

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 28 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K21677

研究課題名(和文) 過渡成長に基づく非平衡乱流場の準秩序構造の解明と予測制御

研究課題名(英文) Transient growth study of quasi-coherent structure of non-equilibrium turbulence for sophisticated flow control

研究代表者

焼野 藍子 (Yakeno, Aiko)

東北大学・流体科学研究所・助教

研究者番号：30634331

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、主流の加速や減速を伴うために、乱流の生成と散逸が釣りあわない非平衡乱流場である二次元丘周りの流れ場や、スパン方向に振動するチャンネル乱流場を対象として、壁面近傍で生成する低速ストリークや縦渦構造など、乱流秩序構造の生成機構を説明し、制御するための方法論を構築することを目的とした研究を行った。特に流れの非モード安定性を捉える過渡成長を算出するプログラムコードを作成、上述のように時空間に変化する基本流での線形安定性を解析した。二次元丘周りの流れ場、スパン方向に振動するチャンネル乱流場で、実際の直接数値計算で観察される乱流構造と、不安定モードとの比較を行い、流体制御則の構築に有用な知見を得た。

研究成果の概要(英文)：This research is targeting flow field in an oscillating channel or around a two-dimensional hill. That is non-equilibrium turbulent under acceleration and deceleration of the mainstream, in which turbulence production and dissipation are not balanced. We studied a mechanism to explain and control turbulence coherent structure such as low speed streak and streamwise vortex generated near the wall surface. In particular, we developed a program code to compute transient growth of non-modal stability of the flow, and analyzed the stability on the base flow that changed in spatiotemporal. Turbulence structure by direct numerical simulation was compared with that by the linear analysis and we obtained useful knowledge for constructing a smart flow control strategy.

研究分野：流体工学

キーワード：流体制御 安定性解析 壁乱流 過渡成長 剥離制御 摩擦抵抗低減制御 ストリーク 縦渦構造

1. 研究開始当初の背景

乱流は、運動量、熱、物質の輸送現象を促進させることから、乱流遷移の制御により様々な熱流体機器の性能を飛躍的に向上出来る。そのため乱流遷移の引き金となる乱流構造と制御に関しては従来多くの研究例がある。一方、実用流体の殆どは、乱流生成と散逸が釣り合わない非平衡乱流場であるが、非平衡乱流場に関する知見はまだ少ない(Lumley (1992), Yoshizawa (1994), Valente *et al.* (2014) etc.). 従来提案される種々の乱流仮説は、平衡乱流場を仮定しており、実際の流れ場では成り立たない場合が多い。

たとえば、これまで応募者らは、図 1(a)に示すようなスパン方向に壁面が時空間変動するチャンネル流れ(Yakeno *et al.* (2014)a), 及び二次元ハンプ周りの流れを対象とした大規模数計算による解析を実施し(Yakeno *et al.* (2014)c), 壁面付近ではストリーク構造など乱流の準秩序構造が生成、乱流遷移を引き起こすので、それぞれ摩擦抵抗及び剥離抑制に寄与が大きいことを示したが、その機構の詳細は未解明な点が多い。そのため、このような非平衡乱流場での、準秩序構造の生成機構を明らかにし、それを制御するための方法論が求められている。

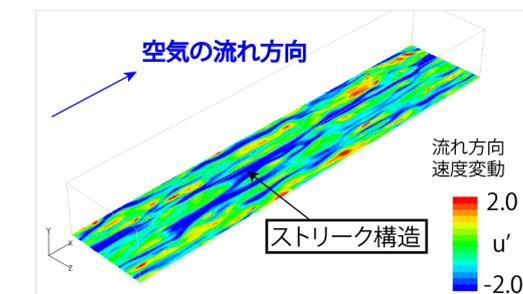


図 1(a) スパン方向に壁面が変動するチャンネル流れ、瞬間流速分布

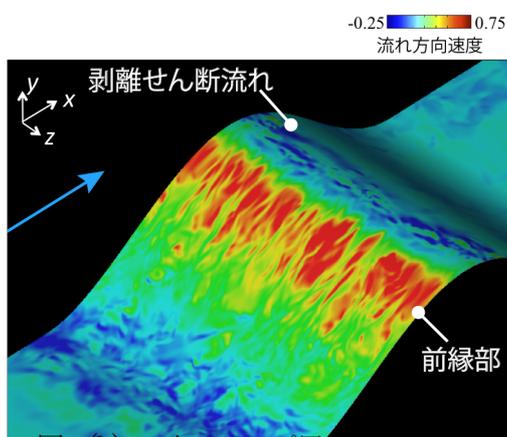


図 1(b) 二次元ハンプ周りの流れ

2. 研究の目的

本研究では、一般にこのような非平衡乱流場での壁乱流構造の詳細を調査し、その知見に基づく制御指針の構築、新しい制御手法の提案を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

研究期間としては 3 年を想定する。まず、スパン方向に壁面振動のあるチャンネル流れ、二次元ハンプ周りにおいて、時空間に変化する乱流統計量を取得、ストリークなど壁乱流準秩序構造に相当する統計量への影響を調査し、背景流れ場の影響を整理する。そこで、取得した乱流統計量を用いて、過渡成長に注目した線形安定性解析を実施、応募者らが従来提案した制御性能を過渡成長率と比較し、制御因子の特定を行う。

4. 研究成果

まずスパン方向に振動するチャンネル乱流場では、縦渦構造の詳細解析から、従来のものは別の、摩擦抵抗低減効果を整理できる、振動の新しい制御パラメータを見出した(Yakeno and Fujii, 2016)。それにより、背景場振動の壁面近傍乱流構造への作用因子を突き止めることができた。過渡成長に着目した線形安定性解析の結果、実際の直接数値計算で観察されるレイノルズ応力の低減効果は、本解析での擾乱エネルギーの成長率の抑制と必ずしも相関していない結果を得た。これは、非線形効果のモデル化が不十分であるためと考えており、これは今後の課題として残された。一方この解析を亜臨界レイノルズ数域のチャンネル流れに適用、乱流スポット周りで生じるスパン方向速度分布を考慮したところ、スパン斜め方向に増幅する過渡成長モードの存在が明らかにされた(Yakeno and Tsukahara, 2017)。亜臨界レイノルズ数領域で観察される斜めの局所乱流域の生成を解明する足がかりになると考えており、今後の研究発展を期待できる。

二次元丘周りでの高解像度数値計算の結果からは、圧力勾配のピーク位置、ストリーク構造の発生位置との関係を確認し、さらに局所平行を仮定した過渡成長解析により、発生する構造の大きさは粘性スケールで整理されることを示した(Yakeno *et al.*, 2016)。さらにその知見に基づき、縞状の構造を発生する流体不安定性を誘起する局所体積力を設置、剥離制御を行った。その結果、二次元丘後流において乱流による運動量輸送が促進、剥離再付着が早まることを実証した(Yakeno *et al.*, 2017)。また、本解析結果では、後流の乱れ強度は局所体積力のスパン方向波長に依存するが、誘起された流れ方向速度強度はいずれの波長の場合でも同じであった。これにより、まず不安定性により生成するのは流れ方向に軸を持つ縦渦構造であり、それに伴って、流れ方向速度のストリーク構造の縞模様が生じることを確認した。

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 4 件)

- ① Aiko Yakeno, Yoshiaki Abe, Soshi Kawai, Taku Nonomura and Kozo Fujii, “Spanwise modulation effects of local body force on downstream turbulence growth around two-dimensional hump,” International Journal of Heat and Fluid Flow, 査読有, Vol. 63, pp. 108-118 (2017). DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2016.11.012
- ② Aiko Yakeno, Soshi Kawai, Taku Nonomura and Kozo Fujii, “Wall-turbulence structure with pressure gradient around 2D hump,” Progress in Turbulence, 査読有, Vol. VI, pp. 167-170 (2016). DOI: 10.2514/6.1990-1480
- ③ Aiko Yakeno, Soshi Kawai, Taku Nonomura and Kozo Fujii, “Separation control based on turbulence transition around a two-dimensional hump at different Reynolds numbers,” International Journal of Heat and Fluid Flow, 査読有, Vol. 55: 52-64 (2015). DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2015.07.014
- ④ 焼野藍子, 河合宗司, 野々村拓, 藤井孝藏, “二次元ハンプ剥離後流渦への周期的制御振動周波数の影響”, ながれ(日本流体力学会), 査読無, 2015年4月.

[学会発表] (計 10 件)

- ① Aiko Yakeno, Yoshiaki Abe, Taku Nonomura, Soshi Kawai, Kozo Fujii, “Turbulence growth and its dependency of wake vortices on excitation frequency by local body-force around two-dimensional hump” 70th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, Nov. 20 (2017).
- ② Aiko Yakeno, Yoshiaki Abe, Soshi Kawai, Taku Nonomura and Kozo Fujii, “Self-sustaining mechanisms of wall turbulence and the optimal design of local body force for flow separation control” The 9th JSME-KSME Thermal and Fluids

Engineering Conference (TFEC9), Okinawa, Japan, Oct. 28-30 (2017).

- ③ Aiko Yakeno and Takahiro Tsukahara, “Linear transient growth of coherent structure in turbulent channel flow at low Reynolds number” The 10th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP10), Chicago-IL. July. 7-9 (2017).

- ④ 焼野藍子, 塚原 隆裕, “低レイノルズ数チャンネル乱流場の線形過渡成長” 京都大学数理解析研究所「非一様乱流の数理解析」, 2017年7月26日

- ⑤ 焼野藍子, 塚原 隆裕, “低レイノルズ数チャンネル乱流場斜め構造の線形過渡成長解析” 第31回数値流体力学シンポジウム, 2017年12月12日

- ⑥ 焼野藍子, “流体の秩序運動に基づく機器最適設計への試み” 設計駆動情報研究会 第2回研究会, 招待講演, 2017年10月22日

- ⑦ Aiko Yakeno and Kozo Fujii, “Transient dynamics and stability on spanwise-oscillatory turbulent channel,” The 24th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM 2016), Montreal, Canada, Aug. 21-26 (2016).

- ⑧ 焼野藍子, “スパン方向振動するチャンネル乱流場の過渡的な力学過程と直接安定性について,” 流体力学会年会, 2016年9月28日

- ⑨ Aiko Yakeno, Yoshiaki Abe, Soshi Kawai, Taku Nonomura and Kozo Fujii, “Effect of interval of spanwise-modulated local forcing on mechanisms of flow separation control,” The 8th International symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer (THMT' 15), Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, Sep. 15-18 (2015).

- ⑩ 焼野藍子, 野々村 拓, 藤井 孝藏, “制御体積力のスパン方向波長が乱流剥離する二次元ハンプ周り流れの再付着に及ぼす影響” 流体力学会年会, 2015年9月26日-28日

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

焼野 藍子 (YAKENO, Aiko)
東北大学・流体科学研究所・助教
研究者番号：30634331

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者