

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14880

研究課題名(和文)パフェット現象を再現する乱流モデル導出を目指した革新的な方程式探査手法の開発

研究課題名(英文)Development of innovative method for equation inference towards derivation of whole new turbulence model for reproducing buffet phenomena

研究代表者

金森 正史(Kanamori, Masashi)

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：50770872

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：パフェット現象は剥離を伴う複雑な現象であり、従来の乱流モデルではこれを再現することが困難である。そのため、この現象の再現には高負荷の非定常解析を実施したのち、時間平均する必要があった。本研究は、そのような時間平均解を解に持つようなモデル方程式を機械的に探索することで逆算する方程式探査アルゴリズムを提案するものである。そして、このアルゴリズムを用いることにより、従来の乱流モデルでは実現が困難であったパフェット現象が再現できる乱流モデルが実現可能かどうかを明らかにすることを目指した。その結果、従来法では困難であった低速高迎角時のパフェット現象を再現できる乱流モデル構築の可能性を示すことに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、剥離を伴う乱流現象という、従来の乱流モデルでの再現が困難な現象に特化して方程式探査アルゴリズムの有効性を検証してきた。しかし、本アルゴリズムはあらゆるデータに対して適用することが可能であり、従ってどの科学技術分野にでも応用することが可能である。昨今、データから有益な情報やモデルを抽出する、いわゆるデータ駆動科学が全盛期を迎えているが、本アルゴリズムはデータ駆動科学の一つとして、今後様々な対象に用いられることが期待される。

研究成果の概要(英文)：Reproduction or modeling of the buffet phenomena is one of the urgent issues to design safer aircraft at lower cost. It is, however, quite difficult because of the complex flowfield including separations of flow, which cannot be simulated appropriately with conventional turbulence models. One therefore has to use higher fidelity methods like DNS, LES or DES, which often suffer from severe computational cost. In this research, so-called equation inference technique is developed in order to distill the data from high fidelity methods into a new turbulence model for the flowfield involved with buffet phenomena. The result from the equation inference technique shows quantitatively good agreements in the lift coefficient of aircraft under low-speed buffet condition. This result also shows the possibility of the equation inference technique for customizing the turbulence model for any complex flowfield.

研究分野：数値流体力学

キーワード：数式探査 微分方程式 遺伝的プログラミング 流体力学 乱流

1. 研究開始当初の背景

計算機の発達及びアルゴリズムの改善により、数値流体力学(CFD)はますますその適用範囲を広げている。実際、乱流のような複雑な流れ場であっても、乱流モデルの導入により低い計算コストで十分実用的な時間平均解が得られる。しかし、バフエット現象に代表されるような剥離を伴う現象については、乱流モデルでは満足な解が得られていないのが現状である。そのため非定常流れを解析し、その時間平均をとるといった、高負荷な解析が必要になるのが現状である。DES (Detached Eddy Simulation)のように剥離の有無で計算方法を変更することで計算負荷を低減する方法も提案されているが、それでも依然として計算負荷は高く、計算機の成長曲線に頭打ちの可能性が囁かれる昨今、このような大規模非定常解析が工学的に用いられる時代が来るとは考えにくい。

このような問題意識に対して、データ同化や数式探査と呼ばれる手法を用いて、乱流モデルの適用範囲を拡大させようとする試みが行われている。すなわち、乱流モデルを修正あるいは一部項を新設することにより、大きな剥離を伴う現象を再現できる乱流モデルを得るような枠組みである。前者は数値解析結果と実験結果を同化させることで、モデル内の定数をチューニングするものであるが、各問題に対してチューニングしている状態に近い。それに対して後者は、限定的にはあるが剥離乱流の問題を解決している(参考文献)など、全く新しい乱流モデルを導出できる可能性を秘めていると言える。

2. 研究の目的

バフエット現象は剥離を伴う複雑な現象であり、従来の乱流モデルではこれを再現することが困難である。そのため、この現象の再現には高負荷の非定常解析を実施したのち、時間平均する必要がある。本研究は、そのような時間平均解を解に持つようなモデル方程式を機械的に探索することで逆算する方程式探査アルゴリズムを提案するものである。そして、このアルゴリズムを用いることにより、従来の乱流モデルでは実現が困難であったバフエット現象が再現できる乱流モデルが実現可能かどうかを明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

研究を実施するにあたり、まずは方程式探査アルゴリズムを実装し、これを検証した。本研究では、まず方程式探査アルゴリズムの構築を実施した。方程式探査は、実験値などの参照値と数値解析結果を組み合わせ、これらの変数及びその導関数が満たす等式(方程式)を探索するという方法である。方法論の概要を図1に示すが、主に次の三つの鍵技術からなる。

- A) 変数の高精度な導関数の計算
- B) 進化的アルゴリズムを用いた数式探査
- C) 得られたモデル方程式の数値解析

これらをツールとして実装し、テスト問題により検証後、低次元の対象から次第に複雑なデータについて適用していき、最終的に流体解析結果に対してこれを適用し、乱流モデルの改善を図る。

4. 研究成果

はじめに、図1に示すような方程式探査アルゴリズム、EQUexplorer (EQUation explorer)を実装した。このアルゴリズムは、以下のようなツール群で構成される。

- A) データの数値微分ツール (EQUstract)

B) 遺伝的プログラミングに基づく数式探査ツール (EQUsplore)

C) 組み合わせ最適化による主要項抽出ツール (sQUeeze)

A については, Algebraic Numerical Differentiator (参考文献)を採用した. この手法は, 任意回数の導関数を精度よく推算することができ, 更にノイズが含まれる場合においても評価することができる.

B は, 遺伝的プログラミング(参考文献)に基づき, 以下の最適化問題を解く.

$$\text{minimize } \|f(x_i, u_j, c_k, s_l)\|_2 \quad (1)$$

ここで x_i, u_j, c_k, s_l はそれぞれ, 独立変数, 従属変数, 定数, パラメータを表す. このような数式はすべてツリー構造で表現し, ツリーの突然変異あるいはツリー同士の交叉等を実施することによって, 進化的に最適な数式を得ることが可能である. 数式探査をより効率的に実施するため, 数式演算ライブラリ GiNaC(参考文献)を導入し, 数式同士の交叉を容易にしている.

C は, B の数式探索で得られた最適な数式に含まれる不要な項をそぎ落とし, 主要項のみを抽出するものである. 具体的には, 数式に含まれる係数を適切に決定することによって, 主要項を残す. これを実施するには, たとえばスパースモデリング等の手法が考えられるが, 本研究では, 係数の数が少ない場合は総当たりで, 多い場合は遺伝的アルゴリズムによる最適候補の抽出によって実施した.

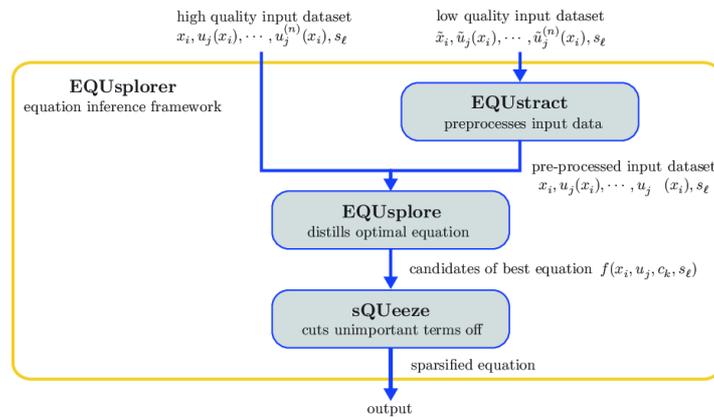


図 1 方程式探査アルゴリズムの全体像

以上のアルゴリズムをテスト問題に適用, 検証したのち, 2次元翼型に対する遷音速パフエット現象発生時における揚力係数の変化に対して適用した. この様子を非定常 RANS (URANS)解析により再現し, 得られた揚力変化を本提案の方程式探査ツールにて解析してモデル方程式を得た. 図 4 は CFD による揚力係数の変化と, モデル方程式を数値積分して得られる揚力係数の変化の比較である. これを見ると, モデル方程式は CFD 解析結果の時間応答を良く表現していることが分かる. 図 5 は, 揚力係数の振動振幅の迎角に対する依存性を, CFD 結果及びモデル方程式の解析結果をそれぞれ用いて示したものである. 遷音速パフエットは, パフエットオンセットと呼ばれる迎角を境に, 微小な振動が増幅され, やがてリミットサイクルへと至る. 本対象の場合, 約 3.4 deg にパフエットオンセットが存在するが, 探索した方程式の解は, 確かにその迎角付近を境に振幅が増大している様子を示している.

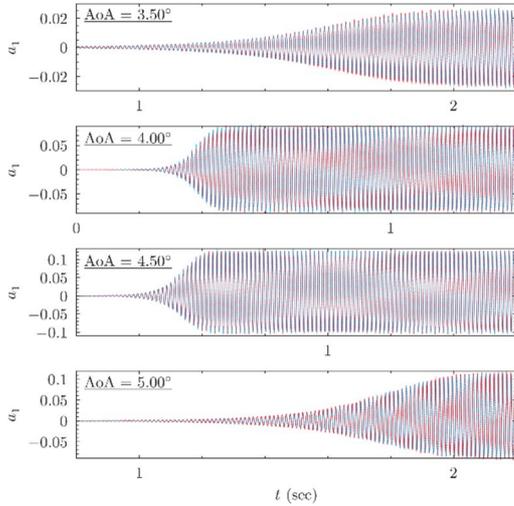


図4 翼型周りの CFD 解析により得られた揚力係数の時間変化(赤)及びそのデータから導出したモデル方程式を数値積分により解いた結果(青)

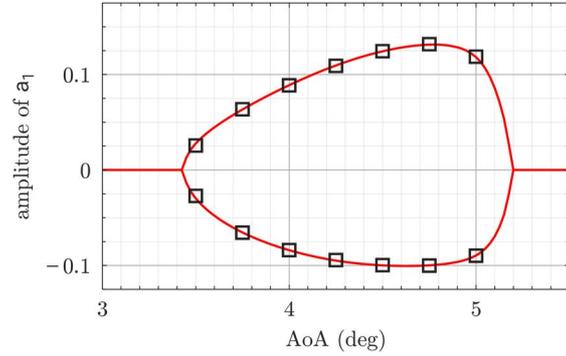


図5 迎角に対する揚力係数の振幅の変化 (CFD 解析結果(黒), モデル方程式による解析結果(赤))

以上の検証を経て、最終目標であるパフェット現象再現を目的とした乱流モデルの改良に取り掛かった。今回は、Spalart-Allmaras (SA)乱流モデルをベースとした DDES (delayed DES)により、NASA-CRM 周りの低速高迎角流れを解析し、時間平均解を求めた。そして、その時間平均解を方程式の解に持つような、新しい SA 乱流モデルの構築を試みた。具体的には、(2)式に示すような SA 乱流モデルの方程式に生成項 $G(\tilde{v}, \tilde{S}, \dots)$ を付加し、DDES の時間平均解を(3)式に代入した際に、等式が成立するような生成項 $G(\tilde{v}, \tilde{S}, \dots)$ を決定する。

$$\frac{\partial \rho \tilde{v}}{\partial t} + \frac{\partial \rho \tilde{v} u_j}{\partial x_j} = \rho C_{b_1} \tilde{S} \tilde{v} - \frac{M_\infty}{Re_\infty} C_{w_1} f_{w_1} \left(\frac{\tilde{v}}{d} \right)^2 + \frac{M_\infty \rho}{Re_\infty \sigma} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\nu + \tilde{v}) \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right\} + C_{b_2} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right] + G(\tilde{v}, \tilde{S}, \dots) = 0 \quad (2)$$

探索を通して得られた、有望な生成項の候補は以下のとおりである。

$$G(\tilde{v}, \tilde{S}, \dots) = -1.199 \times 10^3 \Omega r_{sw} r_{sa} L + 0.01582 \Omega^{\frac{3}{2}} r_{sw} r_{sa} + 0.8668 \Omega p - 0.02017 \Omega^{\frac{3}{2}} p - 0.6597 \Omega r_{sw} r_{sa} \quad (3)$$

ここで Ω , r_{sw} , r_{sa} , L , p はそれぞれ、渦度の絶対値、SA モデルで定義される境界層付近でのスイッチング関数 2 種、SA-DDES モデルで定義される長さスケール、そして圧力である。

以上の結果を CFD 解析コードに実装して対象を解析し、空力係数を比較したものを図 6 及び 7 に示す。特に高迎角時の揚力において、従来の SA 乱流モデルによる予測結果は実験値に対して過小評価している。一方、SA-DDES の時間平均解は、SA の結果より実験結果に近づいている。これらに対して、(3)式を実装した新 SA モデルによる解が、SA-DDES の時間平均解での揚力を再現している。更に、低迎角についても同様に実験値を再現できていることが分かる。一方、抗力については、その再現度には課題が残る。実際、低迎角時の抗力は、従来の SA モデルと比較して大幅に過大評価していることが分かる。これは、生成項が乱流境界層の分布を損なう影響をもたらすためであると考えられる。実際、大迎角時に求められる剥離形態を再現するための生成項であるため、低迎角時の剥離領域がほぼ存在しない条件においても、剥離が助長されてしまうものと考えられる。今後、高迎角だけではなく低迎角における状態も同時に満たすような生成項の実現を目指す。

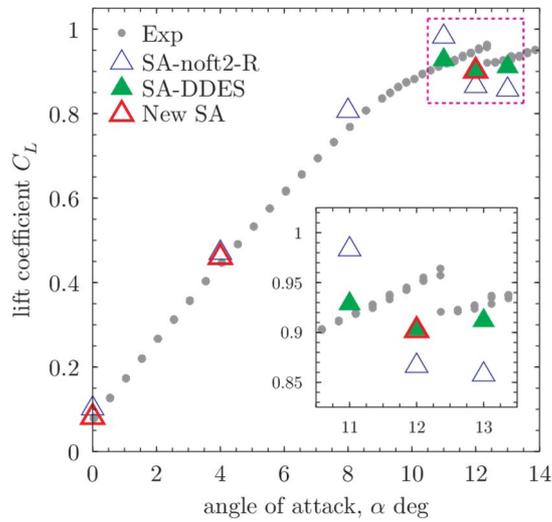


図6 従来の乱流モデル及びDESによる時間平均解と比較した本提案の改良型乱流モデルによるNASA-CRM周りの低速高迎角時の揚力特性

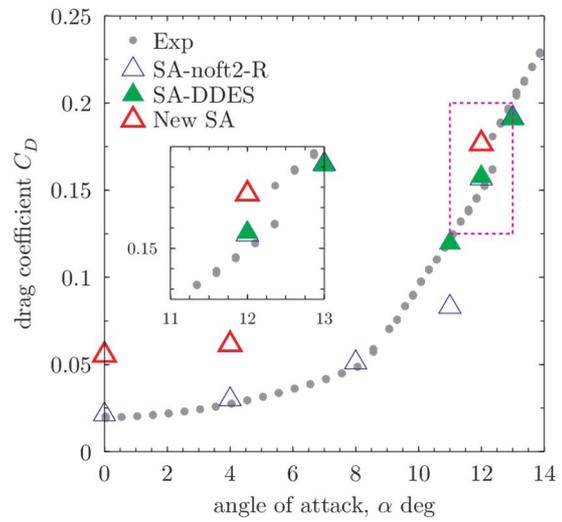


図7 従来の乱流モデル及びDESによる時間平均解と比較した本提案の改良型乱流モデルによるNASA-CRM周りの低速高迎角時の抗力特性

<引用文献>

Weatheritt J. and Sandberg R. "A novel evolutionary algorithm applied to algebraic modifications of the RANS stress-strain relationship," *Journal of Computational Physics*, Vol. 325, 2016, pp. 22-37.

Mboup M., Join C. and Fliess M., "Numerical differentiation with annihilators in noisy environment," HAL 2008.

Azamathulla H. M. and Ghani A. A., "Genetic Programming for Predicting Longitudinal Dispersion Coefficient in Streams," *Water Resources Management*, Vol. 25, No. 6, 2011, pp. 1537-1544.

Bauer C. Frink A. and Kreckel R., "Introduction to the GiNaC Framework for Symbolic Computation within the C++ Programming Language," *Journal of Symbolic Computation*, Vol. 33., No. 1, 2002, pp. 1-12.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Masashi Kanamori, Akiko Hidaka and Shinji Nagai
2. 発表標題 Distilling Model Equation from Numerical and Experimental Data Using Equation Inference Algorithm
3. 学会等名 AIAA Scitech 2019 Forum (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sansica, A. Loiseau, J.-Ch, Kanamori, M. Robinet, J.-Ch and Hashimoto, A.
2. 発表標題 System Identification on 2D Transonic Buffet
3. 学会等名 54th 3AF International Conference on Applied Aerodynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金森正史, 日高亜希子, 永井伸治
2. 発表標題 方程式探査アルゴリズムを用いた再突入カプセルのピッチ運動に関するモデル方程式の導出
3. 学会等名 第50回流体力学講演会 / 第36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 2018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
---------------------------	-----------------------	----