

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 19 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360073

研究課題名(和文)ヘテロ多孔体界面乱流における流れと多孔体構造の相関の解明

研究課題名(英文)Study on the correlation between the surface turbulent flows and structures of heterogeneous porous media

研究代表者

須賀 一彦(Suga, Kazuhiko)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60374089

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：構造に異方性を持つヘテロ多孔体の流動計測実験と数値解析を行った。作動流体の水と光学的屈折率がほぼ等しいFEP樹脂多孔体を製作することで、その内部を粒子画像流速計により計測した。実験から界面垂直方向に比べ他の方向成分の透過率が極めて小さい場合には、内部流体を周囲に押し出しにくくなるので、速度変動の界面垂直成分が結果的に抑えられ、レイノルズせん断応力が界面近傍で抑制される傾向を観察した。数値解析では、ヘテロとホモ計4種類の多孔体を対象にLBM数値解析を行い、構造と乱れの相関を議論した。実験と計算データを参照し、一般的な多孔体流れの二重平均乱流モデルの開発を応力方程式モデルとk-εモデルにて行った。

研究成果の概要(英文)：PIV measurements and numerical simulations of turbulent flows in the interface regions of heterogeneous porous media are performed. For the PIV measurements, we made porous medium of FEP resin whose refractive index is close to that of water to measure flows inside the porous media. Two dimensional turbulent boundary layers over porous media are also measured and simulated to discuss the flow physics totally. As a result, we observed that in the case that the stream-wise and span-wise permeabilities are much lower than the surface-normal one, the normal fluctuation velocity and thus the Reynolds shear stress are damped because of the blocking effects on the vortex motions penetrating inside the porous medium by the saturated fluid inside the porous medium. By the LBM simulations, we discussed the detailed behaviour of the budget terms of the double averaged turbulence equations and constructed Reynolds stress and k-ε models for general porous medium flows.

研究分野：流体力学

キーワード：乱流 多孔質 ヘテロ性 透過率 乱流モデル 格子ボルツマン法 PIV

## 1. 研究開始当初の背景

固相境界として最も複雑で、最も多様性に富む多孔質は、工学分野のみならず、医療や環境分野においても重要な役割を担い、その内部や界面における流動については、古くから多くの研究がなされてきている。従来の研究では、主として体積平均した運動量の式を基にしたバルク的な議論がなされ、多くの知見が積み重ねられてきている。

一方、近年では、例えば燃料電池の拡散層内の水分移動制御のように多孔質を介した物質伝達を制御するために、局所的に構造に変化を与える構造設計が議論されるようになってきている。今後さらに突き詰めていけば、多孔質の網目構造そのものに焦点を当て、目的に応じたヘテロ構造の設計が注目されていくと考えられる。このような多孔質の微細な構造と流動機構との関連は設計上最も重要と考えられるが、従来から行われているマクロな平均化に基づくバルク的なアプローチからは議論できない。したがって極論すれば、多孔質構造を忠実に再現した計算や計測を行う必要があるが、まずどのような効果を見込み、どのようなヘテロ性(不均質性、非等方性)を取り上げるかの指針が必要なことは自明である。

そのためには、パラメーターが多い非等方な多孔質に対しても、従来から行ってきたバルクに向かう議論から、個々のパラメーターの効果を取り上げる議論へと方向転換しなければならない。例えば従前の研究では、多孔質の構造に起因する物性パラメーターである透過率を空隙率の関数として与え、結果的に空隙率のみによって整理しようとするものが多かった。しかし、拡張 Darcy 方程式に自明のように、透過率は多孔質内流動を特性づける $[m^2]$ の次元を持つパラメーターであり、空隙率とは独立な2階のテンソル量である。透過率テンソルは空孔の径や形状に依存し、方向性も合わせ持つので、多孔質構造の流動への影響は透過率テンソルを介して議論すべきである。ところが、透過率と流動現象の相似性については一般化できるような議論が十分なされてこなかった。そこで申請者らは、透過率と多孔層上の境界層構造との関係から相似パラメーターを見出すことに焦点を当てて、実験的・数値的研究を行ってきた。実験では、空隙率は等しいが透過率の異なる3種の発泡多孔体境界層において PIV 計測し、4象限解析などの詳細なデータ解析から、多孔体上の層流から乱流への遷移やストリーク構造の変化が界面垂直方向の透過率に大きく左右され、透過率の平方根と摩擦速度から定義される透過率レイノルズ数によって整理ができることを確認してきた。また、多孔体構造を詳細に再現した数値解析によって、やはり各種発泡多孔体ではによって多孔層界面での滑り速度の大きさがスケールリングできることを示した。しかしながら、発泡多孔体は透過率や構造が等方的

である。より効果的に流動に影響を与える、またはより実際の議論のためには、ヘテロな非等方性構造を持った多孔体界面の流動特性を議論する必要がある。例えば、界面におけるスパン方向の透過率が境界層内の縦渦生成機構と大いに相関を有すると推定できるが、このようなことは検討されたことはない。

## 2. 研究の目的

多孔体界面乱流境界層では、渦運動の一部が多孔体界面から内部に透過しそこで散逸する。従来の研究ではこの界面層内部での運動量変換が、結果的に透過性のない壁面に比べてより大きな界面摩擦や物質伝達の要因と考察されている。また、乱流境界層で形成される縦渦構造が大きく成長しないのは多孔体壁面の透過性のためである。このように透過率によって界面流動現象が支配されることは分かっていたが、多孔体構造の複雑さのため、多孔体界面層内における渦散逸の詳細とそれと連動する界面での乱流渦運動の構造やメカニズムは、実験的にも数値的にもほとんどわかっていない。ましてや、多孔体の空孔のスケールや等方性・非等方性が渦運動の生成・散逸、スケールや非等方性とどのような相関を持つかなど、これまでに議論されたことはない。そこで本研究では、テンソル量としての透過率の異方性が顕著な多孔体上の乱流境界層から多孔体界面内部にわたるまで詳細な PIV 計測を行う。合わせて、格子ボルツマン法(LBM)による構造を正確に再現した数値解析により、実験では得られない情報を補完する(多孔体流の LBM 数値解析では実験のような広範囲の領域や流動条件の全てのケースには対応が困難であるので、代表的なケースを対象とする。)得られたデータから、多孔体の異方性が如何に境界層構造に影響し、また多孔層内でのエネルギーの散逸や生成に作用するかを議論し、ヘテロ多孔体を設計する際の流体力学的知見を得るとともに現象のモデリングも試みる。

## 3. 研究の方法

## (1) ヘテロ多孔体界面流れ PIV 計測

多孔体界面乱流の界面内構造を含めて直接詳細に計測して議論しようという研究は国際的にも極めて稀で、ガラス玉を等方単純格子状に積み重ねた構造の多孔体内流を対象に計測を行った先駆的例が数例あるだけである。言うまでもなく多孔体内部の流動計測は可視化が難しく困難であるため、超音波流速計や屈折率をインデックス・マッチングした光学計測にて行われている。本研究では多孔体の異方性に着目し、その流動への効果の解明を目的に PIV 計測する。多孔体界面流れ計測には、本研究代表者らのこれまでの発泡多孔体を用いた実験的研究に使用してきた循環水流チャンネル流動装置を用いる。ヘテロ多孔体(異方性多孔体)の実験モデルとし

て、F E P樹脂管から作成するメッシュ状構造の多層モデルを製作する。この多孔体モデルでは主流方向とその垂直方向で透過率が異なるように構成し、構造の異なるものを数種類作成する。F E P樹脂材の屈折率(1.34)は作動流体である常温の水の屈折率(1.33)とほぼ等しいので、光学計測に関して屈折率の違いによる悪影響は少ないと考えられる。PIV計測には、研究室保有のステレオPIVシステムを用い、F E P樹脂多孔体の断面画像を蛍光散乱粒子を用い横から撮影する。これまでの研究から当研究室では格子ボルツマン法(LBM)による数値シミュレーションから透過率などを予め求めることができるので、LBM解析を援用して予め目的の構造特性を持っているか検討して設計を行うが、製作した多孔体構造の透過率は実際に計測をして求める。多孔体の透過率は流れに対する空孔の開口径に依存し、粗い網目構造であれば大きくなり、逆であれば小さくなる。一方で、空隙率は相似形であれば変化しないため、同じ空隙率で異なる透過率のものや同じ透過率でも異なる構造のものなどを製作することができる。また、同じ空孔形状であれば透過率は同じであるが、長径や短径の向きが主流方向と異なれば流動も変化すると考えられる。

#### (2) ヘテロ多孔体界面流れLBM解析

多孔質界面乱流の詳細な数値解析研究としては、球状ビーズ層であるアバディーン大学の対象としているものと同様の系を対象にカールスルーエ工大のグループがLESやDNSを行っている。また、デルフト工大グループの研究はDNSといっても多孔質体内は体積平均方程式を解いているので、我々が対象としている異方性多孔体界面流れの計算は前例がない。LBM計算はこれまでに開発してきた多緩和時間LBMコードを用いる。LBMで通常用いられる直交等間隔格子では実験流路に用いる多孔体形状をそのままでは正確に再現できないが、これまでの研究で開発してきた境界面再構築法と補間法を活用することで対応する。多孔体内部まで構造を詳細にメッシュ分割するため、大型機といえども計算領域が十分に取れないので、多孔体の外では十分な程度に粗い格子間隔を併用した解析法も新たに計算プログラムに組み込む作業をする。実験では正確に得ることができない高次の相関量や、非定常な3次元渦構造の発達・減衰過程と多孔体表面層の空孔の非等方性やスケールがどのような相関を有するのかを解明するとともに、現象のモデリングのために各項の収支などのデータを蓄積する。

#### (3) ヘテロ多孔体界面流れのモデリング

ヘテロ多孔体の構造を設計するにおいては、最終的には微細な構造を完全模擬しなければ細部のヘテロ性がもたらす効果を正確

に見積もることはできないと考えられる。しかし、レイノルズ平均したモデルにおいても透過率の異方性や空孔のヘテロ性をモデルに反映させて現象をモデル化することが可能であるので、大局的な性能を見積もることができると考えられ、工学的な意義は大いにある。本研究では実験などで得られたデータをもとに乱流モデリングを実施する。

従来、多孔体内乱流のモデルは、多孔体を等方、均質として扱うことしか行われていないが、本研究ではヘテロな異方性透過率を有する多孔質を対象に実験と数値解析とから、透過率の異方性と流れ構造との相関を明らかにしていくので、これらの情報を基に乱流のモデリングを行う。多孔質の構造が非等方であるので、乱れの非等方性を扱える非線形渦粘性モデル及びレイノルズ応力方程式がそのベースになると考えている。研究代表者は乱流の非線形渦粘性モデルやレイノルズ応力方程式モデルの開発に豊富な経験とノウハウがあるので、これらを生かしながら、モデリングを進める。計画初年度はヘテロ多孔体のデータが十分ないため、等方・均質多孔体のデータを基に上述の乱流モデリングを進め、主としてレイノルズ応力方程式モデルを基にヘテロ多孔体乱流モデルの基礎を開発する。2年目以降では多孔体流れに関して運動量式に付加される項や、多孔体内での体積平均に従来の等方的な概念ではなく、異方性の概念を導入した手法の検討を行う。(多孔体内のモデルでは体積平均とレイノルズ平均のダブル・アベレージングが行われるが、このとき出現するLESのSGS応力に相当する項をはじめとする数多の相関量は、通常無視されている。しかし、非等方多孔体では無視できない量があり、そのモデル化が必要になってくると考えている。)

#### 4. 研究成果

##### (1) ヘテロ多孔体界面流れPIV計測

FEP樹脂により空隙率は約0.83で基本構造が主流方向とスパン方向でほぼ共通であり、界面垂直方向の構造にヘテロ性を有する網目状多孔体を作成し(最終的に3種類)、その界面から内部に渡る領域でのPIV流動計測を行った(雑誌論文)。計測に先立ち各多孔体の透過率の各方向成分を計測した結果、界面垂直方向成分/主流方向成分の比が約3.5, 10, 9.8, フォルヒハイマー係数の界面垂直方向成分/主流方向成分比は4.5, 0.5, 3.1であることを確認している。

矩形ダクトの下面に多孔体を敷いた $Re=4000$ の流れ場の計測結果では、フォルヒハイマー係数比が近い場合、透過率比が大きくなると乱流せん断応力が小さくなる傾向が観察されることが分かった。これは、抗力係数に比例するフォルヒハイマー係数が等価な場合、透過率によって流体塊の運動は制御されると考えられるが、界面垂直方向の透過率が大きくても、界面から進入した流体塊

が多孔体内部でスパン方向及び主流方向に拡散しにくいと、界面からの進入そのものが抑制されることに起因しているためであると考えられる。つまり、流体クッションのような界面垂直方向運動のブロッキングが生じ、結果として同等の総和透過率を持つ多孔体に比べて乱流摩擦応力が低下するのではないかという興味深い結果を得た。このことは、別途にメッシュを重ねて作成した多孔体の2次元乱流境界層の界面計測も行い、おおよその裏付けが得られている(学会発表済)と考えているが、より確かな知見とするためには更なる検討が必要である。

#### (2) ヘテロ多孔体界面流れ LBM 解析

LBMにより、多孔体のような複雑形状流路内乱流を解析するための手法をまず検討した。その結果三次元場で一般的に用いられている D3Q19 モデルでは、曲率を有する界面近傍では正確な乱れ場を再現できないが D3Q27 モデルではそれが可能となることを数学的に証明した(雑誌論文)。その上で、ラージ・エディ・シミュレーションを安定にできる多緩和時間 LBM の開発を行った(雑誌論文, 学会発表)。そして、汎用大型計算機による大規模計算に資するため、GPGPU に対応できるように研究室既存の LBM コードを CUDA+MPI 用書き換え、多孔体内および界面の LES および DNS を行った(雑誌論文, 学会発表, , , 他準備中)。多孔体内流れでは、乱れ量と多孔体の構造パラメータや透過率などとの相関について、角柱群(ヘテロ)、立方体群、フラクタル立方体群、発泡多孔体(以上ホモ)などのヘテロとホモ多孔体の計4種類のモデル多孔体構造において空隙率を変化させて議論した。ここで得られたデータをもとに従来の知見の見直しを試み、現象を記述するパラメータの探索から、ヘテロ、ホモ共通で多孔体内の乱流エネルギーを相関付けるパラメータにはフォルヒハイマー係数が、分散相関エネルギーを記述するパラメータには Tortuosity が有効であることを見出した(雑誌論文投稿中)。

#### (3) ヘテロ多孔体界面流れのモデリング

ダブル・アベレージ(二重平均)乱流方程式を閉じるためにレイノルズ応力方程式を基本とした乱流モデリングを行った(雑誌論文, 学会発表)。二重平均方程式群に表れる多くの未知相関項は LBM による LES の結果を参照しながら、可能な限り各項について個々にモデリングした。そして、得られたモデル方程式群による解の妥当性の評価は本研究で得られた一連の実験データを参照することで行った。その結果、各種多孔体内部および多孔体界面乱流の両領域で良好な予測が可能な乱流モデルの構築ができた。このモデルを温度場に適用する場合の熱流動場のモデリングも一部実施し、まだ条件は角柱群流れに限られるが、乱流スカラー場にも対応できるモデルの構築も行った(雑誌論文, 学会発表)。また、応力方程式モデルを簡

略化することで  $k-\epsilon$  モデルも導出している(雑誌論文)。

以上のように、本研究では透過率の等方性や非等方性が多孔体の流動特性に与える影響や、それを勘案したモデリングについて数多くの成果をあげたといえる。しかし、多孔体の空孔のスケールや等方性・非等方性と渦運動の生成・散逸との相関の解明のために実施できた実験や計算のケースが限られていることもあり、機能性多孔体設計のための知見確立のためには、今後も継続した研究が必要である。

#### 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 16 件)

- Kuwata, Y., Suga, K., Porous medium modelling of turbulent heat transfer in square rod arrays with a multi-scale second moment closure, *Spec. Top. Rev. Porous Media*, accepted, 査読有,  
Suga, K., Kuwata, Y., Takashima, K., Chikasue, R., A D3Q27 multiple-relaxation-time lattice Boltzmann method for turbulent flows, *Comp. Math. Appl.*, vol.69 (2015)518-529, 査読有,  
doi:10.1016/j.camwa.2015.01.010  
Kuwata, Y., Suga, K., Progress in the extension of a second-moment closure for turbulent environmental flows, *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol.51(2015)268-284, 査読有,  
doi:10.1016/j.ijheatfluidflow.2014.10.011  
Kuwata, Y., Suga, K., Anomaly of the lattice Boltzmann methods in three dimensional cylindrical flows, *J. Comput. Phys.*, vol.280 (2015) 563-569, 査読有,  
doi:10.1016/j.jcp.2014.10.002  
Kuwata, Y., Suga, K., Sakurai, Y., Development and application of a multi-scale  $k-\epsilon$  model for turbulent porous medium flows, *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 49 (2014) 135-150, 査読有,  
doi:10.1016/j.ijheatfluidflow.2014.02.007  
Suga, K., Kuwata, Y., On the budget terms of the double averaged turbulent stress transport equations in porous media, *Procedia Eng.* vol.79(2014) 3-8, 査読有,  
doi:10.1016/j.proeng.2014.06.302  
Suga, K., Kuwata, Y., Turbulence over/inside porous surfaces and challenges to its modelling, *J. Phys. Conf. Ser.*, vol.530 (2014) 012004, 査読有,  
doi:10.1088/1742-6596/530/1/012004  
Iida, T., Taneo, A., Kaneda, M., Suga, K., PIV measurements of interface turbulence over hetero-porous media, *J. Phys. Conf. Ser.*, vol.530(2014)012058, 査読有,  
doi:10.1088/1742-6596/530/1/012058  
Suga, K., Tominaga, S., Mori, M., Kaneda, M., Turbulence characteristics in flows over solid and porous square ribs mounted on porous walls, *Flow, Turb. Combust.*, vol.91 (2013) 19-40, 査読有,  
doi:10.1088/0169-5983/45/3/034501

##### [学会発表](計 54 件)

Sakurai, Y., Kuwata, Y., Suga, K., Lattice

Boltzmann LES of Conjugate Turbulent Heat Transfer in Square Rod Arrays, *ETMM10, Marbella, Spain* (2014.9.19)  
Kuwata, Y., Suga, K., Large Eddy Simulation of Turbulence in Porous Media, *ETMM10, Marbella, Spain* (2014.9.19)  
Kuwata, Y., Suga, K., Multi-scale second moment modelling of turbulence and heat transfer in porous media, *Int. Heat Transfer Conf. 15, 国立京都国際会館( 京都府京都市 )* (2014.8.11)  
Suga, K., Turbulence characteristics over permeable walls, *2013 AGU Fall Meeting, San Francisco, U.S.A.*, (2013.12.13)  
Y. Kuwata, K. Suga, An analysis on budget terms of the volume averaged Reynolds stress transport equation for flows in porous media, *14th European Turbulence Conference, Lyon, France*, (2013.9.2)  
Y. Nakagawa, M. Kaneda, K. Suga, Spanwise Measurements Of Turbulence Structure Over Permeable Walls, *14th European Turbulence Conference, Lyon, France*, (2013.9.1)  
Y. Kuwata, K. Suga, Second moment modelling of turbulence in porous media, *7th Int. Conf. on Turbulence, Heat and Mass Transfer, Palermo, Italy* (2012.9.25)  
Y. Kuwata, K. Suga, LES of turbulence in porous media by the MRT lattice Boltzmann method, *JSME-CMD Int. Comput. Mechanics Symp, 神戸大学 ( 兵庫県神戸市 )* (2012.10.10)  
K. Takashima, M. Kaneda, K. Suga, Large eddy simulation of complex internal turbulent flows by the MRT-LBM, *JSME-CMD Int. Comput. Mechanics Symp, 神戸大学 ( 兵庫県神戸市 )* (2012.10.10)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等：特になし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

須賀 一彦 (Suga, Kazuhiko)  
大阪府立大学・工学研究科・教授  
研究者番号：60374089

### (2) 研究分担者

金田 昌之 (Kaneda, Masayuki)  
大阪府立大学・工学研究科・准教授