

開水路隅角部付近における縦渦の配列特性について

On the Arrangement of Longitudinal Eddies near the Corner in Open Channel Flow

京都大学防災研究所 正員 今本 博 健

京都大学防災研究所 正員 石 垣 泰 輔

1. はじめに

乱流状態の一樣開水路における流れは3次元のであり、その主要因として主流方向に軸を持つ縦渦の存在が挙げられる。縦渦の存在のため、開水路流れでは等速度線の歪み、壁面せん断力分布の非一様性、最大流速点の降下現象および路床における縦筋の形成等の現象が見られる。これらの現象を引き起す縦渦は、乱れの発生機構に関連したバースティング現象あるいはNikuradse¹⁾をはじめ古くより知られている隅角部等の断面形状の効果により生じた乱れの非一様性に起因した二次流に誘起されるものと考えられるが、そ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、断面形状の効果により生じる隅角部付近の縦渦をレーザ・ドップラ流速計を用いた速度計測結果および可視化法を用いた壁面せん断力分布の計測結果より推定し、縦渦の配列、安定性、スケール等について実験的に検討したものである。

2. 実験装置および方法

実験は、種々の水路幅/水深比 ($B/H=0.5 \sim 10$) の長方形滑面水路を対象とし、レーザ・ドップラ流速計による速度計測および水素気泡法を用いた壁面せん断力分布の計測を行った。実験方法を以下に示す。

レーザ・ドップラ流速計による速度計測： 1成分および2成分用レーザ・ドップラ流速計(15mW, He-Neレーザ)を用い、幅40cm、深さ25cm、長さ8mのガラス製壁面を持つ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、表-1に示す水理条件 (Case A-1~5) のもとで実験を行った。なお、流速計は前方散乱型で使用しており、速度の3次元計測は、レーザ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Uと横断速度成分Vを計測する方法を用いた。

壁面せん断力分布の計測： 開水路流れにおける壁面せん断力は、シアプレートを用いた直接測定法^{2),3)}あるいはプレストン管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・Roy⁴⁾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時間的にも空間的にも変動する縦渦を推定するため、瞬間的に流れの挙動を把握することができる可視化法を用いた壁面せん断力分布の計測を行った。すなわち、リニア底層内の瞬間速度分布を水素気泡法により得られたタイムライン間隔より算定し、壁面に垂直な方向の速度分布に直線分布を仮定して壁面せん断力分布を算定した。^{5),6),7)} この手法は、速度分布の仮

表-1 水理条件

Case	I	Q (l/s)	B (cm)	H (cm)	T (°C)	Re	Fr
A-1	1/400	0.449	4.10	4.00	24.27	4069	0.75
A-2	1/400	2.136	12.06	4.08	25.15	11816	0.89
A-3	1/400	3.889	20.00	4.00	25.60	15694	0.92
A-4	1/400	1.436	20.00	2.00	23.95	6518	0.89
A-5	1/400	3.865	20.03	4.00	17.33	12839	0.91
B-1	1/6115	0.423	4.01	8.02	22.90	2244	0.33
B-2	1/1075	0.343	4.03	4.02	22.20	2976	0.58
B-3	1/1043	0.734	8.01	3.99	23.80	4984	0.52
B-4	1/2394	0.893	12.00	4.02	28.09	5324	0.38
B-5	1/2050	1.299	16.01	4.00	27.80	6418	0.40
B-6	1/3012	1.492	20.00	3.99	27.55	6296	0.35
B-7	1/562	0.773	20.00	1.85	28.16	3901	0.53

定、壁面せん断力と速度の相関等の点で定量性については若干疑問の余地が残されているが、定性的にはかなりの信頼性があると考えられる。なお、実験は、幅20cm、深さ15cm、長さ8mの一部アクリル製の木製水路に隔壁を設置することにより水路幅/水深比を変化させ、表-1に示す水理条件 (Case B-1 ~ 7) の下で各ケース約30枚の可視化撮影を行った。

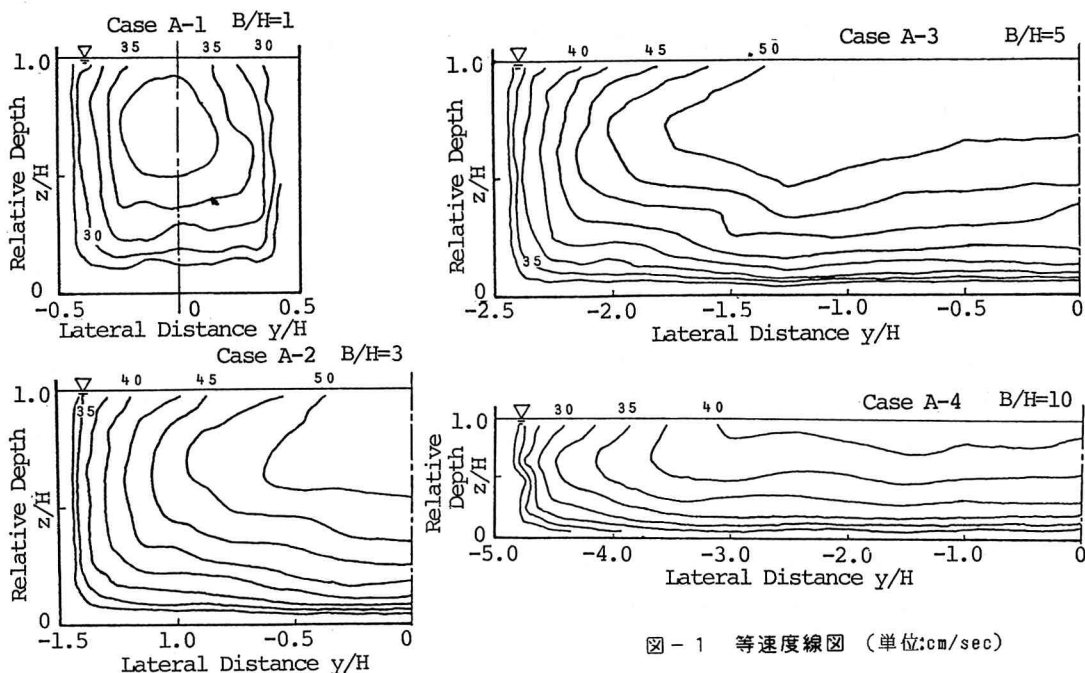


図-1 等速度線図 (単位:cm/sec)

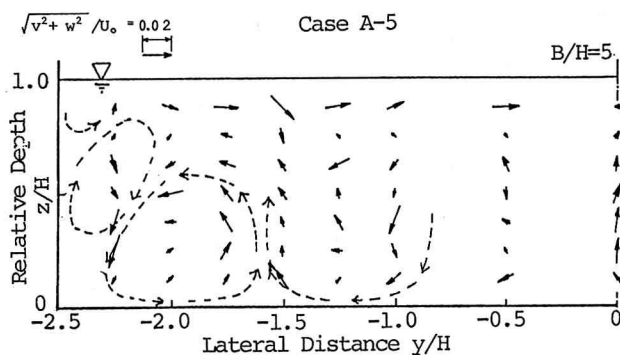


図-2 速度ベクトル図

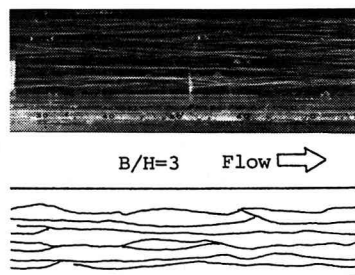


図-3 路床近傍の縦筋

3. 実験結果および検討

3.1 速度計測結果による縦渦の検討

図-1は、種々の水路幅／水深比における主流方向速度 U の等速度線を示したものである。図より、いずれのケースにおいても隅角部より水深の2倍程度の範囲では、最大流速点の降下、等速度線の隅角凹部への突出および自由表面近傍での水路中央部への歪み等の現象が見られるが、これらは隅角部に生じる二次流とそれにより誘起される縦渦の存在に起因するものと考えられる。また、 $B/H=10$ の場合には、水路中央部で水深の2倍程度の間隔の等速度線の歪みが認められる。これらより、隅角部付近では隅角凹部へ向う流れおよび自由表面近傍で側壁より水路中央部へ向う流れの存在が推定される。

以上より、隅角部付近には $B/H>1$ の場合、側壁側に2個と路床側に1個の比較的安定した縦渦の存在が推定される。しかしながら、図-3に示した路床近傍に注入した塩化ビニル粒子をカメラ撮影により可視化した縦筋の撮影例と図化された結果を見ると、^{6),7)} 縦渦は時間的にも空間的にも変動している事が知れ、瞬間的に流れの挙動を捉えて縦渦を検討する必要がある。以下に瞬間的に捉えた壁面せん断力分布より隅角部付近の縦渦の配列特性について検討する。

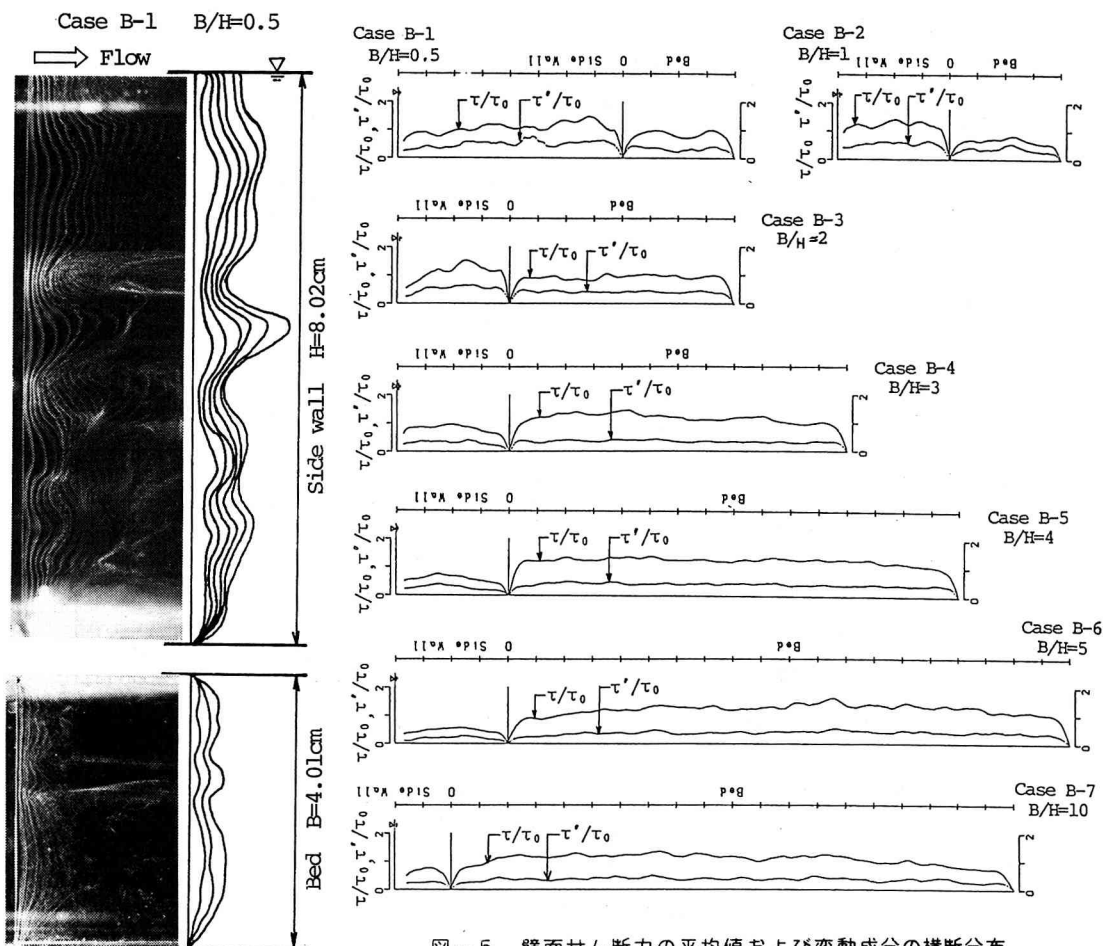


図-5 壁面せん断力の平均値および変動成分の横断分布

図-4 タイムラインの撮影例

3.2 壁面せん断力分布による縦渦の検討

図-4は、側壁近傍および路床近傍におけるタイムラインの撮影例とトレース結果を $B/H=0.5$ の場合について示したものである。図より、タイムラインは波状を呈し、高速部と低速部が交互に配列されている。これは路床、側壁とも同様に認められる。このような写真を各ケース約30枚撮影し、得られたタイムラインの間隔より算定された壁面せん断力の平均値 τ およびその変動成分 τ' の分布を平均壁面せん断力 $\tau_0 (= \rho g R I)$ 、ここに、 ρ :密度、 g :重力加速度、 R :径深、 I :勾配)で無次元化して示したものが図-5である。まず、 τ 分布を見ると、 B/H が小さな場合には波状を呈するが、 B/H が大きくなるとほぼ一様となる。また、 B/H が小さい場合は路床より側壁の τ が大きいのにに対し、 B/H が大きくなるにつれて路床の τ の方が大きくなる傾向がある。なお、 τ は τ_0 の0.5~1.7倍程度であるのに対し、 τ' は τ_0 の0.5倍程度となっている。

つぎに、壁面せん断力分布の非一様性より縦渦の推定を行う。壁面せん断力分布の極大部と極小部は、路床においては縦渦の下降部および上昇部にそれぞれ相当し、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。したがって、壁面せん断力分布の極大部および極小部の発生位置を検討することにより縦渦の配列特性を検討することができる。

図-6は、壁面せん断力分布の極小部の発生位置頻度分布を種々の B/H の場合について示したものであり、図中、 $B/H > 2$ のケースは半断面について示しているが、分布形は水路中心線に対してほぼ対称であった。

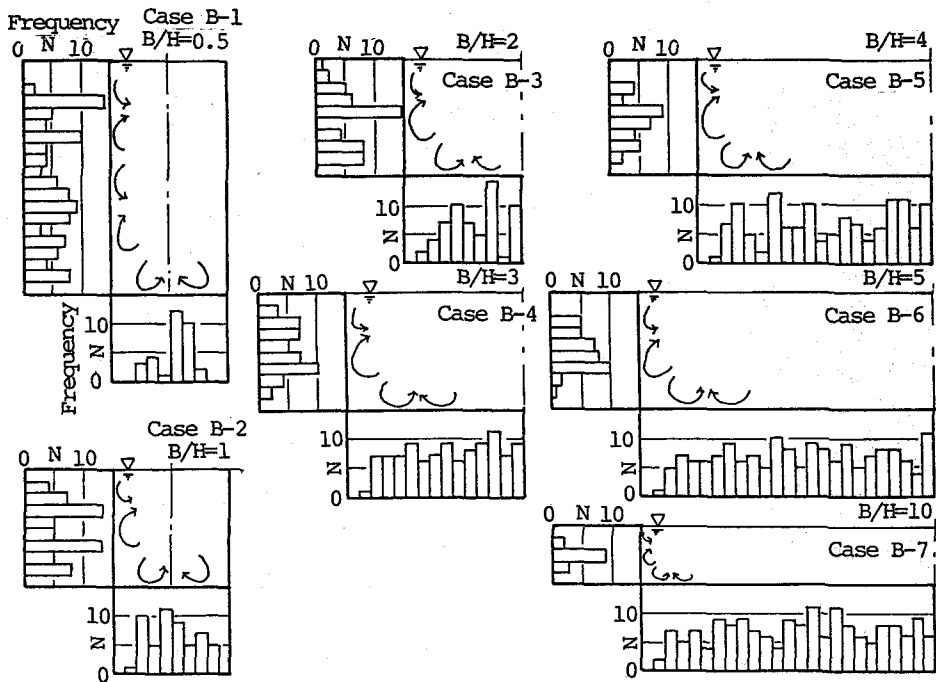


図-6 壁面せん断力分布の極小部の発生位置頻度分布

まず、側壁の分布について見ると、 B/H が0.5 の場合を除いて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推定される。また、 B/H が0.5 の場合には、高頻度の部分が2箇所存在し、側壁に沿って縦渦が4個配列されていることが推定される。一方、路床の頻度分布について見ると、 $B/H=0.5$ と1.0 の場合は水路中央付近、その他のケースでは隅角部から水深の0.5 倍程度の位置に高頻度の部分が存在するが、水路中央部付近では $B/H=10$ の場合を除いて水深スケールの縦渦の存在が推定されるような高頻度の部分の存在は認められない。

以上の結果と、隅角凹部には一般的に凹部へ向う流れが存在することを考慮すると、隅角部付近には図中に示すような縦渦の配列が推定される。すなわち、隅角部を挟んで側壁側と路床側に縦渦が存在しそれぞれの縦渦により反対回りの縦渦が誘起されている。

図-6 で示した隅角部の縦渦のスケールを検討するため、隅角部に最も近い縦渦の上昇部および縦渦の離岸部に着目し、平均発生位置を B/H で整理したものが図-7 である。ここに、 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 および L_b はほぼ同様の値となり、 B/H の増加にともなって水深の0.5 倍程度の値に近づく。また、 $B/H=0.5$ の場合は、 L_s および L_b を B で無次元すると他のケースとほぼ同様の値となることより、隅角部に最も近い縦渦のスケールは水深あるいは水路幅の短い方の0.5 倍程度であると考えられる。これと図-2 で示した速度ベクトルの計測結果より推定される縦渦のスケールは若干異なるが、これは計測スケールの効果によるものと考えられるが、詳細については今後検討が必要である。

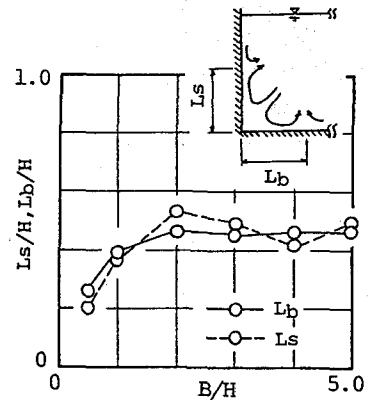


図-7 隅角部付近の縦渦のスケール

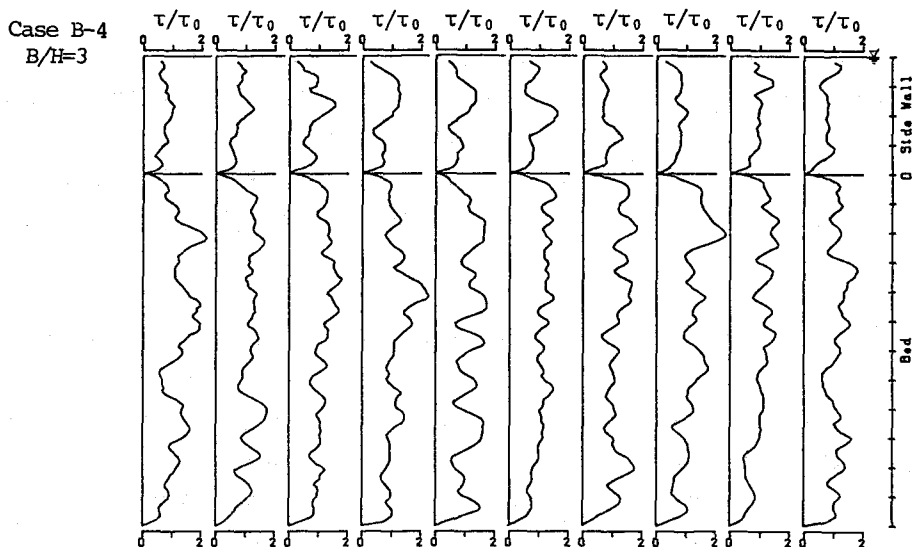


図-8 壁面せん断力分布の経時変化

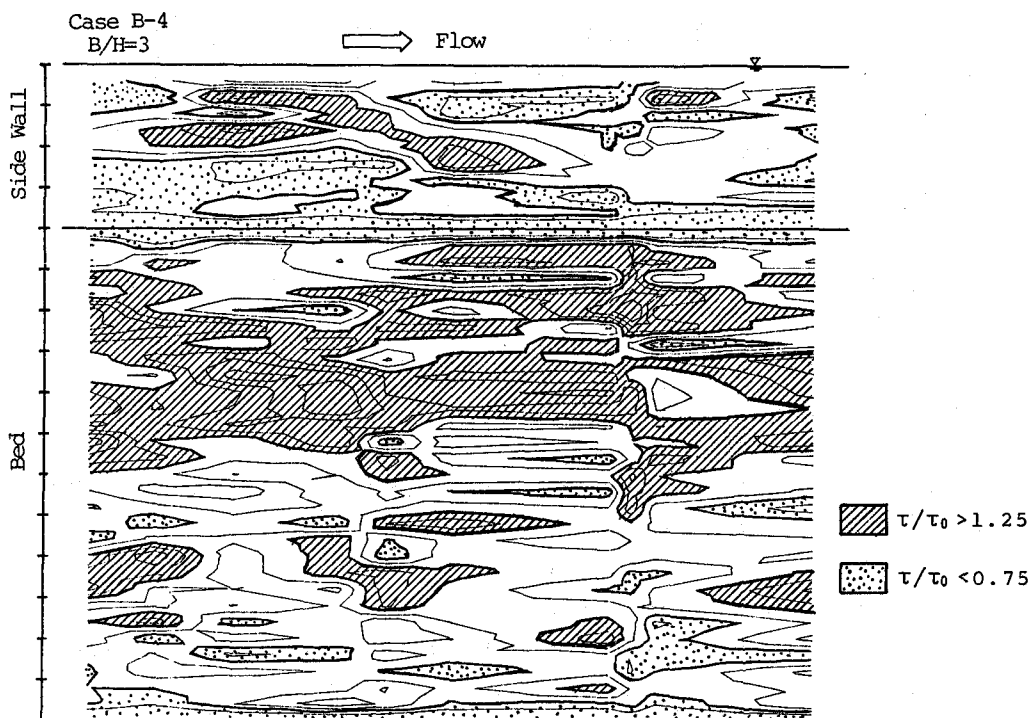


図-9 壁面せん断力分布の平面分布

つぎに、縦渦の時間的および空間的な変動について若干の検討を加える。図-8は、 $B/H=3.0$ における壁面せん断力分布の経時変化（約2.4秒間）を示したものであり、これに凍結乱流の仮定を用いて路床および側壁における壁面せん断力の平面分布のコンターを示したものが図-9である。

図-9は、壁面せん断力 τ を平均壁面せん断力 $\tau_0 (=pgRI)$ で無次元化して示しており、 $\tau/\tau_0=0.25$ のピッチでコンターを描いている。また、 $\tau/\tau_0 < 0.75$ と $\tau/\tau_0 > 1.25$ の低壁面せん断力の部分と高壁面せん断力の部分を図示している。路床部分を見ると、高壁面せん断力の部分が片側に偏っているが、図-5で示した平

均壁面せん断力分布がほぼ一様であることを考慮すると、高壁面せん断力部分が左右岸にゆらいでいることが推定される。また、高壁面せん断力部分と低壁面せん断力部分は水路横断方向に交互に配列されており、このケースでは、低壁面せん断力部が水路中央付近および側壁より半水深離れた付近に流下方向に並んでいるのが認められる。また、隅角部付近を流下方向に沿って見ると、側壁側と路床側の変動がほぼ同位相となっている。以上より、隅角部を挟んで生ずる一対の縦渦は、同様の変動特性を示すことが類推される。

4. おわりに

本研究では、開水路隅角部付近における縦渦の配列特性について検討を行ったが、その主な結果を示すとつぎのようである。

1) 図-1 に示した種々のB/H における等速度線図より、側壁より水深の2倍程度の範囲は隅角部に生ずる縦渦の影響が顕著に認められる。 2) 図-2 に示した速度ベクトルの計測結果より、隅角凹部に向う流れと自由表面近傍での側壁より水中央部へ向う卓越した流れが認められたが、推定される縦渦のスケールは壁面せん断力分布より推定されるものと異なる。この理由として計測スケールの効果等が考えられるが、詳細については今後検討が必要である。 3) 壁面せん断力分布による検討より、隅角部付近には隅角部を挟んで側壁側と路床側に縦渦が存在し、それにより誘起される渦とともに比較的安定した配列となっている。また、隅角部を挟む縦渦のスケールは、水深あるいは水路幅のどちらか短い方の0.5倍程度である。 4) 壁面せん断力の平面分布より、隅角部を挟む一対の縦渦は同様の変動特性を示すことが類推される。今後は、種々の断面形状における縦渦の配列特性について研究を進めて行く予定である。

参 考 文 献

- 1) Nikuradse, J.: Untersuchungen über turbulente Strömungen in nicht kreisförmigen Rohren, Ingenieur-Archiv, Vol.1, 1930.
- 2) 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, 1984, p.311-314.
- 3) 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, p.382-383.
- 4) Ghosh, J.H. and Roy, N. : Boundary shear distribution in open channel flow, Journal of the Hydraulics Division, Proc. ASCE, Vol. 96, No. HY4, 1970, p.987-994.
- 5) 今本博健・石垣泰輔・木下聖司 : 可視化法による開水路流れの壁面せん断力分布の検討, 土木学会関西支部年次学術講演概要, II-51, 1983.
- 6) 今本博健・石垣泰輔・木下聖司 : 開水路流れの3次元構造に及ぼす断面形状の効果について, 第38回土木学会年次学術講演会講演概要集, 1983, p.475-476.
- 7) 今本博健・石垣泰輔 : 開水路流れの壁面せん断力と縦渦に関する実験的検討(1), 京都大学防災研究所年報, 第26号 B-2, 1983, p.477-487.