

都市河川における水質汚濁機構解析

解析事業部 環境解析部

山 崎 徹

1. はじめに

流域の生産活動が豊かで、排出される汚濁負荷量の大きな都市河川では、水質悪化に伴う周辺住民への弊害や、親水性の低下が問題視される。近年、排水規制や下水道の整備により、水質環境が改善傾向にあると言えるが、長い年月を経た汚濁物質の蓄積により、底泥からの溶出や富栄養化による二次的な汚濁が増大し、「自浄作用」ならぬ「自濁作用」が生じることがしばしば見られる。

都市を流れる河川には、下水道整備によって、固有の水源を失う場合が多く、維持用水の確保が困難なこともある。また、下水道普及率が高くても下水道排除方式が合流式である場合（東京都内や大阪市など）には、雨天時に下水量が一定流量を超過すると下水が公共用水域に直接流入するため、初期降雨による汚濁負荷が問題となる。

本稿は、大阪府堺市を流れる土居川をフィールドとして、水質汚濁機構解析のための現地調査およびシミュレーションモデルの構築を行った結果をとりまとめたものである。

2. 土居川の特徴

大阪府堺市を流れる土居川は、流路延長

2,127m、仁徳陵と旧堺港の間に位置するかつての環濠であり、水源を持たない河川である（市街地を流れる単独水系）。また、前述の通り、合流式下水道による初期降雨の影響が存在する。塩水は最上流部まで遡上し、潮汐の干満による流れに支配される感潮河川である。

本河川では、COD(BOD) 等有機汚濁指標の低減にもかかわらず、溶存酸素(DO)が回復しないという問題を抱える。この原因は、河川延長が長



図 2-1 調査位置

く河川水が滞留しがちであること、底泥によりD
Oが消費されること等が複合的に影響しているも
のと考えられる。

そのため、本河川のD O改善施策を定量的に検
討していくために、土居川のD Oの挙動を表現で
きるシミュレーションモデルの構築を行った。

および室内実験を行った。

3.2 流況現地調査結果

現地調査結果として、土居川の中流域の代表点
である相生橋の流況調査結果を図 3-1 に示した。

表 3-1 調査および実験概要

3. 現地調査および室内実験

3.1 調査および実験概要

モデルを構築するにあたり、現地水質
および底質環境の把握のため、現地調査

調査日	2002/7/27(小潮時), 8/3 ~ 4(大潮時)
調査地点	4地点: 栄橋, 相生橋, 出島橋, 導水管口
現地調査	流況(電磁流速計), 水質(DO, COD, BOD, T-N, T-P etc), 底質(CODsed, 硫化物 etc)
室内実験	底泥 DO 消費実験, 河川水 DO 消費実験

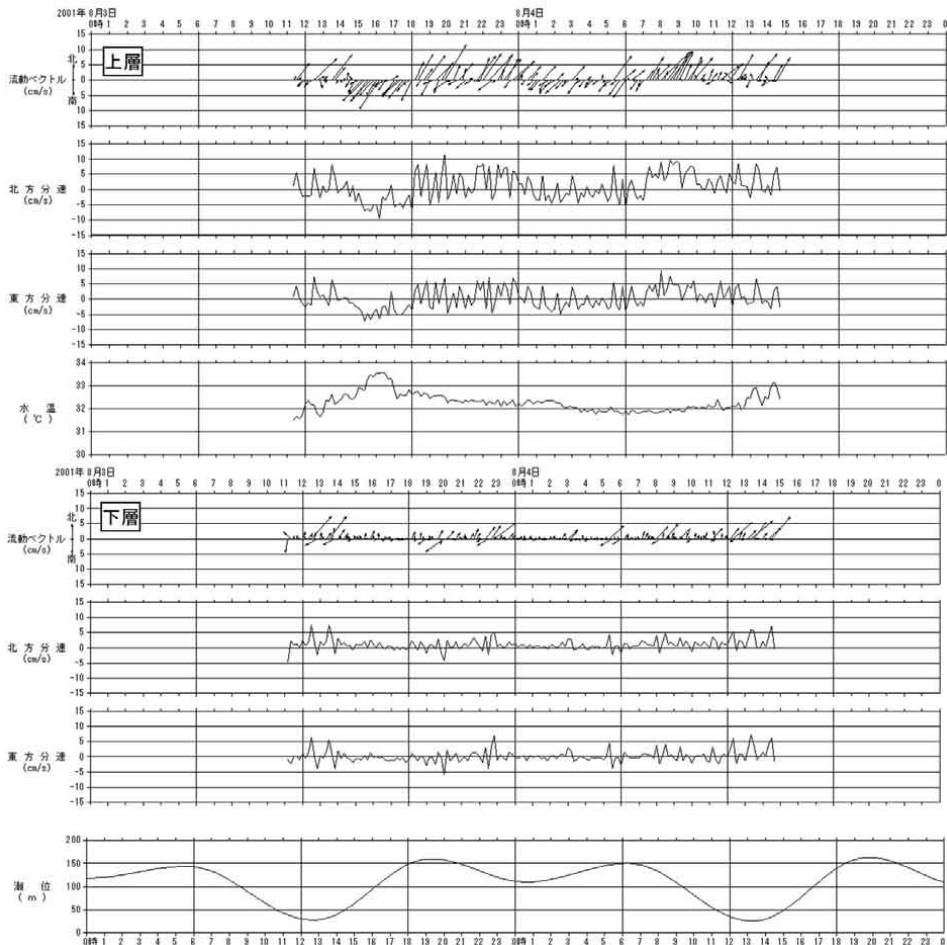


図 3-1 流況調査結果 (相生橋: H13 8/3 ~ 4: 大潮時)

これによると、本河川は、流域からの淡水流入による流れの影響はほとんど見られず、河口に位置する旧堺港の卓越潮汐である M2 分潮に支配されており、6 時間毎に流向が変化することがわかる。測得最大の流速は、上層が 13.5cm/sec、下層が 9.9cm/sec であり、下層では上層の 1/2 程度しか流速が発生していない時間帯が多く見られた。潮汐の影響が大きい大潮時でも、流速は非常に緩やかであると言える。

3.3 水質調査結果

水質調査結果として、大潮時における土居川の DO 濃度鉛直断面分布図を図 3-2 に示した。

これによると、土居川では一日の間に DO 濃度に非常に大きな変化があることがわかる。干潮時にあたる午前中には全域でほぼ貧酸素状態であったが、正午付近には、淡水流入の存在する上流および潮汐の影響を強く受ける下流から、それぞれ表層で過飽和となった。さらに、夕方の満潮時頃には、底層を除いたほぼ全域で DO は過飽和となった。DO の供給源は、主に河口域からの海水の遡上、上流導水管口からの淡水流入、植物プランクトンの光合成および水面の曝気であると考えられる。反面、これらの供給源がありながら、状況が変化すると短時間のうちに無酸素状態になることから、土居川では DO の消費速度が非常に速いと考えられた。

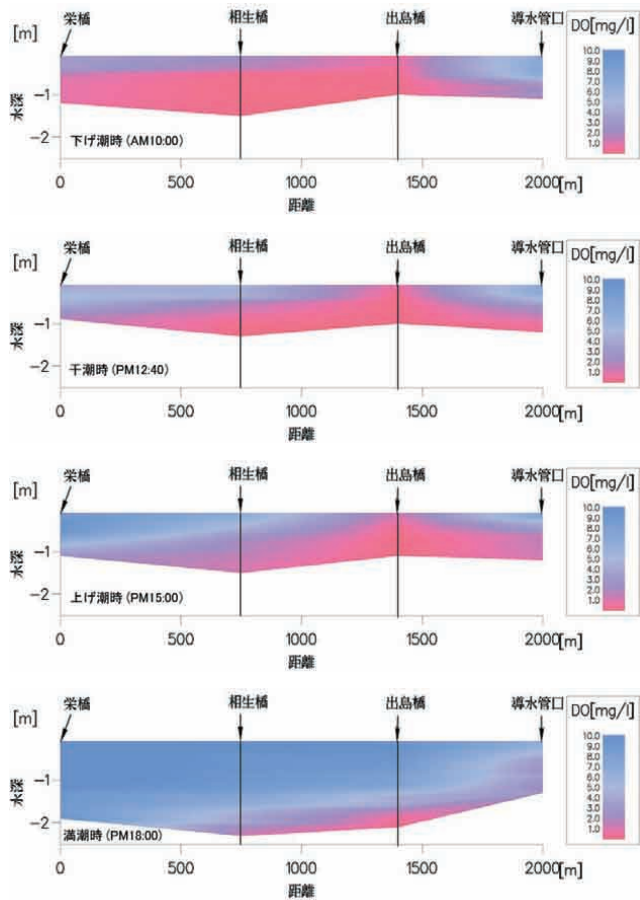


図 3-2 DO 濃度鉛直断面分布図

3.4 DO 消費実験

(1) 底泥 DO 消費実験

底泥の DO 消費実験については、不攪乱な状態で採取した底泥試料(底泥+直上水)から、底泥を乱さないように直上水を抜き取り、あらかじめエアレーションによって DO 過飽和状態に調整済みの人工海水と置き換えた。その後、DO センサーをゴム栓で固定・密栓し、恒温槽(暗所:28℃)に移し実験を開始し、一定時間毎に DO 濃度を測定した。

実験結果を図 3-4 に示した。実験を行った 2 地

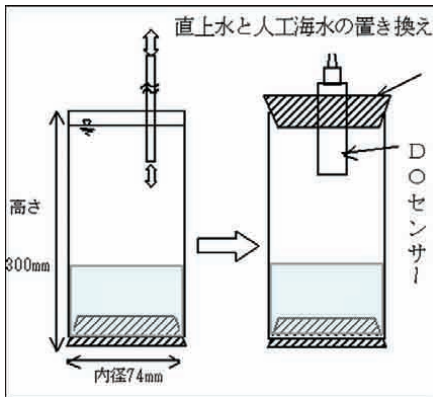


図 3-3 底泥 DO 消費実験概況

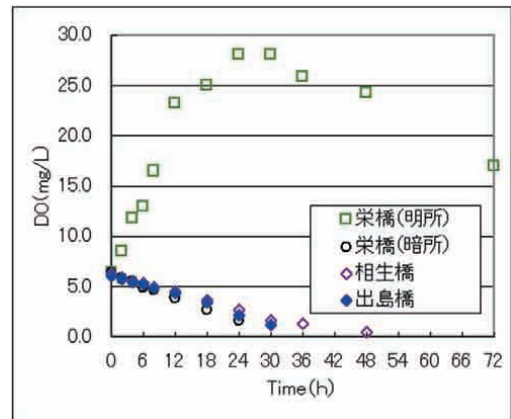


図 3-5 河川水 DO 消費実験結果

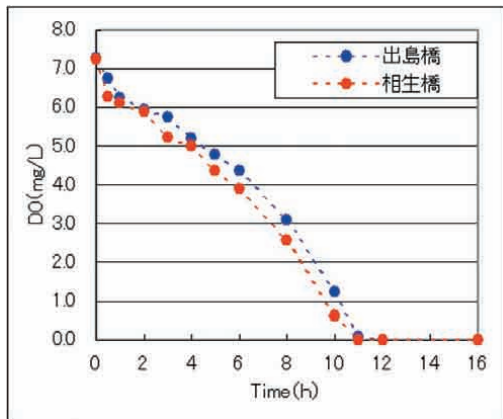


図 3-4 底泥 DO 消費実験結果

点ともに、実験開始後、12時間後には無酸素状態となった。

(2) 河川水の DO 消費実験

河川水の DO 消費実験については、採取した河川水にエアレーションを行い、DO 飽和状態とした後、一定時間毎の濃度の変化を測定した。基本設定として、暗所 28℃条件で実験を行い生物の呼吸を含む河川水の消費速度を測定した。また、植物プランクトン量が最も大きいと考えられる栄橋では、明所 28℃条件での実験を行い、光合成による DO 生産を含む濃度の変化傾向を測定した。

実験結果を図 3-5 に示した。暗所条件では、実験を行った 3 地点ともに、実験開始後、48 時間後にはほぼ無酸素状態となった。それに対し、栄橋の明所条件の結果は、実験開始後 24 時間頃をピークに DO 濃度は増加したことから、光条件が十分であれば、植物プランクトン活性が高く、DO 過飽和状態となることを示した。その後、栄養塩の枯渇などが原因となり徐々に低下したと考えられる。

3.5 DO 消費速度の算出

DO 消費実験結果から、単位時間あたりの底泥および河川水の DO 消費速度を算出し、水質および底質調査の結果と共に表 3-2 に示した。

底泥の DO 消費速度は底質の性状によって、やや異なるが、1.32 ~ 2.53g/m²/day 程度であり、富栄養化海域で示されている文献値（大阪湾：0.46 ~ 5.0g/m²/day, 東京湾：1.50 ~ 4.31g/m²/day）と、同程度であった。水深が浅く、本来浄化機能が高い河川としては非常に高い値である。

さらに、河川水の DO 消費速度は、底泥の消費量 (g/day) と比較すると 2 倍以上となり、底泥以上

表 3-2 DO 消費速度および水質・底質

項目	単位	栄橋	相生橋	出島橋
底泥 DO 消費速度	g/m ² /day	—	1.89 ~ 2.53	1.32 ~ 2.39
	g/day	—	2.20	1.82
CODsed	mg/g	—	92.5	18.2
硫化物	mg/g	—	2.96	2.62
性状		—	シルト	シルト砂混じり
河川水 DO 消費速度	mg/L/day	4.8	3.6	3.9
	g/day		6.4	6.9
CODMn	mg/L	9.7	9.0	10.7
BOD	mg/L	6.7	5.1	6.3
T-N	mg/L	2.26	2.14	2.44
T-P	mg/L	0.282	0.286	0.354

に河川水の消費速度が、DO 濃度の低下に大きく関わっていることが確認された。

4. 土居川水質予測モデルの構築

4.1 予測モデル

調査結果より、夏季における土居川のDOレベルについては、ほぼ全域で貧酸素状態が生じている。底泥および河川水のDO消費速度は非常に大きく、潮廻りによっては、表層では飽和に近いDO濃度がある時でさえ、下層は無酸素状態である状況が見られた。

外部からの流入として、最上流の導水管口より2,500m³/dayの工業用水導入が存在するが、流れの因子としては、潮汐が支配的である。

土居川は断面方向にはほぼ一様な護岸形状を示しており、地形については、流下方向のみ表現できれば十分であると考えられるため、断面二次元非定常モデルを使用した。

座標軸は、河川の縦断方向にx、鉛直方向にzとし、それぞれ上流方向、鉛直上向きを正とした。また、非圧縮性流体、静水圧近似を仮定する。

【運動方程式】

$$x \text{ 方向} : \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$z \text{ 方向} : 0 = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}$$

【連続式】

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

【拡散方程式】

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial S}{\partial z} \right)$$

u, w : x, z 方向の流速

g : 重力加速度 (=980cm/s²)

S : 物質濃度

ν : 鉛直渦動粘性係数 (=10cm²/s)

D_x : 水平渦動拡散係数 (=10²cm²/s)

D_z : 鉛直渦動拡散係数 (=10⁻¹cm²/s)

ρ : 水の密度

P : 圧力

また、境界条件は次のとおりである。

【自由表面】

$$w_s = \frac{\partial h_s}{\partial t} + u_s \frac{\partial h_s}{\partial x}$$

【河床】

$$w_b - u_b \frac{\partial h_b}{\partial x}$$

u_s, w_s : 自由表面における x, z 方向の流速

u_b, w_b : 河床における x, z 方向の流速

h_s : 自由表面の水位

h_b : 河床の高さ

なお、拡散項では、水温・塩分について熱収支の式・塩分収支の式を解き、状態方程式により密度成層を再現した。また、密度 ρ は水温・塩分の関数として、ユネスコ(1981)によって定義された式を用いた。

【DO収支定式化】

DOモデルについては、前記の基本式に加えて、生態系内での生物化学的反応経路が考えられる。

$$\frac{dDO}{dt} = \text{光合成による供給(D1)}$$

- 植物プランクトンの呼吸による消費(D2)
- 動物プランクトンの呼吸による消費(D3)
- 懸濁態有機物の無機化に伴う消費(D4)
- 溶存態有機物の無機化に伴う消費(D5)
- 底泥による酸素消費(D6)
- + 再曝気(D7)

土居川は非常に特異な水圏環境を持つため、モデルについても土居川独自のモデルを構築すべきである。したがって、利用可能なデータの蓄積やパラメータ諸元の充実が図られた場合に、随時、改良対応できるようモデルを組み立てるものとした。

土居川における D1 および D2 植物プランクトンの生理活性に伴う増減)については、海域からの影響を非常に強く受ける。植物プランクトンの存在は、時には水質浄化に寄与したり、逆に水質悪化に寄与したりと、非常に不確定な要素である。本河川においては、既往の調査結果より、夏期における植物プランクトンの存在は、昼間は DO の供給、夜間は DO の消費に働いていると考えられる。D3 ~ D5 についても個々を区別して考えるには不確定な要素であり、データが十分蓄積されていない現時点では、そのフラックスについて設定することは非常に困難である。

このような不確定な要素について、それぞれの生物の生理活性や物質の化学的形態別変化をモデルに組み入れたとしても、必ずしも精度の向上につながるとは考え難い。

基本となるモデルとして、以下の事項に留意したモデルを構築した。

D1 については、プラス α の要素(天候等により左右される不確定要素)であるため、本モデル上は安全側を考慮して設定しないものとした。

D2 ~ D5 については、水中からの(河川水による)酸素消費としてこれらを総合し、有機物質(COD)の分解による消費速度(脱酸素)として室内実験の値(河川水DO消費速度)を設定した。

底泥による酸素消費(D6)についても、室内実験

による実測値を設定した。

物理的に酸素の供給を期待できる再曝気(D7)については、再曝気係数を設定した。また、対策による強制曝気の効果を検討できるような構築した。

以上より、評価項目であるDOと、DOの増減に深く係わる有機物(COD)に関して、以下に示す基礎式を用いるものとした。

【溶存酸素(DO)濃度収支】

$$\frac{dC}{dt} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - U \frac{\partial C}{\partial x} - K_1 L + K_2 (C_s - C) L + R_i$$

【有機物(COD)濃度収支】

$$\frac{dL}{dt} = D_x \frac{\partial^2 L}{\partial x^2} - U \frac{\partial L}{\partial x} - K_1 L + L_a$$

- C : 溶存酸素
- L : 有機物濃度
- D_x : 拡散係数
- U : 流速
- K_1 : 河川水D₀消費速度
- K_2 : 再曝気係数
- L_a : 流入、溶出によるCOD負荷
- C_s : 飽和溶存酸素
- R_i : 底泥による酸素消費

再曝気係数の設定には以下の公式を利用した。

〈再曝気係数〉

$$K_2 = 8.55 \frac{g^{3/8} \rho^{1/2} D^{1/2}}{\sigma^{1/2}} \cdot \frac{n^{3/4} U_0^{9/8}}{HR^{1/2}} \cdot v^{3/8}$$

- K_2 : 再曝気係数
- g : 重力加速度
- ρ : 密度

- ν : 動粘性係数
- D : 拡散係数(O₂: 1.76×10^{-4})
- σ : 表面張力(30°C, 7.12×10^{-2} N/m)
- n : Manningの粗度係数
- U_0 : 流速
- H : 水深
- R : 径深

4.2 計算条件

計算は、潮汐の影響が大きいと考えられる大潮時を対象とした。

現地調査結果および文献値より設定した計算条件の一覧を表4-1に示した。

表4-1 計算条件一覧

諸元	設定値
格子幅	10m
層厚	10cm
潮汐境界条件	大潮時： M2分潮+S2分潮：47.9cm
水平拡散係数	29.02 cm ² /sec (リチャードソン 4/3)
鉛直拡散係数	0.145 cm ² /sec (リチャードソン 4/3)
底面摩擦係数	0.0026
潮汐周期	12時間(卓越周期)
計算時間	8潮汐
Time step	1.0秒
水質境界条件	水温：32.2°C, 塩分：23.9 DO：11.4mg/l, COD：9.7mg/l
淡水流入条件	導水管口(工業用導水) 流量：2,500m ³ /day 水温：29.0°C, 塩分：0.0 DO：7.1mg/l, COD：7.9mg/l

4.3 モデル河川

土居川の深浅測量データより作成した、モデル河川を図 4-1 に示した。

検討範囲は、土居川全域を対象とし、栄橋（河口部：下流）から導水管口（上流）にかけての約 2 km を予測範囲とした。

格子間隔は、深浅測量データの密度、将来検討されると考えられる対策の規模、再現性を考慮して、流下方向に 10 m とした。また、表層に分布する淡水層を表現できるよう鉛直方向には、10cm 毎に分割した。

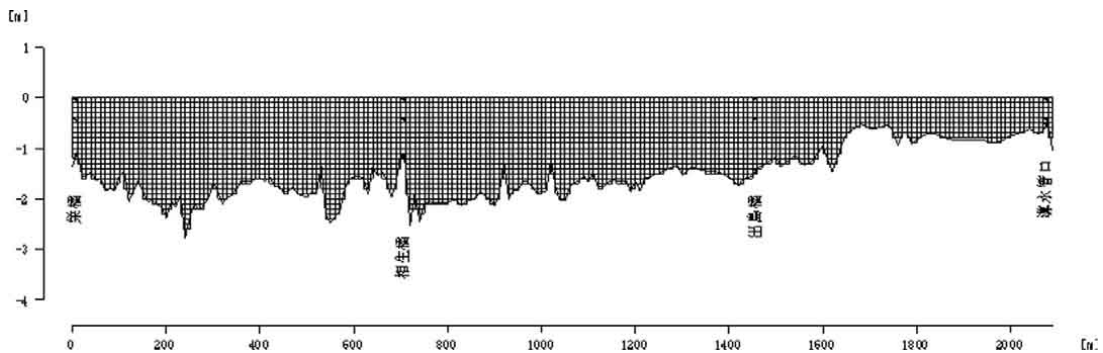


図 4-1 モデル河川格子分割図

4.4 再現性の検討

(1) 流動

土居川の流動について、現地観測が行われた大潮時の観測値と計算値の比較を試みた。上げ潮最強時および下げ潮最強時の流速値について比較を行った結果を表 4-2 に示した。これによると、観測値と計算値のオーダーは一致しており、ほぼ測得レンジ内に収まっている。したがって、本モデルは、大潮時土居川の平均的な流れを概ね再現していると言える。

流況の計算結果として、上げ潮最強時および下げ潮最強時の流況図を図 4-2 に示した。

これによると、下げ潮時に表層流が強く河川水

表 4-2 流速値の比較

		栄橋		相生橋		出島橋	
		上げ最強	下げ最強	上げ最強	下げ最強	上げ最強	下げ最強
上層	観測値						
	min	0.9	-12.7	-1.1	-10.7	0.0	-9.7
	ave	6.7	-5.2	4.0	-1.8	2.2	-3.6
	max	13.8	-1.1	8.8	6.4	4.9	2.8
	計算値	10.9	-11.2	0.4	-10.2	1.7	-7.4
下層	観測値						
	min	0.3	-9.1	-1.7	-6.4	-0.5	-4.2
	ave	5.4	-3.4	-0.5	0.2	1.2	1.7
	max	9.4	-0.85	1.6	7.4	3.4	7.6
	計算値	8.7	-1.5	1.0	0.1	1.7	-0.1

* 上流へ向かう流れを+、下流へ向かう流れを-で表示した。

単位：cm/sec

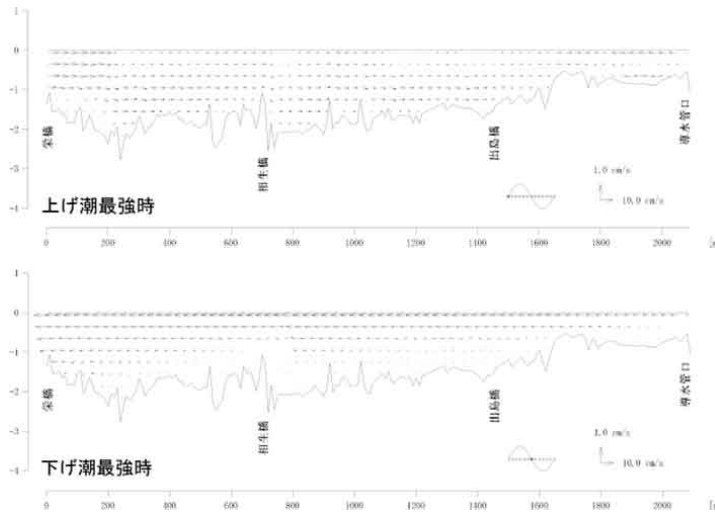


図 4-2 流速ベクトル図(大潮時)

は表層を伝って海域に流出している。それに対し上げ潮時には、中層の流れが強く、海水は中層を伝って河川を遡上すると予測された。実際には、導水管口からの流量が、計画流量(2,500m³/sec)より下回っている場合があることや、河道が風の通り道になっており、表層では吹送流が起きても考えられ、実際の現場では表層の流れは非常に不規則であると考えられた。

(2) 水質

水質については、大潮時の塩分、DO について、計算結果と現地観測結果の比較を試みた。

計算結果の日平均値と観測値の比較を、図 4-3 に示した。

塩分については、計算値の方が全体にやや高いものの、各地点の分布傾向は概ね再現できている。塩分は保守系物質であり、水塊分布に支配的に働く流動の影響を表している。したがって、塩分の分布を再現することにより、流動の再現性についても補足できたと言える。

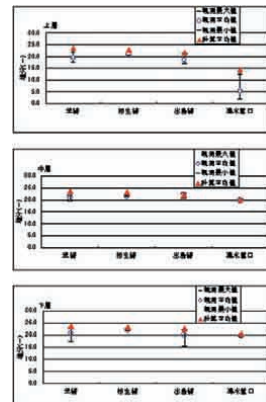


図 4-3(1) 塩分観測結果と計算結果の比較

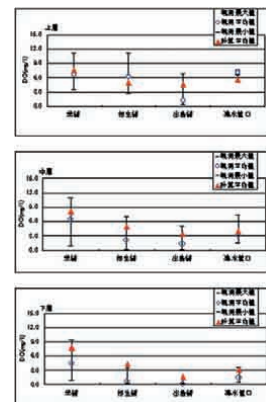


図 4-3(2) DO 観測結果と計算結果の比較

DOについては、中層および下層で計算値の
方がやや高いものの、各地点の濃度分布傾向は
概ね再現できている。中層や下層では、硫化水
素等の DO 消費の原因物質が存在するか、ある
いは、少量ではあるが流域から排水管を通して
流入する有機物負荷が影響しているものと考え
られた。

DO の鉛直断面分布図を図 4-4 に示した。

これによると、河口からの塩水の遡上による
影響が非常に顕著であること、表層では曝気お
よび最上流での導水により比較的 DO 濃度は高
いが、中流域の中層から底層にかけて、貧酸素
水塊が滞留する様子が現れている。また、土居
川の河道内には起伏が数カ所存在し、それが流
動を妨げ、貧酸素水塊の滞留を招いている可能
性についても示唆された。

5. ま と め

都市河川の汚濁は、外部からの流入による一次
的な負荷だけではなく、河川内に蓄積された汚濁
物質による二次的な負荷（底泥からの溶出、DO
消費など）が原因となって慢性化していることが
多い。DO を指標として行った今回の土居川にお
ける調査でも、2次汚濁の影響が大きいことが確
認された。水域独自の流動および汚濁機構の解析
と、不確定な要素を含まない、できるだけ単純化
した現象のモデル化を行った結果、概ね良好な再
現性が得られ、今後の DO 改善施策の検討手法と
して利用可能な予測モデルが構築できたと言え
る。

今後、今回構築したモデルを利用し、本河川の
DO の増減に大きく寄与していると考えられる植

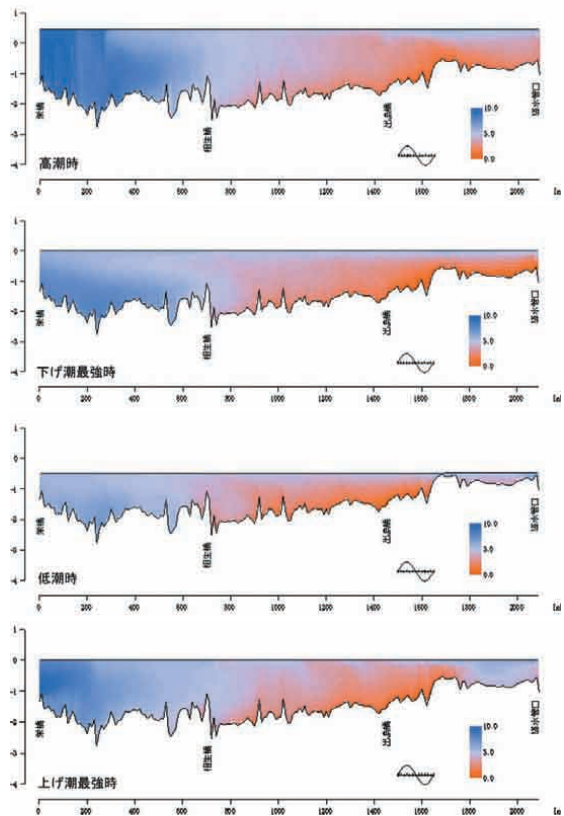


図 4-4 DO 鉛直断面分布図（大潮時）

物プランクトンの影響、潮廻りとの組み合わせに
よる解析により、モデルの予測精度を向上し、土
居川浄化対策の検討を行う予定である。

謝 辞

本稿は、大阪府堺市委託の「土居川汚濁機構解
析業務」ならびに「土居川水質シミュレーション
モデル構築業務」に基づいています。作成にあたり、
多大な御協力をいただいた堺市土木部河川水
路課の西河氏、尾崎氏ならびに関係各位に深く感
謝致します。

参考文献

- 1) 國松孝男・村岡浩爾：「河川汚濁のモデル解析」，技報堂出版，1990
- 2) 岩佐義朗：「湖沼工学」，山海堂，1990
- 3) 宗宮功：「自然の浄化機構」，技報堂出版，1990
- 4) 松梨順三郎：「環境流体汚染」，森北出版，1996
- 5) 土木学会：「水理公式集[平成11年版]」，丸善 1999
- 6) 土居川・内川をきれいにし再生する研究会：「よみがえれ！フェニックス土居川」，清風堂，1999



土居川導水管口（南宗寺前）