

RIM-PIV 法を用いた礫河床内部の乱流場・浮遊砂輸送過程の可視化計測 Visualization of a Turbulent Flow Field and Suspended Load Transport within a Gravel Bed Using RIM-PIV

○松本知将・岡本隆明・山上路生

○Kazumasa MATSUMOTO・Taka-aki OKAMOTO・Michio SANJOU

Riverbed armoring and expansion of riverine vegetation are crucial problems in terms of flood risk and aquatic environment. Therefore, it is important to understand the sediment transport processes within and over a gravel bed. This study investigates the fundamental mechanisms of mass and momentum transport within a rough bed consisting of hemispherical roughness elements by flow velocity measurements in a laboratory flume. We applied the refractive-index matching (RIM) method to PIV and successfully visualized the detailed turbulent flow structure between roughness elements. The results of RIM-PIV suggest that high-speed flows that pass over the rough bed cause strong upward flows and fine sediment entrainment within roughness elements (107 words).

1. はじめに

近年、治水対策による洪水発生頻度や土砂供給量の減少に伴い、河床の粗粒化や河道の樹林化等の治水・環境上の課題が発生している。このような河道の環境変化を予測し、適切な対策を講じるためには、礫河床における土砂や植物の種子といった浮遊粒子の輸送メカニズムを解明することが重要である。一方で、物質輸送過程を支配する礫河床内部の詳細な流れ場の構造は水路実験でも計測が難しく、未解明点が多く残されている。

本研究では RIM (Refractive-Index Matching, 屈折率整合) 法¹⁾と呼ばれる可視化手法を PIV 流速計測に応用し、礫河床を模擬した半球粗度要素からなる粗面内部の乱流構造の解明を試みる。また、浮遊粒子を粗面上に投入してその挙動を観察することで、粗面近傍で発達する乱流構造と粒子の輸送メカニズムの関連について考察する。

2. 実験手法・水理条件

本研究では長さ 10 m、幅 0.40 m の可変勾配水路を使用した。礫河床を模擬するために、水路底面の 6 m 区間に半球状粗度要素(半径 $k = 1.8$ cm)を千鳥格子状に配置した。水理条件は断面平均流速 $U_m = 25$ cm/s・水深 $H = 12$ cm の等流条件とした。粗度領域上流端から 4 m 下流を対象に、流速計測として鉛直面 PIV 計測を実施した。水路中央ライン ($z = 0$) にレーザーライトシートを照射し、流下方向 (x 方向)・鉛直方向 (y 方向) の 2 成分瞬間流速場 (\vec{u}, \vec{v}) を 60 s 間にわたって計測した。

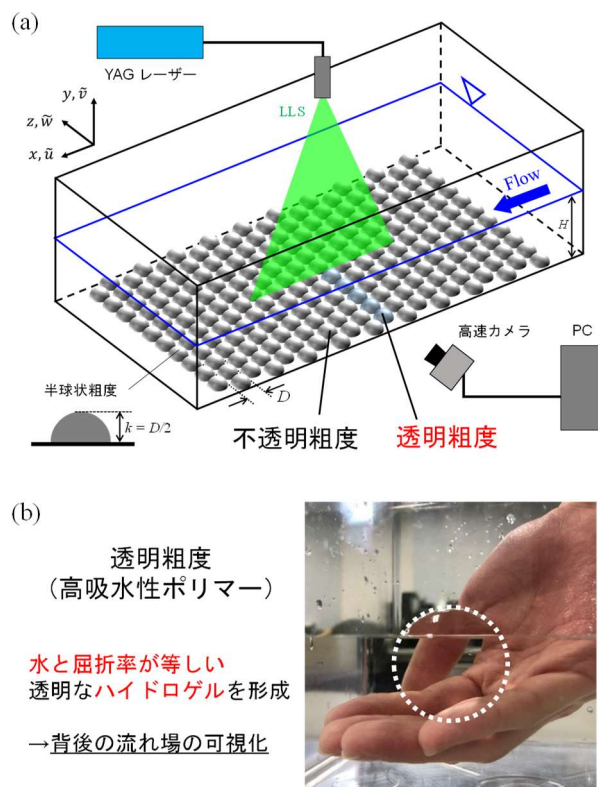


図-1 実験概要 ((a)PIV 計測システム・(b)透明粗度)

従来の PIV で計測が困難な障害物背後の流れ場を可視化するために、障害物と流体に屈折率が等しい物質 (例えば、ガラスと NaI 水溶液) を使用する RIM 法が提案されている。本研究では水と屈折率が等しい高吸水性ポリマー (SAP) のハイドロゲル¹⁾を計測部周辺の半球粗度要素として使用することで、粗度層 (礫河床) 内部における乱流構造の可視化計測を試みた^{2), 3)}。

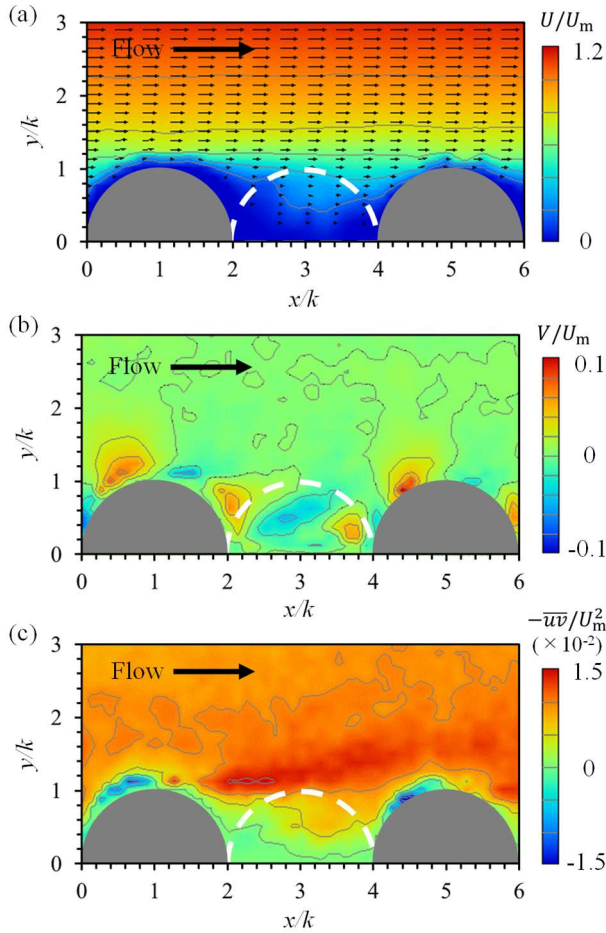


図-2 粗度層内部の流れ場の可視化結果 ((a)主流速 U ・(b)鉛直流速 V ・(c)レイノルズ応力 $-\overline{uv}$)

3. 実験結果・考察

図-2 に粗度層近傍における(a)時間平均主流速 U 、(b)時間平均鉛直流速 V および(c)レイノルズ応力 $-\overline{uv}$ の鉛直面コンター図を示す。ここで、図中の白破線は計測断面($z = 0$)とカメラの間に位置する透明粗度の輪郭を表しており、RIM法によって可視化に成功した領域である。粗度要素間の谷部では上昇流と下降流の対が2組形成されており($2 < x/k < 3$ および $3 < x/k < 4$)、流れが粗度表面に衝突して底面に潜り込むことによる馬蹄渦の発生を示しているものと考えられる。また、粗度頂部背後のせん断領域($2 < x/k < 3$, $y/k \approx 1$)では $-\overline{uv}$ が極めて大きくなっており、またその下流($3 < x/k < 4$)ではレイノルズ応力が大きい領域(混合層)が底面近傍まで達している。このように、粗面近傍では平均流・乱流構造が個々の粗度要素の形状に沿って局所的に変化する。

浮遊粒子(直径2 mm・比重1.2の小球)を投入してその挙動観察したところ、粗度要素間に捕捉

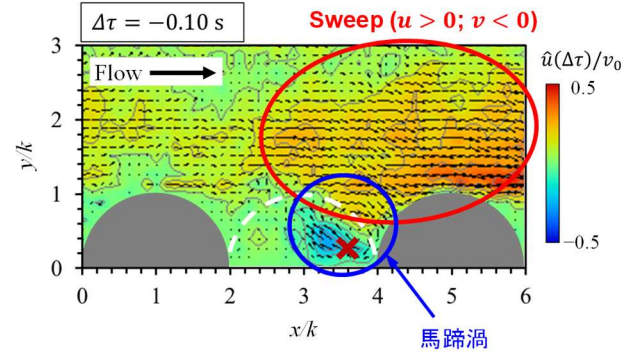


図-3 上昇流発生直前($\Delta\tau = -0.10$ s)の条件付き流速場

された粒子が間欠的に再流出する様子が確認された。そこで、線形統計的推定(LSE)により、底面近傍で上昇流が発生する際の典型的な瞬間流速場を統計的に推定した。図-3にLSEを用いて推定された上昇流発生の直前における条件付き瞬間流速分布を示す。時間平均流速分布(図-2(b))において確認された粗度要素上流における馬蹄渦が、条件付き流速場でも確認できる。同時に、下流側の粗度要素付近でSweep($u > 0$, $v < 0$)が流下しており、高速流塊の粗度要素への衝突により、馬蹄渦が強められているものと考えられる。したがって、粗度層上部で発達する乱流の組織構造が粗度層内部における瞬間的な上昇流および底層粒子の間欠的な浮上の要因となることが示唆される。

4. まとめ

RIM-PIVによる流速計測により、礫河床を模擬した粗度層内部の詳細な乱流構造の可視化計測に成功した。本手法を幅広い水理条件や粗度配置・形状(半球・全球等)の流速計測に応用することで、礫河床における浮遊砂輸送メカニズムの解明と定量的な評価につながることを期待される。

参考文献

- 1) Weitzman, J. S., Samuel, L. C., Craig, A. E., Zeller, R. B., Monismith, S. G., and Koseff, J. R.: On the use of refractive-index-matched hydrogel for fluid velocity measurement within and around geometrically complex solid obstructions, *Exp Fluids*, 55:1862, 2014.
- 2) 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), 118–128, 2020.
- 3) Matsumoto, K., Okamoto, T., and Sanjou, M.: Particle entrainment by bursting phenomena in open-channel flow over rough bed, *Environ. Fluid Mech.*, 24, 287–314, 2024