

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2009

課題番号：20760184

研究課題名（和文） 積層電磁鋼板の厚さ方向圧縮応力が電力機器の性能に及ぼす影響

研究課題名（英文） Influence of compressive stress along the thickness direction in laminated electrical steel sheet on properties of electrical machines

研究代表者

宮城 大輔（MIYAGI DAISUKE）

岡山大学・大学院自然科学研究科・助教

研究者番号：10346413

研究成果の概要（和文）： モータなどに用いられる鉄心において、構造上必要となるボルト締めやバンド締めに伴う電磁鋼板の厚さ方向に印加される圧縮応力が磁気特性の劣化に及ぼす影響を測定する装置を開発し、測定結果により調査を行った。その結果、電磁鋼板のグレードの差異よりも圧延方向と直角方向でその影響に大きな差異が見られた。圧延方向に励磁した場合は、厚さ方向に0.5MPa程度の小さな圧縮応力が印加されると、ヒステリシス損が増加するのに対し、直角方向に励磁した場合は、ヒステリシス損にはほとんど変化が無く、一方、渦電流損は、圧延方向、直角方向に関係無く、厚さ方向の圧縮応力が増加するにつれて増加する結果が得られた。よって、直角方向に励磁される場所でバンドやボルトなどで積層鋼板を固定することで、低損失な機器設計が可能である。

研究成果の概要（英文）： The magnetic properties of a motor core are affected by the distortion due to the compressive stress in the thickness direction caused by bolt bundles etc. The correlation between the compressive stress and its magnetic properties of a non-oriented electrical steel sheet is measured using a single sheet tester which is developed in this study. Under the compressive stress in the thickness direction, the permeability in both the rolling and transverse directions is decreased. The hysteresis loss in the rolling direction is increased even if a small amount of compressive stress is impressed in the thickness direction. On the other hand, the hysteresis loss in the transverse direction is increased little under the compressive stress in the thickness direction. As the compressed stress in the thickness direction is increased, the eddy current losses in both the rolling direction and the transverse direction are increased.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学，電力変換，電気機器

キーワード：無方向性電磁鋼板，圧縮応力依存性，鉄損，比透磁率，異方性，ヒステリシスループ

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化対策やエネルギーの枯渇問題の観点から、その対策の一環として、エネルギー資源（電力）を出来る限り無駄にすることなく利用することが重要であり、国内電力消費量の約半分を占めている回転機の高効率化を図る事が強く求められている。したがって、回転機などの鉄心の素材としては、高透磁率・低鉄損が強く求められている。

実際の設計において、実機のモータで生じる損失は設計時に行った数値解析法で求めた値と異なっていることが問題となっている。特に、高透磁率・低鉄損の電磁鋼板を用いた場合に、この差異が大きく、高効率・低損失電気機器の開発の大きな問題となっている。この原因として、モータ製造の際の組み立てによる機械的応力、切断加工や打ち抜き加工に伴う鉄心端部の歪み、やきばめやボルト締めなど鉄心保持のためにコアに付与される弾性歪みなどによる鉄心磁気特性の劣化が考えられる。これまでに電磁鋼板面内の圧縮応力が磁気特性の劣化に大きく影響することが報告されており、特にやきばめによる面内方向圧縮応力による電磁鋼板の磁気特性の劣化が問題視され、多くの研究が行われている。しかし、ボルト締めやかしめ等によりモータコアを固定した際、モータコアの積層鉄心の厚さ方向に働く圧縮応力によって磁気特性がどの程度劣化するかについての体系的検討は、国内外を見ても、ほとんど行われていない。また、変圧器などの電気機器においても電磁鋼板を積層したものを鉄心として利用するため、構造上、ボルト締めやバンド締めなどにより、電磁鋼板の厚さ方向に圧縮応力が印加される

場合が多く、鉄心磁気特性の劣化が危惧されている。

2. 研究の目的

電磁鋼板の厚さ方向の応力歪みによる磁気特性の劣化が分かれば、実機でどの程度磁気特性が劣化するかを事前に確認できると同時に、厚さ方向の圧縮応力歪みによる磁気特性の劣化が少なくなるような構造および組み立てを開発することが可能となる。しかし、一般に磁気特性を測定する単板磁気試験器では、測定原理上、厚さ方向に圧縮応力を印加することが出来ず、測定装置の開発が大きな問題であった。

そこで、本研究では、電磁鋼板の厚さ方向に圧縮力を加えた状態での磁気特性が測定できる単板磁気特性試験装置を開発し、様々なグレードの電磁鋼板の厚さ方向に圧縮力を加えた状態での磁気特性の測定を行い、厚さ方向の圧縮応力が、比透磁率およびヒステリシス損や渦電流損に及ぼす影響を明らかにする。また、測定試料を単板とすることにより、磁気異方性と厚さ方向の圧縮応力との関係についても測定を行ない、電磁鋼板のグレードや磁気異方性など体系的に、測定結果をまとめ、数値解析にも利用可能なデータベースの構築を行なう。さらに、得られた測定結果をもとに、低損失な電磁鋼板の積層固定の方法について検討を行なうことを目的とする。

3. 研究の方法

(1) これまでの単板磁気試験器の測定技術を発展させ、厚さ方向に圧縮応力が印加された単板の電磁鋼板の磁気特性を高精度に測定する装置の開発

(2) 厚さ方向に圧縮応力が印加されたときの電磁鋼板の磁気特性の測定

- ① 厚さ方向の圧縮応力が、電磁鋼板のグレードの違いにどのような影響を与えるかを測定して検討する。
- ② 厚さ方向の圧縮応力が、電磁鋼板の磁気異方性にどのような影響を与えるかを測定して検討する。
- ③ 厚さ方向の圧縮応力が、比透磁率、ヒステリシス損、渦電流損にどのような影響を与えるかを測定して検討する。

(3) 得られた測定結果をもとに、低損失な電磁鋼板の積層固定の方法について検討

4. 研究成果

(1) 圧縮応力が印加された単板の電磁鋼板の磁気特性測定装置の開発

図1に試料に圧縮力を加えるための測定装置を、図2に圧縮部分の詳細図を示す。圧縮力の大きさは、装置に設置した荷重変換器を用いて測定した。

10mm×10mmのガラスエポキシ板を試料上下に密着させて、その上から力を印加した。本測定装置は測定領域を局部的に加圧する構造であるため、Hコイルを試料に設置することが出来ない。そこで、ゴム板をC字形に曲げ、両端を固定して磁路長を一定(=10mm)とし、これを巻き枠とした特殊Hコイル(1370ターン)を用いた。図3に製作した特殊ロゴスキーコイルを示す。試料は、ワイヤーカットで8mm×260mmに切断したものをを用いた。Bコイルは、図4に示すように、圧縮応力印加部の両側すぐ脇に10ターンずつ、計20ターンとした。また、測定回路図を図5に示す。日本ナショナルインスツルメンツ製のD/AボードとA/Dボードを同期させ、PXIバスを利用することにより、高速波形制御を実現し、高精度でありながら測定時間の短縮を行っている。

作製した特殊Hコイルの測定精度を検討する

ために、厚さ0.5mm、幅5mmのガラスエポキシ板に同じ磁路長で125ターン巻いたHコイルを作製した。35A300の直角方向試料を用い、応力を加えない状態で、特殊HコイルとHコイルそれぞれで測定を行い、測定結果を比較した結果、比透磁率、鉄損ともに、特殊ロゴスキーコイルの測定結果はHコイルの測定結果に近い値が得られた。両者の比透磁率の差の約3%、鉄損の差も約3%であった。

10mm×10mmのガラスエポキシ板を試料上下に密着させて、その上から力を印加した。しかし、試料を押さえる10mm×10mmの部分で均一

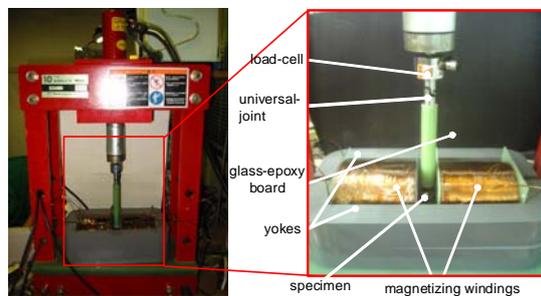
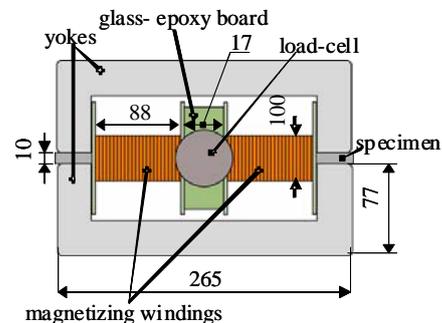
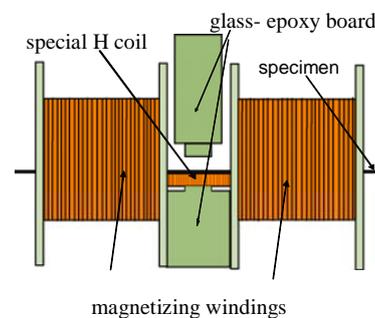


Fig. 1 Equipment for impressing compressive stress.



(a)



(b)

Fig. 2 Special measuring apparatus of magnetic properties. (a) upper view. (b) front view.

に応力が印加されているかは不明であった。そこで、応力測定フィルム（富士フィルム製：プレスケール、圧力測定フィルム、微圧用ツリーシートタイプ）を用いて応力の印加精度の検討を行った。応力測定フィルムとは、種類の異なるフィルムを重ね合わせ、それを試料の上に載せ、応力を印加すると、応力が印加された部分は赤く染まるという反応が起こるフィルムである。図6に、応力が局所的に印加された場合と均一に印加された場合のフィル

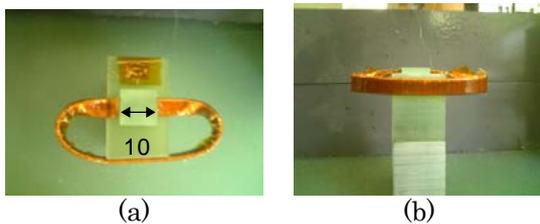


Fig. 3 Rogowski-Chattock Potentiometer (RCP). (a) upperside view. (b) front view.

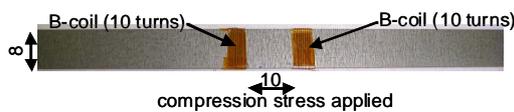


Fig. 4 Specimen and B coils.

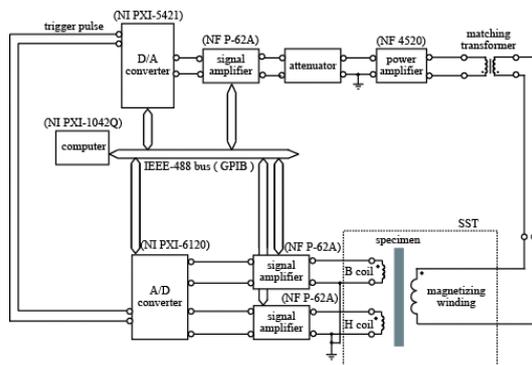


Fig. 5 Measurement system.

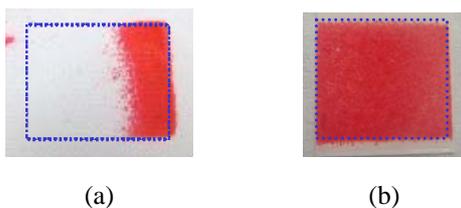
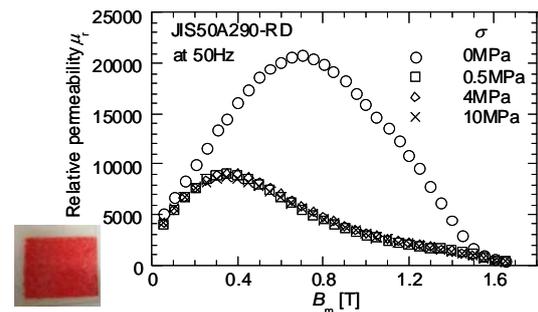


Fig. 6 Examination of uniformity of compressive stress using the stress measurement sheets. (a) Inhomogeneous. (b) Homogeneous.

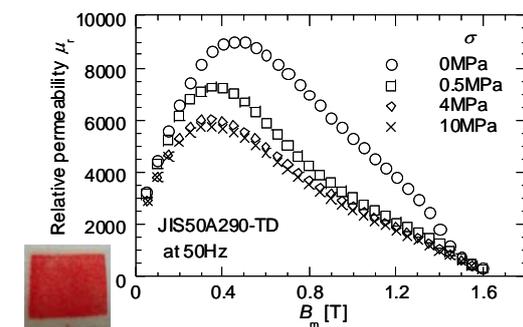
ムの発色分布を示す。このフィルムを用いることにより、応力がほぼ均一に印加されているかどうかを確認できる。

以上のような工夫を行なうことで、厚さ方向に圧縮応力下での単板磁気特性測定装置の開発を行なった。

(2) 厚さ方向に圧縮応力が印加されたときの電磁鋼板の磁気特性の測定 図7に、試料50 A290の厚さ方向圧縮応力下の比透磁率の測定結果を示す。なお、測定結果の左脇に測定時の応力測定フィルムの反応結果を示す。全体的に赤く反応し、応力がほぼ均一に印加されたことが確認できる。圧延方向 (Rolling direction : RD) の比透磁率は、0.5MPa程度の応力が印加されると、極端に低下するが、それ以上応力を印加してもほとんど影響を受



(a)

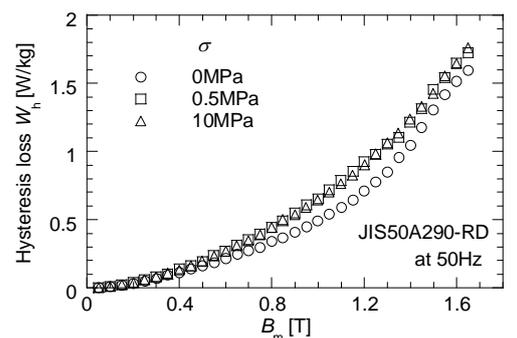


(b)

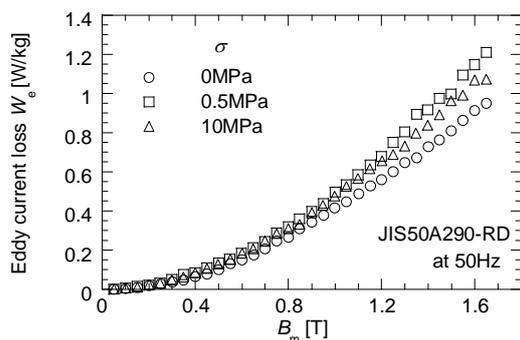
Fig. 7 Effect of the compressive stress in the thickness direction on relative permeabilities of the non-oriented electrical steel sheet (JIS50290) and the examination of uniformity of compressive stress using the stress measurement sheet. (a) Rolling direction. (b) Transverse direction.

けない結果が得られた。一方、直角方向 (Transverse direction : TD) の比透磁率は、10MPaまででは、圧縮応力が増加すると比透磁率は低下する結果が得られた。

図8に試料50A290のヒステリシス損、図9に渦電流損を示す。25Hzと50Hzの鉄損測定結果より、鉄損分離より求めた結果である。図8(a)に示すように、圧延方向のヒステリシス損は、厚さ方向に0.5MPa程度の圧縮応力が印加されても、20%程度増加するのに対して、図9(a)に示すように、直角方向のヒステリシス損は、10MPa印加されてもほとんど増加しない結果が得られた。一方、図8(b)と図9(b)に示すように、渦電流損は、圧延方向、直角方向にかかわらず、圧縮応力が増加すると渦電流損も増加する結果が得られた。特に、1T以上で増加



(a)

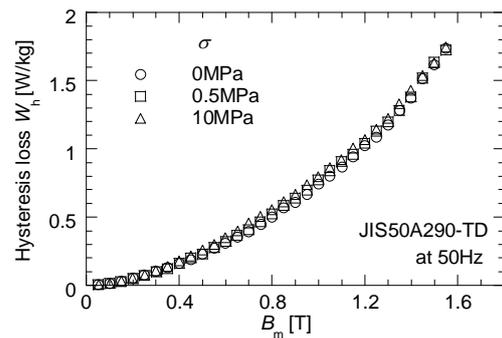


(b)

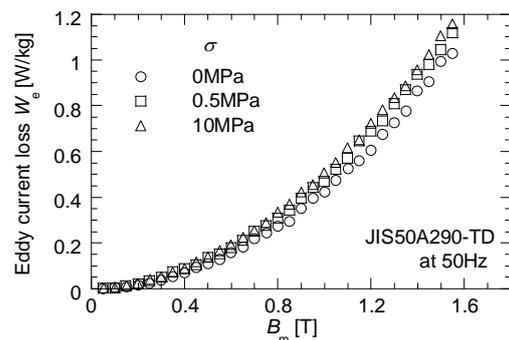
Fig. 8 Effect of the compressive stress in the thickness direction on iron loss properties along the rolling direction of the non-oriented electrical steel sheet (JIS50290). (a) Hysteresis loss W_h at 50 Hz. (b) Eddy current loss W_e at 50 Hz.

傾向が強い結果が得られた。今回測定を行った10MPa以下では、圧縮応力によって導電率は変化しないことが測定により確認されたため、これらの増加は異常渦電流損の増加に起因すると考えられるが、詳細については今後更なる研究が必要である。

35A300の電磁鋼板に関しても同様の測定を行ったが、50A290の測定結果と同様の特性がえられた。また、圧延方向から30度、60度方向の比透磁率および鉄損特性の測定も行ったが、30度、60度ともに圧延方向と直角方向の特性の間の特性を示す結果が得られた。以上から、無方向性電磁鋼板の厚さ方向に圧縮応力が印加されたときの比透磁率の異方性およびヒステリシス損、渦電流損の異方性を詳細に明らかにした。



(a)



(b)

Fig. 9 Effect of the compressive stress in the thickness direction on iron loss properties along the transverse direction of the non-oriented electrical steel sheet (JIS50290). (a) Hysteresis loss W_h at 50 Hz. (b) Eddy current loss W_e at 50 Hz.

(3)得られた測定結果をもとに、低損失な電磁鋼板の積層固定の方法について検討 直角方向に励磁されている箇所よりも圧延方向に励磁されている箇所の方が、厚さ方向の圧縮応力が印加されたときの損失増加が大きいことが測定結果より明らかになり、直角方向に励磁される箇所でボルト締めやバンド締めを行うことで、損失増加を防げる可能性を示唆した。

本研究では、これまで世界中でほとんど知られていなかった、無方向性電磁鋼板の厚さ方向圧縮応力下での磁気特性および鉄損特性を明らかにし、電気機器の設計に重要な設計指針を与えることが出来た。今後の課題として、これらの詳細な測定結果を数値解析に反映させることで、積極的に応力コントロールを用いて、低損失な電気機器の設計を行い、実機を試作することにより検証することである。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① Daisuke Miyagi, Yutaro Aoki, Masanori Nakano, Norio Takahashi, “Effect of compressive stress in thickness direction on iron losses of non-oriented electrical steel sheet,” to be published in *IEEE Transactions on*

Magnetics, vol.46, 2010, 査読有

[学会発表] (計5件)

- ① Daisuke Miyagi, “Effect of compressive stress in thickness direction on iron losses of non-oriented electrical steel sheet,” 11th joint MMM-INTERMAG Conference, 2010.1.22, Washington, DC, USA
- ② 青木雄太郎, “厚さ方向圧縮応力印加時の無方向性電磁鋼板の磁気特性,” 第33回日本磁気学会学術講演会, 2009.9.14, 長崎市
- ③ 青木雄太郎, “厚さ方向の圧縮応力が無方向性電磁鋼板の磁気特性に及ぼす影響,” 電気学科マグネティクス研究会, 2009.7.15, 金沢市
- ④ Daisuke Miyagi, “Effect of compressive stress in thickness direction on magnetic properties of electrical steel sheet,” IEEE International Magnetics Conference 2009 (INTERMAG Conference 2009), 2009.5.7, Sacramento, California, USA
- ⑤ 青木雄太郎, “無方向性電磁鋼板の厚さ方向圧縮応力下磁気特性の測定,” 平成21年度電気学会全国大会, 2009.3.19, 札幌市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮城 大輔 (MIYAGI DAISUKE)

岡山大学・大学院自然科学研究科・助教

研究者番号：10346413