

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：17701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820105

研究課題名(和文)低損失モータ用鉄心の応力ベクトル磁気特性制御のための誘導加熱処理技術の開発

研究課題名(英文)Development of Induction Heating Technique for controlling Stress Vector Magnetic Properties of Core Material for Low Loss Motor

研究代表者

甲斐 祐一郎(Kai, Yuichiro)

鹿児島大学・理工学域工学系・准教授

研究者番号：50595436

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高効率モータの開発のために、誘導加熱処理を用いた鉄心材料の応力ベクトル磁気特性を制御技術の開発を目指す。まず、モータ鉄心の局所部を加熱するために円筒型磁束収束板を用いた加熱コイルを作製する。次に、モータ鉄心に誘導加熱処理を施し、その鉄心材料のベクトル磁気特性を明らかにする。これらの結果から、モータ鉄心に誘導加熱処理を施すことによって鉄損が約40%減少することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This research reports new induction heating technique to control stress vector magnetic property of motor core materials for developing high efficiency motor. At first a new heating coil, which is used cylindrical magnetic flux concentration plate is made by using in order to heat the local part of the motor core. Next, the motor cores are heated by using the new developed heating coil. In addition the magnetic properties of the heated motor core is measured. As these results, it is possible to decrease the magnetic power loss about 40% of the motor core by using the induction heating.

研究分野：磁気工学

キーワード：鉄心材料 モータ 高効率 低損失 応力ベクトル磁気特性 誘導加熱

1. 研究開始当初の背景

近年、モータや変圧器などの電気機器には、高効率・低損失化が要求されており、これらに使用される鉄心材料の評価とその有効活用技術が必要である。一般に、鉄心材料は、磁気ひずみを有し、応力に対して極めて敏感であるため、モータの加工・組立工程で生じた外部応力や残留応力によって磁気特性は劣化することが知られている。著者らは、モータ鉄心内の残留応力を把握するため、X線残留応力測定装置を用いて、残留応力分布測定を行った。図1にモータ鉄心の残留応力分布の測定結果を示す。鉄心内の各位置で、引張・圧縮応力が発生しており、これらの応力が磁気特性の劣化要因であることがわかった。一方、前述した加工・組立工程における応力以外にも、モータ駆動時に交番及び回転磁束条件が発生し、鉄心内の磁気特性は複雑な挙動を示すことが予想される。図2に実機駆動状態におけるモータ鉄心の残留応力と磁束を示す。著者らは、前述した応力とベクトル磁気特性の関係を明らかにするため、応力ベクトル磁気特性評価法を提案し、モータ鉄心の磁気特性を明らかにしてきた。これまでの応力下における磁気特性評価法は、応力印加方向と励磁方向が平行であり、ある特定の条件下の磁気特性しか評価されてこなかった。本手法を用いることによって、実機内に近い様々な応力・磁束条件下のベクトル磁気特性を測定可能であり、鉄心材料の応力磁気異方性や鉄損を正確に把握することが可能である。

一般に、モータの高効率のためには、加工・組立工程で生じたモータ鉄心の残留応力を低減する必要があり、モータ鉄心全体を加熱するひずみ取り焼鈍が用いられている。また、鉄心材料の低損失化法として、磁化容易軸が鋼板面内でランダムもしくは特定の方向を向くような集合組織制御が行われてきた。その他にも、鉄心材料の渦電流損を低減するために、抵抗値の向上、薄板化やレーザー照射やプラズマ照射による磁区細分化など技術が開発されている。

本研究では、これまでの従来技術と大きく異なっており、応力を積極的に利用したモータ鉄心のベクトル磁気特性のコントロールを目指している。その具体的な手法として、誘導加熱技術を導入し、応力ベクトル磁気特性のコントロール技術を確認させる。図3に誘導加熱時に生じる熱・応力・磁場の関係を示す。一般に、誘導加熱とは、金属に交流磁場を印加し内部に渦電流を発生させ、金属を加熱する技術であり、鉄鋼材の焼入れや金属の溶融技術など産業上の幅広い分野で用いられる。誘導加熱を用いて加熱物を急加熱することで、熱応力を発生させることができる。もう一つの特徴として、加熱コイルが作る磁場分布と渦電流が作用し、電磁力が働く作用がある。著者らは、熱応力と電磁力の作用を組み合わせることによって、モータ鉄心の応力印加・緩和を試みる。

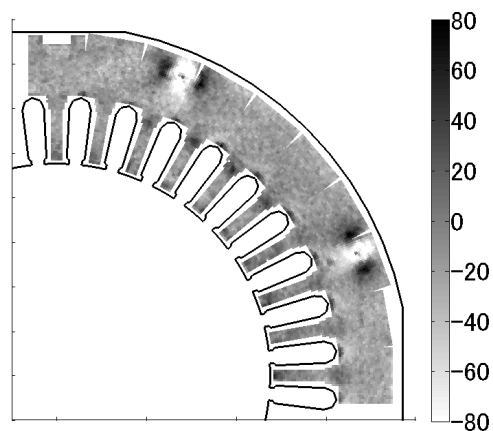


図1 モータ鉄心の残留応力分布

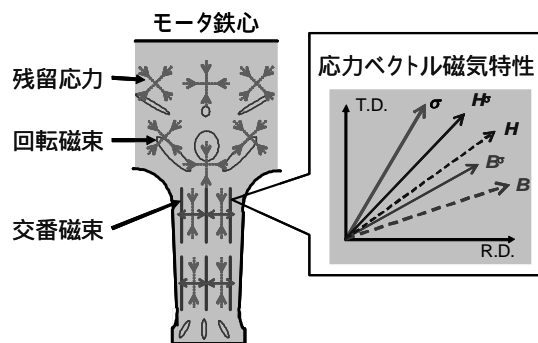


図2 実機駆動状態におけるモータ鉄心の残留応力と磁束

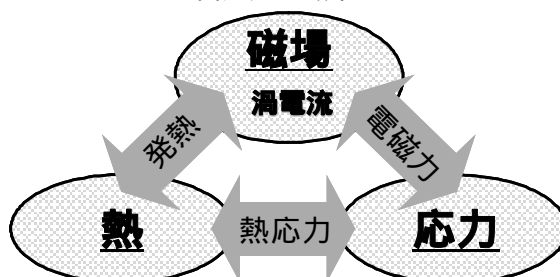


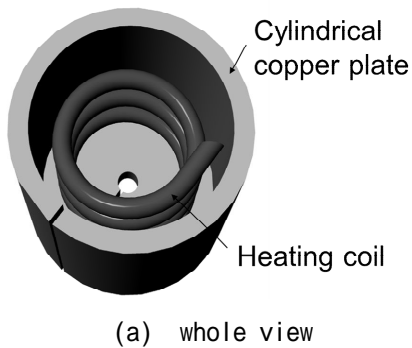
図3 誘導加熱時における熱・応力・磁場の関係

2. 研究の目的

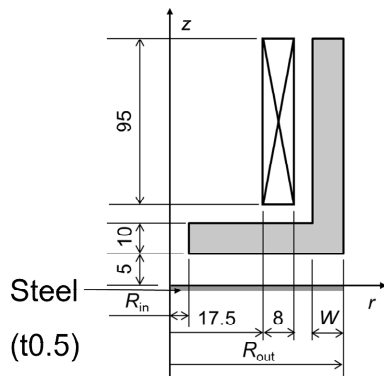
本研究課題において、モータ鉄心の応力ベクトル磁気特性を制御するため、新しい誘導加熱処理技術の開発を目指しており、研究期間内において、以下の課題について取り組んでいく。

- (1) 誘導加熱コイルの設計・開発
- (2) 誘導加熱されたモータ鉄心の応力効果の評価

まず、(1) 誘導加熱コイルの設計・開発においては、数値シミュレーションにてモータ鉄心内の渦電流、熱応力及び電磁力分布を明らかにし、加熱コイル構造を最適化し、コイルを作製する。(2)においては、(1)で作製した誘導加熱コイルを用いてモータ鉄心に誘導加熱処理を施し、ベクトル磁気特性を測定し、



(a) whole view



(b) side view

図4 誘導加熱コイルの構造

その応力効果を明らかにする。さらに、誘導加熱処理による応力とベクトル磁気特性の因果関係の解明並びに最適な応力条件を模索する。

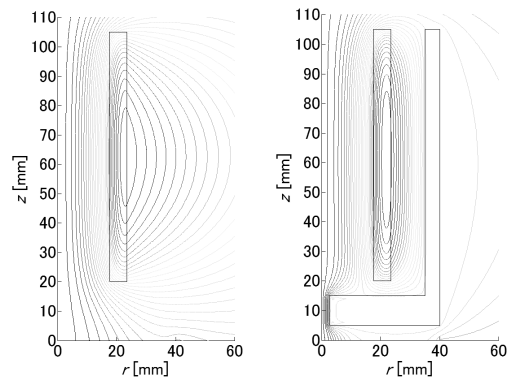
3. 研究の方法

本研究は、モータ鉄心の応力ベクトル磁気特性を制御するための誘導加熱処理技術を開発に取り組む。初年度は、熱・応力・磁場連成数値シミュレーションを用いて、誘導加熱時におけるモータ鉄心内に渦電流、熱応力及び電磁力を評価し、誘導加熱コイル構造を最適化する。この際、鉄心内の渦電流を制御するために、円筒型磁束収束板を用いた新たな加熱コイルを作製する。次年度以降は、初年度作製した誘導加熱コイルを用いて、モータ鉄心に誘導加熱処理を施し、ベクトル磁気特性を測定し、その応力効果について詳細な検討を行う。さらに、誘導加熱によって生じた応力とベクトル磁気特性の因果関係を明らかにし、その知見を踏まえた上で、最適な応力条件について模索し、モータ鉄心の高効率・低損失化を図る。

4. 研究成果

(1) 誘導加熱コイルの設計

図4に加熱コイルの構造を示す。図4(a)に示すように、加熱コイルは円筒型磁束収束板の中に挿入されている。図4(b)に円筒型磁束収束板とコイルの断面と寸法を示す。円筒型磁束収束板には、スリットと穴が設けられている。磁場中に磁束収束板を置いた場合、



(a) Without plate (b) With plate

図5 円筒型磁束収束板有無における磁束線分布の比較

収束板内に磁束を妨げる方向に渦電流が発生する。スリットがなければ、渦電流は導体全体で同じ方向に渦電流が流れる。一方、スリットを設けることによって、磁束収束板内側と外側では渦電流の流れる方向が異なる。その結果、渦電流によって外側部分では磁束を減少させるような磁束が発生し、内側部分では磁束を強めあうように磁束が発生し、外部の磁束と同方向になるため、磁束収束板の内側に磁束が集中する。さらに、磁束収束板構造を円筒型構造にすることによって、加熱コイルの漏れ磁束が減少し、局所部に渦電流密度を向上させることができる特徴を持つ。

図5に加熱コイルのみと円筒型磁束収束板を用いた加熱コイルの磁束線分布を比較した結果を示す。図5に示すように、円筒型磁束収束板を用いることで、磁束線の広がりが大幅に減少し、磁束線が試料中央部に集中していることがわかる。

(2) 誘導加熱コイルの作製

図6に電磁鋼板中央部分の温度の測定方法を示す。円筒型磁束収束板と電磁鋼板の中心が一致するように設置し、サーミスターを用いて電磁鋼板の中心付近の温度を測定した。さらに、加熱時における電磁鋼板の固定と断熱を兼ねて、電磁鋼板と磁束収束板の間に、厚み3mmの断熱材を挟んだ。

誘導加熱電源は、アロニクス社製、型番20/10、出力20kW、周波数5k - 15kHzである。今回用いた誘導加熱時の周波数は、12.5kHzである。また、誘導加熱電源は、加熱コイルに印加する電圧の大きさと時間を調整可能であり、加熱電圧を50 ~ 300V、加熱時間を10 ~ 60sまで変化させた。

図7に印加電圧と加熱時間を変化させたときの温度特性を示す。図7(a)に加熱時間を30s、印加電圧を50 ~ 300Vまで変化させたときの温度特性を示す。印加電圧を増加させることによって、電磁鋼板中心部分の温度が上昇した。本条件では、印加電圧が300Vの時に約270まで上昇することがわかった。図7(b)に印加電圧200Vを一定とし、加熱

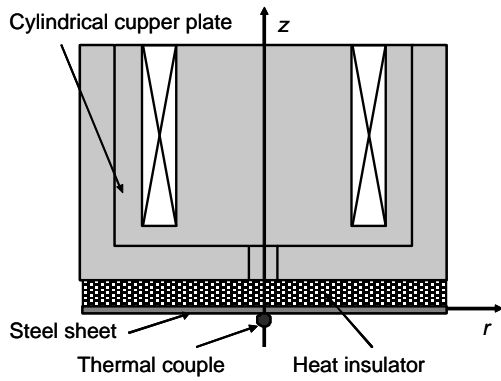
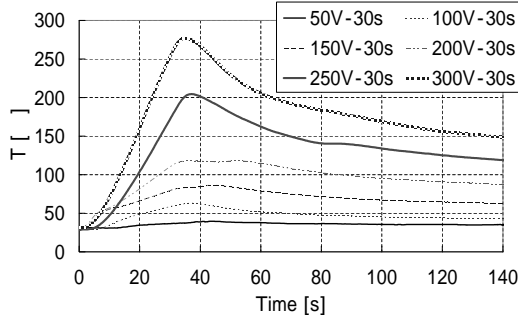
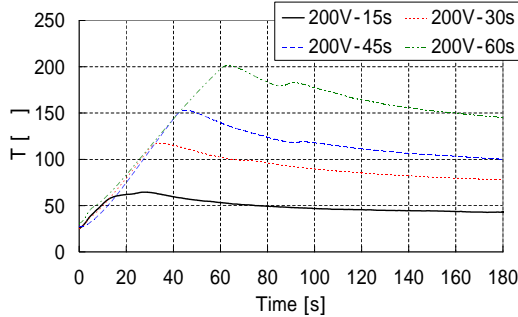


図6 電磁鋼板の温度測定方法



(a) 加熱電圧に対する温度特性



(b) 加熱時間に対する温度特性

図7 印加電圧と加熱時間を変化させた時の温度特性

時間を 15, 30, 45, 60 s と変化させたときの温度特性を示す。加熱時間の増加とともに、温度も上昇しており、本条件では、約 200 まで温度が上昇することがわかった。

(3) 電磁鋼板の誘導加熱処理条件

図8に磁束条件を示す。ベクトル磁気特性測定では、磁束密度ベクトル B の大きさと方向を制御する必要がある。図8(a)に示すように、最大磁束密度を $|B|_{\max}$ 、圧延方向からの磁束密度ベクトルの傾き角度 θ_B を図のように定義し、交番磁束条件下のベクトル磁気特性を測定する。さらに、図8(b)に示すように、最大磁束密度を $|B|_{\max}$ 、軸比 α を図のように定義し、回転磁束条件下のベクトル磁気特性を測定する。まず、誘導加熱処理が無方向性電磁鋼板の磁気異方性へ及ぼす影響を検討するために、回転磁束条件下におけるベクトル磁気特性を測定した。

図9に磁束密度ベクトル軌跡を示す。磁束条件は、 $|B|_{\max} = 0.1 \text{ T}$ 、 $\alpha = 1.0$ である。

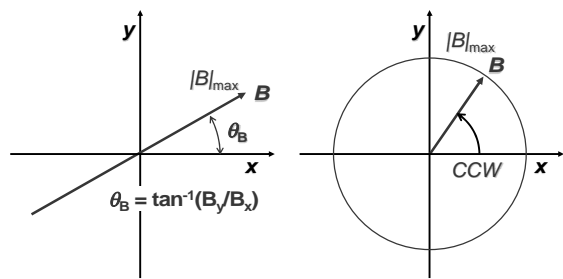


図8 交番及び回転磁束条件

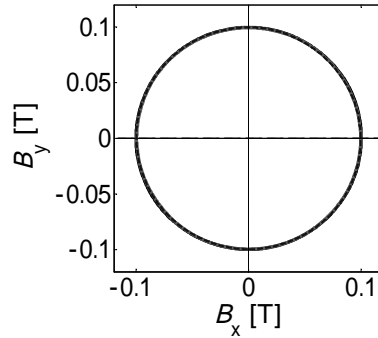
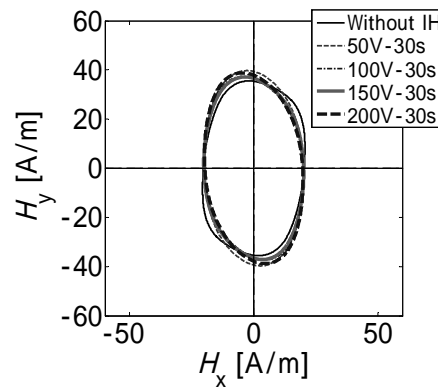
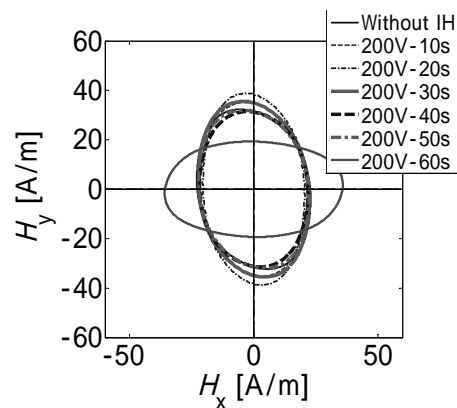


図9 回転磁束下における磁束密度ベクトル軌跡



(a) 加熱時間一定、加熱電圧変化



(b) 加熱時間変化、加熱電圧一定

図10 加熱条件を変化させた時の磁界強度ベクトル軌跡

図10に加熱条件を変化させた時の磁界強度ベクトル軌跡を示す。図10(a)に示すように、印加電圧の増加に伴い、わずかであるが磁界強度ベクトル軌跡が変化した。また、図

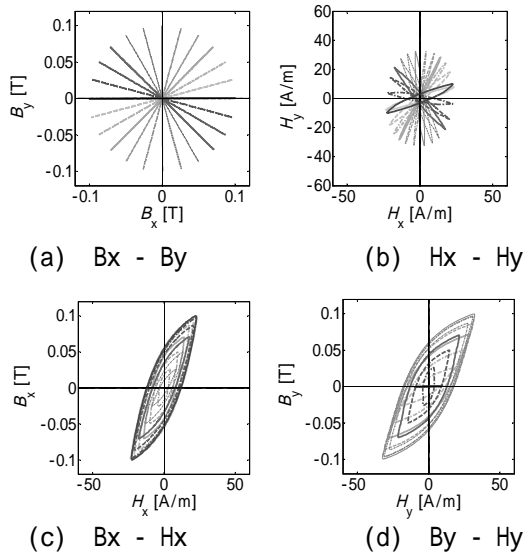


図 11 誘導加熱処理前の無方向性電磁鋼板のベクトル磁気特性

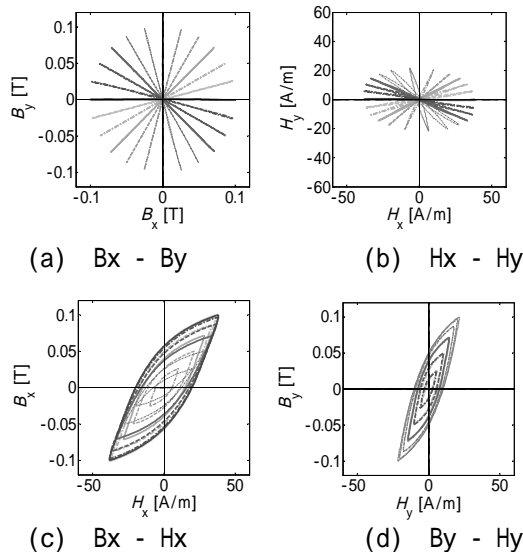
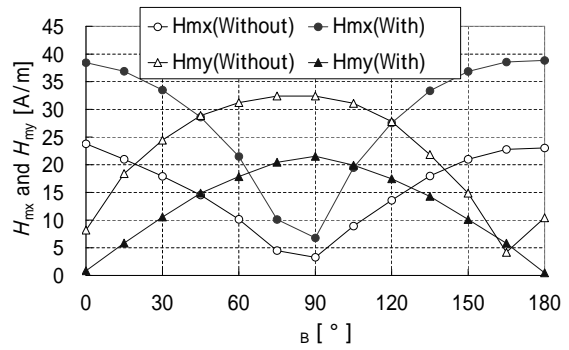


図 12 誘導加熱処理後の無方向性電磁鋼板のベクトル磁気特性

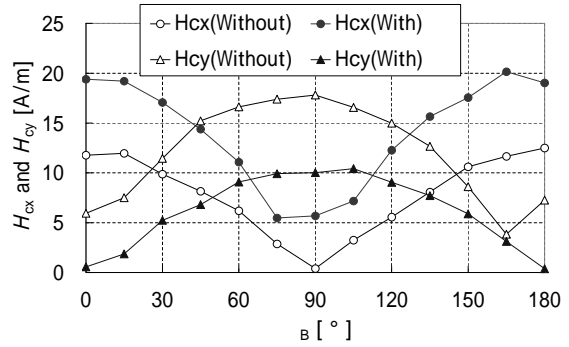
10(b)に示すように、加熱時間が 10 ~ 50 s では磁界強度ベクトル軌跡の変化がほとんど見られないが、60 s のときに磁界強度ベクトル軌跡が大きく変化した。

(4) 電磁鋼板の誘導加熱処理効果

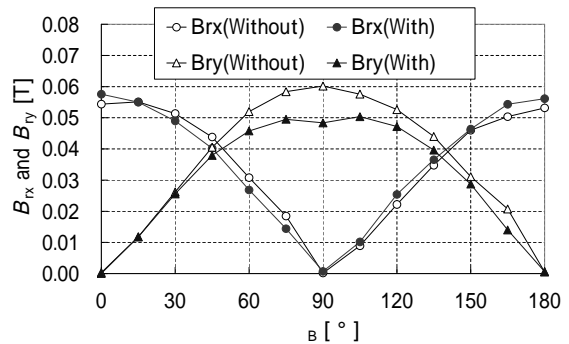
図 11 と図 12 に交番磁束条件下におけるベクトル磁気特性の測定結果を示す。磁束密度条件として、図 11(a)と図 12(a) に示すように、磁束密度ベクトルの大きさを $|B|_{\max} = 0.1$ T とし、 $\theta_B = 0 \sim 180^\circ$ まで変化させた。磁束密度ベクトルの方向を変化させることによって、磁界強度ベクトルの軌跡も変化した。誘導加熱処理前では、 $\theta_B = 0^\circ$ の時と比較して、 $\theta_B = 90^\circ$ の時に磁界強度の値が増加した。一方、誘導加熱処理後においては、誘導加熱処理前の磁気特性と比較して、 $\theta_B = 0^\circ$ の時に磁界強度が増加し、 $\theta_B = 90^\circ$ の時に磁界強度の値が減少した。さらに、誘導加熱を施す



(a) θ_B - H_{mx} and H_{my}



(b) θ_B - H_{cx} and H_{cy}



(c) θ_B - B_{rx} and B_{ry}

図 13 θ_B に対する x および y 成分の磁気特性

ことによって x 成分のヒステリシスループ ($B_x - H_x$) の磁界強度や保磁力の値が増加し、y 成分のヒステリシスループ ($B_y - H_y$) の磁界強度や保磁力の値が減少した。

図 13 に θ_B に対する x 及び y 成分の最大磁界強度、保磁力と残留磁束密度を示す。 θ_B に対して各磁気特性は変化しており、 $\theta_B = 0^\circ$ の時の x 成分の最大磁界強度と保磁力は増加し、圧延方向の磁気特性が劣化したことがわかる。一方、 $\theta_B = 90^\circ$ に近づくにつれて y 成分の最大磁界強度と保磁力は減少しており、誘導加熱処理によって直角方向の磁気特性が改善したことがわかる。また、残留磁束密度は、最大磁界強度や保磁力と比較して、誘導加熱処理の影響が小さい。

図 14 に θ_B に対する磁気損失 W_m と変化率 ϵ_{Wm} を示す。磁気損失は次式にて算出した。

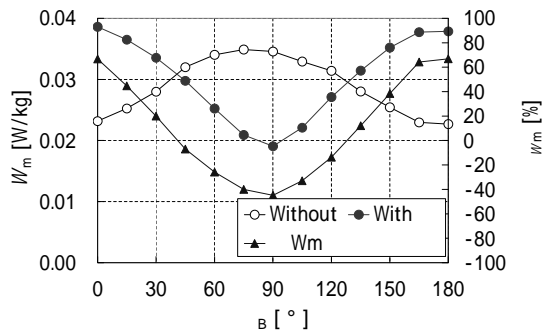


図 14 θ_B に対する磁気損失と変化率

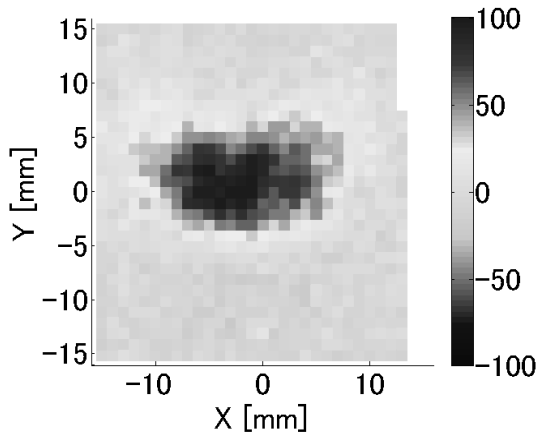


図 15 誘導加熱処理を施した無方向性電磁鋼板の残留応力分布

$$W_m = \frac{f}{\rho} \int_0^{1/f} \left(H_x \frac{dB_x}{dt} + H_y \frac{dB_y}{dt} \right) dt$$

ここで、 f は励磁周波数、 ρ は材料密度である。また、磁気損失の変化率は次式にて算出した。

$$\varepsilon_{W_m} = \frac{W_m(\text{With IH}) - W_m(\text{Without IH})}{W_m(\text{Without IH})} \times 100$$

ここで、 W_m (Without IH) は、誘導加熱処理前の磁気損失の値、 W_m (With IH) は誘導加熱処理後の磁気損失の値である。図 14 に示すように、 θ_B に対して磁気損失も変化しており、 $\theta_B = 90^\circ$ の時に磁気損失の値が約 40% 減少した。一方、 $\theta_B = 0^\circ$ と 180° においては、磁気損失は約 60% 増加した。

以上の結果から、無方向性電磁鋼板に誘導加熱処理を施すことによって、圧延方向の磁気特性は劣化し、直角方向の磁気特性が改善することがわかった。

(4) 電磁鋼板の応力効果

次に、誘導加熱処理材のベクトル磁気特性変化が応力効果によるものかを検討するため、X 線残留応力測定装置を用いて熱処理材表面の残留応力分布を測定した。図 15 に誘導加熱処理を施した無方向性電磁鋼板の残留応力分布を示す。試料表面に引張と圧縮の残留応力が発生していることを明らかにし

た。

実機駆動状態におけるモータ鉄心には様々な磁束が発生し、各場所で鉄損が異なると考えられ、適所適材で鉄損を低減する必要がある。本研究課題の成果を踏まえて、モータ鉄心に最適な局所応力を印加することによって、交番や回転磁束下における鉄損を低減することが可能であり、高効率・低損失機器開発に貢献することができるものと考えられる。

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 2 件)

[1] Y.Kai, S.Yoshida, M. Enokizono, Influence of Stress-Relief Annealing on Magnetic Properties of Motor Cores Using Induced Current Heating Method, Vol. 23, No. 3., pp.469-473 (2015.9)(査読有)

[2] Yuichiro Kai, Yuji Tsuchida, Takashi Todaka, Masato Enokizono : "Three-Dimensional Magnetic Field Analysis for Local Induction Heating of Steel Sheet by Using Magnetic Flux Concentration Plate", Materials Science Forum, Vol. 792, pp.87-92 (2014) (査読有)

〔学会発表〕(計 3 件)

[1] 甲斐祐一郎, 榎園正人, 次世代電磁機器開発に向けた応力下ベクトル磁気特性評価技術, 平成 27 年度電気学会産業応用部門大会, 3-OS1-5, pp. III-53 - III-56, (2015.9.4)

[2] 甲斐祐一郎, 槌田雄二, 榎園正人, 回転機性能向上のための熱処理による低鉄損化技術の提案, 平成 27 年度電気学会産業応用部門大会, 3-OS1-7, pp. III-61 - III-64, (2015.9.4)

[3] 甲斐祐一郎, 榎園正人, 円筒型磁束収束板を用いた誘導加熱処理が無方向性電磁鋼板のベクトル磁気特性へ及ぼす影響, 電気学会研究会資料, マグネティクス研究会, MAG-15-069, pp.31-36 (2015.7.17)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

甲斐 祐一郎 (KAI YUICHIRO)

鹿児島大学・学術研究院理工学域(工学系)・准教授

研究者番号: 50595436