

中川運河における水質の季節変化に関する研究

指導教員 富永晃宏 教授

森下 真那人

1. はじめに 中川運河は名古屋港側の中川口閘門と堀川との接合部に位置する松重閘門により区切られた総延長8.2kmの運河であり、かつては名古屋港と市街中心部を結ぶ物流の軸として中部の産業発展に貢献してきた。しかしながら、現在の中川運河は、閉鎖性に伴う水質悪化が問題となっており、主な要因として 1) 富栄養化による植物プランクトンの内部生産、2) 密度成層による底層の貧酸素化が挙げられている。そこで、本研究は運河における水質の季節変化について、夏季及び冬季の現地観測と水質分析に加え、数値計算により検討、考察を行い、運河の水環境改善に寄与する手法の提案を目的とする。

2. 水質観測

2-1. 定点観測、時間鉛直分布の観測の概要 特に汚濁が激しいとされている運河の最奥部に位置する東支線西日置橋にて冬季に定点観測、夏季及び冬季に時間鉛直分布の観測を実施した。観測地点を図-1に、観測日程を表-1に示す。定点観測は、2014年12月8日から12月22日の2週間にかけて多項目水質計（東亜 DKK 製 WQC-24）を表層（水面から0.5m）、中層（水面から1.5m）、底層（水底から0.5m）に設置し、5分毎にpH、溶存酸素濃度（DO）、塩分、水温、クロロフィルa（中層、Chl.a）、濁度、酸化還元電位（底層、ORP）を測定した。時間鉛直分布の観測は、2014年1月9日6:00~24:00（冬季）、5月15日6:00~24:00（春季）、8月1日6:00~24:00（夏季）の18時間、計3回実施した。多項目水質計を用いて、30分毎に水面から0.5m間隔で鉛直方向にpH、DO、塩分、水温、Chl.aを計測した。西日置橋の水深は約3m（N.P.0.2m）である。

2-2. 移動観測の概要 移動観測は、2015年8月5日（夏季）と12月1日（冬季）に多項目水質計を使用し、図-1に示す9か所の橋を観測対象とし、いろは橋（St.1）か

ら上流に向かって西日置橋（St.5）まで移動し、計測を実施した。水面から0.5m間隔で鉛直方向にpH、DO、塩分、水温、Chl.aを計測した。ただし、夏季は水質計の不調により、いろは橋での水質観測は実施していない。

3. 観測結果と考察

3-1. 定点観測結果から見た冬季のDOの変化特性

図-2に2014年12月8日~12月22日に東支線西日置橋にて実施したDOの定点観測結果を示す。表層（水面から0.5m）のDO濃度は観測期間を通じて6~20mg/Lであり、降雨の多かった観測期間の後半では、過飽和である場合が認められる。中層（水面から1.5m）のDOは、表層DO濃度に追従する時間変化特性を示す。底層（水底から0.5m）のDO濃度は、恒常的に底質による酸素消費を伴い2mg/L以下の貧酸素であることが多いが、12月17日の12時頃から18日にかけて、底層のDO濃度が急上昇し、表層及び中層のDO濃度とほぼ一致していることが認められる。この原因として、12月16日の降雨による未処理水（淡水）の流入で、DO濃度は一時的に低下するものの、その後内部攪乱に伴う鉛直混合が促進され、表層と底層の水温差が減少し、循環により水温成層が解消されたことが挙げられる。加えて、未処理水が含有する豊富な栄養塩を利用した植物プランクトンの生産活動により、一時的に全層にわたりDOが高まったことが考えられる。また12月17日の午後にかけて、Chl.a濃度が200µg/Lを超える急上昇を示したことから、この時間帯に植物プランクトンの生産活動が促進されたことが示唆され、DO濃度上昇を裏づける結果となった。

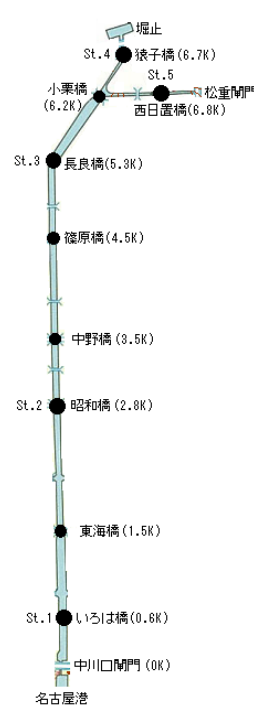


図-1 観測地点

表-1 観測日程

観測形態	観測日	観測時間	観測地点
定点観測	2014.12.08~12.22	2週間	西日置橋
時間鉛直分布の観測	2014.01.09	6:00~24:00(18時間)	西日置橋
時間鉛直分布の観測	2014.05.15	6:00~24:00(18時間)	西日置橋
時間鉛直分布の観測	2014.08.01	6:00~24:00(18時間)	西日置橋
移動観測	2015.08.05	10:00~21:00	図-1
移動観測	2015.12.01	10:00~17:30	図-1

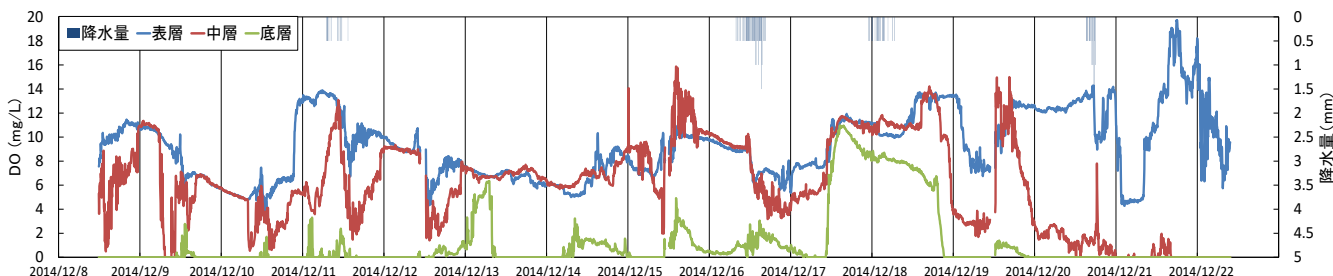


図-2 DO 定点観測結果（西日置橋） 2014年12月8日~12月22日

3-2. 時間鉛直分布から見た季節変化及び時間変化特性

図-3 (a) ~ (f) に2014年8月1日(夏季)及び2014年1月9日(冬季)の東支線西日置橋におけるDO, 水温, Chl.aの時間鉛直変化を示す。計測時間は夏季・冬季ともに6時~24時の18時間である。図-3 (a) に示す8月(夏季)のDO濃度は、底質による酸素消費に伴い、中層以下で貧酸素水塊が広がっていることが認められる。それに対し、図-3 (b) に示す1月(冬季)のDO濃度は、全層にわたり高濃度で行き渡っていた。図-3 (c) に示す8月(夏季)の水温は、日射により表層水温が上昇し、底層と2~3°Cの水温差が生じる水温成層が形成されていることがわかる。図-3 (d) に示す1月(冬季)の水温は、表層と底層における水温差が減少し、水温成層が解消されており、前述の定点観測にて水温成層が未解消だったという結果とは異なる。図-3 (e) に示す8月(夏季)のChl.a濃度は表層では40 $\mu\text{g/L}$ 程度で、底層では60~80 $\mu\text{g/L}$ と表層より底層で高濃度となった。これは強い日射の影響で、植物プランクトンが強光阻害を起こしたと考えられる。図-3 (f) に示す1月(冬季)のChl.aは水温成層が破壊されたことで、栄養塩が空間的に行き渡ることが考えられる。その結果、植物プランクトンの増殖を促進し、冬季のDO濃度を高めたものと推察される。塩分は冬季の表層で若干の低下が確認されたが、夏季・冬季ともにほぼ一様であり、成層は形成されていなかった。

3-3. 移動観測結果から見た季節変化及び空間変化特性

図-4 (a) ~ (f) に2015年8月5日(夏季)と2015年12月1日(冬季)にDO, 水温, Chl.aの縦断方向の鉛直変化を示す。図-4 (a) ~ (b) に示す夏季及び冬季におけるDOについてみると、夏季のDOは、時間鉛直分布と同様の傾向であった。冬季のDOは、夏季のDOに比べ、貧酸素水塊の層が下に押し下げられ、表層から中層は夏季よりも相対的に高いことがわかる。図-4 (c) に示す夏季の水温は、表層が高く、底層が低い夏季の水温成層の形成が認められる。反対に、図-4 (d) に示す冬季の水温は、気温低下により表層水温が下がり、底層が高くなる冬季の水温成層が確認される。水温とDOとの関係は、夏季は正の関係($R=0.800$)であり、冬季は負の関係($R=-0.896$)であった。DOは水温成層によらず、常時、表層が高く底層が低い鉛直分布を形成していることがわかるが、水温成層との関係性は明白ではない。図-4 (e) ~ (f) に示す夏季及び冬季におけるChl.aの結果について、夏季のChl.aは強い日射により植物プランクトンが強光阻害を起こしたと考えられ、低い値に留まっている。しかし、冬季のChl.aは特徴的で、赤潮が確認された4km地点では、200 $\mu\text{g/L}$ の高いChl.a濃度を示し、異常増殖した植物プランクトンが冬季のDO濃度に大きな影響を与えていることが明らかとなった。塩分は夏季に5PSU程度の塩分層の形成が確認されたが、冬季は名古屋港からの高塩分水塊の流入が見られ、弱い成層を形成している。

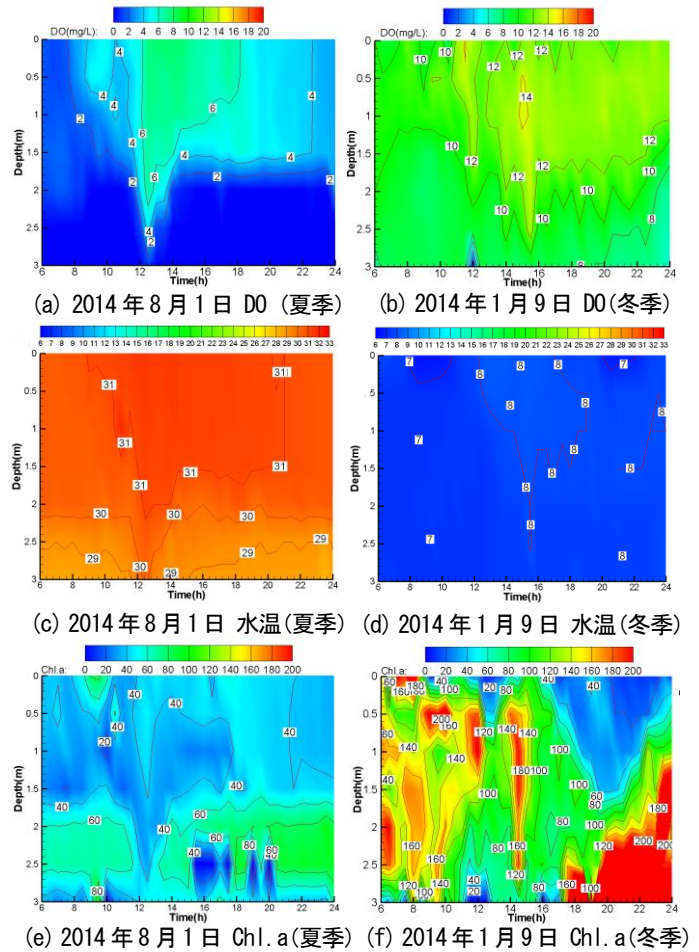


図-3 (a) ~ (f) 西日置橋における時間鉛直変化

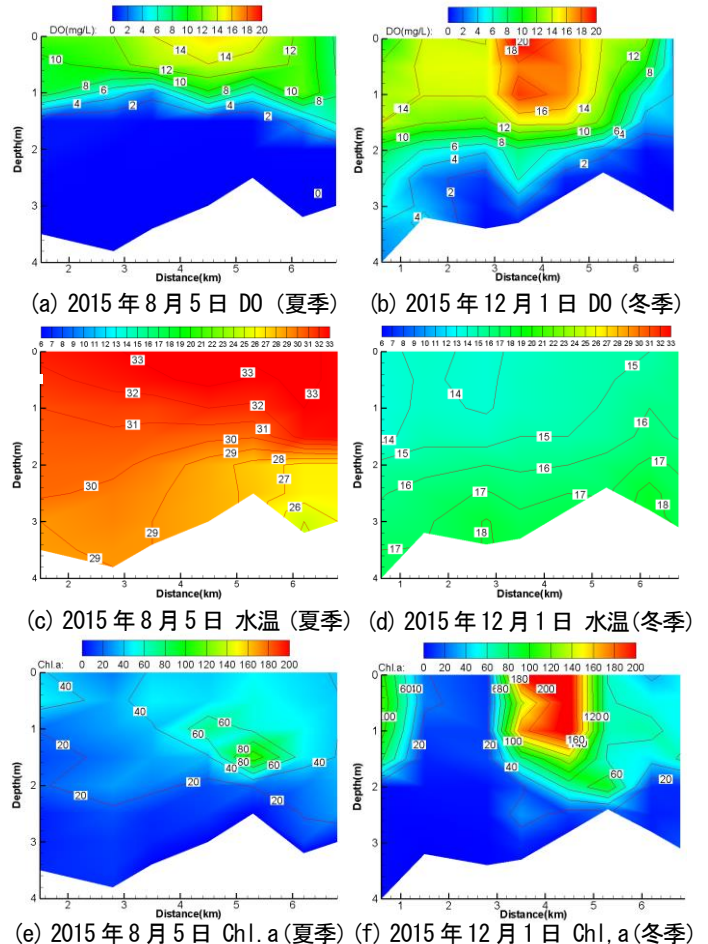


図-4 (a) ~ (f) 移動観測による縦断方向の鉛直変化

4. 水質分析 2015年8月5日(夏季)と12月1日(冬季)に図-1に示した5地点(St.1~St.5)で採水と底質の採取を実施した。採水深度は、表層(水面から0.5m)、中層(水面から1.5m)、底層(水底から0.5m)で、水深毎に3サンプル(各地点で9サンプル)。採泥は各地点で3サンプル採取した。なお、冬季の底質の採取は採泥器の故障のため、St.4及びSt.5の底質採取が実施できなかった。採水サンプルについては全窒素(T-N)、硝酸態窒素(NO₃-N)、亜硝酸態窒素(NO₂-N)、アンモニウム態窒素(NH₄-N)、全リン(T-P)、リン酸態リン(PO₄-P)、浮遊物質量(SS)、化学的酸素要求量(COD_{Mn})について分析を行った。底質サンプルについては全窒素(T-N)、全リン(T-P)、強熱減量(I-L)について分析を行った。表-2に測定項目及び測定法について示す。図-5(a)~(h)に水質分析結果を示し、図-6(a)~(c)に底質分析結果を示す。図-5(a)及び図-5(d)について、夏季は底層において有機物の嫌氣的分解によりNH₄-N及びPO₄-Pが生成され、両者の分布特性は非常に類似し、強い正の相関が認められた(R=0.99)。これより、夏季は嫌気性に伴う底質からの無機態窒素及リンの溶出が顕著であることが明らかとなった。図-5(b)に示すNO₂-Nは、冬季の濃度が夏季に対して全計測点上回る結果となった。これは、冬季の底層が酸化状態であり、NH₄-NからNO₂-Nへ硝化が進行したことが考えられる。反対に夏季は嫌気下であるため、有機物の酸化分解がNH₄-Nの発生で止まり、NO₂-N濃度は上昇していないことがわかる。図-5(c)について、夏季のNO₃-Nのオーダーは冬季と比較し、大きい結果となった。この理由として、夏季は水温の上昇とともに硝化速度も大きくなるため、硝化がNO₃-Nまで進行したことが考えられる。次に図-5(e)及び図-5(f)にT-N及びT-Pの結果を示す。T-Nは、夏季の底層で高く、St.3~St.5では6mg/Lを超える濃度となっているが、それ以外はある程度類似した空間特性を示した。T-Pは、PO₄-Pの分布傾向との類似性が認められ、夏季のSt.3~St.5の底層で高い濃度を示した。環境基準値(湖沼)であるT-N:1.0mg/L、T-P:0.1mg/Lを上回っており、富栄養化が深刻であることが示された。図-5(g)に示すSSは、夏季におけるSt.3~St.5で高濃度となり、NH₄-N及びPO₄-Pと強い正の相関(R=0.97)を示した。これは、SSの主成分である懸濁態有機物などが分解され、NH₄-N及びPO₄-Pが生成されたことを示唆する。図-5(h)に示すCOD_{Mn}は、夏季において底層が高く、St.5では40mg/Lの高濃度を示した。また、COD_{Mn}濃度は、環境基準(湖沼)であるCOD_{Mn}:8mg/Lを超えている場合が多く、SSの結果と合わせて、内部生産による有機汚濁が進行していることが示唆された。次に、図-6(a)~(c)の底質の分析結果について、夏季の上流側においてT-N、T-Pともに高い値を示した。これは底層の嫌気化が進行し、底泥からの間隙水への溶出が増加したものと推察される。また、St.1

表-2 測定項目及び測定法

測定項目	測定法
アンモニウム態窒素(NH ₄ -N)	イオンクロマトグラフ法
亜硝酸態窒素(NO ₂ -N)	ジアゾ化法
硝酸態窒素(NO ₃ -N)	イオンクロマトグラフ法
リン酸態リン(PO ₄ -P)	モリブデン青(アスコルビン酸還元)吸光度法
全窒素(T-N)	過硫酸分解法
全リン(T-P)	ペルオキシ二硫酸カリウム分解法 モリブデン青(アスコルビン酸還元)吸光度法
浮遊物質量(SS)	ガラス繊維ろ紙法
化学的酸素要求量(COD _{Mn})	100°Cにおける過マンガン酸カリウムによる酸素要求量
強熱減量(I-L)	炉乾燥土を750°Cに強熱したときの減少質量を炉乾燥土に対する百分率

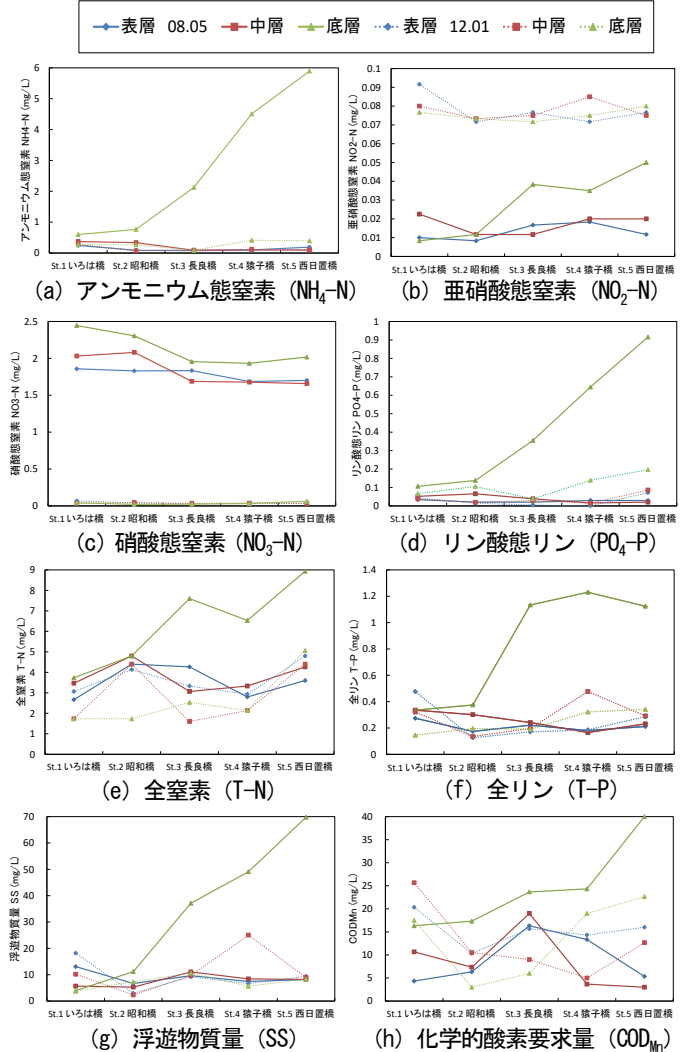


図-5 (a) ~ (h) 水質分析結果

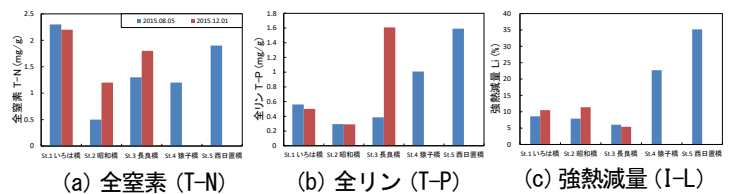


図-6 (a) ~ (c) 底質分析結果

ろは橋でのT-Nの上昇や、St.2昭和橋、St.3長良橋の冬季のT-Nが夏季より高いこと、St.3長良橋において冬季のT-P濃度の上昇が確認された。これらは冬季の好気性による底質への吸着や、好気性・嫌気性の状態が繰り返された結果、底質の表層で濃度が高まった場合が考えられるが、更なる継続的な調査が必要である。強熱減量は、夏季のSt.5では35%であり、東支線は依然として有機汚濁が深刻であることが示された。冬季は顕著な変化はなく、季節による底質の有機物量の変化は小さく、常に有機物の堆積が進んでいることが考えられる。

5. 数値計算 現地観測データとの再現性を確認するため、鉛直2次元モデルであるCE-QUAL-W2を用い、数値計算を行った。また、表-3に示したケースで数値シミュレーションを行い、導水量や導水時間の変化及び覆砂の実施が水質の季節変化に与える影響について検討を行った。

5-1. 再現計算結果及び考察 図-7～図-8に、西日置橋における夏季及び冬季の鉛直分布の再現計算結果を示す。

水温は、冬季において計算値が成層化し、観測値と分布が異なったが、夏季における計算値は日射による影響を若干捉えていることがわかる。塩分は値に多少ずれはあるものの、傾向を捉えることができている。DOは、夏季の底層の貧酸素化や冬季の貧酸素水塊の解消などの変化特性を表現できている。図-9 (a)～(d)に東海橋の表層及び底層における1年間の再現計算結果を示す。表層塩分の計算値は、観測値より低い値で追従しているが、底層塩分は良好な一致を見せている。水温は、計算値の変動が大きいものの、季節変化の妥当な再現性が得られている。DOは細かい日変動は追従していないが、季節特性は概ね表現できており、再現計算の妥当性が示された。

5-2. 数値シミュレーション結果及び考察 図-10及び図-11にcase1の8月1日、12月1日12時の(a)全線覆砂あり(b)覆砂なしの場合のDOの計算結果を示す。なお、覆砂は底質の酸素要求量(SOD)がゼロとして表現した。

図-10について、case1-aでは6000m以降で貧酸素であるが、覆砂を実施したcase1-bでは、東支線における貧酸素が解消しており、夏季において、一定の効果が出ていることが示される。図-11について、case1-bでは、4000m付近からDO濃度の上昇が見られ、底層において5mg/L以上であり、底質の改善が認められる。また、紙面の都合上記載していないが、導水量が14万m³であるcase2は、DOにそれほど影響を与えなかったが、導水量7万m³で、流入時間がcase0より2時間短いcase1が水質改善に効果があり、導水量以上に、導水時間がDOに影響していることが明らかとなった。DOの年平均値を覆砂実施の有無と比較すると、西日置橋の表層で1.24倍(5.98mg/L→7.41mg/L)、底層で1.61倍(3.72mg/L→5.97mg/L)と改善した。現況と同様の7万m³を3時間で導水し、覆砂を実施したcase1-bにおいて最もDOの改善が見られた。

6. まとめ 本研究では、夏季における底質環境の悪化に伴う貧酸素化や冬季における水温成層の解消に起因する一時的なDO改善を明らかにした。また底質の有機物の堆積や栄養塩の溶出が水域の内部生産を助長しており、特に東支線の汚濁が顕著であった。数値計算では季節変化の再現を試み、数値シミュレーションにて導水時間の変化と覆砂の実施が水環境改善に寄与する可能性を示した。今後は、底質環境の継続的な調査と数値計算の精度向上が必要と思われる。

参考文献：森下真那人，中川運河における水質の鉛直構造に関する研究，名古屋工業大学卒業論文，2013

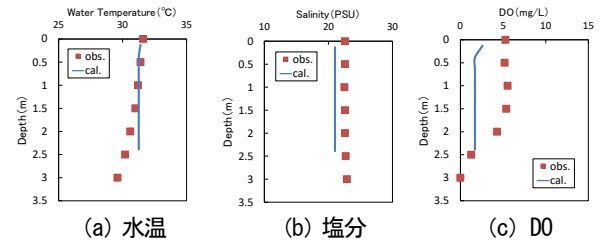


図-7 再現計算結果 (西日置橋) 2014年8月1日 (夏季) 12:00

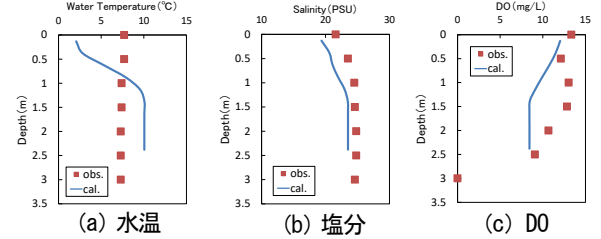


図-8 再現計算結果 (西日置橋) 2014年1月9日 (冬季) 12:00

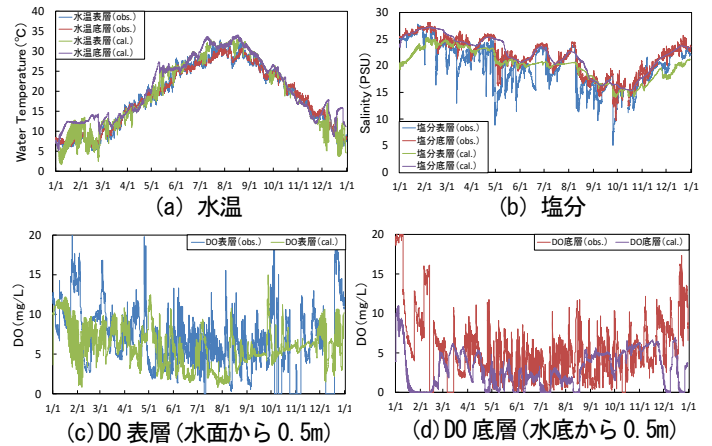


図-9 再現計算結果 (東海橋) 2014年1月1日～12月31日

表-3 シミュレーションのケース設定

ケース名	導水量 (m ³ /day)	導水量 (m ³ /sec)	覆砂 (SOD=0)
Case0-a (現況)	70000	3.858 (10時～15時の5時間)	なし
Case0-b	70000	3.858 (10時～15時の5時間)	あり
Case1-a	70000	6.752 (10時～13時の3時間)	なし
Case1-b	70000	6.752 (10時～13時の3時間)	あり
Case2-a	140000	7.716 (10時～15時の5時間)	なし
Case2-b	140000	7.716 (10時～15時の5時間)	あり

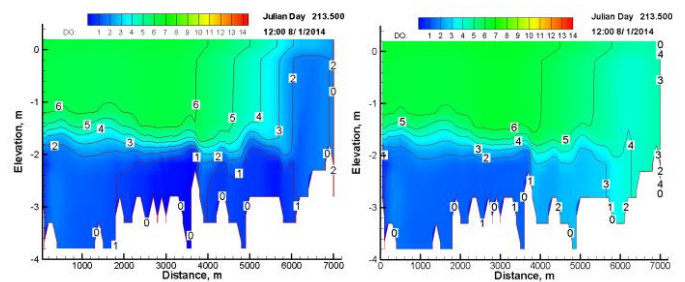


図-10 2014年8月1日(夏季) 12:00 導水量 6.752 (m³/sec)

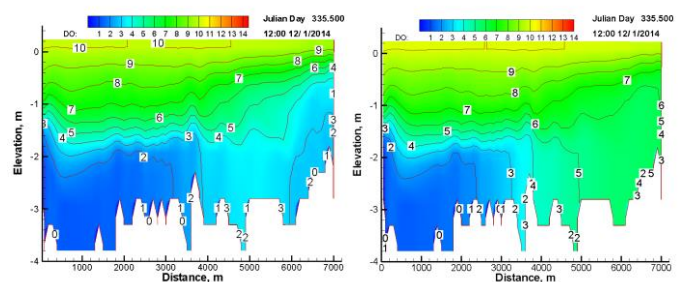


図-11 2014年12月1日(冬季) 12:00 導水量 6.752(m³/sec)