

資 料

広島湾河川感潮域における貧酸素水塊の遡上

後田 俊直

Intrusion of Oxygen Deficient Water into the River Estuary
in Hiroshima Bay

USHIRODA Toshinao

(Received: November 11, 2024)

広島湾に流入する太田川感潮河川の貧酸素水塊の発生状況を把握することを目的として、支川のひとつである京橋川で、湾内の貧酸素化が顕著となる8~9月に調査を行った。河道内の塩分は緩混合型の分布を示し、塩水の遡上に伴い湾内で発生した貧酸素塩水が遡上した。貧酸素水塊の発生パターンは潮汐（大潮、小潮）及び河川流量により異なっており、大潮時には、満潮時に塩分成層が形成され、貧酸素塩水の移流により底層は貧酸素化するが、干潮時に河道内は淡水で満たされ、底層の貧酸素状態は解消された。一方、小潮時には、干潮時においても河道内に塩分成層が維持され、底層の貧酸素状態は継続した。また、貧酸素水塊の形成には、湾内からの貧酸素塩水の遡上に加え、河道底層の酸素消費も寄与していることが示唆された。

Key words : 貧酸素水塊, 底層DO, 感潮河川, 太田川, 広島湾

結 言

2015年に改正された瀬戸内海環境保全特別措置法では、水質が良好な状態で保全されるとともに、生物多様性・生物生産性が確保される等、その価値及び機能が最大限に発揮された「豊かな海」とする考え方が明確にされた。続いて2016年には、底層を利用する水生生物の保全・再生を目的として、底層溶存酸素量（底層DO）が新たに環境基準として追加された。

一方、広島湾は周囲を島に囲まれた瀬戸内海の中でも特に閉鎖性の強い海域であり、湾奥となる北部海域では毎年夏季になると慢性的な貧酸素水塊が発生している[1-3]。その発生要因としては、湾外から酸素を含む海水が届きにくいこと、夏季の成層強度、底泥及び底層水の有機物の分解に伴う酸素消費が挙げられている[1]。広島湾での貧酸素水塊は、成層強度の強くなる7月頃から沿岸部で発生し始め、底層水温の上昇により規模が拡大し、8、9月頃最も顕著となることが確認されている[1]。特に湾奥では毎年DOが2mg/L以下となる海域もみられる[3]。広島湾の湾奥には一級河川太田川が流入しており、瀬戸内海特有の大きな干満差（大潮時最大約4m）

の影響を受け、潮位変動に伴い海水が遡上する感潮河川となっている。河川感潮域は栄養物質が豊富な水域であり、他の水域と比べて一次生産や漁獲量の高い水域といわれている[4]。また、河岸沿いには干潟が広がっており、広島湾では干拓・埋立てにより干潟の大部分が消失した現在、水質浄化、水産資源育成、生物多様性等の機能を有する場として貴重な干潟となっている。しかし、いったん貧酸素状態になれば生物が生活できない環境になり、これらの機能は失われてしまうことになる。湾内につながる河川感潮域では、湾内底層の貧酸素水が遡上し、底層DOに影響を及ぼしていることが予想される。実際、これまでの調査により太田川の河川感潮域では潮汐や出水に対応して海水と淡水の流出入を繰り返しており、湾内の海水が遡上していることが分かっている[5,6]。しかし、これまで河口部より上流の河川感潮域での貧酸素化についての調査は行われていない。

そこで本報では、太田川感潮河川の貧酸素水塊の発生状況を把握することを目的として、太田川の支川のひとつである京橋川で、広島湾の貧酸素化が顕著となる8~9月に調査を行った。また、河口域における底層DOは密度成層の発達に強く依存していることが知られており、密度成層を規定する主要な要因は潮汐による潮位差と

河川流量であることから[7], 調査は, 潮汐(大潮, 小潮)及び河川流量(平水時, 出水時)の異なる日に行い, 貧酸素水塊の発生パターンを考察した。

方 法

調査を行った京橋川は, 太田川水系の分流であり, 太田川が形成する広島デルタの6河川のうちの1つである。京橋川は, 旧太田川から分岐し, 下流で元安川に合流するまでの流路6.2kmの区間である。塩分, DO及び水温の空間分布(縦断分布)を調査するための移動観測を行った。測定機器には多項目水質計(環境システム㈱製, Quanta)を用いた。本調査は, 既報[5]の調査の一環として行われたものであり, 移動観測の詳細は既報のとおりである。調査地点を図1(平面図)及び図2(断面図)に示す。調査地点は京橋川の上流から下流にかけての8地点である。なお, 断面図は河川定期縦横断測量データ(国土交通省太田川河川事務所提供)を基に作成した。断面図は元安川との合流点を基点としており, 河口から元安川合流点までは約2.5kmである。調査は, 潮汐及び河川流量の異なる3回, それぞれ満潮時と干潮時に行った。調査日と当日の河川流量及び潮位の状況を表1, 各調査日における潮位変化, 河川流量及び観測時間帯を図3に示す。河川流量は, 河口から約15km上流の矢口第一観測所(国土交通省)のデータ[8], 潮位は, 広島港の観測データ[9]を用いた。なお, 河川流量は京橋川分

岐点より上流の太田川の流量である。2015年の流況は, 平水流量: 59.85m³/s, 豊水流量: 88.40 m³/s, 低水流量: 38.58 m³/sであった。潮汐は, CASE1及びCASE3は大潮, CASE2は小潮であった。また, CASE3は調査日の3日前に流域で50mmを越える降雨があった。このため, 相対的にCASE1は「干満差: 大, 河川流量: 小」, CASE2は「干満差: 小, 河川流量: 小」, CASE3は「干満差: 大, 河川流量: 大」の条件として考察を行った。



図1 太田川感潮域の地形と調査地点

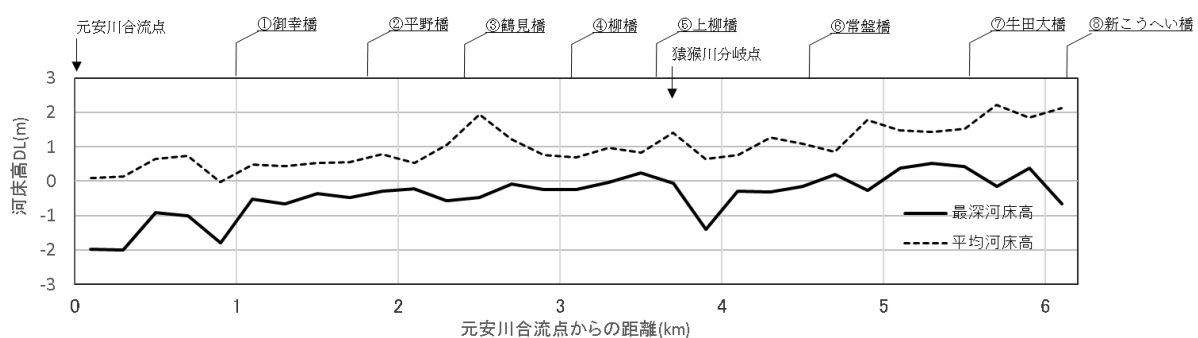


図2 京橋川の縦断面図と調査地点

表1 観測日と河川流量及び潮位の状況

観測日	干満差 (cm)	河川日流量 (m ³ /s)	潮汐, 河川の相対的状況	
			干満差	河川流量
CASE1 2015年9月15日	288	71	大	小
CASE2 2015年9月21日	110	46	小	小
CASE3 2015年8月28日	293	119	大	大

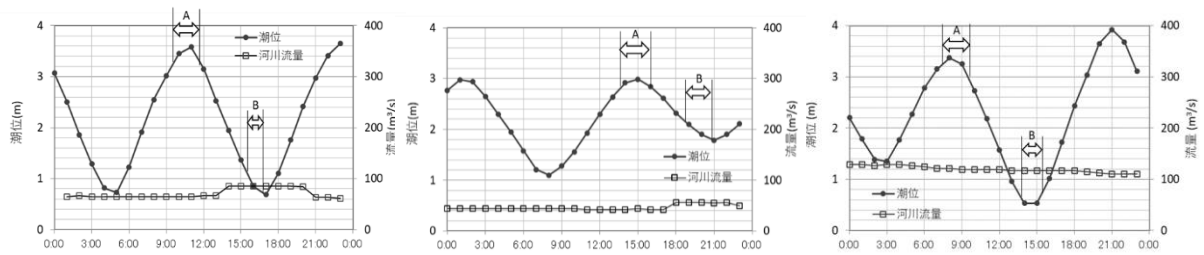


図3 各調査日における潮位変化, 河川流量及び観測時間帯
(A : 満潮時, B : 干潮時)

結果及び考察

移動観測の測定結果から満潮時及び干潮時の塩分・DOの縦断分布図を作成した。CASE1 (干満差 : 大, 河川流量 : 小) のものを図4に示す。また, 地点①, ③, ⑤及び⑦での満潮時のDO, 塩分及び水温の鉛直分布を図5に示す。なお, 地点①, ③, ⑤及び⑦は元安川合流点からそれぞれ1.0km, 2.4km, 3.6km及び5.4kmの地点である。塩分の縦断分布は, 満潮時には上流から下流に向かって河川水が海水の上を流下し, 河底上では逆に塩水が河床に沿って楔状に遡上する分布を示した。

塩分の混合形態は, 等塩分線が斜めに傾き, 塩分勾配が水平, 鉛直の両方向に存在する緩混合型であった。DOの縦断分布は, 塩分分布に対応し, 塩分濃度が高いほどDOは低下した。これは, 貧酸素水の起源は下流側(海側)にあり, 潮の遡上に伴い河道内に侵入してきたものと考えられた。このとき遡上する塩水は, 地点①の底層(底上0.1m)で塩分31.3psu, DO3.6mg/L, 酸素飽和度51.6%であった。ここで貧酸素についてであるが, 「貧酸素」に定義があるわけではなく, DOの指標値については種々の見解があり, 2~3mg/L以下を貧酸素と定義している報告が多い[1,11-14]。海洋生

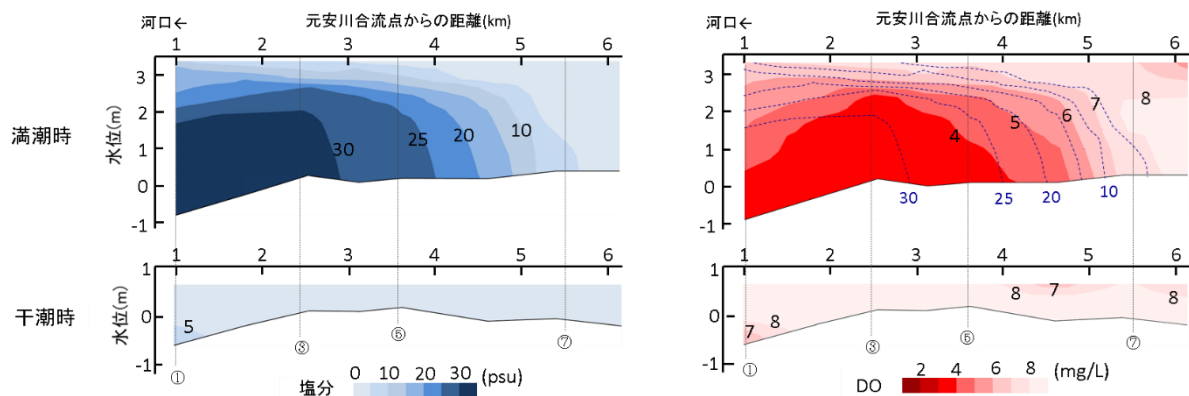


図4 京橋川の塩分(左)・DO(右)の縦断分布 (CASE1 干満差 : 大, 河川流量 : 小)
(DO分布図中の点線は塩分分布を表す)

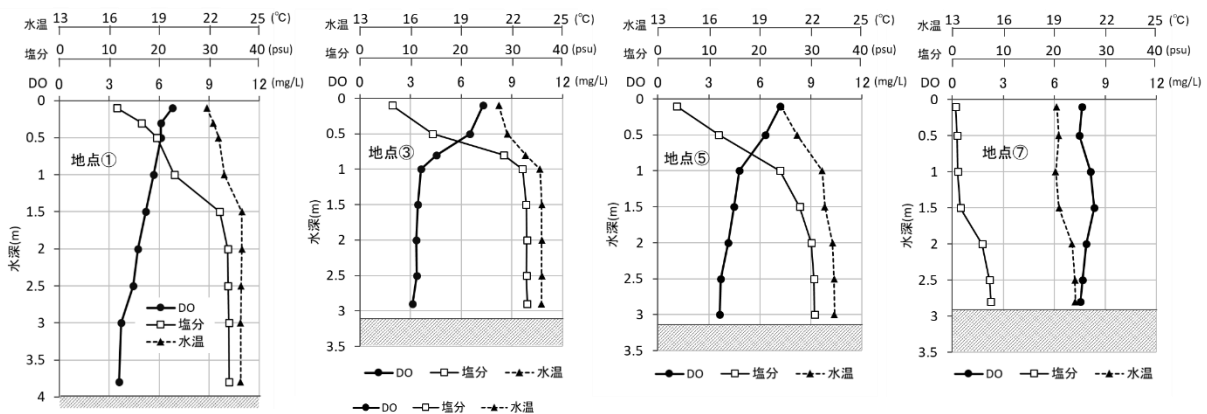


図5 地点①, ③, ⑤及び⑦での満潮時のDO, 塩分及び水温の鉛直分布 (CASE1 干満差 : 大, 河川流量 : 小)

物への影響濃度としては、海底のベントスが正常に分布するためには、 3.6mg/L 以上が必要であり、貧酸素に比較的強い貝類は 2.1mg/L 以下になると生存が危険になるという報告がある[10]。また、底層 DO の環境基準は、水生生物の生息および再生産の場の確保の観点から、貧酸素耐性の違いにより生物 1~3 の三種類の類型に分け、それぞれ 4.0mg/L 以上、 3.0mg/L 以

上、 2.0mg/L 以上の基準値が設定されている。地点①の底層DO値 3.6mg/L は、ベントスへの影響が現れる境界値であった。河道内の他の地点の底層DOは、地点②： 3.3mg/L 、地点③： 3.1mg/L 、地点④： 3.4mg/L 、地点⑤： 3.7mg/L 、地点⑥： 4.6mg/L となっており、 $\text{DO}4\text{mg/L}$ 以下の貧酸素水は元安川合流点から約 4km 上流（河口から約 6.5km 上流）にまで及んでいた。地

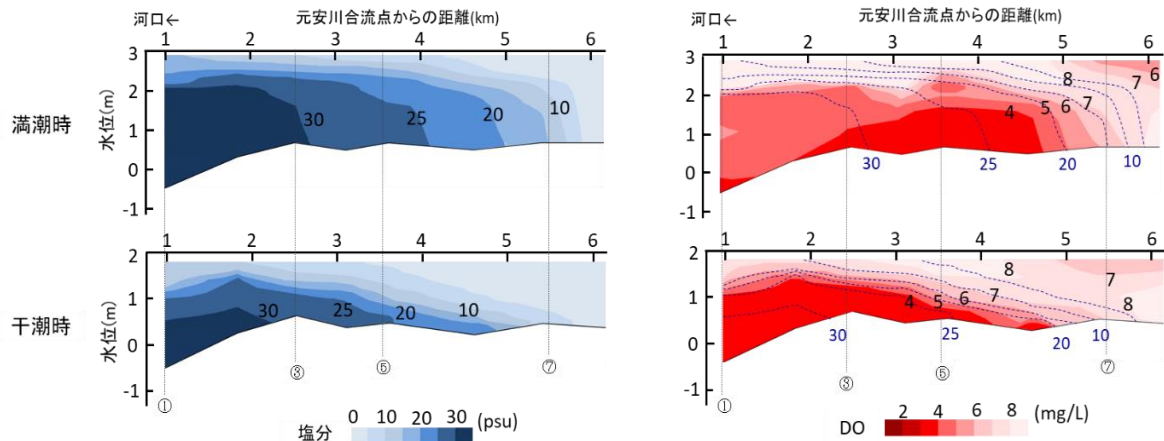


図6 京橋川の塩分(左)・DO(右)の縦断分布 (CASE2 干満差：小，河川流量：小)
(DO分布図中の点線は塩分分布を表す)

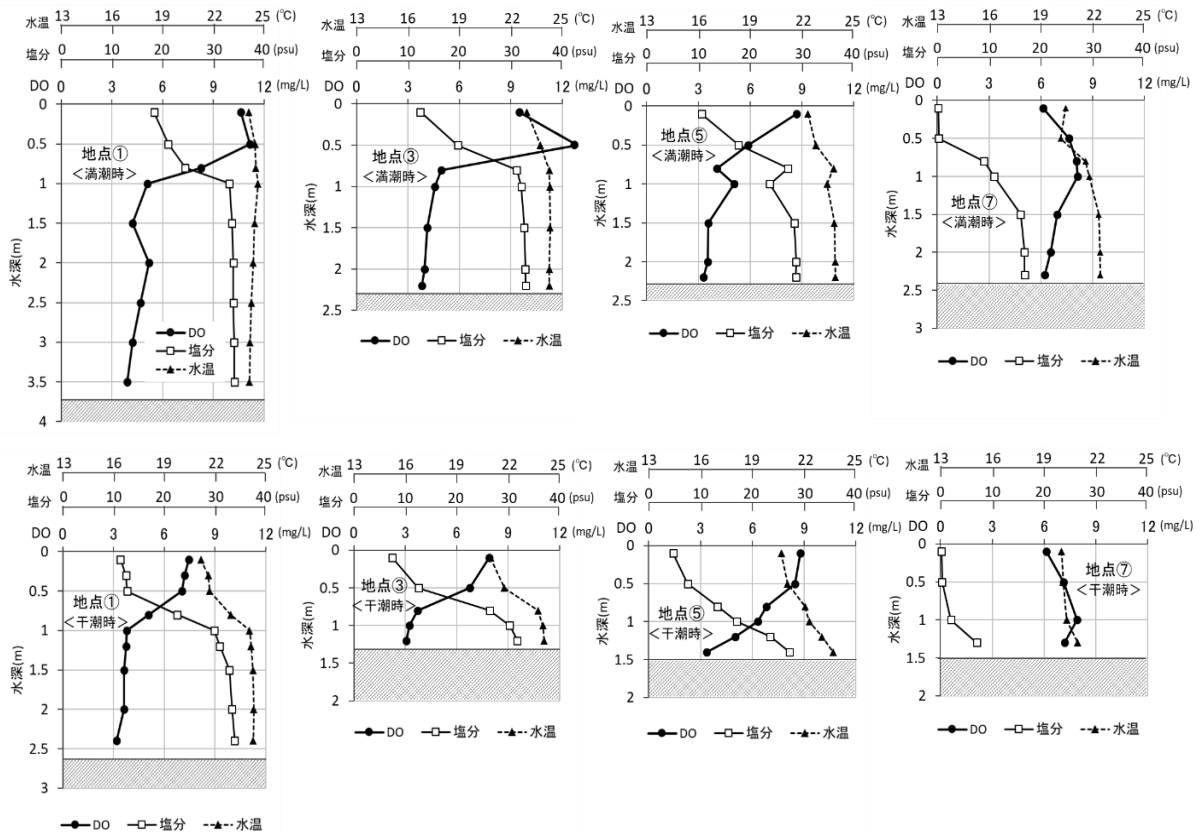


図7 地点①，③，⑤及び⑦での満潮時及び干潮時のDO，塩分及び水温の鉛直分布
(CASE2 干満差：小，河川流量：小)

点②～⑤の底層DOは、地点①（遡上する塩水）よりも低くなっており、この傾向はCASE2及びCASE3でもみられた。この理由については後述する。一方で干潮時には河道内のほぼ全域が淡水で満たされ、貧酸素は解消された。

次にCASE2（干満差：小，河川流量：小）の満潮時及び干潮時の塩分・DOの縦断分布を図6に示す。また、地点①，③，⑤及び⑦での満潮時及び干潮時のDO，塩分及び水温の鉛直分布を図7に示す。満潮時の塩分の縦断分布は、CASE1と同様に塩水楔形の分布を示し、DOの縦断分布も塩分分布に対応した分布を示した。底層DOは、地点①では3.9mg/Lであり、河道内では地点②：4.6mg/L，地点③：3.8mg/L，地点④：3.7mg/L，地点⑤：3.3mg/L，地点⑥：3.8mg/Lとなった。DO4mg/L以下の貧酸素水は元安川合流点から約4.5km上流（河口から約7.0km上流）にまで及んでおり、CASE1と比べて貧酸素水の侵入長は若干長くなっていた。一方、干潮時は、CASE1の場合と異なり河道内に高塩分水が残り、満潮時と同様に塩分躍層が維持されていた。満

潮時と比べると等塩分線は斜めに傾き間隔は狭く、表層の低塩分層は厚くなっているが、底層の高塩分水の侵入長は約0.5km海側に後退した程度であった。貧酸素水も河道内に留まっており、底層DOは、地点①で3.2mg/L，河道内では地点②：3.2mg/L，地点③：3.1mg/L，地点④：3.3mg/L，地点⑤：3.3mg/L，地点⑥：3.4mg/Lであった。底層DOの値は満潮時とほとんど変わらなかった。また、干潮時においてもDO4mg/L以下の貧酸素水は元安川合流点から約4km上流（河口から約6.5km上流）まで達していた。

最後にCASE3（干満差：大，河川流量：大）の満潮時及び干潮時の塩分・DOの縦断分布を図8に示す。また、地点①，③，⑤及び⑦での満潮時のDO，塩分及び水温の鉛直分布を図9に示す。満潮時の塩分の縦断分布では、CASE1及びCASE2と比べて等塩分線の間隔が狭く、表層の淡水層も厚くなっており、河川流量が大きいために塩水の遡上が抑えられているものと推察された。DOの縦断分布も塩分に対応して表層のDOの高い層は厚くなった。底層DOは、地点①では2.8mg/Lで

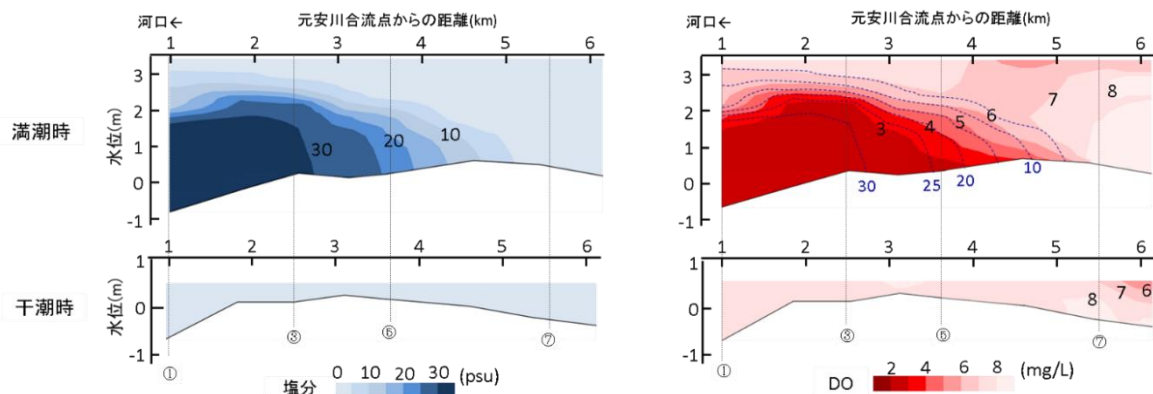


図8 京橋川の塩分(左)・DO(右)の縦断分布 (CASE3 干満差：大，河川流量：大)
(DO分布図中の点線は塩分分布を表す)

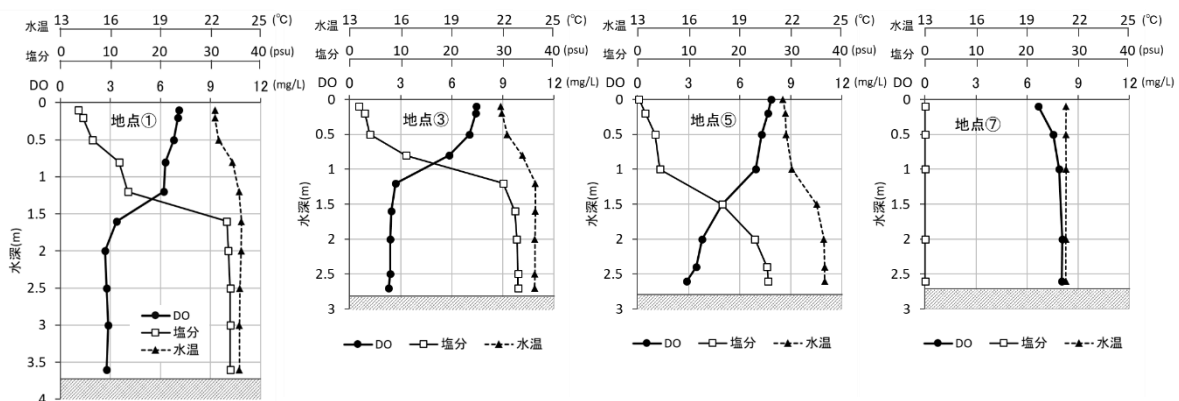


図9 地点①，③，⑤及び⑦での満潮時のDO，塩分及び水温の鉛直分布 (CASE3 干満差：大，河川流量：大)

あり、河道内では地点②: 2.5mg/L, 地点③: 2.3mg/L, 地点④: 2.4mg/L, 地点⑤: 2.9mg/L, 地点⑥: 4.7mg/L となっており, DO3mg/L以下の貧酸素水は元安川合流点から約4km上流(河口から約6.5km上流), DO4mg/L以下の貧酸素水は元安川合流点から約4.5km上流(同約7.0km上流)にまで及んでいた。一方, 干潮時にはCASE1と同様に河道内のほぼ全域が淡水となり, 貧酸素は解消された。河口域では底層DOと干満差との間に正の相関関係があり, 大潮時にDOが高く, 小潮時にDOが低くなる傾向があることが報告されている[15]。今回の調査では, 河道内の底層DOの値は大潮時のCASE3が最も低く, 貧酸素水の遡上長は長くなったが, CASE3の調査日は8月下旬であり, 遡上する塩水(地点①の底層水)のDOが低かった(CASE1: 3.6mg/L, CASE2: 3.9mg/L, CASE3: 2.8mg/L)ことからこのような結果になったものと考えられた。

ここで各調査日の満潮時における底層(底上0.1m)の塩分とDOとの関係を図10に示す。図中の直線(点線)は最下流地点①と最上流地点⑧の点を結んだものである。湾内から遡上する貧酸素塩水は河道内で酸素の供給・消費がなく淡水との混合が卓越する場合は, 下流から上流に向かって塩分の減少とともにDOは直線的に増加するはずである。しかし, 図10をみると, 地点②~⑥のデータのほとんどが地点①と地点⑧を結ぶ直線より下方にプロットされており, 河道内を遡上していく間に酸素が消費されていることが示唆された。このことから, 感潮河川の貧酸素化の要因としては, 湾内からの貧酸素水の遡上に加え, 河道内での酸素消費も寄与していることが推察された。なお, 地点⑥及び⑦については, 地点⑤の上流側に京橋川からの支川である猿猴川の分岐点があることから, 猿猴川を遡上した水塊の影響を受けている可能性も考えられる。

一般に河口域における底層DOは密度成層の発達に強く依存していることが知られており[7], この密度成層の形成は上層から底層へのDOの供給を妨げる要因

となる。密度成層は, 塩分と水温の変化で形成されるが, 水温の鉛直分布(図5, 7, 9参照)をみると全ての地点で底層より表層のほうが低くなっており, 淡水流入による塩分成層が支配的となっていた。河口域で塩分成層を規定する主要な要因は, 潮汐による潮位差と河川流量であり, 混合形態の変化はこれらの大小関係によって変動する[7]。底層DO濃度の変動は, 大潮小潮サイクルが基本となっており, 潮位の差が大きい(大潮)ときは, 河川を遡上する海水の流れが強く, 上流から流下してくる淡水との混合が起こりやすい。一方, 潮位差の小さい(小潮)ときは, 遡上する海水の勢いが弱いため, 上流からの淡水とあまり混合せず上に淡水, 下に塩水という安定した2層構造をつくりやすい。今回の調査においても大潮期(CASE1)では満潮時には貧酸素塩水の遡上により底層は一時的に貧酸素化するが, 干潮時には河道内は淡水で満たされ低酸素の状態は解消された。一方, 小潮期(CASE2)には, 満潮時, 干潮時ともに塩分成層は維持されており, 底層DOの貧酸素化は継続していた。大潮と小潮は約1週間ごとに繰り返していることから, 出水等の突発的な淡水流入がなければ小潮期には河道内底層の貧酸素化は数日間継続することが予想される。今回のCASE2では, 底層DOの最低値は, 3.1mg/L(地点③, 干潮時)であったが, 調査日は中潮から小潮に変わった1日目であり, その後, 底層の酸素消費により底層DOはさらに低下し, 貧酸素化状態が数日間継続したものと推察された。

以上の観測結果から, 京橋川では湾内からの貧酸素塩水の移流と河道内での酸素消費により底層の貧酸素化が起っていることが分かった。また, 小潮期に貧酸素化状態が進行・継続されることも示唆された。太田川は下流デルタ域で6つの支川に分かれて広島湾に注いでいるが, いずれの支川も京橋川と同様の貧酸素化が起っていることが予想される。太田川河川感潮域は, 海域に生息する生物や淡水域に生息する生物のみなら

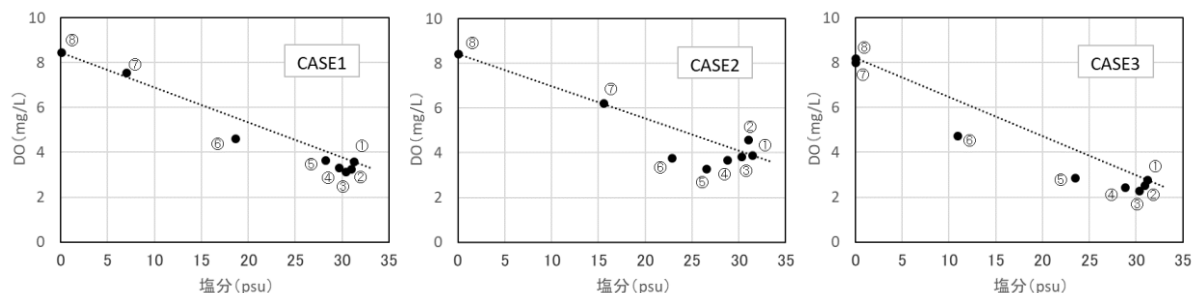


図10 各調査日(満潮時)における底層の塩分とDOとの関係

ず、汽水性の生物が存在し、縦断方向に多種多様な生物が生息している（未発表）。栄養が豊かで高い生産力を有する多様な生態系を形成しており、水質浄化、水産資源育成、生物多様性等の機能を有する貴重な場となっている。また、感潮域上流ではシジミ漁も行われ、「太田川しじみ」のブランドにもなっている。今後は温暖化に伴う海面上昇により貧酸素化域が上流域へ拡大することや海水温の上昇により成層構造の強化、水中・底泥の酸素消費量の増加等が起これ、河川感潮域の貧酸素化がさらに進行することが予想され、生態系への悪影響が危惧される。これまで河口よりも上流側での溶存酸素の調査はされてこなかったが、今後は湾内だけでなく河川感潮域についても定期的なモニタリング調査が望まれる。

結 語

京橋川の感潮河川域において、水温、塩分及びDOの縦断分布調査を行い、貧酸素水塊の発生状況及び発生パターンについて以下の知見を得た。

京橋川の塩分分布は緩混合型の分布を示し、満潮時には混合域は元安川合流点から上流5～6km地点（河口から7.5～8.5km地点）まで及んでいた。DOの縦断分布は塩分の分布に対応しており、湾内の貧酸素水塊が河道内の底層を遡上していた。DO4mg/L以下の貧酸素水塊は、元安川合流点から上流4～5km地点（河口から6.5～7.5km地点）まで及んでいた。

貧酸素水塊の発生パターンは潮汐（大潮、小潮）及び河川流量により異なっており、大潮時には、満潮時に塩分成層が形成され、貧酸素塩水の移流により底層は貧酸素化するが、干潮時に河道内は淡水で満たされ、底層の貧酸素状態は解消された。一方、小潮時には、干潮時においても河道内に塩分成層が維持され、底層の貧酸素状態は継続した。また、貧酸素水塊の形成には、湾内からの貧酸素塩水の遡上に加え、河道底層の酸素消費も寄与していることが示唆された。

謝 辞

本研究の実施にあたり、国環研と地環研とのⅡ型共同研究「干潟・浅場や藻場が里海里湖流域圏において担う生態系機能と注目生物種との関係」（平成27～29年度）のメンバーには有益な情報・意見をいただいた。ここに謝意を表する。

文 献

- [1] 伊達悦二, 清木徹. 広島湾の貧酸素水塊の分布とその形成機構. 広島県保健環境センター研究報告. 2006, 14, 1-12.
- [2] 小田新一郎, 濱脇亮次, 他. 広島湾の底質環境及び底生生物相の現況について. 広島県立総合技術研究所保健環境センター研究報告. 2020, 28, 53-70.
- [3] 国土交通省中国地方整備局. 第15回広島湾水質一斉調査結果について.
https://www.cgr.mlit.go.jp/chiki/hiroshimawan/pdf/grapple/suisitsucyousakekka_15.pdf , 参 照 2024-10-7
- [4] 西條八束・奥田節夫編. 河川感潮域ーその自然と変貌ー. 財団法人名古屋大学出版会, 1996, 109-115.
- [5] 後田俊直. 京橋川の河岸干潟における泥分・有機物集積域の形成要因. 広島県立総合技術研究所保健環境センター研究報告. 2023, 31, 33-41.
- [6] 後田俊直. 京橋川の河川感潮域に形成された干潟の塩分環境と有機物分解活性. 広島県立総合技術研究所保健環境センター研究報告. 2017, 25, 25-30.
- [7] 中村由行, 藤野智亮. 長良川河口堰下流部の溶存酸素濃度の動態. 応用生体工学. 2002, 5(1), 73-84.
- [8] 国土交通省. 水文水質データベース.
<http://www1.river.go.jp/>, 参照2017-9-20
- [9] 広島県防災Web.
<http://www.bousai.pref.hiroshima.jp/hdis/> , 参 照 2017-9-20
- [10] 柳哲雄. シンポジウム「貧酸素水塊」のまとめ. 沿岸海洋研究ノート. 1989, 26(2), 141-145.
- [11] 藤原建紀. 瀬戸内海の底層DO(溶存酸素量). 瀬戸内海. 2016, 72, 21-23.
- [12] 徳永貴久, 児玉真史, 他. 有明海湾奥西部海域における貧酸素水塊の形成特性. 土木学会論文集B2 (海岸工学). 2009, B2-65, 1011-1015.
- [13] 柳哲雄, 石井大輔. 博多湾奥部における貧酸素水塊発生・消滅機構. 海の研究. 2009, 18(2), 169-176
- [14] 東輝明, 山田真知子, 他. 過栄養な内湾 洞海湾における貧酸素水塊の形成過程とその特性について. 日本水産学会誌. 1998, 64(2), 204-210.
- [15] 藤野智亮, 中村由行. 長良川河口堰下流部における貧酸素水塊の形成に関する解析. 水工学論文集. 2002, 46, 923-928.