

宇都宮大学大学院	学生員	田島文敬
宇都宮大学工学部	正員	杉山 均
宇都宮大学工学部		秋山光庸
花王株式会社		佐藤誉之

1. 緒言

直線状河川では整然と配列した縦渦群が存在し、三次元の複雑な流れを示すことが以前より指摘されており、この縦渦の存在は縦筋(sand ridge)やボイルの生成に大きく寄与すると考えられている。本研究は縦筋を伴った三次元乱流場を対象としてレイノルズ応力モデルを用いて数値解析を行うことにより縦筋を伴った乱流場の流動挙動を考察し、同時に助走区間流れにおける第二種ボイルの生成機構について検討する。

2. 解析手法

2.1 計算対象実験 本研究が対象とした Tominaga-Nezu-Nagao^[1]の実験の供試空間及び座標系を Fig.1 に示す。実験装置は $80 \times 400\text{mm}$ の矩形管断面をもつ全長 6m の管路で、縦筋は高さ 3.5mm の三角形断面突起で模擬し、上下壁に対称に設けてある。従って、対象とした流れは自由水面の影響を考慮していない。

2.2 乱流モデル 本研究は乱流モデルとしてレイノルズ応力モデルを用いた。この際、対流項、拡散項に関しては Rodi^[2] 近似を用いて代数応力モデルとして解析を行った。また、モデル化の際特に問題となる圧力・歪み相関項については Launder-Reece-Rodi^[3] により提唱されたモデルを基にその制約条件の一部に改良を加えた著者らの提示モデル^[4]を使用した。

2.3 数値解析 計算領域は系の対称性を考慮して Fig.1 の斜線で示す $1/4$ 断面とし助走区間距離は水力直径 D_h の 100 倍の長さを入れて完全発達領域となるようにした。また、計算格子は断面内で 53×21 流れ方向に 50 断面とし、レイノルズ数は $Re = 40000$ で計算を行った。入口条件としては一様流で $k = U_b \times 10^{-5}$, $\varepsilon = k^{3/2}/D_h$ と小さな値を設定した。

3. 結果と考察

3.1 主流方向速度等値線(Fig.2) 完全発達領域における主流方向速度の実験との比較を示す。各値は、断面内最大主流速度 U_{1max} にて無次元表示してある。この分布で特徴的な ridge 上の等値線の歪みを計算結果は良好に予測している。

3.2 第二種二次流れベクトル線図(Fig.3) 実験結果で見られる ridge 上の強い上昇流、及びその両側に存在する互いに逆向きに回転する縦渦を計算結果においても認めることができる。

3.3 レイノルズ応力の比較(Fig.4,5,6) 各値は平均摩擦速度 $\bar{U}_*^2$ により無次元化してある。乱流エネルギーにおいては壁面近傍に最大値が存在し、計算は実験結果の全体的な傾向をよく捉えているといえる。また、せん断応力分布においても等値線の歪み、異符号領域の存在など実験におけるその特徴、傾向を良好に予測できている。

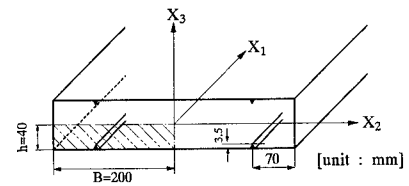


Fig.1 供試空間及び座標系

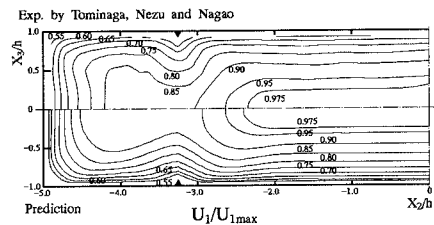


Fig.2 主流方向速度等値線図

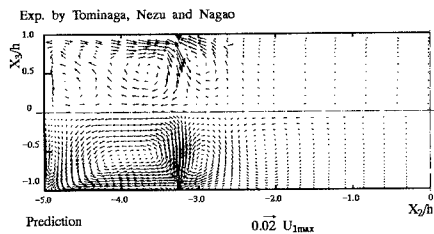


Fig.3 二次流れベクトル線図

以上、Tominaga らの実験との比較より本研究の妥当性を確認できた。そこで次に、助走区間を含めた三次元乱流場の解析結果から第二種ボイルの生成について検討を加える。

3.4 第二種ボイル生成 Fig.7 に示した図は上下対称軸より計算第一点目にあたる $X_3 = -0.025D_h$ の位置における垂直方向速度 U_3 の $X_1 - X_2$ 断面での等値線図である。横軸は流れ方向 X_1 を縦軸は横断方向 X_2 を示し、各値は入口における流入速度 U_{in} によって無次元化してある。また、Fig.8 には各断面における二次流れベクトル強度 I_s の X_1 方向の変化の様子を示した。ここで I_s は次式で定義した。

$$I_s = \frac{1}{U_b \times B \times h} \iint (U_2^2 + U_3^2)^{1/2} dx_2 dx_3 \quad (1)$$

Fig.7 によると、 U_3 の最大値は $X_2/h = -3.25$ の ridge 上に存在し、その値の大きさは最大で主流速度の約 1% である。また、最大値の存在する位置は完全発達域ではなく、 $10D_h$ 付近に見られることが特徴として挙げられる。さらに、Fig.8 よりその位置は二次流れベクトル強度が最大となる位置とほぼ一致することが認められる。

したがって縦筋の存在によって生ずる縦渦の強い上昇流からなる第二種ボイルは、流れの発達過程において縦渦の強度が最大となる位置で生成されと考えることができる。

4. 結論

本研究の結果、この種の流れに特徴的な高速域、低速域の存在、及び縦渦による ridge 上の強い上昇流を再現できた。また、河川における第二種ボイルは、完全発達領域よりもむしろその発達過程において生成し、境界層の発達と大きな関係があると思われる。

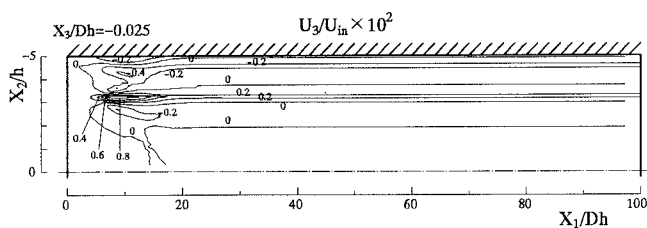


Fig.7 垂直方向速度 U_3 等値線図

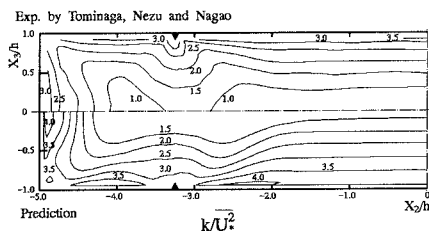


Fig.4 乱流エネルギー k 等値線図

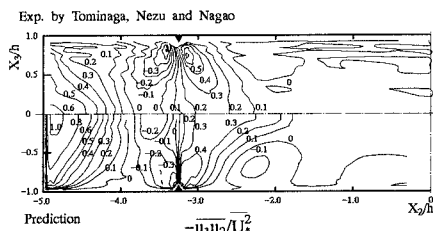


Fig.5 せん断応力 $-u_1u_2$ 等値線図

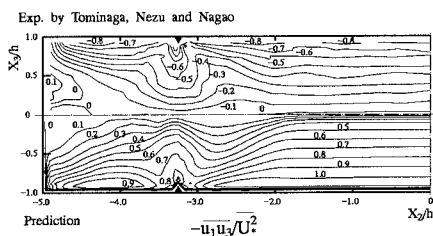


Fig.6 せん断応力 $-u_1u_3$ 等値線図

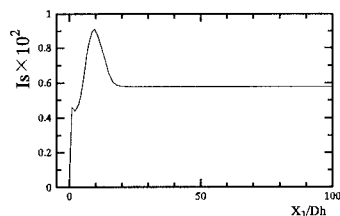


Fig.8 二次流れベクトル強度分布

参考文献 [1]Tomimaga,Nezu and Nagao:Turbulence Control of Channel Flow by Forced Secondary Currents over Longitudinal Ridge, Turbulent Shear Flows 9,14-4,1993 [2]Rodi.W:Z.Angew.Math.Mech.,56, pp.T219-T221,1976 [3]Launder.B.E,Reece.G.J and Rodi.W:J.Fluid Mech.,Vol.68, pp.537-566,1975 [4]杉山均・秋山光庸・芹沢寿行:日本機械学会論文集,56-531,pp.3328-3335,1990 [5]玉井信行・瀬津家久・小松利光 他3名:乱流における組織構造の役割,土木学会論文集,423/II-14,pp.25-41,1990 [6]杉山均・秋山光庸・山中和典・平田賢:縦筋を伴う三次元河川流路の乱流構造解析,土木学会論文集,479/II-25,pp.81-90,1993