

氏 名	石 山 和 志
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 5 年 1 月 13 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 63 年 3 月 東北大学大学院工学研究科電子工学 専攻前期課程
学 位 論 文 題 目	低損失薄珪素鋼板に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 荒井 賢一 東北大学教授 脇山 徳雄 東北大学教授 中村 慶久 東北大学教授 本間 基文 東北大学助教授 山口 正洋

論 文 内 容 要 旨

変圧器での電力損失は送配電中に失われる電力のうちの約1/3を占め、使用電力量の増大と共に極めて大きな値となってきており、1988年現在変圧器鉄心で鉄損として失われる電力損失は1年間で約25.2PJ (70億kWh) に上っている。この値は熊本県で1年間に消費される電力量にほぼ等しく、これを少しでも減少させることは、社会的に極めて大きな要求となってきている。そのためこれまで変圧器用鉄心材料として使われてきた高磁束密度方向性珪素鋼板よりもさらに低鉄損の、新しい電磁材料の開発が望まれている。

本研究では、低鉄損特性が期待されながらその実現が困難であった薄方向性珪素鋼板の実現を目的として、板厚の薄い珪素鋼板の(110)[001]集合組織形成とそれに伴う磁気特性の変化について検討した。さらに作製された薄方向性珪素鋼板の磁区幅制御による鉄損低減化についても検討した。以下に各章の概要を示す。

第 1 章 序 論

第 1 章においては、変圧器鉄心用材料の現状と問題点を明らかにし、本研究の目的を述べている。

第 2 章 薄珪素鋼板の再結晶粒成長と集合組織形成

第 2 章においては(110)[001]組織を有する珪素鋼板に冷間圧延を施しその板厚を100 μ m以下とした後、真空中または水素気流中で焼鈍を施し、それにより起こる再結晶に伴う集合組織の変化、

ならびにそれに伴う磁気特性の変化について検討した。その結果、一次再結晶集合組織は弱い集積度の(110)[001]組織であるが、二次再結晶が起ると[001]軸の集積度は低下し磁気特性は劣化すること、二次再結晶完了後1473K程度の高温での熱処理により三次再結晶が起ること、三次再結晶により成長する結晶粒は(110)[001]方位を有するため、これにより磁気特性の優れた薄方向性珪素鋼板が実現できることを明らかにした。このことは従来作製が困難とされてきた薄方向性珪素鋼板の工業的規模での生産の可能性を示したものである。

第3章 再結晶粒成長に影響を及ぼす諸要因

第3章においては、三次再結晶粒成長に及ぼす要因として、含有不純物量、板厚、焼鈍雰囲気、焼鈍温度に着目し、それらが三次再結晶粒成長に及ぼす影響に関する検討を行った。その結果、試料の純度が三次再結晶粒成長に大きな影響を及ぼし、含有不純物の内で特にCuの含有量を 5×10^{-2} mass%から 1×10^{-3} mass%以下にまで減少させることにより三次再結晶粒成長の完了までに必要な焼鈍時間を約20ksから600s程度までに短縮できることが明らかとなった。また三次再結晶粒成長が起る最低の温度が1223Kまで低下した。三次再結晶粒の成長速度は板厚と焼鈍温度により直線的に変化することを明らかにした。さらに焼鈍雰囲気は三次再結晶粒の成長速度に影響を及ぼし、真空度の劣化により成長速度は低下することを明確にした。また三次再結晶粒の粒径は焼鈍温度と昇温速度を変化させることにより制御可能であることを見いだした。

第4章 磁区幅制御

第4章においては、本研究で示された方法で作製された薄方向性珪素鋼板の磁区を観測し、応力印加による方法と漏れ磁束を利用する方法とで磁区幅制御を試み、磁区細分化のための最適条件を検討した。その結果、局所的に応力を印加することにより磁区が細分化するものの、再度の焼鈍によりその効果が失われることを明らかにした。そこで、表面に溝を形成し、そこでの漏れ磁束を利用する新しい磁区細分化法を提案し、それが歪み取り焼鈍後も磁区細分化のために有効であることを明らかにした。さらにこの方法での磁区細分化のためには、幅が狭く、深い溝を形成することが有効であることを明らかにした。また昇温速度や焼鈍温度などの焼鈍条件を変化させ結晶粒径制御を行うことで、付加技術無しに磁区幅制御が可能であることを明らかにした。

第5章 交流磁気特性

第5章においては、本研究で作製された薄方向性珪素鋼板の鉄損を渦電流損失とヒステリシス損失に分離して商用周波数から1kHzまでの範囲で評価した。その結果、板厚の減少に伴うヒステリシス損失の上昇は、板厚 $50 \mu\text{m}$ 以下で観測されること、その結果鉄損が極小値を示す板厚は周波数50Hzでは $40 \mu\text{m}$ 程度であること、周波数が高くなるに従い鉄損値が極小となる板厚は薄い側へと移動することが明らかとなった。また張力印加、細溝形成、結晶粒径制御それぞれの方法による磁区細分化処理を行った試料の鉄損を測定し、磁区幅の減少と渦電流損失の減少が対応していることを示し、鉄損を最低にするための磁区細分化条件を明確にした。さらに磁区細分化した薄方向性珪

素鋼板の鉄損は、低損失電磁材料として知られる鉄系アモルファス材料の鉄損よりも、測定した50 Hz から 1 kHz の励磁周波数範囲において低いことを明らかにした。表 1 は本実験で得られた薄方向性珪素鋼板の特性を、出発母材である市販の方向性珪素鋼板、および低鉄損材料として知られる鉄系アモルファス材料と比較したものである。これより本研究で作製された薄方向性珪素鋼板の鉄損は鉄系アモルファス材料以下であり、市販の方向性珪素鋼板と比較すると約1/5にまで低下していることがわかる。

表 1 高磁束密度方向性珪素鋼板，鉄系アモルファス薄帯，および三次再結晶で作製した薄方向性珪素鋼板の特性比較

試料	高磁束密度方向性珪素鋼板 (張力皮膜塗布)	鉄系アモルファス薄帯 (磁場中焼純後)	三次再結晶で作製した薄方向性珪素鋼板 (細溝による磁区細分化後)	
THICKNESS (mm)	0.3	0.02~0.04	0.071	0.032
Bs (T)	2.03	1.5~1.6	2.03	2.03
W _{13/50} (W/kg)	0.6	0.15~0.30	0.17	0.13
W _{17/50} (W/kg)	1.02	—	0.35	0.21

第 6 章 結 論

第 6 章においては、本研究で明らかとなった事項についてまとめて述べている。

- (a) (110)〔001〕組織を有する珪素鋼板に冷間圧延と焼鈍を施することにより、表面エネルギーを駆動力とする結晶粒成長が起り、それを利用して板厚100 μm以下の薄方向性珪素鋼板が実現できる。
- (b) 本研究により作製された薄方向性珪素鋼板に対して磁区細分化処理を施することにより極めて低鉄損の薄方向性珪素鋼板が実現できることが明らかとなった。すなわち、本研究により従来材料に比べてその損失が1/5にまで低下した新しい電磁材料が開発された。

以上本研究で得られた結論を要約して述べた。

審 査 結 果 の 要 旨

近年、省エネルギーの観点から電力損失の低減化は極めて重要な社会的課題となっている。特に発電機や変圧器等の電気機器の鉄心用材料として用いられる珪素鋼板において、低損失化の要求は強いものがある。

著者は、低損失特性を有する珪素鋼板を実現するために、板厚 $100\mu\text{m}$ 以下で(110)[001]集合組織を持つ薄珪素鋼板に着目し、その結晶粒の成長挙動と集合組織、並びに損失に及ぼす種々の要因に関して詳細な検討を行った。本論文はその研究成果をまとめたもので、全文6章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、市販の 0.3mm 厚の方向性珪素鋼板を出発材料として、 $100\mu\text{m}$ 以下の厚さまで冷間圧延し真空または水素中 1000°C 以上で焼鈍を施することにより、異常粒成長が起こり極めて集積度の高い(110)[011]集合組織が薄板全面にわたって形成されることを明らかにしている。このことは従来作製が困難とされた薄方向性珪素鋼板を実現する新たな方法を提案したもので、極めて有用な結果である。

第3章では、この異常粒の成長速度に影響を及ぼす要因として、含有不純物の種類と量、板厚、焼鈍条件に着目し、試料の純度の向上により粒成長が極めて短時間に起こること、その成長速度は板厚と焼鈍温度により変化することを明らかにしている。さらに焼鈍雰囲気と異常粒成長の関係を調べ、粒成長の主たる駆動力は結晶粒間の表面エネルギー差であることを明確にしている。

第4章では、本研究で作製された薄珪素鋼板の磁区幅の制御法に関して検討し、薄珪素鋼板の表面に細溝を形成することにより磁区幅が制御可能であり、深く狭い溝を形成することにより磁区細分化が促進されていることを明らかにしている。さらに焼鈍条件を変えて結晶粒径を細かにすることによっても磁区細分化が可能であることを述べている。

第5章では、第2章で述べた方法により作製した磁区細分化を施した薄珪素鋼板の損失特性を検討し、板厚約 $40\mu\text{m}$ で損失が最小となることを見いだすとともに、得られた損失値は例えば 50Hz 、 1.3T では 0.13W/kg であり、市販の方向性珪素鋼板の $1/5$ と低く、また低損失材料として知られる鉄系アモルファス材料の損失をも下回ることを明らかにしている。

第6章は結論である。

以上要するに、本論文は新しい低損失鉄心材料として薄珪素鋼板に着目し、これに(110)[001]集合組織を形成させるための新しい方法を提案し、極めて低損失の珪素鋼板を実現したもので、磁気工学の発展に寄与するところが少なくない。

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。