

ワイドバンドギャップ半導体パワーデバイスの開発動向と 新たな磁気デバイスへの期待

須田 淳
(名古屋大)

Current status of wide-bandgap semiconductor power devices and expectation of new magnetic devices
J. Suda
(Nagoya Univ.)

1947年のトランジスタの発明以降、半導体デバイスはさまざまな発展を遂げたが、その一つに、大電流、高電圧を制御するパワーデバイスがある。パワーデバイス材料として使用されてきたのはシリコン(Si)である。スイッチング素子としては、50Hz/60Hzの交流の制御用にサイリスタ(当時はSilicon Controlled Rectifier, SCRと呼ばれていた)が登場し、出力調整器などに使われた。その後、ベース電流でオン/オフを制御する高耐圧バイポーラトランジスタ(パワーBJT)が台頭し、それを用いたインバータやコンバータが普及した。パワーエレクトロニクスの誕生である。半導体集積回路の微細加工技術が大きく進展すると、その技術を応用したパワーMOSFETが開発された。高速スイッチング性、電圧制御の容易さから広く普及するようになる。

Siの絶縁破壊電界強度は300 kV/cm程度であり、高耐圧素子を作製するためには、耐圧維持層のドーピングを下げ、厚みを増やす必要がある。この耐圧維持層はデバイスがオン時には直列抵抗になるため、耐圧を向上させると導通損失(オン抵抗)の増大(耐圧の2乗に比例)となってしまう。そのため、SiパワーMOSFETの適用範囲はせいぜい400 V程度とされており、より高耐圧の素子については、スイッチング速度は遅いもののキャリア注入による伝導度変調による低オン抵抗化ができるサイリスタが使われていた。その後、伝導度変調と電圧駆動の利点を併せ持つ、絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ(IGBT)が開発され、1980年代後半以降は400VまではSi MOSFET、600V以上はSi IGBTがパワーエレクトロニクスを支えるようになった。IGBTはバイポーラ素子であり、スイッチング速度が遅いため、スイッチング損失が大きい。そのためスイッチング周波数は5~10 kHz程度の設定される場合が多く、電気自動車や鉄道車両からキーンという音がするのはこのスイッチング周波数に起因している。

パワーデバイスの損失を根本的に低減するために、絶縁破壊電界強度の高い半導体材料の開発が進められた。ワイドバンドギャップ(WBG)半導体の炭化珪素(SiC)や窒化ガリウム(GaN)である。オン抵抗は絶縁破壊電界強度の3乗に反比例する。SiCやGaNはSiの10倍の絶縁破壊電界強度を持つので、損失は1/1000となる。これにより、従来Si IGBTが担当していた600 V~3.3 kVのデバイスを、SiC MOSFETで対応できるようになった。MOSFETはユニポーラデバイスでありスイッチング損失がIGBTに比べ圧倒的に少なく、スイッチング周波数の高周波化が可能となった。可聴周波数を超える20kHz~数百kHzが利用可能となった。また、WBG半導体は高温でもリーク電流が少ないという特性があり、Siでは150℃程度が動作限界であるが、SiCでは300℃付近でも動作可能となる。SiCパワーデバイスの開発が進むと、周辺の受動素子の問題が顕在化した。高温、高周波に対応できる受動素子がなく、せつかくのWBG半導体の高温動作、高周波動作が活用できないのである。

GaNはSiCと似た特性を持つが、GaNのMOSFETの場合は、高い電子チャネル移動度に起因してSiC MOSFETよりさらに高い周波数に対応可能となり数~十数MHzのスイッチングが視野に入る。また、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 界面に誘起される二次元電子ガスをを用いた高電子移動度トランジスタ(HEMT)構造を採用すれば、このデバイスは数百MHzのスイッチングさえも可能となる。

本講演では、半導体パワーデバイスの歴史を振り返り、最近のWBG半導体パワーデバイスの技術の進展や開発動向について紹介する。発表者は磁気デバイスについては全くの門外漢であるが、パワーデバイス研究者の立場から、磁気デバイスへの期待についてお話ししたいと考えている。

文部科学省 INNOPEL 事業と受動素子ロードマップ活動の紹介

山口正洋

(INNOPEL プログラムオフィサー・東北大学)

Introduction to MEXT INNOPEL Project and Passive Components Roadmap Activities

Masahiro Yamaguchi

(Program Officer of INNOPEL・Tohoku University)

1. 文部科学省 革新的パワーエレクトロニクス創出基盤技術開発事業 (INNOPEL) ¹⁾

本事業では、世界に先駆けた超省エネ・高性能なパワーエレクトロニクス（以下、パワエレと略す）機器を早期に創出し、2050年カーボンニュートラルの実現と世界市場獲得への貢献を目指している。そのために、GaN等の優れた材料特性を実現できるパワーデバイスやその特性を最大限活かすことのできるパワエレ回路システム、その回路動作に対応できる受動素子等を創出することを目的としている。高周波・小中容量電力（1kW以下～100kW）を扱うパワエレ機器をターゲットとして、パワエレ回路システム領域、パワーデバイス領域、受動素子領域、次々世代・周辺技術領域の4領域を設け、これらの異分野の要素技術を垂直統合して「まとめあげる」ことを特徴としている。事業期間は2020～2025年度で、事業名の英訳 Innovative Power Electronics Technologies から、略称を INNOPEL としている。

2. 磁気素子に関する開発研究

磁気素子に関する主要な課題は、素子の温度上昇の低減である。GaNやSiC等の高速パワーデバイスの開発により、パワエレ回路の高速スイッチング化とスイッチング周波数の高周波化が同時に促進され、より小型で高電力密度のパワエレ機器の社会実装が期待される。これを実現するための最大のボトルネックが磁気素子の温度上昇である。その解決には、「高飽和磁化低損失軟磁性材料」の開発に留まらず、パワエレの真の要求を明確化しそれに応えることが肝要である。これらを踏まえて、磁気異方性軟磁性材料を用いた高周波・電力変換用トランス・インダクタの開発（研究代表者：信州大 水野勉教授）、革新的パワーエレクトロニクスのための超低損失磁性材料の創成（同：物材機構・東北大 岡本聡教授）、次々世代パワエレ用高飽和磁束密度窒化鉄の研究（同：東北大 斉藤伸教授）が2021年度から開始された。主な成果を列挙しよう。

水野チームでは、～1kW、～MHzの小容量磁気素子を対象として、18μm厚Co-Pd置換FINEMET組成ナノ結晶合金異方性薄帯リボンにより、100kHz～1MHzの広い周波数範囲でFINEMETの60%減の鉄損を達成した。岡本チームでは、～100kW、～100kHz、 $B_s \geq 1.5$ T（磁心として）の中容量磁気素子を対象として、NANOMETベース薄帯、NANOMETダストコア等を開発して、FINEMETに迫る低ロス化（89kW/m³@100kHz, 0.1T）とFe系アモルファスを上回る高 B_s （1.6T）を実現し、マルチスケール解析、モデリングを活用して学理の構築にも成果を挙げている。斉藤チームでは、 α -Fe₁₆(C, N)₂粒子を合成して保磁力を $H_c = 86$ Oeまで減少させ、バルク α -窒化鉄系材料として初めてコアを試作し鉄損を計測できた。

3. 受動素子ロードマップ活動

開発研究の実施者を中心にして外部有識者も加わり、PD・POも参画して受動素子技術ロードマップWGを構築している。まずパワーエレクトロニクス回路およびシステムが真に必要な受動素子の要件と現状を磁気素子とコンデンサについて明確にする。次に、それに応える受動素子技術の現状を、前項の成果を含めてまとめる。パワーデバイス技術も要約して記述する。最後に将来動向を記す。2025年度中に発行見込。

目的とするロードマップの内容が一部未確定のため、以下、一部私見を交えて記す。まずインダクタとトランスでは磁性材料への要件が異なることを知ろう。材料から磁心成型へそして巻線と機器実装を経てパワエレ回路素子へ「まとめあげる」過程では応力や未知の損失への新しい挑戦がある。温度上昇の低減のためには、高飽和磁化が不要な場合もある。高周波化は手段であり、目的ではない。はじめに電力、インダクタンス（主たる電氣的指標の意）、寸法、効率がある。一方、パワエレ分野では、中長期的にみて「高飽和磁化低損失軟磁性材料」への期待は根強い。さて、未利用のマイクロ・マクロ計測解析技術が使えらる。LLG方程式はもとより有用だが、kW級素子の全体を解くのは計算時間が非現実的に長い。磁氣的な素過程から回路設計まで様々な段階のモデリングを確立し、それらを連携してパワエレ技術者が使いやすい設計技術に「まとめあげる」ことで、先端材料や革新的設計法を短時間で確実に社会実装できる。そこでは、機械学習を端緒としたパワエレのためのデータ科学を創り、活用したい。これらは大きな意義のある挑戦と思う。パワエレは日本が強い領域であり、今後AIを遊び心で捉えるような若い技術者が大いに活躍し、更に発展するだろう。

本研究は文部科学省革新的パワーエレクトロニクス創出基盤技術研究開発事業JPJ009777の助成による。

参考文献 1) 例えば、INNOPEL シンポジウム 2023, <https://www.mri.co.jp/seminar/20240228.html>

Fe 基アモルファスおよびナノ結晶合金薄帯の 開発動向と実用化ボトルネック

太田 元基

((株) プロテリアル、島根大学)

Development trends and practical bottlenecks of Fe-based amorphous and nanocrystalline alloy ribbons

Motoki Ohta

(PROTERIAL Ltd., Shimane University)

背景

Fe 基アモルファスおよび Fe 基ナノ結晶合金薄帯がコア材料として実用化され始めてから 30 年以上が経過している。ランダム系ゆえに長周期構造を有さない性質により、構造に起因した磁気異方性が低く、良好な軟磁気特性が得られる。これらの合金薄帯は高温の熔融金属を急冷して作製され、その際に冷却速度の制約から板厚は 30 μm 以下で製造されることが一般的である。Fe 基アモルファス合金薄帯は、飽和磁歪が約 30×10^{-6} と軟磁性体の中では大きい部類であり、このことがコア製造に制約を与えていたが、課題が解決され商用のトランスに用いられるようになり、特に低待機電力特性に優れた性能を有する。他方、Fe 基ナノ結晶合金薄帯は、飽和磁歪を 1×10^{-6} 以下で飽和磁束密度 B_s が 1.2 T 以上あり、かつてパーマロイやソフトフェライト等が使われていた数十キロヘルツ以上の周波数帯でトランス、インダクタ、ノイズフィルターや電磁波シールド等に用いられるようになっている。SiC や GaN などのパワー半導体が多く用いられるようになり、モータを駆動させるような数キロヘルツオーダーでも高い次元での軟磁気特性と高 B_s の両立が求められるようになり、このナノ結晶化の技術を用いて、高 B_s ナノ結晶合金薄帯の開発も進められた。

Fe 基アモルファスリボンにおける磁歪対策

Fe 基アモルファス合金薄帯における磁歪の性質は物質の構造と組成で決まる物質固有の性質であるため、磁歪の低減は難しく、影響を少なくする対策が取られてきた。磁路方向と磁化容易軸方向がずれていると B - H ループの飽和性に影響を与えるだけでなく、磁化回転に伴い磁歪が発生し、交流磁場下では騒音の発生原因になる。換言すれば、トランスやインダクタのコアのように磁路方向が決まっていれば、その方向に磁化容易軸が向くように形状やひずみをコントロールすることで、磁歪の影響を少なくすることができる。当初は、磁場中熱処理を施すことで、 B - H ループの形状を制御し、低騒音のアモルファストランスが生産されていた。しかしながら、磁場中熱処理を施したアモルファス薄帯は脆化し、切断加工等を後工程で入れるのが困難になる。そこで、張力をかけながら高速昇温を行い応力誘起の磁気異方性を付与する方法が開発された¹⁾。通常の磁場中熱処理も高温短時間の熱処理を施すことで、脆化を抑えつつ B - H ループの形状を制御が可能となり、平積み型のトランスコア等でも利用が可能となった。

高 B_s ナノ結晶合金粉末の開発

Fe 基ナノ結晶合金はアモルファス相を得たのちに熱処理を施すことで、平均結晶粒径が 10~20 nm 程度のナノ結晶粒がアモルファス相中に高密度で析出した組織を有する。初期のアモルファス相の Fe 量を増加させることで高 B_s 化を目指したわけだが、その分アモルファス相の形成を助ける効果がある元素 Nb や B の総含有量を抑える必要がある。そのため、結晶化の際に結晶粒成長を抑制する役割を担う残留アモルファス相の熱的安定性が低下して、結晶粒の粗大化が起きやすくなり、良好な軟磁気特性が得られにくくなる。Fe-Cu-Si-B アモルファス合金薄帯を結晶化温度以上に高速昇温することで、ナノ結晶組織が得られ、 B_s が 1.8 T 以上、10 kHz におけるロスが電磁後半の 1/3 以下の高 B_s ナノ結晶合金薄帯が開発された。さらに、この技術を応用し、直径 20 μm 程度の粉末においてもナノ結晶相が得られている²⁾。

参考文献

- 1) D. Azuma, N. Ito, M. Ohta: *J. Magn. Magn. Mater.*, **501** (2020) 166373.
- 2) M. Ohta, N. Chiwata: *J. Magn. Magn. Mater.*, **509** (2020) 166838.

拡張型ランダウ自由エネルギーモデルによる鉄損解析

小嗣真人
(東京理科大学)

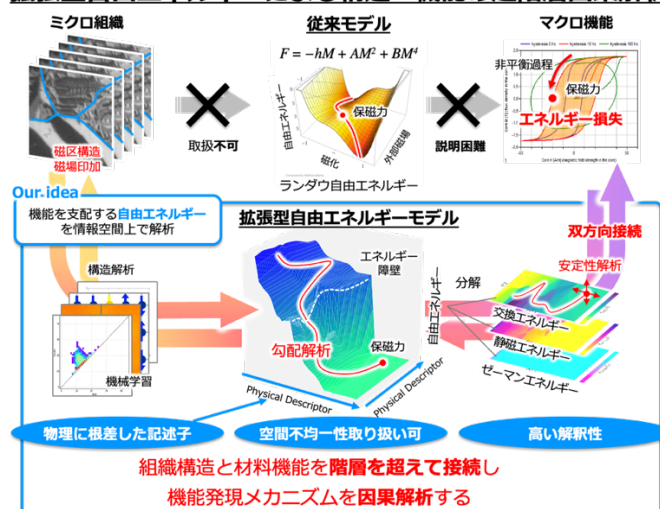
Iron loss analysis by extended Landau free energy model

Masato Kotsugi
(Tokyo University of Science)

次世代パワーエレクトロニクスの実現に向けて、軟磁性材料の機能設計に高い注目が集まっている。その中でも、低鉄損の軟磁性材料の実現は急務であり、鉄損メカニズムの解明が求められている。鉄損における未解決問題のひとつとして異常渦損があり、その理解は応用上喫緊の課題と言われている。既存の Steinmetz 式は高速磁化反転を取り扱える一方で、空間不均一性や異常渦損を正確に取り扱うことが困難であった。特に、急激な磁区構造変化に伴う損失エネルギーの解析手法が無いのが現状である。このような高速磁化反転は非平衡な磁化反転過程を取るとされており、その理解は基礎的にも十分に整備されていない。そのため、次世代軟磁性材料の設計戦略は未だ定まっていないのが現状である。

近年我々は、磁気物理と情報科学を融合した「拡張型自由エネルギーモデル」を開発し、鉄損のメカニズム解析に取り組んでいる。本モデルは、鉄損の背後にある自由エネルギー地形をデータ空間で解析するもので、マクロ機能とミクロ構造を階層を超えて接続することができる。特徴量は物理に根差したホワイトボックス型で設計するため、損失メカニズムの因果解析を実行でき、その原因を元の磁区構造に遡って可視化できる。講演では、モデルの簡単な原理説明と様々な軟磁性材料での解析結果を報告する。

拡張型自由エネルギーによる構造-機能の超階層因果解析



参考文献

- 1) R. Nagaoka, K. Masuzawa, M. Taniwaki, A. L. Foggiatto, T. Yamazaki, I. Obayashi, Y. Hiraoka, C. Mitsumata, M. Kotsugi*, IEEE Transaction on Magnetics, (2024) accepted
- 2) A. L. Foggiatto, R. Nagaoka, M. Taniwaki, T. Yamazaki, T. Ogasawara, I. Obayashi, Y. Hiraoka, C. Mitsumata, M. Kotsugi, IEEE Transaction on Magnetics, (2024) accepted
- 3) S. Kunii, K. Masuzawa, A. L. Foggiatto, C. Mitsumata & M. Kotsugi*, Sci. Rep. 12, 19892 (2022)
- 4) A. L. Foggiatto, S. Kunii, C. Mitsumata & M. Kotsugi, Communications Physics 5, 277 (2022)
- 5) S. Kunii, A. L. Foggiatto, C. Mitsumata & M. Kotsugi*, Sci. Tech. and Adv. Mater. Methods, 2 445-459 (2022)

LLG/Maxwell 疑似連成シミュレーションによる単磁区モデルの動的磁化反転および動的損失解析

大石恭輔, 齋藤鴻志, 佐藤敏郎, 曾根原誠, 南澤俊孝
(信州大学)

Dynamic magnetization reversal and dynamic loss analyses for single domain model
by means of LLG/Maxwell pseudo-coupled simulation

Kyosuke Oishi, Koshi Saito, Toshiro Sato, Makoto Sonohara, Toshitaka Minamisawa
(Shinshu University)

1. はじめに

高周波駆動のパワーエレクトロニクス回路に用いる磁気素子の設計に有用な磁気素子モデルの作成を目的に、一軸磁気異方性を持つ単磁区軟磁性材料モデルを対象としてトランスおよびインダクタの動作を模擬した解析を行ったのでその結果について報告する。LLG マイクロマグネティクスシミュレーションより得られた動的磁化特性を Maxwell 解析の材料 intrinsic パラメータに適用することにより LLG/Maxwell 疑似連成解析を行った。以下は正弦波交流励磁トランス動作を模擬した結果である。

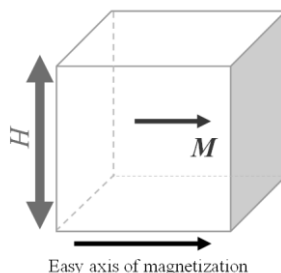


Fig.1 Single domain model.

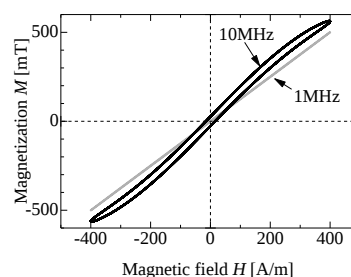


Fig. 2 Dynamic M-H loop obtained from LLG analysis.

2. LLG 磁化ダイナミクスの解析

Fig.1 に示した単磁区磁性体モデルを用いて LLG 磁化ダイナミクスの解析を行った。材料特性としては、飽和磁化 M_s ; 1.0 T, 異方性磁界 H_k ; 800 A/m, ダンピング定数 α ; 0.1, 飽和磁化と異方性磁界から見積もられる強磁性共鳴周波数 f_r ; 30MHz を設定し、困難軸方向に高周波磁界 (100 kHz~10 MHz) を印加した。Fig.2 は磁界振幅 H_m ; 400 A/m の場合の動的 M-H マイナーループを示すものであり、共鳴周波数より十分に近い 1MHz では線形ループであるが、共鳴周波数に近い 10MHz では M-H マイナーループに非線形性が現れることが明らかとなった。

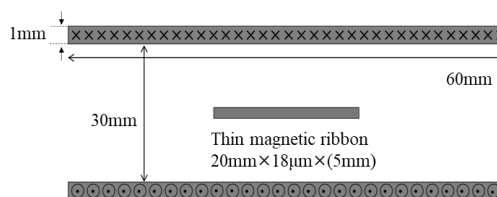


Fig.3 Ribbon model for Maxwell simulation.

3. 磁化の動的損失の解析

Fig.3 に二次元 Maxwell 非線形磁界解析の薄帯モデルを示す。薄帯の長手方向 (磁化困難軸方向) の磁化特性として LLG 解析による動的 M-H ループを指定し、薄帯の電気抵抗率 ρ ; $1.2 \mu\Omega \cdot m$, 薄帯厚さ; $18\mu m$ とした。Fig. 4 は外部から困難軸方向に交流磁界を印加し、薄帯の厚さ方向で平均化した磁束密度振幅 B_m をパラメータとしたときの動的エネルギー損失 $W [J/m^3]$ の周波数特性である。ここで計算される動的損失には磁化回転によるダンピング損失とうず電流損失が含まれるが、1 MHz 以下の動的損失は古典論によるうず電流損失と良く一致し、共鳴周波数に近づくにつれて古典論とのずれが大きくなった。インダクタの動作を考慮した直流バイアス磁界下での解析については学術講演会当日に報告する。

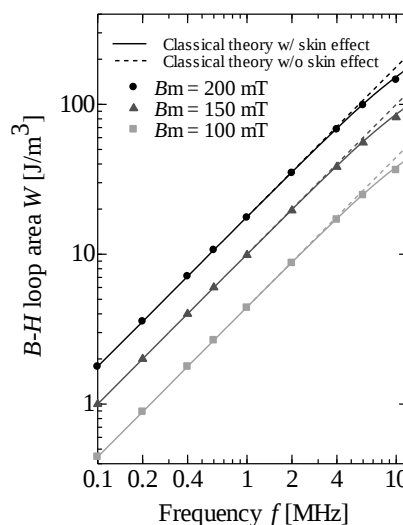


Fig.1 Dynamic loss vs. frequency obtained from LLG/Maxwell simulation.

Effect of nanostructure on the core loss of soft magnetic materials

H. Sepehri-Amin¹, R. Gautam¹, S. Hiramoto², A. Bolyachkin¹, N. Kulesh¹, H. Mamiya¹, S. Okamoto²,
T. Ohkubo¹

¹National Institute for Materials Science, Tsukuba, Japan

²Tohoku University, Sendai, Japan

Soft magnets are important components in high-frequency power electronic devices, significantly contributing to efficient energy conversion. They are commonly utilized in transformers, inductors, and magnetic cores within high-frequency power converters. However, cutting-edge power electronics technologies demand soft magnets with minimal core loss at high frequencies. This study demonstrates that high-frequency core losses in Fe-based soft magnetic ribbons can be reduced through nanostructure engineering. We present the optimal microstructure designed to minimize core losses in the 10-20 kHz frequency range.

Amorphous Fe-based ribbons with different compositions were prepared by rapid solidification. The amorphous ribbons were annealed at a varied temperature range and time to realize different microstructural features. The microstructure studies were carried out using XRD, TEM, and APT. Magnetic domain observations were conducted by magneto-optical Kerr effect (MOKE) and Lorentz microscopy. Saturation magnetization and coercivity were evaluated by LakeShore VSM 740 vibration sample magnetometer up to an applied magnetic field of 2.0 T. Core losses were measured using B-H analyzer under a magnetic flux density of 1-1.5 T and a frequency range of 0.1-20 kHz.

Figure 1(a) shows the total core loss of the Fe-based soft magnetic ribbons obtained under 1.0 T at 10 kHz as a function of the volume fraction of α -Fe crystals of ribbons with different annealing backgrounds. The total core losses at 10 kHz decreased from 165 W/kg in an amorphous state to a value of 75 W/kg as the volume fraction of α -Fe crystals increased to 5.1 vol% in an amorphous matrix, and then increased again as the crystalline volume fraction increased. Detailed analysis of the core losses showed that the contribution of hysteresis and classical eddy current losses to the obtained results is small and the observed core loss dependence on the volume fraction of α -Fe crystals is due to excess losses. According to the microstructure and magnetic domain observation (Fig. 1(b)), it was found that reduction of core loss is due to change in the magnetic domain shape and their movement under an ac magnetic field. Based on detailed microstructural characterizations and magnetic domain observations, the underlying mechanism is discussed. Moreover, we will present how this concept is universal among many different types of soft magnetic materials. In addition, other nanostructural factors which are influential to the core losses of soft magnetic materials will be introduced.

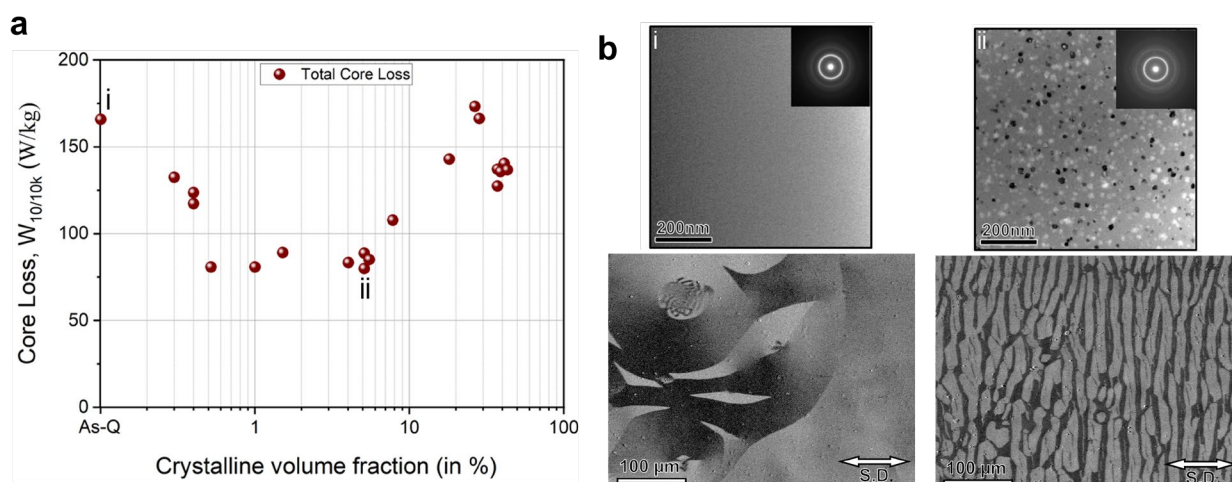


Fig. 1. (a) Total core loss measured under 1 T at 10 kHz from Fe-based soft magnetic ribbons as a function of volume fraction of α -Fe crystals, and (b) BF-TEM images, selected area electron diffraction patterns, and magnetic domain configuration in the remanence state obtained from samples i and ii marked in (b).

軟磁性材料における過剰損失発生機構の解明

塚原宙^{1,3}, H. Huang², 鈴木清策², 小野寛太³, 岡本聡¹

(¹ 東北大, ² モナッシュ大学, ³ 大阪大学)

Origin of excess losses in soft magnetic materials

H. Tsukahara^{1,3}, H. Huang², K. Suzuki², K. Ono³, S. Okamoto¹

(¹Tohoku Univ., ²Monash Univ., & ³Osaka Univ.)

はじめに

軟磁性材料のエネルギー損失は Steinmetz の方程式により説明されてきた。この方程式はヒステリシス損失、古典渦損失および過剰損失により構成される。ヒステリシス損失の原因は保磁力であり磁気異方性が高いと大きくなる。これに対して古典渦損失と過剰損失の原因は磁化運動による渦電流であると説明されてきた。そのため低い保磁力と高い電気抵抗が軟磁性材料の設計指針とされてきたが、近年電気抵抗と関係を持たない過剰損失が報告された [1]。この過剰損失は磁歪定数と相関を持ち、先行研究において我々は磁壁による局所的な歪が過剰損失の原因になりうる事を証明した [2]。磁歪によるエネルギー損失は渦電流によるエネルギー損失と同じ周波数依存性を示し実験結果を定性的に説明したが [3,4]、渦電流と磁歪どちらが支配的であるか定量的な議論には至らなかった。本研究において我々は磁壁運動における渦電流と磁歪効果を正確に定式化し、Steinmetz の方程式を拡張することで定量的な比較を可能にし、軟磁性材料の過剰損失発生機構を明らかにした。

結果および考察

図1(a)に示される単純なストライプ磁区モデルを用いて過剰損失の定式化を行った。磁区は x 方向のみに存在し、外部磁場により磁壁もまた x 方向に移動する。磁壁が移動すると局所的に渦電流と歪みが発生し、それぞれ電気抵抗および材料の粘性により抵抗力 $\beta \dot{x}$ を発生する。ここに β は粘性係数である。この抵抗力を含めた磁壁の運動方程式からエネルギー損失の定式化をおこない以下の方程式

$$P_{\text{exc}} = \sqrt{(\beta_{\text{eddy}} + \beta_{\text{ma}}) I_s L V_0 [(I_p/I_s) f]^{\frac{3}{2}}} \quad (1)$$

を得た。ここに I_s は飽和磁束密度、 L は系の長さ、 V_0 は磁壁の増加率、 I_p は最大磁束密度であり f は外部磁場の周波数である。また β_{eddy} と β_{ma} はそれぞれ渦電流と磁歪による粘性係数を表し

$$\beta_{\text{eddy}} = 4\sigma G d I_s^2, \quad \beta_{\text{ma}} = \frac{2I_s \lambda_s^2 D}{\gamma \delta_w} \quad (2)$$

と表される。ここに σ は電気伝導率、 $G = 0.1356$ 、 d は磁性体の厚み、 λ_s は磁歪定数、 D は材料の粘性を表す定数、 γ は磁気回転比であり δ_w は磁壁厚みである。この定式化を用いることで、大まかにではあるが、図1に示すように過剰損失の実験結果を解析計算により再現することができ、磁歪定数が 10 ppm を超えると磁歪による効果が支配的になることを理論的に明らかにした。

[1] Parsons, R. et al. J. Magn. Magn. Mater. **476**, 142 (2019).

[2] H. Tsukahara, et al. NPG Asia Mater. **14** 44 (2022).

[3] H. Huang, et al. Phys. Rev. B **109**, 104408 (2024).

[4] H. Tsukahara, et al. NPG Asia Mater. **16** 19 (2024).

謝辞

本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務 (JPNP14004) で実施された。

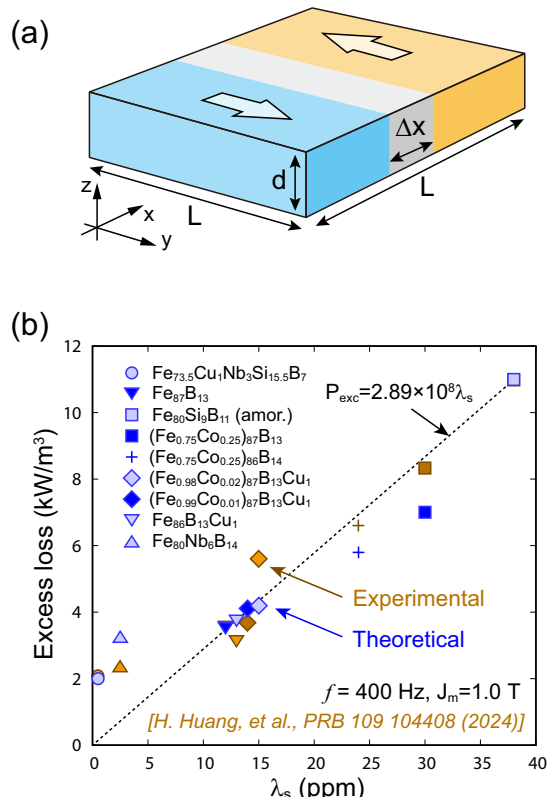


Fig 1: (a) Simple stripe domain mode for our formulation. (b) Excess losses obtained by experimental and theoretical calculations.

正弦波/三角波励磁によるトロイダルコアの損失測定

上原裕二、岡本聡*、佐藤佑樹**, 谷口卓也*
(磁気デバイス研究所、東北大学*, 青山学院大学**)

Magnetic core loss measurements of toroidal cores under sinusoidal and triangle waveform

Y. Uehara, S. Okamoto*, Y. Sato**, T. Taniguchi*

(Magnetic Device Laboratory Ltd., Tohoku Univ. *, Aoyama Gakuin Univ. **)

はじめに

磁性材料の損失評価はその簡便さから正弦波励磁で行われることが多い。一方、実際のインダクタ等のデバイスは三角波励磁で使用されることが多い。このため、正弦波/三角波励磁での損失についての理論的および実測による検討が行われている。Bertotti らは Fig.1 に示すようにコア損失をヒステリシス損失と渦電流損失に分けて考え、ヒステリシス損失は励磁波形に依存せず、渦電流損失のみが励磁波形に依存するとして励磁波形による損失の差を論じている⁽¹⁾。この考え方によると、ヒステリシス損失が支配的な材料ではコア損失は励磁波形に依らないことになり、渦電流損失が支配的な材料においては三角波励磁でのコア損失は正弦波励磁の約 80 % の損失になることが示されている。この考え方と実測の関係を論じた報告はほとんどなされていないため、本発表では正弦波/三角波励磁によるコア損失を精度良く測定し、上記モデルとの比較を行った。

コア損失の測定方法

コア損失の測定は Inductive Cancellation 法によって行った⁽²⁾。この方法は Fig.2 に示すように測定サンプルと空心トランスを直列接続し、2 次側で空心トランスの極性を逆にすることで測定サンプルのインダクタンス成分をキャンセルし、測定回路に流れる電流と測定サンプルに誘起される電圧の位相差を小さくすることで損失の測定誤差を抑えることができる優れた手法である。

測定には、渦電流損失がほとんどない高抵抗材料として Ni-Zn フェライト (Fire Rite 社製 FT50-67) を、渦電流損失がある材料としてセンダスト粉からなる圧粉コア (トーキン製) を用いた。サンプルの比透磁率は 100 kHz でそれぞれ 45、32 である。正弦波/三角波励磁の比較は 2 kHz から 100 kHz の周波数で行った。

Fig.3 には、センダスト圧粉コアの正弦波励磁における損失の周波数依存性を示す。測定時の最大磁束密度 B_m は 10 mT とした。100 kHz 以下の周波数ではコア損失はほぼ一定となっており、この周波数領域ではヒステリシス損失が支配的であることが分かる。センダスト圧粉コアは渦電流損失のある材料として選択したが、今回はヒステリシス損失が支配的な条件での検討となる。

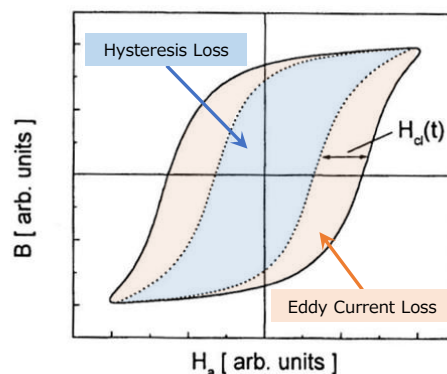


Fig.1 Hysteresis loop shape ⁽¹⁾

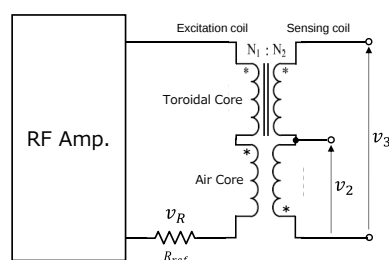


Fig.2 Inductive Cancellation Method

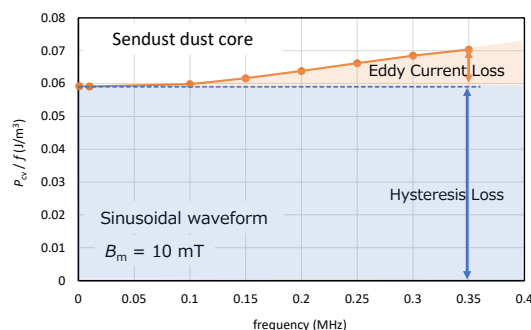


Fig.3 Frequency dependence of core loss of Sendust dust core

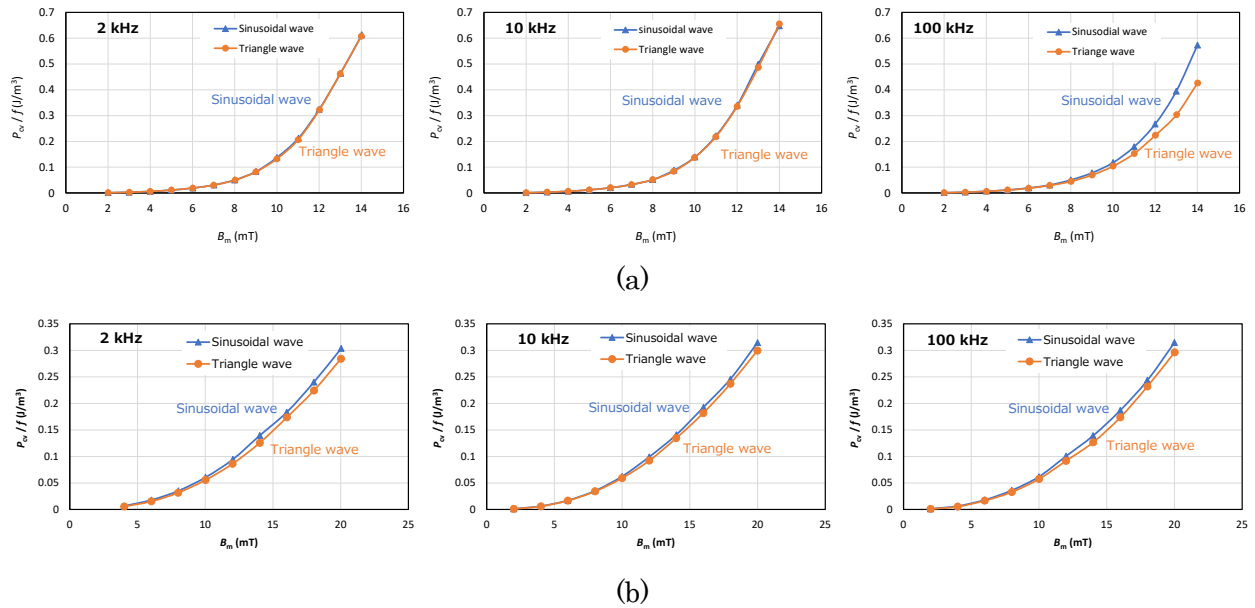


Fig.4 Comparison between sinusoidal and triangle waveform excitation. The measurement frequencies are 2 kHz to 100 kHz. (a) Ferrite core and (b) Sendust dust core.

測定結果と考察

Fig.4 にフェライトおよびセンダスト圧粉コアの正弦波/三角波励磁におけるコア損失の測定結果を示す。測定周波数は 2 kHz, 10 kHz および 100 kHz である。Bertotti らの考え方によればいずれのサンプルにおいても励磁波形による損失差はないはずであるが、フェライトコアでは 100 kHz、9 mT 以上の磁束密度において励磁波形に依存する結果が得られた。一方、センダスト圧粉コアの場合はいずれの周波数、磁束密度においても励磁波形による差がみられ、三角波励磁でのコア損失は正弦波励磁の約 95 %となっている。これらの結果は磁気余効による可能性があるため、それぞれの材料の磁化緩和の測定を行った。測定は Fig.5(a)に示すような三角波電流に t_1 のピーク保持時間を追加した台形状の電流波形を印加して行った⁽³⁾。磁化緩和は Fig.5(b)に示すように、フェライトコアでは数 μs 、センダスト圧粉コアでは数 10 μs で起こっており、サンプル間で大きく異なる結果となった。これらの結果から、フェライトコアでは低い周波数で磁化の緩和が十分に進み励磁波形による損失差がなくなるが、センダスト圧粉コアでは磁化緩和に時間がかかるため低い周波数でも損失差がみられていると考えられる。

謝辞

センダスト圧粉コアは(株)トーキン様より提供頂いた。本研究は文科省革新的パワーエレクトロニクス創出基盤技術研究開発事業 JPJ009777 の支援の下で行われた。

参考文献

- 1) Bertotti: "Hysteresis in Magnetism," Academic Press (2008).
- 2) D. Hou, M. Mu, F. C. Lee, and Q. Li: *IEEE Trans. Power Electron.*, **32**, 2987 (2017).
- 3) J. Mühlethaler, J. Biela, J. W. Walter, and A. Ecklebe: *IEEE Trans. Power Electron.*, **27**, 964 (2012).

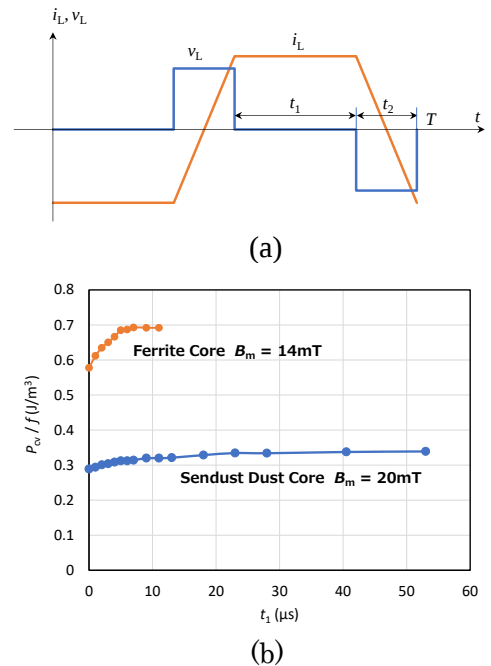


Fig.5 (a) Trapezoidal current waveform for measuring magnetic relaxation. (b) Measurement results of magnetic relaxation.

PWM インバータ用 AC フィルタインダクタにおける 損失最小設計時の励磁条件検証

山口 太勢、松盛 裕明
(名古屋工業大学)

Operating conditions for minimized loss design of AC filter inductors used in PWM inverters.
T. Yamaguchi, and H. Matsumori
(Nagoya Institute of Technology)

はじめに

ICT 技術の需要はクラウドや AI の発展に伴い急増しており、データセンタの消費電力削減が急務となっている。データセンタ向けの電力変換器は従来の Si デバイスから SiC や GaN といったワイドギャップ半導体デバイスへの置き換えにより、効率の向上と体積の削減が実現されてきた。しかし、データセンタ向けのなどに代表される電力変換器の実動作状態においては、損失の大部分を占めるのが磁性体部品であることが報告されている¹⁾。本研究では無停電電源装置にも使用される PWM インバータ用 AC フィルタインダクタについて損失が最小となる設計をセンダストや鉄粉といった様々な磁性体材料に対して行い、このときの磁性体の励磁条件について検討をしたので報告を行う。

研究目的および手法

磁性部品の設計においては、一般的に鉄損と銅損の割合が 1:1 となる点が経験則として最適とされている。しかし、PWM インバータ用の AC フィルタインダクタの場合、後述するが、鉄損には出力電流の正弦波（メジャーロープ）と半導体のスイッチング成分（マイナーループ）に起因するものが含まれている。特にマイナーループに起因する鉄損は電力変換器の動作条件やインダクタの設計（磁性体材料・巻数・コア体積）により複雑に変化する。そのため、経験則である銅損と鉄損の割合が 1:1 となる点が必ずしも最適でないことが予想される。また、マイナーループに起因する鉄損については磁性材料メーカからのデータ提供がないため、正確な鉄損予測が困難であった。ただし、先行研究により、マイナーループに起因する鉄損はロスマップ²⁾の使用により計算可能になった。本研究では AC フィルタインダクタの損失（鉄損・銅損の合計）が最小となる設計をセンダストや鉄粉材料といった様々な磁性体材料に対して行う。PWM インバータの仕様は Fig.1 および Table 1 に記載する。

AC フィルタインダクタの最適設計結果

Fig. 1 に示す単相 PWM インバータにおいて、磁性体材料（材料組成・透磁率）とコア体積を変更し損失が最小となる設計を行った結果の一例を Fig. 2 に示す。BH 波形にはマイナーループが含まれていることがわかる。インダクタの損失と体積のバランスが最も良いコアをベストケース、検討対象のコアにおいてインダクタ損失および体積が最大のコアをそれぞれワーストケース（1）および（2）とする。ベストケースと 2 つのワーストケースを比較すると、ベストケースのインダ

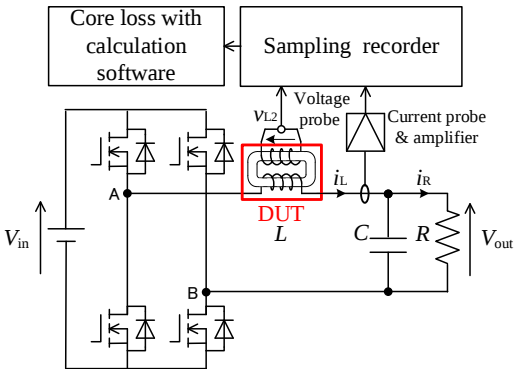


Fig. 1 Single-phase PWM inverter circuit

Table. 1 Specification of single-phase PWM inverter

Input voltage V_{in}	DC 200 V
Output power P_{out}	350 W
Output frequency f_{out}	50 Hz
Switching frequency f_{sw}	20 kHz
Modulation rate m	0.707
AC filter inductance L	1 mH
AC filter capacitance C	10 μ F
Output resistance R	28.5 Ω

クタ損失はワーストケース（1）よりも 55.7 % (2.37 W)、体積はワーストケース（2）よりも 69.3 % (35.9 cm³) 小さいことが分かる。磁性体材料の適切な選択によりインダクタ損失と体積を大幅に削減できることが示されている。また、ベストケースにおける損失割合はほぼ均等になっているのに対し、ワーストケース（2）のように体積が大きくても低損失な設計では損失割合が異なる結果も得られている。さらに、BH 曲線に注目すると全てのインダクタは飽和磁束密度に対して 50%以下の領域を利用している。PWM インバータ用 AC フィルタインダクタのマイナーループ鉄損はインバータの励磁条件によって複雑に変化するので一概には言えないが、少なくとも今回の PWM インバータの動作条件では、AC フィルタインダクタの設計において飽和磁束密度から十分に余裕を持たせた領域で動作させればインダクタ損失が低減する。

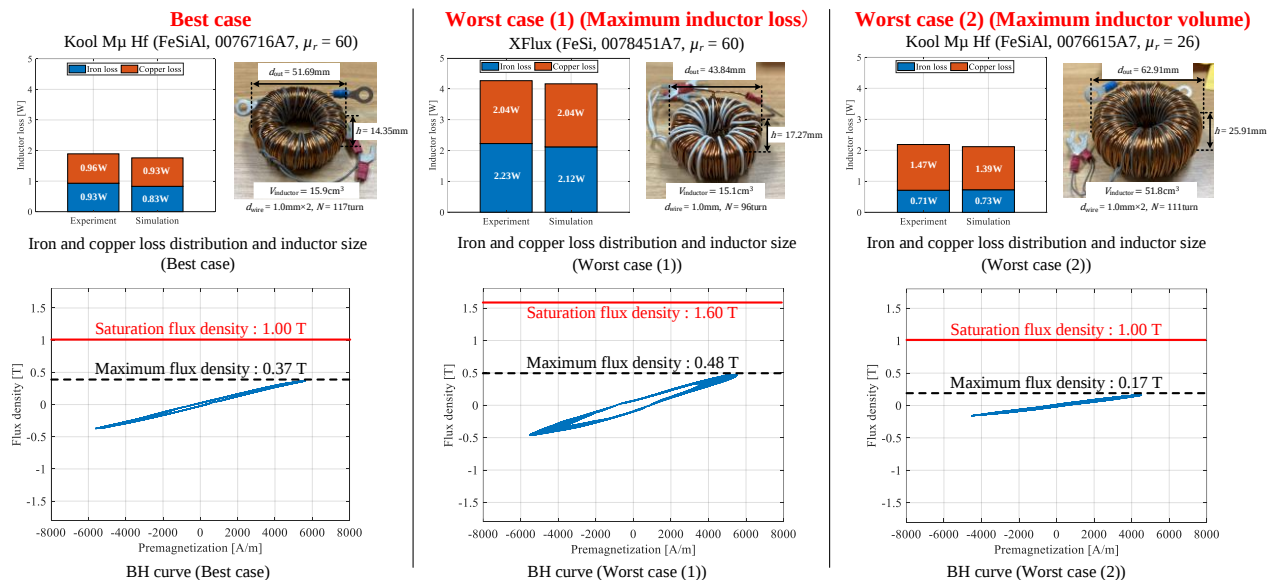


Fig. 2 Example of optimal design results for AC filter inductor

むすび

本研究では、単相 PWM インバータ励磁下における AC フィルタインダクタについて、センダストや鉄粉といった様々な磁性体材料に対してインダクタ損失が最小となる設計を行い、設計したインダクタの中でインダクタ損失と体積のバランスが最適な条件を抽出した。材料の違いにより損失は最大 55.7%、体積は最大 69.3%の違いがあり、適切な磁性体材料の選定が AC フィルタインダクタの設計に重要であることがわかった。さらに、各種材料の AC フィルタインダクタの動作点を確認したところ、すべてのインダクタにおいて、飽和磁束密度に対して 50%以下の領域で動作していた。PWM インバータ用 AC フィルタインダクタのマイナーループ鉄損はインバータの励磁条件によって複雑に変化するので、一概には言えないが、今回の条件に限っては磁性体を飽和磁束密度に対して低い領域で動作させれば、インダクタ全体で低損失となる結果が得られた。今回の様に電力変換器を指定し動作条件が決まっていれば、アプリケーション毎の磁性体材料の開発方向を示すことは可能である。

参考文献

- Jonathan G. Koomey, "GROWTH IN DATA CENTER ELECTRICITY USE 2005 TO 2010 Analytics Press", Analytics Press, Aug.2011
- Hiroaki Matsumori, Taisei Yamaguchi, Toshihisa Shimizu, Takashi Kosaka, Nobuyuki Matsui; Iron loss evaluation method for SiFe sheet material under PWM inverter excitation. AIP Advances 1 February 2023; 13 (2): 025302. <https://doi.org/10.1063/9.0000537>

金属磁性コアにおけるインピーダンス透磁率の周波数依存性

富田祐也、高林宏之、入山恭彦

(大同特殊鋼株式会社)

Frequency dependence of impedance permeability in magnetic metal core

Y. Tomita, H. Takabayashi, T. Iriyama

(Daido Steel Co., Ltd.)

背景・目的

インダクタやチョークコイルに用いる磁性コアにおいては kHz 帯でのインピーダンス透磁率 μ_r が重要な特性指標となるが、その磁化機構には不明な点が多い。本研究では、1kHz-1MHz における磁化機構を明らかにするため、 μ_r の周波数依存性について磁壁の運動方程式に基づいた解析を実施し、実測値と比較した。

実験方法及び解析方法

単ロール超急冷法により得られた厚み約 20 μm の Fe 基金属急冷薄帯を巻回し外径 21.5 mm、内径 20 mm、高さ 5 mm のトロイダルコアを作製し、真空雰囲気下、843 K で 1.8 ks 保持したコアを供した。 μ_r はキーサイト製インピーダンスアナライザ E4990A により磁場強度 $H_m = 0.05 \text{ A/m}$ の条件で測定した。磁壁枚数の周波数特性は岩崎通信機製交流 BH アナライザ SY8218 により測定した 2 次コイル電圧 V_m 及び保磁力 H_c の周波数特性を基に Sakaki の提案した手法¹⁾により推定した。

透磁率解析には磁壁の運動方程式より得られる磁壁緩和の式(1)を用いた。式(1)における f_r は緩和周波数と呼ばれ、磁壁枚数 n に比例する定数である。(i) 磁壁枚数 n が一定であるという仮定の下で、 f_r は μ_r のピーク周波数 f_p と一致するため、 $f_r = f_p$ とした。ところが、磁壁枚数 n の周波数特性は Haller²⁾ や Sakaki¹⁾ によって $f^{1/2}$ に比例することが報告されている。そこで (ii) 磁壁枚数 n の周波数依存性を考慮して修正した式(3)による計算も実施した。

$$\mu_r = \mu_{DC} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+(f/f_r)^2}} \quad \dots (1) \quad \mu_r = \mu_{DC} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+(f/f_p)^2}} \quad \dots (2) \quad \mu_r = \mu_{DC} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+A(f/f_p)^2}} \quad \dots (3)$$

結果

Fig. 1 に相対磁壁枚数 $n(f)/n_{10 \text{ kHz}}$ の周波数依存性を示す。 $f > 100 \text{ kHz}$ において磁壁枚数 n は $f^{1/4}$ に比例して増加することが確認された。また $f < 10 \text{ kHz}$ 未満の周波数帯での磁壁枚数は装置制約により評価ができなかった。そこで上述の結果を基に (iii) f_r が $f^{1/4}$ に比例すると仮定して修正した式(4)についても計算を行い、実測値との比較を行った。

$$\mu_r = \mu_{DC} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+A(f/f_p)^{3/2}}} \quad \dots (4)$$

Fig. 2 に μ_r の実測値及び式(2)、(3)、(4)による計算値を示す。式中 μ_{DC} 及び f_p にはそれぞれ 100 Hz における μ_r の実測値 $\mu_{r, 100 \text{ Hz}} = 76,000$ 及び $f_p = 20.9 \text{ kHz}$ を用いた。 $f < 10 \text{ kHz}$ の低周波域では式(3)、 $f > 100 \text{ kHz}$ の高周波域では式(4)が実験値をよく再現することが確認され、磁壁枚数 n は低周波域では $f^{1/2}$ に、高周波域では $f^{1/4}$ に比例して増加することが示唆された。

参考文献

- 1) Y. Sakaki, *IEEE Trans. Magn.*, **16**(4), 569-572, 1980
- 2) K. Haller, J. J. Kramer, *J. Appl. Phys.*, **41**(3), 1036-1037, 1970

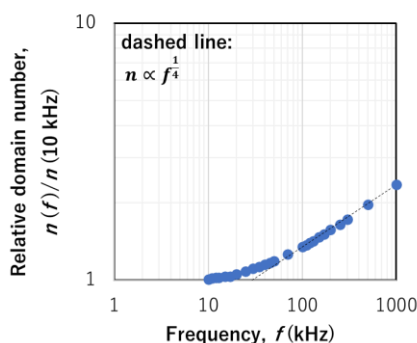


Fig. 1 Frequency dependence of domain number.

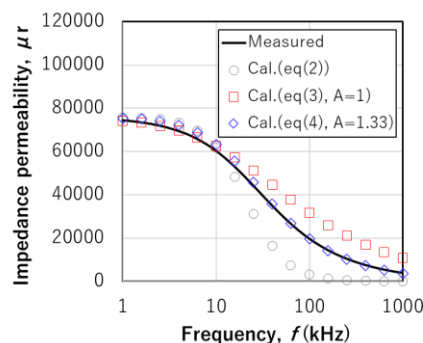


Fig. 2 Frequency dependence of permeability.

磁界中熱処理 Co-Pd 置換 FINEMET 組成薄帯の磁気特性評価

橋本竜大, 寺西英治, 襲田朗成, 南澤俊孝, 曾根原誠, 佐藤敏郎
(信州大学)

Evaluation of Magnetic properties of Co-Pd Substituted FINEMET Composition Ribbon

After Magnetic Field Annealing

Tatsuhiro Hashimoto, Eiji Teranishi, Akinari Osoda, Toshitaka Minamisawa, Makoto Sonehara, Toshiro Sato
(Shinshu University)

1. はじめに

SiC や GaN などのワイドバンドギャップ半導体を用いたパワーデバイスによって電力変換装置の動作周波数の高周波化が可能となり, トランスなどの磁気部品の小型化が期待されている. 現在, 絶縁型スイッチング電源用トランスには 0.5 T 程度の飽和磁束密度を持つ Mn-Zn 系フェライト磁心が多用されており, トランスのさらなる小型化のためにはトランス用磁心のさらなる低鉄損化と高飽和磁束密度化が求められる.

筆者らのグループでは, 1.2 T 級の飽和磁束密度と数 A/m の低保磁力を有する FINEMET 組成薄帯を出発に, 回転磁化過程の導入によって高周波で問題となるうず電流損失を低減するトランス用異方性薄帯の開発を進めている⁽¹⁾. 本稿では FINEMET 組成の Fe の一部を Co-Pd に置換し, 磁界中熱処理による原子対の方向性規則配列によって磁気異方性を誘導した Co-Pd 置換 FINEMET 組成薄帯の磁気特性評価の結果を示す.

2. 実験方法

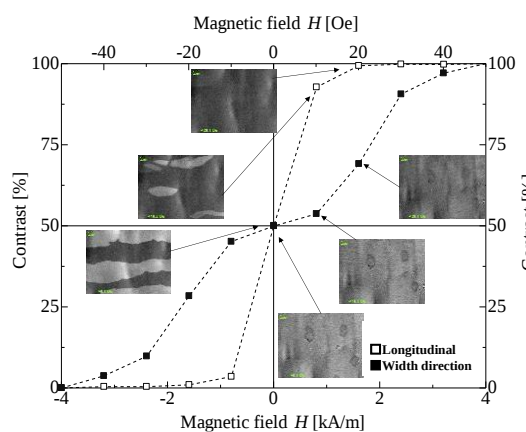
FINEMET の Fe の一部を Pd : Co=1 : 3 の割合で置換した $\text{Fe}_{73.5-x-y}\text{Pd}_x\text{Co}_y\text{Si}_{16.5}\text{B}_6\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ (at.%) 組成のアモルファス薄帯を溶湯急冷装置を用いて作製した後, 0.2 T の直流磁界, アルゴンガス雰囲気中 530°C-1h でナノ結晶化磁界中熱処理して約 18 μm 厚の Co-Pd 置換 FINEMET 組成薄帯を得た. 磁気特性評価として縦 Kerr 効果顕微鏡 (ネオアーク, Neomagnesia) による磁区観察, インピーダンスアナライザによる透磁率の周波数特性, B-H アナライザ (岩通, SY-8218) による鉄損評価を行った.

3. 磁区観察

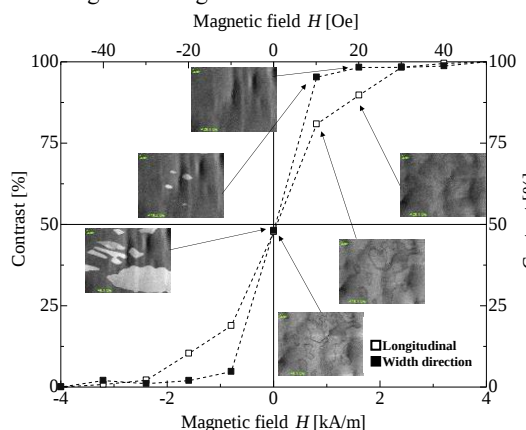
5 mm 角に切り出した薄帯小片に対して薄帯長手方向と幅方向に磁界を加えてナノ結晶化熱処理した二つの試料を用意し, それぞれに対し直交する二方向に磁界を印加して磁区の変化を観察した. Fig. 1(a)は薄帯長手方向に磁界を加えてナノ結晶化熱処理した場合の直交する二方向の磁区画像のコントラスト比と典型的な磁区画像を示すものである. ナノ結晶化熱処理の磁界印加方向に 180° 磁区に近い磁区構造が観察され, それと直交する方向では明瞭な磁区は観察されない. 薄帯幅方向に磁界を加えてナノ結晶化熱処理した場合も (Fig. 1(b)) ほぼ同様であり, ナノ結晶化熱処理時の磁界の印加方向が磁化容易軸, それと直交する方向が磁化困難軸になっているものと推察される.

学術講演会では, 薄帯幅方向に磁化容易軸を誘導した巻磁心の透磁率や鉄損の測定結果についても報告する.

(1) T. Sato *et al.*, INTERMAG2023, SF-05, Sendai, Japan, 2023.



(a) In case of annealing under applying magnetic field aligned in longitudinal direction of ribbon



(b) In case of annealing under applying magnetic field aligned in width direction of ribbon

Fig.1 Magnetic domain observation.

FINEMET 板状粉末圧粉磁心における加圧方法による特性変化

藤田裕介, 太田涼介, 小川碧斗, 曾根原誠, 佐藤敏郎
(信州大学)

Characteristic Changes Due to Pressing Method in FINEMET Plate-shape Powder Cores

Yusuke Fujita, Ryosuke Ota, Aoto Ogawa

Makoto Sonehara, Toshiro Sato

(Shinshu University)

1. はじめに

本研究は鉄系ナノ結晶粉末圧粉磁心のさらなる低保磁力化と、磁気異方性を誘導してうず電流損失の低減に有効な回転磁化の利用が可能となる圧粉磁心の実現を最終ゴールとして検討したものである。アトマイズ法球形粉末に代えて、本研究ではアトマイズ粉末よりも低保磁力が期待できるロール急冷薄帯を出発とする板状粉末を採用し、板状粉末に対して面内異方性の誘導が可能となる板状粉末の水平配向／垂直積層構造 (Fig. 1 参照) の実現について検討した。

異方性板状粉末圧粉磁心の前段階として、ナノ結晶化前のロール急冷 FINEMET 組成アモルファス薄帯を採用し、脆化熱処理したアモルファス薄帯を振動ミル粉碎して得られる板状粉末⁽¹⁾を用いた FINEMET 板状粉末圧粉磁心を作製した。ここでは FINEMET 板状粉末の水平配向／垂直方向積層構造を実現する粉末加圧法として片軸プレス法と両軸プレス法について検討した結果を示す。

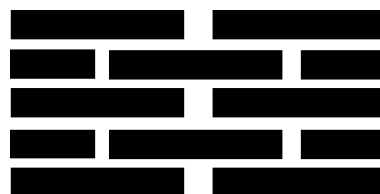


Fig. 1 Schematic cross-section of plate-shaped powder core with horizontally aligned and vertically stacked plate-shaped powders.

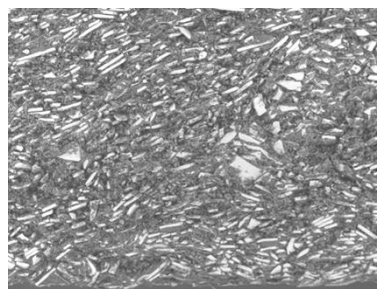
2. FINEMET 板状粉末圧粉磁心の作製方法

厚さ 18 μm のロール急冷 FINEMET 組成アモルファス薄帯を 400°C 脆化熱処理した後、振動ミルで粉碎し、100~150 μm フットプリントで分級した FINEMET アモルファス板状粉末を大気中 300°C・3 時間の熱酸化によって絶縁被膜を形成した。FINEMET 板状粉末をエポキシバインダ造粒し、造粒後の粉末を片軸ならびに両軸プレス法で加圧成形し、不活性ガス中でナノ結晶化熱処理を 522°C 15 分間行った。高温ナノ結晶化熱処理中にエポキシ樹脂が分解して生じる磁心内空隙を埋めるためにシリコーン樹脂で減圧含浸、硬化して圧粉磁心を得た。

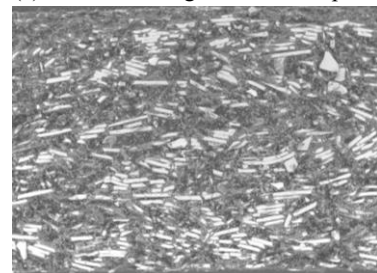
3. 加圧方法による粉末の配向状態と磁心の特性変化

Fig. 2 に片軸加圧した場合と両軸加圧した場合の圧粉磁心の断面を示す。両軸加圧法は金型ダイをフローティングさせて上下方向から圧力を加えることで成形中の粉末の動きに応じてダイが上下に動き、上下の密度差 (圧力ムラ) を小さくできる。Fig. 2 に示すように、両軸加圧した板状粉末圧粉磁心の方が板状粉末の水平配向と垂直積層が優勢になっているものと考えられる。

さらに、造粒粉末の金型への投入の方法によっても粉末の配向、磁心特性に影響を及ぼすことが明らかとなった。例えば、板状粉末を一度に金型に投入して 1 回の加圧で成形する一括法と、粉末を複数回に分けて金型に入れ、粉末を入れるたび加圧する分割法の 2 種類を検討した。学術講演会では、上記 2 つの方法で作製した磁心の保磁力、飽和磁化、透磁率、鉄損についても報告する。



(a) in case of using one side axis press



(b) in case of both side axes press

Fig. 2 Cross-section of FINEMET composition plate-shaped powder cores.

(1) 長澤 永, 他, 電学研資, MAG-23-107, 2023 年 11 月.

磁化過程に基づく鉄損要因解析と統計モデルの比較

○小野 暢久¹、上原 裕二²、大沼 智幸¹、谷口卓也¹、岡本 聡^{1,3,4}

(東北大多元研¹、磁気デバイス研究所²、東北大 CSIS³、NIMS⁴)

Relationship between iron loss analysis based on magnetization processes and statistic model

○Nobuhisa Ono¹, Yuji Uehara², Tomoyuki Onuma¹, Takuya Taniguchi¹, Satoshi Okamoto^{1,3,4}

(IMRAM, Tohoku Univ.¹, Magnetic Device Laboratory², CSIS, Tohoku Univ.³, NIMS⁴)

はじめに

近年、パワーエレクトロニクス素子の小型化・高効率化実現に向けて、高周波帯域における磁性受動素子の低損失化への要求が高まっている。そのためには、高周波領域における鉄損の物理的メカニズムを明らかにする必要がある。この課題に対して、我々はセンダスト圧粉磁心に対して広帯域鉄損計測を行い、過去に提案された磁化過程に基づく2種のモデル(磁化過程分離モデル[1]、実効磁壁モデル[2])を用いて解析を行った。その結果、低周波帯域では磁壁移動が、高周波帯域では磁化回転が主たる鉄損要因となっていることを明らかにした[3]。本発表では、本手法を磁気特性と電気特性が全く異なる他の磁性コアに展開し、さらに過剰損の理論として広く用いられている Bertotti の統計モデル[4]による解析結果との相関を調査した結果について説明する。

実験方法

トロイダル形状(外径 13 mm、内径 8 mm、厚み 5 mm)のセンダスト圧粉コア(透磁率 $\mu_r = 30$ 、飽和磁束密度 $B_s = 1.0$ T)、Mn-Zn フェライトコア($\mu_r = 2,900$, $B_s = 0.51$ T)、および FINEMET 巻回コア($\mu_r = 50,000$, $B_s = 0.90$ T)に対し、2 コイル法及び共振法を用いて 10 Hz から 55 MHz の範囲での広帯域鉄損計測を行った。そして、得られた鉄損データに対して磁化過程分離モデル、実効磁壁モデルおよび統計モデルを用いて解析を行い、各解析結果を比較した。

実験結果

各磁性素子において得られた一周周期当たりの鉄損 W の測定結果と各解析結果を Fig.1 に示す。磁化過程分離モデルによって得られた磁壁移動および磁化回転による鉄損成分を黒色線と灰色線で、統計モデル解析によって得られた過剰損とヒステリシス損の和を赤線で、AC 抵抗率測定から得られた古典渦電流損を青線でそれぞれ表している。磁性コアに関係なく、低周波領域では磁壁移動による損失が、高周波領域で磁化回転による損失が支配的になる一方で、磁化過程の遷移周波数は磁性コアに大きく依存する結果となった。そして各モデル同士を比較することで、磁壁移動による損失はヒステリシス損および過剰損に、磁化回転による損失は古典渦電流損に対応づけられることが分かった。

また、Fig.2 に実効磁壁モデル解析によって得られた、実効磁壁枚数を磁壁ダンピングで割った値 n_{eff}/β の周波数特性(丸マーク)と、統計モデル解析によって得られた、活性化 Magnetic Object(MO)の実効数 n'_{MO} の周波数特性(三角マーク)を示す。実効磁壁枚数は周波数とともに増加し、この挙動は統計モデルで概念的パラメータとして導入された活性化 MO の実効数とよく一致した。

本研究は文科省革新的パワーエレクトロニクス創出基盤技術研究開発事業 JPJ009777 の支援の下で行われた。

[1] C.Beaticce, *et al.*, J. Magn. Magn. Mater. **429**, 129 (2017), [2] Y. Sakaki, IEEE Trans. Magn., **16**, 569 (1980),

[3] N. Ono *et al.*, IEEE Trans. Magn., **59**, 6301305 (2023). [4] G. Bertotti, J. Appl. Phys. **57**, 2110 (1985).

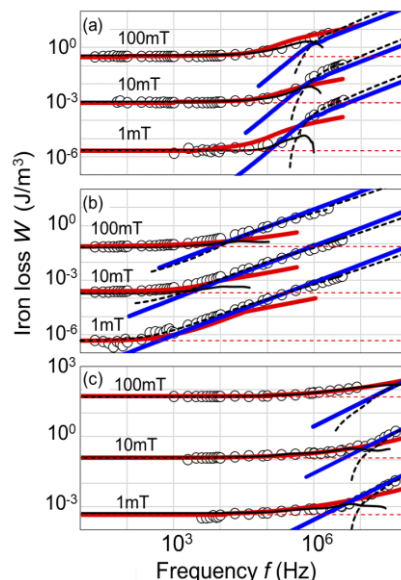


Fig.1 Iron loss per cycle obtained by experiments (marks) and analysis (lines) of (a) Mn-Zn ferrite sintered, (b) FINEMET wound, and (c) Sendust powder cores.

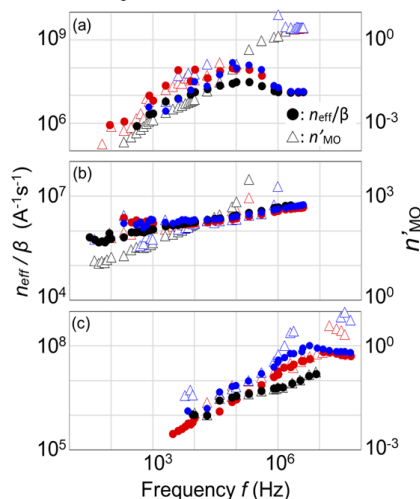


Fig.2 Effective domain wall number over the domain wall damping n_{eff}/β (circle) and effective active MOs number n'_{MO} (triangle) of (a) Mn-Zn ferrite sintered, (b) FINEMET wound, and (c) Sendust powder cores for $B_m = 1$ mT (blue), 10 mT (red), and 100 mT (black) as a function of frequency.

Sinc パルスを用いた広帯域鉄損機構の調査

谷口卓也¹、上原裕二²、佐藤佑樹³、塚原宙¹、岡本聡^{1,4,5}

(¹ 東北大、² 磁気デバイス研究所、³ 青学大、⁴ 東北大 CSIS、⁵ NIMS)

Mechanism of wide-band iron loss using Sinc pulse measurement

(Tohoku Univ., Magnetic Device Laboratory Ltd., Aoyama Gakuin Univ., Tohoku Univ. CSIS, NIMS)

背景・目的

パワーエレクトロニクス(パワエレ)における半導体技術は電力変換効率の向上を目指して近年躍進しているが、2019年のGoogle Little Box Challengeで最先端サーバー用コンバータ回路として設計されたデバイスにおける全エネルギー損失の約40%が磁性受動素子に起因すると報告されているように[1]、磁性受動素子が次世代パワエレ技術開発のボトルネックとなっている。磁性受動素子の開発が遅れている原因の一つは、40年近く前の鉄損の物理的理解を現在のパワエレ回路駆動周波数帯であるkHz-MHz帯で用いていることにあり、鉄損の物理的機構を見直し理論を再構築することが次世代磁性受動素子開発に求められている。

本研究では、インバータ回路の一種であるパルス幅変調(PWM)に対する鉄損機構を調査するため、Sincパルスを用いた鉄損測定手法の開発に取り組む。Sincパルスは広帯域の交流磁場を混合した信号であるため、多様なパルス幅が入力されるPWMにおける鉄損測定およびその物理的機構の理解に適した入力信号であると考えた。

測定手法

Ni-Zn フェライトとセンダストの2種類のトロイダルコアを用意し、Inductive Cancellation法によって鉄損測定を行った[2]。Inductive Cancellation法の特徴は、一次コイルへの入力電流(I_{in})と二次コイルからの出力電圧(V_{out})の位相差を小さくすることで測定誤差を低減できることであり、本実験では2kHzの正弦波電流を用いて位相差が0となるように校正した。同測定回路に、 I_{in} としてSincパルスを0.5ミリ秒間印加し、その際の V_{out} をオシロスコープで測定した。

測定結果

Sincパルスの帯域幅を40kHzとした時の I_{in} および V_{out} をFig. 1(a), (b)に示す。 I_{in} はフェライトとセンダスト共にきれいなSinc波形をとっており、これはFig. 1(c)に示すフーリエ変換後の周波数依存性が帯域範囲内において一定値を取っていることから判る。その一方で、 V_{out} はSinc波形をとらず、周波数に依存した振幅を有していることが判る(Fig. 1(d))。加えて、 I_{in} および V_{out} の位相(θ_i 、 θ_v)の各周波数成分をFig. 1(e)および(f)に示す。 θ_i は設定された帯域幅(< 40 kHz)においてほぼゼロ値を取るのに対して、 θ_v は周波数に大きく依存し、その依存性も物質によって異なることが判る。本講演では、Sincパルスの帯域幅を変化させた結果や正弦波実験の結果、モデル計算結果を含めて混合波における磁化応答機構を議論する。

謝辞

センダスト圧粉コアは(株)トーキンより提供頂いた。また、本研究は文部科学省革新的パワーエレクトロニクス創出基盤技術研究開発事業JPJ009777の支援の下で行われた。

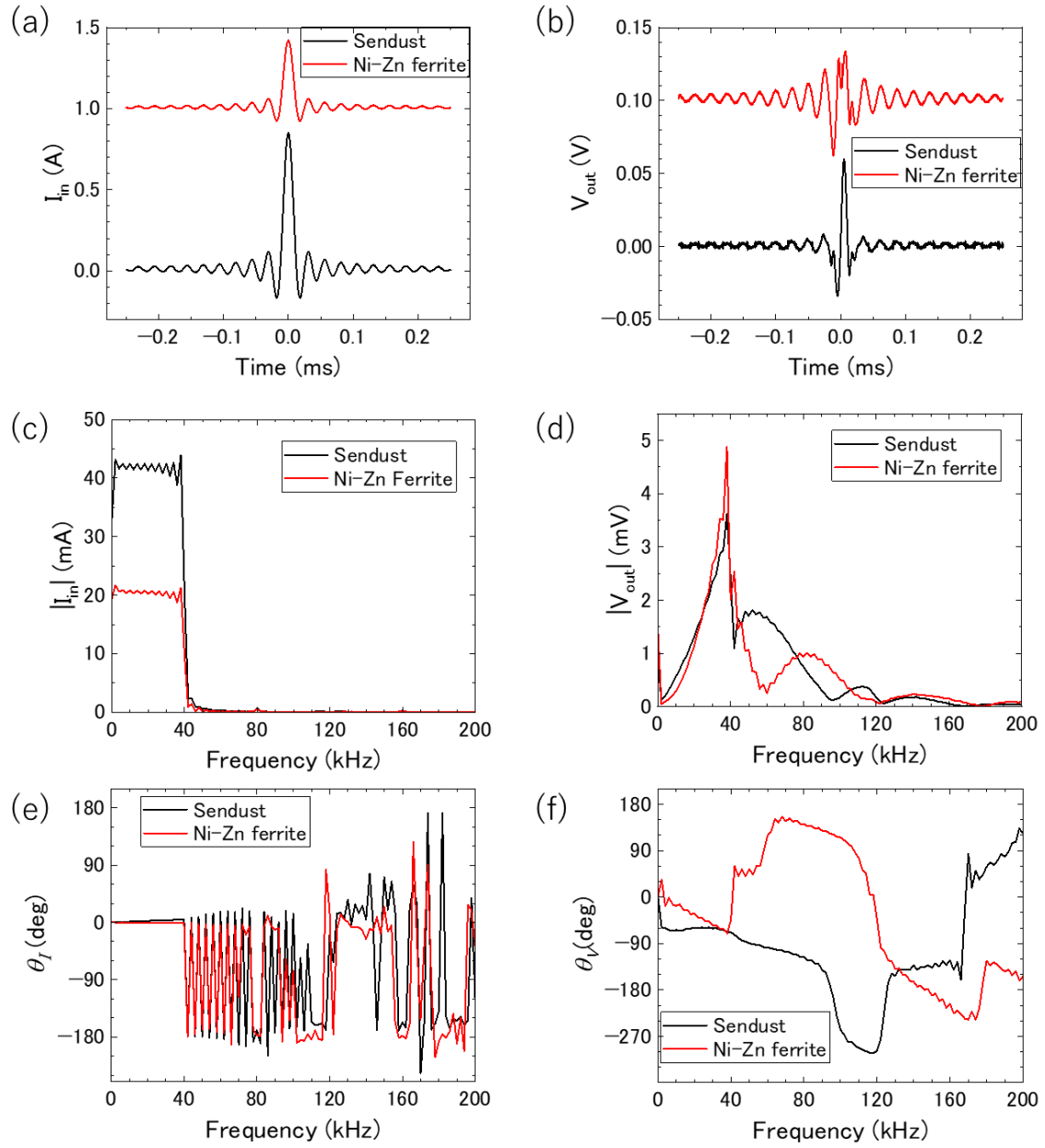


Fig.1 (a, b) Measured (a) I_{in} and (b) V_{out} . (c-e) Fourier transformed results of the measured I_{in} and V_{out} . Black and red lines indicate the results of Sendust and Ni-Zn ferrite, respectively.

参考文献

- 1) D. Neumayr *et al.*, CPSS Trans. Power Electro. Appl. **5**, 251 (2020).
- 2) D. Hou, M. Mu, F. C. Lee, Q. Li, IEEE Trans. Power Electron. **32**, 2987 (2017).

各種磁性コアの直流バイアス特性と B - H カーブ形状の相関

○大沼智幸¹, 小野暢久¹, 岡本聡^{1,2}

東北大多元研¹, 東北大 CSIS²

Correlation between DC bias characteristics and B - H curve shape of various magnetic cores

○Tomoyuki Onuma¹, Nobuhisa Ono¹, Satoshi Okamoto^{1,2}

IMRAM, Tohoku Univ.¹, CSIS, Tohoku Univ.²

はじめに

近年、パワーエレクトロニクス用電力変換器に使用されるトランスやインダクタなどの磁性デバイスの損失低減が求められており、特に損失の多くを占める鉄損のメカニズム解明が待たれている。インダクタは直流バイアス磁界を印加して使用されることが多く、バイアス印加時の鉄損の挙動は重要な性能指標である。我々はバイアス印加時の鉄損挙動を鉄損測定時の B - H カーブの形状の変化と関連付けて考察し、主成分分析 (PCA) を用いることで、 B - H カーブの非線形な形状の変化を定量的に捉える手法の検討を進めてきた¹⁾。本研究では材料ならびに比透磁率 μ_r の異なる各種磁性コアについて鉄損のバイアス特性と B - H カーブ形状の関係を調べ、バイアス印加時の鉄損挙動のメカニズムを考察した。

実験方法および試料

鉄損は 2 コイル法で測定し、直流バイアス磁界は 3 次コイルを用いて印加した。鉄損測定時の磁束密度 ΔB は 40 mT, 周波数 f は 100 kHz に固定した。試料として Magnetics 社製センダスト (Kool M μ ®)、Fe-Si (XFlux®)、Mo パーマロイ (MPP) 圧粉コアおよびトーキン製 MnZn フェライトコアの材料の異なる 4 種類の磁性コアならびに μ_r の異なる 5 種類の Mo パーマロイ (MPP) 圧粉コアを用いた。

結果

図 1 に様々な μ_r をもつ Mo パーマロイ圧粉コアの鉄損のバイアス特性を示す。

$\mu_r = 26$ の試料では鉄損はバイアスに対

し単調に減少する。 μ_r が大きくなるにつれて鉄損のバイアス特性は増加傾向に転じる。 $\mu_r = 550$ の試料では鉄損はバイアスに対し大幅に増加する。図 2 に PCA による B - H カーブ形状解析の結果を示す。第 1 主成分 PC1 は B - H カーブの傾き、第 2 主成分 PC2 は B - H カーブの曲率の変化が特徴量として抽出された。PC1、PC2 それぞれの主成分スコアの分布から、磁性コアの μ_r の違いが B - H カーブの傾き (実効透磁率) や曲率に影響を及ぼし、バイアス印加時の鉄損挙動を変化させていることが分かった。

謝辞

本研究は文部科学省 革新的パワーエレクトロニクス創出基盤技術研究開発事業 JPJ009777 およびデータ創出・活用型マテリアル研究開発プロジェクト事業(データ創出・活用型磁性材料研究拠点)JPMXP1122715503 の助成を受けたものです。また本研究では PCA ツールとしてトヨタ自動車(株)の材料解析クラウドサービス WAVEBASE を使用しました。

参考文献

1) T. Onuma, Z. Li and S. Okamoto, IEEE Trans. Magn., doi: 10.1109/TMAG.2023.3281548.

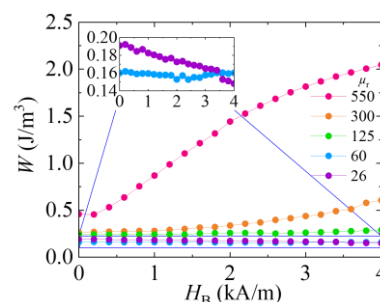


Fig. 1. Bias dependence of iron loss of Mo permalloy with different μ_r .

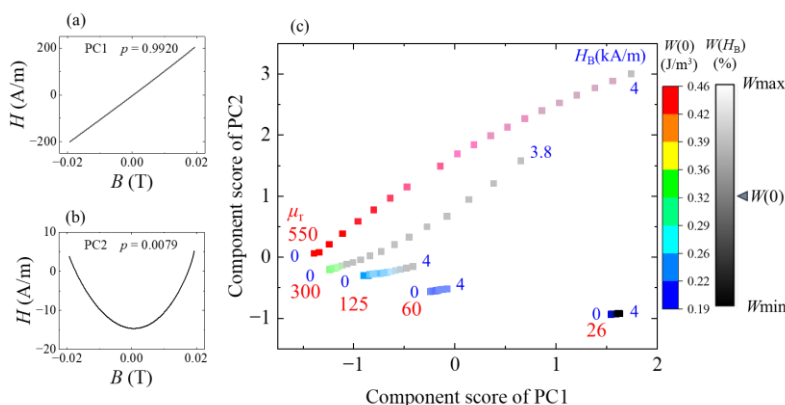


Fig. 2. PCA results for magnetic score with different magnetic permeability. (a) Principal component PC1, (b) Principal component PC2, (c) Principal component score of PC1 and PC2. Note: Wmin = 80, Wmax = 120 at $\mu_r = 26, 60, 125$ and 300. Wmax = 500 at $\mu_r = 550$ (Only Wmax is defined).