

粒子-流体相互作用による乱れの発達に関する可視化計測

Visualization measurement of turbulence by interaction of particles-fluids

北海道大学大学院工学院 ○学生員 松崎 亘 (Wataru Matsuzaki)
北海道大学大学院工学研究院 正員 猿渡 亜由未 (Ayumi Saruwatari)

1. はじめに

海岸構造物の底面では局所洗掘が生じることが知られている。海底面の砂の浮遊・輸送量は水平方向のせん断力を表す Shields 数をパラメータとしてモデル化される。また海底面近傍の粒子流れの特徴は粒子濃度の輸送方程式から評価出来るが経験的に求めるしかない。一方、局所洗掘が発生する構造物周辺では水平方向のせん断力だけでなく鉛直方向のせん断力が複合的に生じる為、Shields 数のみでは砂の輸送現象を記述できない可能性がある。構造物周辺の局所洗掘量を予測する為には砂の浮遊・輸送量と任意の方向・大きさのシアレートとの関係と海底面近傍の流れの特徴を明らかにする必要がある。

せん断流中で粒状底面はおおまかに、粒子の運動のない静止層、粒子間の相互作用が大きく流体のような挙動を示す流動層、そしてサスペンション層に成層化しており、それぞれの層で粒子数密度や流速等の分布の特徴が異なることが知られている (Forterre・Pouliquen, 2008)。特に流動層の領域では高数密度で粒子が存在しており、また粒子数密度が急激に変化していることから粒子と水が活発な相互作用を起こし、これが乱れの発達に大きな影響を与えていると考えられる。

著者ら (2010) は屈折率整合技術を用いて回転二重円筒間に形成される一方向流れのせん断流中における高数密度で底層粒子と流体が混在する流れ場の可視化実験を行った。底層粒子数密度と粒子速度分布から流動層を定義した。また求めた粒子速度と流速から乱れエネルギーの分布を求めた。流動層内で乱れエネルギーが最大となり、この領域で活発に乱れが発達していることを実験的に明らかにしている。しかし回転二重円筒では二次流が発生しているため、完全に様な流れ場となっていない。また実際の海底面には振動のせん断力が働いている流れ場となっている。そこで本研究では小型 U 字型振動流装置水路を用いて振動せん断流の流れ場における高数密度で存在する粒子と流体の流れ場の可視化実験を行い、流動層内の流れを特徴化するとともにこの領域近傍での乱れを定量化していく。

2. 実験方法

2.1 底面下の粒子の可視化法

江藤ら (1996) は固液が混在する流れ場において、液体と固体の屈折率を整合させることにより流れを可視化計測する方法を提案した。図 1 は液体中の透明な粒子群中にあるひとつの粒子を撮影するときの光の経路を描いた概念図である。固液両相の屈折率が異なる時、粒子界面において光が屈折を繰り返すため、粒子群を撮影した

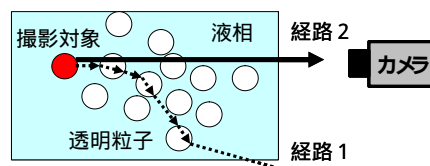


図 1 高数密度粒子流れの可視化法概念図

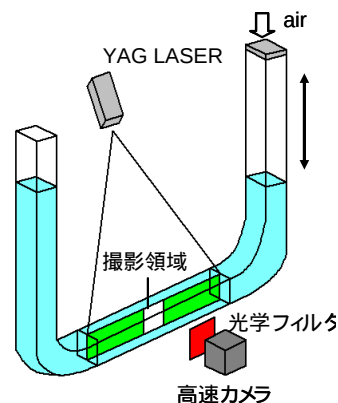


図 2 振動流装置

画像から対象とする粒子の位置を特定することが出来ない (経路 1)。一方固液両相の屈折率が一致するとき、光は粒子界面でも直進するため、対称とする粒子の位置の特定が可能となる (経路 2)。

本研究ではこの屈折率整合技術を用いて底面を構成する粒子の運動を可視化・計測する。底面を構成する材料として、シリカゲル粒子、液相としてヨウ化ナトリウム (NaI) 水溶液を用いた。NaI 水溶液の屈折率は濃度により 1.333-1.496 の範囲で変化する性質があり、本実験の条件下では質量濃度 53.5% のときシリカゲル粒子と屈折率が一致した。

2.2 実験装置と実験条件

図 2 に示す様な 50mm×50mm の水路断面をもつ小型 U 字型振動流装置水路内に NaI 水溶液とシリカゲル粒子を入れた。電動アクチュエータに接続したエアシリンダーがおこす空圧変動により形成される振動流中の粒子の運動を測定した。ここで鉛直上方を z 軸方向とし水路底面を z=0 と定義する。本研究は直径 1.18-2.36mm のシリカゲル粒子を使用した。底面を構成する透明なシリカゲル粒子中に蛍光着色した同粒子を混入し、励起光源として YAG Laser (波長 532nm) により水面上から鉛直にレーザーシートを照射することにより蛍光粒子を励起発光さ

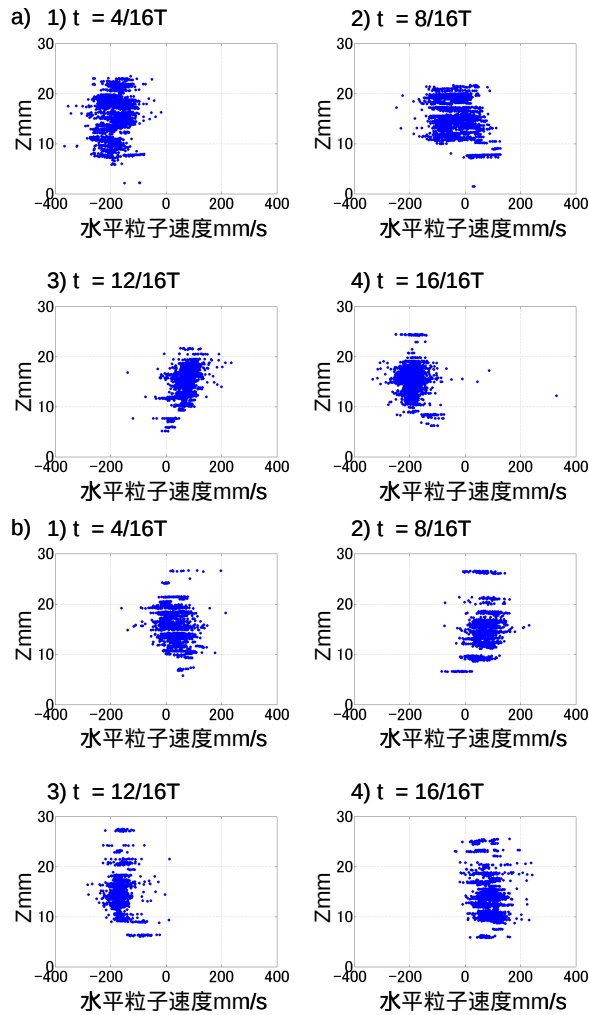


図 - 3 時刻 t における水平粒子速度の鉛直分布
a)は一つめの周期、b)は二つめの周期を表す

せた。蛍光粒子の発光波長の光のみを透過させる光学フィルタ（透過波長 600nm 以上）をレンズ前面に装着した高速度カメラで装置正面から撮影する。本実験では撮影周波数は 500fps、撮影画像サイズは 1024pixel × 1280pixel、FOV は 6.4cm × 8.0cm、撮影解像度は 62.5 μ m/pixel であり、6.14 秒間（画像 3072 枚）の撮影を行った。撮影画像の横軸を x と定義する。

本研究では振幅 3.5cm、水路内の最大速度を 143mm/s、周期 2.2 秒で、初期粒子底層厚さを 15mm、液相を NaI 水溶液で実験を行った。

2.3 粒子速度の決定方法

撮影画像にメディアンフィルタを適用することによりノイズ処理を行った後、粒子の中央位置を決定した。本研究では elliptical Gaussian function を画像の輝度分布にフィッティングさせることにより粒子中央位置を決定した（Nobach・honkanen,2005）。

求めた粒子中央位置から particle tracking velocimetry (PTV)により粒子速度を求める。4 枚の連続画像を元に粒子が取り得る軌道のうち、加速度が最小となる軌道を粒子軌道として採用した。

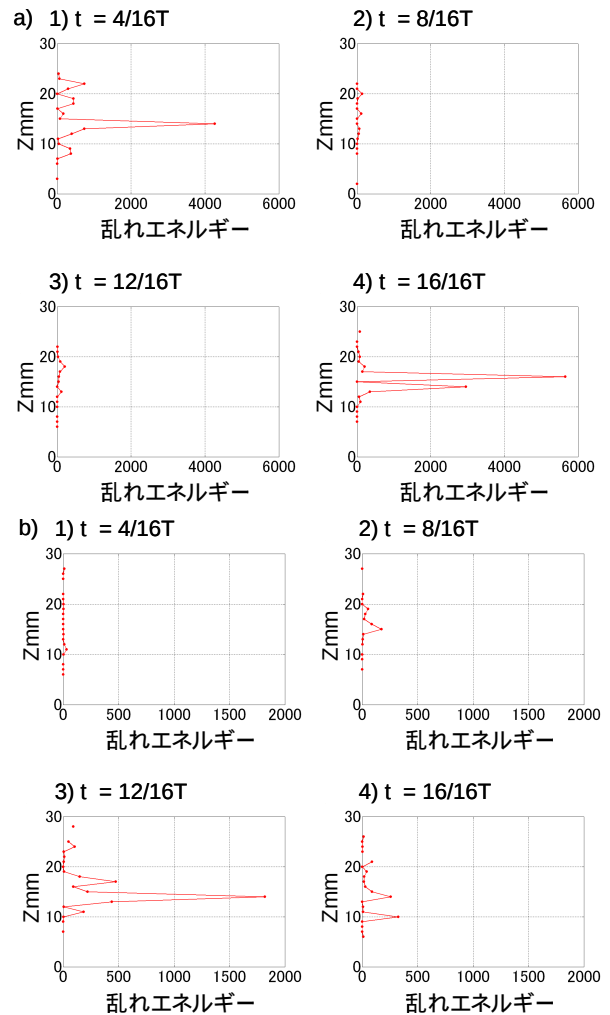


図 - 4 時刻 t における乱れエネルギーの鉛直分布
a)は一つめの周期、b)は二つめの周期を表す

3. 粒子速度分布

本実験では撮影時間内に 2 度の振動周期を確認した。図 3a)は 1 つ目の周期、b)は 2 つ目の周期を表しており、それぞれ周期 T を 16 分割したうちの時刻 $t=4/16T$ 、 $t=8/16T$ 、 $t=12/16T$ 、 $t=16/16T$ の時の水平粒子速度の鉛直分布を示す。水路内の流れに応じて粒子速度も変化しており、最大水平粒子速度は ± 200 mm/s 程度であった。図 3a)の時刻 $t=4/16T$ 、 $t=16/16T$ 、図 3b)の時刻 $t=12/16T$ では流れ場の位相が反転していることが確認できる。本実験における粒子の巻き上り厚さは 10mm 程度であった。

4. 乱れエネルギー

次式により定義される乱れエネルギーを求め、鉛直分布を図 4 に示す。

$$E = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2})$$

図 3 と同様に a)は一つめの周期、b)は二つめの周期を表している。ここで u' 、 v' は速度の平均との偏差であり、オーバーラインは平均操作を意味する。平均水平速度、平均鉛直速度は水路底面から鉛直高さ 1mm ごとの平均

速度を周期ごとのアンサンブル平均を行うことによって求めた。図4の時刻 t は図3のそれぞれの時刻 t に対応している。粒子速度の乱れエネルギー流れの変化がないときはほとんど乱れエネルギーの発達は確認することが出来なかったが流れ場の位相が変わるとき初期粒子底面である15mm付近で高い値を示した。本研究の条件ではサスペンション層は形成されなかった。

5. まとめ

本研究では、NaI 水溶液とシリカゲル粒子を用いた屈折率整合法により、振動流装置水路内に形成されたせん断流中における粒子底面近傍の高数密度粒子群の運動を可視化し、PTVによる粒子速度の計測を行った。本研究の実験条件では10mm程度粒子が巻き上がった。水路内の最大速度が143mm/sと遅い速度であるためサスペンション層が形成されなかった。また周期 T を16分割し、ある時刻 $t=x/16T$ での粒子速度と乱れエネルギーを求めたところ、水路内の流れの方向が変わるところで乱れエネルギーが初期粒子底面付近で高い値を示し、位相が変化するとき、即ち、流れの方向が変わるときに乱れが発達することが示された。

参考文献

- 1) 猿渡亜由未、松崎亘(2010): せん断流中の粒状底面近傍における高数密度粒子流れの計測、土木学会論文集 B2 (海岸工学) Vol.66(2010)、No.1、pp416-420
- 2) 江藤剛治、竹原幸生、横山雄一、井出康男(1996): 水流の可視化法に必要な関連技術の開発—比重整合・屈折率整合・多長波計測—、土木学会論文集、533/-34,pp.87-106
- 3) Forterre, Y., and O. Pouliquen(2008): Flows of dense granular media, Annu. Rev. Fluid Mech., 40, pp.1-24.
- 4) Lamb, M. P., E. D'Asaro and J. D. Parsons(2004): Turbulent structure of high-density suspensions formed under the waves, J. Geophys. Res., 109, C12026.
- 5) Manes, C., D. Pokrajac, I. McEwan and V. Nikora(2009): Turbulence structure of open channel flows over permeable and impermeable beds: A comparative study, Phys. Fluids, 21, 123109.
- 6) Nobach, H. and M. Honkanen(2005): Two-dimensional Gaussian regression for subpixel displacement estimation in E particle image velocimetry of particle position estimation in particle tracking velocimetry Experiments in Fluids, 38, pp.511-515