

令和 5 年 5 月 10 日現在

機関番号：37501
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2020～2022
課題番号：20K04509
研究課題名（和文）高速高パワー密度モータコアのためのインバータ励磁下の高速磁気特性評価装置の構築

研究課題名（英文）Construction of high-speed magnetic property evaluation system under inverter excitation for high-speed high-power density motor core

研究代表者
岡 茂八郎（Oka, Mohachiro）

日本文理大学・工学部・特任教授

研究者番号：80107838

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：この研究では、磁気測定に特化したIGBTを用いたPWMインバータを製作しその有効性を示した。また、SiCやGaNを用いたPWMインバータを試作した。さらに、PWMインバータのパラメータの自動設定など機能を持ったPWMインバータ励磁下の磁気特性測定装置を構築し、極薄電磁鋼板製積層リングコアや巻き積層リングコアの高速モータのステータコアとしての優位性を示した。加えて、アウターロータ型永久磁石型モータやダブルアキシアルギャップ型誘導モータのステータコアの周方向の磁気特性分布を測定し、複雑な形状をしたステータコアの磁気特性を正しく評価することの重要性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この研究の学術的な意義は、PWMインバータの各種パラメータを自動設定できるディレイパターンジェネレータを備え、IGBT製PWMインバータ、数値制御直流電源、広帯域電流プローブを統合したPWMインバータ励磁下の磁気特性測定装置を構築したことである。また、この装置のPWMインバータのSiC化やGaN化にめどをつけたことである。さらに、各種形状のステータコアの磁気特性分布の測定を可能にする励磁法を提案したことである。これによって、従来明らかにされていなかった極薄電磁鋼板製巻き積層コアのPWMインバータ励磁下の磁気特性が明らかになり、これを使ったモータの高効率化に貢献できることである。

研究成果の概要（英文）：In this research, a PWM inverter using an IGBT specialized for magnetic measurement was produced and its effectiveness was demonstrated. We also prototyped a PWM inverter using SiC and GaN. In addition, we constructed a magnetic characteristic measurement device under PWM inverter excitation that has functions such as automatic parameter setting of the PWM inverter. The superiority of the laminated ring core and wound laminated ring core which were made from the ultra-thin electrical steel sheet was also demonstrated. In addition, we measured the circumferential magnetic property distribution of the stator cores of the outer rotor permanent magnet motor and the double axial gap induction motor, demonstrating the importance of correctly evaluating the magnetic properties of stator cores with complex shapes.

研究分野：計測工学

キーワード：PWMインバータ 鉄損 電磁鋼板 ステータコア 高調波 IGBT SiC

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くなっているため、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。鉄損を低減するためには、電磁鋼板やモータコアの鉄損を正確に知る必要がある。そこで、以前から多くの形式のステータコアや電磁鋼板を対象にした「正弦波励磁型の磁気特性評価装置」が用いられているが、モータの高速回転化に対応した高い励磁周波数を扱える装置は AD コンバータの速度の制限から十分といえるものは多くない。加えて、近年のモータは、制御性向上の目的から PWM インバータで駆動されることが一般的であり、モータコアの鉄損をはじめとする磁気特性評価に高周波対応が強く求められている。さらに、PWM インバータ駆動時には励磁波形にキャリア周波数に起因する高調波が含まれており、高い周波数成分を持つ励磁波形での鉄損評価が要求されている。一方、モータのステータコアなどの複雑な形をしたコアの磁気特性の評価をなるべく汎用性のある励磁方式で行い、その特性を把握したいという要求もある。以上が本課題の研究開始当初の社会的背景である。

2. 研究の目的

この課題では、以下の3つの技術的課題を解決することを目的として研究を行った。第1に、現有の「汎用 PWM インバータを備えた磁気特性評価装置」に IGBT や SiC, GaN を Hブリッジに用いた専用 PWM インバータを備え、PWM 波の変調周波数、キャリア周波数、変調率、デッドタイムなどのパラメータを任意に設定できるディレイパターンジェネレータを持ち、最大励磁磁束密度を可変できる「パラメータを任意に設定可能な専用 PWM インバータを備えた磁気特性評価装置」を構築する。これによって、任意の PWM 波下での各種形状や種類の電磁鋼板の磁気特性を明らかにできる(高速 PWM 励磁下の磁気特性評価装置の構築)。第2に、「専用 PWM インバータを備えた磁気特性評価装置」を利用して、近年、高速モータのコアとして注目されている板厚 0.10 mm 以下の極薄電磁鋼板の PWM インバータ励磁下の磁気特性を明らかにする。これによって、極薄電磁鋼板の高周波励磁時の鉄損が、従来の 0.35 mm 厚以上の電磁鋼板に比べて優位であることを示す(PWM 励磁下で各種電磁鋼板の磁気特性評価)。第3に、ステータコアなどの任意の形状をした電磁鋼板の磁気特性を計測する際に重要な課題となる励磁法の開発である。ここでは、アウトロータ型永久磁石モータのステータコアを磁路形成法や励磁コア法で測定する方法や、デュアルアキシシャルギャップ型誘導モータの励磁コイル法による周方向鉄損分布を測定した方法などを開発した(各種形状の励磁コアを用いた磁気特性評価法の開発)。

3. 研究手法と結果

3.1 磁気特性測定装置の改良

我々は、従来から「高速 AD コンバータを備えた正弦波励磁下の磁気特性測定装置」を運用していた。この装置を基にして、PWM インバータ励磁下の各種電磁鋼板の磁気特性の評価を行うための「IGBT を用いた専用 PWM インバータを備えオシロを併用した磁気特性評価装置」(Fig.1)を製作した。加えてこの IGBT を SiC に置換した「高速専用 PWM インバータを備えた磁気特性評価装置」も試作し、磁気特性データの収集を行った。GaN に関しては、プリント基板の作成までを終えた。

3.1.2 PWM インバータ励磁下の磁気特性測定装置の概要

PWM インバータ部を高速化し寄生振動の除去などを行い高速モータに使用される極薄電磁鋼板などの磁気特性測定用に特化し、高周波特性を上げたものを製作した。そのブロック図を Fig. 1 に示す。

なお、Fig.1 に示す PWM インバータ励磁下の磁気特性測定装置の PWM インバータドライブ部は、目的に応じて、Hブリッジのスイッチング素子を IGBT から、SiC や GaN と交換することができる。一方、その他のこの装置を構成する

パソコンや計測機器の一部は、正弦波励磁の磁気特性測定装置と共用できる。共用した機器は、以下の通りである。制御用パソコンは、Windows 7 (32 bit)を OS とし、駆動プログラムは MATLAB で作成されている。この制御用パソコンと DG-8000 と DG-801 (ディレイパターンジェネレータ、変調周波数 $f_m > 10$ kHz, キャリア周波数 $f_c > 1$ MHz, デッドタイム $D_t < 20$ ns, 変調率 $M=0 \sim 0.99$ の性能を持つ)は USB - GP-IB で接続されている。制御用パソコン

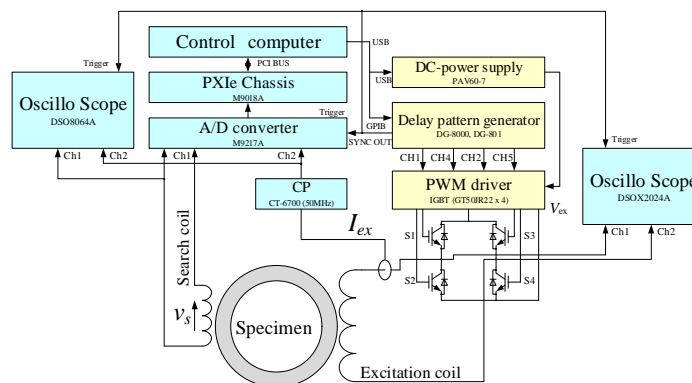
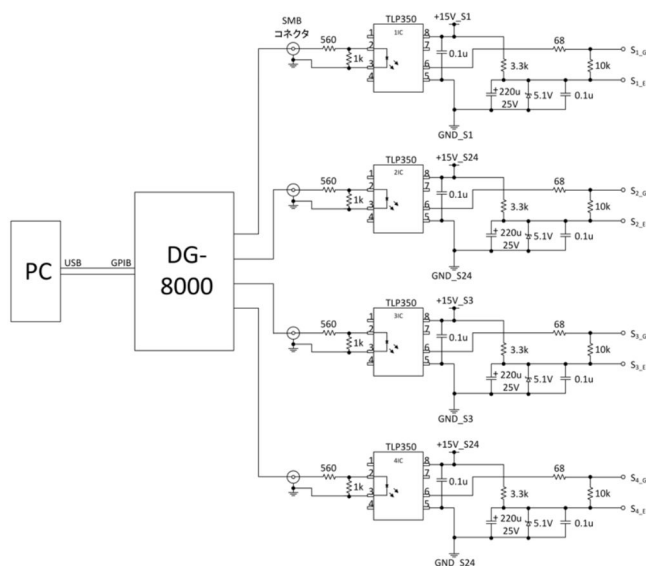


Fig. 1 IGBT を用いた専用 PWM インバータを備えオシロを併用した磁気特性評価装置

ンや AD (Analog to Digital) コンバータからなるデータ収集部とゲート信号発生器 (ディレイパターンジェネレータ, DG-8000 & DG-801, IWATSU) や数値制御可変電圧源(PWR801HM, $V_{max}=240V$, $I_{max}=10A$, KIKUSUI), カレントプローブ (CT-6700, HIOKI, $f_{max}>50MHz$), PWM インバータ励磁部の H-ブリッジから成っている。この装置はディレイパターンジェネレータにプログラムから GP-IB 経由で指令を送ることにより, 励磁条件として PWM 波の変調周波数 f_m [Hz], キャリア周波数 f_c [Hz], 変調率 M (=変調波の最大値/キャリア波の最大値), デッドタイム D_t [s] を任意に設定できる。最大励磁磁束密度 B_{exmax} [T] は H-ブリッジに印加する電圧 V_{ex} [V] を制御して設定している。なお, 本装置に用いた AD コンバータの最高サンプリング周波数は 20 MHz (分解能: 16 bit) であるため, 本装置の取り扱える信号の最高周波数成分は 10 MHz である。

(1) IGBT を用いた専用 PWM インバータドライバ

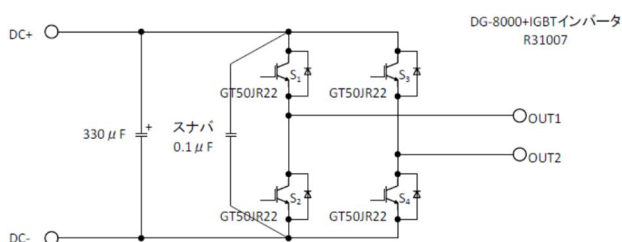
Fig.2 に IGBT を H-ブリッジに用いた PWM インバータドライブ部の回路図と基板の写真を示す。DG-8000 で生成されたゲート信号は, PWM インバータドライブの H-ブリッジのゲートとフォトカプラを介して接続されている。IGBT を用いた専用 PWM ドライバは, $f_m > 500 Hz$, $f_c > 50 kHz$, $D_t < 1 \mu s$ を目標とした。実験結果は, 負荷のインダクタンス等に依存する部分もあるがおおむね目標を達成した。



(a) ゲートドライブ回路



(b) IGBT_PWM インバータドライブ部
基板写真



(c) IGBT H-ブリッジ



(d) ゲートドライブ用フローティング電源

Fig. 2 IGBT を H-ブリッジに用いた PWM インバータドライブ部回路図

(2) SiC を用いた専用 PWM インバータドライバ

Fig.3 に SiC を H-ブリッジに用いた PWM インバータドライブ部の回路図と基板の写真を示す。ここでは, ゲートドライブ IC に ROME 社製の BM61S41RFV-C という専用の IC を用いた。この SiC を用いた専用 PWM ドライバは, $f_m > 2 kHz$, $f_c > 500 kHz$, $D_t < 50ns$ を目標とした。実験結果は, 負荷のインダクタンス等に依存する部分もあるがおおむね目標を達成した。



Fig. 3 SiC を H-ブリッジに用いた PWM
インバータドライブ部基板写真とプリント
パターン

3. 2 PWM 励磁下の磁気特性測定装置の開発・測定結果

3. 2. 1 IGBT を用いた PWM インバータ励磁装置による結果

本研究で開発した H-ブリッジに IGBT を用いた PWM インバータを備えた磁気特性評価装置を用いた測定結果を示す。

(1) 励磁部の波形

Fig.4 に励磁部の波形を示す。Fig.4(a)は励磁磁束密度 B_{ex} [T]を計算するための v_s [V]と磁界の強さ H_{ex} [A/m]を計算するための I_{ex} [A]の波形を示している。Fig.4(b)中の OUT1, OUT2 は、H-ブリッジの出力端子の波形を示し、 V_{out} (= OUT1 - OUT2)は、負荷に印加される励磁波形を示す。 v_s はリングング等が比較的少ない波形となっている。また、 I_{ex} も比較的きれいな波形となっている。この IGBT (GT50JR22) を H-ブリッジに用いた PWM インバータとしては、優れているといえる。

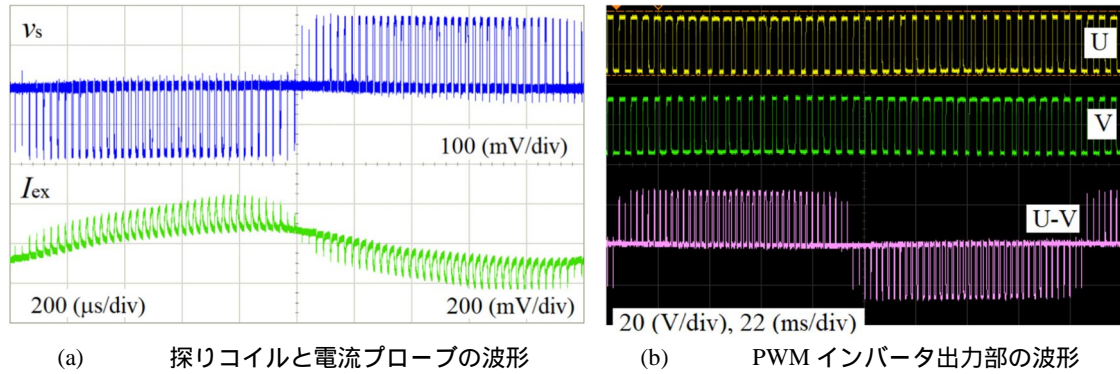


Fig. 4 IGBT を用いた PWM インバータの励磁時の波形
 0.35mmRing , $f_c = 20\text{ kHz}$, $f_m = 500\text{ Hz}$, $M = 0.4$, $B_{ex\max} = 1.2\text{ T}$, $D_t = 1\mu\text{s}$

(2) 標準積層リングコア (0.08mmRing) と IGBT_PWM インバータ励磁

0.08 mm 厚の極薄電磁鋼板を積層した標準積層リングコア試料を用い、IGBT を用いた PWM インバータで励磁した場合の収集した各種磁気特性を Fig.5 に示す。Fig.5(d)は、 H_{ex} の FFT 解析の結果である。キャリア周波数 f_c の 2 倍の 100 kHz のピークから、この PWM インバータはうまく動作していることがわかる。

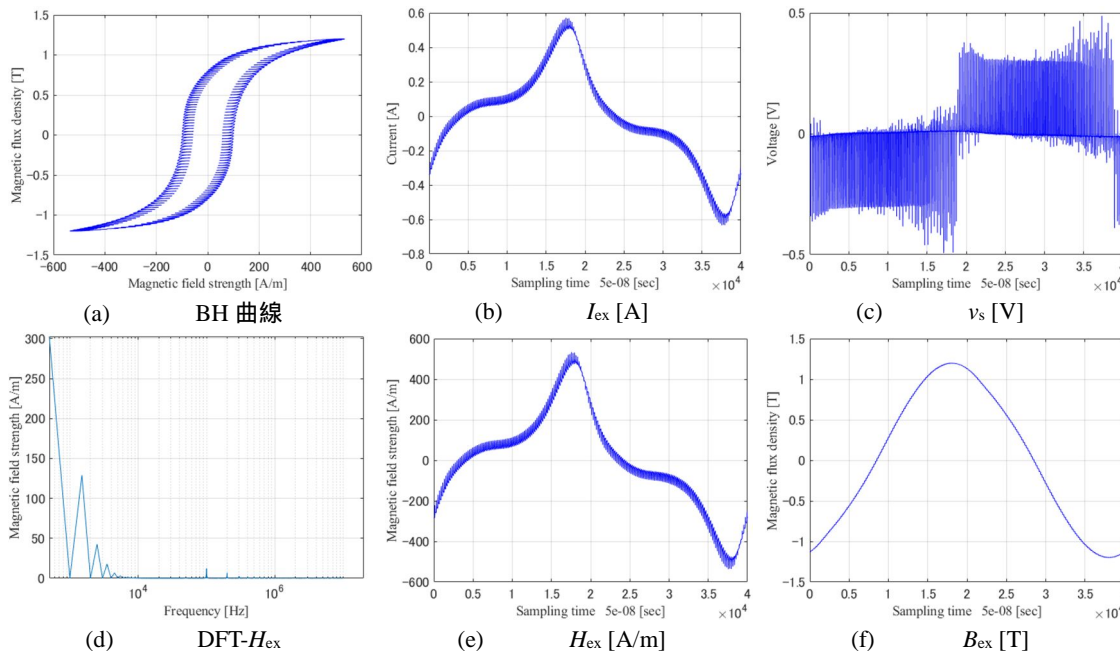


Fig. 5 IGBT を用いた PWM インバータ励磁下の磁気特性(0.08mmRing)
 $f_c = 50\text{ kHz}$, $f_m = 500\text{ Hz}$, $M = 0.4$, $B_{ex\max} = 1.2\text{ T}$, $D_t = 1\mu\text{s}$

3. 2. 2 SiC を用いた PWM インバータ励磁装置による結果

Fig.6 中の OUT1, OUT2 は、H-ブリッジの出力端子の波形を示し、 V_{out} (= OUT1 - OUT2) は、負荷に印加される励磁波形を示す。OUT1, OUT2 とともにリングング等を伴った波形となっているが、これは、ゲート抵抗を調整して SiC のドレイン-ソース間電圧の dV/dt を調整し、さらに、最適なバイパスコンデンサを探索・負荷して場合の波形である。PWM インバータの負荷が誘導であることを考慮すれば適切な波形であるといえる。

Fig.7 は、0.35mmRing 試料の磁気特性を SiC を用いた PWM インバータ励磁装置によって励磁し AD コンバータで収集した各種波形である。励磁条件は $f_c = 300\text{ kHz}$, $f_m = 500\text{ Hz}$, $M =$

0.8, $B_{\text{exmax}} = 1.2 \text{ T}$, $D_t = 100 \text{ ns}$ である。キャリア周波数 f_c が, 300 kHz と高速であるにもかかわらずスイッチングが正しく行われており, リンギングは大きく抑えられている。高速 PWM インバータ励磁下の磁気特性測定用励磁装置として十分に使用できると考えられる。さらに, 高速な AD コンバータとの組み合わせを行ったとしても十分に試料の磁気特性の評価が行えるものと考えられる。

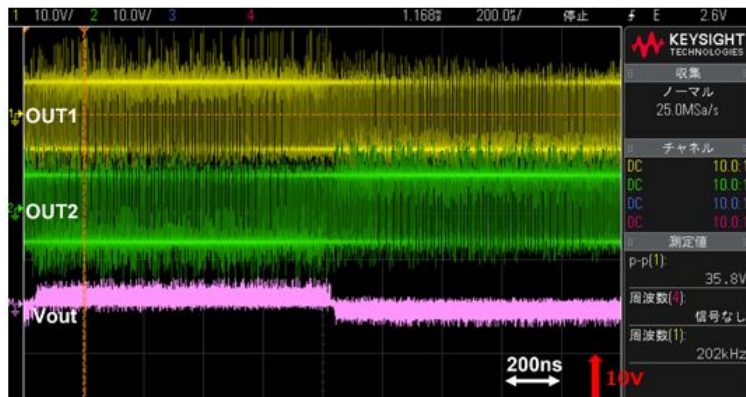


Fig.6 SiC を用いた PWM インバータの励磁波形(0.35mmRing)
 $f_c = 200 \text{ kHz}$, $f_m = 500 \text{ Hz}$, $M = 0.8$, $B_{\text{exmax}} = 1.2 \text{ T}$, $D_t = 100 \text{ ns}$

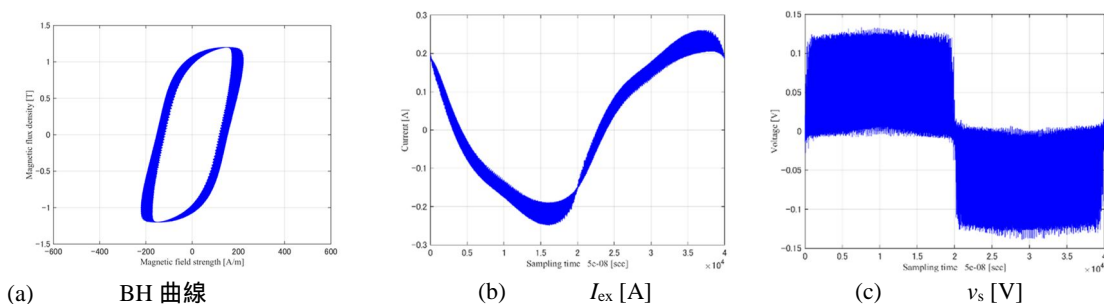


Fig. 7 SiC を用いた PWM インバータ励磁下の磁気特性(0.35mmRing)
 $f_c = 300 \text{ kHz}$, $f_m = 500 \text{ Hz}$, $M = 0.8$, $B_{\text{exmax}} = 1.2 \text{ T}$, $D_t = 100 \text{ ns}$

3.3 まとめ

この課題では, 第1に, 現有の「汎用 PWM インバータを備えた磁気特性評価装置」の汎用 PWM インバータの専用化, 第2に, 各種極薄電磁鋼板製リングコア等の PWM インバータ励磁下の鉄損特性の測定, 第3に, 特殊形状のステータコアの鉄損測定法の改良を目的に研究を行った。その成果の要約は以下のとおりである。

1) IGBT や SiC を H ブリッジに用いた専用 PWM インバータを製作し, データを収集した。GaN を H ブリッジに採用した PWM インバータについては, プリント板の作成まで終了した。

2) PWM 波の変調周波数, キャリア周波数, 変調率, デッドタイムなどのパラメータを任意に設定できるディレイパターンジェネレータや数値制御直流電圧源, 電流プローブなどを備えた, 「パラメータを任意に設定可能な専用 PWM インバータを備えた磁気特性評価装置」を構築した。これによって, 任意の PWM 波下での各種形状や種類の電磁鋼板の磁気特性を自動で測定可能となった。

3) 近年, 高速モータのコアとして注目されている板厚 0.10 mm 以下の極薄電磁鋼板の PWM インバータ励磁下の磁気特性を明らかにする。これによって, 極薄電磁鋼板の高周波励磁時の鉄損が, 従来の 0.35 mm 厚以上の電磁鋼板に比べて優位であることを示した。

4) アウターロータ型永久磁石モータのステータコアを磁路形成法や励磁コア法で測定する方法や, デュアルアキシアルギャップ型誘導モータの励磁コイル法による周方向鉄損分布を測定した方法などを開発した。

以上が, この課題の研究成果である。

今後は, AD コンバータなどのデータ収集装置の高速化を図り, さらに高速な変調周波数やキャリア周波数の PWM 波下での電磁鋼板製コアの磁気特性の解明や, 高速 GaN を用いた PWM インバータ下での磁気特性の解明などに向けて研究を進展させていきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Mohachioro Oka, Hirofumi Kiyotake, Masato Enokizono, Daisuke Wakabayashi	4. 巻 1
2. 論文標題 Iron Loss Measurements under PWM Excitation for Ring Cores Made of Ultrathin Electrical Steel Sheets for a Stator Core	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM2020)	6. 最初と最後の頁 2294 - 2300
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ICEM49940.2020.9270980	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4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 川野裕大, 清武 博文, 岡茂八郎, 榎園正人
2. 発表標題 電磁鋼板製リングコアの鉄損測定に用いるSiC-MOSFETインバータの開発
3. 学会等名 電気学会マグネティックス研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡茂八郎, 清武 博文, 若林大輔, 榎園正人
2. 発表標題 ゲート信号発生器を用いたPWMインバータ励磁下の磁気特性評価装置による電磁鋼板の鉄損評価
3. 学会等名 電気学会マグネティックス研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡茂八郎, 若林大輔, 榎園正人, 菅亮誠
2. 発表標題 アウターロータ型PMモータステータコアの磁気特性評価のための励磁コア法の検討
3. 学会等名 第29回MAGDAコンファレンス in 大津
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡茂八郎, 若林大輔, 菅亮誠, 榎園正人, 清武博文
2. 発表標題 アウターロータ型PMモータ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 2021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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関