

令和 2 年 6 月 26 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06150

研究課題名（和文）乱流カスケードの研究上ブレイクスルーとなる線形モードを利用した実験的研究

研究課題名（英文）An experimental study using linear modes as breakthroughs in the study of turbulent cascade processes

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） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：壁上の乱流中にはストリークなどの秩序構造が存在し、カスケード過程によりそのような大きなスケールの構造から小さな渦へとエネルギーが伝達され、これらの現象が乱流の性質を決定づけている。しかし様々な乱れ構造が引き起こすカスケード過程は多様で発生も不規則なため、実験でその過程をとらえるのは困難であった。本研究では、平板乱流境界層中に人工的に周期攪乱を励起し、測定した流速データを攪乱の位相に基づきアンサンブル平均することで、カスケード現象を抽出することに成功した。この人工攪乱励起とアンサンブル平均による乱れ構造抽出法は今後、秩序構造やカスケード過程の研究で強力なツールとなると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

乱流研究で重要なカギとなる「秩序構造」と「カスケード過程」などの乱流現象については、数値シミュレーションなどでその現象を捉えることができつつあるが、その普遍的な構造や性質については定量的評価が困難であった。今回開発された人工攪乱励起とアンサンブル平均による乱れ構造抽出法は、乱流現象を定量的に評価するだけでなく、現象の時間変化の一般化を可能にしており、乱流を理解する上で重要な発見である。この乱れ構造抽出法は今後の乱流研究において強力かつ主要となるツールとなると予想される。

研究成果の概要（英文）：There exist coherent structures such as streaks and hair-pin vortices in the turbulent flow on the wall, and energy is transferred from such a large-scale structure to a small vortex by the cascade process, and these phenomena determine the nature of the turbulent flow. However, it is difficult to grasp the process experimentally because the cascade process caused by various turbulence structures is diverse and irregular in occurrence. In this study, we succeeded in extracting the cascade phenomenon by artificially exciting the periodic disturbance in the turbulent boundary layer and ensemble-averaging the measured flow velocity based on the phase of the excitation. This method of extracting turbulence structure by artificial disturbance excitation and ensemble averaging is considered to be a powerful tool in the research of coherent structures and their cascade processes.

研究分野：流体力学

キーワード：乱流 せん断流 秩序構造 カスケード 二次不安定 線形 アンサンブル平均 変曲点不安定

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

乱流カスケードは、乱流中で大きい渦が小さい渦を発生させ、その小さい渦がさらに小さい渦を生み出す現象である。この乱流カスケードは、フラクタル性を持つマルチスケール現象の代表例としてだけでなく、乱流の性質を決定づけるため工学的にも重要である。コロモゴロフにより予見された $-5/3$ 乗勾配のエネルギースペクトル分布となる慣性小領域がその後の実験で確認され、近年では、高レイノルズ数の直接数値計算により、慣性小領域でのカスケードのエネルギー輸送過程も明らかにされつつある。しかし、様々なカスケード過程の分類法や定量的な評価に対してはその手法すら確立されていないと言える。これはカスケードがランダムな現象であるとともに、統計的には扱いつらい多様な過程が存在するためと考えられる。これは統計的手法だけに頼らない研究上のブレークスルーが必要であることを示唆している。

2. 研究の目的

カスケード過程の一つとして、乱流境界層内の壁付近に発生するストリークの変曲点型不安定性に着目し、不安定性の構造を実験によって定量的に調べることを目的とした。

3. 研究の方法

秩序構造であるストリークを人工的な初期攪乱とアンサンブル平均法を用いて抽出した。そこに高周波初期攪乱を導入してストリークに変曲点型不安定性を励起させ、熱線流速計で測定した流速をアンサンブル平均することで、その構造を抽出した。

4. 研究成果

変曲点型不安定性の抽出は、ストリークが線形的な性質を持つ場合と非線形である場合とで行った。低周波攪乱強さ $v_L^+$ が線形領域内の2点 $E = 0.26, 0.40 V$  ( $v_L^+ = 5.15 \times 10^{-4}, 7.69 \times 10^{-4}$ )、線形領域外の2点 $E = 0.70, 1.0 V$  ( $v_L^+ = 1.34 \times 10^{-3}, 1.84 \times 10^{-3}$ )、で計測を行い、二次不安定性を抽出した。

図1に流れ方向の流速変動の各成分に対する $X^+ - y^+$ 分布を示す。ここで、 $X^+$ はテイラーの凍結仮説を用いて $X^+ = -U_c^+ \theta u_\tau^2 / \nu$ として求めた流れ方向座標である。 $\theta$ は初期攪乱に基づく位相時間、 $u_\tau^+$ は壁面摩擦速度、 $\nu$ は動粘性係数である。 $U_c^+$ は攪乱の移流速度で、この分布ではMatsubara et al.<sup>①</sup>が求めた $U_c^+ = 13.5$ としている。青色が低速領域、赤色が高速領域を示している。実験は、ストリーク構造を抽出するために周波数50 Hz、攪乱強さ $v_L^+ = 1.84 \times 10^{-3}$ の低周波攪乱を与え、二次不安定性を抽出するための攪乱として周波数500 Hz、攪乱強さ $v_H^+ = 1.18 \times 10^{-3}$ の高周波攪乱を与えた。この低周波攪乱強さは強く、速度分布に変曲点を持つ場合である。

図1の上から、順に(a)低周波攪乱50 Hzのみを挿入した周期変動成分 $\tilde{u}_L^* = \tilde{u}_L^+ / v_L^+$ 、(b)高周波攪乱500 Hzのみを挿入した周期変動成分 $\tilde{u}_H^* = \tilde{u}_H^+ / v_H^+$ 、(c)低周波および高周波攪乱を同時に挿入した周期変動成分 $\tilde{u}_{LH}^* = \tilde{u}_{LH}^+ / (v_L^+ v_H^+)$ 、(d)同時に挿入した成分から低周波攪乱の成分のみを引いた $\Delta\tilde{u}_L^* = (\tilde{u}_{LH}^* - \tilde{u}_L^*) / v_H^+$ 、(e)同時に挿入したものから低周波および高周波の成分を引いた $\Delta\tilde{u}^* = (\tilde{u}_{LH}^* - \tilde{u}_L^* - \tilde{u}_H^*) / (v_L^+ v_H^+)$ を示している。(a)では、抽出された構造は、壁垂直方向に $y^+ = 40$ までの範囲に出現し、線形領域の場合と比べると低速領域がその上流側で高速領域の下に潜り込んでいる。また、低速領域の方が高い $y^+$ まで分布しており流れ方向長さも短い。これは、低周波攪乱が非線形攪乱であるため、構造に対称性がないためであるといえる。

(b)では、抽出された構造は、壁垂直方向に $y^+ = 25$ までの範囲に出現し、低速領域および高速領域

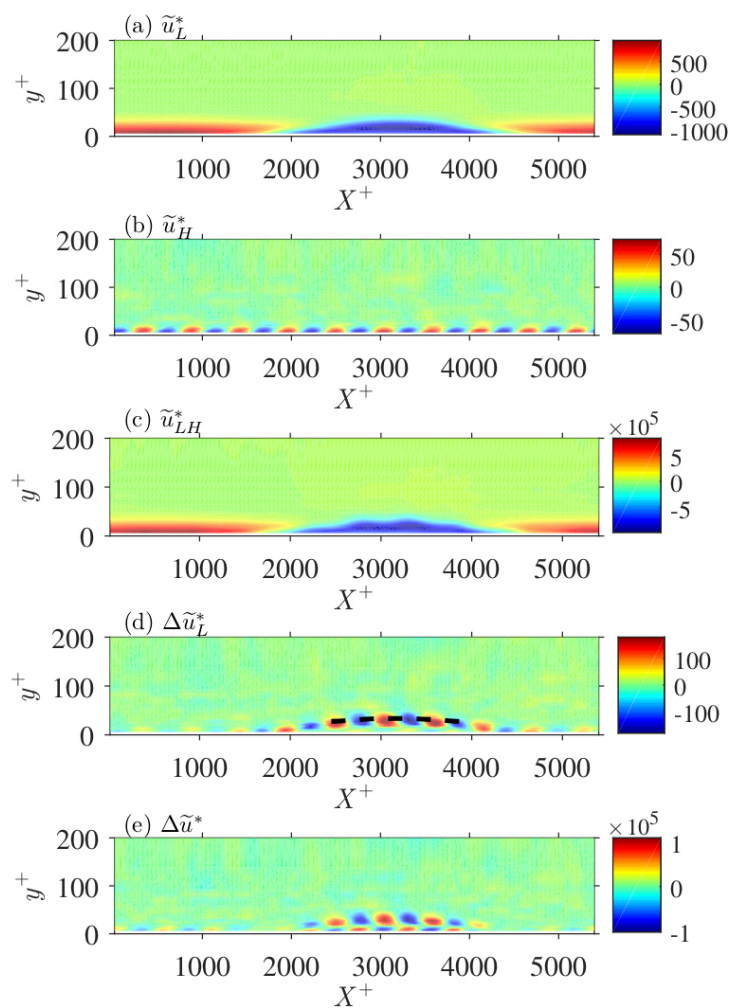


図1 励起された乱れ構造の等値線図

域が対称的に出現している。高周波攪乱は線形攪乱を挿入しているため、高速領域および低速領域の出現に対称性が見られていると考えられる。(d)に低速領域の外縁に位置する弧状に分布する変曲点を破線で表示しており、変曲点不安定が出現していると一致していることがわかる。また、外側の弧状に出現している乱れ構造の内側に振幅は弱い逆位相の構造が確認できる。これら特徴は変曲点不安定性と一致しており、高周波攪乱によって励起された乱れ構造は変曲点不安定性と考えられる。また、(e)では、(d)と同様低速領域に波状の乱れ構造が見られる。この場合、下側に見える逆位相の分布が強調されている。

図2に低周波攪乱強さを線形領域および非線形領域で変化させたときの $\Delta\tilde{u}^*$ の $X^+ - y^+$ 分布を示す。どの条件でも $\Delta\tilde{u}^*$ の分布が存在することは、低周波攪乱と高周波攪乱では重ね合わせの原理が成り立たないことを示している。これは、低周波初期攪乱と高周波初期攪乱で引き起こされる乱れ構造が相互作用していることを示している。線形領域である(a)、(b)の内側にも非常に弱い速度変動が見られ、(c)、(d)では速度変動が強く見られ、逆位相の分布も明瞭についている。線形領域である(a)、(b)でのストリークが励起する速度分布には変曲点は存在せず、そのような変曲点がない場合でも、変曲点不安定性によく似た二次不安定性が存在することがわかった。

速度変動に変曲点を持つストリークの場合、二次不安定性が顕著に出現しているが、発生位置が変曲点上付近であること、その分布が壁高さ方向に逆位相の変動を伴うことからこの二次不安定性は変曲点型不安定性と考えられる。一方、変曲点の存在しない速度変動の場合にも、低速ストリーク上に変曲点型不安定性に非常によく似た構造が抽出できた。さらに、ストリークの変動振幅が小さい線形領域の場合でも、変曲点不安定性に似た構造が確認できた。これらは、乱流中に発生しているストリークに対してカスケード現象を実験的に捉えられることを示唆している。

これにより、乱流中には非線形性であるために、秩序構造の解明が難しいとされてきたが、人工的に励起した秩序構造では弱い初期攪乱に対して線形的に変化することが明らかとなった。これにより、 $\tilde{u}$ の時空間領域では、秩序構造の分析と解明に役立つと考えられる。アンサンブル平均による線形モードの抽出方法は、数値シミュレーションデータにも適用でき、線形モードは線形安定性理論によって特定できる。したがって、線形モードは乱流の現象を明らかにする大きな可能性を持っていると考えられる。さらに、抽出した乱れ構造が壁せん断乱流で観察されるwall-attached structureとよく似ていることから、この線形乱れ構造を調べることで、壁せん断乱流の解明に大きく寄与することが期待される。さらに、線形乱れ構造は二次元乱流噴流でも見られることから、初期攪乱とアンサンブル平均を組み合わせたこの手法は、壁せん断乱流だけでなく乱流全般に適用できると考えられる。

#### <引用文献>

① Matsubara, M., Nagasaki, M., Yokoi, M., Azmeer M., Advection of a Coherent Structure in a Turbulent Boundary Layer, Masaharu Matsubara, Masanari Nagasaki, *Proc. the 5th Int. Conf. Jets, Wakes and Separated Flows (ICJWSF2015)*, Springer Proceedings in Physics, 185, 2016, 311-316.

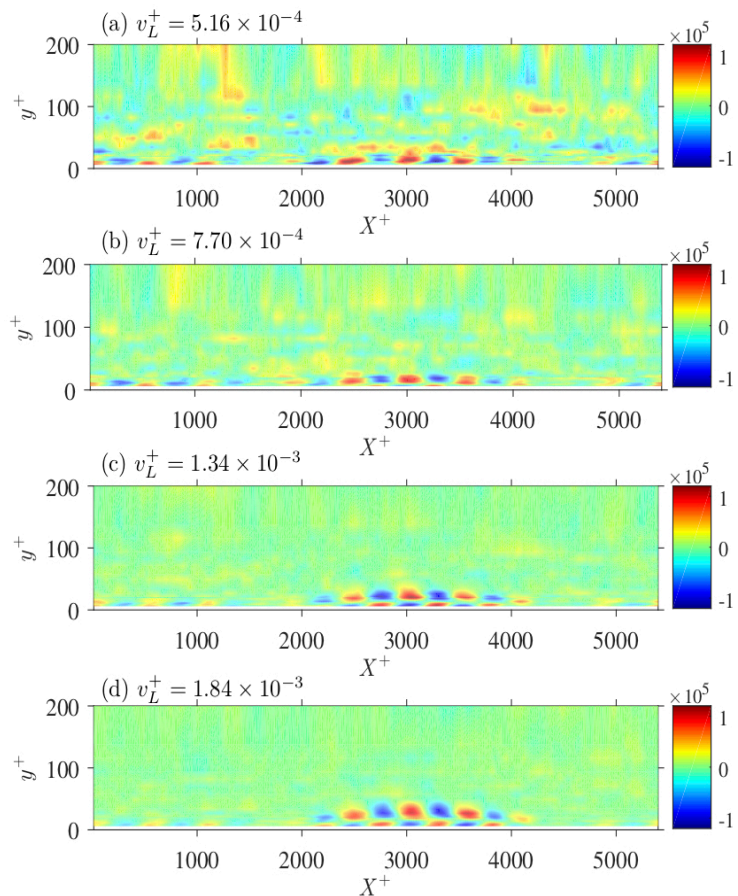


図2 ストリークの強さを变化した時の $\Delta\tilde{u}^*$ の等値線図

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件(うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件)

1. 著者名 Matsubara Masaharu, Alfredsson P. Henrik, Segalini Antonio	4. 巻 888
2. 論文標題 Linear modes in a planar turbulent jet	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of 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) 10.1017/jfm.2020.25	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15件(うち招待講演 0件/うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Masaharu Matsubara, Yu Imanishi, Yuya Tanada, Sattaya Yimprasert, Yutaro Endo, Tatsuya Tsumura
2. 発表標題 Reynolds number dependence on very-large-scale features in transitional and turbulent channel flows.
3. 学会等名 IUTAM symposium on Laminar-Turbulent transition (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Shimizu, Souta Yamauchi, Masaharu Matsubara
2. 発表標題 Development of a Three-Dimensional Calibration Method for Particle Tracking Velocimetry with Light Emitting Diodes
3. 学会等名 Sixteenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takumi Miyakoshi, Tatsuya Ito, Mataru Ito, Masaharu Matsubara
2. 発表標題 Development of a Dynamic Anemometer Sensor Based on the Flexible Printed Circuit Technology
3. 学会等名 Sixteenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuya Hirose, Tatsuya Itoh, Tomoya Kikugawa, Masaharu Matsubara
2. 発表標題 Secondary Instability of the Coherent Structure Artificially Excited in Turbulent Boundary Layer
3. 学会等名 Sixteenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yutaro Endo, Sattaya Yimprasert, Tatsuya Tsumura, Masaaru Matsubara
2. 発表標題 Effect of Polymer Additive to Skin Friction Coefficient and Scales of Turbulence in Two-Dimensional Channel Flow
3. 学会等名 Sixteenth International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 棚田湧也, 松原雅春
2. 発表標題 二次元チャンネル乱流における大規模構造の交替現象
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 廣瀬和也, 菊川智哉, 松原 雅春
2. 発表標題 乱流境界層内の線形秩序構造に対する重ね合わせの原理の検証実験
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 水野智太郎, 津村達也, 松原雅春
2. 発表標題 チャンネル乱流中に励起したストリーク構造に発生する二次不安定性の攪乱周波数依存性
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 Kazuya Hirose, Jun Takahashi, Masaharu Matsubara
2. 発表標題 Development of a linear mode in a turbulent boundary layer
3. 学会等名 Proceedings of the iTi Conference in Turbulence (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jun Takahashi, Tomotaro Mizuno, Masaharu Matsubara
2. 発表標題 On Secondary Instability of Coherent Structure Artificially Excited in Two Dimensional Turbulent Channel Flow
3. 学会等名 The 15th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 廣瀬和也, 高橋諄, 松原雅春
2. 発表標題 乱流境界層における人工的に励起した秩序構造の周波数依存性
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 水野智太郎, 高橋諄, 松原雅春
2. 発表標題 二次元チャンネル乱流中に励起した乱れ構造の二次不安定性に対する高周波数攪乱による影響
3. 学会等名 日本機械学会 北陸信越支部第56期総会・講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 廣瀬和也, 松原雅春
2. 発表標題 乱流境界層中における人工的に励起した秩序構造についての依存性
3. 学会等名 日本機械学会 北陸信越支部第56期総会・講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋諄, 廣瀬和也, 堀内伊織, 松原雅春
2. 発表標題 乱流境界層中で人工的に励起されたヘアピン渦の二次不安定性について
3. 学会等名 日本流体力学会年会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Iori Horiuchi, Tomohiro Nonobe and Masaharu Matsubara
2. 発表標題 Similarity of a coherent structure extracted by an artificial disturbance in a turbulent boundary layer
3. 学会等名 the 16th European Turbulence Conference (国際学会)
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
研究協力者	アルフレッドソン ヘンリック  (Alfredsson P. Henrik)	王立工科大学(スウェーデン)・FLOW, Department of Engineering Mechanics・Professor	
研究協力者	セガリーニ アントニオ  (Segalini Antonio)	王立工科大学(スウェーデン)・FLOW, Department of Engineering Mechanics・Researcher/Docent	