TSUBAME 共同利用　令和元年度　学術利用　成果報告書

# 利用課題名　ボルテックスジェネレータ周りの熱流動直接数値解析
英文：Direct numerical simulation of turbulent heat transfer over a surface with vortex generators

利用課題責任者 ： 桑田　祐丞
First name Surname：Yusuke　Kuwata

所属：大阪府立大学
Affiliation：　Osaka Prefecture University
URL：　http://www2.me.osakafu-u.ac.jp/htlab/

邦文抄録（300 字程度）
ボルテックスジェネレータを代表とする人口粗さによる運動量・熱輸送の増大効果を調べるために，半球粗面乱流熱伝達の直接数値解析を行った．解析の結果，粗さによって運動量・熱輸送ともに増大するが，運動量輸送の増大効果は熱輸送の増大効果に比べて大きくなることが明らかになった．この運動量・熱輸送の非相似性は粗さによる運動量輸送の増大効果が強く表れるほど顕著にみられた．半球個数が一定の場合，スパン方向の半球間隔が短い粗面において，非相似性が強く表れるいっぽうで，主流方向の間隔の短い粗面では非相似性は弱く，少ない摩擦抵抗増で効率的に熱輸送効果を高められることが明らかになった．

英文抄録（100 words 程度）
Direct numerical simulations of turbulent heat transfer over surfaces with hemispheres are conducted to discuss the augmentation of the momentum and heat transfer due to the wall-roughness. The results show that the momentum and heat transfer is enhanced due to the wall-roughness; however, the enhancement of the momentum transfer is larger than that of the heat transfer. This dissimilarity is found to be more substantial as the augmentation of the momentum transfer increases. When the roughness density is fixed, the dissimilarity is substantial for the surface with narrower spanwice spacing between the neighboring spheres while it is less substantial for the surface with narrower streamwise spacing.

*Keywords: vortex generator, lattice Boltzmann, heat transfer, turbulence, direct numerical simulation*

## 背景と目的
ボルテックスジェネレータを始めとする人口粗さは運動量や熱輸送を活発化させることが知られており，近年ではボルテックスジェネレータを用いた積極的な熱流動制御が盛んに行われている．しかしボルテックスジェネレータの形状・配置には多くの組み合わせが存在し，運動量や熱輸送の増大効果に多大な影響を与えるが，実験的な形状・配置の最適化には多大なコストを要するうえに，ボルテックスジェネレータをすべて格子解像してシミュレーションを行うのも工学的には現実的とは言えない．そこで本研究では，複数 GPU 並列された格子ボルツマン法コードを用いて，比較的少ない解析コストでボルテックスジェネレータを模した半球粗面の直接的な熱流動解析を行う．半球の個数や配置を系統的に変えた解析を行うことで，ボルテックスジェネレータの効率的な設置方法を模索するとともに，熱輸送や運動量輸送の増大メカニズムを明らかにする．本解析によって，半球個数が一定の場合，スパン方向の半球間隔が短い粗面では運動量輸送が熱輸送に比べて大きく増大することが分かった．いっぽうで，主流方向の間隔の短い粗面では，少ない摩擦抵抗増で効率的に熱輸送効果を高められることが明らかになった．

## 概要
近年の数値解析・実験技術の進化により，高度な流体制御が可能になりつつある．その1つであるボルテックスジェネレータは，航空機・自動車などの空力性能の向上のために使用されるほか，内燃機関のシリンダー内や熱交換器内部の熱流動を制御する方法としての応用が期待されている．工学的には，

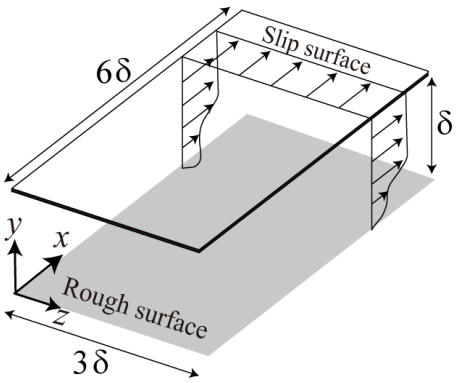


図1　粗面オープンチャネル流れの解析系

乱流モデルを用いて，複数のボルテックスジェネレータの並ぶ壁面での熱流動を低コストに予測することが求められるが，ボルテックスジェネレータの配置や個数が熱流動場に与える影響などに関しては十分に理解されているとは言えない．本研究では，格子ボルツマン法を用いて，ボルテックスジェネレータを模した半球粗面乱流の熱流動解析を行う．解析系は図1に示すように，2次元平行平板チャネルの半分の領域となっており，下壁には半球を千鳥配置した粗面，上面には滑り壁条件とした．下壁に敷き詰めた半球粗面は滑りなし条件・等熱流束加熱条件を与えている．主流（x）・スパン方向(z)には周期境界条件としており，主流方向に圧力勾配を付与することで流体を駆動した．半チャネル幅と摩擦速度を基にしたレイノルズ数で660として解析行った．また，流体には空気を仮定しプラントル数0．71として．計算格子数は解析ケースによって異なるが3～6億点である．対象とした半球粗面は図2に示すように，半球個数を一定として半球を千鳥配置した粗面で，スパン方向と主流方向の半球ピッチを変更させた4つのケースで解析を行った．速度場の解析には3次元27方向速度多緩和時間格子ボルツマン法[1]を用い，温度場の解析には3次元19方向速度正規化格子ボルツマン法[2]を用いた．

結果および考察

瞬時の温度を可視化した結果を図3に示す．下壁近傍では，壁乱流特有の主流方向に伸びたストリーク構造と半球によって生じる乱れが混在した様子が分かる．下壁近傍には，非常に微細な乱流変動も計算格子によってとらえられており，非物理的な数値振動なども見られないことが確認できる．

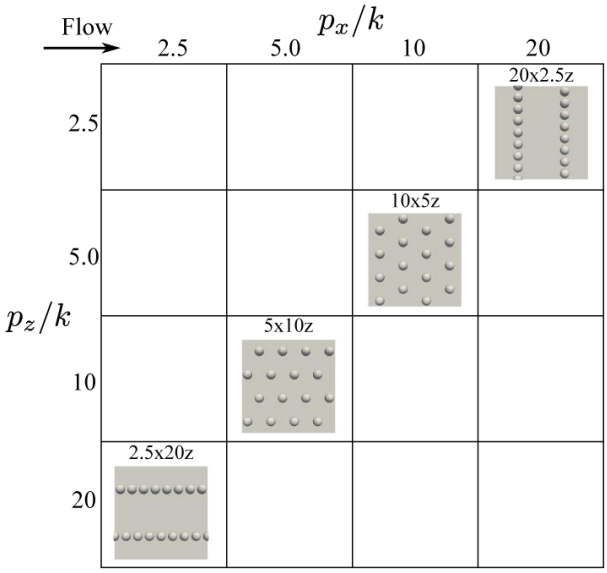


図2　ボルテックスジェネレータを模した半球を千鳥配置した粗面．半球個数は一定で，主流・スパン方向の半球間隔を変えている．

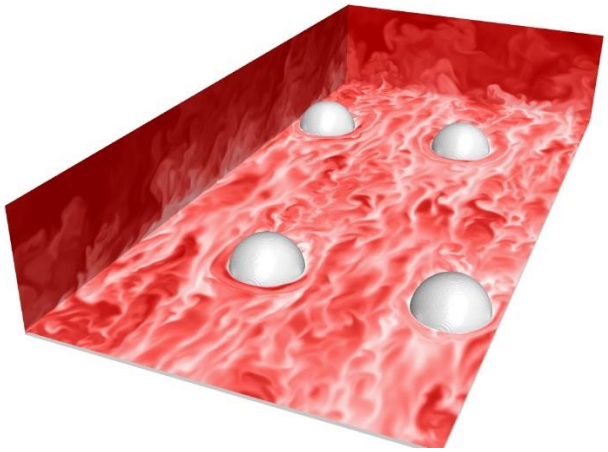

図3　半球粗さ粗面の瞬時温度の可視化結果．粗面は一様等熱流束で加熱されており，白は高温領域，赤は低温領域を示す．

次に粗面による運動量と熱輸送の増大効果を調査するために，ボルテックスジェネレータを設置することによる壁面摩擦係数の増大率を図4，スタントン数の増大率を図5にしめす．これらの結果から，ボルテックスジェネレータを設置することで，壁面摩擦係数・スタントン数ともに増大しており，運動量・熱輸送が増大したことが分かる．しかし，どのケースにおいても，壁面摩擦係数の増大効果はスタントン数の増大効果に比べて大きく，運動量の増大効果は熱輸送の増大効果に比べて大きいことがわかる．この運動量と熱輸送の非相似性は，スパン方向の半球間隔が狭いほど顕著に表れている．主流方向の半球間隔の短い粗面では，摩擦係数の増加率をスタントン数の増加率で除した値が1．4倍であるのに対して，スパン方向の半球間隔の短い粗面では2．4倍になっている．つまり，主流方向の間隔の短い粗面では，少ない摩擦抵抗増で効率的に熱輸送効果を高められることを意味している．

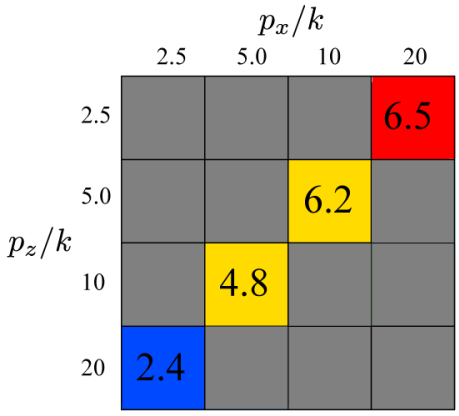


図4　滑面と比較した壁面摩擦係数の増大率．

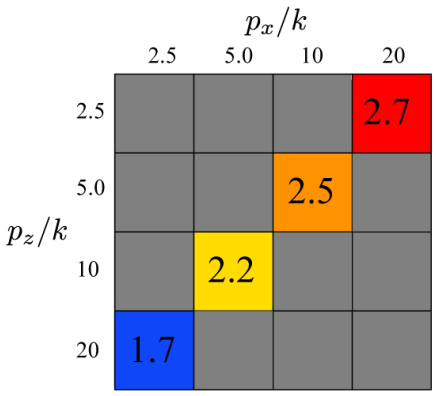


図5　滑面と比較したスタントン数の増大率．．

まとめ、今後の課題

格子ボルツマン法を用いてボルテックスジェネレータを模した半球粗面乱流熱流動の直接数値解析を行った．半球個数を固定した場合においても，半球の配置によって運動量と熱輸送の増大効果は大きく異なることが分かった．とくに，主流方向の間隔の短い粗面では，少ない摩擦抵抗増で効率的に熱輸送効果を高められることが明らかになった．

参考文献

［1］Suga, K., et al. *Computers & Mathematics with Applications* 69.6 (2015): 518-529.

［2］Suga, K. et al., *International Journal of Heat and Fluid Flow* 68 (2017): 225-236.