

第II部門

振動流場に設置された多孔質体によって誘起される乱流場に関する実験的研究

大阪市立大学工学部

学生員

○坂下 直也

大阪市立大学院工学研究科

学生員

中條 壮大

大阪市立大学院工学研究科

正会員

重松 孝昌

1. 序論 閉鎖性水域の水質改善の観点から、透過性を有する多孔質構造物の海水交換、物質拡散、間隙棲生物による浄化機能の定量的評価が期待されている。これらの機能には、間隙部で生成される乱れの寄与が大きいと考えられるが、その計測は困難であり、未解明な点が多い。中條ら(2006)は、屈折率整合法(江藤ら, 1996)と画像流速計測システムを用いて、一方向流中に設置された多孔質体内部及び近傍における流体運動を計測し、乱流の生成機構に関する知見を得ている。しかし、流向や流速が変動する非定常流場における乱れの生成機構は、一方向流のそれと異なると推測される。本研究では、基礎的研究として振動流場における多孔質体誘起乱流の計測を行った。周期 T と速度振幅 V_{max} を実験のパラメータとして、多孔質体間隙部およびその近傍の乱れの特性について検討した。

2. 実験方法 実験は断面寸法 $B = H = 10\text{cm}$ 、 100cm の水平部を有する管水路を用いて行った(図-1)。PC制御により、式(1)で示す正弦関数で振動板の速度を 0.01秒 間隔で制御し、振動流を発生させた。

$$V(t) = V_{max} \sin(2\pi t/T) = V_{max} \sin(\theta) \quad (1)$$

V_{max} および T は表-1のように変化させて9caseの実験を行った。シリコンで作成した直径 $D = 2.0\text{cm}$ の球体を千鳥状に配した多孔質体模型($10 \times 10 \times 14\text{cm}$ 、空隙率 $\phi = 0.45$)を水平管路の中央部に設置した。屈折率整合法の詳細については文献1)、2)を参照されたい。多孔質体模型の重心位置を原点にとり、流軸方向に x 軸を、鉛直上向きに z 軸を、これらと直行する方向に y 軸をとり、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を上方から照射した。同期を取った3台の高速度ビデオカメラを用いて、 $45\text{cm} \times 10\text{cm}$ の領域に存在するトレーサーを $1/250\text{秒}$ 間隔で約12秒間(3072枚)撮影した。レーザーシートは y 軸方向に 7mm 間隔でスライドさせて異なる3断面で計測を行い、それぞれの断面で計測した結果を平均して結果を取りまとめた。

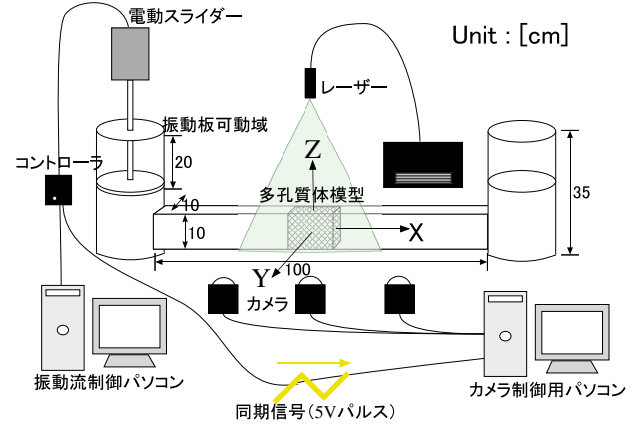


図-1 実験装置

表-1 実験条件

$V_{max} [\text{cm/s}]$	$T [\text{s}]$	Re_p	Re	KC	
2.8	2.0			2.8	$Re_p = V_{max} \phi D / \nu$
	6.0	280	3111	8.4	
	10.0			14.0	
4.1	1.4			2.9	$Re = V_{max} H / \nu$
	4.0	410	4555	8.2	
	6.6			13.5	
5.5	1.0			2.8	$KC = V_{max} T / D$
	3.0	550	6111	8.3	
	5.0			13.8	

3. 解析方法 流速は、連続する二枚の画像中のトレーサーの重心移動距離から流速を求めるPTV法(Super-Resolution KC法(竹原ら, 2000))を用いて計測した。本計測で約 $125\text{個}/\text{cm}^2$ の高空間解像度で流速情報が得られたが、これらの情報を基に、任意の格子点を中心として領域 S (間隙のスケール程度:半径 0.3cm)内に存在する計測流速の平均値 v_s と各計測流速 v_m と v_s の差を乱れ速度 v_m'' と定義し、式(2)より乱れエネルギー K_S を求めた。さらに、 K_S の流軸方向の分布特性を把握するために、式(3)を用いて通過断面平均値 $\langle\langle K_S \rangle\rangle$ を算定した。

$$K_S(x_c, z_c, t) = \frac{1}{2M} \sum_{m=1}^M v_m''^2(x_m, z_m, t) \quad (2)$$

$$\langle\langle K_S \rangle\rangle(x_c, t) = \frac{1}{N_y N_z} \iint K_S(x_c, z_c, t) dy dz \quad (3)$$

ここに、 N_y, N_z はそれぞれ y 軸、 z 軸の格子点数を表す。

4. 実験結果 図-2に、多孔質体の上流および間隙部の代表点($x/D, y/D, z/D$)= $P_{out}(-7.0, 0, 0)$, $P_{in}(0.86, 0, 0)$ における流軸速度成分 u_S の時系列変化を示す。上流点における乱れ速度は主流速度 V と比較するとかなり小さいが、間隙部においては大きな値を示していることが確認される。既往の管水路の振動流の研究によれば減速時に大きな乱れが生成されることが指摘されているが、多孔質体間隙部でも同様な現象が発生しており、速度振幅 V_{max} が増加するとこの減速時の乱れも増大することがわかる。

図-3に、主流速度 $V > 0$ となる位相における $\langle\langle K_S \rangle\rangle$ の分布を示す。各位相間における V の増減に伴い、間隙部の $\langle\langle K_S \rangle\rangle$ も増減し、ばらつきはあるものの、多孔質体中央($-2.0 < x/D < 2.0$)でほぼ一定の値を示している。ただし、多孔質体端付近($2.0 < |x/D| < 5.0$)では $\langle\langle K_S \rangle\rangle$ の空間勾配 $\langle\langle K_S \rangle\rangle/(x/D)$ は大きく、位相によって $\langle\langle K_S \rangle\rangle$ の空間勾配が大きくなる地点も推移することがわかる。しかし、勾配自体はほぼ一定で滑らかに推移していることは注目すべき点である。また、主流速度が同じでも、加速位相($\theta = \pi/4$)と減速位相($\theta = 3\pi/4$)では $\langle\langle K_S \rangle\rangle$ の値に大きな違いが見られる。これは、 u_S の時系列変化においても見られた減速時の乱れの増大と対応している。一方向流場(接近流速 $V_0=4.0\text{cm/s}$)と Re_p 数が同一条件となる位相($\theta = 2\pi/4$, $V=4.1\text{cm/s}$)における $\langle\langle K_S \rangle\rangle$ の間隙部平均値を比較すると、振動流場では2倍程度大きな値を示している。これらの振動流場の特徴は、主流速度の時間変化に伴う圧力勾配の変化が生み出す不安定性や乱れの履歴によるものと考えられる。

図-4は一周期間における $\langle\langle K_S \rangle\rangle$ の最大値、最小値と KC 数および Re_p 数との関係を示したものである。 $\langle\langle K_S \rangle\rangle$ の最大値は KC 数には依存せず、 Re_p 数が増加するほど大きな値を示すことがわかる。また、 Re_p 数が増加するほど $\langle\langle K_S \rangle\rangle$ の間隙内でのばらつきは大きくなっている。このような Re_p 数への依存傾向は一方向流場で得られている知見と一致している。一方、 $\langle\langle K_S \rangle\rangle$ の最小値は Re_p 数だけでなく、 KC 数にも依存し、 KC 数の増加に伴い減少していることがわかる。このような KC 数への依存性は、水粒子移動距離の伸長によって多孔質体内外の一周期あたりの運動量交換が促進されたことによるものと考えられる。

5. 結論 本研究で得られた結論の一部を以下に示す。

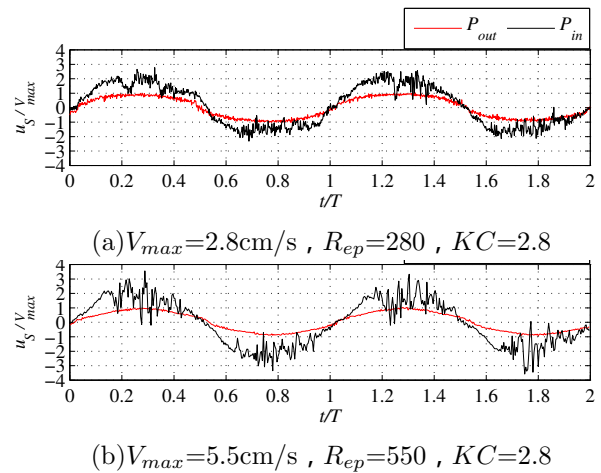


図-2 流軸速度成分 u_S の時系列変化

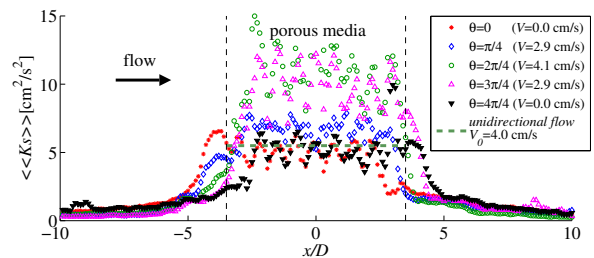


図-3 $\langle\langle K_S \rangle\rangle$ の分布 ($Re_p=410$, $KC=2.9$)

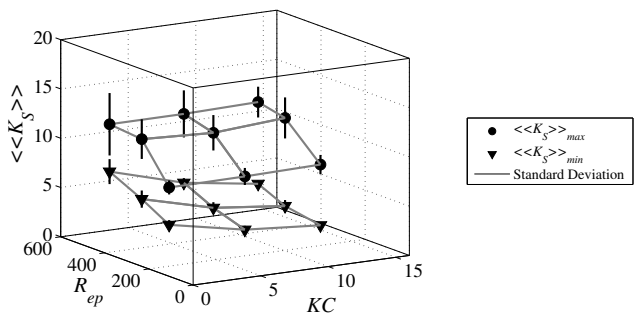


図-4 $\langle\langle K_S \rangle\rangle$ の最大・最小値と KC 数および Re_p 数の関係

1) $Re_p > 280$ では、多孔質体間隙部で強い乱れが生成し、振動流場に特有な減速時位相での乱れが確認された。2) 多孔質体間隙部中央の $\langle\langle K_S \rangle\rangle$ はばらつきながらも各位相では、ほぼ一定の値を示した。端部では大きな空間勾配を示し、さらにその勾配は各位相間で流軸方向に推移した。3) 本研究で用いた Re_p 数がほぼ等しい条件では、間隙内の乱れは一方向流場よりも振動流場のほうが大きくなることが示された。4) $\langle\langle K_S \rangle\rangle$ の最大値は KC 数に依存せず、 Re_p 数の増加に伴い大きくなることが示された。一方、 $\langle\langle K_S \rangle\rangle$ の最小値は KC 数にも依存している。

参考文献

- 中條壮大ら(2006): 海岸工学論文集, 第53巻, pp.761-765.
- 江藤剛治ら(1996): 土木学会論文集, No.566/II-34, pp.84-106.
- 竹原幸生ら(2000): 水工学論文集, 第44巻, pp.431-436.