

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 (3)

Visualization and Processing of Series of Flow Patterns
in Horizontal Cross-sections (3)

京大防災研究所 正員 宇民 正

京大防災研究所 正員 上野鉄男

1. まえがき 乱流構造が組織化されておれば、その部分の局所的な流れパターンは時間経過の後も元のパターンと相似性を示すであろうという予測の下に、流れの可視化写真を数量的に解析し、乱流の組織構造とその特徴を明らかにしようとした。すなわち、一様な開水路流れの場の水平断層面写真をトレーサー法により時間的に連続して撮影し、得られた各写真の間で、局所的な流速分布のパターンを相関解析の手法を用いて相互比較することにより、ある時点のある地点におけるパターンが次の時点（すなわち次の写真）のどの地点の局所的なパターンに最もよく似ているかを見出した。その結果から局所的な流れパターンの相似性を数量化して図示し、それを流れの渦構造の分布と比較することにより、乱流の三次元構造を解明しようとした。

なお、本報告では、x軸は主流流下方向、y軸は水平かつ主流横断方向、z軸は鉛直上向き方向にとっており、各軸方向の流速成分は u 、 v 、 w で表現している。また、 u は流下方向流速成分から当該断面内でのそれらの平均値を差引いたものを意味している。

2. 実験方法 実験方法と資料は既報のものをを用いた。¹⁾ すなわち、図-1に示されるように流れの上層断層面（水路床面から9.3mm）内の流況と下層断層面（水路床面から4.0mm）内のそれとを0.2秒毎に交互に撮影した。シャッター開放時間は0.16秒である。

3. 局所相関係数 各写真に写しこまれた各々のトレーサーの軌跡の長さや方向から得られる速度ベクトル分布を内挿することにより、4mm方眼の格子点上の流速ベクトルが得られる。一例として写真番号No.234（下層断面）の流速ベクトル分布を図-2に、また流下方向速度成分の分布を図-3に示す。ただしこのベクトル分布は、各ベクトルから断面内の平均流下方向流速を差引いたものの分布である。このような一つの断面ベクトル場(I)のある点 (x_1, y_1) と別の断面ベクトル場(II)のある点 (x_2, y_2) の間の流下方向流速成分 u に関する局所相関係数を下のように定義した。すなわち、図-4に示すように、点 (x_1, y_1) を中心として断面ベ

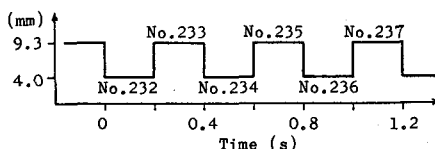


図-1 撮影された水平断面の高さの変化

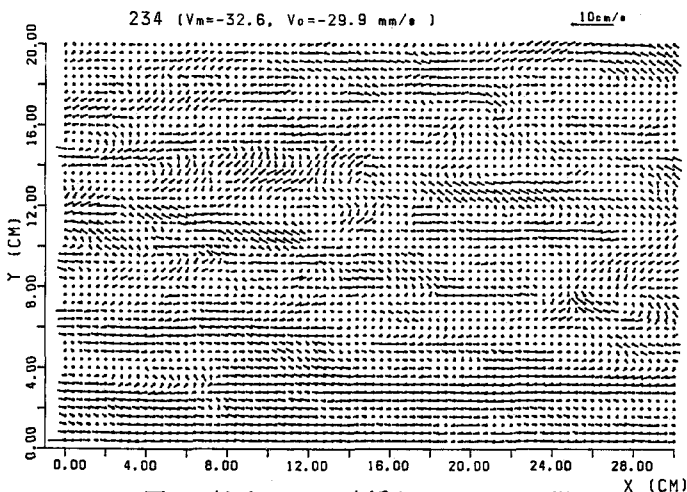


図-2 断面No.234の内挿されたベクトル場

クトル場(I) 内で x 軸方向に 4mm 間隔で13点、 y 軸方向に 5点、都合65点の格子点を取り、それらの各点における流速の x 方向成分に $u_1(1)$ から $u_1(65)$ まで番号づけた。同様に他方の断面ベクトル場(II)についても点 (x_2, y_2) を中心として65点を取り、それらから番号づけられた u の値 $u_2(1) \sim u_2(65)$ がえられる。点 (x_1, y_1) と点 (x_2, y_2) の間の局所相関係数 Ru は、 $u_1(1) \sim u_1(65)$ と $u_2(1) \sim u_2(65)$ の間の相互相関係数で与えられるとした。

ここで、 x 軸方向に13点、 y 軸方向に 5点の格子点をとったのは、それら65の格子点がおおう断面ベクトル場の領域($5.2\text{cm} \times 2.0\text{cm}$)が流れ場の基本的なスケール(渦のスケール、低速縞の間隔など)とほぼ同程度となるようにした結果である。

4. 局所相関ベクトルと最大局所相関係数の定義 断面ベクトル場(I) の点 (x_1, y_1) に対して、断面ベクトル場(II)の中から最も大きな局所相関係数を与える点 (x_2, y_2) を選びだし、 $(\{x_2 - x_1\}/\Delta t, \{y_2 - y_1\}/\Delta t)$ を成分とするベクトルを点 (x_1, y_1) を起点として描き、それを局所相関ベクトルと定義することとする。ただしここで、 Δt は断面ベクトル場(I) と(II)の間の撮影時間間隔であり、空間座標系は断面ベクトル場(I) の平均流速で並進する系である。

図-5は共に下層断面(水路床面から 4.0mm)に位置する断面ベクトル場No.234とNo.236の間の局所相関ベクトルの分布を示したものである。この場合、2 断面の水路床からの高さは同じであるから、局所相関ベ

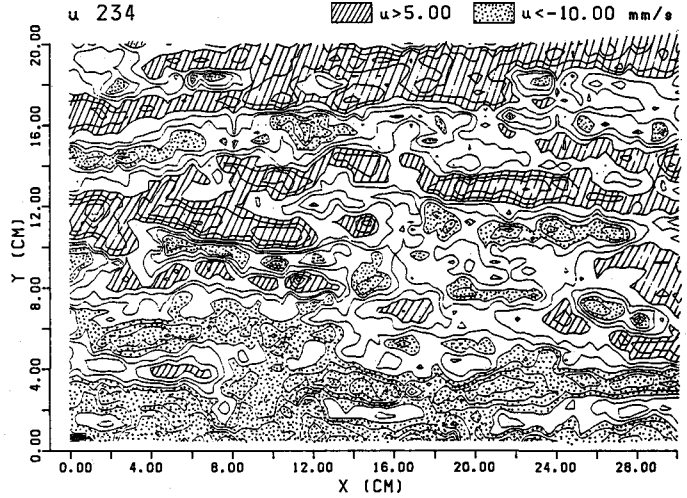


図-3 断面No.234の u 分布

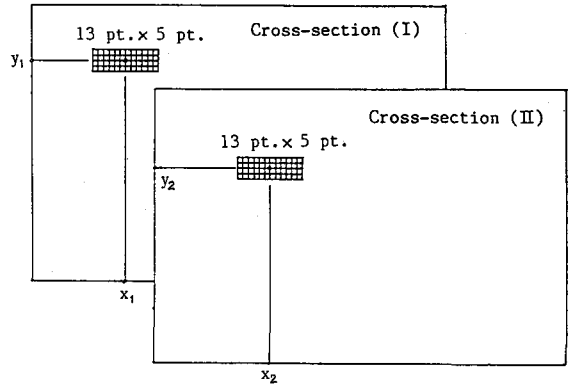


図-4 局所相関係数 Ru の定義

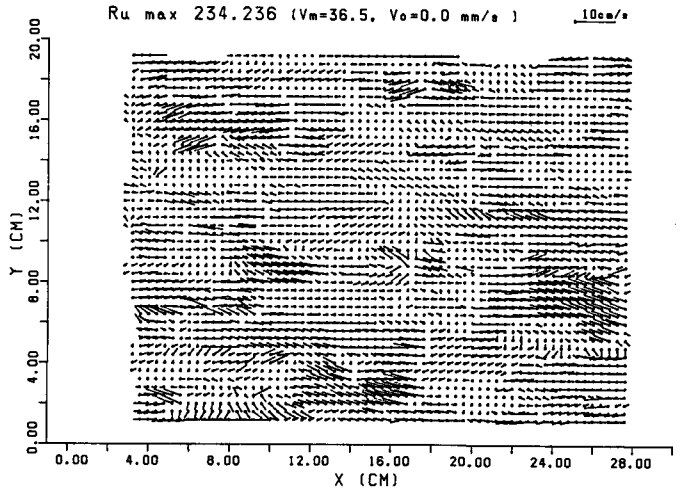


図-5 局所相関ベクトル (No.234とNo.236)

トルは乱流の局所的な構造の実質部分の移動速度を表現していると考えてよいであろう。図-6は上の計算過程で求められた各点(x, y)における最大局所相関係数の値の分布を示している。一方、図-7は、高さ方向に5.3mm隔たった2つの断面ベクトル場 No.234(下層側、T=0.0)とNo.235(上層側、T=0.2s)の間で、No.234の各点毎に先と同様にして最大局所相関係数を求め、その分布を等値線で表現したものである。この場合、二つの断面ベクトル場の撮影時間差0.2秒に対して、断面間距離は比較的大きいので、二つの断面ベクトル場の間で局所相関ベクトルで結合される点どうしは、両者がおのの同一の局所的な乱流構造に属しており、その別の断面を示しているものとするのが妥当であろう。

5. 局所相関係数の定義の再検討

上記の計算では、局所相関係数を求めるのに13点×5点=65点の格子点での流下方向流速成分uを用いた。この適用においては65点という格子点の数の適当性ならびに横断方向流速成分vを考慮していない事が懸念される。

まず、点の数の妥当性を検討するために、上記13点×5点の代わりに、9点×3点=27点ならびに21点×9点=189点について先と同様に局所相関係数を定義し、最大局所相関係数Ruの分布を求めた。図-8にはこれら三種の最大局所相関係数の0.7の等高線を示してある。本図から、局所相関係数を計算する格子点の数が少ない程等高線の形は入りくんだものとなっているが、Ruの大小関

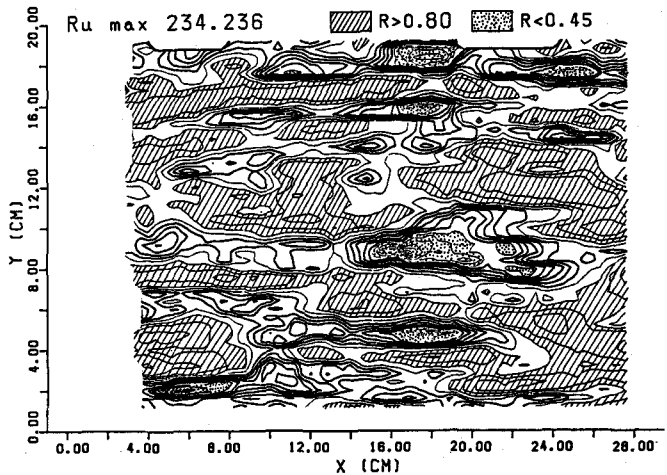


図-6 最大局所相関係数の分布 (No.234とNo.236)

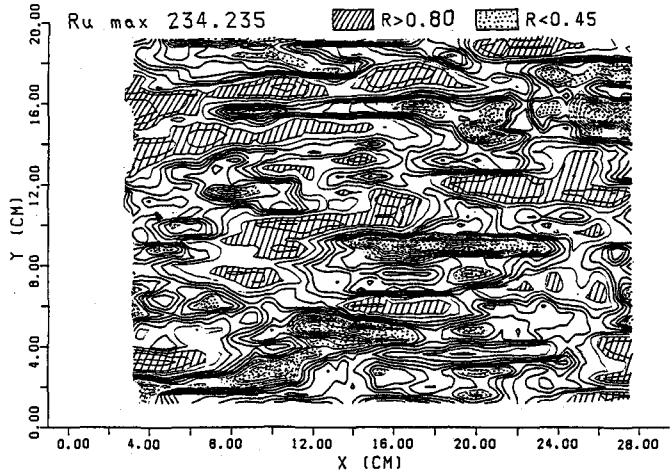


図-7 最大局所相関係数の分布 (No.234とNo.235)

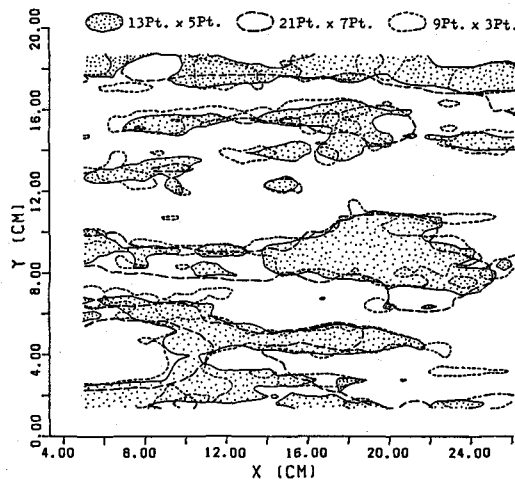


図-8 相関をとる格子点の数によるRuの変化

係の大勢は点の数により変わっていないことがわかる。したがって、検討する乱流のスケールに応じて格子点の数を決めるという先の方法は妥当なものといえよう。

次に、格子点の数は先の計算通り13点×5点=65点とし、これらの点について横断方向流速成分 v に関する相関性を考慮に入れた相関係数を導入し計算してみた。すなわち、第一に、 v についても u と同様に局所相関係数 R_v を計算し、 u に関する局所相関係数 R_u との幾何平均値 $R_{uv} = \sqrt{R_u \times R_v}$ をもって局所相関係数とした。ただし、 $R_u \times R_v < 0$ のときは $R_{uv} = 0$ とした。第二に渦度について先と同様に相関係数 R_r を計算し、これを渦度に関する局所相関係数とした。

断面 No.234 と No.236 の間で以上の R_u , R_{uv} および R_r を用いてそれぞれ最大局所相関係数の分布を計算し、その0.7の等高線の位置を図-9に比較して示した。本図において、これら三者の大小の傾向は大局的には一致していることが認められる。したがって、本論文では、最初に示した様に u に関する局所相関係数を採用し、以下の考察を進めることとする。

6. 乱流構造と渦運動 図-10は断面ベクトル場No.234の鉛直方向渦度成分の分布を示している。本図において渦度の絶対値の大きな所で、図-6の最大局所相関係数も基本的には大きくなっていることがわかる。

ところで、乱流構造が組織化されておれば、その基本的な部分は時間経過があってもその相似性を保存し

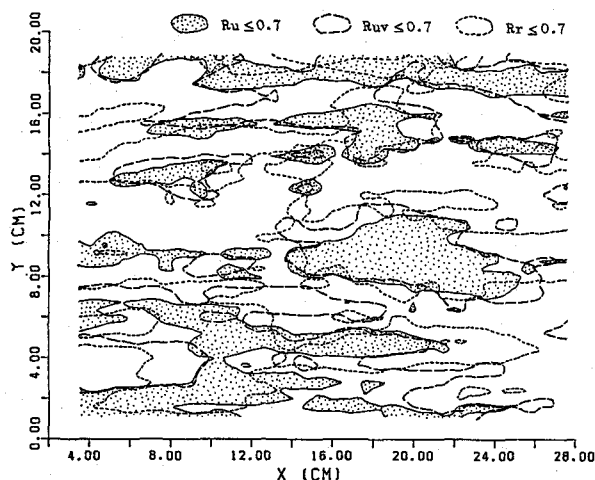


図-9 三種の最大局所相関係数 R_u , R_{uv} および R_r の比較

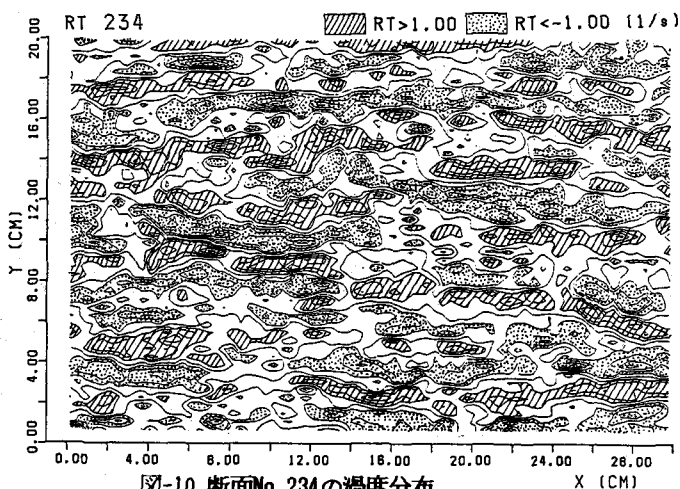


図-10 断面No.234の渦度分布

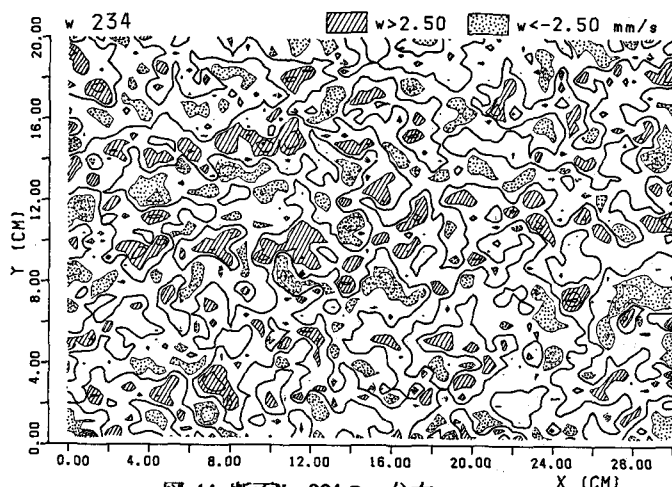


図-11 断面No.234の w 分布

やすいと考えられる。したがって以上の事実から、乱流の組織構造の基本は渦運動であるということができよう。

7. Ejection s とSweeps とBurstings

上で得た写真はすべて流れの水平断面の写真であるから、直接的には流速の水平方向成分(u,v) に関する情報しか含まない。しかし、ある仮定を設けると連続の条件から鉛直方向流速成分w を計算することができる。²⁾

一例としてNo.234断面の w分布は図-11 のようになる。この断面について、このようにして得た w分布と -uの分布の間で次のように定義されるT関数 $T-u,w(x,y)$ を計算し、図-12 に示した。すなわち、

- * $u(x,y) \cdot w(x,y) > 0$
 ならば、 $T-u,w(x,y) = 0.0$
- * $u(x,y) > 0$ かつ $w(x,y) < 0$
 ならば、

$$T-u,w(x,y) = u(x,y) \cdot w(x,y)$$

- * $u(x,y) < 0$ かつ $w(x,y) > 0$
 ならば、

$$T-u,w(x,y) = -u(x,y) \cdot w(x,y)$$

ここで、 $u(x,y)$ および $w(x,y)$ はおのおのの平均値と標準偏差で規準化されている。

T関数の定義から、本図において $T-u,w(x,y)>0$ の所では Ejections が、 $T-u,w(x,y)<0$ の所では Sweeps が生じていることが理解できる。しかも本図と図-10 とを比較すると概念的に図-13 に示すような分布特性を示していることがわかる。

以上から、乱流の組織構造をHorse-shoe Vortex x を基本として考えると Horse-shoe Vortex, Ejections,

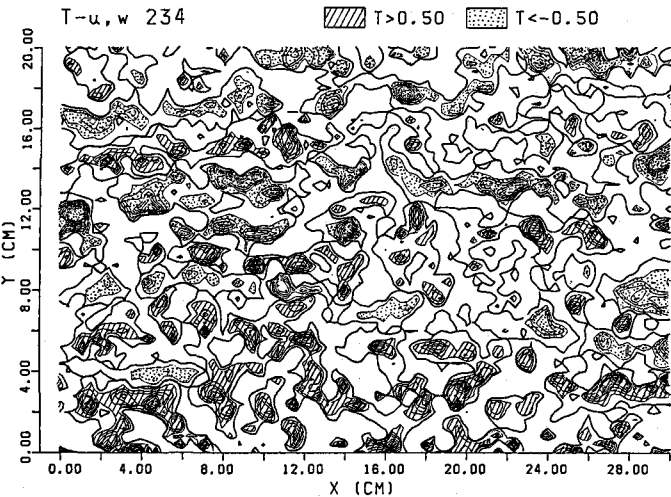


図-12 No.234断面の $T-u,w(x,y)$ の分布

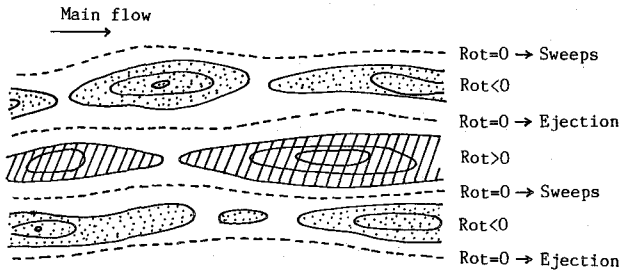


図-13 Sweeps/Ejectionsと渦度との相互関係

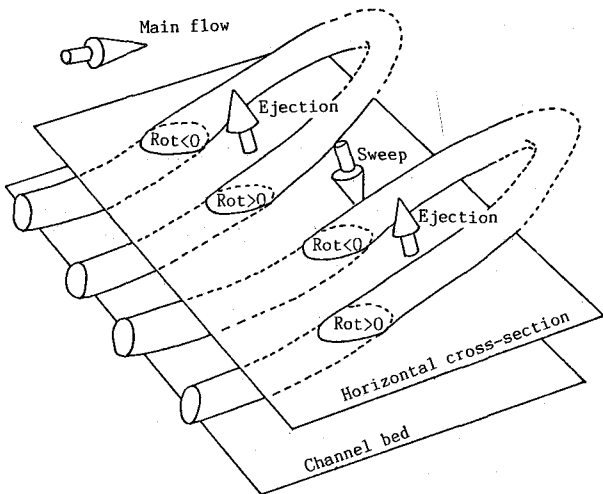


図-14 Sweeps, Ejections, Rotation, Horse-shoe Vortex の相互関係の概念図

Sweeps の関連は概念的に図-14 のように表現され得よう。図-13 に示される配置はこのようなHorse-shoe Vortex が図-15 に示される様に流下方向に行儀よく並んだ結果生じたものと考えられる。しかし、図-10 でも明らかなように、渦度の配列は必ずしも主流流下方向に直線的に並んだものばかりではなく、渦度が正/負の領域が負/正の領域に転じたり、あるいは正/負の領域が枝分れしたりしている。

さて、最大局所相関係数 R_u が大きな値を示す領域については以上に検討した通りであるが、 R_u の分布を示す図-6あるいは図-7においては R_u の値が極度に小さい領域も同時に存在する。この領域が渦度の分布とどのような関係になっているかを次に見てみよう。

図-16 はNo.234断面の渦度分布の峰線と谷線を示したものである。本図で、基本的には峰線は峰線どうし谷線は谷線どうし流下方向に連なっているが、ある所では峰線と谷線とが複雑に交差しており、このような所で図-6の最大局所相関係数 R_u が極度に低下していることがわかる。この部分では u の値も極度に小さくなっており、これらの諸特徴を考えあわせると、この部分の形成にいわゆるBurstingが寄与していると考えられる。

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 (2)、第28回水理講演会論文集、1984、pp.207-212.
- 2) 宇民 正、上野鉄男 : 大規模乱流構造の可視化と解析(2)、京大防災研究所年報、No. 26、B-2、1983、pp. 461-476.

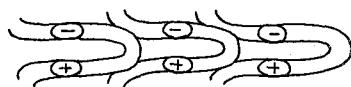


図-15 Horse-shoe Vortexの配置の一例

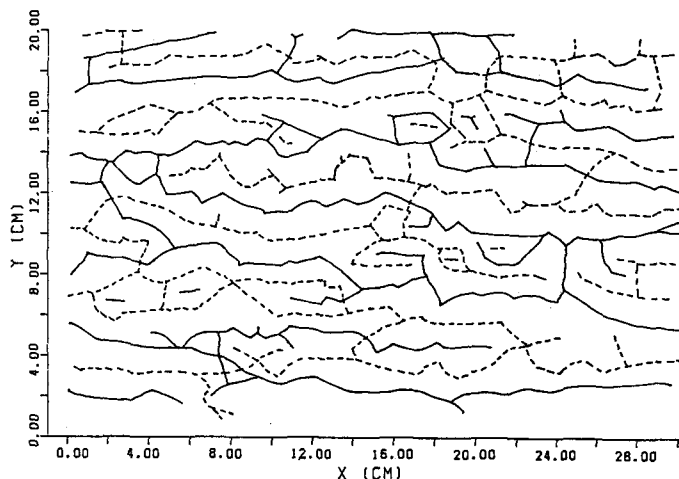


図-16 No.234 断面における渦度分布の峰線と谷線