

港湾海域における底層環境改善指標に関する研究

環境水域工学分野

水田圭亮

底層が貧・無酸素化した海域において、底層環境改善技術は多く開発されているが、技術の評価のための指標がなく、技術を客観的に評価することができていない。そこで本研究では、港湾海域における底層環境改善効果の指標を提案することを目的として、貧酸素化した港湾海域の酸素消費量を、年間を通じて測定し、底質による酸素消費量の変動特性を明らかにするとともに、測定結果に基づいて底質による酸素消費量のモデル化を試みた。その結果、底層溶存酸素濃度と水温によって底質の酸素消費量の推定が可能であることを示し、酸素消費モデル構築におけるキーパラメーターである酸素の浸透深さを底層環境改善指標として提案した。

1. はじめに

都市再生本部は、水質汚濁が慢性化している大都市圏の海の再生を図ることを目的として、都市再生プロジェクトに「海の再生」を位置づけ、東京湾や大阪湾をはじめとする内湾の水質環境改善に関する行動計画を策定している。その取り組みのひとつとして水質一斉調査が実施されるようになり、湾スケールで水質環境の瞬間像で捉えられるようになってきた。例えば、大阪湾水質一斉調査の結果によれば¹⁾、湾奥部とくに港湾海域の底層は、夏季に貧酸素状態となっており、港湾海域の水質改善が重要な課題であることが明らかになってきた。

このような海域の水質改善対策としては、多くの技術が開発されている。水質改善技術を現地に適用する場合には、予めその効果を予測・評価しておく必要があるが、改善効果を評価するための適切な指標がないため、それぞれの技術の改善効果を客観的に示すのが難しいのが実情である。遠藤ら²⁾は貧酸素化した港湾海域で、チャンバー法によって、海底直上水中に酸素を供給したうえで底質による酸素消費速度に関する現地調査を行い、貧酸素化した海域に酸素供給を行う場合にはより多くの酸素を供給しなければ底層の溶存酸素が回復しないという酸素消費ポテンシャルなる概念を提示している。すなわち、海底直上の水質環境を考慮した底質による酸素消費量の予測・評価手法を確立することの必要性が指摘されている。

そこで本研究では、港湾海域における底層環境改善効果の指標を提案することを目的として、底質による酸素消費量の現地調査を実施して、その年変動を把握した。一連の調査によって得られたデータに

基づいて底質による酸素消費モデルの構築をし、モデル構築におけるキーパラメーターを改善指標として提案するものである。

2. 現地調査概要

調査は、大和川の河口に位置する堺泉北港北泊地の港口部（図-1 参照）で、2008年5月から2009年4月までの毎小潮時に行った。調査日における海底直上水の水温及び溶存酸素濃度を図-2 に示す。

底質による酸素消費量の測定には、チャンバー法を用いた。しかし、現行のチャンバー法は海底に設置したチャンバー内にある程度溶存酸素濃度（DO）が存在していないと酸素消費を測定できないため、夏季に底層の貧酸素化が生じている場合は、この手法をそのまま適用することができない。そこで本研究では、遠藤ら²⁾ にならって、底層の貧酸素化が生じている場合は、チャンバー内の初期 DO 濃度を回復させてから酸素消費を計測することができるチャンバー法を用いて現地観測を行った。DO 濃度は蛍光式溶存酸素計（HACH 社）を用いて5分間隔で測定し、

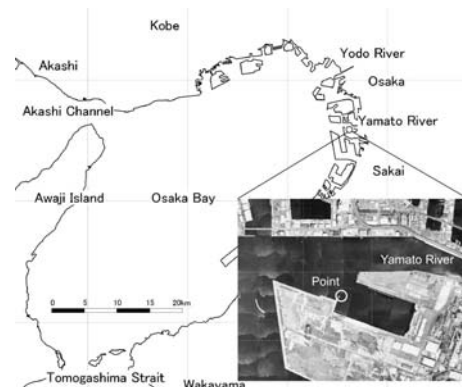
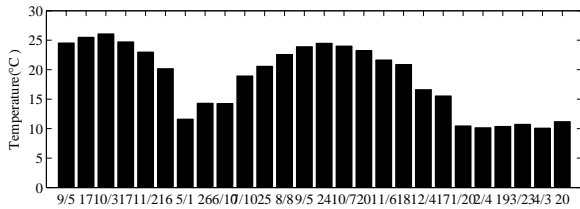
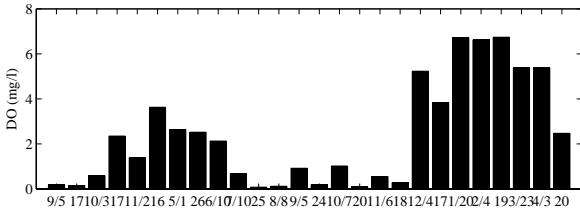


図-1 調査位置図



(a) 水温



(b) 溶存酸素濃度

図-2 海底直上水の水温と溶存酸素

チャンパー内の DO 濃度がほぼ無酸素状態になるまで計測した。

3. 底質による酸素消費の評価方法

チャンパー内の DO 濃度の時間変化と暗瓶内のそれとの差を求め、これにチャンパー内の容積を乗じて底面積で除することによって、単位面積あたりの底質によって消費される酸素量を求める。

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

ここに、 C_c および C_w はチャンパー内および暗瓶内の DO 濃度、 A はチャンパーの底面積である。一般的に式 (1) の右辺の K_1 は酸素消費速度として表されるが、上式より明らかなように K_1 はフラックスの単位を有しているので、本研究では「酸素消費フラックス」と称する。

一方、Hayakawa ら³⁾ は、底質による酸素消費量は水底直上の DO 濃度に依存するとして、次式によって底質の酸素消費量を評価している。

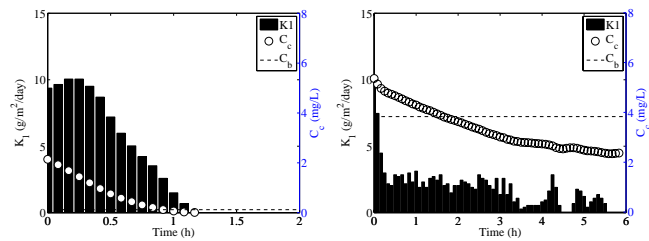
$$-\frac{V}{A} \left(\frac{\partial C_c}{\partial t} - \frac{\partial C_w}{\partial t} \right) = K_2 \cdot C_c \quad (2)$$

上式中の K_2 は速度の次元を有していることから、本研究では「酸素消費速度」と称することとする。

4. 現地調査結果

4.1 底質の酸素消費フラックス

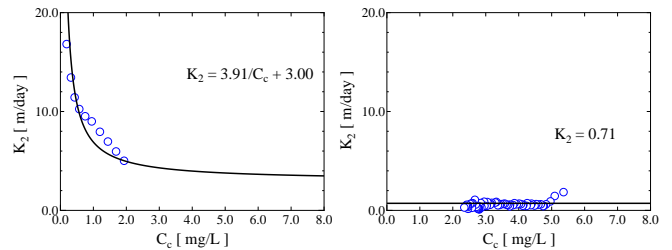
図-3 は、 C_c と K_1 の時間変化を示したものである。図-3 の (a) より、貧酸素化している時季は、チャンパー内の溶存酸素濃度 C_c が豊富な測定開始時には K_1 は大きく、時間が経過して C_c が減少するとともに徐々に K_1 が小さくなる傾向にあることわかる。一方、同図 (b) より、冬季の底層の貧酸素化が解消している時季の K_1 は、測定時間に関わらずほぼ一定の値



(a) 08年8月8日

(b) 08年12月17日

図-3 酸素消費フラックス K_1 と C_c の時間変化



(a) 08年8月8日

(b) 08年12月17日

図-4 K_2 と C_c の関係

を有することがわかる。すなわち、 K_1 で表される酸素消費フラックスは、貧酸素化していない時季には一定値を有するが、貧酸素化している時季には一定値として評価することができないことがわかる。

一方、図-4 は、同観測日の計測結果を K_2 と C_c の関係として示したものである。貧酸素化している時季には K_2 は C_c が低下するとともに増加する傾向を示し (同図 (a))、貧酸素状態が解消している時季には K_2 は C_c にはほとんど依存していないように見取れる (同図 (b))。同図 (a) 中には、 K_1 と K_2 の関係を勘案して回帰曲線を求めた結果を示しているが、貧酸素化している時季の K_2 は、 C_c に依存する項 (第 1 項) と依存しない項 (第 2 項) の和で表すことができる。このことは、海底直上水の溶存酸素濃度によって底質による酸素消費メカニズムは異なることを意味している。すなわち、年間を通して港湾海域の底質による酸素消費量を正確に予測するためには、これらの酸素消費メカニズムを考慮した定式化が必要であると考えられる。

4.2. 酸素消費量の定式化

前節で示したように、年間を通した底質の酸素消費量の年変動をモデル化するためには、海底直上の溶存酸素濃度を指標としたうえで、「酸素消費フラックス」および「酸素消費速度」の両観点を取り入れたモデル化が必要である。そこで、本研究では、次式のように酸素消費量をモデル化することを提案する。

$$-\frac{V}{A} \left(\frac{\partial C_c}{\partial t} - \frac{\partial C_w}{\partial t} \right) = \alpha + \beta \cdot C_c = \left(\frac{\alpha}{C_c} + \beta \right) C_c \quad (3)$$

ここで、 α は生物的酸素消費を表す係数、 β は物理・

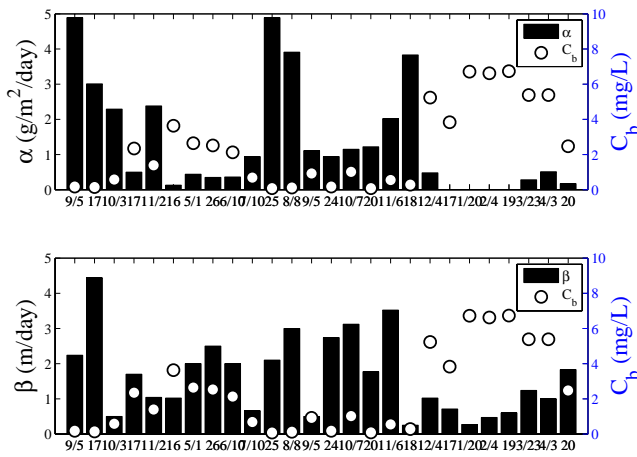


図-5 各測定日の α , β と底層 DO 濃度 C_b

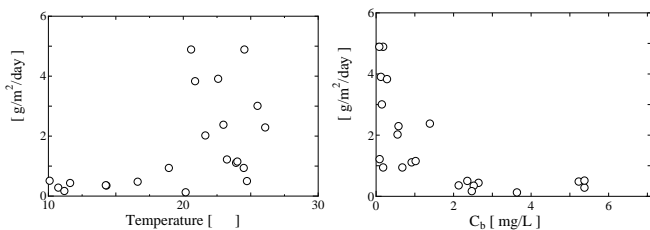


図-6 α と底層水温の関係 図-7 α と底層 DO C_b の関係

化学的酸素消費を表す係数である．年間を通した現地調査で得られた酸素消費量の時間変化より，式(3)中の α および β を回帰的に求めた結果を，図-5に示す．図-5より， α , β とともに，底層の DO 濃度が小さいときは比較的大きな値を示し，底層の DO 濃度が大きくなるとは，比較的小きな値を示していることがわかった．

5. 底層の酸素消費モデルの構築

5.1. α のモデル化

Streeter・Phelps は，有機物の分解に伴う溶存酸素濃度の変化を，有機物濃度 C_B とその分解速度を表す脱酸素係数の積によって表している．本研究で対象とするような富栄養な海域では過剰な有機物が常時供給されると仮定すれば，有機物分解に伴う酸素消費量は，海底の有機物濃度に依存しないと仮定することができる．すなわち，有機物の分解に伴う溶存酸素濃度の変化は，生物の有機物分解活性のみに影響を受けると考えられる．そこで本研究では， α と海底直上水温および直上溶存酸素濃度 C_b との関係について検討した．

まず， α と底層水温の関係を図-6 に示す．図-6 より，底層水温が約 10~20 °C では α はほぼ一定の値を示し，水温が 20 °C を超えると α が急激に大きくなり，また，ばらつきも大きくなる傾向にあることがわかる．

次に， α と底層溶存酸素濃度 C_b の関係を図-7 に示

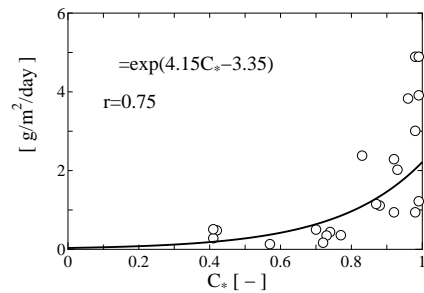


図-8 α と C_s の関係

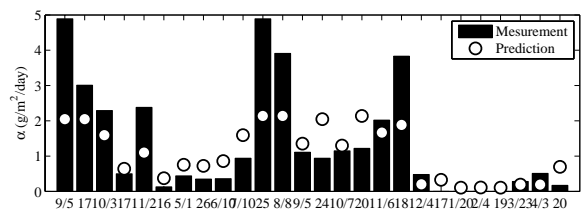


図-9 α の実測値と予測値との比較

す．底層の DO 濃度が低いときに α は大きくなり，底層の DO 濃度が高くなるにつれて α は小さな値を示す傾向にあることがわかる．水温が 20 °C を超える場合でも C_b が極めて低い場合には， α は必ずしも大きな値を示さない．すなわち， α は，底層水温と底層溶存酸素濃度の影響を密接に受けていることが明らかになった．

ここで，次式に示すような海底直上水の溶存酸素不飽和度 C_* の導入を考える．

$$C_* = \frac{C_s - C_b}{C_s} \quad (4)$$

ここに， C_s は飽和溶存酸素濃度である．溶存酸素不飽和度 C_* は， C_b が無酸素状態になると C_* が 1 に， C_b が飽和状態になると C_* は 0 となる無次元数である．図-8 に α と C_* の関係を示す．図中の曲線は，指数関数として求めた回帰曲線で，

$$\alpha = \exp(4.15C_* - 3.35) \quad (5)$$

で，相関係数は 0.75 であった．同図より， C_* が約 0.8 以下では α はほぼ一定の値を示し， C_* が 0.8 以上になると α は急激に大きくなる傾向があり，現地調査結果とその傾向はおおむね一致していることがわかる．式(5)による実測データの再現性を検証するため，式(5)から算出された α と実測データから得られた α を比較した．結果を図-9 に示す．図-9 によれば，式(5)から算出された α は，実測データの年変動を概ね再現できていることがわかる．すなわち，夏季に貧酸素化するような港湾海域における有機物分解に伴う酸素消費量の季節変化は，溶存酸素不飽和度を用いておよそ予測することが可能であると言えることができる．

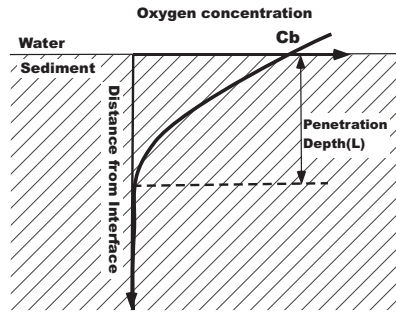


図-10 水-底質境界面の DO プロファイル

5.2. β のモデル化

海底表層部の溶存酸素の鉛直分布を模式的に示したものが、図-10である。一般に、海底面直上である有意な溶存酸素濃度を有している状態であっても、海底面からある距離 L だけ下方の間隙中では無酸素状態になっている。一方、嫌気的な状態の下では、還元物質が酸素と反応することによって水中の溶存酸素を消費する。このような観点から、図-5を眺めれば、海底直上水の溶存酸素濃度 C_b が低い時期には、 β が大きな値を示していることが多い。このような還元物質の反応速度は、溶存酸素の拡散機構と密接な関係を有していると考えられる。すなわち、

$$\beta \cdot C_c = D_{O_2} \frac{\partial C}{\partial z} \quad (6)$$

とモデル化することが考えられる。ここに、 D_{O_2} は水中における酸素の分子拡散係数である。いま、図-10に示すように、底質への酸素の浸透深さ L を用いると、式(6)は次のように書き換えることができる。

$$\beta \cdot C_c = D_{O_2} \frac{C_b - 0}{L} \quad (7)$$

本研究ではチャンバー法を用いて酸素消費量を測定しており、チャンバー内において水底直上の DO 濃度 C_b はチャンバー内の DO 濃度 C_c と等しいことから式(7)は次のように簡略化することができる。

$$\beta = \frac{D_{O_2}}{L} \quad (8)$$

ここで、Wei⁴⁾ に倣って以下の要領で酸素の浸透深さ L を算出した。

$$L = 2\phi D_{O_2} \frac{C_b}{K_{C_b}} \quad (9)$$

ここに、 ϕ は底質の間隙率、 K_{C_b} はチャンバー内の溶存酸素濃度が $C_c = C_b$ となったときの酸素消費フラックスである。式(9)から算出した L と C_b の関係を図-11に示す。図-11より、 L は底層が貧酸素状態のときに小さくなり、貧酸素化が解消しているときに大きな値をとることがわかる。また、図中の直線

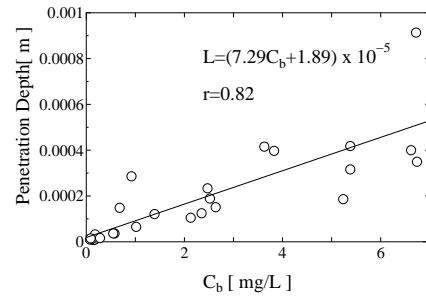


図-11 L と C_b の関係

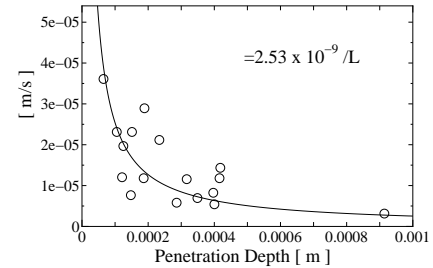


図-12 β と L の関係

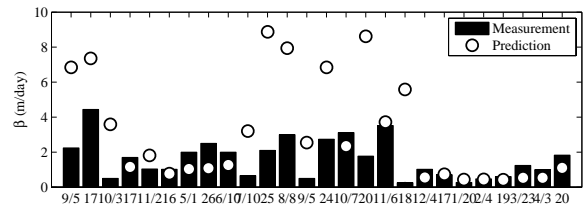


図-13 β の比較

は次式で示される回帰直線を表し、相関係数は 0.82 であった。

$$L = (7.29C_b + 1.89) \times 10^{-5} \quad (10)$$

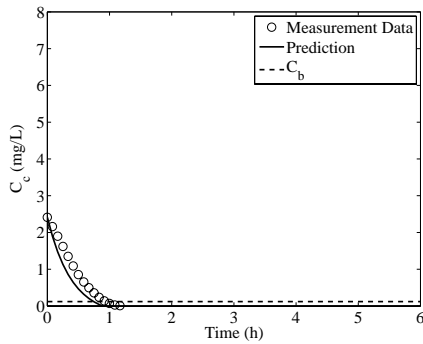
さらに、本手法を用いて得られた L と β との関係を図-12に示す。前述の式(8)が示すように、 β と L との間には反比例の関係があるが、図-12からも、このことを確認することができる。図中の曲線は

$$\beta = \frac{2.53 \times 10^{-9}}{L} \quad (11)$$

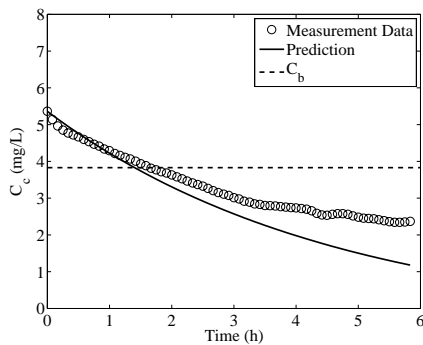
で表される回帰式である。上式中の係数は D_{O_2} を表すが、本計算で L を求める際に用いた値とほぼ同じ値を有していることより、本手法の妥当性が示されていると考えられる。

式(11)から推定される β と実測データから得られた β とを比較した結果を、図-13に示す。図-13より、本手法によって推定される β は、季節変動の影響を定性的に推定することは可能であると言える。

以上より、海底直上の溶存酸素濃度 C_b より浸透深さ L を求めた後、式(11)を用いれば、物理・化学的酸素消費量が、概ね、推定できると言える。



(a) 2008年8月8日



(b) 2008年12月17日

図-14 α, β を用いた C_c の時系列変化の予測

5.3. 底質による酸素消費の経時変化予測

前節で得られた α, β のモデル式を用いて C_c の時系列変化の予測を行った。このとき、 α は式 (5)、 β は式 (11) から算出し、算出された α, β を用いて式 (3) から酸素消費フラックスを算出し、 C_c の時系列変化の予測を行った。その結果を図-14 に示す。図-14 より、底層の貧酸素化しているとき、底層の貧酸素化が解消しているとき共に式 (3) は C_c の時系列変化を予測できていることがわかる。

以上のことから、式 (3) は底層の DO 濃度に関わらず、年間を通じて酸素消費フラックスの予測に用いることができることが明らかになった。

6. 酸素消費量の環境変化に対する応答

次に、本研究で開発した酸素消費モデルを用いて底層環境の変化による酸素消費量の応答について検討した。図-15 に酸素消費モデルを用いて推定した各測定日における海域の現状の酸素消費量と溶存酸素を 3mg/l まで回復させた直後の酸素消費量を示す。酸素供給直後の酸素消費量の推定において、酸素の浸透深さは現状の海域の値と同じ値を用いた。図-15 より、図中の で示される酸素供給した直後の酸素消費量は底層の貧酸素化が生じている時季に、現状の酸素消費量に比べて非常に大きくなっている。これは、底層の貧酸素化が生じている時季に底層に酸素を供給しても、供給直後はたちまち酸素が消費されてしまうことを示している。図-16 に十分に酸素供給した後の酸素消費量を示す。十分に酸素供給をし

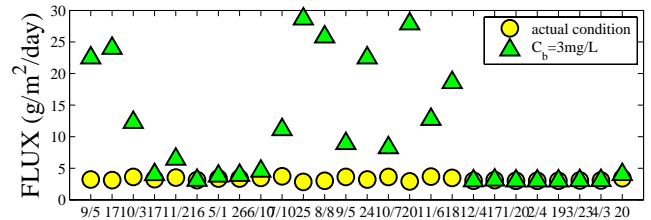


図-15 現状と酸素供給した直後の酸素消費量

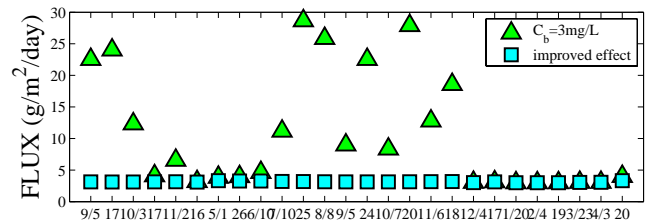


図-16 十分に酸素供給した後の酸素消費量

た後の酸素消費量の推定において、酸素の浸透深さは回復した後の溶存酸素濃度を用いて推定した。つまり、図-16 中の で示される酸素供給直後の酸素消費量と で示される十分に酸素供給後の酸素消費量の違いは、酸素の浸透深さの違いを示していることになる。図-16 より、底層の貧酸素化している時季は十分に酸素供給した後の酸素消費量は酸素供給直後の酸素消費量に比べて非常に小さくなっていることがわかる。両者の違いは、酸素の浸透深さの違いであることから酸素の浸透深さを回復させることによって、底層の酸素消費量は小さくなることが明らかになった。

これらの結果から、貧酸素化改善のために底層に酸素供給を行う場合、底層の酸素の浸透深さが回復していないと底層の酸素消費量が非常に大きくなるので、酸素の浸透深さが回復するまで十分に酸素供給をしなければ底層の貧酸素化の改善にはつながらないということがわかった。つまり、底層の酸素消費の観点からみて、底層への酸素の浸透深さを検討することは非常に重要なことであり、底層の環境改善のひとつの指標になるのではないかと考えられる。

7. 酸素の浸透深さの動的変化の検討

貧酸素化改善技術を評価する際に本研究で開発した酸素消費モデルを適用する場合、環境の変化に応じて酸素の浸透深さが時間的に変化する過程を正確に把握することは必要不可欠である。しかし、現段階の酸素消費モデルでは酸素の浸透深さは一定値を用いているため酸素の浸透深さの経時的な変化を考慮できていない。そこで酸素消費モデルを適用した場合の酸素の浸透深さが直上水の環境変化に応じて動的に変化することができるようにモデルの改良を行った。

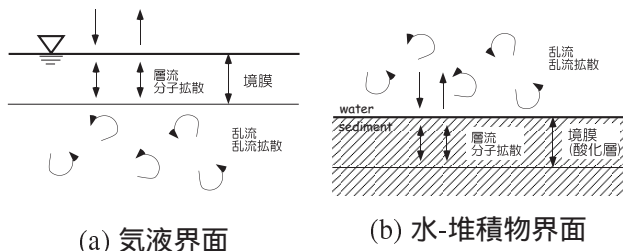


図-17 表面更新説模式図

本研究では、酸素の浸透深さの時間的な変化を考える際に、気液界面のガス交換における表面更新説の概念を適用した。気液界面において表面更新説によると物質移動係数 K_L は以下のように示される。

$$K_L = 2 \sqrt{\frac{D}{\pi\tau}} \quad (12)$$

ここに、 D は分子拡散係数、 τ は表面更新時間である。図-17(b) に示されるように、酸化層が底質直上の環境変化に影響を受けて変化するとすれば、PCOC 係数 β は式 (13) より以下のように推定される。

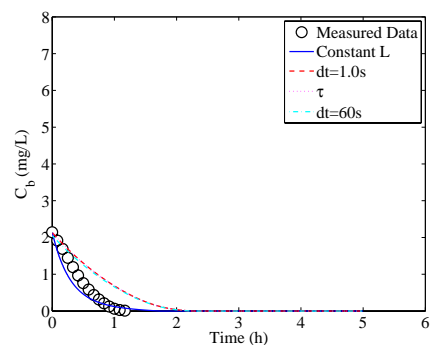
$$\beta = 2 \sqrt{\frac{D}{\pi\tau}} \quad (13)$$

式 (13) を展開すると酸化層の厚さが更新される時間 τ は以下のように示される。

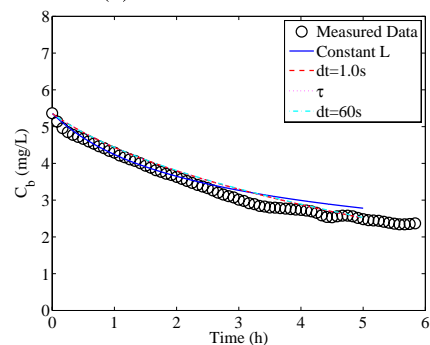
$$\tau = \frac{4D}{\pi\beta^2} \quad (14)$$

そこで、式 (14) から酸化層の更新時間を求めて、酸素の浸透深さ L を動的に変化させ、チャンバー内の溶存酸素濃度の時系列変化の予測を行った。このとき同時に、酸素の浸透深さを一定値で用いた場合、1s、60s で酸素の浸透深さを更新させた場合で予測を行い、 τ を用いて酸素の浸透深さを更新させたときとの比較を行った。予測結果を図-18 に示す。予測において τ を用いた場合、酸素の浸透深さは 10s のオーダーで更新されていた。図-18(a) より、底層の貧酸素化が生じている夏季は τ を用いた場合、酸素の浸透深さに一定値を用いた場合に比べて酸素消費が遅くなることがわかった。一定値を用いた場合の方が実測データにあっているが、酸素の浸透深さを更新させた場合もある程度実測データを予測できていると考えられる。一方、図-18(b) より冬季は、酸素の浸透深さに一定値を用いた場合と τ を用いて更新させた場合に大きな差はみらず、実測データの予測がきている。

以上の結果から、酸化層更新時間 τ を用いることで本研究で開発した酸素消費モデルにおいて酸素の浸透深さを動的に変化させることが可能になった。これによって、本研究で開発した酸素消費モデルを用



(a) 2008年8月8日



(b) 2008年12月17日

図-18 L を動的に変化させたときの C_c の予測

いることで、底層環境改善指標として底質への酸素の浸透深さをを用いることができ、底層環境改善の評価に用いることが可能になったといえる。

8. 結論

本研究では、港湾海域における現地調査結果に基づいて底質の酸素消費量のモデル化を行った。その結果、底層溶存酸素濃度と水温から底質の酸素消費量の推定が可能になった。また、モデル構築のキーパラメータである底質への酸素の浸透深さを底層環境改善指標として提案した。貧酸素化した海域に酸素供給をする場合、底質の酸素の浸透深さを回復させることで、底質の酸素消費量が小さくなり、底層環境改善につながると考えられる。

参考文献

- 1) 大阪湾再生推進会議; 「大阪湾再生」水質一斉調査について”, (オンライン), 入手先 <http://www.kkr.mlit.go.jp/plan/suishin/suishitutyosa/index.html>
- 2) 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底質の酸素消費特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp.1066-1070.
- 3) Y. Hayakawa, K. Hayashizaki and K. Watanabe (1999): Measurement of Dissolved Oxygen Consumption Rates by Bottom Sediment in Estuary, Journal of National Fisheries Univ., Vol. 48, pp. 73-80.
- 4) Wei-Jun Cai, Frederick L. Sayles (1996): Oxygen penetration depths and fluxes in marine sediment, Marine Chemistry, Vol. 52, pp. 123-131.

討議等

◇ 討議 [矢持先生]

α は生物的酸素消費を示していると言っているが、溶存酸素不飽和度 C_s が増加する、つまり貧酸素化が生じると α が増加するのは微生物学的には矛盾しているのではないか。 α, β は生物的酸素消費、物理化学的酸素消費と言い切ることができるのか。

◇ 回答：生物的酸素消費には、底層の水温と溶存酸素濃度の両方が影響していると考えられます。貧酸素化している時季は、底層の溶存酸素濃度は小さいですが、水温は冬季に比べて高いためその影響もあり、 α が大きくなっていると考えられます。

本研究において α は、 C_b が十分にある場合には水温が上昇すれば DO 消費が促進され、水温が低い場合や C_b が低い場合には DO 消費が抑制される効果を表していることから、生物的酸素消費に起因する項としました。また β は、 C_b が低下すると酸素消費が促進される項であることから、物理・化学的酸素消費に起因する項としました。

◇ 討議 [貫上先生]

チャンバー法で測定している値は、酸素消費ポテンシャルであって実際の酸素消費速度とは違うのか。底層の溶存酸素濃度 C_b のみから酸素の浸透深さが推定できるのであれば、酸素の浸透深さより C_b が指標となるのではないか。

◇ 回答：底層の貧酸素化している時季は、チャンバー内に酸素供給して酸素消費量を測定しているため、酸素消費ポテンシャルを測定していることとなります。しかし、冬季の測定においては、底層酸素供給をしていないため実際の酸素消費速度を測定していることとなります。本研究においては、それらを酸素消費量と称しています。

本研究で提案する方法では、酸素浸透深さは C_b から推定可能ですが、 C_b は時間変動が大きい指標として用いるには不適切であると考えられます。酸素浸透深さを C_b から推定するためには、まずチャンバー法を用いて酸素消費量を測定する必要があるため、酸素浸透深さが指標であることが、 C_b が指標であることと同様のことではないと考えられます。

◇ 討議 [内田先生]

チャンバー内の溶存酸素濃度 C_c の経時変化予測が貧酸素化している時季と貧酸素化が解消している時

季で同様に実測値とずれているのはなぜか。単純に補正項を追加するだけではいけないのか。

◇ 回答：本研究において、図-14 に示すように C_c の時系列変化が同様にずれているには、酸素浸透深さに一定値を用いていることが問題であると考えています。補正項を用いることは考えてなく、梗概の最後に示すように、酸素浸透深さは底質直上の水質によって経時的に変化すると考えられるのでその現象を考慮することで本酸素消費モデルの予測値が変化すると考えています。