

氏名	あずま だい ち 東 大 地		
授与学位	博士 (工学)		
学位授与年月日	平成22年9月 8 日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻		
学位論文題目	変圧器用 Fe 基アモルファス合金の損失発生機構と その低損失化に関する研究		
指導教員	東北大学教授 高橋 研		
論文審査委員	主査 東北大学教授 高橋 研	東北大学教授 佐橋 政司	
	東北大学教授 山口 正洋	東北大学准教授 齋藤 伸	

論文内容要旨

変圧器用の磁心材料には方向性珪素鋼板と Fe-Si-B アモルファス合金薄帯が実用化されている。市販材である $\text{Fe}_{80}\text{Si}_9\text{B}_{11}$ アモルファス合金は方向性珪素鋼板に対して非常に低損失であるが、その飽和磁束密度は 1.57 T と方向性珪素鋼板の 2.0 T に対して低く、また磁歪も 27 ppm と大きく騒音も相対的に大きい。したがって、変圧器用アモルファス合金は、高飽和磁束密度化による電磁変換能の増大と同時に低損失化、低騒音化が必須である。従来の研究の結果から Fe 量を増加させると保磁力が増加することが知られているため、市販材は飽和磁束密度よりもアモルファス合金の特徴である低損失化を優先した合金組成となっている。これに対して日立金属 /Metglas Inc. は、飽和磁束密度を 1.57 T から 1.64 T へ高めながら市販材と同程度の保磁力、磁気損失を実現した $\text{Fe}_{82}(\text{SiB})_{18}$ アモルファス合金を開発した。しかしながら、研究開始当時 (2006 年) は $\text{Fe}_{82}(\text{SiB})_{18}$ アモルファス合金の軟磁性導出指針が明らかとなっていなかった。そこで本研究では、 $\text{Fe}_{82}(\text{SiB})_{18}$ アモルファス合金薄帯、および巻磁心の損失発生機構を新たに作製した広視野域での磁区観察装置を用いた磁区観察の結果と併せて解析し、本材が市販材と同程度の磁気損失を実現できた要因を検討し、さらに本材を用いた実機規模のモデル磁心を試作し、変圧器磁心への適用を検証することを目的とした。

第 1 章 序論であり、本研究の背景および目的を述べている。

第 2 章では、試料作製方法、構造解析法、磁気特性評価法、広域磁区観察装置に関して記述している。

第 3 章では、アモルファス合金薄帯の軟磁性導出に関する磁界中冷却の効果について述べている。 $\text{Fe}_{82}(\text{SiB})_{18}$ アモルファス合金では薄帯作製時の液体急冷プロセスの厳密な温度制御により冷却歪の低減化の重要性を示すと同時に、磁界中冷却後に残留する冷却歪と磁区構造の相関を議論している。無磁界中冷却による $\text{Fe}_{82}(\text{SiB})_{18}$ アモルファス合金薄帯と市販材との構造の変化を、構造敏感な保磁力、X 線回折法により調べた結果、各々の合金の表面核発生直前の熱処理温度 340°C ($\text{Fe}_{82}(\text{SiB})_{18}$ アモルファス合金薄帯)、360°C (市販材) において保磁力が極小をとることがわかった。 $\text{Fe}_{82}(\text{SiB})_{18}$ アモルファス合金薄帯における保磁力の極小値は 1.9 A/m と市販材の 3.4

A/m より低いこと明らかとなり、 $\text{Fe}_{82}(\text{SiB})_{18}$ アモルファス合金薄帯の残留冷却歪が市販材よりも小さいことがわかった。また磁区観察の結果より残留冷却歪による局所的な異方性分散が磁壁の直線性を乱していると考えられる。 $\text{Fe}_{82}(\text{SiB})_{18}$ アモルファス合金薄帯の冷却歪が低減された結果、表面核発生直前の 340°C からの磁界中冷却により 0.8 A/m の低い保磁力が導出されることがわかった。

第 4 章では、アモルファス合金薄帯の損失発生機構を周波数依存性の測定結果を基に論じている。市販材と $\text{Fe}_{82}(\text{SiB})_{18}$ アモルファス合金とを比較すると、低い磁気損失得られる磁界中冷却の温度範囲は市販材の 40°C ($320\text{--}360^\circ\text{C}$) から 60°C ($280\text{--}340^\circ\text{C}$) に拡張すること、および全損失に占める異常渦電流損の割合は 7 割から 8 割に増加することを見出した。この熱処理温度範囲の拡張は作製時の冷却歪の低減化が広い温度範囲でヒステリシス損失の低下を促したことによることが分かった。また異常渦電流損失の増加の原因を調べるために $\text{Fe}_{82}(\text{SiB})_{18}$ アモルファス合金の動的磁壁挙動観察の結果、 10 mm 幅あたりの磁壁数は、 $60\text{--}200\text{ Hz}$ では 12 枚、 $500\text{--}800\text{ Hz}$ では 14 枚の一定値であった (図 1)。これはアモルファス合金薄帯の交番磁界下での低損失化を実現する上で磁壁枚数の制御が非常に重要であることを意味している。

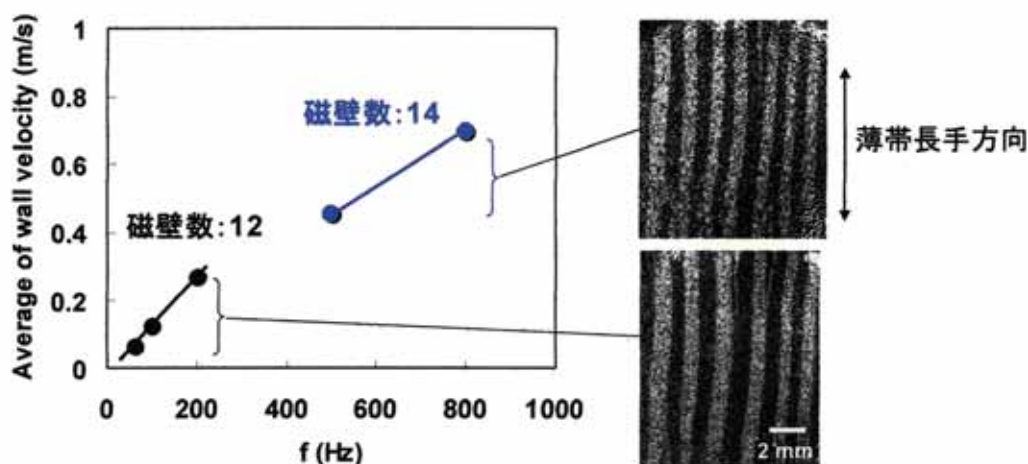


図1 320°C から磁界強度 2400 A/m で磁界中冷却した $\text{Fe}_{82}(\text{SiB})_{18}$ アモルファス合金薄帯の磁壁の平均移動速度と磁区像、図中の磁壁数は 10 mm 幅あたりの磁壁数を表す。

第 5 章では、アモルファス薄帯に特有の現象である、巻磁心化に伴う損失増加要因を $\text{Fe}_{82}(\text{SiB})_{18}$ アモルファス合金を用いて検討した。また同合金を用いた巻磁心において、周波数の増加に伴う異常渦電流損失の増加を消磁状態の巻磁心最外殻表面の磁区観察結果と併せて議論している。薄帯を巻き回すことにより導入される巻歪の影響を、 25.4 mm 幅の薄帯を用いて巻磁心直径を変えることにより調べた結果、直径が 50 mm より小さくなると磁界中冷却後も巻歪が残留し、ヒステリシス損失を増加させることが分かった。一方の異常渦電流損失は残留巻歪によらずほぼ一定であることが明らかとなった。 25.4 mm 幅の薄帯による巻磁心の占積率を変えることにより、巻磁心積層方向の実効的な電気抵抗が $3.2\text{--}25.7\ \Omega$ と異なる巻磁心を作製し、励磁磁束密度 1.45 T における磁気

損失の周波数依存性を 60–8 kHz の範囲で調べた。その結果、周波数の増加に伴う磁気損失の変化は占積率によらず一定であり、隣接した薄帯間に層間電流が流れることによる損失増加がないことを確認した。25.4 mm 幅の $\text{Fe}_{82}(\text{SiB})_{18}$ アモルファス合金を用いた巻磁心について、60 Hz での消磁後の最外殻表面を巻磁心形状のまま磁区観察した結果、磁区幅は薄帯時と比べ幅方向端部では同等、中央部では約 4 倍となることを見出した (図 2)。さらに幅内に観測される磁壁数は、異常渦電流損失と同様に周波数の 0.5 乗に比例して増加することから、磁気損失の低減のためには巻磁心中央部の磁壁の細分化が肝要であると考えられる。

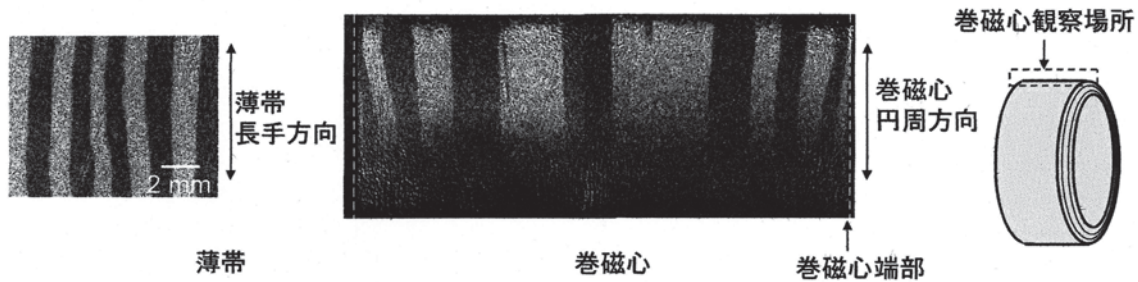


図2 $\text{Fe}_{82}(\text{SiB})_{18}$ アモルファス合金薄帯と巻磁心の最外殻表面の磁区構造 (60 Hz 消磁)

第 6 章では、 $\text{Fe}_{82}(\text{SiB})_{18}$ アモルファス合金を用いて実機規模のモデル磁心を試作し特性を評価した結果について述べている。磁心作製での最重要工程である磁界中冷却の適用可能な温度範囲は、 $\text{Fe}_{82}(\text{SiB})_{18}$ アモルファス合金においては 10°C と市販材と同程度であり、現行の変圧器用アモルファス磁心作製プロセスにより $\text{Fe}_{82}(\text{SiB})_{18}$ アモルファス合金を用いた変圧器用磁心を作製できることを実証した。 $\text{Fe}_{82}(\text{SiB})_{18}$ アモルファス合金による磁心を市販材による磁心とを比較した場合、励磁磁束密度を 0.1 T 向上可能なため小型化できること、また損失を同程度に維持しつつ騒音を 3 dB 低減可能なことを示し、本アモルファス合金薄帯が変圧器用の材料として市販材に対して優位であることを明らかにした。

第 7 章では、本研究を総括している。 $\text{Fe}_{82}(\text{SiB})_{18}$ アモルファス合金薄帯、および巻磁心の損失発生機構を解析し、本材が市販材と同程度の磁気損失を実現できた要因を検討した結果、以下のことが明らかになった。①液体急冷プロセスの厳密な温度制御により冷却歪の低減化が $\text{Fe}_{82}(\text{SiB})_{18}$ アモルファス合金薄帯の軟磁性導出の鍵であることがわかった。② $\text{Fe}_{82}(\text{SiB})_{18}$ アモルファス合金の動的磁壁挙動観察の結果、10 mm 幅あたりの磁壁数は、60–200 Hz では 12 枚、500–800 Hz では 14 枚の一定値であることを確認し、アモルファス合金薄帯の交番磁界下での低損失化を実現には磁壁枚数の制御が非常に重要であることがわかった。③薄帯の巻磁心化に伴う損失増加が、主として加工に伴う磁区幅の増大に起因することを広域観察装置を用いた磁区観察結果より明らかにし、巻磁心損失の低減には巻磁心中央部の磁壁の細分化が重要であることを示した。④実機規模のモデル磁心を試作した結果、 $\text{Fe}_{82}(\text{SiB})_{18}$ アモルファス合金は市販材に対して、小型化・低騒音化の点で優位であることを実証した。

論文審査結果の要旨

変圧器用アモルファス合金薄帯は高飽和磁束密度化による電磁変換能の向上と同時に低損失化、低騒音化が必須であり、薄帯作製時に導入される冷却歪の低減化が軟磁性導出の鍵である。著者は、 $\text{Fe}_{82}(\text{SiB})_{18}$ アモルファス合金（以下 82 材と略記）に着目し、薄帯の巻磁心化に伴う損失増加が、主として曲げ加工に伴う磁区幅の増大に起因することを、新たに開発した広視野域での磁区観察の結果から明らかにした。また実機規模のモデル磁心を試作し、市販材である $\text{Fe}_{80}\text{Si}_9\text{B}_{11}$ アモルファス合金による磁心に対して、小型化・低騒音化の点で優位であることを実証した。本論文はそれらの研究成果をまとめたもので、全文 7 章よりなる。

第 1 章は序論である。

第 2 章では、試料作製方法、構造解析法、磁気特性評価法、広域磁区観察装置に関して記述している。

第 3 章では、アモルファス合金薄帯の軟磁性導出に関する磁界中冷却の効果について述べている。82 材では薄帯作製時の液体急冷プロセスの厳密な温度制御により冷却歪が低減され、表面核発生直前の 340°C からの磁界中冷却により 0.8 A/m の低い保磁力が導出されることを見出した。これは、従来からの薄帯化技術による本組成合金では達し得なかった値であり、磁性材料プロセス工学上重要な知見である。

第 4 章では、アモルファス合金薄帯の損失発生機構を周波数依存性の測定結果を基に論じている。市販材と 82 材とを比較すると、各々の全損失に占める異常渦電流損の割合は 7 割から 8 割に増加する。この増加の原因を調べるために 82 材の動的磁壁挙動観察を行った結果、 10 mm 幅あたりの磁壁数は、 $60\text{--}200\text{Hz}$ では 12 枚、 $500\text{--}800 \text{ Hz}$ では 14 枚の一定値であった。これはアモルファス合金薄帯の交番磁界下での低損失化を実現する上で磁壁枚数の制御が非常に重要であることを意味している。

第 5 章では、アモルファス薄帯に特有の現象である、巻磁心化に伴う磁気損失増加の要因を明らかにした。 25.4 mm 幅の 82 材を用いた巻磁心について、 60Hz での消磁後の最外層表面を巻磁心形状のまま磁区観察した結果、磁区幅は平面状薄帯時と比べ幅方向端部では同等、中央部では約 4 倍となることを見出した。さらに幅内に観測される磁壁数は、異常渦電流損失と同様に周波数の 0.5 乗に比例して増加することから、磁気損失の低減のためには巻磁心中央部の磁壁の細分化が肝要であることを指摘した。これはアモルファス合金薄帯を巻磁心化する上で非常に有用である。

第 6 章では、82 材を用いて実機規模のモデル磁心を試作し特性を評価した結果について述べている。82 材による磁心を市販材による磁心と比較した場合、励磁磁束密度の 0.1 T 向上による小型化、また損失を同程度に維持しつつ騒音を 3 dB 低減可能なことを示した。このことは変圧器用途の場合、本アモルファス合金薄帯が市販材に対して優位であることを示している。

第 7 章は結論である。

以上要するに本論文は、 $\text{Fe}_{82}(\text{SiB})_{18}$ アモルファス合金を薄帯化・巻磁心化した際の損失発生機構を解析し、本材を変圧器磁心へ適用して市販材磁心に対する優位性を実証したものであり、磁性材料工学及び電子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。