

# 振動流場における 粒状層内外の流動に関する実験的研究

## An Experimental Study on Internal and External Flow of Porous Medium in Oscillation Flow Field

河海工学研究室 岡田祐也

### Abstract

粒状層を含むその近傍の流れに関する知見は数少ない。本研究は、屈折率整合法を用いた画像計測手法により、振動流場における粒状層内とその近傍の流動を高時間・高空間解像度で計測した。計測結果に基づいて、流動場における平均流速および乱流諸量を算定し、流れの時・空間的特性について検討した。その結果、粒状層界面近傍の流動に関する知見を得た。また、乱れエネルギーの断面平均値は、界面近傍において最大となり、 $Re_p$ が増加するにつれ大きい値を示した。

In this study, Fluid velocities of internal and external flow of porous medium in oscillation flow were measured by the Particle Image Velocimetry (PIV) with matching refraction index using two high-speed cameras. Based on the measurement results, distribution of the spatial average flow velocities and turbulent quantities such as turbulent energy and the Reynolds' stress were calculated. As a result, the distribution of flow in the interface between internal and external flow was presented. The cross-sectional averaged value of the turbulent energy near the surface of porous medium were the largest, and were larger as the particle Reynolds' number increased.

### 1. 序論

河川・海岸に代表されるように、粒子状の固体群で構成される層(以下、粒状層)の上部を通過する流れは自然界に数多く存在する。その流動を把握することは水圏における土砂管理や構造物の安定性等の工学上の課題と密接に関連している(Ferreira[1])。

粒状層近傍の流れは、粒状層上の流れ(上部流)と粒状層内の流れ(浸透流)に大別することができる。粒状層近傍流れに関する既往の研究は以下に記すようにこの2つに分けられる。

#### 粒状層上の流れ(上部流)

粒状層上の流れは、PIV(Particle Image Velocimetry)を用いたTomkinsら[2]の先駆的な研究により、乱流構造の一端が明らかにされている。また、Detertら[3]は、PIV計測および圧力分布測定を行うことによって、粒状層近傍で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と示している。このように、粒状層上の流れに関しては、徐々に明らかにされつつある。し

かし、対象としている流れが定常流のみであり、透過性構造物の機能や安定性を検討するためには非定常流場に関する知見が望まれている。

#### 粒状層内の流れ(浸透流)

粒状層内の流れに関しては、粒状層を構成している粒子自身の存在により計測が困難であった。中條ら[4]は画像計測手法と屈折率整合法(江藤ら[5])を併用して間隙部の流動を計測し、その流動特性を明らかにしている。

以上のように、粒状層近傍の流れは徐々に明らかにされつつあるが、粒状層が透過性を有していることから、粒状層近傍の流れは上部流と浸透流の双方を考慮すべきであることが示唆されている(中川ら[6])。しかし、双方の流れを同時に考慮した研究は数少ない。

そこで、本研究では振動流場において屈折率整合法を併用した画像計測を行い、粒状層内とその近傍の流動を同時に計測し、計測結果に基づいて、流速場および乱流諸量の時・空間的特性に関する知見を得ることを目的とする。

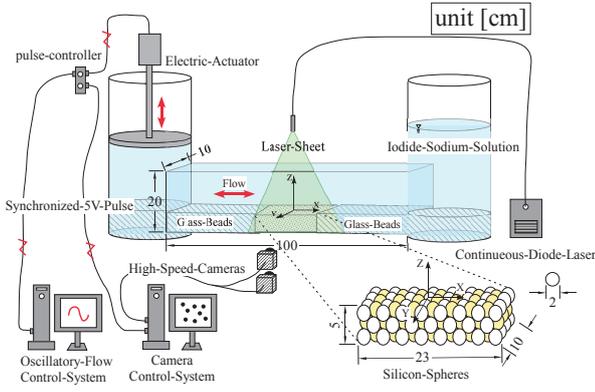


図-1: 実験概要

表-1: 実験条件

$V_0$ [cm/s]	$T$ [s]	$Re_p$	$KC$	$\langle \bar{P}_v \rangle$ [個/cm <sup>2</sup> ]
3.0	2.0		3.0	90.3
	6.0	157	9.0	104.0
	10.0		15.0	126.5
4.5	1.4		2.9	105.8
	4.0	240	9.0	95.2
	6.6		15.1	130.3
6.0	1.0		3.0	94.5
	3.0	313	9.0	80.8
	5.0		15.0	102.4

## 2. 実験概要

### 2.1 実験装置および実験条件

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を用いて行った．直径  $D=2\text{cm}$  のシリコン (KE-108: 信越化学 (株)) 球を 158 個製作し，これらを接着して多孔質体模型 (約  $23 \times 10 \times 5\text{cm}$ ) を製作した (間隙率  $\phi=0.34$ )．この模型を水平水路の中央の管底部に設置し，他の管底部には高さが  $5\text{cm}$  となるよう直径約  $2\text{cm}$  のガラス球 ((株) 花昭) を敷き詰めた．また，水路内を重量濃度約 40% のヨウ化ナトリウム水溶液 (動粘性係数  $\nu=0.9 \times 10^{-2}\text{cm}^2/\text{s}$ ，和光薬品 (株)) で満たした後，振動板を上下振動させることにより振動流を発生させた．

振動板は，PC を用いて式 (1) で示される正弦関数で  $0.01$  秒刻みで制御し，速度振幅  $V_0$  と振動周期  $T$  を変化させて実験を行った．実験結果は，式 (2) ~ (3) で定義される粒子レイノルズ数  $Re_p$  と  $KC$  数 (Keulegan-Carpenter 数) を用いて整理した (表-1)．また，計測領域内における正味の流速ベクトルの密度  $\langle \bar{P}_v \rangle$  を式 (4) を用いて算定した． $N_y$  は計測断面数， $N_v$  は計測領域内の流速ベクトル数， $A_w$  は流体部の面積を表す．

$$v = V_0 \sin(2\pi t/T) \quad (1)$$

$$Re_p = V_0 \phi D / \nu \quad (2)$$

$$KC = V_0 T / D \quad (3)$$

$$\langle \bar{P}_v \rangle = \frac{1}{N_y T} \sum_{iy=1}^{N_y} \sum_{t=1}^T N_v(t, iy) / A_w(iy) \quad (4)$$

多孔質体模型上部の中央位置を原点とし，管路水平 (流軸) 方向に  $X$  軸を，鉛直上向きに  $Z$  軸を，これらと直交する管路奥行き方向に  $Y$  軸を取るよう座標軸を設定する．

流軸を含み， $Y$  軸に対して垂直になるようにレーザーシート (DPSS Green Laser DPGL5W, (株) 日本レーザー)

を上方から照射し，同期をとった 2 台の高速度カメラ (MotionScope M3, IDT ジャパン (株)) を用いて，多孔質体模型を含む  $5.6 \times 11.6\text{cm}$  の領域に存在するトレーサー (ポリ塩化ビニル，比重 1.33) を撮影した．レンズには，縁辺部でひずみの少ない，Ai Micro Nikkor 105mm/F2.85((株)Nikon) を使用した．また，高速度カメラは振動板制御装置と同期をとっている．

画像の撮影条件は，撮影間隔  $\Delta t=1/250$  秒，シャッター速度  $1/500$  秒で，カメラ 1 台あたり約 3000 枚の画像を取得し，約 12 秒間撮影した．また，空間解像度は  $5.5 \times 10^{-3}\text{cm}/\text{pixel}$  である．流動経路の違いによって生じるばらつきを考慮するため，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 ( $y/D=0.000, 0.375, 0.750$ ) の計測を行った．

### 2.2 解析手法

画像解析のアルゴリズムには，PIV 解析手法の一つである Super-Resolution KC 法 (竹原ら [7]) を用いた．画像解析にあたっては，撮影画像からトレーサー粒子の情報のみを抽出する前処理と，得られた流速ベクトルから誤ベクトルを除去する後処理を行った．前処理に関しては，重松ら [8] を参照されたい．後処理は撮影領域全体での平均速度ベクトル  $v_{ave}$  を算定し，式 (5) で示される  $v_m$  に収まる流速ベクトルのみを有意であるとみなした．ここで， $v_{std}$  は，各速度ベクトルの平均速度ベクトルからの偏差を平均したものである．すなわち，平均値より偏差が 4 倍以上異なる速度ベクトル (存在確率) を誤ベクトルとして判定している．

$$v_{ave} - 4v_{std} < v_m < v_{ave} + 4v_{std} \quad (5)$$

計測値はトレーサーの存在する地点の流速であり，後述の議論のために，任意の定点における流速を算定しておく．本研究では，式 (6) を用いて定義される空間平均流速  $v_S$  を用いた．

$$v_S(x_C, y_C) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M v_m(x_m, y_m) \quad (6)$$

ここで、添え字の  $C$  は任意の格子点の座標を、添え字の  $m$  は計測流速の座標をそれぞれ表し、 $M$  は空間平均領域内に存在する流速ベクトルの個数を表す。本研究では、多孔質体の間隙スケール  $\phi D$  と同程度の直径  $R=0.3\text{cm}$  の領域を空間平均領域として設定した。また、格子点間隔は  $0.1\text{cm}$  間隔で解析を行った。3章で用いる  $\langle u_S \rangle$ 、 $\langle w_S \rangle$  はそれぞれ  $X$  軸、 $Z$  軸方向の空間平均流速である。このように算定された空間平均流速の時間変動解析結果から、粒状層近傍の流況について考察した。

また、式(7)で示すように、空間平均流速に対する個々の計測流速の空間的な偏差を、乱れ成分と定義した。

$$v'_m(x_m, y_m) = v_m(x_m, y_m) - v_S(x_C, y_C) \quad (7)$$

この乱れを用いて算定される乱れエネルギーの時・空間分布について考察した。また、4章で用いる  $u'_m$ 、 $w'_m$  はそれぞれ  $X$  軸、 $Z$  軸方向の乱れ成分である。

### 3. 流況の計測結果

#### 3.1 断面平均値からみた流況の計測結果

粒状層近傍の流況について検討するため、式(8)～(9)を用いて、断面平均流速  $\langle\langle u_S \rangle\rangle_{xy}$  および  $\langle\langle w_S \rangle\rangle_{xy}$  を算定した。

$$\langle\langle u_S \rangle\rangle_{xy}(z_C, t) = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{iy=1}^{N_y} \sum_{ix=1}^{N_x} u_S(x_C, y_C, z_C, t) \quad (8)$$

$$\langle\langle w_S \rangle\rangle_{xy}(z_C, t) = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{iy=1}^{N_y} \sum_{ix=1}^{N_x} w_S(x_C, y_C, z_C, t) \quad (9)$$

ここで、 $N_x$  は  $X$  軸方向の格子点数、 $N_y$  は計測断面数である。 $\langle \cdot \rangle_{xy}$  は  $X$  軸と  $Y$  軸方向の空間に対して平均化したことを意味する。

図-2に、 $KC=15.0, 15.1$ における、半周期間の無次元断面平均流速  $\langle\langle u_S \rangle\rangle_{xy}^*$  および  $\langle\langle w_S \rangle\rangle_{xy}^*$  の位相変化を  $Re_p$  数毎に示す。ここで、 $\langle\langle u_S \rangle\rangle_{xy}^*$  および  $\langle\langle w_S \rangle\rangle_{xy}^*$  の添え字の  $*$  は無次元量を表し、 $\langle\langle u_S \rangle\rangle_{xy}$  および  $\langle\langle w_S \rangle\rangle_{xy}$  を  $V_0$  で無次元化したものである。また、図中の横軸は  $Z$  軸を模型球の直径  $D$  で正規化しており、 $z/D=0.0$  は粒状層界面であり、 $z/D \leq 0.0$  に粒状層が存在しており、それぞれの図は  $1/8$  周期毎の分布を  $0 \sim 4/8$  周期で表示している。

図-2によると、粒状層上部 ( $z/D \geq 0.0$ ) では、振動板の移動速度  $v$  に従い、 $\langle\langle u_S \rangle\rangle_{xy}^*$  が変化していることが見て取れ、 $\langle\langle w_S \rangle\rangle_{xy}^*$  はばらつきはあるものの、ほぼ0であることがわかる。また、粒状層内 ( $z/D \leq 0.0$ ) では、 $\langle\langle u_S \rangle\rangle_{xy}^*$  はほぼ0である。粒状層界面 ( $z/D=0.0$ ) 付近では、 $\langle\langle u_S \rangle\rangle_{xy}^*$  が線形

的に変化しており、境界層が発達していることが見て取れる(図-2)。

次に、図-3に、上部の流速が最大となる位相 ( $t/T=0.25$ ,  $v=V_0$ ) における、 $\langle\langle u_S \rangle\rangle_{xy}^*$  および  $\langle\langle w_S \rangle\rangle_{xy}^*$  の鉛直分布を  $KC$  数毎に示す。図-2と同様に、 $\langle\langle u_S \rangle\rangle_{xy}^*$  は粒状層内でほぼ0で一定であり、 $\langle\langle w_S \rangle\rangle_{xy}^*$  は全域にわたり、ほぼ一定であるといえる。また、前述したように、粒状層界面付近で境界層が発達していることがわかる。図-3によると、上流部の最大速度時 ( $t/T=0.25$ ,  $v=V_0$ ) において、境界層は、 $KC$  数および  $Re_p$  数に依らず、 $-0.2 \leq z/D \leq 0.2$  線形的に増加していることが示された。

以上より、粒状層上部の流れは、界面近傍を除き、層流的な流れとなっていることが示唆された。また、上部流速の最大時において、粒状層界面では、 $KC$  数および  $Re_p$  数に依らず、 $-0.2 \leq z/D \leq 0.2$  の範囲で境界層が形成されることが示された。

#### 3.2 粒状層界面近傍の流況

粒状層界面において、どのように内部と外部で流れのやり取りが行われているかを検討するため、図-4のような  $z/D=0.0 \sim 0.5$  の水平断面上において、空間平均流速  $\langle u_S \rangle$  および  $\langle w_S \rangle$  がどのように分布しているかを検討した(図-5)。ここで、図中の横軸は  $X$  軸を模型球の直径  $D$  で正規化しており、縦軸は左右それぞれに  $\langle u_S \rangle$ 、 $\langle w_S \rangle$  を表示している。赤色のプロットは  $\langle u_S \rangle$ 、青色は  $\langle w_S \rangle$  を示している。また、図中の円形の破線は、模型球を表しており、縦軸の0の位置が算定した断面の位置と対応しており、データの欠損箇所は模型球の存在する箇所である。

図-5(a)は、上部の流れが転流時 ( $t/T=0.00$ ) における結果である。転流時であるため、 $\langle u_S \rangle$  はほぼ0の値を示しているが、 $\langle w_S \rangle$  は物体近傍で増加もしくは減少していることが見て取れる。これは、層内から流出もしくは層内に流入する流れである。図-5(a)によると、全般的に、模型球の上流側 ( $X$  軸負方向) 付近で流出、模型球の下流側 ( $X$  軸正方向) 付近で流入していると考えられる。

図-5(b)は、上部の流れが最大となる時 ( $t/T=0.25$ ) である。 $z/D=0.0$  の位置では、模型球に近づくにつれ、 $\langle u_S \rangle$  が増加していることがわかるが、 $z/D \leq -0.1$  では、その様子は確認できない。計測断面が粒状層界面 ( $z/D=0.0$ ) から離れる程、 $\langle u_S \rangle$  が減少しており、 $z/D \leq -0.4$  では、 $\langle u_S \rangle$  がほぼ0となっていることがわかる。一方、 $\langle w_S \rangle$  は  $z/D=0.0$  で、模型球の上流側 ( $X$  軸負方向) 付近で流出、模型球の下流側 ( $X$  軸正方向) 付近で流入している傾向が見て取れるが、界面から離れるにつれ、 $\langle w_S \rangle$  の絶対値が模型球下流

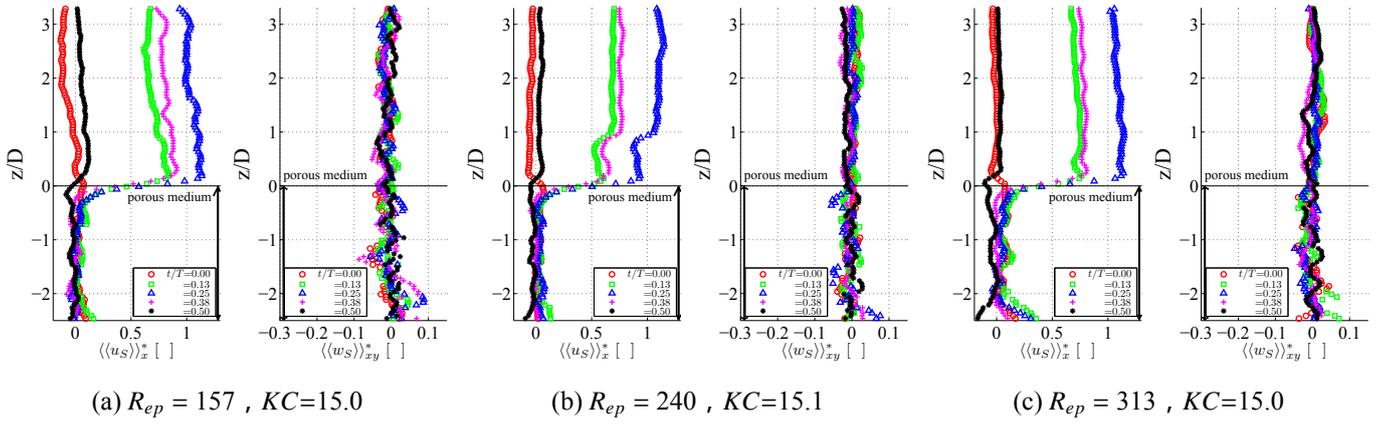


図-2: 無次元断面平均流速  $\langle\langle u_S \rangle\rangle_{xy}^*$  および  $\langle\langle w_S \rangle\rangle_{xy}^*$  の位相変化

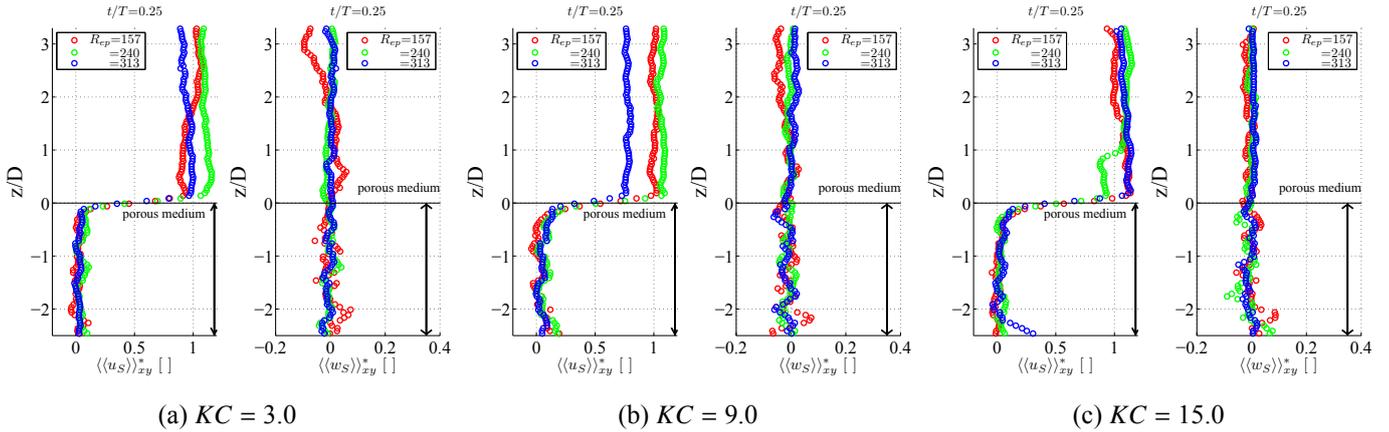


図-3: 最大速度時 ( $t/T=0.25$ ,  $v=V_0$ ) における無次元断面平均流速  $\langle\langle u_S \rangle\rangle_{xy}^*$  および  $\langle\langle w_S \rangle\rangle_{xy}^*$  の鉛直分布 ( $Re_p=157\sim 313$ ,  $KC=3.0\sim 15.0$ )

部で減少し、上流部で増加している。粒状層界面で流入した流れがさらに下層へもぐりこむ流れとなっていることが示唆された。

#### 4. 乱流諸量の解析結果

本研究では、粒状層近傍の乱流諸量を定量的に把握するため、式(10)～(11)を用いて、代表的な乱流諸量である乱れエネルギー  $K_{St}$  およびレイノルズ応力  $R_{Sxz}$  を算定した。

$$K_{St}(x_C, y_C, z_C, t) = \frac{1}{2M} \sum_{m=1}^M (u_m'^2 + w_m'^2)(x_C, y_C, z_C, t) \quad (10)$$

$$R_{Sxz}(x_C, y_C, z_C, t) = -\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M u_m' w_m'(x_C, y_C, z_C, t) \quad (11)$$

#### 4.1 乱流諸量の断面平均値の位相変化

##### (a) 空間乱れエネルギー分布の位相変化

粒状層近傍の乱れエネルギーの空間分布および位相変化について検討するため、式(12)を用いて、空間乱れエネルギー  $\langle K_{St} \rangle_{xy}$  を算定した。

$$\langle K_{St} \rangle_{xy}(z_C, t) = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{iy=1}^{N_y} \sum_{ix=1}^{N_x} K_{St}(x_C, y_C, z_C, t) \quad (12)$$

図-6に、各実験条件における半周期間の  $\langle K_{St} \rangle_{xy}$  の分布を示す。それぞれの図は1/8周期毎の分布を0~4/8周期で表示

している。いずれの図からも、粒状層上部 ( $z/D \geq 0.0$ ) では、少し空間的なばらつきはあるものの、 $\langle K_{St} \rangle_{xy}$  は全般的に小さい値を示し、変動が小さいことがわかる(図-6(b)を除く)。図-6(a)~(c)によると、 $KC=2.9, 3.0$  のとき、 $Re_p$  が増加するにつれ、粒状層界面 ( $z/D=0.0$ ) 付近における  $\langle K_{St} \rangle_{xy}$  のピーク値が大きくなるのがわかる。 $KC=15.0, 15.1$  においても、同様のことがいえる(図-6(a')~(c'))。

図-6(a), (a')によると、 $Re_p=157$  のとき、 $KC$  数が変化しても、 $\langle K_{St} \rangle_{xy}$  は変化していないことがわかる。一方、 $Re_p=240$  および  $313$  のとき、層内における  $\langle K_{St} \rangle_{xy}$  の空間的なばらつきが大きくなっている傾向がみとれる(図-6(b), (b') および (c), (c'))。

##### (b) 空間平均レイノルズ応力分布の位相変化

粒状層近傍のレイノルズ応力の空間分布および位相変化について検討するため、式(13)を用いて、空間平均レイノルズ応力  $\langle R_{Sxz} \rangle_{xy}$  を算定した。ここで、 $R_{Sxz}$  は正負の値をもつため、絶対値から算定している。

$$\langle R_{Sxz} \rangle_{xy}(z_C, t) = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{iy=1}^{N_y} \sum_{ix=1}^{N_x} |R_{Sxz}|(x_C, y_C, z_C, t) \quad (13)$$

図-7に、各実験条件における  $\langle R_{Sxz} \rangle_{xy}$  の分布を示す。どの

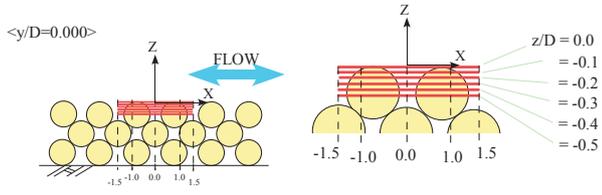


図-4: 粒状層界面近傍の水平断面位置 ( $z/D=0.0\sim-0.5$ )

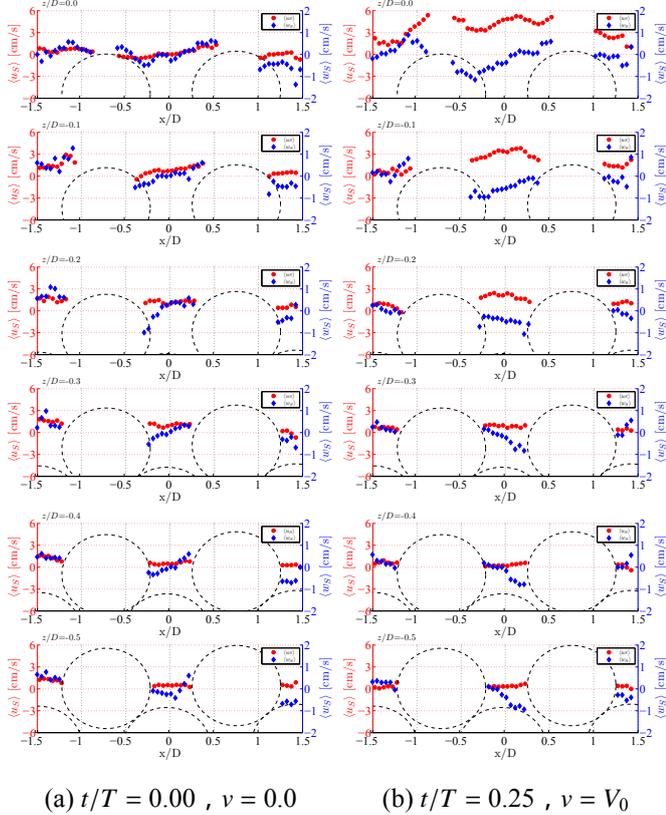


図-5: 上部流の転流時と最大速度時における，粒状層界面近傍の水平断面上 (図-4) の空間平均流速  $\langle u_s \rangle$ ， $\langle w_s \rangle$  の分布 (上から  $z/D=0.0, -0.1, -0.2, -0.3, -0.4, -0.5$ )

図においても， $\langle R_{Sxz} \rangle_{xy}$  は粒状層上部では位相に依らず一定の値を示している．一方，界面付近では， $\langle R_{Sxz} \rangle_{xy}$  が増加し，界面から層内に向かって増加している傾向が見取れる．また，明確ではないが， $KC$  数が増加すると， $\langle R_{Sxz} \rangle_{xy}$  は粒状層内において，空間的なばらつきが大きくなっていることがわかる．一方， $Re_p$  数による変化は見取れない (図-7)．

#### 4.2 無次元空間乱れエネルギー・無次元空間平均レイノルズ応力に及ぼす $Re_p$ 数および $KC$ 数の影響

4.1 節では， $\langle K_{St} \rangle_{xy}$  および  $\langle R_{Sxz} \rangle_{xy}$  の分布の位相変化について述べた．

乱流諸量に及ぼす，振動流特性を検討するため，空間乱れエネルギー  $\langle K_{St} \rangle_{xy}$  および空間平均レイノルズ応力  $\langle R_{Sxz} \rangle_{xy}$  を  $V_0^2$  で無次元化した無次元空間乱れエネルギー  $\langle K_{St} \rangle_{xy}^*$  および無次元空間平均レイノルズ応力  $\langle R_{Sxz} \rangle_{xy}^*$  を算定した．

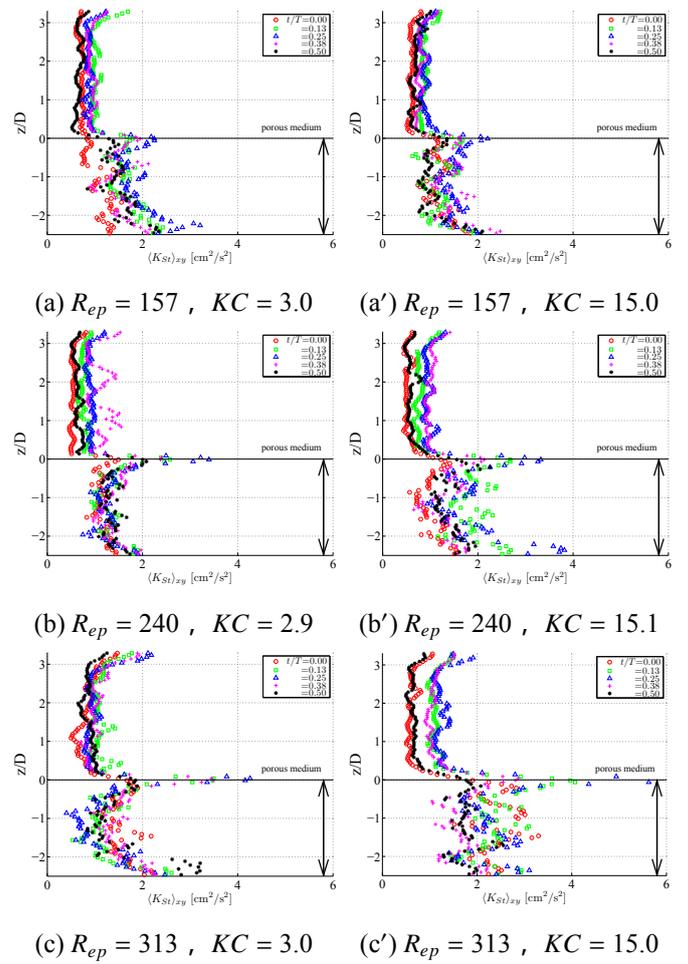


図-6: 位相変化に伴う  $\langle K_{St} \rangle_{xy}$  の推移 ( $t/T=0.00\sim 0.50$ ,  $Re_p=157\sim 313$ ,  $KC=2.9\sim 15.1$ )

さらに，各実験ケースにおける， $\langle K_{St} \rangle_{xy}^*$  および  $\langle R_{Sxz} \rangle_{xy}^*$  の最大値，平均値および最小値を算定し，それらと  $Re_p$  数および  $KC$  数との関係を図-8にまとめた．ここで，図中の塗りつぶした丸は  $\langle K_{St} \rangle_{xy}^*$  および  $\langle R_{Sxz} \rangle_{xy}^*$  の最大値を，アスタリスクは平均値を，塗りつぶした下向きの三角形は最小値を表している．また，ここでの最大値・最小値および平均値とは，粒状層内における  $\langle K_{St} \rangle_{xy}^*$  および  $\langle R_{Sxz} \rangle_{xy}^*$  の最大値・最小値および平均値である．横軸は  $Re_p$  数および  $KC$  数であり，縦軸は  $\langle K_{St} \rangle_{xy}^*$  および  $\langle R_{Sxz} \rangle_{xy}^*$  を示している．図-8(a)によると， $KC=15.0$  の  $\langle K_{St} \rangle_{xy}^*$  を除くと， $Re_p$  が変化しても， $\langle K_{St} \rangle_{xy}^*$  および  $\langle R_{Sxz} \rangle_{xy}^*$  の最大値，最小値および平均値は，ほぼ変化がないことがわかる．

次に，図-8(b)によると，全般的に  $Re_p$  が増加するにつれ， $\langle K_{St} \rangle_{xy}^*$  および  $\langle R_{Sxz} \rangle_{xy}^*$  の最大値，最小値および平均値は，減少していることがわかる．以上より， $\langle K_{St} \rangle_{xy}^*$  および  $\langle R_{Sxz} \rangle_{xy}^*$  は  $Re_p$  数には依らず， $KC$  数に対しては負の相関を示すことが示唆された．

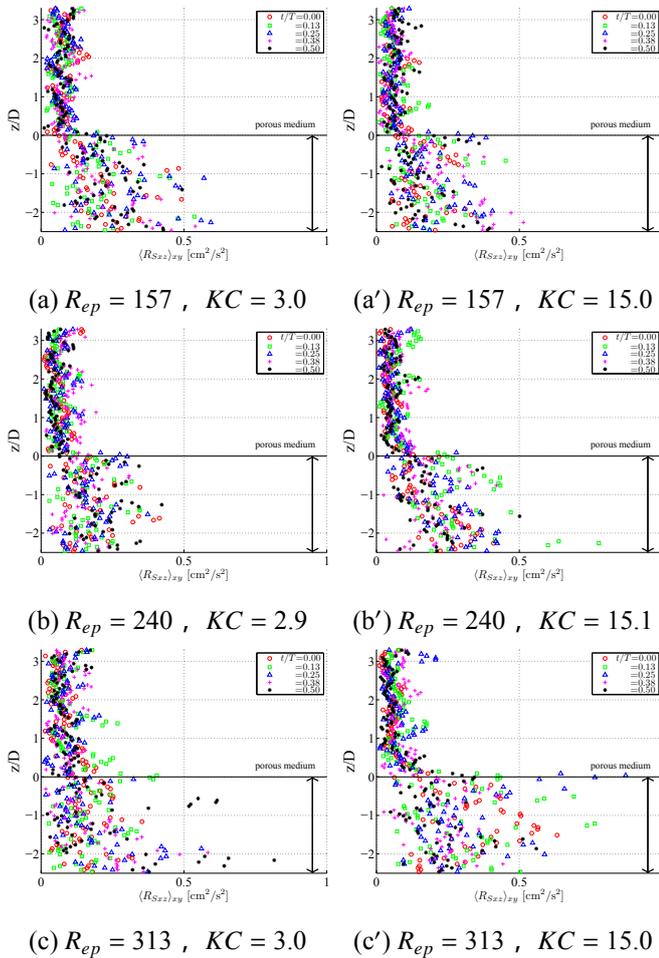


図-7: 位相変化に伴う  $\langle R_{Sxz} \rangle_{xy}$  の推移 ( $Re_p=157\sim 313, KC=2.9\sim 15.1$ )

## 5. 結論

本研究は振動流場において、粒状層内を含む、その近傍の流れを高時間・高空間解像度で計測した。以下に、主な結論をまとめる。

- 流況の断面平均値から、主流方向の流速は  $KC$  数および  $Re_p$  数に依らず、 $-0.2 \leq z/D \leq 0.2$  で境界層が発達していることが示された。
- 粒状層界面近傍の流況から、粒子の上流側で層内から流出、下流側で流入する流れを呈していることが示された。
- 空間乱れエネルギー  $\langle K_{St} \rangle_{xy}$  の分布の位相変化から、粒状層界面付近で  $\langle K_{St} \rangle_{xy}$  が最大となり、 $Re_p$  数が増加するにつれ、 $\langle K_{St} \rangle_{xy}$  が増加することがわかった。
- 空間平均レイノルズ応力  $\langle R_{Sxz} \rangle_{xy}$  の分布の位相変化から、 $KC$  数が増加すると、 $\langle R_{Sxz} \rangle_{xy}$  は粒状層内において、空間的なばらつきが大きくなる傾向が示唆された。
- 無次元空間乱れエネルギー  $\langle K_{St} \rangle_{xy}^*$  および無次元空間レイノルズ応力  $\langle R_{Sxz} \rangle_{xy}^*$  の最大値・最小値および平均

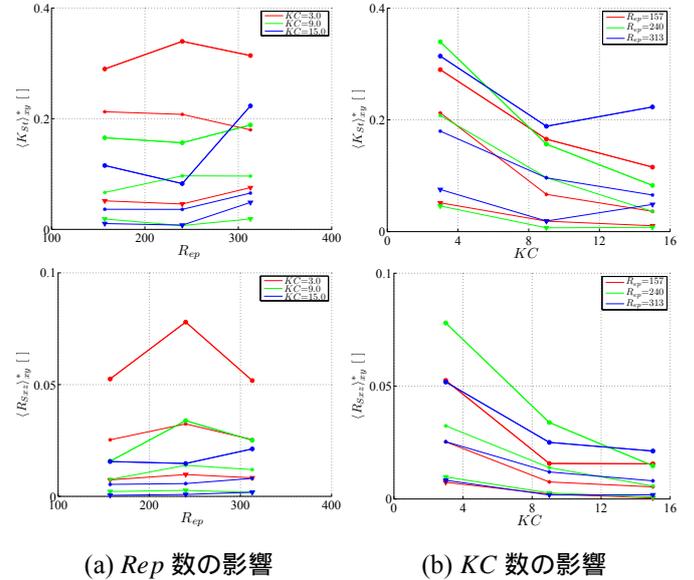


図-8:  $\langle K_{St} \rangle_{xy}^*$  および  $\langle R_{Sxz} \rangle_{xy}^*$  の最大値・最小値と  $Re_p$  数、 $KC$  数との関係 (丸: 最大値, アスタリスク: 平均値, 下向き三角: 最小値)

値は  $Re_p$  数には依らず、 $KC$  数に対しては負の相関を示すことが示唆された。

## 参考文献

- [1] R. M. L. Ferreira · L. M. Ferreira · A. M. Ricardo · M. J. Franca(2010): Impacts of sand transport on flow variables and dissolved oxygen in gravel-bed streams suitable for salmonid spawning, River. Res. Applic. , vol.26, pp.414-438 .
- [2] C. D. Tomkins · R. J. Adrian(2003): Spanwise structure and scale growth in turbulent boundary layers, J.Fluid Mech. , vol.490, pp.37-74 .
- [3] M. Detert · V. Nikora · G. H. Jirka(2010): Synoptic velocity and pressure fields at the water-sediment interface of streambeds, J.Fluid Mech. , vol.660, pp.55-86 .
- [4] 中條壯大 · 重松孝昌 (2010): 画像計測に基づく多孔質体通過流れの非線形乱流モデリングに関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第66巻, pp.771-775 .
- [5] 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, No.533, II-34, pp.87-106 .
- [6] 中川博次 · 祢津家久 (1975): 透過性開水路乱流場における主流と浸透流との相互作用, 土木学会論文集, 第244号, pp.81-90 .
- [7] 竹原幸生 · R.J.Adrian · 江藤剛治 (2000):  $KC$  法を用いた新しい Super-Resolution PIV の提案, 水工学論文集, 第44巻, pp.431-436 .
- [8] 重松孝昌 · 塩足純一 · 竹原幸生 · 辻本剛三 (2004): 一方向流中に置かれた多孔質体による乱流の生成・減衰過程に関する基礎実験, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.661-665 .

討議

討議 [ 大島先生 ]

シリコン球とガラス球はどのように使い分けているのか。  
回答

本研究では、シリコンで製作した多孔質体模型と流体にヨウ化ナトリウム水溶液を使用することで、屈折率を整合し、模型間隙部および背後の流体運動を計測している。そのため、計測領域にシリコン球で製作した多孔質体模型を、それ以外の領域にガラス球を設置し、粒状層を模擬している。

討議 [ 大島先生 ]

土砂等は構成粒子が流れによって動く、今回の研究とのかねあいは。

回答

今回の研究では、粒子自体が動く流動場は対象としていない。しかし、長時間・高空間解像度で流動場の計測が行えているため、粒子に加わる流体力を算定可能な知見は得られたと考えられる。

討議 [ 山田先生 ]

シリコン粒子の挙動を PTV で追うことはできるか。できなければ、その理由は。

回答

本研究で使用しているシリコン球は、透明な物体であるため、撮影画像上で認識できない。ゆえに、PTV で挙動を追うことはできない。また、シリコン球を色つきのものにすれば、PTV は可能となるが、それにより本研究で対象としている流れを計測できなくなる。

討議 [ 谷池先生 ]

実際の粒子は今回の実験より小さい、今回の研究とのかねあいは。

回答

構成する粒子の大きさは多孔質体模型の間隙率と関係していると考えられる。しかし、本研究は間隙率の影響については対象としていない。

討議 [ 鬼頭先生 ]

動粘性係数の設定値に、流体の粘性等の意味は含まれるのか。

回答

ヨウ化ナトリウム水溶液の動粘性係数は、シリコン球の屈折率と整合するために用いている。そのため、流体の粘性を考慮したものではない。

討議 [ 中尾先生 ]

一方向流場での実験は行っているのか。

回答

本研究では、振動流場を対象としているため、対象としていない。