

屈折率整合法を用いて可視化された粒子群の速度の画像計測法

Development of an image measurement method for the particle velocity visualized using refractive-index matching

北海道大学工学部環境社会工学科
北海道大学大学院工学研究院

○学生員 齊藤樹 (Itsuki Saito)
正員 猿渡亜由未 (Ayumi Saruwatari)

1. はじめに

海底を構築している砂などの粒子は、海底に生じる波の影響を受けて巻き上がる。その巻き上がった粒子が周囲の流体と相互作用することに寄って海底の底面近傍には、乱れが発生する。この乱れは海底面近傍のみならず、流れ場全体に影響を及ぼすものであり、これらの原因となる底面近傍の乱れの発達過程は流れを理解する上で大きな意味を持つ。

これまでも乱流中の流体や粒子の挙動については多くの研究がなされてきたが流体と粒子の相互作用による乱れの発達については未だ不明なことが多く今も研究が進んでいる。例えば Cuthbertson ら(2005)は砂、礫、ガラスビーズなど性質や大きさの異なる粒子を敷き詰めた開水路底面上に種々の条件の一樣流を発生させ、水面から供給される大きさの異なる砂の沈降および流体運動を可視化し、その粒子の沈降速度と乱れの発生量の定量化を試みた。彼らの研究のように流体の可視化にはレーザーシートが用いられることも多いが、この際粒子底面近傍などの粒子密度が高い領域ではレーザー光が乱反射してしまうため底面近傍の可視化が困難となる。底面を構成する粒子として透明材料を用いたとしてもこれを避けることは出来ない。江藤・竹原ら(1995)は低屈折率透明材料の性質と、濃度によって屈折率を調節することのできる物質の性質をまとめた。また猿渡・松崎(2010)は屈折率の等しい粒子と流体を砂と水のモデルとして用いることにより粒子底面下の粒子・流体運動を可視化する方法を提案した。しかし、画像計測においては画像上の粒子の中心に粒径の中心ではなく、輝度の中心を用いていたためエラーが多く、粒子と流体の乱れを計測してやりたいとしてもそれが、エラーなのか、乱れによるものなのかの判別ができなかった。本研究ではこれらを参考に、振動流中での粒子と流体の相互作用による乱れの発達過程を画像計測によって解析し、乱れの大きさや、粒子の輸送速度、輸送距離や流速の定量化を図るために粒子のサンプル画像と処理する画像上の粒子を比較することにより粒子位置の決め方を開発した。

2. 実験方法

2-1. 屈折率の整合

本実験では可視化のために用いる粒子は低屈折率透明材料を用いる。砂粒子のモデルとしてしばしば用いられる透明材料としてガラスビーズが挙げられるがその屈折率はおよそ 1.52 と高く、同一屈折率の水溶液を作成するのが困難である。そこで本実験では敷き詰める粒子に

は屈折率 1.46 のシリカゲルを用いる。液相にはヨウ化ナトリウム水溶液を用いる。溶液の屈折率はその濃度を変える事により調節する。溶液濃度 54.7%のときシリカゲル粒子の屈折率と一致した。また酸化による変色を防ぐため、溶液中に極少量のチオ硫酸ナトリウムを加えた。またシリカゲル粒子、54.7%ヨウ化ナトリウム水溶液の比重はそれぞれ 2.4, 1.61 である。

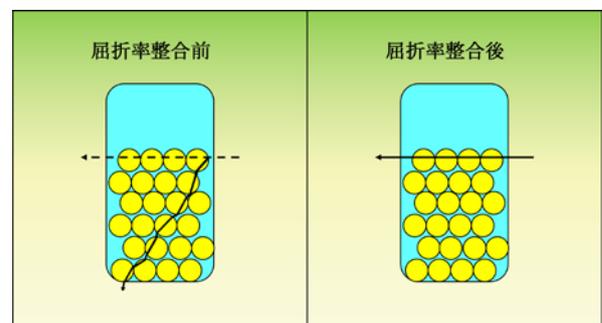


図-1 屈折率の整合(左：粒子と流体の屈折率が異なる場合、右：粒子と流体の屈折率が等しい場合)

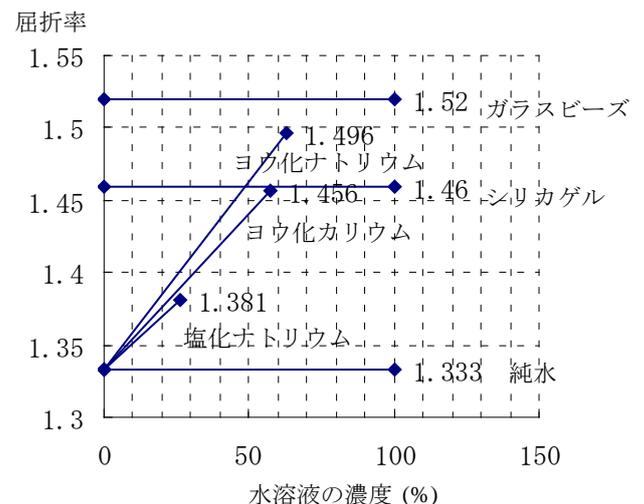


図-2 低屈折率透明材料の屈折率と水溶液の濃度と屈折率の関係

2-2. 実験装置

本実験は U 字型振動流装置を用いて行う。U 字管内のサンドピットにシリカゲル粒子を敷き詰め粒子内に混入

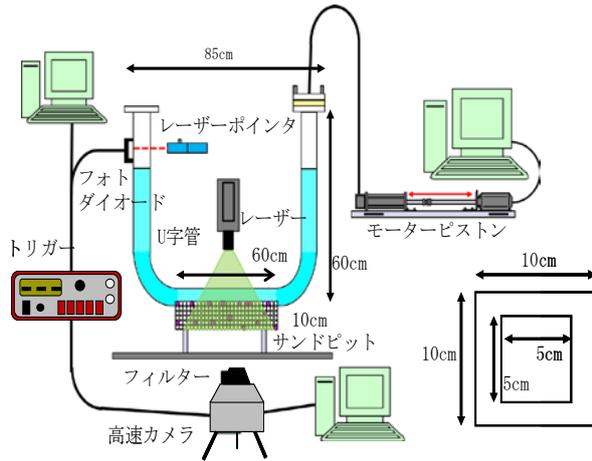


図-3 実験装置の概略図

された着色シリカゲル粒子および流体中の中立粒子の運動を装置前面に設置した高速カメラで撮影する。光源としてレーザーシートを用い、水路中央部を照射した。U字管は高さ 60cm、幅 80cm、管径 5cm×5cm であり、サンドピットは高さ 10cm、幅 60cm、奥行き 5cm である。撮影条件はフレームレート 125fps、シャッタースピード 1/125 秒、FOV49.21mm×61.52mm、解像度 1280×1024pixel、0.04806mm/pixel である。複数回の試行実験を行うため、水槽一端の水面の直上にレーザーポインタとフォトダイオードを設置し、レーザーポインタの光が水面が遮る際のフォトダイオードからの電圧の変化をトリガー信号に変換し、撮影を同期した。

4. 粒子の検出方法

本実験で用いるシリカゲル粒子は平均粒径が 1.5mm 以上と粒子が大きいため上からのレーザー光の照射に対して粒子が均一に光を反射しない(図 4)。そのため最高輝度位置を粒子の中心として扱ってしまうと、正しく粒子の重心が決められず、粒子と流体による乱れを求めたいときにエラーが発生してしまうため、流体と粒子の相互作用による乱れが定量化しない。

そこでまず粒子の位置を検出するためのキャリブレーション画像として振動流装置内に振動流を発生させない状態でシリカゲル粒子の画像を 100 枚撮影しその輝度を平均化した画像から粒子のサンプル画像を定義した。その画像を下の図-4 に示す。次にサンプル画像と相関係数が高くなる位置を粒子の位置とした。

5. 実験

実験は 6 種類の振動流を起こすことによってサンドピットに敷き詰めたシリカゲル粒子の挙動を追跡することによって行った。振動流の流速は時間的に SinWave 状に遷移するように与え、それぞれの流れの最大流速と周期は以下の表-5 に示す通りである。

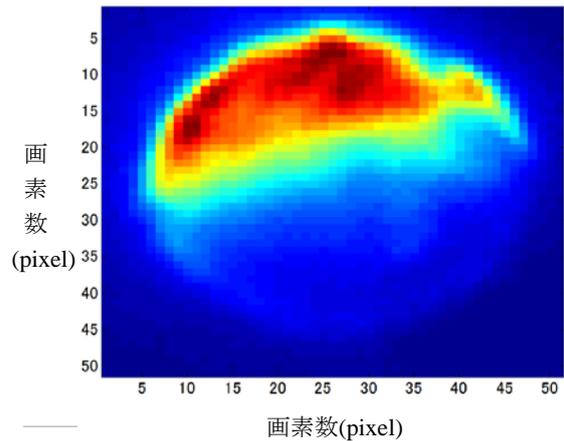


図-4 サンプルとして用いる粒子の画像

表-5 振動流の最大速度と周期

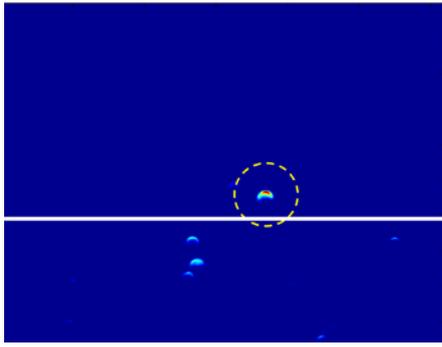
Case	最大流速 umax(cm/s)	周期 T(s)
1	3.25	1.6
2	3.25	2.0
3	3.25	2.8
4	4.25	2.2
5	4.25	3.2
6	4.25	4.4

撮影した画像枚数は 3072 枚で、撮影時間はシャッタースピードが 1/125s なので 24.576s 間である。表 5 に示す 6 種類の振動流で撮影された画像 3072 枚を解析した。図 6 は撮影開始から 4.64 秒後、4.72 秒後、4.80 秒後、4.88 秒後の画像を示したものである。画像中の軸の単位は mm、縦軸原点から 30mm 付近から横軸に平行に引いてある白線は初期粒子底面位置を示している。

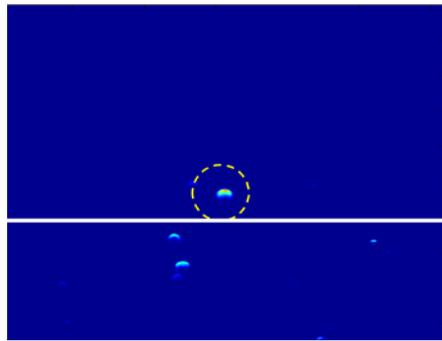
6. 結果

周期のみを変えた振動流中のシリカゲルの挙動は振動流の周期に依存する形で水平方向に振動を繰り返したのを確認した。周期が短いものほど水平方向流速は大きかった。また水平方向の動きの中に鉛直方向の動きが混じっている粒子の存在も確認できた。この鉛直方向の動きは周期が大きいほど顕著であった。最大流速の変化に伴う粒子の移動の変化は移動量、速度共に大きくなっていった。

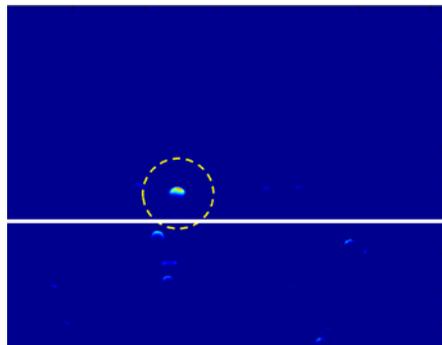
また Case1 について粒子速度も求めた。粒子底面の初期位置を $z=0$ として計算した結果 $z<0$ の領域でもある程度まで粒子が速度を持っていることを確認した。時間変化の特徴としては振動流の方向が変化するのに伴って粒子速度方向も変化するが、 z の値が小さい位置にある粒子から流速が変化することを確認した。図 7 は 0.192s(8 分の 1 周期)ごとの粒子の位置と粒子の速度の分布を $t=t_0, t_0+T/8, t_0+2T/8, t_0+3T/8$ の時刻について示したもので、時間が経つと粒子の位置が上昇し、それに伴って徐々に流速が大きくなっていくのを確認した。



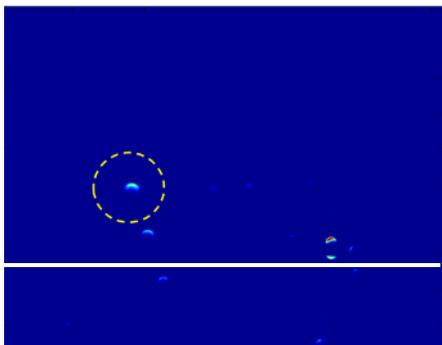
t=4.64



t=4.72

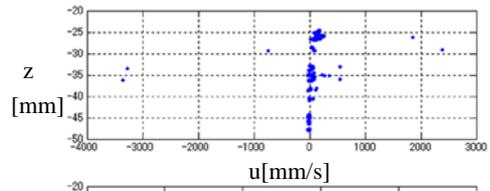


t=4.80

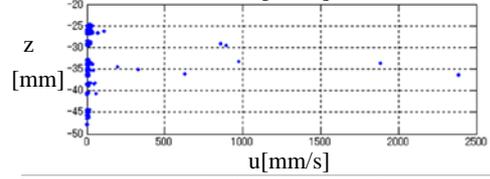


t=4.88

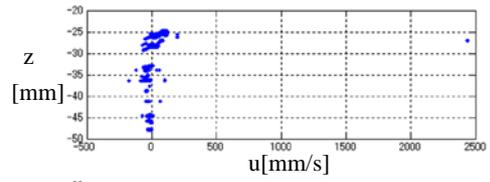
図-6 粒子位置の時間変化の様子



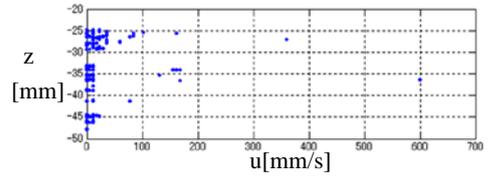
t=0.0sからt=0.192sまで



t=0.200sからt=0.392sまで



t=0.400sからt=0.592sまで



t=0.600sからt=0.792sまで

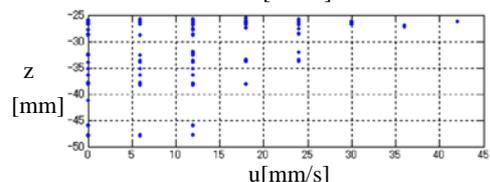
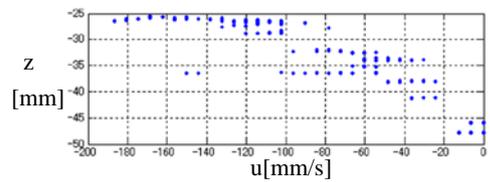
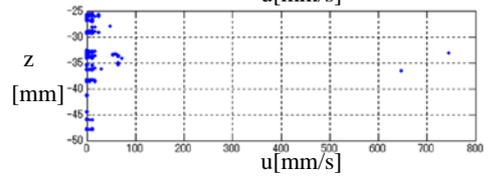
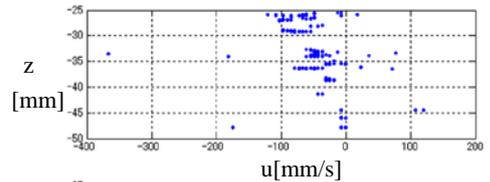


図-7 粒子の位置と流速の関係

7. これから

周期によって粒子の運動の傾向が変わることを確認できたが、最大周期であった Case1 の振動流でも鉛直方向の動きは、わずかなものであったので今後としては周期の大きい振動流を設定してやることで、鉛直方向の動きの大きさがどの程度周期に依存するかを見る必要がある。また今回の実験では振動流の最大速度を一定のまま撮影をしているので周期を同一にした上で最大流速を変更することによって生じるシリカゲル粒子の挙動を今回得られた結果と比較することで粒子の挙動にどう関連していくかを調べる。またこれらと同条件で粒子の速度を図ると同時に流体速度の計測を行い、流体と粒子の相互作用について調べる。最終的には解析結果の定量化を試みる。

参考文献

- 1) 江藤剛治・竹原幸生・横山雄一・井田康夫：
水流の可視化に必要な関連技術の開発 ―比重整合・屈折率整合・多波長計測―，土木学会論文集，
No.533/II-34, 87-106, 1996.2
- 2) 猿渡亜由未・松崎亘：
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,
No.1, 2010, 416-420
- 3) A.J.S.Cuthbertson・D.A.Ervine：
Experimental Study of Fine Sand Particle Settling in Turbulent Open Channel Flows over Rough Porous Beds,
JOURNAL OF HYDROULIC ENGINEERING. ASCE,
906-916, 2007