

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 5 月 6 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14880

研究課題名(和文)非定常/非一様流れ大域的安定性解析による乱流マルチスケール相互作用の解明

研究課題名(英文)Turbulence multi-scale interaction based on global stability of unsteady / nonequilibrium flow

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) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：申請者は、非定常かつ非一様な流れ場に対する流体の大域的な安定性解析を実施することで、流れのマルチスケール相互作用の理論的解明を試みた。特に非直交モードによるエネルギー過渡増幅に注目し、スパン方向壁変動場の抵抗低減や境界層の遷移遅延に関する幾つかの新知見の獲得に成功した。スパン方向壁振動では斜めのストリークが成長し元のストリークが弱化するが、エネルギーの最大過渡増幅の結果と整合した。境界層では壁極近傍に斜めの流れ構造が存在することを初めて確認し、こちらもエネルギーの最大過渡増幅モードと一致した。そのほか航空機後退翼の三次元境界層の遷移や微小粗さの遷移遅延効果についても新しい発見や提案を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

流体機器の低抵抗化は省エネルギーやCO2排出削減を大幅に達成できるため、喫緊の最重要課題の一つである。抵抗の増加は、機器表面近くの流れの秩序運動が主原因である。これまで様々な流れの制御手法が検討されてきているが、いずれも効果が低くとどまるか実現不可能であった。一方、近年の計算機の発展により秩序運動がさらに理解が深まっている。特に支配方程式の非直交的性質による「エネルギーの過渡増幅」により、秩序の発生という世紀の問いの一つが解かれつつある。本研究成果は、基礎理論の拡張にとどまらず、実現可能な新技術の提案をさらに期待できるものである。制御概念はあらゆる流体機器に適用され社会的波及効果は莫大である。

研究成果の概要(英文)：I attempted to theoretically elucidate the multi-scale interaction of the flow by performing a global stability analysis of the fluid for a non-stationary and non-uniform flow field. Focusing on the energy transient amplification in the non-orthogonal mode, we succeeded in acquiring some new findings on the drag reduction of the spanwise wall oscillation and the transition delay of the boundary layer. In the spanwise wall oscillation, oblique streaks grow and the original streak weakens, which is consistent with the result of maximum transient amplification of energy. And, it was confirmed that a small oblique flow structure existed near the wall in the boundary layer, which also coincided with the maximum transient amplification mode of energy. In addition, new discoveries and proposals were made regarding the transition of the three-dimensional boundary layer of the aircraft swept wing and the transition delay effect of micro distributed roughness.

研究分野：流体力学

キーワード：乱流 流体制御 安定性解析 遷移 非モード安定性 エネルギー過渡増幅

1. 研究開始当初の背景

流体機器の低抵抗化は省エネルギーや CO2 排出削減を大幅に達成できるため、喫緊の最重要課題の一つである。抵抗の増加は、機器表面近くの流れの秩序運動が主原因であり、その理解への挑戦とともにこれまで様々な流れの制御手法が検討されてきているが、いずれも効果が低くとどまるか実現不可能であった。中でも乱流場のマルチスケールな秩序構造の生成や散逸の相互機構は、未解明な点が多く残されている。申請者のこれまでの研究では、時空間的に大スケール変動に重畳する小スケールの渦の特徴的な振る舞いが観察されていた (Yakeno *et al.* *Phys. Fluids* 2014, Yakeno *et al.* *Int. J. Heat and Fluid Flow* 2015, 2018 など)。

一方、近年の計算機の発展により、特に支配方程式の非直交的性質による「エネルギーの過渡増幅」により、秩序の発生という世紀の問いの一つが解かれつつある。新しい理論に基づくより高度で高性能な流体制御手法の新提案や、昨今の製造技術の向上を伴って、実用化が大いに期待され、現在世界中の航空機や自動車メーカーが鎬を削っている。本研究内容は、その機運において注目度が高いといえる。

2. 研究の目的

本研究では、非定常/非一様流れの大域的安定性解析を実施し、乱流の秩序構造の生成機構とそれらの相互作用の理論的解明を目指す。申請者は特に、従来手法による直交モードの安定性だけでなく非直交モードによるエネルギー過渡増幅にも焦点をあて、実際の渦生成との関連を調査する。乱流場では、基本流の変動と微小擾乱の非線形効果を確認する。

3. 研究の方法

まず、非定常/非一様な流れを扱う安定性解析に向けて、線形ナビエ・ストークス方程式の非直交システムの過渡成長を捉えるため時間発展する擾乱について固有値解析を実施する準備を行う。申請者がこれまでに開発した計算プログラムに、さらに計算負荷の小さい固有値算出方法として Arnoldi Iteration を実装する。さらに基本流の空間分布にも対応するため、擾乱の支配方程式にスパン方向と流れ方向の勾配の項を追加する修正を施す。

また、マルチスケール相互干渉のうち、より小さなスケール変動の非線形効果として、時空間平均・位相変動・擾乱の三つのスケール分解を適用する。三つのスケールのレイノルズ応力を考慮し、相関式を拡張して、大スケール変動パラメータに依存する新しいレイノルズ応力の線形近似を提案し、非定常/非一様流れの安定性解析に取り入れる。

スパン方向壁振動により摩擦抵抗が低減した流れ場を対象とした解析では、変化したレイノルズ応力を渦粘性近似し、直接安定性解析に取り入れる。その際、制御下のレイノルズ応力から逆算した線形の渦粘性近似を導入する (式(1))。

$$\frac{\partial U_{base}}{\partial y} - \overline{u''v''} = (1 + \nu_t) \frac{\partial U_{base}}{\partial y}. \quad (1)$$

境界層や、自由せん断層の遷移過程についても、例えば乱流スポットや二次元のケルビン・ヘルムホルツ波周りに、空間分布する基本流と非線形効果を取り入れた大域的安定性解析を実施し、擾乱の成長率を算出、遷移過程を非直交モードの過渡成長と関連づける。

4. 研究成果

スパン方向壁振動制御影響下のチャンネル流れの抵抗低減機構に関連して、振動する基本流でストリーク構造に相当するモードのエネルギー過渡増幅について調査した。ストリーク構造は、壁乱流の自立維持機構を担うとされる秩序運動である。その結果、斜めのストリークモードは、制御により強化され、元のストリークモードは弱まり、直接数値計算での様子とよく一致する結果となった。しかし、抵抗が最も低減する制御周期と、ストリークの成長率が最も弱まった制御周期は一致しなかった。抵抗低減機構は本研究の内容である線形ストリークの生成だけでなく、非線形の流れ方向の渦の修正、および壁乱流の再生サイクルにおけるそれらの相互関係に依存していると考えられる。ストリークモードの変化は、制御のスパン方向速度ではなく、スパン方向速度の高さ方向せん断の寄与が大きいことが示された (図 1)。抵抗の主要因である縦渦の回転軸は、制御によって向きを変えられ、そのエネルギー交換機能を抑制される。そこで、縦渦の傾

きの遅延がスパン方向速度せん断の加速度により整理されることに着目することで、これまでより優れた摩擦抵抗低減の予測式を提案した (図2)。(Yakeno, Phys. Fluids 2021)

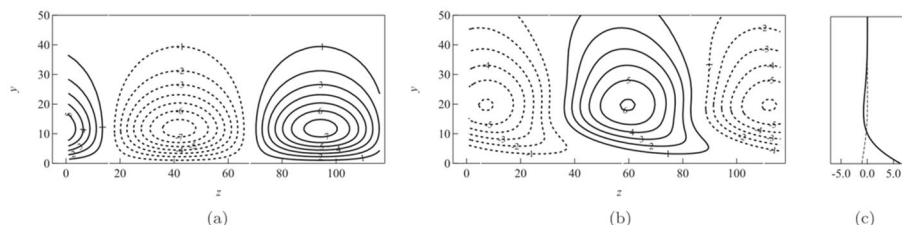


図1 元のストリークモードがスパン方向壁振動影響下で変形する様子：(a)制御なし，(b)制御あり，(c)スパン方向速度(黒線)とその高さ方向勾配(波線)。(Yakeno, Phys. Fluids 2021)

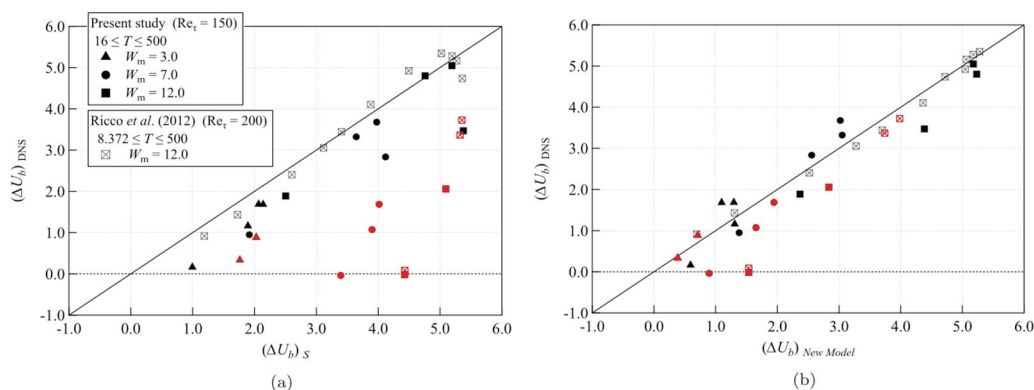


図2 摩擦抵抗低減による流量増加と提案した予測式による値の分布：(a)従来手法，(b)新手法。新手法では、低周波数の場合(赤)も予測可能である。(Yakeno, Phys. Fluids 2021)

一方境界層遷移遅延による抵抗低減機構に関連し、申請者は直接数値計算により、境界層厚さの14%以下の壁極近傍領域で、流れの小さな斜め構造の存在を初めて確認した(図3)。エネルギーの最大の過渡増幅モードと比較したところ、流れの斜め構造の波長と傾斜角度はそれぞれ一致する結果となった。壁極近傍の流れの斜め構造は、バイパス遷移過程の一部を担っている可能性がある。バイパス遷移過程で観察されるストリーク構造だけでなく、本研究で見出された小さな斜め構造も、エネルギー過渡増幅機構によって説明されると考えられる(Yakeno & Obayashi, submitted)。

そのほか、航空機後退翼前縁部の三次元境界層や、微小粗さの遷移遅延効果に関して、本研究で構築されたエネルギー過渡増幅に関する知見を活かした、新しい発見や提案がなされた(Yakeno & Obayashi, Phys. Fluids 2021, Tameike *et al.*, J. Fluid Science and Tech. 2021)。

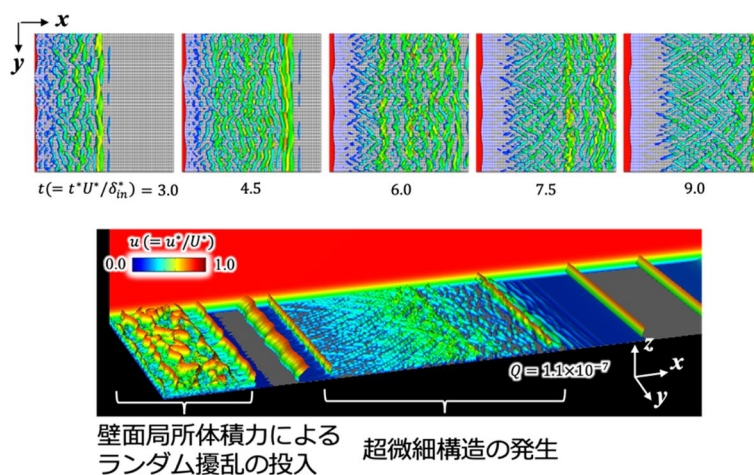


図3 層流境界層の壁極近傍領域に見出された流れの小さな斜め構造(超微細構造)の可視化の様子：等値面は速度勾配テンソルの第二不変量 $Q = 10^{-7}$ 。(Yakeno & Obayashi, submitted)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 Hiroki Tameike, Aiko Yakeno, Shigeru Obayashi | 4. 巻 16 |
| 2. 論文標題 Influence of small wavy roughness on flatplate boundary layer natural transition | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Fluid Science and Technology | 6. 最初と最後の頁 JFST0008 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jfst.2021jfst0008 | 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 - |
| 1. 著者名 Yakeno Aiko, Hirota Makoto | 4. 巻 226 |
| 2. 論文標題 Three-Dimensional Global Stability on Stuart Vortex of Free Shear Layer | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 In: Orlu R., Talamelli A., Peinke J., Oberlack M. (eds) Progress in Turbulence VIII. iTi 2018. Springer Proceedings in Physics | 6. 最初と最後の頁 9~13 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-3-030-22196-6_2 | 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 - |
| 1. 著者名 Yakeno Aiko | 4. 巻 33 |
| 2. 論文標題 Drag reduction and transient growth of a streak in a spanwise wall-oscillatory turbulent channel flow | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Physics of Fluids | 6. 最初と最後の頁 065122 ~ 065122 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0050547 | 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 - |
| 1. 著者名 Yakeno Aiko, Obayashi Shigeru | 4. 巻 33 |
| 2. 論文標題 Propagation of stationary and traveling waves in a leading-edge boundary layer of a swept wing | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Physics of Fluids | 6. 最初と最後の頁 094111 ~ 094111 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0063936 | 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 - |

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 8件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shingo Hamada, Aiko Yakeno, Shigeru Obayashi, Bagus Nugroho |
| 2. 発表標題 Small wavy roughness effect on T-S wave and three-dimensional transition by Direct Numerical Simulation |
| 3. 学会等名 73rd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 焼野 藍子 |
| 2. 発表標題 壁乱流の秩序構造発生のダイナミクスと予測制御 |
| 3. 学会等名 大阪大学MMDSモデリング部門ワークショップ「工学と数学の接点を求めて」（招待講演） |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shingo Hamada, Aiko Yakeno, Bagus Nugroho, Shigeru Obayashi |
| 2. 発表標題 Ultra-fine surface roughness effect on boundary layer transition |
| 3. 学会等名 International Conference on Flow Dynamics (ICFD2020) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Aiko Yakeno, Shigeru Obayashi |
| 2. 発表標題 Traveling-wave propagation in the swept leading-edge boundary layer at high Reynolds number |
| 3. 学会等名 International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Aiko Yakeno, Shigeru Obayashi |
| 2. 発表標題 Global receptivity analysis around an attachment line of a swept wing |
| 3. 学会等名 72nd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Aiko Yakeno, Hiroki Tameike, Shigeru Obayashi |
| 2. 発表標題 Ultra-fine roughness effect on a flat plate boundary layer transition |
| 3. 学会等名 72nd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Hiroki Tameike, Aiko Yakeno, Shigeru Obayashi |
| 2. 発表標題 Influence of Small Wavy Roughness on a Flat Plate Boundary Layer Transition |
| 3. 学会等名 International Conference on Flow Dynamics (ICFD2019) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 溜池 啓輝, 焼野 藍子, 大林 茂 |
| 2. 発表標題 平板上の異なる波長を有する微小波状粗さの境界層遷移への影響 |
| 3. 学会等名 第51回流体力学講演会/第37回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shingo Hamada, Aiko Yakeno, Sayaka Suzuki, Shigeru Obayashi, Bagus Nugroho |
| 2. 発表標題 Transition delay and drag reduction mechanism by designed surface roughness |
| 3. 学会等名 International Conference on Flow Dynamics (ICFD2021) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shigeru Obayashi, Aiko Yakeno, Makoto Hirota, Yuki Ide, Naoko Tokugawa |
| 2. 発表標題 Computational Laminar Flow Technology |
| 3. 学会等名 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT2021) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|--|
| <p>非線形モデルを適用した三次元不安定性解析による秩序渦の生成機構の解明 https://kaken.nii.ac.jp/ja/grant/KAKENHI-PROJECT-19KK0373/</p> |
|--|

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 | 大林 茂 (Obayashi Shigeru) (80183028) | 東北大学・流体科学研究所・教授 (11301) | |

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 | | | |
|---------|-----------------------------|--|--|--|
| フランス | Ecole Centrale de Lyon | | | |
| オーストラリア | The University of Melbourne | | | |