

## 1. はじめに

名古屋市を流れる都市感潮河川堀川では水質の悪化が問題になっており、その浄化の為に様々な活動が行われてきたが、自己水源を持たない事や、未処理の排水が流入等といった様々な要因に

より未だ浄化は達成されていない。そして、その浄化に対する最たる阻害要因として潮汐に伴う塩水塊の存在があげられる。図-1 に、堀川の全体図を示すが、この全長 16.2km の河川は、河口から 13.5km 地点まで、その河床高は河口の名古屋港平均満潮位を下回る。こういった要因により、川の流動は潮位変動にその大部分を依存しており、さらに塩水と淡水の存在により特殊な流れが発生し、底

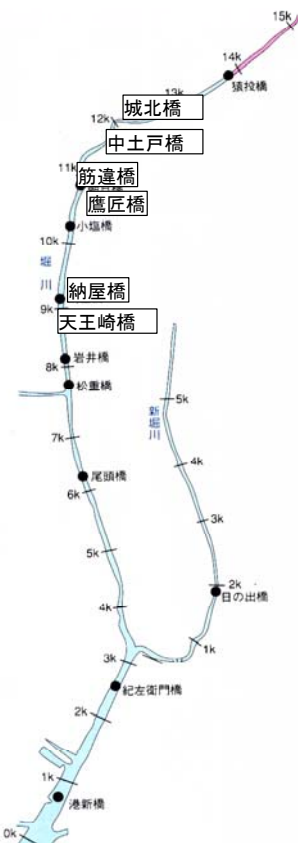


図-1. 堀川の概略図

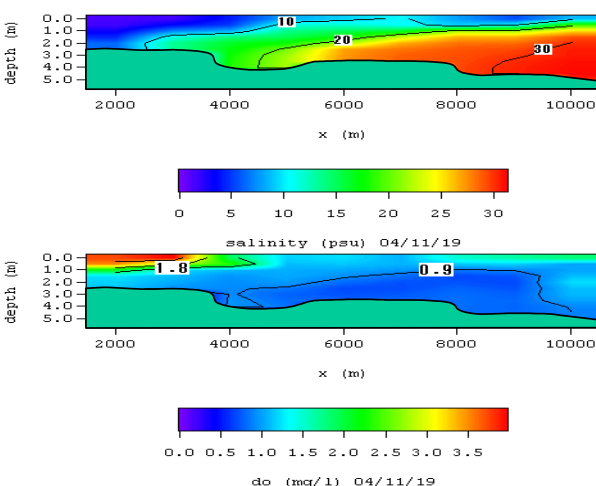


図-2. 観測による塩分濃度, DO 縦断分布図

層に塩分濃度の高く DO の低い貧酸素水塊が形成され、水質の悪化、ヘドロ形成といった事象発生の一翼を担っている。図-2 に観測結果による塩分濃度の縦断分布と DO の縦断分布を示すが、高い塩分濃度の分布と低い DO の分布の傾向が一致している。以上のように特殊な環境におかれた感潮都市河川堀川の水質を浄化する有効な方法は明確には明らかになっておらず、何か浄化のための施策を行うにあたって、それだけの労力や費用をかけるだけの効果が得られるのかは未知数の部分が多く、対策が立てづらい。よって本研究では堀川の特殊な流動を再現できる数値計算シミュレーションを作成し、それを用いて潮汐変化に伴う特殊な流動を考察し、さらに水質改善のための施策を行った場合にどの程度の効果が得られるのかを流動変化、塩分濃度変化の観点から検討を行った。

## 2. 鉛直二次元計算とその再現性の検証

### 2.1 基礎方程式

鉛直二次元モデルによる基礎方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uw}{\partial z} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{g(H-z)}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial ww}{\partial z} = -g \frac{\partial H}{\partial z} - \frac{g(H-z)}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$H = z + \frac{P}{\rho g} + zb \quad (4)$$

$$\rho = \rho_T + 0.0074 S (\%) \quad (5)$$

$$S (\%) = 0.03 + 1.805 cl (g/l) \quad (6)$$

$$R_i = -\frac{g(\partial\rho/\partial z)}{\rho_0(\partial u/\partial z)^2} \quad (7)$$

$$v_{tz} = v_{t0} \cdot \exp(-1.5R_i), \quad D_z = D_{z0} \cdot \exp(-3.0R_i) \quad (8)$$

$u, w$ は流下、鉛直方向の平均流速でそれぞれ正が順流、上昇流、負が逆流、下降流である。 $p$ は圧力、 $v_{tx}, v_{tz}$ は渦動粘性係数、 $cl$ は塩化物イオン濃度、 $v_x, v_z$ は各方向の渦拡散係数である。計算方法は、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、その為に $\sigma$ 座標を用いた。水面の圧力に対応した水位を定め、その水位を等間隔に分け、 $z$ 座標の更新を行っている。また、塩水遡上を考察するために、式(2)の物質収支則を基礎方程式と式(5)の密度に関する状態方程式を用いて解析を行った。なお $v_{tx}, v_{tz}$ は成分による鉛直混合抑制効果を表現するために(7)(8)の局所リチャードソン数を用いて変化させた。

## 2.2 再現性の検証

図-3に河口から9kmの納屋橋地点における塩分濃度鉛直分布時間変化を、現地観測によるものを(a)に、計算結果によるものを(b)に示す。これを比較すると、満潮時に高く、干潮時に低いという傾向が同様で、塩分濃度の分布に対する再現性は妥当であると言える。

次に図-4に同じ納屋橋地点における主流速 $u$ の鉛直分布時間変化を、現地観測によるものを(a)に、計算結果によるものを(b)に示す。これを比較すると、上潮時に全層にわたり逆流が発生し、下げ潮時には表層付近が順流速の最大値を示すという傾向が同様で、主流速の分布に対する再現性は妥当であると言える。

次に図-5に塩分濃度の縦断分布を、現地観測によるものを(a)に、計算結果によるものを(b)に示す。なお、本数値計算では河口から13.5km猿投橋地点を0m、河口から3.5km新堀川合流地点を10000mとして計算の対象となる区間を選定している。これを比較すると、混合形態の推移や、分布の傾向が非常に近く、再現性は妥当であると言える。

## 3. 計算結果による流動特性の考察

### 3.1 主流速の縦断分布による考察

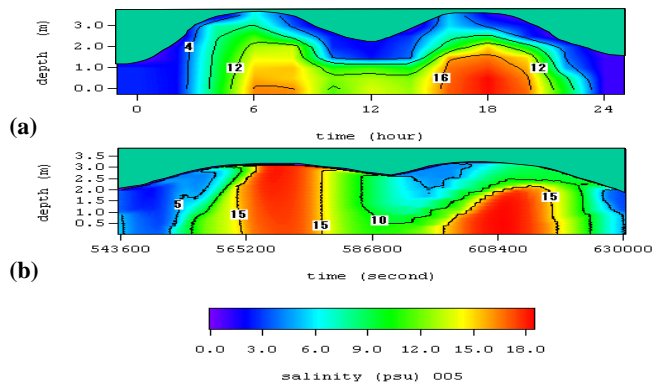


図-3 納屋橋地点での塩分濃度鉛直分布

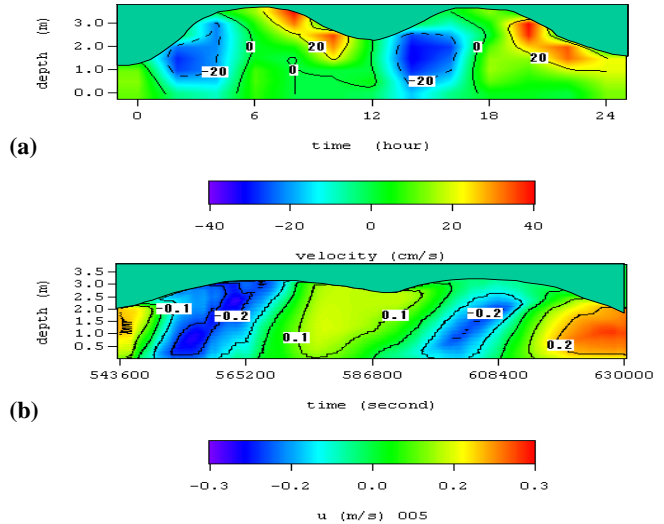


図-4 納屋橋地点での主流速 $u$ の鉛直分布

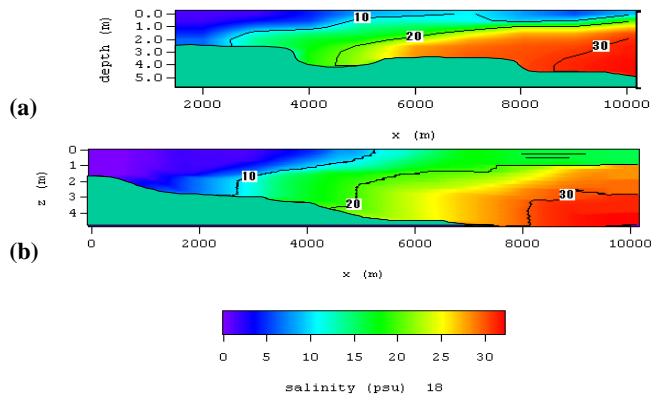


図-5 観測、計算による塩分濃度縦断分布

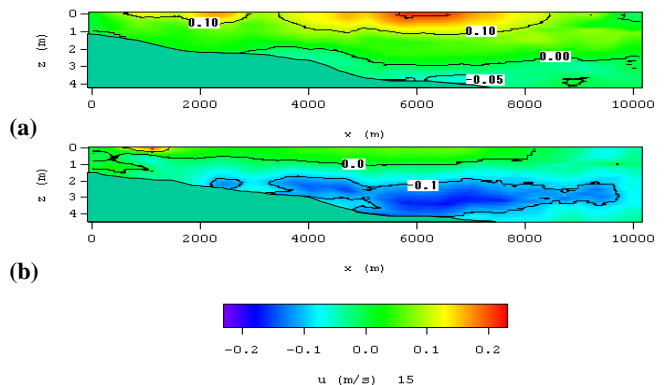


図-6 計算による主流速 $u$ の縦断分布

図-6に計算結果による主流速  $u$  の上潮時の縦断分布を、上潮開始直後を(a)に、上潮時を(b)に示す。(a)に注目すると、表層は順流を示しているにもかかわらず底層では逆流が起こっている事が分かる。次に(b)に注目すると、表層は停滞に近いにもかかわらず底層では大きな逆流を示している事が分かる。通常開水路において主流速は対数速分布を示すにもかかわらずこのような結果が起こるのは、密度差による前後の圧力差、そして動粘性係数の変化によるものであり、この流れにより塩分の混合形態は左右されている事が予想される。

### 3.2 上下流速の鉛直分布時間変化による考察

図-7 に計算結果による納屋橋地点での上下流速  $w$  の鉛直分布時間変化を示す。上昇流を正、下降流を負としている。これを図-4(b)と共に注目すると、逆流開始直前、底層から順に上昇流が発生し、逆流が発生している間は下降流が発生し、それ以外ではほぼ停滞している事が分かる。これにより、塩分濃度の高い水塊が到達する直前には上昇流が発生しヘドロの巻上げにより濁度の上昇が発生すると予想され、さらに底層塩水塊と表層淡水との間では移流による交換はほぼ行われていないことが伺える。

### 4. 淡水流入量増量による効果の検証

淡水流入量増加により、非酸素水塊形成機構となっている底層塩水塊を下流へ押し流す効果がどの程度期待できるかを数値計算により検証を行った。Case1 が上流端から、Case2 はより塩水塊に直接的に影響を与える事を目的として、河口から7.5km、本計算上では6000mの松重閘門地点において、毎秒  $5.0\text{m}^3$  の淡水の導水を行った。なお、通常時堀川上流端の庄内川からの導水量は  $5.0\text{m}^3/\text{s}$  である。図-8 に満潮時の塩分濃度の縦断分布を通常時のものを(a)に、Case1 を(b)に、Case2 を(c)に示す。(b)に注目すると、表層部の塩水が下流に若干押し下げられており、(c)に注目すると下流の塩分濃度の高い水塊が若干押し下げられている事が分かる。次に図-9 に下げ潮時主流速分布縦断分布を通常時のものを(a)に、Case1 を(b)に、

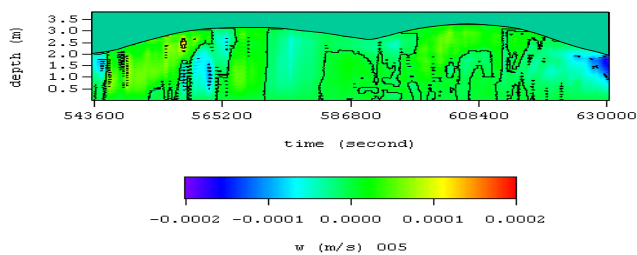


図-7 納屋橋地点における上下流速  $w$  の鉛直分布

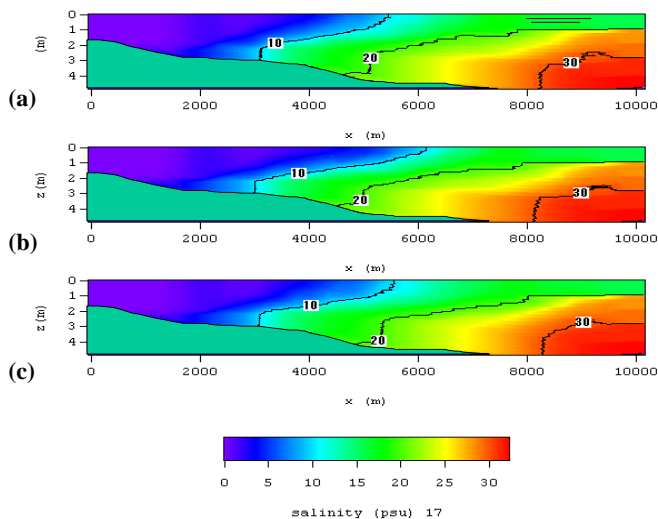


図-8 流入量変化による塩分濃度縦断分布の比較

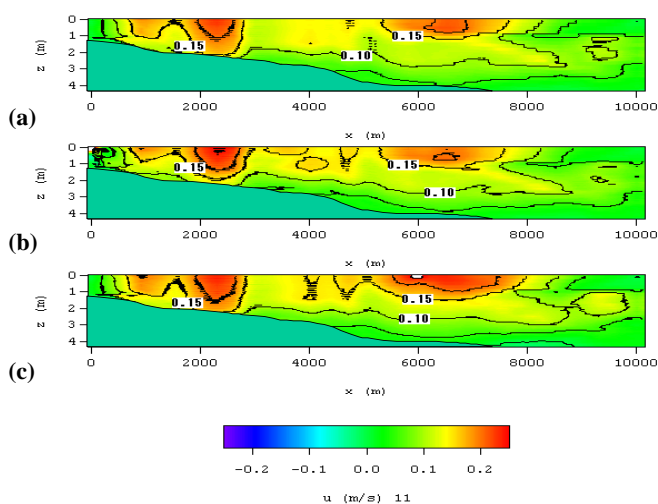


図-9 流入量変化による主流速  $u$  の縦断分布の比較

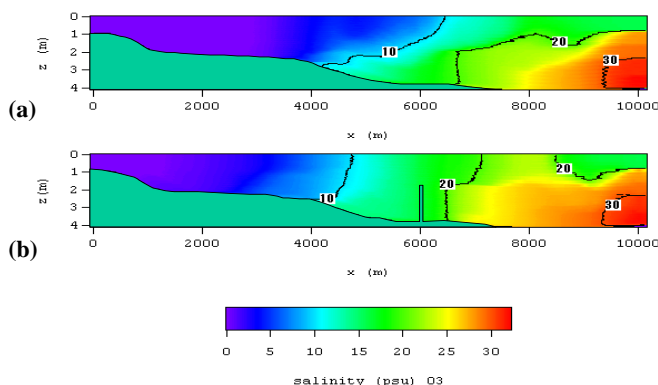


図-10 堰設置による塩分濃度縦断分布の比較

Case2 を(c)に示す。(b)に注目すると、中流域表層部の順流速が若干速くなっており、(c)に注目すると下流域中層部の順流速が若干速くなっている事が分かる。よって同じ  $5.0\text{m}^3/\text{s}$  流入量増量したとしても貧酸素水塊形成機構となっている底層の高濃度塩水塊を押し下げるという意味では中下流域に流入させた場合の方がより効果が望めると考えられる。しかし、塩分濃度、主流速共に影響は極若干であり、上流部における流入水と貧酸素水の混合、希釈という意味では効果は望めるが、貧酸素水塊形成機構改善への効果は、 $5.0\text{m}^3/\text{s}$  という大量の導水を行う事に対する費用を考えると有効であるとは言い難い。なお、まもなく堀川に木曾川から毎秒  $0.4\text{m}^3$  の導水が初年度で 6000 万円の費用をかけて行われようとしているが、ここからも  $5.0\text{m}^3/\text{s}$  という大量の導水にかかる費用が伺えるであろう。

## 5. 越流する堰設置による効果の検証

水中に水深以下の堰を設ける事で、底層の塩水塊の遡上を妨げ、それにより表層と底層の流れの二層化を妨げる事で貧酸素水塊の形成を阻害する効果がどの程度期待できるかを数値計算により検証を行った。設置箇所は河口から 7.5km、本計算上では 6000m の松重閘門地点、堰高さは 2m である。図-10 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。しかし、堰上流部の混合形態が強混合になっており、鉛直方向の塩分濃度の差がほぼ見られない。次に図-11 に同じ上潮時の上下流速  $w$  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。これを比較すると、堰設置時には堰の前後で非常に大きな上下流が発生し、それが広範囲に伝わっている事が見て取れ、大きさとしては最大で 50 倍もの上下流速が発生している。以上により、堰上部での越流により強制的に上下流が発生し、その結果塩水と淡水の成層化を阻害していると考えられる。この結果、河床のヘドロで溶存酸素を消費した貧酸素水がそのまま底層部に残ることなく、表層部の大

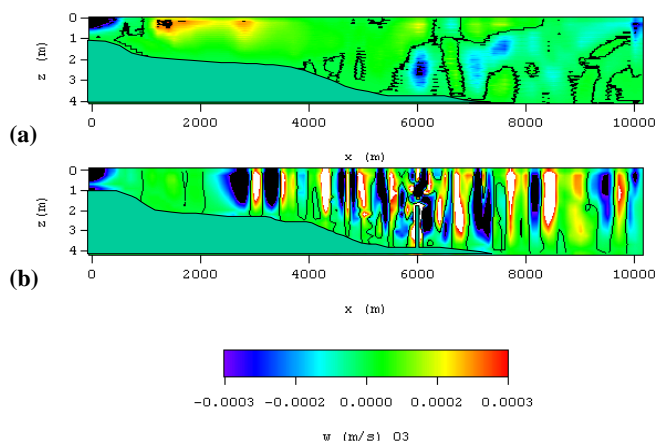


図-11 堰設置による上下流速  $w$  の縦断分布の比較

気によって、また流入水によって酸素を供給された水と混じりあうことで河床にも常にある程度の酸素が供給され、有機物の分解が活発化し河床に堆積したヘドロの分解、水質の改善につながる効果が大きいにあるのではないかと考えられる。

## 5. おわりに

潮位変動と、塩水と淡水の密度差に流動を支配された特殊な流れを数値計算によってある程度再現する事ができ、それによって流動制御を目的とした施策に対する効果の予測を立てる事が可能となった。淡水流入量増量は、流入水は上流域でのみ大きく堀川水と希釈され、その水も表層部から河口へと流出してしまうために、膨大な費用をかける程の効果は期待できないのではないかと考えられる。しかし中流域において流入させれば若干の塩水塊押し下げ効果があると予測される。中流域への越流する堰設置の効果は、越流によって発生する激しい上下流により混合形態の改善や、表層から底層への酸素供給による貧酸素水塊形成の抑制効果があるのではないかと予測される。よって越流する堰と淡水流入量増量を同時に行う事ができれば、流入した DO の高い淡水も中流域以降で混合することなく表層をつたい河口に流出してしまうということなく、より高い効果が望めるのではないかと考えられる。今後はこの数値計算に DO、水温といった要素を加え、それを用いたより詳細な予測を立てる必要がある。

指導教官 富永 晃宏 教授