

# 開水路流れの並列らせん流の発生機構について Production Mechanism of Cellular Secondary Currents in an Open Channel Flow

京都大学工学部 正員 中川 博 次  
 京都大学工学部 正員 瀬 津 家 久  
 京都大学工学部 正員 ○富 永 晃 宏  
 京都大学工学部 学生員 若 井 健

## 1 まえがき

開水路の並列らせん流は、平坦河床においては定常的に見られないが、河床条件を横断方向に周期的に変化させてやれば安定的に存在することが明らかにされている。著者らは、横断方向に滑面と粗面を配置した場合<sup>1)</sup>、粗面上で下降流、滑面上で上昇流が生じ、稜型突起を横断方向に一定間隔で配列した場合<sup>2)</sup>、突起上で上昇流、その中間で下降流が生じることを実験的に示し、並列らせん流の存在を示唆した。この結果、並列らせん流が存在する時の乱流構造もある程度解明され横断方向のレイノルズ応力  $-\bar{u}\bar{w}$  が並列らせん流発生に重要な役割を果たしていることが明らかにされたが、まだ不明の点が多い。

一方、非円形断面をもつダクト流においては、そのコーナ部に運動量を輸送するような2次流が発生することが知られており、従来から多くの研究があるが、この場合の2次流は主流に垂直な平面内の乱れ強さの不均一によって発生するとされている。すなわち、流下方向渦度方程式の中の  $\partial^2 (\bar{v}^2 - \bar{w}^2) / \partial y \partial z$  の項が2次流の起動力になるという考え方であり開水路における並列らせん流についてもこれと同様の考え方に立っているものが多い。

そこで、コーナの2次流と開水路の並列らせん流との関連性を調べ、並列らせん流の発生機構を解明するために、まず矩形ダクトのアスペクト比を変化させ、コーナ2次流の構造の変化を調べ、次に、コーナ近くの路床に稜型突起を敷き、同様に2次流の構造の変化を調べた。また開水路流においても水深を変化させて同様の検討を行った。

## 2 実験方法

矩形ダクトのアスペクト比の変化については、風洞で詳細な計測を行った。ダクトは長さ6m、幅40cm、高さ8cmで、計測断面は上流端から5mの位置に設けた。このダクト内に幅8cm、長さ6mのアクリル板を中央軸をはさんで対称に2枚設置し、これを側壁とすることにより任意のアスペクト比が、得られるようにした。図-1は、計測断面と座標系を示す。アスペクト比  $B/D$  は 5, 3, 2, 1.5, 1 の5通りに変化させ、それぞれ Case A, B, E, D 及び C とした。これを開水路流と比較すれば、水深に対応する長さ  $H=D/2$  であり、上の各ケースに対応するアスペクト比は、それぞれ 10, 6, 4, 3, 2 となる。よって以後、 $B/H$  をアスペクト比とよぶことにする。また Case F は、Case A と同じ断面において側壁から 7 cm 離れた底面に斜辺 7 mm、高さ 3.5 mm の直角二等辺三角形断面の稜型突起を上下左右対称となるように設置した。この位置は後で述べるようにコーナ2次流の底面側の渦の上昇部に対応している。流れの条件は、各ケースとも最大流速  $U_{max}$  を約 7 m/s に一致させ、計測は2成分定温度式ホットワイヤ流速計を用いて行った。

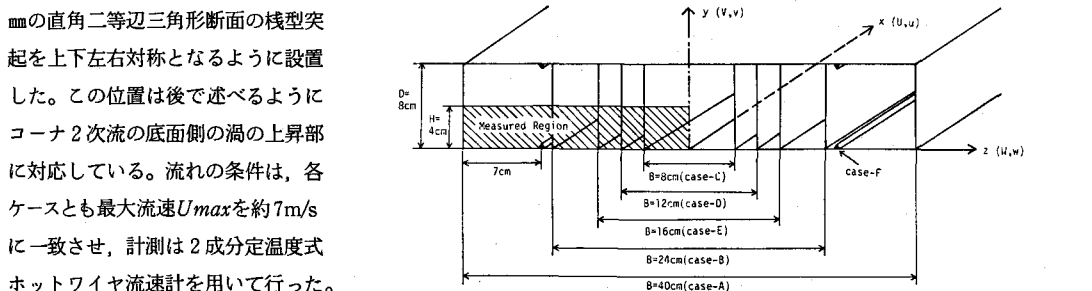


図-1 計測断面と座標系

次に幅 30 cm、高さ 20 cm、長さ 8 m の開水路においてレーザ流速計を用いて計測を行った。水深は 10 cm、7.5 cm、5 cm の 3 通り行い、アスペクト比は 3, 4, 6 となりそれぞれ Case L-1, L-3,

L-2とした。またReynolds数は、代表長さを4R(R:径深)とした時、ほぼ $4.5 \times 10^4$ に一致させた。

### 3 アスペクト比とコーナ2次流の関係

#### 3.1 2次流の流速ベクトル

図-2はCase A~Eの2次流の平均流速( $V, W$ )のベクトル図である。いずれのアスペクト比においてもコーナへ向かう一対の2次流が明確に認められる。 $\sqrt{V^2+W^2}$ で定義される2次流の大きさの最大値はほぼ $0.015 U_{max}$ 程度であり、これは例えばMelling & Whitelaw<sup>3)</sup>の正方形ダクトの結果と同程度である。次に図-3は棧型突起をつけた場合(Case J)の2次流ベクトル図である。 $\sqrt{V^2+W^2}$ の最大値は棧近傍ではほぼ $0.03 U_{max}$ となり、コーナ流より約2倍大きい。図-2のコーナに向かう流れはいずれも、アスペクト比による影響をほとんど受けずにはほぼコーナの2等分線に沿っている。したがってこの2等分線より上側を側壁渦、下側を底面渦とよぶことにすると、前者はアスペクト比が変化しても形、大きさとも変化しない。一方、後者はアスペクト比の増大とともに横方向の幅が増大し、渦の中心も $Z=0$ の中央断面の方へ移動する。Case C, Dでは、中央断面にまで底面渦が及んでいるが、アスペクト比4以上では底面渦の横幅はほぼ $1.4 \sim 1.6 H$ となり中央断面まで達していない。また顕著な渦はこの2つのみで、並列せん流のような渦群は見られない。

#### 3.2 主流速分布

図-4はCase A及びDの主流速 $U$ の各高さ $z$ における横断方向分布であり、 $U_{max}$ で規格化してある。また図-5はCase Aの $U/U_{max}$ のコンタを示す。Case Aでは $|Z/H| \leq 2$ の中央領域においては2次元性が保たれており、それより側壁に近づくにつれて非常にゆっくりと減少している。そして $|Z/H| = 3.4 \sim 4.0$ ではほぼ一定か、あるいは少し増大し一見くぼんだような分布となっている。この部分は底面渦の弱い上昇部に対応している。Case Dでは、底面渦が $Z=0$ まで及んでいるため2次元領域は存在せず、この影響によって中央部が減速され、側壁との中間点で最大値をとるようになる。またCase Cの結果については、文献4)に報告済みであるのでここでは割愛する。

次に、図-6はCase Aについては $y^+$ ( $\equiv U_* y/\nu$ )に対して $U^+$ ( $\equiv U/U_*$ )を片対数紙上にプロットしたもので、図中の実線は次式で与えられる対数則である。(  $U_*$ は摩擦速度、 $\nu$ は動粘性係数である)

$$U/U_* = 5.75 \log_{10}(U_* y/\nu) + 5.5 \quad \dots \dots \dots (1)$$

これを見ると、中央の2次元領域では全体によく式(1)に一致していることがわかる。また側壁に近づくにつれて、底面から離れた領域が徐々に側壁の影響を受け減速されるが、底面近傍では良好に対数則に合致している。これは、先のCase Jの場合とも一致する。

#### 3.3 摩擦速度 $U_*$ の横断分布

局所摩擦速度 $U_*$ は、対数則から逆算的に求めた。ここでは、さらに別の方法で $U_*$ を直接評価することを試み、対数則による方法と比較した。その方法とは、一成分ホットワイヤプローブを中央断面の底面から2mmの高さに固定し、その出力電圧と圧力勾配から求めた $U_*$ との関係を検定するものである。すなわち圧力勾配より計算される $U_*$ と、出力電圧 $E$ の関係は、流速と電圧の関係と同様の形式で

$$E^2 - E_0^2 = AU_*^n \quad \dots \dots \dots (2)$$

と良好に表現できた。ここに $E_0$ は $U_* = 0$ の時の電圧、 $n$ は定数で $n = 0.606$ 、 $A$ は温度の関数である。

この検定曲線を用いて $U_*$ の横断分布を求め、この方法によって求めた $U_*$ を $U_{*1}$ とし、対数則による $U_*$ を $U_{*2}$ としてCase B, Cのこの分布を図-7に示す。いずれも横方向の平均値 $\overline{U_{*1}}$ 、 $\overline{U_{*2}}$ で無次元化されており、 $\overline{U_{*1}}$ と $\overline{U_{*2}}$ の差は2~3%であり、分布形は両者で良く一致している。また、Case Bの分布形は主流速 $U$ の横断分布に対応し、底面渦の上昇部に当たる位置でくぼんだような形となり、Case Cでは、ピークは中央部には現れず $|Z/H| = 0.5$ 付近に現れる。また図中の実線は同一アスペクト比でのLeutheusser<sup>5)</sup>の底面せん断応力 $\tau_0/\tau_0$ の分布から計算した $U_*/\overline{U_*}$ の分布を示している。これはプレストン管法によって求められたものであるが、本実験の結果ともおおむね一致している。

#### 3.4 乱れ強度分布

図-8はCase Aの $w/U_{max}$ のコンタである。コーナに向かって鋭く突出した形状を示し、2次流の影響を大きく受けており、また、底面渦の上昇部の位置( $|Z/H| \approx 3.4$ )で若干値が大きくなっている。

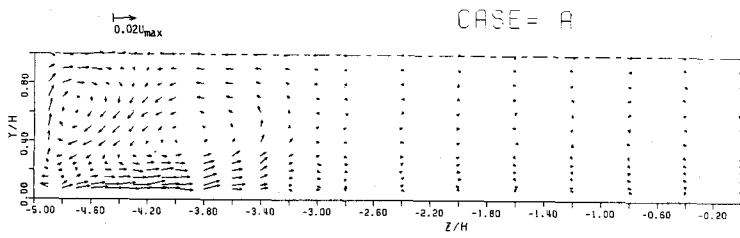


図-2 (a) 2次流ベクトル図 (Case A)

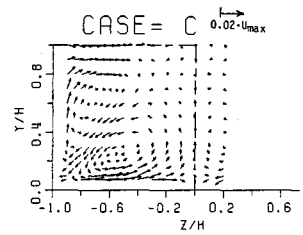


図-2 (c) 2次流ベクトル図 (Case C)

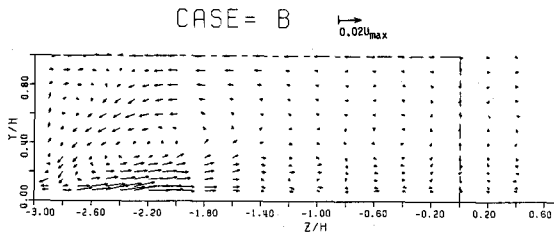


図-2 (b) 2次流ベクトル図 (Case B)

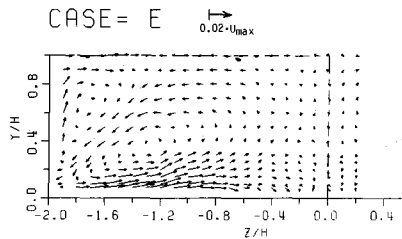


図-2 (e) 2次流ベクトル図 (Case E)

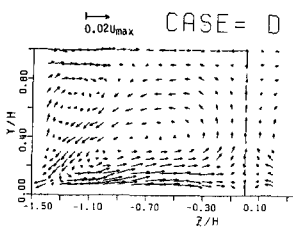


図-2 (d) 2次流ベクトル図 (Case D)

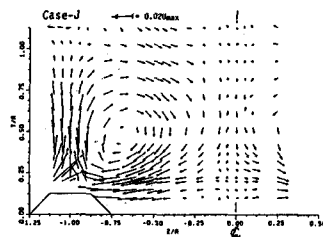


図-3 2次流ベクトル図 (Case J)

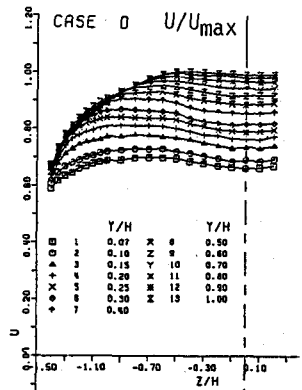


図-4 (b) Uの横断分布 (Case D)

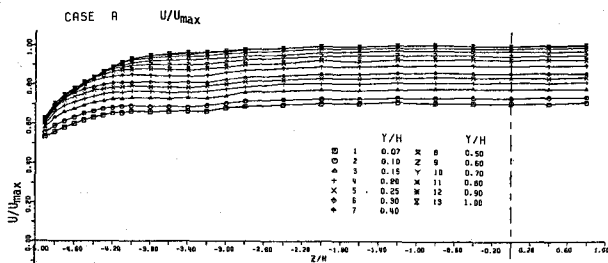


図-4 (a) Uの横断分布 (Case A)

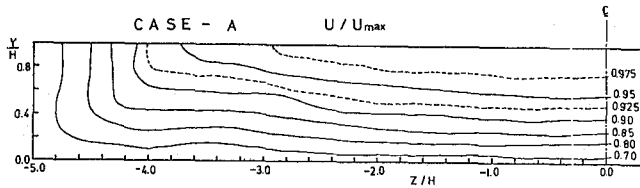


図-5 Uの等値線 (Case A)

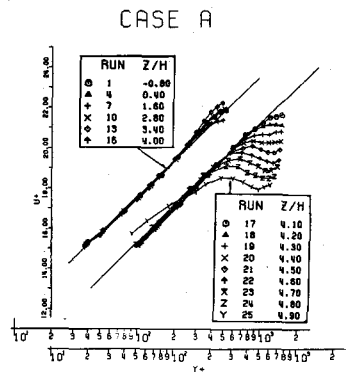


図-6 対数則分布

次に Case A の  $v'/U_{max}$  及び  $w'/U_{max}$  のコンタを図-9 に示す。  $v'$  及び  $w'$  は、コーナ領域において（以後、側壁から  $H$  以内の領域をコーナ領域とよぶことにする）コーナの二等分線に関する対称性は完全にくずれる。すなわち、鉛直方向の乱れ強さ  $v'$  は、底面によって抑制され、水平方向の乱れ強さ  $w'$  は、側壁によって抑制されることにより、コーナ二等分線より上側では  $v'$  の方が大きく、底面側では  $w'$  の方が大きくなる。一般にこの2つの乱れ強さの差から得られる  $\partial^2(\bar{v}^2 - \bar{w}^2)/\partial y \partial z$  が2次流発生の原因とされ、コーナ領域ではこのような乱れの不均一が生じる。

図-10 に Case A の  $(\bar{w}^2 - \bar{v}^2)/U_{max}^2$  のコンタを示す。コーナの二等分線に沿う値はほぼ0となり、これより上側で負、下側で正となり、コーナを中心とする放射状の形状を示す。この分布から  $\partial^2(\bar{v}^2 - \bar{w}^2)/\partial y \partial z$  が0でない値を持つことがわかる。

### 3.5 レイノルズ応力分布

図-11 は、Case A の  $-\bar{u}v/U_{max}^2$  のコンタを示す。コーナ領域の底面側ではコーナに向かってほぼ線形に収束している。側壁側では負の領域が現れるが、この絶対値は底面側に比べてかなり小さく、 $y/H=1.0$  で再び0となる傾向を示す。また図-8 の  $u'$  のコンタと同様に底面渦の上昇部で上側に少しふくらむ傾向が見られる。

この  $-\bar{u}v/U_{max}^2$  の鉛直方向の分布を図-12 に示す。  $|Z/H| \leq 2.8$  の領域では2次元的で

$$-\bar{u}v/U_{max}^2 = (U_* / U_{max})^2 (1 - y/H) \quad (3)$$

の直線分布によくしたがっている。隅角部では直線分布からずれているが、この減少値は底面近傍と  $y=H$  の中央高さでほとんど0で、中央部で大きい放物型の分布となり、その結果、側壁近傍で負の領域が現れる。この現象は、開水路において棧型突起をつけた場合の下降流部でも確認されており<sup>6)</sup>、2次流がある場合の特徴と考えられ

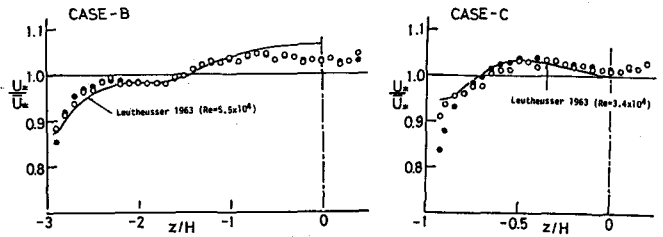


図-7  $U_*$  の横断分布

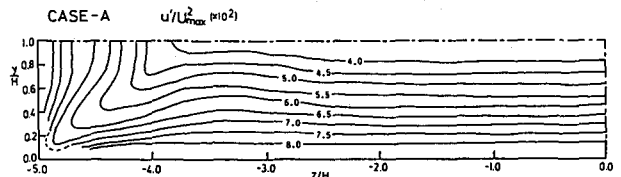


図-8  $u'$  の等値線

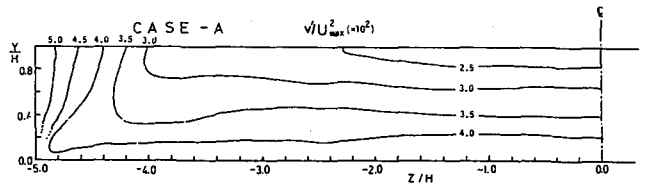


図-9 (a)  $v'$  の等値線

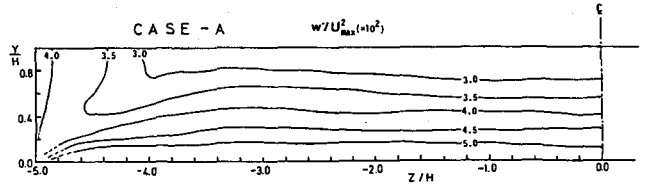


図-9 (b)  $w'$  の等値線

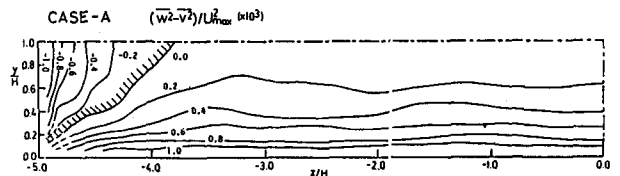


図-10  $\bar{w}^2 - \bar{v}^2$  の等値線

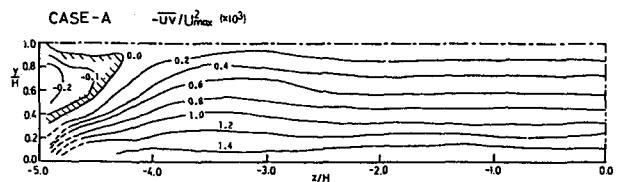


図-11  $-\bar{u}v$  の等値線

る。

次に横断方向のレイノルズ応力 $-\overline{uw}$ の横断分布を図-13に示す。コーナ領域では、 $-\overline{uw}$ の分布を90°回転させたものとはほぼ一致する傾向を示し、また $|Z/H|=3$ 付近で小さなピークをとることが注目される。これは、Case Jの $-\overline{uw}$ の横断分布と比較すると底面渦の弱い上昇流によって引き起こされたものと考えられ、並列せん流の特徴と一致する。しかし、コーナ領域では側壁の存在によって $-\overline{uw}$ が発生するため2次流の影響との判別が困難である。また、コーナ領域以外では高さによらずほぼ同じ値を取り、 $|Z/H| \geq 2.0$ ではほぼ0となる。

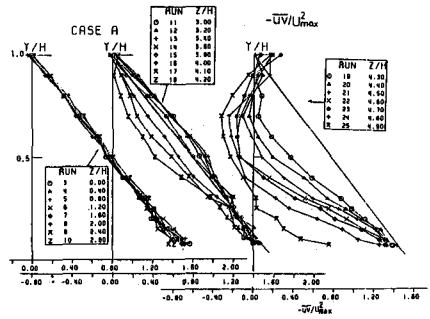


図-12  $-\overline{uw}$ の鉛直分布

#### 4 開水路流の実験結果

図-14にアスペクト比3及び6の開水路流の主流速 $U$ のコンタを示す。開水路の場合、実際は幅が一定で水深が異なるが、水深 $H$ で規格化しているため図のようになる。図-5の空気ダクト流の結果と比較すると、コーナ領域の分布については、コンタは側壁には平行とならず大きく彎曲し最大流速点の降が顕著に現れている。これは自由水面の存在によるものと考えられる。また、コーナ領域以外では底面渦が中央断面にまで達しているアスペクト比3の場合と、アスペクト比6の場合とを比較してみると、後者の方が上へのふくらみが大きく現れる。さらに空気ダクト流の結果では $U$ のコンタの張り出す方向に2次流が形成されることが明らかにされていることを考慮すると<sup>4)</sup>、図中に点線で示したような2次流の存在が示唆される。これを見るとダクト流の場合に比べて底面渦は高さも幅も大きくなり、また側壁渦は小さくなっており、ダクト流とは完全に相似になっていないことがわかる。図-15は開水路のアスペクト比6の場合の $U_*$ の横断分布である。ダクト流の場合と同様に途中のくぼんだ特徴的な分布となる。このくぼみの位置は $U$ のコンタから予測されるようにダクト流より中央断面側へ寄り、また、くぼみの大きさもより顕著となる。側壁側の第2のピークの大きさは、水路中央部の値と同程度となり、ダクト流よりコーナ2次流の影響が強く現れていることがわかる。

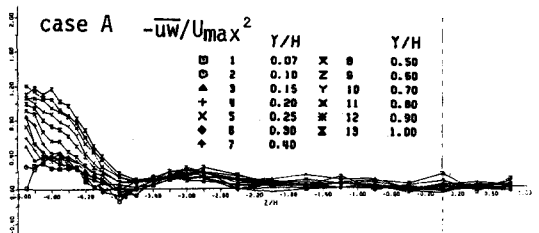


図-13  $-\overline{uw}$ の横断分布

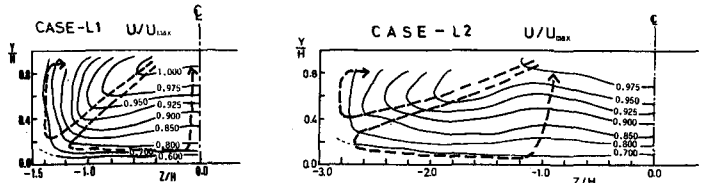


図-14  $U$ の等値線(開水路)

に相似になっていないことがわかる。図-15は開水路のアスペクト比6の場合の $U_*$ の横断分布である。ダクト流の場合と同様に途中のくぼんだ特徴的な分布となる。このくぼみの位置は $U$ のコンタから予測されるようにダクト流より中央断面側へ寄り、また、くぼみの大きさもより顕著となる。側壁側の第2のピークの大きさは、水路中央部の値と同程度となり、ダクト流よりコーナ2次流の影響が強く現れていることがわかる。

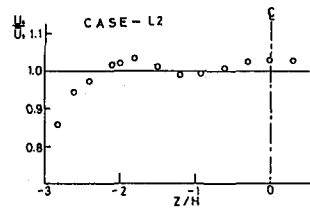


図-15  $U_*$ の横断分布(開水路)

#### 5 コーナ2次流と並列せん流の関係

まずコーナ2次流のアスペクト比による変化についてまとめると次のようになる。

- (1) ダクト流では、コーナに向かう流れはアスペクト比によらずほぼコーナの2等分線に沿っており、側壁渦はほとんど変化しない。開水路流れでは、ダクト流に比べて側壁渦は小さく、コーナへ向かう流れはコーナ2等分線より上側へずれる傾向がある。

- (2) 底面渦は、側壁の拘束がなければその横幅はダクト流で  $1.4 \sim 1.6H$ 、開水路流で  $1.6 \sim 2.0H$  程度まで発達する。したがってアスペクト比が3以下では底面渦は中央断面上まで達する。一般に底面渦は、開水路の方が大きい。
- (3) 底面の摩擦速度  $U_*$  は底面付近の対数則から良好に評価される。その分布は底面渦によって側壁近くの値が増大し途中のへこんだ特徴的な分布となり、このくぼみは底面渦の上昇部に対応する。
- (4) 横断方向のレイノルズ応力  $-\overline{uw}$  の分布は、底面渦の上昇部と対応して弱いピークをとる。

以上から考えて、コーナの2次流によって直接全断面に及ぶ並列らせん流が誘起される可能性は否定された。しかし、底面渦の影響によって側壁から  $2H$  以内の領域では並列らせん流の特性と良く一致した傾向が見られる。特に  $U_*$  の横断分布特性から、実河川のような移動床河床においては、 $U_*$  のくぼみの部分で堆積が促進され、河床の縦筋が形成されることが予想される。先の実験によれば<sup>2)</sup> 縦筋が形成されるとそこで新たな2次流が形成されることが明らかにされており、これを考慮すると、2次流が次々と中央部まで伝搬していき並列らせん流が形成される可能性がある。

そこで次に、Case Aの  $U_*$  の分布のくぼみの位置に、小さな3角形断面の棧型粗度を敷き、この影響を調べた。これをCase Fとし、この場合の2次流流速ベクトルを図-16に示す。突起の上部での強い上昇流の発生によりコーナの底面渦が強められ、突起の中央断面側に新たな2次流が形成されている。しかし、側壁渦はこの突起による影響をほとんど受けない。

次に主流速  $U$  の横断分布を図-17に示す。突起上で大きく減速され、その周辺が若干加速されている。図-18は対数則から求めた  $U_*$  の横断分布をCase Aの結果とともに示したものである。 $U_*$  は、突起上で小さくなり、その中央断面側で大きくなるが、コーナ領域及び中央断面領域ではほとんど変化しない。

最後に、図-19に  $-\overline{uw}$  の横断分布を示す。突起の前後で負から正へと大きく変化し、突起上では非常に大きな勾配となる。この突起によって発生した  $-\overline{uw}$  の大きさは、コーナ領域の  $-\overline{uw}$  の大きさに匹敵し、このように比較的小さな棧型突起でも流れに非常に大きな影響を及ぼすことがわかる。

## 6 あとがき

Case Fの結果から河床の縦筋の2次流発生に果たす役割が非常に大きいことが判明した。したがって2コーナの2次流による  $U_*$  の分布の変動から縦筋が形成され、それによって新たな2次流が誘起され、安定な並列らせん流が存在する可能性が考えられる。今後、移動床で計測を行うことが必須となる。

### <参考文献>

- 1) 中川, 襦津, 富永(1981), 京大防災研年報, 24, B-2
- 2) 中川, 襦津, 富永(1982), 水理講演会論文集
- 3) Melling & Whitelaw (1976), J, Fluid Mech., 78
- 4) 中川, 襦津, 富永, 若井(1982), 第14回乱流シンポジウム
- 5) Leutheusser (1963), ASCE, HY-3
- 6) 中川, 襦津, 富永, 若井(1982), 関西支部年講, II-39

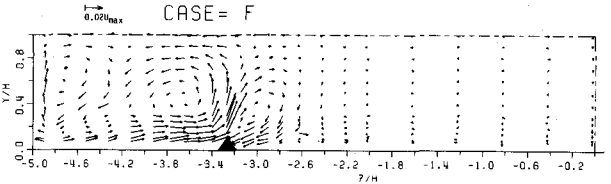


図-16 2次流ベクトル図 (Case F)

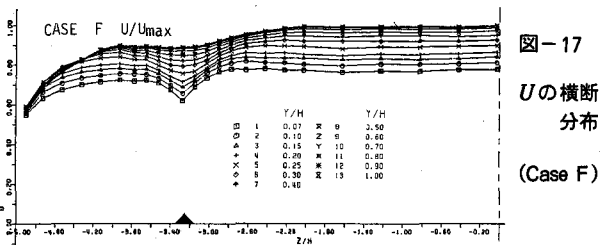


図-17 Uの横断分布 (Case F)

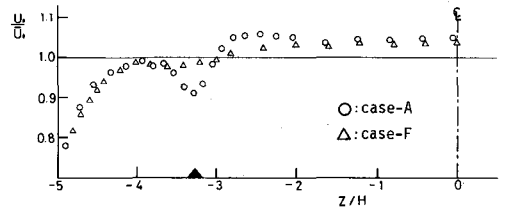


図-18  $U_*$ の横断分布 (Case F)

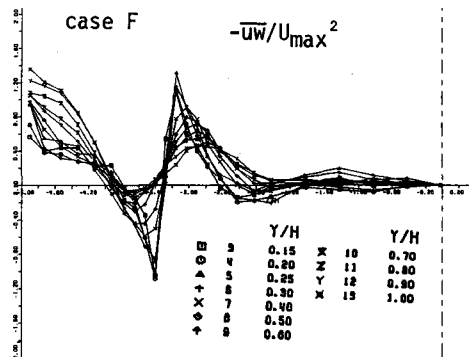


図-19  $-\overline{uw}$ の横断分布 (Case F)