

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：37501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13931

研究課題名(和文)ベクトル磁気特性制御技術の構築

研究課題名(英文)Development of Vector Magnetic Characteristic Control Technology

研究代表者

榎園 正人(Enokizono, Masato)

日本文理大学・工学部・特任教授

研究者番号：40136784

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):ファイバーレーザーによる磁区の極微細分化技術によって方向性電磁鋼板の任意方向並びに回転磁束下における磁気損失を大幅に改善した。ベクトル磁気特性技術の視点から方向性電磁鋼板の磁区極微細分化処理という新しい方法によって圧延方向以外の方向の磁気特性を大幅に改善することができた。回転渦電流損を40%以上減少し、鉄損も減少し、超微細加工による磁区の大きさは、0.25mm×0.25mm以内である。

研究成果の概要(英文): Grain oriented electrical steel sheet has strong uniaxial anisotropy by grain orientation. However it increases the rotational loss in T-joint corner parts of three-phase transformer core. Furthermore the anomalous eddy current loss is large due to the effect of large grain and large magnetic domain size. We developed the new grain-oriented electrical steel sheet with low rotational power loss by hyperfine processing magnetic domain. According to this hyperfine processing effect of magnetic domain, it was possible the rotational power losses were made to decrease to over 40%. And the iron loss of arbitrary direction decrease, also. The size of magnetic domain by hyperfine processing is within 0.25mm × 0.25mm.

研究分野：電気電子工学

キーワード：ベクトル磁気特性 制御 損失 磁区超微細分化 磁気ひずみ

1. 研究開始当初の背景

IEC(International Electrotechnical Commission)によってモータの効率が IE1~IE4 までランク分けされ、米国は 2011 年から、EU は 2015 年から IE3 クラスモータの義務化が進められた。それに対し、我が国は 2010 年によく IE2 クラスの義務化を提唱したが、韓国は 2008 年からであり、我が国の対応は大きく出遅れており様々なマスコミ(日刊工業新聞や日本経済新聞など)が警鐘を鳴らした。我が国は、ブレークスルーする技術が確立されているとは言えず周辺諸国に遅れをとることは間違いなかった。本技術は IE3 のみならず IE4 クラスモータやトップランナー変圧器の開発も可能にするもので、我が国独自の技術である。このように、電気機器の低損失・高効率化に向けた技術開発、特にそれに向けた材料開発は急務で、従来の視点とは全く異なるベクトル磁気特性からの学術的確立が望まれた。

2. 研究の目的

モータ・変圧器などの電気機器の鉄心材料として電磁鋼板が一般的であるが、ここ 25 年間著しい新規開発は行われていない(24 年日経エレクトロニクス社説)。これは成熟し尽くしたものではなく、材料特性評価法に問題がある。電気機器鉄心内では磁束密度ベクトルはいろいろな方向を向いたり、回転磁束が発生するなど複雑な挙動を示す。そのために必要なベクトル磁気特性技術を提唱し、確立してきた。従来の技術では方向性電磁鋼板において圧延方向にのみ特性を向上させたが、わずかでも方向が異なると急激に悪くなっている。ベクトル磁気特性技術は 30 年以上前に筆者によって確立した方法で、B(磁束密度)と H(磁界強度)の両方をベクトルとして活用するベクトル磁気特性活用技術を基本とする。これからの新しい材料開発はベクトル磁気特性の視点から捉え、実機に即した材料が求められている。その基本技術はベクトル間の位相差角に着目した磁区微細分化法の考案により、ベクトル磁気特性制御材の開発に成功し、従来の方向性電磁鋼板の回転磁気損失を 40%以上減に成功した。本研究では、このベクトル磁気特性の制御によって、従来材を質的に大幅に上回る磁性材料の開発法を目的とするものである。

3. 研究の方法

(1)ベクトル磁気特性とは

磁性材料の構成方程式は式 (1) で表すことができ、B ベクトルと H ベクトルの関係は図 1 で示される。従来の磁気特性表示は一次元

磁気測定で、その測定値はスカラー磁気特性とみることができる。

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M} = \mu_0 \tilde{\mu}_s \mathbf{H} \quad (1)$$

一般には磁気透磁率は比例定数として取り扱われているが、上式のベクトル関係を表すにはテンソル量として取り扱われるべきである。更に、実際の磁性材料では H ベクトルと B ベクトル間に空間的位相差角が存在し、B ベクトルの大きさ並びに方向によってそれは変化する。スカラー磁気特性では両ベクトルが同じ方向を向いたときか若しくは B ベクトルと同じ方向の成分の関係を表したことになる。従って、磁性材料の全体の磁気特性を表しているとは言えない。



図 1. ベクトル磁気特性とは

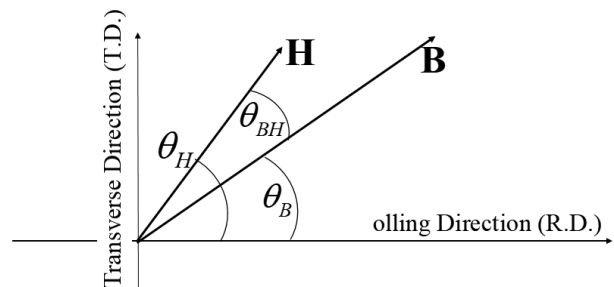


図 2 ベクトル関係図

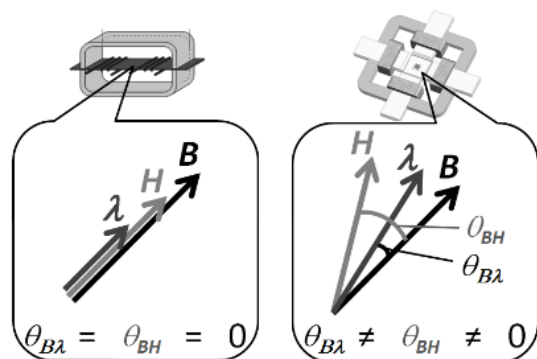
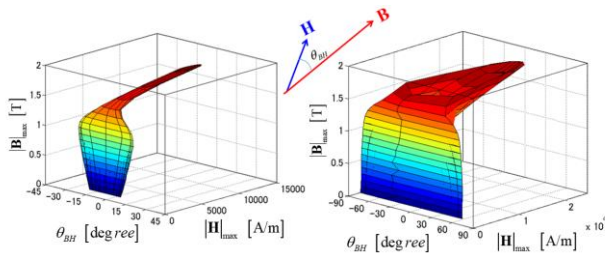


図 3 二次元磁気歪み測定

この時、任意方向の磁気特性を評価しようとして一次測定法（単板磁気試験器）でBベクトルと同じ方向成分のHベクトルの大きさの関係を測定しても、図1に見るようにBベクトルとH₁ベクトル並びにH₂ベクトル間の違いを表すことはできない。最近電磁鋼板を任意方向に切り出して単板磁気試験器で測定した結果が報告されているが、これには上述のような誤りがある。ベクトル関係を測定するには二次元磁気特性測定法（あるいはベクトルヒステリシスアナライザ）による必要がある。

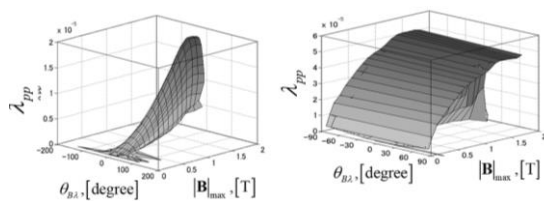
図2は交番磁束条件下の任意方向の磁気特性を二次元磁気特性測定法で測定して得られた結果を示す。このようにHとBのベクトル関係を表すには両ベクトル間の空間的位相差角 θ_{BH} を含めた表示が必要であり、特に θ_{BH} と両ベクトルの大きさの関係を把握する必要がある。

更に、機器の振動や騒音並びに磁気特性に及ぼす応力効果等の起因となる磁気歪みについても同様な視点が必要である。磁気歪み特性は電気機器の低損失・高効率化に重要な磁気特性で、これについても図3に示すように従来の測定法と異なり磁気歪みを変形現象として捉えなおし、それぞれの関係を測定する必要がある。図4は従来の磁気特性表示に代わって $|B|_{max}-|H|_{max}-\theta_{BH}$ 特性として(1)無方向性電磁鋼板、並びに(2)方向性電磁鋼板について示す。このように、鋼板の任意方向の磁気特性の相違を容易に理解することができる。同様に任意方向の磁気歪み特性についても、必ずしもBの大きさのみに依存していない。この磁気歪みを二次元磁気歪みとして図5の $\lambda_{pp}-\theta_{BH}-|B|_{max}$ 特性として示すことができる。



(1) 無方向性電磁鋼板 (2) 方向性電磁鋼板

図4 二次元磁気歪み特性



(1) 無方向性電磁鋼板 (2) 方向性電磁鋼板

図5 二次元磁気歪み特性

(2) 磁区極微細分化処理

レーザ焦点を絞り出力の強弱がコントロール可能なファイバーレーザを用いて、図6に示すように0.25mm x 0.25mm以下の微細な磁区構造に分割する。

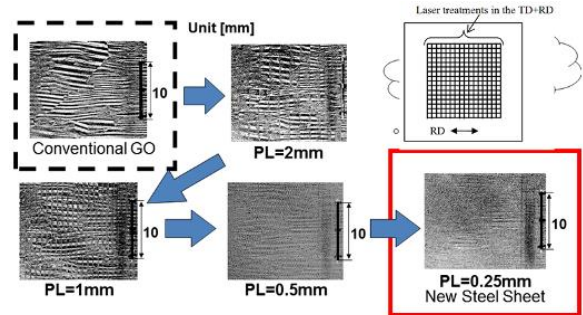
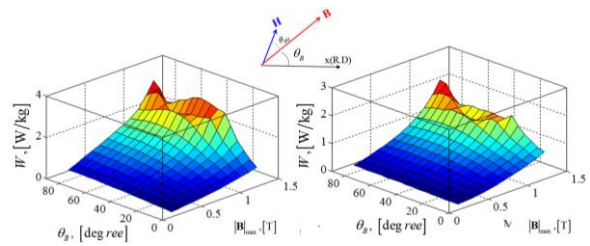


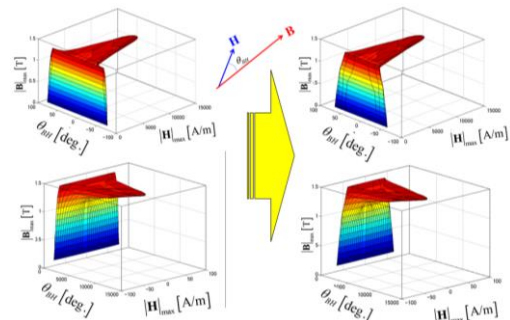
図6 方向性電磁鋼板の磁区極微細分化処理

図7は磁区極微細分化処理によって $|B|_{max}-|H|_{max}-\theta_{BH}$ 特性に及ぼす効果を示す。これにより大幅な θ_{BH} の縮小が起きていることがわかる。更に $W-\theta_B-|B|_{max}$ 磁気特性について示すと任意方向の特性を圧延方向からの傾き角 θ_B で見ると、図8に示すように圧延方向以外の方向の磁気損失が大幅に減少している。



(a) 磁区極微細分化処理前 (b) 磁区極微細分化処理後

図7 $|B|_{max}-|H|_{max}-\theta_{BH}$ 磁気特性の軸微細分化処理効果



(a) 磁区極微細分化処理前 (b) 磁区極微細分化処理後

図8 $W-\theta_B-|B|_{max}$ 磁気特性の磁区微細分化処理効果

図9は方向性電磁鋼板の上に磁区極微細分化処理の前後で任意方向の磁気損失の減少効果をずしたものである。圧延方向には0.5%程度増加し悪化するが全体として新しい磁気特性を持つ電磁鋼板に様変わりしている。

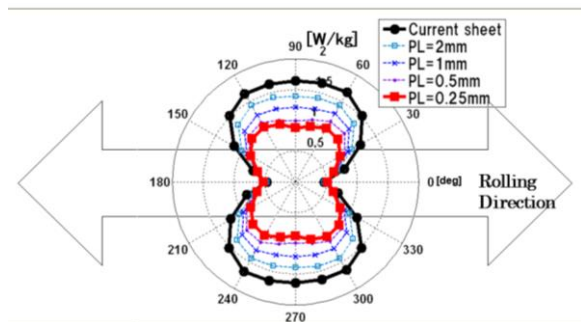


図9 任意方向の鉄損特性

図10は任意方向に歪んだ磁気歪みを二次元磁気歪みとして最大磁気歪み量 λ_{pp} に対する同様の磁区極微細分化効果を調べたものである。磁気歪み量に対しても大幅な減少効果を見ることが出来る。

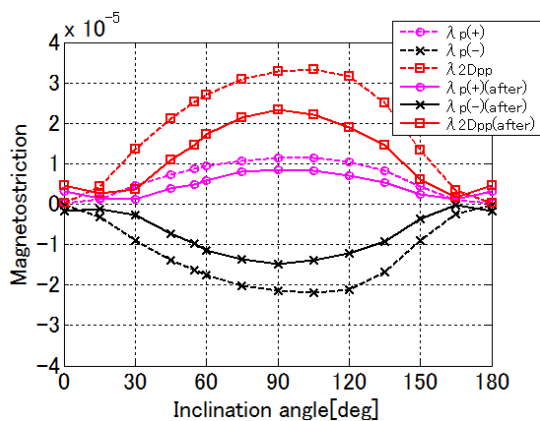


図10 任意方向の磁気歪み特性に及ぼす磁気歪み特性

図11はこの磁区極微細分化処理効果が特定の方向性電磁鋼板に限定されるものではなく、他の種類の方向性電磁鋼板に対して同様の検討を行ったものである。特に23ZDMH85材は従来のレーザスクラッチ材として知られる製品材でこの上にオーバー処理をして、この処理効果の有用性と独自性を示した。いずれの材料についても同様の大幅な磁気損失の減少効果を見ることが出来る。

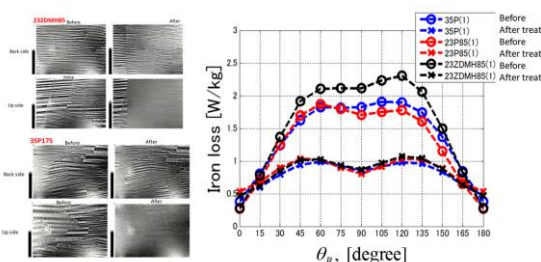


図11 他の種類の方向性電磁鋼板への再現効果

4. 研究成果

ベクトル磁気特性技術の視点から、方向性電磁鋼板の磁区極微細分化処理という新しい方法によって圧延方向以外の方向の磁気特性を大幅に改善することができた。この磁気損失の減少のメカニズムは従来の評価方法では知ることのできない磁束密度ベクトルと磁界強度ベクトルの間の空間的位相角 θ_{BH} の大幅な減少効果にある。

今後、行き詰ったように見える電磁鋼板の開発に本技術は新たな視点に基づく新しい電磁鋼板の開発に一石を投じることになる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 114 件)

①Masato Enokizono, “Technical Problems for Core Loss Reduction of High-Speed Motor Materials Science Forum,” Trans Tech Publications,(査読有),Vol.915,2018, pp.3-8, DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.915.3

②Mohachiro Oka, Masato Enokizono, Yuji Mori, Kazumasa Yamazaki, “Building Factor Evaluation of the Stator Core Made of Ultrathin Electrical Steel Sheet for the High-Speed Motor,” Trans Tech Publications,(査読有),Vol.915,2018, pp.9-15,2017, DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.915.9

③Yohji Okada , Ryou Kondo, Masatsugu Otsuki, Masato Enokizono, “Geometric Study of Space Motor and Power Assist Leg Motor,” Trans Tech Publications,(査読有),Vol.915,2018,pp.47-52 DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.915.45

④ Yuji Tsuchida, Naoyuki Yoshino, Masato Enokizono, “Reduction of Iron Loss on Laminated Electrical Steel Sheet Cores by Means of Secondary Current Heating Method,” IEEE Xplore., Journal: IEEE Transactions on Magnetics,(査読有),Vol.53, No.11, 2017, #8111004, DOI:10.1109/TMAG.2017.2705168

⑤Shohei Ueno, Masato Enokizono, Yuji Mori, Kazumasa Yamazaki, “Vector Magnetic Characteristics of Ultra-Thin Electrical Steel Sheet for Development of High-Efficiency High-Speed Motor,” IEEE Xplore., Journal: IEEE Transactions on Magnetics, (査読有), Vol.53,No.11,2017, #6300604, DOI:10.1109/TMAG.2017. 2731317

⑥Naoya Soda , Masato Enokizono, “Stator Shape Design Method for Improving Power Density in PM Motor,” IEEE Xplore., Journal: IEEE Transactions on Magnetics,(査読有), Vol.53,No.11,2017,#9100504,

DOI:10.1109/TMAG.2017. 2702563

⑦ Yuichiro Kai, Masato Enokizono, “Effect of Arbitrary Shear Stress on Vector Magnetic Properties of Non-Oriented Electrical Steel Sheets,” IEEE Xplore., Journal: IEEE Transactions on Magnetics, (査読有), Vol.53, No.11, 2017, #2002304, DOI:10.1109/TMAG.2017. 2703592

⑧ Yuji Tsuchida, and Masato Enokizono, “Non-Destructive evaluation of materials by magnetic measurements, Materials Science Forum,” (査読有), Vol.856, 2016, pp.141-146, DOI:https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.856.141

⑨ Masato Enokizono(Invited), “How to decrease magnetic power loss for development of high efficiency electric machines,” IEEE Xplore Digital Library Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), 2016(査読有) DOI: 10.1109/SIELA.2016.7542995

⑩ Naoya Soda, Masato Enokizono “Magnetic Field Analysis of Self-propelled Rotary Actuator's Stator in Consideration of the Rolling Direction of the Steel Sheet,” IEEE Transactions on Magnetics, (査読有), Vol.52, No.3, Article, #:7000404, 2016. DOI: 10.1109/TMAG.2015.2477425

⑪ Naoya Soda, Masato Enokizono, ”Utilization Method of Electrical Steel Sheets on Stator of Self-propelled Rotary Actuator,” IEEE Xplore Digital Library, Electrical Machines (ICEM), 2016 XXII International Conference on Electrical Machines(ICEM), (査読有) #16444225, DOI:10.1109/ICELMACH.2016.7732635

⑫ Mohachiro Oka, Masato Enokizono, “Evaluation of Hysteresis Loss and Eddy-Current Loss in Induction Motor Stator Cores Using the Excitation Inner Core Method,” IEEE Xplore Digital Library, Electrical Machines (ICEM), 2016 XXII International Conference on Electrical Machines(ICEM), (査読有), #16444080, DOI:10.1109/ICELMACH.2016.7732751

⑬ Yuji Tsuchida, Masato Enokizono, ”Residual Stress Evaluation by Measuring Barkhausen Signals for High Efficiency Motors,” IEEE Xplore Digital Library, Electrical Machines (ICEM), 2016 XXII International Conference on Electrical Machines(ICEM), (査読有), #16444136 DOI:10.1109/ICELMACH.2016.7732848

⑭ Wakabayashi1, and M.Enokizono, “Two-dimensional magnetostriction under vector magnetic characteristic” Journal of Applied Physics 117,

17A926 (2015)

(査読有) DOI:https://doi.org/10.1063/1.4919612

⑮ Yuichiro Kai, Yuji Tsuchida, Masato Enokizono, “Vector Magnetic Characteristic Analysis of a Permanent Magnet Motor by Controlling Local Stress”, IEE Transaction on Magnetics, Vol.51, No.3, March 2015, (査読有), 8101904, DOI:10.1109/TMAG.2014.2362515

⑯ Yuichiro Kai Masato Enokizono, ”Measurement of two-dimensional magnetostriction of a non-oriented electrical steel sheet under shear stress”, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics Vol.48 Nos 2,3(2015), (査読有), pp.233-238 DOI 10.3233/JAE-151993 IOS Press

⑰ Yohji OKADA Hironari SUZUKI, Ken-ici MATSUDA, Ryou KONDO, Masato Enokizono, “Development of highly efficient hybrid magnetic bearing and application to Ultra-low temperature fluid pump” Mechanical Engineering Journal Vol.2(2015) No.4P.15-00086, DOI:https://doi.org/10.1299/mej.15-00086

[学会発表] (計 115 件)

① 塩崎克樹, 若林大輔, 榎園正人, (優秀論文賞 IEEJ Excellent Presentation Award) ”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,” 電気学会マグネティックス研究会, 韓国濟州市役所会議室, (韓国) 2017.11.27-28

② 榎園正人(招待講演), “電力機器の低損失・高効率化はどうすればよいか?” 電気学会東京支部 茨城支所講演会, 茨城大学工学部イノベーションスペース, (茨城), 2017.1.11

③ Masato Enokizono, “(Invited Speaker as Tutorial), “CORE LOSS REDUCTION METHOD FOR DEVELOPMENT OF HIGH EFFICIENCY MOTORS”, XXIIth International Conference on Electrical Machines (ICEM'2016), SwissTech Convention Center Lausanne – (Switzerland), 2016.9.4-7

④ Masato Enokizono(招待講演), “An overview of Research Methods Conducted for the Past Forty Years : Low Loss And High Efficiency Motor.” ABB Ab Corporate Research Center Vasteras, (Sweden). 2016.6.7

⑤ Masato Enokizono(招待講演), “How to decrease magnetic power loss for development of high efficiency electric machines” , XIXth

International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA2016)
Bourgas,(Bulgaria) 2016.5.29-6.1

⑥榎園正人(招待講演), “低損失高効率なモータのためのベクトル磁気技術応用展開”, 2015 ソリューションフォーラム第21回スマート設計技術フォーラム, サンシャインシティ文化会館,2015.10.21(東京)

⑦榎園正人(招待講演), “磁性鋼板のベクトル磁性評価・活用技術”, 材料の微細組織と機能性 第133委員会 第228回研究会(第1分科会)「磁性材料の微細構造解析」, JR博多シティ会議場 大会議室 1,2015.9.19(福岡)

⑧榎園正人(基調講演), “電気機器の高効率化はどうすればよいか”, 平成27年電気学会産業応用部門大会, 大分大学且野原キャンパス,2015.9.2-9.4.(大分)

⑨Masato Enokizono(基調講演), "Experiences and Suggestions concerning Teaching Electromagnetic Engineering in Japan", Ninth Japanese-Mediterranean Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Super-conducting, Multifunctional and Nanomaterials, (JAPMED'9) Sofia,(Bulgaria) 2015.7.5-8

⑩榎園正人(基調講演), “電磁機器の磁気歪み特性”, 第27回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム(SEAD27), 長崎県佐世保市ハウステンボス タワーシティ, 2015.5.14-15(長崎)

⑪ Masato Enokizono(基調講演), “How to Decrease Loss and Upgrade Efficiency of Electrical Machines by Vector Magnetic Characteristic Technology”, XVIII International Symposium on Theoretical Electrical Engineering (ISTET 2015)& Symposium on Electromagnetic Evaluation of Materials(SEEM'15), 2015.7.7-10,Kolobrzeg, Poland

[図書] (計 5 件)

①技術情報協会企画編集 67名(榎園正人), 「磁性材料・部品の最新開発事例と応用技術～HV・産業用モータ、磁気センサ、アクチュエータ、ワイヤレス給電、電磁波吸収・遮蔽材～」, 技術情報協会出版, 2018(3), 572頁,ISBN: 978-4-86104-705-3

②榎園正人, 解説「電磁場解析から磁気特性解析へ(後編)」(2017)技術総合誌オームOHM, 2017年8月号 pp66-71,第104号第8号第1298号,ISBN 4910021210875

③榎園正人, 解説「電磁場解析から磁気特性解析へ(前編)」(2017)技術総合誌オームOHM, 2017年7月号 pp29-35,第104号第7号第1297号,ISBN 4910021210776

④榎園正人, 科学情報出版(株), 「ベクトル磁気特性技術と設計法-モータの低損失・高効率化設計法」, 2015(4),262頁, ISBN: 978-4-904774-36-6

⑤日本磁気学会編集,共著(榎園正人), 「磁気便覧」丸善出版(株), 2016(1),904頁,ISBN978-4-621-30014-5 [産業財産権]

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 1 件)

名称: ベクトル磁気特性制御材、および、鉄心

発明者: 榎園正人、塩田広

権利者: 東芝産業機器システム(株)、国立大学法人大分大学

種類: 特許

番号: 特許第6215673

取得年月日: 平成29年9月29日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.vector-magtec.jp>

6. 研究組織

(1)研究代表者

榎園 正人 (Enokizono, Masato)

日本文理大学・工学部・特任教授

研究者番号: 40136784

(2)研究分担者

甲斐 祐一郎 (Kai, Yuichiro)

鹿児島大学・理工学域工学系・准教授

研究者番号: 50595436

(3)研究分担者

佐藤 尊 (Sato, Takeru)

大分大学・理工学部・助教

研究者番号: 90647554

(4)研究分担者

若林 大輔 (Wakabayashi, Daisuke)

日本文理大学・工学部・助教

研究者番号: 60748747