

## 2019 年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	産業技術総合研究所 先進パワーエレクトロニクス研究センター
職位または役職	研究員
氏名	八尾 惇

### 1. 研究題目

高効率高温モータの実現に向けたインバータ励磁下の磁気特性に関する研究

### 2. 研究目的

近年、宇宙空間、自動車および火災現場などの高温環境下において使用されるモータシステムの検討が重要となっている。モータシステムは、主に、半導体素子等で構成されるインバータ（直流交流変換器）と磁性材料等で作製されるモータの 2 つの構成要素からなる(図 1)。ここでは、半導体素子を用いて PWM (Pulse Width Modulation) インバータなどのスイッチング動作を行うため、必然的に時間高調波成分を含みモータコアの磁性材料が励磁される。このような必然的に含まれる時間高調波成分により、インバータ励磁下(インバータで磁性材料を励磁すること)の磁性材料の鉄損は、正弦波励磁した場合の鉄損と比べ、増加することがよく知られている。したがって、高温モータシステムにおいても、磁性材料に対する高温下のスイッチング時の高調波成分等の影響を評価することが重要となる。

以上の状況において、申請者は、永守財団研究助成 2018 を用い、高温インバータ励磁下の磁気ヒステリシス曲線評価装置を構築し、インバータの温度特性がインバータ励磁下の磁気特性に影響を及ぼすことを示した (*Journal of the Magnetics Society of Japan*, Vol. 43, No. 3, pp. 46-49 (2019))。本申請では、高効率高温モータシステムを実現するための基礎検討として、高温環境におけるインバータ励磁下の複数の磁性材料の特性を比較することを目的とする。この複数の磁性材料特性の評価に基づき、低損失、高効率の高温モータシステムの設計指針の基礎検討を行う。

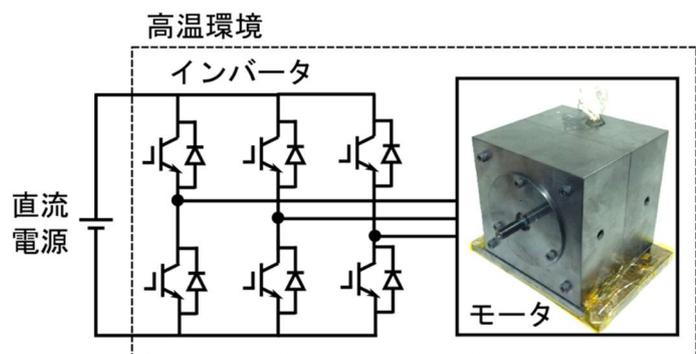


図 1 高温モータシステム

3. 研究内容及び成果

本研究では、インバータ励磁下の複数の磁性材料のリングコアの磁気特性を明らかにした。また、実験で得られた磁気特性評価のための数値計算手法の開発を行った。

本研究では、まず、高温環境で試験可能なインバータ励磁下のアモルファスコアを作製し、300度での動作を実現した。インバータ励磁下の高温アモルファス材の磁気ヒステリシス曲線を実験的に評価した (図 1(a), (b), (c))。アモルファス材では、磁気モーメントの揺らぎにより、温度上昇に伴い、鉄損が減少することを示した。また、プレイカウモデル (磁気特性を表現するモデル)を用いて数値計算により高温インバータ励磁下のアモルファス材の磁気ヒステリシス特性の表現に成功した (図 1(d), (e), (f))。アモルファス材では、磁気モーメントの揺らぎにより、温度上昇に伴い、鉄損が減少することを示した。以上の実験および数値計算結果に関連する内容をまとめ、64th Annual Conference on MMM で発表した。併せて、論文 (*Journal of the Magnetism Society of Japan*, Vol. 44, No. 2)が出版された。

さらに、電気と磁気特性の体系的評価確立の基礎検討のための、強連成解析手法を開発した。図 2 にインバータ励磁下の無方向性電磁鋼板のヒステリシス曲線を示す ((a), (b), (c), (d)はそれぞれキャリア周波数が 1、4、12、20kHz)。ここで、青色は実験結果を、緑色の実線は先行研究の結果を、赤色の実線は本研究で開発した強連成解析の結果をそれぞれ示す。本強連成解析を用い、特に、(1)インバータのデッドタイム特性を考慮した磁気ヒステリシス曲線の表現、(2)カウア等価回路の表現の変更による周波数特性の改善の2点を実現した。以上の数値計算に関連する内容をまとめ、64th Annual Conference on MMM で発表した。また、論文 (*Journal of the Magnetism Society of Japan*, Vol. 43, No. 6)が出版された。

併せて、高温領域でのナノ結晶軟磁性材料コアの磁気特性も明らかとした (*Journal of the Magnetism Society of Japan*, Vol. 44, No. 3)。

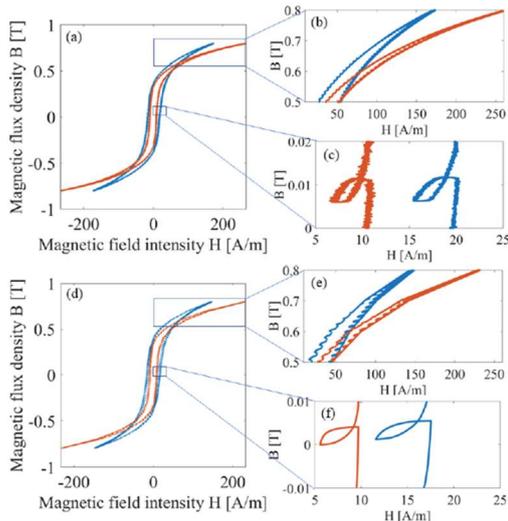


図 1 インバータ励磁下の高温アモルファス材の磁気ヒステリシス曲線。

青色：室温、赤色：300度(高温)。

発表論文 (*Journal of the Magnetism Society of Japan*, Vol. 44, No. 2, pp. 30-33)

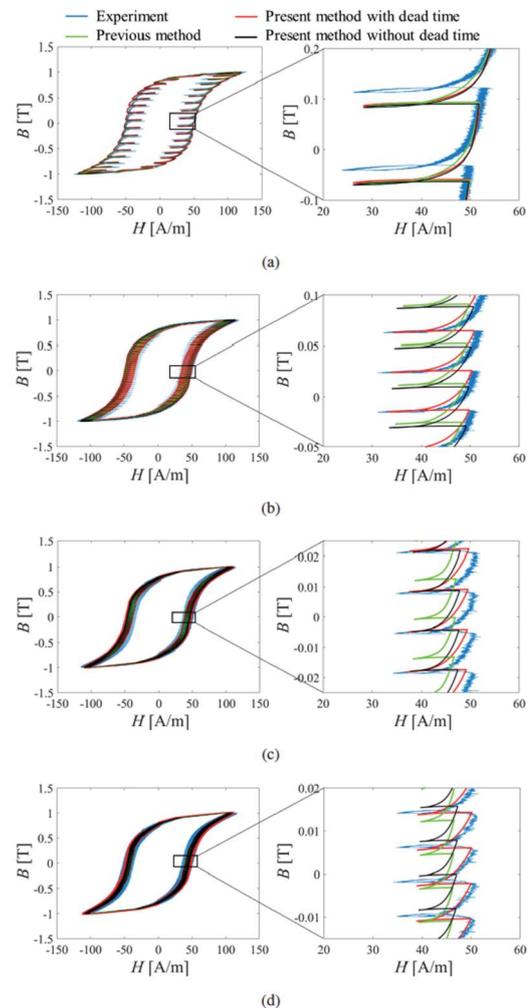


図 2 連成解析の数値計算結果。  
発表論文 (*Journal of the Magnetism Society of Japan*, Vol. 43, No. 6, pp. 105-108 (2019))

#### 4. 今後の研究の見通し

---

本研究では、高効率な高温モータシステムを実現するための基礎検討として、インバータ励磁下の磁性材料の高温磁気特性を明らかにすることを目的としている。ここでは、インバータ励磁下の複数の磁性材料(リングコア)の磁気ヒステリシス曲線と鉄損特性が、温度特性に依存することを実験的及び数値的に示した。したがって、今後は、高温環境のインバータ励磁下のモータコアの磁気特性を有限要素法により明らかにしていくことが重要となる。

#### 5. 助成研究による主な発表論文, 著書名

---

##### 学術論文 (査読付)

1. **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*, Vol. 43, No. 6, pp. 105-108 (2019) [査読有]
2. **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*, Vol. 44, No. 2, pp. 30-33 (2020) [査読有]
3. **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*, Vol. 44, No. 3, pp. 52-55 (2020) [査読有]
4. **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*, Vol. 44, No. 4, pp. 87-90 (2020) [査読有]

##### 国際会議 (査読付)

1. **A. Yao**, T. Hatakeyama, “Magnetic Hysteresis Phenomena under PWM Inverter Excitation by using Coupled Analysis between Electricity and Magnetism in Circuit Simulator” 64th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, CH-04, p.278 (2019)
2. **A. Yao**, T. Hatakeyama, “Iron loss characteristics of a high-temperature amorphous ring under PWM inverter excitation” 64th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, GH-04, p.p.709-710 (2019)

##### 国際会議 (査読なし) ・ 国内会議

1. 守山 遼, **八尾 惇**, 畠山 哲夫, 「高温環境におけるインバータ励磁下のナノ結晶リングコアの鉄損特性に関する一検討」電気学会マグネティクス研究会, MAG-19-203, 慶應義塾大学日吉キャンパス, 2019年12月19日
2. 守山 遼, **八尾 惇**, 畠山 哲夫, 「高キャリア周波数を用いたインバータ励磁下の磁気および鉄損特性に関する一検討」令和元年度 北陸地区学生による研究発表会, 1-1-7, 石川工業高等専門学校, 2020年3月8日
3. **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モータ駆動システム応用時の磁気, S16-2, 2020年3月13日