

# 博士論文審査報告書

## 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

2018年2月

過給機から航空エンジンに至るまで各種動力機械で広く用いられている遠心圧縮機では、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と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やサージなどの不安定現象が発生することが知られている。その中でも特に局所的な流れの不安定性に起因して発生する旋回失速は、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とから、材料疲労が高速度で蓄積される旋回失速状態からは早急な離脱が望まれている。また、圧縮機の設計上、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。そこで従来から、旋回失速の発生メカニズムや、失速セルを構成する非定常的な渦構造の解明が進められてきたが、旋回失速の発生機構や成長過程は、圧縮機の幾何形状(翼・通路形状、翼枚数、翼端隙間)や運転条件(低速・高速、亜音速・遷音速の差異)などに大きく依存し、機差によるばらつきも大きいいため、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)の発展に伴い、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諸現象の理解が進んでいるが、CFDを用いても旋回失速の構造や発生機構の定量的把握は難しく、設計段階での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機構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の拡大要求のため、旋回失速の発生機構の研究は世界中で盛んに行われてきた。旋回失速の詳細な研究は1955年のEmmonsの実験に始まり、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機構について様々な知見が得られているが、軸流機と比べ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、他研究における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で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て、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っている。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剥離渦拡大との関連性について詳細な調査を行っている。

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先行研究の内容を纏め、本研究の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ている。供試羽根車は後向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 枚で構成されている。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ている。

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著者自身で開発した 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、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、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ている。時間積分には MFGS 陰解法、乱流モデルには LES/RANS ハイブリッド手法である SST $k$ - $\omega$  モデルを基にした DES を採用している。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い分けている。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、供試圧縮機の基本的な内部流れ場の特性や旋回失速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ている。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、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ている。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を明らかにしている。

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ている。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に成長することを明らかにしている。

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ている。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成長し、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

る成長に起因する。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果たしている。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移動することがディフューザ失速の旋回構造であることを明解に示している。

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ている。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されている。ディフューザ失速がシュラウドからハブ側へと移動する現象には，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している。

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。

以上を要するに，本論文は遠心圧縮機に発生するディフューザ失速について，高精度の数値計算と精緻な実験により，発生機構と失速セルの構造や伝播機構を解明し，ターボ機械の非定常現象の把握に大きな貢献をすると共に，遠心圧縮機の新たな設計指針を提示した。

よって，本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。

2018年2月

審査員(主査) 早稲田大学教授 工学博士 (早稲田大学) 太田 有

---

早稲田大学教授 博士(工学) (早稲田大学) 吉村 浩明

---

早稲田大学教授 博士(工学) (東京大学) 佐藤 哲也

---

早稲田大学教授 博士(工学) (大阪大学) 宮川 和芳

---