

1. はじめに 名古屋市の中心部を流れる堀川は自己水源が乏しく、名古屋港の潮汐の影響を受ける感潮河川である。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、底層では高塩分、低 DO の貧酸素水塊を形成し、水質悪化の主要因となっている。そこで水質浄化策を立案するために、塩水遡上の実態や、水質への影響を明らかにすることが必要である。本研究では、塩水楔位置の特定や、特徴がある程度つかめ始めている堀川の塩水挙動について現地観測と数値シミュレーションによって検討、考察を行い、堀川清流化の可能性及び対策の立案を目的とする。

2. 観測

2-1. 連続観測, 定点観測 これまで多くの観測が堀川の中流域で行われてきた。松重閘門水域では、中川運河からの導水の影響が大きいということが分かり、その影響を把握するために近年、観測を行っている。2012年11月14日に松重閘門と山王橋で連続観測、2013年6月21日～7月12日に図-1に示す5地点で定点観測を行った。多項目水質計(東亜 DKK 製 WQC-24)を用いて、連続観測では、水面から 0.5m ずつの計測を 30 分間隔で行い、定点観測では、計測地点の河床から 0.5m の位置に水質計を固定し、10 分間隔で pH, DO, 塩分, 水温を計測した。表-1 に各観測日の中川運河からの導水状況を示す。通常の堀川では、塩分と逆相関関係にある DO 値は上げ潮時の塩水遡上によって小さくなる。しかし中川運河からの導水は流量が多く、堀川よりも高 DO, 高塩分であることから、導水と上げ潮のタイミングが重なった場合は上げ潮時に関わらず、DO 値が上昇する¹⁾。図-2 に定点観測の7月7日、大潮の塩分の観測結果を示す。表-1 より、中川運河から導水が行われ始めた時刻は下げ潮から干潮時であり、導水ポンプのある松重閘門に最も近い松重橋と下流に位置する山王橋、古渡橋で塩分の上昇が見られた。そして導水が終了すると、上流側の日置橋と岩井橋においても塩分の上昇が確認できる。潮の流れは導水終了時刻の少し前に上げ潮に切り替わっているが、導水が終わるまで日置橋に変化が確認できないことからポンプ稼働中は潮が上げ潮であっても導水は比較的に下流に流下しやすい傾向があることが分かる。連続観測については後で言及する。以上の結果より松重閘門水域に比べると高塩分、高 DO の水塊が導水されていることは明らかで、この影響は堀川の塩水挙動を把握する上では、無視できないものであると分かる。また中川運河から導水された水塊は下流に流れ易い特徴を持っていることから、堀川の循環を促すという意味も込めて下げ潮時に導水を集中



図-1 観測場所 ()内は松重閘門からの距離

表-1 各観測の中川運河からの導水状況

観測	日時	導水時間	導水量(m ³)
連続	2012/11/14(大潮)	10:30~13:40	83,280
定点	2013/7/7(大潮)	10:50~13:00	57,720

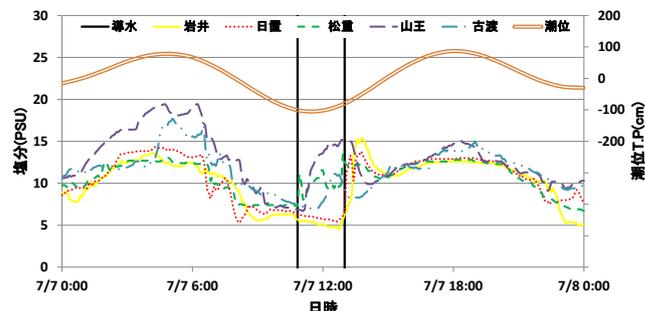


図-2 定点観測結果 塩分 2013/7/7 大潮

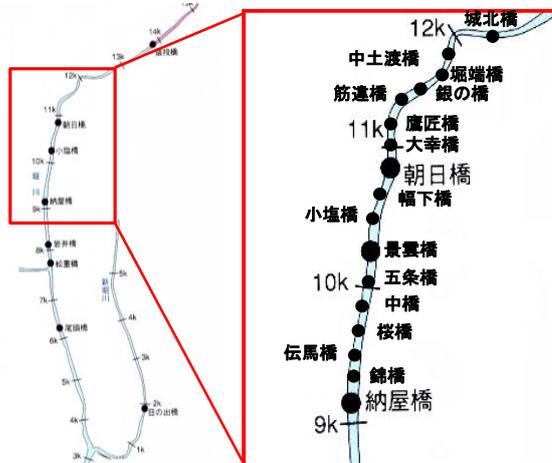


図-3 移動観測の観測場所

表-2 移動観測地点距離表

地点名/猿投橋からの距離(m)							
城北橋	中土戸橋	堀端橋	銀の橋	筋違橋	鷹匠橋	大幸橋	朝日橋
1350	1800	2050	2150	2350	2650	2750	2900
幅下橋	小塩橋	景雲橋	五条橋	中橋	桜橋	錦橋	納屋橋
2950	3250	3500	3650	3900	4050	4350	4550

的に行うといった対策も考えられる。

2-2. 移動観測 先行研究より満潮時の塩水の先端は鷹匠橋～城北橋の間にあると分かっている。その位置を詳しく求めるために図-3 に示した観測地点を下流から順番に移動して観測を行った。計測機器は携帯型 CTD 計 (YSI/Nanotech 製) を使用した。携帯型 CTD 計を橋上から吊るし、水中を自由落下させて、河床に着いたら引き上げる。この作業で鉛直方向の塩分が計測でき、一度の計測時間は2, 3分で済むため移動観測が可能となった。図-4 に2014年10月16日(小潮)の朝日橋～筋違橋の塩分コンター図を示す。この日は満潮前の上げ潮時(11:10~11:22)と満潮後の下げ潮時(11:27~11:44)に計測を行った。満潮時刻は11:22であった。図-4より、鷹匠橋(猿投橋から2630m)付近にあった9(PSU)の等値線が下げ潮では大幸橋(2750m)まで移動している。潮汐が下げ潮に転じるとすぐに塩水が下流に流される傾向がある。小潮日なので成層化しており、表層付近にある塩分の低い水塊の分布状況には大きな変化は確認できないが、底層の塩水はかなり押し下げられた印象を受ける。塩水楔先端では、潮汐が変わる時に塩水の反応がとても早く、下げ潮が始まると、すぐに流下が始まる特徴があると分かった。図-5に10月31日(小潮)、図-6に11月22日(大潮)の納屋橋～銀ノ橋の塩分コンター図を示す。この2つの観測では、ともに最終計測地点の銀の橋での計測時刻が満潮時刻よりも40分以上経過していることから、先ほどの下げ潮に転じるとすぐに塩水が流下する特徴があると考えられて、塩水遡上到達距離はさらに上流に位置していると考えられる。また図は塩分の分布状態等で似た点が多いが、小潮日では表層に塩分の低い水の層が納屋橋(4550m)付近まで存在するなど成層化しており、各々の潮の異なる特徴もしっかりと現れている。ただし、結果的に満潮時刻ちょうどに塩水楔の先端を捉えるのは、瞬間的に到達地点で計測を行う必要があるために実質的には不可能である。正確な塩水遡上の先端を把握するまでは至らなかったが銀の橋より上流まで到達するということが分かった。次に図-7に11月26日(中潮)に船舶観測によって計測した堀川縦断方向(朝日橋～新堀川との合流点の宮渡しまで)の塩分コンター図を示す。計測のタイミングは下げ潮時であり、6000m地点にある松重閘門において中川運河からの塩分の高い塩水が導水されたことは明らかである。以上の結果より堀川の塩水の挙動を考察する上で中川運河からの導水の影響を重要視する必要がある。

次に図-7に11月26日(中潮)に船舶観測によって計測した堀川縦断方向(朝日橋～新堀川との合流点の宮渡しまで)の塩分コンター図を示す。計測のタイミングは下げ潮時であり、6000m地点にある松重閘門において中川運河からの塩分の高い塩水が導水されたことは明らかである。以上の結果より堀川の塩水の挙動を考察する上で中川運河からの導水の影響を重要視する必要がある。

次に図-7に11月26日(中潮)に船舶観測によって計測した堀川縦断方向(朝日橋～新堀川との合流点の宮渡しまで)の塩分コンター図を示す。計測のタイミングは下げ潮時であり、6000m地点にある松重閘門において中川運河からの塩分の高い塩水が導水されたことは明らかである。以上の結果より堀川の塩水の挙動を考察する上で中川運河からの導水の影響を重要視する必要がある。

次に図-7に11月26日(中潮)に船舶観測によって計測した堀川縦断方向(朝日橋～新堀川との合流点の宮渡しまで)の塩分コンター図を示す。計測のタイミングは下げ潮時であり、6000m地点にある松重閘門において中川運河からの塩分の高い塩水が導水されたことは明らかである。以上の結果より堀川の塩水の挙動を考察する上で中川運河からの導水の影響を重要視する必要がある。

次に図-7に11月26日(中潮)に船舶観測によって計測した堀川縦断方向(朝日橋～新堀川との合流点の宮渡しまで)の塩分コンター図を示す。計測のタイミングは下げ潮時であり、6000m地点にある松重閘門において中川運河からの塩分の高い塩水が導水されたことは明らかである。以上の結果より堀川の塩水の挙動を考察する上で中川運河からの導水の影響を重要視する必要がある。

次に図-7に11月26日(中潮)に船舶観測によって計測した堀川縦断方向(朝日橋～新堀川との合流点の宮渡しまで)の塩分コンター図を示す。計測のタイミングは下げ潮時であり、6000m地点にある松重閘門において中川運河からの塩分の高い塩水が導水されたことは明らかである。以上の結果より堀川の塩水の挙動を考察する上で中川運河からの導水の影響を重要視する必要がある。

次に図-7に11月26日(中潮)に船舶観測によって計測した堀川縦断方向(朝日橋～新堀川との合流点の宮渡しまで)の塩分コンター図を示す。計測のタイミングは下げ潮時であり、6000m地点にある松重閘門において中川運河からの塩分の高い塩水が導水されたことは明らかである。以上の結果より堀川の塩水の挙動を考察する上で中川運河からの導水の影響を重要視する必要がある。

次に図-7に11月26日(中潮)に船舶観測によって計測した堀川縦断方向(朝日橋～新堀川との合流点の宮渡しまで)の塩分コンター図を示す。計測のタイミングは下げ潮時であり、6000m地点にある松重閘門において中川運河からの塩分の高い塩水が導水されたことは明らかである。以上の結果より堀川の塩水の挙動を考察する上で中川運河からの導水の影響を重要視する必要がある。

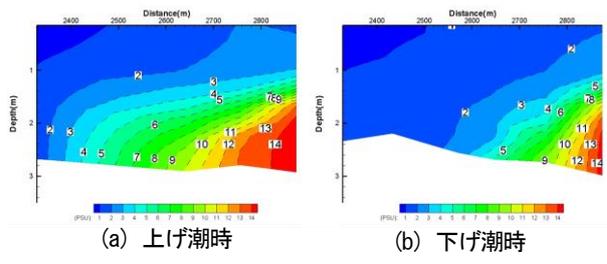


図-4 満潮前後の塩分コンター

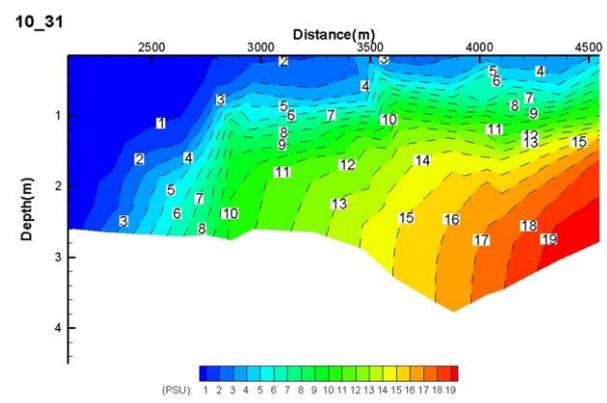


図-5 10月31日 小潮 塩分コンター

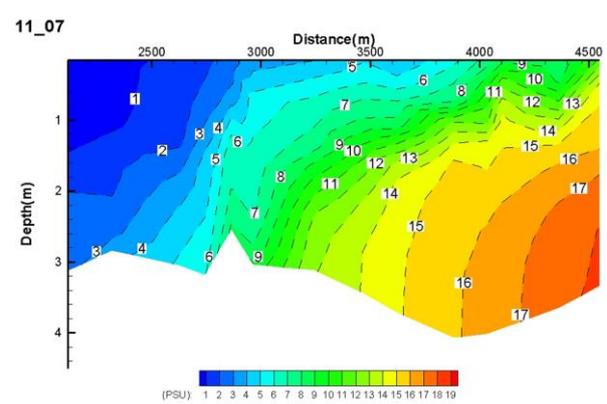


図-6 11月7日 大潮 塩分コンター

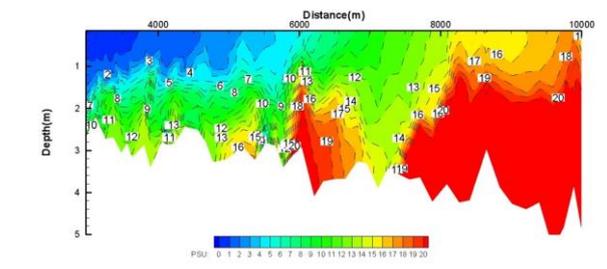


図-7 船舶観測 11月26日 縦断塩分コンター

物質収支則と式(7)の密度に関する状態方程式を用いた。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、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。

$$\frac{\partial Bu}{\partial t} + \frac{\partial Buu}{\partial x} + \frac{\partial Buw}{\partial z} = -gB \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{gB}{\rho} (H-z) \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial B\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial B\tau_{xz}}{\partial z} \rho \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{\partial Bw}{\partial t} + \frac{\partial Buw}{\partial x} + \frac{\partial Bww}{\partial z} = \dots\dots\dots (2)$$

$$-gB \frac{\partial H}{\partial z} - \frac{gB(H-z)}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial B\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial B\tau_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial B\tau_{zx}}{\partial x}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} Bcl + \frac{\partial}{\partial x} (uBcl) + \frac{\partial}{\partial z} (wBcl) = \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial Bcl}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial Bcl}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} BD + \frac{\partial}{\partial x} (uBD) + \frac{\partial}{\partial z} (wBD) = \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial BD}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial BD}{\partial z} \right) + S_{DO}$$

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

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

$$S(\%) = 0.03 + 1.805cl \dots\dots\dots (8)$$

$$R_i = -\frac{g(\partial \rho / \partial z)}{\rho_0(\partial u / \partial z)^2} \dots\dots (9) \quad v_{tz} = v_{t0} \cdot \exp(-1.5R_i) \dots\dots (10)$$

$$D_z = D_{z0} \cdot \exp(-3.0R_i)$$

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(g/l)

p : 圧力, D_x, D_z : 渦拡散係数, B : 川幅

3-2. 空間分布に関する検証 図-8, 9に11月26日の船舶観測によって得られた中流域の8つの橋と下流端の大瀬子橋での実測データと、その実際の潮位におおよそ対応した入力潮位で行った数値計算による塩分とDOの空間分布の結果を示す。観測結果では、各層での塩分の違いが明瞭に表れているが、数値計算結果では、観測値を再現出来ておらず、誤差は生じている。しかし縦断方向で妥当な変化が再現できている。またDOについても計算結果は全体的に実測データよりも値が小さいといった誤差は生じるが、層ごとの違いは表せている。さらに塩分とDOの逆相関関係についても妥当性があることから数値計算を検討可能と判断した。

3-3. 各成分の鉛直分布に関する検証 図-10に松重橋と山王橋における塩分鉛直分布時間変化の現地観測(2012年11月14日、大潮)の結果を、図-11に計算結果を示す。

表-1より、この日は中川運河からの導水が昼頃にあったことが分かる。また導水は松重閘門凹部奥の河床から1.5m地点に流入する。その影響から松重、山王橋ともに干潮時にも関わらず、底層付近に特徴のある高塩分の水塊が確認できる。また大潮日の為、導水が無かった時間帯では、鉛直方向に塩分が一樣となっている。一方、数値計算では、中川運河からの導水が水面に流入するように設定しているため、完全な再現には至っていないが、満潮時に高塩分の水塊があり、干潮時には比較的にないと言った挙動は再現出来ている。以上より、本数値計算

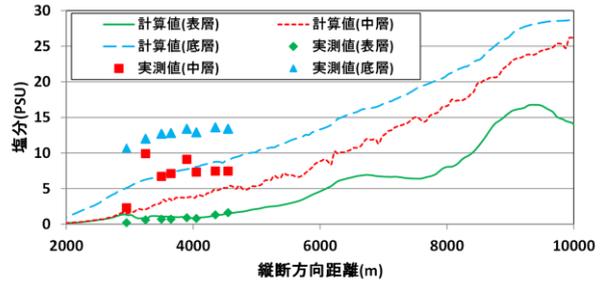


図-8 観測、計算による塩分の空間分布図

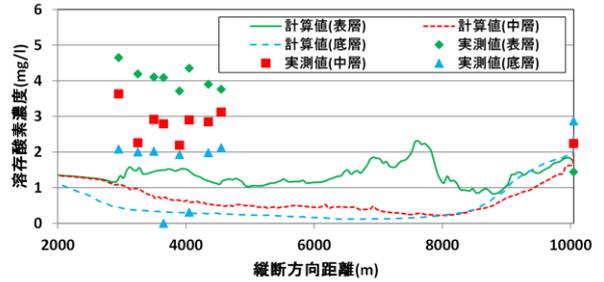
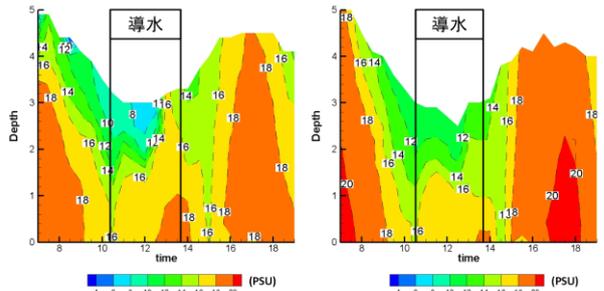
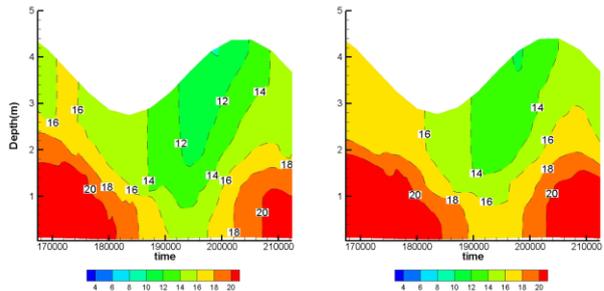


図-9 観測、計算によるDOの空間分布図



(a) 松重橋 (b) 山王橋

図-10 2012年11月14日(大潮) 塩分コンター



(a) 松重橋 (b) 山王橋

図-11 数値計算 塩分コンター

は堀川の水質変化をある程度再現出来ているものとみなし、今後の検討を進める。

4. 導水のタイミングが水質変化に与える影響

堀川における水質変化の支配因子としては名城下水処理場からの排水と中川運河からの導水の影響が大きい²⁾と分かっている。本研究では、中川運河からの導水の流量と時間(潮汐とのタイミング)を変更したいくつかのケースで数値シミュレーションを行い、それらの結果を比較検討した。想定するケースを表-3に示す。計算期間は中潮～小潮～中潮を含んだ10日間で、計算結果を計算開

始から 5 日目の小潮日の鉛直時間分布として求めた。出力地点は水質改善が強く望まれる納屋橋地点とする。まず図-12 に流量変更した場合の case0 と case1 の結果を示す。図より流量を増やした方が DO に関しては比較的良好な結果が得られた。ここでは示さないが、塩分についても case1 の方が良い結果が得られた。これは流量を増やすことによって松重閘門水域で鉛直混合が促され、その混合形態を保ったままの状態では潮汐による上下流の掘川を漂う為だと考えられる。次に流量を増やした case1 と比較するために、case2~4 で導水の時間を調節して計算を行った。case1~4 では、導水時間の調整による影響を求めたいので、一日当りの総導水量が一定になるようにした。図-13 に case2, 3 の DO の結果を示す。図を見ると、大きな違いは確認できず、成層化していることが分かる。case4 でも大きな変化がないことからここでは結果の図示を省略した。原因として、検討している計算時間が小潮の為、弱混合形態となっていることから 1 秒当たりの流量が弱い case2~4 の導水を行っても鉛直混合が促されなかった為だと考えられる。次に図-14, 15 に 5 日目の満潮時刻、図-12, 13 で見ると、水深が最も深くなっている時刻での、縦断方向の表層における塩分と DO の空間分布図を示す。結果の出力地点として、表-4 に示した 10 地点を選定した。瞬間値ではあるが、縦断方向の結果を見ることで異なった見え方が出来る。まず先に述べておく必要があるのが、case1 の導水が満潮の直前の上げ潮に重なっている。図-12, 13 では、鉛直混合が促されることで case1 が堀川にとって良いように感じられたが、図-14 より縦断方向の表層では、最も塩水遡上が長くなっている。また DO についても表層で最も良い結果を示しているのは case2 であり、導水量増加は一長一短であると言える。また、実際の中川運河導水のポンプ位置は底層にあるので流量が弱いとしても鉛直混合は促されると予測され、また異なった結果が得られると考えられる。

5. おわりに

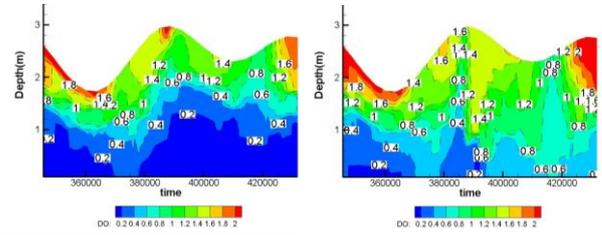
本研究では現地観測により塩水遡上先端の実態と中川運河からの導水の影響について明らかにした。詳細な位置は把握できなかったが、銀の橋より上流まで遡上することや塩水楔先端の特徴について分かった。また数値計算において、中川運河からの導水量とタイミングの調整によるシミュレーションを行い、導水量増加による鉛直混合が促される可能性が見られた。ただし鉛直混合は起きるが、塩水遡上の増加も結果として発生し、一概に導水量増加を推奨することは出来ない。また、本数値計算では未だ考慮していない項目や導水ポンプの深さの不一致などある為、より予測精度を向上させることが堀川浄化対策に結び付けられると考える。

参考文献：

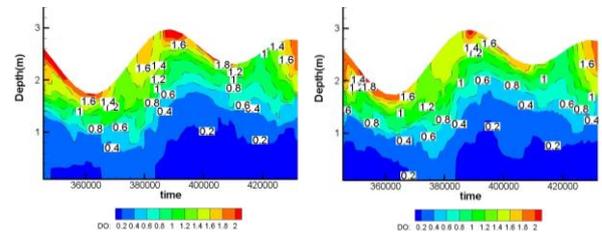
1)花井一雄:松重閘門水域を利用した堀川の水質改善方法に関する研究, 名古屋工業大学大学院修士論文, 2013

表-3 中川運河導水想定ケース

case	導水時間	導水量(m ³ /day)	導水量(m ³ /s)
case0	条件変更無し(9~12時に導水)	75,600	7.00
case1	条件変更無し(9~12時に導水)	151,200	14.00
case2	24時間導水あり	151,200	1.75
case3	上げ潮時に導水あり(一日10時間)	151,200	4.20
case4	下げ潮時に導水あり(一日10時間)	151,200	4.20



case0 case1
図-12 納屋橋該当地点 DO コンター



case2 case3
図-13 納屋橋該当地点 DO コンター

表-4 計算結果出力地点

地点名/距離(m)				
城北橋	小塩橋	中橋	錦橋	納屋橋
1350	3250	3900	4350	4550
新洲崎橋	岩井橋	松重橋	住吉橋	大瀬子橋
5200	5550	6050	7700	10050

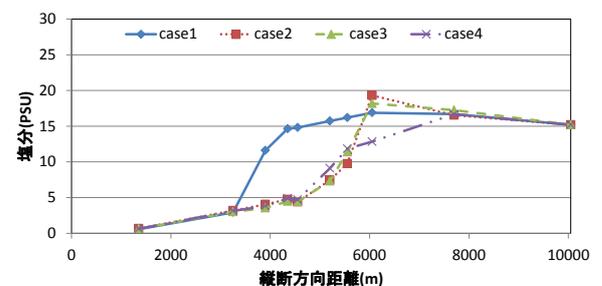


図-14 小潮日 満潮時 表層 塩分 (108 時間後)

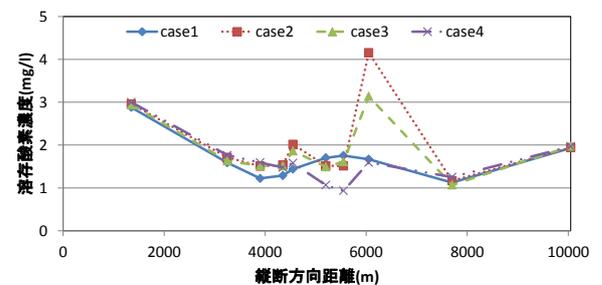


図-15 小潮日 満潮時 表層 DO (108 時間後)

2)岩倉進吾:堀川感潮域における塩水遡上の実態と水質改善対策に関する研究, 名古屋工業大学大学院修士論文, 2006