

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

1. はじめに

実河川では河床形状と流速分布の複雑な相互作用メカニズムが存在する．このような移動床の固液混相流れの諸特性を解明することは水工学や河川環境上において非常に重要である．しかしながら固体粒子と流体の同時計測は難しく，河床発達にともなう流速構造や粒子・流体の相互作用の時間変化特性については未解明な部分が多い．そこで本研究では粒子投影面積判別手法(D-PTV¹⁾)およびそれを改良した D-PIV を用いて粒子速度と流体速度の同時計測を行い，河床波発達における浮遊粒子と河床波流れの相互作用を検討した．

2. 実験方法と水理条件

図-1 に実験装置図を示す．実験水路は長さ 4m，幅 5cm の透明アクリル製水路である．まず路床に 2cm 厚で粒子を隙間なく敷きつめ，表面を平坦にした後に，実験を開始した．一定流量の通水とともに河床波が発達するが，その発達ステージにおいて PIV 計測を行った．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 下流の地点である．1024×480 ピクセルの CCD カメラを水路側壁に設置し，水路上方から照射したレーザーライトシートで可視化計測した．パルスジェネレータによって 1/30s ごとにトリガーをかけて 200Hz のシャッタースピードで連続 2 枚のフレーム組を記録した．これら 2 枚の連続画像から瞬間流速値を時系列に算出した．本研究では PIV 解析と PTV 解析の 2 手法を用いており，PIV 解析では画像上で粒子を除去し，トレーサーのみの画像データによって流体の瞬間流速の算出を行った．PTV 解析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，粒子の瞬間流速の算出を行った．流体速度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 粒子を用いた．一方で河床形成粒子および浮遊粒子として，粒径 0.2mm，比重 2.6 のガラス球を使用した．表-1 に実験条件を示す．

本実験の前に予備実験を行い，粒子の浮上が確認でき，かつ 2 次元河床波が生成されたケースを使用した．考察箇所として，図-2 に示すように(a)河床波頂部，(b)河床波頂部からの段落ち部分，(c)再付着点の背後領域の 3 箇所を選択した．時間ステージは河床波の発達特性ごとに次の 4 ステージに分類した．すなわち，第 1 段階：流体を流した直後の平坦河床状態，第 2 段階：小さな河床波形状が乱立している河床波形成の初期段階，第 3 段階：最終河床形状のおおよその形ができ徐々にそのサイズが増大する河床波発達段階，第 4 段階：河床サイズの発達が終わり平衡な河床波が完成した完成段階である．最終段階までにかかる時間を t_{max} とし，それぞれの段階にいたるまでの時間を $t_i (i=1\sim 4)$ とおき， t_i を t_{max} で無次元化する ($T_i=t_i/t_{max}$)．

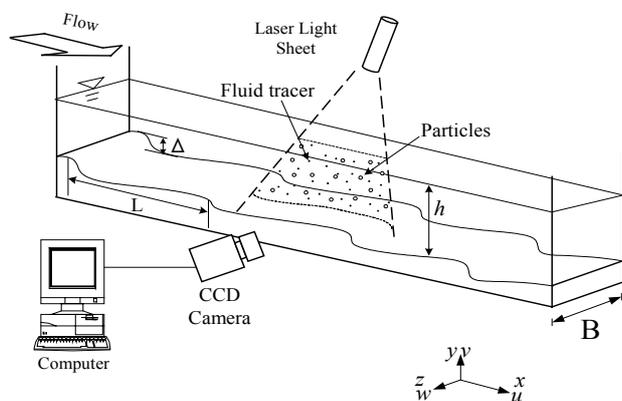


図-1 実験装置図

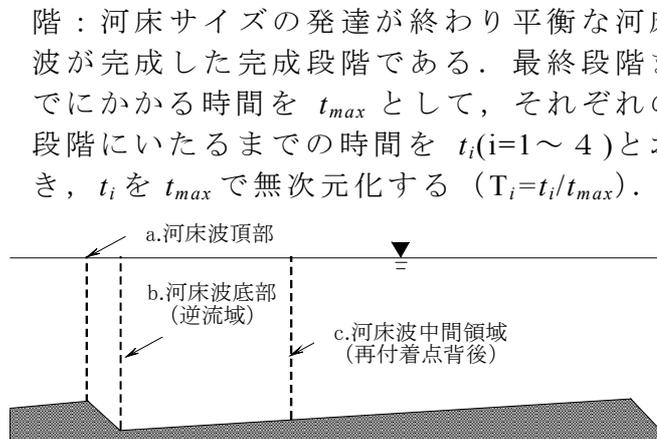


図-2 考察領域

表-1 水理条件表

case	d (mm)	U_m (cm/s)	B (cm)	h (cm)	Fr	\bar{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

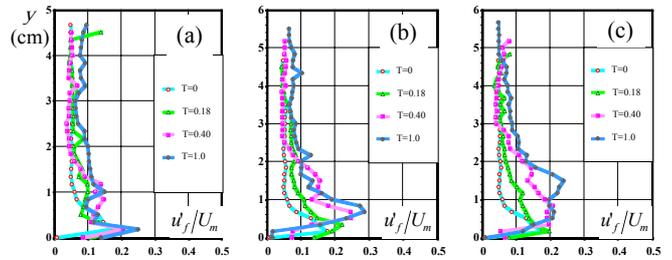


図-4 流下方向乱れ強度分布

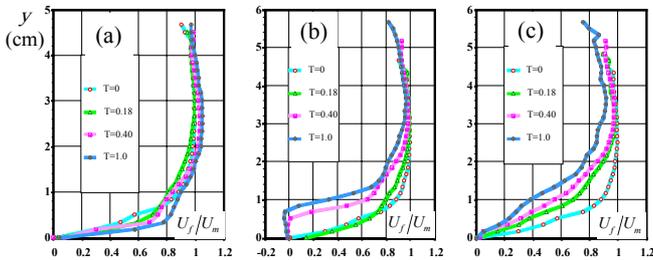


図-3 主流速分布の時間変化

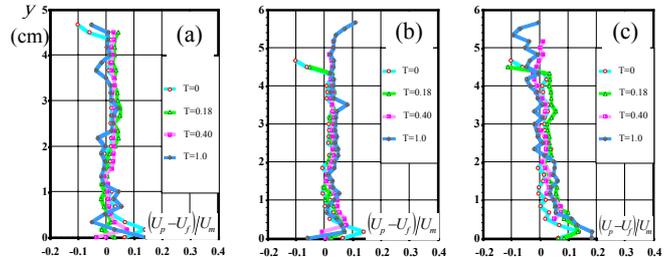


図-5 流下方向相対速度分布

3. 結果と考察

図-3 に 3 つの検査面における流体の時間平均主流速分布 U_f を示す。 U_m は断面平均流速である。 図-3b は内層において時間経過とともに大きな変化がみられる。 これは河床形状の変化とともにトラフ部分で発生する逆流渦が徐々に増大し、逆流域が河床波発達に沿って広がることに対応する。 このことは、図-3c にも同様のことが言える。 一方図-3a においては時間変化による差は小さい。 これは 1 つの河床波クレストを越えるごとに逆流の影響を受けるが、下流の逆スロープ部に到達するまでには、流速分布がほぼ対数則分布に回復していることを意味する。 図-4 に流下方向乱れ強度分布の時間変化を示す。 図-4b の乱れ強度のピーク値は内層に現れ、底面シアーによる u'_f の影響が認められる。 図-4c における内層の乱れ強度分布は、段落ち部分 (図-4b) の乱れ強度分布に比べてピーク形状がゆるやかで、乱れ強度の大きい領域が広く分布している。 これは、再付着点背後からのイジェクション現象(バースト運動)によるものであると考えられ、鉛直方向に乱れが拡散することを意味している。 図-4a の $T=1.0$ における乱れ強度分布は河床近傍でピーク値を持つが、 $y=1.0\text{cm}$ 付近に 2 次ピークを持っていることが確認された。 これは、河床波底部や再付着点領域の図-4b, c においてみられたピークが下流の河床波頂部まで輸送されたものと思われる。 図-5 に粒子速度 U_p と流体速度 U_f の差、すなわち相対速度を示す。 外層では河床波上の全域に渡って U_p と U_f の間に大きな相対速度は生じていない。 一方で流体の運動量が小さい内層、特に河床近傍において相対速度が顕著となり、 $U_p - U_f > 0$ という結果となった。 また、この現象は逆流域 (図-5b) において時間経過とともに顕著になることから、逆流内部の小さな流速において、粒子の追従性が悪いことを示す。 すなわちこの領域に高運動量をもつ粒子が慣性力によって進入し、比較的運動量が小さな流体との間に運動量交換が起こると考えられる。 このことは流体と粒子の相互作用が活発であることを示しており、大変興味深い。

おわりに

本研究は河床波の発達過程において、D-PIV, D-PTV を用いて粒子流体を判別分離し、流体および粒子の速度分布の時間変化や粒子・流体の相互作用について考察を行った。

参考文献

- 1) Nezu, I. and Azuma, R. (2004) : Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, vol.130, pp.988-1001.