第 II 部門　　河床波発達過程における浮遊砂流れの乱流構造変化に関する研究

京都大学　学生員　○野口和則
京都大学　学生員　林　雅仁
京都大学　フェロー　禰津家久
京都大学　正会員　山上路生

１．はじめに

流れ，流砂および河床形状の 3 要素が複雑に絡み合う実河川の流れにおいては，解明すべき点が多く存在するため研究対象として非常に興味深い．このような相互作用の解明の重要性は以前から指摘されており，現在まで様々な研究がなされてきている [1]．そこで本研究では粒子投影面積判別手法(D-PTV)およびそれを改良した D-PIV[2]を用いて粒子速度と流体速度の同時計測を行い，河床波発達過程における浮遊粒子と流れの相互作用について検討した．

２．実験方法と水理条件

本実験で使用した水路は，長さ 4m，幅 5cm のアクリル製小型循環式直線水路である．実験は，水路の底部に 2cm 厚で粒子を隙間なく敷きつめ，移動床表面を平坦にした後，一定流量の水を流し，時間経過とともに河床波が発達していく過程を計測した．計測区間は連続河床波流れが十分に発達したと考えられる水路上流から約 3m 下流の地点に設定した．

撮影は**図-1** に示したように水路側壁付近に設置された CCD カメラによって行い，1/30s ごとに 1024×480 ピクセルのフレーム画像を時間間隔 Δt=1/200s で 2 枚ずつ記録した．その時間差 1/200s の 2 画像を用いて瞬間流速の算出を行った．瞬間流速の算出方法として D-PIV 解析と D-PTV 解析の 2 手法を併用した．すなわち，D-PIV では画像上で粒子画像を除去し，トレーサーのみの画像データによって流体の瞬間流速を算出した．D-PTV ではトレーサーを除去し，粒子のみの画像データによって，粒子の瞬間流速を算出した．流体挙動を代表するトレーサーとして，直径 0.025mm，比重 1.02 のナイロン 12 粒子を用い，浮遊粒子および河床形成粒子として，粒径 0.2mm，比重 2.6 のガラス球を使用した．水理条件を**表-1** に示す．

３．実験結果および考察

表-1 の 3 ケースについて河床波の波長 L の時間変化を**図-2** に示した．図より河床波長 L は水深に依存することが確認された [1]．また河床波の発達過程を**図-2** 中に示す 3 つの時間ステージに分類し以降の考察を行う．河床波サイズは stage1 において著しい変化がみられた．**図-3** に河床波段落ち部分の流下方向および鉛直方向の乱れ強度の時系列分布を示す．ここで $T \equiv t/t_{max}$ であり，t_{max} は河床波が平衡状態に達するまでに要した時間である．u'，v'とも時間経過とともに増加した後，一定値に収束するが，増加が最も顕著にみられたのは stage2 であった．また，乱れ強度の増加には逆流の影響が関与していると予測されるため，発達時間と河床近傍の逆流率 I_r の関係を**図-4** に示す．逆流率は計測時間中の逆流発生時間の割合を表したもので，I_r=0 は全時間順流であることを示す．図より stage2 以降では I_r =0.5 となっており，これは再付着点が存在し，時間平均的

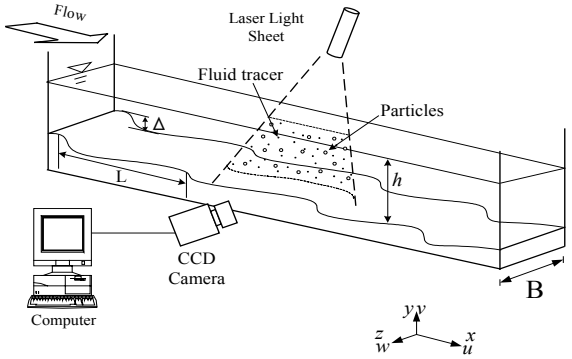

図-1　実験装置図

表-1　水理条件表

case	d (mm)	U_m (cm/s)	B (cm)	h (cm)	Fr	$\overline{C}$ ($\times 10^{-4}$)
MB1	0.2	28.7	5	5	0.41	7.13
MB2		25.7		4		5.48
MB3		22.3		3		3.97

Kazunori NOGUCHI, Masahito HAYASHI, Iehisa NEZU and Michio SANJOU

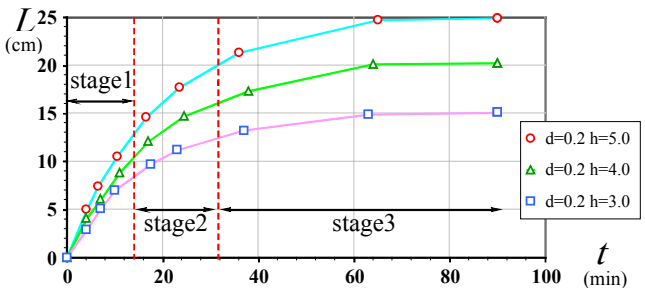

図-2　河床波発達時間と河床波波長

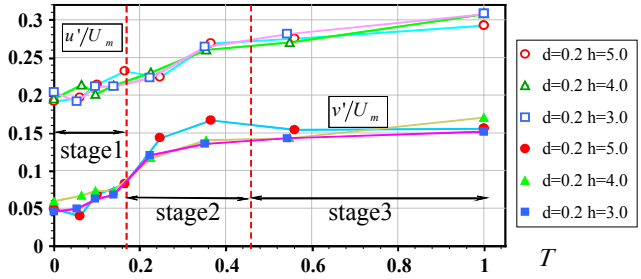

図-3　乱れ強度の時系列分布

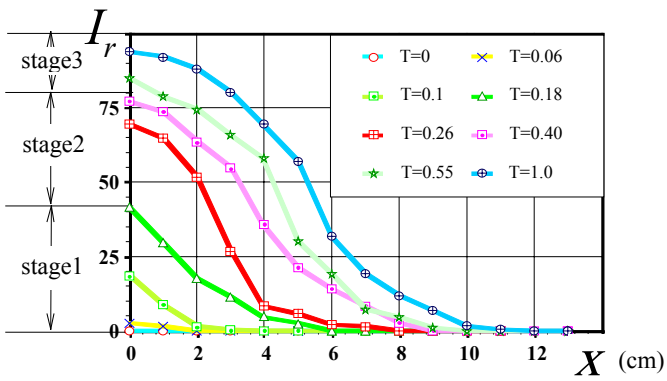

図-4　発達時間と底面近傍(y=0.2cm)の逆流率

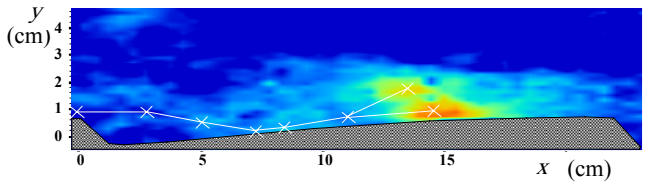

図-5　流体と流体の時空間相関 C_{uu}

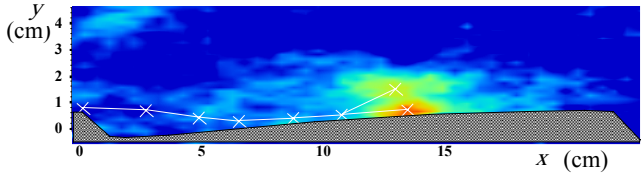

図-6　粒子と流体の時空間相関 C_{ufup}

に逆流域が形成されることがわかる．乱れ強度の発達は stage2 において顕著であった．すなわち，stage1 において河床波サイズが急激に発達し逆流域が徐々に形成され始める．stage2 で逆流域の大きさと乱れ強度が増加し，stage3 において流れ場が完成し，平衡状態となることがわかった．

次に，本研究では再付着点背後で発生するコルク渦に着目し，その組織構造を時空間相関の観点から考察する．**図-5** にケース MB1 の実験における stage3 の時空間相関 C_{uu} を示す．基準点は再付着点背後とした．図より再付着点背後のコルク渦発生領域において，河床波形状に沿う領域とその上部領域で高い相関が確認された．高い相関がみられたこれら 2 つの領域のうち，河床近傍にではより大きな相関を示し，浮上（v>0）の割合が比較的少ないことがわかった．また図中の白線は，河床波頂部を初期相関基準点とし，時間遅れ τ=0.2s ごとに相関のピークを追跡した軌跡であり，組織渦の軌跡をとらえたものと考えられる．河床波頂部から再付着点を経て河床波形状に沿って移流するものと，水面方向に浮上・移流する 2 種類の組織構造の存在が確認できた．また本研究の最重要特徴は粒子と流体を同時計測していることであり，流体データと粒子データの相関をとることが可能であった．そこで，粒子と流体の時空間相関 C_{ufup} を**図-6** に示した．なお全時間，全メッシュ内に粒子データを得るために，時間・空間補完を行った．高相関点は**図-5** とほぼ同様の結果となったが，流体同士の相関でみられた 2 つの高相関領域のうち，粒子と流体の相関については河床近傍でより大きな相関値を示し，上昇流にともなう粒子の浮上の割合が比較的少ないことが示された．

4．おわりに

本研究は，河床波の発達過程における流れ場の発達過程および組織構造の移流について，D-PIV および D-PTV を用いて粒子・流体の相関という観点から考察を行った．

参考文献

1) Yalin, M. S. (1977) : Mechanics of Sediment Transport, Pergamon Press.
2) 禰津家久・野口和則・山上路生 (2006) : 河床波上の浮遊砂流れにおける粒子濃度が液相の乱流構造に及ぼす影響, 応用力学論文集, vol.9, pp.951-958.