

同粒径で比重の異なる二粒子からなる河床の動的平衡状態における鉛直構造

早稲田大学大学院	学生員	○ 稗田明哲
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	鷺津明季
早稲田大学理工学術院	正会員	関根正人

1. 序論

流砂現象は基準点高さを境界として浮遊砂を移流拡散方程式、掃流砂を運動方程式に基づいて検討されてきた。しかし、流砂はすべて河床を起源としていることからその移動速度分布や濃度分布は河床から連続的な分布となるはずである。そのため、当研究室では浮遊砂と掃流砂の区別を排した統一的な流砂理論を構築することを目指している。その一環として粒径差に起因する遮蔽効果が生じないようにしつつ、浮遊砂と掃流砂が同時に存在する状況を作り出すため、同粒径で比重の異なる二粒子からなる河床の動的平衡状態について調べた。

河床変動予測計算には土砂の収支を把握することが必要であり、河床の交換層厚さが重要となる。交換層の厚さについては礫河川において 90% 粒径のおよそ 1~3 倍となるとされており、当研究室においても三つの粒径集団からなる河床における移動粒子の交換層厚さが、その粒径の 1~3 倍となることを確認している¹⁾。本研究では先に述べた条件の下、明らかな分級現象が見られたため、鉛直構造ならびに交換層厚さについて考察する。

2. 実験概要

実験水路には全長 6.0m、幅 0.2m、水路勾配 1/150 のアクリル製循環型開水路を用いた。水路の上流側 2.0m および下流側 1.0m は固定床区間、中央 3.0m は移動床区間となっている。移動床区間は深さ 50mm の凹部となっており、河床材料を充填して模擬河床とした。模擬河床材料にはいずれも粒径が 2mm であり、比重 1.04 で緑色のポリスチレン粒子と比重 2.5 で赤色のガラス粒子を使用した。初期河床はポリスチレン粒子とガラス粒子を体積比 2:1 で混合したものを CASE A1 と CASE A2、体積比 3:1 で混合したものを CASE B とする。また、給砂粒子には CASE A1 では蛍光ポリスチレン粒子と蛍光ガラス粒子を、CASE A2 および CASE B では初期河床と同じポリスチレン粒子およびガラス粒子を用いた。また、下流端で回収した粒子を乾燥させた後、質量を測定した。これにより、給砂量と粒子の流出量が等しい動的平衡状態であることを確認した。流量は 3L/s で一定であり、通水中は水路に平行な面に照射したレーザーシート（カトウ光研製）を撮影範囲としてハイスピードカメラ（カトウ光研製）により撮影を行って PIV 解析を行った。トレーサー粒子には比重 1.01 のダイヤイオン HP20SS（三菱ケミカル製）を使用し、解析には FlowExpert2D2C（カトウ光研製）を用いた。また、レーザーに照射された粒子を追跡することで粒子の軌跡や粒子の移動速度を求めることができる。

通水終了後は水路下流側から 2.5m の中央部分の河床面において 2.5cm×2.5cm の範囲を指定して表層の粒子を回収した。1 粒径分を 1 層として河床面から 1 層ずつ粒子を回収し、層別に粒子の個数・割合を確認した。ガラス粒子の被覆を確認するため、ポリスチレン粒子が表層に見られるようになるまでこの作業を行った。

3. 結果と考察

いずれの実験条件においても、比重の大きいガラス粒子が河床表面を被覆する明らかな分級が生じる結果となった。ビデオカメラの映像により、通水後 10 分程度まで河床面近くのポリスチレン粒子が抜け出し、その間隙をガラス粒子が埋める様子が確認された。この過程が繰り返されることにより、ガラス粒子が河床表面を被覆していくものと推察される。また、写真 1 により CASE A1 における給砂粒子の堆積状況を確認すると、蛍光ガラス粒子が堆積している一方で、蛍光ポリスチレン粒子の堆積は確認されなかった。下流端で回収した粒子によっても、ガラス粒子に関しては蛍光ガラス粒子と初期河床に存在したガラス粒子双方が流出しているのに対して、ポリスチレン粒

キーワード：動的平衡状態、分級、交換層、粒子追跡、PIV 解析

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

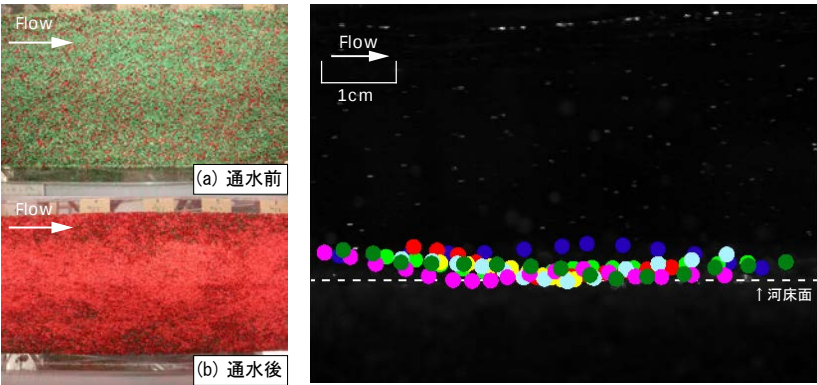


写真-1 河床表面の様子 (上方から撮影, CASE A1)

図-1 ポリスチレン粒子の移動軌跡 (CASE A2)

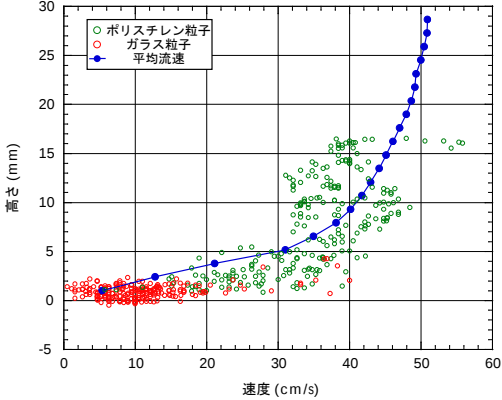


図-2 粒子速度と平均流速 (CASE A2)

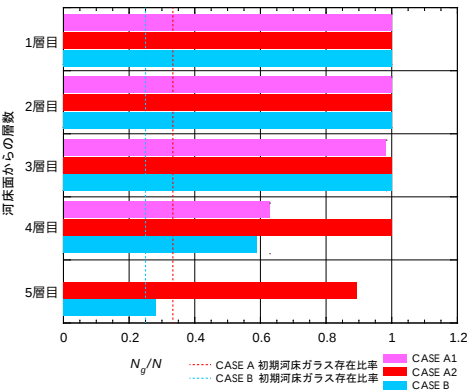


図-3 ガラス粒子存在比率の鉛直分布

表-1 CASE A1 における各層の粒子数

	ポリスチレン粒子 N_p (個)	ガラス粒子 N_g (個)	粒子総数 N (個)	蛍光ガラス粒子 N_{fg} (個)	ガラス粒子存在比率 N_g/N
1層目	0	186	186	162	1.00
2層目	0	183	183	57	1.00
3層目	3	184	187	13	0.98
4層目	69	117	186	2	0.63

子に関しては給砂量とほぼ同等の蛍光ポリスチレン粒子のみが流出することが確認された。次に、CASE A2 の実験で撮影されたハイスピードカメラ画像による解析結果を示す。図-1 はポリスチレン粒子の軌跡を示すものであり、底面付近を移動する粒子も存在することがわかる。そこで、粒子追跡と PIV 解析により流下方向の粒子速度分布と流速分布を算出した結果を示したのが図-2 である。ガラス粒子と同等の速度で移動するポリスチレン粒子が存在していることがわかり、その速度は最小で 5.80cm/s 程度となった。従って、動的平衡状態に達すると比重の大きいガラス粒子が河床表面を被覆し、遮蔽することでポリスチレン粒子が河床から移動を開始することはない。また、ガラス粒子は河床付近を転がるように移動して河床粒子との交換が行われるが、ポリスチレン粒子は底面付近をガラス粒子と同等の速度で移動する場合があるにも関わらずまったく堆積していないことがわかった。

また、表-1 に CASE A1 における通水後河床の鉛直構造に関する観測の結果を、図-3 に三つの実験条件における各層のガラス粒子の存在比率 N_g/N のグラフを示す。いずれの実験条件も 3~4 層目までは N_g/N がほぼ 1.00 となり、ガラス粒子が河床表面を完全に被覆する結果となった。CASE A1 の結果を見ることで給砂した蛍光ガラス粒子の鉛直分級が可視化される。これにより、少なくとも 3 層目まではガラス粒子の入れ替わりが行われていることがわかった。礫河床における交換層の厚さは 90% 粒径のおよそ 1~3 倍となるとされているが、同一粒径で行われた本研究においてもガラス粒子が少なくとも三粒径分河床面を被覆し、交換が行われていることが明らかになった。

4. 結論

同一粒径で比重の異なる二つの粒子からなる河床の動的平衡状態について、ポリスチレン粒子が堆積せず、ガラス粒子は河床表面から約三粒径分被覆し、交換が行われていることがわかった。礫河床における交換層厚さも 90% 粒径のおよそ 1~3 倍とされており、「三粒径分」の持つ意味については今後更に検討したいと考えている。

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) 平松祐基・関根正人・劔持尚樹：骨格となる大礫を伴う河床の動的平衡状態の鉛直構造，土木学会論文集 B1, Vol.71, No.4, I_865~I_870, 2015.