

SOD に及ぼす透水性底質内部への乱れ伝播の影響

大分高専 正会員 東野 誠

1. はじめに

著者は、湖沼や貯水池等の水域底部に堆積した底質による溶存酸素(DO : Dissolved Oxygen)の消費過程について検討を行っており、これまでに粘土、シルト、および有機物質で構成された底質を対象として、水・底質境界面での DO フラックス(SOD : Sedimentary Oxygen Demand)の定量化を行った¹⁾。他方、底質が砂や礫等の透水性材料で構成される場合には、底質直上の乱れが内部へと浸透し、底質内部での DO 等の溶質の移動に影響を及ぼす。著者は、最近、このような透水性底質(透水係数0.01~1cm/s)を対象として、底質直上の乱流の組織構造(near bed coherent motions)に起因する水・底質境界面での圧力変動によって駆動される底質内部の流れ場を再現するためのモデルを構築した²⁾。本研究では、上述のような透水性底質を対象として、乱れが底質内部へと浸透し、溶質移動過程に影響を及ぼす場合の SOD(Hyporheic SOD)について、検討を行った。

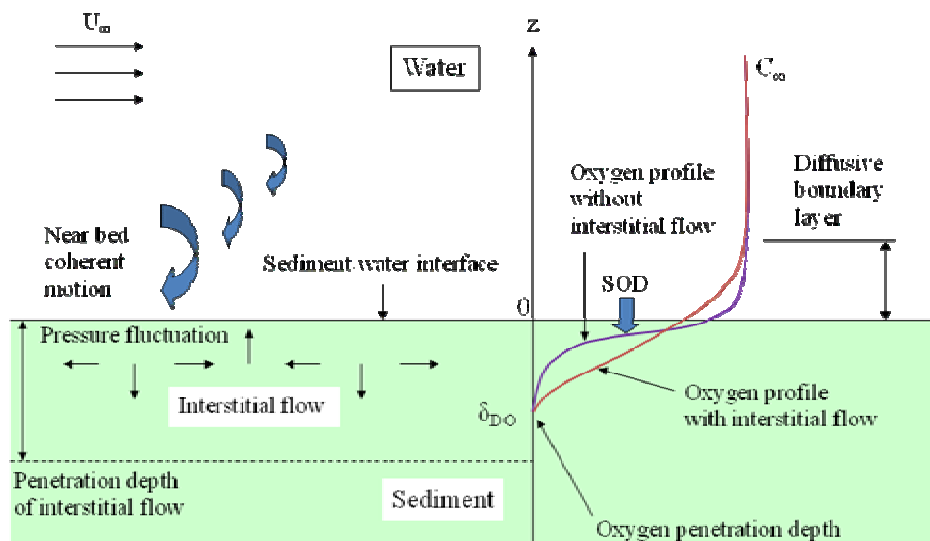


図-1 砂質底質内部への乱れの浸透と DO 濃度分布

2. モデル

前述(1.)のように、本研究では、透水性底質を対象とし、底質直上の乱流の組織構造に起因する水・底質境界面での圧力変動が内部での流れ場(Interstitial flow field)を駆動すると考える(図-1)。この流れ場は、著者らによるモデル²⁾(Pressure pulse model)によって再現される。このモデルによって得られた底質内部での鉛直方向流速の r.m.s., すなわち、 $\sqrt{v^2}$ を速度スケール、底質を構成する粒子の粒径(d_s)を底質構造を考慮して空隙率 ϕ で補正した $\phi^2 d_s$ を長さスケールとして DO の拡散係数(D_e)を次式で表わす。

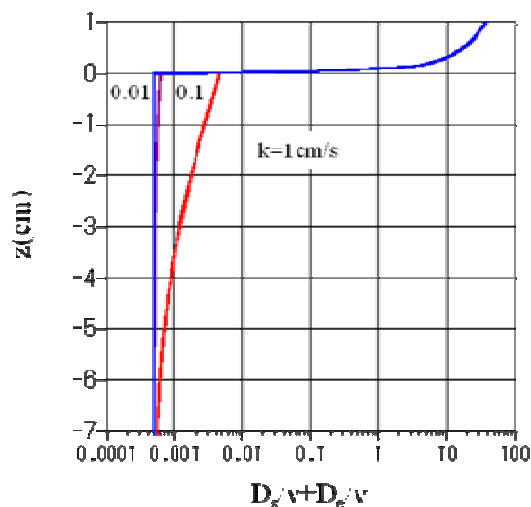
$$D_e = \sqrt{v^2} \phi^2 d_s \quad (1)$$

上式(1)において、底質粒子の粒径(d_s)と透水係数 k とは次式によって関係付けられる。

$$k = \frac{g}{v} \cdot \frac{5.6 \times 10^{-3} \phi^3 d_s^2}{(1 - \phi)^2} \quad (2)$$

ここに、 $g(=9.8\text{m/s}^2)$ は重力加速度、 v は動粘性係数である。底質内部での DO 拡散係数は、底質構造を考慮した DO の分子拡散係数 $D_s(=\phi^2 D)$ 、ここに、 D : 水中 DO の分子拡散係数)と上式(1)より推定される乱れによる DO 拡散係数の和、すなわち、 $D_s/v + D_e/v$ として表現され、 $\phi=0.7$ 、摩擦速度 $U_* (= \sqrt{\tau_0/\rho})$ 、ここに、 τ_0 : 底面せん断応力、 ρ : 水の密度) $=0.95\text{cm/s}$ とし、透水係数 $k=0.01, 0.1$, および 1cm/s について示せば図-2 のようである。小さい透水係数($k=0.01\text{cm/s}$)では、式(1)より得られる乱れによる拡散係数 D_e は分子拡散係数 D_s よりも小さく、底質内部での溶質移動に及ぼす乱れの浸透の影響は無視し得る。DO 移動に及ぼす底質内部への乱れの浸透の影響は透水係数とともに大きくなり、 $k=1\text{cm/s}$ では、水・底質境界面近傍において、乱れによる拡散係数 D_e は分子拡散係数 D_s よりも 1 オーダー大きくなる。また、乱れによる拡散係数 D_e は底質深度とともに小さくなり、乱れの影響が及ばない深部ではゼロとなる。

図-2 底質内部での DO 拡散係数



3. 結果と考察

底質直上の水柱から底質表面への DO の移動には、著者らによる境界層モデル¹⁾を用い、底質内部での DO

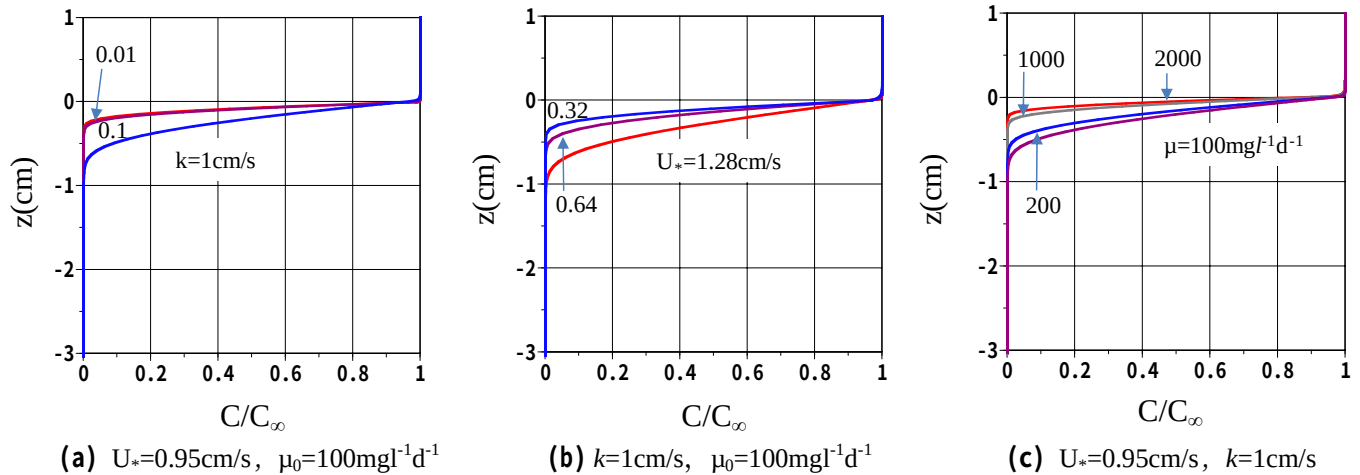


図-3 底質内部の DO 濃度分布

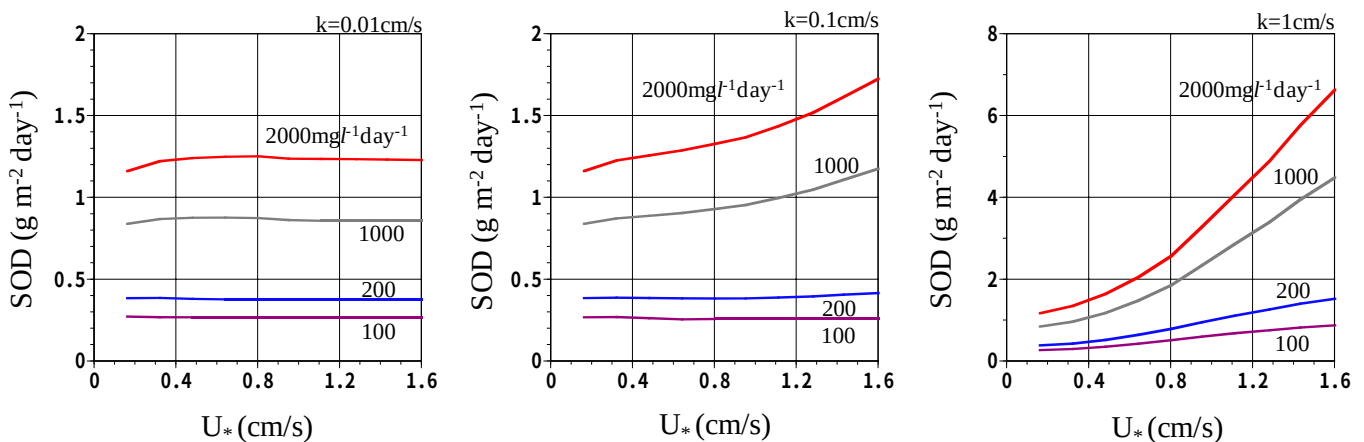


図-4 SOD の推定結果

収支には、乱れの浸透とそれによる影響を表現した式(1)の拡散係数 D_e を組み込んだ次式を用いた。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (D_s + D_e) \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right\} - \frac{\mu C}{K_{O_2} + C} \quad (3)$$

ここに、 μ は最大酸素消費速度、 K_{O_2} ($=0.2 \text{ mg l}^{-1}$) は DO に関する半飽和定数である。このようにして得られた底質内部での DO 濃度分布の一例を図-3 に示す。摩擦速度 $U^*=0.95 \text{ cm/s}$ 、最大酸素消費速度 $\mu=100 \text{ mg l}^{-1} \text{ day}^{-1}$ とし、透水係数 k を変化させた図-3(a)より、DO 浸透深さ δ は k とともに増大してゆく様子が見て取れる ($\delta=0.8 \text{ cm}$ ($k=1 \text{ cm/s}$), 0.4 cm ($k=0.1 \text{ cm/s}$), 0.3 cm ($k=0.01 \text{ cm/s}$)). 次に、透水係数 $k=1 \text{ cm/s}$ 、 $\mu=100 \text{ mg l}^{-1} \text{ day}^{-1}$ とした図-3(b)より、摩擦速度 U^* とともに DO 浸透深さが大きくなる。また、 $U^*=0.95 \text{ cm/s}$ 、 $k=1 \text{ cm/s}$ とした図-3(c)より、 μ の増大とともに底質内部での DO 消費速度が大きくなり、DO 浸透深さが小さくなる。

水・底質境界面での DO フラックス、SOD は得られた DO 濃度分布より、 $SOD = -D \cdot dC/dz|_{z=0}$ で算定され、 $k=1, 0.1$, および 0.01 cm/s について示せば、図-4 のようである。この図より、 $k=0.01 \text{ cm/s}$ のとき、SOD は乱れの底質内部への浸透の影響がない場合¹⁾と同等である。 $k=0.1 \text{ cm/s}$ では、乱れの浸透の影響が、最大酸素消費速度と摩擦速度が大きい場合に顕著になる。また、 $k=1 \text{ cm/s}$ では、摩擦速度や底質の酸素消費能力に係わらず、SOD は乱れの浸透の影響を受け、乱れの浸透がない場合の 5 倍程度まで増大する。今後は、透水係数が更に大きい礫で構成された底質について検討を行う予定である。

本研究は、科学研究費補助金、基盤研究(C)「陸水域における砂質底泥への乱れの浸透と水・底泥間での物質移動過程に関する研究、課題番号：22560522」(代表：東野 誠)の援助を受けて行われた。ここに記して、謝意を表す。

参考文献

- 1) Higashino, M., Gantzer, C.J. and Stefan, H.G. : Unsteady Diffusional Mass Transfer at the Sediment/Water Interface: Theory and Significance for SOD Measurements, *Water Research*, 38, pp.1-12, 2004.
- 2) Higashino, M., Clark, J.J. and Stefan, H.G. (2009). Porewater flow due to near-bed turbulence and associate solute transfer in a stream or lake sediment bed. *Water Resources Research* Vol.45(12), W12414, doi:10.1029/2008WR007374.