

新堀川における潮汐流動と河床形状が水質に及ぼす影響とその制御に関する研究

指導教員 富永晃宏 教授

宇野 裕奎

1. はじめに：名古屋市を南北に流れる堀川に合流する新堀川は、堀留水処理センターから排出される下水処理水が主な水源である。また、名古屋港からの潮汐の影響を受ける感潮河川であり、下層は高塩分・低DOの貧酸素水塊が停滞して、水質悪化の主要因となっている。また、新堀川の全域で表層に淡水、中層に深は塩水という顕著な弱混合型を示している。水質改善策を立案するため、堀川との合流付近の新堀川の潮汐流動と河床形状が水質に及ぼす影響を明らかにする必要がある。本研究では、塩水挙動と水質に関して現地観測と数値シミュレーションにより、新堀川の水質改善策の立案を目的とする。

2. 現地観測の概要

2-1. 定点観測の概要：新堀川上流部の鶉橋上流[5.6km]と富士見橋上流[5.0km]で、塩水遡上と降雨の関連性を把握するために定点観測を行った（[]内は宮の渡しからの距離）。観測は2016年6月22日から7月8日の計17日間実施した。多項目水質計（東亜 DKK 製 WQC-24）を用いて、鶉橋上流は T.P.-1.1m と-2.3m に、富士見橋上流は T.P.-1.2m と-2.1m に水質計を固定して、10分間隔で pH、溶存酸素濃度（以下 DO）、濁度、塩分、水温を計測した。

2-2. 流速・河床形状観測の概要：新堀川・堀川の潮汐流動を観測するために、2016年7月20日に新堀川・堀川合流部にて、ADCP（超音波多層式流速計）を用いた流速・河床形状観測を実施した。流速測定を行った時の観測時間を表-1に、観測断面を図-1に示す。観測は、ADCPを船体の横に設置し曳航して行い、各断面を往復観測し、上げ潮時・下げ潮時の2回実施した。河床形状観測は、ADCPを上記と同様に曳航して、新堀川・堀川・合流後をジグザクに走行して、観測を実施した。

3. 観測結果と考察

3-1. 定点観測の結果と考察：図-2に富士見橋上流で行った定点観測の塩分とDOの結果を示す。T.P.-1.2mにおける塩分は観測日を通して大きな変動を示してい

表-1 観測時間

	潮汐		場所	観測時間
	2016/7/20 (大潮)	下げ潮	新堀川	新堀川
堀川			堀川	10:30~10:40
合流後			合流後	10:45~10:55
上げ潮		新堀川	新堀川	14:50~15:25
		堀川	堀川	15:35~15:45
		合流後	合流後	15:50~16:00



図-1 観測断面

る。一方、T.P.-2.1mは、大潮期間（7月4日周辺）と小潮期間（6月28日周辺）で塩分変動は異なる。大潮期間は、干潮時に塩分が低くなるが、小潮期間は、干潮時でも塩分は大きな変動を示さず、塩分は緩やかに上昇する。これは、潮汐エネルギーの小さい小潮では、塩水の流下能力が小さくなり、上流に塩水が溜まっていると示唆される。DOは、両地点で貧酸素状態であるが、塩分が低下した際は、DOの上昇が確認できるため、淡水では、DOが存在している可能性がある。また、降雨による影響が、新堀川の上流に溜まった塩水を押し流す作用を生み出すことが分かる。図-2より、降水量が5.0 (mm/h)以上となることでその作用が働くと考えられる。また、6月23日の28.0 (mm/h)と、6月28日の9.0 (mm/h)の際は、T.P.-2.1mの場所も完全な淡水となり、DOの急激な上昇も確認できる。しかし、継続的な降雨ではないため、DOは徐々に低下する。降雨後、塩分の上昇に伴い、再び貧酸素状態となった。このことから、新堀川内の塩水の滞留が、水質に悪影響を及ぼしており、上流側からの導水等で塩水の交換を促すことで、新堀川の水質改善につながるのではないかと考える。

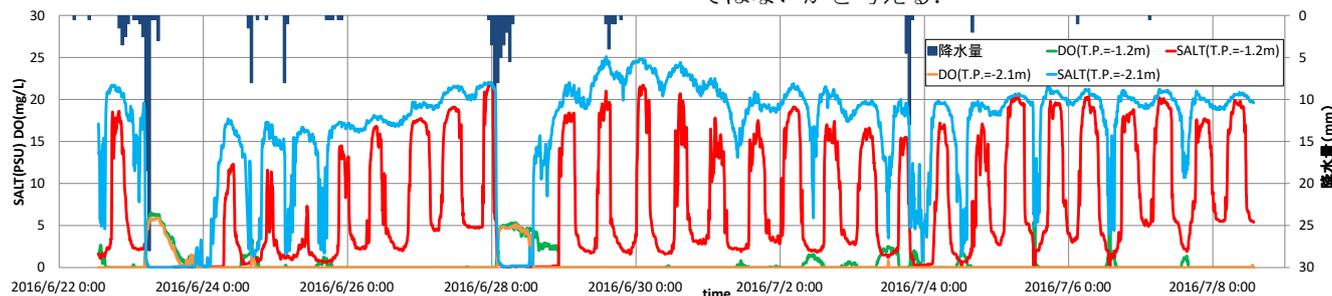


図-2 定点観測結果（富士見橋上流：宮の渡しより5.0km）2016/6/22~7/8

3-2. 流速・河床形状観測の結果と考察：図-3 (a), (b) に上げ潮時の新堀川の section1 と section6 断面における流速分布を、図-4 (a), (b) に下げ潮時の新堀川の section1 と section6 断面における流速分布を示す。流速分布は、順流を正、逆流を負として、各河川の左岸を基準としている。図-5 に河床形状観測による結果を示す。図-3 (a) と図-4 (a) より、新堀川は上げ潮、下げ潮時ともに、最も河床が低下している周辺で卓越した流れが生じている。また、上げ潮時と下げ潮時には異なる流速特性を示している。上げ潮時は、上層から下層まで流れが存在しているが、下げ潮時は、上層と下層のみ流れが存在し、中層では流れがほぼないことが分かる。上げ潮時は、合流後地点の流速が大きいことが1つの要因だと思われる。下げ潮時は、下層と上層で異なる流動要因があると考えられる。下げ潮時では成層化を破壊するような流れが生じないため、上層は塩水の上を滑るように流下し、下層は、宮の渡しに向かい重力の影響も作用して、下降しながら流れると考えられる。また、堀川の流動の影響を受けている可能性も考えられる。一方、図-3 (b) と図-4 (b) より、新堀川の川幅が狭まった周辺における流速分布が分かる。上げ潮時は、上層から底層まで流れが存在する。しかし、下げ潮時は、底層も一部流動が見られるが、上層の流速が卓越している。そのため、上げ潮によって新堀川に塩水は流入してくることにに対して、下げ潮時は下層の流動が小さいため、流下していかない。そのため、塩水が滞留し水質悪化を助長する要因となる。図-5 より、新堀川・堀川合流部の大まかな河床形状を捉えることができる。新堀川は、上流側から下流側に向かう場所の川幅が狭まる周辺で、河床が急激に上昇しているのが分かる。その後 section4 周辺で河床が低下し、再び湾曲部周辺で上昇し、宮の渡し周辺では河床が低下している。新堀川の下流は起伏の大きい河床形状である。また、新堀川の下流側の河床の特徴として、河道の中心から右岸側に近いところの河床が低下しており、上述した流速分布図からもこの付近が遡上してくる塩水の通り道になると考えられる。その場所の川幅が狭いことが、塩水の交換をさまたげる要因となる可能性がある。一方、堀川は右岸の河床は上昇しているが、左岸の河床は低下している。新堀川と比較した際、堀川は塩水の通り道となる断面が広いことが分かる。表-2 に計測した総流量を示す。左岸計測時の合流後の流量が堀川、新堀川の総流量の合計との誤差が、上げ潮時は5%以内で、下げ潮時は17%であった。同様に、右岸計測時の誤差は、上げ潮時は5%以内で、下げ潮時は8%以内であった。計測時間にずれがあることを考慮しても、精度よく計測できたと言える。これらの結果より、新堀川の流量は堀川の流量の約0.4倍と小さいことが分かる。新堀川では、合流地点付近

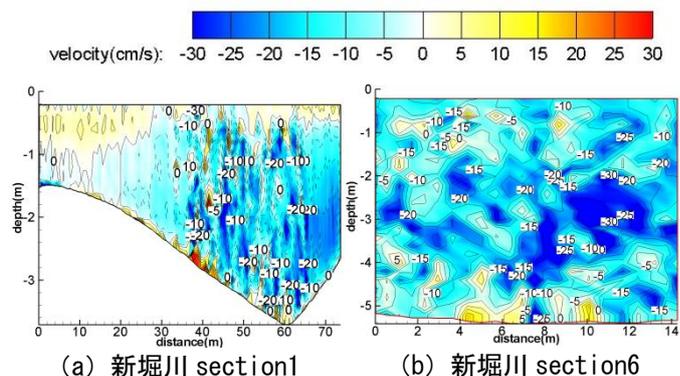


図-3 流速分布（上げ潮時）

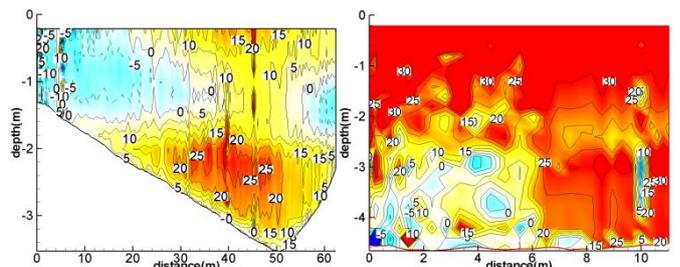


図-4 流速分布（下げ潮時）

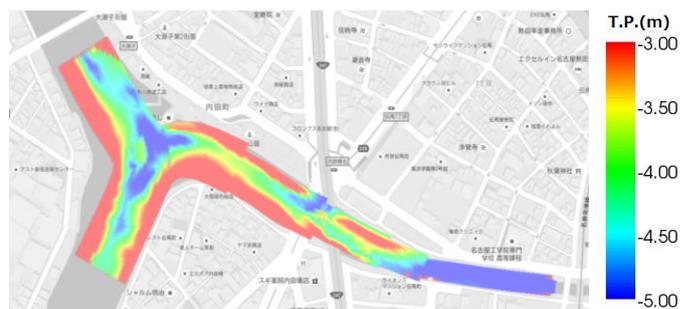


図-5 河床形状コンター

表-2 総流量

潮汐	場所	総流量(m ³ /s)	
		左岸から計測	右岸から計測
上げ潮	新堀川	-13.60	-14.44
	堀川	-34.76	-33.88
	合流後	-50.06	-47.00
下げ潮	新堀川	12.16	12.19
	堀川	29.31	33.68
	合流後	50.37	49.61

の断面に比べて潮汐流動が小さいことが、下流部での堆積を発生させ、河川内の水交換が行われにくい要因となり、水質悪化を引き起こすと考えられる。

4. 鉛直二次元数値シミュレーションによる検討

4-1. 数値計算の概要¹⁾：本研究では、武田ら（2006）で提案された連続式、運動方程式、水温・塩分・DOの収支式を用いる。数値解析には有限体積法を用い、時間項は前進差分、移流項には Quick スキーム、その他の項には中央差分を用いる。水温は、日射や大気との熱輸送等の熱収支を考慮する。DO は水面における再爆気、水中における酸素消費、底層における酸素消費を考慮した。今回は、用いた計算式を省略する。

4-2. 計算領域と境界条件：今回の計算は2016年6月20日から7月8日までを計算対象とし、z方向格子幅を0.25m、x方向格子幅を50mとして新堀川全域を計算領域とした。計算時間間隔 Δt は、安定条件(C.F.L条件)より0.5秒と定め、Leap-Frog法を用いて計算を行った。各水質の初期条件は、2014年10月20日に行った観測の実測値を用いる。塩分に関しては、季節により変化するため、夏季の塩分に相当するように補正した。初期水位は、名古屋港の潮位を与えて、流速はすべて0.0(m/s)とした。各境界条件を以下に示す。

(a) 上流端(堀留水処理センター)

3つのケースを実施した。1) 表層から4層分から処理水の排水が行われるとして与えた。2) 排水場所がT.P.0.00mのところにあると設定し、水位が排水場所より高い時は水面まで排水し、低い時は表層2層だけ排水されるよう設定した。3) 処理水が全層から排水されるように設定した。全ケースにおいて、総流量(1.24m³/s)、塩分0.0(PSU)、水温25(°C)、DO3.00(mg/L)とした。

(b) 熱田水処理センターと伝馬町水処理センター

表層から3層分から処理水が横流入するように与え、塩分、水温、DOは上流端と同様の値を与えた。

(c) 下流端

下流端水位は、名古屋港での1時間潮位を直線近似により計算時間における水位を与えている。塩分と水温は宮の渡しで計測した結果を常時与えている。DOは、0.5(mg/L)を鉛直一様に与えている。

(d) 降水時境界条件

降雨強度が3.0(mm/h)以上の場合上流端から排水される。排水流量の設定は、合成合理式に基づきピーク流量が降雨開始時から1時間後に発生し、継続時間を1時間とし、流出係数は0.68と設定した。降雨による水面での水質変化は、降雨強度と水表面の面積から流量を計算し、横流入流量として与えて考慮した。

4-3. 再現性の検討：降雨の有無を含む、再現性の検討を、富士見橋[5.0km]における日変化と記念橋と新堀田橋の2地点の時間変化鉛直分布を用いて行う。今回の再現性の検討では、再現性が最も高い上流端の流量境界条件 case2 について行った。図-6に降雨なしの富士見橋のT.P.-2.0mにおける塩分変動を示す。図-7に降雨ありの富士見橋のT.P.-2.0mにおける塩分変動を示す。降雨なしでは、上流からの流量が一定であるため、大きな塩分変動を示さない。一方降雨を考慮した計算では、降雨による塩水の流下とその後の塩分の上昇が概ね再現されている。しかし、6月23日の28.0(mm/h)後の塩水の再遡上の時間に関しては、多少の誤差が見られる。今回の計算には上流端以外の雨水吐を考慮していないことが要因の1つだと考える。降雨の影響を

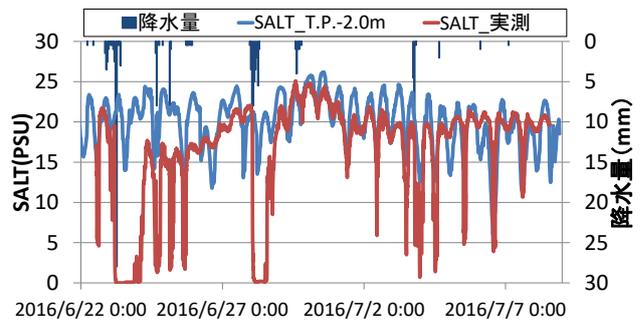


図-6 富士見橋 T.P.-2.0m (降雨なし)

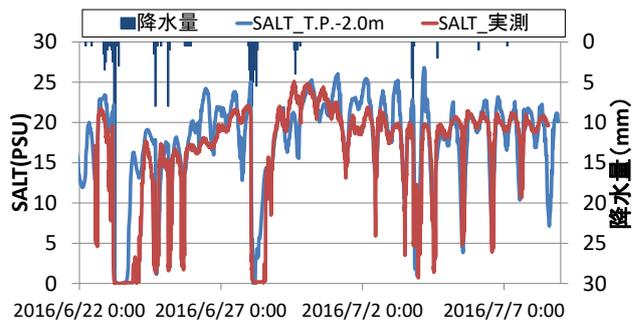


図-7 富士見橋 T.P.-2.0m (降雨あり)

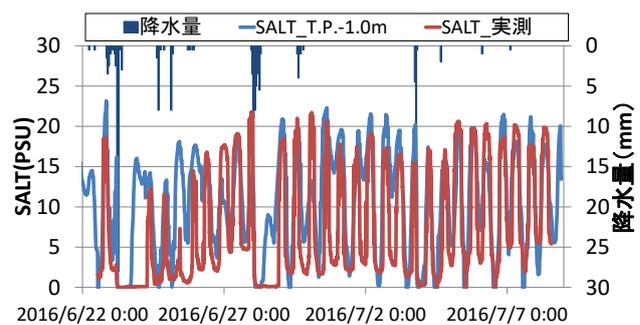
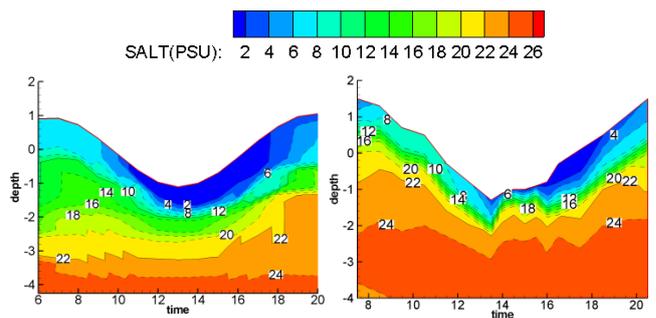
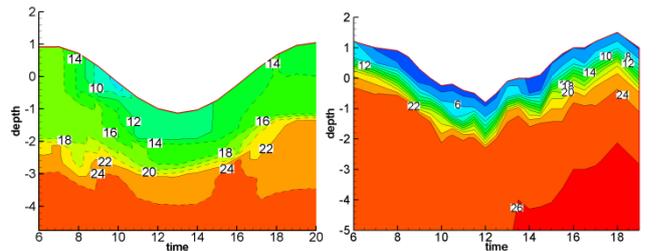


図-8 富士見橋 T.P.-1.0m (降雨あり)



(a) 計算結果 6月22日 (b) 観測 2014年6月16日
図-9 塩分コンター(記念橋:宮の渡しより5.5km)



(a) 計算結果 6月22日 (b) 観測 2014年10月24日
図-10 塩分コンター(新堀田橋:宮の渡しより2.5km)

考慮することで、実測値と計算結果の再現性が高くなることが明らかとなった。図-8に降雨ありの富士見橋の T.P.-1.0m における塩分変動を示す。T.P.-1.0m においても、降雨の影響による塩分の低下等、計算結果と実測値の日変化を概ね再現されている。これらの結果より、新堀川の数值計算において、降雨の影響を考慮に入れることの重要性が分かる。図-9(a), (b)に記念橋における6月22日の塩分の鉛直分布と2014年6月16日の現地観測の結果を示す。図-10(a), (b)に新堀田橋における6月22日の塩分の鉛直分布と、2014年10月24日の現地観測の結果を示す。計算日時と観測日の違いや、潮汐や気象条件が違うが、1日の時間変化の特徴を再現できているかに着目する。図-9より、表層は淡水で下層は塩水という鉛直分布が再現できている。しかし、下層の塩分が計算結果の方が多少低くなる。計算での6月22日以前に降雨があったことが影響し塩水が流下したことが要因だと考えられる。図-10より、季節の違いによる塩分の差が大きく出ているのか、計算と観測との誤差が大きい。しかし、上層は低い塩分で下層は高い塩分という鉛直分布は再現できている。以上より、本数值計算は新堀川の水質変化をある程度再現できたとみなす。

4-4. 数值シミュレーション結果及び考察:本研究では、上述した水質悪化原因である下流端・上流端河床形状、少ない流量、下層の貧酸素水塊に着目して行う。また、水質改善策としての結果をより明確にするために、降雨による上流端からの流量増加の影響を考慮せずに行った。表-3にシミュレーションケースを示す。再現計算時における結果を case0 として基準とした。今回は case3 の導水の影響に着目して検討を行う。導水は底層2層分から淡水流入する設定とした。図-11(a), (b)に case0, 図-12(a), (b)に case3-C1, 図-13(a), (b)に case3-BUC1 の縦断塩分コンターを示す。図-11の case0 では、下層に高濃度の塩水、上層に塩分が低い水塊となっており、成層化している。また、満潮時・干潮時共に下層の塩水は滞留している。図-12の case3-C1 では、上流端掘削を行わずに、底層から導水 (1.0m³/s) を行った。導水により流量が増えたため、上層の塩分が case0 と比較すると低くなる。しかし、下層の塩水には影響を及ぼしていないことが分かる。このことから、上流端の流量が 1.0 (m³/s) 程度増加しても下層に溜まった塩水を流下させることは難しい。しかし、図-13の case3-BUC1 では、他の case と比較すると下層の塩分に影響を及ぼしたと見て取れる。case3-BUC1 では、上流端を掘削し、底層から導水 (1.0m³/s) を行った。この場合、下層の塩水を流下させることが可能となる。今回は上流端を掘削して行ったが、河床上昇部手前の底層から導水しても同様の効果が得られると思われる。

表-3 シミュレーションケース

Case名	河床形状	川幅	導水	エアレーション
case0	-	-	-	-
case1-BD	下流端掘削	-	-	-
case1-BU	上流端掘削	-	-	-
case1-BDBU	下流端・上流端掘削	-	-	-
case2-WD	-	下流端長方形断面	-	-
case2-BDWD	下流端掘削	下流端長方形断面	-	-
case2-BUWD	上流端掘削	下流端長方形断面	-	-
case3-C1	-	-	1.0m ³ /s	-
case3-C2	-	-	3.0m ³ /s	-
case3-C3	-	-	5.0m ³ /s	-
case3-BDC1	下流端掘削	-	1.0m ³ /s	-
case3-BUC1	上流端掘削	-	1.0m ³ /s	-
case3-BDBUC1	下流端・上流端掘削	-	1.0m ³ /s	-
case4-A1	-	-	-	記念橋
case4-A2	-	-	-	新堀田橋・記念橋

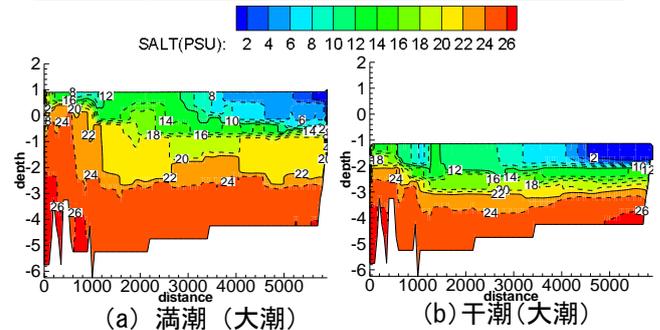


図-11 縦断塩分コンター (case0: 7月4日)

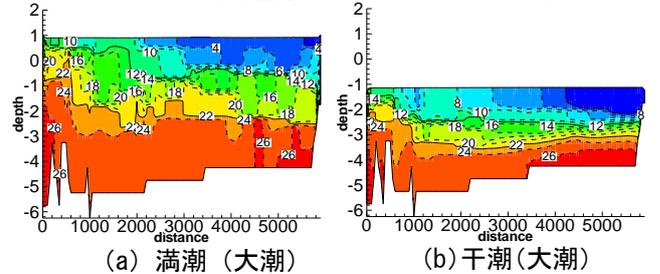


図-12 縦断塩分コンター (case3-C1: 7月4日)

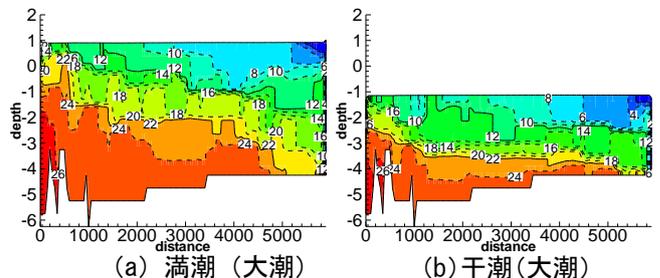


図-13 縦断塩分コンター (case3-BUC1: 7月4日)

滞留している塩水に流動を促すように導水を行うことの重要性が示された。

5. まとめ:本研究では、現地観測により新堀川下流部における流速分布と河床形状を明らかにした。新堀川と堀川における流速分布や流量の違いから、新堀川の水質悪化の要因を推察することができた。また、上流端で行った定点観測より、塩分と DO の日変動が明らかとなり、降雨による塩水の流下と DO の上昇が確認された。数值計算により、塩分変動の再現性が確認された。上流端の河床掘削を行い、底層から導水を行うことで塩水の流下を促すことが可能となった。

参考文献

1) 武田誠, 日置梓, 遠山智, 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值解析, 環境工学研究論文集, 第 43 巻, 2006