

## 開水路乱流における組織構造の時間平均像

Time-averaged Image of Coherent Structures in Turbulent Open Channel Flow

徳山高専 佐賀孝徳 Takanori SAGA  
徳山高専 大成博文 Hirofumi OHNARI  
徳山高専 渡辺勝利 Katutoshi WATANABE  
山口大学工学部 斎藤隆 Takashi SAITOU

Coherent structures in turbulent open channel flow are investigated using flow visualization and their images processing techniques. In this method, tracers distribution on Z-T plane, Y-T plane are processed from the streamwise view of flow visualization using fluorescent dye illuminated by a sheet of laser light. Through taking pictures of them by CCD camera, the images are acquired. After the images get binary processing, they are analyzed statistically. As the result, instantaneous images, time-averaged images, and hierarchy of the coherent structures in turbulent open channel flow are considered.

Keywords : coherent structure, flow visualization, hierarchy

### 1. はじめに

壁乱流に形成される組織構造の解明には、その3次元的な構造性の把握とともに時々刻々の追跡が必要である。著者らは、この組織構造に関する究明を系統的に進めてきた<sup>(1)・(2)</sup>。その結果、壁近くには壁縦渦と呼ばれるヘヤピン型の渦構造が多数形成され、その時空間的な特徴が流速変動やせん断層の形成、パースティング現象、大規模構造の形成過程などにきわめて重要な関係を有することが明らかにされた。

本研究では、それらの結果を踏まえて壁乱流の組織構造のより本質的な解明を行うために、時空間場における瞬間可視化画像の忠実な抽出が試みられ、その瞬間画像とそれらをいくつか重ねた平均像の相互関係、トレーサーの時空間存在分布特性が検討された。

### 2. 実験方法および解析処理方法

実験装置には、長さ10m、幅60cm、高さ15cmの総アクリル製の開水路が用いられ、上流端には整流ハニカム（径4mm、長さ3.2cm）が、下流端には水位調節用の堰がそれぞれ設置された。横断面可視化では、レーザー光線（2wアルゴン）から円柱レンズによってシート状に変換されたスリット面が開水路の横断方向に挿入され、それを通過するトレーサー（フルオレセインナトリウム水溶液、比重1.005）の写し出す形象が下流側より鏡を通してビデオカメラおよび35mmカメラで撮影された。実験方法および実験条件の詳細は参考文献1)を参照して頂き、ここでは省略する。図-1は、その横断面可視化の一例を示す写真であり、さまざまなスケールの壁縦渦<sup>(1)</sup>の横断面形象が存在することが明らかである。本研究では、この横断面視の結果より一定の高さに存在する横断方向(z方向)のトレーサーが描かれ、さらにそれを0.1秒間隔で30秒間連ねてトレーサーの横断方向時系列分布図(Z-T平面)が作成された。なお、その作成には $Y^+=10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 150, 200$ 、水表面の高さごとに行われた。同様に、あるZ位置における水深方向のトレーサーの存在分布を時間的に連続して描いたトレーサーの水深方向時系列分布図(Y-T平面)が描かれている。さらに、これらの図面がCCDカメラ(KYOSHIN, XC-57)からイメージメモリ(PHOTRON, FDM98-4, 256\*256画素, 64階調)を通して、1図面につき4分割されてパソコンへ入力された。1画素あたりの分解能は、本流れ場において $Z^+=3.5, T^+=0.35$ に相当し、この精度は、従来の著者らの可視化画像あるいはKimらのLES法による計算精度と比較しても十分であり、

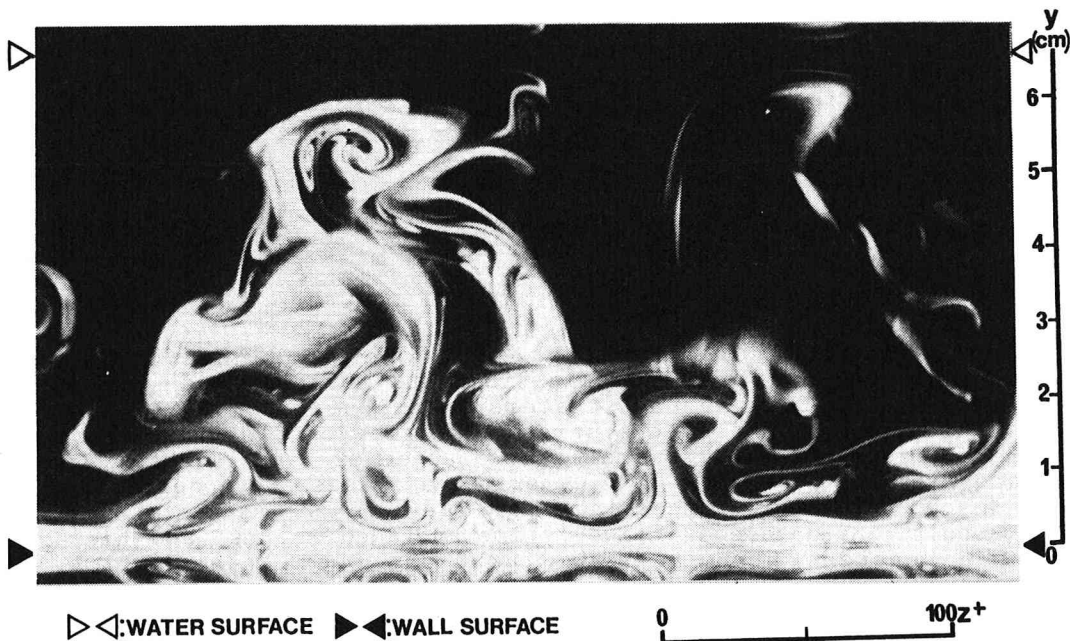


図-1 横断面可視化写真

それらと同様に組織構造の詳細な検討が可能となり得る。そして、入力された画像は、つなぎ合わせを終えた後、適切なしきい値により、2値化が行われた。そのマップをもとに、トレーサーの存在分布の統計計算が行われた。このダイアグラムが図-2に示されている。

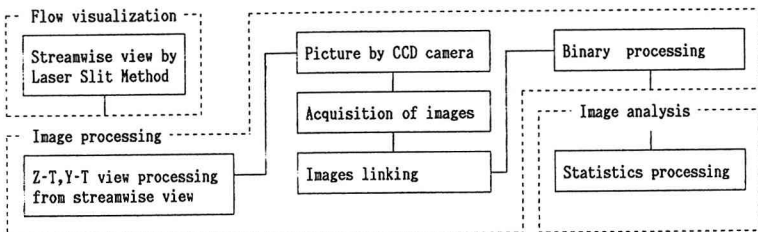


図-2 システムダイアグラム

### 3. 組織構造の時空間画像とその平均操作

#### (1) 組織構造の水平断面時空間特性

上記1.2断面のトレーサーの有無が明確にされた2値画像が丹念に描かれた。これらの特徴は、一言ではトレーサーの存在が忠実に時空間軸上で表現されることにあり、これは壁縦渦や低速縞(low speed streaks)などの組織運動の部分的反映と考えられる。

図-3には、 $Y^+ = 10, 30, 50, 100$ の高さにおける本断面形象の一例がそれぞれ示されている。それぞれの図の縦軸は横幅、横軸は時間を表す。(a)の粘性底層外端は、乱れエネルギーが最も多く生成され<sup>3)</sup>、パーステイング現象の第1過程<sup>4)</sup>(streak lifting)が形成されることから、きわめて力学的に重要な領域である。これより流れ方向に長い、いわゆる筋状の横方向に交互に100wall unitで並ぶ構造が明らかである。ところが、この筋状の構造も横方向に幅広いものと細いものの2つが存在しており、しかも太い方は横方向に集中していることが明らかである。この集中現象に類似する現象は、すでに水素気泡法によるstreakの集中現象として見いだされており<sup>5)</sup>、この領域では、周囲の流体と比較しても相対的に流れ方向流速が遅い、いわゆる上昇流が形成されていると考えられる。これらの両構造と壁縦渦の関係を明らかにすることが重要である。著者らは、従来の度重なる観察において、この層内の低速縞の太い筋構造が壁縦渦の『付け根』<sup>1)</sup>の部分であ

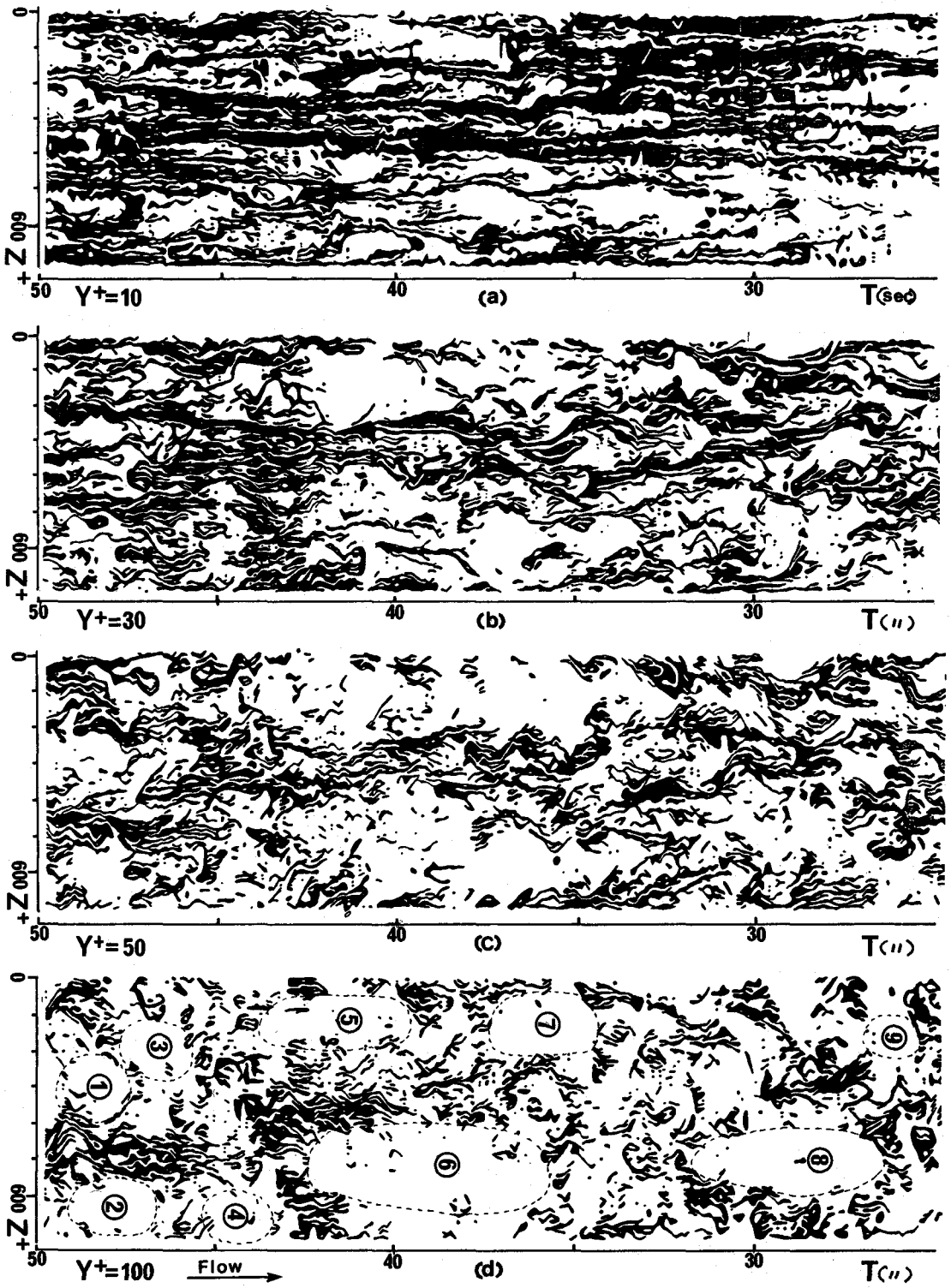


図-3 トレーサーの横断方向時系列分布図 (Z-T平面)

ることを確かめており、それを明確に証明し得るデータの提出が今後必要であると思われる。

(b)のバッファー層外端では、(a)の場合と明らかに異なつて、流れ方向に長く横方向に広い筋状の線が消えて、より細い筋のみが幾重にも形成されている。これらの細線は、流れ方向により短く、しかも横方向に揺動する形態が認められる。また、これらの細線同士の横方向の間隔は、 $10\sim 30$  wall unitほどであり、この値は著者らがすでに明らかにしている水素気泡の low speed streaks 対の横幅<sup>5)</sup>、さらには壁縦渦を構成する渦の横幅 $bz^{*1)$ とほぼ一致する。しかし、

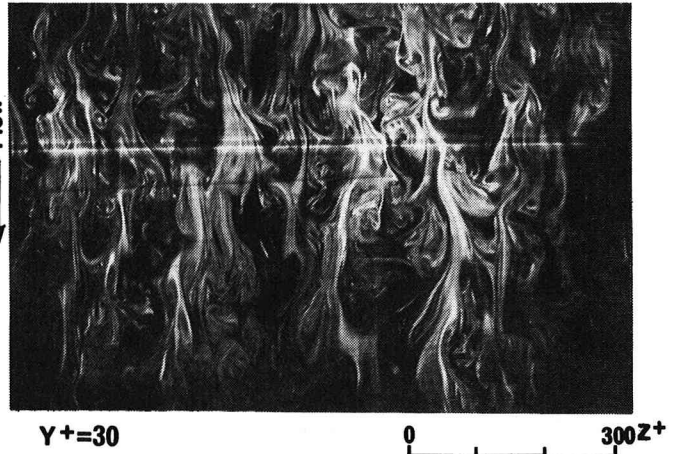


図-4 水平断面可視化 ( $Y^+=30$ )

これらの細線形象は、厳密には壁縦渦を構成する渦の輪郭を表すものではなく、渦内でトレーサーを集中させる部分を骨とすれば、その骨組構造が表現されたものと考えられる。図-4には、 $Y^+=30$ の水平断面視の可視化写真の一例が示されている。これは、瞬時のX-Y平面のトレーサーの存在分布状況を示しており、図-3の時系列分布図と酷似していることは、非常に興味深い。

(c)の内層対数領域では、さらに細線化が進むと同時に、その大規模な集中領域（黒い部分）とそれ以外（白い部分）の領域への分化が認められる。この白い部分は、トレーサーが存在しない領域であり、周囲のトレーサーが存在する領域と比較して、流れ方向により高速を示す領域であり、その流体塊同士の横幅は水深あるいはその2倍のスケールまで達している。一方、細線の集中領域は、上昇流が形成される領域と考えられ、壁縦渦の複合によって大規模な組織構造が形成されるという著者らの見解<sup>6)</sup>が、このデータからも裏付

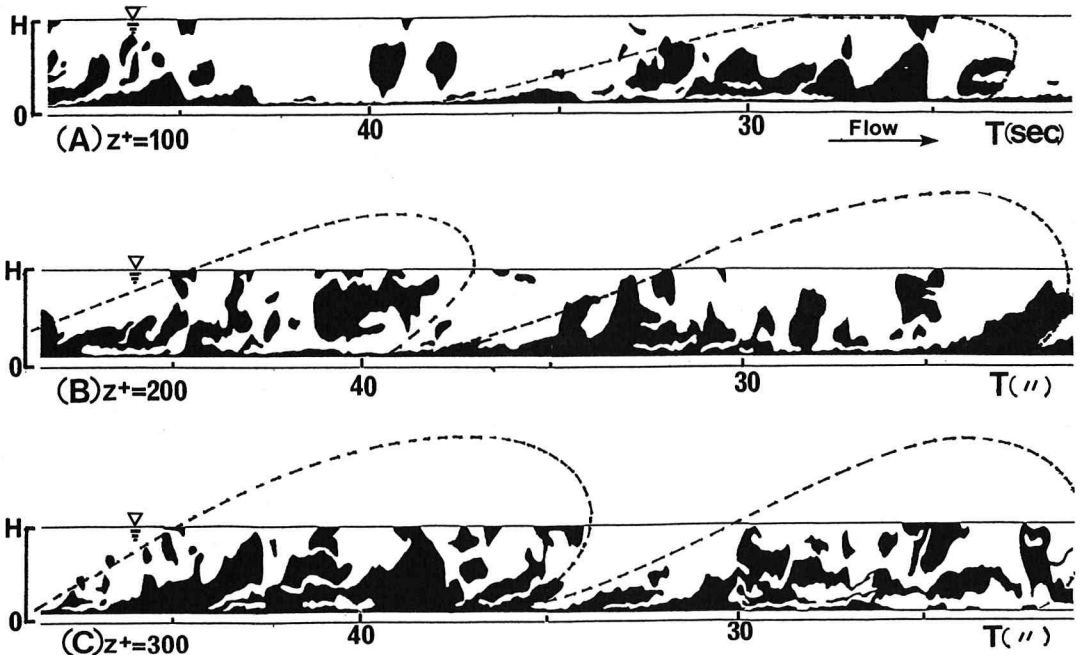


図-5 トレーサーの水深方向時系列分布図 (Y-T平面)

けられるように思われる。これらの大規模組織構造としての分化は、(d)の内層外端にまで達するとより一層明らかとなる。黒い細線領域に囲まれた白い領域は流れ方向により短いスケールを示すが、逆にその数は増して、水深あるいはその2倍のスケールで分布している。また、この白い領域を点線で囲み流れ方向に番号を付すと、その番号は水路をジグザグに横断しながら増加して行くことも明らかである。この高速流体片のジグザグ軌跡からは、並列せん流に類似する構造性の存在が推測される。

### (2) 組織構造の縦断面時空間特性

図-5には、図-3に用いられた横断面視の画像より得られたトレーサーの水深方向時系列分布図が示されている。この図の(A)~(C)は、(B)を中心にして100wall unitだけ横方向に離れた地点における断面形象にそれぞれ相当する。これらの図中の黒く描かれている部分は、トレーサーによって表現された組織構造の輪郭部を示し、その意味でトレーサーの实在部分のみが示された図-2とは異なる描き方がなされている。これらの形象から、組織構造が流れ方向および水深方向に集中して大規模構造を呈しながら流下している様子が認められる。この大規模な構造は乱流境界層に形成されるバルジ<sup>7)</sup> (図中に該当部分を点線で示した)の下部の部分に類似しているように思われ、横方向に(A)~(C)を連ねるとその大規模構造の横方向の構造的な広がりが推測され得る。

### (3) 組織構造の時間平均特性

図-6には、図-3に示された(b), (d)の時間分布図をもとにして、トレーサーの横方向における平均存在頻度が平均時間ごとに示されている。それぞれの平均時間は、5, 10, 20, 30秒の4種類である。

(a)では $Y^+=30$ のデータの存在頻度が示されており、その平均時間の相違によって横方向特性が異なる傾向を示す。すなわち、時間平均が短い場合には、横方向に約 $Z^+=20$ と100の2つの変動成分が認められ、より平均時間が増加するとこの2つの変動成分に加えて、水深あるいはその2倍のスケールの変動成分が形成されるようである。これらの特徴は、(b)の $Y^+=100$ の場合にも認められるが、逆にこの場合には頻度分布が平坦化する一方で、水深方向の変動がより増加して平均時間ごとに横方向の変動がやや異なるようである。これらの平均時間の相違に伴う変動特性の形成は、組織構造の規模と集団配置特性に起因すると考えられ、上述の2変動成分は、それぞれ壁縦渦の横幅スケール<sup>1)</sup>と粘性底層内の低速渦の横幅と一致することが注目される。

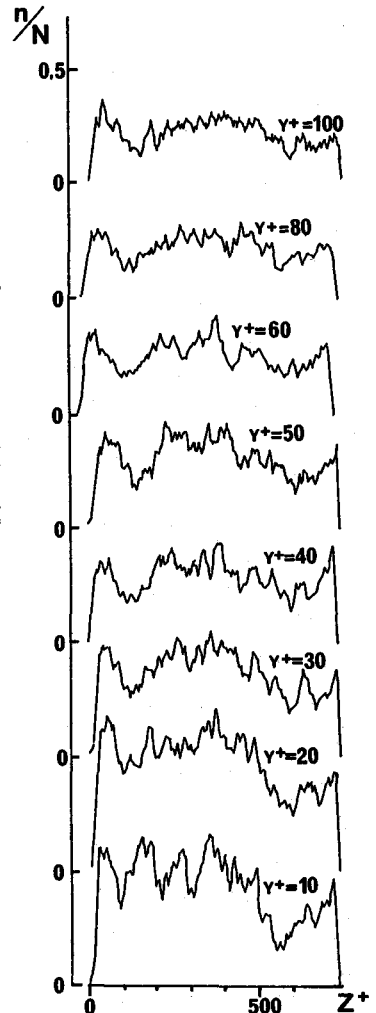
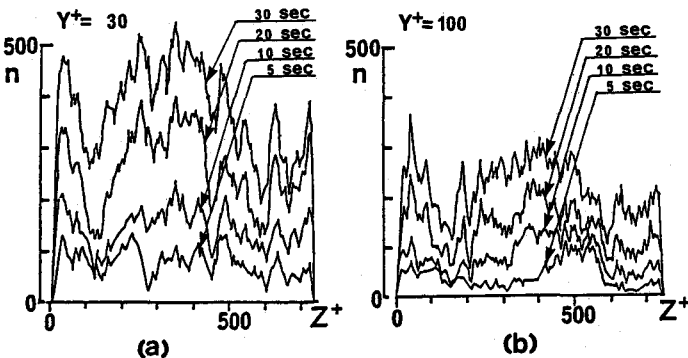


図-6 トレーサーの平均存在頻度の横方向特性 (時間変化)

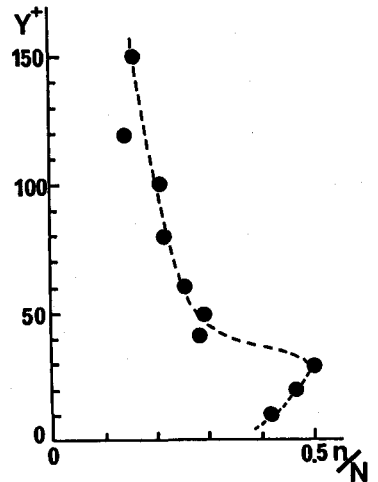
図-7 トレーサーの平均存在頻度

図-7には、図-6に示された平均時間30秒の時間分布図が、壁からの高さに応じてそれぞれ示されている。これより、内層内のトレーサーの平均存在頻度の横方向変動には、上述の3つの成分が存在し、壁近くほど水深規模の変動が顕著であることが明らかである。この傾向は $Z^+=100$ 程度の変動についても同じように壁から離れるに従って、横方向の変動を平坦化させている。しかし、壁縦渦径規模の変動成分は、壁からの高さに関係なくいずれの領域においても存在していることが認められる。

以上のことより、組織構造の時間平均像には、きわめて多重であるが組織的な構造性が明らかに認められるように思われる。

図-8には、図-3をはじめとするトレーサーの存在頻度分布図より、横方向を含めた全存在頻度が求められ、その壁からの高さ方向分布が示されている。

きわめて注目される点は、 $Y^+=20\sim30$ の付近でその頻度がピークを 図-8 トレーサーの全存在頻度示すことである。これは、著者らの水素気泡法による観察結果<sup>5)</sup>や壁縦渦の存在頻度分布<sup>6)</sup>からもほぼ裏付けられることであるが、今後、壁縦渦構造とトレーサーの濃度情報の相互関係をより詳細に究明することが重要と思われる。



#### 4. おわりに

横断面視によるテレビ画像から、トレーサーの存在時系列分布が求められ、それをもとに組織構造の時間平均像に関する若干の考察がなされた。その結果、内層の組織構造の多重構造性と組織性の相互関係が明らかにされた。

今後は、トレーサーの存在時系列分布とそれを作る渦構造やスイープ構造との相互関係を明かにすることが重要である。

#### 参考文献

- 1) 大成博文, 佐賀孝徳, 斎藤 隆: 開水路乱流内層の縦渦構造, 土木学会論文集, 1985.
- 2) 佐賀孝徳, 大成博文, 渡辺勝利, 斎藤 隆: 開水路乱流内層の渦構造と流速波形の相互関係, 土木学会論文集, 1988.
- 3) Kim, H.T., Kline, S.J. and Reynolds, W.C.: The production of turbulence near a smooth wall in a turbulent boundary layer, J.F.M., 1971.
- 4) Kline, S.J.: The role of visualization in the study of the structure of the turbulent boundary layer, Lehigh workshop on coherent structure of turbulent boundary layers, ed. C.R. Smith D.E. Abott, 1978.
- 5) 大成博文, 佐賀孝徳, 斎藤 隆: 壁面領域内乱流構造の立体的可視化, 土木学会論文集, 1984.
- 6) 佐賀孝徳, 大成博文, 渡辺勝利, 斎藤 隆: 壁乱流に形成された組織構造の階層性, 第21回乱流シンポジウム講演論文集, 1989.
- 7) Falco: Coherent motions in the outer region of turbulent boundary layers, Phys. Fluids, 1977.