Dune 上の固液混相流に関する実験的研究

Experimental study on Liquid-Solid two-phase flows over dunes

北海道大学工学部　学生会員　○　山下　智子(Tomoko YAMASHITA)
北海道大学工学部　正会員　渡部　靖憲(Yasunori WATANABE)
北海道大学工学部　正会員　清水　康行(Yasuyuki SHIMIZU)

keywords: *PIV(Particle Image Velocimetry),dune, suspended load*

1.　はじめに

開水路流れにおいて形成されるDuneのクレスト背後では境界層の剥離と同時に剥離渦が発生し,この渦中の乱れは河床の砂を巻き上げ,浮遊させる.そのため ,このクレスト背後の渦に駆動された浮遊砂のクレスト方向への輸送及びクレスト前面の流下方向への流輸送によって Dune 形状が変化し ,またこれに応じて渦形成並びに砂輸送過程が変化する.この浮遊砂の一連の浮遊･輸送過程はまだ,明らかにされていない.

一方, Gore ら [1]によって乱れの中に粒子が入り込んだ際,その粒子の径が乱れの特性長の一割に満たない場合は乱れエネルギーは粒子を動かす事に使われ, 乱れエネルギーは減少し, 逆に乱れの中に大きな粒子が入った場合, 乱れエネルギーは増加する傾向にあるということがわかっている. 流体と浮遊砂が互いに複雑に影響を与える Dune 背後の流れにおいてこうした水-砂間のエネルギー交換は両者の力学的相互相関作用を特長化する上で重要である.

本研究では,この浮遊砂の浮遊,輸送,拡散の過程を同時刻同一箇所の水粒子と砂粒子のそれぞれの速度を画像計測により特長化し流体-砂間の,固液相互作用を明らかにすることを目的とする.

2.　実験方法

実験は全長10m,幅 0.1m,壁面高さ 0.25mのアクリル製の水路で行われた. 底面は可変勾配となっており,今回は 0.002 の一様勾配とした. 流入口での乱れおよび流出口での低下背水を極力抑えるため,上流端から 2m,下流端から 0.5m は固定床とした(図-1 参照).さらに低下背水による流速の増大を抑えるために,流出口ではゲートをやや下げて常流流れとなるようにした. 移動床部分には,固定床の高さと等しくなるよう 0.05m 厚に平均粒径 0.28mm の砂(東北 6 号硅砂)を敷き詰めて通水を行った.また,給砂は上流側の移動床と固定床の境界部において,河床高が一定に保たれるように行った.

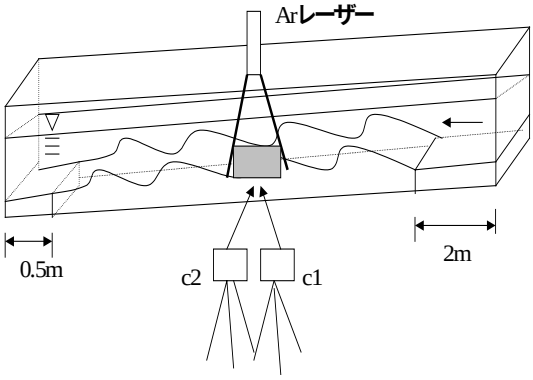

図- 1 実験水路

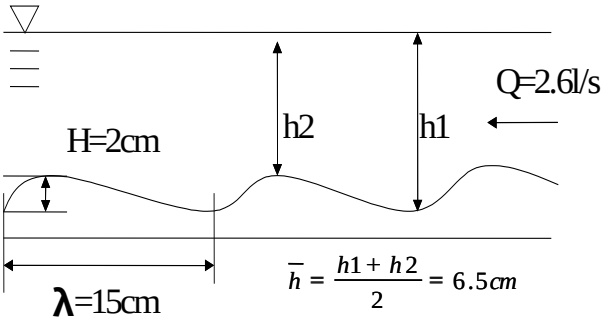

図-2　実験条件

流量 2.6l/s, 平均水深 0.065m, 河床波 dune の平均波長 15cm, 波高 2cm であった(図-2 参照). また, dune の周期は平均 8 分であったため 2 分おきに 10 秒間の画像計測を行いDune のクレストから4位相に対する混相流況を調べた. 流下方向と平行にアルゴンレーザー(波長 514nm,488nm のマルチビーム)をシート状に照射し, 5cm×8cm の範囲を二台の高速ビデオカメラ(フレームレイト 125[fps],シャッタースピード 1/500[1/s] ,解像度 1024×1024pixel)で撮影する. 実験時には,浮遊砂の動き,流体の乱れが上下流端の影響をもっとも受けないと考えられる,水路中央で撮影した. 二台のカメラのうち,一台には波長 530nm 以下の光のみを透過させるローパスフィルターを, 他方のカメラには ,570nm 以上の光のみを透過させるハイパスフィルターを設置した. これにより ,砂粒子からのレーザーの反射光と蛍光中立粒子からの励起光を選択的に異なるカメラで同時計測可能となる.

3.　画像解析

(1)キャリブレーション

あらかじめ, 二台のカメラで同一箇所を画像座標と実座標を対応させるようにキャリブレーションを行った. まず, 1cm 間

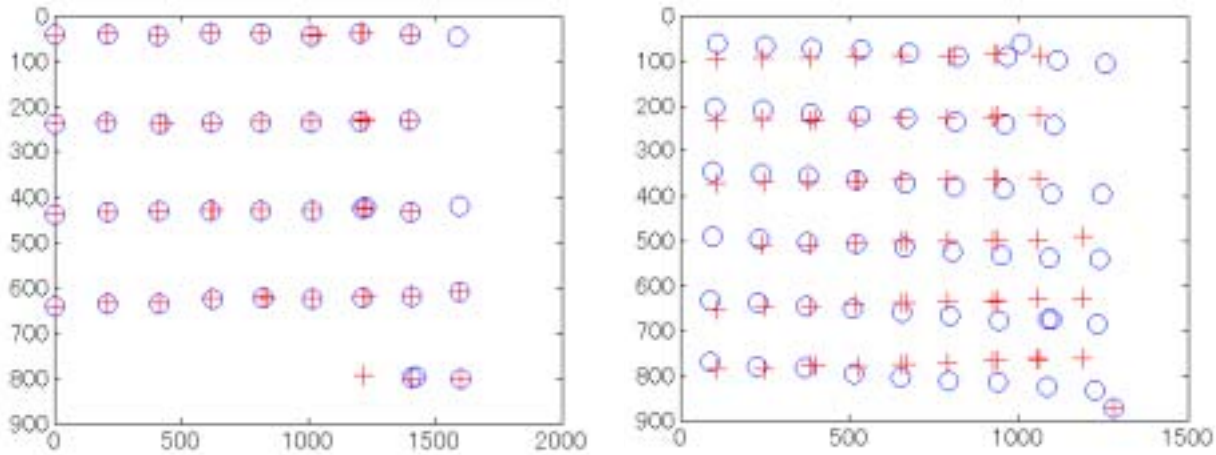

図- 3 線形補正

隔に蛍光色で点を打ったキャリブレーションボードを各々のカメラで対応する点が判別できるようにし光学フィルターをかけて撮影した．撮影した画像から，閾値を決めて二値化し，その点の重心の画像座標を実座標へ線形投影を行った（図-3参照）．

(2)前処理

次に，実験で得られた画像をそれぞれ砂粒子とトレーサー粒子の粒径に合わせてガウシアンフィルターをかけ画像強度の平滑化を行った．さらに，コントラストを調節し，レーザーシート面より前を通過した粒子の影などを除去し，円形のトップハットフィルターをかけることによってその粒子スケールの画像濃度と，それ以外の背景画像濃度とを分離した．

(3)Particle Imaging Velocimetry(PIV)

取得画像を小領域に分割し，その分割された領域内の輝度値パターンを用いて，2画像間でパターンの類似している領域をｘ方向ｙ方向に分けて探査する画像相関法を用いた．その類似度を評価するには直接相互相関法（式 1）を用いた．

直接相互相関関数

$$C_{fg}(x,y) \quad \overline{f(x,y,t)f(x \quad x,y \quad y,t \quad t)}$$

$$\lim_{l_0} \frac{1}{L_0^2} \int_{-\frac{L_0}{2}}^{\frac{L_0}{2}} \int_{-\frac{L_0}{2}}^{\frac{L_0}{2}} f(x,y,t)f(x \quad x,y \quad y,t \quad t)dxdy$$

L_0: 領域サイズ

離散表現

$$\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} f(x_i,y_j,t)f(x_i \quad x,y_j \quad y,t \quad t) \qquad (1)$$

$$u \quad \frac{x_{cfg\max}}{t} \qquad v \quad \frac{y_{cfg\max}}{t}$$

N：検査領域サイズ

ここでfは画像濃度，Δｘ，Δｙ，Δｔは二画像間の検査距離及び時間間隔，$x_{cg\max}$，$y_{cg\max}$はそれぞれ相互相関関数が最大値をとるときの移動距離である．

また，デジタル画像上で輝度パターンを表すと画素単位の移動量しか得られないが，さらに詳細な移動量を検出するためサブピクセル解析を行った．

検査領域サイズＮは，相対的小スケール乱れを解像するために 2.5×2.5mm=50×50pixel と設定した．また，探査領域は検査領域を囲む 150×150(pixel)と設定した.一般に砂粒子濃度は底面で高く水面に近づく程濃度は低下し，水に混入させた中立粒子濃度は Dune 背後で低い．領域内の粒子が5個以下だった場合,式(1)で与えられる相関関数の信頼性が低い為周辺8点の中で粒子数が十分な領域から算出した速度から逆数補間法 により速度が決定される．

(4)後処理

PIV により得られた速度ベクトルには，実際とは異なる粒子対応付けが行われ大きな誤差を含む，誤ベクトルが含まれる．流体は連続体であり流速も空間的に滑らかに分布するはずであり浮遊砂速度も空間的に分布をもつと仮定し，周辺の速度ベクトルと比較して誤ベクトルを除去した．今回は，粒子数が少ない時と同様に周囲8点での着目点からの距離の二乗の逆数補間を行った．

4.　結果

測定された流体と砂の瞬時速度$\mathbf{u}_s, \mathbf{u}_f$は次の様に平均，変動速度の和で表される．

$\mathbf{u}_s \quad \overline{\mathbf{u}_s} \quad \mathbf{u}'_s$　（$\overline{\mathbf{u}_s}$：平均速度成分　$\mathbf{u}_s'$: 変動速度成分）

$\mathbf{u}_f \quad \overline{\mathbf{u}_f} \quad \mathbf{u}'_f$　（$\overline{\mathbf{u}_f}$：平均速度成分　$\mathbf{u}_f'$: 変動速度成分）

各相の平均，変動速度を平均処理することで砂とトレーサーの各レイノルズ応力: $\overline{u_s'v_s'}, \overline{u_f'v_f'}$，各乱れエネルギー: $k_s \quad (\overline{u'^2_s} \quad \overline{v'^2_s})/2, k_f \quad (\overline{u'^2_f} \quad \overline{v'^2_f})/2$，，トレーサーの砂に対する相対速度: $\mathbf{U} \quad \overline{\mathbf{u}_s} \quad \overline{\mathbf{u}_s}$ が求められる．また，添え字はs:砂粒子，f:トレーサー粒子である．

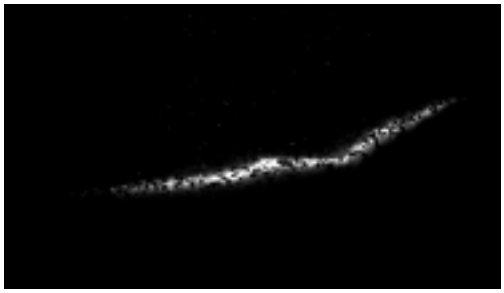

図-4　計測開始直後の砂からの反射光画像

図-5　計測開始直後の蛍光トレーサーからの蛍光励起光画像

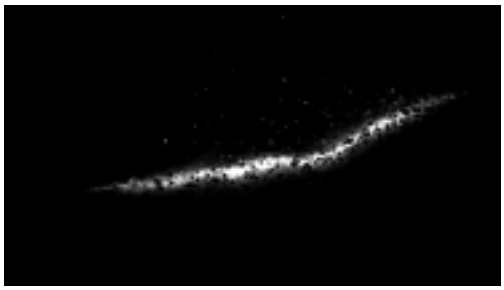

図-6　図-4から3秒後の計測開始直後の砂からの反射光画像

図-7　図-5から3秒後の計測開始直後の蛍光トレーサーからの蛍光励起光画像

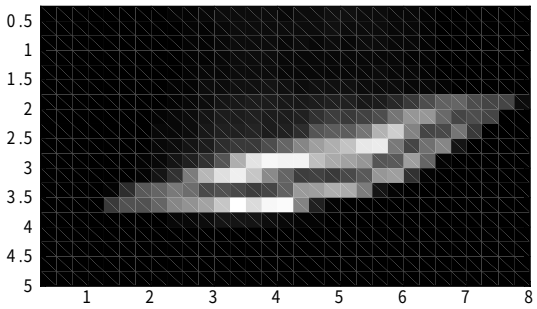

図-8　平均砂粒子個数分布

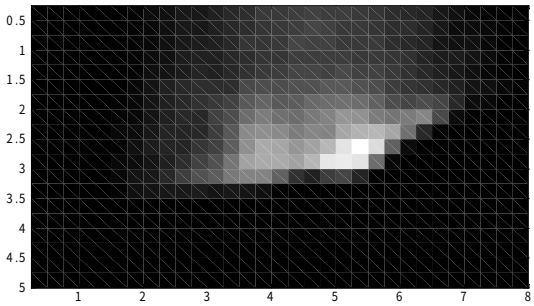

図-9　平均蛍光トレーサー個数分布

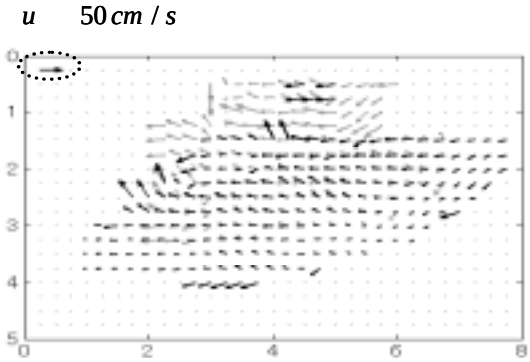

図-10　平均流速

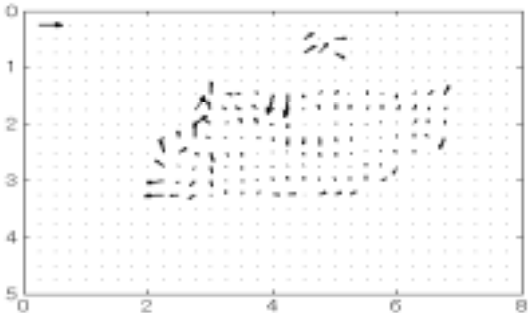

図-11　水粒子の砂粒子に対する相対速度

浮遊砂
中立トレーサー

以下にクレスト背後での３秒間（画像375枚分）の速度計測の統計処理の結果について説明する．図-4，-5はそれぞれ計測開始直後の砂粒子からの反射光及び蛍光粒子からの蛍光励起光を記録した実画像である．図-6，-7は３秒後の同様な画像である．この期間内に顕著なDune形状の変化はなく，浮遊砂及び蛍光トレーサーの移動のみを計測したことになる．図-8 は砂粒子の計測時間内の平均個数分布である．河床面近傍のみではなくクレスト背後で剥離によって浮遊した砂が広い領域に輸送されているのがわかる．図-10 は浮遊砂（固相流れ）と水粒子（液相流れ）の平均速度分布を表したものである．浮遊砂は水平方向には液相流れに追従するものの液相とは異なる鉛直速度分布を持っている．特に一般にモデル化されている様な浮遊砂の沈殿過程は少なくともこの領域では表れていない．砂の粒径，浮遊砂濃度，流況で異なる複雑な浮

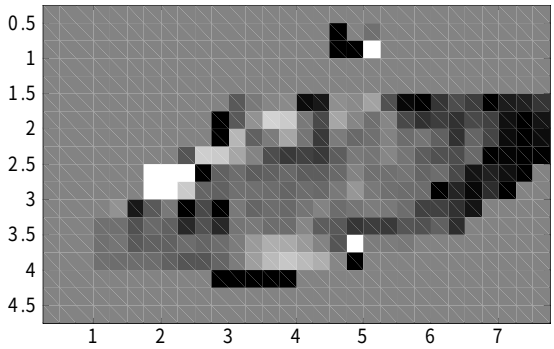

図-12　液相流れのレイノルズ応力 $(\overline{u'_f v'_f})$

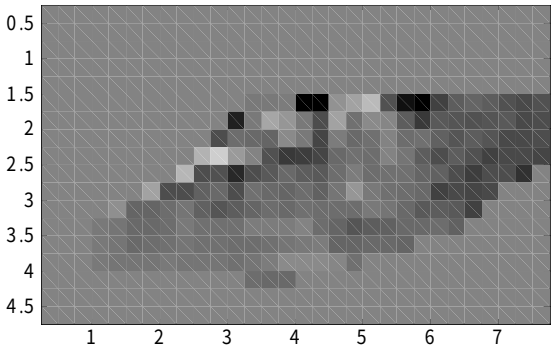

図-13　固相流れのレイノルズ応力 $(\overline{u'_s v'_s})$

250 (cm^2/s^2)　　250 (cm^2/s^2)

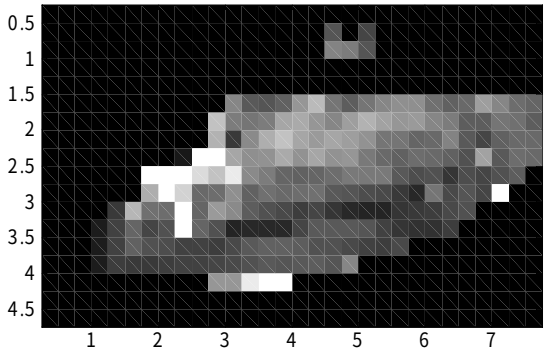

図-14　液相流れの乱れエネルギー (k_f)

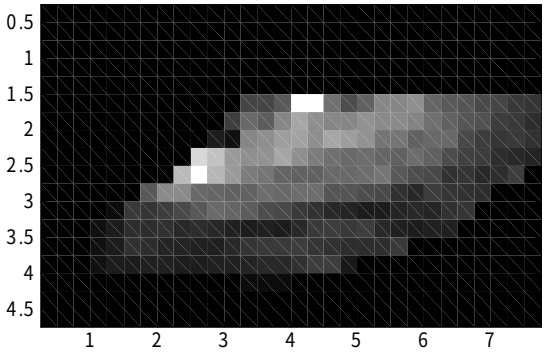

図-15　固相流れの乱れエネルギー (k_s)

$0(cm^2/s^2)$　　$875(cm^2/s^2)$

遊砂輸送機構があるものと考えている．図-11 は固液相の相対速度を表したものである．水平相対速度が鉛直相対速度より小さい結果は流下方向には浮遊砂は流れに受動的に運動する一方，鉛直方向には相対的に大きな抗力を流体に与えていると考えられる．

図-12，-13 は両相のレイノルズ応力を表し，図-14，-15 は両相の乱れエネルギーを表している．液相のレイノルズ応力は Dune のクレスト背後で大きく変化し，剥離渦内の典型的な分布となる一方，固相のレイノルズ応力には同様な分布は見られない．一方，乱れエネルギーの分布は両相で相似性が見られる．また，固相流のレイノルズ応力と乱れエネルギーよりも液相流のものの方が変動が大きく，浮遊砂の乱れが流体の乱れから誘発されているものと考えられる．

平均砂粒子個数分布と乱れエネルギーを比較すると，浮遊砂が多い領域で相対的に乱れエネルギーは小さく，相関がみられない事から密度の高い方が乱れも大きくなるわけではないということがわかる．また，砂の乱れに関して，レイノルズ応力も乱れエネルギーも河床近くよりクレストの高さに近い方の分布が高い．これは，流体の剥離渦の死水域での巻上げの乱れよりも流体の速い流れに誘発されて起こる乱れの方が支配的な乱れであるためと推測できる．

5.　結論

・浮遊砂，流体の同時速度分布画像計測法を提案した．

・本計測法により砂の浮遊，輸送，拡散過程を解明するための固液速度分布が取得可能である．

・両相に対する乱流統計量を計算し乱れの相互作用について議論を行った．

今後,正確なデータと解析方法を探っていきたい．

参考文献

1）R.A.Gore and C.T.Crowe:Effect of particle size on modulating turbulent intensity,proceeding,Iint,j,Multphase Flow Vol.15 No,2,pp.279-285,1989

2）PIV ハンドブック　可視化情報学会　森北出版