底泥内部での分子拡散による物質移動に関する一考察

大分高專 正会員 東野 誠

1.はじめに

著者は湖沼・貯水池等の閉鎖性水域に堆積した底泥による溶存酸素(DO)消費過程について検討を行い,底 泥直上の水柱から底泥表面へと移動する DO のフラックス(SOD:Sedimentary Oxygen Demand)を底泥直上の水 理条件(水流流速)と底泥内部での好気性微生物の菌体増殖速度の関数としてモデル化した¹⁾.このモデルは微 小電極による水・底泥境界面近傍の DO 濃度分布の測定結果を良好に再現するが,現時点で幾つかの課題も残

されている.一例として,モデル(後述(2.))中の底泥内部での DOの分子拡散係数を取り上げてみると,これに関しては未解明 な部分が多い.そこで,本研究では,底泥を高粘性の流体と考え, 運動量の輸送と物質移動のアナロジーを仮定して,底泥内部での 分子拡散による物質移動に及ぼす乱れの影響について検討した. 2.既往の SOD モデル

著者らのモデルでは,底泥表面直上と底泥内部でのDO(C)の収 支は,図-1のように鉛直上向きにy軸を取れば,それぞれ次のよ うに表される.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \{ (D_w + D_t) \frac{\partial C}{\partial y} \}$$
(1)
$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_s \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - \frac{1}{Y_c} \mu \frac{C}{Ko_2 + C} X$$
(2)

ここに, $D_w \ge D_t$ は水中の DO の分子拡散係数,および乱流拡散 係数, μ は最大 DO 消費速度, Ko_2 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_c は収率である.また, X は好気 性微生物の菌体濃度であり,ロジスティックモデルを用いて定式 化される¹⁾.

式(2)中の D_s は底泥内部での DO の分子拡散係 数であり,従来,底泥の空隙率を用いて D_w , あるいは 2D_w というように水中の値よりも低く 見積もられる場合が多かった.上述の著者のモデ ルでは,底泥直上の水柱では物質移動は乱れの影響を受けると仮定されているが,底泥内部は物質 移動は乱れの影響を受けない,として取り扱われていた.本研究では,乱れは底泥内部へと伝播し, 底泥内部での物質移動は底泥表面直上の乱れの影響を受けると考え,以下に考察する. 3.底泥内部での乱れのモデル化

乱れによる物質移動フラックスは,鉛直方向の 変動速度をv'とすれば, $v'C = -D_t \cdot dC/dy$ と表され, 乱流拡散係数 $D_t \geq v' \geq 0$ 間には $D_t \quad v'$ の関係が期 待される.そこで,底泥を高粘性の流体と考えv'に着目した解析を行う.v'は粘性流体の運動方程式, すなわち,Navier-Stokesの式に規定されるが,N (sup) 頃を無視すれば,次の Burgersの方程式に帰着する.)

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial y} = v \frac{\partial^2 V}{\partial y^2}$$
(3)

ここに, は底泥を高粘性の Newton 流体と考えた 場合の動粘性係数である.なお,変動速度 v'は V に置き換えられている.基礎式(3)は長さスケール L,速度スケール Uを用いて無次元化される.



図-1 水・底泥境界面近傍の DO 濃度分布



図-2 初期波形



図-3 底泥中への乱れの伝播(Re=100)

$$\frac{\partial U^{+}}{\partial t^{+}} + U^{+} \frac{\partial U^{+}}{\partial y^{+}} = \frac{1}{Re} \frac{\partial^{2} U^{+}}{\partial y^{+}}$$
(4)

上式(4)において,以下のような無次元量が用いられている.

$$U^{+} = \frac{V}{U}, \quad y^{+} = \frac{y}{L}, \quad t^{+} = \frac{U}{L}t$$
 (5)

また, Re は次式(6)で定義されるレイノルズ数である.

$$Re = \frac{UL}{v} \tag{6}$$

水・底泥境界面(y=0)での変動速度,すなわち,乱流の渦は底 泥内部(v 軸方向)へと底泥の粘性によって減衰しつつ伝播して ゆく.いま,界面(y=0)での変動速度として図-2のような正弦 波を仮定し,その底泥内部への伝播をシミュレートする.式(4), (5)中の速度スケール U は正弦波の振幅であり,ここでは 1cm/s とする(U=1cm/s).シミュレーションに際して, 無次元化され た基礎式(4)はスペクトル法によって離散化される.図-2 で表 される初期条件は フーリエ変換され ,周期境界条件の下で数値 解が求められる.図-3はL=5cm, すなわち, 波長と周期が それぞれ 1cm, 1s の波形が Re=100(/ 0=5, 0: 水の動粘 性係数(=0.01cm²/s))の底泥中を伝播してゆく様子を示した ものである(鉛直上向きを y 軸正の方向とする).この図より, 時間とともに非線形効果によって振幅が正の領域は底泥内 部の方向へ,負の領域は底泥表面方向に移動して波が突っ立 ち,波形が変形するとともに,底泥の粘性によって2.5秒後 には振幅が初期波形の 1/10 以下にまで減衰してゆく様子が 見て取れる.

4.底泥内部での乱れの減衰特性

前述(3.)のように,水・底泥境界面直上の乱れは底泥内 部へと伝播し,深さとともに底泥の粘性によって減衰し,界 面から十分下方ではその影響は殆んどなくなる.ここでは, 底泥深さ方向への乱れの減衰特性を調べた.乱流は様々なス ケールの渦を内在するので、図-2の初期波形で周期Tを0.01、 0.1,1sと変化させた.波の伝播速度に関しては,前出(3.) の検討と同様,U=1cm/sとした.したがって,初期波形はt 秒後には底泥内部,界面から (cm)(=1(cm/s)×t(s))まで達 することになる.このようにして,界面からの距離 とそ のときの波形の最大振幅Vmax/Uとの関係を波の周期毎にプ ロットすれば図-4~6のようである.図-4より,乱流に起因 する水・底泥境界面での変動速度は,界面から5cmの深さで 底泥の粘度に係わらずその振幅が界面(y=0)でのそれの1/10 以下になる.また.底泥の粘度が大きいほど界面直下で急速 に減衰する.乱れの周期を0.1sとした図-5では,界面から 0.1cm(1mm)以内で,また,周期を0.01sとした図-6では界面 から0.001cm(0.01mm)以内で乱れの振幅V_{max}/Uは界面(y=0) でのそれの1/10程度まで減衰する.これより,周期の短い (高周波)成分ほど,また,底泥の粘度が高いほど乱れは底 泥内部で急速に減衰するといえる.以上より,底泥内部での 物質移動に及ぼす乱れの影響に関しては,底泥表面近傍の みが重要であり、界面から十分離れた底泥内部では物質移 動に及ぼす乱れの影響は僅かであるといえる. 参考文献

1) 東野 誠:底泥による溶存酸素消費過程における濃度境界 層発達の影響,水工学論文集,第48巻,pp.1351-1356,2004.









図-6 底泥内部での乱れの減衰(T=0.01s)