

高温インバータ励磁下の電磁鋼板の特性評価及び設計指針の創生

研究代表者 産業技術総合研究所 研究員 八尾 惇

共同研究者 富山県立大学 電子・情報工学科 教授 畠山 哲夫

1. 緒言

近年、宇宙空間、火災現場及び自動車などの高温環境下において使用されるモータシステムが注目されている¹⁻⁴⁾。モータシステムでは、半導体素子を用いた PWM (Pulse Width Modulation) インバータで電磁鋼板などのモータコアを励磁するため、必然的に発生する時間高調波成分の影響で、正弦波励磁時より鉄損が増加する⁵⁻⁸⁾。このような高調波の鉄損を減らすために、アモルファス材やナノ結晶材⁹⁾など、高周波特性の良い磁性材料が開発されている。また、近年、アモルファス材やナノ結晶材をモータのコア材料に適用する研究も行われている¹⁰⁻¹³⁾。したがって、高温環境におけるインバータ励磁下の無方向性電磁鋼板 (NO 材)、アモルファス材、ナノ結晶材等の磁性材料の基礎的な磁気及び鉄損特性を評価することは有意義なことといえる。

以上の観点より、本研究では、高効率な高温モータシステムの基礎検討として、高温環境における PWM インバータ励磁下の磁性材料の特性を検討する。ここでは、まず、回路シミュレーターにて、室温時の磁気ヒステリシス曲線の計算を行う。次に、高温及び室温環境のインバータ励磁下における磁性材料の磁気ヒステリシス及び鉄損特性について、数値計算及び実験により検討する。最後に、インバータ励磁下における NO、アモルファス及びナノ結晶リングコアの鉄損特性の温度依存性について議論する。なお、本報告は、文献¹⁴⁻¹⁸⁾などで報告されたものをまとめたものである。

2. 回路シミュレーターを用いた磁気ヒステリシスの計算

本章では PWM インバータ励磁下の磁性材料の磁気ヒステリシス特性及び鉄損特性を、数値的に検討する。

2. 1. 方法

図 1 に、ヒステリシスモデル(プレイモデル及びカウア等価回路)とインバータ回路の連成解析の概略図を示す。

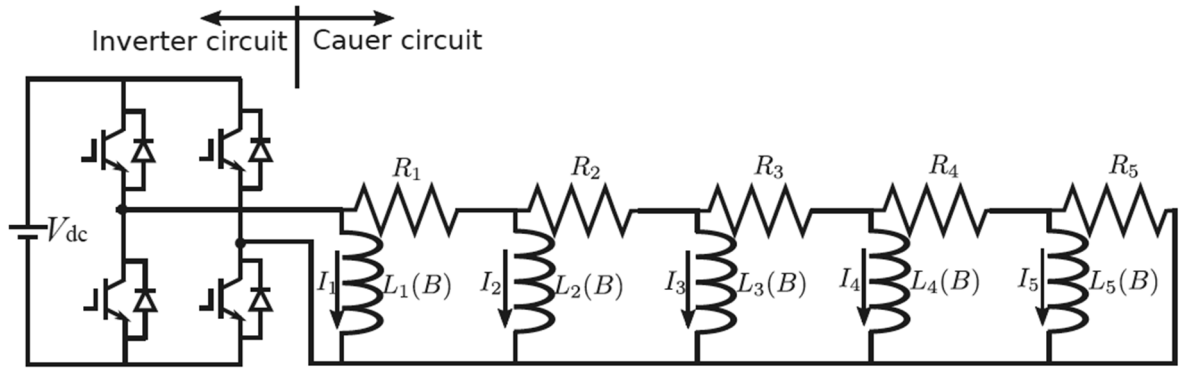


図1 ヒステリシスモデル(プレイモデル及びカウア等価回路)とインバータ回路の連成解析の概略図 (発表論文(16)より転載)

本研究では、回路シミュレーター(PSIM)にて磁気ヒステリシスの計算を行う。ここでは、磁気ヒステリシス曲線の計算を以下の方法により行う。

- (1) PWM インバータの出力電圧波形より、磁束密度 B を導出する。
- (2) プレイモデルとカウア等価回路理論より B を入力として、磁界強度 H を算出する。
- (3) 得られた磁界強度から出力電流を算出する。
- (4) 得られた出力電流より半導体の IV 特性を考慮し、再計算を行う。
- (5) 収束後、磁気ヒステリシス曲線を導出する。

本研究では、プレイモデル¹⁹⁾とカウア等価回路理論に基づき、以下の式より計算する¹⁶⁾。

$$I_n = \frac{l}{N_1} H_{DC}((4n - 3)B_n), \quad (1)$$

$$R_n = \frac{N_1 N_2 S}{l} (4n - 1) \frac{12}{\alpha \sigma d^2}, \quad (2)$$

ここで、 $H_{bc}(B)$ はプレイモデルより得られる直流磁気特性、 d は磁性材料の厚さ、 σ は磁性材料の導電率、 R_n は渦電流を表現するための等価抵抗、 α は異常渦電流損係数、 N_1 及び N_2 は 1 次及び 2 次巻線数をそれぞれ示す。

2. 2. 結果

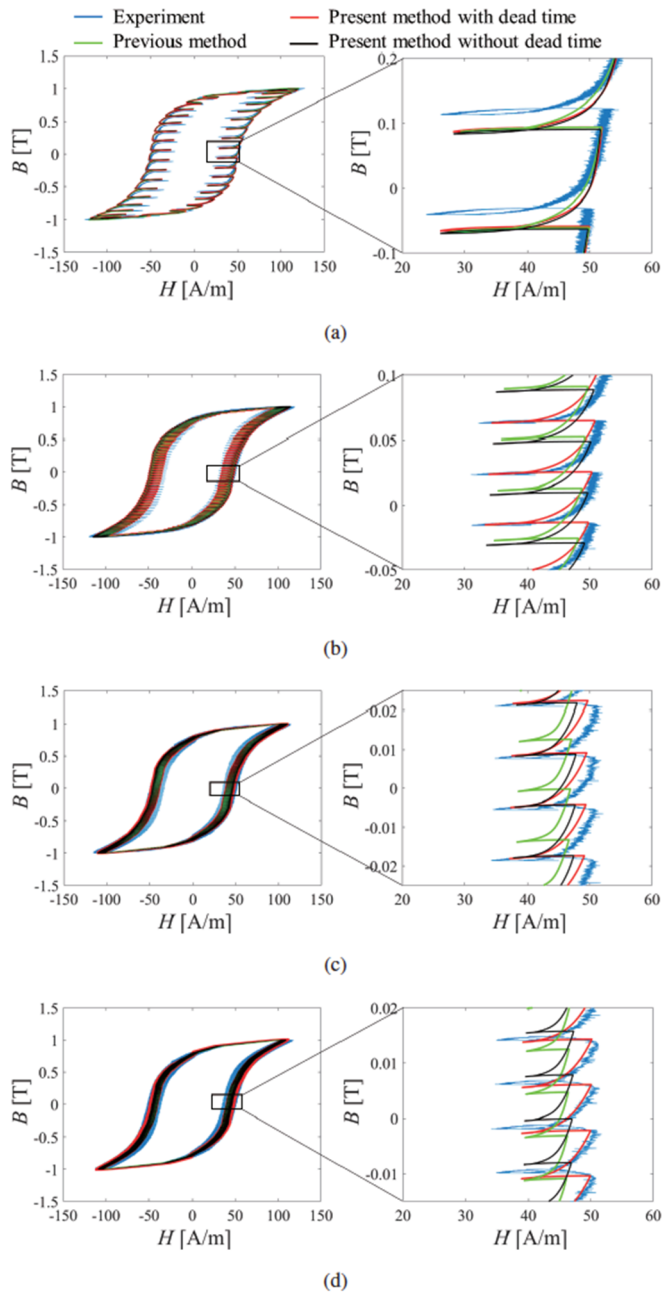


図2 磁気ヒステリシス結果
(発表論文(16)より転載)

図2に、PWM インバータ励磁下の NO 材のヒステリシス曲線を示す。ここで、青色の実線は実験結果を、緑色の実線は先行研究(弱連成解析)の結果を、赤色及び黒色の実線は回路シミュレーター(強連成解析)を用いて導出した計算結果をそれぞれ示す。なお、赤色はデッドタイム を考慮した結果を、黒色はデッドタイム を考慮していない結果をそれぞれ示す。同図からわかるように、インバータ励磁下では、時間高調波成分の影響が生じていることがわかる。また、実験結果 (青色の実線) と本研究の計算手法より導出した結果 (赤色の実線) がよく一致している。回路シミュレーターを用いることにより、電気と磁気の強連成解析により、インバータ励磁下の磁気特性を数値的に表現できることが明らかとなった。

図 3 にキャリア周波数を変更した際のインバータ励磁下の NO リングコアの鉄損特性を示す。ここで、青色の四角点は実験結果を、緑色の菱形点は先行研究(弱連成解析)の結果を、黒色の三角点は回路シミュレーター(強連成解析)を用いデッドタイムを考慮しない場合の計算結果を、赤色の丸点は回路シミュレーター(強連成解析)を用いデッドタイムを考慮した場合の計算結果をそれぞれ示す。本計算手法(赤色の丸点)を用いることにより、従来手法(緑色の菱形点)と比較し、より精度良く(平均誤差 3%程度)鉄損の計算が出来ることが明らかとなった。さらに、本計算手法を用いることにより、磁性材料コア部及びインバータ部の損失見積りが可能となった。

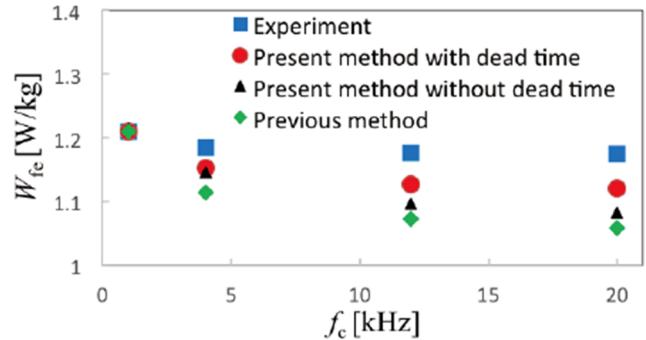


図 3 鉄損結果 (発表論文(16)より転載)

3. 高温インバータ励磁下における磁性材料の特性

本章では、高温及び室温環境のインバータ励磁下における磁性材料のヒステリシス及び鉄損特性について議論する。

3. 1. 方法

図 4 にリング試料の励磁及び測定システムを示す。本研究では、高温インバータを使用し、時間高調波を含む単相 PWM インバータ励磁下のリング試料の鉄損評価を行う。ここでは、Si-IGBT インバータを使用し、IGBT とダイオード素子を恒温槽内に設置し、半導体素子の温度を変化させている。次に、リングコアの作製方法について述べる。まず、ワイヤーカット法を用いて、NO 材をリング状に切る。その後、コア材を積層し、ケースに入れ、2 次電圧及び 1 次電流を測定するために、1 次巻線及び 2 次巻線を巻く。本測定では、半導体の温度特性と鉄損の関係を検証するため、Si-IGBT は恒温槽に設置し温度を変化させるが、NO リングは室温に設定している。

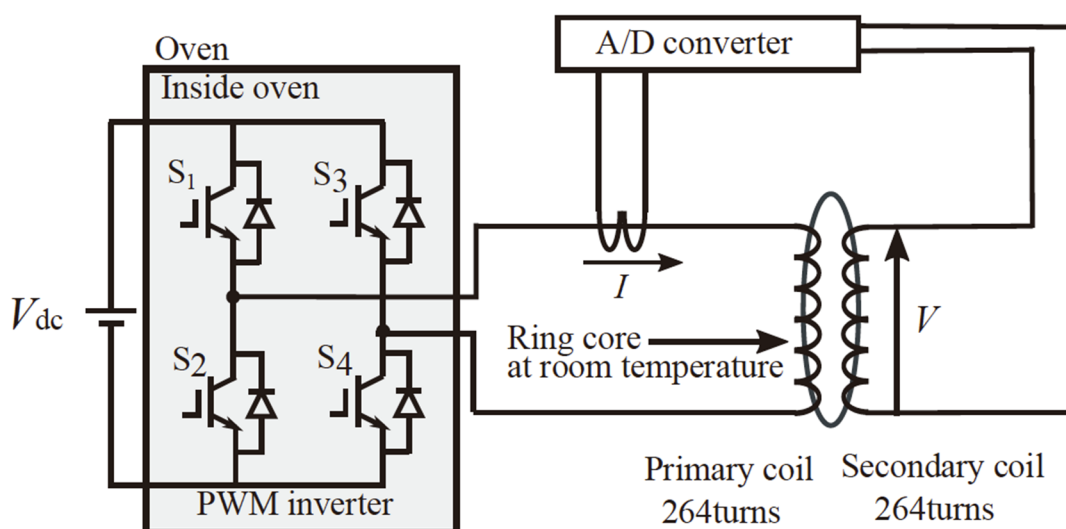


図 4 高温及び室温環境のインバータ励磁下における磁性材料のヒステリシス
及び鉄損特性評価装置（発表論文(14)より転載）

次に、鉄損導出方法について述べる。本研究では、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 から、磁界強度 H 及び磁束密度 B を算出し、鉄損 W を以下の式より導出する。

$$H = \frac{N_1}{l} I \quad (3)$$

$$B = \frac{1}{N_2 S} \int V dt \quad (4)$$

$$W = \frac{f_0}{\rho} \int H dB \quad (5)$$

ここで、 $N_1 (= 264)$ 、 $N_2 (= 264)$ 、 $L (= 0.36\text{m})$ 、及び $S (= 87.5\text{mm}^2)$ 、はそれぞれ、一次側巻線数、二次側巻線数、平均磁路長、及び断面積である。

3. 2. 結果

図 5 に、高温及び室温インバータ励磁下のインバータ励磁下のヒステリシス曲線の実験結果を示す。ここで、青色が室温インバータ励磁時の波形を、赤色が高温インバータ励磁時の波形を示している。拡大図に示すように高温環境では、マイナーループの面積が縮小している。これは、マイナーループの高さがインバータ励磁時の半導体のオン電圧に依存するためと考えられる。ここで、鉄損は、300 度で 0.072W/kg 、室温で 0.08W/kg となる。すなわち、本研究により、半導体の温度特性が磁気・鉄損特性に影響を及ぼすことが明ら

かとなった。

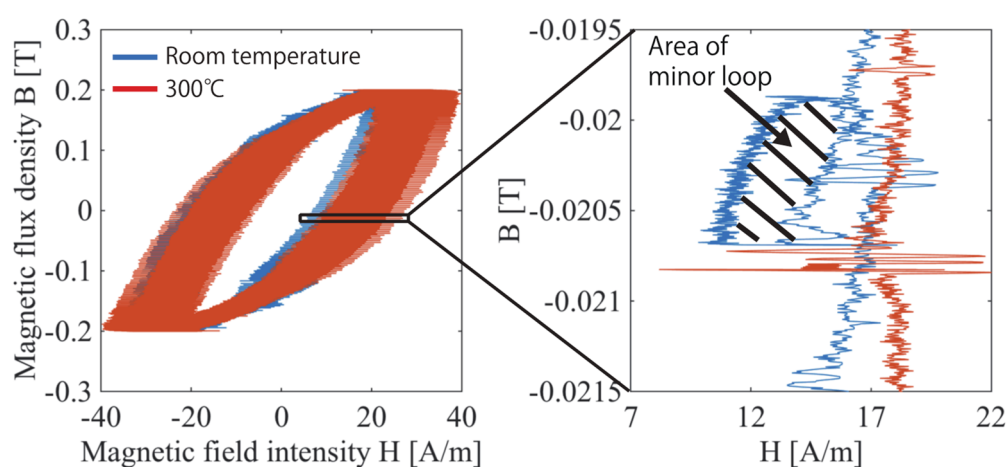


図5 高温インバータ励磁下の磁気特性 (実験)
(発表論文(14)より転載)

図6に、室温及び高温インバータ励磁下の磁気ヒステリシス曲線の計算結果を示す。本研究では、半導体の温度特性を考慮し、計算を行っている。ここで、青色が室温インバータ励磁時の波形を、赤色が高温インバータ励磁時の波形を示している。図5の実験と同様に、高温環境では、マイナーループの面積が縮小していることがわかる。すなわち、計算によっても、半導体の温度特性が磁気・鉄損特性に影響が生じていることが明らかとなった。

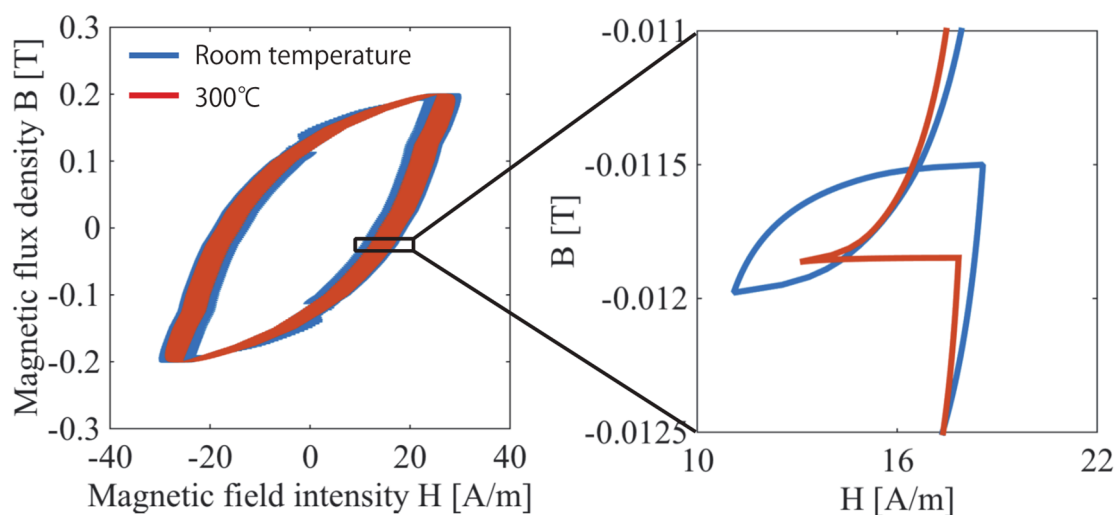


図6 高温インバータ励磁下の磁気特性 (計算)
(発表論文(14)より転載)

図 7 に、室温及び高温環境のインバータ励磁下の鉄損のキャリア周波数依存性を示す。ここで、青点が室温インバータ励磁時の結果を、赤点が高温インバータ励磁時の結果を示している。青点で示すように、室温では、キャリア周波数の増加にともない、鉄損減少後、増加している。一方、赤点で示すように、高温では、キャリア周波数の増加にともない、鉄損減少している。さらに、高温下では、室温と比較し、鉄損が減少していることがわかる。以上の結果より、高効率な(高温)モータの実現のためには、電気と磁気の連成解析が必要であると考えられる。

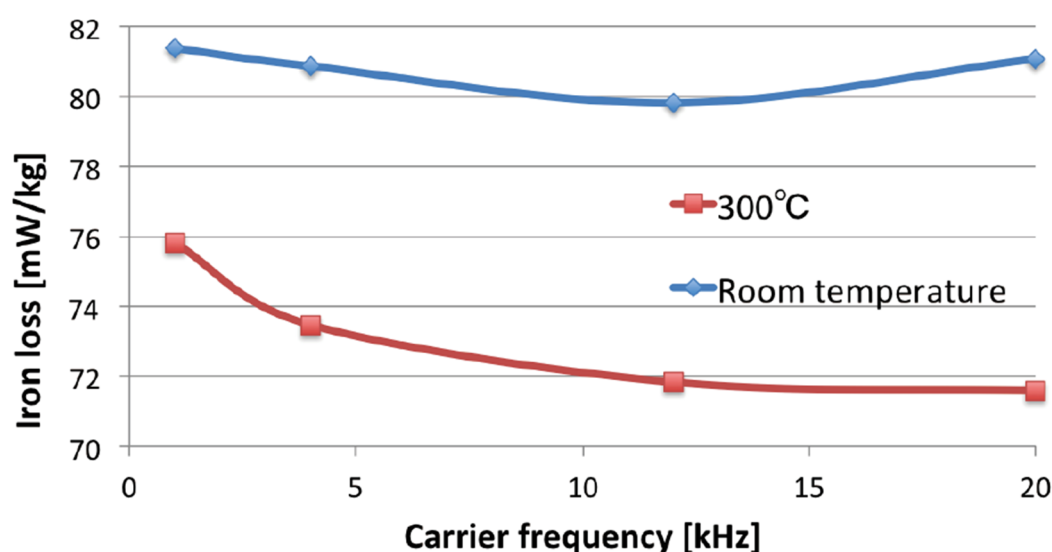


図 7 高温インバータ励磁下の鉄損のキャリア周波数依存性（発表論文(14)より転載）

4. インバータ励磁下の高温環境の磁性材料の特性

本章では、インバータ励磁下における NO、アモルファス及びナノ結晶リングコアの鉄損特性の温度依存性の実験結果について議論する。

4. 1. 方法

図 8 に、リング試料の鉄損特性評価システムを示す。本研究では、PWM インバータ励磁下の磁性材料の鉄損の温度依存性を評価する。ここでは、磁性材料のリング試料を恒温槽(エスベック(株)製、型番 STH-120)に設置し、鉄損特性を測定する。なお、前述と同様に、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 から、磁界強度 H 及び磁束密度 B を算出し、鉄損 W を導出した。

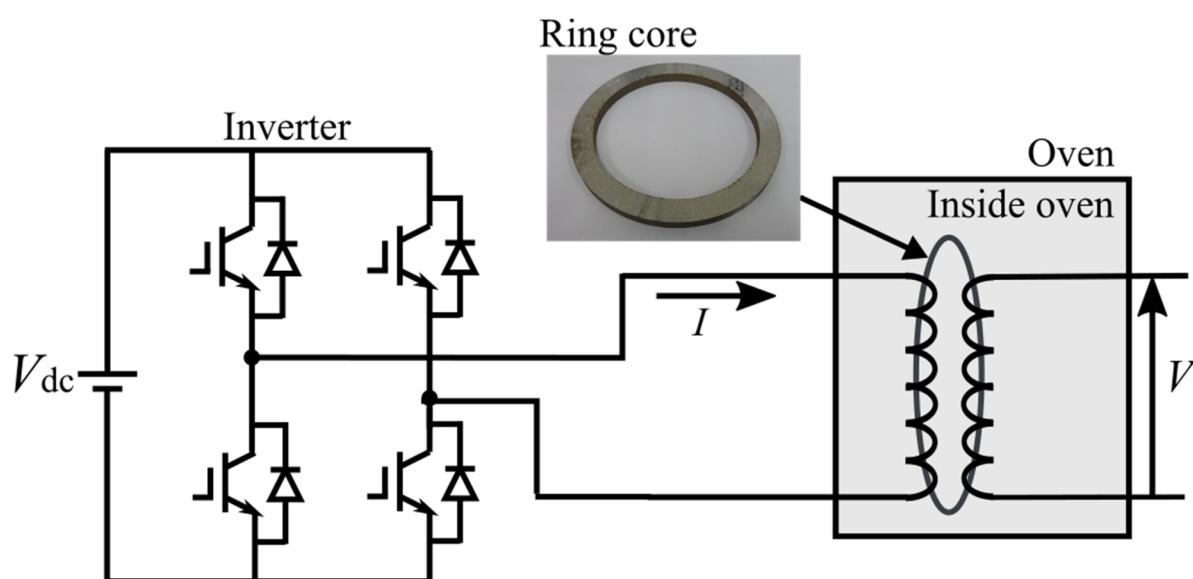


図 8 インバータ励磁時における高温環境下のリング試料の鉄損特性に対する温度依存性評価システム

4. 2. 結果

図 9、図 10 及び図 11 に、インバータ励磁下のナノ結晶、アモルファス及び NO リングコアの鉄損の温度依存性を示す。ここで、赤点は 300 度での鉄損結果を、青点は室温での鉄損結果をそれぞれ示す。NO 及びアモルファス材では、高温環境下において、鉄損が減少することがわかった。ここでは、インバータ励磁下のアモルファス材と NO 材の温度特性が磁気特性に影響を及ぼし、磁気モーメントの揺らぎにより、温度上昇に伴い、鉄損値が減少することが明らかとなった。一方、ナノ結晶材では、高温環境下において、鉄損が減少することがわかった。ナノ結晶材では、磁氣的相互作用が弱くなり、保磁力が増加し、鉄損が増加した。以上のナノ結晶材、NO 材、アモルファス材の比較により、インバータ励磁下では、磁気モーメントの揺らぎに基づく鉄損が支配的な場合には、温度上昇に伴い、鉄損値が減少するが、磁氣的相互作用に基づく鉄損が支配的な場合には、鉄損が増加することが明らかとなった^{4,15,17)}。したがって、高効率な高温モータシステムを実現するためには、磁気モーメントの揺らぎを利用し、鉄損を低減していくことが重要であると考えられる。

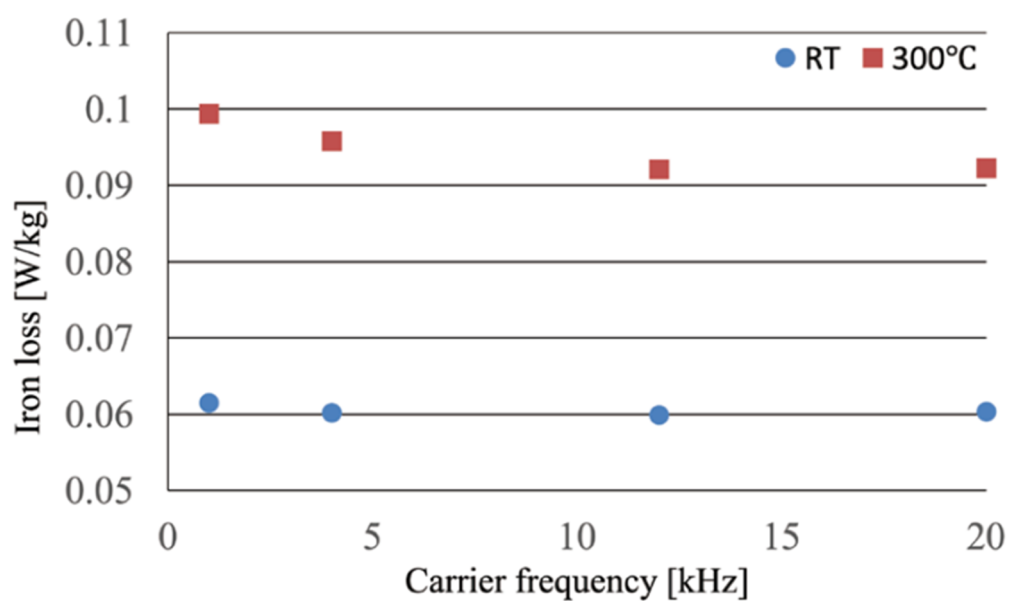


図 9 室温及び 300 度のナノ結晶リングコアの鉄損
(発表論文(17)より転載)

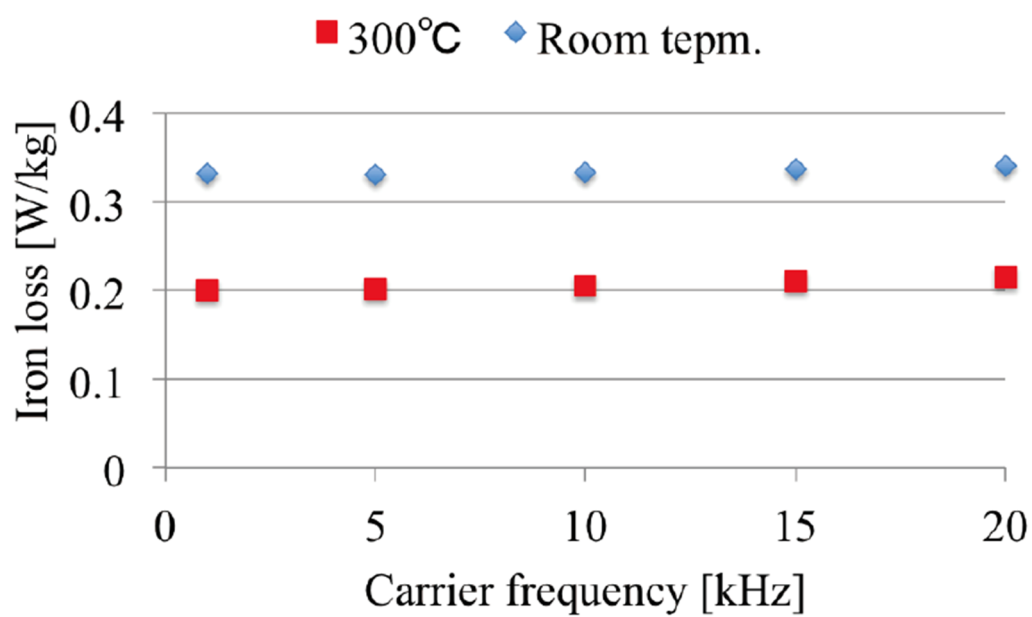


図 10 室温及び 300 度のアモルファスリングコアの鉄損
(発表論文(15)より転載)

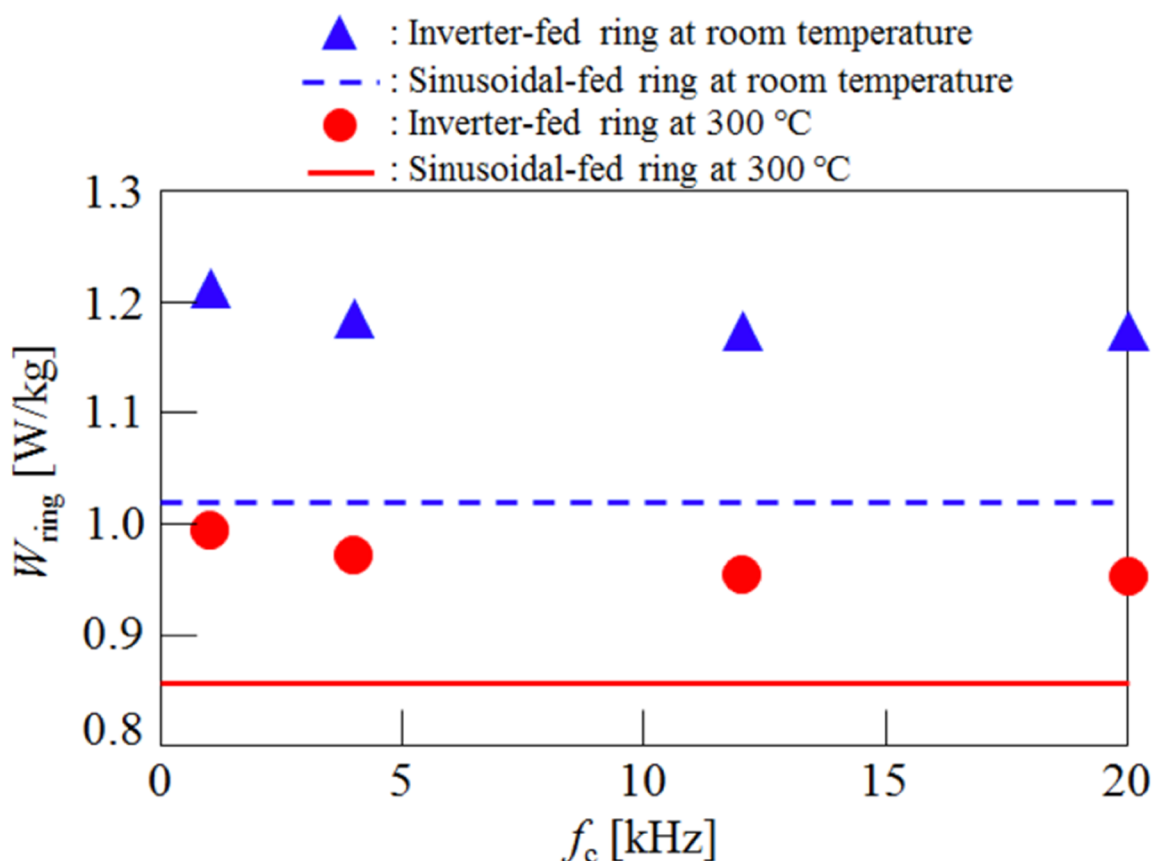


図 11 室温及び 300 度の NO リングコアの鉄損
(発表論文(4)より転載)

5. 結言

本報告では、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。
本報告の得られた知見は以下である。

- (1) 回路シミュレーター(強連成解析)を用いデッドタイムを考慮することにより、精度良く鉄損の計算が出来ることが明らかとなった。
- (2) 半導体の温度特性が磁気・鉄損特性に影響を及ぼすことが明らかとなった。高効率な(高温)モータの実現のためには、電気と磁気の連成解析が必要であると考えられる。
- (3) インバータ励磁下では、磁気モーメントの揺らぎに基づく鉄損が支配的な場合には、温度上昇に伴い、鉄損値が減少するが、磁氣的相互作用に基づく鉄損が支配的な場合には、鉄損が増加することを示した。

謝辞

本研究の一部は、公益財団法人 JFE21 世紀財団の助成を受けて行いました。ここに感謝の意を示します。また、本研究にご協力頂いた富山県立大学工学部電子・情報工学科の

守山遼さんに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] L. Burdet, Active magnetic bearing design and characterization for high temperature applications, PhD thesis, (Citeseer, 2006).
- [2] T. D. Kefalas and A. G. Kladas, Thermal investigation of permanent-magnet synchronous motor for aerospace applications., IEEE Transactions on Industrial Electronics, 61 (8), 4404–4411 (2014).
- [3] 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), 1–7 (2017).
- [4] A. Yao, S. Odawara, and K. Fujisaki, Iron loss and hysteretic properties under pwm inverter excitation at high ambient temperatures, IEEE Journal of Industry Applications, 7 (4), 298–304 (2018).
- [5] 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, 27 (6), 5334–5336 (1991).
- [6] A. Yao, K. Tsukada, and K. Fujisaki, Investigating iron loss properties in an amorphous ring excited by inverters based on silicon and gallium nitride, IEEE Journal of Industry Applications, 7 (4), 321–328 (2018).
- [7] A. Yao, R. Moriyama, and T. Hatakeyama, Iron losses and magnetic-hysteresis properties under gan inverter excitation at high-frequencies, Journal of the Magnetics Society of Japan, 44 (4), 87–90 (2020).
- [8] A. Yao, F. Kato, and H. Sato, Iron loss and hysteresis properties of nanocrystalline magnetic materials under high frequency inverter excitation, Journal of the Magnetics Society of Japan, 44 (6), 129–132 (2020).
- [9] Y. Yoshizawa and K. Yamauchi, Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure, Materials Transactions, JIM, 31 (4), 307–314 (1990).
- [10] 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, 6 (5), 055925 (2016).
- [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, 8 (5), 056804 (2018).
- [12] 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, 54 (11), 1–5 (2018).
- [13] A. Yao, T. Sugimoto, and K. Fujisaki, Core losses of a nanocrystalline motor under inverter and sinusoidal excitations, *Journal of the Magnetics Society of Japan*, 43 (3), 42–45 (2019).
 - [14] A. Yao and T. Hatakeyama, Iron loss and hysteresis properties under high-temperature inverter excitation, *Journal of the Magnetics Society of Japan*, 43 (3), 46–49 (2019).
 - [15] A. Yao, Iron loss and hysteresis properties of an amorphous ring core at high temperatures under inverter excitation, *Journal of the Magnetics Society of Japan*, 44 (2), 30–33 (2020).
 - [16] A. Yao, T. Funaki, and T. Hatakeyama, Representation of magnetic hysteresis phenomena under inverter excitation in a circuit simulator using coupling analysis of electricity and magnetism, *Journal of the Magnetics Society of Japan*, 43 (6), 105–108 (2019).
 - [17] A. Yao, R. Moriyama, and T. Hatakeyama, Iron loss and magnetic hysteresis properties of nanocrystalline ring core at high and room temperatures under inverter excitation, *Journal of the Magnetics Society of Japan*, 44 (3), 52–55 (2020).
 - [18] 八尾 惇, インバータ励磁下の磁性材料の磁気および鉄損特性, 令和 2 年電気学会全国大会シンポジウム, S16-2, (2020).
 - [19] T. Matsuo and M. Shimasaki, An identification method of play model with input-dependent shape function, *IEEE Transactions on Magnetics*, 41 (10), 3112–3114 (2005).