

複断面開水路流れにおける中規模渦の形成過程に関する研究

On the Formation of Depth-scale Longitudinal Eddies
in an Open Channel Flow With Flood Plain

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

複断面河道に関する問題は、流れの抵抗特性に関するもの、高水敷上への堆砂など断面内の物質輸送に関するもの、あるいは低水路の側岸侵食に関するものなどが考えられるが、いずれも未解明の点が多く残されている。著者らは、これらの問題を解明する基礎として、複断面開水路流れの水理特性に関する実験的研究を進め、流速分布特性と流れの内部構造の関連などを指摘して来た。^{1),2)} また、壁面せん断力分布および低水路と高水路の境界付近に見出される水深規模の中規模渦構造について検討して来た。^{3),4)} すなわち、複断面開水路流れにおける流速計測結果および水面あるいは路床近傍での流れの可視化結果に基づき、高水敷先端部より自由水面に向う斜昇流と、それにより誘起される流下方向の軸を持つ水深規模の渦により構成される中規模渦構造は図-1 のようであると推定される。ここでは、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つの渦が存在する。また、同図に示すように高水敷の先端形状が変化しても同様の渦構造の存在することが実験的に確かめられている。しかしながら、これらの中規模渦の形成過程を解明するには至っていない。本研究は、これらの中規模渦をLaser Light Sheet を用いることにより流れの内部を可視化し、その形成過程について検討しようとするものである。

なお、本研究で対象とする中規模渦とは以下のような分類に基づいたスケールの渦を示す。すなわち、開水路流れを種々のスケールの渦構造と考えた場合、そのスケールにより、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極小規模渦、粘性底層やバッファ層における乱れの生成過程に関する小規模渦、水深あるいは局所的な断面形状に相当するスケールの中規模渦、湾曲部などにみられる水路幅スケールの大規模渦および河床変動スケールの超大規模渦である。

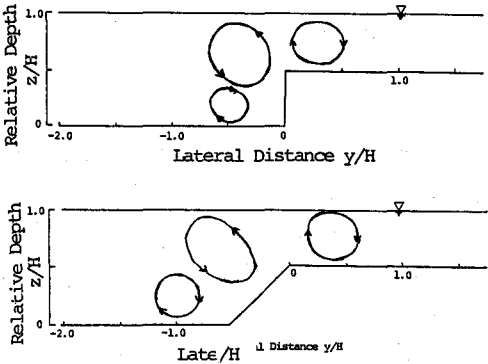


図-1 中規模渦構造

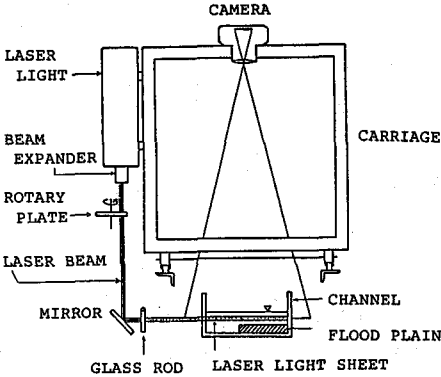


図-2 実験装置

2. 中規模渦構造の形成過程に関する実験

実験装置および方法：実験は幅20cm、深さ15cm、長さ8mの一部アクリル樹脂製の木製直線矩形断面水路内に幅12cm、高さ2cmのアクリル樹脂製の高水敷を左岸側に設置して複断面水路としたものを用いている。

本研究で用いた内部流況可視化実験装置を図-2に示す。実験方法は、トレーサとして流れに注入した中立粒子をレーザ光源を用いて作ったスリット状の光(Laser Light Sheet、LLSと略記)により照明し、流れの任意の断面内の流況を可視化する方法である。用いた光源は5mWのヘリウム・ネオンレーザであり、光をガラス棒を通してスリット光としている。また、スリット幅は、光源に取付けたビーム・エキスパンダにより任意の幅に設定することが可能であるが、本実験では3mmとしている。一方、トレーサとして用いた粒子は、平均粒径0.45mm、比重1.005のポリスチレン粒子であり、静水中の沈降速度は0.05cm/sと対象としている流速に比して十分小さく、流れに追従するものである。撮影は、水路上流端で注入したトレーサをレーザ光で照明し、35mmスチルカメラを固定して用いる固定撮影と、移動する台車上に設置したカメラを用いる移動撮影を行っている。なお、撮影条件は、固定撮影の場合は絞り $F=1.2$ 、露光時間 $T=1/15$ 秒とし、移動撮影の場合は $F=1.2$ 、 $T=1/4$ 秒としている。なお、LLSは、水平、縦断および斜め横断面に設置し、流れの内部流況を種々の角度より検討している。また、本装置では、流速とともに流向を知るため、図に示すように、レーザ光を開口部を設けた回転板にて遮断することによりストロボ光とする工夫を行っている。

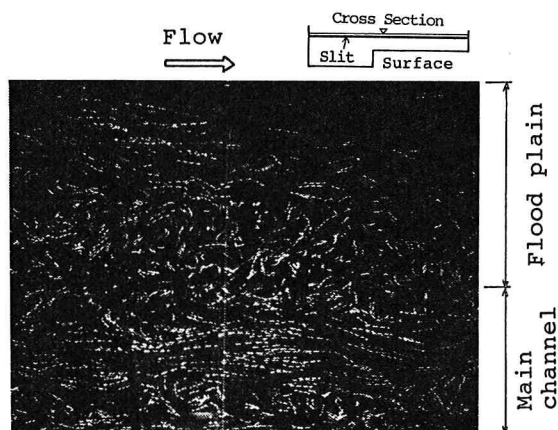
以上述べた実験に加え、増感装置を組み込んだビデオカメラによる撮影を行い、内部流況の観察をしている。本論文に示した結果は、流量 $Q=1.4$ l/s、水深4.0cm、断面平均流速約25cm/s、レイノルズ数8000、フルード数0.6、路床勾配 $I=1/400$ の等流状態におけるものである。

内部流況：写真-1は、断面平均流速に相当する速度で移動撮影を行った例を示したものであり、LLSの位置を変化させることにより、自由水面近傍の水平断面(写真-1(a)、路床より3.5-3.8cm)、高水敷直上の水平断面(写真-1(b)、路床より2.3-2.6cm)および高水路と低水路の境界部の低水路側の縦断面(写真-1(c)、高水敷端より0.3cmの範囲)の内部流況を可視化したものである。写真を見ると、トレーサのパスラインは長い線と短い線で構成されて写っている。これは、前述した回転板の開口部幅を変化させて作ったストロボ光によって得られ、長い線と短い線の間隔が約1/45秒、長い線と長い線の間隔が約1/15秒となっている。ここで示した撮影条件では3～4組の長・短線が存在すれば露光時間内に対象とする層内に粒子が存在していたことになる。また、トレーサの移動方向は長い線より短い線の方であると判断できる。

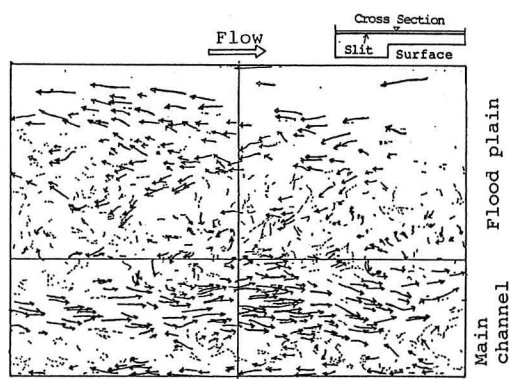
写真-1(a),(b)より、低水路中央および高水路中央では比較的流れは一樣であるが、高水敷先端近傍および低水路側壁近傍では複雑な動きをしており、発散、集中、回転などの流体の挙動がうかがわれる。また後者の領域では、パスラインの長・短線の構成組数が露光時間内の所定数より少ないものが多く、粒子の撮影対象層外への移動あるいは層外よりの侵入があり、流体の出入が推定される。また、写真-1(c)に示した縦断面の撮影例をみると、路床より水面まで達するような水深規模の流体の動きが見られる。

撮影したネガフィルムより水平断面については水路全幅20cm×流下方向30cmの範囲を、縦断面については水深方向4cm×流下方向15cmの範囲に存在する粒子のパスラインを読み取り、流向が判別可能なものについては矢印を付して示したものが図-3(a),(b),(c)である。流れは図に向かって左より右であるが、移動撮影を行っているため、台車の速度より遅い粒子は左向き、速い粒子は右向きとなっている。

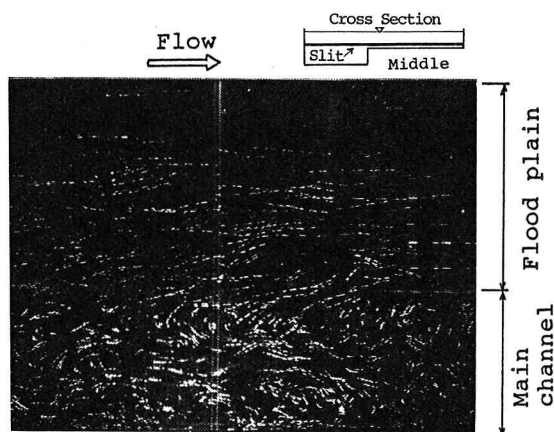
自由水面近傍の結果(a)を見ると、低水路と高水路の境界付近では非常に複雑であるが、境界に沿って島状に存在する渦(例えば図の中央線左側)を見ると、その下流側に流出点状の運動が見られる。これは著者らが従来指摘した斜昇流のなかでもボイル状の強いものが水面に達し、押しのけられた流体が低水路の速い流れに引き込まれて行く過程を示すものと考えられる。一方、高水敷直上の結果(b)を見ると、高水路内の流体は低水路の流れに引き込まれ、境界線の低水路側で渦を形成しているのが確認される(図(b)の中央、



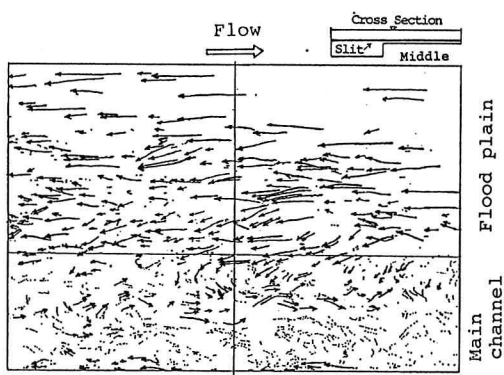
(a) 水平断面 (水面近傍)



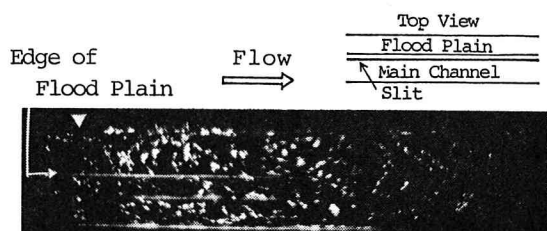
(a) 水平断面 (水面近傍)



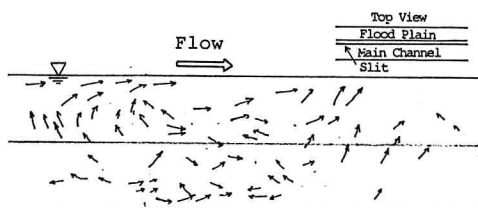
(b) 水平断面 (高水敷直上)



(b) 水平断面 (高水敷直上)



(c) 縦断面 (低水路)



(c) 縦断面 (低水路)

写真-1 内部流況 (移動撮影)

図-3 パスライン (内部流況、移動撮影)

境界線下方)。また、縦断面の結果(c)では、低水路路床付近より水面にまで達する流体の挙動、すなわち斜昇流の存在が明確に認められる。このことを考慮すると、渦の中心付近では上方への流体の移動が生じているものと考えられる。以上をまとめると、高水敷端近傍において高水路内の流体と低水路路床より上方に向う流れが混合して渦を形成しつつ上昇し、水面に達して発散し、押しのけられた流体が低水路の流れとの境界で渦を形成するという過程が考えられる。

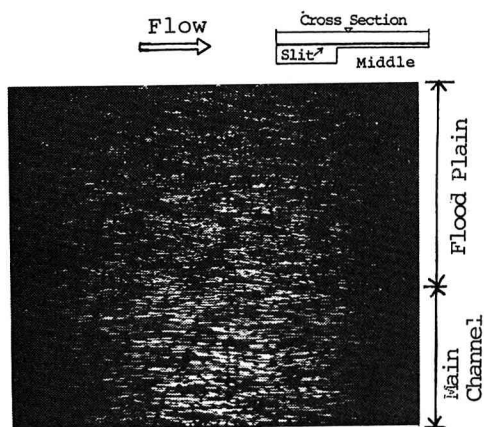
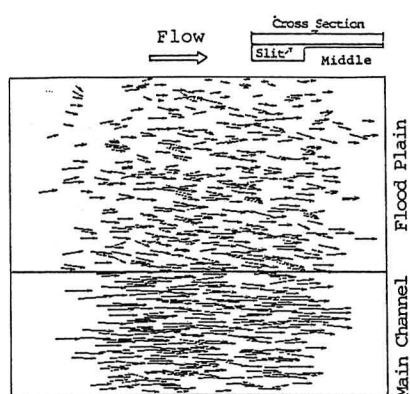
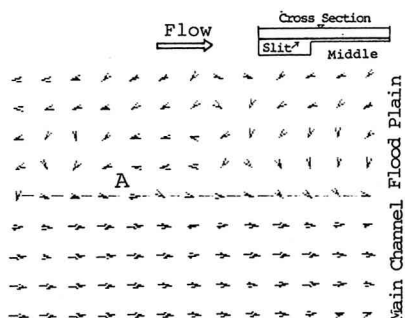


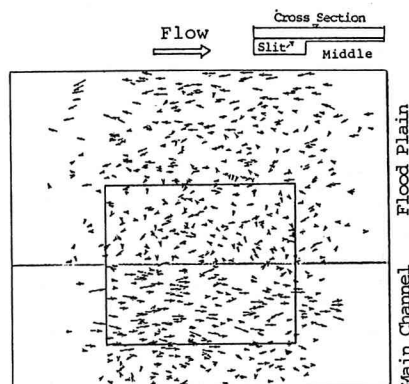
写真-2 内部流況（固定撮影）
水平断面（高水敷直上）



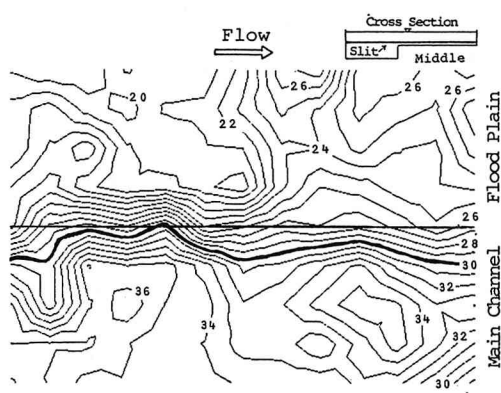
(a) 速度ベクトル（固定座標系）



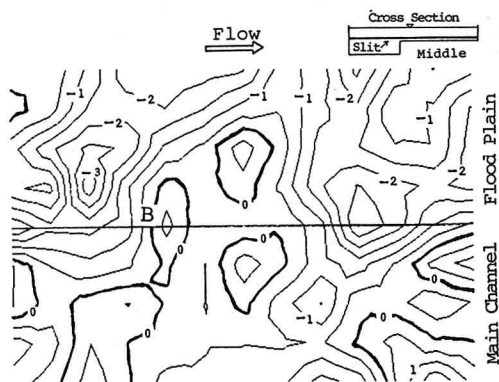
(c) 速度ベクトル（格子点、移動座標系）



(b) 速度ベクトル（移動座標系）



(d) 流下方向速度分布



(e) 横断方向速度分布

図-4 速度ベクトル分布（水平断面）

3. 中規模渦の内部構造に関する実験

ここでは固定撮影の結果より速度ベクトルを評価し、中規模渦の内部構造について検討する。

写真-2は高水敷直上の水平断面（路床より2.3-2.6cm）における固定撮影例を示したものである。この写真のネガフィルムより長い線と短い線で構成される一組の粒子のパスラインを読みとり、その間隔を用いて速度ベクトルを算定したものが図-4(a)であり、図で1mmが5cm/sの速度に相当する。また、読み取ったすべての粒子の流下方向平均速度24.3cm/sで移動する座標系より見た速度ベクトルは図-4(b)のように表

わされる。図より、前節で示した移動撮影結果とほぼ

同様に境界部の渦の存在が認められ、結果の妥当性がEdge of

うかがわれる。つぎに、図-4(b)の図中に実線で囲んだ範囲(高水敷端より低水路側と高水敷側4cm×流下方向12cm)の結果を1cm間隔の格子点における速度ベクトルに変換し、図-4(b)と同様の移動座標系から見たものが図-4(c)である。図より、A点を中心とする渦構造が見られ、これは高水敷上の流体をまきこむ過程を表していると考えられる。さらに、格子点速度ベクトルより流下方向速度 u および横断方向速度 v (図中、高水敷へ向う流れを正方向)の分布状況を等速度線で示すと図-4(d),(e)のようになる。境界線上を流下方向に見ると、速い部分と遅い部分が交互に現れるとともに、図-4(c)で示したA点に相当するB点付近では、低水路と高水路の流体の混合が行われていることがこれらの結果よりわかる。

一方、境界部の流体の挙動を縦断面内で見ると以下のようである。写真-3は高水路と低水路の境界部の低水路側の縦断面における固定撮影例であり、写真中央付近に高水敷先端より水面に向う斜昇流が捉えられている。この上昇角度は約 15° であり、他の撮影結果でもほぼ同様の値であった。また、高水敷高さ以下を見ると、上方に向う粒子と下方に向う粒子があり、図-1で示した低水路隅角部へ向う流れの存在が確認される。写真-3と同様に読取った粒子のパスラインより速度ベクトルを描くと図-5(a),(b)のようになり、図-3(c)で示した移動撮影結果と定性的に一致する。また、図-5(b)の実線で囲んだ範囲を格子点の速度ベクトルに変換し、流下方向速度 u と鉛直方向速度 w の分布状況を等速度線で示すと図-5(c),(d)のようになる。図-5(c)の結果を見ると、自由水面近傍では流下方向に高速部、低速部が交互に配列されており、図-5(a)および図-5(c)の結果を考慮すると下流側の低速部は斜昇流が水面に達した部分と考えられる。また、図-5(d)より、 w が負の部分の境界に沿って斜昇流が上昇することと、斜昇流が流下方向にある広がりを持って上昇するものであることが推定される。すなわち、斜昇流の上昇に伴って下流側の流体は下方へ、上流側の流体は上方へ押しやられるものと考えられる。

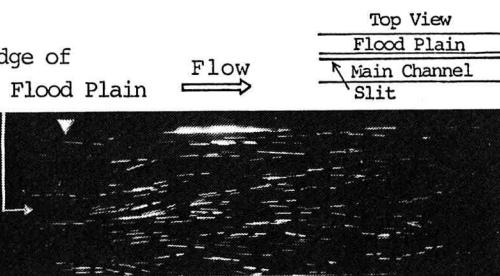
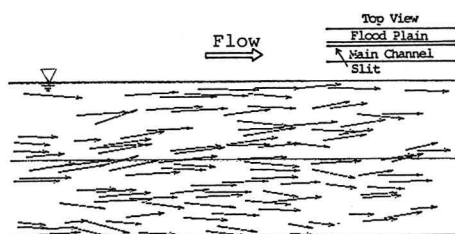
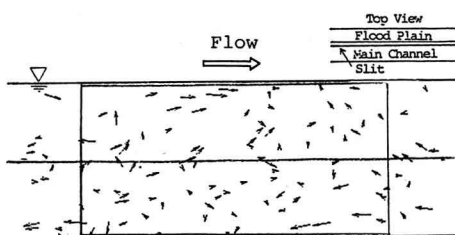


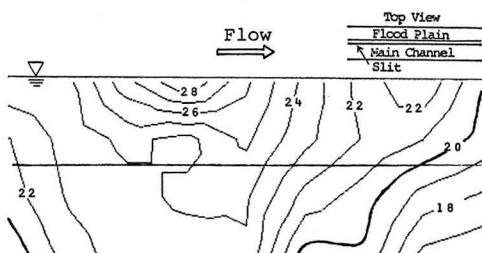
写真-3 内部流況(固定撮影)
縦断面(低水路)



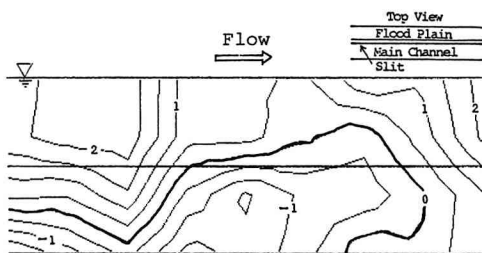
(a) 速度ベクトル(固定座標系)



(b) 速度ベクトル(移動座標系)



(c) 流下方向速度分布



(d) 鉛直方向速度分布

図-5 速度ベクトル分布(縦断面)

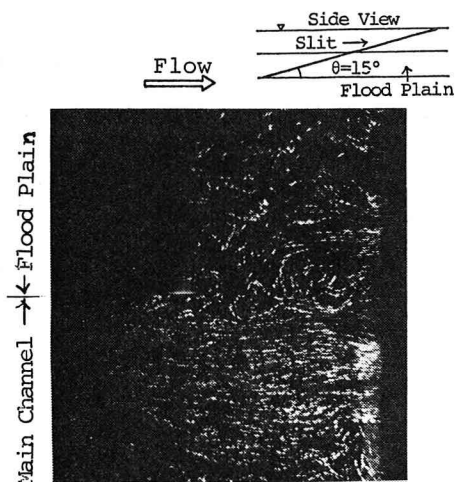


写真-4 内部流況（移動撮影，15° 斜め横断面）

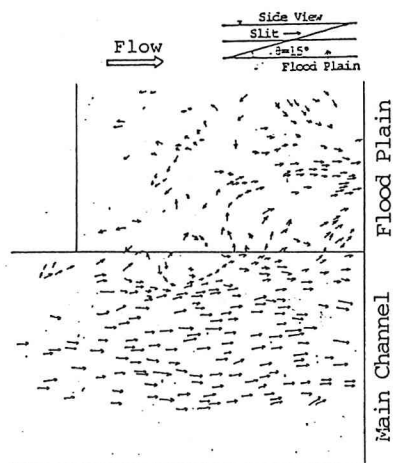
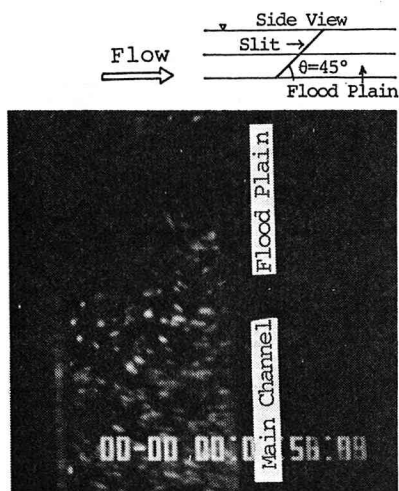
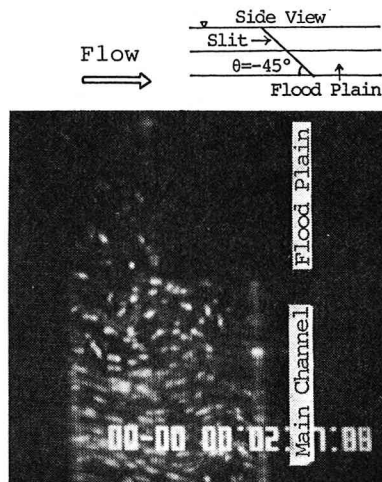


図-6 パスライン（移動撮影，15° 斜め横断面）



(a) +45° 斜め横断面



(b) -45° 斜め横断面

写真-5 内部流況（移動撮影，斜め横断面）

以上は、水平あるいは縦断面内の流体の挙動を見たが、つぎに斜め横断面の可視化結果について示す。写真-4は路床との角度を15°としたLLSで照明した粒子を鉛直上方に設置したカメラを用いて移動撮影した例を示したものであり、写真の右側が水面である。低水路と高水路の境界部では複雑な挙動を示しているが、パスラインを流向とともに示した図-6をみると、一様に流れている低水路流れの境界に沿っていくつかの渦状の部分が認められ、その部分は水面に近づくにつれて横断方向に広がりを持つようになっている。また、路床に対し、下流側に45°あるいは上流側に45°傾いたLLSを用いて内部流況をビデオカメラにより可視化した映像を35mmスチルカメラで撮影したものを写真-5(a),(b)に示す。これらの写真とビデオ映像より図-1に示したような中規模渦の存在が確かめられる。

4. おわりに

以上、複断面開水路流れにおける中規模渦の形成過程について実験的検討を行った結果を示したが、今後は種々の水理条件のもとで検討を加えて行く予定である。

- 参考文献 1) 今本・石垣：27回水理講演会論文集，1983. 2) 今本・石垣・木下：京大防災研年報，26，B-2，1984.
3) 石垣・今本・福井：39回全国大会，II-294，1984. 4) 福井・今本・石垣：39回全国大会，II-238，1984.