

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13683

研究課題名（和文）風洞実験による壁乱流中の大規模構造の発生・維持機構の解明と新規抵抗低減手法の探索

研究課題名（英文）Experimental study on the mechanism of large-scale structure in wall turbulence

研究代表者

岩野 耕治（Iwano, Koji）

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：20750285

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、乱流境界層内に存在する大規模構造の発生・維持機構を明らかにすることを目的に、風洞実験においてプラズマアクチュエータを用いて境界層内に人工的な大規模構造を導入した。バッファ領域の速度変動と対数領域の速度変動を、多点熱線流速計を用いて同時に計測した。その結果、バッファ領域のバースト発生周波数は、大規模構造の持つ局所的な摩擦速度を用いて整理されることが分かった。このことは、壁近くの小規模渦は大規模構造から一方向的な影響を受けること、また、大規模構造は小規模渦とは無関係に維持されている可能性が高いことを示唆する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

壁乱流の構造を理解し制御することは、工学の様々な分野において重要である。本研究では、壁面摩擦の大部分を生み出す壁近傍の小規模渦は、境界層内に存在する大規模構造の影響を一方向的に受けており、大規模構造は小規模渦の存在に頼らず維持されている可能性が高いことが明らかとなった。これは大規模渦を制御することにより、壁面摩擦を低減させることができる可能性を示唆するものであり、工学的に重要な知見である。

研究成果の概要（英文）：In this study, artificial large-scale structures were introduced into the boundary layer using the plasma actuators in a wind tunnel with the aim of clarifying the generation and maintenance mechanisms of the large-scale structure in the turbulent boundary layer. The velocity fluctuations in the buffer region and the logarithmic region were measured simultaneously using a multi-point hot wire anemometer. As a result, it was found that the burst frequency in the buffer region is scaled using the local friction velocity of the large-scale structure. This suggests that the small-scale vortices near the wall are unilaterally influenced by the large-scale structure, and that the large-scale structure is likely to be maintained independently of the small-scale vortices.

研究分野：流体工学

キーワード：乱流境界層 大規模構造 バースト現象 抵抗低減

### 1. 研究開始当初の背景

従来、壁乱流中の乱れの大部分は粘性力と慣性力が同程度に寄与する壁近くのバッファ層で生成されるとして、主に壁近くの小規模渦構造に焦点が当てられてきた。しかし、近年、主流方向に境界層厚さの数倍もの大きさをもつ高速および低速のストリーク構造(以下、大規模構造と呼ぶ)が壁から離れた外層領域に常に存在していること明らかとなった。さらに、この大規模構造は高レイノルズ数の壁乱流においては壁面摩擦抵抗の発生に数十%も寄与している可能性も指摘されている。そのため、壁乱流において抵抗低減を実現するためには、大規模構造の発生と維持のメカニズムを理解することが重要である。現在、大規模構造の発生・維持機構として主に次の2つのモデル:「Co-Supporting Cycle (CSC)」と「Self-Sustaining Process (SSP)」が注目されている。「Co-Supporting Cycle」は壁近傍の小さなヘアピン渦(小規模構造)と対数領域の大規模構造がお互い助け合って構造を維持しているとするモデルである。一方、「Self-Sustaining Process」とは、大規模構造が小規模構造の存在に関係なく自立しているとするモデルである。上記の2つのモデルのうちどちらが正しいのか、もしくはさらに別の機構が存在するのかは未だ完全には明らかになっていない。

### 2. 研究の目的

本研究では風洞を用いた実験において流れ場を操作することにより大規模構造の発生・維持機構を解明することを目指す。これに類するアプローチとして、近年、風洞実験で滑面の代わりに粗面を使用し、壁近くの乱れ構造を変化させることで、大規模構造が小規模構造の影響を受けないと結論づけたものがあるが、単独の実験結果だけでは証拠として不十分である。本研究ではプラズマアクチュエータを壁面に設置し、境界層内に人工的に大規模構造を作る実験を行い、小規模構造の応答を調べることで、大規模構造の発生・維持機構を理解することを目的とする。

### 3. 研究の方法

大規模構造が小規模渦構造の変調にどのように寄与するかを明確に理解するために、境界層内に人工的な大規模構造を生成する実験を行う。大規模構造の導入には壁面に並べたプラズマアクチュエータ(以下PAと呼ぶ)を用いる(図1)。壁面近傍の小規模渦により生み出されるバースト現象と対数領域の大規模構造による速度変動を多点熱線流速計により同時計測する(図2)。大規模構造による小規模乱れの変調現象を自然発生する大規模構造と人工的に導入した大規模構造の場合で比較することで、小規模渦構造と大規模渦構造の相互作用の強さを評価する。すべての実験で、境界層厚さ $\delta$ と摩擦速度 $u_\tau$ にもとづく乱流境界層のレイノルズ数は約1300で固定した。

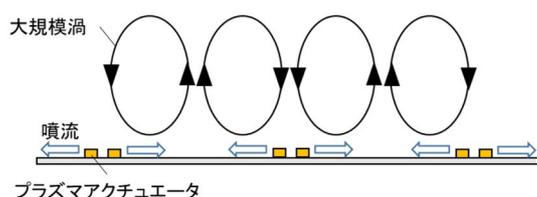


図1. 人工的な大規模構造の導入

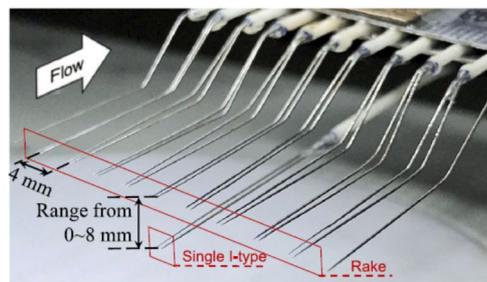


図2. 多点熱線流速計

### 4. 研究成果

図3に複数の高さで測定された主流方向速度変動の低周波成分 $u_L$ の2次元分布を示す。熱線流速計の時間信号は各高さにおける平均流速を用いて空間情報に変換した。また、 $u_L$ は各高さの速度変動RMS値 $u_{rms}$ で無次元化されてある。図の黒線で囲まれた領域が速度変動に閾値を設けて抽出された大規模構造であり、赤色が高速の大規模構造、青色が低速の大規模構造を意味する。また、星印がバッファ領域( $y^+ = 36$ )で検出されたバースト現象( )の分布

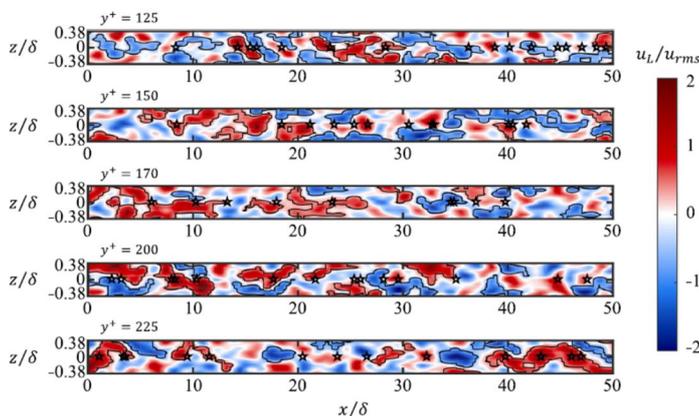


図3. 対数領域において抽出された大規模構造(黒線)とバッファ領域におけるバースト現象( )の分布

スト現象である．バーストの検出には VITA 法を用いた．図より，境界層内に主流方向に境界層厚さの数倍の長さを持つ大規模構造が検出されていることがわかる．また，バースト現象は，高速の大規模構造の下で検出される確率が高いことがわかる．統計を取ると，高速の大規模構造の下の平均的なバースト発生周波数  $f$  は約 70Hz，低速の大規模構造の下では約 30Hz と，その差は 2 倍以上あることが分かった．しかしながら，この周波数を各大規模構造存在時の局所的な壁変数で  $f^+ = fv/u_\tau^2$  のように無次元化すると，高速の場合と低速の場合で  $f^+$  は一致することが分かった．これは，自然状態の大規模構造では，各大規模構造下の乱流構造は局所的に平衡状態となっており，壁近くの小規模渦構造は大規模構造に対してパッシブに反応している可能性が高いことを示唆している．

図 4 に壁面に設置した PA を駆動させない場合とさせた場合の主流方向平均流速  $U$  を示す．なお， $U$  は各実験における摩擦速度で無次元化されている．図より，PA による壁面からの吹上流により，壁面近傍の低速流体が持ち上げられ，逆に下降流により高速の流体が壁面近くまで到達していることがわかる．これは自然の大規模構造が存在する場合に，大規模構造周りに作られる流れ場と同じ構造であり，PA を用いることにより，定常的に高速と低速の大規模構造を生成できることが明らかとなった．

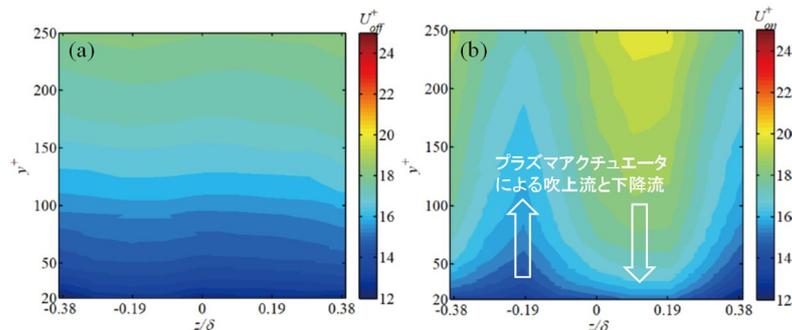


図 4. 壁変数で無次元化された主流方向平均流速の  $y$ - $z$  断面分布  
(a)アクチュエータ OFF, (b)アクチュエータ ON (8kV)

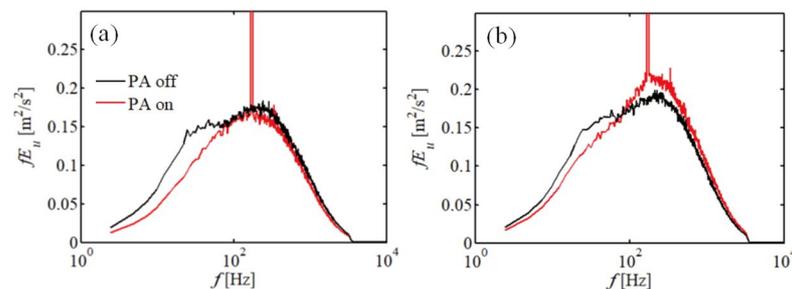


図 5 バッファ領域における主流方向速度変動のプレマルチプライドスペクトル．(a)  $z/\delta = -0.19$ , (b)  $z/\delta = 0.19$ .

図 5 に  $z/\delta = -0.19, 0.19$  のバッファ領域における主流方向速度変動のプレマルチプライドスペクトルを示す．図より，PA がオンの場合はオフの場合と比べて，それぞれの位置で 100Hz 以上の周波数領域でパワーが減少，および増加していることが分かる．これは図 2 に示すように  $z/\delta = -0.19, 0.19$  の位置で壁近傍の平均流速が減少，および増加しているためだと考えられる．また，100Hz 以下の周波数ではどちらの位置でも PA オンによりパワーが減少しているが，これは PA により人工的に作られた大規模構造は，自然発生した大規模構造と異なりスパン方向に蛇行しないためだと考えられる．

図 6 に異なる電圧で PA を駆動した場合のバースト周波数と平均流速の関係を示す．ここで，PA 駆動時は  $z$  位置によって平均流速が異なることに注意されたい．図より，バースト周波数と平均流速の関係は，印加電圧によらず概ね一つの直線にまとまることわかる．また，図には PA をオフにした場合に自然発生する低速と高速の大規模構造 (offn, offp) の下のバースト周波数もプロットしてある．図から 2 つのプロットは PA がオンの場合の直線と近い位置にあることがわかる．これは，自然発生した大規模構造でも，人工的に作った大規模構造でも，それらが壁面近傍の小規模渦に及ぼす影響は大きく変わらないことを意味している．以上より，壁近くの小規模渦が対数域の大規模渦から一方向的な影響を受けていること，また，大規模構造は小規模渦とは無関係に維持されている可能性が高いことが示唆される．

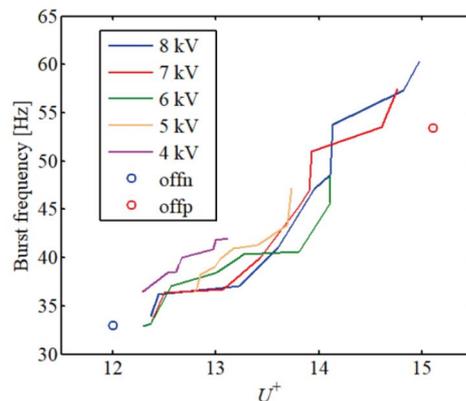


図 6 異なる電圧で PA を駆動した場合のバースト周波数と平均流速の関係

## 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<br>高牟礼 光太郎, 酒井 康彦, 伊藤 靖仁, 岩野 耕治   | 4. 巻<br>39                  |
| 2. 論文標題<br>乱流混合層中の大規模構造が乱流プラントル数に及ぼす影響   | 5. 発行年<br>2019年             |
| 3. 雑誌名<br>可視化情報学会論文集   | 6. 最初と最後の頁<br>1~10          |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3154/tvsj.39.1  | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>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<br>-                   |
| 1. 著者名<br>Takahashi Mamoru, Iwano Koji, Sakai Yasuhiko, Ito Yasumasa   | 4. 巻<br>31                  |
| 2. 論文標題<br>Three-dimensional visualization of destruction events of turbulent momentum transfer in a plane jet | 5. 発行年<br>2019年             |
| 3. 雑誌名<br>Physics of Fluids  | 6. 最初と最後の頁<br>105114~105114 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1063/1.5122219  | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>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<br>-                   |
| 1. 著者名<br>岩野 耕治, 鈴木, 航司, 酒井 康彦, 伊藤 靖仁  | 4. 巻<br>39                  |
| 2. 論文標題<br>光ファイバLIF法による高空間分解能・高SN比濃度計測   | 5. 発行年<br>2019年             |
| 3. 雑誌名<br>可視化情報学会論文集   | 6. 最初と最後の頁<br>28~34         |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3154/tvsj.39.28   | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>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<br>-                   |
| 1. 著者名<br>岩野 耕治, 高橋 護, 酒井 康彦, 伊藤 靖仁  | 4. 巻<br>38                  |
| 2. 論文標題<br>クロスウェーブレットを用いた二次元乱流噴流中のレイノルズ応力輸送機構の解析   | 5. 発行年<br>2018年             |
| 3. 雑誌名<br>可視化情報学会論文集   | 6. 最初と最後の頁<br>26~35         |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3154/tvsj.38.26   | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>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<br>-                   |

|  |                  |
|--|------------------|
| 1. 著者名<br>Takahashi Mamoru, Iwano Koji, Sakai Yasuhiko, Ito Yasumasa                   | 4. 巻<br>60       |
| 2. 論文標題<br>Experimental investigation on destruction of Reynolds stress in a plane jet | 5. 発行年<br>2019年  |
| 3. 雑誌名<br>Experiments in Fluids  | 6. 最初と最後の頁<br>46 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1007/s00348-019-2691-8                                  | 査読の有無<br>有       |
| オープンアクセス<br>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<br>-        |

|  |                      |
|--|----------------------|
| 1. 著者名<br>Xiaonan Chen , Koji Iwano, Yasuhiko Sakai , Yasumasa Ito                             | 4. 巻<br>89           |
| 2. 論文標題<br>Effect of large-scale structures on bursting phenomenon in turbulent boundary layer | 5. 発行年<br>2021年      |
| 3. 雑誌名<br>International Journal of Heat and Fluid Flow   | 6. 最初と最後の頁<br>108811 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.ijheatfluidflow.2021.10881                               | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>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<br>-            |

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>陳 曉楠, 岩野 耕治, 酒井 康彦, 伊藤 靖仁   |
| 2. 発表標題<br>乱流境界層内大規模構造がバースト現象の分布に及ぼす影響 |
| 3. 学会等名<br>第47回可視化情報シンポジウム             |
| 4. 発表年<br>2019年                        |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>中野功詞, 岩野耕治, 酒井康彦, 伊藤靖仁            |
| 2. 発表標題<br>二次元壁面噴流における乱流統計量の初期条件依存性に関する実験的研究 |
| 3. 学会等名<br>日本機械学会東海支部 第69期総会・講演会             |
| 4. 発表年<br>2020年                              |

|                                      |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>陳 暁楠, 岩野 耕治, 酒井 康彦, 伊藤 靖仁 |
| 2. 発表標題<br>乱流境界層内の大規模構造とバースト現象の関係    |
| 3. 学会等名<br>日本機械学会 第96期 流体工学部門講演会     |
| 4. 発表年<br>2018年                      |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>陳 暁楠, 岩野 耕治, 酒井 康彦, 伊藤 靖仁           |
| 2. 発表標題<br>乱流境界層内のSuperstructure がバースト現象に及ぼす影響 |
| 3. 学会等名<br>日本機械学会 東海支部第68 期総会講演会               |
| 4. 発表年<br>2019年                                |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Mamoru Takahashi, Koji Iwano, Yasuhiko Sakai, Yasumasa Ito            |
| 2. 発表標題<br>Numerical Visualization of Reynolds Stress Destruction in a Plane Jet |
| 3. 学会等名<br>15th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)                 |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>山口 晃平, 岩野 耕治 陳 暁楠, 酒井 康彦, 伊藤 靖仁     |
| 2. 発表標題<br>プラズマアクチュエータを用いた乱流境界層内における人工大規模構造の生成 |
| 3. 学会等名<br>日本機械学会2020年年次大会                     |
| 4. 発表年<br>2020年                                |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>陳 曉楠, 岩野 耕治, 酒井 康彦, 伊藤 靖仁        |
| 2. 発表標題<br>乱流境界層における大規模構造間の剪断層がバースト現象に及ぼす影響 |
| 3. 学会等名<br>日本機械学会第98期流体工学部門講演会              |
| 4. 発表年<br>2020年                             |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>山口 晃平, 岩野 耕治, 陳 曉楠, 酒井 康彦, 伊藤 靖仁 |
| 2. 発表標題<br>大規模人工渦の導入による乱流境界層の壁近傍構造変化に関する研究  |
| 3. 学会等名<br>日本機械学会東海支部 第70期総会・講演会            |
| 4. 発表年<br>2021年                             |

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

|                               |                            |                        |
|-------------------------------|----------------------------|------------------------|
| 産業財産権の名称<br>熱線センサ             | 発明者<br>酒井康彦, 岩野耕治, 秦誠一 他3名 | 権利者<br>国立大学法人名古屋大学 他1名 |
| 産業財産権の種類、番号<br>特許、2020-008756 | 出願年<br>2020年               | 国内・外国の別<br>国内          |

〔取得〕 計0件

〔その他〕

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(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 |
|---------|---------|
|---------|---------|