

都市河川感潮域における塩水遡上と鉛直混合特性の現地観測

FIELD OBSERVATIONS ON CHARACTERISTICS OF SALINITY INTRUSION AND VERTICAL MIXING IN AN URBAN TIDAL RIVER

富永晃宏¹・庄建治朗²・川上哲生³・尾崎勝³

Akihiro TOMINAGA, Kenjiro SHO, Tetsuo KAWAKAMI and Masaru OZAKI

¹正会員 工博 名古屋工業大学教授 大学院工学研究科社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

²正会員 工博 名古屋工業大学助手 大学院工学研究科社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

³学生会員 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

Field observations on characteristics of salinity intrusion and vertical mixing were conducted in an urban tidal river, the Horikawa River in Nagoya City, in order to understand the effects of stratified flow and reciprocating flow on water quality. We measured time series of vertical distribution of water depth, velocity, salinity, temperature, DO etc. during one tide by using an electromagnetic velocimeter and a multiple water quality meter. The vertical mixing type in the measured region was basically classified as a mild mixing type, but a considerable change of mixing type was observed with time and location. An increase of installed water slightly affects a stratified flow structure at the measuring site. Salt water has lower DO value than that in fresh water and it is moving up and down through a bottom layer during tidal motion.

Key Words : tidal river, urban river, salinity intrusion, vertical mixing, stratified flow
field observation, water quality

1. はじめに

全国の都市河川において、河川環境改善のために様々な施策が行われている。その中にあって、名古屋市の堀川では市民による水質浄化運動が活発になってきている。名古屋市の中心部を南北に流れる堀川は、名古屋城築城のために掘られた人工の川であり、歴史的には名古屋の経済の大動脈として重要な役割を果たしてきたが、現状はヘドロが堆積して生物のきわめて少ない、市民から背を向けられた川となっている。名古屋市中心部を流れる河川として、この堀川を再生して都市に水辺環境を取り戻そうという市民の願いは強い。最近では、堀川への環境導水の増量を国に働きかけ、これに伴って一般市民、大学、民間企業と行政が一体となって約 2 ヶ月にわたって堀川全体の種々の観測を行い、導水の効果を調べるという大規模な調査が行われた。著者らは、この活動に参加する中で、堀川が感潮河川であることから、水質と物質輸送に大きな影響を与えと思われる塩水遡上と鉛直混合特性に着目した。

感潮域は、潮汐の非定常な動きに伴い淡水と海水が交じり合い、場所的にも時間的にも変化に富む複雑な流動形態が出現する。密度成層が存在する感潮

域では、鉛直方向の混合が抑制されるため、水質や汚濁堆積に大きな影響を及ぼすことが予想される。しかし、従来の調査においては、表層水の水質調査のみが定期的に行われているだけで、感潮域での流速や水質の鉛直方向分布などを計測しておらず、塩水遡上の実態に関する知見が得られていないのが現状である。特に、堀川などの都市河川では自己の水源を持たず、その流量の大部分が生活排水や下水処理水となっており、潮汐による流動が支配的である場合が多いと考えられる。また、昨今の都市型水害の増加に伴い、洪水防御対策として都市河川において河床の掘削が増加して、その影響で河川の感潮域が増加しているという事態も多く発生している。したがって、都市感潮河川の水質改善策を考える上では、潮汐による流動特性を把握することが重要な課題である。河口域における塩水遡上形態や水質との関連に関しては、多くの現地計測が行われている^{1),2)}。また、都市河川の感潮域における現地観測がいくつか行われているが^{3),4),5)}、現地固有の特性が大きく反映されるため、さらに現地データを集積していくことが必要である。

そこで本研究では、堀川の水質改善の支配要因となる塩水遡上について現地観測を行い、塩水・淡水

の鉛直混合特性の場所的・時間的変化について検討したものである。

2. 現地観測の概要

(1) 対象河川の概要

本研究で対象とする川は、名古屋市の中心部を南北に流れる堀川で、江戸時代に名古屋城築城のための材木などを運搬するために掘削された人工河川である。堀川は、庄内川から導水された水と下水処理水を主な水源とし、名古屋港に注ぐ全長 16.2km、流域面積 27.9km²の河川であり、途中 3.4km で新堀川と合流している。また、河口から 14km までが感潮域であり、川の大部分を感潮域が占めている。図-1 に堀川の河道平面図、図-2 に河道縦断面図を示す。図-2 に朔望平均満潮位および干潮位を示している。

(2) 観測の概要

現地観測場所として水質改善が望まれる都心部の感潮域である納屋橋 (9.1km)、岩井橋 (8.1km) および景雲橋 (10.15km) を選定した。図-1 に観測地点の橋の位置を示している。計測は2003年12月から2004年の9月にかけて定期的大潮の日を選択して行った。表-1 に観測日時を示す。途中で庄内川からの導水量の増量実験期間も含まれており、第4回と第5回は増量時期に当たる。第6回は比較のために小潮の日に観測を行った。

流速計測には電磁流速計 (アレック電子・AM1-D) を水質項目測定にはポータブル多項目水質計 (東亜 DKK・WQC-24) を用いた。計測法は橋上から流速計および水質計をロープで釣って下ろし、水面から鉛直

下向きに0.5m間隔で底面まで鉛直分布を計測した。計測項目は流速、水深、水温、D0、ph、電気伝導度、塩分、濁度である。

3. 観測結果と考察

3.1 塩分の鉛直分布から見た流動特性

(1) 冬季における塩分の鉛直分布特性

図-3(a)～(c)に測定地点の景雲橋・納屋橋・岩井橋における塩分の鉛直分布の時間変化を示す。図は横軸に時間、縦軸に鉛直距離をとった等値線で表している。2003年12月から2004年1月にかけての冬季における第1回から第3回の計測である。いずれも大潮期で、0時、12時に干潮、6時、18時が満潮であり気象条件もほぼ同様であるため、これにより場所的な変化特性をある程度考察できると考える。ただし、岩井橋では6～18時までの12時間、納屋橋では0～24時までの24時間、景雲橋では0～18時までの18時間計測であった。潮位変化はかなり顕著な日潮不等を示しており、12時の干潮は水位低下が小さく、0時の干潮位に比べて1mも水位が高い。

下流の岩井橋では、満潮時に濃度の高い塩水が底層に現れており、水面近くも比較的高い濃度を示している。12時の干潮時においても比較的高い濃度が残っており、大潮時は全体が塩水で占められていることになる。ただし、この地点では0時、24時の水位の低い干潮時の計測がなされていない。中間点の納屋橋では、0時、24時の干潮時では塩分がほぼゼロとなり淡水で占められていることがわかる。上げ潮時

表-1 観測日時

	観測日	観測時間	観測地点	状態	導水量
第1回	2003.12.23	0:00～24:00	納屋橋	大潮	0.3m ³ /s
第2回	2004.1.8	6:00～18:00	岩井橋	大潮	0.3m ³ /s
第3回	2004.1.22	0:00～18:00	景雲橋	大潮	0.3m ³ /s
第4回	2004.4.10	8:00～20:00	納屋橋	大潮	0.5m ³ /s
第5回	2004.5.19	8:00～20:00	納屋橋	大潮	1.0m ³ /s
第6回	2004.6.10	8:00～20:00	納屋橋	小潮	0.3m ³ /s
第7回	2004.8.2	0:00～24:00	納屋橋	大潮	0.3m ³ /s
第8回	2004.9.14	0:00～24:00	岩井橋	大潮	0.3m ³ /s

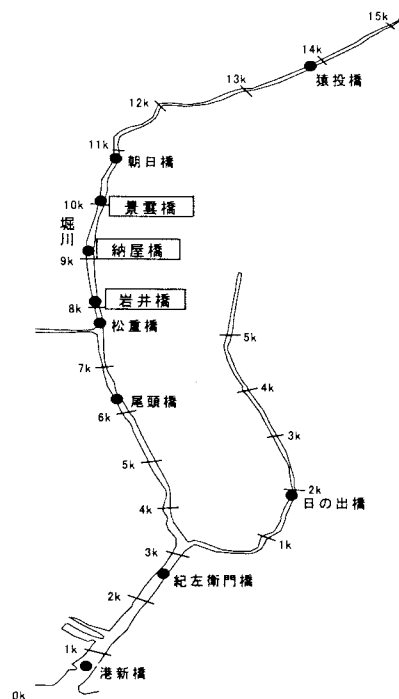


図-1 堀川の河道平面図と観測地点

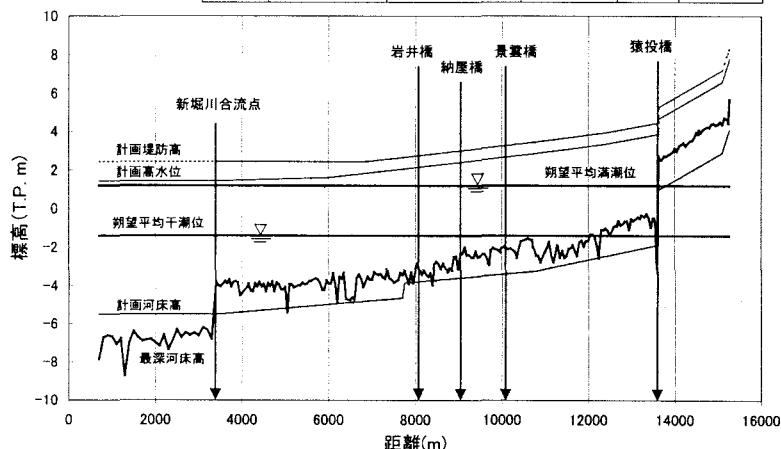


図-2 堀川の河道縦断面図

には水深全体にわたって塩分が増大していき、満潮時前後では底面側に濃度の高い塩水の侵入が見られ、上層は塩分が低い成層流状態となっていることがわかる。12時の水位低下の小さい干潮時には、上層には淡水の層が現れるが、底層にはまだ高い塩分を持つ層が残っている。ここから再び満潮時にかけて底層に塩水の侵入が見られ成層化したまま上層へ塩分が押し上げられている。下げ潮時にはやや急速に塩分が減少する。一方、上流の景雲橋では0時、24時の干潮時に全体が淡水化し、満潮時には底層の塩分が高くなるが、その濃度は下流に比べて減少している。しかし、12時の干潮時には下層部に塩水が停滞しており海水の影響を受けていると考えられる。全体の塩分は小さくなるものの、鉛直分布の時間的変化傾向は納屋橋とはほぼ同様であるといえる。

鉛直混合形態の分類の目安として C_s/C_b の値を用いることとする。 $C_s/C_b < 0.1$ で弱混合、 $0.1 < C_s/C_b < 0.5$ で緩混合、 $0.5 < C_s/C_b$ で強混合と分類される⁶⁾。これは須賀の区分法とも呼ばれる⁷⁾。それぞれの地点における C_s/C_b の時間変化を図-4に示す。納屋橋と景雲橋における0時の干潮から満潮までの上げ潮時にかけて C_s/C_b は0.5以上の値を示しているが、これは全体が淡水化しているためである。6時の満潮から12時の干潮までの下げ潮時は C_s/C_b の値が小さくなり緩混合から弱混合状態へ近づく。12時の干潮では水位低下

が小さく底層の塩水が抜け切らないことから表層を淡水が流れ、成層状態が維持されている。ここからの上げ潮において若干混合が進む傾向にあるが、18時の満潮に至っても強混合とはならず、そのまま下げ潮となり再び成層化が進む。そして24時の干潮時にはまた全層が淡水化するため混合状態となる。下流の岩井橋では、相対的に C_s/C_b の値が大きく、全体に強混合状態にあるが、時間変化特性は上流の納屋橋、景雲橋と同様な変化を示している。この図では塩分の絶対値が不明なので、 C_s/C_b の底層塩分に対する時間変化として図-5に示す。図中の数字は時間を示し矢印は時間進行方向を意味する。最下流の岩井橋では底層塩分は相対的に高く、 C_s/C_b の値が0.5以上の強混合状態を示す。それでも12時の干潮時には若干の成層化が見られる。中間の納屋橋地点では上げ潮時に底層塩分の増大に伴って C_s/C_b の値が減少し、弱混合へと移行する様子が認められる。12時の干潮時に底層塩分は減少するが C_s/C_b の値はあまり変化せず0.2付近の値をとっている。下げ潮時には上げ潮時に比べて成層化が強いこともわかる。最上流の景雲橋ではさらに底層塩分が減少し混合が進行しているものの、 C_s/C_b の値の時間変化過程については納屋橋と同様の傾向を示す。また、12時の干潮を挟む満潮期間で底層塩分の変化は小さい。以上より、堀川全体としては緩混合であり、岩井橋付近では強

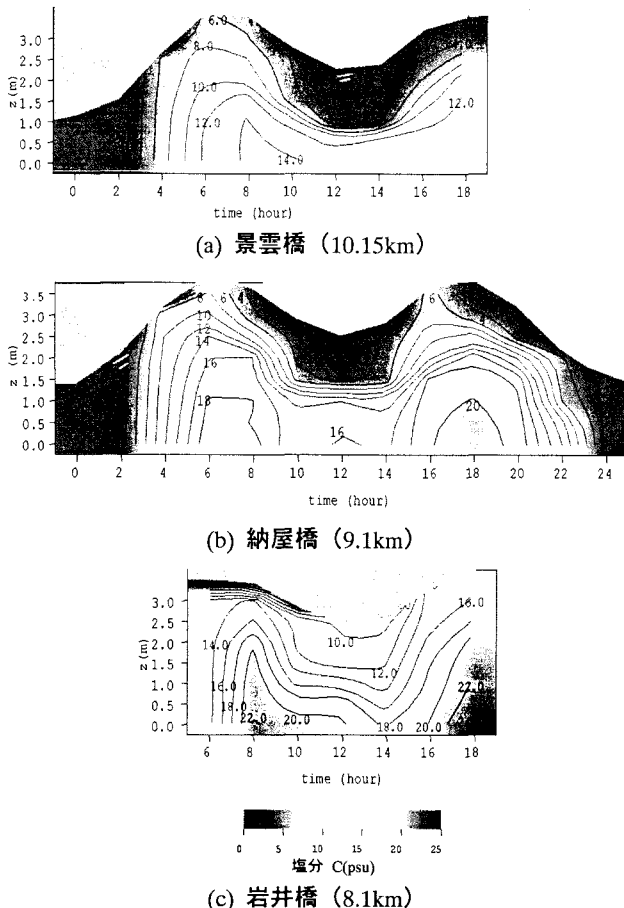


図-3 各地点における塩分時間変化

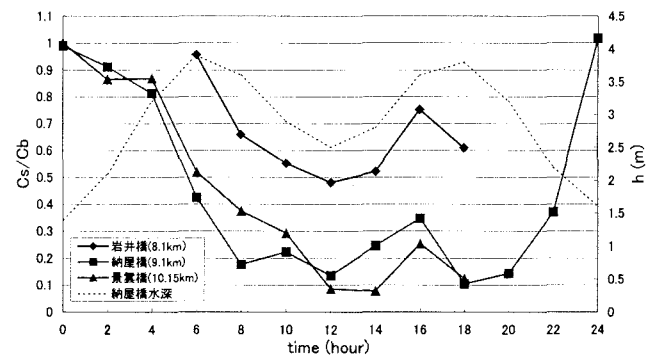


図-4 混合指標 C_s/C_b の時間変化

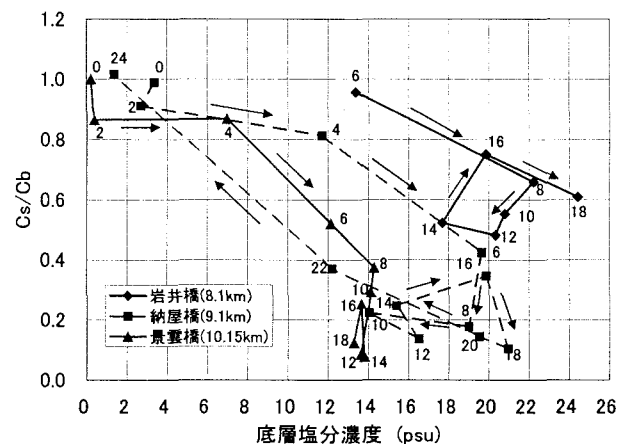


図-5 C_s/C_b - 底層塩分分布

混合から緩混合に移行する位置にあたると考えられる。納屋橋、景雲橋ではちょうど塩水の先端部にあたり下層は希釈されていながら弱混合状態を示す。

(2) 塩分鉛直分布の季節および時期的変化

図-6は夏季の8月2日の大潮における納屋橋での塩分時間変化である。この時は日潮不等により1時の干潮の水位低下が小さい。底層の塩分は冬季の場合と同程度であり、塩分の時間変化特性は基本的に冬季の観測結果と類似している。ただし、上げ潮時に上層まで混合が進み、表層の塩分が冬季より高く、水位低下の大きい干潮時にも若干の塩分が残っている。また、図-7は6月10日の小潮時に納屋橋で計測した結果である。この場合計測時間が短く、上げ潮時が十分捉えられていないが、ほぼ全時間にわたって、水面下1mより底層の塩分が高く表層が淡水という明確な成層化を示している。底層の塩分は他のケースとほぼ同程度の濃度である。これら2つのケースについて、混合指標である C_s/C_b の時間変化を示したのが図

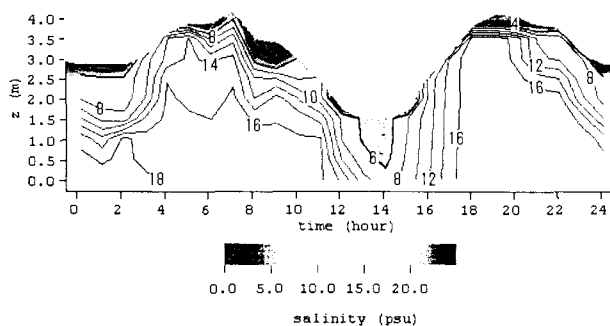


図-6 夏季における塩分時間変化(納屋橋)

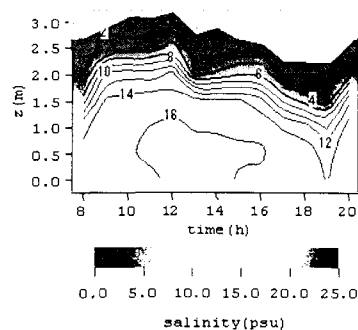


図-7 小潮時における塩分時間変化(納屋橋)

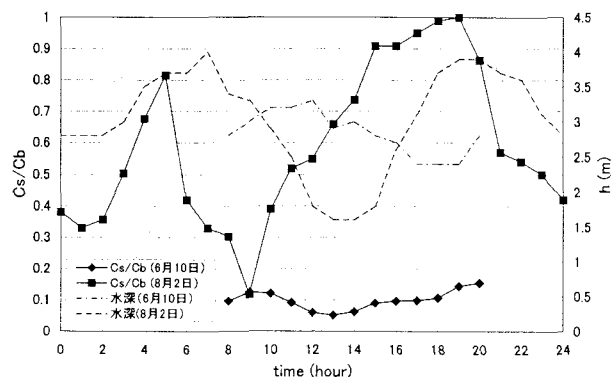
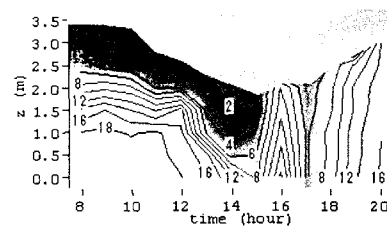


図-8 夏季と小潮時における混合指標の時間変化

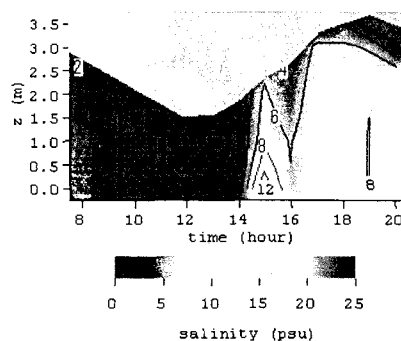
-8である。8月2日の値は15時から19時にかけての強い上げ潮時に全層がほぼ均一化する強混合状態となっている。また12時から16時の水位低下の大きい干潮時には淡水化が底層までおよび底層の塩分が低下するため C_s/C_b の値が大きくなっている。特に成層化が発達するのは7時から10時の強い下げ潮時であり、 C_s/C_b は0.1の弱混合に近づく。2時から5時にかけての弱い上げ潮時にも強混合状態が発生している。そのため全体に強混合状態が多くを占めている。一方、小潮時の6月10日では C_s/C_b は全体に0.1前後の値をとり、全時間的に弱混合であることがわかる。

(3) 導水量増量の塩分分布に及ぼす影響

先述のように、堀川では水質改善のための浄化用水として庄内川からの導水量を一定期間増量することを試験的に行った。2004年4月10日より導水量を $0.3\text{m}^3/\text{s}$ から $0.5\text{m}^3/\text{s}$ に増量し、さらに4月26日から5月28日まで $1.0\text{m}^3/\text{s}$ に増量した。その前後に「堀川1000人調査隊」と呼ばれる一般から公募した調査グループが流れのようすやCODのパックテストなどの規定プログラム調査とそれぞれが独自の調査を行う自由プログラム調査を行った。これらの調査結果については1枚のCD-ROMにまとめられている⁸⁾。調査内容は様々であり、導水量増量の効果については、各区間や項目によって評価が異なっている。ここでは増水実験時の納屋橋における塩分計測結果について述べる。図-9は2段階の増水時における納屋橋での塩分計測結果である。まず、4月10日は10:00から導水量の $0.3\text{m}^3/\text{s}$ から $0.5\text{m}^3/\text{s}$ への増量が行われた。この地点での流量はこれに加えて下水処理場からの放流水が日平均 $0.7\text{m}^3/\text{s}$ のみである。下げ潮時に成層化が認められ、上げ潮時に強混合へ移行するが、途中の17時



(a) 導水量 $0.5\text{m}^3/\text{s}$ 後の塩分 (納屋橋 4月10日)



(b) 導水量 $1.0\text{m}^3/\text{s}$ 後の塩分 (納屋橋 5月19日)

図-9 導水量増量の塩分分布に及ぼす影響

頃塩分が1時的に低下している。納屋橋は16.2kmの上流端取水口からは約7kmの地点である。約7時間でその影響が現れたものと考えられる。しかし、満潮時にかけては鉛直混合が進み全層にわたって塩分が高くなっていく。したがって、増水の効果は一時的なものにとどまり、塩水を下流へ押し下げるまでの効果は見られないことがわかる。次に、5月19日では導水量が $1.0\text{m}^3/\text{s}$ に増量されている。この場合は下げ潮時に全層が淡水化している。上げ潮時に塩分が増加するが、増水前に比べるとかなり低くなっており、増水の効果が明らかに現れたものといえる。ただし、下流における計測を行っておらず塩水の押し下げ効果がどこまで及んだかは明らかではない。

3.2 流速鉛直分布の時間変化特性

図-10に納屋橋における流速鉛直分布の時間変化を示す。上げ潮時にはほぼ水深全体にわたって逆流が発生しているのに対し、下げ潮時には水面から約1mまでが強い順流となりそれより下では非常に遅い流れとなっていることがわかる。図-11は各地点での上げ潮時と下げ潮時における鉛直方向流速分布を示したものである。また、導水量 $1.0\text{m}^3/\text{s}$ の増水時（5月19日）の分布も併示している。いずれの地点においても上げ潮時にはほぼ水深全体にわたって逆流が発生しており、底面近くを除き一様な流速分布となっている。下げ潮時には順流となるが、増水時以外においては下層の1m以下では流速が小さく、変曲点を有する鉛直分布構造になっている。岩井橋では強混合状態を示していたが、底層の流速は小さいことがわかる。増水時においても上げ潮時の逆流の流速分布は増水前とほぼ同様である。下げ潮時には増水前と比べてかなり大きな順流速を示し、下層流速も増大している。したがって、この増量により下げ潮時には底層の物質輸送に大きな効果があることが推測される。また、図-12に9月14日に岩井橋と納屋橋において水深を同時計測した時の水位の経時変化を示す。ほぼ同様の水位変化を示しており、平均的には約30分の位相のズレが見られる。両者では1kmの距離があるが、上げ潮時には水位差が小さくなり、下げ潮時に水位差が大きくなっていることがわかる。

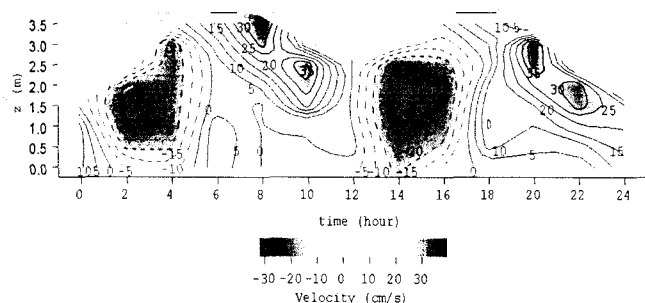


図-10 流速鉛直分布の時間変化（納屋橋 12月23日）

3.3 DOの時間変化特性

堀川は環境基準においてD類型に指定されており、DOの基準値は 2mg/l である。現在、堀川全体でこの基準を満たしているが、上流と下流で高いものの、中心部の今回計測地点付近が小さい傾向にある。しかし、名古屋港において底層のDO濃度が低いことが知られており、堀川においても底層ではDO濃度が低い状態であることが問題となっている。

図-13(a)～(c)に景雲橋・納屋橋・岩井橋におけるDO濃度の鉛直分布の時間変化を示す。納屋橋においては、0時および24時の干潮時には水面から底面まで大きな値を示すが、潮位が上昇するにつれて底層にDOの低い流体が進入し、いったんは水面近くもDO濃度が下がる。満潮時には水面近くの値は増大するが底層は 2mg/l 以下の低い値を示している。12時の水位低下の低い干潮付近では上層の値は大きくなるが、底層までは回復していない。上流の景雲橋では納屋橋と同様の变化を示す。この結果からは、底層の塩水のDO濃度が低いといえる。下流の岩井橋では満潮時の底層においてもDO濃度が大きい。この理由は明らかではないが、岩井橋においては塩水と淡水が強混合状態となっていることが関係している可能性がある。次に、夏季の納屋橋におけるDO濃度を示す。夏季においては全体にDO濃度が低く、表層でかろうじて基準値の 2mg/l を満たしているにすぎない。

そこで、DOと塩分の関係を示したのが図-15であ

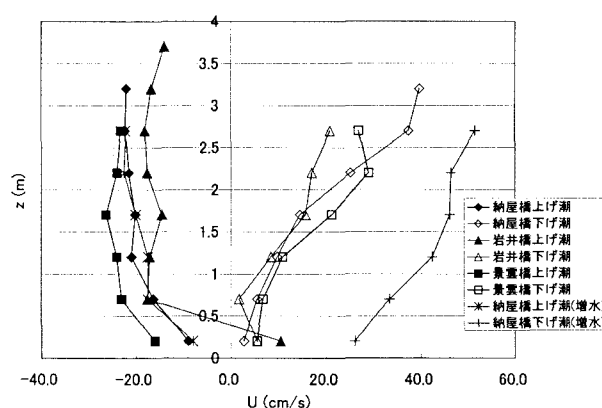


図-11 流速鉛直分布の比較

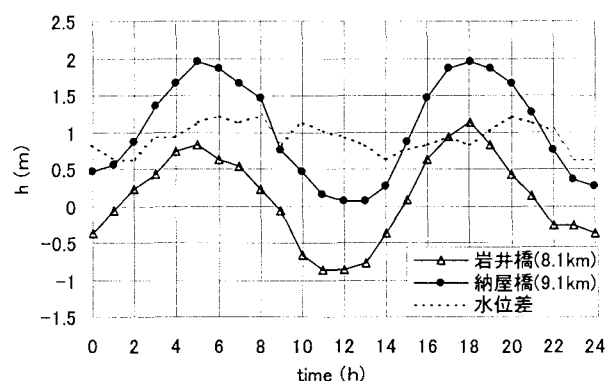


図-12 岩井橋と納屋橋における水位時間変化

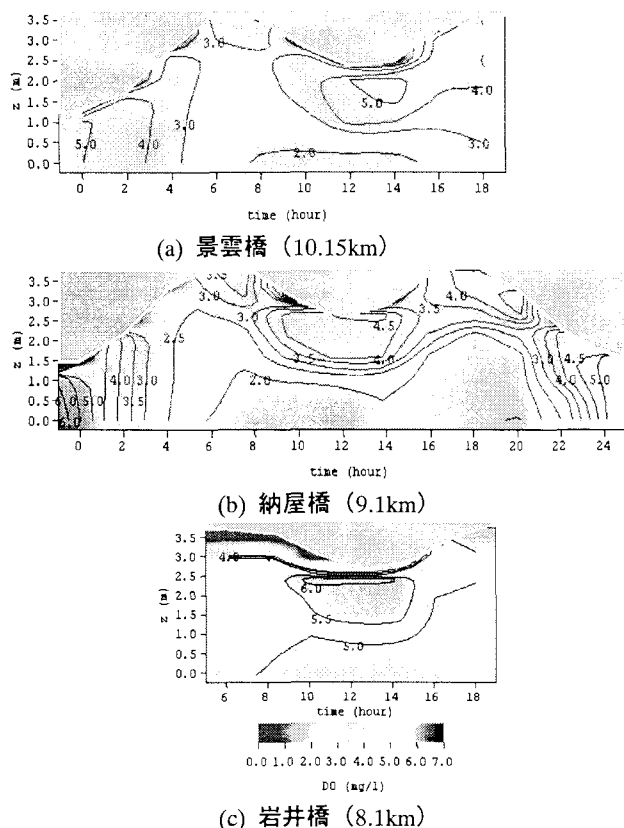


図-13 各地点におけるDO時間変化

る。納屋橋、景雲橋の分布を見ると、塩分の増大にしたがってDOがほぼ線形的に減少していることが明らかである。夏季にはDO濃度が低くなっているが、冬季と同様に線形に減少する傾向を示す。一方、岩井橋ではDOが非常に高い値を示すが、同様に塩分の増大に対してDOは減少している。この結果からは塩水のDO値が低いことが認められる。しかし、岩井橋の結果を見ると、遡上する塩水のDO濃度が必ずしも低いわけではなく、底層のヘドロによる酸素消費に成層化が加わって底層の塩水のDO濃度を低くしているものと推測される。この点は成層の破壊が有効な浄化対策となるかどうかを判断する上で重要な点であり、さらに観測を加えて検討すべき課題である。

4. おわりに

以上の観測により堀川の河口より8~10km付近における塩水遡上特性および鉛直混合特性がある程度把握できた。観測した約2kmの区間は、基本的には緩混合の形態を示しているが、10kmから9kmの間で混合形態が大きく変化していることがわかった。9km地点では導水量の増量によって塩分が低下することが認められた。特に下げ潮時の流速分布に大きな違いが見られた。DO値は塩分と逆比例関係にあり、塩分が増大するとDO値が低下する傾向にある。緩混合から弱混合の領域では、底層の塩水層はDO値が低く、これが潮汐に伴い遡上・流下を繰り返している。た

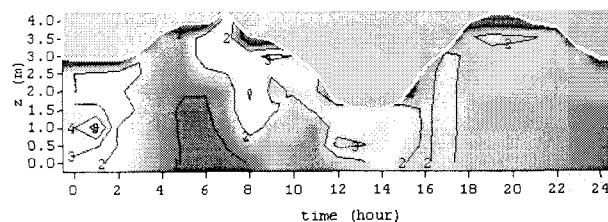


図-14 夏季におけるDO時間変化(納屋橋)

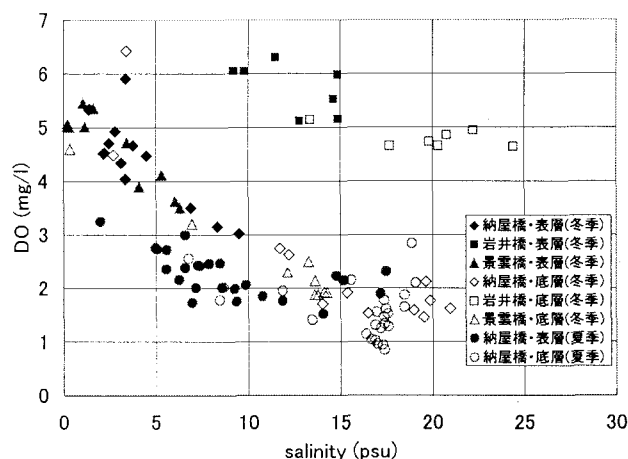


図-15 DOと塩分の関係

だし、強混合下では底層までDO値が高い場合も観測されており、鉛直混合形態との関係は今後さらに検討する必要がある。

なお、本研究は(財)河川環境管理財団の河川整備基金の助成を受けたことを記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 橋本彰博, 有田正光, 南澤公太郎: 長良川河口堰が塩水侵入に及ぼした影響, 水工学論文集, VOL.48, 1201-1206, 2004.
- 2) 伊福誠, 合田宏隆, 中田正人: 肱川感潮域における懸濁物質の挙動, 水工学論文集, VOL.47, 1165-1170, 2003.
- 3) 松本治彦, 坂本淳一, 天野卓三, 隈野博一, 羽田野袈裟義: 都市河川感潮部の水質と物質輸送の現地観測, 水工学論文集, Vol.42, 799-804, 1998.
- 4) 土屋十圀, 和泉清: 目黒川感潮部における水質変動と底泥堆積物の挙動, 水理講演会論文集, Vol.33, 637-642, 1989.
- 5) 土屋十圀, 和泉清: 都市河川の感潮部における水質と汚濁堆積物の挙動, 水工学論文集, Vol.35, 573-578, 1991.
- 6) Simmons, H.B.: Field experience in estuaries, Estuary and Coastline Hydrodynamics (Ippen ed.), McGraw-Hill, 673-690, 1968.
- 7) 須賀堯三: 河川工学, 朝倉書店, 1985.
- 8) 堀川 1000 人調査隊 CD-ROM, 全名古屋ライオンズクラブ連絡会, 2004.

(2004.9.30 受付)