TSUBAME 共同利用　令和6年度　学術利用　成果報告書

利用課題名　直接数値解析による非相似伝熱制御の検討
英文：Direct numerical simulations on the dissimilar turbulent heat transfer

利用課題責任者
桑田　祐丞

所属
大阪公立大学　工学研究科
URL：https://www.omu.ac.jp/eng/htlab/

ケルビンヘルムホルツ（K-H:Kelvin-Helmholtz）不安定波誘起の大規模渦を利用した伝熱促進に関する検討を直接数値解析によって行った．本研究では，K-H 不安定波に起因する乱流構造を発達させるために，流れの方向に沿って規則的に並ぶリブ列を壁面上に設置し，リブ列の間隔やレイノルズ数を変化させて熱流動場の特性を調査した．その結果，リブ列の上部には，K-H 不安定波に起因した大規模渦が発達し，摩擦係数とスタントン数の比で現れるレイノルズアナロジファクタは1を大きく超えて，理想的な非相似伝熱状態が実現できることを確認した．また，レイノルズアナロジファクタはバルク平均速度とリブ頂点の面平均速度の比を用いてスケーリングすることができることが明らかとなった．

We discussed the dissimilar heat transfer control by the large-scale turbulence structure associated with the Kelvin-Helmholtz instability by means of direct numerical simulations. We considered a channel with the streamwise-aligned regularly distributed rib array to trigger the K-H instability and discussed the effects of the Reynolds number and rib separation on the turbulent heat transfer. The results show that the rib arrays allow the development of the large-scale turbulence structure associated with the K-H instability leading to the favorable breakdown of the Reynolds analogy. It is also found that the Reynolds analogy factor can be reasonably scaled by the ratio of the plane-averaged velocity at the rib crest to the bulk mean velocity.

Keywords: Direct numerical simulation, rib roughness, Reynolds analogy, Lattice Boltzmann method, Kelvin-Helmholtz instability

背景と目的

熱交換器等の伝熱機器の性能向上のために，伝熱面に人工的な粗さを設置する取り組みが盛んに行われてきた．伝熱面に設置した粗さは，伝熱面積を増やす効果の他に，伝熱面近傍の乱流の強化や平均流の蛇行による流体混合を促進し，熱伝達を向上させる．一方，粗さは熱伝達率のみならず摩擦係数を増大させ，摩擦係数の増大率は熱伝達率の増大率を上回ることも報告されている．一方，Kuwata[1]は主流方向に並ぶリブ列を伝熱面に設置することで，熱伝達率の増大率が摩擦係数の増大率を上回る理想的な伝熱制御が可能であることを直接数値解析によって示した．また，熱・運動量輸送の非相似性は，ケルビンヘルムホルツ不安定波誘起の乱流に起因していることを示した．しかし，リブの幾何的な形状やレイノルズ数が熱・運動量輸送の非相似性に与える影響は十分に理解されていない．そこで，本研究では，リブ間隔とレイノルズ数が熱伝達率や摩擦係数に与える影響を直接数値解析によって調査を行った．その結果，ケルビンヘルムホルツ不安定波誘起の大規模乱流構造が顕著になるケースで熱・運動量輸送の非相似性が最大となり，非相似性の強さは，バルク平均速度とリブ頂点の面平均速度の比を用いてスケーリングすることができることが明らかとなった．

概要

ケルビンヘルムホルツ不安定波に起因する大規模渦を誘起することで，流動抵抗の増加を押さえつつ高い伝熱促進効果をもたらす非相似伝熱制御の検討を行う．本研究では，ケルビンヘルムホルツ不安定性に起因する大規模渦を誘起するために，主流方向に並ぶリブ列を用いる．数値解析手法には密度分布関数とエネルギ分布関数の2つの分布関数を解く格子ボルツマン法を用いる．リブ列の間隔を変えた複数のケースに対して，直接数値解析を実施することで，大規模渦の

特性や，運動量・熱輸送の非相似的な挙動について議論を深める．

対象とした流れ場は図 1 に示すリブ付きオープンチャネルである．上面は断熱のすべり壁とし，下壁には主流方向に並ぶ縦リブ列を考える．リブ列上部の流体領域の高さH_cに対して，リブの高さ$h = 0.67H_c$，リブ幅$w = 0.05H_c$とし，リブ間隔$s/w = 1, 1.5, 4, 9, 24$の 5 種類のリブ列を対象とした．リブ列頂点の位置における摩擦速度によって定義された摩擦レイノルズ数を 180, 500 とした．プラントル数は 1 として，浮力や温度変化に伴う物性値の変化を無視した非圧縮の流体を考えた．リブ表面と下壁は等温条件，流体には一様発熱を与えた．主流方向・スパン方向には周期境界条件を用い，主流方向・スパン方向の領域サイズはそれぞれ$8H_c$，$6H_c$として十分大きな計算領域を確保した．

数値解析手法に関しては，速度場は27方向速度多緩和時間格子ボルツマン[(2)]を用い，温度場には19方向速度正規化格子ボルツマン[(3)]を用いた．計算格子は立法格子を用い，リブ列近傍の格子幅は乱流渦の最小スケールであるコロモゴロフスケールと同程度となるように設定した．リブ列から離れた領域では，不均衡修正局所細密格子法[(4)]を用いて，粗い計算格子を設定した．総格子点数は摩擦レイノルズ数 500 のケースで約 7.6 億点となった．並列化には領域分割法を採用し，領域ごとに割り当てられた GPU によって解析を行った．

結果および考察

乱流構造について議論する為に，図2にリブ頂点近傍の主流方向の乱流変動速度を示す．リブ列上では，主流方向に伸びる高速・低速ストリーク構造が明確にみられないが，リブ間隔が最も狭い時には，主流方向に伸びた微細な乱流変動速度が観察される．リブ間隔が広がるにつれてスパン方向につながった乱流構造が出現し，主流方向には低速・高速領域が交互に現れる．

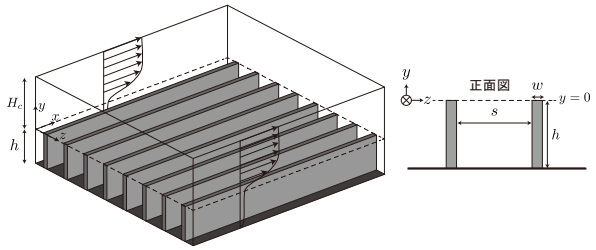

図1　リブ列を有するオープンチャネル．

このような乱流構造は，多孔質体や植生流れなどで見られるケルビンヘルムホルツ不安定波に起因した大規模構造であると考えらえる．この構造は，リブ間隔が$s/w = 4$となる時に最も顕著に表れる．さらにリブ間隔

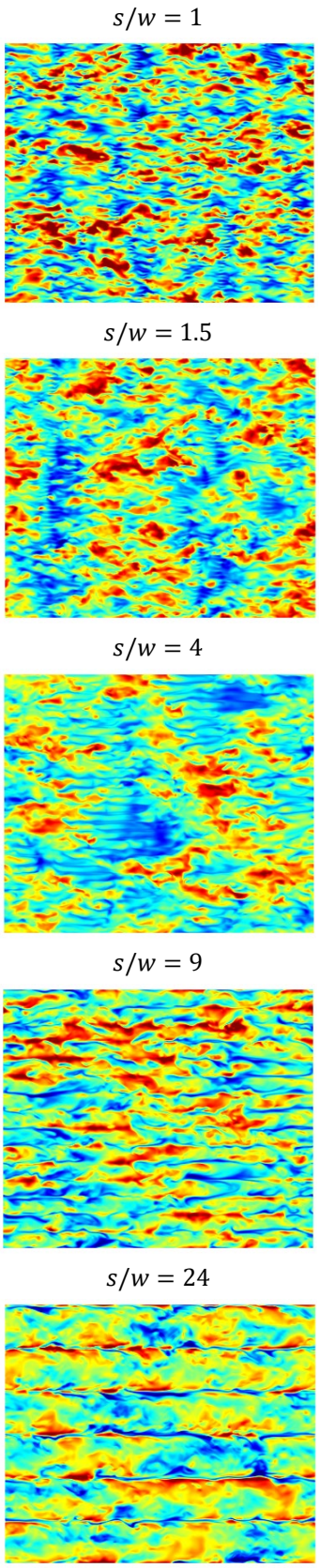

図2 リブ頂点付近の x−z 面の主流乱流変動速度．

が広がると，スパン方向の繋がりは消滅し，リブ列に沿って主流方向に伸びた乱流変動速度が観察される．リブ列の間隔が最も広いケースにおいては，この傾向が特に顕著であり，リブ壁面で発達した乱流境界層に伴う乱流変動が観察される．

次に，熱・運動量輸送の非相似性について議論する為に，スタントン数と摩擦係数の比で表されるレイノルズアナロジファクタを調べる．レイノルズアナロジファクタは，熱・運動量輸送の相似性が成立する平滑面乱流では 1 となり，熱輸送が運動量輸送を上回ると 1 を超え，下回ると 1 より小さな値を取る．図 3 にレイノルズアナロジファクタRAを縦軸に，滑り速度パラメータF_sを横軸としてプロットする．F_sは，バルク速度U_bとリブと流体領域の界面速度U_sとの比を用いて$F_s = U_s/U_b$として定義する．また，参照データとして摩擦レイノルズ 300 の文献データ[(1)]もプロットしている．図より，レイノルズアナロジファクタはすべてのレイノルズ数・リブ間隔において，1を超えており，熱輸送が運動量輸送を上回る理想的な非相似状態が実現できていることが分かる．また，レイノルズアナロジファクタの大きさはリブ間隔やレイノルズ数に強く依存するが，滑り速度パラメータを用いておおむねスケーリング可能であることが分かる．滑り速度パラメータが 0 の値から上昇するにつれて，アナロジファクタは増大し，熱・運動量輸送の非相似性が強くなる．アナロジファクタは，滑り速度パラメータが 0.3 付近で最大値を取り，滑り速度パラメータがさらに上昇すると，アナロジファクタは減少する．リブ間隔が最も大きいケースでは，滑り速度パラメータも増大し，アナロジファクタは再び1程度の値となる．これらの結果より，滑り速度パラメータが 0.3 付近で，熱輸送が運動量輸送を上回る最も理想的な伝熱制御が可能であることが分かった．このケースはリブ間隔が$s/w = 4$となるケースに対応しており，ケルビンヘルムホルツ不安定波に由来する大規模渦が最も顕著にみられるケースと対応する．よって，輸送が運動量輸送を上回る非相似状態は，ケルビンヘルムホルツ不安定波に由来する大規模渦に起因して現れることが示唆された．

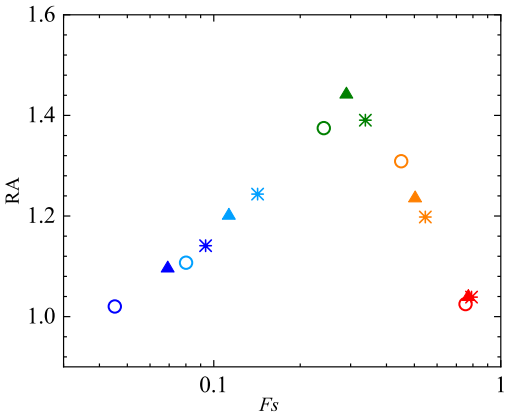

図 3 レイノルズアナロジファクタ．

まとめ、今後の課題

ケルビンヘルムホルツ不安定波誘起の大規模渦を利用した伝熱促進に関する検討を直接数値解析によって行った．その結果，リブ列の上部には，ケルビンヘルムホルツ不安定波に起因した大規模渦が発達し，摩擦係数とスタントン数の比で現れるレイノルズアナロジファクタは1を大きく超えて，理想的な非相似伝熱状態が実現できることを確認した．非相似伝熱は，大規模乱流構造によって引き起こされることが示唆され，非相似伝熱の強さを表すレイノルズアナロジファクタはバルク平均速度とリブ頂点の面平均速度の比を用いてスケーリングすることができることが明らかとなった．

参考文献

(1) Y Kuwata , “Dissimilar turbulent heat transfer enhancement by Kelvin–Helmholtz rollers over high-aspect-ratio longitudinal ribs”, *Journal of Fluid Mechanics* **952**, A21 (2022).

(2) K Suga, Y Kuwata, K Takashima, R Chikasue, “A D3Q27 multiple-relaxation-time lattice Boltzmann method for turbulent flows”, *Computers & Mathematics with Applications* **69** (6), 518-529 (2015).

(3) K Suga, R Chikasue, Y Kuwata, “Modelling turbulent and dispersion heat fluxes in turbulent porous medium flows using the resolved LES data”, *International Journal of Heat and Fluid Flow* **68**, 225-236 (2017).

(4) Y Kuwata, K Suga , “Imbalance-correction grid-refinement method for lattice Boltzmann flow simulations”, *Journal of Computational Physics* **311**, 348-362 (2016).