

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：24402  
 研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2010 ～ 2012  
 課題番号：22560521  
 研究課題名（和文） 多孔質体生成乱流の三次元計測手法の開発とそれに基づく新たな乱流モデリングの提案  
 研究課題名（英文） Development of measurement technique of 3-D turbulence generated by flowing through porous media and a new turbulence modeling  
 研究代表者  
 重松 孝昌（SHIGEMATSU TAKAAKI）  
 大阪市立大学・大学院工学研究科・教授  
 研究者番号：80206086

研究成果の概要（和文）：多孔質体を通過する流れによって生成される乱流の計測手法として、既に開発していた二次元流跡線連結法なる画像流速計測手法を改良して 3 次元計測が行えるようにするとともに、その測定精度および解析速度の向上を図った。また、画像流速計測手法を用いて多孔質体間隙部およびその周辺の流体運動を計測し、多孔質体という複雑境界を有する非定常流場における非線形乱流モデルの妥当性について検証した。

研究成果の概要（英文）：The 2-D path-line connecting method, which has been developed by Shigematsu, was improved to measure 3-D velocity field with higher accuracy and short duration for analysis. The flow motions within a porous media in uni-directional and oscillatory flow were measured by using the image velocimetry were measured. Based on the measurement data, validity of a nonlinear turbulence model was investigated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：多孔質体、画像流速計測、乱流、モデル化

## 1. 研究開始当初の背景

流体運動によって引き起こされる粒子群の運動（液相誘起型固液混相流）や粒子群の運動によって引き起こされる流体運動（固相誘起型固液混相流）は、個々の粒子と流体との相互作用だけでなく粒子間距離に応じて形成される複雑な流体運動を考慮しなければならない。しかし、粒子間の間隙における流体運動の実測が困難であったために、粒子間流体運動、特に、個々の粒子の運動を決定づける乱流現象の解明はほとんどなされていないのが実情である。したがって、上記の固液あるいは固液混相流の予測モデルのほとんどは、固体・流体間作用力を経験則に基づいて与えざるを得ず、その際に必要となる係数は試行錯誤的に決定するしか術がない

のが実情である（たとえば、玉井ら(1993)による  $k-\epsilon$  乱流モデルや灘岡ら(1996)による固体-液体混相乱流モデル）。

研究代表者は、主に固相誘起型固液混相流を対象として、固相の運動を解析するための個別要素法と流体の運動を解析するための SMAC を併用した数値モデルを開発し、個々の粒子と流体との相互作用を考慮した水中を沈降する粒子群の挙動を予測するとともに、その堆積形状を定量的に予測する手法を開発してきた。1990 年には 2 次元モデルを、2000 年には 3 次元モデルを開発している。ただし、上記の理由により、個々の粒子と流体間の相互作用力は平均流を介したモリソン型のモデルを採用するに留まっているという上記の研究例と同様な課題を有してい

た。

そこで、固相・流体間の相互作用力の定式化を目的とした基礎的研究として、多孔質体間隙部を流れる流体運動の計測に着手した。これは多孔質体模型と流体の屈折率を整合させる屈折率整合法を用いて物体背後域の可視化を図り、二次元画像流速計測法(PTV)によって流体運動を高空間・高時間解像度で計測するものである。この研究によって、個々の粒子周りに生成される乱流諸量の計測に成功し、一方向流場、振動流場および波動場において、間隙内を流体が流下・流出する過程における乱れの生成・減衰過程を把握するに至っている。この一連の研究によって、(1) 多孔質体の間隙部とその近傍で計測される乱流諸量(乱れエネルギーやエネルギー散逸率など)は異なる値を有すること、それ故、多孔質体近傍の乱流諸量の把握には間隙部におけるその生成過程を明らかにする必要があること、(2) 多孔質体の間隙部およびその近傍で計測される無次元化された乱流諸量は粒子レイノルズ数を用いて定量的に予測できること、(3) 一方向流場において計測される乱流諸量の知見に基づいて、非定常流場における乱流諸量を求めることはできないこと、(4) 広く用いられているような、レイノルズ応力をせん断速度勾配のみと関係づける乱流モデルでは実測値は再現することはできない、などを明らかにした。

定常流場を対象とした多孔質体間隙部の乱流を計測した研究例は見られるものの、その空間分布あるいは非定常流場におけるその時・空間分布を計測した研究例は、少なくとも研究代表者の知るところではない。実用的な観点からは、乱流の三次元構造を把握したうえでより高粒子レイノルズ数領域における知見とともに、乱流量を高精度に予測する新たな乱流モデルの開発が求められる。

## 2. 研究の目的

工学の分野では粒子群と流体との相互作用によってもたらされる複雑な現象が数多く存在し、未解明な点が多く残されている。国土保全や水際の景観に重要な役割を担う砂移動現象や、深掘跡の埋戻しやゴミ処分地造成などを目的とした土砂・捨て石投棄に伴って発生する流動およびこれによる物質の拡散現象などがその一例として挙げられる。これらの現象は、粒子の周辺に形成される微小な渦構造が個々の粒子の複雑な運動を誘起し、さらには粒子群としての挙動を決定することによって、固液混相流全体の運動を形成している。しかし、現段階では、個々の粒子と微小スケールの渦構造との相互作用を計測した例はほとんどないのが実情で、それ故、固相と液相あるいは気相の運動を解明しそれらの相互作用を定量的に評価し、予測す

るには至っていない。

このような背景に基づいて、本研究は高濃度の固液混相流場を高精度に予測することを最終目的とし、本申請研究では、その基礎的段階として多孔質体間隙部の三次元乱流の計測結果に基づいて乱流モデルの提案を行う。

## 3. 研究の方法

低レイノルズ数領域における多孔質体間隙部における流速の2次元計測は、高時間解像度・高空間解像度を有する Super-Resolution KC 法と屈折率整合法を用いることによって既に遂行しており、有益な知見を得ている。しかし、得られた知見を実用化に供するためには、流れの3次元性をも考慮したうえでより高レイノルズ数領域における知見を得る必要がある。高レイノルズ数領域の計測には、一般的には高速度で豊富な光量を連射できる光源と高速度カメラが必要であり、経済的負担が大きい。重松ら(2007)は、連続光源を用いて流し撮影によってレーザーシート内に存在するトレーサーの流跡線を撮影し、連続して撮影された画像間で流跡線を連結することによって確実に対応付けられたトレーサー情報のみを用いて流体速度を計測する2次元流跡線連結法を開発している。このとき、撮影画像間のブランク時間は $4 \times 10^{-6}$ 秒しかないため、撮影されたトレーサーの大部分は誤対応が極めて少なく、したがって、データ収集効率が極めて高いという特徴を有する。この手法は、流し撮影を行ってトレーサーの運動を撮影するため、凍結画像を撮影する場合と比較すれば、光量は少なくともよいという利点を有している。また、撮影のブランク時間が微小であるため、従来の流し撮影で行われていたような特殊な撮影(たとえば、菅原ら(2000))を行わなくても、時間的に連続する画像間で流跡線に対応づけることが可能であり、その結果、流向を決定することができるのでアルゴリズムも簡便である。

本研究では、これを三次元計測用へ拡張する。従来のアルゴリズムでは、撮影画像を二値化した後に流跡線を細線化することによってその端点を求めていたために、端点の空間情報の取得に際してその精度に課題があった。本研究では、二値化することなく輝度情報を用いて端点を求めるアルゴリズムを開発することによって、この問題を解決する。このことは、同時に、解析アルゴリズムの簡素化につながり、解析時間の短縮化を図る。また、輝度情報を用いることによって、交差流跡線の分離が容易になり、トレーサーの検出率および端点の判別処理が容易になり、解析時間のさらなる短縮化を図る。

さらに、アルゴリズムの並列処理を行って

解析の高速化に努め、迅速な計測が行えるようにする。

次に、高レイノルズ数領域における多孔質体間隙部の流速を計測し、その特性について検討する。まず、低レイノルズ数領域において計測を行い、低レイノルズ数領域における二次元計測によって得られた乱流特性に関する知見と三次元計測によって得られる知見とを比較・検討する。その後、高レイノルズ数領域において計測を行い、生成乱流のレイノルズ数依存性について検討する。低レイノルズ数領域における多孔質体間隙中の流体運動の計測例は、申請者らによるもの他に Hendricks *et al.*(1997)や Masuoka *et al.*(2002)等の例はあるが、高レイノルズ数領域におけるその時・空間分布を計測した研究例はほとんどない。

計測結果によれば、レイノルズ応力の空間分布は、レイノルズ応力がせん断速度に比例するとする渦粘性近似が適用できないことを示している。このような指摘は、既に、多くの研究者によってなされている (Franke *et al.*(1989)など) が、その多くは自由せん断流場を対象とした研究であり、本研究で対象としている多孔質体間隙部のような複雑な境界条件の下で検討した例はほとんどない。このような課題への対応として、RANS モデルをベースとした非線形レイノルズ応力モデルが提案されているが (Yoshizawa(1984)、Shih & Lumley(1992)など)、係数の決定方法に課題がある。また、Smagorinsky モデルあるいは Dynamic Smagorinsky モデルを導入した LES モデルもあるが、渦粘性乱流モデルの限界は多くの研究例が指摘するところである。

本研究では、乱流計測結果に基づいて、非渦粘性乱流モデル (非線形乱流モデル) の提案を行う。レイノルズ応力を含む乱流諸量の時・空間分布の情報を大量に取得できること、および、振動流などの非定常乱流の情報も取得できるので、現象に応じたモデルパラメータのチューニングではなく、せん断・回転・

伸縮などの流体運動を考慮した乱流モデルを提案し、a priori 的に検証を行うことができる。

#### 4. 研究成果

流跡線連結法は、連続して撮影された流跡線の端点の位置情報からトレーサの移動距離およびトレーサの移動速度を求める手法である。従来、二値化操作を施して端点情報を得てきたが、この手法で得られる端点情報の精度はピクセルオーダーであった。この点を改善するために、図-1 に示すように、連続する流跡線画像にそれぞれの固有の色相を付加したうえで、これらの図を重ね合わせると、流跡線の端点が異なる色相を併せ持つて表示されるとともに、端点部分に有意な輝度分布を有することになる。凍結画像に基づいてトレーサ位置をサブピクセル精度で抽出する汎用 PIV 手法と同様に、この輝度分布をガウス分布と仮定して流跡線端点の位置情報の抽出に利用することによって、流跡線の端点をサブピクセル精度で抽出することが可能になった。

3次元流跡線連結法は、流跡線の端点を抽出するルーチンとステレオマッチング (SM) 操作のルーチンに大別される。SM 操作とは、異なるカメラで撮影された画像から得られた流跡線情報を対応づける操作である、この操作が成された後、それぞれの流跡線の三次元位置が決定される。端点抽出に要する時間は全解析に要する時間の3%、SM 操作に要する時間は97%と、圧倒的に SM 操作に時間を要する。そこで、SM 演算を行列化し、アルゴリズムの高速化に取り組んだ。行列化によって SM 演算に要する時間は56%程度にまで短縮することができた。

SM 演算行列の大きさが  $10^4$  程度になると、計算不可が大きくなり、その結果、解析時間が増大するとともに、メモリ不足のために行列演算を行うことができなくなる。この課題を解決するために、行列サイズを細分化したうえで SM 操作を施すこととした。このとき、分割後の行列サイズ  $S_{DM}$  を変化させて、解析

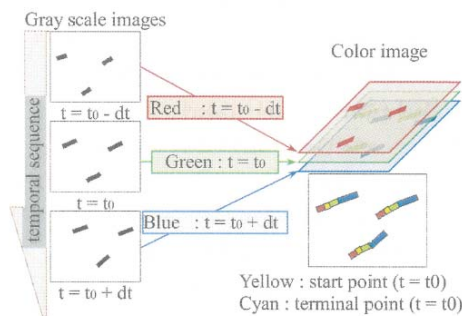


図-1 カラー画像作成法と始点・終点の判別

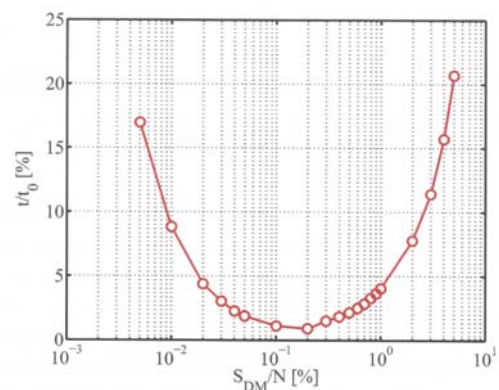


図-2 分割後の行列サイズと解析時間

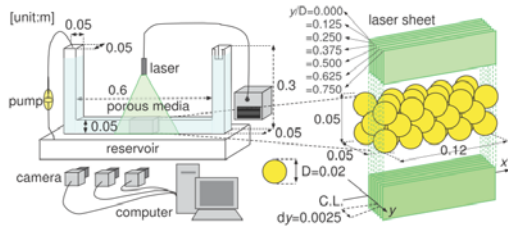


図-3 実験装置の概要

に要する時間を調べることで、最適な  $S_{DM}$  を模索した。図-2 にその検討結果の一例を示すように、撮影された総流跡線数  $N$  の  $2 \times 10^{-1}\%$  程度とした時に、最も効率的に解析が実行でき、解析時間は繰り返し計算による SM 演算に要した時間  $t_0$  の約 1% で有ることが確認された。

乱流場における流体運動および物質等の輸送プロセスを支配する因子として Reynolds があげられる。図-3 に示すように、シリコン球で製作された多孔質体模型を U 字状管路内に固定し、これと屈折率の等しいヨウ化ナトリウム水溶液を用いて、多孔質体間隙部およびその周辺の流速分布を計測し、計測された流速値を用いて、Reynolds 応力と線形渦粘性モデルの妥当性を検討した。その結果、一方向流場に設置された多孔質体を通過する流れを対象に、時間平均操作に基づいて定義される無次元 Reynolds 応力と無次元せん断速度との間には、比較的高い相関性が見られ、線形渦粘性モデルの妥当性が示された。しかし、同データに対して空間平均操作に基づいて定義されるそれらの関係を検討すると、その相関性はかなり低く、線形渦粘性モ

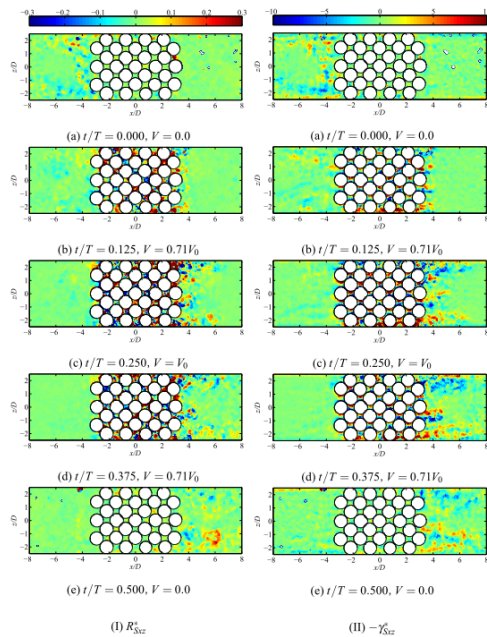


図-4 無次元 Reynolds 応力  $R_{Sxz}$  と無次元せん断速度  $-\dot{\gamma}_{Sxz}$  の分布 ( $R_{ep}=310$ ,  $KC=13.5$ )

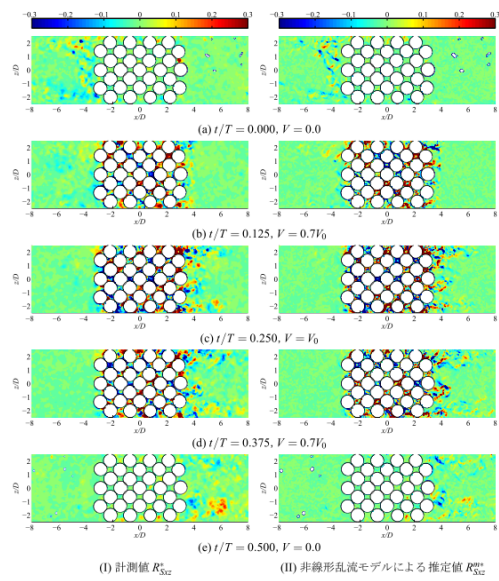
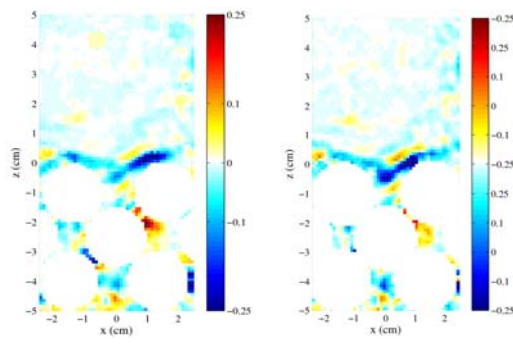


図-5 無次元 Reynolds 応力  $R_{Sxz}$  と無非線形乱流モデルによる推定  $R_{Sxz}$  の分布 ( $R_{ep}=310$ ,  $KC=13.5$ )

デルの適用は困難であることが示唆された。振動流場におけるそれらの関係を検討した結果、両者の相関はかなり弱く、振動流場においても線形渦粘性近似の妥当性が低いことが確認された。

流れの非定常性をも考慮した汎用的な乱流モデルを構築するため、実験で求められた流速値を用いて、せん断速度、伸縮速度、回転速度の空間分布を調査したうえで、非線形乱流モデルの妥当性について検討した。図-5 にその一例を示すように、実験値と非線形渦粘性モデルによるその推定値との間には良好な一致が見られることがわかり、多孔質体通過流れに対する非線形渦粘性モデルの妥当性が示された。

その有用性が検証された非線形渦粘性モデルを、多孔質体上部を振動流が通過し、多孔質体空隙部と上部流との運動量交換が自由に成される場にも適用し、その妥当性の更なる検証を行った。図-6 にその一例を示すように、非線形渦粘性モデルによるレイノルズ



(a) 実験結果 (b) 推定結果

図-6 レイノルズ応力の分布

応力の推定値およびその分布は、実験結果と良好に一致しており、その有用性が再確認できたと結論づけられる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- (1) 岡田祐也、重松孝昌、中條壯大、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、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、査読有、2013, vol. 69, 頁番号は未定、受理済
- (2) 重松孝昌、岡田祐也、中條壯大、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、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、査読有、2013, vol. 69, 頁番号は未定、受理済
- (3) Sota Nakajo and Takaaki Shigematsu, 'Experimental verification of turbulent modeling for the flow through a porous media by using PTV', Proceedings of 7th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, 査読有、2011、6p.、6D5P.  
<http://www.tsf7.org/papers/6D5P.pdf>
- (4) Sota Nakajo, Yusuke Takeoka and Takaaki Shigematsu, 'Numerical Simulation of Fluid Force acting on Circular Cylinders in Unidirectional Flow', Proceedings of 7th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, 査読有、2011、7p.、P37P.  
<http://www.tsf7.org/papers/P37P.pdf>

[学会発表] (計 6 件)

- (1) 中條 壯大・重松 孝昌 (2011) : PTV 結果を用いた多孔質体通過流における非線形乱流モデルの検証、可視化情報学会シンポジウム、P03-006、2011 年 7 月 18 日.
- (2) 岡田祐也・馬瀬慎也・重松孝昌 (2011) : 流跡線連結法を用いた多孔質体間隙部の 3 次元流動の計測、II-48、2011 年 6 月 12 日.
- (3) 石川智景・竹岡佑介・重松孝昌 (2011) : IB 法を用いた振動円柱周辺流動場の数値計算、II-49、2011 年 6 月 12 日.
- (4) 馬瀬慎也・中條壯大・重松孝昌 (2010) : 流跡線連結法を用いた浮上粒子周りの 3 次元流体運動計測、日本混相流学会年会講演会 2010 講演論文集、pp. 176-177、2010 年 7 月 18 日.
- (5) 竹岡佑介・重松孝昌・中條壯大 (2010) : IB 法を用いた円柱群通過流れの 2 次元数値シミュレーション、日本混相流学会

年会講演会 2010 講演論文集、pp. 188-189、2010 年 7 月 18 日.

- (6) 竹岡佑介・中條壯大・重松孝昌 (2010) : IB 法に基づいた数値モデルによる単一円柱周り流れの数値計算、II-4、2010 年 5 月 22 日.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

重松 孝昌 (SHIGEMATSU TAKAAKI)  
大阪市立大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：80206086

##### (2) 研究分担者

なし

##### (3) 連携研究者

なし