

# 博士論文審査報告書

## 論文題目

過給機用遠心圧縮機の性能向上  
および騒音低減化に関する研究

Improvement of Compressor Performance  
and Reduction of Radiated Noise  
in a Centrifugal Compressor

申請者

後藤	尚志
Takashi	GOTO

機械科学専攻 流体工学研究

ターボ機械は輸送機器から社会インフラに至るまで広く利用されており、地球温暖化をはじめとする環境問題への対応のため、高効率化・高比出力化が求められている。その対策の一つとして小型化が挙げられ、小型化に伴う流量低下に対処するために過給機が多用されている。過給機の構成要素である遠心圧縮機は、高効率化および高圧力比化を達成するために羽根付ディフューザが採用されるが、高効率かつ高い圧力上昇が得られる反面、流量閉塞やサージ限界により安定作動範囲が縮小するだけでなく、発生騒音が著しく増大することが知られている。最も支配的な騒音は、羽根車吐出流とディフューザ案内羽根との周期的な動静翼干渉が原因であり、単一周波数の騒音が著しく高いレベルで発生するため、聴覚的に不快となるだけでなく、遠心圧縮機の近くで働く作業員の身体に害を与えることも報告されている。

そこで本研究では、遠心圧縮機の内部流れ場を詳細に調査することで、従来は別々に扱われてきた発生騒音の低減と圧縮機性能の向上を同時に目標としている。特に、発生騒音レベルの上昇を抑制しつつ、高い圧力上昇が得られるディフューザ案内羽根形状を提案することを最終的な目的としている。

本論文は 7 章から構成されている。

第 1 章では緒言として、研究背景および従来の関連研究について纏め、本研究の目的と意義、位置付けを明確に示している。

第 2 章では、本研究に用いた過給機用圧縮機の仕様およびその構成要素について纏めると共に、基本性能や騒音特性について示している。供試圧縮機は、船舶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あり、定格回転数は本来  $22,000 \text{ min}^{-1}$  であるが、本研究では  $6,000 \text{ min}^{-1}$  で実験を行っている。これは、羽根車吐出流の強い二次流れや衝撃波の影響を除いたことに相当する。これにより得られた知見は、遠心圧縮機のみならず遠心送風機をはじめとする低圧力比のターボ機械にも応用可能であると考えられる。供試羽根車はインデューサの付いた長羽根 7 枚と短羽根 7 枚の計 14 枚で構成される開放型であり、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が採用可能となっている。羽根付ディフューザを採用した場合には、羽根なしディフューザ設置時に比べて高い圧力上昇が得られる反面、性能曲線の右上がり不安定領域が拡大して安定作動領域が縮小する。また、羽根車吐出流とディフューザ案内羽根とが周期的に干渉することにより発生する動静翼干渉騒音の音圧レベルが著しく上昇する。この動静翼干渉騒音は顕著な離散周波数成分として周波数解析結果中に現れ、圧縮機全体の騒音特性を強く支配する。このため、この動静翼干渉騒音に対する有効な低減対策を施すことで、圧縮機全体の騒音レベルを低減できることを述べている。

第 3 章では、本研究を遂行するにあたって開発した数値解析コードの概要と流れの可視化手法について述べている。また、その数値解析コードを用いて調査した供試圧縮機の基本特性について示している。本研究では、有限体

積法に基づいて離散化を施した連続方程式，非定常圧縮性 Navier-Stokes 方程式，エネルギーの式，理想気体の状態方程式を支配方程式とした 2 種類の解析コードが用いられている．1 つは羽根車およびディフューザ翼間全体を計算対象とした計算負荷の軽い Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulation (URANS) コードであり，乱流モデルには Baldwin-Lomax モデルが採用されている．もう 1 つは詳細な内部流れ構造の調査を目的とした Detached Eddy Simulation (DES) コードであり，スプリッタブレードを含む長羽根 1 翼間を対象とした RANS/LES のハイブリッドスキームである．乱流モデルとして RANS には Spalart-Allmaras モデル，LES には Smagorinsky モデルが採用されている．解析格子は，羽根車およびディフューザ領域にマルチブロック法および重合格子法を適用して複雑形状に対応可能としている．また，速度勾配テンソルの第二不変量に基づく手法により流れ中の渦コアを同定し，無次元ヘリシティで着色することでその構造を調査している．

第 4 章では，高い圧力上昇を維持したまま，動静翼干渉騒音を低減可能なディフューザ案内羽根の前縁部形状について述べている．また，提案した前縁部形状が圧縮機の内部流れ場に与える影響を数値解析により調査している．まず，羽根車吐出流との干渉面積を縮小させるため，ディフューザ案内羽根前縁にスリットを設けた鉤形案内羽根が圧縮機特性に与える影響を調査し，スリット部の切り込み深さや案内羽根前縁高さには最適値が存在することを確認すると共に，鉤型案内羽根の問題点を明示している．その後，鉤型案内羽根の問題点を改善する新たな前縁形状としてテーパ形案内羽根を提案している．前縁部に三次元的なテーパ加工を施したテーパ形案内羽根は，羽根付ディフューザとほぼ同等の性能を維持しつつ，動静翼干渉騒音および広帯域騒音の音圧レベルを有効に低減できることを示している．テーパ形案内羽根を設置すると，テーパ部を貫通する二次流れによって案内羽根前縁部のハブ側およびシュラウド側に互いに逆向きの渦対が形成される．この渦対の影響により，主流部の運動量が案内羽根圧力面側の境界層内に輸送され，その発達が抑制される．その結果として，案内羽根前縁部に発達する前縁剥離渦の放出は著しく減少し，広帯域騒音の低減が達成されたと結論付けている．

第 5 章では，ディフューザ通路幅が圧縮機特性に与える影響を述べている．また，テーパ形案内羽根を用いることにより，高い圧力上昇を維持しつつ，発生騒音を低減可能であることを示している．まず，ディフューザ通路幅の拡大に伴う内部流れ場への影響を数値解析により調査し，羽根車吐出流の子午面速度がシュラウド側で極端に低速となることを明らかにしている．このため，ディフューザ前縁部では定常的に渦度が蓄積して，周期的に渦が発生する．数値解析結果より，この渦は流量の低下に伴い拡大縮小を繰り返しながら流路内にブロックageを形成し，局所的にディフューザ翼間を失速状態に陥らせるため，低流量時における性能劣化の要因になることを示している．そこで，この渦の成長抑制を目的として，ハブ側またはシュラウド側にのみ

テーパ加工を施した 2 種類テーパ形案内羽根を提案している。シュラウド側テーパ形案内羽根は、テーパ部を貫通する循環流により圧縮機性能が劣化する一方、ハブ側テーパ形案内羽根は低流量時にディフューザ前縁渦の成長を抑制することが可能であることを示している。この結果、部分流量運転時における安定作動範囲の拡大と、前縁部テーパ形状の影響による動静翼干渉騒音レベルの大幅な低減が可能であることを明らかにしている。

第 6 章では、動静翼間距離およびディフューザ案内羽根設置角度が圧縮機特性に与える影響について調査し、テーパ形案内羽根の有用性について述べている。動静翼間距離を縮小すると、発生騒音は上昇するが、セミベーンレス部に発生する混合損失が抑制されるため、性能を改善できることを確認している。本研究で提案したテーパ形案内羽根を適用することにより、動静翼間距離を縮小する前の騒音レベルに保ったまま、性能を改善できることを示し、テーパ形案内羽根の広範な適用可能性を確認している。一方で、入口角度を変化させた場合には、圧縮機性能は大きく影響を受けるものの、発生騒音レベルには大きな変化は認められなかった。この場合においてもテーパ形案内羽根を適用することにより、発生騒音レベルの増大を抑制しつつ圧縮機性能を改善可能であることを示している。

第 7 章では、本研究で得られた成果や知見について纏めると共に、今後の展望や研究課題について言及している。

以上要約するに、本論文は、過給機用遠心圧縮機に発生する動静翼干渉騒音の低減と性能向上を同時に達成することを目的として、新たな前縁部形状を有するディフューザ案内羽根を提案し、詳細な内部流れ場の調査と関連させた実験・数値的検討によりその有効性を実証した。特に前縁部ハブ側にテーパ加工を施した案内羽根を用いることで、部分流量運転時に発生する非定常渦の成長を抑制し、性能を保ったまま動静翼干渉騒音および広帯域騒音の音圧レベルを有効に低減できることを示している。また、部分流量運転時に発生する前縁渦の特徴を詳細に調査し、性能の劣化やディフューザ失速との関連性について、多くの有益な知見を得るに至っている。本論文で得られた結果は、遠心型気体機械に新たな設計指針を与えると共に、非定常現象の解明にも大きく貢献しており、その工業的・工学的価値は高く評価できる。

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。

2013 年 4 月

審査員 (主査)	早稲田大学教授	博士(工学)(早稲田大学)	太田	有
	早稲田大学元教授	工学博士(早稲田大学)	山本	勝弘
	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