

開水路流れの壁面せん断力分布と縦渦に関する 実験的検討 (1)

今 本 博 健・石 垣 泰 輔

EXPERIMENTAL STUDY ON THE BOUNDARY SHEAR STRESS DISTRIBUTION AND LONGITUDINAL EDDIES IN OPEN CHANNEL FLOW

By *Hirotake* IMAMOTO and *Taisuke* ISHIGAKI

Synopsis

Open-channel turbulent flows often present three dimensional aspects because of the existence of the longitudinal eddies. The longitudinal eddies can be separated into those of the first kind (originated from the shape of the cross-section) and those of the second kind (related to the bursting phenomenon in the boundary layer).

In this paper the characteristics of the longitudinal eddies in the small width-to-depth ratio channel are investigated using experimental results of the boundary shear stress distribution, sand-ridges visualized by Cameron effect and velocity vectors measured by laser doppler anemometer. Experimental results show that the shape of the cross-section has an effect on the arrangement, stability and scale of the longitudinal eddies.

1. は じ め に

乱流状態の一樣開水路における流れは3次元的な挙動を示し、その主要因として、主流方向に軸をもち横断方向に並列した縦渦あるいは並列せん断流と呼ばれる二次流の存在が挙げられる。これらの縦渦の存在のため、等速度線の歪み・壁面せん断力分布の非一様性・最大流速点の降下現象等が生じる事が古くより知られている。縦渦に関する従来の研究は、Nikuradse¹⁾をはじめとする実験的研究と、Einstein・Li²⁾に端を発する理論的研究に分けられ、近年では渦度方程式を用いた吉川・池田³⁾、林・山田⁴⁾、黒木・岸⁵⁾等の理論的研究、および中川⁶⁾による実験的研究が行われている。また、実河川を対象とした研究が木下⁷⁾により行われ、河床形態との関係が検討されている。しかしながら、縦渦の形成機構および空間構造については不明の点が多く残されている。

本研究は、乱れの発生機構に関連したバースティング現象に誘起される縦渦と、隅角部等の断面形状に起因した縦渦が強く干渉し合う水路幅・水深比の小さな長方形断面水路を対象とし、水素気泡法を用いた壁面せん断力分布の計測、カメロン撮影による床床近傍の縦筋の可視化、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を行い、そこに形成される縦渦の配列・安定性・スケール等について実験的検討を行ったものであって、いくつかの興味ある結果が得られている。

2. 実験装置および方法

2.1 壁面せん断力

従来、開水路流れにおける壁面せん断力は、Shear plate を用いた直接測定法⁸⁾⁹⁾、あるいは Preston

tube¹⁰⁾等を用い、仮定した速度分布より壁面せん断力を算定する間接測定法により計測され、例えば、Ghosh・Roy¹¹⁾によりその分布形が得られている。本研究では、壁面せん断力分布の非一様性より縦渦を推定する方法を用いているが、縦渦は時間的・空間的に変動するため、瞬間的に壁面せん断力分布を計測する必要がある。したがって、水素気泡法により潤辺に沿った瞬間速度分布を計測し、間接的に壁面せん断力分布をとらえる方法を用いた。

実験に用いた水路は、幅 20 cm・深さ 10 cm・長さ 2 m のアクリル樹脂製直線水路であり、水路内に隔壁を設置することにより水路幅・水深比を変化させ、Table 1 (Case 1~5) に示す水理条件のもとで実験を行った。

Table 1 Hydraulic conditions.

Case	I_e	Q (l/s)	B (cm)	H (cm)	T (°C)	R_e	F_r
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	1/1010	0.688	5.00	5.05	13.70	3850	0.67
7	1/1266	0.934	10.00	4.94	14.10	4020	0.38
8	1/3871	1.337	15.00	4.86	14.61	4690	0.34
9	1/670	0.726	5.00	5.00	12.08	3930	0.12
10	1/1485	1.066	10.00	5.01	14.33	4580	0.43
11	1/1304	1.606	15.00	5.00	12.63	5280	0.40

壁面せん断力の間接測定では速度分布を仮定する必要がある。一般に、開水路流れの速度分布は乱流境界層における多層モデル¹²⁾が外部層を除いてほぼそのまま適用されることが多い。すなわち、内部層のリニア底層とバッファ層からなる粘性底層と対数則層とに区別された多層モデルである。本研究では、リニア底層内の速度分布式、 $U/U_f = U_f Z/\nu$ を用いて壁面せん断力を算定した。ここに、 U : 速度、 U_f : 摩擦速度、 Z : 壁面からの鉛直距離、 ν : 動粘性係数である。以下に方法を示す。

側壁および路床において、壁面より約 0.3 mm (本実験では $U_f Z/\nu = 1.6 \sim 2.4$) に設置した直径 0.05 mm の白金線に 0.05~0.09 秒間隔で水素気泡を発生させた。形成されたタイムラインをスライド・プロジェクター (1000 W, タングステン電球) を用いてスリット状の照明を行い、35 mm スチルカメラにより各ケース約 30 枚の撮影を行った (絞り $F = 1.2 \sim 2.0$, 露光時間 $T = 1/125$ 秒)。撮影されたタイムラインの間隔を、白金線自身の後流の影響が及ばない範囲 (白金線直径の 70 倍以上¹³⁾) で、ディジタイザーを用いて測線に沿って 1 mm 毎に読み取り、各点の瞬間速度 U_i を算定した後、壁面に立てた法線上の速度分布を直線的と仮定して壁面せん断力 τ_i を求めた。

$$\tau_i = \mu U_i / d \quad (\mu: \text{粘性係数}, d: \text{壁面からの距離})$$

なお、 d の値は速度 U_i を評価した点での壁面からの距離であり、水素気泡の浮上等の影響により白金線の設置高さとは異なるため、潤辺 S に沿った τ_i の積分値が力のつりあいより得られる値 $\tau_0 \cdot S = \rho g A I_e$ (ここに $\tau_0 = \rho g R I_e$, ρ : 密度, g : 重力加速度, R : 径深, A : 通水断面積, I_e : エネルギー勾配) と一致するように d を決定した。

2.2 縦筋

路床近傍の縦筋の可視化実験は、幅 40 cm・深さ 20 cm・長さ 13 m の直線水路を用いてカメロン撮影 (カメロン効果¹⁴⁾を利用した撮影法)を行った。なお、水路内に隔壁を設置することにより水路幅・水深比を変化させ、Table 1 (Case 6~8) に示す水理条件のもとで実験を行った。観測用トレーサーとして用いた平均粒径 0.05 mm・比重 1.45 の塩化ビニル粒子を路床近傍に注入し、水路上方 1.7 m に 16 cm 間隔で設置

した2台のカメラの撮影時間間隔を0.05秒に設定して撮影を行った（絞り $F=2.8$, 露光時間 $T=1/500$ 秒）。照明には 500 W のヨウ素ランプ2灯を用いた。

2.3 速度ベクトル

速度ベクトルの計測は、2成分用レーザー・ドップラー流速計（15mW He-Ne レーザー）を用い、幅 40 cm・深さ 25 cm・長さ 8 m の壁面ガラス製の直線水路内に隔壁を設置することにより水路幅・水深比を変化させ、Table 1（Case 9～11）に示す水理条件のもとで行った。レーザー流速計は前方散乱型で使用しており、速度の3成分は、レーザー光を側壁に垂直に入射して主流速度成分 u と鉛直速度成分 w を計測し、路床面に垂直に入射して主流速度成分 u と横断速度成分 v を計測する方法を用いた。計測を各ケースとも計測断面の半断面について 5 mm 間隔の格子点上で30秒間行った後、サンプリング周波数 20 Hz で $A-D$ 変換した500個のデータを平均して速度成分を算定している。

3. 壁面せん断力分布

Photo. 1 は、路床近傍および側壁近傍におけるタイムラインの撮影例を水路幅・水深比別に示したものである。まず、路床のタイムラインを見ると、水路幅・水深比 B/H にかかわらず波状を呈し、高速部と低速部が交互に配列されている。また、低速部に着目すると、その発生個数は B/H によって異なり B/H の増加に伴って増加している。一方、側壁におけるタイムラインは、いずれのケースにおいても自由水面側より高速部・低速部・高速部というパターンが認められる。目視観察によると、時間的に全体が鉛直方向にゆ

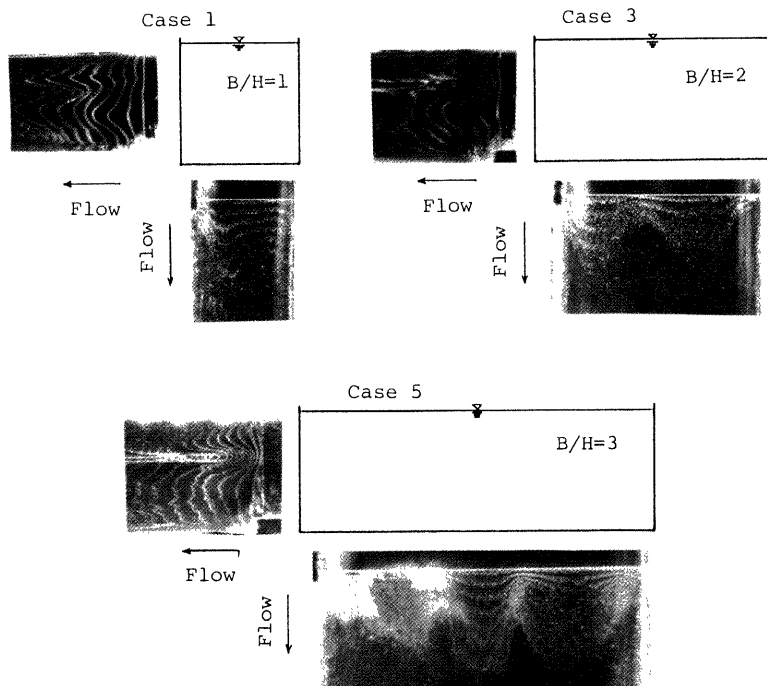


Photo. 1 Example photograph of time-lines near the bed and the side wall.

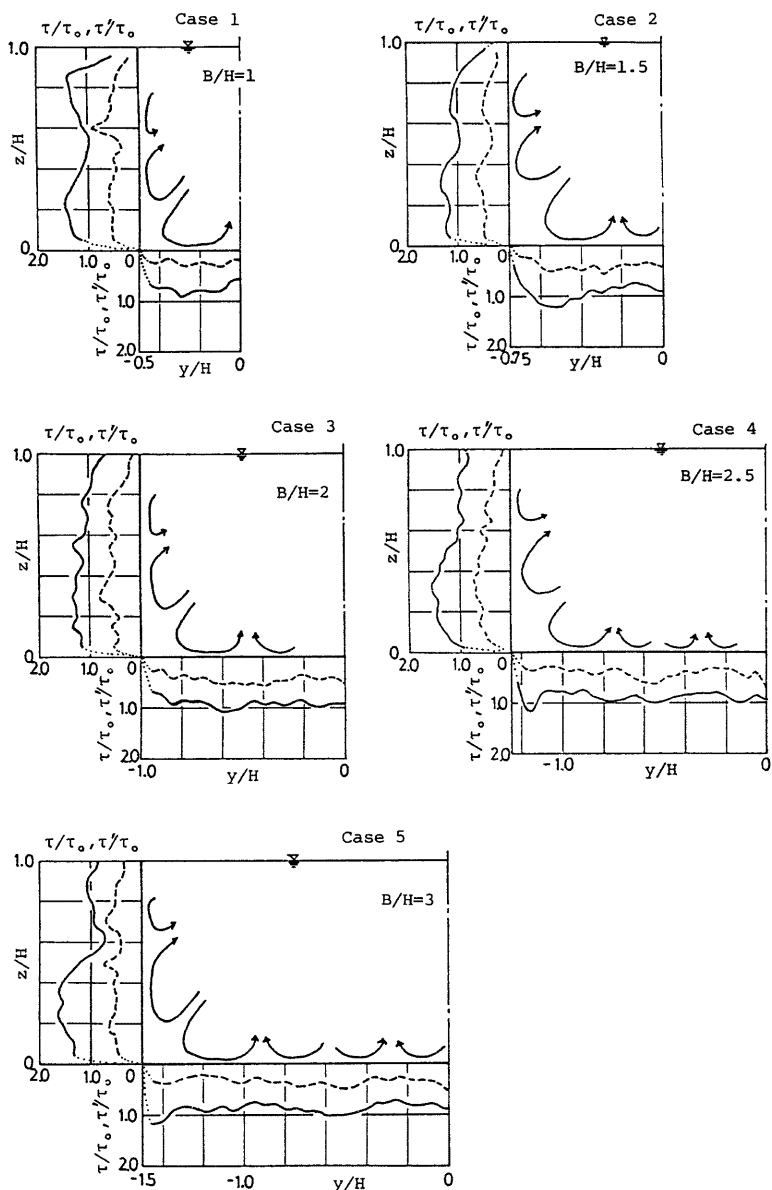


Fig. 1 Distribution of normalized boundary shear stress τ/τ_0 (solid lines) and normalized fluctuation of boundary shear stress τ'/τ_0 (broken lines).

らいてるのが見られた。また、半水深付近の低速部が瞬間的に崩れさり水路中央部へまき込まれるようなバースティングに似た現象が観察された。

Fig. 1 は、ケース毎に約30枚撮影されたタイムラインの間隔より得られた壁面せん断力の平均値 τ (図中の実線) とその変動成分 τ' (図中の破線) の分布を平均壁面せん断力 $\tau_0 (= \rho g R I_0)$ で無次元化して示したものである。図より、水路幅・水深比により τ が一様分布に近い場合と、明確に波状分布を示す場合があることが知れる。Photo. 1 よりいずれのケースにおいても τ 分布が波状となることを考慮すると、一様分布に近い場合の τ の極大部・極小部の発生位置は変動が大きく不安定であり、波状分布を示す場合にはそれらの発生位置の変動が小さく安定していると考えられる。また、ここで得られた分布形を Ghosh・Roy¹¹⁾ の結果と比較すると、滑面水路における結果よりも隅角部近傍に極大値を示す粗面水路での結果に近いが、詳細については今後検討する必要がある。

Fig. 1 に併示した壁面せん断力 τ の変動成分 τ' は、 τ と同様の分布特性を示し、 τ が τ_0 の0.7~1.7倍程度であるのに対し、 τ' は τ_0 の0.5倍程度である。

つぎに、壁面せん断力分布の非一様性より縦渦の推定を試みる。つぎの2点を考慮して断面内の縦渦を推定すると、Fig. 1 に矢印で示すようになる。すなわち、第1点は壁面せん断力分布の極大部および極小部は、路床ではそれぞれ、縦渦の下降部および上昇部に相当し、側壁ではそれぞれ縦渦の接岸部および離岸部に相当すること、第2点は、隅角凹部には一般的に凹部へ向う流れが存在することである。図より、いずれのケースにおいても隅角部付近には路床側に1個、側壁側に2個の縦渦が存在することが知れるが、これは Nikuradse¹⁾ による推定結果とほぼ一致している。

4. 縦渦の配列

4.1 壁面せん断力分布による検討

前述したように、壁面せん断力分布の極大部・極小部の位置は、路床で縦渦の下降部・上昇部に、側壁で縦渦の接岸部・離岸部に相当する。以下、路床における縦渦の上昇部、および側壁における縦渦の離岸部に着目し、縦渦の配列、安定性、スケールについて検討する。

縦渦の配列：Fig. 2 は、路床における縦渦の上昇部および側壁における縦渦の離岸部の発生位置の頻度分布を示したものである。なお、図中の曲線は頻度の移動平均を示す。側壁について見ると、いずれのケースにおいても半水深付近に高頻度の部分が存在し、縦渦の離岸部が半水深付近に存在することが類推される。一方、路床での頻度分布を見ると、水路幅・水深比 $B/H=1, 1.5$ および3の場合には高頻度の部分の存在が明確に認められるが、 $B/H=2$ および2.5の場合では一様な頻度分布に近い。本実験の範囲で見ると、あるスケールを持った縦渦が横断方向に配列される場合、水路幅・水深比、すなわち、断面形状の影響を受けて縦渦の位置が時間的・空間的にゆらぐと考えられる。したがって、縦渦がより不安定な場合には $B/H=2$ あるいは2.5の場合のように一様な分布を示すのであろう。以上の結果と Fig. 1 に示した結果より縦渦の配列については以下のことが言える。すなわち、水路幅・水深比によらず隅角部では側壁側に2個・路床側に1個の縦渦が存在するが、水路中央付近での縦渦の個数は水路幅・水深比の増大とともに増加する。

縦渦の安定性：側壁の縦渦は水路幅・水深比によらず比較的安定しているので、ここでは路床の縦渦の安定性について検討する。縦渦の配列が安定している場合には、縦渦の上昇部の発生個数も一定になるであろう。そこで各ケース約30枚撮影されたタイムラインの写真を、縦渦の上昇部の発生個数毎に分類し、全体に占める割合を示したものが Fig. 3 である。図中の数字 n は発生個数を示し、例えば $B/H=1$ では撮影されたタイムラインの97%は縦渦の上昇部が1ヶ所であることを意味する。図より、 $B/H=1$ および3の場合には発生個数がそれぞれ1および4とほぼ一定であり、縦渦の配列は安定していると言える。一方、 $B/H=1.5, 2$ および2.5の場合には発生個数が一定とならず、縦渦の発生・消滅等が生じ、非常に不安定な状態となっている。

つぎに、横断方向に配列された個々の縦渦の安定性について、縦渦の配列が比較的安定している $B/H=3$

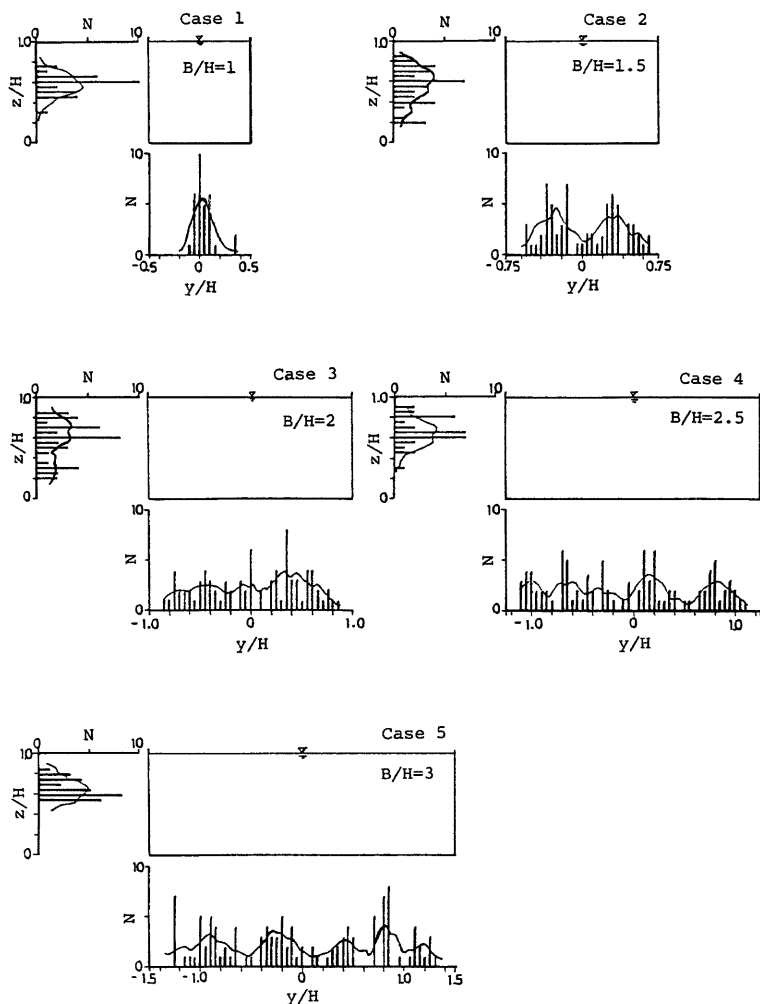


Fig. 2 Lateral and vertical distribution of frequency N of the position where the longitudinal eddies flow apart from the bed or the side wall.

の結果を用いて検討する。このケースでは縦渦の上昇部は4ヶ所存在するが、側壁より n 番目という条件をつけて発生位置の頻度分布を整理すると Fig. 4 のようになる。図より、個々の縦渦の上部は、水路横断方向へのゆらぎは認められるものの、比較的安定した発生位置の存在が分布形より推定される。これより、隣り合う縦渦は相互に干渉し合いある間隔をもって存在していることが類推される。

縦渦のスケール：Fig. 4 と同様の方法で隅角部のコーナーに最も近い縦渦の上部（路床）および縦渦の

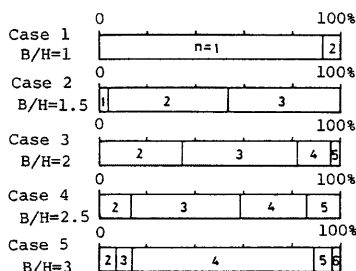


Fig. 3 Number of the positions where the longitudinal eddies flow apart from the bed.

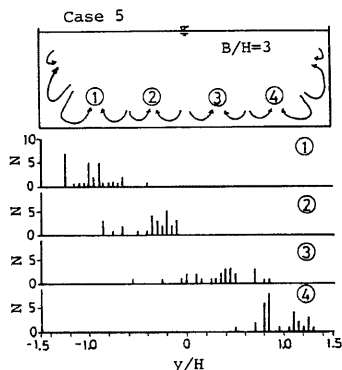


Fig. 4 Lateral distribution of frequency N of the position where the longitudinal eddies flow apart from the bed

離岸部（側壁）に着目し、発生位置を発生頻度で重み付け平均した結果を整理したものが Fig. 5 である。 L_s は側壁の縦渦の離岸部の平均発生位置を示し、 L_b は隅角部路床側に生じた縦渦の上昇部の平均発生位置を示している。図より、 L_s 、 L_b は B/H の増加とともに若干増加する傾向はあるが、その大きさは両者とも水深の 0.5~0.6 倍程度である。一方、路床での縦渦の上昇部の間隔は、 $B/H=3$ の場合には水深の 0.6 倍程度であり、広幅水路で見られる縦渦のスケールに比してやや小さいものとなっている。

4.2 路床近傍の縦筋による検討

壁面せん断力分布より推定された縦渦のスケールが、対象とした水理条件では内部変数 ν/U_f で規定されるバースティングの横断方向間隔と同程度のスケールとなり、支配スケールが不明確となっている。したがって、4.1 で示した結果の妥当性を確認するとともに、縦渦の空間的な挙動を推定するため、カメロン効果を利用して得られる路床近傍の瞬間速度の平面分布より縦筋の挙動について検討した。

Photo. 2 は、塩化ビニル粒子を路床近傍に注入し、カメロン撮影をした例を示したものであり、これらの 2 枚 1 組の写真を実体視すると、低速部と高速部が横断方向に交互に見られ、横断方向にゆらいでいるが縦断方向に連なっているのが観察される。この低速部を連ねた線を図化したものが Fig. 6 であり縦筋に相当する。縦筋が縦渦の上昇部に相当することを考慮すれば、図より、縦渦は流下方向に連なり左右にゆらぐとともに、縦渦の分裂・合体が生じていることが推定される。

Fig. 7 は、Fig. 6 で示した縦筋の発生位置の頻度分布を示したものである。これを Fig. 2 の結果と比較すると、高頻度を示す位置・個数・間隔等ほぼ同様であり、4.1 での結果の妥当性がうかがえる。

4.3 速度ベクトルによる検討

4.1 および 4.2 では壁面近傍での実験結果に基づいて縦渦の検討を行ったが、ここでは流れの内部での縦

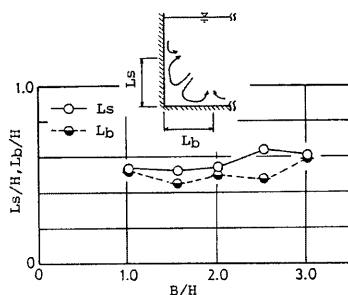


Fig. 5 Scale of the longitudinal eddies near the corner.

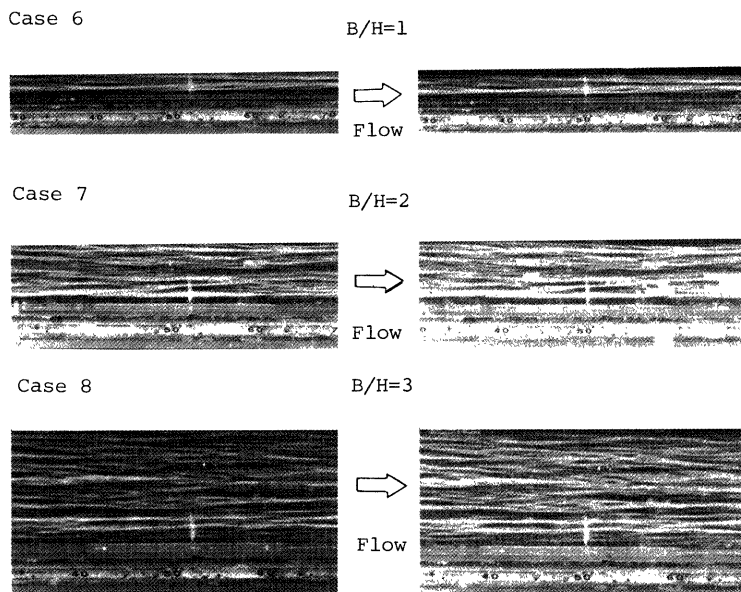


Photo. 2 Example photograph of sand-ridges using Cameron effect.

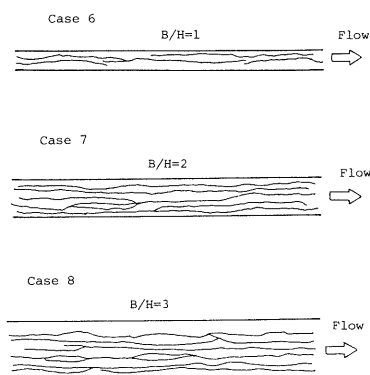


Fig. 6 Sketch of sand-ridges on the bed.

渦の挙動を検討することを目的として速度ベクトルの計測をレーザー・ドップラー流速計を用いて行った結果を示す。

Fig. 8 は、主流速度成分 U の等速度線図を示したものである。いずれのケースにおいても等速度線は路床面あるいは側壁面に平行ではなく波状を呈している。また、水路幅・水深比 $B/H=1$ と 2 のケースでは最大流速点の降下現象が見られる。等速度線の凹凸より流れの中央部から隅角凹部へ向う流れおよび自由表面付近で側壁より水路中央へ向う流れが推定される。つぎに、横断速度成分 V および鉛直速度成分 W より得られる速度ベクトルを Fig. 9 に示す。図より、等速度線から推定されるのと同様の卓越した流れが認められ、図中に破線で示すような縦渦の存在が推定される。この結果と Fig. 1 で示した壁面せん断力分布より推定される縦渦配列と比較する

と、Fig. 9 では側壁の自由表面近傍の渦の存在が不明確であるとともに、隅角部路床側の渦のスケールも異なっている。また、隅角部側壁側の縦渦が自由表面付近で不明確となり、水路中央部路床での縦渦の存在も認められない。これは、縦渦の時間的・空間的な変動および縦渦の強さの違い等が計測の時間スケールの効果により平均化されてしまい、縦渦の存在を不明確なものにしていると考えられる。したがって、縦渦を検討する場合には計測の時間スケールを考慮する必要があると考えられる。

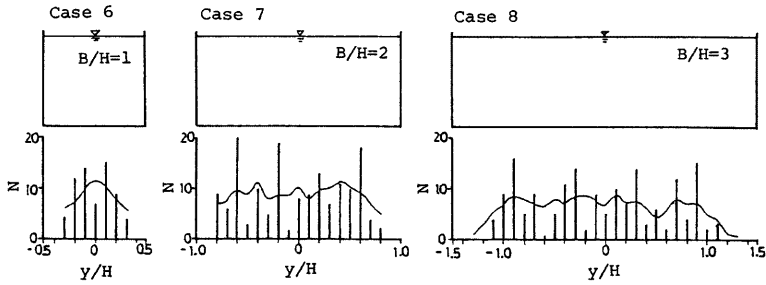


Fig. 7 Lateral distribution of frequency N of the position of the sand-ridges.

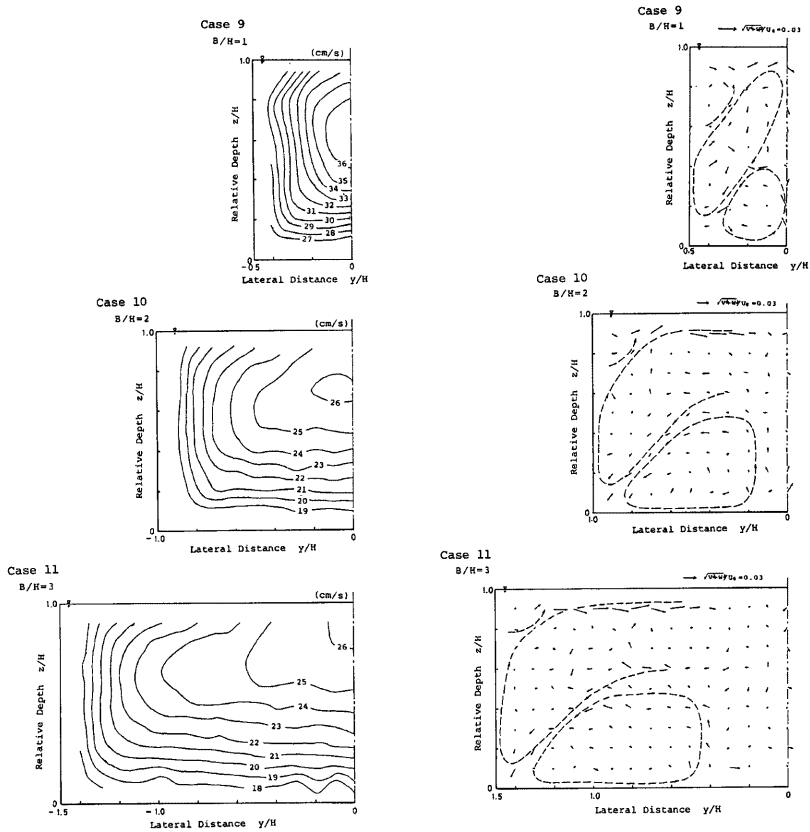


Fig. 8 Iso-velocity lines of longitudinal mean velocity in the cross-section.

Fig. 9 Distribution of mean velocity of lateral and vertical components in the cross-section.

5. お わ り に

本研究は、開水路流れの3次元性の主要因である縦渦について、隅角凹部に生ずる縦渦の影響が強い水路幅・水深比の小さな長方形断面水路を対象に、その配列・安定性・スケール等について実験的検討を行ったものであるが、得られた成果を要約して列挙すると次のようである。

1) 水素気泡法を用いた壁面せん断力の計測により、瞬間的な分布が得られ、その分布の非一様性より縦渦の配列等の推定が可能である。

2) 上記の方法により推定された縦渦の配列より、隅角部には側壁側に2個と路床側に1個の比較的安定した縦渦が、水路幅・水深比によらず存在することが認められた。また、この結果は Nikuradse¹⁾ により推定されたものとほぼ一致している。

3) 縦渦の配列は断面形状の影響を受け、配列が安定している場合の平均壁面せん断力分布は明確な波状形を呈するが、配列が不安定な場合には一様な分布に近いものになる。

4) 水路幅・水深比が小さな範囲（本実験では $B/H \leq 3$ ）では、壁面せん断力分布による検討の結果算定される隅角部付近の縦渦のスケールは、水深の0.5~0.6倍程度となり、水路幅・水深比によりあまり変化しない。また、水路中央部での縦渦の上昇部の間隔は、 $B/H=3$ の場合、水深の0.6倍程度であり広幅水路で見られる縦渦のスケールに比してやや小さいものとなっている。

5) 以上の結果は、路床近傍の縦筋の可視化結果により妥当性が確認された。また、縦渦は横断方向にゆらいではいるが縦断方向に連っており、局所的には分裂・合体等の現象が類推される。

6) 2成分用レーザー・ドップラー流速計による速度ベクトルの計測結果より、2つの卓越した流れが認められた。すなわち、水路中央から隅角凹部へ向う流れと自由表面における側壁より水路中央へ向う流れである。

7) 速度ベクトルより推定される縦渦と壁面せん断力より推定される縦渦とは、その個数、スケール等が異なる。これは、速度計測のようにある評価時間内の平均値をとる場合には、計測スケールの効果により時間的・空間的に変動する縦渦の挙動をとらえるのが困難となるためと考えられる。したがって、縦渦の検討を行う場合には計測スケールの考慮が必要である。

なお、本研究では水路幅・水深比の小さな範囲での結果を示したが、今後は、水路幅・水深比の大きな場合および高レイノルズ数の場合について研究を進めて行く予定である。

最後に、本研究の遂行にあたり実験ならびにデータ解析に協力された吉村庄平氏（現大阪府）および京都大学大学院生、木下聖司氏および福井淳太氏に対し深堪なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Nikuradse, J.: Untersuchungen über turbulente Strömungen in nicht kreisförmigen Rohren, Ingenieur-Archiv, Vol. 1, 1930.
- 2) Einstein, H. A. and Li, H.: Secondary currents in straight channels, Trans. American Geophysical Union, Vol. 39, No. 6, 1958, pp. 1085~1088.
- 3) 吉川秀夫・池田駿介：正方形断面を持つ直線水路の速度分布に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，No. 250, 1976, pp. 63~71.
- 4) 林 泰造・山田 正：開水路における縦渦の形成に関する研究，第21回水理講演会論文集，1977, pp. 245~253.
- 5) 黒木幹男・岸 力：開水路に発生する縦渦の構造の研究，土木学会論文報告集，312号，1981, pp. 83~92.
- 6) 中川博次・称津家久・富永見宏：開水路流れにおける横断方向の渦構造と大規模乱流，土木学会論文報告集，312号，1981, pp. 93~105.
- 7) 木下良作：航空写真による洪水流の解析，写真測量，Vol. 106, No. 1, 1967, pp. 1~17.

- 8) 余越正一郎・角屋 睦：Wall Shear の直接測定—緩こう配流れに関する研究(2)，京都大学防災研究所年報，第 7 号，1964，pp. 311～314.
- 9) 勝井秀博・花村哲也・田村滋美：開水路における底面摩擦の直接測定について，第32回 土木学会年次学術講演会講演概要集，1977，pp. 382～383.
- 10) Preston, J. H.: The determination of turbulent skin friction by means of Pitot Tubes, Journal, Royal Aeronautical Society, Vol. 58, 1954.
- 11) Ghosh, S. N. and Roy, N.: Boundary shear distribution in open channel flow, Journal of the Hydraulics Division, Proc. ASCE, Vol. 96, No. HY 4, 1970, pp. 967～994.
- 12) Bradshaw, P.: Turbulence, Springer-Verlag, 1976.
- 13) 浅沼 強編：流れの可視化ハンドブック，朝倉書店，1977，pp. 274～275.
- 14) Cameron, H. L.: Measurement of water current velocities by Parallax Method, Photogrammetric Engineering 18, 1952.