

II-98

三次元乱流場における歪度について

熊本大学工学部 正員 大本照憲
九州大学工学部 正員 平野宗夫
建設技術研究所(株) 正員 天野光歩

1. まえがき

前報¹⁾において、著者等は模擬縦筋河床上の主流速、二次流およびレイノルズ応力の分布特性および二次流の発生維持機構について検討を行った。本研究では、二次流が安定して存在する三次元せん断乱流場における高次モーメントの分布特性について実験的考察が加えられた。また、主流方向の歪度は、Navier-Stokesの運動方程式から導かれた歪度の収支式を基に、その特徴が顕著に現れる上昇流部および下降流部において検討された。

2. 二次流を伴う三次元乱流場

図-1は、高次モーメントが考察される流れ場における主流速の等値線および二次流ベクトルを示したものである。水路床は模擬縦筋河床で、水理条件は表-1に示す。図より縦筋河床のTrough上に当る $y/b=0$ の近傍では、下降流が発生し高速流域となり、一方、Ridge上に当る $y/b=\pm 1$ では上昇流が発生し低速流域となることが明瞭に現れている。

表-1 水理条件

平均流速	$U_m=45.55$ cm/sec
水深	$H_{max}=4.82$ cm
摩擦速度	$U_* \approx 3.37$ cm/sec
水路勾配	$i_0 = 1/400$

3. 歪度

図-2および3は、それぞれ主流方向の流速変動に関する歪度 $S_u = \overline{u^3} / (\overline{u^2})^{3/2}$ の横断分布および鉛直分布を示す。図-2より、 S_u は横断方向に下降流部に当る $y/b=0$ の近傍で極小値、上昇流部に当る $y/b=\pm 1$ で極大値を取る波状分布を示すこと、および二次流の鉛直成分とはほぼ同位相であることが認められる。また、図-3より S_u は、下降流部($y/b=-0.4 \sim 0$)では河床および自由水面の近傍でゼロに近い値を示し、半水深付近で極小値を取り、分布形は二次元開水路流れの場合に一致する。上昇流部($y/b=1.0 \sim 0.6$)では、下降流部とは大きく異なり、強い上昇流が生ずるRidge上では、河床近傍で正の極大

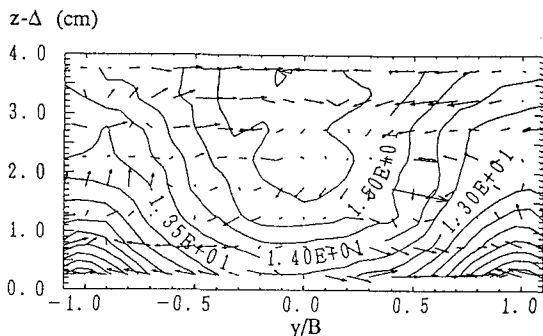


図-1 主流速の等値線および二次流ベクトル

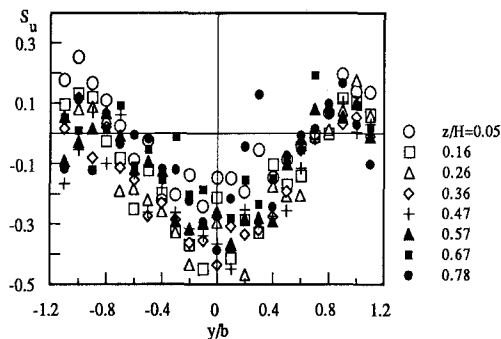


図-2 歪度 S_u の横断分布

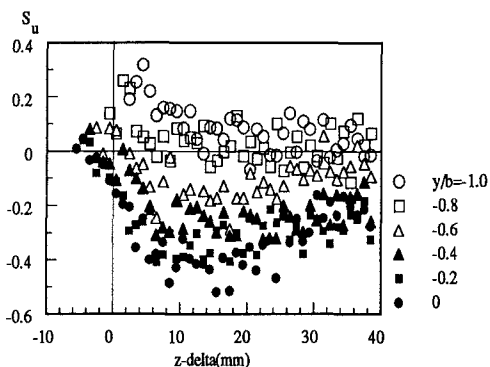


図-3 歪度(S_u)の鉛直分布

値を取り上方に向かうに従って減少する傾向が認められる。図4および5は、それぞれ横断方向の流速変動の歪度 S_v の横断分布および鉛直方向の流速変動の歪度 S_w の鉛直分布を示す。歪度 S_v は、横断方向に乱れ特性が一様な二次元開水路流れにおいてはゼロであるのに対して二次流が存在する場合には横断方向に大きく変動し、河床より半水深の領域では $-1 < y/b < 0$ で $S_v > 0$ 、 $0 < y/b < 1$ で $S_v < 0$ の傾向を示し、主流方向と横断方向の流速変動から成るレイノルズせん断応力と同位相であることが認められた。歪度 S_w は、大きくばらついているが河床から鉛直上方に向って増大することおよび上昇流部に較べて下降流部で大きな値を示す傾向を持つ。

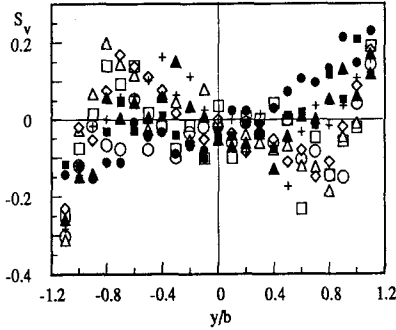


図4 歪み度 S_v の横断分布

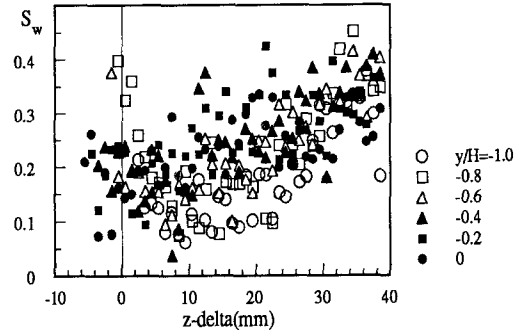


図5 歪み度 S_w の鉛直分布

4.歪度 S_v の収支関係：主流方向の流速変動の三次のモーメントは、レイノルズ数が大きい場合、Navier-Stokesの運動方程式から次式が導かれる。

$$\begin{aligned} \frac{Du_i u_j u_k}{Dt} = & -(\overline{u_i u_j u_m} \frac{\partial U_k}{\partial x_m} + \overline{u_j u_k u_m} \frac{\partial U_i}{\partial x_m} + \overline{u_k u_i u_m} \frac{\partial U_j}{\partial x_m}) + (\overline{u_i u_j} \frac{\partial \overline{u_k u_m}}{\partial x_m} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial \overline{u_i u_m}}{\partial x_m} + \overline{u_k u_i} \frac{\partial \overline{u_j u_m}}{\partial x_m}) \\ & - \frac{\partial \overline{u_i u_j u_k u_m}}{\partial x_m} - (\overline{u_i u_j} \frac{\partial p}{\partial x_k} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \overline{u_k u_i} \frac{\partial p}{\partial x_j}) \end{aligned} \quad (1)$$

流れは、主流方向に一様であることから x に関する微分項は消え、上昇流部および下降流部においては、主流速の横断方向の変化はゼロとなり、さらに圧力変動と流速変動の相互作用を無視すれば上式は次のようになる。

$$\begin{aligned} W \frac{\partial u^3}{\partial z} = & \underbrace{-3\overline{u^2 w}}_{(A)} \frac{\partial U}{\partial z} + \underbrace{3\overline{u^2} \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y}}_{(B)} + \underbrace{3\overline{u^2} \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z}}_{(C)} - \underbrace{\frac{\partial \overline{u^3 v'}}{\partial y}}_{(D)} - \underbrace{\frac{\partial \overline{u^3 w'}}{\partial z}}_{(E)} \end{aligned} \quad (2)$$

図6および7は、それぞれ上昇流部および下降流部における式(2)の各項の鉛直分布を示す。図6より、下降流部においては式(2)の右辺第一項 $-3\overline{u^2 w} \partial U / \partial z$ および第三項 $3\overline{u^2} \partial (\overline{u'w'}) / \partial z$ が卓越し、これら二つの項がバランスして S_v が決定されていることが示唆される。一方、下降流部に較べて上昇流部においては式(2)の右辺第三項が減少し第四項 $-\partial (\overline{u^3 v'}) / \partial z$ が増大し、右辺第二 $3\overline{u^2} \partial (\overline{u'v'}) / \partial y$ 項の符号逆転していることが注目され、上昇流部で S_v が正の符号を示す要因として右辺第四項が考えられる。

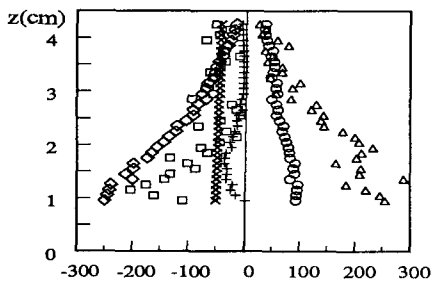


図6 $\overline{u^3}$ の収支関係（下降流部）

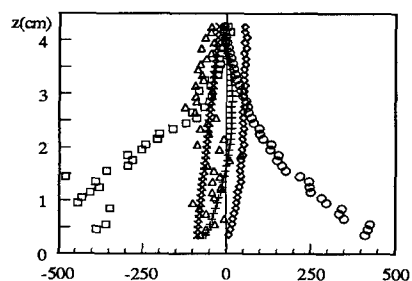


図7 $\overline{u^3}$ の収支関係（上昇流部）