

人工構造物に囲まれた水域における DOおよび栄養塩の時空間分布特性

SPATIAL AND TEMPORAL DISTRIBUTIONS OF DISSOLVED OXYGEN AND
NUTRIENTS AROUND ARTIFICIALLY RECLAIMED LANDS IN ESTUARIES

入江政安¹・中辻啓二²・西田修三³・石垣衛⁴・窪田勇輝⁵
Masayasu IRIE, Keiji NAKATSUJI, Shuzo NISHIDA, Mamoru ISHIGAKI
and Yuki KUBOTA

¹正会員 博(工) 大阪大学大学院助手 工学研究科地球総合工学専攻(〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

²フェロー 工博 大阪大学大学院教授 工学研究科地球総合工学専攻(〒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 工学研究科地球総合工学専攻(〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

⁴正会員 博(工) (株)大林組 土木技術本部 環境技術第二部 (〒108-8502 港区港南2-15-2)

⁵学生会員 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻(〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

Water mass which is deficient in oxygen spreads in the Port of Amagasaki-Nishinomiya -Ashiya in the head of Osaka Bay from April to November. In the past two years field survey of dissolved oxygen has been carried out in the port, but the detailed dynamics of the oxygen-deficient water is not clear totally in the head of the port. In the present paper a new field survey of DO and nutrients is conducted in small water areas around the reclaimed islands in the head of the port. The water areas are divided into two types, that is, the small and enclosed areas in the head and the other area in the port. In the head of the port excess production of phytoplankton increases, and the great deal of organic nutrients makes the concentration of DO very low in spring. This oxygen-deficient water spreads out to the other water area in early summer. The behavior of the oxygen-deficient water in each area is linked together in high summer.

Key Words : dissolved oxygen, enclosed coastal waters, field survey, artificial beach, Osaka Bay

1. はじめに

大阪湾奥部において、夏季の底層水が貧酸素化することは1960年中ごろから知られている。貧酸素化あるいは無酸素化が生態系に多大な影響を及ぼすことは自明のことである。湾奥部の閉鎖性水域においては、貧酸素水塊は密度躍層直下まで拡大している。このような状況において、強風が連吹すれば、その方向によっては貧酸素状態の底層水が湧昇し、青潮が発生することになる。

東京湾では、青潮は湾規模の大きさで、毎年と言っていいほど発生が報告されている。これは大阪湾に比べて、岸沿いの水深が浅いことが一つの要因である。一方、大阪湾では、水深10~15mまで埋立地や防波堤が張り巡らされているので、大規模な青潮の発生は認められない。しかし、湾奥の限られた水域において、毎年数回青潮が観測されている。

大阪湾の貧酸素水塊の調査は、様々な機関によって実施されてきた。継続的に実施されているのは大阪府立水産試験場による浅海定線調査¹⁾や国土交通省近畿地方整備局によるモニタリング²⁾、水質汚濁防止法に基づいた公共用水域水質調査である。これらの調査結果を基に、城³⁾や堀江⁴⁾の報告に代表される解析が行われてきた。

しかし、これらのデータは年に4回のデータであり、貧酸素水塊の季節変動を捉えた調査は限られている。1985年頃から実施されている大阪府立水産試験場による調査の他、1986~1987年に旧運輸省第三港湾局が実施した調査⁵⁾や1997~1999年に旧通産省中国工業技術研究所が実施した調査^{6), 7)}、1999年に大阪市港湾局が実施した調査⁸⁾などが挙げられる。これらの調査の中で、港湾内に着目したのは旧通産省中国工業技術研究所による尼崎西宮芦屋港と堺泉北港の調査と大阪市による大阪港と尼崎西宮芦屋港の調査に限られていた。

そこで、著者は貧酸素水塊の発生源となる港湾域に着目し、尼崎西宮芦屋港内で貧酸素水塊の調査を実施してきた^{9), 10), 11)}。得られた知見としては、

- ・貧酸素化は5月には始まっており、港奥では11月でもなお貧酸素水塊が残る。
- ・発達期においては、一般的に水温の上昇により貧酸素化が進むが、早期の水温上昇は活発な植物プランクトン生産とその分解に伴う酸素消費をもたらし、早期に貧酸素水塊が拡大する契機となる。
- ・貧酸素化の進展に年度ごとの差異が生じる原因は中層における有機物の分解量によるところが大きいと考えられる。

などが挙げられる。なかでも、大阪湾全体の貧酸素水塊の消長と尼崎西宮芦屋港内のそれでは、機構が大きく異なる。城³⁾は湾全体の貧酸素化について、底層のDOは水温成層との相関が強いと指摘している。しかし、港内の貧酸素水塊の消長からは、この相関は認められない。その原因として、

- ・貧酸素水塊最盛期においては、表層の無機態栄養塩が枯渇し、初夏に比べて植物プランクトンの生産が減少する。水温上昇に伴い内部生産が増えるわけではない。
- ・成層強度が強くなるにつれ貧酸素化するという特性は湾全体の貧酸素水塊と同じである。しかし、閉鎖性水域内の中層における酸素消費の影響が、一般的な沿岸域よりも大きい。閉鎖性水域においては中層における酸素消費も貧酸素水塊の発達・消滅過程に重要な役割を果たしているものと考えられる。

ことなどが挙げられている。

このような湾全体の一般的性向とは異なる港湾内の貧酸素水塊の動態を明らかにするために、著者は貧酸素水塊調査を実施してきた。しかし、栄養塩の時空間分布が明らかでなかったために、栄養塩の循環と貧酸素水塊の消長の関係については十分明らかでなかった。そこで、2004年の調査において、DO（溶存酸素）調査と採水分析調査を同時に実施した。また、これまでの調査に比べて、港奥部の狭い領域で貧酸素水塊調査を実施した。これは、より詳細な貧酸素水塊の空間分布特性、人工構造物周辺の貧酸素水塊の発生・発達の機構を明らかにするためである。

本報では、2004年5月～11月に実施した貧酸素水塊調査および水質採水調査の結果を基に、栄養塩とDOの時空間分布特性とその関連性を明らかにする。また、閉鎖性水域の貧酸素化に栄養塩の生産・分解が及ぼす影響を明らかにする。

2. 調査の概要

(1) 対象領域の地形

尼崎西宮芦屋港を図-1に示す。尼崎西宮芦屋港は大阪

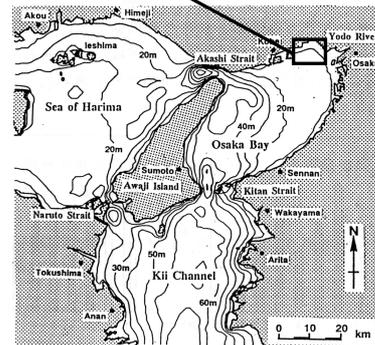
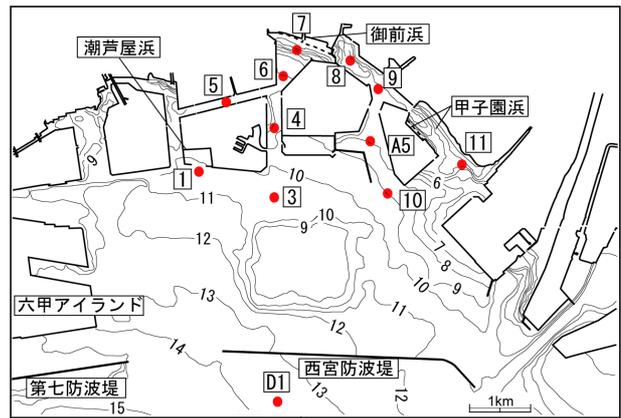


図-1 大阪湾と観測対象領域

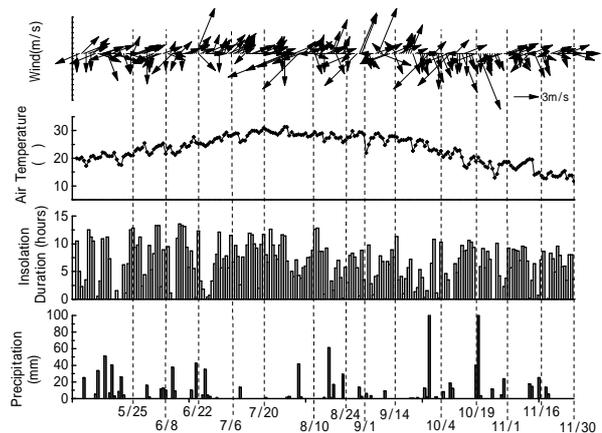


図-2 観測期間中の風向・風速、気温、日照時間、降水量

湾奥部北岸に位置し、大阪港と神戸港に挟まれた海域にあたる。沖合の西宮防波堤や人工島に囲まれることにより、港外とは400m～1.6kmの4力所の開口部のみで接続している。本調査は2002年および2003年に実施した調査^{9) 10)}の対象海域に比べて、港奥部に観測点を多く配置した。過去の調査に比べて、港中央部（港奥の人工島から西宮防波堤までの領域）の調査点が少ない。しかし、これまでの研究^{9), 11)}により、測点3を調査すれば、港中央部の密度構造や貧酸素状態はおおよそ推測できる。測点1、測点7、測点11はそれぞれ、潮芦屋浜、御前浜、甲子園浜と呼ばれる砂浜前面に位置する。また、測点4、5、A5は水路にあり、なかでも測点5のある水路は水深6m、幅140mの直線の水路で、春季から秋季まで水上スキー

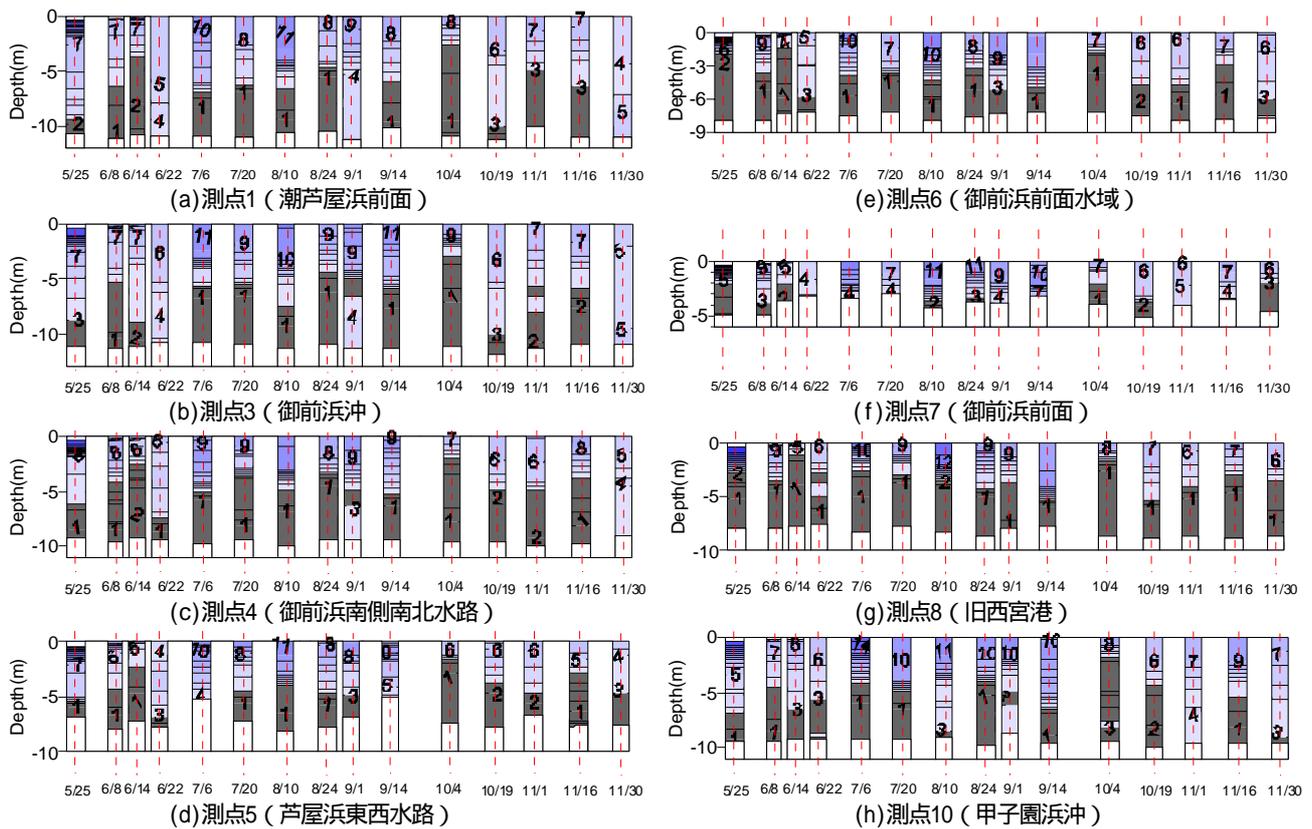


図-3 DOの時空間分布（图中灰色領域はDOが3mg/l以下であることを表す）

（ウェイクボード）やカヌーの練習場になっている。測点8は垂直護岸で囲まれた水域に位置し、港奥の中では水深約8mと、特に深い。

(2)対象領域の貧酸素化の状況

これまでに把握できた貧酸素化の状況は冒頭で述べたとおりである。尼崎西宮芦屋港内では、底層のDOは、4月にすでに貧酸素状態になる日もあり、6月から9月まではほぼ無酸素状態である³⁾。港奥においては水深1.5~2mの密度躍層付近まで、貧酸素水塊が拡大する。そのため、風況の変化により、貧酸素水塊は容易に表層に現れ、青潮の発生原因になる。しかし、変化が止むと、底層の貧酸素状態は強固に継続する¹⁰⁾。

また、貧酸素化の程度は、甲子園浜・御前浜ではアサリの生息に好適な水深まで及ぶ場合があり、潮芦屋浜では及ばないことが、これら3つの浜における夏季以降のアサリの個体数・湿重量に違いが現れる一要因となっている¹²⁾。

本論文では、 $DO < 3\text{mg/l}$ を貧酸素状態、 $DO < 1\text{mg/l}$ を無酸素状態と定義する。また、全水深からDOが3mg/lとなる水深を引いた値を「貧酸素水塊厚」と呼ぶことにし、貧酸素水塊の消長を表現することを提案している。

(3)調査期間の気象

現地調査は2004年5月25日~11月30日に実施した。図-2

に観測期間中の風向・風速、気温、日照時間、降水量を示す。2004年は、年平均気温が観測史上2番目の高さをしめすほど、気温が高い年であった。5月は前線の影響を受け、平年に比べて降雨量が多く、日照時間は少なかった。また、梅雨期の雨が少なく、7月は平年の3分の1の降雨量であった。9月は残暑が厳しく、11月も平年に比べて、1~3 高かった。また、2004年は台風の上陸が多く、6月~8月に6回、9月および10月に4回といずれも記録開始以来最多であった。夏季の台風通過時には南風が吹くことが多く、秋季の台風通過時には北風が卓越することが多かった。

(4)調査の内容

観測は主に貧酸素水塊調査と採水分析調査に分けられ、船で巡回して、測定を実施した。貧酸素水塊調査は図-1に示した12測点において、水温、塩分、濁度、クロロフィルa（機器測定）、DOの鉛直分布を計測した。採水分析調査は測点1, 7, 9, A5, D1を除く8測点で、水面から1mと底面から1mの2層で採水を行った。試料は持ち帰って化学分析を行った。調査は2004年5月25日~11月30日の間をほぼ2週間に1回で実施した。

3. 港奥部のDO分布特性

著者らがこれまでに実施した尼崎西宮芦屋港内の貧酸

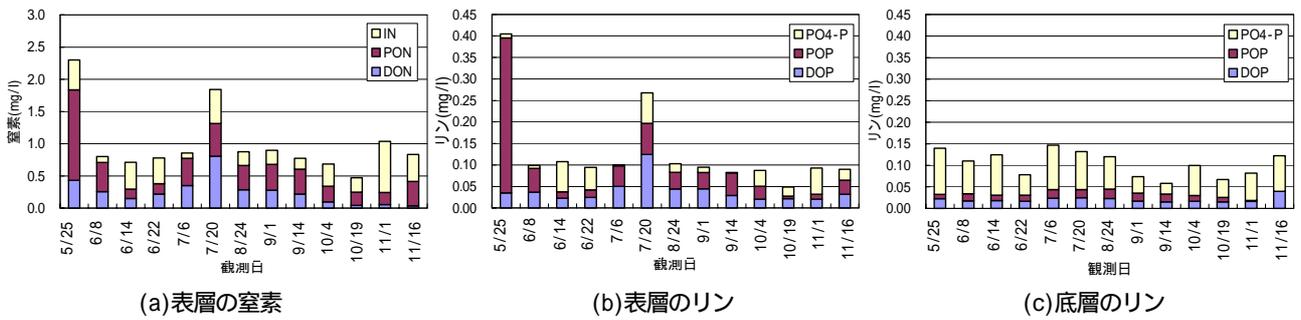


図-4 測点6における窒素・リン濃度

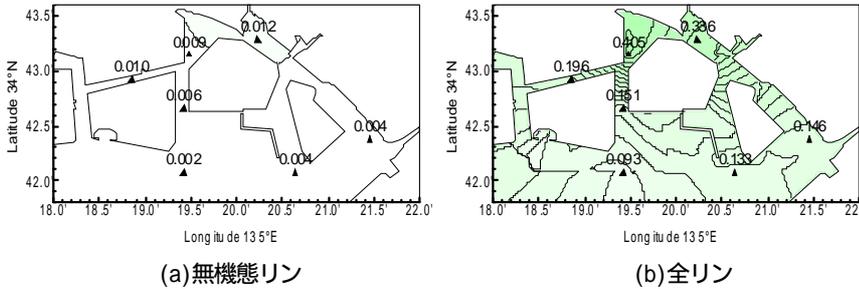


図-5 5月25日の表層における無機態リン・全リンの水平分布

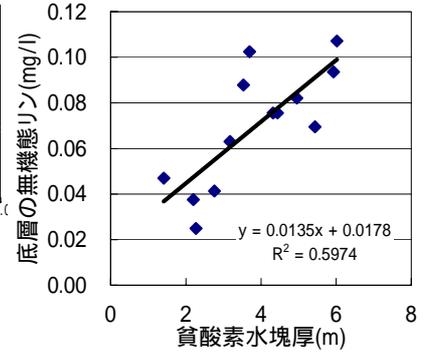


図-6 貧酸素水塊厚と底層IPとの相関

素水塊調査では、港内全体を対象としていた。このため、最初に貧酸素水塊が発生する位置や貧酸素水塊が拡大過程・機構について、港湾地形を踏まえて議論することができなかった。2004年は人工島周辺において調査を実施したので、これらの点についても考察可能となった。

(1) 貧酸素水塊の発生位置

港奥の各観測点におけるDOの鉛直分布を時系列で並べた時空間分布を図-3に示す。貧酸素化はどの測点においても、5月25日に始まっており、観測対象領域の底層は全て貧酸素化している。しかし、鉛直分布をみると、港最奥部の測点6, 7, 8では、水深2~3mに達している。港最奥部につながる2つの水路に位置する測点4, 5においては、DOが3mg/lになる水深は5~6mである。人工島南側の測点1, 3に至っては、底層上1~2mが貧酸素化しているのみである。この点から判断して、貧酸素水塊が最初に発生するのは御前浜前面やその東側などの港最奥部であると考えられる。

(2) 貧酸素水塊の空間変動

5月にすでに発生している貧酸素水塊の拡大の傾向は地点によって異なる。水路や人工島南側では、5月以降夏季において、貧酸素化の最盛期を迎える。これに対し、港最奥部の測点6, 7では、むしろ5月25日に最も貧酸素化している。また、測点1, 3では、6月22日や9月1日に貧酸素水塊が認められず、同じ人工島南側の測点10では8月10日と9月1日、11月1日に見られなかった。6月22日は、前日に台風6号が近畿地方を通過し、最大瞬間風速31.4m/sの南南西の風が吹き、42.5mmの降水があった。また、9月1日は、8月30日に台風16号が九州・中国地方に上陸した。30・31日の両日は最大瞬間風速30m/sの南

西風が吹いていたが、降水は少なかった。両日に貧酸素水塊が見られないのはこの南西風による吹送流の影響である可能性が高い。

貧酸素水塊の発達形態（遅れ）を見ると、水路上の測点4, 5の時空間分布特性は、港最奥部より人工島南側に似ている。したがって、DOの時空間分布からみると、港最奥部と水路・人工島南側の2つに分けることができる。

4. 湾奥部の栄養塩分布特性

(1) 無機態窒素・リンの分布特性

図-4に御前浜前面水域の測点6の表層の窒素・リン濃度および底層のリン濃度を示す。窒素・リンとも5月25日に最も高い。無機態リンのみが枯渇していることから、植物プランクトンの増殖はリンによって制限されていることが分かる。表層の無機態リン（I-P）および全リン（T-P）の水平分布を図-5に示す。図には示さないが、港最奥部がリン制限を受けている5月25日は水路や人工島南側でも同様に無機態リンが枯渇している。一方で、全リンは港最奥部に近づくとともに、高い濃度を示し、最奥部では植物プランクトンの生産性が高いことを示している。

また、図-4において6月14日や6月22日の無機態栄養塩濃度は比較的高い。6月14日は、3日前に台風4号が通過し、37mmの降水があり、3日間連続して北寄りの風が連吹したこと、22日は前日に台風6号が通過しており、南南西から北西へ風向きを変えながら、43mmの降水があったことにより、表層の無機態栄養塩が増加している

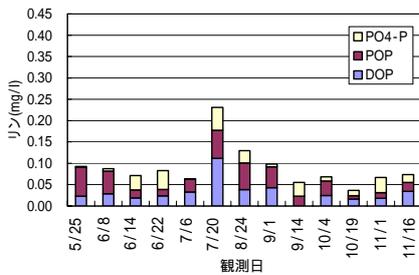


図-7 測点3におけるリン濃度

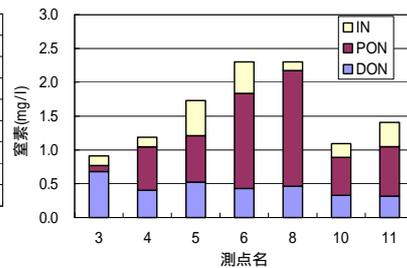


図-8 各測点における窒素濃度 (5月25日)

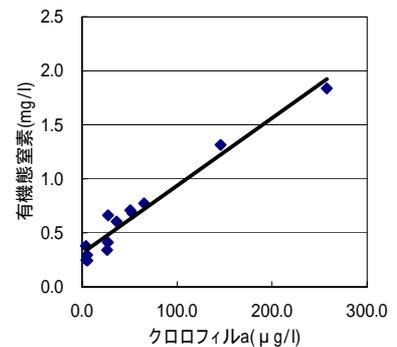


図-9 クロロフィルaとO-Nの相関

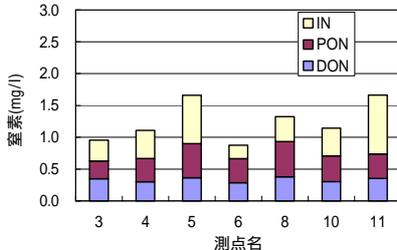


図-10 8月24日の表層の窒素濃度

ものと考えられる。図-4(c)に示すように、両日の表層の全リン濃度と組成は底層のそれらによく一致している。しかし、このデータだけでは下層水の湧昇によるものか、あるいは、鉛直混合の発生によるものかは論じることができない。

一方で、高くなった無機態リンは7月6日にはすでに消費されている。同様に、7月20日に増えた無機態栄養塩は8月24日、9月1日を経て、9月14日に枯渇している。これらの見かけのI-Pの減少量から、見かけのクロロフィルa増加量を次式で試算する。

$$\Delta C_{PP} = \Delta C_{IP} / (f_{pc} \cdot f_{chl}) \quad (1)$$

ここで、 C_{PP} ：植物プランクトンの増加量、 C_{IP} ：無機態リンの減少量、 f_{pc} ：リン炭素換算係数 (0.025 [mgP/mgC])、 f_{chl} ：炭素クロロフィル換算係数 (112.5 [mgC/mgChl-a]) である。試算すると、6月14日から7月6日にかけて、また、7月20日から9月14日にかけての見かけの無機態リン減少量とともに、25 $\mu\text{g/l}$ の見かけのクロロフィルa増加量に相当する。これは、底層水の湧昇や陸域からの流入などによる一時的な無機態リンの供給によって増加可能なクロロフィルa量の最大値が25 $\mu\text{g/l}$ であるというように考えることができる。この測点のクロロフィルaは5月25日に最大値258 $\mu\text{g/l}$ になり、全ての観測日の単純平均が55 $\mu\text{g/l}$ である。したがって、一時的な無機態栄養塩の供給はこの水域での植物プランクトン増殖の主たる要因とはなり得ない。供給源として水域外からの水平流入も無視できないが、隣接水域も同様に活発な内部生産があり、無機態リン濃度が低い。これらの点から、有機態リンの分解による再生産や底泥からの溶出によって、より多くの無機態リンの供給を受け、植物プランクトンが増殖しなければ、上で述べた平均値や最大値にはならないものと考えられる。

一方、底層の栄養塩は、図-4(c)から明らかなように、無機態のものが多い。図-6に示すように、貧酸素水塊厚は底層の無機態リンと良い相関をもっている。

(2)有機態窒素・リンの分布特性

図-7は人工島南側の測点3における表層のリン濃度の季節変化を示す。図-4(b)より、港奥部の測点6では、表層の有機態栄養塩は5月25日に最も高い。しかし、人工島南側の測点3では、最も高いのは7月20日になる。この日は前線による集中豪雨 (13日・16日：新潟・福島豪雨、18日福井豪雨) の直後の調査であり、栄養塩濃度が高いは河川の出水によるものだと考えられる。

港最奥部での有機態栄養塩の増加は活発な内部生産によるものであると推測される。図-8に5月25日の各測点の表層における窒素の濃度と組成を示す。港奥の測点6、8にいくにつれ、粒子体有機態窒素の濃度が高くなっている。また、測点6における有機態窒素 (PON + DON) とクロロフィルaの相関を図-9に示す。表層のクロロフィルaと有機態窒素の相関係数は0.98、粒子体有機態窒素のみとの相関係数は0.95である。両者の値は非常に高い。クロロフィルaと有機態リンとの相関も非常に良い。最奥部の測点8についても同様である。また、人工島南側の測点3の表層のクロロフィルaと有機態窒素の相関係数は0.90であった。図-9のy切片はたかだか0.31mg/lであり、湾最奥部の表層における有機態栄養塩増加に内部生産が大きく寄与していることが分かる。

(3) 栄養塩分布から見た類型

以上の考察から、栄養塩分布からみて、測点を2つの類型に分類できる。一方は、河川流入や底層水の湧昇による栄養塩供給より大きな内部生産を持つ構造の水域で、他方は前者に比して、河川流入による栄養塩供給の影響が大きく出やすい水域の2つである。前者には測点6、8といった港最奥部が相当し、人工島南側の測点は後者となる。両者を接続する水路部の測点は後者に近い。

5. DOおよび栄養塩の時空間構造から見た水質の空間分布特性

今回の調査では、人工島周囲の微地形に注目して、水質調査を実施した。これらの測定結果の関わりについて総合的に考察してみる。

測点7（御前浜前面）から南へ、測点6（御前浜前面水域内）、4（南北水路内）、3（人工島南側）におけるDOの時空間分布をみる（図-3）。全ての測点で表層の時間変化はほぼ同じ変動をする。海底面直近においては、どの測点も観測開始当初より貧酸素化しており、底面上のDO調査だけでは貧酸素水塊の発達を捉えることはできない。中下層においては、測点3では測点6での貧酸素化の影響を受けているが、両者は異なった変動を示す。測点6では春季より貧酸素水塊が発達し、測点3では発達しない。測点4では春季のDOは測点6とは一致しないが、初夏には連動するようになる。測点3は測点4に遅れて、7月頃より測点6と連動するようになる。8月24日の表層の窒素濃度を図-10に示す。図-8に示した春季の窒素濃度に比べると、各測点の濃度にばらつきが少ないことが分かる。つまり、春季においては、港最奥部での活発な内部生産とともに貧酸素化しており、夏季には港内全体で同様の貧酸素化が起きていることになる。したがって、このような湾奥部であり港奥部でもある小水域の春季の内部生産に伴う貧酸素化を浅場の造成などにより制限すれば、港全体への連動が遅れ、中下層が貧酸素化する期間が短くなることが期待される。

尼崎西宮芦屋港で最も貧酸素化が進むのは測点8である。測点8のある水域の空間の特徴は湾最奥部でありながら水深が7.7mと深く、窪みになる地形があること、西側水域との接続部が約40mと狭いことである。栄養塩の面から見ても、測点8は周辺の測点に比べて、全窒素、有機態窒素濃度が高い。

6. まとめ

本研究では、大阪湾奥部の尼崎西宮芦屋港内で、港奥部を中心に、貧酸素水塊調査および採水調査を実施した。人工島近傍の調査を実施することで、DOおよび栄養塩についての人工島周辺の詳細な時空間分布を得た。本研究で得られた主たる結果は以下の通りである。

春季の栄養塩濃度とその組成は測点間でかなりのばらつきがある。港最奥部、人工島背後の水域において、無機態リンが枯渇するまでの活発な内部生産が行われ、春季からの極端な貧酸素化の原因になっている。

夏季以降の表層の栄養塩濃度は地点間で大きな違いはなく、表層のDOが地点間で大きな違いが認められない点と一致する。

各測点でDOの鉛直分布調査を実施した結果、貧酸素水塊の時系列的な変化を観測することができた。貧酸素水塊は港最奥部の人工島背後で発達し、人工島間の水路、人工島南部へと拡大していくことが分

かった。

栄養塩およびDOの時空間分布から見て、港最奥部とそれ以外の水域に大きく分類できる。流れの小さい港最奥部については浅場を造成するなど、貧酸素化対策を行えば、港内の貧酸素化する期間を短縮できる可能性がある。

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）により行われたことを付記し、ここに深甚の謝意を表す。

参考文献

- 1) 大阪府水産試験場：浅海定線調査，大阪府水産試験場事業報告，1973-1997。
- 2) 国土交通省：瀬戸内海総合水質調査，国土交通省瀬戸内海総合水質調査ホームページ <http://www.pa.cgr.mlit.go.jp/gicyo/suishitu/>，2005。
- 3) 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。
- 4) 堀江毅：内湾における水質分布とその予測 - 大阪湾を事例として - ，昭和60年度港湾技術研究所講演会講演集，pp.59-118，1985.12。
- 5) 運輸省第三港湾建設局：大阪湾全域汚染実態調査報告書，1987・1988。
- 6) 通商産業省工業技術院中国工業技術研究所：瀬戸内海の適正環境創造のためのミチゲーション技術適用に関する研究（平成9年度），pp.47-1-47-16，1998。
- 7) 通商産業省工業技術院中国工業技術研究所：瀬戸内海の適正環境創造のためのミチゲーション技術適用に関する研究（平成10年度），pp.45-1-45-14，1999。
- 8) (財)大阪港開発技術協会：大阪港周辺における水質と漁業生物への影響調査報告書，2000.3。
- 9) 中辻啓二，入江政安，西田修三，湯浅楠勝：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，水工学論文集，第47巻，pp.1285-1290，2003。
- 10) 入江政安・西田修三・中辻啓二・金俊憲・湯浅楠勝：都市域近傍の閉鎖性水域の貧酸素水塊の挙動に及ぼす気象の影響，海岸工学論文集，第50巻，pp.991-995，2003。
- 11) 入江政安・西村和幸・佐々木昇平・西田修三・中辻啓二：湾奥部閉鎖性水域における貧酸素水塊の消長への影響因子，水工学論文集，第49巻，pp.1303-1308，2005。
- 12) 石垣衛・入江政安・中辻啓二・山本縁：大阪湾奥の物理的攪乱と貧酸素水塊が二枚貝の生息域に及ぼす影響，海岸工学論文集第52巻，pp.1181-1185，2005。
- 13) 尹鍾星・中辻啓二・村岡浩爾：風応力作用化の成層水域における密度界面の挙動および混合特性 - 水理実験と数値実験 - ，水工学論文集，第39巻，pp.811-818，1995。

(2005.9.30受付)