

博士学位論文審査要旨

2016年2月17日

論文題目：電磁鋼板の局所領域磁気特性および加工劣化に関する研究

学位申請者：千田 邦浩

審査委員：

主査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 藤原 耕二

副査：同志社大学 名誉教授 石原 好之

副査：東北大学電気通信研究所 教授 石山 和志

要 旨：

本論文は、電磁鋼板を使用した電磁応用機器の特性改善のための基礎的な知見を得ることを目的に、鉄心材料自身の内部に存在する磁気特性の不均一性に関する問題として、方向性電磁鋼板の二次再結晶組織に起因する磁気特性の分布を取り挙げ、その評価方法を開発するとともに、提案方法を用いて磁束密度が鋼板内部で変化する原因を解析した。また、無方向性電磁鋼板から鉄心を製造する際の加工による鉄心内部の部分的な磁気特性の変化に関して、打抜き加工とカシメ加工の影響について検討を行った。さらに、鉄心を機器本体に固定する場合、あるいは打抜き加工やカシメ加工を施した場合に鉄心特性の低下の原因となる応力の影響について評価方法を開発し、それを用いて劣化挙動の検討とその原因の解明を行った。

第1章では、局所的観点から磁気特性を把握することの重要性、および本研究で検討対象とした方向性電磁鋼板および無方向性電磁鋼板のそれぞれの特徴について説明した。

第2章では、局所磁束密度測定法である探針法の測定精度を実験的に評価し、探りコイルと同等の精度を有すること、および測定精度を保証するために必要な要件を明らかにした。この結果を受け、探針とホール素子を組み合わせた実用的な局所磁気測定プローブを開発した。

第3章では、単結晶、双結晶、多結晶の各種試料の内部に生じる局所磁束密度に着目して、方向性電磁鋼板内部で磁束密度と鉄損が不均一に分布する機構について検討し、方向性電磁鋼板の鉄損特性改善に有効と考えられる二次再結晶組織について提案した。

第4章では、無方向性電磁鋼板の加工劣化について、剪断加工端部付近における磁区観察、および剪断加工による試料幅を種々変更した磁気測定結果から、打抜き加工端部の磁気特性劣化幅は板厚の2～4倍程度と結論した。ブラシレス DC モータの実測試験により、打抜き歪によるモータ鉄損の劣化は、約16%程度と見積もった。

第5章では、鉄心内部でのカシメの個数密度とヒステリシス損および渦電流損の増分の関係を明らかにし、回転機鉄心でのカシメ起因の鉄損増加量を簡易的に予測する手法を提案した。

第6章では、単板試料の磁化方向に圧縮応力を加えた状態における磁気測定について、座屈防止用の押え板と試料の間の摩擦の影響を評価して測定精度の高精度化を図り、一定以上の圧縮応力下では、結晶粒径が大きい材料の方が有利であることを明らかにした。

第7章では、研究成果のまとめを行っている。

以上、本研究で得られた方向性電磁鋼板内部における磁気特性の不均一性、および無方向性電磁鋼板の加工に起因する磁気特性劣化に関する結果は、今後、より優れた鉄心材料の開発や鉄心特性改善策の確立に活用可能であり、省エネルギー推進に貢献できると考えられる。

よって、本論文は、博士（工学）（同志社大学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

学力確認結果の要旨

2016年2月17日

論文題目：電磁鋼板の局所領域磁気特性および加工劣化に関する研究

学位申請者：千田 邦浩

審査委員：

主査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 藤原 耕二

副査：同志社大学 名誉教授 石原 好之

副査：東北大学電気通信研究所 教授 石山 和志

要 旨：

本論文の提出者は、大阪大学大学院理学研究科物理学専攻博士前期課程を1992年3月に修了し、直ちに川崎製鉄株式会社（現 JFE スチール株式会社）に勤務し、電磁鋼板の製造技術および磁気特性評価、電気機器への応用に関する研究業務に従事している。

本論文の主たる内容は、電気学会論文誌、Journal of Magnetism and Magnetic Materials、IEEEJ Journal of Industry Applications などに合計7件掲載され、既に十分な評価を得ている。

2016年1月30日13:30より3時間に亘り、提出論文に関する学術講演会が開催され、種々の質疑討論が行われたが、提出者の説明により、いずれについても十分な理解が得られた。

さらに講演会終了後、審査委員により、学位論文に関係した諸問題について口頭試問を実施した結果、本人の十分な学力を確認することができた。

なお提出者は、英語による複数の論文発表を行うとともに、海外国際会議において口頭発表も行っており、十分な語学能力を有すると認められる。

以上のことから、本学位申請者の専門分野に関する学力ならびに語学力は十分なものであると認める。

博士学位論文要旨

論文題目： 電磁鋼板の局所領域磁気特性および加工劣化に関する研究
氏名： 千田 邦浩

要 旨：

省エネルギー推進の観点から、モータや変圧器、リアクトルをはじめとする電磁応用機器の効率改善は、継続的な重要課題である。これらの機器は、いずれも交流で磁化される鉄心を有していることから、機器のエネルギー効率向上のためには鉄心性能の向上が必須である。鉄心の性能には、機器および鉄心の設計だけでなく、鉄心材料そのものの磁気特性と、電磁鋼板を加工して鉄心を製造する際の磁気特性の劣化が大きく影響する。本研究では、鉄心材料の局所的な磁気特性分布、あるいは加工による鉄心内部の部分的な磁気特性の劣化の問題に着目し、これらの状況を詳細に検討するとともに、その発生機構を明らかにして、電磁鋼板を使用した電磁応用機器の特性改善のための基礎的な知見を得ることを目的とした。

本研究では、鉄心材料自身の内部に存在する磁気特性の不均一性に関する問題として、方向性電磁鋼板の二次再結晶組織に起因する磁気特性の分布を取り上げ、その評価方法を開発するとともに、提案方法を用いて磁束密度が鋼板内部で変化する原因を解析した。また、無方向性電磁鋼板から鉄心を製造する際の加工による鉄心内部の部分的な磁気特性の変化に関して、打抜き加工とカシメ加工の影響について検討を行った。さらに、鉄心を機器本体に固定する場合、あるいは打抜き加工やカシメ加工を施した場合に鉄心特性の低下の原因となる応力の影響について評価方法を開発し、それを用いて劣化挙動の検討とその原因の解明を行った。以下に、本研究の要旨をまとめる。

第1章では、電磁鋼板や鉄心の特性改善のため、局所的観点から磁気特性を把握することの重要性を述べるとともに、本研究で検討対象とした方向性電磁鋼板および無方向性電磁鋼板のそれぞれの特徴について説明した。

第2章では、局所的な磁束密度測定の方法である探針法の測定精度を実験的に評価し、方向性電磁鋼板内部の局所的な磁束密度の測定において、探りコイルと同等の精度を有することを示した。また、探針に加える荷重や継鉄の構造など、測定精度を保証するために必要な要件を明らかにした。この結果を受け、探針とホール素子を組み合わせた局所磁気測定プローブおよび局所磁気特性の自動測定装置を開発し、電磁鋼板内部の局所的な磁気特性を測定するための実用的な手法とした。

第3章では、開発した局所磁気測定方法を用いて、方向性電磁鋼板内部の磁気特性（局所磁束密度、局所鉄損）の分布状態とその原因に関する検討結果を述べた。まず、単結晶試料内部に生じる磁束分布を測定し、磁区観察を併用して、励磁レベルに従った磁束分布の変化の原因を明らかにした。続いて、双結晶試料の局所磁束密度分布を検討し、磁束密度の分布は、結晶粒界を挟む2つの結晶粒の α 角と結晶粒界の方向により規定される粒界磁極量に依存していることを明らかにした。次に、多結晶の方向性電磁鋼板についても、 α 角を原因とする粒界磁極の分布が鋼板内部の磁束密度分布の不均一性の原因であることを示した。さらに、局所領域の鉄損分布の原因についても検討し、局所鉄損が局所領域の磁束密度と磁区幅に依存し、局所磁束密度が高い部分ほど磁区幅に対する鉄損の依存性が著しくなることを明らかにした。さらに、 α 角そのものに対する局所鉄損の依存性や、 β 角が小さい結晶粒内部での磁区幅の変化に伴う局所鉄損の変化を解明した。これらにより、方向性電磁鋼板の内部で磁束密度と鉄損が不均一に分布する機構について示した。得られた知見から、方向性電磁鋼板の鉄損特性改善のためには、鋼板内部での磁束密

度分布の均一化を図ることが重要であり、このために有効と考えられる二次再結晶組織について提案した。

第4章では、無方向性電磁鋼板から打抜き加工により回転機鉄心を製造する際、打抜き端部に導入される歪が鉄心の磁気特性に与える影響の検討結果について述べた。硬度分布および結晶方位変化から、打抜き加工による塑性歪の残留は、打抜き端部から板厚の約1/2の深さに及ぶと見積もられたが、これに基づく鉄損解析では実際の磁気特性劣化量を説明できなかった。一方、剪断加工端部付近の磁区模様を歪取焼鈍の前後で観察した結果から、板厚の2～3倍程度の幅を有する領域で磁気特性の変化が生じていることを確認した。また、剪断加工による試料の幅を種々変更し行った磁気測定結果から、磁区観察から求められた結果と同等な劣化領域の幅が推定された。これらの結果から、打抜き加工端部で磁気特性の劣化が生じている領域の幅が板厚の2～4倍程度と結論した。磁気特性劣化領域の幅が塑性歪を含む領域よりも広くなる理由は、打抜き加工で塑性変形した部分が周辺を局部的に拘束して弾性歪を生じるためと予想した。続いて、ブラシレスDCモータの実験により、モータ鉄損に及ぼす打抜き加工端部の磁気特性劣化の影響を評価し、打抜き歪によるモータ鉄損の劣化は約16%程度と見積もった。さらに、鉄心各部と同じ幅で剪断加工した試料の磁気特性を利用することで、打抜き歪によるモータ鉄損の劣化量を予測することが可能であることを示した。

第5章では、カシメ加工を施したリングコアを用いた実験により、カシメ加工の各段階での鉄心磁気特性の劣化要因を解析し、以下を明らかにした。カシメ加工の工程の中で、低周波域(50 Hz程度)の鉄損劣化に及ぼす寄与は、ダボ形成と締結でほぼ同等であるが、高周波域(400 Hz)の鉄損に関しては、締結による増分がダボ形成による増分を上回ることを示した。また、低磁化力域での鉄損値は穴開けコアよりもダボ形成コアの方が大きいことから、ダボの存在による塑性拘束に起因した弾性歪の存在が示唆された。さらに、ダボ同士の締結は、鉄心の磁気特性の劣化を助長させていることが確認され、鉄心材の締結のための応力の影響と推定した。これらの歪みの影響に加え、2個のカシメ対を結ぶ線と鎖交する磁束成分が存在するようなカシメ配置では、カシメ部での短絡による電氣的閉回路の形成を原因とする渦電流損の顕著な増加が認められた。続いて、鉄心内部でのカシメの個数密度とヒステリシス損および渦電流損の増分の関係を明らかにし、回転機鉄心でのカシメ起因の鉄損増加量を簡易的に予測する手法を提案した。

第6章では、無方向性電磁鋼板に加えられた応力による磁気特性劣化に関する基礎的な知見を得ることを目的とし、応力下での磁気測定手法を検討した上で、材料間で応力による磁気特性の変化の挙動が異なる原因について示した。まず、単板試料の磁化方向に圧縮応力を加えた状態で磁気測定を行うために、座屈の防止のために押え板を介して試料に面圧を加える方法において、押え板と試料の間の摩擦の影響を評価し、これを補正して、押え板から受ける摩擦力の影響を除いた磁化方向応力下での磁気測定の方法を提案した。続いて、開発した測定方法を用いて種々の無方向性電磁鋼板の応力下での磁気特性を検討し、圧縮応力による鉄損劣化に及ぼす結晶粒径の影響を明らかにし、一定以上の圧縮応力の下では結晶粒径が大きい材料の方が有利であることを明らかにした。また、低い磁化力での磁気分極あるいは透磁率に及ぼす磁化方向応力の影響に関して、磁区観察結果をもとに、応力に応じた磁化ベクトル方向の変化によって説明した。さらに、高磁化力域での磁化は、従来知られていた低磁化力での挙動と異なり、Si含有量の低い材料では、圧縮によって磁気分極が増加することを明らかにするとともに、磁歪の観点からその原因を解明した。

以上、方向性電磁鋼板内部において、磁気特性に不均一性が生じる原因を明らかにした。さらに、無方向性電磁鋼板を鉄心に加工する際に生じる磁気特性の劣化の原因を明らかにするとともに、おおよその劣化量を予測することを可能とした。本研究で得られた結果は、今後、より優れた鉄心材料の開発や鉄心特性改善策の確立に活用可能であり、省エネルギー推進に貢献できると考えられる。