

高数密度粒子群を含む流れ場の画像計測

Image Measurements of Particle-Laden Flows with High Number Density

北海道大学工学部環境社会工学科 ○学生員 岡義久 (Yoshihisa Oka)

北海道大学院工学研究院 正員 猿渡亜由未 (Ayumi Saruwatari)

1. はじめに

海底を構成する砂層に波浪による流速場が作用すると、流れの条件によっては砂粒子は巻き上がると共に底面が流動化し流体とともに底層全体が運動する。このような砂粒子は流体との相互作用を通して、粒径や数密度に応じて周囲の乱れを強化または減衰させる事が知られている(e.g. Gore & Crowe, 1998). 海底面近傍の砂粒子は底面下から浮遊砂を含む底面上における乱れは波浪下の流れ場を適切に予測するためには砂粒子の巻き上げや底面の流動化による乱流場の発達過程を正しく理解する必要がある。

粒子流体混相流についてはこれまでに数多くの研究がなされており、いくつもの乱流モデルが提案されている(Amoudry & Sauza, 2011). これらのモデルが低数密度の粒子混相乱流に対して適用可能であることは実験結果との比較等を通して確認されているものの、底面近傍の高数密度混相乱流を十分予測できるには至っていない(e.g. Amoudry, 2014)。

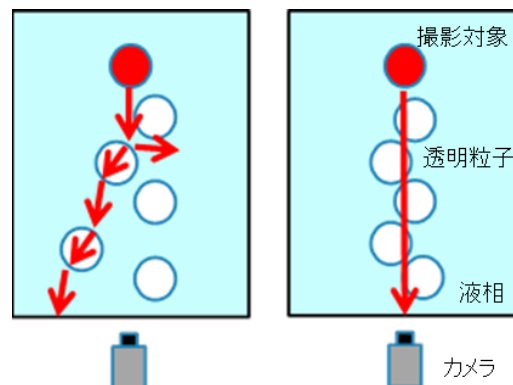
近年 Particle Image Velocimetry(PIV) や Particle Tracking Velocimetry(PTV)等の画像ベースの流体計測がしばしば行われているが、流動化した底層内部やその近傍の工数密度粒子群を含む流れ場を計測することは困難である。Knowles & Kiger(2012)はレーザーシートを根源として用いる場合、光が底面で反射、散乱することにより有効シート厚が増大し、本来のシート面外に存在する粒子まで画像に移りこんでしまうことを説明している。猿渡・松崎(2010)は屈折率を完全に一致させた流体と透明粒子を用いて粒子界面における光の屈折、散乱を抑制することにより底面を構成する粒子層を透明化し、流れにより底層が流動化した際の粒子速度の鉛直プロファイル画像計測した。これにより流動化層を中心とする高数密度粒子混相流が最大の乱れエネルギーのソースとなっていることを明らかにし、本領域における乱れの発達過程が流れ場に大きな影響を与えうる事を示唆した。

本研究は粒子底面上に振動流を発生させた時の底面極近傍における流速分布を屈折率整合技術を用いて画像計測し、高数密度粒子流体混相流中における乱れの発達過程について特徴化する事を目的としている。

2. 実験方法

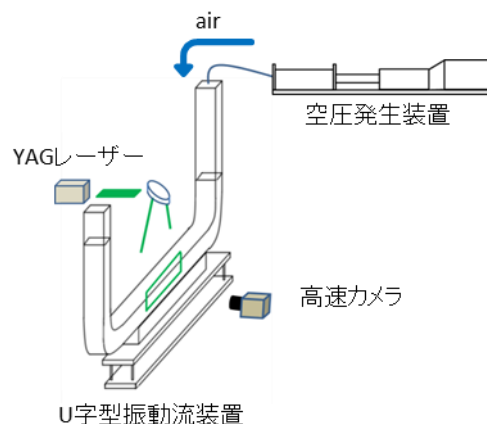
2.1 流れの可視化法

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、流れの可視化計測法を提案した。図1は液体中の透明な高数密度粒子群中における光の経路の概念図である。固液両相の屈折率を等しくすることで、その境界面での屈折、反射を抑



図一1 高数密度粒子群における光の経路の概念図

(左：固液両相の屈折率が異なる場合、
右：固液両相の屈折率が等しい場合)



図一2 実験装置概略図

えることができ、通常では光の乱反射により撮影することのできない高数密度粒子群中の流れ場を撮影することが出来る。本研究ではこの屈折率整合技術を応用させ、高数密度粒子流体流れを可視化する。

ヨウ化ナトリウム(NaI)水溶液は濃度によって屈折率が1.33-1.5間で変化することが知られている。本研究では底面粒子として透明なシリカ粒子(屈折率 1.46, 粒径 200-500 μm), 液相に 29%NaI 水溶液(屈折率 1.39)を用いることにより、水と砂を用いる場合に比べて粒子表面における光の乱反射を低減させ、高数密度で粒子が存在する底面近傍の流れ場の可視化計測を可能とした。水溶液の中には液相と比重の等しいポリ塩化ビニルの中立粒子(粒径 120-140 μm)をトレーサーとして混入した。

2.2 実験装置と実験条件

本実験は図2に示す 50mm $\times$ 50mm の水路断面を持ち、空圧変動により駆動される U 字型振動流装置を用いて行った。水平水路底面は、層厚 50mm のシリカ粒子に

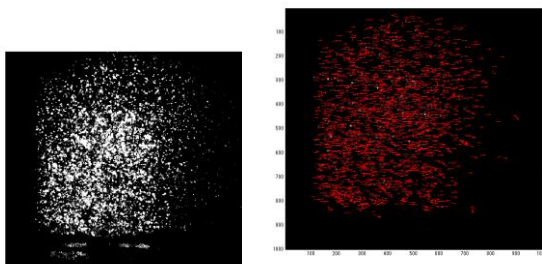
より構成されている．鉛直上方からミラーを介して YAG レーザー(波長 532nm)をシート状に照射することにより，水槽壁面からの影響の少ない水路中央平面上の粒子を，装置正面に設置した高速度カメラで撮影する．カメラレンズ全面には光学フィルター(中央透過波長 533nm)を装着した．撮影条件は，撮影周波数を 500fps，シャッタースピードを 1/2000sec，撮影画像サイズを 1280×1024 pixel，解像度 0.068mm/pixel，FOV 86.5×69.2 mm とした．発生させた振動流の最大流速は 41.4cm/s，周期は 0.47sec である．本実験では試行実験を行った，ただし，本論分で示す解析結果はその内 2 回のアンサンブル平均である．

2.3 解析方法

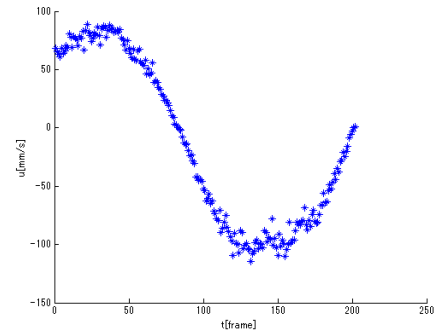
本研究では，撮影画像のキャリブレーションを行った後，Super-Resolution PIV(SRPIV)により解析を行った (Watanabe & Hideshima, 2006)．これは PIV と PTV を組み合わせることにより，サブピクセル精度での流量計測を可能にした方法である．即ちガウシアンフィルタによるノイズ除去処理を行った後，撮影画像に 64×64 pixel の検査領域の 1 フレーム間での移動速度をトレーサの輝度分布に基づきピクセル精度で求める．このとき次のフレームでの探索領域は検査領域の 3 倍のサイズとし，探索領域内で探索領域との輝度分布の相関が最大となる領域を，検査領域の移動位置と推定して領域の移動速度を決定した．振動流の最大流速の 1.5 倍を閾値としてエラー処理を行ったのち，SRPIV を行った．ここでは，マスク相関法により抽出された個々の粒子が，PIV により求めた平均流速に近い流速を持つと仮定して，移動先の候補粒子を決定する．3 フレーム間の粒子軌道候補，加速度が最小となるものを粒子軌道として採用しサブピクセル精度で流速を求めた．SRPIV は，PIV により求めた流速を用い，PTV に比べて粒子軌道候補を大幅に減少させることで，高数密度粒子群中での粒子の追跡を可能としている．図 3 は実際に SRPIV 行い元の画像上に速度ベクトルをプロットしたものである．

3 結果

実座標への変換を行うにあたって，軸は再設定され，水路底面は $z=8$ mm に位置する．図 4 は $z=62$ mm における平均水平流速のアンサンブル平均であり，時間変数 t は図の $T=0$ となる時間を 0 とした．

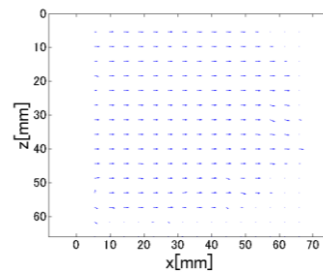


図—3 SRPIV による個々の粒子の追跡

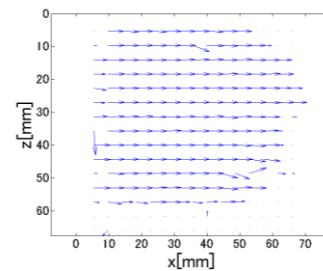


図—4 平均水平流速のアンサンブル平均($z=62$ mm)

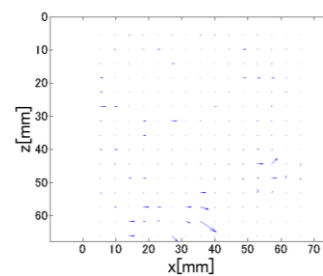
a) $t = 0$



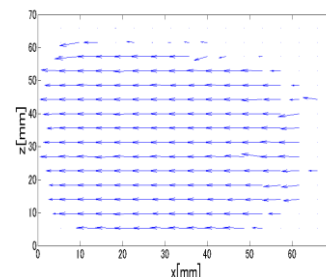
b) $t = 1/4T$



c) $t = 1/2T$

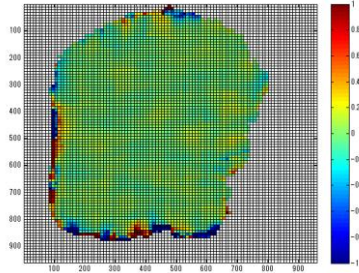


d) $t = 3/4T$

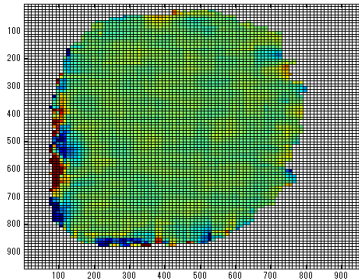


図—5 水平流速の分布

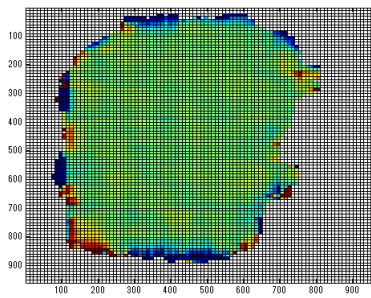
a) $t = 0$



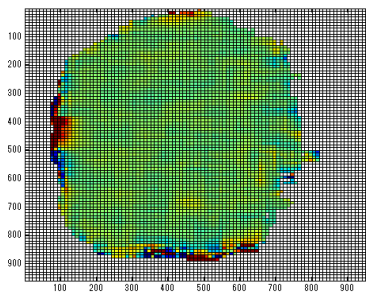
b) $t = 1/4T$



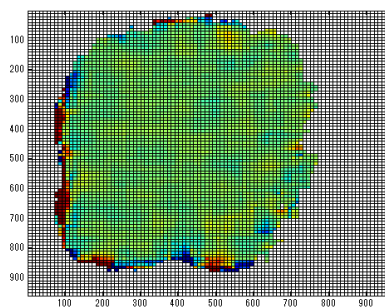
c) $t = 1/2T$



d) $t = 3/4T$

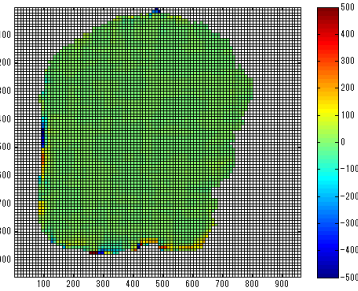


e) $t = T$

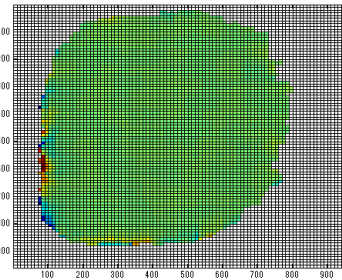


図一6 各周期におけるせん断応力

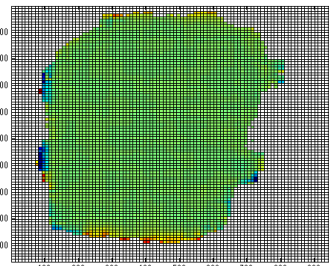
a) $t = 0$



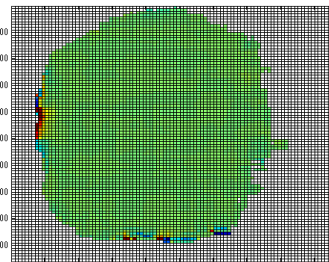
b) $t = 1/4T$



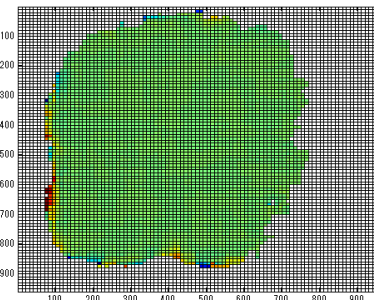
c) $t = 1/2T$



d) $t = 3/4T$



e) $t = T$



図一7 各周期における渦度

図 5, 図 6 に本研究の画像計測により得られた U 字管内に発生させた第 1 波目の流速分布及び流速プロファイルをそれぞれ示す。底面近傍で流速がゼロとなり底面直上で急速に振動流速へと達する典型的な流速プロファイルが現れた。また本研究の実験は振動流発生時に底面粒子が大きく巻き上がる条件下で実験を行ったが、底面粒子の巻き上がりと同時にその周辺で鉛直流速が発達するのも確認された。

本研究で得られた流速場を基に流体内のせん断力と渦度の分布も求めた(図 7, 図 8)。測定領域周辺に現れた高せん断, 高渦度場は測定エラーであるが, 粒子の巻き上がりと共にその周辺で渦度は発達, 減衰を繰り返す様子が確認された。底面から発生する乱れの定量化の為に更なる解析, 検討が必要である。

4 まとめ

周期におけるせん断応力, 渦度から底面近傍において乱れが発生していることが分かる。また速度分布と照らし合わせて見ると, 水平速度が 0 となるときに乱れが生じる傾向にある。今後は, より試行回数を増やし一般的な事象の再現をしていく。

5 参考文献

- 1) R.A.gore &C.T.Crowe(1988) :Effct of particles size on modulating turbulent intensity
- 2) Laurent O. Amoudry and Alejandro J. Souza(2011): DETERMINISTIC COASTAL MORPHOLOGICAL AND SEDIMENT TRANSPORT MODELING: A REVIEW AND DISCUSSION