

開水路乱流内層の渦構造と流速波形の相互関係*

CORRELATION BETWEEN VORTICAL STRUCTURE AND VELOCITY SIGNALS
IN THE INNER LAYER OF TURBULENT CHANNEL FLOW

佐賀孝徳**・大成博文***・渡辺勝利****・斎藤 隆*****

By Takanori SAGA, Hirofumi OHNARI, Katsutoshi WATANABE and Takashi SAITOU

Coherent structures in the inner layer of turbulent channel flow are investigated using the technique of simultaneous flow visualization/LDV measurement. The flow visualization were done in the streamwise view using fluorescent dye illuminated by a sheet of halogen light. Some new aspects of the correlation between characteristic velocity signals of U , V and the structures of streamwise vortices are inferred from this present experiment. The velocity signals associated with bursting event are formed when the pairs of counterrotating streamwise vortices pass through, which generate near the viscous sublayer and develop away from the wall in the inner layer of turbulent channel flow. Further an evaluation of effectiveness of the VITA technique is done by making direct comparisons with the flow visualization.

Keywords: coherent structure, streamwise vortex, VITA technique, bursting, flow visualization

1. 緒 論

今日、乱流現象内の秩序構造を認識する方法は、可視化法、ブルーブ計測法、数値計算法などに大別される。これらは、個々に優れた特徴を有し、秩序構造の解明に有力な役割を果たしてきたが、互いにそれぞれの結果を整合し得る段階までの発展には至っていない¹⁾。特に、前2者に関しては、従来よりよく用いられてきた手法であるにもかかわらず、その長・短所がほぼ相反し合うことから、互いの結果が相容れなくなってしまうこともこれまでには少なくないとされている^{1),4)}。そこで、両者の短所を相補し、長所を生かす手法の確立が非常に重要であり⁵⁾、本論においては、その適用の1つとして可視化とブルーブ計測の同時併用が試みられた。

すでに、乱流境界層においてこの種の実験が、スモークワイヤ法と熱線流速計を併用して、Headら⁶⁾、Falco^{7),8)}などによって試みられている。なかでもFalcoは、乱流境界層の外層に'typical eddies'とよばれる秩序構造が存在することを見出し、それが、壁近くに降下して'pocket'を形成する要因となり、同時に瞬間的な高レイノルズ応力の発生を誘起させることを明らかにしている。また、Bogardら⁹⁾は、矩形管流れにおける熱膜流速計と色素注入法の同時併用実験によって、従来の条件付検出法の問題点を比較検討し、特に、最適な条件付検出法を決める際に可視化の結果との対応を明らかにしておくことが重要であることを指摘した。

ところが、このような重要な解明の試みもどちらかといえば流速波形の解析に重点が置かれており、著者らの判断するかぎり、瞬間的な流速波形に詳細に対応する可視化の形象をもとにした十分な考察は、これまでに得られていないように思われる。

一方、著者らは、可視化法を用いて開水路乱流内層に形成された鱗形状や low speed streak などの重要な秩序構造の三次元的特徴を詳細に解明し^{10),11)}、さらにそれらが bursting 波形¹²⁾や瞬間高レイノルズ応力の発生などに関係することを明らかにしてきた¹³⁾。また、蛍光染料注入法による横断面可視化によって、鱗形状や low

* 本研究は、第30回水理講演会および第18回乱流シンポジウムで発表した内容^{2),3)}に、その後新たなデータを加えて考察を重ね、さらに系統的に発展させたものである。

** 正会員 徳山工業高等専門学校助教授 土木建築工学科 (〒745 徳山市久米高城 3538)

*** 正会員 工博 徳山工業高等専門学校助教授 土木建築工学科 (同上)

**** 正会員 工修 徳山工業高等専門学校助手 土木建築工学科 (同上)

***** 正会員 工博 山口大学教授 工学部建設工学科 (〒755 宇部市常盤台 2557)

speed streak に関係する「壁縦渦 (OSS 渦)」の存在を明らかにし、さらにその三次元的スケールや流れ方向の傾斜角、配置特性などについて詳細に考察した^{14),15)}。しかし、壁縦渦構造と流速波形の相互関係は不明のままであり、それを明らかにすることが、乱れの発生機構やそれを担う秩序構造の三次元構造を解明するうえできわめて重要と思われる。

以上を踏まえながら本研究では、開水路乱流内層において蛍光染料注入法を用いた横断面視とレーザー流速計測の同時併用が行われ、壁縦渦と瞬間的な流速変動波形の対応が詳細に考察された。また、壁縦渦と VITA 法による条件付検出波形の対応も詳しく検討され、さらに、VITA 法自身の問題点についても考察が加えられた。

2. 実験方法および実験条件

実験には、長さ 10 m、幅 60 cm、深さ 15 cm の綵アクリル製開水路が用いられた。水路勾配は 1/500 に設定され、上流端には整流装置 (径 4 mm、長さ 3.2 cm、幅 60 cm のハニカム)、下流端には水位調整用の堰が設けられた。この水路の上流端から 5.5 m 下流付近で、横断面可視化と流速計測の同時併用実験が Fig. 1 に示すように行われ、壁近くの縦渦の挙動と流速波形 (U , V 成分)の両方が連続的に対応した情報として得られるように工夫された。可視化法には、蛍光染料注入法による横断面可視化が採用された。その詳細については前報¹⁴⁾に示されており、ここでは省略する。

流速計測には前方散乱方式のレーザー流速計が用いられた。計測中はレーザーの出力を最大 (2W) にし、蛍光染料が流速計測点に侵入することによる出力波形のドロップアウトを可能な限り防ぐことにした。

以上の計測システムを採用することによって、低流速の波形を精度よくしかも可視化形象を乱すことなく測定することが可能となった。

可視化の形象と流速波形の対応は、レーザー光線を瞬間的に遮断して波形の出力を停止させ、そのときの画像

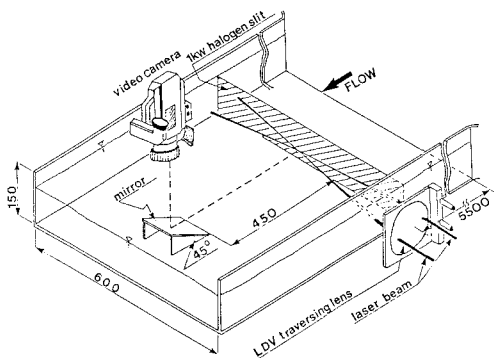


Fig. 1 Experimental apparatus.

の時刻を読み取ることによって明確にされた。さらに、モニターテレビおよびシンクロスコープの両方において、鮮明な可視化画像と正常な流速波形が得られ続けていることが確認された。流速計測点には、壁縦渦の形成領域¹⁴⁾を考慮して U 成分において $y^+ = 30$ 、 V 成分において $y^+ = 100$ が選ばれた。撮影および計測が 2 回繰り返され、その時間はいずれも約 240 秒であった。

実験条件は、Table 1 に示されるとおりであり、壁縦渦の実寸を可能な限り大きくし、鮮明な可視化画像が得られるような流れ場が設定された。また、摩擦速度 u_τ は平均流速分布より求められた。

Table 1 Experimental conditions.

Case	U_m (cm/s)	U_τ (cm/s)	H (cm)	$Re_{(U_m H)}$	$Re_{(U_m \delta)}$
A	7.56	0.42	10.8	9475	640
B	4.75	0.29	6.62	3660	351
Kim ¹²⁾	7.62	0.36	7.87(=8)	5550	666

3. 実験結果

(1) 壁縦渦と流速変動の対応を考察する視点

壁縦渦と流速変動との対応を考察する際に、以下の視点を踏まえることが重要と思われる。

壁縦渦は、内層に形成されたきわめて重要な秩序構造の 1 つであり¹⁴⁾、それが壁近くの流速変動の形成に重要な役割を果たしていると思われる。そこで、まず第 1 に、壁縦渦と流速計測点との相対的位置関係に注目しながら、壁縦渦の横断面形象と流速波形の相互関係を 1 対 1 の対応で識別することである。

第 2 は、壁縦渦の三次元的挙動と流速変動の相互関係を明らかにすることである。

第 3 は、第 1、第 2 の結果を踏まえながら従来の平面視による同時併用の結果との整合性について検討することである。

第 4 は、上記の 3 つの視点を踏まえながら、VITA 法によって流速波形を条件付検出し、その検出波形と可視化の形象との対応を詳しく考察することによって VITA 法の利点および問題点を明らかにすることである。

(2) 壁縦渦と流速変動との対応

Fig. 2 は、壁近くに形成された壁縦渦の横断面可視化写真の一例である。壁縦渦は、粘性底層に付根を持って個々の渦が、常に対で形成され、固有の三次元的スケールと流れ方向傾斜角をもつヘアピン型の渦構造である¹⁴⁾。壁縦渦の三次元的挙動や相互作用、複合などによって壁近くにさまざまな 2 次流れが誘起されることから、これらの運動が流速変動場の形成にきわめて重要な影響を与え得ると考えられる。以下、壁縦渦の横断面形象と流速波形の対応を詳察する。

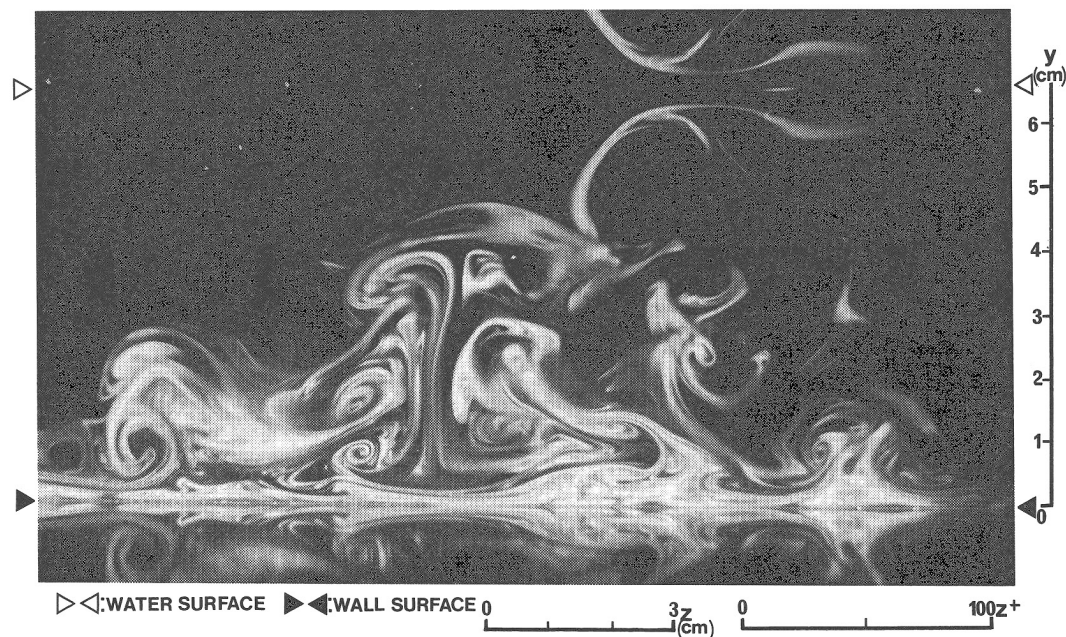


Fig.2 Streamwise vortices in the inner layer (Case B).

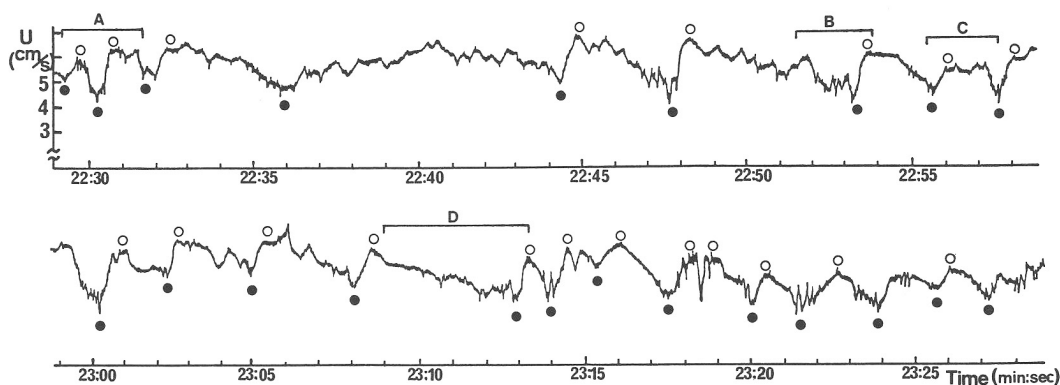
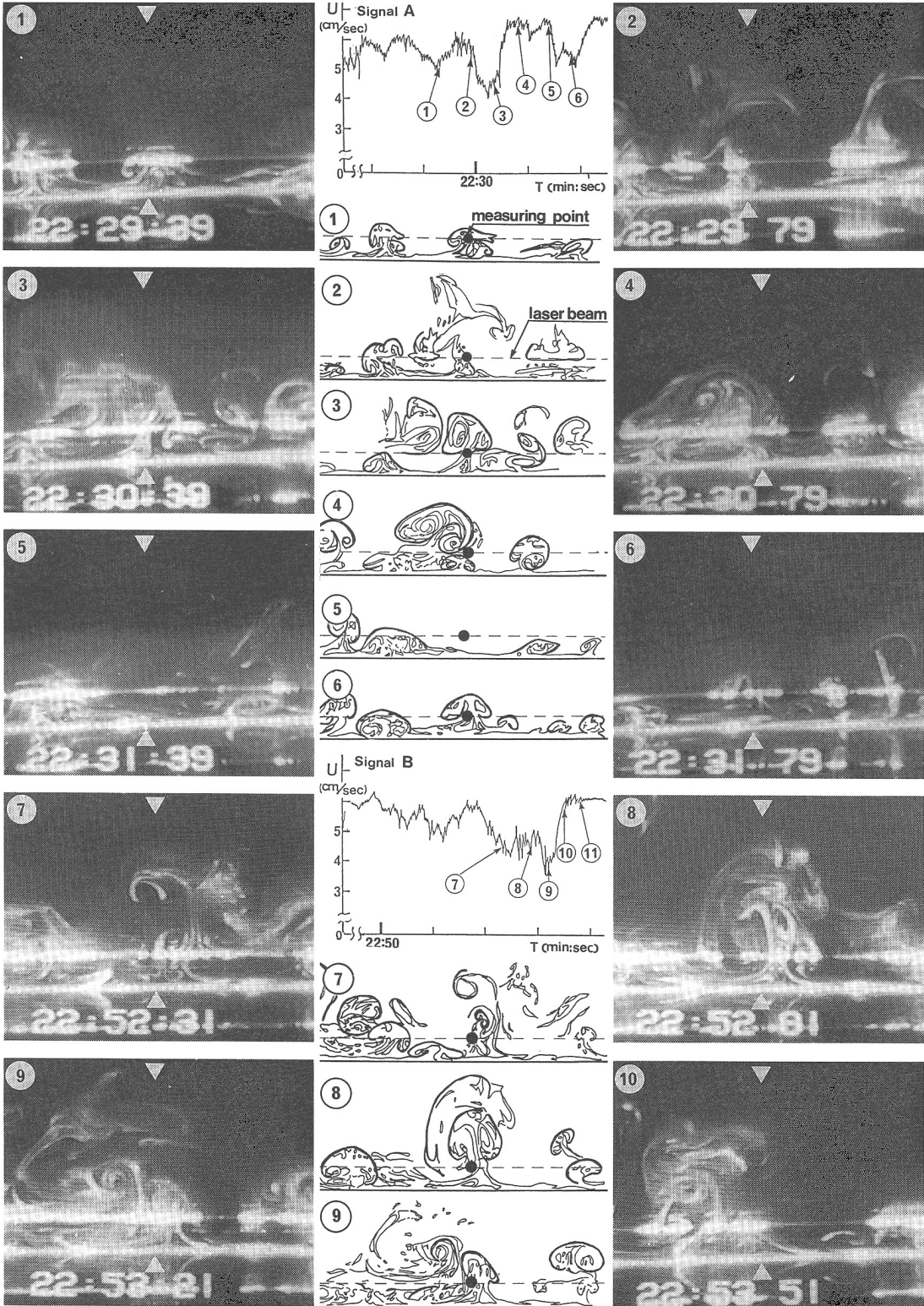


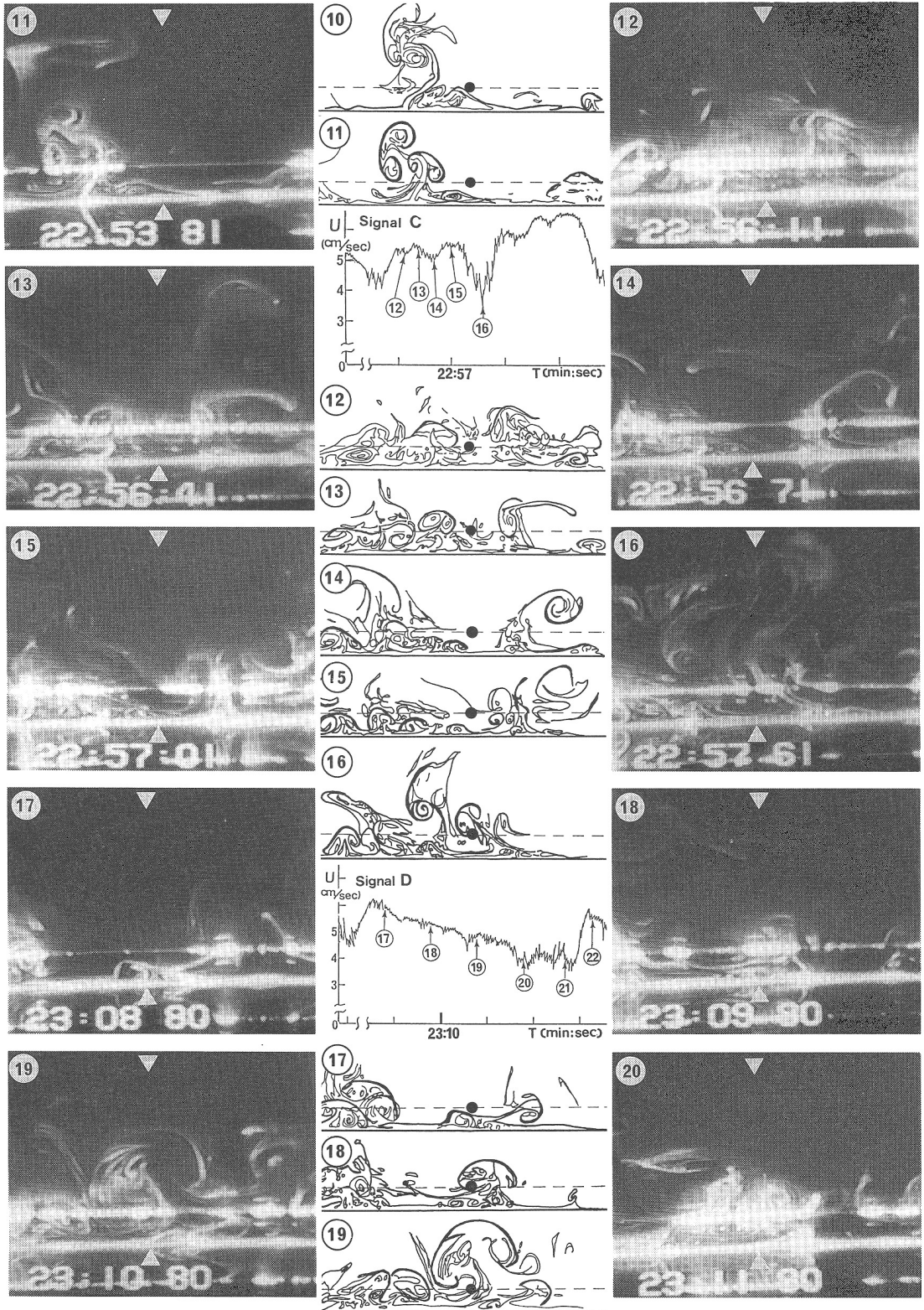
Fig.3 U-velocity signals (Case A, $y^+ = 30$).

Fig. 3 には、 $y^+ = 30$ における流れ方向の流速変動波形が示されている。この変動波形には、壁乱流特有の緩やかに減速した後に急激に加速する、いわゆる bursting 波形¹²⁾が認められる (たとえば波形 B, D)。また、比較的短周期の急激な変動を示すスパイク型の波形も注目された (波形 A, C)。Fig. 4 には、それらの代表的な波形 (波形 A~D) とそれに対応する壁縦渦の横断面写真およびそのトレースが示されている。写真下部の数字には最小単位 0.01 秒のストップウォッチの時刻が示されており、この時刻と波形に示された時刻とが対応する。そして、これらの 3 者に対応する番号が、写真、トレース、波形のそれぞれに示されている。また、時刻を表わす数字の上部に位置する白い横線が底壁面であり、その上の

細い白い横線が $y^+ = 30$ に挿入されたレーザー光線である。流速計測点は、白く映るビームと \blacktriangledown 印を結ぶ線の交点 (トレースでは●印点) に位置している。Fig. 5 には、壁縦渦と流速計測点との相対的位置関係を説明する際に必要な壁縦渦の横断面形象の領域区分が示されている。図中の L 領域は壁縦渦の付根の領域であり、M 領域は L 領域上部の壁縦渦の左右の渦に挟まれた中央部分である。N 領域は、壁縦渦の両端の領域である。

波形 A (写真①~⑥) は、低速、高速を繰り返すスパイク型の速度変動である。写真①では、小さな壁縦渦の M 領域に計測点が存在し、そのときの波形は低速を示している。②では、計測点の左側で高速流体が入り込み、それに伴って壁縦渦が左側へ揺動しながら計測点を外れ





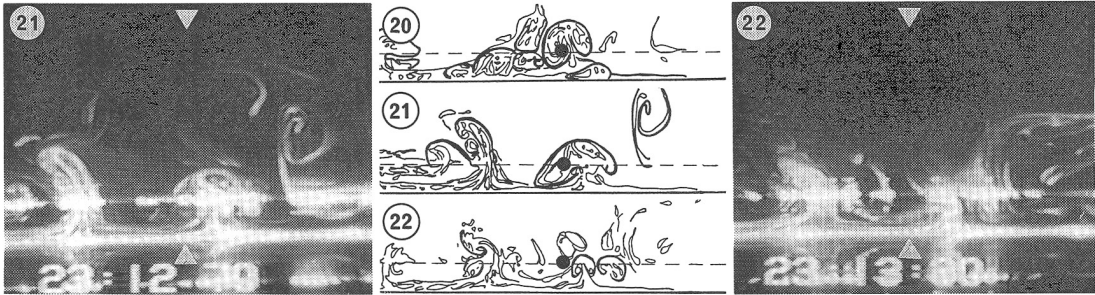


Fig.4 Simultaneous pictures of streamwise vortices and U -velocity signals (Case A).

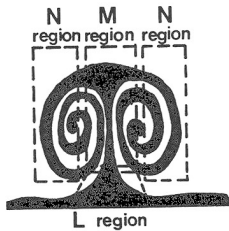


Fig.5 Individual regions of a streamwise vortex.

ており、そのときに高速の波形が出現している。逆に、③では計測点に壁縦渦のL領域が位置し、流速は低速に向かっている。さらに④では、計測点よりも右側に入り込んだ高速流体が横方向に広がり、③で計測点に位置した壁縦渦を左に揺動させている。⑤では、その運動がさらに進行して高速波形が維持されているのが明らかである。⑥では、新たに壁縦渦が計測点上に発生し、それに伴って減速波形が生じていることが認められる。これらの①から⑤の一連の低・高速を交互に繰り返す挙動は、壁縦渦と高速流体塊の相互作用のもとで壁縦渦自身が左右に揺動することによって形成されたものと思われる。

波形B(写真⑦~⑪)は、比較的高周波数成分を伴った低速状態から急激に加速する速度変動を示している。⑦の形象では、小さな壁縦渦の付根(L領域)に計測点が位置している。この縦渦対は時間の経過とともにさらに小さくなるが、⑧では新たな壁縦渦が計測点に進入し、それが徐々に縮小して⑨に示す状態まで低速が維持されている。ところが、⑩ではその壁縦渦が横に押されて計測点からはずれ、低速から高速へと波形が変化し、⑪では高速状態が維持されている。これらのことより、計測点が2つの壁縦渦のL領域を連続して通過することにより比較的最長期間の低速状態が維持されていることが明らかである。また、低速状態における比較的高周波数成分は、計測点が壁縦渦中に存在する際に検出された。

波形C(写真⑫~⑯)は、高速状態が比較的維持され、それに続きスパイク型の波形が生じているパターンを示している。高速がほぼ一定に維持されはじめるのは⑫か

らであり、⑬~⑮と進むに従って高速流体塊がより壁近くまで到達して、さらにそれが壁に衝突することによって流体が横方向に広がり、左右の壁縦渦の発達が促されているようである。特に、⑬では上方からの高速流体の進入を示す渦形象が計測点上によくみられ、⑭~⑮では、高速の波形が維持されている。ところが、⑯において計測点の右側の壁縦渦(⑮)が計測点方向に揺動し、計測点上にそのL領域が来ることによって減速され低速の波形が形成されたように思われる。これは、揺動現象の一形態と考えられ、A波形と同時に高速流体の進入と密接な関係があることも同時に示唆しているように思われる。

波形D(写真⑰~⑳)は、波形Bよりもさらにゆるやかに減速し、そして急に加速されるパターンを示している。この波形の周期は、約4.5秒であるが、これをBurst周期とみなして外層スケール表示すると $T_B U_{max}/H = 3.2$ となり、これは中川らの開水路乱流で得られた結果 ($T_B U_{max}/H = 1.5 \sim 3.0$)¹⁵⁾ とほぼ一致する。この減速区間において、矢印に対応する5枚の写真が示されたが、それぞれ、いずれも壁縦渦のL, M領域が常に計測点付近に連続して形成され、減速化をそれらが引き継いでいるようである。重要と思われる点は、単独の壁縦渦がこのような長周期の減速を引き起こしたのではなく、数個のそれが次々と減速に寄与していることである。また⑳, ㉑では、波形Bの場合と同様に計測点が渦中にあり、より高周波数成分が顕著に形成されていることが明らかである。最後の㉒では、高速流体の進入によって計測点上の壁縦渦が右方向に揺動し、計測点を外れると同時に急激に加速され、高速の波形を形成している。

以上の対応を踏まえながら、壁縦渦の空間構造と流速変動の相互関係をより詳細に考察する。

すでに著者らは、本実験と同様な流れ場において壁縦渦の横断面形象の流れ方向の維持時間 T^+ が、約90程度であり¹⁶⁾、この範囲では、Taylorの仮説が成り立つことを明らかにしている。そこで、0.1秒ごとのビデオ

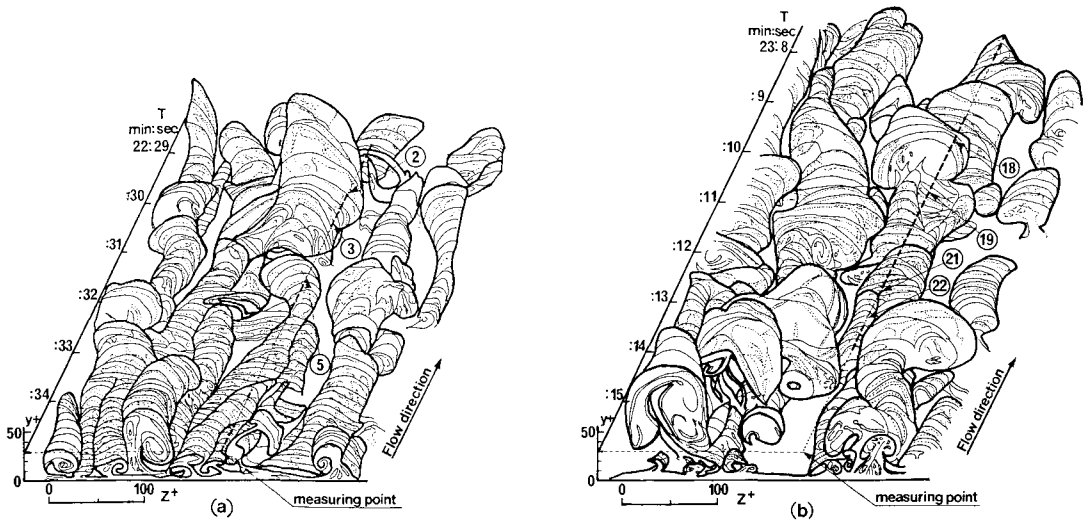


Fig. 6 Correlation between three dimensional structure of streamwise vortices and measuring point (Case A).

画像間に Taylor の仮説を適用し、それを連ねることによって得られた壁縦渦の三次元構造図が Fig. 6 に示されている。

壁縦渦には、横方向および流れ方向に配置特性¹⁴⁾が存在することから、流速波形も壁縦渦群のそれに大きく依存すると考えられる。Fig. 6 から明らかなように、壁縦渦は流れ方向に連続して発生し、横方向には相互作用を伴いながら複合して大規模化を遂げるものも存在している。Fig. 6(a) に示された波形 A の揺動パターンは、ちょうど流れ方向に連なった壁縦渦の周辺部が計測点を通過した場合といえ、計測点が壁縦渦内を出入りする様子(細点線および太点線で区別)が明らかである。Fig. 6(b) には、同様にして描かれた壁縦渦の三次元構造と計測点の時間軸の位置が示されている。この場合計測点は流れ方向に連なって形成された 3 つの壁縦渦内を通過し、その後壁縦渦の形成されていない相対的高速領域へと抜け出していることがより一層明らかである。この計測点がわずかに左右に移動し壁縦渦の周辺付近を通過すると上述の波形 A に類似したパターンが出現し、さらに、壁縦渦が存在しない領域(細点線)では、相対的に高速を伴う波形が連続して形成されることが推測され得る。

以上のことから、壁縦渦の三次元構造と配置特性が、流速変動波形の形成に重要な寄与をなすことが明らかである。

V 成分波形 ($y^+ = 100$) の同時併用の結果が、Fig. 7 に示されている。グラフの縦軸は、底壁より水表面に向かう方向を正とした鉛直速度成分であり、横軸は時間を表わす。写真下部の数字には、最小単位 0.01 秒のストップウォッチの時刻が示されており、それぞれの波形の時刻に対応している。時刻上の白い横線が底壁面であり、

その上の 2 本のクロスした横線が $y^+ = 100$ に挿入されたレーザー光線である。流速計測点はこのクロス点にあり、その点の上下には Σ 印が記されている。

②③には、クロス点に上方から高速流体が降下してきたときが示されており、下降流を示す負の流速波形が形成されている。②④、②⑤では、反対に壁近くから壁縦渦が発生してクロス点まで頭をもたげてきた場合であり、正の高速波形が形成された。そして、②⑥では再び高速流体塊がくさび上に進入して、下降流を示す負の流速波形が形成されている。また、これ以外についても V 成分波形と壁縦渦との同様の対応が多く確認された。

以上のように、上昇流を形成する壁縦渦の L 領域と M 領域では、低速波形に対応しており、壁縦渦の揺動などにより、計測点上に上昇流がなくなる場合や下降流が新たに形成される場合では高速波形が出現している。上記 4 波形のほかに、Fig. 3 の ●、○印で示された急激な変動を示す波形に関して同様の可視化との対応が調べられ、そのすべてにおいて壁縦渦が重要な役割を果たしていることが明らかとなった。

次に、本結果と従来の平面視による同時併用結果¹³⁾との整合性を若干考察する。平面視の結果によれば、低速の波形は、low speed streak の通過によって形成される¹³⁾が、この壁近くの low speed streak の断面形象は、壁縦渦の L および M 領域とほぼ一致しているように思われる。また、高速波形の形成は、鱗形状の通過や low speed streak の抜け出しの際に実現されている¹³⁾が、これは壁から離れた高速流体塊が壁近くに到達し、計測点から壁縦渦が外れる挙動と対応しているように思われる。鱗形状は、粘性底層上端付近に形成された平面形象であり、中央部は高速流体の進入によって陥没し、その

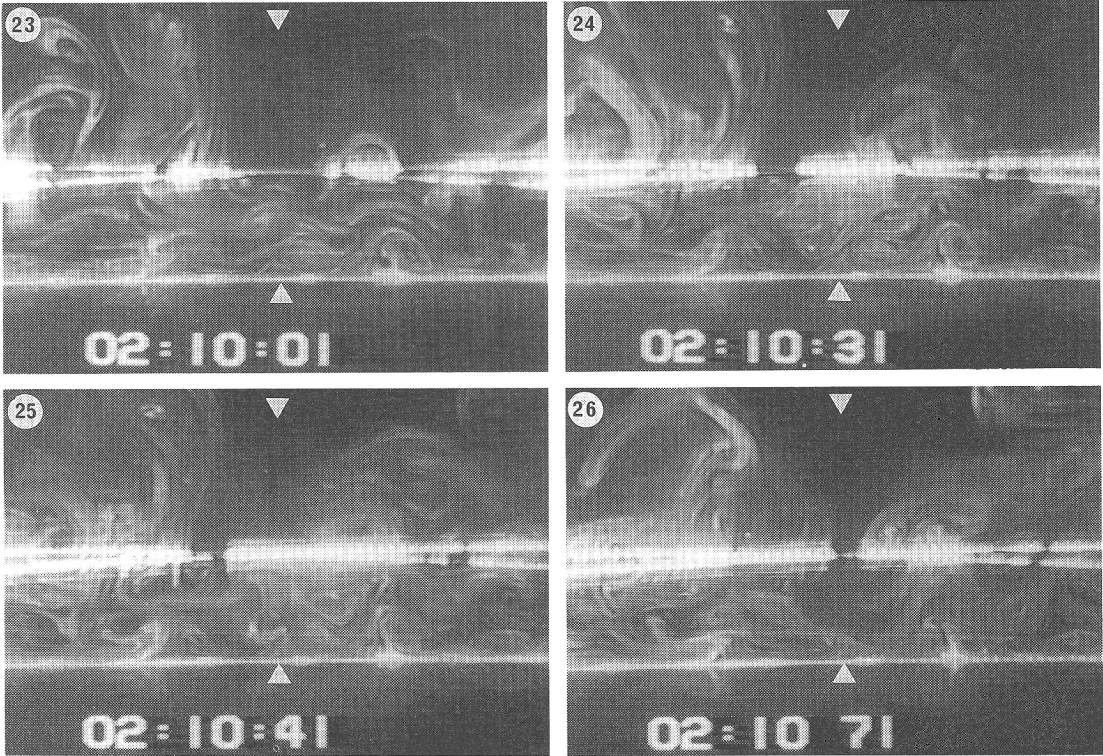
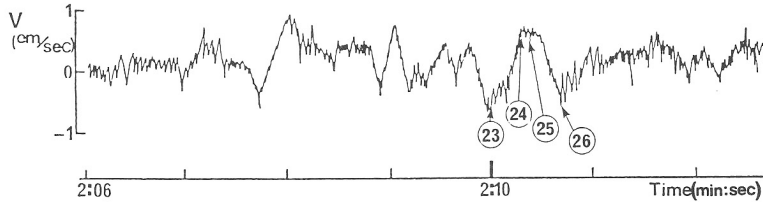


Fig. 7 Simultaneous pictures of streamwise vortices and V -velocity signals (Case A).

輪郭は2つの壁縦渦によって構成されている¹⁷⁾が、上述の⑫~⑯の過程は、鱗形状が可視化面を通過する際の断面形象と相対的高速波形の通過周期において類似の傾向を示している。また、low speed streakの抜け出しは、たとえば⑳から㉑に向かう過程が相当しているように思われる。

以上の考察を包括的に踏まえ、Fig. 8に示されるような壁乱流内層の概念渦モデルが作成された。これにより、壁縦渦と流速計測点の相対的位置関係によって、それぞれ異なる流速変動波形の形成される機構が明らかであり、図中の細点線および太点線は、それぞれ壁縦渦の外および中を計測点が通過した場合の軌跡に相当する。

(3) 壁縦渦と VITA 法による検出波形の検討

VITA 法は、bursting 現象の通過に伴って発生する特徴的な速度波形を計測波形から条件検出しようとする手法である¹⁸⁾。この手法の最も重大な問題は、最適な平

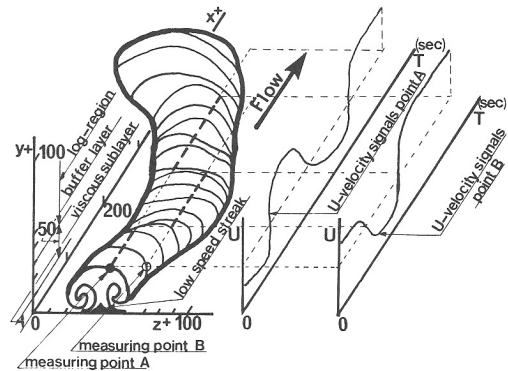


Fig. 8 Conceptual model of vortical structure.

均時間 T^+ としきい値 k をどのように決めればよいかの基準が存在しないことである。そこで、 U 成分の流速波形に T^+ 、および k を変化させて条件付検出し、得

られた波形と壁縦渦との相互関係が検討された。

Fig. 9には、条件付検出された波形と可視化の対応の可否に関する確率分布が示されている。縦軸は、それぞれ $P(R) = \beta/\alpha$, $P(F) \textcircled{A} = \bar{\beta}/\gamma$, $P(F) \textcircled{B} = \tilde{\beta}/\gamma$ で表わされる。ただし、 α は可視化と原波形との対応が確認された総数、 β は、可視化と対応のとれる条件付検出波形の数、 $\bar{\beta}$ は可視化と対応のとれない条件付検出波形の数、 $\tilde{\beta}$ は複数の変動波形を単一のものとしてエラー検出した数、そして γ は条件付検出波形の総数であり、 $\gamma = \beta + \bar{\beta} + \tilde{\beta}$ となる。横軸はしきい値 k であり、 T^+ は 6.5 から 26 まで 4 種類変えられた。この図より $P(R)$ が最も大きくかつ $P(F)$ が最も小さい場合が、VITA 法にとって最適なパラメーター k , T^+ として選択され得る。

平均時間 $T^+ = 6.5$ では、しきい値 k が小さくなるにつれて、 $P(R)$ の値が増加するが、 $k = 0.4$ 以下ではそれに伴って $P(F) \textcircled{A}$ の値も増加している。 $T^+ = 13$ では、 k の値とはほぼ無関係に、 $P(R)$ が 60~80% の高い値を示し、 $k = 0.8$ で最頻値を得ている。また、 $P(F) \textcircled{A}$, \textcircled{B} は、 $k = 0.6$ 以下で増加が認められる。また、 $T^+ = 19.5$ の場合においても同様に、 $k = 0.8$ で最頻値が出現するが、同時に $P(F) \textcircled{A}$ もより高い値を示している。そして、 k の減少とともに $P(F) \textcircled{B}$ のより高い値も出現している。 $T^+ = 26$ では、 $P(R)$ のピーク値を含めて全体が小さくなり、 k の減少とともに $P(F) \textcircled{B}$ の値がより増加している。

これらのことより、 $P(R)$ が最も大きく、しかも $P(F) \textcircled{A}$, \textcircled{B} が最も小さい最適な条件は、 $T^+ = 13$ および $k = 0.8$ である。これは、最近 Bogard ら⁹⁾ が用いた $T^+ = 14$

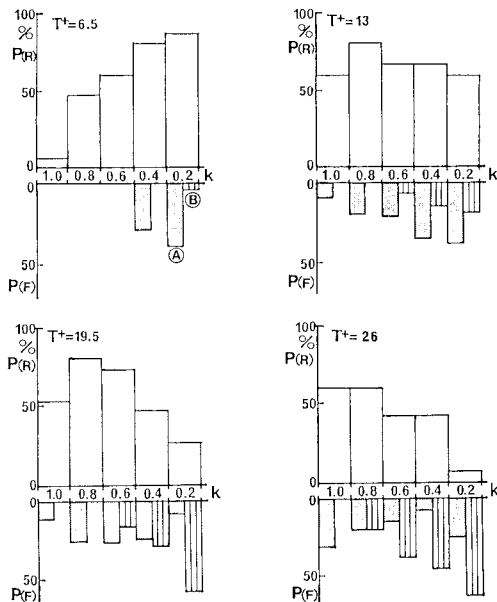


Fig. 9 Histogram of $P(R)$ and $P(F)$.

および $k = 1.0$ の値と大きな差異はないように思われる。

さらに、 T^+ および k と Burst 周期の相互関係を明らかにするために、Fig. 10 が描かれた。横軸には、しきい値 k 、縦軸には Burst 周期がそれぞれ示されている。図中のシンボル OS は、それぞれの T^+ および k において条件付検出された波形の平均周期を表わし、また CS は、OS の中で可視化と対応した波形のみの平均周期に相当する。また、原波形において壁縦渦と関係づけられたすべての波形の平均周期が破線 S_T で示されている。この値は、中川らによって計測された Burst 周期の値と¹⁵⁾一致している。

この図より、CS が、OS と最も接近し、さらに S_T に最も近い値を示すときの T^+ および k が最適パラメーターと考えられることから、それらの値として $T^+ = 13$, $k = 0.8$ が得られた。これは、当然のことながら Fig. 9 の結果とも一致する。

また、CS と OS を比較すると、 T^+ および k の変化に応じて、CS は大きく変化するが、逆に OS は全体として S_T 値付近に分布している。このことは、上述の最適パラメーターの決定方法が重要であり、OS のみでは壁縦渦と無関係の変動波形をエラー検出する場合があることを示している。

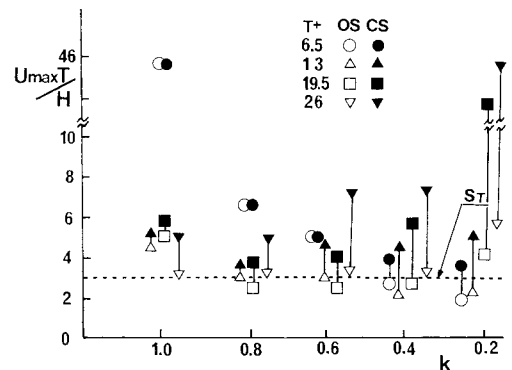


Fig. 10 Average burst periods as T^+ , k is changed.

以上の Fig. 9, Fig. 10 の結果から、VITA 法における最適パラメーターを決定する際には、可視化の形象と流速波形の 1 対 1 の対応を明確にすることが必要と思われる。

4. 結 論

横断面可視化と流速計測の同時併用によって、壁縦渦構造と U, V 成分の流速変動波形の対応が詳細に検討され、壁縦渦の空間的挙動とその配置特性が流速変動の形成にきわめて重要な役割を果たすことが明らかにされた。また、本同時併用の結果をもとに、VITA 法におけ

る最適パラメータの決定方法についても考察が加えられた。以下に、本論の主要な結論を示す。

(1) 壁縦渦の横断面形象と流速変動波形は、1対1で対応し、低・高速の変動波形のパターンは、流速計測点と壁縦渦の相対的位置関係によって区別され得る。すなわち、壁縦渦の中央部分とその付根の領域(M, N領域)で上昇流が、壁縦渦の周辺領域(L領域)において下降流が形成される。

(2) 壁縦渦構造およびその配置特性に対応する特徴的波形には、bursting型とスパイク型の2つがある。bursting型波形は、壁縦渦のいくつかが集めた領域を計測点が通過する際に形成され、比較的小規模の秩序構造の集団が、長周期の波形を造り出すこともあり得る。またスパイク型波形は、壁縦渦を構成するそれぞれの渦対同士が互いに横方向に揺動する際に形成される。

(3) VITA法における最適パラメータを決定する際には、可視化の形象と流速波形の相互関係を明らかにすることが必要であり、それを踏まえて $T^+=13$, $k=0.8$ が得られた。

参 考 文 献

- 1) Kline, S. J. : The role of visualization in the study of the turbulent boundary layer, Lehigh Workshop on Coherent Structure of Turbulent Boundary Layers, pp.1~26, 1978.
- 2) 大成博文・佐賀孝徳・山本恭子・斎藤 隆：開水路乱流の可視化と流速計測の同時併用(2), 第30回水理講演会論文集, pp.577~582, 1986.
- 3) 佐賀孝徳・大成博文・斎藤 隆：壁乱流内層の可視化と流速計測の同時併用, 第18回乱流シンポジウム講演論文集, pp.95~101, 1986.
- 4) 佐藤 浩：乱れの中の秩序, 乱流現象の解明と制御 中津川研究成果報告集, pp.1~12, 1981.
- 5) 中川博次：乱流研究の展望と今後の課題, 土木学会論文集, 第351号/II-2, pp.29~40, 1984.
- 6) Head, M. R. and Bandyopadhyay, P. : Combined flow visualization and hot-wire measurements in turbulent

boundary layers, Lehigh Workshop on Coherent Structure of Turbulent Boundary Layers, pp.98~129, 1978.

- 7) Falco, R. E. : The role of outer flow coherent motions in the production of turbulence near a wall, Lehigh Workshop on Coherent Structure of Turbulent Boundary Layers, pp.448~461, 1978.
- 8) Falco, R. E. : The production of turbulence near a wall, AIAA 13th Fluid & Plasma Dynamics Conference, pp.1~11, 1980.
- 9) Bogard, D. G. and Tiederman, W. G. : Burst detection with single-point velocity measurements, J. Fluid Mech., Vol.162, pp.389~413, 1986.
- 10) 大成博文・佐賀孝徳・山本恭子・斎藤 隆：壁面領域内乱流構造の比較可視化, 流れの可視化, Vol.4, No.12, pp.47~54, 1984.
- 11) 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, 第345号/II-1, pp.63~71, 1984.
- 12) Kim, H. T., Kline, S. J. and Reynolds, W. C. : The production of turbulence near a smooth wall in a turbulent boundary layer, J. Fluid Mech., Vol.50 part 1, pp.133~160, 1971.
- 13) 大成博文・佐賀孝徳・斎藤 隆：開水路乱流の可視化と流速計測の同時併用, 第28回水理講演会論文集, pp.213~218, 1984.
- 14) 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, 第363号/II-4, pp.135~144, 1985.
- 15) 中川博次・福津家久・富永晃宏：開水路流れにおける横断方向の渦構造と大規模乱流, 土木学会論文報告集, 第312号, pp.93~105, 1981.
- 16) 大成博文・佐賀孝徳・渡辺勝利・斎藤 隆：壁乱流内層の秩序構造のラグランジュ的追跡, 第19回乱流シンポジウム講演論文集, pp.205~209, 1987.
- 17) 大成博文・佐賀孝徳・斎藤 隆：開水路乱流における秩序運動の相互作用過程, 第28回水理講演会論文集, pp.233~238, 1984.
- 18) Blackwelder, R. F. and Kaplan, R. E. : On the wall structure of the turbulent boundary layer, J. Fluid Mech., Vol.76, part 1, pp.89~112, 1976.

(1987.12.10・受付)