1.はじめに

著者は、砂や礫等で構成された透水性底質を対象として、直上の乱れの底質内部への浸透、およびそれによる底質内での溶存酸素(DO)等の物質移動について検討を行っている¹⁾.前報²⁾では、透水係数 0.01 < *k* < 1 cm/s の底質を対象として、水・底質間での DO のフラックス(SOD)について考察した.直上の乱れの底質内部への 浸透によって引き起こされる流れ場は、

著者らによる"Pressure pulse model"¹⁾に よって再現し、この流れの DO 移動過 程への影響は、浸透流速の関数として" 乱れによる拡散係数"によって評価し た. このモデルは乱れの浸透による DO 移動速度の増大が SOD を増加させるこ とを定性的に説明する.ここで,底質 粒径に着目すれば, 粒径が大きくなれ ば透水係数も大きくなり, 乱れによる 物質移動速度,そして SOD が増大する. 一方,底質内部での微生物による DO 消費速度について考えれば, 底質粒径 の増大は含有する有機物量を減少させ, その結果として SOD を低下させると考 えられるが,これに関しては検討が行 われていない、そこで、本研究では、 透水係数 0.1<k<20cm/s の砂, 礫を対 象として、底質の粒径の増大が透水係 数, すなわち, DO の移動速度, および 微生物による DO 消費速度に及ぼす影 響をモデル化するとともに, SOD の定 量化を行う.



図-1 透水性底質内部への乱れの浸透と DO 濃度分布

2. モデル

. モテル 図-1 のように河川や湖沼等の水域底部での砂や礫で構成された透水性底質(透水係数 0.1<k<20cm/s)を考

える. 底質直上の乱流の組織構造 (bursting) は水・底質境界面直上において圧力変動を引き起こし、この圧力 変動が底質内部での流れ場を駆動する. その流れ場は、著者らによる"Pressure pulse model"¹⁾によってシミュレートされる. このとき、底質内部での DO(*C*)の収支は次式で表わされる.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (uC)}{\partial x} + \frac{\partial (vC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) - R \tag{1}$$

式(1)中の分散係数のテンソル D_{xx} , D_{yy} , D_{yx} , D_{yy} は Darcy 流速を底質の空隙率 ϕ で除して得られる底質内部 での実流速u, vを用いて, それぞれ次のように与えられる.

$$D_{xx} = \alpha_L \frac{uu}{|V|} + \alpha_T \frac{vv}{|V|} + D_e, \quad D_{xy} = D_{yx} = (\alpha_L - \alpha_T) \frac{uv}{|V|}, \quad D_{yy} = \alpha_L \frac{vv}{|V|} + \alpha_T \frac{uu}{|V|} + D_e$$
(2)

ここに、 $|V| = \sqrt{u^2 + v^2}$, α_L :縦方向分散長, α_T :横方向分散長である.また, D_e は底質内部での DO の拡散係数であり, $D_e = \phi^2 D_m (D_m \text{ th DO } O \text{ ch ch b})$ である.

底質内部での微生物による DO 消費は式(1)中の R によって表わされ, R は DO 濃度 C, および DO 消費に 係わる従属栄養細菌の菌体濃度 X の関数である.

$$R = \frac{1}{Y_c} \mu \frac{C}{Ko_2 + C} X \tag{3}$$

ここに、 $Y_c: 収率$ 、 $\mu: 最大 DO 消費速度 (=2.4d^1), Ko_2: DO 消費に関する半飽和定数 (=0.2mg/l) である. 菌 体濃度 X は次の Logistic モデルによって表わされる.$

$$\frac{dX}{dt} = (\mu \frac{C}{Ko_2 + C} - k_d)(1 - \frac{X}{X_{\text{max}}})X$$
(4)

ここに、 k_d : 菌体の死滅係数(=0.1 d^{-1})、 X_{max} : 最大菌体濃度である.

ここで、底質粒径 d_s に着目すれば、粒径 d_s の増大は透水係数 kを大きくし、底質内部での DO の移動に対する底質直上の乱れの影響がより顕著になる.一方、粒径 d_s が大きくなれば底質の比表面積が減少するので、 底質内部の微生物が利用可能な有機物量はこれとともに減少すると考えられる.以上の考察を基に、本研究で は、底質粒径の増大に伴う底質内部での DO 消費速度の低下を表現するために、式(4)中の X_{max} を底質粒径 d_s と間隙率 ϕ の関数として、定数 α を用いて次式で表わす.

$$X_{\max} = \alpha \frac{1 - \phi}{d_s} \tag{5}$$

3. 数值解法

基礎式(1)は速度スケールとして摩擦速度 $U_*(=\sqrt{\tau_0/\rho}, \text{ ここに}, \tau_0: 底面せん断応力, \rho: 水の密度), 長 さスケールとして底質深さ <math>\delta$ を用いて無次元化され, x 方向に擬スペクトル法, y 方向に中心差分法を用いて離散化される.境界条件は,

 $C=C_{\infty}$ at y=0(底質表面) & C=0 at $y=-\delta$ (底質底部) (6) x 方向には周期境界条件が適用される.また,透水係数 k と底質粒径 d_s とは次式によって関係付けられる.

$$k = \frac{g}{\nu} \cdot \frac{5.6 \times 10^{-3} \phi^3 d_s^2}{(1-\phi)^2} \tag{7}$$

ここに、 $g(=9.8 \text{m/s}^2)$ は重力加速度、 $v(=0.01 \text{cm}^2/\text{s})$ は動粘性係数である.最近の Hyporheic flow に関する研究³⁾ を参考に、式(2)中の縦方向分散長については $\alpha_L = d_s \ge 0$ 、 $\alpha_L / \alpha_T = 2 \ge 0$ とた.シミュレーションは底質内部で の DO 濃度分布と菌体濃度分布が見掛け上変化しなくなるまで、すなわち、擬似定常状態に達するまで繰り返 した.このようにして得られた DO 濃度分布より、次式によって SOD(gm^2d^{-1})を求めた.

$$SOD = \int_{-\infty}^{0} R(y) dy \qquad (8)$$

4.結果と考察

図−2にSODと透水係数*k*との関係を, 摩擦速度 U*を変化させて示す. 摩擦速 度が小さい(U*=0.48cm/s)とき, SOD は 透水係数 k の単調増加関数である. これ を除けば,透水係数 k の増大とともに SOD は増加し、ピーク値をとった後、 透水係数 k の増大とともに減少する.こ こでは、底質粒径 d、に着目して以下に 考察する. 先ず, 底質粒径 d_s が小さい とき, 透水係数 k は小さく, 底質内部で の DO 移動速度も小さい.他方,底質の 比表面積は大きく,このため底質には微 生物が分解可能な有機物が多く含まれ る. よって, DO 移動速度が SOD を律 することになる.次に、底質粒径 d。が 大きくなると,透水係数kも大きくなり, この結果, DO 移動速度も大きくなる. 他方,比表面積は小さくなるので底質内 部の有機物量は減少する. このような



図-2 SOD に及ぼす透水係数 k と摩擦速度 U_{*}の影響

DO 移動速度の増大によって律速段階が DO 移動から微生物による DO 消費速度へと遷移する.更に粒径が大 きくなれば,底質内部での有機物量は一層少なくなるため,SOD は粒径の増大とともに低下するようになる. 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,謝意を表する.

参考文献

- 1) Higashino, M., Clark, J.J. and Stefan, H.G. : 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, 2009.
- 2) 東野 誠: SODに及ぼす透水性底質内部への乱れ伝播の影響,平成22年度土木学会西部支部研究発表会講演概 要集,Ⅱ-009, pp.157-158, 2011.
- 3) Qian, Q., V.R. Voller and H.G. Stefan. : A vertical dispersion model for solute exchange induced by underflow and periodic hyporheic flow in a stream gravel bed., *Water Resources Research*, Vol. 44, doi:10.1029/2007WR006366, 2008.