

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：33924

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420259

研究課題名(和文)「異方性モータ」試作による鉄損低減効果の検証

研究課題名(英文) Verification of Iron Loss Reduction in Trial Manufacturing "Magnetic Anisotropic Motor"

研究代表者

藤崎 敬介 (FUJISAKI, Keisuke)

豊田工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80373869

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：特別な治具を用いて方向性電磁鋼板GO材を用いた異方性モータを製作し、コア損を引摺り損および無負荷での実験で計測した。異方性モータでは、磁気異方性の強いGO材の磁化容易軸方向がステータコアの主磁束の方向と一致するように、ヨーク部とティース部とを分割配置させた。従来のNO材のモータコア損と比較することで、引摺り損では13.5%程度、無負荷損で5%程度のコア損低減を確認した。計測したコア損は、二軸異方性による磁気異方性の電磁界数値解析結果と良い一致が確認された。更なるコア損低減策として、アモルファス材の適用を行い、従来のNO材のコア損と比べて半分程度の損失低減を確認した。

研究成果の概要(英文)：An interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) using a stator core made of grain-oriented (GO) anisotropic magnetic material is manufactured to evaluate the potential iron loss reduction that GO can bring compared to the conventionally used non-oriented (NO) quasi-isotropic silicon steel. The stator core is divided into yoke and teeth pieces that are arranged so that the GO material easy magnetization direction follows the main magnetic flux that flows in the core during the motor operation. The motor iron loss is measured under two conditions as drag force operation and no-load operation. The manufactured motor shows 13.5% iron loss reduction during drag force operation and 5% reduction during no-load operation. Numerical calculation is also carried out by 2-D finite element analysis to confirm the experimental data. For further reduction of core loss, amorphous steel is also applied to the stator core and it is confirmed by the measured data and numerical calculation.

研究分野：工学

キーワード：鉄損 異方性モータ 方向性電磁鋼板 GO材 二軸異方性 コア損 アモルファス

1. 研究開始当初の背景

今後電気自動車の普及が促進され、電気モータの高效率・小型化が益々重要になっているが、電気モータが発明されて150年以上経過した現在、銅損低減の研究(超伝導応用)、機械損低減の研究(浮上・真空応用)に比べて鉄損低減の研究に関しては十分に研究されているとは言い難い。そこで鉄損低減のブレークスルーを狙うべく、市販材料の磁気異方性特性を極限まで活かした「異方性モータ」を試作・実測評価してその妥当性検証を行う。

これまでのモータコアは、そこでの磁束流れにより磁氣的等方な NO 材 (Non-Oriented steel: 無方向性電磁鋼板) を使用してきた。しかしそれは鉄原子構造起因の磁気異方性特性を減じることで等方的特性を得ているために、必ずしも磁性材料として優れた特性ではなかった。これに対し GO 材 (Grain-Oriented steel: 方向性電磁鋼板) は鉄原子の結晶方位を活かし集積させた材料であるため、その磁化容易軸特性を活かせれば、図1のごとく鉄損は半分程度低減し励磁特性(つまり銅損)は二桁減じ得ることになる。モータ時の複雑な磁気挙動のため全てを直接反映させることは難しいが、現状の損失技術を考えればこれは決して少ない数字とは

いえ、電気機器の損失低減に大きく貢献できる技術といえる。

しかし現行の NO 材を GO 材に置き換えただけでは、GO 材の磁気異方性特性のためモータの鉄損低減効果は期待できず、また GO 材を適切に利用したモータの設計試作、評価を行った研究事例は国内外になかった。その理由を更に考察してみると、以下のごとく、現在のモータ設計論にはある種の限界があり、材料特性を考慮した新しい設計論の創出を必要としているものと考えられる。

これまでの電気機器の設計論は、目に見えない電磁気現象の複雑さ、難解さのために、材料特性を、線形、集中定数、等方性、ヒステリシス無視、均質を前提として論じられてきた。但し非線形性、分布定数性については、有限要素法・計算機技術の進歩で相当数考慮されている。

このため、電気機器設計者が材料製造者に要求する仕様は、線形、集中定数性、等方性、ヒステリシス無視、均質といった材料特性をもつことであった。

しかしながら、材料の原子構造および分子構造は、本質的に非線形性、分布定数性、異方性、ヒステリシス性、不均一性を有するものであり、現行のモータ用材料はその材料特性を十分に反映しているとは言い難いところがある。

このため、更なるモータ特性の向上を図るためには、こうした材料本来が有している特性を発現させ、かつ積極的に活かしたモータ作りを行うことが、モータ研究だけではなく材料研究にも肝要なことと考える。

そこで応募者は、これまで GO 材料研究およびそれを用いたステータコア研究を行ってきた。単に材料を GO 材に置き換えただけの代替技術では、GO 材の磁化困難軸方向をも励磁して却って特性が悪化する。このためモータ・ステータコアの磁束の流れに着目し、図2のごとく GO 材を鋼片ピースに分割して

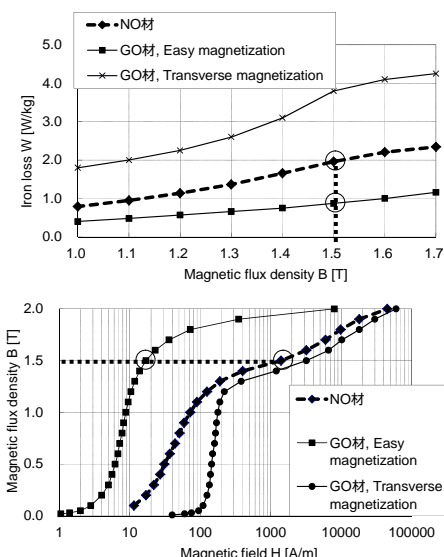


図1. 方向性電磁鋼板 (GO 材) と無方向性電磁鋼板 (NO 材) との磁気特性の差

配置させる「異方性モータ」を考案した。またその製造方法として、ヨーク・ティースのラップ接合方式を考案している。更に、これまでの研究で鉄損が3割以上低減し、電磁トルクが増大する設計条件見出した。しかし、その「異方性モータ」を試作・評価した事例は未だないので、それを製作・評価し、従来のNO一体モータより低鉄損であることを示す研究を今回行うことにする。

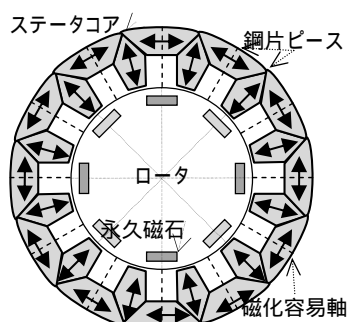


図2 材料特性を活かした異方性モータ

2. 研究の目的

これまで磁気異方性を考慮した電磁界数値解析の設計によって得られた「異方性モータ」を実際に試作し、実測することで鉄損低減効果を検証する。技術的課題は、その製造技術と損失評価である。

NO材と比べてGO材は外部応力に関する鉄損劣化が著しく、モータ製造過程にて外部応力がGO材に印加されやすい。更に分割ピースのコア成形時にステータ・ロータ間の空隙を高精度に保つ必要があるため、製造時には細心の注意が要求される。そこで製造時の応力印加を回避し分割ピースを高精度に製作する技術確立する。

材料評価のときと比べてモータコア形状の損失評価では、磁束密度および磁界が空間的に分布するので鉄損の直接測定は難しく、間接的な損失評価になる。ここでは、他の損失との分離・評価をも同時に行う必要があるため、数値解析を併用した多面的な評価を行い損失評価する。

3. 研究の方法

本研究では、これまで設計した「異方性モータ」のステータコアを試作し、鉄損低減効果を実測・評価する。鉄損低減および実使用条件を考慮した2種類のGO分割コアと、従来のNO一体コアとを試作する。鋼片ピース切断時にはワイヤ放電加工を用い、コア製作時には応力印加回避および取付け精度向上のための専用治具を作成し、ステータコアを製作する。鉄損評価には、ヨーク励磁、無垢鉄ロータ、引摺り損、無負荷特性、負荷特性と段階的な測定を行い、数値解析を併用した多面的な評価方法を行う。NO一体コアと比較することで「異方性モータ」の損失特性を明らかにする。

4. 研究成果

(1). GO分割コアの製作

GO分割コアの製作に当たり、図3(a)のごとき分割ピースを精密に位置決めし固定させる専用治具を製作し、図3(b)のごとく分割ピースを一枚一枚配置して製作した。

製作したコアの写真が図4であり、従来のNOコアと比べてT字部にてヨークとティース部とが分割されていることがわかる。

製作したコアの仕様を表1に占めすが、GO分割コアが高密度に製作されている。



図3. GO分割コア製作専用の治具による分割ピースの設置写真

表1. NOコア製作とGOコア製作の仕様比較

	NO core	GO core
Material	35H300	35ZH135
Inner diameter of stator	76.50 mm	76.40 mm
Stack length	46.65 mm	46.80 mm
Number of layers	132	136
Space factor	97.7 %	99.8 %

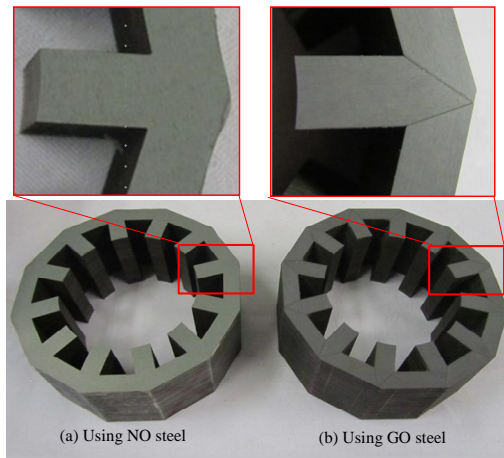


図 4. 製作した NO コアと GO 分割コアの写真

(2). コア特性の計測

コア損を計測するために、図 5(a)のごとき引摺り損（電流なし）と、図 5(b)のごとき無負荷損（負荷なし、インバータにて励磁）の条件にてコア損を計測した。

結果を図 6 に示す。NO コアのモータより、GO 材のコアを用いたコア損のほうが引摺り損で小さいことがわかる。次にステータコアに銅コイルを巻きつけ、インバータにて励磁させ、電流位相角ゼロにて無負荷損を計測した。無負荷損より銅損と機械損を差し引くことで無負荷時のコア損を計測すると、従来の NO 材のモータと比べて 5% 程度のコア損低減を確認した。引摺り損より無負荷損が増えている理由としては、インバータ励磁による高調波による損失増加といえる。

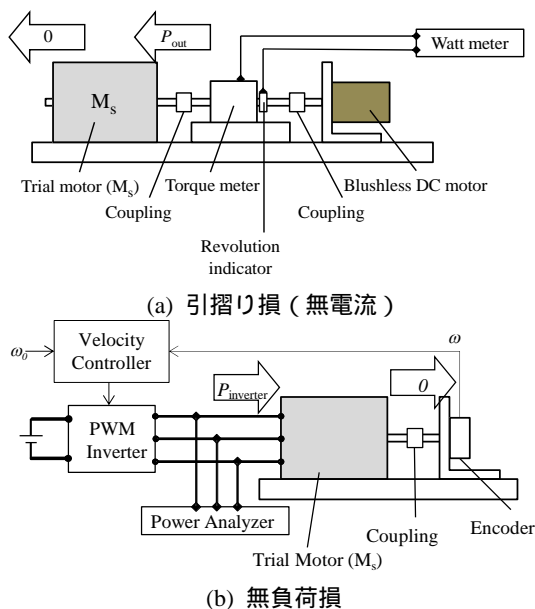
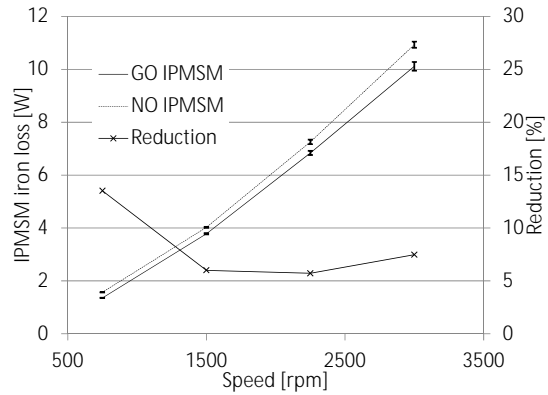
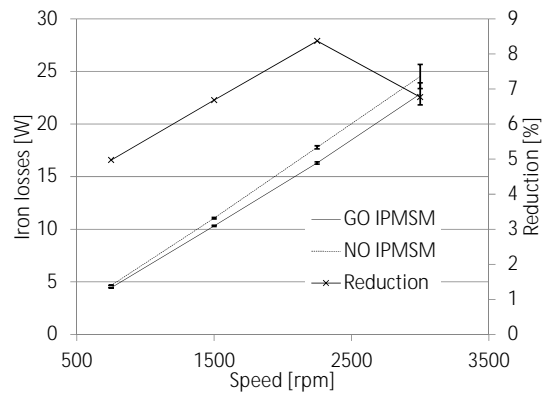


図 5. コア損の評価装置



(a) 引摺り損（無電流）



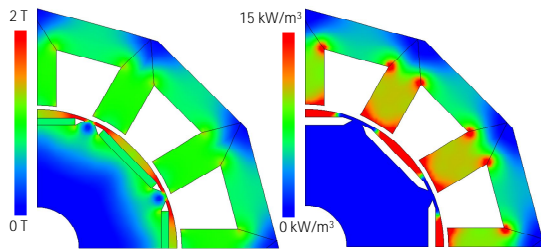
(b) 無負荷損

図 6. コア損の計測結果

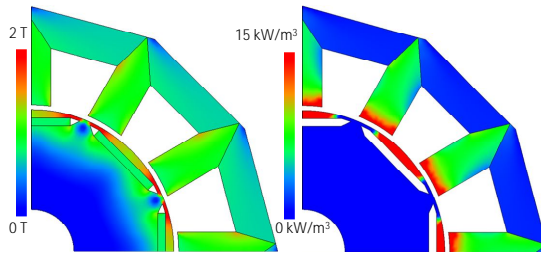
(3) 数値解析

前述で計測したコア損には、ステータの鉄損だけではなくロータの鉄損および磁石の渦電流損が含まれている。今回は、ステータの材料だけを変えたので、その部分の鉄損のみを分離するために数値解析をも同時に行った。二次元の二軸異方性にて解析し、得られた各要素の磁束密度の時間波形よりフーリエ展開し、高周波領域までも考慮した Steinmetz の式を用いて鉄損を算出した。解析結果の一例を図 7, 8 に示す。

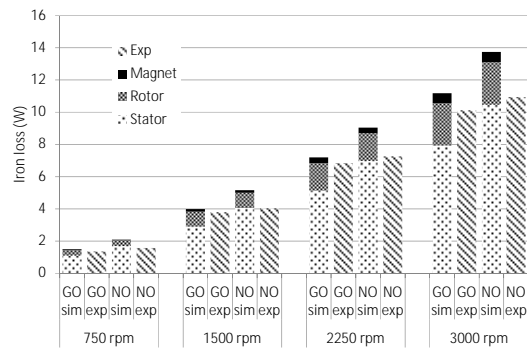
コア損の計測結果と数値解析結果の比較を図 9 示す。引摺り損、無負荷損ともに両者の良い一致をみている、両者とも、ロータ損および磁石損は同一の値を示しており、NO モータと GO モータとのコア損の差異は、ステータ損の差異といえる。解析結果の結果、ステータの鉄損は NO 材から GO 材に代わることで 10-20% 程度低下していることがわかる。



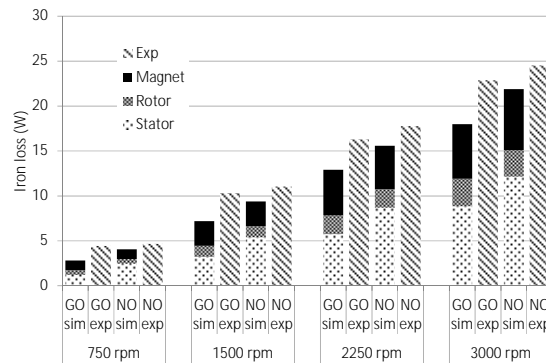
(a) 磁束密度 (b) 鉄損分布
 図 7. NO コアでの解析結果(750 rpm, 引摺損).



(a) 磁束密度 (b) 鉄損分布
 図 8. GO コアでの解析結果(750 rpm, 引摺損).



(a) 引摺り損 (無電流)



(b) 無負荷損

図 9. コア損の計測と数値解析結果の比較

(4) アモルファスモータコアの試作評価

また、材料特性を生かした低鉄損モータとして、新材料の適用及び試作評価を行った。ここでは新材料としてアモルファスを考え、同形状のステータコアを試作し、コア損を実測評価した。その結果渋滞の NO 材のコア損

と比べて半分程度の損失低減を確認した。この結果は、引摺り損だけではなく無負荷損にても同様の損失低減効果があることを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

1. S. Okamoto, N. Denis, M. Ieki, K. Fujisaki, "Core Loss Reduction of an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Using Amorphous Stator Core," IEEE Transactions on Industry Applications, vol.52, no.3, pp.2261-2268, May/June 2016. (査読有)
2. N. Denis, Y. Kato, M. Ieki, K. Fujisaki, "Core Losses of an Inverter-Fed Permanent Magnet Synchronous Motor with an Amorphous Stator Core under No-Load," AIP ADVANCES 6, 055916 (2016) (査読有)

〔学会発表〕(計 7 件)

1. S. Okamoto, N. Denis, K. Fujisaki, "Core Loss Reduction of an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Using Amorphous Stator Core," IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC2015), Coeur d'Alene, ID, USA, DF-001619, 2015.5 (査読有)
2. S. Takeda, K. Fujitani, S. Odawara, K. Fujisaki, "Trial Manufacture of Magnetic Anisotropic Motor and Evaluation of Drag Loss Characteristics," Proceedings of the 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Berlin, Germany, pp. 2049-2055, 2014. (査読有)
3. K. FUJITANI, N. HARUTA and K. FUJISAKI, "Evaluation of Stator Core Iron Loss of 'Magnetic Anisotropic Motor'," EVTec, Yokohama, 20144081, 2014. (査読有)
4. N. Denis, K. Fujitani, K. Fujisaki, "Analysis of Speed Control Performance Differences Between NO-core and GO-core IPMSM," 電気学会全国大会、東京、5-014, 2015.3
5. 藤谷幸平, 武田慎也, 岡本昭太郎, 藤崎敬介 「「異方性モータ」の無負荷鉄損特性」電気学会全国大会、東京、5-034, 2015.3
6. デニニコラ, 藤谷幸平, 藤崎敬介 「Analysis of Speed Control Performance Differences Between NO-core and GO-core IPMSM」電気学会マグネティクス・リニアドライブ・日本磁気学会合同研究会資料、MAG-14-216, LD-14-108,名古屋, 2014.12.

6. 研究組織

(1)研究代表者

藤崎敬介 (FUJISAKI, Keisuke)
 豊田工業大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：80373869