

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K06465

研究課題名(和文) 二次電流加熱法によるモータ積層コア熱処理システムの開発

研究課題名(英文) Development of Motor Laminated Core Heat Treatment System by Secondary Current Heating Method

研究代表者

槌田 雄二 (TSUCHIDA, Yuji)

大分大学・理工学部・准教授

研究者番号：80284785

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、「二次電流加熱法」と名付けた新しい短時間熱処理手法を提案し、従来の大型電気炉と比較して、大幅な短時間にて鉄損の低減が可能となった。具体的な研究結果は次の2つである。(1)「二次電流加熱法」を提案、同手法に基づく装置を開発し、装置の電磁特性、試料の温度特性を明らかにし、電磁鋼板積層コアに対して十分な性能を有する事を明らかにした。(2)従来の焼鈍では、大型電気炉を必要とし、12時間程度かかる。「二次電流加熱法」をリング形状の電磁鋼板積層コアに適用し、簡便な装置にて、10分間の短時間熱処理によって、磁気特性を改善し、鉄損を10%程度低減出来る事を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、短時間の熱処理によってモータ積層コアの鉄損を低減するシステムの開発を目的とした。その結果、研究代表者らが考案した「二次電流加熱法」により、モータ積層コアを短時間で効率的に加熱することによって鉄損低減化を可能とし、既存のモータ製造工程にも容易に導入可能で、かつ運用も低コストな「熱処理システム」の開発を実現した。研究成果は、国内の総エネルギー消費量の約半分を占めているモータの低損失化・高効率化に適用することが可能であり、CO2などの温室効果ガス排出量の増加による地球温暖化対策に貢献することが期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, a new short-time heat treatment method named "secondary current heating method" is proposed, which can reduce iron loss in a much shorter time than the conventional large electric furnace. The specific results of this research are as follows. (1) We proposed the "secondary current heating method," developed an apparatus based on this method, clarified the electromagnetic characteristics of the apparatus and the temperature characteristics of the specimens, and demonstrated that it has sufficient performance for laminated cores of electrical steel sheets. (2) Conventional annealing requires a large electric furnace and takes about 12 hours. We applied the "secondary current heating method" to ring-shaped electrical steel sheet laminated cores and found that magnetic properties could be improved and iron loss reduced by about 10% with a short heat treatment time of 10 minutes.

研究分野：磁気工学

キーワード：鉄損低減 磁気特性改善 熱処理 二次電流加熱 低損失モータ 積層コア 無方向性電磁鋼板 モータ製造工程

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

近年、世界的な人口の増加による消費拡大や途上国の経済発展により、化石エネルギーへの依存が益々高まる中、エネルギー問題が深刻化するとともに、CO₂などの温室効果ガス排出量の増加による地球温暖化が取り沙汰されている。電気エネルギーの分野では、国内の総エネルギー消費量の約半分を占めているモータ、取り分け、その大部分を占める産業用モータに対して、2015年4月からトップランナー制度の導入による法規制で、高効率モータの使用を義務付ける動きがある①。

電磁鋼板は、モータや変圧器、発電機などの電気機器の鉄心材料として、産業界および身の回りで広く用いられており、電気機器の性能を大きく左右する材料である。したがって、低損失な電磁鋼板の活用がモータなどの電気機器の高効率へとつながり、省エネルギー化社会へと大きく貢献する。しかしながら、モータ鉄心の製造工程である、打抜き、積層、溶接、巻線、圧入などで生じる残留応力は、電磁鋼板の磁気特性が劣化する要因となる。そのため、次式で定義される、「製造後の製品の磁気損失の総和」を、「製造前の材料の磁気損失の総和」で割った値であるビルディングファクタ *B.F.* を増加させてしまう。

$$B.F. = \frac{\text{(製造後の製品の磁気損失の総和)}}{\text{(製造前の材料の磁気損失の総和)}} \quad (1)$$

電磁鋼板を有効に活用し、モータ等の電気機器を高効率化するためには、*B.F.* を 1.0 に近づける必要がある。そのため、以前は、すべてのモータ鉄心に対して、大型電気炉を用いた熱処理(焼鈍処理)を施していた②③。大型電気炉では、雰囲気加熱(間接加熱)となるため、熱処理時間が長時間(12時間程度)となり、高ランニングコストが避けられず、現在の産業用モータ鉄心に対しては、熱処理は行われていない。特殊用途向けモータに対しては、高周波誘導加熱(直接加熱)を用いた熱処理が行われている場合もあるが、それでも3時間程度の処理時間を必要とする④⑤。長時間を要する焼鈍処理は、モータ高効率化への妨げになっている。しかしながら、省エネルギー化社会において、何らかの処理により、モータ鉄心の低損失化を図り、モータの高効率化を図る事が近々の重要な課題である。

2. 研究の目的

そこで、本研究では、被加熱物となる電磁鋼板積層コア(モータ鉄心)を、図1に示すように、従来の大型電気炉と比較して、大幅な短時間で熱処理を施し、鉄損の低減が可能となる手法の提案を行う。提案する新しい熱処理手法を「二次電流加熱法」と名付け、同装置を開発した。二次電流加熱法で目標とした項目を箇条書きにすると以下のようになる。

- ・高周波誘導加熱時に必要となる高価な特殊高周波電源が不要で、商用電源にて直接加熱を可能とする。商用周波数電源を用い、構造的に被加熱物内部から加熱可能とする。
- ・従来の焼鈍温度よりも低い温度で、応力除去を可能とし、10分程度の短時間処理にて磁性材料の特性改善を可能とする。
- ・既設製造設備に容易に追加可能となるよう、熱処理時のみ処理可能な着脱方式とする。

二次電流加熱法による装置の電磁特性と被加熱物の温度特性を示し、電磁鋼板積層コアに適用した研究結果について報告する。

3. 研究の方法

図2に新しく提案する熱処理法である「二次電流加熱法」による装置の概略図と断面図を示す。同図に示すように、装置は、メインヨーク、励磁コイル、補助ヨーク、及

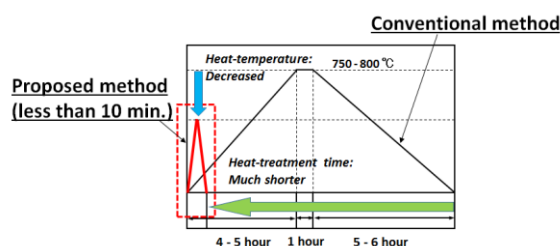
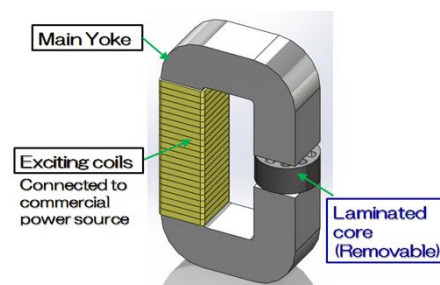
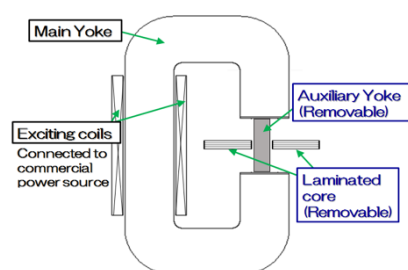


図1 提案手法と従来法の熱処理時間の比較



(a) 装置概略図



(b) 装置断面図

図2 二次電流加熱法

び被加熱物である電磁鋼板積層コアからなる。補助ヨークと電磁鋼板積層コアは、実際の製造工程への導入を前提として着脱方式とした。励磁コイルは商用電源(単相 200 V, 60 Hz)に接続されている。したがって、高価で特殊な高周波電源は不要である。励磁コイルにより、メインヨークと補助ヨークに磁束が発生する。交番磁束により、補助ヨークの外周にある電磁鋼板積層コアには時間変化する磁束が鎖交し、誘導起電力が発生する。電磁鋼板積層コアは電氣的に短絡しているので、二次電流(短絡電流)が流れる。この二次電流により、電磁鋼板積層コア自体にジュール熱が発生し、電磁鋼板積層コア自体の温度が上昇し、残留応力が除去され、鉄損が減少すると考えられる。高周波誘導加熱では、表皮効果によりコイル直下の試料表面しか加熱する事が出来ないが、本手法を用いれば、電磁鋼板積層コア内部から加熱することが可能である。

4. 研究成果

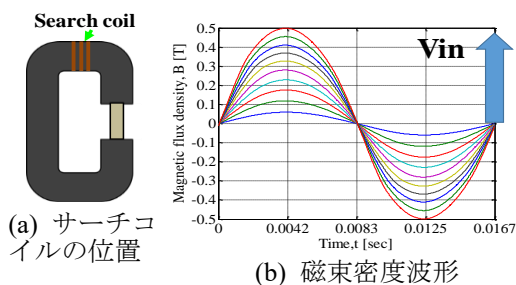


図3 メインヨークにおける磁束密度測定

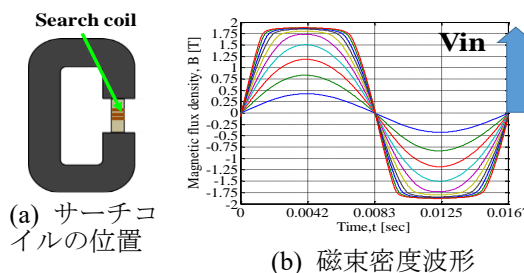


図4 補助ヨークにおける磁束密度測定

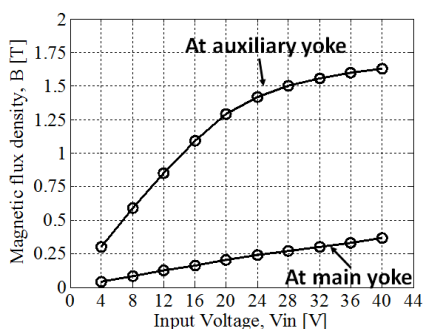


図5 メインヨーク、補助ヨークにおける入力電圧に対する磁束密度値

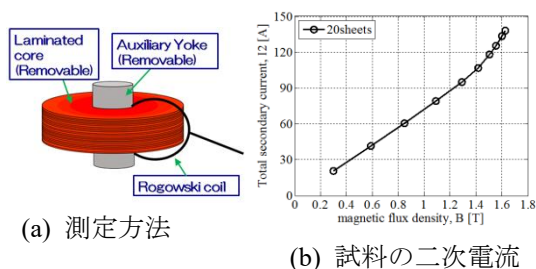


図6 ロゴスキーコイルによる二次電流の測定

新しく提案した二次電流加熱法による装置の電磁特性と被加熱物の温度特性を確認するために、メインヨークと補助ヨークの磁束密度値、電磁鋼板積層コアの二次電流値、及び電磁鋼板積層コアの温度特性を測定した。

図3(a)にメインヨークにおける磁束密度測定のためのサーチコイルの位置を示す。また、図3(b)に入力電圧値を4から40Vまで変えた時の1周期分の磁束密度波形を示す。なお、実際の熱処理は130V程度を印加して行うが、熱が上がらない範囲で入力電圧値を調整し、外挿する事によって、実際の熱処理時の磁束密度条件を概算した。図3(b)から分かるように、これらの電圧範囲では、磁束密度は最大でも0.5T未満であり、1周期の磁束密度波形も正弦波であり、メインヨークはこの電圧範囲で線形領域であることが分かる。同様に、図4(a)に補助ヨークにおける磁束密度測定のためのサーチコイルの位置を示す。また、図4(b)に同電圧範囲での1周期分の磁束密度波形を示す。補助ヨークは、磁束密度が最大1.7T以上となり、早い段階で正弦波から歪む事が分かる。今回の電磁鋼板積層コアサイズに合わせて、補助ヨークの断面積を小さくしたため、メインヨークの磁束が補助ヨークに集中し、飽和していると考えられる。メインヨーク、補助ヨークの磁束密度値を入力電圧値に対してまとめたものを図5に示す。まず、2箇所測定結果から、両カーブの近似式を導出した。実際の熱処理時の印加電圧値は130Vであり、この電圧値を近似式に代入することによって、メインヨークの磁束密度値は1.2T程度、補助ヨークの磁束密度値は、1.8T程度と算出した。補助ヨークは低い電圧で飽和するので実際の動作時に磁束密度が1.8T程度になることは避けられない。また、メインヨークの磁束密度値は1.2T程度と線形領域を多少超えた範囲なので、今回の電磁鋼板積層コアの大きさからして、ヨークの大きさ、励磁コイルの巻数は適当なものであると判断した。また、図6(a)と(b)に、二次電流の測定方法と実際に測定した二次電流値の総和を示す。試料としては、無方向性電磁鋼板:

35A300, 内径 18.2 mm, 外径 43.3 mm, 積層 7 mm のリング形状の積層コアを用いた。1 枚の板厚が 0.35 mm であるので、積層枚数は 20 枚となる。図 6 (a)に示すように、ログスキーコイルを用いて、電磁鋼板積層コアの二次電流値の総和の測定を行った。上記と同様に、入力電圧値を 4 から 40 V まで変えた時の 1 周期分の総二次電流値の波形を図 6 (b)に示す。先程、見積もった補助ヨークの動作磁束密度 1.8 T 時には、150 A 程度の総二次電流が電磁鋼板積層コアに流れることが分かる。この結果を用いて、10 分間の温度上昇をジュール熱の式と比熱の式から計算すると、300–400°C となることが分かった。当初、400°C 程度にて短時間加熱を想定していたので、今回用いる電磁鋼板積層コアの大きさに対して、メインヨーク、補助ヨークの大きさは適当なものである事が分かった。

二次電流加熱法にて、オンラインを想定し、効果的に短時間で鉄損を低減するために、加熱時間を 2.5, 5.0, 7.5, 10 分間に設定した。残留応力を短時間にて除去するためには、300 から 600°C に温度制御する必要があると考え、これらの時間を選択した。従来法の焼鈍処理では、再結晶を目的としているため、キュリー温度以上(750 - 800°C)にて 12 時間以上の熱処理が必要となる。

この時、入力電圧 130 V にて、それぞれの設定時間で電磁鋼板積層コアを二次電流加熱法にて加熱した時の最大温度を図 7 に示す。図 7 から分かるように、電磁鋼板積層コアの温度上昇は、2.5 分間加熱で 312°C、5.0 分間加熱で 465°C、7.5 分間加熱で 565°C、10 分間加熱で 617°C となった。予備実験から、鉄損低減のため、10 分間以下の短時間で試料を 300 から 600°C に温度を上昇させるためには、115 枚の試料が必要な事が明らかになったので、それぞれの加熱処理では、115 枚となるよう電磁鋼板積層コアを積み上げ、中央部 20 枚分の磁気特性の測定を行った。

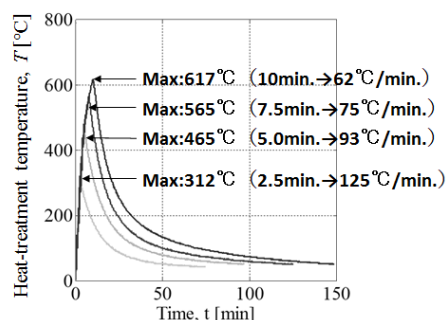


図 7 電磁鋼板積層コアの温度特性

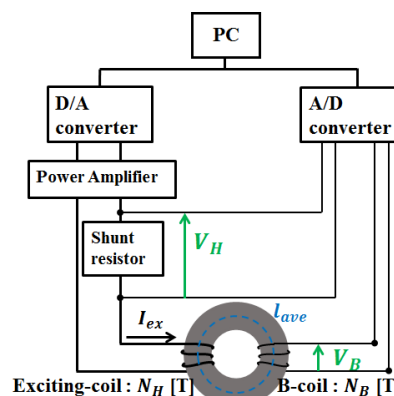


図 8 短時間熱処理前後の磁気特性測定システム

二次電流加熱法による短時間熱処理前後での電磁鋼板積層コアの磁気特性測定システムを図 8 に示す。同測定システムでは、熱処理によって異なる材料特性となる電磁鋼板積層コアの磁気特性と鉄損を同一磁束条件で比較評価出来るようにした。試料となる電磁鋼板積層コアの磁束密度 B を常時目標値となるよう、PC を用いてフィードバックコントロールしている。図 8 に示すように、試料となる電磁鋼板積層コアは、PC で作成された励磁電圧波形を、D/A 変換器にてアナログ変換し、パワー増幅器を用いて増幅し、電磁鋼板積層コアに巻かれた励磁コイルにて励磁される。これにより、電磁鋼板積層コア内に磁束が発生し、電磁鋼板積層コアに巻かれた別のコイル(B コイル)に誘導起電力が発生する。同電圧は、A/D 変換器を通して PC に集録され、PC 上で積分することによって、磁束密度波形 B が導出される。また、励磁コイルの手前に設置されたシャント抵抗の両端の電位差を、同様に A/D 変換器を通して PC で集録し、電流値に変換後、磁界強度波形 H を算出する。以上により、B-H ループを導出し、磁気特性を比較評価した。また、B-H ループより鉄損を算出し、二次電流加熱法の有用性の評価を行った。

図 9 に、二次電流加熱処理前、及び上記 4 条件の処理後での B-H ループをそれぞれ示す。渦電流の影響を少なくし、材料自身の磁気特性を評価するため、励磁は 10 Hz で行い、それぞれの電磁鋼板積層コアの最大磁束密度が 1.0 T となるようにフィードバックコントロールを行っている。すべての電磁鋼板は打ち抜き加工にて作製され、その後、積層されているので、打ち抜き工程及び積層工程で必ず残留応力が発生している。それぞれの B-H ループは、前述のように、2.5 分間加熱(312°C)、5.0 分間加熱(465°C)、7.5 分間加熱(565°C)、10 分間加熱(617°C)後の電磁鋼板積層コアから測定されたものと、熱処理が施されていない電磁鋼板積層コアから測定されたものである。5 つの B-H ループを比較してみると、2.5, 5.0 分間加熱後に測定された B-H ループは、熱処理前に測定された B-H ループとほとんど変化が無いが、7.5, 10 分間加熱後に測定された B-H ループは、最大磁界密度 H_{max} 、保磁力 H_c とも減少しており、これらの電磁鋼板積層コアは軟磁性化している事が分かる。500°C 以下の処理温度では磁気特性は変化しないが、短時間でも 500°C 以上の熱処理を施せば磁気特性が改善することが分かる。これらの温度は、キュリー点以下であり、従来の焼鈍処理による再結晶化とは異なり、残留応力が緩和した事によ

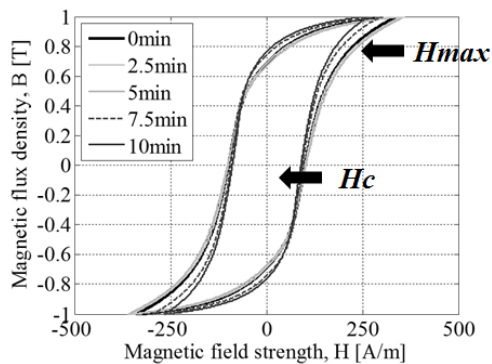


図9 二次電流加熱処理前後のB-Hループ

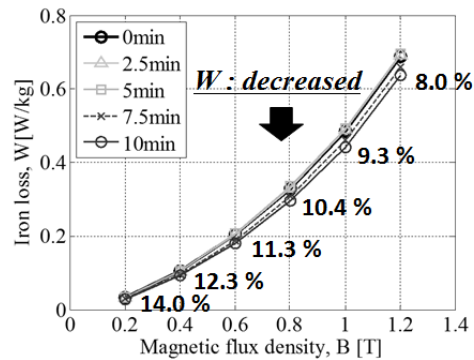


図10 二次電流加熱処理前後の鉄損特性

て、磁気特性が改善したと考えられる。図9より、10分間加熱(617°C)後の方が、より磁気特性が改善している事が分かる。

図9に示したB-Hループから算出した、最大磁束密度を変化させた場合の鉄損特性を図10に示す。同図から分かるように、二次電流加熱法で短時間加熱した場合、10分間加熱で鉄損が8.0~14%低減される。ステータ形状の最適化を行っても鉄損はここまで下がらないので、新しく提案した二次電流加熱法によって効果的に鉄損を低減することが出来ると言える。また、7.5分間加熱では上記の半分程度の鉄損が低減している。図9に示したB-Hループと同様に、2.5、5.0分間加熱では鉄損もほとんど変化していない事が分かる。したがって、実際の製造ラインの生産性、低減したい鉄損の割合を鑑みて、7.5~10分間の間で適切な熱処理時間を調整する事が可能である。

本研究では、「二次電流加熱法」と名付けた新しい短時間熱処理手法を提案し、同手法の有効性について検討を行った。その結果、従来の大型電気炉と比較して、大幅な短時間にて鉄損の低減が可能となった。以下に検討結果を具体的に箇条書きにする。

- (1) 「二次電流加熱法」を提案、同手法に基づく装置を開発し、装置の電磁特性、試料の温度特性を明らかにし、電磁鋼板積層コアに対して十分な性能を有する事を明らかにした。
- (2) 従来の焼鈍では、30~40%程度鉄損が低減するが、大型電気炉を必要とし、12時間程度かかる。「二次電流加熱法」をリング形状の電磁鋼板積層コアに適用し、簡便な装置にて、10分間の短時間熱処理によって、磁気特性を改善し、鉄損を10%程度低減出来る事が明白となった。

提案手法は、実際のモータ積層コア形状で検討後、製造工程に容易に導入することが可能である。

<引用文献>

- ①日本電機工業会、トッランナーモータ 2015年度スタート！！, https://www.jemagnet.or.jp/Japanese/pis/top_runner/sansou_yudou.html.
- ②五弓勇雄, 阿部秀雄, 珪素鋼板, コロナ社, 1955.
- ③黄柏英, 山本健一, 山城康正, 無方向性けい素鋼板の熱処理条件と磁気特性, 日本応用磁気学会誌 Vol. 22, p. 649-652, 1998.
- ④和田正美, フラッシュ焼鈍による電磁鋼板の磁気特性改善, National Technical Report, Vol. 30, No. 6, p. 878-882, 1984.
- ⑤平尾誠, 前側明, 和田正美, フラッシュ焼鈍によるハーメチックモータの生産, National Technical Report, Vol. 33, No. 5, p. 626-631, 1987.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tsuchida Yuji, Enokizono Masato	4. 巻 8
2. 論文標題 Residual stress evaluation by Barkhausen signals with a magnetic field sensor for high efficiency electrical motors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 047608 ~ 047608
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4994228	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 Tsuchida Yuji, Yoshino Naoyuki, Enokizono Masato	4. 巻 53
2. 論文標題 Reduction of Iron Loss on Laminated Electrical Steel Sheet Cores by Means of Secondary Current Heating Method	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1 ~ 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2017.2705168	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 -

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 植田雄二
2. 発表標題 無方向性電磁鋼板の磁気特性改善と残留応力評価
3. 学会等名 電気学会マグネティックス研究会資料
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 植田雄二
2. 発表標題 電力用磁性材料の積層技術と積層コア磁気特性改善技術 - 磁性材料の熱処理とその評価 -
3. 学会等名 令和3年電気学会 基礎・材料・共通部門大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuji Tsuchida
2. 発表標題 Improvement of Magnetic Properties and Reduction of Iron Loss on Laminated Electrical Steel Sheet Cores by Means of Secondary Current Heating Method
3. 学会等名 INTERMAG AMERICAS 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大村遼平, 槌田雄二
2. 発表標題 電磁鋼板活用のための磁気特性評価
3. 学会等名 第32回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 槌田雄二
2. 発表標題 高効率高パワー密度モータのための高性能化技術
3. 学会等名 第31回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuji Tsuchida
2. 発表標題 Resunaction techniques of electrical steel sheets by secondary current heating for high efficiency motors
3. 学会等名 11th Japanese-Mediterranean Workshop Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting, Multifunctional and Nanomaterials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 槌田雄二, 吉野直之, 佐藤尊, 榎園正人
2. 発表標題 無方向性電磁鋼板のX線応力評価
3. 学会等名 電気学会マグネティックス研究会資料
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuji Tsuchida
2. 発表標題 Refuction Techniques of Electrical Steel Sheets for High Efficiency Motors
3. 学会等名 The 5th International Conference of Asian Union of Magnetics Societies (IcAUMS 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 槌田雄二
2. 発表標題 X線による無方向性電磁鋼板の応力評価と磁気特性
3. 学会等名 電気学会マグネティックス研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuji Tsuchida
2. 発表標題 Hybrid computing based on measured vector magnetic properties of electrical steel sheets for high performance electromagnetic devices
3. 学会等名 15th International Workshop on 1&2 Dimensional Magnetic Measurement and Testing (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 植田雄二
2. 発表標題 X線残留応力とベクトル磁気特性による無方向性電磁鋼板の材料評価
3. 学会等名 第27回MAGDAコンファレンス in Katsushihka
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 植田雄二
2. 発表標題 無方向性電磁鋼板のX線応力評価と磁気特性評価
3. 学会等名 電気学会マグネティックス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuji Tsuchida, Naoyuki Yoshino and Masato Enokizono
2. 発表標題 Reduction of Iron Loss on Laminated Electrical Steel Sheet Cores by Means of Secondary Current Heating Method
3. 学会等名 INTERMAG Europe 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 植田雄二, 吉野直之, 佐藤尊, 榎園正人, 森祐司, 山崎一正
2. 発表標題 二次電流加熱法による極薄電磁鋼板積層コアの鉄損低減化
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

1. 発表者名 槌田雄二, 吉野直之, 佐藤尊, 榎園正人
2. 発表標題 二次電流加熱法による電磁鋼板積層コアの鉄損低減化
3. 学会等名 平成29年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 槌田雄二, 上野尚平, 佐藤尊, 若林大輔, 岡茂八郎, 祖田直也, 榎園正人
2. 発表標題 モータ高効率化のための計測技術とその評価について
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 槌田雄二, 山下浩平, 榎園正人
2. 発表標題 永久磁石モータステータコアの鉄損低減化
3. 学会等名 平成30年電気学会全国大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

槌田研究室のホームページ
<https://tsuchida.eee.oita-u.ac.jp>

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
---------	---------