

擬似 3D 解析を用いたアキシアルギャップ型 SR モータの トルク重量密度の最大化

Maximization of torque weight density of axial flux type switched reluctance motor using quasi-3D analysis

阿部洋央・後藤博樹[†]

宇都宮大学大学院地域創生科学研究科, 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2 (〒321-8585)

H. Abe and H. Goto[†]

Utsunomiya Univ., Graduate School of Regional Development and Creativity, 7-1-2 Yoto, Utsunomiya, Tochigi 321-8585, Japan

Currently, there is a demand for the electrification of aircraft, and motors for driving aircraft are required to be lightweight and have high output. Therefore, this study focused on the axial flux SR motor (AFSRM) for high torque density. However, the 3D finite element method generally used in electromagnetic optimization of AFSRM is problematic because it requires a large amount of computation time. In the study, a quasi-3D analysis was used to study how to maximize the torque weight density of AFSRM; the motor was divided in the radial direction, and the divided cross-sectional model was analyzed as a 2D model. In addition, the analysis was performed under the condition of a constant motor weight.

Key words: Electric aircraft, axial flux motor, switched reluctance motor, torque weight density, quasi-3D analysis

1. はじめに

近年、二酸化炭素排出削減の観点から、ハイブリッド自動車や電気自動車が普及しつつあり、自動車の電動化が急速に進行しているが、航空機分野においても同様に電動化が望まれており、航空機向けの主機モータの開発が活発化している¹⁾。航空機用モータにおいては、航空機の積載可能量を確保するため、より一層の軽量化と高出力化、すなわち高出力密度化が要求される。

現在一般的に電動航空機に開発されているモータは、出力密度と効率の点から、永久磁石同期モータ(PMSM)が主流である。一方、PMSMの問題点として、永久磁石の原材料であるレアアースの供給の不安定さによる価格高騰や、永久磁石の熱減磁による性能劣化が挙げられる。特に航空機分野においては、飛行中のモータの信頼性は極めて重要であり、原理的に熱減磁を生じない、磁石レスモータは一考に値する。そのため、磁石レス、あるいはレアアースレス高性能モータに関する研究が活発化している^{2,3)}。

スイッチトリラクタンスモータ(Switched Reluctance motor: SRM)は、磁石レスであるため、熱減磁の心配がなく、回転子の構造が簡単なため、過酷な環境においても使用可能な高い信頼性を備えるモータの一つである。一方で、SRMはPMSMのようなレアアースを用いたモータと比較してトルク密度が低い⁴⁾ため、高トルク密度化が課題となっている⁵⁾。

SRMは、構造の違いによりラジアルギャップ型SRMとアキシアルギャップ型SRMに分類される。筆者らは高トルク密度が期待できる信頼性の高いモータとして、アキシアルギャップ型スイッチトリラクタンスモータ(Axial Flux Switched Reluctance Motor: AFSRM)に着目した。AFSRMは、巻線占積率を上げやすく、またギャップ面積を増やしても極間の漏れ磁束が増加しにくいことから、同重量でトルク密度を比較した場合、ラジアルギャップ型に比べてアキシアルギャップ型の方が有利であると考えられる。

AFSRMにおける解析では、磁束の軸方向成分を考慮する必要があるため、通常は3次元有限要素解析(3D-FEM)を用いる必要がある。しかし、3D-FEMは膨大な計算時間が必要となるため、多くのパラメータスタディをこなすことが困難である。そこで、本研究では、計算時間を短縮できる疑似3次元解析(Quasi-3D Analysis)⁶⁾により、AFSRMのトルク重量密度の最大化について検討した。

2. 擬似 3D 解析の概要

2.1 断面モデルの作成

擬似3D解析は、モータの3Dモデルを径方向に分割し、分割した断面モデルごとに2D解析を行い、各断面モデルの解析結果を統合して、全体の解析結果を得る手法である。

まず、Fig. 2.1に示すように、コイルエンドを無視した鉄心領域のみに対し、内径 R_{in} から外径 R_{out} の間を径方向に薄いドーナツ状に等間隔で n 分割する。Fig. 2.2に示すように、AFSRMの磁束密度の分布は径方向に対して一様ではないため、径方向の分割数 n によって計算精度が影響を受ける。一般に、分割数 n を増やすと、解析精度は向上するが、それに伴い解析に要する時間は増加してしまう⁷⁾。また、分割数 n を一定以上増加させても、精度は一定以上向上しないことがわかっている⁸⁾。本検討では、解析精度と解析時間のバランスを検討した結果、分割数 $n=10$ とした。

ここで、この時の各断面モデルの半径 R_k は(1)式で与えられる。

$$R_k = R_{in} + \left\{ \frac{(R_{out} - R_{in})}{n - 1} \right\} (k - 1) \quad (1)$$

次に、各断面をFig. 2.3のように展開して n 個の断面モデルを作成する。ここで、最内径側の断面モデルをSeg. 1、内径側から k 番目のモデルをSeg. k とし、その面積をそれぞれ S_1 、 S_k とする。続いて、これらの断面モデルそれぞれについて2D-FEM解析を行う。2D-FEMにより得られた結果は、各断面の特性であるため、モータ全体の特性を評価するためには各断面の結果を合成する必要がある⁹⁾。加重平均⁹⁾を用いて特性算定を行った。

Corresponding author: H. Goto (e-mail: h_goto@cc.utsunomiya-u.ac.jp)

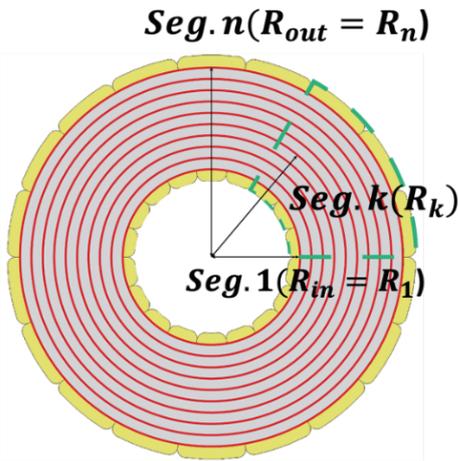


Fig. 2.1 Split of AFSRM.

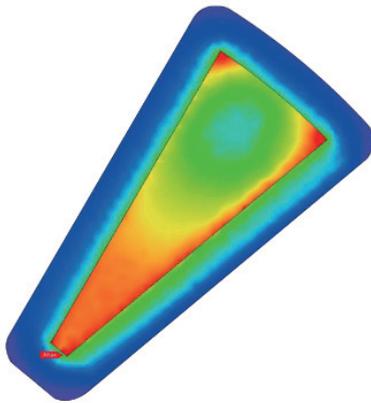


Fig. 2.2 Magnetic flux density distribution of stator pole.

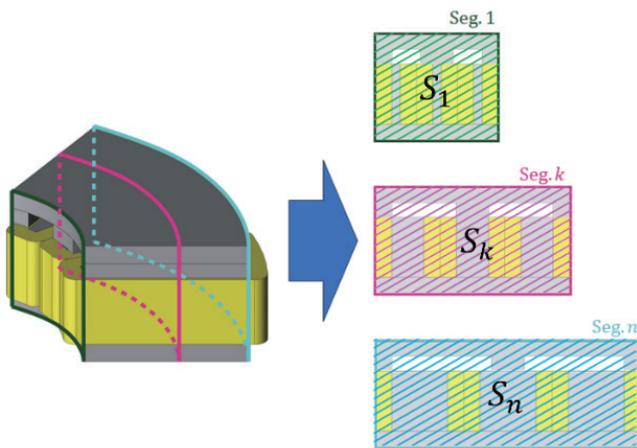


Fig. 2.3 Creating cross-sectional model.

2.2 加重平均を用いた特性算定

各断面モデルの 2D-FEM により得られた特性値 C_k を用いて、(2)式を用いて合成し、モータモデル全体の特性を得る。このとき、特性値 C_k は回転方向の電磁力であり、(2)式により得られるモータモデル全体の特性値 C はトルクである。

$$C = (R_{out} - R_{in}) \sum_{k=1}^n \beta_k C_k R_k \quad (2)$$

ここで、(2)式の重み係数 β_k は各断面モデルの面積比であり、各断面モデルの面積を S_k として(3)式で与えられる。

$$\beta_k = \frac{S_k}{\sum_{k=1}^n S_k} \quad (3)$$

3. 擬似 3D 解析を用いたトルク重量密度の最大化

3.1 AFSRM の概要

本研究で用いた AFSRM モデルの一例を Fig. 3.1 に示し、その詳細を Table. 3.1 に示す。検討で用いたモータは、固定子 18 極、回転子 12 極の 1 ステータ 2 ロータ型の AFSRM であり、重量はすべてのモデルで 15kg となっている。

今回の解析では、特定の電流密度時におけるトルク特性のみに着目するため、電源電圧が十分に大きく、この回転数において、十分な電流の制御性があることを想定し、全てのモデルにおいて、Fig. 3.2 の電流波形を適用した。そのため、各モデルにおける必要電圧は異なることになるが、最適化後、N-T 特性と電源電圧を考慮して、線径・ターン数を調整し、同一電流密度・同一起磁力を確保する予定である。

3.2 解析条件

今回の検討では、モータ重量を 15kg 一定条件下で外径と軸長を変化させ、トルクが最大となる寸法パラメータを探索した。なお、固定子極長と回転子極長の比、および、回転子極幅とコイルスロット幅については一定とした。

3.3 最適化方法

最初に、初期形状を定義する。今回の検討では、外径が 240mm, 270mm, 290mm, 300mm, 310mm, 330mm, 360mm の 7 つのモデルについて検討を行った。それぞれの外径のモデルについて、Fig. 3.3 に示すように、極断面形状に関して、回転子極断面面積 S_{rp} と固定子極断面面積 S_{sp} 、コイルスロット面積 S_{slot} の 3 つの面積が等しくなるように回転子極幅 W_{rp} を決定し⁹⁾、初期モデルとする。

初期形状が決定したのち、Fig. 3.4 に示す、軸長を探索パラメータとして変化させて擬似 3D 解析によりトルクを算定する。このとき、モータ重量が 15kg ちょうどとなるように内径を調整している。これにより、軸長を短くした場合は内径が小さくなり、逆に軸長を長くした場合、内径は大きくなりリング状に近づく形状となる。

軸長を変化させるにあたって、回転子極長と固定子極長とヨーク厚の比は一定である。また、巻線径は一定であるため、軸長の変化に応じて巻線の巻数を変化させている。

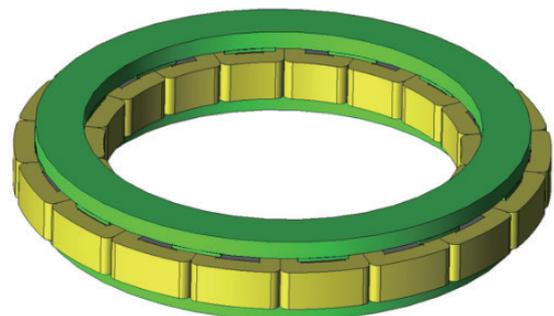


Fig. 3.1 Structure of AFSRM.

Table 3.1 Specifications of AFSRM.

Stator/rotor poles	18/12 poles
Weight	15.0 kg
Current density	12.75 A/mm ²
Rotation speed	3000 rpm
Gap length	0.3 mm
Winding size	1.1 × 1.1 mm ²
Winding slot fill factor	70 %
Core material	35H300

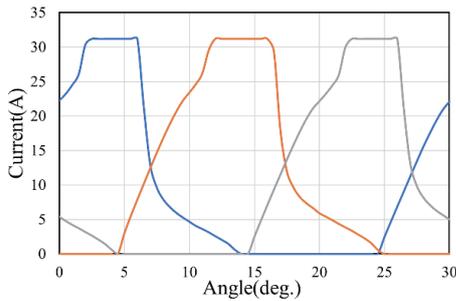


Fig. 3.2 Current waveform.

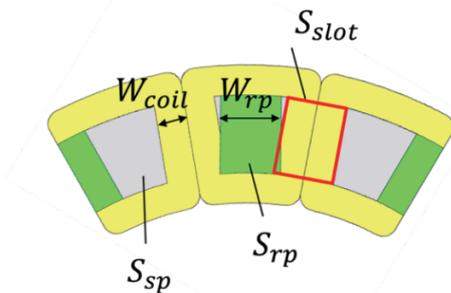


Fig. 3.3 Determining initial pole shape.

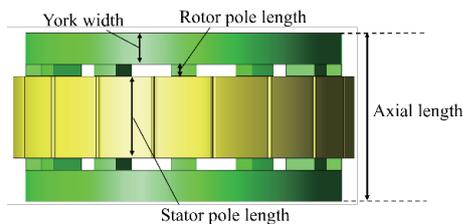


Fig. 3.4 Relationships between axial length and pole length.

4. 検討結果

4.1 軸長と内径の変化による影響

各外径モデルにおける、軸長と内径の変化による平均トルクとトルク重量密度への影響を Fig. 4.1 に示す。また、Fig. 4.2 に外径 300mm、軸長 50mm、70mm、90mm のモータモデルの磁束密度分布を示す。Fig. 4.1 に示すように、今回検討した各外径モデルでは、どのモデルも軸長 70mm 付近にピークが来ていることがわかる。また、Fig. 4.2 より、これよりも軸長が短くなると、固定子極とヨーク部の磁気飽和の影響によりトルクが低下したと考えられる。

Fig. 4.3 に外径 240mm、300mm、360mm の3つのモデルにおける、15deg. 時の1極当たりのコイルの鎖交磁束数を示す。ただし、ロー

タ極とステータ極が完全に対向になる回転子位置を 0deg. と定義する。Fig. 4.3 からわかるように、鎖交磁束数は最適な軸長付近を境に減少している。

また、Fig. 4.4 に軸長を変化させたときのモータ形状を図示する。Fig. 4.4 に示すように、軸長を長くし、内径が大きくなった場合、コイルターン数は増加するが、内径が大きくなるため、対向する面積が減少するため、トータルでは鎖交磁束数が微減し、トルクが低下したと考えられる。

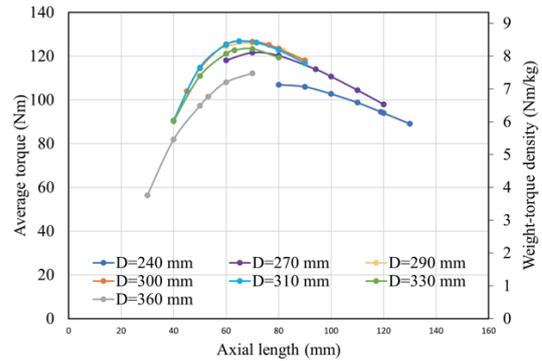


Fig. 4.1 Effect of pole length and inner diameter on average torque and torque weight density.

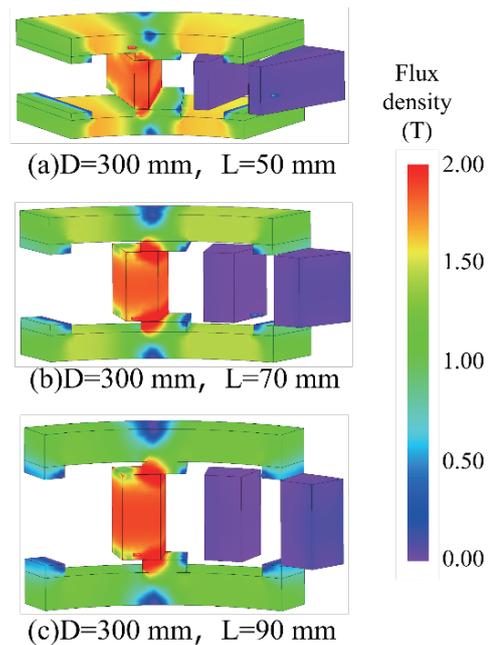


Fig. 4.2 Distribution of magnetic flux density.

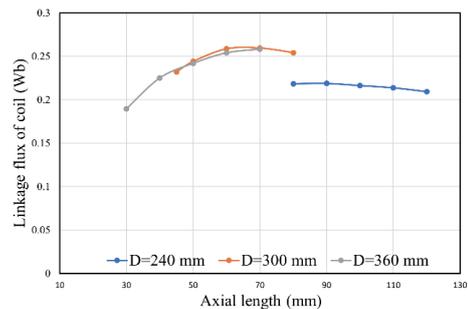
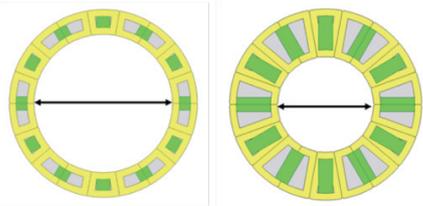


Fig. 4.3 Linkage flux of coil (15 deg.).



(a) Longer axial length (b) Shorter axial length

Fig. 4.4 Relationship between axial length and inner diameter.

4.2 外径と平均トルク

Fig. 4.5 に外径と平均トルクの関係を示す。ただし、軸長は最適化されたモデルを使用しており、各モデルの軸長は 70mm 付近であり、ここでは外径のトルクへの影響を考察する。また、Fig. 4.6 に外径 270mm, 310mm, 330mm のモータモデルの磁束密度分布を示す。さらに、今回の検討で得られた最適モデルの寸法パラメータを Fig. 4.7 に示す。

Fig. 4.5 より、トルクが最大となったのは外径が 310mm のモデルであった。このモデルの平均トルクは 126.9Nm, トルク重量密度の最大値は 8.46Nm/kg となった。前述したように、各モデルで軸長の最適点がほぼ変わらないことから、Fig. 4.6 より、外径が 310mm より大きいモデルについては、内径が大きく、極端面積が小さくなっていることで、磁気飽和の影響によりトルクが低下したと考えられる。また、外径が小さい場合については、同等の電磁力でも直径が小さいためトルクが低下したと考えられる。

4.3 3D 解析と擬似 3D 解析の比較

Fig. 4.8 に外径 310mm モデル (最適モデル) の 3D 解析と擬似 3D 解析におけるトルク波形の比較を示す。

図より、トルクのボトム等は波形レベルでよく一致しているが、ピーク部では擬似 3D 解析の方がトルクが大きく算定されてしまっていることがわかる。平均トルクは 3D 解析が 120.2Nm, 擬似 3D 解析が 126.9Nm であり、誤差は 5.5% であった。誤差の原因については、コイル端部の漏れ磁束の影響によるものだと考えられる。

一方で、解析時間については、3D 解析の場合は 1 モデルあたり 193 分 45 秒、擬似 3D 解析を使用した場合は 26 分 27 秒となり、擬似 3D 解析を用いることで解析時間を約 7 分の 1 に短縮できており、限られた設計時間でより多くのパラメータスタディをこなせることが可能であることがわかる。

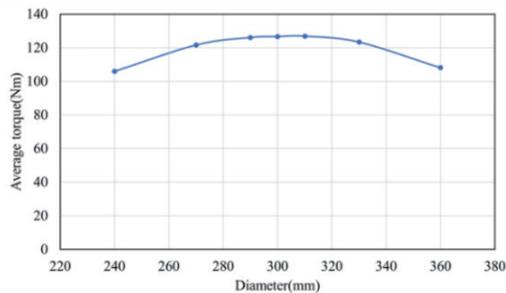


Fig. 4.5 Relationship between outer diameter and average torque.

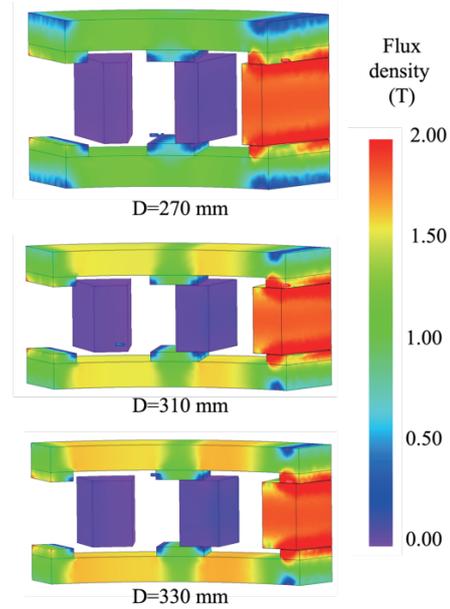


Fig. 4.6 Distribution of magnetic flux density.

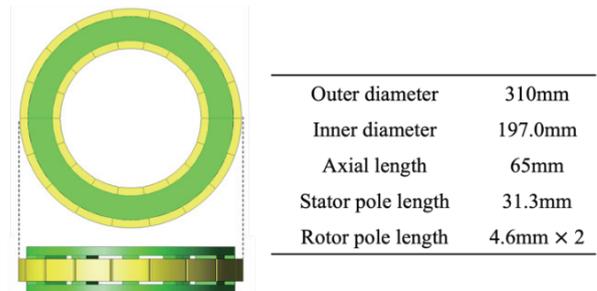


Fig. 4.7 Optimal motor model in this study.

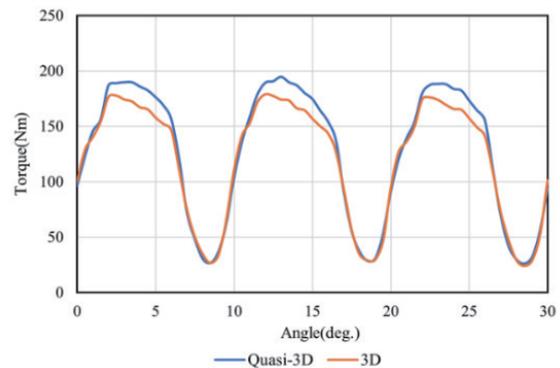


Fig. 4.8 Comparison of torque waveforms.

5. まとめ

本研究ではアキシシャルギャップ型 SR モータ (AFSRM) に着目し、擬似 3D 解析を用いてトルク重量密度の最大化を図った。擬似 3D 解析を用いることで、3D-FEM の約 7 分の 1 の計算時間を達成できそれにより多くのパラメータスタディを実行できた。その結果、モータ重量 15kg 一定の条件下において、軸長と外径の最適化により、最大トルク 126.9Nm, トルク重量密度 8.46Nm/kg を達成することができた。同体格、同構造の AFSRM⁷⁾と比較すると、重量 14.4kg, トルク 90Nm, トルク重量密度 6.25Nm/kg であり、従来の設計より

も高トルク重量密度となった。

今後は、今回最適化を行った軸長と外径以外のパラメータの最適化や、他の重量モデルや電流密度域でのトルク重量密度の検討を行い、本手法の有効性の確認と課題の抽出を行っていきたい。

References

- 1) H. Kobayashi and A. Nishizawa: *Jpn. Soc. Aero. Space. Sci.*, **63**, 42 (2015).
- 2) J.D. Widmer, R. Martin, M. Kimiabeigi: *Sustain. Mater. Technol.*, **3**, 7 (2015).

- 3) T. Ishibashi: *Denki-Seiko*, **73**, 263 (2002).
- 4) W. Cao: *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **59**, 3523 (2012).
- 5) T. Oishi and H. Goto: *IEEJ Joint Technical Meeting on Semiconductor Power Converter/Motor Drive*, MD-23-094 (2023).
- 6) H. Goto: *Inst. Electr. Eng. Jpn.*, **137**, 829 (2017) (in Japanese).
- 7) H. Goto, K. Takase, and O. Ichinokura: *IEEJ Joint Technical Meeting on Magnetics/Motor Drive, Linear Drive*, MAG-15-143 (2015).

2024年10月30日受理, 2025年1月29日再受理, 2025年3月1日採録