

SOD に及ぼす底泥直上の環境条件の変化について

大分高専 正会員 東野 誠

1. はじめに

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、水域でのDO収支を考える上で重要なパラメータであり、従来、これに関しては定常状態を対象として検討が行われてきた。本研究では、底泥直上の水流流速や水質等の環境条件が時間とともに変化する場合、すなわち、非定常過程でのSOD推定のためのモデルを構築した。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の推定値をSteinberger and Hondzoの実測値<sup>1)</sup>と比較することでモデルの妥当性を検討した。

2. 非定常SODモデル

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。非定常状態における底泥直上の濃度境界層(Diffusive Boundary layer)、および底泥内部のDO収支は、この図のように水・底泥境界面を原点として鉛直上向きにy軸を取れば、それぞれ次式で表わされる。

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

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_s \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - \frac{\mu C}{K_{O_2} + C} \quad (\text{底泥内部}) \quad (2)$$

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、 $\mu$ 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( $D_s=1/2D_w$ )。なお、DO濃度は水平方向に一様であり、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 $\nu$ 、および長さスケール $l(=100 \cdot \nu/U_*)$ 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、 $U_*(=\sqrt{\tau_0/\rho})$ は摩擦速度、 $\tau_0$ は底面せん断応力、 $\rho$ は流体(水)の密度である。式(3)、(4)中の $Sc(=\nu/D)$ はシュミット数であり、また、以下のような無次元量が用いられている。

$$\left. \begin{aligned} C^* &= \frac{C}{C_\infty}, \quad t^* = \frac{\nu}{l^2} t, \quad y^* = \frac{y}{l} \\ K_{O_2}^* &= \frac{K_{O_2}}{C_\infty}, \quad \mu^* = \frac{\mu l^2}{\nu C_\infty}, \quad \nu_i^* = \frac{\nu_i}{\nu} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式(5)において、 $\nu_i$ 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 $\nu_i$ に等しいと仮定されている( $\nu_i=D_i$ )。この渦動粘性係数に関して、 $\nu_i^*(=\nu_i/\nu)$ は $y$ と $U_*$ の関数であり、次式で表わされる。

$$\nu_i^* = \left( n \frac{U_* y}{\nu} \right)^3 \quad \text{for} \quad \frac{U_* y}{\nu} \leq 10 \quad (6)$$

ここに、 $n(=0.1)$ は定数である。

境界条件は、式(3)に対して

$$C^* = 1 \quad (C=C_\infty) \quad \text{at} \quad y^* = 1 \quad (y=l), \quad C^* = C_w/C_\infty \quad \text{at} \quad y^* = 0 \quad (y=0) \quad (7)$$

式(4)に対して

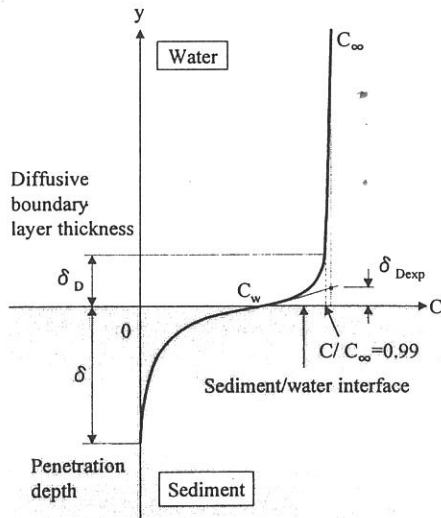


図-1 水・底泥境界面近傍のDO濃度分布

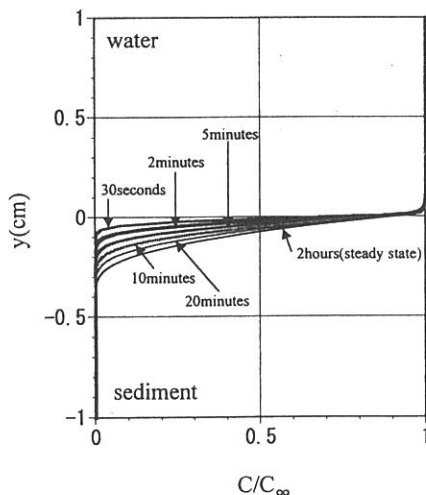


図-2 DO濃度分布の時間変化( $U_*=1.0\text{cm/s}$ )

$$C^* = C_w/C_\infty \quad \text{at } y^* = 0 \quad (y=0), \quad C^* = 0 \quad \text{at } y^* = -l_s/l \quad (y=-l_s) \quad (8)$$

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

### 3. 水・底泥境界面近傍での DO 濃度分布と SOD の時間変化

図-2は  $Ko_2=0.2 \text{ (mg} \cdot \text{l}^{-1})$ ,  $\mu=200 \text{ (mg} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$ ,

$Sc=500$ ,  $U_s=1.0 \text{ (cm/s)}$  に対する水・底泥境界面近傍の DO 濃度分布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。図-2より、DO 浸透厚さ  $\delta$  は 2~3mm であるのに対して、濃度境界層厚さ  $\delta_D$  は 1mm 以下であり、極めて薄い。一方、図-3は異なる  $\mu$  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 ( $\mu$  値の大きい) 底泥ほど、短時間で定常状態に達するのが確認できる。

### 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  $U_s$  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  $t_{std}$  は水流流速 (摩擦速度  $U_s$ ) 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  $\mu$  が大きい) ほど短くなる。 $t_{std}$  の摩擦速度  $U_s$  への依存性は  $\mu$  値によって異なり、小さい  $\mu$  値に対して、 $t_{std}$  は  $U_s$  に強く依存する。一方、大きい  $\mu$  値 ( $=1000, 2000 \text{ (mg} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$ ) に対して、 $t_{std}$  の  $U_s$  への依存性は極めて小さく、 $t_{std}$  は  $\mu$  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  $\delta_D$  を測定している<sup>1)</sup>。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。

$$SOD = \frac{\partial}{\partial t} \int_0^\delta C(y) dy + \int_0^\delta \frac{\mu C}{Ko_2 + C} dy \quad (9)$$

図-5に、SOD~ $U_s$  関係曲線を Steinberger and Hondzo の実測値と併せて示す。SOD は摩擦速度  $U_s$  とともに増加し、摩擦速度  $U_s$  が大きくなれば一定値に漸近する様子が見取れる。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  $\mu$  が大きくなれば、SOD~ $U_s$  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。

#### 参考文献

- Steinberger, N. and Hondzo, M. : Diffusional mass transfer at the sediment-water interface, *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, pp.192-200, 1999.

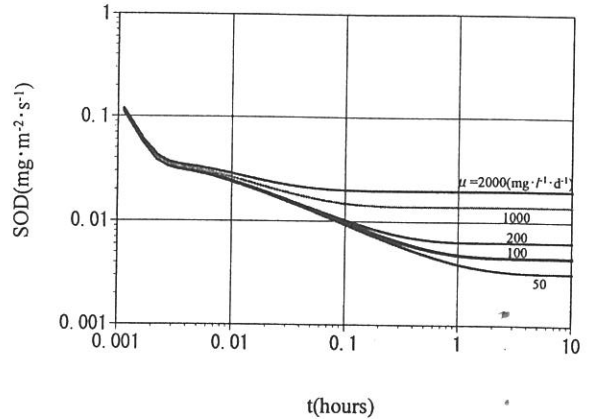


図-3 SOD の時間変化 ( $U_s=1.0 \text{ cm/s}$ )

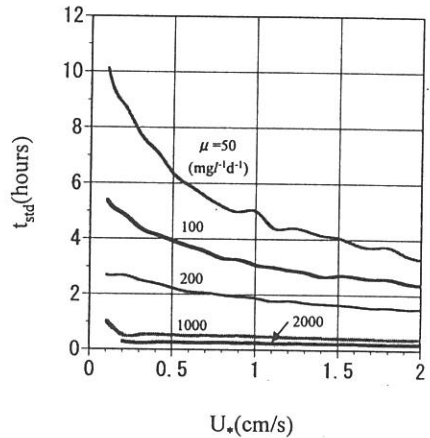


図-4  $t_{std} \sim U_s$  関係

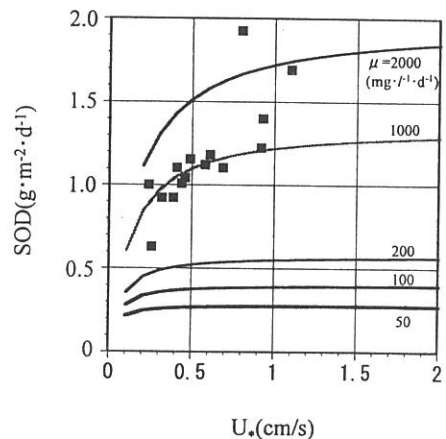


図-5 SOD~ $U_s$  関係