

令和 6 年 5 月 8 日現在

機関番号：15301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20429

研究課題名（和文）高性能化と低コスト化を両立する自動車駆動用アキシアルギャップモータの開発

研究課題名（英文）Development of an Axial Gap Motor for Traction Applications Achieving Both High Performance and Low Cost

研究代表者

網田 錬 (Tsunata, Ren)

岡山大学・環境生命自然科学学域・研究准教授

研究者番号：40965646

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：近年、電気自動車の駆動源となる永久磁石同期モータの生産台数が大幅に増加すると予想されている。そのためモータの更なる高性能化のみならず、低コスト化との両立も求められている。しかし、現状のモータの多くは高性能化を実現するため、高価格なネオジム焼結磁石や平角銅線を使用している。そこで本研究では、アキシアルギャップモータにおいて新しい回転子構造の提案と固定子の先端形状を最適化することで、低価格なフェライト磁石と丸銅線を用いながらも、従来モータと同等以上の性能を実現できる『高性能化と低コスト化を両立した自動車駆動用モータ』の開発に成功した。最終的に提案モータの試作機を開発し、有効性を実験で明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、世界中で自動車の電動化の動きが活発になっており、自動車の駆動源がエンジンからモータに変わりつつある。経済産業省によると、我が国でも2030年にはモータを駆動源としたEV等の販売台数を全体の約50～70%にするための政策が進められている。以上より、自動車駆動用モータの生産台数が飛躍的に増加することが予想されており、今後の駆動用モータは高性能でありながら、「低コスト」で生産できることが重要である。本研究の提案モータは「フェライト磁石」と「丸銅線」という低価格な材料で一般的な駆動用モータと同等以上の性能を実現できるため、将来的に自動車駆動用モータの有力な選択肢となる可能性を持っている。

研究成果の概要（英文）：In recent years, the production volume of permanent magnet synchronous motors, which serve as the drive source for electric vehicles, is expected to increase significantly. Therefore, there is a need not only for higher performance motors, but also for lower costs. However, in order to achieve high performance, many current motors use expensive neodymium sintered permanent magnets and rectangular copper wire. Therefore, in this research, I proposed a new rotor structure and optimized the stator tip shape for an axial gap motor, thereby achieving performance equivalent to or better than conventional motors while using low-cost ferrite permanent magnets and round copper wire. We have succeeded in developing a "traction motor that achieves both high performance and low cost." Finally, I developed a prototype of the proposed axial gap motor and demonstrated its effectiveness through experiments.

研究分野：電気機器

キーワード：省エネルギー 自動車駆動用モータ 電気自動車(EV) アキシアルギャップモータ 低コスト 高効率
フェライト磁石

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

近年、自動車の電動化を推進するために、電気自動車(EV)の駆動源となる永久磁石同期モータの生産台数が大幅に増加すると予想されている。駆動用モータの更なる高性能化はもちろんのこと、生産台数の増加に対応するため、低コスト化との両立も求められている。しかし、現状の駆動用モータの多くは高性能化を実現するために、高価格なネオジム焼結磁石や平角銅線を使用しており、コストが高くなる一方であった。以上の背景から、本研究では低価格なフェライト磁石と丸銅線を用いながらも、従来モータと同等以上の性能を実現できる『高性能化と低コスト化を両立した自動車駆動用モータの開発』を目指している。これが実現できれば、将来的な自動車駆動用モータの有力な選択肢になり得ると同時に、ネオジム焼結磁石等のように大半を中国からの輸入に依存している材料を使用せずともモータを生産可能となるため、リスク回避の観点からも有用であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究の目的は『高性能化と低コスト化を両立した自動車駆動用モータ』を開発することであるが、そのために「フェライト磁石」と「丸銅線」を採用したアキシヤルギャップモータ(AGM)を検討する。フェライト磁石と丸銅線の両材料は低価格であるものの、AGMの磁気装荷と電気装荷の低下を招いてしまう。そこで、両材料の課題を改善しつつ高性能化を実現できる構造を提案する。また、本研究では提案構造を用いたAGMを試作して、実験により有効性を検証する。加えて、提案AGMが市販の自動車に搭載されている駆動用モータに対して、性能面で優れていることも検証する。

3. 研究の方法

本研究では、主に以下の項目を実施した。それぞれの項目の成果については次章で記述する。

(1) 「新しい回転子構造の提案」と「固定子つば形状の最適化」

本研究では低コスト化のためにフェライト磁石と丸銅線を用いているが、両材料の磁気装荷と電気装荷を低減してしまうという課題を改善するための構造を三次元有限要素法(3D-FEA)による磁場解析で探索する。市販の自動車駆動用モータと同サイズで同等の出力を実現できたかを課題改善の判断指標とした。

(2) 冷却を考慮したモータケースの設計と提案AGMの図面作成

自動車駆動用モータは電機子巻線の電流密度が高く発熱が非常に大きいため、実機において冷却機構を検討する必要がある。しかし、AGMは一般的なモータとはケースとの接触面が異なるため、新たに冷却機構を構築する必要があり、製造性を加味してCADソフト上で検討する。

(3) 提案AGMの試作機における有効性の実験的検証

提案AGMの試作機を製造した後に、検討する自動車の駆動用システムにおいて想定されるモータの全運転範囲において実機検証を行う。その際に、全運転範囲における効率と、最大トルク特性に着目し、提案AGMの有効性を明らかにする。

(4) 一般的な自動車駆動用モータに対する提案AGMの優位性の検証

提案AGMの有効性をより明確にするために、一般的な自動車駆動用モータとの比較を実施する。一般的な自動車駆動用モータには、高価なネオジム焼結磁石と平角銅線を採用したモデルを選定し、同サイズにおける効率面での比較を実施し、提案AGMの優位性を示す。

4. 研究成果

(1) 「新しい回転子構造の提案」と「固定子つば形状の最適化」

表1は、提案AGMの開発を実施するにあたって設定した駆動用モータとしての要求仕様であり、市販車の駆動用モータと同様のものである。本研究における提案AGMは表1の仕様を示した通り、市販の駆動用モータと同じ運転範囲、サイズ、電源の条件下において設計した。

図1は市販車に搭載された既存の駆動用モータであり、半径(ラジアル)方向に磁束が流れるため、ラジアルギャップモータ(RGM)と呼ばれる一般的な構造である。自動車駆動用モータには「小型&高出力」が求められるため、図1のRGMのように、永久磁石には「ネオジム焼結磁石」、固定子の巻線には「平角銅線」がよく使用される。ネオジム焼結磁石は市販品で最も高性能である一方で、NdやDy等のレアアースを含むため高価で、供給が不安定である。また、平角銅線は占積率を向上できるが、丸銅線と比べて製造難易度とコストが高い等の問題がある。以上より現状のモータは高価であり、材料供給も不安定という課題がある。今後の生産数増加に伴い、EV等を普及させるためには、上記課題の改善

表1 開発する駆動用モータの要求仕様

Max. power	22 kW
Max. torque	160 Nm
Max. speed	6800 rpm
DC-bus voltage	173 V
Max. inverter current	220 Arms
Axial length (including coil end)	78.6 mm
Outer diameter	261.6 mm

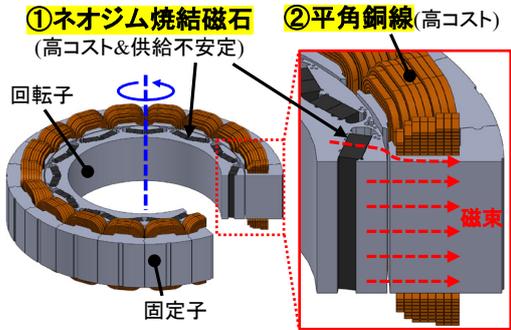


図1 既製品の自動車駆動用モータ(RGM)

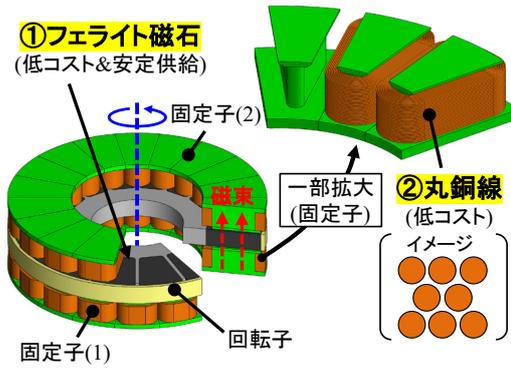


図2 本研究における開発モータ(AGM)

が重要である。そこで本研究では、図2の「フェライト磁石」と「丸銅線」を用いたアキシシャルギャップモータ(AGM)を提案し、同サイズのRGM(図1)よりも低コストで「同等以上の性能」を実現できることを目指す。なおAGMは一般的なRGMと異なり、軸(アキシアル)方向に磁束が流れるためアキシアルギャップモータと呼ばれる。フェライト磁石は安価であり、Nd, Dy等のレアアースを含まないため安定した生産が可能である。また丸銅線の採用により、生産性やコストで更に有利となる。

一方でフェライト磁石はネオジウム焼結磁石に比べて磁束量が約70%少ない。加えて、丸銅線は平角銅線に比べて占積率が低下するため、電機子巻線が発生できる磁束量も低下してしまう。その結果、必要な最大トルク160Nm(表1)が出力できないという課題が発生してしまった。更に、磁石の磁束が低下するとモータの力率が低下してしまうため、工夫無しでは必要な最大出力22kW(表1)が得られない課題があった。

そこで本研究では、1つめの対策として図3に示すような新しい回転子構造を提案した。図3はAGMの回転子の基本(上図)及び改良(下図)構造と、最高速度における応力分布を示している。基本構造は、著者が特別研究員奨励費(20J10951)における研究で新たに提案したコアレス回転子構造であり、産業用途の小型モータの高効率化に適した構造であった。しかし、大型の自動車駆動用モータに適用した場合、十分な機械強度を保つためには、磁石の有効表面積が犠牲となり、トルクが不十分であった。そこで本研究では、降伏点強度が高い保護リング(CFRP)で直接磁石を抑える新構造を提案する。その結果、機械強度の安全率を保ちつつ、磁石の有効表面積を32%増加でき、フェライト磁石及び丸線を用いているにもかかわらず、目標トルク160Nmを達成できることを3D-FEAの磁場解析で明らかにした。

また、一般的にAGMでは、軸方向を含めて3次的に磁束が流れるため、固定子コアに磁気的等方性を持つ圧粉磁芯(SMC)を用いる。SMCは鉄粉を金型により圧縮成形して製造するが、これまでの固定子コアの先端部分(つば)は、厚みが薄いため加工技術の観点から単純な板のような構造をしていた。そのため、これまでAGMでの力率・出力向上のための適切なつば形状は未検証であった。そこで本研究では、近年のSMCの加工技術の向上に着目し、フェライト磁石による力率・出力低下を補うため、AGMのつば形状の最適化を実施した(図4)。図5はつばのパラメータ変更時の提案AGMの最大トルクを示しており、つば形状の影響を大きく受けている。提

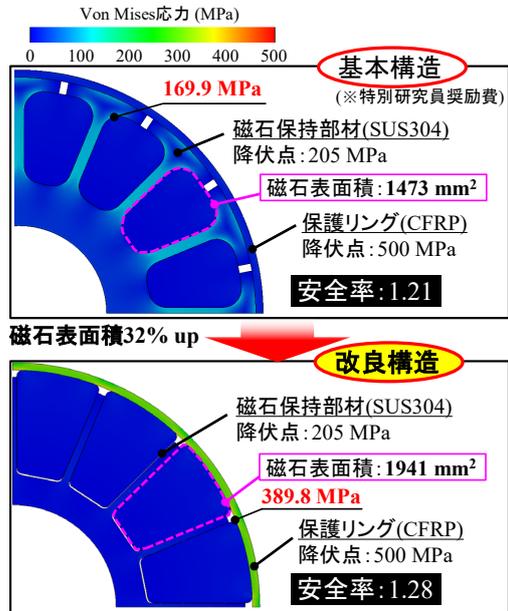


図3 基本(上)/改良(下)回転子の応力分布図

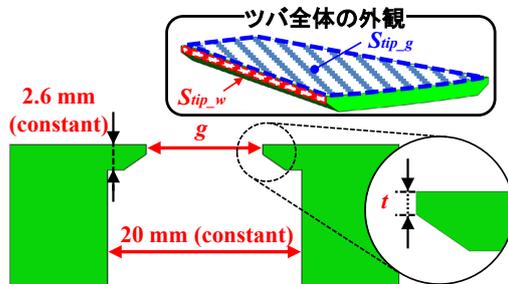


図4 固定子つば形状の最適化(設計変数)

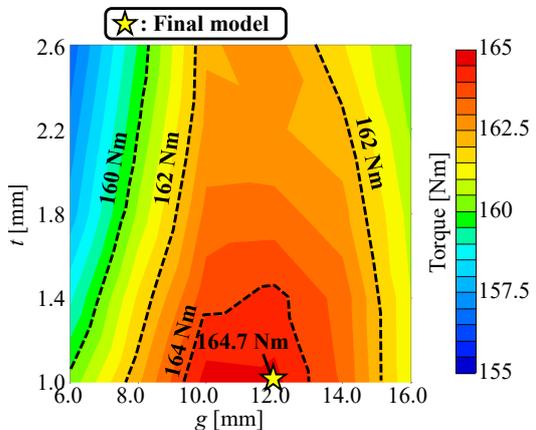


図5 つば形状による最大トルク推移

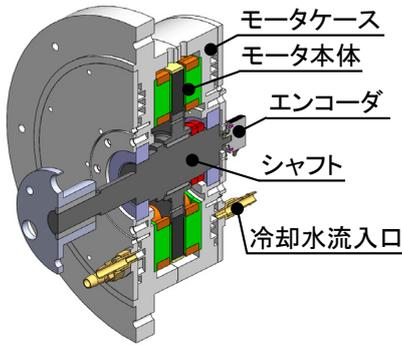


図 6 提案 AGM の冷却機構を含めたモデル

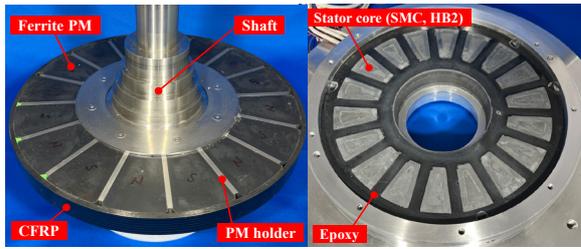


図 7 試作機の回転子(左)/固定子(右)の外観

案 AGM は最大トルクとなる $t = 1.0 \text{ mm}$, $g = 12.0 \text{ mm}$ のパラメータを選定しており、この結果から SMC の加工技術によって AGM のトルク性能が向上できることを示している。

(2) ケースの設計と提案 AGM の図面作成

AGM は一般的な RGM と構造が異なるため、ケースと固定子の接触面、すなわち放熱面が異なる。そのため、ケースを含めた冷却機構を新たに設計する必要があった。そこで本研究では図 6 に示すようなモーターケースを含めた提案 AGM の CAD モデルを作成した。各部品を図面化し、試作機を製造することで、冷却性能を含めて提案 AGM の有効性を実験で検証した。実験結果については次項に記載する。

(3) 試作機における有効性の実験的検証

図 7 に本研究の提案 AGM の試作機の外観を示す。また、図 8 に基底速度において電機子電流を増加した際の平均トルクの解析値と実測値の比較を示している。3D-FEA によるトルクと実測値は傾向と数値共によく一致しており、試作機は精度良く作られていることが分かる。また、実機においても表 1 に示している自動車駆動用モータとして必要な最大トルク 160 Nm を定格電流以内で発生することができている。この結果から、提案 AGM はフェライト磁石と丸銅線を用いているにも関わらず、必要なトルク特性を満たせることを明らかにした。

図 9 は提案 AGM の試作機において測定した全運転範囲の効率マップを示している。高速領域においても要求仕様を満たす定出力特性が得られていることと同時に、常用領域で 95% を超える高効率特性を広い範囲で達成している。したがって、提案 AGM は低価格な材料を使用しながら市販車の駆動用モータに必要な仕様を満たしつつ、高効率特性を実現することが可能である。

(4) 「新しい回転子構造の提案」と「固定子つば形状の最適化」

図 10 に提案 AGM と RGM の最高速・最大出力時の誘起電圧波形を示す。提案 AGM は高効率なだけでなく、電圧波形の THD も市販車用の RGM に対して大きく低減することができる。

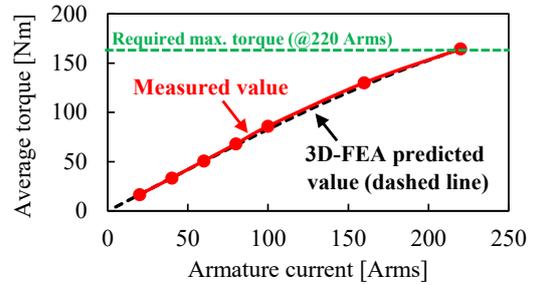


図 8 電流に対するトルク(解析及び測定値)

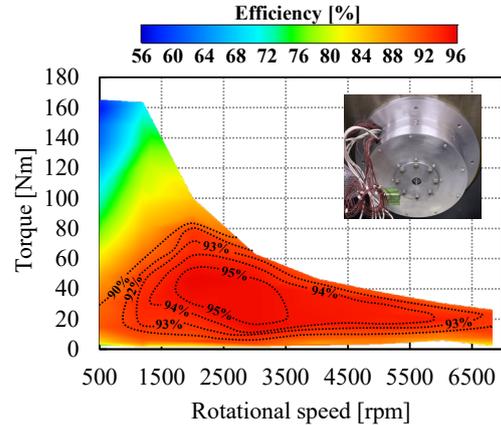
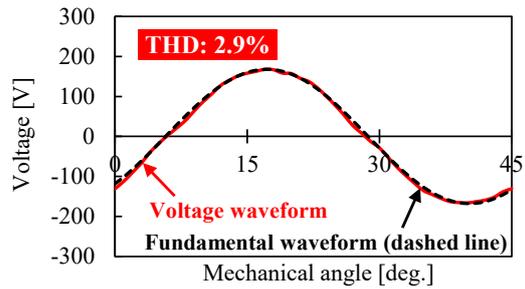
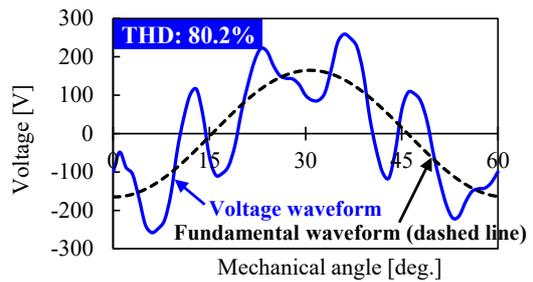


図 9 提案 AGM の実測した効率マップ



(a) 提案 AGM



(b) 市販車搭載の RGM

図 10 最高速(6800 rpm), 最大出力(22 kW) 時の提案 AGM と RGM の電圧波形の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Tsunata Ren, Takemoto Masatsugu, Ogasawara Satoshi, Saito Tatsuya, Ueno Tomoyuki	4. 巻 58
2. 論文標題 SMC Development Guidelines for Axial Flux PM Machines Employing Coreless Rotor Structure for Enhancing Efficiency Based on Experimental Results	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 3470 ~ 3485
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIA.2022.3154336	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 -

1. 著者名 R. Tsunata, M. Takemoto, J. Imai, T. Saito and T. Ueno	4. 巻 59
2. 論文標題 Comparison of Thermal Characteristics in Various Aspect Ratios for Radial-Flux and Axial-Flux Permanent Magnet Machines	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transaction on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 3353-3367
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIA.2023.3255845	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 -

1. 著者名 Tao Xianji, Takemoto Masatsugu, Tsunata Ren, Ogasawara Satoshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Novel Rotor Structure Employing Large Flux Barrier and Disproportional Airgap for Enhancing Efficiency of IPMSM Adopting Concentrated Winding Structure	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 2848 ~ 2862
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2022.3232843	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 Tsunata Ren, Takemoto Masatsugu, Imai Jun, Saito Tatsuya, Ueno Tomoyuki	4. 巻 11
2. 論文標題 A Proposal of an Axial-Flux Permanent-Magnet Machine Employing SMC Core With Tooth-Tips Constructed by One-Pressing Process: Improving Torque and Manufacturability	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 109435 ~ 109447
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2023.3321829	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 Tsunata Ren, Izumiya Kosuke, Takemoto Masatsugu, Imai Jun, Saito Tatsuya, Ueno Tomoyuki	4. 巻 -
2. 論文標題 Designing and Prototyping an Axial-Flux Machine Using Ferrite PM and Round Wire for Traction Applications: Comparison with a Radial-Flux Machine Using Nd-Fe-B PM and Rectangular Wire	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 1~15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIA.2024.3371959	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 -

[学会発表] 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 K. Izumiya, R. Tsunata, M. Takemoto, J. Imai, T. Saito and T. Ueno
2. 発表標題 Axial-Flux Machine Using Ferrite PM and Round Wire Competitive to Radial-Flux Machine Using Nd-Fe-B PM for HEV Traction
3. 学会等名 IEEE International Conference of Electrical Machines (ICEM2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 和泉谷洗輔, 網田錬, 竹本真紹, 今井純, 齋藤達哉, 上野友之
2. 発表標題 フェライト磁石と丸線を採用した自動車駆動用アキシアルギャップモータにおける高出力密度化及び高効率化のための検討
3. 学会等名 令和4年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Tsunata, M. Takemoto, J. Imai, T. Saito and T. Ueno
2. 発表標題 Comparison of Thermal Characteristic in Various Aspect Ratios of Radial-Flux and Axial-Flux Permanent Magnet Machines
3. 学会等名 IEEE ENERGY CONVERSION CONGRESS and EXPO. (ECCE2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 綱田錬, 竹本真紹, 今井純, 齋藤達哉, 上野友之
2. 発表標題 アキシャルギャップモータ及びラジアルギャップモータにおける扁平率毎の熱特性の比較検討
3. 学会等名 令和4年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Tsunata, M. Takemoto, J. Imai, T. Saito and T. Ueno
2. 発表標題 The Superiority of Efficiency Considering Harmonic Current caused by PWM inverter in Axial-Flux PM Machine Using Ferrite PM for Traction applications: Comparison to Radial-Flux PM Machines Using NdFeB PM
3. 学会等名 IEEE ENERGY CONVERSION CONGRESS and EXPO. (ECCE2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 綱田錬, 竹本真紹, 今井純, 齋藤達哉, 上野友之
2. 発表標題 PWM駆動時における自動車駆動用アキシャルギャップモータのラジアルギャップモータに対する効率優位性の検証
3. 学会等名 令和5年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2023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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------