

第II部門

礫河床内部の乱流構造と種子輸送メカニズムに関する実験的研究

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

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。この樹林化の直接的な要因の一つとして、洪水時に種子が上流から土砂とともに運搬され、礫河床に供給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挙動は、底面近傍で発達する乱流特性の影響を強く受けることが知られている。その一方で、粗面流れにおける乱流構造と浮遊粒子の挙動の相互作用に関する研究は未だに少ない。特に、粗度層内部の流れ場を計測した例は極めて少なく、その乱流構造については未解明な点が多い。そこで本研究では、礫河床をモデル化した半球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特性および種子挙動への影響について詳細に調べた。

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。計測画像から鉛直面の瞬間流速ベクトル ($\vec{u}, \vec{v}$) を算出した。撮影領域のサイズは 19×15 cm 領域である。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。

本実験では礫床河川を想定し、図-2 に示すように

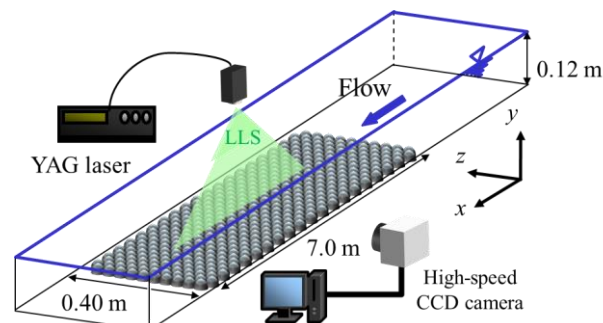


図-1 PIV 流速計測実験装置

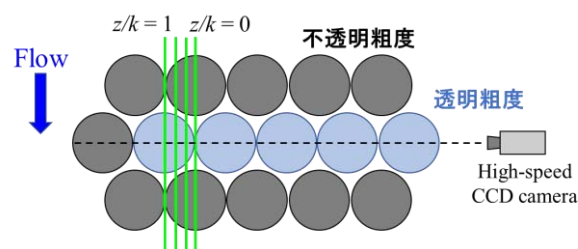


図-2 LLS 照射位置

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

半球粗度 (半径 $k=1.8$ cm) を水路床に千鳥格子状配置で貼り付けて一様粗面とした。なお、粗度層内部の流れ場を可視化するために、計測部手前の一列の粗度に透明で水と屈折率が等しい高吸水性ポリマーを用いた。計測部分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ビデオカメラで撮影し、画像解析ソフト ImageJ を用いてその軌跡を追跡した。

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。

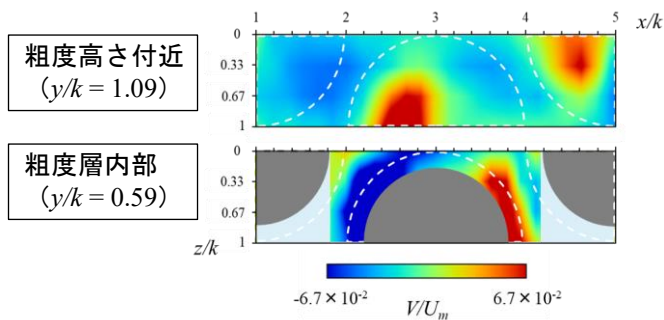
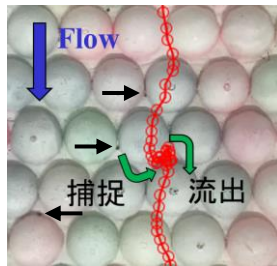
図-3 時間平均鉛直流速 V の水平面コンター

図-4 粗度層近傍における種子の挙動の例

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 の高さ $y/k = 0.59$ および 1.09 における時間平均鉛直流速 V の水平面コンターを示す。粗度高さ付近 ($y/k = 1.09$) 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 ($y/k = 0.59$) では粗度上流側側面を囲むように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。

Case30 で観察された粗度層における種子の軌跡の一例を図-4 に示す。この例では種子が粗度高さ付近を流下した後、粗度上流側に衝突して粗度層内部へ捕捉されている。したがって、種子の捕捉には図-3 で示した粗度上流側における平均的な下降流が強く影響していると考えられる。また、一度捕捉された種子が一定時間経過後に再び下流へ流出する様子が確認された。その一方で、図-4 中に黒矢印で示した種子のように、長時間にわたって粗度内部に留まり続ける種子も観察されたことから、粗度層内部では乱流が種子の挙動を決定づけると推測される。

以上の観察結果を踏まえ、種子が粗度間から浮上して流出する際の流れ場に対して改めて PIV 計測を

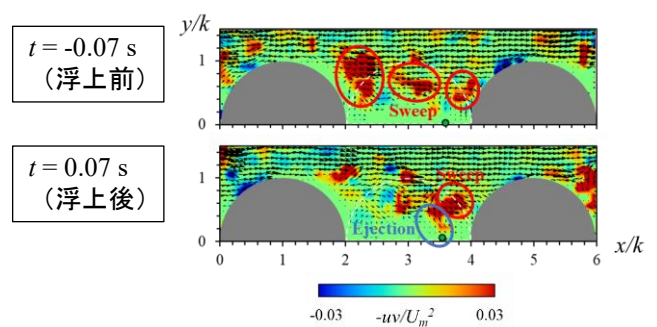


図-5 種子流出時の瞬間レイノルズ応力コンター

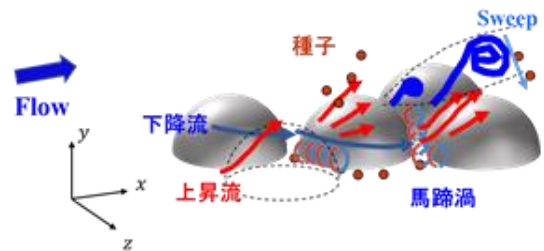


図-6 礫床近傍における種子輸送現象モデル

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 から、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.