

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：37501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18025

研究課題名(和文)ベクトル磁気特性制御による変圧器騒音の低減に関する研究

研究課題名(英文)Study on Reduction of Transformer Noise by Vector Magnetic Characteristic Control

研究代表者

若林 大輔(Wakabayashi, Daisuke)

日本文理大学・工学部・助教

研究者番号：60748747

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、変圧器騒音の主要因である方向性電磁鋼板の磁気ひずみに着目し、鉄損と磁気ひずみの両方を低減可能な技術の構築を行った。既存方向性電磁鋼板表面にレーザー処理を施すことで、任意方向交番磁束及び回転磁束下での鉄損と磁気ひずみの低減を確認した。レーザー処理により磁区構造が微細分化されていることも確認した。この処理技術を変圧器モデル鉄心に適用し、その効果について検証した。その結果、鉄損を低減することができベクトル磁気特性制御技術の有効性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this study, focusing on the magnetostriction of grain-oriented electrical steel sheet which is the main factor of transformer noise, we have constructed a technology capable of reducing both iron loss and magnetostriction. We confirmed reduction of iron loss and magnetostriction under arbitrary directional alternating magnetic flux and rotating magnetic flux by applying laser treatment to the surface of the existing grain oriented electromagnetic steel sheet. It was also confirmed that the magnetic domain structure was finely differentiated by laser treatment. This processing technique was applied to the transformer model core and its effect was verified. As a result, iron loss can be reduced and the effectiveness of the vector magnetic characteristic control technology is clarified.

研究分野：電気電子工学

キーワード：ベクトル磁気特性 二次元磁気ひずみ 電磁鋼板 鉄損 変圧器 騒音 磁区微細分化処理 鉄心

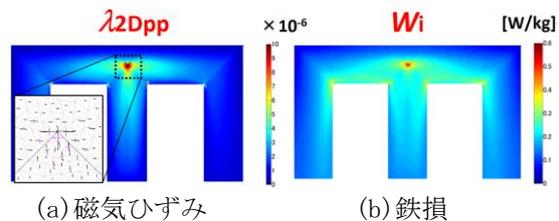
## 1. 研究開始当初の背景

変圧器の騒音問題は古くから知られており、その原因は変圧器鉄心のT接合部に発生する回転磁束による磁気ひずみであることが指摘されている。磁気ひずみとは、強磁性体が磁化した際に外形が変化する現象で、交流磁界下では騒音の要因となる。変圧器鉄心に使用される方向性電磁鋼板の磁気特性と磁気ひずみは通常、IECやJISで規格化されている単板磁気試験器を用いて、圧延方向励磁下の特性測定から評価される。このような条件下では方向性電磁鋼板は低鉄損で低磁気ひずみ特性を示す。この評価から、磁気ひずみは磁束密度の大きさに対して増加する結果が得られ、この結果を用いた場合の変圧器鉄心の磁気ひずみ解析は、磁束密度が大きい脚部で大きな磁気ひずみが発生し変形する。これらの結果より、変圧器の磁気ひずみによる騒音を低減するには、鉄心の大型化による最大磁束密度の低下等を行うしかない。しかし、電気自動車等への応用を見据えた近年の小型化の要求に反しており、騒音低減の新しい技術開発が求められている。

研究代表者は、これらの問題に対して、新しい視点に立った測定・評価法並びに解析手法を提案してきた。磁気特性である磁束密度と磁界強度をベクトル量として扱えるベクトル磁気特性を基礎として、任意方向に生じる磁気ひずみ(二次元磁気ひずみ)を測定することで、回転磁束等で生じる磁気特性と磁気ひずみの関係を正確に評価することができる。磁束密度ベクトル  $B$  と磁界強度ベクトル  $H$  また任意方向に生じる伸び( $\lambda+$ )と縮み( $\lambda-$ )の二次元磁気ひずみは違う方向に発生し、無方向性電磁鋼板と方向性電磁鋼板で現象が異なることを明らかにした。これらの結果から、従来測定法の問題点と提案手法の有効性を示してきた。

また、提案手法で測定したデータを用いた二次元磁気ひずみ解析手法を開発し、図1に示すように、T接合部で大きな磁気ひずみが発生する結果を世界で初めて解析的手法で明らかにした。これらの提案手法により変圧器鉄心に生じるベクトル磁気特性と二次元磁気ひずみを正確に評価することが可能になった。

方向性電磁鋼板の鉄損推移はこの10年、ほぼ一定であり、鉄損低減の革新的技術が望まれている。このような中、既存の方向性電磁鋼板を低鉄損化させたベクトル磁気特性制御による新しいベクトル磁気特性制御材が提案された(図2、大分大学榎園名誉教授)。最大で47%も鉄損を低減できる。この提案材を用いることで変圧器の低鉄損化が行える可能性がある。また、二次元磁気ひずみを評価し、変圧器の低騒音化が行えるかを検討する必要がある。



(a) 磁気ひずみ (b) 鉄損  
図1 提案解析手法による変圧器モデル鉄心の磁気ひずみと鉄損分布



図2 日刊工業新聞記事(2014年3月13日)

## 2. 研究の目的

変圧器鉄心に使用されている方向性電磁鋼板は、圧延方向に磁束が通る場合に低鉄損で低磁気ひずみな特性を示す。しかしながら、変圧器のT接合部で生じる回転磁束の場合等では、大鉄損で大磁気ひずみとなり、効率低下や騒音の発生要因となる。代表研究者は、回転磁束等の場合の測定・評価さらには解析を行える測定装置、評価法さらには解析手法を提案し、これらの技術により変圧器鉄心に生じる現象を正確に評価する技術を確立した。また、近年新しく提案された既存の方向性電磁鋼板を低鉄損化できるベクトル磁気特性制御技術により、回転磁束による特性悪化を緩和できる。これらの技術を組み合わせることで、変圧器の低損失化かつ低騒音化を試み、基礎的技術を構築する。

## 3. 研究の方法

本研究では、ベクトル磁気特性制御技術の有効性を検証するために下記に示す提案測定手法に基づいた材料の詳細測定や、変圧器モデル鉄心への適用による効果検証を実測から行った。

### (1) ベクトル磁気特性・二次元磁気ひずみ

図3に単板の方向性電磁鋼板のベクトル磁気特性と二次元磁気ひずみを測定するシステムを示す。磁束密度ベクトル  $B$  は試料に直接巻かれた十字の探りコイル、磁界強度ベクトル  $H$  は試料近傍に設置する二方向のHコイルを用いて測定する。 $B$  と  $H$  の間の角度である空間的位相差角を評価することが可能

となる。この手法を用いて測定される磁気特性をベクトル磁気特性という。

板厚 0.5mm 以下の薄い単板試料において二次元磁気ひずみは試料に直接貼られた三軸ひずみゲージにより測定される三方向の磁気ひずみから得られる。この三方向の磁気ひずみより任意方向の磁気ひずみが求まり、これを二次元磁気ひずみという。この測定手法を用いることで、磁気ひずみにより試料が変形したときの伸びと縮みの最大磁気ひずみ量とその発生方向を把握することが可能となり、ベクトル磁気特性との関係を明らかにすることが出来る。

図4は測定手法の比較を示す。従来手法では特定の一方方向の特性のみで評価されてきたが、提案手法では、磁気特性はベクトル量、磁気ひずみはテンソル量として評価でき、それぞれの発生方向を正確に把握できる特徴を有する。

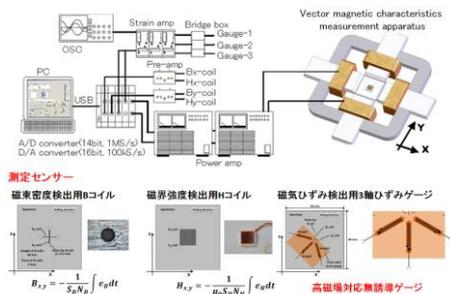
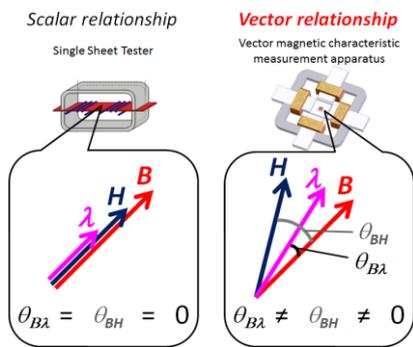


図3 提案測定システム



(a) 従来手法 (b) 提案手法  
図4 測定手法の比較

(2) ベクトル磁気特性制御技術

図5にベクトル磁気特性及び二次元磁気ひずみ測定用の 80 mm×80 mm 正方形試料を示す。試料表面には、MIYACHI 社製半導体レーザーML-7320 を用いて、中央部 40 mm×40 mm の範囲に格子状にレーザーを照射している。格子状の一边を処理ピッチ PL とし、PL が 0.25 mm とした場合に最も鉄損が低減される。既存の方向性電磁鋼板表面に図5のような処理を施す技術をベクトル磁気特性制御技術といい、適用された試料をベクトル磁気特性制御材と呼ぶ。処理前後のベクトル磁気特性と二次元磁気ひずみを比較し、その有効性を検討する。

を検討する。

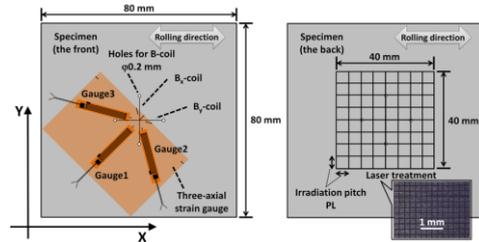
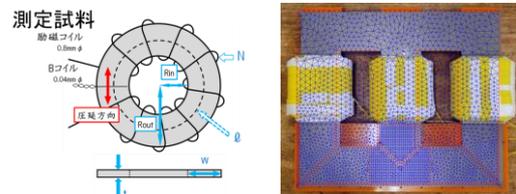


図5 ベクトル磁気特性制御材

(3) 変圧器モデル鉄心

図6に示す変圧器モデル鉄心を用い、ベクトル磁気特性制御技術の実機変圧器鉄心への応用を検討する。それぞれ、鉄心の一部に処理を行い、処理前後の磁気特性、鉄損特性を比較し、ベクトル磁気特性制御技術の有効性を検証した。

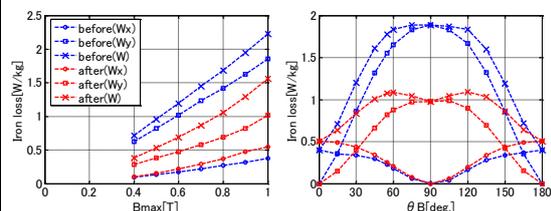


(a) 簡易モデル (b) 三相三脚モデル  
図6 変圧器モデル鉄心

4. 研究成果

(1) ベクトル磁気特性評価による鉄損低減効果

図7に処理前後の鉄損特性を示す。回転磁束及び任意交番磁束下においても鉄損は低減しており、最大で48%低下した条件もある。一方で、圧延方向に磁化した条件(0deg.)では、鉄損は増加している。

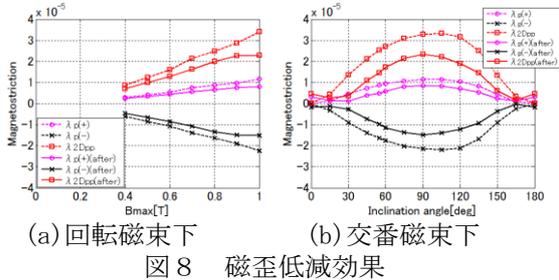


(a) 回転磁束下 (b) 交番磁束下  
図7 鉄損低減効果

(2) 二次元磁気ひずみ評価による磁歪低減効果

図8に処理前後の磁歪特性を示す。回転磁束及び任意交番磁束下においても鉄損と同様に低減しており、最大で72%低下した条件もある。一方で、圧延方向に磁化した条件(0deg.)では、磁歪は増加している。

方向性電磁鋼板は磁区制御や張力皮膜により圧延方向の鉄損が最小となるように製造されているが、ベクトル磁気特性制御技術により張力皮膜などの効果が減り、圧延方向の鉄損及び磁歪の増加に繋がったと推測する。しかしながら、その増加量は他の磁束条件での減少量に比べれば小さいことがわかる。

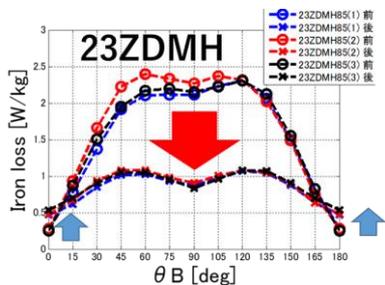


(3) 各種方向性電磁鋼板に対するベクトル磁気特性制御技術の有効性検証

ベクトル磁気特性制御技術による鉄損低減の再現性についても検証を行った。検証試料として既存の方向性電磁鋼板3種、それぞれ3枚について測定を行った。板厚 0.35mm の 35P175、板厚 0.23mm の 23P85 と 23ZDMH85 である。23ZDMH85 は市販されている既存の磁区制御材である。

図9に既存磁区制御材 23ZDMH85 に対する鉄損低減効果を示す。既存磁区制御材においても処理後では大幅に鉄損が低減されており、3枚とも同様な傾向を示している。また、圧延方向の特性についても先に述べたように鉄損は増加する傾向を示している。この結果は他の鋼板でも同様であった。

以上の検討から、ベクトル磁気特性制御技術は既存の各種方向性電磁鋼板の鉄損及び磁歪低減に有効であり、特に回転磁束や任意方向交番磁束下においては大きな効果が期待できる。一方で、圧延方向から 15deg. 以内に磁束が発生する箇所については処理により鉄損及び磁歪が増加することが分かった。



(4) 磁区観察によるベクトル磁気特性制御技術の効果検証

図10にベクトル磁気特性制御技術適用

前後の磁区構造を示す。処理前では、圧延方向（画像の左右方向）に伸びた白黒の模様を確認できる。この一つ一つが磁区である。一方で、処理後においては、処理前の磁区に比べ細かくなっていることが観察できている。この磁区構造の変化が鉄損及び磁歪特性に影響を与え、大幅な減少効果をもたらしたと考えられる。

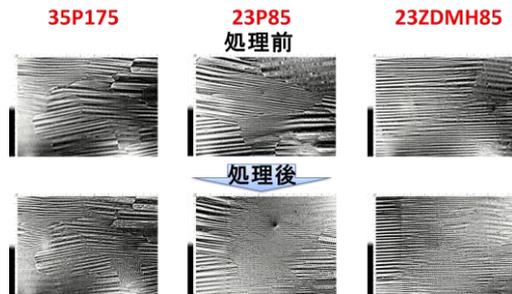


図10 ベクトル磁気特性制御技術適用前後の磁区構造

(5) 簡易変圧器モデル鉄心（リングコア）におけるベクトル磁気特性制御技術の有効性検証

図11に簡易変圧器モデル鉄心（リングコア）への処理領域を示す。試料は単板である。リングコア各領域内部には圧延方向以外の磁束が同時に発生しており、図中に示す領域に順次処理を適用した場合の鉄損低減効果を検証した。

図12にその処理前後の比較結果を示す。処理前の鉄損は青色の曲線、圧延方向に対して直角方向に磁束が通る領域①に処理を施した場合の鉄損は黒色の曲線、更に圧延方向に対して斜めに磁束が通る領域②を追加で処理を施した場合の鉄損は赤色の曲線を示す。処理領域を広くすることで、処理前に比べ順に鉄損が低減していることが分かる。本検証を行うには処理前後で励磁巻線の巻き直しなどを行う必要があるが、巻き直しによる鉄損変化に比べて大きく鉄損が低減していることを確認している。

以上の検討から、リングコア内の磁束方向を考慮し処理領域を広げることでリングコアの平均的な鉄損値は低減したことから、ベクトル磁気特性制御技術の変圧器鉄心への応用は可能であることが示された。但し、圧延方向に磁束が通る領域に追加で処理を施した場合、鉄損は僅かに増加したため、ベクトル磁気特性測定が示す結果となった。

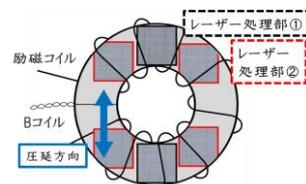


図11 簡易変圧器モデル鉄心の処理

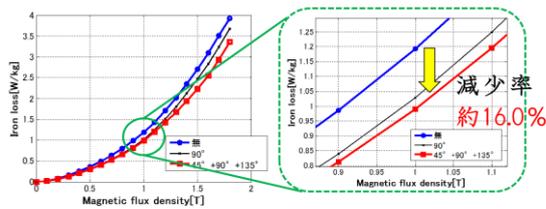


図 1.2 簡易変圧器モデル鉄心の処理効果

(6) 三相三脚変圧器モデル鉄心におけるベクトル磁気特性制御技術の有効性検証

図 1.3 に三相三脚変圧器モデル鉄心の処理領域、図 1.4 にその処理前後の特性を示す。積層数は 3 層である。処理前後の鉄損より、処理した領域内で鉄損の増減が見られ、平均して 13% の鉄損低減となった。以上のことから、変圧器モデル鉄心においても制御技術の有効性が認められた。

今後の課題としては、図 1.5 に示すように、磁束発生方向や回転磁束を考慮し、処理領域の最適化を行い、更なる鉄損低減を行う必要がある。また、積層数をより実機に近づけ、鉄損低減及び磁歪低減効果を明らかにする。加えて、ベクトル磁気特性及び二次元磁気ひずみの詳細なデータベースを活用し、シミュレーションによる低鉄損且つ低磁気ひずみとなる変圧器鉄心の設計を行っていく。



図 1.3 三相三脚変圧器モデル鉄心の処理 (T 接合部)

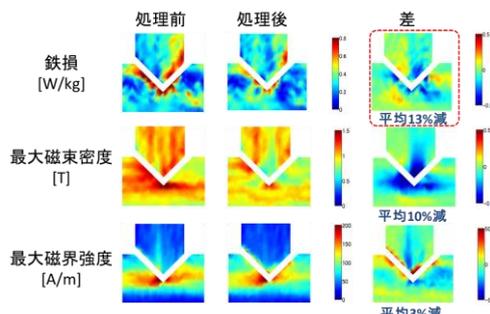


図 1.4 三相三脚変圧器モデル鉄心の処理効果

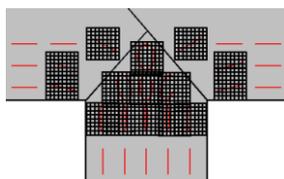


図 1.5 ベクトル磁気特性制御技術の適用方法の課題

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 8 件)

① 方向性電磁鋼板の低鉄損化手法の検討、若林大輔、榎園正人、日本文理大学紀要、査読無 (研究ノート)、第 45 巻第 2 号・第 46 巻第 1 号合併号、pp. 163-170、(2017. 11)

② 高効率モータの開発に向けて～電磁鋼板の鉄損と磁気ひずみ評価～、若林大輔、榎園正人、日本文理大学紀要、査読有、第 45 巻第 2 号・第 46 巻第 1 号合併号、pp. 47-53、(2017. 11)

③ 鉄心材料の二次元磁気ひずみ特性、若林大輔、榎園正人、日本 AEM 学会誌、査読有、第 25 巻 第 3、pp. 338-445、(2017. 9)

④ 任意回転磁束条件下における電磁鋼板の二次元磁気ひずみ特性、若林大輔、榎園正人、日本文理大学紀要、査読有、第 44 巻 第 2、pp. 1-8、(2016)

⑤ 三相変圧器モデル鉄心の局所二次元磁気ひずみ測定、若林大輔、榎園正人、日本 AEM 学会誌、査読付 (研究ノートして掲載)、第 23 巻 第 4、pp. 59-64、(2015. 12)

⑥ 三相誘導電動機の二次元磁気ひずみ解析、若林大輔、榎園正人、電気学会論文誌 A (基礎・材料・共通部門誌)、査読有、第 135 巻第 11、pp. 718-724、(2015. 11)

⑦ 回転磁束条件下での電磁鋼板の二次元磁気ひずみとベクトル磁気特性、若林大輔、榎園正人、日本文理大学紀要、査読有、第 43 巻 第 2、pp. 19-27、(2015. 10)

⑧ Two-dimensional magnetostriction under vector magnetic characteristic、D. Wakabayashi、M. Enokizono、Journal of Applied Physics、査読有、No. 117、17A926 (電子版のためページ数無)、(2015. 5)

〔学会発表〕 (計 3 1 件)

① リング形状方向性電磁鋼板を用いたベクトル磁気特性制御技術の効果検証、若林大輔、塩崎克樹、榎園正人、平成 30 年電気学会全国大会、(2018. 3)

② リング形状方向性電磁鋼板を用いた磁気特性制御の検証、塩崎克樹、若林大輔、榎園正人、電気学会マグネティックス研究会、(2017. 11)

③ Measurement system of local vector magnetic characteristics on magnetic core、Daisuke Wakabayashi、Masato Enokizono、

Magnetic Measurement 2017(MM2017)、(2017.9)

④ Measurement of two-dimensional magnetostriction under vector magnetic characteristics、Daisuke Wakabayashi、Masato Enokizono、Magnetic Measurement 2017(MM2017)、(2017.9)

⑤ Core Loss Reduction of Grain-oriented Electrical Steel Sheet by Hyperfine Processing Magnetic Domain、Masato Enokizono、Daisuke Wakabayashi、Yukio Mamiduka、23rd Soft Magnetic Materials conference (SMM2017)、(2017.9)

⑥ ベクトル磁気特性制御技術を用いた三相変圧器モデル鉄心の低鉄損化及び低磁気ひずみ化の基礎的検討、若林大輔、榎園正人、電気学会マグネティックス研究会、(2017.7)

⑦ Reduction of Two-dimensional Magnetostriction and Iron Loss of Grain-oriented Electrical Steel Sheet depend on Vector Magnetic Characteristic Control、D. Wakabayashi、M. Enokizono、The Tenth Japanese-Mediterranean Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting, Multifunctional and Nanomaterials (JAPMED' 10)、(2017.7)

⑧ 非標準条件下磁気特性（二次元磁気特性）、若林大輔、榎園正人、平成 29 年電気学会全国大会、(2017.3)

⑨ 鉄心材料の二次元磁気ひずみ特性、若林大輔、榎園正人、第 25 回 MAGDA コンファレンス in 桐生～電磁現象及び電磁力に関するコンファレンス～、(2016.11)

⑩ 低鉄損と低磁気ひずみを実現したベクトル磁気特性制御材の磁束密度と磁界強度ベクトル間の空間的位相差角評価、若林大輔、榎園正人、第 28 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム、(2016.5)

⑪ ベクトル磁気特性制御材の二次元磁気ひずみ測定、若林大輔、榎園正人、第 24 回 MAGDA コンファレンス in Tohoku -電磁現象及び電磁力に関するコンファレンス-、(2015.11)

⑫ 任意回転磁束条件下における電磁鋼板の二次元磁気ひずみ特性、若林大輔、榎園正人、平成 27 年電気学会基礎・材料・共通部門大会、(2015.9)

⑬ 次世代電磁機器開発に向けたベクトル磁気特性及び二次元磁気ひずみ測定、若林大輔、榎園正人、平成 27 年電気学会産業応用部門

大会、(2015.9)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

① 若林研究室ホームページ

<http://www.nbu.ac.jp/~wakabayashids/index.html>

② research map

<https://researchmap.jp/wakabayashids/>

受賞

① 電気学会平成 29 年度優秀論文発表賞 (IEEJ Excellent Presentation Award)、塩崎克樹(所属学生)、2018.9(受賞内定)、電気学会平成 30 年基礎・共通・部門大会、電気学会マグネティックス研究会(2017.11、韓国)の発表論文「リング形状方向性電磁鋼板を用いた磁気特性制御の検証」

② 平成 28 年電気学会全国大会優秀論文発表賞、若林大輔、2017.3、平成 29 年電気学会全国大会、平成 28 年電気学会全国大会の発表論文「方向性電磁鋼板の低磁気ひずみ化技術」

③ 日本 AEM 学会 MAGDA 優秀講演論文賞、若林大輔、2015.11、第 24 回 MAGDA コンファレンス in Tohoku、第 24 回 MAGDA コンファレンス in Tohoku の発表論文「ベクトル磁気特性制御材の二次元磁気ひずみ測定」

④ 電気学会平成 26 年優秀論文発表賞、若林大輔、2015.9、平成 27 年電気学会基礎・材料・共通部門大会、発表論文「E&S-W モデルを用いた電気機器鉄心の二次元磁気ひずみ解析」

6. 研究組織

(1) 研究代表者

若林 大輔 (WAKABAYASHI, Daisuke)

日本文理大学・工学部機械電気工学科・助教

研究者番号：60748747