

2023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

◆2023年度の目的

目的②:提案モータの「2号機」(実験済みの1号機の課題を改善した試作機)の有効性を実験で検証する

目的③:更に高性能化した「3号機」(高効率化 or 高トルク化 or 構造の簡易化)を解析で検討する

【研究背景】

現状、我が国の電力の約30%が産業用モータで消費されているため、高効率化が喫緊の課題となっている。加えて、同時にシステムを小型化して省資源化に貢献するために超扁平なモータが有効であり、そのようなモータが求められている。そこで本研究では2022年度に引き続き、産業システム用の「超扁平」かつ「高トルク&高効率」を実現でき「量産可能」なモータの実現を目指す(目的①)。

図1に、扁平な構造において高いトルク密度を実現できる一般的なアキシアルギャップモータ(AGM)を示している。しかし図1に示すAGMは、モータ構造の扁平度合いを示す扁平率「=(軸長/最外径)」が約0.38の場合にトルクが最大となり、それ以上の扁平構造(扁平率0.35以下)となると、急激にトルクが低下してしまう。そこで、本研究では図2のような「C型コアを用いた超扁平アキシアルギャップモータ(AGM)」を提案して

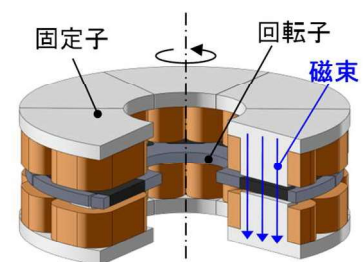


図1 従来のAGM(扁平率:0.38)

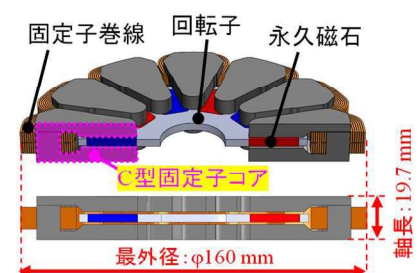


図2 提案AGM(扁平率:0.12)

おり、扁平率 0.12 という極端な扁平構造でも高いトルクを実現できることをこれまでに解析と実験の双方で明らかにしている(2022 年度の成果)。

しかし、2022 年度に作製した試作機(1 号機)では、製造性も高く、出力トルクも解析と一致することが確認できた一方で、効率が解析から大きく低下してしまうという問題が発生した。考察の結果、その原因はモータ本体ではなく、ケースで発生する渦電流損失であることが分かった。そこで 2023 年度は、この問題を改善した試作機(2 号機)の実機検証を行い、その対策の有効性を明らかにする(目的②)。

また 2023 年度は、提案する C 型超扁平モータの更なる高性能化に向けた 3 号機の設計を行う。1 号機・2 号機までの試作と実験による知見に基づいて、高トルク化・高効率化・構造の簡易化が可能な構造を検討することで、提案モータの付加価値を更に高めていく(目的③)。

3. 研究内容及び成果

目的②で記述したように、昨年度作製した試作 1 号機は、提案する超扁平モータのトルク特性は要求仕様を達成した。しかし、図 3 に示したように解析に対して 1 号機で測定した効率が高速回転(6000 rpm)時に大きく低下してしまっていることが明らかとなった。昨年時点でこの効率低下の原因は図 4 に示したように、ケースに磁束が漏れることによって発生する渦電流損(漂遊負荷損)であることを明確にしている。

そこで本年度の 1 つ目の成果として、このケースの渦電流損を低減するための対策を検討した。図 4 の渦電流の分布を見ると、隣り合うコア同士の間で特に電流密度が高くなっていることが確認できる。したがって、例えばこの部分を空隙にすることによって、磁束が漏れても渦電流の発生を防ぐことが可能となる。そこで、ケースで発生する渦電流損を低減するために、ケースに空隙を設けることを検討した。

一方で、渦電流対策のためにケースに空隙を設けることでケースの剛性が低下してしまうため、空隙のサイズを最小限にしながら渦電流を効果的に低減したい。そこで、図 5 のようにまずは固定子コア近傍の磁束密度を観測し、どのような分布で漏れ磁束が発生しているかを明らかにした。図 5(a)が観測点(分解能)を示しており、図 5(b)が観測値をマップ化したものである。この磁束密度分布からも、コアの中心ではなく、コアの端部に向かうほど磁束密度が高くなっていることが分かる。このことからコア間の漏れ磁束が大きく、ケースでの渦電流損の原因となっていることが分かる。また、図 5(b)において磁束密度が高い部分のケースを空隙にすることによって、効果的に渦電流損を低減できることになる。

上記の結果を踏まえてケースに空隙を設けたところ、有限要素法による磁場解析結果では、ケースで発生する渦電流損を約 90%低減できることを明らかにした。そこで、図 6 のように渦電流対策のために空隙を設けたケースを作製し、2 号機として実機検証を行った。

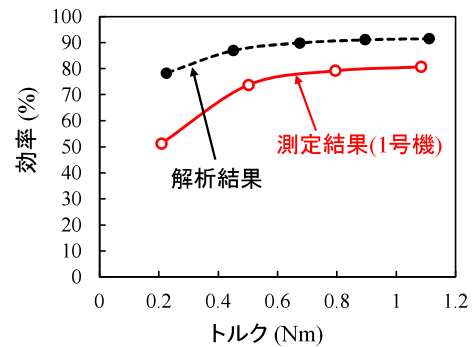


図 3 トルクに対する効率(1 号機, 6000rpm)

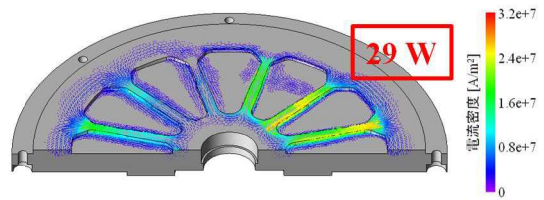
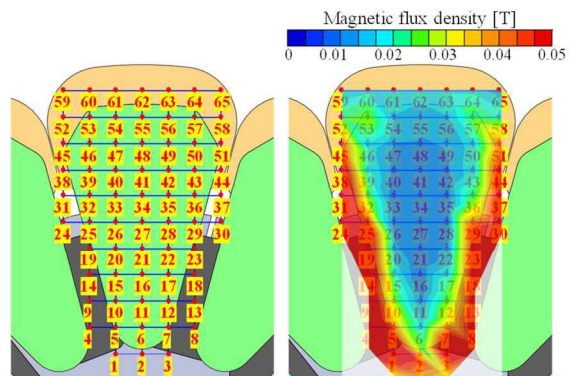


図 4 ケースで発生する渦電流損



(a) 観測点 (b)磁束密度

図 5 固定子コア近傍の磁束密度分布



図 6 渦電流損対策を施した 2 号機のモータケースの試作品

図 7 がケース損失対策を実施した 2 号機の効率マップの測定結果であり、回転数とトルクに対する効率が等高線で示されている。図 3 に示すようにケース損失対策前の 1 号機では 6000 rpm の 1 Nm 付近の効率が約 80%であった。しかし、図 7 に示すように、同じ運転点の効率が 87%まで向上している。渦電流損は回転数の 2 乗に比例して大きくなるため、6000 rpm で最もケース損失対策の効果が顕著に表れている。

本研究課題のモータの用途は産業用であるため、高速重負荷領域で連続運転を想定している。そのため、図 7 のように高速重負荷の運転点が最高効率となる設計は適しており、想定通りの特性が実現できている。

以上の成果により、1 馬力相当の超扁平モータにおいて十分な量産性を確保しつつ、実機で IE5 クラスの高効率を実現することができた。

4. 今後の研究の見通し

今年度は目的③で記述したような更なる高性能化の検討も実施した。図 8 は高性能化の検討結果の一例を示しており、トルクリプルを低減するための提案構造である。C 型のコアを周方向に θ deg. スキューを設けることによって、トルクリプルを低減する。C 型コアであれば巻線エリアの形状はそのまま、図 8 のようにスキューを設けることが可能である。提案モータの場合、 $\theta = 10$ deg. の場合にトルクリプルが最小となった。図 9 はその際のトルク波形を示しており、スキューを設けていない従来構造と比較している。従来構造で 5.2%であったトルクリプルが 2.4%まで低減できている。

今後、上記のようなトルクリプルのみならず、様々な方向性の高性能化(低コスト化、高効率化)の手法について解析にて検討を進めていく。必要に応じて、新しい技術を採用した超扁平モータを 3 号機として試作、実機検証を実施する。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

学術論文(査読あり)

1. R. Tsunata, M. Takemoto, J. Imai, T. Saito and T. Ueno, "A Proposal of an Axial-Flux Permanent-Magnet Machine Employing SMC Core With Tooth-tips Constructed by One-Pressing Process: Improving Torque and Manufacturability," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 109435-109447, 2023.
2. R. Tsunata, M. Takemoto, J. Imai, T. Saito and T. Ueno, "Superior Efficiency Under PWM Harmonic Current in an Axial-Flux PM Machine for HEV/EV Traction: Comparison With a Radial-Flux PM Machine," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 60, no. 5, pp. 6736-6751, Sept.-Oct. 2024.

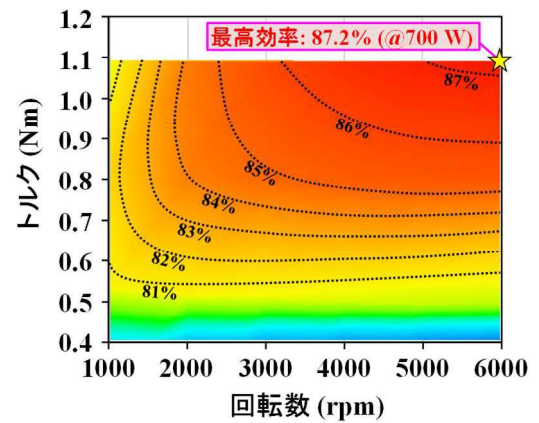


図 7 損失対策後(2号機)の効率マップ

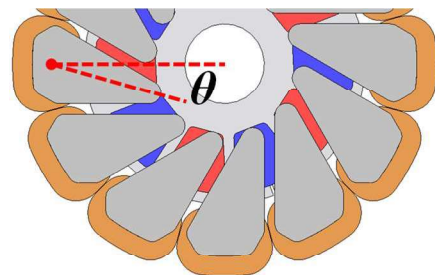


図 8 トルクリプル低減のための構造

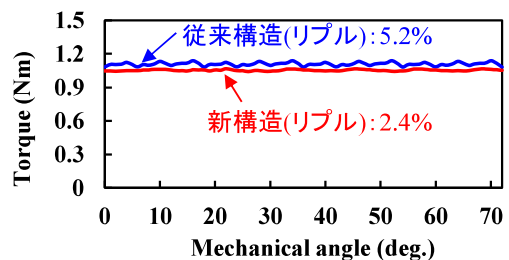


図 9 最大電流時のトルク波形比較