

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420103

研究課題名(和文)乱流パフの個性とその生存率における出生の影響

研究課題名(英文)Characteristics of turbulent puffs and its dependence of generation scheme

研究代表者

田坂 裕司(Tasaka, Yuji)

北海道大学・工学(系)研究科(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) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：攪乱の添加により突発的に乱流遷移が生じる管内流れにおいて、局所乱流塊である乱流パフの遷移過程と遷移条件に着目して研究を進めた。(1)ピストン・シリンダ駆動による管内流れ装置(管長8m, 管内径32mm)を開発し、自然遷移レイノルズ数25,000以上を実現した。(2)乱流パフ内の渦構造を効果的に抽出する可視化画像処理計測法を開発した。実験を通し、(3)過去の代表者らの研究で得られた、複雑な層流-乱流界面の再現とそれらが内包する物理的意味を明らかにするとともに、(4)マイクロバブルの混入が乱流遷移に与える影響を統計評価した。

研究成果の概要(英文)：We studied process and condition of transition to a turbulent puff that is local turbulence observed in a pipe flow as catastrophic flow transition to turbulence. (1) A fine pipe flow facility with 8 m in the pipe length and 32 mm in the inner diameter of pipe that realizes laminar flow for more than 25,000 of Reynolds number without perturbation was constructed. (2) Novel visualization technique was established to extract vortical structure in a puff effectively. Through experiments, (3) complex edge of turbulence that was found by our previous study was represented in this system and physics embedded in the complex edge was elucidated, and further, (4) influence of adding microbubbles into pipe flows were investigated statistically: turbulent puffs were stabilized by adding bubbles.

研究分野：流体力学

キーワード：乱流遷移 流体計測

1. 研究開始当初の背景

これまで、熱対流など段階的に進む遷移過程についてはおおよそその実態が明らかにされてきた。一方で、攪乱の添加により突発的に生じる亜臨界乱流遷移については、比較的低レイノルズ数で生じる乱流パフ(図1)は、レイノルズ数に応じて異なるライフタイムを持つこと、持続可能な乱流状態に至るためには乱流パフの分裂とそれに伴う乱流スラグへの遷移が必要であることなど、解明に向けてのいくつかの手がかりが得られているものの、本質的な理解には至っていない。特に、乱流パフに向かう過程について、Edge of chaos や Chaotic saddle など数理モデルに基づくアイデアが提案されているが、それを実証する実験結果に乏しい状況である。

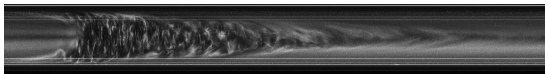


図1 乱流パフの可視化写真

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえて、代表者らによる過去の実験で得られた、複雑な層流・乱流境界を異なる実験装置で再現し、(1)異なる攪乱注入条件で形成された乱流パフ、ならびにその形成過程がどのような違いを持つかを明らかにすること、および流れの制御を目的として(2)微細気泡の混入がパフの形成に与える影響を明らかにすることを研究目的に設定した。

3. 研究の方法

新たに精緻な管内流れの装置を作成し、過去に得られた結果を再現することで、それが普遍的な現象であることを示す。それと同時に、流れの特徴量を抽出するための効果的な可視化計測手法を開発する。それらを用いて実験を行い、上記2つの目的を達成する。

4. 研究成果

(1) ピストン・シリンダ駆動方式による一定流量の管内流れ装置を作成した。可視化計測を主な計測手法とするため内径は32mmとし、管長は8mとした。検証実験の結果、攪乱を注入しない場合の自然レイノルズ数は25,000以上と非常に精度の高い装置であることが分かった。

(2) 乱流パフが内包する渦構造を効果的に抽出するため、フレック二色可視化法を応用した新たな計測法を開発した。これを用いることで、渦構造を画像上で異なる色のストライプとして認識し、非常に困難な速度場計測を経ることなく渦構造を得られるようになった。この結果は Journal of Visualization に論文発表するとともに、日本可視化情報学会で学生が講演し、優秀講演賞を受賞した。

(3) 研究代表者らの過去の研究で得られた、攪乱の強さに対して乱流パフの形成確率が単調増加しない、複雑な層流・乱流境界を再

現することができた(図2)。これにより、この結果が装置に依存する限定的な物では無く、現象に固有の本質的な特徴であることを示した。この結果については、数値解析で示されている、Edge of chaos との関連を今後検証していく必要がある。

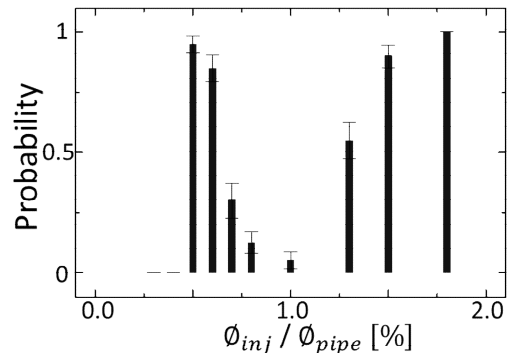


図2 攪乱強度に対する乱流パフ形成確率の推移(レイノルズ数は1900)

(4) 図2から分かるように、攪乱強度に対するパフ形成確率の変化はいくつかの極値を持つ。それらの条件で、注入された攪乱がどのように発展し乱流パフ形成に至るのかを染料による可視化計測(図3)と粒子画像流速計測法(PIV)による流れ場計測により調査した。その結果として、攪乱注入がヘアピン状の渦列形成を伴い、また渦の「頭」が間中央付近にとどまる場合にパフへの遷移確率が高まること(図3上)、ヘアピン渦が形成されても管中心を横切って逆の速度勾配の影響を受け、比較的速く減衰する場合にはパフの形成に至らないこと(図3中)、ヘアピン渦の形成に関係なく、十分に攪乱が強い場合には基本流が大きく乱され、パフが形成されること(図3下)などが明らかになった。

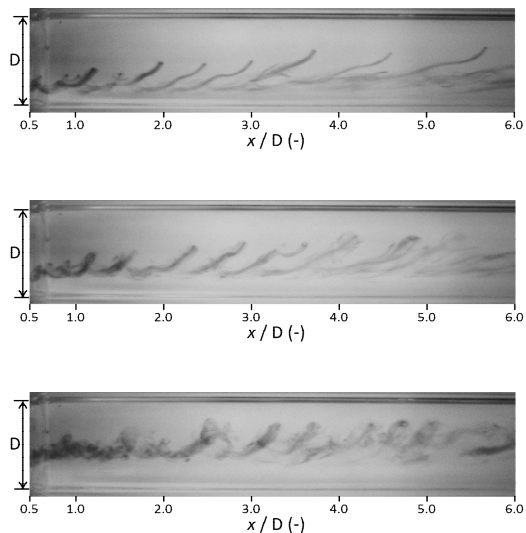


図3 注入された攪乱の染料による可視化。(上)攪乱強度0.5%,(中)1.0%,(下)1.8%

さらに、PIVによる速度場計測により、へ

アピン渦列が円管中央付近にとどまる場合には、放物線型の基本流が変曲点を持つ形にゆがめられ、それが比較的下流まで持続すること、より強い攪乱を加えた場合、初期の基本流の変形は大きい、すぐに変形が修正されることなどが明らかになった。パフの形成に関しては、境界層の遷移で見られるような線形不安定波により基本流が変曲点を持ち、それにより生じる二次不安定との関連性が考えられる。円管内流れの場合には基本流が線形不安定を生じないため、攪乱注入によって形成されるヘアピン渦列がその代わりとなることが考えられる。なお、PIVによる速度場計測から渦度場を算出し、攪乱注入によりもたらされる循環を評価したが、その値事態はパフ形成の有無に重要な影響を与えないことが示された。

(5) 管内流れ装置のヘッドタンク内部に白金線を設置し、電気分解によりサブミリ径の微細気泡を発生させて流れに混入した。単相の場合と同様に攪乱を与え、乱流パフの生成に気泡混入が与える影響を統計的に調査した。その結果として、微細気泡の添加は乱流パフの生成を促進することは無いが、一度形成されたパフを維持する効果があることが分かった(図4 単相(左)と気泡有り(右)、赤が下流の位置で乱流パフを観測した確率、緑が減衰過程のパフを観測した確率、青が層流状態を取る確率)。これに関しては、パフが内包する渦構造と微細気泡群との相互干渉により、気泡が渦構造内部に集積され、渦を増強するシナリオを想定しており、数値計算などを使った検証を行っている。

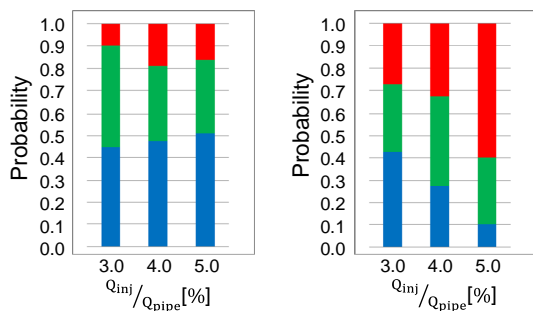


図4 下流側観測位置で得られた攪乱注入に対する流れ状態の確率。単相(左)と気泡有り(右)、赤が下流の位置で乱流パフを観測した確率、緑が減衰過程のパフを観測した確率、青が層流状態を取る確率

(6) 攪乱の注入により形成されるヘアピン渦は、主流と攪乱の強度、注入する穴の大きさなどにより決まり、周波数や個数などを制御するのは困難である。これを実現するためにシンセティックジェットアクチュエータを新たに開発し、形成されるヘアピン渦の周波数などをある程度制御することに成功した。今後はそれらの時間パラメータが乱流パフの形成に与える影響を明らかにする予定で

ある。

(7) 天然ガスパイプラインのミスト拡散問題に関連して、技術指導を行った。実ガス配管にも乱流パフに似たような局所乱流塊が不規則に形成され、ミストの拡散が予測困難な問題であることを示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

(1) Jumpei OHKUBO, Yuji TASAKA, Hyun Jin PARK, Yuichi MURAI: “Extraction of 3D vortex structures from a turbulent puff in a pipe using two-color illumination and flakes”, Journal of Visualization, (2016) (査読有り) DOI 10.1007/s00348-014-1867-5(11 pages).

(2) 竹内智朗, 田坂裕司: 「都市ガスパイプラインにおける物質拡散と乱流遷移の計測」ながれ, Vol.32, pp.233-239(2015)

<http://www.nagare.or.jp/download/noauth.html?d=34-3tokushu3.pdf&dir=76>

(査読無し)

〔学会発表〕(計 6 件)

(1) 石坂駿, 田坂裕司, 村井祐一: 「シンセティックジェットを攪乱として用いた管内流の遷移」第 58 回「乱流遷移の解明と制御」研究会 (2016.3.22) 首都大学東京日野キャンパス (東京都・日野市)

(2) Yuji TASAKA, Kotaro NAKAMURA an Yuichi MURAI: “Possibility of flow transition control by adding microbubbles” Workshop of “transition Control in Dispersed Flows” (2016.1.14) IReNav (Brest, France)

(3) 大久保順平, 田坂裕司, 村井祐一: 「ヘアピン渦列による円管ポアズユ流れの変形と乱流パフの生成について」日本流体力学会年会 2015 USB 講演論文集, No.099 (2015.9.28) 東京工業大学大岡山キャンパス (東京都・目黒区)

(4) 中村幸太郎, 大久保順平, 大石義彦, 田坂裕司, 村井祐一: 「管内流れの局所乱流塊生成におけるマイクロバブルの影響」混相流シンポジウム 2015 講演論文集 (USB, No.E152) (2015.8.4) 高知工科大学 (高知県・香美市)

(5) 大久保順平, 田坂裕司, Jorge Peixinho, 大石義彦, 村井祐一: 「拡大管流れの局所乱流塊における渦構造」第 56 回「乱流遷移の解明と制御」研究会 (2015.3.27) 電気通信大学 (東京都・調布市)

(6) 大久保順平, 大石義彦, 田坂裕司, 村井祐一: 「2色シート光とフレーク状粒子による円管内乱流パフの渦構造可視化」第 42 回可視化情報シンポジウム講演論文集 (Vol. 34, Suppl. 1), pp.229-230(2014.7.21) 工学院大学 (東京都・新宿区)

〔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〕

特になし。

6. 研究組織

(1)研究代表者

田坂 裕司 (TASAKA, Yuji)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：00419946

(2)研究分担者

無し

(3)連携研究者

村井 祐一 (MURAI, Yuichi)

北海道大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：80273001