

| | |
|---------|---|
| 氏名 | ほんだ たけし 本多 武史 |
| 本籍（国籍） | 茨城県 |
| 学位の種類 | 博士(工学) |
| 学位記番号 | 工博 第281号 |
| 学位授与年月日 | 平成29年 9月25日 |
| 学位授与の要件 | 学位規則第5条第1項該当 課程博士 |
| 研究科及び専攻 | 工学研究科機械・社会環境システム工学専攻 |
| 学位論文題目 | 小型遠心ブロワの翼通過周波数騒音と内部圧力変動と 圧力変動モードに関する研究 |
| 学位審査委員 | 主査 教授 船崎健一 副査 教授 柳岡英樹 副査 教授 上野和之 |

論文内容の要旨

地球温暖化防止に向けた環境問題への関心の高まりから、製品の省電力化は重要である。また、共働き家庭の増加から夜に家事を行う機会が増え、家事に用いられる製品の静音化の需要が高まっている。上記背景から家庭用電気掃除機に搭載される本研究対象の遠心ブロワは、高効率化と運転範囲内における翼通過周波数（Blade Passing Frequency (BPF)）騒音を含む騒音の低減が求められている。さらに、対象遠心ブロワは製品の主要部品であることから小型化が重要で、小型化と共にインペラの外周部に設ける羽根付きディフューザとインペラの両者の高効率化が必要である。なお、本遠心ブロワは小型であることから翼通過周波数の波長と羽根付きディフューザの流路長さが近く流路内で音響共鳴が生じやすい特徴を持つ。上記の特徴の中で、対象遠心ブロワは、電気掃除機の運転モードや、掃除機のごみの蓄積量により運転回転数が変化する。このため、運転範囲内で音響共鳴発生による騒音レベルの増加や音質劣化の可能性があり、音響共鳴の回避が重要な課題である。

従来、遠心型ターボ機械の低騒音化については、2つの有力な手段が採用されてきた。ひとつはディフューザにベーンレスディフューザ（羽根を持たない）を採用すること。もうひとつは動静翼間を大きくとることや加振の位相を変化させるなどの動静翼干渉の低減である。それらは翼通過周波数騒音の低減効果が期待できる。しかしながら、これらの騒音低減手法は高効率化とのトレードオフが存在する。また、本研究対象ではディフューザ内部で定在波が符在することが過去の研究から得られている。一方、ディフューザ内部の圧力変動場は更なる現象把握が必要であり、ディフューザ内部で生じる定在波の影響や、ディフューザ羽根枚数により遠心ブロワの騒音が異なる理由について、十分に説明できていない。

そこで、本研究は小型かつ高効率・低騒音の遠心ブロワを開発するために必要な設計指針を得ることを目的として、小型化と高効率化の両立の検討として羽根付きディフューザの翼間曲率半径の影響を、低騒音化の検討としてディフューザ内で生じる圧力変動と定在波の影響、ディフューザ羽根枚数が内部圧力変動や騒音に及ぼす影響の要因分析について研究した。また、高効率化と低騒音化の両立の手段として隣接翼間の圧力差を用いたスリットディフューザに関する効果とその要因分析、ディフューザ周辺での低騒音化構造について研究した。

その結果、

(1) 翼通過周波数の波長とディフューザ流路長さが近く、運転回転数範囲の広い小型遠心ブロワの低騒音化指針の抽出を目的に、羽根付きディフューザ内部で生じる圧力変動の把握を、非定常圧力計測と圧縮性非定常流体解析を用いて行い、以下の知見を得た。

①本研究のディフューザの最大圧力変動位置は、ディフューザ内の定在波モードの影響を受け、運転回転数範囲によって流れ方向に変化する。

②流体解析結果で得た配力変動の RMS 分布は、動静翼干渉場を自由端、ディフューザ重なり流路長さを開放端補正した長さ L の開放端（重なり部の出口側）を固定端とした場合の定在波の 3 倍振動モードと関連していることを明らかにした。

③定在波の 3 倍振動モードの抑制、定在波の加振力であるディフューザ入口における圧力変動の低減が必要である。

(2) 小型遠心ブロワの小型化と高効率化の両立を目的に、重なり流路の曲率半径が異なる 2 種類の羽根付きディフューザの内部流れ、ディフューザ圧力回復係数に関する影響を検討し、以下の結論を得た。

①曲率半径が小さいディフューザ **Type-1** は、ハブおよびシュラウド面で生じる 2 次流れが翼面上に到達するため、ディフューザ重なり流路高さの中央部 (50%span) において低速域が形成され、ディフューザ重なり流路の後半の圧力回復量を低下させていることを明らかにした。

②曲率半径を大きくしたディフューザ **Type-2** は、ハブおよびシュラウド面の 2 次流れが低減でき低速域が改善された。また、重なり流路の流れ方向の損失発生位置が下流に移動したことで、重なり流路の後半の圧力回復量が増加するため、ブロワの高効率化が可能であることを得た。

③小型遠心ブロワにおいても重なり部の曲率半径を大きくすることが重要である。

(3) 羽根付きディフューザの羽根枚数が及ぼす性能と騒音およびディフューザ内部圧力変動の把握による低騒音化指針の抽出を目的に、別途試験で騒音特性の変化が顕著であった羽根枚数 $Zd13$ と $Zd17$ のディフューザ内部圧力変動を比較した結果、以下の知見を得た。

①ディフューザ入口の加振力としては、動翼のポテンシャル干渉の他に、インペラとケーシング擦間で生じる回転圧力場が存在し、加振力低減のためには回転圧力場の空間次数を高くすることが加振力低減に有効であることを得た。

②羽担枚数 Zd17 は、インペラとケーシング隙間で生じる回転圧力場のモードが回転方向に 9 個と、羽根枚数 Zd13 に比べて空間次数が高次であること、およびディフューザ出口における隣接翼間の圧力変動の位相差が、羽担枚数 Zd13 の 136deg に対して 183deg と逆位相の圧力場となっていることで、定在波が発生する環境下においても圧力変動が抑制され、騒音の低減が可能で騒音低減効果が大きいことを示した。

(4) 遠心プロワの高効率化と低騒音化の両立を目的に、ディフューザの圧力面と負圧面を連結するスリット構造を適用したスリットディフューザ、ディフューザ重なり部にヘルムホルツ型共鳴器や動静翼干渉場に開口を持つ音響管を搭載したディフューザを開発し、性能評価した結果、以下の結論を得た。

①スリットディフューザはスリット無しに比べて、設計回転数において 1stBPF 騒音を約-5 dB、音響共鳴の可能性を持つ回転数の 1stBPF 騒音の低減効果が高く、広い運転範囲での低騒音化と高効率化の両立が可能であることを確認した。

②ディフューザ重なり部にヘルムホルツ共鳴器を搭載したディフューザは、静圧上昇を維持したまま、設計動作点の騒音をオーバーオール値で 5 dB の低減、151BPF の騒音を 5 dB 低減でき、幅広い回転数範囲で低騒音化が可能であることを得た。また、騒音が低減する周波数は、ヘルムホルツ型共鳴器の共鳴周波数と一致し、所定の周波数を狙い騒音を低減できることを確認した。

③ インペラハブ板とディフューザの仕切板（ケーシング）との間に、動静翼干渉場に 2 つの開口を持つ音響管を設置したディフューザは、設計動作点において、静圧上昇を維持したまま、騒音のオーバーオール値を 5dB 低減、1stBPF の騒音を 8dB 低減できることを確認した。

以上の知見は、今後の遠心プロワの小型化と高効率化および低騒音化を実現できる構造案創出 に役立つものであり、一部の構成は既に製品に搭載された遠心プロワに適用済みで、その有効性を確認済みである。

論文審査結果の要旨

本論文では、家庭用電気掃除機の高性能化、低騒音化を目的として、掃除機に搭載される遠心プロワを対象とした調査を扱っている。家庭用電気掃除機に搭載される小型遠心プロワは、高効率化と運転範囲内における翼通過周波数 (Blade Passing Frequency (BPF)) 騒音を含む騒音の低減が求められているが、遠心プロワには回転するインペラとインペラから出た流れを効率良く減速させるディフューザの両者の高効率化が必要であり、高効率化のためにはディフューザ部に羽根付きディフューザを採用するケースが多い。本論文で対象としている遠心プロワは、設計点における高効率化が重要であることから羽根付きディフューザの中でも弦節比の大きい羽根付きディフューザ（通路型）を有するが、翼通過周波数の波長と流路長さが近く流路内で音響共鳴が生じやすい特徴を持つ。対象の遠心プロワでは、電気掃除機の

運転モードや掃除機のごみの蓄積量により運転回転数が増加し、運転回転数範囲が広いこと、運転範囲内での音響共鳴により騒音増加するため、音響共鳴の回避が重要な課題とされている。

本論文では小型かつ高効率・低騒音の遠心ブロワを開発するために必要な設計指針を得ることを目的として、羽根付きディフューザ内で生じる圧力変動の現象把握およびディフューザ羽根枚数による内部圧力変動や騒音に及ぼす影響の要因分析を調査するとともに、小型化と高効率化の両立の手段として、ディフューザ翼間曲率半径の影響や、隣接翼間の圧力差を用いたスリットディフューザの効果について扱っている。

本論文の構成を簡単に述べる。第一章では、研究背景を詳述するとともに、既往の研究を取り上げ、本論文の新規性を確認している。第二章では、本研究で用いた計測方法及び流体解析手法について詳述している。測定方法としては、騒音計、壁面圧力計測及び粒子画像流速測定法（PIV）を使いディフューザ内部流れと非定常圧力場の詳細把握を可能にしている。また、汎用の流体解析コードを利用した CFD による高精度定常流れ解析及び非定常解析手法を解析モデルとともに述べている。第3章では、翼通過周波数の波長とディフューザ流路長さが近接している場合において、ディフューザ内部の圧力変動計測と非定常圧力計測と圧縮性非定常流体解析を行っている。その結果として、定在波の3倍振動モードの抑制など騒音低減に関する貴重な知見を得ている。第4章、第5章では、ディフューザ翼間曲率半径及び羽枚数が内部流れや圧力回復係数に与える影響を、性能測定、PIV 及び定常流体解析を通じて明らかにしている。第6章では、ディフューザにスリット、ヘルムホルツ共鳴器及び音響管を設けてブロアの低騒音化を試み、それぞれ効果があることを確認している。

上記の知見は、今後の遠心ブロワの小型化と高効率化および低騒音化を実現できる構造案創出に役立つものであり、さらに一部の構成は既に製品に搭載された遠心ブロワに適用済みであり、その有効性は確認済みである。

以上、本論文は空力性能と騒音低減の点で総合的に優れた小型遠心ブロアの新たな設計指針を獲得するという目標を達成しており、得られた知見は学術的にも工業的にも非常に重要なものである。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。

原著論文名（1編を記載）

本多武史、坂上誠二、船崎健一、小型遠心ブロアの騒音とディフューザ内部圧力変動に関する研究、日本機械学会論文集、82巻840号、2017、07