

令和元年6月13日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H06066

研究課題名(和文) 亜臨界乱流遷移におけるグローバル安定性と大規模間欠構造の複雑流への研究展開

研究課題名(英文) On global stability and large-scale intermittent structures in subcritical wall-turbulence transition and complex fluid flows

研究代表者

塚原 隆裕 (TSUKAHARA, TAKAHIRO)

東京理科大学・理工学部機械工学科・准教授

研究者番号：60516186

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,900,000円

研究成果の概要(和文)：流れの層流・乱流間の亜臨界遷移において局在乱流の重要性が注目されており、本研究では壁乱流を対象として、乱流を維持し得る限界付近で局在乱流が形成する“大規模間欠構造(空間パターン)”について数値計算と可視化実験により調査した。複雑化した流れ(粗面壁面・粘弾性流体・固液二相流)における大規模間欠構造のロバスト性、及び下臨界レイノルズ数(グローバル不安定性)と変化を調べ、特に乱流縞(局在乱流領域が呈する、主流方向に対して斜めの縞状パターン)の普遍性に関する統一的理解を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

流体力学の未解決問題の一つ「亜臨界乱流遷移」の解明は、乱流起源を探る理学的興味に加えて、流体機器の乱流制御という工学的重要性から、長年切望されてきた。例えば、熱交換器内で(乱流遷移の)臨界に近い流動状態がしばしば現れるが、層流化や乱流化または混在した間欠的な場を維持するかで流動/伝熱特性が大幅に変化する事象がある。亜臨界状態の予測や制御が可能となれば、高効率で安全な混合や熱伝達を促進する技術開発に繋がるものと期待できる。

研究成果の概要(英文)：The importance of localized turbulence has been noted in the subcritical transition between laminar state and turbulent state of the flow. In this study, large-scale intermittent structures, or spatial patterns, formed by localized turbulence in the vicinity of the limit where turbulence can be maintained are investigated by numerical simulation and visualization experiments for wall turbulence. The robustness of large-scale intermittent structure in complicated flows, such as flows on rough wall surface, viscoelastic fluid flows, and solid-liquid two-phase flows, and the lower critical Reynolds number (global instability) and its dependencies on control parameters were examined. In particular, the the universality of turbulent stripe (stripy patterns oblique to the main flow direction) was discussed.

研究分野：流体工学

キーワード：亜臨界遷移 壁乱流 DNS 乱流縞 粘弾性流体

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

流体力学の未解決問題の一つ「亜臨界乱流遷移」は、理論構築が難しく古くから実験が行われ、最近では局在乱流の重要性が注目されてきている。乱流起源を探索する理学的興味に加えて、流体機械内の乱流制御という工学的な重要性という観点から、長年のあいだ乱流遷移過程とダイナミクスの理解が切望されてきた。工学的な重要性というのも、高温ガス炉内冷却剤流れや小型熱交換器内流れにおいて、(乱流遷移の)臨界状態に近い状態のものがしばしば現れ、層流化や乱流化または混在した間欠的な場を維持するかで流動/伝熱特性が大幅に変化する点にある。臨界状態の予測や制御が可能となれば、レイノルズ数の低い状態でも効率的に混合や熱伝達を促進することが期待できる。

一般に見る単相ニュートン流体の壁乱流遷移は亜臨界遷移によるものである。亜臨界遷移とは、有限振幅の擾乱により生じる非線形過程(バイパス遷移)である。一方、層流が維持し得る(無限小擾乱に対する)臨界レイノルズ数は線形安定性理論により与えられる。本研究では、乱流を維持し得る最低限のレイノルズ数に注目するもので、下臨界(下臨界値以下の条件では必ず層流)付近では、流れ場に乱流域と層流域が同時に現れる大規模な間欠的乱流が発生し、それに伴う大規模な二次流れにより極めて複雑な3次元非線形問題となる。そのため、乱流から層流となる厳密な下臨界値の決定は難しく、理論的な記述が困難であるといった問題点があった。

近年、亜臨界遷移の下臨界レイノルズ数を定めるために、円管内流の局在乱流構造「パフ」の有限寿命と分裂時間の関係が議論され、その定量的で厳密な値が求められた。他の流路形状においても、それぞれ特有の局在乱流構造の有限寿命に着目すれば、下臨界値が決定できると考えられ、平面ポアズイコ流に関する研究成果が報告されてきた(図1)。平面チャンネル内では、局在乱流域が主流方向に対して一定角度に傾斜した斜めの乱流縞が発生する。平面クエット流についても同様で、その乱流縞形成メカニズムについて関心が寄せられていた。大規模計算領域を用いた直接数値シミュレーション(DNS)により、乱流縞を捉えた場合には下臨界値が有意に低下することも判明した。この発見は、“真の下臨界値”が乱流縞と大規模二次流れの発生に依存していることを意味し、つまりグローバルな流れの不安定性が下臨界レイノルズ数付近で重要であることが示唆された。

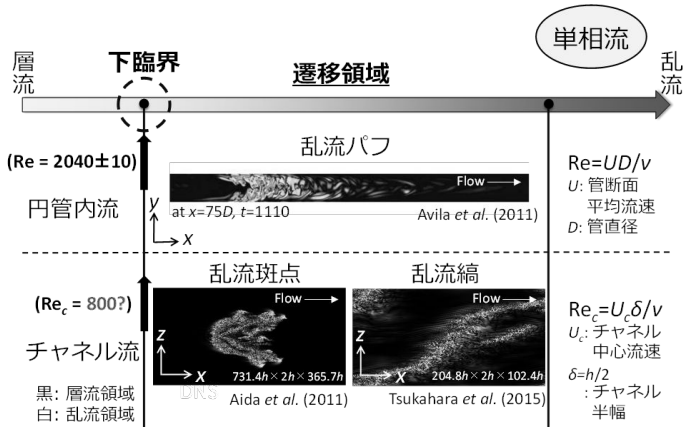


図1 単相ニュートン流体の亜臨界遷移の局在乱流構造

以上より、ニュートン流体単相チャンネル流の下臨界レイノルズ数付近で普遍的に発生する乱流縞と大規模二次流れの現象について、より詳細な調査が亜臨界乱流遷移の理解に重要である。乱流縞などの大規模間欠構造の発生は、従来認められてきた臨界値よりも低いレイノルズ数まで局在乱流を維持する要となることが判明した今、様々な流体・流動条件における大規模間欠構造の有無や形態について研究を展開させる好機となった。

2. 研究の目的

亜臨界乱流遷移において局在乱流の重要性が注目されており、本研究では閉空間の壁乱流を対象として、(乱流を維持し得る)下臨界レイノルズ数付近での局在乱流が縞状または帯状に持続する大規模間欠構造についてDNSや水路実験により調査する。特に、複雑化した流れ「分散性粒子の固液二相流」「粗面壁面」「粘弾性流体」における大規模間欠構造のロバスト性、及び下臨界レイノルズ数(グローバル不安定性)とその変化の解明を目的とする。

3. 研究の方法

主に有限差分法によるチャンネル流のDNSコードをツールとして、「分散性粒子の固液二相流」「粗面チャンネル」「粘弾性流体」の要素をそれぞれ加味したコードに発展させて、大型並列計算機による大規模DNSを実施した。それぞれの目的に沿って境界埋込法、PFA(parametric focusing approach)法、またはGiesekus粘弾性モデルによる構成方程式の導入が必要となる。DNS検証用に、環状(二重円管内)チャンネル流の可視化実験や、界面活性剤水溶液(粘弾性流体)の回転平面クエット流の可視化実験も実施した。また、各解析対象について、海外の共同研究者(仏CNRS、スウェーデンKTH)と協力してDNS・実験・議論を重ね、最終年度に乱流縞ロバスト性などの統一的理解の構築を目指す。

4. 研究成果

当該研究で取り扱う4問題「分散性粒子の(乱流縞形成への)影響」「粗面の影響」「粘弾性流体の影響」「ニュートン流体単相流の乱流縞の実証と特性解明」について、それぞれ記す。

(1) 分散性粒子が混入した固液二相チャンネル流について、2-way カップリングによる DNS コードの開発を行い、重い分散性粒子を含むと乱流縞の規則的パターンが崩壊する様子を捉えることに成功した。固液二相流における乱流縞遷移過程のロバスト性、乱流縞の構造変化および発生条件を調査する範囲を特定できた。重い粒子（密度比：大）の場合には流路内で一様な乱流誘起が起き、つまり乱流領域の局在性を失うことで即座に層流化に向かう様子を捉えた。これにより、乱流局在性とそれに伴う大規模二次流れの存在が亜臨界条件下での乱流維持に寄与することが示唆された。

(2) 粗面上の流体解析に PFA 法を用いて、Navier-Stokes 方程式中に粗さ要素による仮想抵抗力項を付加したシミュレーションコードを開発してきた。その付加項には粗さ要素の高さ・分布形状・配置密度の 3 パラメータを含み、系統的評価がし易くなるよう提案されている。平面クエット流における遷移過程が粗面条件によっていかに変化するかを調査した。粗さの分布形状・配置密度は限定し、粗さ高さおよびレイノルズ数を系統的に変化させ、遷移構造の多様性を確認した。特に粗さ高さの大きい場合には局在乱流がスパン方向に一様な分布を呈する、垂直型乱流帯 (transverse turbulent band) の形成を発見した (図 2)。局在乱流領域が形成する斜め縞と垂直縞の構造変化に関する相図を作成し、垂直縞の流動構造やレイノルズ数依存性を明らかにした。レイノルズ数低下に伴い局在乱流領域の面積もしくは乱流帯の幅が一次関数的に減少し、層流化に向かうことが分かった。

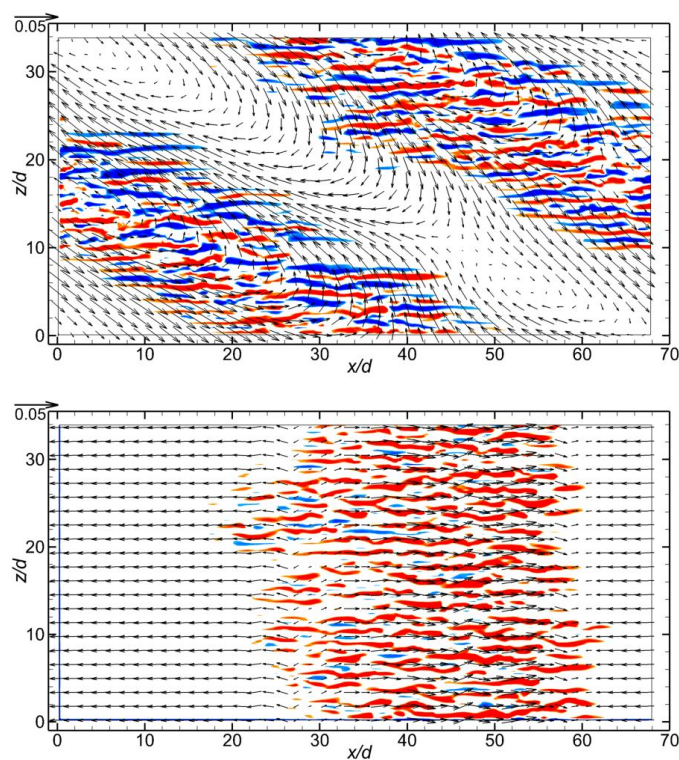


図 2 粗面壁乱流で形成する局在乱流構造：上) 滑面での斜め乱流縞；下) 粗面上の垂直型乱流縞。チャンネル中央平面の 2 次元空間分布を可視化し、主流方向(x)は右向き。チャンネル幅は d 。赤・青のコンターは壁垂直方向速度変動を表し、局在した乱流領域を呈する。ベクトルは大規模流れを表す。引用：T. Tsukahara *et al.*, (2018) *J. Fluid Science & Technology*, **13**, JFST0019.

(3) 粘弾性の再現には Giesekus 粘弾性モデル構成方程式を用いて、回転系平面クエット流の遷移形態の解析を行い、粘弾性流体特有の非定常状態を発見した。ワイゼンベルグ数（流体弾性の緩和時間）増加に伴い、波状ロールセルが直線的ロールセルへと変形し、定常ロールセルが一定の時間周期で拍動し始める様子を捉えることに成功した。これにより、流体粘弾性が縦渦の三次元化を抑制したり、新たな非定常性をもたらしたりすることが分かり、乱流抑制効果または弾性乱流の解明につながる知見が得られた。また、乱流縞への影響も調査が進んだ。

(4) 環状流路の可視化実験により、亜臨界遷移過程の螺旋乱流の発生が実証された。水路（環状流路と粘弾性流体回転クエット流）による観察実験も開始し、DNS の結果を定性的に裏付ける傾向が確認できてきた。特に、環状流路の実験においては、偶然的にも内円筒と外円筒の中心軸がずれたことで、下臨界値がさらに低下して局在乱流の特性が変化することを発見した。この結果は、例えば熱交換器の（低レイノルズ数条件下での）更なる伝熱促進をもたらす技術開発への期待を高め、当該研究においては当初予期していない事象により得られた新たな研究展開をもたらしている。

以上により、様々な条件下での亜臨界乱流遷移におけるグローバル安定性と大規模間欠構造の統一的理解が大いに進んだ。得られた成果については既に多くの英文学術雑誌（査読有）と国際会議にて発表しており、未発表の研究結果についても順次論文発表により告知する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 9 件)

- (1) [Takahiro Tsukahara](#), Takeru Tomioka, Takahiro Ishida, Yohann Duguet, Geert Brethouwer, “Transverse turbulent bands in rough plane Couette flow,” *Journal of Fluid Science and Technology*,

Vol. 13, Issue 3 (2018), JFST0019. 査読有

DOI: 10.1299/jfst.2018jfst0019

- (2) Tomohiro Nimura, Takuya Kawata, Takahiro Tsukahara, “Viscoelasticity-induced pulsatile motion of 2D roll cell in laminar wall-bounded shear flow,” *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 74 (2018), 65-75. 査読有
DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2018.09.001
- (3) Tomohiro Nimura, Takuya Kawata, Takahiro Tsukahara, “Viscoelastic effect on steady wavy roll cells in wall-bounded shear flow,” *Fluid Dynamics Research*, Vol. 50, No. 5 (2018), 051414. 査読有
DOI: 10.1088/1873-7005/aac477
- (4) Koji Fukudome, Takahiro Tsukahara, Yoshifumi Ogami, “Heat and momentum transfer of turbulent stripe in transitional-regime plane Couette flow,” *International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics*, Vol. 10, Issue 4 (2018), 291-298. 査読有
DOI: 10.1007/s12572-018-0219-8
- (5) Ryo Tanaka, Takuya Kawata, Takahiro Tsukahara, “DNS of Taylor-Couette flow between counter-rotating cylinders at small radius ratio,” *International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics*, Vol. 10, Issue 2 (2018), 159-170. 査読有
DOI: 10.1007/s12572-018-0217-x
- (6) Takahiro Ishida, Yohann Duguet, Takahiro Tsukahara, “Turbulent bifurcations in intermittent shear flows: from puffs to oblique stripes,” *Physical Review Fluids*, Vol. 2 (2017), 073902. 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevFluids.2.073902
- (7) Takahiro Ishida, Geert Brethouwer, Yohann Duguet, Takahiro Tsukahara, “Laminar-turbulent patterns with rough walls,” *Physical Review Fluids*, Vol. 2 (2017), 073901. 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevFluids.2.073901
- (8) Takahiro Ishida, Takahiro Tsukahara, “Friction factor of annular Poiseuille flow in a transitional regime,” *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 9, No. 1 (2017). 査読有
DOI: 10.1177/1687814016683358
- (9) 國井康平, 石田貴大, 塚原隆裕, “遷移域スライディング・クエット流の局在乱流構造と統計量に及ぼす壁面曲率の影響”, *日本流体力学会誌「ながれ」*, 第 35 巻 第 6 号 (2016), 475-480. 査読無

〔学会発表〕(計 28 件)

- (1) 塚原隆裕, 國井康平, 石田貴大, Y. Duguet, “環状クエット流における層流—乱流共存場”, 第 64 回「乱流遷移の解明と制御」研究会 (2019).
- (2) K. Fukudome, T. Tsukahara, Y. Ogami, M. Yamamoto, “Relaminarization of turbulent channel flow under stable density stratification,” *The Second Int. Conf. on Mechanics* (2018).
- (3) T. Fukuda, T. Tsukahara, “Turbulent heat transfer of transitional regime with large-scale intermittent structure in annular flow,” *12th Int. Symp. on Eng. Turbulence Modelling and Measurements* (2018).
- (4) T. Nimura, T. Kawata, T. Tsukahara, “Self-sustainability of turbulent stripe in rotating plane Couette flow,” *12th European Fluid Mechanics Conf.* (2018).
- (5) Y. Duguet, T. Ishida, K. Kunii, T. Tsukahara, “Spot morphogenesis in annular shear flows,” *EC598: Coherent Structures in Wall-bounded Turbulence: New Directions in a Classic Problem* (2018).
- (6) T. Tomioka, T. Tsukahara, “DNS of plane Couette flow with roughness in the transitional region,” *13th World Congress on Computational Mechanics* (2018).
- (7) M. Hanabusa, T. Tsukahara, “DNS of particle-laden turbulent channel flow in transitional regime,” *13th World Congress on Computational Mechanics* (2018).
- (8) K. Fukudome, T. Tsukahara, Y. Ogami, “Dissimilarity between heat and momentum transport for the turbulent stripes in transitional plane Couette flow,” *9th Int. Symp. on Turbulence, Heat and Mass Transfer* (2018).
- (9) 仁村友洋, 河田卓也, 塚原隆裕, “乱流縞の維持機構: コリオリ安定効果を与えて”, 第 63 回「乱流遷移の解明と制御」研究会 (2018).
- (10) 福留功二, 塚原隆裕, 山本誠, “乱流遷移域における大規模間欠構造の熱流動特性”, 第 63 回「乱流遷移の解明と制御」研究会 (2018).
- (11) 焼野藍子, 塚原隆裕, “低レイノルズ数チャネル乱流場斜め構造の線形過渡成長解析”, 第 63 回「乱流遷移の解明と制御」研究会 (2018).
- (12) 酒匂翔洋, 塚原隆裕, 川口靖夫, “同心二重円管内ポアズイユ流の亜臨界遷移における大規模間欠構造の可視化観測”, 第 46 回可視化情報シンポジウム (2018).
- (13) 花房真輝, 塚原隆裕, “固体粒子を含むチャネル流における乱流縞構造安定性に関する研究”, *日本流体力学会年会 2018* (2018).
- (14) 福田雄大, 塚原隆裕, “環状ポアズイユ流における大規模間欠構造を伴う遷移域の乱流熱伝達”, 第 55 回日本伝熱シンポジウム (2018).
- (15) 仁村友洋, 塚原隆裕, “粘弾性流体の回転平面クエット流における DNS 解析”, *日本機械学会関東学生会第 56 回学生員卒業研究発表講演会* (2017).
- (16) 國井康平, 石田貴大, 塚原隆裕, “DNS による遷移域スライディング・クエット流の乱流

- 間欠率に関する研究”，日本機械学会関東支部第 23 期総会・講演会 (2017) .
- (17) 石田貴大, 塚原隆裕, “環状流における周方向大規模流れに起因した遷移構造の変化”, 日本機械学会関東支部第 23 期総会・講演会 (2017) .
 - (18) T. Tsukahara, T. Ishida, G. Brethouwer, Y. Duguet, “Laminar-turbulent pattern in plane Couette flow with one roughened wall,” The Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Eng. Conf. (2017).
 - (19) T. Nimura, T. Ishida, T. Kawata, T. Tsukahara, “Modulated roll cells in rotating plane Couette flow of viscoelastic fluid,” The 10th Int. Symp. on Turbulence and Shear Flow Phenomena (2017).
 - (20) T. Nimura, T. Tsukahara, “Turbulent band in rotating plane Couette flow of viscoelastic fluid,” The 16th EUROMECH European Turbulence Conf. (2017).
 - (21) T. Nimura, T. Tsukahara, “Viscoelastic effect on roll cells in rotating plane Couette flow,” The 7th Int. Symp. Bifurcations and Instabilities in Fluid Dynamics (2017).
 - (22) T. Tsukahara, T. Ishida, “Robustness and universality of turbulent stripe,” The 61st Workshop on Investigation and Control of Transition to Turbulence (2017).
 - (23) 塚原隆裕, 石田貴大, Y. Duguet, “環状チャネル流の局在乱流パターンニング：円管とチャネルのホモトピー”, 日本流体力学会年会 2017 (2017) .
 - (24) 仁村友洋, 河田卓也, 塚原隆裕, “回転平面クエット流中のロールセルに対する粘弾性応答の DNS 解析”, 日本流体力学会年会 2017 (2017) .
 - (25) K. Kunii, T. Ishida, T. Tsukahara, “Helical turbulence and puff in transitional sliding Couette flow,” 24th Int. Congress of Theoretical Applied Mechanics (2016).
 - (26) 石田貴大, Geert Brethouwer, Yohann Duguet, 塚原隆裕, “粗面クエット流において発生する様々な準秩序構造”, 第 94 期日本機械学会流体工学部門講演会 (2016) .
 - (27) 國井康平, 石田貴大, 塚原隆裕, “遷移域スライディング・クエット流の局在乱流構造と統計量に及ぼす壁面曲率の影響”, 日本流体力学会年会 2016 (2016) .
 - (28) 塚原隆裕, 石田貴大, 戸倉彰太, “粘弾性流体の回転平面クエット流におけるロールセル変調”, 第 44 回可視化情報シンポジウム (2016) .

〔その他〕

ホームページ等

<https://www.rs.tus.ac.jp/~t2lab/db/>

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。