

吹送流の組織的渦構造の可視化

FLOW VISUALIZATION OF ORGANIZED STRUCTURE WITHIN A WIND-DRIVEN CURRENT

日野 幹雄*・灘岡 和夫**・須見徹太郎***

By Mikio HINO, Kazuo NADAOKA and Tetsutaro SUMI

Coherent structure of large scale eddies and turbulence within the upper surface shear layer of a wind-driven current has been investigated by utilizing several flow visualization techniques. In the region of transition from laminar to turbulent flow, the visualization demonstrates the existence of a streak structure which can be shown in a plan view at the level close to the water surface and reveals that longitudinal vortices existing near the surface are responsible for the appearance of the streak structure. As the stream goes down into the turbulent region, the flow field related to these vortices develops into that of three-dimensional 'hairpin' vortices. A tentative model is presented to describe the evolution of these vortical flow field from a viewpoint of local instability due to the longitudinal vortices themselves. The flow structure of turbulent boundary layer near the surface has been shown to resemble that of usual wall turbulence.

1. まえがき

吹送流に関する研究は、これまで、Keulegan¹⁾をはじめとして Baines & Knapp²⁾や Wu³⁾など数多くの研究者により行われており、平均流速分布や、風によるシアアと吹送流の関係などについて論じられてきている。しかしながら、これらは平均流速や摩擦速度といった何らかの平均量を対象としたものであり、吹送流中の運動量の鉛直輸送機構を直接支配する乱れの構造についてはほとんど明らかにされていない。また、湖沼や貯水池での温度躍層の形成や侵食機構には、吹送流中の乱れに内在する組織渦が直接関与することが最近著者ら⁴⁾により明らかにされている。

本論文は、吹送流の特にその組織的渦構造を明らかにするために行った実験の結果について報告したものである。実験には、いわゆる流れの可視化手法を数多く用いているが、その場合の測定対象としては、層流から乱流への遷移領域を含むレイノルズ数の比較的小さい領域を

選んだ。

可視化の結果、遷移領域ではいわゆる streak 構造が明瞭な形で存在することや、それが水面近傍に存在する縦渦によるものであることが示された。また、乱流域に近づくと縦渦から三次元的な渦構造が発達してくるが、ここではその発達過程を説明し得るモデルを示した。最後に、乱流境界層の可視化の結果を示し、通常の壁面乱流境界層の乱流構造との類似性について言及した。

2. 実験装置と流れの可視化方法

実験には Fig.1 に示すような風洞付きの亚克力樹脂製水路（長さ 4 m, 幅 15 cm, 高さ 16.4 cm）を使用し水深を 10.5 cm に設定して実験を行った。実験にあたっては、実験条件を簡単にするために少量のラウリル硫酸ナトリウムを水中に溶かし込み風波の発生を抑えるようにした。また、設定風速は風路入口の中心部で 5.9 m/s とした。

流れの可視化方法としては、水素気泡法、アルミ粉末法、および色素注入法を用いた。また、鮎川によって提案されたカラースリット法⁵⁾と水素気泡法を組み合わせることにより、流れの三次元的な可視化を行うことを試みた。

* 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科
(〒152 目黒区大岡 2-12-1)

** 正会員 工修 東京工業大学助手 工学部土木工学科
(同上)

*** 正会員 東京工業大学, (現, 長崎県土木部河川開発課)
(〒850 長崎市江戸町 2-13)

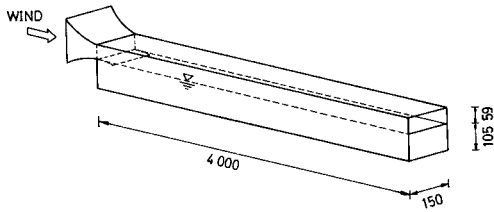


Fig. 1 Experimental apparatus.

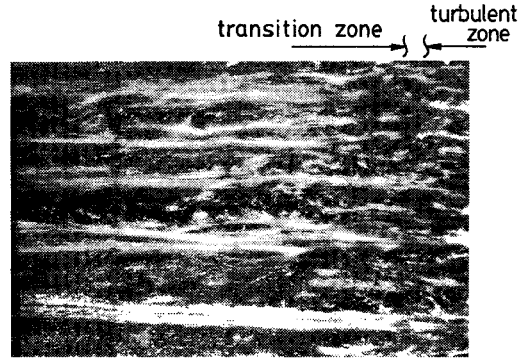
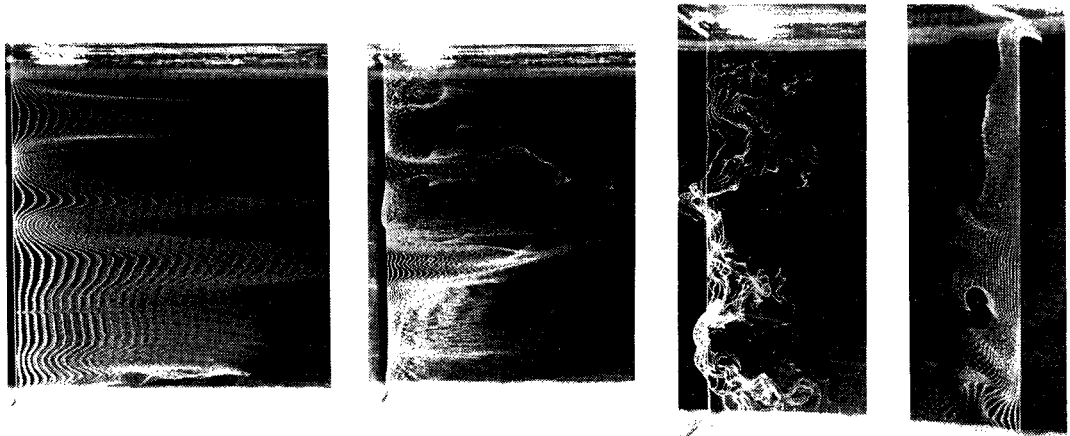


Photo 1 Streak structure in the transition zone visualized by aluminum powder method.

Photo 2 Plan views at several depths in the transition zone visualized by hydrogen-bubble method ($x \approx 1.8$ m).

3. 遷移領域の streak 構造

乱れに内在する組織的な構造を比較的明瞭な形で抽出するには、レイノルズ数が比較的小さい流れを対象にするといふ。実際乱流境界層内の組織構造の研究の先駆けとなった Kline ら⁶⁾の可視化実験でも、運動量厚さで定義されたレイノルズ数 Re_θ は約 1000 という値の流れが対象とされている。そこで本研究では、層流から乱流への遷移領域を含む、レイノルズ数が小さい領域の流れを可視化の対象とした実験を行った¹¹⁾。ここではまず、遷移領域での流れの可視化を行った結果について述べる。

Photo 1 は、目視によって判断された層流から乱流への遷移領域 ($x \approx 1.8$ m, x は風路入口より流下方向に

とった距離) をアルミ粉末法によって可視化したものである。流れは左から右で、水面下 0.5 cm の位置に水平スリット光を当て、水路上方より撮影した。これを見ると数本の streak が明瞭な形で存在することがわかるが、これらの streak の無次元間隔 λ^+ ($=\lambda u_* / \nu$, u_* : 摩擦速度, ν : 動粘性係数。なお u_* は水表面上の空気流の流速分布より算定した) は 150~200 程度で、発生位置は時間的にあまり変動しない。写真の右端付近から乱流域に入るが、この辺りでは写真からわかるように streak はあまり明瞭でなくなり、streak 間隔より小さいスケールの構造がいくつも現われている。

Photo 2 は、遷移領域の同様の写真を図に示した水深にタングステン線を張り、水素気泡法によって撮ったものである。Photo 2 (a) は Photo 1 と同じ $z=0.5$ cm ($z^+=zu_*/\nu=35$, z は水表面から下方を正にとった鉛直座標) での可視化写真であるが、高速部分と低速部分がかなり周期的に並んでいるのがわかる (高速部分が Photo 1 の高速部分に対応する)。このような streak 構

注 1) 低レイノルズ数での乱れの組織的な構造が高レイノルズ数の境界層内にも同様に存在するかどうかという点に関してはなお議論のあるところであるが、最近の乱流シンポジウム等での議論ではそれを支持する方向にあるようである。

造は $z^+=70$ ((b)) でも認められるが、 $z^+=140$ ((c)) ではかなり不明瞭になっている。逆流域に入る $z^+=280$ ((d)) での写真には streak 構造はみられず、代わりに渦管によって変形を受けたとみられる模様が現われている。

なお、上述の streak 構造が風速の大小やラウリル硫酸ナトリウムの混入の有無にかかわらず存在することは予備実験の結果から確かめられている。

4. streak 構造と縦渦との関係

前節で示したように、層流から乱流への遷移領域内には、水表面近傍に streak 構造が明瞭な形で存在するがここでは、その形式要因を探るために行った可視化実験の結果について述べる。

Photo 3 は、遷移領域の上流側の水面下 5 mm の位置にタングステン線を水平に張って水素気泡をシート状に出し、Fig. 2 (a) に示すように水面に対して 45° の角度の断面で流下方向にはば数 cm おきに可視化したものである。写真の上から下の順で乱流域に近くなっており、各写真の両端は水路の側壁に対応している。これを見る

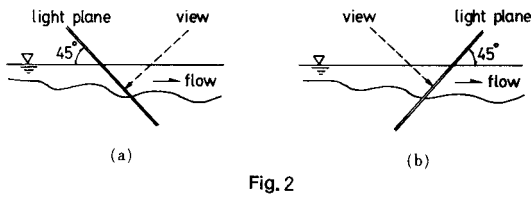


Fig. 2

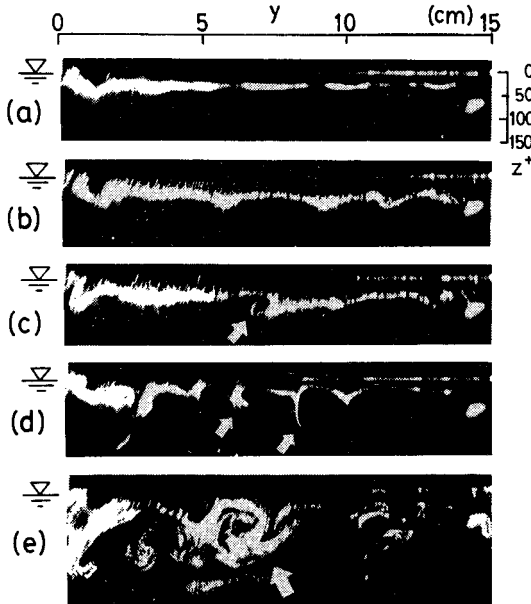


Photo 3 Cross sectional views of hydrogen-bubble sheet which reveals the existence of longitudinal vortices.

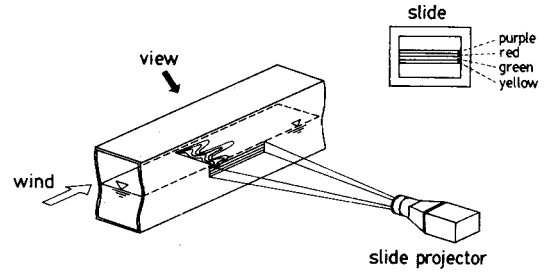


Fig. 3 Experimental setup for the flow visualization by coloured-slit method combined with hydrogen-bubble method.

と、(a) から (b) にかけて水素気泡のシートがしだいに波状に変形し、(c)、(d) ではシートの沈み込む位置がさらに鋭くなって渦に巻き込まれた形になっているのがわかる (図中の矢印)。さらに乱流域に近い (e) では、いわゆるヘアピン渦を輪切りにしたような渦対が流体の沈み込む位置に発生していることが確認できる (図中の矢印)。

このように、遷移領域での断面内の水粒子運動を可視化すると主流の流下方向に軸をもついわゆる縦渦に起因すると考えられるパターンが得られる。このことから、先に述べた streak 構造は、縦渦によって流体塊が上下方向に輸送され、そのため流軸方向流速の平面分布が周期的に歪んだ結果現われたものであると考えられる⁽¹²⁾。そこで、このことをさらに確かめるために、カラー・スリット法³⁾を水素気泡法と組み合わせて流れの三次元的な構造を調べてみた。この方法は、Fig. 3 に示すように、水路側方よりスライド・プロジェクターを使った 5 mm 程度の幅の水平スリット光を互いに色を違わせて層状に重ねて当て、水素気泡の上下方向の動きを気泡からの散乱光の色の違いによって把握しようとするものである。このような色違いの多層のスリット光は、スライド・プロジェクターを使用する場合、細い帯状の色付きセロハン紙を図のようにスライドにマウントすることにより簡単に作り出せる。スリット光の色順序は、ここでは上から順に紫、赤、緑の順になるようにした。また、水素気泡発生用のタングステン線は、水面下 5 mm の位置に図に示すような形で水平に張り、スリット光の赤色の部分がタングステン線に当たるようにスリット光の上下位置をセットした。この可視化の結果、streak の高速部分では、最初赤色だった水素気泡の色が streak の先端部分で緑色に変化し、逆に、streak の低速部分では赤から紫に色に変化することが確認された。したがって、このこ

注 2) 吹送流の場合には、ここで示したように streak 構造がかなり明瞭な形で現われる。これは、通常の壁面乱流の場合と異なって、吹送流の場合には流下方向に流れが加速される効果があり、これによって縦渦が stretch されるためと考えられる。

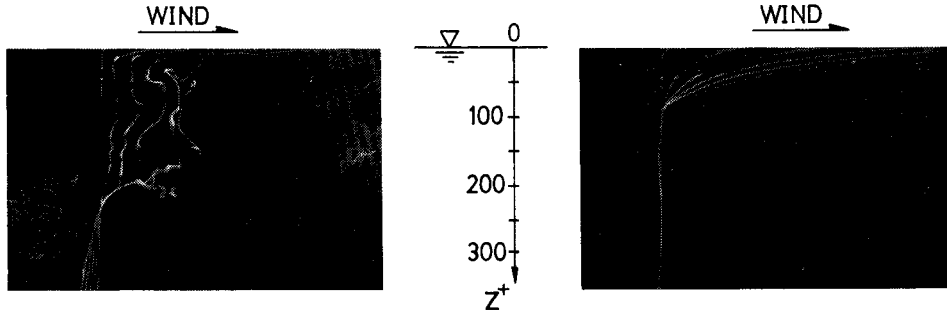


Photo 4 Side views of time lines of hydrogen-bubbles at the position of (a) high speed streak, and (b) low speed streak.

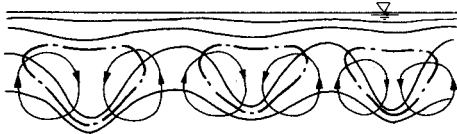


Fig. 4 Schematic diagram of contour lines of stream-wise velocity skewed by the longitudinal vortices. The dash-dash lines indicate the location of inflection points.

とから streak の高速部分では流体が沈み込み、逆に低速部分では湧き上がっているということがわかる。

同様なことは、鉛直方向にタングステン線を張って水路側面から撮影した写真から得られるタイムラインのパターンからも確認された。Photo 4 (a), (b) がその例で、(a) が streak の高速部分に (b) が低速部分に対応している。これから、やはり streak の高速部分では水表面付近から流体塊が沈み込んでおり低速部分では逆に下方より湧き上がっている様子がわかる。

5. 三次元的渦構造の生成モデル

Photo 3 の一連の断面写真に示されているように、遷移領域内では乱流域に近づくにつれて、縦渦から三次元的な渦構造が発達してくる。ここでは、その発達過程を説明し得るモデルを考える。

Fig. 4 は、Photo 2~4 より推定される流軸方向流速の断面分布と縦渦の関係の模式図である。図中、矢印を付した閉曲線は縦渦に伴う水粒子運動の方向を示しており、実線はこの縦渦によって変形を受けた後の流軸方向流速の等流速線図（上側の線ほど流速が大きい）を表わしている。このような流軸方向流速分布については図中に一点鎖線で示すような位置に変曲点が存在するが、このような変曲点はもともと微小攪乱に対して不安定な点であり、ここから渦管が発生すると考えると、それは平均流速場のもつシア効果によって stretch され、その結果 Fig. 5 に示すようなヘアピン渦状の渦構造に発達していくと考えられる。Photo 5 は水素気泡法による水路側面からの可視化写真で、Fig. 5 で示すようなヘアピン

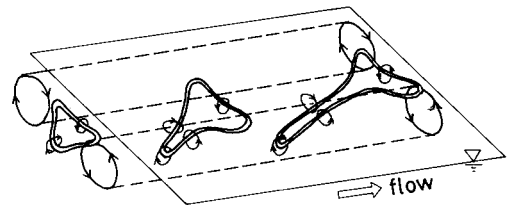


Fig. 5 The evolution of vortex tube generated by the existence of the inflection points shown in Fig. 4.

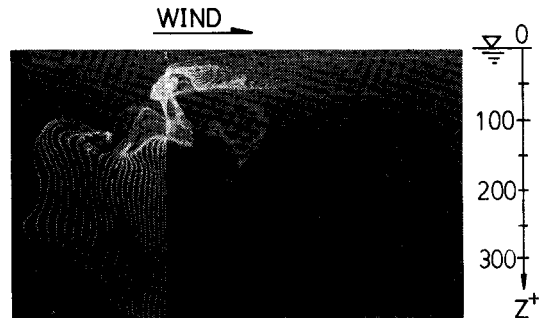


Photo 5 Side view of time lines deformed by the a 'hair-pin' vortex.

渦によってタイムラインが変形を受けたと考えられるものの一例である。これには、水面近くと逆流域部分に渦管の断面とみられるタイムラインのパターンが現われている。これは Fig. 5 で示す渦管をそのほぼ中央で切ったときの断面に対応するものと考えられる。

6. 乱流境界層中の渦構造

著者らは先に⁴⁾、貯水池などでの温度躍層の侵食機構に吹送流中の乱れに内在する組織的な大規模渦が直接関与することを明らかにしている。Photo 6 (a), (b) は、そこで得られた乱流境界層内での組織的渦構造の存在を示す水路側面からの可視化写真である。この場合には、四塩化炭素とトルエンの混合液を密度調整したものを注射器により粉霧状に注入する液体トレーサー法を可視化方法として用いている。Photo 6 (a) には表面せん断層

内に組織的な渦構造が存在することが示されているが、この渦は間欠的に (b) に示されているような形で下方に侵入する。

このような組織的な渦構造の実態とその形成過程が次に問題となるが、これには遷移領域においてみられたも

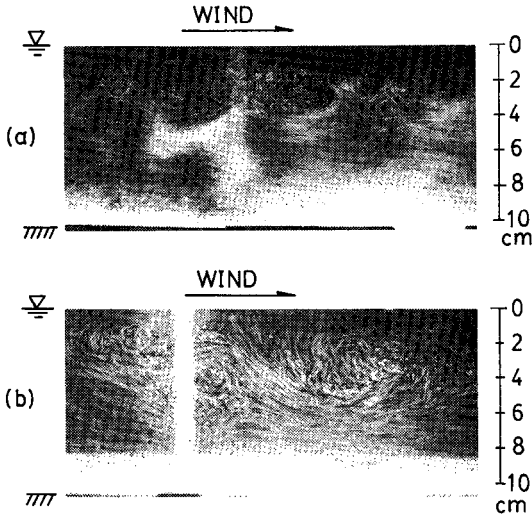


Photo 6 (a) Large scale organized eddies developed in the turbulent boundary layer near the water surface.
(b) Intermittent downward motion of the eddies.

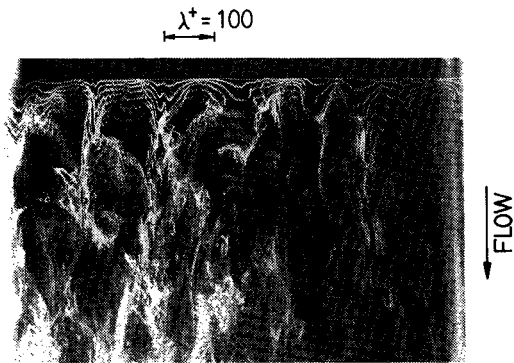


Photo 7 Streak structure at the turbulent region visualized by hydrogen-bubble method ($x=2.5$ m).

のと同様の streak 構造やそれに伴う縦渦によって誘起されるヘアピン渦状の三次元的渦構造との関連性が予想される。そこで、そのような構造が乱流境界層中にも存在するかどうかを可視化によって調べてみた。

Photo 7 は、遷移領域で行われた Photo 2 (a) と同様の可視化を乱流境界層に対して行ったものである。これをみると、乱れ成分によって多少不明瞭ではあるが、やはり streak 構造が存在することがわかる。この場合の streak 間隔は $\lambda^+ = 100 \sim 150$ 程度で、これは壁面乱流境界層に対して Kline ら⁶⁾によって得られた値 $\lambda^+ \approx 100$ とオーダー的にはほぼ同じ値になっている。

Photo 8 は、乱流境界層中に色素を注入し、水路側面より撮影した可視化写真である。これより、乱流境界層の外縁が大きく波打っていることがわかるが、これは、境界層厚程度のスケールの大規模な渦構造によるものと考えられる。そこで、このような構造に対して、スリット光を Fig. 2 の (a) あるいは (b) のように当てて、境界層の断面写真を撮ったものがそれぞれ、Photo 9 の (a) と (b) である。これをみると、Photo 9 (a) には、Photo 3 (e) に示されたものと類似の数個の渦対がみえており、一方 Photo 9 (b) では舌状の構造がみえる (図中の矢印)。これらの可視化写真は、壁面乱流境界層に対して Head ら⁷⁾が示したものと類似のヘアピン渦状の渦構造の断面を示したものであると考えられる。

これらのことから、Photo 6 にみられる組織的渦構造

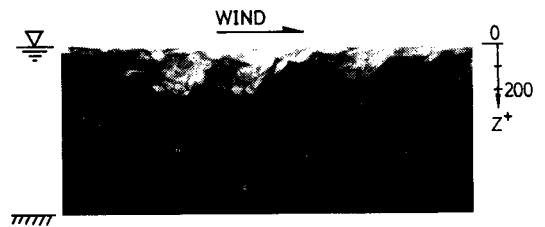


Photo 8 Side view of the turbulent boundary layer visualized by dye-injection method. A 'billow' can be shown at the outer edge of the layer.



Photo 9 (a) Cross sectional view at the turbulent region visualized with a light plane inclined 45° upstream as shown in Fig. 2 (a) ($x=2.3$ m).

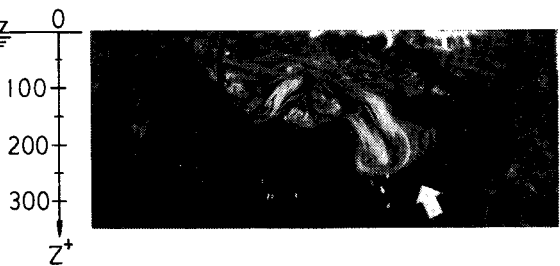


Photo 9 (b) Tongue-like structure at the same region visualized with a light plane inclined 45° downstream as shown in Fig. 2 (b) ($x=2.3$ m).

は、ヘアピン渦状の三次的な渦構造の側面からの断面であると考えられる。また上述のことと乱流境界層内の平均流速分布が対数則に従うこと⁴⁾などを考え併せると、(風波の発生を抑えた場合の)吹送流の乱流境界層は、通常の壁面乱流境界層と類似の乱流構造を有しているものと考えられる。

7. おわりに

本論文では、風波の発生を抑えて条件を簡単にした場合の吹送流の組織的な渦構造を、いくつかの流れの可視化手法を用いて調べた。以下に、本論文で得られた主な結論を列挙する。

(1) 層流から乱流への遷移領域には、streak 構造が明瞭な形で存在する。

(2) この streak 構造は、水表面付近に存在する縦渦によって形成されたものである。

(3) 遷移領域内では、乱流域に近づくにつれて三次元的な渦構造が発達してくるが、ここではその発達過程を説明し得るモデルを示した。

(4) 乱流境界層では、通常の壁面乱流境界層にみられるものと同様な streak 構造やヘアピン渦構造が存在

する。

参 考 文 献

- 1) Keulegan, G. H. : Wind tides in small closed channels, J. Res. Nat. Bur. Stand., Vol. 46, pp. 358 ~ 381, 1951.
- 2) Baines, W. D. and Knapp, D. J. : Wind driven water currents, J. Hyd. Div., A. S. C. E., Vol. 91, pp. 205 ~ 221, 1965.
- 3) Wu, J. : Wind-induced drift currents, J. Fluid Mech., Vol. 68, pp. 49 ~ 70, 1975.
- 4) 日野幹雄・瀬岡和夫・須見徹太郎：吹送流型成層密度流の乱流構造と界面変動特性について，第 28 回水理講演会論文集，pp. 239 ~ 244, 1984.
- 5) 鮎川恭三：カラーズリット法を用いた可視化による管内乱れ構造の解析，流れの可視化，Vol. 2, No. 4, pp. 38 ~ 43, 1982.
- 6) Kline, S. J., Reynolds, W. C., Schraub, F. A. and Rundstadler, P. W. : The structure of turbulent boundary layers, J. Fluid Mech., Vol. 30, pp. 741 ~ 773, 1967.
- 7) Head, M. R. and Bandyopadhyay, P. : New aspects turbulent boundary-layer structure, J. Fluid Mech., Vol. 107, pp. 297 ~ 338, 1981.

(1984. 7. 7・受付)