

氏名	北爪三智男
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記号番号	博理工乙第172号
学位授与年月日	平成20年3月24日
学位授与の条件	学位規則第4条第2項該当
学位論文題目	小型多翼遠心式送風機内複雑流れの実験解析
論文審査委員	委員長 教授 川橋 正昭 委員 教授 大八木重治 委員 准教授 平原 裕行 委員 准教授 小原 哲郎 委員 准教授 本間 俊司

論文の内容の要旨

1) 研究の背景と目的

多翼送風機は民生用や業務用の空調機器に広く搭載されており、大風量・高静圧を比較的容易に得ることができる小型の遠心ファンとして知られ、車両用空調装置にも、送風機として搭載されている。車両のエネルギー効率向上は重要な課題であり、地球環境保護の観点から、空調装置に搭載されている送風機にも、更なる小型・軽量・高効率化が求められている。また、車両の高機能・高性能化の観点から、高静圧化・低騒音化も同様に性能向上が求められている。ターボ機械の歴史は古く、1899年にRateauの試作結果の論文が公表されて以来、研究開発が続けられ、関連分野も多岐にわたる。羽根車に関するEulerの角運動量の式は広く応用されており、特に低圧ファンでは経験値を加味することにより実用的な設計基準となっている。また、一般的に送風機開発には数多く蓄積されている経験上のデータが利用されているため、成熟した技術領域と認識されがちであるが、前述したような多岐にわたる高度な要求に応えるためには、新しい観点から送風機開発を見直すべきであり、特に、複雑な内部流れ解析を基礎とするアプローチが重要となる。そのために、送風機内に形成される複雑3次元流れ場の詳細な解析が必要となる。

本研究では、車載用多翼送風機の小型・高効率化を目的に、車載空調用の多翼送風機の内部の流れと送風機特性との相関を実験的に解析することを試み、定量的なデータから小型・高効率送風機設計に有用な知見を得ることを目的としている。

2) 研究内容

研究の内容は、次に示す3つの章で構成されている。1つは、翼通過流に関する解析である。オイラーヘッドを生み出す羽根車に着目し、羽根車の基本要素である翼型の違いによる翼間通過流の変化、送風特性、騒音特性に及ぼす影響について考察した。羽根車ヘッドの損失は、翼間の剥離循環流や後縁側のせん断流に起因するものと仮定し、羽根車翼形状の改良を試みた。改良された翼は、前縁側を翼型とした翼型翼と、翼の中間部を分割した分割型翼である。標準的な2次元複合円弧翼を基本指標とし、同一形状のスクロールケーシングを用いて、羽根車を変えることで、羽根車翼形状の違いによる翼通過流の変化、送風特性および騒音

特性に及ぼす影響について実験的に解析した。

2つめは、送風機内部の流れ場に関する解析である。ケーシングの小型化に着目し、インボリュートの拡大角を縮小することにより小型化した場合に生じる流れ場の変化について調べた。同一形状の羽根車を用い、ケーシングのみを小型化した送風機では、高風量域で送風性能が大幅に低下する。この送風性能低下要因について調べた。3次元流れ場解析にSPIV (Stereoscopic PIV) 法を適用し、子午面断面の速度3成分を計測することにより、送風機内部で生じる各損失を定量的に解析した。これらの結果をもとに、送風機の小型化が送風性能に及ぼす影響を明らかにした。

3つめは、前述した小型送風機の空力特性改善に向けた検討である。ケーシングの小型化により生じた渦流の影響を緩和させるために、回転軸方向にスクロール幅が拡大する新しい送風機構造を考案し、その拡大構造と流れ場及び送風性能との相関について実験的に解析した。

3) 結論

複雑3次元幾何学構造を有する遠心式小型多翼送風機内を対象として、定性的可視化、PIVによる流速場の解析、騒音解析の手法を用いて、送風機内に生じる複雑流れ場と送風機諸性能との相関に関する実験的解析を行うとともに、小型・高効率化を目的とした送風機構造の改良を試みた。総合的な実験解析の結果、送風機内の複雑な流れ場及び小型送風機設計について、次に示す知見を得た。

羽根車形状について

送風機の基本要素である羽根車の翼型形状に着目し、標準的な2次元複合円弧翼、前縁側を翼型とした翼型翼、翼型翼形状を基本に中間部を分割した分割翼型翼の異なる3タイプの羽根車を用いた実験解析を行い、次のことが明らかになった。

- ・前縁側を翼型翼とすることで、標準的な2次元複合円弧翼で生じていた前縁近傍の剥離循環渦域および流入角と翼取り付け角とのずれ幅が縮小し、翼面に沿った流入状態に改善される。さらに、翼の中間部を分割し、翼の中間部で正圧面側から負圧面側に再流入させることで、翼出口直後の正圧面側と負圧面側との速度差が減少し、1翼間の出口速度分布は均一化する。このような翼形状の改良により、翼流入時の衝突損失や、翼出口側の混合損失などの翼周りの損失が低減されていると考えられる。その結果、翼型翼を有し中間部を分割した分割翼型翼では、標準的な2次元円弧翼に比べ、送風機効率が向上し、消費電力と騒音値を低減できる可能性がある。
- ・前縁側を翼型翼とした羽根車を用いて、翼通過流の分布を解析した。スクロール角方向、回転軸方向位置により、翼通過流の流動状態は変化し、特に、舌部域を挟んだ上流、下流域および回転軸方向のベルマウス側の領域では、オイラーヘッドを生み出す翼からの流出流が減少し、羽根車としての機能が低下する。羽根車として機能している領域は、羽根車翼幅方向のハブ側とスクロール角 $\theta=135^\circ$ 以上の領域である。

スクロールケーシングの小型化について

ボリュート角の異なるスクロールケーシングを用いた小型多翼ファンにおけるP-Q特性の相違について、ケーシング内流れの3次元実験解析を行い、送風機の空力性能改善に向けた送風機構造の改良検討を行った結果、以下のことが明らかになった。

- ・標準的に設計されたケーシングでは、ケーシング内子午面内に生じる2次的旋回流の渦中心は、スクロール角の拡大とともに、半径方向外周側かつ回転軸方向ハブ側へと移動するが、ボリュート角縮

小により小型化したケーシングでは、羽根車出口近傍に位置したまま、ほとんど移動しない。その結果、ケーシング内子午面内に生じる2次的旋回流と羽根車通過流との干渉が顕著となり、羽根車翼幅方向の有効領域を減少させる。

- ・ケーシング小型化による P-Q 特性の差異について、送風機内で生じる損失をスクロール壁面での摩擦損失、デフューザ部の拡大損失、羽根車流出流とケーシング内流れの混合損失、羽根車仕事の損失に分類し、S-PIV 及び PIV のデータから混合損失を除くそれぞれの損失分を定量的に見積もった。その結果、摩擦損失には違いは無く、拡大損失がヘッド差の約 24%、羽根車仕事の損失がヘッド差の約 67%となり、混合損失を除いた3つの要因で、ヘッド差の約 90%を説明でき、羽根車仕事の損失が、そのほとんどであることが分かった。ポリュート角を縮小し小型化したケーシング構造では、前述した2次的旋回流と羽根車通過流との干渉が顕著となることにより、すべり係数が増加し、その結果、羽根車仕事の損失が増加すると考えられる。
- ・ヘッド低下を改善するには、2次的旋回流と羽根車通過流との干渉を緩和することが有効と考え、旋回流中心を上方に移動させる目的で、回転軸方向にスクロール幅が拡大する送風機構造を考案した。その拡大構造について、ベルマウス側を拡大する構造とハブ側を拡大する2種類の構造を検討した結果、ハブ側を拡大する構造では、ケーシング内子午面内にベルマウス側とハブ側双方に向かう2次的旋回流となる2つの渦体が形成されてしまい、騒音値の増加を引き起こしてしまう。これに対し、ベルマウス側のみを拡大する構造では、最大風量に近い領域で送風性能が低下するものの、実用上の動作範囲内では、標準仕様と同等の送風性能、騒音特性を示し、小型化・低騒音化を両立できる可能性がある。これらのことから、軸方向に拡大する構造では、ハブ側に拡大せずに、ベルマウス側に拡大する構造が有効と考えられる。
- ・複雑な実機形状の流体機械内部流の解析に SPIV を適用する場合、光学配置に制限が生じることから、全領域の計測には多くの困難を伴うが、得られた結果は、複雑3次元流れ場の理解に極めて有効である。

論文の審査結果の要旨

上記申請者より提出された学位論文の審査結果の要旨を以下に示す。

本学位論文申請者は、車両用空調装置に搭載される多翼遠心送風機内における騒音低減や効率改善、さらに省スペース化などの観点から、送風機内に生じる複雑3次元流れの実験的解析を行い、羽根車の翼形状やケーシング形状が、騒音発生や送風機基本特性にどのような影響を与えるかについて、明らかにしている。以下に論文の要旨を示す。

近年、地球環境変化の観点や車両の高機能化から車載される空調機の高度化が進み、送風機に関しても更なる小型・軽量・高効率化が求められていることから、本論文では、送風機の小型・高効率化を具体的目標として、送風機内3次元複雑流れの実験的解析による研究がなされている。

研究の内容は、大きく三つに分けられる。まずはじめに、羽根車の基本要素である翼型に着目した研究であり、翼の中間部を分割する構造を提案し、翼間内の流れの形態と送風機効率、騒音特性との相関を明らかにしている。次に、ケーシング内の流れ構造に関する解析であり、送風機の小型化が送風機特性に及ぼす影響を明らかにしている。さらに、小型送風機の空力特性の改善に関する研究がなされている。第2のテーマで明らかになった現象を改善するために、スクロールベルマウス側に拡がる新たなケーシング構造に基づく、小型・高効率を両立する送風機構造を提案している。このような送風機に関する多岐に渡る研究により、複雑形状を有する送風機内部の実験的な流れ解析手法を構築するとともに、定量的な実験データから小型・高効率送風機の具体的設計に有用な知見を得ている。

それぞれの研究内容の詳細は以下に示す通りである。

1) 羽根車構造に関する研究

羽根車ヘッドの損失が、翼間の剥離循環流や後縁側のせん断流に起因するものと仮定し、羽根車翼形状の改良を試みている。改良された翼は、前縁側を翼型とした翼型翼と、翼の中間部を分割した分割型翼が用いられている。標準的な2次元複合円弧翼を基本指標とし、同一形状のスクロールケーシングを用いて、羽根車を変えることで、羽根車翼形状の違いによる翼通過流の変化、送風特性および騒音特性に及ぼす影響について解析している。

その結果、次のことが明らかにされている。

前縁側を翼型翼とすることで、標準的な2次元複合円弧翼で生じていた前縁近傍の剥離循環渦域および流入角と翼取り付け角とのずれ幅が縮小し、翼面に沿った流入状態に改善される。さらに、翼の中間部を分割し、翼の中間部で正圧面側から負圧面側に再流入させることで、翼出口直後の正圧面側と負圧面側との速度差が減少し、1翼間の出口速度分布は均一化する。このような翼形状の改良により、翼流入時の衝突損失や、翼出口側の混合損失などの翼周りの損失が低減されていると考えられ、翼型翼を有し中間部を分割した分割型翼では、標準的な2次元円弧翼に比べ送風機効率が向上し、消費電力と騒音値を低減できる可能性がある。

2) 小型ケーシング構造における送風機内部の流れ場に関する研究

ケーシングの小型化に着目し、インポリュートの拡大角を縮小することにより小型化した場合に生じる流れ場の変化について調べている。同一形状の羽根車を用いてケーシングのみを小型化した送風機では、高風量域で送風性能が大幅に低下する。この空力特性の低下要因について、3次元流れ場解析にSPIV (Stereoscopic PIV) 法を適用し、子午面断面の速度3成分を計測することにより、流れ場の構造、送風機内部で生じる各損失を定量的に解析している。これらの結果から、拡大角を縮小した構造では標準的なケーシ

ングに比べ、2次的旋回渦流の渦中心の位置が羽根車近傍に移動してケーシング内流れと羽根車流出流との干渉が顕著となり、羽根車理論仕事を低下させる可能性があることを明らかにしている。

3) 小型送風機の空力特性改善に関する研究

前述した小型ケーシングでは、ベルマウス側に強い渦流が生じることが明らかとなり、その影響を緩和させるために回転軸方向にスクロール幅が拡大する新しい送風機構造を考案し、その拡大構造と流れ場及び送風性能との相関について実験的に解析している。その拡大構造について、ベルマウス側を拡大する構造とハブ側を拡大する2種類の構造を検討した結果、ハブ側を拡大する構造では、ケーシング内子午面内にベルマウス側とハブ側双方に向かう2次的旋回流となる2つの渦体が形成されることから騒音値の増加を引き起こしてしまう。これに対し、ベルマウス側のみを拡大する構造では、最大風量に近い領域で送風性能が低下するものの、実用上の動作範囲内では標準仕様と同等の送風性能、騒音特性を示し、小型化・低騒音化を両立できる可能性があることを明らかにしている。

以上の3つテーマに対して、定性的可視化、PIVによる流速場の解析、騒音解析の手法を用いて、送風機内に生じる複雑流れ場と送風機諸性能との相関に関する実験的解析を行うとともに、小型・高効率化を目的とした送風機構造の改良を試みて、送風機設計に有用な知見を得ている。また、複雑な実機形状の流体機械内部流の解析にSPIVを適用する場合、光学配置に制限が生じることから全領域の計測には多くの困難を伴うが、得られた結果が複雑3次元流れ場の理解に極めて有効であることも明らかにしている。

これらの研究成果は、送風機内流れに関連した様々な物理現象を明らかにするとともに、具体的送風機設計において、大きく貢献するものである。したがって、本論文が、博士(工学)の学位を与えるに相応しいものと判断した。