

2024 年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所 属 機 関	岡山大学 大学院環境生命自然科学研究科
職位または役職	研究准教授
氏 名	綱田 錬

1. 研究題目

C 型 SMC コアを用いた超扁平アキシアルギャップモータの開発

2. 研究目的

◆継続的な目的（申請年度に関わらない本研究の根本となる目的）

目的①:「高効率かつ超扁平なモータ」を開発し、産業用システムの高効率化・小型化の両立に貢献する

◆2024 年度の目的

目的②:2023 年度に設計した「トルクリプルを低減した」設計について、有効性を実機で確認する

目的③:提案モータにおいて「更なる高性能化」を実現しつつ、「応用範囲を広げる」

【研究背景】

近代社会では産業用モータは高効率だけでなく、小型化できる等といった高い付加価値も求められる。その中で、本研究課題では図 1 に示すような、システムを小型化して省資源化に貢献するための C 型コアを用いた超扁平モータを提案している(目的①)。

提案モータはアキシアル(軸)方向に磁束が通過するため、アキシアルギャップモータ(AGM)と呼ばれる。この C 型超扁平 AGM において、2022 年度にはコンセプトの有効性を確認するための 1 号機で実機検証を行い、2023 年度(～2024/9)には 1 号機で発生した問題を改善した 2 号機の検証を実施した。また、2023 年度は高性能化の一環としてトルクリプルを低減可能な新構造を提案した(図 2)。2024 年度はその新構造を 3 号機として試作し、有効性を実験にて検証する(目的②)。

また、ここまでの研究において提案モータのコンセプトの有効性と高性能化の手法が明らかとなってきた。最終年度となる 2024 年度では、更なる高性能化を実現しつつ応

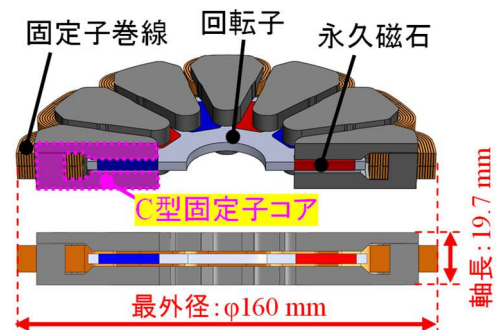


図 1 提案超扁平 AGM(扁平率:0.12)

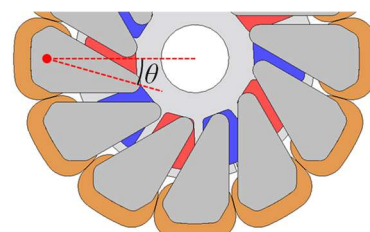


図 2 トルクリプル低減可能な構造

用範囲を広げるための検討を実施することで、提案モータの得手不得手を定量的に把握する(目的③)。

3. 研究内容及び成果

本研究ではこれまでに、軸長 20 mm 以下の超扁平構造ながらも IE5 クラスの高効率を実機で実現可能な 1 馬力モータを実現した。その中で、目的②に記載したように提案モータの更なる高付加価値化の一つとして、「低トルクリプル化」が可能な図 2 の新構造を提案している。新構造は C 型のコアを周方向にスキューを設けることでトルクリプルの低減を実現する。これまでのダブルステータ構造等の従来 AGM では、超扁平構造ではツバを設けることが困難であるため、スキューを採用することは難しい。一方で、提案構造は回転子への対向部分に巻線が存在しないため、図 2 のように超扁平構造においてもコアにスキューを設けることが可能となる。当初は、提案構造にスキューを設けた 3 号機を試作・実験する研究計画であったが、昨今の試作費と材料費の高騰により、予算内での試作が困難となった。その代わりに、スキューを設けた際の特性について詳細を分析した。

図 3 は提案構造においてスキュー角 θ を変更した場合の定格運転時(6000 rpm, 4.0 Arms/mm²)の固定子コア内の磁束密度分布図を示している。スキュー角 θ を大きくしていくと、スキュー効果により巻線係数が低下するため、僅かに固定子コアの磁束密度が低下していく。その結果、平均トルクが減少する。一方で、図 4(a)にはスキュー角 θ に対するトルクリプルの推移を示しており、スキュー角 $\theta = 15 \text{ deg.}$ で最小の 2.4% まで低減可能である。15 deg. 以上となると平均トルクの低下が大きいため、トルクリプル率が高くなってしまふ。

また、図 4(b)にスキュー角 θ を変化した場合の出力に対する鉄損の割合を示している。これまでの研究において、提案モータは高速回転(6000 rpm)であることに加えて、固定子コアの使用量が多いため、全損失中の鉄損の割合が高くなっていた。上述したように、スキュー角 θ を大きくしていくと、固定子コアの磁束密度が低くなるため、鉄損は小さくなる。一方で、同時に同じ固定子起磁力に対する出力も減少する。その結果、スキュー角 θ が 10 deg. の際に出力に対する鉄損の割合が最も低くなる。

以上の特性を踏まえ、図 4 に示すようにスキュー角 θ が 15 deg. の場合がトルクリプル率や出力に対する鉄損割合が低いため、総合的に優れた設計であることを結論付けた。

提案モータの得手不得手を把握するという目的③に対して、今年度は多様な検討を実施しており、その中でも回転子の機械強度に関する内容を紹介する。図 5 は最高速度(6000 rpm)における回転子の応力分布図を示している。図 5(a)は従来のダブルステータ構造を用いた AGM の回転子、図 5(b)は提案 AGM の回転子の解析結果を示している。従来構造は、固定子が扁平構造となっている

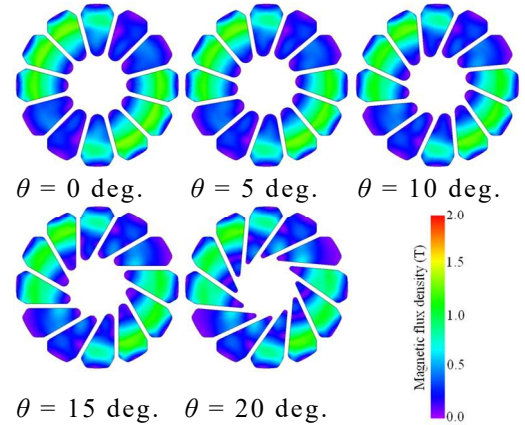
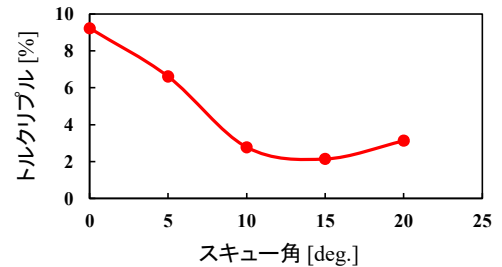
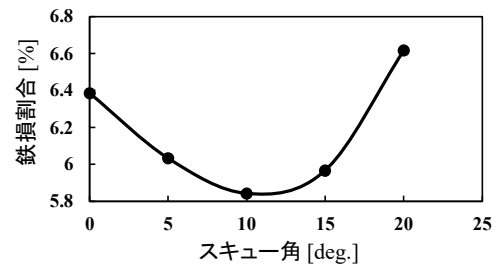


図 3 スキュー角毎の磁束密度分布

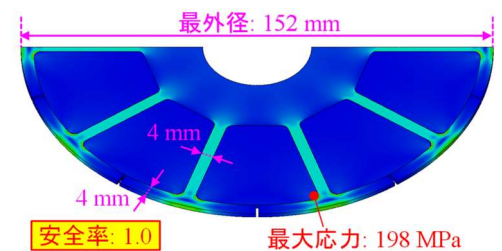


(a) トルクリプル

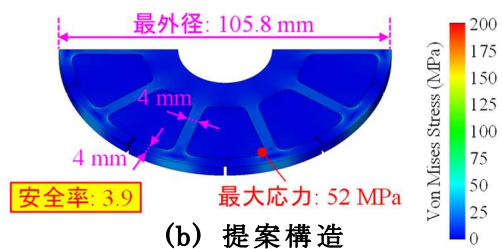


(b) 出力に対する鉄損割合

図 4 スキュー角による特性変化



(a) 従来ダブルステータ構造



(b) 提案構造

図 5 最高速での応力分布図

ため、それに合わせて回転子の最外径も 152 mm と大きくなる。その結果、機械強度の安全率は 1.0 となり、製造精度によっては成立しない。一方で、提案構造では、回転子の外周部に C 型コアを設置するため、回転子の最外径が 105.8 mm となり、従来構造よりも 30.4% 小さくなる。そのため、発生する応力も小さく、機械的な安全率が 3.9 となる。したがって、提案構造は更に扁平にしても回転子の応力的には成立可能であることがわかる。

また、モータの重要な性能指標の一つである熱特性についても評価を実施した。図 6 は昨年度製造した 2 号機を用いた定格運転時の熱特性の評価結果を示している。図 6(a) は固定子に設置した 6 箇所の熱電対を示している。図 6(b) は運転を開始してから定常状態になってからのサーモグラフィによる測定結果を示している。モータ全体の温度が 40~50℃ まで上昇しているが、超扁平構造にもかかわらず、冷却無しで連続運転可能であることが分かった。なお、ケースの穴から回転子の永久磁石の温度も観測したところ、約 40℃ であった。これは、渦電流損が殆ど発生しないネオジムボンド磁石を採用しているためであり、発熱の抑制に貢献している。

4. 今後の研究の見通し

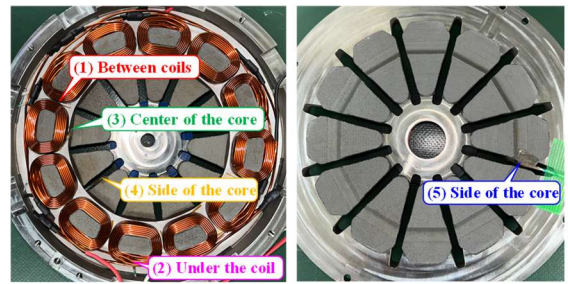
これまでの 3 年間の研究を通して、本研究における提案モータが軸長 20 mm 以下という極めて扁平な構造において問題無く製造可能であることに加えて、1 馬力モータとして IE5 の高効率を実機で実現できることを明らかにした。また、優れた熱特性や機械強度を有していることも明らかとなり、超扁平構造における有力な選択肢の一つに成り得ると考える。

今後は、モータ単体のみならず、インバータやギア等を含めた機電一体システムでの超扁平化の実現を検討している。一方で、1 号機での実験で明らかとなったように、隣り合う C 型コア間での漏れ磁束が発生する。その場合、インバータやギアにおける漂遊負荷損を考慮しながら全体のシステム設計を進める必要がある。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

学術論文（査読付）

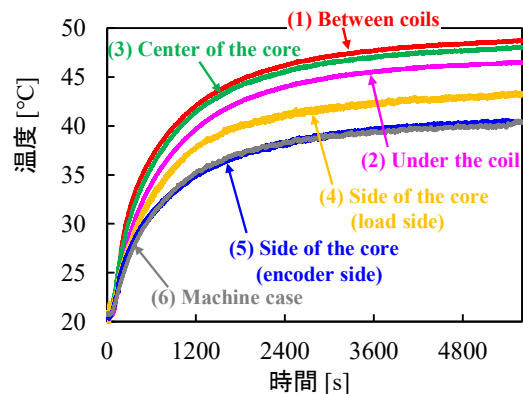
Ren Tsunata *et al*, "Transverse- and Axial-Flux Permanent Magnet Machine with C-Type SMC Stator: A Solution for Ultra-Flat Applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, DOI: 10.1109/TIE.2025.3629360 (アクセプト済み、掲載予定)



(a) 固定子への熱電対の設置



(b) サーモグラフィによる測定



(c) 熱電対の測定結果

図 6 定格運転時の熱特性の測定
(6000 rpm, 4.0 Arms/mm²)