

開水路流れの壁面領域内乱流構造の空間的組織性

Coherent structure of the wall region in an openchannel 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

この20年、壁乱流 (wall turbulence) 内の組織構造 (coherent structure) に関する研究が盛んに行なわれている。最近、それらの包括的報告が Cantwell¹⁾によってなされているが、それは、二つの Work shop (リーハイ大学1978年²⁾、ミシガン州大1979年³⁾) の結果を踏まえたものである。これらは、今日の乱流研究の第一線での集約と言え、その到達点と課題の提示が余すところなく詳細に行なわれている。

さて、開水路乱流は、従来から、せん断乱流を基本形式とした「多重構造的性」を有する流れとされている。この多重構造的性の指摘は、組織構造の存在を示唆するものであったと言えるが、最も代表的には水深オーダーの二次流れの構造がかなり前から究明されてきている。この二次流れを形成する乱流構造は、いわゆる「large scale motion」に相当し、最近ではそれらの固有の構造のみならず、壁面領域 (wall layer) の乱流構造との相互作用プロセスのあり方をめぐってかなりの議論が行なわれている。

壁面領域内の乱流構造を最も支配する現象は、bursting現象とstreakの挙動である。前者は、乱れの発生機構、そして輸送過程を規定する重要な現象とされ、後者は粘性底層内で最も顕著に出現し、その不安定性が前者を形成させる引き金になるという関係を有する。しかも、これらは相互作用過程として存在し、前述のように、外層内の乱流構造とのさらに大規模な相互作用過程を有する。これらは、かなり高次の複雑性を体内化した乱流構造であり、今なお、いくつもの重要な未解明の課題を残している。なかでも重要な課題のひとつが、その三次元構造を明らかにすることである。その際、横断方向構造の解明が重要な役割を果たす。

すでに、著者らはこの点に注目しながら、AMD法と呼ばれる一種の混合トレーサーを用いて、bursting現象の解明をいくつか試みてきている^{4), 5), 6)}。本論は、その延長線上のものであり、本課題解明に有効な手法と思われる二つの手法 (「比較可視化」、^{4), 5), 6)}「可視化と流速計測の同時併用」) の適用結果の一部を示すものである。また、AMD法の妥当性に関していくつかの疑問が示されていることから、その手法自身の検討結果について若干の整理を行う。この整理は、単なる手法の検証に留らず、bursting現象の内部構造と深く結びつけて行なわれることが必要である。本論での二つの手法の適用結果は、その検証にも有効であり、二重の意味において考察される必要がある。Fig. 1 に装置の概略を示す。方法の詳細は文献4)にあり、省略する。

2. 壁面領域内乱流構造の比較可視化

2.1 比較可視化の方法

壁面領域は、粘性底層、バッファー層、対数領域の一部という三様の流れから構成され、それぞれが固有の三次元性と非定常性を有し、さらにそれらの間で相互輸送過程を維持しているという極めて複雑な乱流構造を有する流れ場である。しかも、都合が悪いことにこれら三様の流れが壁近くの極めて薄い層内に存在していることから、通常の流速計測法の適用がなかなか難しい。そこで可視化法の適用が考えられるが、これもまた通常の方法がなかなか通用しそうにない。なぜ

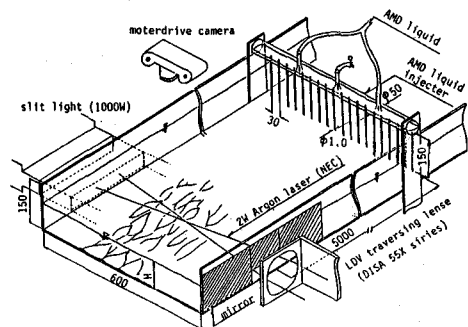


Fig.1 Water channel schematic

なら、大量な乱れエネルギーの発生とその急激な輸送過程がいつも簡単に可視化の情報を拡散させてしまうからである。「可視化の物理的有効性は認められても、まったく相容れない結果が生ずる¹⁾」という事態も起り得る。対象とする流れに対して最適の可視化法が存在しない場合には、同一流れ条件下でいくつかの可視化法を適用し、それぞれの結果を重畳化させながら比較検討し、総合化する方法が必要となる。著者らは、この方法を「比較可視化」と呼ぶが、これによって個々の可視化法の利点・欠点が比較され、それらの適用限界も明らかになることから、結果的により信頼されるべき可視化の情報へと導かれ得る。(文献5)、7)参照)

2.2 比較可視化の結果

さて、比較可視化の一例をFig.2に示す。三者は、AMD法、蛍光染料法、および水素気泡膜法である。最も注目すべき組織構造は、鱗形状とstreak lineの二つであり、前者は(a)と(b)に顕著であり、後者は(b)と(c)に顕著に認められる。(a)についてもstreak lineの存在がすでに観察されているが、(b)の提示によって三者が共通の乱流構造を反映しながら微妙に違う部分を有していることがわかる。鱗形状は、高速流体塊(sweep)の侵入と壁面への衝突によって形成され、bursting現象の第一過程(lift up)の引き金となる。streak lineは低速部に形成され、lift-up、oscillation、breakupを反映した挙動を示す。鱗形状およびstreak lineの横幅は、ともに100 wall unit (ν/u_* , u_* : 摩擦速度、 ν : 動粘性係数)の平均値を持つ。横断方向に通したレーザー光線の間隔は6.0 cmであり、上流側が $y^+ = 10$ 、下流側が $y^+ = 30$ の高さにそれぞれ設定されている。このレーザー光線(2 W Ar レーザー、NEC製)に注目すると、トレーサーが交差している点で一際光彩を放っていることがわかる。この鮮点をたどると、鱗形状とそれと同じ高さに相当するstreak lineの大部分が、粘性底層外端($y^+ = 7 \sim 10$)からバッファー層外端($y^+ = 30$)までにはば存在していることがわかる。(レーザー光線の太さは $6 \nu/u_*$ に相当する。)

次に(c)の場合をさらに深く検討する。もともと、この方法はAMD法に類似する方法として採用されたものであるが、陰極線に直流電圧を印加することによって水素気泡を面として連続的に発生させることによって実現される。従来良く用いられているタイムライン法と比較して、可視化の情報をより豊富に得ることができる点に特徴があり、流下とともにstreakが変形・集中してゆく様子が明瞭に観察できる。

Fig. 3は、水素気泡膜の発生位置を変えて、そのstreakの挙動を比較したものである。(y⁺ = 20の場合は、Fig. 2(c)を参照。)Klineも指摘しているように、streakの挙動は、粘性底層、バッファー層、対数領域内のそれぞれにおいてかなり異なる。その識別の手助けとなり得るものが二本のレーザー光線であり、Fig. 2の場合と同様の高さに設定されている。(a)は、wireを粘性底層内に没入させた場合であり、マーカーは低速部に顕著に集中し、対のstreak lineを形成している。このstreak lineは、流れ方向にかなり長く、流下とともにゆっくりと動揺している。streak lineの狭間に相当する高速部では、気泡が底層内に押しつけら

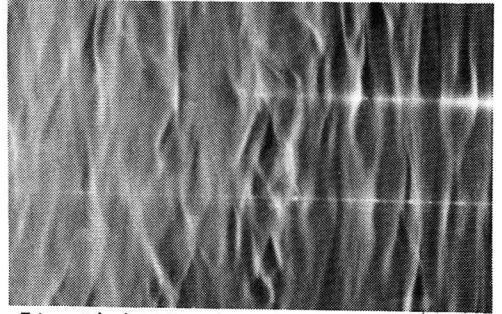


Fig.2(a) Plan view by AMD method

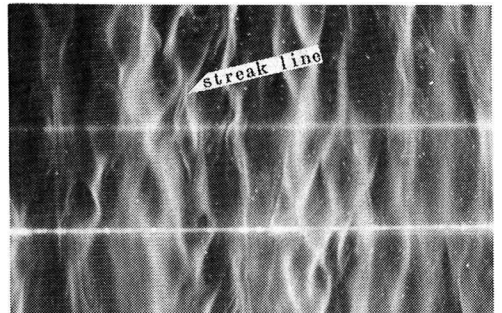


Fig.2(b) by fluorescene dye method

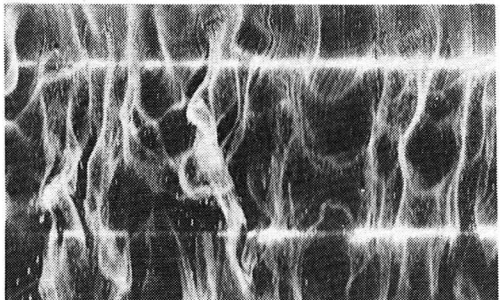
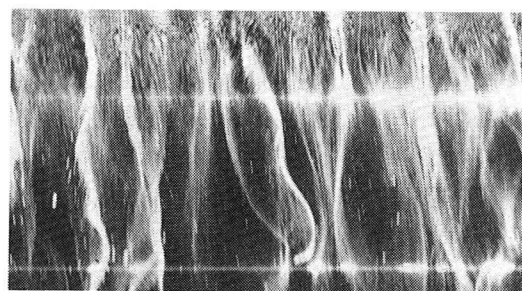
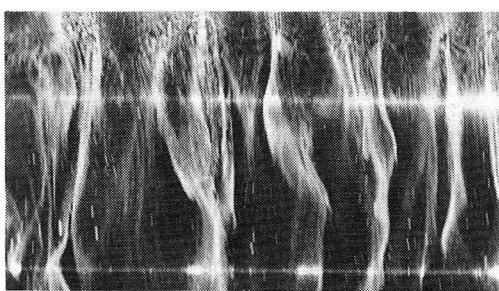


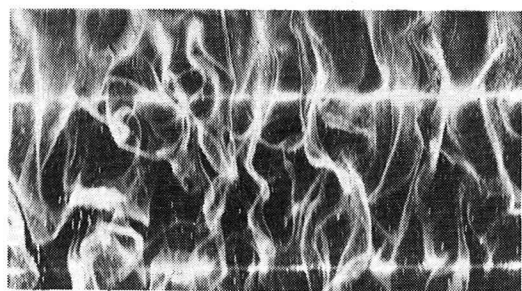
Fig.2(c) by hydrogen bubble method
(Re=4200, H=6.6cm)



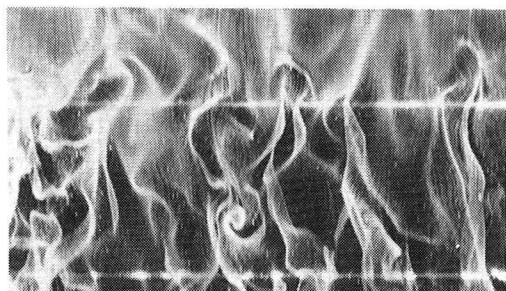
(a) Plan view, wire height $y^+ = 5$



(b) Plan view, wire height $y^+ = 10$



(d) Plan view, wire height $y^+ = 30$



(e) Plan view, wire height $y^+ = 50$

Fig.3 Plan view by hydrogen bubble layer method ($Re=4200, H=6.6cm$)

れたかの挙動を示している。レーザー光線とマーカーの交差点（鮮点）は、ともに低速部のstreak line（以下LSSL）上にあり、下流の $y^+ = 30$ のレーザー光線に対しても同様にLSSL上に鮮点が存在している。これは、LSSLが粘性底層外端からバッファー層内を通して発達していることを示すものであると言えよう。また、対同志の横幅間隔は、平均的に100wall unitの値を示し、対をなす細いstreak lineの間隔は、15～30 wall unitの値をほぼ示している。(b)は、粘性底層外端にwireを置いた場合である。(a)に比べてstreakの左右の揺れが大きくなり、不安定性がやや増加している。鮮点の位置は、LSSL上であり、streakの横幅スケールもほぼ同じである。 $y^+ = 20$ (Fig. 2 (c)) にwireを設置した(c)の場合になるとstreaksの挙動は増々非定常性を示し、複雑な模様を描く、ところが一方でstreaksの集中現象が発生し、streak同志の相互作用過程も複雑となる。また、高速流体塊の挙動の反映も表現されてきて、LSSLとの相互作用の様子も観察可能である。レーザーの鮮点は上流側の方で逆転し、高速部に存在している。しかし、下流側では依然としてLSSL上にある。(d)の場合は、さらにstreakの非定常性が増し、その集中の仕方(c)の場合が流下方向に線として長く集中しているのに対し、放射状に似た集中がおこり、その中心部(streaksの交差した集中度の一番高い部分)で上昇する小水塊が存在しているかのような挙動を示している。鮮点は上流側で高速部の一部のみに有り、下流側でLSSL上に有る。対数領域の(e)の場合となると、組織構造の識別がなかなか難しく、水深方向に軸を持つ渦の存在も認められる。

以上、壁からの高さ方向に可視化面を変えて、とくにstreaksの挙動について簡単な現象論的考察を加えてきた。この種の結果については、¹⁰⁾ klineのものがあがるが、本論のように詳細には触れておらず、今後時空間の変形（発達）過程の系統的な究明が重要となるであろう。

3. 可視化と流速計測の同時併用

3.1 同時併用の目的と方法

可視化と流速計測の関係は、前者が空間的な把握に便利であるのに対し、後者は精度に優れるという、いわば利点と欠点が相反している。組織構造の解明には、両手法の同時併用が重要であり、最近ではこの成功例

として、乱流境界層内で熱線流速計およびスモークワイヤー法を用いて行った Falco の研究がある。著者らは、この手法を確立するうえで、その方法の選択と適用の仕方が重要であると考え。とくに、可視化法では、(1)明確な可視化形状が得られること、(2)形状内に流速計測点が認められ、計測装置が流れを余分に乱さないことが重要であり、一方流速計測側では、トレーサの混入によって波形が歪まないことが必要である。

本方法を採用する目的は、最終的に(i)レイノルズ応力の生成に寄与するスケール運動の構造、(ii)高レイノルズ応力を生成する流れの組織性とその因果関係、の二つを解明することにある。そこで、上記の視点を踏まえつつ、流速計測にレーザー流速計、そして可視化法に蛍光染料法を採用し、その第一段階として流れ方向成分 (u) についてのみ検討を行うことにした。レーザー流速計 (DISA55 X シリーズ、2 W アルゴンレーザー) の最大の利点は、非接触計測が可能である点に求められるが、それに加えて(a)水中でレーザー光線が可視される、(b)周波数シフターを付けることによって低流速計測 (秒速数 cm 程度) が可能となり、それが可視化可能な流速条件と対応する、(c)トレーサを注入してもある程度まで追跡し、追跡しない場合には急激なドロップアウトが生ずる。(つまり、信頼すべき波形かどうかの判断がそう難しくない。ただし、前方散乱方式で 2 W のレーザーを用い、信号出力の低下を防いでいる。)(d)レーザー光にトレーサが交差し鮮点が出現するが、それによって流速計測点とトレーサの相対的位置関係が明確となる。(e)白色スリット光源を照射しても Ar レーザー光は消えない。

さて、もう一方の可視化法についてであるが、レーザー流速計を用いるかぎり、これまでの AMD 法や水素気泡法はあまり適さない。その理由は、AMD 法の場合には、ミルクがレーザー光を遮断し、水素気泡法では、気泡が散乱効果に異常をきたすからである。そこで、透過性の比較的有る蛍光染料をトレーサとして用いる。この蛍光染料法については、すでに鮎川によって試みられている。

3.2 同時併用の結果

(1)同時併用波形の信頼性

まず、同一流れ条件下で、流速計測のみの場合 (CASE-A) とトレーサを流して同時併用した場合 (CASE-B) の両者の平均流速および変動値の比較を行ない、得られた波形の信頼性を検討する。

CASE-A、B の平均流速分布を示したのが Fig. 4 であり、トレーサの有無による違いはほとんど見られない。またこの平均流速分布は、対数則に十分従っている。(Fig. 5) 壁面領域内の乱れ強度についても従来の傾向とはほぼ一致し、両者の違いもあまり見られない。(Fig. 6)

また、Fig. 7 は、CASE-A、B の流速変動値を示したものである。これらには、速度がゆっくりと減少し急に回復するというバースティング現象特有の波形がいくつも見られる。トレーサの有無による変動値の違いも認められない。

従って、本実験条件の範囲内では、トレーサの影響が平均値および変動値に大きく加わっているとは認め難く、トレーサを流し続けた状態での検出波形の信頼度はかなりあるものと思われる。

(2)可視化形状と流速変動波形の対応

条件付検出法によってパターン化される流速変動波形が、乱流現象内の組織構造とどのように対応するか、そしてそれらが先述した

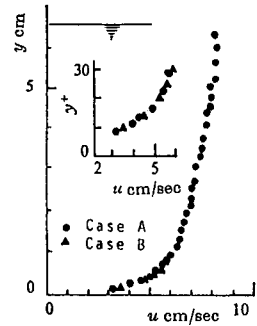


Fig.4 Mean velocity profile

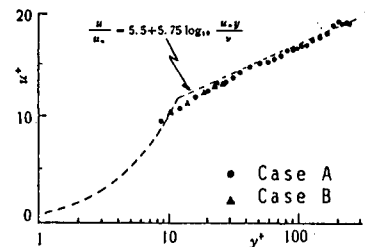


Fig.5 U^+ versus $\log y^+$

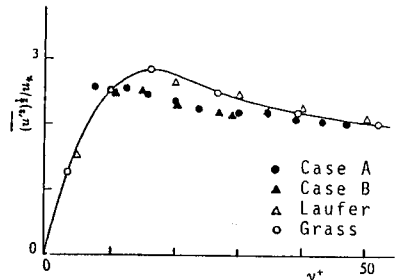


Fig.6 Turbulence intensity

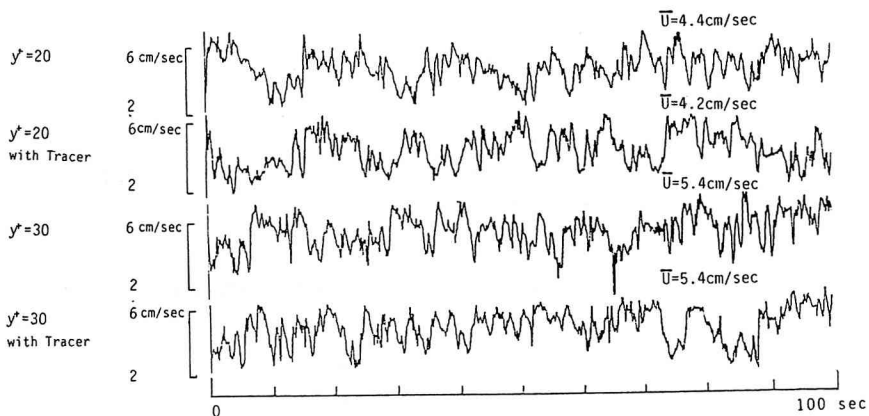


Fig.7 A comparison of velocity signal at $y^*=20, y^*=30$

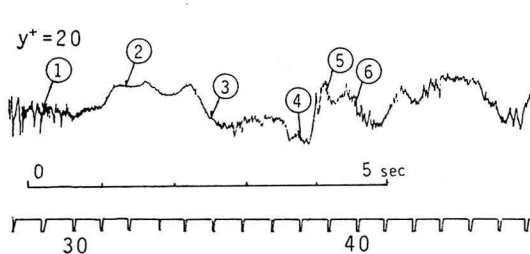


Fig.8(a) Velocity signal at $y^*=20$

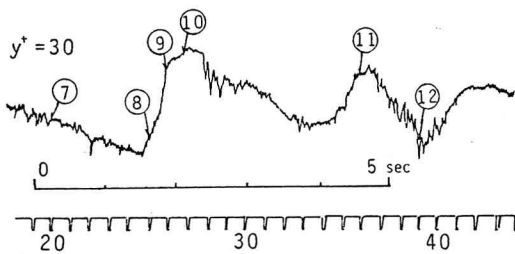


Fig.8(b) Velocity signal at $y^*=30$

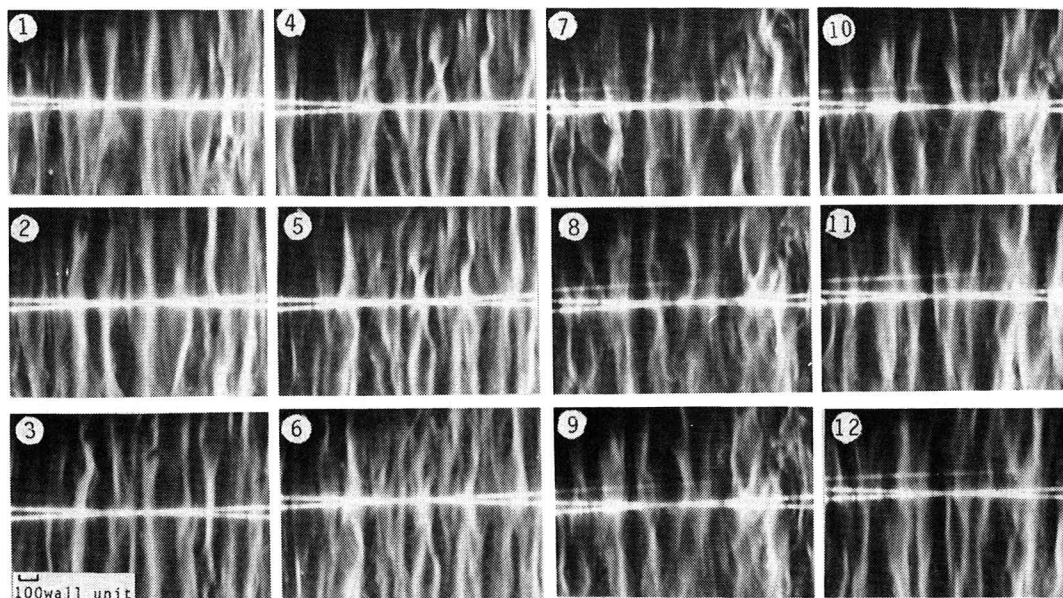


Fig.9 A plan view of flow pattern $U=7.15\text{cm/sec}, u_\tau=0.43\text{cm/sec}$
 $H=6.61\text{cm}$

(i)、(ii)の課題とどう関係するかは、多くの注目を浴びた極めて重要な課題である。著者らは、この対応を評価する際に、(1)詳細な可視化形状を接写によって得、それらの前後左右の相対的な位置関係を考慮すること、(2)高さを設定した計測計測点にどのように可視化の情報が侵入しているのかを考慮することなどが重要と考える。なぜならば、三次元的構造を保有する可視化の情報に対して、本論では一次元の流速成分のみがスライスするという限界を常に有しており、詳細な対応を求めることがもともと厳密には困難であることが予想されるからである。そこで大規模な変動に注目して以下の考察を行う。

さて、流速計測地点を $y^+ = 20$ と30とし、流速データーを連続して記憶する一方でモータードライブカメラ（ニコンF2、毎秒3.8コマ）を用い映像を集録した。Fig. 8は拡大した流速変動データと同時に記録されたシャッター信号を示したものである。このシャッター信号を数えることによってフィルム枚数がすぐになり、簡単に遅れもなく対応がとれる。Fig. 9は、クロス点の可視化写真であり、写真番号がFig. 8の流速変動の各点に示されていて、同一番号が両者の同時併用結果に対応している。

(i)流速計測点 $y^+ = 20$ の場合

No.	フィルム番号	波 形	可 視 化 形 状
①	イー29	ノ イ ズ	左側（フォトマル側）にビームを乗り越えたトレーサが有りノイズとなる。
②	イー32	や や 高 速	鱗形状の中央にビームのクロス点がある。
③	イー35	減 速 開 始	下流にはstreakの末尾、上流には鱗の先端がある。
④	イー38	減 速 終 了	鱗の側辺（streak）上にクロス点がある。上流に典型的鱗（高速部）がある。
⑤	イー39	加 速 頂 点	鱗形状の先端が通加し、すぐ右上にはstreakの上昇が見られる。
⑥	イー40	減 速 開 始	streakが交差している。このstreakはイー39の段階ですでに形成されている。

(ii)流速計測点 $y^+ = 30$ の場合

⑦	ロー20	ゆっくり減速	幅の狭いstreak対上に交差点がある。
⑧	ロー25	加 速 開 始	鱗の先端。streakが交差。上流に大きな鱗形状が形成され始めている。
⑨	ロー26	急 激 な 加 速	鱗の先端が通過、鱗の前半分が急激な加速域である。sweepの到達。
⑩	ロー27	加 速 ピーク	鱗形状の中心にクロス点がある。
⑪	ロー36	ゆっくり減速	streak上に交差点がある。
⑫	ロー39	減速から加速	鱗の末尾に交差点がある。鱗が通過した後である。

これらの比較可視化、同時併用の結果についてはさらに詳細は検討が必要である。しかし、この範囲でもAMD法の妥当性を示唆する有力な結果ともなり得るであろう。AMD液の比重は与えられた流速条件によって決められるべきものであるが、低流速の場合にはその比重が1.007を用いてやはり鱗形状が出現している。隠し絵のようなstreak lineの存在、立体的な組織構造、鱗の相互作用・歴史サイクル、巻き込み渦の形成など重要な特性の存在が得られている。その妥当性は、これらを詳しく検討した後に最終的に確かめられることであり、講演当日にはさらに整理した結果を報告するつもりである。

4. 結 論

壁面領域内乱流構造の組織性を解明するうえで、比較可視化と同時併用の二つの手法が有効であることが明らかとなった。前者については時空間的変動プロセスについて、後者についてはサンプル数を増やして検討を深めることが重要である。

本研究に対して、宇民正、上野鉄男（京大防災研）の両氏から貴重な教示を、実験には多田・福永・遠藤黒岩（徳山高専）の四君の協力を得た。また、科研費奨励研究(A)の援助を受けた。ともに深く謝意を表する。

参考文献

- 1) Cantwell; A.R. of J.F.M, 13, 1981.
- 2) Smith他; AFOSR/Lehigh Workshop, 1978.
- 3) Kline他; AFOSR/MSU Workshop, 1979.
- 4)~7) 大成他; 水理講演会、第10回可視化シンポ、第14回乱流シンポ（1982）、流れの可視化（投稿中）
- 8) 鮎川他; 流れの可視化、2-6, 1982.
- 9) Offen他; Stanford Report MD-31, 1973.
- 10) Kline他; J. Fluid Mech. 30, 1967.
- 11) Falco; AIAA-80-1356, 1980.