

令和元年6月18日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06088

研究課題名(和文) ニューラルネットワークを用いた多目的最適化による自己修復機能の探索

研究課題名(英文) Global search of the self-repair function by an multi-objective optimization using neural networks

研究代表者

坂口 大作 (SAKAGUCHI, Daisaku)

長崎大学・工学研究科・教授

研究者番号：70244035

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：近年の流体機械における設計要件は、設計点における効率のみならず非設計点における安定した運転が求められるようになってきた。従来の設計手法は、剥離を抑制し損失を減らすことに重点が置かれおり、非設計点では流れが剥離してサージなどの自励的不安定現象を生じてしまう。本研究では、流れが剥離しても流れ場自身が自動的に自己修復して安定した流れ場を実現する機能を有する形状を探索する。探索システムとして、数値流体解析を効率的に行うことができる多目的最適化設計手法を用い、遺伝的アルゴリズムによる全方位的形狀探索とし、さらにメタモデルとしてニューラルネットワークを適用することで、最適形状を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人工知能の利用は流体機械の設計にも有効であり、従来検討していなかった形状まで全方位的に探索できるようになった。本課題でも、流体機械の非設計点における設計を行う際に、人工知能を利用することで、効率的な形状探索を行うことができた。ただし、コンピュータにどのようなデータを与えて学習させ、何を期待するかを明確に示さなければ、コンピュータの提案する形状は最適なものとはならない。本課題では、二次流れの積極的利用というアイデアを具現化するために、最適形状を探索させ、従来に成しえなかった性能を得ることができた。流体機械の性能改善という具体的な提案だけでなく、人工知能の利用方法について指針を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：A technical issue for turbomachinery is not only for operation of a design condition but also for operation of an off-design condition. Classical design method is only focused on the flow condition at the design condition with reducing a loss based on flow separation. However, if it considered the operation at off-design condition, it is impossible to escape from generation of flow separation, as a result, unstable flow is observed such as rotating stall and surge. The objective of this study is to propose a design which has a function of self-repair of the flow using secondary flow at off-design condition. Multi-point multi-objective optimization system is applied for global search. Genetic algorithms with a meta-model of neural network is effective to reduce the computational cost. As a result, a novel design of a recirculation flow type casing treatment and a low solidity diffuser are found for the flow range enhancement with an effect of self-improvement by secondary flow.

研究分野：流体機械

キーワード：流体機械 人工知能 最適化 サージ ケーシングトリートメント 小弦節比翼列ディフューザ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ターボ機械は産業用プラントやガスタービンエンジン、ターボチャージャーなどに良く用いられ、様々な流量、回転数条件で運転されるようになった。ターボ機械に求められる性能は、効率曲線の目玉を拡大することであり、最高効率点のみならず、低流量域での運転が可能であること、さらには低流量域でも効率を損なわないことが求められている。

例えば、自動車用エンジンの燃費改善のためには、ターボチャージャーをより効率的に用いることが必要であり、モータと組み合わせたハイブリッドターボが期待される。ハイブリッドターボの問題点は、吸入空気流量が少ない状態でもモーターアシストにより回転数が増し、サージラインをまたぐ運転が行われてしまうことにあり、モータを組み合わせたハイブリッドターボチャージャーには、コンプレッサのサージフリー化が強く要求される。サージが発生する原因は流路内における逆流域が成長することにあり、羽根車入口インデューサ部の壁面に生じる逆流域によるものおよび羽根車出口ディフューザ部における逆流域によるものに大別できる。

非設計点における失速抑制対策は、循環流型ケーシングトリートメントおよび小弦節比翼列ディフューザが効果的である。どちらの方法も、低エネルギー流体が2次流れにより吸い出され、主流に戻されることで局所的な失速が回復するという特徴があり、最適な設計を行えば、流れ場自身が自己修復機能を持つという着想に至った。しかし、循環流型ケーシングトリートメントおよび小弦節比翼列ディフューザのどちらも多くの設計パラメータがあり、さらに設計点流量だけでなく非設計点流量で効果的な形状を見出す設計手法は考え出されていない。

2. 研究の目的

本研究では、流れ場が自己修復機能を持つターボ機械を多目的最適化により見出すことを目的とする。対象として、広い運転流量範囲が求められる自動車用ターボチャージャー圧縮機とし、インデューサ失速を抑制する方法として循環流型ケーシングトリートメントを適用し、ディフューザ失速を抑制する方法として小弦節比翼列ディフューザを同時に適用することで、失速しにくく運転流量範囲が広い遠心圧縮機を開発する。

3. 研究の方法

設計手法として、流れ場の数値計算による設計を効率的に行うことができる多目的最適化設計に着目した。数値解析は内部流動を理解するのに有効な手段であり、試作まえに性能予測することで開発コストを抑えることができる。しかし、数値解析の計算コストは未だ高く、いくつもの設計パラメータを組み合わせる数十から数百通りの数値計算を行うことは実用的でない。そこで、目的とする性能を持つ最適な形状を自動探索するシステムとして、図1に示す多目的最適化設計手法を適用する。設計パラメータの組み合わせについては、遺伝的アルゴリズム(GA: Genetic Algorithm)に基づいて求め、さらに組み合わせ結果を簡易的に評価する代替モデル(メタモデル)により構成し、CFDの実計算を行う回数を大幅に省略できるシステムであり、多目的最適化を実用的設計ツールとして用いることができるようになる。

インデューサ失速は循環流型ケーシングトリートメントを適用し、ディフューザ失速は小弦節比翼列ディフューザにより失速を抑制する。シュラウドケーシング形状およびディフューザ翼形状について、耐失速に支配的なパラメータを目的関数とし、多目的最適化システムにより全方位的に形状探索を数値計算により行う。

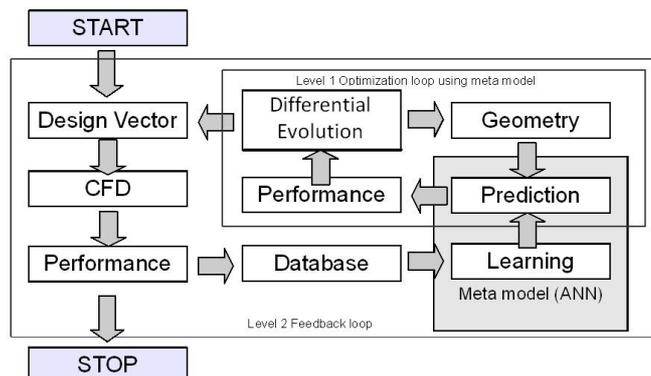


図1 ニューラルネットワークをメタモデルとした多目的最適化システム

4. 研究成果

循環流型ケーシングトリートメントの最適化

羽根車直径 51mm のターボチャージャー用遠心圧縮機を対象とし、循環流型ケーシングトリートメントを適用する。上流側吸い込み管シュラウド壁面の環状溝と下流側羽根車入口のど部のシュラウド壁面環状溝とをバイパス通路で連結し、両溝間の圧力差により下流側溝からは低エネルギー流体が吸い出され、上流側溝から主流に戻される循環流が形成される。主流に戻され

た低エネルギー流体は、自身の持つ旋回成分が予旋回効果となること、循環流量の分だけ羽根車入口における流入流量が増加することにより前縁剥離が抑制される。

従来の研究により、循環流量は下流側溝位置に依存すること、循環流による前縁剥離抑制効果はシュラウド側の一部に限られ、ハブ側で前縁剥離が大きくなって最終的にサージに至ることが分かっている。すなわち、インデューサ失速を完全に抑制するためには、(1) 十分な循環流を確保すること、(2) 局所的な予旋回効果を抑制しハブ側の剥離を循環流増大効果により抑制すること、が必要である。以上の知見を多目的最適化の目的関数および拘束条件として与えることでインデューサ失速を完全に抑制するバイパス形状を探索した。さらに、環状通路のみで低エネルギー流体の吸い出し効果が不十分と判断され、ガイドベーンを環状通路内に設け、過大な予旋回成分を抑制することを考えた。

図2に最適化システムにより探索した形状について、横軸に設計点流量、縦軸に非設計点流量での効率を示し、最適形状の3次元図を示す。最適化結果は明瞭なパレート解を示し、設計点流量および非設計点流量の2点で効率を改善できる形状を見出すことができた。また、最適形状の内部流れを詳細に求めたところ、効率改善には最適な循環流量となるよう設計することが重要であり、最適な循環流量では、羽根車入口における局所的な速度歪みを抑制し、スパン方向に均一な入射角分布を得ることができていることが分かった。

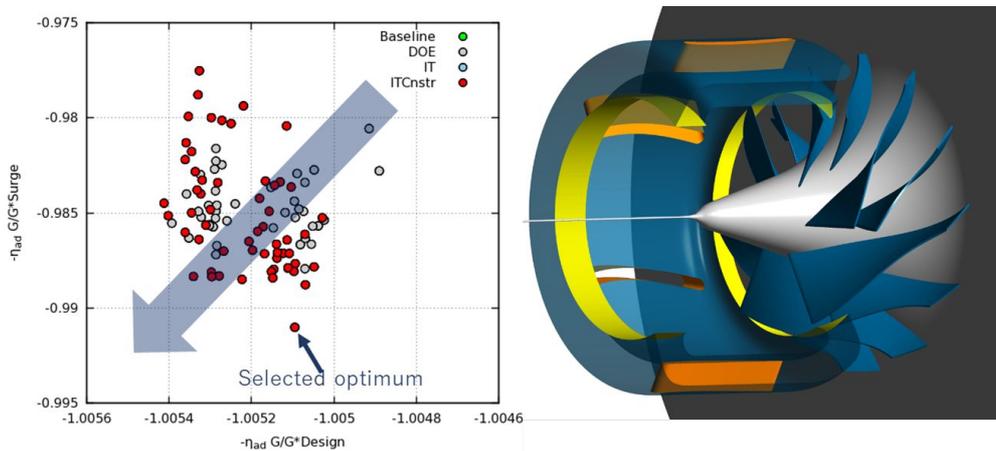


図2 循環流型ケーシングトリートメントの最適形状探索結果および3次元形状

小弦節比翼列ディフューザの最適化

過給機用遠心圧縮機において、小弦節比翼列ディフューザの適用可能性を追究した。遺伝的アルゴリズムおよびニューラルネットワークを用いた全方位探索システムである多目的最適化を適用し、数値解析により最適形状を求めるシステムを構築した。

図3に小弦節比翼列ディフューザの最適形状を探索した結果を示す。横軸にサージ近傍の非設計点流量におけるディフューザ圧力回復率、縦軸に設計点流量におけるディフューザ圧力回復率を示す。多目的最適化を用いれば、ディフューザ流入角が大きく変化する運転領域でも、失速しない翼列ディフューザの設計が可能であり、明瞭なパレート解を示した。特に、ディフューザ先端隙間を通路幅の約10%程度設けると、二次流れ効果が得やすくなり、最適形状を見出しやすくなる。図中の赤丸印はディフューザ先端隙間を設けた場合にのみみられる最適形状である。また、内部流れを詳細に調べたところ、図の紫色で示す側壁上の二次流れが隣接翼に流入し、隣接翼の失速を抑制すること、失速抑制効果が周方向に伝播し軸対象流れが維持できることでディフューザ失速を抑制する物理的な失速抑制メカニズムが明らかになった。

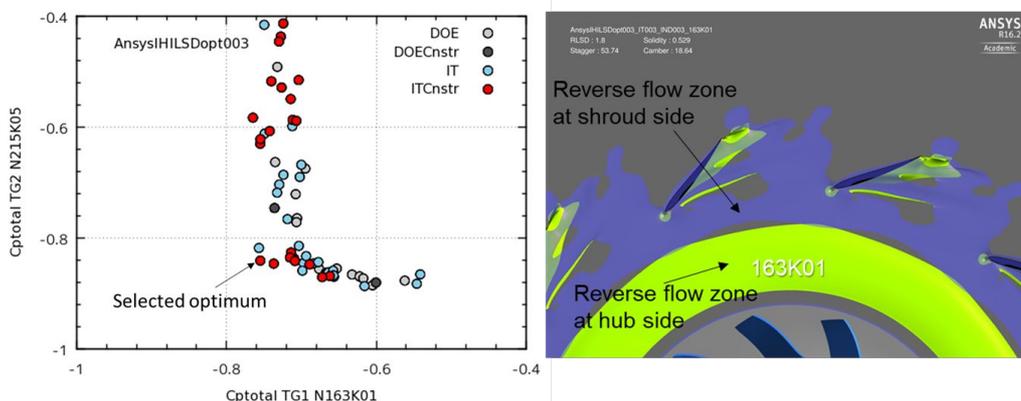


図3 小弦節比翼列ディフューザの最適形状探索結果および二次流れ分布

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

1. Daisaku Sakaguchi, Sakue Daiki, Tun Min Thaw, Global Search of a Three-dimensional Low Solidity Circular Cascade Diffuser for Centrifugal Blowers by Meta-model Assisted Optimization, Journal of Thermal Science, 査読有, 10.1007/s11630-018-0991-6, Volume 27, Issue 2, pp 111-116 (2018)
2. 坂口大作, 多目的最適化による循環流型ケーシングトリートメントの設計, ターボ機械, Vol45, No.11 pp.660-669, 査読無 (2017)
3. Min Thaw Tun, Daisaku Sakaguchi, Multi-point Optimization of Recirculation Flow Type Casing Treatment in Centrifugal Compressors, Journal of Thermal Science, 査読有, Vol.25, No.3, pp.231-241 (2016)

〔学会発表〕(計 8 件)

1. Cheng BinBin, Shouta Miyashita, Daisaku Sakaguchi, Optimization of a Recirculation Flow Type Casing Treatment with Guide Vanes for Centrifugal Compressors, Proceedings of the 15th Joint Symposium between Sister Universities in Mechanical Engineering, JSSUME2018(2018)
2. Ryouta Ishihara, Yusuke Kawachi, Yoshiki Ishibashi, Daisaku Sakaguchi, Optimization of an Aero-foil Type Diffuser for Centrifugal Compressors, Proceedings of the 15th Joint Symposium between Sister Universities in Mechanical Engineering, JSSUME2018 (2018)
3. Daisaku Sakaguchi, Min Thaw Tun, Design of Recirculation Flow Type Casing Treatment with Guide Vanes in Centrifugal Compressors by an ANN Assisted Optimization, The 5th Asian Joint Workshop on Thermodynamics and Fluid Science, AJWTF 2018(2018)
4. Daisaku Sakaguchi, Takuya Kitamura, Daiki Sakue, Global search of a Three-dimensional Low Solidity Circular Cascade Diffuser for Centrifugal Blowers by Meta-model Assisted Optimization, Proceedings of the 13th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, ISAI2017 (2017)
5. 平山恒輝, 原田光之亮, 篠原峻, 日隈克将, Min Thaw Tun, 坂口大作, ターボチャージャー用遠心圧縮機の高性能化設計(ケーシングトリートメント内ガイドベーンの多目的最適化), 日本機械学会年次大会 (2016)
6. 坂口大作, Min Thaw Tun, ターボチャージャー用遠心圧縮機の高性能化設計(ケーシングトリートメントの最適化と圧縮機効率), 第76回ターボ機械協会(北見)講演会 (2016)
7. Daisaku Sakaguchi, Min Thaw Tun, Design of a Three-dimensional Blade of Low Solidity Circular Cascade Diffusers by Multi-Point Optimization, The 7th International Conference on Science and Engineering, ICSE 2016 (2016)
8. Min Thaw Tun, Daisaku Sakaguchi, Off-design Performance Improvement in Centrifugal Compressors with Recirculation Flow Type Casing Treatment by Optimized Guide Vane, The 7th International Conference on Science and Engineering, ICSE 2016 (2016)

6 . 研究組織

なし