

神戸大学工学部 学生員 ○小田 崇裕 神戸大学大学院 正会員 藤田 一郎  
 神戸大学大学院 学生員 岡西 健史 神戸大学大学院 学生員 本田 将人  
 神戸大学大学院 学生員 小阪 純史

1. はじめに

自然河川の流れや水面は洪水時などにおいて大きく、不規則に変動している。既往の研究では、開水路滑面乱流場に対する研究は多く行われているが、自然河川のような開水路粗面乱流場に対する研究は十分ではない。特に、直接水面変動を計測して内部流速場との関係を詳細に検討した研究はほとんどなく、乱流場が水面変動におよぼす影響については未解明な部分が多い。そこで本研究では、開水路粗面乱流場における水面変動と内部流速場の関係を明らかにするため、水面変動と内部流速場の同時計測システムを構築し、底面に礫を敷いた実験水路を用いて可視化画像計測を行った。

2. 実験概要

本研究では、水路全長約 6m、水路幅 30cm の可変勾配型循環式直線水路を用いて実験を行った。礫は水路上流端から約 1.5m 下流の位置より約 4m の区間に敷き詰めている。また、撮影は礫の効果による乱流場が十分に発達したと思われる上流端から約 4.5m の位置で行っている。図-1 に実験装置の概略を示す。シリコンチューブ内部から上流方向へ照射されたレーザー光膜により水路中央部の縦断面内の可視化を行い、2 台の同期をとったハイスピードカメラを用いて内部流速場と水面変動の同時計測を行う。内部流速場計測の対象は水路中央の縦断面とする。水面変動計測については、内部流速場計測領域上部に設置した鏡にレーザー光膜と水面の交わる箇所を写し出し計測する。表-1 に水理条件を示す。本研究では、粒径が 1.0cm、1.5cm の礫床 2 パターン及び滑面の合計 3 パターンについて水深  $h$  をに一定に固定し、Fr 数を段階的に変化させながら実験を行ったが、ここでは水面変動が顕著に現れた 4 つの実験ケース(R10-3, R10-4, R15-3, R15-4)を対象として考察を行う。また、水深  $h$  は礫の頂点を原点とした水深である。水面変動の解析については、同時計測において撮影した水面の画像を用いて波形の変化から水面変動を求める。そのため、以下のような画像処理を施す。まず、原画像における水面形を把握しやすくするため、1 枚目~10 枚目、2 枚目~11 枚目という様に 10 枚区切り(時間スケールで 0.02s 区切り)で多重合成を行う。その様子を図-2 に示す。左が原画像、右が多重合成後の画像である。

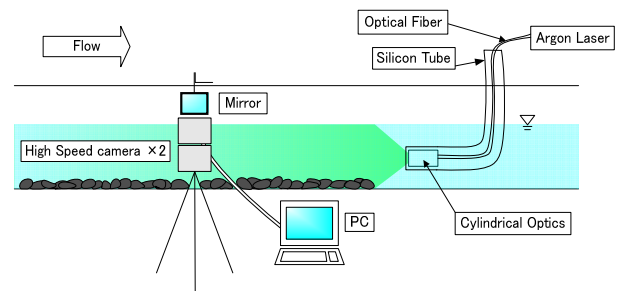


図-1 実験装置概略図

表-1 水理条件

Case	$D$ (cm)	$h$ (cm)	$Q$ (l/min)	$I$	$U_m$ (cm/s)	Fr	Re	$h_{rms}$ (mm)
R10-3	1.0	5.0	250	0.0025	28.30	0.40	14150	0.690
R10-4	1.0	5.0	378	0.0056	41.23	0.60	20615	0.899
R15-3	1.5	5.0	250	0.0025	26.27	0.40	13135	0.808
R15-4	1.5	5.0	378	0.0056	39.21	0.60	19605	0.929

ここに、 $D$ ：礫の粒径、 $h$ ：水深、 $Q$ ：流量、 $I$ ：水路勾配、 $U_m$ ：断面平均主流速、 $Fr$ ：フルード数、 $Re$ ：レイノルズ数、 $h_{rms}$ ：水面変動  $h' (=h-h_m)$  の RMS 値。

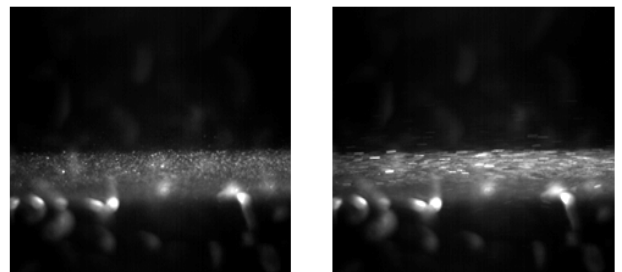


図-2 多重合成画像例

この多重合成後の画像に流下方向の移動平均を行うことにより滑らかな水面形を得る。その様子を図-3 に示す。

この段階まで処理を行った状態で画像の水面付近を切り出し、二値化処理を行う。二値化の前処理として切り出した水面画像に半径 16Pixel の広半径のメディアンフィルタをかけトレーサー粒子の除去を行う。二値化処理の流れを図-4 に示す。上から順に水面付近の切り出し画像例、メディアンフィルタをかけた後の画像例、二値化処理後の画像例である。メディアンフィルタをかけた後の画像には二値化処理で得られた水面形を赤線で示す。これより処理前後で波形が概ね一致していることが確認できる。以上の処理を撮影した全画像に対して行い瞬時の水面形とし、水面変動を求める。また、内部流速場の解析には三枚連続画像による時空間微分法を用いた PIV を使用した。

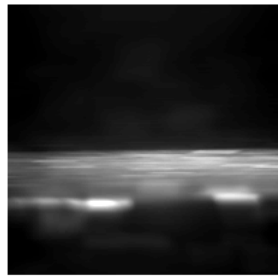


図-3 移動平均画像例

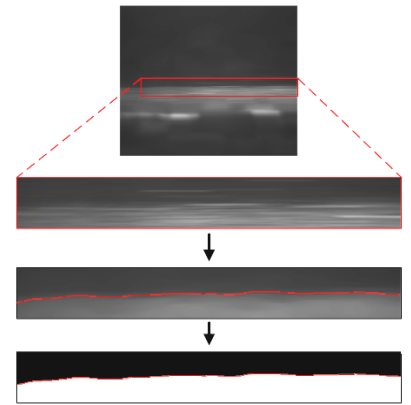


図-4 二値化処理流れ例

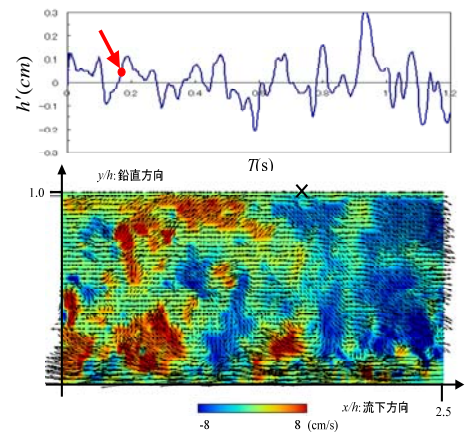


図-5 内部流速場と水面変動

### 3. 実験結果及び考察

図-5 に R10-4 のケースにおける水面変動の時系列と瞬間の内部流速場を示す。水面変動の時系列については、内部流速場の図中に×で示す固定点における水面変動の時系列を表示する。瞬間の内部流速場については、水面変動の時系列図中の矢印が指す点における鉛直方向流速成分のコンター図を示しており、図中のベクトルは内部流速場の構造を明確にするため、平均主流速の 80% を差し引いたものである。底面近傍より発生した多数の上昇流が水面へ到達し水面近傍で 1 つの大きな上昇流となり水面変動に影響を及ぼしていることが多く確認できた。また、水面変動は固定点直下よりも上流側の鉛直方向流速成分の影響を受けていることがわかる。

図-6 は R10-4, R15-4 のケースについて図中の×で示す点における水面変動  $h'_i$  と各点における鉛直方向速度変動  $v'_i(x, y)$  との相互相関係数  $R_{hv}(x, y)$  を計算し、コンタープロットしたものである。双方のケースにおいて×で示す固定点直下から上流側にかけての水面近傍において相関係数が高い値を示し、固定点直下から下流側にかけての水面近傍において相関係数が低い値を示していることが確認できる。また、底面近傍では相関が小さく、同じフルード数の場合粒径が大きいケース、つまり内部流速場の乱れが大きいケースのほうがより広く、深い範囲まで高い相関値を維持していることが確認できる。また、瀬津・中山りは滑面において  $h'$  と  $v'$  の相関解析をおこなっているが、フルード数 0.6 程度のケースにおける相互相関係数は最大でも 0.04 程度と非常に小さく、今回の礫床のケースと大きく異なる点が興味深い。

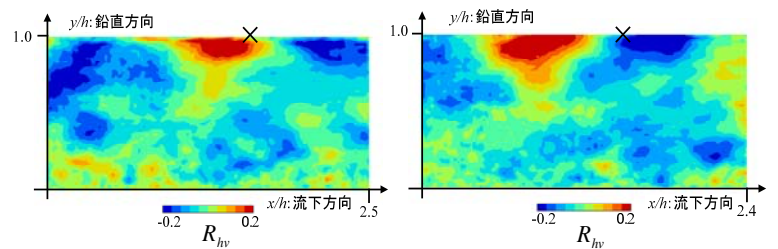


図-6 相関係数  $R_{hv}(x, y)$  の空間分布

図-6 は R10-4, R15-4 のケースについて図中の×で示す点における水面変動  $h'_i$  と各点における鉛直方向速度変動  $v'_i(x, y)$  との相互相関係数  $R_{hv}(x, y)$  を計算し、コンタープロットしたものである。双方のケースにおいて×で示す固定点直下から上流側にかけての水面近傍において相関係数が高い値を示し、固定点直下から下流側にかけての水面近傍において相関係数が低い値を示していることが確認できる。また、底面近傍では相関が小さく、同じフルード数の場合粒径が大きいケース、つまり内部流速場の乱れが大きいケースのほうがより広く、深い範囲まで高い相関値を維持していることが確認できる。また、瀬津・中山りは滑面において  $h'$  と  $v'$  の相関解析をおこなっているが、フルード数 0.6 程度のケースにおける相互相関係数は最大でも 0.04 程度と非常に小さく、今回の礫床のケースと大きく異なる点が興味深い。

### 4. おわりに

本研究において、水面変動と内部流速場の同時計測システムの構築を行い、良好に結果が得られた。礫床ケースに関して水面近傍の鉛直方向速度変動と水面変動との間には非常に強い相関があり、礫の存在が水面変動に大きく影響していることを明らかにした。

### 参考文献

- 1) 瀬津家久, 中山忠暢: 自由水面近傍における組織渦の時空間相関構造に関する研究, 土木学会論文集, 第 586 号/II-42, pp.51-60, 1998.