

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：17401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23760460

研究課題名（和文） 可視化計測による粒状層の界面近傍における動的乱流構造の解明

研究課題名（英文） Flow visualization and image velocimetry of dynamics of turbulence structure nearby porous bed

研究代表者

中條 壮大 (NAKAJO SOTA)

熊本大学・大学院自然科学研究科・助教

研究者番号：20590871

研究成果の概要（和文）：粒状層界面近傍における，上部流と間隙流の相互作用，強せん断層の変化や乱流量の分布とその時間変化特性について，画像流速計測法を用いて明らかにした．強せん断層は上部流の加速位相で深く，減速位相で浅くなり，その結果として間隙部では上部流が減速する位相で逆流が生じている．また，非線形乱流モデルによって粒状層界面近傍および間隙部の乱流量の分布が再現可能であることが明らかとなった．

研究成果の概要（英文）：In this study, the interaction of upper clear flow and porous media flow, the variation of strong shear flow near porous bed and temporal/spatial distribution pattern of turbulent properties were shown by using image velocimetry. The interaction region of strong shear flow was changed in response to the acceleration of upper clear flow. And the reverse flow was generated inside porous media in response to its change. Finally, it was clear that the nonlinear turbulence model have high performance to reproduce time variation of turbulent properties nearby porous bed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：海岸工学，多孔質体，乱流

## 1. 研究開始当初の背景

粒状層上を通過する流れは，河床や海底など自然界に広く一般的に見られ，その流動の把握は出水時の土砂流出や海浜の安定性といった水理学上の重要課題と密に関連している．近年では底質の移動が溶存酸素環境を一時的に悪化させ，水生生物の産卵や生育の環境に影響を及ぼすなど，水質問題とも関連が深いことが報告されている．また，透過性の多孔質構造物の上面についても粒状層上の流れの一形態であると考えれば，その近傍の流れは透過構造物による水勢減衰効果の把握や，構造物近傍で生じる砂の吸い出しに伴う構造物の沈下機構の解明とも関連

している．また，視野を工学一般に広げれば，熱交換器内の熱流動や都市・植生キャノピー層上部の流れの解析においても，粒状層界面における運動量・熱量の交換をモデル化して取り扱っており，広範な分野・スケールにおいて粒状層界面近傍の流れに関する知見が必要とされている．

これまで超音波流速計等を用いた粒状層近傍の流れの計測は，粒状層の界面近傍で生じる散乱によって，正確な計測が困難であった．しかし，画像流速計測法(PIV)の発達に伴って，その詳細が徐々に明らかにされている．TomkinsとAdrian(2003)はPIVを用いた先駆的な研究により，粒状層上の界面近傍

では、主流方向に発達する高速流域にそって、逆回転する対称渦がパッチ状に発生していることを示している。また、Detertら(2010)は粒状層上のPIVおよび圧力分布測定を行うことで、粒状層近傍においても滑面流れと類似した渦を伴う楔型のエントレインメント構造が発達すること、またその渦により間欠的に生じる負圧が粒状層を構成する粒子を持ち上げる初期因子として重要であることを示している。

このように、粒状層上の流動についてはある程度明らかにされつつあるが、粒状層自体が透過性を有しているために、その間隙部における浸透流の影響も無視することはできない。特に、間欠的かつコヒーレント構造を有する粒状層上の渦構造には、粒状層間隙部から放出される渦流も関与していると考えられる。また逆に、粒状層上で発達した渦流が粒状層間隙部における渦構造に影響を及ぼすとともに、海面に位置する粒状体の運動そのものを支配している。こうした上部流(clear flow)と下部間隙流(porous media flow)の相互作用は、長年にわたり関心が高いところであるが、計測の困難さから、これまでその詳細はほとんど明らかにされていない。

## 2. 研究の目的

研究代表者らは、これまでに一様流・振動流が多孔質充填層を通過する際の乱流の生成・発達メカニズムに関する知見を取得してきた。本研究では、粒状層が存在することで大きな流速勾配が生じる場における乱流の生成と、粒状層内外の相互作用について知見を得ることに意義がある。すなわち、これまでの定常場・非定常場における乱流の生成・発達メカニズムに加えて、強せん断流場におけるそれに関する知見を得ることが目的である。

本研究では粒状層を介した運動量交換がもたらす粒状層上部の流れと粒状層間隙部の流れの相互作用について、PIVから得られる時空間流速情報より解明する。

## 3. 研究の方法

屈折率整合法を併用した可視化計測法により、粒状層界面近傍における上部流と下部間隙流の乱流構造の相互作用を明らかにした。

固定粒状層を対象に、上部流と下部間隙流との基礎的な関係について把握するために、その遷移域も含めて屈折率整合法を用いて実測し、各乱流量や平均運動量の時間発展を考慮した相関関係を調べた。実験装置の概要を図-1に示す。

実験は、高さ $H=20\text{cm}$ 、幅 $B=10\text{cm}$ 、長さ $L=100\text{cm}$ の水平部を有する管水路内に設置さ

れた粒状層を対象として行われた。直径 $D=2\text{cm}$ の球をシリコンを用いて158個製作し、これらと同じシリコンで接着して、粒状層模型(約 $23\times 10\times 5\text{cm}$ )を製作した。粒状層の間隙率は $\phi=0.34$ であった。この模型を管水路中央の底部に設置し、その周辺には面一となるように、同じ直径 $2\text{cm}$ のガラス球を高さ $5\text{cm}$ に敷き詰めた。また、流体には重量百分率が約40%のヨウ化ナトリウム水溶液を用いた。粒状層模型にシリコンを、流体にNaIを用いる事で、両者の屈折率が一致し、粒状層内の画像を歪むことなく取得可能となる。管路の片側の開放部には振動板を設置し、その上下運動によって管路内に振動流を発生させた。流体中に散布されたレーザーのレーザーシート平面内の運動を、振動流の制御PCと同期した2台の高速度カメラを用いて撮影した。撮影条件は、撮影間隔 $1/250$ 秒、シャッター速度 $1/500$ 秒で、カメラ1台あたり約3,000枚の画像を取得し、約12秒間撮影した。また、空間解像度は $5.5\times 10^{-3}\text{cm/pixel}$ である。間隙内の流路の違いによって流動特性に生じる違いを考慮するため、レーザーシートを $y$ 軸方向に移動させて、断面形状の異なる3断面( $y/D=0.000, 0.375, 0.750$ )での計測を行った。実験は慣性力の指標である粒子レイ

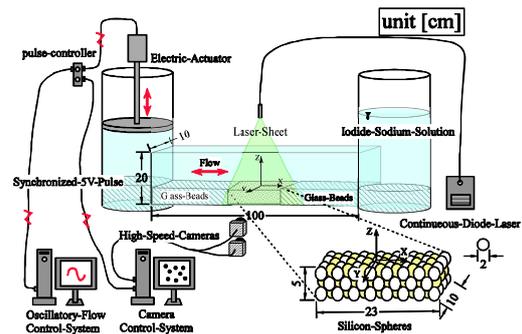


図-1 実験装置の概要

表-1 実験条件

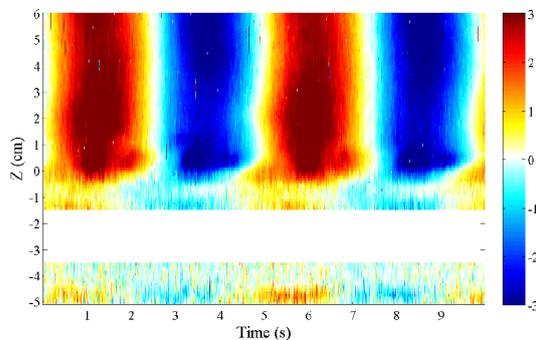
$V_0$ (cm/s)	$T$ (s)	$Re_p$ (-)	$KC$ (-)
1.5	2.0	113	1.5
	6.0		4.5
	10.0		7.5
2.5	1.4	189	1.75
	4.0		5.0
	6.6		8.25
3.2	1.0	242	1.6
	3.0		4.8
	5.0		8.0

ノルズ数  $R_{ep}=V_0\phi D/\nu$  と、流れの非定常性の指標である Keulegan-Carpenter 数  $KC=V_0T/D$  の異なる条件で実験を行った (表-1)。ここで  $V_0$  および  $T$  は上部流の速度振幅および振動板の振動周期である。

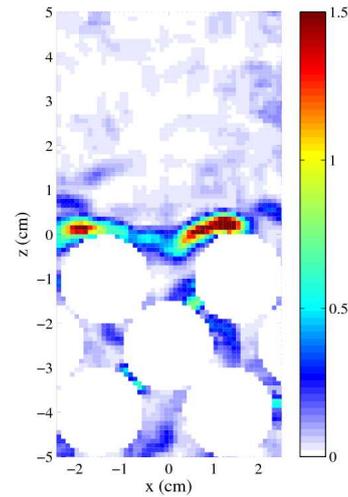
また、水理実験と並行して開発された IB 法に基づく数値モデルを用いて、粒状層内の流れの再現性についても検証した。最後に、粒状層の上部流から間隙流までを統一的に表現可能な乱流モデルの構築を目指して、既に充填層流れでその有効性が検証された非線形乱流モデルの検証を実施した。

#### 4. 研究成果

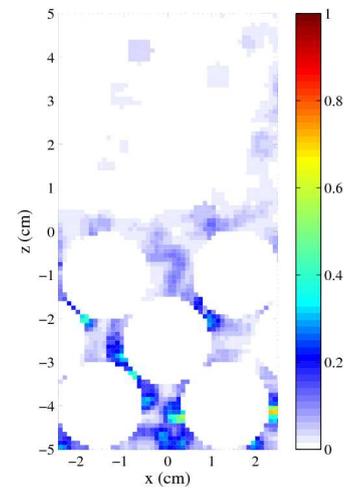
一例として、**図-2** に粒状層の界面近傍における流速の鉛直分布の時間変化を示す。PTV により得られる流速はトレーサの存在点における値であるため、ここでは逆距離荷重法により求めた補間値を示す。粒状層は  $z/D < 0.0$  に設置されており、図中で常に欠測の区間は粒状層の固体内に相当する。上部流では振動板の振動と一致した周期による正弦波形の速度変動が生じているのに対し、粒状層の界面近傍では速度の絶対値が急減し、強いせん断層が生じていることが明らかとなった。特に、そうしたせん断層の位置が、上部流の位相に応じて変化する、加速位相で深く、減速位相で浅くなっていることが示された。こうした知見は、これまでの超音波流速計 (ADV) やレーザー流速計を用いた計測では、固体近傍で生じる異常散乱等により、明らかにはされてこなかった新たな知見である。また、せん断層の影響範囲の変化にともなって、上部流が減速時の位相では、粒状層内に上部流とは逆方向に流れる時間が存在することが示された。また、こうした知見は転流時において粒状層界面近傍で負圧が発生することを示唆している。土砂の輸送機構との類推からは、こうした上部流と間隙流の間に生じる位相差が、細粒分の吸出しに関与



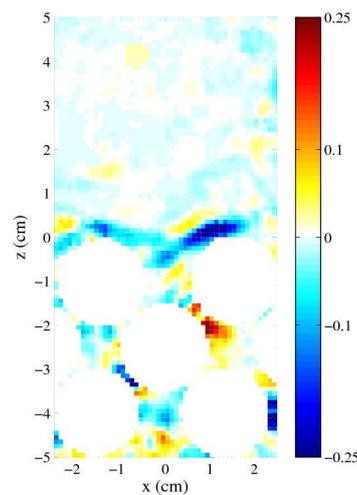
**図-2** 水平流速 (cm/s) 鉛直分布の時間変化  
水路中心 ( $x/D=0.0, y/D=0.0$ )  
 $R_{ep}=242, KC=8.0$



(a) 水平方向の乱流強度  $I_x^2$



(b) 鉛直方向の乱流強度  $I_z^2$



(c) レイノルズ応力  $R_{xz}$

**図-3** 瞬時の乱流量分布 (単位:  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ )  
 $V=V_0$  の位相,  $R_{ep}=242, KC=8.0$

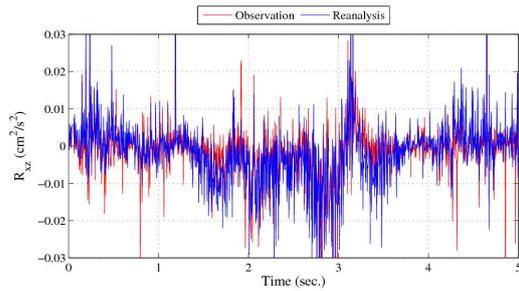


図-5 粒状層界面 ( $x, y, z = 0, 0, 0$ ) のレイノルズ応力の時系列について観測値と非線形乱流モデルの推定値を比較した結果

$$R_{ep}=242, KC=8.0$$

している可能性が高いと推察された。

補間流速に対して空間平均操作を行い、算定した乱流量（乱流強度とレイノルズ応力）の分布の一例を図-3に示す。全般的に上部流よりも粒状層の近傍と間隙部において大きな値を示した。流速が正方向に最大となる位相では、粒状層の界面近傍、構成粒子に対しては上手側で水平方向の乱流強度が最大値を示した。図-2で示したせん断層の強い領域と、水平方向の乱流強度の大きな箇所は一致しているが、界面近傍で一様に分布しているのではなく、構成粒子スケールでの変動が存在していることが明らかとなった。鉛直方向の乱流強度は界面近傍における水平成分に比べると小さいが、粒状層の内側に粒子径  $D$  程度入ると、ほぼ同程度であり、局所的には  $V_0^2$  の  $1/40 \sim 1/20$  程度の乱流量を有していることが明らかとなった。また、レイノルズ応力の分布は、界面と間隙部で絶対値に大きな差は見られない。このように、粒状層の内部の乱流量の分布は構成粒子のスケールで局所的に分布パターンを複雑に変化させており、また上部流の変化に応じて分布傾向も変化するために単純ではないことが、明らかとなった。

研究代表者らは、これまでに一方向流場および振動流場における充填層内を通過する流れに対して、非線形速度勾配項で構成される乱流モデル（非線形乱流モデル）の適用性を、画像計測結果から検証する a priori 検証法により検討してきた。図-4には同様に検証した結果の一例を示す。非線形乱流モデルは粒状層の界面近傍の流れにおいても良い再現性を示すことが、図-3(c)との比較より明らかとなった。なお、今回の比較において用いたモデル係数は0.1であり、これは一方向流場の充填層流れで最適とした値(0.12)とほぼ同値である。これはすなわち、充填層流れから粒状層の界面近傍の流れま

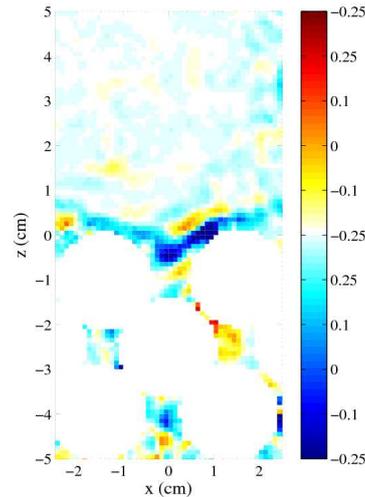


図-4 非線形乱流モデル式より算定したレイノルズ応力分布 (図-3(c))と対応, 単位:  $\text{cm}^2/\text{s}^2$   $V=V_0$ の位相,  $R_{ep}=242, KC=8.0$

で統一的な表現が可能であることを示唆するものである。

図-5 は粒状層界面におけるレイノルズ応力を時系列で比較した結果である。図のように、上部流の変化に応じた乱流量の変化をモデルは適切に再現していることが明らかとなった。両者の相関は 0.85 と高い値を示した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① 岡田祐也, 重松孝昌, 中條壯大, 振動流場における粒状層内外の微細流動に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読有, 2013, vol. 69, 頁番号は未定, 受理済
- ② 重松孝昌, 岡田祐也, 中條壯大, 粒状層上の振動流によって誘起される乱流諸量に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読有, 2013, vol. 69, 頁番号は未定, 受理済
- ③ Sota Nakajo and Takaaki Shigematsu, 'Experimental verification of turbulent modeling for the flow through a porous media by using PTV', Proceedings of 7th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, 査読有, 2011, 6p., 6D5P. <http://www.tsfp7.org/papers/6D5P.pdf>

f

- ④ Sota Nakajo, Yusuke Takeoka and Takaaki Shigematsu, 'Numerical Simulation of Fluid Force acting on Circular Cylinders in Unidirectional Flow', Proceedings of 7th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, 査読有, 2011, 7p., P37P.  
<http://www.tsfp7.org/papers/P37P.pdf>

[学会発表] (計3件)

- ① Sota Nakajo, 'Experimental verification of turbulent modeling for the flow through a porous media by using PTV', 7th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, 2011年7月30日, Ottawa Convention Centre (Canada, Ottawa)
- ② Sota Nakajo, 'Numerical Simulation of Fluid Force acting on Circular Cylinders in Unidirectional Flow', 7th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, 2011年7月30日, Ottawa Convention Centre (Canada, Ottawa)
- ③ 中條 壯大, 「PTV結果を用いた多孔質体通過流における非線形乱流モデルの検証」, 可視化情報学会シンポジウム, 2011年7月18日, 工学院大学(東京都 新宿)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中條 壯大 (NAKAJO SOTA)  
熊本大学・大学院自然科学研究科・助教  
研究者番号: 20590871

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

重松 孝昌 (SHIGEMATSU TAKAAKI)  
大阪市立大学・工学部・教授  
研究者番号: 80206086

### (4) 研究協力者

竹岡 佑介 (TAKEOKA YUSUKE)  
株式会社 西島製作所  
研究者番号: なし

岡田 祐也 (OKADA YUUYA)  
株式会社 日水コン  
研究者番号: なし