

補助事業番号 2024M-566

補助事業名 2024年度 異種駆動力に基づく波動的運動を用いた非相似な乱流輸送の創出補助事業

補助事業者名 同志社大学 原峻平

1 研究の概要

本補助事業では、省エネルギー技術の開発の一助となる基礎研究として、柔軟薄膜の挿入および超音波照射により、壁乱流に外的な波動的運動を与えることで、運動量輸送と熱輸送の関係が変化することを確認した。柔軟薄膜を用いた実験では、設置位置に応じて壁面摩擦係数とヌセルト数の変化傾向が異なり、熱輸送優位または運動量輸送優位の非相似状態が生じることを示した。超音波照射実験では、条件によって圧力損失を大きく変化させずに伝熱促進が生じる場合があり、熱輸送を選択的に変化させ得る可能性を示した。また、速度場解析から、柔軟薄膜および超音波照射はいずれも壁面近傍の乱流運動を変化させることが分かった。特に、四象限運動の変化が運動量輸送と熱輸送の非相似化に関係することが示唆された。これにより、異なる駆動方法であっても、壁面近傍の組織的乱流運動を改変するという共通の物理を通じて、乱流輸送の非相似性が生じる可能性を明らかにした。

2 研究の目的と背景

乱流輸送の非相似性を制御できる省エネルギー技術は熱交換器を取り扱う産業全般に直接的に利益をもたらす。また、伝熱現象が絡む製造プロセスや環境が関与する産業全体に間接的に利益をもたらす。SDGs等で社会的に要求されている省エネルギー化のこれまでの限界を打ち破るべく、新たな方針のもと乱流制御法が求められている。

本補助事業では、超音波照射を利用した音響流と柔軟薄膜の弾性を活かした乱流変調によって生み出す二つの波動的運動を有した壁乱流の乱流輸送の非相似性を調べ、そこにある共通の物理を探求することを目的とした。

3 研究内容

(<https://ht-lab.doshisha.ac.jp/>)

本研究では、壁乱流における運動量輸送と熱輸送を個別に制御するため、柔軟薄膜の挿入と超音波照射を用いた実験を行った。研究対象として、伝熱板を有する平行平板間流れ、ダクト流れ、および乱流境界層を用い、異なる外的駆動によって壁面近傍の乱流構造がどのように変化するかを調べた。

柔軟薄膜を用いた実験では、平板間隔20 mmの伝熱板付き平行平板間流れを構築し、流路内に柔軟薄膜を挿入した(図1)。柔軟薄膜と伝熱板との距離を変化させながら、高速度カメラとレー

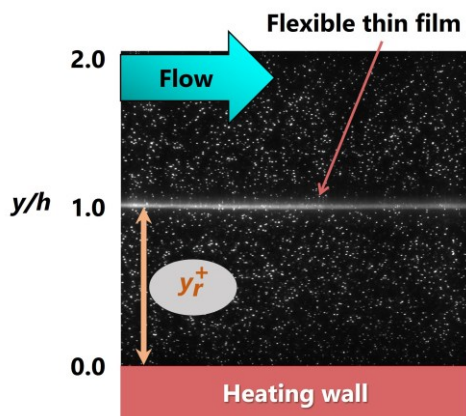


図1: 柔軟薄膜有りの平行平板間流れ.

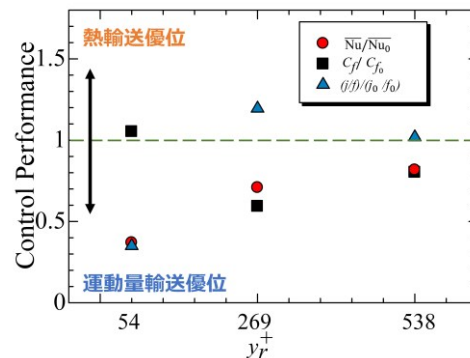


図2: 柔軟薄膜設置位置と非相似促進比の関係.

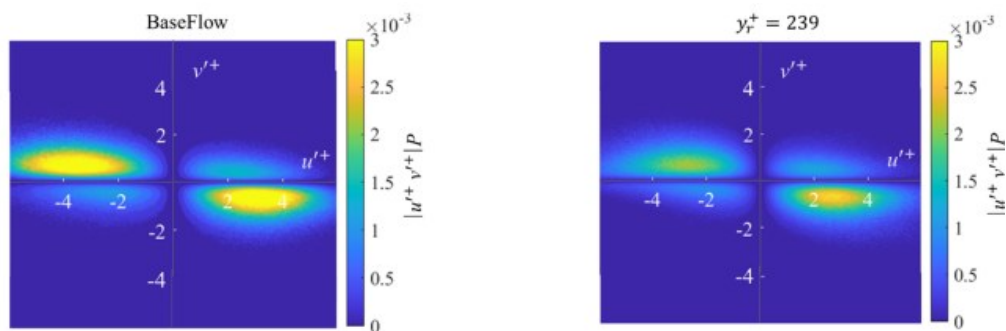


図3: 柔軟薄膜を挿入した平行平板間流れにおける流れ方向および壁面垂直方向の速度変動の重み付き四象限解析. 解析対象は柔軟薄膜近くの変動. 柔軟薄膜の挿入により第二象限(左上の象限)内のコンター強度が顕著に低下していることがわかる.

ザーを用いてトレーサ粒子の動きを撮影し、速度場を測定した。また、平均主流速度分布から壁面摩擦係数を算出し、伝熱板上の熱伝達率と比較することで、柔軟薄膜の設置位置が摩擦抵抗と熱輸送に及ぼす影響を評価した(図2)。取得した速度場に対しては、速度変動のスペクトル解析および四象限解析に基づく条件付き平均を行い、第二象限・第四象限運動などの組織的乱流運動の変化を評価した(図3)。

超音波照射を用いた実験では、最初に水槽中の静止流体に2 MHzの超音波を照射し、音響流が発生することを確認した。次に、平行平板間流れに200 kHzおよび2 MHzの超音波を照射し、レイノルズ数5000から20000の範囲で、圧力損失、熱伝達率、速度場を測定した。さらに、トランスデューサを流路に取り付けるための穴付きアクリル窓を製作し、超音波を流路内へ照射できる実験環境を整えた。また、乱流境界層に対して高周波超音波を照射し、その下流でPIV計測を行った。

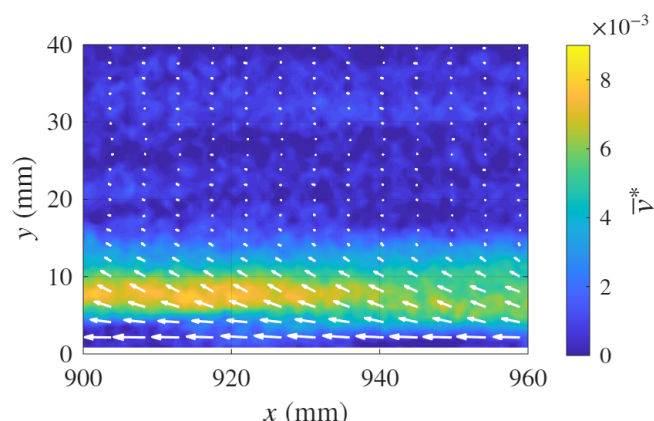


図4: 高周波超音波の有無による乱流境界層の平均速度場. コンターは壁面垂直方向の時間平均速度. ベクトルは照射の有無によって生じた平均速度の差. 超音波照射によって壁面近傍で平均主流方向速度は減速し, 壁から離れると壁面垂直方向に流れが誘起されている.

これにより, 超音波照射によって生じる音響流が, 平均速度分布(図4), 乱れ強度, レイノルズせん断応力に及ぼす影響を調べた. 取得した速度場に対しては, 速度変動のスペクトル解析および四象限解析に基づく条件付き平均を行い, 第二象限・第四象限運動などの組織的乱流運動の変化を評価した.

これらの実験により, 柔軟薄膜の設置位置や超音波照射条件によって, 摩擦抵抗と熱伝達が異なる傾向を示すことを確認した. 特に, 柔軟薄膜を挿入した条件では, 熱輸送が相対的に優位となる場合と, 運動量輸送が相対的に優位となる場合が確認された. また, 超音波照射では, 条件によって圧力損失を大きく変化させずに伝熱促進が生じる可能性が示された. これにより, 異なる駆動方法であっても, 壁面近傍の組織的乱流運動を改変するという共通の物理を通じて, 乱流輸送の非相似性が生じる可能性を明らかにした.

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究では, 柔軟薄膜の挿入および超音波照射により, 壁乱流における運動量輸送と熱輸送を非相似的に変化させ得ることを示した. これは, 従来のように熱伝達を高めると圧力損失も増加するという制約を超え, 必要な輸送だけを選択的に制御する技術につながる成果である. 将来的には, 地域冷暖房, 発電プラント, 熱交換器, 電子機器冷却などにおいて, ポンプ動力の増加を抑えながら伝熱性能を向上させる省エネルギー技術への応用が期待される. また, 製造プロセスにおける伝熱・混合制御にも展開でき, 品質安定化や高効率生産にも貢献し得る. 本研究は, 多様な流動条件に適用可能な乱流制御理論の構築に向けた基礎的成果である.

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

これまでに申請者は, 粘弾性物質を添加した壁乱流では波動的運動によって乱流輸送が非相似となることを突き止め, 波動的運動を模擬した外力を加えた直接数値計算においても非相似な

乱流輸送が観測されることを突き止めている。本補助事業では、波動的運動を作り出すことを念頭に、異なる駆動力を流れ場に与えた結果、非相似な乱流輸送が確認された。これまでの申請者の非相似性に関する知見が今回の成果によって裏付けされた。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

・Shinya Nagino, Hiroya Mamori, Shumpei Hara, Two-point correlation analysis of large-scale structure in a turbulent channel flow installed with the flexible thin film, 1st European Fluid Dynamics Conference (EFDC1), 2024.

・名木野伸矢, 守裕也, 原峻平, チャンネル乱流中に設置した柔軟薄膜の変位速度と乱流運動のスペクトル解析, 第61回伝熱シンポジウム, 神戸, 2024年.

・丸地峻平, 原峻平, 高周波超音波照射による乱流境界層の改変, 日本機械学会関西支部第101期定時総会講演会, 大阪, 2026年.

7 補助事業に係る成果物

該当なし

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 同志社大学理工学部(ドウシシャダイガクリコウガクブ)

住 所: 〒610-0394

京都府京田辺市多久羅都谷1-3

担 当 者: 准教授 原峻平(ハラシュンペイ)

担 当 部 署: 機械理工学科(キカイリコウガツカ)

E - m a i l: shhara@mail.doshisha.ac.jp

U R L: <https://ht-lab.doshisha.ac.jp/>