

## 2022年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	長岡技術科学大学 電気電子情報系
職位または役職	准教授
氏名	日高 勇気

### 1. 研究題目

異なる2つのモータを1つに統合する次世代高性能複数統合型モータの開発

### 2. 研究目的

#### 【研究背景】

電気自動車用モータには、永久磁石モータと巻線界磁モータが広く使われている。両モータは特性が大きく異なり図1に示す関係にある。巻線界磁モータは、ロータ巻線で磁束の量を調整でき、必要最小限の磁束でトルクを生み出せる。無駄な損失を発生しないため、広い動作範囲で高効率に駆動できることから、市街地走行での高い電費性能を有する。一方、高車速域での加速性能に課題がある。対して、永久磁石モータは、巻線界磁モータとは相反する特性を持つ(図1)。日本では市街地での電費が重視されるが、欧州/北米では高い加速性能が要求される。ゆえに、電気自動車用モータ仕様の世界標準化には、2つのモータ特性を1つのモータで実現する必要がある。そこで、本研究の本質を成す問い「異なる構造を持つ2つのモータを、1つに統合することはできないか？」に達する。

#### 【研究目的】

本研究の目的は、巻線界磁モータと永久磁石モータのように、全く異なる2つのモータ特性を、1つのモータで実現し、モータ性能を飛躍的に改善させることにある。これを達成するために、2つのモータ構造体を1つに統合する複数統合型モータを着想し、シミュレーション上で検証してきた。結果、巻線界磁モータの特性と、永久磁石モータの特性を、1つのモータで実現できる見通しを得た。本年度は、提案モータ実現に向け実機検証を遂行し、複数統合型モータの基礎技術を確立する。

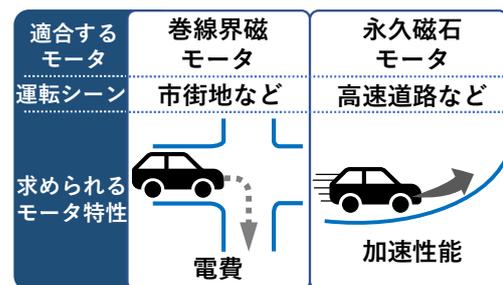
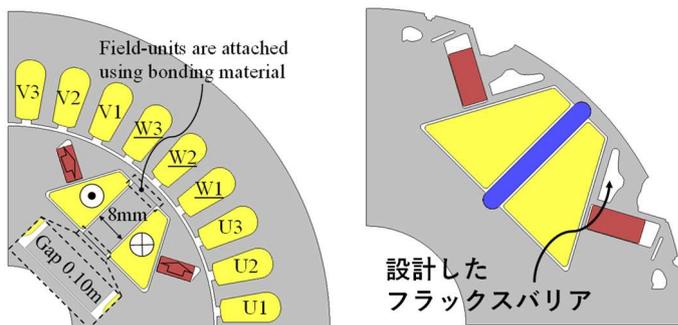


図1 巻線界磁/永久磁石モータの比較

### 3. 研究内容及び成果

#### (1). 数値解析を用いた磁気設計

2021 年度助成で提案したモータを図 2(a)に示す。同モータにより、従来のモータ比で約 15%トルク改善を実現した。一方、図 2(a)のモータでは、トルクリップル特性が、大幅に低下する課題があった。そこで、2022 年度助成では、数値最適化を用いて、ロータ内のフラックスバリア形状の最適化を実施した。同検討で得られた形状を図 2(b)に示す。ロータの磁石・巻線周囲にフラックスバリアが形成されていることが分かる。同形状による効果を図 3 に示す。図 3 から、提案するフラックスバリア形状により、大幅なトルクリップル低減を実現していることが分かる。また、図 2(a)のモータに対して、平均トルクも同等となっており、平均トルクを維持しつつ、トルクリップルを大幅に低減することに成功した。以降の内容では、提案するフラックスバリア形状を施した試作機を製作し、実機検証で図 3 結果の妥当性を検証する。



(a) 21 年度助成 (b) 22 年度助成  
図 2 2022 年度助成での実施内容

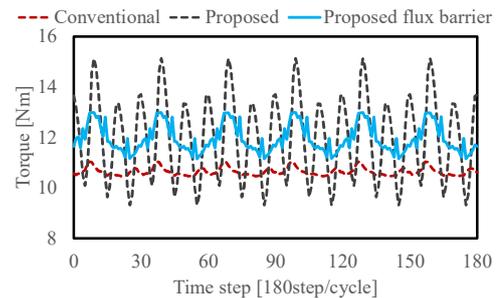


図 3 フラックスバリアの効果  
トルクリップルを約 64.1%低減

#### (2). 試作機の製作と負荷試験系構築

数値解析により明らかにした提案モータの効果を、実機にて確認するため、図 4 に示す試作モータと、図 5 に示す試験ベンチを構築した。試作モータでは、図 2(b)で示したフラックスバリアを備えており、同形状による効果を本試作モータで検証する。

負荷試験を実施するための試験ベンチについて記述する。試験ベンチは、負荷用のサーボモータで速度指令し、回転数を一定回転に固定する。試験モータは、回生直流電源およびインバータで駆動し、電流振幅および負荷角を変更することで、様々な負荷条件で駆動する。また、トルクを計測するためのトルクメータを配置し、トルク波形を取得する。

これまでに実験で得られた成果として、最大トルク条件でのトルクリップル特性を、図 2(a)のモータと、図 2(b)のモータで、実験結果を比較した。結果を以下に記述する。

- 21 年度助成(図 2(a)):6.15Nm
- 22 年度助成(図 2(b)):1.97Nm

上記結果より、提案するフラックスバリアにより、約 67.9%トルクリップルが低減される結果となった。本効果は、図 3 に示すシミュレーション結果と、ほぼ同等の値となっている。

上記結果より、22 年度助成で検討した、トルクリップルを低減するフラックスバリア構造は、提案する複数統合型モータに有効であることが分かった。今後は、より詳細な検討のため、様々な負荷条件でリップル特性を、実機検証にて取得予定である。

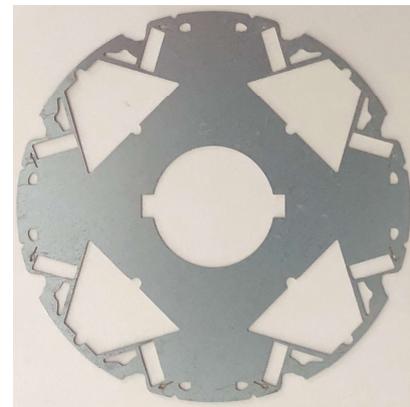


図 4 試作モータ

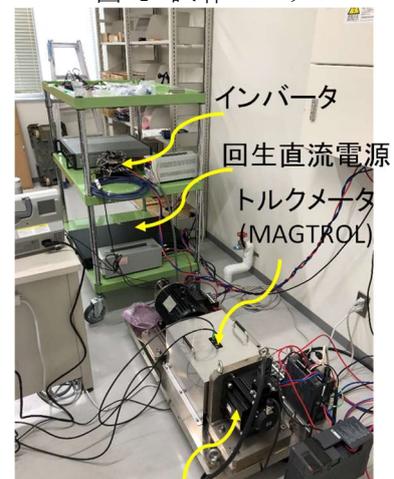


図 5 試験ベンチ

4. 今後の研究の見通し

“3. 研究内容及び成果”で述べた通り、提案する複数統合型モータの課題である、トルクリップルの増大は、フラックスバリア形状の最適化により、大幅に改善可能であることを明らかにした。一方、図3の数値シミュレーション結果から、従来法(conventional)に対して、まだトルクリップルが大きくなっている。そのため、ロータ構造だけでなく、モータ制御まで含めたトルクリップル低減を目指す。

そこで、図6に示すような検討を、23年度助成で実施する。具体的には、回帰モデルを活用した、トルクリップル抑制制御法を開発する。これまでに製作した試作モータを用いて、実機で電流指令値に対する、トルク特性を取得する。これを回帰モデルでモデル化し、電流指令値/トルク応答の関係をモデル化する。作成したモデルから、トルクリップル抑制を実現する電流指令値を逆推定する。逆推定で得られた電流指令値を入力することで、トルクリップルを低減することができる。

これまでの研究では、モータ構造に着目した研究を進めてきたが、23年度助成では更なる性能改善を目指し、モータ制御に着目したアプローチで、提案する複数統合型モータの高性能化を目指す。

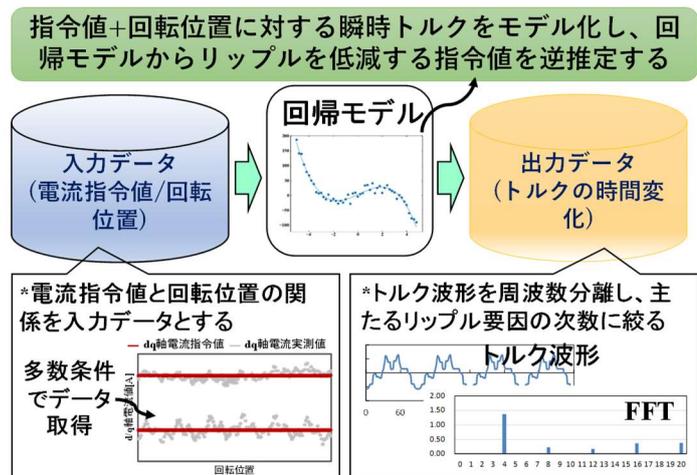


図6 回帰モデルを活用したトルクリップル抑制制御

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]. Y. Hidaka, "Torque Improvement of Magnet-Assisted Wound Field Motor with Field Unit Type Rotor," IEEE Transactions on Industry Applications, doi: 10.1109/TIA.2023.3295361.

国内会議

[2]. 趙 鉄陽, 木原 由晴, 日高 勇気, 比留間 真悟, 貝森 弘行, 江川 みち, 松下 嘉子:「巻線界磁モータの実機トルク特性における効率的データドリブン法の検討 -バイズアプローチを用いた学習データの品質向上-」, 電気学会 静止器回転機合同研究会, 2023.

[3]. Minh Khoa Nguyen, 日高 勇気:「トポロジー最適化を用いた磁石補助型巻線界磁モータのフラックスバリア形状最適化によるトルクリップル低減」, 電気・情報関係学会北陸支部連合大会, 2023.

[4]. 安達 健悟, 日高 勇気:「回帰モデルによる逆推定を用いた巻線界磁モータの高調波電流抑制」, 電気・情報関係学会北陸支部連合大会, 2023.