

TSUBAME 共同利用 平成 26 年度 学術利用 成果報告書

利用課題名 多孔体界面乱流の直接数値計算

Direct numerical simulation of turbulent flows over permeable porous media

利用課題責任者 須賀 一彦

First name Surname: Kazuhiko Suga

所属 大阪府立大学

Affiliation Osaka: Prefecture University

URL

#### 邦文抄録

多孔体表層の乱流現象を理解するために、チャンネルの下面に多孔体を敷き詰めた多孔体チャンネルの直接数値計算を行った。本研究では、計算密度が高く、大規模並列計算に適した格子ボルツマン法に、マルチブロック法を組み合わせることで、高効率・高精度な乱流解析を可能にした。計算プログラムは MPI を用いた複数 GPU, CPU によって行い、数億スケールの格子点数に関しても高速演算に可能なプログラムの開発を行った。得られた結果を用いて、多孔体界面表層の詳細な乱流渦構造を調べ、多孔体内部の乱流方程式の収支解析を行うことで、乱流の生成・輸送機構を調べた。

#### 英文抄録

To understand the flow physics around a permeable porous layer, a direct numerical simulation of the porous-walled channel flow whose bottom wall is made of a porous medium is performed by the lattice Boltzmann method coupled with the multi-block method, which enables efficient and accurate turbulent flow simulations. Using the message passing interface, the computation is carried out by CPUs + GPUs. Using the simulation results, the budget term analysis of the turbulence equations is conducted and the detailed turbulence structure and the turbulent transport near the porous layer are investigated.

*Keywords:* Lattice Boltzmann method, Direct numerical simulation, Porous media, Turbulent budget terms

#### 背景と目的

多孔体は、医療、環境工学のみならず、工業製品においては燃料電池内のガス拡散層、熱交換器、触媒装置など多くの場面で見られる。したがって、多孔体内外の流動現象を理解し、モデル化を行うことは、これら工業製品の設計において重要である。しかし、多孔体内外の乱流現象は、多孔体構造の影響を強く受け、複雑な流動となる、とりわけ、多孔体壁表層の乱流現象は、滑面での現象と大きく異なることが報告されている。しかし、微細な構造をもつ多孔体内部の実験的計測は難しく、多孔体構造の複雑さゆえ、数値計算における乱流解析も十分には行われていない。そのため、多孔体壁の表層・内部の乱流輸送現象は十分には理解されていない。本研究では、多孔体界面乱流の直接数値計算を行うことで、多孔体壁表層の渦構

造、乱流輸送メカニズムの理解を進めた。

#### 概要

本研究ではチャンネルの下面に多孔体を敷き詰めた多孔対チャンネルを対象とする。多孔体チャンネルは複雑な多孔体構造を解像する必要があることに加えて、すべての乱流渦を捉えるだけの大きな計算領域が必要とされる。そのため、複雑形状の取り扱いが容易で、大規模並列演算に適した格子ボルツマン法に注目する。本研究では、乱流場の高精度解析の可能な三次元27方向速度多緩和時間格子ボルツマン法<sup>(1)</sup>を用い、MPIを用いた複数 GPUs+CPUs により多孔体チャンネルの直接数値解析を行った。

本解析で対象とした流れ場を図1に示す。多孔体構造は立方体がスタッガード配置されたもので、

空隙率は 0.73 となっており、解像される立方体の総数は 5560 個となっている。図1に示した計算領域は、マルチブロック法を用いてクリアチャンネル領域、多孔体領域の解像度の異なる二つに分けて解析を行った。多孔体領域には、多孔体の微細な構造を解像するために、クリアチャンネル領域の二倍の解像度で解析を行った。計算領域はクリアチャンネル高さ  $H$  に対して、 $2\pi H(x) \times H(y) \times \pi H(z)$  となっており、レイノルズ数 3000 に対して、総格子点数は約3.3億点である。計算は、MPIにより計算領域を流れ方向に88分割し、それぞれの領域でCPU+GPUによる計算を行う。分割された領域にはオーバーラップ領域を設け、オーバーラップ領域の通信中に内部領域の計算を行うことで、通信時間を隠蔽している。解析は50万ステップの統計計算に約24時間を要した。

### 結果および考察

図2に速度勾配テンソルの第二不変量の等値面を示す。図2から、多孔体界面近傍は上壁面近傍に比べて非常に強い乱れが生じていることが分かる。また、多孔体表層で生じた強い乱れは、多孔体内部では維持されず、減衰していることがわかる。

図3に多孔体界面近傍の瞬時速度ベクトルと変動圧力分布を示す。多孔体界面近傍では、多孔体の構造スケールより大きな圧力変動が、クリアチャンネル領域全体に渡って生じていることが分かる。また、圧力変動に伴い、大きなスケールの速度の変動も見られる。瞬時の圧力・速度の大きな変動は立方体層二つ程度まで到達していることが分かる。

最後に多孔体界面近傍での乱流輸送を議論するために、図4に $x-z$ 面で面平均を行った乱流エネルギーの収支項を示す。乱流エネルギーの生成項は多孔体層二つ程度深( $y/H = -0.1$ )まで生じていることが分かる。さらに、立方体層の接続面近傍( $y/H = 0, -0.1$ )で粘性拡散、散逸率が強く働いていることが分かる。いっぽう乱流・圧力拡散項は多孔体内部では全体的に働くことが分かり、特

に圧力拡散項は多孔体深部で働くことが分かる。

### まとめ、今後の課題

多孔体界面近傍の乱流現象を理解するために、多孔体チャンネルの直接数値計算を行った。本解析は、大規模な並列化計算に適している格子ボルツマンを用いて複数 GPU, CPU により行った。本解析により、多孔体界面近傍では強い乱れが生成され、多孔体の構造スケールより大きなスケールの圧力変動が生じていることが分かった。また、多孔体の固体障害物近傍で粘性拡散、散逸率が働き、多孔体内部全体にわたって乱流拡散・圧力拡散項が働いていることが分かった。これらの内容は国際学会<sup>(2),(3)</sup>で発表予定である。

今後は、瞬時の変動モードに関してより詳細に調べていく予定である。さらに、体積・レイノルズ平均方程式を基にした詳細な乱流輸送の議論を行っていき、多孔体界面近傍の乱流輸送メカニズムの解明を行う。

### 参考文献

- [1] Suga, K., et al., Comput. Math. Appl. Vol.69, 2015, pp.518-529.
- [2] Kuwata, Y., et al. Proc. THMT15, 2015.
- [3] Kuwata, Y., et al. Proc. TSFP9, 2015.

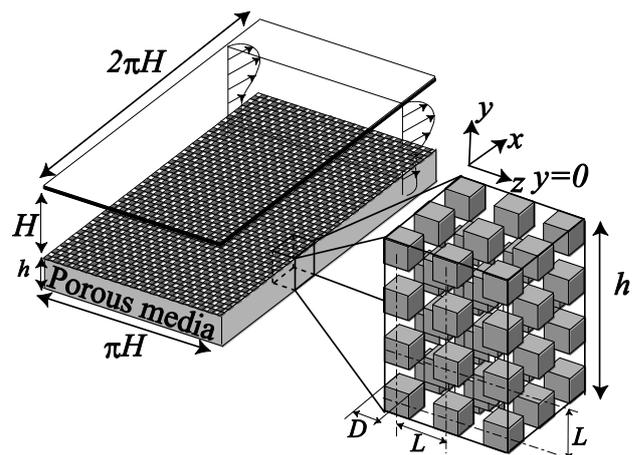


Fig.1 Computational geometry of porous-walled channel flow.

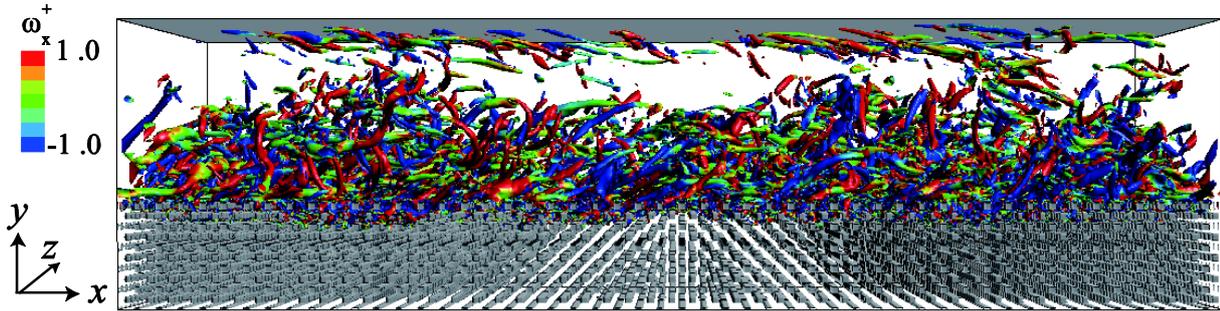


Fig.2 Second invariant of the velocity gradient tensor colored by the streamwise vorticity

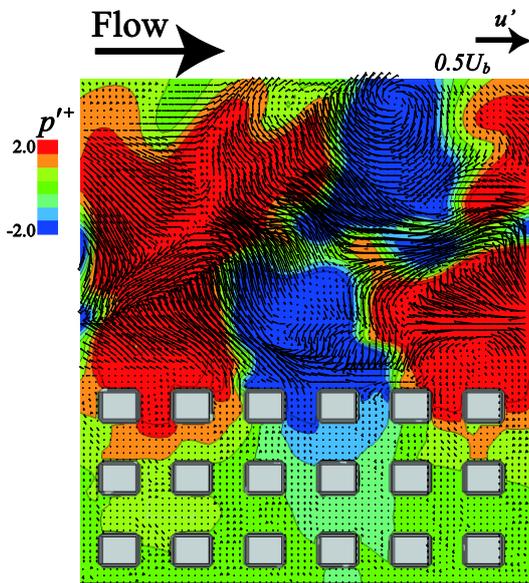


Fig.3 Instantaneous fluctuating pressure and velocity vectors.

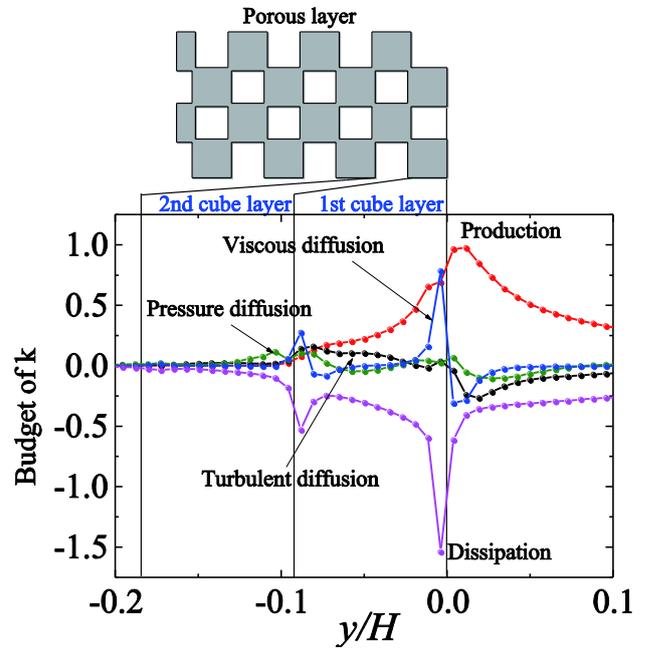


Fig.4 Budget terms of the turbulent kinetic energy equation.