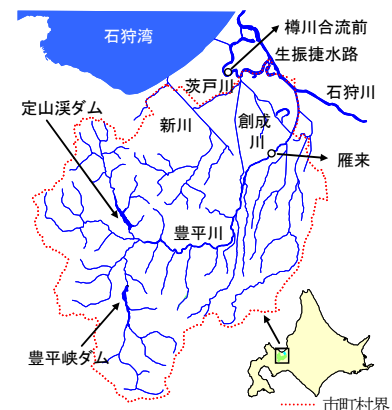


図-1 札幌市水系網

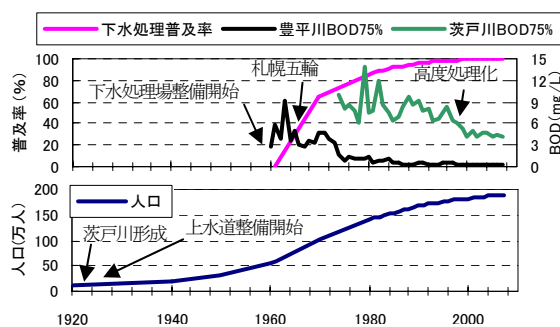


図-2 札幌市の人口、水環境の推移

和6年)に石狩川の治水対策を目的とした生振捷水路の開削にともない形成された石狩川の旧川が荒川となり、現在の水系が形成された。また札幌市域の面積は1,121km²であり、山林・原野が78%, 宅地が11%, 農地が3%, その他が8%で、近10年では宅地が0.2%増加し、農地が0.2%減少している⁸⁾。流域の土地利用は、工業用地、農地が少なく、ほぼ森林と宅地で構成されており、生活排水の環境影響を知るうえでモデルケースとなりうる流域であることを示唆している。

3. 水循環と水環境の変遷

流末水域の水質について検討を行うための事前情報として札幌市の水循環、その流末端にある荒川の水環境についてとりまとめを行った。

(1) 人口と流末水質

図-2に人口推移⁸⁾、下水処理普及率⁹⁾、豊平川BOD75%値(歴来、図-1参照)、荒川BOD75%値(樽川合流前、図-1参照)の推移¹⁰⁾を示す。町村合併を含めた札幌市の人口をみると、荒川が形成された1931年(昭和6年)当時人口は16万人であったが、下水処理場の整備が開始される1961年(昭和36年)当時は50万人であった。その後も人口は増加し、2007年(平成19年)現在では189万人となっている。また、下水処理普及率をみると1972年(昭和47年)の札幌五輪を契機に整備が進行し、普及率は急激に上昇して、現在では99.7%となっている。次に豊平川BODをみると、下水処理場が整備されるまでは50万人の生活排水が流入するために汚濁が進行していたが、処理場の普及にともない水質が改善されてきたことがわかる。

一方で荒川BODをみると下水処理普及率が90%以上となっても依然としてBOD濃度は5mg/Lを下回らず、1997年に処理場の高度処理設備が整備され始めてからは若干の減少が見られ、4mg/L程度で推移している。すなわち、札幌市域のほとんどが生活排水由来の汚濁負荷を発生させ、下水普及率も高いという流域の特徴から流末水域の水質は、下水処理場放流水に強く依存することになる。そこで上・下水道の水量、水質の変遷をまとめ、水循環の構造を明らかにした。

(2) 上・下水道の量的推移

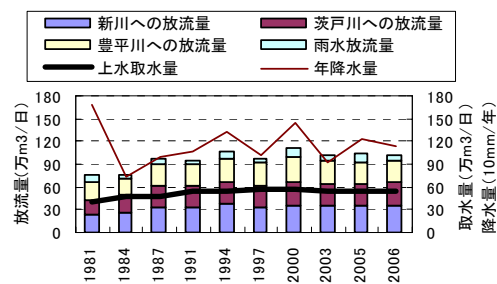


図-3 上・下水道の量的推移

最初に河川、用排水に関わる水量、水質について記録が残っている1980年以降のデータ^{9), 11), 12)}について集計を行った。

豊平川の利水は水利権の最大取水量比較で発電用水(88%), 上水(11%), その他(1%)となる。このなかで発電用水は上流域で利用され、豊平川に還流するため、水循環において重要なのは上水取水量となる。札幌市の上水は97%を豊平川から取水している。図-3に上水取水量の推移(黒線)を示す。人口の増加とともに取水量も増加しているが、1997年からは人口は増加しても取水量は若干の減少傾向に転じている。これは節水機器の普及など¹³⁾が影響していると考えられる。また原水の水質は近30年でほぼ変化しておらず、平均してBODが0.9mg/L、T-Nが0.22mg/L、T-Pが0.012mg/Lであった。なお、図示していないが地下水揚水量は近30年ほぼ一定で10万m³/日であり、9割以上が工業用などに利用されている。

次に下水道をみると、札幌市内には10箇所の処理場があり、完全分流方式は4処理場であり、他の処理場は一部分流式となっており、札幌市全体として下水処理場の放流量比較で合流式71%, 分流式29%(処理面積比では65%:35%)となっている。処理水の放流先は新川、荒川、豊平川(図-1参照)に3分される。図-3に3河川ごとの分・合流をあわせた総処理放流量と合流式処理場のみの未処理雨水放流量、年降水量を示す(なお、分流式処理場の雨水放流量は不明である)。処理放流量は年々増加傾向にあり、3河川にほぼ均等に分配されている。雨水放流量は降水量に対応して増減している。また、雨水放流割合は全放流量に対して15%前後となっている。

(3) 下水放流の質的推移

次に負荷量についてまとめる。図-3の処理放流量は処理形態が雨天時に行われる簡易処理放流量と晴天時に行われる高級処理放流量がある。そこで高級処理の水質濃度については、資料⁹⁾より年平均値を算出し、雨天時の簡易処理水質については雨天時に行われた排水ポンプ場出口での調査結果¹⁴⁾の値を用いた。各負荷について図-4に示す。

図-4より放流負荷を見ると、1997年より順次高度処理施設を整備したことにより、BOD、T-Nの晴天時放流負荷量は1990年代半ばをピークに減少傾向にある。またSSは雨天時放流負荷が大きい、晴天時放流負荷は1997年より

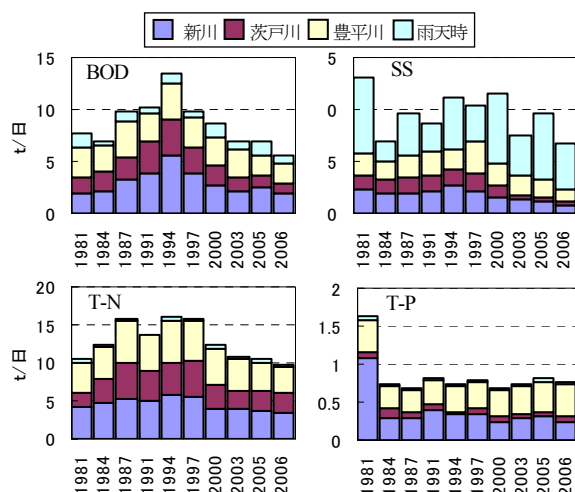


図-4 下水放流負荷量の推移

減少傾向にある。T-Pについては1981年の洪水年に高い値を示しているが、ほぼ一定値で推移していた。

晴天時のBOD、SS、T-N負荷は1997年までは3河川に均等に分配されていたが、高度処理の普及によって茨戸川への負荷の減少が顕著となっている。T-Pについては茨戸川への負荷が元来小さい。その理由は不明であるが、流入原水負荷が新川、豊平川で1.6t/日に対し、茨戸川で0.9t/日と低いこと、さらに茨戸川へ放流する処理場の除去能力が高いことが考えられる。

なお、雨天時の負荷算出にあたって簡易放流開始直後の初期フラッシュが不明なため過少に見積もっている可能性も考えられるが、雨天時の負荷は近30年で大きく変化せず、晴天時を含めた全負荷量に対しBODで15%、SSで50%、T-N、T-Pで10%程度である。このことは負荷量的には晴天時の処理能力が重要であることを示している。しかし処理場での各成分の除去率は30年でBODが94%から96%、SSが87%から93%、T-Nが51%から63%、T-Pで74%から78%といずれも上昇している。このことから、栄養塩については改善の余地が残されていると言える。

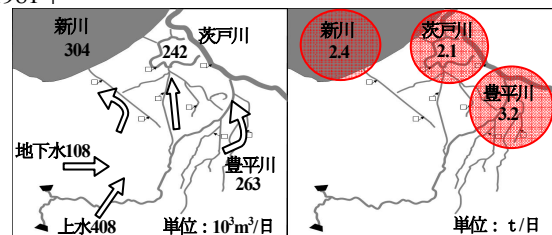
茨戸川においては流入負荷の減少にともない、水質の改善傾向がみられる(図-2、図-4参照)。放流水質の更なる改善のためには新たな処理技術の導入が必要であるが、早急には困難であると考えられる。この結果からも茨戸川の改善には水循環系の量的再構築を考慮した対策を検討すべきと考えられる。

(4) 水循環のまとめ

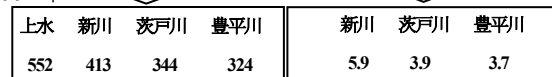
これまでの結果より札幌市における水循環量の推移を模式的に図-5に示す。左側は水量、右側はBOD負荷量を表している。1981年から1994年にかけて人口は1.24倍になり、放流量合計は1.33倍となっており、水量は人口増加にほぼ比例している。1994年以降は人口1.08倍に対し、放流量合計は0.96倍とほぼ一定で推移している。

河川毎にみると、茨戸川への放流量が1981年から2006年にかけて1.73倍となり、3河川では最も増加していた。一方、BOD負荷量は1994年にピークとなっており、その後

1981年



1994年



2006年

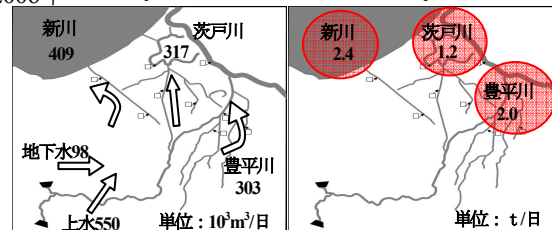


図-5 水量(左図)、BOD負荷量(右図)の推移

の減少率を見ると茨戸川で0.31倍となり、最も減少していた。図-2の茨戸川BODの推移と水循環をあわせてみると、1996年までの水量、負荷量共に増加する期間はBODが7mg/L以上であった。その後、水量は増加するが、負荷量が減少する1997年以降はBODが減少しており、4mg/Lほどで横ばいとなっている。

BODは下水流入量の増加とともに比例的に増加し、下水普及が完備された都市域においては一定以上の改善は困難である¹⁵⁾といわれており、茨戸川はまさに札幌市の下水流入を受け入れ、負荷削減により改善しつつあるも、これ以上の改善が困難な状況かと考えられる。このような状況を脱却するために、導水など水循環系の量的再構築を基本とした新たな対策が必要である。そのためには対策効果を評価できる茨戸川の水質モデルが必要である。

4. 水質予測モデル

水循環が茨戸川に与える水質影響を検討するために水中生態系の動態に基づいてBODが推算できる水質予測モデルを構築した。

茨戸川は潮位、石狩川の背水影響を受け滞留時間が10～25日という水理構造を有しており、水温躍層も形成される。そこで、流動計算は土木研究所の2次元モデル¹⁶⁾を踏襲し、逆流も考慮できるよう改良した。また鉛直直交座標によって格子分割し、各格子において生態系モデルによる水質計算を行う仕様¹⁷⁾とした。以下に基礎式を抜粋する。

(1) 連続式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

ここで、 x, z : 流下方向、鉛直方向の座標(m)、 u, v : 流下方向、鉛直方向の流速(m/s)を表す。

(2)運動量保存則

x方向

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{mx} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{mz} \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2)$$

z方向

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \quad (3)$$

ここで ρ_0 ：基準密度(1,000kg/m³)、 ρ ：流水密度(kg/m³)でSSと温度の関数とした、 P ：水圧(kg/ms²)、 D_{mx} ：流下方向の運動量拡散係数(m²/s)でリチャードソンの4/3乗則から、 D_{my} ：鉛直方向の運動量拡散係数(m²/s)でリチャードソン数の関数¹⁸⁾とした、 g ：重力加速度(9.8m/s²)である。

(3)生態系モデル

次に水質計算は、茨戸川は停滞性が高いことから、図-6に示すような植物プランクトンを中心とする生態系モデルを構築した。水温については水面熱収支を考慮して算出(詳細は既報告¹⁹⁾参照)した。各水質成分は、(4)式に示すような基礎式により計算する。

$$\begin{aligned} \frac{\partial X}{\partial t} + u \frac{\partial X}{\partial x} + (v + v_x) \frac{\partial X}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \frac{\partial X}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial X}{\partial z} \right) + S(X) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 X ：各水質成分濃度(mg/L)、 A_x, A_z ：水平方向、鉛直方向の拡散係数(m²/s)、 v_x ：各水質成分の沈降速度、 S ：生産・消費項(生物・化学的変化)である。

(4)BOD内部項基礎式

BODは好気性微生物の酸素消費量を通して有機物量の指標とされるが、嫌気条件下では微生物が呼吸できずBODは低い。有機物が多いという不具合が生じる。そのため、BODの算出には、関係する水質項目(DO、プランクトン数など、図-6参照)を水深方向に平均化して、(5)式に示すBODの内部生産・消費項を計算し、流下方向のみの1次元的な扱いとした。各パラメーターの内訳は表-1に示す。

$$\begin{aligned} S(BOD) = K_{PPB} R_{PP} PP + \gamma_{BOD} \frac{A_B}{V} \\ - R_{DB} f_1 \theta_{DB}^{T-20} X + R_{WB} f_2 \theta_{WB}^{T-20} \frac{A_B}{V} \end{aligned} \quad (5)$$

なお、パラメーター、入力条件である気象、水位、支川流量、負荷量(支川、面源)については現地観測²⁰⁾や既往文献¹⁹⁾によって決定した。

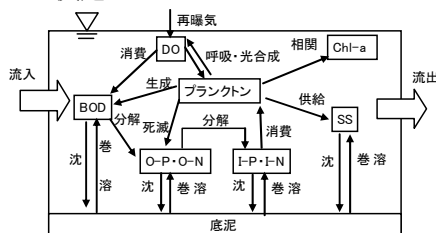


図-6 生態系モデル概念図

5. 茨戸川水環境の分析

(1)茨戸川浄化対策の経緯

図-7に茨戸川の詳細図を示す。図中白丸は環境基準点を、白三角は補助地点を示している。これまで茨戸川の浄化対策として底泥浚渫(1980年～1999年)、処理場の高度処理化(1997年～)、導水(2008)が行われている。この中で導水の運用開始に先立ち、2005年に石狩川導水試験(図-7中、山口橋上流から石狩川河川水をポンプによって1m³/sを8/1～8/21の間、連続導水。効果は既報告²¹⁾)と2007年に創成川導水試験(創成川を通して、豊平川河川水を1m³/sで9/1～11/15の間、連続導水)が現地にて行われている。これら導水による評価を行うためにも、入力条件に的確に応答できるモデルが必要となる。

(2)モデルの再現性の確認

構築したモデルを用いて茨戸川の水質再現性を確認した。茨戸川の平均水深は2.3mだが、最深部で15mある。そのため茨戸川全長約18.9kmを水平方向500m間隔、鉛直方向に0.5m幅で30層のメッシュで計算した。再現状況は図-8に示すように2007年の10万m³/日の創成川導水等、流域の変化に対応できており、比較的再現性がよいと判断できる。

(3)流入負荷に対する感度

構築したモデルを用いて水循環系の変遷を入力条件として茨戸川水質の変遷について検討した。具体的には茨戸川水質の支配要因として流入負荷に着目し、その変化に水質がどのように応答するかを計算によって分析した。計算対象は図-7の茨戸川とその流入支川とした。また2005年、2007年には茨戸川現地において導水試験が実施されているため、茨戸川水質の基準年として、導水実施以前の2002年を選択した。流入インパクトに対する茨戸川のレスポンスを確認するために、流入支川、下水処理場の流量、負荷量のみを変化させ、その他条件は2002年基準で計算を行った。なお、入力データは2002年データを基準に図-3、図-4より得られた結果をもとに作成した。さらに評

表-1 BOD内部項パラメーター

記号	単位	説明	記号	単位	説明
K_{PPB}	$\mu\text{g}/\text{個}$	植物プランクトン中BOD物質量(0.03)	θ_{DB}	-	BOD分解の温度係数(1.04)
R_{PP}	-	植物プランクトン増殖係数	θ_{WB}	-	BOD溶出の温度係数(1.05)
PP	個/L	植物プランクトン数	R_{DB}	1/day	BOD分解率(0.24)
A_B	m ²	底面積	R_{WB}	mg/m ² /day	BOD溶出率(0.8)
V	m ³	体積	f_1	-	DOによる分解係数
γ_{BOD}	g/m ² /day	BOD巻上げ量(5.2)	f_2	-	DOによる溶出係数

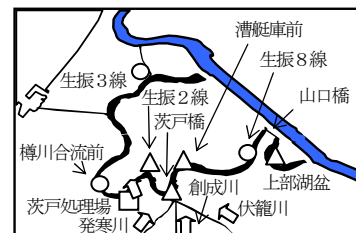


図-7 茨戸川詳細図

価年としては1984年、最も負荷量の大きい1994年、基準年とした2002年の3ヵ年とした。

表-2に各年の茨戸川への下水放流量、平均放流BOD濃度を示す。1984年と比較して1994年は放流量、BOD濃度ともに上昇している。また、2002年は1994年と比較して放流量はほぼ同じであるが、BOD濃度は減少している。これらの条件を反映させた入力条件での計算結果を比較した。

図-9に計算結果と実測値を示す。計算上、流入負荷量を変化(図-7中、創成川、伏籠川、茨戸処理場)させ、気温・日射量・雨量・風向風速などの条件は2002年時一定としている。そのため1984年、1994年の計算においては2002年の計算結果と季節的な変動が同じである。このとき2002年計算結果は実測値とよく一致しており、1984年の計算結果が最もBODが高くなる結果となった。さらに図-10に参考として計算により求めたBOD75%値と実測のBOD75%値を示す。各地点、各年ではほぼ一致していた。このことは茨戸川の水質が負荷量に依存していることを示していると同時に構築したモデルが茨戸川の水環境特性をよく反映できていることも示している。

これらの結果から、2002年と1994年の負荷形態を比較すると(表-2参照)、下水放流量はほぼ同じであるが、放流BOD濃度は2002年が低いため、茨戸川におけるBOD濃度も低くなっている。特筆すべきは1984年と1994年を比較すると、1994年の下水放流量、放流BOD濃度が高いにも関わらず、茨戸川の水質が低下していたことである。このことは負荷は増加するが、流量が多くなることによって流末水域の水質が改善されることを示している。このことは天野ら⁷⁾の結果と同じく、滞留時間の改善が重要であり、茨戸川においては水質濃度が同程度ならば、負荷が増大しても流量を増加させた方が水質改善効果が高いこと

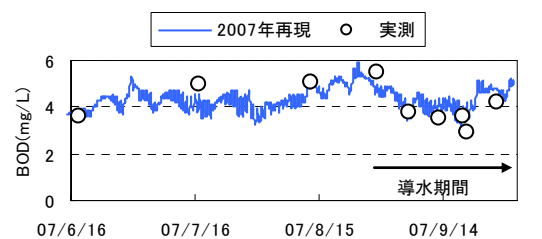


図-8 モデルによるBODの再現性(2007年漕艇庫前地点)

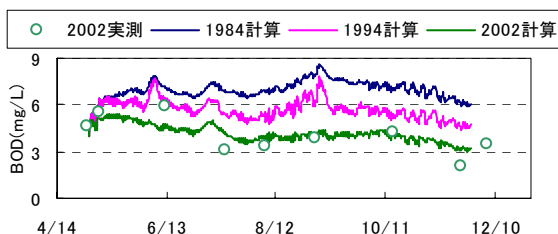


図-9 計算結果(樽川合流前)

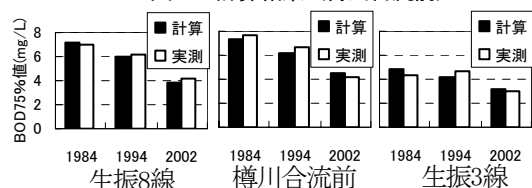


図-10 BOD75%値比較

を示している。このような結果はプランクトンの内部生産と流下(滞留)時間のバランスに依存するが、本事例では滞留時間が10日以下となる流量で改善効果が現れた。今後、観測及びシミュレーションの結果を蓄積し、内部生産と滞留時間のバランスが水質に及ぼす影響を検証していきたい。

一方、現状での茨戸川のBOD濃度は4mg/L程度であり、水利用の観点からは、環境基準B類型の3mg/Lまで改善させることが望ましい。そのためには処理技術の向上²²⁾、浄化用水の導水などの対策が考えられる。

実際の茨戸川においては、導水試験を行っており、現地観測結果とあわせ、水循環を変更することによる茨戸川への影響について検討した。

6. 対策(導水)

(1) 現地試験

2007年に行われた創成川導水試験として既存施設の創成川樋門からの取水量(通常2.6万 m^3 /日)を10.4万 m^3 /日に増加させたときの水質影響を調べた現地観測結果を図-11に示す。

図-11のBODの変化図(調査位置は図-8参照)から、導水により創成川と茨戸川の合流点である茨戸橋では濃度の減少傾向がみられ、降雨に対応した濃度スパイク(9/20, 10/31)が確認された。導水前の平均値(4.3mg/L)と比較して導水後の平均値(2.3mg/L)は約2.0mg/LのBOD低減効果を示していた。茨戸橋から上流の漕艇庫前では1.1mg/L、下流の生振2線と樽川合流前ではそれぞれ1.5mg/L、0.8mg/Lの低減効果が観測された。このように創成川の導水によってBOD低濃度用水を導水することによる希釈、さらに流量を増加させることによる滞留時間の短縮により、茨戸川では創成川合流点から上下流にBOD濃度の改善効果が伝播していくと考えられる。また現地では導水前に水温躍層(上層24℃、下層18℃)が形成されていたが、導水によって躍層が消失する傾向は見られなかった。これは導水水温(22~24℃)が上層水温とほぼ同じために密度流が形成されなかったためと考えられる。

表-2 対象年の下水放流緒元の比較

	1984	1994	2002
下水放流量($10^3 \text{m}^3/\text{日}$)	269	344	335
放流BOD濃度 (mg/L)	9.1	11.1	5.9

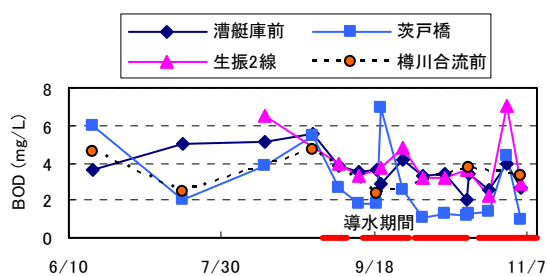


図-11 導水試験時BOD観測結果

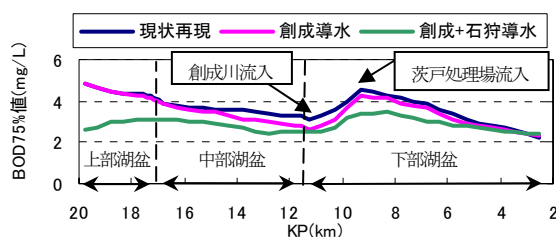


図-12 導水によるBOD縦断変化

(2) 導水シミュレーション

導水による茨戸川への影響についてシミュレーションした結果からBOD75%値を算出し、その縦断変化を図-12に示す。いずれもモデルによる計算結果であり、2002年を基準として、創成川に豊平川より10.4万 m^3 /日導水した場合と、創成川導水に加え、上部湖盆上流端(図-7参照)より石狩川から8.6万 m^3 /日(1 m^3 /s)導水することを想定した場合で比較を行った。創成川の導水のみでは、合流点付近にのみ改善効果がみられ、上流域では変化がない結果となった。そこで石狩川からの導水も追加した場合、茨戸川全域でほぼBOD3 mg/L (環境基準B類型)とすることが可能であるとの結果を得た。なお、紙面の都合上、割愛するが、導水前後での水温、水質の鉛直方向の再現性は確認している²¹⁾。また留意すべき点として茨戸川の負荷を海域に押し出すことになるが、石狩川の希釈効果(石狩川平均流量500 m^3 /sに対し茨戸川の平均流出量8 m^3 /s)が大きく、導水による海域への負荷量は5%ほどの増加と推定される。また石狩湾も開放性の貧栄養湾であることから影響は少ないと考えられる。以上の結果より、札幌市の水循環において流末水域の流量を回復するように水循環系を再構築することによって、水環境も再生されることが考えられる。

7. まとめ

札幌市は生活排水中心の負荷形態を有し、その負荷を3分する水循環系を構築していた。この循環系において流末の停滞性水域である茨戸川に環境影響が局在化しており、この環境影響改善のため水循環に注目した検討を行った。本研究により得られた知見としては次の通りである。①茨戸川が都市からの流入負荷を通して都市水循環系の鏡となっており、その構造を明らかにした。②都市流末水域の水質環境のインパクトレスポンスが評価できるモデルを構築した。③流入のほとんどが下水負荷である停滞性水域において水質改善を行うには、水質負荷の削減だけでなく、導水など水量の増加が必要である。④導水の効果をモデルによって評価することが可能となった。以上により都市循環系とその流末水域の環境改善方を評価できる方法論を提案することができた。

謝辞：本研究にあたり北海道開発局石狩川開発建設部よりデータを提供いただいた、ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 「自然と共生した流域圏・都市の再生」ワークショップ実行委員会編：自然と共生した流域圏・都市の再生，山海堂，2005。
- 2) 藤田光一，伊藤弘之，小路剛志，安間智之：水物質循環モデルを活用した水環境政策評価～東京湾とその流域を対象として～，国土技術政策総合研究所資料，第298号，2006。
- 3) 西田修三，北畠大督，入江政安：淀川流域圏の水環境と大阪湾への影響解析，水工学論文集，第51巻，pp. 1153-1158，2006。
- 4) 辻本哲郎，戸田祐嗣，尾花まき子：「伊勢湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発」研究プロジェクトのねらい，河川技術論文集，第13巻，pp. 291-296，2007。
- 5) 吉川勝秀：流域都市論，鹿島出版会，2008。
- 6) 山崎祐二，二瓶泰雄，西村司，猪爪高見：手賀沼の水質環境に及ぼす浄化用水量の影響，土木学会年次学術講演会講演要旨集第二部，58，pp. 427-428，2003。
- 7) 天野邦彦，中西哲：富栄養化の進んだ湖沼における導水による水質改善に関する考察—印旛沼を事例にして—，水工学論文集，第52巻，pp. 1267-1272，2008。
- 8) 札幌市：札幌市統計書およびインターネット，1920-2007。
- 9) 札幌市：建設局下水道施設部 維持管理年報，1981-2006。
- 10) 国土交通省：水文水質データベース，1960-2007。
- 11) 札幌市：水道局 水量水質年報，1981-2006。
- 12) 札幌市：環境局 札幌市環境白書，1990-2006。
- 13) 中川直子，大瀧雅寛，真田圭太郎，荒巻俊也：水利用機器を考慮した家庭用水使用量予測—東京都におけるケーススタディ—，水文・水資源学会2008年度研究発表会要旨集，pp. 40-41，2008。
- 14) 濱原能成，中津川誠：豊平川流域を中心とした水循環の実態と評価，平成14年度土木学会北海道支部論文報告集，第59号，pp. 912-915，2002。
- 15) 小倉紀雄，山本晃一：自然的攪乱・人為的インパクトと河川生態系，技報堂出版，2005。
- 16) 建設省土木研究所ダム部水資源開発研究室：貯水池の冷濁水ならびに富栄養化現象の数値モデル（その2），土木研究所資料，No. 443，1987。
- 17) 杉原幸樹，益塚芳雄，中津川誠：茨戸川における導水に係る水質予測，平成19年度 土木学会北海道支部論文報告集，第64号，G-3，2008。
- 18) 松尾直規，山田正人，宗宮功：貯水池上流端における流動特性と淡水赤潮現象との関係，水工学論文集，第40巻，pp. 575-581，1996。
- 19) 杉原幸樹，濱原能成，加藤晃司，中津川誠：茨戸川の富栄養化に関する総合的解析 その2，北海道開発土木研究所月報，No. 615，pp. 10-24，2004。
- 20) 北海道開発局 石狩川開発建設部：平成17年度茨戸川清流ルネッサンスⅡ水質調査資料整理業務報告書，2006。
- 21) 杉原幸樹，中津川誠，秋山泰祐，坂井一治，益塚芳雄：茨戸川の水質改善に向けた導水効果の検証，河川技術論文集，第14巻，2008。
- 22) 丹保憲仁：都市と自然系を連ねる水システムの質の使い分け，環境システム研究，Vol. 16，pp. 1-7，1988。

(2008. 9. 30受付)