

令和 2 年 6 月 18 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06308

研究課題名（和文）磁性材料の革新的活用技術を用いたステータモジュール型バーニアモータの開発

研究課題名（英文）Development of stator module type vernier motor using innovative technology of magnetic materials

研究代表者

戸高 孝（Todaka, Takashi）

大分大学・理工学部・教授

研究者番号：50163994

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：電気自動車やハイブリッド自動車の成長は、さらなる高電力密度電気機器の開発への注目を牽引してきた。それらの性能を達成するために、電気機器に用いられる磁性材料は重要な役割を果たしている。著者らは、新しいステータモジュール型バーニアモータに鉄系アモルファス磁性材料を用いることに着目した。鉄系アモルファス磁性材料は、高透磁率、低鉄損で、コア材として非常に優れている。しかしながら、アモルファス材料は、打抜きによって従来の積層コア形状に加工することが困難である。本研究では、新しいU字カットコアを用いたバーニアモータの開発の中で、低応力な加工方法、残留応力制御法や効果的な磁場中熱処理方法を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発したステータモジュール型バーニアモータ（ギアモータ）では、アモルファス磁性材料の高周波での低損失特性を活かした構造を実現することで高効率化を実証した。また、製造過程の課題である応力依存磁気特性を調査し、応力下・磁場中熱処理法を明らかにした。これらの成果はモータのさらなる高電力密度化に対して有効に活用できる。研究の中で得られた応力依存磁気特性の数値モデルとシミュレーション手法は、モータの損失や効率を高精度に予測できる新しい設計支援技術であり、開発した薄帯ならびに積層試料の磁気特性の評価方法は、将来的には国際標準の測定方法に繋がることを期待できる。

研究成果の概要（英文）：Growth of electric and hybrid electric vehicles has drawn more attention toward development of high power density electrical machines. Magnetic materials used in the electric machines play an important role in achieving their performance. We have focused on use of Fe-based amorphous magnetic materials for a new stator module type vernier motor. The Fe-based amorphous magnetic material has high permeability and low loss, and is extremely excellent as a core material. However, the amorphous material is difficult to process in the conventional laminated core structure by stamping. In this study, we clarified low-stress processing method and residual stress control method and effective heat treatment method in magnetic field through developing the new vernier motor utilizing U-shaped cut-cores.

研究分野：磁気工学

キーワード：バーニアモータ アモルファス磁性材料 低鉄損 ギアドモータ 高効率 磁場中熱処理 電気機器 磁気異方性

## 1. 研究開始当初の背景

日本の総発電電力量の約 55%は、工場や輸送機関の動力源として使用されているモータで消費されている(経産省報告)。これを受け、政府はトプランナー方式の導入や IE3(高効率モータ規格)の規制を 2015 年 4 月からかけるなどの対策をとっているが、将来的には更に厳しい規制(IE4, IE5)の摘要もあり得る。また、自動車業界でも石油の枯渇や高騰に対応すべく EV を開発販売しているが、バッテリー駆動モータの効率や重量は走行距離や電費と密接に関連するため、更なる軽量・高効率化が要求されている。このため、国内では、NEDO のプロジェクト「次世代自動車向け高効率モータ用磁性材料技術開発」の中で高飽和磁束密度・低鉄損の Fe 基ナノ結晶軟磁性材料やレアアースフリーの永久磁石の開発研究が行われているが、製品レベルのナノ結晶軟磁性材料の開発が遅れている。欧米での高効率モータ規制は、日本より進んでいるが、国土が広く送配電電圧も高いため、大型化による旧来の技術の摘要による対応がほとんどであり、新材料やアモルファス磁性材料の利用は進んでいない。

著者らは、これまで、磁性材料の様々な損失の増加要因を詳細に調査し、モータ実機の残留応力分布測定法、局所磁気特性測定法やサーモグラフィカメラによる鉄損分布測定法を開発してきた。また、モータに関しては、永久磁石の磁束集束配列を考案してエアギャップ中の磁束密度を向上させることにより産業用モータの小型・高トルク化を実現した。

一方、鉄損の極めて少ないアモルファス磁性材料を世界的にも初めてモータに適用して、同時に高効率化も実現した。アモルファス磁性材料はこれまで、巻鉄心として変圧器用に利用されてきたが、加工応力の影響を強く受け磁気特性が大きく劣化する(磁気ひずみが大い)ため、カシメや溶接などでの積層化が困難であった。そこで、巻鉄心構造を採用してアキシアルギャップ型のモータを開発した。しかしながら、長手方向に対して垂直方向の磁路を利用しているため磁気特性は最適ではなく、その方向に磁場を印加して熱処理する方法が困難で、材料の特性を活かしきれずに改良すべき点が多かった。そこで、本研究では長手方向に磁路をとれる巻鉄心カットコアを利用し、ステータモジュール型構造とすることで励磁磁場を変調するバーニアモータを開発することにした。

## 2. 研究の目的

電力の有効利用による化石燃料の保護、二酸化炭素排出量の削減や EV の高電費化のため、モータの更なる高効率化と過酷なほどの軽量化が要求されている。本研究では、低鉄損磁性材料を用いた軽量・高効率モータの開発支援技術の構築を目的として、薄帯磁性材料の巻鉄心カットコアを利用したステータモジュール型ラジアルバーニアモータを開発する。低鉄損磁性材料が開発されてもその低い加工性や熱処理の困難性から、現状のモータ材料に置き換えることが難しい実状がある。そこで、材料を有効利用できる構造での置き換えを達成するために以下の検討を行う。

- (1) 応力依存磁気特性の正確な把握とシミュレーション技術の構築
- (2) 低応力加工技術の開発
- (3) 応力制御焼鈍技術の開発
- (4) 試作機の製作による実証

## 3. 研究の方法

- (1) 応力依存磁気特性の正確な把握とシミュレーション技術の構築

高周波励磁と応力印加が可能な磁気試験器を製作し、アモルファス磁性材料、ナノ結晶軟磁性材料並びに電磁鋼板(薄板)等の応力依存磁気特性を測定し、応力依存磁気特性のデータベースを構築する。これらの測定結果を基に材料特性の数値モデリングを構築し、その有限要素法解析への適用可能性とモデリングに用いるデータ量削減を検討する。並行して、独自開発の電磁界解析ソフトを用いてステータモジュール型バーニアモータの概要設計を行い、モータ体格やコア寸法並びに巻線仕様を決定する。

- (2) 低応力加工技術の開発

接着剤を利用した積層化ならびに巻鉄心により、加工方法と接着・積層試料の磁気特性の関係を明らかにし、最適な加工、曲げや接着方法に関する知見を得る。また、形状や径を変えた巻鉄心材と接着積層材の磁気特性を評価し、各種整形条件での残留応力の影響を明らかにするとともに、熱処理の有無による磁気特性の変化を明らかにする。

### (3) 応力制御焼鈍技術の開発

応力下・磁場中熱処理装置を用いて、単板（薄帯）並びに積層や巻鉄心の応力下・磁場中熱処理を行って、磁気特性の回復や改善についての知見を得る。また、巻鉄心や単板並びに積層材に対して応力下・磁場中熱処理を行って得られた磁気特性を、磁区観察やX線回折で得られた微細データ等を参考にして評価・分析し、残留応力の緩和や異方性の発現、ならびに磁気特性の改善方法を明らかにする。

### (4) 試作機の製作による実証

以上の結果を基に試作するステータモジュール型バーニアモータの仕様を決定し、最終の詳細設計をシミュレーション中心に行う。また加工公差の影響を明らかにして、組み立て制度を向上するような治具を作製する。試作が完成後、無負荷ならびに負荷特性試験を行い解析結果と比較検証を行う。

## 4. 研究成果

初年度は、応力依存磁気特性の正確な把握とシミュレーション技術の構築のため、アモルファス積層試料に対する高周波励磁が可能な磁気試験器を設計・製作し、アモルファス磁性材料並びに電磁鋼板の応力依存磁気特性を測定しデータベースを作成した。磁気試験器としてはダブルヨークの縦型と横型を試作しその測定精度の検証を行い、横型を最終的に採用した。並行して、独自開発の電磁界解析ソフトを用いてステータモジュール型バーニアモータの概要設計を行い、アモルファス磁性材料を用いた場合の低損失化を検証し、国際会議 (INTERMAG 2018) に投稿した。また、低応力加工技術の開発のため、耐熱接着剤を使用した積層鉄心ならびに巻鉄心により、加工方法と接着・積層試料の磁気特性の関係を明らかにした。さらに、応力制御焼鈍技術の開発に向けて、応力下・磁場中熱処理装置を用いて、無方向性電磁鋼板とアモルファス磁性材料の応力下・磁場中熱処理を行って、磁気特性の回復や改善についての知見を得た。

初年度に引き続き、得られた応力依存磁気特性の測定結果を基に応力下磁気特性のデータベース形モデリングを開発した。数値モデルを独自開発の有限要素解析コードに組み込むことで、モータの鉄損評価の精度が向上出来ることを示した。続いて、非線形計算アルゴリズムを導入し、より実用的な手法への改良を行うことにした。並行して、ステータモジュール型バーニアモータの概要設計を行い、アモルファス磁性材料を用いた場合の低損失化を検証し、国際会議 (INTERMAG2018) ならびに国内会議 (MAGDA2018) 等で報告した。

また、低応力加工技術の開発のため、形状や径を変えた巻鉄心材と 500 以上の耐熱性をもつ接着剤を用いた接着積層材の磁気特性を評価し、各種整形条件での残留応力の影響や熱処理の有無による磁気特性の変化を明らかにした。さらに、巻鉄心や単板及び積層材に対して応力下・磁場中熱処理を行って得られた磁気特性を評価し、磁気異方性の発現ならびに磁気特性の改善方法を明らかにした。以上の結果を基に、試作するステータモジュール型バーニアモータの仕様を決定した。図 1 と図 2 にモータ構造と基本特性をそれぞれ示し、表 1 に仕様を示す。

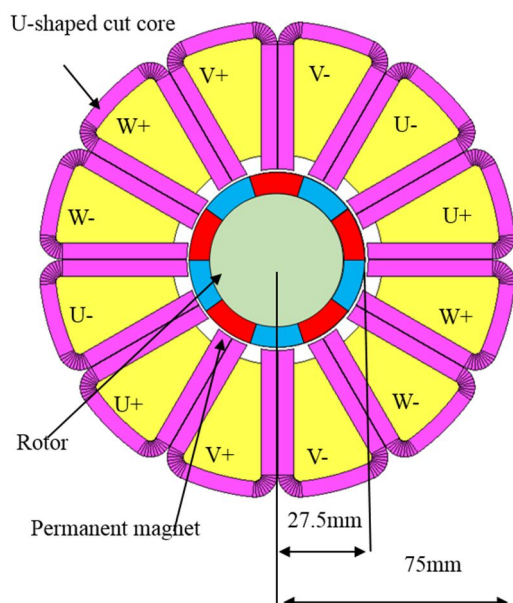


図 1 モータ構造

表 1 モータ仕様

TERM	VALUE
Number of poles	10
Number of slots	12
Rotor outer diameter [mm]	55
Stator outer diameter [mm]	150
Air gap length [mm]	1
Number of turns of coil [turn/phase]	264
Core thickness [mm]	100
Winding resistance [ $\Omega$ ]	0.93
Frequency [Hz]	50 - 400
Revolution speed [rpm]	600 - 4800
Magnetization of the magnets [T]	0.4
Magnet width [mm]	3

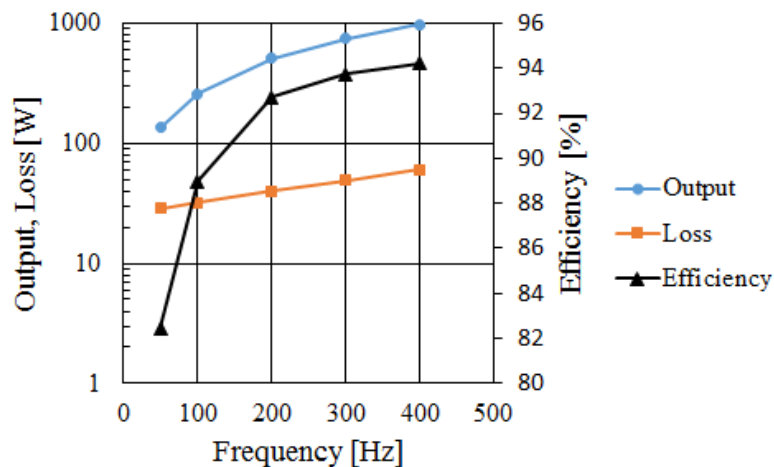


図 2 モータ特性の解析結果（励磁電流 3A）

さらに、応力依存磁気特性の測定結果を基にした応力下磁気特性のデータベース形モデリングを用いて巻鉄心の磁気特性の異方性をさらに有限要素解析コードに組み込み、ニュートンラプソン法を適用することで、モータの鉄損評価の精度を向上させた。開発手法を用いて、前述の仕様に対するエアギャップ長、分割コア間のギャップや分割コアのティース幅の加工公差がモータ特性に与える影響について検証し最終仕様を決定した。低応力加工技術の開発に関しては、1cm厚に積める短冊状アモルファスシートを磁場中熱処理した後に、100 以下の耐熱性の低い接着材を用いて作製した積層試料を用いて、接着による磁気特性の劣化程度を調査し、アモルファスシートを面接着すると占積率が大きく低下することから、熱処理後に側面接着することが有効であることを明らかにした。巻鉄心や単板並びに積層試料に対して応力下・磁場中熱処理を行う前後の磁気特性の評価も継続して行い、磁気異方性の発現ならびに磁気特性の改善方法を明らかにした。試作機については、U字型ステータモジュールの試験段階であり加工組立後の磁気特性を評価中である。試作モータとしての特性評価と解析結果との比較は今後の課題である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 上杉一進, 佐藤尊, 戸高孝	4. 巻 27-3
2. 論文標題 FeSiBアモルファス磁性材料の引張り応力下焼鈍効果	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本AEM学会誌	6. 最初と最後の頁 329-334
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 中川博貴, 佐藤尊, 戸高孝	4. 巻 27-2
2. 論文標題 アモルファス磁性材料を使用したステータモジュール型パーニアモータの特性評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本AEM学会誌	6. 最初と最後の頁 194-199
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 T. Sato, T. Todaka	4. 巻 54
2. 論文標題 Effect of Magnetic Annealing on Magnetic Characteristic of Amorphous Wound Core	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2018.2847698	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計20件（うち招待講演 0件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 前田純弥, 佐藤尊, 戸高孝
2. 発表標題 ステータモジュール型パーニアモータの有限要素法による特性解析
3. 学会等名 2020年電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 戸高孝, 上杉一進, 中川博貴
2. 発表標題 鉄系アモルファス薄帯の磁気特性制御とパーニアモータへの応用
3. 学会等名 2019年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中川博貴, 佐藤尊, 戸高孝
2. 発表標題 ステータモジュール型パーニアモータ用巻鉄心構造の検討
3. 学会等名 第72回電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上杉一進, 佐藤尊, 戸高孝
2. 発表標題 FeSiB系アモルファス磁性材料の引張応力下焼鈍効果
3. 学会等名 第72回電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 片岡優貴, 佐藤尊, 戸高孝
2. 発表標題 アモルファス磁性材料の積層効果の検討
3. 学会等名 第72回電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Todaka, Isshin Uesugi, Takeru Sato
2. 発表標題 Effects of Annealing in Magnetic Field or under Tensile Stress on the Magnetic Properties of Fe-based Amorphous Magnetic Material
3. 学会等名 IEEE International Magnetism Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takeru Sato, Takashi Todaka
2. 発表標題 Effect of Magnetic Annealing on Magnetic Characteristic of Amorphous Wound Core
3. 学会等名 IEEE International Magnetism Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroyuki Nakagawa, Takeru Sato, Takashi Todaka
2. 発表標題 Development of a New Stator Module Type Vernier Motor utilizing Amorphous Cut Core
3. 学会等名 IEEE International Magnetism Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上杉一進, 佐藤尊, 戸高孝
2. 発表標題 FeSiB系アモルファス磁性材料の応力下焼鈍効果
3. 学会等名 日本AEM学会 MAGDAコンファレンス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中川博貴, 佐藤尊, 戸高孝
2. 発表標題 ステータモジュール型バーニアモータの特性評価
3. 学会等名 日本 A E M 学会 MAGDA コンファレンス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上杉一進, 戸高孝, 佐藤尊
2. 発表標題 アモルファス磁性材料の応力下焼鈍効果の検討
3. 学会等名 電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中川博貴, 佐藤尊, 戸高孝
2. 発表標題 ステータモジュール型バーニアモータの特性解析
3. 学会等名 電気・情報関係学会九州支部連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井上皓太, 佐藤尊, 戸高孝
2. 発表標題 アモルファス磁性材料のビルディングファクター評価
3. 学会等名 日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2017年



〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	佐藤 尊  (Sato Takeru)  (90647554)	大分大学・理工学部・助教    (17501)	