

TSUBAME 共同利用 令和2年度 学術利用 成果報告書

利用課題名: フラクタル構造を有する粗さ面の乱流熱流動の大規模直接数値解析

英文: Large-scale direct numerical simulation of turbulent heat transfer over fractal roughness elements

利用課題責任者 桑田 祐丞

Kuwata Yusuke

大阪府立大学 工学研究科 機械系専攻 機械工学分野

Department of mechanical engineering, Osaka Prefecture University

<http://www2.me.osakafu-u.ac.jp/htlab/>

邦文抄録(300 字程度)

複数スケールの自己相似構造を有するフラクタル構造粗さによる伝熱促進の可能性を探るため、フラクタル構造が有するマルチスケール粗さが伝熱促進に与える影響を直接的な数値解析を用いて調査した。一般的に、壁面粗さは、熱・運動量輸送を増加させ、熱伝達率・壁面摩擦係数が増大するが、熱伝達率の増大率は壁面摩擦係数の増大率に比べて小さくなる傾向がある。しかし、単一スケール粗さに比べて、マルチスケール粗さは、壁面摩擦係数の増加を抑えつつ、より高い熱伝達率の増加効果が得られることが明らかになった。これら結果から、マルチスケールの粗さを有するフラクタル粗面を用いることで、より高効率な伝熱促進が可能であることが示唆された。

英文抄録(100 words 程度)

To explore the effectiveness of the heat transfer enhancement by fractal roughness which has the same roughness elements at different scales, we performed the direct numerical simulation of turbulent heat transfer over walls roughened by multi-scale roughness elements. The roughness increases the heat and momentum transfer leading to the enhancement of the skin friction and heat transfer rate; however, the augmentation of the heat transfer is generally smaller than that of the skin friction. However, it is found that the multi-scale roughness yields more ideal heat transfer performance than the single scale roughness; that is, the multi-scale roughness leads smaller drag increasing but larger heat transfer enhancement. This suggests that the fractal roughness has high heat transfer performance.

*Keywords:* rough wall, turbulent heat transfer, lattice Boltzmann method, direct numerical simulation, fractal structure.

## 背景と目的

壁面上に粗さを設置することで、壁面に接する流れの混合を促進させることができ、運動量・熱輸送を飛躍的に向上させることが可能である。とりわけ、熱輸送の向上を目的として、伝熱機器に粗さを設置する取り組みが盛んに行われてきた。粗さを有する壁面(粗面)の伝熱に関しては、実験研究が古くから行われており、様々な粗さ構造による伝熱促進技術が数多く提案されてきた。しかし、実験的な研究では 3 次元的速度場・温度場の時空間データを取得することは困難であり、粗さを有する壁面を用いた伝熱促進メカニズムに関しては十分に理解されていない。また、粗面の熱伝達率の予測式に関しても、数多くの経験式が提案されているものの、未だに粗さ構造と熱伝達率の関係を汎用的に予測する方法は見つかっていない。

いっぽう、近年のスーパーコンピューティング技術

に進歩に伴い、粗面近傍の乱流熱伝達の直接的な数値解析が現実味を帯びてきた。しかし、依然として、粗面近傍の乱流熱伝達をシミュレーションするには非常に膨大な計算コストが要求されるため、その実施例は極めて少ない。本研究では、格子ボルツマン法を支配方程式として、複数GPUを用いた並列計算に特化した乱流熱流動解析プログラムを開発し、粗面熱流動の直接的な数値解析を実施した。本プロジェクトでは、複数スケールの自己相似構造を有するフラクタル構造に着目し、フラクタル構造が有するマルチスケール性が乱流熱流動に与える影響を詳細に調査する。マルチスケール粗面の乱流熱輸送現象を詳細に理解するとともに、フラクタル構造を利用した新たな伝熱促進デバイスの検討を行うことを目的とした。

概要

壁面に設置された粗さは流体の混合を促進させ、運動量・熱・物質輸送を大幅に増大させることが知られており、人工的な粗さを設置することで伝熱機器の性能を向上させる取り組みが古くから行われてきた。本研究では特に複数スケールの粗さ要素を持つフラクタル構造に着目し、マルチスケール粗さが乱流熱流動に与える影響を調査する。対象とした計算系と粗さ構造をそれぞれ図1、図2に示す。解析は2次元平板チャンネルの半分の計算領域を持つオープンチャンネル流を対象とし、スパン方向 $L_z = 3L_y$ 、主流方向 $L_x = 6L_y$ の計算ボックスを使用した。主流方向に圧力勾配を付与することで流体を駆動し、上面はフリースリップ境界条件、主流・スパン方向には周期境界条件を適用する。熱的境界条件として、上面は断熱条件、粗面は等温冷却条件とし、流体には一様発熱を与えた。流体は空気を想定し、プラントル数を0.71とした。

摩擦レイノルズ数は150, 300, 600の3ケースとした。対象とした粗面は図2に示す3ケースであり、半球を等方的に配置した mono6k (図2a) を基本として、multi6k (図2b) は mono6k の構造に 1/2 スケールの半球を敷き詰めた粗面である。また、mono3.46k (図2c) は単一スケールの半球を用いて、multi6k と同等の表面積を持つ粗面である。

乱流熱伝達の解析は乱流モデルを使用しない直接数値解析であり、壁面近傍の微細な乱流変動も全て格子解像可能な格子幅を設定し、計算格子数は最大で4.6億点となった。計算プログラムは,Cuda Fortran で記述されており、複数 GPU を用いた並列計算を行った。

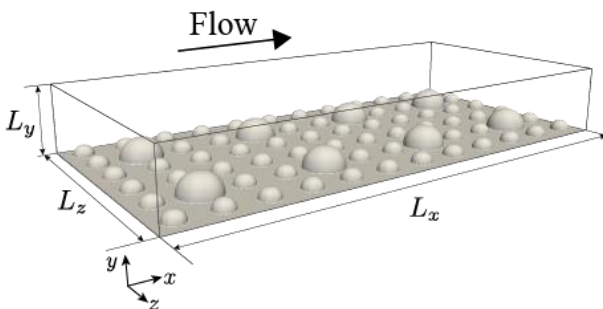


図1 粗面オープンチャンネル流れの計算領域

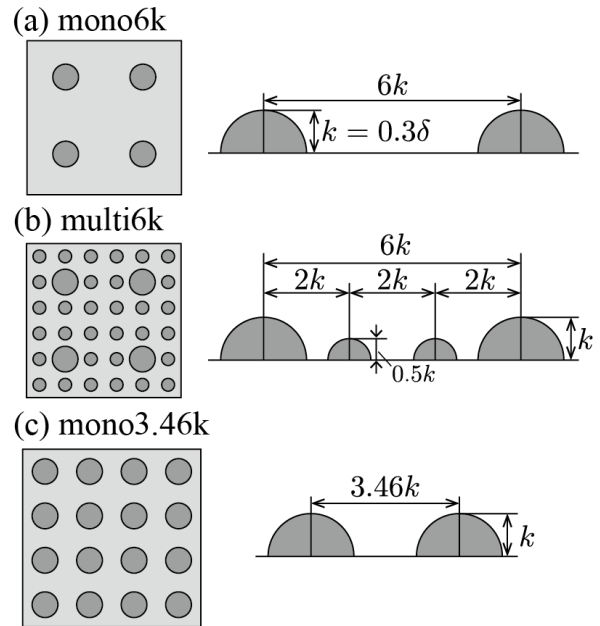


図2 対象とした粗面形状: (a) 単一スケール粗さ, (b) マルチスケール粗さ, (c) 粗面(b)と同様の表面積を有する単一スケール粗さ。

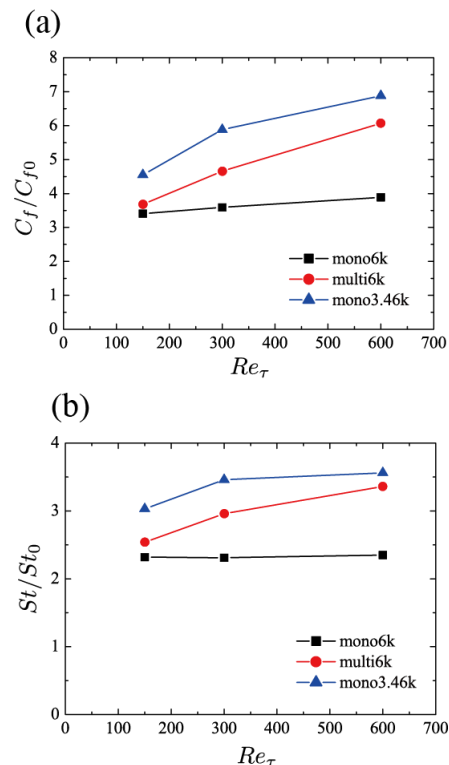


図3(a) 壁面摩擦係数の増大率, (b) スタントン数の増大率

結果および考察

粗さによる運動量・熱輸送の増大を評価するために、粗面の壁面摩擦係数 $C_f$ 、スタントン数 $St$ を滑面

の値( $C_{f0}, St_0$ )で除した結果を図4に示す. すべてのケースにおいて, 壁面摩擦係数, スタントン数は粗さによって増大していることが確認できる. 粗さ要素が最も疎に並ぶケースである mono6k は増大率が一番低く, 単一スケールで密な配置である mono3.46k が一番高い値を示している. multi6k は mono6k, mono3.46k の中間に位置しており, 摩擦レイノルズ数が低いケースでは mono6k の結果に近く, 摩擦レイノルズ数が高いケースでは mono3.46k に近い結果が得られていることが分かる. これは, レイノルズ数が低いケースでは, サブスケールの半球粗さが粘性底層内に埋もれてしまい, 運動量・熱輸送の増大に大きく寄与しないのに対して, レイノルズ数が高いケースでは, 相対的に粘性底層が薄くなるために, サブスケール粗さであっても粘性底層を超えて, 輸送現象の増大に対して有効であるからであると考えられる.

次に, 摩擦係数とスタントン数の比であるレイノルズアナロジーファクター  $RA = 2St/C_f$  を図4に示す. 滑面乱流においては,  $RA_0 = Pr^{-2/3}$  となることが知られており, プラントル数が1の時には, 運動量・熱輸送の間には強い相似性が見られ  $RA_0 = 1$  となる. しかし, 図4から分かるように, 粗面乱流のケースでは滑面の値と比べて非常に小さく, 運動量輸送における粗さ効果が, 熱輸送における粗さ効果と比べて, 大きいことを意味している. 言い換えると, 壁面粗さは, 熱伝達率よりも壁面摩擦係数をより増加させる効果がある. 図より, この非相似的なふるまいは, 摩擦係数の増大率  $C_f/C_{f0}$  が大きくなるに従って, より顕著になることが分かる. しかし, 表面積の増大率の等しい multi6k, mono3.46k は, mono6k に比べて,  $C_f/C_{f0}$  に対する  $RA$  の値が大きく, より理想的な伝熱促進が可能であることが分かる.

これらの結果より, 表面積の増大率の大きい粗面ほど, 理想的な伝熱促進が可能であることが分かる. つまり, よりフラクタル次元の高い構造粗さにすることで, 効果的に表面積を増大させ, 理想的な伝熱促進が可能であることが示唆される.

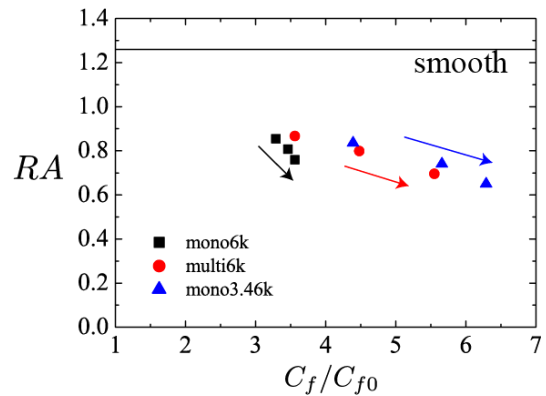


図4 レイノルズアナロジーファクター

#### まとめ、今後の課題

フラクタル構造を持つ粗さによる伝熱促進法の可能性を検討するために, フラクタル構造に特徴的なマルチスケール性が乱流熱伝達に与える影響を直接数値解析によって調査した. その結果, 比表面積の大きな粗面は, 少ない流動抵抗増で大きな熱伝達促進をもたらすことが分かり, 表面積の大きなフラクタル構造粗さが理想的な伝熱促進法である可能性が示唆された. 今後は, 実際のフラクタル構造に近い構造粗さを用いた検討を行う.

#### 参考文献

- [1] K Suga, Y Kuwata, K Takashima, R Chikasue, Computers & Mathematics with Applications 69 (6), 518-529.
- [2] K Suga, R Chikasue, Y Kuwata, International journal of heat and fluid flow 68, 225-236.