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

An Experimental Study on Properties of Turbulence induced by Oscillatory Flow over a Porous Medium

岡田祐也¹・重松孝昌²・中條壮大³

Yuya OKADA, Takaaki SHIGEMATSU and Sota NAKAJO

The internal and external fluid flows induced by oscillatory flow over a porous medium were measured by the Particle Tracking Velocimetry (PTV) with matching the refraction index method using two high-speed cameras. The characteristics of spatial variance of velocity components were shown in detail with the time phase variance. Further, the properties of the turbulent quantities such as turbulent kinematic energy and the Reynolds' stress were presented and the relationship among the turbulence properties, the Reynolds' number, and the KC number was discussed.

1. はじめに

浅海域における砂質地盤は、沿岸生態系にとって貴重な生息場である。底質の安定性に関する研究は、これまでも多くの研究者によってその解明の努力が成されてきている。例を挙げるならば、PIV（Particle Image Velocimetry）を用いて、粒状層上の流れ（上部流）の乱流構造の一端を明らかにしたTomkinsら（2003）やPIV計測および圧力分布測定の結果から、粒状層を持ち上げる初期因子として粒状層近傍で間欠的に生じる負圧が重要であることを示したDetertら（2010）、画像計測手法と屈折率整合法（江藤ら（1996））を併用して粒状層充填層内の流動特性を明らかにした中條ら（2010）が挙げられる。しかし、底質内の物質輸送等に大きな影響を及ぼす底質間隙および底質界面を介した底質間隙とその上部流との間の乱れの輸送機構については、まだ、未解明な点が多く残されている。

本研究では、振動流場に置かれた粒状層を対象として、屈折率整合法を用いた画像計測手法を行い、粒状層内、粒状層界面近傍およびその上部の流れを、高時間・高空間解像度で同時計測し、振動流によって生成される乱流量に関する知見を得ることを目的とする。

2. 実験概要

(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 $H=20$ cm、幅 $B=10$ cm、長さ $L=100$ cmの水平部を有する管路内に設置された粒状層を対象として行われた。直径 $D=2$ cmの球をシリコンを用いて158個製作し、これらと同じシ

図-1 実験装置の概要

リコンで接着して、粒状層模型（約 $23 \times 10 \times 5$ cm）を製作した。粒状層の間隙率は $\phi=0.34$ であった。この模型を管路中央の底部に設置し、その周辺には同じ直径2 cmのガラス球を高さ5 cmで水路全体に敷き詰めた。流体には重量百分率が約40%のヨウ化ナトリウム水溶液NaI（動粘性係数 $\nu=0.9 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ ）を用いた。粒状層模型にシリコンを、流体にNaIを用いることによって、両者の屈折率が一致し、粒状層間隙内の画像を歪むことなく取得できる（屈折率整合法、江藤ら（1996））。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。

粒状層模型の上部界面における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 軸となるように座標系を設定した。 xz 平面内にレーザーシート（DPSS Green Laser DPGL 5W）を実験装置の上方から照射し、流体中に散布されたトレーサ（ポリ塩化ビニル、比重1.33）の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（MotionScope M3）を用いて撮影した。2台を合わせた撮影領域は、粒状層模型を含む 5.6×11.6

1 非会員 修(工) (株)日水コン
2 正会員 博(工) 大阪市立大学教授 大学院工学研究科
3 正会員 博(工) 熊本大学助教 大学院自然科学研究科

表-1 実験条件

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

cmの領域である．高速度カメラのレンズには，縁辺部でひずみの少ないAi Micro Nikkor 105 mm/F2.85を使用した．撮影条件は，撮影間隔 $t=1/250$ 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．空間解像度は 5.5×10^{-3} cm/pixelであった．間隙内の流路の違いが流動特性に及ぼす影響を考慮するため，レーザーシートを y 軸方向に平行移動させて，断面形状の異なる3断面（ $y/D=0.000, 0.375, 0.750$ ）で計測を行った．

振動板の移動速度は0.01秒刻みに正弦関数で変化するようにPC制御され，その速度振幅と振動周期 T を変化させることで，外力条件の異なる実験を行った．なお，以降のデータ整理では，粒状層を設置しないで振動流を発生させた際の速度振幅 V_0 を代表流速として用いた．任意の時刻における流速 V は式(1)で表現される．

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

外力条件の分類には，式(2)で表される慣性力の指標である粒子レイノルズ数 Re_p と，式(3)で表される非定常性の指標であるKeulegan-Carpenter数（以下，KC数）を用いた．

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

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

各実験条件を表-1に示す．表-1には，式(4)で算定された，計測領域内における計測流速ベクトルの密度 $\langle \bar{P}_v \rangle$ も併記している（ N_y ；計測断面数， N_v ；計測領域内の計測流速ベクトル数， A_w ；流体部の面積）．概ね，1cm²あたり100個程度の流速ベクトルが計測されている．

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

(2) 解析手法

画像計測手法のアルゴリズムには，個々のトレーサの運動を追跡するPTVの一種，Super-Resolution KC法（竹原ら（2000））を用いた．画像解析の前には，撮影画

図-2 時系列の流速データの取得位置：計測断面 $y/D=0.000$

像から平均画像（背景画像）を取り除き，トレーサ粒子のみを抽出する前処理を行った．前処理の詳細は，重松ら（2004）に詳しい．また，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．後処理では，撮影領域全体における平均速度ベクトル v_{ave} を算定し，式(5)で示される v_m を信頼性の高い計測値とみなし，以後の解析に用いた．

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

ここに， v_{std} は各速度ベクトルの標準偏差である．PTVによる計測値は，トレーサの存在する地点の流速であり，流動特性の時系列変化を調べる際には，何かしらの代表流速を算定しておく必要がある．また，乱流量を算定する際には，何かしらの平均操作とそこからの偏差を定義する必要がある．よって，式(6)を用いて定義される空間平均流速 $\langle v_s \rangle$ を定点における代表流速として算定し，式(7)から算定される $\langle v_s \rangle$ と $\langle v_s \rangle$ の差を乱れ速度 v'_m として定義した．

$$\langle v_s \rangle(x_c, y_c) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M v_m(x_m, y_m) \quad \cdots \cdots \cdots (6)$$

$$v'_m(x_m, y_m) = v_m(x_m, y_m) - \langle v_s \rangle(x_c, y_c) \quad \cdots \cdots \cdots (7)$$

ここに，添え字の c は空間平均流速を求める格子点の座標を，添え字の m は流速の計測地点の座標を， M は空間平均流速を求める領域内の流速計測数を表す．本研究では，空間平均領域サイズを粒状層の粒径 D と同程度の直径 $R=0.3$ cmとし，格子間隔は0.1 cmとした．表-1に示した計測流速ベクトルの密度 $\langle \bar{P}_v \rangle$ から見積もると，平均して約30個程度の計測値が空間平均領域に存在することになる．このようにして算定された空間平均流速から流速の時間変動特性を，乱れ速度から乱流量の分布について考察した．

3. 乱流諸量の解析結果

(1) 空間平均流速の位相変化

図-2に示したA～Hの8地点における，空間平均流速の位相変化を考察した．図-3に，その結果を示す

図-3 各点 $(x/D, z/D)$ における無次元化された空間平均流速の位相変化：計測断面 $y/D=0.000$ ($R_{ep}=240, KC=9.0$)

($R_{ep}=240, KC=9.0$)．図中の $\langle u_s \rangle^*$ および $\langle w_s \rangle^*$ は V_0 で無次元化した x 方向および z 方向の速度成分を示している．また、図の横軸は振動周期 T で無次元化した時間 t/T を、破線は V の変化をそれぞれ表している．

まず、粒状層上部の点Aおよび点Bに着目すると、鉛直方向成分 $\langle w_s \rangle^*$ は緩やかな周期変動が見られるものの、その振幅は小さい．一方、水平方向成分 $\langle u_s \rangle^*$ の変化からは、 $0.25 < t/T < 0.75$ の位相で振動板の位相とわずかにずれが見られるが、顕著な差はない．また、 V の波形との比較より、粒状層のない時と同程度の流れが粒状層の上部で生じていることがわかる．しかし、粒状層界面との距離が近づくにつれ（点Cおよび点D）、 $\langle u_s \rangle^*$ の位相遅れは顕著となり、 $\langle w_s \rangle^*$ にも周期の短い変動が見られるようになる．このように、界面からの距離に応じて徐々に変化しているものの、点A～Dではそれほど高周波数の変動は見られず、概ね規則的な流れとなっている．

一方で、粒状層界面の点Eでは $\langle u_s \rangle^*$ の波形は滑らかな正弦関数ではなく、直線的に変化している．また、 $\langle w_s \rangle^*$ は、上部流の点A～Dのそれと比較すると、明らかに変動の振幅が大きくなっている．さらに粒状層内部に入った点Fを見ると、 $\langle u_s \rangle^*$ の長周期の変動の振幅は $0.15 \sim 0.2V_0$ 程度に弱まるとともに、上部流の変動と間隙流の変動の位相には大きな差が現れる．また、 $\langle w_s \rangle^*$ にも位相のずれた変動が確認されるようになる．点Fにおける $\langle w_s \rangle^*$ の高周波の変動は、点Eのそれと明瞭な差は見られない．さらに内部に入った点GおよびHの結果からは、 $\langle u_s \rangle^*$ および $\langle w_s \rangle^*$ ともに高周波数の変動の速度振幅が点

Fと比べても増大していることがわかる．

(2) 乱流諸量の計測区間平均値の位相変化

代表的な乱流量である、乱れエネルギー K_{St} およびレイノルズ応力 R_{Sxz} について検討した結果を示す．本研究では、式(7)より算定した乱れ速度から、以下の式を用いて K_{St} および R_{Sxz} を算定した．

$$K_{St}(x_c, y_c, z_c, t) = \frac{1}{2M} \sum_{m=1}^M (u_m'^2 + w_m'^2) \quad \cdots \cdots (8)$$

$$R_{Sxz}(x_c, y_c, z_c, t) = -\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (u_m' w_m') \quad \cdots \cdots (9)$$

ここに、 u_m' および w_m' は v_m' の x および z 方向の成分である．また、 K_{St} および R_{Sxz} の計測区間平均値 $\langle K_{St} \rangle_{xy}$ および $\langle R_{Sxz} \rangle_{xy}$ はそれぞれ以下の式で算定される．

$$\langle K_{St} \rangle_{xy}(z_c, t) = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{iy=1}^{N_y} \sum_{ix=1}^{N_x} K_{St}(x_c, y_c, z_c, t) \quad \cdots \cdots (10)$$

$$\langle R_{Sxz} \rangle_{xy}(z_c, t) = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{iy=1}^{N_y} \sum_{ix=1}^{N_x} |R_{Sxz}|(x_c, y_c, z_c, t) \quad \cdots \cdots (11)$$

ここに、 N_x は x 方向の測定点数、 N_y は計測断面数である． $\langle \rangle_{xy}$ は x と y 方向の両空間に対して平均化したことを意味する．すなわち、計測区間平均値は間隙の形状等の違いを平均化した値である．また、レイノルズ応力は正負の値を有するため、ここではその絶対値から計測区間平均値を求めている．

図-4に、 $0 \leq t/T \leq 0.5$ において、レイノルズ数が240と一定で、KC数が異なる場合の $\langle K_{St} \rangle_{xy}$ および $\langle R_{Sxz} \rangle_{xy}$ の鉛

図-4 $\langle K_{St} \rangle_{xy}$ および $\langle R_{Sxz} \rangle_{xy}$ の位相変化

直分布を示す。(a) $KC=2.9$ と(b) $KC=15.1$ のいずれの場合においても、粒状層上部においては、 V が増加する加速位相 ($0 \leq t/T \leq 0.25$) で $\langle K_{St} \rangle_{xy}$ が増加していること、流速が最大となる位相 ($t/T=0.25$) よりも少し遅れて ($t/T=0.38$)、 $\langle K_{St} \rangle_{xy}$ はより一層大きくなること、さらに、鉛直方向の $\langle K_{St} \rangle_{xy}$ の変化には周期性があることなどが見て取れる。また、粒状層界面で $\langle K_{St} \rangle_{xy}$ は大きく、 $z/D < 0$ の間隙部では急激に減少するが、その後、間隙部では変動しつつ上部流よりも大きな値で安定する傾向にある。さらに、 KC 数が小さい時には、相対的に一周期間の乱流量の変動幅が小さいことが示された。

一方、 $\langle R_{Sxz} \rangle_{xy}$ に関しては、粒状層上部 ($z/D > 0.0$) で約 $0.1 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 以下の値を示し、位相による変化は $\langle K_{St} \rangle_{xy}$ ほど明瞭ではない。また、上部流速が大きい $t/T=0.13, 0.25$ では粒状層界面でやや大きな値を示す。粒状層間隙部においては、ばらつきが大きくその分布傾向は捉えにくい、各位相で概ね $\langle K_{St} \rangle_{xy}$ の1/4程度の $\langle R_{Sxz} \rangle_{xy}$ が分布している。

(3) 無次元化した乱れエネルギーとレイノルズ応力に及ぼすレイノルズ数および KC 数の影響

レイノルズ数および KC 数が粒状層内の乱れエネルギーとレイノルズ応力に及ぼす影響を調べるために、 V_0 で

無次元化した計測区間平均の乱れエネルギー $\langle K_{St} \rangle_{xy}^*$ およびレイノルズ応力 $\langle R_{Sxz} \rangle_{xy}^*$ の一周期間における平均値および最大・最小値を算定し、レイノルズ数および KC 数との関係を図-5と図-6にまとめた。図中の○は $\langle K_{St} \rangle_{xy}^*$ および $\langle R_{Sxz} \rangle_{xy}^*$ の最大値を、▽は最小値を、*は平均値をそれぞれ表している。図-5および図-6によると、今回の実験条件の下では、 $\langle K_{St} \rangle_{xy}^*$ および $\langle R_{Sxz} \rangle_{xy}^*$ の最大・最小値および平均値に対してレイノルズ数が及ぼす影響は大きくない。ただし、 $Re_p=313, KC=15.0$ のケースについては、最大値および最小値は他と比べて大きな値を示している。一方で、 KC 数が小さいほど粒状層内の最大値と最小値との差が大きくなる傾向にあり、全般的に KC 数が増加するとともに、 $\langle K_{St} \rangle_{xy}^*$ および $\langle R_{Sxz} \rangle_{xy}^*$ の最大値・最小値および平均値は減少する傾向が見られた。

4. 結論

本研究で得られた主要な結論を、以下に要約する。1) 粒状層界面から粒径の2倍程度離れた地点では粒状層の影響は小さいが、粒径程度になると上部振動流との間に位相差が見られるようになり、粒状層界面では、水平方向速度成分の時間波形は直線的となった。このことから、平均的な流れに対する粒状層の影響範囲が示された。2)

図-5 粒状層内における $\langle K_{St} \rangle_{xy}^*$ および $\langle R_{Sxz} \rangle_{xy}^*$ の一周期間における平均値および最大・最小値と Reynolds 数の関係 図-6 粒状層内における $\langle K_{St} \rangle_{xy}^*$ および $\langle R_{Sxz} \rangle_{xy}^*$ の一周期間における平均値および最大・最小値と KC 数の関係

粒状層内部の界面近傍では、その速度振幅は上部流の速度振幅よりも小さくなるとともに、大きな位相差が現れる。その一方で、鉛直方向速度成分の変動が大きくなる。粒状層界面から粒径程度内部に入ると、高周波の速度変動振幅が著しく増大する。3) 乱れエネルギーおよびレイノルズ応力の平均値より、上部流では加速位相でこれらの乱流量が増加する傾向にあること、粒状層界面で大きな値をとること、粒状層内部では界面における値よりも小さくはなるが、上部流における値よりも大きな値で安定する傾向にある。4) 粒状層内においては、無次元化した乱れエネルギーおよびレイノルズ応力の一周期間の平均値および最大・最小値は、レイノルズ数にはほとんど依存せず、KC 数の影響を強く受ける。また、KC 数が小さい時には、相対的に一周期間の乱流量の変動幅が小さい。

謝辞：本研究の一部は科学技術研究費補助金・若手研究 (B) (3760460) および基盤研究 (C) (22560521) の援助

を受けた。ここに感謝の意を表す。

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，No.533，II-34，pp. 87-106.
- 重松孝昌・塩足純一・竹原幸生・辻本剛三 (2004)：一方向流中にお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.
- 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.
- 中條壮大・重松孝昌・坂下直也・辻本剛三・竹原幸生 (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.
- Detert, M., 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.
- Tomkins, C. D., R.J.Adrian (2003)：Spanwise structure and scale growth in turbulent boundary layers, J. Fluid Mech., vol. 490, pp. 37-74.