

大阪湾湾奥部閉鎖性海域における 貧酸素水塊の現地調査

FIELD SURVEYS OF ANOXIC WATER IN ENCLOSED COASTAL AREA OF OSAKA BAY

中辻啓二¹・入江政安²・西田修三³・湯浅楠勝⁴
Keiji NAKATSUJI, Masayasu IRIE, Shuzo NISHIDA and Kusakatsu YUASA

¹正会員 工博 大阪大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

²学生会員 修(工) 大阪大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

³正会員 工博 大阪大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

⁴正会員 工修 国土交通省神戸港湾空港技術調査事務所副所長 (〒651-0082 神戸市小野浜町7-30)

Appearances of algae blossom at the sea surface and anoxic water over the sea bed have often been observed in the enclosed coastal area at the head of Osaka Bay. In particular, special attentions have recently been paid to the anoxic water, because it finally relates to lives of fish and shellfish. In this paper, we present the results of our field observation of temperature, salinity, chlorophyll-a, dissolved oxygen, and so on at 15 stations in the Port of Amagasaki-Nishinomiyashiya every week from June to September, 2002. During the period, blue tide, that is, upwelling phenomena of anoxic seabottom water was able to be observed in the enclosed coastal area under the north wind blowing, but the water existed strongly over the seabed after the dramatic change. The effect of rainfall was limited at the sea surface and did not have an impact on anoxic water in the port. In addition, the thickness of the water depended on the depth of thermocline, not the strength of stratification.

Key Words : *anoxic water, dissolved oxygen, field survey, enclosed coastal waters, reclamation, Osaka Bay*

1. はじめに

近年, 沿岸住民の大阪湾の水質に対する関心は高まっている。入江・中辻¹⁾の調査によると, 沿岸住民はゴミや透明度といった分かりやすい指標だけでなく, CODや溶存酸素(DO)といった科学的指標も今後の大阪湾の環境を考える上で重要であると認識している。また, 科学的指標の中でも, DOは植物プランクトンの発生や枯死, 藻類の大量増殖(赤潮の発生), 底泥による酸素消費などの生物・化学的過程の最終的な結果として表れる指標である。とくに, 大阪湾湾奥での貧酸素状態は, この海域への陸域からの栄養塩負荷の過大さ, 地形改変による流速の減少などがもたらす結果である。大阪湾湾奥部では貧酸素化現象が広範囲で長期間発生しており, 貧酸素水塊の解消が急務である。

大阪湾全域の水質や貧酸素水塊については大阪府立水産試験場の浅海定線調査²⁾がある。また, 貧酸素水塊に関する調査³⁾⁴⁾も様々に行われるようになってきた。こ

れらの調査結果によると, 大阪湾の貧酸素水塊は夏期にほとんど解消されることなく発生している。何らかの影響で底層の貧酸素化が解消されても, 貧酸素水塊は再び湾奥の底層を覆うのが確認されている。このような湾全域や湾奥全域を対象に調査研究は多く行われているが, 流速の小さい防波堤内や人工島背後の水域について詳しく調査した例⁵⁾は多くはない。このような小領域では海水交換が悪く, 表層と底層の水温差など様々な要因による貧酸素化や水質への影響が際立つ可能性が考えられる。そこで本研究では, 大阪湾湾奥の閉鎖性の強い小領域において, 貧酸素水塊の動態を把握することを中心とした水質調査を行い, 水際の貧酸素水塊の発生と挙動について解析する。

2. 調査の概要

(1) 地理的状況

図-1に調査した海域および観測点を示す。調査海域は

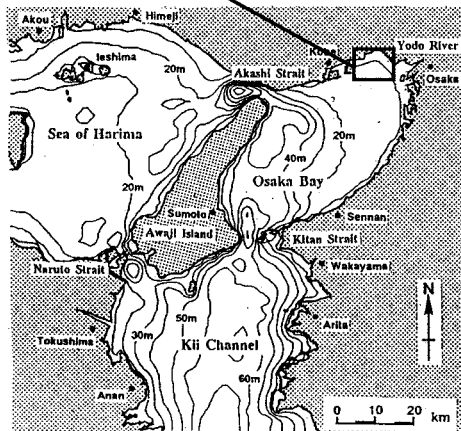
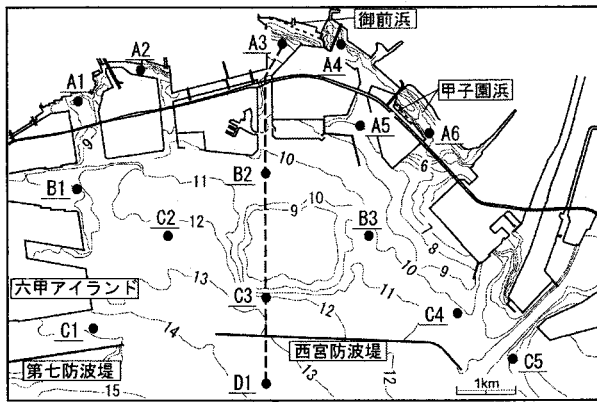


図-1 大阪湾と観測対象領域

大阪湾の湾奥に位置する神戸港東側と尼崎西宮芦屋港であり、東西約6.7km、南北約4.6kmである。調査海域西側は六甲アイランドで、岸壁は港湾施設が占め、島中央には住宅や企業のオフィスがある。調査海域の北側から東側（芦屋から西宮）にかけては港湾施設はあるものの、大阪と神戸に挟まれたベッドタウンとしての地理的状況を反映して住宅が多く、汀線沿いには多くのマンションが建っている。また、西宮には古くからのヨットハーバーがあり、ヨットからウィンドサーフィンまで含めたマリンスポーツが盛んな地域でもある。また、神戸・大阪沿岸では数少ない自然海浜「御前浜」が残されており、その東側には人工海浜「甲子園浜」も整備されている。調査対象領域は大阪と神戸という大都市に挟まれて、住民にとっては幾分近づきやすい沿岸域であるといえる。

尼崎西宮芦屋港は沖合いに西宮防波堤があり、この海域における水交換は、西側は六甲アイランドの北側の0.4kmと南側の0.7km、南側は六甲アイランド沖の第七防波堤と西宮防波堤間の航路の幅1.6km、東側は西宮防波堤東端の開口部の幅1.3kmのみでなされており、閉鎖性の強い海域となっている。水深は沖の西宮防波堤付近で12～14m、奥部の砂浜の近く（A3、A5付近）で5m、直立護岸近くで8～12mである。港奥部の観測点のA1、A2、A4、A5は直立護岸で囲まれており、A3、A6は砂浜に面している。淀川の出水のあるときは東側開口部から淡水が侵入する。今回の水質観測期間中に4回実施した流況

表-1 観測の内容

対象領域	神戸港六甲アイランド以東 ～尼崎西宮芦屋港
期間	2002年6月3日～2002年9月4日
観測項目	水温、塩分、濁度、クロロフィルa DO、透明度、水色、気温、風向・風速
使用機材	クロロフィルセンサー付きSTD DO計
観測方法	測量船による巡回測定

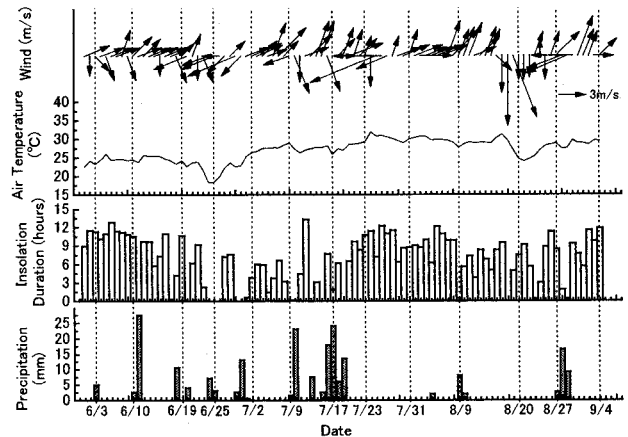


図-2 観測期間中の風向・風速と平均気温、
日射時間、降水量

観測のうち出水時の調査結果によると、上げ潮、下げ潮に関係なく、低塩分の河川水が侵入しているのが観測された。尼崎西宮芦屋港沖では、西から東に向かう時計回りの循環流（西宮沖環流）があり、これによる流れは西宮沖を通過後、海岸線に沿って南下する。

(2)大阪湾全域の貧酸素化の概況

大阪湾では、過剰な栄養塩の陸からの流入により、植物プランクトンや藻類の異常繁殖で赤潮が発生する。それらの死骸の海底への沈降と堆積により貧酸素化が生じることが1960年頃の観測ですでに指摘されている。城⁹⁾によると、大阪湾湾奥部の貧酸素化現象の出現回数は1970年代にピークを迎え、その後CODの総量規制等によって、やや減少傾向にある。湾全域の底層水の溶存酸素(20定点の平均値)は、1970年代は2～3mg/lであったのが、1980年代に入り、2.5～3.5mg/lに改善している。貧酸素水塊はおおむね水深20mの等深線より東に見られる⁷⁾。

(3)調査の内容

表-1に調査の概要を示す。調査は2002年6月3日から9月4日まで、クロロフィルセンサー付きSTDおよびDO計による水質調査を行った。調査項目は塩分、水温、クロロフィルa、濁度、DOである。調査間隔はほぼ週1回である。調査地点数は15点で、観測は午前8時30分ごろに開始し、日中約9時間かけて、船で巡回して行った。これとは別に月1回の12点の採水調査を4回、6測線の流況

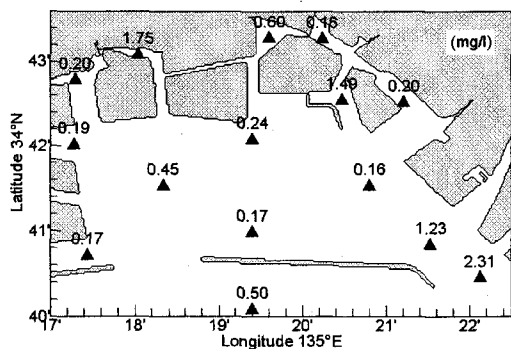


図-3 底層のDO分布 (7月17日)

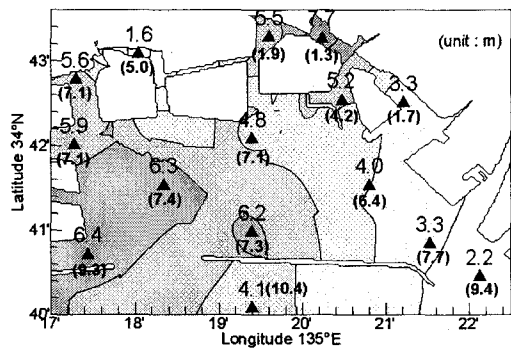


図-4 底層の貧酸素水塊厚 (7月17日)

(カッコ内はDOが3mg/lになる水深)

調査を4回行っているが、ここでは水質調査の結果を中心に述べることにする。また、本研究ではDOが3mg/l以下を貧酸素状態、1mg/l以下を無酸素状態と呼ぶことにする。

図-2に調査期間中の神戸海洋気象台で観測された風向・風速、降水量を示す。平均風速は3.4m/s、風向は西南西から南南西が卓越している。一日の日射時間は平均6.6時間で、降雨量は計211.5mmであった。なお、8月18～20日に台風14号が本州南岸を通過しており、この期間中は強い北風が吹いていた。

3. 貧酸素水塊の水平分布

底層のDOの水平分布の一例として、7月17日の観測結果を図-3に示す。この結果は特に気象の影響などを受けていない典型的な対象水域の水平分布を示している。DOは防波堤東端の港口部で2.3mg/lとやや高い値を示しているが、対象水域全体が貧酸素化している。この状況は観測期間を通して、風による底層水の湧昇などが生じた特別な期間をのぞき、同様の結果であった。そこで、底層の貧酸素状態を分かりやすく説明するため、DOが3mg/l以下になる底層水の厚さ（以降、貧酸素水塊厚と呼ぶ。）の水平分布を図-4に示す。括弧書きの数字は全水深から貧酸素水塊厚を引いた、DOが3mg/l以上の水塊の厚さを示している。観測点の水深は人工島付近で4～12m、西宮防波堤付近で11～16mである。予期されどおり、最奥部A4では貧酸素水塊厚が7.7mに達し、港中央部で4～6mである。沖に行くにしたがい、貧酸素水塊

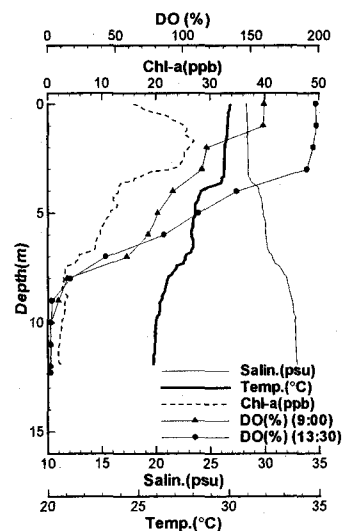


図-5 午前・午後のDOと午後水温・塩分・クロロフィルaの鉛直分布

厚が減少していることが分かる。

観測は観測船で巡回しながら行っているため、図-4に示した水平分布に気象変化に起因する日周規模の変動が内在している可能性がある。日周変動の例として、湾奥の測点A1で午前9時と午後1時30分に計測したDO飽和度の鉛直分布を図-5に示す。当日の天候は晴れで、雲量は3～4であった。この図より、表層のDO飽和度は植物プランクトンの光合成により上昇しているが、水温躍層のある水深7m以深はほとんど変化がなく、表層のDOが増加する日変化は貧酸素水塊厚に影響を与えないといえる。

この点をふまれば、図-4に示した貧酸素水塊厚の水平分布のばらつきは地形による影響と、流況・海象の変化によるものであると考えられる。DOが3mg/l以上の水塊の厚さで見ると、港外との接続部で9～10m、港中央で6～7m、湾奥で1m～7mとなっている。これらの厚さは水温躍層までの厚さとはほぼ一致している。湾奥でのDO3mg/l以上の水塊の厚さのばらつきは結局のところ、A3、A4、A6では、地形の影響で港中央との水交換が阻害されて、水温躍層の水深が浅くなっていることによるところの大きいものと推測される。

4. 貧酸素水塊の消長とその要因

図-6は西宮防波堤の沖から人工島背後の御前浜手前までのDOの縦断分布（図-1中の破線）である。図中の縦の黒棒は西宮防波堤を、濃い灰色の領域はDOが3mg/l以下であることを示す。貧酸素水塊は6月3日にはすでに発生しており、港中央B2では、6月10日には層厚が3.5m、翌週6月19日には8mに達している。6月25日には港中央では貧酸素水塊厚は減少し、湾奥A3で表層まで貧酸素化していることが分かる。これは図-2の風向・風速に示すとおり、前日からの北西風の連吹による影響で、底層

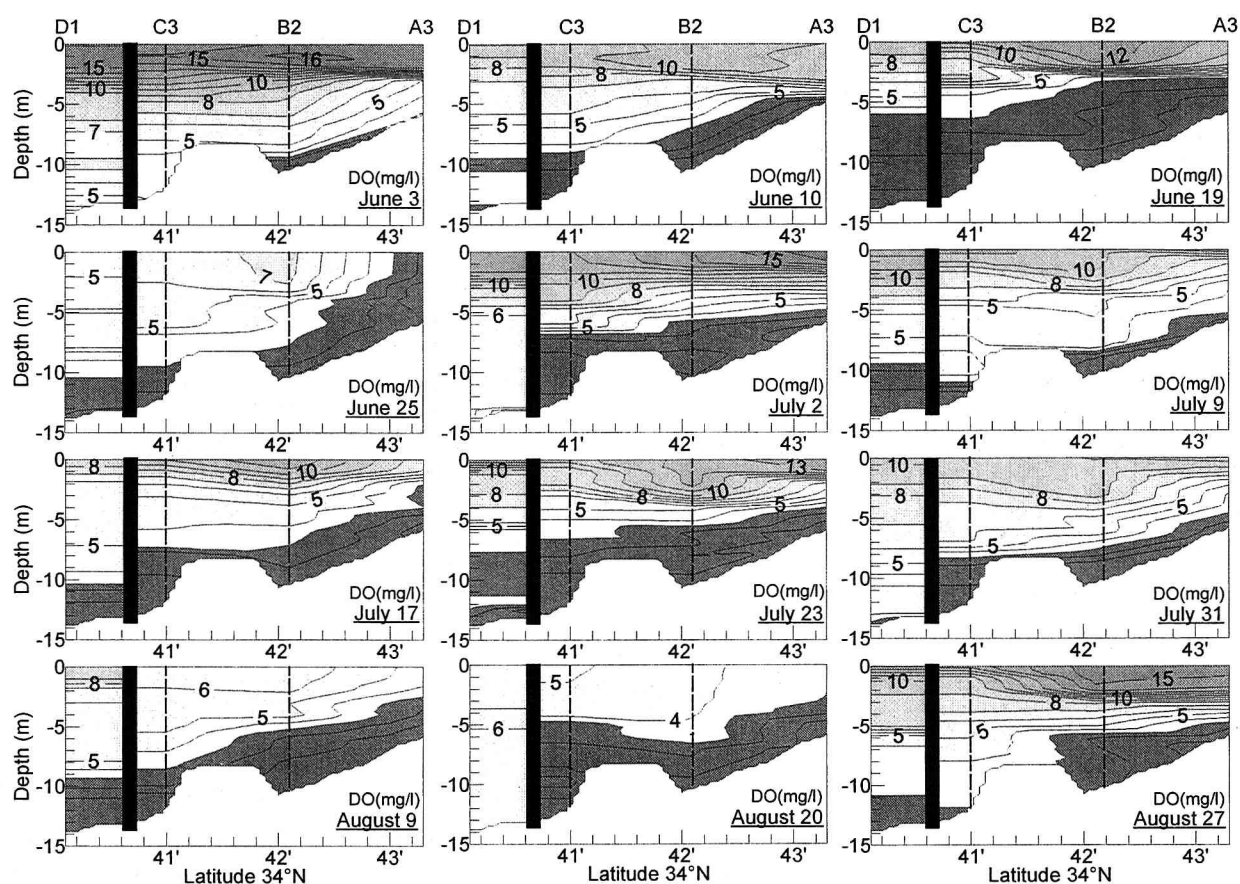


図-6 DOの縦断分布 (D1-A3測線) の時間変化 (図中灰色部は貧酸素水塊を示す)

水の湧昇が起きたためである。通常、大阪湾湾奥部では夏場は南西風が卓越するため、底層水の湧昇による青潮現象は確認されることは少ない。しかし、この観測日には風の影響を受けて、湾奥A3、A4付近の海域の水色は白濁し、青潮が確認された。翌週の7月2日になると、DOの等値線は水平に戻り、堤防内のDO3mg/lの等値線は水深5mに達している。一方、堤防外では底層でもDOは5mg/l程度の値を有し、貧酸素水塊が移動しており、防波堤内外で貧酸素水塊が異なる挙動を示しているのが分かる。8月20日の観測では、台風14号の影響で18日から北風が連吹したため、表層のDOは3~6mg/lと低く、またDOの鉛直分布や、ここでは図示していないが、水温や塩分の鉛直分布もほぼ一定値を示し、湧昇が起きているものと考えられる。その結果、図-6の8月20日の分布に示すように、D1では貧酸素水塊が見られない。しかし、翌週の8月27日にはD1の貧酸素水塊は復元している。この時期の風による底層水の湧昇はある程度の鉛直混合を生起させる一方で、貧酸素水塊の消長に対しては一時的な影響しか与えないと考えられる。

また、7月17日は、観測日の前後の降雨による淀川の出水の影響で、対象水域中央部においても表層の塩分が18psuまで下がった。翌週の7月23日も出水の影響が残り、表層の塩分は22psu程度であった。このような大きな出水があったとしても、底層の貧酸素水塊にはほとんど影響を及ぼしていないことが分かる。

7月9日と7月31日には、突発的な気象擾乱がないにもかかわらず、貧酸素水塊が減少している。7月9日より前の1週間は、図-2を見て分かるとおり、日射時間が少ないので、7月9日の貧酸素水塊の減少は日射量の減少に起因しているとも考えられる。しかし、7月31日については日射時間、気温とも増加、上昇していることから、貧酸素水塊の減少が単純に日射量の減少によるとは言えないと考えられる。現に、貧酸素水塊厚やその前回比(増分)と日射時間との相関解析を行ったが、明瞭な相関は認められず、結局、今回の観測結果からは、貧酸素水塊の消長と日射量の短期的な増減との関係は不明である。

杉山ら⁶⁾によると、名古屋港の貧酸素水塊は期間中に集中豪雨を挟んでもなお、強固に存在した。本研究の対象水域においても、観測期間を通してのDOの挙動から類推すると、観測期間中の貧酸素水塊は風により突発的に移動はするものの、出水などにも影響を受けず、強固に存在し続けていると言える。

5. 貧酸素水塊と水質項目の鉛直構造

図-7に港奥のA3における水温、塩分、クロロフィルa、DOの鉛直分布を示す。表層の水温は観測期間中、徐々に上昇し、底層付近でも表層の水温上昇の影響を受ける。6月25日は風による湧昇の影響を受けて、各項目とも鉛直方向にほぼ一様化しているのが分かる。

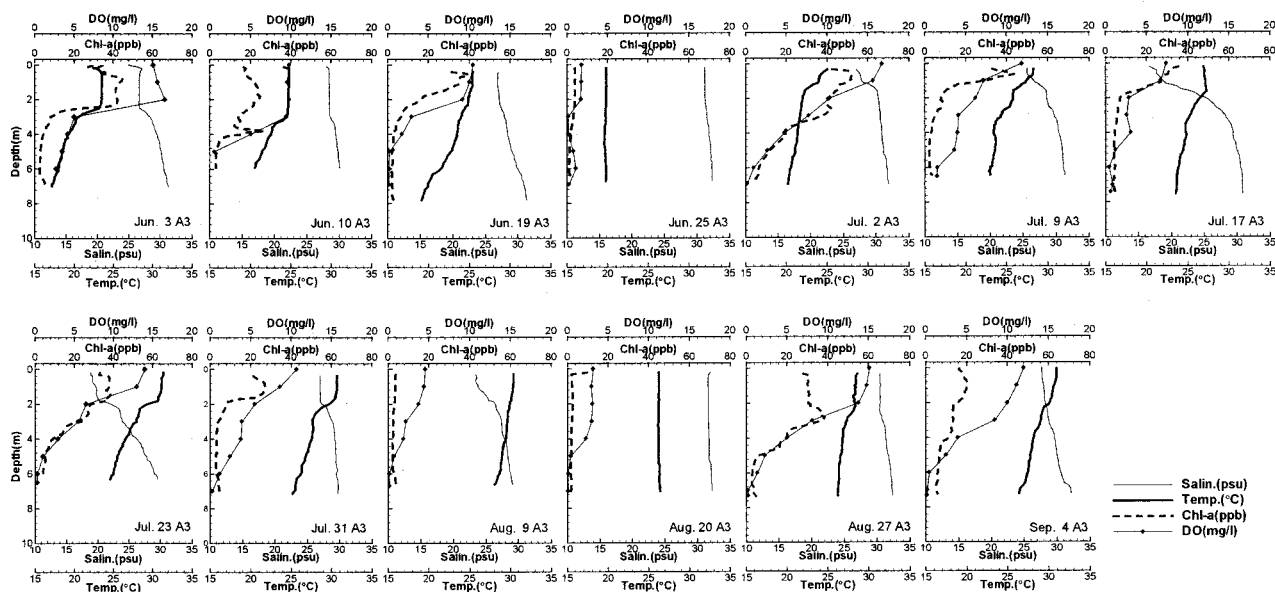


図-7 観測点A3における水温・塩分・クロロフィルa・DOの鉛直分布の時間変化

貧酸素水塊と表層と底層の水温差（以降、表底水温差と呼ぶ。）やクロロフィルaとの相関を時系列で見れば、明確な相関は得られないが、観測日ごとの鉛直分布においては、DOと水温・塩分・クロロフィルaとの関係は明確である。DOとクロロフィルの鉛直分布は非常によく似ており、DOが急減するところでは水温躍層、塩分躍層が見られる。貧酸素水塊の厚さはこの躍層によって規定されるものと考えられる。

躍層の位置は期間を通して変化している。6月3日には水深約2.5mの位置に水温躍層があり、6月19日には表層と底層の温度差は大きく変わらないが、水温躍層は不明瞭になる。6月25日の湧昇後は、水深約1.5mのところに水温躍層ができてはじめて、7月31日までゆっくりと下降しているのが分かる。

これに呼応して、クロロフィルaは6月3日や7月9日～7月31日は、水温躍層より上層で増殖している。水温が底層に向かってゆっくり低下している6月19日はクロロフィルaの増加する層は水温躍層によって制限されずに、濁度や透明度の観測結果から、むしろ有光層厚で制限されているものと見られる。DOは6月3日や7月9日～7月31日には水温躍層より下層で貧酸素状態になっている。このような水温躍層の明確でない観測日にはDOも明確な落ち込みを見せない。成層が弱まり、鉛直混合が若干行われている間に、植物プランクトンのデトリタス態が沈降しながら分解されていく過程で、酸素消費が徐々に行われていくことが推測される。

鉛直分布の空間的相違の例として、図-8に7月17日のA1, A4, A6, C1, D1の観測値を示す。城⁷⁾は本研究における観測点D1の近傍で得られたデータをもとに、鉛直分布について解析した結果、貧酸素水塊の発達するこの時期には、DOの鉛直分布は表層で植物プランクトンの活発なブルーミングが起きている層と、底泥による酸

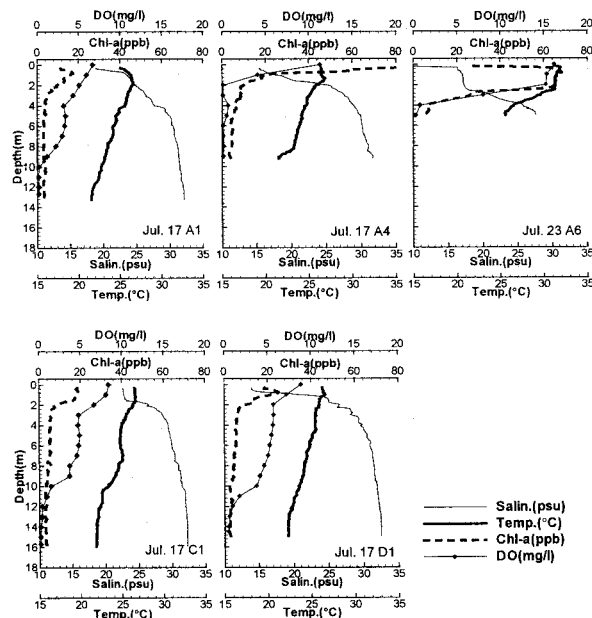


図-8 各観測点の鉛直分布の比較（7月17日）

素消費が行われて極度に貧酸素化している底層と、その間の中間層に分けることができると報告している。今回の観測結果は城の結果を支持するものである。一方、湾奥の水深の浅い水域では、その中間層が存在せず、光合成の盛んな表層と多くの酸素消費が行われる底層とが水温躍層を挟んで存在する2層構造を有すると言える。これは、当然のことながら、湾奥でも底泥による酸素消費が活発に行われていることを示している。

6. 考察

城⁷⁾は、浅海定線調査のデータを用いて、DOは表底密度差ではなく、表底水温差との相関が高いと指摘している。そこで、貧酸素水塊の挙動の原因を把握するため、

表-2 DOと表底水温差および密度差の相関

観測点	相関係数	
	表底水温差	表底密度差
A1	0.48	0.43
A2	0.37	0.35
A3	0.72	0.64
A4	0.61	0.56
A5	0.54	0.49
A6	0.63	0.56
B1	0.28	0.24
B2	0.11	0.02
B3	0.41	0.34
C1	0.19	0.25
C2	0.31	0.19
C3	0.28	0.20
C4	0.02	0.11
C5	0.14	0.10
D1	0.39	0.43

貧酸素水塊厚と表底水温差やその前回調査からの増減量などの様々な指標と回帰分析を行ったが、有意な相関が得られるには至らなかった。例えば、表-2に貧酸素水塊厚と表底水温差、表層と底層の密度差（以降、表底密度差と呼ぶ。）の各点ごとの時系列データをもとに解析した相関係数を示す。相関があると言えるのは、A3, A4, A6の貧酸素水塊厚と表底水温差の相関のみであった。これは夏季の貧酸素水塊の消長が表底水温差などのいわゆる「成層強度」で支配されているのではなく、単純に水温躍層の位置で決まっているためと考えられる。

また、ほとんどの点で、貧酸素水塊厚は表底密度差より表底水温差との相関係数が大きく、貧酸素水塊の消長は表底水温差に影響を受けやすいと考えられる。一方で、港奥部の3点のみで貧酸素水塊厚と表底水温差との相関があると認められるので、港奥の人工島背後のような地形の影響を大きく受ける領域では、水温成層がより貧酸素水塊の挙動を制限していると言える。つまり、この海域の貧酸素水塊を解消する方策を立てるのであれば、水温成層を破壊することが一義的に重要であると言える。

風の影響については、城⁷⁾によると、大阪湾湾奥の東部海域では、北寄りの風が底層への酸素供給を助長する役割を果たすと述べている。今回の観測結果では8月20日がこの気象状況に相当するが、DOが鉛直方向にはほぼ一様のまま、港奥から沖へ向かって上昇していることより、大阪湾全体で見た場合、北風が湾奥の底層の貧酸素状態の回復に寄与していることが窺える。しかし、同時に尼崎西宮芦屋港においては貧酸素水塊が湧昇しており、大阪湾湾奥部の貧酸素状態の回復はさらに奥部の広域の貧酸素状態の一時的な悪化を同時に招いていることになる。本研究の対象領域においては、南西寄りに風の場合はほとんど鉛直混合が生起せず、北寄りの風は貧酸素水塊の湧昇を促すので、盛夏には、風による貧酸素水塊の解消は期待できないことが分かる。

本研究では、湾奥の閉鎖性の強い海域における詳細なDOの挙動解析を行った。これまで大阪湾湾奥部全体で行われていたDOに関する観測を湾奥部の閉鎖性の強い海域で詳細に行ったことで、風による貧酸素水塊の解消が見られないなど、いわゆる湾奥部の一般的な傾向と異なる傾向ももつことが定性的に明らかになった。また、大阪湾ではあまり観測されない青潮と白濁現象も観測された。貧酸素水塊は強固に残り、夏期の風による攪乱や日射量の一時的な減少などにより、一時的なDOの回復が見られるが、翌週にはほとんど復元する。貧酸素水塊の消長には気候の長期的な変動に加え、様々な短期的な攪乱が影響を及ぼしていると言えるが、貧酸素水塊の消長の主要因と言える単一要素はないと考えられる。唯一、港奥の底層の貧酸素水塊が水温躍層によって拡大を制限されているということが明らかになった。今後、採水分析や流況観測の結果の解析と、さらに、数値シミュレーションなどを利用して、複合的に絡む貧酸素水塊の消長過程を明らかにする必要があると考えている。

謝辞：本研究は科学研究費補助金・基盤研究(A)(2)（課題番号14205073、代表者中辻啓二）により行われ、国土交通省近畿地方建設局神戸港湾空港技術調査事務所と大阪大学との協力による「大阪湾湾奥部閉鎖性海域貧酸素水塊調査」によるものであることを付記し、ここに深甚の謝意を表する。

参考文献

- 1) 入江政安、中辻啓二：沿岸域環境に対する住民意識の把握と水質モデルによる環境施策の一試算—WWW上でのアンケート調査をもとに—、日本沿岸域学会論文集、No.14、pp.13-24、2002。
- 2) 大阪府立水産試験場：大阪府立水産試験場事業報告、平成12年度、pp.1-18、2002。
- 3) 矢持進・小田一紀・柳川竜一・山根和夫・田代孝行・新瀬幾恵：大阪湾湾奥域の環境特性と大型底生動物群集の時系列変化、海岸工学論文集、第48巻、pp.1191-1195、2001。
- 4) 松梨史郎：湾奥水域における水質の時空間変化の解析、土木学会論文集、No.573/VII-4、pp.93-110、1997。
- 5) 城久：大阪湾の開発と海域環境の変遷、沿岸海洋研究ノート、第29巻第1号、pp.3-12、1991。
- 6) 杉山陽一・依田眞・原田一利：名古屋港の貧酸素水塊に関する現地調査、海岸工学論文集、第48巻、pp.1056-1060、2001。
- 7) 城久：大阪湾の貧酸素水塊、沿岸海洋研究ノート、第26巻第2号、pp.87-97、1989。
- 8) 藤原建紀、肥後竹彦、高杉由夫：大阪湾の恒流と潮流・渦、海岸工学論文集、第36巻、pp.209-213、1989。

(2002. 9. 30受付)

7. 結論