

複断面開水路流れの水力特性について (2)

今本 博健・石垣 泰輔・木下 聖司

ON THE HYDRAULICS OF AN OPEN CHANNEL FLOW IN COMPLEX CROSS SECTION (2)

By *Hirotake* IMAMOTO, *Taisuke* ISHIGAKI and *Seiji* KINOSHITA

Synopsis

In an open channel with flood plains, a flow has a complex turbulent structure and it has not been clarified yet. In this paper, the distribution of boundary shear stress was measured using a hydrogen bubble method, and longitudinal eddies near the edge of flood plain were investigated by velocity measurement with a laser doppler anemometer and a hot film anemometer, and flow Visualization techniques. Experiments were made in a complex cross section channel in which the slope of flood plain's bank was 90° or 45° .

Experimental results show that the slope of flood plain's bank influences on the distribution of boundary shear stress, and that three longitudinal eddies are recognized near the edge of flood plain.

1. は じ め に

複断面開水路流れは高水敷先端に生じる斜昇流とそれにより誘起される縦渦で特徴づけられ、流下方向平均速度の横断分布形状および低水路と高水路の境界付近の自由表面流況に顕著な特性を示すことが指摘されている¹⁾²⁾。しかしながら、複断面開水路流れに関する従来の研究では、高水敷先端の法面勾配 θ は 90° の場合がほとんどである。

本研究は、 θ として 90° と 45° の2種類の高水敷形状を有する複断面水路を用い、壁面せん断力分布および高水敷先端付近にみられる流下方向に軸を持つ水深規模の渦構造に及ぼす高水敷先端法面勾配の影響について実験的検討を行ったものである。実験は、水素気泡法を用いた壁面せん断力分布の計測³⁾⁴⁾、カメロン撮影による自由表面における瞬間速度平面分布の可視化、中立粒子トレーサを用いた内部流況の可視化およびレーザ・ドップラ流速計を用いた平均および乱れ速度計測を行っている。

2. 壁面せん断力分布に関する実験

2.1 壁面せん断力計測法

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ている。複断面開水路流れを対象とした壁面せん断力分布は Myers・Elsawy⁵⁾ により計測されており、Fig. 1 に示すように高水敷先端付近で特有の分布特性を示している。すなわち、高水敷先端法面では低水路底面で 0 であり高水敷先端に向かって増加し、先端で最大となる分布形が得られている。しかしながら $\theta \neq 90^\circ$ の場合についての結果は得られていない。

本研究に用いた方法は間接測定法であって、速度分布が直線分布となる壁面近傍のリニア底層内の速度を計測し壁面せん断力を求めようとするものである。すなわち、Fig. 2 に示すように直径 0.05 mm の白金線

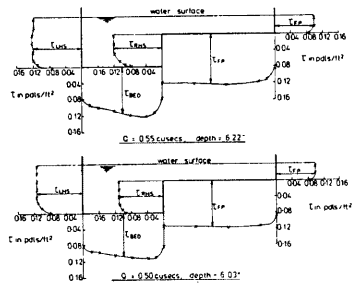


Fig. 1 Distribution of boundary shear stress in a complex cross section (after Myers & Elsayy¹⁾)

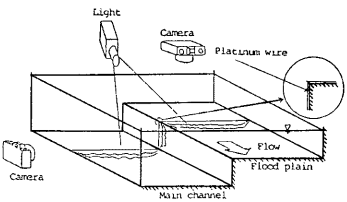


Fig. 2 Sketch of experimental set-up

を壁面から約 0.3 mm の位置に設置し、50 ms の間隔で発生させた水素気泡により形成されるタイムラインを鉛直上方および水平側方に置いた 35 mm スチルカメラにより撮影する。このようにして得られたタイムラインの間隔をディジタル化にて量子化した値を用いて局所瞬間速度 u を求め、 $\tau = \mu du/dn$ として壁面せん断力 τ を算定した^{3),4)}。ここに、 μ は粘性係数、 n は壁面からの鉛直距離を示し、 $n=0$ で $u=0$ としている。なお、白金線はアクリル樹脂製高水敷先端法面の先端および下端に埋め込んだ直径 0.42 mm の縫針によりサポートし、すきまゲージを用いて壁面より 0.3 mm の位置に設置した。また、タイムラインの撮影は絞り $F=2.8$ 、露光時間 $T=1/125$ 秒、毎秒3.8コマで連続30枚の連写を行っている。

この手法は、速度分布の仮定などの点で定量化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。

実験に用いた水路は、幅 20 cm、深さ 15 cm、長さ 6 m の一部アクリル樹脂製の木製直線水路内に、高さ 2 cm、幅 12 cm の高水敷を左岸側に設置し複断面としたものである。また、高水敷先端法面の勾配 θ は 90° と 45° としたが、 $\theta=45^\circ$ の場合には計測断面上下流 1 m 区間の法面はアクリル樹脂製であり、それ以外は木製とした。水理条件は **Table 1** に示す通りである。

2.2 壁面せん断力分布特性

(1) 平均壁面せん断力分布

Photo. 1 は、高水敷先端法面上に形成されたタイムラインを水平側方に設置したカメラにより撮影した一例を示したものである。 $\theta=90^\circ$ の場合と $\theta=45^\circ$ の場合を比較すると、 $\theta=90^\circ$ の場合には低水路底面近傍

Table 1 Hydraulics conditions

Case	Slope of bank $\theta(^{\circ})$	Slope I	Discharge $Q(l/s)$	Chamel width $B(cm)$	Depth $H(cm)$	Flood plain		Reynolds number Re	Froude number Fr
						Width $b(cm)$	Height $h(cm)$		
C-1	90	1/456	1.292	20	3.99	12.20	2.00	4077	0.55
C-2	45	1/462	1.301	20	4.00	12.60	2.10	4172	0.65
C-3	90	1/400	5.533	40	3.97	16.20	2.00	9425	0.86
C-4	45	1/389	5.712	40	4.00	16.60	2.10	9962	0.92
C-5	90	1/400	6.115	40	3.99	16.10	2.00	14547	0.94
C-6	45	1/400	6.000	40	4.00	16.50	2.10	12985	
C-7	90	1/1248	1.288	20	4.09	12.20	2.00	3465	0.51
C-8	45	1/950	1.297	20	4.07	12.80	2.10	3624	0.57

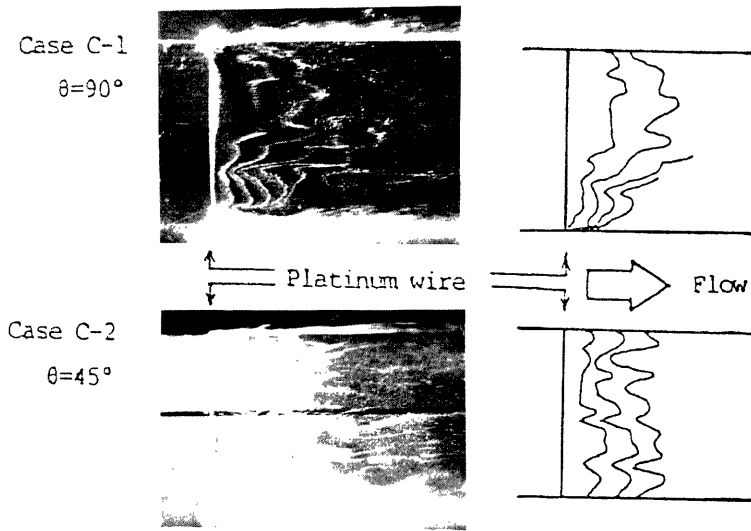


Photo 1 Example photographs of time-line near the bank of flood plain

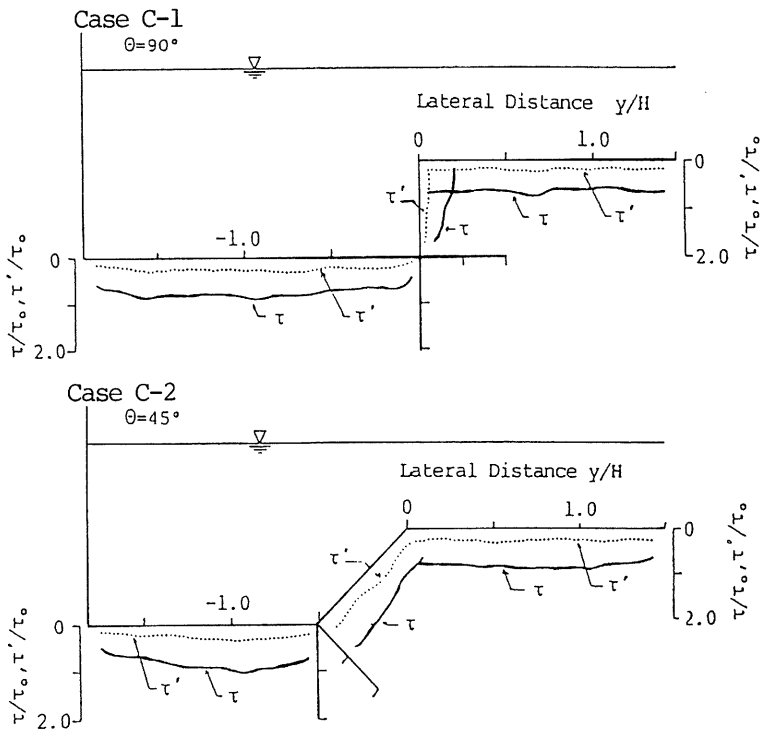


Fig. 3 Distribution of mean boundary shear stress and its root mean square

(写真下側)に比し高水敷面側(写真上側)のタイムライン間隔が広がっているのに対し、 $\theta=45^\circ$ の場合には低水路底面側が広くなり顕著な差異を示している。なお、高水敷上および低水路底面のタイムラインの θ の違いによる差は顕著には認められなかった。

Fig. 3 は各ケース約30枚撮影したタイムラインの間隔より算定した壁面せん断力の平均値 τ およびその変動成分 τ' を $\tau_0 = \rho g R I$ で無次元化して示したものである。ここに、 ρ は密度、 g は重力加速度、 R は径深、 I はエネルギー勾配である。 $\theta=90^\circ$ の場合、高水敷先端法面を除くとほぼ一様な分布となっているが、高水敷先端法面では法面下端より上方に単調増加して高水敷先端で最大となる分布をしている。この結果は **Fig. 1** に示した Myers・Elsawy⁵⁾ の結果と定性的に一致している。一方、 $\theta=45^\circ$ の場合には、高水敷先端法面を除くと $\theta=90^\circ$ の場合と同様に一様な分布特性を示しているが、法面では下端付近で最大となり上方に向って単調減少している。このような結果を比較する複断面水路における計測例は見当たらないが、Ghosh・Roy⁶⁾ が台形断面水路にて計測した側壁法面での分布形状(法面下方部に最大値が生じる分布)と定性的に一致しており本研究で用いた計測法の妥当性がうかがえる。

変動成分 τ' の分布について見ると、 τ とほぼ同様の分布特性を示しており τ のほぼ0.2~0.3倍程度の値となっている。なお、 τ' は τ の瞬間値の r. m. s. であり、図では τ_0 で無次元化して示している。

(2) 壁面せん断力の平面分布

本研究で用いた計測法では、流れの可視化法を用いているため流れの瞬間的挙動を捉えることが可能であり、壁面せん断力分布の瞬間値を計測することが出来る。したがって、時系列の計測を行うことにより面的な分布形状が得られる。

Fig. 4 は高水敷先端法面勾配 $\theta=90^\circ$ および $\theta=45^\circ$ の場合について毎秒3.8コマの連続撮影より得られる壁面せん断力の経時変化に基づき、面的な分布状況をコンターで示したものである。なお、撮影条件の制約より全周辺についての同時撮影ではなく、低水路底面と高水敷面および高水敷先端法面に分けて撮影を行っているため、図が同一時刻の分布状況でない。

コンターは $\tau/\tau_0=0.25$ ピッチで描き、低壁面せん断力部と高壁面せん断力部をそれぞれ、 $\tau/\tau_0 < 0.75$ および $\tau/\tau_0 > 1.25$ に区分して示している。図より、いずれのケースにおいても低壁面せん断力部と高壁面せん断力部が横断方向および流下方向に複雑に配列され、瞬間的な壁面せん断力分布の非一様性が確かめられる。また、高壁面せん断力部と低壁面せん断力部は流下方向に連らなって存在していることより、流れの組

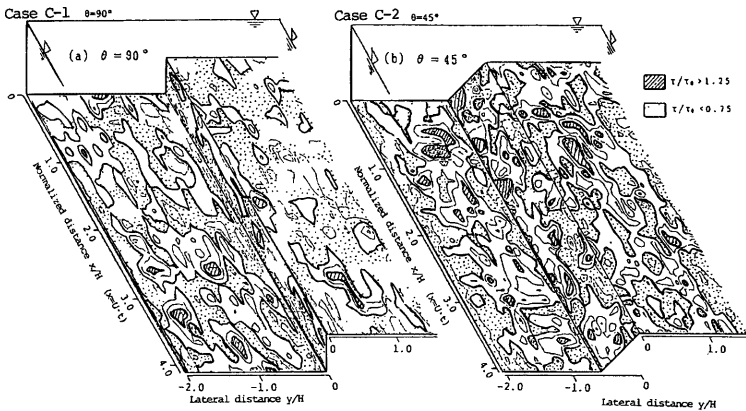


Fig. 4 Contour of boundary shear stress in a complex cross section

織的な構造の存在がうかがえる。高水敷上および高水敷先端法面上の分布を見ると、いずれのケースにおいても高水敷先端に低壁面せん断力部が間欠的に見られ、高水敷先端より自由水面に向う斜昇流の存在がうかがえる。また、高水敷先端法面上の分布は $\theta=90^\circ$ の場合と $\theta=45^\circ$ の場合では大きく異なり、 $\theta=45^\circ$ の場合に高壁面せん断力領域が流下方向に連なり Fig. 3 に示した平均壁面せん断力分布形状が定常的に認められる。

3. 中規模渦構造

3.1 中規模渦構造に関する実験

開水路流れを種々のスケールを持つ渦構造と考えた場合、そのスケールにより以下のように分類して考えることができる。すなわち、スペクトル構造にみられるカスケード過程が成立する領域のスケールを持つ極小規模渦構造、粘性底層やバッファ層における乱れの生成過程に関与する小規模渦構造、水深あるいは局所的断面形状の変化スケールの中規模渦構造、彎曲部などに見られる水路幅スケールの大規模渦構造および河床変動スケールの超大規模渦構造である。本章では、複断面開水路流れの中規模渦構造に着目し、その構造および配列特性について流れの可視化法を主に用いて実験的に検討した結果について示している。

(1) 自由水面流況に関する実験

カメロン効果を利用した撮影法により自由水面における瞬間速度平面分布の可視化を行った。方法は、アルミニウム粉末を塗布したおがくずを自由水面に一様に散布し、上方 2.1 m の高さに設置した 2 台の 35 mm スチルカメラの撮影間隔を 30 ms に設定して露光時間 1/500 秒で撮影するものである。なお、実験に用いた水路は幅 40 cm、深さ 20 cm、長さ 13 m のアクリル樹脂製直線水路であり、水力条件は Table 1 に示した。

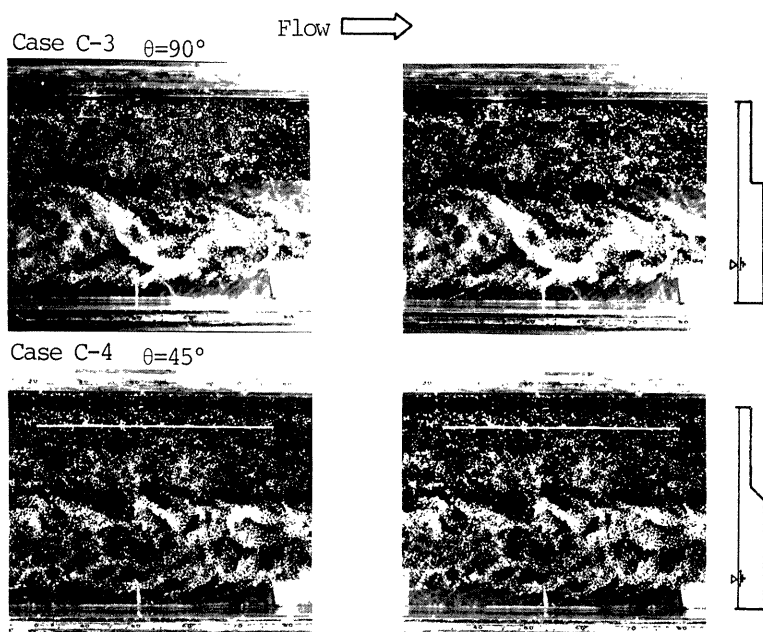


Photo 2 Example photographs using Cameron effect

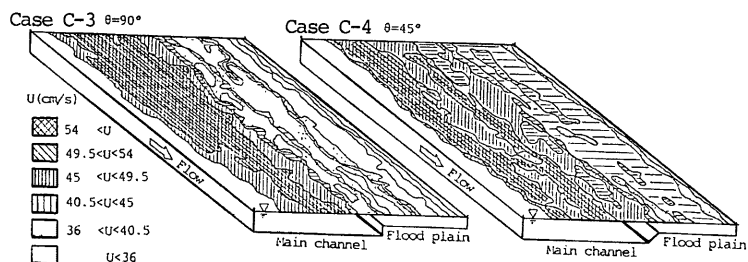


Fig. 5 Contour of longitudinal mean velocity on the water surface in a complex cross section

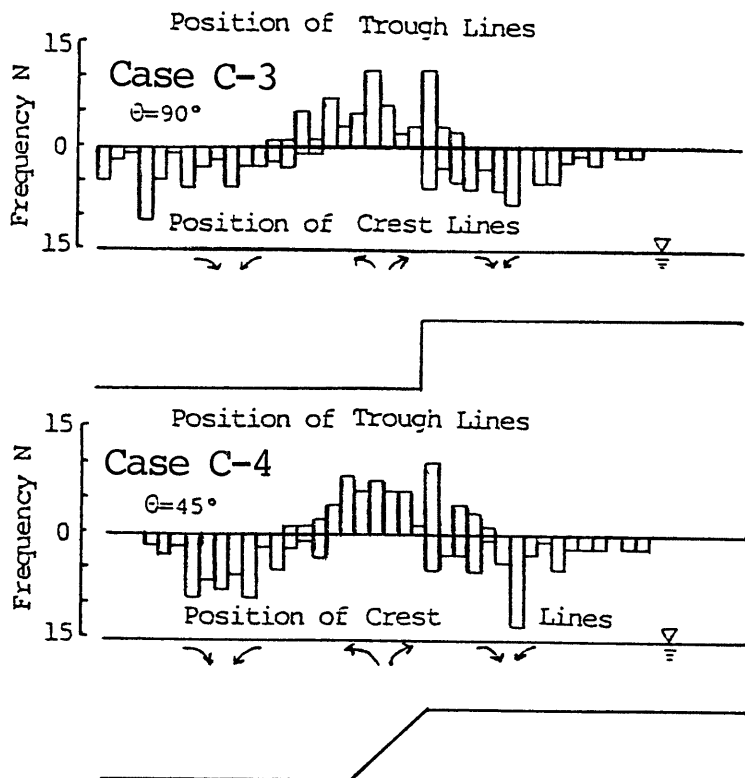


Fig. 6 Lateral distribution of frequency N of the position of trough and crest line

Photo. 2 はカメロン撮影例であり、これらの 2 枚 1 組の写真を実体視すると速度の差が高低差として可視化され、瞬間速度の平面分布が得られる。**Fig. 5** は可視化された瞬間速度の平面分布を示したものである。図より、 $\theta=90^\circ$ あるいは $\theta=45^\circ$ のいずれの場合にも低水路内は高速、高水路内は低速であるが、 $\theta=90^\circ$ に比し $\theta=45^\circ$ の場合に低水路と高水路の流速差が小さくなっている事が認められる。また、低水路と高水路の境界付近に見られる島状に並んだ低速部、すなわち、斜昇流の水面への到達位置に相当する部分を見ると、 $\theta=90^\circ$ の方がより顕著に存在が認められるとともに、その流下方向間隔も小さく $\theta=45^\circ$ に比しやや低水路側に位置している。

流れの内部構造との関係を考慮すると、低速部は下方より流体が上昇して水面に達した位置に相当し、高速部は下方への流体の沈み込む位置に相当すると考えられる。したがって、低水路と高水路の境界近傍では低速部が斜昇流の上昇位置に相当し、高速部が斜昇流により誘起された渦の下降位置に相当する。**Fig. 6** は、高速部を連ねた峯線および低速部を連ねた谷線の発生位置の頻度分布を示したものであり、この結果より自由水面近傍の流体の挙動を推定することが出来る。なお、発生位置は 18 組の写真を実体視し、60ヶ所の横断測線上において計測した結果である。図より、いずれのケースにおいても谷線は高水数端よりやや低水路側に生起する頻度が高く、峯線は高水数端を挟んで両側に発生している。 $\theta=90^\circ$ の場合と $\theta=45^\circ$ の場合を比較すると、 $\theta=45^\circ$ の方が谷線の発生位置がやや高水数側に寄る傾向が見られ、斜昇流の向きが高水数先端法面の形状に影響されていることが推定される。また、前述した流れの内部構造との関係より、図に示すような流体の挙動、すなわち、高水数端より自由水面に達した斜昇流が横断方向へ向う流れおよびそれにより誘起された渦が沈み込む流れが類推される。

(2) 速度分布特性に関する実験

流れの内部構造を検討するためレーザ・ドップラ流速計およびホットフィルム流速計を用いた速度計測を行った。レーザ・ドップラ流速計 (DISA 55X 型, 15 mW He-Ne レーザ) は前方散乱方式で用いているため、レーザビームの通過しない高水数高さより下方ではホットフィルム流速計 (DISA 55R42, 一成分コンカル型プローブ) を使用した。計測は、幅 40 cm, 長さ 8 m のガラス製壁面を有する直線水路内にアクリル樹脂製高水数を設置した複断面水路を用い、 $\theta=90^\circ$ の場合で 229 点、 $\theta=45^\circ$ の場合で 286 点で行っている。また、それぞれの流速計にて同一点の計測を行い計測値の妥当性を確認している。なお、水利条件は **Table 1** に示す。

Fig. 7 は、流下方向平均速度 u の横断分布を (a) 高水路半水深、(b) 高水数上 1 mm および (c) 高水数半高さの位置において示したものである。 $\theta=90^\circ$ と $\theta=45^\circ$ の場合を比較すると、(b) および (c) 測線ではほ

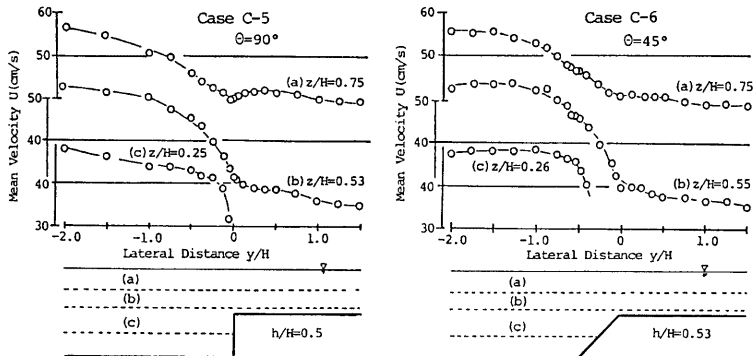


Fig. 7 Lateral distribution of longitudinal mean velocity

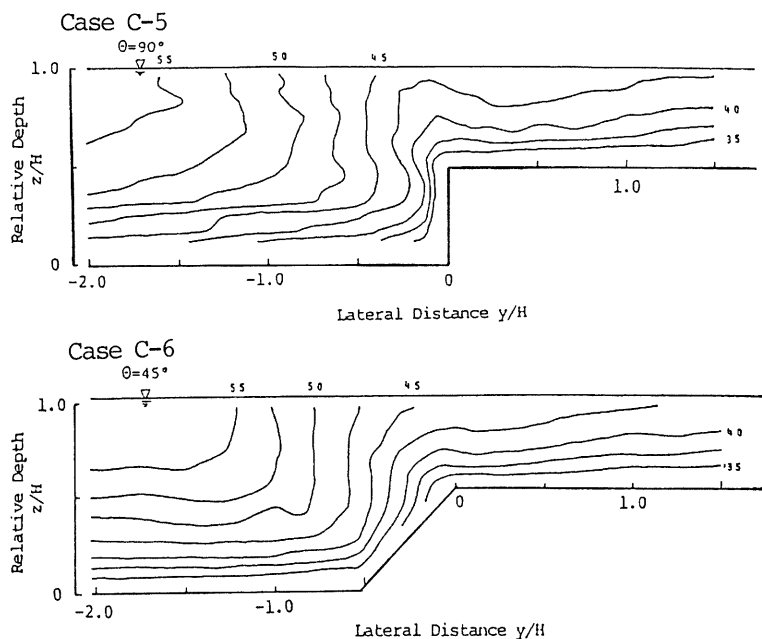


Fig. 8 Contour of longitudinal mean velocity in a complex cross section

Case C-8 $\theta = 45^\circ$

Top view

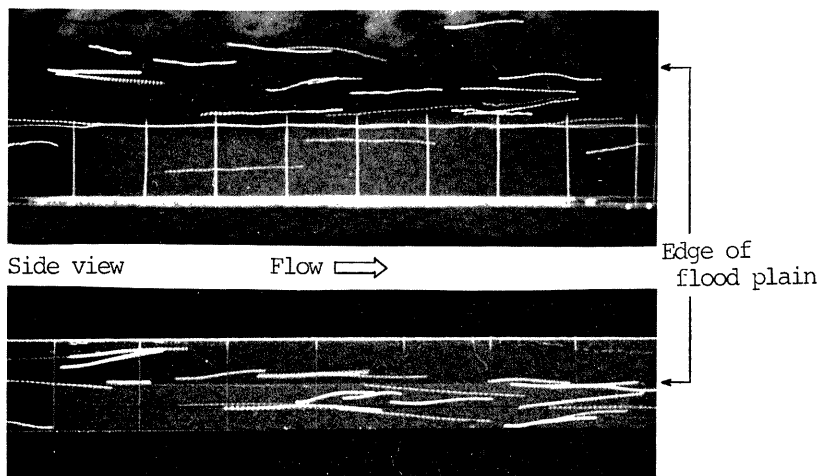


Photo 3 Example photographs of pass lines of neutral tracers in a complex cross section

は同様の分布形状を示しているが、(a) 測線を見ると $\theta=90^\circ$ の場合には既報¹⁾ で示したように高水敷先端で明確な極小値および極大値の存在が認められるものの $\theta=45^\circ$ の場合には不明確となっている。このことは、Fig. 5 に示した結果と一致し、 $\theta=45^\circ$ の場合の方が低水路の流れが高水路に及ぼす影響が大であると言える。

つぎに横断面内の平均速度のコンターを Fig. 8 に示す。図より、いずれのケースにおいても高水敷先端より自由水面に向う低速度領域の突出および高水敷先端法面と低水路底面に囲まれた隅角凹部への高速度領域の突出が特徴的である。すなわち、強さは異なるもののいずれのケースにおいても斜昇流と隅角凹部へ向う流れの存在が認められる。また、 $\theta=90^\circ$ の場合、等速度線の曲率が大きいことより流れが集中した強い斜昇流が推定されるのに対し、 $\theta=45^\circ$ の場合には曲率が $\theta=90^\circ$ に比して小さく斜昇流も弱いものと考えられる。

(3) 内部流況の可視化実験

内部の3次元流況を捉えることを目的として中立粒子トレーサを用いた流れの可視化実験を行った。すなわち、蛍光塗料により着色したポリスチレン粒子をトレーサとして用い、鉛直上方と水平側方より2台の35 mm スチルカメラによりトレーサの挙動を捉える方法である。用いたトレーサは、直径 1.41~2.0 mm で静水中の沈降速度は平均 0.47 cm/s であり、Allen の終末沈降速度式⁷⁾ を用いて算定した見かけの比重は1.0053である。流水中の粒子の沈降速度がさらに小さくなることと目視観察による流れへの追従性の結果より、可視化結果は定量的には若干の問題を残すが定性的には充分流れの挙動を表わしていると考えられる。実験は、幅 20 cm、長さ 6 m の一部アクリル樹脂製の直線水路にて Table 1 に示す水理条件のもとで行った。

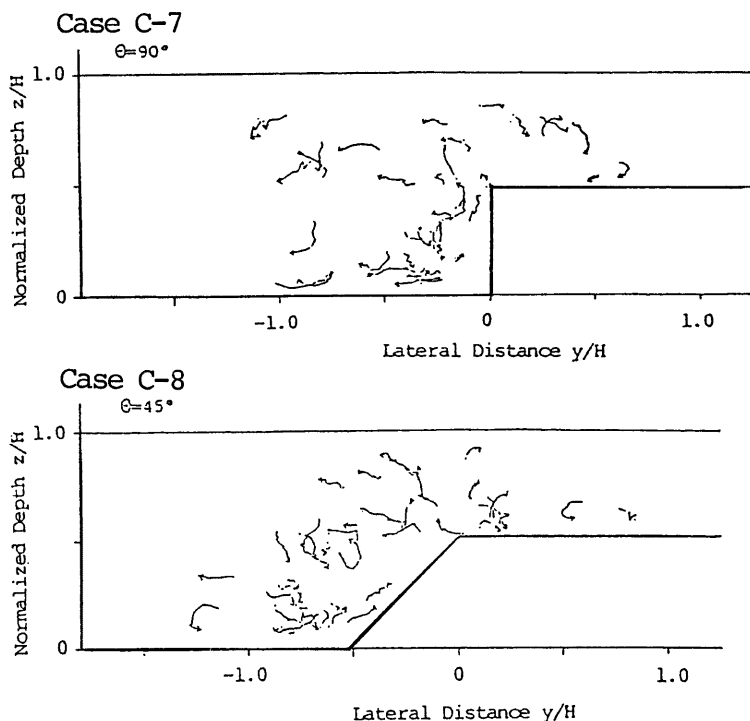


Fig. 9 Pass lines of neutral tracers in the cross section

また、撮影は蛍光ランプを照明装置として用い、絞り $F=4.0$ 、露光時間1/4秒で行った。

Photo 3 は、 $\theta=45^\circ$ の場合の撮影例を示したものであり、このような2枚1組の写真よりトレーサの座標位置をデジタイザを用いて流下方向1mm毎に量子化し、横断面内のトレーサの軌跡を求めている。その結果を **Fig. 9** に示す。図より、いずれのケースにおいても高水敷先端より自由水面に向う斜昇流と低水路底面隅角凹部に向う流れが明確に認められるとともに、それらの流れにより誘起された渦構造が見られる。すなわち、低水路中央→隅角凹部→低水路底面→低水路中央、低水路中央→隅角凹部→高水敷法面→高水敷先端→自由水面→低水路中央および高水敷底面→高水敷先端→自由水面→高水敷水面→高水敷底面の3つの渦構造の存在が認められる。一方、 $\theta=90^\circ$ の場合と $\theta=45^\circ$ の場合を比較すると、 $\theta=45^\circ$ の場合の方が渦のスケールが若干大きく、そのスケールは高水敷先端法面の形状に関係のあることが類推されるが、詳細については今後の検討課題である。

3.2 中規模渦構造の配列特性

自由水面流況および内部流況の検討より高水敷先端付近の中規模渦構造の存在を類推したが、前章で示した壁面せん断力分布より検討することが可能である。すなわち、壁面せん断力分布の非一様性と流れの内部構造との関係を考慮すると、壁面せん断力分布の極大部は速度の大きな流体が壁面に近づくことにより生じし、極小部は壁面近傍の速度の小さい流体が離れることにより生じるものと考えられる。したがって、極大

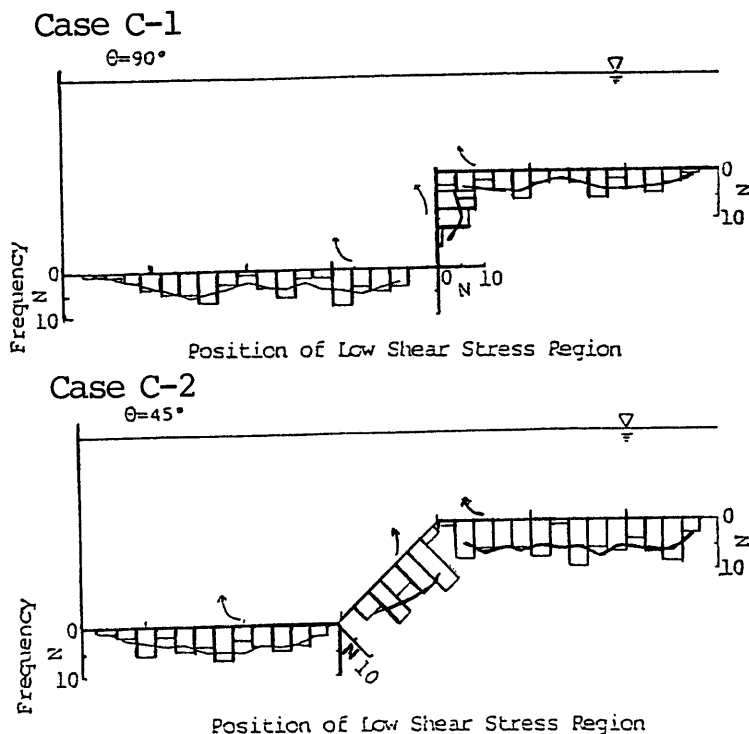


Fig. 10 Lateral distribution of frequency N of the position where the boundary shear stress is small

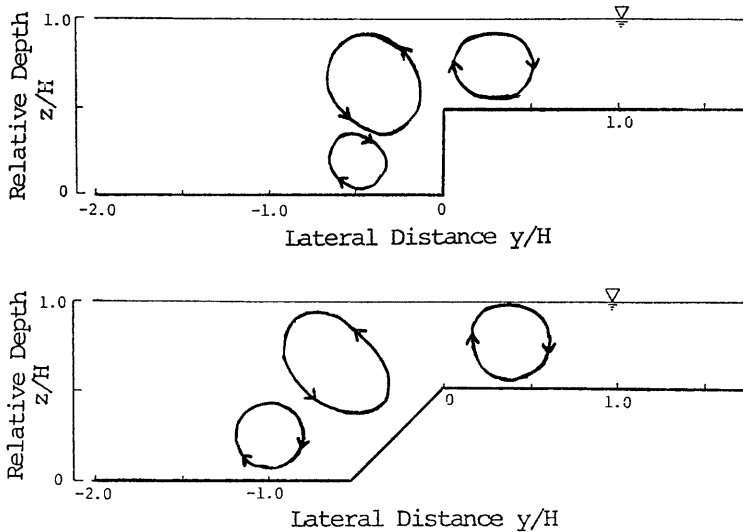


Fig. 11 Sketch of middle scale longitudinal eddies near the edge of flood plain

部あるいは極小部の発生位置を検討することにより壁面近傍の流体の挙動を類推することが出来る。

Fig. 10 は、壁面せん断力分布の極小部の発生位置頻度分布を示したものである。図より、いずれのケースにおいても高水敷面および先端法面上部と、低水路底面の高水敷高さ程度離れた位置に高頻度の部分が存在し、図に示すような流体の挙動が推定される。ただし、図に示した頻度分布には、パースティング現象に関連した小規模渦構造と水深規模の中規模渦構造の情報が混在し、各々の特性を抽出することは難しいが、小規模渦構造が本来時間的にも空間的にもランダムに生起するものとするれば、発生位置の頻度分布は一樣であり図に見い出される高頻度の部分は中規模渦構造に関連した情報であると考えられる。しかしながら、詳細については今後検討が必要である。

以上の結果と前節までに述べた結果を総合して高水敷先端付近の中規模渦構造を抽くと **Fig. 11** のようになる。すなわち、高水敷先端付近には、高水敷先端より自由水面に向う斜昇流と高水敷先端法面の下端隅角凹部へ向う流れにより誘起される中規模渦が図のような配列で存在する。これらの渦は低水路水深、高水敷水深および高水敷端法面の形状と関係したスケールを持つ。

4. お わ り に

本研究は、複断面開水路流れの水力特性を解明する基礎として、壁面せん断力分布特性および高水敷先端付近の中規模渦構造について高水敷先端法面の勾配 θ が 90° と 45° の場合について実験的検討を行ったものである。以下に主な結果を要約して示す。

1) 複断面開水路流れでは、低水路と高水路の境界に存在する斜昇流に起因した低壁面せん断力領域が高水敷先端近傍に間欠的に現われる。また、高水敷先端法面の勾配によっては法面下端近傍に高壁面せん断力領域が定常的に現われる。

2) 境界部付近の中規模渦構造は、斜昇流と低水路底面隅角凹部へ向う流れにより誘起される渦で規定される。すなわち、低水路中央→隅角凹部→低水路底面→低水路中央、低水路中央→隅角凹部→高水敷法面→

高水敷先端→自由水面→低水路中央および高水敷底面→高水敷先端→自由水面→高水路水面→高水敷底面の3つの渦の存在が認められる。

3) 高水敷先端近傍の中規模渦のスケールは水深および高水敷端の形状のスケールに関係がある。

4) 高水敷先端形状の差異は、中規模渦構造の存在そのものには大きな影響は及ぼさないものの、高水敷先端付近の壁面せん断力分布形状を大きく変える。

以上が本研究で得られた結果であるが、高水敷先端形状により高壁面せん断力領域の生起位置が異なることは河道断面を設計する上で重要な要素であり、今後さらに詳細な検討を加えることが必要である。

最後に、本研究を遂行するにあたり実験ならびにデータ解析に協力された京都大学大学院生の福井淳太氏および学部生の二摩慎一氏に対し深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 今本博健・石垣泰輔・稲田修一：複断面開水路流れの水理特性について，京大防災研年報，第25号 B-2，1982，pp. 509-527.
- 2) 今本博健・石垣泰輔：複断面開水路流れの水理特性に関する実験的研究，第27回水理講演会論文集，1983，pp. 61-66.
- 3) 今本博健・石垣泰輔：開水路流れの壁面せん断力分布と縦渦に関する実験的研究，京大防災研年報，第26号 B-2，1983，pp. 477-487.
- 4) 今本博健・石垣泰輔：開水路隅角部付近における縦渦の配列特性について，第28回水理講演会論文集，1984，pp. 257-262.
- 5) Myers, R. C. and E. M. Elsayy: Boundary Shear in Channel with Flood-plain, Proc. ASCE, Vol. 101, HY7, 1975, pp. 933-946.
- 6) Ghosh, S. N. and N. Roy: Boundary Shear Distribution in Open Channel Flow, Proc. ASCE, Vol. 96, HY4, 1970, pp. 967-994.
- 7) 土木学会編：水理公式集，1971，pp. 411.