

富栄養化した港湾海域における 底層環境改善指標に関する研究

A STUDY ON AN INDEX FOR IMPROVEMENT OF SEA BOTTOM ENVIRONMENT IN EUTROPHIED PORT AND HARBOR

水田圭亮¹・遠藤 徹²・重松孝昌³

Keisuke MIZUTA, Toru ENDO and Takaaki SHIGEMASTU

¹ 修(工) パシフィックコンサルタンツ(株) 大阪本社水工技術部 (〒541-0052 大阪市中央区安土町 2-3-13)

² 正会員 博(工) 大阪市立大学大学院工学研究科 助教 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

³ 正会員 博(工) 大阪市立大学大学院工学研究科 教授 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

In order to get knowledge of sediment oxygen consumption in a eutrophied port through a whole year, field investigation on oxygen consumption flux by the sea bottom was carried out using a chamber and a dark bottle with fluorescence type oxygen sensors. Based on the measurement data, biological and physical-chemical oxygen consumption processes are modeled with water temperature and dissolved oxygen concentration near the sea bottom. It is shown that the oxygen penetration depth can be a useful index which represents a restoration degree of sea area under low or no dissolved oxygen concentration. It is also shown that the presented sediment oxygen consumption model can predict the change of the oxygen consumption by oxygen supply with reasonable accuracy.

Key Words: *modeling of sediment oxygen consumption, oxygen penetration depth, improvement of sea bottom environment*

1. はじめに

貧・無酸素化した海域は生物の生息が困難になることから「死の海」と呼ばれることもあり、世界中の閉鎖性海域において拡大の方向にあると言われている。すなわち、貧・無酸素化の改善は、世界的な環境問題のひとつとして認識されている。日本の閉鎖性海域の貧・無酸素化は、陸域からの栄養塩の過剰供給が大きな原因のひとつであるとの認識の下、窒素やリンなどの栄養塩の排出総量規制とともに、下水道整備が進められてきた。その成果の一端として内湾の水質はずいぶんと改善されたとの認識が一般的ではあるが、未だ、貧・無酸素化は改善方向にあるという報告はほとんどない。このことは、海域における酸素動態に関わる環境の構造を改善・修復する必要性を示唆していると考えられる。

このような海域の環境構造を改善するために、多くの技術が開発・提案されている。これらの技術を現地に適用するためには、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のが実情であると思われる。例えば、底層に酸素を供給する場合に、その効果を底層における溶存酸素濃度を指標として評価することは適切であるとは思えない。例えば、相馬¹⁾は、構築した数値モデル

による検討結果として、貧酸素化した海域における底質による酸素消費速度は小さいが、その状態で底層の溶存酸素濃度を高くしてもすぐに酸素が消費されてしまうことを示している。また、遠藤ら²⁾は、貧酸素化した港湾海域における底質による酸素消費速度の計測から、相馬の検討結果を裏付けるデータを示している。すなわち、底質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・評価手法を確立し、これを評価するための指標を確立する必要があると考えられる。

そこで、本研究では、閉鎖性の極めて強い港湾海域を対象として、底質による酸素消費量の現地調査結果に基づいて、底質による酸素消費モデルの構築方法を提案し、モデル構築におけるキーパラメーターを底層環境改善指標として提案するものである。

2. 調査概要

調査は、大阪湾に流入する大和川の河口に位地する堺泉北港湾海域北泊地の港口部(図-1 参照)において、2008年5月から2009年4月にかけての毎小潮時に行われた。調査日における海底直上水の水温および溶存酸素濃度(DO) C_b を図-2に示す。同図より、7月から11月にかけての長期にわたって、調査地点の直上水は貧酸素状態にあったことが確認される。

底質による酸素消費量の測定には、チャンバー法を

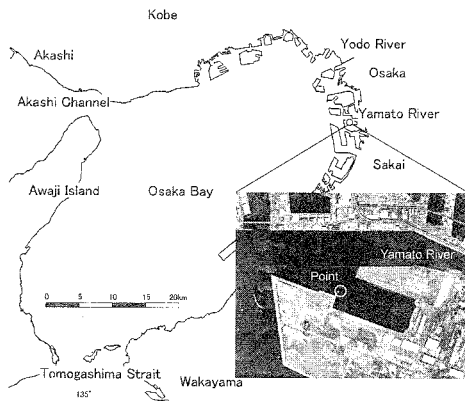
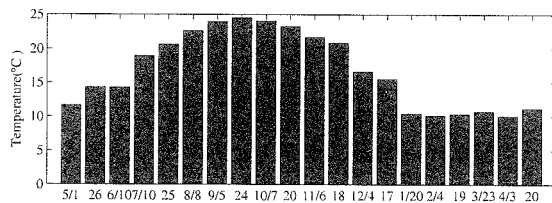
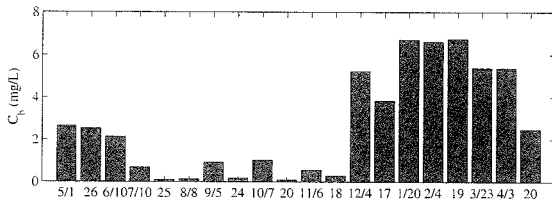


図-1 調査位置図



(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

用いた。貧酸素化している調査地点において酸素消費量を測定するため、チャンパー内の初期 DO 濃度を回復させてから酸素消費を計測する手法を採用した。詳細は、遠藤ら²⁾を参照されたい。

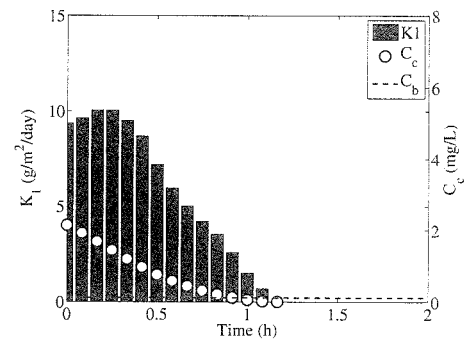
3. 底質による酸素消費の従来の評価方法

チャンパー法を用いた底質による酸素消費量の評価方法は、下記の 2 通りがある。ひとつは、チャンパー内の DO 濃度 C_c の時間変化と暗瓶内のそれ C_w との差を求め、これにチャンパー内の容積 V を乗じて底面積 A 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方法である。

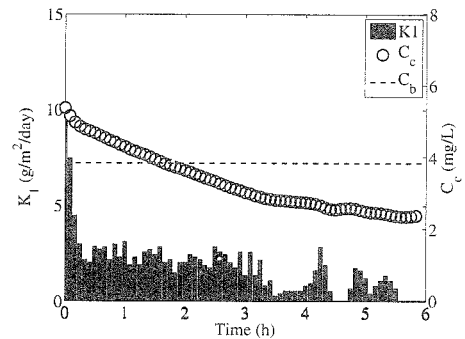
$$-\frac{V}{A} \left(\frac{\partial C_c}{\partial t} - \frac{\partial C_w}{\partial t} \right) = K_1 \quad (1)$$

一般的に式 (1) の右辺の定数 K_1 は酸素消費速度と称されるが、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ため、本研究では「酸素消費フラックス」と称する。

もうひとつの方法は、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



(a) 2008 年 8 月 8 日



(b) 2008 年 12 月 17 日

図-3 酸素消費フラックス K_1 と C_c

の酸素消費量を評価する方法である³⁾。

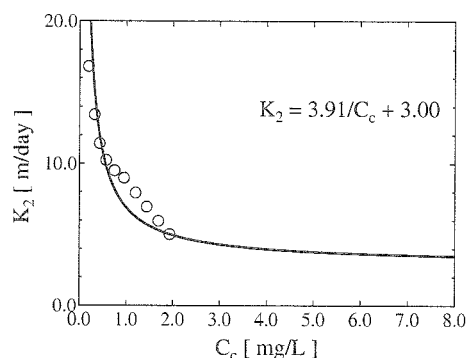
$$-\frac{V}{A} \left(\frac{\partial C_c}{\partial t} - \frac{\partial C_w}{\partial t} \right) = K_2 C_c \quad (2)$$

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 K_2 を「酸素消費速度」と称することとする。一般的には式 (1) の右辺の定数 K_1 を酸素消費速度と称することが多いが、上式より明らかなように K_1 はフラックスの単位を、 K_2 は速度の単位を有するので、本研究では K_1 を「酸素消費フラックス」、 K_2 を「酸素消費速度」と称するので、留意されたい。

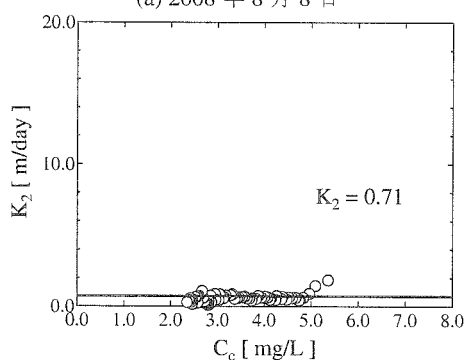
図-3 は、 C_c と K_1 の時間変化を示したものである。図中には、観測日の海底直上の DO 濃度 C_b を点線で示している。図-3 の (a) からわかるように、貧酸素化している時季の底質による酸素消費フラックス K_1 は、チャンパー内の溶存酸素濃度 C_c が豊富な測定開始時には大きく、時間が経過して C_c が減少するとともに徐々に小さくなる。すなわち、この時季の K_1 は時間あるいは DO によって変化する。また、同図 (b) より、貧酸素化が解消している時季の K_1 は、測定時間あるいは DO に関わらずほぼ一定の値を有することがわかる。

一方、図-4 は、同観測日の計測結果を酸素消費速度 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て取れる (同図 (b))。

図-3 と図-4 を総じて見れば、貧酸素化している時季



(a) 2008 年 8 月 8 日



(b) 2008 年 12 月 17 日

図-4 酸素消費速度 K_2 と C_c

は、計測とともに酸素消費フラックスは減少するが酸素消費速度は増加すること、貧酸素化が解消している時季は、計測期間中において両者がほぼ一定の値を有すること、がわかる。すなわち、閉鎖性の強い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、酸素消費フラックスと酸素消費速度の両観点から酸素消費メカニズムを考慮できる定式化が必要であると考えられる。

4. 新たな底質による酸素消費の評価方法

前節の検討結果に基づいて、本研究では、底質による酸素消費量を次式でモデル化することを提案する。

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

上式中の α はフラックスの、 β は速度の次元を有する係数であり、式(1)と式(2)の和としてモデル化されていることになる。これらの係数を、現地調査で得られた酸素消費量に関するデータを基に回帰的に求め、モデル化を図る。図-4 中の実線は回帰式の一例を示したものである。

(1) α のモデル化

α の年間変動を、図-5 に棒線で示す。図-2 の水温および DO と併せて見れば、 α は基本的には水温が高くなると大きな値を示すが、DO が低くなると抑制される

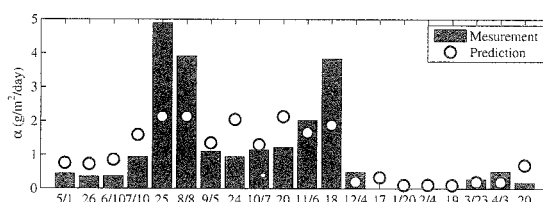


図-5 α の年間変動

傾向があるように見て取ることができる。また、本研究で用いた調査法のように、一時的な DO の変化を与えても有機物を分解する生物の生息数に大きな影響は与えないであろうこと、その結果、生物活性によって消費される酸素はほぼ一定と考えられること等から、 α は生物的な酸素消費フラックスを表す係数 (BOC 係数) であると推察される。

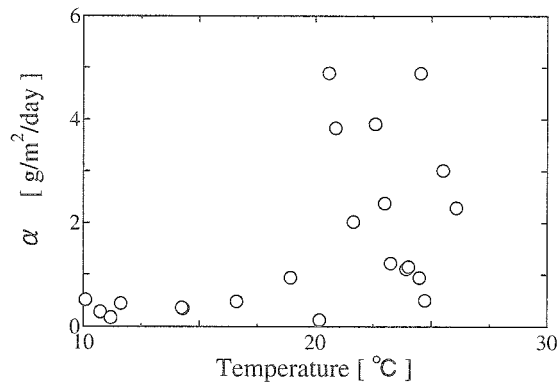
本来であれば、有機物分解に伴う酸素消費には、有機物濃度や塩分、水温、DO などが関係すると考えられるが、本研究の調査対象地点では、有機物濃度が過剰に存在すると仮定できることや底層塩分が年間を通してほぼ一定であることなどから、ここでは、 α が DO と水温のみに依存するとしてモデル化することを考える。式(3)で底質による酸素消費をモデル化したことと、 α が DO に依存することとの間に矛盾を感じるかもしれない。なるほど、好気的環境下においては BOC 係数 α は DO に依存しないと考えられるが、本研究の対象としているような貧・無酸素化するような海域においては、生物活性が DO に依存することは十分に考えられることである。事実、図-5 に示される α の実測値は、下記の貧酸素化している時季には低い傾向を示している。

図-6 に、調査日の底層水温および底層 DO 濃度 C_b と α との関係を示す。同図 (a) からは、底層水温が約 10~20℃では α はほぼ一定の値を示し、水温が 20℃を超えると α が急激に大きく、また、ばらつきも大きくなる傾向にあることがわかる。同図 (b) からは、 C_b が低いときには α は大きくなり、 C_b が 2mg/l 以上になると α は小さな値を示す傾向にあることがわかる。このことは、 α が生物学的酸素消費を表すパラメーターであるとの推察に矛盾するように思われるかもしれないが、調査海域では、 $C_b > 2\text{mg/l}$ となるのは水温が低い時季であること、水温が 20℃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ことなどから、先述の推察とは決して矛盾しない。

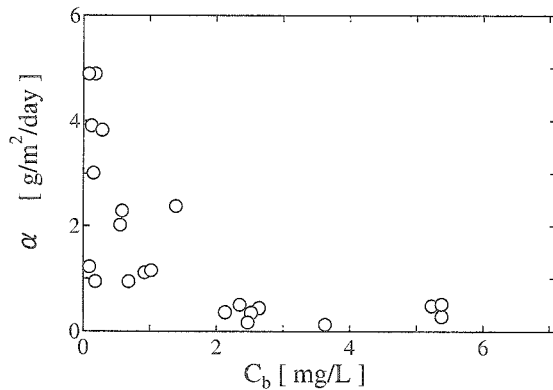
ここで、水温や塩分からワイズの式によって求められる飽和酸素濃度 C_s と C_b を用いた溶存酸素不飽和度 C_* の導入を考える。

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

図-7 に α と C_* の関係を示す。同図より、 α は、 C_* が約 0.8 以下ではほぼ一定の値を示し、それ以上になると急激に大きくなる傾向があることがわかる。図中の曲



(a) 底層水温



(b) 底層 DO

図-6 α と底層 DO, 水温の関係

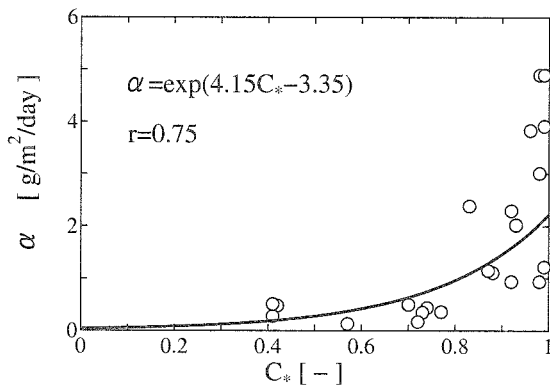


図-7 α と C_* の関係

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。式(5)から算出される α を、図-5中に○印で示した。同図によれば、式(5)から算出された α は、実測値と比較するとその変動の大きさを十分には再現できていないものの、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、溶存酸素飽和度を用いておおよそ予測することが可能であると言える。

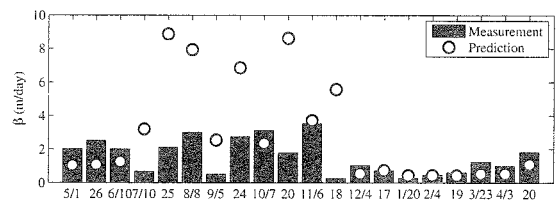


図-8 β の比較

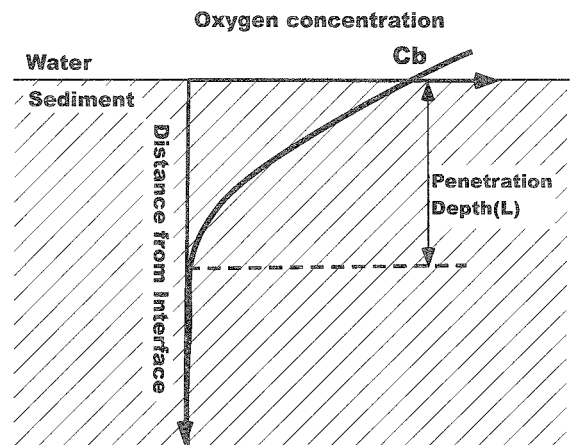


図-9 水-底質境界面の DO プロファイル

(2) β のモデル化

調査データから求められた β の年間変動を、図-8に棒線で示す。データのばらつきは見られるものの、図-2(b)のDOが高いときに β は小さい値を、DOが低いときに大きな値をとることが多い。

さて、図-9は、底質表層部のDO濃度の鉛直分布を模式的に示したものである。一般的に、海底直上で十分なDOが存在する状態であっても、海底面からある距離 L より下方の間隙中では無酸素状態になっている。このような底質中においてDO濃度が有意な値を有する深さは、酸素浸透深さと呼ばれ、微小電極を用いた計測などが行われている⁴⁾。酸素浸透深さ内における酸素の動態は、拡散や化学反応に依存することは容易に想像される。海底直上水が貧・無酸素状態になれば、底質からの溶出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とは、周知のことである。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。そこで、

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

とモデル化することを提案する。ここに、 D_{O_2} は水中における酸素の分子拡散係数($0.78 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$)である。いま、図-9に示される酸素浸透深さ 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得られた酸素消費フラックスが、水底直上のDO濃度 C_b とその環境下で形

成される酸素浸透深さ L によって規程されると考えれば、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、Wei ら⁵⁾ 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 (相馬ら⁶⁾ に倣って $\phi = 0.9$ とした)、 K_{C_b} はチャンパー内の DO 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-10 に示す。図-10 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。

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

このようにして求められた L と β との関係を図-11 に示す。このとき、調査地点の粒経を考慮して浸透深さが 0.05mm 以下のものは除外して考えた。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。式中の係数は D_{O_2} を表す (式 (8) 参照) 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。また、酸素浸透深さ L は、底面直上水の流動の影響を受けることも考えられる。本研究ではチャンパー内の濃度の均一化を図るために水中モーターを用いて緩やかな流動を発生させている。式 (11) として求められた係数が、計算に用いた拡散係数よりも大きな値を示しているのは、このことが影響していると考えられる。

式 (11) から推定される β を、図-8 中に○印で示す。図-8 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。

(3) モデルの検証

式 (5) および式 (11) によってモデル化された α および β を用いて、実測されたチャンパー内の DO 濃度 C_c の経時変化を式 (3) によって計算することによって、モデルの検証を行った。図-12 は、貧酸素化している時季 (同図 (a)) および貧酸素化していない時季 (同図 (b)) の C_c の経時変化の実測値と計算結果の比較を示したものである。同図によれば、両時季におけるチャンパー内の DO 濃度の経時変化を良好な精度で再現できていることがわかる。すなわち、本研究で提案する底質によ

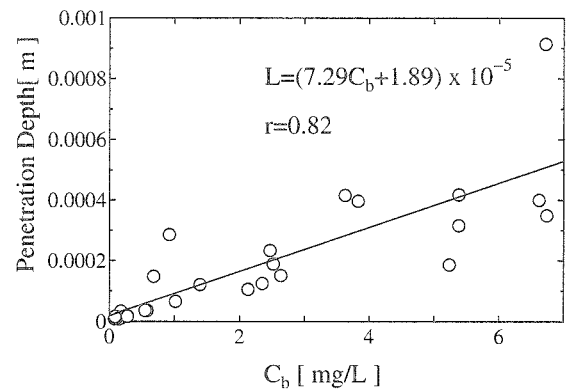


図-10 L と C_b の関係

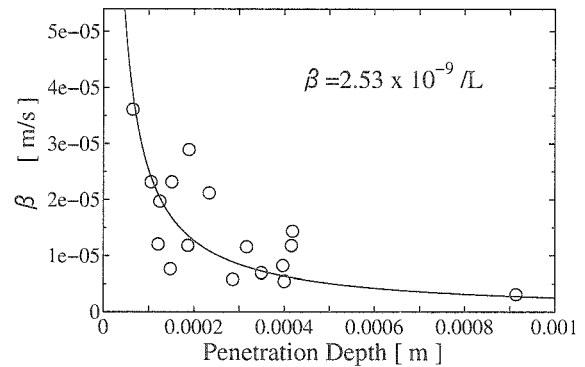


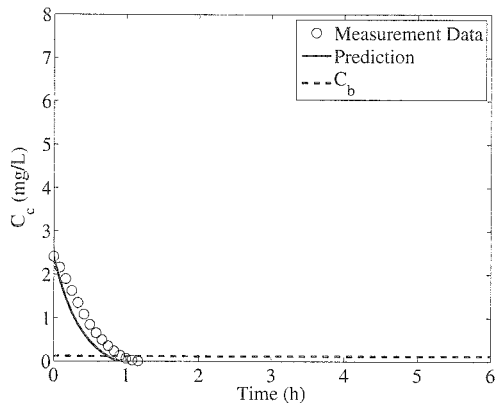
図-11 β と L の関係

る酸素消費モデルは、海底直上の DO 濃度にかかわらず、年間を通じて酸素消費フラックスの定量的予測を行うに有用であることが確認された。

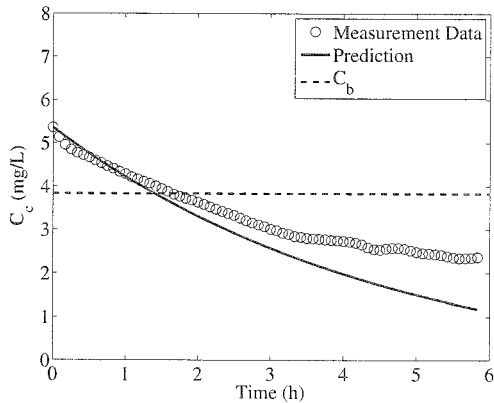
5. 酸素消費量の環境変化に対する応答

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。本研究で調査を実施した底層環境 (水温、海底直上水中の DO) の下で、直上水中の DO (C_b) を何らかの手段で 3mg/l まで回復させた直後の酸素消費フラックスを、式 (3) より推定した。図-13 に、その推定結果 (△印) を、各測定日における酸素消費フラックスの現状 (○印) とともに示す。ただし、酸素供給直後の酸素消費量の推定においては、調査時の C_b を用いて酸素浸透深さ L を求めている。図-13 によれば、底層の貧酸素化が深刻な時季においては、 C_b を回復させた直後の酸素消費は現状の酸素消費に比べて非常に大きくなることが予想される。このことは、底層の貧酸素化が生じている時季に酸素を供給しても、酸素はたちまち消費されてしまうことを示している。

次に、十分に酸素供給を行って $C_b = 3\text{mg/l}$ を維持した後の酸素消費フラックスを推定した。このとき、酸素浸透深さ L は $C_b = 3\text{mg/l}$ として求めている。すなわち、酸素供給直後の酸素消費フラックスの推定値と、十



(a) 2008 年 8 月 8 日



(b) 2008 年 12 月 17 日

図-12 α , β を用いた C_c の経時変化の予測

分に供給した後のそれとの相違は、酸素浸透深さ L の相違のみによってもたらされていることになる。図-14 には、十分に酸素供給した後の酸素消費フラックスの推定値 (□印) を、酸素供給直後の酸素消費フラックスの推定値 (△印) とともに示す。図-14 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フラックスは、酸素供給直後のそれと比較すると、非常に小さな値となることがわかる。この推定結果は、貧酸素化した海域においてその改善のために底層に酸素供給を行う場合には、酸素浸透深さが十分な厚みに回復するまで酸素供給をし続けなければならないことを示唆している。すなわち、底質による酸素消費を低減させるためには、酸素浸透深さを大きくすることが重要である。換言すれば、底質環境改善指標として酸素浸透深さが有用であると判断される。さらに、底質中における酸素浸透深さは、チャンパー法を用いた現地調査に基づいて本研究で提案したような回帰式を構築すれば、高価な機器を用いなくても海底直上の水温と DO を計測すれば、おおよそ推定することが可能である。

6. 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酸素消費メカニズムを考慮した底質の酸素消費量のモデル化を行った。本研究の成果によれば、海底直

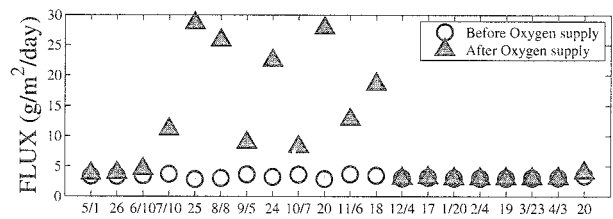


図-13 酸素供給前と直後の酸素消費量

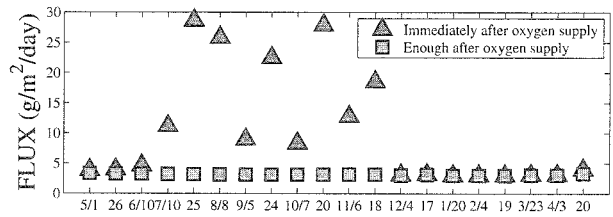


図-14 十分に酸素供給した後の酸素消費量

上の溶存酸素濃度と水温を計測することによって、貧酸素化した港湾海域における生物的、物理・化学的酸素消費フラックス、および、これらの総和としての底質による酸素消費フラックスを推定することが可能となった。また、推定値を求める過程に、底質中の酸素浸透深さがキーパラメーターであることを見出し、底層環境改善の指標として酸素浸透深さが有用な指標であることを提案するとともに、その簡便な推定法も提示している。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金・基盤研究 (B) (代表者：中尾正喜) の補助を受けて遂行された。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 相馬明郎, 関口泰之, 桑江朝比呂, 中村由行: 東京湾の生態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, 2008.
- 2) 遠藤徹, 水田圭亮, 重松孝昌: 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, 2008.
- 3) Hayakawa Y., Hayashizaki K. and Watanabe K.: Measurement of Dissolved Oxygen Consumption Rates by Bottom Sediment in Estuary, Journal of National Fisheries Univ., Vol. 48, pp. 73-80, 1999.
- 4) 中村由行, 井上徹教, Fatos Kerciku, 左山幹雄: 微小酸素電極を用いた濃度境界層の微細構造の把握, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp.1081-1085, 1996.
- 5) Cai W.-J., Sayles L. F.: Oxygen penetration depths and fluxes in marine sediment, Marine Chemistry, Vol.52, pp.123-131, 1996.
- 6) 相馬明郎, 左山幹雄: 酸素・窒素・炭素動態の鉛直微細構造を表現する沿岸域堆積物表層物質循環モデルの開発, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 1231-1235, 2002.