

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 19 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289067

研究課題名(和文) アキシャルギャップSRモータと電気自動車への応用に関する研究

研究課題名(英文) Study on Axial Gap Switched Reluctance Motor for Electric Vehicle Application

## 研究代表者

一ノ倉 理 (Ichinokura, Osamu)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20134017

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：電気自動車に使用されるモータにはネオジムとジスプロシウムといった希土類元素が使われており、資源上の理由からその削減が求められている。スイッチトリラクタンスモータ(以下SRモータ)は、希土類フリーモータとして期待されるが、従来のモータと比較して効率や出力が劣るという課題を抱えていた。そこで、磁束を軸方向に流すアキシャルギャップ構造に着目し、これをSRモータに適用して種々検討を行った。その結果、従来の希土類モータを上回る性能を達成し、さらに、実際に小型の電気自動車を用いた走行試験にも成功した。

研究成果の概要(英文)：Rare earth materials such as neodymium and dysprosium are used in the motors for electric vehicles, that reduction is required for resource reasons. Switched reluctance(SR) motor is expected as rare earth material free motor. But it has less efficiency and output compared with conventional motor. Then, we focused on axial gap structure which magnetic flux flows to axial direction, and we applied the axial gap structure to SR motor. As a result, better performance of the proposed axial gap SR motor than that of is achieved than that of traditional rare earth motor. In addition, driving tests using small electric cars with two axial gap SR motors was done successfully.

研究分野：電気機器

キーワード：SRモータ インホイールモータ アキシャルギャップモータ 電気自動車

## 1. 研究開始当初の背景

環境対策と脱石油資源からハイブリッド自動車や電気自動車の普及は急務であるが、キーとなるのは二次電池、モータ、およびインバータなどの要素技術である。電気自動車の性能を左右する二次電池の高性能化は喫緊の課題であるが、希土類磁石に使用されるネオジウムとジスプロシウムは地域偏在性が強く、供給量や価格が安定しないという問題を抱えている。その対策として国内外でジスプロシウムを削減した磁石や、代替磁石の開発が進められているが、同時に、希土類磁石を削減あるいは使わないモータの研究も活発化している。たとえば、フェライト磁石を用いたアキシアルギャップモータ(北海道大学、日立製作所)、フェライト磁石を活用したIPMモータ(伊 Padova 大学)、界磁巻線とフェライト磁石を併用した同期モータ(三菱電機)、フェライト磁石と圧粉鉄心を用いたクローポール型モータ(名古屋工大)、磁石アシストタイプ誘導モータ(仏 ESIEE)、Transverse Flux(横磁束)型PMモータ(独 Stuttgart 大学)、磁石を併用したリラクタンスマータ(大阪府立大学、米国 Florida 大学、英 Sheffield 大学、伊 Torino 大学)、高ケイ素鋼板を用いたSRモータ(東京工大)などが報告されている。しかし、フェライト磁石は磁束密度と減磁耐力が低く、電気自動車の主機モータとしての実用化には課題も多い。一方、スイッチトリラクタンスマータ(以下SRモータ)は、回転子に巻線がなく永久磁石も使用しないため希土類フリーモータとして期待されるが、トルクリプルと騒音が大きく、希土類(ネオジウム)磁石モータと比較して効率や出力密度も小さいという課題を抱えていた。

## 2. 研究の目的

これまで我々の研究グループでは、インホイールダイレクトドライブ電気自動車に適用するために、アウトロータ型SRモータの研究を行ってきた。しかしラジアルギャップ構造で低速大トルクを得るには積み厚を増やす必要があり、インホイールのように扁平形状が要求されるモータには適さない。そこでアキシアルギャップ構造に着目し、回転子ならびに固定子の形状について種々検討を行った。その結果ダブルロータ構造のアキシアルギャップSRモータにすれば、ラジアルギャップ方式のSRモータと比較してモータ出力密度が1.7倍程度向上することを見出した。これは現状のハイブリッド自動車に使用されている希土類磁石モータの出力密度の84%に相当する。アキシアルギャップSRモータはこれまで報告例がなく、極数や極形状など設計パラメータが極めて多い。これらの最適化を図ることによって、さらなる出力の向上やトルクリプルと騒音の低減も期待される。本研究ではこのような着想のもとにアキシアルギャップSRモータの開発と

電気自動車への適用試験を行うことを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1)アキシアルギャップSRモータの設計指針の確立

平成16年度基盤研究Bにおいて開発したラジアルギャップ方式のインホイールSRモータをベースとして出力密度の向上とトルクリプル低減を目的としてアキシアルギャップSRモータの鉄心形状の最適化を行った。アキシアルギャップSRモータは、固定子ならびに回転子の極ピッチ、極の断面形状、高さ、ヨークの厚みなど設計パラメータが極めて多い。さらに、トルクリプル低減には回転子極のスキュー構造なども検討する必要がある。そこで、有限要素法による磁界解析のほか、我々の研究グループで提案しているRNAによる高速モータ解析手法を駆使して最適形状を探索した。

### (2)アキシアルギャップ型SRモータの最適駆動方式の検討

アキシアルギャップSRモータの駆動方法は、ラジアルギャップSRモータと同様であるが、アキシアルギャップモータでは固定子極と回転子極の断面形状が同一とは限らないため、最適な駆動方式は未だ確定していない。本研究では最適形状の探索と平行して最適駆動方式についてもシミュレーションによる検討を行った。

### (3)アキシアルギャップSRモータの支持機構の検討

アキシアルギャップSRモータは軸方向の電磁力が極めて大きくなるため、支持機構の検討も重要な事項である。固定子の支持構造が複雑になるためできるだけシンプルで十分な強度が確保できるような支持機構について検討を行った。

### (4)駆動回路の設計

検討した最適駆動方式を実現するための駆動回路と制御基板の設計を行った。前進、後退、回生制動のほかに、瞬時電流制御によるトルクリプル低減方式も取り入れた。

### (5)モータと駆動回路の製作ならびに単体の特性試験

以上の検討結果に基づいて、アキシアルギャップSRモータとその駆動回路ならびに制御基板を製作した。次いでトルクメータにより試作モータのトルク速度特性や電流特性を詳細に測定した。

### (6)電気自動車用アキシアルギャップSRモータの追加製作の試験

(5)の試験結果に基づき、アキシアルギャップSRモータとその駆動回路を追加製作した。インホイールドライブにはモータが最低

2台必要になるが、1台は(5)で製作したモータを利用し、もう1台を新たに制作した。その際、(5)の試験結果によってはロータの支持構造等を見直し、改良を行った。

(7)実装ならびに走行試験

(5)および(6)で製作したモータならびに駆動回路を電気自動車に実装し、走行試験を行った。

4. 研究成果

まず、シミュレーションベースでアキシャルギャップSRモータの極数や極形状などの設計パラメータの最適化を図り、同体格の希土類磁石モータと同等以上の性能を達成可能なSRモータの設計を達成できた。有限要素法による磁界解析のほかに、我々の研究グループが提案したRNAによる高速モータ解析手法を駆使して最適形状を探索した結果、希土類磁石モータと同等以上のトルク密度を発生可能なモータ形状を明らかにすることができた。また、アキシャルギャップSRモータの最適な直径・軸長比も明らかにすることができた。

これらの知見から、1人乗り小型電気自動車用アキシャルギャップSRモータの最適設計を行った。その結果、ほぼ同体格の減速ギヤ内蔵型希土類磁石モータと同等以上のトルクおよび出力性能を達成するアキシャルギャップSRモータの設計を明らかにした。また、アキシャルギャップSRモータは軸方向の電磁力が極めて大きくなり、振動や騒音につながるため、軸方向の電磁力が互いに打ち消されるように、ダブルステータ構造を採用し、その支持構造を考案した。さらに、ブレーキの取り付け、配線の取り回し、および排熱を考慮して実用的なハウジング構造を決定し、外注にてモータを試作した。図1に試作したアキシャルギャップSRモータの外観と内部を示す。

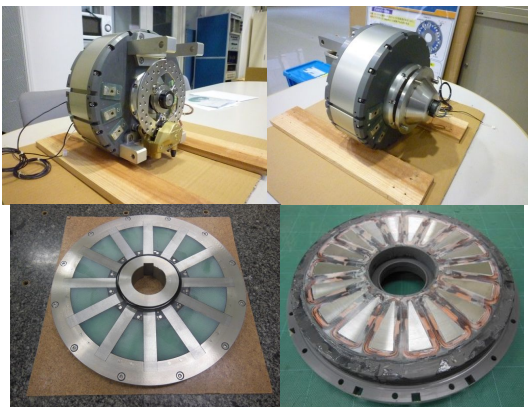
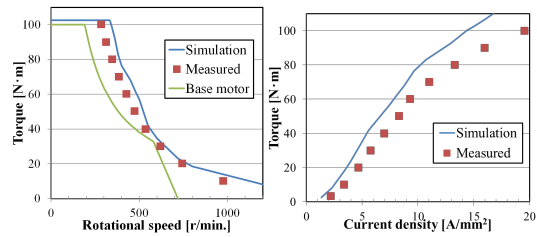


図1 試作したアキシャルギャップSRモータの外観の内部

試作したアキシャルギャップSRモータについて、現有のトルクメータとパワーアナライザなどの測定器をベースとして、追加で必要

な治具等を設計・制作して試験ベンチを構成した。試験ベンチを用いて負荷試験を行い、トルク 電流特性、速度 - トルク特性、および効率特性等を詳細に測定し、問題がないことを確認した。また、試験結果に基づき、支持構造およびロータ径を見直し、アキシャルギャップSRモータを追加製作し、2台目のアキシャルギャップSRモータについても特性試験を行い問題ないことを確認した。図2に電流測定結果を示す。回転速度 トルク特性はシミュレーション結果とほぼ同等の性能を達成し、ベースとなった希土類永久磁石モータと比較して全域で上回る特性を得たが、電流密度 トルク特性の測定結果はシミュレーションと比較して若干の劣化が見受けられた。これはハウジングにおける渦電流等が要因と考えられるが、走行に必要なトルク性能は確保できた。



(a)回転速度 トルク特性 (b)電流密度-トルク特性  
図2 アキシャルギャップSRモータの特性

一方、アキシャルギャップSRモータの駆動方法は、ラジアルギャップSRモータと同様であるが、設計したアキシャルギャップモータでは固定子極と回転子極の断面形状が異なるため、最適駆動方式についても検討を行い、従来の提案最適駆動方式を基本として、アキシャルギャップSRモータの制御方法を考案した。そこで、提案した最適駆動方式を実現するための駆動回路と制御基板の設計を行った。制御基板はFPGAとモデルベース設計を用いることによりシンプルでフレキシブルな取り扱いが可能となった。

製作した2台のアキシャルギャップSRモータならびに駆動回路を小型電気自動車に実装し、走行試験を行った。車両にアキシャルギャップSRモータを搭載した様子を図3に示す。



図3 車両へのSRモータの搭載

アキシャルギャップSRモータは板バネとアームにより車体に固定され、モータ軸に取り付けられたホイールハブに12インチのホールとタイヤを装着した。また、電池はもともと搭載されていた鉛蓄電池を流用した。走

行試験の結果，所望の走行性能が出ていることを確認した。

以上，アキシアルギャップSRモータを電気自動車に実用するために必要な事項を明らかにした。

#### 5．主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 3件)

時田崇広、後藤 博樹、一ノ倉 理、軸方向電磁力リップル低減によるアキシアルギャップ型SRモータの振動・騒音低減に関する検討、電気学会論文誌D(産業応用部門誌) 査読有、136巻、2016、248-253  
DOI:10.1541/ieejias.136.248

Kaitaro Isobe1、Kenji Nakamura、Osamu Ichinokura、A Consideration of High-Speed SR Motor for Electric Power Tools、Journal of the Magnetics Society of Japan、査読有、38巻、2014、194-198  
DOI:10.3379/msjmag.1409R001

T. Ogasawara、H. Goto、O. Ichinokura、A Study of Rotor Pole Shape in Outer Rotor Type SR Motor、Journal of the Magnetics Society of Japan、査読有、37巻、2013、273-277  
DOI:10.3379/msjmag.1305R009

〔学会発表〕(計 20件)

H. Goto、S. Murakami、O. Ichinokura、Design to Maximize Torque-Volume Density of Axial-Flux SRM for In-Wheel EV、The 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society、2015年11月12日、みなとみらい(横浜市)

S. Murakami、H. Goto、O. Ichinokura、A Study about Optimum Stator Pole Design of Axial-Gap Switched Reluctance Motor、The 21th International Conference on Electrical Machines、2014年9月4日、ベルリン(ドイツ)

H. Goto、O. Ichinokura、Model Prediction Based Instantaneous Torque Control of Switched Reluctance Motor、The 21th International Conference on Electrical Machines、2014年9月4日、ベルリン(ドイツ)

T. Tokita、H. Goto、O. Ichinokura、An effect of Electromagnetic Force on Acoustic Noise of Axial-gap In-wheel SR Motor、The 21th International Conference on Electrical Machines、2014年9月3日、ベルリン(ドイツ)

T. Ogasawara、H. Goto、O. Ichinokura、A Study of Rotor Pole Shape of In-Wheel Direct Drive SR Motor、15th European Conference on Power Electronics and

Applications、2013年9月5日、リール(フランス)

H. Goto、T. Shibamoto、K. Nakamura、O. Ichinokura、Development of High Torque Density Axial-gap Switched Reluctance Motor for In-wheel Direct-Drive EV、15th European Conference on Power Electronics and Applications、2013年9月4日、リール(フランス)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

なし

#### 6．研究組織

(1)研究代表者

一ノ倉 理 (ICHINOKURA, Osamu)  
東北大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：20134017

(2)研究分担者

中村 健二 (NAKAMURA, Kenji)  
東北大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：70323061

(3)研究分担者

後藤 博樹 (GOTO, Hiroki)  
東北大学・大学院工学研究科・講師  
研究者番号：90374959