

2022 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 環境生命自然科学専攻
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ヤルギャップモータの開発

2. 研究目的

本研究の目的は次の 2 点である。

- ① 高効率で超扁平構造のモータを開発し、産業システムの高効率化・小型化の両立に貢献する
 - ② 提案超扁平モータの有効性を実験で検証する
- 【上記目的の背景】

我が国の電力の約 30%が産業用モータで消費されており、モータの高効率化が求められている。また、近年は高効率化に加えて、小型化も両立できる高付加価値なモータが求められている。特に産業用システムでは、大量生産するため、小型化により低コスト化をすることは極めて重要である。

図 1 はポンプシステムの例を示しており、一般的なモータは細長い構造であるため、左図のようにモータの上下にデッドスペースが存在してしまう。その結果、システムサイズが大きくなってしまふ。一方、右図のように扁平なモータを採用することで、システムサイズを低減できるため、用途によっては「扁平かつ高効率なモータ」が求められる。しかし現在は、図 2 に示すような半径(ラジアル)方向に磁束が流れるラジアルギャップモータ(RGM)が一般的であり、RGM は扁平形状においては十分なトルクを発生できない欠点がある。そこで、扁平形状においても高トルクを発生可能な、軸(アキシヤル)方向に磁束が流れるアキシヤルギャップモータ(AGM)がある。しかし、AGM でも約 0.35 以下の「扁平率(=軸長/最外径)」では、トルクが急激に低下してしまうため、それ以上の扁平な形状への適用は困難であった。

そこで報告者は、扁平率が 0.12 であり、更なるシステムサイズの低減が可能な「C 型コアを用いた超扁平 AGM(図 3)」を新たに提案する。報告者はこれまで、提案モータが扁平率 0.12 という超扁

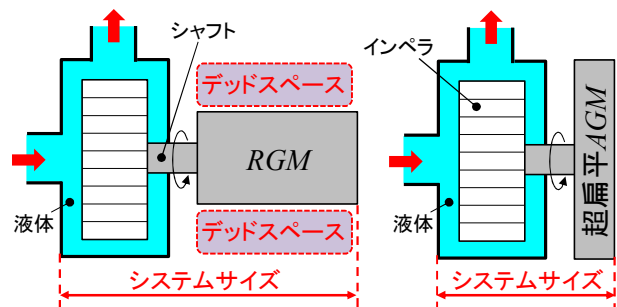


図 1 超扁平 AGM によるポンプシステム小型化

平形状において、従来の RGM や AGM よりも高いトルクを実現できることを解析によって明らかにするなど、基本的な有効性を確認している。しかし、これまでの検討は解析結果であるため、提案モータを試作し、実機検証でその特性を明らかにする必要がある。特に、提案モータは 700 W 程度の出力でありながら、軸長が 19.7 mm と極めて小さく、報告者が知る限り前例が無い。そのため、提案モータの製造面などの課題を含めた実機での性能が不明瞭であり、実験で有効性を明らかにすることが目的である。これは、今後の産業用システムの小型・高出力密度化の選択肢の確立として、非常に有意義である。

3. 研究内容及び成果

ここまでの研究で得られた成果は以下の 3 点である。

①提案する超扁平 AGM の製造性について

本研究において開発する超扁平モータにおいて重要な評価項目の一つとして、「提案モータは極端に扁平な構造であるため、問題なく製造できるかを確認する」ことがあった。提案モータのケースや取り回し線等を設計して試作をした結果、図 4 に示すように提案モータを問題なく製造できることを確認した。提案モータは超扁平であるが、非常にシンプルな構造となっている。そのため、試作においても特殊な生産設備を用いる必要もなく、大量生産にも対応可能であると考えられる。

②試作機におけるトルク性能について

試作機の組み立てに関しては、問題無きことを確認した一方で、所望の電磁性能が得られているかを評価する必要がある。中でも、必要な負荷を駆動するのに必要なトルクが得られているかが特に重要である。図 5 に試作機による実験で測定した電流密度に対する平均トルクの増加を示しており、磁場解析結果と比較している(1000 rpm)。グラフの傾きであるトルク乗数の誤差は 2.3% であり、非常に精度良く試作できていることが分かった。同時に、軸長 19.7 mm の超扁平構造でも、解析通り必要なトルクを出力することができる。

③試作機における効率性能について(新たな課題)

提案する超扁平 AGM の試作機において、定格回転速度 6000 rpm でのエネルギー効率を測定した。高いトルク特性の一方で、図 6 に示すように 6000 rpm での効率が解析から大きく低下してしまっていることが分かった。一般的に、実験における効率は「インバータ駆動による高周波電流による鉄損増加」、「材料の加工劣化による鉄損増加」等が原因で解析値に比べて低くなる。しかし、解析で約 90% であった効率が実験では 80% を下回っているため、通常のもータよりはるかに大きく効率が低下してしまっている。

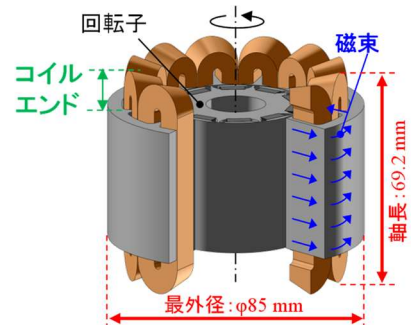


図 2 一般的な RGM(扁平率: 0.81)

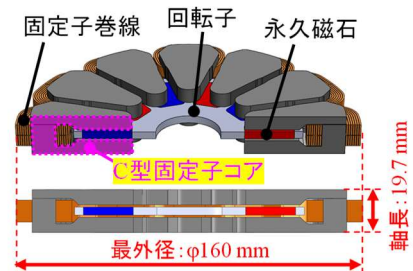


図 3 提案超扁平 AGM(扁平率: 0.12)

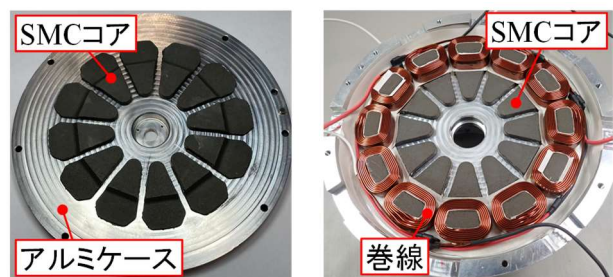


図 4 試作した提案する超扁平モータの外観

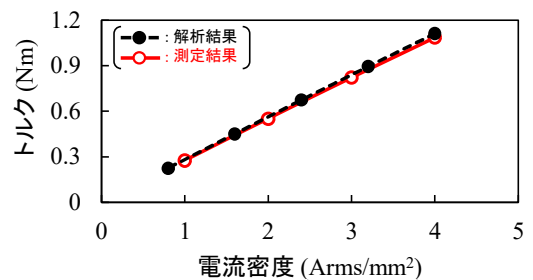


図 5 実験による電流に対するトルク増加

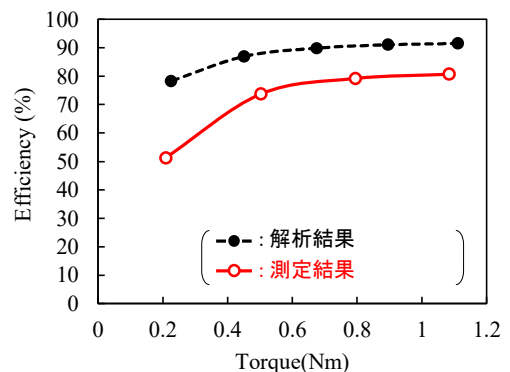


図 6 トルクに対する効率推移(6000 rpm)

効率低下の原因を調査した結果、モータケースにおける渦電流損が 29 W(両側で 58 W)発生していることが分かった。出力が約 700 W のモータで 58 W 損失が増加すると、効率には著しい影響を与えてしまう。超扁平構造では固定子コアが薄いため、構造に関わらず磁束が外部に漏れやすい。その結果、図 7 のようにモータケースで渦電流が発生してしまう。これは通常のモータではあまり発生しないため、通常はモータケースを解析には含めないが、超扁平構造ではケースも含めた解析が必要であることが実験を通して明らかになった。今後の研究において、対策する必要がある。

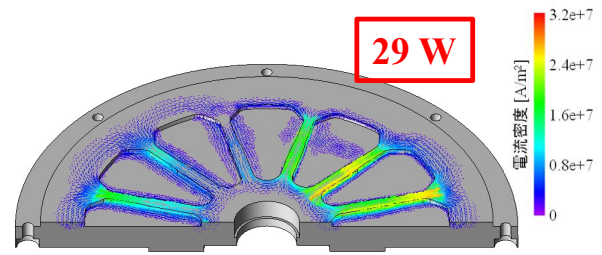


図 7 ケースの渦電流密度分布(6000 rpm)

4. 今後の研究の見通し

前述のように、これまでに研究において、トルクこそ所望の特性を実現している一方で、高速回転時にケースでの損失によって効率が低下してしまうという課題が明らかとなった。そこで今後、まずはケースでの損失の対策を実施し、改めて試作・実験を行う(2号機)。例えば図 8 に示したように、渦電流発生箇所のスルーホールを設けることによって対策が可能である。この場合、ケースにおける渦電流損を 90%低減できることを確認している。上記のような対策を含めて、実用性を考慮した上で適切なモータケースを設計する。

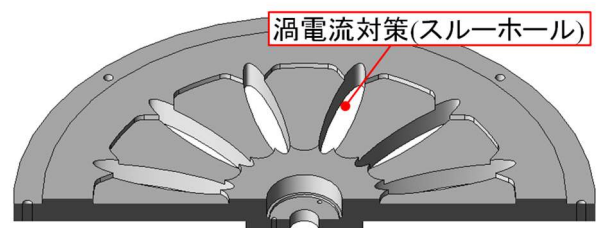


図 8 ケースで発生する損失対策

また、超扁平 AGM 自体の性能を更に向上することも目指す。例えば、現状の提案 AGM は各固定子コアが独立しているため、各相の巻線の相互インダクタンス分が失われている。そのため、二層巻きにすることによってトルク特性が向上できる可能性がある。また、これまでは主に固定子に関する検討が大部分を占めていたが、回転子構造においても、超扁平 AGM に適した構造を探索することによって、効率・トルクともに改善できる可能性がある。今後は、上記のような検討を実施、これまで以上の高性能化をしていく予定である。

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. Ren Tsunata, Masatsugu Takemoto, Jun Imai, Satoshi Ogasawara, Tatsuya Saito, Tomoyuki Ueno " Transverse- and Axial-Flux Permanent Magnet Machine Employing C-Type SMC Stator: A Solution for Ultra-Flat Applications," IEEE Transaction on Industrial Electronics. (投稿予定)

国内学会(査読なし)

1. 綱田錬, 竹本真紹, 今井純, 齋藤達哉, 上野友之:「C 型 SMC コアを用いた超扁平アキシヤルギャップモータの実機検証」, 令和 5 年 電気学会全国大会講演論文集 No. 5-063, 2023.

受賞

1. 令和 5 年 電気学会全国大会 優秀論文発表賞, 電気学会, 2023 年 3 月 16 日(国内学会 1 の研究内容に対して)