

越流型水制域内の流れ構造の可視化解析

VISUALIZATION ANALYSIS OF FLOW STRUCTURES IN SUBMERGED SPUR DIKES

富永 晃宏¹・中野 義郎²・藤田 享良³

Akihiro TOMINAGA, Yoshiro NAKANO and Takayoshi FUJITA

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 工学部社会開発工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

³正会員 工修 矢作建設工業株式会社 (〒461 名古屋市東区葵 3-19-7)

It is important to clarify three-dimensional flow structures and instantaneous vortex structures in order to understand the mechanism of sediment transport and water quality exchange in spur-dike regions. In this study, characteristics of organized vortex structures around the submerged spur dikes were investigated by using PIV method. The velocity vectors were obtained in several slices of vertical and horizontal plane. The instantaneous flow structure in the region between spur dikes is quite different from the long-time averaged flow structures. The vertical vortices and transverse vortices interact with each other and the flow indicates strongly three-dimensional phase. Two-dimensional PIV analyses of vertical and horizontal planes can catch the fragment of instantaneous vortex structures.

Key Words : PIV, spur dike, local flow, vortex structure, organized vortex

1. 序論

河岸域を洪水の侵食から守り、また多様な流れ場を創造して豊かな自然環境を提供するという水制の役割が大きくなってきている。河岸に見られるわんどは生態系にとって重要な場所であり、生息・繁殖場所や洪水時の避難場所となり、最近では人工的にわんどを造成する例も多い¹⁾。ここでは水制をこうした河岸域のわんどの形成や流れ場制御の目的に用いるものと考え、一対の水制で挟まれた水域を水制域と呼び、水制域内の土砂の輸送や水質交換機構を解明するための基礎となる流れ構造を把握することを目的としたものである。このような目的に対しては洪水時には水中に没する越流型水制群が有効と考えられる。越流型水制群のマクロな粗度効果や水はね効果および河床変動についてはいくつかの研究が見られるが^{2), 3)}、水制域内のミクロな流れ構造については不明な点が多い。特に越流型水制では、水制域内の流体の主流域の流れとの交換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次元的流れ構造を示すと考えられる^{4), 5)}。また、水制背後の流れは、周期的に変動する

大規模剥離渦の運動が支配的であることが知られている⁶⁾。このような水制周辺の流れの詳細な3次元構造および瞬間的な渦構造を知ることが、水制域内の物質輸送機構を知る上で重要である。そのためには、瞬間の流れ場を捉えることのできる可視化法が適していると考えられる。また、最近目覚ましい進歩が見られるPIV法⁷⁾を用いることにより、定量的な評価も可能となる⁸⁾。さらに、PIV計測は電磁流速計では計測困難な底面・側壁・水面・構造物近傍計測が可能になる点が優れていると思われる。

そこで、本研究はレーザーシート光と中立浮遊トレーサー粒子を用いて断面内を可視化し、高速ビデオカメラのビデオ画像を解析して断面内流速ベクトルを計測することにより、水制域内の流れ構造を解析したものである。長時間平均の3次元流れ構造はこの方法で明らかにすることができるが、3次元の瞬間的な渦構造は、水平断面および鉛直縦断面での解析からは捉えることはできない。しかし、いくつかのスライスした平面の流速ベクトルの特徴を分析することにより、3次元の特徴を推定することは可能であるとの考えに立ち、水制域内の組織的渦構造について検討した。

2. 実験方法

実験水路は水路幅 $B=0.3\text{m}$ 、長さ $L=8\text{m}$ の長方形勾配可変型水路を用い、路床勾配 $i=1/2000$ とした。水制設置場所は水路の中間部、上流端から $4.5\sim 4.8\text{m}$ の範囲を水制区間とし、左岸側壁に沿って図-1に示すような2個の連続水制モデルを設置した。水制モデルの単体は、高さ h 、長さ l が共に 5.0cm 、幅 b が 2.0cm の真鍮製の角棒で、流れ方向には間隔 $s=20\text{cm}$ に、側壁に対しては直角に配置した。流量 $Q=3.8\text{l/s}$ の定常流量を通水し計測域内の水深 $H=7.5\text{cm}$ の越流型水制となるように、水路下流端で堰上げを行った。

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用い、厚さ約 3mm のシート状にした 500mW アルゴンレーザー光を開水路鉛直縦断面と水平断面に照射した。鉛直断面として7断面（水制側側壁から $10, 25, 40, 55, 70, 100, 150\text{mm}$ ）、水平断面として6断面（河床から $5, 15, 30, 45, 55, 70\text{mm}$ ）を設定した。なお、以後鉛直縦断面照射の計測断面を水制側側壁から順に $Y10, Y25, \dots, Y150$ 、水平断面照射の計測断面を河床から順に $Z5, Z15, \dots, Z70$ と付けることにする。

この可視化画像を高速ビデオカメラを用いて 120F/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。水制区間 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% とした。パソコンの画像メモリボードに記録される画像は最大 99 枚であるため、連続画像が得られるように調整を行いながら記録し、計 961 枚の連続画像から得られる 8 秒間の流速ベクト

ルを解析対象とした。

3. 長時間平均構造の解析結果および考察

本研究では、まず PIV 計測の精度の確認を行うために開水路乱流における流速分布の計測を行った。その結果、PIV 計測は高周波数の垂直変動には追従できないが、平均流速と主流方向変動については十分な精度を有しており、比較的大規模な渦構造の解析には適用できることが確認された。長時間平均 (8 秒間平均の画像データ) の流速ベクトルおよびレイノルズ応力分布の一例を図-2、図-3に示す。縦断面 $y=25\text{mm}$ では水制間中央付近から第2水制前面にかけて横断渦が確認でき、水制域内の $y < 3\text{cm}$ において逆流が存在し、第2水制前面で下降流が認められる。しかし、この平面内で閉じた渦構造とは言えず、奥行き方向の流れの存在が示唆される。水制先端より主流域に少し入った $y=55\text{mm}$ では水制間中央付近から下流方向にかけて下降流が現れている。これより上流の水制高さ以下ではほとんど流れが見られない。この領域は図-3の平面図と対応させると水制域から主流域へ向かう流れの断面を捉えていることがわかる。レイノルズ応力 $-\overline{uw}$ の分布をみると、水制頂部

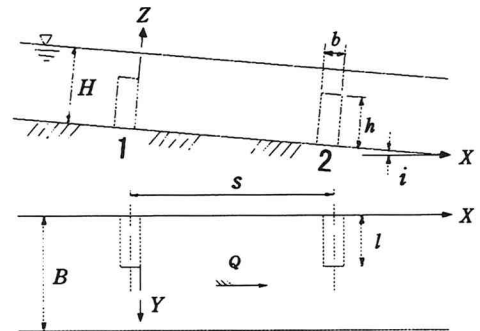


図-1 水制模型配置図

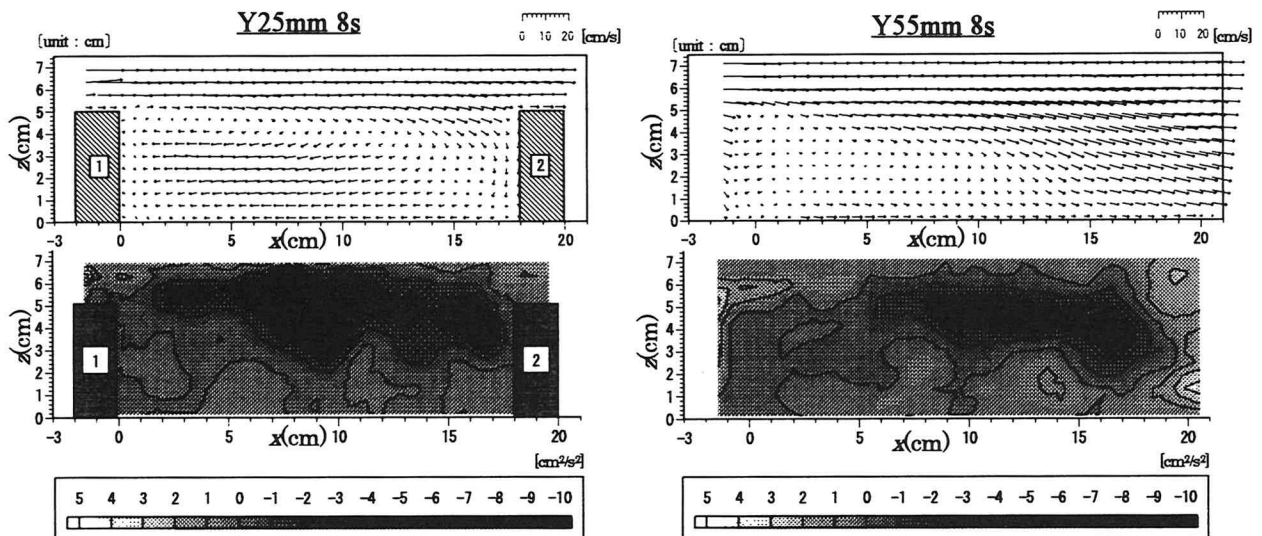


図-2 縦断面長時間平均流速ベクトルとレイノルズ応力 $-\overline{uw}$ の分布

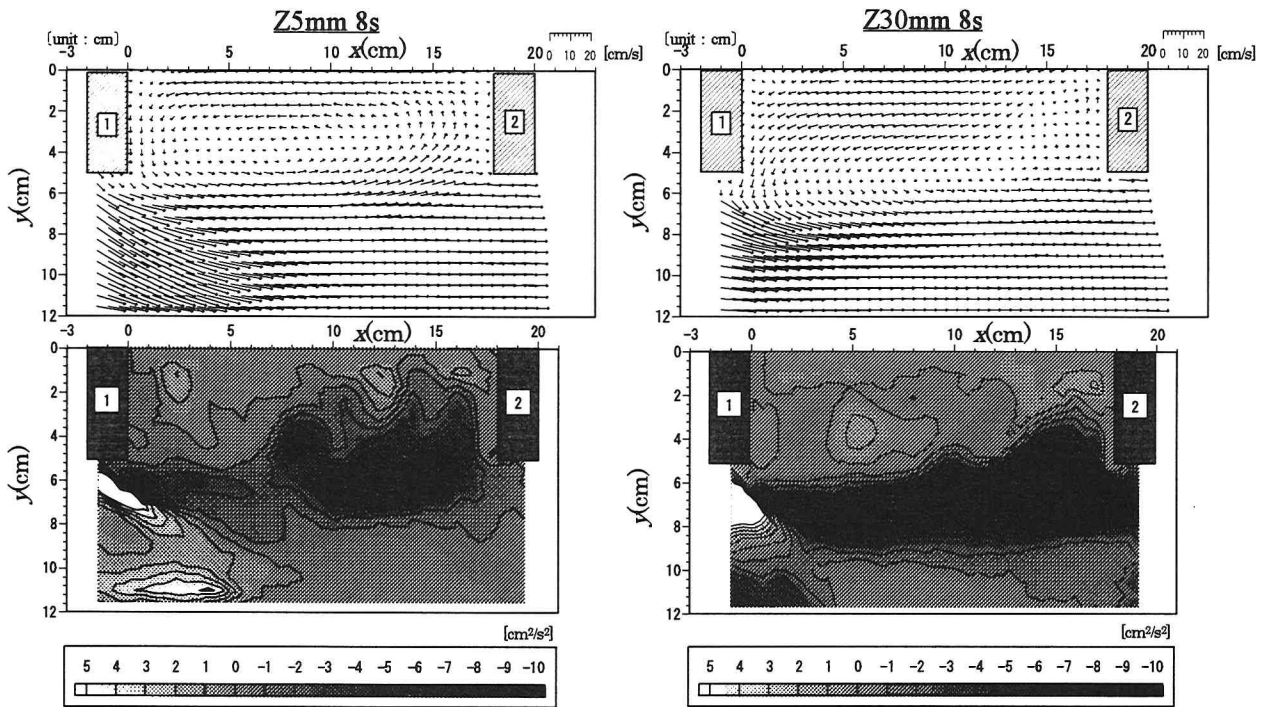


図-3 水平面長時間平均流速ベクトルとレイノルズ応力 $-\overline{uv}$ の分布

を結ぶ線に沿って大きく、水制間中央から下流側水制前面にかけて大きな値を示す。y=55mm ではピーク位置がy=25mm より少し底面側で下流側に移る。水平断面z=5mm では第1水制による強い水はねが確認でき、第2水制前面に周り込む水制域全体に及ぶ大規模な平面渦が現れている。このように底面近くは比較的平面内で閉じた渦構造であることがわかる。z=30mm では、第1水制による水はねはz=5mm より弱くなり、横断方向流速 v はかなり小さくなっている。また、第2水制前面に周り込む流れは見られなくなり、水制前面ではほとんど流速がない。この場合も平面内で閉じた渦構造を示さず3次元的な流れであることを示唆しており、この領域は縦断面で見られる下降流の断面を捉えたものと考えられる。レイノルズ応力 $-\overline{uv}$ の分布を見ると、縦断面の場合と同様に水制先端を結ぶ線上の値が大きく、特に水制間中央より下流側にピークを持ち、かなり広い範囲に大きな乱れの領域が広がる。z=30mm における第2水制先端部から上流では非常に大きな値が現れている。この付近では $\partial U/\partial y$ は大きな値を示すが、後に述べるように剥離渦の変動による周期的かつ大規模な乱れの寄与が大きいものと推測される。8秒間の平均は十分長いわけではないが、ある程度平均的な流れ構造を捉えることができたと考えられる。しかし、このような全時間平均の流れ構造だけでは、水制域内の混合輸送機構を解明したことにはならない。瞬間の流れ構造はこの長時間平均された結果とは全く異なる渦構造を呈しており、単なる乱れ統計量の情報だけでなく、大規模な組織渦構造の特徴を把握することが重要であると考えられる。

4. 短時間平均からみた大規模渦構造の特性

大規模で継続時間の長い渦構造を抽出するために0.5秒間(60枚の画像)の短時間平均流速ベクトルの時系列変化を検討した。瞬間の2枚の画像から得られた流速ベクトルはある程度の誤差を含んでいるため、平滑化を行う意味で0.5秒平均を行ったものである。各計測断面のうち、2断面(y=25mmの縦断面、z=30mmの水平断面)の短時間平均流速ベクトルの一例を図-4、図-5に示す。各断面の流速ベクトルは同時刻のものではないため、流れの3次元的な瞬間像を一度に捉えることはできないが、基本的なパターンを抽出して各断面間で比較し全体像を推測することが考えられる。

y=25mmの縦断面では、(a)に示すようにz<40mmの領域で逆流が見られるが、これは鉛直面のせん断による横断軸を持つ渦を示すとともに、鉛直軸を持つ平面渦のスライスも捉えている。第1水制頂部後方からは比較的安定した横断渦が発生し、これが発達・移動する様子が見えてくる。(b)のように第2水制前方において強い下降流が頻繁に現れ、水制域全体におよぶ横断渦構造を示す。(c)では(b)において第1水制後方で発生した渦が水制域中央付近に移動し発達し始める。(d)において、この横断渦は第2水制前面の下降流と相互作用して強い渦になり、水制間中央付近で強い上昇流が発生している。この上昇流の通過後(e),(f)に示すように水制間中央付近に下降流が発生しているのがわかる。

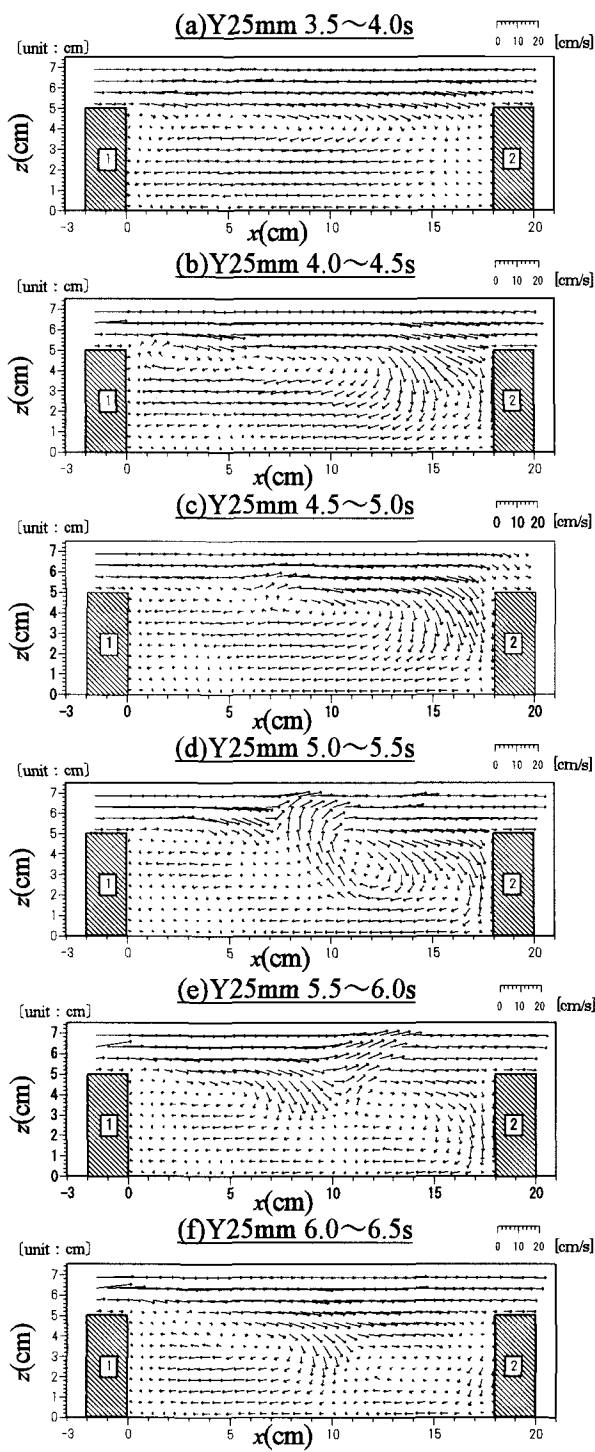


図-4 縦断面短時間平均流速ベクトル ($y=25\text{mm}$)

$z=30\text{mm}$ の水平断面では、第1水制によって流れが主流域側へ大きく曲げられ、水制後方において水制域外へ流出する流れを伴う大きな平面渦を形成する。(g)で水制間中央付近に渦が形成され始め、これが(h)において第2水制前面に向かって入り込む流れとなる。(i)では根元付近まで達する強い横断方向流れとなり、第1水制後方の流出が大きくなる。この後、(j)では水制間中央部から水制区域外に湧き出していく流れが現れ、(k)になると第2水制前面の根元へ向かう流れがなくなり、先端付近で外へ向かって流れるようになる。この水制間中央の外向きの流れは(d)の上昇

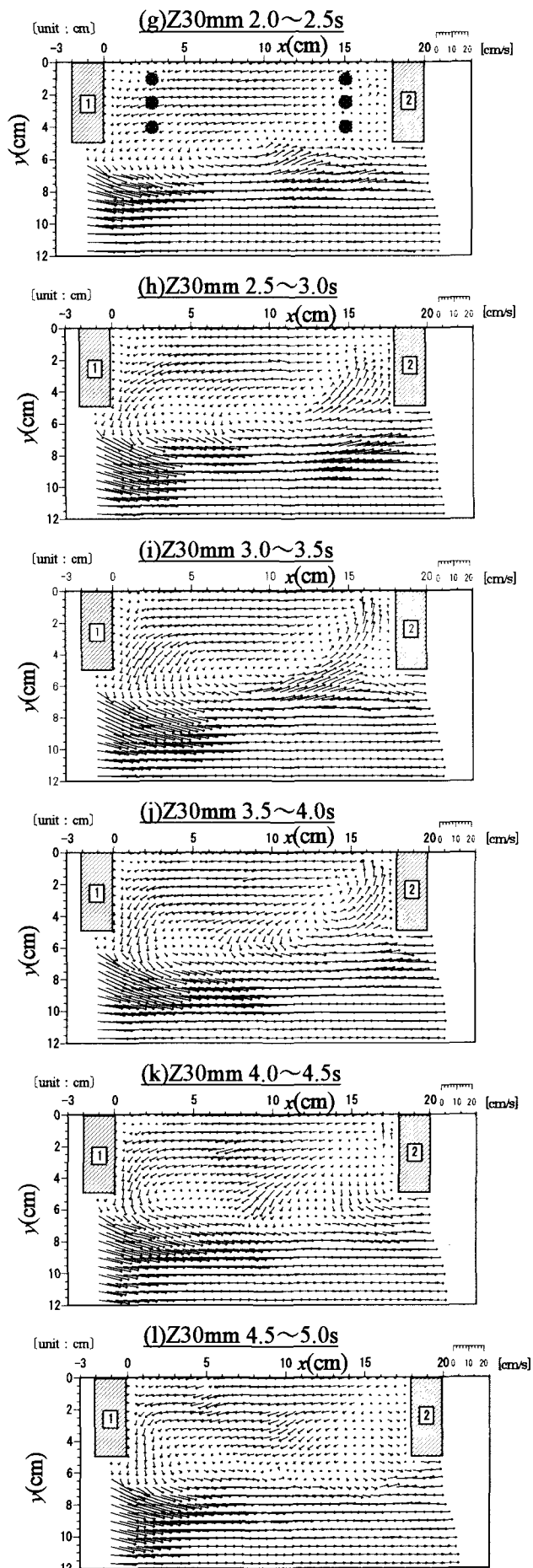


図-5 水平面短時間平均流速ベクトル ($z=30\text{mm}$)

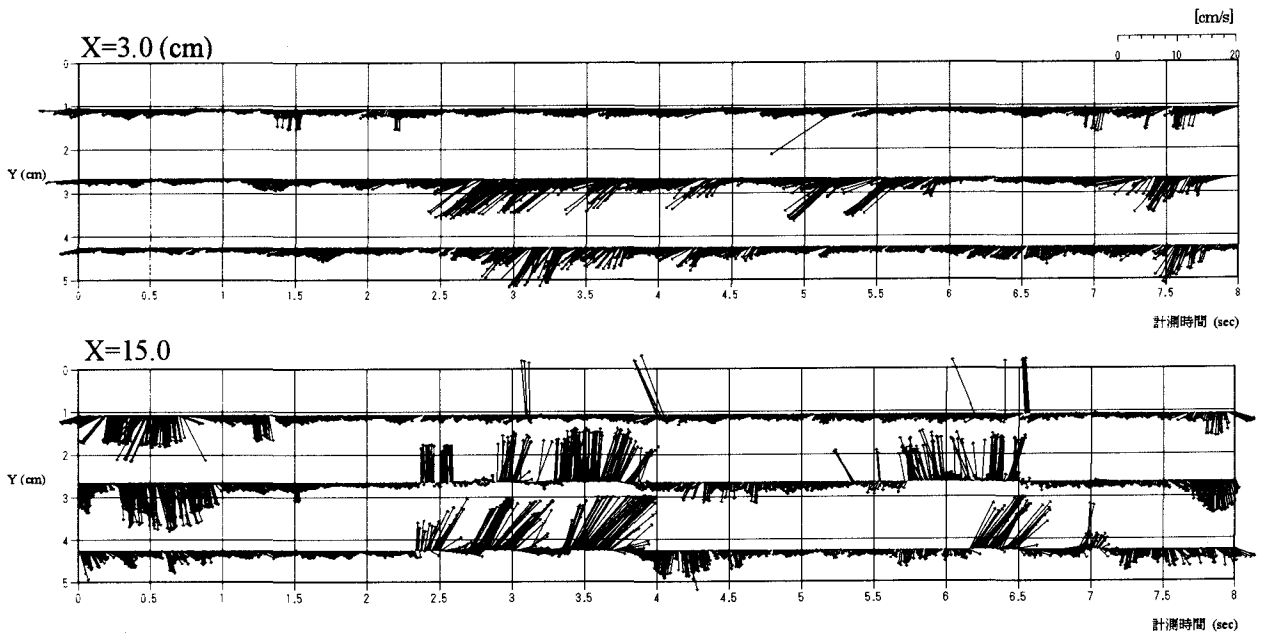


図-6 固定点における流速ベクトルの時系列変化

流と対応しているように推察される。なお、(l)では再び(g)に似た流れ構造となっていることより、ここに示した流れパターンもある程度周期的に繰り返していることが確認される。また、図-5の(g)に点で示した計6個の座標点を選択し、それぞれ一点について1/120秒刻みで8秒間の (u,v) 流速ベクトルの時系列変化を示したのが図-6である。図の上方向が水制根元方向、下向きが主流域方向を示し、時間軸方向に流下方向をとっている。第1水制下流側の $x=3\text{cm}$ における3点はすべて主流域方向の流れとなっており、周期的に大きな主流域方向の逆流が発生していることがわかる。第2水制前面近傍の $x=15\text{cm}$ における3点では、水制根元方向の流れと主流域方向の流れが、1.5~2秒程度の継続時間を持ってほぼ周期的に繰り返している。かなり大きな横断方向流速がしばらく続いた後急に方向を変えるという現象が認められる。8秒間の計測では平均的な周期を求めるには不十分であるが、約4秒程度の周期で内向き流れと外向き流れが交代していると考えられる。これは、図-5の一連の流速ベクトルからの考察と対応しており、流れの周期性についても確認された。

このような流体の挙動は、断面によっても異なりそれぞれ特徴的な挙動を示す。 $y=25\text{mm}$ 、 $z=30\text{mm}$ 以外の断面における短時間平均流速ベクトルの一例を図-7、図-8に示す。 $y=10\text{mm}$ では、ほぼ全ての時間間隔において(m)のような水制間中央付近に安定した横断渦を示し、鉛直軸を持つ平面渦の端部も捉えている。 $y=40\text{mm}$ の水制先端付近についてみると、(n)では水制域内から第2水制を越流するような流れが、(o)では第1水制後方に大規模な横断渦構造と、第2水制前方に潜り込むような流れが捉えられている。水制先端より主流域側の $y=55\text{mm}$ では渦構造が複雑になり、水制間中央付近で(p)のような急激な下降流が見られ、

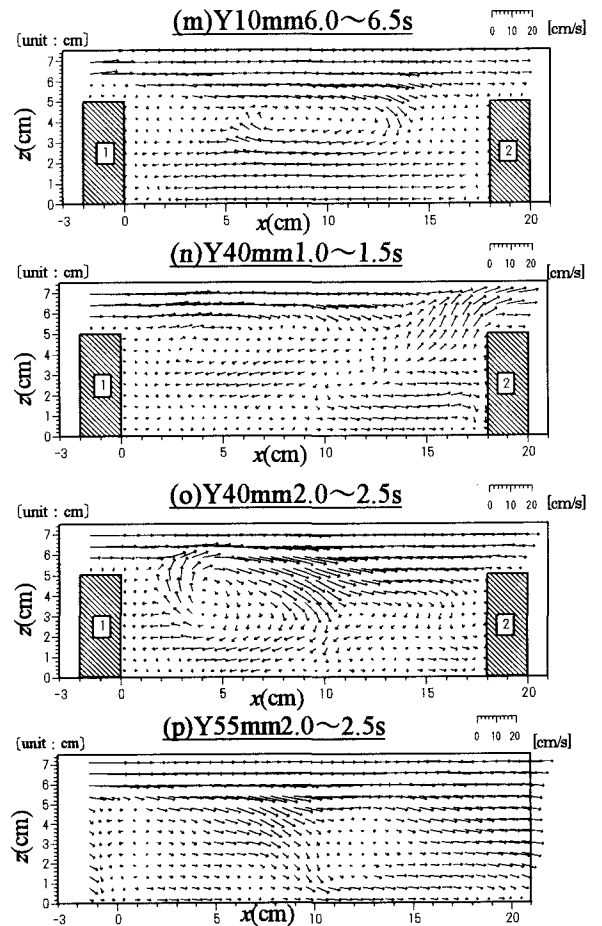


図-7 縦断面短時間平均ベクトル (その他断面)

この下降流で分割された前後では吸い込み・湧き出しが見られる。これは $z=30\text{mm}$ の(i)のような水制域内から出て行く流れと、水制域内に入ってくる流れに対応していると考えられる。次に平面構造についてみると、底面近傍の $z=5\text{mm}$ では、全体的に(q)のように水制域内に安定した平面渦が

見られ、また第1水制による水はねの影響が非常に大きく、第2水制前面での水制根側への流れ込みが大きい。 $z=15\text{mm}$ では、(r)のように水制間中央付近に主流速逆方向に流出が見られ、第2水制前面の流入があまり見られなくなる。水制高さより5mm下の $z=45\text{mm}$ では(s)のように側壁から主流域方向に急激に向きを変えるような流れが頻繁に見られる。これは $y=40\text{mm}$ の(o)に見られるような横断渦構造と対応しているのではないかと考えられる。水制高さより5mm上の $z=55\text{mm}$ では、 $z=45\text{mm}$ で見られた水制域から主流域への流向変化が顕著に認められる。したがって、水制を越流する流れは水制域上部で主流域方向へ曲げられることになる。

5. 結論

PIV法によって越流型水制間に生じる平均的および瞬間的組織渦構造をある程度定量的に捉えることができた。長時間平均の流れ構造は必ずしも水制域内の流れの特徴を代表するものではないことがわかった。瞬間の平面流速ベクトルの追跡から、水制域内に発生する渦構造は図-9に示すように立体的な8の字構造のような流れが支配的であると考えられる。この図は水粒子がこのような軌跡をとるという意味ではなく、越流型水制による鉛直方向軸を持つ剥離渦と横断方向軸を持つ剥離渦の相互作用としてこのような流れ構造が優先的に現れるという解釈である。もちろんこの8の字構造は周期的にその位置を変えているため、スライスした平面では流れ構造に時間的に大きな変化が現れる。周期性については8秒間の計測時間は十分ではなく、さらに長時間の連続データが必要となろう。本研究で3次元性の強い流れ場を断面でスライスした2次元的な考察で検討する可能性を示すことができたが、3次元構造については点計測との同時計測などによってさらに明らかにしていく必要がある。また、物質輸送に関する定量的評価に結びつけることが重要である。

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～豊かな河川環境を目指して～，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，第42巻，pp.997-1002，1998。
- 3) 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，第42巻，pp.1003-1008，1998。
- 4) 長坂剛・今野威一郎・加藤敦・富永晃宏：越流型水制群周辺の流れに及ぼす越流水深の影響，土木学会第34回年次学術講演会講演概要集，第2部，pp.202-203，1999。
- 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，第40巻，pp.787-792，1996。

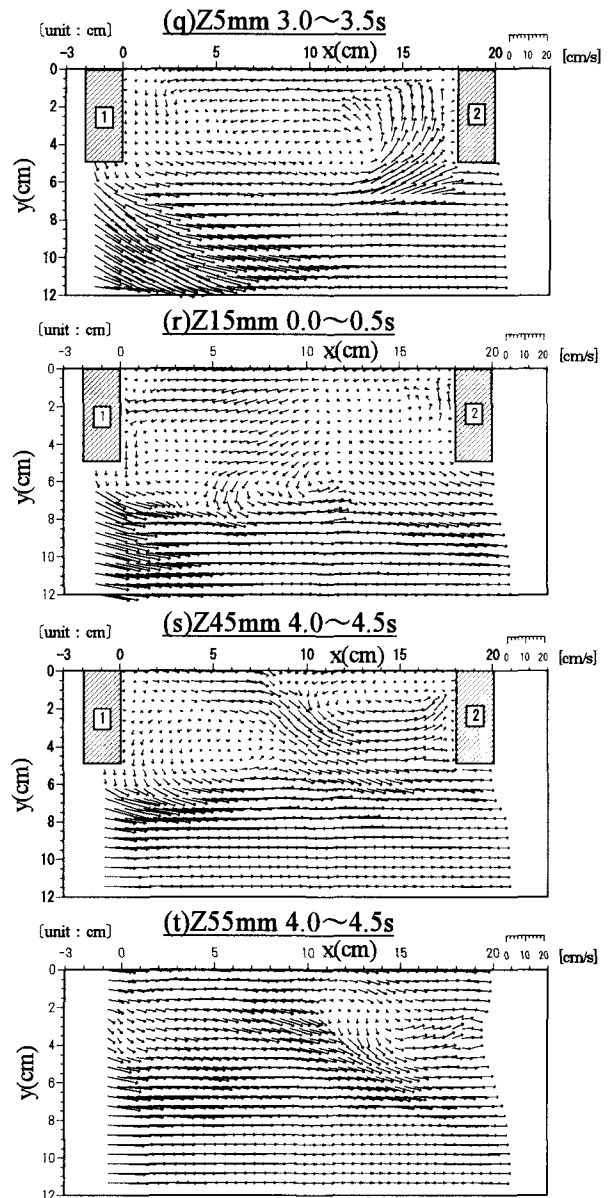


図-8 水平面短時間平均ベクトル (その他断面)

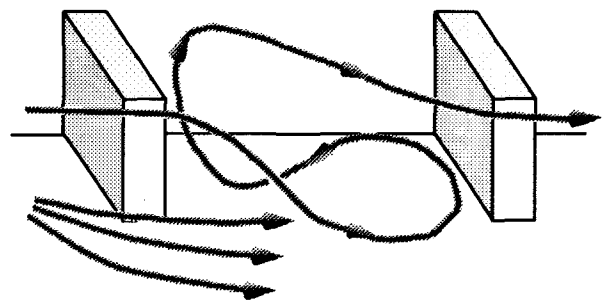


図-9 水制域内の代表的流れパターン概略図

- 6) 藤田享良・長坂剛・富永晃宏・中野義郎：平成10年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集，pp.193-194，1999。
- 7) 可視化情報学会編：P I Vの要点，可視化情報学会，pp.1-25，1998。
- 8) 藤田一郎：トレーサを利用した実河川水制周辺流れの画像解析，水工学論文集，第42巻，pp.505-510，1998。

(1999. 9. 30 受付)