

底泥による溶存酸素消費過程における 濃度境界層発達の影響

THE EFFECT OF DEVELOPING DIFFUSIVE BOUNDARY LAYER ON SEDIMENTARY OXYGEN DEMAND

東野 誠¹
Makoto HIGASHINO

¹正会員 博(工) 大分工業高等専門学校助教授 土木工学科 (〒870-0152 大分市大字牧1666)

A model of sedimentary oxygen demand (SOD) for a sediment bed for finite length is presented. The model describes the effect of developing a diffusive boundary layer on oxygen transfer just above the sediment/water interface and on microbial oxygen uptake inside the sediment. Variations of biomass profile inside the sediment, dissolved oxygen concentration profile near the sediment/water interface, and SOD in accordance with the developing diffusive boundary layer are investigated numerically.

Key Words : *dissolved oxygen, sedimentary oxygen demand, sediment/water interface, diffusive boundary layer, oxygen uptake*

1. はじめに

湖沼・貯水池において、水中から底泥表面へと移動する溶存酸素(DO)のフラックス(SOD: Sedimentary Oxygen Demand)は、底泥直上の水柱のDO収支に大きな影響を及ぼす。SODは底泥内部での生物・化学的DO消費過程のみならず、底泥直上の水流流速の影響を受けて変化する。これは、水・底泥境界面直上の濃度境界層の厚さが、流れ場の影響を受けて変化するためである。従来よりSODに関する理論的・実験的検討が行われ^{1), 2), 3)}, SODに及ぼす底泥直上の水流流速の影響のモデル化・定式化等が試みられてきた。これらの定式化・モデル化の妥当性を検証するために、実底泥を用いて有限長さの底泥床による実験が行われている^{4), 5), 6)}。SODのモデル化・定式化においては、濃度境界層は十分に発達しており、DO濃度分布の流れ方向の変化はなく、鉛直方向にのみ変化すると仮定されている。ところが、種々の制約の下、短い長さの底泥床を用いた実験では濃度境界層が十分に発達していない場合もあり、そこで得られたデータを用いて上述のモデル化・定式化の妥当性を検証することは困難である場合も少なくない。

実験よりSODを求めるには、1)微小電極によって水・底泥境界面近傍のDO濃度分布を測定し、濃度勾配より算定する、2)実験系内でのDO収支より算定する、等が

考えられる。まず、1)に関して、微小電極が設置された場所では、濃度境界層が十分に発達していることが不可欠である。次に2)に関して、この方法で得られるSODは底泥床全長に対する平均値であるが、その際、濃度境界層の発達段階における局所的なSODの影響を無視するために必要な底泥床の長さを知る必要がある。

著者らは、濃度境界層の発達に伴う局所的な物質移動フラックス、および有限長さの底泥床全長に対する平均物質移動フラックスについて検討を行った⁷⁾。その際、底泥内部での生物・化学的過程は考慮せず、水・底泥境界面での溶質濃度は一定として取り扱った。ところが、底泥によるDO消費過程においては底泥表面、および内部でのDO消費に関与する好気性微生物の分布は、水中から底泥表面へと移動するDOフラックスの影響、すなわち、濃度境界層発達に伴うDOフラックス変化の影響を受けて流れ方向に変化する。

そこで、本研究では、底泥内部でのDO消費速度をDO消費に関与する微生物の菌体増殖速度の関数としてモデル化し、これを前述の筆者らの有限長さの底泥床に対する濃度境界層での物質移動速度に関するモデルと対応させて、有限長さの底泥床に対するSODをモデル化した。次に、本モデルによって、濃度境界層の発達が水・底泥境界面近傍のDO濃度分布と底泥内部の微生物の菌体濃度分布に及ぼす影響を調べるとともに、境界層の発達に伴うSODの流れ方向への変化について検討した。

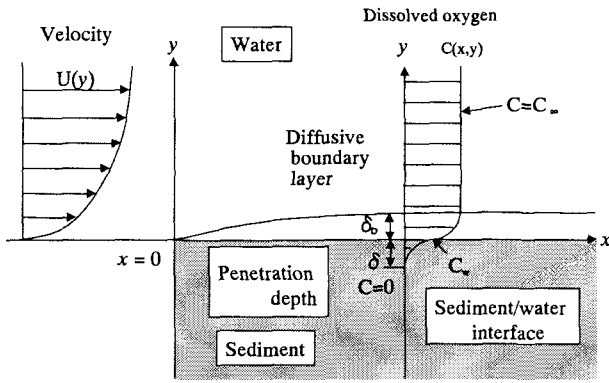


図-1 有限長さの底泥床における水・底泥境界面近傍のDO濃度分布

2. モデル

(1) 濃度境界層でのDO移動速度、および底泥内部でのDO消費速度のモデル化

図-1に示すような有限長さの底泥床に対して考察を行う。底泥床前縁($x=0$)において、乱流場は十分に発達している、すなわち、等流状態であり流速分布の流れ方向への変化はないと仮定する。底泥直上の水柱と濃度境界層内でのDO消費は無視し、DOの移動のみ考慮する。底泥内部では分子拡散によるDOの移動と、微生物の菌体増殖に伴うDO消費を考慮し、化学的DO消費は考慮しない。なお、本研究では底泥内部での好気性従属栄養細菌の増殖とそれに伴うDO消費を想定している。また、底泥表面は平坦で水理学的滑面であるとする。

図-1のように、流れ方向に x 軸、鉛直上向きに y 軸を取る。濃度境界層は、底泥床前縁($x=0$)より流れ方向に発達する。このとき、 $x=0$ 以降下流のDO濃度 C の収支は、次式のように簡略化される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (D_w + D_t) \frac{\partial C}{\partial y} \right\} \quad (1)$$

ここに、 U は流れ方向の時間平均流速、 D_w と D_t はそれぞれ、DOの分子拡散係数、および乱流拡散係数である。

底泥内部では、DO以外の物質の収支は考慮せず、微生物の菌体増殖はDOによってのみ律せられるとする。したがって、微生物によるDO消費速度は菌体増殖速度の関数となる。このとき、底泥内部でのDOの収支は次式で表わされる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_s \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - \frac{1}{Y_c} \mu \frac{C}{K_{O_2} + C} X \quad (2)$$

ここに、 X は好気性微生物の菌体濃度、 μ は最大DO消費速度、 K_{O_2} は好気性従属栄養細菌によるDO消費に関する半飽和定数、 Y_c は収率、 D_s は底泥内部でのDOの分子拡散係数であり、水中の値の50% ($D_s = 1/2 D_w$) と仮定されて

いる。

一方、菌体収支はロジスティックモデルを用いて次式で表わされる。

$$\frac{dX}{dt} = \left(\mu \frac{C}{K_{O_2} + C} - k_d \right) \left(1 - \frac{X}{X_{max}} \right) X \quad (3)$$

ここに、 k_d は死滅係数、 X_{max} は底泥内部での菌体の飽和量であり、底泥中に含まれる分解可能な有機物量に関係する。すなわち、生分解性の有機物を多く含む底泥ほど X_{max} は大きくなる。この X_{max} は底泥ごとに異なった値をとる。また、同一底泥においても底泥表面からの深さによって異なる可能性がある。実底泥に対する、 X_{max} 値の推定は容易ではないが、モデル化に際してDO以外の他の有機物等の収支を考慮する必要がない、等の利点もある。

基礎式(1)は、摩擦速度 $U_* (= \sqrt{\tau_0 / \rho})$ と動粘性係数 ν を用いて、次のように無次元化される。なお、 τ_0 は底面せん断応力、 ρ は流体(水)の密度である。

$$\frac{\partial C^+}{\partial t^+} + U^+ \frac{\partial C^+}{\partial x^+} = \frac{\partial}{\partial y^+} \left\{ \left(\frac{1}{Sc} + \nu_t^+ \right) \frac{\partial C^+}{\partial y^+} \right\} \quad (4)$$

上式において、 Sc は次式で定義されるシュミット数であり、DOの場合は20°Cで500である。

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (5)$$

また、以下のような無次元量が用いられている。

$$\left. \begin{aligned} C^+ &= \frac{C}{C_\infty}, U^+ = \frac{U}{U_*}, \nu_t^+ = \frac{\nu_t}{\nu}, \\ y^+ &= \frac{y}{l}, x^+ = \frac{x}{l}, t^+ = \frac{U_*^2 t}{\nu} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここに、 C_∞ は主流中のDO濃度、 ν_t は渦動粘性係数である。なお、無次元化に際して、DOの乱流拡散係数 D_t は渦動粘性係数 ν_t と等価である($\nu_t = D_t$)と仮定されている。また、 l は長さスケールであり、摩擦速度 U_* と動粘性係数 ν を用いて次式のように表わされる。

$$l = \frac{\nu}{U_*} \quad (7)$$

基礎式(2)、(3)も同様に、次のように無次元化される。

$$\frac{\partial C^+}{\partial t^+} = \frac{1}{2Sc} \frac{\partial^2 C^+}{\partial y^{+2}} - \mu_1^+ \frac{C^+}{K_{O_2}^+ + C^+} X^+ \quad (8)$$

$$\frac{dX^+}{dt^+} = \left(\mu_2^+ \frac{C^+}{K_{O_2}^+ + C^+} - k_d^+ \right) \left(1 - \frac{X^+}{X_{max}^+} \right) X^+ \quad (9)$$

上式(8)、(9)において、次のような無次元量が用いられている。

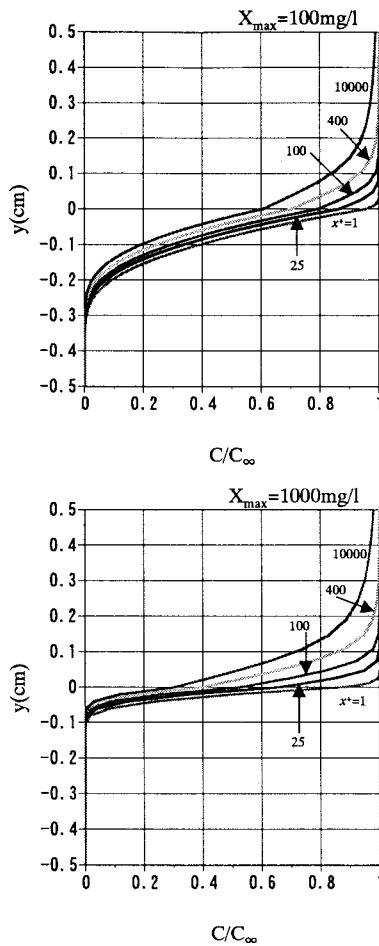


図-2(a) 水・底泥境界面近傍のDO濃度分布 ($U_* = 0.1 \text{ cm/s}$)

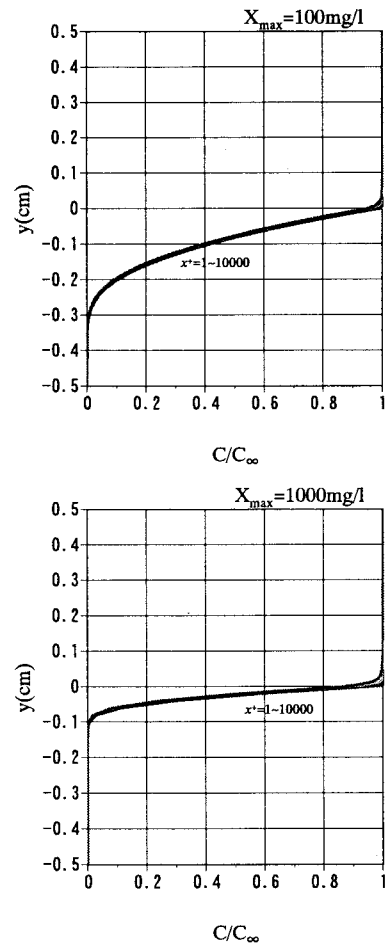


図-2(b) 水・底泥境界面近傍のDO濃度分布 ($U_* = 1.0 \text{ cm/s}$)

$$\left. \begin{aligned} X^+ &= \frac{X}{X_0}, X_{\max}^+ = \frac{X_{\max}}{X_0}, Ko_2^+ = \frac{Ko_2}{C_{\infty}}, \\ \mu_1^+ &= \frac{l^2 X_0 \mu}{Y_c C_{\infty} \nu}, \mu_2^+ = \frac{l^2 \mu}{\nu}, k_d^+ = \frac{l^2 k_d}{\nu} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ここに、 X_0 は後述(2. (2))のように初期菌体濃度である。

(2) SODの数値解とモデル定数

水・底泥境界面近傍でのDO濃度分布とSODは、無次元化した式(4)、(8)、および(9)を数値的に解くことによって得られる。(4)式中の渦動粘性係数 ν_t の推定に際しては、Dadeの式を用いる。これによると、 ν_t^+ (ν_t/ν)は粘性底層内($y^+ \leq 10$)と乱流域とで異なった関数形となり、それぞれ次のように表わされる²⁾。

$$\begin{aligned} \nu_t^+ &= (ny^+)^3 \quad \text{for } y^+ \leq 10 \quad (11, a) \\ \nu_t^+ &= \frac{\kappa y^+ - 2 + \sqrt{(\kappa y^+ - 2)^2 - 4}}{2} \quad \text{for } y^+ > 10 \quad (11, b) \end{aligned}$$

ここに、 $n(=0.1)$ は定数、 $\kappa(=0.4)$ はカルマン定数である。

また、底泥直上の流速分布 U^+ (式(4))は、次式で表わされる。

$$U^+ = \int_0^{y^+} \frac{dy^+}{1 + \nu_t^+} \quad (12)$$

初期条件として、DO濃度は水中の至る所で C_{∞} 、底泥中では至る所でゼロ、また菌体濃度は底泥中の至る所で X_0 とした。

境界条件は、水中において

$$C^+ = 1(C = C_{\infty}) \quad \text{at } x^+ = 0(x = 0) \quad \text{or } y^+ = 300 \quad (13, a)$$

一方、水中から底泥表面へと移動したDOは、底泥表面から深さ δ (図-1)の間に消費され、それ以深は無酸素状態となる。このDOの底泥内部への浸透深さは底泥ごとに異なると考えられるが、本研究では、最近の微小電極を用いた測定結果⁹⁾に基づいて、底泥内部での境界条件を以下のように設定した。

$$C^+ = 0(C = 0) \quad \text{at } y = -20 \text{ mm} \quad (13, b)$$

数値計算において、流れ方向(x)の格子点数は1000、

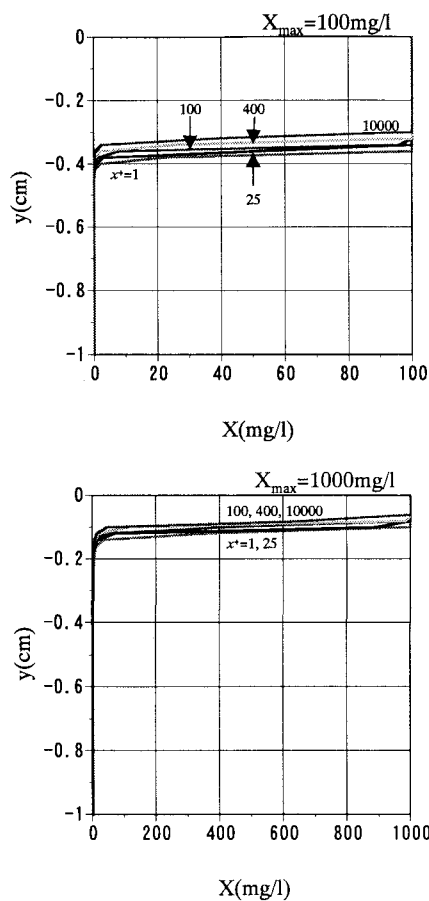


図-3(a) 底泥内部の微生物の菌体濃度分布
($U=0.1\text{cm/s}$)

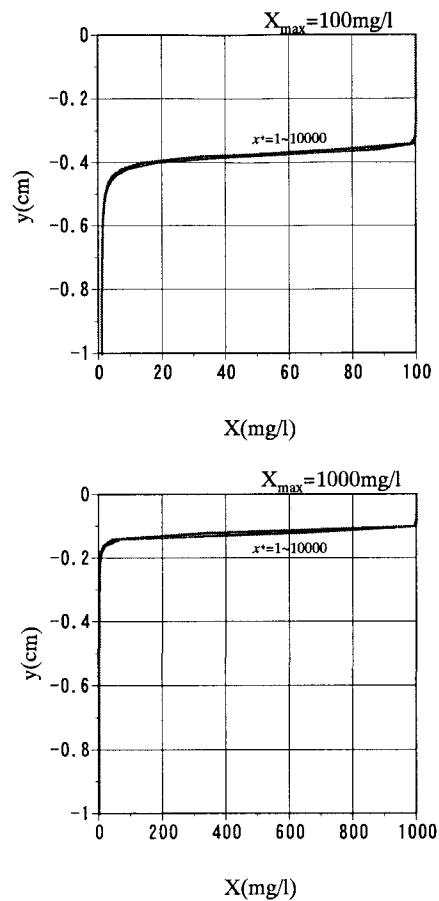


図-3(b) 底泥内部の微生物の菌体濃度分布
($U=1.0\text{cm/s}$)

鉛直方向(y)には水中と底泥内部、それぞれ100とした。濃度境界層の発達にDO濃度分布、微生物の菌体濃度分布に及ぼす影響を表現するために、 x 方向には底泥床前縁において間隔が狭くなるよう格子を配置した。また、 y 方向では、乱れの底泥表面への漸近挙動を表現できるよう、水・底泥境界面近傍において間隔が狭くなるよう格子を配置してある。

式(4)、(8)の両式において、各時間・各 x 座標における水・底泥境界面($y=0$)でのDO濃度(C_w)を与える必要がある。この C_w は界面($y=0$)でのDOフラックスの連続条件より算定される。

計算は前述の初期状態より、底泥内部での微生物の菌体濃度分布が時間とともに変化しなくなるまで繰り返し、種々の摩擦速度 U と $X_{\max}$ に対する定常状態でのDO濃度分布、微生物の菌体濃度分布、およびSODを求めた。

シミュレーションにおいては、水柱から底泥内部まで、温度は 20°C で一定と考えている。モデル定数は文献値⁹⁾を基に決定した。すなわち、最大DO消費速度定数と死滅係数は、それぞれ、 $\mu = 2.4(1/\text{day})$ 、および $k_d = 0.1(1/\text{day})$ 、また、収率は $Y_c = 1.0(\text{mgX}/\text{mgO}_2)$ とした。なお、微生物によるDO消費に関する半飽和定数は $K_{O_2} = 0.2(\text{mg/l})$ 、主流中のDO濃度は $C_\infty = 10(\text{mg/l})$ である。

3. DO濃度分布、微生物の菌体濃度分布、およびSOD変化

(1) 水・底泥境界面近傍でのDO濃度分布

図-2(a)、(b)に、モデルより得られた濃度境界層の発達に伴う水・底泥境界面近傍でのDO濃度分布の流れ方向への変化を示す。シミュレーションは、底泥直上の水流流速を変化させて(摩擦速度 $U=0.1, 1.0\text{cm/s}$)、2つの $X_{\max}$ 値(100mg/l, 1000mg/l)に対して実施した。なお、シュミット数は $Sc=500$ である。これらの図より、底泥床前縁($x=0$)からの距離とともに濃度境界層が厚さを増す(発達する)のは明らかである。濃度境界層が十分に発達したとき($x^+=10000$)、その厚さは $U=0.1\text{cm/s}$ で約1cm、 $U=1.0\text{cm/s}$ のとき約1mmであり、摩擦速度に強く依存する。一方、底泥内部へのDO浸透深さは $X_{\max}$ 、すなわち、底泥内部でのDO消費のポテンシャルに強く依存し、流れの方向(x)には $U=0.1\text{cm/s}$ 、 1cm/s のいずれにおいても殆んど変化しない。これより、底泥内部へのDOの浸透深さは微生物によるDO消費活性によって決まり、底泥直上の水流流速(摩擦速度)のDO浸透深さへの影響は僅かであるといえる。

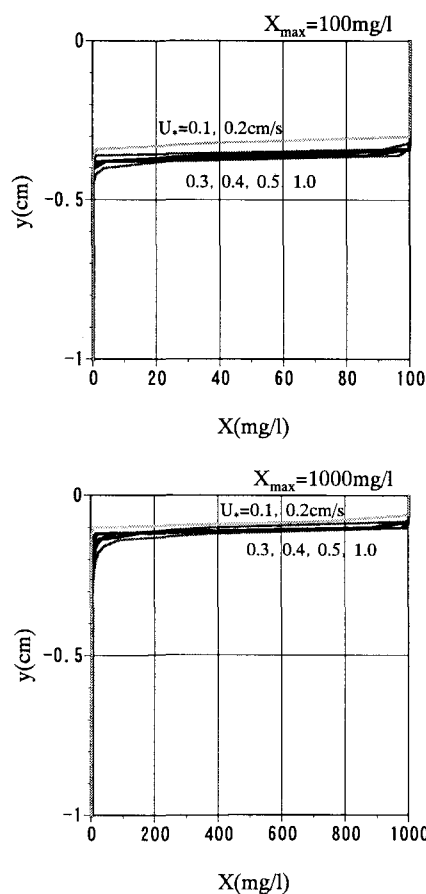


図-3(c) 底泥内部の微生物の菌体濃度分布

(2) 微生物の菌体濃度分布

モデルによる、濃度境界層の発達に伴う底泥内部の微生物の菌体濃度分布の流れ方向への変化を図-3(a), (b)に示す。摩擦速度を $U_* = 1.0 \text{ cm/s}$ とした図-3(b)では、流れ方向(x)への菌体濃度分布の変化は見られない。これは、底泥直上の水流流速が大きければ水中から底泥表面へのDO移動速度は底泥内部のDO消費速度に対して十分に大きく、DO濃度分布、微生物の菌体濃度分布、SODは底泥床の至る所で底泥内部のDO消費に律せられることに起因している。摩擦速度を小さくした図-3(a) ($U_* = 0.1 \text{ cm/s}$)では、菌体濃度分布は濃度境界層の発達とともに流れ方向(x)に変化しており、これは前述(3.(1))のDO濃度分布と同様の傾向である。

図-3(c)は、濃度境界層が十分に発達した状態での菌体濃度分布を示したものである。摩擦速度とともに底泥内部へのDO供給量が増大し、好気性微生物の分布が底泥のより深部へと拡大する様子が見て取れる。

(3) SOD

SODは得られたDO濃度分布より、次式によって算定される。

$$SOD = -D_w \cdot \frac{dC}{dy} \Big|_{y=0} \quad (14)$$

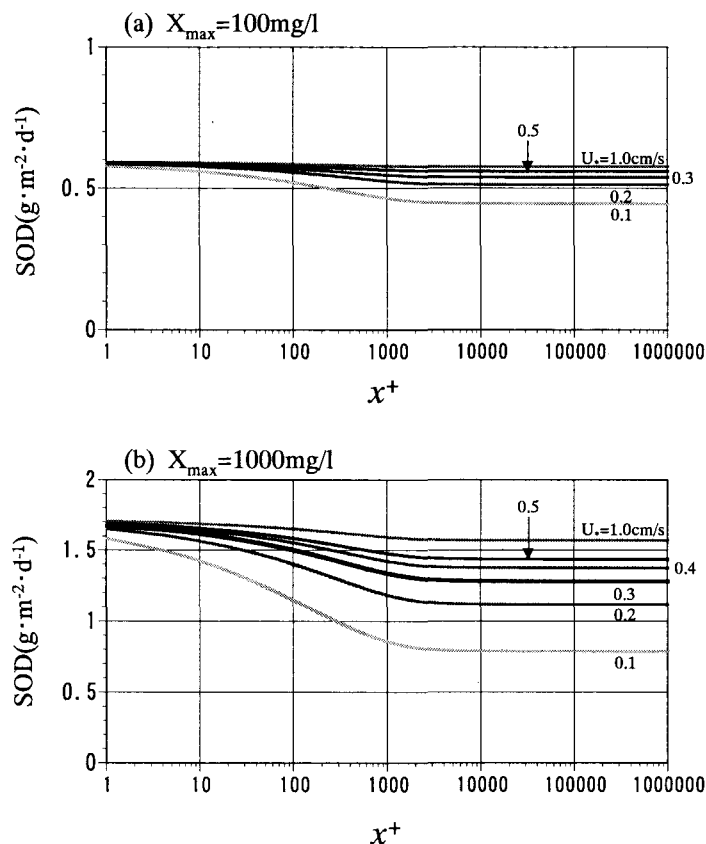


図-4 SOD $\sim x^+$ 関係

濃度境界層は流れ方向に発達するので、図-4に示すようにSODは底泥床前縁($x=0$)からの距離(x^+)とともに変化する。底泥床前縁($x=0$)近傍では濃度境界層は薄く、SODは $x^+=0$ 近傍において最大となる。その後、濃度境界層の発達とともにSODは小さくなり遂には一定値に漸近する。また、当然のこととして、微生物活性の高い($X_{\max}=1000 \text{ mg/l}$)底泥に対するSODは、これよりも低い($X_{\max}=100 \text{ mg/l}$)底泥に対するSODよりも大きくなる。このような、濃度境界層の発達に伴うSOD変化は、摩擦速度が小さいほど顕著である。底泥床前縁近傍では境界層は薄く、SODは底泥内部でのDO消費に律せられるが、流下とともに境界層が厚くなり、SODは水中から底泥表面へのDO移動速度によって決まるようになる。一方、摩擦速度が大きければ、底泥床の至る所で底泥表面には内部でのDO消費に対して十分なDOが供給され、前縁($x=0$)から十分に下流に至るまで、SODは底泥内部での微生物によるDO消費に律せられ、濃度境界層の発達に伴う変化は殆んど見られない。

4. 実験結果との比較

前述(3.(3))のように、底泥床前縁($x=0$)から十分に下流ではSODは一定値(SOD_{∞})へと漸近する。そこで、

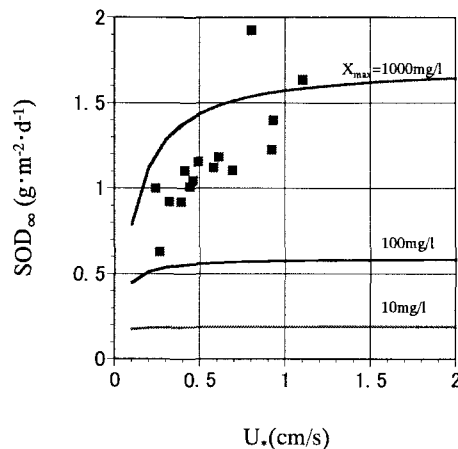


図-5 SOD～ U^* 関係

$X_{max}=10\text{mg/l}$, 100mg/l , 1000mg/l とし、摩擦速度 U^* を変化させたときのモデルによる SOD_{∞} の推定結果を図-5に示す。図にはSteinberger and Hondzoが微小電極によって測定した実験値⁶⁾も併せて示されている。これより、実験値は $X_{max}=1000\text{mg/l}$ とした推定曲線周辺にプロットされる。同様に、モデルによる濃度境界層が十分に発達した状態での水・底泥境界面におけるDO濃度(C_w/C_{∞})の推定結果を図-6に示す。この図より、Steinberger and Hondzoの実験値は、 $X_{max}=1000\text{mg/l}$ とした推定曲線よりも下方にプロットされる。Steinberger and Hondzoは実測で得られた水・底泥境界面近傍でのDO濃度勾配よりSODを算定している⁶⁾が、このDO濃度勾配と界面でのDO濃度を精確に測定することは現時点では困難であり、今後の検討が必要であろう。

5. 結 論

本研究で得られた結果を要約すると以下のようである。

- 1) 濃度境界層は、底泥床前縁($x=0$)より流下とともに厚くなる。一方、DO浸透深さは、流下方向には殆んど変化しない。これより、濃度境界層の発達が底泥内部の微生物活性に及ぼす影響は小さい。
- 2) SODの流れ方向(x)の変化は小さく、これより、濃度境界層の発達がSODに及ぼす影響は、摩擦速度が小さい($U^* \leq 0.1\text{cm/s}$)場合を除いて僅かである。
- 3) 濃度境界層は、摩擦速度と底泥内部での微生物活性に係わらず、 $x^+=10000$ において十分に発達し、SODは一定値へと漸近する。
- 4) SODは底泥内部での微生物活性と底泥直上の水流流速の影響を受けて変化する。すなわち、濃度境界層でのDO移動速度、または底泥内部での微生物によるDO消費速度のいずれか一方、あるいは両者によってSODが決まる。

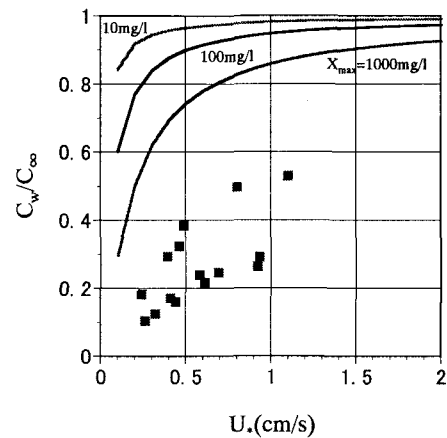


図-6 C_w/C_{∞} ～ U^* 関係

謝辞：本研究は、平成14年度文部科学省科学研究費補助金若手研究(B)(課題番号14750436、代表：東野 誠)の補助を受けて行われた。また、本研究を遂行するにあたり、ミネソタ大学 ステファン,H.G.教授には熱心にご議論頂くとともに、数々の有益なご助言を賜った。ここに、記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 中村由行, 御子神 学, H.G.ステファン：閉鎖性水域における底質の酸素消費速度-流れの影響のモデル化-, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.986-990, 1993.
- 2) Dade,W.B.：Near-bed turbulence and hydrodynamic control of diffusional mass transfer at the sea floor, *Limnology and Oceanography*, 38(1), pp.52-69, 1993.
- 3) 細井由彦, 村上仁士, 上月康則：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.83-92,1992.
- 4) Mackenthun, A. and Stefan, H.G.：Effect of flow velocity on sediment oxygen demand: Laboratory measurements, *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, 12(3), pp.222-230, 1998.
- 5) Josiam, R. and Stefan, H.G.：Effect of flow velocity on sediment oxygen demand: Comparison of theory and experiments, *Journal of the American Water Resources Association*, 35(2), pp.433-439, 1999.
- 6) Steinberger, N. and Hondzo, M.：Diffusional mass transfer at the sediment-water interface, *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, pp.192-200, 1999.
- 7) Higashino, M. and Stefan, H.G.：Diffusive boundary layer development above a sediment/water interface, *Water Environment Research*, 2003 (印刷中).
- 8) House,W.A.：Factors influencing the extent and development of the oxic zone in river-bed sediment, *Biogeochemistry*, 63, pp.317-333, 2002.
- 9) Rittmann, B.E. and McCarty, P.L.：Environmental Biotechnology: Principles and Applications, McGraw-Hill, 2001.

(2003. 9. 30受付)