II-267　多列円柱粗度水路における流速分布と浮遊砂の堆積過程

京都大学防災研究所　正員　大久保 賢治
京都大学防災研究所　正員　村 本 嘉 雄

1．はじめに　植生が存在する場における微細土砂の堆積過程を明らかにするため多列円柱粗度を配置した開水路実験で浮遊砂の堆積過程を検討した。流速・浮遊砂濃度分布の同時測定を行ったが、それらとの比較に用いた分布形モデルと実験値との比較について述べる。

2．流速分布　直線部とそれに接続する対数則について一種の壁法則を考える。密な粗度配列で間隔程度の高さｓで混合距離が一定になるとみて壁法則の動粘性係数を(1)式のν_vで置換える。粗度頂部z_kからｓだけ下方のz_bまでは流速・濃度とともにν_vは一定、$z=z_a$で(2)式の値になるとする。これらの渦動粘性係数の比を(3)式のλで表す。$z=z_b$, z_aでの流速をそれぞれu_b, u_aとし、(4,5)式で偏差系に変換すると(6,7)式が形式的壁法則である。両式は、(6)式が$z=z_a$で(8)式となることからスケールを$\hat{u}_a$に変更して(9,10)式のように書ける。ここに、$\zeta=\hat{z}/a$で、ａをモーニン・オブコフ長と見れば気象学の変数と同形である。異なるのは対数則と直線分布の重ね合わせではなく、直線分布と対数則の接続、すなわち壁法則に基づく点であり、接続点z_aでは勾配が不連続で、(1),(2)式のいずれを用いるかによりν_vにλ倍のギャップがある。

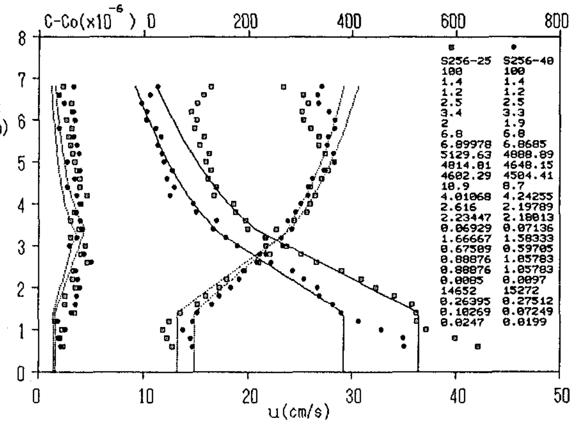
3．濃度分布　流速・濃度分布が相似とし、一定の拡散・粘性係数比βを用いて、渦動拡散係数κ_vを(11)式で表す。$z=z_a$でκ_vは(12)式の値とする。$z=z_b$およびz_aでの密度をρ_b, ρ_aとし、流速分布と同様に$z=z_b$を基面とする偏差系密度分布に変換するため(13,14)式を用いる。形式的な壁法則は(15,16)式であり、(16)式右辺の係数を$(\beta\kappa)^{-1}$として摩擦密度ρ_*を定義する。こうして、(15,16)式は(6,7)式と相似になるが、(17,18)式の$\Delta\rho$から(19,20)式のようにも書け、(20,21)式のχは以下のように変形できる。鉛直速度w_eを用い(22,23)式の形におくと(21,24)式より(25)式を得る。一方、(8)式より(26)式、オブコフ長の定義から(27)式という２種の摩擦速度の表示が得られ、これらを等置して(28)式を得る。これと(21)式との比較から(29)式のようにχは線形層のRichardson数R_iに等しく最小値をもつと推察される。浮遊砂濃度の密度差は体積濃度ｃと砂の水中比重σより(30)式で変換する。例えば、$z=z_a$で拡散と沈降フラックスが釣合う平衡条件は(31)式となり、(29)式のχは(32,33)式でRouseパラメータに関係づけられる。ここに、w_sは砂の沈降速度、c_oは(14)式の密度ρ_oに相当する濃度である。

表－１　モデルの変数と式

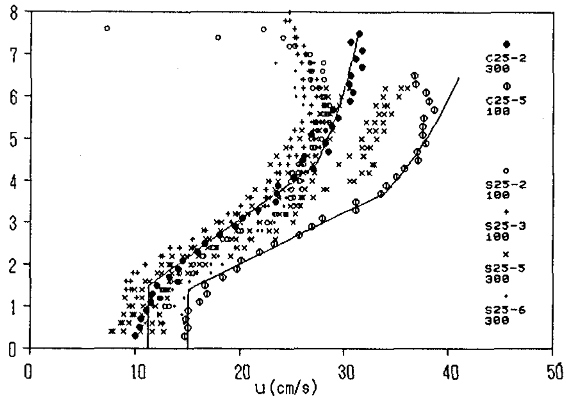
$$\nu_v=\kappa u_* s \quad (1),\quad \nu_v=\kappa u_* a \quad (2),\quad \lambda=a/s \quad (3),\quad \hat{z}=z-z_b \quad (4),\quad \hat{u}=u-u_b \quad (5)$$
$$\hat{u}/u_*=u_*\hat{z}/\nu_v \quad (0\leqq\hat{z}\leqq a) \quad (6),\quad \hat{u}/u_*=\kappa^{-1}\ln(\hat{z}/a) \quad (a\leqq\hat{z}) \quad (7),\quad \hat{u}_a/u_*=\lambda/\kappa \quad (8)$$
$$\hat{u}/\hat{u}_a=\zeta \quad (0\leqq\zeta\leqq 1) \quad (9),\quad \hat{u}/\hat{u}_a=1+\lambda^{-1}\ln\zeta \quad (1\leqq\zeta) \quad (10)$$
$$\kappa_v=\beta\kappa u_* s \quad (11),\quad \kappa_v=\beta\kappa u_* a \quad (12),\quad \hat{\rho}=\rho-\rho_o \quad (13),\quad \rho_o=(\beta+1)\rho_a-\beta\rho_b \quad (14)$$
$$(\rho_b-\rho)/\rho_*=\hat{z}/\beta\kappa s \quad (15),\quad (\rho_b-\rho)/\rho_*=(\beta\kappa)^{-1}\ln(\hat{z}/a) \quad (16),\quad \Delta\rho/\rho_*=\lambda/\beta\kappa \quad (17)$$
$$\Delta\rho=\rho_b-\rho_a \quad (18),\quad \hat{\rho}/\hat{\rho}_a=1+\beta^{-1}-\beta^{-1}\zeta \quad (19),\quad \hat{\rho}/\hat{\rho}_a=1-\chi\ln\zeta \quad (20),\quad \chi=\lambda^{-1}\beta^{-1} \quad (21)$$
$$\hat{u}_a w_e=u_*^2 \quad (22),\quad \hat{\rho}_a w_e=\rho_* u_* \quad (23),\quad \hat{\rho}_a/\rho_*=u_*/w_e=\hat{u}_a/u_*=\lambda/\kappa \quad (24),\quad \chi=w_e/\beta\kappa u_* \quad (25)$$
$$u_*=\kappa\hat{u}_a/\lambda \quad (26),\quad u_*=\kappa(\lambda^{-1}\beta g'a)^{1/2} \quad (27),\quad \lambda^{-1}\beta^{-1}=g'a/\hat{u}_a^2 \quad (28),\quad \chi=g'a/\hat{u}_a^2 \quad (29)$$
$$\hat{\rho}=\rho_o\sigma(c-c_o) \quad (30),\quad c_a w_s=(c_a-c_o)w_e \quad (31),\quad \chi=\gamma w_s/\beta\kappa u_* \quad (32),\quad \gamma=\hat{c}_a/c_a \quad (33)$$
$$R_i=-(g/\rho_o)(\partial\rho/\partial z)/(\partial u/\partial z)^2 \quad (34),\quad R_f=-(g/\rho_o)\hat{\rho}_a w_e/(u_*^2\,\partial u/\partial z) \quad (35)$$
$$\partial u/\partial z=\hat{u}_a/a \text{ and } \hat{u}_a/\lambda z \quad (36),\quad \partial\rho/\partial z=-\hat{\rho}_a/\beta a \text{ and } -\chi\hat{\rho}_a/z \quad (37)$$
$$R_i=\chi \text{ and } \beta^{-1}\zeta \quad (38),\quad R_f=\lambda^{-1} \text{ and } \zeta \quad (39),\quad R_f=\beta R_i \quad (40)$$
$$\kappa_v=\beta\kappa u_* s \text{ and } \lambda\beta\kappa u_* s\zeta^{-1} \quad (41),\quad \langle\rho'w'\rangle/\rho_* u_*=1 \text{ and } \zeta^{-2} \quad (42)$$
$$-\langle u'w'\rangle/u_*^2=1 \text{ and } \zeta^{-2} \quad (43),\quad \langle u'u'\rangle/\langle u'w'\rangle=1 \quad (44)$$
$$u_{rms}/\hat{u}_a=\kappa/\lambda^2 \quad (45),\quad u_{rms}/\hat{u}_a=(\kappa/\lambda^2)\{1+(\lambda^2-1)\zeta\} \text{ and } (\kappa/\lambda)\zeta^{-1} \quad (46)$$

4．拡散係数　まず、勾配およびフラックス型のRichardson数、R_i(34)式とR_f(35)式を考える。流速分布（9,10)式、密度分布(19,20)式より各量の鉛直勾配が(36,37)式で層毎に求められ、R_iは(38)式、R_fは(39)式となり、いずれの層でも$R_f=\beta R_i$すなわち(40)式の関係が認められるが、$z=z_a$で勾配が不連続なためRichardson数も連続でない。しかし、(34,35)と(40)式から予想できるようにκ_vがR_iに反比例するという一般的仮定を用いるとフラックスについて連続となる。なお、線形層下方の一様分布と仮定している層では実際には種々の密度分布が起こるが、この層は中立とする。拡散係数を(41)式で与えれば各層のフラックスは(42,43)式のようになる。フラックスは実測していないが(44)式を仮定し、乱れ強度については、一定層で(45)式、線形・対数層で(46)式の実験式が得られる。

5．実験との比較　実験は長さ 200cm、幅15cm の循環式水路で、プロペラ流速計と光学式濁度計により行った。実験砂は平均粒径106μmの珪砂8号で、水面から幅方向一様に給砂した。高さ25mm、直径 8mmの円柱粗度要素を横断方向の中心間距離40mmで千鳥に配置した。まず、数層で流速横断分布を測定したが、粗度の内部領域では流れが３次元的で多列らせん流を伴うと推察された。特に水深の小さいケース以外は流速分布の３領域は明確であった。粗度要素との相対位置により分布形の場所的相違は存在したが、濃度分布も測定する場合は粗度縦列線間の分布に限定した。濃度測定は河床から２mm間隔で水面に向かって行ったが、１分布の測定に約８分を要し、堆積実験では濃度が時間的に増加したので、この間の濃度変化を除外するため時間補正を施した。図－１に流速・濃度および乱れ強度分布を示す。実験番号末尾の数字は給砂開始後の経過時間(分)であり、堆積厚は水路中流部で約10mm、$z=z_b$における下向きのフラックスが掃流砂の場所的変化と平衡する条件となった。点線は(9,10)と(19,20)式をもとの座標系に変換して示し、左側のデータ群が乱れ強度を表す。なお、堆積過程の濃度分布では浮力束に拡散フラックスのみ考慮した(27)式の摩擦速度は過大であり、それを用いた(29)式のRichardson数χは過小となるため(32)式のχを使用し、これが最小のR_iに対応すると考えられる。図－２は清水流速分布との比較である（Cが清水流、Sが浮遊砂流、数値は勾配を表す）。浮遊砂流の流速分布は、河床上昇を考慮すれば、z_bが小さく、堆積のために、流速分布が勾配の小さい場合のそれに遷移している。



図－１　流速・濃度と乱れ強度の分布



図－２　清水・浮遊砂流の流速分布の比較

6．まとめ　ここでは、沈降および拡散フラックスを表示して河床付近での堆積速度に結び付けようとしている。これまでの実験では堆積速度の大きな初期の時間帯における濃度分布を測定するには至っておらず、掃流砂の場所的変化により平衡するような条件に限られた。今後、高い植生を用いた実験を行っていく予定である。しかしながら、流速および濃度分布については実験値と一致する結果が得られた。最後に、本研究は文部省科学研究費（重点領域研究(2)02201226）の補助を受けたことを付記しておく。