



Title	EV・HEV向けフェライト磁石アキシタルギャップモータの高出力密度化に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	高橋, 朋平
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15090号
Issue Date	2022-03-24
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/85617">https://hdl.handle.net/2115/85617</a>
Rights(URL)	<a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a>
Type	doctoral thesis
File Information	Tomohira_TAKAHASHI_review.pdf, 審査の要旨



## 学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士(工学) 氏名 高橋 朋平

審査担当者 主査教授 小笠原 悟司  
副査教授 五十嵐 一  
副査教授 北 裕幸  
副査教授 竹本 真紹 (岡山大学・自然科学研究科)

### 学位論文題名

EV・HEV向けフェライト磁石アキシシャルギャップモータの高出力密度化に関する研究  
(Study of High-Power-Density Axial-Gap Motors Using Ferrite Permanent Magnets for EV/HEV)

近年、自動車の排出ガスや二酸化炭素排出量の規制が強化されており、その対策として自動車駆動源の電動化が進められている。自動車用の主機モータには居住性や電費性能の向上のため小型・軽量化が求められ、残留磁束密度の大きい希土類磁石を用いた永久磁石同期モータの研究・開発が主流である。しかし、希少な希土類金属を使用する希土類磁石は高価であり、特に希土類金属資源の乏しい我が国においては他国からの輸入に頼らざるを得ず、安定供給の面でも不安を抱えている。このことから、希土類金属不使用の磁石を用いたモータの高性能化への要求は高く、各機関が研究に取り組んでいる。筆者が所属する研究グループでは、以前より希土類金属不使用のフェライト磁石を採用したモータを多数提案してきた。フェライト磁石の価格は希土類磁石の1/10程度であるが、残留磁束密度はおおよそ3~4割程度と低く、モータ自体の出力を高くすることが困難である。その中で、希土類磁石を使用したモータにも劣らない出力を発揮可能なモータとして、インホイール方式の車両向けのアキシシャルギャップモータがある。インホイール方式の車両は、車輪の内部にモータを格納するように配置するため、居住空間の増大が可能であること、またドライブシャフトが不要であり伝達効率の向上が見込まれることから、電気自動車の駆動方式の一つとして注目を集めている。ただし、車輪の内部という設置場所の都合上、モータには軸方向に扁平な形状であるという特徴が求められる。その点、一般的なラジアルギャップ構造に比べ扁平形状でトルク出力を得やすいアキシシャルギャップモータは適している。

しかしながら、近年の車両に求められる駆動出力は増加の一途をたどっており、主機モータには出力密度の向上が強く要求されている。そこで本論文は、インホイール方式向けフェライト磁石アキシシャルギャップモータのさらなる高出力密度化について、2種類の方法を提案・検討する。

まず、第2章および第3章では、従来のアキシシャルギャップモータに比べ、小型・軽量化を実現可能な3kWアキシシャルギャップモータを3次元有限要素解析によって検討した。従来モータに採用されていた固定子のオープンスロット構造は、固定子ティースに巻回されているコイルに磁石磁束が鎖交しうず電流が発生しないよう、ティースのコイルからの飛び出し部を大きく設けている。そのため、軸長が大きくなりやすい傾向にあった。そこで、ティース先端の磁石対向面を拡大する「つば」を設ける半閉スロット構造を提案した。つばによって磁石磁束のコイルへの鎖交を防ぐことができるとともに、つばにより磁石磁束をより多く活用することが可能となり、コイル巻数を削減することができる。半閉スロット構造はつばを含めた軸長をオープンスロット構造の軸長より小さくし

ながら、トルクや効率は同等の特性を得ることができることを示した。最終的に、3 kW アキシアルギャップモータにおける目標の「軸長 40 mm, 重量 3.7 kg 未満」を達成するモータを設計することができた。提案する半閉スロット構造のアキシアルギャップモータが要求仕様を満足する見込みを得られたため、実際に試作機を製作し、実機試験を行った。目標仕様を達成するトルクや出力を得るとともに、広い範囲で 90% を超える高効率を実現可能であることを確認した。連続運転時の巻線温度の測定も行い、最大出力・定格出力の両方において、それぞれに要求される連続運転時間を余裕を持って達成することを確認した。結果として、提案した小型・軽量化を実現可能な 3 kW アキシアルギャップモータは、当初の目標仕様を全て満足することを確認した。

第 4 章から第 7 章では、希土類磁石に匹敵する高トルクと希土類磁石使用時には困難であった軽負荷における高効率を達成できる、直流界磁巻線を設置したフェライト磁石コンシクエントポール PM 型アキシアルギャップモータを 3 次元有限要素解析によって検討した。本構造は、永久磁石の一部を圧粉鉄心に置き換え、界磁巻線によって励磁することで磁石の代替とする。界磁巻線に通電する直流電流の向きや大きさによって、界磁磁束の大きさをフレキシブルに変更することができ、さまざまな負荷に対して最適な界磁磁束を設定することで、高トルク特性と軽負荷高効率特性の両立が可能となる。

提案するモータに適した極-スロットの組み合わせについて検討し、20 極 24 スロットが適していることを示した。また、界磁磁束を効率的に発生させるために、主軸やケースといった構造部材を活用する構造を提案した。さらに、最適な磁石と圧粉鉄心量のバランスや、回転子支持部材に発生するうず電流の経路を切断し抑制する構造を検討した。解析を用いた詳細検討の結果、十分な性能を持つモータを実現する見込みを得たため、実際に試作機を製作し実機試験を行なった。試作機の最大トルクの値は 82.2 Nm, 最高出力は 13.7 kW となった。電機子電流密度 1 A/mm<sup>2</sup> 当たりの最高トルク密度の値は 1.84 Nm/(L · A/mm<sup>2</sup>) であり、市販の希土類磁石を用いたハイブリッド自動車駆動用モータと同等以上のトルク特性を実現した。さらに、高速域まで定出力運転を行うためには、界磁巻線による強め界磁制御と、電機子巻線による弱め磁束制御を併用する必要があることを明らかにした。また、全運転範囲で高効率の運転を行うための、各電流パラメータの決定方法を確立した。最適な電流パラメータ設定で運転した場合、最高効率は 95.2% を達成し、軽負荷領域においても広い範囲で 90% 以上の効率を達成した。結果として、高トルク出力と軽負荷における高効率という相反する特性を両立できることを明らかにした。

これを要するに、本論文は、インホイール型の車両駆動用レアアースレス永久磁石同期モータとして、二種類のフェライト磁石を使用したアキシアルギャップモータを提案し、解析と実機試験結果の両面からその提案構造の有効性を実証して新しい知見を得たものであり、電気工学ならびに電気機器分野に対して貢献するところ大なるものがある。よって、著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。