

## 大規模乱流構造の可視化と解析 (2)

宇 民 正・上 野 鉄 男

### VISUALIZATION AND PICTURE PROCESSING OF OPEN CHANNEL FLOW (2)

By *Tadashi* UTAMI and *Tetsuo* UENO

#### Synopsis

Tracer method was applied to take the time series of pictures of flow patterns in horizontal cross-sections of an open channel flow. The pictures obtained were processed by a computer system. The method of experiment and analysis reported in the foregoing report was revised widely to get more precise results.

Various kinds of physical properties of the flow in horizontal cross-sections such as distribution of velocity vectors, two-dimensional divergence and patterns of streamlines, time-lines and path-lines were evaluated numerically and they were displayed as graphical outputs. At the same time, vertical components of velocity vectors were evaluated on the assumption of the frozen turbulence.

These results contributed to the elucidation of the three-dimensional structure of turbulent open-channel flows such as low speed streaks, upflows, downflows, bursts and downrushes.

#### 1. はじめに

流れの水平断面内での状況をトレーサー法により次々と時間的に連続して写真撮影した。一つの水平断面内での流況を撮影すると、次には 2 mm 上の断面内での流況を撮影するという様にして、4.1 cm の水深の流れについて 2 mm 間隔で 1/4 秒毎に 22 枚の写真を得た。

撮影結果から、各水平断面内での流速ベクトルの分布を求め、それを基にして各断面内での流線、発散、渦度、水素気泡法を適用した場合の気泡列パターンなどを計算により求めた。さらに流れの鉛直断面および横断面内での流況についても計算により求めた。これらの各種計算結果に基づいて、水路床近傍の乱流の三次元構造について考察を行った。

本研究では、実験手法として基本的には前報<sup>1)</sup>で報告したものを用いた。ただ若干の技術的改良により、実験精度を向上させた。一方計算機による図形処理の方法については、前報で報告したものに大幅な改善を加えた。

#### 2. 実験方法

実験装置の概要を Fig. 1 に示す。カメラのシャッタースピードは 1/4 秒にセットされており、2 台のカメラを交互に作動させることにより、Fig. 2 に示されるように時間的な空隙がない状態で撮影が連続的になされる。レンズの直前方で 4 箇の穴があいた円板をカメラのシャッターと同期させて 1/4 秒の周期で回転させ、撮影されたトレーサーにタイムマークが刻印されるようにした。トレーサーとしてはポリスチレンビーズ(粒径 0.1~0.5 mm)を用いた。照明装置は観測台車上下向きに取付けられ、そこから投げられるスリット状の光線を 45° 傾いた鏡で水平向きに反射させ、流れの水平な断面が照らし出されるようにした。このよ

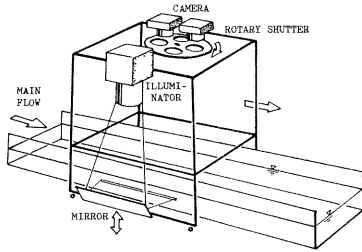


Fig. 1 Experimental setup.

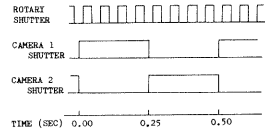


Fig. 2 Timing of each shutter opening.

うにして照らし出される断面内のトレーサーを2台のカメラで連続的に撮影した。

撮影を行いながら、台車を水流の平均流速  $9.8 \text{ cm/s}$  より若干遅い  $7.91 \text{ cm/s}$  で流下方向に移動させ、擬似的にラグランジ的に現象が捉えられるようにした。同時に鏡をも上方に  $8.0 \text{ mm/s}$  の速さで移動させ、流れの構造の各高さでの断面が刻々に撮影されるようにした。得られた写真の一例を **Photo. 1** に示す。この写真は平均的に水路床面から  $5.5 \text{ cm}$  の断面内の流況をとらえた No. 133 の写真である。

実験水路は幅  $40 \text{ cm}$  の一様水路で、三面とも透明アクリル樹脂でできている。水路床勾配は  $1/1000$ 、流量  $1.61 \text{ l/s}$ 、測定部分の平均水深  $4.1 \text{ cm}$ 、 $Re$  数  $4000$ 、 $U_*$  は  $0.9 \text{ cm/s}$  である。

以上の実験方法により、1回の実験で1組22枚の写真が得られる。1回の実験に要する時間はわずか数秒であり、この実験をくり返し行って最も写りのよい1組の写真を採用することとした。

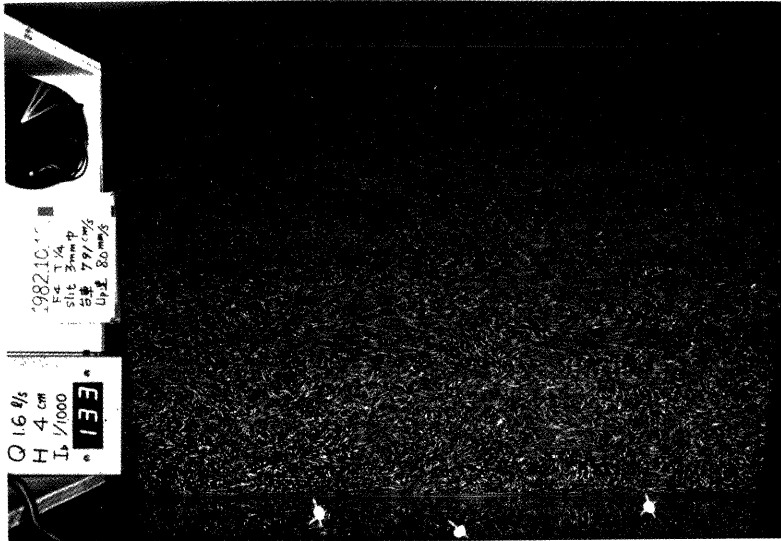


Photo. 1 Picture of flow patterns in the horizontal cross-section of the flow. Main flow direction is from left to right. The case of frame No. 133.

### 3. 解析方法

#### 3.1 解析を行った資料の範囲

上記の実験で得られた何組かの写真のうち、ここでは、フィルム番号130から151までの写真を含む一組の写真を採ることとし、とりあえずそのうちの奇数番号の写真を解析することとした。各フィルムに写しこまれた流れの場の時空間領域は Fig. 3 のとおりである。ここで  $z$  は水路床面からの距離、 $t$  は経過時間を表わしている。したがって解析した各フィルムに写しこまれた各断面間の中心間隔は 4mm、その時間間隔は 1/2秒である。

解析の範囲を水路側壁面 ( $y=0$  cm) と水路中心線 ( $y=20$  cm) とに挟まれた主流方向に 30 cm の長さをもつ領域に限定した。次の解析段階で行う内挿計算に備えるため、上記の 20 cm × 30 cm の範囲の外側周辺に 2 cm 幅の領域を付加え、結局 22 cm × 34 cm の領域に写しこまれているトレーサーの軌跡の始端と終端の位置座標をすべてデジタイザーで数値化して計算機に入力した。

なお、座標軸としては、水路の右岸側壁に沿って主流流下方向に  $x$  軸、水路床面に沿って水路横断方向に  $y$  軸、そして水路床面からそれに垂直かつ上向きに  $z$  軸をとっている。

#### 3.2 データの内挿計算

以後の各種の計算を容易に行うため、ランダムに配置されている読みとられた流速ベクトルの値を基にして、4 mm の間隔の格子点における流速ベクトルを内挿計算によって求めた。

2次元データの内挿法としては既にいくつかの方法が提案されているが、そこで取扱う元データだけでも莫大な数に達するため、あまり高度な内挿計算法を用いると計算機の容量に無理を来すおそれがある。したがって、ここでは流速ベクトルの読取り精度に対応した精度をもっておりしかも計算機の容量をなるべく消費しないような内挿計算法を用いた。その概要は次のようである。

すなわち、まず当該格子点を原点として解析の対象の場を4つの象限に分割する。内挿されるべき離散関数  $f_i(x, y)$  ( $i=1 \sim N$ ,  $N$ : データ数) とし、各象限の中から1つずつ原点に最も近い点を選出する。

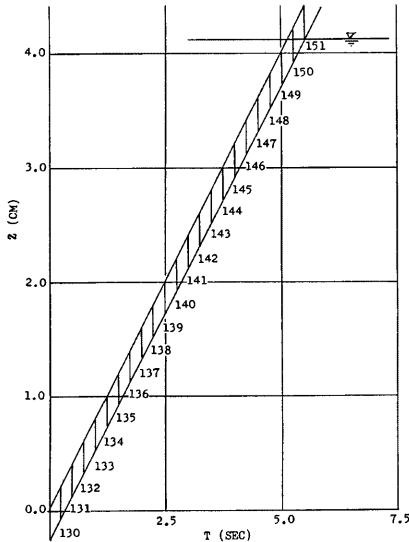


Fig. 3 Time-space range caught by each frame of a picture.

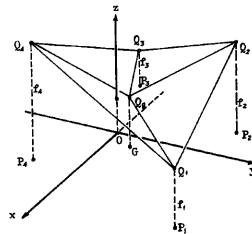


Fig. 4 The method to get the value of a function at the origine by interpolating 4 values at the points  $P_1 \sim P_4$ .

それらの点を  $P_1(x_1, y_1)$ ,  $P_2(x_2, y_2)$ ,  $P_3(x_3, y_3)$ ,  $P_4(x_4, y_4)$  とし、そこにおける関数値を  $f_1, f_2, f_3, f_4$  とする。Fig. 4 に示されるように、これら各点においてそれぞれの関数値を高さにもつ点を  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$  とする。また、四角形  $P_1P_2P_3P_4$  の重心の位置を  $G$  としそこでの関数値  $f_g$  は近似的に  $f_g = (f_1 + f_2 + f_3 + f_4)/4$  で与えられるものと仮定する。 $G$  において  $f_g$  の高さをもつ点を  $Q_g$  とする。面  $Q_1Q_2Q_g, Q_2Q_3Q_g, Q_3Q_4Q_g, Q_4Q_1Q_g$  の4面が構成する一つの屈曲面の原点における高さが求める内挿関数の値であるとする。

以上の方法によって流速ベクトルの二つの成分を別々に内挿して求め、各格子点での流速ベクトルを求めた。

#### 4. 解析結果とその考察

##### 4.1 水面近傍の流況の特徴

水面近傍の No. 149 の水平断面の撮影結果を例にとって解析の手続きと流れの構造について述べる。Fig. 5 は写真に写してまれたトレーサーの軌跡を紙面上にトレースしたもので、Fig. 6 はそれを上記の内挿法により各格子点上のベクトルにおきかえたものである。これらの図において黒丸はトレーサーの軌跡あるいは流速ベクトルの始点を表わしている。両図を詳細に比較してみると、上記の内挿法によって充分精度よく内挿が行われているといえよう。

Fig. 7 は、Fig. 6 の各ベクトルからそれらの平均流下方向流速成分だけ差引いたものを示したものであり、換言すると、流れの場をその平均流下方向流速に等しい速度で並進する系から見た場合の流れのパターンである。

またFig. 8 は、Fig. 7 の理解を助けるために、Fig. 7 の各ベクトルを妥当な曲線で包絡したもので、いわゆる流線に相当する。次にFig. 9 と Fig. 10 は、Fig. 7 の各ベクトルの流下方向成分の平均値よりおのおの1.0cm/s および 2.0m/s 遅い速度で並進する系から見た場合の流線図である。Fig. 8~Fig. 10 から、流線のパターンはその観察者の相対速度によりかなり異なってくることがわかる。また、(14 cm, 12 cm) および (18 cm, 3 cm) のあたりに流線が強く発散している様子が認められ、一方 (7 cm, 2.5 cm), (12 cm, 3 cm), (23 cm, 4 cm) ならびに (30 cm, 4 cm) のあたりに跳び石状に強い渦運動のパターンがあることが認められる。

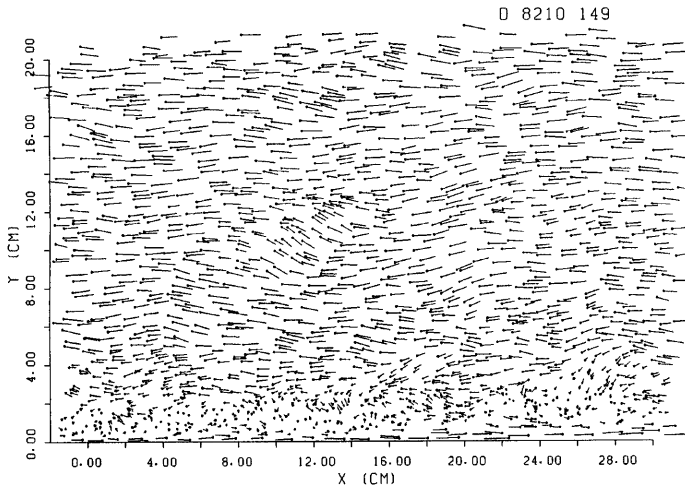


Fig. 5 Traced streaks of tracers. A line segment means the shift of a tracer during a quarter of a second. A dot is an initial end. The case of frame No. 149.

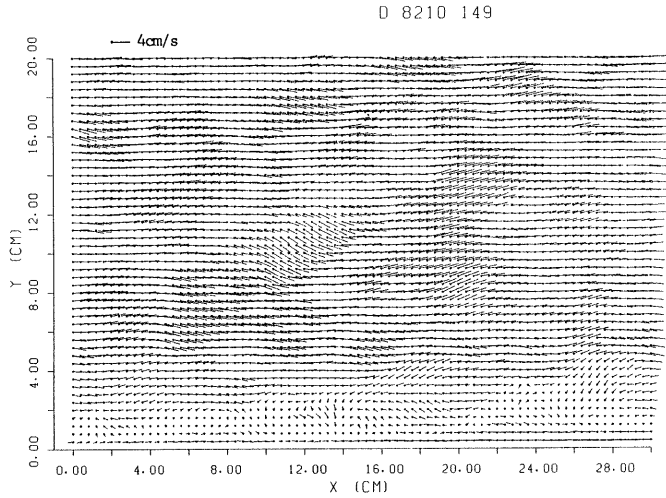


Fig. 6 Distribution of velocity vectors at lattice points calculated from Fig. 5 by an interpolation. The case of frame No. 149.

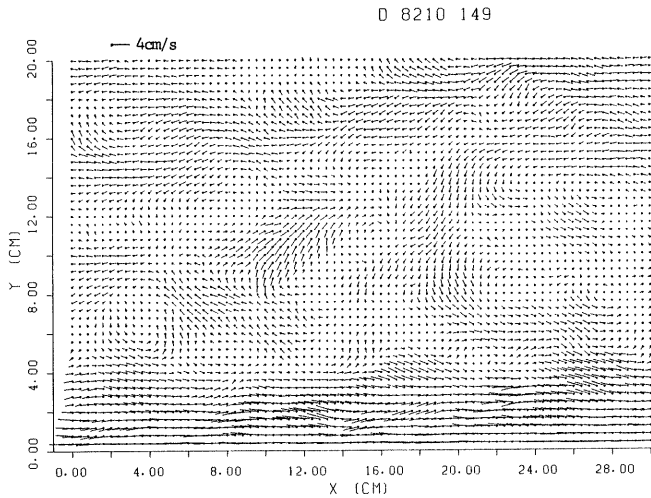


Fig. 7 The vector field observed from the view point moving at the speed equivalent with the mean velocity of the flow field. The case of frame No. 149.

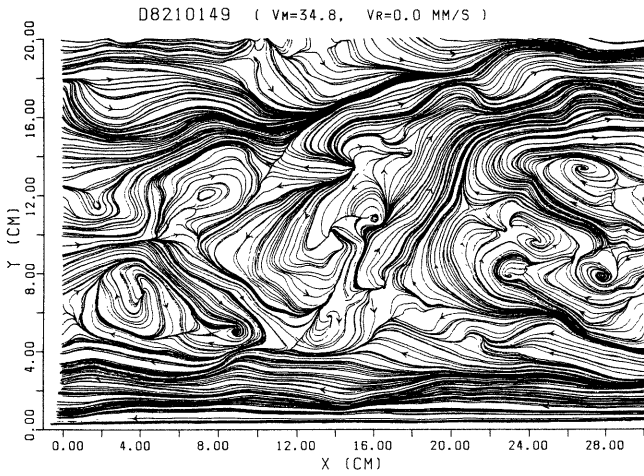


Fig. 8 Patterns of streamlines viewed by the observer moving at a speed equivalent to the mean velocity of the flow field. The case of frame No. 149.

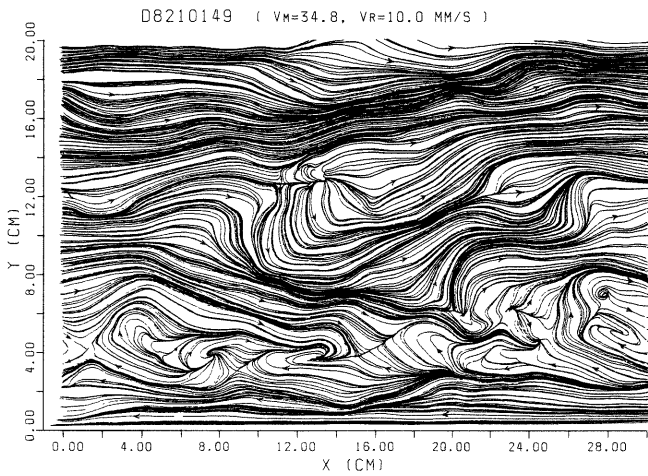


Fig. 9 Patterns of streamlines viewed by the observer moving at a speed 1 cm/s slower than the mean velocity of the flow field. The case of frame No. 149.

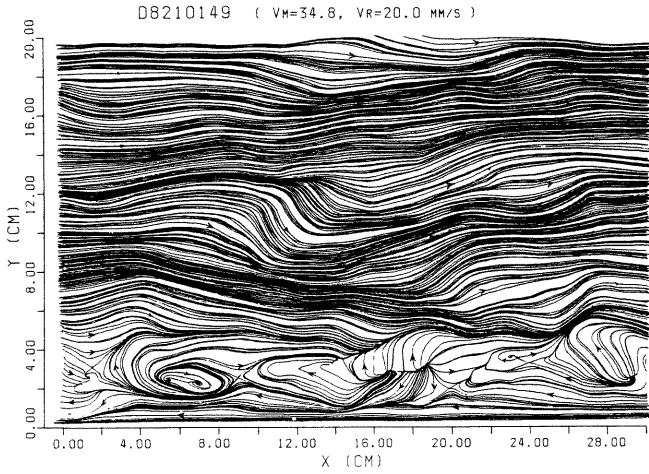


Fig. 10 Patterns of streamlines viewed by the observer moving at a speed 2 cm/s slower than the mean velocity of the flow field. The case of frame No. 149.

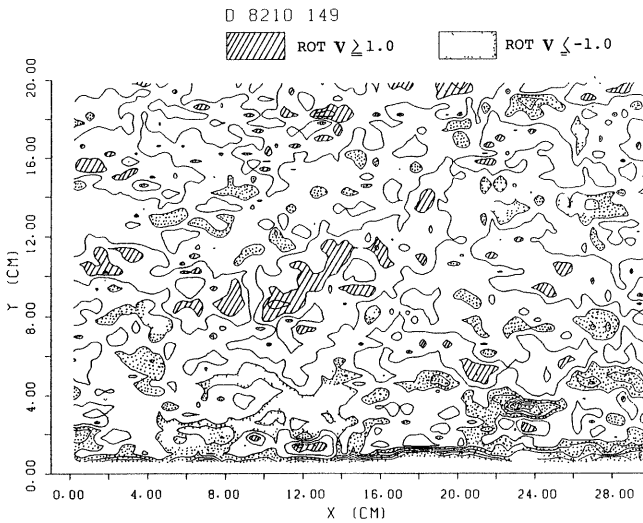


Fig. 11 A distribution of vertical component of rotation. An interval of contour values is 1 1/s. The case of frame No. 149.

Fig. 11 は渦度ベクトルの鉛直方向成分の分布を示したものである。先に示した流線パターンにおいて渦運動のパターンあるいは流向が急激に転換するパターンが存在する位置で、渦度もやはり大きくなっていることがわかる。なお、等値線の間隔は  $1(1/s)$  である。

Fig. 12 は2次元発散  $\partial u/\partial x + \partial v/\partial y$  の分布を示している。等値線の間隔はやはり  $1(1/s)$  である。流線が発散している位置で2次元発散の値もやはり大きくなっている。当該断面が水面に近いことを考えると、2次元発散の値が大きくなっているこれらの位置ではボイルが生じていると見なされる。

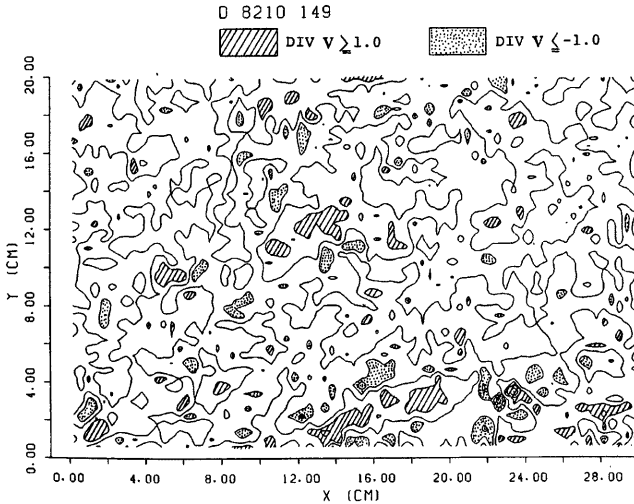


Fig. 12 A distribution of two dimensional divergence. An interval of contour values is  $1(1/s)$ . The case of frame No. 149.

#### 4.2 水路床近傍の流況の特徴

Fig. 13 は No. 133 の写真からえたベクトルの分布図で、水路床面から平均的に  $5.5\text{ mm}$  の位置の断面内での流況をその断面内の平均流下方向流速で移動する系から見たものである。また Fig. 14 はその流速ベクトルを滑らかな曲線で包絡したものである。バッファー層の領域が底から  $0.6\text{ mm}$  ないし  $8\text{ mm}$  であるから、この断面はバッファー層の中間の水平断面に相当する。

これらのパターンはその断面内の平均流下方向流速で移動する系から観察したものであることを考慮すると、Fig. 14 の流線が下流方向を向いている所は高速部であり、上流側を向いている所は低速部である。低速部の中でもとりわけ流線が集中しておいて流下方向に長く続いている部分は低速渦である。

この図から、水路床付近の乱流構造は横断方向に低速渦により区切られており、そのスケールはほぼ水深ないしは半水深のスケールであることがわかる。

Fig. 15 は上と同じ断面の渦度の分布を示したものである。渦度が正でその絶対値が大きな領域と、負でやはり絶対値が大きな領域とが横断方向に交互に配列されており、乱流構造の規則性が如実に示されている。これらの分布形は、水路床に対して僅かに傾いた渦が流下方向に伸びており、その断面を示していると考えられる。この渦がいわゆる馬蹄型渦に相当するものであろう。

Fig. 16 は2次元発散の値を示している。この図と Fig. 14 の流線パターンとを比較すると、低速渦に沿って断続的に発散が負でその絶対値が大きな領域があることがわかる。この断面面が水路床に近いことを



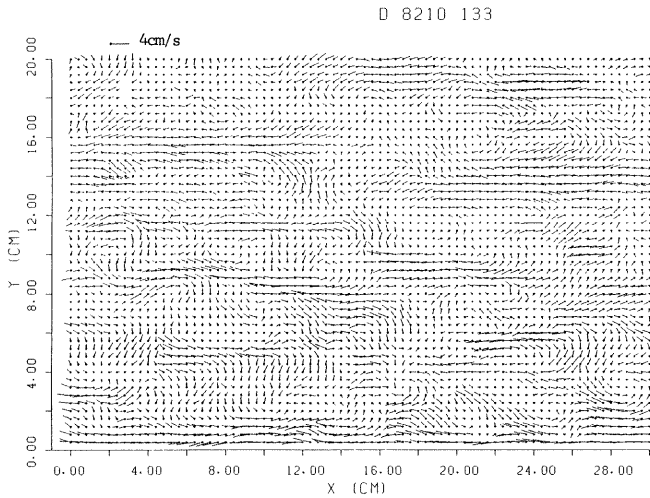


Fig. 13 The distribution of velocity vectors in the horizontal cross-section 5.5 mm from the channel bed viewed by the observer moving at the mean velocity in the section. The case of frame No. 133.

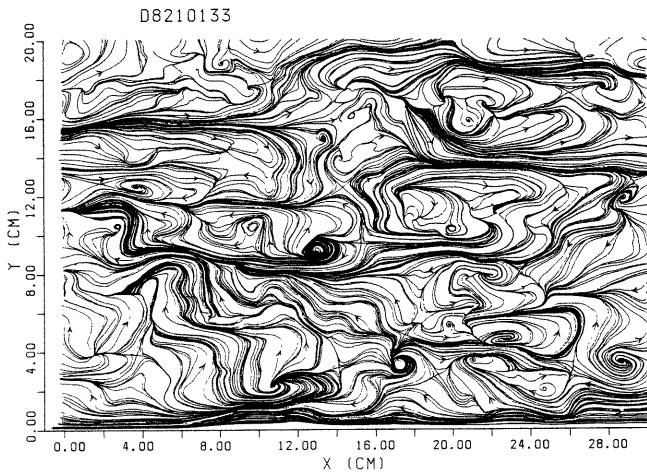


Fig. 14 Patterns of streamlines obtained from Fig. 13. The case of frame No. 133.

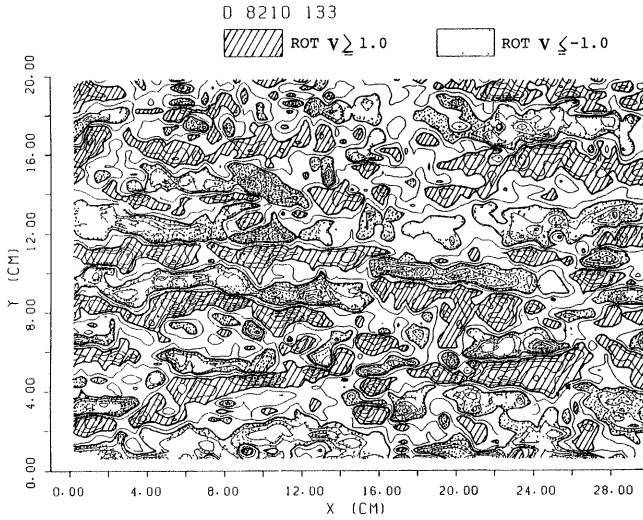


Fig. 15 A distribution of the vertical component of rotation. An interval of contour values is 1 1/s. The case of frame No. 133.

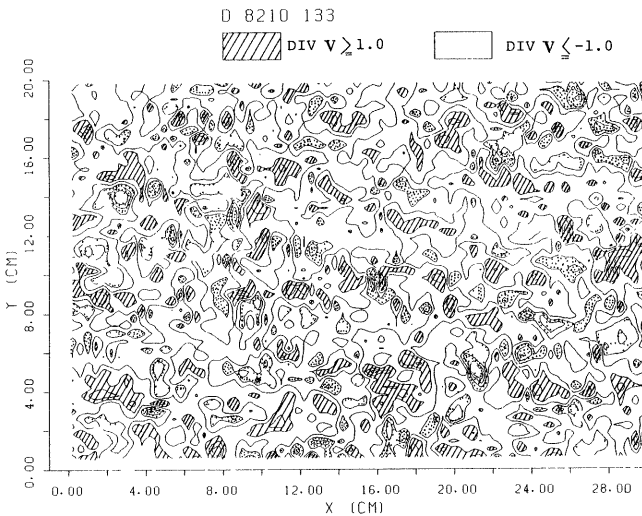


Fig. 16 A distribution of two-dimensional divergence. An interval of contour values is 1 1/s. The case of frame No. 133.

考慮すると、この断面での負の発散値は、この面からの流体の流出すなわち上昇流の存在を意味するといえる。したがって、上記のことから、低速渦に沿っては上昇流がその強さを変動させながら連なって生じていることがわかる。

Fig. 17 は No. 131 の写真から得られた流線パターンで、平均的には水路床面から 1.5 mm の高さの流況を、その断面内の平均流下方向流速で移動する系から見たものである。本図と Fig. 14 とを比較すると、本図における方が低速渦の横断方向の間隔ならびに渦の流下方向スケールはともに一層小さくなっていることがわかる。

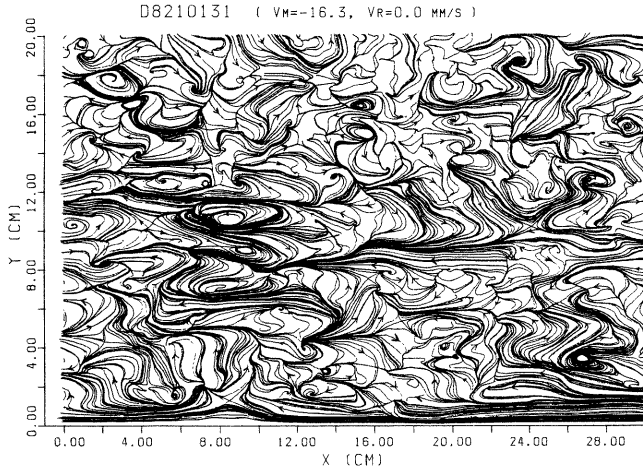


Fig. 17 Patterns of streamlines viewed by the observer moving at a speed equivalent to the mean velocity of the flow field. The case of flame No. 131.

#### 4.3 水路床近傍の乱流の三次元構造<sup>1),2),3)</sup>

Fig. 14 や Fig. 17 に示されるような水路近傍の流線パターンの中にある規則性を把握するために、これらの図中にある特異点(鞍形点)の周辺の流線パターンを分類してみた。その特徴的なものをあげると Fig. 18 のようである。すなわち、図の (a) は特異点の上流側に高速部、下流側に低速渦が生じる場合で、Fig. 17 の (17.5 cm, 5 cm) の位置にある特異点ならびに Fig. 14 の (15.5 cm, 10 cm) の位置の特異点がこれに相当する。(b) 図は以上とは逆に、特異点の上流側に低速渦、下流側に高速部が生じる場合で、Fig. 17 の (9.5 cm, 5 cm) の特異点、Fig. 14 の (17.5 cm, 4.5 cm) の特異点がこれに相当する。また (c) 図は 1 つの特異点において高速部は低速渦に、低速渦は高速部にそれぞれ遷移している例で、Fig. 17 の  $x=2\sim 9$  cm,  $y=9\sim 13$  cm の範囲内にある特異点群がそれに相当する。

ところで、渦の形態として馬蹄型渦を考えると、馬蹄型渦と高速部あるいは低速渦の位置関係は Fig. 19 のように概念的に表わされる。すなわち、低速渦は 1 つの馬蹄型渦の互に対をなす 2 本の脚の間に挟まれた細長い領域で生じ、高速部は 2 つの馬蹄型渦の間の領域に生じる。Fig. 18 と Fig. 19 とをあわせ考えると、Fig. 18 の (a)~(c) に対応する馬蹄型渦の配置はそれぞれ Fig. 20 (a)~(c) のようであると考えられる。

一方流線パターンとそれに対応する二次元発散の分布とを比較すると、Fig. 18(a) の型の特異点を横断方向に過ぎる遷移流線の上で二次元発散の値は負の大きな値を示しており、(b) 型の特異点についてはそれをやはり横断方向に過ぎる遷移流線の上で二次元発散の値は正の大きな値が示していることが認められる。このような傾向は流線パターンから判断しても首肯できることである。

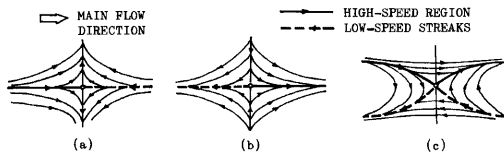


Fig. 18 Characteristic flow patterns around singular point (saddle point).

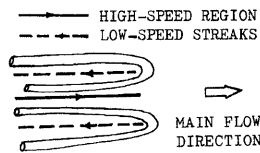


Fig. 19 Spatial distribution of horse-shoe vortex, high-speed region and low-speed streaks.

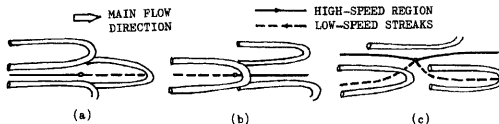


Fig. 20 Spatial distribution of horse-shoe vortices around a singular point.

以上のことを総合して考えると、Fig. 18 (a) 型の特異点の周辺における2次元発散の負の大きな値は局所的で強い上昇流を意味しており、これがいわゆるバーストであると考えられ、その三次元的な構造はFig. 20 (a) に示されるような馬蹄型渦の配置で説明される。一方 Fig. 18 (b) 型の特異点の周辺における2次元発散の正の大きな値は強い局所的な下降流の存在を意味していると考えられ、それは Fig. 20 (b) のような馬蹄型渦の配列の下に生じている。Grass<sup>4)</sup> が Inrush と呼んでいる現象はこれに相当するものと思われる。最後に、Fig. 18 (c) 型の特異点の周辺の馬蹄型渦の配置としては Fig. 20 (c) の形態が考えられる。ここにおける流体運動の特徴はまだ詳らかではない。

以上の考察をまとめて述べると次のようである。すなわち、低速渦における細長い領域にわたる緩慢な上昇流、高速部における全般的な下降流、バーストと呼ばれる局所的で強い上昇流、および特異点周辺の局所的で強い下降流はそれぞれに関連をもって生じていると同時に区別されるべきものである。すなわち、前二者はその発生機構が Fig. 19 に示されるように、基本的には二本の並列な渦管の間の現象である。一方バーストと局所的な下降流は、その発生機構が Fig. 20 に示されるように、平面的には千鳥型に配置されている複数の馬蹄型渦の重複部分で生じる現象である。

##### 5. 水素気泡法の気泡パターンの検討

実験の対象とした流れに水素気泡法を適用したとき、どのような気泡列パターンが得られるかを当該水平断面で乱流構造が凍結されているという仮定の下に計算により求めてみた。Fig. 21 の (a)~(c) は水素気泡の放出の仕方とカメラの撮影の方法の差異により生じる各種パターンを同じ一つの断面 (写真番号 No. 133) の同じ位置について計算し、その結果を比較したものである。

すなわち、Fig. 21 (a) は最も一般的な水素気泡列パターンで、 $x=8\text{ cm}$  の位置に水平かつ横断方向に水素気泡発生用の電極をおき、それに  $20\text{ Hz}$  のパルス状電圧を負荷したときに生じる水素気泡のタイムラインのある瞬間におけるパターンである。本図と Fig. 14 の流線パターンとを比較してみると、流線が上流を向いている所で明白に低速渦が生じていることがわかる。また本図で、 $(15.5\text{ cm}, 10\text{ cm})$  の位置あたりでは高速部が低速渦に移行する様子が明白にうかがわれ、そこに見られるタイムラインのパターンが、いわゆるバーストが生じた時のパターンであることがわかる。

Fig. 21 (b) はやはり  $x=8\text{ cm}$  の位置に横断方向に張られた電極に  $2\text{ mm}$  間隔の刻印をつけ、そこから水素気泡を連続して放出するときのある瞬間におけるパターンを計算により求めたもので、いわゆる流脈線に相当する。先の (a) 図のパターンと比較してみると、低速渦の所で流脈線は収束しておりまた、高速部で

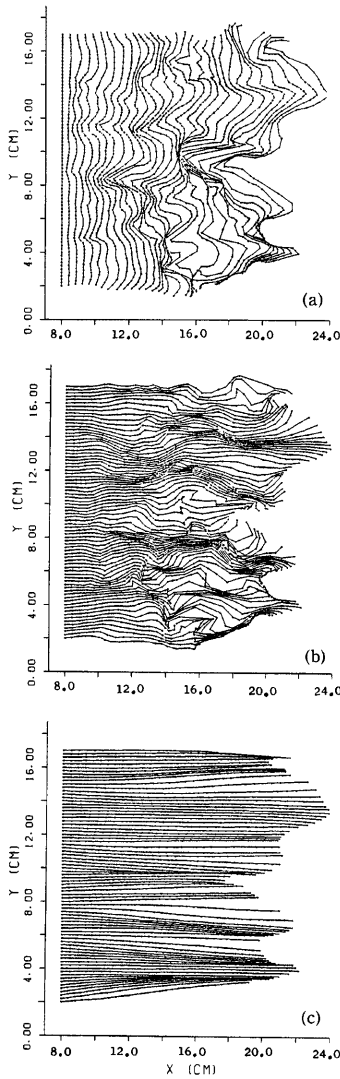


Fig. 21 Patterns of hydrogen bubble lines calculated on the assumption of frozen structure of turbulence. A negative electrode is supposed to be set on the transversal line of  $x=8$  cm. The case of frame No. 133.  
 (a) Time lines, (b) Streak lines, (c) Path lines.

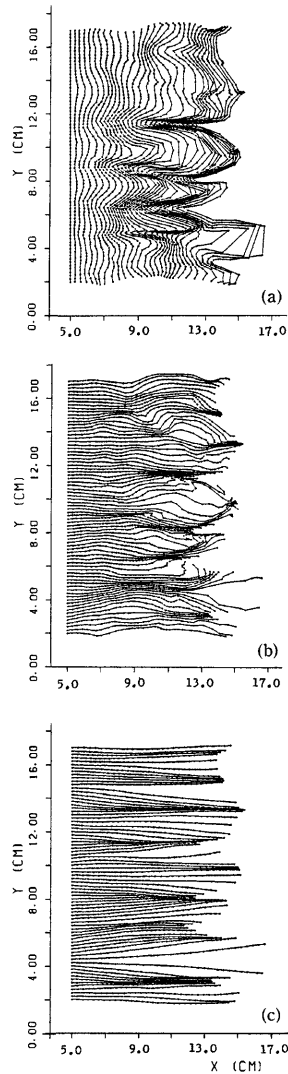


Fig. 22 Patterns of hydrogen bubble lines calculated on the assumption of frozen structure of turbulence. A negative electrode is supposed to be set on the transversal line of  $x=5$  cm. The case of frame No. 131.  
 (a) Time lines, (b) Streak lines, (c) Path lines.

はそれらは発散している様子が認められる。このような傾向は、低速域で上昇流、高速域で下降流が生じるという傾向の反映と考えられる。また、(15.5 cm, 10 cm) の位置のバースト付近では流脈線も極端に乱れている様子がよくわかる。

Fig. 21 (c) はいわゆる流跡線で、先と同じ  $x=8$  cm に張られた電極上の 2 mm 間隔の点からある一瞬に放出された気泡が描く軌跡を示している。流脈線に比べて直線性が強いことが注目される。

Fig. 22 (a) は写真番号 No. 131 の写真に相当する断面（水路床面から平均的に 1.5 mm の高さ）で水素気泡法を適用した場合のタイムラインのパターンの計算結果で、この場合は水素気泡発生用の電極を  $x=5$  cm の位置に置いたとしている。水路床に近い断面では低速域の所でのタイムラインの堀れ込みが深くなっていることが認められる。またこの図の (12 cm, 5 cm) あたりで低速域から高速部への遷移が認められ、ここでは局所的に強い下降流が生じた模様がかがわれる。

Fig. 22 (b) は上図と同じ位置における流脈線を示している。低速域の所で流脈線の収束が起り、高速域で発散が生じている様子が著者にうかがわれる。また低速域から高速部へ遷移している位置周辺では流脈線の発散が著しく、強い局所的な下降流の存在を示している。同じく Fig. 22 (c) は、同じ場合における流跡線を示している。

## 6. 縦断面内の流況

以上までの議論は、流れの水平断面内の実測資料に基づいた水平断面内の流況に関するものであった。すなわち、以上に示した流水の可視化法は流れの水平断面を可視化したものであるから、その結果から流速ベクトルの鉛直方向成分を直接的に求めることはできない。しかしもしも流れの水平断面内で凍結乱流の仮定を用いるとするならば、Fig. 2 に示すように各断面の撮影時刻が異なっているため、その時間差に相当する距離だけ各断面の原点を平行移動させた上で連続の式を適用すると、鉛直方向流速成分は次のように求められる。すなわち、式

$$w = \int_0^z \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right) dz = - \int_0^z \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) dz$$

において、被積分関数は既に求めた 2 次元発散の値であるから、これを  $z$  方向に数値積分して  $w$  の分布が求められる。このようにして求めた  $w$  を用いて流れの鉛直縦断面内の流速分布を計算し、そのうちの若干例を Fig. 23 と Fig. 24 に示した。すなわち、Fig. 23 (a) は測定台車速度 7.91 cm/s に等しい速度で

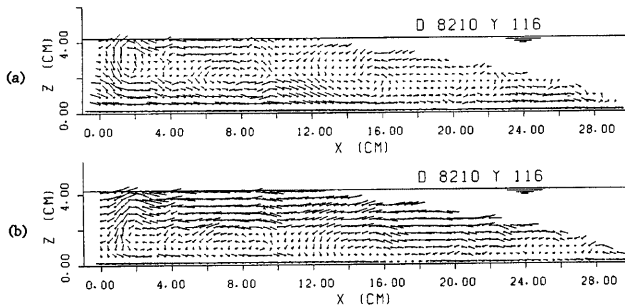


Fig. 23 Distribution of velocity vectors in longitudinal vertical cross-section of  $x=11.6$  cm, where upward flow is remarkable.

- (a) Distribution of velocity vectors viewed by the observer moving at a speed of the measuring frame.  
 (b) The same as (a) but the observer is moving at a speed 2 cm/s slower.

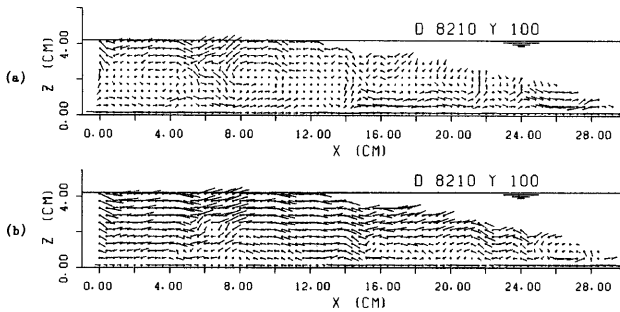


Fig. 24 Distribution of velocity vectors in longitudinal vertical cross-section of  $x = 10$  cm, where downward flow is remarkable.

- (a) Distribution of velocity vectors viewed by the observer moving at a speed of the measuring frame.
- (b) The same as (a) but the observer is moving at a speed 2 cm/s slower.

$y = 11.6$  cm の縦断面内の流況を見たものであり、同図 (b) は水路床近傍の流況を見るために台車速度より 2.0 cm/s おそい速度で同じ縦断面の流況を見たものである。Fig. 14 から判断すると、この縦断面付近には低速帯が走っており、一般的に上昇流が生じることが推察される。実際 Fig. 23 では上昇流が顕著に認められ、あるものは水面にまで達していることがわかる。

Fig. 24 は  $y = 10$  cm の縦断面における流れのパターンで、上図と同様、(a) 図は測定台車速度 7.91 cm/s に等しい速度で当該縦断面内の流況を見たものであり、(b) 図はそれより 2 cm/s おそい 5.91 cm/s の速度で流況を見たものである。Fig. 14 あるいは Fig. 17 から判断すると、 $y = 11.5$  cm あたりと  $y = 8.5$  cm あたりに低速帯があり、 $y = 10.0$  cm の縦断面はその丁度中間にあたるので、そこでは下降流の存在が推察される。実際、この断面では一般的に下降流が顕著である。

これら縦断面内の流況には水深あるいはその 2 倍程度のスケールの構造があることが認められる。

### 7. 横断面内の流況

先に得た鉛直方向流速成分を用いて、流れ

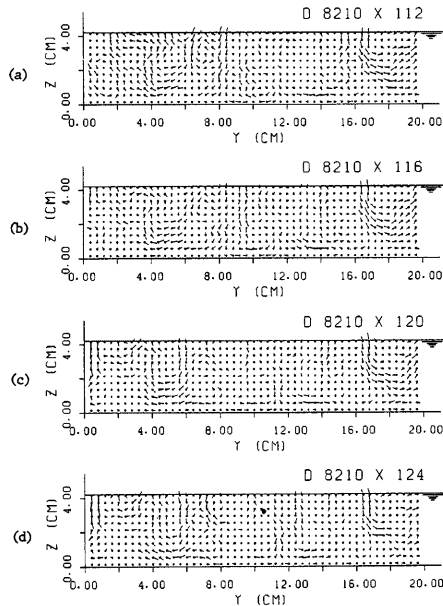


Fig. 25 Distribution of velocity vectors in transversal vertical cross-sections of the flow. (a)  $x = 11.2$  cm, (b)  $x = 11.6$  cm, (c)  $x = 12.0$  cm, and (d)  $x = 12.4$  cm.

の鉛直断面内の流況を図化した。Fig. 25 の4枚の横断面流況はそれぞれ  $x=11.2\text{ cm}$  から  $12.4\text{ cm}$  までの間の流況を  $4\text{ mm}$  間隔で示したものである。

流れの上層と下層とで撮影時刻がずれていること、また、それを補足するために水平断面内で凍結乱流の仮定を導入したことなど、本計算を行うにあたっての基本条件に多くの問題点はあるものの、この図から次のことが指摘できる。すなわち、先に述べたように  $x=11.2\text{ cm}\sim 11.6\text{ cm}$  の横断面では  $y=8.5\text{ cm}$  あたりと  $y=11.5\text{ cm}$  のあたりに上昇流があり、その中間に下降流があって、二次流が形成されていることがわかる。また上記以外の所でも数ヶ所二次流の存在が確認できるが、それらの軸は下流の横断面におけるほど高くなっていることがわかる。

## 8. おわりに

連続断面撮影法とでも表現できる流れの可視化法と、それにより得られた資料の計算機による解析法とを提示した。流れの可視化は流れの水平断面内の流況に関して時間的に連続して行われるものであるが、解析計算によって流れの水平断面内の状況はもとより、鉛直断面内ならびに横断面内の状況まで図化できることが示された。また、これらの各種断面内の流況解析によって、水路床面近傍の乱流の三次元的な構造を明らかにすることができた。

ただ、ここで報告した三次元的な流れの構造あるいは特徴を図化するための解析方法はあくまでも凍結乱流の仮定に基づく近似的なものである。近似の度合いを向上させるためには、実験的にも解析的にもまだまだ多くの改良が必要である。たとえば、(1)正確に平行でかつ明るさが充分な照明装置と照明光線の迅速な移動装置の開発、(2)密度と粒径が適当なトレーサーの調整、(3)写真フィルムの読みとりの自動化、(4)凍結乱流の仮定の改良、(5)流水の三次元構造の表現方法の開発、などである。

本研究を行うにあたり京都大学防災研究所今本博健教授から貴重な助言を賜った。また、実験ならびに資料整理には京大大学院生の辻野文隆君ならびに摂南大学学生の石塚雅美君の協力を得た。等値線の作図のためのプログラムは京都大学防災研究所松村一男氏作成のものを利用した。末筆ながら深甚の謝意を表す次第です。また本研究の計算ならびに結果の図化の多くは京都大学防災研究所防災科学資料センターの計算機を用いてなされたこと、ならびに本研究の一部は文部省科学研究費補助金試験研究(2) (代表者宇民正)の補助を受けたことを付記し、謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 宇民 正・上野鉄男：大規模乱流構造の可視化と解析，京都大学防災研究所年報，第25号 B-2，1982，pp. 545-556.
- 2) 宇民 正・上野鉄男：可視化法による大スケール乱れに関する研究，京都大学 防災研究所年報，第19号 B，1976，pp. 267-288.
- 3) 宇民 正・上野鉄男：可視化法による大スケール乱れに関する研究 (2)，京都大学防災研究所年報，第20号 B-2，1977，pp. 331-354.
- 4) Grass, A. J.: Structural features of turbulent flow over smooth and rough boundaries, J. Fluid Mech., Vol. 50, part 2, 1971, pp. 233-255.