

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420110

研究課題名(和文) 平板乱流境界層におけるトリッピングの影響

研究課題名(英文) Effect of tripping device on turbulent boundary layer

研究代表者

松原 雅春 (MATSUBARA, Masaharu)

信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号：10324229

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では5種類のトリッピング装置を用いて乱流境界層に対するそれらの影響を実験的に調べた。トリッピングとして、従来の円柱に加え、72個の小スロットスパン方向に並べた攪乱装置を壁に取り付けて使用した。熱線流速計と壁にスパン方向に64個並べた圧力センサーを用いて測定したところ、流速分布や乱れ分布はトリッピングの影響をほとんど受けないのに対し、速度-圧力相関にはトリッピングによりその分布が変化することがわかった。本実験は低いレイノルズ数範囲だけの結果ではあるが、今後、速度-圧力相関などの高次の乱流統計量を扱う場合には、トリッピングの影響にも注意しなければならないことが示唆された。

研究成果の概要(英文)：The present study has experimentally revealed tripping influence on a turbulent boundary layer with five different tripping devices including the classical circular rods and the wall-mounted disturbance array that has 72 slots aligned in spanwise direction. Measurements were made with a single hot wire and a spanwise sensor array of 64 MEMS microphone mounted on the wall. The experimental results indicated that the velocity-pressure correlation is sensitively changed by the tripping devices, while the mean velocity profile is not remarkably affected. Though this tripping influence on the correlation was confirmed only in the low range of Reynolds number, it warns that the transition process should be taken into consideration in investigations on turbulent boundary layer flow.

研究分野：乱流・層流乱流遷移

キーワード：乱流 境界層 トリッピング 速度圧力相関

1. 研究開始当初の背景

一世紀以上にわたる乱流研究において、平板乱流境界層はユニーク、つまり種類しかないと多くの研究者が考えてきた。しかし乱流境界層に対するいくつかの数値計算結果には流速変動のピーク値と外層の平均流速分布において無視できない相違が存在していることが明らかとなった^①。その原因の一つとして、上流での境界層遷移が下流の乱流境界層の性質に影響している可能性が考えられる。また、この影響は乱流中の攪乱構造にも及んでいることが考えられる。このことは計算や実験を違った条件で行う場合は、乱流境界層の性質が異なることを示唆しており、乱流境界層に関する様々な研究結果を統一的に説明しようとする近年の動向に、警笛を鳴らすものである。

2. 研究の目的

乱流境界層に関しては長い研究が続けられてきたが、近年かなり高いレイノルズ数の乱流境界層が数値的にシミュレーションできるようになり、その計算結果との比較において実験も再び注目されてきている。特に乱流境界層の流速分布や乱れ強さ分布、さらに乱れのスペクトル等を統一的に説明しようとする研究が、理論家も含めた多くの研究者によって試みられてきている。ところが、圧力勾配がない平板乱流境界層に対する実験および計算を統合的に比較した、それぞれの結果が明らかに違っていることがわかってきた^①。特に壁面近くでの乱れ強さの最大値と主流近くの外層の平均流速分布が違い、それらの違いは計算結果同士でも認められた。この違いは計算手法の違いや実験誤差で合理的説明できる範囲を明らかに超えるものである。この違いを説明する一つの可能性として、上流の遷移過程が下流の乱流境界層に影響しているためと考えられる。そこで、圧力勾配のない平板乱流境界層で乱流遷移を励起するトリッピングを変えて実験を行ってみた。トリッピングは乱流境界層の一般的な実験で乱流遷移を促進するための装置であるが、実験ではトリッピングを5種類用いて比較した。

3. 研究の方法

本実験では回流型の風洞を用いた。インバータによって回転数を制御するブローヤより送りだされた空気はメッシュとハニカムにより整流され縮流比9の三次元ノズルにより縮流され、試験部へ流入する。試験部は幅400 mm、高さ600 mm、長さ4350 mmである。試験平板は先端がノズル出口より1510 mm下流に鉛直に設置されており、座標系は平板前縁の中心を座標原点にとり、流れ方向を x 、壁面垂直方向を y 、スパン方向を z とする。直径2.5 μm の白金線をセンサとしたI型熱線プローブを用いた。壁面圧力の測定には64個のセンサを持つ圧力センサアレイを用い

た。このセンサアレイは直径0.5 mmの孔がスパン方向に0.6 mm等間隔で並べられ、それぞれの孔は64個のデジタルMEMS(Micro Electro Mechanical Systems)マイク(EPCOS製, T4030)に接続されている。マイクの周波数特性は10 Hzから10 kHzまで ± 3 dBのフラットな特性をもっている。マイククロフォンの出力は四次オーダーのPDM $\Sigma\Delta$ -modulatorであり、アナログ信号に変換するためにサンプルしたデジタル信号を20 kHzのローパスフィルタをかけている。この圧力センサを試験平板前縁から $x=1530$ mmの位置に試験平板と段差が生じないように、壁面に埋め込むように設置した。

トリッピングデバイスや設置する位置により境界層の発達の様子が違うため $x=1530$ mmで流れの条件を合わせるために、主流速 U_∞ を調整しそれぞれの実験で乱流境界層の運動量厚さ θ [m]と動粘性係数 ν [m^2/s]に基づくレイノルズ数 $Re_\theta = U_\infty \theta / \nu$ をおよそ2700から2800の間に合わせ実験を行った。ここで運動量厚さ θ は測定した平均流速分布を補間し求めている。トリップデバイスはTable 1に示すように5種類である。また乱流境界層計測から得られたスケーリングパラメータを示している。ここで x_t とは前縁からトリッピングまでの距離または範囲である。V1は5枚の樹脂製のテープにV字形の突起を打ち込み(以下Vテープとする) $x=315$ mmから415 mmの間に並べて貼り付けた。ここで、V字の縦の長さは5.5 mm、幅4 mm、高さは0.5 mmであり、Vの頂部は下流方向を向くように間隔が3.5 mmでスパン方向に並んでいる。V2は7枚のVテープと1枚の100番の紙やすりを $x=150$ mmから400 mmの間に並べて貼った。C1からC3は外径 $\Phi=1.0, 2.0, 6.0$ mmのステンレス管をそれぞれ $x=150$ mmに1本壁面上に貼り付けた。壁面摩擦速度 u_t [m/s]の見積りには、Kapil A. Chauhan^②が示した平均流速を近似式に当てはめる手法を用いた。

Tab. 1: Scaling parameter

	x_t [mm]	Re_θ	U_∞ [m/s]
V1	315-415	2740	17.1
V2	150-400	2790	14.0
C1	150	2810	13.9
C2	150	2770	13.0
C3	150	2740	9.5

4. 研究成果

Fig. 1に熱線風速計により測定した平均流速分布を示す。平均流速も速度変動もすべてのケースで乱流境界層の分布の特徴を有していることが分かる。 $y^+=4$ 以下の粘性底層ではそれぞれのケースで結果にばらつきがあるのは、対数軸で書くと壁からの位置の誤差が相対的に大きいことと、流速の計測が壁への熱放出の影響をうけるためと思われる。 $y^+=120$ から1000の間ではC3, V3, V4が

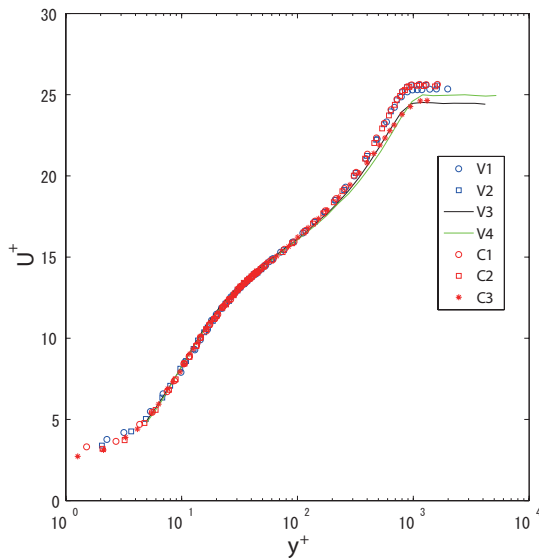


Fig. 1: The streamwise mean velocity profiles.

他のケースと比べて U^+ が小さい。また V1, V2, C1, C2 でも $y^+=1000$ である外層でずれている。これは U_{∞}^+ が一定ではないためであると思われる。 Re_{θ} の増加とともに U_{∞}^+ は増加するはずであるが、 Re_{θ} が他の実験のケースよりも高い V3, V4 で主流 U_{∞}^+ が低い結果となっている。これは U_{∞}^+ の違いが単に Re_{θ} の影響でないことを示している。壁位置から $y^+=200$ の対数領域まではすべてのケースはよく一致しており、どのトリップを用いた実験でも壁近傍の平均流速分布は普遍的であることが分かる。

Fig. 2 に乱れ強さ分布を示す。V2, C1 と C2 はそれぞれよく一致している。V1 では外層で他のケース一致しているが、他のケースに比べて乱れ強さのピーク値が低い傾向にある。C3 では、乱れ強さはピーク位置である $y^+=10$ から $y^+=1000$ の外層まで全体的に高い傾向を示している。平均流速分布では壁位置から対数領域はよく一致していた一方で、乱れ強さ分布はトリッピングごとにずれが見られた。また C3 は境界層厚さを超えるトリッピングを用いているが、それでも他のケースと同様に平均流速分布は壁近くで急激な流速上昇、乱れ強さ分布の壁近傍の急激なピークなどの壁乱流の特徴を捉えられており、量的にも他のケースとの違いは小さい。

Fig. 3 は構造の空間発達を評価するためにそれぞれのセンサ孔と熱線センサ部の相対距離別のデータの空間相関係数 R_{up} の分布を求めた。横軸はセンサ孔と熱線センサ部の相対距離 Δz^+ であり、縦軸は熱線センサの壁からの距離 y^+ を示している。オレンジ色が正の相関、緑が負の相関値を示しており、等値線間隔は正の相関では 0.5 % であり、負の相関では 2 % である。また白のラインは 0 の相関を示している。実験は圧力センサアレイと同じ x 位置で熱線を z 方向のトラバースさせて行った。

Fig. 3 からどのケースも壁近傍から外層に向かって広がっている正の相関が特徴的であ

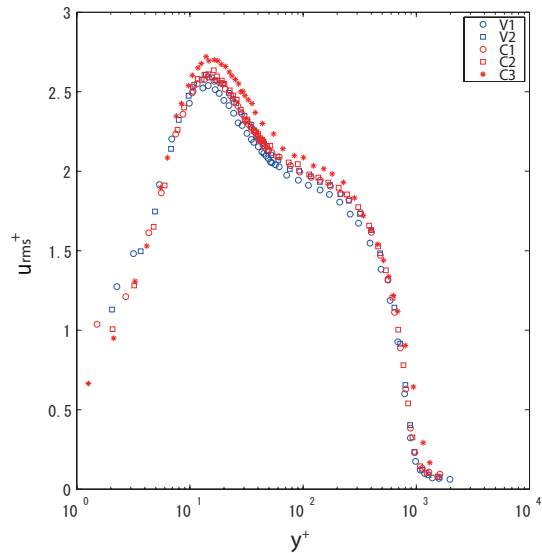


Fig. 2: Distributions of streamwise velocity fluctuation.

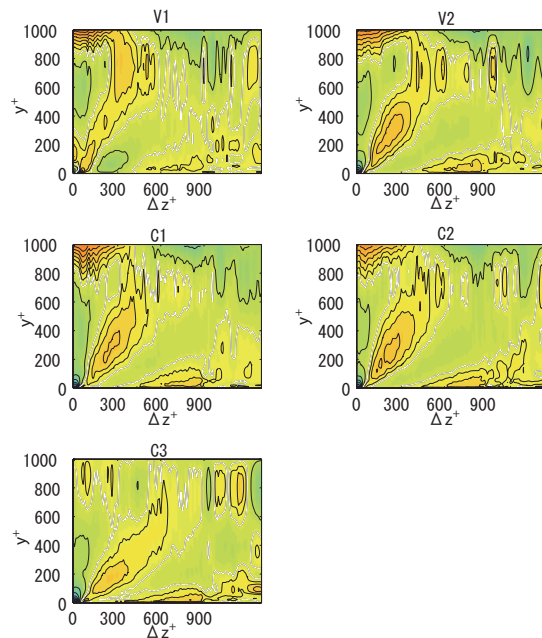


Fig. 3: Contour maps of correlation coefficient R_{up} in $y-z$ cross section at $\Delta t=0$. Contour spacing is 0.5% in the positive region and 2% in the negative region. The positive and negative regions are colored in orange and green, respectively. The white line indicates a zero contour.

ある。V1 では壁からスパン方向拡がりの角度が小さく、幅の狭い正の相関が表れる。さらに $\Delta z^+=0$ まで正の相関が $y^+=200$ の付近で見られる。V2, C1, C2 では正の相関は似たような傾向を持ち、V2 はそれらの中でも強い相関が広がっている。C1 は V2 よりも正の相関の幅が幅広く分布している。C3 に関しては正の相関の値が小さく拡がり角度が大きい。 $\Delta z^+=800$ で壁近傍に分布している正の相関も V2, C1, C2, C3 で見られた。その拡がり方もトリッピングの強さに依存しており、特に円柱のトリッピングを使った実験では、C3 が最もスパン方向へ広がっており、C1 では逆に拡がり方が小さい傾向にある。

平均流速や乱れ強さ分布などの統計量ではトリッピングによる差異は比較的小さいのに対し、速度-圧力相互相関分布ではトリッピングにより大きな違いが表れており、乱流境界層中の攪乱構造の違いを敏感に捉えられていると考えられる。このことは遷移過程が下流で発達する乱流境界層の攪乱構造に影響を与えていることを示唆している。乱れ強さ分布ではピーク値の違いが見られたが、平均流速分布は対数領域から粘性底層までよく一致しており、壁近傍の平均流速分布は普遍的であることが分かった。

速度-圧力相互相関図は平均流速や乱れ強さ分布などの統計量とは異なりトリッピングにより大きな違いが表れた。遷移過程が下流で発達する乱流境界層の攪乱構造に影響を与えていることを示しており、乱流境界層の実験において遷移過程の影響も考慮する必要があることが明らかとなった。

<引用文献>

(1) P. Schlatter and R. Örlü, 2010, Assessment of DNS data for turbulent boundary layers, *J. Fluid Mech.* (2010), vol. 659, pp. 116-126

(2) Kapil A. Chauhan, Peter A. Moonkewitz and Hassan M. Nagib, Criteria for assessing experiments in zero pressure gradient boundary layers, *Fluid Dyn. Res.* (2009), vol. 41, 2, 021404.

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 Masaharu Matsubara, Masanari Nagasaki, Akihito Yokoi, Muhammad Azmeer, Advection of a coherent structure in a turbulent boundary layer, *Proc. ICJWSF 2015*, 査読有, 2156106, (6 pages), 2015.

② Masaharu Matsubara, Daisuke Saito, Yuta Takahashi, Shun Horii, Very large-scale fluctuation in turbulent channel flow at low Reynolds number, *Proc. ICJWSF 2015*, 査読有, 2156114, (6 pages), 2015.

[学会発表] (計 18 件)

① 松原雅春, 二次元チャンネル流における亜臨界遷移について (基調講演), 日本機械学会北陸信越支部第 53 期総会・講演会講演論文集, 長野, 1511(2 pages), 2016 年 3 月 5 日.

② 横井章人, 堀内伊織, 松原雅春, 乱流境界層における線形モードの時空間構造, 日

本機械学会北陸信越支部第 53 期総会・講演会講演論文集, 長野, 1518(2 pages), 2016 年 3 月 5 日.

③ 堀井舜, 佐川佳幸, 齊藤大輔, 高橋勇太, 松原雅春, 広範囲レイノルズ数における二次元チャンネル流の大規模構造について, 日本機械学会北陸信越支部第 53 期総会・講演会講演論文集, 長野, 1519(2 pages), 2016 年 3 月 5 日.

④ Akihito Yokoi, Muhammad Azmeer, Iori Horiuchi, Masanari Nagasaki, Masaharu Matsubara, Spatiotemporal structure of a linear mode in a turbulent boundary layer, Twelfth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan, 494-495, 2015, Oct. 29.

⑤ 堀井舜, 佐川佳幸, 齊藤大輔, 高橋勇太, 松原雅春, 二次元乱流チャンネル流における大規模構造のスパン方向スケール, 日本流体力学会年会 2015, 東京, 220(2 pages), 2015 年 9 月 27 日.

⑥ Masaharu Matsubara, Masanari Nagasaki, Akihito Yokoi, Taiki Mishiba and Konosuke Mastumoto, Temporal-spatial structure of the linear mode in a turbulent boundary layer, iTi Conference in Turbulence 2014, Bertinoro, 34-35, Oct. 27-29, 2014.

⑦ 長崎将成, 横井章人, 松原雅春, 平板乱流境界層における壁面摩擦速度と周期攪乱の位相速度の関係, 日本流体力学会年会 2014, 仙台, 252(2 pages), 2014 年 9 月 15 日.

⑧ 宮崎誠, 堀井舜, 山崎 雄生, 松原 雅春, 移動カメラによる二次元チャンネル流における乱流斑点の成長の可視化, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 0903(2 pages), 2014 年 10 月 26 日.

⑨ 宮崎誠, 堀井舜, Yimprasert Sattaya, 松原雅春, 無機繊維か遷移二次元チャンネル流の壁面摩擦に与える影響, 日本機械学会北陸信越支部第 52 期総会・講演会, 柏崎, 2014 年 3 月 7 日.

⑩ 齊藤大輔, 高橋勇太, 松原雅春, 二次元チャンネル乱流における攪乱の大規模構造の性質について, 日本機械学会北陸信越支部第 52 期総会・講演会, 柏崎, 年 3 月 7 日.

⑪ 長崎将成, 横井章人, Muhammad Azmeer, 松原雅春, 平板乱流境界層における周期攪乱の位相速度と壁面摩擦速度の関係,

日本機械学会北陸信越支部第 52 期総会・講演会, 柏崎, 2014 年 3 月 7 日.

信州大学・学術研究院工学系・教授
松原 雅春(MATSUBARA, Masaharu)
研究者番号 : 10324229

- ⑫ Masaharu Matsubara, Makoto Miyazaki, Kenta Watanabe, Mathias Kvik, Fredrik Lundell, Daniel Söderberg, Effect of nano-fibrillated cellulose suspension on transitional two-dimensional channel flow, 4th Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows, ICJWSF2013-1222 (5 pages), Nagoya, Japan, 2013, Sep. 20.
- ⑬ Taiki Mishiba, Yasuyuki Sendai, Konosuke Matsumoto, Kousei Ienaka, Masaharu Matsubara, Influence of tripping on spatiotemporal correlation between velocity and wall pressure in a turbulent boundary layer, 4th Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows, ICJWSF2013-1149 (4 pages), Nagoya, Japan, 2013, Sep. 20.
- ⑭ Masaharu Matsubara, Masanari Nagasaki, Konosuke Mastumoto, Taiki Mishiba, Linear-disturbance structure in a turbulent boundary layer, 4th Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows, ICJWSF2013-1211 (4 pages), Nagoya, Japan, 2013, Sep. 19.
- ⑮ Shohei Shirosaki, Daisuke Saito, Shun Tazoe, Shin Aruga, Masaharu Matsubara, Comparison of linear disturbance in a two-dimensional turbulent jet with a linear stability theory, 4th Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows, ICJWSF2013-1217 (6 pages), Nagoya, Japan, 2013, Sep. 19.
- ⑯ 宮崎誠, 松原雅春, Mathias Kvik, 渡辺健太, Fredrik Lundell, Daniel Söderberg, 遷移二次元チャンネル流に対するナノファイバーセルロース懸濁液濃度の影響, 日本流体力学会年会 2013, (3 pages), 東京, 2013 年 9 月 14 日.
- ⑰ 岩谷芳拓, 松原雅春, 平板前縁に突入した渦輪による境界層内での攪乱の発達について, 日本流体力学会年会 2013, (2 pages), 東京, 2013 年 9 月 14 日.
- ⑱ 齊藤大輔, 関大輔, 松原雅春, 低レイノルズ数における二次元チャンネル乱流の構造, 日本流体力学会年会 2013, (2 pages), 東京, 2013 年 9 月 12 日.

6. 研究組織

(1)研究代表者