

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02179

研究課題名（和文）軟磁性微粒子の高周波帯域における磁気損失の起源解明とその設計手法の開発

研究課題名（英文）Energy loss analysis in soft magnetic particles for high frequency region and development of its design method

研究代表者

岡本 聡 (Satoshi, Okamoto)

東北大学・多元物質科学研究所・教授

研究者番号：10292278

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：軟磁性材料の磁気損失は電磁波抑制素子やパワーエレクトロニクスにおける受動素子等、様々な磁気デバイスにおいて重要な因子であり、特に応用上重要なMHz帯からGHzの実用材料における磁気損失の理解は十分ではなかった。磁性素子を構成する単一粒子の高感度計測に基づく磁気損失起源解明と集合組織での磁気損失機構解析を目的として本研究を実施した。単一粒子の高感度計測では、集合組織の損失挙動とほぼ同一の結果が得られ、また磁気Vortex理論に基づくモデルで非常によく説明できることを明らかにした。一方、集合組織における磁気損失機構解明は、ブロードバンド計測を実施し、磁化過程に基づく解析で説明できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

軟磁性材料はモーターコアや電力変換、電磁波干渉抑制などに広く用いられており、現代社会において不可欠な材料の一つである。その重要性の反面、磁化挙動由来のエネルギー損失の理解が十分ではなく、持続可能性社会の実現に向けた超高効率電力利用のための重要課題となっている。本研究では、軟磁性材料におけるエネルギー損失メカニズムを、磁性素子の構成要素であるミクロスケールの単一粒子にまで立ち返り、高感度計測に基づく解析を実施した。またバルク磁性素子についても広帯域での損失測定を行い、それぞれの損失機構について解析し、低損失化に向けた重要な知見を得た。

研究成果の概要（英文）：Magnetic soft materials are widely used in many devices as noise suppression sheet, passive devices in power electronics systems, and so on. Although the magnetic energy loss is a very important factor in these devices, the physical mechanism of magnetic energy loss has not been well understood for the frequency range from MHz to GHz, which is the most important frequency range for various practical applications. In this study, we performed high-sensitivity measurements of a single constituent particle of magnetic device, and its magnetic energy loss mechanism was analyzed using magnetic vortex theory. On the other hand, the magnetic energy loss in a bulk magnetic device was also studied by means of broad-band energy loss measurements. We clearly showed that the energy loss was well analyzed by the model based on magnetization reversal process.

研究分野：磁気工学

キーワード：軟磁性 高周波 磁気損失 電磁波抑制 パワーデバイス

1. 研究開始当初の背景

軟磁性材料の磁気損失には様々な現象が関与し、kHz 帯域以下の低周波領域ではトランスなど古くから実用上の重要性が高かったため、ヒステリシス損、渦電流損、磁壁移動にともなう異常渦電流損などが学術的にも詳細に研究されてきた。また MHz 帯域での磁壁共鳴や GHz 帯域での強磁性共鳴に付随した磁気損失は、マイクロ波技術の進展に伴い物理的な興味の対象として、こちらも長年にわたって学術研究がなされてきた。また近年は、スピントロニクス分野において、強磁性共鳴による磁気損失(Gilbert damping)が角運動量移行効率を決める重要因子であるため、精力的な学術研究が行われてきた。

一方、ここ最近、スピントロニクス分野以外においても MHz 帯域から GHz 帯域における磁気損失の制御が重要となってきている。その一つは、特定周波数で高い磁気損失を有する電磁波干渉抑制材料であり、移動通信機器の小型化、高信号品質化に不可欠なものとなっている。5G 通信は低 SHF 帯(6 GHz 以下)からスタートしたが、その後継である 5G+では、高 SHF 帯(6-30 GHz)で高い磁気損失を示す材料開発が強く望まれている。二つ目はパワーデバイスに SiC や GaN が実用化されてきたことにより、スイッチング周波数が MHz 帯域から GHz 帯域近くへと高周波化が進んでいる。そのため、この周波数帯域で低磁気損失の軟磁性材料が開発できれば、機器内部で大きな体積と重量を占めるインダクターの大幅な小型化と省電力化につながり、モバイル機器だけでなく、電動化が進むモビリティ分野においても大きなインパクトを持つ。

このように高周波軟磁性材料は、超スマート社会実現のための重要課題の一つであるが、現状はデバイス実装が先行しており、学術研究はほとんど進展していない。その一例として、電磁波干渉抑制材料として移動通信機器等に広く実装されているノイズ抑制シート(NSS)の高周波透磁率特性が挙げられる。これは鍛造法により作製した軟磁性扁平微粒子を有機バインダー中に分散させ、シート状に加工したものである。機器内部に実装することで、磁気損失により不要電磁波を吸収する。通常NSSでは数100 MHz付近と数GHz付近に2つの損失ピーク(透磁率の虚部 μ'')が存在しており、母原料の鍛造、熱処理条件により、所望の周波数帯域に損失ピーク位置が来るように調整される。しかしながら、これまでは膨大な試行に基づく経験的な最適化がなされてきたものであり、今後の高SHF帯に向けた材料開発の指針や指導原理などは無い状況にあった。低磁気損失材料についても同様、現在はフェライトやアモルファス磁性微粒子、ナノ結晶磁性微粒子をプレス形成したものが用いられているが、集合組織としての測定結果に対して磁壁共鳴や強磁性共鳴に関する議論が定性的になされるのみであった。

2. 研究の目的

これまでは軟磁性微粒子の集合組織での特性が評価されてきたのみであるが、本研究においては、その構成要素である単一軟磁性微粒子の高周波特性を詳細に調べ、その磁気損失の起源解明を第一の目的とした。次に、この単一軟磁性微粒子の結果を集合組織に反映させる解析理論モデル構築を第二の目的とした。

3. 研究の方法

目的1および2に対応する形で以下の2項目に注力して研究を進めた。

(1) 単一軟磁性微粒子の高周波特性と磁気損失起源解明

高感度な透磁率測定装置を用いて、NSSの構成要素である単一軟磁性粒子の透磁率測定を実施し、また理論計算などとも比較することで磁気損失起源について検討した。さらに考察内容を検証するため、SPring-8での磁化状態の可視化計測も実施した。

(2) 集合組織における損失解析

微粒子集合組織の磁気損失をブロードバンドで高精度に計測し、その損失挙動を解析することで、解析理論モデルの構築を行った。

4. 研究成果

(1) 単一軟磁性微粒子の高周波特性と磁気損失起源解明

図1にNSSとその構成要素である単一軟磁性微粒子の透磁率スペクトルを示す。単一軟磁性粒子の透磁率測定にはトランス結合型透磁率計を用いた。本装置は研究分担者(田丸)により開発されたものであり、非常に高感度な透磁率測定が可能となる。両者ともに100 MHz付近と数GHzの帯域にピークを持つバイモダル型のスペクトル形状となっていることが確認できる。このバイモダル型のスペクトル形状はNSSに特有のものであり、その開発当初から知られていたものであるが、NSSは粒径分散が大きいいため、長らく低周波ピークと高周波ピークは別々の粒子に起因するものと考察されてきた。しかしながら本結果は、従来の考察を完全に否定するものであり、単一粒子の透磁率スペクトルが集合組織であるNSSの透磁率スペクトルとほぼ同一であることを明らかにした。この結果は、集合組織の磁気特性が構成要素である個々の磁性粒子の磁気特性で決まってしまうことを示すものである。

図2(a)は外部磁場を印可して測定した単一軟磁性粒子の透磁率ピーク周波数の磁場依存性を

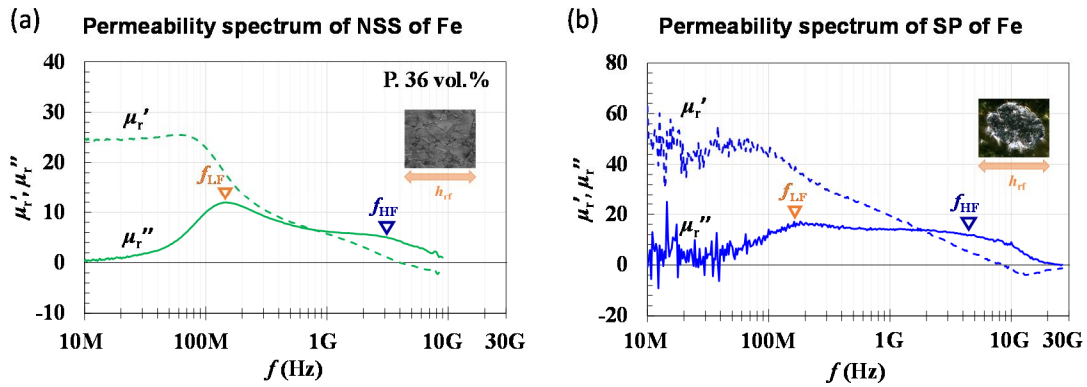


図 1 (a) NSS ならびに(b)単一軟磁性粒子の透磁率スペクトル

示す。破線は Kittel モード(一様励起)を仮定した計算結果である。高磁場領域では Kittel モードによく一致しており、単磁区化により一様励起となっていることが確認できる。一方、パイモデル型スペクトルを示す低磁場領域では Kittel モードとは一致せず、一様励起とは異なる励起モードであることが分かった。図 2(b)は同一の単一軟磁性粒子の磁化曲線を測定した結果である。この結果、ゼロ磁場では残留磁化がほぼゼロとなっており、磁束が閉じた磁化状態(渦状磁化状態)となっていることが示唆された。

この渦状磁化状態は、古くから磁気 Vortex として知られており、渦中心は Vortex core と呼ばれる準粒子的な振舞いをすることから磁気物理の分野では活発な研究されてきた。したがって、磁気 Vortex の理論を用いて NSS のパイモデル型の透磁率スペクトルを説明することを試み、低周波ピークと高周波ピークがそれぞれ Vortex core の周回運動(Gyration モード)および磁気 Vortex 外周部の円環状磁化状態の励起(Flux closure モード)として解析を行った。図 3 にそのまとめの結果を示す。粒子全体(直径 $D = 147 \mu\text{m}$)で磁気 Vortex 構造となっていると仮定した場合の Gyration モードならびに Flux closure モードの計算結果がそれぞれ f_{G1}, f_{C1} であり、実測値にいずれも近いものの一致はあまり良くない。またこの仮定で計算される透磁率は 170 となり、実測値の 47 とは一致しないことも分かった。今度は逆に実測値の透磁率 47 を用いて、磁気 Vortex 有効径を見積り、その値を用いて Gyration モードならびに Flux closure モードを計算した結果がそれぞれ f_{G2}, f_{C2} であり、実測の透磁率スペクトルとの一致は向上している。この場合の磁気 Vortex 有効径は $32 \mu\text{m}$ であり、実際の粒子サイズの約 1/5 の大きさとなっている。つまり、図 3 の模式図に示す

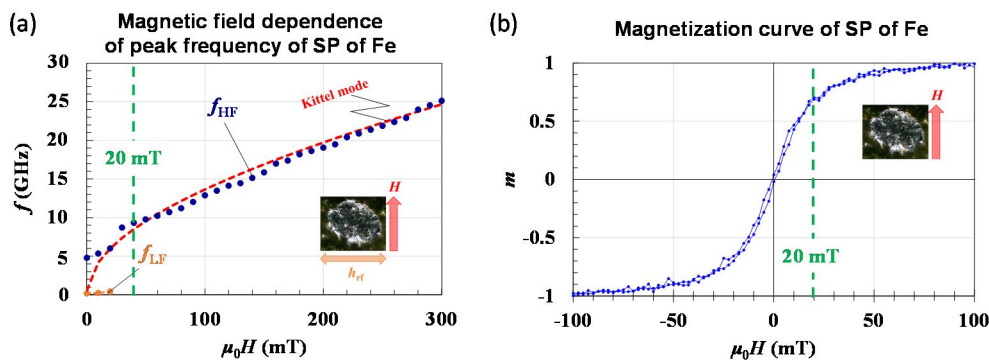


図 2 単一軟磁性粒子の(a) 透磁率ピーク周波数の磁場依存性ならびに(b)磁化曲線

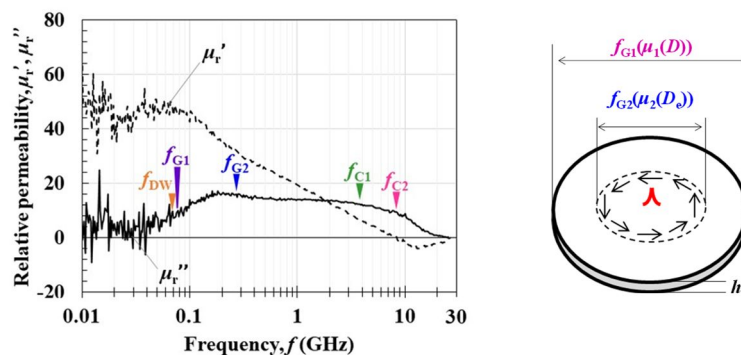


図 3 単一軟磁性粒子の透磁率スペクトルと磁気 Vortex モデルに基づく計算結果。模式図は粒子内に形成された磁気 Vortex のイメージ

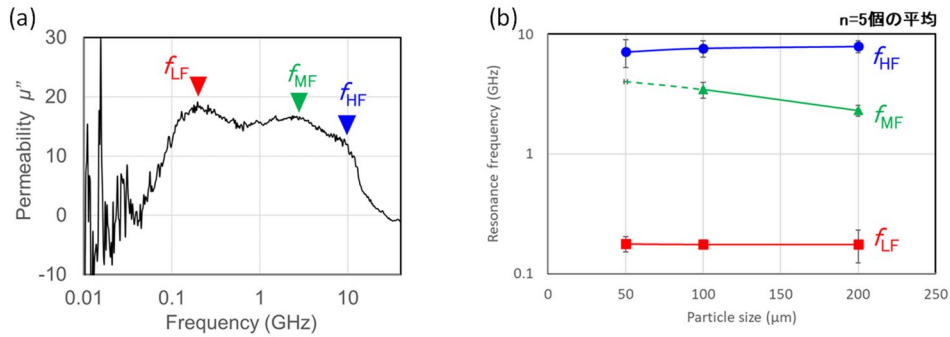


図 4 (a) 粒径 200 μm の単一軟磁性粒子の透磁率スペクトルと(b)各透磁率ピーク周波数の粒径依存性

ように粒子内の一部が磁気 Vortex となっていることが示唆される結果であった。

更に粒子サイズの異なる単一粒子に対して詳細に透磁率スペクトル測定を行った結果、これまでの試料では明瞭に確認できなかったが、図 4(a)に示すように中間領域にも透磁率ピークを有する状態であることが分かった。粒径に対する各透磁率ピーク周波数をプロットした結果を図 4(b)に示す。これらは、それぞれ粒子内に存在する磁気 Vortex の Gyration モードならびに Flux closure モード、さらには粒子外周部での Flux closure モードでそれぞれ計算結果と良い一致を示すことが分かった。

このような磁化状態を確認するため、SPring-8 の XMCD 顕微計測を用いて単一扁平磁性粒子の磁化状態観察を行った。その結果を図 5 に示す。理想的な磁気 Vortex 構造ではないものの、flux closure 状態が複数形成されており、低周波領域と高周波領域の吸収ピークに対応する磁化状態であることを確認することができ、また flux closure 状態のサイズも粒径の凡そ 1/5 程度であることも確認することができた。

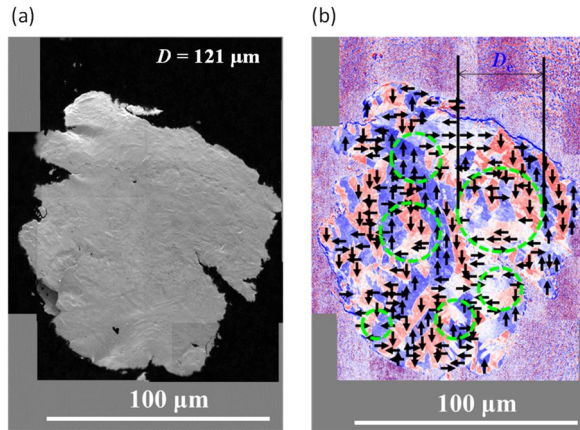


図 5 SPring-8 で計測された単一軟磁性粒子の(a)X線吸収像(XAS)ならびに(b)磁気イメージング像

(2) 集合組織における損失解析

集合組織であるバルク磁性素子においては、損失測定の測定精度を検証する手法が未整備であり、信頼性評価が十分でない。この点に関して、磁気損失(鉄損)が等価回路における抵抗成分(等価抵抗)によるものであるため、その微小励磁極限がインピーダンスアナライザや VNA 等で測定される実部インピーダンスと一致する筈、との仮説に基づいて検証を行った。その結果を図 5 に示す。図 6(a)は鉄損 P を励磁電流 I の 2 乗で割ることで等価抵抗 R を求め、その微小励磁極限を R_0 として求めた。このようにして求めた R_0 の周波数依存性と、VNA を用いた透過法によって測定されたインピーダンス実部 Z_{real} との比較を図 6(b)に示す。両者は全周波数範囲にわたって良好な一致を見せており、本手法が鉄損精度検証に用いることが出来ることを確認した。

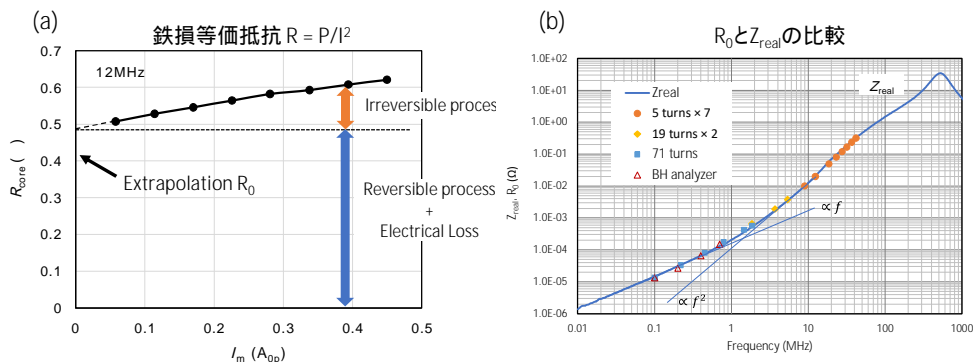


図 6 鉄損評価精度検証手法 ((a)鉄損等価抵抗、(b) R_0 と Z_{real} の比較)

この検証手法を基に、前年度までに進めていたBHアナライザーと共振法を併用したブロードバンド鉄損計測をセンダスト圧粉コアに対して適用した結果を図7に示す。磁束密度振幅 B_m によらずBHアナライザーと共振法の測定データの接続は良好であることが確認できる。このようにして測定されたブロードバンド鉄損データの物理要因解析を行った結果について次に説明する。Rayleigh 範囲では磁化率は可逆/不可逆成分に分離できる。この可逆/不可逆磁化率はそれぞれ磁場に非依存/比例の関係を有している。図8(a)に示す透磁率の周波数依存性の結果では、低周波領域で B_m に依存しており、高周波領域では B_m に依存せずにVNAで測定された透磁率に収束する様子が確認できる。この結果を基に透磁率の可逆/不可逆成分の分離ができる。さらに、この透磁率の可逆/不可逆成分を用いて鉄損を計算して実測データとの比較を行った結果が図

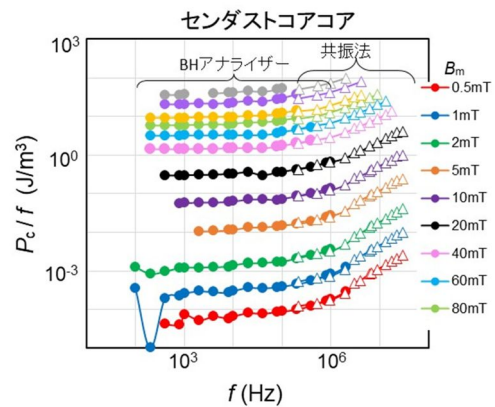


図7 センダスト圧粉コアのブロードバンド鉄損計測結果

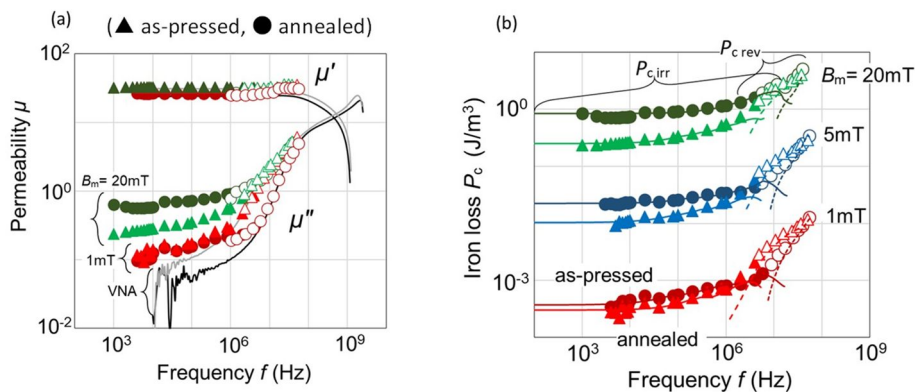


図8 センダスト圧粉コアの鉄損の磁化過程分離モデルによる解析結果 (a)透磁率、(b)鉄損)

8(b)であり、実験の鉄損データを良好に説明できていることが分かる。したがって本解析により、低周波領域では不可逆磁化過程が支配的であり、高周波領域では可逆磁化過程が支配的となっていることが分かる。さらに、同一データに対して有効磁壁モデルによる解析を行った結果を図9に示す。有効磁壁モデルは鉄損計測の際の出力電圧が磁壁移動に伴う磁束変化によるものとし、その有効磁壁数 n_{eff} を解析するものである。 n_{eff} は周波数増加に伴い単調に増加し、数 MHz 以上では飽和する挙動となることが分かった。これは磁化過程分離モデルの結果と併せて考えると、低周波領域では磁壁移動が支配的であり、高周波領域では磁壁枚数が多くなり磁化回転と区別ができなくなっている状況と理解することが出来る。

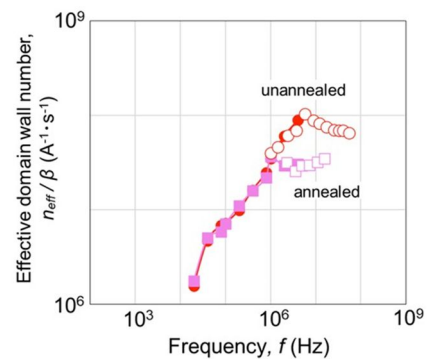


図9 センダスト圧粉コアの有効磁壁モデルによる解析結果

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 0件）

1. 著者名 Onuma Tomoyuki, Li Zhenzhuang, Okamoto Satoshi	4. 巻 Early Access
2. 論文標題 Feature analysis on B-H curves of dust cores under the application of DC bias field	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMAG.2023.3281548	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8件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大沼智幸
2. 発表標題 Fe単一扁平粒子の透磁率スペクトルの粒径依存性
3. 学会等名 第45回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 五十嵐利行
2. 発表標題 ノイズ抑制シートにおける bimodal型複素透磁率スペクトルメカニズム
3. 学会等名 第45回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡本聡
2. 発表標題 時間・空間的マルチスケール磁気機能解析とデバイス応用
3. 学会等名 展開共同研究A研究会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小野 暢久, 上原 裕二, 遠藤 恭, 吉田 栄吉, 及川 英彦, 菊池 伸明, 岡本 聡
2. 発表標題 2 コイル法と共振法の併用によるセンダスト圧粉コアのブロードバンド鉄損測定
3. 学会等名 第46回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 彭 牧天, 大沼智幸, 畑山正寿, 菊池伸明, 田丸慎吾, 岡本 聡
2. 発表標題 ディスク状微細加工磁性ドットアレイによる高周波電磁波吸収材特性
3. 学会等名 第46回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Satoshi Okamoto
2. 発表標題 Approaches of Ultra-Low Iron Loss in Magnetic Materials and Devices for Power Electronics
3. 学会等名 ICFPM2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小野 暢久, 上原 裕二, 遠藤 恭, 吉田 栄吉, 菊池 伸明, 岡本 聡
2. 発表標題 磁化過程分離モデルを用いたセンダスト圧粉磁性コアの鉄損要因解析
3. 学会等名 日本金属学会2023年春季(第172回)講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大沼智幸, 李 振庄, 岡本 聡
2. 発表標題 圧粉コアの直流バイアス特性における B-H カーブ形状の特徴解析
3. 学会等名 日本金属学会2023年春季(第172回)講演大会
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	島津 武仁 (Shimatsu Takehito) (50206182)	東北大学・学際科学フロンティア研究所・教授 (11301)	
研究分担者	吉田 栄吉 (Yoshida Shigeyoshi) (70500867)	東北大学・産学連携先端材料研究開発センター・特任教授 (11301)	
研究分担者	田丸 慎吾 (Tamaru Shingo) (70773802)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員 (82626)	
研究分担者	菊池 伸明 (Kikuchi Nobuaki) (80436170)	東北大学・多元物質科学研究所・准教授 (11301)	

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