第II部門　**水制周辺流れの三次元構造に関する実験的研究**

京都大学　学生員　○廣藤嘉紀
京都大学　正会員　山上路生
京都大学　フェロー　禰津家久

## １．はじめに

水制周りの流れは土砂洗掘や水面変動を伴い，水工学的にも重要な流れ場の一つである．また強い３次元性をもつため，詳細な解明が急務である．これまでにも水制周りの流れ場に関する研究は多々あるが，最近では門田ら(2010)[1)]が多種形状の水制を用いて水制周辺の流況解析を行っている．特に，本研究と同じI型(主流方向に垂直な方向に直線形状)の水制を用いたものに関して，水制上流側で下降流が発生し，水制先端付近ではそれが最大値をもつことを指摘している． また 水制先端部で対岸へ向かう流れが大きくなっており，水制による縮流状態が確認されている．水深の低い位置では水深の高い位置に比べて主流速が小さくなっており，逆に逆流流速は水深が高い位置よりも大きくなっているという結果が得られている．本研究では超音波ドップラー流速計(ＡＤＶ)を用いて流速３成分を乱流計測し，既往の研究でも多く取り上げられている水平面分布だけでなく，縦断面や横断面の流速分布も検討する．さらにレイノルズ応力などの乱れ統計量についても詳細に調べて，それらに起因する組織渦や大規模循環流の構造を研究する．これらの乱流構造や渦特性は底面の土砂輸送と大きく関わり，実河川管理にとっても重要なテーマである．本研究では流れの基礎特性を解明するために，第一ステージとして固定床条件における室内実験を遂行し，流れの３次元構造について研究する．

## ２．実験手法および水理条件

**図-1** に実験装置と座標系を示す．本計測で用いた水路は全幅 40cm，全長 10m の循環式水路で，流量はコンピュータによって自動制御できる．さらにジャッキによって勾配が可変である．側壁は強化ガラス製で流れの観察が容易にできる設計である．側壁上のフレームにはガードレールを設けて，水路を横断するように移動台車を設置しており，高精度トラバース装置により ADV プローブを 0.1mm 精度で流下，鉛直，横断の全方向にプローブをトラバースできる．ADV は Sontec 製の３Ｄプローブ(micro ADV)を使用しており，サンプリングボリュームはプローブの下方向 5cm の位置にある．そのため水面下 5cm 以下の位置までしか測定することができない．Ｉ型の長さ $L=0.1$ (m)の非越流型の水制模型を水路側面に設置し，流量を $Q=20\ell$/s，水

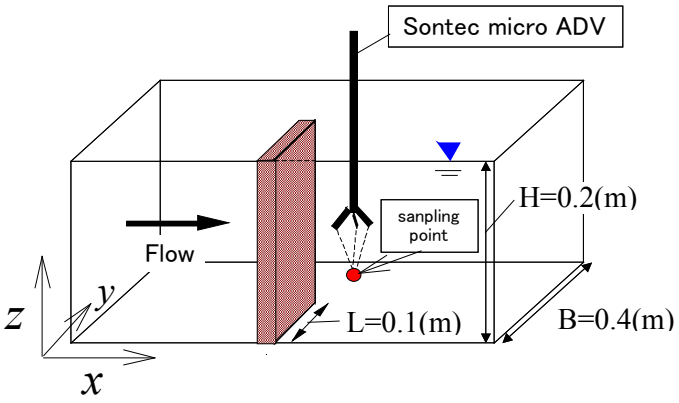


**図-1**　実験装置

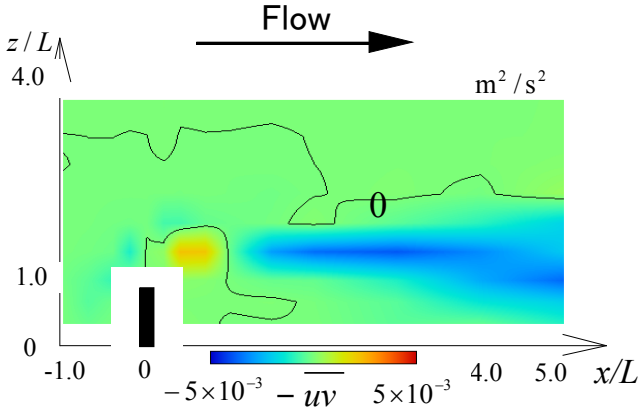


**図-2**　水深平均したレイノルズ応力-$\overline{uv}$の分布

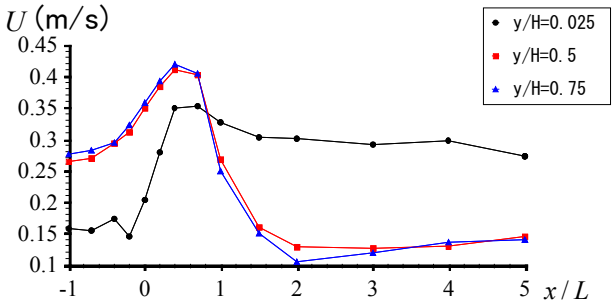


**図-3**　主流速$U$の流下方向変化

深を $H$ =0.2mにした．$x$，$y$，$z$ はそれぞれ主流，鉛直および横断軸である．原点については水制中心位置を $x$=0，水制側側壁を $y$=0 および底面を $z$=0 とした．計測高さは $y/H=0.025$，0.5 および 0.15 の３通りを設定した．

## ３．実験結果及び考察

**図-2** は３つの高さの結果を水深平均した鉛直レイノルズ応力 $-\overline{uv}$ の水平面分布である．主流と後流域の境界で $-\overline{uv}$ が負の値をとる．一方図-3 は $z/L=0.1$（水制先端位置）における主流速の流下方向分布である．これらの図面を比較すると，底面付近の主流速が水面付近の主流速よりも大きい値をとる位置と，$-\overline{uv}$ が負の値をとる位置がほぼ一致している．このことから，$-\overline{uv}$ が負の値をとる領域では水面部の主流速が減少し，底面付近の主流速が増大するような渦が発生するものと思われる．本研究では水制から下流側にかけて $x/L=5$ までしか計測していないが，さらに下流まで計測すると再び水面付近の主流速が底面付近の主流速を上回るようになると思われる．

**図-4** は水深平均したクロスレイノルズ応力 $-\overline{vw}$ のコンター図である．この統計量の計測は LDA や PIV では困難で，ADV 計測の大きな長所といえよう．主流と後流域の境界（$z/L=0.1$）に沿って $-\overline{vw}$ が大きく変動する．横断面に軸をもつ渦度の輸送方程式では $-\overline{vw}$ の２階微分値が渦度の抑制項を示すため，この値が変動する位置で横断面の強い二次流が発生するといえる．本実験結果では主流と後流域の境界，特に境界から主流の方向にかけて $-\overline{vw}$ の変動が著しいことから，この領域で横断面２次流が発生すると推測される．**図-5** は $x/L=3$ における横断方向流速の横断方向変化を高さごとにプロットしたものである．底面近傍（$y/H=0.025$）では正負が逆転しており，この結果より横断面には回転方向の異なる１対の二次循環流が形成されることが予想される．水制先端下流側には強い下降流が発生しており，二次流が存在するとなると，下降流と何らかの相関関係があるように思われる．

このように水制流れにおいては既往研究でも指摘されているように複雑な３次元構造が存在することが確認できた．今後はこの２次流発生のメカニズムを乱流の観点から説明するべく検討していきたい．

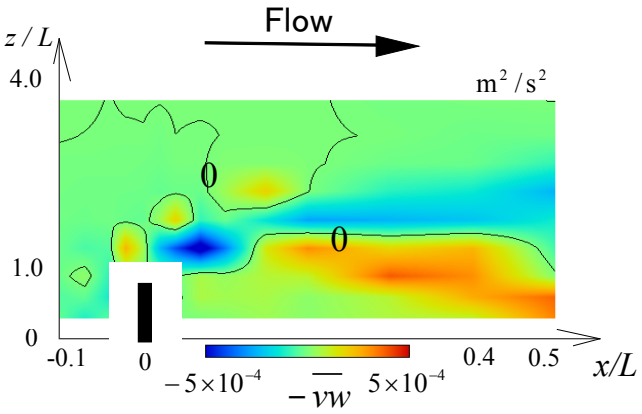


**図-4**　水深平均したレイノルズ応力 $-\overline{vw}$ の分布

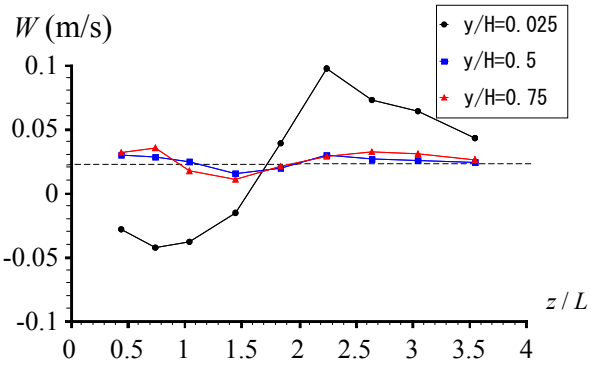


**図-5**　横断方向流速 $W$ の横断方向変化

## ４．おわりに

側壁に接する非越流Ｉ型水制周りの流れ場という比較的単純な流れ場ではあったが，ADV による実験ではレイノルズ応力分布から様々な渦の存在が確認される等，複雑な流れ構造であることがわかった．さらに実験を重ねることにより，水制と縦断面から確認される渦のスケールの相関関係，水制からの位置と二次流のスケールの相関関係等を解き明かし，今後底面付近に流砂を敷いた移動床実験をする際にそれらの渦が土砂輸送に与える影響を予測することができると考えている．今後移動床の研究に着手するにあたって，濁水に対しても使用できる ADV は非常に有用であるといえる．一方で ADV に適した水理条件のもと実験を行っても，ドップラーノイズの処理は避けられない．特に実河川では実験室のように理想的な水質環境が得られるとは限らない．そのためにも，ADV のノイズ処理も今後の重要な課題である．

## 参考文献

１）門田章宏・小林英司・鈴木幸一：各種水制形状に起因する平均流構造 および組織的流れ構造，水工学論文集,第 54 巻，pp.937-942，2010.