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

An Experimental Study on Microscopic Flow Over and Inside Porous Medium Placed on Oscillatory Flow

岡田祐也¹・重松孝昌²・中條壮大³

Yuya OKADA, Takaaki SHIGEMATSU and Sota NAKAJO

In order to investigate interaction between upper and inside flow of a porous medium, the microscopic structure of upper and inside flow of the porous medium placed in oscillatory flow was measured by the Particle Tracking Velocimetry (PTV) with the refractive index matching method. The strong shear flow was observed in the vicinity of the porous medium and the depth of shear flow varied with the phase of the oscillatory flow. The depth of non-dimensional shear flow was almost constant and it independent with the Reynolds number. Besides, the phase difference of oscillatory flow between upper and inside flow of the porous medium was observed.

1. はじめに

海岸や河川の土砂管理においては、水底を構成する礫や砂などの土砂粒子や、それらの上に設置されるマウンドや水制、消波工などの透過性の多孔質構造物の間隙を通過する流れ（以下、間隙流と称す）の特性を把握することは重要である。土砂粒子や多孔質構造物を総じて粒状層と表現するならば、粒状層の周辺の流れと粒状層内の間隙流は互いの外力条件を形成している。したがって、その相互作用について知ることは、砂の吸出しや粒状層の構成要素そのものの安定性、更には粒状層界面を介した物質の輸送メカニズムの解明に結びつく。

粒状層内およびその界面に形成される境界層内の流れを計測するには、流れを乱さないように計測機器を設置する必要がある。この困難な課題のために、例えば、Losa daら（1995）やYarlagaddaら（1989）はLDVを用いた計測を行い、計測結果から比較的単純な格子状構造物内の流動特性を明らかにしている。しかし、間隙内の流動は時・空間的に複雑に変化するため、その全体像を把握するには、同時刻多点での計測が必要である。このような背景から、中條ら（2007, 2008）は、一方向流および振動流場に設置された多孔質体の間隙部およびその近傍の流動を、画像計測手法により計測し、間隙内の乱流量の分布特性を明らかにした。

一方、流動層上の流れ（上部流）に関する研究としては、画像計測法のひとつであるPIV（Particle Image Velocimetry）を用いてストリーク構造の一端を明らかにしたTomkinsら（2003）の研究や、PIVおよび圧力計の計測結果から、粒状層に作用する間欠的な負圧と上部流

図-1 実験装置の概要

に生じるバースティングの関係性を示したDetertら（2010）の研究があげられる。しかし、上部流と間隙流を同時に計測した例はほとんど見られず、その相互作用についてはほぼ未解明である。

本研究では、上部流と間隙流の相互作用に関する基礎的な知見を得るために、振動流場に置かれた粒状層を対象に、画像計測手法を用いて、粒状層間隙部、粒状層界面近傍および上部流を同時に計測し、粒状層内外の微細流動に関する時・空間的特性を明らかにす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 $H=20\text{cm}$ 、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（KE-108：信越化学（株））を用いて158個製作し、これらを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

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

し、その周辺には同じ直径2cmのガラス球（(株)花昭）を高さ5cm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 $\nu=0.9 \times 10^{-2} \text{cm}^2/\text{s}$ 、和光薬品(株)）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軸を設定した。 xz 平面内にレーザーシート（DPSS Green Laser DPGL 5W, (株)日本レーザー）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ー（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, IDT ジャパン（株））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 $5.6 \times 11.6 \text{cm}$ の領域である。高速度カメラのレンズには、緑辺部でひずみの少ないAi Micro Nikkor 105 mm / F2.85（(株)Nikon）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枚の画像を約12秒間で撮影した。空間解像度は $5.5 \times 10^{-3} \text{cm/pixel}$ 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。

振動板は式(1)で表される正弦関数により、0.01秒刻みでPC制御され、速度振幅 V_0 と振動周期 T を変化させることによって、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）の異なる条件で実験を行った。

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

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

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

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 $\langle \overline{P_v} \rangle$ 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 ；間隙部の面積）。概ね、 1cm^2 あたり100個程度の流速ベクトルが計測されている。

$$\langle \overline{P_v} \rangle = \frac{1}{N_y T} \sum_{iy=1}^{N_y} \sum_{t=1}^T N_v(t, iy) / A_w(iy) \quad \dots\dots(4)$$

表-1 実験条件

$V_0[\text{cm/s}]$	$T[\text{s}]$	Re_p	KC	$\langle \overline{P_v} \rangle [\text{個}/\text{cm}^2]$
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

(2) 解析手法

画像計測手法のアルゴリズムには、個々のトレーサーの運動を追跡するPTVの一種、Super-Resolution KC法（竹原ら（2000））を用いた。画像解析の前には、撮影画像から平均画像（背景画像）を取り除き、トレーサー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。

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

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、トレーサーの存在する地点の流速であり、後述する議論で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。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た。

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

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 $R=0.3 \text{cm}$ とし、格子間隔は 0.1cm とした。このようにして算定された空間平均流速の時間変動解析より、粒状層近傍の微細流動について考察した。

3. 粒状層内外の微細流動の分布特性

(1) 流速分布の時間変化

一例として、 $Re_p=313$ 、 $KC=15.1$ の条件における断面 $y/D=0.000$ での流速の鉛直分布の時間変化から微細流動

図-2 時系列の流速データの取得位置： $x/D=0.0$ の直線上，計測断面 $y/D=0.000$

図-3 空間平均流速の鉛直分布の時系列変化 ($R_{ep}=313$, $KC=15.1$)

の構造を示す。流速のデータは図-2に示す直線上 ($x/D=0.0$, 間隔 0.1cm) で取得した，空間平均流速の x および z 方向成分 ($\langle u_s \rangle$ および $\langle w_s \rangle$) である。図-3に流速の鉛直分布の時間変化を成分毎に示す。図の縦軸は粒径 D で正規化した鉛直座標，横軸は振動流の周期 T で正規化した無次元時間である。暖色が $\langle u_s \rangle$ および $\langle w_s \rangle$ の正の値を，寒色が負の値を表している。 $z/D=0.0$ は粒状層界面であり， $z/D<0.0$ に粒状層が存在する。図中の $-1.7<z/D<-0.7$ は粒状層の固体領域であり，計測値は無い。

図-3(a) に示された $\langle u_s \rangle$ の変化より，上部流の $\langle u_s \rangle$ は振動板の移動速度 V と一致して周期的に変化している

ことがわかる。 $z/D=2$ 程度以上離れた地点での流速の時間変化の周期が振動板の周期と一致していることは，別途，確認した。注目すべき点として，粒状層の界面近傍 ($z/D=0.0$) で急激に速度の絶対値が低下しており，強いせん断層が存在することが読み取れる。また，そのせん断層の位置は振動流の位相に応じて滑らかに変化し，加速位相 ($0.0 < t/T < 0.25$ および $0.5 < t/T < 0.75$) においては粒状層の比較的深くにまで達し，減速位相 ($0.25 < t/T < 0.5$ および $0.75 < t/T < 1.0$) においては浅くなるのがわかる。なお，振動流では一周間に主流が正と負の方向に反転するため，加速位相と減速位相は各々2回生じる。また，このせん断層の変化にともなう，間隙流が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ている。特に，上部流が静止している位相 ($t/T=0.0$ および 0.5 付近) においても，界面近傍では微小ながら速度を有しており，同位相の上部流とは逆方向の速度を有している点は興味深い。

粒状層間隙部 ($z/D < 0.0$) の流速は，上部流に比べて平均的には1オーダー程度小さな流速が計測されている。しかし，間欠的，局所的には上部流と同程度の流速も観察される。特に $\langle u_s \rangle$ 成分は，界面近傍で，間隙を通過した噴流状の流れによって，周期的に大きな値を示す (例えば $z/D=-0.7$ や -1.7 の $t/T=0.15$ や 0.65 付近)。この周期変動と上部流のそれとの間には位相差があるという点は特徴的である。管路の底面付近 ($z/D=-0.25$) でも，上部流の位相とずれた周期変動が，やや大きな速度で計測されている。これは，管壁付近では間隙のサイズが大きくなるのが主な要因であると考えられる。

図-3(b) に示された $\langle w_s \rangle$ の変化からは， $x/D=0.0$ 地点の上部流には，鉛直上向きの流れが周期的に生じる傾向が見られることがわかる。また，この周期的な上昇流は，粒状層からの距離に依存した位相差が生じている。粒状層界面の直下では，上部流の流向が切り替わる加速位相付近 ($0.0 < t/T < 0.25$ および $0.5 < t/T < 0.75$) で，それぞれ下降流と上昇流が継続的に生じている。こうした変化傾向には，粒状層の間隙配置の影響が強く，今回は $x/D < 0$ 側の間隙から噴出する流れの影響が強く現れたのではないかと考えられる。一方で， $z/D < -1.7$ の粒状層下部の間隙においては，上部の間隙ほど明確なパターンは見られない。重要な点は，粒状層のいずれの間隙においても比較的速い流れが存在しており，特に鉛直成分 $\langle w_s \rangle$ においては，上部流で観察されるよりも大きな値を示していること，上部流に粒状層からの距離に依存した上昇流の変化が観察されている点である。すなわち，間隙流が十分に大きいことは粒状層内での乱れが大きいことを，周期的に変化する上部流はそれを通じた，界面近傍での運動量輸送の存在を示唆している。

図-4 断面平均流速（無次元量）の位相変化

(2) 粒子レイノルズ数と流速の鉛直分布

実験条件の違いが微細流動の分布に与える影響を把握するために、図-4に粒子レイノルズ数 R_{ep} を 157, 240, 313 と変化させた場合の流速の鉛直分布の変化を 1/8 周期

毎に $t/T = 0.0 \sim 0.5$ まで示す。比較に際して KC 数は約 15.0 と一定としている。ただし、ここでは、以下の式 (7) および (8) で算定した断面平均の無次元空間平均流速 $\langle\langle u_s \rangle\rangle_{xy}^*$ および $\langle\langle w_s \rangle\rangle_{xy}^*$ を用いて比較を行った。

$$\langle\langle u_s \rangle\rangle_{xy}^*(z_c, t) = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{iy=1}^{N_y} \sum_{ix=1}^{N_x} \frac{u_S}{V_0}(x_c, y_c, z_c, t) \quad \cdots (7)$$

$$\langle\langle w_s \rangle\rangle_{xy}^*(z_c, t) = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{iy=1}^{N_y} \sum_{ix=1}^{N_x} \frac{w_S}{V_0}(x_c, y_c, z_c, t) \quad \cdots (8)$$

ここに、 N_x は x 方向の定点数、 N_y は計測断面数である。 $\langle\langle \rangle\rangle_{xy}$ は x と y 方向の空間に対して平均化したことを意味する。すなわち、断面平均値は間隙の形状等の違いを平均化した値である。

いずれの実験条件においても、上部流は正弦関数による振動板の移動に合わせて増減し、無次元値で比較すると、 R_{ep} の違いによる差はそれほど大きくない。ただし、 $t/T = 0.13$ と 0.38 は、振動板の移動速度は同じであるが、上部流の流速としては兩位相で必ずしも同じではなく、 R_{ep} が小さいほど、その差はやや大きくなっている。また、いずれの実験条件においても、上部流が発達した位相では界面近傍 ($-0.2 < z/D < 0.2$) で線形的に流速が増加し、強いせん断層が発達することが $\langle\langle u_s \rangle\rangle_{xy}^*$ の分布より確認できる。図-3で確認したように、時間とともにせん断層の分布とその強さは変化しているが、無次元量で比較した場合、 R_{ep} の違いはそれほど大きくない。ただし、(b) に示された $R_{ep} = 240$ の場合については、 $z/D = 1.0$ の付近にも比較的緩やかなせん断層が見られる。この理由については現在不明であるが、比較的長周期の速度変動の可能性もあり、今後は幾つかの位相平均をとることによる検討も必要であると考えている。

間隙部の流動は流向が時・空間的に複雑に変化するため、断面平均操作により異方向の速度ベクトルが相殺し、絶対値としては小さな値を示す。しかし、平均的には上部流と同じ流向を有している。今回は振動流の速度振幅で無次元化を行ったが、間隙流については同一位相で比較した場合、無次元化した値であっても R_{ep} が大きくなるほど平均的に大きな値を示す傾向にある。

(3) 粒状層界面近傍の運動量輸送について

粒状層界面において、どのように間隙流と上部流の間で運動量の輸送が行われているかについて検討するために、界面近傍の空間平均流速の x 方向の分布を、図-5(a) に示す幾つかの水平面内で調べた。 $t/T = 0.00$ および 0.25 の位相での分布を、一例として図-5(b-1) および (b-2) に示す。図中で左右の縦軸はそれぞれ $\langle u_s \rangle$ 、 $\langle w_s \rangle$ の値を示しており、赤色のプロットは $\langle u_s \rangle$ を、青色は $\langle w_s \rangle$ を示している。さらに図中の円形の破線は粒状層の位置

(a) 水平断面位置

(b-1) $t/T = 0.00, V = 0.0$ (b-2) $t/T = 0.25, V = V_0$ 図-5 粒状層の界面近傍における各水平面内 ($z/D = 0.0 \sim -0.5$) での空間平均流速の分布比較 ($y/D = 0.000$)

を示し、流速0の軸位置が水平面高さに対応している。図-5 (b-1) は上部流がxの正方向へと転流する位相時 ($t/T = 0.00, V = 0.0$)、また、同図 (b-2) は正方向流速が最大の位相時 ($t/T = 0.25, V = V_0$) の結果である。図-5 (b-1) によれば、粒状層を構成する球体の上流側近傍で上向きの流速成分が卓越し、また、球体の下流側近傍で下向きの流速成分が卓越することがわかる。この事は上部流が静止する位相で、粒状層から噴出する流れが存在することを意味している。一方、図-5 (b) によれば、 $z/D = 0.0$ では上部流に連行されて粒状層を構成する球体の上流側近傍で上向き、球体の下流側近傍で下向きの流速成分が卓越するのは同様であるが、 $z/D < -0.2$ では逆に粒状層の間隙部に潜り込む流れの存在することがわかる。このように、上部流の方向が同じ位相においても、粒状層の界面近傍における運動量輸送の形態は一様でないことが示された。

4. 結論

本研究は振動流場に設置された粒状層の間隙部およびその上部の流れを、画像計測手法を用いて同時に計測した。以下に本研究で得られた主な結論をまとめる。1) 粒状層界面には強いせん断層が存在し、その作用深さは振動流の位相に応じて変化する。また、このせん断層の変化とともに、減速位相の粒状層の界面では、上部流とは逆方向に流れる時間が存在する。2) 粒状層間隙部の流速は、上部流よりも約1オーダー程度小さい。しかし、間欠的、局所的には上部流と同程度の流速も存在する。間隙を通過した噴流状の流れによって、周期的に流速は増減するが、この周期変動と上部流それとの間には位相差がある。3) 今回の検討範囲では、粒子レイノルズ数 Re_p が粒状層界面に形成されるせん断層に及ぼす影響は小さいことが示された。4) 上部流の流向が同じ位相においても、粒状層から噴出する流れや貫入する流れが存在し、運動量輸送の形態は一様ではない。

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.
- 中條壮太・重松孝昌・辻本剛三・竹原幸生 (2007)：多孔質体によって生成される乱流諸量に及ぼすレイノルズ数の影響に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 801-805.
- 中條壮太・重松孝昌・坂下直也・辻本剛三・竹原幸生 (2008)：振動流が多孔質体誘起乱流に及ぼす影響に関する研究, 海岸工学論文集, 第55巻, pp. 841-845.
- 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.
- Losada, I. J., M. A. Losada, F. L. Martin (1995)：Experimental study of wave-induced flow in a porous structure, Coastal Engineering, Vol.26, pp. 77-98.
- Tomkins, C. D., R.J.Adrian (2003)：Spanwise structure and scale growth in turbulent boundary layers, J. Fluid Mech., vol.490, pp. 37-74.
- Yarlagadda, A. P., A. P. Yoganathan (1989)：Experimental studies of model porous media fluid dynamics, Experiments in Fluids, vol. 8, pp. 59-71.