

第Ⅱ部門

半球粗度上流れの乱流現象とその粒子挙動への影響に関する実験的研究

京都大学 学生員 ○岡田啓頌
 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

近年河道内に必要以上の植生が繁茂する樹林化の発生が報告されており、抵抗の増加による流化能力の低下や洪水時の樹木流出など、主に治水面上においてリスクを増大させることが指摘されている。この樹林化の要因の一つとして、洪水時に礫河床へ種子が土砂とともに運搬されることが挙げられる。このような輸送現象のメカニズムを解明し、樹林化による植生の分布を予測することは河川管理上極めて重要である。

礫床流れでは粗度の影響により乱流が発達しており、土砂や種子などの粒子挙動は粗度近傍で発達する乱流特性の影響を強く受けると考えられる。しかし、礫床近傍での組織乱流構造が粒子の挙動に与える影響に関する研究は未だ少なく、それらの相互作用が十分に解明されているとは言えない。したがって本研究では、室内実験水路において礫河床をモデル化した半球粗度模型を用いて半球粗度上流れにおける粗度近傍の乱流現象と粒子挙動の関連性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、粗度層内部および近傍の平均流や乱流の構造を詳細に調べた。図-1 に PIV 計測装置図を示す。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。また、PIV 計測と同時に粒子を投入することで粗度

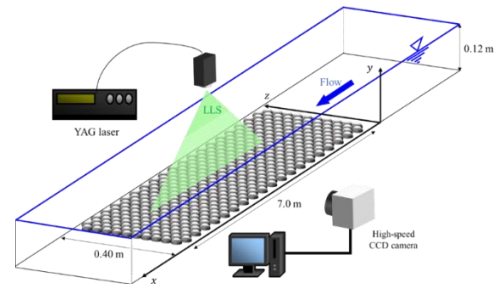


図-1 PIV 計測実験装置図

表-1 粒子の物性値

材質		$d[cm]$	σ [g/cm^3]	V_t [cm/s]
S2	種子	0.19	1.21	5.19
N3	ナイロン	0.30	1.1	8.80
N4		0.40	1.1	10.7

表-2 粒子の物性値

	Q [cm ³ /s]	U_m [cm/s]	H [cm]	Fr	Re [×10 ⁴]
Case08	9.6×10^3	30	8.0	0.34	2.4
Case12	14.4×10^3	30	12.0	0.28	3.6

近傍の乱流構造と粒子の輸送現象との相互作用について考察した。粒子の投入位置は光源から 1 m 上流の地点とした。使用した粒子はブロッコリースプラウトの種子（平均粒径 $d = 0.19 \text{ cm}$ 、密度 $\sigma = 1.03 \text{ g/cm}^3$ 、沈降速度 $V_t = 5.77 \text{ cm/s}$ ）である。なお、本実験では半球粗度（半径 $k = 1.8 \text{ cm}$ ）を水路床に千鳥格子状に配置して一様粗面とし、一部に透明粗度を用いて粗度層内部を可視化している。

さらに、半球粗度上流れにおける粒子の挙動について調べるために、水路に粒子を投入してその挙動をビデオカメラで撮影し、撮影した画像から粒子の軌跡をトラッキング追跡した。この際、粒子の挙動

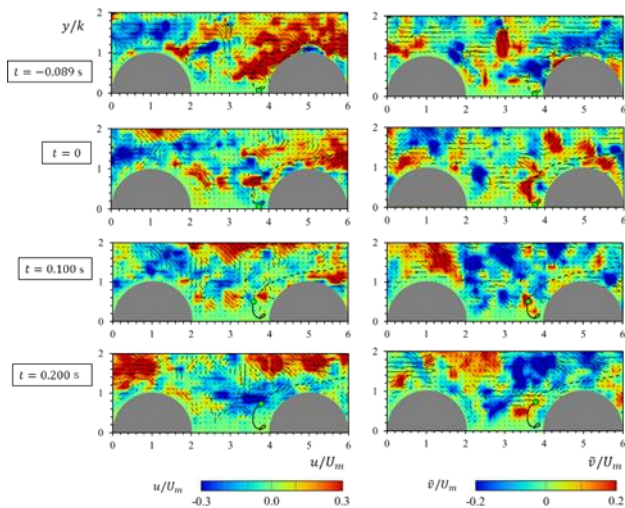


図-2 流出時の瞬間主流速変動 u および
瞬間鉛直流速 v の時間変化

特性を示す統計量として、1回の運動における粒子の移動距離である $\text{Step len}/t_h$ および河床内で停止してから再流出するまでの時間である $\text{Waitin}/\text{time}$ を測定した。使用した粒子の物性値を表-1に示す。また、表-2に本実験の水理条件を示す。

3. 実験結果

図-2にPIV計測によって得られたCase12における瞬間主流速変動 u および瞬間鉛直流速 v の時間変化およびその際の粒子挙動を示す。ここで図中の黒破線はその後の粒子の軌跡を表している。粒子の浮上開始時刻を $t = 0$ としている。この例では、sweepが粗度に衝突することで生じた瞬間的な上昇流に乗って粒子が浮上し、その後ejectionに乗ることで最終的に粗度層外部に輸送される様子が見られた。

図-3にCase12における瞬間レイノルズ応力 $-uv$ の時間変化およびその際の粒子挙動を示す。 $t = 0$ において粒子はejectionに乗り、粗度層外部へ流出・流下している。 $t = 0.13\text{ s}$ では粒子がejectionから離脱して下降し、最終的に粗度層へ捕捉された。

粒子投入実験では $\text{Step len}/t_h$ の大きく異なる粒子挙動パターン2つが観察された。これは浮上時にejectionに乗った粒子は $\text{Step len}/t_h$ が大きく、乗らなかった粒子は $\text{Step len}/t_h$ が小さくなることに对应すると考えられる。また、沈降速度が大きい粒子ほど $\text{Step len}/t_h$ が減少し、 $\text{Waitin}/\text{time}$ が増加する傾向が見られた。これは、沈降速度が大きい粒子ほど上昇流

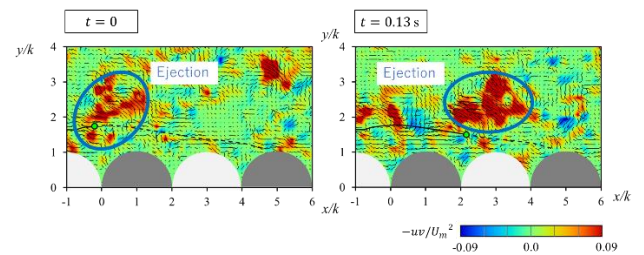


図-3 ejectionからの離脱による粗度層への捕捉

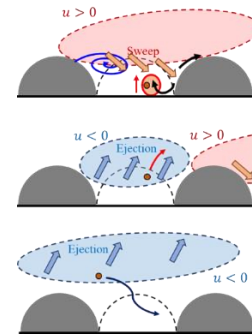


図-4 粒子の輸送現象モデル

塊から離脱しやすく、より活発な上昇流が粗度層からの流出に必要となるためと推測される。

したがって半球粗度上流れにおける乱流現象は粒子の流下距離や流出・捕捉確率においても多大な影響を及ぼしていると考えられる。

以上の結果から、粒子の輸送現象モデルを図-4に示す。sweepが粗度に衝突して生じる瞬間的な上昇流により粒子が浮上し、粗度高さ付近のejectionにより粗度層外部へ輸送される。逆にejectionが存在しなかった場合、粒子は粗度層に留まる。粒子が流出した後、ejectionから離脱することで、再び上昇流塊に捕捉されない限り粒子は沈降し続ける。

4. おわりに

礫河床をモデル化した半球粗度上流れにおいてPIV計測と粒子挙動の観察を行うことで、粗度近傍および内部における乱流現象による粒子の輸送現象モデルを明らかにした。今後は水平面の乱流と粒子挙動についての解明が課題として考えられる。

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.