

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

指導教員 富永 晃宏 教授

岩倉 進悟

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、底層では高塩分、低 DO の貧酸素水塊を形成し、水質悪化の主要要因となっている。このように塩水の影響を大きく受ける堀川感潮域の水質浄化策を立案する為には、塩水遡上の実態や、その水質への影響を明らかにすることが必要である。そこで本研究では、長期定点観測に基づき塩水遡上の実態を捉え、また平成 19 年 4 月から行われている木曽川導水実験の効果について検討を行なった。更に、DO の変動を表わす数値解析モデルを用いて水質改善の可能性について検討を行った。

2.長期定点観測

2-1.現地観測の概要

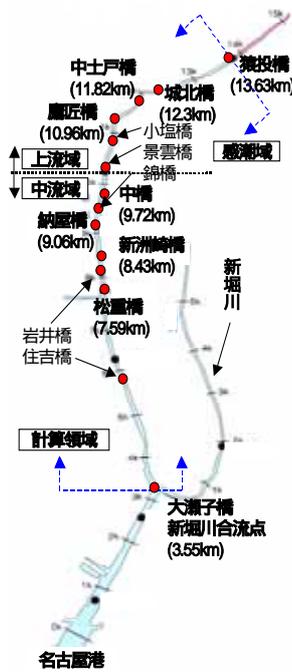


図-1 堀川感潮域の概略図

ポータブル多項目水質計 (WQC-24(東亜 DKK 製)) を河床から 0.5m の位置に固定し、時間間隔 30 分毎に、塩分濃度、DO、濁度、水温、水深、電気伝導度、pH を計測した。これを 2 地点で同時に実施し、一方で塩分有り、一方で塩分無しという状況を探ることで、その 2 地点間に塩水の先端が位置していると判断した。なお、塩水と判断する基準は塩分 1.0psu とした。本報では、実施した観測結果の内、表-1 に示した日程の観測結果に絞り、塩分濃度および DO について検討した。観測地点および堀川の概略図は図-1 に示すとおりである。

2-2.堀川感潮域における塩水遡上の実態

図-2 に 2006 年 11 月 3 日～11 月 10 日実施の定点観測による塩分濃度時系列変化を、図-3 に 2006 年 11 月 17 日～11 月 24 日実施の定点観測による塩分濃度時系列変化を示す。図-2 を見ると、新洲崎橋では干潮時含め、常時

表-1 観測条件

	観測日時	観測地点(河口からの距離)
導水前	2006年 11月3日～11月10日	中橋(9.72km) 新洲崎橋(8.43km)
	2006年 11月17日～11月24日	城北橋(12.3km) 鷹匠橋(10.96km)
導水後	2007年 3月30日～4月5日	中橋(9.72km) 新洲崎橋(8.43km)
	2007年 4月17日～4月30日	城北橋(12.3km) 中土戸橋(11.82km)

1.0psu を上回る塩分濃度を示している。一方、中橋では、干潮時において 1.0psu を下回る塩分濃度を示した。塩分が、下流側には有るが、上流側には無い。この状況から、干潮時、塩水の先端は新洲崎橋(8.43km)から中橋(9.72km)の間の堀川中流域まで押し下げられていると考えられる。同様に図-3 を見ると、城北橋ではほとんど塩水の浸入が無く、鷹匠橋では干潮時には完全に塩水が押し下げられるが、遡上流に伴い塩水が進入している。以上より、満潮時、塩水の先端は鷹匠橋(10.96km)から城北橋(12.3km)の間まで達しており、堀川における塩水の遡上境界位置は城北橋下流付近であると考えられる。つぎに、導水前のこの塩水遡上の状況が、木曽川導水実験開始後、塩分濃度、DO 等の水質項目に効果を及ぼすか検討する。

2-3.木曽川導水実験の効果検証

木曽川導水実験は水源を持たない堀川に、木曽川の清流な水を 3 年間導水する事業であり、平成 19 年 4 月に開始された。導水量は $0.4\text{m}^3/\text{s}$ であり、堀川感潮域上端の猿投橋直下流に放水される。図-4 に試験導水が開始された後の 2007 年 3 月 30 日～4 月 5 日実施の定点観測による塩分濃度時系列変化を、図-5 に本格的に導水が開始される時期を挟んだ 2007 年 4 月 17 日～4 月 30 日実施の定点観測による塩分濃度時系列変化を示す。図-4 を見ると、3 月 31 日から降った降雨の影響を受け、一部で塩分の低下が見られるほかは導水前と同様の塩水遡上状態にあることがわかった。また、干潮時に塩分が新洲崎橋には有るが、中橋には無い状況が見られ、導水量増加によっても、導水前と塩水位置が変わっていないことがわかる。以上より、導水による塩水押し下げの効果は中流域には及んでいない、またはその効果は非常に小さいものであると考えられる。つづいて上流域の塩水先端に着目した図-5 を見る。今回観測期間中では、4 月 22 日から木曽川からの本格通水が始まり、4 月 27 日に通水が中止された。すなわち、観測期間のうち 4 月 22 日～4 月 27 日のみが導水実施期間であり、その他の期間では導水が行われていなかった。導水が行われていた期間に注目すると、両橋とも塩分は 1.0psu を大きく下回っており、この区間には塩水が存在しないことを示している。その他の期間では中土戸橋に塩水の浸入が確認できる。以上より、導水実施期間のみで塩水の押し下げが確認できたため、導水量増加による塩水押し下げの効果は上流域には有効であると考えられる。また、導水前後の水質の変化を見るにあたり、DO 値が水温等によって大きく変化することを考慮して、DO 飽和値および DO 飽和度を求めた。得られた値

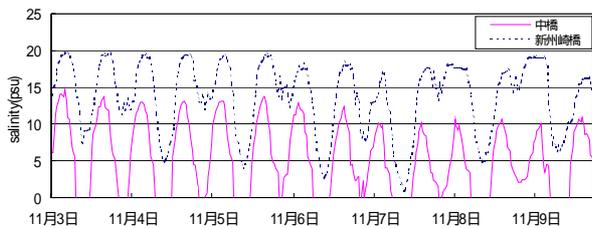


図-2 堀川中流域における塩分濃度時系列変化
(2006/11/3~11/10 中橋, 新州崎橋)

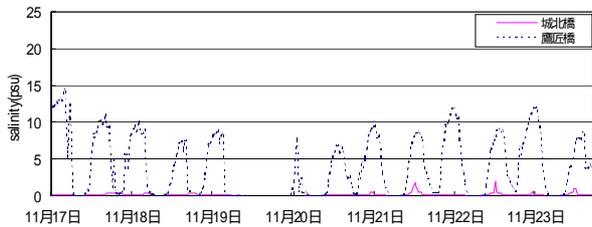


図-3 堀川上流域における塩分濃度時系列変化
(2006/11/17~11/24 城北橋, 鷹匠橋)

を表-2 に示す。本表から, D0 飽和値は減少もしくは大きな変化がないにも関わらず, D0 飽和度の方は城北橋では同じ値を示し, 中土戸橋では大きく増加していることが見られる。したがって, 導水後の高い D0 は, D0 飽和値が変化したことによるものではなく, 他の要因によって D0 が溶解しやすい環境になったことが考えられる。D0 飽和度が特に大きく増加している中土戸橋における D0 飽和度と水温, 塩分の相関図を示した図-6 を見ると, 導水前後で同程度の水温分布を示しているにも関わらず 導水後の方が D0 飽和度は高くなっている。この時の D0 飽和度と塩分濃度の相関を見ると, 導

表-2 D0 飽和値と D0 飽和度

中土戸橋

	導水前 (06.11.17-11.24)			導水後 (07.04.17-04.30)		
	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値
D0 飽和値	9.34	9.85	8.92	9.21	9.79	8.69
D0 飽和度	24%	65%	0%	47%	69%	4%

城北橋

	導水前 (06.11.17-11.24)			導水後 (07.04.17-04.30)		
	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値
D0 飽和値	9.46	10.94	8.71	9.29	9.87	8.71
D0 飽和度	47%	90%	10%	47%	67%	3%

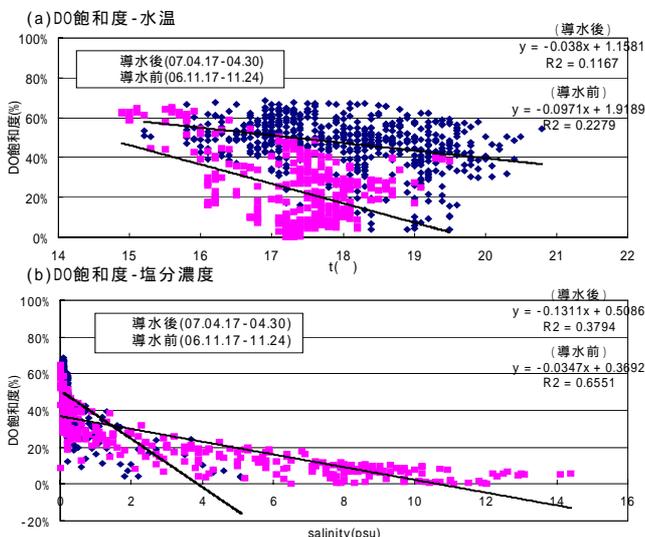


図-6 D0 飽和度と水温, 塩分の相関図 (中土戸橋)

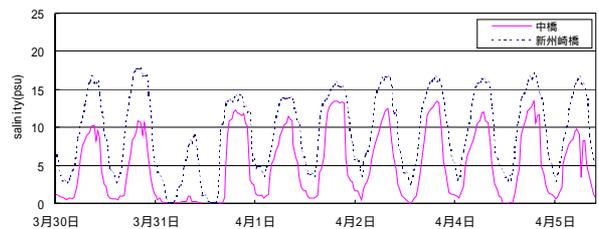


図-4 導水開始後の塩分濃度時系列変化
(2007/3/30~4/5 中橋, 新州崎橋)

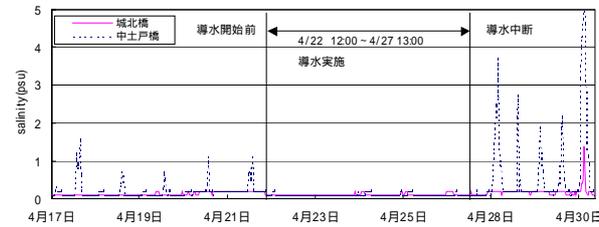


図-5 導水開始後の塩分濃度時系列変化
(2007/4/17~4/30 城北橋, 中土戸橋)

水後では塩分分布が低い値に偏っており, この低い塩分が高い D0 飽和度の要因ではないかと考える。塩分の浸入はいわゆる塩水楔を形成し, 上層の淡水と下層の高塩分・貧酸素の水塊とが層を成し, 鉛直混合が妨げられ, 下層での酸素消費は更に加速される。逆に今回の低塩分の結果は, 塩水楔の浸入が無い, 弱いということであり, 下層での酸素消費は和らぐ。これらの機構が作用して今回の D0 飽和度は高い値を示していると考えた。元をたどれば, 導水による流量増加が塩水を押し下げ, D0 飽和度を上げたと考えられる。以上の結果から, 上流域においては木曾川導水によって塩水の押し下げ効果が確認でき, また塩水押し下げに伴った水質の改善効果が確認された。また, その効果は導水実施期間に限定されていた為, 安定的な導水量の確保が求められる。

3.堀川の流動および水質に関する数値解析

3-1.数値解析モデルの概要

本研究で用いた水路幅平均の鉛直二次元数値解析モデルによる基礎方程式を表-3 に示す。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, 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(3)の物質収支則を基礎方程式と式(7)の密度に関する状態方程式を用いて解析を行った。なお t_x , t_z は成分による鉛直混合抑制効果を表現するために(9)(10)のように局所リチャードソン数を用いて変化させた。更に, 溶存酸素濃度の分布を再現するために, 式(4)の溶存酸素濃度 D0 の収支則を用いた。ここで, S_{D0} は生成, 消費項であり, 表層の再曝気, 水中, 底層の酸素消費を(11)~(13)のように考慮している。尚, D0 に関する係数などは, 過去の観測データを参考にすると共に¹⁾, 数値実験により試行錯誤的に求めている。

表-3 数値解析に用いた基礎式

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

$$\frac{\partial Bw}{\partial t} + \frac{\partial Buw}{\partial x} + \frac{\partial Bww}{\partial z} = -gB \frac{\partial H}{\partial z} - \frac{gB(H-z)}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial B\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial B\tau_{zz}}{\partial z} \dots(2)$$

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

$$\frac{\partial}{\partial t} BD + \frac{\partial}{\partial x} (uBD) + \frac{\partial}{\partial z} (wBD) = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial BD}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial BD}{\partial z} \right) + S_{DO} \dots(4)$$

$$\frac{\partial Bu}{\partial x} + \frac{\partial Bw}{\partial z} = 0 \dots(5) \quad H = z + p/\rho g + zb \dots(6) \quad \rho = \rho_f + 0.0074S(\%) \dots(7) \quad S(\%) = 0.03 + 1.805cl \dots(8)$$

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

表層: $S_{DO} = k_2(D^* - D) - k_1D \dots(11)$
 中層: $S_{DO} = -k_1D \dots(12)$
 底層: $S_{DO} = -k_1D - k_b/\Delta z \dots(13)$

u: 流下方向の平均流速(m/s), w: 鉛直方向の平均流速(m/s), p: 圧力, τ_{xx}, τ_{xz} : 渦動粘性係数, cl: 塩化物イオン濃度(g/l), D_x, D_z : 渦動拡散係数, B: 川幅, D: 溶存酸素濃度 DO(mg/l), k_1 : 脱酸素係数(1/day) (=1.0), k_2 : 水表面での再曝気係数(1/day)(=3.5), k_3 : 底泥の酸素消費係数(g/m²/day)(=5.0), D^* : 飽和溶存酸素量(=代表温度 20 での飽和値 8.84mg/l)

3-2.再現計算 図-7 に塩分濃度, DO の観測と計算それぞれによる縦断分布を示す. なお, 本数値計算では河口から 13.5km の猿投橋地点を 0m, 河口から 3.5km の新堀川合流地点を 10000m として計算対象を選定している. 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.

次に図-8 に数値計算による塩分, DO の空間分布を示す. DO の結果を見ると層別での値の大小関係は再現できている. DO 値は観測値と多少の差があるが, 堀川における水質は潮汐流動に伴い時々刻々と変化するため, 完全な再現は困難であり, 理想的な水質変化が表現できていれば妥当性があるとみなした. また塩分空間分布からも, 成層の発達の様子など, 観測値との一致が見られ, 計算結果の妥当性が示されている. 以上より, 本計算は堀川の水質変化を再現できているものとみなし, 今後の検討を進める.

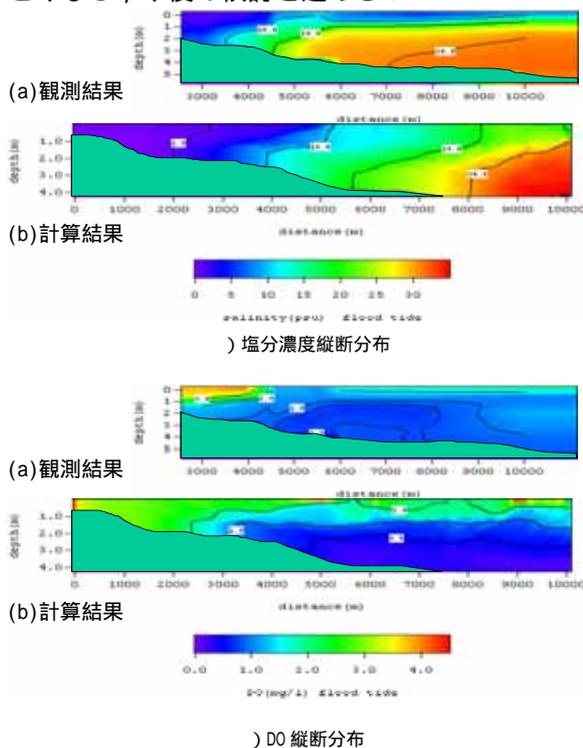


図-7 観測, 計算による縦断分布

4.堀川の水質変化に与える支配因子 まず, 堀川における水質変化の支配因子を探るため, 数値計算上与えている外部流入条件を表-4のように変化させ, 計算を行った. 計算結果を示した図-9より, 考慮した設定条件の中で DO への影響が大きく現れているのは名城下水処理場からの排水(Case2)と中川運河の導水(Case4)であった. それ以外の設定条件ではCase1, Case3, Case5のそれぞれ表層のみで若干の影響が見られた. しかし, 上述の2条件と比較してあまり大きな違いがなく, 全体の傾向も大きな違いは見られない. 名城下水処理場からの排水がない場合, その影響はDOでは表層, 底層ともに小塩橋から納屋橋付近まで見られた. 中川運河からの導水が無い場合では, その影響は表層では納屋橋から松重橋付近でDO値が増加し, 底層では景雲橋から松重橋付近まで低下する影響が見られる. 松重閘門

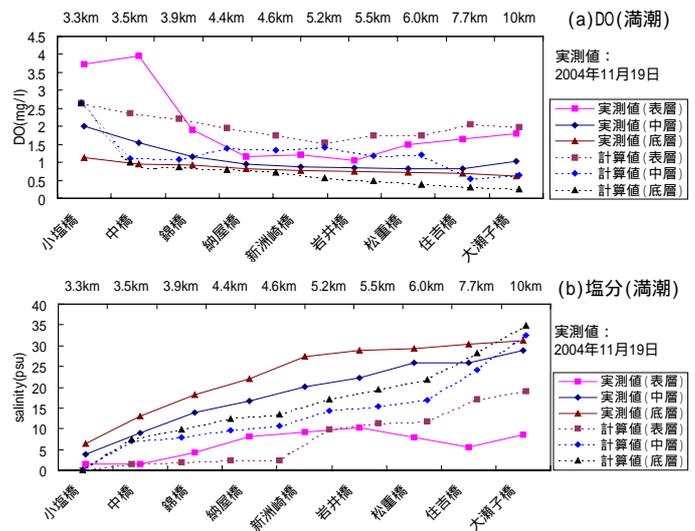


図-8 観測, 計算による空間分布

表-4 外部流入条件を変化させた計算条件

Case	計算条件
Case0	条件変更無し
Case1	上流端(猿投橋)からの流入無し
Case2	名城下水処理場からの下水処理水排水なし
Case3	納屋橋下流におけるエアレーション施設なし
Case4	松重橋下流における中川運河の導水なし
Case5	開境界条件のDO変化なし(DO=0.5mg/l)

からは、表層から 7.0psu の塩分を含む中川運河の水を流入させており、塩分流入によって鉛直混合が促進され、表層では下層の貧酸素域の影響を受け DO 値を低下させてしまうが、底層では鉛直混合促進によって DO 値が増加されることが予測される。

つぎに、堀川への外部流入条件の内、表底両層で DO 値の低下の見られた名城下水処理場の処理水質を変化させ、名城下水処理水の流入条件のうち最も堀川水質への影響が大きい因子を探った。得られた結果を図-10 に示す。名城下水処理水の DO 値が低かった場合を想定し、DO を 0.0mg/l にした場合、表層底層ともに、条件変更のないものより DO 値が減少した。また逆に、名城下水処理水の DO を過飽和状態（20 の DO 飽和値）の 8.84mg/l とした場合では、DO 値が増加した。その影響は岩井橋付近までの堀川上中流域に現れていた。また、名城下水処理場からの流入無しの場合、DO 無し（流入あり）の場合と概ね一致することがわかる。すなわち、単に流量増加のみの流入では DO 値を上げる効果は少ないことが示された。以上の結果をまとめると、上～中流域の水質は名城下水処理水に大きく影響を受けており、特に処理水の流量と放流先に比べ DO が高いことが大きく影響していることがわかった。

5.外部流入水量の堀川水質への影響 最後に外部流入水量が堀川水質に与える影響を検討した。図-11 に導水量条件および計算結果を示す。本図から、考慮した設定条件の中で DO への影響が現れているのは名城下水処理場からの流入量を 2.0m³/s、4.0m³/s としたケースであった。それ以外の設定条件では上述の条件と比較してあまり大きな違いがなく、全体の傾向も大きな違いは見られない。ここで、堀川容積と導水量との関係を表-5 に示す。木曾川導水実験開始後の導水流量 0.7m³/s では堀川容積を埋めるのに約 1 ヶ月を要し、1 日の流入量が堀川容積に占める割合は 3.26% に留まることがわかる。ここでの堀川容積は本数値計算での入力条件から簡易的に求めたものであり、計算領域外の新堀川合流点～名古屋港までを含めると更に流入水量の効果は小さくなってしまふ。このことから、流入水量は堀川全体に対し非常に少なく、塩水押し下げ、水質改善効果は極々少量であり、堀川水質を大幅に改善するには流入量が足りないことがわかる。以上の結果をまとめると、堀川における水質を支配している最大因子は、名城下水処理場からの処理水中に含まれる DO であり、その水量を増加させることで DO 値の増加には大いに効果が期待できることが示唆された。

6.おわりに 本研究では現地観測により、堀川の塩水遡上の実態と木曾川導水実験の効果を明らかにした。導水実験は 3 年間に及ぶが、さらに調査を続けることで水質の変動を細かく見守る必要がある。また、流動及び水質の変動を再現できる数値解析モデルにより水

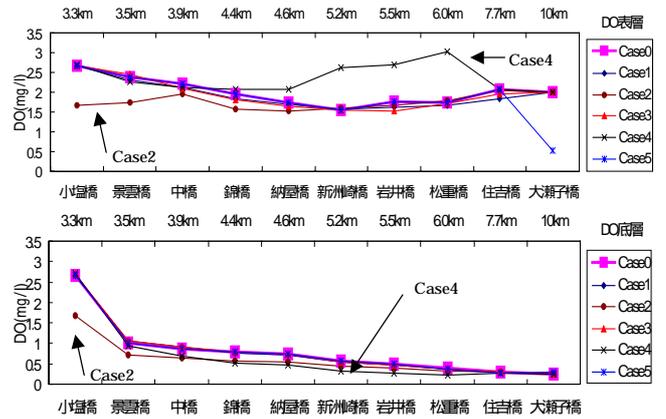


図-9 外部流入条件変更シミュレーション結果

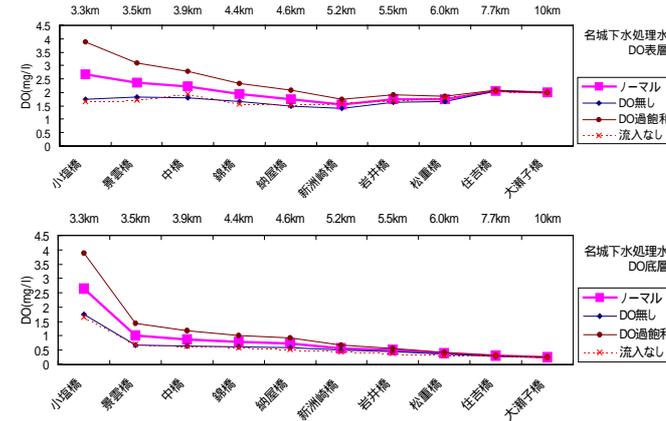


図-10 名城下水処理場の水質変更シミュレーション結果

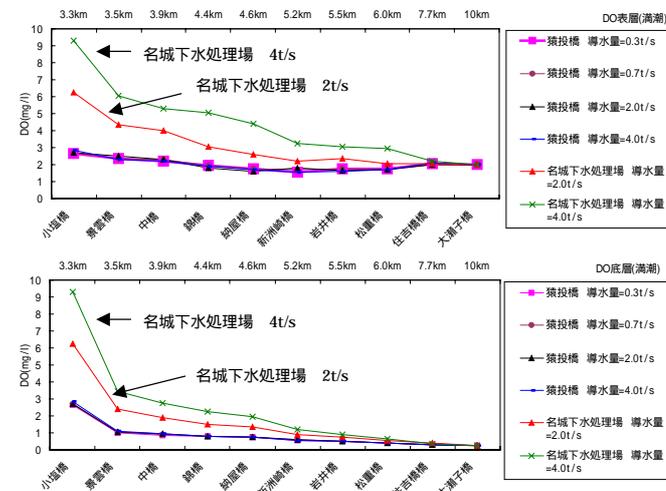


図-11 流入流量増加シミュレーション結果

表-5 堀川の容積と導水量の関係

堀川感潮域の容積(m ³)	1.86E+06
流量0.7t/sで堀川容積を埋めるのに要する時間(day)	30.70
流量4.0t/sで堀川容積を埋めるのに要する時間(day)	5.38
1日の流入量(0.7t/sの時)が堀川容積に占める割合(%)	3.26
1日の流入量(4.0t/sの時)が堀川容積に占める割合(%)	18.60

質改善の可能性を示唆した。しかし、本数値計算には水温や BOD といった項目が考慮されていないため、今後はこれらの要素を加えた解析によりモデルの予測精度を向上させることで、堀川浄化対策の検討を行なう必要がある。

参考文献：1) 武田誠，松尾直規：冬季における堀川の水質変化に関する現地観測と数値解析，中部大学 2006