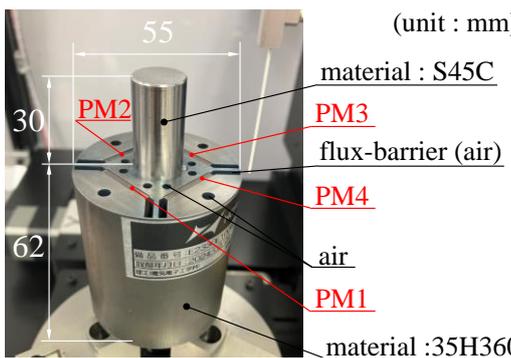


2024 年度若手研究者共同研究プロジェクト実施報告書

法政大学総長 殿

以下のとおり研究実施報告書を提出します。

基 本 情 報	研究課題名：永久磁石磁化推定システムの開発
	研究代表者氏名：中村 勢到
	【在籍者】 研究科・専攻・学年：理工学研究科・電気電子工学専攻・3 年 【修了者】 所属・職種：
	指導教員（所属・職・氏名）：理工学部 電気電子工学科・教授・岡本吉史 （※在籍者のみ記入）
	共同研究者（所属・職・氏名）： （※指導教員と同人の場合は記入不要）
	その他 研究分担者：
	研究期間： 2022 年度 ～ 2024 年度（※研究終了年度を記載）
年 間 の 研 究 実 施 概 要	<p>※研究計画の進捗状況を中心に今年度の研究実施状況を記載してください。</p> <p>近年、凄まじい勢いで地球温暖化が進んでおり、カーボンニュートラルの実現が急務となっている。電気工学分野では、電気自動車（EV）の普及に伴い、永久磁石同期電動機（PMSM）の高出力化設計の要求が高まっている。その一端を担うべく、本研究では、永久磁石をモータ鉄芯から取り外すことなく、磁気回路の漏れ磁束より永久磁石磁化を非破壊的に推定できるシステムの開発を目的とする。結果、PMSM の高回転化に伴う磁石渦損起因の熱減磁に伴う永久磁石エネルギー積の経時変化、あるいは、設計段階における着磁の状態を把握することができる。開発予定のシステムは、PMSM から発生する漏れ磁束を計測する自動計測器と、測定器から得られる漏れ磁束を入力値として数値的に永久磁石磁化分布を推定する手法（MELF）から成り立っている。本システムより得られる磁化分布により、高性能な PMSM の設計が可能となり、さらに、装荷された永久磁石の経時変化を検知し、再着磁による永久磁石の再利用が可能となる。2024 年度は次のように、研究を進めてきた。</p> <p>2024 年度研究計画進捗状況</p> <p>本年度は、組立後着磁において着磁率が異なる永久磁石の組合せを複数準備し、これらを埋込磁石同期電動機（電気学会ベンチマークモデル D モデル^[1]）の実機回転子に装荷した状態で、漏れ磁束の実測データに基づく磁化推定を実施した^[2]。図 1 に、使用した回転子の寸法と材料を示す。ローターコアの素材は 35H360、シャフトの素材は S45C である。また、準備した永久磁石は、着磁率が 45.9 %（Case A）、100 %（Case B）となるケースで組立後着磁した。</p>
	 <p>(unit : mm)</p> <p>material : S45C</p> <p>PM3</p> <p>flux-barrier (air)</p> <p>PM4</p> <p>air</p> <p>PM1</p> <p>material : 35H360</p>
	図 1 電気学会 D モデルの回転子 ^[2]

漏れ磁束を計測する点は、回転子から径方向に 1 mm 離れた領域に 3° 間隔、z 方向に 1 mm 間隔に配置し、計測点数は 12,120 点とした。図 2 に、各着磁率の永久磁石が装荷されていた状態における漏れ磁束分布を示す。測定には、株式会社アイエムエス製の磁界計測器 MTX-6R を用いた。両ケースにおいて、極が切り替わる部分で漏れ磁束が大きくなっていることが分かる。また、着磁率に比例して、漏れ磁束の大きさが変化している。

図 3 に、MELF により推定された磁化分布を示す。Case A の推定結果に着目すると、着磁率を低下させた場合、各極の永久磁石が不均一な磁化強度で着磁されていることが分かる。Case B の推定結果では、各極の永久磁石は、一様な平行配向に推定されている。

MELF の推定結果の妥当性を検討するために、専用の治具を用いて、両ケースの永久磁石を回転子から押し出し、自由空間における永久磁石の磁化推定手法 SiGrad^[3] による推定を行った。図 4 及び図 5 に、SiGrad より推定された各永久磁石の磁化分布を示す。Case A における磁化強度に着目すると、どの磁石においても、中央部では弱く、端部では強めの磁化強度で推定されている。これは、着磁電流が微弱なため、磁束が磁石中央部まで届かず、磁気抵抗小さい磁石端部に磁束が集中したことが考えられる。Case C においては、一様な平行配向が推定されていることが分かる。この結果から、両手法により得られた磁化分布には類似した傾向が見られ、着磁率が異なる永久磁石を装荷した実機の回転子に対して、MELF を用いることで不均一な磁化分布を推定できることが明らかとなった。

年
間
の
研
究
実
施
概
要

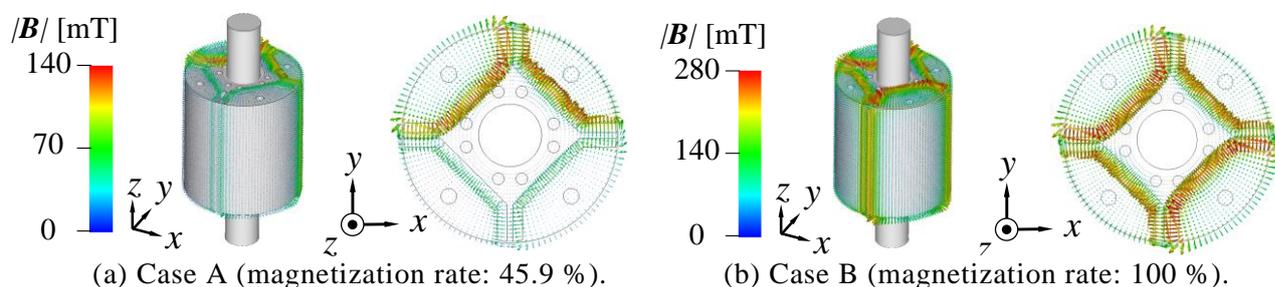


図 2 測定した漏れ磁束分布

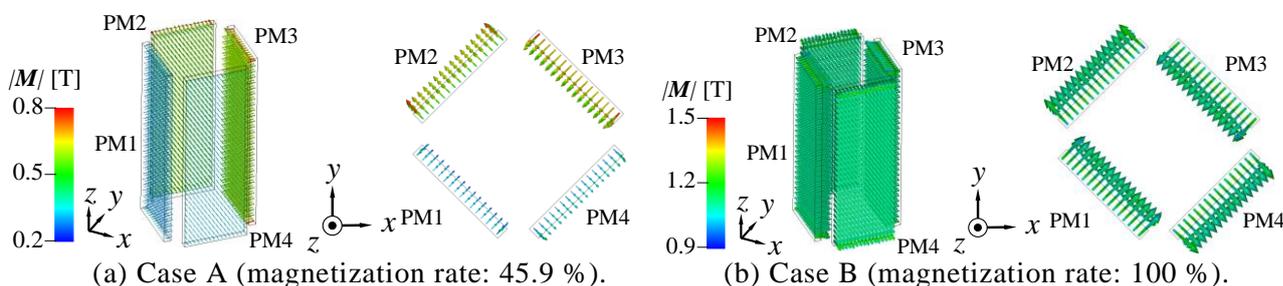


図 3 MELF より推定された磁化分布^[2]

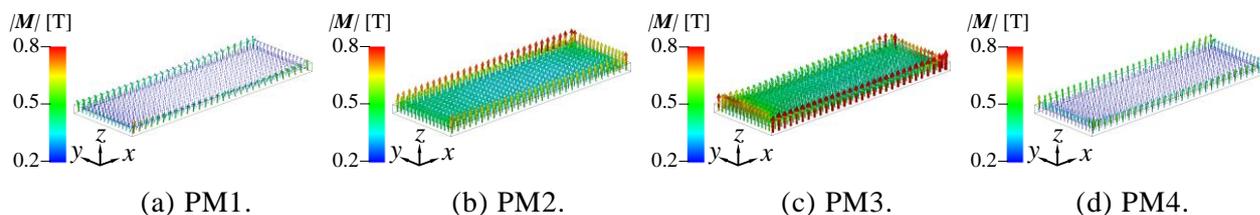


図 4 SiGrad より推定された磁化分布 (Case A)^[2]

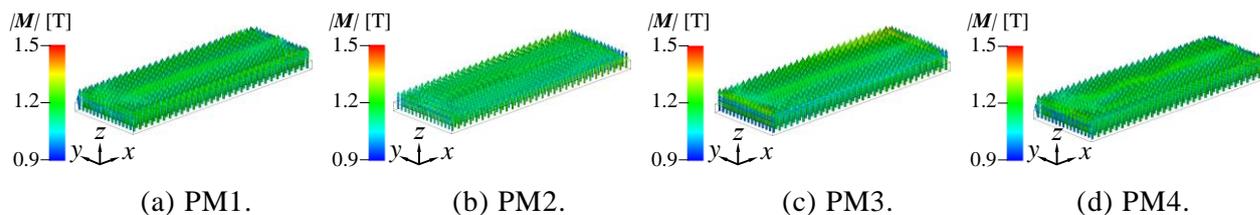


図 5 SiGrad より推定された磁化分布 (Case B)^[2]

参考文献

- [1] 回転機のバーチャルエンジニアリングのための電磁界解析技術調査専門委員会：「回転機のバーチャルエンジニアリングのための電磁界解析」，電気学会技術報告，No. 776 (2000)
- [2] 中村勢到・岡本吉史・富田直矢・堀充孝：「漏れ磁束の実測値を用いた組立着磁後における永久磁石磁化推定」，電気学会静止器・回転機合同研究会資料，SA-25-005，RM-25-005，2025 年 3 月
- [3] N. Nakamura, Y. Okamoto, K. Osanai, S. Doi, T. Aoki, and K. Okazaki, "Magnetization estimation method for permanent magnet based on mathematical programming combined with sigmoid function," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 58, no. 9-6000704, Sep. 2022.

成果発表（学会・論文・研究会等）			
	学会・論文・研究会等の別	タイトル	発行または発表年月
研 究 業 績	学術論文 IEEE Access	Magnetization estimation technique of permanent magnets loaded on rotor of IPMSM using actual measurement value of leakage flux	2025年1月 査読有
	国際学会発表 CEFC 2024	Nondestructive estimation of permanent magnet magnetization using measured value of leakage flux originating from PMSM rotor	2024年6月
	学会発表 2024年度 非破壊検査総合シンポジウム	SPMSM 回転子における漏れ磁束を用いた極異方配向磁石の磁化推定に関する検討	2024年6月
	学会発表 電気学会静止器・回転機合同研究会	漏れ磁束の実測値を用いた組立着磁後における永久磁石磁化推定	2025年3月
	その他（アピールすることがあればご記入ください。）		