港湾等の強閉鎖性海域の貧酸素水塊の発生機構と動態

Generation Mechanism and Movement of Hypoxia in Strongly Enclosed Waters of Ports and Harbors

藤井智康¹・駒井幸雄²・藤原建紀³・横井貴範⁴

Tomoyasu FUJII, Yukio KOMAI, Tateki FUJIWARA and Takanori YOKOI

We conducted field observations in relation to hypoxia which occurs in strongly enclosed waters, such as ports and harbors, and examined generation mechanism and movement of hypoxia. Diurnal variations in hypoxia were driven by tide and wind in the strongly enclosed waters in the head of Osaka Bay. It was found that processes of the organism decomposition, oxygen consumption and carbon dioxide generation were different in and out of the ports. In the spring and summer when the water column is stratified, surface water absorbs CO₂ and bottom water stores CO₂ in strongly enclosed waters. On the other hand, in the end of summer, the stored CO₂ upwells to the surface and causes spontaneous emission because the north wind induces the upwelling.

1. はじめに

湾奥部の港湾水域は、市民の最も身近な親水空間“里海”となっている。このような水域では、しばしば赤潮が起き、またときには無酸素水が湧昇し、青潮が発生し、悪臭を放つこともある。

青潮は、東京湾においては頻繁に発生が確認される現象であるが、近年では大阪湾奥部でも発生が確認されている(藤原ら, 2005)。青潮の発生には窪地の存在や風による流れとの関係が指摘されている(佐々木ら, 1996; 柿野ら, 1987)。このような港湾水域の貧酸素・無酸素水塊について、現状では有効な発生防止対策がないのが現状である。

貧酸素化は、大阪湾のみならず他の内湾でも起きており、貧酸素化対策は内湾の環境再生に共通する主要な課題となっている。

中辻ら(2003)によれば、大阪湾奥部の貧酸素水塊の挙動については、風による貧酸素水塊の解消が見られず、湾奥部の一般的な傾向と異なる傾向を持つことが示されており、貧酸素水塊の消長には複雑な要因が影響していることが指摘されている。また、一時的なDOの回復が見られてもすぐに復元されることが示されている。

このように、閉鎖性内湾における研究例は数多くあるが、複合的な要因が絡むことによって貧酸素水塊の消長については未だ明らかにされていない部分も多い。さらに防波堤で囲まれた港湾等の強閉鎖性海域内の流動、海水交換、貧酸素水塊の発生や消滅機構については知見が

少ないのが現状である。

そこで、本論文では港湾規模の強閉鎖性海域で発生する貧酸素水塊対策に関連し、現地調査を実施し、強閉鎖性海域の貧酸素化機構やその動態について検討した。

2. 現地調査および解析

現地調査は、大阪湾奥部に位置する新西宮ヨットハーバー(以下YHと称す)で実施した(図-1)。

(1) 水質調査

水質調査は、2009年5月下旬から12月初旬まで、図-1に示すYH内のSt.A(34°42'30"N, 135°19'47"E)で月2回程度行った。また、2009年11月12日～13日には、同地点で1時間間隔の24時間調査を実施した。

クロロテック(JFEアレック社製AAQ1183)により、水温、塩分、DO、pH、濁度、クロロフィルの鉛直分布を0.1m間隔で測定した。

図-1 調査地点

1 正会員	博(理)	奈良教育大学	准教授	教育学部
2 正会員	博(学)	大阪工業大学	教授	工学部
3 正会員	農博	京都大学大学院	教授	農学研究科
4	修(教)	奈良教育大学大学院		
		(現 岐阜県瑞穂市公立小学校	講師)	

また、バンドーン採水器により表層から海底直上1mまで1m間隔で多層採水を行った。採水試料は、公定法にしたがってDIN ($\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$), TP, $\text{PO}_4\text{-P}$ を分析し、三菱アナリテック社製TN-100でTNを、島津製作所製TOC-VでTOCを測定した。また、滴定法により全アルカリ度の測定を行った（方法はJISK0400-15-10:1998）。この採水調査により、貧酸素水塊中に蓄えられる栄養塩および二酸化炭素濃度を求めた。

(2) 水温連続観測

水質調査では、風と対応した躍層深度の変化、湧昇が貧酸素水塊の挙動に影響を与えていた。このため、YH内 (St.A) の海底より水深1mごとにメモリー水温計 (Onset社製ホボウォーターテンプロ H20-001, 精度: $\pm 0.2^\circ\text{C}$) を設置し、10分間隔で水温連続観測を行った。観測期間は、2008年11月20日～28日である。

(3) 風向・風速データ

上記調査期間中の風向・風速データは、調査対象地域に近い国土交通省近畿地方整備局神戸港湾空港技術調査事務所管理の神戸港波浪観測塔 (六甲アイランド沖: $34^\circ 38' 50''\text{N}$, $135^\circ 16' 36''\text{E}$) の2時間間隔のデータを提供して頂き、解析に用いた。

(4) 二酸化炭素の解析

貧酸素水塊中では、酸素消費にともなって二酸化炭素 (CO_2) が生成され蓄積されていた (藤原, 2010)。そこで本研究では、YHにおける CO_2 の挙動も調べた。

CO_2 系の各項目の値は、pHと全アルカリ度から計算で求める方法である。計算式はCDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center) が提供する CO_2SYS (Lewis&Wallace,1998) を用いた。

全アルカリ度は、本調査によって得られた全アルカリ度と塩分の関係式と、田口ら (2009) による全アルカリ度と塩分との関係式には有意な差がなかったため、後者を用いて算出した。

計算で求めた表面海水の二酸化炭素分圧 (pCO_2) と大気中の二酸化炭素分圧 ($380\mu\text{atm}$) の差 (ΔpCO_2) が正のとき ($\Delta\text{pCO}_2>0$)、海水から大気への CO_2 の放出、負のとき ($\Delta\text{pCO}_2<0$) を、吸収とした。

また、YHのような港内海域と、港外海域の比較を行うため、神戸市公共用水域水質調査、第五管区海上保安本部海洋情報部の大阪湾環境調査の塩分・水温・pHデータを提供して頂き、これから大阪湾東部の ΔpCO_2 の3年間 (2006～2008年度) の平均値を求めた。

3. 調査結果

(1) 水質の季節変化

St.Aにおける塩分、DO、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、および $\text{NH}_4\text{-N}$ の2009年の季節変化を図-2に示す。

塩分躍層は6月中旬から発達し、7月中旬に最も強くなった後、8月下旬から9月上旬にかけて弱くなった。

9月21日には一時的に塩分躍層が消滅し、表層まで高塩分となり、下層の高塩分水が上層まで湧昇したことを示唆している。

水深が約9mのSt.Aにおいて、5月下旬の時点で水深3m以深でDOが 3mg/l 以下の貧酸素状態であり、6月初旬には水深7m以深でDOが 1mg/l 以下となった。成層の発達に伴い、貧酸素層は上方に拡大し、8月には水深3m以深でDOが 3mg/l 以下となった。

図-2 YH内 (St.A) における水質の季節変化 (2009年)

貧酸素層の深度に季節変化はあっても、少なくとも11月まで貧酸素状態は継続していた。また、10月下旬から11月にかけては、中層に貧酸素水塊が形成されていた。

塩分躍層が消滅した9月21日には、底層から表層まで全層にわたってDOが1mg/l以下となるとともに、 $\text{NH}_4\text{-N}$ や $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度が高くなった。

大雨に伴う流入河川水の影響によって、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が増加することを除くと、無機態窒素の大部分は $\text{NH}_4\text{-N}$ であった。いずれも底層で濃度が高く、表層に向かって減少する傾向を示し、貧酸素水塊の消長とよく対応している。

(2) 水温変動

貧酸素水塊の動態を明らかにするために、YH内のSt.Aにおける、風速の北方成分と水温の変動を図-3に示す。

YH内では、大阪湾上の風による吹送に伴って、躍層深度が変動した。防波堤に囲まれた強閉鎖性海域であるYH内のSt.Aでは、2008年11月24日～25日にかけての北風の連吹(北方風速が4m/s)により、水温躍層付近の水深3～4m(海底上6～7m付近)の水塊が、水面付近まで湧昇した。

図-3 YH内(St.A)の北方風速(北風が負)と水温変動(2008年11月23日～26日)

図-4 神戸港における風配図
(a)夏季6～8月, (b)秋季9～11月
(統計期間:2004～2009年)

(3) 大阪湾の風の特徴

躍層の形成および貧酸素水塊の形成が顕著な夏季から秋季にかけての神戸港の風配図を図-4に示す。

夏季(6～8月)では、南西風が卓越し、大阪湾の沖方向から湾奥部への風が顕著であった。また、秋季(9～11月)では、北北東風が卓越し、湾奥部から沖方向への風が顕著であった。大阪湾では、夏季と秋季で卓越風向が異なっていた。

(4) 貧酸素水塊の消滅過程

防波堤で囲まれた強閉鎖性海域の底層貧酸素水塊の消滅過程を明らかにするために、2009年の成層後期の11月上旬から11月下旬の塩分およびDOの鉛直分布を図-5に示す。

11月2日に水深4～5m付近にみられた塩分躍層が、日が経つにつれて徐々に上方に移動し、11月16日には顕著な塩分躍層は消滅した。

一方、DOについては、11月2日に水深6m以深にみられた無酸素水塊(DOが0mg/l)が、塩分躍層の上方への移動に伴い、11月12日には水深5～6m、11月13日には水深4mまで上昇し、中層に無酸素水塊が形成された。逆に底層付近のDOが徐々に回復していた。その後、塩分躍層の消滅とともに無酸素水塊が消滅した。

中層貧酸素水塊の形成は、内湾でよくみられる現象であるが(藤原ら, 2000), 防波堤で囲まれた強閉鎖性海域でも観測された。

(5) 強閉鎖性海域のCO₂の変動特性

a) YH内のDOとpCO₂の変動

St.AにおけるDO, pH, pCO₂の鉛直分布を図-6に示す。また、同地点の2009年のpCO₂の季節変動を図-7に示す。

図-6に示すように、DOは底層に向かうにつれ低下していた。このときpHもDOにほぼ比例して小さくなった。またpCO₂は、海面では大気平衡分圧の380 μatm に近いのに対し、貧酸素水塊中(水深8m付近)では、表層pCO₂の約5倍以上(1,900 μatm 以上)に達していた。

図-5 YH内(St.A)の塩分・DO鉛直分布(2009年)

図-6 YH内 (St.A) のDO, pH, pCO₂の鉛直分布 (2009年8月15日)

図-7 YH内 (St.A) におけるpCO₂の季節変化 (2009年)

図-7に示すように、pCO₂は底層の貧酸素・無酸素水塊の形成に伴い高くなっていた。この高いpCO₂水が、9月21日には上層にまで拡大し、その後、11月中旬以降に全層でほぼ同じpCO₂となっていた。

b) 港内と港外のCO₂放出・吸収

強閉鎖性海域の港内と港外を比較するために、大阪湾東部の2006年4月～2009年6月までの約3年間の表層海水のΔpCO₂の平均値を図-8に示す。

大阪港側はΔpCO₂>0であり、CO₂の大気への放出域であった。一方、神戸港側はΔpCO₂<0であり、CO₂の吸収域となっていた。しかし、吸収域の神戸港側でも、港内である兵庫運河では、ΔpCO₂が195μatmであり、放出となっていた。

4. 考察

(1) 成層の発達とDO・栄養塩濃度の季節変化

貧酸素水塊が形成されている底層では、NH₄-NやPO₄-P濃度が高くなっていた。一方、DOが過飽和となっている表層では濃度が低くなっていた (図-2)。このことは、防波堤で囲まれた強閉鎖性海域では、直接の水質汚濁源がなくとも、底層では、貧酸素化の進行に伴い、底質からの溶出と有機物分解でNH₄-Nが生じ、底層のみならず上層に拡大し、植物プランクトンに利用され、次の再生生産に利用されていることが推察される。

また、9月21日の一時的な底層水の表層への湧昇 (図-2)

図-8 大阪湾東部の表層海水のΔpCO₂ (2006年4月～2009年6月までの毎月の平均値)

の要因については、9月18日から日本南岸には停滞前線があり、その南を台風14号が東進したことによって、大阪湾では北東風が連吹していた。そのため、大阪湾奥部では、下層水の湧昇が生じ、底層水が表層まで持ち上げられたと推察される。

(2) 風による吹送と貧酸素水塊の動態

図-3に示す、2008年11月25日の北風の連吹に伴う底層水の水面への湧昇は、図-9に示すように、大阪湾上を北風が連吹することにより、上層水は、湾奥部より沖方向に流出し、逆に下層水は湾奥部に寄せられ、上昇する。そのため、YH内 (St.A) には、大阪湾の下層水が防波堤の間を通過して密度流として流入し、YH内の底層水を持ち上げる。つまり、大阪湾上の風による吹送と強閉鎖性海域内の貧酸素水塊の動態とは連動している。

成層後期の9～11月にあたるYH内 (St.A) では、大阪湾上の北北東の風の卓越により、沿岸部では貧酸素水塊が湧昇しやすい条件となっていた。

(3) 貧酸素水塊の発生と消滅

貧酸素水塊の発生過程には、有機物分解に伴う酸素消費が大きい。酸素消費は主に生物化学過程であり、バクテリアによる有機物分解 (呼吸) によって酸素が消費さ

図-9 大阪湾上の北風の連吹と躍層面の変動

れる。この呼吸は、上層で起きる光合成の逆過程であり、有機物と酸素から、無機態窒素・リン（栄養塩）と二酸化炭素が生じる（藤原，2010）。これは、図-6のDOと $p\text{CO}_2$ の鉛直分布が示しており、貧酸素・無酸素化に伴い CO_2 が高濃度で蓄えられていることを示す。これが、風による吹送に伴い、沿岸に寄せられ、水面まで湧昇することが明らかとなった。

一方、消滅過程には、図-5に示されるように、強閉鎖性海域内の底層に形成された貧酸素水塊の下に、この水塊よりも重い（密度の大きい）港外からの海水が防波堤の間を通して密度流として流入し、港内の底層貧酸素水塊を上を持ち上げることによって、中層貧酸素水塊が形成される。その後、さらに上方へ持ち上げられることによって貧酸素水塊が消滅する。

(4) 貧酸素水塊と CO_2 の放出・吸収

大阪港側では、淀川や大和川から流入した有機物が河口域から沿岸部で分解され、栄養塩となり、その後、西宮沖環流によって北上し、神戸港側で再生生産による有機物生成と栄養塩消費が起きていることを示唆している（図-8）。また、9～10月の大阪湾では、北方向の風が卓越することにより（図-4）、大阪湾北部の沿岸域では、湧昇となる。したがって、成層期の8月下旬までに底層に蓄えられた CO_2 （図-7）が、水面に湧昇し、大気への CO_2 の放出となると推察される。

5. 結論

本研究では、強閉鎖性海域の貧酸素水塊の発生機構と動態に関して水質調査、連続観測およびデータ解析を行った。その結果、防波堤で囲まれた強閉鎖性海域のように河川からの直接の水質汚濁源がなくとも、底層では、貧酸素化に伴い、底質からの栄養塩の溶出と有機物分解による栄養塩の生成が生じ、鉛直循環や湧昇により、次の再生生産に利用されていることが明らかとなった。また、底層の酸素消費と二酸化炭素生成は連動しており、

貧酸素・無酸素水塊中には CO_2 が高濃度で蓄えられていること、および風による吹送に伴う港外の躍層面の昇降の繰り返しによって、強閉鎖性海域内に形成された底層の貧酸素水塊が動き、ときには水面まで湧昇することが明らかとなった。これらのことから、貧酸素化が問題となる沿岸域が CO_2 の吸収源か、放出源かを明らかにすることは、沿岸の環境保全にとって重要である。

今後の課題としては、貧酸素水塊の季節的・場所的な違いとともに、 CO_2 吸収・放出量（フラックス）を明らかにする必要があると考えている。

謝辞：本研究は大阪湾広域臨海環境整備センターの平成20年度及び平成21年度「大阪湾圏域における海域環境の再生・創造に係る研究の助成事業」により行われた。

参 考 文 献

- 藤原建紀・高橋鉄哉・山田佳昭・金子昭夫（2000）：東京湾の貧酸素水塊に外洋の海況変動が及ぼす影響，海の研究，9，pp. 303-313.
- 藤原建紀（2010）：内湾の貧酸素化と青潮，沿岸海洋研究，48，印刷中.
- 藤原隆一・小竹康夫・上田悦子・知振佐苗（2005）：大阪湾で発生した青潮の現地調査，海洋開発論文集，No. 21，pp. 361-366.
- 柿野 純・松村皐月・佐藤善徳・加瀬信明（1987）：風による流れと青潮の関係，日本水産学会誌，No. 53，pp. 1475-1481.
- Lewis and Wallace (1998)：Program Developed for CO_2 System Calculations, Carbon Dioxide Information Analysis Center, pp. 1-21.
- 中辻啓二・入江政安・西田修三・湯浅楠勝（2003）：大阪湾奥部閉鎖性海域の貧酸素水塊の現地調査，水工学論文集，No. 47，pp. 1285-1290.
- 佐々木 淳・磯部雅彦・渡辺 昇・五明美智男（1996）：東京湾における青潮の発生規模に関する考察，海岸工学論文集，No. 43，pp. 1111-1115.
- 田口二三生・藤原建紀・山田佳昭・藤田弘一・杉山雅人（2009）：沿岸海域のアルカリ度，沿岸海洋研究，47，pp. 71-75.