

開水路乱流の可視化と流速計測の同時併用

Combined simultaneous flow visualization / velocity measurement in an openchannel turbulent flow.

徳山 高 専 正 員 大 成 博 文
徳山 高 専 正 員 ○ 佐 賀 孝 徳
山口大学工学部 正 員 斎 藤 隆

1. 概 説

今日、乱流現象内の秩序構造を究明することが大きな話題のひとつとなっている。秩序構造の解明は、乱流現象の本質的理解に留まらず、土砂輸送、密度流界面の機構、洪水流の内部構造、汚濁物の微視的混合機構などをはじめ数多くの水工学上の重要な課題と深く関係している。

秩序運動を実験的に究明する方法として、可視化法とブループロブ計測法の二つがある。両者はともに優れた方法であるが、それぞれの機能比較を行うと長所と短所がほぼ相反してしまう^{1), 2)}。

両者の欠点を補い長所を生かして同時に適用するという優れた方法がHead³⁾やFalco^{4)~6)}などによって本格的に試みられた。これらはいずれも空気流を対象とし、可視化法にはスモークワイヤー法、流速計測には熱線流速計がそれぞれ用いられた。なかでも、Falcoの一連の研究^{4)~6)}には重要な成果が含まれており、pocket moduleが高レイノルズ応力を発生させるという新しい結果が示された。ところがこのような重要解明もどちらかと言えば流速波形の解析に重点を置いて進められており、著者らの判断するかぎり、流速の波形に詳細に対応する可視化の形象は十分に得られていない。

本研究の目的は、より詳細に可視化の形象と流速波形の対応を考察することにある。とくに、高レイノルズ応力を生み出す秩序運動がどのようなものかを見出すことにある。著者らは、開水路流れの壁近くにおいて、可視化と流速計測の同時併用に蛍光染料注入法とレーザー流速計の組合せが適することを前報⁷⁾で明らかにした。本論では、前回が流れ方向成分 u のみについて検討したのに対し、それをさらに二成分(u, v)の波形と可視化の形象の対応にまで発展させて検討を行った。 u, v 成分の検出に、それぞれ熱膜流速計とレーザー流速計が用いられた。その結果、鱗形状、low speed streakの集中、揺動などの諸現象が高レイノルズ応力の発生に寄与することが明らかとなった。

2. 実験装置および実験方法

実験は、長さ10 m、幅60 cm、深さ15 cmの総アクリル製開水路を用いて行われた。水路勾配は1/1000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)、下流端には水位調節用の堰が設けられた。

同時併用実験の概略をFig. 1に示す。流速計測にはレーザー流速計(DISA 55 Xシリーズ、最大出力二ワットのアルゴンレーザー)と熱膜流速計(塩水用ウェッジ型ブループロブ)を使用した。この両流速計を組合わせて用いることには理由があり、(i)低流速である、(ii)壁近くを計測する($y^+ = 25$)、(iii)トレーサーを注入する、(iv)流れ場をできるだけ乱したくない、(v)計測の精度を向上させるなどのためである。

レーザー流速計のフォトマルは前方散乱方式で、信号処理に周波数シフターおよび周波数トラッカーが用いられた。レーザー流速計を用いて v 成分を計測する場合の困難は、壁自身が邪魔をして通常の方法ではビームのクロス点を壁近くにまで移動できないことである。そこで、Fig. 2に示すようにレーザー流速計の光学系を流れ方向に回転させてその速度成分から v 成分を換算することにした。熱膜流速計のブループロブに塩水用を採用した理由は、トレーサーを注入することからフィルムが汚れて応答性を失うことをできるだけ長い時間にわたって防ぐためである。トレーサーの有無で対象とする周波数の波形に変化がないことがあらかじめ確かめられた。また、熱膜流速計の波形はレーザー流速計による同成分の波形と常に比較され、両者にほと

んどの差異がないことが確認された。熱膜流速計の検定にもレーザー流速計が使用された。Fig. 3 に二つの流速計の検出波形の一例を示す。尚、熱膜流速計のプローブの位置をレーザー光線のクロス点より1 mm 下流とした。

可視化法には蛍光染料注入法⁸⁾(フルオレセインナトリウム、比重1.01)が採用された。この方法の利点は、スリット光を当てると文字通り蛍光することにより、わずかな光量でも比較的明るい可視化の形象が得られることにある。また、水溶液が比較的透過性に優れるためにレーザー光線が通過しやすく、そのことがレーザー流速計による計測に適することと繋っている。しかし、同時にトレーサーがビームのクロス点を通過する場合があっても可能な限り波形が遮断されたり、ノイズが侵入したりしないように、計測時のレーザーの出力を最大限の二ワットとした。スリット光源は側方から、厚さ約5 mm、幅15 cm で照射された。

流速計測点は、 $y^+ = 25$ の高さを選んだ。(ここに、 $y^+ = \frac{u_* y}{\nu}$ 、 u_* : 摩擦速度、 ν : 動粘性係数、 y : 壁からの高さ)トレーサーの大部分はこのビームの下を通過するが、low speed streak が上昇してこのビーム高さを乗り越える挙動も時折り観察された。

撮影は、水路上部に設定したビデオカメラによった。現象が比較的遅いためにこの映像でも十分追跡が可能となった。また、画像内に最小単位1/100秒のストップウォッチが組み込まれた。撮影と同時に波形もデータレコーダーに集録された。可視化の形象と流速波形の対応開始は、レーザー光線を瞬間的に遮断して出力を停止させその時の画像の時刻を読むことによって明確にされた。その際、レーザー光の遮断によって流速波形の出力が遅れないことをあらかじめ確かめた。

3. 同時併用の結果

3.1 流れ場の基本的な特性

Fig. 4 に平均流速分布を示す。分布は対数則が成立ち、これより摩擦速度 u_* を求めた。二成分の流速波形の一例を Fig. 5 に示す。これらが本実験条件下でトレーサーを流した場合とそうでない場合でほとんど変わらないことを確認した。また、各成分の乱れ強度を求め、これらが開水路流れや乱流境界層での従来の結果^{9), 10)} とほぼ一致した。

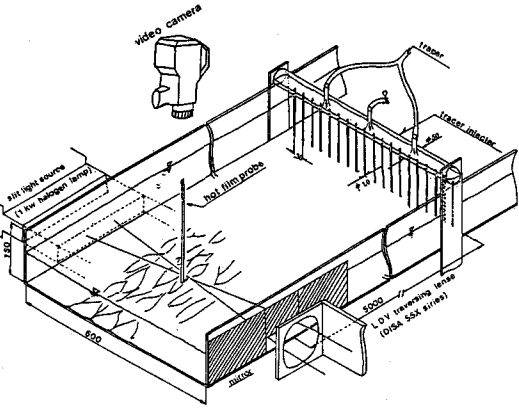


Fig. 1 Experimental apparatus (dimension in mm)

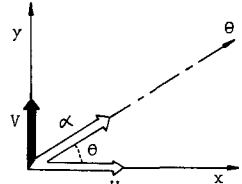


Fig. 2 Transformation of velocity vector

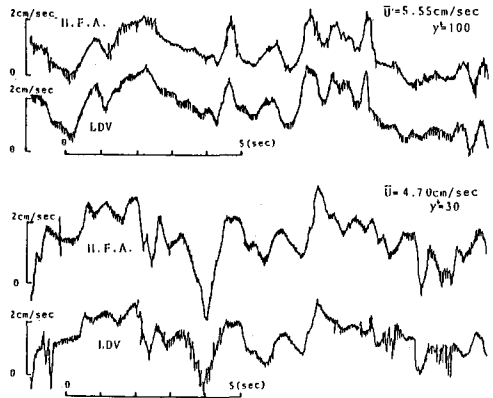


Fig. 3 Simultaneous u-velocity signal of LDV and hot film anemometer (H.F.A.)

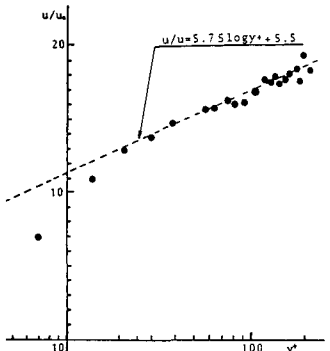


Fig. 4 Mean velocity profiles

3.2 鱗形状と low speed streak (LSS)

壁近傍の流れの秩序運動の反映結果としての鱗形状や low speed streak の挙動は、壁近くの乱流構造を詳細に知るうえで非常に重要な位置を占めている。

鱗形状とは、粘性底層外縁付近からバッファー層にかけて形成される可視化の形象であり、その三次元的な構造は、規模の異なる縦渦の挙動によって形成される¹¹⁾。一方、low speed streak は、粘性底層内で流れ方向に細長く筋状を呈する低速の領域を示すものであり¹²⁾、これが粘性底層外端から lift-up すると bursting 現象¹³⁾ が開始される。lift-up 後は、oscillation と続いて break-up ($y^+ = 10 \sim 30$ ¹⁴⁾) で終了する。

本実験では、これらの挙動に注目することにした。Fig.5 Simultaneous velocity signals of u, v

3.3 可視化の形象と流速波形の対応

Falco の表示方法⁶⁾に従って、Fig. 6 に二成分 (u, v) の流速波形とその加速度成分、レイノルズ応力、そして波形と対応するそれぞれの可視化写真を示す。

(1) lifted low speed streak の通過

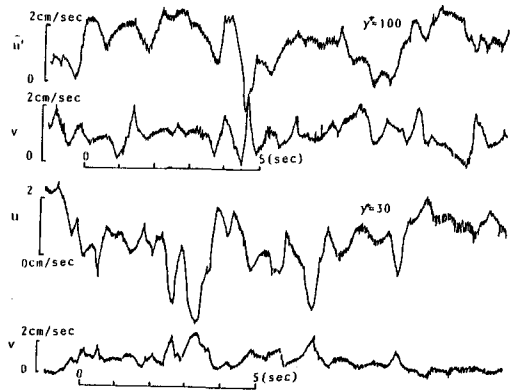
画面内にはほぼ一定の間隔で細長く流れ方向に延びた部分が low speed streak¹³⁾ (LSS) である。粘性底層内の LSS は流れ方向にかなり安定した筋状の領域を形成するが、これが一端 lift-up するとその後はそれ以前とは質的に異なる不安定な挙動を示す。No ①～③は、その lift-up した LSS がビームのクロス点付近を通過する場合である。①では、LSS がわずかに右下方向に移動しながらクロス点に到達している。この時の u 成分は減少、 v 成分は微増加、そして $-u'v'$ もわずかに大きい値を示す。②では LSS が右下方向に移動したことにより、 u 成分の増加が始まる。そして③では新たな LSS が左上方からクロス点に接近し、 u, v は①の時と同様のパターンを示すが、 $-u'v'$ はより大きい値を示す。粘性底層から急上昇した LSS が比較的高いレイノルズ応力の発生に寄与している。

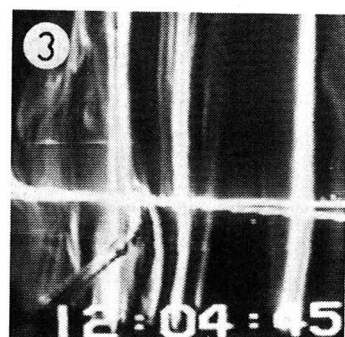
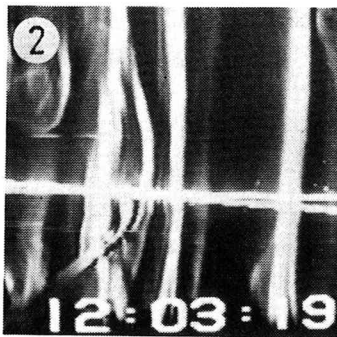
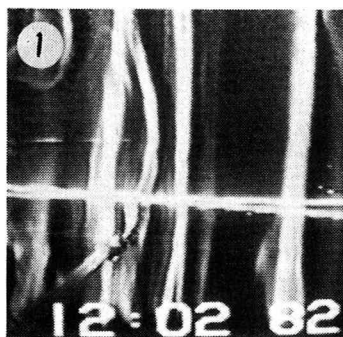
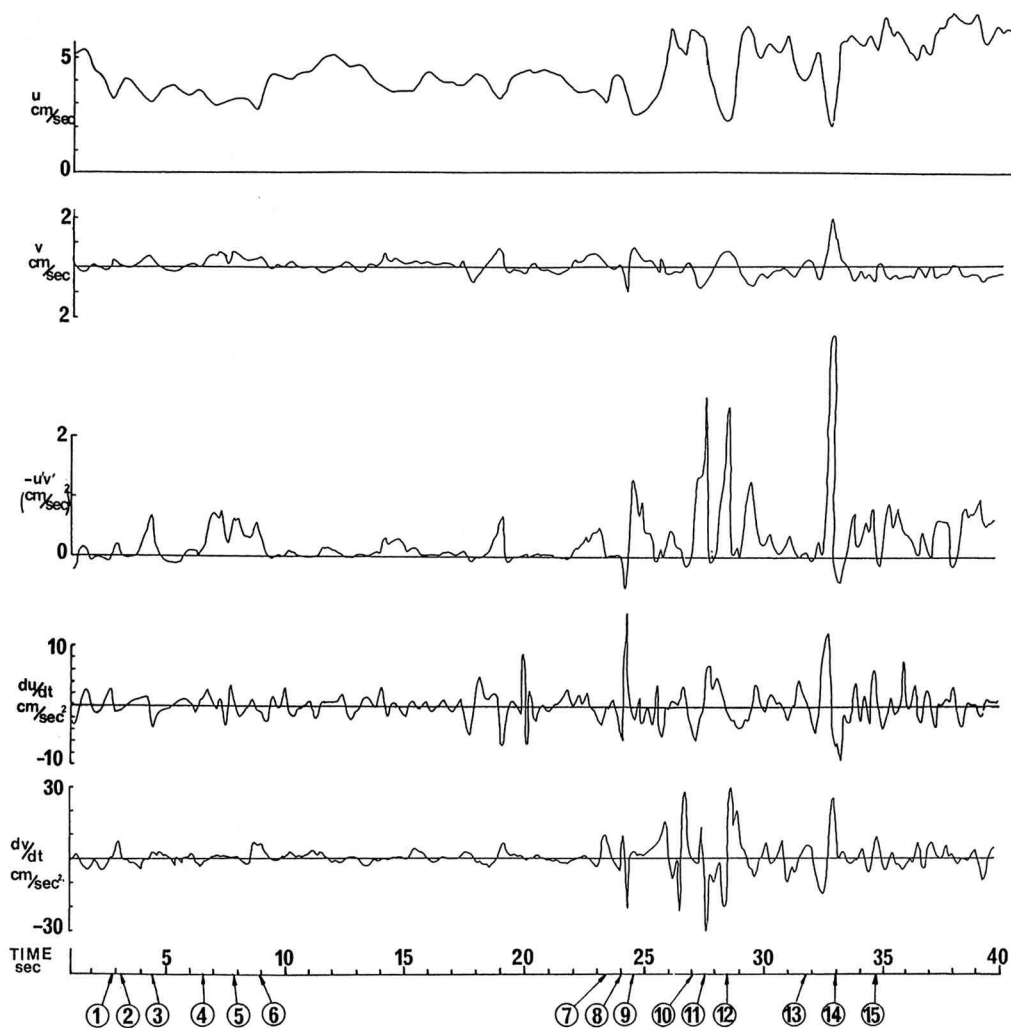
(2) low speed streak の横方向集中

LSS はすぐ横隣りの高速流体との相互作用をもち、それが LSS の横方向間隔が常に変動する原因となる¹⁴⁾。No ④～⑥は、二つの LSS が横の高速流体の侵入によって横方向に集中させられた場合である。二つの LSS は互いに接近し合い $yz = 100$ ¹⁵⁾ よりもかなり小さい横幅をもつ。そしてこの集中させられた部分では細かい LSS が何本も形成され、LSS 対¹⁴⁾ が出現している。この集中させられた LSS 対が通過すると $-u'v'$ の急増大がいくつも連続して発生する。 $-u'v'$ のピーク値は③の場合と同程度である。この LSS の集中部分は全体的に壁から離れて上昇する挙動が顕著であるが¹⁴⁾、 u が減少、 v が増加という波形からもそれが裏づけられる。LSS の横方向集中は高レイノルズ応力を連続して発生させる。

(3) LSS の回転

LSS は縦渦の一部を表わす挙動¹⁴⁾ であり、平面視したビデオの映像の映像からも目視される。No ⑧は、グループのすぐ右上部の LSS が右から左へと流れ方向を軸として反時計回りに回転しはじめた時である。⑨はその LSS の回転がクロス点に到達した時であり、その回転によって急激な下降流 ($v < 0$) が形成される。このときの u 成分は減少傾向にあり、この u, v の挙動によって瞬間的な負のレイノルズ応力が発生する。この負のレイノルズ応力の発生は従来から指摘¹⁶⁾ されているが、その発生の機構は全く不明とされている。LSS の回転によって急激な下降流が真上からクロス点の直上部に形成されると、流れ方向には瞬間的によどみが生じ u は減少を続ける。この結果として負のレイノルズ応力が発生すると考えられる。そして、この負のレイノルズ応力発生直後にすぐ LSS が通過し、正の高レイノルズ応力の発生へと繋っている。局所的





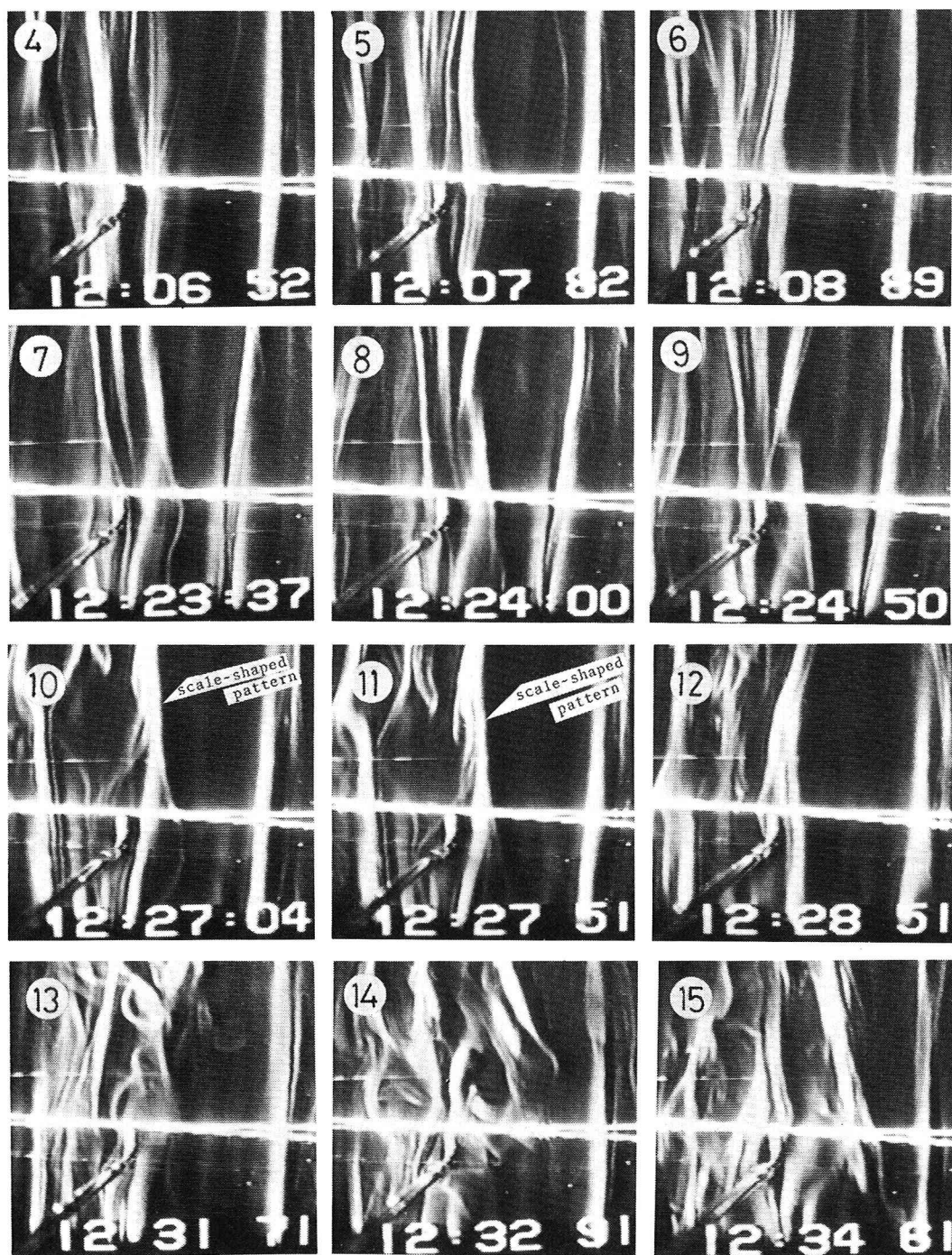


Fig.6 Simultaneous velocity signals of $u, v, -\bar{u}'v', du/dt, dv/dt$,
and visual data $\bar{U}=5.23\text{cm}, U_*=0.34\text{cm}, H=6.80\text{cm}, Re=3610, Re=260$

な下降流の次に上昇流が形成させたと考えられるが、これは sweep のあとに lift-up が起るという Offen¹⁷⁾の観察結果とも一致する。

(4) 鱗形状の発生に伴う巻き込み渦

鱗形状の発生は高速流体が壁面に到達することによって引起こされるが、その後は周囲の低速の流体が鱗上に覆いかぶさるようにはいり込み、その過程で巻き込み渦と称される縦渦が形成される^{9), 14)}。すなわち、鱗形状の発生は sweep 的な挙動によって促され、巻き込み渦は LSS が高速部に瞬間的に侵入して行く挙動と考えられる。No ⑪、⑫はともに高レイノルズ応力を発生するが、その u , v のパターンは全く逆である。No ⑩ではグループ左上部に鱗形状が発生している。これが流下し⑪でクロス点を通過するが、その際に $u > 0$ 、 $v < 0$ のパターンで高レイノルズ応力を発生させている。その後⑫では LSS が高速部に侵入し、今度は逆に $u < 0$ 、 $v > 0$ のパターンで高レイノルズ応力を発生させる。この高速部へ LSS を侵入させる挙動が巻き込み渦によって形成されている。

(5) 鱗形状の相互作用

No ⑬には乱れたトレーサーの塊が高速で通過する様子が示されている。この時の u , v はともに 0 に近い値を示し、 $-u'v'$ も当然 0 に近い。これは、雲のようなトレーサーの塊を形成する流体運動が上流に存在し、それが平均流にのって流下したものである。壁近くにしかないトレーサーがより上部にまで巻上げられ、塊として流下することは、その上流に形成された流体運動が水深方向に激しい混合を繰り返す挙動であることを推測させる。その激しい流体運動は、壁付近に鱗形状の集団を形成させる運動であった。No ⑭はその集団がクロス点を通過する時を示している。横に並ぶ二つの鱗形状が相互に作用して側辺部の streak を急激に上昇させている。(側方からスリット光を当てるとより白い部分が壁から離れたより高い部分となる。) この時に高レイノルズ応力が $u < 0$ 、 $v > 0$ のパターンで発生する。この $-u'v'$ 値が本観察結果では最も大きい値を示した。鱗形状通過後も激しく乱れた部分が続き、断続的に高レイノルズ応力が発生する。その一例を No ⑮に示す。この⑭～⑮の可視化の形象は、乱流斑点の前部から中央部にかけての壁面付近の挙動¹⁸⁾とよく類似しているように思われる。

4. 結 語

螢光染料注入法で壁近くの流れを可視化し、同時に熱膜流速計およびレーザー流速計を用いて二成分の流速計測を行った。可視化の形象と流速波形の対応を詳細に検討し、高レイノルズ応力を発生させる可視化の形象を抽出した。その結果、五種類の高レイノルズ応力発生パターンが判明した。おそらく、残りの本実験データを詳しく検討してゆけば、パターンの分類数も増えてゆくものと思われる。また、本実験の流速波形は $y^+ = 25$ の場合のみであり、今後計測点の高さを変えて検討を重ねてゆくつもりである。

最後に、本研究に協力して下さった山本恭子(徳山高専機械電気工学科助手)さんに謝意を表します。また本研究の一部は文部省科研費奨励研究(A)の援助を得た。重ねて謝意を表します。

参考文献

- 1) Kline : AFOSR/Lehigh Workshop, 1978.
- 2) 佐藤 浩 : 中津川研究成果報告集, 1981.
- 3) Head 他 : J. F. M., 107, 1981.
- 4) Falco : AIAA-80-1356, 1980.
- 5) Falco : AFOSR/Lehigh Workshop, 1978.
- 6) Falco : turbulence in liquids, 1981.
- 7) 大成博文他 : 水理講演会論文集, 26, 1982.
- 8) 大成博文他 : 水理講演会論文集, 27, 1983.
- 9) 中川博次他 : 土木学会論文報告集, 261, 1977.
- 10) Laufer : NACA, TR-1174, 1954.
- 11) 大成博文他 : 水理講演会論文集, 28, 1984.
- 12) Kline 他 : J. F. M., 30, 1967.
- 13) Kim 他 : J. F. M., 50, 1971.
- 14) 大成博文他 : 土木学会論文報告集(投稿中).
- 15) Cantwell : A. R. of J. F. M., 13, 1981.
- 16) Lu 他 : J. F. M., 60, 1973.
- 17) Offen 他 : J. F. M., 62, 1974.
- 18) 大成博文他 : 流れの可視化, 3, 10, 1983.