

壁乱流における流脈パターンと瞬時流跡の同時抽出

Combined simultaneous flow visualization of dye-streak pattern/particle-pass line
in the near-wall turbulence

渡辺勝利* 大成博文** 佐賀孝徳*** 前田邦男****

By Katsutosi WATANABE, Hirofumi OHNARI, Takanori SAGA and Kunio MAEDA

Correlation between simultaneous visual pattern of coherent motion and fluctuating components of velocity in the near-wall turbulent flow is investigated using 'dye-particle-image velocimetry' technique. The results indicate that the dye-streak pattern of coherent motion associates with the transversal vortical structure in the head of 'wall streamwise vortices', large-scale sweep event and large-scale ejection event.

DPIV technique plays an important role to understand the physics of coherent motion in the near-wall turbulence.

Keywords: coherent motion, streak pattern, particle-image technique, flow visualization
vortical structure

1. はじめに

近年、流れのなかに多数の微小粒子を注入し、その瞬間流跡の画像処理によって、流れ場全体の構造を把握しようとする手法が次々に開発されている¹⁾。この手法は、PIV (particle-image velocimetry) 法と呼ばれ、すでに、わが国においても、木下による先駆的研究²⁾や、宇民・上野³⁾、西野ら⁴⁾によって、せん断乱流の構造を解明する試みがなされ、すぐれたいくつかの成果が示されている。

最近、Kline⁵⁾は、せん断流れにおける乱流構造、とりわけ、秩序運動 (coherent motion) を究明する課題が、乱流の物理的理解におけるますます中心的存在となりつつあることを示し、その基本的な未解明の課題として、(a)秩序構造の時空間関係、(b)秩序構造の因果関係、(c)基本的力学を明らかにすることの重要性を指摘した。また、Robinson⁶⁾も同様の観点から、秩序運動に関する1980年代の研究を詳しく解説し、次の2つがその課題解明の鍵となることを示した。

① 渦の形成と発達を明らかにする。

② 内外層の秩序運動の相互作用を明らかにする。

そこで、本研究においては、①の課題を達成するために、上述のPIV法と、従来の断面視法⁷⁾を同時に

*	正会員	工修	徳山工業高等専門学校助手	土木建築工学科	(〒745 徳山市久米高城3538)
**	正会員	工博	徳山工業高等専門学校教授	土木建築工学科	(同上)
***	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	(同上)
****	正会員		中電技術コンサルタント(株)	土木第1本部	(〒734 広島市南区出汐2-3-30)

適用することによって、秩序運動の流脈パターンとそれを形成させる速度ベクトルの関係が比較検討された。

2. DPIV法の概念と秩序運動の定義

壁乱流における秩序運動を解明する新しい手法として、DPIV (dye-particle-image velocimetry) 法を導入する。本方法では、トレーサーとして染料と粒子の両方を同時に流れ場に注入する。前者においては、秩序運動の流脈パターンが表現され、後者においては、それぞれの瞬時流跡から流れ場の各地点における速度ベクトルが得られることから、この流脈パターンと速度変動の関係が詳しく検討され得る。この場合、それぞれのトレーサーの果たす役割は次の通りである。

染料の流脈パターン：秩序運動の空間構造あるいはそれ同士の境界を明確にする。

粒子の流脈パターン：それぞれの粒子の描く瞬時流跡のパターンより、流れの各地点における速度ベクトルが求められる。

これらの役割の明確化とその重量的考察によって、秩序運動の構造的性に関する理解はより平易でかつ本質的となり得る。

ところで、本論における「秩序運動」の定義は、次のRobinson⁶⁾のそれに従う。

「少なくともひとつの基本的な流れの変動（速度成分、密度、湿度など）が、流れの最小局所スケールよりも本質的に大きい時空間領域上で、それ自身あるいは他の変動量と本質的な相関を示すような流れの3次元領域」

3. DPIV法の適用例

(1) 可視化法

図1には、DPIV法の適用を可能とする可視化システムの一例が示されている。流れ場は開水路乱流であり、本図はその上部から平面的に眺めたものである。秩序運動の側断面視を行うために、水路上部からハロゲンスリットが照射された。このスリット内に可視化された染料流脈と粒子流跡が、左右の2台のカメラのそれぞれによって撮影された。左のカメラでは、比較的短い撮影時間（1/125秒）で撮影され、流脈パターンが鮮明に可視化された。一方、右のカメラでは、それと相対的に長い撮影時間（1/15秒）で、粒子流跡が撮影された。この後者の撮影ネガの左右を反転させて焼き付けすると、流脈と流跡が対応する一組の写真ができあがる。これを図2に示す。この図の(a)流脈パターンがトレースされ、さらに(b)に示された流跡がデジタイザーで読み取られた。この両者の合成を図3に示す。

(2) 平均流速分布と乱れ強度特性

本実験は、とりあえずリブレット粗面乱流境界層でなされた。流れ場のレイノルズ数 $Re = 7000$ 、水深 8 cm 、計測点のレイノルズ数 $R_x = 4 \times 10^5$ 、運動量厚さを用いたレイノルズ数 $Re = 430$ 程度である。

図4には、LDVによる流速計測結果と、粒子の流跡から求められた平均流速と乱れ強度のそれぞれが示されている。なお、粒子流跡から求められた平均流速は、水深方向に40の領域分割がなされ、その分割領域内に存在した粒子流跡の平均値に対して、1回の移動平均値より求められた。LDVによる平均流速分布の全体は、リブレット粗面上の流れ場のためにやや対数則からはずれる傾向を示すが、粒子流跡から得られた分布とは、かなりの一致を示している。また、同図(b)には、実線がLDV、○と□が粒子流跡の乱れ強度の計測結果のそれぞれが示されているが、この両者

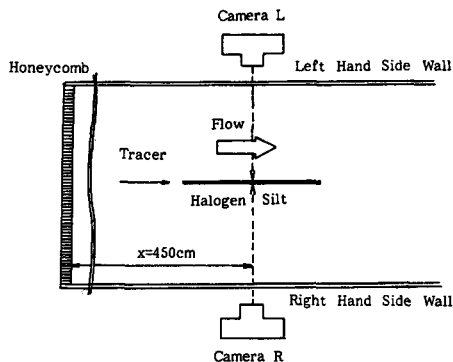
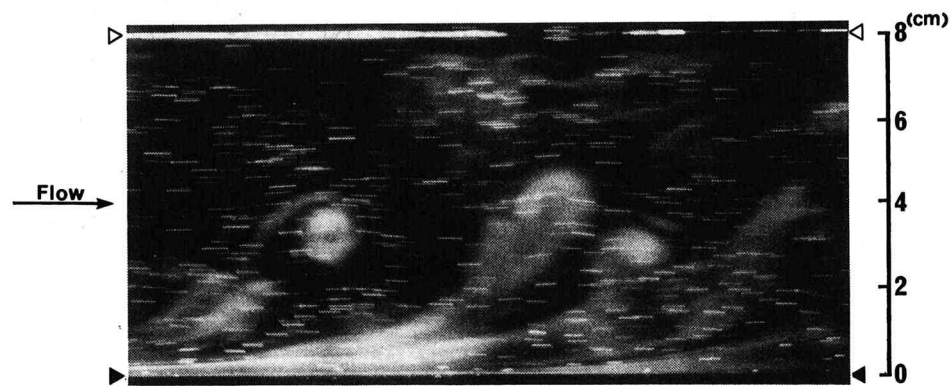


図1 DPIV法のシステムの一例



(a) 流脈パターン



(b) 粒子流跡

図2 DPIV法による縦断面視の一例 (△: 水表面, ▲: 底壁面)

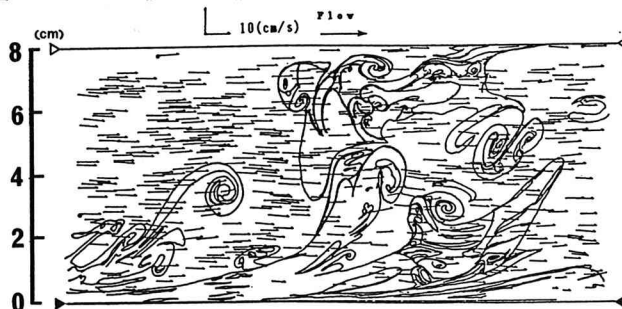
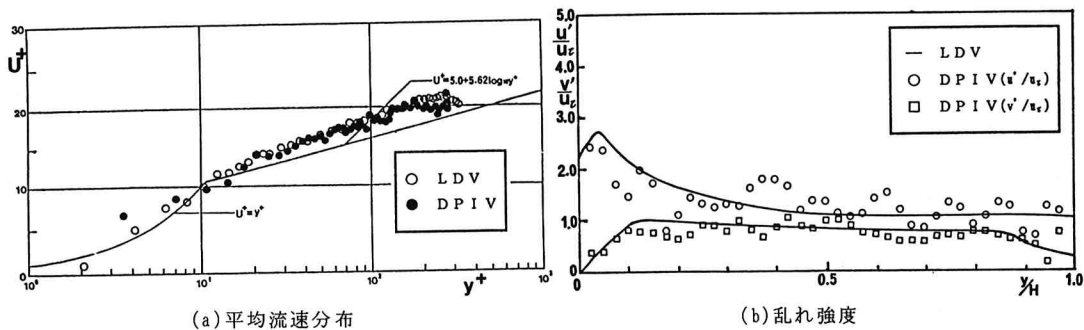


図3 流脈パターンと粒子流跡の重合図



(a) 平均流速分布

(b) 乱れ強度

図4 流速計測におけるLDVとDPIV法による比較

においてもかなりの一致が認められる。

(3) 流脈パターンと速度変動ベクトルとの対応

図5には、流脈パターンと速度変動ベクトルを重ねたものが示されている。図中の細線ベクトルは流れ方向流速成分が正、太線ベクトルは負である場合を示す。これより、S①では、横渦（壁渦の先端部）成分の存在を示す流脈パターンが明らかであり、この周囲では、この横渦によって誘起されたと思われる速度変動パターンが示されている。また、S②は、この横渦領域と下流の染料上昇領域（S③）の間に挟まれた領域であり、その下流での大規模な上昇流のために流れ方向流速成分の発達が抑制されて、壁に向かう、いわゆる典型的な sweep 型の大規模な下降流が形成され始めている。さらに S③領域では、染料が存在するほとんどの領域で、太線速度変動ベクトルが存在し、流れ方向成分が負のいわゆる ejection 型の大規模な上昇流の領域が形成されている。しかし、この領域内には、下降流成分も認められ、この領域全体としては、複雑な多重構造的性を示しているように思われる。

次に、図5の速度変動ベクトルについて、水深方向に5分割、流れ方向に10分割し、それぞれの格子に含まれる速度変動ベクトルの平均値を求めて、その変動ベクトルの始点座標を格子の中心とした。また、格子を水深方向および流れ方向に1/4格子ずつ移動させ、上記の計算を繰り返すことによって、おおまかな空間平均操作を行った。そのベクトル図を図6に示す。これより、各点の速度変動ベクトルと秩序運動の流脈パターンとの対応はより一層明確となりうる。

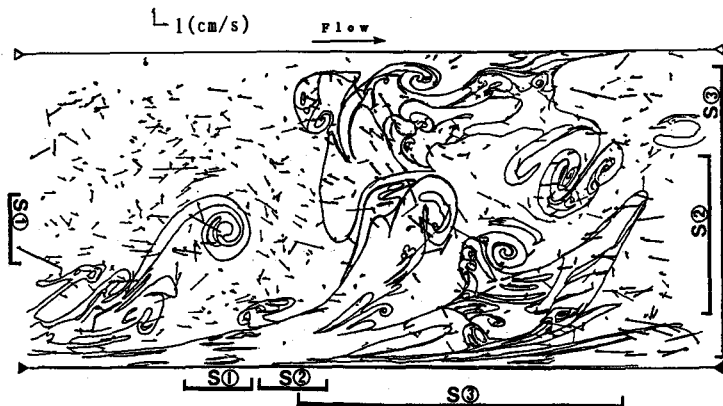


図5 流脈パターンと変動流速ベクトルの重合図

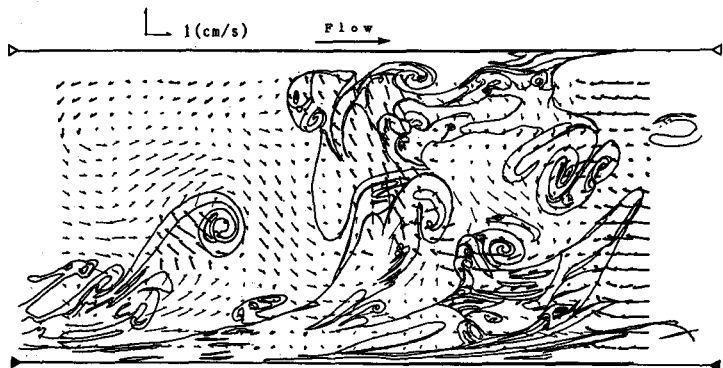


図6 流脈パターンと平均操作を行った変動流速ベクトルの重合図

4. おわりに

秩序運動の流脈パターンと速度変動ベクトルの対応から、それらの相互関係が考察された。また、流脈パターンは、 u, v 値や渦度 ω_z の分布ともかなりの対応を示すが、それらについては紙数の関係で省略する。最後に本研究は、文部省科研費総合 (A) (課題番号03302031) の援助を得た。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) Adrian, R. J.: Ann. Rev. Fluid Mech. 1991, 23, 261-304. 2) 木下良作: 石狩川開発研究部, 1981. 3) Utami, T., Ueno, T.: J. Fluid Mech. 1987, 174, 399-440. 4) 西野耕一他: 第22回乱流シンポジウム講演論文集, 1990, 108-112. 5) Kline, S. J. et al: Proc. IUTAM Symp. Struct. of Turbul. and Drag Reduct. 1989, 2nd, Zurich. 6) Robinson, S. K.: Ann. Rev. Fluid Mech. 1991, 23, 601-639. 7) 佐賀孝徳他: 土木学会論文集, 1992, 443, 55-63.