

TSUBAME 共同利用 令和7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円管内強制対流の非相似伝熱制御の検討

英文: Direct numerical simulations of turbulent forced convection through a pipe on dissimilar heat transfer control

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不安定波に起因する大規模渦を円管内で誘起することで、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直接数値解析によって行った。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、主流方向に並ぶ溝列を用い、溝の幾何的な形状の影響を主に調査した。溝列は熱伝達率・摩擦係数を増大させるが、熱伝達率の増大率は摩擦係数の増大率を上回り、熱・運動量の好都合な非相似伝熱状態を実現できることが分かった。また、溝列の幅・深さが摩擦係数・熱伝達率に与える影響は異なり、熱・運動量の非相似性の強さに影響を及ぼすことが分かった。

Direct numerical simulations of turbulent heat transfer in a pipe were conducted to investigate favorably dissimilar heat transfer enhancement induced by large-scale perturbations associated with the Kelvin–Helmholtz instability. Streamwise-aligned grooves were introduced, and the effects of groove geometry on turbulent heat transfer were examined. The results show that the grooves increase both the skin friction coefficient and the heat transfer rate; however, the heat transfer enhancement exceeds the friction resistance increase, resulting in favorably dissimilar heat transfer enhancement. The effects of groove geometry (groove width and height) on the skin friction coefficient differ from those on the heat transfer rate, indicating that the groove geometry influences the dissimilarity between heat and momentum transport.

Keywords: Direct Numerical Simulation, Turbulent Heat Transfer, Lattice Boltzmann Method, Dissimilar Heat Transfer Enhancement, Kelvin-Helmholtz Instability

背景と目的

ケルビンヘルムホルツ(K-H: Kelvin-Helmholtz)不安定波に誘起される大規模乱流変動は、流体混合を大幅に促進させることが知られている。K-H不安定性は平均速度分布の変曲点から発生する不安定性であり、透過壁や粗面壁に発達する乱流境界層において存在が報告されている。K-H不安定性によって誘起される大規模な乱流変動は運動量輸送に比べて、特に熱輸送を増大させ、運動量・熱輸送の好都合な非相似性を実現することが報告されている⁽¹⁾。一方、大規模変動はチャンネル乱流や境界層流れで発達することが確認されているが、空間的な制約のある円管流における大規模変動の特性については理解されていない。また、透過壁の特性と大規模乱流変動との相関関係についても十分に理解されていない。

本研究では、シェル&チューブ型の熱交換機等に用いられる円管内の乱流熱伝達を対象とし、円管壁面に

溝列を設置することでK-H不安定性に起因する大規模乱流変動を誘起させ、好都合な熱・運動量輸送の非相似制御の可能性を検討する。さらに、溝列の幾何形状が熱・運動量輸送特性に与える影響を調査する。

概要

円管内部にK-H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、K-H不安定性に起因する大規模渦を誘起するために、主流方向に並ぶ溝列を円管壁に設置する。数値解析手法には密度分布関数とエネルギー分布関数の2つの分布関数を解く格子ボルツマン法を用いる。溝列の間隔や高さを変えた複数のケースに対して、直接数値解析を実施し、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に示す溝列付き円管とした。

本研究では、内壁 ($r = R_i$) の溝間隔 g_s を固定し、溝形状の異なる2種類の溝タイプ(図2)を考える。一方の溝タイプは溝幅が半径方向に一定と ($g = g_i$) となるよう設定し(図2右)、もう一方は溝幅が深さに対して線形変化 $g = g_i r / R_i$ する形状(図2左)を考える。それぞれの溝に対して、溝幅 g_i と溝深さ h を変えた解析を実施した。溝幅は $g_i/g_s = 1, 1.5, 4, 9$ と4通り、溝高さは $h/R_i = 0.11, 0.22, 0.44, 0.66, 1.0, 2.0$ と5通り変えた合計40通りの溝形状を調査した。流体のプラントル数は1とし、浮力の影響を無視した非圧縮流体を考え、溝壁面は等温冷却、流体には一様発熱を加えた。溝の無い円管領域の半径 R_i 、内壁上 ($r = R_i$) の摩擦速度をもとにした摩擦レイノルズ数は180に固定し、円管長さは直径の5倍となるよう設定した。計算格子は、円管の直径に対して216格子を用いており、事前検証により、本解析条件は円管内乱流の文献結果を再現できることを確認した。解析手法に関して、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。解析には立法等間隔格子を用い、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設定した。分布関数の壁面境界条件は、線形補間を用いた跳ね返り条件によって与え、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。

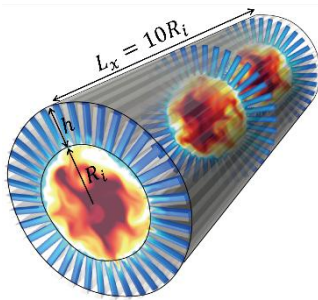


図1 溝付き円管の計算系

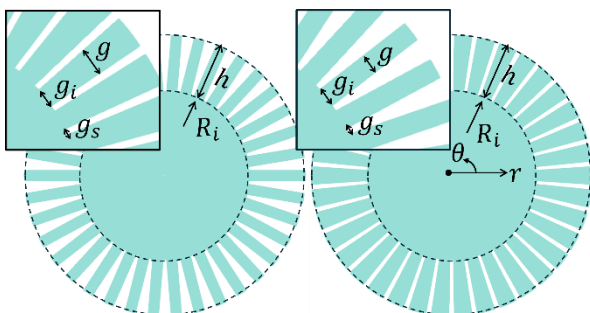
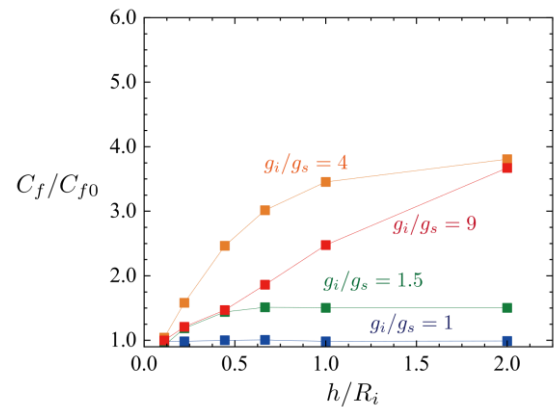


図2 対象とした2種類の溝形状

結果および考察

溝列の幾何形状がバルクの熱流動特性に与える影響を明らかにするために、流動抵抗に関連する無次元数である壁面摩擦係数 C_f 、熱伝達率の無次元数であるスタントン数 S_t の増大率を図3に示す。図中の C_{f0} と S_{t0} はそれぞれ溝列が無い円管内乱流の結果を表す。壁面摩擦係数とスタントン数は内壁 ($r = R_i$) の総応力・総熱流束を用いて定義し、バルク速度・バルク温度は溝の無い円管領域 ($0 < r < R_i$) で評価した。ここでは、溝幅一定 ($g = g_i$) の結果を示す。図3より、 g_i/g_s が1から4に増大すると、 C_f と S_t の両方が増加するが、溝幅がさらに増大すると、 C_f と S_t は減少に転じることが明らかとなった。また、溝が深くなるにつれて、 C_f と S_t の増大率も増えることが分かった。溝幅が広いケース ($g_i/g_s = 4, 9$) においては、溝の深さが円管半径の1~2倍となる深溝の場合においても、溝の深さの影響が顕著に表れることが分かった。

(a)



(b)

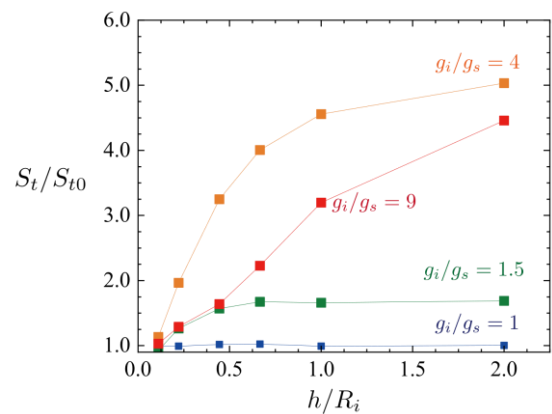


図3 (a)摩擦係数増大率, (b)スタントン数増大率

次に、図4に非相似伝熱の大きさを表す指標であるレイノルズアナログファクタ $RA = 2S_t/C_f$ を示す。プラントル数1の溝無しの場合では、熱・運動量輸送の相似性が成立し $RA = 1$ となる。一方、熱輸送が運動量輸送を上回る好都合な非相似では $RA > 1$ となり、熱輸送が運動量輸送を下回る場合は $RA < 1$ となる。図4より、いずれの溝形状のタイプにおいても、 RA は1を超えており、溝による熱伝達の増大効果が流動抵抗の増大効果を上回っている好都合な非相似伝熱状態が実現できていることが分かる。特に、溝幅 ($g_i/g_s = 4$) では好都合な非相似性が最も顕著に表れ、 $RA = 1.35$ に達している。溝深さの影響に関して、溝深さが円管半径より小さい ($h/R_i < 1$) 時、 RA は溝が深くなるにつれて増大するが、溝深さが円管半径を超える場合 ($h/R_i > 1$) では、その増大効果が弱まる。図4 (b)の溝幅が深さに対して線形変化する形状では、溝幅が広いケース ($g_i/g_s = 9$) において、溝の深さが円管半径の1~2倍となる深溝の場合において RA が急激に減少する傾向が見られる。これは溝領域における流速の減少が十分では無く、K-H 不安定性の必要条件である速度分布の変曲点が顕著にみられず、K-H 不安定性に起因する大規模渦が弱められた結果であると考えられる。

最後に、K-H 不安定性に起因する大規模渦の構造を調査するために、図5に溝幅一定 ($g_i/g_s = 4$) のケース (RA が最大となるケース) において、壁面近傍 ($r \approx R_i$) の半径方向速度の乱流変動分布を示す。図5より、主流方向に対して大規模な高速・低速領域が交互に並んでおり、高速・低速領域は半径方向に広がる構造を有していることが分かる。このような乱流構造はチャンネルで見られる K-H 不安定に起因する大規模構造と類似しており、K-H 不安定性に起因する大規模渦が円管内でも発達していると考えられる。主流方向に並ぶ高速・低速領域の間隔は円管半径の3倍程度であり、これは境界層流れにおいて発達する高速・低速領域間隔と同程度である(境界層高さの3~5倍程度)。また、このような大規模渦は RA の小さいケースでは見られないことから、このような大規模乱流変動が非相似伝熱の実現に寄与していると考えられる

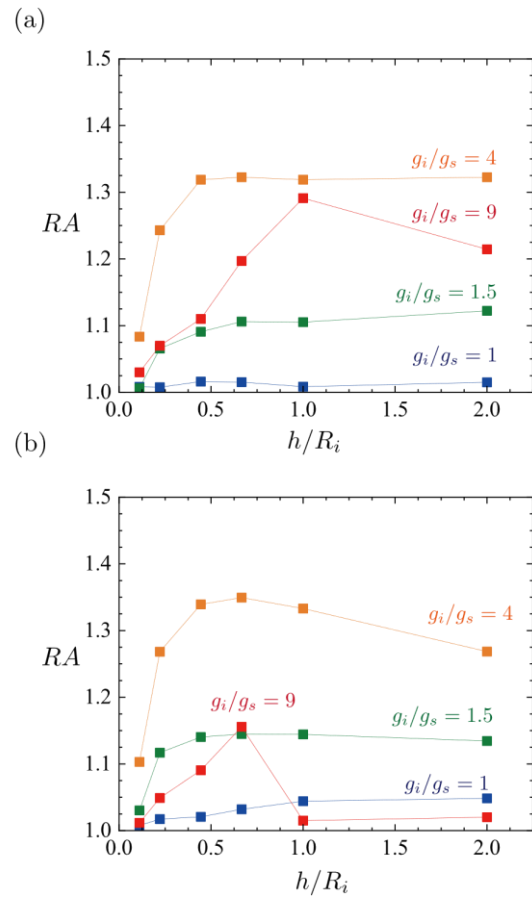


図4 レイノルズアナログファクタ $RA = 2S_t/C_f$. (a) 溝幅一定, (b) 溝幅が線形変化する形状.

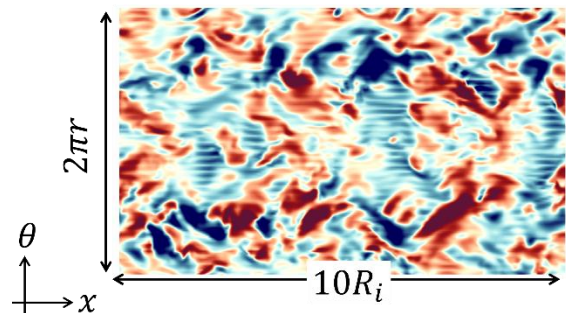


図5 半径方向速度の乱流変動分布

まとめ、今後の課題

K-H 不安定波に起因する大規模渦を円管内で誘起することで、流動抵抗の増加を抑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直接数値解析によって行った。本研究では、K-H 不安定性に起因する大規模渦を誘起するために、主流方向に並ぶ溝列を用い、溝の幾何的な形状の影響を主に調査した。空間的な制約のある円管内流れにおいても K-H 不安定波に起因する大規模渦が発達し、溝列による熱伝達率の増大率は摩擦係数の増大率を上

回り、熱・運動量の好都合な非相似伝熱状態を実現できることが分かった。また、溝列の幅・深さが摩擦係数・熱伝達率に与える影響は異なり、溝深さが円管半径の1～2倍となるような深溝において、熱流動場に与える影響が顕著であることが確認された。

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).