

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)

Visualization and Processing of Series of Flow Patterns
in Horizontal Cross-sections (4)

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. はじめに

開水路のバッファ層およびその周辺の組織化された乱流構造を可視化の手法を用いて検討した。底面から4mmと9.3mmの二つの水平断層面を0.2秒毎に交互に照明し、その度毎にトレーサー法により写真撮影した。得られた写真を数値化して水路床近傍の乱流の三次元的な構造を数量的に検討した。実験データは昨年発表したもの¹⁾を初めから読み直して精度を上げて再用した。本文において、 x は流下方向、 y は水平横断方向、 z は鉛直上向き方向に設定されており、 x 、 y 、 z 方向流速成分をおのおの u 、 v 、 w で表わしている。

2. 流速分布

一例として、No.235 断面における u と v の分布を図-1と2に示す。 u の流下方向スケールは v のそれに比べてずっと大きいことが認められる。そこで、以下に u と v の自己相関係数を検討する。

3. 自己相関係数

一つの断面における $u(x, y)$ の自己相関係数 $Ru(x', y)$ を次のように定義した。すなわち、

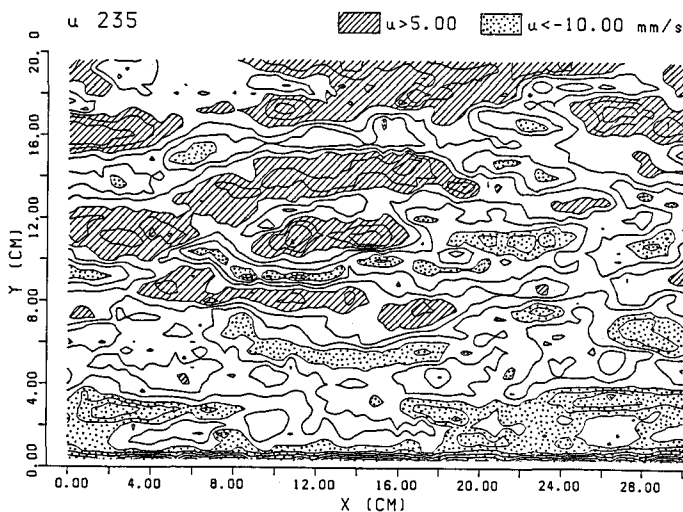
$$x' > 0 \text{ のとき } Ru(x', y) = \frac{\int_{y-B}^{y+B} \int_0^{L-x'} u'(x, y) \cdot u'(x+x', y) dx dy}{2B(L-x')}$$

$$x' < 0 \text{ のとき } Ru(x', y) = \frac{\int_{y-B}^{y+B} \int_0^{L+x'} u'(x-x', y) \cdot u'(x, y) dx dy}{2B(L+x')}$$

ここで、 x' は x 方向のずらし距離であり、 $2B$ と L は相関を計算する二次元的な範囲の幅と長さである。また、 $u'(x, y)$ は $2B \cdot L$ の範囲の $u(x, y)$ の平均値と標準偏差でそれを規準化したものである。すなわち上式は、相関係数を一直線上の値の分布からではなく、平面的な値の分布から求めている点で一般の相関係数の定義と異なっている。 u の分布図(図-1)においては高速域と低速域とが横断方向に交互に配列されており、それぞれの幅はほぼ水深 H の半分に相当するので、ここでは $2B=H/2$ とした。 L には解析断面の長さ30cmをもちいた。計算された自己相関係数は x' と y の関数として図-3のように示される。また、同様の式を用いて v の自己相関係数を求めると図-4の様になる。これらの図において、相関係数が0の等高線を太い実線で示してあるが、その x' 座標の平均値を求めると、 u の自己相関係数の場合には7.9cm、 v の場合には3.7cmとなる。自己相関係数0の位置はそれぞれの変動の波長の1/4にほぼ匹敵するから、 u の波長は約32cm、 v のそれは16cmとなり前者は後者のほぼ二倍となることが注目される。 u も v も同じ乱流構造のそれぞれの側面でありながら、その分布形状も変動スケールも互いに異なっているのである。

図-5において、図-3の $Ru=0$ の等値線が実線で、図-4の $Rv=0$ の等値線は破線でそれぞれ示されている。本図から、 u と v のスケールとその相互関係には二種類あることがうかがえる。一つは図でAで示されている領域で、 u と v の1/4波長はともに約5cmで一致している。

一方、Bの領域では、 v の1/4波長は

図-1 235断面における u の分布

約2.5cm、 u のそれはずっと大きくしかも定まらない。

4. 渦の配列とsweep Ejection

235断面の鉛直方向渦度分布を図-6に示す。本図と流線の分布図とから渦の断面は図-7のように分布していると推定される。本図は、渦の構造には平均スケール数センチの比較的小さなものと10センチ前後の比較的大きなものと二種類があり、後者はいくつかの小さな渦から成っており、いわゆる多重構造をもっていることを示唆している。また、多くの渦は逆符号の渦度をもつ渦対を形成している。一對の渦の両脚に挟まれた細い領域内にある渦度0の線を低速線と呼称することとし、それを太い実線で示した。

図-8は、図-7の渦構造配置図の上に前報の T 関数で識別される Ejection ($T > 0.5$) および Sweep ($T < 0.5$) の分布を重ねて記入したものである。この図から、渦対の両脚に挟まれた所ではEjectionが生じており、また、二つの渦対に挟まれた領域ではそれらが接近している所で Sweepが生じていることがわかる。

5. 渦の配列とスケール

多重構造をもつ渦構造のうち大きなスケールをもつ方の渦の配列とスケールについて検討する。水平断面内の渦の配置は正の渦度領域と負のそれとの対の配置で表現される。これらの渦の典型的配列パターンを図-7を参考にして若干想定してみ、その各場合に u と

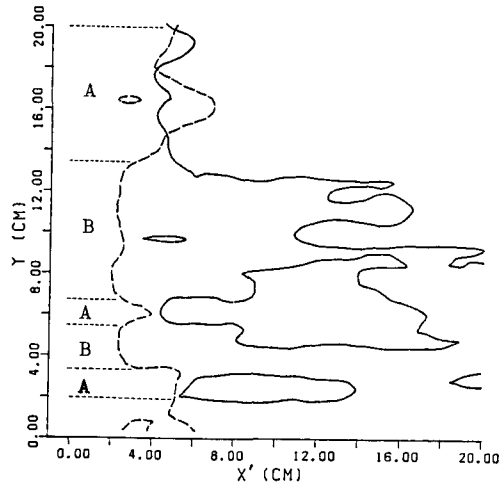


図-5 $Ru=0$ の等値線(実線)と $Rv=0$ の等値線(破線)

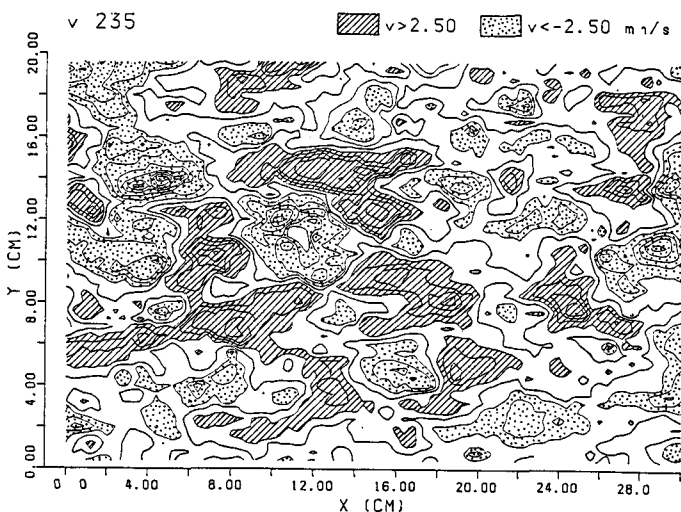


図-2 235断面における v の分布

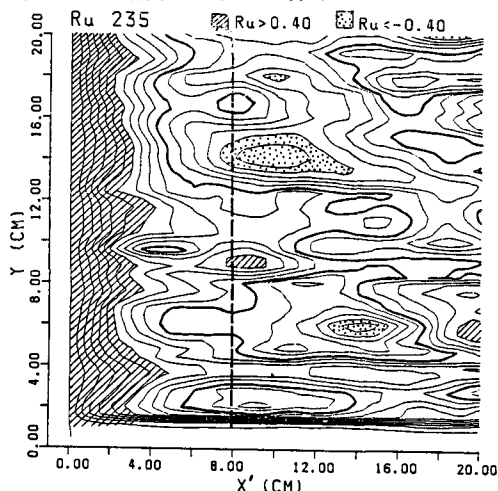


図-3 235断面における u の自己相関係数の分布

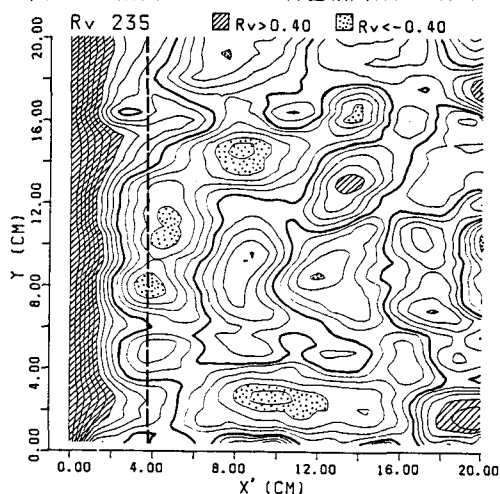


図-4 235断面における v の自己相関係数の分布

vの流下方向スケールがどう評価されるかを調べてみた。簡単のためすべての渦のスケールd が等しいとした。図-9がその結果であるが、図で楕円形により渦の水平断面を表現しており、渦の回転方向を矢印で示している。それぞれの渦配置が凍結されて流下するとして、流速計による固定点計測を細い実線で示した所で行ったとした場合uとvの測定結果がどうなるかを各図の下部に示した。また、このような測定結果を相関解析したときに算出されるであろう uとvの波長 λ_u 、 λ_v も示した。図中の太い実線は低速線を示している。

(a) は渦対が千鳥状に配列されている場合で、図-7から判断する限り最も典型的な配列パターンである。この場合、 λ_u と λ_v の値が等しくなっており図-5の A領域がこの配列であることが示唆される。(b)は渦対三つが流下方向に連なったものが千鳥状に配列されている場合である。 λ_v が(a)の場合のほぼ半分であり、 λ_u は(a)の場合よりずっと大きくなっていて、図-5の B領域のうち側壁面近傍の渦配列を示唆している。(c)は(a)の配置から少し位相が横断方向にずれたもので、図-5 B領域のうち側壁面から隔たった所の配列を示している。

以上から、図-5のA領域では(a)の渦配置、B領域ではその他の渦配置といった定式化ができればよい。その場合2dがほぼ20cmに相当することより、渦対の平均的な長さ方向スケールdはほぼ10 cmであることがわかる。実際、図-7の個々の渦対は平均的にそのスケールになっている。

以上から、乱流構造の内の渦対構造のスケールならびにその計測法について次のことが指摘される。(1)固定点計測法で得た速度成分の相関解析より得られる uの波長 λ_u は一般に vの波

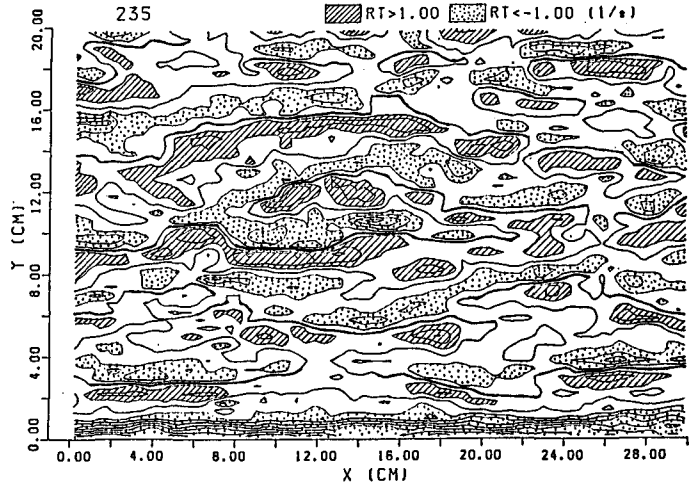


図-6 235断面における渦度の鉛直方向成分の分布

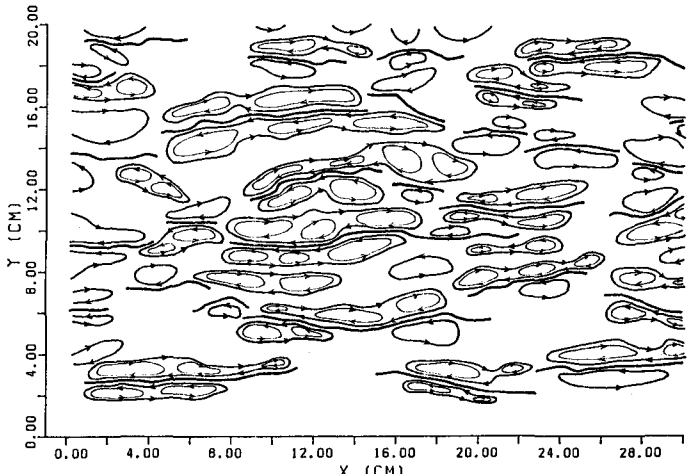


図-7 235断面における渦構造の配置

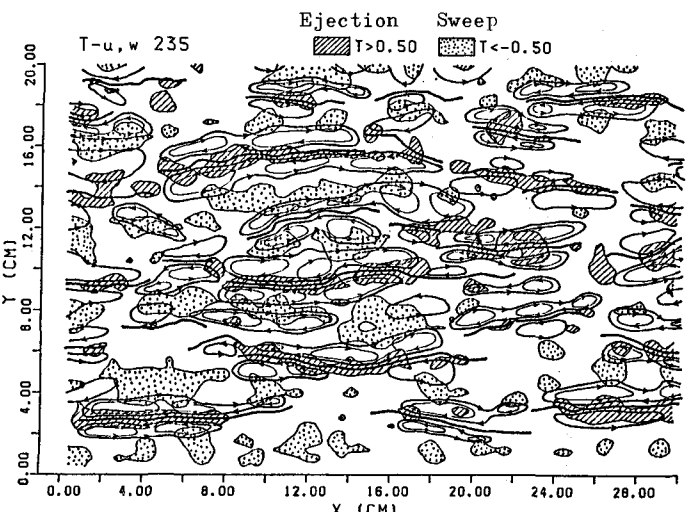


図-8 235断面における渦構造、Sweep、Ejectionの配置

長 λ_v と異なることがある。(2) λ_u はかならずしも渦対構造の真のスケールを反映しておらず渦対構造の配置によってその値が変わってくる。(3)一方 λ_v は、渦対構造の基本的な配列状況(図-9(a))のもとでは渦対構造のスケール d の二倍に一致し、その他の配列状況では d に近くなる。(4)したがって乱流の渦対構造のスケールを固定点計測結果の相関解析で求めるには、 v の計測結果を用いる方がよい。

6. 乱流構造の傾き

図-10 は、234 断面(水路床面から

4.0mm)と235断面(同じく9.3mm)の間で先と同様の方法で u の相互相関係数を求めたものである。235断面の座標原点は、234断面のそれより撮影時間差(0.2秒)×断面平均流速に相当する距離だけ下流側にずらして設定されているので、図における相関係数の分布の峰線の y 軸からの偏位は両断面間における乱流渦構造の位相のずれの距離を示している。このずれの距離の平均値と断面間隔(5.3mm)とから乱流構造の平均的な傾きが19.2度と計算される。

一方図-11 は、両断面における渦度分布の間の相互相関係数を同様の方法で求めたものである。この場合の位相のずれの距離は一見して u のそれより小さくなっており、乱流構造の平均的な傾きは36.0度と算出される。以上の一見相矛盾する二つの事実は、乱流構造の二重構造性の反映と考えられる。

HeadとBandyopadhyay²⁾は、境界層乱流の可視化と熱線流速計による観測から、乱流構造に二種類の角度が検出されることを指摘し、それが乱流の二重構造によるものであることを示唆している。

7. 渦度の三成分の分布

一種の凍結乱流の仮定の下に u と v の三次元分布から流速の鉛直方向成分 w の分布が計算される。得られた u 、 v 、 w の三次元分布から渦度の残りの二成分 ω_x および ω_y を計算し、234断面と235断面との間の断面におけるそれぞれの分布を図-12ならびに13に示した。

ω_x の分布図には、234断面の低速線が実線で、235断面の低速線が破線でそれぞれ示されている。低速線のすぐ下で概ね ω_x は正、すぐ上で負となっており、渦対構造の存在があらためて認められる。 ω_y の分布図にも同様に低速線が記入されている。 ω_y の値が正

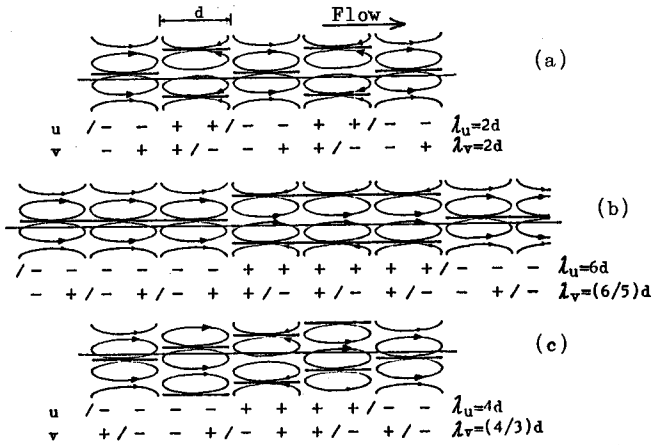


図-9 渦構造の配列の典型例

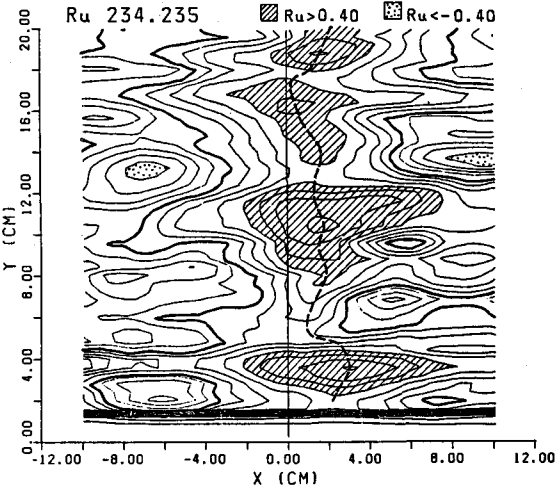


図-10 234・235断面間の u の相互相関係数の分布

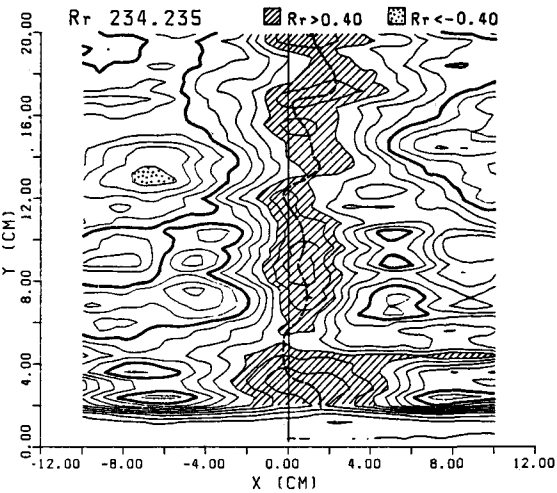


図-11 234・235断面間の渦度の相互相関係数の分布

でしかも大きい領域が低速線に沿って存在する傾向が認められ、ここでは、水路床近くの大きな渦度をもつ渦線が持ち上げられている様子がうかがわれる。

図-14は、 ω_x と ω_y を二成分とする渦度ベクトルに包絡する滑らかな曲線を描いたもので、二次元渦線とも呼ばれるべきものである。低速線のあたりで、渦線は流下方向に凸になっており、先の事実と考えあわせると、低速域で渦線が上方かつ下流側に凸になっており、逆に高速部では上流側かつ下側に凸になっていることがわかる。

8. 乱流構造のモデル

以上の検討から、壁面領域における乱流構造として次のような概念モデルが提案される。

壁面近傍の流れは強いせん断層の存在で特徴づけられる。もしそれが局部的にでも擾乱を受けると、その層は波状になり局所的な渦度の集中が生じる。渦度の存在形態を渦線で表現することになると、集中させられた渦線は Π 型に変形し、周辺の渦線を巻き込んで強くなるとともに Biot-Savart の法則により頭をもちあげ、主流によって引き伸ばされる。このようにして馬蹄形の渦が形成される。この段階における渦の状況の概念図は図-15(a)に示されている。本図で実線は渦線を表しており、特に渦の根元付近で、渦線が渦軸に平行しておらず、巻きついた形になっているのが特徴である。

この馬蹄形の渦は、さらに壁面近傍の渦線を巻き込みながら伸長し、その過程で、巻き込まれたいくつかの渦線の周りにさらに渦線が集中する。集中した渦線を渦管で表現すると、この段階における渦構造の概念図は図-15(b)のように与えられる。本図が、本報告で議論の対称となっている発達した乱流の壁面領域の構造を示すものである。

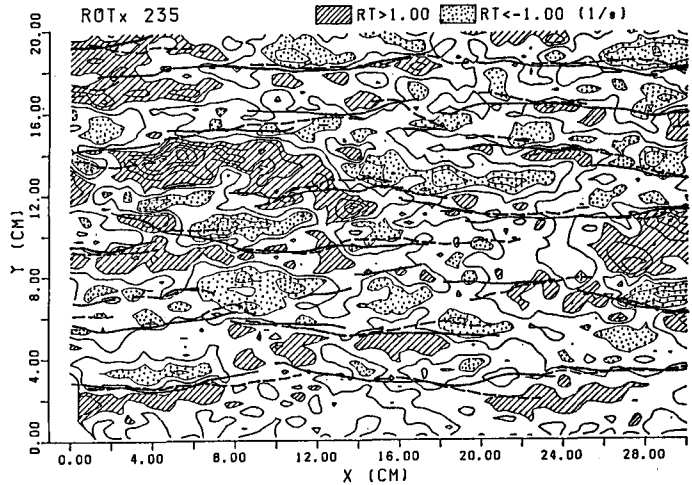


図-12 渦度のx成分 ω_x の分布

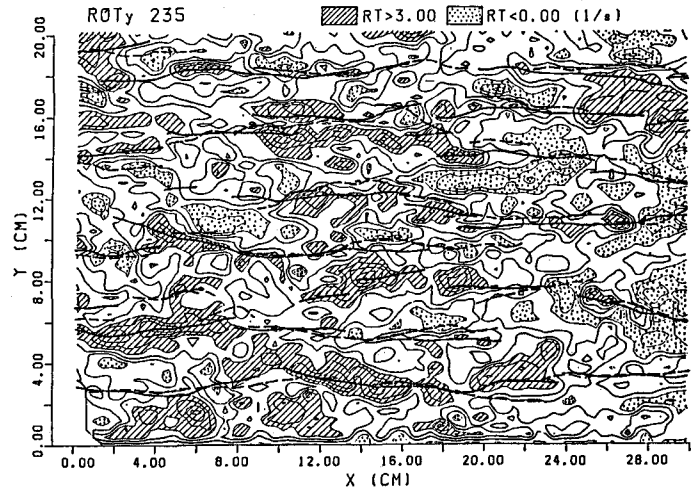


図-13 渦度のy成分 ω_y の分布

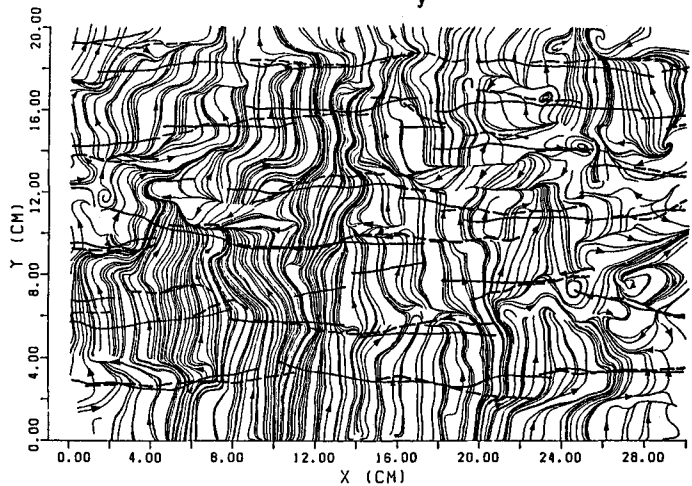


図-14 二次元渦線の分布

この段階では、もともとあった馬蹄形の渦は、渦線の集中を示す渦管の束として存在しており、図-15(b)ではそれは破線で示されている。それは、一般に縦渦と呼ばれているものに相当する。本報告で渦のスケールの議論の対称になっており渦対と呼ばれたりしているのがこの渦である。

一方、図で渦管で表現されている渦は一般に馬蹄形渦とかヘアピン渦と呼ばれる渦に相当する。先述の縦渦は殆ど対をなして存在しているのに対して、この馬蹄形渦は必ずしも対をなすとは限らず、また、馬蹄形渦は急速に主流によって引き伸ばされるので一般的にその頭部の存在を確認することは困難である。その意味ではその呼称は適切ではないがここでも馬蹄形渦とよぶこととする。

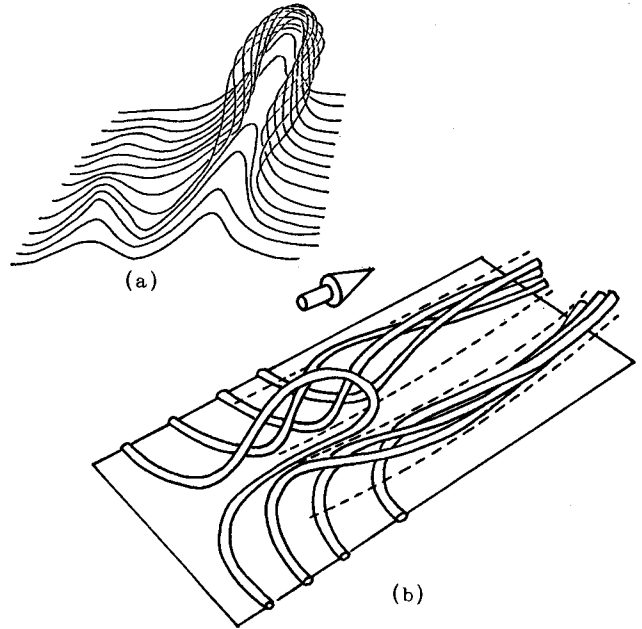


図-15 壁面領域の乱流構造の発生発達機構のモデル³⁾

以上のように、壁面近傍の乱流構造は比較的大きな縦渦と比較的小きな馬蹄形渦から成っており、更に馬蹄形渦は渦線が集中したものとして把握される。このような乱流構造の多重性は本モデルの重要な特徴である。

このようなモデルに則って先述の相関解析の結果を検討する。速度場は渦構造全体によって Biot-Savart の法則で規定されているので、その相関解析では馬蹄形渦を束ねている縦渦の位相が検出されるであろう。これに対して、渦度は個々の馬蹄形渦の核の所で大きくなるのでその相関解析では馬蹄形渦の位相が検出されるであろう。すなわち u の相互相関解析から得られた壁面に対して平均的に 19.2 度傾いている構造は縦渦であり、その水平断面は流下方向に平均的に約 10 cm、横断方向には半水深かそれよりやや小規模のスケールをもつ。一方、渦度の相関解析から得られた 36.0 度の傾きをもつ構造は馬蹄形渦と判断される。この渦は、縦渦の根元のあたりではその軸の周りに巻着くような形になっており、結果的に壁面に対して縦渦よりずっと大きな角度をなすのである。図-7 によると、縦渦は二三の馬蹄形渦で構成されており、馬蹄形渦が単独で存在する場合もあるようである。

縦渦の根元あたりで、その両脚に挟まれた細い領域では、先述のように馬蹄形渦が壁面に対して大きな角度をなしているの、流体は Biot-Savart の法則により上流側かつ上方に押し遣られる。これが Ejection である。一方、二対の縦渦に挟まれた領域では、そこでは殆ど壁面に平行になっている渦線によって、やはり Biot-savart の法則により流体は下向きに押し遣られる。これが Sweep である。

参考文献

- 1) 宇民 正、上野鉄男；連続断面撮影法による大規模乱流構造の可視化とその解析 (3)、第29回水理講演会論文集、1985、pp.785-790。
- 2) Head, R. and P. Bandyopadhyay; New aspects of turbulent boundary-layer structure, Jour. Fl. Mech., Vol.107, 1981, pp.297-338.
- 3) 宇民 正、上野鉄男；可視化法による大スケール乱れに関する研究、京大防災研究所年報、第19号、B-2、1976、pp.267-288。