

河川乱流における縦渦構造について

熊本大学大学院 学生員 ○松葉 謙児
 熊本県庁土木部 正会員 林 俊一郎
 熊本大学工学部 正会員 大本 照憲
 熊本大学工学部 正会員 矢北 孝一

1.はじめに

一般に、せん断乱流の支配因子として並列する縦渦群の存在が挙げられている。その生成機構に関して数多くの研究が成されており、特に近年のコンピュータ技術の発展による数値解析法には大きな期待が寄せられている。しかし実験的研究では、その精度上の限界から二次流の発生機構を解明するまでには至っていない。そこで本研究では、縦筋河床上の開水路乱流場へDNSを適用し、その挙動特性や、二次流の生成機構を検討した。

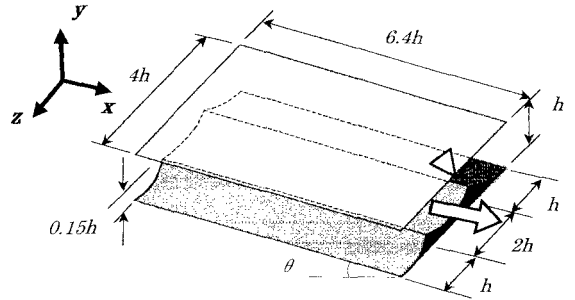


図-1 計算対象の概要

2.解析対象および計算方法

計算対象は、縦筋河床を有する完全発達した直線開水路乱流場とし、底面形状や河床高は平坦河床から発達した縦筋を参考に図-1のように設定した¹⁾。なお、流下方向とスパン方向に周期境界条件を与え側壁の効果がない流れ場とする。

基礎方程式には、任意境界への適合を可能とするため、3次元一般座標系へ写像したナビエ・ストークス方程式と圧力ポアソン方程式を用いるものとする。境界条件には、底面において流速にノンスリップ条件、自由水面では流速 u 、 w にスリップ条件、 v に 0 を与え、圧力はノイマン条件とする。その他の計算条件やアルゴリズムなどについては、表-1 および既報^{2)~4)}のとおりである。

表-1 計算条件

Coupling algorithm	Fractional Step Method
Time advancement	3rd Adams-Bashforth Method
Grid system	Regular Grid System
Spatial scheme	5th-order Upwind Scheme (Convective term)
Grid numbers	64×65×65 $\Delta x^* = 14.7$ ($x^* = 942$)
Spatial resolution	$\Delta y^* = 0.1 \sim 5.8$ ($y^* = 150$)
	$\Delta z^* = 8.0 \sim 9.6$ ($z^* = 600$)
Reynolds number	$Re_c = u_c h / \nu = 150$
Time step	$\Delta t = 2/1000 * h / u_c$

3.結果と考察

以下では、十分に発達した乱流状態における 500,000 ステップ ($\Delta t = 2/1000 * h / u_c$) の時間平均結果を考察する。なお、時空間平均された摩擦速度 $\langle u_* \rangle$ と動粘性係数 ν で無次元化された物理量を以後+で表示する。

主流速 U^+ および二次流ベクトル (V^+ , W^+) の横断分布をそれぞれ図-2 および図-3 に示す。図-2 より主流速は、trough 上では高速域、ridge 上では低速域に当たり、その等値線は釣鐘状に突き出た分布形状を示す。なお、ridge を中心に左右対称となっていないのは観測時間の不足が原因と思われる。また、図-3 より二次流ベクトルは trough 上で下降流、ridge 上で上昇流が発生し、主流速の空間分布と二次流の基本的関係が良好に再現されていることが分かる^{1), 5)}。図-4 は、主流方向の渦度成分 ω_x^+ の等値線を示したものである。水深スケールの縦渦がその向きを交互に変えて配列し、縦渦の中心は二次流のそれとは一致せず、ridge により近づいた位置に在ることが分かる。このことは、Smith & Schwartz⁶⁾ によって示された粘性底層内に発生する縦渦の挙動と類似し、縦渦間の相互作用と底面の影響から浮上運動を起こす方向に接近するためである。また、底層内縦渦と異なり水深スケールの縦渦がその中心を底面付近にとどめるのは、境界としての水面の影響が効いたためであり、渦糸モデルによる安定解析と対応している¹⁾。

主流方向に軸を持つ平均渦度成分 ω_x^+ の収支式は、Brundrett & Baines⁷⁾ に従い、次の式(1)で表される。

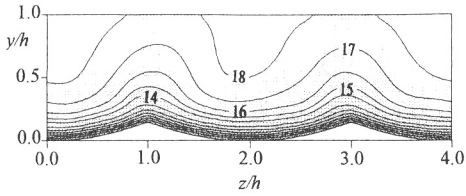


図-2 主流速 U^+ の分布

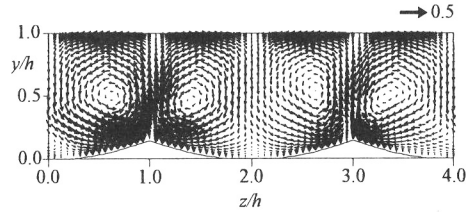


図-3 二次流 V^+, W^+ のベクトル図

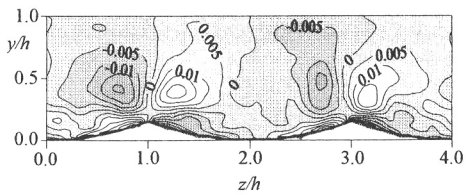
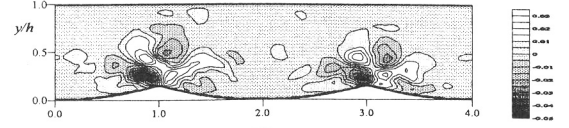
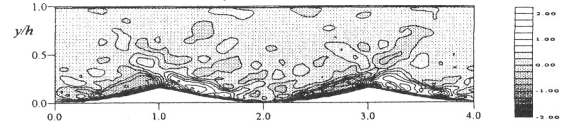


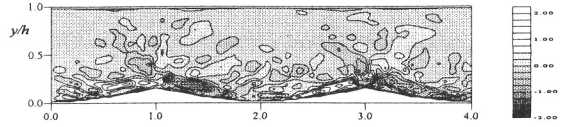
図-4 渦度 ω_x^+ の分布



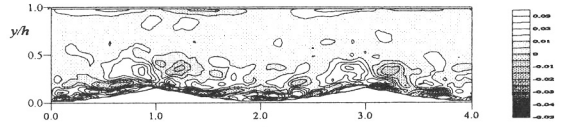
(A) 移流項 $(v^+ \frac{\partial \omega_x^+}{\partial y} + W^+ \frac{\partial \omega_x^+}{\partial z}) \times 10^3$ の空間分布



(B) 垂直成分項 $\frac{\partial^2}{\partial y \partial z} (v^+{}^2 - w^+{}^2) \times 10^3$ の空間分布



(C) せん断成分項 $(\frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2}) v^+ w^+ \times 10^3$ の空間分布



(D) 粘性拡散項 $\frac{1}{Re_\tau} (\frac{\partial^2 \omega_x^+}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega_x^+}{\partial z^2}) \times 10^3$ の空間分布

図-5 渦度輸送方程式の空間分布

$$U_j^+ \frac{\partial \omega_x^+}{\partial x_j} = \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} (\overline{v^+{}^2} - \overline{w^+{}^2}) + (\frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{\partial^2}{\partial z^2}) (-\overline{v^+ w^+}) + \frac{1}{Re_\tau} (\frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}) \omega_x^+ \quad (1)$$

左辺の移流項, 右辺第一項のレイノルズ法線応力差, 第二項のレイノルズせん断応力および第三項の粘性拡散の計算値を図-5に示す. 計算結果は禰津・中川⁸⁾による実験結果とよく一致しており, ω_x^+ の絶対値が大きい領域で, 右辺第一項と第二項が卓越し, 互いに逆符号を取りバランスしていること, ならびに移流項および粘性拡散項は相対的に小さく無視できることが分かる. レイノルズせん断応力 $-\overline{v^+ w^+}$ は, 他のレイノルズせん断応力項に較べて微量でありエネルギー収支においては無視できるが, 空間2階微分係数は相対的に大きな値をとり, ω_x^+ の収支式においては支配項となる. さらに, ω_x^+ の符号はレイノルズせん断応力 $-\overline{v^+ w^+}$ の空間2階微分係数の符号と一致し, 法線応力差 $(\overline{v^+{}^2} - \overline{w^+{}^2})$ の空間2階微分係数の符号とは逆の符号をとることが認められる. 即ち, DNSの計算結果から, 二次流の発生原因として定説化されてきたレイノルズ応力差 $(\overline{v^+{}^2} - \overline{w^+{}^2})$ は二次流を抑制する働きを持ち, レイノルズせん断応力 $-\overline{v^+ w^+}$ が二次流を発生させる駆動力としての作用を持ち, 両者がバランスして安定な二次流が形成されたものと考えられる.

参考文献: 1) 大本照憲: 開水路流れにおける二次流構造と縦筋河床に関する基礎的研究, 九州大学学位論文, 1991.

2) 林俊一郎, 大本照憲, 矢北孝一, 平川隆一: 風上差分スキームを用いた直接数値シミュレーションの基礎的研究, 応用力学論文集, Vol.2, pp.599-608, 1999.

3) 林俊一郎, 大本照憲, 矢北孝一, 平川隆一: 一般座標系 Regular 格子による開水路乱流のDNS, 水工学論文集, 第44巻, pp.593-598, 2000.

4) 林俊一郎, 大本照憲, 矢北孝一, 平川隆一: 一般座標系風上DNSによる開水路乱流の構造解析, 応用力学論文集, Vol.3, pp.763-774, 2000.

5) 中川博次, 禰津家久, 富永晃宏: 2次流を伴う流れの乱流構造について, 第26回水理講演会論文集, pp.469-474, 1982.

6) C.R. Smith & S.P. Schwartz: Observation of streamwise rotation in the near-wall region of a turbulent boundary layer, *Phys. Fluids*, 26, No.3, pp.641-652, 1983.

7) Brundrett, E. & Baines, W.D.: The production and diffusion of vorticity in duct flow, *J. Fluids Mech.*, Vol.19, pp. 375-394, 1964.

8) 禰津家久, 中川博次: 渦度輸送方程式による並列せん断流の実験的研究, 第26回水理講演会論文集, pp.641-646, 1982.