

開水路乱流の水路床近傍の組織構造について
On the Coherent Structure of Near-Wall Turbulence
in an Open-Channel Flow

京都大学防災研究所 上野 鉄男 Tetsuo UENO
京都大学防災研究所 宇民 正 Tadashi Utami
南カリフォルニア大学 Ron F. Blackwelder

A method of flow visualization was introduced into an open-channel flow with $Re_d=3900$ and $u_*=0.57$ cm/sec. A rapid time series of photographs of the horizontal cross-section of the flow at various heights from the channel bed were taken. The pictures were digitized and processed by a computer.

Extensive correlations were calculated from the data in the wall region over $8 < y^+ < 84$. Some interesting properties were pointed out concerning the correlation length scales. The two dimensional spatial correlations of $R_{uw}(dx, dz)$ showed that the correlation motion of u and w have a unique and distinct spatial pattern.

Keywords: turbulence, coherent structure, flow-visualization, image processing, correlation

1. はじめに

開水路乱流の組織的構造を流れ場の連続断面撮影と画像解析の手法を用いて検討した。幅 40 cm、長さ 12 m の開水路において、幅 3 mm の水平なスリット光を水路床から 2.3 mm づつ移動させて、各高さの水平断面内の粒子トレーサーを、4 台のカメラを使用して、約 1/30 秒の時間差で 2 枚づつ写真撮影した。本実験においては、4 cm の水深に対して、水路床から水面まで約 2.1 秒で 18 組の撮影を行ったが、ここでは水路床近傍の流況を画像解析した結果について述べる。

2. 画像解析

まず、写真撮影したフィルムの明暗を PDS マイクロデンシトメーターによって 8 bit データに数値化した。数値化の分解能を 8 ミクロンに設定したが、これは実長の 0.32 mm に相当する。

つぎに、同一水平断面の僅かな時間差をもつ 1 組の写真データの間に局所相関法を適用して、その断面における瞬間的な速度ベクトルを求めた。すなわち、写真 a のデータのある点を中心とする小領域（ここでは 25 ピクセル x 15 ピクセルとした）を適当に選び、写真 b のデータのそれにほぼ対応する点を中心とするおなじ大きさの領域との間で濃度分布の相関係数を計算した。写真 b の方の点を 1 ピクセルづつずらして、その都度同様の相関係数を計算し、相関係数が最大となる点をもとの点の対応点とし、両点を結ぶベクトルを流速ベクトルとした。速度ベクトルは、流下方向に 35 cm、横断方向には 25 cm の範囲でおおよそ 2 mm 間隔の格子点毎に求められた。

写真から得られたトレーサーの位置は水面での光の屈折によって歪められているので、それを簡単な光学計算によって修正した。また、僅ではあるが誤って得られたベクトルが含まれていたため、周辺のベクトルと著しく傾向を異にするベクトルを除去した。以上の処理の後、新たな 2 mm 間隔の正方格子点毎の速度ベクトルを二次元線形内挿法で計算し直した。

$y^+ = 21$ の断面における得られた流速の流下方向成分 u および横断方向成分 w の分布を図 - 1 および図 - 2 に示す。本図において、 u および w はそれぞれの乱れ速度 u' および w' で無次元化されており、等高線の間隔はそれぞれ $u/u' = 1$ および $w/w' = 1$ 、太い等高線はそれらが 0 のものである。本論においては、 $y^+ = 8, 21, 37, 52, 67$ および 84 の水平断面において速度分布が計算された。

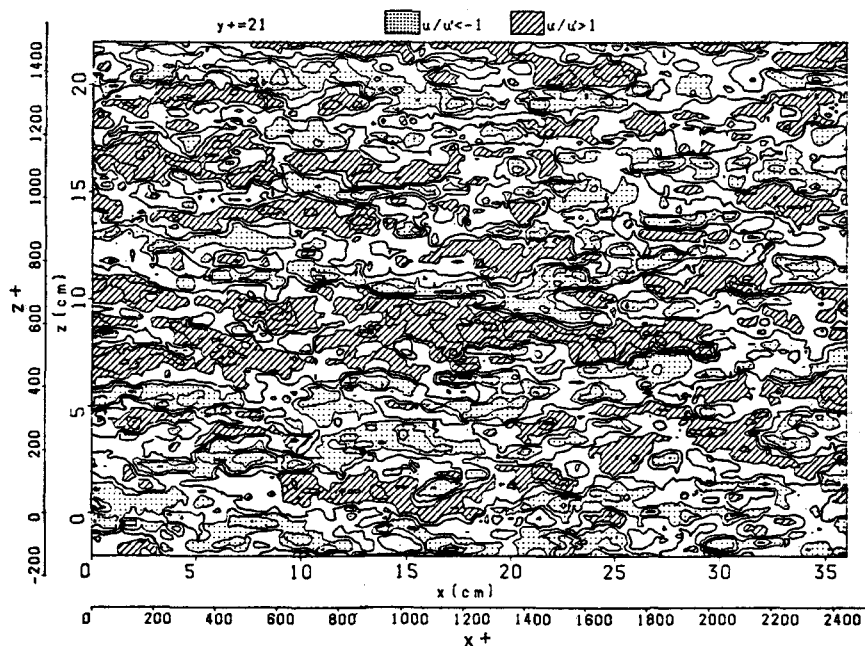


図 - 1 流下方向流速成分の分布

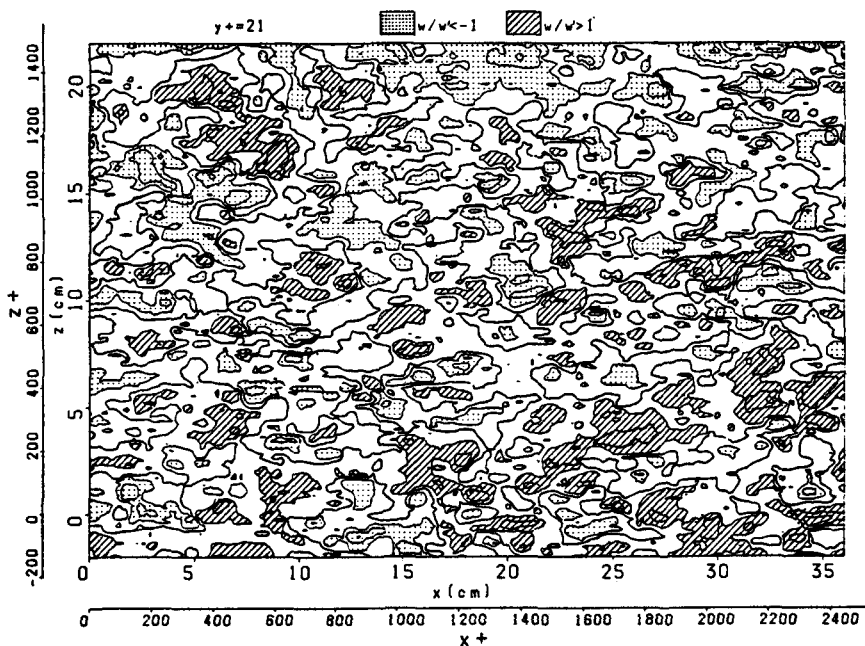


図 - 2 横断方向流速成分の分布

乱流の空間的な構造の特性を調べるために、次式で表される各種の二次元相関係数 $Ru_i u_j(\Delta x_i, \Delta x_j)$ を計算した。

$$Ru_i u_j(\Delta x_i, \Delta x_j) = \frac{\iint \{u_i(x_i, x_j) \cdot u_j(x_i + \Delta x_i, x_j + \Delta x_j)\} dx_i dx_j}{\sqrt{\iint \{u_i(x_i, x_j)\}^2 dx_i dx_j \cdot \iint \{u_j(x_i + \Delta x_i, x_j + \Delta x_j)\}^2 dx_i dx_j}} \quad (1)$$

ここで、 Δx_i および Δx_j はそれぞれ流下方向ならびに横断方向のずらし距離であり、 (x_i, x_j) は格子点の座標を表す。

3. 二次元自己相関係数

$i=j$ のとき (1) 式は自己相関係数を表す。流下方向流速 u および横断方向流速 w の二次元自己相関係数 R_{uu} および R_{ww} をそれぞれ図 - 3 および図 - 4 に示す。各図で (a) は $y^+ = 21$ 、(b) は $y^+ = 84$ の結果であり、等高線の間隔は 0.1 である。また、それぞれの座標 Δx 、 Δz は無次元化されて x^+ 、 z^+ で示されている。

図 - 3(a) より、水路床近傍では R_{uu} の大きな範囲は流下方向に長く伸びており、横断方向の幅は小さいことがわかる。水路床から離れた(b)図の場合には、流下方向の特性は (a) 図と同様であるが、横断方向の幅が大きくなっている。

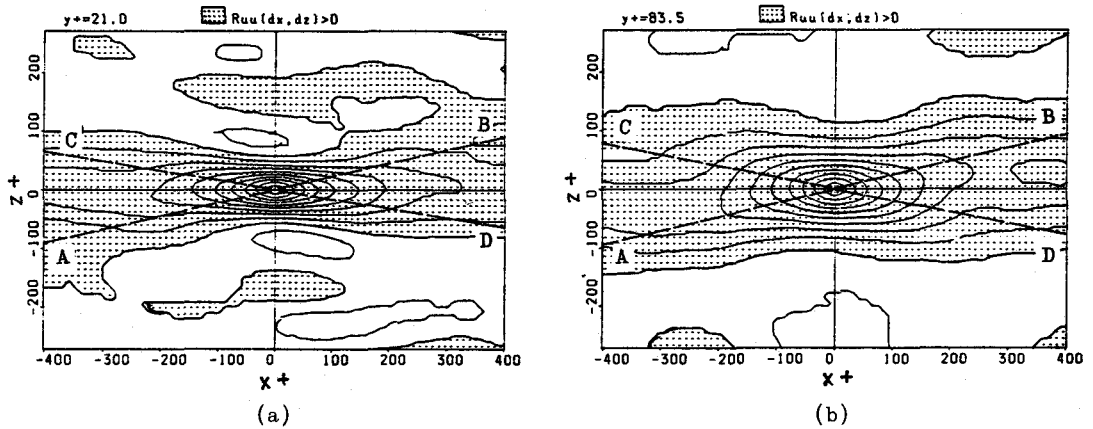


図 - 3 流下方向流速成分 u の二次元自己相関係数 R_{uu} の分布

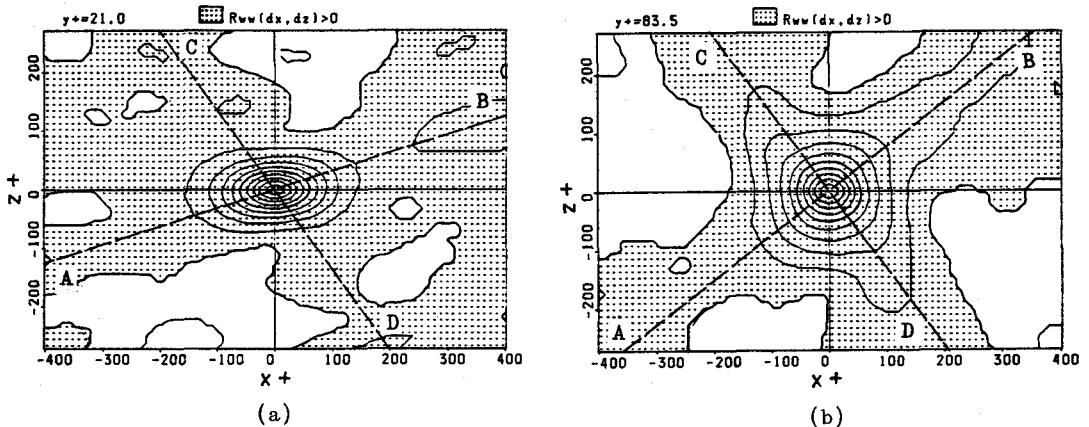


図 - 4 横断方向流速成分 w の二次元自己相関係数 R_{ww} の分布

一方、図 - 4 の R_{ww} の分布は R_{uu} の分布とかなり異なる特性を示している。この特徴を調べるために、相関係数がある値 R の等高線の形状のアスペクト比 A の変化を表 - 1 に示した。本表において A_u および A_w はそれぞれ u および w に関するアスペクト比である。表から、 A_w は A_u に比してかなり小さい値となっており、水路床から離れた $y^+ = 84$ の場合には A_w 、 A_u ともその値は小さくなっている。また、 A_u は R の値とともに変化するが、 A_w は R の値にかかわらずほぼ一定となっている。さらに両図を比較すると、 u の横断方向のスケールは w のそれよりかなり小さいことがわかる。ちなみに、 y^+ が 8 から 84 までの各断面での u の相関係数の 0.5 の等高線の横断方向の径長は w のそれぞれのそれぞれ 0.68, 0.82, 0.79, 0.85, 0.80, 0.81 倍となっている。

表 - 1 相関係数 R の等高線のアスペクト比

	R	$y^+=21$	$y^+=84$
A_u	0.7	3.0	2.1
	0.5	4.1	2.7
	0.3	5.7	3.6
A_w	0.7	1.8	1.2
	0.5	1.9	1.1
	0.3	1.9	1.0

図 - 3 および図 - 4 に関して、上記の他に次のような特徴も認められる。すなわち、図 - 4 において相関係数の比較的大きな領域が、図中に破線 AB ならびに CD で示したように、流下方向とある角度をもって斜め方向にも広がっており、図 - 2 においてもそれとほぼ等しい角度で斜線の領域あるいは点を施した領域が斜め方向に配列されていることが認められる。同様に図 - 1 の u の分布においても斜線の領域あるいは点を施した領域が斜め方向に連なる部分が多く認められるが、 u 分布の場合にはその卓越角度は w の場合よりも小さくなっている。図 - 3 において、ずらしの距離 x^+ の絶対値が大きくなると相関係数の正の範囲が横断方向に広がる傾向にあり、 $x^+ = 0$ の部分がくびれた形状をもつのは上記の特性が反映したものと考えられる。そこで、 $x^+ = 0 \sim \pm 200$ 付近の相関係数 $R = 0$ のコンターに並行するように破線 AB、CD を引くと、それは図 - 1 の斜めの線とほぼ等しい角度となる。

u も w もおなじ乱流構造のある側面でありながら、相関係数の分布の形状やスケールが互いに異なるということは非常に興味あることである。著者らは、 u の流下方向スケールが w のそれより大きくなる要因は個々の渦構造の配置にあることを示した^{1), 2)}。同様のことが横断方向スケールについても成り立つことが考えられる。

そこで、渦度の鉛直方向成分 ω_y について同様の方法で自己相関係数 R_{rr} を計算し、図 - 5 に示した。 R_{rr} は u の相関係数 R_{uu} と類似した分布特性を示すが、相関係数の値が大きい範囲の横断方向スケールは

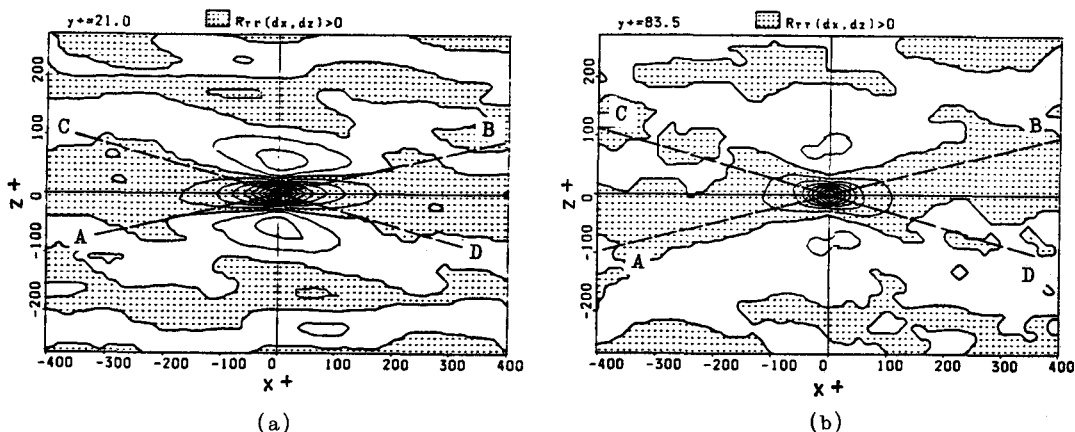


図 - 5 鉛直方向渦度成分 r の二次元自己相関係数 R_{rr} の分布

さらに小さくなっている。 u の場合と同様に破線 AB、CD を引くと、その方向は u の相関係数の方向特性とほぼ一致している。ところで、壁面乱流の基本的な構造の一つとして壁面とある角度をもつ渦対を想定すると¹⁾、それらは流れの場の水平断面では長楕円形状の渦対となる。図-5 において相関係数のピーク的位置の上と下にそれから約 60 viscous scale 隔たった所に相関係数の負の極値があるのは、このような渦対の存在によるものであろう。さらに、渦度の相関係数に先に述べたような方向特性があることは、渦対が図-5 の AB、CD で示されるような斜め方向にも配列されていることを示唆している。

以上のような R_{rr} の自己相関係数の分布特性から、渦対どうしが斜め方向に配列される場合の代表的な状態として図-6 の二つが考えられる。(a) 図においては、AB 上で $u - \bar{u}$ が負となり、CD 上で正となるので、 u の斜め方向の相関が大きくなる。しかし、 w が斜め方向に同じ符号で連続することはない。一方 (b) 図においては、AB 上で w は正、CD 上で負となるが、 u が同符号で連続することはない。(a) 図における各直線は図-3 の AB、CD に対応し、(b) 図のそれは図-4 の AB、CD に対応すると考えられる。 w の相関係数が斜め方向に卓越する傾きが u のそれよりも大きくなる事実も説明される。

再び相関係数の横断方向スケールについて考察すると、図-6 において個々の渦の横断方向の代表的なスケールを b とすると、(a) 図においては、 u の波長 λ_u と w の波長 λ_w はともに $2b$ に等しい。一方、(b) 図においては λ_u が $2b$ であるのに対して、 λ_w は $4b$ となる。ここで検討している流れ場においては、渦の配置の代表的なパターンとして (a) 図の状態と (b) 図の状態が混在していると考え、さらにはそれらとは異なる状態も含まれていると考え、このような流れ場を平均的に処理した相関係数から得られる u の横断方向のスケールは w のそれよりも小さくなることが説明される。

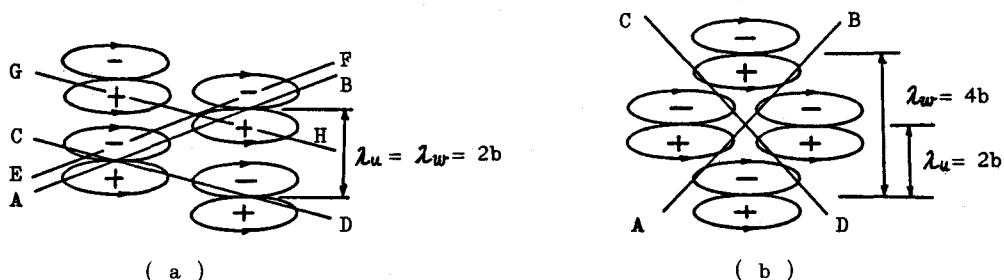


図-6 渦対構造の配列パターン

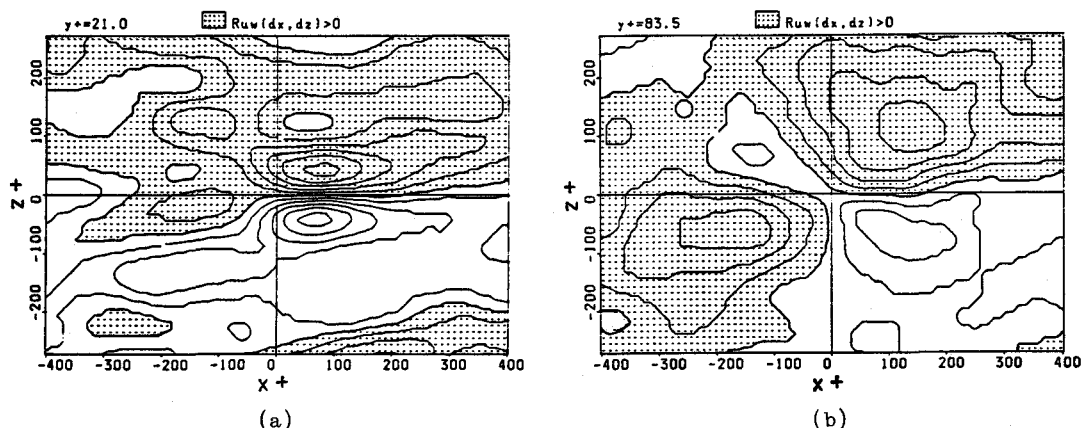


図-7 u と w の相互相関係数 R_{uw} の分布

4. 二次元相互相関係数

流下方向流速成分 u と横断方向流速成分 w の相互相関係数 R_{uw} を図 - 7 に示す。図において、等高線の間隔は 0.05 である。図から、 R_{uw} のピークは原点からずれた所にあり、それらの値そのものは大きくはないが、各象限に R_{uw} のピークが存在することがわかる。他の高さの水平断面についても同様の相互相関係数を求めたが、いずれにおいても、 $x^+ > 0$ の相互相関係数のピークの方が $x^+ < 0$ のそれに比べて値が大きく

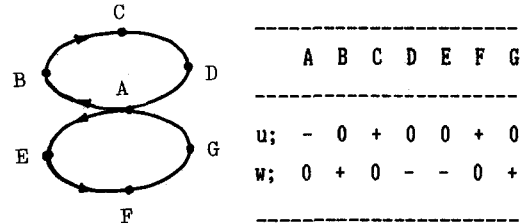


図 - 8 渦対内の u 、 w の符号の変化

その位置も安定していて原点に近い。図 - 8 は、一つの渦対構造の水平断面を模式的に示したものであるが、図中の渦対内の u 、 w の符号の変化を考えると、A - D、A - E、C - B あるいは F - G の位置関係で R_{uw} は正の極大値をとり A - G、A - B、C - D あるいは F - E の位置関係で負の極小値をとることとなる。このことが図 - 7 の原点と各極大点あるいは極小点との位置関係に反映していると考えられる。

5. おわりに

開水路流れの水平断層面の可視化写真を画像処理し、得られたデータから各種の二次元相関係数が計算された。その結果、相関係数の分布は個々の渦の構造とそれらの配列のパターンを反映したものであることが明かにされた。また、それらの配列のパターンの中には渦対が斜め方向にならぶものが特徴的であることがわかった。

本研究においては、実験結果のうち水路床近傍のものについて相関解析が行われた。今後は、前水深にわたって種々の解析を行い、流れの三次元構造を明かにしていきたい。

なお、写真画像の数値化は東京大学理学部天文学教育研究センター・木曾観測所の PDS マイクロデンストメーターを利用して行った。御協力いただいた当観測所の岡村定矩助教授ならびに樽沢賢一技官に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 宇民正、上野鉄男；連続断層面撮影法による大規模乱流構造の可視化とその解析(4)、第30回水理講演会論文集、pp.571-576、1986.
- 2) Utami, T. and T. Ueno: Experimental Study on the Coherent Structure of Turbulent Open-Channel Flow Using Visualization and Picture Processing, Jour. Fluid Mech., Vol.174, pp.399-440, 1987.