

浮遊砂に対するStep-length 確率モデルの開発

A step-length model for suspended sands

渡部靖憲
Yasunori Watanabe

北海道大学大学院工学研究科 准教授

要 旨

この論文は、光学的波長選択による固液同時画像計測技術を基に、デューン上を流れる開水路乱流中の浮遊砂による乱流エネルギーの変化とデューン背後に形成されるせん断層の変化を誘発する物理機構を明らかにすると共に、これらの浮遊砂の輸送距離への寄与を議論するものである。浮遊砂による乱流強度の修正は浮遊砂の径に依存し、これにより砂の輸送距離及び河床への堆積分布が修正される基礎的力学特性が明らかになった。さらに、これらの浮遊砂混在乱流の力学的相互作用を反映する基礎的数値モデルを開発し、浮遊砂が発達させる3次元乱流の特徴とステップレングスのモデル化に向けたパラメータ化について議論している。

《キーワード：デューン, PIV, 乱流, 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・清水ら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。これを目的として、Nezu&Azumaら³⁾はPTVによる画像計測に流体と粒子の判別分離機能を追加し、流体と粒子の同時計測を行った。秩父ら^{4),5)}は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。

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しようとするものである。さらに、砂粒子群の輸送フラックスから浮遊砂が河床に落下するまでの領域並びに数密度変化率を定量的に与え、浮遊砂の堆積あるいは輸送距離について議論を行う。最後に、現在開発中の乱流中の浮遊粒子計算モデルについて説明する。

2. 実験概要

(1) 実験装置

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)。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波長分設置した。なお、デューンの波高は30mm、波長は380mmであった(図-2参照)。

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 μm)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剥離域の影響範囲までとした。砂相・液相をそれぞれ撮影する同期された高速カメラ(解像度：1024 \times 1280ピクセル、フレームレート：500fps)を計測領域側方に設置し撮影を行った。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。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。実験に用いる砂粒子には粒径による影響を検討するために0.3~0.4mmと0.8~1.0mmの東北硅砂を用いた。硅砂は一定の割合で水面から初速度のないように放出した。なお、本実験ではデューン河床上のクレスト部付近から

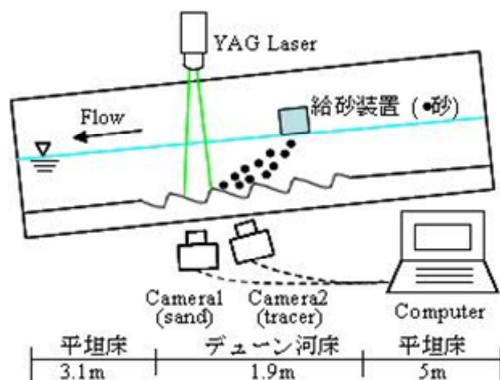


図-1 実験装置

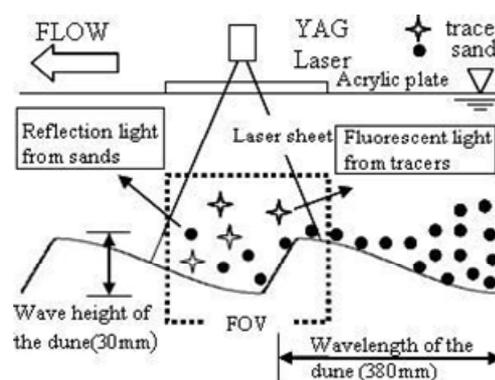


図-2 実験構成

初期条件の制御された浮遊砂が放出される様に0.3~0.4mmの砂は撮影対象とするクレスト部から80cm上流から、0.8~1.0mmの砂は50cm上流から投入した。これにより、砂粒子は撮影領域のクレストより手前の河床に落下し、水面から投入することによる影響が取り除かれることを確認した。しかし、この条件でデューン河床での浮遊砂流れを完全に再現することは難しいと考えられるので砂粒子の投入方法に関して検討が必要である。

表-1に実験で使用した砂粒子と水理条件を示す。dは砂の粒径、Bは水路幅、hは水深、 u_* は摩擦速度、 w_0 は沈降速度である。

表1 実験条件

Case	d (mm)	B (m)	h (cm)	u_*, w_0
case1	-	0.2	9.6	-
case2	0.3~0.4	0.2	9.6	0.29
case3	0.8~1.0	0.2	9.6	0.16

(2) 画像計測と解析手法

本実験では秩父ら⁴⁾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、撮影を行うというものである。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。このゆがみを補正し、対応する点を実座標に対応させるためキャリブレーションを行った。

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、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砂粒子の数密度変化から砂粒子の輸送構造について議論をすることが可能である。

なお、6秒間(3000frames)の撮影画像より議論を行った。

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2mm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粒子の輸送について議論を行う。

3. 結果と考察

(1) 浮遊砂による乱れ生成と輸送

開水路中での浮遊砂輸送速度の変動(乱れ)と砂の散乱の基礎的な特徴を把握するため、底面形状に変動のない様な開水路流れにおいて、砂を水面から放出し砂の輸送と流れを計測した。なお、清流時において生じる乱れはノイズ程度の大きさであることが予備実験により確認されている。

図-3は、case3における砂粒子投入後の拡散範囲内の砂輸送速度($\mathbf{u}_s = \langle \mathbf{u}_s \rangle + \mathbf{u}'_s$ 、ここで $\langle \mathbf{u}_s \rangle$ は平均速度、 \mathbf{u}'_s は変動速度)の乱れエネルギー($k_s = |\mathbf{u}'_s|^2/2$)を表したものである。砂の拡散領域は流速の鉛直勾配により特に底面に近づくにつれて流下方向に広がっていくと同時に、乱れエネルギー k_s もまた増加されていく。特に底面近傍では急速に k_s が増加しているのがわかる。図-4は、浮遊砂の落下点近傍の k_s と、流体の乱れエネルギー($k_f = |\mathbf{u}'_f|^2/2$)を比較したものである。 k_s が約 $35\text{cm}^2/\text{s}^2$ 程度であるのに対して、 k_f は約1割ほど低いものの k_s と同様に底面に近いほど発達していることがわかる。Croweら⁶⁾の指摘によって乱れはせん断率に応じて強化されることが判明されており、本実験においても沈降砂粒子によって誘発された流体の乱れが相対的にせん断性の高い底面近傍において発達し、同時に流体の乱流拡散により浮遊砂の乱れを増大させているものと考えられることができる。粒径の小さいcase2において拡散領域は相対的に増大するが、沈降速度が低い砂粒子によって誘発される k_f は相対的に低下し、流体の乱れによる k_s の強化も相対的に低下する。なお、着水から河床に落下するまでの砂粒子の水平輸送距離の数密度は両ケース共正規分布で近似可能な単純な分布となった(図-5参照)。

(2) デューン上の浮遊砂による乱流の変化

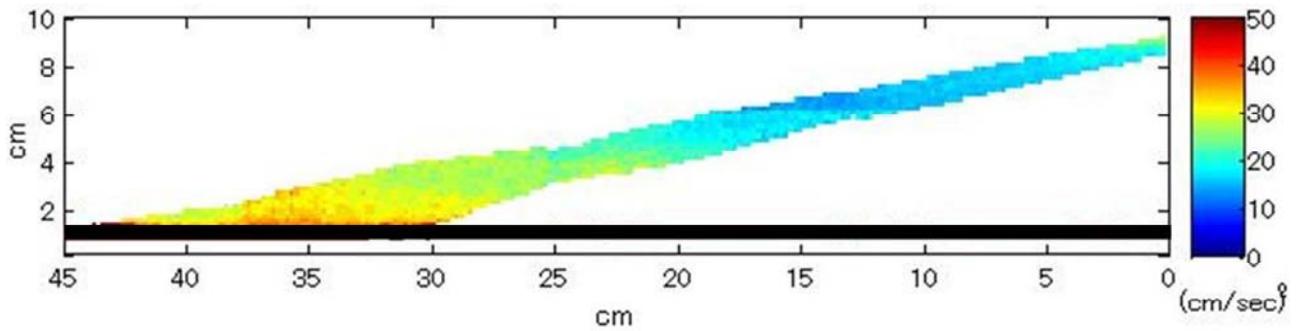


図-3 平坦床における砂の乱れエネルギー

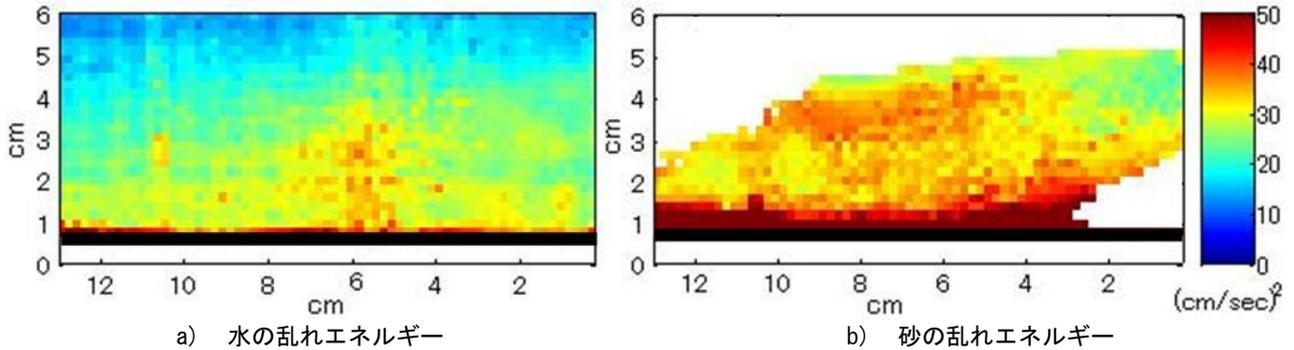


図-4 平坦床における浮遊砂落下時の乱れエネルギー

図-6は、浮遊砂の存在しないcase1におけるデューン上の平均流体流速、及びcase 2と3における流速とcase1のそれとの差を表したものである。case1においてデューンクレストのレベルにおいて典型的なせん断流れとなり、その下方で単一の剥離渦の発生が確認できる。浮遊砂の存在により流体はクレスト背後全域において沈降方向と主流方向に加速されており、その変化は沈降速度が大きいcase3の方が大きい。即ち、粒径に応じてデューンクレストを過ぎる流体の再付着位置が変化することになる。また、浮遊砂のない流れでは大規模な剥離渦がクレスト背後の流れを支配するが、浮遊砂の存在、またその粒径の増大に伴い、この領域の流れは複雑に小スケール化しているのがわかる。

図-7は、浮遊砂の平均輸送速度 $\langle u_s \rangle$ の分布を表している。小径粒子は断面積に比例する抗力が体積力である重力より相対的に大きいため、流体による流下方向への輸送が支配し、大径粒子は逆に沈降が顕著となるため、砂の輸送距離が小径粒子に比べ短く剥離域直後のクレスト背後に顕著な再付着領域が存在する。小径粒子に対するCase2では、剥離渦の指向性に応じたクレスト部へ向かう輸送が底面近傍で確認できる。また、前図に示す流速差と砂輸送速度の分布が類似している結果は砂粒子存在時の流れの変化分が砂粒子の持つ運動量が流体に受け渡されることによるものであることを表している。

図-8は、全てのケースにおける流体の乱れエネルギーの分布を表したものである。浮遊砂のないcase1では、クレスト背後に形成される水平なせん断面を

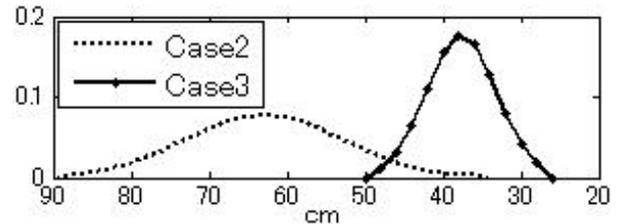


図-5 砂粒子水平輸送距離確率密度分布

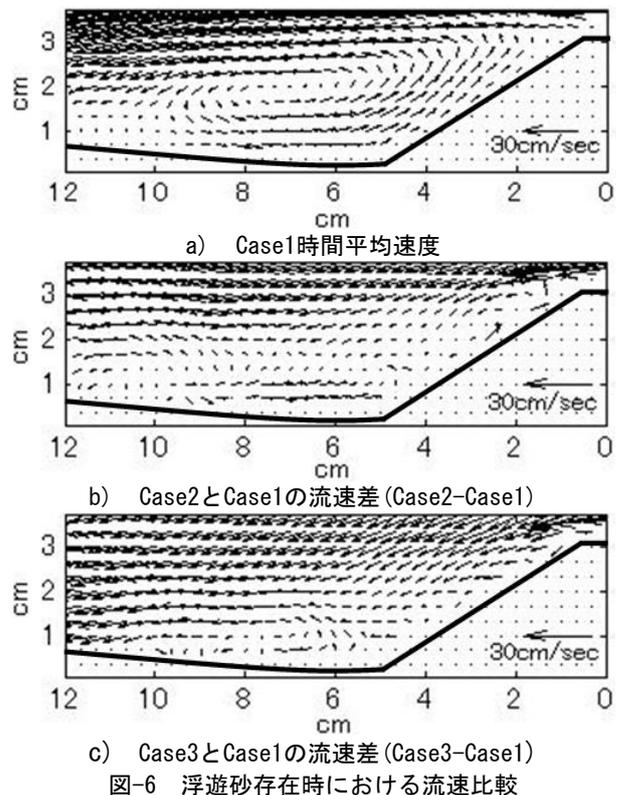


図-6 浮遊砂存在時における流速比較

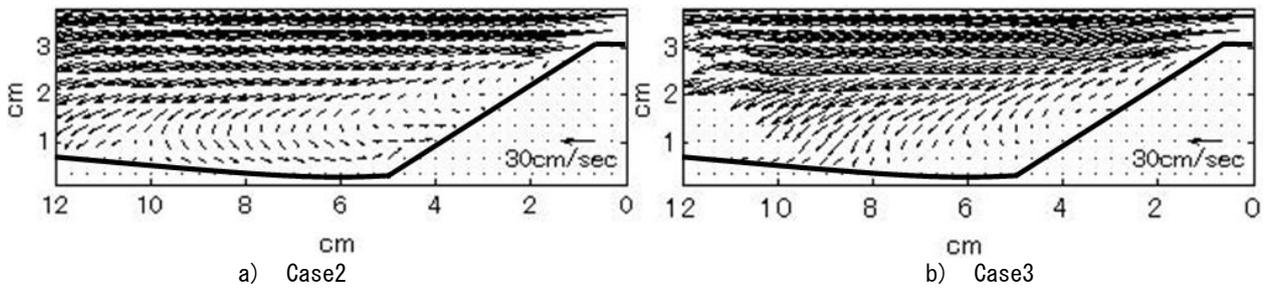


図-7 砂粒子の時間平均速度

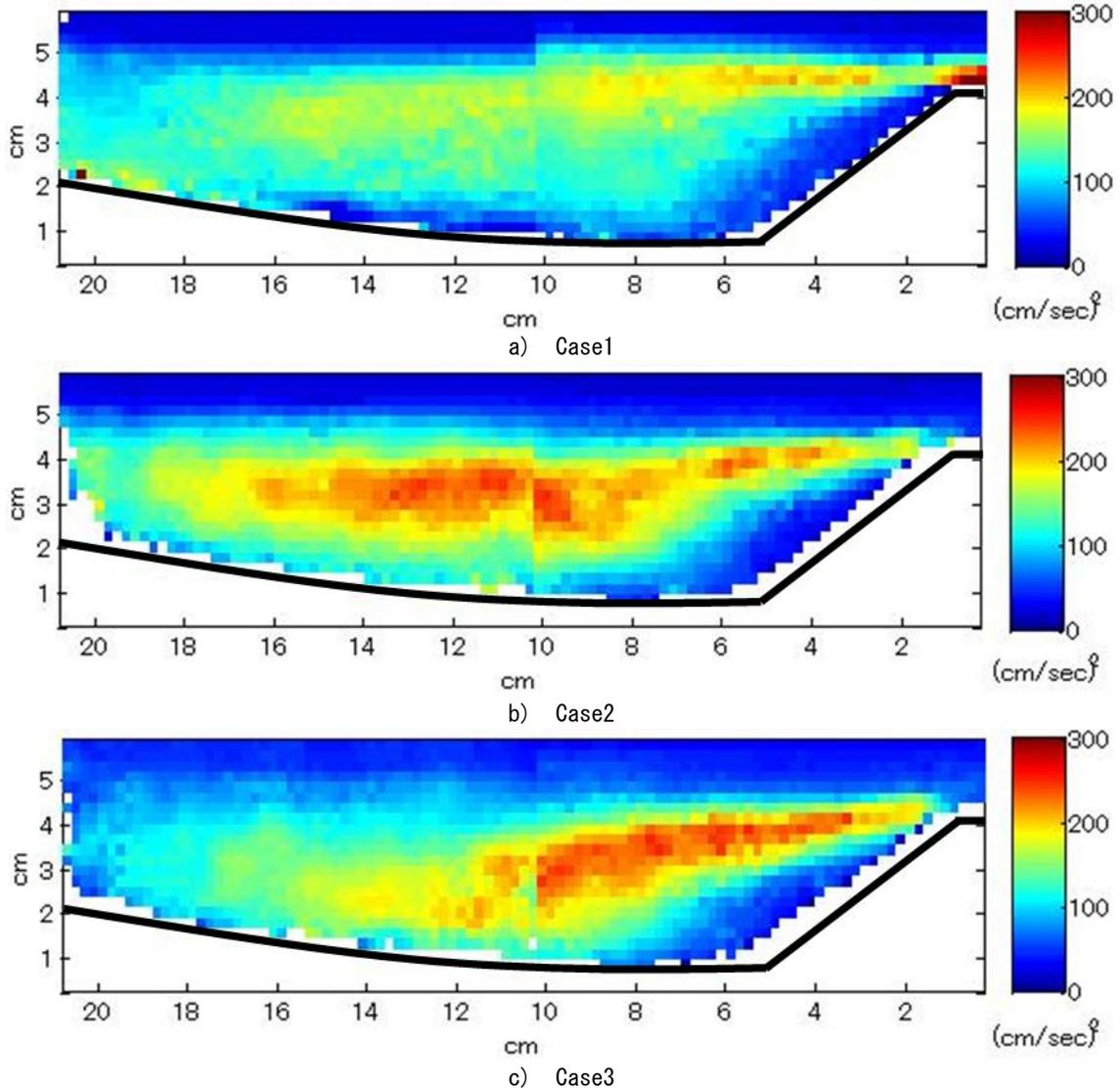


図-8 デューン河床における流体の乱れエネルギー

中心に拡散しながら発達する乱れエネルギー分布となるが、浮遊砂が存在する場合は明らかに乱れエネルギーの増加があり、粒径の増大と共に乱れエネルギー分布の指向性が明確に下方へ変化する様子が確認できる。3(1)で議論されたように、浮遊砂によって誘発された乱れは、流れのせん断性に応じて強化される。デューンクレスト背後の強いせん断面近傍において砂粒子による乱れは顕著に増幅され、**case1**の最大乱れエネルギーに比べ20%以上高い乱れエネルギーが広域に分布することになる。秩父ら⁵⁾は砂粒子がその輸送及び沈降過程において新たな乱れを誘発することを指摘している。しかし、この領域では、砂が誘発する乱れだけではなく、せん断流によるこの乱れの強化が顕著に現れており、デューン背後の乱流を決定する重要な現象と考える。一方、粒径の小さな**case2**の方が**case3**よりも高い乱れエネルギーが広く分布している。これは3(1)で示した平坦床での沈降砂に対する結果と同様の傾向を示す。これについては次で議論を行う。

図-9は、クレスト背後の砂輸送速度の乱れエネルギー分布を表したものである。3(1)における砂粒子に誘

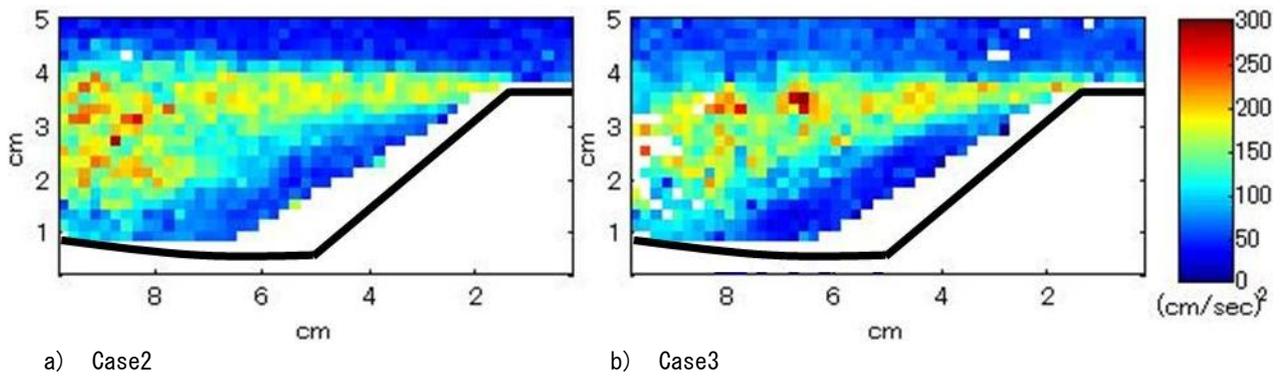


図-9 デューン河床における砂の乱れエネルギー

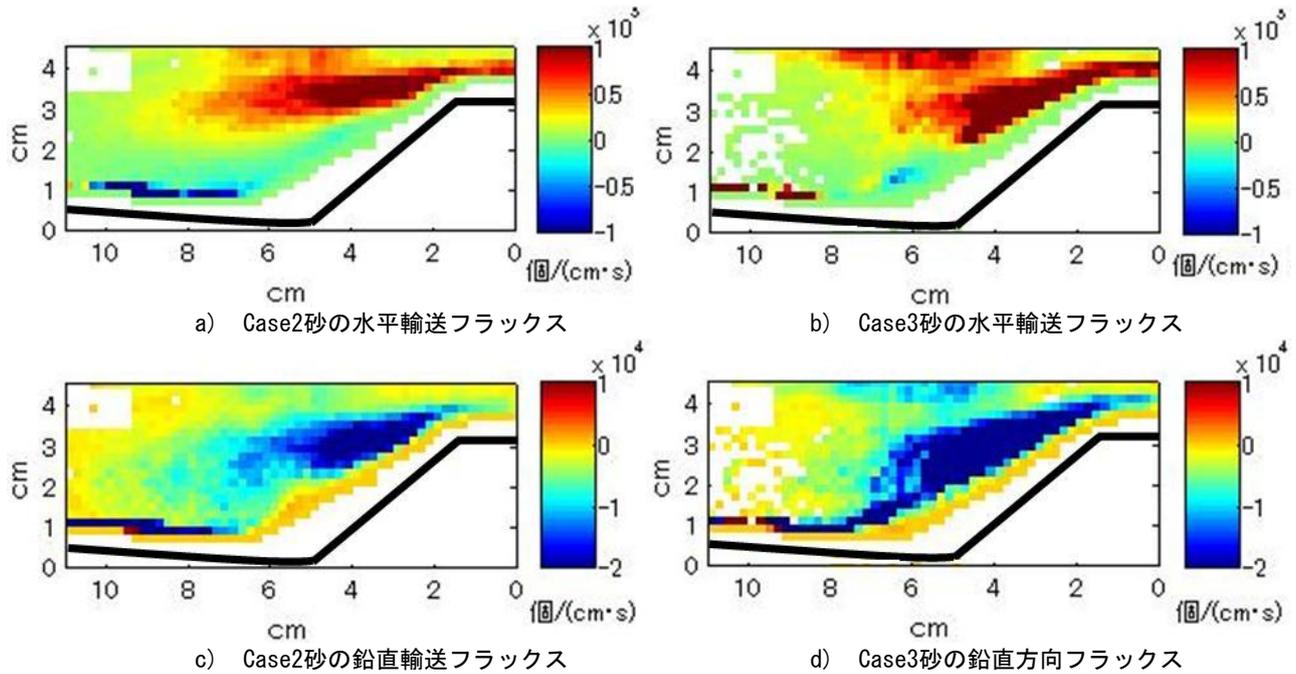


図-10 砂の輸送フラックス

発される乱れは沈降過程がその原因となるが、ここで対象とするような乱流中では、それ以外に流体乱れにより砂自体が駆動されその運動は変動する。一般に、流体の流れの変動に対しては粒径の大きい粒子ほど応答時間が長く追従性は低下する。結果として大径浮遊砂の輸送速度の乱れエネルギーは相対的に低下し、これに応じて粒子運動の変動に伴って誘発される流体乱れも相対的に低くなると考える。つまり、前図で示した相対的な流体の乱れエネルギーの差は、沈降過程に起因して発生する流体の乱れより、この乱流によって駆動され変動する粒子運動に誘発される影響が顕著に表れているものと考えられる。

(3) 浮遊砂の輸送フラックス

浮遊砂の数密度分布をもとに、砂の輸送フラックスを算出した。図-10は、case2及び3のそれぞれ水平方向、鉛直方向の輸送フラックス分布を表している。両ケース共にクレスト背後において、水平方向に正のフラックス、即ち流下方向への顕著な砂の輸送量が、鉛直方向に負のフラックス、即ち鉛直下方への輸送が明確に現れているのがわかる。特に、鉛直フラックスはクレストから放出された砂粒子の単位時間当たりの河床に落下する粒子数を定量的に表すものであり、ステップレンクス等の砂の輸送距離の特定を行うために意味をもつ。大径粒子であるcase3の鉛直フラックスは、case2と比べ、広域に多量の砂粒子の落下が確認され、クレスト背後全域に堆積する。

図-11は、それぞれの輸送フラックスの発散、即ち単位時間当たりの砂粒子の数密度の増加率を表したものである。Case3ではクレスト部からトラフ部に渡ってcase2の値の倍以上の負の発散、つまり正の砂の数密度の増加率を示す一方、case2では負の発散域はクレストの極近傍に限定されているのがわか

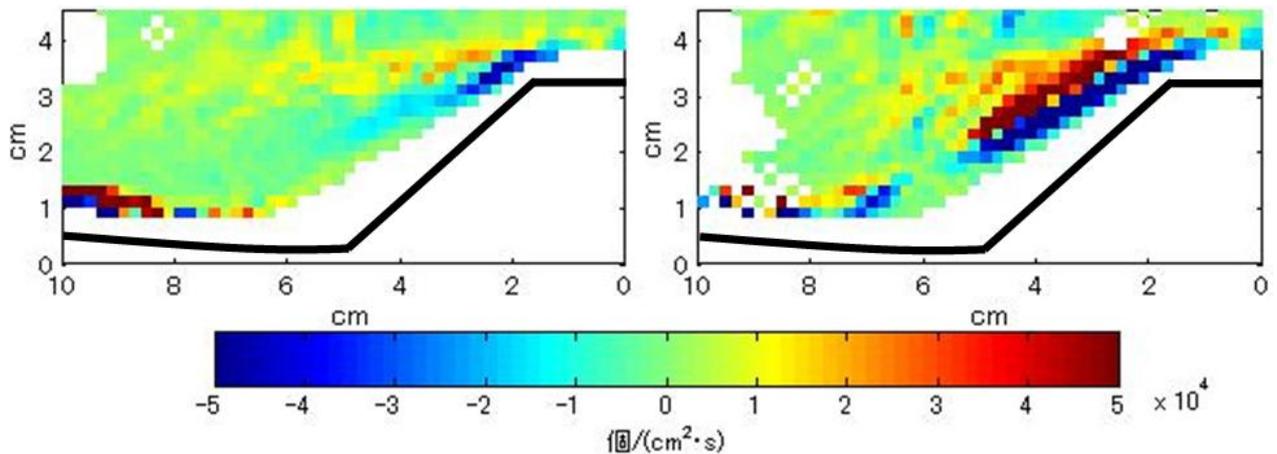


図-11 砂粒子輸送フラックス発散分布

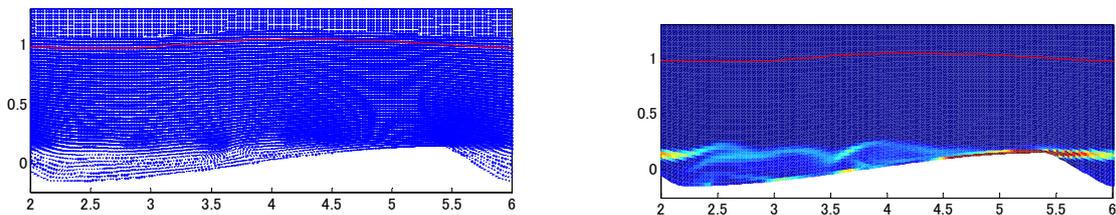


図-12 計算領域中央断面上の流速分布(左)と乱れエネルギー分布(右). 赤線は自由水面.

る。即ち、クレスト背後の砂の堆積量と範囲、あるいは砂の輸送距離と河床への落下分布が粒径に強く依存することを表している。なお、この結果は、3(2)の議論から明らかなように、デューン背後のせん断乱流と粒径に応じた粒子による乱れの発達と浮遊砂の沈降過程が相互に影響し、結果として現れるものであり、流況、地形形状、粒径の異なるさらなるパラメータスタディーについて本研究で行った解析法を適用することにより物理的に合理性のある乱れと砂の輸送現象を説明できるものとする。

4. ステップレングスモデル化に向けた数値モデル開発

これまでの実験をベースとした浮遊砂の輸送の特定によって本研究の目的であるステップレングスのモデル化は可能となると考えるが、砂の径、デューンの形状だけでなく流量、河床勾配によって初期乱れ強度が大きく変化するため、発生する乱れをパラメータとする砂輸送の特徴化は容易ではない。本実験を模擬する浮遊砂混入下の乱流を数値的にシミュレートするための数値モデルを現在開発中である。

計算は、渡部ら(2007)と同様に、Large Eddy Simulationと粒子運動のStochasticモデルをリンクさせたTwo-wayフルカップリングモデルを採用した。実験と同一形状の固定不透過底面をもつ3次元開水路流れを再現し、水面はLevel-set法により計算する。

図-12に計算領域中央断面の流速分布と乱れ強度の分布を示す。LESは瞬時の流速場を記述するため、直接図-8との比較はできないが、特徴的な水平せん断層の発達と再付着に応じた乱れの変化が表されている。

図-13は、粒子投入後初期段階における、粒子位置、横断方向を軸とする渦度、流下方向を軸とする渦度の分布を表している。初期投入粒子速度はゼロに固定しており、粒子投入の影響が粒子位置より下流側の渦度を変化させている様子を確認することができる。特に旋回性の流下方向を軸とする渦度は浮遊粒子に顕著に影響を受け、広い範囲において発達していく(図-14)。

この数値モデルは、開発中であり、実験との検証もできていないが、この様な数値ツールにより詳細なパラメータスタディーが可能となり、ステップレングスモデルの決定に繋がるものとする。

5. おわりに

本研究は光学的選択分離手法を適応したPIV解析を行い、清流及び浮遊砂存在時の乱流特性の比較を行うことにより浮遊砂の輸送と流体の相互作用について議論を行った。

底面形状に変動のない様な開水路流れにおいて、流体はせん断性の高い河床近傍で浮遊砂の影響を受けることによりその乱れを強化し、その結果、浮遊砂の乱れが増加する様子が確認された。

デューン河床で特徴的な流れを示す剥離域において浮遊砂は流れの指向性に変化を与え、剥離渦のスケールに変化を及ぼすことが確認された。また、浮遊砂は流体の乱れエネルギーを清流時のそれに比べ20%以上増加させ、乱れエネルギー分布の指向性を下方へ変化させた。これらの現象は砂粒子の粒径によって大きく異なることが確認された。一方、浮遊砂は剥離域において流体から強い影響を受け、流れとの相互作用によりその輸送過程が大きく変化することが確認された。また、クレスト背後において流体に駆動される浮遊砂はその粒径によって堆積量と堆積範囲が大きく異なることが浮遊砂の輸送フラックスを用いた議論により明らかとなった。

本実験を模擬する浮遊砂混入下の乱流を数値的にシミュレートするための数値モデルを現在開発中である。この様な数値ツールにより詳細なパラメータスタディが可能となり、ステップレングスモデルの決定に繋が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) Nezu, I. and Azuma, R.: Turbulence characteristics and interaction between particle and fluid in particle-laden open-channel flows, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.130, pp.988-1001
- 4) 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
- 5) 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.583-388
- 6) C. T. Crowe, R. Troutt and J. N. Chung : Numerical models for two-phase turbulent flows, Annual Reviews Fluid Mech, 1996

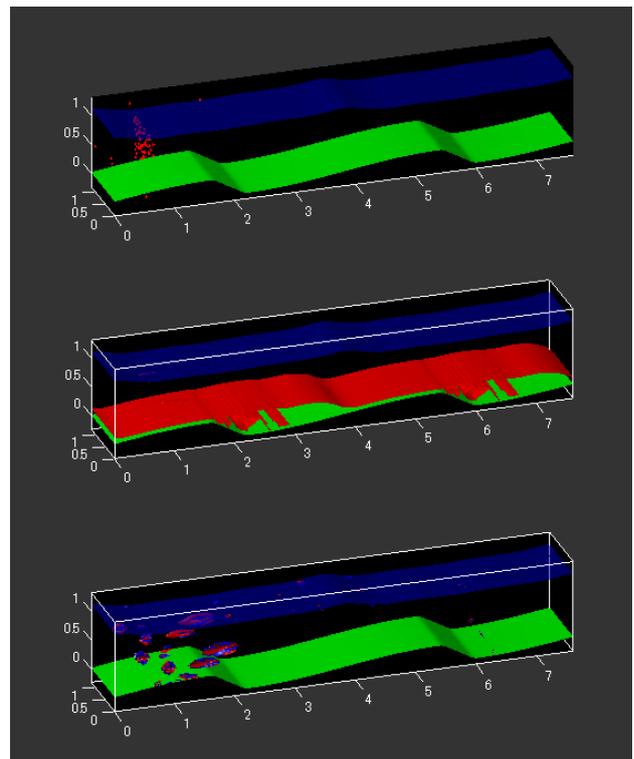


図-13 粒子投入(100個)直後の浮遊粒子位置(上), 横断方向を軸とする渦度(中), 流下方向を軸とする渦度(下).

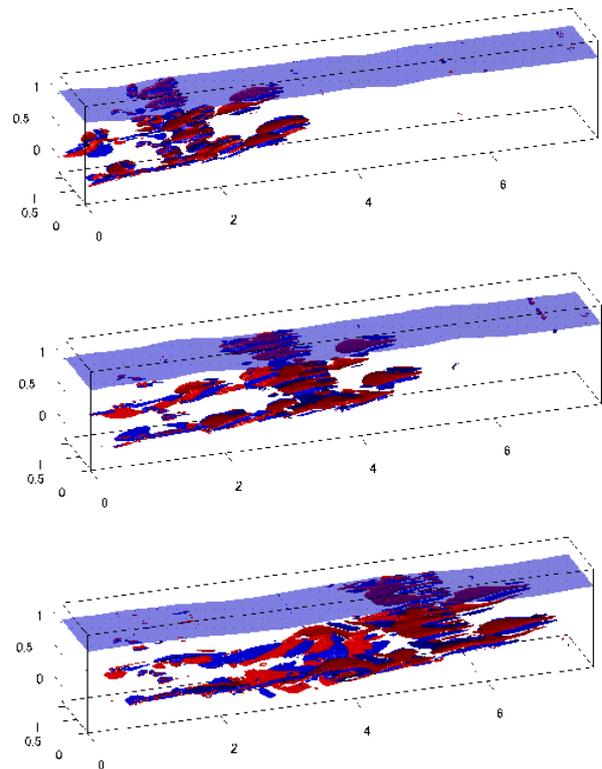


図-14 流下方向を軸とする渦度の発達の様子