

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04354

研究課題名(和文) 磁界解析における圧粉磁芯の均質化手法の開発と小形高周波リアクトルの設計

研究課題名(英文) Developments of Homogenization Techniques of Soft Magnetic Composite in Magnetic Field Analysis and Design of Design of Small High Frequency Reactor

研究代表者

村松 和弘 (MURAMATSU, Kazuhiro)

佐賀大学・理工学部・教授

研究者番号：30263627

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)：本研究では、高周波用金属磁性材料である圧粉磁芯の均質化手法を開発し、高周波用リアクトルの最適設計を行った。(1)渦電流損失計算法に関して、古典渦電流損のみでなく、異常渦電流損も考慮し、さらに、粒子、ギャップ、磁区幅と方向のばらつきまで考慮する方法を提案し、実測値を再現した。(2)インダクタンス計算法に関して、圧粉磁芯の圧縮成形の粒子の変形による異方性を粒子モデルで表現する方法を提案し、実測値を再現した。また、脚の圧粉磁芯を、磁気特性が悪い圧縮方向を磁路に向けた方が増分インダクタンスの特性が良くなることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鋼板が規則正しく積み上げられた積層鉄芯の均質化手法とは異なり、粒子及びギャップにばらつきがある圧粉磁芯の均質化手法では、これらのばらつきにより、磁芯内の磁束分布が不均一となり、この不均一性を考慮しないと渦電流損失などの磁気特性を表現できないことを示した学術的意義は高い。また、そのばらつきが渦電流損の増加に及ぼす影響、圧縮成形がインダクタンスに及ぼす影響を示した社会的意義は大きい。

研究成果の概要(英文)： In this research, homogenization techniques of soft magnetic composite (SMC), which is metallic magnetic materials for high frequencies, are developed, and an optimal design of reactor is done. (1) In the eddy current loss calculation, methods to take account of not only the classical eddy current loss but also the excess loss, moreover, the non-uniformities of the particles, gaps, domain widths and directions are proposed, and the measured eddy current loss can be represented. (2) In the inductance calculation, a method to model the anisotropic magnetic characteristics due to compression molding by the flattened particle cell model is proposed, and the measured inductance can be represented. Moreover, it is shown that the characteristics of the incremental inductance become better by setting the legs to be the compression direction, which has worse magnetic characteristics.

研究分野：電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：圧粉磁芯 磁界解析 均質化手法 鉄損 異常渦電流損 リアクトル インダクタンス 異方性

1. 研究開始当初の背景

CO2 削減の観点から、電気自動車やエアコンなどに用いられるモータの駆動には、所望の電流波形が自由に発生できるパワー半導体デバイスを用いたインバータ電源が用いられ、省エネルギー運転が行われる。パワー半導体デバイスでは、スイッチング周波数が高いほど周辺部品を小形化できるため、その周波数は、従来のケイ素(Si)を用いたデバイスの数 kHz から、炭化ケイ素(SiC)や窒化ガリウム(GaN)を用いる新しいデバイスでは、100kHz~数 MHz と高くなっている。一方、スイッチング周波数に起因する高調波成分を抑制する周辺部品のリアクトルの磁芯には、従来、高抵抗のフェライト磁芯が用いられてきたが、近年、飽和磁束密度が大きい圧粉磁芯の適用が検討されている。

圧粉磁芯は、絶縁皮膜された鉄粉などの金属磁性粉末に樹脂を混合し圧縮成形をしたもので、高周波で問題となる渦電流の影響が小さく、従来のフェライト磁芯に比べて飽和磁束密度が高いため、磁芯を小形化できる。近年、磁性粉末の組成制御、絶縁皮膜の耐熱性向上による歪取り焼鈍、圧縮成形時の圧力向上による高充填率などのため、圧粉磁芯の磁気特性は格段に向上し、既に、電気自動車の昇圧コンバータ用リアクトルなどで実用化が始まっている。

圧粉磁芯を用いる高周波用リアクトルのさらなる小形・低損失化設計を行うためには、圧粉磁芯の粒子中の磁気飽和と渦電流まで考慮した磁界解析が有用と考えるが、解析で圧粉磁芯の膨大な粒子をそのままモデル化することは、計算負荷が膨大となり、不可能である。一方、電磁鋼板を積み上げた積層鉄芯では、積層鉄芯を塊状鉄芯でモデル化する均質化手法が開発され、その妥当性と有用性が示されている。そこで、研究代表者らは、既に、本手法を圧粉磁芯に拡張するため、その基礎的検討として、均一な粒子が格子状に整列していると仮定した粒子一つ(セルモデル)の非線形渦電流解析により、圧粉磁芯の磁気特性をモデリングする方法を開発し、実際の圧粉磁芯の磁気特性の実測値の再現を試みた。その結果、同じ鋼板を均等に積み上げた積層鉄芯とは異なり、圧粉磁芯では、粒子にばらつきがあるため、粒子のばらつきを考慮した均質化手法を開発する必要性が明らかになった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、圧粉磁芯を用いた高周波用リアクトルの小形・低損失化設計を可能にするため、粒子の非線形磁気特性、渦電流、及びばらつきを考慮した均質化手法による圧粉磁芯の磁界解析法を開発するとともに、実際に高周波用リアクトルの設計を行い、試作実験により、本提案法の妥当性と有用性を示す。

3. 研究の方法

本研究では、主に、圧粉磁芯を用いた高周波用リアクトルの均質化手法で問題となった以下の2項目について研究を行った。

- (1) 圧粉磁芯の渦電流損を平均粒径と体積充填率から決定される一定の絶縁層の厚みを有するセルモデルの古典渦電流損で評価すると実測値より小さかった。そのため、粒子のばらつきや異常渦電流損を考慮したモデリング方法について検討した。
- (2) 圧粉磁芯を用いたリアクトルのインダクタンスを磁界解析で求める場合、リング試料を用いて測定された磁芯の磁気特性を用いてもインダクタンスが実測値と一致しない場合があった。そこで、圧縮成形の粒子の変形による異方性磁気特性を考慮したインダクタンスの計算法について検討した。

4. 研究成果

(1) 粒子のばらつきと異常渦電流損を考慮した渦電流損のモデリング⁽¹⁾

渦電流損の実測には、圧粉磁芯(ダイヤメット社製:MBS-R3)の内径 50, 外径 70, 厚み 5mm のリング試料を用いた。本圧粉磁芯は純鉄のアトマイズ粉末に MgO 絶縁被膜を施した磁性粉末を成形したもので、成形後焼鈍が行われたので、圧粉磁芯の粒子の磁気特性は純鉄と同様とした。粒子径 D の平均は $50 \mu\text{m}$ であり、体積充填率 F は 92 % である。

図 1 に、絶縁物に囲まれた磁性粒子が格子状に無限に並んでいると仮定したモデルの粒子一つ分のみの解析モデル(セルモデル)を示す。本モデルは古典渦電流損計算用である。(a)図は絶縁層の厚みが一定、(b)図は絶縁層の一部の厚みが異なるモデルである。解析領域は、対称性を考慮して $1/8$ 領域のみとし、最大値 1T, 周波数 1 kHz の正弦波で変化する一様な磁束密度を z 方向に与えた。磁性粒子の磁気特性は純鉄の初期磁化曲線、導電率は $\sigma = 9 \times 10^6 \text{ S/m}$ とし、一次直方体辺要素有限要素法を用いた $A-\phi$ 法による非線形過渡渦電流解析で得られた渦電流密度より古典渦電流損を計算した。

最初に、平均粒径と体積充填率で寸法を決定した標準セルモデルを用いて古典渦電流損を計算した。図 1(a) で、 $D=D_1=D_2=50 \mu\text{m}$, $G_0=1.37 \mu\text{m}$ とした標準セルモデルで得られた古典渦電流損の計算値は 2.03 W/kg となり、実測の渦電流損 11.35 W/kg の約 $1/5$ と大幅に小さく評価された。そこで、粒子間の絶縁が完全でない場合に流れる粒子間渦電流による渦電流損も検討したが、本試料では、パルク体で測定された導電率が 0.01 S/m と小さく、この値を用いた上記リング試料の渦電流損の計算値も $4.18 \times 10^{-5} \text{ W/kg}$ と無視できるほど小さかった。

実測の渦電流損が計算値より大きくなり原因として、粒子サイズ、粒子形状にばらつきがある場合の磁束が鎖交する断面積の増加、大きな粒子への磁束の集中、不均一なギャップによる磁束の局所的な集中、及び異常渦電流損による渦電流損の増加が考えられる。そのため、粒子と絶縁層のばらつき、及び異常渦電流損が、渦電流損に及ぼす影響を検討した。まず、古典渦電流損について、図 1 (a)のモデルを用いて、粒子サイズ D ($=D_1=D_2$)、粒子形状 R ($=D_2/D_1$)のばらつき、図 1(b)のモデルを用いてギャップ形状による影響を検討した。なお、 D と R のばらつきは標準セルモデルを平均とするガウス分布で近似し、標準偏差は実測に用いた圧粉磁芯の SEM 写真より推定した。異常渦電流損は、図 2 に示す磁束の変化を磁壁の移動で表すモデルの線形過渡渦電流解析より算出した。異常渦電流損のモデルでも、標準セルモデルの粒子サイズ D と磁区幅 w_d を、それぞれ、50と6.25 μm とし、 D 、 w_d 、及び磁区方向のばらつきを考慮した。 D と w_d の関係、 w_d のばらつき(ガウス分布)は、文献を参照した。方向のばらつきは、確率密度を一定とした。

図 3 に、上記諸因子が渦電流損に及ぼす影響を示す。全体の渦電流損に対する異常渦電流損は無視できず、また、古典、異常渦電流損ともに、粒子及び磁区のばらつきにより増加し、これらを考慮すると標準モデルの古典渦電流損より実測値に近づくことがわかる。

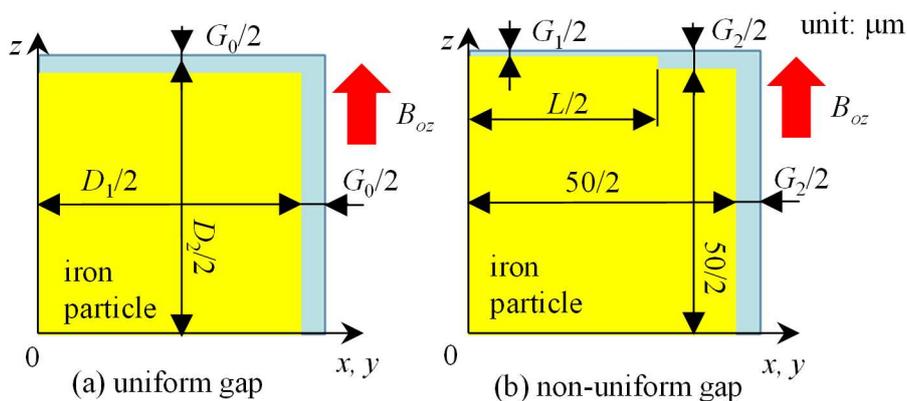


図 1 古典渦電流損計算用セルモデル (1/8 領域)

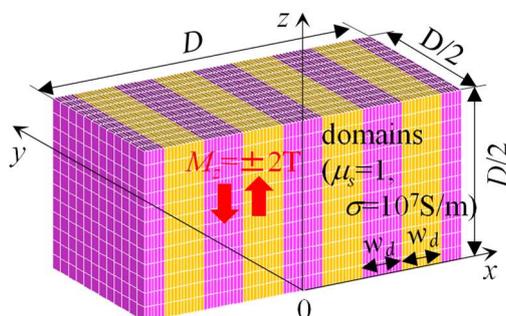


図 2 異常渦電流損計算用セルモデル (1/4 領域)

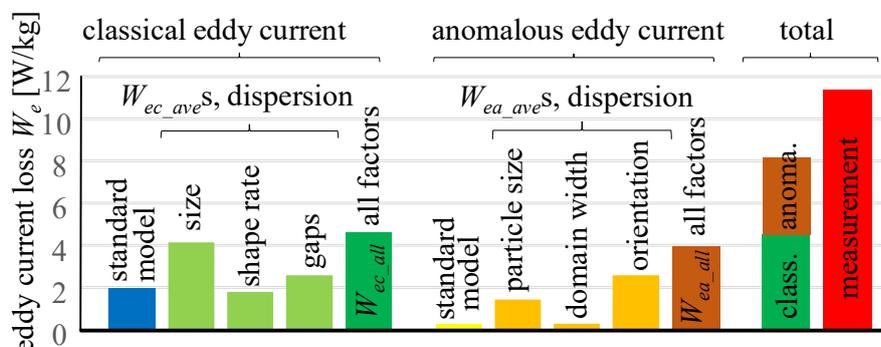


図 3 粒子のばらつき、ギャップ形状、異常渦電流損が渦電流損に及ぼす影響

(2) 圧縮成形による磁気異方性を考慮したインダクタンス計算⁽²⁾

実測には、純鉄のアトマイズ粉末に絶縁被膜を施した磁性粉末を体積充填率 F が 94 %になるように圧縮成形した圧粉磁芯(昭和電工マテリアルズ:EU-71)を用いた。粒子径の平均は 50 μm である。また、

成形後、焼鈍が施されるため、粒子の磁気特性は等方性と仮定した。

圧粉磁芯の磁気特性を表現するセルモデルとして、図 4 に示す圧縮方向に扁平な直方体磁性粒子を一定の厚みの絶縁層で囲んだモデルを提案した。本モデルでは、粒子の圧縮及び垂直方向の寸法 l_c 及び l_v と絶縁層の厚み g の比率が異なるため、磁芯の圧縮と垂直方向の実効的な磁気特性は異なり、異方性が表現できる。 l_c 、 l_v 、及び g は、実測で得られた圧縮と垂直方向の異なる B_m - H_b 曲線を再現するように決定した。図 5 に、58 mm × 10 mm × 10 mm の直方体の圧粉磁芯を、長手方向と幅方向に圧縮成形して製作し(それぞれ、Rod_com と Rod_ver)、パーミアメータを用いて測定された長手方向の B_m - H_b 曲線 (B_m : 最大磁束密度、 H_b : B_m 時の磁界の強さ)、及び l_c 、 l_v 、及び g を、それぞれ 30.84、16.15、及び 0.137 mm に調整して得られた粒子(等方性)及び磁芯の圧縮と垂直方向の B_m - H_b 曲線を示す。実測の B_m - H_b 曲線は圧縮と垂直方向で異なり、提案モデルで再現できていることがわかる。なお、提案モデルは、粒子の磁気特性が等方性であるため、任意方向の磁気特性も表現できる。

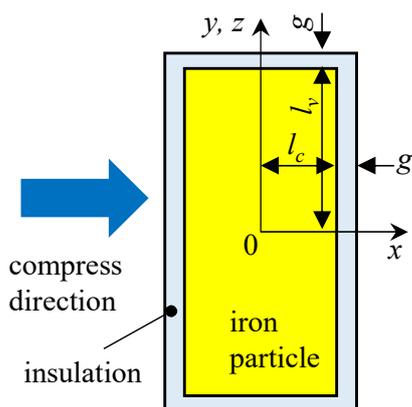


図 4 異方性磁気特性用セルモデル

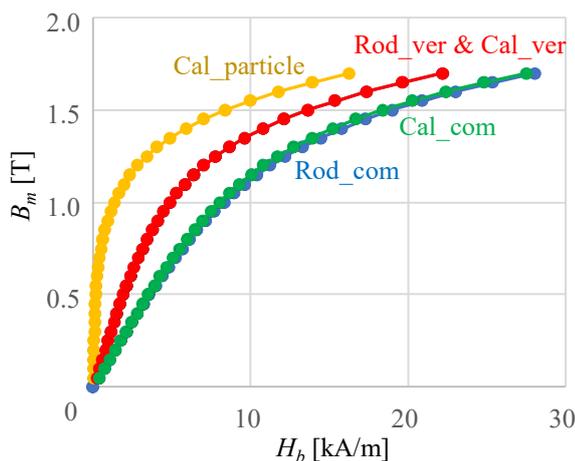


図 5 B_m - H_b 曲線

インダクタの直流重畳時の増分インダクタンス ΔL を計算する場合、圧粉磁芯の圧縮と直角方向の実効的な増分透磁率 $\Delta\mu_{ec}$ と $\Delta\mu_{ev}$ が必要になる。これらは、まず、厚み方向に圧縮成形されたリング試料(内径: 45 mm, 外径: 55 mm, 厚み: 5 mm)に導線を 157 ターン巻き、巻線に直流電流を流した状態で LCR メータ (Keysight Technologies: precision LCR meter E4980) により $\Delta\mu_{ev}$ を実測し (Ring_ver)、 $\Delta\mu_{ec}$ は上記粒子セルモデルを用いて推定した。図 6 に、実測された直流磁束密度 B_{dc} を重畳した場合の直角方向の増分比透磁率 $\Delta\mu_{rev}$ 、推定された粒子の増分比透磁率 $\Delta\mu_{rp}$ 、圧縮方向の増分比透磁率 $\Delta\mu_{rec}$ を示す。

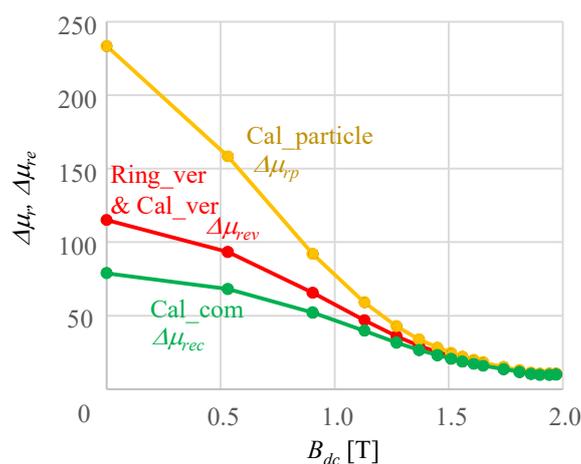


図 6 直流磁束重畳時の増分比透磁率

本セルモデルを用いて、図 7 に示すインダクタモデルの直流重畳時の増分インダクタンス ΔL を計算した。ただし、対称性により 1/8 領域のみ解析した。磁気特性の異方性の影響を検討するため、Model ZZ と XZ のように、それぞれ、圧縮方向が z と x 方向と異なる圧粉磁芯が脚に用いられた。巻線は、全領域で 52 ターン巻かれている。磁芯間のギャップ G は、実測では密着させたが、製作上の誤差を考え、解析では、 $I_{dc} = 0$ の ΔL が、なるべく実測値と一致するように、Model ZZ と XZ で、それぞれ、 $G = 0.1$ と 0.04 mm とした。

実測は、直流重畳電流 I_{dc} を流した状態の ΔL を上記の LCR メータ ($V_f=1V, 10kHz$) で測定し、解析は、**A** 法による一次直方体辺要素有限要素法で静磁界解析を行った。まず、直流重畳電流 I_{dc} を与えた場合の磁束密度 B_{dc} の分布を、図 5 で推定された粒子の B_m-H_b 曲線とセルモデルにより異方性を表現した非線形静磁界解析により求める。次に、増分インダクタンス ΔL を、上記の B_{dc} の大きさから図 6 を用いて得られる増分透磁率 $\Delta\mu_{ec}, \Delta\mu_{ev}$ の分布を与えた線形静磁界解析により求める。

図 8 に、直流重畳電流 I_{dc} に対する増分インダクタンス ΔL の変化の計算値と実測値を示す。計算値と実測値は概ね一致しており、また、Model ZZ と XZ で ΔL が異なっており、圧粉磁芯のインダクタのインダクタンス計算では、圧縮成形による磁気特性の異方性を考慮する必要があることがわかる。さらに、図 8 では、Model ZZ の方が電流に対する ΔL の変化が小さく、また、電流が大きい領域では ΔL が大きくなっており、本リアクトルでは、脚の圧粉磁芯は、磁気特性が悪い圧縮方向を磁路の方向に向けた方が、リアクトルの特性は良くなることわかる。

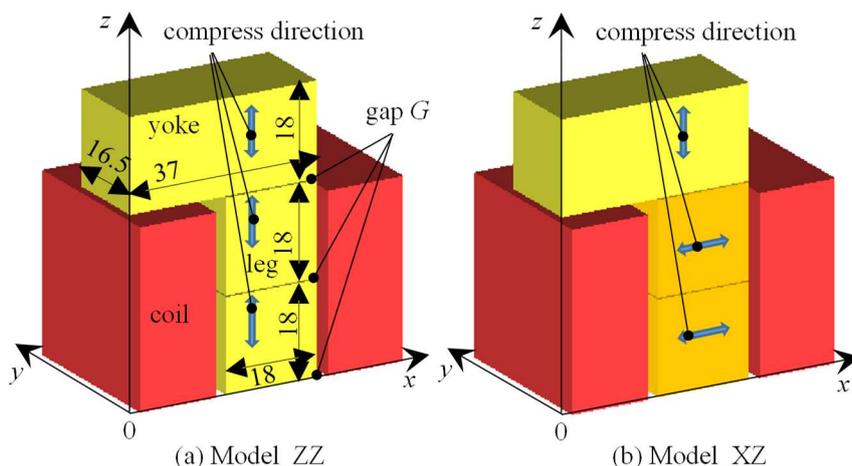


図 7 インダクタの解析モデル (1/8 領域)

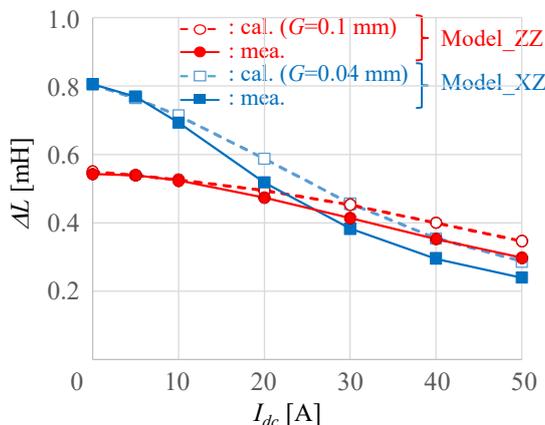


図 8 増分インダクタンス

最後に、本研究で得られた成果を要約すると以下ようになる。

- (1) 渦電流損失計算法に関して、渦電流損は、古典渦電流損のみでなく、異常渦電流損も考慮し、さらに、粒子、絶縁物、磁区幅と方向のばらつきまで考慮する方法を提案し、実測値を再現した。
- (2) インダクタンス計算法に関して、圧粉磁芯の圧縮成形の粒子の変形による異方性を粒子モデルで表現する方法を提案し、実測値を再現した。また、脚の圧粉磁芯を、磁気特性が悪い圧縮方向を磁路に向けた方が増分インダクタの特性が良くなることを示した。

参考文献

- (1) Y. Gao, Y. Araki, H. Dozono, K. Muramatsu, W. Guan, J. Yuan, C. Tian, and B. Chen, "Modeling of anomalous eddy current losses due to movement of domain walls in particles of a soft magnetic composite," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 56, no. 4, #7515904, 2020.
- (2) Y. Gao, Y. Gotoh, K. Hamada, S. Araki, K. Muramatsu, Y. Takeuchi, Y. Takahashi, K. Fujiwara, T. Ogawa, C. Ishihara, K. Aiba, and S. Otsuka, "Modelling of magnetic anisotropy due to compression molding of soft magnetic composite for inductance calculation," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 58, no. 9, #7200905, 2022.

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Gao Yanhui, Araki Yusuke, Dozono Hiroshi, Muramatsu Kazuhiro, Guan Weimin, Yuan Jiaxin, Tian Cuihua, Chen Baichao	4. 巻 56
2. 論文標題 Modeling of Anomalous Eddy Current Losses Due to Movement of Domain Walls in Particles of a Soft Magnetic Composite	5. 発行年 2020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.2019.2956977	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 該当する

1. 著者名 Gao Yanhui, Ichimaru Shuhei, Miyabe Toshihisa, Dozono Hiroshi, Muramatsu Kazuhiro, Guan Weimin, Yuan Jiaxin, Tian Cuihua, Chen Baichao	4. 巻 57
2. 論文標題 Proposal of Core Structures for Iron Loss and Noise Reduction of Three-Phase Reactor With Anisotropic Iron Core	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMAG.2020.3004840	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 該当する

1. 著者名 Gao Yanhui, Gotoh Yuji, Hamada Kyoya, Araki Shun, Muramatsu Kazuhiro, Takeuchi Yukiha, Takahashi Yasuhito, Fujiwara Koji, Ogawa Tetsuya, Ishihara Chio, Aiba Kohei, Otsuka Seira	4. 巻 58
2. 論文標題 Modeling of Magnetic Anisotropy Due to Compression Molding of Soft Magnetic Composite for Inductance Calculation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMAG.2022.3176853	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 該当する

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Yanhui Gao, Yusuke Araki, Hiroshi Dozono, Kazuhiro Muramatsu, Weimin Guan, Jiaxin Yuan, Cuihua Tian, Baichao Chen
2. 発表標題 Modelling of anomalous eddy current loss due to movement of domain wall in particle of soft magnetic composite
3. 学会等名 The 22nd International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG 2019), no. PC-A2 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荒木優佑, 高 炎輝, 堂園 浩, 村松和弘
2. 発表標題 圧粉磁芯の磁区のばらつきを考慮した異常渦電流損のモデリング
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会, Nos. SA-19-072, RM-19-092
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yanhui Gao, Hiroshi Dozono, Kazuhiro Muramatsu, Weimin Guan, Cuihua Tian, Jiaxin Yuan, Baichao Chen, Hamed Hamzehbahmani
2. 発表標題 Modeling of excess loss taking account of variation of crystal orientation in non-oriented electrical steel sheet
3. 学会等名 The 19th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (IEEE CEFC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Weimin Guan, Yanhui Gao, Kazuhiro Muramatsu, Hamed Hamzehbahmani
2. 発表標題 Modeling of domain wall associated eddy current in silicon steels
3. 学会等名 The 19th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (IEEE CEFC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 村松和弘, 荒木 駿, 濱田恭也, 竹内雪葉, 藤原耕二, 高 炎輝, 後藤雄治, 小川哲矢, 石原千生, 相場高平, 大塚聖良
2. 発表標題 圧縮成形による異方性と直流重畳を考慮した圧粉磁芯のインダクタンス計算
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会, nos. SA-21-052, RM-21-073
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古賀達也, 村松和弘
2. 発表標題 インバータ電源用LCフィルタのリアクトルの非線形磁気特性を考慮した磁界解析
3. 学会等名 電気学会静止器・回転機合同研究会, nos. SA-22-017, RM-22-017
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Gao, Y Gotoh, K. Hamada, S. Araki, K. Muramatsu, Y. Takeuchi, Y. Takahashi, K. Fujiwara, T. Ogawa, C. Ishihara, K. Aiba, S. Otsuka
2. 発表標題 Inductance Calculation of Soft Magnetic Composite Inductor Considering Anisotropy Due to Compression Molding and DC Bias
3. 学会等名 The 23rd International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG 2021), no. PB-A1-13 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Xuanda Hou, Kazuya Kawai, Hiroshi Dozono, Kazuhiro Muramatsu, Norihiro Ogishima, Nguyen Gia Minh Thao, Keisuke Fujisaki, Yanhui Gao, Weimin Guan
2. 発表標題 Electromagnetic field analysis on ringing phenomenon of inductor in inverter considering stray capacitance of windings
3. 学会等名 The Joint Technical Meeting on Static Apparatus and Rotating Machinery, IEEJ, nos. SA-22-061, RM-22-064
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Xuanda Hou, Kazuya Kawai, Hiroshi Dozono, Kazuhiro Muramatsu, Norihiro Ogishima, Nguyen Gia Minh Thao, Keisuke Fujisaki, Yanhui Gao, Weimin Guan, Cuihuad Tian, Jiixin Yuan, Baichao Chen
2. 発表標題 Electromagnetic field analysis on ringing phenomenon of inductor in inverter considering stray capacitance of windings
3. 学会等名 The 20th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (IEEE CEFC 2022), no. P05-6 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Xuanda Hou, Kazuya Kawai, Hiroshi Dozono, Kazuhiro Muramatsu, Norihiro Ogishima, Yoshimoto Kawakita, Nguyen Gia Minh Thao, Keisuke Fujisaki, Yanhui Gao, Weimin Guan
2. 発表標題 Investigation on resonance of inductor in high frequency using electromagnetic field analysis considering stray capacitance of winding
3. 学会等名 The Joint Technical Meeting on Static Apparatus and Rotating Machinery, IEEJ, nos. SA-23-003, RM-23-003
4. 発表年 2023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
研究分担者	高 炎輝 (GAO Yanhui) (40586286)	大分大学・理工学部・准教授 (17501)	

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		
中国	武漢大学		