

複断面蛇行流の可視化観測

宇民 正・上野 鉄男

EXPERIMENTAL STUDY ON THE STRUCTURE OF THE MEANDERING CHANNEL FLOW WITH COMPOUND CROSS-SECTION USING FLOW VISUALIZATION

By *Tadashi* UTAMI and *Tetsuo* UENO

Synopsis

The horizontal cross-sections of the meandering channel flow with compound cross-section were visualized using fine particles as tracers. Picture films were digitized and processed by the computer to obtain two-dimensional distributions of velocity vectors.

The flow structures on the flood plain were shown to be composed of the zone of a large scale separation vortex motion and the zone of longitudinal vortex motions. The flow structures in the lower part of the deeper river course are characterized by the longitudinal vortex motions with the scale of the deeper course depth.

The flow structure of particular interest is the separation vortices occurring in the interacting region between flood plain flow and deeper course flow. The three-dimensional structures of these vortices were elucidated and possibility for these vortices to appear in flood conditions was discussed.

1. 概 説

わが国では、河川の間地域及びデルタ地域において複断面形状が採用されることが多く、しかもそこでは一般に河道は蛇行している。複断面蛇行河道においてはその複雑な境界条件のために、二次流や剥離など複雑な流況が生じ、それが局所的な洗掘や堆積の原因となる。すなわち、高水敷では、低水路河岸近くに堆積が多く生じるので、後背湿地化が進行し、河川が荒廃する。木下^{1),2)}の1986年の石狩川洪水後の現地調査によれば、高水敷堆積は地形によっては1 mに達している。低水路では一般に、凸岸上流部に局所洗掘が、その下流部に堆積が生じる。

複断面蛇行流に関しては、従来から、実験的あるいは現地観測によっていくつかの特徴が明かにされてきた。木下³⁾は淀川における洪水時航測により洪水流の表面流速を詳細に計測し、洪水主流部に低水路を一致させれば安定河道が得られる事を指摘した。木下⁴⁾は複断面蛇行流の三次元流況を着色された中立粒子をトレーサーとして用いて立体観測し、とりわけ高水敷から低水路へ流入する流れおよびその逆の流れの特性を把握した。石川ら⁵⁾は、水面の流況を可視化法により把握し、木下と同様に高水敷上の流れと低水路の流れとの交換があることを指摘し、それが低水路河岸の局所洗掘の原因になり得ることを指摘した。上記のような流れは氾濫状態にある河川の河岸付近の流れと共通するものがある。伊勢屋⁶⁾は中小河川の洪水時現地観測により、そこでの興味ある土砂堆積特性を見いだした。著者ら⁷⁾は中小河川の氾濫後

の現地調査に基づいて、洪水時の流れの構造を基礎実験により検討した。

一方、最近数値解析による現象解明も進展しつつある。森ら^{8),9)}は複断面蛇行流の構造を三次元数値計算によって解析した。とくに高水敷から低水路に流入する低速流体の果たす特異な役割を明かにした。

木下¹⁰⁾は複断面水路の流況に関連する因子として、1) 交互砂州を形成する蛇行水路、2) 低水路形状、3) 堤防線形を考え、そのうちの2)と3)の関連を実験的に検討した。その結果、低水路の蛇行の振幅が堤防のそれの1/2で、低水路の蛇行の位相が堤防のそれより1/7.2波長下流側にずれている河道(e型河道)においては、流心線が低水路内を通り、低水路における洗掘深さは僅かとなり、しかも最深部は低水路護岸から離れたところに生じることが明かにされた。この知見は河川工学的に非常に重要であり、そのような河道における流れの構造を明かにすることは重要な意味をもつと考えられる。

本研究は、以上のような問題意識から、e型河道の優位性を検討することを目的とし、その第一段階として、堤防線形と低水路形状が同じ位相で同じ振幅の場合(木下のc型河道)における流れの内部流況の特徴を実験的に解明しようとしたものである。

実験の目的からして、流れの内部流況を実験的に把握する必要がある。そこで、複断面蛇行形状の実験水路で流れの水平断面をスリット光で照射し、水路上方から二台のカメラを用いて断面内の流況を僅かな時間差で撮影した。撮影は水路床面からいろいろな高さで行われた。得られた写真を数値化して計算機に入力し、画像処理の手法によって撮影断面における二次元的な流速分布を得た。

本報では、用いた画像処理の方法について述べるとともに、それによる解析から得られた複断面蛇行流の乱流構造の特徴について述べる。

本報告において、 x 、 y および z 軸は直交直線座標系で、 x 軸は主流流下方向、 y 軸は水平横断方向、 z 軸は高水敷面から鉛直上向き方向である。また、 x および y 方向の流速成分をそれぞれ u および v で表記している。

2. 実験方法と実験条件

水路の平面形状の概要はFig. 1(a)に示すようであり、低水路線形と堤防法線とは同じ位相をもつ。水路の中心線には最大偏角 20° 、波長180 cmのsine-generated曲線を採用した。水路中心線に直角方向の横断面はFig. 1(b)に示されるようであり、水路幅60 cm、低水路幅20 cm、低水路の深さ21 mm、高水敷上の水深19 mmであり、高水敷上には3 mm粒径の砂粒で粗度付けした。低水路河床は粒径0.4 mmの砂で構成されているが、本実験の水理条件では、限界掃流状態以下である。流量は1.38 l/s、水路床勾配1/1000、水面勾配1/9000である。

流れの水平断面を水路の両側から厚さ3 mmのシート状の光で照射し、その断面内の流況を水路の上方に光軸が平行になるように並べて設置した二台のカメラを用いて僅かな時間差(約38 ms)で撮影した。トレーサーとしては0.4 mmのポリスチレン粒子を用い

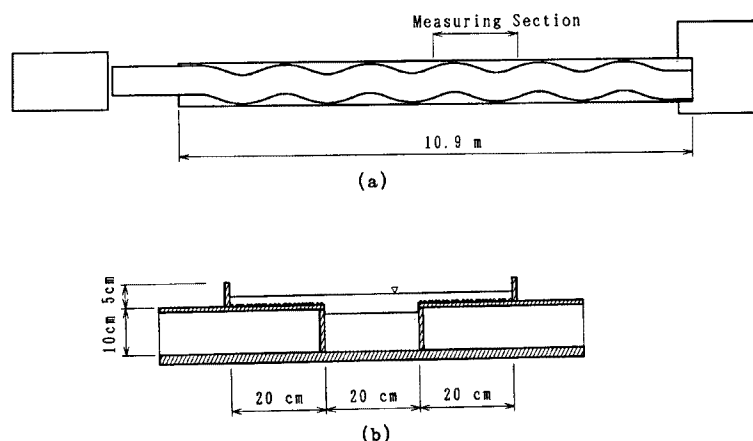


Fig. 1. Experimental setup. (a) Plan view. (b) Cross-section of the experimental channel.

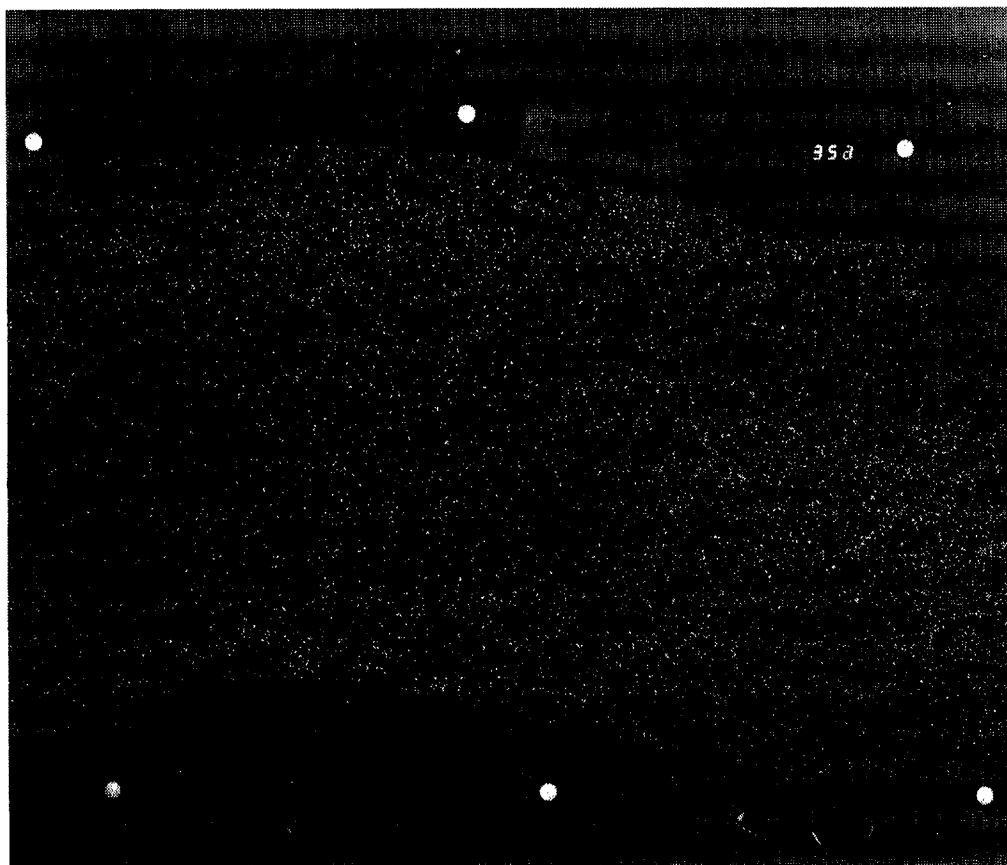


Photo. 1. Photograph of the flow pattern in the horizontal cross-section of the meandering channel flow with compound cross-section.

た。カメラフィルムの高水敷面から高さは 256 cm，撮影断面の高水敷面からの高さ z は -16.5， -10.0， 6.7， 17.5 mm である。得られた写真の一例を **Photo. 1** に示す。写真の周辺に写し込まれた 6 個の標定点の位置座標は予め計測されており，これによって一対の写真の位置関係を得た。

3. 画像解析

3.1 写真画像の数値化

約 40 ms 間隔で撮影された二枚一組の写真フィルムを東京大学木曾観測所の PDS マイクロデンストメーターにより 10 ミクロン間隔（実長 0.48 mm）で 12 ビットデータとして数値化した。解析には防災研究所宇治川水理実験所の計算機（NEC MS 190）を用いた。この計算機の容量上の制約のため，数値化されたデータを 8 ビットデータに変換して計算機に入力した。

3.2 標定点の中心点の位置座標の決定

標定点及びその周辺の各ピクセルにおける濃度の分布の一例を **Fig. 2** に示す。写真画像上の標定点の半径（ピクセル単位）とほぼ等しい標準偏差をもつ二次元ガウス分布を想定し，これと標定点の近傍のある点を中心とする濃度分布との相関係数を計算し，それをその点における相関係数値とする。標定点及びその近傍の各ピクセル毎にこの相関係数を計算し，さらにそれらの内最大値を与える 9 点（縦方向 3 点，横方向 3 点）の間を内挿することにより相関係数の最大となる位置を求め，それを標定点の中心の位置座

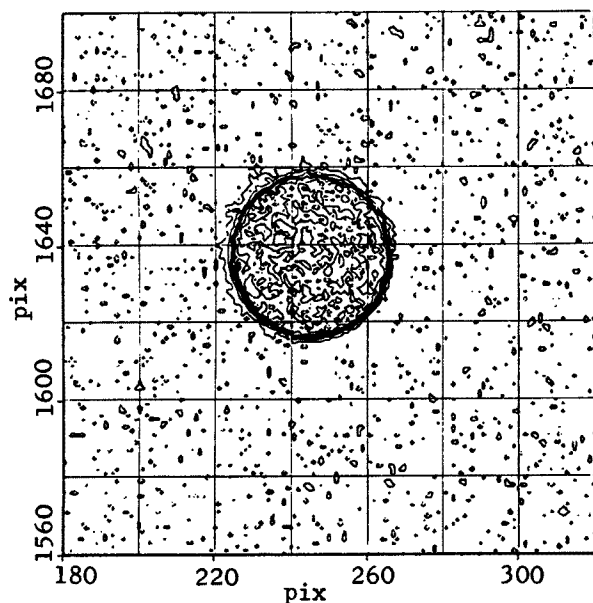


Fig. 2. Intensity distribution around a reference mark in a photograph.

同様の大きさの微小領域 (b 領域と呼ぶ) における濃度分布との間の相関係数を計算した。続いて、 b 領域を 1 ピクセル分 x 方向或は y 方向にずらして、同様に相関係数を計算した。以上の操作を繰り返すことにより、第一の写真の A 点に対して第二の写真上に相関係数の分布が得られるが、そのうちの最大の相関係数を与える点が A 点の対応点と考えられる。ただし、1 ピクセルの大きさが実長にして約 0.48 mm あるので、実際には、求めた対応点を中心とする 9 点 (x 方向 3 点、 y 方向 3 点) における相関係数の分布から、第二の写真においてそれが最大となる位置の座標を内挿法によって求め、それが A 点の真の対応点であるとした。以上の方法により、流下方向および横断方向に 10 ピクセル (実長 4.8 mm) 毎に流速ベクトルを算定した。

得られたベクトルおよびその位置座標 (ピクセル単位) から水面での屈折の影響を除去し、さらに、標定点との相対的な位置関係を用いて真のベクトルならびにその位置を求めた。

3.4 過誤ベクトルの除去

以上のようにして得られた結果の一例として $z = 17.5$ mm 断面において算出されたベクトルの分布を Fig. 3 に示す。本図には座標系もあわせて示されている。また、6 個の十字印は標定点を示している。本図では、水路横断方向には得られた全ての流速ベクトルを、流下方向には 5 つに 1 つの割合で図示している。ただし、相関係数が 0.2 以下のベクトルはプロットされていない。

図からも明らかなように得られたベクトルの内には誤って求められたものも若干含まれている。これらの過誤ベクトルを以下の方法で除去した。まず、ベクトルを算出したときの相関係数が 0.4 以下のものを除去した。次に、ベクトルを計算した流れの場をいくつかの小領域に分割し、各小領域毎にその中に含まれるベクトルについてその x 方向成分 u と y 方向成分 v とを二成分とする二次元ヒストグラムを作成し、モード値からの偏位が閾値を越えるベクトルを除去した。

3.5 格子点ベクトルの計算

以後の計算の便のため、水路法線に一致した直交曲線座標系を設定し、そこでの各格子点でのベクトルを内挿法で求めた。この格子点の間隔は横断方向には 5 mm、流下方向には水路中心線上で 7.5 mm である。

標とした。

3.3 速度ベクトルの計算

流速ベクトルの計算法として著者らは三種の方法を用いてきた。その第一は、流跡線の写真から流速ベクトルを得る方法¹¹⁾であり、第二は、微小時間差で撮影された二枚の写真を用いて相互相関法により個々のトレーサーを追跡する方法^{12), 13)}、そして第三は、同じく相互相関法により任意の位置の速度ベクトルを計算する方法^{14), 15)}である。ここでは第三の方法によって速度ベクトルを計算することにした。すなわち、一对の写真のうち第一の写真の速度を求めるべき位置 A の周りの微小領域 (a 領域と呼ぶ、本計算では x 方向に 23 ピクセル、 y 方向に 15 ピクセルとした) における濃度分布と、その点から平均流速に相当する距離だけ流下した点を第二の写真の上求め、その点を中心とする同様の大きさの微小領域 (b 領域と呼ぶ) における濃度分布との間の相関係数を計算した。続いて、 b 領域を 1 ピクセル分 x 方向或は y 方向にずらして、同様に相関係数を計算した。以上の操作を繰り返すことにより、第一の写真の A 点に対して第二の写真上に相関係数の分布が得られるが、そのうちの最大の相関係数を与える点が A 点の対応点と考えられる。ただし、1 ピクセルの大きさが実長にして約 0.48 mm あるので、実際には、求めた対応点を中心とする 9 点 (x 方向 3 点、 y 方向 3 点) における相関係数の分布から、第二の写真においてそれが最大となる位置の座標を内挿法によって求め、それが A 点の真の対応点であるとした。以上の方法により、流下方向および横断方向に 10 ピクセル (実長 4.8 mm) 毎に流速ベクトルを算定した。

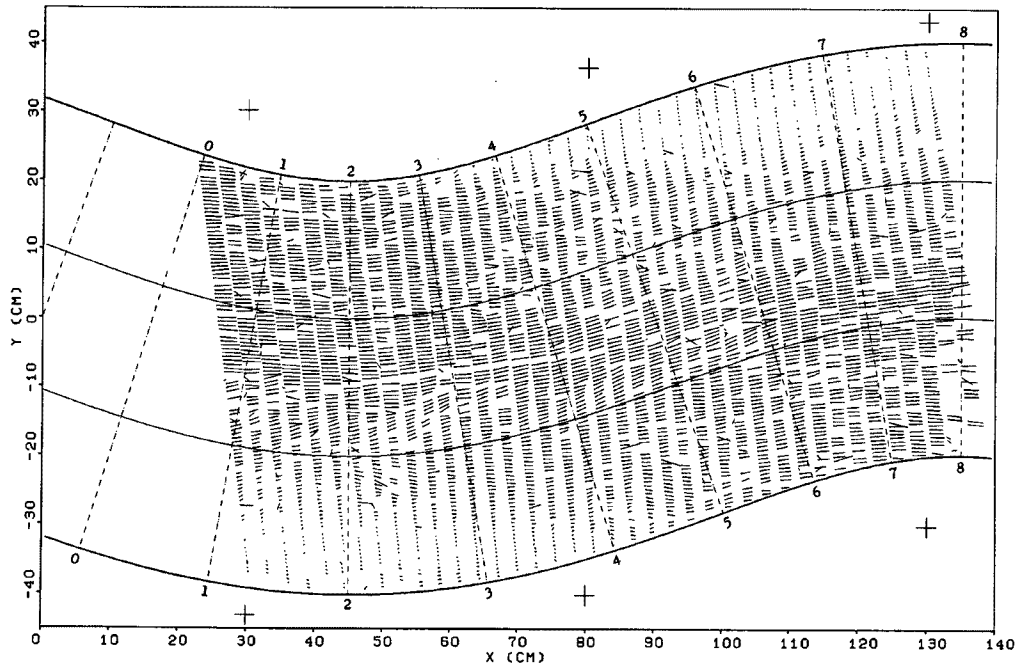


Fig. 3. An example of velocity vectors obtained by image processing.

4. 解析結果

以上の解析によって得られたデータの内 (a) x 方向流速成分 u , (b) 流線のパターン, (c) 渦度ベクトルの z 方向成分 ($\text{rot} = \partial v / \partial x - \partial u / \partial y$) ならびに (d) 二次元発散 ($\text{div} = \partial u / \partial x + \partial v / \partial y$) は基本的な水理量で, 以下の検討でも度々引用されるので, まとめて示す。Fig. 4 は水面に近接した測定断面 $z = 17.5 \text{ mm}$ における上記の諸量を示している。Fig. 5 は高水敷面の直上方の断面 $z = 6.7 \text{ mm}$ における, Fig. 6 は高水敷面下方の断面 $z = -10.0 \text{ mm}$ における, そして Fig. 7 は低水路水路床に近接する断面 $z = -16.5 \text{ mm}$ における諸量の分布を示している。等高線間隔は, u については 1 (cm/s) , rot は 1 (1/s) そして div は 0.5 (1/s) となっている。なお, 図には上記の諸量の半波長分が示されている。

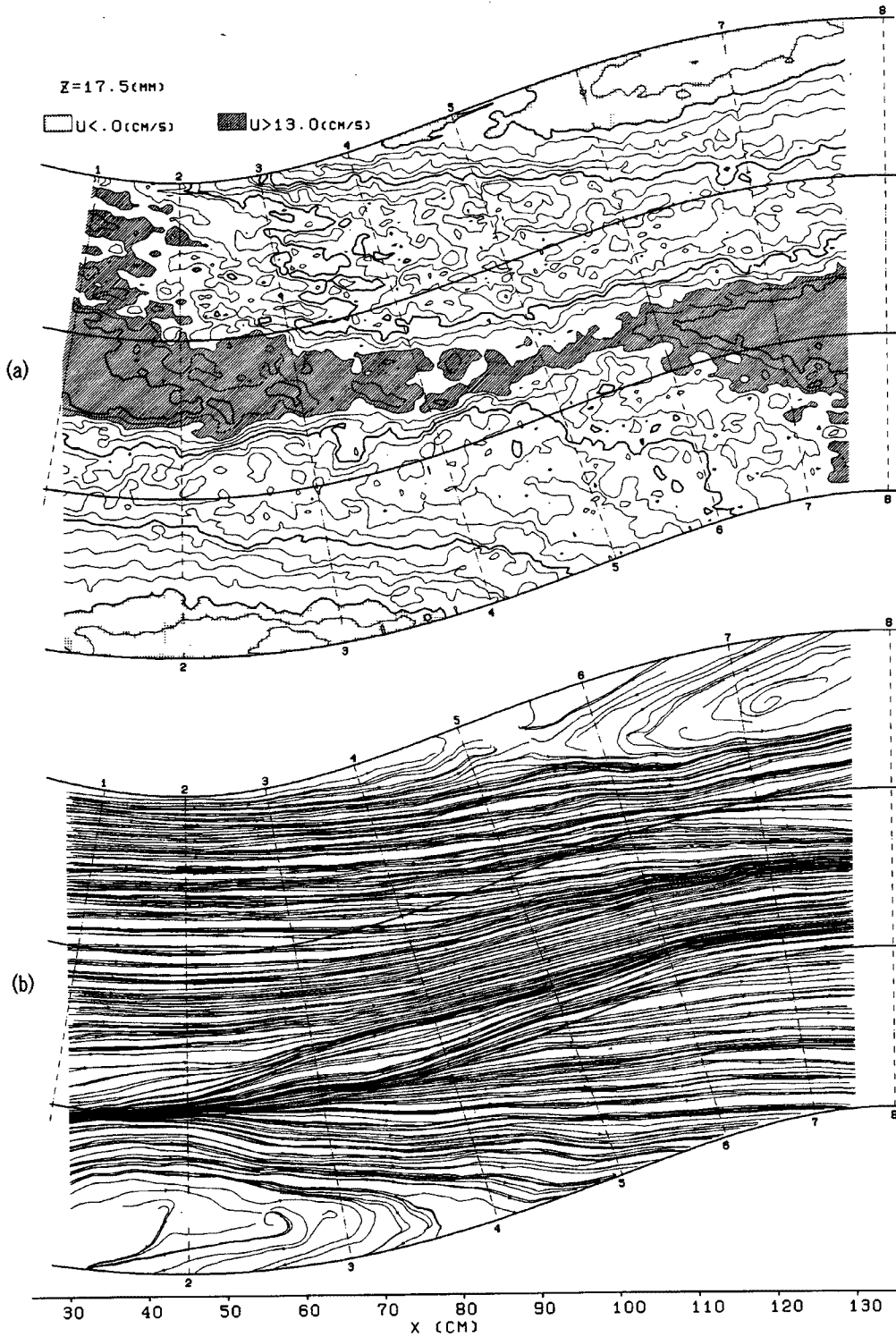
5. 高水敷上の流れの特徴

5.1 凸岸下流部の剝離渦

$z = 17.5 \text{ mm}$ および $z = 6.7 \text{ mm}$ の水平断面における流線のパターンを示す Fig. 4 (b), Fig. 5 (b) ならびにそれぞれの断面における流速分布を示している Fig. 4 (a), Fig. 5 (a) から, 高水敷においては凸岸の下流側で側壁近くにはかなり広い剝離域が発達しており, そこでは流速は小さいが大きな水平渦運動が観察される。

5.2 高水敷上の流速分布の方向特性

高水敷上の剝離域の外側の流れについては, 凸岸の上流部では流れが低水路から乗り上げて来ており, 平均的に見ると加速流となっている。一方, 凸岸下流部の流れは減速流となっている。これらの加速流域あるいは減速流域の流速分布には, Fig. 4 (a) においても Fig. 5 (a) においても流下方向に細長く伸びた高速領域と, 同様の形態の低速領域とが横断方向に交互に並んだ縞状構造があることが認められ, しかも



(a) distribution of x-component u of velocity and (b) streamlines in the cross-section $z=17.5$ cm (continued).

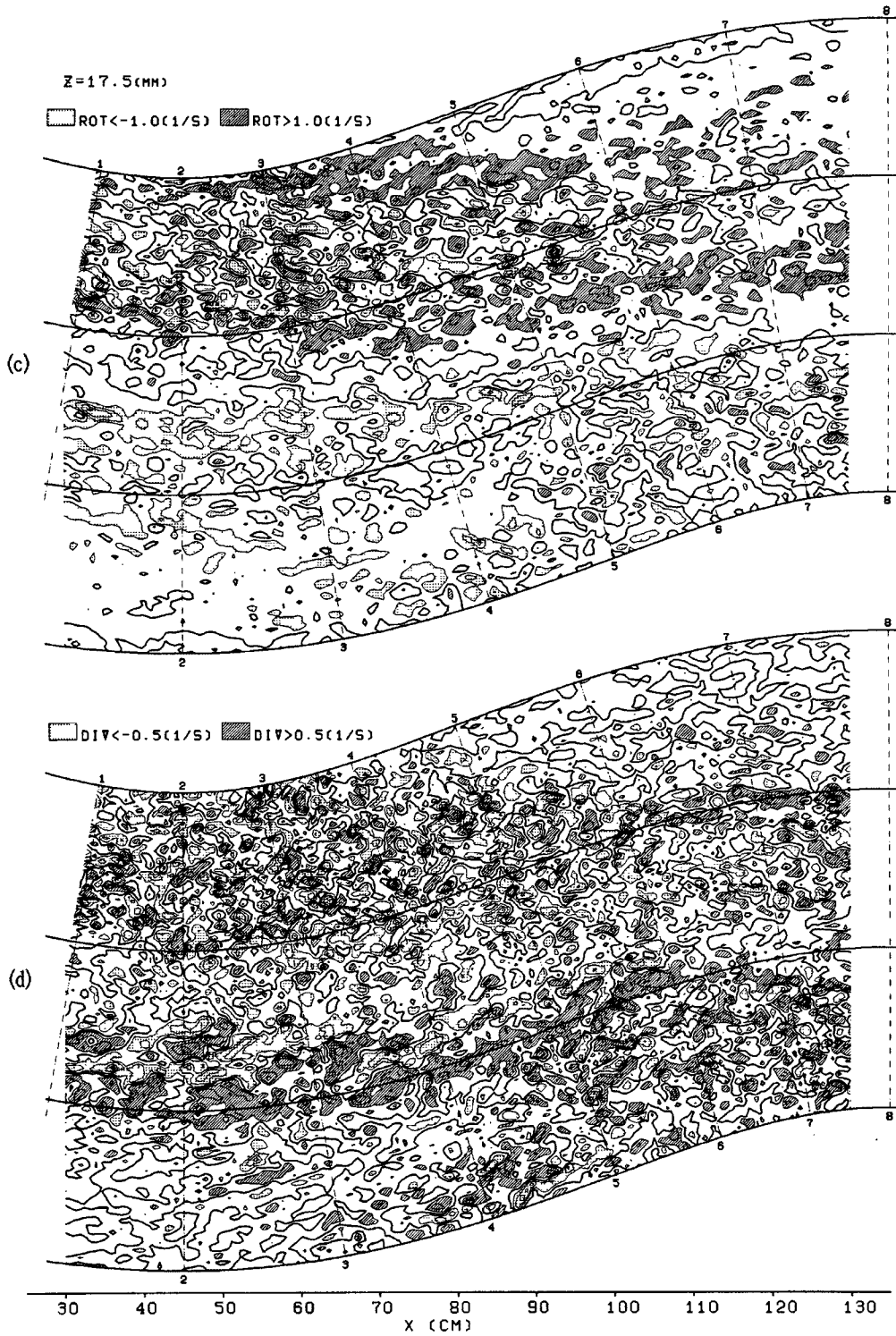
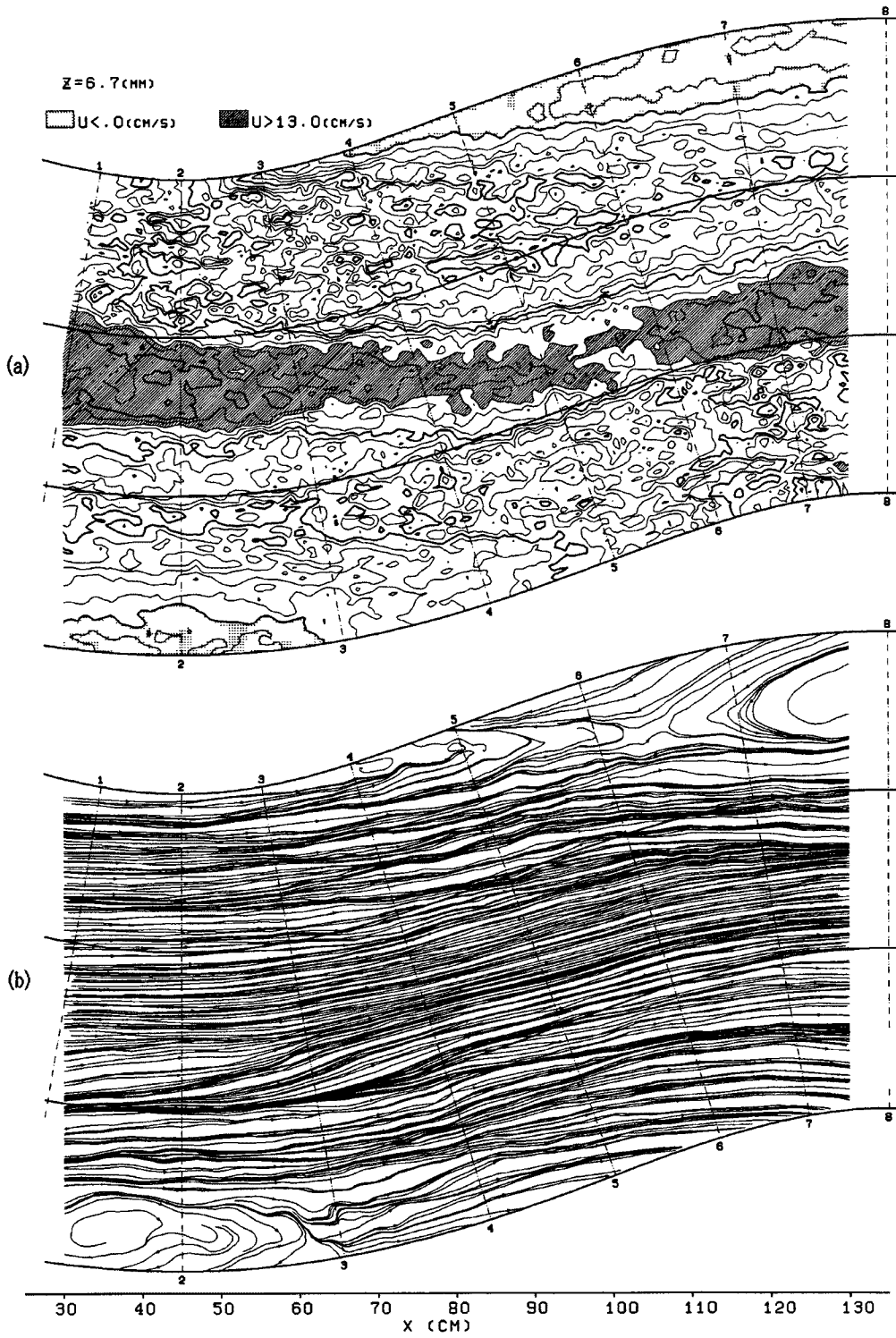


Fig. 4. (c) distribution of z component of vorticity (1/s) and (d) distribution of two-dimensional divergence (1/s) in the cross-section $z = 17.5$ cm.



(continued)

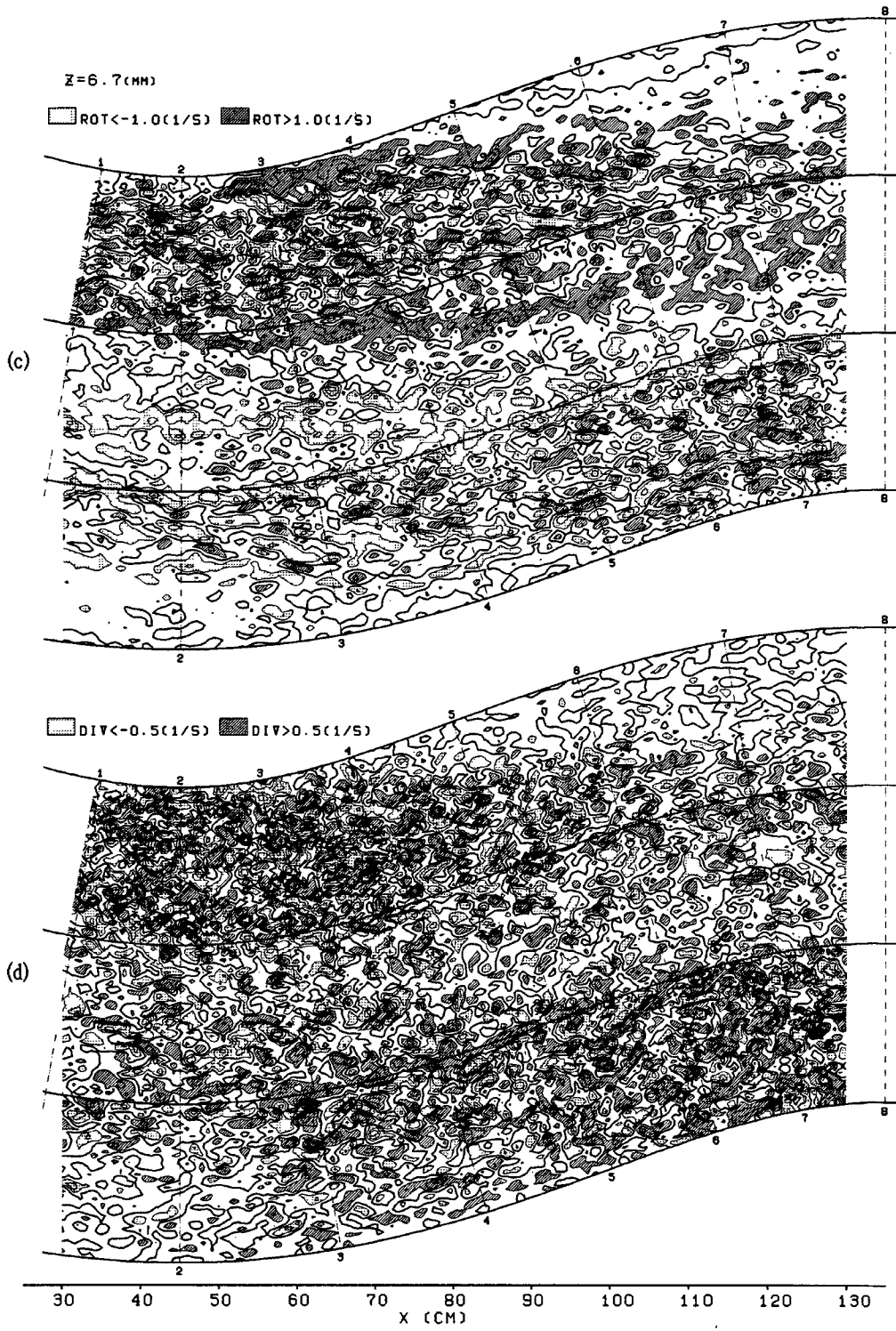


Fig. 5. The same with Fig. 4 but in the cross-section $z=6.7$ mm.

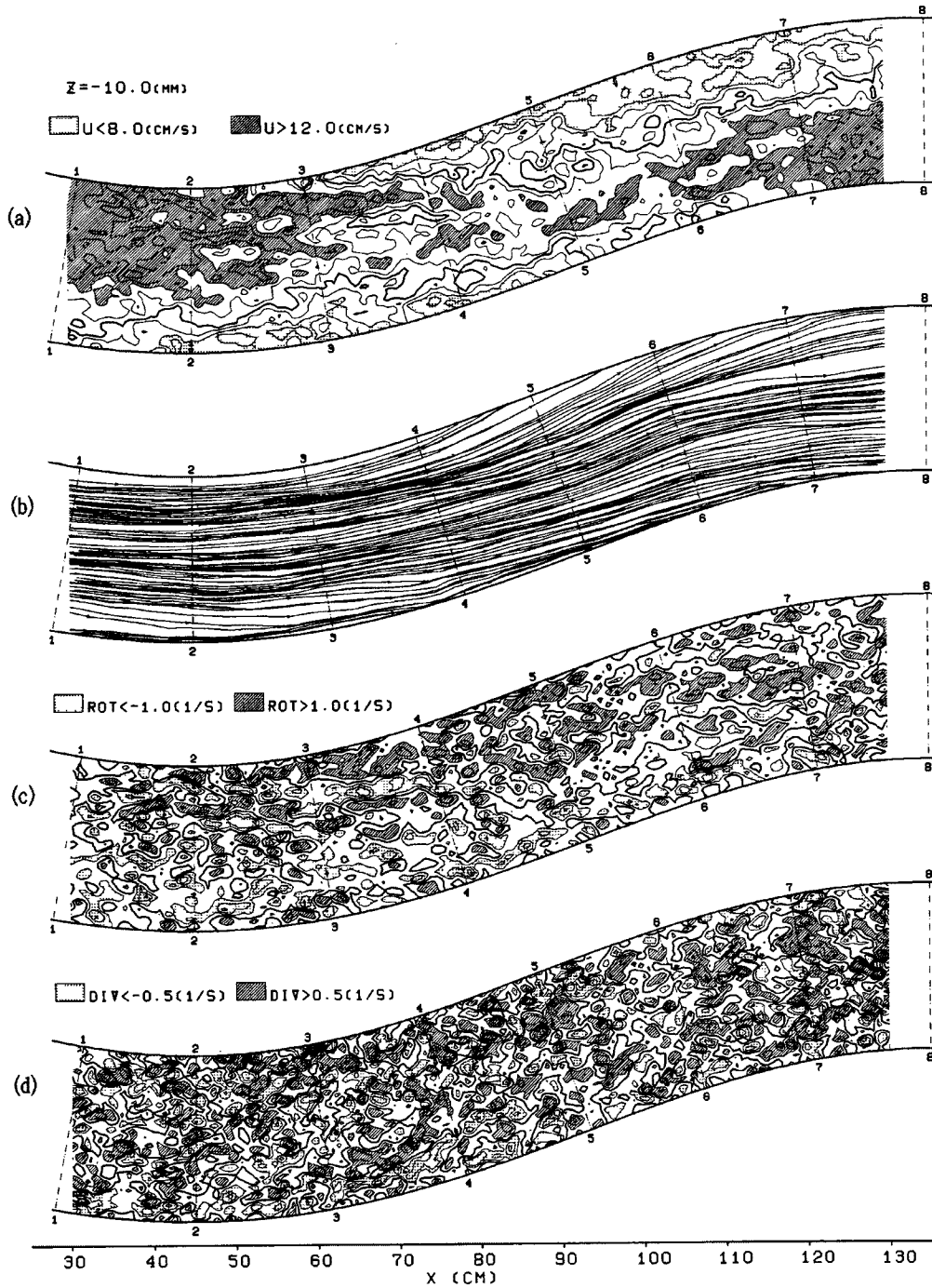


Fig. 6. The same with Fig. 4 but in the cross-section $z = -10.0$ mm.

高速領域どうしの平均的な間隔はほぼ3 cmとなっている。これらの水平断面における渦度の分布を示している Fig. 4 (c) および Fig. 5 (c) において上記のような縞状構造はとりわけ顕著に観察される。ところが興味あることに、これらの峰線の方法は Fig. 4 (b) あるいは Fig. 5 (c) で示されている流線の方法とある角度ずれており、この傾向は減速域である凸岸下流部において特に顕著であることが認められる。すなわち、渦度の分布の正領域は細長く流下方向に連なっており、それらの峰線の方法は流線の方法とある角度をなしている。

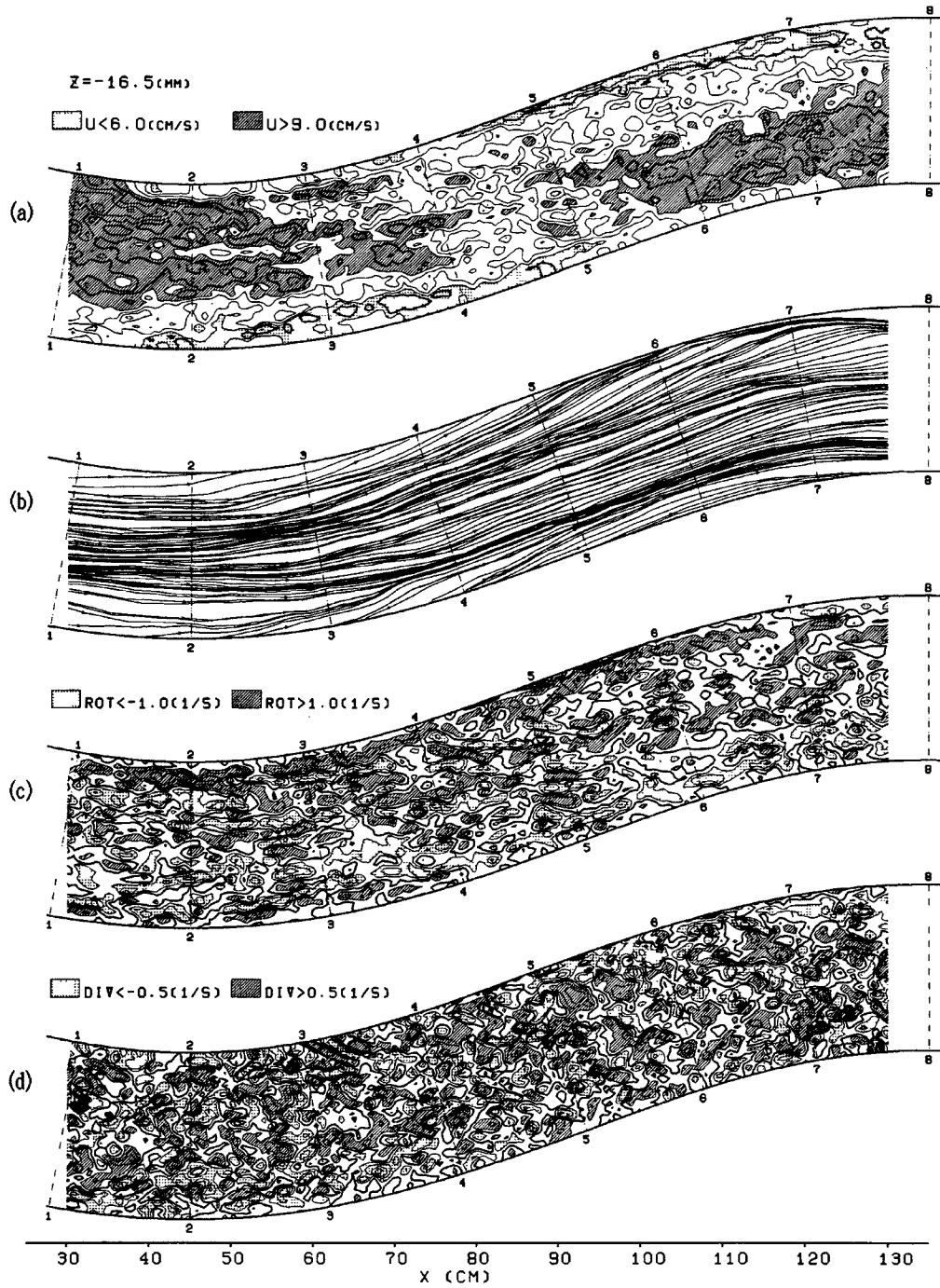


Fig. 7. The same with Fig. 4 but in the cross-section $z = -16.5$ mm.

Fig. 8(a)は、高水敷面直上の $z = 6.7$ mm断面の流速分布の峰線を白丸で、谷線を黒丸で示したものであるが、上記のような流速分布に関する縞状の構造が一層はっきりと認められる。本図を詳細に見てみると、上記のような峰線の卓越した方向角度のほかにもそれと斜交するもう一つ方向性があることがわかる。すなわち、流速の峰線は二種の方向性を有しており、それら二種の峰線の交点を流下方向に連ねる方向が流線方向と一致しているのである。水面近傍の $z = 17.5$ mm断面についてはこの様な流速分布の方向性に関

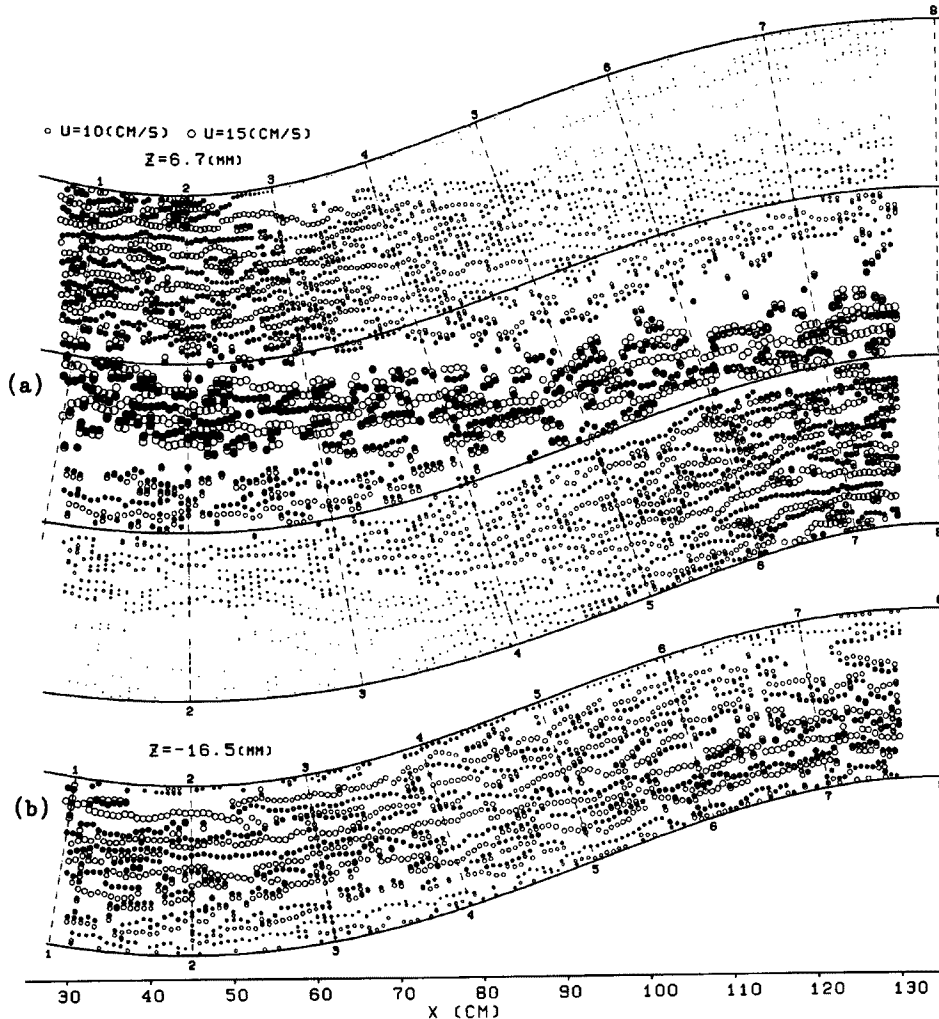


Fig. 8. The ridge line (blank circle) and the trough line (black circle) of the velocity distribution in the cross-section of (a) $z=6.7$ mm and (b) $z=-16.5$ mm. The radius of a circle shows the velocity value.

する特徴はさらに顕著に認められる。

5.3 二次元発散の分布

断面 $z=6.7$ mm における二次元発散を示す Fig. 5 (d) においては、その断面が路床近傍に位置することを考慮すると、発散が正の領域では下降流が、負の領域では上昇流が生じていると見なせる。この発散の分布と、同じ断面の流速の峰線の分布とを照合してもあまり顕著な対応性は認められない。しかし、参考までに、この断面における $\partial v / \partial y$ の分布を計算してみたところ、その配置パターンは Fig. 5 (c) に示されている渦度の分布とよく対応していることが認められた。

5.4 高水敷上の流れの乱流構造

上記のような流速分布に関する特徴が減速域である凸岸下流部においてとりわけ顕著に生じていることを考慮すると、これらは高水敷面に生成された馬蹄型渦によって生じていると考えられる。それら馬蹄型渦の配置を反映していると考えられる断面 $z=6.7$ mm の渦度分布に二方向性があることから、馬蹄型渦は

千鳥状に配列されていると推測される。すなわち、高水敷上の流れにおいてはこれらの馬蹄型渦によって並列螺旋流が形成され、それがまた馬蹄型渦の配列を規則的なものとしていていると考えられる。

著者ら¹⁴⁾は、一様な開水路流れにおける流速分布の方向特性を相関解析の方法で検討し、乱流の基本的な構造が馬蹄型渦であること、またたとえそれらの渦の平面的な配置が不規則的であったとしても、流速の平面的な分布の中に主流流下方向とは異なる方向性があり、しかもその方向の主流方向となす角度については u のそれと v のそれとで異なることを示した。本報告における実験結果は、減速流といった乱れの生成が著しい流れでは馬蹄型渦の配列そのものにも規則性が出てくることを示唆している。またこの場合、水面における上昇流の位置や水面における高速部あるいは低速部はいっそう整然と配列されることを示している。

6. 低水路における流れの特徴

6.1 流下方向流速成分 u の分布

流下方向流速成分 u (mm/s) の分布を示している Fig. 4(a), Fig. 5(a), Fig. 6(a) および Fig. 7(a) の何れにおいても、低水路における流れについては水路の変曲点周辺の領域では全般的にその流速が小さくなっている。

6.2 高水敷面より下の低水路流れの構造

Fig. 8(b) は底面近傍の $z = -16.5$ mm 断面における流速の峰線を白丸で、谷線を黒丸で示しており、丸の直径はそこでの流速の絶対値に比例している。本図から、側壁面から隔った所では低速部と高速部が規則的に縞状に並んでおり、それら縞状構造の方向は平均的には流線の方向と並行していることが認められる。同じ断面の渦度 rot の分布を示す Fig. 7(c) においても、水路中央部では渦度が整然と流下方向に配列されており、それが u 分布の縞模様と対応している。著者ら¹⁴⁾は、開水路の水路床近傍の乱流構造が、底面直近の強渦度の渦糸群、それらが組織化されて形成される馬蹄型渦ならびに馬蹄型渦を数個集めて形成される縦渦から構成される多重構造をもつことを示した。上記のことから、水路床近くに馬蹄型渦によって形成された縦渦がほぼ規則的に配列されていることがわかる。これら高速部の横断方向の平均的な間隔は低水路床近傍の断面では2ないし4 cmで、高水敷直下の $z = -10$ mm 断面では約4 cmとなっている。この4 cmという値は全水深と同等であり、低水路深さの2倍となっていることは注目される。

さらに、高水敷面より下の断面においては、凸岸下流の側壁面近くと凹岸部のやはり側壁近くでは、上記のような縦渦は明確には認められず、これらの領域内の流れの構造は上に述べたような低水路中央部の構造とは異なっていると考えられる。これらの領域は図の上では別々になっているが、水理学的には連続しているものと見なされる。これらの領域の流れの特徴については7.において検討する。

6.3 高水敷面より上の低水路流れの構造

一方、高水敷より上の二つの水平断面では、それらの断面における渦度分布を与える Fig. 4(c), Fig. 5(c) が示す様に、低水路域の流れに上記の様な縦渦状の構造は認められず、むしろ低水路凸岸から発達している強いせん断層が流れの主たる構造となっている。この様なせん断層は上記の凸岸下流部の壁面近くの流れの上層における構造と考えられる。

以上のように、低水路においては高水敷面あたりを境として上と下とで流れの構造が変わっているようである。

6.4 水路床近傍の二次元発散の分布の特徴

$z = -16.5$ mm の断面が低水路床面に近いことを考慮すると、ここでの二次元発散 div の分布を示す Fig.

7(d)において発散の値が正の領域は下降流を、負の領域は上昇流をそれぞれ意味している。低水路中央部では、発散が正の領域と負の領域とが一見不規則的に配置されており、先に示した縦渦の規則的な配置との対応が認めにくい。ところが、参考までに Fig. 9(a)に同じ断面における $\partial u/\partial x$ を、Fig. 9(b)に $\partial v/\partial y$ を別々に計算して示してあるが、上記の高水敷より下に形成される低水路深さ規模の縦渦の横断方向の配置は主として $\partial v/\partial y$ の分布に対応していることが認められる。一方 Fig. 7(c)に示される渦度分布から、絶対値が特に大きな正負の渦度領域が対を成すもの（いわゆる渦対）を識別すると、それらの流下方向の配置は二次元発散のうちの $\partial u/\partial x$ の分布に対応していることが認められる。このような二次元発散の二成分と渦度の分布との対応関係は壁面乱流の構造を見る上で興味深い現象である。

7. 低水路河岸付近の流れの特徴

7.1 低水路凸岸上流部の上昇流

Fig. 4(d)に示される $z = 17.5$ mm断面における二次元発散分布から、低水路の凹岸から凸岸にかけて発散が大きな領域が低水路河岸に沿って分布していることが認められる。この断面が水面に近接していることを考慮すると、発散の正の値は上昇流を意味するから、この領域には強い上昇流が分布していることがわかる。 $z = 6.7$ mm断面においても Fig. 5(d)に示される様に、同様の領域に発散の正の大きな値が分布していることから、この上昇流は高水敷面より下の低水路部分から上がってきていることがわかる。Fig. 4(b)に示されている流線のパターンから判断すると、この部分は低水路の流れが高水敷に乗り上げるところに相当し、ここでは Fig. 5(a)に示されるように低水路における流速が高水敷で急速に低下している。この様な流況は木下⁴⁾によって詳細に把握されている。

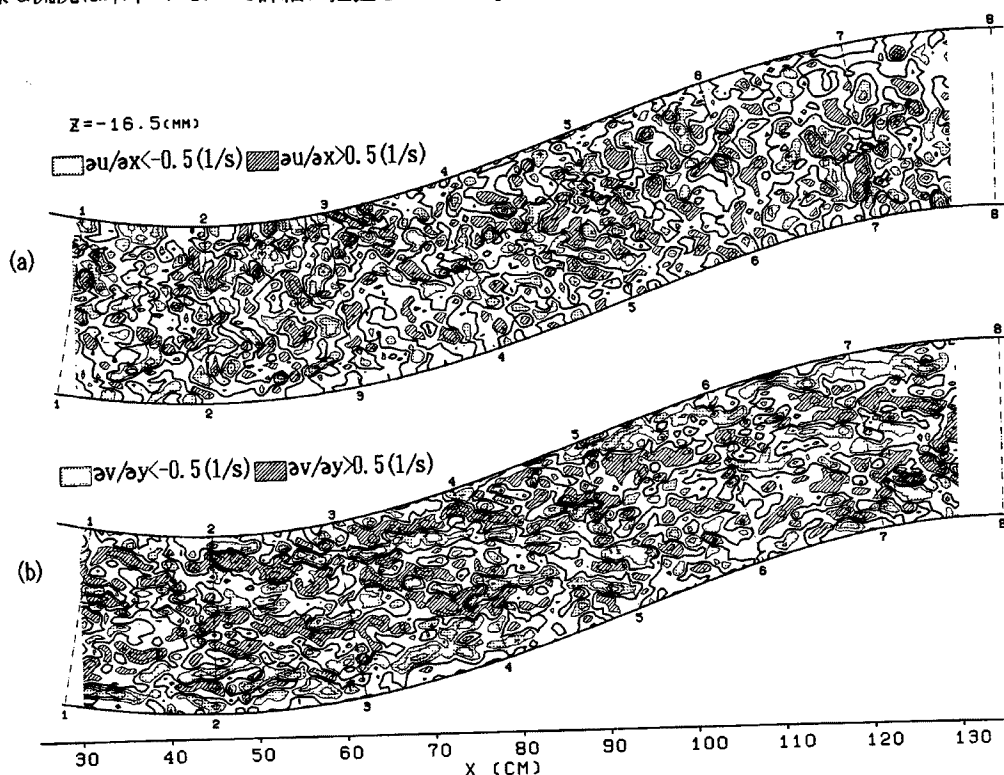


Fig. 9. Distribution of (a) $\partial u/\partial x$ and (b) $\partial v/\partial y$ in the cross-section $z = -16.5$ mm. The contour interval is 0.5 1/s.

したがって、河の流れが上砂を含有している場合には、低水路の凹岸から凸岸にかけては高水敷上に土砂が堆積することになるであろう。伊勢屋⁶⁾が桜川で観測した河畔堆積はこの様な水理現象に基づくものと考えられる。とくに低水路河岸にこれほど強い上昇流があると、低水路河床に洗掘があれば高水敷の堆積は増大すると考えられる。

一方木下¹⁾は、蛇行河道形成との関連において低水路凸岸から下流部における河岸堆積の重要性を指摘している。この様な低水路凸岸上流部の堆積機構とその下流部の堆積機構がどのような機構で生じているのか、また、どのような関連性をもっているのかについて興味もたれる。そこで、以下に低水路河岸の流況について検討する。

7.2 低水路側壁面の剝離せん断層

低水路床面に近接する $z = -16.5$ mm断面の発散 div の分布を示す Fig. 7(d)において、低水路凸岸から凹岸にかけて低水路側岸近傍で上昇流が卓越しており、しかもそれら上昇流が顕著に生じている領域が側岸に斜交して細長く下流方向に伸びていることが注目される。また、同じ断面の渦度を示す Fig. 7(c)からは、その領域が右岸に位置する場合にはそこでは全体として正の渦度が卓越しているのに対して、左岸に位置する場合には負の渦度が低水路河岸に斜交して細長く下流方向に伸びていることが認められる。しかも、先に示した強い上昇流の領域は、これらの渦度領域と低水路側壁面との間に位置している。以上の流況から、低水路の底面近傍では、低水路側壁面のせん断層が凸岸から凹岸にかけて数ヶ所にわたって剝離していると考えられる。大きな渦度をもつ領域は渦の水平断面と考えられるから、この渦を剝離せん断渦と呼ぶこととする。

Fig. 10は、水面近くの $z = 17.5$ mm断面での流向を v/u で求めた値に対する底面近くの $z = -16.5$ mm断面でのその偏差を示したものであるが、下層断面における剝離せん断層の発生領域では偏差角が大きくなっていることが注目される。

7.3 上層の流れにおけるせん断層

Fig. 4(a)とFig. 5(a)に示される上層の水平断面の流速分布から、高水敷面より上層の流れには、低水路凸岸のやや下流からせん断層が発達していることが認められる。そこではFig. 4(c)とFig. 5(c)に示される様に強い渦度をもつ領域が断続的に配置されており、この強い渦度の領域のスケールも底面におけるよりもずっと大きくなっていることが認められる。さらに、高水敷より下層の断面では剝離せん断層が低水路側壁面のごく近傍にありしかも凸岸のあたりから始まっているのに対して、上層の流れにおける

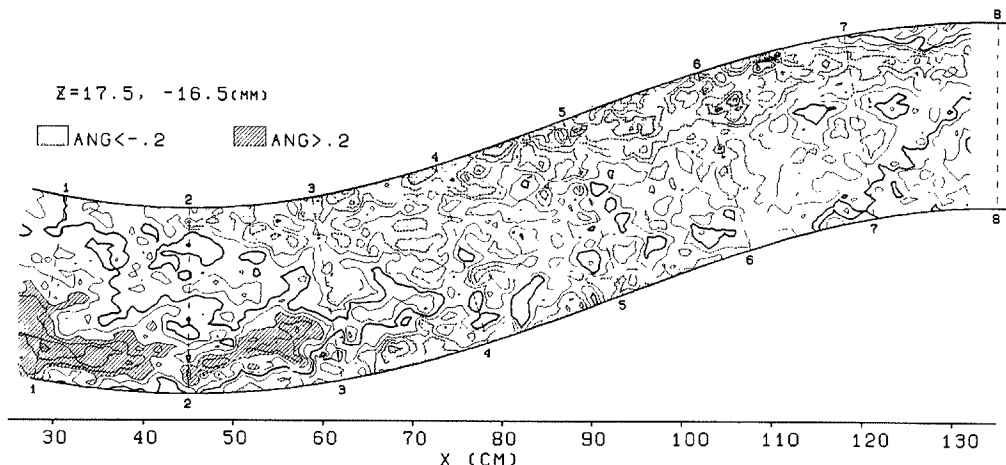


Fig. 10. The deviation of v/u value in the cross-section $z = -16.5$ mm from that in the cross-section $z = 17.5$ mm.

せん断層は、低水路凸岸のやや下流部から発達し、低水路側壁面の位置からも大きく隔たっていることがわかる。

下層の流れでは、Fig. 6 (b)あるいはFig. 7 (b)に示される様に流向が低水路中央部から側壁面に向かっていているのに対して、上層の断面では、Fig. 4 (b)あるいはFig. 5 (b)に示される様にその逆になっていること、ならびに、流下方向流速成分には流れの上層と下層とで大きな差があることを考慮すると、上記の諸事実から上層のせん断層は下層の剝離せん断層の上部における構造であると推測される。すなわち、上層のせん断層を構成するせん断渦は下層の剝離せん断渦と結合していると考えられる。このような渦群を河岸渦と呼ぶこととする。

7.4 河岸渦の内部構造

これら流れの上層ならびに下層におけるせん断層領域、すなわち河岸渦領域の内部構造を視覚的に把握するために、各断面の流速成分 u および v から平均的な流速を差し引いたうえで、流線を図化した。差し引くべき平均的な流速としては、それぞれの位置を中心とする小領域の平均流速を用いた。小領域の範囲としては、剝離せん断層の幅が各水平断面毎に異なっていることを勘案して、 $z = 17.5$ mm断面では横断方向に35格子点、 $z = 6.7$ mm断面では31格子点、 $z = -10.0$ mm断面では13格子点、 $z = -16.5$ mm断面では11格子点を取り、流下方向にはいずれの断面においても21格子点をとった。得られた流線のパターンをFig. 11 (a)-(d)に示す。本図には、高水敷より上層の断面については、その内の低水路部分のみ示されている。本図ではまた、渦度の鉛直成分 rot の絶対値が大きな領域も斜線あるいは点を施すことにより合わせて示されているが、流線が渦状の構造を示しているところや流線の曲率の大きなところで渦度が大きくなっていることが認められる。

水路床に近い $z = -16.5$ mm断面においては、本図によると、凸岸から凹岸に至る低水路側壁面近傍では数カ所にわたって流線が上流に向かって集中しており、それらの集中線は太い実線で示されているように大きな渦度をもつ領域につながっている。これらの集中線はまたFig. 7 (a)の低速部に一致している。すなわち、Fig. 7 (a)では低速部分が低水路側面から数カ所にわたって剝離しており、そこではFig. 7 (d)に示されるように、発散の値が負でその絶対値が大きくなっている。すなわち、上昇流が大きくなっている。同様な現象は、上野・宇民⁷⁾によっても観察されている。

高水敷面より上の断面においては、渦列構造は非常に明確に現れている。ここでは、Fig. 11 (a)の断面3-3の低水路側壁近傍あたりから発生したスケールの大きな渦が流下方向に並んでおり、この渦列はその下流側の凸岸付近まで連なっている。流下方向に並んでいる各渦は流線の描く鞍型点により隔てられており、この鞍型点を通り低水路法線とほぼ同じ角度をなす流線にその他の流線が収束している。これらの収束線をやはり太い実線で示したが、これらの位置はFig. 4 (d)およびFig. 5 (d)で示されている二次元発散が負の領域とはっきりと一致している。すなわち、流線の収束線上およびその近傍で下降流が生じている。なお、鞍型点を通過して上記の収束線と斜交する流線からは、その他の流線が発散している様子も同時に観察される。しかし、これらの発散線の位置をやはりFig. 4 (d)あるいはFig. 5 (d)に示されている正の二次元発散の領域の位置と照合してみると、これらの発散線の上では二次元発散の値はそれほど大きくなっていない。これは、渦のある領域では流れは全体的には下降流であるため、下流方向に傾斜した軸をもつ渦によって生成される下降流は強調されて上記の収束線上或はその近傍に強く現れるのに対して、上昇流は相殺されて比較的弱くなるためと考えられる。

Fig. 11 (c)に示される $z = -10$ mmの断面では渦列のパターンは明確には認められない。これは、この断面の高さにおいては高水敷面より上の高速流とそれより下の低速流との流速差のため渦管が流下方向に引き伸ばされると共に渦軸の方向が水平に近くなっているため、渦の水平断面が明瞭に現れなかったものと思われる。

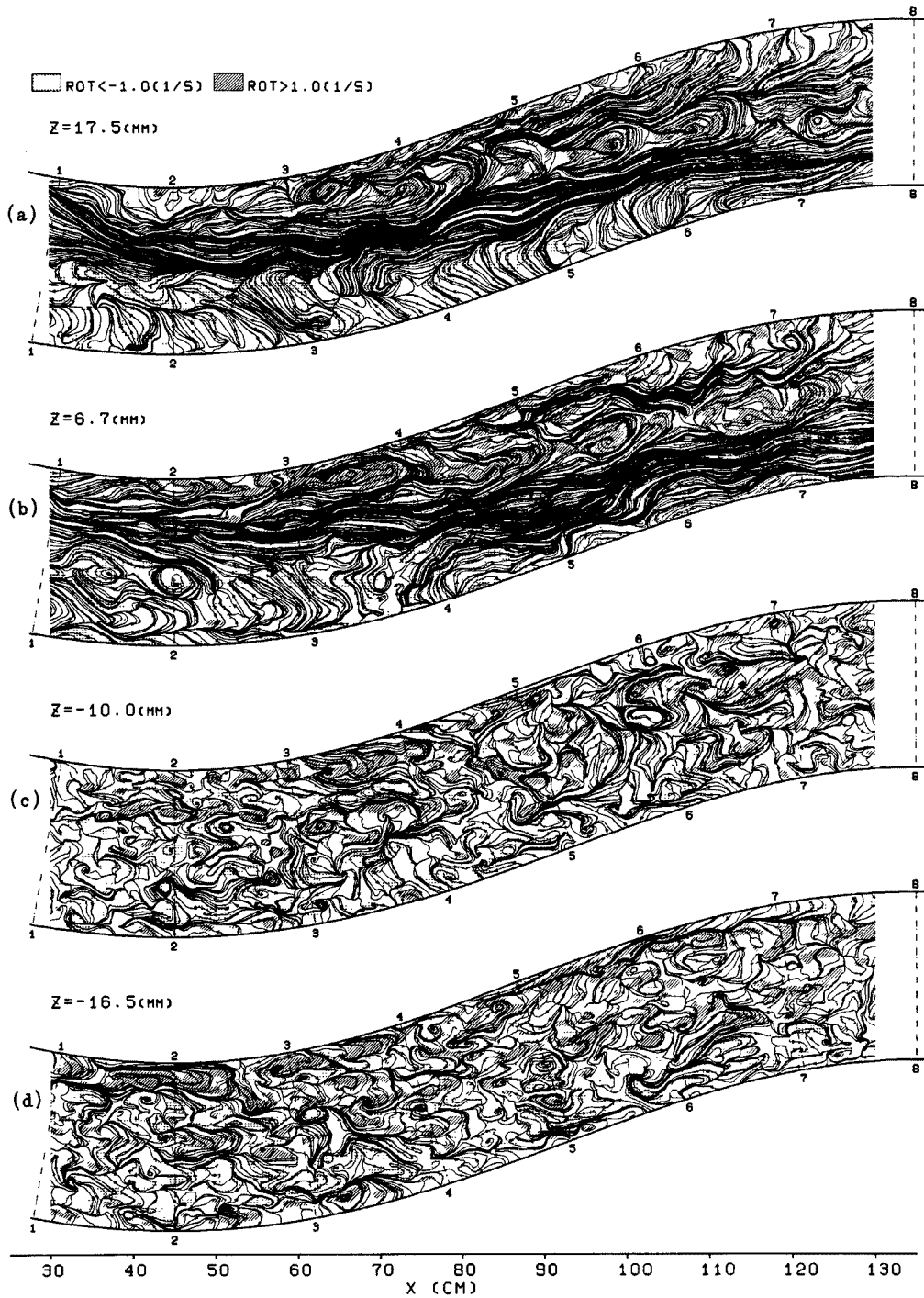


Fig. 11. Streamline patterns of turbulence component of velocity vectors based on the velocity components obtained by subtracting local mean value from each velocity component.

7.5 河岸渦の発生発達機構

以上の現象把握ならびに木下¹⁰⁾の実験結果を合わせて考察することにより、河岸渦の発生発達機構の概要を以下のように示すことができる。高水敷より上層の流れについては、その流向が低水路凸岸あたりで低水路法線と平行になるため、高水敷上の比較的低速な流れと低水路内の高速な流れとの間に急速にせん断層が形成される。このせん断層内に形成される渦が低水路側面せん断層内に形成されている渦と結合して河岸渦を形成すると考えられる。

この河岸渦の高水敷面より下の部分は、低水路中心部から低水路側壁面に向かう流れのために側壁面に接近した位置で発達しながら流下方向に引き伸ばされていく。高水敷面より上の部分では、主流の流向は逆に高水敷から低水路に向かっており、しかも高水敷面の高さあたりで上下方向に著しい流速差があるため、この渦の中間部は流下するにつれて引き伸ばされ、頭部は低水路中央部の方に押しやられる。水面では Fig. 11 (a) に示されるような大規模な渦が形成される。低水路床近くでは、この渦は隅角部からそれに斜交して流下方向に向くので、渦と側壁面との間に上昇流が形成される。この様子が Fig. 7 (c) と Fig. 7 (d) に示されている渦度と発散の分布に現れている。この河岸渦が流下して下流側の低水路凸岸近くにまで達すると、そこでは、低水路河岸に沿う上昇流と低水路から高水敷上に向かう流れがあるので流れが土砂を含む場合には高水敷の縁辺に土砂堆積が起こり得る。

このような河岸渦の発生発達過程を概念的に示すと Fig. 12 の様である。本図(a)はその概要を立体的に表現したものであるが、A₁ 渦は河岸渦の発生に至る前の渦の状態で、低水路側壁面の剥離せん断渦は高水敷面のせん断層中の渦と結合している。A₂ 渦より下流の渦は河岸渦として発達過程にあるものである。これらの渦の根元は低水路床面のせん断層内の渦に結合されていると考えられる。本図(b)は上記の各渦の側面図を示している。高水敷面のあたりの高さでは渦管は引き伸ばされると同時に下降流により若干押し下げられる。高水敷面より上の位置では、流向ならびに流速の上下方向の差は

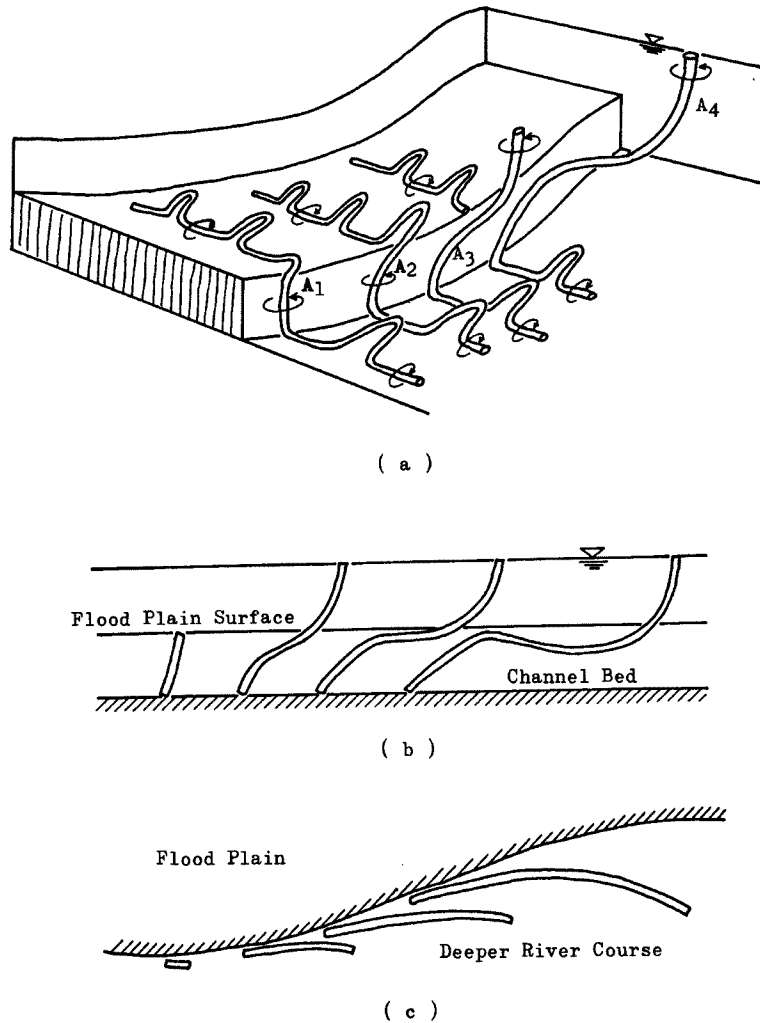


Fig. 12. Conceptual model of vortices developing in the interacting region between flood plain flow and deeper river course flow.
 (a) Three-dimensional configuration. (b) Side view.
 (c) Plan view.

僅かなので渦軸は鉛直に近い。本図(c)は河岸渦の平面図を示している。発生して間もない河岸渦は低水路側岸近傍に位置するが、流下するにつれてその上部が高水敷面から低水路へ向かう流れのため低水路中央部へ押しやられる。

7.6 実河川における河岸渦に関する考察

Fig. 11 に示されている乱流成分の流線のパターンによって渦の概要と配置が明確になった。ただ、先にも記したように、本図は流速成分 u および v から局所的な平均流速を差引いた流速成分を用いて描いたものであり、ここで差し引いた平均流速としてどのようなものを探るかによって図化される渦構造の詳細は若干変化することに注意を要する。そこで、流れの横断線上では同一の平均値を用いる方が渦の構造が一層明確に把握できると考えられるので、Fig. 4(c) に示されている渦度分布の低水路内における大局的な峰線を求め、流れの横断線上の流速成分から横断線とこの峰線との交点の周辺の局所的な平均流速を差し引くことによって各位置の流速成分を求め、 $z = 17.5$ mm断面の渦列近傍の流線を描いて見たものが Fig. 13(a) である。

本図に示されている渦列の示すパターンは重要な特徴を示している。すなわち、第一に、各渦は流線の収束線によって隔てられている。この収束線の近傍では流れは沈み込む。この特徴は Fig. 11 でも認められた。第二に、各渦には右岸側と左岸側とからそれぞれ流れが巻き込まれている。このような流線のパターンを単純化して示すと、Fig. 13(b) の様になる。

ところで、高水敷から低水路に向かう流速が小さいといった水理条件あるいはその他の境界条件によって、河岸渦が低水路凸岸下流で側岸に沿って発達する可能性もあり得よう。その場合、本図で示されるような渦が平均的な流れに乗って低水路河岸に沿って流下することになる。実河川においては一般に高水敷上の流れは低流速であるため土砂含有量は比較的少なく、澄んでいる。この様な流れが、本図で言えば左岸側から収束線に向かって集中していくので、渦列の左岸側並びに収束線のあたりでは水は比較的澄んでいる。この収束線は流れの沈み込む領域であるため、水面において澄んだ流れの領域は徐々に狭くなっていく。一方、渦列の右岸側には低水路の土砂を含む流れがあって、それが各渦の下流側から渦に巻き込まれ、渦領域は土砂濃度の高い流れで占められる。Fig. 13(b) では土砂濃度の高い領域が斜線で示されてい

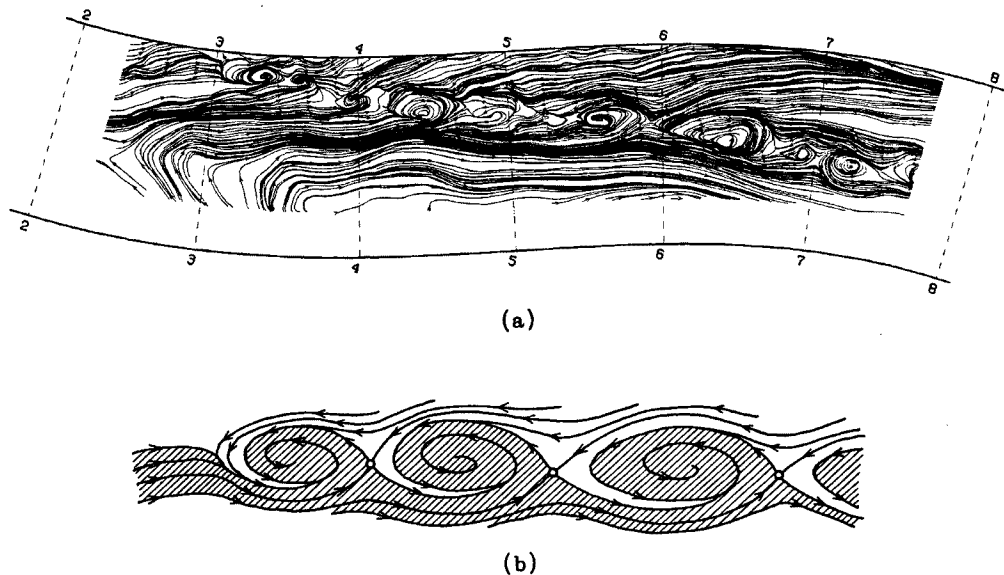


Fig. 13. (a) Streamline patterns of turbulence component of velocity vectors. (b) Typical patterns of streamlines based on the turbulence component of velocity vectors.

る。木下¹⁰⁾によって観測された石狩川浦臼地先の巨大な河岸渦はこの様な場合の渦でないかと推測される。流況によっては、木下²⁾によって観測された利根川の草林地先の渦運動の様に、左岸側から流入した高水敷の澄んだ流れと、右岸側から流入した低水路の土砂濃度の高い流れが、渦領域の中で交互に現れて渦巻模様を呈する。

これらの流線はあくまでも一種の乱流成分の流線である事に注意すべきであろう。実河川で観測される河岸渦は上記のように乱流成分によって巻き上げられる土砂の濃度の濃淡によって識別され、それは平均的な流速で運搬されるので、木下¹⁰⁾によって指摘されているように、河岸渦のパターンは実際の流線や流跡線とは全く別のものとなる。例えば、流線は渦領域およびその近傍で波状を呈するのみである。これは、非常に興味ある現象と言えよう。

8. 結 語

複断面蛇行流の水平断面をシート状の光で照射してそこでの流況を二台のカメラを用いて僅かな時間差で撮影した。得られた写真フィルムの濃淡を数値化して画像処理によって断面内の流速ベクトルの分布を計算した。複雑な境界をもつこの様な流れにおいても本画像処理により詳細かつ正確な流速分布が得られることが判明した。

得られた流速ベクトルの分布に関する資料を検討した結果、高水敷の上の流れについては、それが堤防の凸岸下流に発達する大規模な剝離渦とそれ以外の領域に発達する並列螺旋流から成っていることが認められ、並列螺旋流の構造が明かにされた。

低水路における流れについては、高水敷面の高さを境として流れが異なる性質をもち、下層の流れは低水路の深さのスケールをもつ縦渦で特徴づけられることが示された。

最も興味ある流れの構造は、低水路側壁面近傍と低水路上層部を占めているいわゆる河岸渦領域に見られる。ここでは、低水路側壁面に発達する剝離せん断渦と流れの上層部におけるせん断渦とが結合して大規模な渦列が形成される。これらの渦の三次元的な構造が明かにされ、また、そのような渦が実河川で現れる場合の渦の役割について考察した。

本研究を行うにあたり、自由学園の木下良作博士から懇切な御教示ならびに貴重な資料の提供を賜った。また、写真画像の数値化にあたり東京大学理学部天文学教育センター・木曾観測所の岡村定矩助教授ならびに樽沢賢一技官の御協力を得た。これらの方々に深甚の謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 木下良作: 昭和56年8月洪水による石狩川高水敷堆積調査, 石狩川開発建設部, 1983, pp. 538-594.
- 2) 木下良作: 航空写真による洪水流解析の現状と今後の課題, 土木学会論文集, 第345号/II-1, 1984, pp. 1-19.
- 3) 木下良作: 航空写真による洪水時の流況測定, 水工学シリーズ68-12, 土木学会水理委員会, 1968, pp. 1-40.
- 4) 木下良作: 利根川下流部洪水流三次元流況の実験的研究, 建設省利根川下流工事事務所, 1981.
- 5) 石川忠晴・須賀堯三・湯城豊勝: 複断面河道湾曲部の流況に関する研究, 土木学会第36回年次講演会, 1981, pp. 307-308.
- 6) 伊勢屋ふじこ: 茨木県, 桜川における逆グレーディングをした洪水堆積物の成因, 地理学評論, 第55巻, 第9号, 1982, pp. 597-613.

- 7) 上野鉄男・宇民正：昭和 58 年 7 月豪雨による三隅川の河川構造物災害とその実験的検討，京大防災研究所年報，第 27 号，B-2，1984，pp. 161 - 177.
- 8) 森明巨・岸力：昭和 56 年石狩川洪水で観測された弯曲部河床変動の特性，第 30 回水理講演会論文集，1986，pp. 493 - 498.
- 9) 森明巨：弯曲・蛇行河道における三次元数値解，沖積地河川における洪水流の制御と治水安全度の向上に関する研究，文部省科学研究費自然災害特別研究（岸力代表）報告書，1988，pp. 91 - 104.
- 10) 木下良作：洪水時の沖積作用調査と適正複断面河道に関する実験的研究，沖積河川における洪水流の制御と治水安全度の向上に関する研究，文部省科学研究費自然災害特別研究（岸力代表）報告書，1988，pp. 55 - 68.
- 11) Utami, T. and T. Ueno: Experimental study on coherent structure of turbulent open-channel flow using flow visualization and picture processing, Jour. Fluid Mech., Vol. 174, 1987, pp. 399 - 440.
- 12) 宇民正・上野鉄男：第 18 回乱流シンポジウム講演論文集，日本流体力学会，1988，pp. 178 - 181.
- 13) Utami, T., R. F. Blackwelder and T. Ueno: Flow visualization with image processing of three-dimensional features of coherent structures in an open-channel flow, Intern. Seminar on Near-Wall Turbulence, 1988.
- 14) 上野鉄男・宇民正・R. F. Blackwelder: 開水路乱流の水路床近傍の組織構造について，第 33 回水理講演会論文集，1989，pp. 547 - 552.
- 15) Utami, T., R. F. Blackwelder and T. Ueno: A cross-correlation technique for velocity field extraction from particulate visualization (投稿中).