

港湾海域における底質の酸素消費特性の季節変化に関する研究

Seasonal Variations in Characteristics of Oxygen Consumption by the Bottom of Ports and Harbors

遠藤 徹¹・重松孝昌²

Toru ENDO and Takaaki SHIGEMATSU

For effective restoration of enclosed coastal zone under anoxic environment such as Osaka bay, it is necessary to understand characteristics of oxygen consumption by the bottom sediment of ports and harbors. In this study, field measurements of the oxygen consumption rate were carried out during the year in a harbor. Seasonal variations in characteristics of the oxygen consumption by sediment were presented and the formulation of oxygen consumption by bottom sediment was attempted.

1. はじめに

東京湾や大阪湾のような閉鎖性海域では、密度成層が発生する夏季になると、その底層は慢性的な貧酸素状態に陥る。特に、入り組んだ地形を有する湾奥部の港湾海域では、台風が通過した後でさえも貧酸素状態が解消されず、深刻な状況下にある(矢持, 2004)。底層が貧酸素化すると、水生生物に壊滅的な影響を及ぼす(鈴木ら, 1998)ため、水産業に甚大な被害をもたらす。また、底生生態系の崩壊により海域の自浄機能が低下するだけでなく、底質から栄養塩が溶出して富栄養化がいつそう促進される(城, 1983)など、水質悪化の負の連鎖が起こる(柳, 2004)。このように、港湾海域における底層の貧酸素状態は、その周辺の沿岸環境に甚大な影響を及ぼしていると考えられ、海岸工学分野における重要な課題のひとつであるといえる。

このような貧酸素化の改善対策として、鉛直混合(重松ら, 2003)やエアレーション(鯉渕ら, 2004)等によって、底層へ酸素供給を促進する技術が多く開発されている。これらの技術を現地に適用する場合には、貧酸素化の改善効果を定量的に提示することが望まれる。そのためには、港湾海域における底質による酸素消費特性を定量的に評価することが重要である。

一般的に、底層が貧酸素状態になっている場合の底質による酸素消費速度は、貧酸素化していない時期と比較すると遅くなると指摘されている(相馬ら, 2008)。しかし、このことは、酸素消費要因が少ないことを意味しているのではなく、本来ならば有機物の分解や還元物質の酸化に必要とされる十分な酸素量が水中にないため、

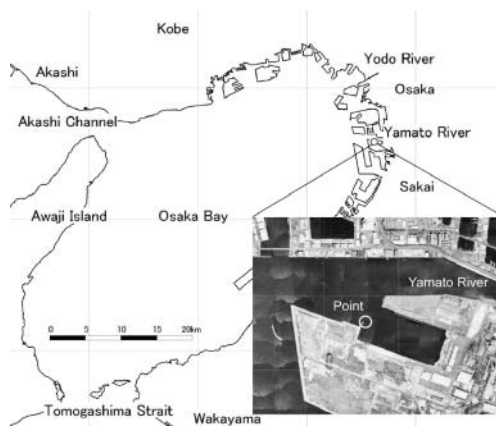


図-1 観測地点の位置情報

未分解の有機物や還元物質が底層に存在・沈積し続けていることを意味している。すなわち、酸素を供給すれば、より多くの酸素を消費するポテンシャルを有していると言える。遠藤ら(2008)は、夏季の港湾海域において底質の酸素消費の時系列を求めることによってこのことを明らかにしている。また、相馬ら(2008)は数値計算の結果より同様の指摘をしている。

本研究では、年間を通して港湾海域における水質および底質による酸素消費量の現地観測を実施し、底質による酸素消費特性の季節的な変化について検討した。

2. 調査および解析の概要

現地観測は、2008年5月から2009年4月の小潮期に、大阪湾湾奥部の堺区北港堺2区北泊地の開口部で実施した(図-1)。本研究では、北泊地において海底面への酸素消費フラックスと水質の鉛直分布、海底直上の水質について年間を通して計測し、港湾海域の底質の酸素消費特性の季節変化について検討した。

1 正会員 工(博) 大阪市立大学助教授 工学研究科都市系専攻
2 正会員 工(博) 大阪市立大学准教授 工学研究科都市系専攻

(1) 水質調査項目

水質の鉛直分布に関して、2008年5月26日から2009年1月20日までの観測では、Compact CTD (JFEアレックス(株))を用いて、水温・塩分の鉛直分布を計測するとともに、蛍光式溶存酸素計 (HACH: HQ40d)を用いて溶存酸素濃度の鉛直分布計測した。また、2008年2月4日から2009年4月20日の観測では、MiniSonde 5 ((株)環境システム)を用いて、水温・塩分・溶存酸素濃度・pH・ORPの鉛直分布を計測した。

一方、底層直上水を北原式採水器を用いて採水し、アンモニア態窒素・リン酸態リン濃度をNANOCOLOR 400 D ((株)セントラル科学貿易(株))を用いて簡易現場計測を実施した。アンモニア態窒素はインドフェノール法による吸光度を、リン酸態リンはモリブデンブルー法による吸光度を計測している。計測にあたっては、シリジフィルターを用いて、試水と大気とが直接接しないように十分留意した。また、2008年5月26日から2009年1月20日までは、ポータブルpH・ORP計 (東亜DKK(株))を用いて底層水中のpH・ORPを計測した。

(2) 底質による酸素消費フラックスの計測

底質による酸素消費フラックスは、遠藤ら(2008)が開発したチャンバー装置を用いて計測した。チャンバー装置の概略図を図-2に示す。チャンバー法は、海底面にチャンバーを設置して創出された海水-海底間の密閉系内のDO濃度の時間変化から、海底面へのフラックスを直接的に求める方法であるため、貧酸素化している場合には、海底付近に酸素が存在しないため酸素消費フラックスを計測することはできない。そこで、以下の操作を実施してチャンバー内に酸素供給を行った。まず、チャンバーの上部に設けられた通水孔を開放状態にしてチャンバーを海底面に設置する。この状態でチャンバー内のDO濃度を計測し、DO濃度が低ければ、予め採水して曝気しておいた底層水をチャンバー内へ供給することでチャンバー内のDO濃度を上げ、その後、ゴム栓によって通水孔を閉じることによって、密閉系を創出している。このため、酸素供給を実施した期間(2007年7月10日から2007年11月18日)に計測される酸素消費フラックスは、酸素供給を実施した場合に消費される量、すなわち、酸素消費ポテンシャルを計測していることになる。

(3) 酸素消費フラックスの算出

底質による酸素消費は実験開始時のDO濃度と、実験終了時のDO濃度の差から時間内に消費された酸素量を求めて表された(たとえば、星加ら, 1989)。しかし、底質の酸素消費が安定した要因によって起こるならば問題ないが、酸素を供給することによって酸素消費ポテンシャルが生じ、これによって、チャンバー内の酸素消費速度が一定でないことが明らかとなっている。そこで本

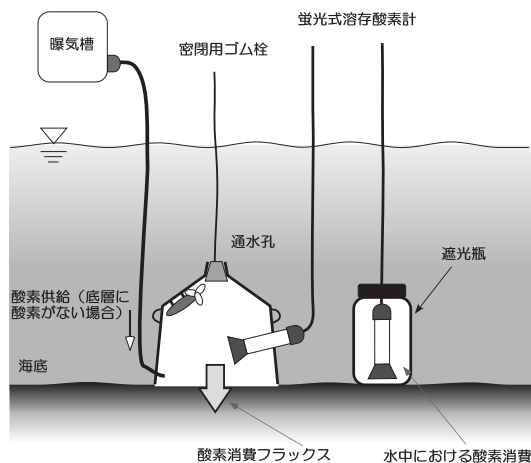


図-2 酸素消費フラックス測定装置の概要

研究では、チャンバー内のDO濃度の時間変化から測定間隔ごとの酸素消費フラックスを求め、微小酸素消費フラックスについて着目した。酸素消費フラックスの求め方は次式の通りである。チャンバー内のDO濃度の時間変化は次のように表される。

$$\frac{\partial C_c}{\partial t} \cdot V = -\Delta \text{flux} \cdot A + \frac{\partial C_w}{\partial t} \cdot V \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 Δflux は酸素消費フラックス、 V はチャンバーの容積、 A はチャンバーによって覆われる底面積、 C_c はチャンバー内のDO濃度、 C_w は直上水中のDO濃度である。 C_w は、チャンバー近傍に遮光瓶を設置し遮光瓶内のDO濃度の時間変化を計測した。

3. 観測結果

(1) 水塊構造の季節変動

調査期間中の水温・塩分・溶存酸素濃度の鉛直分布を図-3 (a) から (c) に示す。水面近傍の塩分は、季節に関わりなく約10psuであり、大和川からの淡水流入の影響を、常時、受けていることがわかる。塩分躍層が形成される水深を見ると、河川水の影響水深は水面下1.0～2.0mの範囲にあると言える。

溶存酸素濃度に視点を転じれば、2008年7月～11月の期間で、水底が貧酸素化していることがわかる。特に、2008年11月では水底から6mまでが貧酸素化しており、大阪湾湾奥部の貧酸素化の深刻さが伺える計測結果となった。このように、大阪湾湾奥部は、水面下1mあたりにふたをされた状態であり、また、水深が10 m以上あるため、台風が通過しても鉛直混合が行われず春から秋にかけて底層が常に貧酸素状態に陥っていることがわかる。

(2) 海底面近傍の水質の季節変化

海底近傍の水質の季節変化を、図-4 (a) から (f) に示す。調査地点における底層DO濃度は、5月26日には

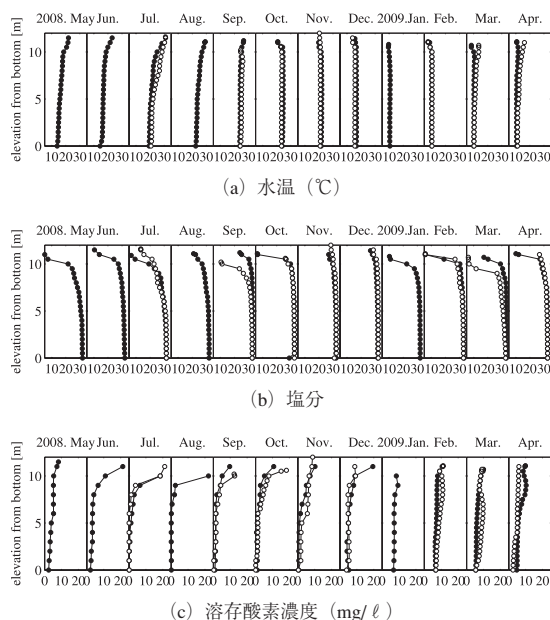


図-3 水塊構造の季節変化 (●: 上旬, ○: 下旬)

2.0mg/l で、既にほぼ貧酸素状態にあった。その後、DO 濃度は低下し、11月18日まで無・貧酸素状態が続いている。12月から翌年3月の冬季は、生物棲息に十分なDO 濃度が存在しているが、2009年4月には徐々にDO 濃度が低下し始めている様子が伺える。底層の水温は、気温が上昇する夏に25℃程度まで上昇し、冬になると10℃程度まで下がっており、季節的な変動がわかる。塩分は、年間を通じて30psuであり季節的な変化はほとんどみられない。酸化還元電位は、貧酸素期に値が小さくなっている傾向が見られる (9月5日はデータが欠損している)。アンモニア態窒素は、貧酸素期に濃度が上昇しており、底層が嫌氣的になり硝化反応が起こらなくなったものと考えられる。リン酸態リンも貧酸素期に濃度が上昇しているが、底層が貧酸素化した初期に比較的大きな値を示しており、海底堆積物中からの溶出によりリン濃度が増加し、低酸素状態が維持されて溶出速度が徐々に低下してきたと考えられる。

(3) 酸素消費フラックスの時間変化

図-5に2008年10月7日と12月17日の酸素消費フラックスの時間変化を示す。同図 (a) に示す底層が貧酸素化している夏季の酸素消費フラックスは、測定開始直後にはそのフラックスが大きく、時間の経過とともに徐々に低下する傾向を示すことがわかる。一方、貧酸素化が解消した冬季の酸素消費フラックスは、計測開始時から実験終了時までほぼ一定の値を示している。このように、酸素供給によって貧酸素期における酸素消費フラックスが増加していることがわかる。本実験結果のように、酸

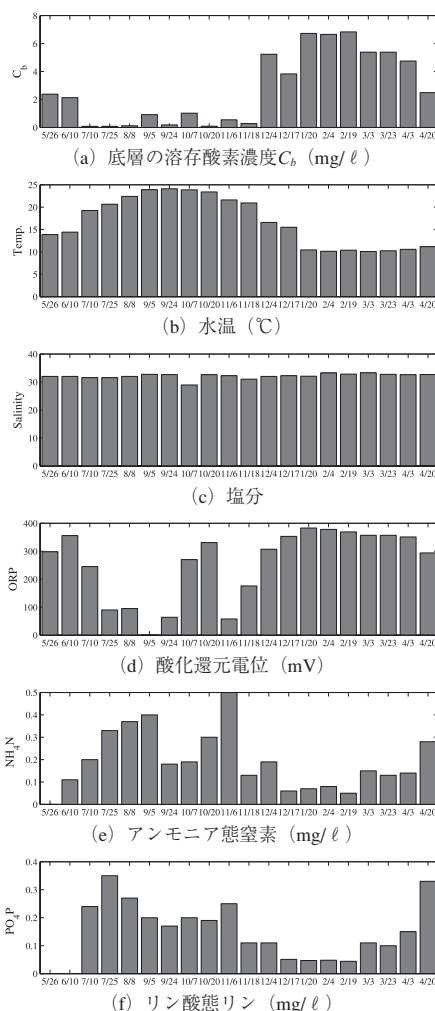
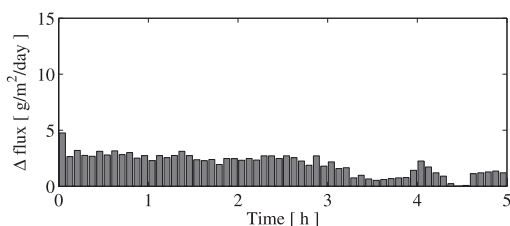
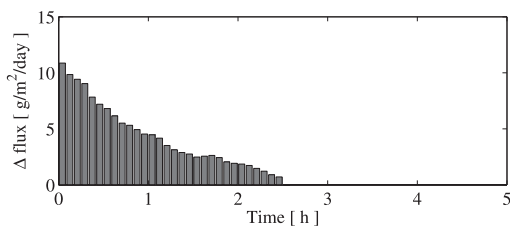
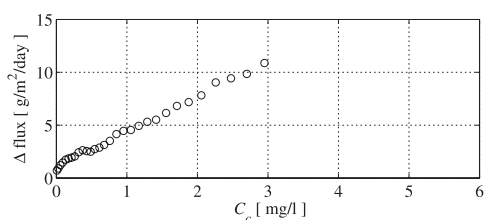
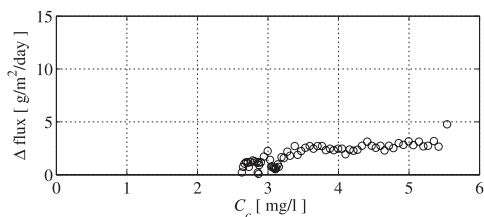


図-4 海底面近傍の水質の季節変化


 図-5 Δ fluxの時間変化

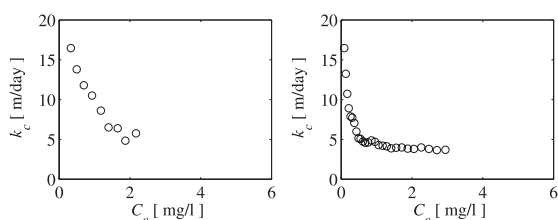


(a) 2008年10月7日

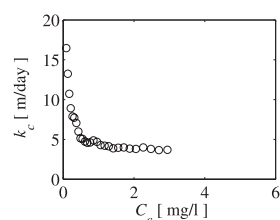


(b) 2008年12月7日

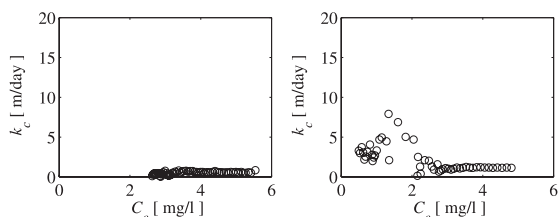
図-6 ΔfluxとCcの関係



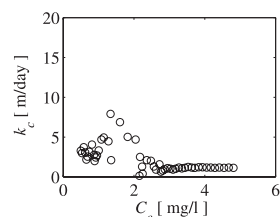
(a) 2008年7月25日



(b) 2008年10月7日



(c) 2008年12月17日



(d) 2009年4月20日

図-7 k_cとCcの関係

素消費フラックスは時間的にも季節的にも変動しており、酸素消費フラックスの変動を正確に評価するためには、そのときの環境条件を考慮して評価をする必要がある。

4. 酸素消費フラックスの推定

(1) 定式化

底質の酸素消費（本研究ではフラックスとして取り扱っている）に関する既往の研究の多くは、単位面積あたりの酸素消費量を定数として求められる（星加ら，1989）か、直上の酸素濃度に依存する1次反応式として求める（Hayakawaら，1999）ものが多い。本実験によって求められた酸素消費フラックスの時間変化（図-5）によると、底層が貧酸素化している10月17日の酸素消費フラックスは時間的に変化しており、貧酸素化していない12月12日の酸素消費フラックスはほぼ一定値であった。一方で、チャンパー内の溶存酸素濃度との関係（図-6）によれば、ΔfluxとCcには、底層が貧酸素化している時期にはCcの増加とともに酸素消費フラックスが増加するような傾向が見られ、底層が貧酸素化していない時期にはCcとは無関係にほぼ一定値をとるような傾向が見られる。そこで、本研究で計測された酸素消費フラックスは、直上の酸素濃度に依存する項と一定値で表される項の和として次式のように定式化することとした。

$$\Delta \text{flux} = \alpha + \beta \cdot C_c \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、αはフラックスの次元を有する係数、また、βは速度の次元を持つ係数である。

(2) αとβの算出

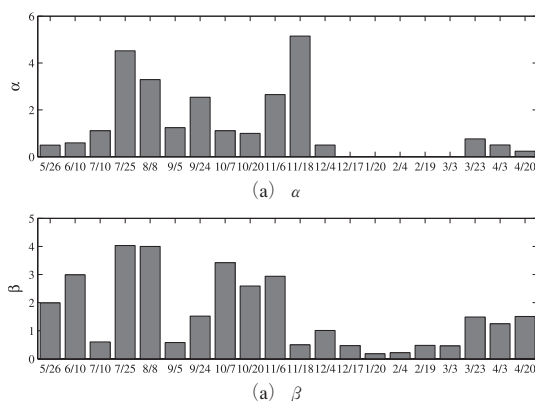
全実測データを用いて、αおよびβを回帰的に求めた。このとき、式(2)を

$$\Delta \text{flux} = \left(\frac{\alpha}{C_c} + \beta \right) \cdot C_c = k_c \cdot C_c \quad \dots\dots\dots (3)$$

として、Δfluxからk_cを、k_cとCcの関係からα、βを求めることとした。なお、k_cは速度の次元を有する係数であるので、本論文では酸素消費速度と称する。k_cとCcの関係を図-7に示す。底層が貧酸素化している時期（同図(a)および(b)）には、k_cとCcの間には反比例の関係が見られ、式(3)で表されるような関係が成り立っている。また、底層が貧酸素化していない時期（同図(c)）には、αの影響が小さくなり、k_cはほぼ一定と見なせることがわかる。すなわち、貧酸素化している場合にはチャンパー内の溶存酸素濃度Ccの低下とともに酸素消費速度が大きくなるのに対して、貧酸素化していない場合には酸素消費速度k_cはチャンパー内の溶存酸素濃度Ccとは無関係であることを意味している。調査期間中のデータの中には、図-7(d)に示すようなデータのばらつきが激しいものもあったことを付記しておく。

以上のようにして求めた全観測日のα、βの季節変化を図-8に示す。図-8(a)より、αは貧酸素期に大きな値を示し、貧酸素化が解消している冬季にほぼ0となっている。図-8(b)より、βに関してもαと同様に、貧酸素期に大きな値を示し、貧酸素化が解消した時期には小さな値を示している。

次に、底面直上水の水質と、αおよびβとの関係を図-9に示す。塩分に関しては、季節変化がほとんど無かったため、除外した。αは、水温や、アンモニア態窒素、リン酸態リン等の生物的作用に関連する水質項目に関してやや相関関係があるように見受けられる。一方、βは底層のDO濃度Cbとの間に弱い相関が見られる。また、αほどではないが、アンモニア態窒素、リン酸態リンとも


 図-8 α と β の季節変化

相関があるように見受けられる。しかしながら、本研究では、現地観測によって求めた見かけの酸素消費フラックスから酸素消費特性について考察しようと試みたが、 α も β もデータのばらつきが大きく、本研究で検討した水質項目とは明瞭な相関関係を見出すには至らなかった。今後、底質および水質との関係について詳細に検討し、酸素消費要因について検討することが課題である。

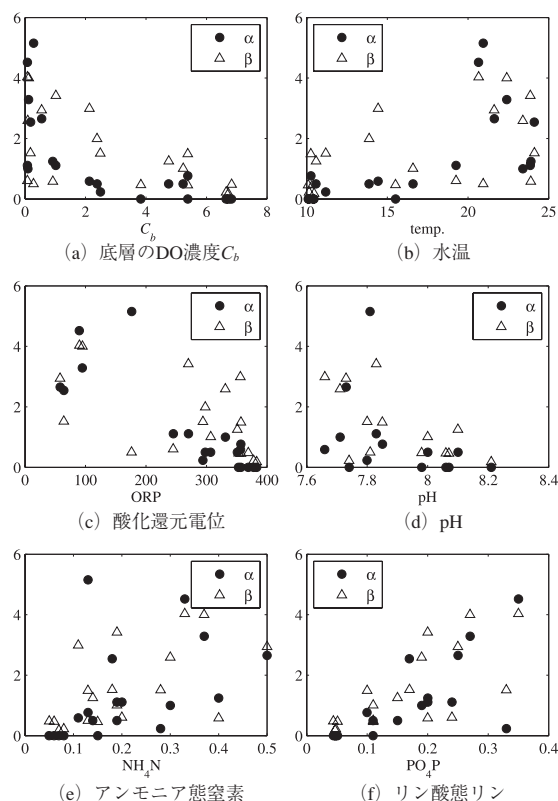
5. まとめ

港湾海域における底質の酸素消費について年間を通じた調査から、底層水の貧酸素期に酸素供給を実施すると、底質の酸素消費フラックスは時間的に変化することを明らかにした。この時間的な変動フラックスは、底層のDO濃度との関数として表した酸素消費速度を定式化することによって評価可能であることを明らかにした。

謝辞：本研究を行うにあたり、本研究室の水田圭亮氏、笹山知希氏、また、新日本製鐵株式会社建材事業部堺製鐵所の今津利弘氏、日産マリーナ株式会社大阪営業所の皆様にはご協力して頂き感謝の意を表します。なお、本研究は日本学術振興会特別研究員奨励費による補助を受けたことを付記する。

参 考 文 献

- 遠藤 徹・水田圭亮・重松孝昌 (2008)：貧酸素化した港湾海域における低湿の酸素消費特性に関する研究，海岸工学論文集，第55巻，pp. 1,066-1,070。
 鯉淵幸生・磯部雅彦・佐々木淳・藤田昌史・五明美智男・栗原明夫・田中真史・Mohammad Islam・鈴木俊之 (2004)：貧酸素水改善に向けた現地微細気泡実験，海岸工学論文集，第51巻，pp. 1156-1160。


 図-9 α および β と海底近傍の水質との関係

- 重松孝昌・池田憲造・小田一紀 (2003)：貧酸素化の抑制を目的とした鉛直循環流誘起堤体の開発，土木学会論文集，No.741/VII-28，pp. 57-67。
 城 久 (1983)：大阪湾底泥中に含まれるリンの存在形態と溶出分画，日本水産学会誌，Vol. 47，No. 3，pp. 447-454。
 鈴木輝明・青山裕晃・甲斐正信・今尾和正 (1998)：底層の貧酸素化が内湾浅海底生物群集の変化に及ぼす影響，海の研究，Vol. 7，No. 4，pp. 223-236。
 相馬明郎・関口泰之・桑江朝比呂・中村由行 (2008)：東京湾の底生系における酸素消費メカニズム－内湾複合生態系モデルの解析－，海岸工学論文集，第55巻，pp. 1206-1210。
 星 加章・谷本照巳・川名吉一郎 (1989)：燧灘海域の底層環境における酸素消費速度，水質汚濁研究，Vol. 12，No. 7，pp. 423-430。
 柳 哲雄 (2004)：貧酸素水塊の生成・維持・変動・消滅機構と化学・生物的影響，海の研究，Vol. 15，No. 5，pp. 451-460。
 矢持 進 (2004)：港湾海域の貧酸素水塊－大阪湾沿岸一斉水質調査結果－，瀬戸内海，No. 42，pp. 31-36。
 Hayakawa, Y., K. Hayashizaki and K. Watanabe (1999)：Measurement of dissolved oxygen consumption rates by bottom sediment in an estuary, J. National Fisheries Univ., Vol. 48(1), pp. 73-80。