

越流型水制周辺の流れ構造に及ぼす 水制間隔の効果

EFFECTS OF INTERVAL LENGTH ON FLOW STRUCTURES AROUND SUBMERGED SPUR DIKES

冨永晃宏¹・井嶋康二²
Akihiro TOMINAGA and Koji IJIMA

¹ 正会員 工博 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

² 学生会員 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

To predict and control flow, sediment transport and water quality exchange by using submerged spur-dike, it is necessary to clarify three-dimensional flow structures around spur-dike zones. The interval length affects flow structures in the region enveloped by two spur dikes. In this study, the longer interval cases are investigated by using PIV method adding on the previous experimental data in which the orientation angle of super dike was changed as a design parameter. The transverse and vertical vortices generated by the first spur dike are limited in streamwise length. With an increase of the interval length, the flow structures in the downstream region become ambiguous. However, fundamental flow structures characteristic in each orientation angle are not so much changed.

*Key Words : submerged spur dike, 3D flow structures, local flow, PIV method
orientation angle, interval length*

1. はじめに

水制は河岸付近の流速を減速する粗度効果と水流を河岸から遠ざける水はね効果を有し、治水構造物として古くから利用されている。一方、河岸防護のための方策として、護岸による河岸の人工化に対して、水制は河岸域に止水域を形成し水生生物の生息環境として有利な点も注目されてきている。前者の目的に対しては、流水抵抗としての評価と局所洗掘からの防御が課題となる¹⁾²⁾。後者の目的としては、水制間に土砂堆積を促したり、植生を回復させたり、瀬と淵の造成を目的に使用したりすることも考えられ³⁾、このような多様な目的に対して水制の最適な設置法を考える上では、水制周辺の詳細な流れ構造を知ることが重要である。特に越流型水制では、水制域内流体と主流域の流れおよび水制上部の流れとの交換の両方が存在し、両者の相互作用により複雑な3次元の流れ構造を示すことが知られている⁴⁾⁵⁾。著者らは、越流型水制の相対水制高の変化および主流方向に対する水制設置角度の変化が水制周辺における流れ構造に与える影響を可視化PIV法を用いて実験的に検討した。その結果、越流型水制では水制間の領域における逆流が相対水制高の増大とともに

強くなること⁶⁾、設置角度の違いにより水制間領域の流動特性が全く異なること⁷⁾などを明らかにしてきた。上向き水制では側面から流入して上面から流出する縦渦的要素が強くなり、下向き水制では上面から流入して側面から流出する1方向的な流れが顕著であった。しかし、これらのケースでは2基の水制間隔が水制長の2倍に限定されていたため、鉛直方向を軸とする鉛直渦と横断方向を軸とする横断渦のスケールが同等で相互作用が強く、また水制間の渦構造が比較的安定であった。そこで、本研究では相違が顕著に見られた直角、上向および下向き水制において2基の水制間隔を大きくした場合の流れ構造の変化について、PIV計測によって検討した。PIV計測では2次元の鉛直および水平断面の流れ場を計測することになるが、時間平均の3次元構造を十分捉えることが可能である⁸⁾。水制間隔が大きい場合には、水制間の渦構造がかなり不安定となり、瞬間の渦構造は時間的に大きく変化している。物質輸送においては瞬間流れ構造を明らかにすることが重要と考えられるが、この合理的な解析法についてはまだ検討の余地が多く残されており困難な面がある。したがって、本研究では、まず時間平均流速構造についての検討を行った。

表-1 実験条件

CASE	直角水制			上向水制			下向水制			
	2R	3R	4R	2U	3U	4U	2D	3D	4D	
水路床勾配	i			1/2000			1/2000			
流量	Q (l/s)			4.1			4.1			
水深	h (cm)			8.0			8.0			
水制間隔/水制長	s/l	2	3	4	2	3	4	2	3	4
水制間隔	s (cm)	10	15	20	10	15	20	10	15	20

2. 実験方法

実験水路は、水路幅 $B=0.3\text{m}$ 、長さ 8m の長方形勾配可変型開水路を用い、路床勾配 $i=1/2000$ とした。水制設置場所は水路の中間部を水制区間とし、左岸側壁に沿って2個の連続水制モデルを配置した。これは先頭水制水はね効果と、水制間の流れ構造を捉えることを目的としたためである。水制モデルは、長さ $l=5.0\text{cm}$ 、幅 $b=2.0\text{cm}$ に固定し、水制高 $d=4\text{cm}$ とした。また水制間隔は水制長の2倍程度が比較的渦構造が安定する $s=10\text{cm}$ のケースに加え、水制間隔が3倍の $s=15\text{cm}$ 、4倍の $s=20\text{cm}$ と変化させた合計3ケースの実験条件を設定した。実験ケース名は水制間隔が2倍の物を(2R)、3倍を(3R)、4倍を(4R)と表した。流量 $Q=4.1\text{l/s}$ の定常流量を通水し、水制を設置しない状態で、下流部での堰上げを調整して水深 $h=8.0\text{cm}$ とし、すべての実験ケースにおいてこの状態で堰上げを固定した。

PIV計測の流れの可視化には、比重1.02、粒径 $50\mu\text{m}$ のナイロン樹脂粒子を用い、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、8断面 (水制側壁から $5, 15, 25, 35, 45, 55, 70, 90\text{mm}$) を設定した。この可視化画像は高速ビデオカメラを用いて $1/120\text{s}$ で撮影した。画像は高速ビデオカメラのメモリーに録画された後、ハードディスクに 640×480 画素のTIFFファイルとして記録される。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。第1水制上流 4cm から第2水制後端までの最大 25cm 程度の範囲を解析対象として計測した。相関法では検査エリアを 32×32 画素、オーバーラップは 50% とし、高速ビデオカメラで連続撮影可能な計 1963 枚、約 16 秒間平均値の流速ベクトルデータを得て統計処理した。

3. 実験結果および考察

(1) 直角水制

直角水制の $y=5\text{mm}$ と 25mm の鉛直縦断面平均流速ベクトルを図-1に示す。 $y=5\text{mm}$ の側壁近傍を見ると、

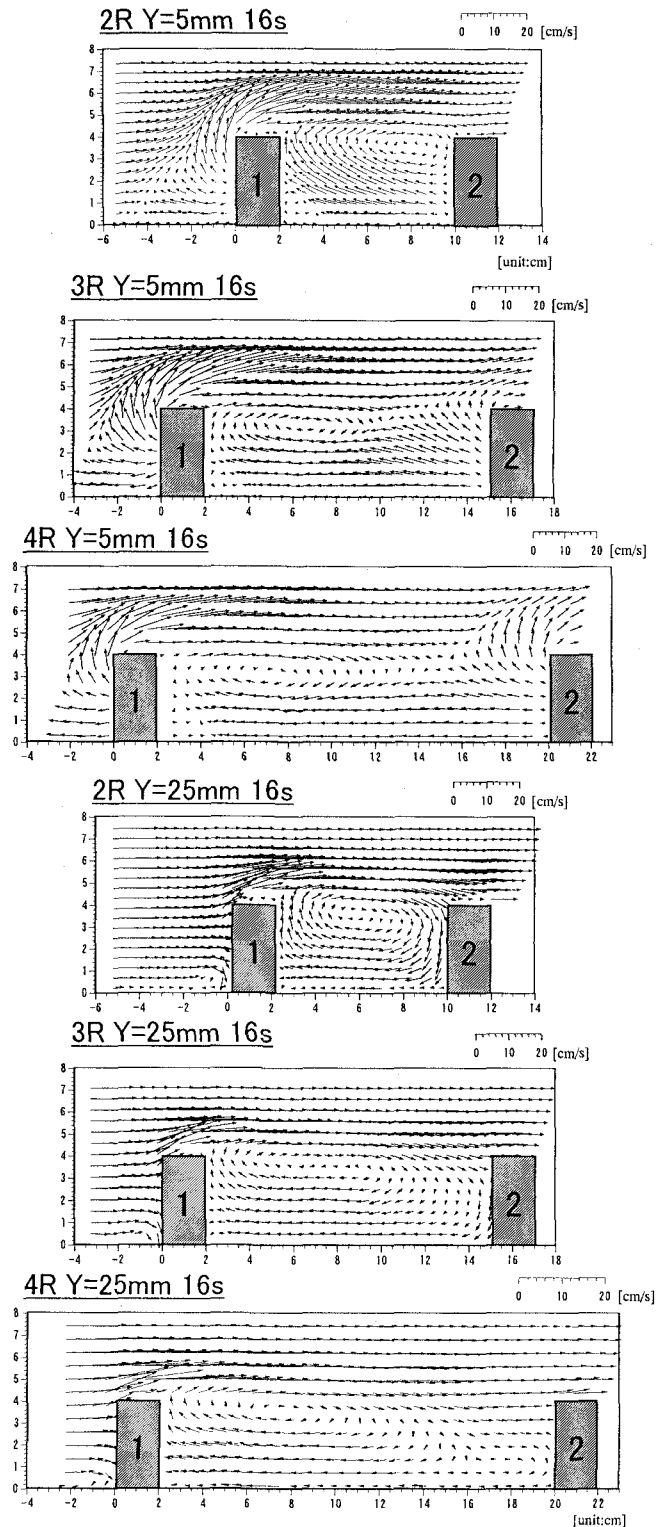


図-1 鉛直縦断面ベクトル (直角水制)

いずれの間隔においても第1水制上流面から強い上昇流が発生しており、ほぼ同じ構造を示している。水制間隔が広がるにつれて、可視化画像の撮影範囲が広がり画像解析の分解能が少し劣ってくるのであるが、水制間隔4倍のケースも十分な精度で流れを捉えているといえる。まず、水制間隔2倍では $y=5\text{mm}$ において下流に偏った中心を持つ横断渦が存在し、

水制領域で上流側へ上向きの流れが支配的である。水制間隔が広がるにつれて、この横断渦はその流下方向スケールにはほとんど変化が見られず、第1水制後方の上昇流が弱まる。しかし、水制域底面近傍は常に逆流が存在し、第2水制上流面では上向の逆流が顕著となる。また、第2水制頭部を越える上昇流が強くなり、間隔が広がるにつれて、単独水制の状況に近づいていることがわかる。水制長の中央である $y=25\text{mm}$ では、明確な横断渦が観測されるが、渦の中心位置は2Rでほぼ水制間中央にあるのに対し、水制間隔の増加に従い、第1水制下流面からの絶対距離で若干下流へ移動するものの大きな変化はない。3Rまでは第2水制上流面の下降流が存在するが、4Rでは横断渦の発達がほぼ水制高の3倍程度の位置で止まり、第2水制上流面では底面近傍に回り込む流れが存在するのみで上側では流下方向成分のみが現れる。 $y=5\text{mm}$ でみられたような第2水制頭部を乗り越える流れは小さい。

次に、水平断面 $z=5\text{mm}$ と 35mm における流速ベクトルを図-2に示す。ここでも水制間隔が大きい場合撮影範囲が大きく解像度が粗くなっているが、第1水制による水はねはほぼ同様に観測される。 $z=5\text{mm}$ についてみると、2Rでは第1水制頭部の後方2cm付近に中心を持つ鉛直渦が存在し、水制領域内で大きな逆流域が現れるのが特徴である。3Rになると渦の中心位置は余り変化せずに、下流側へ引き伸ばされた渦構造となる。したがって、第2水制上流面の広い領域で流入が見られる。4Rでもこの傾向は同じで、渦中心位置は変化しないが、下流側で渦の形が崩れ、第2水制上流面では流入が弱くなっている。したがって、鉛直渦についても水制長の3倍程度が発達限界のようである。水制頂部少し下の $z=35\text{mm}$ では、2Rにおいて第1水制後方の主流域への流出と第2水制へ向かう流れが顕著となり鉛直渦の中心は第2水制根元付近へ移動している。3Rでもこれと同様の傾向が見られるが、水制間中央付近が引き伸ばされた構造となっている。4Rではこれらとはかなり異なる流れ構造を示し、第1水制後方の流出がかなり弱くなり、鉛直渦構造がほとんど認められず、下流域では第2水制に向かう主流の入り込みが支配的となっている。

(2) 上向き水制

図-3は $y=5\text{mm}$ および $y=25\text{mm}$ における鉛直縦断面流速ベクトルである。上向き水制では、第1水制上流面の激しい上昇流と、水制域内の斜め上流向きの上昇流が特徴である。水制間隔が広がるにつれて、2Uで特徴的であった斜め上向き逆流は第2水制上流面の約水制高さの2倍程度の領域に限られることがわかる。第1水制後方では水制域内で水平な逆流となり、水制頂部付近に中心を持つ横断渦が現れるようにな

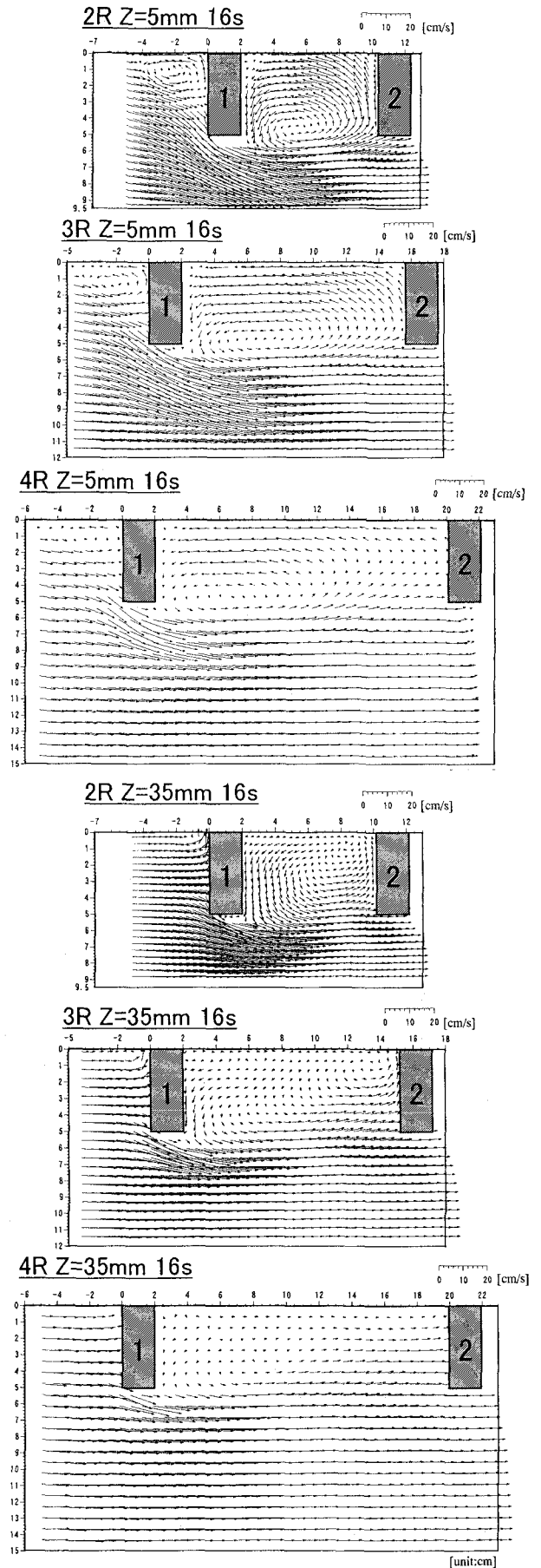


図-2 水平断面流速ベクトル (直角水制)

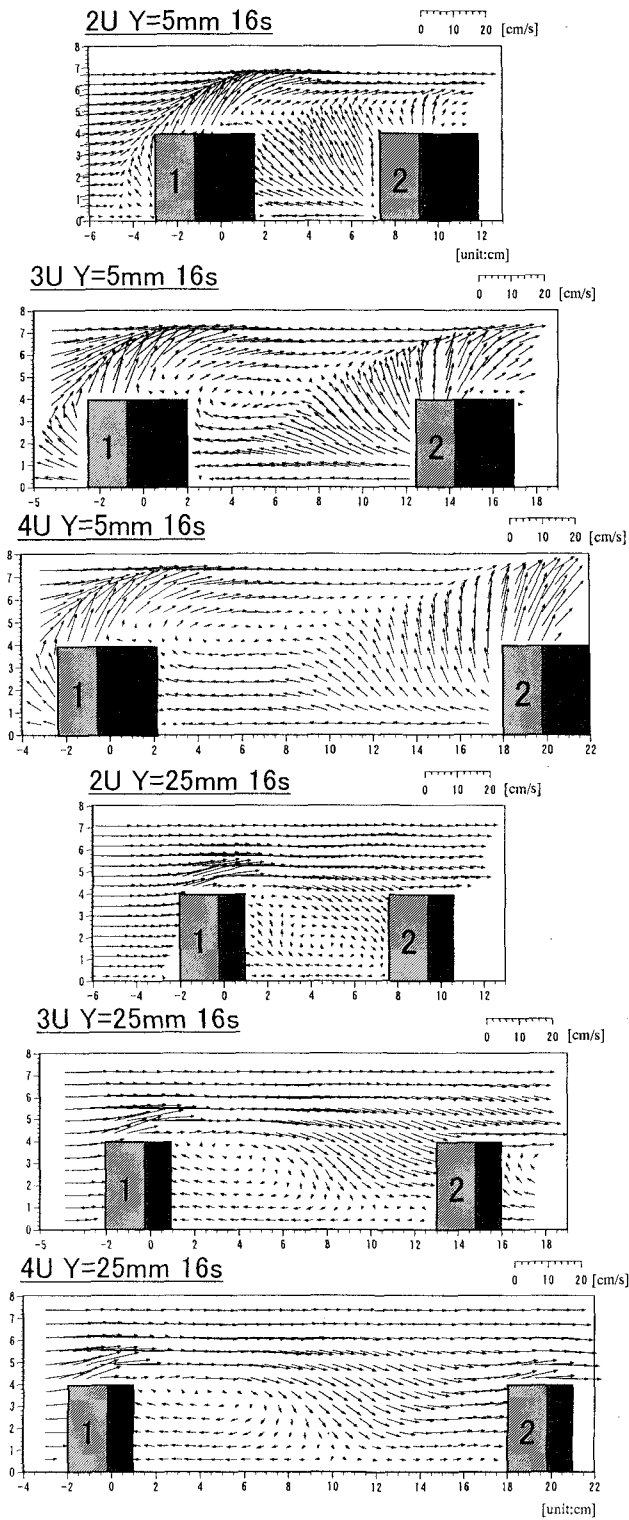


図-3 鉛直断面流速ベクトル（上向き水制）

る。第2水制上流面上昇流の角度は、水制間隔の増大とともに大きくなり、鉛直に近くなる。以上より第2水制の根元へ集中した流れが側壁付近で激しく上昇する傾向は水制間隔が広がっても存在することがわかる。y=25mmでは、直角水制と比べて第2水制上流面で斜め下方へ向かう流れが顕著となり、2Uでは横断渦の中心が底面近くへ移る。水制間隔が増大するにつれて、第1水制後方に水制高の2倍程度の

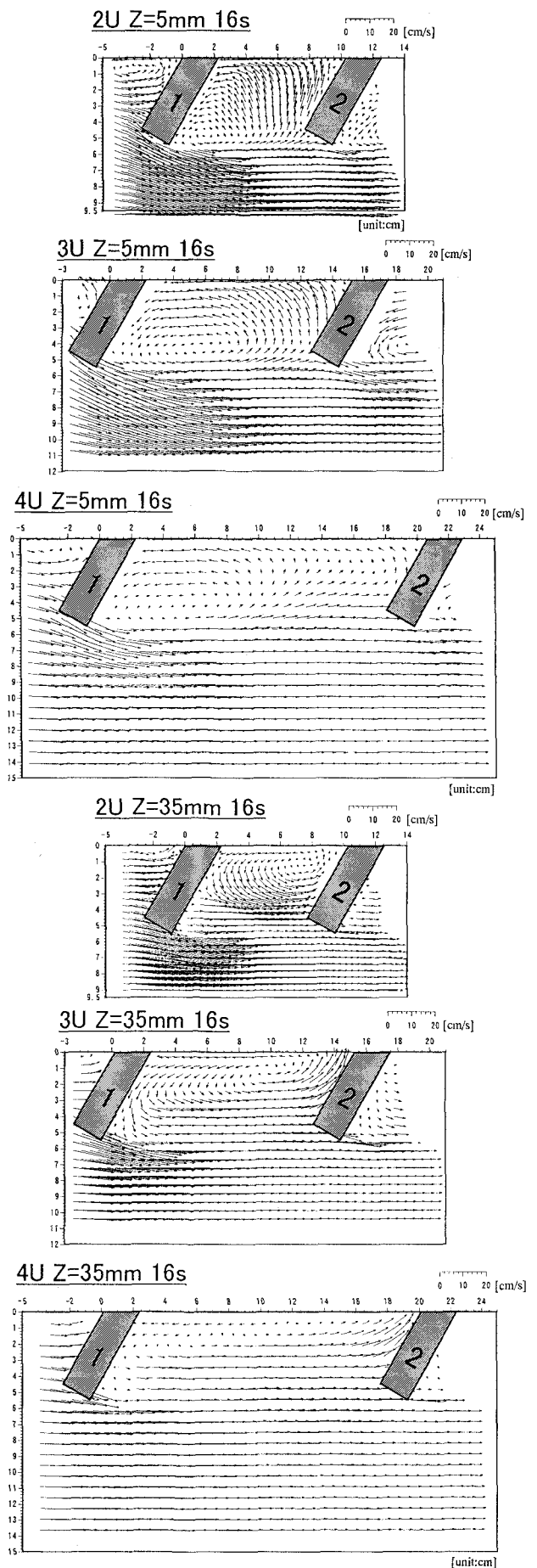


図-4 水平断面流速ベクトル（上向き水制）

縦方向長さを持つ横断渦が形成されるようになる。この渦を巻き込むように第2水制へ向かう水平方向流れが支配的となっていく様子がわかる。第2水制頂部を超える上昇流はほとんど見られない。

次に水平断面内の流速ベクトルを、 $z=5\text{mm}$ と 35mm について図-4に示す。 $z=5\text{mm}$ の底面近傍において、2Rでは側壁にほぼ垂直に流入する流れが支配的であり、第1水制頭部直下を中心とする小さな鉛直渦が観測される。水制間隔の増大とともに、第1水制後方の鉛直渦は流下方向に発達するが、第2水制上流面の流入はやはり大きい。3Uでは水制域内をほぼカバーする1つの鉛直渦が存在するが、4Uでは下流域が広く分散した流入領域となる。 $z=35\text{mm}$ では水制の先端領域にかなり主流が侵入してきており、鉛直渦が側壁側へ寄っている。第1水制後方根元側からの流出と第2水制の上流面に沿う流入が支配的である。3Uでは2Uの鉛直渦を引き伸ばした構造になっているが第1水制先端付近後方の流出が強くなっている。4Uになると第1水制後方の流出が小さくなりほとんど鉛直渦構造が崩れてしまうが、第2水制上流面に沿う流入は大きいままである。

(3) 下向き水制

図-5は $y=5\text{mm}$ と特に違いが見られた $y=45\text{mm}$ における鉛直縦断面流速ベクトル図である。 $y=5\text{mm}$ では下向き水制では他のケースと異なり、水制域内への下向き流入が支配的であり、横断渦の中心は底面付近に現れる。2Dでは特に第2水制上流面での下降流が強い。水制間隔が大きくなると、この流入下降流の範囲が下流域へ拡大し、第2水制上流面の下降流は小さくなる傾向にある。4Dでは水制間中央付近で下降流が強く横断渦が不明確になっている。 $y=45\text{mm}$ では、水制間隔が3倍までの水制域内では第2水制上流面の下降流の支配的領域と底面付近の逆流の支配的領域が混在し、上流側では横断渦を形成している。4Dになると上流側の横断渦領域は存在するが、下流側の下降流領域が変化し、第2水制より上流で一旦上昇流が現れる。水制間隔が広がったことで2つの領域の境界が明確になったものと思われる。

次に、水平断面について $z=5\text{mm}$ と特徴が認められた $z=30\text{mm}$ における流速ベクトルを図-6に示す。下向き水制の $z=5\text{mm}$ では2Dにおいて水制域内の鉛直渦が全く観察されず、主流域側へ流出する流れが支配的であり、非常に特徴的な流れ構造を有している。また、第1水制上流面に沿う形で水はねが発生し最も偏流角度が大きい。注意深くみると第1水制先端部下流に小さな鉛直渦が認められる。水制間隔の増大によってこの鉛直渦が大きくなっている。第2水制上流面から上流外向きの流れは次第に横断方向成分が減少し、第1水制後方の鉛直渦と一体化した流れとなる。この外向き流れは第2水制の上流側の根元から垂線

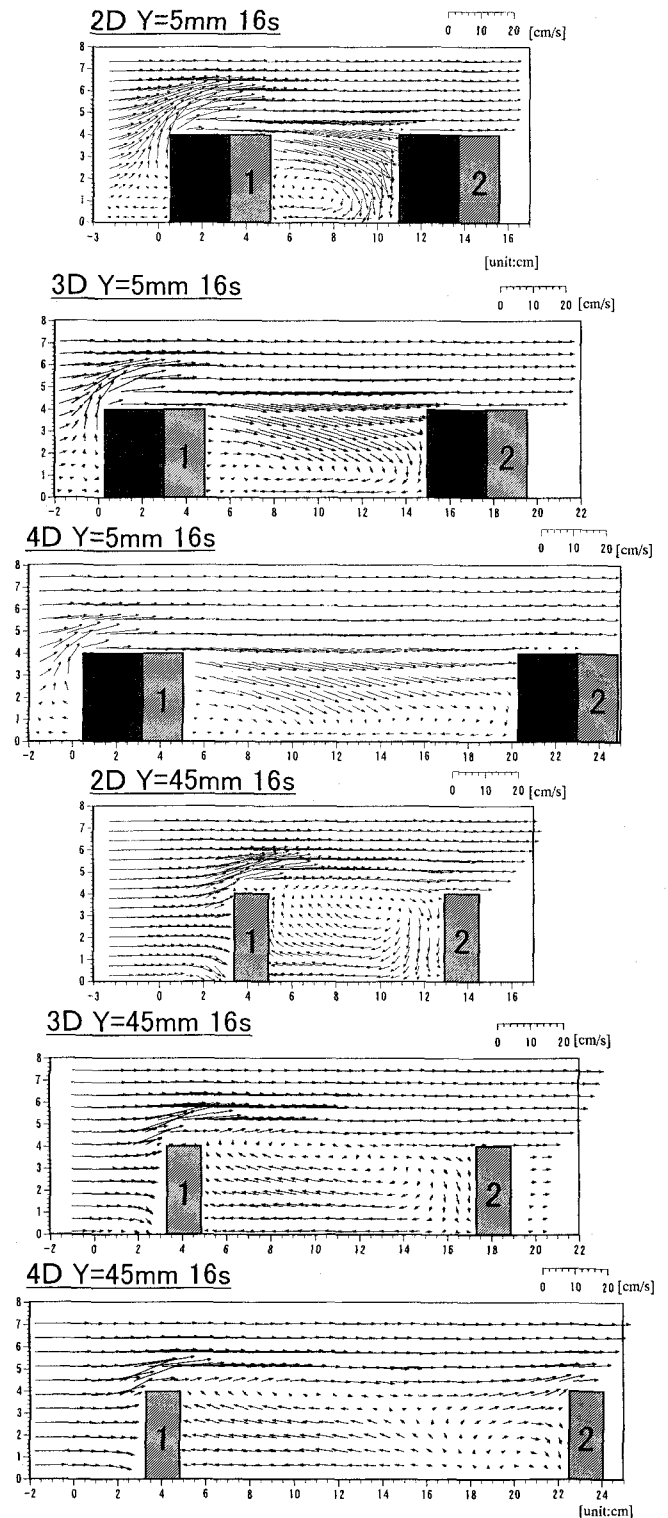


図-5 鉛直縦断面流速ベクトル図（下向き水制）

を伸ばした水制長さ付近のところで主流と衝突して上流側と下流側へ別れている様子がうかがえる。下流側への流れは第2水制による水はね効果を与えている。 $z=30\text{mm}$ の2Dでは水制域内の側壁に沿って平行に下流へ向かい第2水制上流面に沿って主流方向へ向かう流れと第2水制先端で内側へ向いた流れおよび第1水制先端後方の鉛直渦が存在し、複雑な構造を示している。3Dにおいても相似な構造を示してい

るが、水制域内への流入が中央で強くなっている。4Dでも水制域内の流れ構造はほぼ同様で3Dの流れを流下方向に引き伸ばした形になっている。

4. おわりに

直角、上向き、下向きの1対の水制群の設置間隔を変化させ、その影響を調べた。第1水制の水はねに起因する横断渦および鉛直渦は、流下方向にほぼそれぞれの長さスケールである水制高および水制長の3倍程度までは発達することが示された。水制間隔が大きいケースでは、水制域の下流側で不安定となり長時間平均した渦構造は拡散した形となるとともに、主流の入り込みが活発になる。結果を総合して水制頂部を結ぶ上面および水制先端を結ぶ側面を通しての流出・流入量を見積もると、直角水制ではいずれの間隔においても上面および側面とも下流側から流入、上流側から流出し、上面と側面の割合はほぼ同程度である。ただし、4倍の間隔では第2水制根元付近から上面への流出が現れた。上向き水制では上面を通して水制先端側からの流入と根元側から流出が卓越し、水制間隔の増大とともに上面からの流出域が下流側へ移動する。下向き水制では、上面を通して第2水制上流面から根元にかけての流入と側面の第2水制上流面底面付近からの流出が卓越し、水制間隔の増大によって上面の流入が側壁側へ移動する。結果として、それぞれの設置角度に特有の渦構造は水制間隔の変化によっても失われなかった。

今後は、乱れ構造について検討するとともに、PIVでしか得られない瞬間渦構造の変化過程について詳細な分析と物質輸送への影響を考察する必要がある。

参考文献

- 1) 河川環境管理財団大阪研究所編:わんどの機能と保全・創造～豊かな河川を目指して～, 1999.
- 2) 福岡捷二・岡信昌利・川口広司・西村達也, 越流型水制周辺の流れと河床変動, 水工学論文集, 42, pp.997-1002, 1998.
- 3) 福岡捷二・渡邊明英・川口広司・安竹悠:透過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, 44, pp.1047-1052, 2000.
- 4) 大本照憲・平川隆一・井出賢正:越流型水制群に対する二次流と流砂の応答, 水工学論文集, 42, pp.1003-1008, 1998.
- 5) 陳飛勇・池田駿介:水制周りの水平剥離渦の構造に関する実験的研究, 水工学論文集, 40, pp. 787-792, 1996.
- 6) 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.
- 7) 富永晃宏・井嶋康二・中野義郎:斜め越流型水制周辺の流れ構造のPIV解析, 水工学論文集, 45, pp.379-384, 2001.
- 8) 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.

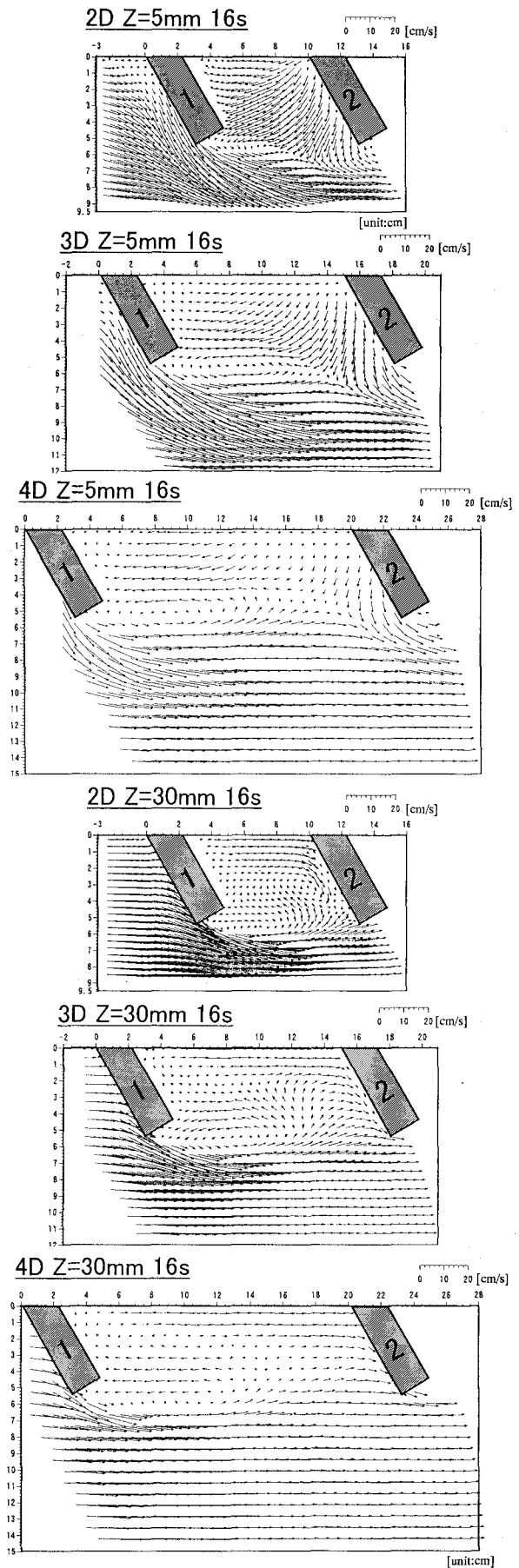


図-6 水平断面流速ベクトル図 (下向き水制)

(2001. 10. 1受付)