

令和元年6月14日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18312

研究課題名(和文)革新的空力設計技術確立に向けた全体安定性感度解析法の研究

研究課題名(英文) Study on adjoint global stability analysis method for innovative aerodynamic design technology

研究代表者

大道 勇哉 (Ohmichi, Yuya)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・研究開発員

研究者番号：40733168

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：流れ場の非定常性制御に有効な解析手法として全体安定性感度解析法(Adjoint GLSA)を開発し、その有効性を示した。Adjoint GLSAに必要な随伴方程式の定式化や適切な境界条件を導き、2次元円柱流れとキャビティ流れを対象に検証した。また、感度関数の定義を見直すことで、不安定モードの増幅率と振動数のそれぞれの制御に有効な感度領域を特定できることを明らかにした。さらに、提案手法を旋回噴流の渦崩壊現象の解析に適用し、渦崩壊をもたらす不安定モードとその感度領域を明らかにした。得られた感度領域を元に流れ場に制御を加えることで、渦崩壊をもたらす不安定モードを抑制あるいは増幅できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案手法が確立されることで、今後の非定常空力設計法は、これまでの定性的な考察に基づく設計から定量的な指標に基づく設計に変わり、それにより実験・数値解析の回数削減、個々の条件に応じた細やかな最適化などが可能になると期待される。

研究成果の概要(英文)：We developed the adjoint global stability analysis method (Adjoint GLSA) as an effective analysis method for control of unsteady flow fields and showed its effectiveness. The formulation of the adjoint equation and the appropriate boundary conditions are derived, and verified for a two-dimensional flow around a circular cylinder and a cavity flow. In addition, it was clarified that the sensitivity region effective for controlling each of growth rate and frequency of a target unstable mode can be specified by reviewing the definition of sensitivity function. Furthermore, the proposed method is applied to the analysis of vortex breakdown phenomena of a swirling jet, and the unstable mode that causes the vortex breakdown and its sensitivity region are clarified. We demonstrated that unstable modes that cause vortex breakdown can be suppressed or amplified by adding control to the flow field based on the obtained sensitivity region.

研究分野：流体解析

キーワード：非定常空気力学 圧縮性流体 全体安定性 随伴解析 数値流体力学 固有値解析

様式 C-19, F-19-1, Z-19, CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

航空宇宙機や流体機械の設計において、流れ場の非定常性は取り扱いの難しい問題である。例えば、ジェット騒音や機体の動不安定などの原因となる流れ場の非定常現象を抑制するために、機体形状最適化や流体アクチュエータ等による流れ場の制御を実施しようとしても、どのように形状を変化すればよいか・どのようなアクチュエータを設計すればよいかは、流体の定性的な理解を元に判断するしかない。実際の設計では、「流れ場の非定常特性を望んだ方向へ変化させるにはどのように設計すればよいか」に対する具体的な判断を与える技術が必要である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は上記の問題を解決する手法である「全体安定性感度解析法 (Adjoint GLSA)」を開発し、その有効性を示すことである。Adjoint GLSA を用いることで、狙った不安定モードを増幅/減衰させるためには流れ場のどの位置のどの物理量を変化させればよいか (感度の情報) を明らかにすることと、得られた感度を元に流れ場の制御を実際にも実施可能であることを示す。

Adjoint GLSA は既にいくつかの手法が提案されているが、本研究では、時間発展型のスペクトル変換法を組み合わせることで、航空宇宙分野で取り扱う空間3次元・圧縮性の流体現象を低消費メモリかつ現実的な計算コストで解析可能な技術を新たに提案する。

### 3. 研究の方法

研究代表がこれまで開発してきた圧縮性ナビエーストークス方程式に対する時間発展型の全体安定性感度解析法を随伴方程式 (Adjoint 方程式) に対して拡張する。開発した手法を比較的解析の容易な低レイノルズ数の2次元円柱周り流れに対して提案手法を適用し、最も不安定なモードに対する Adjoint モードを求め、既存研究と比較し、提案手法を実装する際の定式化やその解法に誤りが無いことを確認する。

次に3次元キャビティ流れや旋回噴流に生じるバブルの不安定性に対して提案手法を適用し、提案手法によって3次元流れ場の不安定モードと感度領域を得られることを確認する。さらに、得られた感度領域に対してフィードバック制御を施すことで流れ場の安定性を制御できることを示す。

### 4. 研究成果

研究の最初のステップでは、3次元圧縮性流体に対する全体安定性感度解析および感度解析のコード開発および検証を実施した。具体的には、3次元圧縮性線形化ナビエーストークス方程式およびその Adjoint 方程式の定式化を確認し、これらの方程式を用いた全体安定性感度解析プログラムを実装した。本プログラムを2次元円柱周り流れおよび2次元キャビティ流れに適用し、解析手法が正しく不安定モードを捉えることを確認した (図1, 図2)。また、Adjoint 方程式以外の感度解析法として、流れ場の安定性に対するバロクリニックトルクの影響を明らかにする安定性感度解析手法の検討を行った。本手法を2次元キャビティ流れの不安定モードに適用し、圧縮性によって生じるバロクリニックトルクがキャビティ流れの不安定モードの安定化に寄与していることを直接的に示すことに成功した。

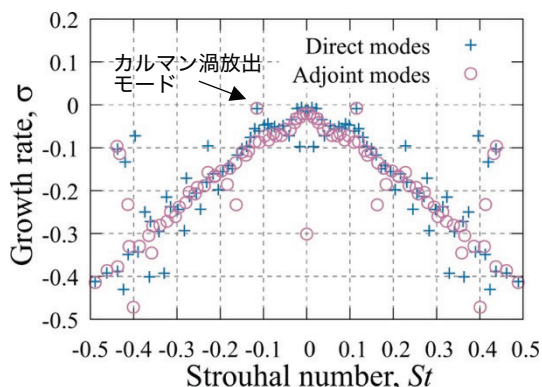


図1. 2次元円柱流れの固有値分布。

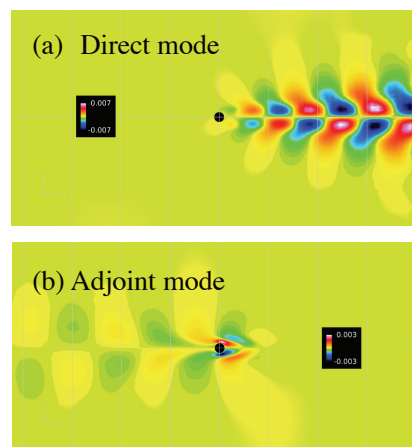


図2. カルマン渦放出に対応するモードの固有ベクトル. 主流方向運動量成分。

次に、随伴安定性感度解析における境界条件について、経験的な解析および理論的な解析の両面から適切な境界条件を調べた。その結果、壁面境界および流入・流出境界に対する境界条件の満たすべき式を明らかにした。

さらに、実際の3次元流れ場への適用例として、旋回噴流中の渦崩壊現象に対して提案手法を適用し、有効性を検証した。まず、全体安定性感度解析により、旋回噴流にスパイラル型の渦崩壊を

もたらず不安定モードが現れることを確かめた。本モードに対して提案手法による感度解析を実施することで、流れ場に生じるバブルの上流側に感度の大きな領域が現れることが明らかとなった(図3)。さらに、これまで用いられてきた感度関数の定義を見直すことにより、増幅率と振動率のそれぞれの制御に有効な感度領域を特定できることがわかった。図4中の①と②の領域の変動に対してローカルフィードバック制御をかけることによって、提案手法から予測される通りの流れ場の①安定化および②不安定化効果を得られることを実証した。

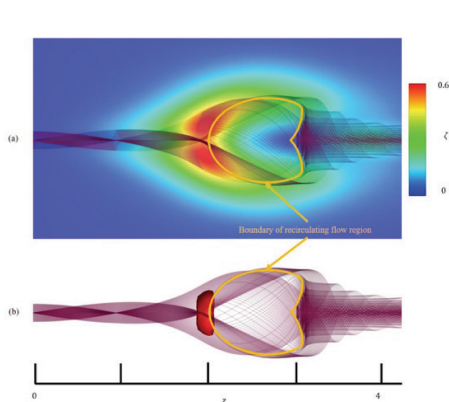


図3. 旋回噴流バの流線と感度分布.

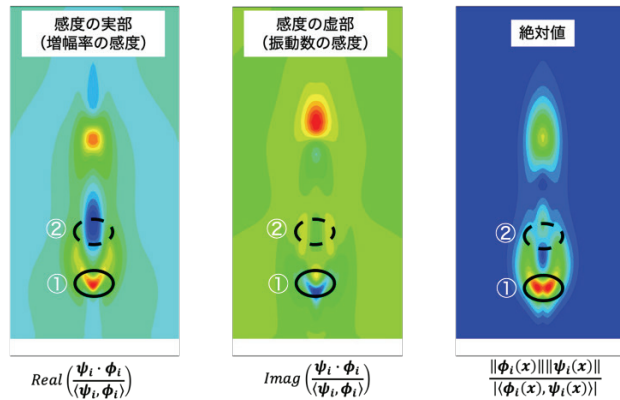


図4. 感度関数の実部, 虚部, 絶対値の分布.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

1. Ohmichi, Y., and Yamada, K., “Compressibility effects on the first global instability mode of the vortex formed in a regularized lid-driven cavity flow,” *Computers and Fluids*, Vol. 145, pp. 1-7, 2017.

〔学会発表〕(計 4 件)

1. Ohmichi, Y., and Yamada, K., “Numerical Method for adjoint global stability analysis of compressible flows based on matrix-free approach,” 71st APS DFD Annual Meeting, Atlanta, 2018 Nov.
2. Yamada, K., Ohmichi, Y., and Suzuki, K., “Global Stability Analysis of Vortex Breakdown in Misaligned Compressible Swirling Jet,” 71st APS DFD Annual Meeting, Atlanta, 2018 Nov.
3. 大道勇哉, 山田健翔, “随伴方程式に基づく3次元全体安定性感度解析法の開発”, 第31回数値流体力学シンポジウム, C08-2, 京都, 2017年12月.
4. 山田健翔, 大道勇哉, 鈴木宏二郎, “旋回噴流中の渦崩壊現象の全体線形安定性解析”, 第31回数値流体力学シンポジウム, A07-1, 京都, 2017年12月.

〔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：  
 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：

国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。