

日本橋川における水質の現状と その改善に関する解析的検討

FIELD OBSERVATION AND NUMERICAL MODELING APPROACH
TO IMPROVE WATER QUALITY IN THE NIHOMBASHI RIVER, TOKYO

高坂信章¹・林秀彦¹・石塚与志雄²・三宅紀治³・工藤健太郎⁴・守田優⁵
Nobuaki KOHSAKA, Hidehiko HAYASHI, Yoshio ISHIZUKA, Noriharu MIYAKE,
Kentaro KUDO and Masaru MORITA

¹正会員 工修 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島三丁目4-17)

²フェロー会員 工博 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島三丁目4-17)

³非会員 理博 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島三丁目4-17)

⁴正会員 博(工) いであ株式会社 国土環境研究所 (〒224-0025 神奈川県横浜市都筑区早渕二丁目2-2)

⁵正会員 工博 芝浦工業大学 工学部土木工学科 (〒135-8548 東京都江東区豊洲三丁目7-5)

The feasibility of improving water quality in the Nihombashi River, a tidal river in an urban area of Tokyo Metropolis, using a numerical modeling approach was investigated. Field investigation of the river sites clearly exhibited saltwater intrusion and very low dissolved oxygen in the river water.

A numerical model simulating vertical two-dimensional saltwater intrusion combined with the conveyance of the river water was employed to improve dissolved oxygen levels. The simulation results demonstrated that the water-conveyance measure not only improved water quality, but also effectively utilized heat in the river water. The effectiveness of water quality improvement and its influence on the thermal environment depended on locations of withdrawal and reflux points in the water-conveyance.

Key Words : Nihombashi River, tidal river, field observation, dissolved oxygen, numerical simulation

1. はじめに

我が国の大都市は、河口域の沖積平野に位置し、江戸時代以降、自然河川と人工的に作られた堀割・水路などにより豊かな水辺空間が形成されてきた。しかし、高度経済成長、市街地拡大とともに、舟運の衰退、水質劣化により都市河川は隅に追いやられて水と触合う機会も減った。近年、多くの都市河川では、ヘドロの浚渫や下水道整備、導水などによる水質改善が図られている。しかし、大雨時に合流式下水道から汚濁水が流入することや、感潮部における塩水遡上などにより、スカム・悪臭の発生や白濁化などが問題となっており、その改善が求められている。

都市河川の多くは、上流側自然水源からの流入量が少なく、他河川からの分流・合流あるいは下水処理場の放流水などに、その水源を頼っている。一方、下流部は潮汐の影響を受けて塩水が遡上する感潮域となっており、複雑な流動・水環境を形成している。このため、水質改

善のためには、対象河川の動態を的確に把握し、その特性に応じた対策を講じる必要がある。

感潮河川域の水環境特性については、(財)河川環境管理財団¹⁾によって、水理、水質環境、生物・生態系、植生などの観点から既往研究が取りまとめられ、河口密度流の解析や底質輸送に着目した水環境などが整理されている。東京、大阪、名古屋など大都市部の感潮河川については、現地観測を主体とした研究が行われている。例えば、東京では呉ら²⁾が日本橋川・神田川・隅田川および荒川を広範に亘って調査し、BOD、窒素、リンの分布を明らかにするとともに、塩水遡上と大雨時の出水の関係により溶存酸素(DO)濃度が大きく影響を受けることを指摘した。大阪では入江ら³⁾が河川網の水質動態観測と水質分布特性の解析によりその変動特性を明らかにした。名古屋の堀川では武田ら⁴⁾が、現地調査を行い流れと水質の関係を明らかにした。

本研究では、都市空間の有効活用という観点から、水質の改善が急務となっている日本橋川を対象として現地観測を行い、河川縦断・深度方向の水質(水温、塩分、

DOなど) および流速分布を把握した。次に、底質による酸素消費を考慮した鉛直2次元塩水流動解析により現況の再現解析を行い、数値モデルを構築した。この数値モデルに対し、水質改善と河川水熱利用を目的とした河川水導水を模擬した予測解析を実施した。取水・還水位置や導水量により水質改善効果、熱環境影響が大きく変化することを明らかにし、水質改善および河川水熱利用の可能性を示した。

2. 日本橋川の概要

日本橋川は東京都内低地部を流れる延長4.8kmの一級河川である。千代田区の三崎橋で神田川から分流し、中央区の豊海橋で隅田川に合流する(図-1参照)。その全域が感潮域であり、常時は上流からの河川水(平均3m³/s程度の下処理水)流入と、河口からの塩水浸入により水質変動している⁵⁾。日本橋川の水質は、環境基準C類型に指定されている。pH(基準値:6.5~8.5)、BOD(基準値:5 mg/L以下)、SS(基準値:50 mg/L以下)などは環境基準をほぼ満足しているが、DO濃度(基準値:5 mg/L以上)は基準が満足されないことが多い⁶⁾。また、大雨時には周辺の合流式下水道から、処理されないままの生下水が河川内に流入し、水質低下の一因となっている。

両岸には洪水・高潮被害から街を守るために、A.P.+5.5m程度の高さを有するコンクリート護岸が構築されている。川沿いにビルが建ち並び、川に近づくことができない部分が多い。また、ほぼ全川にわたって首都高速道路が河川上に建設されており、日当たりも悪い。

近年、都市河川をアメニティ空間や舟運航路として有効に利用する計画が立案されている。このためには、河川水質が良好で、臭気などが発生しないことが必要である。このような観点から、日本橋川の水質改善が急務と

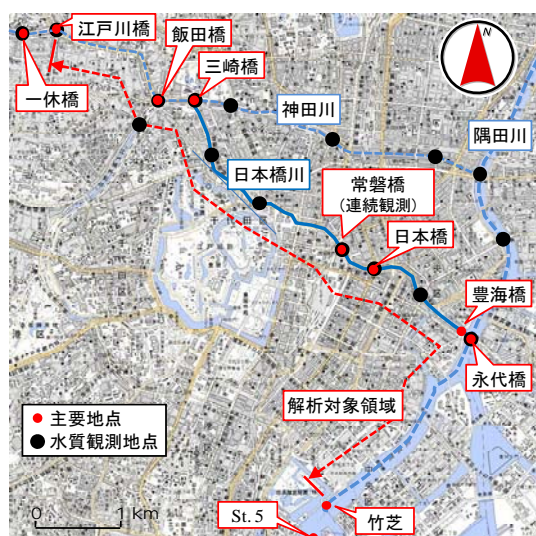


図-1 日本橋川の概要と観測地点、解析領域

考えられる。また、省エネルギー、温室効果ガス削減、ヒートアイランド対策などとして、河川水の有する未利用エネルギーを空調用熱源として有効利用することも計画されている。

3. 日本橋川の水質観測

(1) 観測条件

観測は2007年8月6日8:00~7日8:00の期間で実施した。観測期間の気象等の条件を図-2に示す。東京港東京灯標における潮位⁷⁾は8月6日昼間の変動量が0.3m程度と小さく、小潮に相当する。千代田区により観測された日本橋川最上流部に位置する三崎橋付近の河川水位⁸⁾は、潮位にほぼ追従する形で変動しており、日本橋川全域が感潮域となっている。

東京(大手町)における気温は夜間26°C、昼間32°C程度の範囲で変動している。8月1日以降、降雨はほとんどない条件であった。

(2) 観測手法

a) 多点同時観測

日本橋川、神田川、隅田川および外濠の水質を広域的に評価するために、図-1に示す16地点において8月6日10:30(満潮)、12:30(下潮)、15:30(干潮)、18:00(上潮)の4回、多項目水質計により深さ0.5mごとに観測した。

b) 定点連続観測

日本橋川河口より2.0km地点に位置する常磐橋(図-1参照)において、30分ごとに観測した。多項目水質計および流向流速計により深さ0.5mごとの観測を行った。

(3) 観測結果

a) 多点同時観測

観測結果の一例として、飯田橋、日本橋川6地点および永代橋(隅田川)で観測した8月6日10:30の縦断方向水質分布を図-3に示す。

(a)に示す水温分布は、上流側表層、河口側表層に高温域が認められる。河口側高温域はこの後、時間の経過

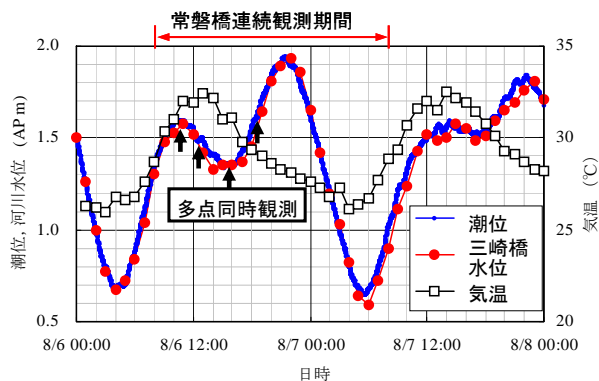


図-2 観測実施時の潮位、河川水位、気温

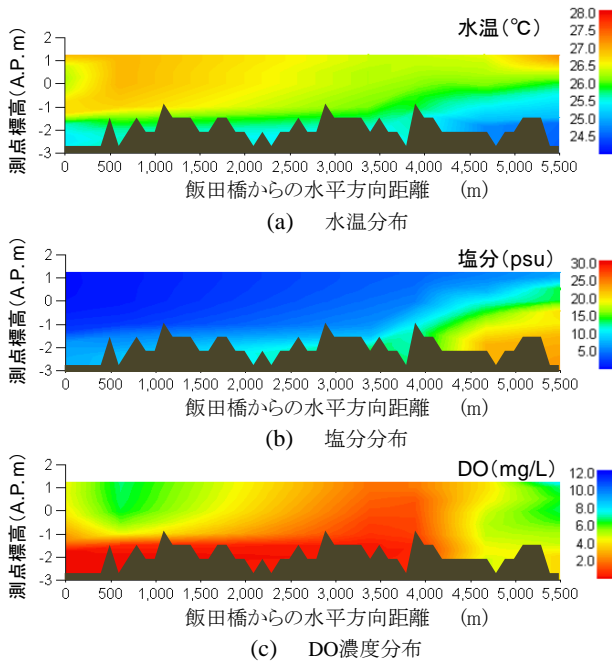


図-3 多点同時観測結果 (2007年8月6日 10:30)

とともに拡大する傾向が認められた。上流側の高温域は上流側から流入する河川水の水温が高いこと、河口側高温域は日射による影響と考えられる。中流域の水温が表層でもさほど高くない原因として、河川上にかかる首都高速道路高架の影響が考えられる。

(b) に示す塩分分布は、河口側からの塩水楔浸入状況を明確に表している。(c) に示すDO濃度分布は、上流側表層と河口域を除くほぼ全域が、生物の生育に適さない2mg/L以下の貧酸素状態を示している。上流側底層凹部にも貧酸素水塊が存在する。このようなDO濃度の低さが、日本橋川の水質に関わる最大の問題となっている。

b) 定点連続観測

常磐橋で観測した水質および流速の深度分布を図-4に示す。8月6日 21:30(満潮), 8月7日 01:30(下潮), 05:30(干潮), 08:00(上潮) の4回のデータをプロットした。

水温は、(a) に示すように表層が高く底層が低い分布を示している。表層、底層の水温変化は小さく、中間層では1°C程度の水温変化が生じている。(b) に示す塩分は底層ほど高い値を示しており塩水楔の浸入を表している。塩分も表層、底層における変化は小さく、中間層で大きく変化している。塩淡水境界の高さが潮汐により上下することを示している。(a) の水温分布と(b) の塩分分布はほぼ対称形を示しており、潮汐による塩水浸入が水温変化の原因となっていることがわかる。

(c) にDO濃度分布を示す。底層は0.5mg/L以下の非常に低い値を示している。潮位変動によりこの貧酸素層の厚さが変化している。下潮から干潮にかけては、上流から流下する比較的DO濃度の高い水の影響で、表層・中間層のDO濃度が増加する。上潮から満潮にかけては、下流側から遡上する塩分が高く、DO濃度の低い水に押

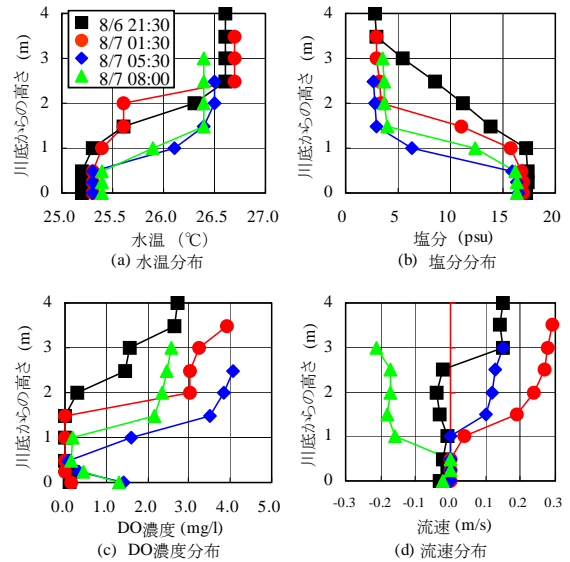


図-4 常磐橋 定点連続観測結果

し上げられる形で、表層・中間層のDO濃度が減少する。(d) に流速分布を示す。満潮～下潮～干潮の期間(8月6日 21:30～8月7日 05:30)は表層において順流(上流から下流への流れ)が生じているものの、底層1m程度はほとんど流れがない。上潮時(8月7日 08:00)には逆流(下流から上流への流れ)が発生しているが、このときも底層0.5m程度はほとんど流れが認められない。

4. 日本橋川の水質解析

(1) 解析手法の概要

日本橋川の現状を再現し、水質改善などの操作を行った場合の効果を予測するために、数値解析を実施した。本研究では、鈴木らの研究⁹⁾を参考として、鉛直2次元塩水流動モデルを構築し、日本橋川の塩水流動およびDO濃度の解析を行った。

このモデルでは、流れを既定する物理量(流速、水温など)が横断方向に一樣であると仮定し、本来、3次元である基礎方程式を横断方向に積分して得られる鉛直2次元の基礎式を用いた。鉛直2次元連続式、ブシネスク近似した運動方程式、 $k-\epsilon$ 乱流モデル式、および水温・塩分・DO濃度の輸送方程式により基礎式を構成した。数値拡散の発生を抑制するために、移流項の解析には高精度風上差分の一種であるTVDスキーム¹⁰⁾を用いた。圧力解放としてはSMAC法を用いた。なお、 $k-\epsilon$ 乱流モデルのモデルパラメータは、鈴木らの研究⁹⁾と同様に設定した。

計算項目は、水位、流速、圧力、水温、塩分、DO濃度であり、DO濃度に関しては、流れ場に基づく移流拡散のほか、水面における酸素の交換、河川水および底質による酸素消費を考慮した。具体的な設定方法は後述する。

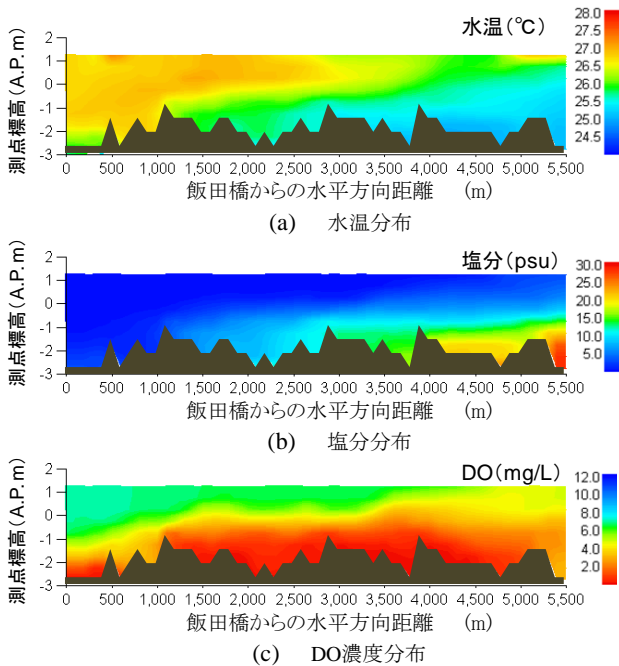


図-5 現況再現解析結果 (2007年8月6日 10:30)

(2) 解析条件

解析対象領域は図-1に示す江戸川橋～竹芝（隅田川）までの10.5km区間とした。これは日本橋川のみを解析対象とした場合、適切な境界条件を設定することが困難なことによる。メッシュ分割は、縦断方向100m間隔、鉛直方向0.5m間隔とした。河道地形は、東京都建設局による平成15年度河川堆積土測量結果¹¹⁾に基づいて設定した。河川内の高速道路橋脚については、これを円柱で近似し、その流体抵抗を方程式中で考慮した。また、高架による日射遮蔽の影響として、水面上に高架のある区間では水面上に到達する全天日射量を最大90%低減して計算した。

解析対象期間は、前出の観測期間が含まれる2007年8月1日～14日までの14日間とした。解析のタイムステップは、解の安定性を考慮し5秒とした。

上流側の境界条件として、江戸川橋地点に水温27.2℃（東京都環境局⁶⁾による一休橋地点平年値）、飽和DO濃度、塩分 0 psu の流入水3m³/s（落合水再生センターからの平均的な放流量）を与えた。

下流側境界条件として、竹芝地点に東京港の潮位⁷⁾を与えた。また、この地点の水温を25.3℃、DO濃度を8.9 mg/L（東京都環境局⁶⁾による St.5 地点平年値）とした。塩分については水面下1mまでが5psu、水面下4m以深が32psuとし、この中間層をスプライン補間で与えた。

水面における再曝気係数は、村上の式¹²⁾に基づいて設定した。水中の酸素消費速度は、現地のBOD値を参考に0.5 mg/L/day の一定値を与えた。また、観測結果から日本橋川においては、底面における酸素消費が相当量あるものと推測される。本解析においては、底面における酸素消費量を酸素消費速度で見積もることとし、既往の文献^(例えば 9), 13) および予備解析結果をもとに、酸素消費速度

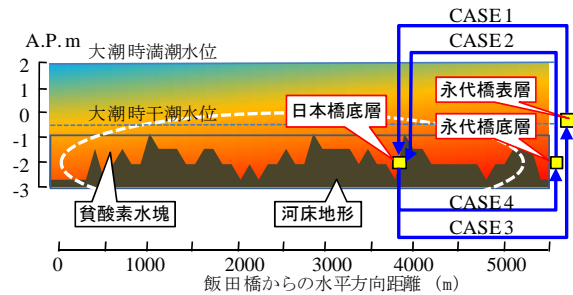


図-6 取水・還水地点の設定ケース模式図

を0.5～2.5 g/m²/day に設定した。

(3) 現況再現解析結果

観測結果を再現しうる解析モデルを構築するために現況再現解析を実施した。以下に観測結果と解析結果を比較し、その妥当性を検証する。

観測結果と同様に、8月6日10:30における縦断方向水質分布を図-5に示す。図-3に示した観測結果と比較すると、(a)の水温分布、(b)の塩分分布は、両者がよく一致している。(c)のDO濃度分布は、底層に存在する貧酸素水塊の状況は再現できている。しかし、表層のDO濃度は解析結果のほうが高い、河口側のDO濃度は観測結果のほうが高い、など一部不整合が認められる。

この原因として、水面の再曝気係数の計算値が実際より大きいこと、表層水の酸素消費速度が低く見積もられていること、などが考えられる。しかし、底層の貧酸素状態は良好に再現されていることから、以降の検討には重大な影響は及ぼさないものと判断した。

(4) 対策効果評価解析結果

前項により、現況を再現した解析モデルが構築された。このモデルに対し、水質改善および熱利用を目的とした導水を行ったときの水質・水温変化を予測解析する。

a) 取水・還水地点による比較

河川水の水質改善と河川水熱利用（夏季の冷熱利用）を想定し、河川から取水した水を飽和DO濃度とするとともに、取水水温+5℃として還水する操作を模擬した。取水・還水地点を図-6のように変化させた4ケースについて解析した。

CASE 1, 2は下流側隅田川合流点（永代橋表層または底層）で取水した水をDO濃度の低い地点（日本橋底層）に導水する操作、CASE 3, 4はDO濃度の低い地点（日本橋底層）で取水し、下流側隅田川合流点（永代橋表層または底層）に導水する操作を模擬している。導水量はいずれも4m³/sとした。

解析結果を表-1および図-7に示す。表-1には小潮満潮時（2007年8月6日21:30）の水質・水温を無対策時解析結果との変化量として示す。塩分およびDO濃度は、日本橋より上流2km区間の底層（A.P. 0m以深）での変化量の平均値を、水温は、日本橋川全区間、全層における水温変化量の最大値を示した。図-7は小潮満潮時（2007年

表-1 取水・還水地点による水質・水温変化量
(小潮満潮時：2007年8月6日 21:30, 導水量4m³/s)

CASE	取水地点	還水地点	底層塩分 (psu)	水温最大値 (°C)	底層DO濃度 (mg/L)
1	永代橋表層	日本橋底層	-2.0	10.5	5.0
2	永代橋底層	日本橋底層	12.0	8.8	4.6
3	日本橋底層	永代橋表層	-2.2	11.8	3.8
4	日本橋底層	永代橋底層	-1.9	4.8	4.2

8月6日21:30)における日本橋川全区間の水温上昇量分布をコンタ図で示している。

これらの結果より、DO濃度は、いずれのケースも3.8mg/L以上の増加が認められ、大きな効果が期待できる。塩分は、濃度の高い永代橋底層の水を日本橋地点に導水するCASE 2において大きく増加する結果となっているが、それ以外のケースでは2 psu 程度減少している。水温は、いずれのケースも上昇しているが、CASE 4の水温上昇量は、他のケースに比べて小さく、このような導水を行えば、熱環境影響を抑えることが可能である。

b) 河床条件による比較

CASE 4が他のケースに比べて水温上昇が小さい原因として、塩分が高く比重の大きい水を下流側底層に還水することにより、上流側への遡上が抑制されていること

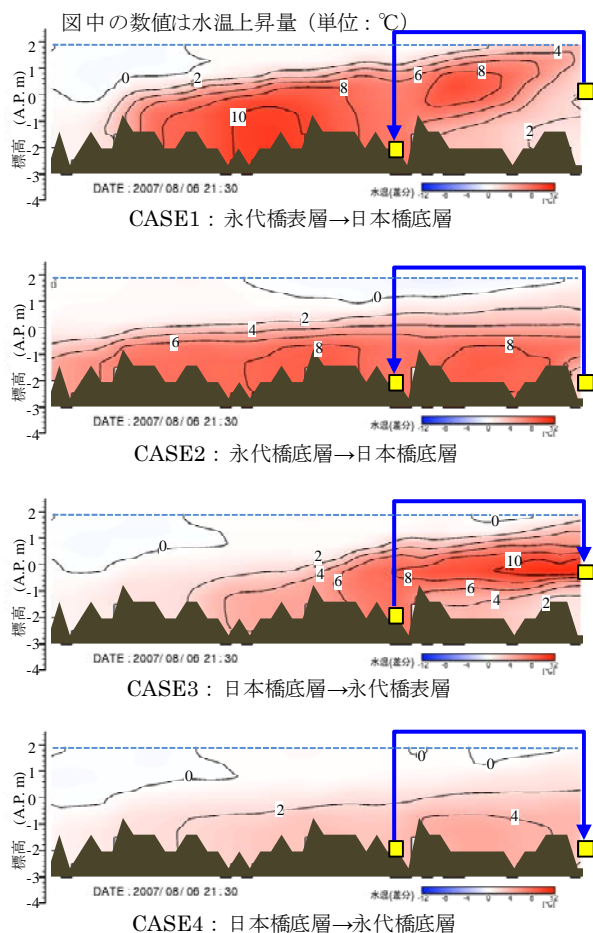


図-7 取水・還水地点による水温上昇分布の比較
(小潮満潮時：2007年8月6日 21:30, 導水量4m³/s)

表-2 河床条件による水質・水温変化量
(小潮満潮時：2007年8月6日 21:30, 導水量 4m³/s)

CASE	河床条件	底層塩分 (psu)	水温最大値 (°C)	底層DO濃度 (mg/L)
4	現況河床	-1.9	4.8	4.2
4'	河床平坦化	2.4	7.0	4.0
4''	河床平坦化 + 河口埋没堰	-5.6	3.4	4.5

が考えられる。この効果には、現況河床の凹凸が強く影響していることが推察される。

これを確認するために、河床条件を変化させた解析を行った。現況河床 (CASE 4) に対し、河床を計画河床高さ (A.P. -2.5m) まで掘削して平坦化したケース (CASE 4')、さらに日本橋川河口付近に埋没堰 (天端高さA.P. -1.0m) を設置したケース (CASE 4'') を比較した。結果を表-2および図-8に示す。表-2は表-1と同様に現況との変化量で示している。図-8は小潮満潮時 (2007年8月6日21:30) の塩分浸入状況を比較している。

この結果より、河床掘削を行い平坦化した場合、塩水が深く浸入し、水温上昇も大きくなる。浚渫などにより河床の凹凸が平坦化された場合には、河口付近に設置した埋没堰が有効に機能することがわかる。

c) 導水条件による比較

これまでの解析では、水質改善と河川水熱利用を想定し、飽和DO濃度、取水水温+5°Cにして還水する条件を与えた。CASE 4のような取水・還水条件であれば、低DO濃度水を対象領域から除去するだけでも水質改善の効果が期待できる。そこで、河川水の導水のみを行うケース (CASE 4a: 取水した水をそのまま還水)、導水時に河川水の熱利用を行うケース (CASE 4b: 取水水温+5°Cとして還水) の解析を実施し、CASE 4と効果を比較した。

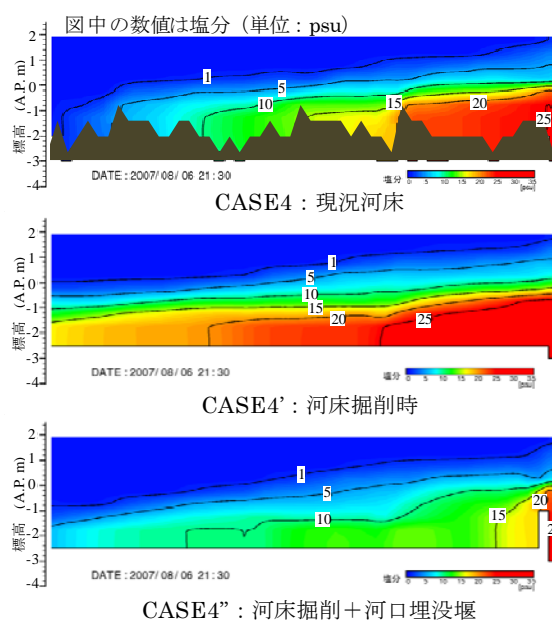


図-8 河床条件による塩分浸入状況の比較
(小潮満潮時：2007年8月6日 21:30, 導水量4m³/s)

表-3 導水条件による水質・水温変化量
(小潮満潮時：2007年8月6日 21:30, 導水量 4m³/s)

CASE	導水条件	底層塩分 (psu)	水温最大値 (°C)	底層DO濃度 (mg/L)
4a	導水のみ	-2.9	0.9	3.5
4b	熱利用	-1.9	4.8	3.5
4	水質改善+熱利用	-1.9	4.8	4.2

結果を表-3に示す。表-1と同様に現況との変化量を示した。河川水を導水する操作だけ (CASE 4a) でも、河床に滞留している低DO濃度水が取水除去され、河川水の循環が促進されるため、DO濃度が3.5mg/L増加している。熱利用を行った場合 (CASE 4b) でもこの効果は変化しない。また、熱利用後の水を飽和DO濃度に水質改善して還水することにより、さらに0.7mg/L程度のDO濃度改善効果が期待できる。

d) 導水量による変化

CASE 4b (日本橋川底層から永代橋底層へ導水：熱利用+5°Cのみ実施) の条件のもとで、導水量を変化させた場合の水質改善効果、熱環境影響を評価した。結果を図-9に示す。小潮満潮時、大潮満潮時についてDO濃度増加量、水温上昇量を導水量との関係で図示した。導水量を増やすことにより、DO濃度改善効果は高まるが、水温上昇量も大きくなる。水質浄化のための必要導水量と、熱環境影響という観点からの可能導水量は異なる。熱利用の条件 (還水時の水温上昇量) や運転時間を調節して、効果的な導水方法を検討する必要がある。

5. おわりに

日本橋川の水質改善および河川水熱利用を目的とした現地観測、数値解析を実施した。本研究で得られた知見を以下に列挙する。

- ① 現地観測により、日本橋川全体の水温・塩分・DO濃度の縦断分布、経時変化を把握した。その結果、日本橋川への塩水楔の浸入状況、全般的な貧酸素状態などを確認した。
- ② 鉛直2次元塩水流動解析を用い、観測結果を再現する数値モデルを構築した。
- ③ 構築した数値モデルに対し、河川水導水による水質改善、河川水熱利用を模擬した予測解析を実施した。
- ④ 導水時の取水・還水地点により、水質改善効果や熱環境影響が異なる。日本橋底層付近から取水し、下流側永代橋底層付近に還水する方法が効果的かつ環境影響が小さい。
- ⑤ 河床の凹凸が塩分・高水温水・低DO濃度水の遡上の抑制に大きく寄与している。浚渫などによる河床条件変更時にも有効な対策とするためには、河口付近に埋没堰を設置することが有効である。

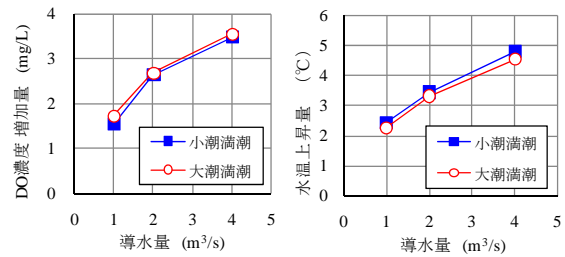


図-9 導水量によるDO濃度および水温の変化状況

- ⑥ 導水操作で、DO濃度が低い地点の水を除去するだけでも大きなDO濃度改善効果が期待できる。飽和DO濃度に改善して還水すると、さらにDO濃度が増加するが、その効果はあまり大きくない。
- ⑦ 導水量を増やすことにより、DO濃度増加量、水温上昇量とも増加する。

謝辞：神田川・日本橋川の河床データは東京都建設局第一建設事務所より提供いただいた。現地調査にあたっては、芝浦工業大学学生諸氏の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献・参照データ

- 1) (財) 河川環境管理財団 編：感潮河川の水環境特性に関する研究，(財) 河川環境管理財団，2000。
- 2) 呉修一，渡邊暁人，多田直人，山田正：都市河川感潮域における水質の空間分布特性に関する現地観測，水工学論文集，第52巻，pp.1105-1110，2008。
- 3) 入江政安，西田修三，庄路友紀子：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，水工学論文集，第52巻，pp.1099-1104，2008。
- 4) 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。
- 5) 高坂信章，石塚与志雄，内山伸，守田優：日本橋川感潮域における水質変動特性，第35回土木学会関東支部技術研究発表会，II-108，2008。
- 6) 東京都環境局：公共用水域水質調査結果，<http://www2.kankyo.metro.tokyo.jp/kansi/mizu/sokutei/sokuteikekk/a/kokyou.htm>
- 7) 東京港湾局潮位記録：http://www2.kouwan2.metro.tokyo.jp/users/tidedata/Tide_Data/
- 8) 千代田区河川情報システム：<http://chiyoda-kasen.on.arena.ne.jp/>
- 9) 鈴木伴征，石川忠晴，銭新，工藤健太郎，大作和弘：利根川河口堰下流部における貧酸素水塊の発生と流動，水環境学会誌，Vol.23，No.10，pp.624-637，2000。
- 10) 越塚誠一：数値流体力学，培風館，1997。
- 11) 東京都建設局：平成15年度河川堆積土測量。
- 12) (社) 土木学会：水理公式集 [平成11年版]，p.403，1999。
- 13) 茂庭竹生：底泥の酸素消費量に関する室内実験，水質汚濁研究，Vol.9，No.4，pp.231-238，1986。

(2008. 9. 30受付)