半球粗面乱流場における水面近傍の乱れ構造と水面変動の関係

神戸大学大学院工学研究科　学生員　○古谷　勇樹
神戸大学大学院工学研究科　正会員　藤田　一郎
神戸大学大学院工学研究科　学生員　松嶌　仁志

1. 研究背景

近年，洪水時に危険を冒すことなく河川の流速を計測できる方法として LSPIV(Large-Scale Particle Image Velocimetry)[1]や STIV(Space-Time Image Velocimetry)[2]といった非接触型流速計測技術が注目されている．これらは水面波紋の移流速度を表面流速とみなして計測している．だが水面波紋の移流速度と表面速度の関連性については不明な点も多い．そこで本研究ではこの水面波紋の移流特性について底面粗度を有する開水路での水理実験結果から考察を行った．

2. 実験方法と水理条件

水路長約 6m，水路幅 30cm，半球粗度を千鳥状に敷詰めた実験水路を用いた．下流に設置した縦長のアクリルケース内よりレーザー光膜を照射，水面と交差する箇所を鏡で映しこれをハイスピードカメラ(HAS-500)によって撮影することによって水面波紋(波形)の移流速度を計測する．図-1 に実験水路，図-2 に実験装置の設置概略図を示した．撮影条件は 1024×496 ピクセルを 500fps で 8 秒間連続撮影である．水理条件は表-1 のように Fr 数がほぼ同等になるように 3 ケース設定した．また，同様の水理条件において水面にトレーサー粒子を散布し，これを撮影して表面速度の計測も行った．更に内部流の撮影を行い，水面近傍の鉛直方向乱れ成分を PIV によって計測した．

3. 解析手法

水面波形の解析手順は以下の通りである．得られた連続画像上に等間隔に検査線を設置する．この線上の画素を 1frame ごとに右方向へ並べていき図-3 に示すような時空間画像を作成する．この時空間画像に 2 値化しノイズ除去のため膨張収縮処理を行い，輝度勾配から水面位置 h を推定する．時空間画像の処理例を図-4 に示した．

表-1 水理条件

	I	Q (cm^3/sec)	H(cm)	U_m (cm/s)	Fr	Re
Case1	1/100	9900	6.400	51.566	0.651	33000
Case2	1/100	4700	3.991	39.253	0.627	15667
Case3	1/100	3000	2.947	33.927	0.631	10000

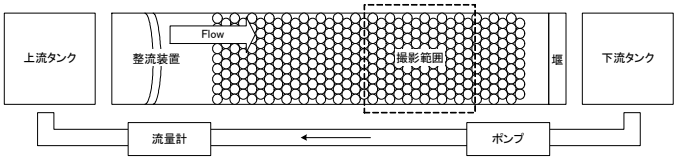

図-1 実験水路

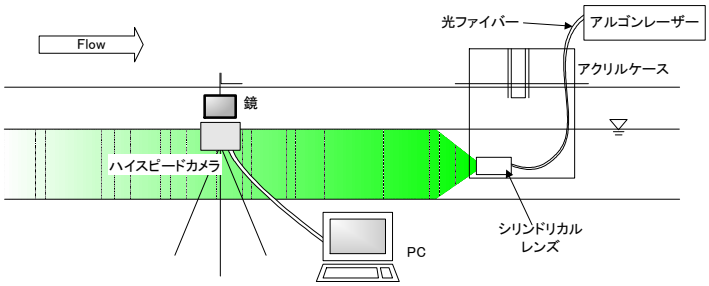

図-2 実験装置設置概略図

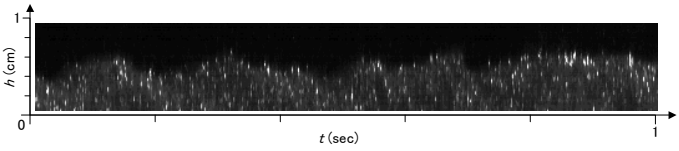

図-3 時空間画像例

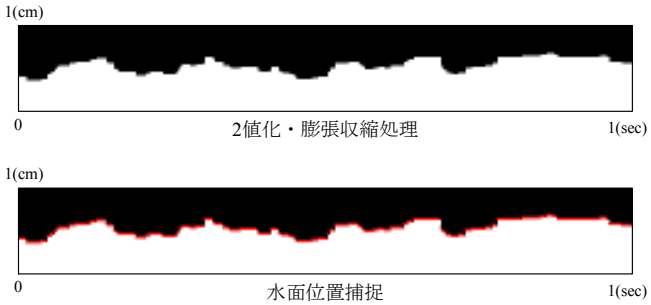

図-4 時空間画像処理例

キーワード　開水路，粗面，乱流場，水面変動
連絡先　〒657-8501　神戸市灘区六甲台町 1-1　神戸大学大学院工学研究科　ＴＥＬ078-803-6439

異なる 2 本の検査線でのデータを時間軸方向に Δt ずつずらしながら相互相関係数 R_h を計算する．R_h の式は式(1)で表される．ここで h_1 と h_2 はそれぞれ対象となる検査線での水面位置情報である．こうして求めた R_h が最大となる Δt を検査線間の水面波形の移動時間と考え，これを検査線間隔で除すことで水面波形移流速度を計算する．また表面流速については表面トレーサー画像に対し輝度勾配による STIV[2]を用いて解析することで算出した．

$$R_h = \frac{\sum (h_1 - \overline{h_1})(h_2 - \overline{h_2})}{\sqrt{\sum (h_1 - \overline{h_1})^2}\sqrt{\sum (h_2 - \overline{h_2})^2}} \quad (1)$$

4. 水面波形移流速度と表面流速の関係

図-5 に水面波形移流速度 U_{wave} と表面流速 U_s の計測結果を示した．これらを見ると Case2，Case3 において両者がほぼ一致していることがわかる．一方 Case1 では若干 U_{wave} が過小評価となっている．図-6 は流下方向を x とし時空間上に最初の 1 秒間での水面変動 h'をプロットしたものである．これを見ると濃い黒で示される大規模な水面変動が発生している箇所で時空間上での縞の傾きが大きくなっているように見える．この変動は底面からの低速流体塊の到達が引き起こしたものと思われる．時空間上での傾きが大きいということはその移流速度が低下しているということであり，この大規模変動が波形移流速度の 5%程度の低下をもたらしたと考えられる．

5. 水面近傍乱れ成分との関係

Case 2 の水理条件において，水面最近傍での鉛直方向乱れ成分 w'を計測し，時空間表示したものが図-7 である．図中 Line A は表面トレーサー移流速度，Line B は水面波形移流速度をそれぞれ示している．この図から大きな w'が発生している箇所以外では Line A, B が定常的に存在している縞パターンの傾きと一致しているのがわかる．他のケースでも基本的には同様の傾向が見られた．この傾向は図-6 の結果とも類似しており，水面変動と水面最近傍鉛直方向乱れ成分の間に直接的な関係が存在すると考えられる．

6. 結論

粗面乱流場において，底面からの低速流体塊の影響を強く受ける場合を除けば，表面流速と水面波形移流速度がほぼ一致し，さらに水面近傍での鉛直方向乱れ成分の移流速度とも一致するという結果が得られた．

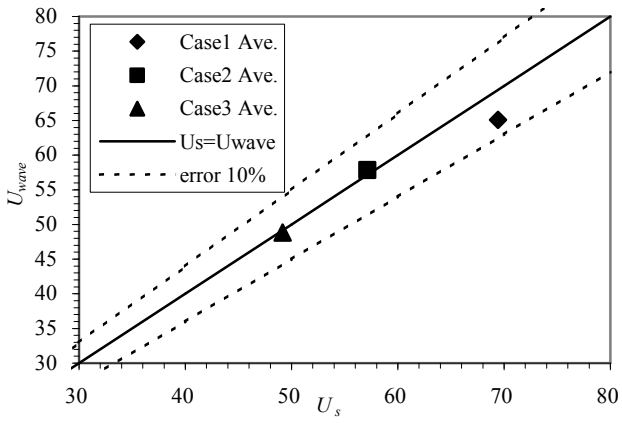

図-5 U_{wave}-U_s 分布図

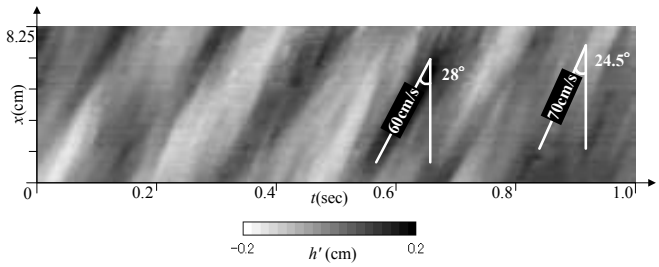

図-6 h' 時空間プロット (Case 1)

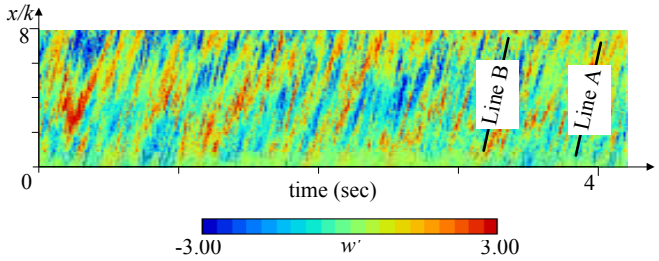

図-7 水面近傍 w'時空間表示 (Case 2)

参考文献

1) I. Fujita, M. Muste and A. Kruger : Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications, J. Hydr. Res., Vol.36(3), pp.397-414, 1998.

2) 藤田一郎，椿良太：時空間画像を利用した河川表面波紋の移流速度計測，河川技術論文集，Vol.9，pp.55-60, 2003.