都市域の感潮河川網における水質構造とその潮汐応答性

TEMPORAL AND SPATIAL CHARACTERISTICS OF WATER QUALITY AND ITS RESPONSES TO TIDE IN URBAN TIDAL RIVER NETWORK

入江政安[1]・西田修三[2]・庄路友紀子[3]
Masayasu IRIE, Shuzo NISHIDA and Yukiko SHOJI

[1]正会員　博（工）　大阪大学大学院助教　工学研究科地球総合工学専攻（〒565-0871 吹田市山田丘2-1）
[2]正会員　工博　大阪大学大学院准教授　工学研究科地球総合工学専攻（〒565-0871 吹田市山田丘2-1）
[3]学生会員　大阪大学大学院　工学研究科地球総合工学専攻（〒565-0871 吹田市山田丘2-1）

The discharges of urban rivers in Japan are poor because of heavy water use and the water quality of them is better than those in 1970s but not desirable even today. They are also tidal, and the concentration of dissolved oxygen (DO) in the intruding saline water is very low. Therefore, the characteristics and dynamics of the water quality in them are very complicated. In the presenting paper field observation is carried out in order to clear the temporal and spatial characteristics of nitrogen, phosphorus and DO and the influence of tide and saline water in the rivers and canals which flows through the city center of Osaka. Two kinds of upstream waters flow into the area, and the water containing higher concentration of nutrients remains longer in the rivers. The water masses in which the concentration of DO is lowest are found in the saline water near the river mouths.

Key Words : *tidal river, dissolved oxygen, water quality, field observation, runoff, urban river*

１．はじめに

都市河川，特に以前堀割の役割を果たしたような都市中心部を流れる河川は都市内の限られたオープンスペースとして重要な空間である．本研究で対象としている大阪市内河川も都市再生特別措置法に基づいた「水都再生プロジェクト」の対象となっている．このような河川の特徴として，上流側での取水と下水処理場が河口側に設置されることにより，河川内を流下する流量が少ないこと，また，1970年代前後の汚濁状況に比べれば，水質は大幅に改善されているものの，依然として清浄とはいえないこと，下流側からは海水が侵入し，海域の水質の影響を受けることなどが挙げられる．

このような汚濁した都市河川においては，導水量の増加による水質浄化が最も有効な手段のひとつと考えられる．しかし，大阪市内河川については，導水される側の淀川下流域の河川環境も決して良いわけではなく，容易に実施しうる手段とは言えない．

河川感潮域においては，塩水侵入の動態と塩分や懸濁物といった物質量の輸送・混合過程について，長く水理学的検討が行われてきている．しかし，本論文ではその点を主眼としていない．都市内においては，ヒートアイランド・都市排熱対策への河川水の利用や，合流式下水道の改善問題など，河川の利用において新たな課題が出ている．それと併せて，河川水質を改善するためには，個別具体の対策の検討が必要であり，水質項目の動態の把握[1),2)]や河道内での生物化学的な反応に着目した解析が必要である．本研究で対象とした大阪市内河川には，上流から，窒素及びリン濃度の高い寝屋川の河川水と比較的清浄な大川からの河川水が流入する．上流の河川水は潮汐の影響を受けて，流向を変えながら流下するうえ，大阪市内河川は分流と合流を繰り返すため，汚濁した寝屋川水が流下する形態によって，各河道内の水質汚濁特性が異なることが予想される．そこで，本研究では，大阪市内河川の水質動態の把握を目的に，都市感潮河川網における水質汚濁特性およびその水質の潮汐応答特性を明らかにするため，現地観測を実施し，解析する．

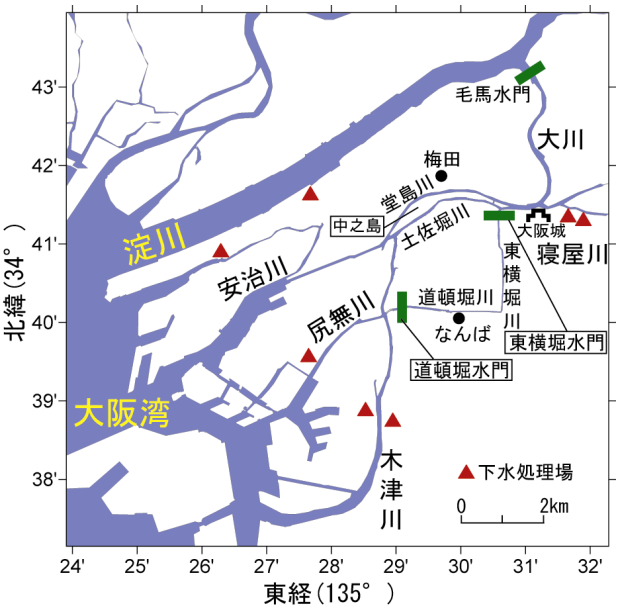


図-1　対象領域

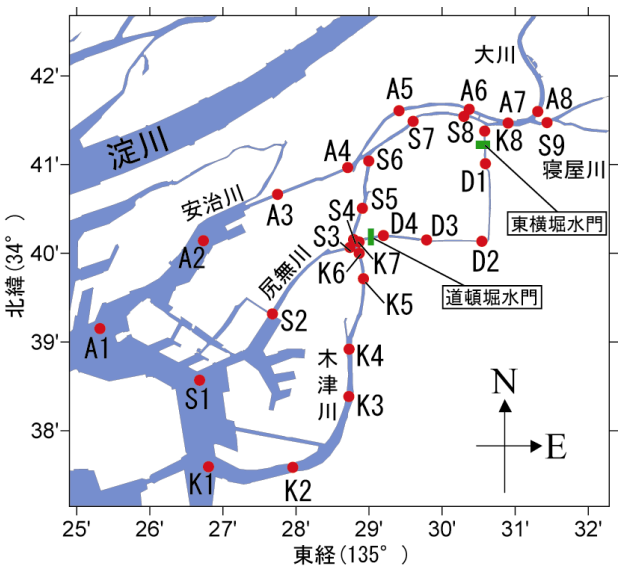


図-2　観測点位置図

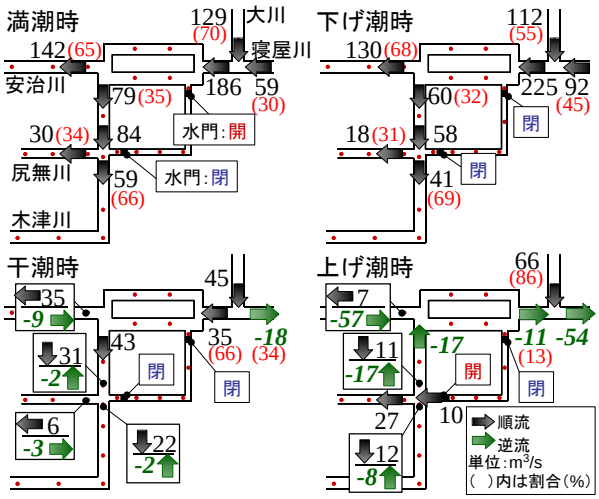


図-3　各潮時における流量フラックス

2．現地観測の概要

(1) 対象領域の概要

対象領域は大阪市内を流下する河川である．対象領域を図-1に示す．上流には，毛馬の水門を通して淀川から導水される大川（旧淀川）と大阪府東部の低平地を流れる寝屋川がある．大川と寝屋川が合流したのち，すぐに堂島川と土佐堀川に分流し，土佐堀川からはさらに，東横堀川・道頓堀川方向へ分流する．また，中之島地区を流下した後，土佐堀川からは木津川へと分流し，木津川は道頓堀川と合流すると同時に，尻無川方向へ分流する．土佐堀川の本川は再び堂島川と合流し，安治川へと流下する．したがって，大阪湾からの海水は安治川，尻無川，木津川の3つの河口から侵入する．淀川河川水の導水量は大川上流端の毛馬水門で70m^3/s，寝屋川上流の寝屋川浄化ポンプ場で0.5m^3/s（18年度年平均）[3] となっている．また，寝屋川水系には下水処理場から18 m^3/s（13年度実績）の処理水が放流されている．寝屋川・大川への望ましい正常流量の検討については国交省淀川河川事務所で検討会が設置され，現在検討されているところである．

東横堀川および道頓堀川の上下流には水門が設置されており，水質汚濁を防ぐために，水門操作が行われている．この水門操作および潮汐に対する水質の応答特性については著者ら[4]で解析している．この中で図-2に示す測点K6での連続観測により，下げ潮時には寝屋川の汚濁水の影響を徐々に受け，上げ潮時には低栄養塩・貧酸素の塩水が流入していることが分かっている．

(2)観測方法

現地観測は2006年4月25日に実施した．観測地点を図-2に示す．測点A1～A8，S1～S9，K1～K8の25点においてはバンドン採水器および北原式採水器を用いて，採水を行い，同時にCTD計（アレック電子製AAQ-1183，ACL220-PDK）およびDO計（Hydrolab製Quanta-G）による水温・塩分・濁度・DOの測定を実施した．採水およびDOについては水表面下1m（表層）と底面上1m（底層）の2点のみで行い，採水したサンプルは実験室に持ち帰り，室内分析を行った．分析項目はT-N，NH_4-N，NO_2-N，NO_3-N，T-P，PO_4-Pである．水温・塩分・濁度については水深0.1mピッチで測定している．また，東横堀川と道頓堀川の上下流の水門に挟まれる区間に位置する測点D1～D4の4点では，採水のみを行った．

また，本観測では河道内の流況と流量を精度良く計測するために，ADCP（RDInstruments製ADCP，1200kHz）を用いて，A2，A4，S2，S3，S4，S6，S9，K2，K6，K7の10測点において，河道横断方向の流速分布を測定した．

観測は1半日潮汐周期（12.5時間）のうち，上げ潮，満潮，下げ潮，干潮時の計4回行った．調査日の潮汐は

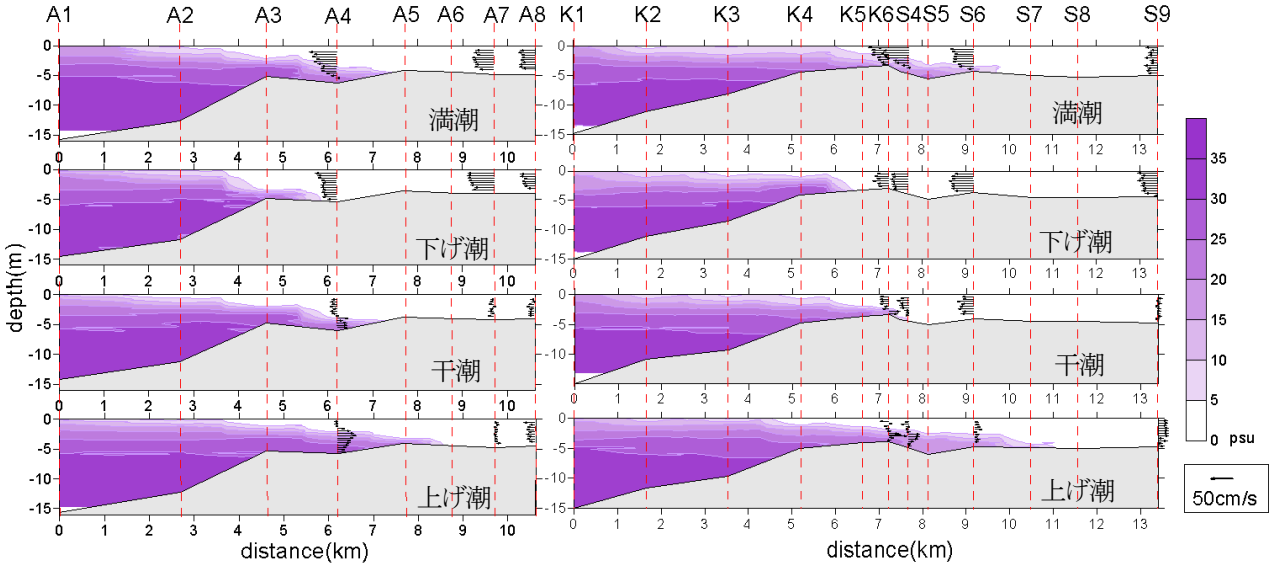


図-4　塩分（psu）の縦断分布（左；安治川ー堂島川　右；木津川ー土佐堀川）

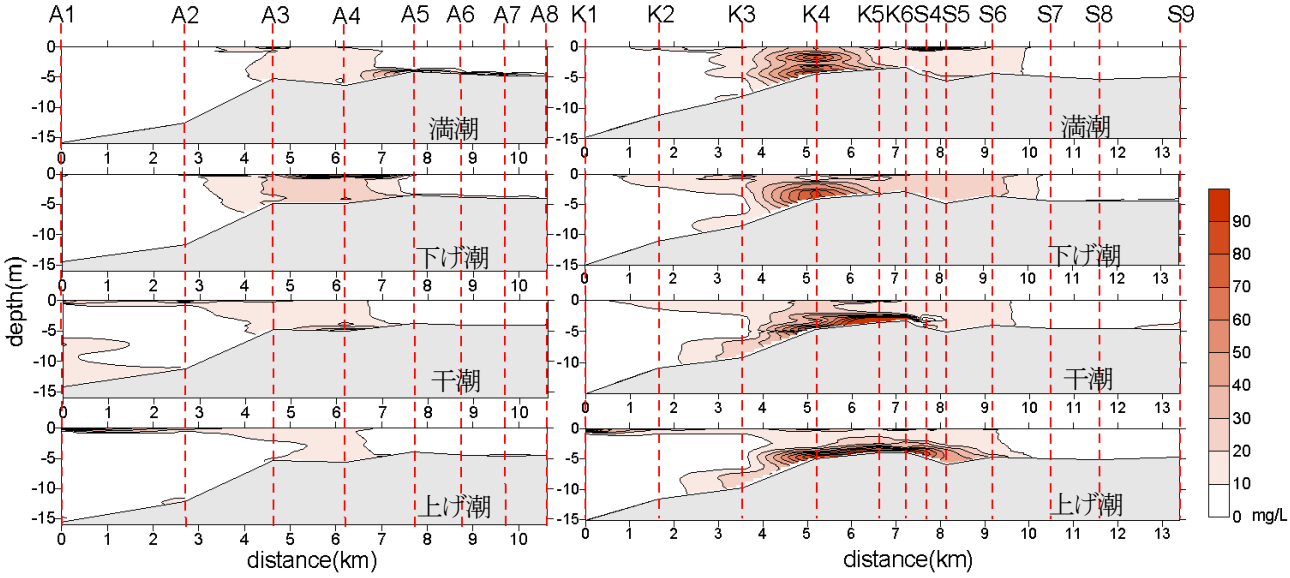


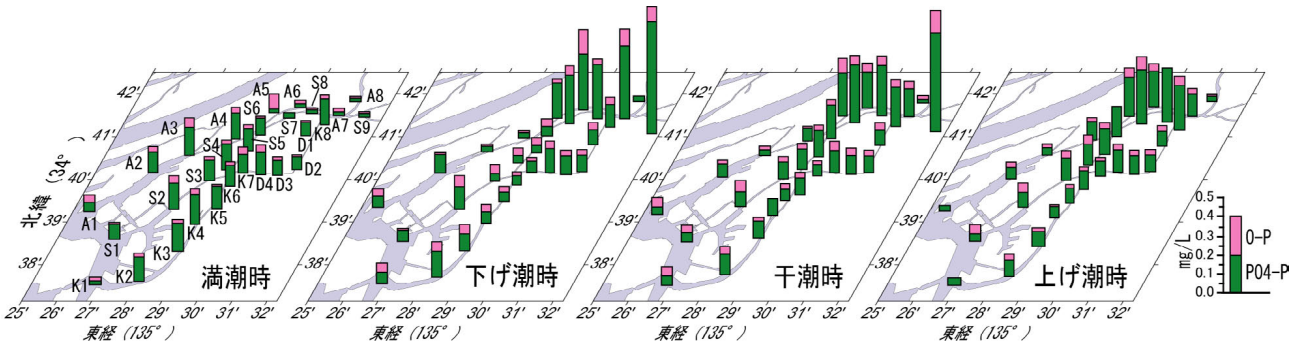
図-5　濁度（mg/l）の縦断分布（左；安治川ー堂島川　右；木津川ー土佐堀川）

日潮不等の小さい中潮で，大阪港における観測された干満の潮位差は約93cmである．A，S，K系統の測点は4隻の観測船で移動しての観測，D系統の測点は陸上を移動しての観測であるため，同じ潮時の観測とは言え，各測点の観測時間にはばらつきが生じている．観測日の降水は無く，天気は晴れ，風向は北西寄りで，風速は3～6m/sであった．

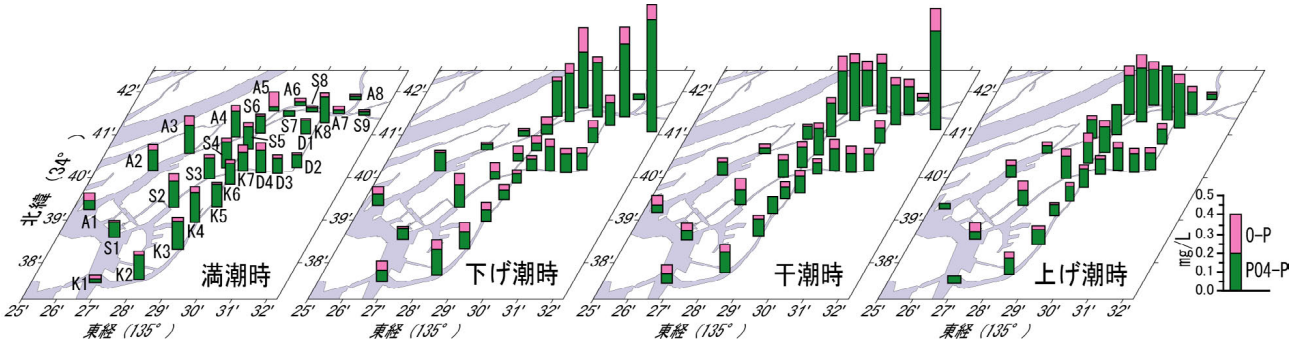
３．観測結果

(1)流況と塩水の侵入

図-3に各潮時における流量フラックスを，**図-4**に各潮時における縦断方向の塩分分布と流況を示す．塩水は安治川，尻無川，木津川の河口から侵入し，堂島川と土佐堀川の合流部付近（測点A4，S6）より上流にまで到達している．流量フラックスは河道横断方向に計測された流速の横断面分布を基に計算した．逆流が観られた測点においては，正負を別に図示している．観測船で移動しながらの計測であったため，各断面間のフラックスの収支については整合性が得られていない．しかし，分流部，合流部では比較的観測時間にずれが少ないことから，概ねの傾向を知ることが可能である．下流端からの流入を無視し，観測された断面積から粗く補間した観測範囲の河道体積を観測結果の上流端流量のアンサンブル平均値で割った値は8～13 時間であった．この図を見ると，上流から流下する河川水は満潮時から下げ潮時にかけて，安治川方面（下げ潮時断面積300m^2）に約2/3，木津川方面（同200m^2）に約1/3流下している．木津川方面に流下した水は尻無川分流部において，木津川河口方向（同160m^2）へ約2/3，尻無川方向（同110m^2）へ約1/3流下していることが分かる．干潮時には，河口に近い測点A4，S3，K6では，下層において，塩水の遡上が始まっており，上げ潮時に顕著になる．上げ潮時に遡上した塩分フラックスは測点A4において1,070psu・m^3/s，測点S6にお



(a) 表層



(b) 底層

図-6　各潮時におけるT-P，O-P，PO_4-P濃度の水平分布

いて24 psu・m^3/sとなり，堂島川土佐堀川へと遡上する塩水はおおかた安治川方面からの遡上であると言える．

(2)濁度の縦断分布特性

河川感潮域では，塩水楔の上流端付近で高濁度域が形成されることがよく知られている．**図-5**に各潮時における濁度の縦断分布を示す．安治川と木津川ともに，塩水の上流端付近において，干潮から上げ潮にかけて，底層で高濁度域が形成されていることが分かる．両河川とも干潮時に河口から6km付近の底層に高濁度の水塊が発生し，上げ潮時には上流に遡上している．観測は満潮時から開始しているので，上げ潮時の観測結果から満潮時の観測結果へと単純に結びつけることができない可能性もあるが，満潮時には上層へ連行，あるいは上層と混合された後，下げ潮時には下流側へ拡散しながら移動しているものとも見ることができる．

(3)リンの濃度分布と潮汐応答特性

採水したサンプルは窒素の各態についても分析を行っているが，ここでは，**図-6**に各潮時におけるリン濃度の水平分布を示す．各測点のO-P，PO_4-P濃度を棒グラフで示している．満潮時の堂島川，土佐堀川より上流（測点A5～A8，S7～S9）では，T-Pが0.04mg/l以下と低く，比較的清浄な大川からの河川水が流入している．下流の安治川・木津川・尻無川のT-Pは0.1～0.2mg/lとなり，上流に比べて，高くなっている．下げ潮時には，寝屋川からT-Pが0.6mg/lを超える高濃度水が流入し，堂島川・土佐堀川に及んでいる．一方，安治川（測点A3，A4），木

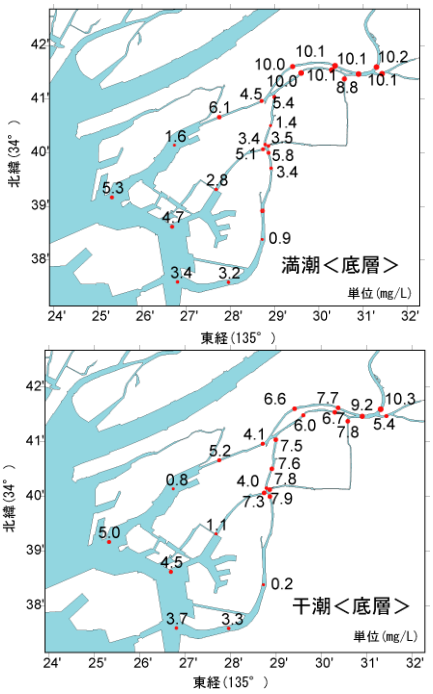


図-7　満潮時と干潮時におけるDOの水平分布

津川の上流部（測点S4，S5）では満潮時に比べてリン濃度が低くなっており，満潮時に堂島川・土佐堀川付近に流下していた大川水がこの付近に達していることが分かる．干潮時にも寝屋川水の影響は強く，堂島川・土佐堀川を越えて，木津川方向へ高栄養塩水が流下している．上げ潮時（測点S9は欠測）には潮位の上昇に伴い，河口から逆流が認められる．一方で，上流端の大川と寝屋川の合流部付近では，大川から河川水の影響が強くなり，寝屋川水は堂島川・土佐堀川・木津川付近に滞留する．

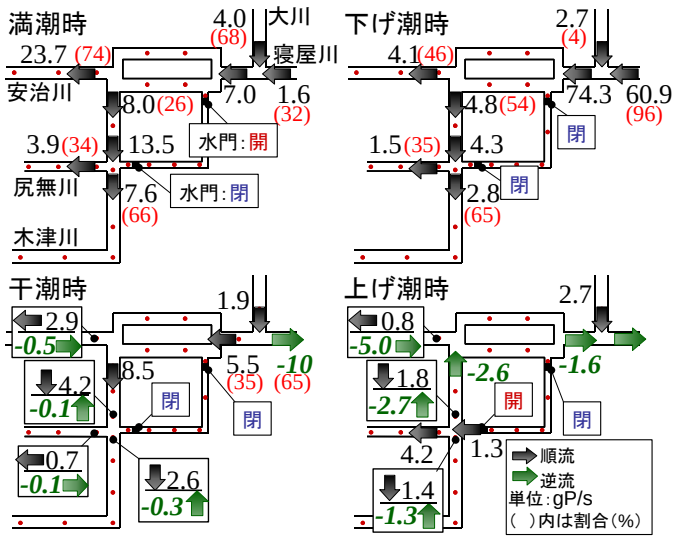


図-8　各潮時におけるT-Pフラックス（gP/s）

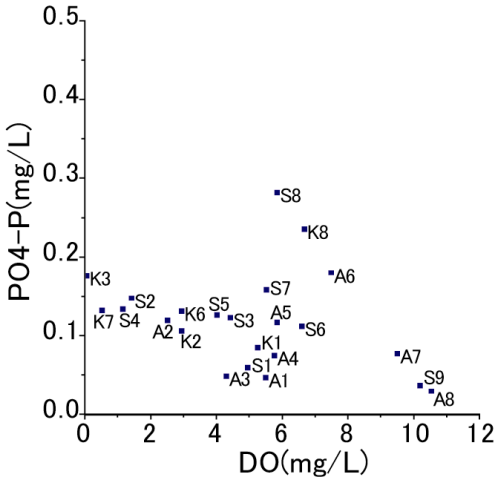


図-9　底層におけるDOとPO_4-Pの関係

(4)底層のDOの水平分布特性

図-7に満潮時と干潮時の底層のDO分布を示す．冬季から春季にかけての淀川河口部のDO飽和度はほぼ100%かそれ以上であり，したがって，水温の低さからDO濃度は10mg/l程度となる．満潮時に大川の水が流入する堂島川および土佐堀川から上流では概ねDOが10mg/l以上となっている．一方，干潮時には堂島川・土佐堀川付近および木津川上流部（測点S4～S6）には寝屋川水が流入しており，DOは7～9mg/lとなっている．港湾内の測点A1，S1，K1ではDOは3.4～5.7mg/lとなっている．今回の対象領域でDOが最も低くなっているのは測点A2，S2，K3であり，潮時によって多少変動するものの，干潮時には0.2～1.1mg/l，満潮時には0.9～2.8mg/lと貧酸素状態となっている．これらの地点の特徴として，直上流側河道部の水深が5m前後であるのに比べて，水深が10m程度で深くなり，港湾域に近いこと，また，図-4の塩分分布を見ると分かるように，潮汐による塩分濃度の変動が少ない測点であることが挙げられる．また，これらの地点のうち，測点S2およびK3は，図-1で示した下水処理場の処理水放流口に近い点も共通の特徴として挙げられる．

4．考察

(1)栄養塩の流出特性

得られた横断面流速分布と採水分析結果から断面を通過した栄養塩フラックスを算出した．ここで，採水した水深は表底層2水深である．このため，栄養塩濃度と塩分濃度に良い相関が得られたことから，塩分の鉛直分布を基に，栄養塩の鉛直分布を仮定し，その水深の流速と横断面積を掛けて，栄養塩フラックスを算出した．ただし，観測船で移動しながらの今回の計測法が原因のフラックスの非整合性についてはすでに述べたとおりである．図-8に各潮時におけるT-Pのフラックスを示す．

上流端でのT-Pフラックスを見ると，下げ潮時の寝屋川からのT-Pフラックスが60.9gP/sと，期間中を通して最も高いだけでなく，市内河川に流入するフラックスのほとんどを占めていることが分かる．これは流量が多く，T-Pも極めて高いためである．フラックスは満潮時にも寝屋川から市内河川へと流入する方向となるが，上げ潮の間に遡上していた大川起源の低栄養塩水が再び流下しているため，フラックスは小さい．

堂島川・土佐堀川を経て，西向きの安治川と南向きの木津川への分流部においては，満潮時および下げ潮時に栄養塩が流下し，満潮時の安治川方面へのT-Pフラックスが最も大きい．分流時のフラックスの割合（安治川方向：木津川方向）は満潮時で3:1，下げ潮時で1:1となる．特に，下げ潮時の木津川方向には，流量フラックスは安治川方向の1/2にもかかわらず，T-Pフラックスはほぼ同じとなっていることから，下げ潮時には寝屋川水の影響が多く見られている．木津川から尻無川へ再度分流する地点においては，満潮時および下げ潮時とも木津川下流方向のT-Pフラックスが尻無川方向の約2倍となっている．

干潮時から上げ潮時にかけては塩水が侵入するが，塩水中の栄養塩濃度は河川水に比して低いため，遡上するT-Pフラックスは小さい．

(2) 流下中の栄養塩とDOの変動特性

図-7においては測点A2，S2，K3において，潮時に関わらず，DOが低いことが示された．この原因として考えられるものの1つは下水処理場からの排水であるが，2007年6月21日（晴天時）に測点S2近くの処理場からの排水を海水と混濁した状態で採水した結果，DOは6.3mg/lと低くはなかった．したがって，下水処理水が直接的に水域のDOを下げているわけではない．また，これらの点は最大濁度点の位置とも異なっている．

大阪市によって行われた平成17年度底質試験結果[5]によると，測点S2，K2の近接観測点における強熱減量は11～21%，COD_{sed}は43～77mg/gとなっている．これらの

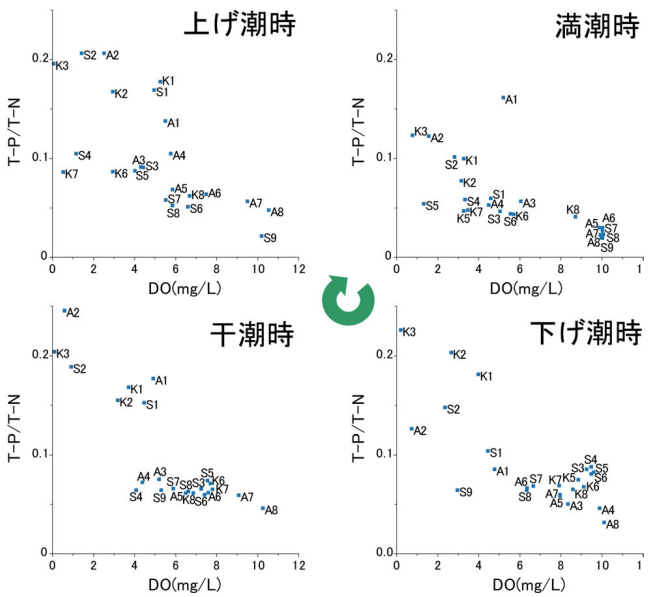


図-10　各潮時における底層のT-P／T-N比とDO

値は採泥時期にもよるが，例えば，大阪湾奥部に位置する尼崎西宮芦屋港内の夙川河口の停滞性水域における夏季の値（11～13%）より高く，同じく夙川河口のCOD_{sed}値（30mg/g）よりもはるかに高い．このように強熱減量やCODsedが高いのは測点A2～A3，S2，K2～K4付近であり，測点A1，S1，K1より沖側では低くなっている．こ河口部のこれらの地点においては，有機物の堆積により，活発な酸素消費が行われているものと推測される．この他の下水処理場近く（正蓮寺川）においても同様に底質に有機物が多く含まれることから，堆積物については下水処理場からの排出される有機懸濁物が起源のひとつである可能性がある．

しかし，これらの底質は，DO最小値をもつ測点A2，S2，K3のみだけが極端に悪いわけではない．図-9には上げ潮時の底層におけるDOとPO4-Pの関係を示す．この関係図では海域のPO_4-P濃度が大川と寝屋川のPO_4-P濃度の間にあることもあり，混合過程がわかりにくい．そこで，得られたデータからT-P／T-N比を計算し，図-10に各測点底層におけるT-P／T-N比とDOの関係を潮時別に示す．例えば，満潮時の図を見ると，DOが約10mg/l，T-P／T-N比が0.01～0.04を示している水塊は大川からの河川水を示している．また，下げ潮時の測点S9は寝屋川からの河川水であるので，下げ潮時から干潮時にかけてのT-P／T-N比が0.05-0.08となる測点は寝屋川の影響を受け，また，大川からの河川水とも混合していく過程が分かる．図-10で，T-P／T-N比が高いのは，期間を通して測点A2，S2，K3である．これらの測点では期間中塩分濃度も高く，下水やその他の排水が起源であるとは考えにくい．

このように高い値を示すのは，嫌気状態における底質からの無機態リンの溶出，あるいは，場合によっては底層水中の有機物の分解・無機化が原因であると推測できる．さらには，測点A2，S2，K3より河口側の測点A1，S1，K1では，DOはやや回復し，また，底泥の性状も幾分良くなることから，T-P／T-N比もやや低くなっているものと考えられる．したがって，塩水の影響を受ける範囲では，T-P／T-N比が0.1～0.2，DOが0～5mg/lのレンジで水塊が潮時に応じて遡上・流下を繰り返し，結果として，測点A2，S2，K3において，最も貧酸素化，無機化した水が現れているものと推察される．

５．まとめ

本研究では，大阪市内河川を対象とし，都市感潮河川における水質の変動特性を把握するため，現地観測を実施し，水質分布特性の解析を行った．本研究の結論は以下の通りである．

(1) 大阪市内河川は潮時に応じて，大川と寝屋川の水が交互に流入する．しかし，寝屋川から流入する時間が長く，また，栄養塩フラックスも大きいために，堂島川・土佐堀川といった市内河川中流部においては，高栄養塩水が滞留しやすい状況にある．

(2) 滞留している高栄養塩水は満潮時に安治川方面へ流れるものが多いが，潮時によっては木津川方向への栄養塩フラックスが大きくなることもあり，木津川の汚濁を助けている．

(3) 底層の塩水楔上流端において濁度の高い領域があり，干潮時から上げ潮時にかけて発生し，上層に拡散した後，満潮時から下げ潮時にかけて河口へ向かっている．

(4) 測点A2，S2，K2にDO最小となる水域が現れた．底質が著しく悪いことから，容易に酸素消費が起こりやすい状態にあると考えられる．また，T-P／T-N比とDOの比較から，塩水が遡上・流下を繰り返すうちに酸素消費が進み，結果として，DO最小域が現れるものと推察される．

参考文献

1) 武田誠，松尾直規：堀川の流れと水質に関する現地調査，水工学論文集，第51巻，pp.-1135-1140，2007.
2) 西村政倫，藤原弘和，黄光偉，佐藤愼司：相模川感潮域における溶存酸素濃度の変動と栄養塩濃度に関する現地観測，水工学論文集，第51巻，pp.-1123-1128，2007.
3) 国土交通省淀川河川事務所，淀川下流域の 河川環境上望ましい流量に関する検討会第4回会資料，www.yodogawa.kkr.mlit.go.jp/activity/comit/flow/4st/pdf/03.pdf，48pp.，2007.
4) 入江政安，西田修三：道頓堀川の水質変動特性と水質管理についての調査解析，水工学論文集，第51巻，pp.-1129-1134，2007.
5) 大阪市都市環境局：大阪市環境白書（平成18年版），pp.資－47,2006.

（2007. 9. 30受付）