

デューン上の浮遊砂-水の混相乱流解析

Analysis on two-phase turbulent flow between sediment and water over dunes

北海道大学大学院工学研究科 学生員 秩父宏太郎 (Kotaro Chichibu)
 北海道大学大学院工学研究科 正員 渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)
 北海道大学大学院工学研究科 正員 清水康行 (Yasuyuki Shimizu)

1. はじめに

河床近傍の境界層において発生した乱れは河床を攪乱し、接触力を失った砂はその抗力により容易に浮遊させられ、下流へと輸送される。流体はそのエネルギーを砂が駆動するために砂へと受け渡すと同時に浮遊砂近傍で新たな乱れが生成され、逆に砂相が流体運動へ影響を与える。この固液相互作用を経由した固液混相乱流中の乱れの発達あるいは減衰は、固体粒子サイズと乱れスケールとの比で決定される¹⁾。一方、デューン上で剥離を伴うような局所的にせん断力、圧力が急変する複雑な非等方乱流における固液相互作用については未解明である。特に、デューンのクレスト背後で発生する剥離渦による砂の巻き上げや捕捉、砂の渦からの放出や移流された乱れの河床への再付着など極めて複雑な相間作用を経由して乱流構造並びにデューン形状が決定されるため、砂の浮遊量及び浮遊砂の輸送を一般化し定量的に予測するためには、これら乱流中の固液相互作用を適切に見積もる必要がある。そのため砂相及び液相の瞬時速度を同時に取得し、更に粒子スケールでの解析が望まれる。

本研究は、固液両相の瞬時速度を光学的粒子選択技術により撮影した画像から PIV により求め、更に後述する SR 法により粒子軌跡を求めることにより、従来の相関法 PIV よりもより細密なスケールでデューン上におけるエネルギー交換および渦構造を解析した。

2. 実験方法

2.1. 実験装置

全長 10m、幅 0.2m、壁面高さ 0.3m、勾配 0.003 をもつアクリル製水路で実験を行った (図-1 参照)。

水路上流端から 2m、下流端から 1m の区間を固定床とし、その間の 7m 区間をサンドピットとし、平均粒径 0.34mm の東北 6

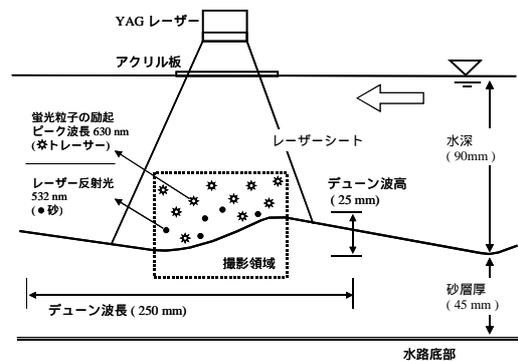
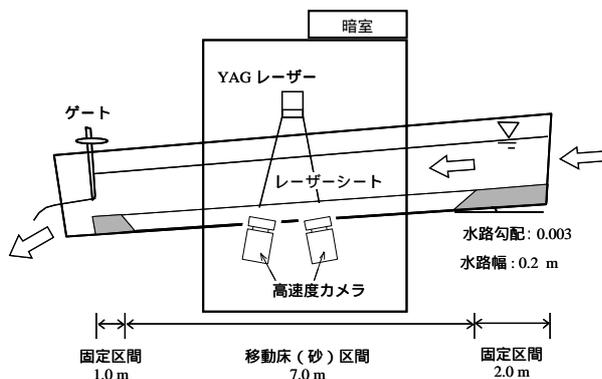
号珪砂 (比重 2.61) を敷き詰めた。実験中、上流側の固定床との境界部分において河床高が一定に保たれるように給砂を行った。流量 8.69 l/sec を与え、形成されたデューンを撮影した。この時水深は 90mm で計測対象としたデューンは波高 25mm、波長 250mm であった。

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 (DIA 10N, HP20, 粒径 250~600 μm) を用いた。砂相、液相をそれぞれ撮影する 2 台の同期された高速度カメラ (解像度: 1K×1K 画素, フレームレート: 500fps) が計測領域側方に設置され暗室内で撮影が行われた。FOV (Field of view) を含む流下方向に平行な鉛直断面に対して YAG レーザーシート (励起波長 532nm) を水面上方より照射した (図-2 参照)。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。

2.2. 画像計測と前処理

同期された 2 台のカメラの内、一方のカメラには 550nm 以上の光のみを透過させるハイパスフィルタを装着させることで、レーザー照射により励起した蛍光中立粒子から放出される励起光 (波長ピーク 630nm) のみを撮影できる。また、他方のカメラには 532nm に透過ピーク波長をもつバンドパスフィルタを装着させることで、砂からのレーザー反射光のみ撮影することができる。この様に、砂及び中立粒子から放出される、異なった波長の光を光学的に選択して撮影し、それぞれの粒子の移動から PIV により各相の瞬時速度を算定することができる。

検査領域は 5mm (=55pixel) 四方に設定し、2.5mm (=28pixel) 毎にオーバーラップさせて計算を行った。最大流速 80cm/sec に対応するため探査領域はそれより前後 18(pixel) 広い領域、つまり 91×91(pixel) と設定した。



本研究で用いた PIV プログラムの精度を確認するために可視化情報学会⁵⁾より提供されている人工画像を用いた。従来用いた相関法 PIV ではエッジ部分や数密度の小さい領域でエラーが生じていたが今回用いた SR 法をグリッドに補間したものはエッジ部を含めた領域でも 99.2%という精度を得ることが出来た。同様に代表速度に対する相対流速誤差標準偏差は 4.5%という結果が得られ、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。

2.3. 乱流統計量

局所定常性を仮定した計測期間 6 秒間 (3000frames) の速度から得られる統計量をもとに、固液相間のエネルギー授受について議論を行う。なお、この計測期間は、河床波の伝達周期 (約 20 分) と比べ十分に短くかつ剥離渦近傍の速度変動の代表時間スケール (10msec オーダー) と比べて十分に長く、局所定常性を仮定し統計評価を行う上で適当である。粒子数密度の変動の影響を排するため統計評価において、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 点から内挿補間を行った。

3. 解析方法

3.1. 相関法 PIV

広く使われている相互相関係数による標準的な PIV により速度分布を算定した。これは連続した撮影フレーム間において複数の粒子群の輝度分布から相互相関係数を計算し、その最大値をとるものから粒子群の代表移動距離を推定するものである。ここでは、PIV 法の詳細は省略する⁴⁾。本研究では、相関係数 0.7 以上の結果のみ採用し、これ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。

3.2. マスク相関法

画像中の粒子重心座標を知るにあたり、画像抽出手法であるマスク相関法を利用した。標準的な粒子画像として輝度分布をガウシアンカーブとした人工粒子画像を用い、それと計測画像

の相関の高い箇所を粒子座標とした。この方法は粒子の重なりに対しても効果が高く、高い精度で抽出が可能である。

3.3. SR-PIV

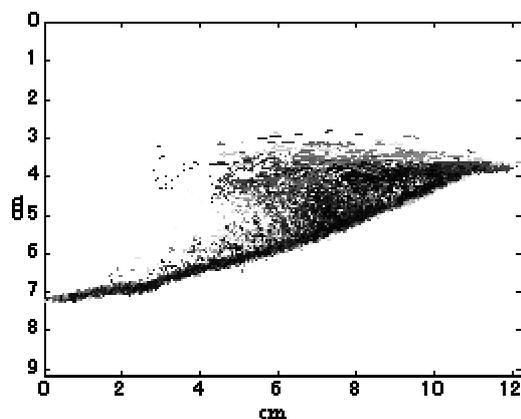
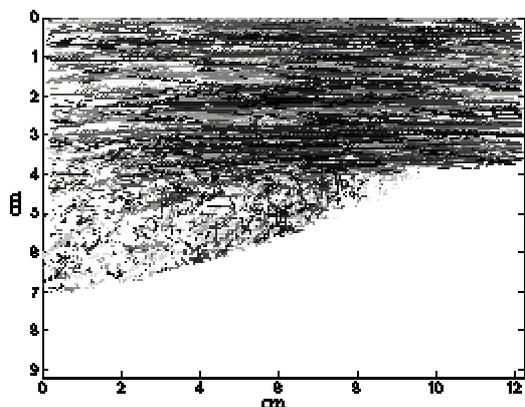
Adrian ら⁶⁾によって提案された SR 法 (super-resolution method) は従来用いられてきた相関法 PIV を応用して個々の粒子の速度を計算するものである。マスク相関法によって抽出された粒子の座標に対して、相関法 PIV の速度を内挿し、次時刻でのフレームで推定領域を定める。もし推定領域内に複数個粒子が存在した場合は前後の画像から加速度が最小となる粒子の組み合わせを採用する、3 時刻追跡法を用いた。

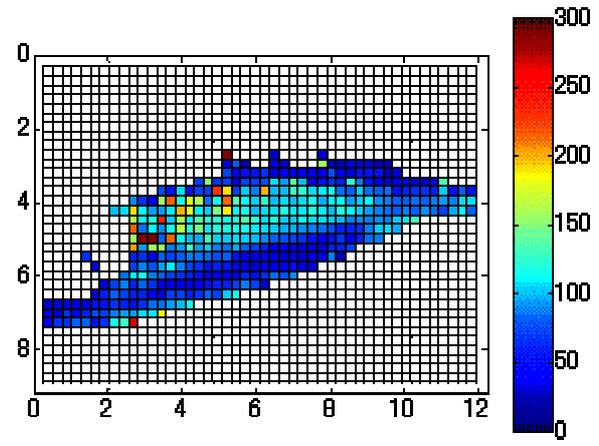
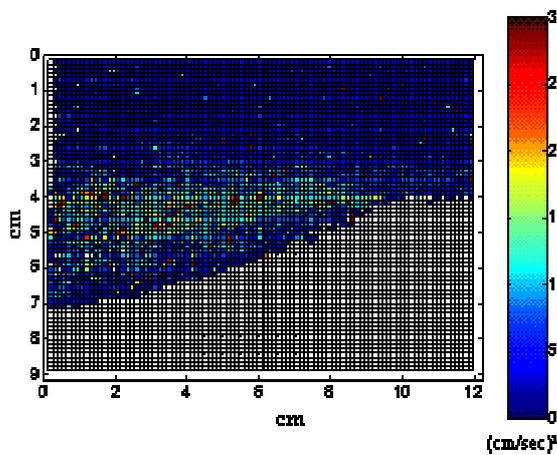
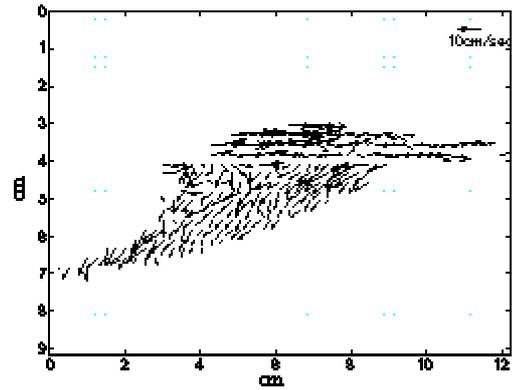
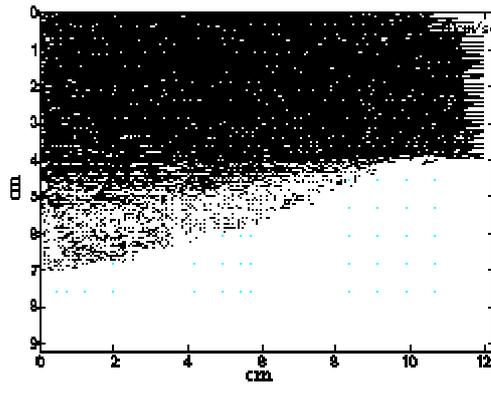
4. 結果と考察

図 3 は SR 法によって計算された流体の軌跡である (1 秒間)。クレストを境として上下で異なった流れ構造となっている。つまり、上部は一樣な、比較的早い流れとなっているのに対し下部では回転性を有した、複雑な流れが見て取れる。対して、図 4 は砂粒子の軌跡である (図は見やすくするために 0.25 秒間)。クレストから放出された砂が下流方向へ輸送されるとともに重力により沈降しているのが分かる。また砂の場合、数密度も場所ごとに大きく異なっている。

計測時間における個々のトレーサー粒子の速度をグリッドへ補間した結果を図 5 に示す。流跡線の結果と同様に、上部では秒速 70 cm/sec の一樣流れに対し、下部では 10cm/sec 以下の小さなスケールの流れが渦構造を有しながら存在している。この傾向は同様に補間された砂の平均速度でも見られるが、流体の流れに追従している砂粒子の速度は水より相対的に小さく、最大 55 cm/sec 程度となっている。砂粒子に働く抗力は流速との相対速度の二乗に比例し、これにより砂粒子が駆動されると同時に流体の運動に影響を与える。図 7 にその相対速度の分布を示す。クレスト背後に顕著に発生する相対速度は抗力を介して砂がこの領域で浮遊し下流へと駆動され、一方、流体は逆に水平方向に減速されることを表している。また、トラフ上では浮遊砂が沈降することで鉛直下向きに流体を加速させていることを表している。こうした浮遊砂の存在が流体へ影響を与えていることは次から述べる乱流統計量からも見ることが出来る。

図 9 は流体のオイラー的乱れエネルギーを計算したものである。これによればクレスト近傍からせん断境界層の発達による





乱れが確認され、それは除所に広がりながら下流へ続いている。図 10 は砂粒子のオイラー的乱れエネルギーである。流体のそれと比較するとエネルギー量としては同程度もしくはそれ以下であるが分布は水のそれより滑らかであり、対して流体の乱れは場所ごとの変動が大きい。

図 12 および流体のレイノルズ応力を計算したものである。両相ともにクレスト部及びせん断層近傍でレイノルズ応力の符号の交代が見られ、これらの領域で流下する水平運動量が乱れに強く影響を受けていることがわかる。

上記のオイラー的な視点に続き、ラグランジアン的な乱れ統計量に話を進める。図 14 はラグランジアン的な乱れエネルギーの分布を示したものであり、個々の流跡線で 1 つの値が計算されたものを周囲のグリッドへ補間したものである。オイラー的乱れの分布と同様に、クレストからせん断境界層にかけて強い乱れが確認された。砂粒子の場合(図 15)でもせん断層近傍で比較的強い乱れが確認されている。

以上のように流体および砂の乱れがオイラー的視点とラグランジュ的視点で求められた。砂粒子の確率的なふるまいをモデル化する上で乱れの分散である拡散係数を求める必要があるがその推定にあたって Lagrangian time scale が計算される。図

17 および図 18 に流体の Lagrangian time scale の分布を示す。クレストから発達するせん断境界層を境にした流れ構造の違いを受けて上下で平均値を求めた。鉛直方向の Lagrangian time scale では上部 0.0133(sec)、下部 0.0106(sec)と下部は上部の 80%程度となり、水平方向においては上部 0.241(sec)、下部 0.0148(sec)と下部が上部の 60%程度のスケールとなった。つまり境界せん断層を境に下部のほうが鉛直、水平ともに渦の時間スケールは数十%小さいという結果が得られ、こうした違いはデューン上の流れを特徴付ける上で重要である。

5. 結論

レーザーと光学フィルターを用いた光学的分離手法を用いてデューン上における同一箇所の砂水両相を同時に撮影した。それを SR 法によって粒子レベルで流れを解析し、砂・水両相の乱れ構造の比較を行った。それによれば砂粒子は流体から乱れを得るが、両相の応答の違いから水の乱れと砂のそれでは空間分布にずれを生じ、結果としてその違いが流体へと影響を与える。

クレストから発達したせん断境界層はデューン流れにおいて粒子の輸送および乱れに対して大きな影響を与え、その上下部では流れの特徴が異なる。

6. 参考文献

- 1) Gore, R. A. & Crowe, C. T.: Effect of particle size on modulating turbulent intensity, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol.15, pp.279-285, 1989.
- 2) McLean, S. R., Nelson, J. M. & Wolfe, S. R.: Turbulence structure over two dimensional bed forms, Implications for sediment transport, *Journal of Geophysical Research*, Vol99 (C6), pp.12729-12747, 1994.
- 3) 禰津ら：河床波上の浮遊砂流れにおける粒子濃度が固相・液相の乱流構造に及ぼす影響，*応用力学論文集*, Vol.9, pp.951-958, 2006.
- 4) 秩父宏太郎ら：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) Visualization society of Japan. Standardization and popularization project. Standard images. <http://www.vsj.or.jp/piv/>.
Keane, R. D., Adrian, R. J. & Zhang, Y.: Super-resolution particle imaging velocimetry, *Meas. Sci. Technol*, Vol.6, pp.754-768, 1995.

