

遠心ブロワ・遠心圧縮機の高効率化・広作動範囲化 に関する研究

平舘, 澄賢

<https://hdl.handle.net/2324/4496065>

出版情報 : Kyushu University, 2021, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 平舘 澄賢

論 文 名 : 遠心ブロワ・遠心圧縮機の高効率化・広作動範囲化に関する研究

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

遠心ブロワや遠心圧縮機は、比較的小流量かつ高圧力比なガス仕様が求められる際にガスを昇圧・圧送するための機械であり、様々な産業分野で用いられている。機器運転時のランニングコスト低減や、広い流量範囲での安定したガス取り扱いに対するニーズから、これら機器には高効率化と広作動範囲化が求められる。高効率化や広作動範囲化にとって重要な構成要素として挙げられるのが、遠心羽根車やディフューザである。高効率化と広作動範囲化の実現には、設計流量点から低流量側までの広い流量範囲にわたって遠心羽根車やディフューザの流路形状と内部流れ場との間の相関を深く理解し、内部流れ場を改善するための知見を生み出すことが必要となる。

本論文は、全6章から構成される。本研究では、遠心羽根車やディフューザなどの設計流量点から低流量側までの内部流れ詳細分析と、その結果を活用した高性能化設計手法の構築を通じ、遠心ブロワや遠心圧縮機の高効率化と広作動範囲化に資する知見を得ることを目的としている。

第1章の序論に続き第2章では、低比速度二次元遠心羽根車を搭載した、吸込流量係数の異なる二つの遠心ブロワ段の高性能化について検討している。まず、一つ目の低比速度遠心ブロワ段では、羽根車の設計点流量におけるスロート減速比と出入口減速比に上限を設けた上で設計点効率を最大化する、二次元遠心羽根車の設計手法を構築した。また、直交表とCFD (Computational Fluid Dynamics, 数値流体力学) 解析とを組み合わせ、ステータ部設計手法を構築した。これら設計手法を適用して形状を最適化した遠心ブロワ段のモデル性能試験を行い、吸込ノズル付きの条件下にて、従来段に対する2.3%の設計点効率向上と、5%のサージラインの低流量側シフトを確認した。続いて、一つ目の遠心ブロワ段よりも比速度が約36.5%小さい二つ目の低比速度遠心ブロワ段では、多目的遺伝的アルゴリズムとCFDを組み合わせ、二次元遠心羽根車の形状最適化設計手法を構築した。最適化では、設計点流量における羽根車のシュラウド側スロート減速比ならびに効率を目的関数に設定し、更にハブ・シュラウド壁面上の境界層剥離に対する負荷限界を表すde Haller数にも制約を設けた。本設計手法を適用して形状最適化を行った羽根車を搭載した遠心ブロワ段のモデル性能試験を行い、従来段に対する設計点効率の4.7%向上と失速マージン拡大を確認した。

第3章では、軸流式ターボ機械にて多数の検討事例のある二次流れ制御に対して有効な曲線要素羽根に着目し、遠心羽根車への曲線要素羽根の適用による遠心圧縮機の高性能化、ならびにフルシュラウド三次元遠心羽根車向けの曲線要素羽根設計手法の提案を試みている。中比速度仕様のフルシュラウド三次元遠心羽根車を対象に、先行研究事例を参考にした曲線要素羽根車の設計および羽根車の内部流れ詳細分析を実施した。その結果、翼負圧面が凹型状となるような曲線要素羽根化が、羽根車内部の二次流れ抑制に対して有効である一方、羽根車失速マージンの悪化をもたらすことも判明した。得られたこれらの知見を元に、翼負圧面シュラウド側前半部における翼負荷の低減と、翼負圧面が凹型状となるような曲線要素羽根化とを組み合わせ、曲線要素羽根を有するフルシュ

ラウド三次元遠心羽根車向けの設計手法を提案した。本設計手法に基づいて設計した曲線要素羽根車を搭載した、遠心圧縮機段のモデル性能試験を行った。その結果、従来直線要素羽根車搭載段に対する2.4%の設計点効率の向上と、凡そ5%の失速マージン拡大を確認し、提案したフルシュラウド三次元遠心羽根車向けの曲線要素羽根設計手法の妥当性を確認した。

第4章では、第3章にて構築した曲線要素遠心羽根車の設計手法について、高比速度仕様のフルシュラウド三次元遠心羽根車への横展開を検討している。設計した曲線要素羽根車の設計上の特徴は、傾斜方向が羽根車反回転方向となるような翼傾斜の付与とシュラウド側前半部の翼負荷軽減に加え、これに伴うスロート面積減少による大流量側特性悪化に対応するため、翼前縁の子午面形状が凹型状となるような曲線要素羽根化を施したことにある。本曲線要素羽根車を搭載した遠心圧縮機段のモデル性能試験を行い、従来直線要素羽根車搭載段に対する1.7%の設計点効率の向上を確認した。また、オフデザイン性能についても従来段と同等となることを確認した。以上より、第3章にて構築した曲線要素遠心羽根車の設計手法を、高比速度仕様のフルシュラウド三次元遠心羽根車に横展開するための、本章にて提案した設計手法の有効性を確認した。

第5章では、インレットガイドベーン（IGV）付き多段遠心ターボ機械において、従来研究事例がなかった低流量側不安定流動現象を詳細に把握することによる、低流量側作動範囲拡大指針を得ることを目的とした検討を行っている。まず、IGV付き多段遠心ブロワにて発生する低流量側不安定流動現象について把握するため、ブロワの各部静圧上昇計測と非定常静圧変動計測を実施した。その結果対象ブロワにおいて、低流量側にて3種類の特徴的な静圧変動（Deep surge, スパイク型旋回失速, Mild surge）の発生を確認した。IGV最小開度条件においてMild surgeは、ブロワの全段静圧上昇特性カーブの傾きが急峻な負の勾配となっている流量域においても生じることが判明した。分析の結果、IGV最小開度条件におけるこのMild surgeは、IGVにより予旋回が付与される初段の静圧上昇特性の急峻な右下がり勾配がもたらす安定化作用と、既に失速している2段目以降の静圧上昇特性における正の勾配がもたらす不安定化作用のバランスにより、系の動作点が微小振動している状態であると推測した。このMild surgeの発生メカニズム仮説の妥当性を確認するため、初段と2段目以降の段とで圧力 - 流量上昇特性を分割してモデル化した、多段ブロワ向け集中定数系システム動特性計算手法を構築した。システム動特性計算の結果、本仮説の妥当性を確認した。また、IGV最小開度条件におけるMild surge発生のトリガーとなっているのは、より厳密には2段目以降の段の小弦節比ディフューザの失速である事を明らかにした。これより、2段目以降の段のディフューザ失速マージンを拡大するという、IGV付き多段遠心ブロワ向けの低流量側作動範囲拡大指針を提案した。

最後に第6章では、以上の結果をとりまとめている。