

粒子底面上の渦度の発達過程

The development process of the vorticity on granular bottom

北海道大学大学院工学院 ○学生員 岡義久 (Yoshihisa Oka)
北海道大学大学院工学研究院 正員 猿渡亜由未 (Ayumi Saruwaari)

1. はじめに

海底に発達する振動せん断流により巻き上がった底面粒子がもたらす乱れの発生、発達についてはこれまで数々の研究がなされてきたが未だそれらに関する知見は十分ではなく、底面から発生する乱れ強度の予測モデルは確立されていない。Lamb (2004) らは液相のみのときは $O(cm)$ であった波浪下のせん断流中の底面境界層厚さが粒子底面上では $O(mm)$ にまで減少する事を実験により示したが、このとき境界層内での流速勾配が増大するため粒子底面近傍ではより強い乱れが生成され得ることを指摘した。粒子の巻き上がりに伴う場合粒子周辺で粒径スケールの流速変動と渦の生成が乱れを更に強化すると同時に、数密度や粒径によっては粒子流体混相流の有効粘性の増大や粒子表面における抗力によるエネルギー散逸等の効果により乱れが低減される。複雑に影響し合いながら発達する粒子底面上の乱れ場は、高数密度の粒子-流体混相流場の実験、数値解析等の困難さともあいまって、未だ現象の十分な解明には至っていない。粒子底面近傍の流れ場計測についてはこれまでの研究では超音波流速計や濁度計、間隙水压計などを用いて多くの計測が行われてきたが、著者ら (2010) は同一の屈折率を有する粒子と液体を用いた高数密度粒子混相流れの可視化計測法を提案している。これまでは、流れの可視化のトレーサー粒子として樹脂製粒子を用いてきたが、その密度、粒径から中立していない、画像上の数密度が不十分であるなどの問題を有しており、本研究ではトレーサー粒子としてアルミ粉末を用いる。

本研究では固定平板上、移動可能な粒子底面上で発達する流れ場を画像計測する事により、浮遊粒子による効果と底面の浸透性による効果それぞれによる乱れの発達の特徴を調査する。

2. 実験方法

実験は $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ の正方形断面を有する透明アクリル製 U 字型振動流装置内で行った (図-1)。装置内部の流れは装置片端から送り込まれる空圧振動により駆動される。振動流装置の水平部には深さ 50 mm 、長さ 50 mm のサンドビットが設置されており、底面を(1) 移動可能な粒子底面、(2) アクリル平板による固定床の 2 パターンに変化させて実験を行った。本研究では全てのケースで液相として約 56% ヨウ化ナトリウム水溶液 (屈折率: 1.46) を用い、底面を構成する粒子には砂の主成分であり個体としては低屈折率材料でもある透明シリカ粒子 (屈折率: 1.46, 中央粒径: $350\text{ }\mu\text{m}$) を用いた。

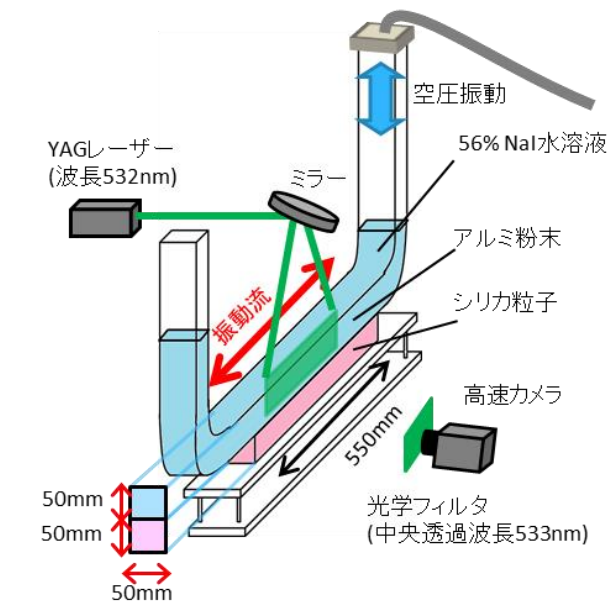


図-1 U 字型振動流装置と装置のセットアップ

底面粒子と流体の屈折率のわずかなずれから、シリカ粒子を完全に透過することは出来ていないが、底面表層にトラップされたアルミ粉末の検出、光源として照射する光の底面近傍における乱反射の低減を可能とし、底面極近傍まで流速を画像計測する事が可能となる。

振動流装置の水平床中央部を本研究のテストセクションとしている。U 字管中央の縦断面に装置上方から波長 532 nm の YAG レーザーを光源としてシート状に照射し、液相に混入した粒径 $40\text{ }\mu\text{m}$ 以下のアルミ粉末 (比重: 2.7) の動きを装置前面に設置した高速度カメラで撮影することにより流速の画像計測を行った。アルミ粉末の比重は液相と一致しないが、微小な体積ゆえに重力、浮力の影響を受けにくく、流れに追従する。カメラ前面には中央透過波長 533 nm の光学フィルタを装着し、レーザー以外の波長の光を遮断した。高速カメラの

表-1 撮影条件

解像度	0.067 mm/pixel
FOV	30 mm × 30 mm
撮影周波数	500 fps
露光時間	1/2000 sec
撮影時間	10 sec

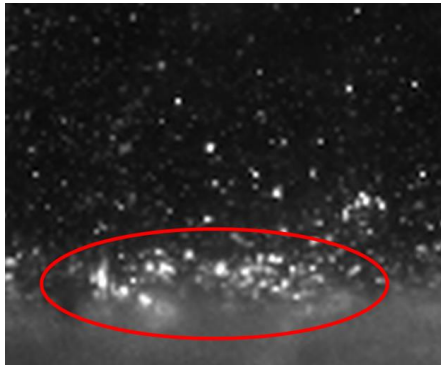


図-2 底面粒子にトラップされたアルミ粉末

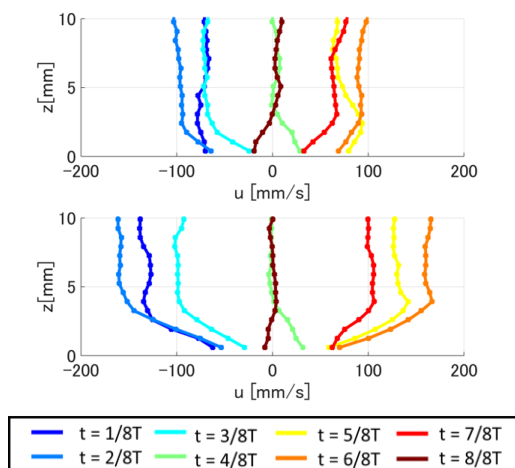
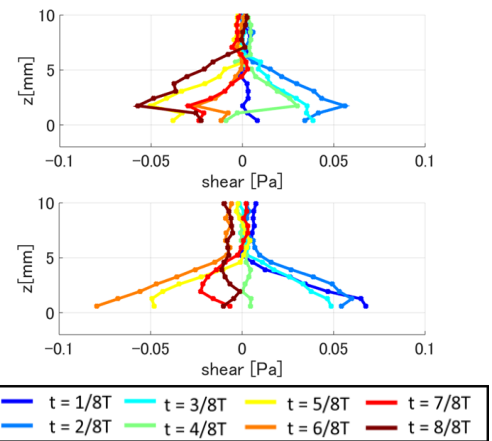
撮影条件は表-1 に示す通りである．撮影した連続画像を基に，PIV と PTV を組み合わせることにより高精度の流速計測が可能な Super- Resolution Particle Image Velocimetry (SR-PIV) (Watanabe ら, 2006) を行うことにより流速場を画像計測し，Moving Least Square (MLS) (竹原ら, 2009) により離散化された流速データからせん断応力，渦度を求める．

装置内の振動流れは全てのケースにおいて正弦関数により与えられる同一の空圧振動により生成した．流れ場は周期 $T = 1.16 \text{ sec}$ の振動流であり，その最大流速は固定床で 100 mm/sec である．静止状態から振動流を発生させ，機械的動作の安定した 3 周期目以降の振動流を本研究の解析対象としている．また，本論文では水平方向に x 軸を，静水時の底面のレベルを原点として鉛直上方に z 軸を定義する．粒子底面表層に分散していないアルミ粉末が見られたが(図-2)，これは底面内部にアルミ粉末が底面粒子にトラップされたものであり，その速度は底面表層の速度を反映している．流動時には，底面の流動に伴い底面のレベルが $z = 1.54 \text{ mm}$ まで上昇し，その付近は底面流動層の速度が反映されている．

3. 結果

3.1. 流速プロファイルとせん断応力プロファイル

図-3 は 4 周期目の底面近傍における水平流速の鉛直

図-3 水平流速の鉛直プロファイル
(上：粒子底面 下：固定床)図-4 せん断応力の鉛直プロファイル
(上：粒子底面 下：固定床)

プロファイルを $1/8$ 位相ごとに表したものである．同じ空圧振動を用いているが，固定床に比べて，粒子底面での最大流速は減少している．これは底面内部間隙への浸透流の影響と，液相から底面粒子への運動量の輸送に起因するものと考えられる．粒子底面では， $z = 0.5 \sim 3 \text{ mm}$ に極大流速を有しており，固定床と同様な底面近傍の流速の先行が見られる．図-4 は図-3 に対応する位相におけるせん断応力プロファイルである．固定床のケースでは，平均流速の増大とともに底面のせん断応力も増大するという単純な応答が見られる一方，粒子底面のケースでは，必ずしも平均流速と底面せん断応力が対応していない．これは平均流からある位相差でもって底面粒子が移動する場合，底面の相対液相速度が小さくなり，底面のせん断応力が低減するためである．

3.2 渦の生成と平面渦度分布

図-5 は各ケースの流速場から求めた渦度の平面分布である．ともに底面近傍において高渦度領域が発生している．固定床では平均流の流速に応じて，発生する渦度変動するのに対して，粒子底面では 1 周期間を通して定常的に渦度が発生する．底面近傍 ($z \leq 2 \sim 3 \text{ mm}$) の領域で生じている渦度の大部分は図-4 と同一の水平せん断応力に由来するものである．その一方で粒子底面のケースではそれ以外の要因によると考えられる渦度の発生も確認された．図-6 は粒子底面における， $T = 2/8$ の原画像と渦度分布である．原画像中の赤丸内に底面粒子が渦巻きながら上方へと巻き上がる様子が確認された．また渦度も同位置においてわずかに増大している．共著者らは粒子底面流れにおいて，底面以下のレベルに渦度の極大値が存在しうること示したが，本結果は，底面以下の乱れが粒子の巻き上げを誘発し，それにより新たな乱れが生成されていることを示唆する．

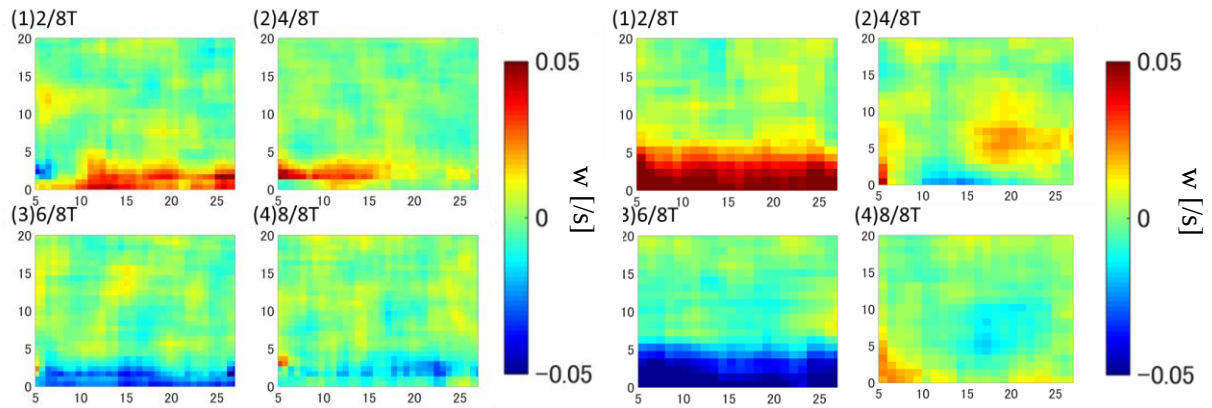


図-5 渦度の平面分布 (左：粒子底面 右：固定床)

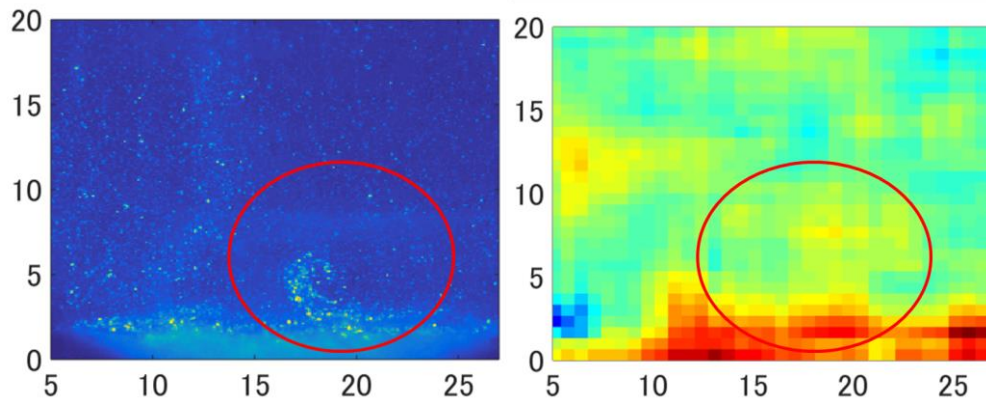


図-6 原画像と渦度分布 (左：原画像 右：渦度分布)

4. まとめ

粒子底面の底面近傍の流れ場の特徴について実験により調査した。粒子底面よりも底面における水平流速の鉛直勾配が徐々に緩くなる。底面粒子の移動によりせん断強度は大きく影響を受けた。粒子底面上では底面流動層で周期を通して渦度が発生する。底面流動層において発生した渦度が流れ場中に放出される様子をとらえた可能性がある。

参考文献

- 1) Lamb, M. P., D'Asaro, E., and Parsons, J. D.: Turbulent structure of high-density suspensions formed under waves, J. Geophys. Res.: Oceans, Vol.109, C12026, 2004.
- 2) Saruwatari, A., Matsuzaki, W., and Watanabe, Y.: Turbulent behavior of fluidized sediments in composite shear flow, Proc. Int. Conf. on Coast. Eng., Vol.32, Sediment 7, 2010.
- 3) 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・他波長計測-, 土木学会論文集, Vol.553/II-34, pp.87-106, 1996.
- 4) Watanabe, Y., Hideshima, Y., Shigematsu, T., and Takehara, K.: Application of three-dimensional hybrid stereoscopic particle image velocimetry to breaking waves, Meas. Sci. Technol., Vol.17, No.6, pp.1456-1469, 2006.