

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14958

研究課題名（和文）因果推論と縮約モデルによる非定常流体データからの現象間相互作用解析

研究課題名（英文）Analysis of Interactions between Fluid Phenomena using Modal Analysis and Time-Delay Embedding

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・主任研究開発員

研究者番号：40733168

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：複雑な流体データから時空間パターンを抽出し、流体现象間の相互作用を解析するための技術に関連する研究を実施した。主な成果は以下にまとめられる。

(1) ノイズを含むデータに適した動的モード分解のアルゴリズムを提案し、既存手法よりもロバストに計算できることを実証した。(2) 力学系の時間遅れ座標による埋め込みとデータの低次元表現を組み合わせることで、非定常感圧塗料計測データなどに含まれる大きなランダムノイズを除去する技術を提案し、その有効性を実証した。(3) 過渡的現象や非周期的現象を含む流れ場の現象間の相互作用を解析するために必要なモード解析手法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、複雑な流体现象のメカニズム解明や制御・予測を可能とするための研究である。特にデータ解析技術の一つであるモード解析技術の研究開発を実施した。研究成果により、これまで困難であった統計的に非定常な流体现象のデータ駆動型モデリングが可能となると期待される。また、既存のモード解析技術の計算安定性の向上や、モード解析技術を応用した高次元時系列データからのノイズ除去技術も提案した。これらの技術は、例えば非定常感圧塗料と呼ばれる流れ場中の非定常圧力場を計測する技術の計測結果等に活用でき、これまで困難であった大きなノイズを含む流体データの解析が可能となる。

研究成果の概要（英文）：We conducted research related to the techniques for extracting spatiotemporal patterns from complex fluid data and analyzing interactions between fluid phenomena. The main achievements can be summarized as follows:

(1) We proposed an algorithm for dynamic mode decomposition suitable for data containing noise, and demonstrated its robustness compared to existing methods. (2) We proposed a technique that combines time-delay embedding coordinates of dynamical systems and low-dimensional representation of data to remove significant random noise present in unsteady pressure sensitive paint measurement data. We demonstrated its effectiveness through CFD and experimental data. (3) We proposed modal analysis techniques necessary for analyzing interactions between phenomena in flow fields involving statistically nonstationary phenomena.

研究分野：流体力学

キーワード：モード解析 時系列モデリング 動的モード分解 ノイズ処理 Nonstationary流体现象 過渡的流体现象 圧縮性流体 信号処理

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、研究者個人に帰属します。

## 1 . 研究開始当初の背景

航空宇宙機や流体機械の安全性や燃費向上, 低騒音化などのために, 流れ場の非定常性を考慮した空力設計の技術確立が必要である. 近年, 実験や数値流体力学(CFD)で得られる3次元非定常流体データから現象やスケール構造を抽出するためのデータ解析技術(モード解析)の研究が盛んに進められている. また, モード解析で抽出された時空間パターンの時間変化をモデル化することで, 流れ場のメカニズム解明や制御・予測をするための技術も研究されている. しかしながら, モード解析で得られた時空間パターンが示す流体现象・スケール構造間の因果関係や相互作用を解析する技術は未発達である. 流体は非線形性を持つため, 非定常流体现象のメカニズムを正確に解明するためには, 流れ場中の各流体现象やスケール構造が互いにどのように影響を与えているのかを理解することが求められる. 一方で, 流体分野以外の多くの分野でも, 機械学習や因果推論等の技術を用いた時系列データの解析手法が急速に発展している. そこで, 本研究では特に時間遅れ座標を用いた解析手法に着目し, 流体分野で発展したモード解析の技術に応用することで, 非線形性を持つ流体现象の現象間・スケール間の相互作用をモデル化する解析手法を検討した.

## 2 . 研究の目的

本研究の目的は, モード解析(縮約モデル)技術と機械学習・因果推論技術を用いることで, 複雑な流れ場に含まれる流体现象やスケール間の相互作用の解析手法を提案し, その有効性を示すことである.

## 3 . 研究の方法

当初予定では, 従来手法である固有直交分解(POD)と動的モード分解(DMD)などのモード解析手法を時間遅れ座標を用いた時系列モデリング技術と組み合わせることで研究を遂行する予定であったが, 研究を進める過程で従来のモード解析手法では,

(a) 実験データのノイズによる影響を大きく受ける問題

(b) 統計的に非定常(Nonstationary)な現象を捉えることが困難な問題

が明らかとなった. そこで本研究では, 主に風洞実験で得られる非定常感圧塗料計測データとCFDデータを対象に, それらの問題の解決を図った.

(a)への対応としては, まずDMDアルゴリズムの計算安定性向上を図った. 既存のDMDアルゴリズムの計算不安定性の原因を調査し, 解決方法を提案した. また, 実験計測データからのノイズ除去手法として, 時系列モデリング技術として検討を進めていた時間遅れ座標を活用することで, 時系列データの効果的なノイズ除去手法を提案した. 提案手法を, 実際の非定常感圧塗料計測データに適用し, その有効性を検証した.

(b)への対応としては, 信号処理分野で近年提案された非定常信号のモード分解手法を用いたNonstationary流体现象の解析手法を提案した. 提案手法を, 簡単なCFDデータに適用し, その有効性を検証した.

## 4 . 研究成果

### (1) ノイズを含むデータに対する安定な動的モード分解アルゴリズムの開発

非定常感圧塗料計測による圧力分布データはショットノイズの影響を受けるため, 従来の動的モード分解(DMD)のアルゴリズムでは安定に計算出来ない場合があることがわかった. 本研究課題では, ノイズを含むデータに対するDMDアルゴリズムとして最もよく利用されるTotal least squared DMD (TLS DMD)が, 計算の数値的な不安定性によって正確な結果を得られないことがあることを示し, その改善手法としてTruncated-TLS DMD (T-TLS DMD)アルゴリズムを提案した. T-TLS DMDでは, 従来TLS DMDアルゴリズムの中で計算される特異値分解で分解された成分のうち計算の不安定性の原因となる成分を自動的に打ち切ることにより, 安定な計算が可能である.

図1に従来手法と提案手法による固有値分布を示す. 絶対値が各モードの増幅率, 偏角が周波数を表している. また, 図にはノイズの影響で生じる固有値のばらつきを点線の楕円で表している. 従来手法では, 入力データに含まれるノイズの大きさ( $\sigma$ )によって, 固有値に大きなばらつきが生じる(すなわち, 計算が不安定)であるのに対し, 図中青色で示している提案手法ではばらつきが小さい(計算が安定)であることが確認できる. また, 図2には実際に非定常感圧塗料で計測された航空機主翼上のパフェットセル現象に対応する固有ベクトルを示す. 提案手法は既存手法よりもノイズの影響の小さな明瞭なパフェットセル構造を抽出できていることがわかる. これらの成果は査読付き論文誌(AIAA Journal)から出版された.

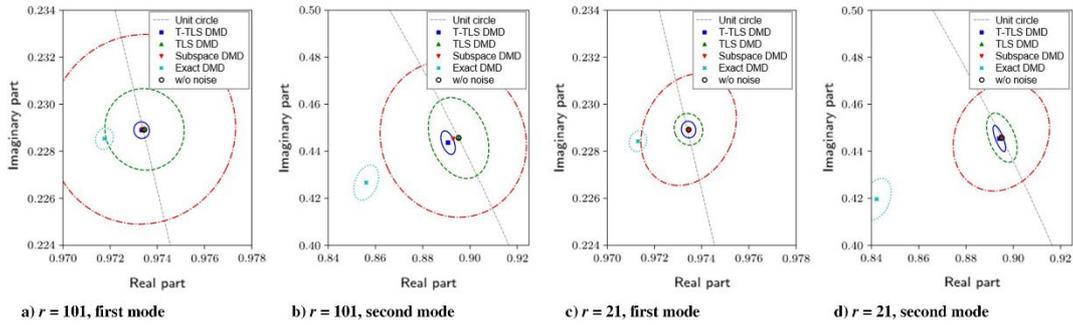


図 1 : ノイズによる DMD 固有値のばらつき . 提案手法(T-TLS DMD)は既存手法よりもばらつきが小さく , 計算が安定している .

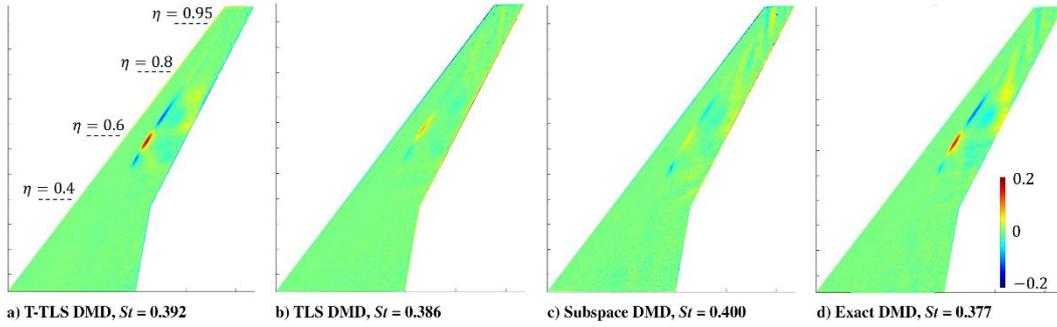


図 2 : 非正常感圧塗料計測データの DMD 解析結果 . パフェットセル構造に対応する DMD モードを示している . 提案手法(T-TLS DMD)は既存手法よりも明瞭にセル構造を捉えられる .

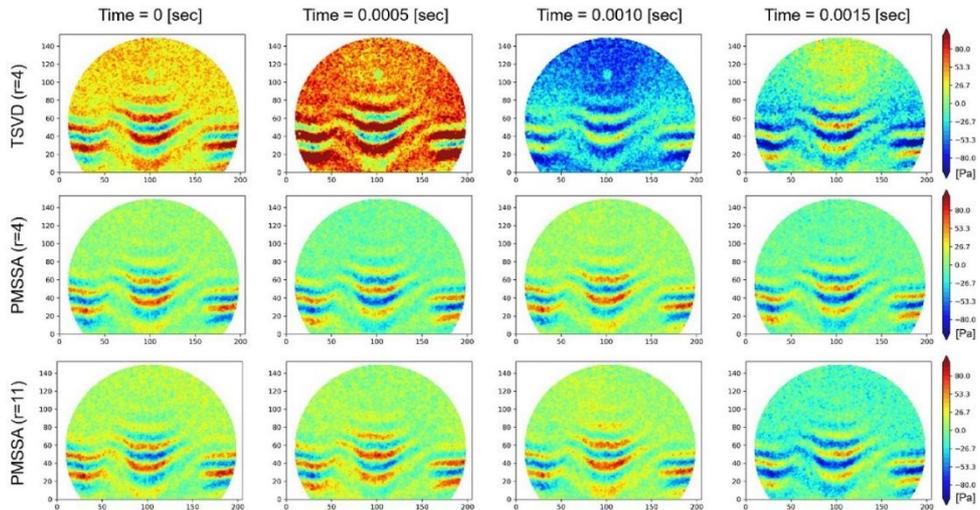


図 3 : 非正常感圧塗料計測データのノイズ処理結果 . 提案手法(PMSSA)は従来手法(TSVD)にみられる計測ノイズによる変動を低減できる .

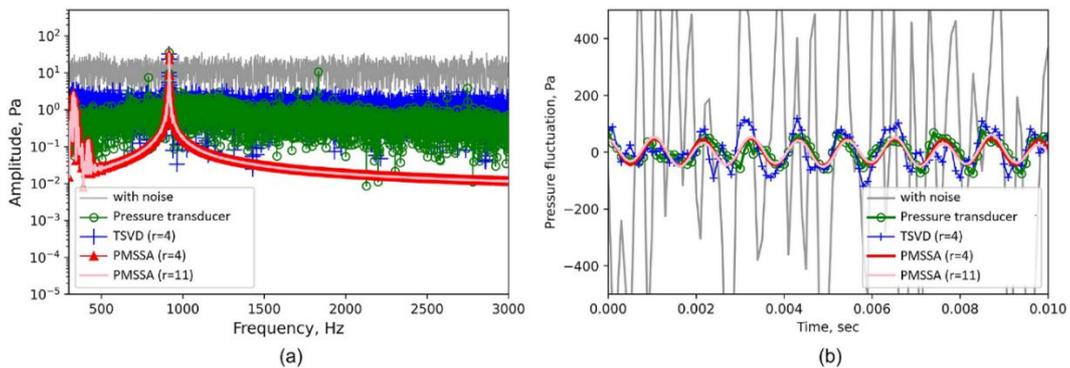


図 4 : 圧力変動の周波数分布 . 提案手法(PMSSA)は物理的現象を表す滑らかな変動を復元することができる .

## (2) 時間遅れ座標系を用いた時系列データのノイズ処理技術の開発

低速流れの非定常感圧塗料計測データでは信号雑音比が顕著に悪化し、解析上の問題となった。そこで非定常感圧塗料計測データに含まれるショットノイズを効果的に除去する技術として、多変量特異スペクトル解析(Multivariate Singular Spectrum Analysis, MSSA)と低次元データ表現を組み合わせたノイズ低減手法(Projected MSSA, PMSSA)を提案した。MSSA は時間遅れ埋込を利用した状態空間再構成技術であり、低次元データ表現を組み合わせることで、流体データのような大規模データにも適用可能とした。

図3, 4に翼型周り流れの Tone trailing-edge noise に関する非定常感圧塗料計測データのノイズ処理結果を示す。提案手法は、既存の特異値分解(Singular Value Decomposition, SVD)に基づく手法と異なり、打ち切り次元のパラメータ  $r$  の値の影響が小さい。また SVD よりも滑らかな時間変化が捉えられることが示された(図4)。これは、PMSSA が時間遅れ埋込を用いて状態空間上で信号を復元することにより、物理現象に対応する滑らかな信号の変動を捉えているためである。これらの成果は査読付き論文誌(Experiments in Fluids)から出版された。

## (3) 現象間の相互作用解明に向けた Nonstationary 現象のモード解析手法の開発

研究を進めていくなかで、流体现象は過渡的現象や非周期的・間欠的現象(Nonstationary 現象)を生じるため、現象間の相互作用を適切にモデル化するには、Nonstationary 現象の抽出技術が必要と考えられた。しかしながら、既存のモード解析手法は Nonstationary 現象を適切に扱うことが困難という問題があった。そこで本研究では、CFD や実験計測のデータから Nonstationary 現象を抽出し、得られた現象間の時間変化等の関係を解析するための手法(Variational Mode Decomposition-based Nonstationary Coherent Structure analysis, VMD-NCS 解析)を開発した。

図5, 6に角柱周りの過渡的成長を生じる流れ場の提案手法による解析結果を示す。従来のモード解析では解析が困難な過渡的現象と周期的現象、背景流れの緩やかな時間変化が、それぞれ個別のモードとして抽出できることを確認できる。また、モードの振幅の時間変化を調べることで、背景流れの振幅が小さくなるにつれ過渡的現象の振幅が大きくなる関係などが観察される。今後の研究では、本手法を工学問題で現れるより複雑な流体现象へ適用し、その有効性を実証する予定である。また、提案手法にはパラメータ依存性があることが分かっている。パラメータ依存性の解明や適切なパラメータの設定手法等についても検討を進める予定である。

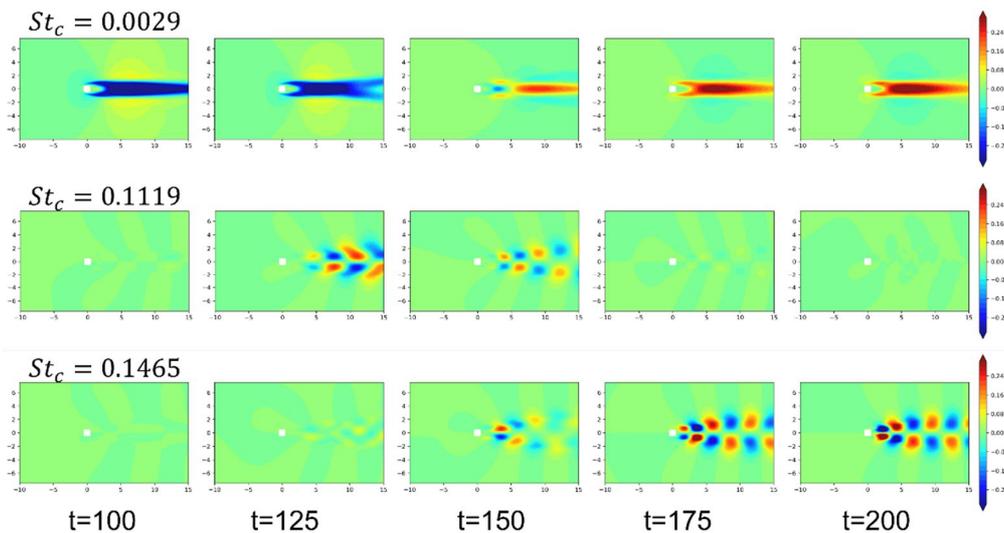


図5：提案手法(VMD-NCS 解析)によって抽出された角柱周り流れの現象

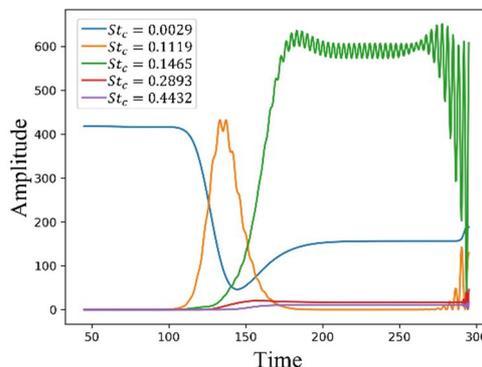


図6：提案手法(VMD-NCS 解析)によって抽出された各モードの振幅の時間変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ohmichi Yuya, Sugioka Yosuke, Nakakita Kazuyuki	4. 巻 60
2. 論文標題 Stable Dynamic Mode Decomposition Algorithm for Noisy Pressure-Sensitive-Paint Measurement Data	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIAA Journal	6. 最初と最後の頁 1965 ~ 1970
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.J061086	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 Ohmichi Yuya, Takahashi Kohmi, Nakakita Kazuyuki	4. 巻 63
2. 論文標題 Time-series image denoising of pressure-sensitive paint data by projected multivariate singular spectrum analysis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Experiments in Fluids	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/s00348-022-03523-5	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 0件）

1. 発表者名 大道 勇哉, 杉岡 洋介, 中北 和之
2. 発表標題 ノイズありデータに対する正則化動的モード分解法の検証
3. 学会等名 第53回流体力学講演会/第39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 2021年

1. 発表者名 大道 勇哉, 杉岡 洋介, 中北 和之
2. 発表標題 非定常PSPデータのモード分解による高速パフェット現象の迎角依存性解析
3. 学会等名 第52回流体力学講演会/第38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 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
---------	---------