

# 博士論文概要

## 論文題目

遠心圧縮機に発生するディフューザ失速の  
初生と旋回機構に関する研究

Inception and Rotating Mechanism of  
Diffuser Stall in a Centrifugal Compressor

申請者

藤澤	信道
Nobumichi	FUJISAWA

機械科学専攻 流体工学研究

2017年10月

各種エンジンの構成要素である遠心圧縮機は、その主たる産業用用途において、超小型から大型、低圧から高圧、低回転から高回転に至るまで、幅広い条件で運転されている。特に、遠心圧縮機は小型化・高効率化の観点から羽根付ディフューザが多用されている。しかし、羽根付ディフューザを採用することにより高い圧力上昇が得られる反面、右上がり不安定領域が拡大し、部分流量運転時に旋回失速に代表される不安定現象が生じるという問題がある。旋回失速は局所的な流れの不安定性に起因して発生するものであり、失速セルの通過による周期的な変動が、動・静翼列に高速度の繰り返し荷重とモーメントを与える。このため、材料疲労が高速度で蓄積される旋回失速の状態からは早急に離脱することが望まれる。また、新たな圧縮機を設計する上で、失速挙動の予測や、失速に対して堅牢な設計指針を得ることは、設計・製造現場に大きく貢献する。そこで、失速に対する設計指針・速やかに失速から離脱する技術の開発のため、従来から旋回失速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。しかし、旋回失速の発生構造や成長過程は、圧縮機の幾何形状(翼・通路形状、翼枚数、翼端隙間幅)や運転条件(低速・高速、亜音速・遷音速の差異)などにより大きく異なり、現在までに普遍的な解釈は得られていない。近年、数値流体力学(CFD)解析の進展から、圧縮機性能や内部流れ場の特徴を予測することは容易となり、実機試験結果と組み合わせることで圧縮機内部に発生する現象の理解が急速に進んでいる。ただし、CFDを用いても旋回失速の定量的な予測は未だ難しく、設計段階での失速予測はほぼ不可能である。そのため、現在においても圧縮機に発生する旋回失速の普遍的な発生メカニズムを解明することは必要不可欠である。

圧縮機の安定作動範囲拡大の要求のため、旋回失速の発生メカニズムの研究は世界中で盛んに行われている。旋回失速の詳細な研究は1955年のEmmonsの研究に始まり、軸流・遠心機ともに調査が進められている。しかし、遠心圧縮機内部に発生する旋回失速の発生メカニズムについて様々な知見が得られているが、軸流機と比べてまだまだ未解明の部分が多く残されている。さらに近年、翼前縁で形成される非定常渦と旋回失速との関係性が軸流・遠心機を問わず注目されているが、翼前縁剥離渦の非定常挙動については失速初生に絞った数値解析の報告に留まっており、失速初生からサージ点近傍の失速が発達した状態までの特性については未だ解明されていない。本研究ではこれら未解決の問題に取り組み、翼前縁部に発生する非定常渦に着目し、数値流体力学(CFD)と実験流体力学(EFD)を組み合わせることで、旋回失速の初生から発達までの形成メカニズムの解明を行う。特に、ディフューザ失速の初生および圧縮機全体への拡大とディフューザ案内羽根前縁部での前縁剥離渦の拡大との関連性について調査する。

本論文は8章から構成されている。

第一章では緒言として、研究背景や従来から行われている研究についてまとめ、

本研究の研究目的および研究内容について述べている。

第二章では、本研究に用いた過給機用遠心圧縮機の仕様およびその構成要素についてまとめると共に、流速や圧力などの計測方法について示している。供試遠心圧縮機は船用ディーゼルエンジンに用いられる過給機用遠心圧縮機で、回転数を  $6000 \text{ min}^{-1}$  に設定して実験を行った。供試羽根車は後向き羽根を有する開放型羽根車であり、短羽根 7 枚、長羽根 7 枚の計 14 枚で構成される。また、ディフューザには平行流路の羽根なしディフューザと、15 枚のくさび形案内羽根を設置した羽根付ディフューザを採用した。

第三章では、圧縮機に発生する旋回失速の構造解明を行うために開発した LES と RANS の Hybrid コードである DES コードについての理論、解析に用いた格子および渦の可視化手法について示している。本研究では、連続方程式、3 次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式、エネルギー保存の式を支配方程式として数値解析コードを開発した。対流項の評価には MUSCL 法により 3 次精度まで高次精度化した FDS を用いた。粘性項は Gauss の定理に基づく 2 次精度中心差分により評価した。時間積分には MFGS 陰解法を採用した。また、乱流モデルには LES/RANS ハイブリッド手法である SSTk- $\omega$  モデルを基にした DES を採用した。本研究では、調査する目的に応じて 2 種類の計算格子を使用した。1 つ目は、旋回失速の詳細な渦構造を調査するために、羽根車およびディフューザ全周を解析対象としたものであり、総格子点数は約 5100 万点である。また 2 つ目は、旋回失速の過渡特性を調査するために、渦型室を含めた遠心圧縮機全体を解析対象としたもので、総格子点数は約 8000 万点である。

第四章では、本圧縮機の基本的な内部流れ場の特性や旋回失速の特性について調査した結果について述べている。さらに、作成した数値解析コードの妥当性を検証するため、様々な観点から数値解析と実験結果との比較を行った。供試圧縮機では、失速点において羽根車入口部で旋回する羽根車失速およびディフューザ案内羽根入口部で旋回するディフューザ失速が共存しており、流量を低下させると段全体で 1 つの旋回失速が形成される。羽根車失速が羽根車回転速度の 55%、ディフューザ失速が 25%、段失速が 22% で旋回しており、それぞれ 1 セルで構成される。解析より得られた失速特性や内部流れ場の特性は、実機試験の結果と良い一致を示していることを明らかにした。特に、実験および解析の結果より、ディフューザ案内羽根前縁部シュラウド側で前縁渦が発生し、流量低下に伴い拡大することが分かった。

第五章では、ディフューザ前縁渦がディフューザ内部流れ場に与える影響と非定常挙動を調査した。また、ディフューザ前縁渦の渦構造やその発生機構に焦点を絞った。ディフューザ前縁渦は、案内羽根前縁部シュラウド側の竜巻状の剥離渦、案内羽根負圧面シュラウド側コーナー部で発生する縦渦により構成される。

特に失速点においては，前縁渦はディフューザ流路を塞ぐようなブロックageに成長する．

第六章では，失速点において羽根車前縁部にて発生する羽根車失速およびディフューザ案内羽根前縁部にて発生するディフューザ失速の渦構造を数値解析により調査した．失速点において発生する羽根車失速は，羽根車前縁部にて発生した剥離渦が竜巻状の渦へと発達し，隣接翼へと旋回する構造を持つ．また，ディフューザ失速は，ディフューザ案内羽根前縁部で発生する前縁渦の複数翼間にわたる成長によるものである．ディフューザ失速セルは，ディフューザ案内羽根前縁部で発達した前縁渦，竜巻型の剥離渦およびスロート部で発生する縦渦の組により構成される．つまり，羽根車失速およびディフューザ失速ともに，翼前縁部の渦構造が失速の発生構造に重要な役割を持つ．特に，ディフューザ失速内部では，前縁渦が隣接翼の前縁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クageとなる．このスロート部でのブロックage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していくことがディフューザ失速の旋回構造であることが示された．

第七章では，羽根車およびディフューザ失速が段全体への失速へと陥る過渡現象の発生構造を実機試験および数値解析により調査した．失速点より流量を低下させると，羽根車前縁部において羽根車失速およびディフューザ案内羽根前縁部においてディフューザ失速が共存して旋回している状態から，シュラウド側で旋回していたディフューザ失速がハブ側へと移行する偏流現象へと急激に失速特性が変化する．さらに，ディフューザ失速は羽根車流路側へと拡大した後，羽根車失速と干渉し，段全体で旋回するひとつの失速セルを形成する．さらに，解析において舌部近傍であるディフューザ流路でハブ側からシュラウド側への偏流現象が確認できた．ディフューザ失速がシュラウドからハブ側へと遷移する現象には，ディフューザ流路ハブ側スロート部の渦構造が重要な役割を果たしていることを示唆した．

第八章では，本研究で得られた成果や知見についてまとめると共に，今後の展望や研究課題について言及している．

## 早稲田大学 博士 (工学) 学位申請 研究業績書

氏名 藤澤 信道 印

(2017年 10月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者 (申請者含む)
論文	<p>○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, 2017-6, <u>Nobumichi Fujisawa</u>, Yutaka Ohta</p> <p>○Unsteady Behavior of Leading-edge Vortex and Diffuser Stall in a Centrifugal Compressor with Vaned Diffuser, Journal of Thermal Science, Vol.25, No.1, pp.13-21, 2016-1, <u>Nobumichi Fujisawa</u>, Shotaro Hara, Yutaka Ohta</p> <p>○羽根付ディフューザを有する遠心圧縮機に発生する失速と前縁渦の関係, 日本機械学会論文集, Vol181, No. 829, DOI:10.1299/transjsme.15-00194, 2015-9, <u>藤澤信道</u>, 原昇太郎, 太田有</p> <p>○Unsteady Behavior and Control of Vortices in Centrifugal Compressor, Journal of Thermal Science, Vol.23, No.5, pp.401-411, 2014-10, Yutaka Ohta, <u>Nobumichi Fujisawa</u></p>
総説	遠心圧縮機ディフューザ前縁形状が騒音・失速特性に与える影響, ターボ機械, 2017-11, <u>藤澤信道</u> , 太田有 (掲載決定)
国際会議	<p>Unsteady Behavior of Diffuser Stall in a Centrifugal Compressor with Vaned Diffuser, Proceedings of ASME Turbo Expo 2017, GT2017-63400, Charlotte, NC, USA, 2017-6, <u>Nobumichi Fujisawa</u>, Ema Daiki, Yutaka Ohta</p> <p>Investigation of Unsteady Flow Field under Developed Rotating Stall in a Centrifugal Compressor with Vaned Diffuser, The 5th Korea-Japan Joint Workshop on Fans and Compressors, Kyoto, Japan, 2016-10, Sota Ikezu, <u>Nobumichi Fujisawa</u>, Yutaka Ohta</p> <p>Stall Characteristics of a Centrifugal Compressor with Vaned Diffuser, Proceedings of 6th Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science, Guilin, China, 2016-9, Sota Ikezu, <u>Nobumichi Fujisawa</u>, Yutaka Ohta</p> <p>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, 2016-6, <u>Nobumichi Fujisawa</u>, Sota Ikezu, Yutaka Ohta</p> <p>Characteristics of Diffuser Stall and Diffuser Leading-edge Vortex in a Centrifugal Compressor, International Gas Turbine Congress 2015, Tokyo, Japan, 2015-11, <u>Nobumichi Fujisawa</u>, Shotaro Hara, Yutaka Ohta</p> <p>Unsteady Behavior of Leading-edge Vortex and Diffuser Stall in a Centrifugal Compressor, The 4th Japan Korea Joint Workshop on Fans and Compressor, Goyang, Korea, 2015-10, <u>Nobumichi Fujisawa</u>, Sota Ikezu, Yutaka Ohta</p> <p>Unsteady Behavior of Leading-edge Vortex and Diffuser Stall in a Centrifugal Compressor with Vaned Diffuser, 12th International Symposium on Experimental Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, Lerici, Italy, 2015-7, <u>Nobumichi Fujisawa</u>, Shotaro Hara, Yutaka Ohta</p>

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
国際会議 (つづき)	<p>Unsteady Behavior of Leading Edge Vortex and Diffuser Stall Inception in a Centrifugal Compressor, Proceedings of ASME 2014 4th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting, FEDSM2014-21242, Chicago, USA, 2014-8, <u>Nobumichi Fujisawa</u>, Shotaro Hara, Yutaka Ohta, Takashi Goto</p> <p>Experiments Investigation of Three-dimensional Structure of Rotating Instability Vortex in a Centrifugal Compressor, Asian Congress on Gas Turbine, Seoul, Korea, 2014-8, Yasuyuki Fukuda, Yuta Itagaki, <u>Nobumichi Fujisawa</u>, Yutaka Ohta</p> <p>Effects of Diffuser Vane Geometries on Compressor Performance and Noise Characteristics in a Centrifugal Compressor, Proceedings of ASME 2013 Fluids Engineering Division Summer Meeting, FEDSM2013-16145, Incline Village, Nevada, USA, 2014-8, Yohei Morita, <u>Nobumichi Fujisawa</u>, Takashi Goto, Yutaka Ohta</p>
講演	<p>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, 愛媛, 2017-10, 乾哲也, <u>藤澤信道</u>, 太田有(発表予定)</p> <p>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成長過程, 日本流体力学会年会 2017, 東京, 2017-8, 江間大輝, <u>藤澤信道</u>, 太田有</p> <p>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, 2016-11, 江間大輝, 池津聡太, <u>藤澤信道</u>, 太田有</p> <p>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, 2016-10, 池津聡太, 江間大輝, <u>藤澤信道</u>, 太田有</p> <p>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, 2016-9, <u>藤澤信道</u>, 池津聡太, 太田有</p> <p>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, 2016-7, <u>藤澤信道</u>, 池津聡太, 太田有</p> <p>遠心圧縮機の羽根車翼端隙間が内部流れに及ぼす影響, 日本機械学会第93期流体工学部門講演会, 東京, 2015-11, 黒田未来, 池津聡太, <u>藤澤信道</u>, 太田有</p> <p>遠心圧縮機内部に発生する旋回失速と非定常渦の構造, 第43回日本ガスタービン学会定期講演会, 鳥取, 2015-9, 池津聡太, <u>藤澤信道</u>, 太田有</p> <p>遠心圧縮機ディフューザ前縁部に発生する非定常渦の構造, 第8回送風機・圧縮機の騒音と性能研究文科会, 東京, 2015-5, <u>藤澤信道</u>, 原昇太郎, 太田有</p> <p>羽根付ディフューザを有する遠心圧縮機に発生する失速と前縁渦の関係, 第42回日本ガスタービン学会定期講演会, 熊本, 2014-10, <u>藤澤信道</u>, 原昇太郎, 太田有, 後藤尚志</p>

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
その他	<p data-bbox="300 367 1474 443">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，研究活動スタート支援，採択番号 16H07293，2016-9</p> <p data-bbox="300 479 1102 517">ターボ機械協会第 76 回北見講演会 若手優秀講演賞 2016-9</p> <p data-bbox="300 553 691 591">日本機械学会 三浦賞 2015-3</p> <p data-bbox="300 627 1031 665">第 42 回日本ガスタービン学会学生優秀講演賞 2014-10</p> <p data-bbox="300 701 691 739">日本機械学会 畠山賞 2013-3</p>