

連続断層面撮影法による大規模乱流構造の可視化とその解析
Visualization and Processing of Series of Flow Patterns
in Horizontal Cross-sections

京都大学防災研究所 正 員 宇 民 正
京都大学防災研究所 正 員 上 野 鉄 男
京 都 大 学 大 学 院 学 生 員 辻 野 文 隆
摂 南 大 学 学 生 員 石 塚 雅 美

1. はじめに

流れの計測法において、固定点計測法は文字どおり流れの中の数点における情報を提供するのに対し、可視化法は二次元的あるいは三次元的なひろがりをもつ領域内の情報を提供する。しかもわれわれはそれを視覚で認識し判断することができる。さらに可視化法は擬似的にラグランジュ的に現象を把握することができる。これらの点で可視化法は固定点計測法に比して優位である。しかし一方可視化法は、それによって得られた結果を数量化する上で難点をもっていた。とりわけ三次元的な流れ場の可視化とその結果の数量化は困難である。例えばGrass¹⁾は大規模乱流構造を可視化しその結果を数量的に処理しているが、その解析の対象は流れ場の1断面内の流況に限られている。ところが最近計算機が普及し、上記のような可視化法の制約が取除かれつつある。木下²⁾は彎曲した複雑な開水路の流れをトレーサー法により2台のカメラを用いて撮影し、その写真を実体視してトレーサーの三次元的な位置を読みとった。その他にも可視化結果の計算機による処理について最近いくつかの研究が発表されている。^{3) 4)}

著者らは、流れの断層面をつぎつぎに撮影することにより流れの三次元的な構造を近似的にはあるが数量的に把握する方途を見出した。ここにその概要を報告する。

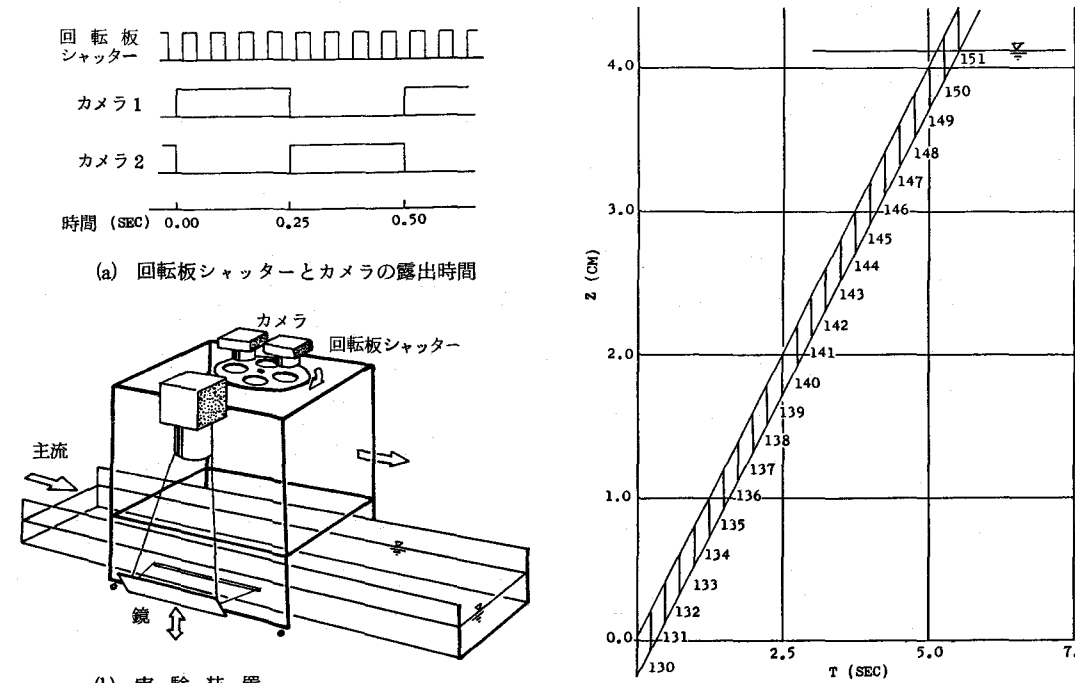


図 1. 実験方法

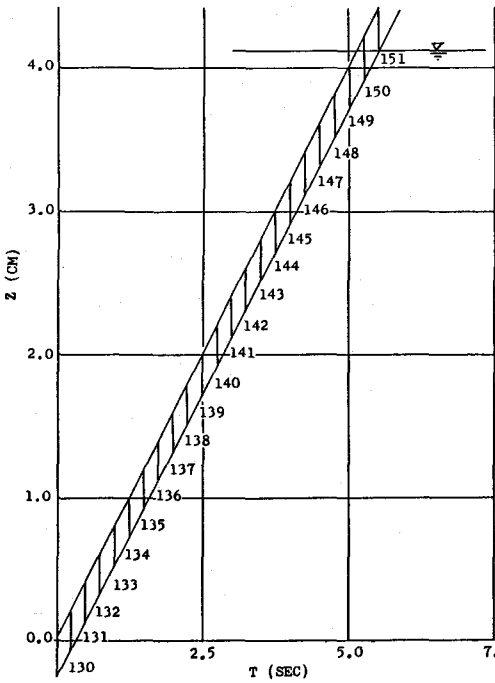


図 2. 撮影領域

2. 実験方法

実験装置の概要を図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、二台のカメラを交互に作動させることにより、図1(a)に示されるように時間的な間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箇の穴の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Time Markが入るようにした。トレーサーとしてはポリスチレンビーズ(粒径 $0.1 \sim 0.5\text{mm}$)を用いた。照明装置は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。このようにして照らし出される断面内のトレーサーを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 cm/sec より若干遅い 7.91 cm/sec で流下方向に移動させ、擬似的にラグランジ的に現象が把握されるようにした。同時に鏡をも上方に 8.0 mm/sec の速さで移動させ、流れの構造の各高さでの断面が撮影させるようにした。

実験水路は幅 40 cm の一樣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 1.6 l/sec 、測定部分の平均水深 4.1 cm 、 Re 数 $4,000$ 、 U_* は 0.9 cm/sec である。

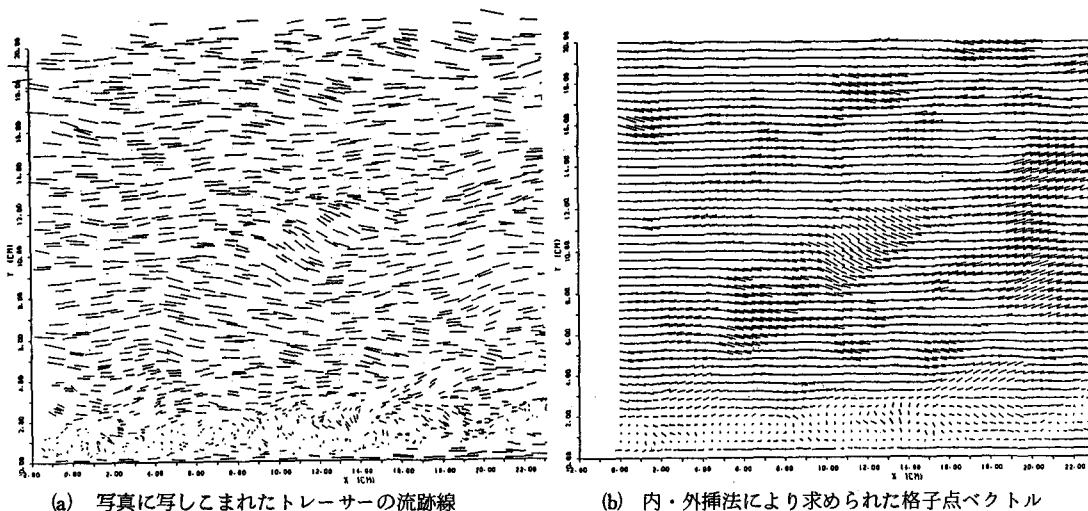
3. 解析方法

上記の方法により、1回の実験で1組 $22 \sim 23$ 枚の写真が何組か得られる。ここではそのうちの1組(フィルム番号 $130 \sim 151$)のうち奇数番号のフィルムを解析した結果について述べる。これら各フィルムに写しこまれている時空間領域は図2のようである。

解析の範囲を水路側壁面($Y=0\text{ cm}$)と水路中心線($Y=20\text{ cm}$)に挟まれた主流方向に 30 cm の領域に限定し、その範囲で写真に写しこまれたトレーサーの軌跡をすべて紙面上にトレースし、次にそれら各ベクトルの始点と終点の座標をデジタイザーで数値化して計算機に入力した。計算機により、各水平断面の入力されたベクトルのデータから 4 mm 間隔の各格子点における流速ベクトルを内・外挿法により求め、また、流れの場を台車速度とは別の移動速度をもつ系から見た場合のベクトル場を計算した。次に得られたベクトル場から2次元場の渦度と発散の分布を求めた。さらに先に得た2次元ベクトル場から、流れの横断面と縦断面の流況を求めた。以下にこれらの結果について具体的に述べる。

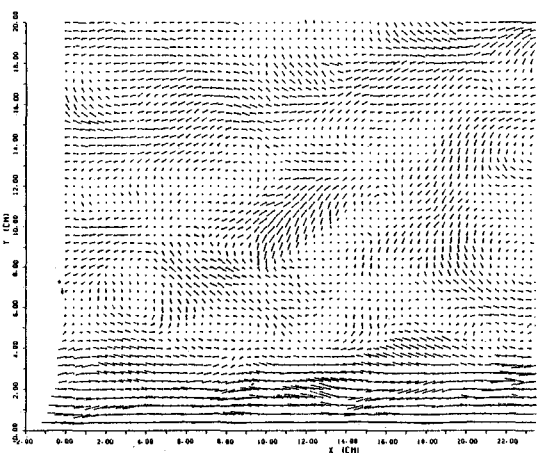
4. 水面近傍の流況の特徴

上記の計算手順を水面近傍のNo.149の水平断面の撮影結果の解析を例にとって述べる。解析は $30\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ の領域について行ったが、紙面の都合上図にはその内の $22\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ の領域について示されている。図3(a)は写真に写しこまれたトレーサーの軌跡を紙面上にトレースしたもの、図3(b)は図(a)の結果から各格子点上のベ

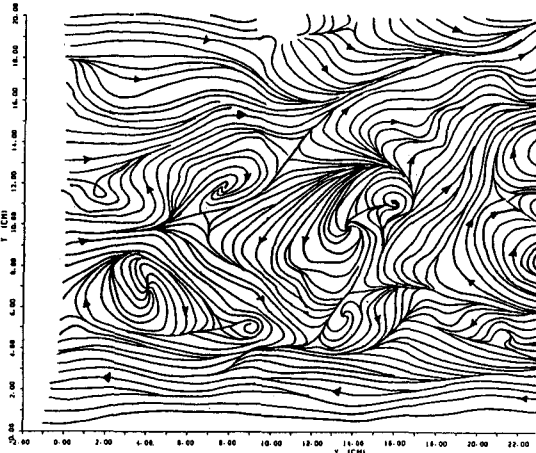


(a) 写真に写しこまれたトレーサーの流跡線

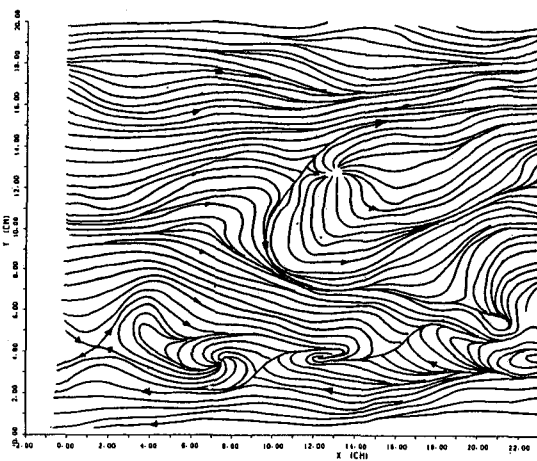
(b) 内・外挿法により求められた格子点ベクトル



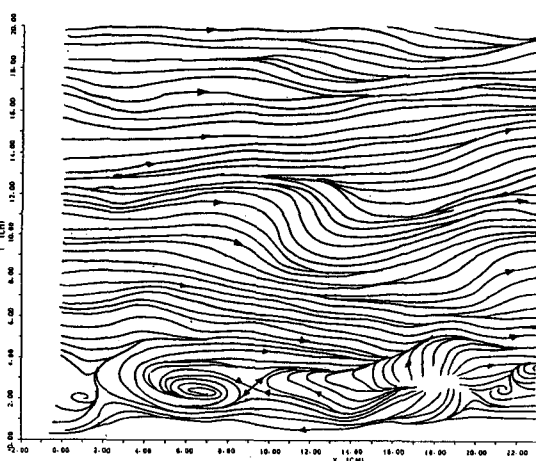
(c) (b)図を並進系から見た場合のベクトル分布



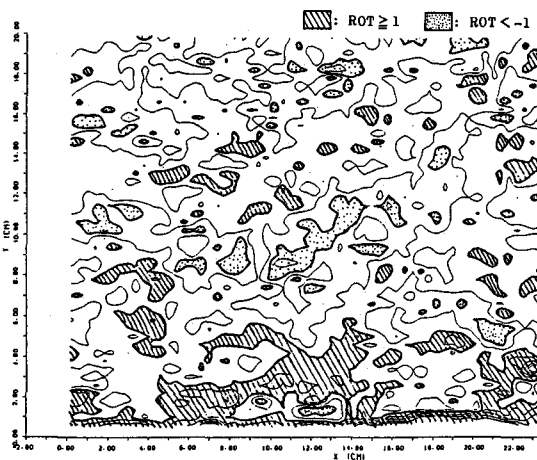
(d) (c)図の流線図



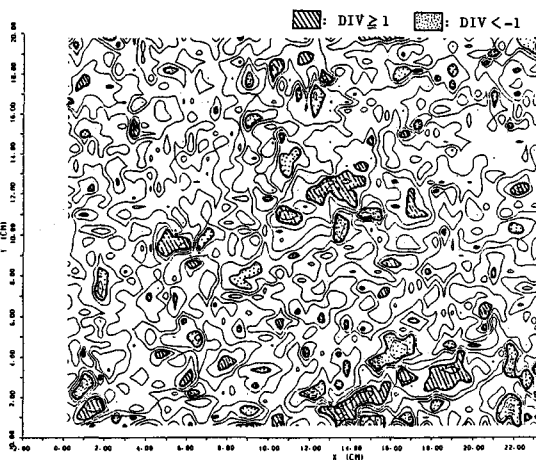
(e) (b)図を 1cm/sec遅い並進系から見た場合



(f) (b)図を 2cm/sec遅い並進系から見た場合



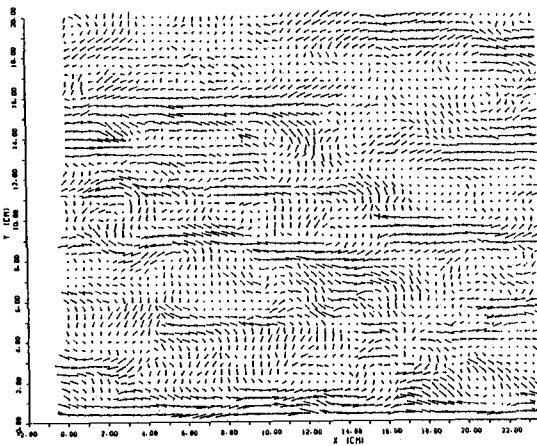
(g) 渦度の分布



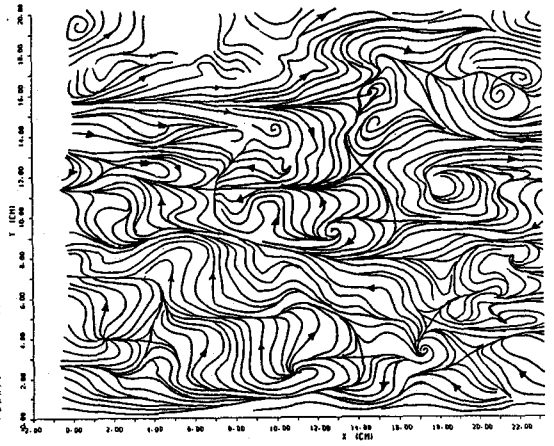
(h) 2次元発散の分布

図 3. 水面近傍の断面(Na 149)における流況の特徴

クトルを内・外挿法により求めたもの、(c)図は(b)図の各ベクトルからそれらの平均流下方向流速分だけ差引いたベクトル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(d)図は、(c)図の理解を助けるために、(c)図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(e)図と(f)図は、(b)図の各ベクトルの平均流下方向流速よりおのおの1.0 cm/secおよび2.0 cm/sec遅い速度で並進する系から見た場合の流線図である。(g)図と(h)図はおのおの渦度と2次元発散の分布を示している。(e)図の中程と(f)図の右下に大きな沸出しが見られ、そこでは(h)図の発散の値も大きくなっている。これらの事はこの部分へ下方から流れが供給されていることを示し、これらの沸出しはボイルであるといえよう。また(e)図と(f)図には下方に大きな渦構造が見られ、(g)図ではそこで渦度が大きくなっている。よく言われていることではあるが、流線のパターンはそれを観察する系の速度により全く別のものとなっている。



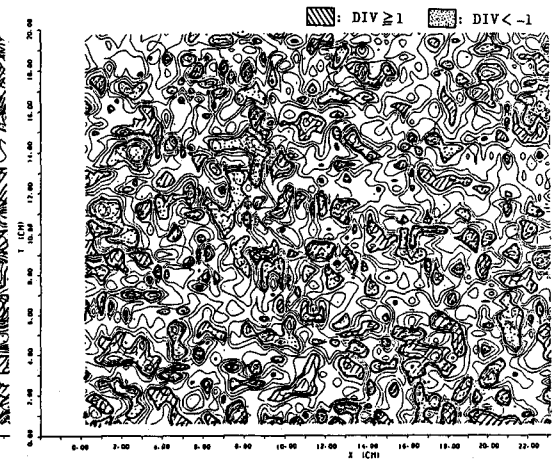
(a) 並進系から見た場合のベクトル分布



(b) (a)図の流線図



(c) 渦度の分布



(d) 2次元発散の分布

図4. 水路床近傍の断面(Na 133)における流況の特徴

5. 水路床近傍の流況の特徴

図4.に示されている断面は、平均的に水路床面から0.58 cmの位置にあり、バッファー層の内側でその外縁に近い。この断面層が水路床に近いことを考慮すると、この断面層で発散が正值をとることはスweep現象が生じていることを意味し、負値をとることはエジェクション現象が生じていることを意味する。このような目で(d)図を見てみると、エジェクション現象は流下方向に波状に連なって生じており、スweep現象はどちらかといえば連続的な構造をもたない形で生じていることがわかる。また、渦度の正值の領域と負値の領域が流下方向に長い長円の形をして横断方向に交互に並んでおり、バッファー層内に水路床に対して少し起き上がった形の渦構造が並んでいることを示唆している。

6. 鉛直縦断面内の流況の計算

以上に示した流れ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、当然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が

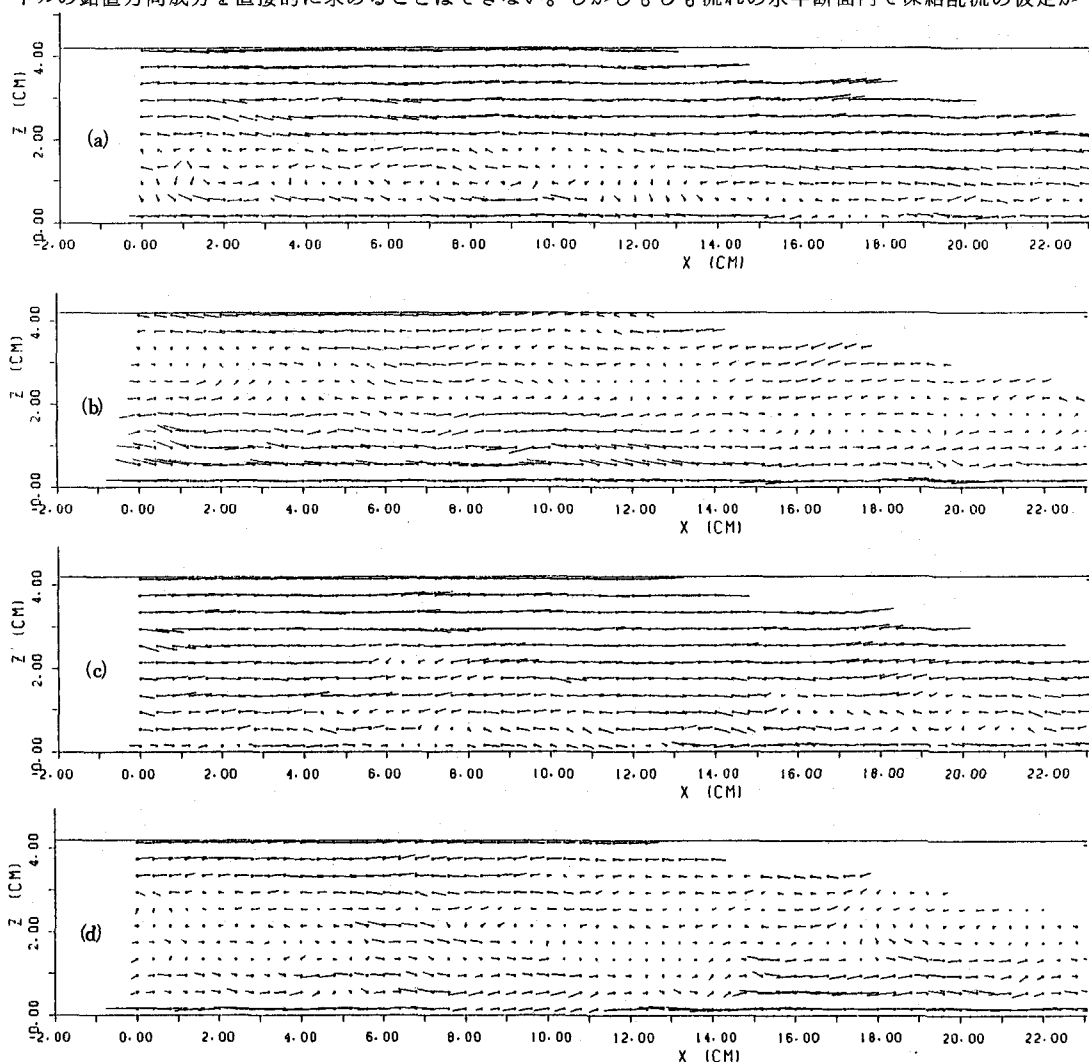


図5. 縦断面内の流況 (a): 台車速度に等しい並進系から見た $y = 11.6$ cm断面の流況, (b): 台車速度より 2 cm/sec 早い系から見た同断面の流況, (c): 台車速度に等しい並進系から見た $y = 10.0$ cm断面の流況, (d): 台車速度より 2 cm/sec 早い系から見た同断面の流況

成立しているとするならば、図 2. に示すように各断面の撮影の時刻が異なっているので、その時間差に相当する距離だけ断面の原点を移動させたうえで連続式を適用すると、鉛直方向流速成分は次式により求められる。すなわち、式

$$w = \int_0^z (\partial w / \partial z) dz = - \int_0^z (\partial u / \partial z + \partial v / \partial y) dz$$

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の流速分布を計算し図 5. に示した。図の (a) と (b) は、図 4. においてエジエクシオン現象が流下方向に連なって生じている $y = 11.6$ cm の縦断面内の流速ベクトルの分布を示しており、その分布を (a) 図は台車速度 7.91 cm/sec と等しい並進系から見た場合、(b) 図はそれを台車速度より 2 cm/sec 早い並進系から見た場合を示している。

同様に、図 5. の (c) 図と (d) 図は、図 3. においてスリーブ現象がとくに多い $y = 10.0$ cm の縦断面内の流速ベクトルの分布を示しており、先と同様に (c) 図は台車速度に等しい並進系から、(d) 図はそれより 2 cm/sec 早い並進系からそれぞれ見た場合を示している。

7. 鉛直横断面内の流況の計算

先に求めた w の分布を用いて、鉛直横断面内の流速ベクトルの分布を求め図 6. に示した。(a) 図、(b) 図、(c) 図はおおの $x = 0.4$ cm, $x = 1.2$ cm, $x = 2.0$ cm における横断面内の流況を示している。本図にはそれほど明確には並列らせん流の断面がうかがえないが、それはここで前提とした水平断面内凍結乱流の仮定のせいでもあり、さらには、本図で再現した流況は瞬時の流況であるせいでもあろう。

参考文献：1) Grass, A. J. : J. Fluid Mech., Vol. 50, part 2, 1971, pp. 233-255

2) 木下良作：流れの可視化, Vol. 1, No. 3, 1981, pp. 36-43.

3) 中口 博：流れの可視化, Vol. 2, No. 8, 1982, pp. 3-8.

4) Internatinal Symposium on Flow Visualization, Bochum, 1980.

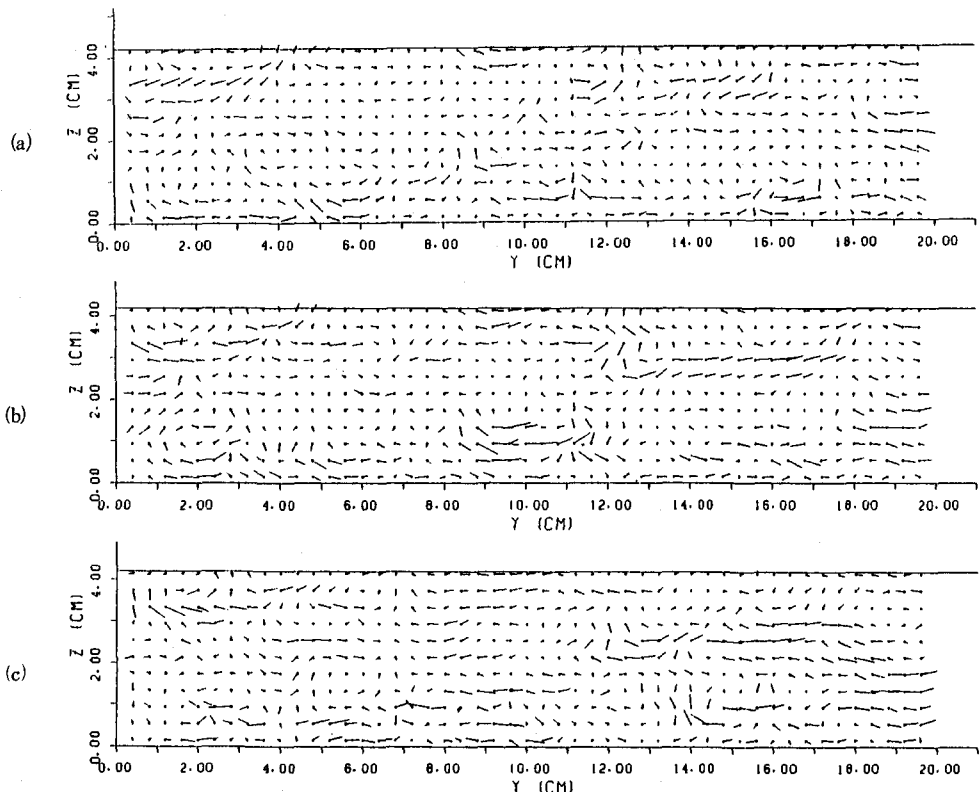


図 6. 鉛直横断面内の流況 (a) : $x = 0.4$ cm, (b) : $x = 1.2$ cm, (c) : $x = 2.0$ cm