

底質直上の乱流構造が内部での流体の流動に及ぼす影響

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における水・底泥間での物質移動について検討を行っている¹⁾。本研究では、底質が細砂等の透水性材料で構成される場合を対象として、底質直上の乱れの内部への浸透について考察した。すなわち、透水性材料で構成される底質の場合、底上直上の乱流の組織構造に起因する底質表面での圧力変動が内部へと伝播し、物質移動に何らかの影響を及ぼすと考え(図-1)、数値実験による検討を行った。

2. 底泥直上の乱流構造

せん断乱流(turbulent shear flow)においては、底面での乱流の組織構造(near-bed coherent motions)が乱れの生成に重要な役割を担っていることが知られている²⁾。それらは、高速流体の底面方向への急な突込み(sweep)と底面近傍からの低速流体の外側への放り上げ(ejection)であり、これらの間欠的発生によって、乱れエネルギーが生産される。上述の組織構造の時間・空間スケール(T_B , λ_x)は、以下のように摩擦速度 $U_* (= \sqrt{\tau_0/\rho})$, τ_0 : 底面せん断応力, ρ : 水の密度) および動粘性係数 ν によって特徴付けられる。

$$T_B = 100 \frac{\nu}{U_*^2}, \quad \lambda_x = 1000 \frac{\nu}{U_*} \quad (1)$$

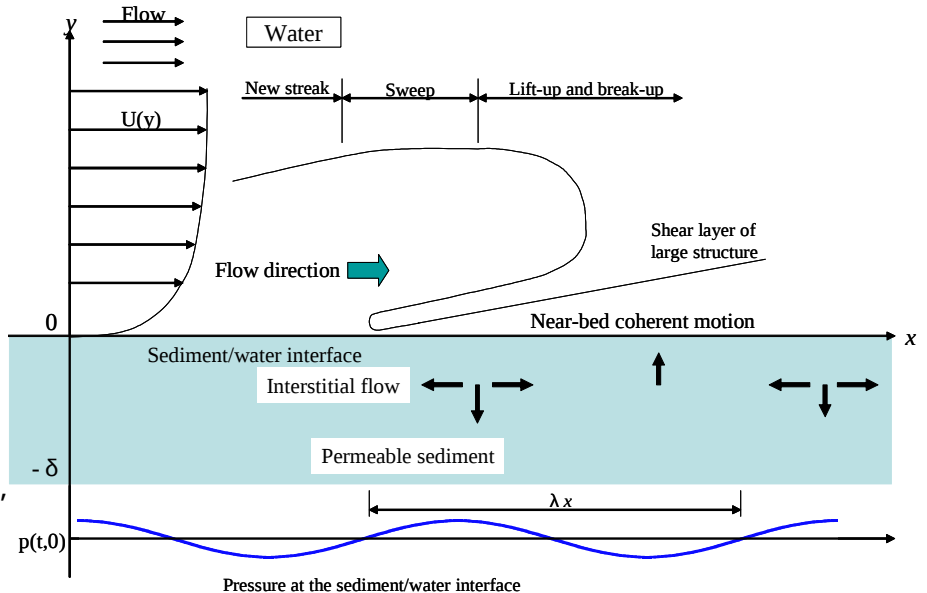


図-1 底泥直上の乱流構造と底泥内部での流れ

上述の組織構造は、底面において圧力変動をも引き起こす。乱流は3次元的であるので、これに起因する圧力変動も、本来、3次元的である。本研究では、これを簡略化して次式のように表す。

$$p(x,0,t) = p_0 \cos(\chi x - \sigma t) \quad (2)$$

ここに、 p_0 は振幅、 $\chi (=2\pi/\lambda_x)$ は波数、 $\sigma (=2\pi/T_B)$ は角周波数である。上式は、底面での圧力変動を乱流の組織構造と関連付け、流れの方向に一定の速度 $c (= \lambda_x/T_B)$ で伝播すると仮定したものである。式(2)を1周期、すなわち、 $t_0 \sim t_0 + T_B$ まで積分して平均値を取ればゼロである。他方、乱れのエネルギー(K)は、ベルヌーイの定理を想起すれば、次式のように与えられる。

$$K = \frac{u_j^2}{2} \approx \frac{\sqrt{p^2}}{\rho} = \frac{p_0}{\rho} \left(\frac{1}{T_B} \int_{t_0}^{t_0+T_B} \cos^2(\chi x - \sigma t) dt \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{p_0}{\rho} \quad (3)$$

ここに、 $u_j (j=1,2,3)$ は変動流速成分である。式(3)中の組織構造に起因する乱れのエネルギー(K)は粘性底層外縁($z^+ \approx 10 \sim 20$)において、最大($K^+ (=K/U_*^2) \approx 4.0 \sim 5.0$)となることを想起して、本研究では(2)式中の振幅 p_0 を次式で与えた。

$$\frac{p_0}{\rho} = \sqrt{2} K = \sqrt{2} \cdot (4.0 \sim 5.0) \cdot U_*^2 \quad (4)$$

3. 底泥内部での流れのモデル化

底質直上の乱流の組織構造は底質表面に式(2)で表される圧力変動を引き起こし、これが底質内部へと過剰間隙水圧として伝播すると考える。透水性材料で構成された底質内部での流れ場(圧力場)はDarcy則と連続の式によって記述され、流れの方向に x 軸、鉛直方向に z 軸を取れば、次式のように表される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

ここに、 $h (=p/\rho g)$, g : 重力加速度) は間隙水圧に対する水頭である。また、定数 a は透水係数 k , および体積圧縮率 m_v より、次式で表される。

$$a = \frac{k}{\rho v m_v} \quad (6)$$

上式中の体積圧縮率は砂質土の場合, その締め固めの度合いによって異なり, $180 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{N} \sim 920 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{N}$ の実測値が示されているが³⁾, 本研究では $m_v = 550 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{N}$ として解析を進める.

式(5)を式(2)の境界条件の下に解けば, 乱れによる圧力変動によって駆動される底質内部の圧力場が得られ, これより流速の流れ方向成分(u), および鉛直方向成分(w)が次の Darcy 則より求まる.

$$u = -k \frac{\partial h}{\partial x}, \quad w = -k \frac{\partial h}{\partial z} \quad (7)$$

基礎式(5)は流れ方向にフーリエ級数を用いたスペクトル法, 鉛直方向に2次精度の中央差分法を用いて離散化される. 解析領域は鉛直方向に δ (乱流の浸透深さ), 流れ方向に $2\pi\delta$ とし, それぞれ 100×100 の格子点が配置される. 初期条件として底質内部の至る所で $h(t, 0) = 0$ を仮定した. 式(5)はフーリエ変換され, 得られたフーリエ成分より Crank-Nicholson 法によって次の時間ステップのフーリエ成分が計算される. これを逆フーリエ変換すれば, 新しい時間ステップの圧力場が得られる.

4. 乱れの底泥内部への浸透

前述(3.)のモデルによって得られた圧力場を, 摩擦速度 $U_* = 0.32, 0.80, 1.28 \text{ cm/s}$ について, 図-2 に示す. 図の濃淡は間隙水圧に対する水頭 h の正負(+/-)に対応しており, 白い部分が正(+), 黒い部分が負(-)である. なお, 正負(黒白)ともに色が濃くなる(黒く, あるいは白く)程, その絶対値が大きいことを示している. 式(1)より, 乱流の組織構造の周期(T_B)は摩擦速度(U_*)に関係するが, 摩擦速度(U_*)が小さい, すなわち, 組織構造の周期が長い場合, 底質表面の圧力変動が内部へとより深く浸透する様子が見て取れる. 式(7)で底質内部での圧力場に対する流速を求め, それが底質表面での値のそれぞれ 10%, 1%, 0.1% になる深さ(乱れの浸透深さ)と摩擦速度(U_*)との関係を図-3 に示す. なお, 乱れの浸透深さは透水係数 k に依存せず, 摩擦速度(U_*), すなわち, 底質直上の乱流の組織構造の周期のみに関係する. 図より, 摩擦速度(U_*)の増大(組織構造の周期の短縮)とともに, 乱れの浸透深さが小さくなることは明らかである.

以上のように, 底質直上の乱流の組織構造は底質表面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へと浸透して圧力場(流れ場)を駆動する. このような流れは底質表面での酸素や栄養塩等の物質移動, ひては水域全体での物質収支に重大な影響を及ぼすことが示唆され, 今後の検討が必要である.

参考文献

- 1) 東野 誠: 乱れの伝達と底泥内部での物質移動, 平成18年度土木学会西部支部研究発表会, 2007.
- 2) Boudreau, B.P. and Joergensen, B.B.: "The Benthic Boundary Layer: Transport Processes and Biogeochemistry", Oxford University Press, UK, 2001.
- 3) 松尾新一郎編著: 新稿土質工学, 山海堂, 1989.

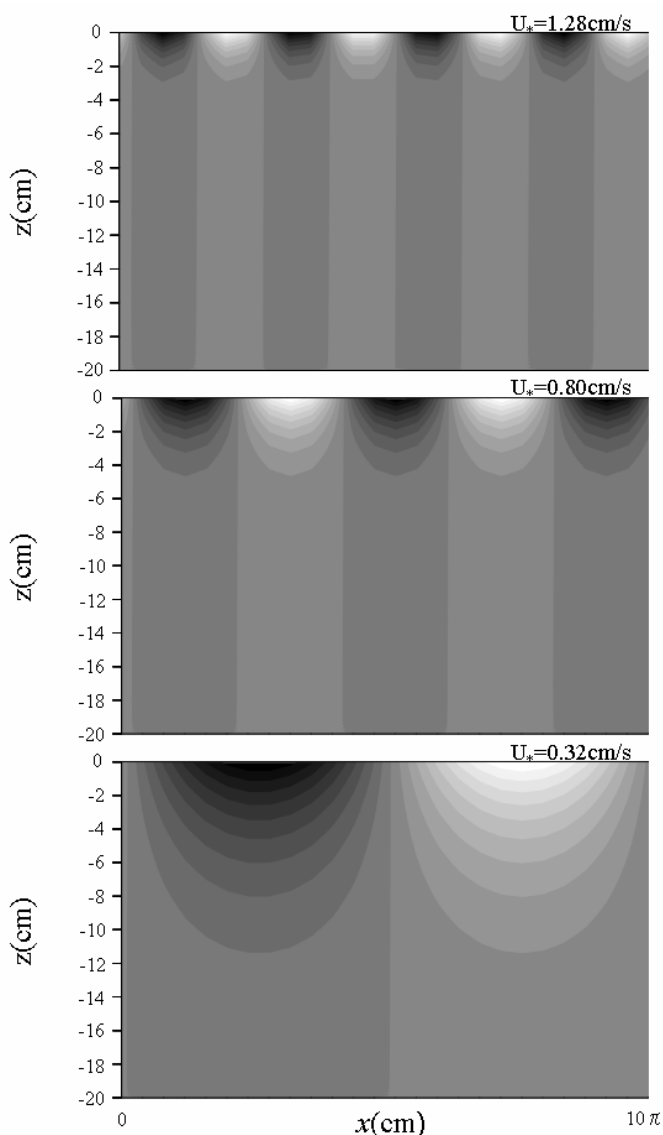


図-2 底質内部の圧力場

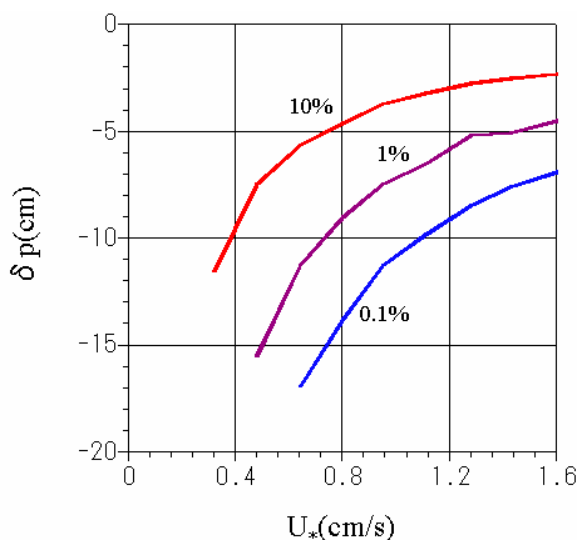


図-3 乱れの浸透深さ ~ U_* 関係