

令和元年5月20日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04260

研究課題名(和文)人工ヘアピン渦列攪乱によるEdge of Chaosの探究

研究課題名(英文) A study on edge of chaos using perturbation accompanying with artificial hair-pin vortices

研究代表者

田坂 裕司 (Tasaka, Yuji)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：00419946

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：円管内流れの亜臨界遷移問題に対し、シンセティックジェットアクチュエータを攪乱発生器として用いることで、ヘアピン渦列をその個数など制御しつつ攪乱として与え、遷移過程を観察した。その結果として、攪乱の振幅や周波数に対する特段の効果は観察されなかったが、ヘアピンの個数が少ない場合、乱流塊の形成に対して個数による有意な差が見られた。その他、気泡を管壁に貼り付けることで孤立乱流塊の自己維持機構に変調を与え、効果的に乱流塊へ再層流化をもたらすことができることを見いだした。そのメカニズムとして、気泡が存在することによる偏流、および気泡表面でのスリップによる変曲点型速度分布の変形が挙げられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

流れの乱流遷移は、これまでの研究により、熱対流などのように段階的に遷移が進むモーダルな過程は理論や数値計算、実験などによりおおよそのメカニズムが解明されつつある。一方で、円管流れに代表される突発的な遷移(亜臨界遷移)については、Edge stateなど数理面での理解が進むものの、具体的な遷移過程、特に少ないエネルギーで乱流化異形成に導く最適攪乱の問題など、未だ明らかにされていないことが多い。本研究では、これまでの研究から最適攪乱としての機能を見込めるヘアピン渦列を、制御可能な条件で生成できるシンセティックジェットを用いて生成し、最適攪乱を探索する課題である。

研究成果の概要(英文)：The present study investigated subcritical flow transitions in a pipe with hair-pin vortices as disturbances generated by a synthetic jet actuator, which is capable to control amplitude, frequency and number of the hair-pins. The experimental results indicated that the frequency and amplitude do not affect considerably the transition, but for small number of hair-pins, the transition clearly depends on the number of vortices. As other project in the study, trials to modify self-sustaining process of the local turbulence were performed by, for example, attachment of a bubble on the pipe wall. It works well to introduce relaminarization of the local turbulence and corresponding mechanism we considered is removing inflection points on the velocity profile at the trailing edge of the turbulence by flow winding and slip on the bubble surface.

研究分野：流体力学

キーワード：乱流遷移 流れ制御

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

1. 研究開始当初の背景

20世紀初頭のレイノルズの実験から続く、壁面せん断流の亜臨界乱流遷移問題に、革新的な概念がもたらされた。Edge state と呼ばれるその概念では、層流と乱流は Edge of chaos と呼ばれる相空間上の超曲面により隔てられている (Itano & Toh 2001)。層流状態に有限振幅攪乱が加えられその超曲面を超えたとき、流れは必ず曲面上の固定点 (Edge state) 近傍を經由して、Chaotic saddle と呼ばれる過渡的な乱流状態に移行する。その曲面は「ごつごつ」しており、遷移の有無は必ずしも攪乱の強度 (層流状態からの距離) によらない。米国物理学会の Physical Review Letters に掲載された申請者らの論文 (Tasaka *et al.* 2010) は、これを実験で捉えた最初の例として引用されている。効果的な乱流遷移をもたらすには、超曲面上でかつ層流状態との距離が近く、また Edge state により近い流れの状態を攪乱として与えることが求められる。これに関連して、Itano *et al.* (2013) は最小ユニットのクエット流れにおいて解析を行い、対称性を持つ定常ヘアピン渦の解がこの最適攪乱条件に相当し、その強度はレイノルズ数 (Re) の-1 乗に比例して減少することを示している。

有限振幅攪乱の添加は、層流である基本流に歪みをもたらす。これに関して、遷移を導く最適な基本流の歪み (Gavarini *et al.* 2004) および時間変動を含む最適な攪乱の加え方 (Eliahou *et al.* 1998) などが提案されている。Hof *et al.* (2003) の実験では、攪乱を加える時間長と遷移の関係が示されている。Peixinho & Mullin (2007) では、攪乱の添加がヘアピン渦列の生成と移流を伴う場合、遷移が緩やかに進むこと、遷移に必要な攪乱強度が Re の-1.5 乗に比例して減少する (通常は Re^{-1} に比例) ことが報告されている。Edge state の概念は数理的な亜臨界遷移の理解を与える一方で、これらの知見を説明するに至っていない。これについては、Edge state は今のところ定常解を想定しており、時間情報の組み込みが困難であること、また両者をつなぐ情報が不足していることが原因だと考えている。これを解決するには、「時間」をキーワードにした実験的知見を増やし、理論の発展を促す必要がある。

2. 研究の目的

本申請課題では、混相流体を含む、流れの亜臨界遷移における普遍的な性質を明らかにすることを最終的な目的とする。これを実現するため、「時間」をパラメータに組み込んだ最適攪乱と、渦構造との相互干渉をもたらす「微細気泡」の基本流への混入が、壁面せん断流れの亜臨界乱流遷移におよぼす影響を、精緻な実験研究から明らかにすることを目標とする。

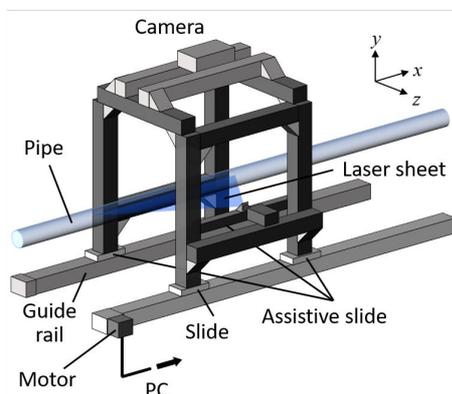
3. 研究の方法

低乱円管ポアズイユ流れの装置を標準実験プラットフォームとして、亜臨界乱流遷移における層流と乱流の境界、Edge of chaos の探索を行う。シンセティックジェットアクチュエータ (SJA) により生成した人工ヘアピン渦列を攪乱とし、(1)渦列の周波数や攪乱添加時間など「時間」をパラメータにした最適攪乱 (minimal perturbation) を決定すること、(2)流れに添加した微細気泡群が流れの亜臨界遷移に与える影響を明らかにすること、上記に加えて(3)管内壁面装飾により孤立乱流塊の減衰特性を調査し、乱流の維持構造変調への最適な制御方法を明らかにすることを3年間の研究の柱とする。得られた研究成果の数理的扱いを可能にするため、応用数学 (非線形数理) が専門の中野博士に連携研究者として助言を仰ぐ。ルアーブル大学の Peixinho 博士と連携し、亜臨界遷移における普遍性の検証を行う。また壁面装飾については、ケンブリッジ大学の Box 博士からの助言を得る。

4. 研究成果

ラグランジアン追跡システムの構築

図1に示すように、リニアスライダを円管脇に設置し、攪乱の注入とスライダの動きを連動させることで、形成されるヘアピン渦列あるいは孤立乱流塊を追跡しながらその時空間速度場の変化を調べるシステムを構築した。光学系として、レーザー照明とカメラをスライダ上に設置し、PIV 計測を可能にした。



Max. speed [mm/s]	3000
Min. speed (unit) [mm/s]	0.078
Stroke length [mm]	3200

図1 製作したラグランジアン追跡システム;(左)模式図と(右)写真および諸元

(1) 人工ヘアピン渦列を攪乱に用いた流れの遷移

図 2(a)に示すようなモーターと偏心カムで穴の空いたキャビティに設置した膜を振動させることで、シンセティックジェットアクチュエータ (SJA) を形成した。これを内径 20mm の管内流れに加えることで、図 3 の可視化写真に示すようなヘアピン渦列を形成した。ヘアピン渦列形成は、ジェットの速度の主流速度の速度比で決まる。SJA の稼働パラメータは膜の振動振幅と周波数である。ヘアピン渦列が形成される条件で、周波数が十分に小さい場合、形成される過程の渦列中の一つの渦から、もう一つの渦が形成される。局所乱流塊の形成との関係を調べた結果、基本的に攪乱速度が速いほど乱流塊の形成確率が高くなるという、従来の単純噴流の場合と代わらない結果となった。一方、渦列中のヘアピン渦の下図が制御可能であるため、その個数と乱流塊形成確率との関係を調べた結果、右図の数が増えるほど確率は増すが、数が 8 に満たない場合、確率が偶数個と奇数個とで有意に異なるとの結果が得られた。これは、渦同士の間隔が乱流塊への遷移に影響を及ぼしていると言えるが、詳細は現時点では明らかになっていない。

同様に、急拡大管へ SJA を設置し、シンセティックジェット攪乱の遷移への影響を調査した。この流れでは、攪乱を加えることにより急拡大管部に生じるせん断層の不安定が成長し、再循環領域に変調を加えることで、攪乱を加えている間、移流せずせん断層下流にとどまる乱流塊が観察される。直円管の場合と同様に、SJA の周波数と振幅を変化させて遷移の観察を行った結果、SJA によりもたらされるせん断層の振動が効果的な遷移をもたらすこと、また、SJA によるヘアピン渦形成の有無は、下流での乱流生成に影響を与えないことが分かった。

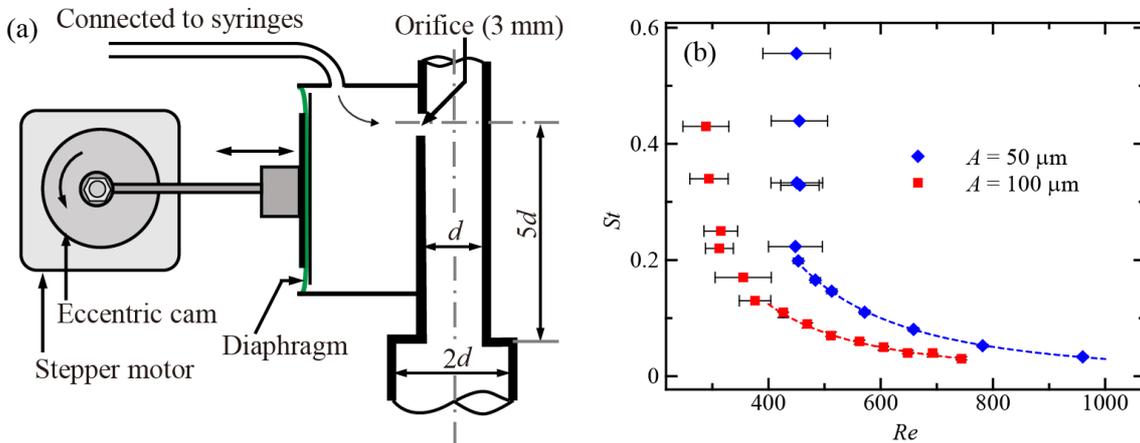


図 2 (a)ヘアピン渦列形成用シンセティックジェットアクチュエータ (SJA) の模式図 (急拡大管に取り付けた場合)、(b)急拡大管で SJA を攪乱発生器として用いた場合の臨界条件

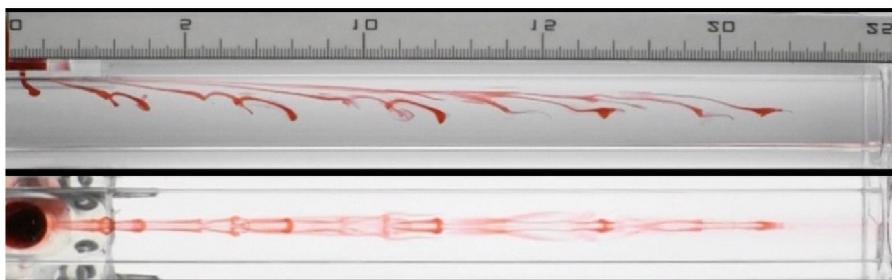


図 3 SJA により円管内に形成されたヘアピン渦列の染料による可視化

(2) 微細気泡添加による孤立乱流塊の特性変化

これまでに行った研究により、流れに微小気泡を混入することにより、攪乱を加えた場合の乱流塊の生成確率が向上することが示された。この実験的事実から、流れが渦構造を持つ場合に一様に形成された微小気泡がその渦に集積し、渦構造を強固にすることで乱流の維持機構を強化し、結果として乱流塊の生成確率を向上させる、との仮説を考えた。これを検証するため、乱流塊の DNS データを大阪大学・清水博士より提供いただき、乱流塊が内包する渦構造において、気泡がどのような集積挙動を示すのかを数値計算により明らかにした。DNS データを固定された流れ場とし、気泡の運動方程式を数値的に解くことで気泡の運動を予測した。図 4 はその計算結果の一例である。ポアズイユ流れの分布に対して一応に分布させた気泡 (白色点) が、渦構造との干渉により集積している様子が確認できる。現在は、可視化計測によりこのような集積挙動の観察確認、およびその集積気泡が

流れに与える影響を，レオロジーの観点から調査しているところである．

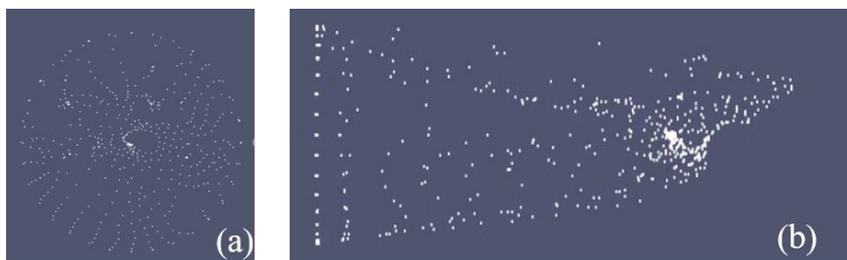


図4 乱流パフの数値計算結果と気泡の運動方程式を元に得た気泡の集積パターン（例）

(3) 壁面装飾による孤立乱流塊の減衰

乱流塊の減衰過程からそのメカニズムを明らかにするため，壁面装飾による効率的な乱流塊の減衰を目指した．壁面への超撥水コーティングや壁面の局所加熱など，いくつかの方法を試した結果，管壁に気泡を取り付ける方法にたどり着いた．

図5 (a)-(c)は， $Re = 1,900$ の条件において，内径 20mm の円管管壁に設けた微細孔から空気を注入し，管壁に気泡を形成した可視化写真である．流れとの干渉により（写真では左から右に流れている），気泡の形状ははく離しづらい形状に変形している．これよりも小さな気泡量の場合，表面張力との関係から気泡が半球状に近くなり，流れがはく離することで主流が大きく乱される．流れのはく離が見られない場合，気泡設置部上流で，攪乱を加えることにより生成された孤立乱流塊は，この設置部を通過することにより，高い確率で減衰し，再層流化した（図5 (d)）．この理由として，気泡表面での流れのスリップと流れの非対称化が挙げられる．

図6は，孤立乱流塊の挙動をフレークによる可視化で観察した結果である．(a)の通常の乱流塊で観察される，乱流塊後端の低速ストリーク部が，(b)の気泡通過後では下流側に大きく取り残されていることが分かる．下部に示す速度分布は，可視化写真に示す断面でのPIV計測の結果である．特に乱流塊の後端近傍で，流れが大きく偏っていることが分かる．これは，気泡が管壁に付着していることによりその側での速度が増加し，また，気泡表面でのスリップにより速度分布が大きく変形した結果である．孤立乱流塊は，その後端に存在する縦渦の形成，それによる低速ストリークの形成，そして低速部と乱流塊後端から突入する層流高速流れとの干渉による，ケルビン・ヘルムホルツ不安定による乱れ成分の生成がその自己維持機構として知られている．今回行った気泡の貼り付けは，その自己維持機構に変調を与える効果があると考えられる．つまり，周方向に周期的に生じるはずの低速ストリークは，流れの偏流により気泡側に形成されず，その反対側に大規模に形成される．しかし，下流側に拡大したストリークは，高速流との干渉で乱れを生成する物の，乱流塊後端から大きく離れており，乱れが乱流塊にフィードバックされない．結果として乱流塊は主流から乱れのエネギーを導入できず，再層流化に至る．そのようなシナリオを考えている．

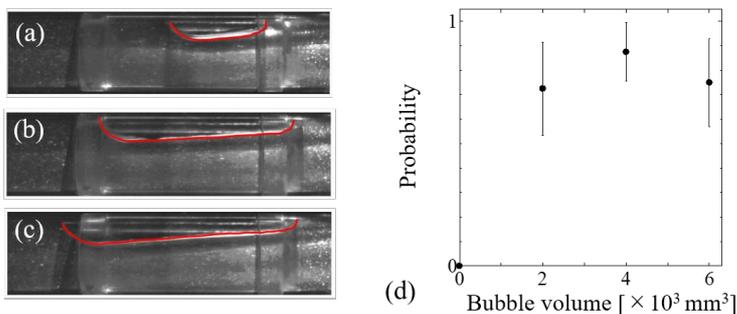


図5 管壁に貼り付いた気泡の可視化写真，それぞれ空気量で(a) 2×10^3 ，(b) 4×10^3 (c) $6 \times 10^3 \text{ mm}^3$ ．(d)気泡貼り付けによる乱流塊の減衰確率．

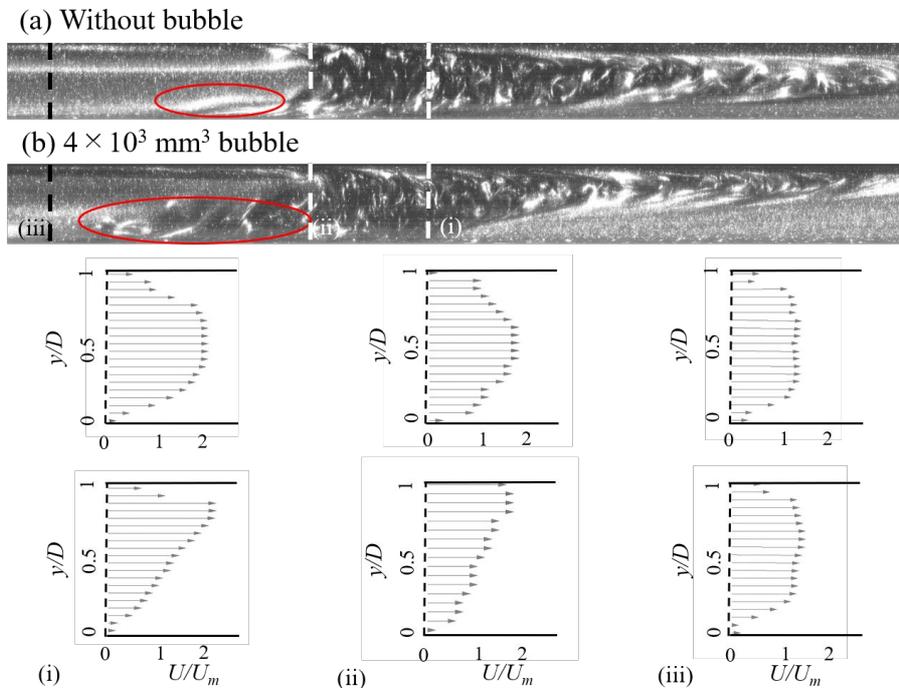


図6 フレーク粒子により可視化した乱流塊，(a)気泡が無い場合，(b)壁面に付着した気泡部を通り過ぎた乱流塊，(下)PIVにより計測した，写真中の各断面での速度分布．

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- (1) Benoît Lebon, Jorge Peixinho, Shun Ishizaka and Yuji Tasaka, Subcritical transition to turbulence in a sudden circular pipe expansion”, J. Fluid Mech. Vol. 849, pp. 340-354. (2018.6) DOI: /10.1017/jfm.2018.421B (査読有)
- (2) 中村幸太郎, 田坂裕司, 村井祐一 「円管流れの局所乱流塊形成におけるマイクロバブルの影響」日本混相流学会論文集, Vol. 31, No.1, pp.20-28 (2017) (査読有)

〔学会発表〕(計 12 件)

- (1) 金田大希, 中村幸太郎, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一, 「論文局所壁面加熱による管内乱流パフの渦構造変調」, 日本機械学会北海道支部第 47 回学生員卒業研究発表講演会, No.182-1, pp. 137-138 138, (2019.3, 北見)
- (2) 高木真也, 中村幸太郎, 朴炫珍, 田坂裕司, 村井祐一, 「乱流パフ生成過程のラグレンジ追跡計測」, 日本機械学会北海道支部第 47 回学生員卒業研究発表講演会, No. 192-1, pp. 157-158, (2019.3, 北見)
- (3) Yuji Tasaka, Jumpei Ohkubo, Kotaro Nakamura, Yuichi Murai “Gradual development of perturbations toward a turbulent puff in pipe flows” Bulletin of 71st Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, A27-6, p. 86 (2018.11, Atlanta, USA)
- (4) Kotaro Nakamura, Yuji Tasaka, Yuichi Murai “Modulation on turbulent puffs in pipe flows by diluted dispersed microbubbles” Bulletin of 71st Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, KP1-108-10, p. 396 (2018.11, Atlanta, USA)
- (5) S. Ishizaka, B. Lebon, J. Peixinho, Y. Tasaka, Y. Murai, “Growth of finite amplitude disturbances in pipe flow with sudden expansion”, Proc. 70th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, Denver, KP1-15, pp. 374 (2017.11, Denver, USA)
- (6) Benoit Lebon, Jorge Peixinho, Shun Ishizaka, Yuji Tasaka, Minh-Quan Nguyen, Mostafa Safdari Shadloo, Abdellah Hadjadj: “Flow in a circular expansion pipe with synthetic disturbances”, Euromech Sym. Colloquium 591: Three-dimensional instability mechanisms in transitional and turbulent flows (2017.9, Bari, Italy)
- (7) 中村幸太郎, 田坂裕司, 村井祐一 「管内流に形成される乱流パフによるマイクロバブルの集積について」日本流体力学会年会 2017 USB 講演論文集, No.095, 1-4 (2017.9, 東京)
- (8) 石坂俊, 田坂裕司, 村井祐一, PEIXINHO Jorge 「急拡大管内流れにおける有限攪乱の過渡的成長について」日本流体力学会年会 2017 USB 講演論文集, No.096, 1-6 (2017.8, 東京)
- (9) K. Nakamura, H.J. Park, Y. Tasaka, and Y. Murai, “Preferential concentration of microbubbles in a pipe flow at moderate Reynolds number”, Workshop ‘transition, Control and Turbulence in Bubbly Flows’, (2017.7, Toulouse, France)
- (10) Yuji Tasaka, Kotaro Nakamura, Shun Ishizaka, Jumpei Ohkubo, Yuichi Murai, and Tom Mullin,

“Development of perturbations having different vortex structures toward a turbulent puff in a pipe”
RIMS Camp-Style Seminar: Dynamics of wall-bounded shear flows (2016.9, Kyoto)

(11) 石坂俊, 田坂裕司, 村井祐一 「シンセティックジェットによる円管内の渦構造」日本流体力学会年会 2016 USB 講演論文集, No.107 (2016.9, 名古屋)

(12) Yuji Tasaka, Jumpei Ohkubo, Yuichi Murai, Tom Mullin: “An experimental study on development of perturbations toward a turbulent puff”, Poster presentation # 13 in International Symposium on Near-Wall Flows: Transition and Turbulence (2016.6, Kyoto)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：村井 祐一

ローマ字氏名：MURAI, Yuichi

所属研究機関名：北海道大学

部局名：大学院工学研究院

職名：教授

研究者番号(8桁)：80273001

(2)研究協力者

研究協力者：中野 直人

ローマ字氏名：NAKANO Naoto

研究協力者氏名：ペクシーノ ジョルジ

ローマ字氏名：PEIXINHO Jorge

研究協力者氏名：ボックス フィン

ローマ字氏名：BOX Finn

研究協力者氏名：ムリン トム

ローマ字氏名：MULLIN Tom

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。