

貧酸素化した港湾海域における底質の酸素消費特性に関する研究

Characteristics of Oxygen Consumption by the Bottom of Port and Harbor under Anoxic Environment

遠藤 徹¹・水田圭亮²・重松孝昌³

Toru ENDO, Keisuke Mizuta 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 port and harbor. In this study, in-situ measurement method of oxygen consumption by using a convenient chamber was developed. From results of field investigation particular characteristics of the sediment oxygen demand in port and harbor under anoxic environment were presented.

1. 緒言

閉鎖性海域では、夏季になると安定した成層構造を有するため海域内の鉛直混合が制限され底層域への酸素供給が低下する。そのため、底層には貧酸素水塊が発生し沿岸域環境に深刻な影響を及ぼしている(柳, 2004)。

この対策として、流動によって底層への酸素循環を促進する方法(矢持ら, 1999, 重松ら, 2003)やマイクロバブルや高濃度酸素水を直接底層へ供給する方法(鯉淵ら, 2004, 片倉ら, 2005)などの技術の開発が行われている。海域の酸素動態を考える上で底質の酸素消費は重要な要因であるため、これらの技術の改善効果、もしくは、適用条件を事前に評価するためには貧酸素化した海域の底質が潜在的に有する酸素消費特性を明らかにする必要がある。

これまでに、好氣的な海域における底質の酸素消費量に関しては多くの測定事例がある。

星加ら(1989)はベルジャーシステムを用いて燧灘海域の酸素消費速度を測定しており、ベルジャー内の酸素濃度がほぼ直線的に減少していたことから、底質の酸素消費は一定速度であるとして、この酸素消費速度をフラックスに換算して酸素消費量を検討している。しかしながら、本研究で対象とする貧酸素海域の底層環境は嫌氣的な状態であるため、このような場に酸素供給を実施した場合、底質の酸素消費はバクテリアの有機物分解に伴う生物的な酸素消費に加え、還元物質の酸化反応や無酸素間隙水中への拡散など複雑な形態を有すると推察される。

そこで本研究では、まず、人為的にチャンバー内の溶存酸素濃度を操作できるチャンバー装置を開発し貧酸素

海域において底質の酸素消費速度を測定することによって、無・貧酸素化した海域に酸素供給を実施した場合の酸素消費形態を把握するため、チャンバー内の溶存酸素濃度の時間変化を連続計測して底質の酸素消費過程について検討することを目的とした。

2. 酸素消費速度測定装置

底質の酸素消費速度の測定方法は、大きく分けると現地観測と室内実験の2つの方法がある。現地での測定方法としてはチャンバー法が一般的である。このチャンバー法は、海底面に容器を設置し、チャンバー内に設置した溶存酸素計によって計測したチャンバー内のDO減少量からチャンバーで覆った底質が消費した溶存酸素量を求める方法である。このチャンバー法は多くの研究事例があり、この方法によって日本各地で底質の酸素消費が測定されている。一方、後者の室内実験法は、底質のコアサンプル、もしくは、採泥器によって採取した底質を実験室へ持ち帰り、必要に応じて底質の洗浄・整形を行って底質の酸素消費を測定する方法である。この方法は、実験条件を制御することが容易であるため底質の酸素消費特性に関する主成分分析を行う場合には適しているが、採泥の際に底質を攪乱してしまうという問題がある。このため本研究では前者のチャンバー法を採用することにした。しかしながら、前述したようにチャンバー法は海底に設置した密閉容器内にDO濃度がある程度存在することが前提条件であるため、底層が無酸素状態の場合では現行の方法をそのまま用いることができない。そこで本研究では、底層に設置した後で底層の曝気水をチャンバー内に注入することによりチャンバー内のDO濃度を人為的に操作できるチャンバー法を開発した。

本研究で用いたチャンバー装置による測定手順を図-1に示す。本装置は図-2(a)に示すように、チャンバー本体(容積： $V=10.0\text{ l}$ 、底面積： $A=0.071\text{ m}^2$)とエアレーションタンクによって構成されている。チャンバーの上

1 学生会員 工(修) 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻
日本学術振興会特別研究員(DC2)

2 学生会員 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻

3 正会員 工(博) 大阪市立大学准教授工学研究科都市系専攻

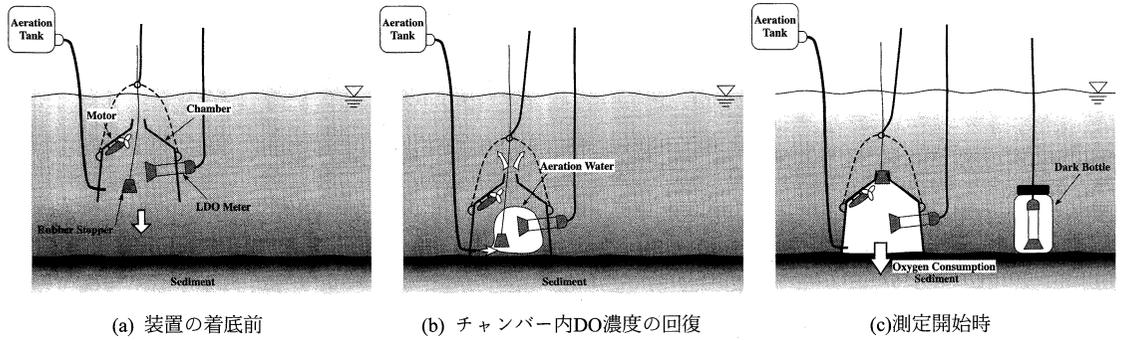


図-1 チャンバー装置の概略図

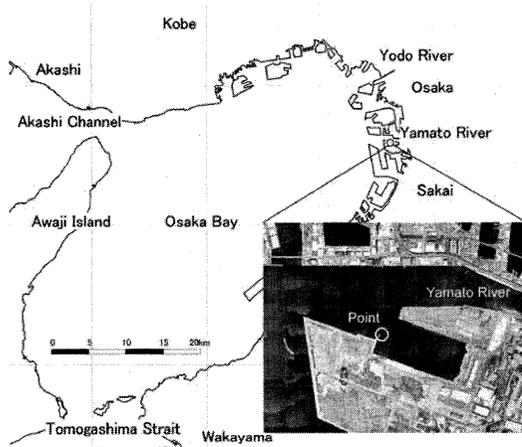


図-2 観測地点の位置情報

部には、海水交換用の通水部が設けてあり、チャンバー内部には蛍光式溶存酸素計(HACH社:LDO)、曝気水注入用のチューブ、水中モーターが取り付けられている。まず、チャンバー上部の通水部を開放状態にしたままで、底質が巻きあがらないように注意を払いながらゆっくりと海底に着底させる(図-1(a))。チャンバーの底部にはタイヤチューブを取り付けており、チャンバーを設置した際に容器と海底面に間隙が生じないようにしてある。続いて、予め採水してエアレーションタンクで曝気しておいた底層水(海底から0.5m)をチューブを通してチャンバー内にゆっくりと注入し、チャンバー内の無酸素水と交換する(図-1(b))。チャンバー内のDO濃度がある程度まで回復したらゴム栓によって上部通水部を閉じて密閉状態を創出し、曝気水の注入を停止する(図-1(c))。その後、チャンバー内のDO濃度が減少し始めるのを確認してから測定を開始した。DO濃度の測定は5分間隔とし、チャンバー内のDO濃度がおおよそ0.0mg/lになるまで連続測定した。測定中は、チャンバー内のDO濃度が均一になるように、かつ、底質が巻き上がらない程度に水中モーター(タミヤ製)を作動させて混合した。また、チャンバー内に注入した曝気底層水で満たした暗瓶(容

積2.0 l)をチャンバー付近に設置し、暗瓶内のDO濃度の時間変化を測定することで底質直上水中における酸素消費速度を測定した。

チャンバー内のDO減少量から暗瓶内のDO減少量を差し引くことによって底質のみによる酸素消費を求めた。

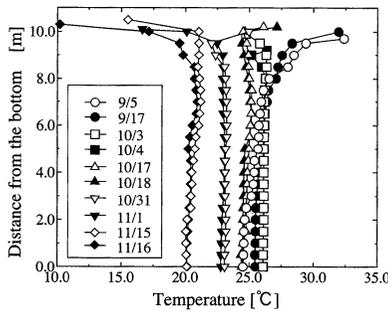
3. 現地調査の概要

貧酸素化した海域における底質の酸素消費を測定するため、大阪湾奥部の大和川河口域に位置する堺泉北港北泊地の開口部において現地調査を行った(図-2参照)。北泊地は、閉鎖性が極めて強い地理的条件を有しており、また、大和川の河口に位置するため、海底堆積量が多い海域であり、夏季を過ぎても慢性的な貧酸素状態に陥っている(矢持, 2004)。調査期間は、貧酸素化が顕著に発生した2007年9月から、貧酸素化が緩和した2007年11月までとし、潮汐変動に伴う調査海域の環境構造の変化が少ないと考えられる小潮時に実施した。

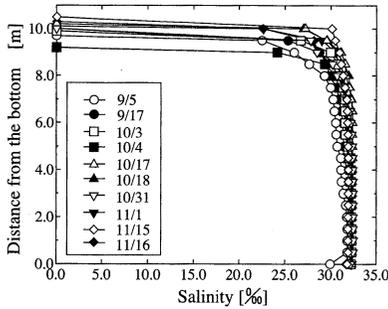
4. 調査海域の環境構造

調査では、底質の酸素消費速度の測定と同時に、水温・塩分およびDO濃度の鉛直プロファイルを測定した。水温・塩分の測定にはポータブル多項目水質計(アレック電子:CTD)を、また、DO濃度の測定にはガルバニ式溶存酸素計(YSI社:Model-58)を用い、水底から水表面まで1.0m間隔で測定した。全調査日の水温、塩分およびDO濃度の鉛直プロファイルを図-3に示す。測定日毎の環境構造は、測定時間内であまり変化しなかったため各調査日で12時に測定されたプロファイルを示す。

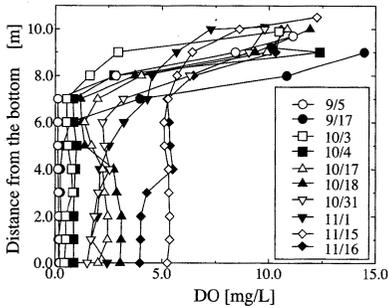
水温の鉛直分布によると、9月は表層水が暖められることによって、11月は表層水が冷やされることによって水面下2mの層に水温躍層が形成されていることがわかる。また、調査期間内で底層水の水温は25℃から20℃に変化している。塩分の鉛直分布によると、大和川河水の影響により明瞭な塩分躍層が形成されている。調査期間内で塩分躍層の層厚は若干変化しているものの、水面下2.0m以深の塩分はほとんど変化がない。調査海域は、



(a) 水温の鉛直プロファイル



(b) 塩分の鉛直プロファイル



(c) DO濃度の鉛直プロファイル

図-3 調査海域の環境構造

水深10mのうち水面下2.0m付近に密度躍層が形成される場であった。

9月のDO濃度は、水面下3m以深ではほぼ0.0mg/lであり深刻な無酸素状態に陥っていることがわかる。10月上旬になると無酸素状態ではなくなっているが依然として水面下3m以深で貧酸素状態にある。10月下旬から11月上旬にかけて、底層のDO濃度は0.5から2.5mg/lに回復していき、また中層域に存在する躍層も弱くなっており貧酸素化が徐々に緩和している段階にある。調査終盤の11月中旬になると、底層のDO濃度は3.0mg/l以上であり貧酸素化は緩和されていることがわかる。以上の結果より、本調査期間内に底層のDO環境は表-1に示す4段階に分類することができる。

表-1 調査期間における底層の溶存酸素環境の分類

調査日	底層DO濃度の平均値 (mg/l)	底層のDO環境
9月5日	0.19	無酸素状態
9月17日	0.15	無酸素状態
10月3日	0.50	貧酸素状態
10月4日	0.88	貧酸素状態
10月17日	2.46	貧酸素化が緩和し始める状態
10月18日	2.87	
10月31日	1.68	
11月1日	1.70	
11月15日	5.36	貧酸素化が緩和した状態
11月16日	4.00	

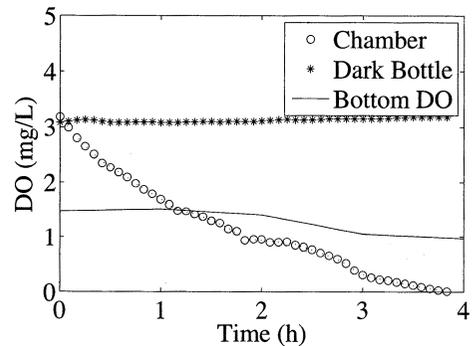


図-4 チャンバー内と暗瓶内のDO濃度の時間変化 (測定日: 2007年10月31日)

5. 底質の酸素消費測定

(1) チャンバー内のDO濃度の時間変化

2007年10月31日に測定した、チャンバー内と暗瓶内のDO濃度、およびの鉛直プロファイルから得られた底層DO濃度の時間変化を図-4に示す。10月31日の底層DO濃度は、1.0から1.5mg/l程度の貧酸素状態であったため、チャンバー内のDO濃度を3.0mg/lまで回復させて酸素消費を測定した。暗瓶内のDO濃度の時間変化は、測定開始から測定終了時までほとんど変化していないことから、底質直上水中における酸素消費はほとんどないことがわかる。一方、チャンバー内のDO濃度は、溶存酸素を供給した測定開始時に大きく減少し、時間の経過とともにその減少割合は小さくなっている。特に、この減少割合はチャンバー内のDO濃度が底層DO濃度よりも高い領域で大きく、逆に低い領域ではほぼ一定速度であることがわかる。このことから、底層DO濃度よりも高い濃度のDOを供給した場合、チャンバー内のDOは一定速度で減少するのではなく時間とともに変化していることがわかる。そのため、貧酸素化した海域の底質による酸素消費速度を評価する上で、測定間隔毎に変化する酸素消

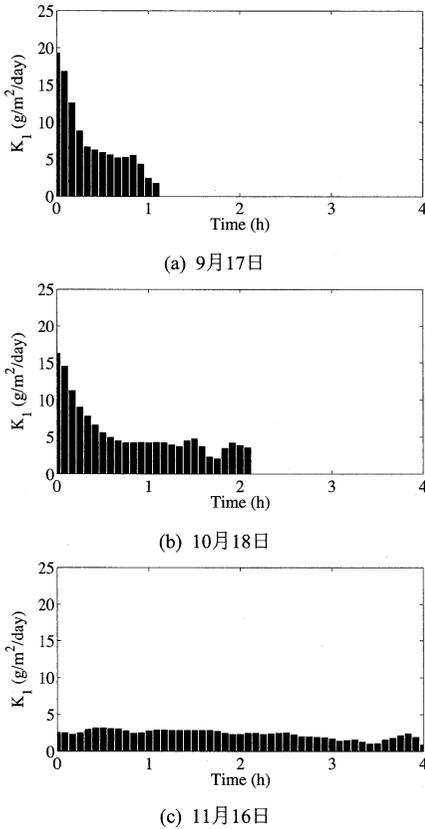


図-5 微笑フラックス K_1 の時間変化

費フラックスの挙動について検討する必要がある。

(2) 底質の酸素消費フラックス

前述したように、貧酸素海域の底質の酸素消費を考える上で、微小フラックスが重要である。そこで、測定間隔毎に変化する底質の酸素消費フラックスを K_1 として次式のようにして求めた。

$$\Delta \text{Flux} = \frac{V}{A} \left(\frac{\partial C_c}{\partial t} - \frac{\partial C_w}{\partial t} \right) = -K_1 \quad (1)$$

ここに、 C_c : チャンバー内のDO濃度、 C_w : 暗瓶内のDO濃度、 t : 時間、 K_1 : 測定間隔毎の酸素消費フラックス、 V : チャンバーの容積、 A : チャンバーの底面積である。 K_1 の時間変化を図-5に示す。底層の貧酸素化が最も顕著である9月17日の K_1 は、チャンパー内にDOが豊富に存在する測定開始初期から時間の経過とともに小さくなっており、時間的に変化していることがわかる。また、底層の貧酸素化が緩和し始めている10月18日の K_1 は、測定開始から約1時間までは時間の経過とともに小さくなっているが、それ以降はほぼ一定であることがわかる。一方、貧酸素化していない11月16日の K_1 は、測定開始時から測定終了まで時間的に変動することはなくほぼ一定であった。このことから、貧酸素化の程度によって、 K_1 は供給

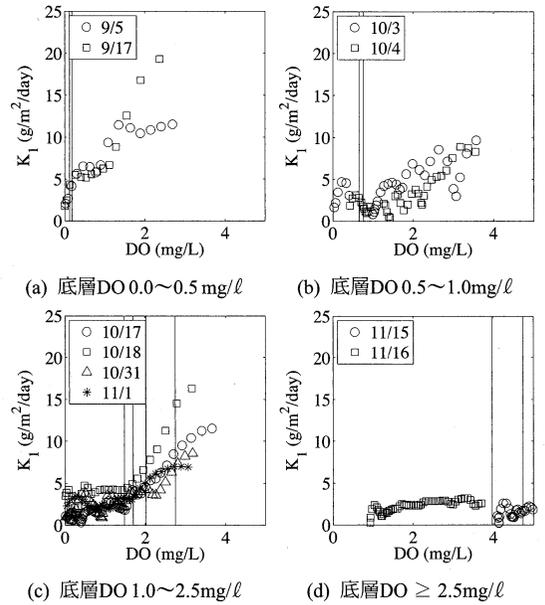


図-6 酸素消費フラックス K_1 と値上DO濃度の関係

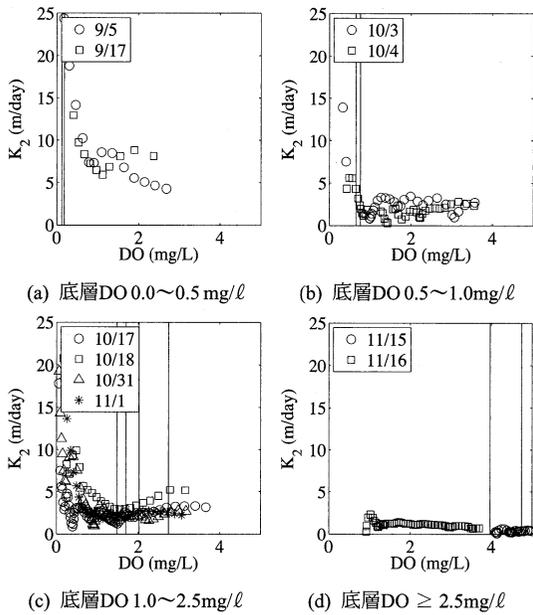
された溶存酸素濃度に依存して変化するものと考えられる。そこで、 K_1 とチャンパー内のDO濃度の関係を図-6に示す。

図中の実線は測定日の底層のDO濃度を示している。

図-6(a)より、底層DO濃度が無酸素状態である9月5日、17日の K_1 は、チャンパー内の底質直上に存在するDO濃度との間に正の相関が見られる。底層DO濃度が0.5~1.0 mg/lの10月3日、4日では、底層DO濃度よりもチャンパー内のDO濃度が高い領域で両者に相関が見られるが、それ以下の領域では明瞭な相関がみられなくなっている(図-6(b))。この傾向は、底層DOが1.0~2.5mg/lである10月17日から11月1日までの期間でもみられる(図-6(c))。さらに、貧酸素化が解消された11月15日になると、直上のDO濃度に関係なく K_1 はほぼ一定の値を示しており、酸素消費形態は直上水中のDO濃度に依存しなくなっている。つまり、底層DO濃度よりも高い濃度のDOを供給した場合、底質の酸素消費速度は水底直上のDO濃度に依存する消費形態を潜在的に有していることが明らかとなった。

(3) 底質の酸素消費のDOの依存性

Hayakawaら(1999)は、チャンパー内のDOの時間変化が底質直上のDO濃度に依存していると考え酸素消費速度として底質の酸素消費を評価している。Hayakawaらに倣って、測定間各毎の酸素消費フラックスを直上DO濃度に依存する1次反応式として以下のように定式化した。

図-7 K_2 と直上DO濃度の関係

$$\Delta \text{Flux} = \frac{V}{A} \left(\frac{\partial C_c}{\partial t} - \frac{\partial C_w}{\partial t} \right) = -K_2 \cdot C \quad (2)$$

ここで、 K_2 ：酸素消費速度、 C ：水底直上のDO濃度である。 K_2 と直上のDO濃度との関係を図-7に示す。 K_2 は定式上、直上DO濃度が1.0mg/l以下になると値は発散するため、 K_2 に関してはDO濃度が1.0mg/l以上の領域で検討した。 K_2 は各測定日においてチャンバー内のDO濃度が減少していく過程で、ほぼ一定値を示していることがわかる。さらに、貧酸素化が解消された11月15日になると、直上のDO濃度に関係なく K_2 はほぼ一定の値を示しており、酸素消費形態は直上水中のDO濃度に依存しなくなっている。つまり、底層DO濃度よりも高い濃度のDOを供給した場合、底質の酸素消費速度は水底直上のDO濃度に依存する消費形態を潜在的に有していることが明らかとなった。

これらの結果を整理すると、貧酸素海域に酸素供給を行った場合、底質は潜在的に直上水中のDO濃度に依存する K_2 による消費形態を有している。この K_2 の影響は、貧酸素化の度合いによって変化し貧酸素化が顕著な場合ほど大きい。そのため、貧酸素化が顕著な海域に酸素供給を行う場合、 K_2 の影響がなくなるまで直上のDO濃度を回復させなければ底質の改善は図れないと考えられる。

6. 結言

本研究は、貧酸素海域の酸素消費特性を把握するために、人為的にチャンバー内のDO濃度を操作することのできるチャンバー法を開発し貧酸素海域において現地調査を実施して底質の酸素消費過程について検討したものである。本研究結果によると、無・貧酸素化した海域に酸素供給を行った場合、底層のDO濃度よりも供給したDO濃度が高い領域で底質は潜在的に供給したDO濃度に依存する消費形態を有することが明らかとなった。そのため、修復技術の貧酸素化の改善効果を評価する際には、この影響を考慮しなければならないことがわかった。

謝辞：本研究を行うにあたり、新日本製鐵株式会社建材事業部堺製鐵所の今津弘弘氏、日産マリン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ここに付記する。

参考文献

- 片倉徳男・上野成三・大谷英夫(2005)：酸素飽和度200%の高濃度酸素水を発生する装置の開発，海岸工学論文集，第52巻，pp.1116-1120。
- 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。
- 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，pp57-67。
- 中村由行・井上徹教・小松利光・柳町武志・Fatos Kerciku・山室真澄・神谷宏・石飛裕・左山幹雄・前田広人(1997)：栄養塩の溶出及びSODに関する室内実験手法の提案，水工学論文集，第41巻，pp.433-438。
- 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。
- 細井由彦・村上仁士・上月康則(1992)：底泥による酸素消費に関する研究，土木学会論文集，No.456/II-21，pp.83-92。
- 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，岡本庄市，山下貴幸，久保佳洋，小田一紀(1999)：噴流式水流発生装置による港湾域での生物生息環境の改善，海岸工学論文集，第46巻，pp.1086-1090。
- 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。
- Yasuhiro Hayakawa, Ken-ichi Hayashizaki and Kentaro Watanabe (1999): Measurement of Dissolved Oxygen Consumption Rates by Bottom Sediment in an Estuary, Journal of National Fisheries University. Vol.48(1), pp.73-80.