

高水敷に水制を有する複断面河道の流れ構造

FLOW STRUCTURES AROUND GROYNES ON FLOOD PLAIN IN COMPOUND OPEN CHANNELS

鄭 載勲¹・富永晃宏²

Jaehun JONG and Akihiro TOMINAGA

¹ 学生会員 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

² 正会員 工博 名古屋工業大学教授 工学部都市社会工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

The flow structures around groynes and in the groyne area (embayment) are very complicated depending on the groyne length, flow depth and channel bed conditions. The groynes on the floodplain may cause much scour and sand deposition by the flow interaction between main-channel and floodplain, superimposed on their obstruction and contraction effects. In order to investigate the flow structures around groynes in compound open channel, we performed experimental study by using Particle Image velocimetry (PIV). Velocities were measured in a compound open channel with setting groynes of different lengths on the flood plain. In addition, the secondary flow structures were clarified by synthesizing the velocity components in horizontal and vertical planes. The groynes on the floodplain deflected the main flow and produced 3-D flow structures around the groynes.

Key Words : *groyne, compound open channel, secondary flow, 3-D flow structure, PIV*

1. はじめに

近年、豪雨による河川の氾濫災害が多発する中、流下能力を増大させ、河川環境を長期的に維持する目的で、高水敷の一部掘削による河積の拡大工事が各地で行われている。このような掘削により、複断面河道の高水敷と低水路の間に冠水頻度が高い中水敷と呼ばれる空間が形成され、この中水敷に水制が出現した例がある。木曾川水系の一級河川である揖斐川では、高水敷の掘削により大正時代設置されたケレップ水制が出現し、中水敷上に水制が置かれた形の河道が形成された。このような水制を有する複断面河道では、水制の本来の設置目的と河道の通水能向上といった治水面での目的を並立させることが重要な課題となる。また、水制周辺では平水時および洪水時に局所的洗掘や水制域内の土砂堆積が起り、形成された中水敷は河川平水位との比高によってその後の土砂堆積状況と植生繁茂状況が変化し、再び高水敷化する可能性もある。したがって、水制周辺の流れ構造や土砂の輸送機構を把握する必要がある。ここでは、水制群周辺の低水路河床の低下と水制間の土砂堆積による高水敷化の進行過程において比高の高い位置に水制が置かれた場合を対象としている。

水制周辺の流れ構造や河床変動については数多くの研究がなされているが¹⁾²⁾³⁾⁴⁾、ほとんどの研究が低水路流れを対象としたものが多く、本研究のような高水敷上に水制が設けられた場合の研究は少ない。また、複断面河道の流れに関する研究は数多く、2次流構造や大規模平面渦構造などの3次元流れ構造が明らかにされている⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾。Weitbrecht⁹⁾と Sturm¹⁰⁾の研究では高水敷上に水制を設置し、水制周辺の渦構造や局所洗掘、また、高水敷と低水路との境界部流れを2次的に検討している。しかし、複断面河道と水制周辺の流れ場はその境界部に発生する大規模渦や水はねなどによる複雑な3次的流れ構造が支配的であると思われる。このような複断面水制周辺の流れを把握することが、複断面河道における土砂堆積機構を知る上で重要である。

そこで、本研究では水制を有する複断面河道の流れ構造について実験的研究を行った。PIV計測法を用い、水平断面と鉛直断面を細かく撮影することによって複断面や水制周辺の3次的流れ構造を解析した。また、水制の長さや流量を変化させ、その効果について検討した。さらに、土砂堆積実験を行い、水制周辺の浮遊砂の局所的堆積状況を調べた。

表-1 実験条件

ケース	流量 $Q(l/s)$	断面平均流速 $U_m(cm/sec)$	低水路 水深 $H(cm)$	高水敷 水深 $h(cm)$	水制長 $L(cm)$	水路 勾配 I
H6	1.6	11.4	6	4	—	1/1000
H4	0.8	10.0	4	2	—	
A1	1.6	11.4	6	4	20	
A2	0.8	10.0	4	2	10	
B1	1.6	11.4	6	4	20	
B2	0.8	10.0	4	2	10	

2. 実験方法および実験条件

実験水路は、長さ8m、幅30cm、勾配1/1000の長方形勾配可変型水路を用いた。水路左岸に幅20cmの塩ビ板を設置し高さ2cmの高水敷を作り、水路の中間部、上流端から4.5~5.0mの範囲に2基の水制を設置し水制区間とした。上流側の水制を第1水制、下流側の水制を第2水制とし、水制モデルの単体は、高水敷上に高さ2cm、幅0.5cm、長さ20cmと10cmの亚克力製板を33cmの間隔で側壁に対して直角に配置した。実験ケースおよび水制模型配置は図-1に示す通りであり、実験条件を表-1に示す。水制長さが20cmの場合がケースA、10cmの場合をケースBとし、流量 $Q=1.6l/s$ の越流型水制がシリーズ1、 $Q=0.8l/s$ の非越流型水制をシリーズ2とし、ケース名の後にこの番号を付けている。水制無しの場合は流量 $Q=1.6l/s$ 、低水路水深6cmをケースH6とし、流量 $Q=0.8l/s$ 、低水路水深4cmの場合をケースH4とした。流れの可視化には、比重1.02、粒径50micronのナイロン樹脂粒子をトレーサーとして使い、厚さ約3mmのシート状にした500mWアルゴンレーザー光 (Ion Laser Technology) を開水路鉛直縦断面 ($x-z$ 平面) と水平断面 ($x-y$ 平面) に照射した。レーザーシートの鉛直縦断面の照射位置は全てのケースで28断面 (左岸側側壁から $y=10\sim 270mm$ までの10mm間隔と高水敷と低水路の境界面の $y=205mm$)、水平断面の照射位置は低水路水深6cmの場合に11断面 (河床から $z=5\sim 55mm$ を5mm間隔) を、低水路水深4cmの場合は7断面 (河床から $z=5\sim 35mm$ を5mm間隔) を設定した。これは鉛直断面と水平断面を合成することによってその流れ場に置いての3次元流れ構造を捉えるためである。

この可視化画像は高速 CCD カメラを用いて1秒間200フレームで撮影され、パソコン側のキャプチャーボードにより、ハードディスクに640×480画素のBMPファイルとして記録された。画像計測にはVISIFLOW (AEA Technology) PIVシステムを用い、相互相関法により画像解析した。相関法では検査エリアを32×32画素、オーバーラップは75%とし、一画素の実長が0.54687mm/pixel

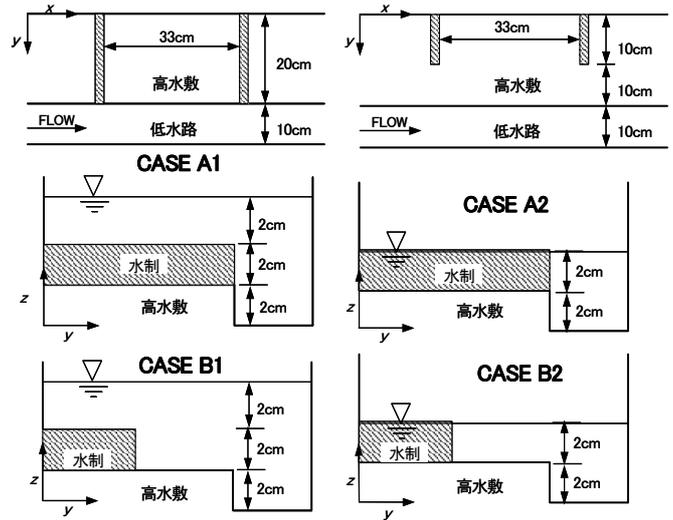


図-1 実験ケースおよび水制模型配置図

の画像をパソコンのメモリ容量範囲内の連続撮影可能な計3200枚、約16秒間平均値の流速ベクトルデータを得た後、統計処理した。

砂堆積実験は、固定床において平均粒径0.075mmの珪砂を用い、上流端に設置した給砂装置から平均150g/minの給砂を行い、3時間後に堆積状況を写真撮影した。この実験は、砂をトレーサーとして循環させて局部的堆積状況を調べ、流れとの関係を検討しようとしたもので、平衡的な流砂輸送を対象としたものではない。

3. 実験結果および考察

(1) 水制無しの複断面流れ

本研究では、PIV計測の水平断面と鉛直断面を細かく撮り、それらの各断面における横断方向速度成分 v と鉛直方向速度成分 w を合成することによって2次流を再現することができた。図-2にケースH6とH4の2次流ベクトルと主流速分布を示す。従来の複断面開水路流れの研究と同様に高水敷と低水路の境界部に斜昇流が見られるが、水深の変化による渦構造は若干異なる傾向が現れた。2次流ベクトルでは水深の深いケースH6では斜昇流に伴って生じる高水敷上の反時計回りの渦が形成されているが、水深が浅いケースH4ではそれが見られず、境界部で水面向きの強い斜昇流が見られる。2次流速の最大値はH6で最大流速の3.4%、H4で6.4%であり、H4の方が大きい。従来報告されている2次流速の大きさと同程度である^{6),8)}。主流速分布では、ケースH6の高水敷上の奥まで速い流速が存在しているのに対し、ケースH4の高水敷上では全体的に遅い流速を示している。また、ケースH6とH4における高水敷の角付近 ($y=20cm$, $z=2cm$) の領域に着目するとコンターが低水路側の水面方向へと張り出して分布していることがわかる。これは2次流の運動量輸送によるものと考えられる。さらに、最大流速に注目するとケースH4では低水路中央部の水

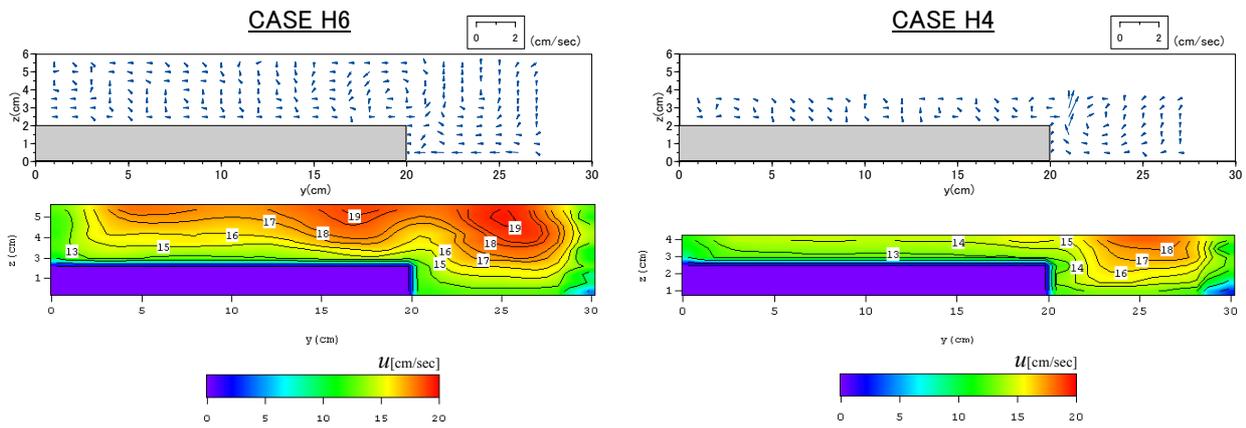


図-2 2次流ベクトルと主流速分布

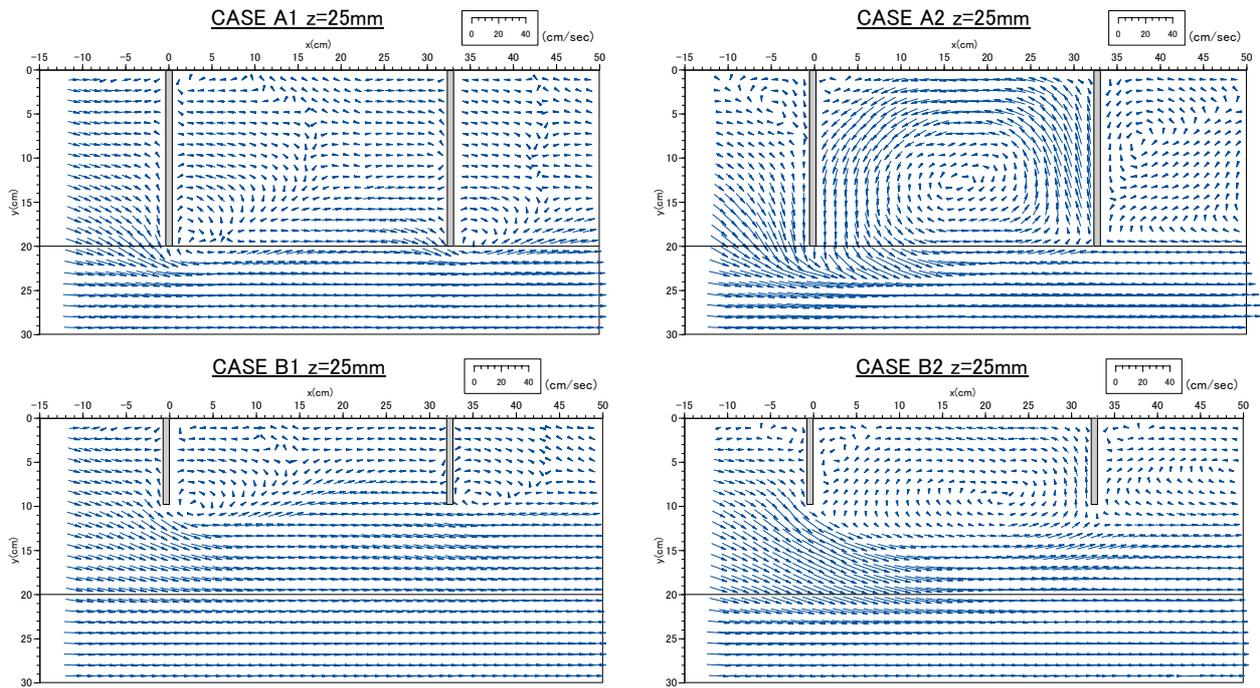


図-3 水平断面時間平均流速ベクトル

面付近に存在しているのに対し、水深が深いケース H6 では低水路と高水敷上に発生している。このことは、高水敷の角から上昇した斜昇流が徐々に低水路側と高水敷に向かう流れに分離した結果、水面付近で高水敷に向かう流れが高運動量塊を高水敷上に移流させた結果生じるものと考えられる。

(2) 水制を有する複断面流れ

a) 時間平均流速ベクトル

水制を有する複断面流れの場合は複断面流れと水制周辺の流れとの相互作用でより複雑な3次元流れ構造が見られる。まず、PIV結果得られた16秒間の時間平均流速ベクトルについて説明する。

図-3に各ケースにおける $z=25\text{mm}$ での水平断面時間平均流速ベクトルを、図-4に短い水制先端部($y=105\text{mm}$)と高水敷・低水路の境界部($y=205\text{mm}$)における鉛直断面時間平均流速ベクトルを示す。図-3は高水敷から

5mm上の断面であり、高水敷上の流れと低水路流れの相互関係をよく捉えたものであると考えられる。全ケースにおいて第一水制の先端部からの水はねが見られるが、その大きさや再付着点の距離は各ケースで異なるパターンを示している。越流型水制のケースA1とB1では水制先端のすぐ後に小さい渦が確認できる。また、第1水制と第2水制の後方に水制頂部を乗り越えた剥離渦の再付着点が $x=15\text{cm}$ と $x=42\text{cm}$ の位置で形成されている。非越流型水制であるケースA2とB2の水平断面では水制域全体をカバーする循環渦が見られるが、長い水制の場合が短い水制より強い回転を示している。ケースB2の場合、第1水制の先端に形成された水はねが下流側 $x=25\text{cm}$ 付近まで達しており、水制長が短い場合でも水はねの影響は低水路まで及んでいる。

図-4に水制先端部における横断方向流速 v の比較を示す。ここで示す正の値は低水路から高水敷へ向かう流れの流速であり、負の値は低水路に向かう流れの流速であ

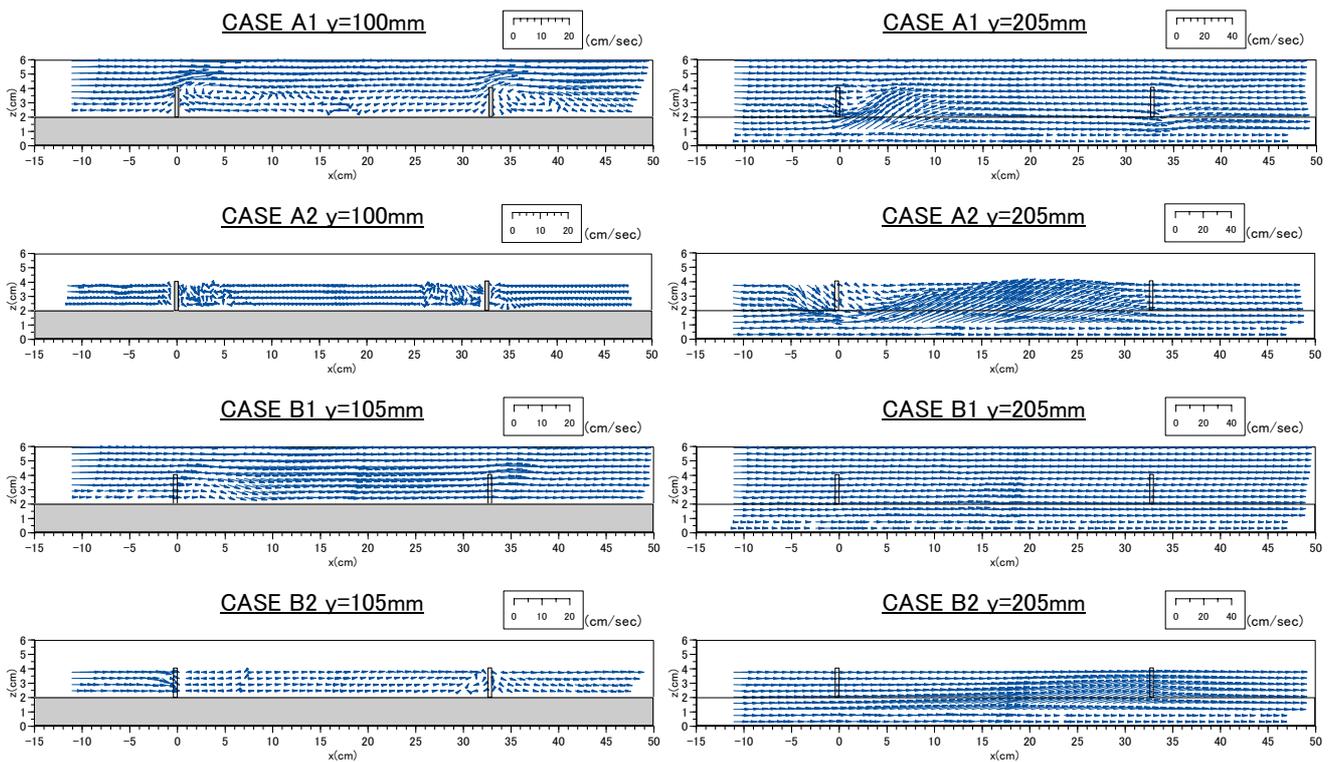


図-5 鉛直断面時間平均流速ベクトル

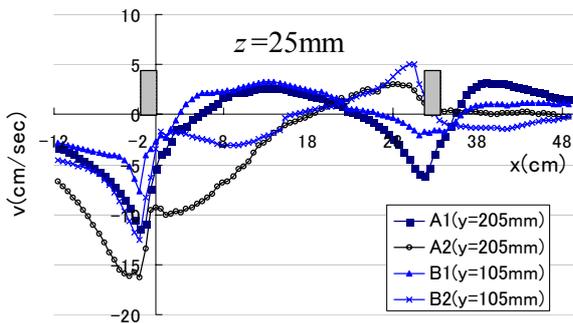


図-4 横断方向流速縦断分布

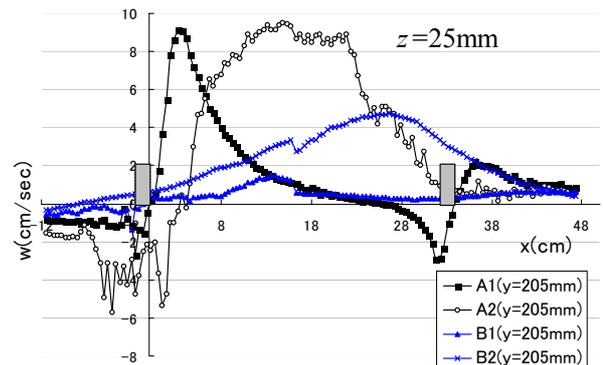


図-6 鉛直方向流速縦断分布

る。第1水制で水はねによる v の値は越流型と非越流型ともに水制長が長いケースの方が大きな値を示している。また、水制域内への入り込み（正に値）と低水路へ出て行く流れ（負の値）のパターンが非越流と越流で逆になっているのがわかる。

図-5の鉛直断面時間平均流速ベクトルでは、水制域内 ($y=100\text{mm}$) において越流型水制であるケース A1 と B1 の水制のすぐ後に水はねによる剥離渦が現れる。高水敷と低水路の境界部においてケース A1 と A2 の水制の前方で下降流が発生し、水制の後方では上昇流が見られる。ケース A2 では第1水制から第2水制まで強い上昇流が見られる。また、ケース B1 ではその傾向が見られないがケース B2 では高水敷と低水路の境界部の第2水制を過ぎた所まで上昇流が観察できる。ケース B1, B2 の水制先端領域では、ケース A1, A2 のような上昇流が見られず、ケース B1 の第1水制の後方では下降流が現れる。

図-3のケース B2 の水平断面ベクトルで示したように第1水制から剥離された低水路に向かう流れ成分が下流側低水路まで維持され、低水路の流れに影響したものと考えられる。このような水制先端で河床底面に潜り込んで再び上昇する流れは水制局所洗掘の原因となる。短い水制の場合は水制の先端が高水敷上に位置しているため、高水敷の維持管理に重大な問題になる。

図-6に複断面と低水路の境界部における鉛直方向流速 w の分布を示す。これは境界部での上昇流（正の値）および下降流（負の値）を示したもので低水路における土砂の巻き上げや沈降に大きく関わる。長い水制のケース A1, A2 では第1水制の前方で下降し、後方で上昇している。ケース A1, A2 で、ピークの値はほぼ同じであるが、A2では水制域内の広い範囲で大きい値をとる。ケース A1 では第2水制領域でも下降と上昇流が見られる。短い水制のケース B1, B2 の第1水制のかなり後ろに上

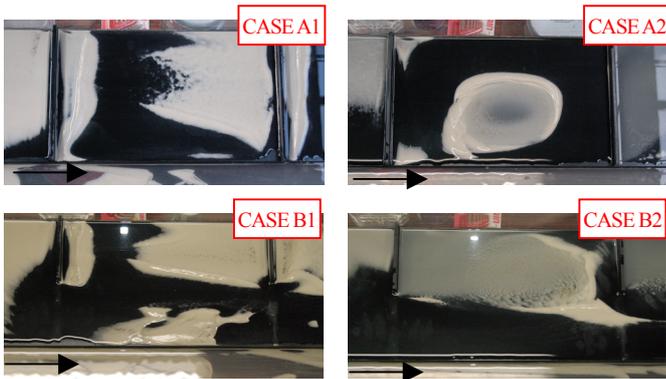


図-7 浮遊砂堆積形状

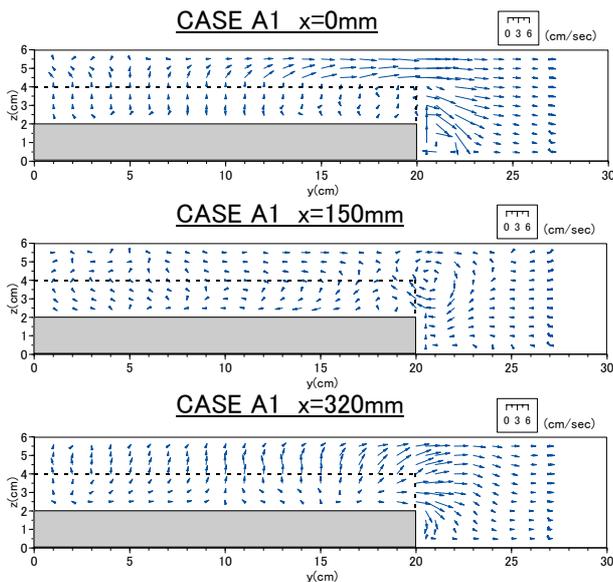


図-8 ケース A1 における 2 次流ベクトル

昇流が見られるが、ケース B1 は比較的小さい値であり、B2 では第 2 水制の前方で大きい値を示す。

b) 浮遊砂堆積状況

土砂堆積実験による浮遊砂堆積形状を図-7 に示す。この堆積形状は図-3 の水平断面ベクトルで示した流れ構造とよく関係付けられる。ケース A1 と B1 では第 1 水制と第 2 水制の後方で水制の長さに沿って堆積が見られる。これは水制頂点を乗り越えた流砂が水制域内で発生する剥離渦に巻き込まれ、さらに、上流に向かう逆流が原因である。また、水制域内の中央部から見られる堆積のパターンはケース A1 と B1 で同じ傾向を示している。これは、第 1 水制後方で起きる水はねの再付着が原因で水平断面ベクトル図に見られる再付着点を繋ぐ横断線とほぼ一致している。ケース A2 の場合は水制域内で発生する大きい循環渦が支配的で流速が遅くなる中央部に堆積が集中している。しかし、ケース B2 では水制域内下流側に一つの大規模循環渦が見られ、その上流側に遅い流速に伴う薄い堆積形状を示している。

c) 2 次流構造

高水敷水制では、水制域内の流体と主流域の流れとの交換および水制頂部の流れとの交換が両方存在し、さら

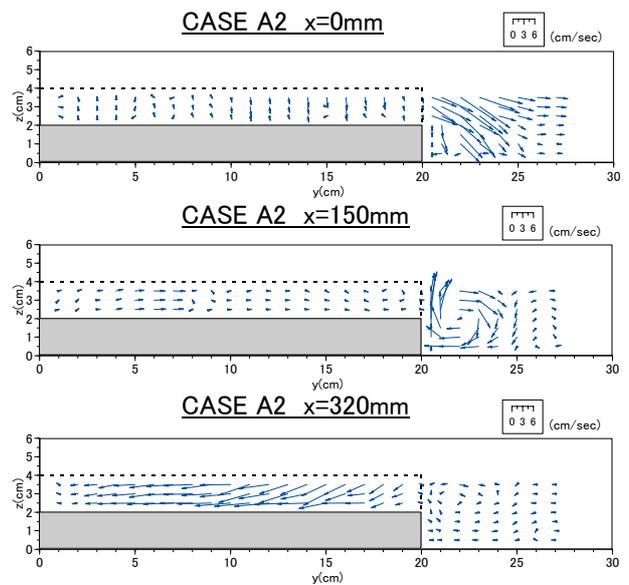


図-9 ケース A2 における 2 次流ベクトル

に、複断面流れの特徴である 2 次流の存在がより複雑な 3 次元構造を示す。ここでは、第 1 水制の上流側から第 2 水制までの 2 次流構造について説明する。まず、実験水路の座標系は第 1 水制の左岸側を $x=0$, $y=0$ とし、流下方向に対して正の値とする。

図-8、図-9、図-10、図-11 に各ケースにおける 2 次流ベクトルを示す。まず、長い水制のケース A1, A2 は水制の長さと同複断面の幅が同じで、水制の先端と高水敷・低水路の境界部が同じ位置であることから水制の水はねによる低水路流れへの影響が大きいと考えられる。ケース A1, A2 の第 1 水制のすぐ後 ($x=0\text{mm}$) では両方とも $y=20\text{cm}$ の境界部で低水路底面に向かう下降流が発生しているが、下流側に行くにつれて 2 次流のパターンが変わる。水制域の中間部である $x=150\text{mm}$ では、時計周りの渦が水制先端の上層部に見られる越流型水制のケース A1 に対し、ケース A2 では低水路の横断面半分にかけて、強い上昇流を伴う渦が形成されている。上流側 ($x=0\text{mm}$) の低水路底面の境界部に注目すると、高水敷から低水路に向かう比較的強い流れが存在しており、この流れが主流部の流れと相互作用して低水路と高水敷との境界部に渦を形成させ、さらに流下方向へ移動するらせん流の形となって現れる。ケース A1 の第 2 水制の前方 ($x=320\text{mm}$) では、水制によって妨げられた流れが水面および低水路に向かう流れと変化し、 $x=150\text{mm}$ で見られた渦が消滅されている。しかし、ケース A2 では、第 2 水制の先方で水制域の奥部に向かう強い流れが形成されており、低水路では規模は小さいが $x=150\text{mm}$ の位置で見られた渦の成分が残されている。短い水制の場合 (図-10 と図-11) は、 $x=0$ の位置で水制先端部から低水路に向かう流れが生じ、低水路付近では下降流になって境界部で高水敷高さ程度の渦が形成されているのがわかる。非越流型水制のケース B2 の $x=150\text{mm}$ では境界部の渦が発達しているが、越流型のケース B1 ではその規模が小さくなってい

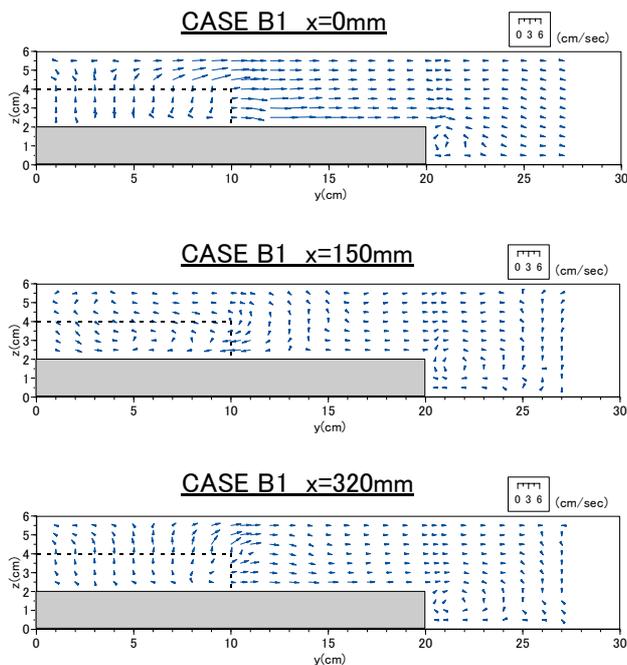


図-10 ケース B1 における 2 次流ベクトル

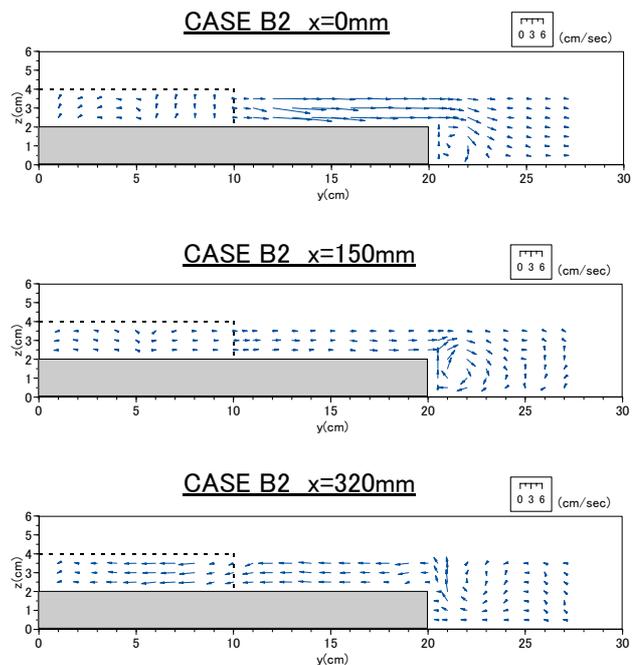


図-11 ケース B2 における 2 次流ベクトル

る。むしろ第 1 水制後方の高水敷中央付近に時計回りの 2 次流が確認できる。また、ケース B2 の $x=320\text{mm}$ の位置では、境界部の上昇流が高水敷上に乗り上げられ、水制の奥部へ向かう流れになっているのに対し、ケース B1 では、逆に低水路に向かう流れが見られる。これは越流型水制の第 1 水制の先端で形成された水はねが、第 2 水制前方で再び起こることが原因である。

4. おわりに

PIV 可視化法によって複断面河道および高水敷上の水制周辺に生じる流れの 3 次元構造を捉えることができた。また、水制の長さや水深を変化させ、その周辺の流れ構造を比較した。水制無しの場合では典型的な 2 次流構造が捉えられており、水深変化による 2 次流のパターンや高水敷および低水路で生じる最大流速の分布について考察できた。高水敷上に水制があるケースにおいて、長い水制の場合は第 1 水制による水はねの影響は非常に大きく、低水路において強い上昇流や下降流を形成する。一方、短い水制の場合は第 1 水制の水はね効果が高水敷上から低水路の流れにまで及ぼすことがわかった。また、越流型と非越流型それぞれで、水制長さの変化にかかわらず同じパターンの 2 次流構造が見られた。

以上の結果から高水敷上に水制がある場合は水制周辺で生じる流れ構造が高水敷および低水路流れに大きく影響することと、このような流れ構造がもたらす土砂堆積機構についてもある程度予測できることがわかった。しかし、水制を中水敷の維持・形成に利用する上で限られた実験の範囲では不十分な点があり、複々断面のようなより複雑な条件における実験や精度の高い土砂堆積実験

を行う必要があると考える。

参考文献

- 1) 富永晃宏, 中野義郎, 藤田享良: 越流型水制域内の流れ構造の可視化解析, 水工学論文集, 第 44 巻, pp.1041-1046, 2000.
- 2) 富永晃宏, 中野義郎, 井嶋康二, 長坂剛: 越流型水制域内の流れ構造に及ぼす相対水制高の影響, 応用力学論文集, vol.3, pp.805-812, 2000.
- 3) 富永晃宏, 中居毅, 内藤健, 中村尚子: 開水路湾曲部に設置した透過水制の流れと河床変動に及ぼす影響, 水工学論文集, Vol.48, pp.547-552, 2004.
- 4) 川口広司, 岡信昌利, 福岡捷二: 越流型水制群に作用する流体力の特性, 水工学論文集, vol.4, pp.1065-1070, 2000.
- 5) 禰津家久, 鬼東幸樹, 相良幸輝, 池谷和哉: かぶり水深の変化が複断面開水路流れの組織渦に及ぼす影響に関する研究, 土木学会論文集, No.649/II-51, pp.1-15, 2000.
- 6) 石垣泰輔, 今本博健: 可視化法による複断面開水路流れの 3 次元構造に関する研究, 土木学会論文集, No.515/II-31, pp.45-54, 1995.
- 7) 池田駿介, 村山, 空閑: 複断面開水路水平渦の安定性とその 3 次元構造, 土木学会論文集, No.509/II-30, pp.131-142, 1995.
- 8) Tominaga, A. and Nezu, I., Turbulent structure in compound open channel flows, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 117(1), pp.21-41, 1991.
- 9) Weitbrecht, V., Socolofsky, S. A., Jirka, G. H.: Experiments on mass exchange between groin fields and main stream in rivers, in *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 134, No.2, pp.173-183, 2008.
- 10) Sturm, T. W.: Scour around bankline and setback abutments in compound channels, in *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.132, No.1, pp.21-32, 2006. (2008. 9. 30 受付)