

京都大学 工学部 正会員 清水義彦
東京工業大学 工学部 正会員 福岡 捷二

1. はじめに 河床形状が横断的に変化する流路では横断方向の主流速差によって流体間にせん断力が作用する。しかし一般にその評価が難しいために、これを取り入れた平面二次元浅水流解析は現在のところなされていない。本研究では交互砂州河床形状の主要構成モードの一つである cosine 型河床形状(カマボコ形状)上の流れと河床せん断力を実験的に求めて評価し、流体間に作用するせん断力を水平混合の形で浅水流方程式に導入して交互砂州上の流速解や掃流力分布の精度を向上させる。

2. 実験方法 水路幅 20 cm, 縦断長さ 5 m の長方形断面の直線水路内に、平均粒径 0.067 cm の砂を均一に敷きつめる。次に木製のコテを用いて流路中央に関して対称な波長 16 cm, 振幅 0.5 cm の cosine 形を砂面に作り、アクリル製ボンドとトルエンの混合液を砂面にかけて固定化する。実験条件は河床勾配 $\frac{1}{100}$, 流量 1.37 ℓ/sec , 平均水深 1.07 cm, 平均流速 49.7 cm/sec である。流速の測定にはピトー管流速計を用い、河床せん断力の算定はプレストン法と粗面について適用した Hwang & Lau-
-rsen の方法を用いた。

3. 主流速および底面せん断力の横断分布

図 2 のロ印は実測の水深方向に平均化された主流速の横断分布である。河床形状の影響を受けて河床高さの高い流路中央付近ほど流速は小さく、河床高さの低い側序部付近では流速は大きくなっている。図 3 のロ印はプレストン法より算定した河床せん断力の横断分布である。水深の浅い流路中央付近では河床せん断力は小さく、流速の横断分布形と同様な分布形となる。図 2, 図 3 の・印は各地点の局所水深もより与えられる $\rho g h_i \cos \theta_y$ (i : 河床縦断勾配, θ_y : 河床横断勾配角) がその地点の河床せん断力に等しいとした流体間に働くせん断力を考慮しない浅水流解析による分布である。流体間に働くせん断力を考慮しない場合は、流速の横断方向の変動中を実測のものよりも過剰に評価することになり、流体間に作用するせん断力による流れの平滑化機構を浅水流解析にとり入れる必要があることを示している。そこで実測の主流速の横断分布を用いて流体間のせん断効果と水平混合係数とで見積ることを検討する。

4. 水平混合係数の見積り

図 4 に示すように水柱をコントロールボリュームとして、これに作用する力の釣り合いを考えると式(1)を得る。流体間に働くせん断力を式(2)のように横断方向の速度勾配と水深の積

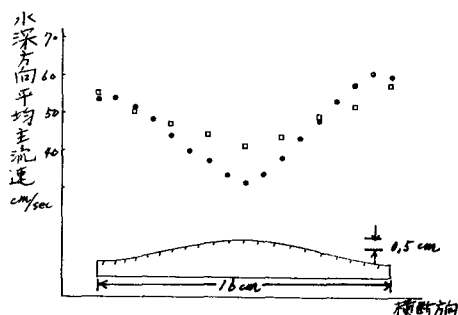
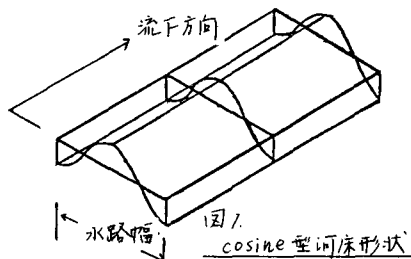


図2 主流速の横断分布

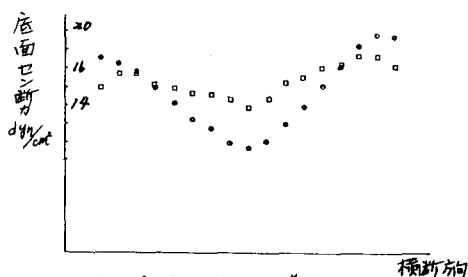


図3 底面せん断力の横断分布

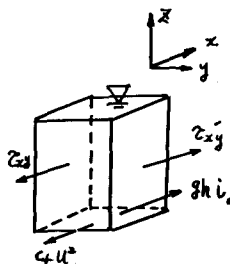


図4. 水柱に働く力の釣り合い

に比例するとして、水平混合係数 E_y を定義する。次に水深方向平均流速 U と局所水深 h を平坦河床時での流速 U_0 、平均水深 h_0 とそれからの変動量 u' , h' に分割し式(1)、式(2)に代入する。cosine 型河床形状式(4)のもとに変動流速成分 u' を式(5)のように展開し、式(1)、式(2)より線形変動流速解を求めると式(7)の形を得る。一方実験より得られた主流速の横断分布を式(8)で近似すれば、その振幅を用いて U_{100} から α が算定される。本実験では摩擦係数 $C_f = 0.66 \times 10^{-2}$ 、 $l = 0.269$ のもとに水平混合係数 E_y は

$$E_y = 0.174 U_* h$$

となり、対教則を用いた鉛直混合係数 $E_z (= \kappa/6 \cdot U_* h)$ のほぼ10倍程度の値をとる。そこで次にこの程度の水平混合効果を考慮して交互砂州上の流速解を算定する。

5. 水平混合効果を考慮した交互砂州上の変動流速解
交互砂州河床形状として代表的な2つのモードから構成される式(9)を採用する。縦断方向の水流の運動方程式に水平混合効果を導入した浅水流基礎式は式(10)～式(12)となる。ここで未知量と式(3)と同様に平坦河床時のものとそれからの変動量に分け、変動量に関して線形化して解くと図5の流速ベクトル図、図6の平均値からの変動流速ベクトル図を得る。水平混合を考慮した場合は、これを考慮しない場合に比べ変動流速の横断変化が緩和されるが、このことは交互砂州形状のオ1モード($Q_1 = a_1 \sin lY \cos(kX - \phi)$)による流速解よりもオ2モード($Q_2 = a_2 \cos 2lY$)による流速解に強く現われており、オ1モードのように縦断方向に周期的に変化する河床形状上の流れにおいては水平混合の効果は小さいようである。従って交互砂州上の流速分布や掃流力分布を把握する上でオ2モード(カマボコ形)に起因する水平混合効果をいかに見積るかが重要である。次に水平混合を考慮した流れの非線形解を用いて交互砂州波高の平衡波高の解析²⁾を行った。山坂が指摘しているようにオ2モードに起因する流速解はオ1モードの波高 Q_1 の発達に寄与するため、水平混合効果を考慮し得えない流れの解析においては波高 Q_1 の発達作用と過剰に評価してしまう。従って水平混合を導入したより適切な流速解を用いることによりこの問題は解消される。しかし波高の安定化に重要な役割を果たす非線形変動流速を同時に小さくするため解析的に得られる平衡波高の範囲をばらすしを広げることはできなかった。平衡波高の範囲を広げるには、波高の発達と抑制する作用と精度よく見積る必要が不可欠であるが、今後はこの点を水平混合を考慮した流速解やそれにともなう掃流力分布を用いて検討していきたい。

<参考文献> 1) Li-San Huang & E.M. Laursen; J. Hydr. Div. ASCE, Hy 2 March 1963 2) 山坂・福田; 河床形状・流れ・流砂量間の非線形関係に着目した交互砂州の平衡波高の理論(投稿中)

水柱に作用する力の釣り合い

$$g h i_0 - C_f U^2 + \frac{\partial}{\partial y} \int_0^h \tau_{xy} dz = 0 \quad (1)$$

C_f : 摩擦係数

τ_{xy} : 水柱の側面に働くせん断力

$$\int_0^h \tau_{xy} dz = \rho E_y \frac{\partial U}{\partial y} \cdot h \quad (2)$$

E_y : 水平混合係数 $\alpha U_* h$ とおく

α : const, U_* : 摩擦速度

$$U = U_0 + U', \quad h = h_0 + h' \quad (3)$$

$$E_y = \alpha C_f U_0 h_0 (1 + U'/U_0) (1 + h'/h_0)$$

$$h'/h_0 = -a_{20} \cos 2lY \quad l = \frac{\pi h_0}{\beta} \quad Y = \frac{y}{h_0} \quad (4)$$

$$U'/U_0 = a_{20} U_1 + a_{20} U_1^2 + \dots \quad (5)$$

a_{20} a 0 次の order

$$C_f = l/F_r^2 \quad (6)$$

a_{20} a 1 次の order

$$\left. \begin{aligned} U'/U_0 &= U_{100} a_{20} \cos 2lY \\ U_{100} &= -\frac{1}{2 + \frac{4\alpha l^2}{\sqrt{C_f}}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\text{実験値} \quad U'/U_0 = -0.378 \cos 2lY \quad (8)$$

交互砂州形状

$$h'/h_0 = Q_1 + Q_2 = a_1 \sin lY \cos(kX - \phi) - a_2 \cos 2lY$$

$$k = 2\pi h_0/L, \quad X = x/h_0 \quad (9)$$

水平混合を考慮した浅水流方程式

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = g(l_0 - \frac{\partial h}{\partial X}(h - \eta)) - \frac{C_f U^2}{h} + \frac{E_y}{h} \frac{\partial}{\partial y} (h \frac{\partial U}{\partial y}) \quad (10)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -g \frac{\partial h}{\partial Y}(h - \eta) - \frac{C_f V^2}{h} \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial X}(hU) + \frac{\partial}{\partial Y}(hV) = 0 \quad (12)$$

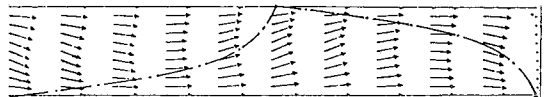


図5. 交互砂州上の流速ベクトル

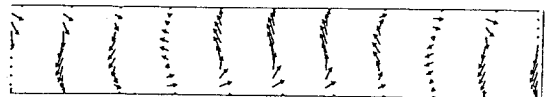


図6. 交互砂州上の変動流速ベクトル