

博士学位論文審査要旨

2011年2月13日

論文題目： 低鉄損電磁鋼板の開発と積層鉄心における電磁鋼板の磁化挙動に関する研究

学位申請者： 山口 広

審査委員：

主査： 同志社大学工学研究科 教授 石原 好之

副査： 同志社大学工学研究科 教授 大鉢 忠

副査： 岐阜大学 名誉教授 岡崎 靖雄

要 旨：

現在、我々の生活に無くてはならない電力は、火力、原子力、水力などの発電所で発電機によって発電され、そこから変電所、電柱に設置されている変圧器によって、昇圧、降圧され我々のところに適切な電圧で送られている。このとき使用される機器である発電機及び変圧器、また電力の半分以上を消費する電動機などの電気機器鉄心のほとんどすべてに、鉄にわずかなシリコンを混ぜた電磁鋼板が使用されている。

本論文は、この電磁鋼板でも、主として変圧器及び発電機に使用される方向性電磁鋼板について、鉄損低減のための新しい製造方法の開発、変圧器に使用された場合の鉄心内での磁束の振る舞い、特に鉄心接合部近傍での磁束の振る舞いを明らかにするための測定方法の開発、その測定結果に基づく開発品の低鉄損の理論的説明を試みたものである。

本論文は6章から構成されている。

第1章では、研究の背景、目的及び研究概要を述べている。

第2章では、電磁鋼板の低鉄損化を実現するため、CVD法によりTiNを絶縁皮膜として生成することにより、絶縁と共に高張力による鉄損低減を実現する方法を開発している。開発した方法によりパイロットプラントでの製品ではあるが、方向性電磁鋼板としては世界最高クラスの低損失の実現に成功している。また、開発材を使用して製作した三相三脚変圧器を試作し、従来品で製作した変圧器に比較し、優れた特性を確認している。

第3章では、新しく開発した電磁鋼板とこれまでの市販製品について、商用周波数での交流磁場、回転磁場、垂直磁場における鉄損特性、磁歪特性の比較を詳細に行うとことにより、鉄損特性改善の主要因が、補助磁区に起因するものであることを明らかにしている。

第4章では、開発材を変圧器鉄心として利用した場合の、鉄心接合部での磁束の振る舞いを明らかにするため、Cuを材料表面に蒸着した探りコイルを製作し、積層された板と板との間を渡る磁束の測定を、センサ挿入による磁束の変化を招くことなく行い、接合部近傍での磁束の流れを明らかにしている。この測定により、開発材で製作された変圧器接合部での鉄損増加が少ないのは、垂直磁束による電磁鋼板の面内渦電流損が少ないことを明らかにしている。

第5章では、第4章で求めた測定結果に基づいて、鉄心接合部近傍における磁束の流れを説明するため、新たに主磁区と補助磁区からなる電磁鋼板の磁区モデルを提案している。この磁区モデルは3軸の磁歪測定による裏付けを行い、開発材が従来材に比較して低鉄損となる理論的な証明を行っている。

第6章では、本研究をまとめると共に、今後の更なる低鉄損材の開発に対して指針を与えている。

以上、この論文は今後製造される電力用変圧器の高効率化、省エネルギーに寄与するところが極めて大きいものがある。

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

2011年2月13日

論文題目： 低鉄損電磁鋼板の開発と積層鉄心における電磁鋼板の磁化挙動に関する研究

学位申請者： 山口 広

審査委員：

主 査： 同志社大学工学研究科 教授 石原 好之

副 査： 同志社大学工学研究科 教授 大鉢 忠

副 査： 岐阜大学 名誉教授 岡崎 靖雄

要 旨：

本論文提出者は、東京工業大学大学院総合理工学研究科材料科学専攻修士課程を1993年3月に修了し、JFEスチール株式会社に入社、スチール研究所で電磁鋼板の開発に従事してきた。

本論文の主たる内容は、Surf. & Coat. Tech.に1件、J. Magnetism and Magnetic Materialsに2件、電気学会論文誌に2件などに掲載され、すでに十分な評価を受けている。

本年1月22日10時より約2時間20分にわたり、提出論文に関する学術講演会(博士論文公聴会)が開催され、多くの大学、企業からの研究者により種々の質疑討論が行われたが、提出者の説明により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、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できた。また、英語及びドイツ語については、英文による論文、海外での国際学会で講演、オーストリアのウィーン工科大学に2年間客員研究員として滞在し、研究を行っていることなどから、十分な語学力を有するものと認定した。

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：低鉄損電磁鋼板の開発と積層鉄心における電磁鋼板の
磁化挙動に関する研究

氏名：山口 広

要 旨：

方向性電磁鋼板のための鉄損低減の技術開発は圧延方向の特性改善を主体になされてきた。しかしながら実際の変圧器では鋼板は積層され、積層鉄心変圧器の場合には閉磁路を構成するためにいくつかの接合部が設けられる。三相三脚変圧器鉄心の T 接合部においては回転磁化が発生し、鋼板同士がわずかに重なり合って積層されるラップ部においては隣接鋼板への渡り磁束、すなわち面外磁束成分が生じる。磁化容易軸である圧延方向以外への磁化は損失増加を招き、素材鉄損に対する変圧器鉄損の比率、ビルディングファクタが増大する。また局所的にみると三相変圧器鉄心内の磁束密度波形は歪んでおり、その波形歪みによっても鉄損は増加する。

本研究は、変圧器など実際の使用条件下でその磁気特性が最大限発揮できる理想的な方向性電磁鋼板の姿を念頭におき、次世代の方向性電磁鋼板の試作とその全方位的な磁気特性評価、変圧器鉄心内で生じる三次元的な磁束流れの把握、面内磁化回転や垂直磁化など、磁化容易軸である圧延方向からずれた場合の磁化過程の様子を磁区構造モデルに基づいて考察し、方向性電磁鋼板のさらなる低損失化のために、変圧器鉄心における磁化挙動を明らかにすることを目的としてなされた。

はじめに表面平滑化と高張力被膜を組み合わせた次世代の方向性電磁鋼板の試作とその磁気特性評価を行った。方向性電磁鋼板に対して圧延方向と平行に弾性範囲内で引張応力を付与すると鉄損値は低下し、表面酸化物を除去して鏡面状に平滑化した場合には、その低下量が大幅に改善することが知られている。高張力を付与できるセラミックス被膜として窒化物や炭化物は有効であるが、CVD 法により連続的に形成するプロセスは一般に長時間を要するため、連続鋼帯の短時間処理の実現は困難であると考えられていたが、 $\text{TiCl}_4\text{-H}_2\text{-N}_2$ ガス系での CVD 法により $1.0\mu\text{m}/\text{分}$ 以上という極めて速い成膜速度で TiN 膜を形成する条件を見だし、CVD 法による鋼帯への連続セラミックス被膜形成処理の可能性を示すことができた。

TiN 被膜の成膜法として選択した雰囲気成膜およびノズル成膜のいずれにおいても、TiN 被膜の成膜反応は鋼板表面における反応ガス種の競合吸着が律速過程 (Langmuir-Hinshelwood 型) であることを明らかにし、各反応ガスの表面吸着定数や表面反応の速度定数を算出して TiN 生成量の定式化に成功した。反応モデルの確立により、パイロット試験装置の設計等を効率的に進めることができた。パイロット試験装置で連続製造された TiN 被膜を有する鋼帯は、鉄損値 $W_{17/50}=0.63\text{W}/\text{kg}$ と、製造

された方向性電磁鋼板としては世界最高の低損失材料であり、それらを鉄心材料として用いて製作した変圧器も極めて優れた磁気特性を示した。

TiN 成膜を施した開発材は圧延方向の磁気特性だけでなく、圧延直角方向の磁気特性も優れていた。積層鉄心のコーナーにおける斜角接合部や中央脚の T 接合部など板面内の磁化回転が生じる箇所では、圧延方向から外れた方向にも良好な磁気特性が要求される。さらに鋼板をわずかにラップさせながら積層される突き合わせ箇所では、積層された上下の鋼板への磁束の渡りが生じることから、板面に垂直な方向の磁気特性も必要である。

回転単板磁気試験器を用いて方向性電磁鋼板に付与される応力と表面状態とが単板の二次元磁気特性に及ぼす影響を評価した。開発材は圧延方向を含むすべての方位に対して良好な磁気特性、磁歪特性を有することを明らかにし、全方位的な磁気特性が要求される積鉄心変圧器において示された優位性を裏づける結果を得た。開発材は磁界の強さ H に対する磁化応答性（磁束密度 B の変化）に優れていると考えられ、優れた磁化応答性は電磁鋼板表面の平滑化処理と高張力被膜の組み合わせにより実現することを示した。

張力被膜を除去し、鏡面化処理により鋼板表面の平滑化のみを行った場合、圧延方向の磁気特性はやや劣化するが、圧延直角方向や回転磁束励磁下における磁気特性は改善することがわかった。磁化回転を伴う磁化過程において垂直方向の磁歪 λ_{ND} が大きな変化を示したことから、 90° 磁区などからなるランセットが重要な役割を果たしていることが明らかとなった。

変圧器鉄心内で生じる磁化回転は、一般に回転鉄損評価に使用される楕円磁束励磁と異なり、回転する磁束密度ベクトル (B ベクトル) の角速度は一定ではない。前者を B 波形の正弦波制御を行う制御励磁、後者を波形制御を行わない無制御励磁とすると、無制御励磁がより実変圧器内での磁化状態に近いと考えられる。両者の磁化挙動を比較すると、 B 波形制御を行っていないために歪んだ B 波形となる無制御励磁の磁歪変化は各方向とも正弦波形に近い変化を示した。逆に B 波形が正弦波形となる制御励磁では歪んだ磁歪波形が観察された。磁歪振動は磁区構造を直接反映していると考えられるが、無制御励磁では結晶磁気異方性エネルギーや磁気弾性エネルギーなど全体のエネルギー変化が最小となるような磁区構造変化が起こるために、なめらかで正弦波に近い磁歪振動挙動が実現したと推察される。その磁区構造変化の結果として B ベクトルの軌跡が決まると考えられる。

次に変圧器鉄心内で生じる三次元的な磁束流れを把握するために、探針法と探りコイルを組み合わせた Cu 蒸着による層間挿入型の三次元磁束センサを新たに開発し、変圧器鉄心の接合部近傍における磁束流れの時間変化の計測を行った。積層鉄心のコーナー部や T 接合部において、探りコイル等のセンサ挿入による鉄心積層の磁化状態の変化を招くことなく、三次元的な磁束流れの時間変化を計測した初めての例と考えられる。

真空蒸着によりコイル、信号線などすべてを $1\mu\text{m}$ 以下の蒸着線で形成させたこと、

探針法の応用では探針を用いることなく絶縁コーティングの微小除去で電圧降下を測定できるようにしたこと、探りコイル等を新たに巻くのではなく積層する電磁鋼板の表面に直接センサを実装したこと、センサ信号を積層鉄心の端部にて授受できるようにピックアップ部を工夫したことなど、新規な技術の組合せにより、三次元磁束センサを開発することができた。

コーナー部における磁化挙動の計測結果から、開発材では鋼板面内の磁束密度 B の軌跡にヒステリシスは見られずほぼ 45° 方向に直線的に磁化することが明らかとなり、二次元磁束励磁下で見られた磁界の強さ H の変化に対する良好な磁気応答性が変圧器鉄心内でも実現していることがわかった。

鋼板面外方向への磁化挙動に関しては、ラップ部における隣接鋼板への渡り磁束（垂直磁束）量が張力被膜のない場合と比較して少なく、開発材は垂直磁束により生じる電磁鋼板の板面内に流れる渦電流による損失（planar current loss）も低い可能性があり、優れた圧延方向の磁気特性に加えて、積鉄心変圧器の接合部などで生じる局所的な鉄損の増加をも抑制できる可能性が示された。変圧器鉄心における磁束流れの三次元計測が明らかにした立体的な磁化挙動は、今後の変圧器鉄心における局所的な鉄損解析やシミュレーション計算において、極めて有益な結果をもたらすと考えられる。

方向性電磁鋼板の回転磁束励磁下における二次元磁化過程、あるいは接合部等で観察された立体的な磁束流れが実現する三次元的な磁化過程を理解するために、その磁化過程を担う動的な磁区構造変化について新たな磁区構造モデルを提案し、種々の磁化過程について考察した。主磁区と補助磁区からなる方向性電磁鋼板の磁区構造について、補助磁区の体積分率と主磁区および補助磁区の磁化回転角をパラメータとしたモデリングを行い、三軸の磁歪計測値に基づいて幾何学的にその磁区構造を決定した。モデルで予想される磁区構造から磁気異方性エネルギーと磁気弾性エネルギーの変化についても考察を行った。

開発材の回転磁束励磁下で見られた優れた磁化応答性は、補助磁区の増減をほとんど伴わず、主磁区の磁化回転を主体とした磁化挙動によりもたらされることを明らかにした。他方、鏡面化処理を施した平滑材では補助磁区の増減を主体とする磁区構造変化を示すことがわかった。補助磁区の増減は 90° 磁壁の移動を伴うために磁気弾性エネルギーの変化が大きく、磁化応答性に遅れを生じる要因となるため、磁氣的損失が増大する。したがって、補助磁区がほとんど活動しない開発材の磁化挙動は、低損失磁化過程の理想を示していると考えられる。

磁区構造は電磁鋼板における磁氣的損失と振動、すなわち鉄損と騒音の根源となる重要な因子であるため、動的な磁区観察による検証と併せて詳細な解析が必要であると考えられる。今後は本研究の成果を生かした材料開発の指針に基づいて、鉄心材料として究極の方向性電磁鋼板の開発を行いたい。