

## 開水路乱流内層の縦渦構造\*

THE STRUCTURE OF STREAMWISE VORTEX IN THE INNER LAYER OF  
TURBULENT CHANNEL FLOW

大成博文\*\*・佐賀孝徳\*\*\*・斎藤 隆\*\*\*\*

By Hirofumi OHNARI, Takanori SAGA and Takashi SAITOU

Coherent structures in the near-wall region of turbulent channel flow are investigated using a novel visualization technique that utilizes fluorescent dye excited by a sheet of laser light. Some new aspects of streamwise vortices in the near-wall region, especially with respect to pattern of existence, structure, behavior and formation, are inferred from the present experiment. The results indicate that a number of pairs of counterrotating streamwise vortices generate near the viscous sublayer and develop away from the wall, which have inherent three dimensional scales and inclined angles in the viscous sublayer, the buffer layer, and the log-region respectively in the inner layer. Further studies suggest that the behaviors of these pairs and the interaction between streamwise vortices have an important role to generate secondary flows in various scales. To further understand the characteristics of the streamwise vortices, three dimensional structures of the streamwise vortices are illustrated based on Taylor's hypothesis and the formation of the streamwise vortices is discussed in detail. On the base of these results, a model of three dimensional structure of the vortex in the near-wall region, termed OSS vortex, is proposed.

## 1. 緒 論

乱流の本性は三次元性と非定常性にあるとされているが、それを本質的に理解するには、乱流現象内の秩序構造 (coherent structure) の詳細を解明することを不可欠としている。この20年余、秩序構造に関する研究が非常に盛んになり、大規模なワークショップが開催されたり、相次いでレビューが報告されるようになってきた<sup>1)~5)</sup>。ところが、これらにも明らかなように、秩序構造の詳細は依然として不明な点が多く、その今日の状況は、「解明点よりも未解明の課題がはるかに多く発生する事態<sup>2)</sup>とさえいわれている。

本研究は、壁乱流の秩序構造を対象とし、なかでもとりわけ重要でかつ未解明点の多い内層 (inner layer) 内の縦渦 (streamwise vortex) の構造に関する考察を試

みたものである。

これまでに、かなり多くの研究者によって、壁近くの秩序運動が縦渦的挙動を呈するという重要な指摘が行われている<sup>8)~17)</sup>。

最初の本格的な究明が、Klineを中心とするスタンフォード大学グループによって行われた<sup>8)~11)</sup>。彼らは、秩序構造の解明に可視化法をみごとに適用し、壁近くに形成された low speed streak の集中現象や bursting 現象の第1、第2過程 (lift-up, oscillation) などが縦渦的挙動と重要な関係をもつとして、それらをいくつかのモデルで説明した<sup>8)~10)</sup>。また、Blackwelderら<sup>12)</sup>は、壁近くの流れの渦度を計測し、その結果をもとに low speed streak の lift-up が縦渦の対によって形成されると考え、同時に縦渦の横方向スケールについても論及した。このほか、同様の lift-up と縦渦の相互関係は、Praturiら<sup>13)</sup>によっても強調された。ところが、これらの研究のほとんどが、lift-up に縦渦が関係するという指摘にとどまったことから、その後、スタンフォード大学グループ自身によって、縦渦と bursting 現象の個々の過程との詳細な相互関係や縦渦の形成機構を解明する重要性が再説されるようになった<sup>2), 11)</sup>。

一方、最近になって Headら<sup>14)</sup>は、レーザー光膜を可視化に応用し、乱流境界層の壁近くで縦渦対が形成され

\* 本研究は、第12回流れの可視化シンポジウムおよび第16回乱流シンポジウムで発表した内容<sup>6), 7)</sup>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 工修 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 徳山工業高等専門学校講師 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)

ることを示したが、その詳細な構造の究明には至らなかった。同様のレーザーを応用する方法は Falco<sup>15)</sup> によってもなされたが、縦渦を見出すには至らなかった。可視化法は異なるが宇民ら<sup>16)</sup>によっても縦渦対の存在が指摘された。著者ら<sup>17)</sup>も水素気泡法を用いてその立体的可視化を試み、壁近くに縦渦に類似した挙動を見出したが、可視化法の限界もあって縦渦の詳細な構造を考察することができなかった。

以上のように、壁近くに秩序運動としての縦渦（あるいは縦渦対）を見出そうとする試みやその存在の指摘は従来よりかなりあるが、縦渦の構造に関する詳しい考察はほとんどなく、また、縦渦と秩序運動の関係についても十分明確にされてはいない。

本研究の目的は、壁近くに形成された秩序運動としての縦渦を可視化し、その詳細な構造（存在様式、形成領域と規模、相互作用、三次元構造、配置）を解明することにある。可視化法は、レーザースリットによる横断面視法であり、トレーサーに蛍光染料が用いられたことによって前報の方法<sup>17)</sup>よりもさらに改良が加えられた。その結果、壁近くには鮮明な縦渦の横断面が次々と浮かび上がり、縦渦の構造に関する従来にない考察が可能となった。なお、本論における従来の秩序構造に関する用語法とその定義および壁近くの流れ場の領域区分法などについては、すべて文献1), 2) に従うことにした。

## 2. 流れの可視化法

### (1) 実験水路および流速計測装置

実験は、長さ10 m、幅60 cm、深さ15 cmの総アクリル製滑面開水路で行われた。水路の上流端には整流ハニカム（径4 mm、長さ3.2 cm、幅60 cm）が、下流端には水位調節用堰板がそれぞれ設置された。また、事前に路床壁面のレベル調整が行われ、壁面全体の凹凸が0.3 mm以下に押さえられた。流速計測点および撮影位置は整流ハニカムより5 m下流付近であり、そこでは十分発達したと思われるせん断流場が形成された。

流速計測にはレーザー流速計（DISA 55 X シリーズ、最大出力2 Wのアルゴンレーザー：NEC製）が使用された。フォトマルは前方散乱方式で用いられ、そこからの信号は周波数シフターを経て周波数トラッカーで処理された。これにより、可視化が行われるような比較的遅い流れの流速計測が精度よく行われた。Fig. 1にはその平均流速分布の計測例が示されている。平均流速分布の傾向は、従来の内層（ $y^+ < 100$ ,  $y^+ = U_\tau y / \nu$ ,  $U_\tau$ : 摩擦速度,  $y$ : 壁からの距離,  $\nu$ : 動粘性係数）の結果と同様であり、最近の低レイノルズ数下の乱流境界層における Purtell ら<sup>18)</sup>の結果ともよい一致を示している。 $U_\tau$ は Fig. 1 に示されている流速分布から求められた。

### (2) レーザースリット法による横断面視

強力なレーザー光線（前述）を円柱プリズムを通して、薄くて均一な厚さ（2 mm）のスリットに変換し、流れの横断面に挿入した。この方法の特徴は、トレーサーがレーザースリットを通過する際に文字どおり蛍光を発して、平均流に載って流下する秩序構造の横断面形象があたかも輪切りにされたかのように瞬間的かつ鮮明に表現されることにある。

トレーサーにはフルオレセインナトリウム水溶液（比重1.005）が用いられた。このトレーサーの特徴は蛍光性と透過性に優れることにあり、この両方の性質によってスリット面に鮮やかでかつ明暗の斑のない形象が得られた。トレーサーは、撮影地点より約3 m上流で200 cc程度をピーカーから一度に注入された。注入後、大部分のトレーサーが流れ去ってしまうが、その一部は粘性底層内に滞留し続けながら流下した。この間、注入直後の攪乱の影響が十分なくなったと思われる時間経過（1～2分）を置くことにした。粘性底層内のトレーサーは、流下とともに流体運動自身によって次々と巻き上げられ、その一部は水表面近くにまでも達した。この様子を本スリットなしでただ外観するのみでは何もみえない

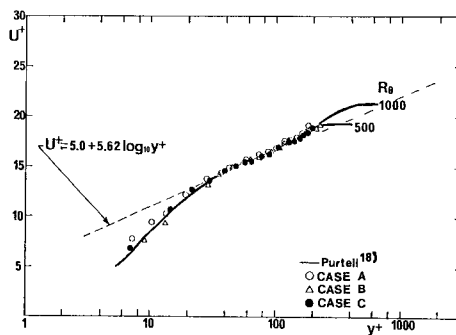


Fig. 1 Mean velocity profiles.

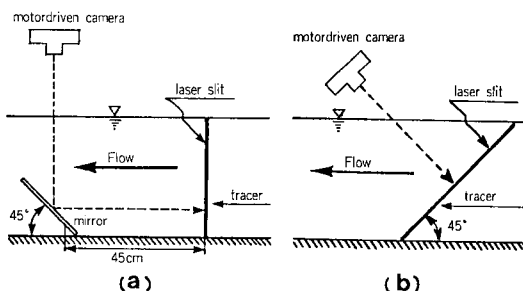


Fig. 2 Flow visualization apparatus.

Table 1 Experimental conditions.

CASE	$U_m$ (cm/s)	$U_\tau$ (cm/s)	H (cm)	$Re = U_m H / \nu$	$Re = U_m \delta / \nu$
A	4.75	0.29	6.62	3660	351
B	5.43	0.33	6.71	4720	393
C	5.23	0.34	6.80	4280	308

が、トレーサーが本スリットを通過すると事情が一変して縦渦が明瞭に可視化された。本スリットの挿入は Fig. 2 に示されるような2つの方法で行われた。(a) の場合は広範囲の撮影を行うためであり、その撮影がスリットより45 cm 下流に置かれた鏡(9 cm×9 cm, 下流方向への傾斜角度45度)を通して行われた。なお、この距離で鏡がスリット面に現われる形象にほとんど影響しないことが事前に十分確かめられた。一方、(b) の方法は縦渦を接写する際に採用された。Table 1 に本実験条件が示されている。

### 3. 縦渦構造

#### (1) 縦渦構造を解明する視点

本実験に用いた流れ場は開水路流れであるが、そこの壁近くの乱流構造は、乱流境界層のそれと以下のような理由から本質的な差異はないと考えられる。

- ① 平均流速分布および乱れ強度分布が一致する<sup>7), 19)</sup>。
- ② bursting 波形や sweep 波形がともに検出される<sup>20)</sup>。
- ③ low speed streak や pocket など同様の可視化の形象がともに形成される<sup>17), 20)</sup>。

そこで、両流れの内層はほぼ同様の秩序構造を有する可能性が高いという前提のもとで縦渦構造を考察するが、その際必要と思われる視点は次のようなものがある。

第1は秩序運動としての縦渦を明確に定義することで

ある。一般に、縦渦は流れ方向に軸をもって回転する渦運動と定義される。その縦渦が壁近くの秩序運動を横断面視することによって見出された。本来、秩序運動は固有の三次元構造をもつと思われることから、本論での縦渦は秩序運動の一断面形象のなかで認められた挙動ではないことを踏まえておくことが重要である。

第2は秩序運動としての縦渦と「乱流二次流れとしての縦渦<sup>21)</sup>」を明確に区別することである。後者の特徴はすでに明らかであり、渦の強さが弱いのに流れを完全に三次元化すること、しかも減衰がわずかで主流方向に長い距離を持続することなどが知られている。ところが、これらの特徴はある意味ではかなり限られた条件下で得られたものであり、秩序運動としての縦渦の形成条件および検出条件と比較すると次のような大きな相違が存在すると思われる。これらの比較からも明らかのように、

	秩序運動としての縦渦	乱流二次流れとしての縦渦
流路	平滑壁面	隅角部や凹壁面などの非平板壁面
検出方法	横断面において瞬間的に場全体の情報を検出	固定点検出法、縦渦としての場情報は点計測の集合として把握
平均操作	不要	十分な長時間平均操作が必要

秩序運動としての縦渦(以下、縦渦とよぶ)の特徴は明らかに乱流二次流れとしての縦渦のそれと大きく異なることが予想される。

第3は縦渦の存在様式と形成領域、そしてその規模を明らかにすることである。壁乱流の秩序構造は、大別して内層、外層(outer layer  $y^+ > 100$ )に属するもの、そ



Fig. 3 Streamwise vortices in the near-wall region (CASE A).

してそれらの相互作用(interaction)などに分類される<sup>2)</sup>. 本論では内層を粘性底層 ( $0 < y^+ < 7-10$ ), バッファ層 ( $7-10 \leq y^+ \leq 30$ ), 対数領域 ( $30 < y^+ \leq 100$ ) に区分する<sup>1)</sup>. そして, それぞれの領域において, 縦渦の存在様式と規模を検討する.

第4は縦渦の空間的な挙動および三次元構造を明らかにすることである. 縦渦の形成機構, 縦渦によって誘起される種々の局所的二次流れ, 縦渦同士の相互作用, 三

次元構造, 縦渦群の空間的配置, 大規模化の過程などに関する解明が重要である. これらは, 壁近くの乱れエネルギーの発生機構や輸送過程に深く関係している非常に重要な現象と思われる.

第5は縦渦と従来より知られている bursting 現象<sup>11)</sup>の相互関係について若干の考察を試みることである.

## (2) 縦渦の空間的構造

壁乱流の最も基本的な属性は, 三次元性と非定常性,

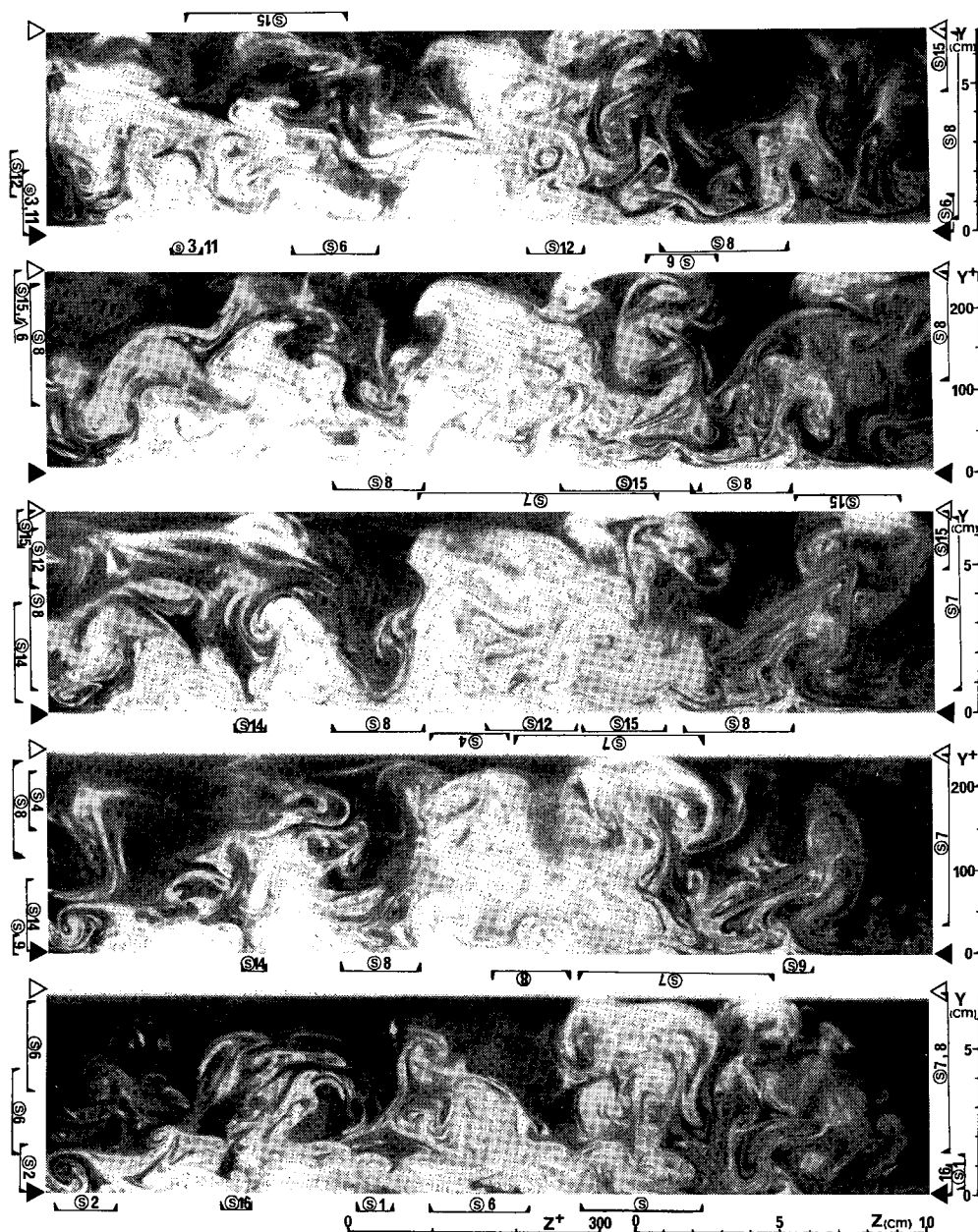


Fig. 4 Picture sequence of streamwise view in the near-wall region (CASE B).

そして壁近くの非等方性などにあると考えられる。壁近くの縦渦の挙動を考察するには、これらの壁乱流の本性にまでさかのぼって考察することを不可欠としている。

Fig. 3, 4 には、レーザースリット法による横断面視の拡大写真、連続写真がそれぞれ示されている。各写真の上下端は水表面(▷印)と路床壁面(▶印)に相当する。長さスケールは、実寸と壁スケール(wall scale:  $\nu/U_\tau^{(1)}$ )の両方で示されている。この場合、水深を壁スケールで表わすと  $250 \nu/U_\tau$  程度であり、内層と外層の境界は約半水深に位置している。空気流による通常の乱流境界層と比較すると、水と空気では  $\nu$  の値が 1 桁違うにもかかわらず、本実験での  $U_\tau$  が相対的には極端に小さいことから、水流では本実験のように内層厚実寸をかなり拡大して設定することが可能となった。これにより、通常の空気流による乱流境界層ではほとんど不可能な内層内の詳細な可視化実験が可能となった。流れ方向は手前から向こうである。Fig. 3, 4 に示されるようなスチールの連続写真およびテレビカメラで連続的に撮影された映像を丹念に繰り返し観察し、次のような縦渦構造に関する特徴が得られた。

a) 縦渦の存在様式

縦渦は内層内のいたるところに多数形成され、これらの 1 つ 1 つがみごとな秩序性を示す一方で、常に場所的・時間的に変化し続けた。ここでの縦渦の定義は、その横断面形象において明らかに渦としての回転運動が認められるとすることであり、しかも後述するようにその三次元方向のスケールが乱流二次流れとしての縦渦と比較して非常に小さい点も重要な属性でありかつ注目点と思われる。

縦渦に関して最も注目すべき特徴の第 1 は、そのほとんどが対をなしていることである(⑤ 1)。縦渦対のそれぞれの渦は互いに影響を及ぼし合い、さらには対自身としても複雑な挙動を繰り返した。また、渦対の一方が発達し他方が極端に減衰すると短期的には単独渦が形成される場合も存在した(⑤ 2)。第 2 は縦渦対が壁近くであたかも壁に鉛直に立つかのように多数形成されたことである(⑤ 3)。この渦(対)を「壁縦渦(対)」(wall streamwise vortex)とよぶ。この壁縦渦対の形成は、壁乱流固有の非常に重要な特徴の 1 つと考えられる。一方、壁から離れると壁縦渦の発生頻度が減り、種々の規模の渦対が任意の方向に自由に形成された(⑤ 4)。また、もう 1 つの重要な特徴として、壁縦渦対と壁の間には「付根」とよべる部分(⑤ 5)が存在した。渦対と付根を合わせると、マッシュルームの鉛直断面形象によく似ている。第 3 は渦のなかに渦が存在するという階層的な構造が観察されたことである。Fig. 3, 4 に示された縦渦は、上流で粘性底層内の一部に滞留したトレーサが流体運

動自身によって巻き上げられ、それがスリットを通過する際に表現されたものである。このトレーサが壁から離れて大きく浮き上がる部分(⑤ 7)では、トレーサが存在しない周囲の流体(⑤ 8)と比較して相対的に上昇する流れが形成されていると考えられる。この大規模な上昇流が形成されていると思われる部分で渦のなかに渦がある構造が観察された。

b) 縦渦の形成領域と規模

内層のそれぞれの領域において、縦渦の水深方面および横方向の長さスケールを求めた。

(i) 粘性底層 ( $0 < y^+ < 7-10$ )

粘性底層は三次元的な構造をもち、low & high speed streak が横方向に交互に存在する、いわゆる streak 構造が最も顕著に見出される領域である<sup>8),11)</sup>。

Fig. 3, 4 に示されるように、low speed streak の横断面形象には縦渦ないし縦渦的挙動が認められた。縦渦と縦渦的挙動を明確に分けることは難しいが、縦渦と明瞭に認められる場合のほとんどが、渦の中心がこの底層内に位置しながら渦全体としては粘性底層とバッファー層の両方にまたがって存在するものであった(⑤ 9)。一方、streak が完全にこの層内に没入する場合の構造は、ほとんどが縦渦的挙動を示した(⑤ 10)。これらの横断面形

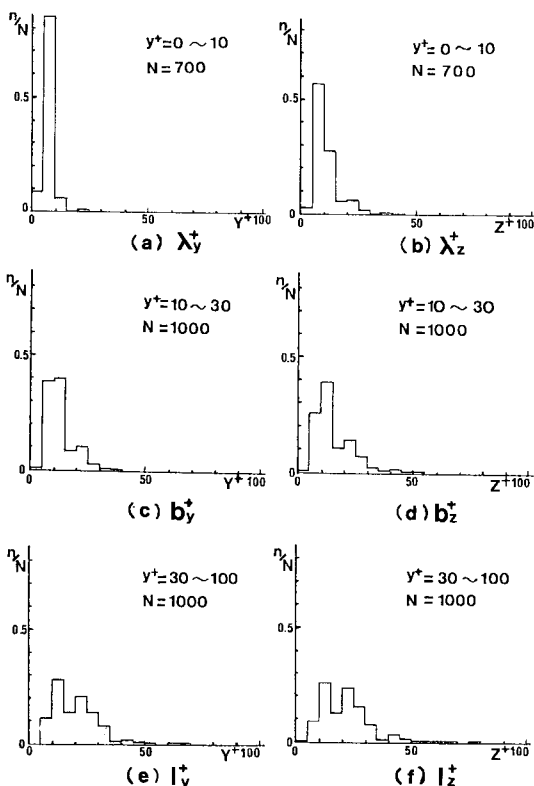


Fig. 5 Histogram of  $\lambda_{y,z}^+$ ,  $b_{y,z}^+$  &  $l_{y,z}^+$  (CASE A).

象の縦横スケールをそれぞれ読み取り、その平均値 ( $\lambda_y$ ,  $\lambda_z$ ) を式 (1), (2) に、その頻度分布を Fig. 5 (a), (b) に示す。それぞれの読取り個数は 700 である。

$$\lambda_y \approx 7 \nu / U_\tau \dots\dots\dots (1)$$

$$\lambda_z \approx 10 \nu / U_\tau \dots\dots\dots (2)$$

式 (1), (2) より、縦渦ないし縦渦的挙動の縦スケールはほぼ粘性底層厚さに等しいといえ、また、横幅スケールは従来の low speed streak 幅  $\lambda^*$  と比して著しく小さく、約 1/10 の値を示していることがわかる。 $\lambda^*$  と  $\lambda_z$  の明確な相違はむしろ当然であり、前者が streak 同士の間隔であるのに対し、 $\lambda_z$  は 1 つの streak 自身の横幅を求めたものだからである。一方、頻度分布からはこれらの平均値付近のスケールが非常に卓越していることが明瞭である。これは、この層内の streak が流れ方向に長いスケールをもち、しかも安定して形成されるという従来の結果<sup>8), 11)</sup> と少しも矛盾しない。

(ii) バッファー層 ( $7-10 \leq y^+ \leq 30$ )

この層には常に多くの壁縦渦が存在した (㉔ 3)。これらの渦の断面形象は、自らの付根 (前述) を中心にして左右に動く揺動現象を粘性底層内に比してより顕著に示した。縦渦のスケール ( $b_y$ ,  $b_z$ ) が式 (3), (4) に示されている。読取り個数はそれぞれ 1000 個である。

$$b_y \approx 12 \nu / U_\tau \dots\dots\dots (3)$$

$$b_z \approx 15 \nu / U_\tau \dots\dots\dots (4)$$

これより、縦渦の規模が粘性底層よりもやや増していることが明らかである。また、頻度分布 (Fig. 5 (c), (d)) は粘性底層のそれよりも全体的にやや広がりを見せ、より規模の大きい渦の形成も認められる。なかでも注目点は最頻値の変化であり、 $\lambda_y$ ,  $\lambda_z$  がともに  $5-10 \nu / U_\tau$  程度が卓越したのに対し、この層ではスケールアップして  $10-15 \nu / U_\tau$  の値を示していることである。 $b_z$  の値は、low speed streak が粘性底層外端から lift up する際に対をなすその横幅スケール<sup>17)</sup> とほとんど一致する。

(iii) 対数領域

$$(30 < y^+ \leq 100)$$

この領域の縦渦のスケール ( $l_y$ ,  $l_z$ ) はさらに拡大し、その頻度分布 (Fig. 5 (e), (f)) もより一段と広がりを示して

いる。これらより、縦渦は発達するが、その発達度合がさまざまであることが推察可能である。式 (5), (6) に平均スケールが示されている。それぞれ読取り個数は 1000 個である。

$$l_y \approx 20 \nu / U_\tau \dots\dots\dots (5)$$

$$l_z \approx 21 \nu / U_\tau \dots\dots\dots (6)$$

この領域では、壁縦渦対がかなり発達して存在する場合 (㉔ 11) と「付根」をもたない渦対がいろいろな方向に自由に形成される場合 (㉔ 12) の 2 通りがあった。発達した壁縦渦対に関する重要な特徴は、それが単独で内層を越えて外層にまで発達することがほとんどあり得なかったことである。当然のことながら、単独渦対の発達が水表面に達することも皆無であった。また式 (5), (6) において  $l_y$  と  $l_z$  の値がほぼ一致するが、これは発達した渦がほぼ円形であることを意味する。そこで式 (1)~(6) より、粘性底層内で偏平を呈した渦が形成され、それが壁から離れて自らの規模を増しながら発達すると渦本来の円形に近くなることが明らかである。これは、壁乱流における渦の発達機構を考えるうえで重要な特徴の 1 つと思われる。

c) 縦渦の相互作用

縦渦対は、対をなす渦同士が相互に影響を及ぼし合うことによって変化するだけでなく、相隣の渦対同士でもそれぞれの渦の強さと規模に応じて相互作用を繰り返す、さまざまな局所的二次流れを誘起させた。Fig. 6 (a), (b), (c) には、Fig. 4 (b) のトレーサーが存在する部分、縦渦の部分、縦渦同士によって誘起されたと思われる局

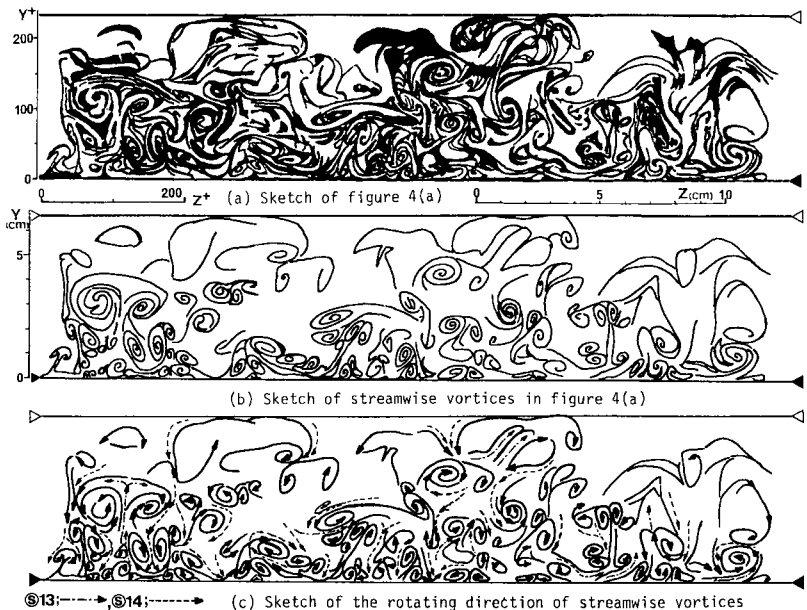


Fig. 6 Sketch of cross-sectional views and rotating direction of s.v. (CASE B).

所的二次流れ（上昇流は一点鎖線，下降流は点線）などがそれぞれ示されている．壁縦渦対は，互いに反対に回転する渦をもち，その両渦で挟まれた部分で粘性底層付近からの急激な上昇流（ejection, ㉔13）を誘起する．また，相隣る壁渦対間では，壁に向かう下降流（小規模な sweep, ㉔14）が渦同士によって誘起させられている．この局所的な下降流は，壁面に衝突した後，横方向の流れを形成し，それがすぐ下流の渦による上昇形成の引金となるように思われる．これらの挙動は，後述の縦渦の揺動現象と加えて壁近くでの乱れの発生機構にかかわる非常に重要な特徴といえよう．以上の個々の渦間の相互作用のほか，渦の集団間で行われる大規模な相互作用が内層の各層を越えて存在した．秩序構造の大規模化は2つ以上の渦の複合化や相互作用によって達成されるようであり，なかには内層を越えて外層に及び，さらに水表面にまで到達するものも観察された（㉔15）．この大規模化の機構については次報で詳細に考察する予定である．

#### d) 縦渦の揺動現象

スリット面に現われる壁縦渦対の挙動を連続的に追跡すると，渦対が付根を中心にして左右に揺動現象を呈するというもう1つの重要な特徴が見出された．Fig. 7には，この揺動現象の一部が示されている．図中の渦の断面は，Fig. 2 (b) の方法によってテレビカメラで撮影された画像を35 mm カメラで再撮影し，そのネガフィルムを拡大してトレースすることによって得られたものである．

そこで，揺動が最も典型的な㉔16, 17の部分に注目すると，揺動に伴う渦の生成が明らかである．すなわち，渦Aは渦Bの形成を誘起し，渦Bはさらに渦Cの形成を誘起しているようである．また，同様に渦Dも渦Eを誘起しているようである．これらの揺動の原因は，渦対を形成するそれぞれの渦の強さが常に異なるためと考えられ，その強さが大きい方へと常に揺動が繰り返されるように思われる．

さて，揺動する渦対の断面を1コマごとに連ねてゆくと渦対管を構成する渦管の傾斜角度が異なる構造として表わされる<sup>7)</sup>ことから，スリット面に現われる渦の揺動は，壁近くに多数形成された渦対管の三次元構造の反映と考えることが可能である．壁近くでは渦管の揺動があったところで形成され，これに前述の相互作用が加わることによって，次々と新たな渦管が下流に形成されるように思われる．揺動する渦管の形成領域は，乱れの多くが発生する領域と一致しており，渦対管の揺動が乱れの発生機構に深く関与しているものと考えられる．

#### e) 壁近くの渦の三次元構造

Fig. 3, 4に示されるような秩序構造の横断面形象を

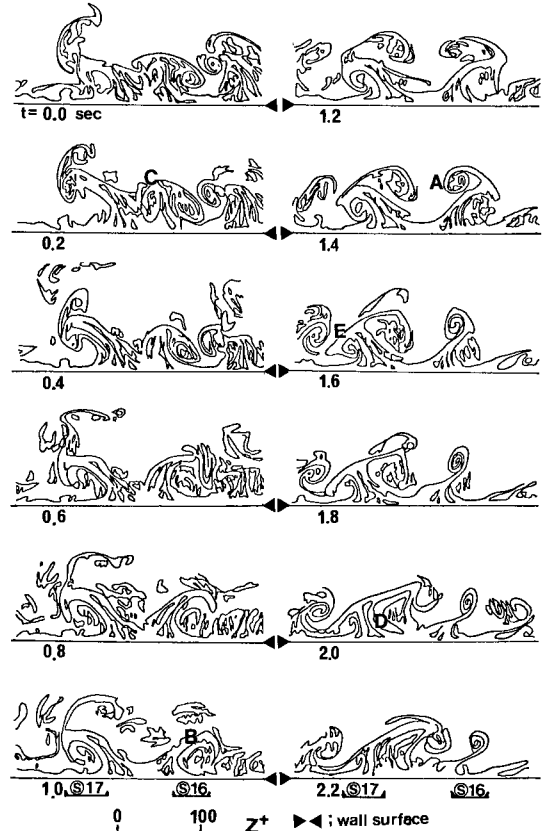


Fig. 7 Oscillation of wall streamwise vortices (CASE B).

微小時間間隔で長時間連続撮影した後，その1コマ間の画像にTaylorの凍結乱流の仮説を適用し，何枚もの画像を連ねてゆくと容易に秩序運動の三次元構造を表現することができる．ただし，この場合，その仮定を用いて秩序構造の三次元的な特徴を考察する際に，①秩序運動の時間的変化を無視する，②相隣る2画像内の形象がきわめてわずかしき変化しておらずこの仮定の適用の妥当性がある，③個々の秩序構造の流れ方向スケールの検討はBurst周期<sup>9)</sup>以下の小さいものに限るのがよいなどの前提が存在することを十分踏まえることが必要である．

Fig. 8は壁縦渦管の側面形象の一部が示されており，これから渦管の傾斜角と流れ方向スケールが求まる．図中の各点は右上に示した $Y_0$ 点であり，各点間は前述の仮説に基づいて1コマ時間間隔（0.2秒）に，2点のうち上流側の点の平均流速値を乗じて得られた．図中の各点を連ね，渦の流れ方向スケールと傾斜角の場地的変化が明らかとなった．渦管は粘性底層からバッファー層にかけてわずかに上昇し，その後同層内である距離だけ壁に平行になり，再びより急な角度で壁から離れて同層を越えてゆくとというパターンが比較的多いようである．

傾斜角と流れ方向スケールを定量的に評価するため

に、合計 105 個の渦管について Fig. 8 に例示したような側面図を描き、渦管の傾斜が急変する際の角度とその座標位置をそれぞれ求めた。まず、壁からの高さごとの傾斜角度の平均値および内層内各層における同角度の頻度分布が Fig. 9 に示されている。渦管の傾斜角  $\theta$  は、粘性底層からバッファ層にかけて徐々に増加し、さらに内層内対数領域に至るとほぼ一定の値を示している。図中の実線は内層内対数領域における傾斜角度の平均値を示すものであり、その値は約 18 度である。同様の傾向が内層内各領域における  $\theta$  の頻度分布からも明らかであり、壁から離れるに従って最頻値がより  $\theta$  の大きい値の方に移動し、双頭分布を示すようになっていく。ここで注目すべき点は、内層内対数領域における渦管の傾斜角度が約 18 度を示すことであり、これは、それぞれ方法は異なるが秩序構造の傾きが Brown ら<sup>22)</sup> および Falco<sup>23)</sup> などによって求められた値と一致する。また、1 つの渦管のバッファ層と内層対数領域における流れ方向スケールが次のように求められた。

$$b_x \approx 167 \nu / U_\tau \dots\dots\dots (7)$$

$$l_x \approx 172 \nu / U_\tau \dots\dots\dots (8)$$

これらの  $b_x$ ,  $l_x$  は Burst 周期<sup>3)</sup> を換算した長さスケールと比較して非常に小さい値である。しかし、縦断面可視化の結果と合わせてより詳細な  $\theta$ ,  $b_x$  および  $l_x$  に関する検討が今後必要である。

次に、式 (1)~(8) と Fig. 9 の  $\theta$  をもとに壁縦渦管の三次元構造を描き Fig. 10 に示した。この渦構造は、個々に三次元構造をもつ渦管を 105 個平均化して求められたものに相当し、それがそのまま三次元渦モデルとなり得る。著者らの代表文字を用いて、これを「OSS 渦」とよび、同時に壁近くに形成された渦の三次元構造モデルとして提案する。従来のモデルと比較して本モデルの勝れた点は、図中の左上および右下に示されたような可視化の実測データをもとに渦モデルが作られたことにある。また従来モデルとの明瞭な相違点は、たとえば馬蹄型渦モデル<sup>8)</sup> の足の部分に相当するような横渦とよべる部分が存在しないことである。

さらに、三次元構造を有する壁近くの渦群の空間的な配置 (formation) を検討するために Fig. 11 を描いた。この図は、本可視化法によって得られた形象をテレビカメラで連続撮影し、その画像を 0.1 秒ごとにサンプリングし、その画像間に Taylor の仮説を適用しそれぞれの画像を重ね合わせることによって得られたものである。流れ方向のスケールは、壁縦渦対の半平均高さにはほぼ相当する  $y^+ = 30$  の地点の平均流速値に 0.1 秒を乗じて決められた。そこで図中

の個々の渦対管 (太実線で囲まれている) の形象は、 $y^+ = 30$  以下で実際の真の形象よりも若干引き伸ばされ気味、逆に  $y^+ = 30$  以上で若干縮小気味に表現されている。また、図中の細実線は 1 画像内の縦渦断面の輪郭が示されたものであり、その 1 画像内の輪郭が次の画像内のそれと重なる部分は点線で描かれた。さらに渦の内部構造も点線で示された。細点で満たされた領域は、粘性底層の下部および底壁面に相当する。

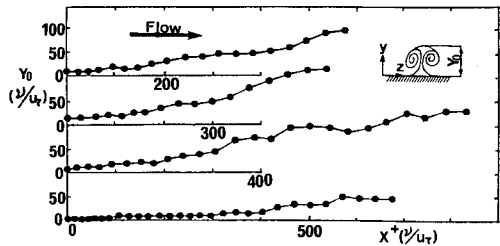


Fig. 8 Inclined wall streamwise vortices (CASE C).

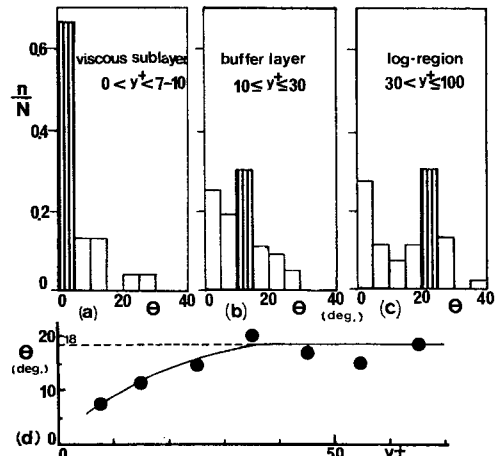


Fig. 9 Histogram of  $\theta$  and  $\theta$  as a function of  $y^+$  (CASE C).

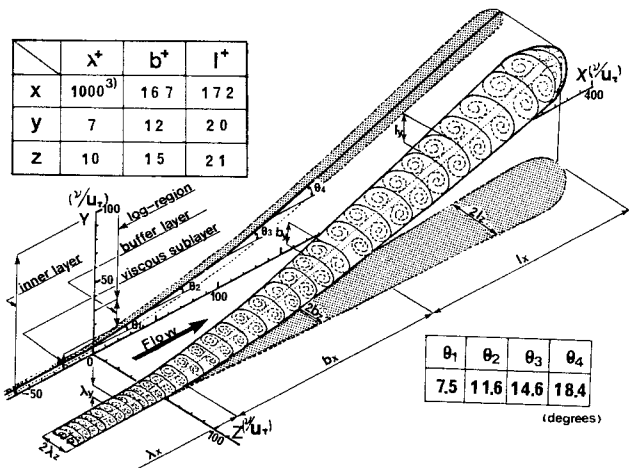


Fig. 10 A model of OSS vortex.



この図より、個々の OSS 渦が壁面から次々と発生・発達し、さらに減衰している様子が一目瞭然である（ただし、渦の発達・減衰の識別の根拠は、流れ方向に渦の規模を拡大・縮小しているかに置かれている）。さて、ここでは、OSS 渦の配置 (formation) 上の特徴に関して考察を行うが、秩序構造が流下とともに時間的に変化してしまうことを除けば、それが十分可能と思われる。説明を容易にするために 53 個の渦すべてに番号を付し、さらに発達・減衰する渦を○・□で分類した。また、発達する渦を比較的大規模なものと同規模なものにさらに区分し、前者の渦を□の記号で表わすことにした。

まず比較的大規模な渦 (□印) に注目すると、それらは中央部および左右の両端部で流れ方向に次々と多数形成されている。1つの大規模な OSS 渦の形成は、すぐ下流にはほぼ同規模の OSS 渦の形成の引金になっているかのようであり、特に注目すべき点は、OSS 渦の前部とそのすぐ下流の OSS 渦の後部とが水深方向に上から眺めるとそのほとんどが重なっていることである。大規模な OSS 渦群を峰とすると、この峰と峰の間の谷部に

比較的小規模で発達する渦と減衰する渦の両方が位置している。これらの峰と峰、谷と谷（たとえば、図と図、図と図）の横幅間隔は、壁近くの OSS 渦同士の横幅間隔  $100 \nu/U_\tau$  のほぼ倍の値を示し、さらに水深とほぼ一致する。峰部では、比較的大規模な OSS 渦が流れ方向に集中的に形成され、それが結果として比較的大規模な上昇流の形成となっているようであり、逆に谷部では、峰部周辺の大規模な渦の下降流を誘起する成分によって比較的大規模な下降流が相対的に形成されているように思われる。また、谷部の壁近くでは小規模に発達する渦か減衰する渦しかないことをすでに述べたが、これらはこれらの上部で比較的大規模な下降流の形成を許す条件の1つともなっていると考えられる。

以上、内層内の OSS 渦の配置に関する基本的特徴の 2,3 について検討した。今後、外層内の渦との相互作用を含めてさらに詳細に考察してゆくことが必要である。

最後に、OSS 渦と bursting 現象および sweep 現象との相互関係について若干の考察を行う。

bursting 現象の第 1 過程 (lift-up) は、low speed

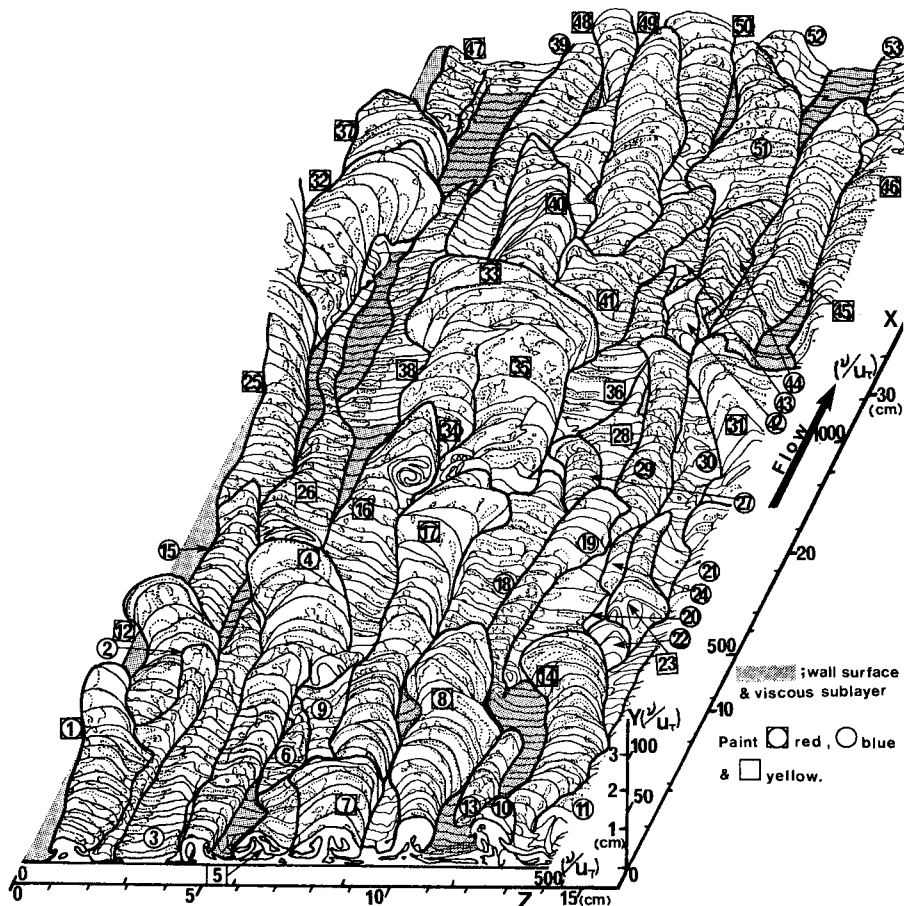


Fig. 11 Three dimensional structure of wall streamwise vortices (CASE C).

streak が粘性底層外端からバッファー層へ上昇する運動である<sup>11)</sup>が、これは OSS 渦によって引き起こされると考えられる。すなわち、lift-up は、OSS 渦の粘性底層外端部の渦管傾斜角度が変化する (Fig. 11 の  $\theta_1$ ) 部分の渦対によって挟まれる領域で引き起こされる。streak は lift-up する際にほとんど対をなす<sup>17)</sup>が、その対の横幅と前述の OSS 渦の横幅  $b_x$  がほぼ一致する。第 2 過程 (oscillation) は、バッファー層での渦対の揺動 (実際には渦管の傾斜) によって引き起こされると考えられる。oscillation の流れ方向スケール<sup>2)</sup>は、OSS 渦のバッファー層における長さスケール  $b_x$  とほぼ一致する。第 3 過程 (break up) との相互関係は不明である。sweep 現象は、もともと大規模な下降流<sup>2)</sup>とされているが、実際にはそれのみにとどまらず、OSS 渦同士の相互作用によって内層でも規模は異なるが存在し、Kline ら<sup>11)</sup>の観察結果と一致する。

#### 4. 結 論

レーザースリット法の横断面視によって、開水路乱流内層における秩序運動としての縦渦の構造が、その存在様式、形成領域と規模、相互作用、揺動現象、三次元構造などに関して系統的に考察され、いくつかの重要な解明がなされた。また、それらをもとに壁乱流における三次元渦モデルが提案され OSS 渦と名付けられた。本研究における結論は次のとおりである。

壁近くの乱流構造は、従来考えられてきたような不規則で混沌としたものではなく、非常に複雑な三次元性を示すが渦としてのみごとな秩序性を有するものである。

内層の秩序構造のなかで最も重要なのが壁縦渦 (OSS 渦) である。壁縦渦の基本的様式は、そのほとんどが常に対をなすことであり、渦対の付根が壁に付着していることである。壁縦渦は、内層の各領域で固有の規模と傾斜角をもつ。この傾斜角のうち、内層対数領域の値は従来の推測値と一致した。また、壁縦渦は、壁面のいたるところで発生し、発達や減衰を繰り返す。しかし、壁縦渦が発達して単独で水表面にまで達することはなく、秩序構造の大規模化は渦の複合化と相互作用によって引き起こされる。これらの渦の運動によって瞬間的かつ局所的にさまざまな規模の二次流れが形成された。

#### 参 考 文 献

- 1) Smith, C. R., et al. : AFOSR/Lehigh Workshop on Coherent Structure of Turbulent Boundary Layers, 1978.
- 2) Kline, S. J., et al. : Summary of the AFOSR/MSU research specialists workshop on coherent structure in turbulent boundary layers, AFOSR-TR-80-0290, 1980.
- 3) Cantwell, B. J. : Organized motion in turbulent flow, A. R. of Fluid Mech., Vol. 13, pp. 457~488, 1981.
- 4) Hussain, A. K. M. F. : Coherent structure-reality and myth, Phys. Fluids, 26 (10), pp. 2816~2850, 1983.
- 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) 大成博文ほか：壁乱流における縦渦の可視化，流れの可視化，Vol. 4, No. 14, pp. 233~238, 1984.
- 7) 大成博文ほか：壁乱流における縦渦の可視化，第 16 回乱流シンポジウム講演論文集，pp. 222~226, 1984.
- 8) Kline, S. J., et al. : The structure of the turbulent boundary layer, J. Fluid Mech., Vol. 30, pp. 741~773, 1967.
- 9) Kim, H. T., et al. : The production of the wall region in turbulent boundary layer, J. Fluid Mech., Vol. 50, pp. 133~160, 1971.
- 10) Offen, G. R., et al. : Combined dye-streak and hydrogen-bubble visual observations of a turbulent boundary layer, J. Fluid Mech., Vol. 62, pp. 223~239, 1974.
- 11) 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, pp. 1~26, 1978.
- 12) Blackwelder, R. F., et al. : Streamwise vortice associated with the bursting phenomenon, J. Fluid Mech., Vol. 94, pp. 577~594, 1979.
- 13) Praturi, A. K., et al. : A stereoscopic visual study of coherent structures in turbulent shear flow, J. Fluid Mech., Vol. 89, pp. 251~272, 1978.
- 14) Head, M. R., et al. : New aspects turbulent boundary layer structure, J. Fluid Mech., Vol. 107, pp. 297~338, 1981.
- 15) Falco, R. E. : Structural aspects of turbulence in boundary layer flow, Proceedings of the Sixth Symposium on Turbulence in Liquids, pp. 1~15, 1981.
- 16) 宇民 正ほか：開水路乱流の可視化とその局所相関解析，第 16 回乱流シンポジウム講演論文集，pp. 227~232, 1984.
- 17) 大成博文ほか：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.
- 18) Purtell, L. P., et al. : Turbulent boundary layer at low Reynolds number, Phys. Fluids, 24 (5), pp. 802~811, 1981.
- 19) Nakagawa, H., et al. : Turbulence of open channel flow over smooth and rough beds, Proc. JSCE, No. 241, pp. 155~168, 1975.
- 20) Nakagawa, H., et al. : Structure of space-time correlations of bursting phenomena in an open channel flow, J. Fluid Mech., Vol. 104, pp. 1~43, 1981.
- 21) 谷 一郎：剪断流れにおける縦渦の形成，ながれ，2-2, pp. 160~165, 1983.
- 22) Brown, G. L., et al. : Large structure in a turbulent boundary layer, Phys. Fluid, 20, pp. 234~252, 1977.
- 23) Falco, R. E. : Coherent motions in the outer region of turbulent boundary layers, Phys. Fluid, 20, pp. 124~132, 1977.

(1985. 5. 15・受付)