

## 2024年度 永守財団 研究助成 研究報告書

|             |                           |
|-------------|---------------------------|
| 所 属 機 関     | 長崎大学 総合生産科学域(工学系)電気電子工学部門 |
| 職 位 または 役 職 | 助教                        |
| 氏 名         | 大友 佳嗣                     |

### 1. 研究題目

磁極の3次元構造最適化に基づく高出力密度な航空機用 SPM モータの開発

### 2. 研究目的

加速的な CO<sub>2</sub> 削減要求に伴い、航空産業においても 2050 年までにその実質排出量をゼロにする目標を掲げている。この目標達成のため現在、航空機電動化に関する技術開発が世界的に推進されており、中でも航空機の要求仕様に特化したモータ開発が重要な技術課題になっている。航空機に用いられるモータ設計では規定の飛行高度を維持するため必要となる高トルク性能と、航続距離改善のため必要となる軽量性を同時に考慮する必要がある。そのため、航空機用モータにおいては現行の自動車用モータを大幅に上回る出力密度(kW / kg)の達成が強く求められている。上記仕様を満足するモータの実現に向け、高出力密度な表面磁石(SPM)モータの開発が世界的に進められている。先行研究においては高飽和磁束密度のコア材やハルバッハ配列の磁石配置を採用することにより、その出力密度向上に向けた検討がなされている。しかし、いずれの例においても SPM モータの2次元断面最適化が議論の中心であり、回転軸方向への構造変化を含む最適化の有効性は検討されていない。

そこで本研究では、助成者が開発してきた電気機器のトポロジー最適化による3次元形状最適化法を上記 SPM モータの最適設計へと拡張し、航空機の特殊環境下においてもその出力密度を飛躍的に向上させる全く新しい3次元構造を見出すことを目的とする。本研究により得られるモータの3次元構造に対する知見は航空機のみならず、自動車や産業機械におけるモータ開発技術の発展にも資する内容になると考える。

### 3. 研究内容及び成果

#### (1) 3次元トポロジー最適化手法の開発

本研究では、従来検討されていなかった航空機用 SPM モータの3次元トポロジー最適化手法の開発をはじめに行った。図1に示すのは設計対象とする40極48スロット SPM モータの3次元最適化モデルである。磁極の対称性から青色で示す設計領域の材料分布(空気・鉄・磁石)をトポロジー最適化により決定すると共に、磁石材料の面内磁化方向も最適化により合わせて決定する。SPM モータの3次元材料分布をトポロジー最適化によって完全自由に決定した場合、実製造困難な微細形状や曲面構造が設計領域内に生成される恐れがある。そこで提案法においては図1に示すように、設計領域を回転軸に沿っていくつかのレイヤーに分割し、各レイヤー内において積層方向の材料分布を均一とする手法を採用した。これにより、3次元的な新規構造の探索と実製造性のバランスを考慮した形状最適設計が可能になる。本最適化のイメージは図2に示す通りである。ここで、各レイヤーの材料分布および磁石の磁化方向は、ガウス基底関数の重ね合わせにより表現される形状関数の出力を、図3に示す材料チャートに割り当てることにより決定される。

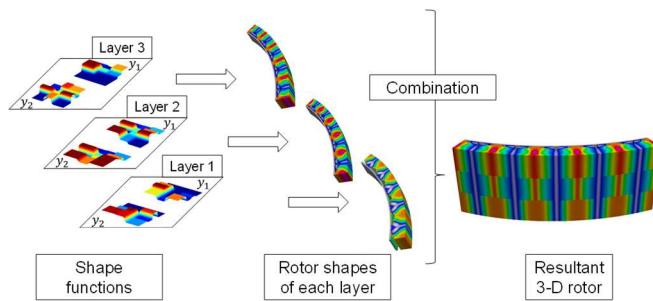


図2 3次元トポロジー最適化の概念図

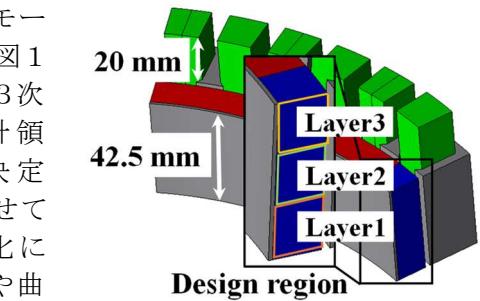
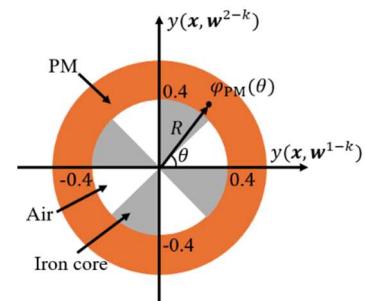
図1 最適化モデル  
(1/16 モデル)

図3 トポロジー最適化の材料チャート

#### (2) 3次元ハイブリッド最適化手法の開発

前述の手法は積層方向に分割したレイヤー高さやロータ幅については最適化の設計変数に含まれていないため、3次元構造最適化による効果を十分に発揮できているとは言えない。そこで、(1)において開発した手法をベースに、ロータ幅や各レイヤー高さも寸法最適化によって同時に決定する、3次元ハイブリッド最適化手法の開発を行った。図4に示すのは今回の最適化手法開発において検討した、3つの形状パラメータ設定である。これら形状パラメータの変化毎に3次元モデルの有限要素分割を実施した場合、許容できない程にまで最適化に要する計算時間が増大する問題を生じる。そこで本研究では、設計領域内において事前分割した有限要素の節点を形状パラメータに応じて可変とする、3次元要素変形法を開発した(図5)。これにより、有限要素の再分割が不要になるため、計算時間を増大させることなく、各レイヤー内のトポロジー最適化と図4に示す形状パラメータ最適化を同時に実現することが可能になる。

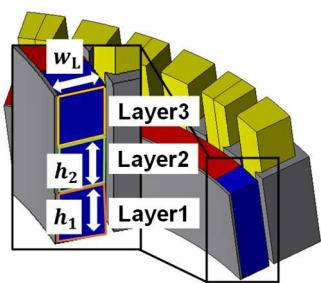


図4 形状パラメータ設定

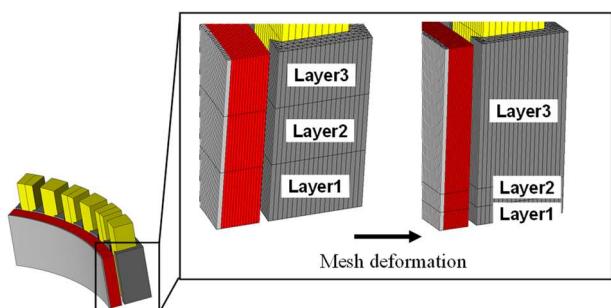
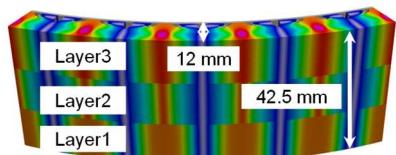


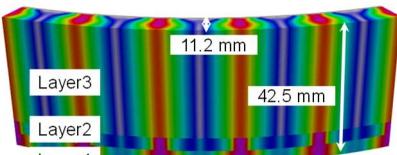
図5 3次元要素の変形

### (3) 最適化結果の比較

前述の最適化法により得られた SPM モータのロータ最適化形状を図6に、トルク密度の比較結果を図7にそれぞれ示す。ここで、図6におけるカラーコンターは磁石磁化方向を表している。ロータ幅と各レイヤー高さを可変とした図6(b)に示す3次元ハイブリッド最適化形状は、既存の2次元最適化および、各レイヤーの形状パラメータ(図4)を固定とした3次元トポロジー最適化に対して大幅なトルク密度向上を達成した。これはロータ重量の3次元的な軽量化実現と、最適な3次元磁気回路の構成が効果的に実現されたことによる。以上の結果より、トポロジー最適化と形状パラメータ最適化を組み合わせる3次元ハイブリッド最適化が、航空機用 SPM モータの特性改善に有望であることを明らかにした。



(a) トポロジー最適化



(b) ハイブリッド最適化

図6 ロータの3次元最適化形状(1/16 モデル)

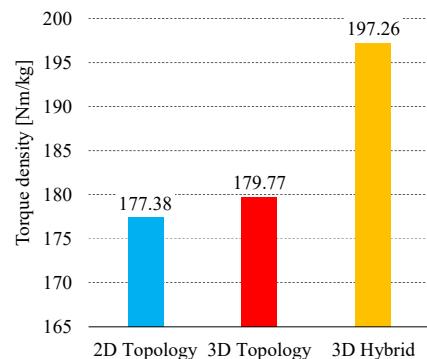


図7 トルク密度の比較

### 4. 今後の研究の見通し

2024 年度の研究助成においては、航空機用 SPM モータのトルク密度を飛躍的に向上させることを可能にする、3次元ハイブリッド最適化法の開発に成功した。本最適化法を基盤として今後の研究においてはまず、3 次元的な磁石磁化方向の探索および、ステータ形状の3次元構造最適化を実現可能にする。これにより、図7に示すトルク密度を更に凌駕する、革新的な SPM モータの最適構造が探索可能になると考える。また、実際の航空機用モータは 200°C 近くにまで達する高温環境下での使用が想定されるため、この特殊環境においても SPM モータの性能を維持する最適設計を実現する必要がある。そこで、磁石の耐減磁や渦電流損を改善させる最適設計を新たに検討する。これにより、トルク密度の改善に留まらない、動作環境の変化にロバストな SPM モータの3次元構造最適設計を目指す。

### 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] Haruki Kinoshita, Yoshitsugu Otomo, and Takashi Abe, “3D Multi-Material Topology Optimization of a Surface Permanent Magnet Motor with High Torque Density for Urban Air Mobility”, IET Science, Measurement & Technology. (投稿中)

#### 【国際会議(査読付)】

- [1] Haruki Kinoshita, Yoshitsugu Otomo, and Takashi Abe, “3-D Multi-Material Topology Optimization of a Surface Permanent Magnet Motor with High Torque Density for Urban Air Mobility”, Compumag2025, no. 286, Naples, Italy, Jun. 2025.

#### 【国内会議(査読無)】

- [1] 木下 陽暉, 大友 佳嗣, 阿部 貴志, 「アーバンエアモビリティ用 SPM モータの高出力密度化に向けた 3 次元トポロジー最適化の基礎検討」, 令和7年電気学会全国大会, no. 5-045, 2025 年 3 月.