

TSUBAME 共同利用 令和3年度 学術利用 成果報告書

利用課題名 粗さをういた熱・運動量輸送の非相似制御に関する研究

英文: Controlling the dissimilarity between the momentum and heat transfer by the wall roughness

利用課題責任者

桑田 祐丞

Yusuke Kuwata

大阪府立大学 工学研究科 機械系専攻
Department of Mechanical engineering
Osaka Prefecture UniversityURL: <http://www2.me.osakafu-u.ac.jp/htlab/>

邦文抄録(300字程度)

壁面に設置された粗さが熱・運動量輸送の非相似性に与える影響を理解するために、粗面乱流熱伝達の直接数値解析を行なった。本研究では、粗さの波長が非相似性に与える影響を調査する為に、3次元正弦波粗さを対象として、波長を変えた粗面を用いた数値解析を行った。数値解析手法に格子ボルツマン法を用い、乱流モデルを使用しない直接数値解析を行った。粗面の波長は速度場のスケーリングには影響を与えないが、温度のスケーリングに大きな影響を与えることが分かった。波長の短い粗面では、スタントン数と摩擦係数との比で定義されるレイノルズアナログファクタの減少が小さく、少ない流動抵抗で高い伝熱促進効果が得られることが示唆された。

英文抄録(100 words 程度)

We performed direct numerical simulation of rough wall turbulence to understand the effects of wall roughness on an analogy between the heat and momentum transfer. This study considered three-dimensional sinusoidal rough surfaces with various wavelength values. We utilized the lattice Boltzmann method for the direct numerical simulations. It is found that the wavelength does not affect the scaling for the mean velocity but has considerable effects on the scaling for the mean temperature. The Reynolds analogy factor, which is defined as the ratio of the doubled Stanton number to the skin friction coefficient, is larger for the surface with a small wavelength value, suggesting that surfaces with small wavelength roughness yield higher heat transfer rate with lower frictional resistance.

Keywords: Rough surface, Turbulence, Heat transfer, Lattice Boltzmann, Reynolds analogy

背景と目的

平滑面の乱流熱伝達に関しては、運動量・熱輸送の間に相似性が成立することが知られており、プラントル数が1の条件下では、スタントン数と摩擦係数との比はレイノルズ数に拠らずほぼ一定値を示す。しかし、表面粗さが出現すると、熱輸送に対する運動量輸送の増大が著しく、熱・運動量輸送の相似性が悪い意味で崩壊することが知られている。つまり、粗さによる流動抵抗の増大効果は、熱伝達の増大効果を上回る。粗さをういた伝熱制御を考えた際、流動抵抗の増加を最小限にしつつ、熱伝達率を最大化することが求められるが、粗さが非相似性の大きさに及ぼす影響は十分に理解されていない。本研究では、少ない流動抵抗で高い伝熱促進効果をもたらす理想的な粗さ構造を探求するために、粗面の乱流熱伝達に関する直接数値解析を実施し、相似性を表すパラメータであるレイノルズアナログファ

クタのスケーリングに関する調査を行う。

概要

本研究では、少ない流動抵抗増で高い伝熱促進効果をもたらす理想的な粗さ構造を探求するために、粗面の乱流熱伝達に関する直接数値解析を実施し、相似性を表すパラメータであるレイノルズアナログファクタのスケーリングに関する調査を行う。

本研究で対象とする解析系は、粗面を下面にもつオープンチャンネル流である。粗面の平均高さ位置 $y = k$ から、上面 $y = \delta$ までの高さで定義される有効チャンネル高さ $\delta_e = \delta - k$ に対して、計算領域は主流方向に $6\delta_e$ 、スパン方向に $3\delta_e$ とした。入口・出口境界の圧力差を一定とすることで流体を駆動し、有効チャンネル高さを代表長さとする摩擦レイノルズ数 $Re_\tau = 180, 300, 600$ の3つの条件で解析を行った。境界条件は、主流方向およびスパン方向に周

期境界条件を課し、上面は滑り境界条件を課した。熱的境界条件として、粗面は等温条件、上面は断熱条件とし、流体には一様発熱を与えた。プラントル数は空気を仮定し $Pr = 0.7$ とし、浮力の影響を無視したパンプスカラーとして温度を取り扱った。解析に用いた三次元正弦波粗面の粗面高さ $h(x, z)$ は以下のように与えられる。

$$h(x, z) = k \left(1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} z\right) \right),$$

ここで、 λ は波長、 k は振幅を表し、粗面領域は $0 < y < 2k$ である。粗面の振幅 $k = \delta/11.5$ とし、波長 λ と振幅 k との比を $\lambda/k = 2, 4, 8, 16$ とした 4 種類の粗面で解析を行った。

熱流動の解析は 2 種類の分布関数を用いる格子ボルツマン法によって行った。速度場は 3 次元 27 方向多緩和時間格子ボルツマン法⁽¹⁾を用いて解析し、温度場には 3 次元 19 方向速度正規化格子ボルツマン法⁽²⁾を用いる。格子ボルツマン方程式は、全て等間隔格子で離散化されており、計算格子の解像度は壁単位で 2.0 程度となるように設定した。計算格子数は、 $Re_\tau = 180$ のケースで $640(x) \times 116(y) \times 320(z)$ 、 $Re_\tau = 300$ のケースで $896(x) \times 162(y) \times 448(z)$ 、 $Re_\tau = 600$ のケースで $1536(x) \times 277(y) \times 768(z)$ となった。プログラムコードは CUDA Fortran によって記述されており、複数の GPU を用いた領域分割法によって並列化した。GPU 間の通信は、CPU を通じて MPI 通信によって行い、分割した領域には袖領域を設けており、領域間の通信時間を隠蔽するように工夫した。

結果および考察

図 1 に波長 $\lambda/k = 16$ 、摩擦レイノルズ数 $Re_\tau = 600$ のケースにおける、乱流渦と温度変動を可視化した図を示す。乱流渦は速度勾配テンソルの第 2 不変量の等値面で可視化をしており、コンター図は温度変動を示す。乱流渦は粗面の近傍で見られ、小スケールの乱流変動による激しい温度変動が見られる。これらの熱流動場を統計的に議論するために、図 2 に主流平均速度・温度分布を示す。

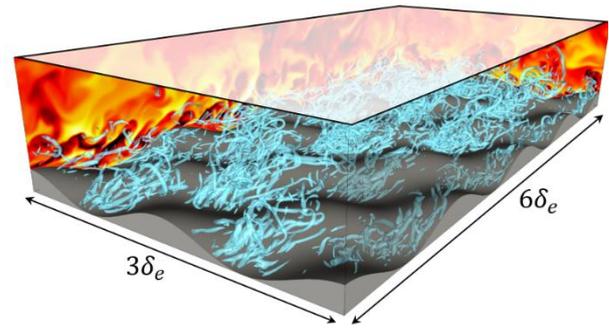


図 1 波長 $\lambda/k = 16$ 、摩擦レイノルズ数 $Re_\tau = 600$ のケースにおける、乱流渦と温度変動の可視化結果。

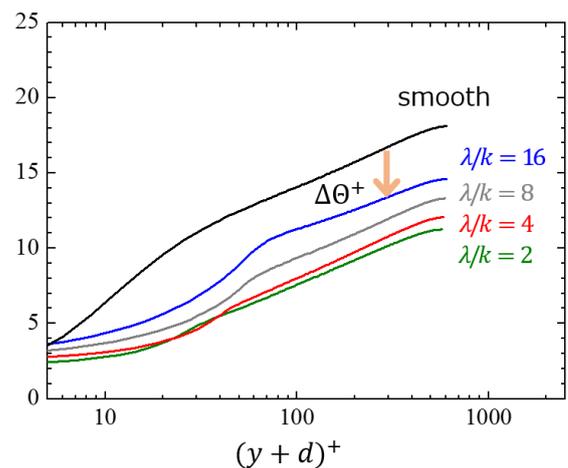
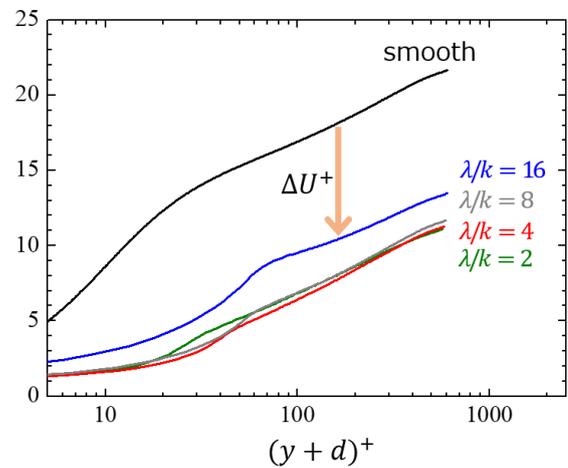


図 2 上図は摩擦速度で無次元化された主流平均速度分布、下図は摩擦温度で無次元化された平均温度分布。壁からの距離には、Jackson モデル⁽³⁾で得られた仮想原点からの距離を用いた。

平均速度は、摩擦速度を用いて無次元化しており、平均温度は摩擦温度を用いて無次元化した。図2より、粗面の平均温度・速度分布は滑面の結果と比較して、下方に位置していることが確認できる。これは、粗面によって壁面摩擦・熱伝達率が増加した結果である。対数領域における平均速度・温度の下方シフト量である速度粗さ関数 ΔU^+ 、温度粗さ関数 $\Delta \theta^+$ は波長が短くなるほど大きくなる。温度粗さ関数 $\Delta \theta^+$ は、 ΔU^+ と比較して小さいが、波長 λ/k の影響を大きく受けている様子が観察される。

これら平均速度・温度の変化が流動抵抗・熱伝達率に与える影響を調べる為に、熱伝達率の無次元数であるスタントン数 S_t 、流動抵抗の無次元数である摩擦係数 C_f を議論する。図3に、スタントン数と摩擦係数との比で表されるレイノルズアナログファクタ $RA = 2S_t/C_f$ と摩擦係数 C_f との関係を示す。なお、図中には、レイノルズアナログファクタ RA 、摩擦係数 C_f を滑面における値 RA_0 、 C_{f0} で無次元化した値を示す。図より、 RA/RA_0 は1を下回っており、粗面による摩擦係数の増大効果は、熱伝達率の増大効果を上回っていることが分かった。粗面乱流熱伝達における速度場と温度場の非相似的なふるまいは、摩擦係数 C_f が大きくなるほど顕著であり、 RA は C_f の増大に従って減少することが分かる。興味深いことに、波長が短くなるほど、 RA の減少が緩やかであることが確認される。つまり、波長の短い粗面では、より少ない流動抵抗増で高い伝熱促進効果をもたらすと言える。

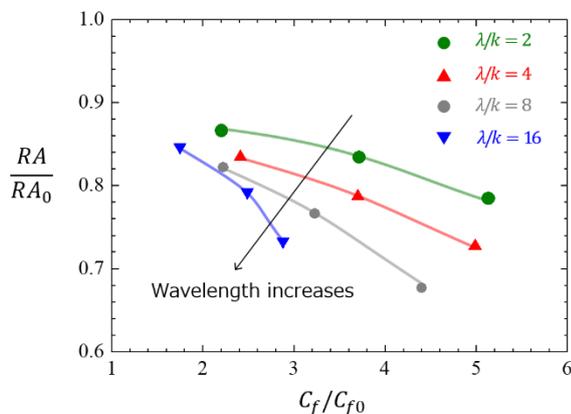


図3 レイノルズアナログファクタ RA/RA_0 と摩擦係数 C_f/C_{f0} との相関関係。 RA_0 、 C_{f0} は同じ摩擦レイノルズ数条件における滑面の値を示す。

まとめ、今後の課題

少ない流動抵抗増で高い伝熱促進効果をもたらす理想的なパッシブ伝熱制御を確立するために、粗さの特徴量が運動量・熱輸送に与える影響を直接数値解析によって調査した。対象とした粗面は3次元正弦波粗さとし、波長を変えたケースを複数の摩擦レイノルズ数条件で解析した。直接数値解析は密度分布関数・エネルギー密度分布関数を用いた格子ボルツマン法を用いて、複数GPUを用いた並列計算によって実施した。粗面要素の波長の大きさは、速度場のスケージングには影響を与えないが、温度場のスケージングに大きな影響を与えることが分かった。また、波長の短い粗面は、少ない流動抵抗で高い伝熱促進効果をもたらすことが示唆された。

参考文献

- [1] K Suga, Y Kuwata, K Takashima, R Chikasue, *Computers & Mathematics with Applications* **69** (6) (2015), 518–529.
- [2] K Suga, R Chikasue, Y Kuwata, *International journal of heat and fluid flow*, **68** (2017), 225–236.
- [3] Jackson, P. S., *Journal of fluid mechanics*, **111** (1981) 15–25.