

砂漣上の流れの乱流構造と浮遊砂の移動に関する実験的検討

早稲田大学大学院	学生員	○ 帆足拓海
早稲田大学大学院	学生員	鷲津明季
早稲田大学大学院 (当時)	学生員	中間遼太
早稲田大学理工学術院	正会員	関根正人

1. 序論

流量が小さく、掃流力が限界掃流力を少しだけ上回る条件下での土砂移動によって砂漣が形成される。砂漣にはクレスト前方に発生する組織渦や粒子の再付着点の存在が確認されており、その乱流構造はたびたび議論されてきた。しかし、多量に通過する粒子の撮影は過去の研究では撮影技術上困難であり、通過する粒子の軌跡およびこれと乱流構造との関連を検討した例は少ない。関根・吉川(1987)は砂漣を越える流れの乱流構造や組織渦が浮遊土砂の輸送に及ぼす影響を評価する試みを行った。この研究によって砂漣特有の乱流構造の存在は明らかになったが、固定床の条件下で行った実験であり、河床上を掃流砂が移動する条件下での乱流構造の評価には至っていない。

本実験では移動床の条件下にて砂漣の移動の様子をハイスピードカメラを用いて撮影することにより、粒子の追跡やPIV解析による乱流構造の評価を可能とした。PIV解析による乱流構造の解析結果と粒子追跡を合わせて検討することで、組織渦と粒子運動の関連を明らかにすることが目的である。

2. 実験概要

本実験では長さ6m、幅0.2m、勾配1/150の亚克力製の循環型水路を使用した。河床の上流側2mと下流側1mは底面がゴム板で覆われた固定床区間、中央部3mは移動床区間である。移動床区間の水路床は固定床区間より5cm低くなっており、この凹部に河床材料を充填して模擬河床とした。模擬河床材料として粒径2mm、比重1.04、沈降速度0.022m/sのポリスチレン粒子を使用した。河床作成の際には、河床に気泡が混入するのを防ぐため充填する前に湛水を行い、予め水と十分混合させた河床材料を流し込んで設置した。流量は2L/sに設定し、下流端に堰を設置して水路内の水深を大きくとることによって限界掃流力を上回る程度の掃流力となるよう設定した。

実験時の撮影にはビデオカメラとカトウ光研製ハイスピードカメラを用いた。移動床区間中央部の左岸より5cmの位置に水路を縦断するように水面上方よりレーザーシートを照射してハイスピードカメラの撮影区間とした。水路上流側の固定床区間からトレーサー粒子として三菱ケミカル製ダイイオンHP20SSを投入し、レーザーシートを通過する粒子を撮影した。ハイスピードカメラでは300fpsで約15秒間撮影を行った。PIV解析と粒子追跡には、河床波の移動の影響を小さくするため、3～4秒の映像をひとつの単位として解析を行った。PIV解析にはカトウ光研製2次元流体計測ソフトウェアFlow Expert 2D2Cを用いた。これにより、撮影区間における流速分布・乱れ強度・レイノルズ応力を解析して求めることができる。粒子追跡はクレスト後の組織渦の様子や再付着点付近での粒子の動きに着目した。また、ビデオカメラでは広域での撮影が可能であり、撮影結果から砂漣の形状や移動速度を求めた。

3. 結果と考察

通水開始直後、移動床上流部の河床が大きく浸食され、大量の粒子が流下する。その後、粒子移動の不均一性から河床波が生成される。生成され移動する砂漣のうち、本論文では通水開始後26分時点で撮影区間を通過した砂漣を解析の対象とした。ビデオカメラ動画により対象となる砂漣の移動速度は1.06mm/sであることがわかった。

図-1に平均流速・レイノルズ応力・乱れ強度のコンター図を示す。同図(a)では平均流速の鉛直方向成分を表しており、クレスト前方の流速に注目すると上流側より下降流、上昇流、下降流、上昇流と続くことがわかる。クレスト底端を $x=0(\text{mm})$ とすると、再付着点は水平方向 $x=35(\text{mm})$ の位置に相当する。流速ベクトルから組織渦の存在を確認できる。クレスト直下流で発生する下降流は流下方向に従うのに対して、再付着点付近までの流れは逆

キーワード：砂漣，再付着点，粒子追跡，組織渦，PIV解析

連絡先：〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1, TEL 03-5286-3401

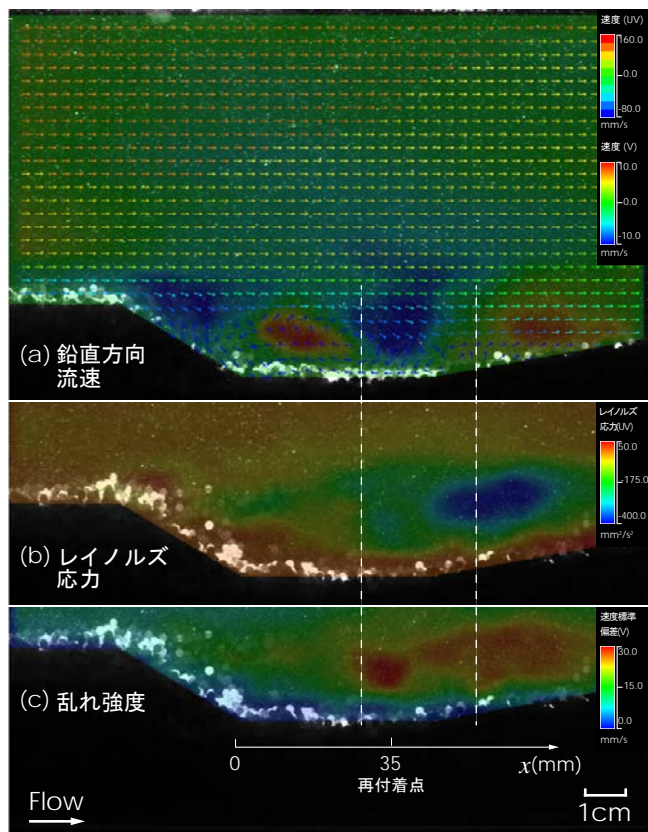


図-1 流速分布と乱流構造のカウンター図

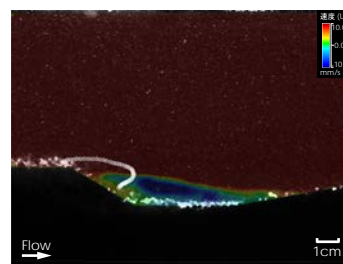


図-2 逆流の影響を受ける粒子の追跡

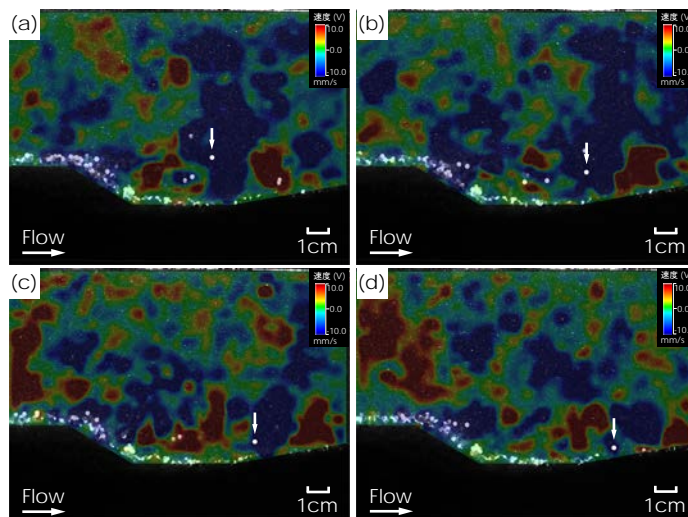


図-3 再付着点に下降する粒子の追跡

向きになっている。再付着点を過ぎた上昇流は再び流下方向に従う。

図-1(b), (c)にて示されるレイノルズ応力・乱れ強度には同様の傾向が見られ、クレスト前方より乱れが増加し、再付着点と下流側の上昇流の境界部にピークが現れることがわかる。しかしながら、流速ベクトルから渦の存在が確認できることから、乱れ強度やレイノルズ応力がクレスト直後から大きな値になることも十分予想される。本実験結果のようにクレスト前方が軽微な乱れとなった背景には、流砂の存在によって流れに抵抗が生じて渦のエネルギーを減衰させている可能性が指摘できる。関根・吉川(1987)の行った実験では固定床における砂漣上の流れが対象であり、本研究での結果とは異なり、クレスト直後から乱れ強度とレイノルズ応力は大きく変動していた。今後は、流砂の与える影響を検証すべく本実験とは異なる掃流力条件下での実験を行ってきたい。

図-2, 3が粒子追跡の結果である。図-2では水平方向の平均流速カウンターと粒子移動の軌跡をあわせて示す。クレスト上部を過ぎた粒子はまず流下方向に沿って移動する。その後、図の緑・青色の領域に達すると逆流の影響を受けて進行方向を変え、剥離域に達する。この粒子と同じ動きをする粒子はほかにも多く確認されており、砂漣の移動プロセスの一端が見える。図-3では再付着点に向けて下降する粒子を対象に行った追跡結果である。鉛直方向の流速カウンターと合わせて約0.17秒ごとにプロットした連続画像として示している。粒子が下降流の影響を受けて再付着点近くに堆積していく様子がわかる。このほかにも、再付着点周辺の組織渦の影響で河床面近くを水平移動する粒子も見られ、再付着点での組織渦による乱れの影響が大きいことがわかる。

4. 結論

本論文では砂漣に起因する乱流構造と乱れの影響を受ける粒子運動の解析を目的として行った実験結果を示した。その結果、再付着点における強い乱れ、クレスト前方の弱い乱れが確認され、それぞれの位置で粒子追跡を行うことで乱れが粒子の移動に及ぼす影響を評価できた。

謝辞：

本研究の遂行に当たり科学研究費基盤研究 B (No.20H02262) の補助を受けた。記して謝意を表します。

参考文献：

1) 関根正人・吉川秀夫：砂漣上の浮遊砂に関する実験的研究，土木学会論文集 B，第 387 号，II- 8, 95-103, 1987.11