# 屈折率整合法を用いた高濃度粒子混相乱流場の画像計測法の開発

Image measurement technique for multtiphase flows with dense particles using refractive index matching

北海道大学大学院工学部　○学生員　　松崎亘　（Wataru Matsuzaki）
北海道大学大学院工学研究科助教　　正　員　　猿渡亜由未　（Ayumi Saruwatari）

## １．　はじめに

波浪下のせん断流は海底を構成する砂等の粒子を巻上がらせ輸送を開始させるが，特に海岸構造物の周りではせん断流による底質の巻上げがより活発となり scour と呼ばれる地形変形がピア周辺などに形成される事が知られている(Sumer & Fredsoe, 2008)．これは構造物周辺では海底面方向のせん断流に加え構造物壁面方向のせん断流が生じ，より複雑な複合せん断流が形成される為である．

粒状底面にせん断流が作用すると底面は流動化（液状化）層の形成を経て巻き上がり，高濃度の浮遊粒子群（サスペンション）を形成する事が知られているが（Forterre & Pouliquen, 2008），流動化層やサスペンション等の高濃度粒子混相流の物理的特性に関して詳細は明らかにされていない．流動化層やサスペンションが形成されると流れに応答して底質が移動しやすい状態となる為，これらの形成は海底の地形変化と密接な関係がある．

流動化層やサスペンション中の流れは高濃度で粒子が存在する混相乱流状態となっている．こ底面の巻き上がりに関する研究は数多くなされてきたが，現在せん断流下における海底からの底質浮遊フラックスは，水平方向の代表流速を元に定義された Shields 数ベースにモデル化されている(e. g. Nielsen, 1992)．しかし構造物周りの水平・鉛直方向の速度勾配を含む複合せん断流の場合，対応する Shields 数を適切に定義できない可能性があり，複合せん断流の底質浮遊過程については更なる研究が必要と考えられる．れまでこの流れを超音波流速計や間隙水圧計等を用いて計測した例や，透明水槽の壁面近傍の流れ場を画像計測した例はあるものの（Lamb et al, 2004 他）水槽壁面の影響を受けない領域におけるサスペンション中や底層内部の流れ場を可視化し画像計測する方法は無かった．一方江藤ら(1996)は固相と液相の屈折率を整合させる事により固液界面を透明化し流れを可視化する方法について詳細に研究している．

本研究では粒子と液体の屈折率整合による高濃度粒子混相流れを可視化し画像計測する方法を開発する．本計測法により回転二重円筒内の複合せん断流れにより誘発された粒子 - 液体混相流れ場の計測を行う．

## ２．　実験内容

### ２－１　実験方法

本研究では透明アクリル製回転二重円筒間に形成されたせん断流中における粒状底面の流動化，巻き上げ，サスペンション形成が同時に発生した流れ場の計測を行う．二重円筒の内円筒半径は $r_2$=9cm，外円筒半径 $r_1$=14．4cm，高さは 15cm であり，内外円筒はそれぞれ 0～200rpm の範囲で回転させることができる．

本実験では底質粒子がせん断流中で流体内に分散する事により形成される高濃度粒子−液体混相流の内部を可視化する為に流体と粒子の屈折率整合を行う事により粒子界面における光の屈折や乱反射を抑制し，粒子相を透明化した．粒子として用いたのは透明シリカゲル粒子であり，屈折率は 1.46 とガラス等と比較して低く，比重は 2.4 と砂と同程度である．流相にはヨウ化ナトリウム水溶液を用いているが，本溶液の屈折率は溶質濃度に依存して 1.33～1.49 の範囲で変化する．本研究ではヨウ化ナトリウム水溶液の濃度が 42%でシリカゲル粒子の屈折率と等しくなることを確認した．このときの溶液の比重は 1.39 であった．

底質粒子の一部に蛍光染料で着色した粒子を混入させた．図１に示すように内円筒から距離 $D_L$=1.2cm の地点にレーザーシート(YAG LASER; ピーク波長 532mm)を鉛直に照射し，シート面上の蛍光粒子を励起発光させた(蛍光波長 600mm 以上)．レーザーシート面に対して直角に視軸が来るよう高速カメラを二重円筒前面に設置し，レンズ前面に 600nm 以上の光を透過させるハイパスフィルターを装着することにより蛍光発光した粒子のみを撮影した．撮影解析度は 0.10mm/pixel，撮影周波数は 500fps，シャッタースピードは 1/500s とした．また，撮影画像中で解析に用いるのはシート面中央の 1cm 幅の領域とした．撮影時間は 3.0s 間とした．

### ２－２，　実験条件

本研究では直径 1.0㎜ のシリカゲル粒子を用いて実験を行った．二重円筒底面から 160㎜ に初期粒状底面，550 ㎜ に初期水面が存在する．本研究では内円筒のみを一方向に 190rpm で回転させ，円筒の半径方向及び鉛直方向に速度勾配を有する複合せん断流れを形成させた．この流れ場はピア周辺の局所流れのモデルとして設定したものである．また，二重円筒で円周方向(流下方向)を $x$ 軸，鉛直上方を $z$ 軸($z$=0 は初期水面)と定義する．

### ２－３，　画像解析法

取得した画像はメディアンフィルタによりノイズ処理を行ったのち，粒子の中央位置をピックアップし Particle Tracking Velocimetry(PTV)により速度場を求めた．図２に本実験で撮影された連続画像の例を示す．

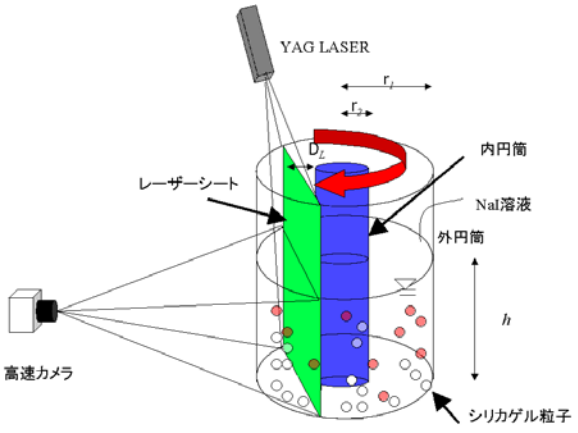



図１：実験装置

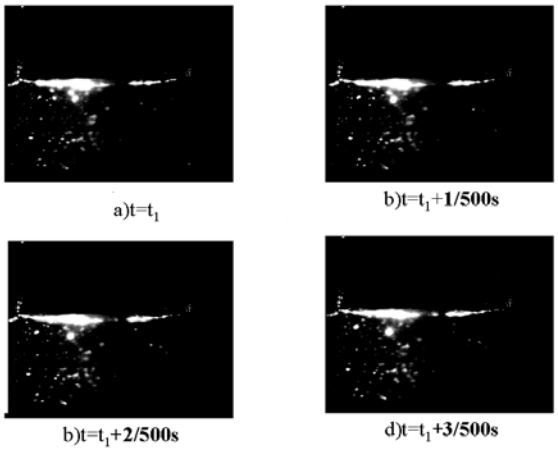



図２：撮影した連続画像の例

３．　実験結果

実験装置の内円筒を回転させると円筒間に水平及び，鉛直方向に速度勾配を有する複合せん断流場が形成される．円筒の回転速度が極遅い条件であっても，円筒間の粒状底層は表層部から流動化していく．内円筒の回転速度を増加させていくと流動層内の速度場に乱れが発生し，粒子の巻き上げを誘発する．これにより流動化底層上にサスペンション層が形成され，粒子群は流れ場の中で激しく輸送されるようになる．本研究では厳密には定義しないが，せん断流下の高濃度で粒子が存在する領域は，流れに応答しない静止底層，流動状態となった流動化底層，サスペンション層に大まかに分類することが出来る．（図３及び Forterre&Pouliquen，2008 参照）．本実験で与えた内円筒回転条件の場合，およそ z=−50〜−40mm の範囲に流動化層，z=−40〜−10mm の範囲にサスペンション層が形成された．

図５の（上）は実験画像から求めた平均水平粒子速度及び鉛直粒子速度の rms 値の鉛直分布を表す．内円筒から外円筒に向かう線上における円周方向速度の分布が直線近似できると仮定すると，計測点上の流速は $U_{f\theta}$ 1047mm/s と計算される（図６上面図参照）．本実験では液相の流速は測定していないが，$U_{f\theta}$が流体の速度の最大値とお表すと仮定すると粒子速度は $U_{f\theta}$の 0.7 倍となり，この粒子-液体間の速度差が混相流場に乱れを生む要因の一つとなると考えられる．また，鉛直粒子速度の rms 値は速度の乱れ強度のスケールとなるものであり，z=-27mm 地点で極大値となった．ここで図 5(下)はこの時の底層粒子濃度の鉛直分布を模式的に描いたものであり，サスペンション層と流動化底層が存在するおよその範囲を同時に示している．鉛直粒子速度の極大値が現れる地点は流動化層の内部に位置している．この事から，高濃度粒子混相粒内で発達する乱れが粒子の巻き上がりとサスペンション形成と関係しているものと考える．

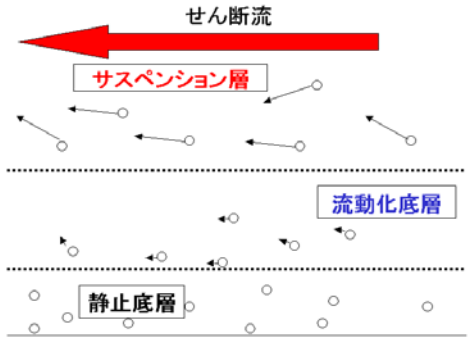
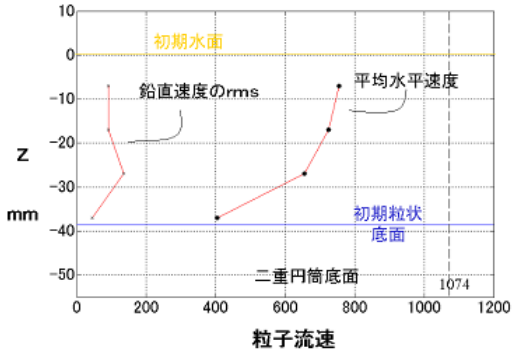



図３：せん断流中で形成される静止層，流動層，サスペンション層を表す模式図



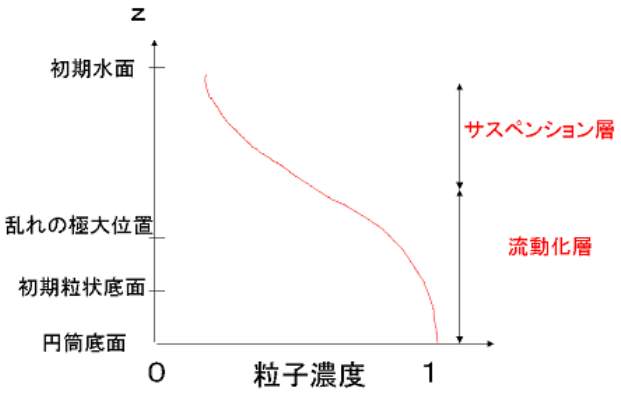




図５：(上)実験結果から求めた平均流速度（・）及び鉛直粒子速度の rms 値の鉛直分布(x)及び(下)粒子濃度の鉛直分布の模式図.

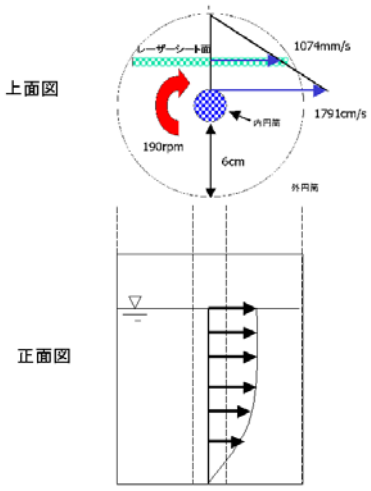



図６：回転二重円筒内で形成される複合せん断流の模式図

４．　結論

本研究では高濃度粒子−流体混相乱流場の内部の流れの可視化及び画像計測法を提案した．粒子と流体の屈折率整合が高濃度粒子混相流場の可視化に有効であることを確認した．本研究で与えた実験条件下では底面を構築する粒子が複合せん断流中で移動し，流動化層とサスペンション層を形成した．この時の円周方向粒子速度と粒子速度の乱れ強度の鉛直分布を，実験画像を基に測定した．流動化底層内において発生した乱れは，底面下の粒子の巻き上げとサスペンション形成に影響を与えて

いると予想された.

参考文献

Sumer&Fredsoe(2002)　The mechanics　of scor in the marine enviroment.Advanced Series on Eng.,17,pp.149.
Forterre&Pouliquen(2008) Flow of dense granular media, Annu.Rev,Fluid Mech.,40,pp.1-24.
Nielsen(1992)Coastal bottom boundary layers and sediment transport. Advanced Series on Eng.,4pp.222.
Lamb,D'Asaro & Parsons (2004),Turbulent structure of high-density suspensions formed under waves. J. Geophys.Res.,109,C12026.
江藤剛治, 竹原幸生, 横山雄一, 井田康生(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