

自流のない都市感潮河川の環境構造とその修復に関する研究

A Study on Environmental Structure and Restoration of a Tidal River Without Significant Current in Urban Area

建部祐哉¹・重松孝昌²・坂東良太³

Yuya TATEBE, Takaaki SHIGEMATSU and Ryota BANDO

Field investigation of a tidal river was carried out in order to understand environmental structure at the Doi river flowing in Sakai, Osaka. On the basis of the distribution of velocity, salinity, dissolved oxygen, and so on, responsible mechanism of degraded environment was presumed. As one of possible restoration method, horizontal ejection of fresh water with rich dissolved oxygen just above the bottom was proposed. Impact assessment of the ejection was also presented with experimental results by using the particle image velocimetry.

1. はじめに

かつては城下町として栄えた都市内には、時代の変遷とともに土地利用形態や交通・輸送手段が変化し、昔は貴重な社会基盤として利用されていた運河や堀・濠等の一部が埋め立てられ、今では源流を持たない川として存在しているものがある。このような小河川は流れがほとんど無いために水質が悪化し、周辺住民の住環境を損なっている場合が少なくない。

一方、1978年頃から下水処理水が再利用されるようになってきているが、2003年度末における一年間の全国の下水処理水総量137.4億 m³ の約1.8%である2.5億 m³ しか有効利用されていないのが現状である(国土交通省, 2005)。今後、下水処理水を有効に利用して陸域水路網の再生を図るとともに、前述のような自流のない河川の水域環境の改善に活用すべきであろうと考えられる。

そこで、本研究では、源流がなく自流のない大阪府堺市内を流れる内川・土居川を対象として、その環境構造を明らかにするとともに、その水質改善施策を提案することを目的とするものである。

2. 土居川の水質改善の取り組み

堺市臨海部に位置する内川・土居川は、昔は環濠として利用されていたが、時代の変遷とともに、その一部が埋め立てられ、現在では図-1に示すように、源流のない感潮河川として存在している。急激な人口増加や産業の発展に伴って水質は深刻な状態になっており、特に、上流域では悪臭が漂う劣悪な環境となっている。このよう

な環境を改善するために、堺市では仁徳陵・内川水環境再生プランを策定して水質改善に努めている。たとえば、1998年には汚濁水の流入を削減し、2000年にはエアレーションによる溶存酸素の増加と流動の促進を目的として、土居川上流端で約1.5mの落差を設けて水面から滝状に淡水を表層へ供給している。その結果、BOD値は低下したものの、供給淡水量が2500m³/日以下と極めてわずかな量でしかないため十分な環境改善には至っていないのが実情である。

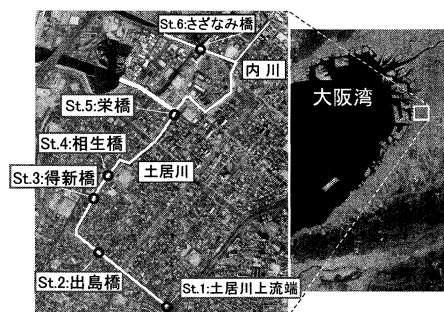


図-1 調査対象地域

3. 環境構造調査

(1) 流動調査

臨海部に位置する土居川は、自流がほとんどないので、河道内の流動は潮汐変動の影響を強く受けると考えられる。そこで、まず、河口部のさざなみ橋(図-1中のSt.6)に於いて、2006年6月5日(小潮)、6月12日(大潮)、7月10日(大潮)、7月17日(小潮)に、一潮汐間にわたって流向・流速の調査を行った。測定結果によれば、河口部における流動は潮汐の影響を受けて上下流方向に変動するが、大潮の場合でさえ0.1m/s以下と非常に微小であった。

1 正 会 員 工(修) (株)建設技術研究所

2 正 会 員 工(博) 大阪市立大学准教授大学院工学研究科都市系専攻

3 国土交通省四国地方整備局

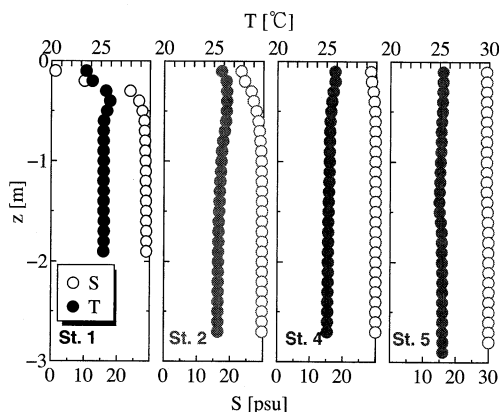


図-2 水温・塩分の分布(9月29日)

(2) 水質調査

塩分、水温、溶存酸素（以後 DO）の空間分布を把握するため、2006年7月18日、9月29日、12月16・20・26日、2007年1月16日に調査を行った。塩分・水温は水面から0.1m間隔で、DOは水面から0.5mまでの表層は0.1m間隔で、水面下0.5mからは水底までは0.5m間隔で測定した。

水温および塩分の計測結果の一例として、9月29日（小潮）の計測結果を図-2に示す。土居川上流端の St.1 では水面に淡水が供給されているために表層付近で塩分が著しく低いが、水面下0.5m 以深ではほぼ30psu と海水であることがわかる。このような明瞭かつ強固な塩分躍層は、下流に向かうにしたがって表層塩分が高くなって緩和される。すなわち、土居川全域はほぼ海水で満たされた川であることがわかる。一方、水温は全水深にわたって、大凡、一様な分布を示しており、明瞭な水温躍層は存在しない。土居川上流端である St.1 の表層で23.5～24.1℃とやや低い値を示すが、密度に及ぼす影響を考慮すれば、水温よりも塩分による影響ははるかに大きいと言える。

このような塩分躍層の影響を受けて、水底付近の DO は著しく低い状態にある。図-3は、調査期間中の底層 DO の空間分布を示したものである。横軸は河口からの距離を表している。図-3によれば、底層 DO は、季節によらず、河口付近で高く、上流へ遡るにつれて低下し、河口から1000m 以上遡ると生物の生存が困難な貧・無酸素状態にあることがわかる。土居川上流端では、川面にボラなどの魚が群れている様子を目視することができるが、本調査結果は生物の生存空間が水表面近傍に限定されていることを示していると考えられる。

(3) 河道内水の交換領域

夏季においては大阪湾奥部の港湾海域の DO は著しく低く、貧・無酸素状態になるが、冬季になれば回復することは周知の事実である。そこで、港湾海域の溶存酸素

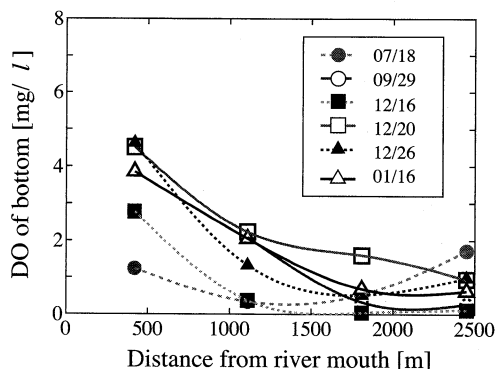


図-3 DO の分布

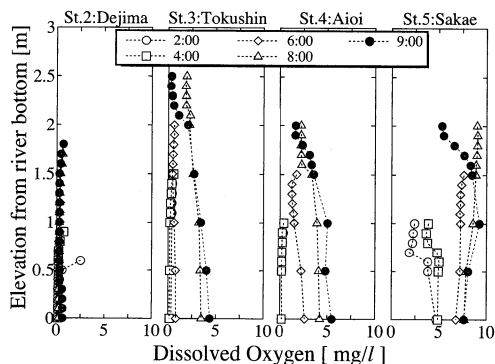


図-4 DO の時・空間変化

が回復する冬季の大潮時に、DO の時・空間変化を計測し、河道内の海水交換領域を推定することとした。調査は2007年2月20日2:00(干潮)～9:00(満潮)で、1時間毎に計測を行った。調査期間中の潮位変動は T.P. -0.33m ～ +0.58m (気象庁、大阪市港区築港)であった。計測結果を図-4に示す。同図によれば、干潮時である2:00においては河口に近い栄橋(St.5)以外の DO は全水深にわたって貧・無酸素状態であった。その後、潮位の上昇とともに、栄橋、相生橋(St.4)、得新橋(St.3)では、底層から DO が回復した。しかし、St.2の出島橋では水位は上昇するものの DO の変化は見られなかった。すなわち、DO の高い外海水は潮位の上昇とともに底層より河道内に侵入し、これによって河口から得新橋(St.3)までの区間では底層の DO が回復することがわかる。

(4) 土居川的环境構造

年間を通して潮位変動を見てみれば、今回の調査期間中の潮位が年間最大潮位ではないので、必ずしも河口から得新橋までの領域を河道内水の交換領域であると断言することはできないが、前述の DO の時・空間分布を併せて考えれば、土居川的环境構造は、図-5のように模式的に表すことができる。すなわち、

(i) 上流端における水面への淡水供給は、河道内の流

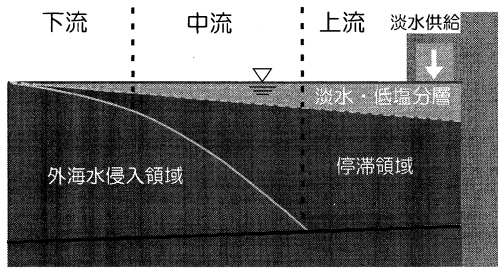


図-5 土居川の環境構造

動を促進するにはその供給量が少なく、密度成層化を助長することになり、その結果、鉛直混合や表層から中・底層への酸素供給を阻害することになっている。

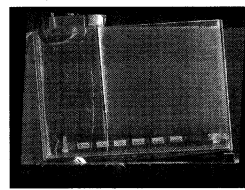
(ii) 潮位変動に伴って外海水が河道内を遡上するが、上流域まで外海水が遡上することはまれであり、その結果、流動がほとんどない上流域は河道内水の流動がほとんどない停滞領域となっている。

したがって、河道内の水質を改善するためには、港湾海域の水質改善対策を併せて考慮しなければならない中・下流域と、河道内のみの対策によって水質改善が期待される上流域とを分離して考える必要がある。本研究では、上流域すなわち停滞領域の水質改善策について考えることとした。

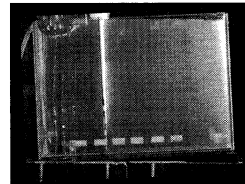
4. 停滞領域の水質改善方法の提案

(1) 淡水供給方法の検討

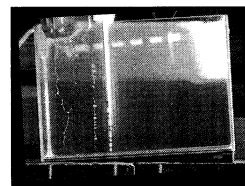
土居川上流端は、川幅約10m、平均水深が2m程度の矩形横断面を有している。前述のように、停滞領域では流路方向および鉛直方向の流動がほとんどなく、このことが底質・水質の悪化を招いていると考えられる。そこで、現在、上流端で水面に供給されている淡水を底層から供給することによって、流動を促進することを提案する。そのための基礎的知見を得ることを目的として、長さ0.3m、幅0.2m、高さ0.25mの水槽を用いて、淡水供給方法および供給流量を変えて実験を行った。水槽は長さ方向に1/19の勾配を設けて塩分30‰の塩水を入れて満水状態とし、後述の要領で淡水を供給することによって水槽の一端から水を越流させることによって、水槽内の水位を一定に保つようにした。淡水は、管径0.01mの管に供給孔径0.002 mの円形放出孔をひとつだけ設けた硬質ビニール管を水底に固定し、淡水供給タンクとチューブと連結させた上で、淡水供給タンク内の水面と水槽内の水面との水位差により一定流量で供給するように設定した。淡水はウランを用いて着色し、ビデオカメラによって淡水の挙動が明らかになるようにした。同時に、塩分計を用いて水槽内の塩分の経時変化を計測した。実験条件を表-1に示す。



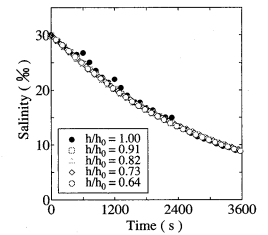
(a) case2-a



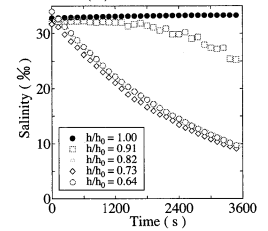
(b) case2-b



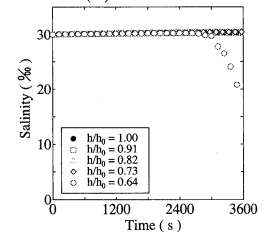
(c) case2-c



(a) case2-a



(b) case2-b



(c) case2-c

図-6 5分後の混合状況

図-7 塩分の経時変化

case2-a, b, cについて、実験開始から5分後の様子を図-6に、また、それぞれのケースの塩分の経時変化を図-7に示す。ここに、 h_0 は水深、 h は塩分計の設置水深を表しており、 $h/h_0=1.0$ は水底を表す。図-6より、水面から淡水を供給するcase2-cでは、水深の1/2付近に明瞭な成層が形成されていることがわかる。水底から上向きに淡水を供給するcase2-aでは、水底近傍では密度成層が形成された状態が維持されている。一方、case2-bでは、水底上を淡水が移動した後に浮力および水槽側壁の影響を受けて上昇し、この過程で周囲流体の運動を促進されて密度成層が崩壊していることがわかる。このことは、図-7の塩分の経時変化を見ても明らかである。すなわち、水底上を水平方向に淡水を供給すれば、成層化を抑制す

表-1 実験条件

case	流量 $Q[\times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}]$	供給位置 $z[\text{m}]$	供給方向
1-a	2.88	0.20(底層)	上向
1-b	2.88	0.20(底層)	水平
2-a	4.21	0.20(底層)	上向
2-b	4.21	0.20(底層)	水平
2-c	4.21	0.02(表層)	水平

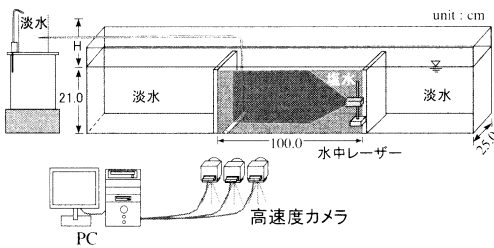
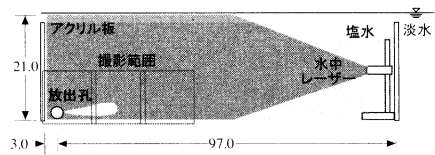


図-8 実河川断面を模した水理実験概要

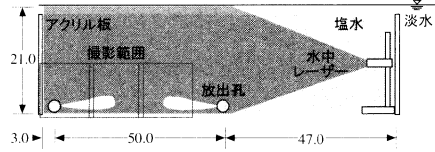
る効果が期待される。ただし、水槽の一端より表層水を越流させているために、表層近傍の流動性が抑制され、その結果、水槽内における流動を促進する結果となり、成層の破壊効果を過剰に評価している可能性がある。

(2) 水底淡水供給の効果

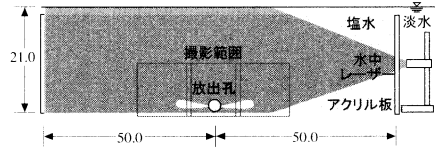
実河川における効果を見積もるためには、河道断面を考慮した実験を行っておく必要がある。そこで、長さ4.0m、幅0.25m、高さ0.5mの亚克力製の水槽を用いて、土居川上流端における河川断面諸元を模した実験（現地断面の約1/10のスケール）を行った。すなわち、亚克力水槽の長手方向中央部を高さ0.2mの亚克力板で幅1.0mとし、この領域内には塩分30%の塩水で満たした。その上で、水槽内の水深が0.21mになるように淡水を入れることによって、密度成層場を形成した。水底から供給される淡水は、塩水と混合しながら表層まで上昇し、その後、水面付近を亚克力水槽内全域へと移流することになる（図-8参照）。本実験では、亚克力板で挟まれた断面を河道横断面と想定しており、紙面の奥行き方向が流路である。本来、表層水は紙面の奥行き方向に流れるように設定しなければならないが、より小規模の実験を行うことは精度の観点から好ましくないこと、水面近傍に浮上した淡水が流路方向に流れなくても河道断面内に留まって過剰な鉛直混合を誘起しなければよいこと、水槽内の水量に対して供給水量が極めて少ないことなどから、本実験条件の下で実験を行っても現地における流況と大差ないものと推測され、このような条件の下で実験を行った。その結果、case2-bの条件下では、放出孔から噴出された淡水は底面上を水平に運動した後に浮力の影響によって浮上するという前述の基礎実験と同様な現象を示したものの、表層に淡水層が形成されて密度成層化が崩壊することはなかった。すなわち、水底より水平に淡水を供給させても成層化を抑制することはできないと考えられる。しかし、底層の流動を促進する効果は期待でき、現在、土居川上流端で表層から供給されている淡水のDOがほぼ飽和状態であることを勘案すれば、DOの豊富な淡水が水底面上を運動することによって底質に酸素が供給されれば、底質改善の効果が期待される。



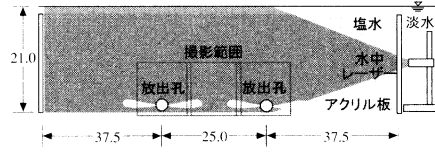
(a) case-A



(b) case-B



(c) case-C



(d) case-D

図-9 実験条件

そこで、底面直上で水平方向に放出される淡水によって、底面上の流体運動が促進される影響範囲を、PIVによって明らかにすることとした。淡水の供給方法は、図-9に示すとおりである。すべての放出孔から放出される淡水総供給量 Q を、1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 6.0 cm³/sと変えて実験を行った。現象がほぼ定常状態となる淡水供給開始10分後からカメラによる撮影を開始し、1/125秒間隔で、20.0秒間行った。トレーサには、ナイロン粒子（平均粒径50 μ m、比重1.02）を用いた。得られた画像データを用いてPIV解析を行って流速の時・空間分布を求めた後、時間平均流速を求めた。図-10に計測結果の一例を示す。図中の丸印は淡水供給パイプを示しているが、この近傍では流速が速過ぎてPIV解析では十分な精度で流速が計測されていないことに注意を要する。放出流量 Q が一定であるので、供給孔の数が増えると共に放出流速は小さくなっている。図-10より、放出された淡水は供給孔から離れるに従ってその噴流幅を広げながら徐々に上昇し、放出流量 Q の増加とともに上昇し始める位置が遠くなることが明らかである。さらに、ブルームの外縁部では淡水の上昇に連行された塩水が引き寄せられている様子が確認される。このように、底層より水平方向に淡水を供給することによって、底面近傍の流動を促進することができることが確認された。

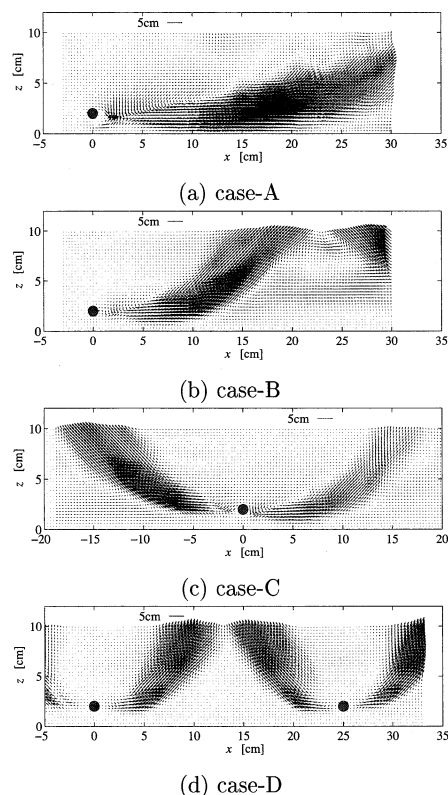


図-10 時間平均流速 ($Q=4.0\text{cm}^3/\text{s}$)

底層淡水供給による影響範囲を定量的に評価するために、供給孔高さにおける供給孔からの水平距離と水平流速の分布の一例を示したものが図-11である。流速は供給方向を正として表している。図-11では、 $x=0.03\text{m}$ が供給孔であるが、これより右側に離れるとともに水平流速は増加し、その後、減少に転じることがわかる。この流速の増加傾向を示す範囲内、特に、供給孔近傍では、前述のように正確な流速を求めることができておらず、実際にはこの範囲の流速はこの図に示されている最大値あるいはそれ以上の値を有すると考えられる。

本研究では、図-11中に示す供給孔高さにおける水平流速が放出方向と同じ方向を有する範囲を淡水放流の影響範囲 L_e と定義することとする(図-11参照)。淡水の供給速度 u と影響範囲 L_e との関係を示したものが、図-12である。同図によれば、両者の間にはほぼ線形の関係があることがわかる。すなわち、淡水を底層から水平に供給する影響範囲を L_e で評価することとすれば、影響範囲は淡水の供給速度によって予測することが可能であると結論づけることができる。

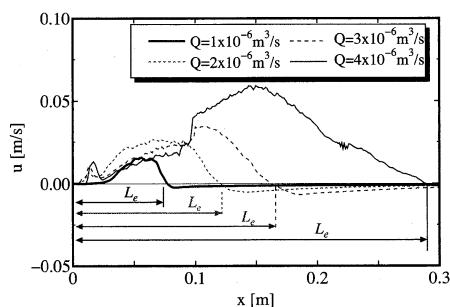


図-11 供給孔高さにおける水平流速分布 (case-A)

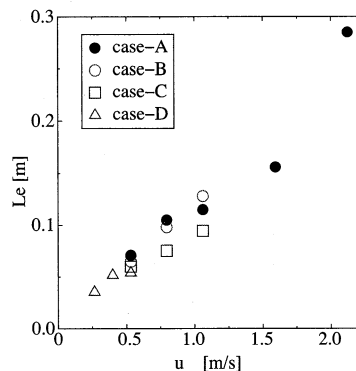


図-12 放出流速と影響範囲との関係

5. 結論

本研究によって得られた主要な結果を要約すると、以下のようなものである。

(1) 上流端における淡水供給は、供給量がわずかであるために密度成層化を助長し、鉛直循環や酸素供給を阻害している。その結果、潮汐変動によっても外海水がほとんど遡上しない停滞領域では、貧・無酸素状態が常態化している。

(2) 河道内における対策のみによって水質改善が期待される停滞領域において、淡水を底面から水平に供給する方法を提案し、その影響範囲について検討した。その結果、本研究で定義した影響範囲は供給流速と線形の関係があることがわかった。

謝辞：本研究の遂行にあたっては、堺市建設局土木課河川水路課にご尽力いただいた。また、本研究の一部は、ニッセイ財団環境問題研究助成の補助を受けて行われた。ここに記して、謝意を表する。

参考文献

- 国土交通省都市・地域整備局下水道部, 国土交通省国土技術政策総合研究所(2005): 下水処理水の再利用水質基準マニュアル, 45p.
- 気象庁: <http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/tide/suisan/>