

開水路乱流の三次元構造に関する実験的研究

上野 鉄男・宇民 正・北川 吉男

EXPERIMENTAL STUDY ON THE THREE-DIMENSIONAL TURBULENCE STRUCTURE IN AN OPEN CHANNEL FLOW

By *Tetsuo UENO, Tadashi UTAMI and Yoshio KITAGAWA*

Synopsis

The large scale structure of turbulence in an open channel flow was examined by flow visualization and picture analysis. A horizontal cross-section of the flow was illuminated by a sheet of light and a pair of photographs were taken in a short span of time using the 35 mm movie camera. Then the illuminated cross-section was quickly shifted upward and another pair of pictures were taken. 15 pairs of photographs were taken from the channel bed to the water surface.

The photographs were digitized by a CCD digital camera and velocity vectors were calculated by multi-step correlation technique.

Characteristic features of turbulence structures near the channel bed and in the upper layer were discussed based on the three-dimensional distribution of vorticity.

1. 概 説

乱流に関する実験的研究は 1940 年代から盛んに行われるようになったが、1960 年代から、熱線流速計による計測技術と計算機の発達によって、乱流の統計的性質が明らかにされてきた。一方、1950 年代後半から 1960 年代にかけて、Hama¹⁾ や Kline ら²⁾ によって、流れの可視化実験からせん断乱流中に組織的な構造が存在することが見いだされ、以後流れの可視化実験や条件付資料解析法を用いた計測法の導入によって乱流の組織構造の解明が進展した。しかし、これらの実験的研究において、プローブ計測法では乱流構造を空間的に捉えることに限界があり、流れの可視化法では現象の定性的把握にとどまっているという問題が残っていた。

1980 年代に入って乱流研究に新しい手法が導入された。一つは画像処理による可視化結果の数量化手法、他の一つは乱流の数値解析手法である。

本研究は、開水路乱流の水平断層面の連続撮影によって得た写真画像を画像解析することにより乱流の空間的な構造を解明しようとしたものである。写真撮影に 35 mm 撮影機を導入することにより著者ら³⁾ の従来の計測法より格段に計測精度を向上させることができた。水深 37.2 mm の流れの水路床から水面までの 15 断面が 3 度にわたって連続的に撮影されたが、本研究ではとりあえずその内の 1 回の 15 断面の撮影画像を解析した結果について報告する。

2. 実験方法

一様な開水路流れ（幅 40 cm，水深 3.72 cm，断面平均流速 10.9 cm/sec）の水平断層面を厚さ 2 mm のスリット光で照明し，そこでの流況をトレーサー法によって可視化した。トレーサーとしては平均粒径 0.4 mm のポリスチレン粒子を用いた。断層面の高さを水路床上 1.5 mm の位置から水面まで 2.5 mm ずつ次々と移動させて，各断層面内の流況をわずかな時間差（1/30 sec）で二枚ずつ写真撮影した。

Fig. 1 に実験装置を示す。鏡 B を左右に移動させることにより，水路内のスリット光が上下するようになっており，流況は宇治川水理実験所で製作された 35 mm ムービーカメラ（**Photo. 1**）で撮影された。カメラの撮影スピードは毎秒 30 コマ，シャッター解放時間は 1/60 sec で，回転シャッターからのパルス信号に同期してシャッターが閉じている 1/60 sec の間にスリット光が上下に移動するように鏡 B（**Photo. 2**）の動きがパソコンで制御されている。この方法により，水路床から水面までの15の水平断層面内の流況を約 1 sec で撮影することができる。

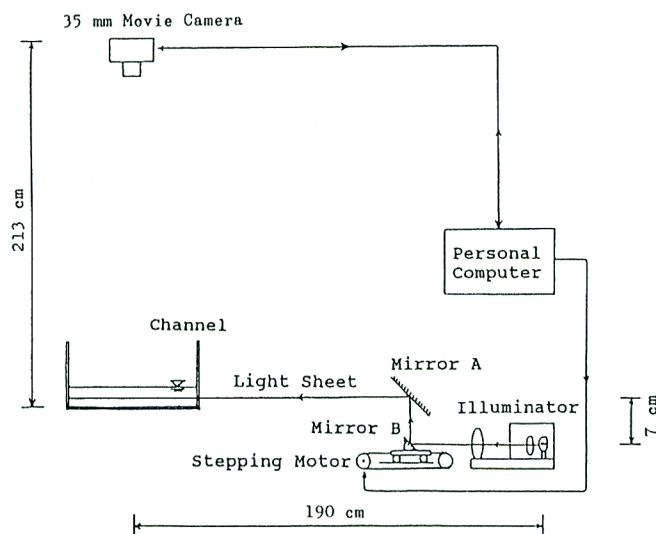


Fig. 1. The experimental setup.

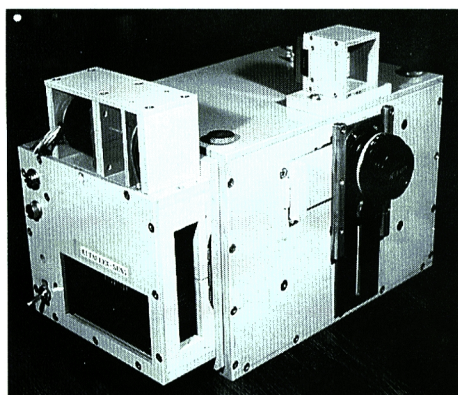


Photo. 1. 35 mm movie camera.

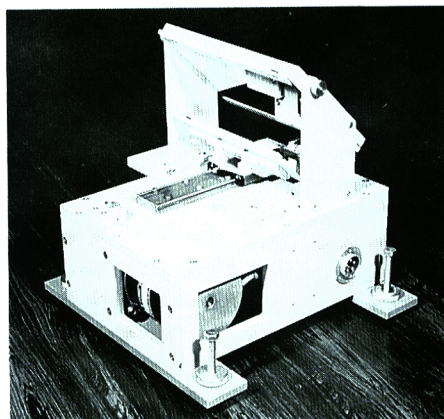


Photo. 2. The mirror system for light sheet shifting.

著者ら³⁾の前回の実験では4台の35 mm スチールカメラを連動させる方法が採られたが、この方法ではカメラの正確な設定が困難で、しかもせいぜい毎秒 16.9 コマしか撮影できず、さらに画像解析の段階でレンズによる収差の影響が大きくなるなど多くの問題があった。35 mm ムービーカメラの導入によってこれらの問題点が解消された。

スリット光の位置と写真撮影時間との関係を Fig. 2 に示す。本実験においては水路床から水面までの 15 断面の撮影が3回繰り返され、 $2 \times 15 \times 3 = 90$ コマの写真画像が得られた。得られた写真画像の一例を Photo. 3 に示す。写真において、流れは左から右に向かっている。左右の水路側壁面には、水面の直上の位置に点光源が取り付けられている。これらは画像解析時に標定点として用いられた。二つの回転盤は撮影

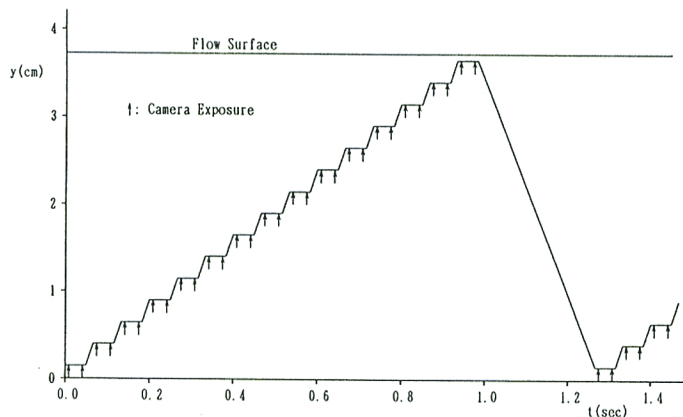


Fig. 2. The space time motion of the sheet light and shutter timing.

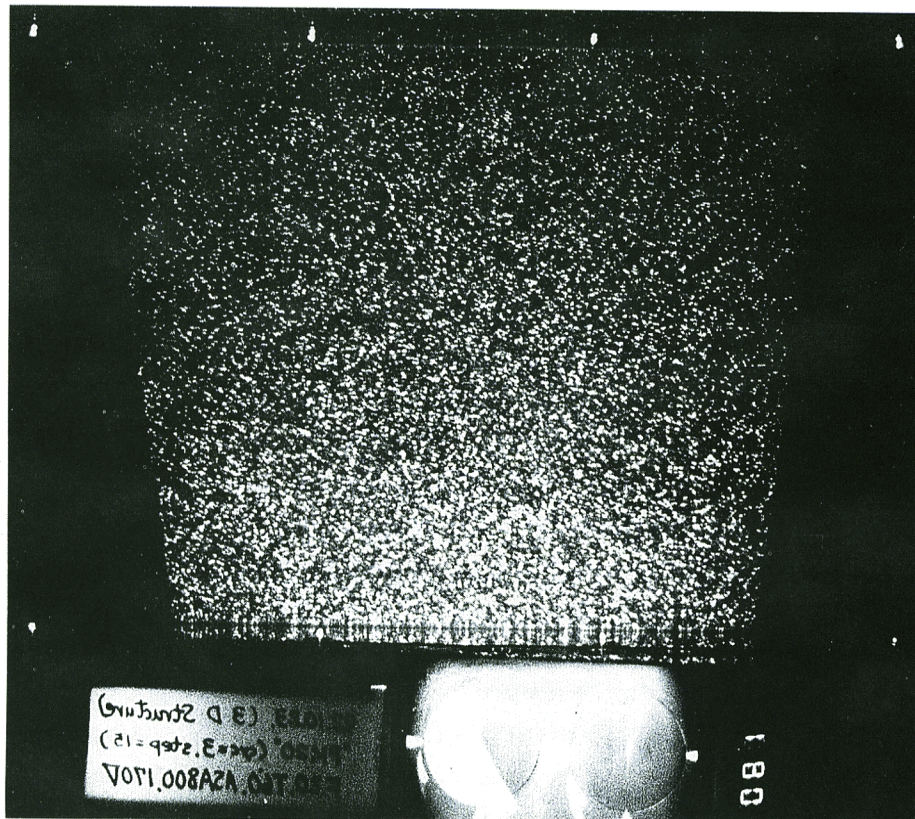


Photo. 3. An obtained photograph of the horizontal cross-section of the flow.

時刻を確認するためのもので、一方は 30 rps, 他方は 3 rps である。

測定した流れの水理条件は以下のものである。流量 $1625 \text{ cm}^3/\text{sec}$, 平均水深 3.72 cm , 断面平均流速 10.9 cm/sec , 水路床勾配 $1/10,000$, 水面勾配 $1/7,500$, 水温 19.9°C , 摩擦速度 0.70 cm/sec , レイノルズ数 4,022。

3. 解析方法

CCD デジタルカメラ (Eikonics 1412) によって、写真フィルム画像の濃淡分布を 12 ビットデータに数値化した。画素間隔は 8μ であり、実長では 0.32 mm に相当する。

流速ベクトルは、同一断面の $1/30 \text{ sec}$ の時間差をもつ一対の画像データを用いて多段階相関法によって求めた。この方法は、はじめは粗くベクトルを計算し、次の段階ではその前段階の結果を用いて精度を上げて計算するということを繰り返すもので、それによって計算時間を節約し、計算精度を向上させることができる。

すなわち、従来の相関法による流速ベクトルの計算³⁾では、相関窓（一対の写真画像データの間で相互相関係数を計算する小領域）ならびに検索窓（最大の相関係数を検索する範囲）の設定をいかにするかという問題があった。相関法では、流速ベクトルは相関窓の範囲で平均化されたものが得られるので、その面からは相関窓は小さい方が望ましいが、小さくしすぎると誤ベクトルが算出されやすい。ベクトル計算の分解能も相関窓の大きさに左右される。また、検索範囲を小さくすると、計算時間は節約できるが正しいベクトルを逃がしてしまう可能性がある。

本研究においては、三段階の相関計算を行った。各段階において用いた写真データならびに相関計算の諸元は Table 1 の様である。

Table 1. Dimensions and resolutions of photograph data and analysis

	Number of Pixels (pixel)	Pixels Interval (mm)	Correlation Window (mm)	Search Window (mm)	Vector Interval dx (mm) dy (mm)		Number of Vectors
1st process	506× 356	1.28	34.6×21.8	14.1×14.1	25.6	25.6	16× 17
2nd process	1014× 714	0.64	17.3×10.9	8.3× 7.0	12.8	12.8	32× 33
3rd process	2030×1430	0.32	14.4× 4.8	2.9× 2.9	6.4	3.2	65×136

相関法による流速ベクトル計算においては誤ベクトルの算出は避けられないので、周辺の流速ベクトルと著しく傾向を異にするベクトルを計算ならびに視覚によって判断し除去した上で、周辺のベクトルから内挿によって補充した。

なお、以上に得られたベクトルはいわゆる相関ベクトルであり、2つの画像の間のずれが反映されている。そこで、各画像データにおける8個の標定点が各々一致するように最少自乗法で2つの画像を一致させ、さらに座標軸が水路側壁面に沿うように座標変換した上で、主流流下方向に 5 mm 間隔で 81 点、横断方向に 2.5 mm 間隔で 161 点の格子点を設定し直し、そこでの流速ベクトルを内挿によって求めた。なお、水面における光の屈折の影響については、それが微小であることが確認できたので修正しなかった。

最終的に得られた流速ベクトル分布の一例を Fig. 3 に示す。本報においては、座標軸は流下方向を x 軸、鉛直方向を y 軸、横断方向を z 軸とした。また、 x, y および z 方向流速成分を u, v および w としている。

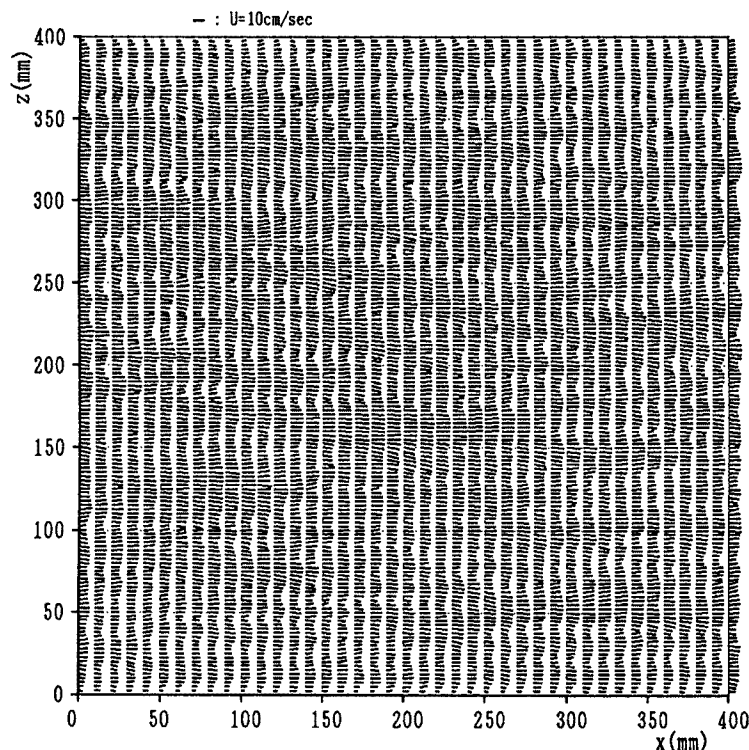


Fig. 3. Velocity vectors obtained through multi-step correlation technique (the cross-section of $y^+ = 27.7$).

4. 解析結果

各水平断面において得られた流速ベクトルを用いて各種水理量を計算した。以下には、その一例を示すとともに、そこから得られる乱流構造の特徴について述べる。

4.1 水平断面内の水理量の分布特性

(1) 流下方向流速成分 u (Fig. 4)

流速の大きな領域と小さな領域とが流下方向に長く続いており、横断方向にはそれらが交互に現れている。

(2) 横断方向流速成分 w (Fig. 5)

同符号の横断方向流速の領域が水路を斜めに横切る傾向が見られ、興味深い。

(3) 鉛直方向渦度成分 ω_v (Fig. 6)

同符号をもつ渦度の絶対値の大きな領域が流下方向に細長く連なっており、正の渦度の大きな領域と負のそれとが対をなしている。高い渦度をもつ水路床近くの帯状の領域は縦渦によって形成されており、なかでも渦度の高い部分は馬蹄型渦に対応していると考えられる⁴⁾。

4.2 横断面内の流速の分布特性

Fig. 7 は、流下方向流速成分 u の横断面内における分布を流下方向に 20 mm 毎に示したものである。本図では、各断面の写真撮影時刻のずれは凍結乱流の仮定によって修正されている。

本図において、水路床近傍から上方へと広がっている低流速の領域が流下方向に連なっており、それらが

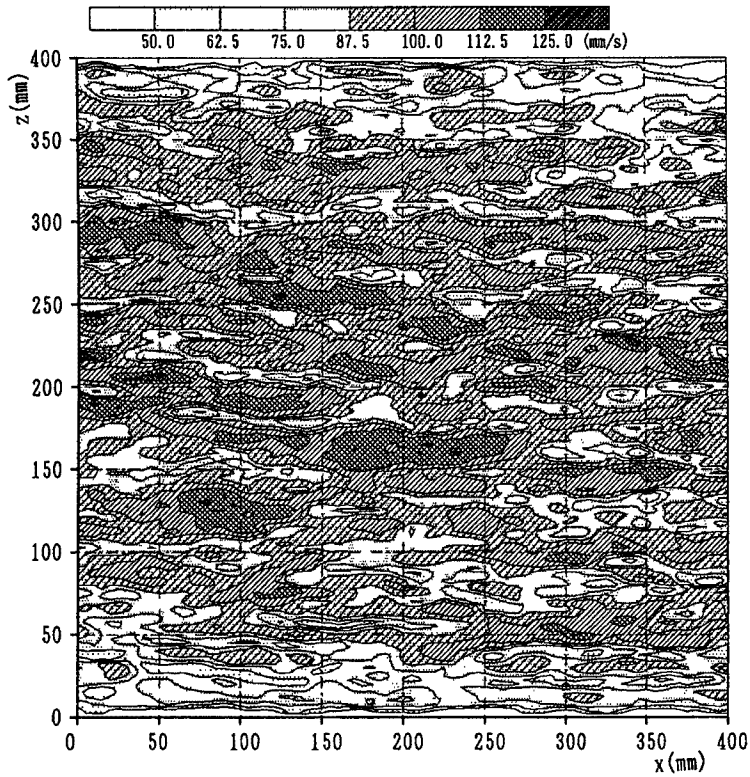


Fig. 4. The contours of the longitudinal component of velocity (the cross-section of $y^+ = 27.7$).

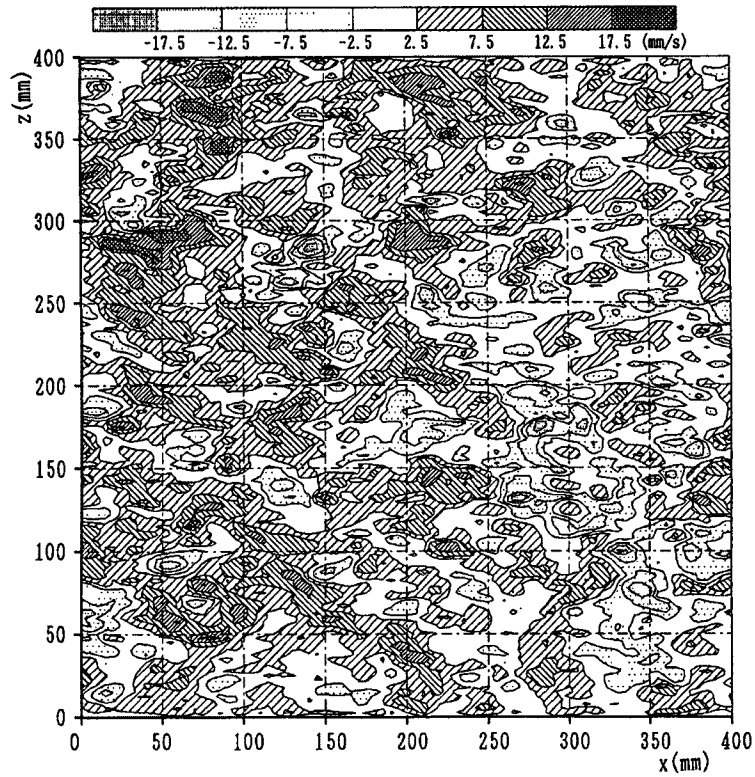


Fig. 5. The contours of the transverse component of velocity (the cross-section of $y^+ = 131.7$).

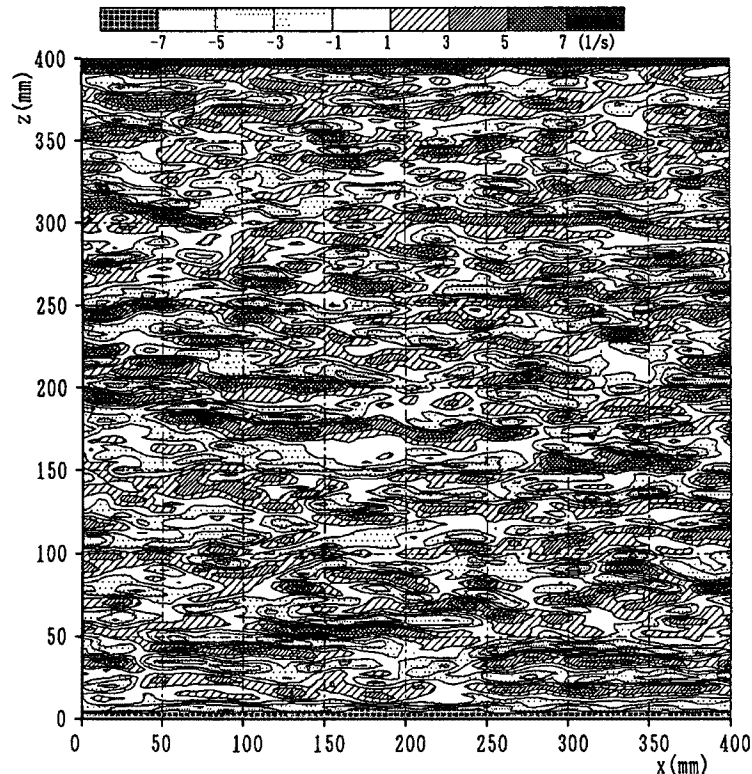


Fig. 6. The contours of the vertical component of vorticity (the cross-section of $y^+ = 27.7$).

横断方向に数 cm (100~300 unit length) の間隔で形成されていることが注目される。これらは、先述の縦渦によって形成されたものと考えられる。

流れの上層部に行くにつれてこれらの低流速領域の2~3のものが集まってさらに大きな規模の低流速領域を形成しており、それらの水面近傍での横断方向間隔は水深のおよそ2倍 (520 unit length) になっている。これは、木下⁵⁾が指摘した並列らせん流の存在を示唆している。

4.3 渦度の3次元分布特性

そこで、渦度の3次元分布特性を調べることによって縦渦の形成状況を検討する。

Fig. 8 は、鉛直方向渦度成分 ω_v の横断面内の分布を流下方向に 20 mm 毎に示したものである。図において水路床近傍に渦度の絶対値の大きな領域があり、正の渦度の大きな領域と負のそれとが横断方向に対をなして存在していることが注目される。また、これらの高渦度領域は流下方向に連続している。

Fig. 9 は、鉛直方向渦度成分 ω_v の鉛直縦断面内における分布を横断方向に 20 mm ごとに示したものである。図によると、渦度の絶対値の大きな領域が流下方向に連なっている様子が一層よくわかる。

Fig. 8 および Fig. 9 から以下のことが指摘できる。

① 水路床近傍に渦度の絶対値が大きく流下方向に長く続いている領域があり、そのスケールは、流下方向に長いもので 10~20 cm (700~1400 unit length), 横断方向にはおよそ 1~1.5 cm (70~105 unit length) になる。領域の中心部はとくに渦度が高くなっている。この様な高渦度領域は縦渦⁴⁾に対応するものと考えられ、互いに逆符号の渦度をもつ縦渦が横断方向には交互に並んでいる。

② この様な高渦度領域の上流側は水路床に近接しており、一方下流側は水路床から離れてもちあがった

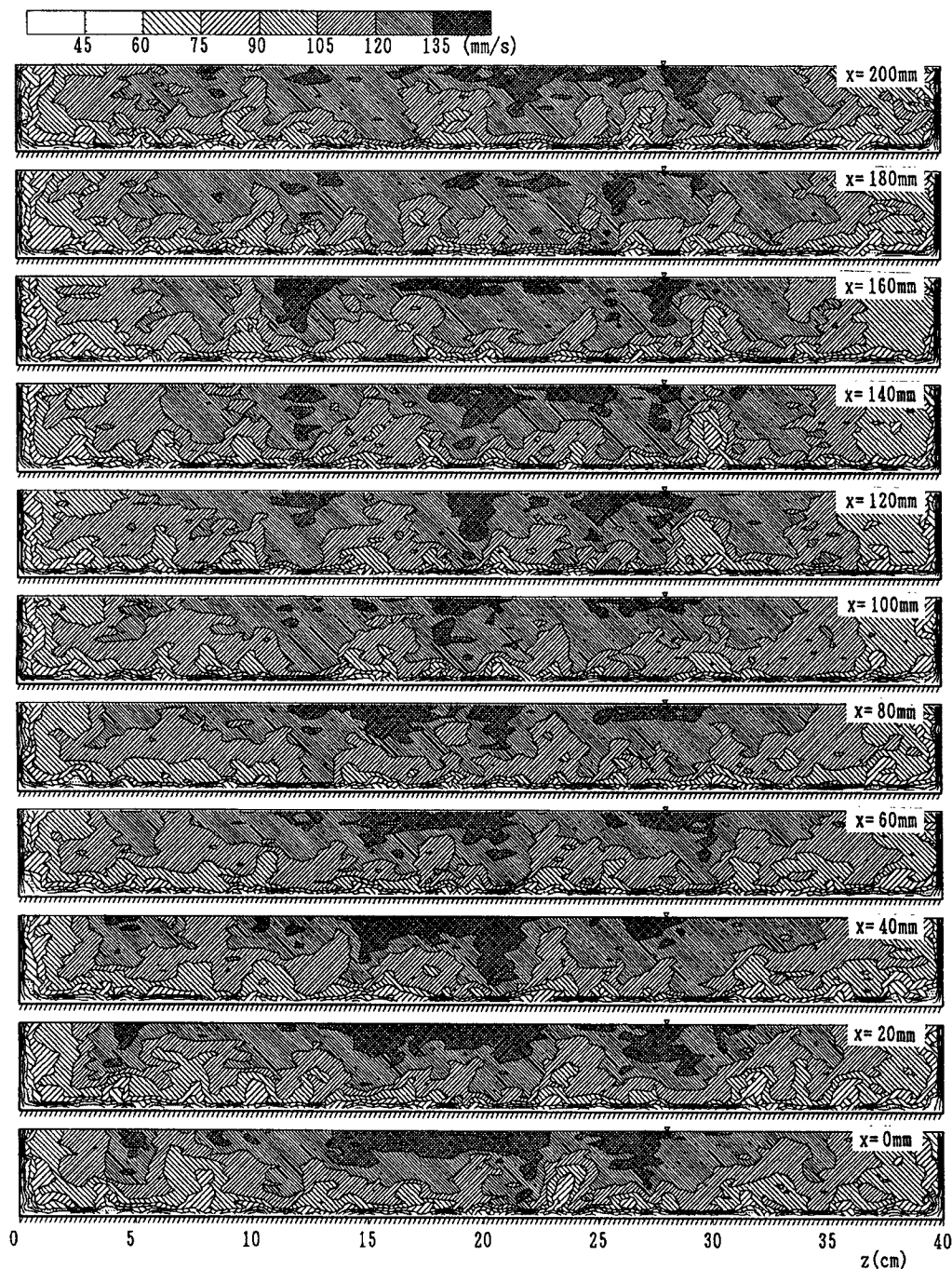


Fig. 7. The contours of the longitudinal component of velocity in transverse cross-sections.

形になっている。縦渦の下流端は、水路床から水深のおよそ $1/5 \sim 1/3$ (50~90 unit length) の距離にあり、水面まで達することはない。すなわち、縦渦の中心は水路床からせいぜい 100 unit length 迄の領域に存在すると考えられる。

③ 高渦度領域が水路床と離れた所では、水路床との間の狭い空間に同符号あるいは逆符号の別の高渦度領域が形成されている。このことから、縦渦は水路床とわずかな傾きをもって、一つの縦渦の下流部分が他

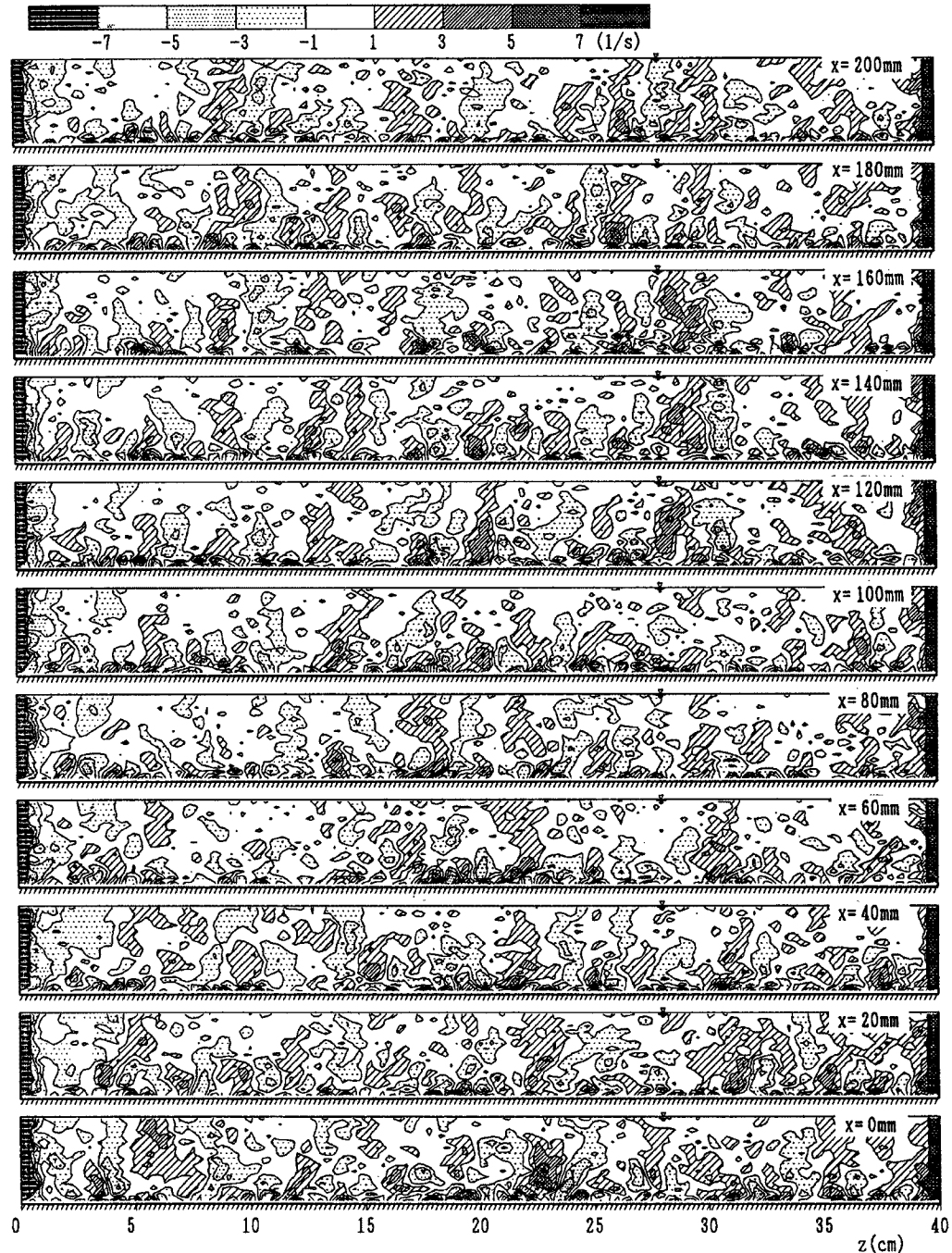


Fig. 8. The contours of the vertical component of vorticity in transverse cross-sections.

の縦渦の上流部分と重なりあいながら連なって形成されていると考えられる。また、渦度分布の幅の変化から、縦渦は上流側ではその断面が小さく下流にゆくほど大きくなっていることがわかる。

④ 縦渦の存在する領域より上の領域 ($y^+ > 100$) では、渦度の絶対値は水路床近傍のものより相対的に小さく、分布範囲は鉛直方向に広がっている。しかしこの範囲の流下方向の長さはせいぜい 500~600 unit length である。このような上層部の渦度領域の上流部は下層部の縦渦に連なっている。

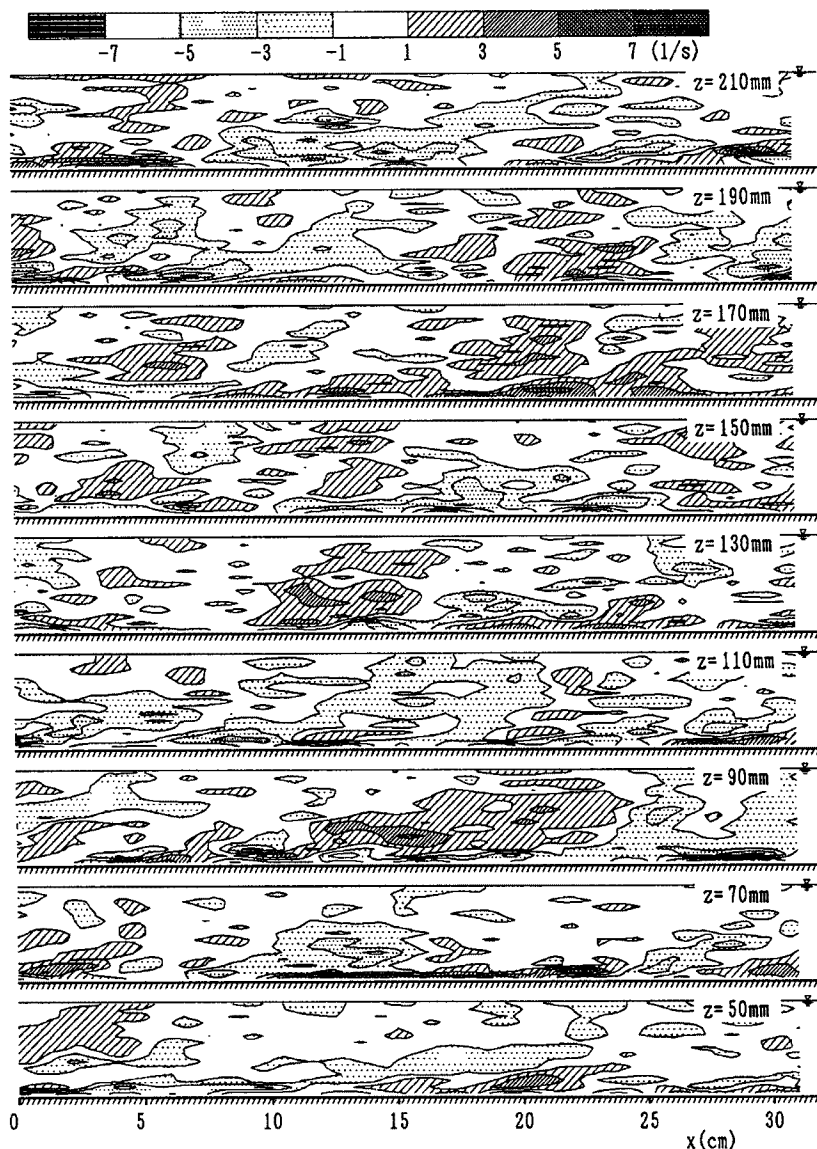


Fig. 9. The contours of the vertical component of vorticity in vertical longitudinal cross-sections.

⑤ 下層部における強渦度領域のうち同符号のもの2～3領域が上方にゆくにつれて合体し、上層部においては、絶対値が小さいながらも同符号の渦度をもつ領域は横断方向に水深の規模にまで広がっており、互いに逆符号をもつ渦度領域が横断方向に交互に存在している。

このことから2～3の同符号の渦度をもつ縦渦が集まって水深規模の循環（並列らせん流）を形成すると考えられる。

5. 結 語

開水路乱流の三次元構造を明らかにするため、35 mm 撮影機を用いて流れの水平断層面の連続撮影を迅速かつ精度よく行う方法を開発した。また、画像解析による流速ベクトル分布の計算に多段階相関法の手法

を導入することによって、計算時間を節約し、かつ計算精度を向上させることができた。

流速と渦度の空間的な分布特性を検討した結果、以下のことが明らかになった。

① 水路床近傍には縦渦が形成されており、その流下方向スケールは 700～1400 unit length であり、横断方向スケールは 70～100 unit length である。

② 縦渦は水路床とある傾きをもっており、その角度はバッファー層で $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ である。1つの縦渦と水路床との間隙には他の縦渦の上流端が形成される形で、縦渦どうしは互いの位相をずらせながら重なりあっている。また、縦渦の横断面は下流に行くほど増加している。

③ 流れの上層部 ($y^+ > 100$) では、2～3の同符号をもつ縦渦が集合して水深規模の横断方向スケールをもつ渦度領域が形成されており、これが水深規模の循環（並列らせん流）の発生原因となっていると考えられる。

参 考 文 献

- 1) Corrsin, S: Some current problems in turbulent shear flows, Proc. Symp. Naval Hydrodyn., Publ. 515, Nat. Acad. Sci., Nat. Res. Council, 1957, pp. 373-407.
- 2) Kline, S. J., W. C. Reynolds, F. A. Schraub and P. W. Randstadler: The structure of turbulent boundary layers, J. Fluid Mech., Vol. 30, 1967, pp. 741-773.
- 3) Utami, T., R. F. Blackwelder and T. Ueno: A Cross-Correlation Technique for Velocity Field Extraction from Particulate Visualization, Experiments in Fluids, Vol. 10, 1991, pp. 213-223.
- 4) Utami, T. and T. Ueno: Experimental study on the coherent structure of turbulent open-channel flow using visualization and picture processing, J. Fluid Mech., Vol. 174, 1987, pp. 399-440.
- 5) 木下良作：航空写真による洪水流の解析，写真測量，Vol. 6, No. 1, 1967, pp. 1-17.