

令和 4 年 6 月 27 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14671

研究課題名（和文）局在乱流の非相似効果を利用した効率的伝熱促進とその応用

研究課題名（英文）Effective heat transfer enhancement and the application using dissimilarity effect of localized turbulence

研究代表者

福留 功二（Fukudome, Koji）

東京理科大学・工学部機械工学科・助教

研究者番号：70710698

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：一般にコルバーンのアナロジーに代表される相似性のため、流体の熱輸送の増加には流体摩擦の増大が伴う。本研究では、この相似性を破り効率的熱輸送状態を実現する新しい流れの発見とそのメカニズムを明らかにした。対象とする流れは、層流に発達する乱流スポットである。この乱流スポットの成長過程において効率的熱輸送状態が実現されることを直接数値シミュレーションにより調査した。その結果、この成長過程で効率的熱輸送状態が確認でき、この効果は小スケールの乱流運動により生成されることを明らかにした。さらに、浮力が作用する場合においても乱流スポットの成長過程で同様の効率的熱輸送状態が確認されることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年のエネルギー問題の解決に向けて熱交換器の効率を向上させることは喫緊の課題である。しかし、流体の熱輸送と運動量輸送の相似性から、熱輸送のみを増加させることは一般に困難であった。本研究で発見した乱流スポットの効率的熱輸送状態は、これからの非相似性を有する流れの実現に向けて重要な礎となることが期待できることから学術的意義が大きいと考えられる。さらに、熱交換器や物質混合器などの性能向上を実現し、様々な設計問題のブレイクスルーに繋がることから工学的意義が大きい。また、エネルギーの有効利用に貢献し、社会的な環境問題や資源問題の解決の一助となることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：Generally, when we increase the convective heat transfer, turbulent flow is one of the solutions. However, the turbulent flow is accompanied by an increase in fluid friction because of the similarity represented by Colburn's analogy, increasing power input. This study discovered a new characteristic flow that breaks the similarity and realizes an efficient heat transfer state by using direct numerical simulations. The objective flow is turbulent spots that develop in the laminar plane Couette flow. As a result, an efficient heat transport state was confirmed for the developing turbulent spot, and we revealed that the small-scale turbulent motion contributes appearance of the dissimilarity. Furthermore, it was found that similar efficient heat transfer states were confirmed in the growth process of the turbulent spots under thermal density stratification.

研究分野：熱工学

キーワード：強制対流 乱流 非相似性 乱流スポット

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年のエネルギー問題や環境問題の解決に向けた省エネルギー技術の開発は喫緊の課題である。熱交換器はエネルギー機器に欠かすことのできない構成要素であり、システムの効率を担う重要な構成要素である。熱交換器の世界的市場は、今後も増加が見込まれていることから、熱交換器における熱効率の改善は世界的なエネルギー問題や環境問題の解決に貢献することが期待される。

熱交換器の性能は、作動流体の熱輸送に依存する。熱の輸送を増大させるためには、乱流を利用して熱伝達率を増加させることが行われるが、乱流は熱輸送の増加と共に流体摩擦も増加させる。これは、熱輸送と流体摩擦には一般的に相似性(コルバンのアナロジー等)があり、熱輸送を増加させると流体摩擦も増加することによる。省エネルギーの観点から、この相似性を破り、高い熱輸送と低い流体摩擦の流れ(以後、効率的熱輸送状態と呼ぶ)の実現が要求されている。

これまでの研究で、層流と乱流の間に発生する局在乱流(図1:乱流と層流が混在する流れ)の一つである乱流ストライプ(図1中央図)が一般の乱流(図1右図)と比較して、効率的に熱輸送が行われることが分かっている[A1]。そこで本研究ではもう一つの代表的な局在乱流である乱流スポット(図1右図)を対象として、その熱流動特性を明らかにする。

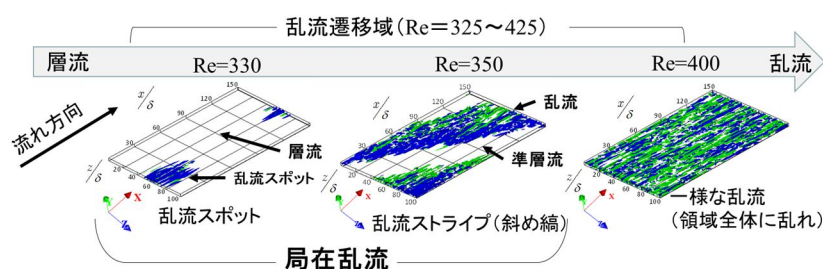


図1 平面クエット流の乱流遷移域の流れ場。

流れ方向速度変動を等値面で可視化。Re<325は乱流が維持できず層流になる。局在乱流である乱流スポット(Re=330)や乱流ストライプ(Re=350)が発生。

2. 研究の目的

局在乱流の乱流スポットを対象として、その熱流動特性をスペクトル法に基づいた直接数値シミュレーションにより調査し、非相似性の発生とそのメカニズムを明らかにする。特に、次の項目に着目して研究を行った。

効率的熱輸送状態の発生メカニズム解明とその定量的評価を行う。

浮力の影響下で乱流スポットの効率的熱輸送状態の実現とそのメカニズムの解明を行う。

乱流スポットの発生に関して効率的な発生方法を調査する。

これらの研究により、乱流スポットの効率的熱輸送状態の定量的評価とその応用範囲の拡大を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

平面クエット流(図2)を対象として、スペクトル法を用いた直接数値シミュレーションを行った。ここで、作動流体のプラントル数を1とすることで、非相似性の解析を容易にした。初期場は、層流の平面クエット流とし、流れ方向速度と温度の分布は同じものとした。また、速度場と温度場の壁面境界条件を完全に一致させ、非相似性の発生メカニズムについて厳密な解析を可能とした。攪乱は、局所的な吹出しを模擬した渦対[A2]を導入した。この導入した攪乱により発生する乱流スポットの成長過程において非相似性解析を行った。

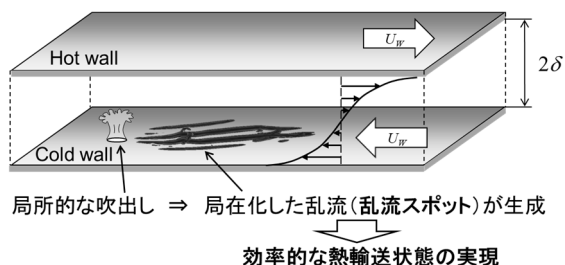


図2 平面クエット流;上下壁が異方向に移動することで内部に発生する流れ。厳密な非相似性の解析が可能。

4. 研究成果

(1) 乱流スポットの発達と非相似性の発生メカニズム

図3に速度勾配テンソルの第二不変量により可視化した流れ方向渦の時間発展の様子を示す。初期場 ($t=0$) で導入した2対の縦渦は、流れ方向に伸長しながら渦を生成し、ひし形の乱流スポットを形成 ($t=150$) する。そして、 $t=250$ において z 方向の計算領域の端に達する。その後、計算領域全体に渦が見られ、空間的に一様な乱れを有する平板クエット乱流となる。

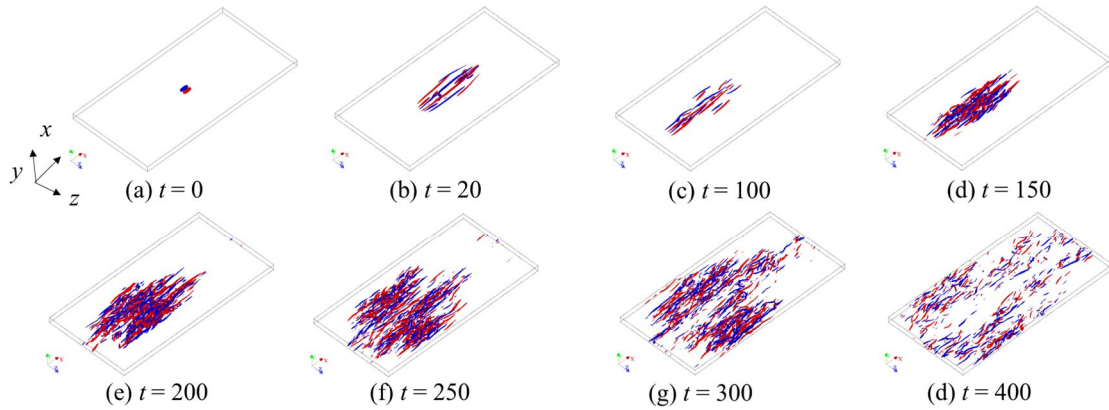


図3 初期攪乱の発達の様子. 赤と青の等値面はそれぞれ流れ方向に時計回りと反時計回りの縦渦.

図4に摩擦係数 C_f とスタントン数 St の時間発展を示す。また、散逸率より判定した乱流占有率 Γ を合わせて示す。ここで、スタントン数は後の非相似性の解析の都合上、 $2St$ を示す。乱流スポットの成長に伴い、摩擦係数とスタントン数が増加する。ここで成長過程には $t=0 \sim 150$ までの緩やかな成長過程と $t=150 \sim 350$ の急激な増加過程を再現した。これは、Henningson らの先行研究 [A2] と一致する。さらに、乱流占有率も同様に増加することが分かる。乱流スポットの発達を終了した後、これらはほぼ一定値をとることが分かる。

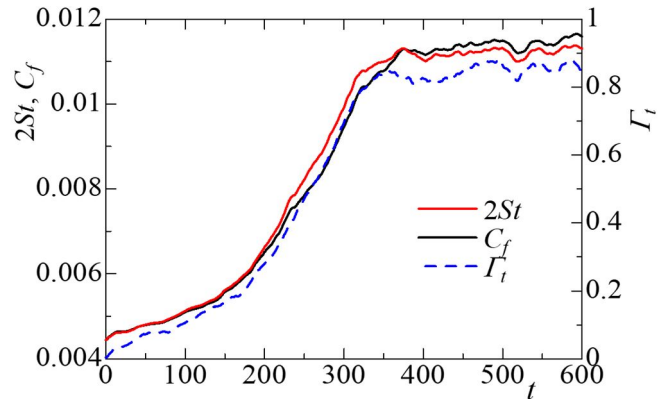


図4 摩擦係数 C_f とスタントン数 St 、および乱流占有率 Γ の時間発展の様子.

非相似性の指標としてコルバンのアナロジーを採用するとスタントン数と摩擦係数は、 $2St = C_f$ の関係がある。これより、図4において熱輸送 ($2St$) が流体摩擦 (C_f) に比べ大きい状態が乱流スポットの成長過程で見られる。これを定量的に評価するため、非相似ファクタの時間発展を図5に示す。0を超える領域が非相似性を有し効率的な熱輸送の状態を示す。これにより、乱流スポットの成長過程で約6%の効率的熱輸送状態を実現することが分かった。この効率的熱輸送状態は計算領域を大きくすることでより大きくなり最大約16%程度まで得られることを確認した。

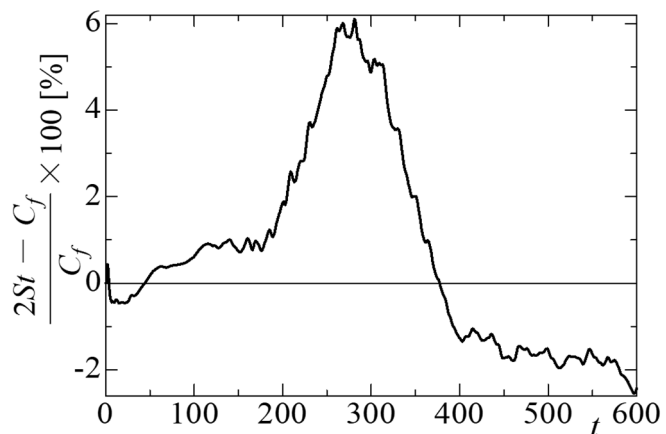


図5 効率的熱輸送の評価.

この非相似性の発生メカニズム

の解明のため、FIK 恒等式 [A3,A4] による解析を行った。その結果、平均速度分布や平均温度分布が変化する効果は小さく、乱流運動によって非相似性を生じることが分かった。また、乱流運動による輸送であるレイノルズせん断応力と乱流熱流束の解析から、圧力-歪相関項と散逸項が非相似性の因子であることが分かった。

(2) 浮力が作用する状態での非相似性の発現について

図 2 に示す平面クエット流の平板垂直方向に重力を作用させ、ブジネスク近似を施した浮力を負荷して乱流スポットの発生を観察した。その結果、浮力が作用する流れにおいても乱流スポットの成長過程で効率的熱輸送状態が実現されることを確認した。さらに、高いレイノルズ数においても、同様の効率的熱輸送状態が実現されることを確認した。

(3) 乱流スポットの発生に関する効率的な発生方法

乱流スポットの生成方法を変化させ、効率的な熱輸送状態の発生を検討した。その結果、いずれの発生方法においても、乱流スポットの成長において効率的熱輸送状態を確認した。実際の応用を鑑みて図 1 に示す壁面からの吹き出しによる生成は有効な方法であると考えられる。今後の検討課題として、壁面からの吹き出し流れを再現したシミュレーションを実行して発達の様子を確認する必要がある。

<参考文献>

[A1] K. Fukudome, et al., *International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics*, 10(4), (2018), 291-298.

[A2] D.S. Henningson and J. Kim, J., *Journal of Fluid Mechanics*, 228, (1991), 183-205.

[A3] K. Fukagata et al., *Physics of Fluids*, 14(11), (2002), L73-L76.

[A4] A. Yamamoto, et al., *Journal of Fluid Mechanics*, 733, (2013), 189-220.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 福留功二
2. 発表標題 せん断流れにおける間欠乱流を利用した熱輸送と運動量輸送の非相似性の発現
3. 学会等名 第1回乱流輸送研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Fukudome, T. Tsukahara, H. Mamori, M. Yamamoto
2. 発表標題 Emergence of transport dissimilarity by growing turbulent spot in plane Couette flow
3. 学会等名 25th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM2020+1) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福留 功二, 塚原 隆裕, 守 裕也, 山本 誠
2. 発表標題 平面クエット流において成長する乱流スポットの非相似性の発生機構
3. 学会等名 第58回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福留功二, 塚原隆裕, 守裕也, 山本誠
2. 発表標題 平面クエット流における乱流スポットの成長と非相似性の発生
3. 学会等名 第36回生研TSFDシンポジウム「乱流シミュレーションと流れの設計 - 環境制御とCFDの新しい展開 - 」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福留功二, 塚原隆裕, 守裕也, 山本誠
2. 発表標題 平面クエット流で成長する乱流スポットの運動量輸送と熱輸送の非相似性解析
3. 学会等名 熱工学コンファレンス2020
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	山本 誠 (Yamamoto Makoto)		
研究協力者	塚原 隆裕 (Tsukahara Takahiro)		
研究協力者	守 裕也 (Mamori Hiroya)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------