

1.はじめに 名古屋市を流れる堀川では水質汚濁が問題になっており、特に潮汐に伴う塩水遡上の存在は淡水との密度差による特殊な流れを発生させるとともに、水質にも様々な影響をもたらしている。このような環境にある堀川において、水質改善策を立案するには複雑な流動による水質変動を把握することが重要である。そこで本研究では現地観測により、汚濁水の指標となる pH、DO、濁質(濁度、SS 濃度)という水質項目について変動特性の検討を行った。また、数値シミュレーションによる、濁質傾向の再現、流動制御による改善策の検討を行った。

2.堀川における水質変動

現地観測は、**図-1**に示す地点において)多項目水質計を用いた底層水質の長期定点観測、)濁質の鉛直分布の計測の2種類を実施した。以下では、観測結果から、堀川における水質変動の特徴を表しているものを挙げる。観測条件を**表-1**に示す。

まず、)について述べる。**図-2**は2006年11月4~10日の新須崎橋における pH と塩分の関係である。塩分濃度が上昇すると pH が上昇していることが確認できる。これは pH 値の高い海水が混入することが要因と考えられる。次に**図-3**は2007年11月5~12日の鷹匠橋における DO と塩分の関係である。鷹匠橋において DO 値は塩分がなくなると上昇し、塩分が上昇するとともに減少していることが確認できる。これは貧酸素の海水が混入することで DO 値が減少するためと考えられる。また、堀川上流域に位置する鷹匠橋でも塩分濃度の上昇は低い海水が混入すると DO 値が大きく下がる傾向が確認できる。

次に堀川中流域における濁質変動の特徴について述べる。まず、**図-4**に中橋における2007年11月23~29日の濁度と水位、濁度と塩分の関係である。濁度は上げ潮時に塩分が上昇しはじめると急上昇し、水位差が大きいほど数値も大きい。これは塩水楔の先端が通過する際の乱れにより上昇すると考えられる。

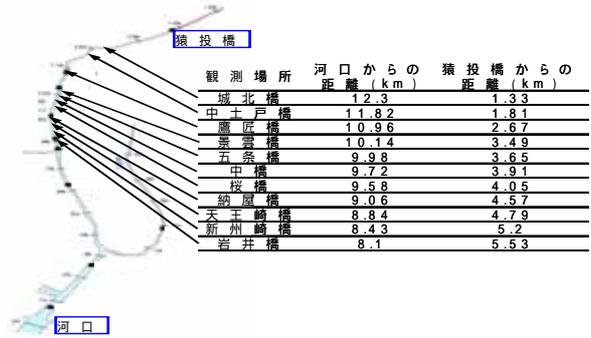


図-1 観測場所

日時	場所	計測ポイント
2006年11月4~10日	五条橋・新須崎橋	底層
2007年11月6~12日	鷹匠橋・城北橋	底層
2007年11月22~29日	中橋	底層

日時	最大潮位差	観測場所	観測日および直前の降雨	船の通過
2009年5月26日 9:30~16:30	238m	五条橋	なし	なし
2009年7月23日 7:00~18:00	253m	五条橋	なし	9:50, 9:55

表-1 観測条件(上: , 下:)

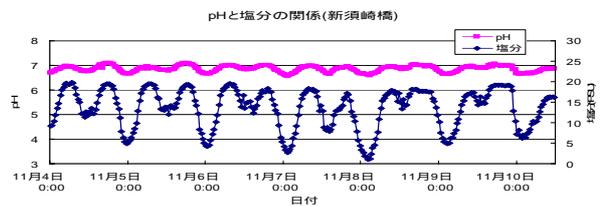


図-2 pH と塩分の関係

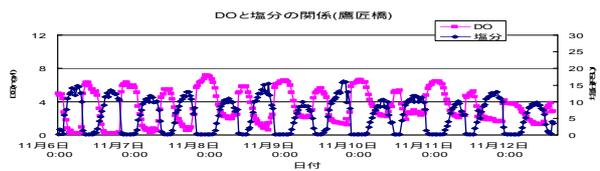


図-3 DO と塩分の関係

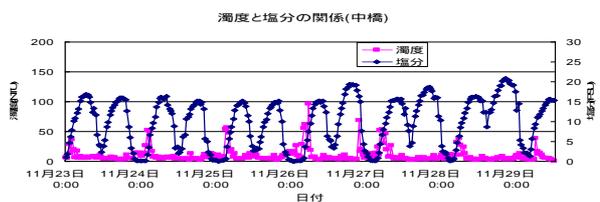
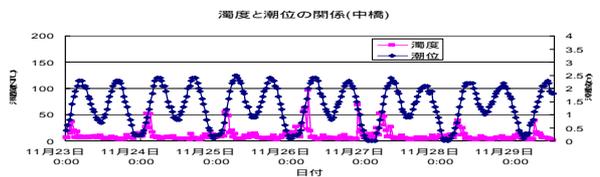


図-4 濁度との関係(上: 潮位, 下: 塩分)

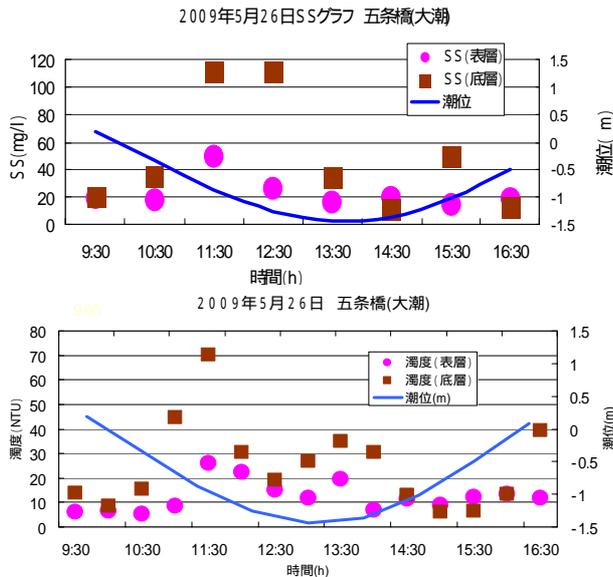


図-5 濁質と潮位の関係 2009.5.26

次は) について述べる . 図-5 に 2009 年 5 月 26 日の五条橋における濁質と潮位の関係 , 図-6 に流速コンター図を示す . まず , 特徴として SS 濃度 , 濁度ともに下げ潮の終わりに大きく上昇が確認できる . ここで流速に着目すると早い順流が発生していることが確認できる . また , 水深も低く底層においても流速が速くなっていたと考えられる . このため掃流力が増大し , 底泥が巻き上げられたことで濁質が上昇したと考えられる . 流速について 2009 年 7 月 23 日の流速分布図に着目すると 5 月 26 日と同様に順流期間が長くなっている . このような流動傾向にある堀川中流域では潮位差が大きい場合に下げ潮から干潮にかけても底泥の巻き上げによる濁質の上昇が起これと考えられる . 以下に現地観測から得られた堀川における水質変動の特徴をまとめる . 海水の侵入により pH 値と DO 値に影響が確認できた . 特に海水の混入は DO 値を大きく低下させる . これは上流でも確認でき , 広範囲に渡って堀川の水質に悪影響を及ぼしているといえる . また , 濁質は上げ潮時と下げ潮時から干潮にかけて大きく上昇する傾向が見られる . 塩水楔の先端の通過や流速が影響していると考えられる .

3. 濁質を付加した鉛直二次元数値シミュレーションによる検討

3.1 基礎方程式

鉛直二次元モデルを用いた堀川の水質流動を再現

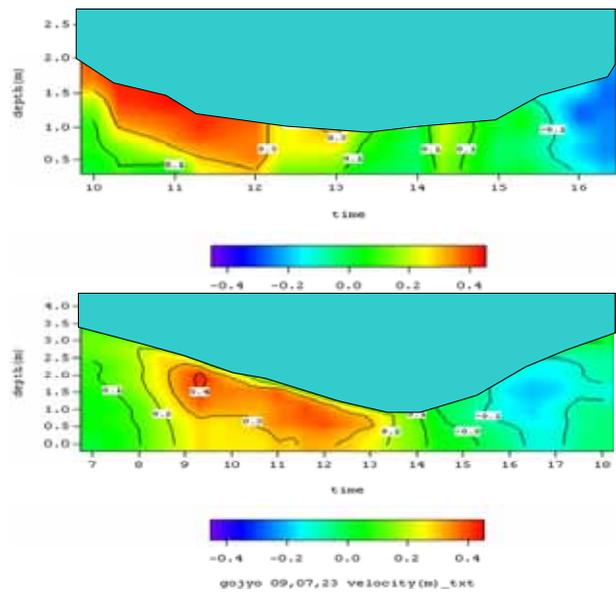


図-6 流速コンター図(上 : 5 月 26 日 , 下 : 7 月 23 日)

するために , 水路幅平均の基礎方程式を以下に示す .

$$\frac{\partial(bu)}{\partial t} + \frac{\partial(buu)}{\partial x} + \frac{\partial(buw)}{\partial z} = -gb \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gb(H-z)}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial(b\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(b\tau_{xz})}{\partial z} \quad (1)$$

$$\frac{\partial(bw)}{\partial t} + \frac{\partial(buw)}{\partial x} + \frac{\partial(bww)}{\partial z} = -gb \frac{\partial H}{\partial z} - \frac{gb(H-z)}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial(b\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(b\tau_{zz})}{\partial z} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(bcl)}{\partial t} + \frac{\partial(bucl)}{\partial x} + \frac{\partial(bwcl)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial(bcl)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial(bcl)}{\partial z} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial(bss)}{\partial t} + \frac{\partial(buss)}{\partial x} + \frac{\partial(bwss)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial(bss)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial(bss)}{\partial z} \right) + EA + GA \quad (4)$$

$$\frac{\partial(bu)}{\partial x} + \frac{\partial(bw)}{\partial z} = 0 \quad (5) \quad H = \frac{P}{\rho g} + z \quad (6)$$

$$\rho = \rho_T + 0.0074 S (\%) \quad (7)$$

$$S (\%) = 0.03 + 1.805 cl (g/l) \quad (8)$$

$$R_i = -\frac{g(\partial \rho / \partial z)}{\rho_0 (\partial u / \partial z)^2} \quad (9)$$

$$v_{tz} = v_{t0} \cdot \exp(-1.5R_i), \quad D_z = D_{z0} \cdot \exp(-3.0R_i) \quad (10)$$

u : 主流速 (正が順流) v_{tx}, v_{tz} : 渦動粘性係数

w : 鉛直流速 (正が上昇流) cl : 塩化物イオン濃度

P : 圧力 D_x, D_z : 渦拡散係数

ss : 濁質濃度 b : 水路幅 A : 底面積
 E : 巻き上げフラックス G : 沈降フラックス
 計算には, z 座標系を用いた. 下流端に名古屋港の潮位データを与えることで水位変化をさせ, 水面の圧力に対応した水位を定めた後, 水位を等間隔に分け z 座標の更新を行っている. また, 塩水遡上を再現するために, 式(2)の物質収支則と式(5)の密度に関する状態方程式を用いた. なお V_{lx}, V_{lz} は成分による鉛直混合抑制効果を表現するために式(9)の局所リチャードソン数を用いて式(10)のように変化させた. 巻き上げフラックスおよび沈降フラックスは以下のように与えた.

$$\begin{aligned}
 E &= 0.003 \left(\frac{\tau}{\tau_e} - 1 \right)^{1.7}, & G &= 0 & (\tau \geq \tau_e) \\
 E &= 0, & G &= 0 & (\tau_d < \tau < \tau_e) \\
 E &= 0, & G &= -w_o C & (\tau < \tau_d)
 \end{aligned}$$

w_o は沈降速度, τ はせん断力, τ_e は巻上げの限界せん断力, τ_d は沈降の限界せん断力である. 堀川の浮遊物の沈降試験より $w_o = 2.56 \times 10^{-4} (m/s)$ を, ヘドロを下汚泥 ($\tau_e = 0.03 \sim 0.08 (N/m)$) と同様の挙動を示すと仮定し $\tau_e = 0.06 (N/m)$ を, 浮遊物の沈降条件を流速が約 10 cm/s 以下であると仮定し $\tau_d = 0.005 (N/m)$ を用いた.

3.2 縦断分布に関する検証

本数値計算では河口から 13.5 km 猿投橋地点を 0 m , 河口から 3.5 km 新堀川合流地点を 10000 m として計算の対象となる区間を選定している. また, 計算結果は最も堀川の流動形態の特徴と似ていた 24 時間分に着目し, 現地観測結果と照らし合わせていく.

まず, 各成分の縦断分布について述べる. 図-7 に塩分濃度縦断分布の現地観測結果および計算結果を示す. これらと比較すると, 塩分の分布や混合形態が同じ傾向を示している. また, 塩水楔の先端部が $3000 \text{ m} \sim 6000 \text{ m}$ の間に存在しており, 再現性は妥当であるといえる.

次に, 図-8 に計算結果による上潮時と下潮時の主流速 u の縦断分布を示す. 上潮時に注目すると, 表層は停滞に近いが底層では大きな逆流を示している事が分かる. 下潮時に注目すると, 表層は順流を示しているが底層では逆流が起き始めていることが分かる. 通常開水路において主流速は対数速分布を示すが, このような流速分布となるのは, 密度差による前後の

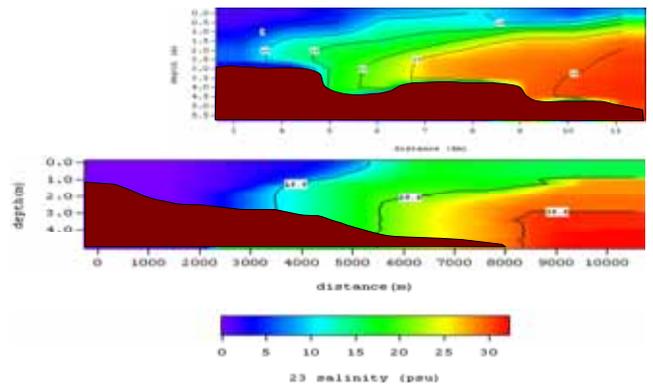


図-7 塩分濃度縦断分布 (上: 現地観測, 下: 計算結果)

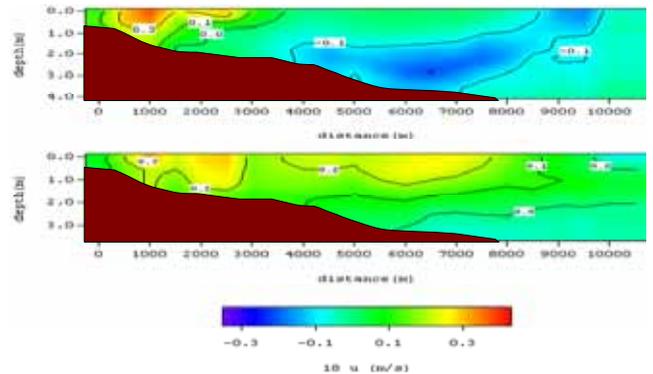


図-8 主流速縦断分布 (上: 上潮, 下: 下潮)

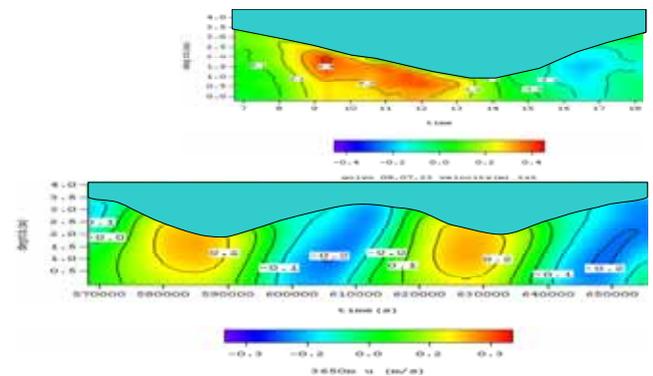


図-9 主流速鉛直分布 (上: 現地観測, 下: 計算結果)

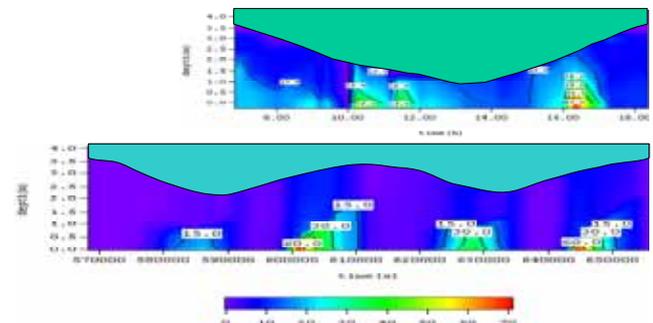


図-10 濁質の鉛直分布 (上: 現地観測, 下: 計算結果)

圧力差や渦動粘性係数の変化に影響を受けるためと考えられる.

3.3 各成分の鉛直分布に関する検証

図-9 に五条橋地点における主流速 u の鉛直分布時間変化を現地観測 (2009年7月23日), 計算結果の順に示す。これらと比較すると, 上潮時には全層にわたり逆流が発生し, 下げ潮から干潮にかけて順流が発生しているという傾向が同様である。

続いて, 図-10 に同じ五条橋地点における濁質濃度鉛直分布時間変化の計算結果を示す。計算結果には現地観測で見られた, 上潮時に濁質濃度が急上昇すること, 下げ潮から干潮にかけて上昇しているという傾向が現れており, 概ね再現ができていているといえる。

4. 導水位置に関する検討

塩水遡上を阻害する効果について導水による検討を行った。導水位置による上流域での効果を検討するために上流端 (Case01) と名城下水処理場 (Case02) から, それぞれ $5.0 \text{ m}^3/\text{s}$ を流入させている。Case02 はより塩水遡上限界点に近い位置からの流入した場合の効果を検証するためである。図-11 に満潮時の塩分濃度の縦断分布を Case01 を (a) に, Case02 を (b) に示す。(b) に注目すると上流の塩水が若干押し下げられている事が分かる。次に図-12 に下げ潮時主流速分布縦断分布を Case01 を (a) に, Case02 を (b) に示す。(b) に注目すると下流域中層部の順流速が速くなっている事が分かる。以上のことから, より塩水先端に近い名城下水処理場からの流入は塩水を押し下げる効果が微少だがあると言える。しかし, その効果を期待するには流量を増量する必要があると考えられる。

5. 越流する堰設置による検討

水中に水深以下の潜り堰を設けることで, 底層の塩水塊の上流への遡上をどの程度妨げる効果があるか, 数値計算により検証を行った。堰設置点は本計算上では 2900m の朝日橋地点, 堰高さは 1m である。図-13 に上潮時の塩分濃度の縦断分布を通常時のものを (a) に, 堰設置時のものを (b) に示す。比較すると, 塩分は全体的に堰設置時のほうが遡上している事が見て取れる。次に図-14 に同じ上潮時の主流速 u 縦断分布を通常時のものを (a) に, 堰設置時のものを (b) に示す。これを比較すると, 堰設置時には堰上部の流速が早くなっており, 通常よりも上流に塩水が流れ込んだと考えられる。以上から越流する堰設置による塩水遡上を止める効果はあまり期待できないと考えられる。

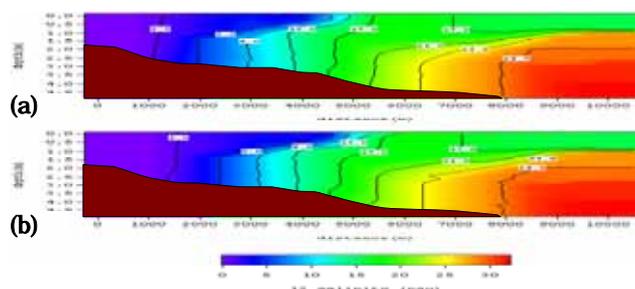


図-11 流入点変化による塩分濃度縦断分布の比較

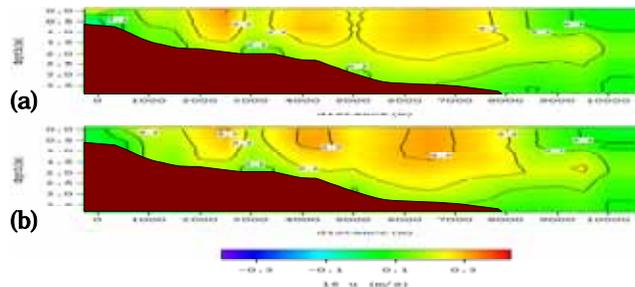


図-12 流入点変化による主流速 u の縦断分布の比較

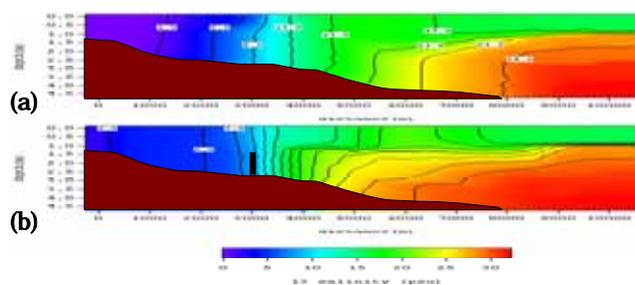


図-13 堰設置による塩分濃度縦断分布の比較

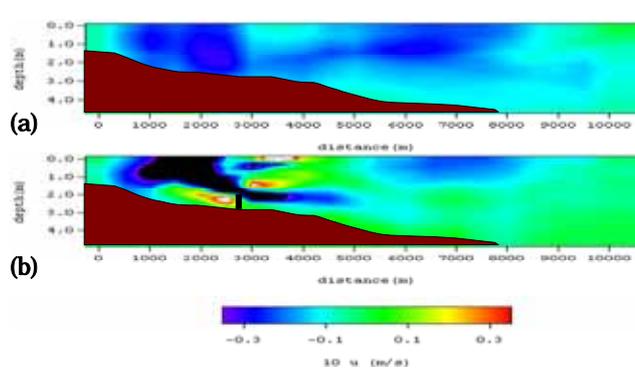


図-14 堰設置による主流速 u 縦断分布の比較

6. おわりに

堀川では海水の混入により pH や DO に影響を与えている。満潮時には DO が低下し, 水質に悪影響を及ぼし, 上流でも影響がある。また, 潮位差の大きい場合は順流の期間が長く, 干潮時前後には濁質上昇が起こりやすいと考えられる。上流域での改善を考えた場合, 塩水遡上限界点に近い位置からの導水は有効であると考えられるが, 流入量の増加は必要である。潜り堰についてはかえって塩水を上流に留める作用もみられたため, 堰の可動化による運用が不可欠といえる。