

TSUBAME 共同利用 平成 27 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

多孔体構造が内外の乱流現象に及ぼす影響を調べるために、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、新たに開発した局所細密格子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。本研究では特に異方性透過率を有する多孔体を対象として解析を行い、非等方的な性質が内外の乱流現象に及ぼす影響について調べた。

英文抄録

To understand the influence of the porous characteristics on turbulence around a porous wall, 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 with the zonal grid refinement method. The anisotropic porous media are considered for porous walls and the influence of the anisotropic characters of the porous media on turbulence is investigated in detail.

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用いられる。したがって、多孔体内外の流動現象を理解することは、これら工業製品の設計において重要である。これまで等方的な性質を持つ多孔体を対象とする解析が取り組まれてきており、多孔体の性質が内外の乱流場に与える影響について調べられてきた。

しかし、実際の多孔体は非等方的な構造を持つものが多く、非等方的な性質が内外の乱流現象に与える影響を明らかにすることは乱流を制御する上で重要である。本研究では、非等方的な構造をもつ多孔体を下面に敷き詰めたチャンネル乱流の解析を行い、非等方的な性質と乱流構造の相関を明らかにした。

概要

本研究は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を用いて解析を行う。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⁽¹⁾を用い、MPIを用いた複数GPU+CPUにより多孔体チャンネルの直接数値解析を行った。

さらに、効率的な解析を行うために高精度な局所細密格子法⁽²⁾を開発し、多孔体領域にのみ細密格子を配置して解析を行った。

本解析で対象とした流れ場を図1に示す。チャンネル下面には非等方な構造をもつ4種類の多孔体を用いた。Case Yは垂直方向にのみ透過性を持ち、Case XY, YZは垂直方向に加えて主流方向、スパン方向に透過性をもつ多孔体である。Case XYZは全方向に透過性をもつ等方多孔体である。それぞれの多孔体の空隙率 ϕ 、透過率テンソル

K_{ii} を表1に示す。図1に示した計算領域の多孔体領域には、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、上面・下面の平均摩擦速度を用いたレイノルズ数 111 に対して、総格子点数は約 6.6 千万点である。

計算は、MPI により計算領域を流れ方向に分割し、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 24 GPUs を用いて約 9 時間を要した。

結果および考察

図 2 に滑面の摩擦速度で無次元化した x - z 面平均主流速度、図 3 に面平均レイノルズせん断応力 R_{12} を示す。Case Y における R_{12} の大きさは多孔体側、滑面側で大きな違いは見られず、平均速度も対称に近い分布となっている。いっぽう、Case YZ, XY, XYZ は多孔体側で R_{12} が大きくなり、図 2 に見られるように平均速度は非対称な分布となる。特に、Case XY は Case YZ に比べて多孔体側の R_{12} は大きな値を示し、Case XYZ における R_{12} の大きさは Case XY と同等の大きさになっていることがわかる。また、レイノルズ応力の増加とともに多孔体壁の摩擦が増加し、表 1 に示すようにバルクレイノルズ数が減少する。

次に渦構造を理解するために、図 4 に速度勾配テンソルの第二不変量の等値面を示す。図 4 から、垂直方向のみに透過性をもつ Case Y では乱流渦は多く可視化されないのに対して、垂直方向に加えて主流もしくはスパン方向に透過性をもつ Case YZ, XY では多くの乱流渦が可視化されている。特に、垂直方向に加えて主流方向に透過性のある Case XY では多孔体界面でより活発な渦が生成されていることがわかり、全方向に透過性をもつ等方性多孔体 Case XYZ と同程度の渦が観察される。多孔体壁上の渦について詳細に調べるために、図 5 に多孔体界面近傍の主流変動速度のコンターを示す。Case Y では壁乱流で見られる主

流方向に引き伸ばされたストリーク構造を確認することができるが、Case YZ ではストリーク構造はよじれてスパン方向に広がった構造をとっていることがわかる。Case XY, XYZ ではストリーク構造は見られず、Kelvin-Helmholtz (K-H) 不安定性に起因するスパン方向につながった大規模な構造が見られる。この K-H 不安定性は等方多孔体界面で生じ、強い乱れを生み出すことが報告されており^(3, 4)、本解析においては主流方向に透過性をもつケースにのみ確認された。

Table 1 Flow characteristics of the simulation.

Case	ϕ	K_{zz}/H^2	K_{yy}/H^2	K_{xx}/H^2	Re_b	Re_r
Case Y	0.56	0	3.35×10^{-4}	0	3550	111
Case YZ	0.70	0	4.44×10^{-4}	4.44×10^{-4}	2670	111
Case XY	0.70	4.44×10^{-4}	4.44×10^{-4}	0	2330	111
Case XYZ	0.84	5.43×10^{-4}	5.43×10^{-4}	5.43×10^{-4}	2250	111

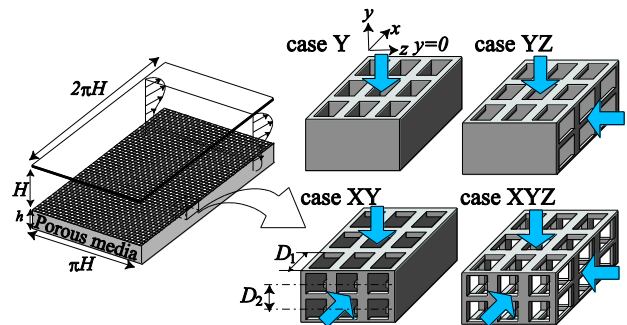


Fig.1 Computational geometries of the porous channel flows.

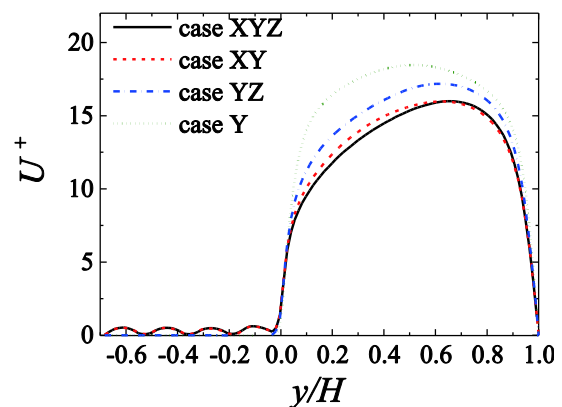


Fig.2 Plane averaged streamwise mean velocity

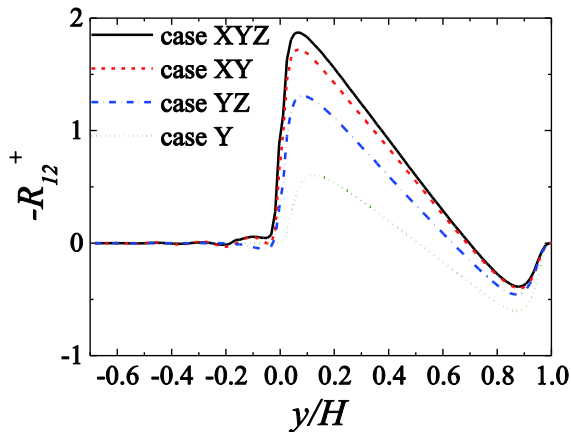


Fig.2 Plane averaged Reynolds shear stress profiles.

まとめ

多孔体構造が界面の乱流に与える影響を理解するために、非等方性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に局所細密格子法を用いて複数 GPU, CPU により行った。本解析により、壁面垂直方向の透過性のみは多孔体壁上の乱れに影響しないが、主流方向の透過性が乱れに大きく寄与していることがわかった。これは、主流方向の透過性により多孔体界面での Kelvin-Helmholtz 不安定性に起因する大規模な運動が維持され、強い乱れを生み出すからであると考えられる。これらの内容は国際学会⁽⁵⁾で発表予定である。

参考文献

- [1] Suga, K., et al., Comput. Math. Appl. Vol.69, 2015, pp.518-529.
- [2] Kuwata, Y and Suga, K., J. Comput. Phys. Vol. 311, 15, 2016, pp.348-362.
- [3] Kuwata, Y., et al. Proc. THMT15, 2015.
- [4] Kuwata, Y., et al. Proc. TSFP9, 2015.
- [5] Kuwata, Y., et al. Proc. ETMM11, 2016.

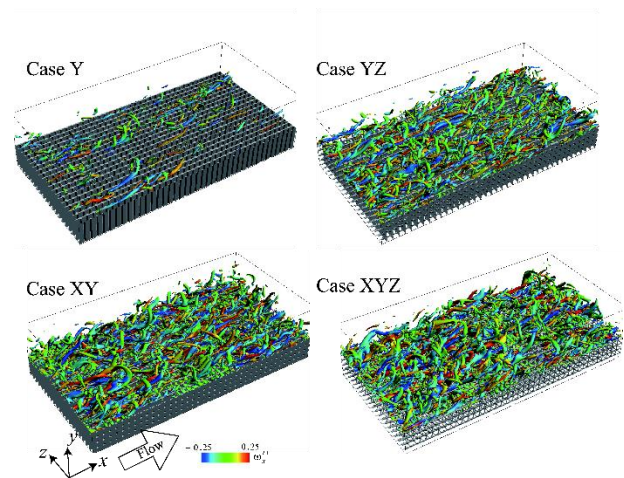


Fig.4 Iso-surfaces of the second invariant of the velocity gradient tensor coloured by the streamwise vorticity.

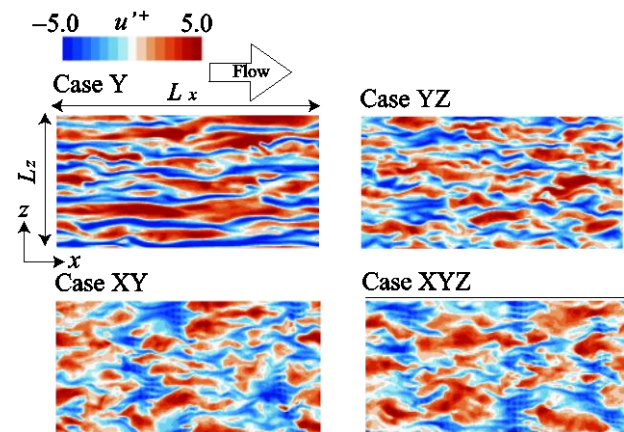


Fig.5 Snapshots of the streamwise velocity fluctuation.