

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

Measurements of Granular Flows with High-Number-Density Particles near Bottoms in Shear Flows

猿渡亜由未¹・松崎 亘²

Ayumi SARUWATARI and Wataru MATSUZAKI

An image measurement of granular flows was performed for fluidized and suspended solid particles involved in shear flows. Refractivity-matching technique using sodium iodide solution and silica-gel particles was applied to the visualization of the particles with high number density, and the velocity field was obtained using conventional particle tracking velocimetry. The visualized images show that the stratification of the granular bottom could be divided into “suspension layer” and “fluidized layer”, they have the different characteristics of distributions of the velocity, particles number density, and turbulent energy. The turbulent energy is shown to be maximum in the fluidized layer.

1. はじめに

海岸構造物の底面では局所洗掘が生じる事が知られている。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構造物壁面に沿った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・大きさのシェアレートとの関係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、粒子が全く動かない静止層、粒子間の相互作用が大きく流体のような運動をする流動層、そしてサスペンション層とに成層化しており、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)。Lambら (2004) は固定底面およびシルト底面上の振動せん断流について速度場計測を行い、液体のみの流れ場では O (cm) であった底面境界層厚が、シルト底面が巻き上がってサスペンションが形成された流れ場では O (mm) にまで減少することを示した。一方せん断流下の流動層内では緩やかな流速勾配が生じる。このように層ごとに特徴の異なる流れ場が形成される。また、Manesら (2009) はポーラスな底面下における流れ場測定を行い、ポーラス底面の内外に流れが流入・流出することにより、底面の上下間で運動量や質量が交換されることを示した。粒状底面においても同様に底面上下間の流れの相互作用が流れ場に影響を与えると考えられる為、その特徴について

明らかにする必要がある。しかし、底面極近傍の高数密度粒子混相流れを測定する方法は限られており、現在のところ間隙水圧計や超音波流速計等を用いてその特徴を間接的に知ることしかできない。

本研究では回転二重円筒間に形成されるせん断流中における高数密度で底層粒子と流体とが混在する流れ場の可視化実験を行う事により底層粒子と流体の速度場を測定し、せん断流中で成層化した流れ場におけるそれぞれの層の流れの特徴について考察する。本研究は構造物周辺に形成されるような任意のせん断力場に対する砂粒子の挙動を知る為の基礎的研究として位置付けられる。

2. 実験方法

(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のあるひとつの粒子を撮影しようと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とき、粒子界面において光が屈折を繰り返す為、粒子群を撮影した画像から対象とする粒子の位置を特定することはできない (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為、任意の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、透明で屈折率が比較的低く比重が砂に近いシリカゲル粒子を用いた。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 の範囲で変化するが、本実験の条件下では質量濃度 42% のときシリカゲルと屈折率が一致した。こ

1 正会員 博(工) 北海道大学助教大学院工学研究院
2 学生会員 北海道大学大学院工学院

の時NaI水溶液の比重は1.39、動粘性係数は水の1.17倍となる。それぞれの物性値については他のよく用いられる物質と共に表-1、表-2にまとめた。ここで、多孔質材料であるシリカゲルは液中で急速に液体を吸収する為、割れやすいという性質がある。その為、本実験におけるシリカゲル粒子底面には半球形状の粒子が含まれる。

(2) 実験装置と実験条件

図-2に示す様な直径9.0cmと14.4cmの二つの円筒間にNaI水溶液とシリカゲル粒子を入れ、内側の円筒のみを回転させることにより形成されるせん断流中の粒子の運動を測定した。この時円筒間には、ピア周辺に形成される水平方向と鉛直方向のせん断力が複合的に生じる流れ場と類似した流れ場が形成される。ここで、座標系は円筒半径方向を r 、鉛直上方を z 軸方向とし、円筒の軸を $r=0$ 、水槽底面を $z=0$ と定義する。本研究の全てのケースで直径1mm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ものを混入し、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せた。レーザーシート面と円筒の軸との距離は全てのケースで65.0mmとした。ここで、水面の変動によるレーザーシートのちらつきを防止する為に、透明アクリル製の上蓋を水面位置に設置した。また、実験は暗室内で行った。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水槽正面から撮影する。また、NaI水溶液を用いた場合と同一の条件とはならないが、水中にシリカゲル粒子で底層を構成した状態で蛍光着色した中立粒子（比重1.0）を混入させ、これを追跡することにより、同様に流速も測定した。本実験の全てのケースで撮影周波数は250fps、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、12.3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。

本研究では内円筒の回転速度を110-350rpm、初期底面厚さを0-30mm、液相をNaI水溶液または水と変化させたケースで実験を行った。表-3に本論文で結果を図示するケースの実験条件を示す。表-3で、液相が水の場合は流速のみ、NaI水溶液のときはシリカゲル粒子速度のみを測定した。本研究で用いた様な実験装置では円筒の回転速度により定義されるReynolds数に応じた二次流が発生する為、半径方向に完全に一樣な流れ場とはなっていないが、二次流の発生が小さくなるよう比較的低い回転速度で実験を行った。

(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。前述したようにシリカゲル粒子は球形のもの他、半球形のものが含まれている為、本研究では次式に示すelliptical

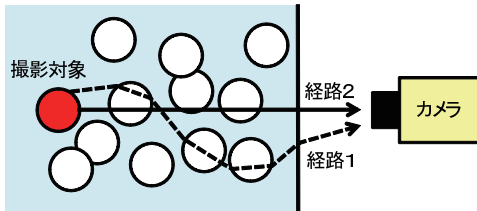


図-1 高数密度粒子流れ可視化法の概念図。液相と粒子の屈折率が異なる時（経路1）と等しい時（経路2）の光の経路。粒子と流体の屈折率が一致するとき、光は粒子界面でも直進する為、任意の粒子の位置の特定が可能となる。

表-1 水とヨウ化ナトリウム水溶液の物性値。

	水	42% NaI 水溶液
比重	1	1.39
屈折率	1.33	1.46
動粘性係数 [m ² /s]	1.0038 × 10 ⁻⁶	1.17 × 10 ⁻⁶

表-2 一般的な砂粒子、ガラスビーズ及び本研究で用いたシリカゲル粒子の物性値。

	砂	ガラスビーズ	シリカゲル粒子
比重	2.6-2.7	2.5-2.7	2.4
屈折率	—	1.5以上	1.46
安息角	30°-60°	20°程度	37°

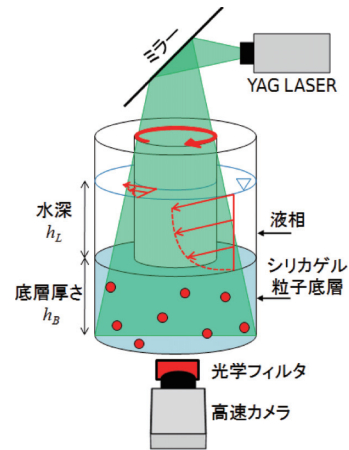


図-2 実験装置。

表-3 本論文で図を示すケースの実験条件。

Case	回転速度 ω rpm	底層厚さ h_B mm	水深 h_L mm	液相
1	150	30	65	NaI
2	200	30	65	NaI
3	150	30	65	水
4	200	0	65	水
5	200	30	65	水
6	300	30	65	水

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)。

$$f(\xi, \zeta) = \frac{1}{2\pi\sigma_\xi\sigma_\zeta} \exp \left\{ - \left[a(\xi - \xi_0)^2 + b(\zeta - \zeta_0)^2 + c(\xi - \xi_0)(\zeta - \zeta_0) \right] \right\} \quad \dots (1)$$

$$a = \left(\frac{\cos \phi}{\sigma_\xi} \right)^2 + \left(\frac{\sin \phi}{\sigma_\zeta} \right)^2 \quad \dots (2)$$

$$b = \left(\frac{\sin \phi}{\sigma_\xi} \right)^2 + \left(\frac{\cos \phi}{\sigma_\zeta} \right)^2 \quad \dots (3)$$

$$c = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sigma_\xi^2} - \frac{1}{\sigma_\zeta^2} \right) \sin 2\phi \quad \dots (4)$$

ここで ξ, ζ は任意の直交座標系, ξ_0, ζ_0 は分布の中央位置, σ_ξ, σ_ζ は ξ, ζ 方向の分布の標準偏差, ϕ は分布の傾きである

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内、加速度が最小となる軌道を粒子軌道として採用した。ここで、粒子軌道の中心がFOV中央の x 軸方向に1.0cm幅の領域内に存在する場合のみを測定対象とした。即ち、 $r = 65.0$ - 65.2 mmの範囲に存在する粒子を測定対象とした。粒子軌道と粒子速度をあるフレームについて求めた結果の一例を図-3 (b) (c) に示す。

3. 底層粒子の可視化計測結果

(1) セン断流中における粒子底層の成層化

セン断流中の粒状底層はセン断強さに応じて上層の粒子が巻き上がりサスペンションを形成すると共に、その

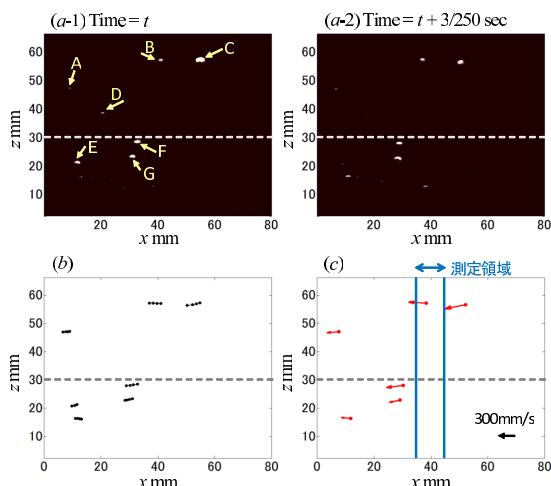


図-3 (a) NaI溶液中のシリカゲル粒子を撮影した典型的な原画像。(b) (a-1) から (a-2) までの4枚の連続画像から求められる粒子軌道。(c) PTVにより求められた粒子中央位置における粒子速度。破線は初期底面位置を表す。

下には流動化した層が形成される。本研究の実験条件では図-4に模式的に表わされるように、鉛直方向に成層化した。本研究ではそれぞれの領域をサスペンション層、流動層と定義する。また、流動層下には粒子が全く動かない領域が、サスペンション層上には粒子が浮遊していない液相のみの領域が存在している。

流動層とサスペンション層の層厚は円筒の回転速度、即ち流れのせん断強さや液相の比重に依存する。水-シリカゲル粒子を用いた場合は円筒回転速度が300rpm以上のケースで僅かに巻き上がりが見られる程度であった一方、NaI水溶液-シリカゲル粒子を用いた場合は回転速度150rpm以上のケースで粒子の巻き上がりが確認された。

(2) 屈折率整合法による可視化結果

図-3 (a) はNaI水溶液中のシリカゲル粒子底層を撮影した画像の一例である。画像中の粒子A-Dはサスペンション化した粒子であり、粒子E-Gは流動層を構成する粒子である。このように底面下や底面の極近傍における高数密度粒子群を可視化することができた。

計測領域内の着色シリカゲル粒子の数密度 n を、静止時の底面下のシリカゲル粒子数密度 n_0 で正規化したものを粒子数密度比 R と定義する。即ち、

$$R = \frac{n}{n_0} \quad \dots (5)$$

図-5は R の鉛直分布である。本来、底層粒子の R は下へ向かうに従い1に漸近していく筈であるが、本実験結果から得られた結果では初期底面位置近傍で極大となる分布となっている。これは固液相の屈折率の僅かな不一致により、下へ向かうに従いレーザー光強度が減衰していき、蛍光粒子の発光強度が弱くなった為と考える。より厳密にNaI水溶液の屈折率を調整することにより可視化できる領域が増大する可能性がある。

(3) 粒子速度分布

図-6は水平粒子速度の鉛直プロファイルを表す。初期底面位置近傍に平均水平粒子速度の鉛直勾配 $(\partial \bar{u} / \partial z)$ が急変する箇所が確認できる。そこで本研究では勾配の異なる二つの直線により水平粒子速度を線形近似し、これを併せてプロットしている。勾配の変化位置 $z = z_1$ は粒子速度の近似直線からの偏差二乗和が最小となるよう

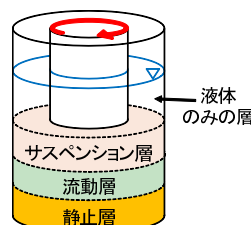


図-4 セン断流中の成層化底面の模式図。

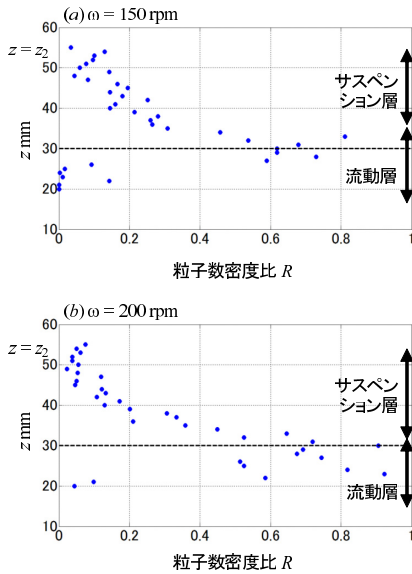


図-5 せん断流中におけるシリカゲル粒子数密度の鉛直分布。
(a) case 1, (b) case 2. 破線は初期底面位置を表す。

決定した。 z_1 を境に粒子速度の特徴が変化している為、本研究ではこの地点をサスペンション層と流動層との境界とした。また、サスペンション層の上限は底層粒子の数密度比 R がゼロに近づく地点 ($z = z_2$, 図-5参照), 流動層の下限を線形近似直線が $u = 0$ となる地点 ($z = z_0$) とした。このとき case 1, case 2 における流動層とサスペンション層の厚さはどちらも 20mm 程度であった。

4. 粒子底面上の流体速度場の計測結果

液相として水を用いたときのシリカゲル粒子底面上における水平流速の鉛直分布を図-7に示す。粒子速度分布について行ったのと同様に、水平流速分布も二つの直線で近似した。図-7 (b) (c) は、フラットな固定底面上および厚さ 30mm の粒子底面上において同一の円筒回転速度でせん断流を生じさせたときの流速場の測定結果である。粒子底面のケースでは流動層が形成されている領域に渡って緩やかに流速が変化した為、底面近傍の流速勾配 $\partial \bar{u} / \partial z$ が固定底面のケースより小さくなった。また、粒子底面のケースでは初期底面位置において non-slip 状態とならず、本研究の条件下では 100-300mm/s 程度の底面流速が存在した。

5. 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-8に示す。

$$E = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで u' , v' は速度の平均との偏差であり、オーバーラ

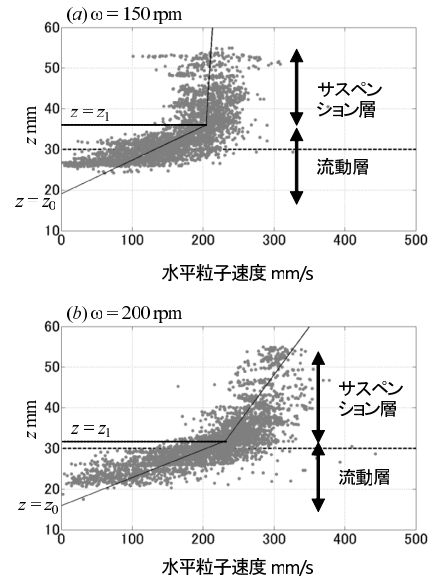


図-6 せん断流中におけるシリカゲル粒子速度の鉛直分布。
(a) case 1, (b) case 2. 破線は初期底面位置を表す。

インは平均操作を意味する。平均水平速度は前節までに求めた層ごとの線形近似から求め、平均鉛直速度はゼロとした。粒子速度の乱れエネルギーは流動層と定義した領域に渡り高い値を示した (図-8 (a) (b))。また流速の乱れエネルギーも初期底面位置近傍で増加した。

ここで、NaI 水溶液と水の比重はそれぞれ 1.39 と 1.0 であり、液相に水を使用したケースでは底層粒子が巻き上がりにくくなる。本研究の実験条件では液相に水を用いた場合 (case 3, 5, 6), 円筒回転速度が 200rpm 以下のケースではサスペンション層は形成されず、300rpm 以上で僅かにサスペンションの形成が確認される程度であった。しかしながら回転速度 300rpm の case 6 ではそれ以下のケースに比べ流速場の乱れエネルギーの急激な増加が見られたことから、サスペンションの有無が乱れの生成に影響を与えているものと考えられる。

6. 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、回転二重円筒間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 による速度場の計測を行った。せん断流中における粒子底面を有する流れ場は液相のみの層、サスペンション層、流動層、静止層とに成層化した。底層粒子の数密度は流動層からサスペンション層の領域に渡り徐々に減少した。それぞれの層における粒子と流体の水平速度の鉛直分布を勾配の異なる二つの直線により線形近似した。本研究では底層粒子数密度と粒子速度の分布から、サスペンション層と流動層の領域を定義した。流

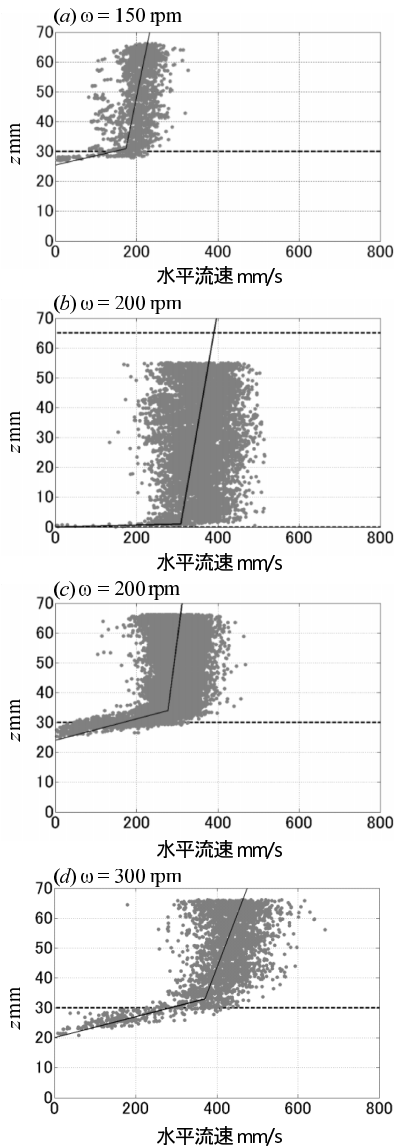


図-7 セン断流中における底面上の水平流速の鉛直分布. (a) case 3, (b) case 4, (c) case 5, (d) case 6. 破線は初期底面位置を表す.

流動層及びサスペンション層の厚さは本研究の実験条件ではいずれも20mm程度であった. 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, この領域で乱れが発達していることが示された.

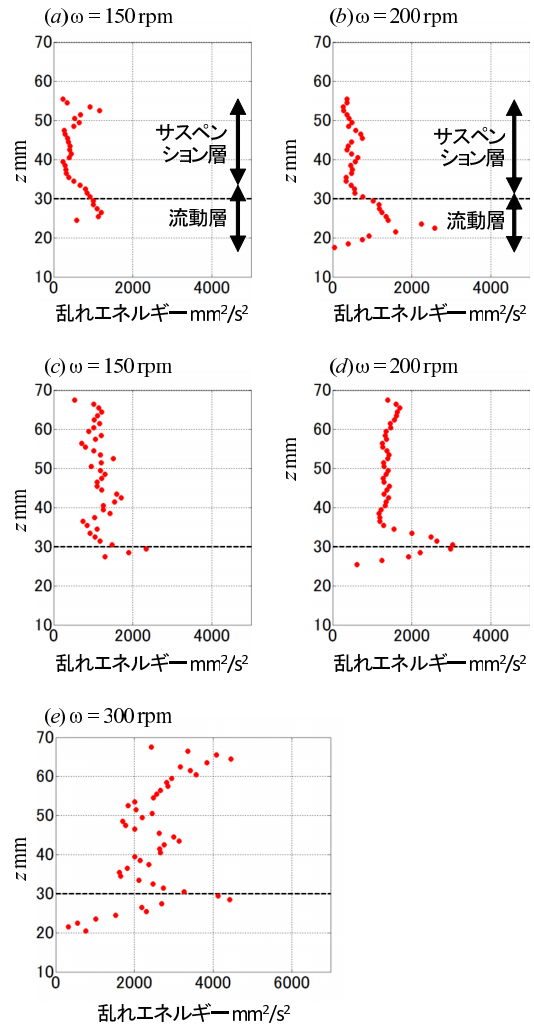


図-8 粒子速度 (a) (b) および流速 (c) - (e) の測定結果から求めた乱れエネルギーの鉛直分布. (a) case 1, (b) case 2, (c) case 3, (d) case 5, (e) case 6. 破線は初期底面位置を表す.

参考文献

- 江藤剛治・竹原幸生・横山雄一・井田康夫 (1996): 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, 533/II-34, pp. 87-106.
- Forterre, Y., and O. Pouliquen (2008): Flows of dense granular media, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 40, pp. 1-24.
- Lamb, M. P., E. D'Asaro and J. D. Parsons (2004): Turbulent structure of high-density suspensions formed under waves, *J. Geophys. Res.*, 109, C12026.
- 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.
- Nobach, H. and M. Honkanen (2005): Two-dimensional Gaussian regression for sub-pixel displacement estimation in particle image velocimetry or particle position estimation in particle tracking velocimetry, *Experiments in Fluids*, 38, pp. 511-515.