

## 2024年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所 属 機 関	宇都宮大学 工学部
職 位 または 役 職	准教授
氏 名	後藤 博樹

### 1. 研究題目

アキシャルギャップセグメント型巻線界磁フラックススイッチングモータの高出力密度化

### 2. 研究目的

CO<sub>2</sub>排出量削減のため、モータを動力源とした電動航空機の普及拡大へ向けた研究開発が世界的に加速しており、実現のためには、モータの高出力密度と高効率の両立が鍵となる。現在、駆動モータとして永久磁石同期モータ(PMSM)が主流となっているが、ファンなどの流体負荷では速度の3乗に比例するため、固定界磁であるPMSMでは、高速回転時の効率向上に限界がある。また、永久磁石の不可逆減磁があるため、フェイルセーフ上の問題がある。これらの問題を解決する手段として、①永久磁石レス、②発熱箇所が全て固定子にあるため冷却容易、③磁束調整機能をもちフェールセーフ運転が可能、などの特長を有する巻線界磁形フラックススイッチングモータ(以下WFFSMと略記)への期待が高まっている。

本研究では、高出力密度かつ高効率な電動航空機用駆動モータの開発を念頭に、セグメント型アキシャルギャップ巻線界磁フラックススイッチングモータの出力密度と効率性能を最大限に引き出すための設計法ならびに駆動方式を数値解析と実機試験の両面から明らかにすることを目的とする。

本研究の達成により、WFFSMをはじめとする可変磁束モータの研究開発に新たな方向性を与える、この分野の発展に貢献するものと考える。さらに、高性能化に適したモータ構造材料を検討する研究、並びに空間高調波を性能向上に利用する研究など、本研究の成果によって、新しい展開を回転機の分野に与えることが期待される。また将来、本研究の成果をきっかけとして、更に高出力密度かつ高効率なWFFSMが実現することで、資源が乏しい我が国の国際競争力を強化し、航空機の電動化、ひいてはカーボンニュートラル社会の実現に貢献する。

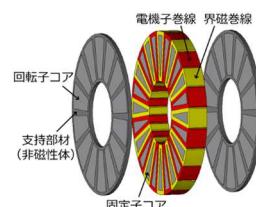


図1 セグメント型アキシャルギャップ WFFSM の構造

### 3. 研究内容及び成果

まず、通常のインナーロータ型ラジアルギヤップ WFFSM モデルを用いて、最適なスロットコンビネーションについて検討した。固定子スロット数を 12 スロットとした場合において、回転子極数を 5 極、7 極、8 極とし、それぞれにおいて最適化を行い、最大トルク特性においては 7 極機が、最大出力特性においては 5 極機が有利であることを明らかにした(図 2)。また、可変界磁時においても最大出力点は変化せず、5 極機の最大出力が最も大きくなることを明らかにした。一方、8 極機の性能が悪い原因として無負荷誘起電圧特性に着目し、8 極機のみ偶数次成分が大きくなることを確認し、式によりその原理を明らかにした。この原理はアキシャルギヤップ型 WFFSM にも適用可能であり、その後のアキシャルギヤップ型 WFFSM の設計に大きく貢献した。本成果については、学術論文(1)にて公表した。

次に、アウターロータ型ラジアルフラックス WFFSM の最適設計を行い、先行研究の同一寸法の SRM、および IPMSM と特性の比較を行った。その結果、ラジアルフラックス型 WFFSM の最適設計手法を確立するとともに、設計した WFFSM のトルク密度が市販 HEV 用 IPMSM に匹敵するトルク体積密度を達成できることを明らかにした。本成果の一部は先の国際会議で報告済みである。

また、アウターロータ型 WFFSM の更なる高トルク重量密度化のため、各部の重量分布について調査し、特に重量の大きいステータコアの軽量化のため、モータ内径をキーパラメータとして最適化を行った。また、学術論文(1)に基づくスロットコンビネーションについても検討を行った。その結果、更なる高トルク重量密度の達成に加え、低トルクリップ化についても達成した。これらの成果については、国内学会(1)および(2)で報告したほか、電気学会論文誌にも投稿し、現在査読中である。

次に、上述までの成果を元にして、アキシャルギヤップ型 WFFSM の最適設計を検討した。先行研究で航空機用として開発されたハルバッハ磁石配置を用いたアキシャルフラックス型 PMSM と同一寸法のアキシャルギヤップ型 WFFSM の設計を行い、先行研究の PMSM と性能の比較を行った。最適設計のキーパラメータとして、直徑一軸長比に着目した。さまざまな直徑一軸長比を設定し、それぞれの比率毎に最適設計を行い、比較検討を行った。これによりアキシャルフラックス型 WFFSM の最適設計手法を確立するとともに、アキシャルフラックス型 WFFSM がハルバッハ磁石配置を用いたアキシャルフラックス型 PMSM に迫るトルク体積密度を達成できることを明らかにした。本結果については、国際会議で口頭発表したほか、学術論文(2)にて公表予定である。

また、ロータおよびステータつばの形状最適化を行った。ロータに関しては、磁束密度が低いロータ外側部をある程度削ってもトルクに与える影響は小さいことに着目し、磁路として不要な部分を削ることで軽量化を図った。ステータつばに関しては、磁束密度が低いつば内側部分を削ることで軽量化を図るとともに、界磁極と電機子極を独立した部品として設計することでトルクの向上を図った。結果として、重量は 5.35 % 軽量化され、トルクは 4.56 % 向上し、トルク密度は 8.45 Nm/kg となった。また、出力密度に関しては 7.20 kW/kg となり、ハルバッハ配列磁石を用いた PMSM に匹敵する高出力密度を達成できる見込みが得られた。この成果に関しては、国内学会(3)で報告したほか、日本磁気学会論文誌に投稿し、現在査読中である。

以上により、有限要素法による磁場解析を用いて、極数やスロット数などの設計パラメータが出力密度や効率特性に及ぼす影響などを詳細に検討し、それら結果に基づいて最適設計法の確立を概ね完了した。また、これにより確立した設計手法および設計指針に基づき、実験室で実験可能なサイズのアキシャルフラックス型 WFFSM の最適設計を行った。その結果、実験室サイズでもアキシャルフラックス型 WFFSM の優位性を明らかにできるモータを設計できた。本成果に関しては試作機の試験後に公表する予定である。

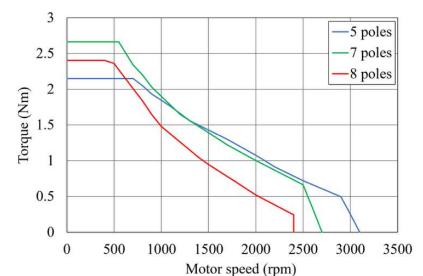


図 2 極数とトルク特性

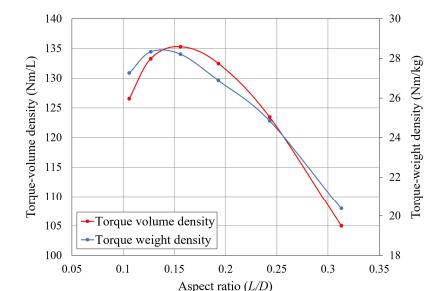


図 3 軸長比とトルクの関係

#### 4. 今後の研究の見通し

これまでの研究により、アキシャルフラックス型 WFFSM が、小型 EV 用、もしくは小型航空機用モータにおいては、他のモータに比較して、出力重量密度・トルク重量密度では同等かそれ以上の性能を達成可能であること、トルクリップルに関しては十分低いことは確認できたが、実用化に向けては、量産上の課題、特にセグメントロータコアの最適支持構造を明らかにする必要がある。また、最適な制御方法についても解決する必要がある。

#### 【小型実証機の試作】

小型実証機を試作し、試作機を用いてモータの特性試験を行う。

#### 【電流波形の最適化】

さきに助成者が行ったラジアルギャップ WFFSM の電流波形の検討では、高調波成分も考慮して電流波形を最適化することで、正弦波駆動時より最大 14 %程度トルクが向上する結果を得られている。そこで本研究では、アキシャルギャップ WFFSM に対して、損失あたりのトルクが最大となるように、高調波成分を考慮した電流波形の最適化を行う。その後、有限要素法による磁場解析を用いて、正弦波駆動時との諸特性の比較を行い、得られた電流波形の有効性を確認する。以上より、高出力密度・高効率を実現する電流駆動方式を明らかにする。

#### 【回転子支持部材の最適材料の検討】

高強度と低導電率の双方の性質を持つ材料として、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)やチタンなどが挙げられる。そこで本研究では、有限要素法による磁場解析を用いて、支持部材の材料を CFRP やチタンなどに種々変更し、諸特性の比較・検討を行う。次いで、有限要素法による構造解析を用いて、材料を種々変更し、軸方向電磁力による軸方向変位について比較・検討を行う。これらを総合することで、支持部材の強度を十分に確保しつつ損失を低減できる材料を明らかにする。

#### 5. 助成研究による主な発表論文、著書名

##### 学術論文(査読付)

- (1) 小石雄大, 後藤博樹, “セグメント構造巻線界磁形フラックススイッチングモータにおける高出力化に適した極数の検討”, 日本磁気学会論文特集号, 25TR906, 2025.
- (2) Yudai Koishi, Hiroki Goto, “Influence of Outer Diameter-to-Axial Length Ratio on Torque density in an Axial Wound Field Flux Switching Motor with Segmental Rotors”, IEEJ Journal of Industry Applications (印刷中)

##### 国際会議(査読付)

- (1) Yudai Koishi, Hiroki Goto, “Influence of Ratio of Outer Diameter and Axial Length on Torque density in Axial Wound Field Flux Switching Motor with Segmental Rotors”, The 27th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2024), OS1E-1, 2024.

##### 国内会議

- (1) 小石雄大, 後藤博樹, ”アウターロータ型セグメント構造巻線界磁形フラックススイッチングモータの高トルク・低トルクリップル化に関する設計検討”, 2025 年電気学会産業応用部門大会, 3-15, 2025.
- (2) 小石雄大, 後藤博樹, ”アウターロータ型セグメント構造巻線界磁形フラックススイッチングモータのトルク重量密度最大化に関する一検討”, 2025 年電気学会電子・情報・システム部門大会, MC2-5, 2025.
- (3) 小石雄大, 後藤博樹, “アキシャルギャップ型セグメント構造巻線界磁形フラックススイッチングモータのロータ軽量化とステータティース形状最適化の検討”, 第 49 回日本磁気学会学術講演会, 19aB-6, 2025.