

壁乱流の縦断面せん断構造

大成博文¹・渡辺勝利²・佐賀孝徳³・斎藤隆⁴・波多野慎⁵

¹正会員 工博 徳山工業高等専門学校教授 土木建築工学科 (〒745-8585 山口県徳山市久米高城 3538)

²正会員 工博 徳山工業高等専門学校助手 土木建築工学科 (〒745-8585 山口県徳山市久米高城 3538)

³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 (〒745-8585 山口県徳山市久米高城 3538)

⁴フェロー 工博 山口大学名誉教授 (〒755-0091 山口県宇部市上宇部山門 2908-3)

⁵正会員 中電技術コンサルタント(株) (〒734-8510 広島市南区出汐 2丁目 3番 30号)

染料流脈パターンと粒子流跡を同時可視化する方法を用いて、壁乱流の秩序構造とその縦断面せん断構造が究明された。とくに、壁近くの low speed streaks の lift-up (bursting の第 1 過程) 現象、壁から離れた領域における横渦の巻き上げ (roll up) 現象などが、流れ方向および鉛直方向の速度せん断構造特性と重要な関係を有することが明らかにされた。また、その流れ方向および鉛直方向の速度せん断構造は、それぞれ、鉛直方向および流れ方向に、正負の高い速度せん断値が交互に形成され、それらが直交する特徴を有する。さらに、染料流脈パターンの形成が、これらのせん断構造の特徴に密接に関係することが示された。

Key Words: coherent structure, turbulent shear flow, near wall turbulence, flow visualization, particle tracking velocimetry, bursting

1. 緒 論

この30年, Hama¹⁾やKlineら²⁾による先駆的研究を契機として、壁乱流の秩序運動 (coherent motion) に関する研究が精力的になされてきた。それらは、Cantwell³⁾, Blackwelder⁴⁾, Robinson⁵⁾などによって詳しく解説され、秩序運動に関する構造的特徴のフレームワーク化と未解明の課題が徐々に明らかにされつつある。なかでも、このフレームワークにおいて、最も重要な運動は、壁近傍に形成された low speed streaks とその運動に直接関係づけられる bursting 現象である。これらは、壁近くの高せん断層に形成され、3次元性と非定常性が強いことから、いまだその物理的特性において不明な点が少なくない。とくに、後者については、それぞれ微妙に異なる5つの見解⁶⁾があり、その認識の差は今日においてもなお解消されていない。

さて、壁乱流の秩序運動において、「心臓部分に横たわる」⁶⁾とされるのが「渦構造」に関する研究である。壁近くでは、バッファー層および対数領域下部に形成される縦渦成分が顕著であり、これを主要素とする渦構造は、「ヘヤピン渦」、「準縦渦 (quasi-streamwise vortex)」⁶⁾、著者らによっては「壁縦渦」⁷⁾と呼ばれてきた。この渦構造は、上述の bursting 現象と密接に関係し、それが誘起する乱れエネルギー生成過程⁸⁾や局所的圧力場の構造⁹⁾、さらには、その空間的配置特性¹⁰⁾が詳

しく検討された。

また、壁から離れた領域では「横渦 (transverse vortex)」の運動が注目されてきた。この構造は、内層においてはヘヤピン型渦の「頭部」を、外層においては「バルジ」を、それぞれ縦断面可視化した場合に観察される。また、内・外層の横渦構造は、いずれの場合においても、瞬間的にせん断層を局所的に屈曲させ、それがせん断乱流場の不安定性を発生させる要因のひとつと考えられてきた¹¹⁾。

このように壁乱流における内外層の重要な解明がいくつもなされてきているが、それらは部分的解明に留まり、それらの相互関係を十分に解明するまでには至っていない。とくに、流れ方向および鉛直方向の瞬時変動速度分布およびせん断構造と bursting 現象、low speed streaks の傾斜構造、横渦の巻き上げ (roll up) などとの相互関係が、2次元の縦断面 (x-y 平面) の流れ場においてさえ不明な点が少なくない。

そこで本研究では、これらの課題を明らかにすることを目的として、染料流脈パターンと粒子流跡を同時可視化する手法 (Dye streak pattern Particle Tracking Velocimetry¹²⁾, DPTV と略称) を用いて、壁乱流の縦断面構造に関する考察がなされた。同時に、壁乱流における染料流脈パターンの持つ物理的意味についても検討が加えられ、それが速度せん断構造と重要な関係を有することが明らかにされた。

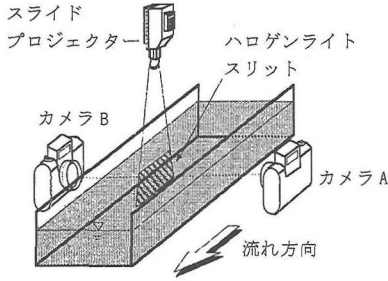
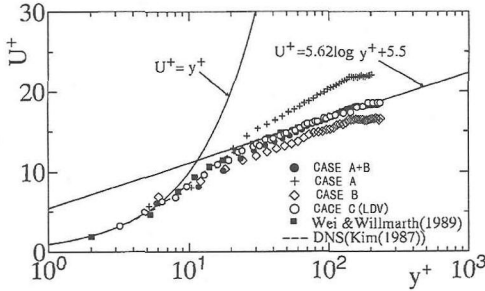
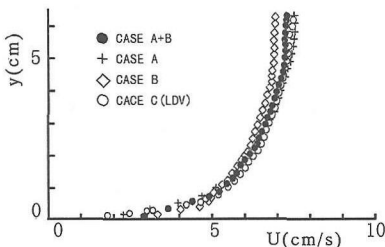


図-1 実験装置



(a) 平均流速分布 (対数則表示)



(b) 平均流速分布 (実測値表示)

図-2 平均流速分布

2. 実験方法

(1) 可視化法

可視化実験は、長さ10m、幅60cm、深さ15cm、勾配1/1000の滑面開水路で行われた。上下流端には、整流用ハニカム（直径4mm、長さ3.2cm）と水位調節用堰がそれぞれ設置された。ハニカム直下流の乱れ強度は、主流の2%程度である。流れは流下とともに遷移を経て発達を遂げ、上流端から約5.5m下流の可視化地点では、後述のように、発達した乱流場で計測される平均流速分布と乱れ強度分布が得られた。図-1に実験装置の概略を示す。可視化面は、開水路中央の縦断面であり、上流端から同時注入された染料水溶液と微細粒子が、この可視化面を通過する際に、左右2台のカメラで同時撮影された。それぞれのカメラでは、染料流脈パターンと粒子流跡を鮮明に撮影するために、シャッター速度が1/125と1/15(sec)に設定された¹²⁾。トレー

表-1 実験条件

	平均速度	水深	レイノルズ数	摩擦速度	計測時間
	U_m (cm/s)	H(cm)	Re	u_τ (cm/s)	T(sec)
CASE-A	6.4	7.5	3700	0.36	3.4
CASE-B	6.4	7.5	3700	0.42	7.4
CASE-C	6.4	7.5	3700	0.417	100.0

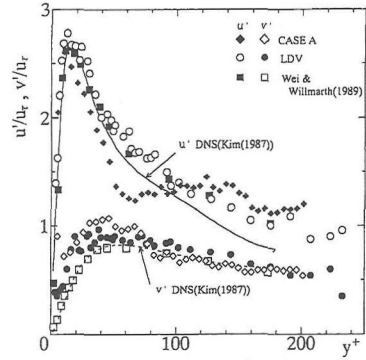


図-3 乱れ強度分布

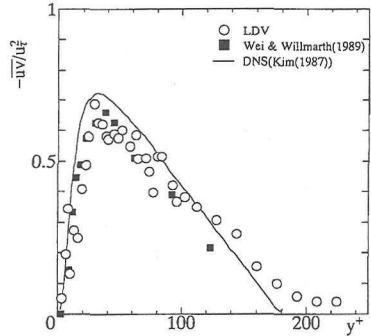


図-4 レイノルズ応力分布

サーには、フルオレセインナトリウム水溶液（比重1.005）と平均粒径300 μ mのポリエチレン系微粒子（比重を1.002~1.005に調整）が用いられた。スリット光源には1KWのハロゲンランプが用いられ、その厚さは約3mmであった。撮影は、トレーサー注入に伴う攪乱の影響を受けた流体塊が通過し、定常状態を確認した後に行われた。本実験条件を表-1に示す。

(2) 平均流速分布および乱れ統計量特性

図-2(a)に、レーザー流速計による長時間計測(CASE-C)とPTVによる平均流速分布の計測結果の比較を示す。前者の計測時間は、各点ごとに約100秒であり、一方、後者においては、連続撮影時間間隔が0.5秒であることから、CASE-Aが3.4秒（写真枚数6枚）、CASE-B（写真枚数13枚）が7.4秒であった。この合計19枚の撮影経過時間の総計は10.8秒であり、レーザー流速計による計測時間の約1/10程度に相当する。そこで、CASE-A, Bのそれぞれの時間内において平均流速分布

を求め、CASE-Cの結果と比較した。摩擦速度 u_τ は、前2者において壁近くの直線分布式から、後者において対数分布式から求めた。また、実測データを示した同図(b)より、CASE-Aでは、CASE-B,Cと比較して、壁近くでより低速、外層でより高速となり、CASE-Bでは、壁近くでより高速、外層で低速という逆の傾向が明らかである。このように、同一の水理条件下においても、短期的には瞬時速度分布が時間的に変化しており、高低速の程度がバッファー層(7-10 < y^+ < 30)を境にして互いに逆モードを示していることが注目される。また、CASE-AとBを総平均すると、その平均流速分布は、この場合、LDVの結果にほぼ近い値にまで近づいている。

図-3, 4に乱れ強度(u' , v')分布およびレイノルズ応力($-\overline{uv}$)分布を示す。ともにLDV計測の結果は従来の結果¹³⁾¹⁴⁾と一致し、発達した2次元乱流場が得られている。またCASE-Aの乱れ強度については、後述のDPTVにおける粒子流跡から求められた結果も比較されており、LDVと従来の結果と比較して1割前後の相異が認められる。これは、上述のようにCASE-Aにおける計測時間が非常に短いことに起因していると考えられる。なお、粒子流跡から求めた流れ方向および鉛直方向変動速度 u , v は、瞬時速度 U , V とLDV計測による同一地点の平均流速 U_m , V_m の差から得られた。

3. DPTVの結果と考察

(1) 視点

① 従来の秩序運動に関する研究は、流れの縦断面(x-y断面)において行われ、流速計測と流れの可視化が別々に行われる場合がほとんどであった。本研究では、染料流脈の可視化とPTVの同時併用を行い、これによって、染料流脈パターンと瞬間的な粒子流跡から求められた「速度情報(この場合、各種速度ベクトルを基にして計算された物理量の総称を表す)」を重畳してより本質的な考察を行う。

② 染料流脈パターンと速度情報の相互関係を系統的に考察することによって、秩序運動の構造のみならず、壁乱流に形成された染料流脈パターンの持つ物理的意味を明らかにする。

③ 流れ方向および鉛直方向の瞬時および変動速度をもとに、2次元の速度せん断構造を検討する。従来の研究においては、流れ方向速度によるせん断構造の考察に留まる場合がほとんどであり、鉛直方向のせん断構造も含めた考察が重要である。

④ 上記の2次元速度せん断構造とburstingにおけるlift-up現象および横渦の巻上げ(roll up)現象との相互関係を明らかにすることが重要である。

(2) 染料流脈パターンの特徴

図-5にDPTVによる可視化写真の一例を示す。同図(a)には、染料流脈パターンが、(b)には粒子流跡が可視化されている。(b)は、撮影フィルムのいわゆる「裏焼き」写真であり、粒子の各流跡の始点(軌跡の左端)が(a)の白く写し出された点状の粒子と対応する。この場合、流跡の形成時間 $T^+ (=u_\tau^2 T / \nu)$ 、ここに、 T はシャッター露出時間、 ν は動粘性係数である)は1程度であり、この時間間隔内では秩序構造の時間変化はきわめて微小であることから⁸⁾、流跡長と撮影時間の商から得られた値とその方向を、瞬時速度ベクトルとみなし得る。そこで、この速度ベクトルと染料流脈パターンを相互に重ね合わせて考察した。

a) low speed streaks

壁近くには、流れ方向に縦筋状に長く伸びたlow speed streaks(LSS1~3, 複数はLSSsと略称する)の縦断面パターンが可視化されている。

LSS1は、粘性底層から徐々に傾斜角を増しながら、バッファー層を超えて対数領域下部にまで達している。LSS2は、その先端がバッファー層内に留まっている。またLSS3は、その流れ方向傾斜角が急であるが、streakが鮮明でなく、少しぼやけて可視化されている。まず、LSS1に注目すると、そのパターンは粘性底層外端付近でlift-upし、バッファー層および対数領域の下部にまで達している。lift-up現象は、Kimら³⁾が発見したbursting現象の第1過程に相当することから、この形成領域における速度情報の検討が重要である。

ところで、これらのLSSsの2次元パターンは、本来3次元の構造的性を有する秩序運動の縦断面形象に相当する。そこで、DNSを用いたBernardらの渦構造の計算結果⁶⁾、および著者らによる壁縦渦の横断面可視化の結果⁷⁾との比較を図-6に示す。図中のBernardらの結果は、壁近くに形成された大規模な縦渦の側面視の一例である。著者らの結果も、横断面可視化された壁縦渦の最も高い点 Y_0 を連ねたものであり、壁縦渦の上背部の高さを示している。これら3者は、それぞれ独立した結果ではあるが、全体的によく一致している。さらに、その流れ方向スケールの傾斜の増減を100~200 wall unitほどのスケールで繰り返すことにおいても3者は同一であることから、LSS1は、壁近くに形成された縦渦の縦断面パターンであると考えられる。

b) low speed streaksの集中・変形

LSSs4~6には、典型的なLSSの集中現象が観察される。この領域では、多数のLSSが集中し、大規模な凹凸状の流脈変形が出現している。

c) 横渦(TV)構造

横渦は、壁近くのせん断層(shear layer)内に形成され、せん断層の不安定性(instability)と乱れの生成に

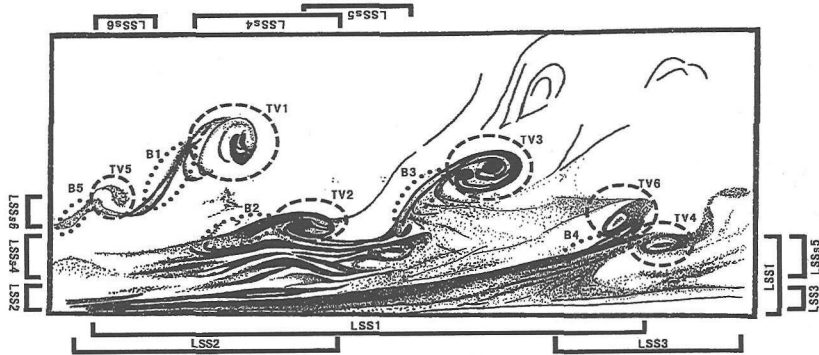
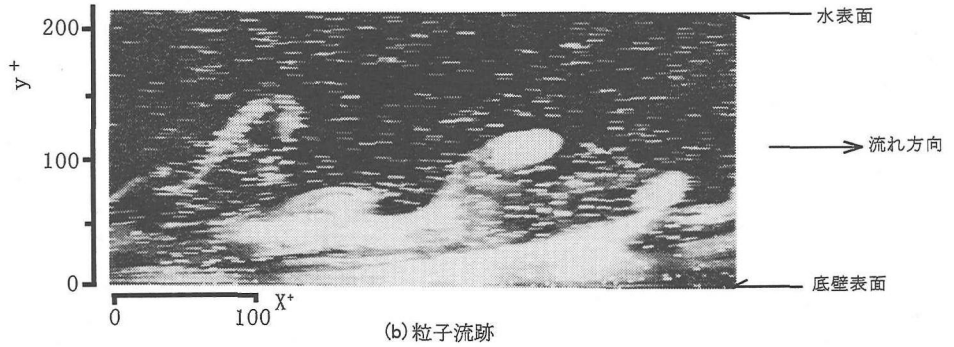
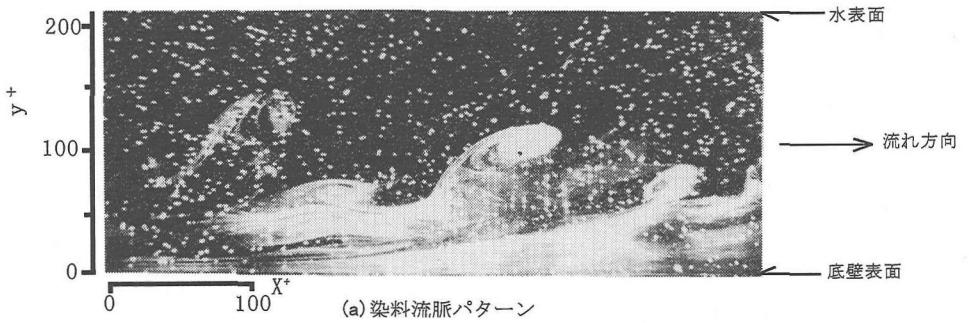


図-5 DPTVによる可視化写真

重要な役割を果たす⁶⁾ことが知られている。本写真には、 $y^+ \geq 40$ の領域に、横渦パターン(TV1~4)が観察される。これらの横渦の回転は、時計方向であり、いずれも流れ方向に伸びたstreakの先端部に形成されている。これらは、その規模や形状においてすべて微妙に異なっている。

また、横渦の周辺構造として、「背中(back)」と呼ばれる領域(B1~5で示す)がある。この領域は、壁近くから発達したLSSと横渦運動との相互作用によって形成されると考えられ、その流れ方向傾斜角は、壁から離れるに従って増加し、対数領域では45度に近い値を示す¹⁴⁾。この背中の部分においても、LSSsの特徴的な変形が認められ、それと横渦運動との相互関係を解明することが重要である。

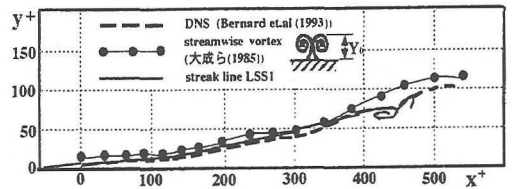


図-6 LSS縦断面パターンと縦渦構造

上述のLSSs, 横渦パターンに加えて、各秩序構造の流れ方向の傾斜が目される。この傾斜現象は、秩序構造のパターン形成における重要な属性と考えられる。

d) 大規模上昇・下降流

染料流脈で可視化されない領域にも、注目すべき運動が存在する。これらについては、粒子流跡から得ら

表-2 横渦パターンと4象限分割ベクトルの対応

横渦	4象限ベクトル	回転方向	形状特性
TV1	1-4-3-2	時 針	ほぼ円形
TV2	1-4-2	時 針	偏平楕円
TV3	1-4-3-1-3-2	時 針	偏平楕円
TV4	1-3-2	時 針	偏平楕円
TV5	4-3	?	わん曲変形
TV6	1-4	反時計針(?)	?

れた速度ベクトルを踏まえ、その構造的考察が可能となる。ここでは、とくに重要な大規模上昇流 (large-scale ejection) と大規模下降流 (large-scale sweep) の2つに注目する。

(3) 変動速度ベクトルと流脈パターンの対応

図-7に、乱れ速度の4象限分割法に基づく変動速度ベクトルを示す。本ベクトルと上述の流脈パターンの特徴との対応における最初の注目点は、横渦の形成領域である。表-2に、横渦パターンの分類と4象限分割変動速度ベクトルの対応を示す。また、本ベクトルの各象限を横渦の背面部から頭部、そして、その下部の順で、さらに、それらのベクトルの回転方向と流脈パターンの形状の比較も示す。このなかで、渦として最も典型的なのがTV1である。その流脈パターンはほぼ円形状を呈し、この領域での変動速度ベクトルは、1-4-3-2の象限順で、それぞれのベクトル群が渦パターンの内外に存在している。

ところが、他の横渦形成領域 (TV2~5) においては、流れ方向に長い楕円状の流脈パターンを示し、そこでベクトルの配置特性においては、それぞれTV1とは微妙に異なる順序が認められる。また、横渦流脈パターンの形状も流れ方向に横長の楕円状を呈しており、TV1の円形状とは大きく異なっている。

しかし、TV6については両対応が不明であり、流脈パターンを見るかぎり、あたかも反時計針方向に回転するように思われるが、そこには第1象限の加速上昇ベクトルが形成されており、このベクトルと対応するのはS①部分のLSS先端でのみで、それ以外の円弧状の流脈の解釈には注意を要する。

第2は、LSSsとの対応である。LSSのほとんどは、同一象限ベクトル群同士の境界、すなわち各象限ベクトルの色の变化領域、あるいはLSSの上下で流れ方向変動速度の差が存在する領域 (より詳しくは、図-11参照) に形成されている。その典型は、LSS1, 2であり、 $y^+ > 10$ の領域で、LSS上部の第1象限ベクトル領域 (加速上昇)、その下部の第2象限ベクトル領域 (減速上昇) の境界線をちょうど連ねる線上にLSS1, 2が形成されている。また、LSS5, 6の凹面型変形領域では、流

脈線にほぼ垂直に第4象限変動速度ベクトルが形成され、streaksの大きな変形に高速下降流が寄与している。さらに、凸面型変形がLSS4に観察される。この領域では、第1象限ベクトルの上部に第2象限ベクトルが形成されている。

このように、TVおよびLSSの形成領域では、変動速度ベクトル分布とほぼ対応して説明され得る。

a) 大規模上昇流

図-7の右側に、第1, 2象限のベクトルで構成される水深規模の大規模上昇流が観察される。この上昇流は、壁近くで2象限、半水深位置で1象限、水表面付近で2象限のそれぞれの変動速度ベクトル領域で構成されている。とくに、水表面付近の減速上昇域 (S①) では、第2象限のベクトルが水表面にまで達し、boilingに類似する構造的特徴が注目される。

b) 大規模下降流

同図中のやや左側に、水表面付近からバッファ層に至る水深規模の大規模な下降流 (S②) が形成されている。この下降流は、第4象限変動速度ベクトルで構成され、TV2, 3の横渦先端部の高速下降領域が互いに上下に重なることによって発生していると考えられる。

以上の大規模な上昇・下降流は、壁乱流の大規模な二次流れを解明する際の重要な運動と考えられるが、これらの構造は染料流脈によって可視化されていない。しかし、この可視化不可能な空白部分は、粒子流跡から求めた変動速度ベクトルの考察によって補完され得ることから、この点においても、本DPTV法の利点が認められる。

(4) 変動速度分布特性

a) u速度分布

図-8にu速度分布を示す。この分布の特徴の第1は、壁近くの加速および減速流が流れ方向に長く連なり、それがx方向に交互に形成されていることである。しかし、壁から離れ対数領域に達すると、uの正負領域が流れ方向に小さくなり、より小さな変動性が増加している。また、水表面付近では、大規模な加速領域が図面中央部、減速域が右側に形成されている。

第2は、この加減速領域がy方向に交互に重なり、流速分布の変曲点が4~6個ほどy方向に形成されていることである (詳しくは図-14参照)。この多数の変曲点の存在は、流れの不安定性が顕著であることを意味する。

b) v速度分布

図-9にv速度分布を示す。この分布の特徴は、u分布とは反対に、上昇および下降の領域がy方向に長く連なることにある。また、そのスケールは、半水深から、最大でほぼ水深規模にまで達し、大規模な上昇お

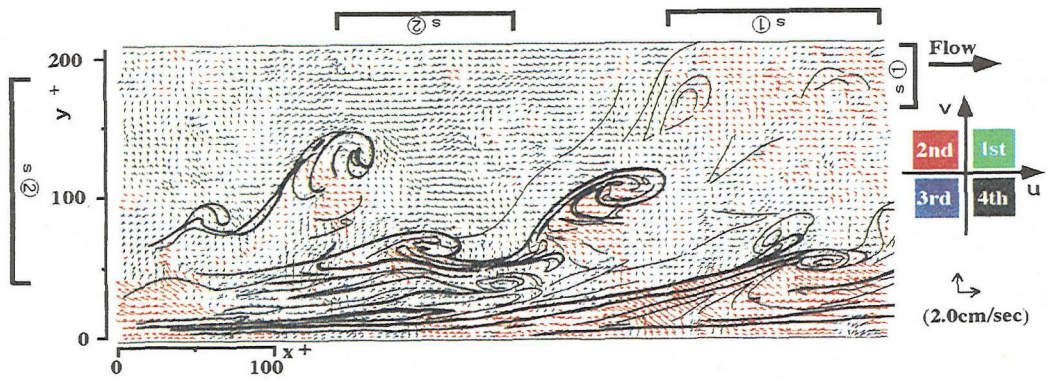


図-7 4象限分割法に基づく変動速度ベクトル

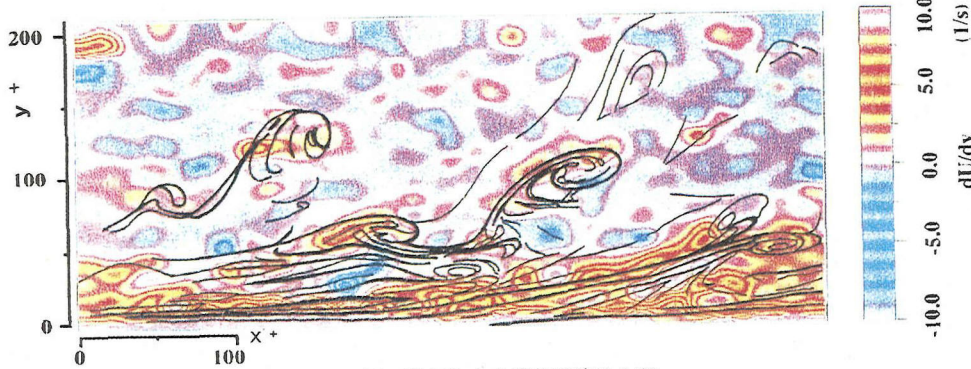


図-10 流れ方向瞬時速度せん断

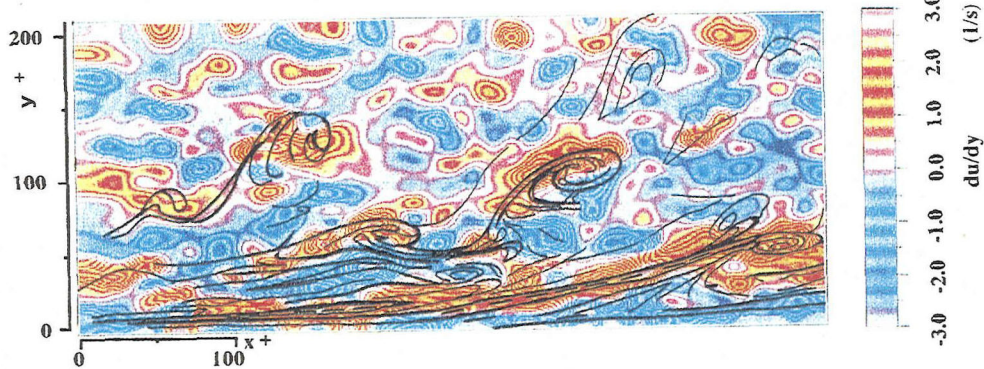


図-11 流れ方向変動速度せん断

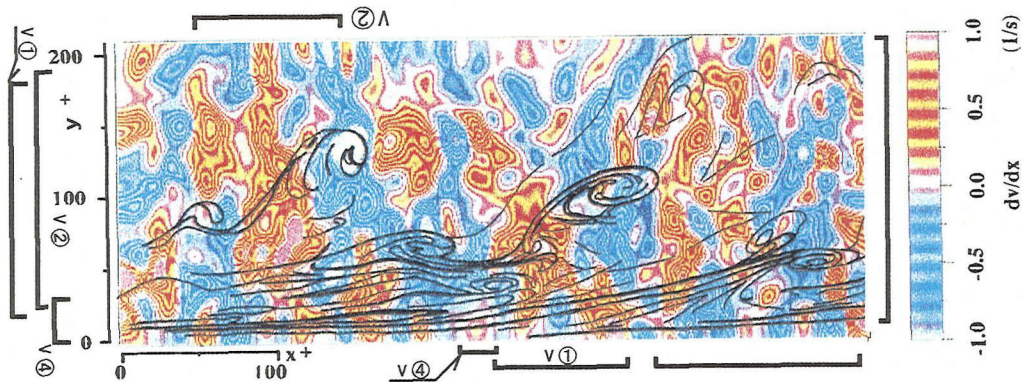


図-12 鉛直方向変動速度せん断

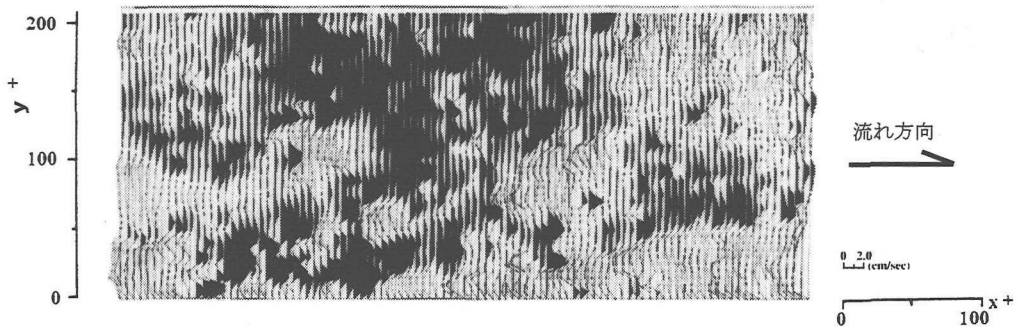


図-8 流れ方向変動速度分布

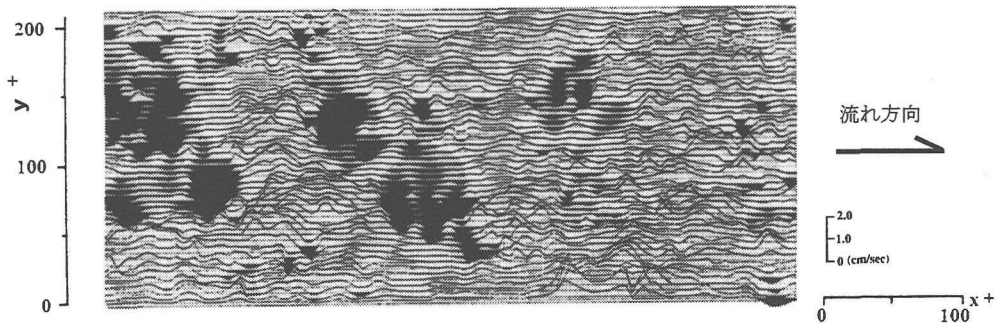


図-9 鉛直方向変動速度分布

よび下降運動が、 x 方向に交互に形成されている。

以上のように、 u および v 分布は、それぞれの方向に長いスケール特性を示すことが明らかである。

(5) 速度せん断構造

壁乱流の構造を考察する際に、 x および y 方向の瞬時速度せん断および変動速度せん断特性を明らかにすることが重要である。その瞬時速度せん断成分 (du/dy) は、平均速度せん断成分 (dU_m/dy) と変動速度せん断成分 (du/dy) に分割される。通常の壁乱流では、壁近くで、変動成分の瞬時成分に対する割合が小さく、本流れ場においても、その相対比は壁近くでおよそ1対3である。ところが、壁から離れるに従って、前者の相対比が増し、それだけ変動成分の重要性が加味される。

a) du/dy 構造

図-10に、瞬時速度せん断の等値線図を示す。この場合、赤色は正、青色は負の速度せん断を示す。この値は、 y 方向に速度差がある場合の流れ方向のせん断を意味する。これより、第1に、粘性底層およびバッファ層内には高せん断層が形成され、流れ方向および鉛直方向に不均一性が顕著となり、速度せん断のさまざまな変動性が明らかである。また、対数領域では、壁近くと比べて速度せん断の値が減少するが、しかしそれでも、正負の対をなすせん断領域がいたるところに形成されている。この速度せん断の無次元値は、

バッファ層下部で最大となる¹¹⁾。

第2に、高せん断層が壁からあても剥がれて上昇するように形成され、それが流れ方向に傾斜して流下する構造が観察される。この高せん断層の傾斜角は、壁近くほど小さく、壁から離れるにしたがって大きい値を示している。

b) du/dy 構造

図-11に、変動速度せん断の等値線図を示す。まず、前図と比較すると、壁近くの $y^+ < 20 \sim 30$ の領域で、その分布の特徴および速度せん断値が互いに異なるが、しかし、 $y^+ \geq 20 \sim 30$ 領域では、それらは、ほとんど同一の分布と値を示している。そこで、これらを踏まえ、変動速度せん断構造の特徴を考察する。

その第1は、壁近くから水表面に向かって、正負の速度せん断層が交互に形成されていることである。この正負の変動速度せん断値は、壁近くで大きく、壁から離れるにしたがって減少している。この2つの特徴を有する構造を「 u せん断構造」と呼ぶ。

第2は、 u せん断構造における正の高せん断領域と染料流脈パターンの相互関係についてである。本図には、染料流脈パターンのスケッチが重ねて示されている。重要な注目点は、高速度せん断領域とLSSや横渦パターンがどのように対応するかである。

そこで、その典型として、LSS1, 2およびTV1, 2の形成領域を選択する。図中の細点線、高速度せん断領域のなかでも最も高い部分を連ねた領域を示す。この

細点線とLSS1, 2の形成領域がよく一致する(ただし, 粘性底層においては, 壁近くの計算精度上の問題があり, 上記の一致はバッファー層以上について該当する)。また, TV1, 2においては, その「背中」であるBI, 2も含めた染料流脈の上部輪郭線が, やはり正の変動速度せん断領域における最高値を連ねる線とよく一致している。

このように, LSSやTVの流脈パターンは, その周囲を含めた局所的な領域における最高の速度せん断領域と一致することが明らかである。また, この一致とともに, LSSおよびTVの下部では負の高速度せん断層が, その正の領域と対をなして形成されていることも注目される。

C) dv/dx 構造

図-12に, 鉛直方向の変動速度せん断 dv/dx を示す。この場合, 平均成分は零であり, 鉛直方向の変動速度せん断は, 瞬時速度せん断の値と等しくなる。この速度せん断値は, 流れ方向に上昇と下降(あるいはその反対)の流体運動が同時に発生する場合のせん断を意味する。この構造は, u せん断構造とともに, 乱流構造の本質的理解において重要な物理的特性と考えられる。図中の赤色は正で, 上述の「下降・上昇」の運動によって起こる変動速度せん断を表し, また, 青色は負で, 逆に「上昇・下降」の運動によって起こる変動速度せん断を表す。

この分布の特徴の第1は, y 方向に長いスケールの高せん断層が形成されていることにある。この速度せん断値の大きさは, 壁近くで u せん断値の約3割程度であるが, 壁から離れた対数領域に至ると, 両速度せん断値はほぼ同程度を示すようになり, この高せん断領域が, u せん断構造と同様に重要な役割を果たすようになる。とくに, LSSs4~6で示される streaksの凸型および凹型の変形は, この鉛直方向の変動速度せん断値の高い領域に形成されていることが注目される。すなわち, LSSs4では, その上流側半分で正, 下流側半分で負の高変動速度せん断領域が流れ方向に連なり, これらの高せん断領域の配置とLSSsの凸型変形が関係している。また, LSSs5, 6では, これとは逆に, 凹型変形部の上流側半分の領域で負, その下流側半分の領域で正の高変動速度せん断層が形成され, それらの配置が凹型変形と関係している。

第2に, 正負の高変動速度せん断領域が底壁面となす傾斜角において, それが総じて70度前後を示すことである。たとえば, 図中央部の v ①領域では約60度, v ②領域では約80度の傾斜角を示す。また, 右側の大規模上昇流の形成領域(v ③)は, 約80~90度の傾斜角を示している。

第3に, 壁と水表面の極近傍では, それぞれの境界

条件の影響を受けて, 鉛直方向の変動速度せん断の値が全体的に小さい値を示していることである。

以上の特徴を有する鉛直方向の変動速度せん断構造を「 v せん断構造」と呼ぶ。

さらに, この v せん断構造とLSS1, 2の対応を考察する。すなわち, これらのLSS上で, 流れ方向に正負の高変動速度せん断領域が交互に形成され, それらがLSSsにほぼ交差する配置特性を有している。この正負の v せん断構造のそれぞれの流れ方向スケールは非常に小さく, 10~30 wall unit程度である。

図-13に, LSS1と v せん断構造の詳細なスケッチを示し, それをもとにbursting現象におけるlift-up過程を考察する。ところで, このlift-upに関する従来の見解は, low speed streaksが, 粘性底層外端部で徐々に上昇(lift-up)し, oscillation, break-upへとバッファー層内で発達を遂げる場合²⁾と, そのlift-up自身がバッファー層から対数領域まで広く及ぶ場合の2つに大別される³⁾。この場合, LSS1は後者の場合, LSS2は両lift-upの初期過程にそれぞれ相当すると思われる。

まず, LSS1の粘性底層外端部($y^+=10$, 矢印①で示す)に注目すると, LSS1は, バッファー層内で約10度の傾斜角を示して上昇している。この上昇域では, v せん断の正負の領域が流れ方向に交互に $x^+=10\sim 30$ 程度のスケールで形成されているが, いずれも, より上流側の負の領域に対して, すぐ下流の正の領域の値がわずかにより大きい値を示し, その正負の領域が, LSS1の先端の横渦パターンの形成領域のすぐ上流側まで(図-13中の矢印②で示す)繰り返して形成されている。

また, 上述のように, LSS1上では, 正の u せん断値の高い領域が形成されることも重要な特徴である。そこで, LSS1の粘性底層外端からのlift-upの形成領域で, u および v せん断の値が正でかつ高いことが, その重要な特徴と考えられる。さらに, LSS2は, 粘性底層外端部でわずかにlift-upしているが, この形成領域においても, 正と負の v せん断領域が $x^+=10\sim 30$ のスケールで交互に形成され, ここでもより下流の正の値が負のそれよりもわずかではあるがより大きい値を示している。

次に, 横渦の巻き上げ(roll up)現象と v せん断構造の相互関係を考察する。

まず, 横渦頭部(TV1~5)のほとんどの領域で, 負の v せん断値の高い領域が形成されていることが重要である。そして, この領域は, 図-11において正の u せん断値の高い領域と重なることから, 結果として, 時計回りの渦度成分が増大することが示唆される。

第2に, これらの横渦頭部の上流側の部分と背中

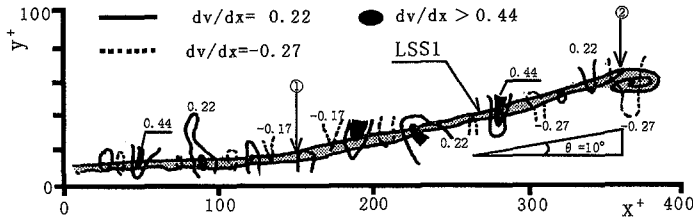


図-13 lift-up現象とvせん断構造

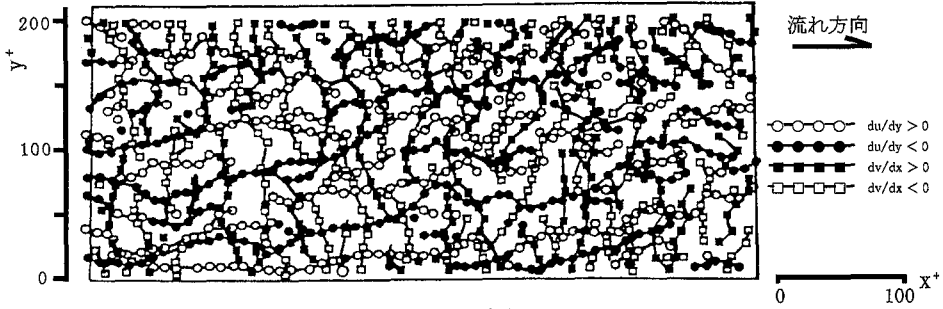


図-14 変動速度分布の変曲点分布

(B1~5) に挟まれる、いわゆる巻き上げ (roll up) 部では、正の v せん断値が高い領域が認められる。これらのTV1~5のうち、最も典型的な巻き上げは、対数領域におけるB1およびB3である。これらの領域では、高くかつ広い範囲に、 v せん断領域が顕著に形成されている。しかし、この同一領域における u せん断値は低く、 v せん断の高い領域が巻き上げ現象と重要な関係を有していることが注目される。

d) u および v せん断構造の相互関係

図-7, 8における変動速度分布の変曲点(IP)を求め図-14に示す。この変曲点では速度せん断の絶対値が最も高ことから、これらの高せん断地点を連ねることにより、流れ場の各点における高速度せん断構造を表現することが可能となる。また、本図は、図-11, 12のせん断構造とも対応する。図中の○および●印は、正および負の u 分布の変曲点(UIP), ■および□印は同じく正および負の v 分布の変曲点(VIP)を示す。この図より、UIPは正負ともに X 方向に長く連なりながら、 y 方向にも変動して波動的変化を示す。また、VIPは y 方向に連なり、 x 方向に変動する波動特性を示している。これらの正負の変曲点連線は、流れ場の至る所で互いに交差し、これら4者からなる高せん断領域の網の目状の構造が明らかである。各網目構造は、せん断変形を受けて歪んでおり、この歪んだ網目構造がせん断乱流の重要な特徴と考えられる。

そこで、この両者が交差する地点の互いの交差角 θ を求め、図-15に示す。図中の実線は、それぞれの壁からの高さごとに交差角の平均値を示す。これより、

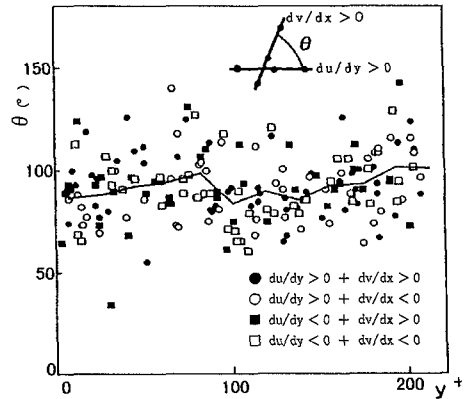


図-15 高速度せん断領域の交差角

UIPとVIPの交差角は、その平均値である90度を前後して、 ± 30 度の範囲で、壁近くから水表面付近に渡ってほぼ一様に分散している。この交差角の分散は、壁乱流における秩序運動の構造性と何らかの関係を有することが推測されることから、その物理的意味について、今後詳しい検討が必要である。

以上のことから、 u および v せん断構造は、ほぼ90度を中心に ± 30 度前後の分散値を示し、互いに交差する網目構造を有し、その速度せん断の大きさ、正負、それらの空間的配置特性が、秩序運動の構造性と重要な関係を有しているように思われる。

4. 結論

染料流脈パターンと粒子流跡から求められた速度情

報を用いて、壁乱流の縦断面せん断構造を考察し、以下の主要な結論を得た。

- (1) 流れ方向および壁と鉛直方向の変動速度分布は、それぞれ、流れ方向および壁と鉛直方向に長く連なる。
- (2) 壁近くには、流れ方向に長く連なった高 u 速度せん断領域が形成され、その流れ方向傾斜角度は約20度前後の値を示す。また、壁と鉛直方向には、その方向に連なる高 v せん断領域が、壁と約70度前後の傾斜角で形成される。また、それぞれの u および v の高せん断領域は、 ± 30 度前後の分散域を有しながらほぼ直交し、全体としては、それらの網目構造を形成する。この高速度せん断構造の空間的な配置特性が、秩序運動の構造性に密接に関係している。
- (3) 染料流脈パターンは2次元速度せん断構造と関係し、そのパターンは、周囲の領域と比較してより高い速度せん断値を連ねる領域に形成される。
- (4) bursting現象における lift-up過程は、正の高 u せん断領域と正負の高 v せん断領域が交差する空間に形成される。また、横渦の roll up形成には、正の高 v せん断領域が密接に関係をしている。

なお本論の考察は、1組の可視化写真に関するものみに留まり、紙数の制限もあって、定量的な考察を展開するまでには至らなかった。しかし、本論の主要な結論は、他の18枚の可視化写真とビデオ画像の解析結果と定性的に一致していることが確認されている。また、物理量の検討においても、変形速度、渦度、瞬時レイノルズ応力、乱れの生成や消散、さらには圧力分布などの重要な考察を行うまでには至らなかった。

そこで、本論で行った定性的考察をさらに発展させるとともに、残りの画像解析データの統計的特性とそれらの未考察の物理量に関する検討を、次報以後の検討課題としたい。

謝辞: 本論文をまとめるにあたり、有益な討論と重要な示唆を与えてくださったBlackwelder教授(南カリフォルニア大学教授)、Eckelmann教授(マックスプランク研究所) およびGrosche博士(ドイツ・ゲッティンゲンDLR) に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Hama, F. R.: Streaklines in a perturbed shear flow, *Phys. Fluid*, 6, 644-655, 1962.
- 2) Kline, S. J., Reynolds, W. C., Schraub, F. A. and Runstadler, P. W.: The structure of turbulent boundary layer, *J. Fluid Mech.*, 50, 133-166, 1967.
- 3) 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.*, 50, 133-166, 1967.
- 4) Cantwell, B. J.: Organized motion in turbulent flow, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 13, 437-515, 1981.
- 5) Blackwelder, R. P.: Some ideas on the control of near wall eddies, *AIAA 2nd Shear Flow Conference*, 89-109, 1989.
- 6) Robinson, S. K.: Coherent motions in the turbulent boundary layer, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 23, 601-39, 1991.
- 7) 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, 363/II-4, pp. 135-144, 1985.
- 8) Bernard, J. M. R. H.: Vortex dynamics and the production of Reynolds stress, *J. Fluid Mech.*, 253, 385-419, 1993.
- 9) Robinson, S. K.: A review of vortex structures and associated coherent motions in turbulent boundary layers, *Proc. IUTAM Symp. Struc. Turbul. and Drag Reduct.*, 2nd, Zurich, 1989.
- 10) Utami, T. and Ueno, T.: Experimental study on the coherent structure of turbulent open-channel flow using visualization and picture processing, *J. Fluid Mech.*, 174, 399-440, 1987.
- 11) Myose, R. Y. and Blackwelder, R. F.: On the role of the outer region in the turbulent-boundary-layer bursting process, *J. Fluid Mech.*, 259, 345-373, 1994.
- 12) 渡辺勝利, 大成博文, 佐賀孝徳, 斎藤隆: 壁乱流における流脈パターンと瞬時流跡の同時抽出, 水工学論文集, 第37巻, pp. 829-832, 1993.
- 13) Wei, T. and Wilmarth, W. W.: Reynolds number effects on the structure of a turbulent channel flow, *J. Fluid Mech.*, 204, 57-96, 1989.
- 14) Kim, J., Moin, P. and Moser, R.: Turbulence statistics in fully-developed channel flow at low Reynolds numbers, *J. Fluid Mech.*, 177, 133-166, 1987.

(1996. 12. 12 受付)

SHEAR STRUCTURES OF LONGITUDINAL CROSS-SECTION IN NEAR-WALL TURBULENCE

Hirofumi ONARI, Katsutoshi WATANABE, Takanori SAGA, Takashi SAITOU and Makoto HATANO

The shear structure of longitudinal cross-section in the near-wall region of turbulent open channel flow is investigated by using the flow visualization technique which combines dye streak injection with Particle Tracking Velocimetry. The formation and magnitude of u and v high-velocity shear play a very important role to form coherent motion in the near-wall region. Lift-up process of low speed streaks in bursting associates with positive-high du/dy and high dv/dx . Further, roll up motions of the transverse vortices in log-region depend on the positive-high dv/dx .