

二次元パターン認識による開水路乱流の組織構造の研究

上野 鉄男・宇民 正

STUDY ON THE COHERENT STRUCTURE OF TURBULENT OPEN CHANNEL FLOW BY TWO-DIMENSIONAL PATTERN RECOGNITION

BY *Tetsuo UENO* and *Tadashi UTAMI*

Synopsis

Two-dimensional pattern recognition method was introduced into the two-dimensional velocity data which were obtained by flow visualization and picture processing.

Variety of two-dimensional patterns of vorticity distributions in the small area were correlated with the vorticity distribution to detect the characteristic structure or arrangement of vortex motions. Ensemble averaged pattern of two-dimensional distribution of velocity vectors, x- and z-components of velocity vectors, vorticity and two-dimensional divergence around the detected points were given.

Based on these results, the structure and the arrangement of vortex motions and the characteristic events accompanying the structures were examined.

1. 概 説

著者ら¹⁾は開水路流れの水平断面の可視化写真を画像処理し、得られた流速ベクトルに関するデータから流速の各成分や渦度に関する二次元相関係数を計算した。その結果、乱流の組織的構造を全体的に把握するには個々の渦の構造と同時にそれらの配列状況をも調べる必要があることが明らかになった。本研究は、同じデータに二次元パターン認識の手法を適用し、乱流構造の特徴的なパターンを抽出し、それらの二次元的な配列パターンならびに渦対構造の周辺の流速分布、渦度分布、二次元発散などの分布特性を明らかにしようとするものである。

プローブ計測のデータにパターン認識法を導入し、せん断乱流中の組織構造を抽出する方法はWallaceら²⁾によって提起された。その方法では、抽出モデルに適合する流下方向流速成分 u の経時変化のパターンが計測データの中に認識され、その周辺の u 、鉛直方向流速成分 v および uv の経時変化がアンサンブル平均されて抽出される。これによって、ejection, sweep, interaction といった事象の発生に伴い、 u 、 v および uv が平均的にどのような経時変化を示すかが壁面からの位置毎に明かにされた。

ところが、Wallaceらの方法は本来三次元的な乱流構造の時系列的な測定結果に適用されるものであるから、次のような限界をもっている。第一に、彼らの手法で抽出された速度変動パターンがどのような三次元的な乱流構造によって形成されたかが曖昧である。実際、彼らの方法によって抽出されたパターンは単一の渦構造によって形成される場合もあり、複数の渦構造の相互作用によって生じる場合もあるが、それらの区別がなされずに平均的な特性が検討されている。第二に、彼らの方法では乱流構造のいろいろ

な部分を抽出して平均してしまう。乱流構造の内の特徴的な部分を抽出するためには、その構造の横断方向の位相も一致させて平均化する必要があると考えられる。

これに対して、二次元的なパターン認識法によれば、次の点で上記の問題点が改善されると期待される。第一に、流速変動のみならず渦度成分の分布に関するパターン認識が可能となる。第二に、特徴的な二次元的な事象を抽出してそのまわりの水理量のアンサンブル平均をとることにより、乱流構造の特徴を二次元的に捉えることができる。第三に、渦構造の空間的な配列状況についても検討ができる。

本文では x 軸は主流流下方向に、 y 軸は鉛直上向き方向、 z 軸は水平かつ水路横断方向に設定されており、各々の方向の流速成分は u 、 v および w で表記されている。

2. 二次元パターン認識法と渦対構造の抽出

幅 40 cm、水深 3.95 cm、摩擦速度 u_* が 0.57 cm/sec の開水路流れの水平断面の可視化写真を画像処理し、各高さの水平断面内の流速ベクトル分布を得た¹⁾。本研究においては、それらのうち水路床近傍の $y^+ = 21$ の断面のデータを用いて二次元パターン認識法を適用した。

Fig. 1 は $y^+ = 21$ の断面における流速の流下方向成分 u の分布を示したものである。本図において、 u は乱れ速度 u' で無次元化されており、 $z = 0$ cm が水路の中央に位置する。Fig. 1 においては低速領域と高速領域が流下方向に細長く連なっておりそれらが横断方向に交互に配列されているという特徴が認められる。

著者ら³⁾は流れの可視化と画像解析の手法を用いて、壁面近くの乱流構造を検討し、乱流構造は壁面に近接して存在する渦糸群、それらが組織化されて形成される馬蹄型渦、ならびに馬蹄型渦を数個まとめて形成される縦渦から構成されるという多重構造をもつことを指摘した。これらの構造は時間とともに発生、発達、消滅を繰り返す、周辺の渦構造と相互に影響を及ぼしあっている。このような乱流構造をパターン認

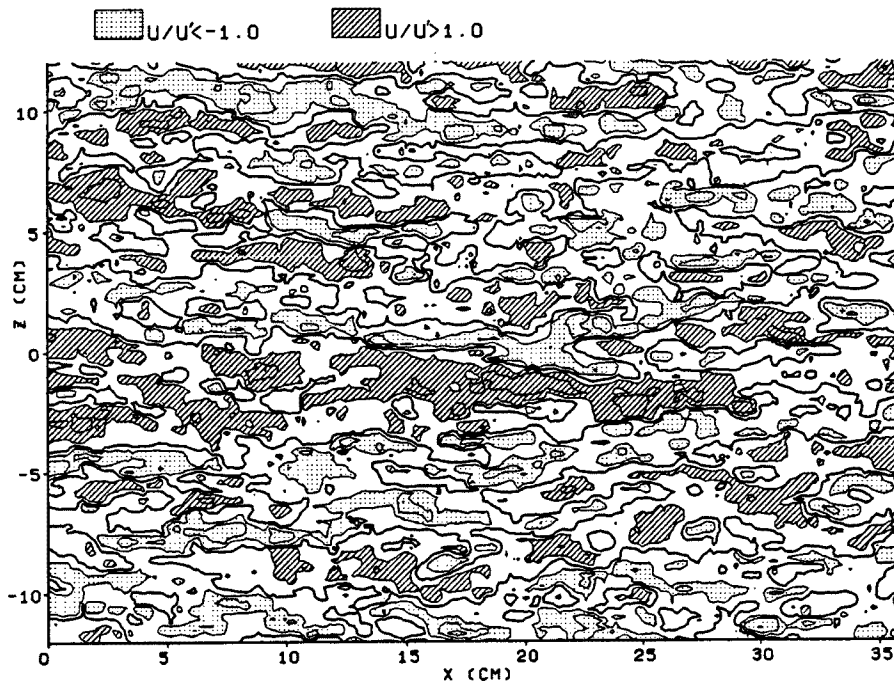


Fig. 1. Distribution of the x -component of velocity u in the horizontal cross-section of the flow ($y^+ = 21$).

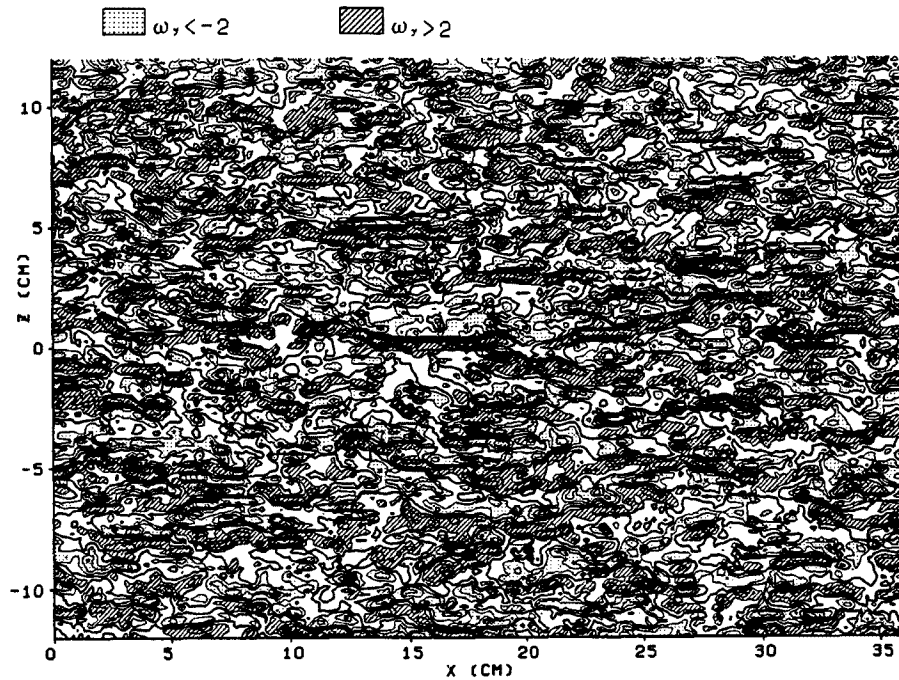


Fig. 2. Distribution of the y-component of vorticity ω_y in the horizontal cross-section of the flow ($y^+=21$).

識の方法で把握するには、渦度の二次元的な分布に関する抽出関数を採用する方がより明快であると考えられる。

Fig. 2 は同じ断面の渦度の鉛直方向成分 ω_y の分布を示したものである。本図においては、異なる符号をもつ渦度の大きな領域が対をなして配置されている様子が認められる。これらは馬蹄型渦の水平断面に相当すると考えられる。そこで、このような渦対を乱流場の基本構造と考えて二次元パターン認識の手法を適用した。

すなわち、先ず、これら渦対を検出するための「検出パターン」として、Fig. 2 に現れている渦対のスケールや渦度分布の特性を考慮に入れて、Fig. 3 の様な 16 mm × 16 mm ($108.6 \times 108.6 \nu/u_*$) の範囲の渦度分布を想定した。本図において斜線部および点を施した部分は各々渦度が正および負の絶対値の大きな領域であることを示す。

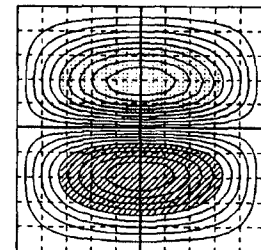


Fig. 3. Pattern of vorticity distribution for detecting vortex pairs.

次に、Fig. 2 の渦度分布図の各格子点を中心として、検出パターンと同じ面積をもつ小領域の渦度分布と検出パターンとの間で、次式で表される二次元相互相関係数 $Cr(x, z)$ を計算した。

$$Cr(x, z) = \frac{\iint \{\omega_y(x+x_1, z+z_1) \cdot \omega_m(x_0+x_1, z_0+z_1)\} dx_1 dz_1}{\sqrt{\iint \{\omega_y(x+x_1, z+z_1)\}^2 dx_1 dz_1 \cdot \iint \{\omega_m(x_0+x_1, z_0+z_1)\}^2 dx_1 dz_1}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ω_m は検出パターンの渦度分布を表し、 (x_0, z_0) はその中心の座標である。また、 x_1 および z_1 は検出パターンの中心からの距離であり、この場合は $-8 \text{ mm} \leq x_1 \leq 8 \text{ mm}$ 、 $-8 \text{ mm} \leq z_1 \leq 8 \text{ mm}$ となる。

検出される特徴的なパターンは Cr の大きな値の所にあり、その中心位置は Cr の値の局所的なピークの位置で与えられると考えられる。この位置を以下には検出点と呼ぶこととする。流れの場が与えられた場合、検出点は検出パターンと相関係数 Cr の閾値に依存する。

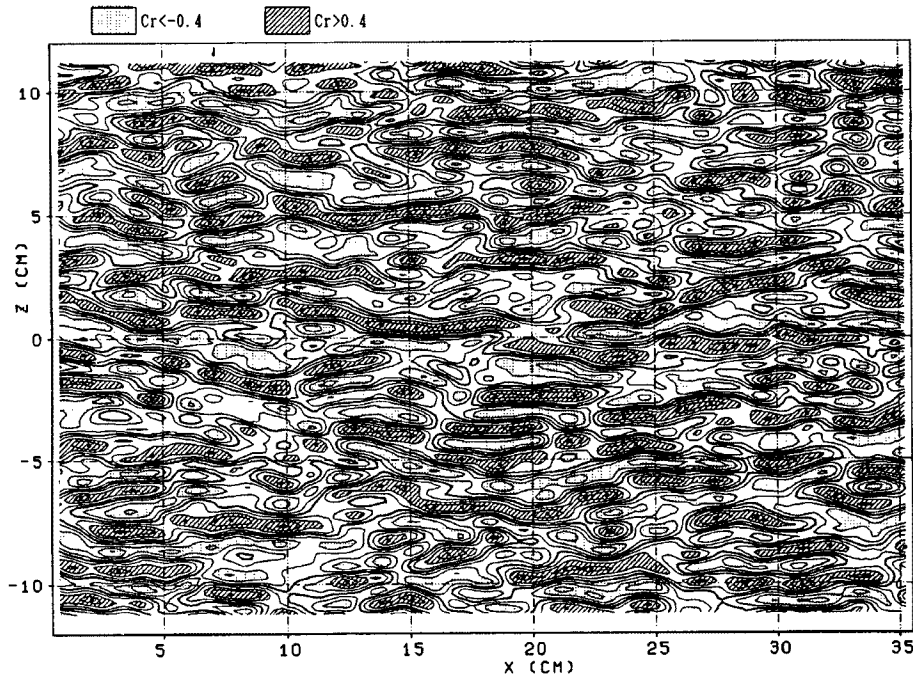


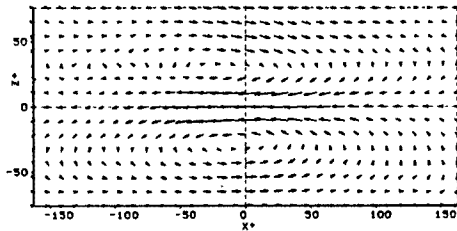
Fig. 4. Distribution of cross-correlation coefficient obtained through the detecting pattern of Fig. 3.

この場合の Cr の分布を示すと Fig. 4 の様になる。図で $Cr > 0.4$ の範囲に斜線を施してあるが、そのピーク付近に渦対の中心があると考えられる。実際、本図と Fig. 1 とを比較すると、 Cr が大きな領域は u の低速部に対応している。一方、点を施した Cr が負のピーク付近は u の高速部に対応し、ここでは渦対同士が隣合うことにより、sweep が発生していると考えられる。図から、渦対が流下方向に数個連続するもの、渦対が横断方向に僅かにずれながら流下方向に連なっているもの、渦対が千鳥状に交互に並んでいるもの等が認められる。

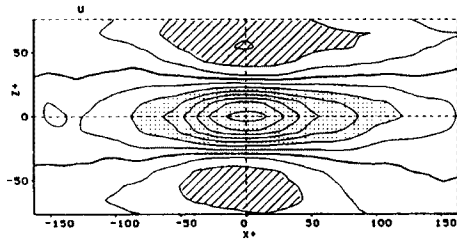
3. 渦対構造の平均的特性

Fig. 4 の Cr 分布に黒点で示されている検出点を中心として、その周辺の $48 \text{ mm} \times 22.4 \text{ mm}$ の小領域における流速分布、渦度分布、二次元発散分布についてアンサンブル平均を施すことにより、渦対周辺の上記諸量の二次元的な分布を得た。ここでは、 Cr の閾値を 0.6 とした。計算結果を Fig. 5 (a)-(e) に示す。図中の斜線はアンサンブル平均値が正で大きな領域を、点を施した部分は負で絶対値が大きな領域を示す。

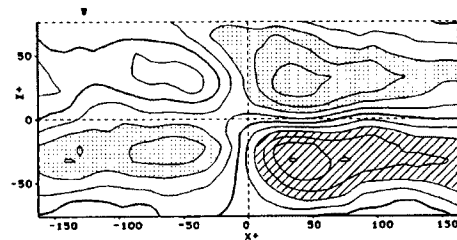
(a)-(c) 図は流速の平均特性を示したものである。渦対の中央部で u は最小となり、 w の絶対値の大きなところで u が 0 となっていることがわかる。また、当然のことではあるが、(a) 図の流速ベクトルは渦の位置を中心として循環するパターンを示している。(d) 図においては、平均的な渦度分布は Fig. 3 で示された検出パターンより流下方向に細長くなっている。これらの図のうち興味深いのは (e) 図の二次元発散の分布である。 $y^+ = 21$ 断面は壁面に近いから、二次元発散が負の領域はそこに上昇流があることを意味する。 (x^+, z^+) の座標 $(-30, 0)$ の位置にピークをもつ二次元発散が負の領域は、渦対構造の中央部より上流側の位置で強い上昇流があることを意味しており、これが大きなレイノルズ応力の発生原因であると考えられる。また、この上昇流発生領域の上流側と下流側にその絶対値は大きくはないが



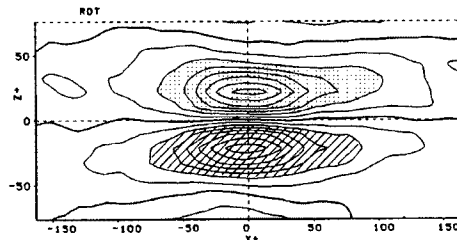
(a) Velocity vectors



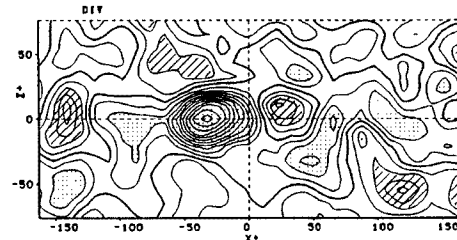
(b) x-component of velocity u



(c) z-component of velocity w



(d) y-component of vorticity ω_y



(e) Divergence

Fig. 5. Two-dimensional ensemble average of velocity, vorticity and divergence obtained through the detecting pattern of Fig. 3.

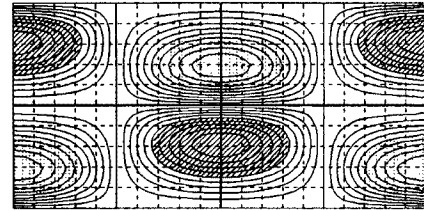


Fig. 6. Detecting pattern for isolated vortex pairs.

二次元発散が正の領域すなわち下降流の発生領域が存在することが注目される。

Fig. 2 の渦度分布においては、数個の渦対が流下方向に連続して配列されている例が多くみられ、その様な配列は Fig. 4 の Cr の計算結果にも現れている。この様な連続した渦対のために、アンサンブル平均された渦度分布が流下方向に長くなると考えられる。

したがって、孤立している渦対の特性を抽出するためには、上記のような連続する渦対をアンサンブル平均から除外する必要がある。そのために Fig. 6 に示すような渦対パターンを検出パターンとし、先と同様にして二次元相互相関係数 Cr を計算した。本パターンは、検出しようとする渦対パターンの上下流に逆位相の渦対パターンを半分だけ配置したものである。ここで、逆位相の渦対パターンと言うのは Fig. 3 に示される渦対パターンの位相を横断方向に半波長分ずらしたものである。

Cr の分布を示すと Fig. 7 の様になる。先に示した Fig. 4 と比較して、 Cr が大きな領域は大幅に減少している。このことは、渦対が単独で存在する確率が非常に小さいことを意味している。言い替えると、多くの場合、渦対は数個連続して配置されている。これらの一連の渦対は一对の縦渦³⁾を形成している。

この様な渦対配列に対する渦対周辺の諸量のアンサンブル平均は Fig. 8 の様である。ここではアンサンブル平均される Cr の閾値を 0.5 とした。この場合には、(d) 図に見られるように渦対の流下方向スケールは約 $100 \nu/u_*$ と小さな値となっている。また、(e) 図から二次元発散の負の領域が Fig. 5 と同様に渦対の中央より上流側にあることがわかる。

4. 渦対検出パターンのスケールの効果

以上においては Fig. 2 の渦度分布に現れている渦

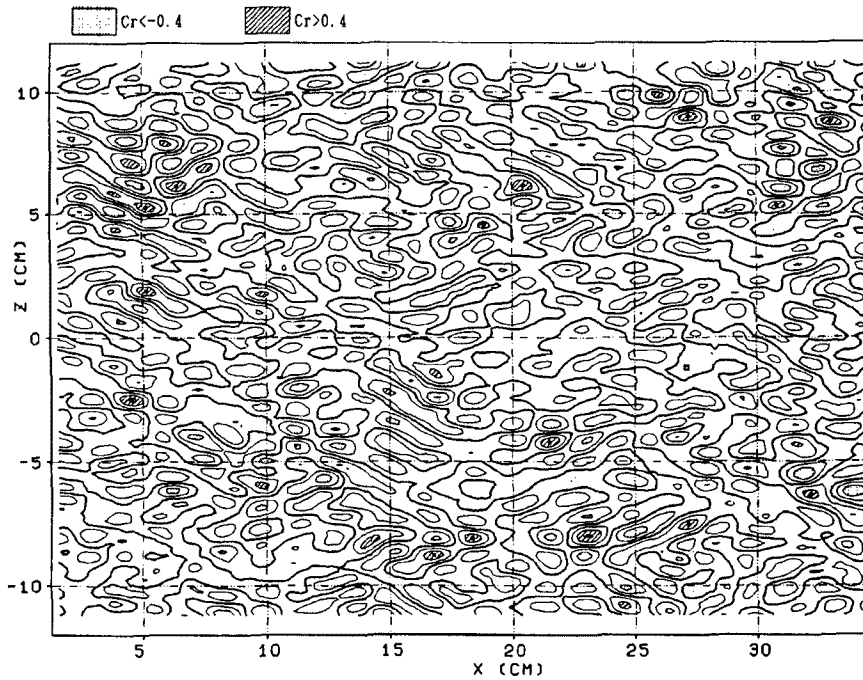


Fig. 7. Distribution of cross-correlation coefficient obtained through the detecting pattern of Fig. 6.

対の平均的なスケールを渦対検出パターンのスケールとしたが、本節においては、渦対検出パターンのスケールを変えると検出される渦構造がどのように変化するかを検討する。

そのために、Fig. 6と類似の渦対配列パターンを検出パターンとし、ただ中央に位置する渦対のスケールを流下方向に変化させた。ここでは、そのスケール L として、 $L^+ = Lu_*/\nu = 65.1, 108.6, 152.0, 217.1$ および 325.7 の5種の値を用いた。また、Fig. 2の渦度分布からわかるように、渦度の絶対値が大きな領域の流下方向スケールは大小さまざまであるが、横断方向のスケールはほぼ一定である。そこで、本研究では渦対検出パターンの横断方向スケールは一定値とした。Fig. 9はその一部を示したものであり、(a)、(b)および(c)図は L^+ がそれぞれ65.1、152.0および325.7の場合の渦対の検出パターンである。また、上下流側に配置されている逆位相の渦対パターンのスケールは、(a)図においては65.1であり、他の場合は108.6である。横断方向のスケールは何れの場合も108.6である。

これらの検出パターンによって計算された二次元相互相関係数 Cr のうち L^+ が65.1と325.7の場合の結果をFig. 10(a)、(b)に示す。先に示したFig. 7は $L^+ = 108.6$ の場合に相当する。これらの図において、 Cr の閾値を0.5としたときの検出点の位置に黒点がつけられている。これらの図から次のことがわかる。

検出パターンの L^+ が最小のFig. 10(a)においては Cr が0.4以上の範囲が小さく、 Cr の閾値が0.5の検出点は14ヶ所 ($100\nu/u_*$ 平方当たり0.040個)しかない。 L^+ が108.6のFig. 7では Cr が0.4以上の範囲はやや大きくなるが、 Cr が0.5以上の検出点はやはり15ヶ所 ($100\nu/u_*$ 平方当たり0.044個)と少ない。これらの点のうち、その (x, z) 座標が(5 cm, 2 cm), (18 cm, -8 cm), (27 cm, 9 cm)および(33 cm, 9 cm)の4点の位置は両図においてほぼ一致している。Fig. 10(a)とFig. 2とを比較すると、この様に検出点が一致する位置には65.1と108.6との中間の流下方向スケールをもつ渦対があり、他の検出点にはそれよりも小スケールの渦対が存在している。

検出パターンの L^+ が最大の場合のFig. 10(b)においては、 Cr が0.4以上の範囲は流下方向に長くなっており、閾値が0.5の検出点は29 ($100\nu/u_*$ 平方当たり0.094個)と多くなっている。なお、ここには

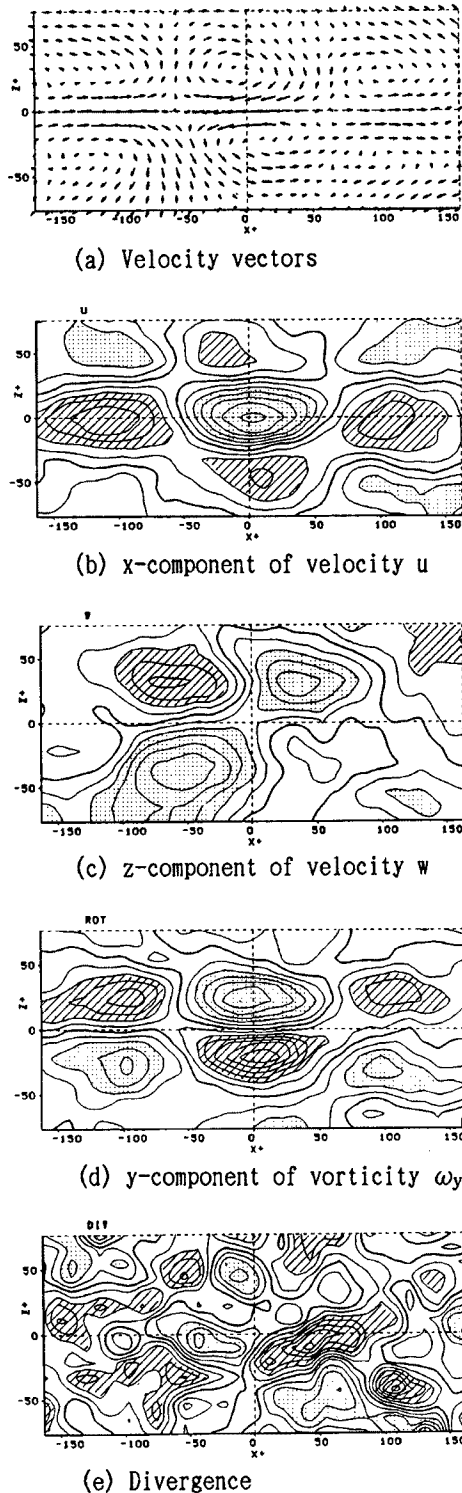


Fig. 8. Two-dimensional ensemble average of velocity, vorticity and divergence obtained through the detecting pattern of Fig. 6.

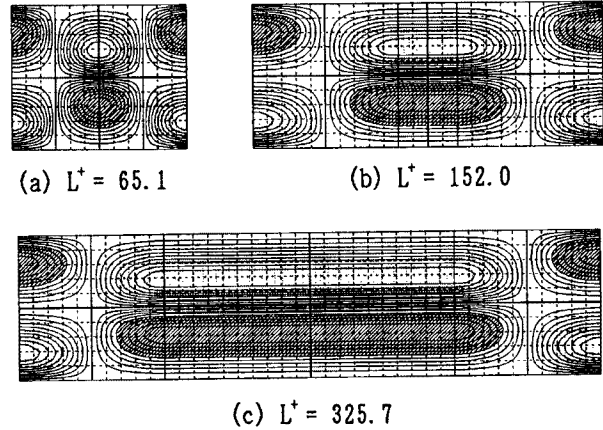


Fig. 9. Detecting patterns for vortex structures of the given longitudinal scale.

示されていないが、 L^+ が 152.0 および 217.1 の場合には、 Cr の分布は Fig. 7 と Fig. 10(b) との中間的な性状を示し、 Cr が 0.4 以上の範囲は L^+ の増加につれて長くなっている。 Cr の閾値が 0.5 の検出点はそれぞれ 32 ($100 \nu/u_*$ 平方当たり 0.096 個) および 31 ケ所 ($100 \nu/u_*$ 平方当たり 0.096 個) であった。

これらの Cr 分布図と Fig. 2 の渦度分布図とを比較すると次のことがわかる。 L^+ が 65.1 の場合には、閾値 0.5 の検出点にはすべて孤立した渦対が対応している。 L^+ が 108.6 の場合には、検出点の殆どは孤立した渦対に対応している。 L^+ が 152.0 の場合には、検出点には孤立した渦対と流下方向に連続した渦対とが同程度の割合で対応している。 L^+ が 217.1 以上の場合には、検出点にはすべて連続した渦対が対応している。

また、各 Cr 分布の間で、検出パターンの L^+ の比が 1.4 - 1.5 の場合には検出点の 40 - 50% が互いに一致しており、その比が 2.0 程度になると約 10% が一致し、その比が 2.3 を超えると一致する検出点は無くなる。

各種の L^+ の値に対する閾値 0.5 の検出点の周辺の流下方向流速成分および鉛直方向渦度成分のアンサンブル平均をそれぞれ Fig. 11 および Fig. 12 に示す。なお、 $L^+ = 108.6$ の場合については Fig. 8 に既に示されている。

これらの図において、流下方向流速分布の $z^+ = 0$ における負の領域の長さおよび渦度分布の渦対の流下方向スケールを求めると、それらは同じ L^+ の検出パターンに対してほぼ等しい値をとり、 L^+ が 65.1, 108.6, 152.0 および 217.1 の場合にそれぞれ 66, 118, 180 および 250 となる。すなわち、検出パターンの L^+ に対応した渦構造が検出されていることがわかるが、後者のスケールの方が前者

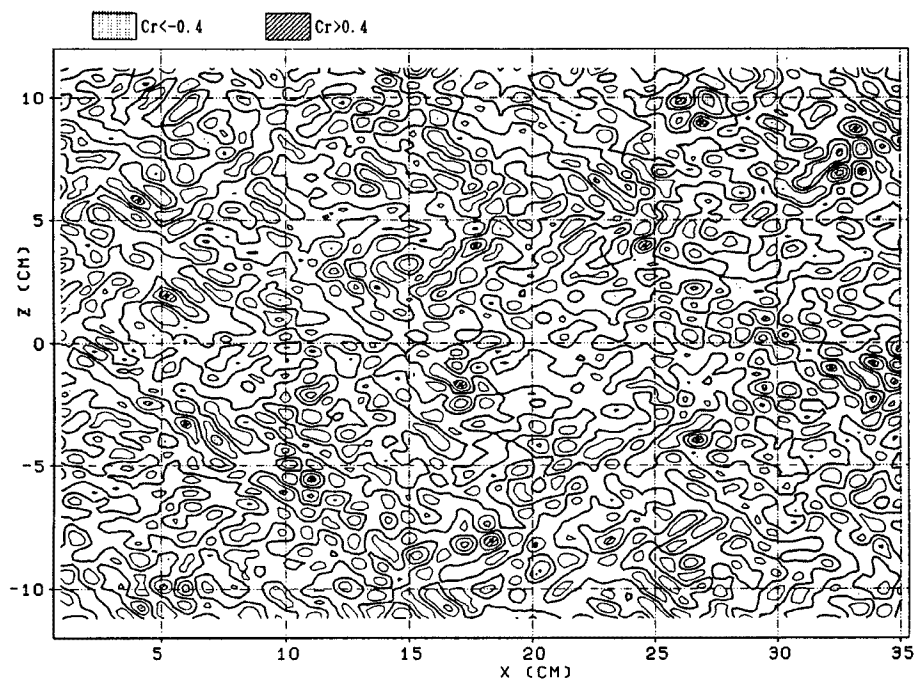
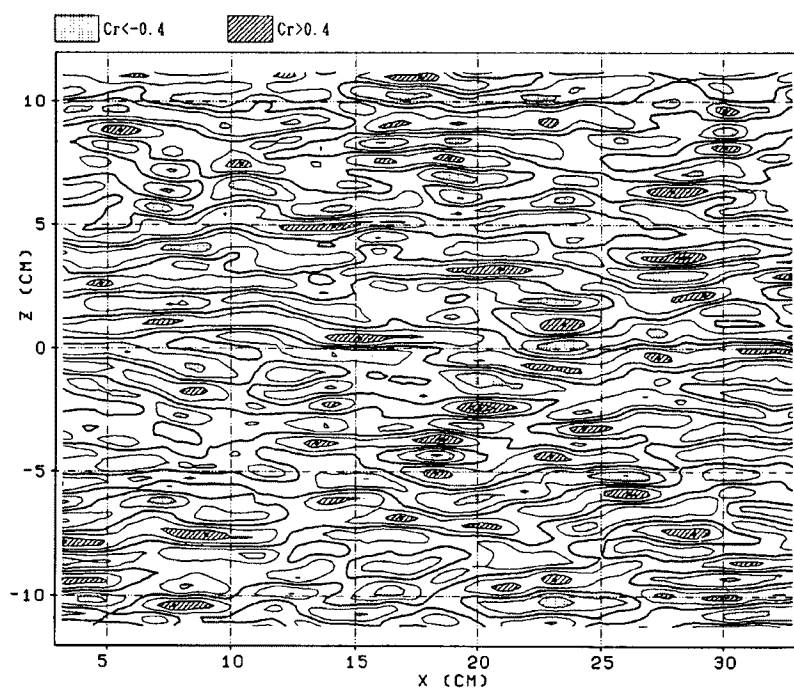
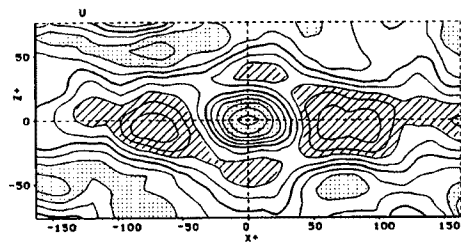
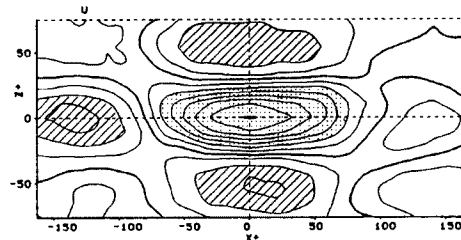
(a) $L^* = 65.1$ (b) $L^* = 325.7$

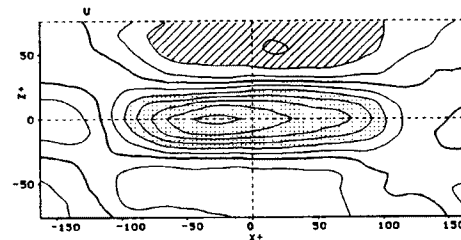
Fig. 10. Distribution of cross-correlation coefficient obtained through the detecting pattern of (a); Fig. 9 (a) and (b); Fig. 9 (c).



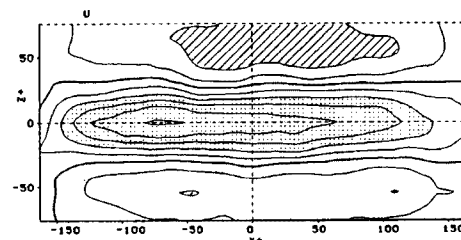
(a) $L^+ = 65.1$



(b) $L^+ = 152.0$

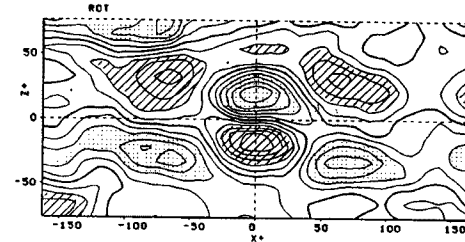


(c) $L^+ = 217.1$

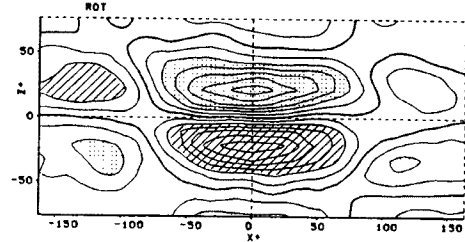


(d) $L^+ = 325.7$

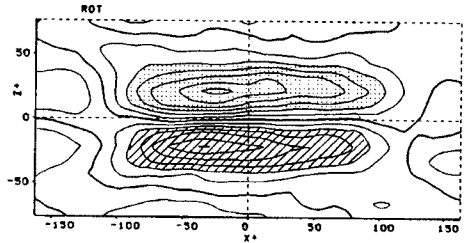
Fig. 11. Two-dimensional ensemble average of x -component of velocity obtained through the detecting patterns partly shown in Fig. 9.



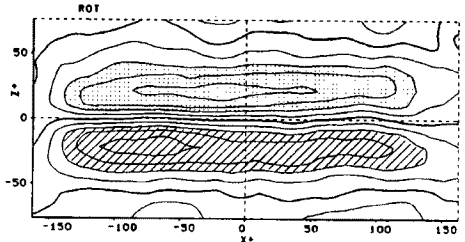
(a) $L^+ = 65.1$



(b) $L^+ = 152.0$



(c) $L^+ = 217.1$



(d) $L^+ = 325.7$

Fig. 12. Two-dimensional ensemble average of y -component of vorticity obtained through the detecting patterns partly shown in Fig. 9.

のそれよりも僅かに大きくなっている。

ここで注目されるのは、Fig. 11(c) および (d) において、渦対構造内の流速分布の極小値が上流側に偏っていることである。これは、Fig. 12(c) および (d) においても渦度の極大値が上流側に移動していることと対応している。 L^+ が 108.6 以下の場合にはアンサンブル平均された渦度分布は単一の渦対となっているが、 L^+ が 217.1 以上では、流下方向に連続した渦対すなわち縦渦が検出されていると考えられ、上記の事実は、縦渦内においては上流側に位置する馬蹄型渦の渦度が比較的大きくなることを示して

いる。縦渦を構成する各渦対（馬蹄型渦）の特徴については次節にあらためて検討する。

5. 縦渦内の渦対の特徴

さきに、渦対は流下方向に数個連なって発生し縦渦を形成することが多いことを指摘した。本節ではこの様な縦渦内の渦対構造の特徴を調べる。とりわけ、縦渦を形成する渦対のうち最も上流側の渦対と最も下流側のそれとの性格の相違について興味を持たれる。

そこで、Fig. 13 に示すような渦対配列パターンを検出パターンとして二次元相互相関係数 Cr を計算した。ここで、(a) 図は検出パターンの中心に縦渦内の最上流の渦対が配置されている場合であり、(b) 図はそこに最下流の渦対が配置されている場合である。それぞれの検出パターンに対する Cr の計算結果においては、 Cr の閾値を 0.5 とした場合の検出点は (a) では 38 ケ所 ($100 \nu/u_*$ 平方あたり 0.118 個)、(b) では 32 ケ所 ($100 \nu/u_*$ 平方あたり 0.099 個) 数えられる。

これらの検出点のまわりの諸量のアンサンブル平均は Fig. 14 および Fig. 15 に与えられている。Fig. 14 においては、(d) において渦度が縦渦内で二つのピークをもつことを示しており、(b) において流下方向流速が流下方向に二つのピークを示していることと対応している。これらのピーク点における渦度ないしは流速の絶対値は、上流側の方が大きくなっていることが注目される。

Fig. 15 においても、(d) および (b) 図より、縦渦内に複数の渦対があることがわかる。この場合も、渦度ないしは流速の絶対値は上流側における方が大きくなっている。

以上の事実から、縦渦内に渦対（馬蹄型渦の脚部）が複数個連なってある場合、渦対の渦度は下流側に行くにつれて小さくなることがわかる。これらの中で最上流にある渦対においては、渦度の絶対値が左右の渦ではほぼ等しくなっており、より規則的な渦対が形成されていると考えられる。また、各々の渦対に流下方向流速の負のピークが対応しているが、その絶対値は上流側のものほど大きくなっている。

以上の特徴を考慮して、乱流場をプローブ計測した場合を考察してみよう。乱流構造が流下する間に大きな変形がないと仮定して、プローブが一つの縦渦を捉えた場合を想定しよう。その場合、まず Fig. 15 (b) の $x^+ = 100$ あたりからの急激な減速が計測され、計測値は最初の極小値に達する。その後も計測値は負の流速を維持しながら馬蹄型渦に対応した流速の極小値をいくつか捉えて波状に変動しながら、全体的には減少してゆき、Fig. 14 (b) の $x^+ = 20$ あたりの流速の最小値に達した後、同図 $x^+ = 20$ から -120 に示される急激な加速を経て縦渦が終ることになる。この加速現象は最初の減速現象より急激な速度変動を伴うことがわかる。

この様な急激な加速現象は Blackwelder ら⁴⁾ の VITA 法、あるいは Wallace ら²⁾ のパターン認識法で捉えられた流速変動の典型的パターンである。彼らが組織構造として捉えたのは、縦渦の上流端付近における流速変動であり、そこでは複数の縦渦の特徴的な配列によって急激な加速現象が引き起こされる。

Fig. 14 (e) および Fig. 15 (e) に示される発散の分布から、縦渦中の各渦対は負の発散即ち上昇流を伴っており、これは ejection に相当すると考えられる。Bogard ら⁵⁾ は、流れの可視化とプローブ計測と

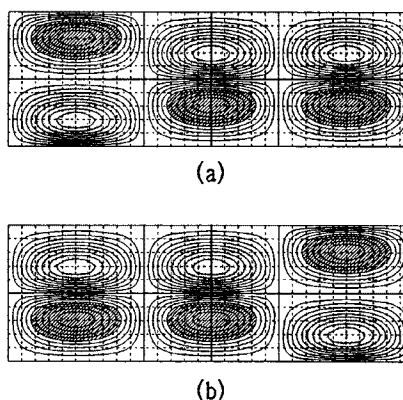
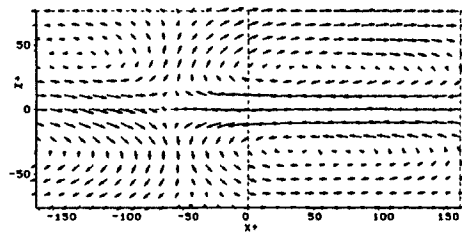
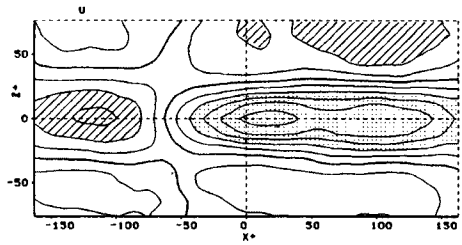


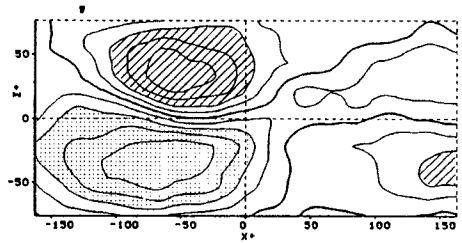
Fig. 13. Detecting pattern for (a); the vortex pair at the upstream end and (b); the vortex pair at the downstream end in the longitudinal vortices.



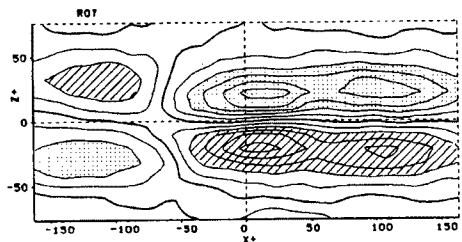
(a) Velocity vectors



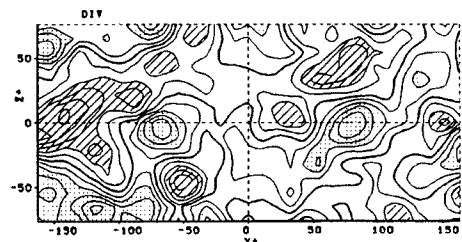
(b) x-component of velocity u



(c) z-component of velocity w

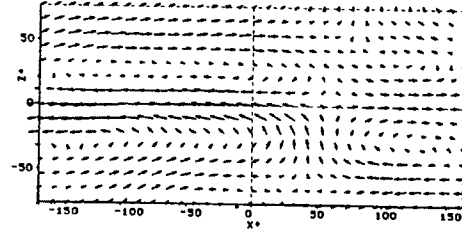


(d) y-component of vorticity ω_y

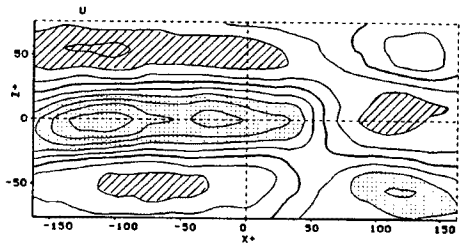


(e) Divergence

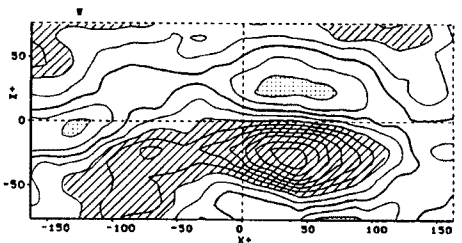
Fig. 14. Two-dimensional ensemble average of velocity, vorticity and divergence obtained through the detecting pattern of Fig. 13 (a).



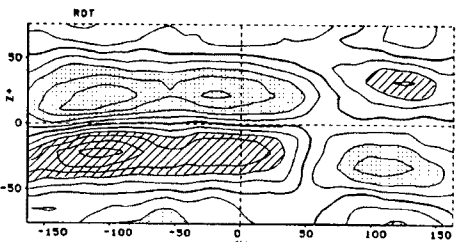
(a) Velocity vectors



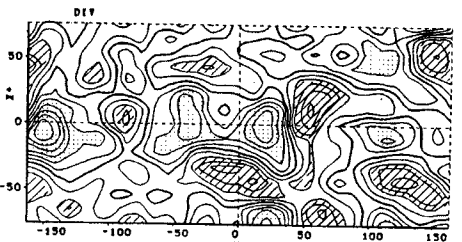
(b) x-component of velocity u



(c) z-component of velocity w



(d) y-component of vorticity ω_y



(e) Divergence

Fig. 15. Two-dimensional ensemble average of velocity, vorticity and divergence obtained through the detecting pattern of Fig. 13 (b).

の同時併用による実験を行い, burst 現象は複数の ejection によって引き起こされるという考えの下に, burst 現象を構成する個々の ejection の関係を検討した。彼らの言う burst 現象を本研究の縦渦と対応させることができるから, 彼らの現象認識は本研究のそれと一致している。しかし, 彼らは一つの burst 現象の内の最初の ejection は 2 番目の ejection より著しく強いことを指摘しており, これは本研究の結果と異なる。

6. 渦対構造の配列

渦対の配列状況を把握するために, 渦対構造の各種の配列パターンを抽出するための検出パターンとして Fig. 16 に示すようなものを設定し, 先と同様に元の渦度分布との間で二次元相互相関係数 Cr を計算した。本図においては, 各渦対は半分だけ配置されているが, これは渦対の相互の位置関係にだけ注目してそれらの配列パターンの特徴を検出しようとしたためである。

Fig. 16 において, (a) は渦対構造が流下方向に連続するパターン, (b), (c) および (d) は上流側の渦対が横断方向にそれぞれ $1/4$ 波長, $1/2$ 波長および $3/4$ 波長ずれて配列されているパターンを示している。また, (e) 図においては上流側に通常の渦対があり, 下流側には逆位相の渦対が配置されており, (c) と (e) とは互いに軸対称となっている。なお, パターンの範囲は $16\text{ mm} \times 16\text{ mm}$ である。

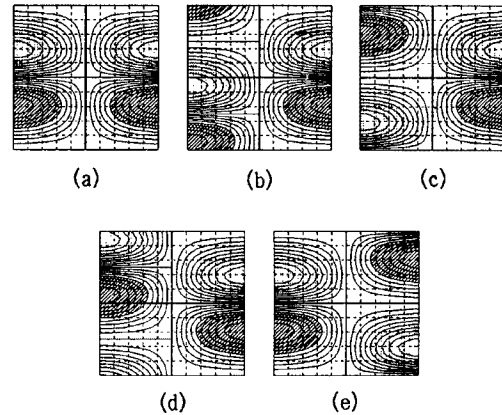


Fig. 16. Detecting patterns for typical arrangements of vortex pairs.

(a) の検出パターンにより計算された Cr の分布を Fig. 17 に示す。本図においては, Cr の大きな領域が流下方向に細長く連なっており, それらが横断方向に $100 - 200 \nu/u_*$ の間隔で分布していることがわかる。また, 検出パターンから考えると, Cr の値の大きな領域を挟んで馬蹄型渦が流下方向に連なって配列されており, 全体として縦渦を形成している。この縦渦の長さは $1000 \nu/u_*$ にまで達している。

(b) の検出パターンから計算された Cr の分布を Fig. 18 に示す。本図においては, Cr の同符号の領域が斜め方向に連続するという特徴が認められる。この傾きは Fig. 16(b) の検出パターンにおける渦対の配列の方向とほぼ一致している。また, Cr が 0.4 以上の領域は, Fig. 17 の場合ほどには大きくないが, かなり広い範囲を占め, Cr の閾値が 0.6 の検出点 (図中に黒点で示す) の数は 82 ($100 \nu/u_*$ 平方当たり 0.23 個) と多くなっている。Fig. 18 を Fig. 4 と比較すると, これらの検出点の多くは縦渦内の渦対どうしが僅かに横断方向にずれて連続する位置関係にあり, 他は横断方向に僅かにずれて配列されている縦渦の端に位置することがわかる。

(c) の検出パターンから計算された Cr の分布を Fig. 19 に示す。本図で, Cr の大きな領域は Fig. 17 および 18 のそれよりかなり狭く, またそれらは斜め方向に飛石状に分布している。 Cr の閾値を 0.6 としたときの検出点の数は 54 ($100 \nu/u_*$ 平方当たり 0.15 個) となっている。

Fig. 19 を Fig. 17 あるいは Fig. 4 と比較すると, 検出点の多くは縦渦の上流端付近に位置している。すなわち, このような配列パターンは縦渦どうしが千鳥状に配列される場合に, 縦渦の上流端付近に現れるパターンであり, このようなパターンがかなり頻繁に現れていることがわかる。

(d) の検出パターンから計算された Cr の分布は, Fig. 18 と同様の傾向を示す。ただしこの場合は, Cr の同符号の領域が Fig. 18 と逆の傾きをもって連なっている。 Cr の閾値が 0.6 の検出点の数は 81 (100

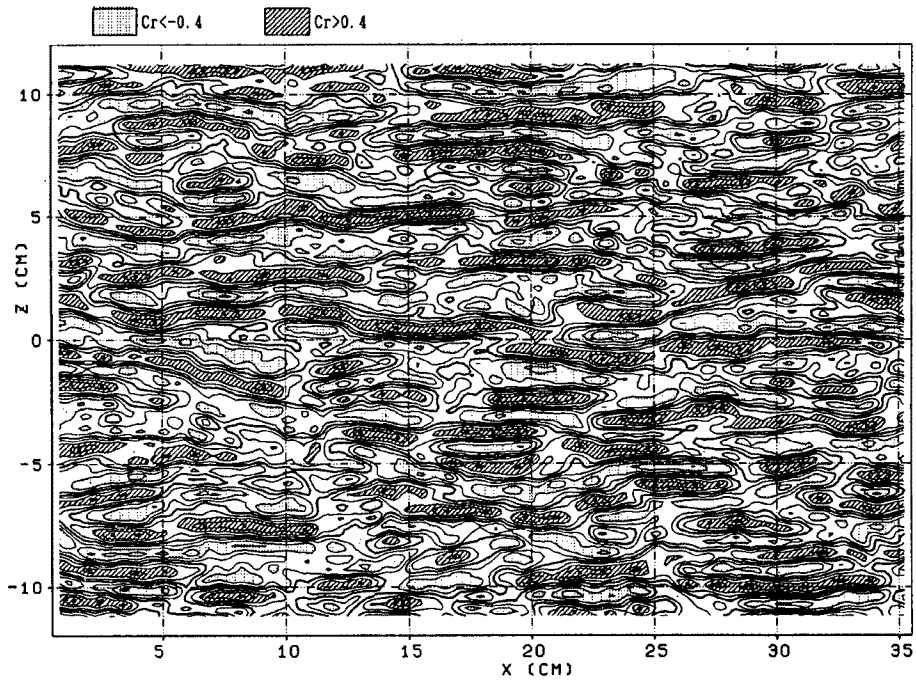


Fig. 17. Distribution of cross-correlation coefficient obtained through the detecting pattern of Fig. 16 (a).

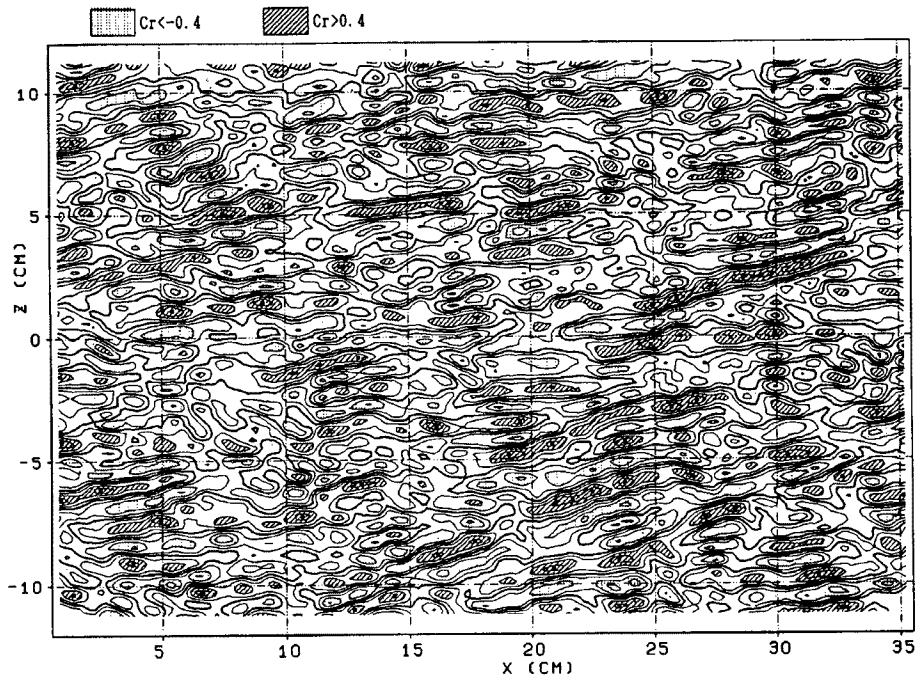


Fig. 18. Distribution of cross-correlation coefficient obtained through the detecting pattern of Fig. 16 (b).

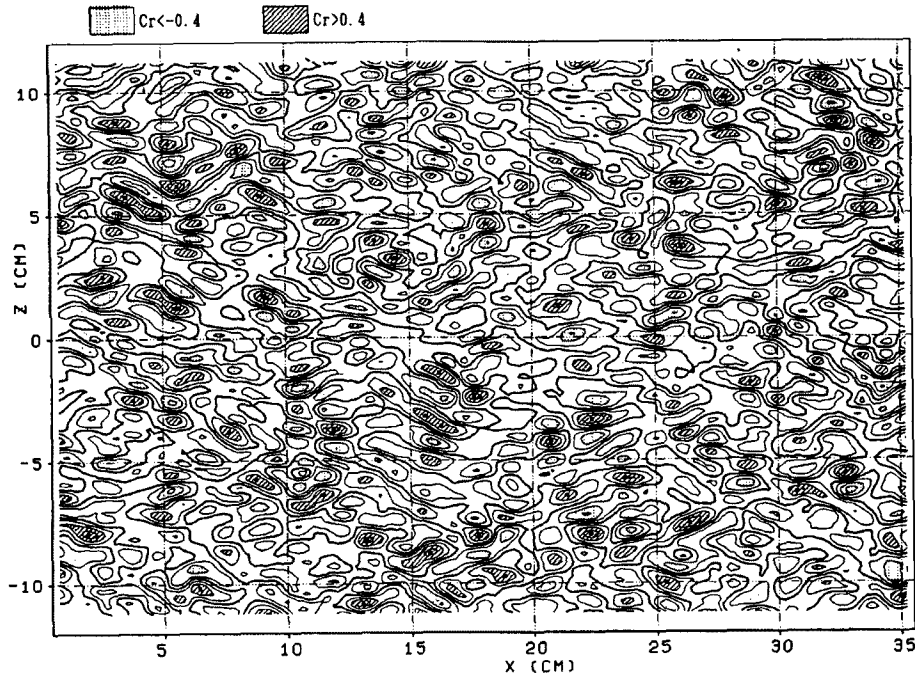


Fig. 19. Distribution of cross-correlation coefficient obtained through the detecting pattern of Fig. 16 (c).

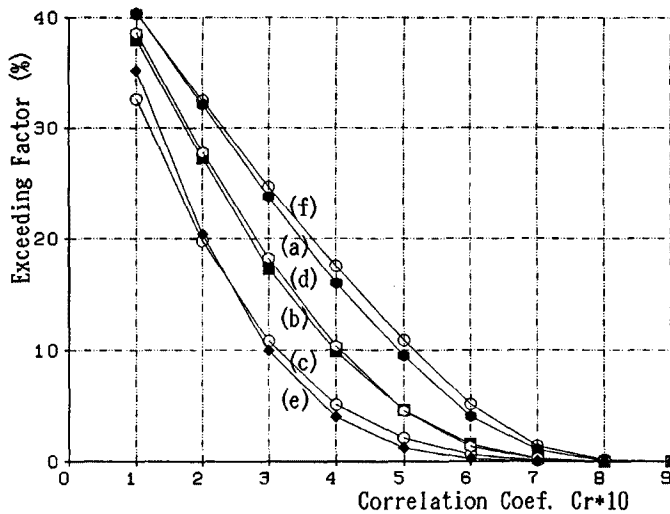


Fig. 20. The factor of the area in which correlation coefficient exceeds the threshold value.

合を示すと Fig. 20 の様になる。図において (a) (e) の各折れ線は Fig. 16 に示された (a)-(e) に対応しており、(f) は Fig. 3 に対応している。

本図より次のことが指摘される。

- ① Cr が 0.1 - 0.2 の場合には、検出パターンによる面積率の差異は少ない。したがって特徴的なパターンを検出するには、 Cr の閾値を高くとる必要がある。
- ② (a) の折れ線と (f) のそれとは接近しており、これは渦対の多くは流下方向に連なって縦渦を形成していることの反映であると考えられる。
- ③ 当然のことながら、(b) と (d) の折れ線はほぼ一致している。それらが折れ線 (a) よりかなり下にあ

ν/u_* 平方当り 0.23 個) となり、Fig. 18 の場合とほぼ等しい。

(e) の検出パターンから計算された Cr の分布は、Fig. 19 の正負を逆転させたものにはほぼ一致する。これは、(e) の検出パターンと (c) のそれとがほぼ軸対称の関係にあるためである。ただしこの場合は、 Cr の閾値が 0.6 の検出点の数は 27 ($100 \nu/u_*$ 平方当り 0.076 個) となり、(c) の場合の 1/2 となっている。

次に、各検出パターンに対する Cr 分布において、 Cr が一定の値より大きな領域の面積を比較してみた。各々の面積の全体の面積に対する割

ることから、縦渦内の渦対が横断方向にずれて連なるパターンはそれほど多くないと言える。④ (c) の検出パターンと (e) のそれとは軸対称であるが、 Cr が 0.5 以上では (c) の方がかなり大きくなっている。これは前節で検討したように、縦渦内の最上流に位置する渦対の構造が規則的でかつ渦度が大きいことと関連していると考えられる。⑤ 先述のように、渦対は複数個集まって縦渦を形成することが多いが、その様な縦渦どうしの位置関係によって (c) あるいは (e) の配列パターンが発生する。このようなパターンの発生率は、当然 (a) のそれより小さくなる。

7. 結 語

開水路流れの水平断面の可視化写真を画像処理して得られたデータに、二次元パターン認識法を適用して、開水路乱流の組織構造を検討した。すなわち、乱流場の基本構造は馬蹄型渦の水平断面を示す渦対構造であると考えて、渦対構造を基本とするいくつかの検出パターンを設定し、それと渦度場との相関をとることによって渦対およびそれらの特徴的な配列状態を検出した。また、検出点付近の水理量のアンサンブル平均を計算した。その結果次のことが明らかになった。

①本研究で用いられた渦度分布に関する二次元パターン認識法によって、一次元パターン認識法では捉えられなかった特徴的な渦対構造ならびに渦対の二次元的な配列状況が検出された。

②検出点周辺の水理量のアンサンブル平均から、渦対内のあるいは縦渦内の流速分布や上昇流の発生位置に関して規則性が見いだされた。

③検出パターンにおける渦対のスケールをおよそ $200 \nu/u_*$ 以上にすると、複数の渦対からなる縦渦が検出され、その中では、上流側の渦対ほど平均的に強い渦度をもっており、それにともなって渦対中央部の流下方向流速の極小値は上流ほど小さい。

④このような縦渦がプローブ計測された場合を想定すると、最初に捉えられる縦渦下流端の減速現象より、最後に捉えられる縦渦上流端の加速現象の方が平均的に急激である。

⑤渦対は複数個集まって縦渦を形成することが多く、また、これらの縦渦が千鳥状に配列されるパターンが乱流場においてかなり頻繁に発生している。

参 考 文 献

- 1) 上野鉄男・宇民 正・R. F. Blackwelder: 開水路乱流の水路床近傍の組織構造について, 第 33 回水理講演会論文集, 1989, pp. 547 - 552.
- 2) Wallace, J.M., R.S. Brodkey and H. Eckelman: Patternrecognized structures in bounded turbulent shear flows, J. Fluid Mech., Vol. 83, 1977, pp. 673 - 693.
- 3) Utami, T. and T. Ueno: Experimental study on the coherent structure of turbulent open-channel flow using visualization and picture processing, J. Fluid Mech., Vol. 174, 1987, pp. 399 - 440.
- 4) Blackwelder, R. F. and R. E. Kaplan: On the wall structure of the turbulent boundary layer, J. Fluid Mech., Vol. 76, 1976, pp. 89 - 112.
- 5) Bogard, D. G. and W. G. Tiederman: Characteristics of ejections in turbulent channel flow, J. Fluid Mech., Vol. 179, 1987, pp. 1 - 19.