

令和 3 年 6 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04556

研究課題名（和文）数値モデルに基いた流れ場の種類によらない新しい層流-乱流遷移CFDモデルの構築

研究課題名（英文）A laminar-turbulent transition model for various flow fields based on a mathematical model

研究代表者

久谷 雄一（Kuya, Yuichi）

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号：00794877

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：乱流と層流では流れの性質が大きく異なるため、層流-乱流遷移現象を数値計算によって正確に予測することは、流体機械の設計において非常に重要である。近年、数値モデル「Directed Percolation (DP)」と遷移現象のアナロジーが様々な流れ場に対して確認されている。本研究ではDPと密接に関係する流体物理に関する解析を行うとともに、既存の遷移予測モデルを発展させ、DP理論を組み込むためのベースとなる遷移予測モデルを構築した。DPと関係する物理量に関する解析は現在も進行中であるが、本課題を通して新たに構築された遷移予測モデルは既存手法と比較して遷移予測精度を向上させたモデルとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究目的であったDP理論に基づいた遷移予測モデルの構築には未だ至っていないが、本課題を通して新たに構築された遷移予測モデルは既存手法と比較して遷移予測精度を大きく向上させたモデルとなっている。今回構築された遷移予測モデルは産業界でもすぐに使えるものとなっているため、今後、ガスタービンや航空機、風力発電タービンなどの流体機械設計において非常に有用なツールの一つとなり得るだけでなく、今後の遷移予測モデルの研究においてベンチマークモデルにもなり得る。

研究成果の概要（英文）：Since turbulent flow and laminar flow have very different flow characteristics, it is important to accurately predict the laminar-turbulent transition phenomena by numerical simulation for designing industrial products related to heat and fluid. Recently, the analogy between the mathematical model called “Directed Percolation (DP)” and the transition phenomena has been confirmed for various flow fields. In this study, the physical flow quantities closely related to DP were numerically analyzed, and a transition prediction model has been developed as a base for incorporating the DP theory. Although the analysis of the physical quantities related to DP is still in progress, the transition prediction model newly developed through this project has improved the accuracy of transition prediction compared with existing methods.

研究分野：数値流体力学

キーワード：層流-乱流遷移現象 数値流体計算 遷移予測モデル Directed Percolation

1. 研究開始当初の背景

層流と乱流では流れの性質が大きく異なるため、層流-乱流遷移現象を数値計算によって正確に予測することは、熱・流体に関係する工業製品の設計において非常に重要である。しかし、遷移現象はとても複雑な物理現象であるため、未だ解明されていないことも多く、どんな流れ場においても高精度に遷移点を予測し、且つ実用的な計算コストで利用出来るモデルは存在していない。そのため実際の開発現場で既存の遷移予測モデルを使用する場合、個々の開発領域（流れ場）に応じてモデルの再チューニングが必要となることも多々ある。そこで流体機械開発現場において、流れ場の種類によらずユニバーサルに利用可能な層流-乱流遷移予測モデルは非常に有用な数値解析ツールとなりうる。

2. 研究の目的

数値モデル” Directed Percolation (DP)” に基づき、流れ場の種類によらない（チューニングフリーな）層流-乱流遷移を予測する数値流体計算モデルの構築を目的とする。DP は疫病や森林火災などの広がり方を確率論的に表す数値モデルであり、ごく近年（2016 年以降）の先行研究によって DP と遷移現象のアナロジーが確認され始めたばかりである。

3. 研究の方法

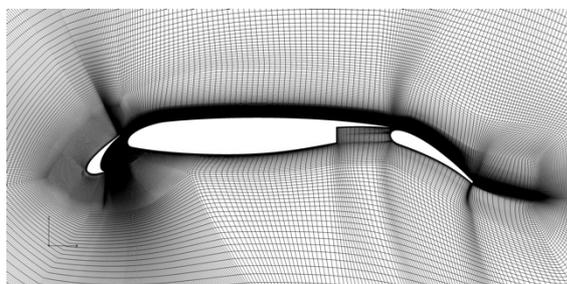
先行研究では DP 理論と遷移現象のアナロジーが様々な流れ場について報告されているものの、DP 理論と関わる流体物理量についての解析はなされていなかった。そこで本研究では高精度数値計算（large eddy simulation; LES）を実施し、得られた流れ場から DP 理論と遷移現象を結びつける普遍的な物理量（局所的なレイノルズ数）を見出すための解析を行った。

4. 研究成果

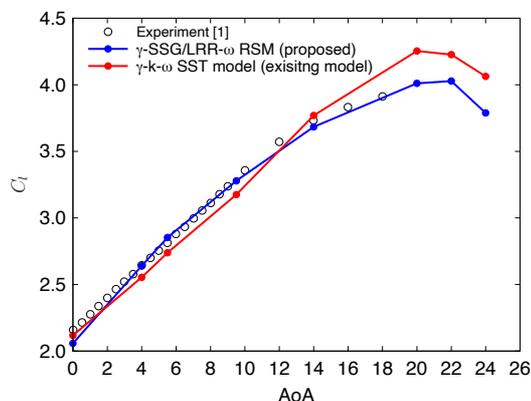
研究開始当初は既存の遷移モデルに DP 理論を組み込むことで流れ場の種類によらないユニバーサルな遷移予測モデルの構築を目指していた。しかし研究を進めるにつれて、ベースとなる既存モデル自体の遷移予測精度が当初想定していたものよりもかなり低かったため、まずは既存モデルの底上げを行った（以下の(1)と(2)に相当）。本研究で新たに構築された遷移予測モデルは既存のモデルと比較して流れ場の予測精度は明らかに向上したものとなっている。そのため新たに構築された遷移予測モデルは流体機械の開発現場において有用なツールになり得るだけでなく、今後の遷移予測モデルに関する研究を実施するにあたって良いベンチマークモデルとなり得るものとなっている。また、DP 理論と遷移現象を結びつける普遍的な物理量（局所的なレイノルズ数：レイノルズ数は流れのスケールを示す指標であり、一般にレイノルズ数が大きくなると流れは遷移しやすくなる）を見出すための LES も行い、実際に得られた流れ場の解析を行った（(3)に相当）。

(1) γ -SSG/LRR-RSM 遷移予測モデル（二次元流れ）

DP 理論を組み込むためのベースとなる既存の遷移予測モデルの底上げを行った。既存の遷移予測モデル(γ - k - ω SST [2])は、 k - ω SST 乱流モデルと遷移を予測する γ 方程式の組み合わせで構築されている。この既存遷移予測モデルは多くの商用流体ソルバーにも実装されており、幅広く産業界でも使用されているものである。しかし k - ω SST 乱流モデルは非等方な乱流場の予測には不向きなものであることが先行研究でも報告されており、本研究では非等方な乱流場に対しても良好な予測精度がある SSG/LRR-RSM 乱流モデルに γ 方程式の組み合わせることで、新たな遷移予測モデルを構築した。新たに構築された γ -SSG/LRR-RSM 遷移モデルを用いた 30P30N



(a) 30P30N 高揚力翼



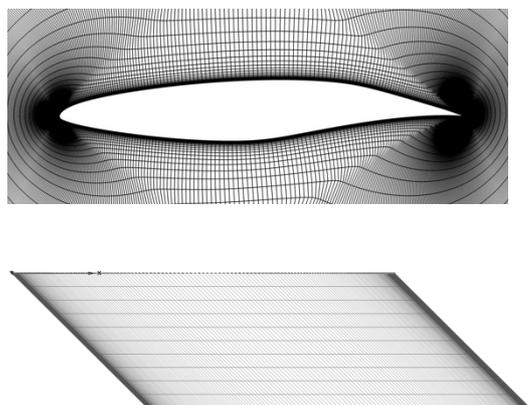
(b) 迎角 (AoA) vs 揚力係数 (C_l)

Fig.1: γ -SSG/LRR-RSM 遷移モデルを用いた 30P30N 周りの数値計算

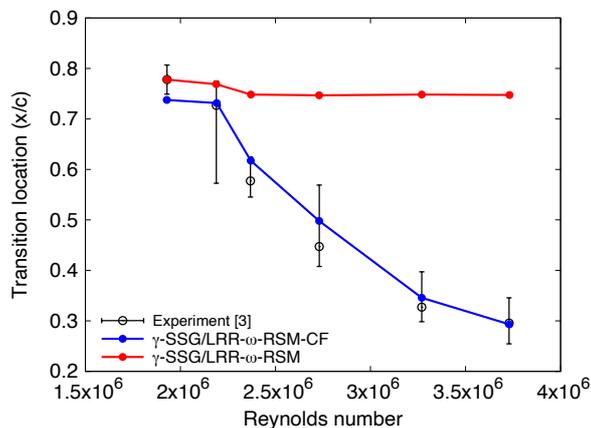
高揚力翼 (図 1(a)) 周りの数値計算例を図 1 に示す. 図 1(b) の横軸は迎角 (Angle of Attack: AoA), 縦軸は揚力係数 (C_l) を示している. また図 1(b) には比較対象として既存遷移予測モデル (γ - k - ω SST [2]) を用いて計算した結果も示されている. 提案モデルは実験値の傾向をよく捉えており, 既存モデルと比較して明らかに数値計算の予測精度が向上していることがわかる. ここで示している 30P30N 以外の流れ場に対しても γ -SSG/LRR-RSM 遷移モデルの既存モデルに対する優位性は示されており, この γ -SSG/LRR-RSM 遷移モデルに関する研究成果はアメリカ航空宇宙学会 (AIAA) 主催の学会において成果報告 [1] も行っている.

(2) γ -SSG/LRR-RSM-CF 遷移予測モデル (三次元流れ)

航空機主翼上のような三次元流れ場では翼面上の流れ方向と主流方向とは必ずしも一致せず, 横方向の流れが生じている. 航空機主翼上の層流-乱流遷移は主にこの横流れによって誘発される. 上記の γ -SSG/LRR-RSM 遷移予測モデルは既存モデルに対し非常に優位なモデルとなっていた一方, この横流れに対する遷移は考慮されていなかった. そこで γ -SSG/LRR-RSM モデルに横流れに対する遷移も考慮した γ -SSG/LRR-RSM-CF 遷移予測モデルを構築した. 新たに構築された γ -SSG/LRR-RSM-CF 遷移モデルを用いた NLF(2)-415 翼 (図 2(a)) 周りの数値計算例を図 2 に示す. この計算では NLF(2)-415 翼の前縁が主流方向に対して斜めに傾いているため, 翼上面で横流れが生じる. 図 2(b) の横軸はレイノルズ数, 縦軸は翼面上での遷移位置 (x は翼前縁からの距離, c は翼弦長) を示している. 実験値を見るとレイノルズ数が大きくなると遷移位置が前方に移動していることがわかり, γ -SSG/LRR-RSM-CF 遷移予測モデルはその傾向を非常によく捉えている. 一方で γ -SSG/LRR-RSM モデルは横流れに対する遷移は考慮されていないため, レイノルズ数が上昇しても遷移予測位置は変化していない. この結果より, 三次元流れ場に対しての γ -SSG/LRR-RSM-CF モデルの有用性が示された.



(a) NLF(2)-415 翼 (side view & top view)



(b) 遷移位置

Fig. 2: 横流れが生じる NLF(2)-415 翼上での遷移位置予測

(3) DP 理論と流体物理に関する解析

上述の γ -SSG/LRR-RSM-CF 遷移予測モデルは既存のモデルの組み合わせではあるが, 非常に予測精度が優れたモデルとなっている. しかしこの γ -SSG/LRR-RSM-CF モデルにも経験則に基づいた数多くのチューニングパラメータが使用されており, 流れ場の種類によらずユニバーサルに優れた予測精度を示す保証はない. そこで γ -SSG/LRR-RSM-CF モデルに使用されているパラメータを出来るだけ DP 理論をベースとしたものに置き換えるため, DP 理論と遷移現象を結びつける普遍的な物理量 (局所的なレイノルズ数) を見出すための LES 解析を行った. 計算対象として図 3 で示されているようなディフューザ流れ [3] を考え, 計算スキームには運動エネルギー・エントロピー保存スキーム [4] を用いた. このディフューザ流れでは逆圧力勾配により流れが一度剥離し, その剥離によって乱流遷移が誘起される. 現状ではまだ流れ場の解析途中であり, DP 理論と遷移現象を結びつける局所的なレイノルズ数の発見には至っていないが, 本研究課題終了後も引き続き流れ場の解析を続ける.



Fig. 3: 高精度数値流体計算 (LES) に用いたディフューザー形状

<引用文献>

- [1] S. Endo, T. Sujisakulvong, Y. Kuya, T. Arika and K Sawada, “Laminar-turbulent transition modeling with a Reynolds stress model for anisotropic flow characteristics”, AIAA Scitech 2020 Forum, AIAA paper 2020-1311
- [2] F. R. Menter, P. E. Smirnov, T. Liu and R. Avancha, “A one-equation local correlation-based transition model”, Flow, Turbulence and Combustion, 2015, 95:583-619
- [3] S. Lardeau, M. Leschziner, and T. Zaki, “Large eddy simulation of transitional separated flow over a flat plate and a compressor blade”, Flow, Turbulence and Combustion, 2012, 88:19-44
- [4] Y. Kuya, K. Totani and S. Kawai, “Kinetic energy and entropy preserving schemes for compressible flows by split convective forms”, Journal of Computational Physics, 2018, 375:823-853

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Shunya Endo, Thanakorn Sujisakulvong, Yuichi Kuya, Taketo Arika, Keisuke Sawada
2. 発表標題 Laminar-Turbulent Transition Modeling with a Reynolds Stress Model for Anisotropic Flow Characteristics
3. 学会等名 AIAA Scitech 2020 Forum (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Thanakorn Sujisakulvong, Taketo Arika, Yuichi Kuya, Keisuke Sawada
2. 発表標題 Flow simulations around NASA-CRM with Reynolds stress model
3. 学会等名 流体力学講演会/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 2020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
---------	---------