

底泥直上の環境条件の変化に伴うSOD応答

RESPONSE OF SOD TO TURBULENCE AND CHANGE IN DISSOLVED OXYGEN CONCENTRATION ABOVE THE SEDIMENT/WATER INTERFACE

東野 誠¹・ステファン,H.G.²
Makoto HIGASHINO and Heinz G. STEFAN

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)

²Ph.D ミネソタ大学教授 Dept. of Civil Engineering, St. Anthony Falls Laboratory (Mississippi River at Third Avenue S.E. Minneapolis MN 55414)

Sediment oxygen demand (SOD) is controlled by oxygen transfer in a diffusive boundary layer and by oxygen consumption due to microbial and chemical processes inside the sediment. SOD is a function of flow velocity above a sediment/water interface, i.e. shear velocity, and biochemical activity rates. A model was presented for the unsteady response of SOD and the dissolved oxygen (DO) profile near the sediment/water interface. The time required to reach a steady state DO profile and SOD for zero DO inside the sediment initially gets faster as biochemical activity becomes strong. The values of SOD estimated by the model were compared with experimental data. The model can reproduce observed diffusive boundary layer thicknesses. It is also found that values of SOD estimated by the model were of the same magnitude as the observed data.

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

1. はじめに

底泥による酸素消費速度, すなわち, 底泥直上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 : Sediment Oxygen Demand) は, 河川, 湖沼, 貯水池等の水域におけるDOの収支, ひいては生態系に大きな影響を及ぼす。SODは底泥直上水中から底泥表面へのDO移動過程と底泥内部での生物・化学的酸素消費過程に依存する¹⁾。すなわち, SODは底泥直上の水理条件(水流流速)と底泥内部での酸素消費速度の両者に規定される。したがって, SOD推定に際しては, これら両者の影響を表現できるようなモデルを構成することが重要である。

水理条件がSODに影響を及ぼすのは, 水・底泥境界面直上の濃度境界層の厚さが水流流速によって変化するためである。近年, 空間分解能が非常に高い微小電極によって, 水流流速の増大とともに濃度境界層厚さが小さくなることが確認されている^{2), 3)}。このようなSODに及ぼす底泥直上の水理条件の影響について理論的^{1), 4), 5)}, 実験的^{6)~9)}検討が行われ, 定常等流状態を対象としてSODの定式化が行われている。一方, 底泥内部での酸素

消費過程に関して, 微小電極を用いて底泥内部でのDO濃度分布が計測され, 生物・化学的酸素消費速度の定量化が試みられている¹⁰⁾。

上述のSODに関する研究は全て定常状態を対象としたものであり, 非定常状態を対象とした水・底泥間での溶質移動過程に関する検討例は僅かである¹¹⁾。しかしながら, 底泥直上の水理・水質条件は, 例えば, 湖沼・貯水池等において生起する内部静振, 内部波等によって時間とともに変化すると考えられる。したがって, 水域水質を精度よく推定するためには, このような状態においてSODを推定可能な非定常モデルの構築が不可欠である。本研究は, 上述のような非定常状態でのSOD推定に関して, 基礎的な検討を行ったものである。

まず, 著者らの従来の研究¹²⁾に基づいて, 濃度境界層でのDO移動過程を定式化した。次に, Houseによる底泥内部での酸素消費過程の検討結果¹⁰⁾を基に, 酸素消費速度をMonod式を用いて表わした。このモデルによって底泥直上のDO濃度が瞬間的に変化した後のDO濃度分布とSODの時間変化をシミュレートするとともに, 定常状態に達したときのSOD, 濃度境界層厚さ等を実測値と比較することでモデルの妥当性を検証した。

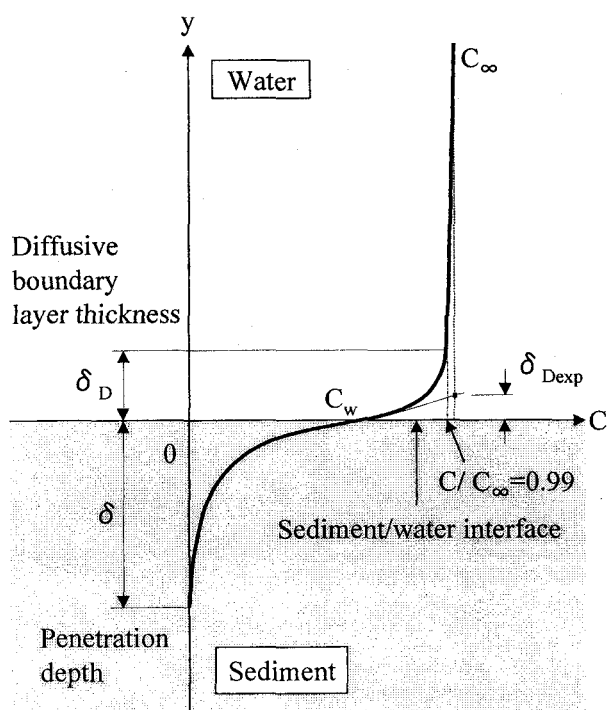


図-1 水・底泥境界面近傍のDO濃度分布

2. 非定常SODモデル

(1) 濃度境界層でのDOの移動および底泥内部での酸素消費速度の定式化

図-1は、水・底泥境界面(Sediment/Water Interface)近傍でのDO濃度分布を模式的に示したものである。底泥直上の濃度境界層(Diffusive Boundary Layer)は通常極めて薄く、境界層内での酸素消費は底泥内部でのそれに比べて僅かであり、無視し得る。一方、底泥内部での酸素消費速度に関して、従来の研究では微生物によるものと化学的酸素消費(第一鉄の酸化等)とに分けて表現されていたが¹⁾、最近の微小電極を用いた底泥内部でのDO濃度分布の測定結果は、酸素消費速度を微生物に起因するものと化学的酸素消費とに区別せず、Monod式あるいは0次反応速度式を用いて表現可能であることを示唆している¹⁰⁾。したがって、非定常状態での濃度境界層、および底泥内部でのDO収支を、図-1のように水・底泥境界面を原点として鉛直上向きにy軸をとり、それぞれ次式で表わす。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \{ (D_w + D_i) \frac{\partial C}{\partial y} \} \quad (\text{底泥直上水中}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_s \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - \frac{\mu C}{K_{o_2} + C} \quad (\text{底泥内部}) \quad (2)$$

ここに、CはDO濃度、 D_w と D_i はそれぞれ水中でのDOの

分子拡散係数および乱流拡散係数、 K_{o_2} はDOの半飽和定数、 μ は最大酸素消費速度である。また、 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%と仮定されている($D_s = 1/2 D_w$)。なお、DO濃度は水平方向に一樣であり、鉛直方向にのみ変化すると考えている。

基礎式(1)、(2)は動粘性係数 ν 、および式(7)で定義される長さスケール l を用いて次のように無次元化される。

$$\frac{\partial C^*}{\partial t^*} = \frac{\partial}{\partial y^*} \left\{ \left(\frac{1}{Sc} + \nu_i^* \right) \frac{\partial C^*}{\partial y^*} \right\} \quad (3)$$

$$\frac{\partial C^*}{\partial t^*} = \frac{1}{2Sc} \frac{\partial^2 C^*}{\partial y^{*2}} - \frac{\mu^* C^*}{K_{o_2}^* + C^*} \quad (4)$$

ここに、

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

はシュミット数であり、水中の酸素分子の場合、20℃で500である。また、上式(3)、(4)において、以下のような無次元量が用いられている。

$$\left. \begin{aligned} C^* &= \frac{C}{C_\infty}, \quad t^* = \frac{\nu}{l^2} t, \quad y^* = \frac{y}{l} \\ K_{o_2}^* &= \frac{K_{o_2}}{C_\infty}, \quad \mu^* = \frac{\mu l^2}{\nu C_\infty}, \quad \nu_i^* = \frac{\nu_i}{\nu} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式(6)において、 ν_i は渦動粘性係数である。なお、基礎式(1)中の乱流拡散係数 D_i は渦動粘性係数 ν_i に等しいと仮定されている($\nu_i = D_i$)。また、 C_∞ は主流中のDO濃度、 l は次式で定義される長さスケールである。

$$l = 100 \frac{\nu}{U_*} \quad (7)$$

ここに、 $U_* (= \sqrt{\tau_0 / \rho})$ は摩擦速度、 τ_0 は底面せん断応力、 ρ は流体(水)の密度である。

前述の渦動粘性係数 $\nu_i^* (= \nu_i / \nu)$ は、 y と U_* の関数であり、種々の関数形が提案されているが、ここでは著者らの従来の解析¹²⁾と同様に、 ν_i^* を次式で表わす⁵⁾。

$$\nu_i^* = \left(n \frac{U_* y}{\nu} \right)^3 \quad \text{for} \quad \frac{U_* y}{\nu} \leq 10 \quad (8)$$

ここに、 $n(=0.1)$ は定数である。上式(8)は粘性底層外($U_* y / \nu > 10$)では過大な ν_i^* の値を与える。しかしながら、DO移動過程においては水・底泥境界面近傍での ν_i^* の挙動が重要であり、界面から離れれば乱流拡散によってDO濃度は一樣化されるため、粘性底層外における ν_i^* の過大評価は問題にならない。

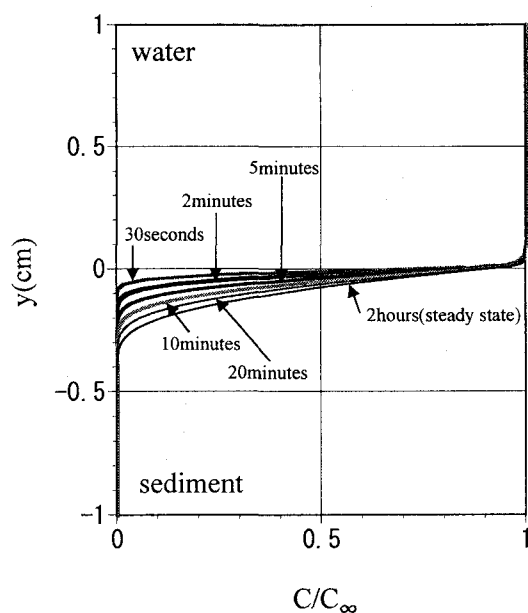


図-2(a) DO濃度分布の時間変化($U^*=1.0\text{cm/s}$)

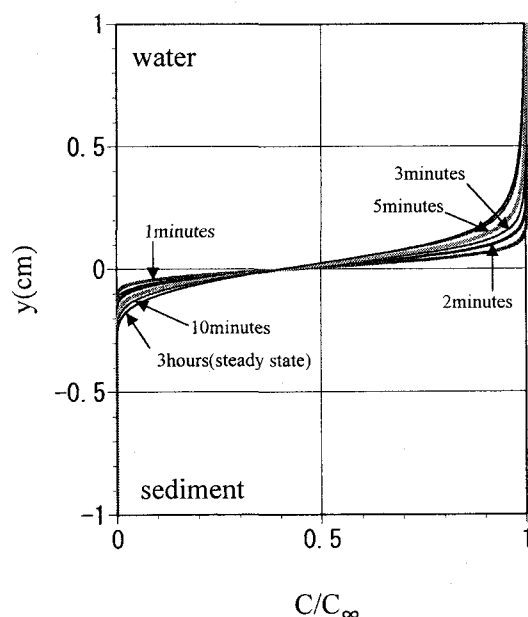


図-2(b) DO濃度分布の時間変化($U^*=0.1\text{cm/s}$)

(2) 各時間における水・底泥境界面でのDO濃度

前述(2. (1))のようにDO濃度は水・底泥境界面近傍において著しく変化し、界面から離れると急激に一定値(C_∞)へと漸近する。本研究では、式(7)で定義される長さスケール l を用い、 $y=l$ において $C=C_\infty$ であるとする。次に、分子拡散によって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)の僅かな領域で消費されてしまい、深さ δ 以深では無酸素状態になる。すなわち、界面より十分下方では $C=0$ である。本研究では、Houseの微小電極による底泥内部でのDO濃度分布⁽¹⁰⁾の測

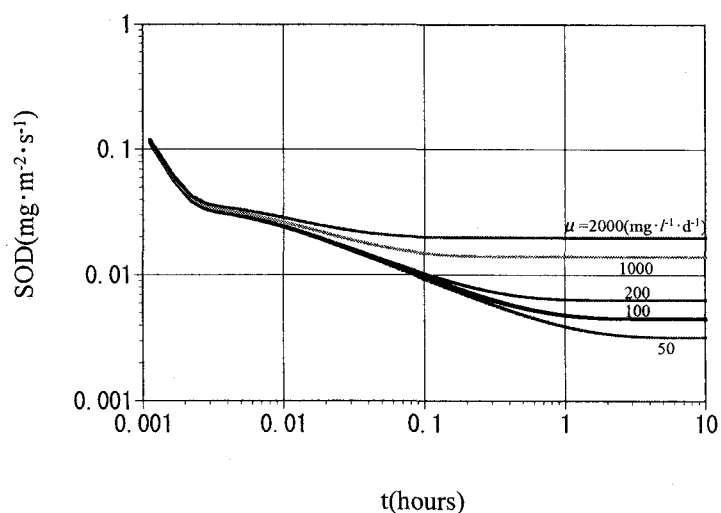


図-3(a) SODの時間変化($U^*=1.0\text{cm/s}$)

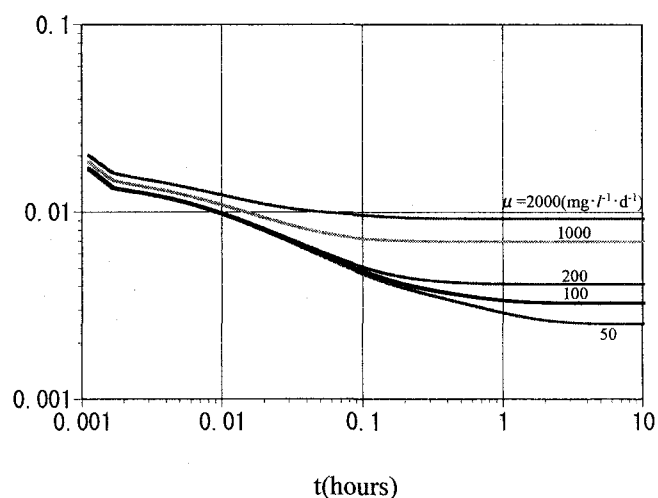


図-3(b) SODの時間変化($U^*=0.1\text{cm/s}$)

定結果を参考に、 $y=l_s (=20\text{mm})$ において $C=0$ とした。

式(3)、(4)を解くためには、各時間における水・底泥境界面でのDO濃度(C_w)を境界条件として与える必要がある。この界面濃度 C_w は、底泥直上水中から底泥表面へと移動するDOフラックスと底泥内部での酸素消費速度とによって決まるものであり、次のように陽的に算定される。まず、界面直上の第一格子点での次の時間のDO濃度 C_1^{n+1} は、現在の時間の値 C_w^n 、 C_1^n 、 C_2^n を用いて、無次元化した基礎式(3)を離散化した次式で表わされる。

$$C_1^{n+1} = C_1^n + \frac{\Delta t}{\Delta y^2} \left\{ \left(\frac{1}{Sc} + v_{t,3/2} \right) C_2^n - \left(\frac{2}{Sc} + v_{t,3/2} + v_{t,1/2} \right) C_1^n + \left(\frac{1}{Sc} + v_{t,1/2} \right) C_w^n \right\} \quad (9)$$

ここに、 Δt と Δy はそれぞれ時間ステップ、および空間

ステップ, $v_{i, 1/2}$ と $v_{i, 3/2}$ はそれぞれ $y^*=3/2, 1/2$ における v_i^* の値である. 同様に, 界面直下の第一格子点でのDO濃度 C_{-1}^{n+1} は

$$C_{-1}^{n+1} = C_{-1}^n + \frac{1}{Sc} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta y^2} (C_{-2}^n - 2C_{-1}^n + C_w^n) - C_{-1}^n \left(k_s^* + \frac{k_{0s}^*}{C_s/C_\infty + C_{-1}^n} \right) \cdot \Delta t \quad (10)$$

式(9)と式(10)より得られる C_1^{n+1} と C_{-1}^{n+1} より, 次の時間の水・底泥境界面でのDO濃度 C_w^{n+1} は次式で与えられる.

$$C_w^{n+1} = \frac{C_1^{n+1} + C_{-1}^{n+1}}{2} \quad (11)$$

以上のようにして各時間における水・底泥境界面近傍のDO濃度分布は, 基礎式(3), (4)を式(12), (13)で表される境界条件の下に解くことによって得られる.

式(3)に対して

$$C^* = 1 \quad (C = C_\infty) \quad \text{at} \quad y^* = 1 \quad (y = l) \quad (12, a)$$

$$C^* = C_w^{n+1}/C_\infty \quad \text{at} \quad y^* = 0 \quad (y = 0) \quad (12, b)$$

式(4)に対して

$$C^* = C_w^{n+1}/C_\infty \quad \text{at} \quad y^* = 0 \quad (y = 0) \quad (13, a)$$

$$C^* = 0 \quad \text{at} \quad y^* = -l_s/l \quad (y = -l_s) \quad (13, b)$$

計算は $y = -l_s (=20\text{mm})$ から $y = l$ までの領域に対して行った.

3. 水・底泥境界面近傍におけるDO濃度とSODの時間変化

図-2, 3は $K_{O_2} = 0.2(\text{mg} \cdot \text{l}^{-1})$, $\mu = 200(\text{mg} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$, $Sc = 500$ とした場合の水・底泥境界面近傍のDO濃度分布とSODの時間変化のシミュレーション結果を示したものである. 計算では初期条件として底泥内部では無酸素状態とし, 水中では至る所で $C_\infty (=10 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1})$ とした. 前述(2. (1))のように, 底泥内部での酸素消費速度はMonod式を用いて簡単に表わされ, これに関与する微生物の増減やその空間的分布に関してはモデル化されていない. すなわち, 底泥直上の水理・水質条件が変化しても底泥内部の微生物の個体数や空間分布は不変であると仮定していることになる. また, このモデルでは, 底泥による酸素消費のポテンシャルは最大酸素消費速度 μ によってのみ表現される. すなわち, 微生物が分解可能な有機物を多く含む底泥ほど μ の値は大きくなる.

$U_* = 1.0(\text{cm/s})$ とした図-2(a)と $U_* = 0.1(\text{cm/s})$ とした図-2(b)で, DO浸透厚さ δ は $2.0 \sim 4.0\text{mm}$ であり, 大きな差異は見られない. 一方, 濃度境界層厚さ δ_D は $U_* = 1(\text{cm/s})$ で 1mm 以下であるのに対し, $U_* = 0.1(\text{cm/s})$ では約 1cm である. これは, 流速が小さいときは濃度境界層が厚く,

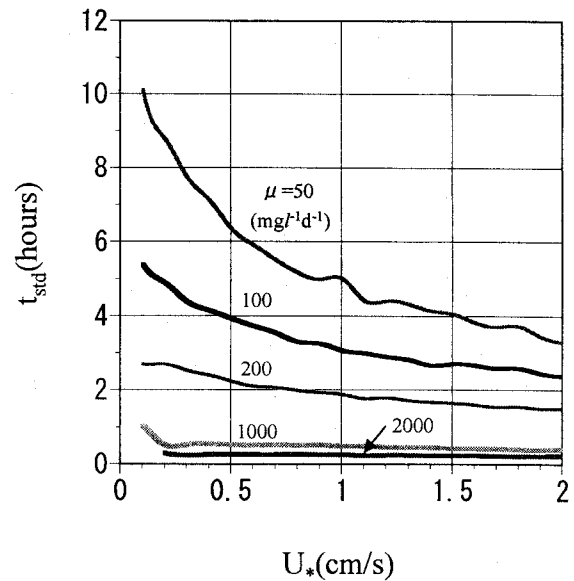


図-4 $t_{ssd} \sim U_*$ 関係

境界層でのDOの移動によってSODが決まるが, 流速が大きくなれば底泥内部での生物・化学的酸素消費が律速となることを示すものである.

図-3は異なる μ 値($=50, 100, 200, 1000, 2000(\text{mg} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$)に対するSODの時間変化を示したものである. SODは時間とともに減少し, 十分な時間の経過の後, 一定値(定常状態のSOD)に漸近する. また, 有機物を高濃度を含む(μ 値の大きい)底泥ほど, 短時間で定常状態に達する.

4. SODに及ぼす底泥直上水流流速の影響

底泥直上の水流流速がSODに及ぼす影響を調べるために5種類の底泥($\mu = 50, 100, 200, 1000, 2000(\text{mg} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$)に対して, 摩擦速度 U_* を $0.1 \sim 2.0(\text{cm/s})$ と変化させてシミュレーションを行なった. 初期条件として, 前述(3.)のように底泥内部は無酸素状態, 底泥直上の水中では至る所で $C_\infty (=10 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1})$ とし, 定常状態に達するまで計算を行った.

図-4に示すように, 定常状態に達するのに要する時間 t_{ssd} は水流流速(摩擦速度 U_*)が大きくなるほど, 底泥の有機物分解活性が高い(最大酸素消費速度 μ が大きい)ほど短くなる. t_{ssd} の摩擦速度 U_* への依存性は μ 値によって異なり, 小さい μ 値に対して, t_{ssd} は U_* に強く依存する. 一方, 大きい μ 値($=1000, 2000(\text{mg} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$)に対して, t_{ssd} の U_* への依存性は極めて小さく, t_{ssd} は μ 値によってのみ定まる.

Steinberger and Hondzoは微小電極を用いて実験を行い, SODおよび濃度境界層厚さ δ_D を測定している⁹⁾. そこで, 彼らの実験と同じ水理・水質条件でシミュレーションを

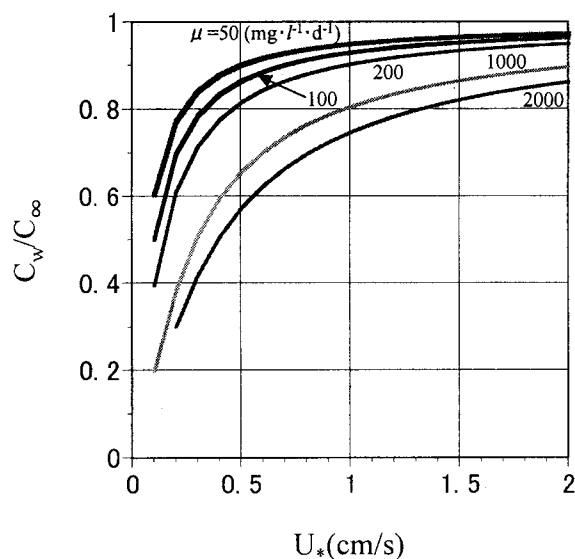


図-5 $C_w^* \sim U_*$ 関係

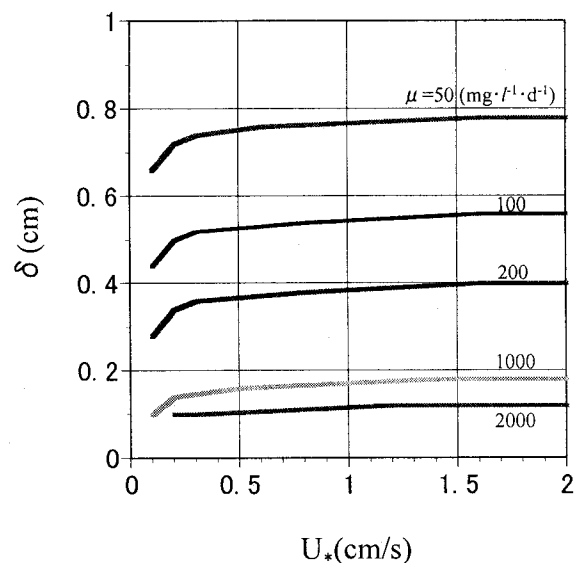


図-6 $\delta \sim U_*$ 関係

行い、実測値と推定値との比較を行った。シミュレーションにおいて、SODは次式で算定される。

$$SOD = \frac{\partial}{\partial t} \int_0^\delta C(y) dy + \int_0^\delta \frac{\mu C}{K_o_2 + C} dy \quad (14)$$

右辺第1項はDO濃度分布の時間変化を表わし、第2項は底泥内部における単位時間あたりの生物・化学的酸素消費量に他ならない。

図-5はモデルによる $C_w^* (=C_w/C_\infty)$ と摩擦速度 U_* との関係を示したものである。これより、いずれの μ 値に対しても、 U_* とともに C_w^* は増大する。また、小さな μ 値に対する推定曲線がグラフ上方に位置し、 μ が大きくなるとともに曲線は下方へとシフトする。Steinberger and

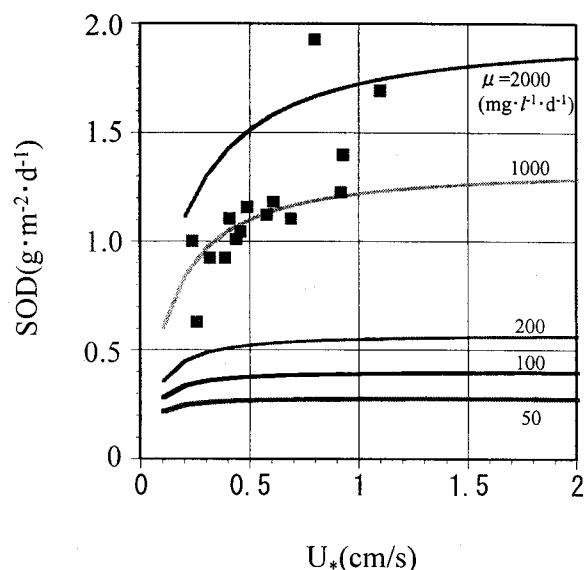


図-7 SOD $\sim U_*$ 関係

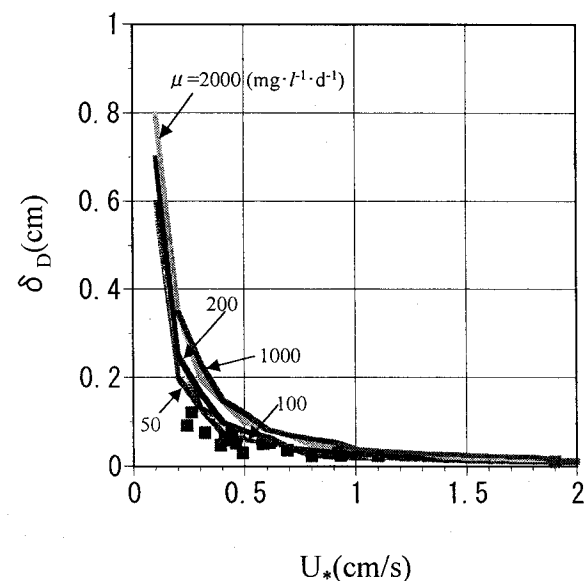


図-8 $\delta_D \sim U_*$ 関係

Hondzoによる C_w の実測値は $0.43 \sim 2.31 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ (平均 $1.09 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$)、 C_∞ は $2.49 \sim 5.49 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ (平均 $3.76 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$) である。したがって、 $C_w^* (=C_w/C_\infty)$ は $0.11 \sim 0.59$ (平均 0.29) であり、これは、モデルでは $2000 (\text{mg} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$ 以上の μ 値に対応する。

図-6は、DO浸透厚さ δ と摩擦速度 U_* との関係を示したものである。シミュレーションでは、 δ は $C^*=0.001$ で定義される。この図より、DO浸透厚さ δ の摩擦速度 U_* への依存性は小さく、底泥の有機物分解活性(最大酸素消費速度 μ) に強く依存するのが確認できる。

図-7に、SOD $\sim U_*$ 関係曲線をSteinberger and Hondzoの実測値と併せて示す。SODは摩擦速度 U_* とともに増加し、摩擦速度 U_* が大きくなれば一定値に漸近する様子が見て

取れる。これは、流速が小さいときには濃度境界層でのDOの移動がSODを規定するが、流速が大きくなれば境界層でのDO移動速度は大きくなり、律速段階が底泥内部での酸素消費へと推移してSODは流速とは無関係になることを示すものである。また、最大酸素消費速度 μ が大きくなれば、 $SOD \sim U$ 関係曲線は上方へとシフトする。Steinberger and Hondzoの実測値は、概ね $\mu=1000(\text{mg} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$ とした推定値周辺にプロットされ、モデルが実験結果をよく再現しているのが確認できる。なお、この結果は前述の C_w^* (図-5)とは異なる。これは、実験において界面でのDO濃度 C_w の値を精確に測定することが現時点でも困難であることに起因していると思われる。

図-8に $\delta_D \sim U$ 関係曲線を示す。ここに、 δ_D は濃度境界層厚さであり、シミュレーションにおいて $C^*=0.99$ で定義される(図-1)。この図より、濃度境界層厚さ δ_D は μ の値とは無関係に、摩擦速度 U にのみ強く依存するのがわかる。図にはSteinberger and Hondzoの実測値も併示してある。実測値は界面近傍でのDO濃度勾配より算出されているため、本研究と定義が異なるものの、実測値は $\delta_D \sim U$ 関係曲線周辺に分布しているように思われる。

Steinberger and Hondzoは界面近傍でのDO濃度勾配よりSODと濃度境界層厚さ δ_D を算定している⁹⁾。しかしながら、DO濃度勾配や界面でのDO濃度 C_w の計測に関しては、前述のような課題も残されており、今後のモデル開発やモデルの改良に際しては、SOD等の算定方法の確立とともに多くの実験的検討が必要であるといえよう。

5. 結 論

本研究では、水・底泥境界面近傍でのDO濃度分布やSODの時間変化をシミュレートするための非定常モデルを構築し、底泥直上の環境条件の変化に伴うSOD応答を調べた。得られた結果を要約すると以下のようなものである。

- 1) 初期条件として底泥内部で無酸素状態としたシミュレーション結果より、水・底泥境界面直上のDO濃度分布は摩擦速度と最大酸素消費速度に依存して、時間とともに変化する。すなわち、界面直上には濃度境界層が発達する。一方、DOは底泥内部へと浸透してゆき、十分な時間の経過の後、定常状態に達する。DO濃度分布の変化に応じてSODも時間とともに変化する、やがて定常状態に達する。
- 2) 上述のシミュレーション結果より、定常状態に達するのに要する時間は数分～数時間であり、有機物分解活性の高い(μ 値の大きい)底泥ほど短時間で定常状態に達する。
- 3) 定常状態では、摩擦速度は底泥直上のDO濃度分布に強く影響する。一方、DOの底泥内部への浸透に対する摩擦速度の影響は僅かである(図-2)。
- 4) Steinberger and Hondzoの微小電極によるSODと濃度

境界層厚さの実測値はモデルによる推定曲線周辺に分布し(図-7, 8)、これより、モデルは実験結果を再現可能であることが確かめられた。

謝辞：本研究は、第一著者がミネソタ大学セントアンソニーフォールズ研究所に文部科学省在外研究員として滞在中に行われたものである。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) Joergensen, B.B. and Revsbech, N.P.: Diffusive boundary layers and the oxygen uptake of sediment and detritus, *Limnology and Oceanography*, 30(1), pp.111-122, 1985.
- 3) Joergensen, B.B. and D.J. Des Marais: Diffusive boundary layer of sediments: Oxygen microgradients over a microbial mat, *Limnology and Oceanography*, 35(6), pp.1343-1355, 1990.
- 4) Rahm, L. and Svensson, U.: On the mass transfer properties of the benthic boundary layer with an application to oxygen fluxes, *Netherlands Journal of Sea Research*, 24(1), pp.27-35, 1989.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) Steinberger, N. and Hondzo, M.: Diffusional mass transfer at the sediment-water interface, *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, pp.192-200, 1999.
- 10) House, W.A.: Factors influencing the extent and development of the oxic zone in river-bed sediment, *Biogeochemistry*, 2002.
- 11) 井上徹教, 中村由行, 安達義彦: 環境条件のステップ的な変化に伴う堆積物の酸素消費・リン溶出の応答, 水工学論文集, 第43巻, pp.1013-1018, 1999.
- 12) 東野 誠, 神田 徹: 一方向流れ場における底泥から上層水への溶解性物質の溶出過程, 土木学会論文集, No.621/II-47, pp.167-177, 1999.

(2002. 9. 30受付)