


## 学位論文審査結果の要旨

専攻	物質生産工学専攻	氏名	瀬々 真吾
論文題目	応力効果を考慮した永久磁石モータの磁気特性解析		
主査	榎園正人・教授・電気電子システム創成工学講座		
審査委員	秋田昌憲・教授・電気電子システム創成工学講座		
審査委員	小川幸吉・教授・電気電子システム創成工学講座		
審査委員	大鶴 徹・教授・人間環境工学講座		
審査委員	戸高 孝・准教授・電気電子システム創成工学講座		
審査結果の要旨 (1000字以内)			
<p>モータの低損失・高効率化のためには鉄損（磁気損失）増大の最大要因である応力の磁気特性に及ぼす影響を明らかにする必要がある、その上で応力効果を考慮した電気機器解析技術の構築が重要な課題となっている。従来の解析技術は磁気特性をスカラー量で表現した電磁界解析であるが、実際には大きさと方向をもつベクトル量で表されるベクトル磁気特性分布を解析する必要がある。ベクトル磁気特性を考慮するための数値モデルとして E&amp;S モデルが提案されており、本研究では実用的な最適設計に適用可能なモデルとして複素 E&amp;S モデルを考案し、複素ベクトル磁気特性解析技術を提案している。開発した手法は従来のベクトル磁気特性解析に比べて適用範囲は限られるが、物理量の正弦波的時間変化を仮定することで、計算時間を大幅に 90%程度短縮している。さらに、応力ベクトル磁気特性は、張力、圧縮力及び剪断力とベクトル磁気特性の相互関係を表現するものであるが、本研究では主応力に着目して、パラメータの削減を行い、また測定結果の対称性に基づいて、使用するデータ量を 200分の1に削減している。</p> <p>提案手法の妥当性について環状モデルで検討した後、適用例として、電気自動車に用いられている永久磁石モータに対して、加工製造工程で発生し磁気特性を劣化させる残留応力を考慮したベクトル磁気特性解析を行い、磁気損失に及ぼす残留応力の影響を明らかにし、解析結果からモータの低損失化の知見を得ている。以上の結果はモータの低損失・高効率化の有効な手段として応力によるベクトル磁気特性のコントロールの可能性を示唆し、次世代モータの新たな技術構築を確立する足がかりとなる。</p> <p>本審査では複素ベクトル磁気特性解析法並びに応力効果を考慮した応力ベクトル磁気特性解析法についてのモデル化に関する質問が行われ、その有用性を分かりやすく示すことが要求された。公聴会では有用性を適切に説明し、また研究の意義についても簡潔にまとめられ全体が統一されていた。また、公聴会では解析手法とモデル化に関して質疑がなされたが、いずれも的確に答えられ、十分な研究資質を備えていることを示した。</p> <p>以上の審査結果を踏まえて、本研究は今日におけるモータの低損失・高効率化技術の発展に大きく寄与するものであると高く評価できる。よって、審査委員会は本研究論文が工学博士の学位論文として相応しいものと判断した。</p>			

## 学位論文の要旨

専攻名	物質生産工学専攻	ふりがな氏名	ぜぜ しんご 瀬々 真吾	
学位論文題目	応力効果を考慮した永久磁石モータの磁気特性解析			

近年、地球環境悪化に関する問題から、工業国の温室効果ガスの削減が急務となっている。温室効果ガス削減に対する対策は大きく分けて、「トップランナー方式を遵守した機器の低損失化（電力消費の低減）」、「電力需要のクリーンエネルギー化または低炭素化」になる。これに対して著者らの研究室では、機器の低損失化の観点からモータの高効率化に着目して研究を行ってきた。モータの損失の一種である鉄損は、ヒステリシス損と渦電流損に分けられ、モータのコアに使用される電磁鋼板中の磁束密度の変化に起因する。この鉄損は、モータを組立てる前に、コア材料に使用される電磁鋼板の鉄損特性とモータの鉄損が発生する部分のコア材料重量から事前に算出することができる。例えば、ある電磁鋼板の素材鉄損が  $1 \text{ W/kg}$ 、使用重量が  $10 \text{ kg}$  とすると、予想鉄損値は  $10 \text{ W}$  となる。しかし、実際には実機に発生する鉄損と予想鉄損値は異なることが知られている。この差異の指標値は、ビルディングファクター (B.F.) と呼ばれている。B.F.値は、1 に近づくほど素材の特性値を最大限に発揮できており、1 より大きくなると素材特性が発揮できていないとされる。モータにおいては、この B.F.が非常に大きいことが問題となっている。その原因は、実機内の電磁鋼板の磁気特性が加工前のそれと比べて劣化していることであり、このことが算定以上にモータの効率を低下させる大きな要因の一つである。加工前と加工後（実装状態）にかけての電磁鋼板の磁気特性を劣化させる原因として、モータの各製造工程によって発生する残留応力が挙げられる。電磁鋼板の磁気特性は、応力に対して非常に敏感であることが知られており、引張応力・圧縮応力によって様々な状態へ変化する。高効率なモータの設計のためには、前述したような応力効果（応力に対する磁気特性の変化）を考慮したモータのコア内の磁気現象の解明を行うことによって内部の損失を正確に把握することが重要な課題となる。そのためには、モータ内部の残留応力の把握、応力下の正確な磁気特性の評価、そして、それらを考慮したモータの磁気特性解析技術の構築が必要不可欠となる。そこで、著者らの研究室では、モータ内部の残留応力の把握には X 線残留応力測定装置、応力下の正確な磁気特性の評価には応力ベクトル磁気特性測定装置を用いて測定を行った。ベクトル磁気特性とは、従来の磁気測定法であるエプスタイン試験器や単板磁気試験器による一次元の測定ではなく、電磁鋼板の磁気特性を二次元量として評価したものである。そのようにすることによって、モータの中で実際に発生している交番磁束・回転磁束下での磁気特性を正確に評価することができる。筆者らの研究室はこれまで、“無応力下”のベクトル磁気特性をモデル化した E&S モデルを用いてモータなどの様々な電磁力応用機器の詳細な磁気特性を明らかにしてきた。しかし、測定データベースが膨大なことと特殊な計算プロセスによって、近年の大容量化・高速化した計算機を使用しても解析時間が非常に膨大になることが問題となっており、未だ実用的な解析時間には至っていない。

また、応力効果を考慮したベクトル磁気特性は、無応力下のベクトル磁気特性に対して応力パラメータが付加されるため、それをモデル化して磁気特性解析に適用した際の解析時間はさらに膨大になると予想される。そこで著者らは、ベクトル磁気特性を簡易化してモデル化した複素 E&S モデルを開発し、解析時間の短縮を図った。本論文ではまず、PM モータを対象とした複素 E&S モデルを用いた磁気特性解析法の提案を行い従来の E&S モデルと比較することにより、その妥当性を示す。その後、応力効果を考慮した複素 E&S モデル（応力複素 E&S モデル）の開発を行い、それを用いた PM モータの磁気特性解析を行うことによって、より実機に近いモータ中の磁気現象を明らかにし、低鉄損化に対する知見を得る。これらの検討を行った結果を報告する。まず、ギャップ中心に対して境界条件を設けることによって、複素 E&S モデルを用いた PM モータの解析を可能にした。また、解析時間は 94~98 %程度短縮した。そして、解析結果を従来の E&S モデルと比較することによって、ある程度の高磁束密度領域（1.6 T 程度）でも適用可能であることを明らかにした。応力効果を考慮した応力複素 E&S モデルによる磁気特性解析では、無応力下での解析結果と応力下の解析結果は全く異なることを示し、今回解析したモデルにおいて、要鉄損発生領域がスロット上部だけでなく、テイス領域にも存在することを明らかにした。また、鉄損増加要因パラメータは、磁束密度よりも磁界強度であることも明らかにした。最後に、全鉄損は無応力下に比べ、約 1.4 倍に増加した。