

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04101

研究課題名(和文) 極薄無方向性電磁鋼板を用いた高効率・高出力密度小型モータの開発

研究課題名(英文) Development of small motor with high-efficient and high-power density using ultra-thin non-oriented electrical steel sheet

研究代表者

祖田 直也 (Soda, Naoya)

茨城大学・理工学研究科(工学野)・准教授

研究者番号：80323210

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：極薄無方向性電磁鋼板を用いた高効率・高出力密度の小型永久磁石モータの開発のために、ベクトル磁気特性解析技術を用いた小型モータ鉄心の高効率・高出力密度化設計法を提案した。最初に、ベジェ曲線による固定子鉄心形状設計後にバックヨーク外側部に生じる低磁束密度領域を切取ることによってトルクを低下させずに固定子鉄心重量を削減させる高出力密度化設計法を提案した。この手法により初期の小型モータモデルに対して20～30%程度出力密度を向上させることが可能であることを確認した。次に、分割コアに対してテイス付根部にアールをつける鉄損低減法を提案した。この手法により鉄損を約17%低減することが可能であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

板厚0.1mm(100 μ m)程度の電磁鋼板はこれまでに国内外にあったが、極薄電磁鋼板は50～80 μ mであり圧倒的に渦電流損が低い。また、極薄電磁鋼板は高い周波数領域においても高飽和磁束密度を有するため、高効率・高出力小型モータの鉄心として最適な材料であり、世界的にみても圧倒的に有利である。この極薄電磁鋼板の磁気特性を最大限に活用し、小型モータの効率を低減させることなく出力密度を向上させる設計法を確立させることは、高効率・高出力密度を有する小型永久磁石モータの開発にとって大変重要である。

研究成果の概要(英文)：High-efficient and high-power density design methods of a small motor core using vector magnetic property analysis technique are proposed to develop a small permanent magnet motor with high-efficient and high-power density using ultra-thin non-oriented electrical steel sheet. First, a stator core design by a Bezier curve for decreasing core loss and a stator core design by cutting out the low magnetic flux density region for realizing high power density motor are proposed. Analysis results confirmed that the method of combining both stator core designs improves the power density of small motor about 20-30% for initial motor model. Next, core loss decreasing method by combination of segmented stator core and application of the corner radius to each tooth root is proposed. Analysis results confirmed that this technique reduced the iron loss of a stator core about 17%.

研究分野：電気機器学

キーワード：ベクトル磁気特性 小型モータ 高効率 高出力密度 固定子鉄心 形状設計 極薄電磁鋼 鉄損

1. 研究開始当初の背景

宇宙用ロケットで 1kg の物体を打ち上げる費用は約 1.2 億円といわれており、そのロケットに搭載される探査車やドローン等には各種ブラシレスモータが多数使われていることから、モータ重量を 1g でも削減できれば経済効果は非常に大きい。また宇宙空間において限られたエネルギーを有効に活用するためにモータは高効率でなければならない。つまり高効率・高出力密度のモータ開発は宇宙開発における最重要課題の 1 つである。モータの出力は回転数とトルクの積で決まるため、高トルクを保ちつつ回転数を上げることが出来れば高出力モータとなる。しかしながら、通常のモータに使用される板厚 0.35mm の電磁鋼板は高速回転時に渦電流反抗磁場が発生するため、トルクに必要な磁束密度を得るためには大きな磁界強度が必要となり励磁電流が増大する。一方、励磁電流を抑えると磁束密度が減少しトルクが低下する。そのため通常の電磁鋼板で高速回転かつ高トルクの小型モータを製作するのは不可能である。そこで、研究協力者である日本文理大学の榎園正人特任教授が日本金属株式会社と共同開発した極薄無方向性電磁鋼板に着目した。この極薄電磁鋼板は板厚が 50~80 μm であるため大幅な渦電流損の低減を図ることができ、励磁周波数 950Hz の場合、板厚 0.35mm の電磁鋼板と比べて鉄損を 66% も低減することが可能である。そのため極薄電磁鋼板は高速回転高トルク用小型モータの鉄心材料として最適だと考える。また、この極薄電磁鋼板は高い周波数領域においても高飽和磁束密度を有するため、モータの鉄心として使用した場合、高速回転時においてもトルクの低下が生じず小型モータの高出力化が可能である。しかしながら、通常の電磁鋼板の磁気特性を用いて設計された小型モータの鉄心を極薄電磁鋼板に置き換えるだけでは最良のモータは完成しない。どんなに優れた特性を持つ電磁鋼板も圧延磁気異方性を有しており、この極薄電磁鋼板も例外ではない。これらの特性を無視して鉄心形状を設計すると逆に鉄損増加を招き、モータの効率を低下させてしまう。また、電磁鋼板のカタログ値や従来の単板磁気試験器で測定された磁気特性は圧延方向のみの磁気特性であり、これらの磁気特性を用いた従来の解析手法では正確なモータ設計は行えない。そのため、極薄電磁鋼板を用いた高効率・高出力密度の小型永久磁石モータを開発するためには、まず極薄電磁鋼板の特性を有効に活用することが出来る小型モータの高出力密度化設計法を確立する必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ベクトル磁気特性技術を用いて極薄電磁鋼板を活用し高効率・高出力密度の小型永久磁石モータを開発することである。そのためにはまず極薄電磁鋼板の特性を有効に活用することが出来る小型モータの高効率・高出力密度化設計法を確立する必要がある。

ベクトル磁気特性測定器では電磁鋼板の圧延方向のみならず任意方向への励磁が可能のため、測定されたベクトル磁気特性によって電磁鋼板の圧延磁気異方性を表現することが可能である。図 1 は無方向性電磁鋼板リング試料を励磁した場合の磁束密度分布である。圧延方向は磁束密度が通りやすいため、実際は(a)の測定結果の様に圧延方向に沿った場所の磁束密度が高くなるのだが、(b)の従来法による解析結果はリング試料内側から磁束密度が均一に分布しており測定結果と異なっている。一方、(c)のベクトル磁気特性を用いた解析結果は圧延方向に沿った場所の磁束密度が高く、圧延方向を考慮出来ており、(a)の測定結果と一致している。また、ベクトル磁気特性測定器では磁束密度と磁界強度の時間的位相差のみならず空間的位相差も測定可能である。そのためベクトル磁気特性を用いた解析は正確な磁束密度分布を得るだけでなく、磁束密度と磁界強度の関係も正確に表現することができ、電磁鋼板内の正確な鉄損分布も得ることが可能である。小型モータの設計は、わずかな形状の変更もモータの特性に大きく影響するため高精度な解析が必要不可欠である。元々低損失である極薄電磁鋼板の磁気特性を有効に活用し、高出力かつ低鉄損を実現する鉄心形状設計には、ベクトル磁気特性解析が最適である。そのため、極薄無方向性電磁鋼板を用いた高効率・高出力密度の小型永久磁石モータの開発のためには、ベクトル磁気特性を用いた小型モータの高効率・高出力密度化設計法を確立することが重要である。

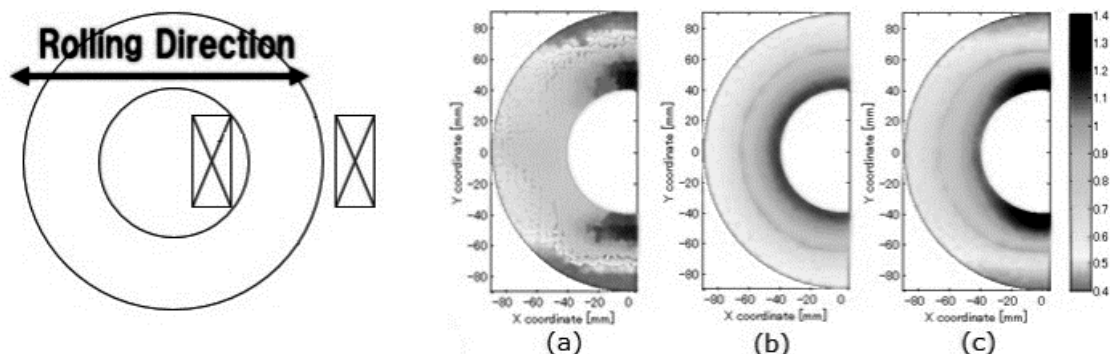


図1 リング試料を励磁した場合の磁束密度分布
(a)測定結果, (b)従来法による解析結果, (c)ベクトル磁気特性を用いた解析結果

3. 研究の方法

本研究は3年間で行った。初年度は、解析に必要なベクトル磁気特性データベースを構築し、鉄損低減を可能とする固定子鉄心形状設計法および高出力密度化設計法を提案した。これまでの研究で固定子鉄心におけるティース先端およびバックヨーク内側のコーナー部にアールを付けることにより、磁束密度の流れを滑らかにし磁束密度の急激な変化を抑えることで鉄損低減を可能にすることを確認していた。そこで、コーナー部へのアール付けをベジェ曲線による曲線化に変更し、ティース先端からバックヨーク内側に対して連続的に滑らかな曲線で固定子鉄心を形状設計することにより、巻線領域を極端に減少させることなく鉄損低減可能な固定子鉄心形状を設計する方法を提案した。さらに、ベジェ曲線による固定子鉄心形状設計後にバックヨーク外側部に生じる低磁束密度領域を切取ることによりトルクを低下させずに固定子鉄心重量を削減させる高出力密度化設計法を提案した。2年目は、固定子コアを非分割コア(打ち抜きコア)から分割コアに変更し、電磁鋼板の圧延方向を考慮した固定子分割コアモータの鉄損低減法を検討し、分割コアとティース付根部にアールをつける鉄損低減法を組み合わせた新しい鉄損低減法を提案した。また最終年度は前年度の鉄損低減法において圧延方向の設定角度を変更することで最も鉄損低減を可能とする圧延方向設定角度を決定した。

4. 研究成果

極薄電磁鋼板は高い周波数領域においても高飽和磁束密度を有するため、高速回転用モータの鉄心として最適であり、小型モータの高出力化として有用である。しかしながら、どんなに優れた特性を持つ電磁鋼板も圧延磁気異方性や結晶磁気異方性を有しており、これらの特性を無視した鉄心形状設計を行ってしまうと逆に鉄損増加を招くこととなり、モータの効率を低下させてしまう。これまでに、ベクトル磁気特性を考慮することが出来る積分型E & Sモデルを導入した有限要素磁界解析を小型モータに適用し、鉄損低減のための固定子鉄心形状について調査した。その結果、図2のように破線で示した初期固定子鉄心形状に対してティース付根部にアールをつけることにより鉄損を低減することが出来た。アールが大きい方が鉄損低減効果も大きいですが、アールを大きくすると巻線領域も減少するため、初期形状のモータと同じ誘起電圧値を得るためには巻線占積率を高くする必要があり、製造が困難となる。また、ティース付根部にアールをつけることにより鉄心面積が増加し、モータ重量も増加してしまう。回転数一定の条件において小型モータの出力密度を向上させるためには、巻線領域にも配慮しつつ鉄損低減可能な固定子鉄心形状を設計する必要がある。

(1) 高出力密度化設計法

図3に示すように、巻線領域を減少させずにティース付根部の角を滑らかにする方法としてベジェ曲線を用いた方法を提案した。図4に基本モデルおよびBezierモデルの鉄損分布を示す。この手法によりティース付根部の角を滑らかにして磁束の集中を防ぐことが出来たため、Bezierモデルは基本モデルに対して5%程度鉄損が低減した。さらに、ティース付根部の角を滑らかにしたことによりバックヨーク側に磁束が張り出さなくなり、図4に破線で囲んだバックヨークにおいて低磁束密度領域が増加した。この領域は切取っても磁気回路的に然程影響がなく、トルクの低下に繋がらないと考え、これにより鉄心重量のみを削減し出力密度の向上を図った。

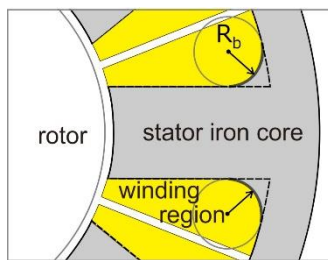


図2 ティース付根部にアールを付けることによる局所的鉄損低減法

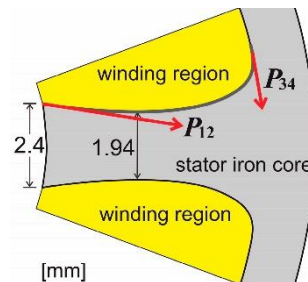


図3 ベジェ曲線を使った固定子鉄心形状の決定

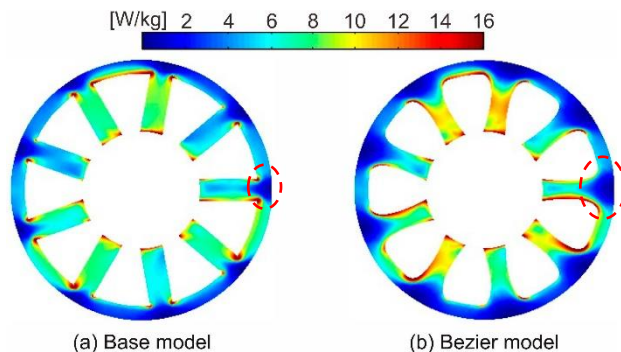


図4 (a)基本モデルと(b)Bezierモデルの固定子鉄心内の鉄損分布

本研究では 0.2~0.3 T 程度を低磁束密度と考え、その範囲内になるように、切取る範囲を半径 1.25 mm および 1.50 mm の円の 2 通りを検討した。図 5 に Bezier モデルのバックヨークを半径 1.25 mm の円で切取った R1.25 モデル、半径 1.50 mm の円で切取った R1.50 モデルを示す。図 6 に基本モデル、R1.25 モデル、R1.50 モデルの負荷角に対する出力密度を示す。R1.25 モデルおよび R1.50 モデルのどちらも Bezier モデルからのトルクの増減は無かったが、固定子鉄心が切取られたためモータ重量が減少した。そのため図 6 に示すように、R1.25 モデル、R1.50 モデルともに出力密度が向上している。出力密度の増加は R1.25 モデルで 9%、R1.50 モデルで 12%であった。なお、この手法により研究当初に検討していた初期のモータモデルに対して 20~30%程度出力密度を向上させることが出来た。

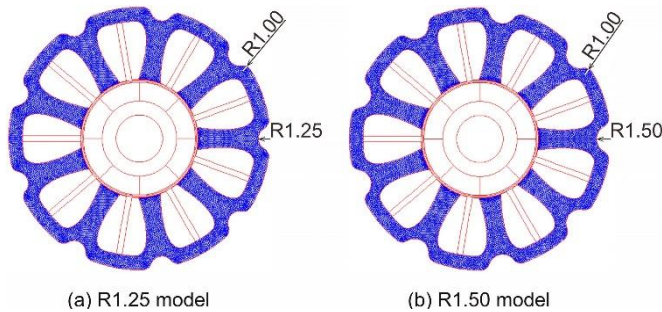


図 5 (a)R1.25 モデルと (b)R1.50 モデル

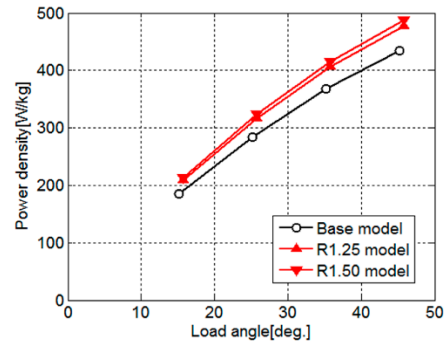


図 6 R1.25 モデル、R1.50 モデルの負荷角に対する出力密度

(2) 分割コアを用いた鉄損低減法

ベジェ曲線を用いた方法は巻線領域を減少させずにティース付根部の角を滑らかにすることが可能であるが鉄損低減効果は低い。そこで分割コアに着目した。分割コアは巻線の占積率を高めることが出来る。また、分割コアは各部分において電磁鋼板を変更すること、圧延方向を変更することで鉄損低減を図ることが出来るメリットもある。そこで、分割コアとティース付根部にアールをつける鉄損低減法を組合せた新しい鉄損低減法を提案した。図 7 に非分割コアモデル、分割コアモデル、アールを付けた分割コアモデルを示す。アールの大きさは図 7 のモデルに付けることが出来る最大の $R_b=1.86 \text{ mm}$ とした。図中の矢印は圧延方向を示す。非分割コアモデルの圧延方向は x 方向に設定した。分割コアモデルおよびアールを付けた分割コアモデルは図 7 (b), (c) のように 9 分割し、それぞれのコア片における圧延方向は径方向に設定した。図 8 に解析結果を示す。非分割コアから分割コアにすることで鉄損を約 3%低減することが可能であり、さらにアールを付けた分割コアの鉄損は非分割コアに対して約 17%低減した。アールを付けた分割コアモデルは、アールを付けたことにより巻線領域が減少したため巻線占積率は 35.7%から 41.4%に上昇したが、分割コアであれば 6%程度の占積率向上は可能な範囲だと考える。

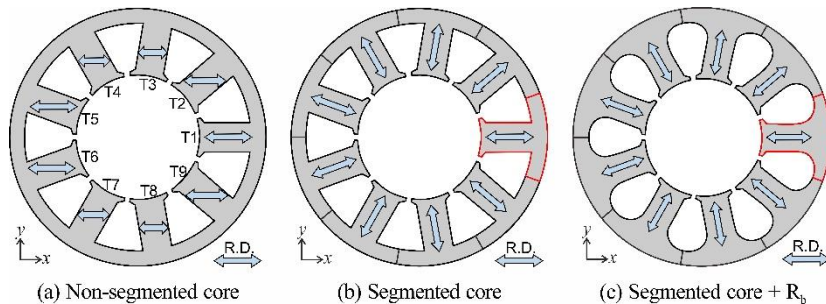


図 7 (a) 非分割コアモデル、(b) 分割コアモデル、(c) アールを付けた分割コアモデル

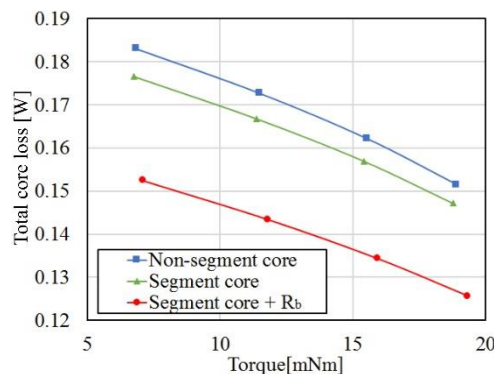


図 8 アールを付けた分割コアモデルのトルクに対する鉄損

(3) 分割コアモデルにおいて最も鉄損低減を可能とする圧延方向設定角度

分割コアモデルは各コアにおいて圧延方向を設定することが可能である。そこで、アールを付けた分割コアモデルにおける圧延方向を変更した場合の鉄損変化を調査した。図 9 に示すように、分割コアにおけるティース中心線からの圧延方向の傾き角を β とし、回転子の回転方向に傾けた場合を正、逆に傾けた場合を負とした。つまり図 7(c)は $\beta=0^\circ$ の場合である。傾き角 β を負にした場合は $\beta=0^\circ$ と比べて鉄損が増加することが分かった。圧延方向を回転方向の逆向きに設定したことにより磁束の流れが悪化して鉄損が増加したと考えられる。そこで傾き角 β を $0\sim 90^\circ$ に変更して鉄損変化を調査した。図 10 に圧延方向の傾き角 β を変更した場合の鉄損変化を示す。本研究における小型モータでは $\beta=20^\circ$ の場合に最も鉄損が低減することが分かった。

以上の結果から、極薄無方向性電磁鋼板を用いた高効率・高出力密度小型モータの開発に必要なベクトル磁気特性を用いた小型モータの高効率・高出力密度化設計法を確立することが出来たと考える。

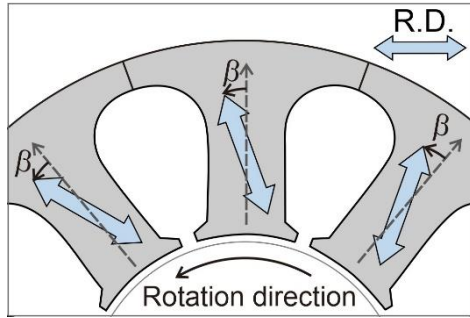


図 9 分割コアにおける圧延方向の傾き角 β の定義

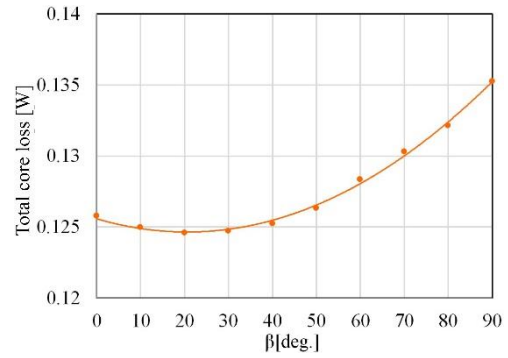


図 10 圧延方向の傾き角 β を変更した場合の鉄損変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Soda Naoya, Enokizono Masato	4. 巻 20
2. 論文標題 Stator Core Shape Design for Low Core Loss and High Power Density of a Small Surface-Mounted Permanent Motor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s20051418	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 Soda Naoya, Enokizono Masato	4. 巻 -
2. 論文標題 Relation Between Stator Core Shape and Torque Ripple for SPM Motor	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 2018 XXIII International Conference on Electrical Machines (ICEM2018)	6. 最初と最後の頁 955-960
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ICELMACH.2018.8507050	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計20件（うち招待講演 0件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 祖田直也、上野尚平、槌田雄二、榎園正人
2. 発表標題 小型高速モータの高効率高パワー密度のための固定子鉄心形状設計
3. 学会等名 第31回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム（SEAD31）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Soda, M. Enokizono
2. 発表標題 Stator core shape design for low core loss and high power density of a small SPM motor
3. 学会等名 19th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF2019)（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 祖田直也、林直輝、榎園正人
2. 発表標題 電磁鋼板の圧延方向を考慮した固定子分割コアモータの鉄損解析
3. 学会等名 電気学会マグネティックス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤真嗣、祖田直也
2. 発表標題 タグチメソッドによるSPMモータのロバスト設計
3. 学会等名 令和元年度電気学会東京支部茨城支所研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村将矢、祖田直也
2. 発表標題 PMモータのトルクリプル低減に関する研究
3. 学会等名 令和元年度電気学会東京支部茨城支所研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Soda N.、Enokizono M.
2. 発表標題 Relation Between Stator Core Shape and Torque Ripple for SPM Motor
3. 学会等名 XXIII International Conference on Electrical Machines (ICEM2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 祖田直也、榎園正人
2. 発表標題 小型SPMモータの出力密度向上のための固定子鉄心形状設計法
3. 学会等名 第27回MAGDAコンファレンス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 熊田勇輝、祖田直也
2. 発表標題 小型SPMモータの永久磁石の配向変更による特性改善に関する研究
3. 学会等名 第27回MAGDAコンファレンス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 林直輝、祖田直也
2. 発表標題 小型PMモータの固定子鉄心形状変更による鉄損低減に関する研究
3. 学会等名 第27回MAGDAコンファレンス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 林直輝、祖田直也
2. 発表標題 小型SPMモータにおける低鉄損化のための固定子鉄心形状変更に関する研究
3. 学会等名 平成30年度電気学会東京支部茨城支所研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 熊田勇輝、祖田直也
2. 発表標題 小型PMモータの回転子磁化方向変更による特性改善に関する研究
3. 学会等名 平成30年度電気学会東京支部茨城支所研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 祖田直也、榎園正人
2. 発表標題 鉄損低減および出力密度向上のための小型SPMモータの固定子鉄心形状設計の提案
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 祖田直也、榎園正人
2. 発表標題 小型SPMモータの出力密度向上のための鉄心形状設計法の提案
3. 学会等名 電気学会マグネティックス研究会
4. 発表年 2019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
研究協力者	榎園 正人 (Enokizono Masato) (40136784)	日本文理大学・工学部・特任教授 (37501)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	林 直輝 (Hayashi Naoki)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関