

開水路流れにおける縦渦の乱流特性について

On the Turbulent Characteristics of Longitudinal Vortices in Open Channel Flows

中央大学工学部 正 員 林 泰造

中央大学工学部 正 員 大橋 正和

中央大学大学院 学生員 ○小谷 裕司

1. 緒 言

近年、自由水面をもった開水路流れにおいて、流下方向に回転軸を有し、水路横断方向に並列して存在する縦渦の大規模乱流構造の解明に、可視化法およびホットフィルム流速計等を用いての乱流計測による実験が数多くなされている。^{1)~6)}しかし、それらの多くは滑面並びに底面上に人工的パターンを有する粗度を設けた場合のものであって、一様粗面の平坦な水路床上において発生する縦渦の乱流構造に関する研究は数少ない。

本研究においては、水路床上に平均粒径 2.7 mm の砂粒粗度を一様に貼りつけた水路を用いて、ホットフィルム流速計を使用し詳細な流速測定を行い、一断面内の平均流速分布、乱れ強度分布、レイノルズ応力分布の解析等から一様粗面上に発生する縦渦の大規模乱流構造を明らかにせんとするものである。

2. 実験装置および実験方法

実験に用いた水路は、図-1に示すように全長 16.5 m (測定長 12.0 m)、横幅 0.69 m 、側壁高 0.30 m の循環式可変勾配水路であり、水路床には平均粒径 2.7 mm の砂粒を一様に貼りつけてある。

本実験は、表-1に示された水理条件のもとで等流を維持した状態で計測を行った。計測位置は、下流端から 6.0 m の位置において図-2に示すように水路の半断面の $z = 0 \sim 20\text{ cm}$ の間を横方向には 1 cm 間隔 (底面では 0.5 cm 間隔)、鉛直方向には $y = 0 \sim 20\text{ mm}$ の間では 2 mm 間隔、 $y = 20 \sim 45\text{ mm}$ の間では 5 mm 間隔、 $y = 45\text{ mm} \sim$ 水面近傍の間では 1 cm 間隔の合計 440 測点の流速測定を行った。

流速測定にはエンドフローX型ホットフィルムプローブ (TSI社製) を用い、得られた出力はデータレコーダ (TEAC製) に記録し、サンプリング周波数 250 Hz で 32 秒間のデータをA/D変換し、Melcom 70/35型ミニコンピュータとFacom M-170F大型計算機を用いて統計処理を行った。

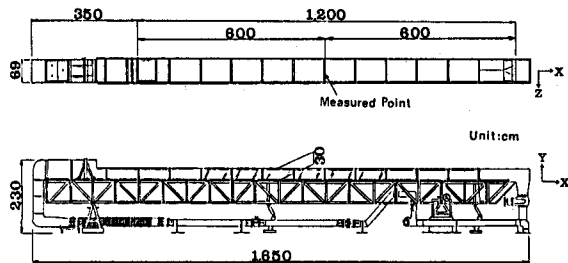


図-1 実験装置図

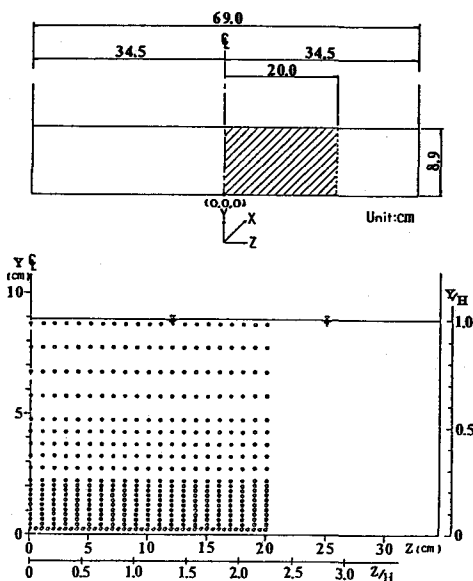


図-2 計測ポイント図

水深 H : 8.9 cm	断面平均流速 U_m : 18.6 cm/s	$Re = U_m H / \nu$: 11,600	砂粒径 k_s : 2.7 mm
水路幅 B : 69.0 cm	平均底面摩擦速度 U_* : 1.07 cm/s	$Fr = U_m / \sqrt{gH}$: 0.199	$k_s U_* / \nu$: 21.5
B/H : 7.74	エネルギー勾配 S : 1/7,600		H/k_s : 32.9

表-1 実験の水力条件

3. 乱れ変動流速の分離法

各測点における U, V 2成分は次のように分離して考えることができる。

$$\left. \begin{aligned} U &= \bar{U} + \tilde{u} + u' \\ V &= \bar{v} + v' \end{aligned} \right\} \dots\dots (1)$$

ただし、 $\bar{U}$: 底面からの高さを同じくする全測点における U の全測点値の平均、 $\tilde{u}$: 各測点における U の全測点値の $\bar{U}$ からの偏位量、 u' : 乱流変動量、 $\tilde{v}$ 及び v' も定義同様。

式(1)による u' 及び v' の分離方法として次の2つの方法が考えられる。

3.1 時間平均法

各測点における流速 U を単に時間平均することにより平均流速を求めてこれを $\bar{U} + \tilde{u}$ の値と考え、 U の瞬間値の $\bar{U} + \tilde{u}$ からの偏差を u' と考える ($\tilde{v}, v'$ についても同様) 方法である。図-3 (a) は水路中央部の底面近傍において測定された流速変動の時間記録である。この方法は定常な2次元流れにおける乱れの定義に広く用いられているものであるが、流れの蛇行性や縦渦などのような不規則性のある3次元的な流れにおいては、組織的な非定常性をもみかけ上の乱れとして取り扱うことになるという欠点がある。

3.2 組織成分分離法

この方法は3.1の手法で用いた時間平均値 $\bar{U} + \tilde{u}$ に有限項で打ち切ったフーリエ級数をあてはめる方法を用いて組織成分と乱れ成分を分離するものである。ところで、フーリエ級数をあてはめる場合に harmonics 数を何項で打ち切れれば合理的であるかということが問題となるが、今回は打ち切り項数 h を色々にかえ、各 h の値に対する u' の自己相関係数を求め、この自己相関係数が $h = 4$ 以降はほとんど変化がないことを確認した上で $h = 4$ をもって最適項数と定めた。計算に使用した

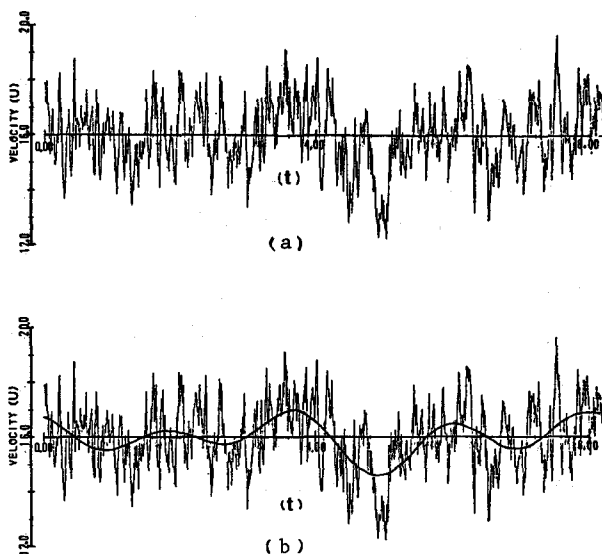


図-3 流速変動記録

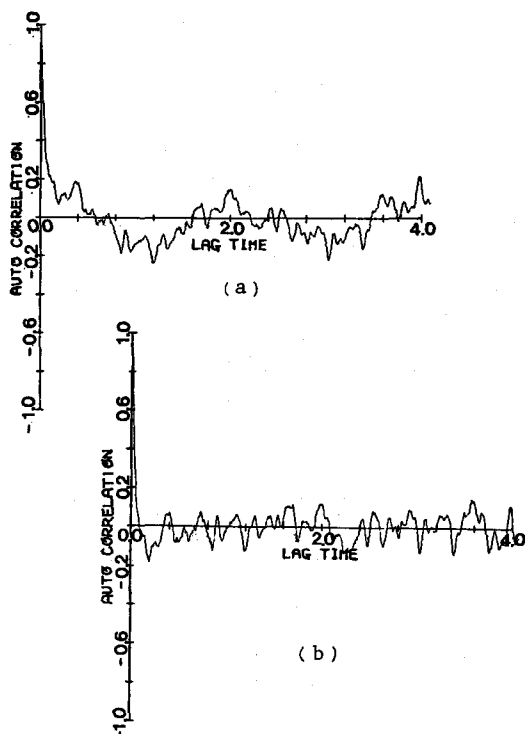


図-4 u' の自己相関係数

式は次の通りである。

$$\left. \begin{aligned} \hat{U}_i &= \bar{U} + \tilde{u} + \sum_{s=1}^h \left(\hat{a}_s \cos \frac{2\pi s i}{N} + \hat{b}_s \sin \frac{2\pi s i}{N} \right) \\ \hat{a}_s &= \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \{ U_i - (\bar{U} + \tilde{u}) \} \cos \frac{2\pi s i}{N} \\ \hat{b}_s &= \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \{ U_i - (\bar{U} + \tilde{u}) \} \sin \frac{2\pi s i}{N} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3)$$

ただし、 $\hat{U}_i = U$ の時間平均推定値、 N ：各測点における U の測定データ総数。

図-3(b)は図(a)の流速変動の時間記録の中に本方法により求められた平均流速曲線を重ねて示したものである。

図-4が手法3.1，3.2により計算した自己相関係数の1例であり、まず単なる時間平均法による結果には組織成分の周期と同じ周期変動が見られることがわかる。これは図-3(a)で示したように流速変動の振幅が一定でないために、特定の位相で乱れとみなす偏差が大きくなることに起因すると考えられる。手法3.2による結果には、周期変動がほとんど見られないため、組織成分と乱れ成分とがうまく分離されていると考えられる。

4. 実験結果

4.1 平均流速分布

図-5は流下方向平均流速 $(\bar{U} + \tilde{u})$ の等流速線を示したものである。この値は断面平均流速 $U_m = Q/BH$ で無次元化されている。これによると、 $z/H \approx 0, 0.8, 1.9$ で下に凸、 $z/H \approx 0.6, 1.7$ で上に凸の等流速線が隣接して現われ $z/H \approx 0.75, 1.85$ に速度差の著しい特徴的な等流速線が見られる。このように断面全域にわたり、従来報告されていたような2次元性は損なわれており、顕著な3次元性を有した等流速線が認められる。

図-6は鉛直方向平均流速 $\tilde{v}$ の等流速線を示したもので、この図において白い部分は上昇流($\tilde{v} > 0$)、黒い部分は下降流($\tilde{v} < 0$)を表わしたものであり、

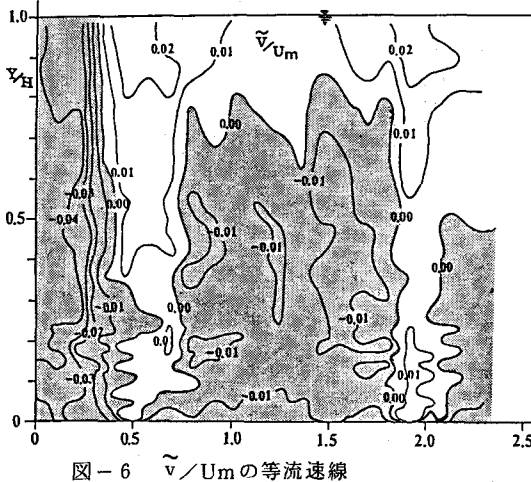


図-6 $\tilde{v}/U_m$ の等流速線

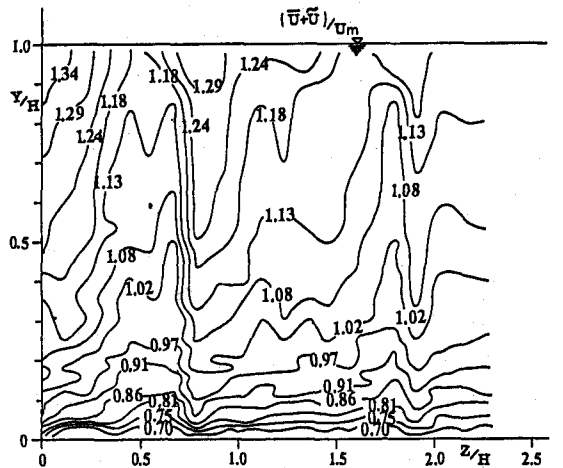


図-5 $(\bar{U} + \tilde{u})/U_m$ の等流速線

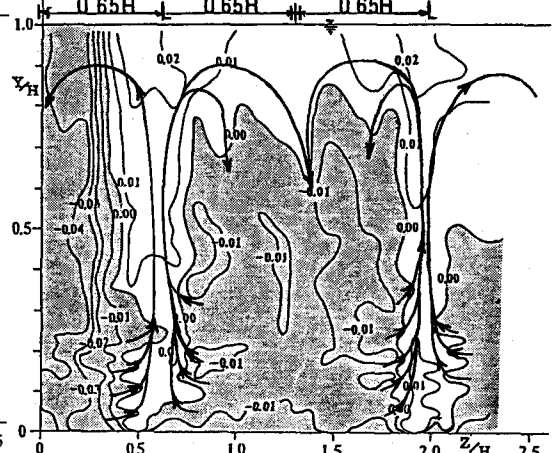


図-7 縦渦の推定図

$0 \leq z/H \leq 0.5$, $0.8 \leq z/H \leq 1.8$ で下降流, $0.5 \leq z/H \leq 0.8$, $1.8 \leq z/H \leq 2.1$ で上昇流が見られる。

この鉛直方向流速の絶対値は $z/H \approx 0$ 付近で U_m の 1~5% の最大値を示し, 他所はほぼ同程度で U_m の 1~2% の値を示している。しかし, 水路中央部を除けば上昇流の幅は下降流の幅より狭く, 全体として $\tilde{v}$ の収支は 0 となり, 急激な上昇域と緩やかで幅の広い下降域という特徴が認められる。

また, $y/H \leq 0.25$ において水平方向に触手を伸ばしたような興味深い流速線がみられ, $y/H > 0.25$ では比較的スムーズな流速線が示されている。通常 $y/H < 0.15 \sim 0.2$ が壁領域と考えられているがこの図からは $y/H = 0.25$ を境界面として壁領域と外部領域の 2 つに区分した方が妥当であるように思われる。

このように, 流下方向流速の高速域で下降流 ($z/H \approx 0, 1.3$), 低速域で上昇流 ($z/H \approx 0.65, 1.95$) という縦渦の基本的な特徴が底面から水面近傍まではっきりと認められることから, 縦渦の推定図は図-7 のように高速域と低速域とが $0.65H$ の距離で等間隔に現われていると考える。

図-8 は $(\bar{U} + \tilde{u})$ と $\tilde{v}$ の横方向分布特性を y/H をパラメータとして示したもので, $(\bar{U} + \tilde{u})$ は横方向に正弦波ではなく, のこぎり歯状の波状を呈しており, $\tilde{v}$ はそれほど特徴的ではないが $(\bar{U} + \tilde{u})$ とはほぼ逆位相の波状形状を示し, 両方とも深さ方向には形状はほとんど変化していない。また, $(\bar{U} + \tilde{u})$ の変動巾は各深さにおいていずれも U_m の 20% 程度にも達する大きな値を示しているが, $(\bar{U} + \tilde{u})$, $\tilde{v}$ ともにその値は $z/H \leq 0.5$ と $z/H \geq 0.5$ とでは顕著な相違がみられ, 不規則な縦渦の存在が示唆されている。

図-9 の(a)は $(\bar{U} + \tilde{u})$, (b)は $\tilde{v}$ の鉛直方向分布を示したものであり, 高速域の流速を $\blacktriangle$, 低速域の流速を $\triangle$, 各高さにおける断面平均値を $\bigcirc$ 印でそれぞれ表示している。

同図(a)からは高速域と低速域の $(\bar{U} + \tilde{u})$ の変動範囲がわかるが, その変動巾は $y/H \approx 0.5$ で U_m の約 25%, $y/H \approx 0.25$ で約 10%, それ以外では U_m の 15~20% 程度であり, 変動巾の最大値は半水深で現われ, 最小値は $y/H \approx 0.25$ 付近において現われている。

(b)は高速域と低速域の $\tilde{v}$ の変動範囲を示しているが, その変動巾は底面近傍で最大値をとり, 次に $y/H \approx 0.5$ なる半水深において大きな値を示し, y/H

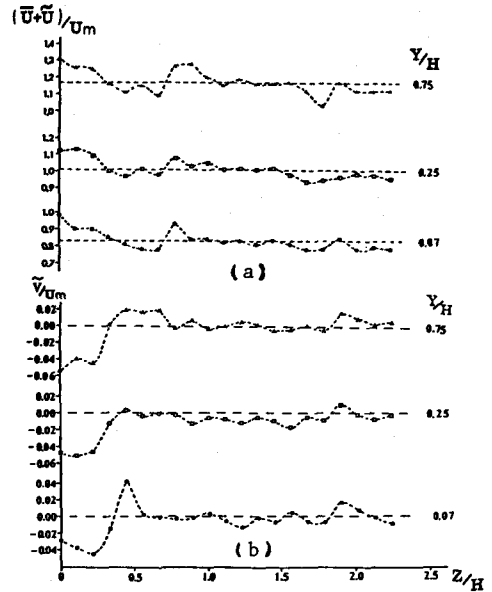


図-8 $(\bar{U} + \tilde{u})/U_m, \tilde{v}/U_m$ の横方向分布

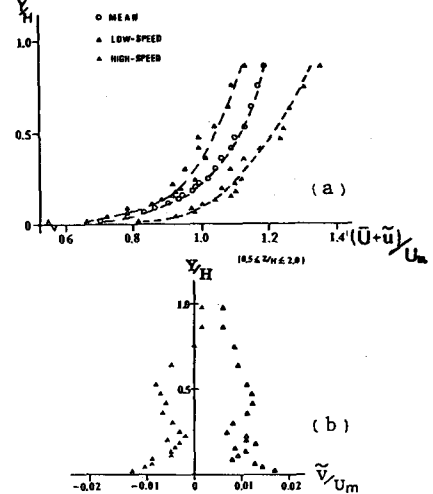


図-9 $(\bar{U} + \tilde{u})/U_m, \tilde{v}/U_m$ の鉛直方向分布

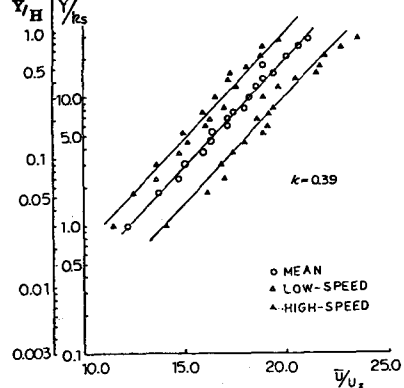


図-10 $(\bar{U} + \tilde{u})/U_m$ の片対数目盛表示

$H \approx 0.25$ で最小値を示している。また $\tilde{v}$ の絶対値は 1 対の縦渦の存在範囲に当る $0.5 \leq z/H \leq 2.0$ の範囲について考えてみると、高速域より低速域の方が全体的に 2 倍程度の大きさを示しており、底面から離れる流れが底面向きの流れより活発に起こっていることがわかる。しかし水路中央部における特性は、これとは異なった現象が生じていることから、水路中央部 ($0 \leq z/H \leq 0.7$) とそれ以外とは特性の異なった縦渦が存在するように思われる。この原因については、今後さらに検討する必要がある。

図-10 は図-9(a) を片対数目盛で図示したものであり、 $y/H \approx 0.5$ の部分を除いては全体的にはいずれも $K = 0.39$ の対数則で表わされることが認められる。

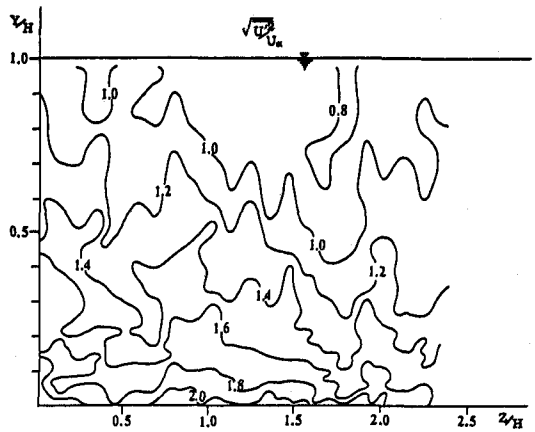


図-11 $\sqrt{u'^2}/U_*$ の等強度線

4.2 乱れ強度分布

流下方向の乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$ の等強度線を図-11 に、鉛直方向の乱れ強度 $\sqrt{v'^2}$ の等強度線を図-12 に示す。これらの値はいずれも摩擦速度 $U_* = \sqrt{gHS}$ で無次元化されている。

いずれの分布も、等流速線の密な部分で乱れ強度は大きな値を示し側壁に近づくにつれ減少するといった同じ傾向を示している。また高速域つまり縦渦の下降流部では乱れが小さく、低速域つまり上昇流部では乱れが大きといった傾向が見られるが、注意深く見れば上昇流部の中心より、上昇流部と下降流部の境界において、上に凸を示すといった特徴的な分布が見られ

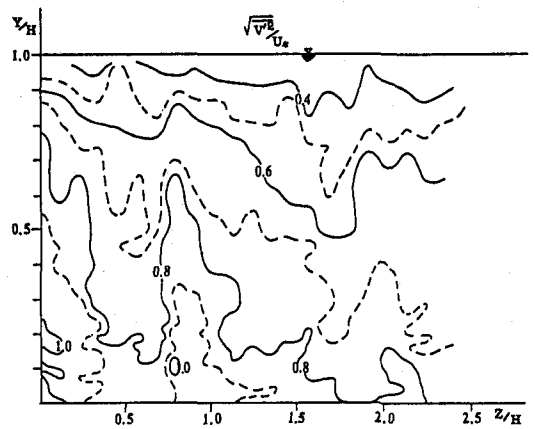


図-12 $\sqrt{v'^2}/U_*$ の等強度線

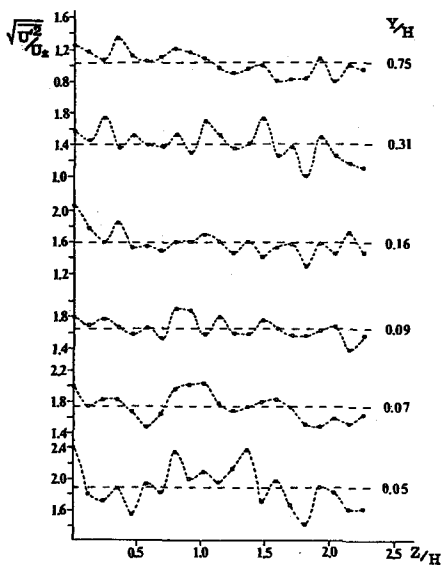


図-13 $\sqrt{u'^2}/U_*$ の横方向分布

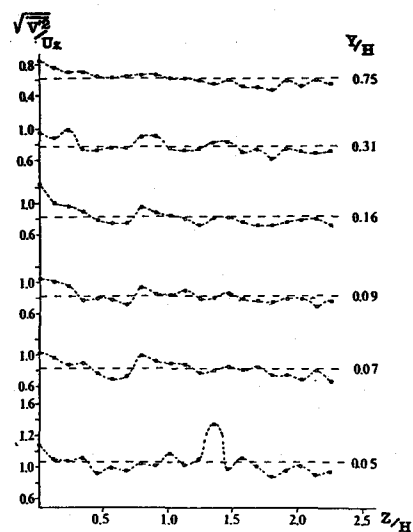


図-14 $\sqrt{v'^2}/U_*$ の横方向分布

る。流下方向の乱れ強度は鉛直方向の乱れ強度の2倍 γ_H 程度の値を示している。

図-13、図-14は $\sqrt{u'^2}$ 、 $\sqrt{v'^2}$ の横方向分布特性を γ_H をパラメータとして示したもので、平均流速分布にみられた波状を呈した分布形状が $\sqrt{u'^2}$ では顕著に現われているが $\sqrt{v'^2}$ の分布には $\sqrt{u'^2}$ ほどはっきりした波状分布は現われていない。また、変動の振幅は $\sqrt{u'^2}$ の方が大きく、深さ方向にはその形状はほとんど変化していない。

4.3 レイノルズ応力

図-15はレイノルズ応力の等値線を示したもので黒い部分は $\bar{v} < 0$ の領域を参考のために重ね合わせて示したものである。乱れ強度分布と同じく上昇流部の中心より上昇流部と下降流部の境界において上に凸の分布を示す。また底面付近に縦渦の間隔とはほぼ一致する凹凸の分布形状がみられる。上方のレイノルズ応力は小さく、縦渦の構造を形成する顕著な特性は見られないことから、壁面付近からの乱れが上方の大規模渦構造に影響を与えていると思われる。

図-16は $-\bar{u}'v'$ の横方向分布特性を示し、乱れ強度分布と同様に顕著な波状分布を呈している。変動の振幅は壁面近傍で大きく、壁面から離れるにつれて振幅は小さくなっている。このことから縦渦を形成する原因は壁面近傍における乱れの寄与によるものと推定される。

図-17は $-\bar{u}'v'$ の鉛直方向分布特性を示したものであり、▲印は高速域（下降流部）のレイノルズ応力 △印は低速域（上昇流部）のレイノルズ応力、また○印は各高さにおける断面平均値をそれぞれ示している。断面平均値の鉛直方向分布の形状は、縦渦が存在しない場合の2次元乱流と同様の直線分布をほぼ表わしているが、高速域、低速域の分布形状は壁面から半水深の間で、この直線分布からは大きくはずれたくびれをもつ特徴的な分布形となっている。

このように縦渦が存在する場合には $-\bar{u}'v'$ の分布は直線分布から大きくはずれた形を示すことがわかる。

5. 縦渦の可視化

写真-1は厚さ1mm、幅40cmのスリットから比重1.004のミルクをトレーサーとして底面より一様に放出し、上方より35mmのモータドライブ付カメラを用

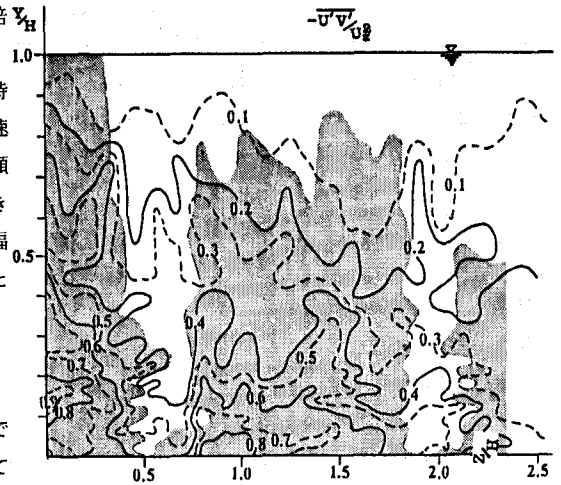


図-15 $-\bar{u}'v'/U_*^2$ の等値線

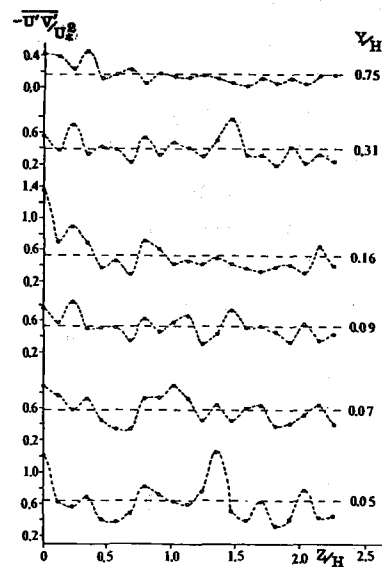


図-16 $-\bar{u}'v'/U_*^2$ の横方向分布

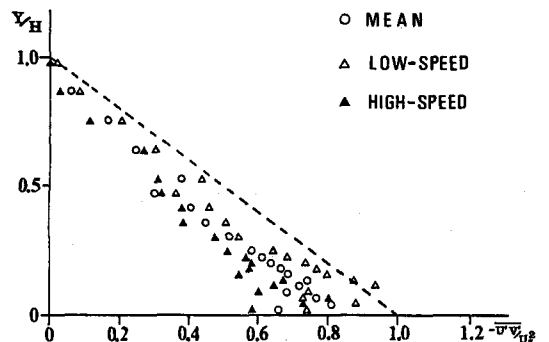


図-17 $-\bar{u}'v'/U_*^2$ の鉛直方向分布

いて水路中央部の可視化を行ったものである。写真の
実寸は左右 35 cm の大きさで計測断面と等しい箇所
のものである。放出した直後には乱れの微細な構造が
みられ、それが発達しながら上昇し、大規模な渦構造に
成長していく様子がみられる。

写真-2 はトレーサーの放出口から 1 m 下流での渦
構造の様子である。このように明瞭な縦渦模様がみら
れる。この渦間隔はホットフィルムプローブを用いた
乱流計測から得られた結果とほぼ等しい $1.3 H$ の値が
得られた。

しかし、写真-1 では瞬間的な乱れを表わしている
と思えるが、写真-2 に表わされている渦構造は平均
値的な流れの乱れ構造を表わしているものと考えられ
る。

6. 結 論

(1) 一様砂粒粗面においても従来から言われるような
縦渦構造が存在することが乱流計測及び可視化実験に
より確かめられた。(2) 縦渦の間隔は外部領域の厚さ
の 2 倍程度と考えられる。実験の結果、外部領域の厚
さは 2 次元一様剪断乱流の場合の $0.85 H \sim 0.80 H$ と
は多少異なり、 $0.75 H$ 程度であると考えられる。(3) 2
次流の流速成分 $\tilde{u}$ 及び $\tilde{v}$ は、安定理論から予想され
るような横方向に正弦的に変化するものではなく、横方
向にのこぎり歯状の非線形性の強い分布形状を示す。
また実験の結果、各一對の縦渦は一方が卓越し一方が
圧迫された非対称な形状をもつものになっていると考
えられる。

本研究の遂行に当っては文部省科学研究費特定研究
「複雑乱流の実験」(研究代表者 東京工業大学 日
野幹雄教授)の補助をうけた。記して謝意を表す。また有益な討議、助言をよせられた中央大学服部昌太
郎教授及び協力をいただいた中央大学青野利夫氏、(株)千代田コンサルタント武安真児氏、(株)八千代エンジニ
アリング朱雀和彦氏に深甚なる謝意を表す。

<参考文献>

- 1) Kline, S. J., W. C. Reynolds, et. al. (1967) J. Fluid Mech., Vol. 30, pp. 741 ~ 773.
- 2) 木下良作 (1967), 写真測量, Vol. 6, № 1, pp. 1 ~ 17.
- 3) 黒木幹男・岸 力 (1981), 土木学会論文報告集, № 312, pp. 83 ~ 92.
- 4) 室田 明・福原輝幸 (1980), 第 24 回水理講演会論文集, pp. 301 ~ 306.
- 5) H. Nakagawa, I. Nezu, A. Tominaga (1981), Momoires, Fac. Eng. Kyoto Univ. Vol. 43.
- 6) 中川博次・祢津家久・富永晃宏 (1982), 第 26 回水理講演会論文集, pp. 469 ~ 474.

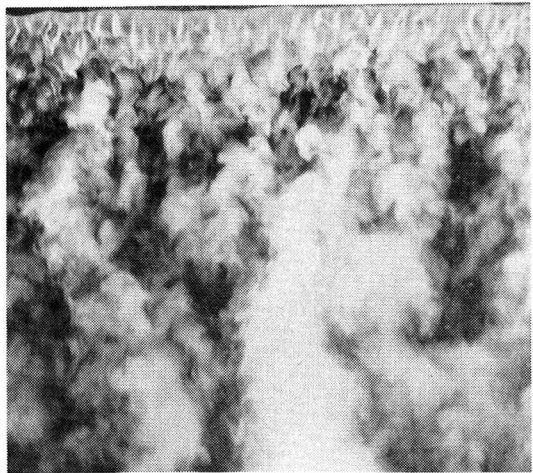


写真-1 放出口付近の乱れの微細構造
(流れは上方から下方へ, $U_m = 18.6 \text{ cm/s}$)

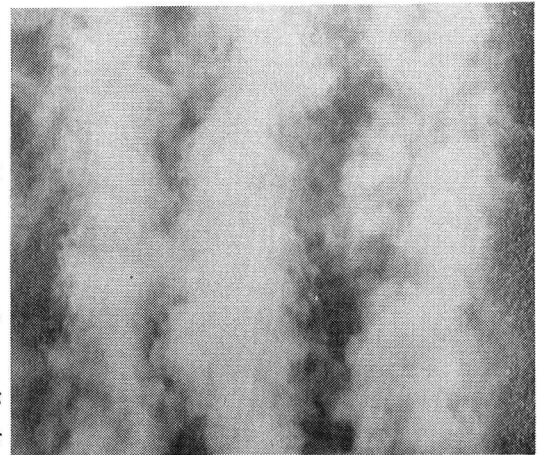


写真-2 放出口から 1 m 下流の縦渦構造
(流れは上方から下方へ, $U_m = 18.6 \text{ cm/s}$)