

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：32689

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H07293

研究課題名(和文)遠心圧縮機内部に発生する旋回失速の過渡的特性の解明と失速制御手法の確立

研究課題名(英文)Stall Control and Transition Process from Diffuser Stall to Stage Stall in a Centrifugal Compressor with a Vaned Diffuser

研究代表者

藤澤 信道(Fujisawa, Nobumichi)

早稲田大学・理工学術院・助手

研究者番号：10778153

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：圧縮機を実際に運転する際、不安定現象を避けるため、流量マージンを取り運転されている。そのため、不安定現象を制御し作動範囲を広げることで、より高性能な点で運転可能となる。しかし、不安定現象の制御方法は、未だ経験的な手法が多いのが現状である。そこで、本研究は不安定現象の抑制および制御手法を明確に提案するために、遠心圧縮機において、部分流量運転時に発生する旋回失速の発生構造を実機計測および数値解析の両面から調査したものである。その結果、ディフューザに発生する旋回失速の詳細な渦構造およびディフューザ失速が拡大する際の流動現象を解明し、ディフューザ失速の制御手法を明確にした。

研究成果の概要(英文)：The centrifugal compressors with vaned diffusers, compared to vaneless diffusers, are prone to unstable phenomena, such as surges and rotating stalls. The operating range of centrifugal compressors with vaned diffuser is limited by surges and rotating stalls, which can potentially cause serious accidents. Especially, the rotating stall can be recognized as a precursor of surge in the impeller or diffuser passage. Therefore, a better understanding of the physics of the rotating stalls leading to a surge is important in predicting of the surge and for the improvement of the stall margin and the control of rotating stall.

This study investigates the evolution process of the diffuser rotating stall in a vaned diffuser of a centrifugal compressor during off-design operation by both experimental and numerical analysis. We revealed the transition characteristics of rotating stalls and the detailed vertical structure of the diffuser stall evolution.

研究分野：流体工学

キーワード：遠心圧縮機 旋回失速 ディフューザ失速 ターボ機械 DES解析 非定常計測

### 1. 研究開始当初の背景

過給機やエンジンの構成要素である遠心圧縮機は高効率化・高圧力比化のために、旋回失速を抑制し安定作動範囲を拡大することが求められている。従来より、失速を制御する技術・速やかに失速から離脱する技術の開発のため、旋回失速を始めとする不安定現象の発生メカニズムおよび非定常的な渦構造の解明が進められてきた。更に遠心機に発生する旋回失速についての研究報告は軸流機に比べ少なく、発生メカニズムの早急な解明が求められている。このような背景のもと、申請者はこれまで数値流体力学(CFD)と実験流体力学(EFD)を組み合わせることにより、遠心圧縮機内部に発生する不安定現象の発生構造の解明に取り組んできた。

旋回失速の詳細な調査は1978年のDayらの研究に始まり、世界中で活発に研究が行われている。近年、軸流圧縮機の動翼前縁剥離渦あるいは遠心圧縮機のディフューザ案内羽根前縁剥離渦が失速初生(Stall Inception)に影響を及ぼすとの報告があり(Pullan et al, J. Turbomachinery, 2015)、(Everitt et al., J. Turbomachinery, 2013)、申請者が報告している翼前縁での非定常渦と旋回失速との関係性が軸流・遠心機問わず注目されている。しかし他研究における翼前縁剥離渦の非定常挙動については解析領域を簡易化した数値解析での報告に留まっており、失速初生からその発達に至るまでの過渡的特性は未だ解明されていない。

### 2. 研究の目的

過給機やエンジンの高性能化に対し、主要構成要素である遠心圧縮機において旋回失速突入を抑制し安定運転範囲を拡大すること、あるいは速やかな失速離脱の技術を開発することは、主要な課題の一つである。本研究の目的は遠心圧縮機による実機試験と数値解析の両面から、旋回失速と不安定現象のメカニズムを解明し、有効な制御手法を提案することである。

具体的な研究項目は、(1)ディフューザ案内羽根設置時における、ディフューザ旋回失速の過渡的特性の解明をすること。特に、ディフューザ失速の初生からディフューザ領域を局所的に旋回するMild Stallに成長した後に、圧縮機全体に拡大するDeep Stallへと陥るメカニズムを解明する。(2)ディフューザ旋回失速を制御および早期離脱するために、有効な制御手法を確立すること。以上の2つである。

### 3. 研究の方法

(1) まず Spike 型の失速初生および失速の旋回挙動を精度良く捉えるために、ディフューザ案内羽根入口周方向6点で高い時間応答性を持つ圧力センサを用いた壁面圧力同時計測を行う。その実験により、(1)失速初生の発生場所、(2)Spike 型の擾乱の旋回速度、(3)

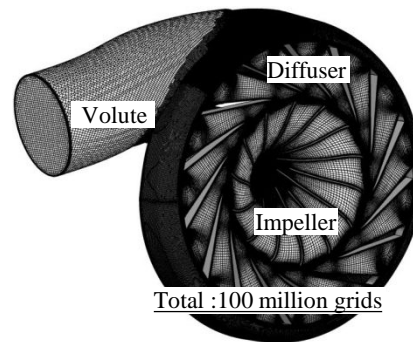


図1. 解析格子概観図

失速初生からディフューザ失速へと成長する時間を測定する。更にディフューザ失速初生時の非定常的な渦構造を模擬するために、高精度な乱流解析手法であるDES解析を用いた数値解析を行う。数値解析コードは申請者自らが作成したものであり、軸流・遠心機問わず流体機械内部流れ解析において良好な解析結果を示しており、高精度かつ高速に乱流場を解析できる。本研究では、羽根車・ディフューザおよびケーシング領域を対象とした圧縮機全体(図1)の解析を行う。失速点近傍において、前縁剥離渦の周方向への伝播が失速初生現象の形成に与える影響を調査する。

(2) ディフューザ領域で局所的に旋回する失速が、流量低下と共に羽根車側へと拡大しDeep Stallへと陥る失速の過渡的特性を明らかにする。そのために、ディフューザ入口部周方向4点および羽根車入口部1点において熱線流速計による流速同時測定を行い、(i)舌部付近で発生するブロック領域の範囲同定、(ii)ディフューザ失速がディフューザ入口から羽根車部へと拡大する間の失速領域の推移、以上2点を実験試験で調査する。更にディフューザ失速がDeep Stallへと陥る際の渦構造の非定常的な挙動を調査するために、(1)と同様のDES解析を行う。まず定常性能の調査と試験結果を比較・検証した後に、Mild StallからDeep Stallへ陥る流量での非定常解析を行う。

### 4. 研究成果

(1) ディフューザ失速セルの発生構造は図2のように示される。まず1翼毎に竜巻型の剥離渦と前縁渦が各案内羽根負圧面の前縁部にて形成される。また前縁渦が形成されている案内羽根の正圧面にて渦が生じ、この渦がスロート部でブロックとなりシュラウド側にて逆流を誘起する。さらに前縁渦が時間経過と共に隣接翼の前縁へと移流し、隣接翼負圧面にて竜巻型の剥離渦と干渉し新たに前縁渦を形成する。ディフューザ失速内部では隣接翼前縁へと移流し干渉する前縁渦が、羽根車から吐出される翼端漏れ渦と同等の役割を果たしていると考えられる。また、前縁渦が隣接翼の前縁へと干渉することにより、隣接翼の正圧面にて渦が形成される。

この正圧面に発生する渦がスロート部でのブロッケージとなる。このスロート部でのブロッケージによって、シュラウド側で逆流が誘起され、案内羽根に対する流入角が増大することにより、隣接翼の前縁部で竜巻型の剥離渦が発生する。よって、案内羽根翼間で形成される竜巻型の剥離渦、前縁渦およびスロート部での渦からなる渦構造が隣接翼へと遷移することがディフューザ失速の巡回構造であると考えられる。

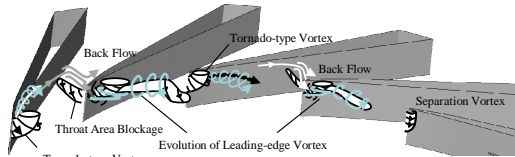


図2. ディフューザ失速セル内の渦構造

(2) ディフューザ失速の拡大過程は以下の(a)-(c)の流動状態にまとめられる。それぞれの状態での圧縮機子午面でのエントロピー分布を図3に示す。

(a) : ディフューザ失速が案内羽根前縁部シュラウド側で前述したような渦構造を持ち巡回している。

(b) : ディフューザ失速が急激にハブ側へと

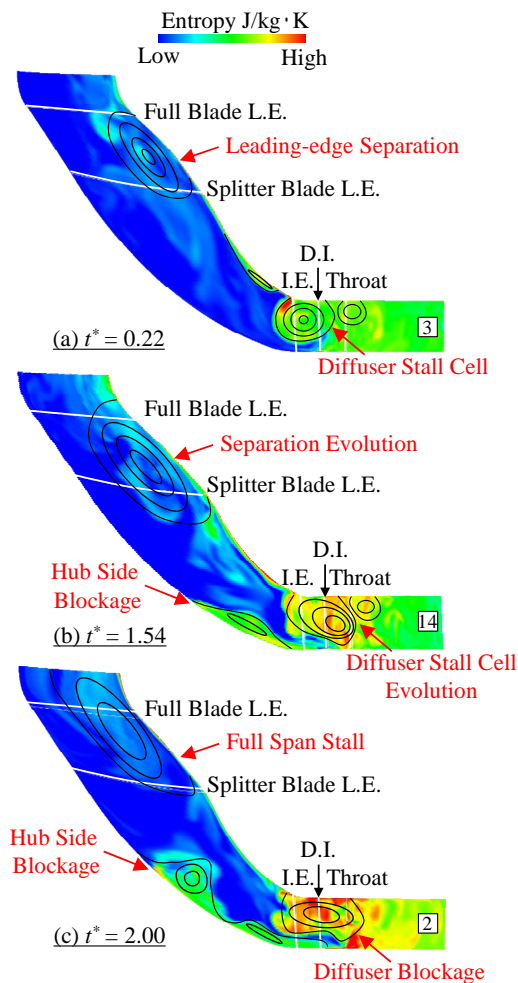
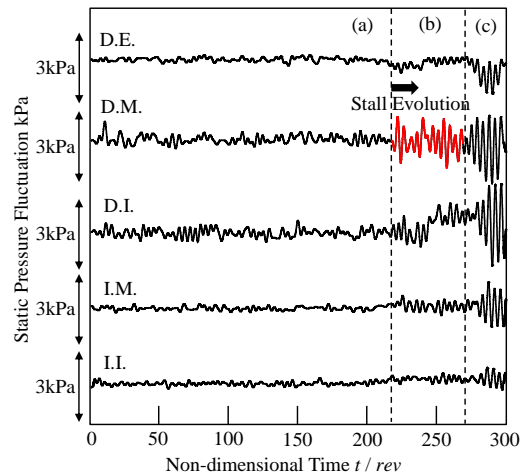
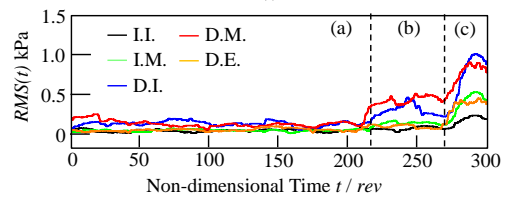


図3 ディフューザ失速拡大時の圧縮機子午面におけるエントロピー分布



(i)



(ii)

図4 圧縮機子午面における圧力波形および変動

巡回位置を変える。これはディフューザスロート部で形成される渦によるブロッケージ効果のためである。時間経過と共にブロッケージは成長し流路を阻害することで、ディフューザ失速は羽根車流路側へと押し出される。

(c) : 羽根車流路側へと拡大したディフューザ失速と羽根車前縁部で巡回する羽根車失速が結合し Deep Stall が形成される。このとき、羽根車流路スロート部においても流路を阻害する縦渦が発生している。

以上より、ディフューザ失速は案内羽根スロート部ハブ側に発生する渦に端を発して、羽根車側へと拡大していくことがわかった。

(3) ディフューザ失速は案内羽根スロート部ハブ側に発生する渦に端を発して、羽根車側へと拡大して様子を実機試験において調査した。圧縮機子午面方向におけるケーシング壁面での静圧変動およびRSM値の測定結果を図4に示す。測定位置は図下部から羽根車入口(I.I.)、羽根車流路中央(I.M.)、案内羽根入口(D.I.)、案内羽根スロート部(D.M.)および案内羽根出口部(D.E.)である。図3よりまず案内羽根スロート部における圧力変動が生じた後に、案内羽根スロート部を起点として上流および下流側共に大きな変動が伝わっていることがわかる。これは(2)で述べた案内羽根スロート部ハブ側に発生する渦がディフューザ失速の圧縮機全体への拡大に重要な役割を果たすという結果を試験においても示すことができたといえる。よって、解析および試験両面においてディフューザ失速の圧縮機全体への拡大過程を詳細に明家にすることができた。

(4) これまでの研究から解明された失速の発生機構を踏まえ、渦構造の制御に有効な案内羽根形状を提案するものである。現段階での研究成果を踏まえると、(A)案内羽根前縁部で発生する前縁渦がディフューザ失速の初生の要因であるため、案内羽根前縁形状を修正する。前縁部で発生する渦を制御するため、図5に示すLean形状を提案する。更に、(B)スロート部付近のプロッキングがDeep Stall形成に重要な役割を果たしていると考えられるため、案内羽根の流路面積分布を変更する。流路面積分布を変更することで、ディフューザ流路内の圧力回復分布が変化し、スロート部で形成される渦を制御できる。今後の研究として、提案する形状の最適化には十分な解析実績を持つ最適化設計ソフトFine/Designを用いることで形状を決定する。更に、最適化された形状を用い実機試験・数値解析を行い、失速に対する有効性および内部流れ場・渦構造の変化を調査する。安定運転範囲は20%の拡大、性能のピークは5%の上昇を目標とする。

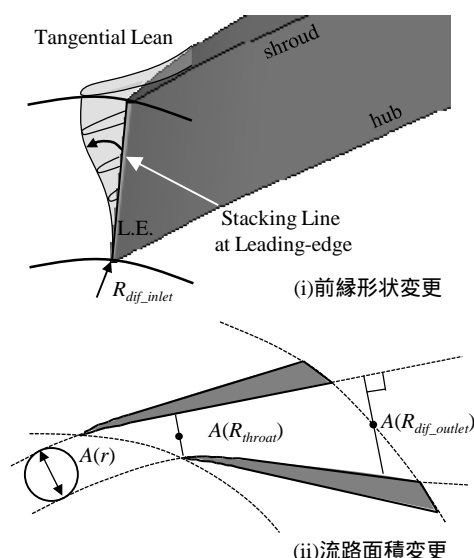


図5 提案する案内羽根形状

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

Nobumichi Fujisawa, Ema Daiki, Yutaka Ohta, "Unsteady Behavior of Diffuser Stall in a Centrifugal Compressor with Vaned Diffuser", Proceedings of ASME Turbo Expo 2017, GT2017-63400, DOI:10.1115/GT2017-63400, 査読有.

Nobumichi Fujisawa, Yutaka Ohta, "Transition Process from Diffuser Stall to Stage Stall in a Centrifugal Compressor with a Vaned Diffuser", International Journal of Rotating Machinery, Vol.2017, Article ID 2861257, June, 2017, DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/2861257>, 査読有.

Nobumichi Fujisawa, Sota Ikezu, Yutaka Ohta, "Structure of Diffuser Stall and Unsteady Vortices in a Centrifugal Compressor with Vaned Diffuser", Proceedings of ASME Turbo Expo 2016, GT2016-56154, DOI:10.1115/GT2016-56154, 査読有.

〔学会発表〕(計9件)

乾哲也, 藤澤信道, 太田有, 「遠心圧縮機内部に発生するディフューザ失速の流量低下に伴う拡大メカニズム」, 第45回日本ガスタービン学会定期講演会, 松山, 2017年10月

江間大輝, 藤澤信道, 太田有, 「羽根付ディフューザを有する遠心圧縮機に発生失速の成長過程」, 日本流体力学会年会 2017, 東京, 2017年8月

Nobumichi Fujisawa, Ema Daiki, Yutaka Ohta, "Unsteady Behavior of Diffuser Stall in a Centrifugal Compressor with Vaned Diffuser", Proceedings of ASME Turbo Expo 2017, GT2017-63400, Charlotte, NC, USA, June 26-30, 2017.

江間大輝, 池津聡太, 藤澤信道, 太田有, 「遠心圧縮機内部に発生する旋回失速の流量低下に伴う過渡特性」, 日本機械学会 第94期 流体工学部門 講演会, 山口, 2016年11月

池津聡太, 江間大輝, 藤澤信道, 太田有, 「羽根付ディフューザを有する遠心圧縮機に発生するディフューザ失速の旋回構造」, 第44回日本ガスタービン学会定期講演会, 山形, 2016年10月

Sota Ikezu, Nobumichi Fujisawa, Yutaka Ohta, "Stall Characteristics of a Centrifugal Compressor with Vaned Diffuser", Proceedings of 6th Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science", Guilin, China, September 20-23, 2016.

藤澤信道, 池津聡太, 太田有, 「遠心圧縮機ディフューザに発生する失速の非定常挙動」, ターボ機械協会 第76回北見講演会, 北海道, 2016年9月

藤澤信道, 池津聡太, 太田有, 「過給機用遠心圧縮機内部に発生するディフューザ失速の構造と非定常挙動」, 第9回送風機・圧縮機の騒音と性能研究文科会, 神奈川, 2016年7月

Nobumichi Fujisawa, Sota Ikezu, Yutaka Ohta, "Structure of Diffuser Stall and Unsteady Vortices in a Centrifugal Compressor with Vaned Diffuser", Proceedings of ASME Turbo Expo 2016, GT2016-56154, Seoul, South Korea, June 13-17, 2016.

〔その他〕  
ホームページ等

<http://www.aoni.waseda.jp/nobumichi-fuji/index.html>

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

藤澤 信道 (FUJISAWA, Nobumichi)

早稲田大学・理工学術院・助手

研究者番号：10778153