

SOD に及ぼす濃度境界層発達の影響について

大分高専 正会員 東野 誠

1. はじめに

筆者は、底泥直上の水柱から底泥表面へと移動する溶存酸素(DO)のフラックス(SOD)について検討している。本研究では、有限長さの底泥床に対するSODについて考察した。すなわち、底泥内部でのDO消費速度をDO消費に関連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推定のためのモデルを構築した。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。

2. SODモデル

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おり、等流状態であると仮定する。底泥直上の水柱と濃度境界層内でのDO消費は無視し、DO移動のみ考慮する。底泥内部では分子拡散によるDO移動と、微生物の菌体増殖に伴うDO消費を考慮する。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、次のように簡略化される。

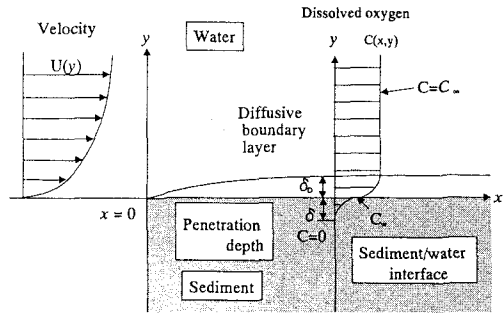


図-1 有限長さの底泥床における水・底泥境界面近傍のDO濃度分布

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

ここに、Uは流れ方向の時間平均流速、D<sub>w</sub>とD<sub>t</sub>はDOの分子拡散係数、および乱流拡散係数である。

底泥内部での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り、底泥内部でのDO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<sub>O<sub>2</sub></sub>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<sub>c</sub>は収率、D<sub>s</sub>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<sub>s</sub>=1/2D<sub>w</sub>)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<sub>d</sub>は死滅係数、X<sub>max</sub>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<sub>max</sub>は大きくなる。

前述の式(1)、(2)、(3)は摩擦速度U<sub>\*</sub>(=√τ<sub>0</sub>/ρ、τ<sub>0</sub>:底面せん断応力、ρ:水の密度)と動粘性係数νを用いて無次元化され、これらの式を数値的に解くことによって水・底泥境界面近傍でのDO濃度分布とSODが得られる。(1)式中の乱流拡散係数D<sub>t</sub>は渦動粘性係数ν<sub>t</sub>と等しいと仮定され(D<sub>t</sub>=ν<sub>t</sub>)、この渦動粘性係数の推定に際しては、Dadeの式を用いる。これによると、ν<sub>t</sub><sup>+</sup>(ν<sub>t</sub><sup>+</sup>=ν<sub>t</sub>/ν)は粘性底層内(y<sup>+</sup>=U<sub>\*</sub>y/ν)≦10と乱流域とで異なり、それぞれ次のように表わされる。

$$\nu_t^+ = (n y^+)^3 \quad \text{for } y^+ \leq 10 \quad (4, a)$$

$$\nu_t^+ = \frac{\kappa y^+ - 2 + \sqrt{(\kappa y^+ - 2)^2 - 4}}{2} \quad \text{for } y^+ > 10 \quad (4, b)$$

ここに、n(=0.1)は定数、κ(=0.4)はカルマン定数である。また、底泥直上の流速分布U<sup>\*</sup>(=U/U<sub>\*</sub>)は、次式で表わされる。

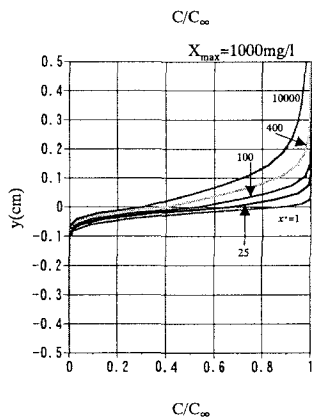
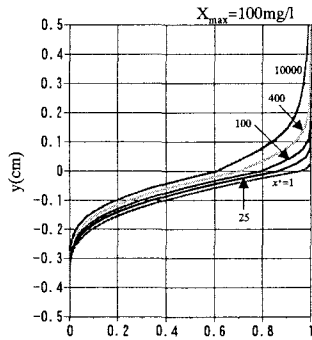


図-2 DO 濃度分布( $U=0.1\text{cm/s}$ )

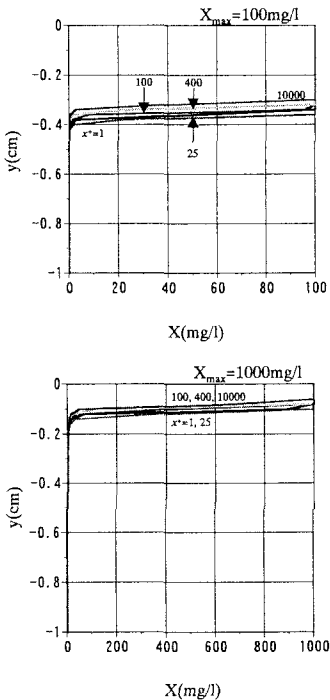


図-3 底泥内部の微生物の菌体濃度分布( $U=0.1\text{cm/s}$ )

$$U^+ = \int_0^{y^+} \frac{dy^+}{1 + \nu_t^+} \quad (5)$$

初期条件として、DO 濃度は水中の至る所で  $C_\infty$ 、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

$$C^+ = 1 (C = C_\infty) \quad \text{at} \quad x^+ = 0 (x = 0) \quad \text{or} \quad y^+ = 300 \quad (6, a)$$

底泥内部では

$$C^+ = 0 (C = 0) \quad \text{at} \quad y = -20\text{mm} \quad (6, b)$$

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。

### 3. DO 濃度分布、微生物の菌体濃度分布、および SOD 変化

図-2は、摩擦速度  $U=0.1\text{cm/s}$  に対する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したものである ( $X_{\max}=100\text{mg/l}$ ,  $1000\text{mg/l}$ )。なお、シュミット数は  $Sc=500$  とした。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)のは明らかであり、濃度境界層が十分に発達したとき ( $x^+ (=U \cdot x / \nu) = 10000$ )、その厚さは約  $1\text{cm}$  である。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 ( $x$ ) には殆んど変化しないのが確認できる。次に、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に示す。この図より、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、これは前述の DO 濃度分布 (図-2) と同様の傾向である。

SOD は得られた DO 濃度分布より、次式によって算定される。

$$SOD = -D_w \cdot \left. \frac{dC}{dy} \right|_{y=0} \quad (7)$$

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。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。今後、実験結果との比較により、モデルをより精巧なものにしてゆく予定である。

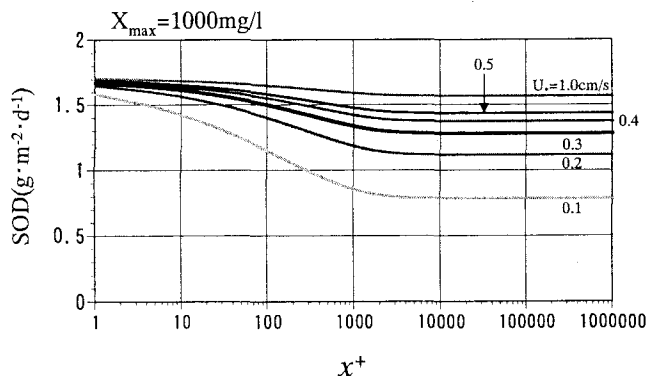


図-4 SOD  $\sim x^+$  関係