

令和 2 年 4 月 30 日現在

機関番号：57501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06480

研究課題名(和文) 広い速度域での高出力高効率モータ実現のためのビルディングファクター評価装置の構築

研究課題名(英文) Construction of building factor evaluation system for realizing high-power and high-efficiency motor in wide speed range

研究代表者

岡 茂八郎 (OKA, Mohachiro)

大分工業高等専門学校・その他部局等・客員教授

研究者番号：80107838

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：この研究の目的は、「高速のビルディングファクター評価装置」の構築とステータコアの正確な鉄損が評価できる「ステータコア励磁法」の開発である。その結果、広い速度域で利用されるモータのステータコアの評価用に高速AD、DAコンバータを備えた「高速ビルディングファクター評価装置」を構築した。この装置に汎用PWMインバータの組み込みを行い、PWM励磁下でのステータコアの評価を可能にした。さらに、回路を工夫して専用PWMインバータの初期的な試作を行った。また、異なった仕様のステータコアに適用できるステータ励磁法として「巻き線励磁法」を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この研究の学術的意義は、従来に比べて高速なAD、DAコンバータ、高速パワーアンプ等をソフトウェアで統合し「高速のビルディングファクター評価装置」を構築し、「巻線励磁法」を提案し、モータの高速パワー密度化に資することができたことである。これによって、高速高パワー密度モータのステータコアの磁気特性評価が可能となった。また、社会的意義は、環境問題や自動運転等の要求から各種動力の電動化が求められているが、その動力源としての高速高パワー密度モータの開発や評価にこの研究で構築した「高速のビルディングファクター評価装置」が貢献できることとなったことである。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research was to build a "high-speed building factor evaluation system" and to develop a "stator core excitation method" that can accurately evaluate the iron loss of the stator core. As a result, a "high-speed building factor evaluation system" equipped with a high-speed AD / DA converter for evaluating the stator core of a motor used in a wide speed range was constructed. By incorporating a general-purpose PWM inverter in this system, it was possible to evaluate the stator core under PWM excitation. Furthermore, the circuit was devised and an initial trial production of a dedicated PWM inverter was performed. We also developed the "winding excitation method" as a stator excitation method that can be applied to stator cores with many different specifications.

研究分野：計測工学

キーワード：回転機 電磁鋼板 ステータコア 鉄損 渦電流損 ビルディングファクター

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

近年、高速高効率高パワー密度モータの開発の社会的要求が強いことから、それを実現するモータの主要部品であるステータコアの鉄損を低減する技術の開発が大いに期待されている。従来から商用電源で用いられる産業用誘導機を対象にしたビルディングファクター問題の解明が徐々に行われており、「低速正弦波励磁下のビルディングファクター評価装置」がすでに実現している。しかし、近年は、モータを高速回転化し高パワー密度化するために励磁周波数を高くすることが多くなっている。また、モータの制御性の向上や制御系とモータを合わせた効率を向上させるために PWM インバータで駆動することが多くなっている。そこで、このような PWM 波で駆動されるステータコアの鉄損評価は従来の技術では困難なことが多いため、新しい技術の導入による評価法の開発が強く望まれている。さらに、高速高効率高パワー密度モータに用いられる複雑な形状の各種形状のステータコアの磁気特性を評価する励磁器の開発も強く望まれている。

### 2. 研究の目的

この研究では、以下の3つの技術的課題を達成することを目的とした。第1に、従来の「商用正弦波励磁下のビルディングファクター評価装置」を、高速 AD、DA コンバータ、さらに、高速パワーアンプを用いることによって高い励磁周波数の正弦波でステータコアの鉄損を評価できる「高速のビルディングファクター評価装置」を構築することである。第2に、複雑な形状をしたステータコアの正確な鉄損が評価できるように励磁するステータコア励磁法を開発することである。第3に、この「高速のビルディングファクター評価装置」と「ステータコア励磁法」によって各種形状のステータコアの磁気特性を PWM インバータ励磁下で把握し、新しいモータの開発に資することのできる「高速ビルディングファクター評価装置」の構築することである。

### 3. 研究の方法

#### 3. 1 研究方法の概略

この目的を達成するために、以下の手順で研究を行った。第1に、現有の「高速 AD、DA コンバータを備えた磁気特性測定装置」の駆動プログラムの改良と実機形状のステータコアの各種励磁法の開発を行った。第2に、正弦波励磁のみが可能であった「高速 AD、DA コンバータを備えた磁気特性測定装置」に PWM 波励磁が可能となる様に汎用 PWM インバータを組み込み、PWM 励磁下のリングコアやステータコアの磁気特性を評価できるシステムを開発した。第3に、モータ制御に用いる汎用 PWM インバータは電磁鋼板等の磁気特性測定には不向きなことが分かったため、磁気特性測定に特化した「IGBTを使用した初期試作の専用 PWM インバータ」の製作を行った。さらに、並行して、各種形状のステータコアの磁気特性を評価する「ステータコア励磁法」を構築した。以下、この4つの研究内容を順を追って詳細に説明する。

#### 3. 1. 1 駆動プログラムの改良とステータ励磁法の開発

##### 1) 駆動プログラムの改良

現有の「高速 AD、DA コンバータを備えた磁気特性測定装置」の駆動プログラムの以下の点を改良した。第1点は、測定中に試料に残留磁気が残らないように励磁電圧を徐々に変化させるズーム励磁法を取り入れた。また、第2点は、メモリの解放などを細かにプログラムすることによって限定的ではあるが連続測定が可能なプログラムとした。この2点の改良によりデータ収集の精度や速度を上げることができた。

##### 2) 各種励磁法の開発

商用周波数で駆動される誘導機のステータコアの励磁法は「励磁用内挿コア法」と、「ステータ巻き線励磁法」が主なものであった。しかし、小型で高速高効率高パワー密度なモータにおいては、ティースの数が奇数な場合があるなどそれぞれのステータコアの形状に対応した励磁法を考案する必要があったため、「双外側励磁法」や「内側励磁法」、「巻き線励磁法」などを考案・製作した。

#### 3. 1. 2 汎用 PWM インバータの組み込みと評価

従来の「正弦波励磁高速 AD、DA コンバータを備えた磁気特性測定装置」を基礎として高速 DA コンバータと高速パワーアンプを用いてプログラムで模擬 PWM 波を生成する「模擬 PWM 波励磁磁気特性評価装置」を製作した。次に、市販されているモータ制御用の汎用 PWM インバータを「高速 AD、DA コンバータを用いた磁気特性測定装置」に組み込み「汎用 PWM インバータ励磁磁気特性評価装置」を構築した。

#### 3. 1. 3 専用 PWM インバータの開発と評価

汎用 PWM インバータは、モータの制御を行うことが目的のインバータであるため磁気測定に

用いるには欠点があった。そこで、IGBTを用いた専用PWMインバータの励磁装置の初期版を試作した。

### 3. 2 試料

Fig.1 にこの実験に用いたリングコアの寸法と巻き線終了後の写真を示す。リングコアは、0.08mm厚極薄電磁鋼板製(0.08mm\_Ring)、0.35mm厚電磁鋼板製(0.35mm\_Ring)の2種を主に用いた。Fig.2 にこの実験で用いた模擬ロータを装備しているステータコアの寸法と写真を示す。また、ステータコアは、0.08mm厚極薄電磁鋼板製(0.08mm\_Core)、0.35mm厚電磁鋼板製(0.35mm\_Core)の2種を用いた。ステータコアの積み厚は、12.4mmであり、ステータコアと模擬ロータ間のギャップは0.1mmである。

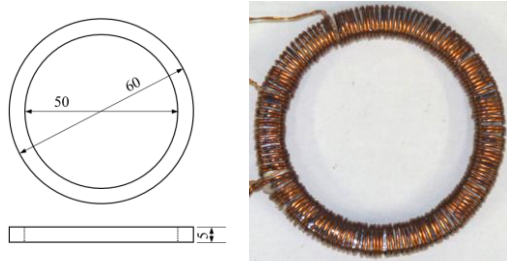


Fig. 1. Dimensions and photograph of the ring core made of an electrical steel sheet. (Unit=mm)

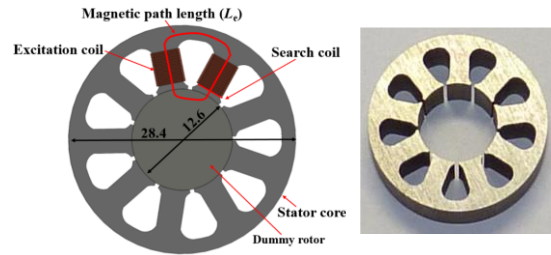


Fig. 2. Dimensions and photograph of the stator core for a small, high-speed, and high power density motor.

### 3. 3 高速ビルディングファクター評価装置

#### 3. 3. 1 汎用PWM励磁高速ビルディングファクター評価装置

Fig.3 に「高速ビルディングファクター評価装置」に汎用PWMインバータやプログラムで出力電圧を設定可能な可変電圧電源を組み込んだ「汎用PWM励磁高速ビルディングファクター評価装置」のブロック図を示す。

#### 3. 3. 2 専用PWM励磁高速ビルディングファクター評価装置

汎用PWMインバータの問題点を解決するために初期的に試作した専用PWMインバータを備えたビルディングファクター評価装置のブロック図をFig.4に示す。この専用PWMインバータを用いた評価システムでは、変調波周波数 $f_m$  [Hz]、搬送波周波数 $f_c$  [Hz]、変調率 $m$ を外部の任意信号発生器で設定する。

### 3. 4 各種励磁法

ここでは、「巻き線励磁法」の概要と巻き線励磁法時の励磁磁束分布の2D-FEM解析結果を示す。Fig.5 に実機の励磁コイルを使用した巻き線励磁法の構成図を示す。励磁用の巻き線は、モータを駆動するための巻き線を利用した。2個の励磁巻き線による磁束がFig.5 図中の主経路となるように励磁した。有効磁路長 $L_e$ は、主磁路の長さとした。また、Fig.6 に磁束分布の2D-FEM解析結果を示す。

## 4. 研究成果

### 4. 1 リングコアを試料とした場合

#### 4. 1. 1 正弦波励磁下での磁気特性

Fig.7 に0.08mm\_Ringと0.35mm\_Ringの場合の $B_{exmax}=1.0$  T、 $f_{ex}=50$ Hzおよび2kHzの時のBH曲線を示す。 $f_{ex}=2$ kHzの高い励磁周波数においてこの装置はBH曲線を正確に評価できている。

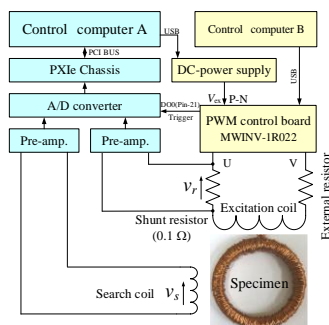


Fig.3. Block diagram of the measurement system under general purpose PWM excitation.

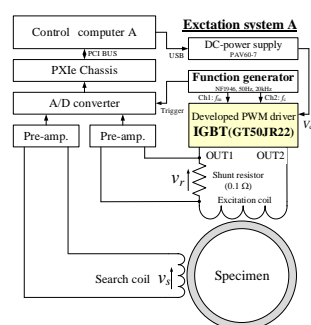


Fig.4. Block diagram of the measurement system under exclusive use PWM excitation.

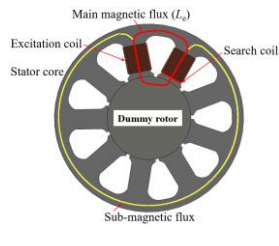


Fig. 5. Arrangement of the stator winding excitation method.

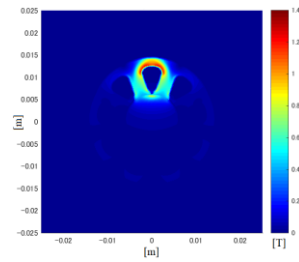
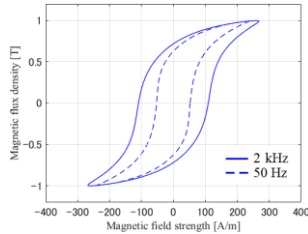
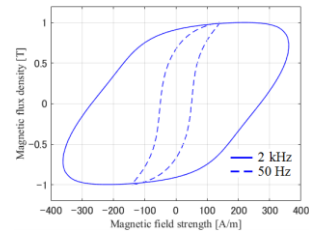


Fig.6. Magnetic flux density distribution of the stator winding excitation method analyzed by the 2D FEM.



(a) 0.08mm\_Ring.

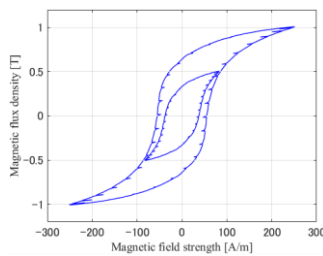


(b) 0.35mm\_Ring.

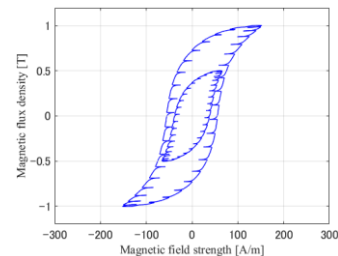
Fig. 7.  $B$ - $H$  curves of the 0.08mm\_Ring and the 0.35mm\_Ring under the sinusoidal wave excitation ( $B_{\text{exmax}}=1.0\text{T}$ ,  $f_{\text{ex}}=50\text{Hz}$ , and  $2\text{kHz}$ ).

#### 4. 1. 2 模擬 PWM 波励磁下での磁気特性

Fig.8に0.08mm\_Ringと0.35mm\_Ringの場合の $B_{\text{exmax}}=0.5\text{T}$ および $1.0\text{T}$ ,  $f_m=50\text{Hz}$ および $f_c=2\text{kHz}$ ,  $m=0.8$ の時の $BH$ 曲線を示す。この装置は模擬 PWM 励磁下の $BH$ 曲線を正確に評価することができる。



(a) 0.08mm\_Ring.



(b) 0.35mm\_Ring.

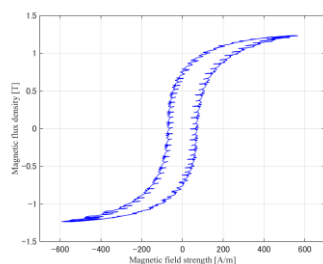
Fig. 8.  $BH$  curves of the 0.08mm\_Ring and the 0.35mm\_Ring under the simulated PWM wave excitation ( $m=0.8$ ,  $B_{\text{exmax}}=0.5$  and  $1.0\text{T}$ ,  $f_m=50\text{Hz}$ ,  $f_c=2\text{kHz}$ ).

#### 4. 1. 3 汎用 PWM インバータ励磁下の磁気特性

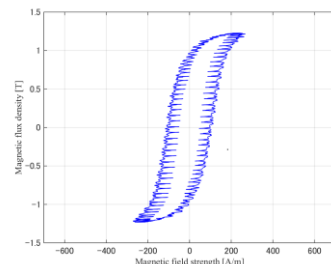
Fig.9に0.08mm\_Ringと0.35mm\_Ringの $f_m$ ,  $f_c$ ,  $m$ ,  $B_{\text{ex1st}}$ がそれぞれ $200\text{Hz}$ ,  $10\text{kHz}$ ,  $0.6$ ,  $1.2\text{T}$ の場合の $B$ - $H$ 曲線を示す。

#### 4. 1. 4 試作専用 PWM インバータ励磁下の磁気特性

Fig.10に $f_m$ ,  $f_c$ ,  $m$ ,  $B_{\text{exmax}}$ はそれぞれ $50\text{Hz}$ ,  $2\text{kHz}$ ,  $0.4$ ,  $1.2\text{T}$ の場合の初期試作専用 PWM インバータ励磁下の $BH$ 曲線を示す。している。キャリアに起因するマイナーループが発生し、試作専用 PWM インバータ励磁の典型的な $BH$ 曲線となっている。Fig.11に $m$ を $0.4$ ,  $0.6$ ,  $0.8$ としたときの、正弦波励磁時の鉄損と試作専用 PWM 励磁下の鉄損との関係を示す。



(a) 0.08mm\_Ring.



(b) 0.35mm\_Ring.

Fig.9.  $B$ - $H$  curves ( $f_m=200\text{Hz}$ ,  $f_c=10\text{kHz}$ ,  $m=0.6$ ,  $B_{\text{ex1st}}=1.2\text{T}$ ).

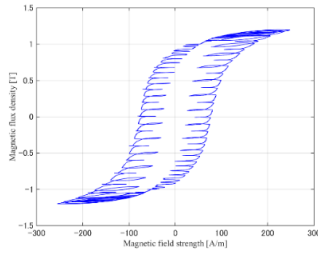


Fig.10 The  $B$ - $H$  curve under designed and manufactured PWM inverter excitation ( $f_m=50\text{Hz}$ ,  $f_c=2\text{kHz}$ ,  $m=0.4$ ,  $B_{\text{exmax}}=1.2\text{T}$ ).

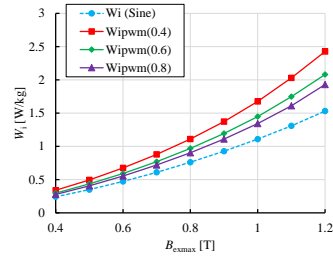


Fig.11 Relationship between iron loss and modulation ratio under designed and manufactured PWM inverter excitation ( $f_m=50\text{Hz}$ ,  $f_c=2\text{kHz}$ ).

#### 4. 1. 5 ステータコアを試料とした場合

Fig.12 に巻き線を施したステータコア(0.08mm Core)の  $BH$  曲線を「巻き線励磁法」を用いて正弦波励磁下で測定した結果を示す。磁路を構成するステータコアと模擬ロータの間に 0.1mm のギャップがあるため、 $f_{\text{ex}}$  が 50Hz, および、1kHz の場合とも、細く傾いている。

Fig. 13 に  $f_m=200\text{ Hz}$ ,  $f_c=5\text{ kHz}$ ,  $B_{\text{ex1st}}=1.2\text{ T}$ ,  $m=0.6$  の場合の、0.08mm\_Core の汎用 PWM インバータ励磁下の  $BH$  曲線を示す。

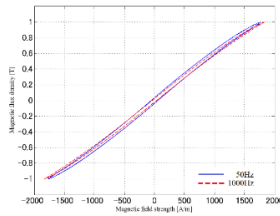


Fig.12  $BH$  curves of the 0.08mm\_Core with windings measured by the winding excitation method ( $B_{\text{exmax}}=1.0\text{T}$ ,  $f_{\text{ex}}=50\text{Hz}$  and  $1000\text{Hz}$ ).

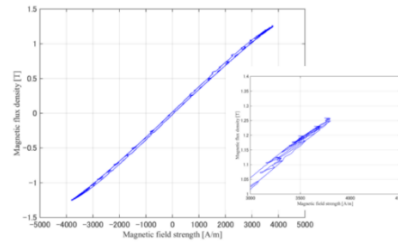


Fig.13.  $BH$  curves of the 0.08mm\_Core under PWM wave excitation ( $f_m=200\text{ Hz}$ ,  $f_c=5\text{ kHz}$ ,  $B_{\text{ex1st}}=1.2\text{ T}$ , and  $m=0.6$ ).

#### 4. 2 研究成果のまとめ

この研究の目的は、以下の2つの技術的課題を達成することであった。第1は、従来の「商用正弦波励磁下のビルディングファクター評価装置」を、高速 AD, DA コンバータ、さらに、高速パワーアンプを用いることによって高い励磁周波数の正弦波でステータコアの鉄損を評価できる「高速のビルディングファクター評価装置」を構築することである。第2に、複雑な形状をしたステータコアの正確な鉄損が評価できるように励磁手法(ステータコア励磁法)を開発することである。また、第3に、PWM 波励磁時のステータコアの鉄損を評価できるように「高速のビルディングファクター評価装置」を改良することである。3年間の研究の結果、以下の成果を得た。

- ① 従来の商用周波数で使用される誘導機のステータコアを対象とした磁気特性評価装置を出発点として、広い速度域で用いられる高出力高効率モータのステータコアを対象とし、高速 AD, DA コンバータを備えた「高速ビルディングファクター評価装置」を構築した。
- ② 構築した「高速ビルディングファクター評価装置」を PWM 励磁下でのステータコアの磁気特性の評価を可能とするために駆動プログラムの改良や汎用 PWM インバータの組み込みを行った。さらに、汎用 PWM インバータでは不足する機能や特性の改良のための専用 PWM インバータの初期的な試作を行った。
- ③ 広い速度域で用いられる高出力高効率モータのステータコアの磁気特性を評価するために各種ステータ励磁法を考案、製作し、その利点や欠点を評価した。
- ④ 各種ステータ励磁法の中では、「巻き線励磁法」が手軽にステータコアの磁気特性を計測できた。
- ⑤ 試作した「高速ビルディングファクター評価装置」は、この研究で用いた試料の範囲内では正弦波励磁時は  $f_{\text{ex}}$  は 2kHz,  $B_{\text{exmax}}$  は 1.2T 程度まで、PWM 波励磁下では、 $f_m$  は 200Hz,  $f_c$  は 20kHz,  $B_{\text{exmax}}$  は 1.2T 程度まで測定可能であった。
- ⑥ 試料として 0.08mm 厚の極薄電磁鋼板を用いたリングコアやステータコアを用いたが、極薄電磁鋼板の高速高出力高効率モータのコア材は、特に有効であることを示した。

以上のように、この科研費による研究の目的を達成することができた。しかし、更なるキャリア波や変調波の高周波化に対応できる「より高速なビルディングファクター評価装置」の開発も必要であるとの課題も明確となった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 M. Oka, and M. Enokizono	4. 巻 23
2. 論文標題 Magnetic Property Evaluation of the High-Speed Motor Stator Core Under Sinusoidal and Pulse Width Modulation Wave Excitation using Stator Winding Excitation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics	6. 最初と最後の頁 458-463
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 M. Oka, M. Enokizono	4. 巻 69
2. 論文標題 Evaluation of Frame-Induced Compressive Stress on the Magnetic Properties of Stator Cores Using the Excitation Inner Core Method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Electrical Engineering	6. 最初と最後の頁 477-480
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2478/jee-2018-0080	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 M. Oka, M. Enokizono, and D. Wakabayashi	4. 巻 -
2. 論文標題 Iron Loss Evaluation of Ultrathin Electrical Steel Sheet for High-speed Motor Stator Core under PWM Excitation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2018 XIII International Conference on Electrical Machines	6. 最初と最後の頁 1240-1245
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ICELMACH.2018.8507198	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 M. Oka, M. Enokizono, Y. Mori, M. Yamazaki	4. 巻 8
2. 論文標題 Magnetic characterization of the stator core of a high-speed motor made of an ultrathin electrical steel sheet using the magnetic property evaluation system	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Advances 8	6. 最初と最後の頁 47603
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.4993502	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 清武 博文, 岡茂八郎, 榎園正人, 若林大輔
2. 発表標題 電磁鋼板製コアの磁気特性測定用PWMインバータ励磁法の検討
3. 学会等名 電気学会マグネティックス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡茂八郎, 清武 博文, 榎園正人, 若林大輔
2. 発表標題 汎用PWMインバータ励磁下の電磁鋼板製小型リングコアの鉄損評価
3. 学会等名 第28回MAGDAコンファレンス in 大分
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡茂八郎, 清武 博文, 榎園正人, 若林大輔
2. 発表標題 PWMインバータ励磁下の電磁鋼板製リングコアの鉄損測定法の検討
3. 学会等名 電気学会マグネティックス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Oka, M. Enokizono, D. Wakabayashi, Hirofumi Kiyotake
2. 発表標題 Iron Loss Evaluation for a Small High-efficiency Motor Stator Core Made of an Ultrathin Electrical Steel Sheet under PWM Inverter Excitation Using the Stator Windings Excitation Method
3. 学会等名 11TH Japanese-Mediterranean Workshop on Applied Electromagnetics for Magnetic, Superconducting and Nano Materials (JAPMED11) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡茂八郎, 清武 博文, 榎園正人
2. 発表標題 電磁鋼板製リングコアのPWM励磁条件下の磁気特性測定法の検討
3. 学会等名 電気学会マグネティックス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡茂八郎, 榎園正人
2. 発表標題 高調波を含む励磁電圧下の極薄電磁鋼板製鉄心の磁気特性評価
3. 学会等名 第30回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Oka, and M. Enokizono
2. 発表標題 Magnetic Property Evaluation of the High-Speed Motor Stator Core Under Sinusoidal and Pulse Width Modulation Wave Excitation using Stator Winding Excitation
3. 学会等名 10th Asia-Pacific symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Oka, M. Enokizono, and D. Wakabayashi
2. 発表標題 Iron Loss Evaluation of Ultrathin Electrical Steel Sheet for High-speed Motor Stator Core under PWM Excitation
3. 学会等名 Proceedings of the 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (国際学会)
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 岡茂八郎, 榎園正人, 森祐司, 山崎一正
2. 発表標題 極薄電磁鋼板製小型高速回転ステータコアの磁気特性評価法の検討
3. 学会等名 電気学会マグネティックス研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡茂八郎, 榎園正人, 森祐司, 山崎一正
2. 発表標題 高速回転用モータコアの励磁コアを用いた磁気特性評価技術の検討
3. 学会等名 第26回MAGDAコンファレンス in Kanazawa
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Oka, M. Enokizono
2. 発表標題 Evaluation of Frame-Induced Compressive Stress on the Magnetic Properties of Stator Cores Using the Excitation Inner Core Method
3. 学会等名 Magnetic Measurements 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Oka, M. Enokizono, Y. Mori, M. Yamazaki
2. 発表標題 Magnetic characterization of the stator core of a high-speed motor made of an ultrathin electrical steel sheet using the magnetic property evaluation system
3. 学会等名 23rd Soft Magnetic Material Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡茂八郎, 榎園正人, 森祐司, 山崎一正
2. 発表標題 極薄電磁鋼板製小型高速回転ステータコアの磁気特性評価法の検討
3. 学会等名 電気学会マグネティックス研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡茂八郎, 榎園正人, 森祐司, 山崎一正
2. 発表標題 高速鉄損評価システムによる極薄電磁鋼板製鉄心の磁気特性評価
3. 学会等名 第29回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	榎園 正人  (Masato Enokizono)  (40136784)	大分大学    (17501)	