

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04262

研究課題名（和文）境界層遷移予測法のフレームワークとなる新たな攪乱抽出法を用いた風洞実験

研究課題名（英文）Wind tunnel experiments as framework of boundary layer transition prediction using a new disturbance extraction method

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） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：流れの中の物体の表面には境界層と呼ばれる薄いせん断層が発達し、下流にいくと乱流へと遷移する。遷移すると壁面での摩擦が大きくなるため、遷移を遅らせれば旅客機などの輸送機器の抵抗軽減につながる。物体周りの流れの乱れ（主流乱れ）が翼などの前縁から境界層に入る受容過程は解析が困難な非線形現象であるため、本研究では乱流研究で成功している線形応答抽出法を受容過程の解明に試みた。実験では主流乱れに人工攪乱を重ねさせ境界層内の速度を位相平均して周期成分を求めた。その結果、周期成分が攪乱の強さに対し線形応答しており、線形応答抽出法が受容性の研究において強力なツールとして使える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

境界層が層流から乱流へと遷移すると、壁面における摩擦や熱交換が数倍も大きくなるため、遷移の制御や予測は工業上の設計で重要である。しかし、遷移予測法は未だ確立されてない。本研究では遷移予測法の開発の妨げとなっていた前縁受容性の解明に対し、線形応答抽出法が適用できることを証明した。今後、さまざまな状況の受容過程に対し線形応答抽出法を用いた研究を行えば、遷移の制御や予測が可能となる。遷移制御を利用すれば大幅な摩擦抵抗の軽減が見込まれ、流体機械の効率化、特に旅客機などの低燃費化につながると考えられる。

研究成果の概要（英文）：A boundary layer on the surface of an object in a flow, undergoes a transition to turbulence downstream. The transition causes high friction of the object, so delaying the transition can reduce drag on transport equipment such as passenger planes. The receptivity process, in which turbulence around an object (free stream turbulence) enters the boundary layer via the leading edge of a wing is difficult to analyze because of is a nonlinearity. This study attempted to elucidate the receptivity process experimentally using a linear response extraction method, which has been successfully used in turbulence research. Artificial disturbance was superimposed on the free stream turbulence, and the periodic components were obtained by phase averaging the velocities in the boundary layer. The results showed that the periodic components respond linearly to the disturbance intensity, indicating that the linear response extraction method can be used as a powerful tool in receptivity studies.

研究分野：流体工学

キーワード：乱流 境界層 主流乱れ 層流乱流遷移 非線形 線形応答

1. 研究開始当初の背景

旅客機の翼やガスタービンの翼列などでは、その壁面上に境界層と呼ばれる速度勾配が強いせん断層が発達する。境界層は層流から乱流へと遷移すると、壁面における摩擦や熱交換が数倍も大きくなるため、遷移の制御や予測は工業上の設計で重要である。実際、旅客機のジェットエンジンでは、エンジン全体を覆う樽状のカバーであるナセルの形状を最適化し、層流領域を広げることで抵抗低減を実現している。

そこで代表研究者は遷移予測法の確立のため、主流乱れによる平板上に発達する境界層の遷移について、流れの可視化や流速測定の実験をしてきた。その結果、平板遷移では初めに現れる乱れ（一次不安定性）が線形安定性理論で予測される Tollmien-Schlichting 波 (T-S 波) だけでなく、ストリークが成長し、その後横方向に波状に変形して乱流へ遷移することを突き止めている。T-S 波もストリークも狭い空間範囲の点状に崩壊し、その後は局在的な乱流領域が下流に移流しながら流れ方向と横方向に一定速度で成長して乱流斑点を形成・成長し、それが境界層を埋め尽くされることで遷移が完了する。この位置が遷移点となる。乱流斑点の成長速度はわかっているので、乱流斑点の発生の確率を求めれば遷移点の予測ができ、さらに乱流斑点の発生予測には一次不安定性 (T-S 波またはストリーク) の発生・成長を予測すれば良い。一次不安定性の成長からその崩壊する直前までは線形現象とみなせ、その過程はナビア・ストークス方程式を線形化した Orr-Sommerfeld 方程式により高精度で予測できる。一次不安定性の発生は主流乱れが境界層上流に入り込む受容過程で決まり、この過程が線形現象であれば、主流の様々な乱れに対する受容過程を調べることで、遷移予測が可能となる。なぜなら、主流乱れを種々の攪乱に分解し、それぞれの攪乱による遷移過程を足し合わせ (線型結合) をすることで、主流乱れから乱流崩壊までの過程が再現できるからである。しかし、申請者は主流乱れと遷移過程の関係を系統的実験で調べた結果、主流乱れに対する前縁受容性が強い非線形現象であることが示唆された。強い非線形があれば、原因 (主流乱れ) と結果 (遷移) を単純に観測するだけでは受容性における数学的なモデルの確立が難しくなる。それだけでなく、例えば単一の攪乱に対するモデルができて、その非線形性を解明しない限り遷移予測はできない。これは、乱流壁せん断流中に発生する壁附着構造 (wall-attached structure, 低速ストリークやヘアピン渦などの総称) の発達過程が解明できて、乱流壁せん断流の統計量を求められないこととよく似ている。

2. 研究の目的

境界層遷移の主要な要因の一つに主流乱れがある。主流乱れが物体前縁で受容され、境界層内に入り、その後境界層内で発生した乱れが成長し、崩壊して乱流斑点をつくることで遷移すると考えられている。主流乱れの強さと境界層内の乱れのエネルギー成長率の関係が調べられており、その結果、境界層内の乱れのエネルギー成長率は主流乱れ強さに比例しないことが示されている。主流乱れと境界層内の乱れの成長過程の間には主流中の攪乱が受容されて境界層内に入る過程があり、主流乱れの前縁受容過程に非線形性があることが示唆される。強い非線形性を持つ現象では原因と結果 (この場合、主流乱れと境界層遷移) を単純に結びつけることができないため、解明が難しい。

近年、強い非線形現象である乱流境界層に人工的な周期攪乱を挿入し、その下流の速度変動を攪乱の位相に基づくアンサンブル平均することによって乱流境界層から乱れを抽出する線形応答抽出法が開発されている。挿入した攪乱の振幅が小さい範囲ではその振幅はアンサンブル平均によって得られた境界層内の速度変動振幅と線形性を示し、乱流境界層内に本来ある乱れを抽出していると考えられる。そのため、この手法は非線形現象の解明に有効であると考えられる。

主流乱れの前縁受容解明に向け、主流乱れと前縁受容による境界層内の乱れの因果関係を明らかにする。そこで、本研究では線形応答抽出法を応用し、主流にある乱れの前縁受容を調べることを目的とする。そのために、主流中に形が変わらず振幅を制御できる人工攪乱を発生させる装置を開発した。そして、その装置を使って発生させた人工攪乱を平板前縁に当て、その下流で発達する平板境界層内の速度変動を周期平均して乱れの抽出を試みた。

3. 研究の方法

主流乱れは乱流格子で作られるため、ランダムな上流攪乱となる。このようなランダムな攪乱から引き起こされる境界層遷移から、特定の遷移過程を抽出するには、振幅を制御できる人工線形攪乱を上流に導入する必要がある。人工線形攪乱は境界層が発達する前縁の上流に入れる必要があるが、人工線形攪乱を作る装置自身が乱れ発生させてしまい、それが前縁付近の流れを通して境界層遷移を引き起こす可能性がある。

この問題を解決する一つの方法として、前縁上流に円管を置き、円管から主流流速と同じ速度で流れを噴出させることで、周期人口攪乱を入れない場合の乱れを極力小さくすることを試みた。その結果、円管からの噴出により速度分布がほぼ一様となり、乱れも大幅に削減した。装置は攪乱発生用の円管とそれに繋がった定常流を発生させるための小型送風機、攪乱を発生させるためのスピーカで構成される。定常流の速度は主流流速 5 m/s とし、スピーカに 500Hz の

周期攪乱を与え、初めに主流中での攪乱の発達、次にこの攪乱を風洞に設置された平板の前縁に当て、平板上に発達する境界層内で励起された乱れの成長を熱線風速計による流速測定で調べた。

4. 研究成果

攪乱発生装置を主流に置くことによる乱れを減らすため、風洞外に置いた攪乱源となるスピーカーにつながった円管を下流に向け、出口から円管による速度欠損を補うための定常流を噴出することのできる円管攪乱装置を製作した。その結果、スピーカーへの印加電圧振幅に比例する振幅を持ち構造が一定な線形攪乱を主流中に挿入することができた。発生させた線形攪乱を試験平板前縁に当て、前縁から $x = 50$ mm 下流の境界層内の速度変動を計測し、得られた速度変動を周期平均した。図1の (a) から (c) に乱流格子がないときの境界層内の \tilde{u} [m/s] をスピーカー印加電圧 E [V] で割った分布を示す。主流流速 $U_\infty = 5$ m/s であり、攪乱の周波数は 500 Hz である。縦軸は壁垂直方向距離 y [mm] を排除厚さ $\delta^* = 1.72\sqrt{vx}/U_\infty$ ($= 0.688$ mm) で割って無次元化している。乱流格子がないときの (a) を見ると境界層内 ($y/\delta^* < 2.9$) では低速領域が、流れ方向に伸び、下流側の浮き上がった部分が、 0.5 ms $< \phi < 1$ ms の範囲で半周期前の高速領域に乗り上げている。これは乱れ構造の移流速度が壁から遠ざかるにつれて大きくなるためであると考えられる。 E を 0.1 V から 0.3 V まで変化させても、 \tilde{u}/E [m/(s·V)] の分布はほぼ同じであり、境界層内においても \tilde{u} と E に線形関係であることがわかる。次に平板前縁上流に乱流格子を設置して主流乱れを導入した結果を図1の (d) から (f) に示す。前縁位置における主流乱れ強さ $Tu = u_{rms}/U_\infty = 2.5\%$ である。(d)から(f)の E が 0.1 V から 0.3 V を見ると、印加電圧を変化させても \tilde{u}/E [m/(s·V)] の分布が保たれていることがわかる。これは、乱流格子がある場合でも境界層内において \tilde{u} と E に線形関係があることを示している。また、乱流格子がない場合と比較して振幅は小さくなっているもののほぼ同じ分布している。これは主流乱れがある場合でも主流乱れがない場合と同様な前縁受容過程が起こっていることを示している。

三成分分解 ($q = \bar{q} + \tilde{q} + \hat{q}$) をナビエ・ストークス方程式に適用し得られる周期成分に対する方程式を以下に示す。ここで \bar{q} は時間平均、 \tilde{q} (または $\langle q \rangle$) は q のアンサンブル平均から \bar{q} を引いた周期成分、 \hat{q} は q から \bar{q} のアンサンブル平均を引いた非周期成分である。

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_l \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_l} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_l} + \nu \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial x_l^2} - \tilde{u}_l \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_l} - \frac{\partial \langle \tilde{u}_i \tilde{u}_l \rangle}{\partial x_l} - \frac{\partial \langle \hat{u}_i \hat{u}_l \rangle}{\partial x_l}$$

この式において、右辺の第4項と第5項以外は周期成分に対して線形項である。周期成分 \tilde{u} が時間平均速度成分 \bar{u} に対して十分小さければ第4項は無視できる。さらに $\langle \tilde{u}\tilde{u} \rangle$ が線形か無視できるほど小さければ、この方程式は線形偏微分方程式となり、その場合、方程式の解である \tilde{u} が線形性を持つ。図2に周期成分 \tilde{u} と $\langle \tilde{u}\tilde{u} \rangle$ の二乗平均平方根の印加電圧振幅 E に対する応答を、乱流格子の有無別に示す。壁からの高さは境界層内の \tilde{u} と $\langle \tilde{u}\tilde{u} \rangle$ がほぼ最大となる $y = 2.3\delta$ である。乱流格子の有無に関わらず、電圧振幅 E に対して境界層内の \tilde{u} および $\langle \tilde{u}\tilde{u} \rangle$ が線形性を示している。これは、上式において $\langle \tilde{u}\tilde{u} \rangle$ を含む右辺第5項が線形項であることを示しており、周期成分 \tilde{u} に線形性があることがこの支配方程式からも説明できる。

上式に出てくる $\langle \tilde{u}\tilde{u} \rangle$ に対する支配方程式は以下の式となる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle \tilde{u}_i \tilde{u}_j \rangle}{\partial t} + \bar{u}_m \frac{\partial \langle \tilde{u}_i \tilde{u}_j \rangle}{\partial x_m} &= \langle \tilde{u}_i \tilde{u}_m \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_m} - \tilde{u}_j \tilde{u}_m \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_m} \rangle - \frac{1}{\rho} \left\langle \tilde{u}_i \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_j} + \tilde{u}_j \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} \right\rangle \\ &+ \nu \frac{\partial^2 \langle \tilde{u}_i \tilde{u}_j \rangle}{\partial x_m \partial x_m} - 2\nu \left\langle \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_m} \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_m} \right\rangle - \langle \tilde{u}_i \tilde{u}_m \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_m} - \tilde{u}_j \tilde{u}_m \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_m} \rangle \\ &- \left\langle \tilde{u}_i \tilde{u}_m \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_m} \right\rangle - \left\langle \tilde{u}_j \tilde{u}_m \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_m} \right\rangle - \left\langle \frac{\partial \tilde{u}_m \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_m} \right\rangle - \left\langle \frac{\partial \tilde{u}_m \tilde{u}_j \tilde{u}_i}{\partial x_m} \right\rangle - \frac{\partial \langle \tilde{u}_i \tilde{u}_j \tilde{u}_m \rangle}{\partial x_m} \end{aligned}$$

初めの式と同様に、この式が線形方程式となるには周期成分が時間平均速度成分 \bar{u} に対して十分小さく、三重相関項 $\langle \tilde{u}\tilde{u}\tilde{u} \rangle$ が周期成分 \tilde{u} に比例するか無視できるほど小さければこの方程式も \tilde{u} および $\langle \tilde{u}\tilde{u} \rangle$ に対して線形偏微分方程式となる。図3をみると、 $\langle \tilde{u}\tilde{u}\tilde{u} \rangle$ も印加電圧振幅 E に対して比例していることがわかる。

攪乱源となるスピーカーと定常流を用いた円管攪乱装置を製作し、その攪乱装置を用いて発生させた攪乱を平板前縁に当て、境界層内の速度変動を計測した。その結果、人工攪乱の振幅に対して \tilde{u} 、 $\langle \tilde{u}\tilde{u} \rangle$ 、 $\langle \tilde{u}\tilde{u}\tilde{u} \rangle$ に線形性があることが明らかとなった。これは周期成分に対する支配方程式が線形偏微分方程式になることで説明が付き、非線形性が示唆されている主流攪乱の前縁受容過程にも線形応答があることを示している。この線形応答の確認により、主流にある乱れの前縁受容を調べる研究として線形応答抽出法が適用できることが明らかとなった。

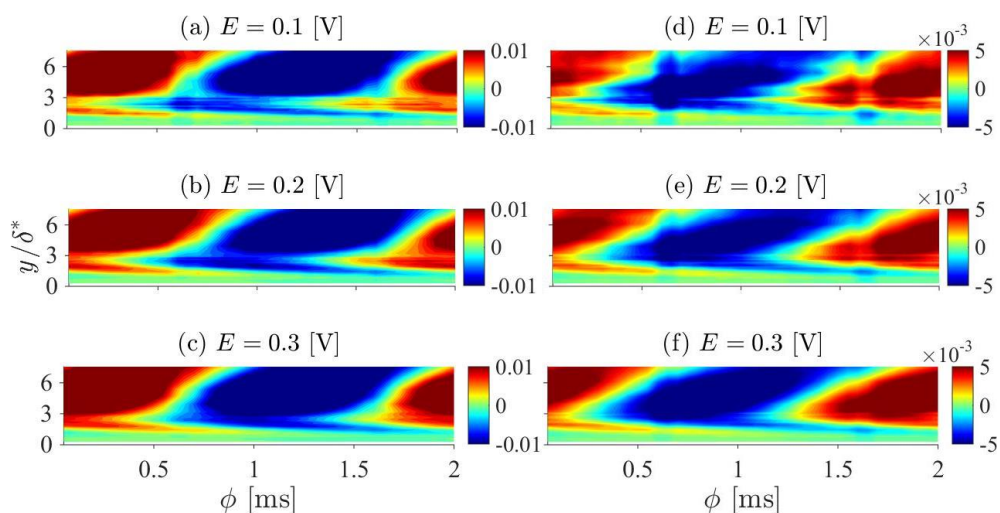


図 1 境界層内に励起された周期成分 \tilde{u} の壁垂直分布. 左側(a)から(c)は乱流格子なし. 左側(d)から(e)は乱流格子あり.

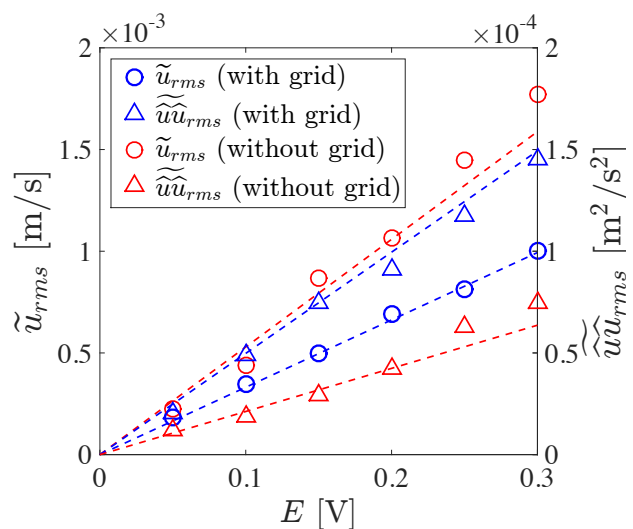


図 2 境界層内に励起された周期成分 \tilde{u} と速度相関項 $\langle \tilde{u} \tilde{u} \rangle$ とスピーカー印加電圧 E の関係.

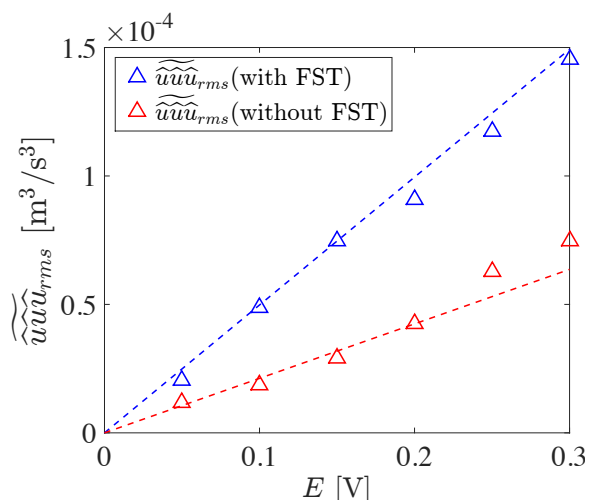


図 3 境界層内に励起された三重相関項 $\langle \tilde{u} \tilde{u} \tilde{u} \rangle$ とスピーカー印加電圧 E の関係.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Sattaya Yimprasert, Kato Kentaro, P. Henrik, Alfredsson, Masaharu Matsubara	4. 巻 18
2. 論文標題 Effects of polymer addition on transition and length scales of flow structures in transitional channel flow	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Science and Technology	6. 最初と最後の頁 JFST0021
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jfst.2023jfst0021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Tatsuya Ito, P. Henrik, Alfredsson, Antonio Segalini, Masaharu Matsubara	4. 巻 267
2. 論文標題 On Similarity of Turbulence Statistics of a Turbulent Planar Jet Taking the Static Pressure into Account	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings in Physics	6. 最初と最後の頁 43-49
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-030-80716-0	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 該当する

1. 著者名 Sattaya Yimprasert, Mathias Kvick, P. Henrik, Alfredsson, Masaharu Matsubara	4. 巻 62, 31
2. 論文標題 Flow visualization and skin friction determination in transitional channel flow	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Experiments in Fluids	6. 最初と最後の頁 16 pages
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00348-020-03102-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件/うち国際学会 10件）

1. 発表者名 Sattaya Yimprasert, P. Henrik Alfredsson, Masaharu Matsubara
2. 発表標題 Effects of Polymer Addition on Transition and Length Scales of Flow Structures in Transitional Channel Flow
3. 学会等名 7th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows（国際学会）
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名 Tomoya Kikugawa, P. Henrik Alfredsson, Masaharu Matsubara
2 . 発表標題 A Linear-response Method to observe Secondary Instability on Near Wall Streaks in Turbulent Boundary Layer
3 . 学会等名 7th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Takato Okuda, Xin Song, Sattaya Yimprasert, P. Henrik Alfredsson, Kentaro Kato, Masaharu Matsubara
2 . 発表標題 Image processing of flow visualisation pictures to determine the structure of transitional channel flow of aqueous polymer solutions
3 . 学会等名 The 13th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Xin Song, Takato Okuda, Masaya Iwanaga, Souta Yamauchi, Kentaro Kato, Masaharu Matsubara
2 . 発表標題 Measurement of Lagrangian acceleration in two-dimensional channel flow using dynamic-hue particle tracking velocimetry,
3 . 学会等名 Nineteenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Asahi Yoshida, Takeo Anada, Ryo Takai, Koki Matsui, Kentaro Kato, Masaharu Matsubara
2 . 発表標題 Extraction of boundary layer transition process using controlled free stream disturbance and ensemble averaging
3 . 学会等名 Nineteenth International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1. 発表者名 Sattaya Yimprasert, P. Henrik Alfredsson, Masaharu Matsubara
2. 発表標題 Effects of Polymer Addition on Transition and Length Scales of Flow Structures in Transitional Channel Flow
3. 学会等名 7th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomoya Kikugawa, P. Henrik Alfredsson, Masaharu Matsubara
2. 発表標題 A Linear-response Method to observe Secondary Instability on Near Wall Streaks in Turbulent Boundary Layer
3. 学会等名 7th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuki Nanri, Masaharu Matsubara
2. 発表標題 Perturbation Induced in a Boundary Layer by a Vortex Ring Hitting the Leading Edge of a Flat Plate
3. 学会等名 The 17th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tatsuya Tsumura, Tomoya Kikugawa, Masaharu Matsubara
2. 発表標題 Quantification of The Intermittency Factor in Transitional Shear Flows Using Probability Density Function
3. 学会等名 The 17th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tatsuya Ito, Takuya Ito, P. Henrik Alfredsson, Antonio Segalini, Masaharu Matsubar
2. 発表標題 On the similarity of turbulence statistics in a planar jet taking the static pressure variation into account
3. 学会等名 iTi CONFERENCE ON TURBULENCE IX (国際学会)
4. 発表年 2021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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
スウェーデン	Royal Institute of Technology		