

A D C P を用いた水制域における流速分布計測

VELOCITY MEASUREMENTS IN A RIVER WITH A SERIES OF GROYNES BY A SHIP-MOUNTED ADCP

武藤 裕 則¹・北 村 耕 一²・馬 場 康 之³・中 川 一⁴

MUTO Yasunori, KITAMURA Koichi, BABA Yasuyuki and NAKAGAWA Hajime

¹正会員 Ph.D 京都大学助手 防災研究所災害観測実験センター (〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖)

²学生会員 京都大学大学院修士課程 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³正会員 博(工) 京都大学助手 防災研究所災害観測実験センター

⁴正会員 工博 京都大学教授 防災研究所災害観測実験センター

Velocity measurements were carried out in a river of straight reach with a series of groynes on one side of the main channel. An Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) mounted on a small boat was used. The measurements were performed under three depth conditions including two submerged cases. Flow patterns induced in groyne fields, exchange processes between the main channel and the groyne field, and local flow peculiar around groynes, are of interests.

2-D large circulation flow is dominant in the non-submerged condition, whereas a vertical vortex is formed just behind a groyne in the shallow submerged case, then these circulating patterns in a groyne field are totally washed away in the deep submerged case. The maximum velocity filament in the main channel appears at different positions as the water depth changes owing to the groynes' effect. A slow water body leaving a groyne and showing a boil-like motion is clearly detected.

Key Words : velocity measurements, ADCP, groyne, circulation, exchange process, boil

1. はじめに

近年, 河川環境の保全・回復や河川景観の改善を目指して, 水制工が活用される例が多数見られる。そこでは, 水制工が引き起こす流れの擾乱とそれに伴う土砂輸送の不均一によって, 多様な流水環境が生み出されることが期待されている。水制工には流速低減や水はねの効果が、それによって流速の遅い領域が形成されたり, 水制域へ土砂が捕捉される¹⁾。しかしながら, 水制を設置することによって現実にどのような流れ場となるかは, 水制の構造・形式や設置する場所の流れや土砂の条件の組み合わせによって多岐に渡るため, これまでのところあまり明確にはなっておらず, 実際には設置後の状況に応じて手直しを必要とすることも多い。

上述の水制の機能に関連する水制工周辺部の流れや河床変動についての基本的特性に関しては, これまで主として実験的に検討がなされてきた^{2), 3), 4)}。そ

こでは, 主に不透水制が対象とされ, 非越流時・越流時の流速分布特性や河床変動特性, 主流域と水制域間の交換特性等についてある程度明らかになっている。一方, 水制群を有する実際の河川における検討は, 二, 三の例^{5), 6)}を除いて極めて少ない。著者らは, 既報⁷⁾において, 宇治川で平水時(非越流)と洪水時(越流)の両方の流れに対してLSPIV法を適用し, 得られた表面での流速分布から, 水制による流速低減効果や, 水制域に発生するボイルについて検討した。しかしながら, LSPIV法はあくまでも水表面での流況を示したものであり, 例えば越流時のボイルに代表されるような内部の複雑な流況についてはこれまでのところほとんどわかっていない。

本研究では, 既報⁷⁾で対象とした同一の観測区間において, ADCPによる流況観測を異なる3種の水制条件の下で行い, 水制周辺部の流れの構造について検討した。

2. 観測地点および観測方法の概要

(1) 観測地点および観測時の水理条件

観測地点は、宇治川（淀川）の河口より42.6kmから42.8kmにかけての約200mである。この区間は、図-1および写真-1に示すように緩やかな彎曲部に続く幅約60mの直線部であり、低水路右岸側に天端長さ10mの水制が40mの間隔で4基の石張水制が河岸より直角に設置されている。座標の定義と水制の位置関係を図-2に示す。



図-1 宇治川下三栖水制群位置図

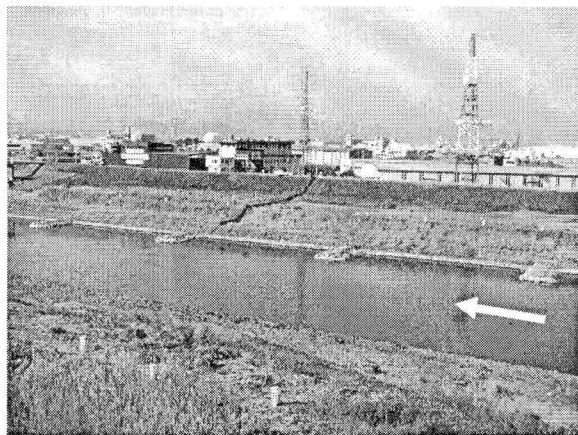


写真-1 宇治川下三栖水制群

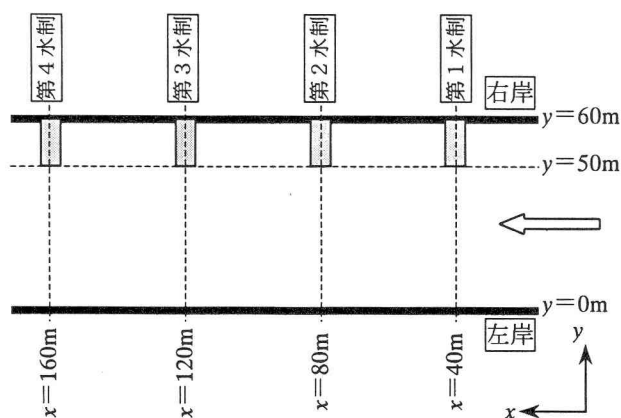


図-2 座標の定義

図-3は、2004年4月から8月にかけての観測区間における水位変化を、直近の水位観測地点である向島での記録から換算して示したものである。水制の天端高はOP+7.81mである。5月10日から24日にかけての他、たびたび越流状態となっているが、これは瀬田川洗堰からの放流操作に関連しての水位上昇である。非越流時の観測は4月7日に行っており、この時の水位はOP+6.41mである。一方、瀬田川洗堰放流に伴う越流時の観測は5月22日および8月26日に行い、前者における水位はOP+11.28m、後者における水位はOP+8.43m、したがってかぶり水深はそれぞれ3.47m、0.62mとなっている。

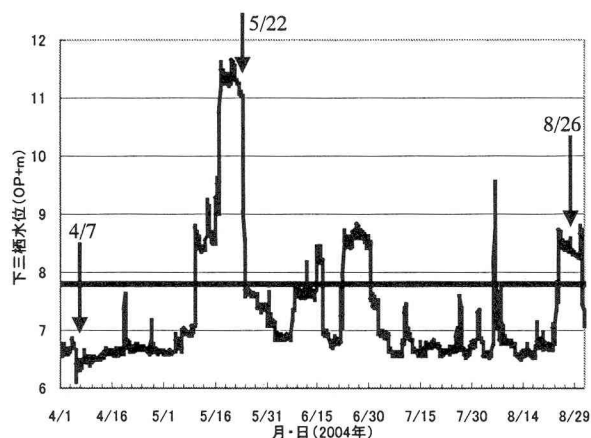


図-3 2004年4～8月の下三栖地点における水位変化

図-4は、非越流時に計測した河床形状を示したものである。なお、ここで示した河床位は、計測時にADCPからの信号が連続して2層以上にわたって戻ってこなくなる位置を河床と見なし、水面からの距離によってOPに換算したものである。図より、水制域の河床は河岸寄りの部分はほぼOP+5m以上であることがわかる。一方、主流部の河床は大半がOP+3m程度であるが、上流部には上流側彎曲部の影響によるOP+1mに近い最深部が存在する。

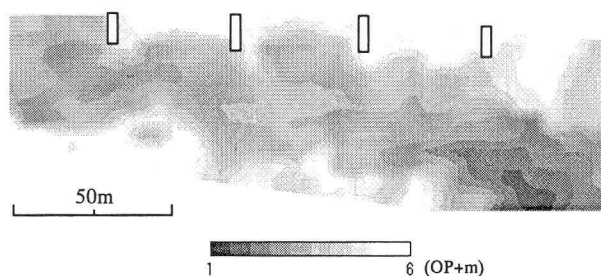


図-4 河床形状の計測結果（4月7日）

(2) ADCPによる観測方法

今回の観測で用いたのは、米国R&D社製のワークホースADCP1200センチネルである。本観測では、

層厚は25cmとし、層数は観測対象区間の最大水深をカバーできるよう適宜設定した。ピングング発信周波数は25Hzとし、20個のデータをアンサンブル平均することで1計測データとした。また、ブランク距離は5cmに設定した。さらに、ボトムトラッキング（対地速度計測）とDGPSを併用することで観測位置を把握した。

観測方法としては、5馬力の船外機を有する小型アルミボート（長さ3.3m、幅1.3m、定員3人）を用い、ボートの片側舷側にアルミ製の板やパイプを用いた手製の架台によってADCPを取り付けた。観測対象区間としては、4基の水制群を含む流下方向に約200m、横断方向に低水路幅である約60mの領域とした。対象領域においてADCPの航跡を縦断方向に定め、操船経路を往路（流下時）と復路（遡上時）とで主流域では5m以内、水制域では2m以内の間隔で変えながら全領域をカバーするまで移動することで、空間内のあらゆる地点における速度情報を偏りなく得ることを目指した。また、計測時のボートの対地速度は、可能な限り1kt以下となるように操作した。そのような計測を複数回繰り返し、得られたデータを積算することで1データセットとした。以上の処理は、観測期間中の水理条件がほとんど変化しないという前提のもとで有効であるが、流量・水位については観測中に適宜チェックし有意な変化が認められないことを確認した。船内には発電機を搭載し、ADCPやGPSの他、データ収録用のPCの電源に供した。データ収録にはR&D社によるソフトウェア（WinRiver, Ver.1.03.000）を用いた。

3. 水制域の流速分布特性

(1) 流速分布に与える水深の影響

図-5は非越流時の流速分布を、また、図-6および

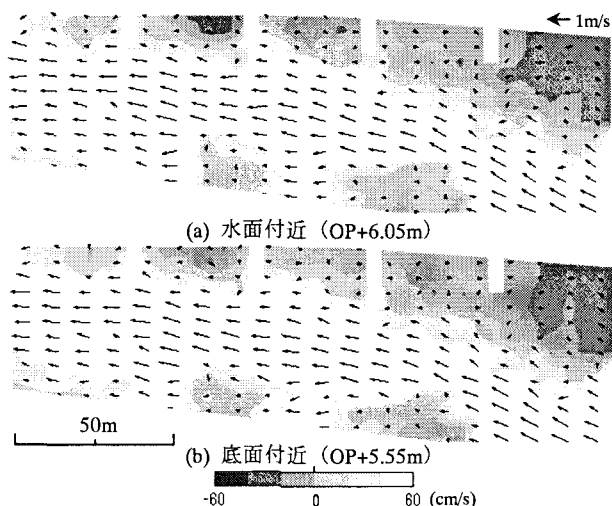


図-5 非越流時の平面流速分布

図-7は瀬田川洗堰放流に伴う越流時の流速分布を、それぞれ代表的な平面について示したものである。なお、主流方向流速をコンターで示している。

まず、非越流時の流況（図-5）について水制域に注目すると、水面付近（OP+6.05m）、底面付近（OP+5.55m）いずれの場合でも水制域には時計回りの循環流が形成されており、従来から指摘されている2次元的な流れ場であることがうかがえる。

これに対して越流時では、水位の低い8月観測時について見ると（図-6）、水面付近（OP+7.77m≒水制天端）においては第1水制域を除く水制域では流向は概ね下流であるが、その流速値は20cm/s以下と主流部に比べてかなり小さい。水制域の底面付近（OP+5.77m）では、各水制域内の上流側において一

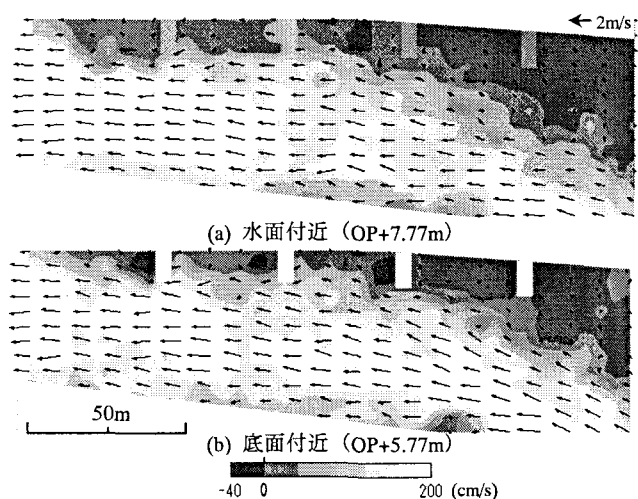


図-6 越流時（8月）の平面流速分布

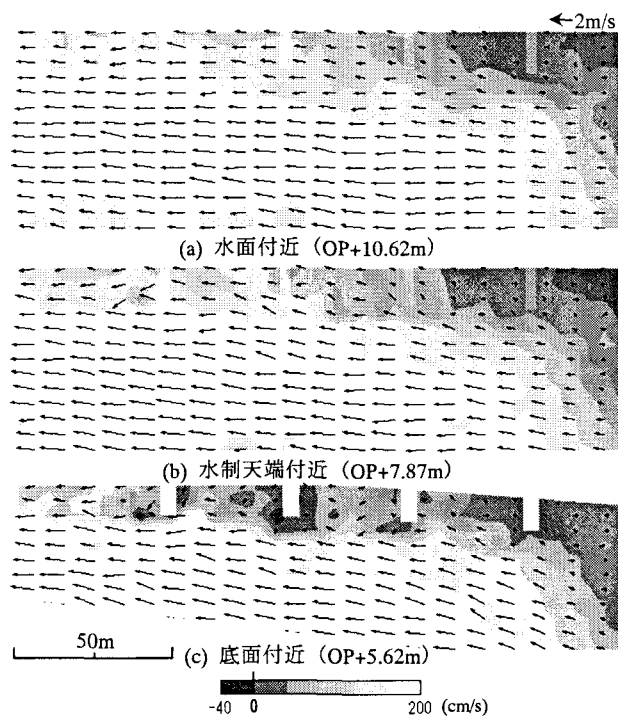


図-7 越流時（5月）の平面流速分布

部逆流域が形成されている。このことから、水制の後流域に鉛直循環流が形成されていることが示唆される。

一方、水位の高い5月観測時について見ると（図-7）、水面付近（OP+10.62m）においては第2水制より下流では流れは流下方向にほぼ並行であるが、速度は主流域に比べてやや遅い。水制天端直上（OP+7.87m）では水制の影響がより強く現れ、速度が主流域の半分程度になることに加えて流向もところどころ乱されるようになってきている。さらに、水制域の底面付近（OP+5.62m）では、水制域と主流域との間にはっきりした速度の境界が形成され、水制直下流部には一部速度が特に小さい部分も見られる。しかしながら、ベクトルは一部を除いて基本的に流下方向を向いている。これより、水制域では流れは一樣に下流へ向かっているが、流速値は鉛直方向にかなりの差異を有する。

以上のように、2次元的な流れ場である非越流時

に対して、越流時は鉛直方向に階層的な構造を有しており、かつその階層構造も水制上のかぶり水深によって異なることがうかがわれる。

(2) 主流部における横断流速分布

今回の対象区間のように片側のみ水制群を有する場合、主流部の流速分布も影響を受け、地形的な水路中央から偏った位置に最大流速が現れることを既報⁷⁾では指摘した。今回、対象ケースが増加したことに加えて内部流況に関する情報も得たので、水位と最大流速の発生位置の関係と共に、それが水面付近と底面付近でどのように異なるかにも着目した。

図-8は、水面付近における横断方向の流速分布を、第2水制（ $x=80\text{m}$ ）から第4水制（ $x=160\text{m}$ ）にかけて20mごとに示したものである。図より、非越流時には、最大流速は低水路幅から水制域を除いた幅50mの中央となる $y=25\text{m}$ 付近に位置することがわかる。これに対して越流時には、さらに左岸

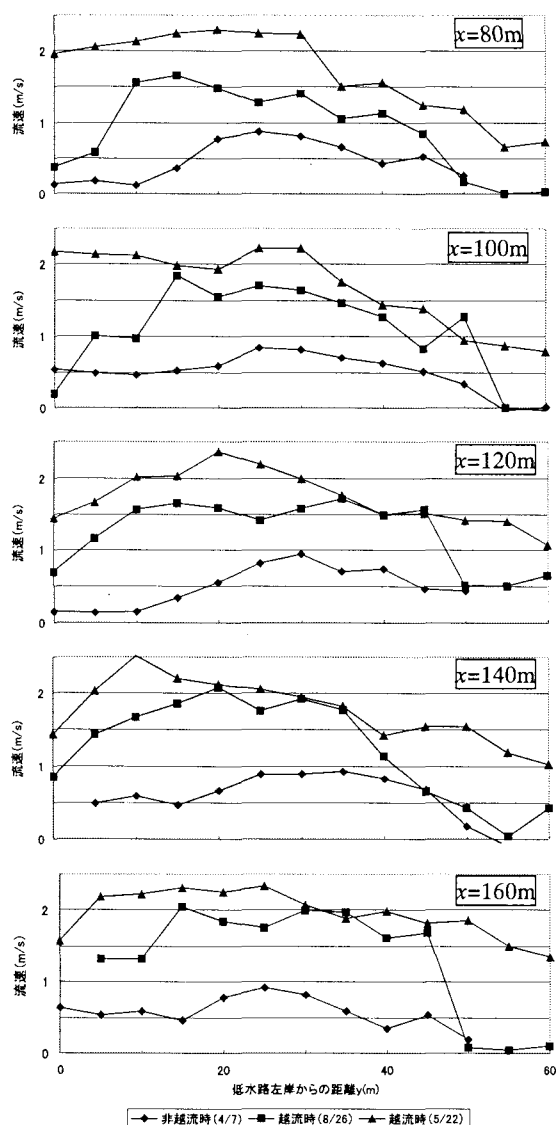


図-8 主要測線上での流下方向流速（水面付近）

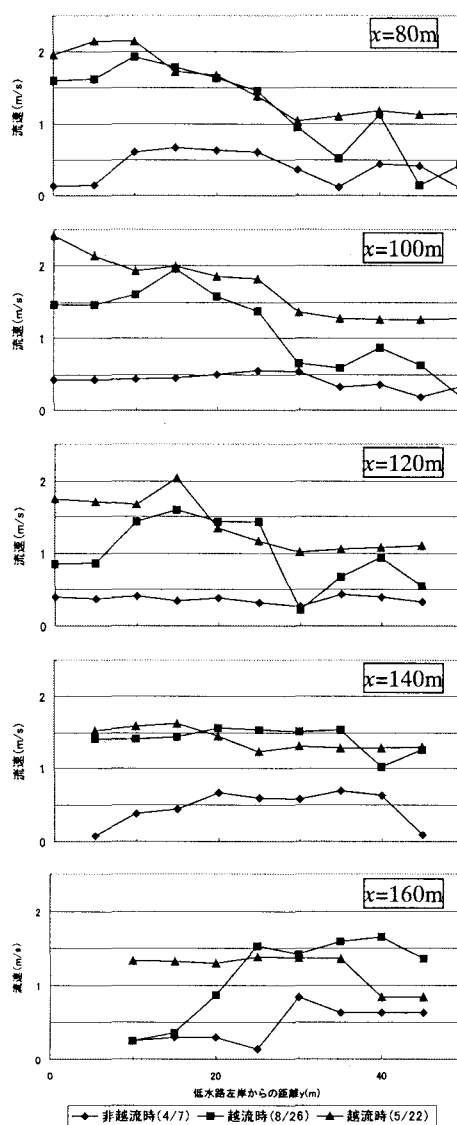


図-9 主要測線上での流下方向流速（底面付近）

寄りにシフトしており、水位の低い8月観測時には概ね $y=15\text{m}$ に最大流速が現れるが、水位の高い5月観測時には $y=20\text{m}$ 付近に現れることが多い。これは、水位の低い8月越流時には水制域の流速が主流域に比べて極端に遅く、水制域が疎通にあまり寄与していないのに対して、水位の高い5月越流時には水路の有効幅が水制域をも含めて右岸側に広がるため、最大流速の発生位置が右岸寄りに多少戻るものと思われる。

一方、低水路底面付近について同様に示したものが図-9である。 $x=120\text{m}$ まではいずれの条件についても水面付近とほぼ同様の分布形を示しているが、それより下流では、越流時には $x=140\text{m}$ でやや一様化した後に、 $x=160\text{m}$ では逆に右岸寄りに最大流速が位置するようになる。これは、図-4に示した河床形状からわかるように、 $x=150\text{m}$ 付近の左岸寄りにマウンドが存在するため、それにより流れが右岸寄りへと押しやられているものと推測される。

以上のように、最大流速の出現位置は水位の条件に応じて変化するが、最大洗掘と最も関連すると思われる底面付近での最大流速は、水面付近のそれとは必ずしも同じ位置には発生しないことが明らかとなった。

(3) 主流部と水制域間の交換機構

主流部と水制域間の交換機構を見るために横断面内の速度分布を示したものが図-10 および図-11 である。なお、断面内の二次流流速成分をベクトルで、流下方向の流速をコンターで示している。非越流時（図-10）について見ると、水制直下流の断面（ $x=125\text{m}$ ）では流れは全水深にわたって水制域から主流部へ向かっているのに対し、水制直上流の断面（ $x=155\text{m}$ ）では逆に主流部から水制域へ向かっている。これは、図-5の平面図に示した大きな循環流と整合し、大規模な横断方向への交換機構の存在をうかがわせるものである。また、水制直下流の断面においては、主流部へ向かう流れにより水制域内の低速流

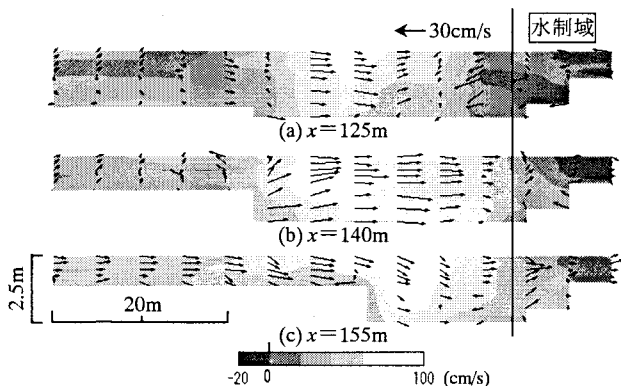


図-10 非越流時の横断面流速分布（第3水制域）

体が主流部へ向かって押し出されるような形になっており、水制による水はね効果とそれに伴う後流域の発達が捉えられている。

これに対し、図-11に示した越流時（8月観測）には、非越流時のような横断方向の交換や低速流体の押し出しは見られない。水制上の断面（ $x=120\text{m}$ ）では、流れは主流部から水制域へ向かうが、続く断面（ $x=130\text{m}$ ）では水面付近で主流部から水制域へ向かった流れが底付近で主流部へ戻り、弱い時計回りの渦状の流れを形成している。このように洪水時には、主流部・水制域境界に水深規模のらせん流の発達および減衰過程の存在がうかがえ、それが交換現象に関与しているものと思われる。

(4) 水制後流部のボイルとの関連

既報⁷⁾では、可視化画像の解析結果より、越流時に水制の下流側に安定して発生するボイルの存在を指摘したが、今回の観測時にはボイルが実際に頻繁に観察された。図-12には第4水制（ $x=160\text{m}$ ）の下流側における横断面内の流速分布を示している。これによれば、 $x=170\text{m}$ の断面では水制先端付近の低速流体塊がこの渦により持ち上げられ、 $x=180\text{m}$ の

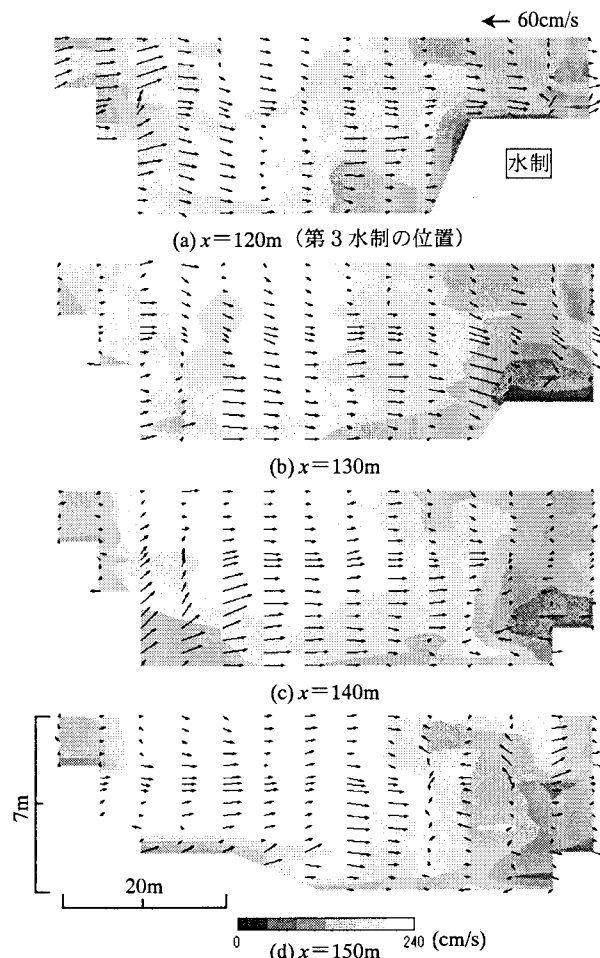


図-11 越流時の横断面流速分布（第3水制域）

断面では低速流体塊は渦に取り込まれるようにさらに上昇している様子が捉えられている。この低速流体塊は、ボイルとの関連性を強くうかがわせるものである。この低速流体塊は、 $x=190\text{m}$ では見られないことから、 $x=185\text{m}$ あたり、すなわち水制から約 25m 下流で水面に到達するものと考えられる。図-7より読み取れるこの領域の平均流速（＝流下速度）を 2m/s 程度とし、ボイルが水制先端部から発生していると考ええると、その流下時間は約 12s となり、かぶり水深が 3.47m であることから上昇速度は 30cm/s 程度となる。この値は、水深の条件は違うものの、既報⁷⁾で試算したボイルの上昇速度とほぼ一致する。

一方、この低速流体塊が上昇する道筋において計測された鉛直方向の平均速度はせいぜい 15cm/s 程度であり、それからするとこの上昇速度はかなり大きい。ボイルの発生は間欠的であることから、上昇過程では何らかの作用により間欠的に加速されていることは推測できるが、今回の計測方法ではその過程を明らかにすることは困難である。しかしながら、ボイルの発生と上昇は、河床材料の巻き上げや浮遊砂の拡散に重要な役割を担っていると考えられ、特に越流状態の水制域では安定かつ頻繁に観察されることから、今後その構造の解明を進める必要がある。

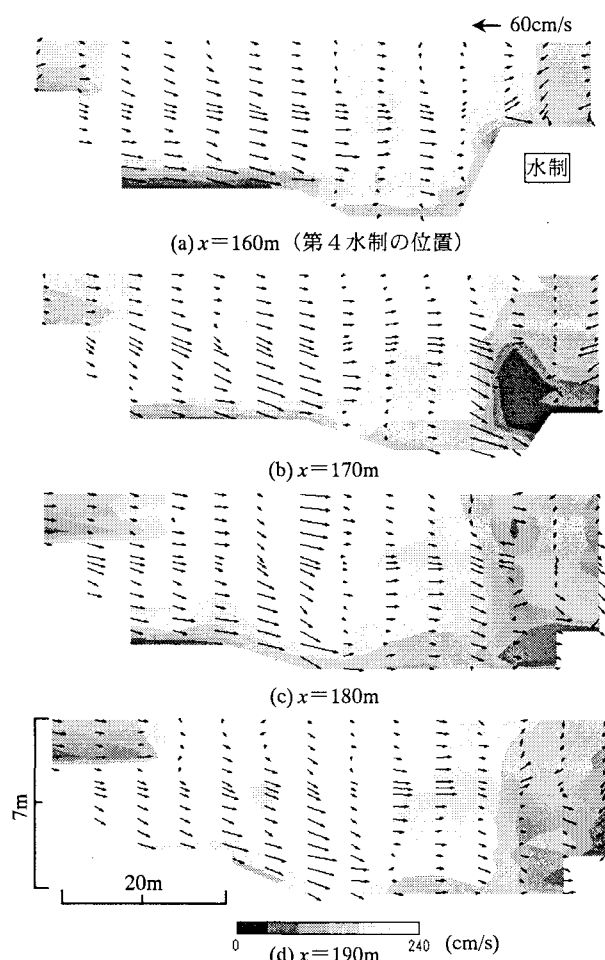


図-12 越流時の横断面流速分布（第4水制の下流）

4. おわりに

本研究による主要な成果を以下に列挙する。

- 1) 舷側設置型ADCPによる流速計測の結果、水制域においては、非越流時には水平循環流が、かぶり水深が比較的小さい越流時には鉛直循環流が形成されるが、かぶり水深が大きくなるとこれらの循環流は消滅することが示された。
- 2) 主流域においては、最大流速の発生位置は低水路の地形的中央からは偏る。これは越流時において特に顕著である。また、水面付近と底面付近では、最大流速の発生位置は異なる。
- 3) 非越流時と越流時とでは主流部・水制域間の交換現象が異なり、越流時には境界部において水深規模の弱いらせん流の存在がうかがえた。
- 4) 越流時には、水制の後流域で発生し、流下に伴い上昇する低速流体塊の存在が示唆された。この低速流体塊はまた、その水面への到達位置や移流状況から、ボイルとの関連が強く示唆された。

謝辞：本研究の遂行にあたり、財団法人河川環境管理財団（基金事業・調査研究）ならびに日本学術振興会（科学研究費補助金・基盤研究(B)(2)）より研究助成を受けた。また、神戸大学教授・藤田一郎先生ならびに大阪工業大学教授・綾史郎先生には有益な助言をいただいた。深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 山本晃一：日本の水制，山海堂，pp.393-395, 1996.
- 2) 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.
- 3) 大本照憲，平川隆一，井手賢正：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) 富永晃宏，田本典秀：越流型連続水制群周辺の流れ構造に及ぼす水制設置角度の効果，水工学論文集，第48巻，pp.805-810, 2004.
- 5) 松岡保正：大規模水制群内の水平渦，水工学論文集，第39巻，pp.773-778, 1995.
- 6) 崇田徳彦，清水康行，板倉忠興：出水による水制周辺の粒度分布及び河床変化について，水工学論文集，第40巻，pp.799-804, 1996.
- 7) 藤田一郎，武藤裕則，嶋津良郎，椿涼太，綾史郎：LSPIV法による水制周辺部の平水時および洪水時流れに関する検討，水工学論文集，第47巻，pp.943-948, 2003.

(2004.9.30 受付)