

京都大学防災研究所 正員 石垣 泰輔  
 京都大学防災研究所 正員 今本 博健  
 京都大学大学院 学生員 木下 聖司

一様開水路における流れの三次元性は、乱れの発生機構に関連したバースティング現象により誘起された縦渦に起因するものと、*Nikuradse*<sup>1)</sup>をはじめ多くの研究者の実験より知られている隅角部に生じる縦渦が起因するものがあるが、これらの縦渦の形成機構および相互干渉についてはいずれも不明の点が多く残されている。本報告は、これら2種の縦渦が強く干渉し合うと考えられる水路幅・水深比の小さな水路を対象とし、縦渦のスケール、安定性、配列等について実験的検討を行ったものであって、水素気泡法を用いた壁面せん断力分布の計測<sup>2)</sup>、カメラ撮影による路床近傍の縦渦の可視化およびレーザードップラー流速計を用いた速度ベクトルの計測<sup>3)</sup>を行った。なお、水理条件は表-1に示すようである。

1. 壁面せん断力分布特性 : 縦渦の存在は、等速度線の歪みあるいは壁面せん断力分布の非一様性より類推されるが、時間的にも空間的にも変動するため瞬時的に流れの挙動を把握する必要がある。そこで、本報告では、リニア底層内の瞬間速度分布を水素気泡法により計測し、その結果より壁面せん断力分布を把握する方法を用いた。写真-1は、水路幅・水深比  $B/H=3$  の場合におけるタイムラインの撮影例を示すにものである。これより、側壁、路床のいずれにおいても高速部と低速部が交互に配列されており、側壁のパターンは水路幅・水深比によらずほぼ同様であるが、路床では水路幅・水深比の増加に伴って高速部、低速部の個数が増加する<sup>2)</sup>。図-1は、撮影されたタイムライン間隔より得られた壁面せん断力の平均値(実線)とその変動成分で(破線)を示すにものであって、速度の鉛直分布を直線的と仮定している。なお、 $\tau$ および $\tau_0$ は平均壁面せん断力で ( $=\rho g R I_e$ ,  $\rho$ : 密度,  $g$ : 重力加速度,  $R$ : 径深,  $I_e$ : エネルギー勾配) で無次元化している。図より、 $\tau$ および $\tau_0$ は波状分布を示しており、 $\tau$ は $\tau_0$ の0.8~1.5倍程度、 $\tau_0$ は $\tau_0$ の0.5倍程度と $\tau$ 、 $\tau_0$ という。

$\tau$ 分布の極小部および極大部が、それぞれ、壁面から離れる流れおよび壁面に向う流れの存在位置に相当することと、隅角凹部には一般に凹部に向う流れが存在することを考慮すれば、図中に矢印で示すように流体の動きが推定される。隅角部での推定結果は *Nikuradse*<sup>1)</sup> による推定結果とはほぼ一致している。

2. 縦渦配列の検討 : 路床における $\tau$ 分布の極小部は縦渦の上昇部に相当するため、その発生個数より縦渦の配列が類推される。図-2は、各水路幅・水深比で撮影された写真を発生個数で分類し、その度数を示すにものである。図より、 $B/H=1$ と3の場合は発生個数が一定値、1および4と見はせるが、他のCaseでは発生個数がかたがり変化している。これより、 $B/H=1$ および3の

表-1 水理条件表

| Case | $I_e$  | $Q(l/s)$ | $B(cm)$ | $H(cm)$ | $T(^{\circ}C)$ | $Re$ | $Fr$ |
|------|--------|----------|---------|---------|----------------|------|------|
| 1    | 1/2089 | 0.058    | 2.08    | 2.01    | 17.30          | 884  | 0.54 |
| 2    | 1/1244 | 0.100    | 3.07    | 1.96    | 17.30          | 1331 | 0.57 |
| 3    | 1/1431 | 0.124    | 4.06    | 2.01    | 17.22          | 1425 | 0.48 |
| 4    | 1/1923 | 0.132    | 5.05    | 1.99    | 16.95          | 1347 | 0.47 |
| 5    | 1/1575 | 0.130    | 6.03    | 2.00    | 16.20          | 1172 | 0.31 |
| 6    | 1/3871 | 1.337    | 15.0    | 4.86    | 14.61          | 4690 | 0.34 |
| 7    | 1/1304 | 1.606    | 15.0    | 5.00    | 14.41          | 5280 | 0.40 |

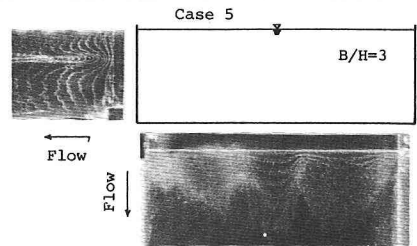


写真-1 タイムラインの撮影例

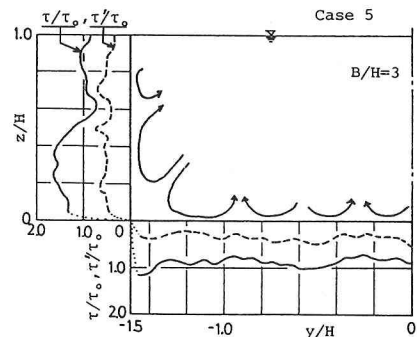


図-1 壁面せん断力 $\tau$ および変動成分 $\tau_0$ の分布

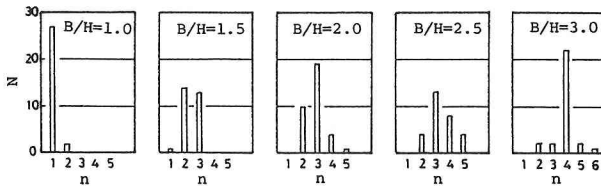


図-2 縦渦の上昇部の発生個数(n)の頻度分布(N)

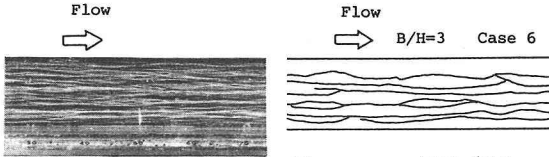


図-4 路床近傍の縦筋のカメロン撮影結果

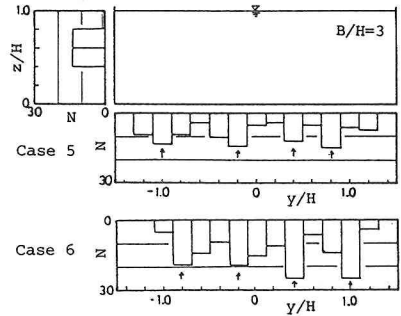


図-3 縦渦の上昇部の発生位置の頻度分布 (Case 5) および縦筋の発生位置の頻度分布 (Case 6)

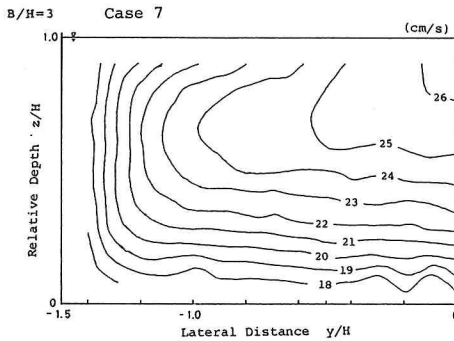


図-5 等速度線図

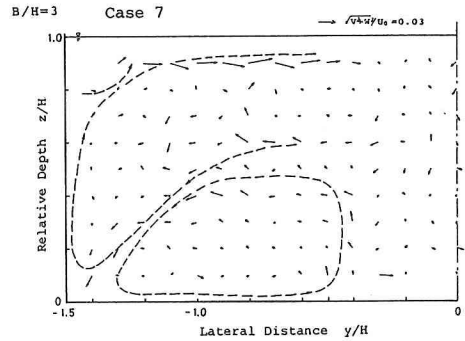


図-6 速度ベクトル図

Case 7では、渦の発生・消滅が生じ、渦は不安定であると推定される。

つぎに、縦渦が安定して存在する  $B/H = 3$  の場合について検討する。縦渦の上昇部の発生位置の頻度分布を示すと図-3のようになる。隅角部の側壁では相対水深  $z/H = 0.6$  程度、路床では隅角部より  $0.5 \sim 0.6H$  程度の位置に縦渦の上昇部が存在する。一方、水路中央部でも発生位置が比較的安定しており、その間隔は水深の  $0.6$  倍程度であって、広幅水路で見られる縦渦のスケールに比べてやや小さいものになっている。

以上の結果は、水路幅  $2 \sim 6 \text{ cm}$ 、長さ  $2 \text{ m}$  の小型水路を用いたものである。そこで、実験結果の妥当性を確認するために、表-1に示した Case 6, 7 の実験を、水路幅  $40 \text{ cm}$ 、長さ  $8 \text{ m}$  および  $13 \text{ m}$  の水路で行った。図-4は、平均粒径  $0.011 \text{ mm}$ 、比重  $1.45$  の塩化ビニル粒子をトレーサに用い、カメロン撮影により路床の縦筋を撮影した写真と、縦筋を実体視して図化した結果である。図より、縦筋は流下方向に連なり左右にゆらいでいる。また、縦筋の分岐・合体が見られる。これより、縦渦の発生位置の頻度分布を整理したものが図-3の下段 (Case 6) である。高頻度を示す位置・個数・間隔等は分布での結果とはほぼ同様であり、前述の結果の妥当性がわかる。

図-5は、レーザー・ドップラー流速計を用い、 $5 \text{ mm}$  間隔の格子点上での速度の  $u$  成分、 $v$ 、 $w$  の計測結果より、主流方向平均速度  $U$  の等速度線を示したものである。また、図-6は速度の横断方向成分  $V$  および鉛直方向成分  $W$  より得られる速度ベクトルを図示したものである。これらの図より、自由水面付近での側壁より水路中央へ向う流れ、隅角部内部へ向う流れ等の卓越した流れが認められ、図-6に破線で示すような縦渦の存在が推定される。しかしながら、図-1の結果と比較すると、側壁の自由水面近傍の渦は認められず、隅角部路床側の渦のスケールも異なっている。これは、計測の時間スケールあるいは縦渦の強さの違い等の影響によるものと考えられる。今後は、レイノルズ数および水路幅・水深比の大きい範囲での検討を行う予定である。

参考文献) Nikuradse, J.: Untersuchungen über turbulente Strömungen in nicht kreisförmigen Röhren, Ingenieur-Archiv, Vol. 1, 1930.

1) 今井, 石垣, 村: 可視化法による水路流れの断面形状の検討, 内田, 1983. 2) 今井, 石垣, 村: 水路流れの断面形状の検討, 内田, 1983. 3) 今井, 石垣, 村: 水路流れの断面形状の検討, 内田, 1983.