

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K12095

研究課題名（和文）航空機の非定常現象発生メカニズム解明のための位相的データ解析

研究課題名（英文）Topological data analysis for elucidating the mechanism of unsteady phenomena in aircraft

研究代表者

千葉 一永 (Chiba, Kazuhisa)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：50450705

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）：本研究では、遷音速パフエット強度をパーシステントホモロジーにより定量化し、検出するか調査した。Navier-Stokes方程式が扱う物理量を数学空間で間接的に扱うホモロジーに代替させ、遷音速パフエット強度の定量化を試みた。その結果、衝撃波通過領域における翼面上の任意の観測点データからパフエットを検出した。圧力係数と主流方向速度変化の2つの物理量は、いずれもパフエットを検出可能だが、主流方向速度変化はパフエット強度に顕著な差異を示し、より適切な指標となる。本手法の適用により、航空機が現在取得している翼表面センサデータから、リアルタイムで遷音速パフエットを検出できることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

航空機の安全性の劇的向上に対する自然現象に起因するボトルネックは、非定常な物理現象である。民間航空機の就航以来多様に研究されてきたが、非定常現象を伴う飛行データはカオス的で解析が困難なため、物理メカニズムは未解明で、現在も重大事故を誘引している。

本研究で行ったパーシステントホモロジーを用いた位相的データ解析法は、カオスの飛行データからパフエット強度を定量化した。航空機が運航中取得するセンサデータを利用できるため、本手法の利用のみで、リアルタイムでの遷音速パフエット発生検知が可能となり、安全性を定量的に計測できる。パフエットの時間的発生起点も特定でき、物理メカニズム追究の一助にもなる。

研究成果の概要（英文）：This study has investigated the quantification and detection of transonic buffeting intensity using persistent homology. The physical quantity treated by the Navier-Stokes equation is replaced by homology indirectly treated in mathematical space. As a result, the buffet was detected from data at arbitrary observation points on the wing surface in the region of the shock wave passage. Although both the pressure coefficient and the gradient in the uniform flow velocity can detect buffeting, the gradient in the uniform flow velocity indicates a significant difference in the buffet intensity and is a more appropriate indicator. The application of this method suggests that transonic buffets can be detected in real-time from the wing surface sensor data currently acquired by the aircraft.

研究分野：高速空気力学

キーワード：位相的データ解析 パーシステントホモロジー 非定常空気力学 遷音速パフエット

1 研究開始当初の背景

経済産業省は国内の次期基幹産業として航空産業を推進している。これが軌道に乗れば、航空機の安全性は今以上の保証が必要である。航空機の安全性の2つの脅威は目下予測不能な非正常物理現象とヒューマンエラーである。本課題はそれらの内の前者、すなわち、現在に至るも物理メカニズムが未解明なため予測不能とされている非正常物理現象に焦点を当てている。

晴天乱気流や遷音速バフエットに代表される非正常物理現象は民間航空機の就航以来知られており、重大事故を引き起こすため、1950年代から世界中で理論的・実験的（近年では計算機の発達により解析的にも）様々研究されてきた。これまでの方法論では、カオス的なデータ挙動に対応できず、思うような結果が得られていない。近年は、固有直交分解や動的モード分解といった数学的アプローチが散見されるが、物理メカニズムの解釈が困難で実設計での活用には至っていない。

航空機の取得する飛行データは常にカオス的な挙動のため、上記2つの非正常現象の物理メカニズムは現在に至るも未解明で、変わらず重大事故を引き起こしている。しかし、現象が起こるといふ結果があるからには、トリガとなる時間的あるいは空間的な何らかの原因がある筈である。この仮説が正しければ、データに必ず潜在する、それらの因果関係を示す相関をどのように発見するか、が本問題の本質となる。

2 研究の目的

カオス的/非カオス的によらず多次元データ構造のパターンを発見する、非正常データセットのための位相的データ解析法(TDA)を開発し、航空機飛行データに応用することである。そして、カオス的な飛行データ構造を数理モデル化することで、60年以上未解明の航空機物理現象の発生メカニズムの解明を目指す。これにより、航空機の安全性を脅かす非正常現象に対応した、これまでと一線を画す新たな航空機体設計戦略が明示されるとともに、自然現象が原因の悲惨な航空機事故の皆無な未来の実現につながる。

3 研究の方法

(1) 非正常な飛行データの3次元空間への写像(疑似アトラクタの生成)

入力データを多様な並べ方で構造化し、結果への影響性を調査する。アトラクタのように直感的にデータ構造が視認できるため、3次元空間での構造体生成を考える。

(2) パーシステントホモロジーによるデータ構造の定量化と変化率の定義

疑似アトラクタからデータ構造の変化を定義するため、本研究ではパーシステントホモロジーの概念を導入し、疑似アトラクタの3次元空間の挙動変化を数値化することで、データ構造の変化率を定量的に扱う。

(3) 変化率の可視化と数理モデル化

特定された時間や空間の流れ場を可視化し、発生現象の物理メカニズムを明文化する。また、データ構造の変化の挙動を数理モデル化し、物理メカニズムの一般性を比較検討する。

4 研究成果

カオス的/非カオス的によらず多次元データ構造のパターンを発見する、非正常データセットのための位相的データ解析法を開発し、実機飛行データに応用した。航空機の空力分野で長い間問題となっている遷音速バフエットを解析対象とした。具体的には、OAT15A超臨界翼の遷音速バフエット強度をパーシステントホモロジーにより定量化し、検出可能か精査した。

航空機設計で重要な非正常現象である遷音速バフエットは、通常、表面積または体積の積分値で定量化される。しかし、この方法では、現象の時間的な起源や空間的な発生を明らかにできず、その発生メカニズムは未だ不明である。また、この診断法を実機に適用することは困難である。そこで、ホモロジーを利用し、Navier-Stokes方程式が扱う物理量を数学空間で間接的に扱うことで、遷音速バフエット強度を定量化することを試みた。

その結果、衝撃波通過領域内の翼面上の任意の測定点のデータから、バフエット検出が可能となった。得られた結果の代表例を図1に示すが、圧力係数と主流方向速度変化の2つの物理量から、いずれもバフエットを検出できた。しかし、主流方向速度変化はバフエット強度に顕著な差を示し、より使い勝手のよい指標であった。本手法の適用により、現在の航空機が取得している翼表面センサデータから、リアルタイムで遷音速バフエットを識別できることが示唆された。

本研究により、TDAの有意性が示された。今後の方針は、(1)適用例の増量、(2)得られた結果の物理的解釈、の2点に大別される。

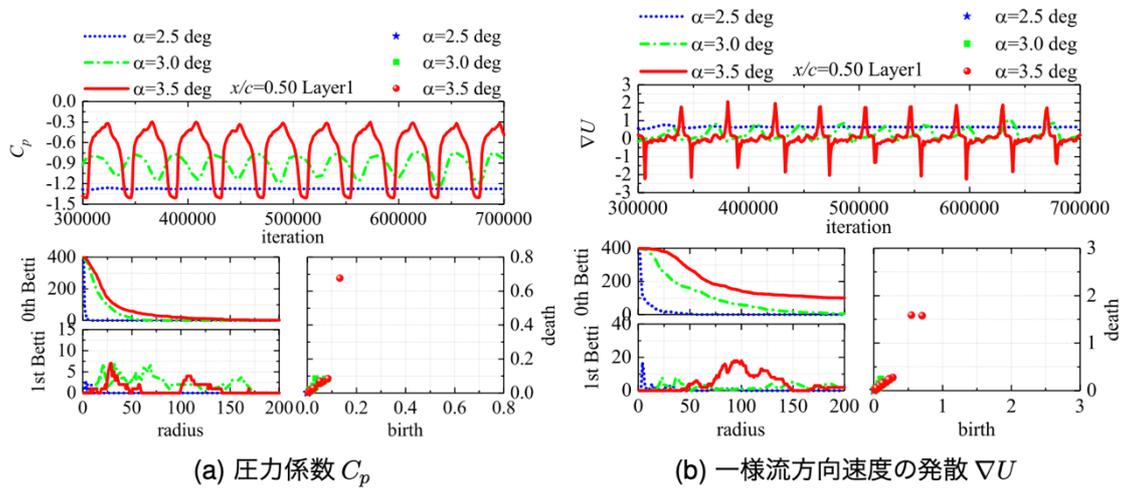


図 1: 開発した TDA を用い、OAT15A 超臨界翼の遷音速パフェットの非定常数値流体解析データに対し適用した結果の一例。各物理量に対して得られた、右下のパersistence図の対角線 ($y = x$) 付近に存在するプロットは、穴の生成から消滅までの時間が短くノイズとして無視される一方、対角線から離れたプロットは生存時間の長い穴で、入力データの摂動に対しロバストなため、穴の生成・消滅の各時間や穴の大きさといった入力データの特徴構造を表現した情報で、各迎角での流れ場の差異が明確に現れている。

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 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Chiba, K., Sawahara, M., Sumimoto, T., Hatta, T., and Kanazaki, M.	4. 巻 33
2. 論文標題 Hypothesis derivation and its verification by a wholly automated many-objective evolutionary optimization system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Neural Computing and Applications	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00521-021-05786-1	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2件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Chiba, K. and Kanazaki, M.
2. 発表標題 Lift Rise Spots Exploration of a Yaw-wise Rotational Flap by Enhanced-Kriging-based Efficient Global Optimization
3. 学会等名 International Conference on Optimization and Learning（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Chiba, K., Umeda, Y., Hamada, N., and Yasue, K.
2. 発表標題 Quantitative Prescription of Transonic-airfoil-buffet Occurrence by Persistent Homology
3. 学会等名 The 1st Aerospace Europe Conference（国際学会）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Kazuhisa Chiba's Website
<http://www.di.mi.uec.ac.jp/chiba/>

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			
ドイツ	University of Konstanz			