

平坦床上の浮遊砂-水の混層乱流解析

Analysis on two-phase turbulent flow between sediment and water plane bed

北海道大学大学院工学研究科 学生員 ○橋本 尚棋 (Naoki Hashimoto)
 北海道大学大学院工学研究科 正員 渡邊 靖憲 (Yasunori Watanabe)
 北海道大学大学院工学研究科 正員 清水 康行 (Yasuyuki Shimizu)
 北海道大学大学院工学研究科 正員 木村 一郎 (Ichirou Kimura)

1. はじめに

河床を構成する砂粒子は流れの影響を受けて輸送・拡散し、転動・滑動・跳動など様々な形態を持つ大変複雑な運動をする。流砂の動きによって、河床形態は決定され、その形態により流水に対する抵抗が変化し水深などに影響を与える。そのため河床変動の予測は防災上重要となる。そのため、河床波の形成過程の予測のためには正確な流砂モデルの構築が不可欠となる。中川・辻本砂粒子の河床からの離脱率(pickup rate)と移動距離(step length)によって流砂を表現した Einstein 型の確立モデルを基に非平衡流砂量式を提案している。また、Giri・清水らは、木村らの非線形 $k-\varepsilon$ モデルを用いた数値計算によって Dune の形成から平坦床への遷移、及び再形成といった非定常現象の再現にも成功している。しかし、このモデルにおいて砂粒子の運動スケールである step length はおらず、経験的に粒径の数十～数百倍という値が与えられるが、理論的根拠に欠けるため合理的な評価が必要となる。秩父ら²⁾は後述する SR 法¹⁾を実験画像に適用することにより、粒子運動の特性量を求め、それらをインプットした砂粒子の確率モデルを用いた数値計算によって砂粒子の放出位置から着床までの水平移動距離の確率密度分布を算定している。

本研究では、砂粒子の運動（ピックアップ、流送、着床）の過程を把握するために、ある高さに巻き上げられた粒子がどのような過程を経て着床するかに着目した。そこで、平坦床上において水面近傍から放出される砂粒子を SRPIV 法を用いて解析し、砂粒子の軌道が河床近傍で定性的に変化するという興味深い特性が得られた。

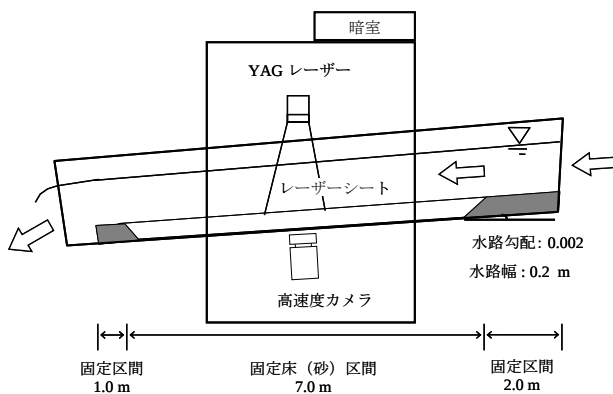


図1 実験構成

2. 実験方法

全長 10m, 幅 0.2m, 壁面高さ 0.3m, 勾配 0.002 をもつアクリル製水路で実験を行った(図1参照)。

水路は上流端から 2m, 下流端から 1m を固定端とし、その間の 7m の区間に高さ 50mm のサンドピットを設置し、平均粒径 0.34mm の東北 6 号珪砂(比重 2.61)を敷き詰め平坦な状態でセメントを河床全体に塗布し固定床とした。

流量 5.50l/sec を与え、水面より放出される砂粒子を撮影した。この時、水深は 5.0cm であった。砂粒子の放出は初速度を与えないように水面近傍で固定して行い(図2参照)、砂粒子の着水から着床までを計測領域がカバーできるように、撮影位置を 9 箇所設け撮影を行った。撮影は高速度カメラ(解像度: 1280×1024 画素, フレームレート: 500fps)を用いた。撮影される FOV を含む流下方向に鉛直縦断面に対して YAG レーザーシート(励起波長 532nm)を水面上方より照射した(図2参照)なお、レーザー照射面ではアクリル板で水面を覆い、水面の揺らぎによるレーザーシート面の変位を防いでいる。水の流れに対するトレーサーとして比重 1.0 となるよう調整した中立粒子を用いた。

3. 解析方法

撮影画像から相関法 PIV により瞬時速度を算定した。検査領域は 0.5cm(=30pixel)四方に設定し、粒子スケールに至るまで計測流速解像度を向上させることを可能とする SRPIV を導入し、固液両相のラグランジュ的粒子運動を計測する。局所定常性の仮定し計測期間を 6 秒間とした。

3.1.PIV 過程

標準的な相互相関法 PIV によって領域内のパターンマッチングベースの平均速度分布を計算する。本研究では、相関係

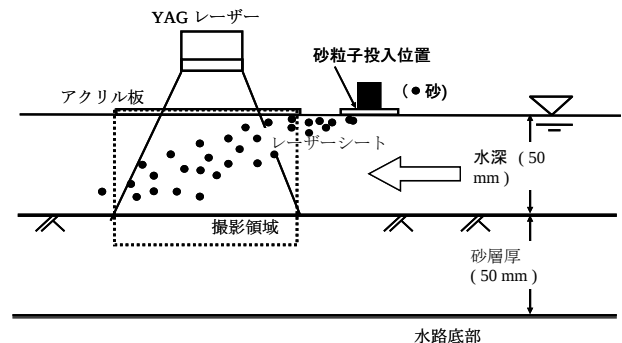


図2 計測領域

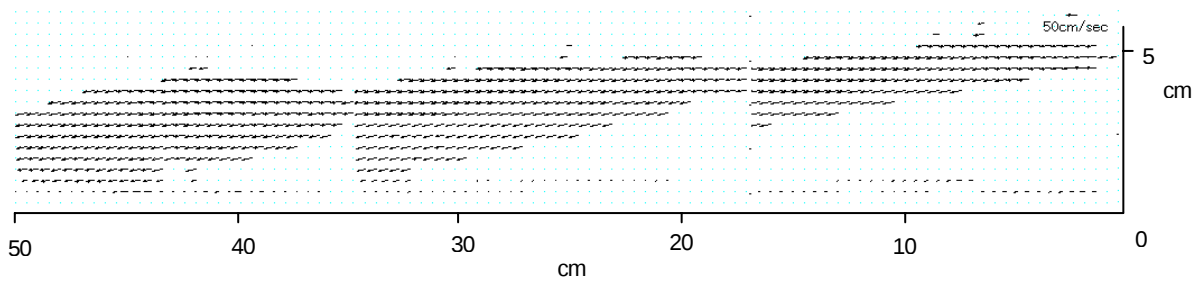


図 3_1 砂粒子の速度ベクトル(撮影領域 1-3)

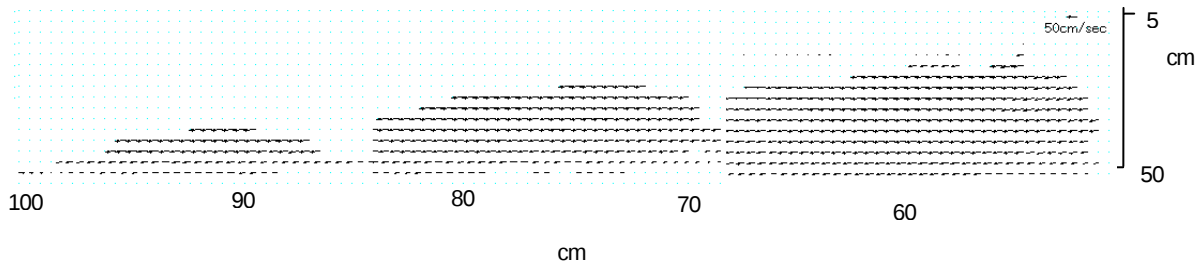


図 3_2 砂粒子の速度ベクトル(撮影領域 4-6)

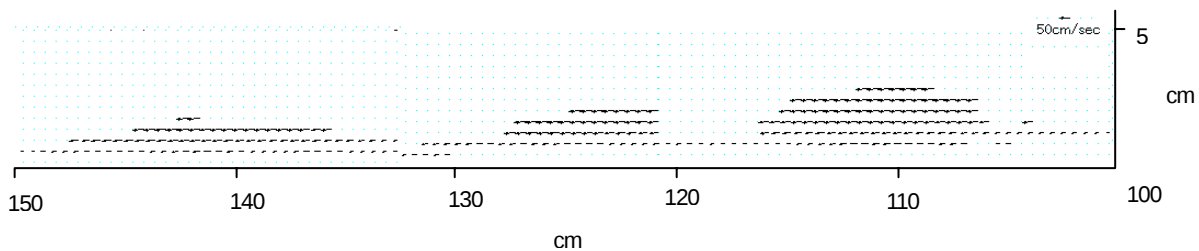


図 3_3 砂粒子の速度ベクトル(撮影領域 7-9)

数 0.7 以上の結果のみを採用し、これ以下の相関係数をもつ信頼性の低い検査領域では逆数補間法により周囲の流速から補間する。

3.2. 粒子抽出

マスク相関法により粒子を画像上の個々の粒子を抽出する。

3.3. SRPIV

マスク相関法によって抽出された粒子の座標に対して、個々の粒子は相関法 PIV で得られた平均流速に近い流速で移流されると仮定し、次時刻のフレームで移動後の粒子が存在する推定領域を定める。同一粒子の粒子軌道は、3 時刻最小加速度原理に基づいて決定される。

4. 結果とその考察

SR 法により個々の砂粒子の速度をグリッドへ補完し、精度を高めた結果を図 3 に示す。水面付近の速度は水平方向が卓越しているのに対し河床底面に近づくに連れて鉛直方向要素が大きくなっていることが見て取れる。図 4 にトレーサ粒子の速度ベクトルを示す。同様に河床近傍の速度の速度ベクトルに鉛直下向きの要素があることから底面付近の流れは砂粒子の影響を受けていることが表れている。砂粒子に働く抗力は流速との相対速度の二乗に比例する。図 5 に砂粒子とトレーサ粒子の相対速度を示す。図 3, 4 の結果で示されたように水面近傍と底面では砂の速度に違いがはっきりと表れているの

が見て取れる。

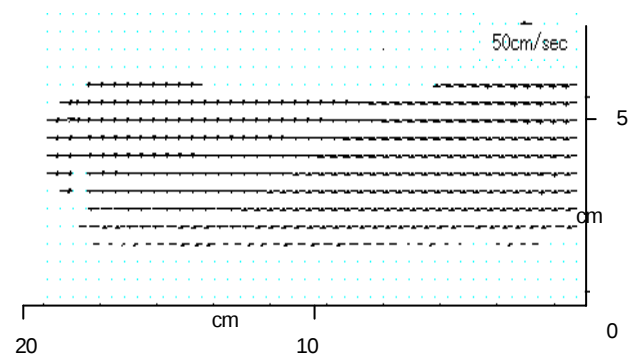


図 4 流れの速度ベクトル

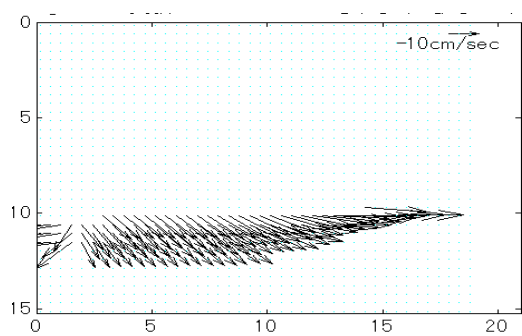


図 5 (1) 粒子投入地点の相対速度 (砂-水)

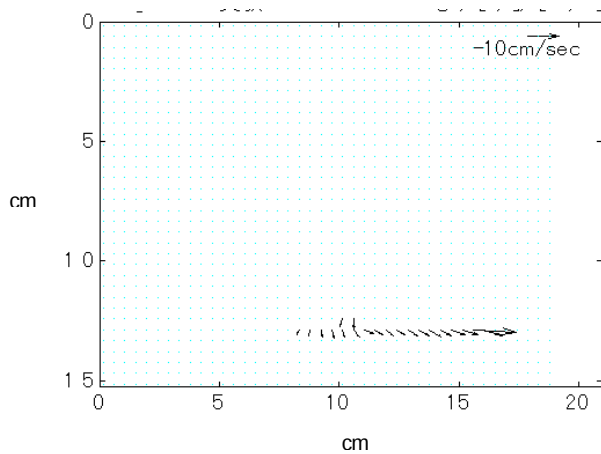


図5(2) 粒子着床付近の相対速度(砂水)

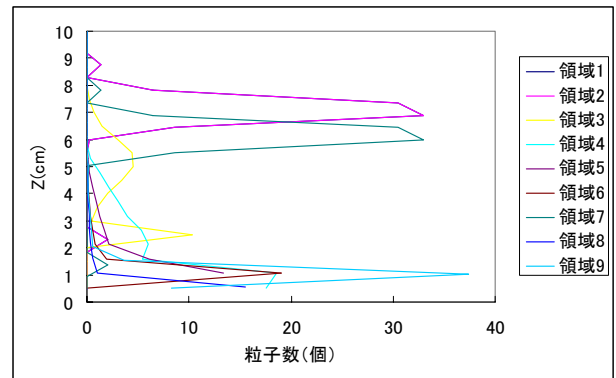


図6 撮影領域別鉛直方向粒子数密度

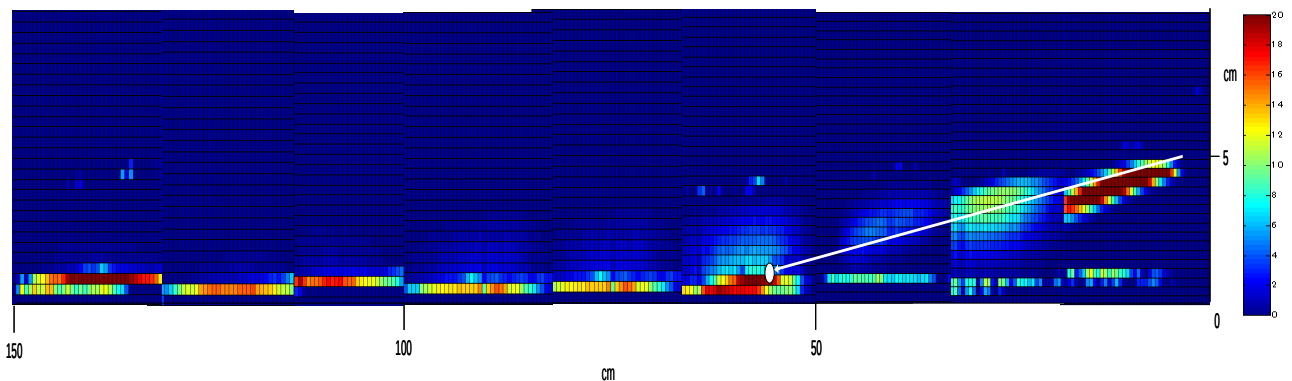


図7 粒子濃度分布図

図7に全撮影領域の砂粒子の平均粒子数分布を示す。この図から砂粒子の軌道が読み取れる。白い矢印は砂放出地点の砂の水平速度を与えた砂粒子が等速直線したと仮定した場合の着床までの軌道を描いたものである。粒子数分布の濃いところを砂粒子が通ったと仮定すると、実際の砂粒子が等速直線運動する粒子よりも着床するまでの距離が長いことが分かる。河床底面付近の相対速度ベクトルからこの現象が起きた要因は乱流境界層から受ける影響であると考察できる。

5. 結論

SRPIVを用いた解析により今まで困難であった砂粒子の挙動と乱流構造の関係について解析可能であることが判明した。今後は計測ケースを増やし粒子の一連の運動をSR法により追跡し秩父らの行ったシミュレーションと比較する必要があると考えられる。

6. 参考文献

- 1) Adrian R.J.: Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics, Annu. Rev. Fluid Mech., Vol.23, pp.261-304,1991.
- 2) 秩父宏太郎・渡部靖憲・清水康行：浮遊砂がデューン上の乱流に与える力学的影響,水工学論文集,第52巻,pp.583-587, 2008.