

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：17601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05947

研究課題名(和文) 電動機製造支援システムのためのベクトル磁気特性プローブ

研究課題名(英文) Measurement Probe of Vector Magnetic Property for Production aids of Electric Motors

研究代表者

長田 尚一郎 (Nagata, Shoichiro)

宮崎大学・工学部・助教

研究者番号：20218001

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：電動機の製造工程における磁性材料の劣化による鉄損の増大が問題となっている。そこで製造中の電動機のコア中の磁気特性を計測できるベクトル磁気特性プローブの開発を行った。従来の 50 mm x 50 mm コアで得られた知見を活かし、25 mm x 25 mm のコアを設計/製作し、検討を行った。小型化によって定性的なベクトル磁気特性が得られているが、従来の V-H アナライザで得られた結果と比較すると、鉄損推定など定量的には不十分である。使用している計測制御システムの老朽化が進み、新規システムへの更新ならびに計測システムの再開発が不可避となり、計測制御システム開発に注力せざるを得なくなった。

研究成果の概要(英文)：In order to reduce the iron loss of electrical motors, magnetic characteristics deterioration during producing process is a big problem. Therefore the authors have tried to develop a vector magnetic property probe, which can measure the characteristics of a motor core. For down sizing the probe core, 25 mm x 25 mm cores for the probe are designed and developed by using a know-how obtained from 50 mm x 50 mm cores. With 25 mm x 25 mm core, qualitative magnetic properties are obtained, however, compared with the values measured by V-H analyzer, it is not sufficient for the iron loss estimation. The conventional measurement and control system for magnetic property measurement becomes obsolete, we should develop a new measurement system and software.

研究分野：磁気工学

キーワード：二次元ベクトル磁気特性 磁性材料 特性測定

1. 研究開始当初の背景

2008年1月からスタートした大分県とJSTによる地域結集事業「次世代電磁力応用開発技術の構築」は多大な成果を残して2012年12月に閉幕した。プロジェクトに参加した筆者らの宮崎大学グループは積分型E&Sモデリング有限要素解析の高速化や局所二次元磁気特性測定装置の開発で貢献している。

プロジェクトで明らかになった課題の一つに電動機のさらなる効率化のためには設計支援のみならず製造支援システムの拡充が急務であるということである。電動機の製造工程でケイ素鋼板の磁気特性が次第に劣化することが明らかとなっている。特にケイ素鋼板を金型で打ち抜く工程においてはケイ素鋼板に圧縮/引張/剪断応力が混在した状態で与えられていることが明らかになった。さらに同一のステータ形状を金型で打ち抜いたものとワイヤ放電加工で応力を加えずに切り取ったものを比較した場合、鉄損分布が変化し後者に鉄損の低減が見られることも明らかになっている。このことから我が国の電力機器の国際競争力を維持/飛躍するためには、設計段階のみならず製造工程にも磁性材料の特性を回復/改善する製造支援が必要である。

図1に高機能製造支援評価システムの概念図を示す。電動機のステータやロータの製造工程において磁気特性の劣化が認められた場合、レーザ応力印加装置や低周波誘導加熱焼鈍を用いて磁気特性の回復を図る。その際に問題になるのはどの位置でどのように磁気特性が劣化しているかを知ることである。磁気特性の劣化が正しく評価されないと適切な磁気特性の回復/改善は不可能である。

本研究では電動機中のケイ素鋼板の磁気特性を測定する「ベクトル磁気特性測定プローブ」の開発を行う。金型で打ち抜かれたケイ素鋼板に残留する応力の分布は複雑で、圧縮/引張/剪断の3種類の応力が混在して分布していることがX線応力装置による分析で解っている。これまで圧縮か引張かのどちらかの応力のみが加わった場合の磁気特性の変化は研究されてきたが、混在している場

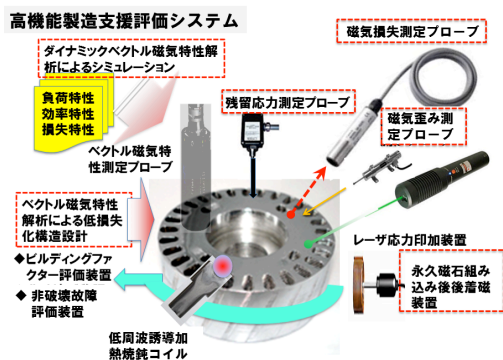


図1. 高機能製造支援評価システム

合や剪断応力の検討が不十分という点も明らかになった。そのため残留応力の分布から磁気特性の劣化を推定することは非常に困難で、特定箇所での磁気特性の劣化を測定できるデバイスが必要である。

2. 研究の目的

変圧器や電動機など電気機器の鉄心材料であるケイ素鋼板の部分的な二次元ベクトル磁気特性を計測する「ベクトル磁気特性測定プローブ」を開発する。電気機器の鉄損を低減させるには製造工程でモータのケイ素鋼板に加わる磁気特性劣化を回復/改善させる**製造支援システム**の導入が有意義である。そのためには内部応力により部分的に生じる磁気特性の劣化を正確に測定できる計測方法が必要である。特に製造工程で使用すること、電動機の複雑な形状に対応できることなどを考慮に入れ、小型のプローブが要求される。4mm x 4mm程度の限定された範囲での測定可能性を探る。図2、図3に従来の研究で4mm x 4mmの範囲を測定するために設計した二次元磁気特性プローブの概略を示す。基本的にはこのプローブを基に当該区間内の二次元磁気特性を測定する改良プローブを開発する。従来のプローブでは微小(高さ0.4mm)の微小ホール素子を用いてHを測定しているが、試料中の10倍以上の値が出ており、測定不能である。

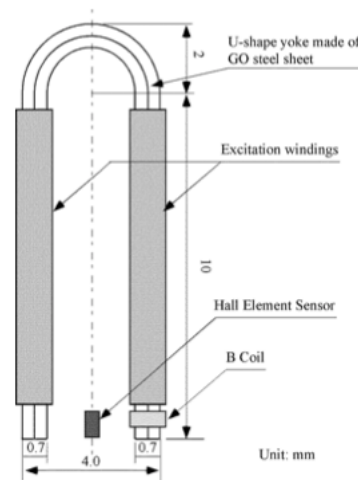


図2 二次元磁気特性プローブ



図3 励磁ヨーク

3. 研究の方法

初年度 (H27) に一次元磁気測定プローブを設計する。測定範囲を 4 mm X 4 mm 程度を目標に磁気特性測定上の問題点を抽出する。プローブの設計のためには三次元有限要素解析による設計支援が必要であるとともに、これまでの研究で明らかになっている磁界強度 H の測定に混入する漏れ磁束の低減化を図る。

平成 28 年度は前年度に得られた知見を応用し、二次元ベクトル磁気特性プローブの設計を行う。X 方向と Y 方向の独立の励磁ヨークを組み合わせるため、一次元とは異なる問題が生じると考えられる。これまでの研究では 50 mm x 50 mm の立体交差コアによって、従来の二次元ベクトル磁気特性測定のパッチマークとなっている V-H アナライザ (岩通) と同等の測定精度が得られることが確認されている。これをより小型化できるかを検討する。

平成 29 年度は設計した一次元磁気測定プローブおよび二次元ベクトル磁気特性測定プローブを実機 (小型誘導電動機のステータ) に適用し、測定を行う。また X 線応力診断装置との比較検討を行い、測定結果の妥当性を吟味する。

4. 研究成果

初年度 (平成 27 年度) は三次元有限要素解析パッケージ FEMAP の契約と納入が遅れたため、2 年目に予定していた二次元ベクトル磁気特性プローブの小型化に関する検討を前倒しした。

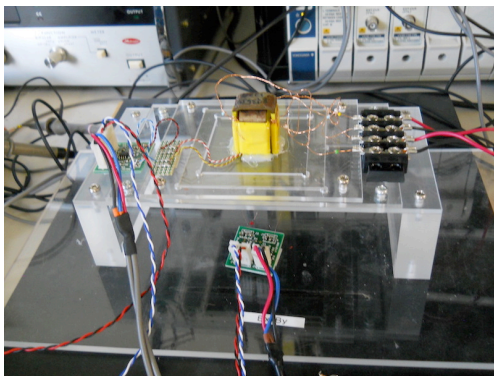


図 4 二次元ベクトル磁気特性プローブ
(25mm コア)

以前開発した 50 mm コアと 5mm 角ダブル H コイルの組み合わせによるプローブでは鉄損の測定にはやや難があるものの、磁気特性測定としては V-H アナライザに比肩する結果が得られている。50 mm コアのノウハウを用いて半分のサイズ 25 mm コアを設計、製作して実験に供した。ダブル H コイルは従来の 5mm 角のものを使用している。試料として 35H330 を用い、同一試料に対して V-H

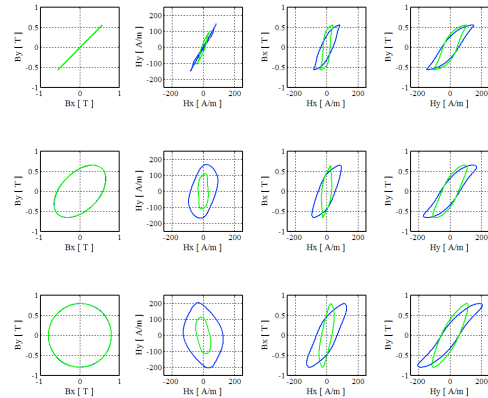


図 5 二次元ベクトル磁気特性

アナライザで測定した結果と比較検討を行った。

図 5 に測定結果を示す。磁束密度 $B = 0.8(T)$ 、傾き角 45° での軸比 0, 0.6, 1 の測定結果である。青で示した特性が 25mm コアでの測定結果であり、緑の特性が V-H アナライザによる結果である。全体的に磁界強度 H が大きめに測定されており、ダブル H コイルが励磁コアからの漏れ磁束を拾っていることが予想される。これは鉄損測定に供するには不十分な精度である。

試料と励磁コアの間にはケイ素鋼板表面に施された絶縁層 (厚さ: 数 μm) があるため、その厚さがエアギャップとなる。図 6 に二次元有限要素解析による解析結果を示す。

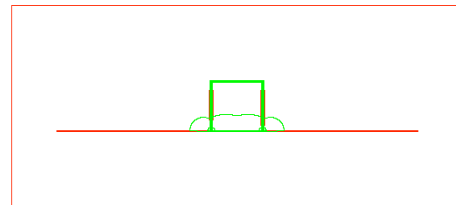


図 6 漏れ磁束分布

エアギャップとして、わずか $3 \mu m$ を設定しているのであるが、漏れ磁束が発生していることがわかる。エアギャップなしで解析した結果では図 6 のような漏れ磁束は発生していない。試料表面の絶縁層は除去すると磁気特性が大きく変化することが報告されており、絶縁層によるエアギャップは除去するわけにはいかない。漏れ磁束を拾わないためには

1. より小型のダブル H コイルを使用する
2. 漏れ磁束の小さいコア形状を設計するなどの打開作が考えられる。

2 年目 (平成 28 年度) 以降、予定していた大学院生の配属が変更になるなどの理由で研究代表者だけで研究を遂行せざるをえない状況になり、研究方法も変わることになった。

現状で二次元ベクトル磁気特性測定装置に使用している横河電機の計測ステーション WE-3000 の廃盤とメンテナンスの終了に伴い、計測／制御方法の改良が困難になってきた。OS やミドルウェアも老朽化 (OS: Windows XP, MATLAB 2006) しており、すでにソフトウェアアップデートでは対応ができなくなっている。そのため、二次元ベクトル磁気特性測定システムならびに測定制御ソフトウェアの更新を余儀なくされた。現状では計測制御システムの候補として Digilent 社の Analog Discovery 2 (A/D, D/A とも 2ch, 14bit 100MSps) (図7) を選定し、ソフトウェア開発を進めている。本機は小型で安価ながら従来の WE-3000 をはるかに凌ぐ性能で、今後電気自動車 (EV) 用

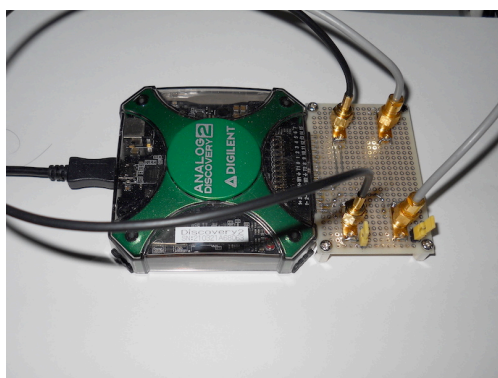


図7 Analog Discovery 2

に必要とされる高速回転モータに使用する磁性材料の測定にも充分対応可能であると判断している。

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] S. Nagata, M. Numachi, Eddy Current Non-Destructive Evaluation for Healthiness of Radiator Structure, IEEE Transactions on Magnetics, (査読有り), Vol. 53, pp. 1 - 4, 2017

〔学会発表〕 (計 4 件)

[1] 長田、沼地、渦電流非破壊検査の減肉診断と厚み計測への応用、第29回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム、2017. 5

[2] S. Nagata, M. Numachi, Eddy Current Non-Destructive Evaluation for Healthiness of Radiator Structure, INTERMAG 2017 Conference, 2017. 4

[3] 長田、沼地、減肉資料の渦電流非破壊検

査の開発、MAGDA コンファレンス in 桐生、2016. 11

[4] 長田、沼地、放熱フィン構造の健全性評価のため渦電流非破壊検査、第28回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム、2016. 5

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長田 尚一郎 (NAGATA, Shoichiro)
宮崎大学・工学部・助教
研究者番号：20218001

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()