

氏 名	お 岡 ざ き 崎 や す 靖 お 雄
授 与 学 位	博 士 ( 工 学 )
学位授与年月日	平成 6 年 2 月 9 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 42 年 3 月 大阪大学大学院研究科冶金学専攻修士課程
学 位 論 文 題 目	広幅鉄基非晶質鉄心材料の高性能化の配電トランス用 巻鉄心への応用
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 増本 健 東北大学教授 藤森 啓安 東北大学教授 荒井 賢一 東北大学教授 宮崎 照宣

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 緒 論

トランスやモータに代表される電気機器は19世紀末に登場して以来、大容量化、小形軽量化が進められ、鉄心材料の磁束密度の向上、鉄損の低減を目指した開発が行われてきた。1972年のオイルショック以来、電力用配電トランスにおいても省エネルギーが強く求められる様になり、鉄心材料の低鉄損化が一層求められている。日本と同様に電力代の高騰が続いていた米国においては、配電トランスの設計磁束密度を下げて鉄損低減を図るとともに、トランスの鉄損を金額で評価する鉄損評価制度が導入された。この動きのなかで、非晶質合金材料の鉄損が方向性電磁鋼板の鉄損の1/3～1/4になり、電力用トランス鉄心に使用出来る可能性が示され、非晶質トランス鉄心の開発研究が精力的に行われ始めた。

鉄基非晶質合金はその構造から本質的に低損失を示す優れた磁性材料であるが、電力用配電トランス鉄心への適用に際しては、非晶質合金材料の特性のばらつきが大きく、また鉄心鉄損が素材鉄損に比べ2～3倍劣化し（ビルディングファクター： $BF=2\sim 3$ ）、工業製品としての基準からはずれた製品になる。従って、電力用配電トランス鉄心材料として本格的実用化を考えるには、これらの問題点を改善しなければならない。

本研究は、非晶質合金薄帯が本質的に持つ低損失の特性を生かした低鉄損の配電トランス用鉄心を開発研究することを目的とし、材料特性支配因子、鉄心特性支配因子を明かにし、材料の高性能化とトランス鉄心特性向上の技術開発を行ったことをまとめたものである。即ち、i) 電力用配電トランス鉄心材料の持つべき特性の整理、ii) 素材磁性の支配因子、鉄心特性の支配因子の解明、

iii) これらの検討結果から非晶質合金材料の高性能化を達成し、更に配電トランス用巻鉄心への適用、を行い、配電トランスの高性能化のための製造技術を開発した。

## 第2章 製造方法及び実験方法

本章では、広幅非晶質合金薄帯の製造装置の特徴を述べるとともに、表面粗さ連続測定装置、磁区構造観察装置、磁気特性測定装置について詳述した。

## 第3章 広幅試料の形状に対する製造上の支配因子

本章では、磁気特性に大きな影響を与える板厚、表面性状を決める鑄造支配因子について検討するとともにその制御方法を明らかにした。

板厚は冷却ロール周速、噴出圧、ロールノズル間隔に依存し、板厚25~40  $\mu\text{m}$ の範囲でロール周速の逆数に、ロールノズル間隔の1/4乗に、噴出圧力の $10^3 \sim 10^4 \text{ Pa}$ の範囲で1/2乗に、比例することを明らかにした。

表面粗さはロール面の空気巻き込みによるエアポケット形成に起因し、その表面性状はエアポケットの形状、量、分布により決まること、この分布が鑄造長さ方向に粗密に変化すると“蛇腹”が形成されることを明らかにした。また、減圧下鑄造の実験結果から、エアポケットの形成はパドル後面の不安定挙動が原因である事を推論した。広幅長時間鑄造条件での表面粗さの支配子の相互の関係について明らかにし、表面粗さ、蛇腹組織、蛇腹ピッチの制御を可能にした。溶湯噴出圧が小さくなると、表面粗さは急激に大きくなり、ロール周速の影響が顕著になることを示し、溶湯温度の影響も明らかにした。

## 第4章 FeSiS系非晶質合金の磁気特性と支配因子

本章では、広幅大量製造体制を前提にした巻鉄心用 Fe-Si-B 非晶質合金の高磁束密度と低鉄損を確保する要件について、合金成分、表面性状、焼鈍条件を検討し、広幅非晶質 Fe-Si-B 合金の磁気特性を決定する最大の要因が表面性状にあることを明らかにし、その制御方法を確立した。

合金成分としては、配電用トランスの実用的観点から磁束密度、鉄損の特性変動、及び磁気時効性を検討した結果から、 $\text{Fe}_{80.5}\text{Si}_{7.5}\text{Si}_{7.5}\text{B}_{12}\text{C}_{0.5}$ 合金を選択した。

エアポケット分布に起因する表面粗さは、磁区構造を変え、磁束密度、鉄損に影響する。特に、蛇腹の発生により磁界中焼鈍後の $180^\circ$ 磁区が細分化されて渦流損が小さくなり、商用周波数での鉄損を改善することを明らかにした。これらの結果から、鑄造条件を制御することにより表面粗さを変え、磁束密度、鉄損ともに優れた配電トランス鉄心用薄帯を得ることを可能とした。さらに、表面粗さと磁気特性の関係を磁区構造の形成と磁壁移動から定量化し、鉄損と磁束密度の特性を両立させ得る鑄造条件式を構築した。すなわち、表面粗さ、板厚と蛇腹ピッチの関数で渦流損  $W_e$  を求める実験式を得、実測値と良く一致する事を示した。

## 第5章 鉄心特性

本章では、配電用トランス巻鉄心に広幅非晶質合金薄帯を適用するに際しての鉄心特性を決定する要因を明らかにし、鉄心の磁気特性を向上させる技術的手法を理論的、実験的に確立した。まず、鉄心形式の磁気特性への影響と鉄心に付与される応力、残留歪、及び、歪除去焼鈍の磁気特性に及ぼす影響を明らかにするとともに、鉄損劣化のない理想鉄心 ( $BF=1$ ) に劣化要因 ( $\Delta BF$ ) を加算すると言う、 $BF$ の定量的な解析手法を提案した。

鉄心鉄損を劣化させる因子として、i) 層間絶縁不良による層間渦流損、ii) 薄帯形状不良による局部歪の発生、iii) 鉄心幅方向の曲げ歪付与、が重要であることを指摘し、これらの因子を詳細に制御することで、鉄損劣化を抑えることが可能であることを明らかにした。一方、鉄心の加工歪は磁界中焼鈍後でも残留して鉄損を劣化させる。この残留歪の大きさは曲げ加工歪の2乗に比例することから、鉄心径と板厚の関数として $BF$ の劣化の程度を見積もることが出来ることを明らかにした。

薄帯表面の層間絶縁不良による鉄心の鉄損への影響を層間抵抗、巻加工張力(面圧)の関数で定量化した。鉄心の渦流損は、面圧を大きくすれば層間絶縁抵抗が急激に低下するために、単調に増加して鉄損を劣化させることを明らかにした。なお、層間渦電流の影響は鉄心占積率が80%以下では無視できることも示した。

## 第6章 絶縁皮膜コーティング

本章では、薄帯表面の層間絶縁抵抗を向上させ、且つ、表面の耐錆性を向上させるコーティング方法について検討した。従来、急冷凝固した鉄基非晶質合金薄帯では表面絶縁皮膜は不要であるとされていたが、実際には層間絶縁不良により鉄心鉄損が大きく劣化することを第5章で明らかにした。

本研究では、鉄心材料として不可欠の表面絶縁コーティング皮膜の効果について、層間渦流損、磁気特性の観点から解析を行い、その解析結果に基づき、素材鉄損を劣化させない面期的な高絶縁抵抗の皮膜を開発した。表面にエアポケットが存在する薄帯に溶液を塗布する従来のコーティング法では、コーティング物質がエアポケットに沈積偏在しガラス化することにより、焼鈍後の薄帯に不均一応力を導入して鉄損を劣化させることを見出した。

本研究では、アルミナを溶液から析出させる“溶液陽極処理法”を開発した。この方法では、表面性状に関係なく高絶縁性のアルミナを粒状に析出させることが可能で、この方法により歪導入を抑えて鉄損劣化を小さく出来ることを明らかにした。更に、溶液陽極処理によるアルミナ皮膜上に微量の無機質物質のコーティングを行うことにより、鉄損を皮膜なし材と同等以上に改善出来た。これは、アルミナ粒子間に無機質のコーティング物質が浸透し、表面の応力分布を変えると共に磁区細分化を行うためであると結論した。以上の結果、鉄心の占積率が80%以上でも、層間絶縁皮膜の形成により効果的に層間渦電流を遮断でき、 $BF$ を十分に小さく出来た。

## 第7章 配電用トランス巻鉄心の試作と評価

本章では、第5、6章で確立した手法を実機規模の鉄心に適用し、鉄心特性とトランスの $BF$ を

評価し、その有効性を立証した。すなわち、単相配電用トランスを試作し評価した結果、その鉄心特性とトランス特性が共に優れた高性能トランスの開発に成功した。鉄心の鉄損は、方向性電磁鋼板 9 milZ6Hに比べ、1/4以下を示した。コーティング皮膜材を用いた鉄心では、80%以上の占積率でもビルディングファクターを1.5以下に抑えられた。アルミナ皮膜コーティング材鉄心では、占積率85%でも鉄心鉄損を0.154w/kg ( $W_{13/50}$ )と非常に低く出来る事を示した。

## 第8章 総括

本章は、本論文で得られた結果を総括したもので、全体をまとめて図1に示す。

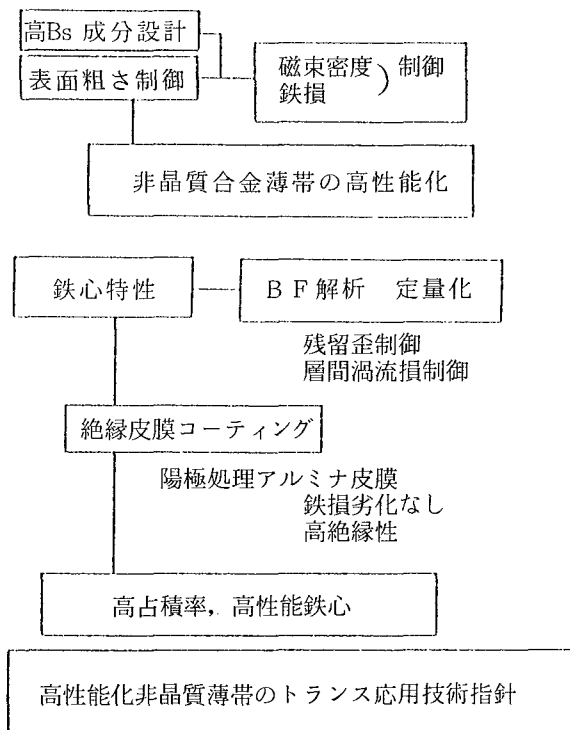


図1. 結論のまとめ

## 審 査 結 果 の 要 旨

電力用配電トランスの鉄心材料としてけい素鋼板が使用されているが、最近、省エネルギー化のための鉄損の低減を目指した開発が行われている。本論文は、非晶質合金材料の鉄損が方向性けい素鋼板の約 1/3 になることに着目して、広幅鉄基非晶質薄帯をトランス鉄心に使用するための材料特性および鉄心特性の支配因子を明らかにし、材料の高性能化とトランス鉄心特性の向上を計り、配電トランスとしての有効性を明らかにした結果を纏めたもので、全編 8 章からなる。

第 1 章は緒論であり、本研究の背景および目的を述べている。

第 2 章では、広幅鉄基非晶質薄帯の製造装置の特徴を述べるとともに、本研究で開発した表面粗さ連続測定装置、磁区構造観察装置、磁気特性測定装置などについて記述している。

第 3 章では、磁気特性に大きな影響を与える板厚、表面性状を決める製造条件について検討するとともに、その制御方法を提案している。特に、広幅にすることによって発生する表面粗さの支配因子を明らかにして、それらを制御する方法を確立したことは注目すべき成果である。

第 4 章では、広幅大量製造法を前提とした巻鉄心用 Fe-Si-B 非晶質合金の高磁束密度、低鉄損を確保するための合金組成、表面性状、熱処理条件を検討し、高性能の鉄心用薄帯が得られたことを述べている。また、渦流損が表面粗さ、板厚、蛇腹ピッチの関数で決まる一般式を得ており、これが実測値と良く一致することを見出している。

第 5 章では、広幅非晶質合金薄帯を巻鉄心に適用した場合の鉄心特性を決定する要因を明確にし、鉄心の磁気特性を向上させる技術的手法を理論的、実験的に明らかにしている。

第 6 章では、鉄心の層間絶縁抵抗を向上させ、かつ表面の耐錆性を向上させる新しいコーティング方法について検討し、鉄損を劣化させないで高絶縁抵抗を付与する皮膜の形成について述べており、アルミナを溶液から析出させる溶液陽極処理法を開発することによって、有効な表面皮膜を得ている。

第 7 章では、本研究により確立した手法を実用トランス鉄心の製造に適用して単相配電用トランスを試作し、評価した結果を述べている。その結果、鉄心特性とトランス特性が共に優れた省エネルギー型トランスの開発に成功している。

第 8 章は、総括である。

以上要するに本論文は、広幅鉄基非晶質鉄心材料の高性能化によって配電トランス用巻鉄心の開発に成功し、省エネルギーの配電トランスの可能性を明らかにしたもので、材料物性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。