

河床形状がわんど流れに及ぼす影響に関する研究

EFFECTS OF BED SHAPE ON TURBULENT STRUCTURE IN SIDE-CAVITY OPEN-CHANNEL FLOWS

瀬津家久¹・鬼束幸樹²・矢野勝士³
Iehisa NEZU, Kouki ONITSUKA and Masashi YANO

¹ フェロー会員 工博 京都大学大学院教授 環境地球工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

² 正会員 博(工) 京都大学大学院助手 環境地球工学専攻

³ 学生員 京都大学大学院 環境地球工学専攻 修士課程

Measurements of instantaneous flow fields in and around side cavity open-channel flows were conducted with a PIV. The aspect ratio (the streamwise length of the side cavity / the lateral length of the side cavity) was set to 2. Two kinds of experiments were carried out. One is the rigid smooth bed condition. The other is movable sands bed condition. In the movable case, the experiments were conducted after the developing the equilibrium sand wave. It was found that a large scour is generated around the edge of the spur dikes. This is because the flow velocity increases there. In contrast, a deposition is generated just behind the sand wave in the main-channel. The vector patterns of time-averaged flow velocities are quite different from each other (movable case and rigid case). In the rigid case, a large horizontal vortex is generated by the shear instability between the main channel and the side cavity. On the other hand, vortex in the side cavity is reduced by the effect of the main flow in the movable case. As the results, turbulent intensity, Reynolds stress and mass and momentum exchange rate noticeably change in comparison with the rigid case.

Key Words: PIV, wando, sand-wave, horizontal vortex, turbulence characteristics

1. はじめに

近年, 河川に多様性を持たせることが河川環境を改善し, 水生生物の生活の場を提供することが指摘されている。そのため, 水深の変化, 水路幅の変化あるいは土砂や植生などの変化を河川にもたせる試みが始められている。ここでは, 開口部を有する「わんど」に着目し, その特性と役割について検討を行う。

わんどを最も単純なモデルで表すと, 側岸に長方形の凹部を有する開水路流となる。中川ら¹⁾は凹部のアスペクト比(凹部の流下方向長さ/凹部の横断方向長さ), 境界面における仕切板の張り出し長さおよび植生が凹部周辺に与える影響および低水時と高水時の特性を解明するために, 流れの可視化を行った。加えて電磁流速計による点計測も行い渦の周期を算出し, 目視によるものと一致することを述べている。池田ら²⁾は凹部のアスペクト比を系統的に変化させた流れを電磁流速計を用いて計測し, 運動量交換率および質量交換率を求めている。Muto *et al.*³⁾はアスペクト比が 1 および 3 の流れを電磁流速計および LDA(Laser Doppler Anemometer)を用いて計測し, 凹部と主流との間の瞬間的な運動量交換について調べている。最近, 瀬津ら^{4),5)}は凹部のアスペクト比を変化させたときの乱流特性と組織渦を解明するために, LDA と PIV(Particle Image Velocimetry)を用いた実験

的研究を行った。彼らはアスペクト比の変化によって乱流構造が大きく変化し, 組織渦構造やせん断不安定に関する特性も変化することを解明し, 開水路凹部における渦モデルを提案した。

一方, 凹部のもつ重要な特性として挙げられる土砂の堆積に関して木村ら⁶⁾は, わんど周辺の浮遊砂輸送・堆積過程について水理実験と数値解析により検討を行い, 体積過程は 4 パターンに分類できるとした。さらにその堆積パターンは主流の摩擦速度と沈降速度の比および主流のフルード数に依存することを示している。また, 福岡ら^{7),8)}は連続的に配置した越流型透過・不透過水制周辺における河床変動について検討を行っている。その結果によると, 水制先端上流部においては局所洗掘が見られており, この傾向に関しては後に述べる本研究での河床変動傾向と一致している。

以上のように開水路凹部流れに関する研究はかなり例が挙げられるが, そのほとんどが底面が固定平坦床の場合を取り扱っている。しかし, 淀川や木曽川に観察されるわんどを観察すると, わんど周辺の河床形状は複雑な状態となっており, 必ずしも固定床滑面で行った実験結果を実河川のわんど流れに応用できるとは限らない。当然, 凹部が存在することによって流れが変化し, その流れによって河床形状が影響を受けるが, 逆に河床形状によって流れが規定されることも推測される。

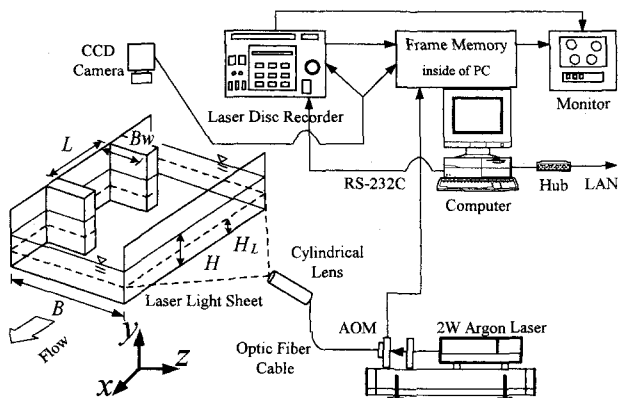


図-1 実験装置

表-1 水理条件

	case1	case2
d_{50} (mm)	-	0.2
H (cm)	3.0	1.5
B_w (cm)	8.0	
L (cm)	16.0	
L/B_w	2.0	
Q (l/sec)	0.3	
$\sin \theta$	1/1000	1/2000

本研究は水路床に粒径 0.2mm の珪砂を敷くことによって河床波を形成させ、平衡状態となったときの流れ場を PIV を用いて計測し、河床形状と乱流特性との相互関係および移動床流れにおける乱流特性と固定床でのそれを比較し、実河川におけるわんど設計に対する貢献を目的とする。

2. 実験装置および実験条件

実験で用いた水路は、長さ 10m、全幅 30cm の可変勾配型循環式直線水路であり、連続的な凹部を形成させるために、水路上流端から 1m～9m の範囲で、図-1 に示すように右岸側に 16cm 毎に四角柱の水制を設置した。ここに、 B_w は凹部の奥行長さ、 L は凹部の流下方向長さ、 H は水深である。座標系としては流下方向に x 軸、 x 軸と垂直上向きに y 軸、横断方向に z 軸をとり x, z 方向の瞬間流速を $\tilde{u} = U + u$ 、 $\tilde{w} = W + w$ とした。ここに $\tilde{u}$ 、 $\tilde{w}$ は瞬間値、 U 、 W は時間平均値、 u 、 w は変動成分とする。

水理条件は表-1 のように設定した。すなわち、凹部のアスペクト比は 2 である。これは、実河川のわんどにおける最頻値であることから採用した。水深は水制よりも低く設定しており、非越流型である。表中の case1 は平坦河床流れ、case2 は平坦河床上に粒径 0.2mm の珪砂を 1.5cm の高さまで敷き詰めたケースである。case2 の実験においてははじめ緩やかに水を通水し、十分に水深が増加したところで徐々に流量を増加させ、その後目的の設定流量を定常的に流した。河床の流砂ははじめは急激な移動をしてい

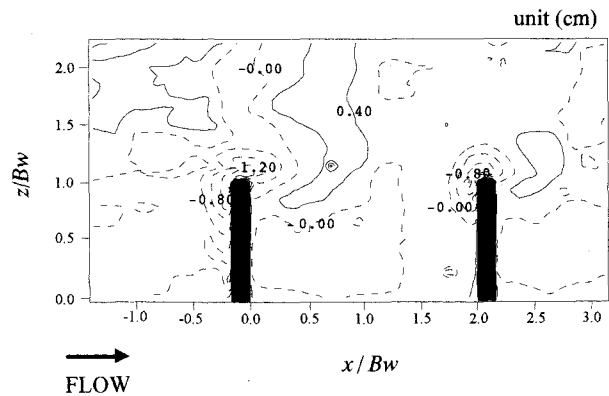


図-2 河床形状

たが、3 時間ほどするとほとんど砂が移動しない動的平衡状態となった。PIV 計測は平衡状態のもとで行われた。

流れの可視化には粒径 100 μ m のナイロン 12 粒子をエタノールに浸した中立浮遊粒子をトレーサーとして用い、2W アルゴンイオンレーザーを光ファイバーケーブル経由でシリンドリカルレンズにより厚さ 2mm のレーザーライトシート (LLS) に変換し、開水路水平断面に照射した。この映像を水路上方から CCD カメラにより 1/30sec 毎に撮影し、レーザーディスクに録画した。計測時間は 60sec とした。こうして得られた可視化画像から相互相関 PIV 法により瞬間流速を計測した。ここで解析範囲として水制区間 16cm 程度を対象とした。

3. 実験結果および考察

(1) 河床形状

本研究では連続水制を設置しているが、水路の始端付近以外の河床形状は多少の相違はあるもののほぼ類似しており、平衡状態であると考えられる。図-2 は任意に抽出した位置における case2 の河床形状を示したもので、初期河床高からの変化量を示している。 $x/B_w = -0.3 \sim 0.3$ 、 $z/B_w = 0.6 \sim 1.3$ 付近において、水制先端付近を最大洗掘位置として $-1.5 \sim -0.5$ cm 程度の洗掘が観察される。これは、水制が存在することによって流れが水制先端に集中し、流速が増加したことによると考えられる。また、その直下流においては堆積傾向が観察され、河床波が形成されている。以下、この堆積した河床波をマウンドと呼ぶこととする。このような水制先端付近で洗掘、その直下流でマウンドを形成するといったパターンは平衡領域における全ての水制について認められた。一方、凹部内での河床形状はほとんど変化していない。

(2) 時間平均流速パターン

図-3 に case1, case2 のそれぞれ最大流速 U_{max} で無

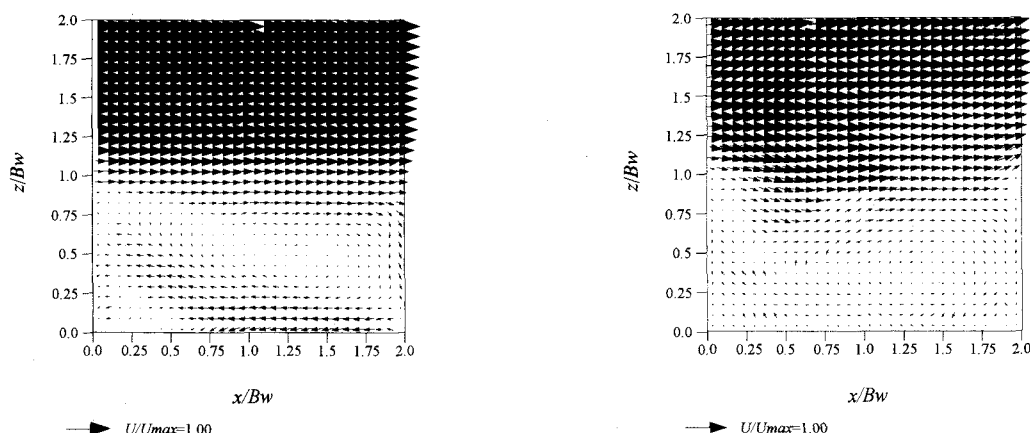


図-3 時間平均流速ベクトル図(U, W) (左図: case1-固定床, 右図: case2-移動床)

次元化された流速ベクトル(U, W)を示す。これは計測時間 60sec で平均したものであり、ここで U_{max} は主流部での最大平均流速とし、case1, case2 についてそれぞれ $U_{max} = 26.23 \text{ cm/sec}$, $U_{max} = 31.29 \text{ cm/sec}$ をとっている。case1 においては凹部下流域において大規模な渦が発生しており、それに伴う小規模渦が $x/B_w = 0.3$, $z/B_w = 0.3$ 付近に観察される。凹部と主流との境界面においては流速ベクトルが x 方向とほぼ平行となっている。以上の結果は、中川ら¹⁾によって電磁流速計で得られた結果とほぼ一致する。一方、case2 では case1 と同様に凹部下流域に水平渦が発生していることが観察される。この渦は case1 のものよりも規模が小さく、強度も小さくなっている。また、凹部の比較的上流側の境界部付近では流速ベクトルが凹部内へと向いていることが認められる。さらに大規模渦の発生に伴う小規模渦も明確には確認できない。また、境界面下流域($x/B_w = 1.9$ 付近)においては下流側の水制の影響により、凹部内から主流部へと流れ出す様子が明確にとらえられている。

(3) 瞬間流速分布パターン

図-4 は流入部における最大流速 U_{max} を用いて無次元化された case1, case2 の瞬間流速ベクトル($\tilde{u}, \tilde{w}$)である。 T は経過時間を示す。case1 においては、凹部内において定常的流れが発生している。こうした結果は前報⁵⁾の PIV の結果と一致している。また、主流部と凹部内部との境界($z/B_w = 1.0$)においては強いせん断不安定が発達している。

一方、case2 に着目すると、case1 の流れ場とはかなり異なる様相を呈している。つまり、水制先端付近を通過した流れは x 方向に平行には流れず、凹部内部に入り込む形となっている。これは、図-2 で観察されたように、マウンドが形成されているために流れが迂回することを表している。さらに、凹部に向かった流れは再び向きを変え、主流方向へと流出している。これは、凹部の比較的下流域に発生している大規模渦と衝突することにより流向が変化した

ものと考えられる。従って、凹部内下流域の大規模渦は case1 よりも規模が縮小しているものと考えられる。これは時間平均された流速ベクトル図でも観察された。また、先程述べた水制先端付近を通過する流れは安定して流れている。そのため、この流れが定常的に下流の大規模渦にぶつかるので、大規模渦も定常的に安定して存在するものと考えられる。

(4) レイノルズ応力分布

図-5 は最大流速 U_{max} で無次元化された横断方向レイノルズ応力 $-\overline{uw}$ を 10^3 倍に表示した分布である。case1 ではコンターラインが水制内部と主流部との境界部を囲い込むように位置しており、境界線上でレイノルズ応力が大きな値を示すことが理解できる。最大値は境界線上の $x/B_w = 1.0$ 付近に観察される。この位置は凹部下流域に存在する水平渦からのリターンフローが主流とぶつかる領域とほぼ一致する。つまり、せん断不安定によって発達したせん断層の影響だけでなく、流れが合流することで発生する乱れも含まれている。また、境界部から主流部かけて($z/B_w = 1.0$ から 1.25 程度)も、レイノルズ応力 $-\overline{uw}$ は大きな値を示している。これは、せん断層の発達および大規模渦のリターンフローが時おり主流部に深く入り込むことによって生じたものの(図-4 参照)と考えられ、水制内部と主流部との境界における水平方向(z 軸方向)の運動量交換が大きいことを示唆している。一方、凹部内においてはレイノルズ応力が境界部付近より低減し、大規模渦の内部でもそれほど大きな値は観察されない。

case2 でのレイノルズ応力 $-\overline{uw}$ の分布は case1 と明らかに異なる分布を示している。凹部背後($x/B_w = 0.7$, $z/B_w = 0.9$)にレイノルズ応力のピークが観察され、その値は case1 におけるピーク値を大きく上回り、より大きな運動量交換が生じていることが示されている。また、 $x/B_w = 0.9$, $z/B_w = 0.8$ 付近では負の値が観測される。これは水制先端付近を通過した流れが凹部内に入り、流向を変化させて再

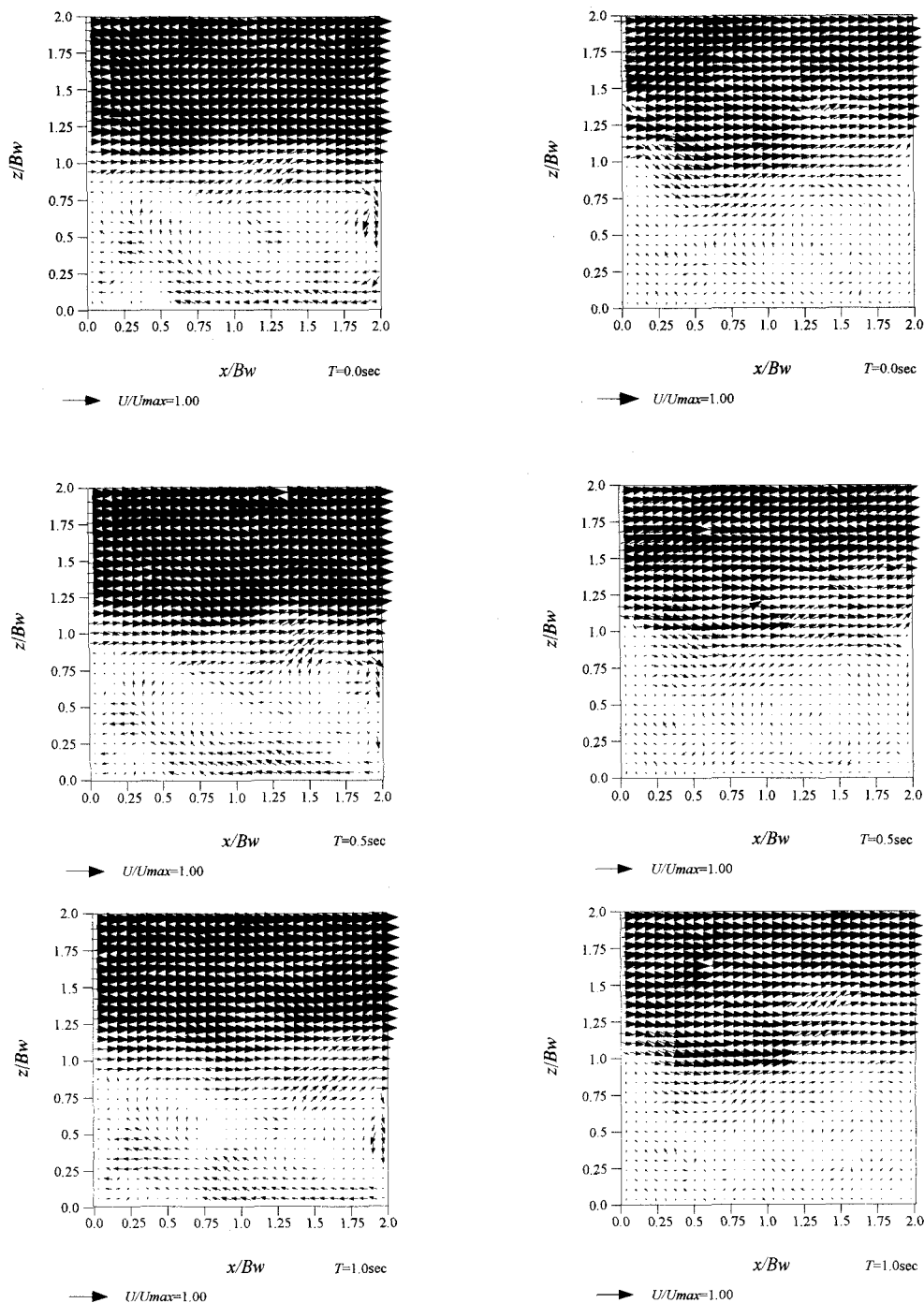


図-4 瞬間流速ベクトル($\vec{u}, \vec{w}$)(左図: case1-固定床, 右図: case2-移動床)

び主流部へと向かう流れの領域と一致している。さらに、下流域での境界面($x/B_w=1.25$, $z/B_w=1.0$ 付近)では再び正の極大領域が観測される。このレイノルズ応力は凹部から主流へと流出することによってシアが発生し、生じたものと考えられる。このピーク値は水制背後のピーク値の半分程度の値である。また、全体的傾向としてピーク絶対値をとる位置がcase1に比べてわんどの内部よりになっていることも注目すべき点である。これらの結果により、河床形状がわんどにおける運動量交換に対して及ぼす影

響はかなり大きいことが明らかとなった。

(5) 乱れ強度

図-6および図-7はそれぞれcase1およびcase2における流下方向乱れ強度 u' および横断方向の乱れ強度 w' を示したものである。なお、最大主流速 U_{max} で無次元化し、値を100倍して表示している。case1における流下方向乱れ強度 u' の最大領域は、境界線上の凹部流入直後と比較的中流域($x/B_w \approx 1.0$)の2

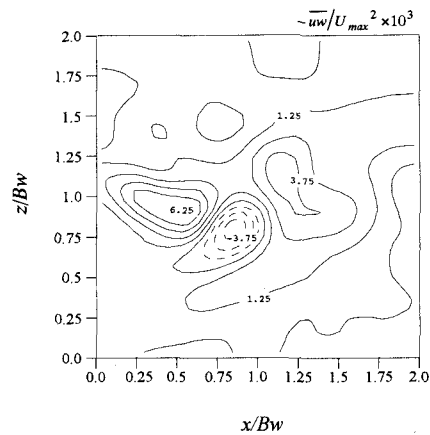
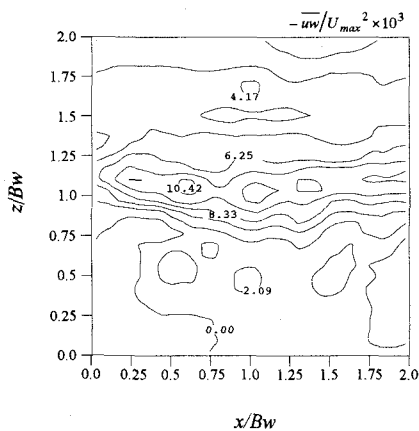


図-5 レイノルズ応力分布 $-\overline{uw}/U_{max}^2$ (左図: case1-固定床, 右図: case2-移動床)

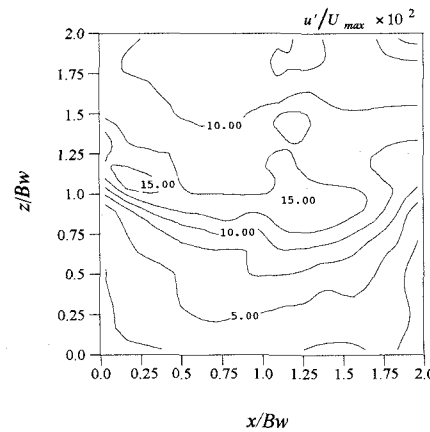
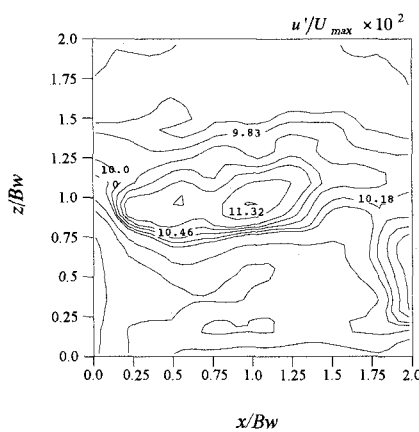


図-6 乱れ強度分布 u'/U_{max} (左図: case1-固定床, 右図: case2-移動床)

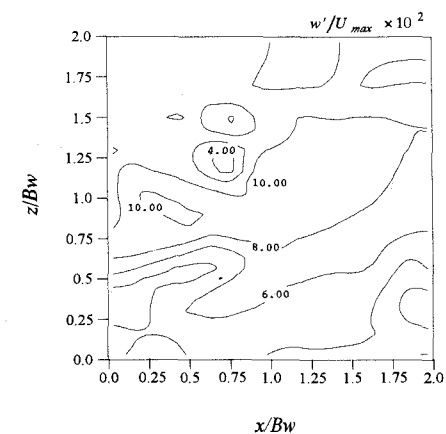
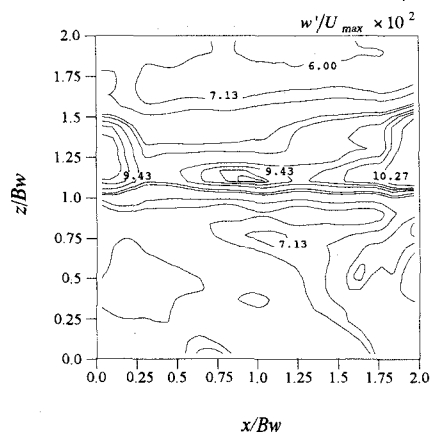


図-7 乱れ強度分布 w'/U_{max} (左図: case1-固定床, 右図: case2-移動床)

力所観察される。前者は水制という壁面が存在することで発生するシアによって引き起こされる乱れである。後者については大規模渦のリターンフローが主流部と合流する位置よりも下流に位置しており、レイノルズ応力が最大値をとる位置よりも下流側となっている。これは、発生した乱れがすぐには逸散されずに下流側に移流したことを示すものと思われる。横断方向乱れ強度 w' の分布に関しては乱れ強度 u' とほぼ同等のオーダーを持ち、そのコンターライ

ンは境界部付近において、流れ方向に沿った傾向を示している。また、図-4 から推察できるように凹部内部においても大きな値となっている。

次に、case2 について述べる。case1 と同様に水制先端背後で最大をとる。これは、case1 と同じメカニズムによる。その他の領域についてはコンターラインが凹部方向に反った弓なりの形状を示している。これは、ちょうどマウンドを囲むような形状となっている。また、流入部 ($x/B_w=0.0$) の主流側において

表-2 質量交換率 M と運動量交換率 θ

	case1	case2
M	2.402E-02	6.874E-02
θ	1.761E-02	2.605E-03

既に大きな乱れ強度を有している。これは、計測対象とした凹部よりも上流域において、同様にマウンド

等の影響で既に発生した乱れが移流していることによると考えられる。横断方向乱れ強度に関してもマウンドを囲むようにコンターラインが取り囲んでおり、マウンドの影響を強く受けているといえる。

(6) 質量交換率と運動量交換率

池田ら²⁾は凹部と主流との物質交換あるいは運動量交換を示す指標として、水制先端を結んだラインを境界面とし、この面における質量交換率 M および運動量交換率 θ を次式のように定義した。

$$M = \frac{1}{\rho U_{\max} L} \int_0^L \rho w |dx| \quad (1)$$

$$\theta = \frac{1}{\rho U_{\max}^2 L} \int_0^L \rho u w dx \quad (2)$$

表-2 に case1 および case2 それぞれのケースにおける質量交換率 M および運動量交換率 θ を示す。質量交換率については case1 よりも case2 の方が大きな値を示している。これは、図-2 で明らかなようにマウンドの存在によって流向が変化し、境界線上で大きな横断方向成分を有することによる。一方、運動量交換率については、逆に case1 の方が case2 よりも大きな値を示している。これは、case1 のレイノルズ応力のピークがほぼ境界線上に存在するのに対し、case2 では境界線よりやや内側に存在することなどが原因である。いずれにしても、case2 の流れ場にはマウンドが大きな影響を与えていることは事実である。

4. おわりに

本研究は連続水制を有する開水路流において、河床形状が平衡となった状態で PIV 計測を行ったものである。また、比較のために同様な幾何学形状で滑面河床を有する流れも計測した。その結果、以下のような結果が得られた。

(1) 水制先端において流れが集中し、そこで局所洗掘が生じる。局所洗掘背後の主流域では急激な掃流力の低下によって堆積(マウンド)が生じる。こうした状態は平衡状態にある全ての水制において観察された。

(2) 流れはマウンドをさけるように迂回して流れる。その結果、水制先端を通過した流れは凹部へと向かう。一方、凹部下流域では循環渦が発生しているため、この流れが循環渦にぶつかることで再び流

向を変えて主流部へと流出する。

(3) マウンドを迂回した流れが凹部下流域に存在する循環渦とぶつかるために、その規模は固定床のものより小さくなる。

(4) レイノルズ応力の極大値は固定床の場合は水制先端を結ぶ境界線上に存在するが、移動床の場合は、やや凹部内に発生し、かつ、正の極大領域のみならず、負の極大領域も観察される。

(5) 乱れ強度分布もマウンドの影響を受け、コンターラインはマウンドを取り囲むよう位置する。これは、流れがマウンドをさけるように流れていることによるものである。

(6) 以上のようなマウンドの影響により、アスペクト比が 2 の場合は、質量交換率は移動床の方が大きくなり、運動量交換率は固定床の方が大きくなる。

謝辞：本研究は土木学会河川懇談会共同研究「ワンドの水理特性と河川環境」(代表者：四日市大学・木村一郎助教授)において行われた現地観測、さらに共同研究会での議論をもとに着想したものである。これら共同研究に参加した皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 中川研造, 河原能久, 玉井信行: ワンド内の流れの水理特性に関する実験的研究, 水工学論文集, 第 39 巻, pp.595-600, 1995.
- 2) 池田駿介, 吉池智明, 杉本高: 不透水水制群を有する流れの構造に関する実験的研究, 水工学論文集, 第 43 巻, pp.281-286, 1999.
- 3) Muto, Y., Imamoto, H. and Ishigaki, T.: Velocity measurements in a straight open channel with a rectangular embayment, *Proc. of 12th Congress of APD-IAHR*, pp.353-362, 2000.
- 4) 瀬津家久, 鬼束幸樹, 高橋俊介: 開水路わんどモデル内の乱流特性と組織渦, 土木学会論文集, No.684/II-56, pp.11-20, 2001.
- 5) 瀬津家久, 鬼束幸樹, 池谷和哉: PIV を用いた開水路凹部流れにおける水平渦構造の解析, 土木学会論文集, No.677/II-55, pp.53-61, 2001.
- 6) 木村一郎, 細田尚, 村本嘉雄: 死水域の浮遊砂堆積過程に関する水理パラメータ依存特性, 水工学論文集, 第 42 巻, pp.1057-1062, 1998.
- 7) 福岡捷二, 西村達也, 岡信昌利, 川口広司: 越流型水制周辺の流れと河床変動, 水工学論文集, 第 42 巻, pp.997-1002, 1998.
- 8) 福岡捷二, 渡邊明英, 川口広司, 安竹悠: 透過型水制工が設置された直線流路における流れと河床変動: 水工学論文集, 第 44 巻, pp.1047-1052, 2000.

(2001. 10. 1 受付)