

多孔質体による乱れの生成・減衰機構の解明に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON GENERATION AND DISSIPATION MECHANISMS OF TURBULENCE INSIDE AND IN THE VICINITY OF POROUS MEDIA

重松孝昌¹・竹原幸生²・塩足純一³・小田一紀⁴

Takaaki Shigematsu, Kousei Takehara, Tamotsu Takano, Jun-ichi Shiotari, and Kazuki Oda

¹正会員 博(工) 大阪市立大学大学院 講師 工学研究科都市系専攻
(〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

²正会員 博(工) 近畿大学 助教授 理工学部社会環境工学科
(〒577-8502 東大阪市小若江3-4-1)

³学生会員 大阪市立大学大学院 工学研究科都市系専攻
(〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

⁴正会員 工博 大阪市立大学大学院 教授 工学研究科都市系専攻
(〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)

A measuring method of fluid motion inside and in the vicinity of porous media made of silicon spheres is presented. Sodium iodide solution is used as the refraction index matching fluid. In order to capture pictures, a CCD camera and YAG laser are used. The velocity datum are obtained by analyzing the pictures using the super-resolution PIV method. Some experimental results on the velocity field and turbulence kinematic energy are presented. Structure of the flow field inside and in the vicinity of the porous media is discussed. Moreover generation and dissipation mechanisms of the turbulence are discussed.

Key Words : Porous Media, Super Resolution PIV, Turbulence, Measuring Technique

1. 緒 言

近年、水環境の改善のために、透過性を有する構造物の築造が推奨される傾向にあるように思われる。透過性構造物による水環境の改善は、流動や海水交換を促進することによるものと、物質の拡散・混合を促進することによるものが期待される。例えば、透過性構造物による水環境改善効果を物質循環の観点から評価しようとするような場合には、物質の拡散・混合を正確に評価することが極めて重要である。しかし、透過性構造物、特に、多孔質構造物による乱れの生成・減衰機構に関する知見はほとんど見られず、拡散・混合による物質フラックスの評価があいまいであるのが、実情であるように思われる。これは、多孔質体内部の流速測定法が確立されていないことに原因があると考えられる。すなわち、電磁流速計やレーザードップラー流速計、超音波式ドップラー

流速計などの従来の流速測定装置では、多孔質体を構成する物質による機器の設置や音・光の伝播阻害のために、多孔質体内部の流速の測定は極めて困難である。また、同時に多点の情報が得られ、流れの時・空間構造の把握に有効と考えられるPIV、PTV計測システムにおいても、多孔質体内部の画像を収集することが困難であった。

一方で、多孔質構造物内の局所乱流力を推定することは、多孔質構造物の機能維持予測の観点からも重要である。そのためにも、多孔質構造物による乱れの生成・減衰機構を解明することは重要な課題である。

このような状況に鑑み、本研究は、多孔質構造物による乱れの生成・減衰機構を解明し、定式化することを最終的な目的とするものであり、多孔質構造物内の空隙における流速場の測定法の確立を目指すものである。多孔質体内部の流れの構造は三次元性の強い流れであると予測されるが、本研究では、基礎的段階として、流速場の二次元計測を行った。

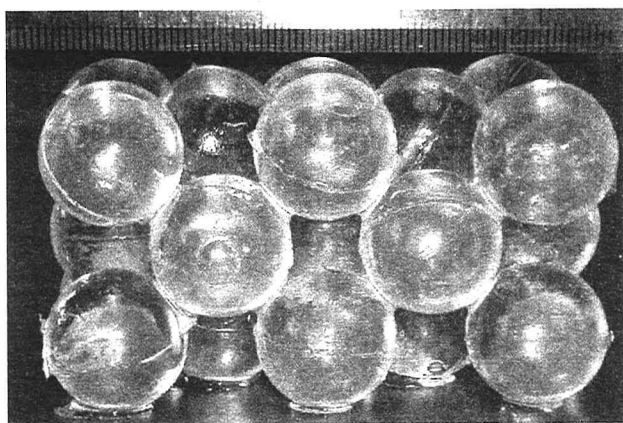


図-1 シリコン真球で製作された多孔質構造物

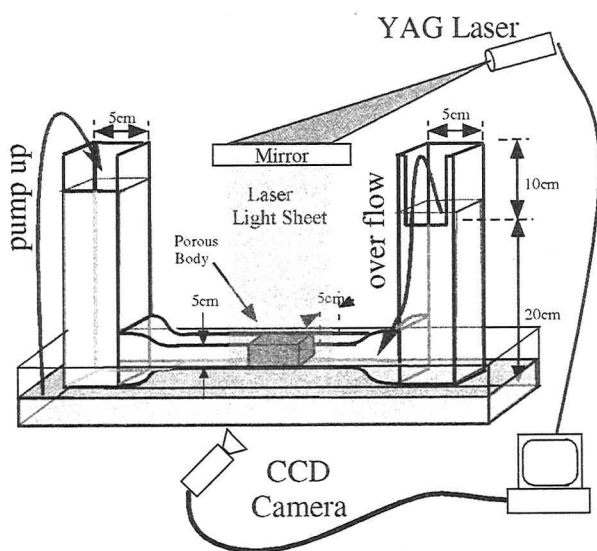


図-2 実験装置の概要

2. 実験装置および実験概要

著者ら^{1),2)}は既に、シリコンとヨウ化ナトリウム水溶液を用いた多孔質構造物内部の流速測定法を提案している。本研究では、著者らと同様の手法を用いて実験を行った。すなわち、シリコン (KE108: 信越化学(株)) を用いて直径2.0cmの真球を作成し、23個の真球を上述のシリコンを用いて接着することによって、幅5cm、高さ5cm、長さ7cmの多孔質体構造物を作成した(図-1)。これを、図-2に示すような管水路の中央部に設置した。管水路はU字型をしており、その一端から重量百分率濃度40%のヨウ化ナトリウム水溶液を注入し、他端は自由越流させることによって、定常流を発生させた。

流速の計測には、竹原ら³⁾の開発した Super-Resolution PIV法を用いた。トレーサー粒子には、比重1.4 (前述のヨウ化ナトリウム水溶液とほぼ同じ比重を

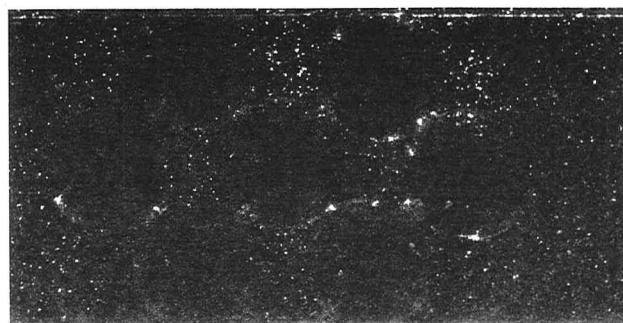


図-3 原画像(粒子層内)

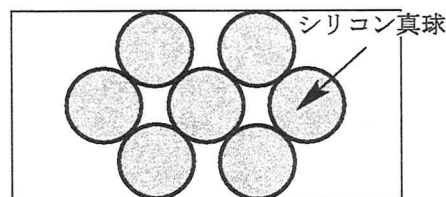


図-4 レーザーシート光が横断した粒子層断面模式図

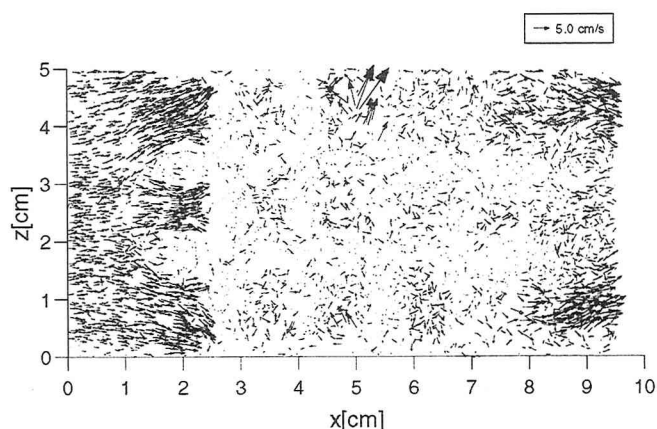


図-5 PIV解析によって求められた速度ベクトル分布

有する)、粒径約50 μm のポリ塩化ビニル製の粒子を用いた。ダブルパルスYAGレーザーからのレーザーシートを管水路の流軸の中央部に照射し、このレーザーシート内で照射されたトレーサー粒子を、CCDカメラで撮影し、1008×1018画素の画像情報を得た。1/15秒間隔で一對のダブルパルスレーザー光を照射し、ダブルパルスの照射間隔は0.01秒とした。

3. 解析手法

CCDカメラで得られた粒子層内の画像の一例を図-3に示す。図中の白い小さな点がトレーサー粒子である。うっすらと白みがかった円がいくつか見られるが、これはシリコン真球である。図-4にその模式図を示すように、レーザーシート光が横断した多孔質体の断面には、7個のシリコン真球があった。図-3と図-4を比較すると、CCDカメラで記録された画像には、レーザーシートとカ

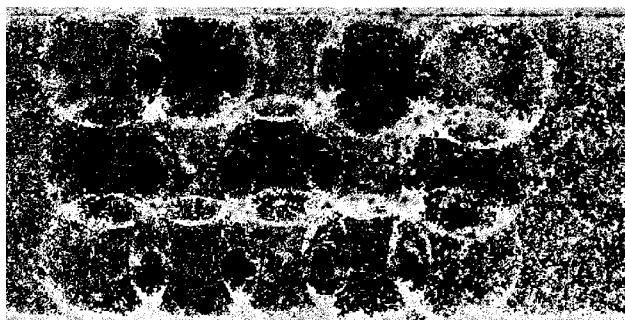


図-6 輝度を上げた画像情報

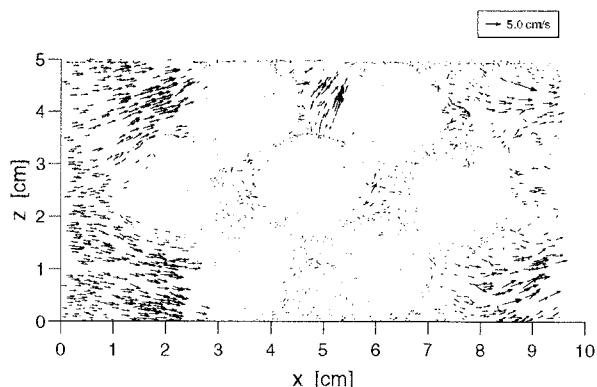
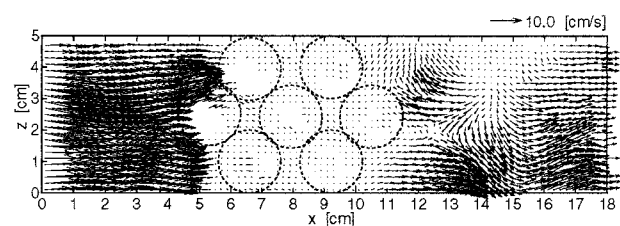
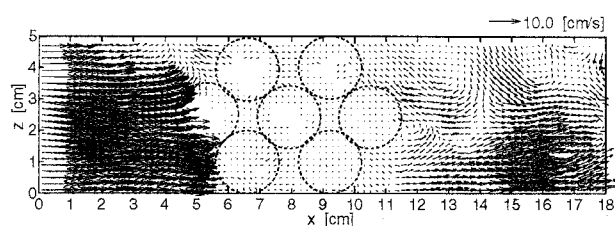


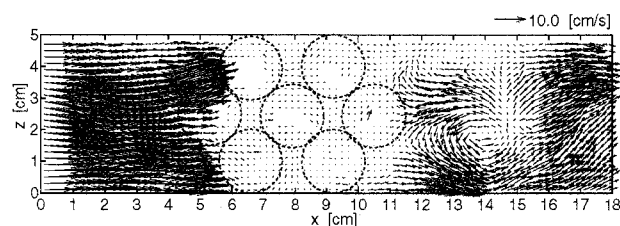
図-7 閾値設定による解析結果の一例



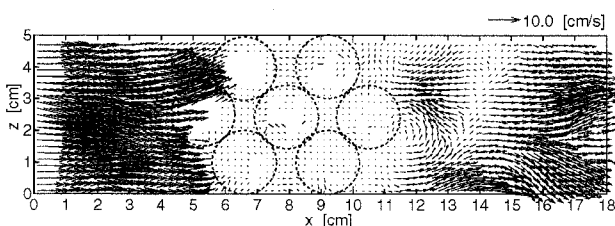
(a) $t=0.0s$



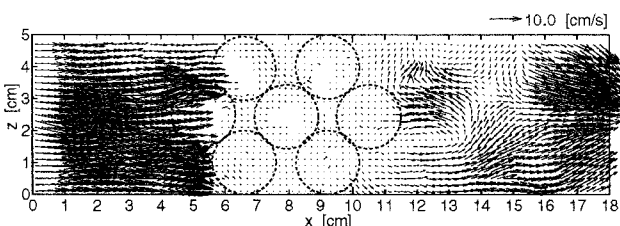
(d) $t=0.3s$



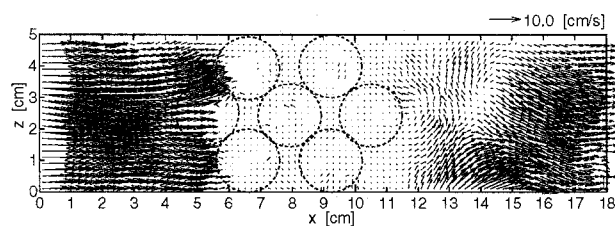
(b) $t=0.1s$



(e) $t=0.4s$



(c) $t=0.2s$



(f) $t=0.5s$

図-8 空間平均流速の時系列変化

メラの間に存在する粒子層に遮られることなく、レーザーシートが横断している多孔質体断面内の映像が記録されていることがわかる。

図-5に、図-3の原画像を用いてPIV画像解析を行った結果の一例を示す。図-5より明らかなように、原画像を用いて解析を行うと、レーザーシートが横断したシリコン球の内部にも流速ベクトルが検出された。原画像の輝度を上げて出力すると、図-6のようになる。すなわち、輝度は低いものの、得られた画像の中には、レーザーシート外にあるトレーサー粒子やシリコン真球の情報が混入していると考えられる。その理由として、①今回の実験では、可視光の下でシリコンとヨウ化ナトリウム水溶液は屈折率を調節したが、可視光線とレーザー光とで

はその波長が異なるため、屈折率の調整が十分ではなかった、②トレーサー粒子によってレーザー光が散乱し、その散乱光によってレーザーシート外のトレーサー粒子が検出された、こと等が考えられる。

本研究では、レーザーシート外に存在するレーザー粒子の輝度は、レーザーシート内に存在するトレーサー粒子の輝度よりも低いことを利用して、輝度の閾値を設定し、この閾値よりも小さな輝度情報は無視することとした。閾値の設定は、得られた画像の輝度の分布に基づいて50とした。このような処理を行うことによって、レーザーシート内に存在すると推定されるトレーサー粒子だけに基づいた多孔質体内の空隙を流れる流速を計測することができる。

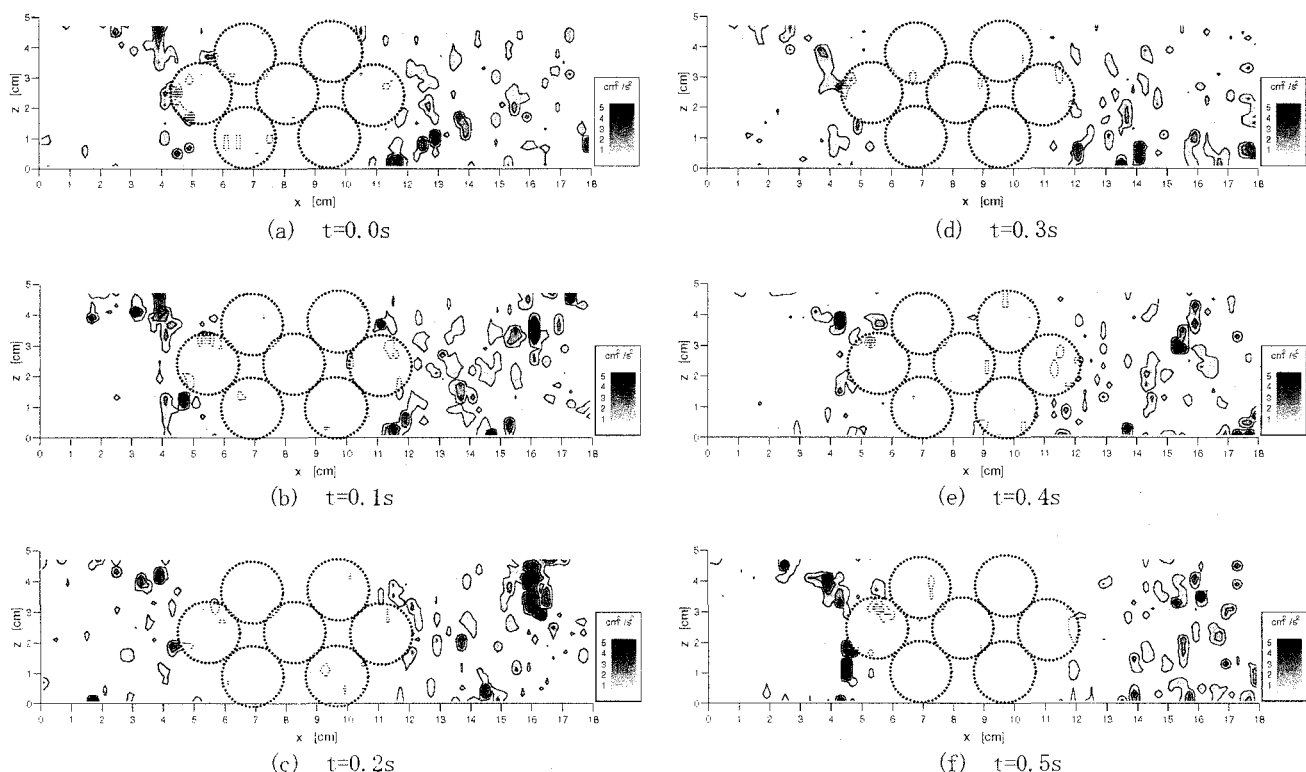


図-9 乱れエネルギー k の空間分布の時間変化

また、PIV解析を行うと、非現実的な流速ベクトルが検出される場合がある。このような速度ベクトルを客観的に排除するため、得られた画像の平均速度 $\bar{U}$ および分散 σ を求め、 $\bar{U} \pm 4\sigma$ の範囲にある流速ベクトルの解析結果のみを、計測値とした。

図-7は、このような処理を施してPIV解析を行った結果の一例を示す。同図より明らかなように、上記の処理を行うことによって、レーザーシート内に存在すると推定されるトレーサー粒子だけに基いた多孔質体内の空隙を流れる流速が計測できる。

4. 実験結果

図-8に多孔質体を含む上下流域の画像解析結果の一例を示す。測定領域の左端の水底を原点として示しており、 $4.5\text{cm} < x < 11.5\text{cm}$ の範囲に多孔質体が設置されている。なお、流体は、図の左側から右側へと流れている。図-8は、 $\Delta x = \Delta z = 0.2\text{cm}$ 毎に計測領域をセルに分割し、それぞれのセルの中央(x_c, z_c)を中心として $dx \times dz$ の領域内で検出された流速ベクトルの情報を基に空間平均流速を求めた結果を示している。すなわち、

$$\langle \mathbf{V}(x_c, z_c) \rangle = \frac{1}{N_i} \int_{z_c-dz}^{z_c+dz} \int_{x_c-dx}^{x_c+dx} \mathbf{V} \, dx \, dz \quad (1)$$

ここに、 N_i は領域内で検出された流速ベクトル二次元流速 $\mathbf{V}$ の個数を、 $\langle \rangle$ は空間平均量を表す。ここでは、

$dx = dz = 0.25\text{cm}$ とした。得られた画像の空間解像度は、 0.18mm/pixel である。解析結果によれば、多孔質体への接近流速（断面平均流速）は、 $U_0 = 9.9\text{cm/s}$ である。図-8より、多孔質構造物の上流では、水平流速が卓越する一方向流が形成されていること、多孔質構造物の上流域でも、多孔質構造物のすぐ近傍では流速ベクトルの向きが時間的に変化していることが見て取れ、したがって多孔質構造物の存在が流体場に及ぼす影響があることが示されている。

多孔質構造物内では、大きな流速ベクトル値は計測されていない。これは、本実験システムでは二次元流速の計測しか行えないにも関わらず、多孔質構造物内の空隙の三次元構造のために流体運動も三次元性が極めて強くなり、その結果として、計測断面に対して垂直な方向の流速成分が卓越しているものと考えられる。

多孔質構造物の下流域では、比較的大規模な渦構造が計測できていることがわかる。流速ベクトルが小さな領域では、多孔質構造物内の流れ構造と同様に計測断面に対して垂直な方向の流速成分が卓越していると考えられ、三次元システムの構築の必要性が示されているものと考えられる。

図-9には、次式で定義される乱れの運動エネルギー k の空間分布を示す。

$$k = \frac{1}{2} \int_{z_c-dz}^{z_c+dz} \int_{x_c-dx}^{x_c+dx} (\mathbf{V} - \langle \mathbf{V} \rangle)^2 \, dx \, dz \quad (2)$$

図-9によれば、多孔質構造物より上流部では多孔質構造物内への流入時に乱れの運動エネルギーが生成されるこ

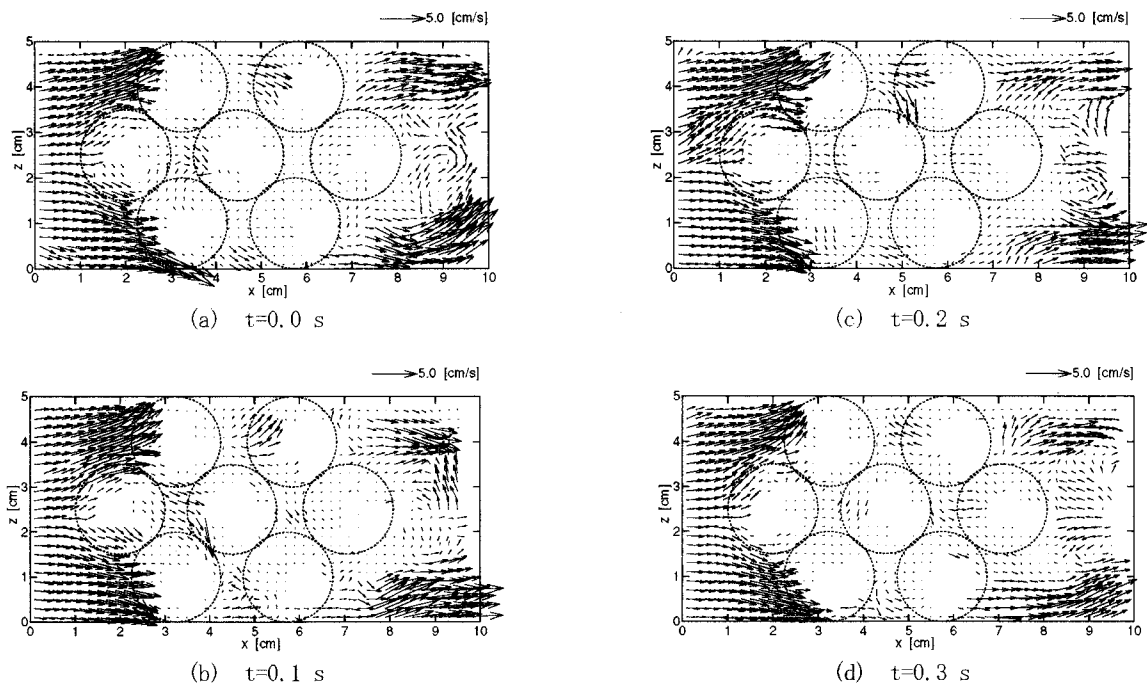


図-10 空間平均ベクトルの時系列変化(粒子層間隙部)

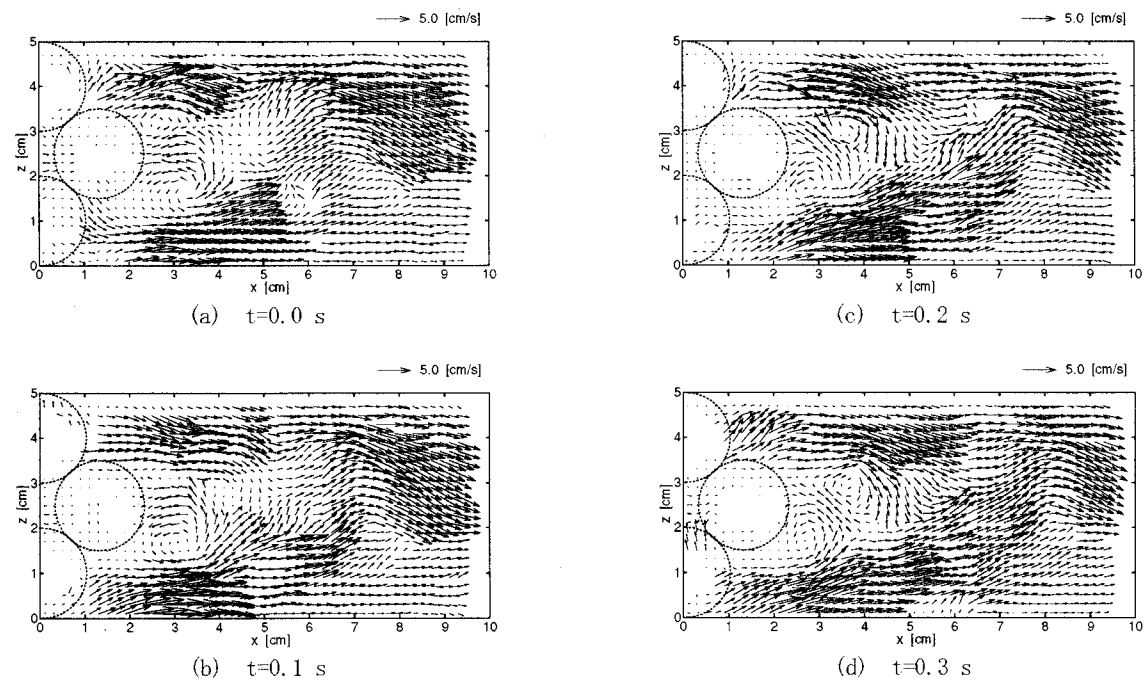


図-11 空間平均ベクトルの時系列変化(粒子層下流部)

と、多孔質構造物より下流域においては多孔質構造物から流出する際に乱れの運動エネルギーが生成され、生成された乱れの運動エネルギーが輸送されていることがわかる。

次に、空間解像度を上げて、多孔質体内部およびその下流域の流速測定を行った結果を、図-10および図-11に示す。いずれの場合も、空間解像度は0.09mm/pixelであった。図-10は多孔質体内部およびその極近傍の流速ベクトルを示したものである。同図より、多孔質体空隙部においても流向が時々刻々と変化している様子が伺え

る。図-11は多孔質体下流域における流速ベクトルを示したものである。空隙から噴流として下流域に流出してくる流れや小規模循環流の形成など、下流域におけるより詳細な流れ構造が捉えられていることがわかる。

5. 結 言

本研究は、多孔質構造物による乱れの生成・減衰機構を解明し、定式化することを最終的な目的とするもので

ある。本論文では、その基礎的段階として、多孔質体内部の空隙を流れる流速の測定方法を確立し、Super-Resolution PIV法を用いた流速の二次元計測を行った。その結果、シリコンとヨウ化ナトリウム水溶液を用いた屈折率整合法が、多孔質体内部の流速測定に有用であることが再確認された。流速の測定結果より、多孔質体の内部では、その空隙の構造に強く依存する三次元速度場が形成されていること、また、下流域においても流れの三次元性は無視できないことが再認識され、多孔質体による乱れの生成・減衰機構の解明には、三次元流速測定システムが必要であることが示された。

一方、本研究の二次元計測によれば、本研究で定義した乱れの運動エネルギーは、多孔質体の直上流部で生成されること、多孔質体内部においては有意な値は計測されなかったこと、さらに、多孔質体から流体が流出する際に生成されていることが、明らかにされた。

今後は、屈折率整合法を用いて流速の三次元計測を行うとともに、多孔質体の空隙構造と乱れの生成・減衰機構の解明を行いたいと考えている。

謝辞：本研究の遂行にあたり、神戸市立工業高等専門学校の辻本剛三先生および近畿大学理工学部の高野保先生には、多大なご尽力を賜った。ここに記して感謝の意を表す。また、本研究は、大阪市立大学大学院工学研究科スカラシップの補助を受けて遂行されたことを付記する。

参考文献

- 1) 高野保英, 田中健司, 重松孝昌, 江藤剛治, 竹原幸生: 屈折率整合法による多孔媒体中のPTV, 第30回可視化情報学会誌, Vol.22, Suppl., No.1, pp.197-200, 2002.
- 2) 高野 保, 重松 孝昌, 江藤 剛治, 竹原 幸生, 田中 健司: 水と屈折率の等しい透明球体を利用した流れ場画像計測の実験的研究, 土木学会平成13年度全国大会, II-161, 2001.
- 3) 竹原幸生, R. J. Adrian, 江藤剛治: 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, 2000.

(2002. 9. 30受付)