

## 論文要旨

### 小型ファンモータの振動低減に関する研究

機械工学専攻博士後期課程 3年 高橋 政行

#### <目次>

- 第 1 章 緒論
- 第 2 章 電磁力励振振動の低減
- 第 3 章 軸受揺動振動の低減
- 第 4 章 外部機器による高周波励振加振の低減
- 第 5 章 流体力励振振動の低減
- 第 6 章 結論

#### 論文要旨

第 1 章では、本研究の背景と目的を述べた。ファンモータはモータと羽根が一体構造をした機械装置で、空気に対してエネルギーを与える送風機の一つであり、産業用や民生用など様々な装置や機器の冷却に幅広く使われている。昨今、小型ファンモータが搭載される装置や機器の高性能化、小型化、軽量化、高密度実装化や使用環境の変化に伴い、従来問題になってきた回転軸の不釣り合い振動および電磁力の高調波成分によるケーシングなどの共振現象によって発生する振動以外に、電磁力励振振動、軸受の揺動振動、接続したインバータなどの外部機器による高周波励振振動、流体力励振振動など、新たな低振動化の要求が生じている。そして、それらが要求するレベルは非常に厳しいものとなっている。本研究では、これらの振動問題を解決するための評価方法と設計的な指針を示すことを目的とする。

第 2 章では、出力 70W の小型ファン用 2 極誘導機について、巻線仕様の一つである各相各極のコイル数の変更により、電磁力および電磁力励振振動の低減が可能であることを数値解析と実験による検証結果から示した。

エアギャップに生じる起磁力分布（起磁力の空間分布）とその時間変化が巻線仕様により異なることに着目し、巻線仕様をパラメータとして求めた起磁力分布の解析結果について、起磁力分布と正弦波形の差を自乗和平方根で表した「起磁力分布係数」を定義して定量化し、理論値での巻線仕様と起磁力の関係を明らかにした。次に数値解析により、巻線仕様と電磁力および電磁力励振振動の関係を求めた。すなわち 2 次元非線形有限要素法の磁界解析によりステータティース端面に生じる電磁力を計算し、その値を用いて 3 次元有限要素法の構造解析によりモータ側面に生じる半径方向の電磁力励振振動を求めた。これらの結果を考察し、電磁力励振振動と起磁力分布係数に相関があることを示し、小型ファン用 2 極誘導機について巻線仕様を基に数値解析により求めた起磁力分布係数から電磁力励振振動を相対的に予測可能なことを示した。

また、数値解析で求めた結果に対して実験的に検証した。巻線仕様を系統的に変化させた小型ファン用 2 極誘導機を作成し、探りコイル法で測定した磁束分布（磁束の空間分布）から、実機の起磁力分布と起磁力分布係数がほぼ理論通りであることを確認した。さらに、巻線仕様を系統的に変えた電磁力励振振動を測定し、起磁力分布係数と電磁力励振振動の関係を明らかにした。

これらの結果から、小型ファン用 2 極誘導機の巻線仕様と電磁力励振振動の関係を明らかにし、巻線仕様を変更した場合の電磁力励振振動を起磁力分布係数から予測できることを示した。

第 3 章では、軸受の揺動振動により発生するフレッチング摩耗を防止するため、軸受のはめあい設計により軸受の揺動振動を低減できることを示した。

耐久性を検証するために実施した高温連続試験において、軸受の外輪とハウジングのはめあい部で発生したフレッチング摩耗について、その摩耗面の断面形状の検証結果を示す。次に、3 軸 LDV（レーザドップラ振動計）を用いて外輪の微細振動を測定し、その結果から 3 次元の実稼働解析を行い、回転中の振動モードを求めた。その結果、ファンモータの軸受外輪振動は、軸の振れ回りに起因する外輪の「揺動振動」と軸受全体が軸方向に同位相で振動する「並進振動」の二つが発生していることがわかり、これらの結果から、フレッチング摩耗の原因が軸の振れ回りによる外輪の「揺動振動」に起因することを示した。

さらに、揺動振動と軸受とハウジングのはめあい隙間の関係を明らかにした。軸受寸法が異なる 2 種類の軸受について、はめあい寸法を系統的に変えた場合の揺動振動を測定し、はめあい寸法と揺動振動に相関があることを示すとともに、連続高温試験の結果を考慮し、フレッチング摩耗を防止することができるはめあい寸法の決定指針を示した。併せて、軸受とハウジング間にグリスを塗布することによる効果を定量的に示した。

第 4 章では、インバータで駆動した場合の PWM 制御信号によるキャリア周波数を基本周波数とするファンモータの羽根の高周波数域の強制振動について、実稼働状態での振動モード形状を推測する方法を示すとともに、数値解析により求めた周波数応答関数とキャリア周波数成分の振動モード形状に対する各固有モードの寄与率から、各固有モードがキャリア周波数成分の振動に及ぼす影響を明らかにした。

キャリア周波数 2kHz および 15kHz のインバータを用いてファンモータを駆動し、騒音測定（周波数分析）とトラッキング分析を行った。キャリア周波数 2kHz の場合、羽根から 2kHz の耳障りな放射音が発生し、対策が必要なことを示した。次に、実験と数値解析による周波数応答関数の結果から、2kHz に固有振動数はなく、放射音は共振現象による振動が原因でないことを示した。次いで、歪応答を利用した実稼働解析で、2kHz の応答形状が羽根のカップ天面が軸方向に往復運動する振動モードであることが明らかにし、2kHz の高周波数領域まで歪応答を利用した実稼働解析が可能であることを示した。さらに、数値解析による周波数応答解析を用いて、2kHz の応答形状に対する各固有モードの寄与率を求め、2kHz の応答形状に対する各固有モードの影響を明らかにした。

第 5 章では、ファンモータの流体力励振振動および流動特性に及ぼす障害物の影響について述べる。上流に円板型障害物が存在する場合の軸流形式のファンモータの性能特性を明らかにするとともに、羽根およびプレナムタンク壁面と障害物間（以下、ファン障害物間と略記）で発生する不安定流れの解明を試みた結果を示す。

主として性能曲線に及ぼすファン障害物間の隙間距離、障害物直径の影響について検討し、性能特性はファンと障害物との相対距離に依存し、性能曲線に対する入口障害物の影響は相対障害物直径が大きくなるほど、ファンと障害物との相対距離が大きい値で現れること、障害物が相

対的に大きく、ファンとの相対距離が小さい場合には低流量域で性能曲線に右上がり特性が現れること、障害物が相対的に大きく、ファンとの相対距離が極めて小さい場合には逆流が生じる場合があることを示した。

また、実測した障害物表面圧力分布と、圧力勾配が遠心力とつり合うと仮定した式にファン－障害物間中央断面の周方向速度を代入して得られた圧力値と比較し、ファン入口付近に障害物が存在する場合の性能低下並びに逆流発生の一原因としてファン－障害物間で羽根によって生成される旋回流の遠心力の作用が考えられることを示した。さらに、ファン－障害物間に生じる不安定流れに着目した変動圧力計測実験を行い、障害物がファンに対して大きく、ファンと障害物との相対距離が小さい場合には、順流・逆流にかかわらず低流量領域でじょう乱が周方向に伝播する不安定流れが発生することを明らかにした。得られた実験結果の一部については数値計算結果と比較検討し、ファン－障害物間にセル構造を伴うベーンレスディフューザの旋回失速と類似の不安定流れが確認されたことを示す。

第6章では本論文の結論を述べた。

電磁力励振振動の低減では、ファン用小型2極三相誘導電動機において、巻線仕様の一つである各相各極のコイル数を起磁力分布係数で定量化し、数値解析と実験により電磁振動の低減率を明確にした。これらの結果から、起磁力分布係数により電磁振動を相対的に予測することができるようになった。特に小型ファンモータでは、全体のコストに対する巻線の比率が大きいため、必要な振動レベルに応じて最適な巻線仕様を選択できることは有効である。

軸受揺動振動の低減では、非接触式の3軸LDVによる実稼働解析を使い、軸受振動とその振動モードを定量化した結果、ファンモータの軸受外輪振動は、軸の振れ回りによる「揺動振動」と軸受全体が軸方向に同位相で振動する「並進振動」の二つが発生しており、このうち揺動振動はフレッチング磨耗の原因となりえるレベルあることを明らかにした。また、軸受外輪とハウジングとのはめあい隙間や軸受の大きさに対する揺動振動を定量化し、長寿命化のためのはめあい設計指針を示すことができた。

外部機器による高周波励振振動の低減では、歪応答を利用した実稼働解析と数値解析により、高周波数域の羽根の振動モードを精度よく定量化できることを示した。また、この応答形状に対する各固有モードの寄与率を求め、応答形状に対する各モードの影響を明らかにした。これらの結果は、低振動化のための構造変更に対する有効なデータとなる。

流体力励振振動の低減では、実験と数値解析によって、軸流形式のファンモータ入口付近に障害物があった場合の性能特性への影響とその原因となる不安定流れなどの流れ場の検証結果を示した。これらの結果から、実際の実装設計において、流体力励振振動の発生と著しい冷却効果の低下を防ぐ実装設計の指針を示すことができた。