

浮遊砂輸送過程及び輸送距離に対するパラメータスタディー

Parameter study on suspended sediment transport

北海道大学大学院工学研究科 ○学生員 葉畑辰文 (Tatsuya Nabatake)

北海道大学大学院工学院 正 員 渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)

北海道大学公共政策院 正 員 清水康行 (Yasuyuki Shimizu)

北海道大学大学院工学院 正 員 木村一郎 (Ichiro Kimura)

1. はじめに

河床に発生する河床波は、水流へ抵抗を与えて水深や平均流速などの流れ特性にも影響を及ぼす。そのため、河床変動の予測は河川防災上重要な現象とされている。そして、小規模河床形態の中でもデューンは流水抵抗にもっとも深く関与する河床形態である。また、デューンは複雑な固液相互作用によって成り立っており、複雑な固液相互作用による砂輸送もまた重要な現象である。これまでデューンに関わる研究は実験的・数値解析的研究に数多く行われてきた。例えば、Giri・清水ら¹⁾は鉛直二次元モデルによる数値計算によって、デューンの形成だけではなく、遷移河床、デューンの消滅や再形成など非定常な現象の再現に成功している。このモデルでは中川・辻本²⁾が提案したEinstein型の確率モデルを基にした非平衡流砂量式を用いており、ステップレングスは試行錯誤的に粒径の数十倍から、数百倍の値を便宜上与えられている。ステップレングスは流砂運動を決定づける重要なパラメーターであるため、十分な根拠に基づいた算定方法が必要である。特に、デューン河床では顕著に発達した乱流が流砂へ移流・混合・拡散を経由して影響を与えるため、その輸送距離あるいはステップレングスの分布は従来のものとは異なり、また粒径にも大きく依存するものと考えられる。このため、デューン上におけるステップレングスを決定するためには、まず河床波上の乱流と流砂の相互関係を明らかにする必要がある。既存の研究では、秩父ら³⁾⁴⁾による移動床上で砂水同時計測を行い、浮遊砂がデューン上の乱流に及ぼす力学的影響を明らかにしている。また橋本らによって、粒径の違いによる輸送過程の変化や、水平輸送距離の確率密度分布がダブルピーク形状になることなどが確認されている。

本研究では、デューン背後のステップレングスに関して、橋本らが行った掃流力と粒径だけではなく、流況や浮遊砂が誘発する乱流の乱れを評価することとする。そのために、粒径(3ケース)と流量(3ケース)を変化させて、計9ケース行い、パラメータスタディーを行こととする。

2. 実験概要

本実験で使用した水路は長さ10m、幅0.2m、勾配0.001

をもつ開水路であり、側面はアクリル製、底面はセメントで固定した固定床である(図-1参照)。また、下流端にゲートを設置し、水位の調節を行い、デューン間で水位が一定となるようにした。また、図-1に実験装置と表-1に実験条件を示す。

デューン河床は予備実験より得られた河床形状データをコサイン曲線を用いてモデル化し、二次元河床波モデルを水路の中心部に5波長文設置した。なお、デューンの波高は30mm、波長は380mmである。

珪砂は一定の割合(3ml/s)で水面から放出させ、デューンクレスト部手前で固定床に着くよう給砂位置を調節した。そして、クレスト部付近から浮遊砂が放出される様に本実験を行った。これにより、砂粒子は撮影領域より手前の河床に落下し、水面から給砂することによる影響が取り除かれることを確認した。

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蛍光中立粒子(MCIゲルCHP20P、粒径75~150 μ m)を用いた。撮影範囲は流れが発達した箇所におけるクレスト部から浮遊砂の再付着地点を確認できる範囲とした。撮影するための高速カメラは解像度1024×1280ピクセル、フレームレート500fpsであるphotoron製のものを使用した。光源として、FOV(Field of view)を含む流下方向に平行な鉛直縦断面にYAGレーザーシートを水面上より照射した(励起波長532nm)。なお、レーザー照射面を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。

3. 画像解析手法

本実験では秩父らが提案した工学的粒子選択技術を利用した。この技術は、YAGレーザーの波長と蛍光粒子が発する波長の違いを利用するものである。YAGレーザーの波長は532nmで蛍光粒子が発する波長は630nmである。そのため、砂相・液相を分離し撮影するために、シャープ違いをカットフィルター(SCF-50S-60R)を用いて、蛍光発光色とレーザー光を工学的に分離して撮影を行った。撮影した画像に対して、光行差によりひずんだ画像を補正し、実座標に対応させるためキャリブレーションを行った。

得られた撮影画像から相互相関法PIVにより各相の瞬時

速度を算定し、Adrianらによって提案されたSR法(Super-resolution method)を用いて粒子の追跡を行う。得られた粒子の速度は2nm間隔のグリッドに内挿し、この結果をもとに乱流統計量を算出する。また、SR法を適用することにより粒子の数密度分布を得ることが可能である。そこで、得られた数密度分布と砂粒子の速度から粒子の輸送フラックスをもとにした浮遊砂粒子の輸送について議論を行う。

表-1 実験条件

case	流量(L)	水深(cm)	粒径(mm)
case1	7.5	9.7	—
			0.8~1.0
			0.6~0.8
			0.3~0.4
case2	10	11.6	—
			0.8~1.0
			0.6~0.8
			0.3~0.4
case3	12.5	12.5	—
			0.8~1.0
			0.6~0.8
			0.3~0.4

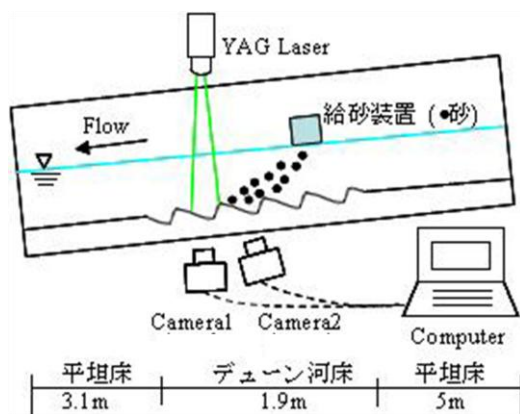


図-1 実験装置

4. 結果と考察

4.1 清流と浮遊砂存在流の比較

図-2は流体の時間平均速度ベクトルを示している。図中のflowは清流を示し、bigとsmallは流体に存在する浮遊砂の粒径を表している。図-2を比較し、浮遊砂が存在する場合と速度ベクトルの違いを検討したが、速度ベクトルの違いは判別することは出来なかった。しかし、図-3は流体の乱れエネルギーを示しており、浮遊砂が存在する場合は乱れエネルギーが増幅していることがわかる。次に、浮遊砂が存在する時の乱れエネルギーと清流の乱れエネルギーの比を図-4に示す。暖色は清流よりも乱れエネルギーが強く、寒色は乱れエネルギーが弱いことを示している。big/flowではせん断層で乱れエネルギーの増幅がみられるが、dune背後域で寒色が広がっており、乱れエネルギーが減衰していることがわかる。粒径が大きい場合、粒子はあまり浮遊しないため、粒子がdune背後域に高濃度となって沈降して乱れを減衰させたと考えられる。small/flowでは大きい粒子の時とは異なり、前面的に乱れエネルギーの増幅がみら

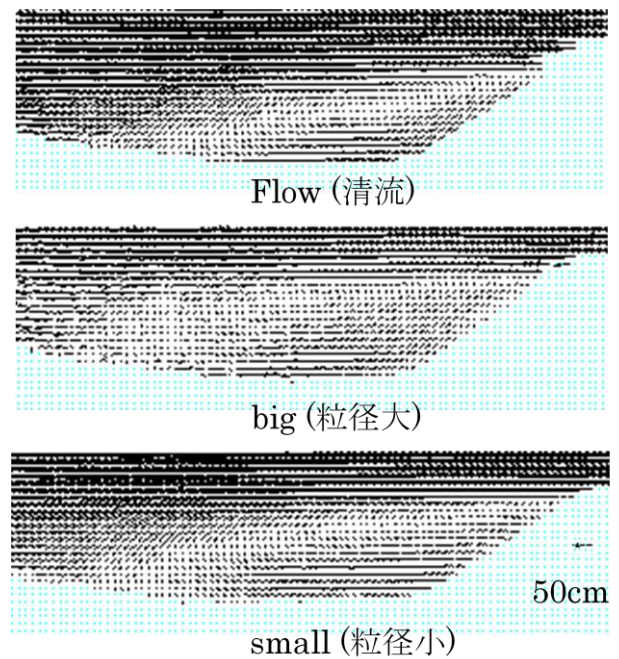


図-2 時間平均速度ベクトル

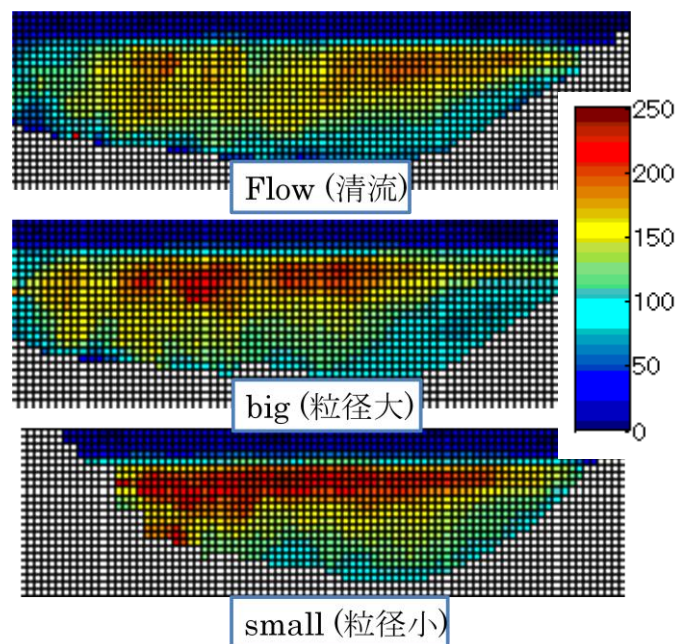


図-3 乱れエネルギー

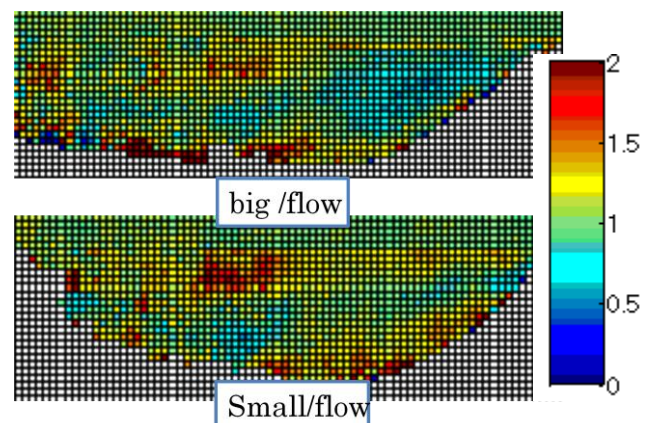


図-4 乱れエネルギー比

れる。小さい粒子の場合、輸送距離が大きい粒子よりも伸び、拡散するため、乱れエネルギーが全面的に増加したと考える。

4.2 浮遊砂の挙動

図-5は流量別の浮遊砂(粒径小)の時間平均速度ベクトルである。ベクトル図を見ると、クレスト部から輸送され再付着する様子がわかる。また、再付着後に流れに対して逆流する浮遊砂の動きがみられる。逆流している地点を赤い印で示すし、流量別に比較すると、流量が大きくなるほど逆流域が下流側へと移動していることがわかる。

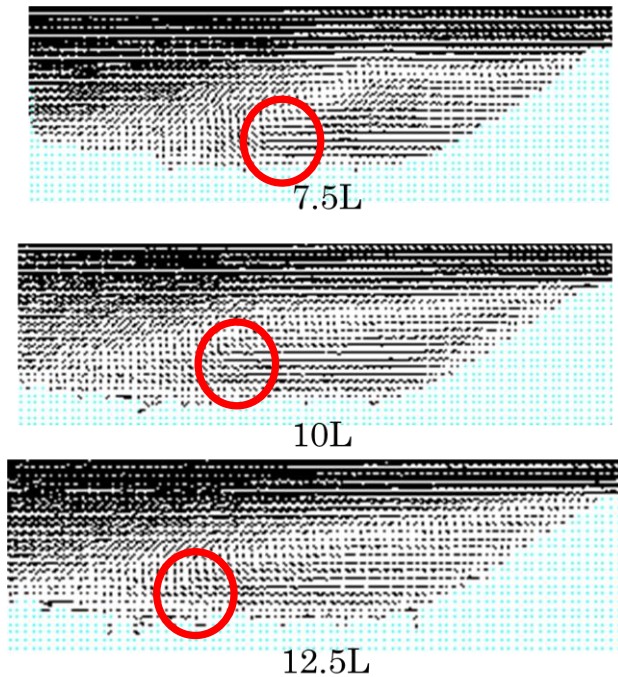


図-5 浮遊砂の時間平均速度ベクトル

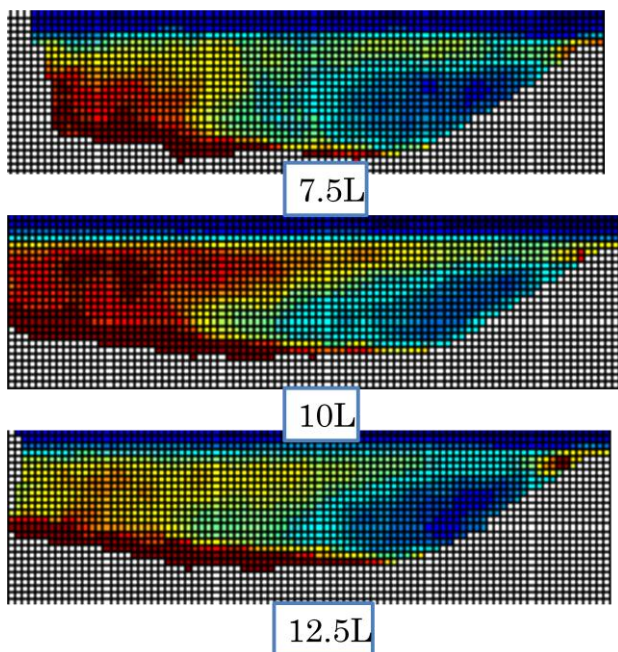


図-6 浮遊砂の乱れエネルギー

次に、浮遊砂の乱れエネルギーを図-6に示すこととする。乱れエネルギーをみると、10Lが一番乱れが強くなっており、7.5L、12.5Lの順番となった。

4.3 固液相互作用

図-7に流体のグリッド毎の乱れエネルギー成分を示す。浮遊砂が存在しないcase1と浮遊砂が存在する場合を比較すると、浮遊砂が存在する場合乱れエネルギーが増加していることがわかる。また、増加方向は水平方向よりも、鉛直方向に乱れが増加していることがわかる。これは、浮遊砂の沈降による流体が鉛直方向に引っ張られることによって鉛直方向の乱れが増幅したと考えられる。また、浮遊砂が乱流による駆動によって鉛直方向の運動が活発化しており、この運動が流体の乱れを誘発したと考えられる。

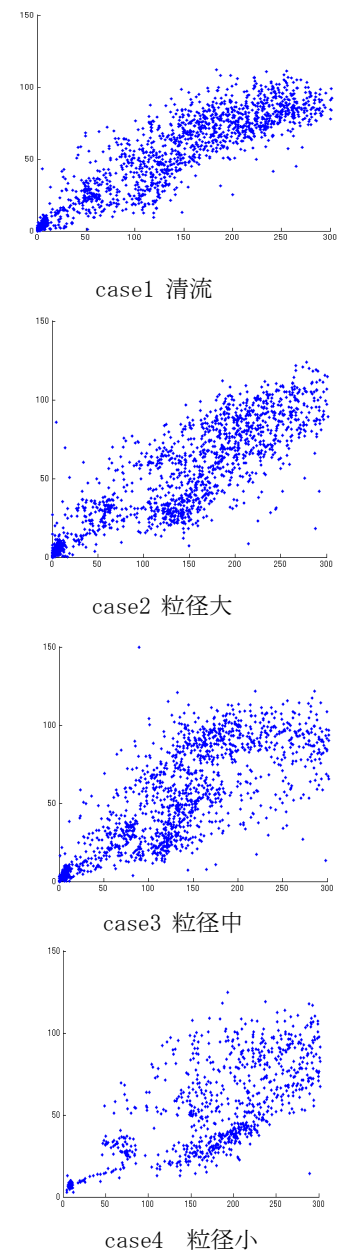


図-7 乱れエネルギー成分

参考文献

- 1)Giri, S. and Shimizu, Y.: Numerical computation of sand dune migration with free surface flow, Water Resources Research, Vol.42, w10422, doi: 10.1029/2005WR004588, 2006
- 2)Nakagawa, H. and Tsujimoto, T.: Sand bed instability due to bed load motion, Proc. ASCE 106, 2029-2051, HY12, 1980
- 3)秩父宏太郎：小規模河床波上の流体－浮遊砂速度の同時PIV計測、応用力学論文集、Vol.9, pp.659~666, 2006
- 4)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.583~588