

乱流中の底面粒子流れの乱流拡散に関する研究

Diddusion of particle flows in turbulence

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

海底面近傍では波によって生じるせん断力が海底面を構築する砂などの粒子を巻き上げらせ、浮遊・輸送させる。底面近傍の粒子流れの特徴は任意の微小領域内の粒子濃度・粒子速度を用いた(1)式から評価することができる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(u_u^p c)}{\partial x} = S \quad \dots (1)$$

(1)式を Reynolds 分解し、整理したものが(2)式である。

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_u} \overline{u_u^p c} = - \frac{\partial}{\partial x_u} \overline{u_u^p c'} + \bar{S} \quad \dots (2)$$

ここで c は粒子濃度、 u_u^p は粒子速度、 c' は粒子濃度の

乱れ、 u_u^p は粒子速度の乱れ、 S は微小領域を表す。

一般に u_u^p と c' は測ることが出来ないため(3)式のようにモデル化されてきた。

$$\overline{u_u^p c'} = - \frac{\nu_{ff}}{\sigma_c} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_u} \quad \dots (3)$$

ここで ν_{ff} / σ_c は乱流拡散係数、 ν_{ff} は流体の渦動粘性

係数、 σ_c は流体の乱流拡散と粒子の拡散との比を表わ

す。現在まで乱流拡散係数は経験的にしか求めることが出来なかった。

そこで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ことにより粒子の速度・密度の乱れを直接測定し、(3)式を用いて ν_{ff} / σ_c と濃度・速度の乱れとの関係を調べる。

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に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為、任意の粒子の位置の特定が可能となる(経路2)。

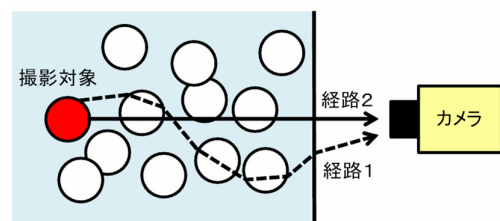


図-1 高数密度流れの可視化法の概念図

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。ここで多孔質材料であるシリカゲル粒子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に示すような直径 9.0cm と 14.6cm 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計測した。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を全てのケースで 65.0mm とした。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。

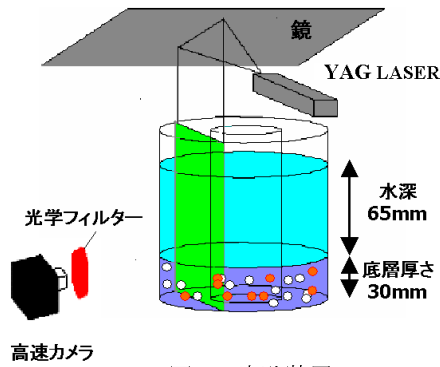


図-2 実験装置

本研究では内円筒の回転速度を 150,200rpm、初期底面厚さを 30mm、水深を粒子底面から 65mm で実験を行った。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、半径方向に完全に様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に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。前述した様にシリカゲル粒子は球形のもの他、半球形のものも含まれている為、本研究では次式に示す 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える軌道のうち、加速度が最小となる軌道を粒子軌道として採用した。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。

3.底層粒子の可視化計測結果

(1)屈折率整合法による可視化結果

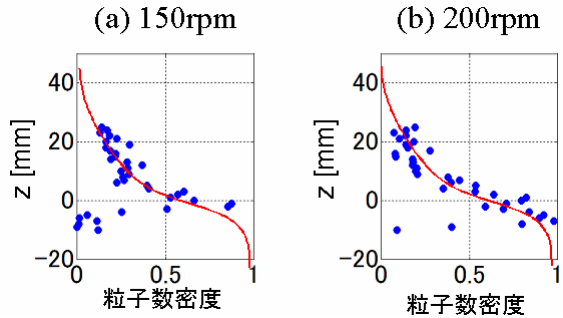
図-3(a)は NaI 水溶液中のシリカゲル粒子底層を撮影した画像の一例である。画像中の粒子はサスペンションしているものと流動化層を構成している粒子である。このように底面下や底面の極近傍における高数密度粒子群を可視化することが出来た。

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、

$$R = \frac{n}{n_0} \quad \dots (4)$$

図-4 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。より厳密に固液の屈折率を調整することにより可視化できる範囲が増大する可能性がある。


 図-4 粒子数密度 R

(2)粒子速度分布

図-5 は平均水平粒子速度の鉛直分布である。すべてのケースで初期底面近傍で流速がゼロから最大速度まで遷移していることがわかる。赤い直線は遷移している範囲を表している。

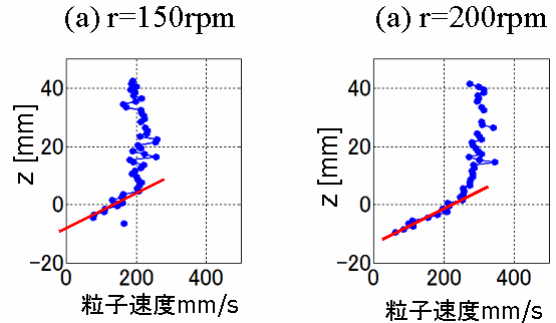


図-5 平均水平粒子速度

4. 乱流拡散係数の決定

本研究で対象としたのは定常一方向流であるので次式を仮定する。

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} = 0$$

また本研究の流れ場では $\bar{S} = 0$ である。

このとき(3)式より次式が与えられる。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \overline{u_u^p c} = - \frac{\partial}{\partial x_i} \overline{u_u^p c'}$$

上式と(4)式より次式で表される v_{ff} / σ_c を実験結果から求めた。

$$\frac{v_{ff}}{\sigma_c} = - \frac{\frac{\partial}{\partial z} \overline{w^p c'}}{\frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial z^2}}$$

150rp の時

$$v_{tf} / \sigma_c = 0.0089$$

200rp の時

$$v_{tf} / \sigma_c = 0.0198$$

5. 結論

本研究では海底面を構成している底層内部を可視化し、粒子の挙動を直接計測することに成功した。計測した粒子の濃度の乱れから乱流拡散係数を求めることが出来、濃度の拡散係数を粒子速度・粒子濃度の乱れを直接計測することによって実験的に求められる可能性を示した。しかし本研究では二つのケースのみにより傾向をつかむことが出来ず、濃度の拡散係数は粒子濃度・乱流強度に依存すると考えられるがこれらについて特徴化するには種々の条件の流れについてのさらなる実験が必要である。

参考文献

- 江藤剛治・竹原幸生・横山雄一・井田康男(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): Turbulence 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.