

早稲田大学大学院 基幹理工学研究科

博士論文概要

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

2012年12月

近年、ターボ機械は輸送機器から社会インフラまで広く利用されている。また、ターボ機械は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および高比出力化が求められている。このため、ターボ機械は小型化による高効率化および高比出力化が進められているが、小型化に伴い、容積が縮小するため、実質的に流量は低下し問題となる。そのため多くの場合、みかけの流量を増加させる目的で、過給機が採用される。過給機の構成要素のひとつである遠心圧縮機もまたターボ機械であることから、その例にもれず高効率化が求められており、遠心圧縮機では高効率化および高圧力比化を達成するため、羽根付ディフューザが採用される。しかし遠心圧縮機に羽根付ディフューザを採用すると高効率かつ高い圧力上昇が得られるものの、その反面チョーク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、発生騒音が著しく上昇する。この騒音は、羽根車吐出流とディフューザ案内羽根との周期的な干渉により発生する動静翼干渉騒音が原因であり、単一周波数の騒音が著しく上昇するため、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が報告されている。このような背景のもと、遠心圧縮機の性能向上に関する研究および発生騒音低減化に関する報告は数多く報告されているが、その多くが性能および騒音について別々に扱っている。しかし、発生騒音と圧縮機性能はそれぞれ、遠心圧縮機の内部流れ場と深く関連があるため、発生騒音の低減化と性能向上のためには、それぞれを別々に扱うのではなく、内部流れ場を十分に理解して、発生騒音の低減化と圧縮機性能の向上を同時に施行することが重要であると考えられる。

そこで本研究では、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目的とした。

本論文は、以下に示す 7 章から構成されている。

第 1 章では、緒言として、上記の研究背景および従来から行われている研究についてまとめ、本研究の意義について述べた。

第 2 章では、本研究に用いた供試圧縮機の仕様およびその構成要素についてまとめた。また、供試圧縮機の基本的な圧縮機性能について示した。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る。定格回転数は本来 22000min^{-1} であるが、本研究では 6000min^{-1} とした。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、スプリッタである短羽根 7 枚の計 14 枚の羽根で構成される開放型羽根車である。ディフューザには平行平板で構成される羽根なしディフューザと、その平板間に 15 枚の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。また、ディフューザ案内羽根の形状は、くさび形となっている。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，右上がり不安定領域が拡大し，安全運転範囲が縮小するだけでなく，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影響により，単一周波数で著しく上昇した．ターボ機械の発生騒音の評価には多くの場合，発生騒音の O.A. 値が利用される．そこで本研究では，まず羽根付ディフューザを有する供試圧縮機から放射される騒音の中から，発生騒音の O.A. 値に支配的となる分離騒音を同定した．供試圧縮機では，回転数が 4000 min^{-1} 以上となると，動静翼干渉騒音の基本成分が発生騒音の O.A. 値に対して支配的となった．このことから，動静翼干渉騒音を低減することにより，発生騒音の O.A. 値を低減可能となることがわかった．

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および可視化手法について述べた．また，その解析コードを用いて解析を行った供試圧縮機の基本特性について示した．本研究の数値解析は，有限体積法に基づき離散化を施した連続の式，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 種類の解析コードにより行った．1 つ目の解析コードは羽根車およびディフューザ翼間全体を対象とした計算負荷の軽い Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulation (URANS) コードである．乱流モデルには Baldwin-Lomax モデルを採用した．2 つ目の解析コードは詳細な内部流れ場を調査するために，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 Detached Eddy Simulation (DES) コードである．乱流モデルとして RANS には Spalart-Allmaras モデル，LES には Smagorinsky モデルを採用した．解析格子は，羽根車領域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複雑形状に対応可能とした．また，供試圧縮機の内部流れ場に影響を与える渦は，速度勾配テンソルの第二不変量に基づく手法により渦コアを同定し，無次元ヘリシティを着色することによりその構造を調査した．

第 4 章では，高い圧力上昇を維持したまま，第 2 章で示した広帯域騒音を低減するための手法として，動静翼干渉騒音を低減化することが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た．また，提案したディフューザ案内羽根の前縁部形状が圧縮機の内部流れ場に与える影響について，数値解析により調査した．まず，羽根車吐出流との干渉面積を縮小するため，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の圧縮機特性について調査した．スリット部の切り込み深さおよび案内羽根前縁高さをパラメータとして変化させ性能試験および騒音試験により決定した．その結果，切り込み深さおよび案内羽根前縁高さにはそれぞれ最適値が存在することを確認するとともに，鉤型案内羽根の問題点を明らかにした．そこで本研究では鉤型案内羽根の問題点を改善する新たな形状としてテーパ形案内羽根を提案した．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

だけでなく、広帯域騒音の騒音レベルを低減化できることを確認した。テーパ形案内羽根を設置すると、テーパ部を貫通しディフューザ翼間内に流れ込む流れにより、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が形成された。この双子の渦により、主流部の運動量が案内羽根圧力面の境界層内に輸送され、境界層の発達が抑制された。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が減少するため、広帯域騒音の低減化がなされたと考える。

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について述べた。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たまま、発生騒音を低減化可能であることを示した。まず、ディフューザ通路幅を拡大したことによる内部流れ場への影響を数値解析により調査した。ディフューザ通路幅を変更すると羽根車吐出流の子午面速度はハブ側では大きな変化は見られないのに対して、シュラウド側で極端に低速となることがわかった。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、渦が定在的に発生した。数値解析によりこの渦を詳細に調査したところ、この渦は流量の低下にともなって、拡大縮小運動をしながら、流路ブロックを形成し、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がわかった。そこで、この渦の成長を抑制することが可能であろうテーパ形案内羽根として、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た。しかし、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が形成されてしまい、逆に性能劣化の要因となることがわかった。一方で、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可能であった。この結果、低流量時における作動範囲を拡大することが可能となり、テーパ形案内羽根の効果から、発生騒音も低減化可能であることが明らかになった。

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た。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た。これまでに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、性能を改善可能であることを示した。一方で、入口角を変化させた場合には、圧縮機性能は大きく変化するものの、発生騒音には大きな変化は見られなかった。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、発生騒音の増大を抑制しつつ圧縮機性能を改善可能であることがわかった。

第7章では、本研究で得られた成果について総括した。また、今後の課題についてまとめた。

以上から、遠心圧縮機に対して高い性能を維持したまま発生騒音の増大を抑制する案内羽根の形状として、テーパ形案内羽根を提案した。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 後藤 尚志 印

(2012年12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>○羽根付ディフューザを有する遠心圧縮機の性能・騒音特性の改善, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 40, No. 6, pp. 351-356, 2012-11, <u>後藤 尚志</u>, 太田 有, 大田 英輔.</p> <p>○ディフューザ案内羽根前縁形状が遠心圧縮機性能・騒音特性に与える影響, 日本機械学会論文集 B編, Vol. 77, No. 777, pp. 1229-1239, 2011-5, <u>後藤 尚志</u>, 太田 有, 大田 英輔.</p> <p>○遠心圧縮機ディフューザに発生する前縁渦の非定常挙動と制御, 日本機械学会論文集 B編, Vol. 76, No. 772, pp. 2039-2049, 2010-12, <u>後藤 尚志</u>, 太田 有, 大田 英輔.</p> <p>○Noise Reduction and Surge Margin Improvement Using Tapered Diffuser Vane in a Centrifugal Compressor, Journal of Thermal Science, Vol.19, No.1, pp.21-25, 2010-1, <u>Takashi GOTO</u>, Eri OHMOTO, Yutaka OHTA and Eisuke OUTA.</p> <p>○Effects of tapered diffuser vane on the flow field and noise of a centrifugal compressor, Journal of Thermal Science, Vol.16, No.4, pp.301-308, 2007-11, Yutaka Ohta, <u>Takashi Goto</u>, Eisuke Ohta.</p> <p>○Aerodynamic Performance and Noise Characteristics of a Centrifugal Compressor with Modified Vaned Diffusers, Journal of Thermal Science, Vol.15, Vol.4, pp.289-295, 2006-12, Yutaka Ohta, Yasuhiko Okutsu, <u>Takashi Goto</u>, Eisuke Ohta.</p>
国際会議	<p>Behavior of Pressure Fluctuation Rotating around Impeller Periphery in a Centrifugal Compressor, Proceedings of Asian Congress on Gas Turbine 2012, USB, 2012-8, <u>Takashi GOTO</u>, Atsuhito MIZUNO, Kazuyoshi MIYAGAWA, Yutaka OHTA and Eisuke OUTA.</p> <p>Effects of Impeller-Diffuser Radial Gap on Unsteady Flow Fields in a Centrifugal Compressor, Proceedings of International Gas Turbine Congress 2011, USB, 2011-12, <u>Takashi Goto</u>, Yutaka Ohta and Eisuke Ohta.</p> <p>Effects of Impeller-Diffuser Radial Gap on Compressor Performance and Noise Characteristics of Centrifugal Compressor, Proceedings of 10th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, USB, 2010-7, <u>Takashi GOTO</u>, Yutaka OHTA and Eisuke OUTA.</p> <p>Unsteady Behavior and Control of Diffuser Leading-edge Vortex in a Centrifugal Compressor, Proceedings of Turbo Expo 2010, DVD-ROM, 2010-6, Yutaka Ohta, <u>Takashi Goto</u> and Eisuke Ohta.</p> <p>Noise Reduction and Surge Margin Improvement Using Tapered Diffuser Vane in a Centrifugal Compressor, Proceedings of 9th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, CD-ROM,</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>2009-9, <u>Takashi Goto</u>, Eri Ohmoto, Yutaka Ohta and Eisuke Ota.</p> <p>Unsteady Vortical Structure and Related Noise and Performance of a Centrifugal Compressor, Proceedings of Asian Congress on Gas Turbine 2009, CD-ROM, 2009-8, <u>Takashi Goto</u>, Eri Ohmoto, Yutaka Ohta and Eisuke Ota.</p> <p>Improvement of Aerodynamic Performance and Noise Reduction of Centrifugal Compressor with Tapered Diffuser Vane, Proceedings of International Gas Turbine Congress 2007, CD-ROM, 2007-12, <u>Takashi Goto</u>, Yutaka Ohta and Eisuke Ota.</p> <p>Effects of Tapered Diffuser Vane on the Flow Field of a Centrifugal Compressor, Proceedings of 8th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, CD-ROM, 2007-7, Yutaka Ohta, <u>Takashi Goto</u>, Yuuri Tsukioka and Eisuke Ota.</p> <p>Active Noise Reduction of blade-passing frequency radiated from a centrifugal blower, Proceedings of Inter-noise 2006, CD-ROM, 2006-12, Yutaka Ohta, <u>Takashi Goto</u> and Eisuke Ota.</p> <p>Aerodynamic Performance and Noise Characteristics of a Centrifugal Compressor with Modified Vaned Diffusers, Proceedings of Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science, pp.1, 2006-6, Yutaka Ohta, Yasuhiko Okutsu, <u>Takashi Goto</u> and Eisuke Ota.</p>
講演	<p>羽根付ディフューザを有する遠心圧縮機の部分流量時における非定常挙動, 日本ガスタービン学会定期講演会, CD-ROM, 2012-10, <u>後藤 尚志</u>, 水野 敦仁, 森田 洋平, 太田 有, 大田 英輔.</p> <p>遠心圧縮機の動静翼間距離が圧縮機性能および内部流れ場に与える影響, 日本流体力学会 年会 2011, CD-ROM, 2011-9, <u>後藤 尚志</u>, 野口 佳恭, 太田 有.</p> <p>羽根付ディフューザを有する遠心圧縮機内部に発生する渦の挙動, 第 38 回可視化情報シンポジウム 講演論文集, pp.399-404, 2011-7, <u>後藤 尚志</u>, 水野 敦仁, 太田 有, 大田 英輔.</p> <p>遠心圧縮機の内部流れ場に発生する非定常流動現象の調査, 第 65 回ターボ機械協会総会講演会 講演論文集, pp.149-154, 2011-5, <u>後藤 尚志</u>, 平戸 康雅, 太田 有, 大田 英輔.</p> <p>羽根付ディフューザを有する遠心圧縮機の性能・騒音特性の改善, 第 38 回ガスタービン学会定期講演会 講演論文集, CD-ROM, 2010-10, <u>後藤 尚志</u>, 平戸 康雅, 太田 有, 大田 英輔.</p> <p>テーパ形案内羽根を有する遠心圧縮機の動静翼間距離が性能・騒音に与える影響, 2010 年度機械学会年次大会 講演論文集 pp.299-300, 2010-9, <u>後藤 尚志</u>, 平戸 康雅,</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）
講演(つづき)	<p>太田 有, 大田 英輔.</p> <p>遠心圧縮機ディフューザに発生する前縁渦の挙動, 2009 年度機械学会年次大会 講演論文集, Vol.2, pp.59-60, 2009-9, <u>後藤 尚志</u>, 大本 絵利, 太田 有, 大田 英輔.</p> <p>遠心圧縮機におけるディフューザ前縁渦の挙動と非定常流れ構造, 第36回ガスタービン定期講演会 講演論文集, pp.85-90, 2008-10, <u>後藤 尚志</u>, 大本 絵利, 太田 有, 大田 英輔.</p> <p>遠心圧縮機ディフューザ内の圧力特性の改善, 2006 年度機械学会年次大会 講演論文集, Vol.2, pp.137-138, <u>後藤 尚志</u>, 太田 有, 大田 英輔.</p>
その他	なし