

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06139

研究課題名(和文) 遷移境界層におけるストリーク不安定と乱流の初生に関する研究

研究課題名(英文) Streak instability and onset of turbulence in a transitional boundary layer

研究代表者

伊澤 精一郎(Izawa, Seiichiro)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90333856

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：平板層流境界層に短時間の吹き出しと吸い込みをかけて局所的に不安定な領域を導入し、この領域に対して下流でトリガーとなる噴流を様々な条件で噴射することで、乱流が発生しやすい条件について探った。生成された領域は流れ方向に伸びたストリーク状の低速及び高速領域を含み単独では乱流に遷移しないが、低速領域が拡大するような条件で噴流を噴射すると乱流の発生頻度が高まることがわかった。また、2点同時計測を行い乱流が検出された試行のみを抽出して調べたところ、導入した不安定領域が弱い場合、乱流は噴流との干渉によってその後流中に形成された低速領域と高速領域からなる2次的な構造が崩壊して誕生したことが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

境界層遷移の後期過程においては非線形性が卓越するため、乱流がどこでどのようにして誕生するのかは未だ詳らかではない。例えばバイパス遷移では、ストリークが2次不安定性により崩壊して乱流斑点を生じることが知られているが、その場所やタイミングを予測することは困難である。本研究は、乱流の初生に求められる条件を明らかにすることを目的として、境界層内の流体構造のどこを刺激すれば遷移の促進あるいは遅延につながるのかを調べたものである。これらの研究成果は、乱流遷移現象についての新たな視点を提供するとともに、境界層内の速度変動が非線形成長する遷移末期を対象とする流れの制御戦略にも資するものである。

研究成果の概要(英文)：A wind tunnel experiment was performed to investigate the requirements for providing a suitable environment for easily creating a localized turbulent region in a laminar boundary layer. A combination of a short-duration jet and suction was used to prepare a potentially unstable region upstream, and another jet was ejected downstream against the region at various timings and different relative spanwise locations. High- and low-speed regions appeared alternately near the wall in both the streamwise and spanwise directions inside a target region. The turbulent spot generation was enhanced when the triggering jet was used at the timing and location that enlarged the low-velocity area in the convecting disturbed region. Moreover, a two-point simultaneous measurement, which was performed to investigate the evolution of the turbulent region, revealed that the turbulent spot grew in the region following the weakly disturbed region.

研究分野：流体工学

キーワード：境界層遷移 局所不安定領域 ストリーク 乱流斑点

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

航空機や各種流体機械の流動抵抗を減らすためには、境界層の遷移過程に関する理解が必要不可欠である。特に、遷移後期過程における流体構造は乱流の発生と密接に関わっており、その変化を把握することは極めて重要である。これまでの研究から、ヘアピン渦や縦渦が乱流斑点の形成に大きな役割を果たしていることが知られているが、その過程は層流境界層内に局所的に乱流領域が発生し始めるような非線形性の強い非常に複雑な現象であるため、どのような流体構造が乱流の初生を引き起こすのかについては未だ詳らかにはなっていない。

2. 研究の目的

境界層のバイパス遷移を特徴づけるストリーク構造の不安定性を取り上げ、これに起因した乱流の初生現象を実験的に調べることでその動力学を明らかにすることが研究の目的である。ストリーク構造の励起には一般に小突起列などが用いられるが、これらの方法ではストリークの強さや間隔を変更したければ装置そのものを交換しなくてはならないことに加え、その崩壊がランダムに起こるため再現性に乏しいのが難点であった。そこで本研究では、まず吹き出しと吸い込みの組み合わせにより層流境界層中にストリーク状の構造を含んだ領域を作り出し、この人為的に導入した局所不安定領域に対して、下流でトリガーとなる噴流を様々な条件のもとで噴射するという方法をとることで、現象の再現性の担保を図ることとした。そしてこの一連の操作を通して、たとえ弱い噴流であっても適切な場所とタイミングで噴射すれば乱流遷移が促進されるケースを拾い上げ、乱流の初生に関わる流動現象について検討した。

3. 研究の方法

(1) 先行研究により開発した翼型の外乱発生装置を一樣流中に設置し、平板前縁に向けてシート状の攪乱を発生させる。本装置はコンプレッサーに接続されており、その後縁部からシート状の噴流を噴射することで装置自身の作る速度欠損を補填し、基本流の速度分布を変えずに局所的に強い乱れだけを導入することができるように設計されている。この装置を用いて、境界層外部の乱れの影響を極力低減した状態で、境界層のバイパス遷移過程について調査する。

(2) 3個のスピーカーを接続した攪乱導入装置を作成し、平板層流境界層に対して壁面設けた小孔から短時間の吹き出しと吸い込みを行うことで、境界層内に局所的に不安定な領域を導入する。その際、小孔の相対位置や駆動信号のタイミングを変え、様態の異なる不安定領域を複数用意する。次いで、250 mm 下流の位置でトリガーとなる噴流を噴射し、流れ場の変化の様子を熱線流速計により計測する。

(3) 風洞実験では取得できる情報に限りがあるため、有限差分法による数値計算も併せて実施する。計算ではクランク型やS字型といった形状が単純な渦を取り上げ、これらが境界層内に置かれたときのふるまいを調べることで、乱流の初生に関わる流体構造についての知見を獲得し、現象の理解の一助とする。

4. 研究成果

(1) バイパス遷移におけるストリーク構造の崩壊は、乱流斑点形成の主要な道筋の一つである。そこでまずストリーク構造に着目し、風洞実験と数値計算の両面から研究を進めた。風洞実験では、境界層外部の乱れの影響を取り除くため、一樣流に加える外乱を平板厚さの1/5程度のシート状領域に絞り、平板境界層の応答について調査した。その結果、境界層内には図1に示すような低速領域と高速領域がスパン方向に交互に並ぶストリーク構造が生じ、sinuous不安定性によって蛇行した後乱流斑点が形成される様子が捉えられた。一方数値計算では、まず層流境界層にそのものに噴流を噴射し、そのわずかな強さの違いで乱流化する条件としない条件を用意し、それらの流れ場を比較することで乱流化の鍵となる構造を探った。その結果、噴射直後に形成された流れ方向に並んだヘアピン渦の後に現れる、周囲の縦渦とのつなぎ変えにより誕生した脚と脚の間隔が広いヘアピン渦が、渦構造を複雑化させる鍵となることが明らかとなった。さらに低速ストリークに対して噴射して varicose 不安定性を刺激したところ、壁面垂直方向に傾いた縦渦の出現が乱流遷移の促進につながることがわかった。

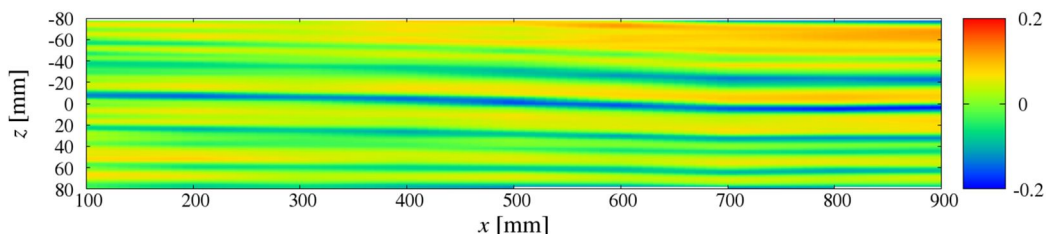


図1 境界層内の速度変動

(2) 自然発生的に現れるストリークは、その崩壊地点を制御することが難しい。そこで、上記の3で述べた方法に従い、層流境界層中に同じ不安定領域が繰り返し現れる条件を整え、この領域に対してトリガーとなる噴流を噴射して流れ場の変化を計測した。生成された局所不安定領域には流れ方向に伸びたストリーク状の低速及び高速領域が含まれているが、下流で2次不安定性が発現することはない、トリガーがなければ乱流に遷移しない(図2)。乱流遷移の促進という観点からすると、不安定領域中の低速領域が通過するタイミングで噴流を噴射しても効果はなく、後続の高速領域に対して噴射したり、あるいはスパン方向に隣接する高速領域との間で噴射したりするなどして、下流で低速領域が拡大するような場合に乱流領域の発生頻度が高くなることが明らかとなった。そこで、下流に固定プローブを設置して2点同時計測を行い、乱流が検出された試行のみを抽出してアンサンブル平均を求め、局所不安定領域と短時間噴流の干渉から乱流の発生に至る過程について調査した。その結果、発生した局所乱流領域は乱流斑点であり、またそれは上流で導入した不安定領域そのものが乱流に遷移して形成されたわけではなく、噴流との干渉によってその後流中に形成された低速領域と高速領域からなる2次的な構造が、下流で崩壊して誕生したものであることが明らかとなった。

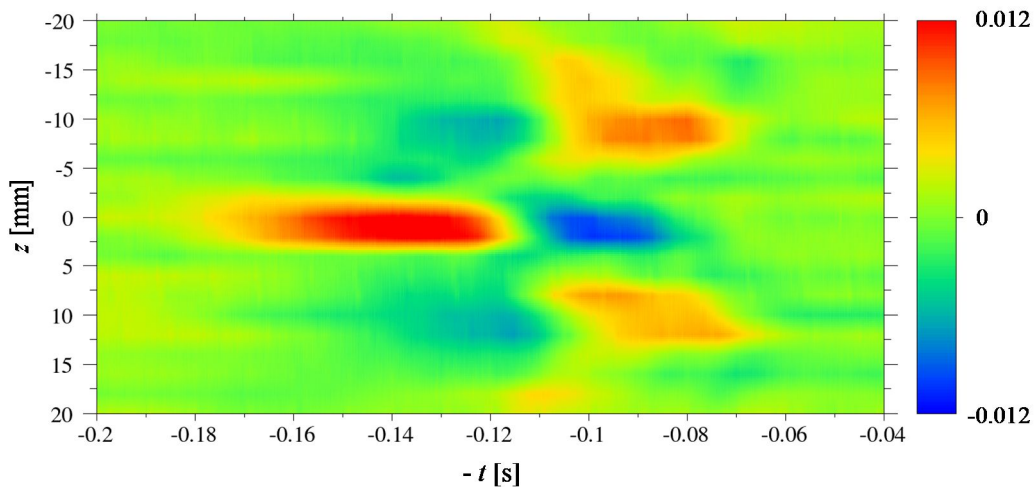


図2 導入した局所不安定領域の一例(速度変動分布)

(3) 数値計算により、層流境界層中に人為的に置かれた渦のふるまいについて調べた(1)で述べた脚と脚の間隔が広いヘアピン渦は、その間隔の広さゆえに減衰しにくいという特徴の他にも、壁面垂直方向に傾いているため、境界層の持つ速度勾配によって引き伸ばされて成長しやすいという特徴を併せ持っている。そこで、このヘアピン渦をクランク状の渦として単純化し、その循環の強さを変えて成長の様子を観察した。その結果、境界層の速度勾配によって渦は壁面垂直方向とスパン方向の2方向に傾いた縦渦となり、渦の強さがある程度以上であれば、粘性拡散に打ち勝って乱流に遷移することがわかった。また、渦の形状の変化と流れ場の関係について詳細に調べたところ、伸長した渦の変曲点付近で新たな渦が生まれ、その渦の誕生がきっかけとなって流体構造の複雑化が進展することが示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Seiichiro Izawa, Hiroko Isawa, Yu Nishio, Yu Fukunishi	4. 巻 13
2. 論文標題 Receptivity to freestream periodic vorticity disturbance on a flat plate with an elliptic leading edge	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kota Tomiuka, Yu Nishio, Seiichiro Izawa, Yu Fukunishi	4. 巻 15
2. 論文標題 Bypass transition in a boundary layer subject to sheet-type freestream disturbance	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Science and Technology	6. 最初と最後の頁 1～12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jfst.2020jfst0001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kensuke Okada, Masato Hirota, Seiichiro Izawa, Yu Fukunishi	4. 巻 14
2. 論文標題 Experimental study on onset turbulence in a flat-plate boundary layer	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Science and Technology	6. 最初と最後の頁 1～12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jfst.2019jfst0008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Joe Yoshikawa, Yu Nishio, Seiichiro Izawa, Yu Fukunishi	4. 巻 9
2. 論文標題 Key structure in laminar-turbulent transition of boundary layer with streaky structures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Theoretical and Applied Mechanics Letters	6. 最初と最後の頁 32～35
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.taml.2019.01.005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 吉川 穰, 西尾 悠, 伊澤 精一郎, 福西 祐	4. 巻 84
2. 論文標題 ストリークの存在する境界層において乱流遷移のきっかけとなる流れの構造	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 17-00478
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.17-00478	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Joe Yoshikawa, Yu Nishio, Seiichiro Izawa, Yu Fukunishi	4. 巻 3
2. 論文標題 Key vortical structure causing laminar-turbulent transition in a boundary layer disturbed by a short-duration jet	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 13904
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.3.013904	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 伊澤 精一郎, 富宇加 洸太, 廣田 真人, 福西 祐
2. 発表標題 一様流中のシート状攪乱による境界層のバイパス遷移
3. 学会等名 日本流体力学会年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 柳澤 幸澄, 岡田 健佑, 廣田 真人, 伊澤 精一郎, 福西 祐
2. 発表標題 平板境界層中の局所的に乱れた領域と噴流の干渉による不安定化の促進
3. 学会等名 日本流体力学会年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡田 健佑, 伊澤 精一郎, 福西 祐
2. 発表標題 遷移境界層における乱流の始まりを探る実験的研究
3. 学会等名 日本機械学会東北支部 第54期総会・講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomohiro Sato, Yu Nishio, Seiichiro Izawa, Yu Fukunishi, Joe Yoshikawa
2. 発表標題 Numerical study of laminar-turbulent transition triggered by artificially introduced vortex
3. 学会等名 The 8th International Conference on Fluid Mechanics (ICFM) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Joe Yoshikawa, Yu Nishio, Seiichiro Izawa, Yu Fukunishi
2. 発表標題 Key structure in laminar-turbulent transition of boundary layer with streaky structures
3. 学会等名 The 8th International Conference on Fluid Mechanics (ICFM) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤 友裕, 吉川 穰, 西尾 悠, 伊澤 精一郎, 福西 祐
2. 発表標題 境界層中に人為的に渦を置くことで乱流の初生に関わる流体構造を探る試み
3. 学会等名 日本流体力学会年会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Joe Yoshikawa, Yu Nishio, Seiichiro Izawa, Yu Fukunishi
2. 発表標題 Vortical Structures Causing Difference in Boundary Layer Transitio
3. 学会等名 The 16th European Turbulence Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yu Fukunishi, Yu Nishio, Seiichiro Izawa, Joe Yoshikawa
2. 発表標題 How Turbulence Begins in a Transitional Flat-Plate Boundary Layer
3. 学会等名 The 9th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 坂田 大晃, 森上 泰行, 西尾 悠, 伊澤 精一郎, 福西 祐
2. 発表標題 シート状攪乱に対する楕円形前縁部の受容性
3. 学会等名 日本機械学会2017年度年次大会
4. 発表年 2017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
研究分担者	福西 祐 (FUKUNISHI Yu) (60189967)	東北大学・工学研究科・教授 (11301)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	西尾 悠 (NISHIO YU) (70712743)	成蹊大学・理工学部・助教 (32629)	