

香川大学工学部 学生会員 ○大八木美由起
香川大学工学部 フェロー 河原 能久

1. はじめに

河川では、水理構造物や地形の影響によって、逆流や大きく水面の変化する流れが発生することがある。3次元性の強い複雑乱流の特性を理解するためには数値解析が有効である。本研究は、段落ち・段上り部が連続的に位置する開水路乱流を対象に、水理実験を行うとともに、3次元数値解析を行ったものである。

2. 実験の概要

図1に示すように、幅(B)50cm、水路床勾配 1/450 の直線開水路内に、高さ(H)6.2cm、幅 50cm、長さ 80cm の直方体模型を、30cm 間隔で4基設置した。

染料による流れの可視化により流れの特徴を理解するとともに、2成分電磁流速計 (I 型, L 型) による流速3成分の測定と、サーボ式波高計とポイントゲージを用いた水深の計測を行った。実験条件を表1に、断面位置を表2に示す。

3. 基礎方程式と数値計算法

基礎方程式は、連続の式、レイノルズ方程式、乱流エネルギー k の輸送方程式、及び、エネルギー散逸率 ε の輸送方程式である。

乱流モデルには、標準 $k - \varepsilon$ モデルとその修正版ともいべき Zhu-Shih モデルを用いた。Zhu-Shih モデルは、次式で表されるが、渦動粘性係数中の係数 c_μ が流れの状態に依存する変数となっている点のみが標準 $k - \varepsilon$ モデルと異なる。

$$-\overline{u_i u_j} = 2\nu_t S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$

$$c_\mu = \frac{2/3}{5.5 + \eta}, \quad \eta = \frac{Sk}{\varepsilon}, \quad S = (2S_{ij}S_{ij})^{1/2}$$

基礎方程式を有限体積法を用いて離散化し、スタガードグリッド上で数値解を算出した。格子点数は段落ち部内で $150 \times 52 \times 28$ (それぞれ x, y, z 方向) であり、計

算結果が格子点数によらないことを確認している。

4. 計算結果と考察

(1) 主流速度

図2は、断面 D10 と断面 D13 の水路中央における主流流速の鉛直分布を示したものである。図3は、断面 D10 と断面 D13 の異なる高さにおける主流の幅方向の分布を示したものである。計算結果と実験結果はほぼ等しく、両モデルとも実験結果を再現できていると言える。

また、計算より次の流れの特徴を再現することができた。

- ① 段落ち部全体に逆流域が形成される。
- ② 主流流速は、断面中央で最大流速とならず側壁近くで最大流速となる。

②のような流速分布となったのは、2次流の影響であると考えられることが、計算結果よりわかった。

(2) 乱流エネルギー k

ここでは図には示さないが、計算より得られた乱流エネルギー k の鉛直分布を見ると、図2において主流流速が大きく変化するところ、すなわち z/H が 0.6 付近で両モデルとも大きな値を示すことがわかった。しかし、段上り前面では標準 $k - \varepsilon$ モデルの方が、Zhu-Shih モデルより、 k を小さく算出していた。

(3) 標準 $k - \varepsilon$ モデルと Zhu-Shih モデルの比較

図2からわかるように、標準 $k - \varepsilon$ モデルと Zhu-Shih モデルによる計算結果には大きな変化は見られなかった。これは、渦動粘性係数 ν_t の値が、ほぼ等しい値となったためであることがわかった。

詳細に見ると、Zhu-Shih モデルにおける c_μ の値は、 z が 6cm 付近では、標準 $k - \varepsilon$ モデルにおける値より 2/3 程度小さく、水面付近では 1.2 倍程度大きく算出していた。このことから、両モデルには多少の違いがあることがわかった。

表1 実験条件

流量 Q (L/s)	中央での水深 (cm)		平均流速 (cm/s)		レイノルズ数 Re=umsH/ ν	フルード数 (模型上) Fr=ums/ (gHs') ^{1/2}
	模型上 Hs'	段落ち部 H'	模型上 ums	段落ち部 um		
5.48	3.61	9.92	30.3	11.0	1.88×10^4	0.51

表2 断面位置

横断面	x(cm)	水平面	z(cm)
D7	0	P3	3
D8	2.5	P4	4
D9	7.5	P5	5
D10	12.5	P7	6.2
D11	17.5	P9	7.7
D12	22.5		
D13	27.5		
D14	30		

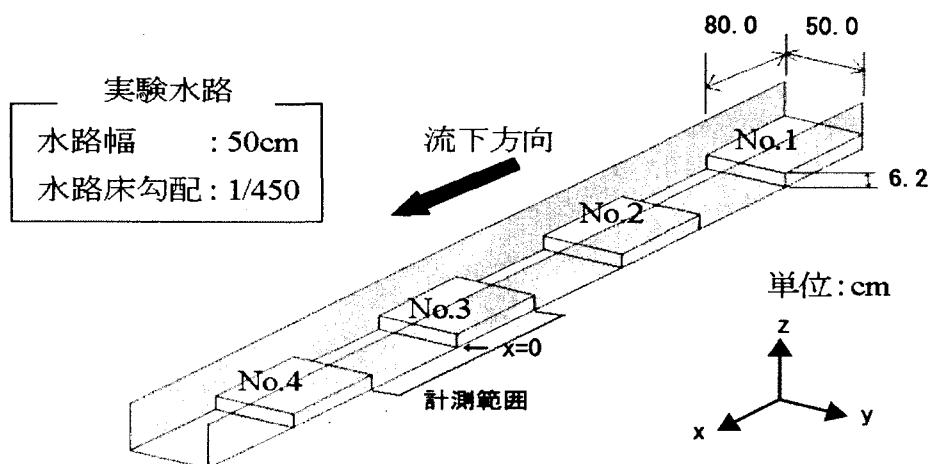
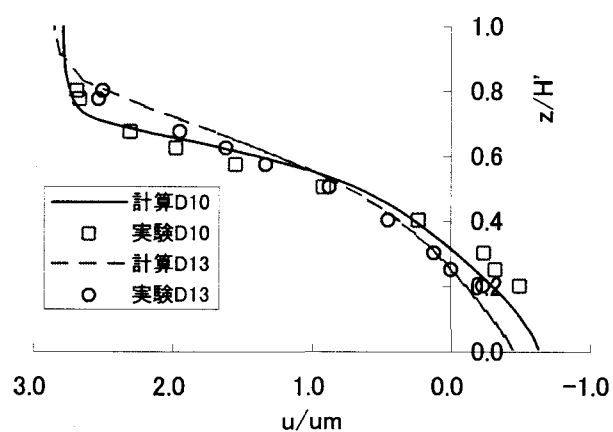
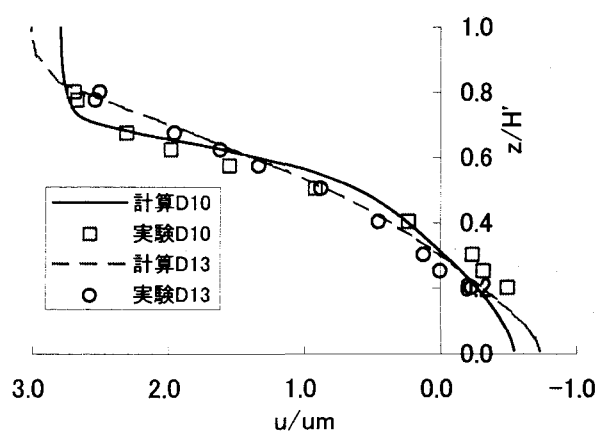
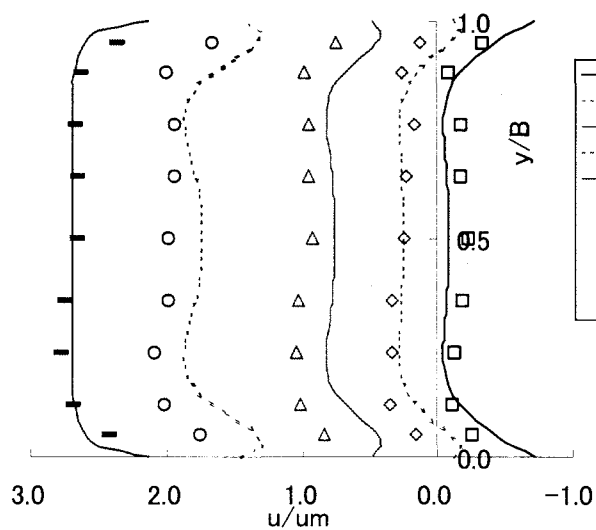


図1 実験水路

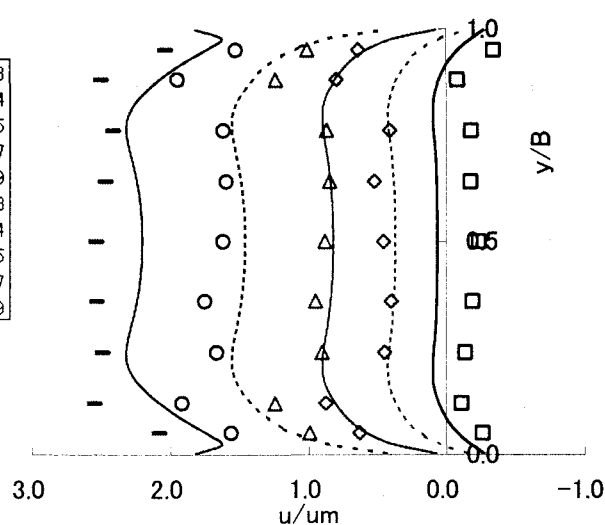
(a) 標準 $k-\varepsilon$ モデル

(b) Zhu-Shih モデル

図2 水路中央における主流流速の鉛直分布(断面10&断面13)



(a) 断面 D10



(b) 断面 D13

図3 異なる高さにおける主流流速の幅方向の分布(標準 $k-\varepsilon$ モデル)