

小規模河床波上の浮遊砂の輸送距離確率モデル

Probability model of suspended sand transport over dunes

渡部 靖憲

Yasunori WATANABE

北海道大学大学院工学研究院 准教授

要 旨

本研究は、流体、浮遊砂の同時画像計測法を適用し、小規模河床波上の浮遊砂と乱流との関係を調査してきた過去の実験成果と粒径、水路勾配、流量に対するパラメータスタディを総合し、河床波上の乱流強度と流速、粒子径に依存した乱れ変調を考慮した浮遊砂輸送距離確率分布モデルを構築するものである。河床波上から放出される浮遊砂及びクレスト背後の砂の堆積、侵食は、それぞれガウス分布、と指数分布、三角関数からなる減衰振動分布を示し、これらはReynolds数、Stokes数、乱れ物理量から記述可能である。

《キーワード：デューン；浮遊砂；ステップレングス》

1. はじめに

移動床流れにおいて、河床形態の変化は流水抵抗に変化をもたらし、さらには水深や平均流速などの流れ特性にも影響を及ぼす。このため、河床変動の予測は防災上重要となる。小規模河床形態のうちで流水抵抗に最も深く関与するのはデューンである。デューンと流砂運動に関する実験的、数値解析的研究はこれまでも数多く行われてきた。例えば、Giri・清水¹⁾は鉛直二次元モデルによる数値計算により、デューンの形成だけではなく、遷移河床、平坦河床の出現によるデューンの消滅や再形成といった非定常の現象再現にも成功している。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。一方、混相流体力学の分野においても、粒子-乱流相互作用の数値モデルについて積極的に研究が進められているが（例えば、Elgobashi³⁾）、固液両相の運動を直接計測する手段がないことが障害となり、未だ不明な問題が多く残っているのが現状である。

秩父⁴⁾は光学的分離可視化技術を応用し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⁵⁾は、同様な実験から、デューン上の浮遊砂の乱流変動を粒子の追従性の指標であるストークス数に着目して整理可能であることを示唆している。

本研究は、初期条件として一様に放出された浮遊砂がデューン背後に存在するせん断乱流域及び剥離域における挙動と乱れとの関係、さらにはそれらの粒径依存性について、光学的な砂粒子-水粒子分離法を適用した高解像度画像計測により明らかにすると同時に、橋本⁵⁾の研究を流量、河床勾配、浮遊砂粒径の異なる多様なケースへ展開し、固液両相の運動を一般化、定式化するためのパラメータスタディを行うものである。即ち、現在まで水理学的手法で困難であった浮遊砂混在流れ中の浮遊砂の輸送について、局所乱流量と浮遊砂の拡散過程に着目し、砂粒子群の輸送フラックスから浮遊砂の数密度変化率、浮遊砂の堆積及び輸送距離に関するパラメータ化をしようとするものである。

2. 実験

本実験に用いた水路は長さ10m、幅0.2mの開水路であり、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。そして、水路に固定床duneを5波長制作し、3波長目のクレスト部から下流側22cmま

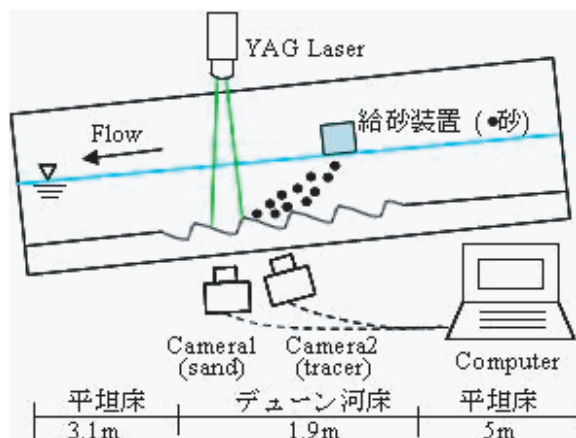


図-1 実験装置

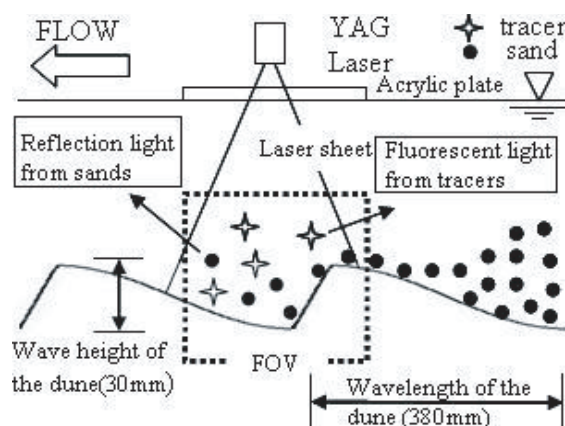


図-2 実験構成

での間を撮影範囲とし、計測域上流から一定の体積率で定常的に給砂された浮遊砂が流下方向へ輸送されながら沈降し、デューンレスト部から浮遊砂の再付着地点までを観測した。図-1に実験装置のセットアップ、図-2に撮影領域の概要を図示する。河床に設置するデューン形状の底面は、同一流量レンジにおいて移動床上で発生するデューンの波長、波高を基に、図-3で示すモデル形状となるようにモルタルで作成した。表-1に示す流量、浮遊砂径、水路勾配をパラメータとして、デューン背後の乱流量に対して砂の輸送を特徴化する。

水の流れに追従するトレーサーとして比重1.0に調整した蛍光中立粒子（MCIゲルCHP20P、粒径75~150 μm ）を用いた。解像度1024 \times 1280ピクセル、フレームレート500fpsのphotoron製高速カメラを2代並列配置し、デューン一波長上の中立粒子あるいは砂粒子を撮影した。光源として、FOV(Field of view)を含む流下方向に平行な鉛直断面に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(図-2参照)。

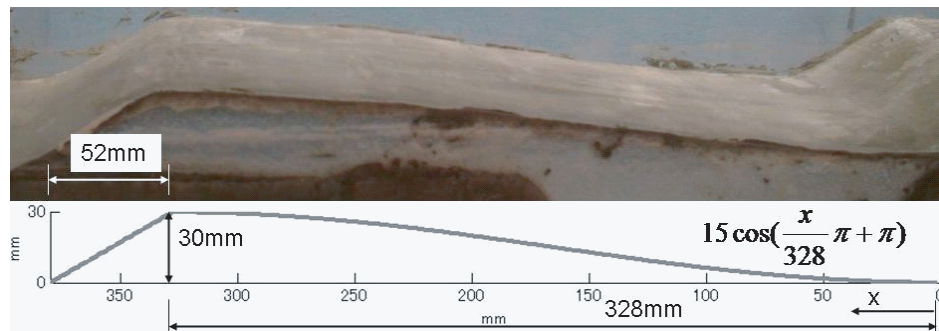


図-3 河床に作成されるモデルデューン形状

3. 解析法

本実験では秩父ら⁹⁾が提案した光学的粒子選択技術を利用した。この技術は、二台のカメラにそれぞれ異なる波長を透過させるフィルターを装着させることで砂相、液相それぞれを光学的に分離し、撮影を行うものである。2台のカメラで同一のFOVを撮影する場合、光行差により歪んだ画像が撮影される。このゆがみを線形投影により補正し、同期した2つの撮影画像を同一座標上で解析した。

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2mm間隔のグリッドに内

表-1 実験条件

case		勾配	流量(L/s)	粒径(mm)
case1	flow	0.001	7.5	-
	coarse			0.82~1.1
	middle			0.6~0.82
	fine			0.4~0.6
case2	very fine	0.001	10	0.3~0.4
	flow			-
	coarse			0.82~1.1
	middle			0.6~0.82
case3	fine	0.001	12.5	0.4~0.6
	very fine			0.3~0.4
	flow			-
	coarse			0.82~1.1
case4	middle	0.002	7.5	0.6~0.82
	fine			0.4~0.6
	very fine			0.3~0.4
	flow			-

挿しこの結果をもとに固液両相に対する時間平均量をベースとした乱流統計量並びに粒子存在位置を算出する。詳細な解析法は秩父ら⁴⁾を参照いただきたい。

得られた粒子の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求め、浮遊砂輸送過程のパラメータ化について議論を行う。ここで、輸送フラックスとは単位時間単位面積当たりの物質の通過量であり、浮遊砂濃度 c 、浮遊砂速度 u_s から次の様に与えられる。

$$F = cu_s \quad (1)$$

一方、質量保存則より、浮遊砂濃度変化とフラックスは次の関係を持つ。

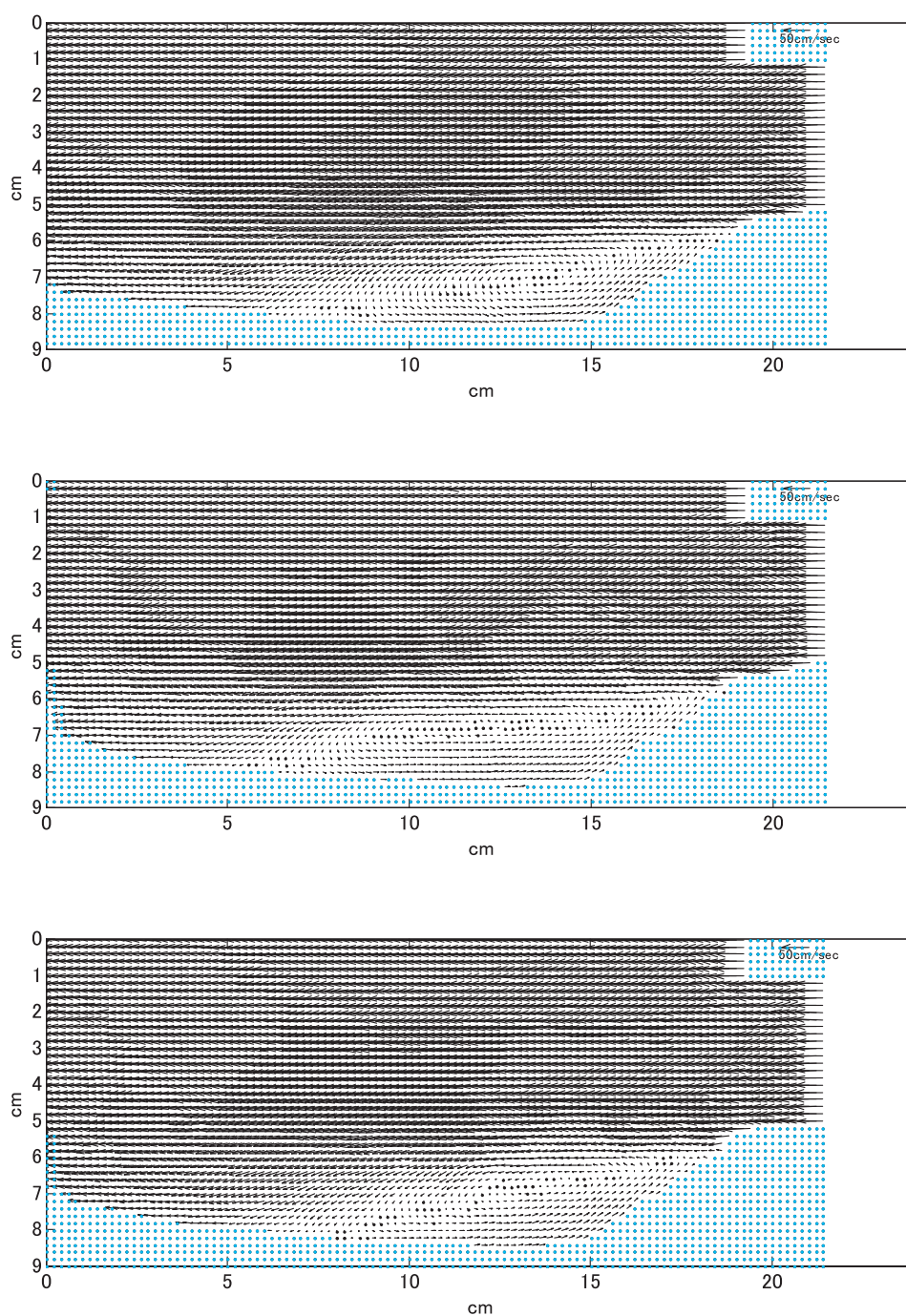


図-4 case2(流量10L/s)に対する(上)清流(浮遊砂なし)、(中)中央粒径0.35mmの浮遊砂存在下、(下)中央粒径0.96mmの浮遊砂存在下における時間平均流速分布

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{F} \quad (2)$$

即ち、浮遊砂輸送フラックスの発散を算出することにより河床近傍の浮遊砂濃度変化を決定することができる。

4. 結果

(1) 結果時間平均流速ベクトル

撮影した3000枚(6秒間)の撮影画像で得られた速度データで平均したものを時間平均流速と定義する。浮遊砂が存在しない場合の流量10L/sケース(case 2 flow, 表-1参照)の時間平均ベクトルを図-4に示す。クレスト部背後に大きな剥離渦上部において強いせん断層が発達し、河床近傍ではクレスト方向へ戻る弱い流れが形成される。また、クレスト部からの流れは剥離渦の背後で河床に再付着し、その後は下流方向に流下する様子がわかる。浮遊砂が存在する場合においても、平均流速分布は剥離渦を中心とした類似のものとなるが、渦の流下方向への長さ、及び渦内流速は浮遊砂の粒径に応じて修正される。即ち、再付着距離、及び砂の沈降浮遊に寄与する鉛直流速が浮遊砂条件に依存し、この流速の修正によって浮遊過程が再度影響を受けるものと考えられる。次に砂の拡散過程を支配する乱れエネルギーの変調について調査を行う。

(2) 乱れエネルギー

清流の場合の乱れエネルギー分布から、クレスト背後から剥離渦上部に発達するせん断層上で高乱れエネルギーが発生し、その下部では、典型的な乱流拡散を確認できる(図-5参照)。

浮遊砂が存在下では、いくつかの特徴的な乱れエネルギー分布の修正が観察できる。中央粒径0.92mmのケース、及び0.71mmのケースでは、クレスト背後で顕著な乱れエネルギーの発達があり、その下流域では明らかに清流時のエネルギーより低

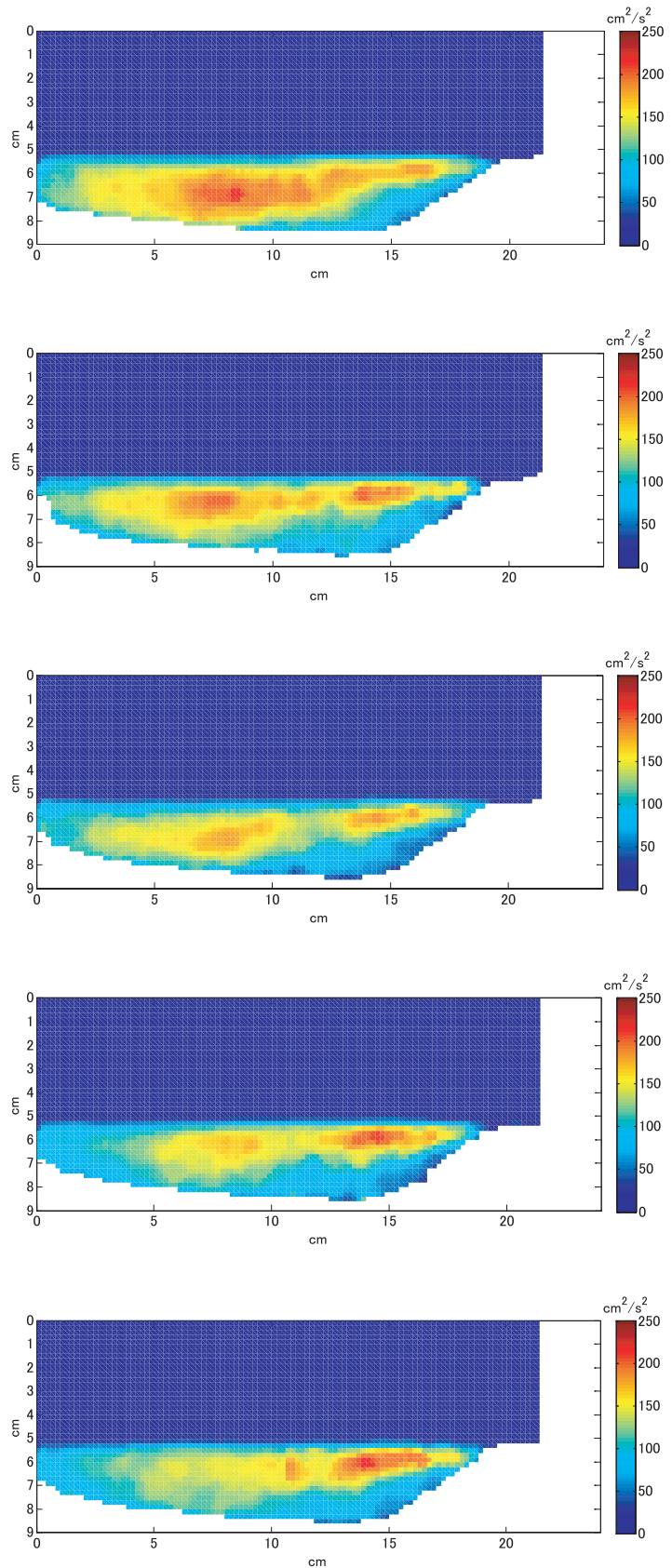


図-5 乱れエネルギー分布(case 2) : 上から、清流、中央粒径0.35mm(very fine, $St=0.29$), 0.5mm(fine, $St=0.59$), 0.71mm(middle, $St=1.2$), 0.92mm(coarse, $St=1.9$)の浮遊砂存在下の流れ(浮遊砂条件は表-1を参照)。

い乱れエネルギーが分布している。一方、それらより粒径の小さなケース（中央粒径0.35mm, 0.5mm）では、清流時と比べ乱れエネルギーは弱く、拡散的で、その志向性が上方へ修正されているのが分かる。一般に、粒子の流れへの追従性を表すStokes数 ($St = \rho r^2 u / \mu L$, ここで、 ρ :粒子の密度, r :粒子の半径, u :流れの代表速度, μ :粘性係数, L :流れの代表長さ) が1より十分大きい場合は流れと無関係に粒子は運動し、逆に1より十分に小さければ、流れにパッシブとなり、また1と同程度だと追従しつつ複雑な運動となることが知られている³⁾。またGore and Crow⁹⁾によると、粒子径(d)と乱れ長さスケール(L)との比(d/L)が0.1以上では、乱れエネルギーは粒子によって強化され、以下では減衰することが指摘されている。つまり、相対的に粒径が大きくなると新たな乱れを発生させることになる。本実験では、相対的に粒径の大きなケースにおいては、粒子は流れに追従せずにクレスト背後で沈降し、この領域で新たな乱れを発生させ、高乱れエネルギー領域を形成する。粒子の沈降により誘発された鉛直下向き流速によって渦の志向性が修正され、渦上部のせん断性が低下し、背後域では相対的に乱れエネルギーが低下する。逆に、小径の浮遊砂が存在する場合、粒子は流れに追従しつつその変動によって広く拡散し、結果として拡散的な乱れエネルギー分布を誘発する。

これらの結果は、粒子に働く抗力のパラメータとなる粒子レイノルズ数 ($Re = ud/\nu$, ここで、 ν :動粘性係数) だけでなく、 St の違いによる乱流の修正が粒子の輸送拡散を決定する重要なパラメータであることを表している。次に、修正された乱流中における浮遊砂の輸送量分布の調査を行う。

(3) 浮遊砂輸送フラックス

流体の流れと同時に計測された浮遊砂の流速並びに数密度から、式(1)により浮遊砂フラックスを決定し、式(2)により、浮遊砂濃度の時間変化 ($\partial c / \partial t$) を求める。ここで、 $\partial c / \partial t$ が正であれば、浮遊砂は堆積し、負であれば侵食する。即ち、堆積域を特定することで浮遊砂の輸送距離を決定することができる。

図-6はcase2 (fine)に対する浮遊砂濃度の時間変化の分布を表している。デューンクレストの極背後で侵食、その直ぐ下流側で堆積する明確な分布を確認することができる。また、さらに下流側においては、その変化率は減衰するものの正負が交互に分布する特徴がある。デューン底面上においては、クレ

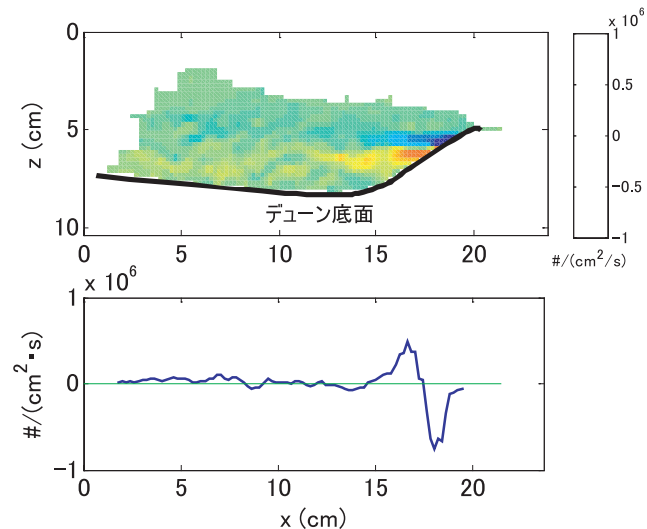


図-6 case2 (fine, 中央粒径0.5mm)に対する浮遊砂濃度の時間変化の空間分布(上)とデューン底面上の侵食、堆積分布

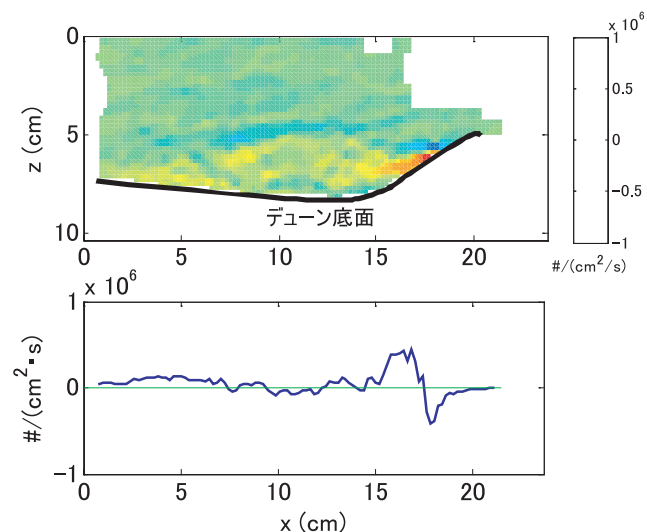


図-7 case2 (very fine, 中央粒径0.35mm)に対する浮遊砂濃度の時間変化の空間分布(上)とデューン底面上の侵食、堆積分布

スト背後で1対の明確な侵食と堆積即ち、ピックアップされた砂の下流への輸送を表し、さらに下流域においても濃度変化率の変動は継続する。

図-7は、同一流量下で中央粒径の小さな(case2 very fine)ケースに対して同様な分布を調べたものである。図-6と同様に、典型的な砂のピックアップと背後への堆積を表す分布とその下流域に継続する砂輸送の分布を確認することができる。この分布は、クレスト背後に発生する渦に捕捉された砂の局所的な輸送を表すものであり、複数のケースに対して類似した侵食堆積分布が得られた結果は、適当なパラメータのもとでこれらの分布が一意に決定できることを示唆している。一方、流れの再付着点近傍($x \approx 5\text{cm}$)において、渦に捕捉されずに浮遊してきた砂が輸送されたものと考えられる堆積域を確認することができる。

実験において、クレスト部から下流につれて渦の大きさが減衰しているような砂の局所運動を確認している。つまり、剥離渦の発生から減衰過程までの一連の渦の輸送効果によって輸送域と堆積域が周期的に発生しているものと考えられる。一方、再付着近傍の堆積域は主流速によって輸送されるため、流体の乱れによって拡散され河床に着床するため、その堆積分布がガウス分布で近似できるものとして、砂の抗力、追従性、乱れ変動、そして再付着距離により、パラメータ化を行う。

(4) 輸送過程のパラメータリゼーション

前節で議論したデューン底面上における浮遊砂濃度変化の堆積侵食分布を表わす近似曲線の定式化を行う。即ち、図-6, 7から特徴的な下流へ減衰しながら振動する特徴を再現するための渦内に捕捉された砂輸送を表す減衰振動曲線(f)と、渦に捕捉されずに直接底面へ再付着する堆積を表すガウス分布曲線(g)を導入する。

$$f(x) = A \exp(-k_1 x) \sin(k_2 x) \quad (3)$$

$$g(x) = B \exp(-(x - x_0)^2 / \sigma^2) \quad (4)$$

ここで、振幅 A 、減衰率 k_1 、波数 k_2 、浮遊砂輸送係数 B 、輸送距離 x_0 、そして輸送分散 σ をそれぞれのケースにおける粒子レイノルズ数 Re 、 St 、再付着距離、乱れエネルギーの分散から、実験で得られている底面上での浮遊砂濃度変化を近似する最適パラメータを決定する。ここで、主体となる剥離渦のスケールは、クレストからトラフまでの水平距離であり、 k_2 はこの水平距離を一波長として決定できることを確認している。

図-8に、他の係数と検討したパラメータとの関係を示す。減衰振動曲線の振幅 A は St 数と線形関係があり、減衰率 k_1 は Re との相関をもつ。つまり、粒子が流体に追従しにくい程、剥離渦に捕捉されやすく、背後域に堆積しやすい特徴を表している。また、抗力を記述する Re が大きくなるほど剥離渦も拡散され減衰しやすくなる特徴が、両者の相関から確認できる。ガウス分布曲線の係数に関しては、係数 B は減衰率 k_1 と負の相関があり、また、輸送距離 x_0 は再付着距離と粒径の比と線形的な関係がある。また、分散 σ は流体乱れエネルギーの分散との相関が確認された。係数 B と k_1 との関係は、粒子による流速の修正に伴う剥離渦の間接的な影響を表し、輸送距離 x_0 は流体の再付着距離だけでなく粒径にも依存する(即ち、粒径が大きい程輸送距離は短い)。分散は、乱れエネルギーが突出して高いなど分散値が大きい程、浮遊砂は拡散されて広域に堆積すると考えられる。

これらのパラメータによって決定された係数を(3)、(4)式に代入し、実験結果と比較したものを図-9に示す。それぞれのケースに対して、特徴的な侵食堆積分布、即ち剥離渦内の捕捉による局所的な侵食と堆積、再付着に伴うデューントラフ部への砂の輸送の特徴をパラメータ化された近似式により適切に記述されていることがわかる。

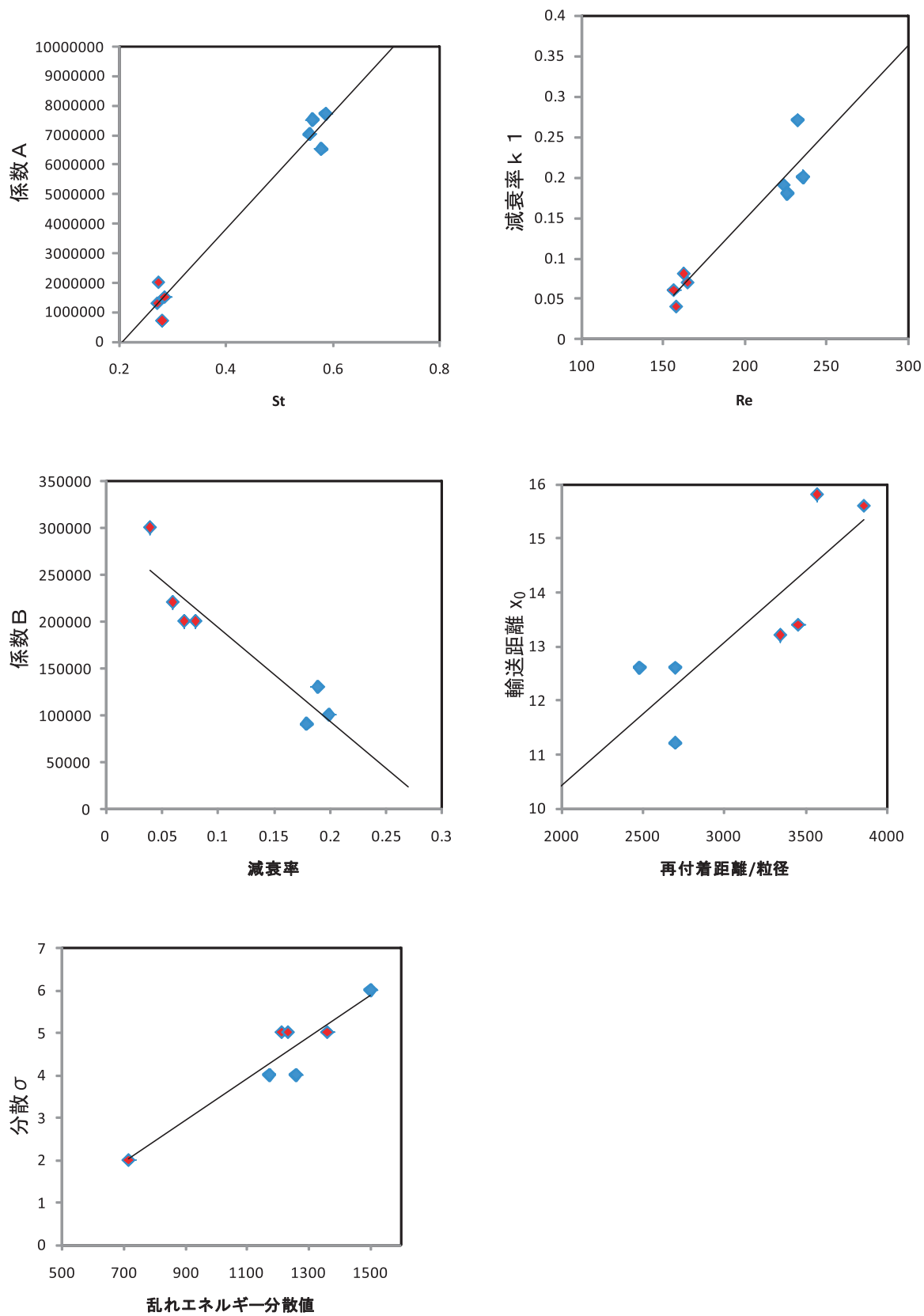


図-8 振幅A, 減衰率 k_1 , 浮遊砂輸送係数B, 輸送距離 x_0 , 輸送分散 σ と粒子レイノルズ数Re, St, 再付着距離, 乱れエネルギーの分散との関係.

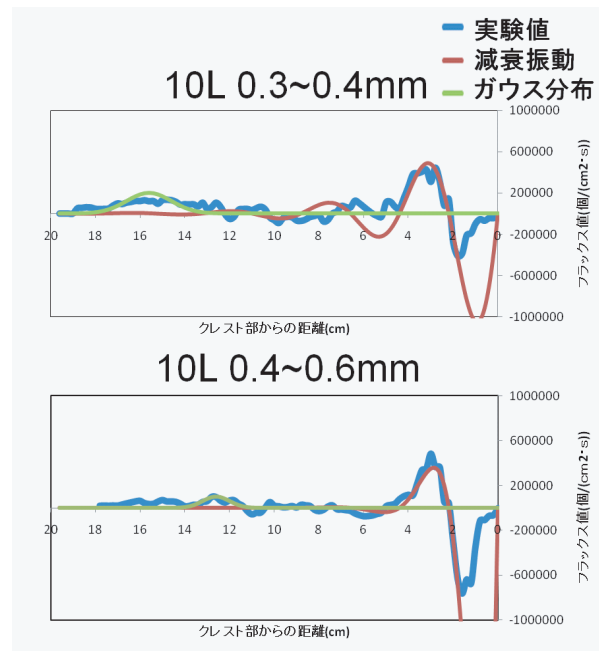


図-9 底面上の輸送フラックス分布と近似曲線 : case 2 very fine(上), case 2 fine(下)

5. おわりに

本研究では、光学的分離手法とSR-PIV法によって砂水を分離した撮影と粒子スケールでの高解像度解析による可視化実験を基に、デューンクレスト部から放出される浮遊砂の乱流輸送過程に関してパラメータスタディを行い、浮遊砂の輸送分布を近似的に記述した。

- ・浮遊砂の存在により、流体への影響は再付着地点の相違や乱れエネルギーの変化といった定量的な違いがある。Stの大きな大径粒子存在下では、クレスト背後において、粒子の沈降に伴い乱れエネルギーを局所的に増幅させる。また、小径浮遊砂は、乱流拡散を促進し、せん断層近傍で発達する乱れエネルギーを減衰させる。
- ・浮遊砂の侵食、堆積域はクレスト部背後と下流域で隣接し、ダブルピークとなる特徴を持つ。即ち、クレスト背後域で顕著となる剥離渦による捕捉のためクレスト直下で放出された砂がその下流域で堆積する局所的な砂の輸送が顕著となる。
- ・浮遊砂の侵食堆積量は渦内の局所的砂輸送を記述する減衰振動曲線と渦外を輸送される浮遊砂濃度を記述するガウス分布曲線の両者によって、近似することが出来る。近似関数の係数は粒子レイノルズ数Re, St, 再付着距離, 乱れエネルギーの分散によってパラメータ化可能であり、再現した侵食堆積分布は、実験結果を良好に再現した。
- ・水理学的な平均流れの物理量からの決定が困難であった浮遊砂の輸送に対して、乱流と浮遊砂条件を基に推定する手法を提案した。これにより、浮遊砂混在下の河床形状の高度な予測に貢献できるものと考えられる。

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) Elgobashi, S . ,1994, On predicting particle-laden turbulent flows, Appl. Sci. Res, vol.52, pp.309-329, 1994
- 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, 2008
- 5) 橋本尚棋・渡部靖憲・清水康行・木村一郎・山口里実: 浮遊砂によるデューン上の固液乱流の変化と浮遊砂輸送フラックス, 水工学論文集, 第54巻, pp.733-738, 2010
- 6) Gore R.A. and Crowe C.T.: Effect of particle size on modulating turbulent intensity, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 15 (2), pp. 279-285, 1989