

交番振動流中の3次元構造の発生過程の実験的研究

Experiments on the growth of the Large-scale Structures in a Reciprocating Oscillatory Flow

東京工業大学大学院 孟 岩 Yan MENG  
 東京工業大学工学部 日野幹雄 Mikio HINO  
 東京工業大学工学部 福西 祐 Yu FUKUNISHI

Oscillatory turbulent shear flows are frequently encountered in the field of hydraulics, such as river flows in tidal estuaries, surging motion of water columns in a penstock and a surge tank of a hydroelectric power station, wave motions on a bottom. The large-scale structures of a reciprocating oscillatory turbulent flow in a rectangular duct is investigated experimentally by multiple-probe hot-wire rakes. Using conditional sampling technique, we have found that the large-scale structures is a pair of counter-rotating fluid motion. These structures grow explosively at the beginning of flow deceleration and produce high Reynolds stress. The character of individual structure is found to be very similar to that of the ensemble averaged structure.

1. はじめに

交番振動乱流中の3次元構造の発生過程について実験的研究を行った。交番振動流の乱れは定常乱流境界層の場合と異なり、乱れの発生・発達・拡散の諸過程が強制的に変化する外部条件により周期的に繰り返されるものである。日野ら<sup>(1)</sup>の研究によると、レイノルズ応力が最大流速時から減速期にかけて壁から急増大する。そのレイノルズ応力のほとんどの部分が3次元構造によって生成されるものであることは昨年の水理講演会にて発表した<sup>(2)</sup>。しかし、この3次元構造がどのような形をしているか、またどのように成長するかについてはまだよく分かっていない。本研究では熱線プローブのレイクと条件付き抽出法を用いて、減速過程の3次元構造の発生及び初期の構造の形を詳細に調べた。

2. 実験装置

(1) 風洞と実験条件

振動流風洞は幅26cm、高さ10cmの矩形断面を持ち長さ1.4mの亚克力製風路である。一端でピストンをモータで駆動することにより周期3.15secの交番振動流が作られる。壁面に鉛直方向はY軸で、スパン方向はZ軸で、ピストンの運動方向をX軸に取る。本研究の実験条件は図1に示すとおりである。Uは断面平均流速の振幅、Tは振動流の周期である。また d : 平行平板間の距離 (b = d/2)、 $\omega$  : 振動流の角周波数、 $\nu$  : 動粘性係数、 $\delta$  : ストークス層厚さである。

$U = 2.4 \text{ [m/s]}$	$\lambda = \frac{d/2}{\delta} = 12.9$
$Re = \frac{Ud}{\nu} = 1.6 \times 10^4$	$\delta = \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}} = 3.87 \text{ [mm]}$
$R_g = \frac{U\delta}{\nu} = 619$	$T = 3.15 \text{ [s]}$

図1 実験条件

(2) 計測の方法

本研究では自の定温度方式のX型プローブの熱線風速計を7本用い、過熱比0.5で使用した。測定にはレイノルズ応力のピークを検出するdetector probeとしてU、Vを測るX型のプローブ1本と、sample用としてX型プローブ6本からなるレイクを用いた。このレイク(図2)はZ軸方向の6つの別々の点で同時にU、Wを測ることも、Y軸方向の6つの別々の点で同時にU、Vを測ることもできる。熱線の出力はレーザー・ドップラー流速計を用いて、キャリアレーションした。熱線風速計の出力は最大8チャンネルの信号を同時刻

にサンプリングできる自作のA/D変換器2台により、メモリ4MBのパソコンに取り込んで解析した。A/D変換の周波数は1KHzで精度は12ビットである。

### 3. 実験結果

本研究では条件付き抽出の方法として乱流のエネルギーに寄与するレイノルズ応力の瞬間値に注目して4象限法を用いた。振動乱流の場合、レイノルズ応力は減速期に間欠的に発生し、ejection型のものが多い。図3にはそれぞれの高さ( $Y/b = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$ )での瞬間速度変動 $u, v$ とレイノルズ応力 $-uv$ を示す、 $0 \sim \pi/2$ が加速期で、 $\pi/2 \sim \pi$ が減速期である。減速期にはレイノルズ応力のピークが多く出現することに注目し、このうちあるthresholdを越えるものだけを抽出することにした。本研究では検出用プローブは $Y/b=0.2$ 、 $Z/b=0.0$ のところに置かれ、早い位相( $90 \sim 100$ 度)で発生した構造に伴う速度変動、渦度、乱れの強さ等を詳細に測定した。

#### (1) 速度変動の空間分布

3次元的な構造の様子を詳しく調べるために、まず、サンプル用プローブとして $u, v$ を測定できるレイクを用い、鉛直断面内で条件付抽出した。そのアンサンプル平均した結果を速度変動 $u, v$ のベクトル図で示した。図4-a~eはそれぞれ( $Z/b=0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ )の鉛直断面内の速度ベクトル図である。図4-aを見て分かるように、 $Z/b=0.0$ 、すなわち、検出用プローブを含んだXY面内に低速上昇流が生じているのが分かる。検出用プローブと離れたXY平面内を見ていくと、速度変動 $u, v$ のベクトルが小さくなり、図4-cの断面でほぼ0となった。ここは渦の中心と考えられる。また図4-dは先ほどとは逆に速度変動 $u$ が正に、 $v$ は負になっている。これはその場に高速下降流が生じていることを示している。

次にサンプル用レイクの方法を換え、壁に平行なXZ平面内の $u, w$ を条件付抽出した。その結果も速度変動ベクトルで表した(図5)。 $X/b=Z/b=0.0, Y/b=0.2$ のところが検出用プローブの位置である。アンサンプル平均をして得ら

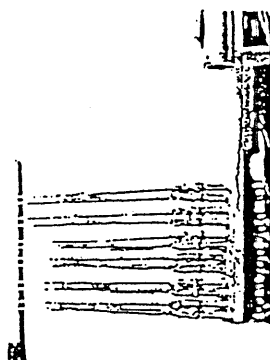


図2 熱線レイクの写真

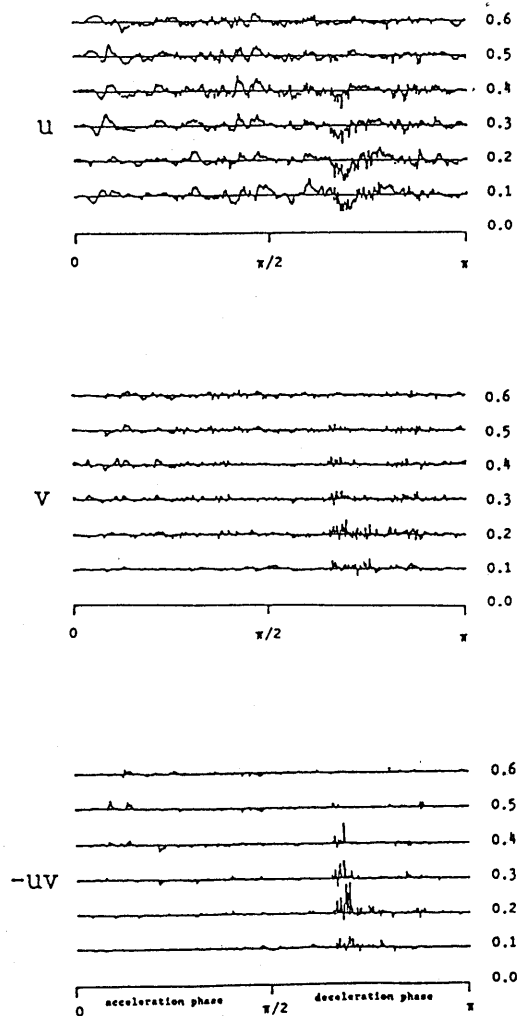


図3 瞬間速度変動 $u, v$ 及びレイノルズ応力 $-uv$ の空間分布

となるので、図5はZの正の側だけが示してある。図5-a、bを見て分かるように検出用プローブの近くで矢印が負の方向を向き、更にその外側では $w$ が正になって、流れが少し回転しているように見える。検出用プローブより高いところではほとんど回転していない。

#### (2) 渦度の空間分布

これらの速度を利用して、渦度成分 $\omega_x$ 、 $\omega_y$ 、 $\omega_z$  (unit: [1/s]) を求めた。図6は位相90~100度でのそれぞれの高さで得られたXZ平面内の渦度成分 $\omega_y$ のコンター図である。これらの図から分かるように渦度が壁面付近に集中し、渦度の軸が傾いている。図7はそれぞれの断面内の渦度成分 $\omega_x$ のコンター図である。この図から複雑な3次元構造をしていることが分かる。図8はそれぞれの断面内の渦度成分 $\omega_z$ のコンター図を示している。

#### (3) 乱れの強さ(r.m.s.)及びレイノルズ応力の空間分布

図9と図10はそれぞれの断面内の乱れr.m.s. ( $u^2$ )<sup>1/2</sup>と( $v^2$ )<sup>1/2</sup> (unit: [m/s]) のコンター図である。図9-dから、壁に近いところの乱れはこの3次元構造によって、持ち上げられ、風洞の中央部に向かって輸送されることが分かる。検出用プローブと離れると、このような動きは見られなくなる。図10の( $v^2$ )<sup>1/2</sup>にも同じ傾向が見られる。図11はアンサンブル平均したレイノルズ応力 (unit: [cm<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]) のコンター図である。この図から分かるように、レイノルズ応力はほとんど3次元構造のまん中で作られている。

最後にsample probe がレイクであることが利用して、検出される一つ一つの構造の形がアンサンブル平均したものとの程度特徴が似ているかを調べた。特にバック・グラウンドの乱れの小さい早い位相に関しては、アンサンブル平均して求めたものと、なま信号の波形がよく似ている(図12)。

### 4. おわりに

乱流領域にある交番振動流の3次元構造についての実験を行い、次のような結論を得た。

- (1) 交番振動流の減速位相の乱流境界層中でレイノルズ応力を発生している組織的構造を条件付抽出することができた。
- (2) 減速位相の初期に発生した3次元構造の形を明らかにした。
- (3) 交番振動流の減速位相のレイノルズ応力や乱れの大部分はこのような3次元構造によって作られたことが分かった。
- (4) 個々の構造とアンサンブル平均した構造とはよく一致している。

### 5. 参考文献

- 1). Hino, M. et al (1983) : Experiments on the turbulence statistics and the structure of a reciprocating oscillatory flow. J.Fluid mech.,vol.131,pp.363- 400.
- 2). 孟岩、日野幹雄、福西祐 (1988) : 交番振動流の3次元構造の実験的研究 第32回水理講演会文書。

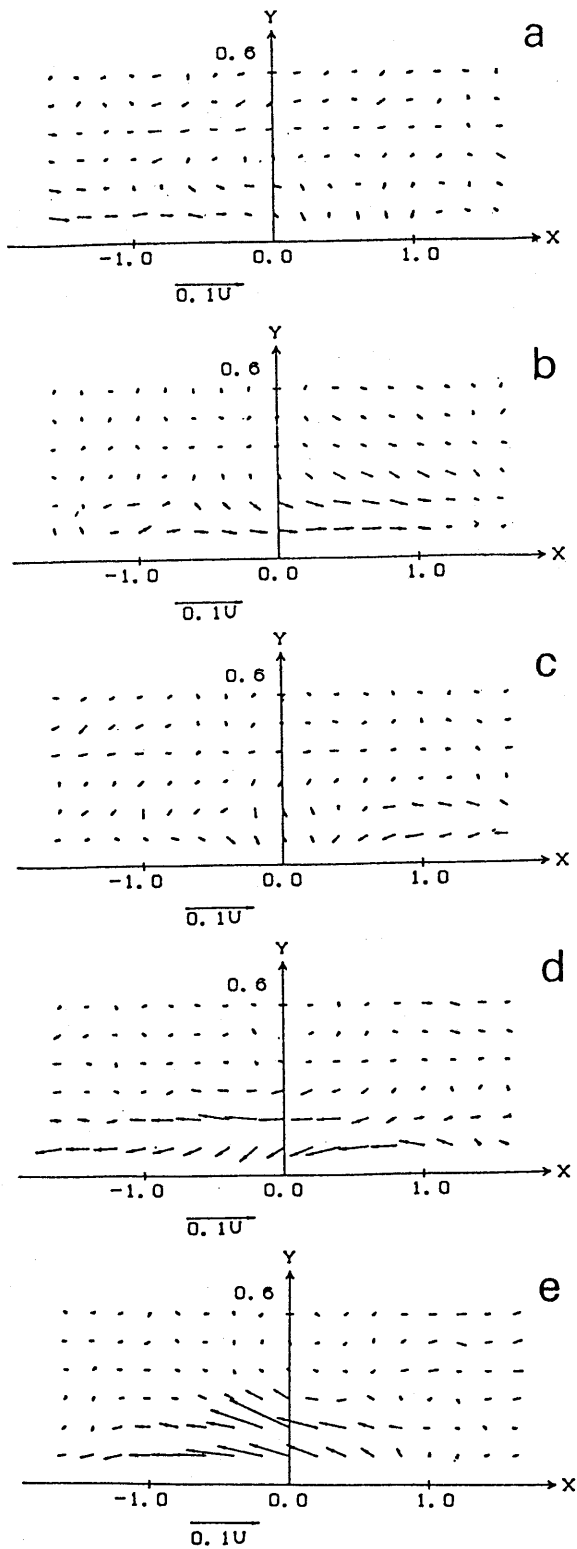


図4 様々な鉛直断面内の $u$ 、 $v$ のベクトル図 (a)  $Z/b=0.4$  (b)  $Z/b=0.3$  (c)  $Z/b=0.2$  (d)  $Z/b=0.1$  (e)  $Z/b=0.0$

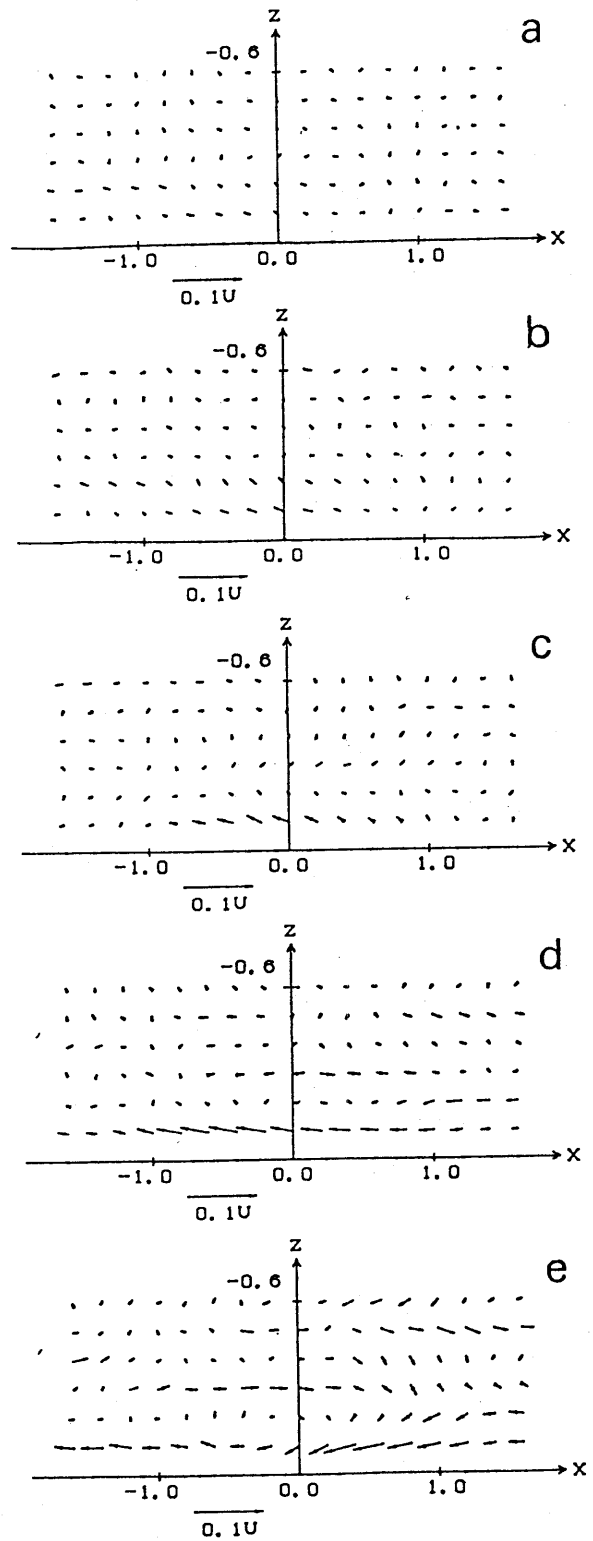


図5 様々な水平断面内の $u$ 、 $w$ のベクトル図 (a)  $Y/b=0.5$  (b)  $Y/b=0.4$  (c)  $Y/b=0.3$  (d)  $Y/b=0.2$  (e)  $Y/b=0.1$

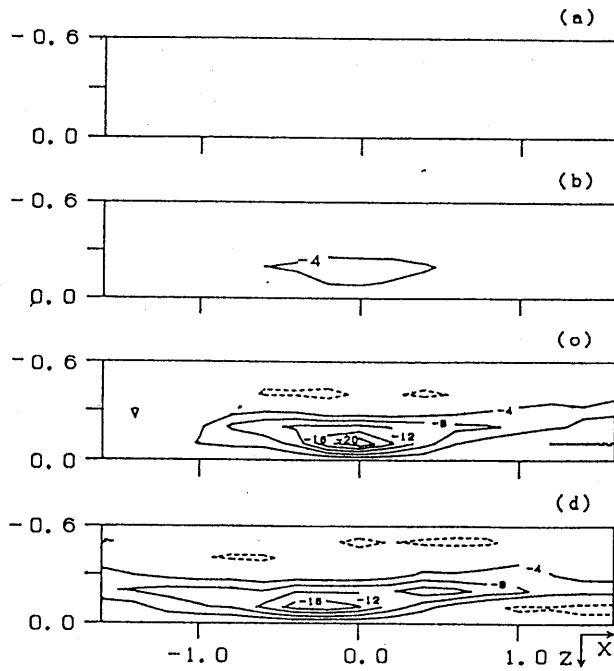


図6 各X Z平面内の渦度 $\omega_y$ の

コンター図 (a)  $Y/b=0.4$   
 (b)  $Y/b=0.3$  (c)  $Y/b=0.2$   
 (d)  $Y/b=0.1$

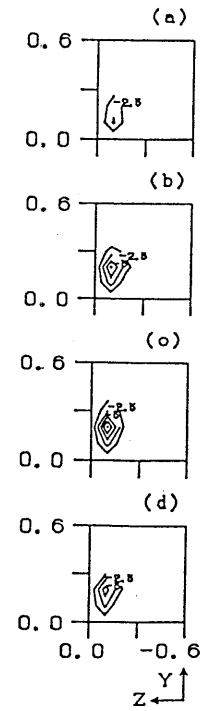


図7 各Y Z断面内の渦度 $\omega_x$ の

コンター図 (a)  $X/b=-0.4$   
 (b)  $X/b=-0.2$  (c)  $X/b=0.0$   
 (d)  $X/b=0.2$

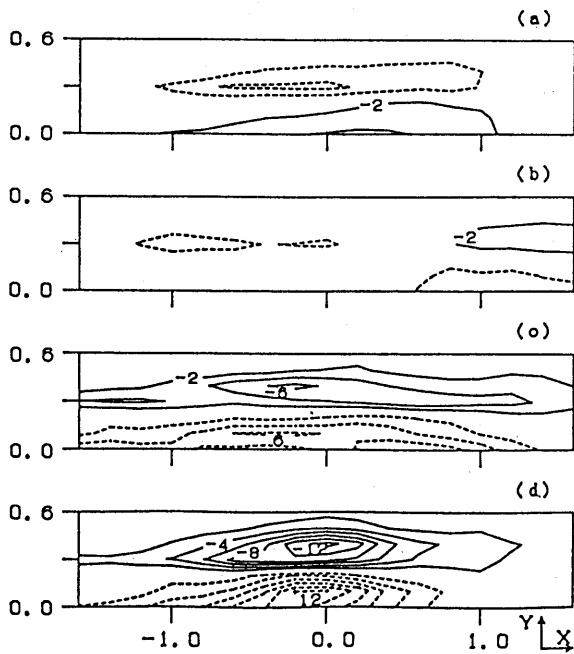


図8 各X Y断面内の渦度 $\omega_z$ の

コンター図 (a)  $Z/b=0.3$   
 (b)  $Z/b=0.2$  (c)  $Z/b=0.1$   
 (d)  $Z/b=0.0$

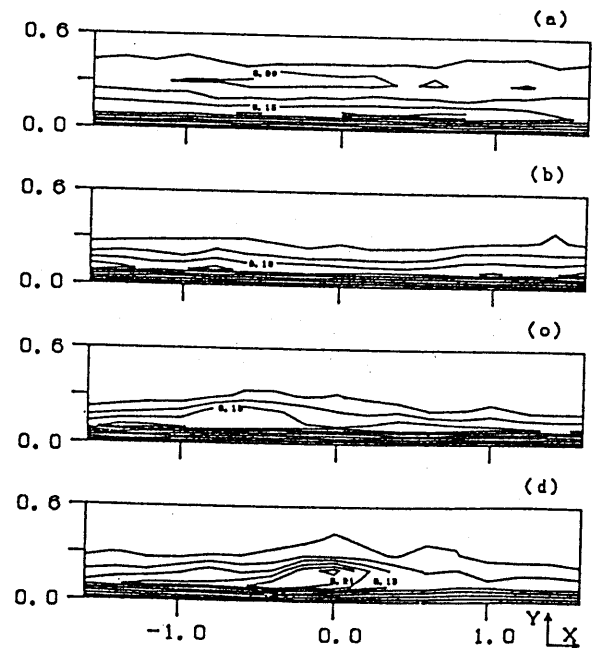


図9 各X Y断面内の乱れのr. m. s.

$(u^2)^{1/2}$ のコンター図  
 (a)  $Z/b=0.3$  (b)  $Z/b=0.2$   
 (c)  $Z/b=0.1$  (d)  $Z/b=0.0$

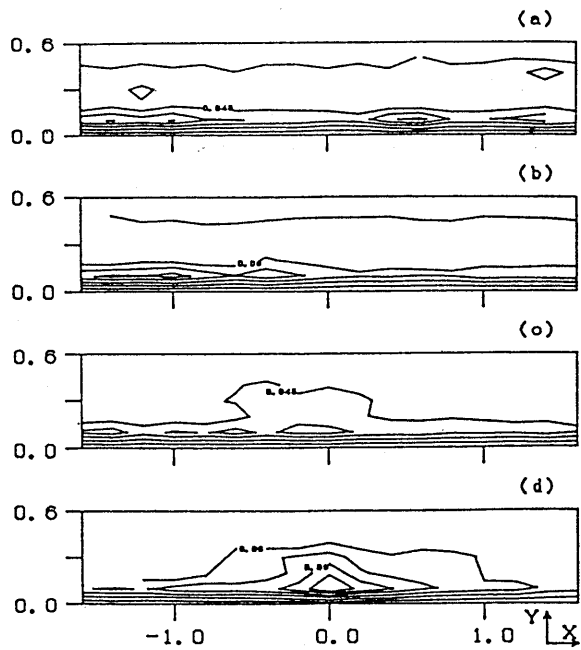


図10 各X Y断面内の乱れのr. m. s.  
 $(v^2)^{1/2}$ のコンター図  
 (a)  $Z/b=0.3$  (b)  $Z/b=0.2$   
 (c)  $Z/b=0.1$  (d)  $Z/b=0.0$

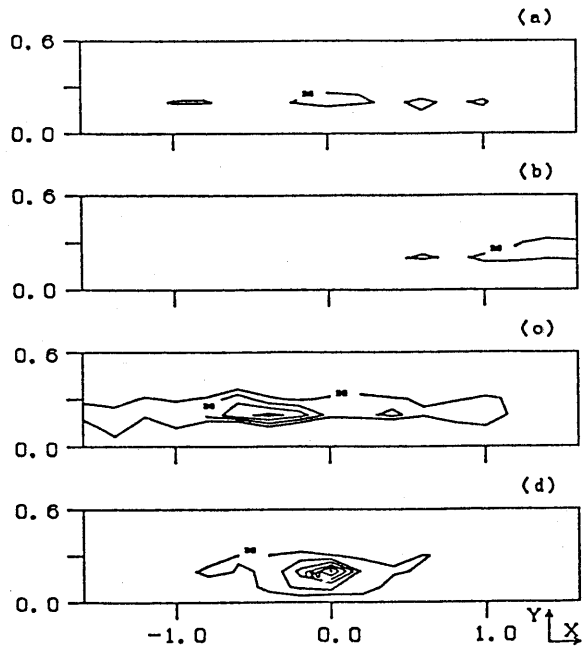


図11 各X Y断面内の平均レイノルズ応力  
 $-uv$ のコンター図  
 (a)  $Z/b=0.3$  (b)  $Z/b=0.2$   
 (c)  $Z/b=0.1$  (d)  $Z/b=0.0$

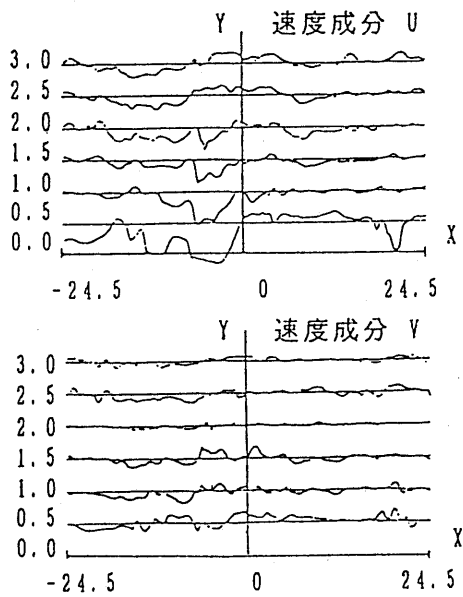


図12 速度変動のなま波形  
 (位相90~100度)