

Si-IGBT および GaN-FET インバータ励磁下の ナノ結晶リングコアの鉄損特性

正 員 八尾 惇^{*a)} 非会員 杉本 昂也^{**} 上級会員 藤崎 敬介^{**}

Iron Loss Properties of a Nanocrystalline Ring Core under Si-IGBT and GaN-FET Inverter Excitation

Atsushi Yao^{*a)}, Member, Takaya Sugimoto^{**}, Non-member, Keisuke Fujisaki^{**}, Senior Member

(2018 年 4 月 11 日受付, 2018 年 11 月 4 日再受付)

We examine the iron loss properties of a nanocrystalline magnetic material (NMM) core excited by pulse width modulation (PWM) inverters with different semiconductors. We report the iron loss characteristics as a function of carrier frequency of the NMM ring core excited by two different inverters, which consist of a silicon-insulated gate bipolar transistor (Si-IGBT) and a gallium nitride-field effect transistor (GaN-FET). The iron losses of the NMM ring core under GaN-FET inverter excitation increase with the increase of carrier frequency owing to the ringing noises generated from the fast switching. However, the iron losses of the Si-IGBT-inverter-excited NMM ring core decrease slightly with increasing carrier frequency. We show that the iron loss properties of NMM ring core depend strongly on power semiconductor characteristics. In addition, to consider the ringing waveform in the NMM ring core by numerical simulations, we focus on a series *RLC* circuit model. We confirm that the numerical damped oscillation of the ringing calculated based on the series *RLC* circuit model is consistent with the experimental damped oscillation.

キーワード：ナノ結晶材料, 鉄損, リングコア, リンギング

Keywords: nanocrystalline magnetic material, iron loss, ring core, ringing

1. 序 論

インバータは、電力変換機器の一つであり、直流電圧を任意の電圧・周波数に変換できるものである。このようなインバータは、モータシステムにおいて、可変速制御を実現するために広く使用されている。一般的に、モータコアは磁性材料により製作され、インバータで励磁された場合、必然的に含まれる時間高調波成分が磁気特性に影響し、インバータにより磁性体を励磁した際の鉄損は、正弦波励磁した際の鉄損と比べて増加することがよく知られている^{(1)~(12)}。近

年、モータコアの磁性材料として、従来の無方向性電磁鋼板 (Non-Oriented electrical steel sheet, NO) から、より低損失なナノ結晶材⁽¹³⁾を使用することが検討されている^{(14)~(16)}。したがって、モータの損失低減の観点から、インバータ励磁下のナノ結晶コアの基礎鉄損特性を把握することは非常に重要である。

さらに、近年、窒化ガリウム (Gallium Nitride, GaN) や炭化ケイ素 (Silicon Carbide, SiC) などの次世代電力用半導体素子材料の研究開発が盛んに行われている。このような新材料の半導体素子は、高速スイッチング・低オン抵抗・高耐圧・高温動作が可能という特徴を持つ。これらをインバータに使用した際には、スイッチング損失を小さくでき、かつ、高周波化が可能ため駆動回路全体を小型化できる⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。すなわち、これらの次世代電力用半導体素子研究開発が盛んな理由のひとつとして、高速スイッチング特性がある。例えば、インバータ励磁におけるキャリア周波数を高周波化することで、より正弦波に近い励磁状況を実現し、その負荷にある磁性体の鉄損を下げられる可能性があると考えられる。したがって、次世代半導体素子を用いたインバータにおいて、キャリア周波数に依存する磁性材料の基礎特

a) Correspondence to: Atsushi Yao. E-mail: yao@pu-toyama.ac.jp

^{*} 富山県立大学
〒939-0398 富山県射水市黒河 5180
Toyama Prefectural University

5180, Kurokawa, Imizu, Toyama 939-0398, Japan
^{**} 豊田工業大学 電磁システム研究室
〒468-8511 愛知県名古屋市中区久方 2-12-1
Electromagnetic Energy System Lab., Toyota Technological Institute
2-12-1, Hisakata, Tempaku-ku, Nagoya, Aichi 468-8511, Japan

性を取得することは意義深い。また、近年、従来の磁性材料である NO 材や低損失材であるアモルファス材において、半導体素子特性が磁性・鉄損特性に影響を及ぼすことが明らかとなった⁽²⁾⁽¹⁹⁾。以上より、次世代電力用半導体素子および従来半導体素子を用いた異なる 2 種類のインバータ励磁下のナノ結晶コア（次世代磁性材料）の鉄損のキャリア周波数特性を比較することは有意義なことといえる。

先行研究では、正弦波励磁下、方形波励磁下、およびフィルタ条件下でナノ結晶材のコアおよびギャップ付きコアの損失評価が行われている^{(20)~(25)}。また、PWM (Pulse Width Modulation) インバータ励磁下のナノ結晶コアのフィルタとしての損失特性が、理論的に検討されている⁽²⁶⁾。ここで、実験により、PWM インバータ励磁下のナノ結晶コアの損失特性が明らかとなれば、時間高調波成分を含む損失特性が実験値より議論でき、モータコア設計等に役立つ。また、次世代半導体および従来半導体素子を用いたインバータで励磁した際のナノ結晶コアの特性を検討することが可能となれば、ナノ結晶コアの磁性・鉄損特性に対する半導体素子特性の影響を評価することができる。

以上の観点より、本研究では、異なるインバータ励磁下のナノ結晶コアの損失評価を実験的および数値的に検討する。具体的には、次世代半導体素子を使用した GaN-FET (Field Effect Transistor) インバータおよび広く普及し、使用されている Si-IGBT (Silicon-Insulated Gate Bipolar Transistor) インバータ励磁下のナノ結晶コアの鉄損特性を実験により評価する。本研究では、ナノ結晶コアを評価するために、リング試料を使用する。また、ナノ結晶リングコアの鉄損特性に影響を及ぼすリングングについて等価回路モデルを用いて数値的に検討する。ここで、リングングは、リングコアを励磁するための波形（電圧および電流波形）に生じる振動を指す。特に、本研究では、PWM インバータのスイッチング動作で生じる振動波形がリングングである。このようなリングングが、リング試料に流れる 1 次電流および誘起される 2 次電圧に生じると、磁界強度および磁束密度が変化し、鉄損特性も変化する可能性が考えられる⁽¹⁹⁾。したがって、ナノ結晶リングコアのリングング特性を実験および数値計算により検討することは意義深い。

構成は以下の通りである。まず、第 2 章では、ナノ結晶コアおよびその損失を測定するための実験システムについて述べる。第 3 章では、まず、実験によりインバータ励磁下の基礎特性および鉄損特性を示す。次に、等価回路モデルより、鉄損特性に影響を及ぼすリングングを数値的に検討する。最後に、第 4 章で結果をまとめる。

2. ナノ結晶コアとその実験システム

本章では、次章以降の実験で使用するナノ結晶リング試料およびインバータに関する基礎事項を述べる。まず、本研究で使用するリング試料について説明する。次に、GaN-FET インバータおよび Si-IGBT インバータについての概略を述べる。最後に鉄損導出方法について説明する。

〈2・1〉 リング試料 本研究では、ナノ結晶材 (FT-3M) で構成されたリング試料を用いて鉄損を導出する。Fig. 1(a) および (b) にナノ結晶材の積層形のリングコアおよび巻線を施したリング試料をそれぞれ示す。Table 1 に、使用したナノ結晶リング試料の仕様を示す。

本研究では、ナノ結晶材の積層形コアを用いたリング試料を以下の製造プロセスおよび加工方法により作製した。

1. Fe-Si-B-Cu-Nb 合金を溶解し、単ロール法にて急冷 ($100 \times 10^4 \text{C/s}$ 以上) し、アモルファス薄帯（厚み $18 \mu\text{m}$ 、幅 142mm ）を作製した。
2. アモルファス薄帯を切断し、積層した（積厚 7mm ）。
3. 積層したアモルファス薄帯を 500°C 程度で約 3 時間、熱処理し、ナノ結晶相を得た。なお、この際、結晶粒径は 10nm 程度となった。
4. 次に、積層したナノ結晶材を樹脂含浸（真空含浸）し、積層状のナノ結晶ブロックコアを作製した。なお、含浸材はアクリル系樹脂を使用した。
5. 積層状のナノ結晶ブロックコアをワイヤーカット法を用いて、リング状に切断した (Fig. 1(a))。
6. 最後に、ケースに入れ、1 次電流および 2 次電圧を測定するために、1 次巻線および 2 次巻線を巻いた (Fig. 1(b))。

以上のように、本ナノ結晶リングコアの原料元素は、Fe-Si-B-Cu-Nb であり、結晶組織は、ナノ結晶相（結晶粒径が 10nm 程度の微細な結晶が均一に析出）となっている。ここでは、主相は bcc Fe (-Si) 相であり結晶粒の周囲にアモルファス相が残存している。なお、コア材の加工方法およびリング試料作製方法の詳細については文献(1), (15), (16)

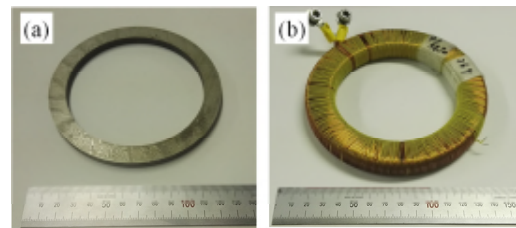


Fig. 1. Fabricated ring specimens composed of nanocrystalline magnetic material (FT-3M). (a) material used for ring core, (b) wound ring specimen.

Table 1. Ring specifications.

Reference	Symbol	FT-3M
Height		7 mm
Outside diameter	d_o	127 mm
Inside diameter	d_i	102 mm
Average magnetic path length	l	0.36 m
Cross section area	S	87.5 mm^2
Primary coil winding	N_1	264 turns
Secondary coil winding	N_2	264 turns
Density	ρ	7300 kg/m^3

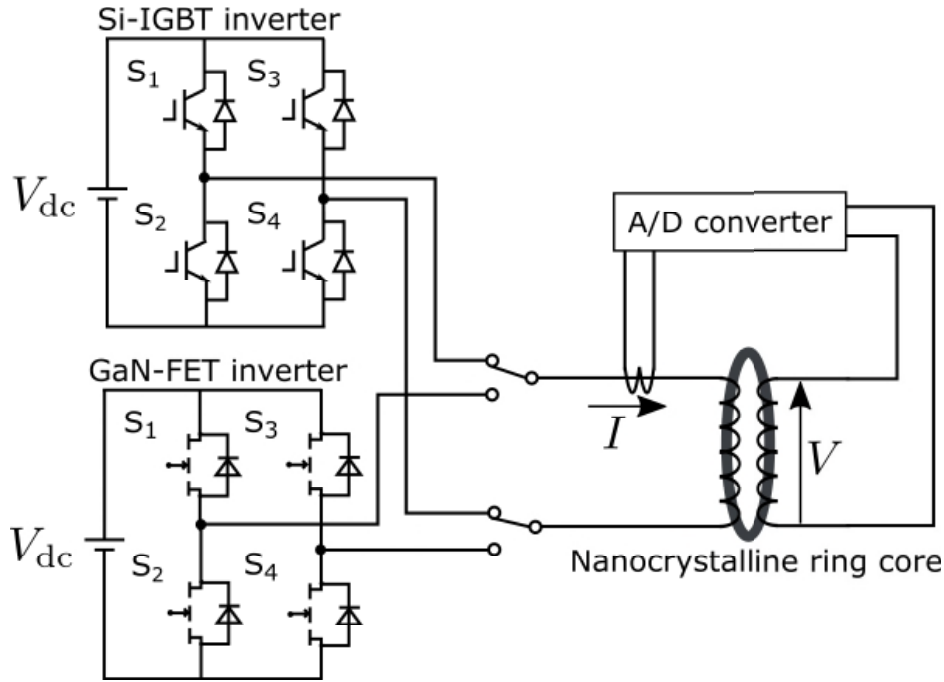


Fig. 2. Schematic of ring tests to experimentally obtain iron loss properties under Si-IGBT and GaN-FET inverter excitations.

を参考にされたい。

〈2・2〉 実験システム Fig. 2 に、リング試料を評価するための 2 種類の異なるインバータ励磁システムを示す。本研究では、単相 PWM インバータ励磁下のリングコアの鉄損評価を行った。前述のように、1 つ目の励磁方法として、Si-IGBT インバータ励磁下の鉄損特性を検討した。本研究では、Si-IGBT インバータとして、三菱電機（株）製の PM75RSD060 を用いた。2 つ目の励磁方法として、次世代半導体素子を用いた GaN-FET インバータ励磁システムにより、鉄損特性の評価を行った。ここでは、サンケン電気（株）製の DGF6010 を使用した。なお、GaN-FET の特徴として、高速スイッチングおよび低オン抵抗等を有する。

本研究では、基本周波数の基本波とキャリア周波数 f_c を有する三角波との交点にてスイッチング素子（Si-IGBT または GaN-FET）が切り替わるようにし、基本波と三角波の波高値の比を変調率 m とした。2 種類のインバータ励磁下では、基本周波数 f_0 を 50 Hz、変調率 m を 0.5 とし励磁した。本研究では、キャリア周波数を 1 kHz、4 kHz、8 kHz、12 kHz、16 kHz、および 20 kHz と変更し、測定を行った。インバータ励磁下でコア中の最大磁束密度 $B_{\max}$ は 1 T と設定し、測定した。Si-IGBT（GaN-FET）インバータ励磁下では、キャリア周波数が 1, 4, 8, 12, 16, 20 kHz の時に、直流電圧 V_{dc} を、それぞれ 13.24, 13.72, 14.24, 14.82, 15.50, 16.29 V (12.09, 12.57, 13.42, 14.44, 15.76, 17.46 V) と設定した。

〈2・3〉 鉄損導出方法 Fig. 2 の測定システムにおいて、リング試料の 1 次巻線に流れる 1 次電流 I と 2 次巻線に誘起される 2 次電圧 V のそれぞれから磁界強度 H と磁束密度 B を導出し、鉄損を導出した。すなわち、磁界強度

H と磁束密度 B より、以下の式を用いて鉄損 W の導出を行った。

$$H = \frac{N_1 I}{l} \dots \dots \dots (1)$$

$$B = \frac{1}{N_2 S} \int V dt \dots \dots \dots (2)$$

$$W = \frac{f_0}{\rho} \int H dB \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 N_1 , N_2 , l , S および ρ は、それぞれ 1 次巻線数、2 次巻線数、平均磁路長、断面積および密度である。

Fig. 2 の A/D converter 部には、National Instruments 製の PXI-5122 を使い、分解能 14 bit、サンプリング周波数 50 MHz として電圧と電流を測定した。また、電流測定では、電流プローブ（岩崎通信機（株）製、型番 SS-250）を用い、電圧測定では、電圧プローブ（岩崎通信機（株）製、型番 SS-320）を用い、測定を行った。

3. 結果と考察

本章では、まず、インバータ励磁下のナノ結晶コアの電流波形および電圧波形について説明する。また、インバータに抵抗を接続した時の電流および電圧波形も検討する。次に、インバータで励磁された際のナノ結晶コアのヒステリシスおよび鉄損特性を示す。特に、GaN-FET インバータ励磁下では、リンギングの影響を検討する。最後に、リンギング波形を等価回路モデルを用いて数値的に検証する。

〈3・1〉 電流および電圧波形 Fig. 3(a) および (b) にそれぞれキャリア周波数が 1 kHz および 20 kHz の Si-IGBT 励磁下のナノ結晶リング試料の 2 次電圧波形を示す。また、

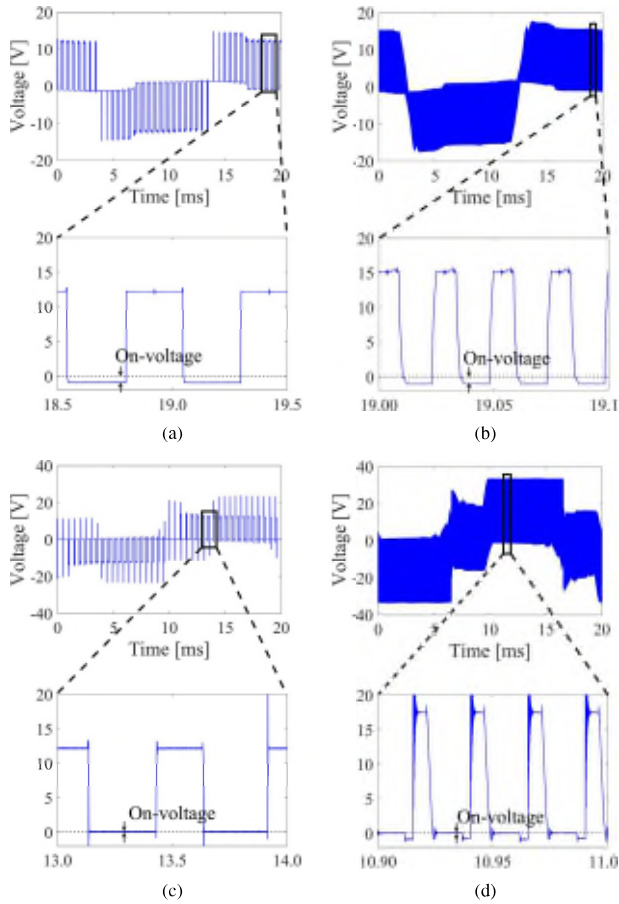


Fig. 3. Waveforms of voltage in nanocrystalline ring specimen. (a) results at $f_c = 1$ kHz under Si-IGBT inverter excitation, (b) results at $f_c = 20$ kHz under Si-IGBT inverter excitation, (c) results at $f_c = 1$ kHz under GaN-FET inverter excitation, (d) results at $f_c = 20$ kHz under GaN-FET inverter excitation.

Fig. 3(c) および (d) にそれぞれキャリア周波数が 1 kHz および 20 kHz の GaN-FET 励磁下のナノ結晶リング試料の 2 次電圧波形を示す。本研究のリング試料では、1 次側巻線数と 2 次側巻線数は同数のため、1 次電圧波形と 2 次電圧波形がほぼ等価な波形となる。Fig. 3 に示すように、2 次電圧波形に負のオン電圧が現れる。Fig. 3 からわかるように、GaN-FET では、Si-IGBT と比較し、オン抵抗が小さいため、オン電圧が小さくなっていることがわかる。

Fig. 4(a) および (b) にそれぞれキャリア周波数が 1 kHz および 20 kHz の Si-IGBT 励磁下のナノ結晶リング試料の 1 次電流波形を示す。同様に、Fig. 4(c) および (d) にキャリア周波数が 1 kHz および 20 kHz の GaN-FET 励磁下のナノ結晶リング試料の 1 次電流波形を示す。Fig. 4(c) および (d) からわかるように、GaN-FET 励磁下のナノ結晶リング試料の電流波形には、リングングが生じている。

次に、インバータに抵抗を接続した時の電流および電圧波形を検討する。Fig. 5(a) および (b) に、Si-IGBT インバータに抵抗を接続した際の電流および電圧波形を示す。また、Fig. 6(a) および (b) に、GaN-FET インバータの抵抗接続時

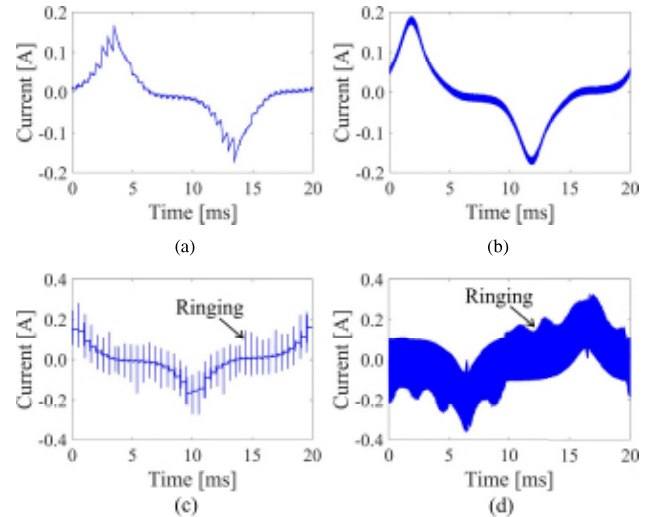


Fig. 4. Waveforms of current in nanocrystalline ring specimen. (a) results at $f_c = 1$ kHz under Si-IGBT inverter excitation, (b) results at $f_c = 20$ kHz under Si-IGBT inverter excitation, (c) results at $f_c = 1$ kHz under GaN-FET inverter excitation, (d) results at $f_c = 20$ kHz under GaN-FET inverter excitation.

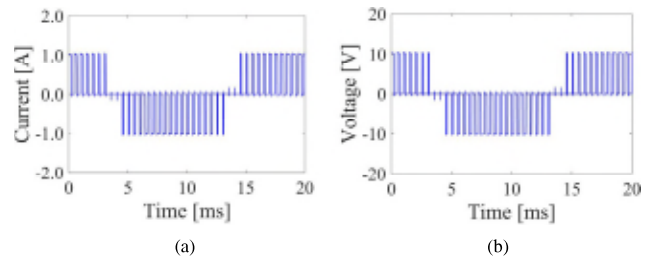


Fig. 5. Experimental waveforms when resistor is connected to Si-IGBT inverter. (a) current, (b) voltage.

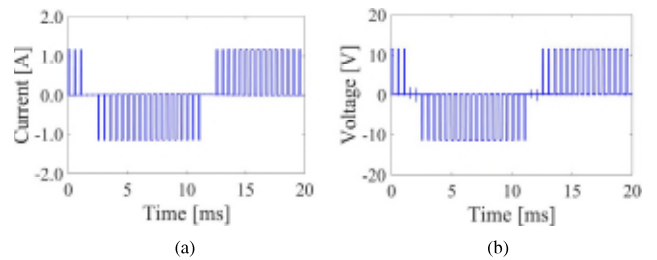


Fig. 6. Waveforms when resistor is connected to GaN-FET inverter. (a) current, (b) voltage.

の電流および電圧波形を示す。ここで、キャリア周波数は 1 kHz としている。図からわかるように、抵抗を接続した際には、両 (Si-IGBT および GaN-FET) インバータの電流および電圧波形にリングングが生じていないことがわかる。また、Si-IGBT および GaN-FET インバータにおいて、抵抗接続時の電圧および電流波形はほぼ同じ形状を示す。すなわち、ナノ結晶リング試料を GaN-FET インバータに接続した際にリングングが発生することがわかる。これは、GaN-FET のスイッチング速度が、Si-IGBT と比較し、高速なため、サージが生じ、リングングが発生するためと考え

られる。つまり、GaN-FET のスイッチングの立ち上がりおよび立ち下がり時間が短いため、その分だけ高い周波数成分が含まれ、寄生成分の影響を受けやすくなったためと考えられる。以上より、GaN-FET インバータ励磁下のナノ結晶リング試料には、リングングが生じることがわかった。

〈3・2〉 ヒステリシスおよび鉄損特性 本節では、インバータ励磁下のナノ結晶リングコアのヒステリシス特性および鉄損特性について議論する。

Fig. 7(a) と (b) に、キャリア周波数を 1 kHz と 20 kHz と設定した場合の Si-IGBT インバータ励磁下のナノ結晶リングコアのヒステリシスカーブをそれぞれ示す。同図からわかるように、インバータ励磁下では、1 次電流および 2 次電圧にキャリア高調波成分を含むため、時間高調波成分の影響が生じる。したがって、拡大図に示すようにヒステリシスカーブに細かいマイナーループが形成される。なお、インバータ励磁下のヒステリシスカーブおよびマイナーループについては、Kawabata らの論文⁽¹⁾を参考にされたい。

Fig. 7(c) と (d) に、キャリア周波数が 1 kHz および 20 kHz の GaN-FET インバータ励磁下のヒステリシスカーブをそれぞれ示す。Fig. 7(a), (b) と比較し、(c), (d) に示すように、GaN-FET インバータ励磁下のナノ結晶リングコアでは、1 次電流波形に生じているリングングがヒステリシスカーブにも生じている。Fig. 7(c) に示すように、リングングが発生した際のヒステリシスカーブの軌道は矢印 (A→B→C→...→G) のように得られる。ここで、斜線で示す領域の面積 (a_1) の方が、斑点模様で示す領域の面積 (b_1) より大きくなっている。すなわち、リングングが発生した場合には、ナノ結晶リングコアの鉄損値が増加することがわかる。

Fig. 8 にキャリア周波数を変更した際のインバータ励磁下のナノ結晶リングコアの鉄損を示す。青色のひし形点で示す Si-IGBT インバータ励磁下では、キャリア周波数が高くなるとナノ結晶リングコアの鉄損は若干低下することがわかる。一方、赤色の四角点で示す GaN-FET インバータ励磁下では、キャリア周波数が増加すると、ナノ結晶リングコアの鉄損が増加することが明らかとなった。これは、Fig. 4(c), (d) および Fig. 7(c), (d) に示すように、GaN-FET インバータ励磁下では、キャリア周波数が増加するとリングングの回数が増え、鉄損が増加するためであると考えられる。

キャリア周波数が増加すると、一般的に、マイナーループでは、磁界強度 H の幅が狭まる⁽²⁷⁾。一方、ヒステリシスカーブのリングング波形では、キャリア周波数が増加すると、磁界強度の幅がわずかに広がる (Fig. 7(c) および (d))。これは、キャリア周波数が増加すると、直流電圧が増加し、

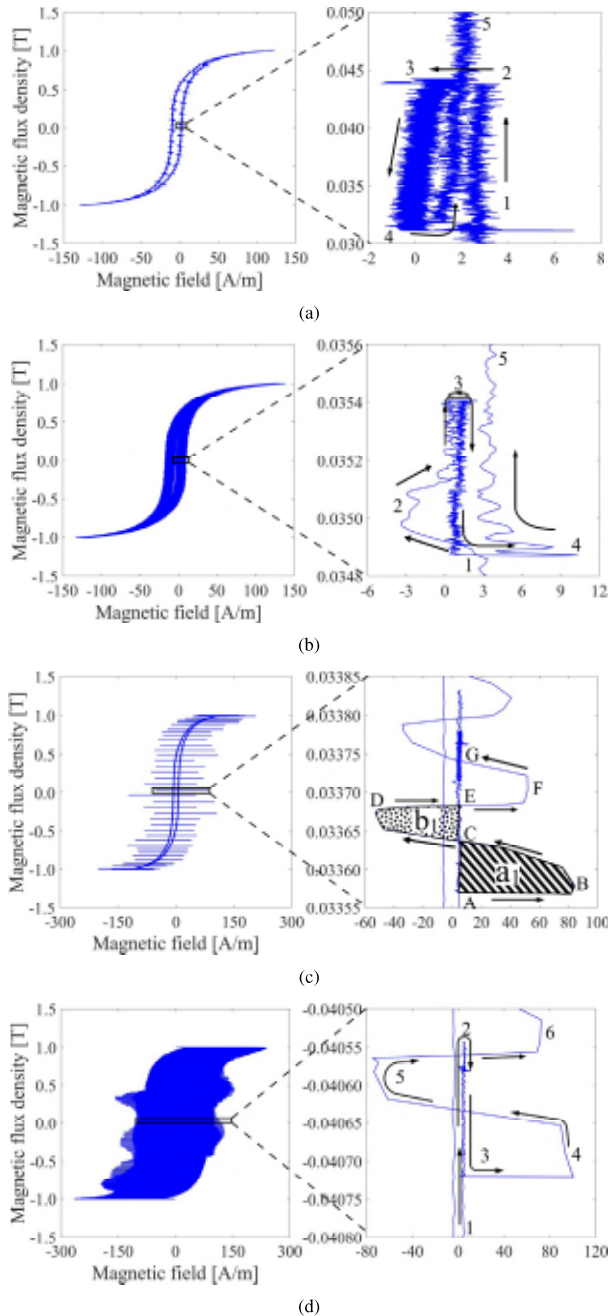


Fig. 7. Experimentally obtained hysteresis loops of nanocrystalline ring core under PWM inverter excitation. The right figures show the magnified hysteresis loops. (a) loop at $f_c = 1$ kHz under Si-IGBT inverter excitation, (b) loop at $f_c = 20$ kHz under Si-IGBT inverter excitation, (c) loop at $f_c = 1$ kHz under GaN-FET inverter excitation, (d) loop at $f_c = 20$ kHz under GaN-FET inverter excitation.

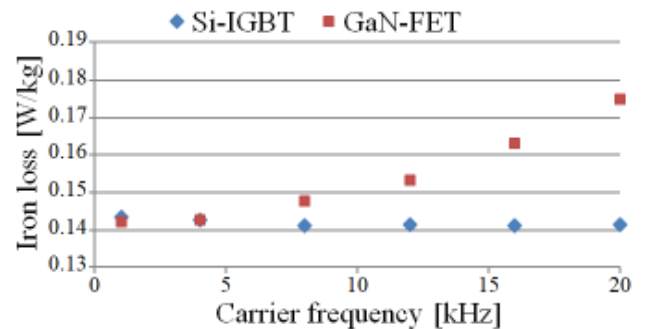


Fig. 8. Iron losses of nanocrystalline ring core with respect to carrier frequency at $B = 1$ T and $f_0 = 50$ Hz. The iron losses are calculated by using Eq. (3).

リングングの波形のピーク値がわずかに大きくなるためと考えられる。したがって、キャリア周波数が増加すると、マイナーループに起因する鉄損値は減少する可能性が考えられるが、リングングの影響による鉄損値は増加する可能性が考えられる。なお、リングングによる鉄損値の増加量のキャリア周波数依存性の詳細な検討については、今後の課題とする。

〈3・3〉 リングングとその収束時間 本節では、前節の実験で生じたリングング波形を数値計算により検討する。ここでは、等価回路モデルを用いて前述のリングング波形を検討する。

本研究では、リングング波形の等価回路モデルを、Fig. 9 に示す RLC 直列共振等価回路モデルと仮定し、検討する⁽¹⁹⁾。このような等価回路モデルでは、アドミッタンス Y は以下の式で記述される。

$$Y = \frac{1}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 R 、 L 、 C はそれぞれ、等価回路モデルの抵抗、インダクタンス、キャパシタンス成分を示す。

Fig. 10 にインピーダンスアナライザ（岩崎通信機（株）製、型番 PSM3750）を用いて測定したナノ結晶リング試料のアドミッタンスを示す。図より、リングングの共振周波

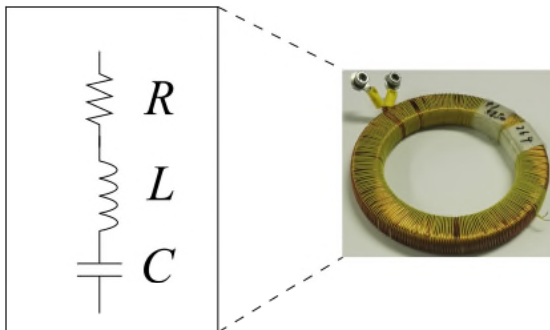


Fig. 9. A series RLC circuit model for nanocrystalline ring specimen.

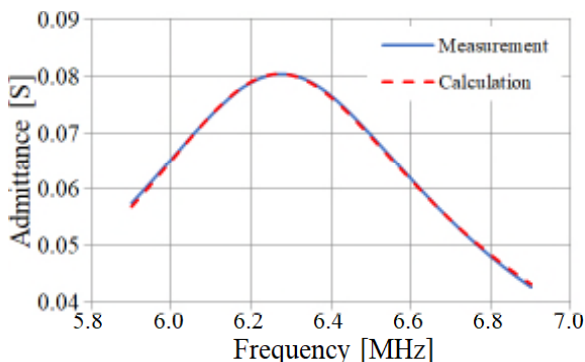


Fig. 10. Experimentally and numerically obtained admittance. The solid and dashed lines correspond to the experimental and numerical results calculated by Eq. (4), respectively.

数は約 6.27 MHz であることがわかる。ここで、青色の実線は実験結果を、赤色の破線は (4) 式より導出した計算結果をそれぞれ示す。なお、計算結果は実験結果をフィッティングし、導出した。本研究では、以下の方法により、ナノ結晶リング試料の抵抗、インダクタンスおよびキャパシタンスを導出した。

1. インピーダンスアナライザを用いてナノ結晶リング試料のアドミッタンスを実験的に測定した。
2. 測定したアドミッタンス結果と (4) 式より導出したデータ点群（アドミッタンスの計算結果）間の距離の差が最小になるようにした。なお、本研究では、最小二乗法を用いてフィッティングを行った。

本研究のナノ結晶リング試料では、抵抗 R は 12.4Ω 、インダクタンス L は $2.59 \mu\text{H}$ 、キャパシタンス C は 249 pF となった。

次に、アドミッタンスより求めたパラメータを使用し、リングングの減衰振動を求める。 RLC 直列共振等価回路モデルの 2 次方程式とその減衰振動は、それぞれ以下のように記述される。

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt \dots\dots\dots (5)$$

$$i(t) = Ae^{-\alpha t} \sin \beta t + B \dots\dots\dots (6)$$

$$\alpha = \frac{R}{2L} \dots\dots\dots (7)$$

$$\beta = \frac{1}{2L} \sqrt{R^2 - 4 \frac{L}{C}} \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 A および B は任意定数を、 α は減衰定数を、 β は減衰振動の角周波数をそれぞれ示す。

Fig. 11 にキャリア周波数が 1 kHz と設定した際の GaN-FET 励磁下のナノ結晶リング試料の 1 次電流のリングング波形の拡大図を示す。同図の青色の実線は実験結果を、赤色の破線は、前述のパラメータ値 ($R = 12.4 \Omega$, $L = 2.59 \mu\text{H}$, $C = 249 \text{ pF}$) を (6) 式に挿入した際の数値計算結果をそれぞれ示す。なお、任意定数 A ($= 0.11 \text{ A}$) は、図中の矢印で示す a 部の値が実験値と数値計算で等しくなるように与え、任意定数 B ($= 8.0 \times 10^{-3} \text{ A}$) には、実験のバイアス成分（図中の b 部）の値を代入した。同図からわかるように、実験によるリングングの減衰振動と数値計算結果がよく一致していることがわかる。すなわち、コア材（ナノ結晶材）およびコアに生じる寄生成分（寄生キャパシタ等）に依存し、ナノ結晶リング試料にリングングが生じることが、実験的および数値的検討から明らかとなった。また、鉄損は、ヒステリシス損と渦電流損からなる。一般的に、ヒステリシス損は周波数に比例し、渦電流損は周波数の 2 乗に比例することがよく知られている⁽²⁸⁾。本実験で生じるリングングの共振周波数は MHz オーダーである。したがって、本研究のリングングの影響による鉄損は渦電流損が支配的であると考えられる。ただし、リングングの影響による鉄損における正確なヒステリシス損と渦電流損の割合の導出については、今後の課題とする。以上の結果より、低オン抵

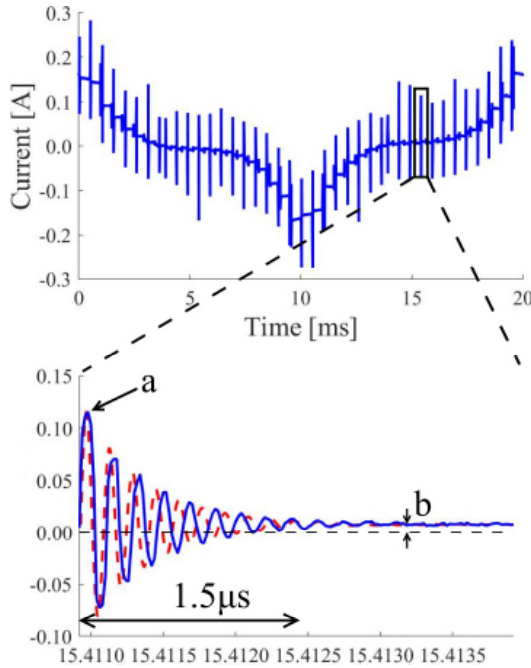


Fig. 11. Waveforms of current in nanocrystalline ring specimen under GaN-FET inverter excitation at $f_c = 1$ kHz. The experimental and numerical waveforms correspond to the solid (blue) and the dashed (red) lines, respectively. The numerical waveform is calculated by Eq. (6).

抗である GaN-FET と低鉄損材料であるナノ結晶コアを使用した場合でも、リングングが発生した際には、必ずしもシステム全体の低損失化が実現できるわけではないことがわかった。

また、本研究のナノ結晶リング試料では、減衰定数が $2.40 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ となる。ここで、リングングによる鉄損増加を抑制するためには、高周波領域におけるインダクタンスを減少させる、または、抵抗値を増加させる必要があると考えられる。また、巻数を調整することなど、鉄損低減のためには、リングング自体を発生させない工夫も必要であると考えられる。

4. 結 論

本研究では、インバータ励磁下のナノ結晶リングコアの鉄損特性を検討した。特に、半導体特性が磁気・鉄損特性に及ぼす影響を調査するため、次世代素子である GaN-FET および従来素子である Si-IGBT の 2 種類のスイッチング素子を用いたインバータを製作し、両インバータ励磁下のナノ結晶リングコアの鉄損特性を比較した。本研究で得られた知見は以下である。

- (1) GaN-FET インバータ励磁では、スイッチング速度が高速なため、ナノ結晶リング試料の 1 次電流波形およびヒステリシスカーブにリングングが生じた。
- (2) GaN-FET インバータ励磁下では、キャリア周波数が増加すると、リングングの影響により、ナノ結

晶リングコアの鉄損が増加した。

- (3) Si-IGBT インバータ励磁下では、キャリア周波数が増加することで、ナノ結晶リングコアの鉄損が若干低下した。
- (4) 半導体特性がナノ結晶リングコアの鉄損特性に強く影響を及ぼした。
- (5) ナノ結晶リング試料の電流波形に生じるリングングは、RLC 直列共振等価回路モデルで記述できた。また、本研究のナノ結晶リング試料では、減衰定数が $2.40 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ となった。ナノ結晶リング試料において、リングングによる鉄損増加を抑制するためには、高周波領域におけるインダクタンスを減少させる、または、抵抗値を増加させる必要があると考えられる。
- (6) 低損失の半導体と磁性材料（GaN とナノ結晶材）を使用した場合でも、リングングが発生した際には、必ずしもシステム全体の低損失化が実現できるわけではない。

今後は、数値解析によりリングングの影響による鉄損増加の定量的な検討を行うとともに、より詳細な等価回路モデルを検討する予定である。また、他の材料⁽¹⁹⁾との比較を行うなど、半導体特性が磁性材料の鉄損特性に及ぼす影響の一般性を導出する予定である。

謝 辞

本研究にあたり、GaN-FET ボードを提供していただいたサンケン電気（株）様に感謝の意を表する。また、本研究の一部は、第 26 回鉄鋼研究振興助成、文部科学省の私学助成、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）および JSPS 科研費 16H07320, 18K13749 で行われた。ここに感謝の意を示す。

文 献

- (1) M. Kawabe, T. Nomiyama, A. Shiozaki, H. Kaihara, N. Takahashi, and M. Nakano: "Behavior of Minor Loop and Iron Loss Under Constant Voltage Type PWM Inverter Excitation", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.48, No.11, pp.3458–3461 (2012)
- (2) K. Fujisaki and S. Liu: "Magnetic hysteresis curve influenced by power-semiconductor characteristics in pulse-width-modulation inverter", *Journal of Applied Physics*, Vol.115, No.17, pp.17A321-1-3 (2014)
- (3) S. Odawara, K. Fujisaki, and F. Ikeda: "Proposing a Numerical Method for Evaluating the Effects of Both Magnetic Properties and Power Semiconductor Properties Under Inverter Excitation", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.50, No.11, pp.7201004-1-4 (2014)
- (4) T. Taitoda, Y. Takahashi, and K. Fujiwara: "Iron Loss Estimation Method for a General Hysteresis Loop With Minor Loops", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.51, No.11, pp.8112304-1-4 (2015)
- (5) A. Yao, K. Tsukada, S. Odawara, K. Fujisaki, Y. Shindo, N. Yoshikawa, and T. Yoshitake: "PWM inverter-excited iron loss characteristics of a reactor core", *AIP Advances*, Vol.7, No.5, pp.056618-1-7 (2017)
- (6) A. Boglietti, P. Ferraris, M. Lazzari, and M. Pastorelli: "Influence of modulation techniques on iron losses with single phase DC/AC converters", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.32, No.5, pp.4884–4886 (1996)
- (7) A. Boglietti, P. Ferraris, M. Lazzari, and F. Profumo: "Iron losses in magnetic materials with six-step and PWM inverter supply (induction motors)", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.27, No.6, pp.5334–5336 (1991)
- (8) A. Boglietti, P. Ferraris, M. Lazzari, and M. Pastorelli: "Change of the iron losses with the switching supply frequency in soft magnetic materials supplied by PWM inverter", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.31, No.6, pp.4250–4252 (1995)

- (9) W.A. Roshen: "Magnetic losses for non-sinusoidal waveforms found in AC motors", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.21, No.4, pp.1138–1141 (2006)
- (10) W.A. Roshen: "A Practical, Accurate and Very General Core Loss Model for Nonsinusoidal Waveforms", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.22, No.1, pp.30–40 (2007)
- (11) A. Yao, T. Sugimoto, S. Odawara, and K. Fujisaki: "Core losses of a permanent magnet synchronous motor with an amorphous stator core under inverter and sinusoidal excitations", *AIP Advances*, Vol.8, No.5, pp.056804-1-6 (2018)
- (12) A. Yao, A. Adachi, and K. Fujisaki: "Iron loss characteristics of electric motor in high-temperature environment", 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), pp.1–7 (2017)
- (13) Y. Yoshizawa and K. Yamauchi: "Fe-Based Soft Magnetic Alloys Composed of Ultrafine Grain Structure", *Materials Transactions*, Vol.31, pp.307–314 (1990)
- (14) N. Nishiyama, K. Tanimoto, and A. Makino: "Outstanding efficiency in energy conversion for electric motors constructed by nanocrystalline soft magnetic alloy "NANOMET®" cores", *AIP Advances*, Vol.6, No.5, pp.055925-1-5 (2016)
- (15) N. Denis, M. Inoue, K. Fujisaki, H. Itabashi, and T. Yano: "Iron Loss Reduction in Permanent Magnet Synchronous Motor by Using Stator Core Made of Nanocrystalline Magnetic Material", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.53, No.11, pp.8110006-1-6 (2017)
- (16) A. Yao, T. Sugimoto, S. Odawara, and K. Fujisaki: "Core Loss Properties of a Motor With Nanocrystalline Rotor and Stator Cores Under Inverter Excitation", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.54, No.11, pp.1–5 (2018)
- (17) Y. Matsumoto, Y. Kondo, Y. Kobayashi, and H. Kimura: "Industrial motor drive inverter adopting sic power devices", *IEEJ Industry Applications Society Conference*, 1-O1-3 (2012)
- (18) H. Yamaguchi: "Recent trend in next generation power electronics R & D", *IEEJ Trans. PE*, Vol.132, No.3, pp.209–212 (2012) (in Japanese)
山口 浩:「次世代パワーエレクトロニクスの研究動向」, 電学論 B, Vol.132, No.3, pp.209–212 (2012)
- (19) A. Yao, K. Tsukada, and K. Fujisaki: "Investigating iron loss properties in an amorphous ring excited by inverters based on silicon and gallium nitride", *IEEJ Transactions on Industry Applications*, Vol.7, No.4, pp.321–328 (2018)
- (20) W. Shen, F. Wang, D. Boroyevich, and C.W. Tipton: "Loss Characterization and Calculation of Nanocrystalline Cores for High-Frequency Magnetics Applications", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.23, No.1, pp.475–484 (2008)
- (21) B. Cougo, A. Tuysuz, J. Muhlethaler, and J.W. Kolar: "Increase of tape wound core losses due to interlamination short circuits and orthogonal flux components", *IECON 2011-37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp.1372–1377 (2011)
- (22) R. Prochazka, J. Hlavacek, and K. Draxler: "Impulse Current Transformer With a Nanocrystalline Core", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.49, No.1, pp.77–80 (2013)
- (23) S. Balci, I. Sefa, and N. Altin: "An Investigation of Ferrite and Nanocrystalline Core Materials for Medium-Frequency Power Transformers", *Journal of Electronic Materials*, Vol.45, No.8, pp.3811–3821 (2016)
- (24) Y. Wang, G. Calderon-Lopez, and A.J. Forsyth: "High-Frequency Gap Losses in Nanocrystalline Cores", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.32, No.6, pp.4683–4690 (2017)
- (25) S. Balci, I. Sefa, and N. Altin: "Design and analysis of a 35 kVA medium frequency power transformer with the nanocrystalline core material", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.42, No.28, pp.17895–17909 (2017)
- (26) F. Forest, E. Laboure, T.A. Meynard, and V. Smet: "Design and Comparison of Inductors and Intercell Transformers for Filtering of PWM Inverter Output", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.24, No.3, pp.812–821 (2009)
- (27) A. Yao, S. Odawara, and K. Fujisaki: "Iron Loss and Hysteretic Properties under PWM Inverter Excitation at High Ambient Temperatures", *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol.7, No.4, pp.298–304 (2018)
- (28) 新日本製鐵電磁鋼板技術部編: 図解わかる電磁鋼板, p.34 (1994)

八 尾 惇（正員） 2015 年 3 月京都大学大学院工学研究科電気工学専攻博士後期課程修了。京都大学工学博士。日本学術振興会特別研究員および豊田工業大学研究員を経て、2018 年 4 月富山県立大学助教。非線形力学の工学的応用，パワーエレクトロニクス，MEMS の研究などに従事。電子情報通信学会，応用物理学会，システム制御情報学会，鉄鋼協会などの会員。



杉 本 昂 也（非会員） 2018 年 3 月豊田工業大学卒業。同年同大学院修士課程に進学，現在に至る。インバータ励磁下のモータの鉄損の研究に従事。



藤 崎 敬 介（上級会員） 1981 年東京大学工学部電子工学科卒業。1986 年 3 月東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。工学博士。同年新日本製鐵（株）入社。2010 年 4 月豊田工業大学教授。モータ駆動システム，鉄鋼プロセス・鉄鋼材料を対象に電磁場とマルチフィジックス，マルチスケールとの融合技術の研究開発に従事。2002～2003 年大分大学客員教授。2003～2009 年東北大学大学院環境科学研究科客員教授。2002 IEEE Industry Application Society, Outstanding Prize Paper Award 受賞。日本鉄鋼協会の平成 10, 17 年度計測・制御・システム研究賞，平成 21 年度白石記念賞を受賞。IEEE Senior Member, 鉄鋼協会会員。

