

礫河床内部における乱流構造の可視化計測および種子輸送過程の解明

京都大学

学生員

○松本

知将

京都大学

正会員

岡本

隆明

京都大学

正会員

山上

路生

寒地土木研究所

正会員

大石

哲也

1. はじめに

河道内の樹林化は流れの抵抗の増大や洪水時の樹木流出などを引き起こし、豪雨時の氾濫リスクの増大を招くことが指摘されている。樹林化の要因として、洪水時に種子が土砂とともに運搬され、礫河床内部へと輸送されることが挙げられる。このような河床への種子供給・再流出のメカニズムを解明することは、河道の植生動態を予測し、適切な河川管理を行う上で極めて重要である。

開水路流れにおける浮遊粒子の輸送問題は、底面近傍で発達する乱流現象の影響を強く受けることが知られている。その一方で、粗面流れにおける粗度背後の流れ場に対しては PIV のような既存の流速計測手法を用いることが困難であるため、粗度層内部の乱流構造については未解明な点が多い。そこで本研究¹⁾では、礫河床をモデル化した半球状の透明粗度模型を用いて室内水路実験を行い、粗度層内部における乱流構造および種子輸送過程への影響について詳細に計測および考察を行った。

2. 実験方法・水理条件

本研究では鉛直面 PIV 計測を行い、その結果から半球状粗度層の平均流・乱流構造について考察した。図-1 に PIV 計測装置を示す。3.0 W の YAG レーザーを光源として水路上方から厚さ 2.0 mm のレーザーライトシート (LLS) を照射し、水路側方に設置した高速 CCD カメラ (1280×1024 pixel) でデジタル撮影した。撮影領域のサイズは 19 cm×15 cm である。なお、粗度近傍では空間的に非一様な流れ場が発達するため、LLS の照射位置を横断方向に変化させて $z/k = 0$ (粗度谷部)、0.33, 0.67 および 1 (粗度頂部) の 4 断面について計測を行った。

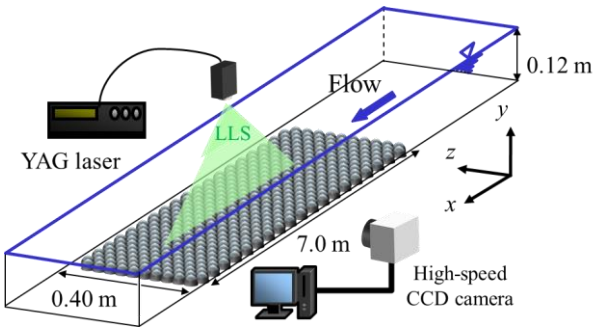


図-1 PIV 流速計測実験装置

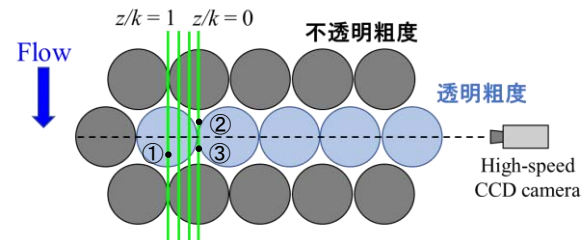


図-2 LLS 照射位置

表-1 水理条件

	U_m [m/s]	H [m]	Fr	Re
Case20	0.20	0.12	0.18	2.4×10^4
Case30	0.30	0.12	0.28	3.6×10^4

本実験では礫床河川を想定し、図-2 に示すように水路床上に半球粗度 (半径 $k = 1.8$ cm) を千鳥格子状に配置した。なお、粗度層内部の流れ場を可視化するために、計測部手前の粗度には透明で水と屈折率が等しい高吸水性ポリマーを用いた。計測地点は乱流が十分に発達している粗度領域の上流端から 3 m 下流の地点とした。さらに、粗度層における種子の挙動を観察するために、ブロッコリースプラウトの種子 (平均粒径 $d = 0.19$ cm, 比重 1.21, 沈降速度 $w_0 = 5.77$ cm/s) を計測部付近に投入してその挙動を観察した。

表-1 に本実験の水理条件を示す。いずれのケースでも水深 $H = 0.12$ m であり、粗度高さ k に対する水深の比である相対水深 H/k は 6.7 である。

キーワード

礫床河川, 乱流構造, 種子輸送, PIV 計測, 透明粗度

連絡先

京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
matsumoto.kazumasa.85s@st.kyoto-u.ac.jp

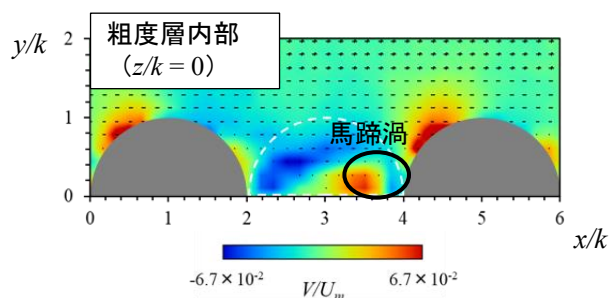


図-3 時間平均鉛直流速 V の鉛直面コンター

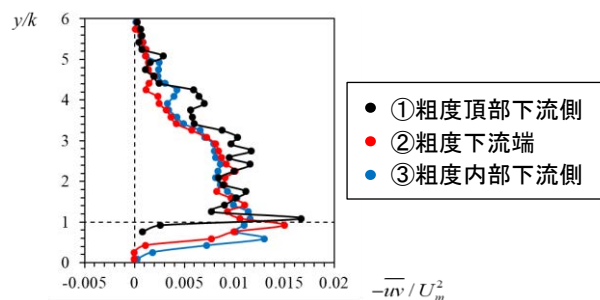


図-4 レイノルズ応力 $-uv$ の鉛直分布

3. 実験結果

低屈折率高吸水性ポリマーを用いた PIV 計測結果から、粗度層近傍および内部における流れ場の構造を明らかにした。図-3 に Case30 の粗度谷部ライン ($z/k=0$) における時間平均鉛直流速 V の鉛直面コンターを示す。粗度高さ付近 ($y/k=1$) では粗度形状に沿って上昇流と下降流が規則的に発達している一方で、粗度層内部 ($y/k \approx 0.5$) では粗度上流側側面付近において下降流が発生している。これは流れが底面へ潜り込む馬蹄渦が発生しているものと考えられ、この礫間における平均的な下降流が粗度層内部への種子の輸送に影響すると予想される。

次に、図-4 に Case30 のレイノルズ応力 $-uv$ の鉛直方向プロット図を示す。この図では図-2 で示した 3 点における鉛直分布を示しており、黒丸印、赤丸印および青丸印はそれぞれ①粗度頂部下流側、②粗度下流端および③粗度内部下流側に対応している。粗度背後（①粗度頂部下流側）の粗度高さ ($y/k=1$) 付近では、流速シアによる乱れが発達している。また、流下方向に移動するにつれてレイノルズ応力のピーク値をとる高さが下方へ移動する様子が確認できる。これらの計測結果から、粗度背後のせん断層およびその下流の礫間において組織乱流が発達しており、この乱流が種子の挙動を決定づけると推測される。

以上の流速計測結果を踏まえ、種子が粗度間から

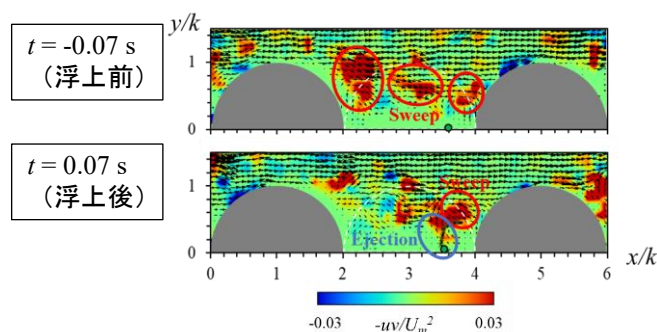


図-5 種子流出時の瞬間レイノルズ応力コンターおよび種子軌跡

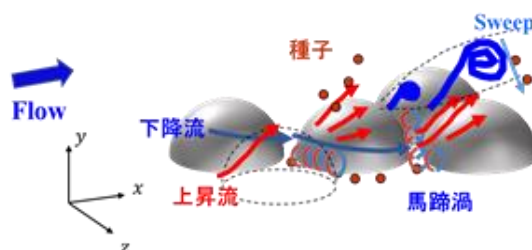


図-6 礫床近傍における種子輸送現象モデル

浮上して流出する際の流れ場に対して改めて PIV 計測を行った。図-5 に種子が移動を開始する直前および直後の瞬間レイノルズ応力 $-uv$ の鉛直面コンター図を示す。ここで、 u および v はそれぞれ流下方向および鉛直方向瞬間流速の時間平均値からの変動値を表す。図-5 より、種子浮上前 ($t = -0.07$ s) に粗度高さ付近で発生した高速の下降流である sweep ($u > 0$, $v < 0$) が種子上方に近付き、その後種子が低速の上昇流である ejection ($u < 0$, $v > 0$) とともに巻き上げられる形で浮上する様子が確認された。したがって、図-6 に示すように、礫床近傍における種子の挙動は平均的な流れ場だけではなく、粗度層で発達する組織乱流の影響を強く受けることが明らかにされた。

4. おわりに

礫河床を模擬した半球粗度流れに対する PIV 計測と種子挙動の観察を通じて、粗度層近傍および内部における種子輸送の現象モデルを明らかにした。今後は粗度流れのより詳細な乱流特性の解明と、その粒子挙動への影響の定量的な評価を行いたい。

参考文献

- 岡本隆明, 松本知将, 大石哲也, 山上路生, 岡崎拓海: 半球粗度まわりの乱流構造が種子捕捉過程に与える影響に関する実験的研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.76(1), pp.118-128, 2020.