

令和 5 年 6 月 18 日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04344

研究課題名(和文) トロイダル巻線構造高トルク密度アキシアルギャップ誘導モータの開発

研究課題名(英文) Development of High Torque Density Axial Gap Induction Motor with Toroidal Winding Structure

研究代表者

吉田 征弘 (Yoshida, Yukihiro)

秋田大学・理工学研究科・講師

研究者番号：60725399

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高トルク化が可能なアキシアルギャップ構造に着目し、同体格のラジアルギャップ誘導モータの約2倍のトルク特性が得られることを明らかにすることを目的としている。設計したモータの特性を実機で検証するため、試作したモータをモータ特性評価ベンチで負荷試験を行い、モータの特性を取得した。モータ制作の過程でコイルとコア間の絶縁を確保するための絶縁フィルムがギャップにはみ出してしまい、ギャップ管理を設計通りに行うことができなかったが、解析により制作したギャップ長での速度-トルク特性は概ね一致したため、計算の精度は確認できた。今後は組付け手順を見直し、再度実機にてモータ特性を取得する予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

アキシアルギャップ構造は、従来構造であるラジアルギャップ構造よりギャップ面積を大きくしやすいことから、トルク密度向上に効果的であることが報告されている。また、固定子のスロットからバックヨークに集中的に巻線を施すトロイダル巻は、分布巻と同様の起磁力が得られ、かつ占積率の向上が可能であるため、損失の低減やトルクの向上が期待できる。

EVやHEVの駆動モータに用いられる磁石はネオジム焼結磁石であり、資源リスクにさらされている。本研究の成果により、レアアースフリーモータで出力特性の向上が実現できれば、資源リスクは大幅に軽減され、EV・HEVの更なる普及の加速につながる事が予想される。

研究成果の概要(英文)：In this study, we propose an induction motor with a toroidal-wound axial gap structure that can achieve high torque. The purpose of this study is to clarify that the torque characteristic of the proposed motor is approximately twice that of a radial-gap induction motor of the same size. To verify the characteristics of the designed motor on an actual machine, a prototype motor was subjected to load tests on a motor characteristics evaluation bench to obtain the motor characteristics. During the process of producing the motor, the insulating film used to ensure insulation between the coil and core extended into the gap, and the gap management could not be carried out as designed. The accuracy of the calculation was confirmed by comparing with measured torque characteristics. In the future, we attempt to modify the assembly procedure and obtain the motor characteristics again on the actual machine.

研究分野：工学

キーワード：アキシアルギャップ誘導モータ トロイダル巻 誘導モータ

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年、地球温暖化などの環境問題への関心が高まっており、自動車業界では、二酸化炭素の排出量が少ない電気自動車（EV）や、ハイブリッド電気自動車（HEV）の普及が拡大している。EV・HEVの駆動用のモータには一般的に永久磁石モータが用いられている。この理由は一般的に永久磁石モータが他の種類のモータと比して高トルク、高効率であるためである。しかしながら、永久磁石モータの永久磁石には希土類が用いられており、価格や供給量の安定性に課題が存在する。したがって、希土類材料を使わないモータであるレアアースフリーモータの開発が希求されている。

誘導モータは永久磁石を使わないレアアースフリーモータであり、回転子は鉄心と二次導体から形成されるため堅牢で、高速回転に適している。これによって高出力化が見込めることからEV・HEV駆動用モータへの適用例がある。さらに、非通電時であれば固定子巻線等には逆起電力が発生せず、惰性で回転し続ける際の損失が小さいことから、4輪駆動モード用の補助駆動モータとしてHEVへの適用例がある。しかし、誘導モータは永久磁石モータと比較して効率、トルク密度が劣るため、搭載容積の限られる自動車への採用例は比して少ない。効率・トルク密度の向上を達成することによって、先述の誘導モータの利点を活用したEV・HEVの開発が期待できるため、誘導モータの高トルク密度化が強く望まれている。

2. 研究の目的

本研究では、高トルク化が可能なアキシシャルギャップ構造に着目し、これに適した制作が可能な誘導モータの最適形状を明らかにするとともに、同体格のラジアルギャップ誘導モータの2倍のトルク特性が得られることを解析および実験の両面から明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、トロイダル巻固定子を用いたシングルステータ・ダブルロータのアキシシャルギャップ誘導モータを設計し、トルク密度が従来のラジアルギャップ誘導モータの2倍となることを実測に基づく検証を行う。

- (1) モータの構造や磁気回路を計算により最適化し、トルク密度が向上するモータ形状を導出する。
- (2) 計算で得られたモータ形状で試作し、実証試験により汎用の誘導モータの2倍のトルク密度となることを証明する。

4. 研究成果

(1) トロイダル巻アキシシャルギャップ誘導モータの設計

図1に比較対象となるラジアルギャップ誘導モータ（RGIM）の解析モデルの概観図を示す。モデルは実機の寸法を参照して作成した。RGIMの固定子の外径は100 mm、コアの積厚は30 mm、コイルエンドを考慮した場合の実効厚さは58 mm、ギャップ長は0.35 mmである。巻線方法は分布巻であり、線径は0.5 mmを40ターン巻いてある。極数は4極、スロット数は24スロットである。回転子直径は54.5 mm、二次導体スロット数は21である。表1に比較対象であるRGIMの諸元を示す。なお、今回作成した解析モデルではスキューは考慮しておらず、RGIMの体格を基準としてアキシシャルギャップ誘導モータ（AGIM）を設計した。

図2に提案するアキシシャルギャップ誘導モータ（AGIM）の固定子の巻線配置図を示す。コイルは固定子コアにトロイダル状に巻かれており、U相、V相、W相はそれぞれ図2（a）、（b）、（c）のように配置される。トロイダル巻線に電流を流すと、分布巻を施したときと同様の起磁力分布をアキシシャル方向に発生させる。コイルはスロットからヨークへと集中的に巻かれるため、コイルエンド部分における巻線同士の干渉がない。このことからRGIMでは11%であった占積率を40%へと向上させて設計を行った。さらに、トロイダル巻は固定子平面両側へ磁界を発生させることができるため、スタータをロータで挟み込む構造である、シングルステータ・ダブルロータ構造を採用した。これによってトロイダル巻によって発生する磁界を有効に活用することができるうえ、ギャップ面積が2倍となるため、トルク密度の増加が期待できる。

図3にロータの構造を示す。二次導体はスポーク状の導体バーの両端に端絡環が接続され構成される。導体バーの断面積はRGIMと同等としている。この二次導体が鉄心に配置されて回転子が構成される。回転子の内径と外径は固定子と同じ寸法を用いた。スロット開口幅はRGIMと同等である。提案モータはダブルロータ構造であるため、図3の回転子が固定子を挟む構造となる。

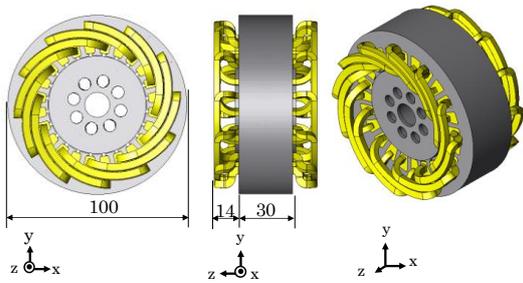
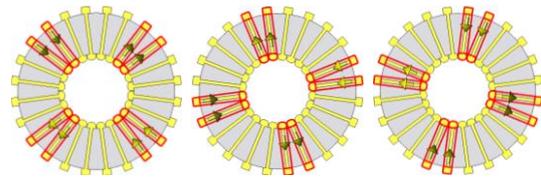


図 1 比較対象の RGIM



(a) U相 (b) V相 (c) W相
図 2 AGIM 用トロイダル巻の巻線配置

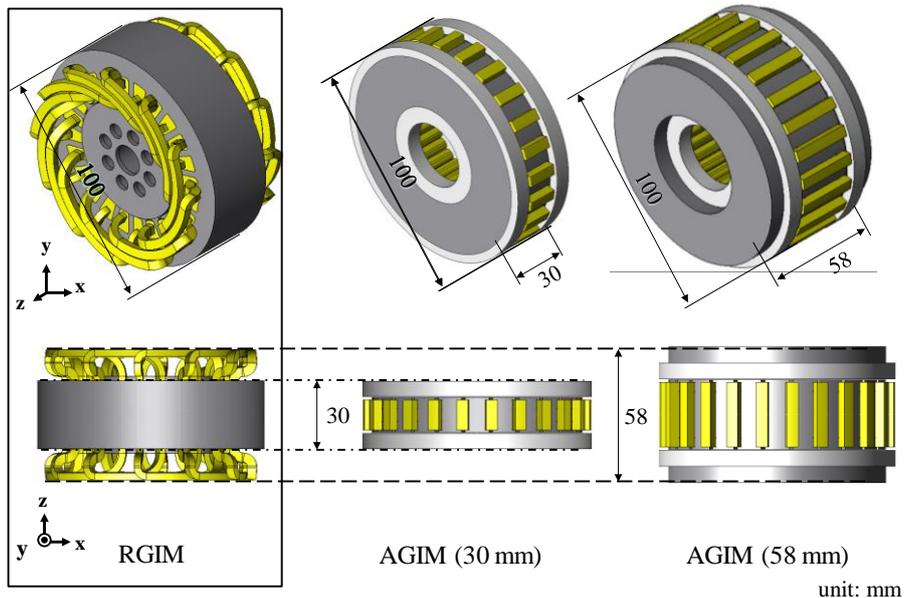


(a) 回転子導体概観図 (b) 回転子磁心概観図 (c) 回転子概観図

図 4 AGIM の回転子構造

図 5 に比較対象の RGIM, 軸長が 30 mm となるように設計した AGIM, 軸長が RGIM と同等の 58 mm となるように設計した AGIM を示す。AGIM (30mm) と AGIM (58mm) の違いは、固定子コアのバックヨーク部の厚さのみで、スロット部およびティース部の形状は同じである。

設計した AGIM と比較対象の s - T 特性を FEM によって解析し、RGIM との比較を行った。図 6 に s - T 特性の解析結果を示す。この図より、設計した AGIM (30 mm) の最大トルクは RGIM とほぼ同等の値であり、AGIM (58 mm) の最大トルクは RGIM と比べるとおよそ 2 倍の値となった。 s - T 特性において示された最大トルクを、コイルエンドを含むモータ体積で除した値をトルク特性として算出した。RGIM の最大トルクは $0.617 \text{ N}\cdot\text{m}$, AGIM(30 mm) の最大トルクは $0.686 \text{ N}\cdot\text{m}$, AGIM(58 mm) の最大トルクは $1.266 \text{ N}\cdot\text{m}$ である。RGIM と AGIM(58 mm) の体積は 0.456 L , AGIM(30 mm) の体積は 0.236 L となり、トルク密度は RGIM : $1.470 \text{ N}\cdot\text{m/L}$, AGIM(30 mm) : $2.15 \text{ N}\cdot\text{m/L}$, AGIM(58 mm) : $2.05 \text{ N}\cdot\text{m/L}$ である。この結果より、RGIM と最大トルクが同等であり、かつ体積が小さいため、AGIM(30 mm) のトルク密度が最大であった。AGIM(58 mm) は RGIM と等しい体積であるため、最大トルクの比がそのままトルク密度の比となった。しかし、どちらの場合においても、RGIM と比較してトルク密度が高いことから、提案した AGIM のトルク密度向上がなされたといえる。



unit: mm

図 5 設計したモータの概観図

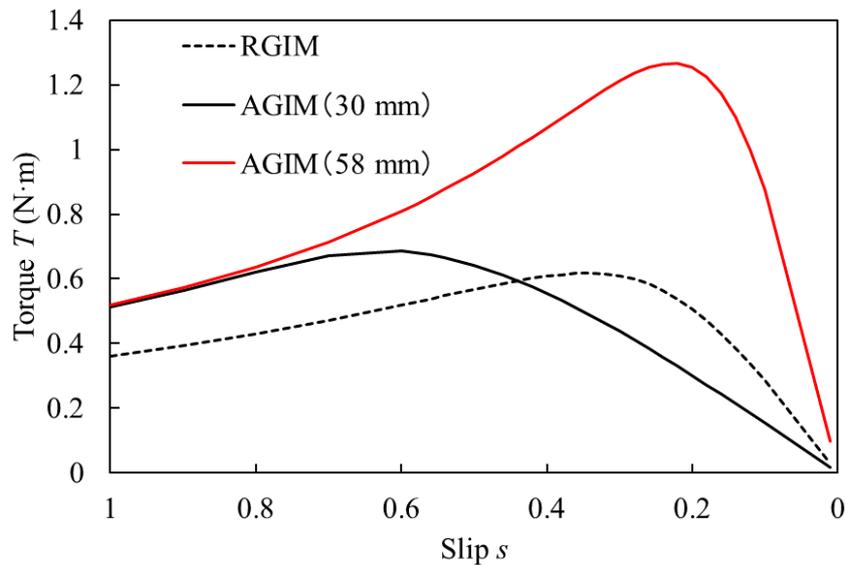
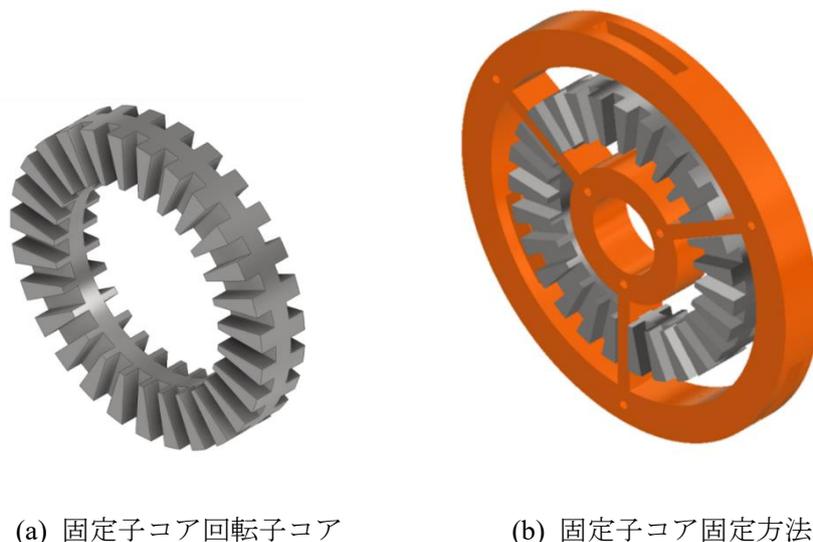


図 6 s - T 特性解析結果

(2) 試作機による検証

アキシシャルギャップ誘導モータは軸方向に固定子と回転子に対向しているため、固定子をケースに固定する箇所は固定子コアの内径側か外形側となる。しかしながら、設計した AGIM はコイルをトロイダル巻としたため、内径側、外径側がともにコイルエンドとなってしまい、コアを焼き嵌め等の手法で直接ケースにすることが難しい。そこで、設計では 24 スロットとしていたスロット数を 27 に増やし、固定子スロット部に樹脂製のバーを通してケースに固定する構造を採用した。図 7 (a) に環状の巻鉄心をワイヤーカットで凹凸形状に加工した固定子コアを、同図 (b) 固定子固定のための樹脂の形状を示す。固定のために 3 スロット分はコイルを巻くことができないため、トルクは低下してしまう。

図 8 にトロイダル巻線を施した固定子コアのギャップ面の写真を示す。今回の試作では、巻線が固定子コアからはみ出してしまい、正確なギャップ管理ができていない。図 9 に実機で測定したトルク特性を示す。同図 (a) は RGIM の実測値と試作した AGIM の実測値の比較である。AGIM の実測値は、設計よりもギャップ長が約 3.4 倍に増加してしまったため、設計に比べると大きくトルクが低下してしまった。図 9 (b) は計算値と実測値の比較である。設計したギャップ長が 0.35 mm の特性に比べて実機はトルクが低下しているのがわかる。また、実機に合わせてギャップを 1.2 mm で計算したところ、実測と計算が概ね合っていることから、コイルを巻き直して設計通りのギャップ管理ができれば、トルク密度の向上を実証することができることがうかがえる。



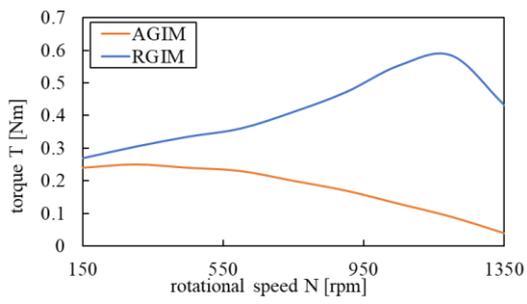
(a) 固定子コア回転子コア

(b) 固定子コア固定方法

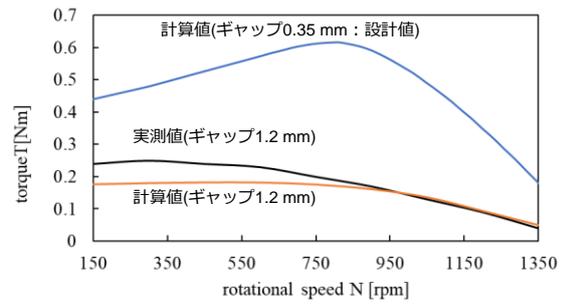
図 7 試作機の固定子構造



図 8 試作機の固定子ギャップ面



(a) RGIM との比較



(b) 計算値との比較

図 9 実機により得られた測定値

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 照井 智理、吉田 征弘、田島 克文 | 4. 巻 6 |
| 2. 論文標題 アキシシャルギャップ誘導モータの設計手法に関する検討 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 日本磁気学会論文特集号 | 6. 最初と最後の頁 74～80 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20819/msj.tmsj.22TR512 | 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4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 照井 颯志、吉田 征弘、田島 克文 |
| 2. 発表標題 アキシシャルギャップ誘導モータの設計手法に関する検討 |
| 3. 学会等名 第45回日本磁気学会学術講演会資料 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 照井 智理、田島 克文、吉田 征弘 |
| 2. 発表標題 リラクタンスネットワーク解析による アキシシャルギャップ誘導モータの特性算定に関する研究 |
| 3. 学会等名 2020年度電気関係学会東北支部連合大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|-------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 照井 颯志、吉田 征弘、田島 克文 |
| 2. 発表標題 磁性くさびを用いたアキシシャルギャップ誘導モータの高トルク化に関する研究 |
| 3. 学会等名 2020年度電気関係学会東北支部連合大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 照井智理, 吉田征弘, 田島克文 |
| 2. 発表標題 RNAに基づくアキシャルギャップ誘導モータの効率マップ作成手法に関する検討 |
| 3. 学会等名 電気学会マグネティックス研究会 |
| 4. 発表年 2021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 |
|---------|---------|
|---------|---------|