

底泥内部への乱れの浸透が物質移動に及ぼす影響

大分高専 学生会員 池永貴史
大分高専 正会員 東野 誠

1. はじめに

著者らは、湖沼・貯水池等の水域での底泥直上の流れ(乱れ)が底泥内部での物質移動に及ぼす影響について検討している^{1), 2)}。底泥直上に流れ(乱れ)がある場合、それが底泥内部での物質移動に及ぼす影響は底泥を構成する物質(砂、シルト、粘土、有機物質等)によって異なる。著者らは底泥が砂やシルトで構成され多孔質とみなされる場合、乱れは底泥の空隙中を底泥の粘性によって減衰しつつ下方へと浸透すると考え、乱れを単一の正弦波と仮定して、その過程を解析した¹⁾。本研究では上述の解析を更に発展させて、単一正弦波で表される乱れが下方へと浸透する際の、底泥内部での物質移動係数(渦拡散係数)の推定を試みた。

2. 底泥内部での物質移動係数

底泥内部での溶質(溶存酸素(DO)、栄養塩等)の濃度を C 、物質移動係数を D_s とすれば、底泥内部での溶質移動フラックス J は次式で表される。ただし、 D_s には底泥直上の乱れの影響が含まれると考えている。

$$J = -D_s \frac{dC}{dy} \quad (1)$$

従来、底泥内部での物質移動係数 D_s は底泥の空隙率 ϕ 等を用いて $D_s = \phi D$ (D は当該溶質の分子拡散係数) のように、水中のそれよりも小さく、また一定値として取り扱う場合が多かった。しかしながら、前報¹⁾で指摘したように、乱れが底泥内部へと浸透する場合、 D_s は分子拡散係数 D よりも大きく、また水・底泥境界面からの深さとともに変化すると考えられる。

上述のように物質移動係数 D_s は底泥内部へと浸透する乱れに起因するものであるから、乱れによる拡散係数、すなわち、渦拡散係数 ν_t と関連付けられる。ここでは、 $D_s = \nu_t$ を仮定して、前報¹⁾で提示したモデル(底泥直上の乱れを単一正弦波と考え、これが底泥内部の空隙中を浸透しつつ、底泥の粘性によって減衰する)を用いて乱れによる渦拡散係数 ν_t を推定する。

3. 基礎式と解析手順

前報¹⁾のように、底泥中の空隙は高粘性の Newton 流体で充たされていると考えれば、基礎式は Navier-Stokes の方程式であり、鉛直上向きに y 軸を取って次式で表される。

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \quad (2)$$

ここに、 v は流速の鉛直方向成分、 g は重力加速度、 ρ は底泥中の空隙を充たしている流体の密度、 ν は流体の動粘性係数である。基礎式(2)は次式(3)のように無次元化され、数値解析に供される。

$$\frac{\partial v^+}{\partial t^+} + v^+ \frac{\partial v^+}{\partial y^+} = \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 v^+}{\partial y^{+2}} \quad (3)$$

上式において、 v^+ 、 t^+ 、および y^+ は無次元量、また Re は次式(4)で定義されるレイノルズ数である。

$$Re = \frac{UVT}{\nu} \quad (4)$$

ここに、 U は正弦波の振幅、 V は正弦波の底泥内部への移動(浸透)速度、 T は正弦波の周期であり、後述(4.)のようにこれらは底泥直上の乱れ、すなわち、摩擦速度 $U_* (= \sqrt{\tau_0 / \rho_0})$ 、 τ_0 : 底面せん断応力、 ρ_0 : 底泥表面直上を流れる水の密度)と関連付けられる。

前述の基礎式(3)、(4)より底泥内部での乱れの浸透をシミュレートできる。この乱れによる渦拡散係数 ν_t は乱れの速度スケール、すなわち、乱れ強度 $\sqrt{v'^2}$ と長さスケール Λ_L を用いて次式で表される。

$$\nu_t = \sqrt{v'^2} \Lambda_L \quad (5)$$

上式中の乱れの長さスケール Λ_L は乱れの速度スケール $\sqrt{v'^2}$ とタイムスケール、すなわち、底泥内部での渦の寿命時間 T_* より、 $\Lambda_L = \sqrt{v'^2} \cdot T_*$ となる。この乱れの寿命時間 T_* は Taylor(1921)の理論³⁾より、Lagrange の相関係数 $R_L(\tau)$ を用いて次式で定義される。

$$T_* = \int_0^\infty R_L(\tau) d\tau \quad (6)$$

ここに、Lagrange の相関係数 $R_L(\tau)$ は次式(7)で定義され、その計算結果の一例(底泥表面からの深さ $y=0$ 、 0.1 、

-0.2, -0.5cm)を示せば図-1 のようである。

$$R_L(\tau) = \frac{v'(t)v'(t-\tau)}{v'^2} \quad (7)$$

この図より、タイムラグ $\tau=0$ のとき、 $R_L(0)=1.0$ であり、 τ の増大とともに $R_L(\tau) \rightarrow 0$ となる様子が見て取れる。

4. 底泥内部での渦拡散係数

図-2 は正弦波の振幅 $U=1\text{cm/s}$ 、移動(浸透)速度 $V=1\text{cm/s}$ 、周期 $T=1\text{s}$ として、底泥間隙中の流体の動粘性係数を $v/v_0=1, 2, 5, 10, 20$ (ここに、 v_0 は水の動粘性係数($=0.01\text{cm}^2/\text{s}$))と変化させた場合の、前述(3.)のモデルによる底泥内部での渦拡散係数 v_t の計算結果を示したものである。その際、 U, V, T は乱れの摩擦速度 U_* の関数としてそれぞれ以下のように与えた。

$$U=U_* \quad (8), \quad V=U_* \quad (9), \quad T=100 \frac{V_0}{U_*^2} \quad (10)$$

ここに、式(10)は湖沼や海域等の Benthic boundary layer における bursting の周期を与える式であり⁴⁾、ここでは正弦波の周期 T は bursting の周期と同じと仮定している。

図-2 より、渦拡散係数 v_t は流体の粘性による乱れエネルギーの消散に起因して底泥表面からの深さとともに小さくなる様子が見て取れる。これは、底泥間隙中の流体の動粘性係数が大きい(例えば、 $v/v_0=20$)ほど顕著である。渦拡散係数 $v_t=0.01\text{cm}^2/\text{s}$ 、すなわち、水の動粘性係数 v_0 と同一の値を取る深さを乱れが及ぶ深さ δ と考えれば、この図より δ は底泥間隙中の流体の動粘性係数とともに小さくなり、 $v/v_0=20$ のとき、 δ 0.3cm、 $v/v_0=1$ のとき δ 3cm である。これより、乱れが物質移動に及ぼす影響は底泥表面数 cm 程度であり、底泥深部では、その影響は僅かであるといえる。

以上のように、底泥直上の乱れが内部へと浸透する場合、底泥内部での物質移動係数は当該物質の分子拡散係数(例えば、溶存酸素の場合、分子拡散係数は水の動粘性係数の $1/500$)よりも大きく、とりわけ底泥表面近傍では乱れの影響が顕著であることが明らかになった。本研究では、底泥直上の乱れの影響を、底泥空隙中を下方へと浸透する単一正弦波として表現したが、その妥当性に関しては実験や実測による検証が必要である。また、今後は、底泥の物性(含有物質の質と量や空隙率 ϕ 等)と底泥空隙を充たす流体の動粘性係数 v を関連付けるとともに、得られた結果を湖沼・貯水池での水質予測モデル中に組み込んでゆく予定である。

参考文献

- 1) 東野 誠：底泥内部での分子拡散による物質移動に関する一考察，平成16年度土木学会西部支部研究発表会，2005。
- 2) 東野 誠：水・底泥間での乱れの伝達に関する一考察，平成17年度土木学会西部支部研究発表会，2006。
- 3) 日野幹雄：流体力学，朝倉書店，1994。
- 4) Boudreau, B.P. and Joergensen, B.B. (2001) Eds. "The Benthic Boundary Layer: Transport Processes and Biogeochemistry" Oxford University Press, UK.

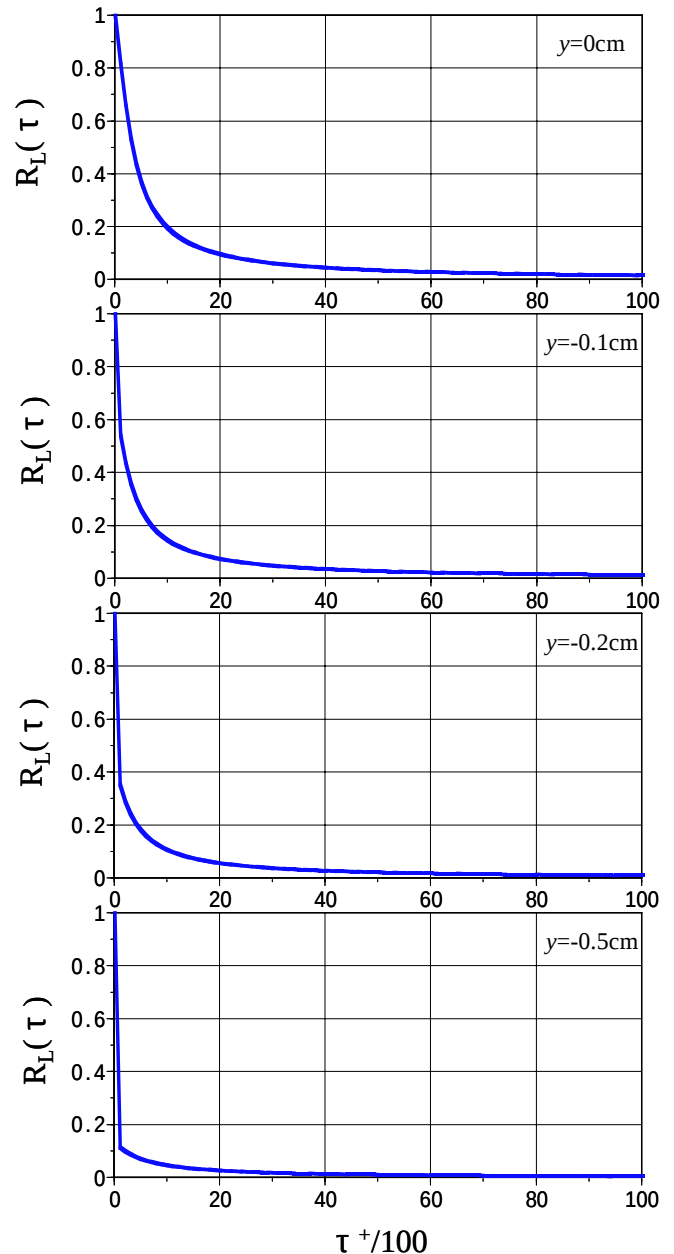


図-1 Lagrange の相関係数

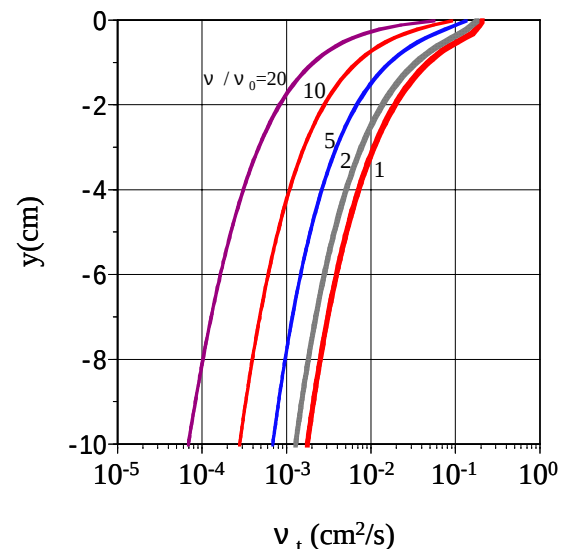


図-2 底泥内部での渦拡散係数