

小規模河床波上の流体-浮遊砂速度の同時 PIV 計測

New imaging technique for measuring fluid and solid velocities
in sand-laden flows over Dunes in an open channel

秩父宏太郎*・山下智子**・渡部靖憲***・清水康行****

Kohtaro Chichibu and Tomoko Yamashita and Yasunori Watanabe and Yasuyuki Shimizu

* 北海道大学 北方圏環境政策工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

**北海道大学 北方圏環境政策工学専攻 (同上)

***正会員 工博 北海道大学助手 環境フィールド工学専攻 (同上)

****正会員 工博 北海道大学教授 北方圏環境政策工学専攻 (同上)

This technique is capable of acquiring simultaneous sand-mixing velocities at high accuracies based on two high-resolution / high-speed video cameras with optical filters. In this paper, a suspension process of sands over the Dunes via mixing process in separated vortices and turbulence disturbances is characterized in terms of turbulence statistics on the basis of the measurement results, and statistical properties of turbulence induced by the suspended sediments is identified.

Key Words: PIV, Dune, solid-fluid two phase flow, simultaneous measurement

キーワード: PIV, 砂堆, 固液2相流, 同時計測

1. はじめに

実河川では流れの乱れ作用によって砂粒子が輸送・拡散され、流況に応じて河床波が発生する。小規模河床波として形成される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。Tooby¹⁾は、渦中の圧力勾配と渦に巻き込まれた固体粒子の重力、慣性力のバランスから固体粒子の渦への捕捉過程を説明した。この粒子の捕捉は、Dune背後で形成された剥離渦中への浮遊砂の浮遊時間の長時間化を経由して局所的な流れによる流下方向への輸送確率を増加させるものであり、浮遊砂の輸送フラックスを決定する上で重要なファクターになると考えられる。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、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1割に満たない場合は乱れエネルギーは粒子を駆動するために消費されるため乱れエネルギーは減少し、逆に乱れの中に相対的に大きな粒

子が入った場合、新たな乱れを生成し乱れエネルギーは増加する²⁾。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徴化する上で重要である。

本研究は、Duneの形成メカニズム及び浮遊砂の浮遊、輸送、拡散の過程を解明するため、PIVによるDune上の同時刻同一箇所の水粒子と砂粒子速度の画像計測法を提案した。PIVに関しては既往研究が多数あるが

(Adrian¹⁾など)、Dune上の流体-浮遊砂速度の同時刻

同一箇所の計測を行っている例は少ない。この計測により瞬時の固液相互作用を特徴化し、特に河床波上で生成される乱れと流体-浮遊砂間の抗力との関係及び浮遊砂の輸送と剥離及び乱れ構造との関係を見積もることが可能となる。

2. 実験方法

実験に用いた水路は全長10m、幅0.1m、壁面高さ0.25mの亚克力製水路である(図-1参照)。勾配は0.002の1様勾配に設定し、流出口付近では低下背水による流速の増大を抑えるために勾配を緩やかにした。流量は平均

2.257 (l/sec)の条件で実験を行った。水路上流端から2m, 下流端から0.5mを固定床とし, その他の移動床部分には平均粒径0.28mmの東北6号硅砂(比重2.61)を0.05m厚に, 固定床の高さと等しくなるように敷き, その中央部河床近傍を計測領域とした。給砂は上流側の固定床との境界部分において河床高が一定に保たれるように行った。

計測領域側方に撮影周波数250Hz, 解像度1024×1024画素の同期された2台の高解像度高速ビデオカメラを, 流下方向に鉛直方向にそれぞれ8cm, 6cmのFOV(Field of view)をとるように並べて配置した(図-1参照)。FOVを含む流下方向に平行な鉛直縦断面に対してアルゴンレーザーシート(波長488, 514nm)を水面上方より照射した。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。このレーザーシートを通過する砂は, 反射によりレーザーと同じ波長の光を返す。一方, 蛍光着色した中立粒子(粒径250~600 μ m)を流れ中に混入することによってそれらはレーザーによる蛍光励起光(スペクトルピーク波数約570 μ m)を放射する。中立粒子の比重は水と等しく水の流れの可視化を可能にする。一台のカメラには530nm以下の光のみを透過させるローパスフィルターを, もう一台のカメラには550nm以上の光のみを透過させるハイパスフィルターを装着することで, 2台のカメラで同時に浮遊砂及び中立粒子を撮影できる。

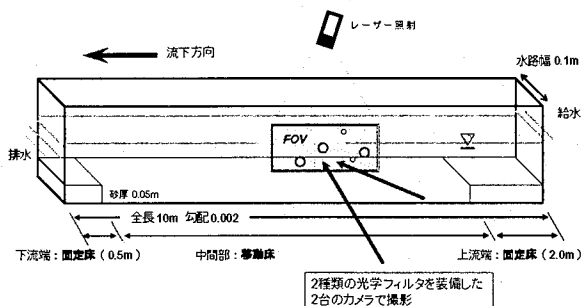


図-1 実験装置

本水理条件では波高が約35mmのDuneが形成された。Duneの峰, 谷を含む特徴的な5位相(即ちDuneの伝達周期を5分割したそれぞれの位相)について, 計測期間10秒(2500frames)に渡り撮影し, 各位相5回の試行計測を行った。(図-2参照)なお, この計測期間は, 河床波の伝達周期(約20分)と比べて十分に短かつ速度変動の時間スケール(10msecオーダー)と比べて十分に長いので, Duneの局所定常性を仮定し統計評価を行う上で問題はない。

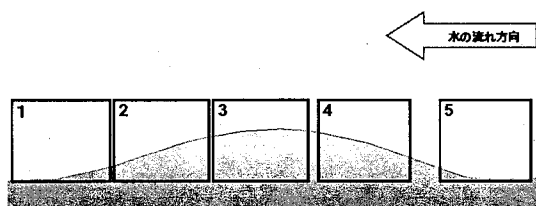


図-2 砂堆上の5つの計測領域

3. 画像解析法

3.1 キャリブレーション

2台のカメラにより同一FOVを撮影する場合, 両カメラからの光行差の違いから歪んだ画像が撮影される。この画像座標上の歪みを補正し, 対応する点を実座標に対応させるためにキャリブレーションを行う。FOVをカバーする1cm間隔の正方グリッドボードを両者のカメラで撮影し, 線形投影により画像座標上のグリッドを直交実座標へと座標変換を行った。この変換により, 2つのカメラで撮影された画像は同一の実座標上で評価可能となる。なお, この座標変換によって生じる最大誤差は5.4pixel=0.271mmであり, キャリブレーショングリッドの数パーセント程度であった。

3.2 前処理

原画像は, 画像変換後, ガウシアンフィルターによりノイズ処理され, トップハットフィルターにより粒子スケールの画像濃度とそれ以外の背景画像濃度とに分離された。また浮遊砂画像に含まれる河床面からの反射光を除去するために計測時間全ての画像輝度の平均より背景を求め, 各画像より差し引いた。

3.3 PIV (Particle Imaging Velocimetry)

本研究では, 広く使われている相互相関係数によるPIV³⁾を採用した。この方法は, 画像中にある複数の粒子群の画像濃度分布に対する連続するフレーム間の最大相互相関係数から移動距離を推定し粒子群の平均速度を求めるものである。離散相互相関係数 R は次のように定義される。

$$R_{fg}(\Delta x, \Delta y) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{ f(x_i, y_j) - f_m \} \{ g(x_i + \Delta x, y_j + \Delta y) - g_m \}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{ f(x_i, y_j) - f_m \}^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{ g(x_i + \Delta x, y_j + \Delta y) - g_m \}^2}} \quad (1)$$

ここで $f(x, y)$ は輝度関数で, $g(x, y)$ は時間間隔 Δt 後の輝度関数である。添え字 m がついたものはそれぞれの空間平均で, N は Δt 後それに対応する領域を調べる検査領域のサイズである。 $\Delta x, \Delta y$ は二画像間の検査距離を表す。

最大相互関数を示す移動距離 $\Delta x_{c/fg \max}, \Delta y_{c/fg \max}$ から, 水平(u), 鉛直(v)流速は次式で表される。

$$u = \frac{\Delta x_{c/fg \max}}{\Delta t} \quad (2)$$

$$v = \frac{\Delta y_{c/fg \max}}{\Delta t} \quad (3)$$

本研究では, 相関係数0.7以上の結果のみ採用し, 以下の相関係数をもつ信頼性の低い検査領域では逆数補

間法により周囲の流速から補完した。また、デジタル画像上で輝度値パターンを表すと画素単位の移動量しか得られないが、より詳細な移動量を検出するために周囲画素の相関係数を重み関数としてサブピクセル精度で流速を算出した。

検査領域サイズは、Dune 峰部からの剥離渦（長さスケール数 cm）を十分解像できるように $5 \times 5 \text{ mm} = 100 \times 100 (\text{pixel})$ に設定し、32 pixel 毎にオーバーラップさせて計算を行った。また探査領域はそれより前後 64(pixel) 広い領域、つまり $228 \times 228 (\text{pixel})$ と設定した。PIV では、一様な密度で検査領域内に十分な数の粒子が存在していることが精度良く流速を評価するための条件となる。流速を取得するための中立粒子の数密度は制御可能な一方、浮遊砂の濃度は一般に底面で高く水面に近づくほど低下する。このため、浮遊砂速度計測に関しては、検査領域内の砂粒子濃度が低い場合、計測信頼性が低くなるため周辺 8 点の中で粒子数が十分な領域から算出した速度から以下の逆数補間により浮遊砂速度を決定した。予備計測において、誤ベクトルによる計測誤差は検査領域内の砂粒子数が 4 個以上で十分無視できることを確認しており、本実験では補間の閾値を検査領域内に 3 個とした。

$$u_{ij}^* = \frac{\sum_{ij} \frac{u_{ij}^2}{l_{ij}^2}}{\sum_{ij} \frac{1}{l_{ij}^2}} \quad (4)$$

ここで、 l は検査領域中央の座標から周囲の検査領域グリッドまでの距離を表す。なお、粒子からの反射光及び蛍光励起光はガウス分布をもつものと仮定し連結画素内の極大値をもつ画素を粒子重心位置と定義し粒子数をカウントした。

3.4 後処理

相関法による PIV では、粒子の配置、濃度分布に依存して誤ベクトルがしばしば取得される。得られた流速及び浮遊砂速度のうち、着目するグリッドの周囲 8 グリッドの平均速度が標準偏差の 2 倍よりも大きい場合、異常流速を示す誤ベクトルと判定する。この誤ベクトルは周囲の正常流速が算出されたグリッドから逆数補間により置き換えられる。

3.5 PIV 解析の精度

可視化情報学会 PIV 標準化・実用化研究会⁹⁾によって公開されている VSJ-PIV 標準画像により本計測法の精度が検証された。流速の相関は約 0.97、代表流速に対する相対標準偏差は 4.97% と流速を評価する上で十分な精度を有することが確認された。仮に流量が増えて流速が増加しても流速に対して十分高いフレームレートで計測することで同等の精度が得られる。

4. 乱流統計量

局所定常性を仮定した計測期間(10 秒間)内の流体、浮遊砂速度の統計量をもとに流体-砂相互作用並びに固-液相間のエネルギー授受について議論を行う。前述のように特に浮遊砂のケースでは、粒子数密度が大きく変動するため、サンプルデータ数に応じて統計評価に制限を与える必要がある。つまり、計測期間内に統計的に意味をもつ有効サンプル数に満たないグリッドにおいては周囲 8 点から内挿を行った（本研究ではサンプル数が 30 以上で統計量の依存性が十分に小さくなることを確認しており、この閾値は 30 とした）。それぞれ流体及び浮遊砂について時間

平均流速 $(\overline{u_f}, \overline{u_p})$ 、乱れエネルギー

$$(k_f = \frac{1}{2}(\overline{u_f'^2} + \overline{v_f'^2}), k_p = \frac{1}{2}(\overline{u_p'^2} + \overline{v_p'^2})) \text{ として}$$

Reynolds stress $(\overline{u_f' v_f'}, \overline{u_p' v_p'})$ の分布及び抗力のパラ

メータとなる相対速度 $(\overline{u_r} = \overline{u_f} - \overline{u_p})$ を各位相について特徴化を行った。

5. 結果

図-3 は、同一時刻におけるハイパスフィルターを装着したカメラによって撮影されたローパスフィルターを装着したカメラによって撮影された砂からのレーザー反射光の原画像(上)及び中立粒子からの蛍光励起光の原画像(下)の一例である。ただし、ここでは視覚的に分かり易くするためコントラストを調整している。それぞれのフィルターによって波長の異なる光を選択的に記録されていることがわかる。

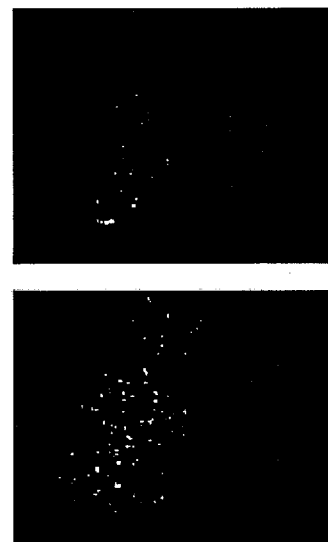
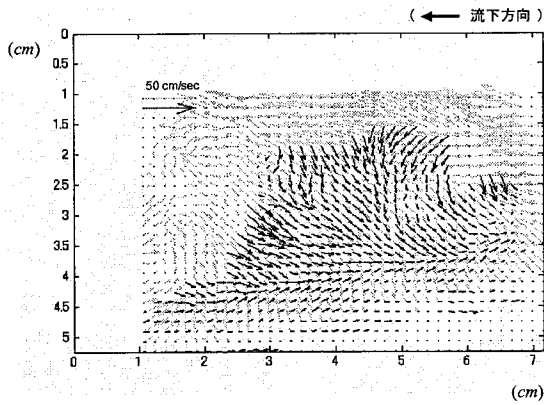
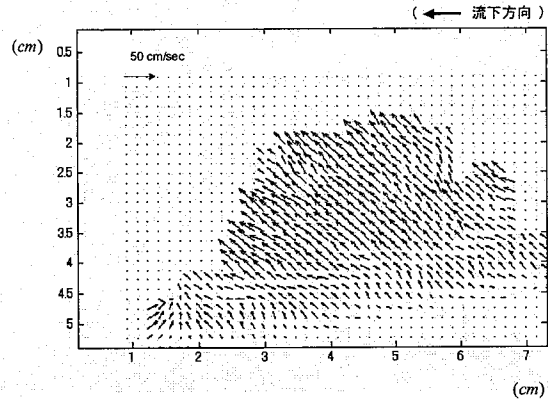


図-3 位相1の原画像(上:砂粒子,下:中立粒子)

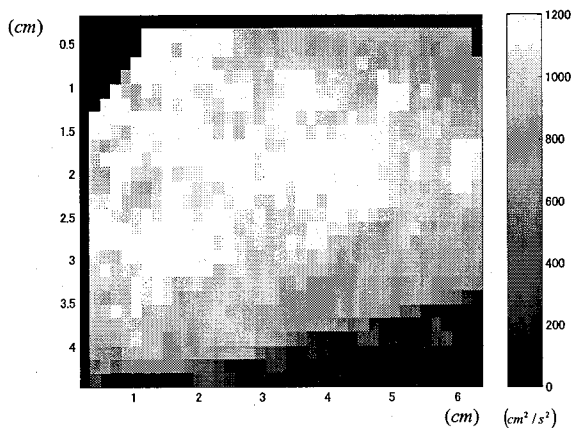


図—4 位相1の平均流速分布

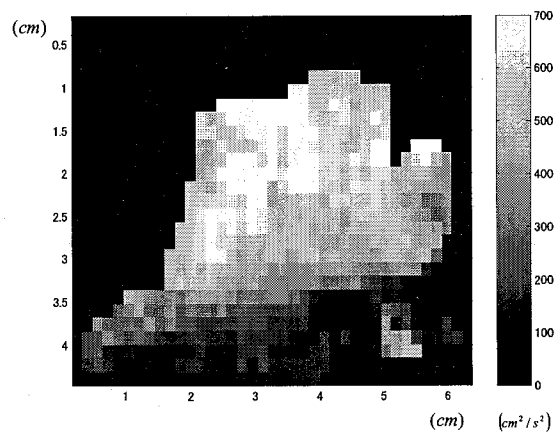
(灰色:流体速度ベクトル, 黒色:浮遊砂速度ベクトル)



図—5 位相1の相対速度分布



図—6 位相1の流体の乱れエネルギー分布



図—7 位相1の浮遊砂の乱れエネルギー分布

図—4は、剥離に伴う砂の浮遊が最も活発になると考えられる Dune のクレスト背後(位相 1)における流速(灰色)、浮遊砂速度(黒色)ベクトルを表したものである。浮遊砂は水面に近い領域では、沈降する傾向を示し、底面近傍では流下方向と逆側のクレストへ向かって移動する。これはクレスト背後の剥離に関連して砂が Dune を急峻化させる運動と解釈できる。流体は水面に近い領域では流下方向への流れとなる一方、底面近傍では上向きのベクトルが卓越し、この領域では時間平均流れが典型的なせん断流あるいは剥離流れの傾向を示さないことがわかる。この砂層から湧き出すような上向き平均流れは砂の浮遊を助長させると共に浮遊時間を長時間化させる。また、この領域の流体と浮遊砂流れの方向が全く相関しない結果は、流体—浮遊砂間に強い抗力を介する相互作用が顕著となることを示している。

図—5は、位相 1 における流体—浮遊砂流れの相対速度ベクトルを表したものである。浮遊砂は、流体により流下方向へ向かう斜め上向きに顕著な抗力を受け、浮遊を継続しつつ浮遊砂を下流へ輸送する方向に働く一方、砂は逆に流体を減速させる方向へ作用しているものと考えられる。

図—6, 7は、それぞれ流体及び浮遊砂の乱れエネルギー

一分布を表したものである。乱れエネルギーの絶対値は浮遊砂より流体の方が強く広い範囲に分布する。

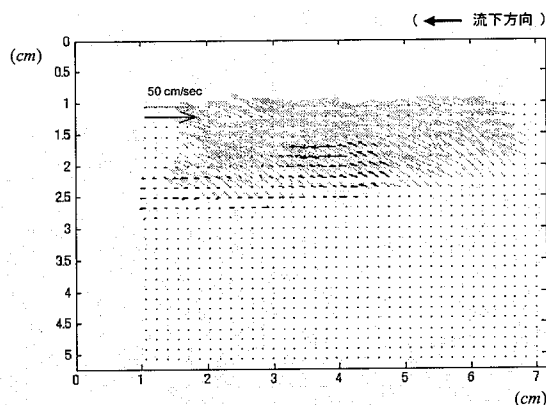
前述の様にこの領域では明確なせん断流あるいは剥離流れが流速ベクトルに現れていない点、また強い流体の乱れエネルギーが浮遊砂の存在している領域から流下方向へ広がっている点から、この領域の流体の乱れは浮遊された砂群が流体の乱れ生成に関わっていると考えられる。体積率 α の微小固体浮遊粒子の抗力になされる仕事が流体のエネルギー散逸率 ε と同等であると仮定すると次の関係式を得る。

$$\varepsilon \approx \frac{\alpha}{D} C_d |u_R|^3 \quad (5)$$

ここで u_R は水と砂の相対速度であり、 D は粒子径、 C_d は抗力係数を表す。慣性領域内では変動スケール l の流速変動 u' はエネルギー散逸と関係付けられ、式 5 は次のようにしてよい。

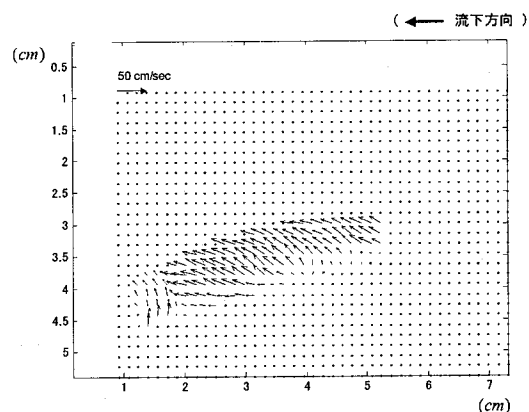
$$\frac{u'}{l} \approx \frac{\alpha}{D} C_d |u_R|^2 \quad (6)$$

これより浮遊砂が誘発する乱れエネルギーは

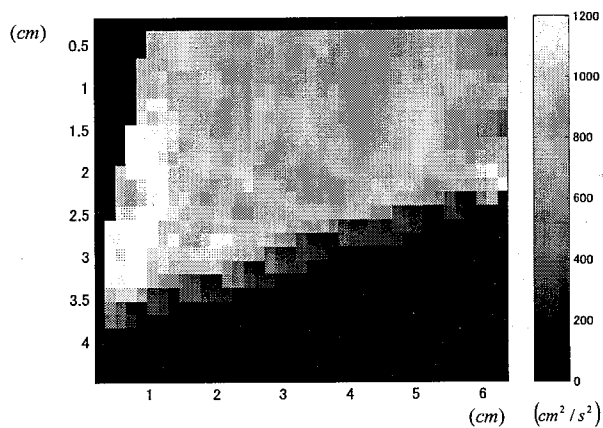


図—8 位相2の平均流速分布

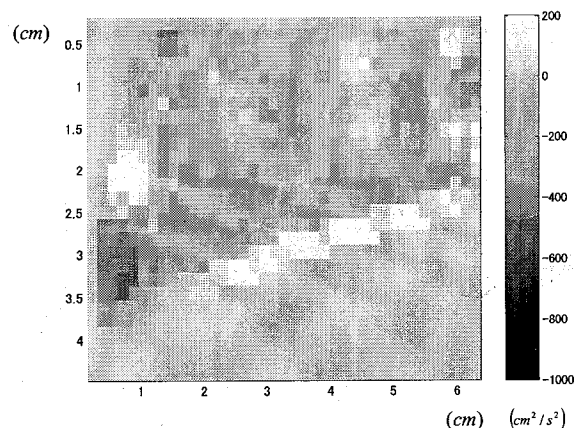
(灰色: 流体速度ベクトル, 黒: 浮遊砂速度ベクトル)



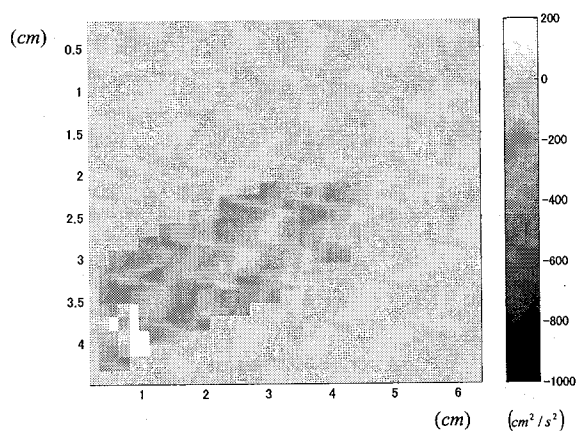
図—9 位相2の相対速度分布



図—10 位相2の流体の乱れエネルギー分布



図—11 位相2のレイノルズ応力分布(中立粒子)



図—12 位相2のレイノルズ応力分布(砂粒子)

$$K_i \approx \left(\alpha \frac{l}{D} C_d \right)^{\frac{2}{3}} |u_R|^2 \quad (7)$$

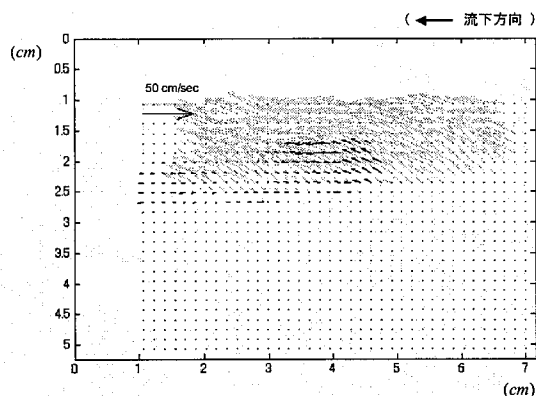
と表してもよく、相対速度が顕著に増加する領域では浮遊砂に起因する乱れが発達することになる。例えばこの位相における浮遊域の平均的な体積率 $\alpha = 0.4\%$ 、代表渦スケール(剥離渦のスケール) $l = 2 \text{ cm}$ とし、式7で浮遊砂による付加乱れエネルギー K_i を見積ると K_i は約960程度となり、図—6で示す総乱れエネルギーのかなりの部

分を占めるのがわかる。

図—8は、剥離の開始点となる Dune のクレスト部極背後(位相2)の流体及び浮遊砂速度ベクトルである。クレストの極背後から Dune の表面に沿ってレイノルズストレスの正負が交代する典型的な剥離が発生している(図—11も参照)。Dune 表面上のせん断流れが剥離の発生に伴い回転性を示し、この領域では砂の輸送が活発になりクレスト方向への輸送が確認できる。抗力の効果を示す相対速度は、流下方向に対して斜め上向きであり、剥離が砂を浮遊させるトリガーとなっていることがわかる(図—9参照)。

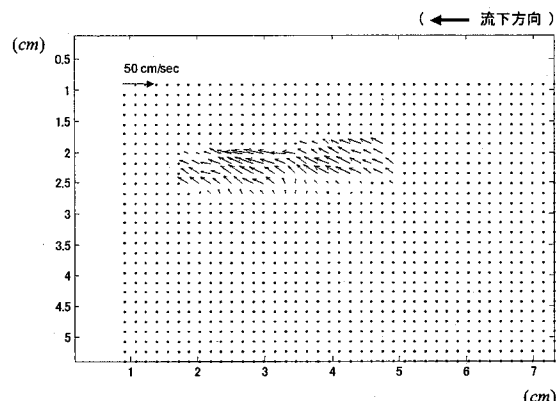
一方、強い流体乱れエネルギーは、必ずしも剥離の発生領域だけでなく、砂の浮遊領域から流下方向へ向かって分布していることがわかる。この結果もまた浮遊砂の存在が流体の乱れのソースとしての主要な役割となることを示すものである。

図—13～16は、位相3(クレスト部)におけるそれぞれ同様な平均流速、相対速度、流体乱れエネルギー、浮遊砂乱れエネルギーを表している。この領域においても少量であるが砂の浮遊が確認できる。砂輸送の方向は位相1と2が底面近傍では流下方向と逆側のクレストへ向かう方向が卓越していたのに対し、この領域では流下方向へ輸送される傾向がある。クレストを挟むこの逆方向への砂輸

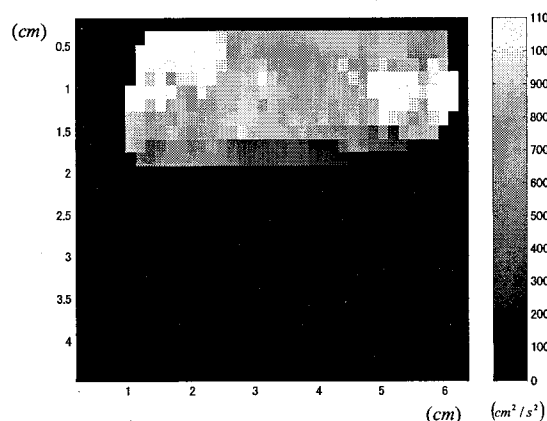


図—13 位相3の平均流速分布

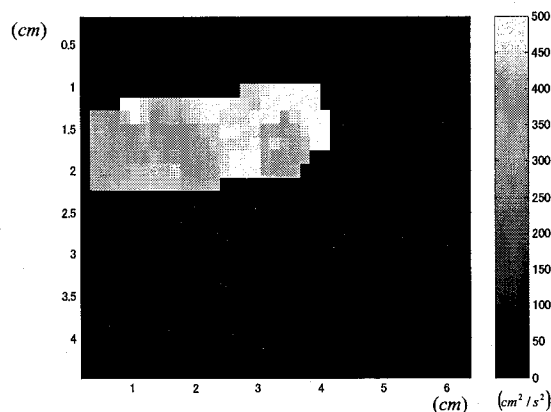
(灰色: 流体速度ベクトル, 黒: 浮遊砂速度ベクトル)



図—14 位相3の相対速度分布



図—15 位相3の流体の乱れエネルギー分布



図—16 位相3の浮遊砂の乱れエネルギー分布

送がクレストのさらなる急峻化に寄与する。相対速度については、位相2とほぼ同様な傾向をもつ。クレストの形成のためこの領域では流体が加速され、また上流側のDuneで生成された乱れが浅くなったクレストと水面までの流体層にパックされ時々強い乱れが観察された。

図—17, 18は、位相4(クレスト前面)における砂水両速度ベクトル及び相対速度を表している。Duneの斜面を駆け上がり流体が加速していく領域にも関わらず、新たに浮遊する砂は確認できなかった。一方、浮遊砂が存在しないにもかかわらずある程度強い流体乱れエネルギーが存在しており、位相3と同様に上流側のDuneで生成された乱れが輸送されているものと考えられる。位相3と4の結果は速い流速の下においても砂の浮遊は顕著とはならないことを示しており、局所流速自体が浮遊過程を決定する直接的なパラメータとならないことを意味している。

図—21, 22は、Duneのトラフ部(位相5)の各平均流速及び相対速度を表している。この領域では、Duneの背後で生成された乱れが底面に再付着する領域であり、この再付着により底面が乱され底面砂はランダムな方向へ拡散し浮遊しているのがわかる。この点で、この領域の浮遊過程は位相1, 2でみられたような剥離に起因する移動方向の決まった砂輸送とは異なる。

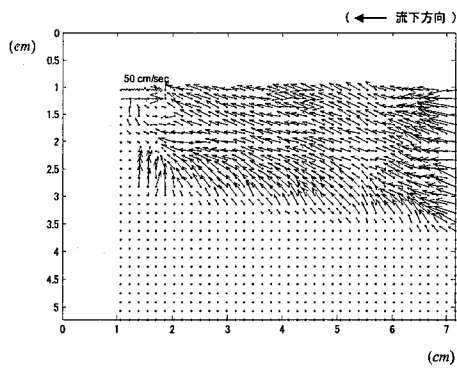
図—23, 24は、位相5における流体及び浮遊砂の乱れエネルギーである。位相1において生成された乱れが輸送、拡散し流体領域全面に相対的に強い流体乱れエネルギーが分布しているのがわかる。一方、浮遊砂乱れエネルギーは浮遊領域のみに相対的に弱い分布を示す(図—7参照)。

6. 結論

同期させた2台の高解像度高速ビデオカメラと2種類の光学フィルターを使い、Dune上の流体流れ及び浮遊砂群を同一領域で同時に計測し相互相関PIVによってそれらの速度を取得する方法を提案した。本計測法は、相対誤差5%以下の精度で固液両相の速度を評価可能である。

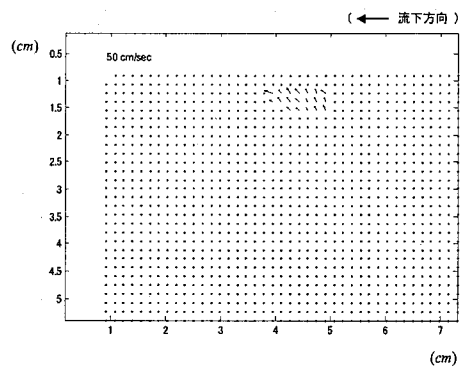
本計測法によって得られた瞬時固液混相流速は、10秒間の局所定常性の仮定の下に統計的に処理され、Duneの特徴的な位相に対する浮遊過程並びに乱れについて特徴化が行われた。

砂の浮遊はDuneクレスト背後の剥離域で開始する。この時、底面近傍の浮遊砂の輸送はクレストに向かう方向が卓越し、底面から離れるに従い浮遊砂の沈降に関わる鉛直下向きの速度が支配的となる。

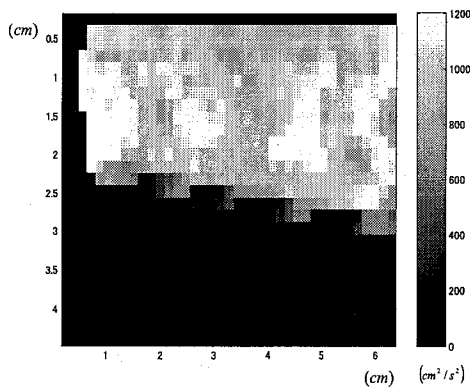


図—17 位相4の平均流速分布

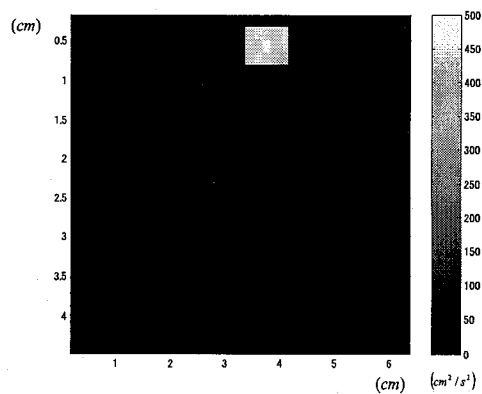
(灰色: 流体速度ベクトル, 黒: 浮遊砂速度ベクトル)



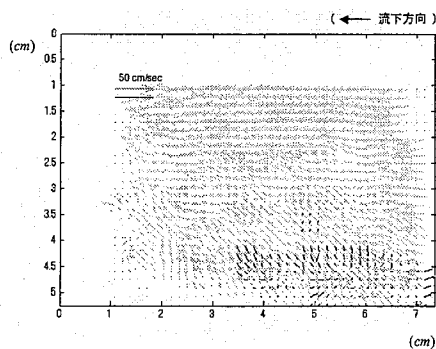
図—18 位相4の相対速度分布



図—19 位相4の流体の乱れエネルギー分布

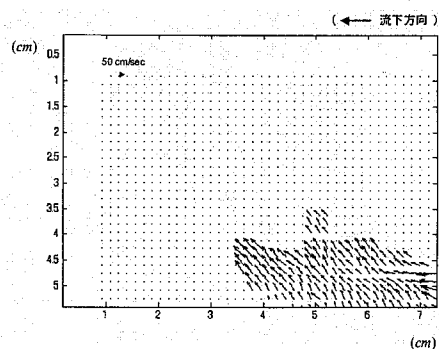


図—20 位相4の浮遊砂の乱れエネルギー分布

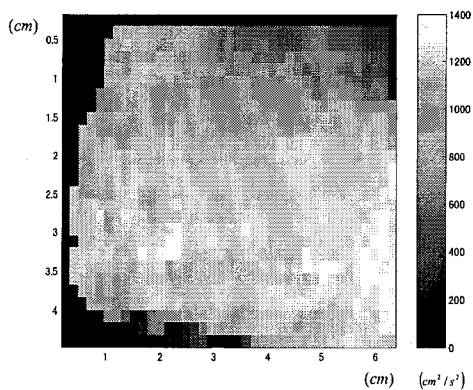


図—21 位相5の平均流速分布

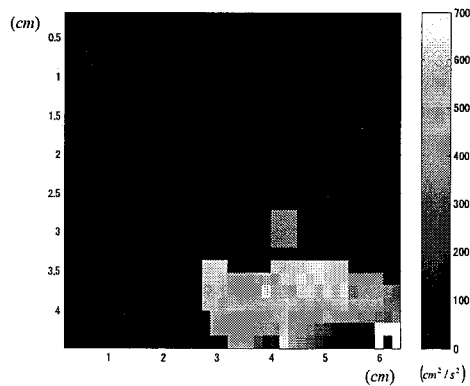
(灰色: 流体速度ベクトル, 黒: 浮遊砂速度ベクトル)



図—22 位相5の相対速度分布



図—23 位相5の流体の乱れエネルギー分布



図—24 位相5の浮遊砂の乱れエネルギー分布

流体の乱れは、砂の流体中への浮遊に起因するものが支配的となる。すなわち、砂の放出に伴い砂粒子を回り込む流れが新たに乱れを生成し、この浮遊砂に起因する乱れは砂の数密度が高いほど強化される。この乱れは抗力あるいは相対速度をパラメータとして見積もれる可能性がある。生成された乱れは主流により移流され、Dune のトラフ近傍で再付着することがある。この再付着に伴い、底面砂は攪乱され再度ランダムな方向へ浮遊させられる。すなわち、本研究で対象とした水理条件においては、砂の浮遊過程は、剥離及び浮遊砂が誘発した乱れの再付着の2つの形態の下に開始される。また、浮遊砂が卓越する領域においては、砂の輸送方向と流体の局所流れ方向は一致せず、強い抗力あるいは流体-砂相互作用が発生している。流下方向の主流流速は砂の浮遊をパラメータ化する上で直接的な役割を持たない。

砂の浮遊が確認される領域では、底面近傍で上向きの流体流れが常に存在していることが明らかになった。この流れは砂層から通過する流れであるか乱れに誘発されて発生しているものか不明であるが、少なくともこの上昇性の流が浮遊過程に大きな影響を与えていることが予想される。これは底面に対して法線方向の流れを拘束する固定床の実験では確認できないことから、固定床実験による底面近傍の流れをベースとして砂の浮遊パラメータを決定することは不可能であることを意味する。また、固定床上の

せん断流は移動床と比べ強く同時に剥離渦も強化される。正確に砂の浮遊現象をパラメータ化するためには流速のみならず流体及び砂層内の圧力変化も考える必要があるかもしれない。

本研究を種々の水理条件、底質条件の下でパラメータスタディを行い、底面砂の浮遊過程を一般化する必要がある。なお、本計測法は本研究で対象とした Dune 上の流体-浮遊砂流れだけでなく多様な混相流に適用可能である。

参考文献

- 1) Adrian, R. J.: Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics, Ann. Rev. Fluid Mech. Vol.23, pp261-304, 1991.
- 2) Tooby, P. F. et al.: The motion of a small sphere in a rotating velocity field, Journal of geophysical research, Vol.82, pp. 2096-2101, 1977.
- 3) R. A. Gore and C. T. Crowe: Effect of particle size on modulating turbulent intensity, Int. J. Multiphase Flow, Vol.15, pp.279-285, 1989.
- 4) 可視化情報学会: PIVハンドブック, 森北出版.

(2006年4月13日 受付)