Copyright ©2025 by the Magnetics Society of Japan.
This article is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0)
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)., **9**, 44-48 (2025) <Paper>

2次元リニアモデルを用いたアキシャルギャップ型PMモータの実用的最適設計法に関する検討

Practical Optimum Design Method of Axial-Flux-type PM Motors using 2D Linear Model

柳沼昂志 [a)]・中村健二 [a)†]・上田祐資 [b)]・木村勇登 [b)]・原 洸 [b)]
[a)] 東北大学 大学院工学研究科，仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11（〒980-8579）
[b)] ヤンマーホールディングス㈱，滋賀県米原市梅ヶ原 2481（〒521-8511）

K. Yaginuma [a)], K. Nakamura [a)†], Y. Ueda [b)], Y. Kimura [b)], and T. Hara [b)]
[a)] Tohoku University, Graduate School of Engineering, *6-6-11 Aoba Aramaki Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan*
[b)] Yanmar Holdings Co., Ltd., *2481 Umegahara, Maibara, Shiga 521-8511, Japan*

Since axial-flux-type motors do not have a uniform structure in the axial direction, three-dimensional (3D) electromagnetic field analysis is required, which increases the calculation time remarkably when seeking optimum shapes and dimensions using optimum design algorithms, such as the genetic algorithm (GA). This paper presents a practical optimum design method using a two-dimensional (2D) linear model of axial-flux-type PM motors. It is demonstrated that the calculation accuracy for torque, losses, and efficiency using the proposed 2D linear model is almost equivalent to that of conventional 3D models, while significantly reducing the calculation time required for optimization.

Keywords: Axial-flux-type permanent magnet (PM) motor, two-dimensional (2D) linear model, genetic algorithm (GA), finite element method (FEM)

1. はじめに

近年，環境問題に対する意識の高まりから，農業機械や建設機械の電動化のニーズが高まっており，その実現に向けたモータ開発が推し進められている．農機・建機用のモータは土や資材といった重量物の運搬などのために，大トルクが要求されるが，モータを搭載するスペースには限りがある．したがって，電動農機・建機の適用拡大において，動力源となるモータには，より小さな空間の中で大トルクを発揮することが求められるため，高トルク密度化が必要不可欠である．

そこで本論文では，アキシャルギャップ構造のモータに着目する．従来のモータは，径方向にギャップを有するラジアルギャップ構造であるが，トルク発生面が半径と軸長に比例するため，狭小かつ偏平な空間では，トルクの低下が課題となる．これに対して，軸方向にギャップを有するアキシャルギャップ構造は，トルク発生面が軸長に依存しないことから，薄型化によるトルク低下を抑制できるという利点がある．また，回転子を両側から固定子で挟む構造や，逆に固定子を両側から回転子で挟む構造にすることで，同一体格でトルク発生面を2倍にすることもできる．このような理由から，アキシャルギャップ構造の採用によりトルク密度の向上が期待され [1)-4)]，特に電動農機・建機用のモータに適すると考えられる．ただし，アキシャルギャップ型モータの構造は軸方向に一様ではないため，3次元の電磁界解析が必須となり，2次元解析と比べて計算コストが増加する．特にトポロジー最適化や遺伝的アルゴリズムなどを用いた最適形状・寸法の探索では，非常に多くのケースの解析が必要となるため，これを3次元解析で実行することは，計算機容量や計算時間の観点から実用的ではない．そこで本論文では，アキシャルギャップ型永久磁石（PM）モータの3次元モデルをこれと等価な2次元リニアモデルに変換することで，実用的な最適設計法の確立を試みたので報告する．

Corresponding author: K. Nakamura (e-mail: kenji.nakamura@tohoku.ac.jp)

2. アキシャルギャップ型PMモータの2次元リニアモデルの導出と特性算定

2.1 2次元リニアモデルの導出

Fig. 1に，本論文での考察に用いたアキシャルギャップ型PMモータの諸元を示す．本モータは3相16極18スロットの分数スロット集中巻のモータであり，固定子および回転子をそれぞれ1つずつ有するシングルステータ・シングルロータ構造を有する．

Fig. 2に，アキシャルギャップ型PMモータの3次元モデル，およびこれと等価な2次元リニアモデルを示す．同図(b)に示すように，2次元リニアモデルの x 軸方向の長さは，3次元モデルにおける同図(a)の直径 D_{ave} に円周率 π を乗じたものとした．ここで直径 D_{ave} は，この直径の円とそれぞれ回転子の外径 D_{outer} および内径 D_{inner} の円で囲まれた2つの面積が等しくなる長さであり，次式で与えられる．

$$D_{ave} = \sqrt{\frac{D_{outer}^2 + D_{inner}^2}{2}} \tag{1}$$

一方，2次元リニアモデルの y 軸方向の長さ L は，3次元モデルの高さに等しい．

最後に，z 軸方向の長さ z_{lin} は，固定子極の断面積が2次元リニアモデルと3次元モデルで一致するように，次式で与えた．

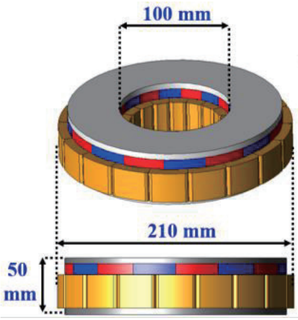
$$z_{lin} = \frac{S_{sp}}{w_{lin}} \tag{2}$$

ここで，w_{lin} は 2 次元リニアモデルの固定子極の極幅である．また，S_{sp} は Fig. 3 に示す固定子極の断面積であり，次式で示すように，固定子鉄心の外径 D_{outer} および内径 D_{inner} の円で囲まれた面積から，スロット開口部の面積を引くことで求まる．

$$S_{sp} = \frac{\pi}{s}\left(\frac{D_{outer}{}^2 - D_{inner}{}^2}{2}\right) - \left(\frac{D_{outer} - D_{inner}}{2}\right)t \tag{3}$$

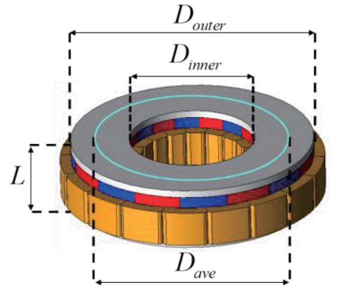
ここで，s はスロット数，t はスロット開口幅である．なお，簡単のため，スロット開口部は長方形とみなした．

上述のように，固定子極の断面積が 2 次元リニアモデルと 3 次元モデルで一致するように，z 軸方向の長さ z_{lin} を求めるため，固定子極の体積は両モデルで一致する一方で，固定子バックヨークの体積は異なる．

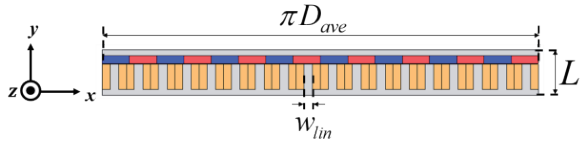


Target power (kW)	25
Target torque (N·m)	100
Max speed (rpm)	3000
No. of poles/slots	16/18
Magnet material	Nd-Fe-B
Material of iron core	35A230

Fig. 1 Specifications of axial-flux-type PM motor.



(a) 3D model



(b) 2D linear model

Fig. 2 Analysis models of axial-flux-type PM motor.

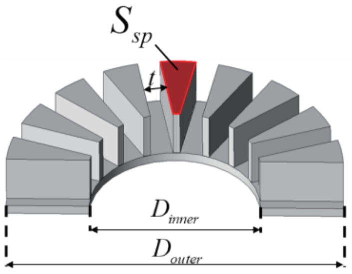


Fig. 3 Cross sectional area of stator pole.

2.2 2 次元リニアモデルによるアキシャルギャップ型 PM モータの特性算定

前節で導出した 2 次元リニアモデルを用いて，2 次元有限要素法（2D-FEM）によるアキシャルギャップ型 PM モータの特性算定を行い，3D-FEM による算定結果と比較した．解析条件は，回転数 2000 rpm，電流位相角 0 deg. とした．なお FEM には，(株)JSOL の JMAG-Designer Ver. 23.0 を用いた．

Fig. 4 に，無負荷誘起電圧の計算波形の比較を示す．この図を見ると，2 次元リニアモデルと 3 次元モデルの計算波形は良く一致していることがわかる．

Fig. 5 に，電流密度対トルク特性を示す．この図を見ると，2 次元リニアモデルと 3 次元モデルの計算値はおおよそ一致していることがわかる．なお，2 次元リニアモデルでは解析上，直線運動になるため，トルクは直接求まらない．そこで，2 次元リニアモデルによるトルク T_{lin} は，次式によって求めた．

$$T_{lin} = F_{lin} \cdot \frac{D_{ave}}{2} \tag{4}$$

ここで，F_{lin} は 2 次元リニアモデルで算定された推力である．

Fig. 6 に，電流密度 10 A/mm^2 における損失内訳および効率の比較結果を示す．なお，効率は次式から求めた．

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + W_c + W_i + W_{pm}} \times 100(\%) \tag{5}$$

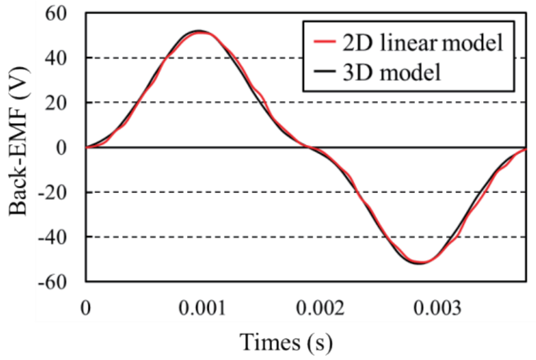


Fig. 4 Comparison of back-EMF waveforms under no load.

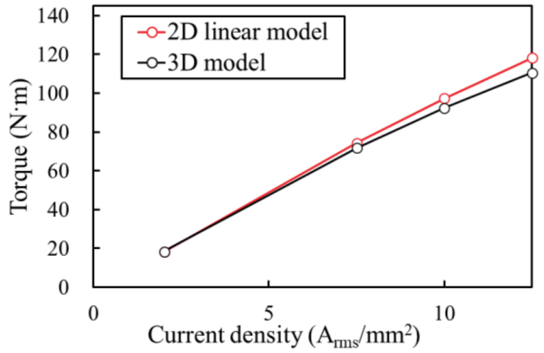


Fig. 5 Comparison of current density versus torque characteristics.

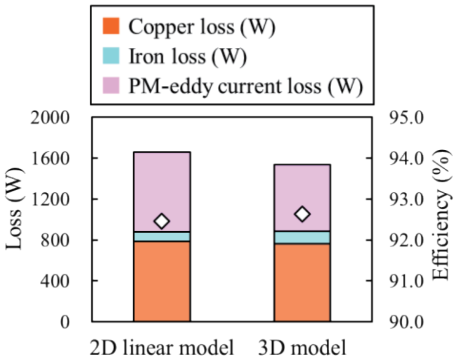


Fig. 6 Comparison of loss breakdown and efficiency.

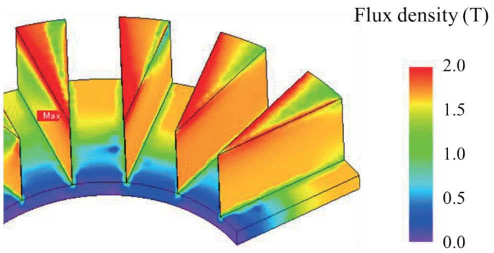
ここで，P_{out} は機械出力，W_c は銅損，W_i は鉄損，W_{pm} は磁石渦電流損である．

この図を見ると，銅損は概ね一致しているが，2 次元リニアモデルにおいて鉄損は過小評価，磁石渦電流損は過大評価しており，これによって効率の算定結果に誤差が生じていることがわかる．この原因を以下で考察する．

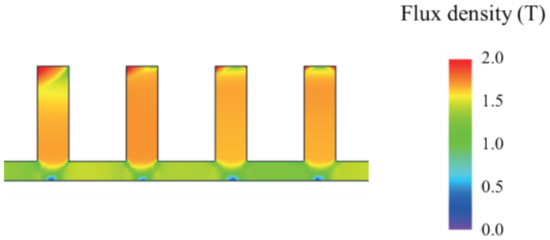
まず，鉄損の過小評価の要因について，Fig. 7 の固定子鉄心の磁束密度コンター図を用いて説明する．まず固定子バックヨークの磁束密度を比較すると，同図(a)の 3 次元モデルにおいては，内径側は 0.5 T 以下と低いのに対して，外径側は 1.7 T 程度まで高くなっており，分布の粗密が大きいことがわかる．一方，同図(b)の 2 次元リニアモデルにおいては，z 軸方向の磁束分布は一様とみなされるため，このような分布の粗密を考慮できない．また，全体的に 1.0～1.2 T 程度と低いことがわかる．さらに，提案の 2 次元リニアモデルでは，先述のとおり，z 軸方向の長さを 3 次元モデルの体積ではなく，固定子極の断面積から決めているため，固定子バックヨークの体積は異なり，2 次元リニアモデルの方が約 9%小さい．したがって，これらが鉄損の過小評価の要因の一つであると考えられる．また同様に，固定子極の磁束密度を比較すると，同図(a)の 3 次元モデルにおいては，磁束密度が 2 T 以上の領域が極先端を中心に広く分布しているのに対して，2 次元リニアモデルではその領域が狭いことがわかる．したがって，これも鉄損が過小評価された要因の一つであると考えられる．

次に，磁石渦電流損の過大評価の原因について，Fig. 8 の回転子磁石のジュール損失密度コンター図を用いて説明する．同図(a)を見ると，3 次元モデルの磁石渦電流損は径方向に分布を持っていることがわかる．これは，固定子極の極幅が径方向に一様ではないことで，固定子から回転子に流れる磁束が径方向で不均一になるためだと考えられる．一方，同図(b)の 2 次元リニアモデルにおいては，z 軸方向の磁石渦電流損の分布は一様とみなされるため，3 次元モデルのように磁石渦電流損が径方向に分布することを考慮できない．これにより磁石渦電流損が過大評価されたと考えられる．

以上の理由から，2 次元リニアモデルにおいて，鉄損は過小評価，磁石渦電流損は過大評価されたと考えられる．

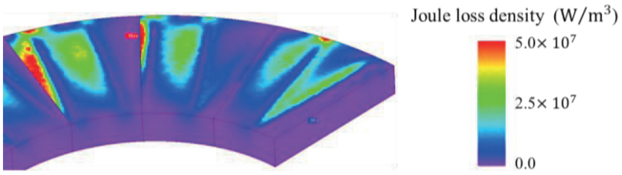


(a) 3D model

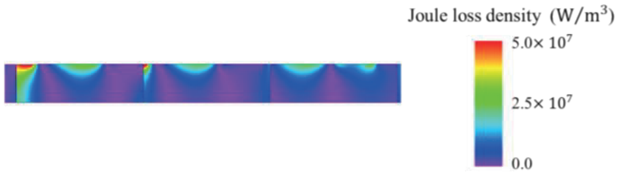


(b) 2D linear model

Fig. 7 Flux density contour diagrams of stator cores.



(a) 3D model



(b) 2D linear model

Fig. 8 Joule loss density contour diagrams of rotor magnets.

しかしながら一方で，Fig. 6 に示したように，両者の効率の差は 1%未満であることから，導出した 2 次元リニアモデルは実用上十分な精度を有していると結論付けることができる．

3. 2 次元リニアモデルによるアキシャルギャップ型 PM モータの寸法最適化

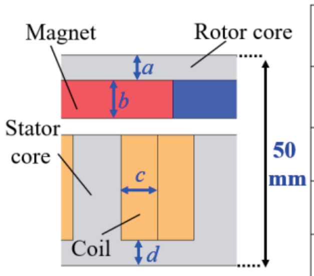
前章では，2 次元リニアモデルを用いたアキシャルギャップ型 PM モータの解析の妥当性を示した．本章では，このモデルを用いてアキシャルギャップ型 PM モータの寸法最適化を行い，2 次元リニアモデルによる最適設計の有用性を明らかにする．

Fig. 9 に，2 次元リニアモデルを用いて最適化を行った 4 つの寸法を示す．寸法の最適化に際しては，軸長およびギャップ長は不変とした．解析条件は，回転数 2000 rpm，電流密度 10 A/mm^2，電流位相角 0 deg. とした．

最適化には遺伝的アルゴリズム（GA）を使用した．GAは，遺伝子の変異，自然淘汰・適者生存という生命進化にヒントを得た最適化手法である．最適設計における GA では，進化における生命の環境への適応度を設計対象の評価値に読み替え，その評価値の高い個体が生き残るように集団の進化を進める [5]．本論文では，評価値をトルクおよび効率とし，これら 2 つの評価値の最大化を目的とする多目的 GA による寸法最適化を実施した．ここで，トルクは 100 N·m 以上，効率は 94%以上を目標とした．また，世代数と集団サイズはそれぞれ 40 とし，全 1600 ケースの解析を実施した．

Fig. 10 に，多目的 GA により得られた解の分布を示す．この図を見ると，2 つの目的関数はトレードオフの関係にあり，いわゆるパレートフロントが得られていることがわかる．ここでパレートフロントとは，基本的にどの解にも劣っていない解の集合のことであり，トレードオフの関係にある複数の目的関数を考慮しながら最適解を探索する際に得られる [6]．今回の最適化ではトルク 100 N·m 以上，効率 94%以上を同時に達成可能な解は見つからなかったことから，パレートフロントの中から，トルクが目標値の 100 N·m 以上である解のうち, 最も高効率なものを最適とした．

Table 1 に, 最適化前後のモデルの寸法とトルクおよび効率の算定値を示す．また比較のため，多目的 GA で得られた寸法を用いて 3 次元モデルを作成し，特性を算定した結果も同表に示す．この表を見ると，2 次元リニアモデルを用いた最適設計の結果は 3 次元モデルの結果に対してほぼ 5%以内で一致していることがわかる．また，トルク，効率



Parameters (mm)	Variable name
Rotor back-yoke thickness	a
Magnet thickness	b
Coil width	c
Stator back-yoke thickness	d

Fig. 9 Parameters to be optimized in 2D linear model.

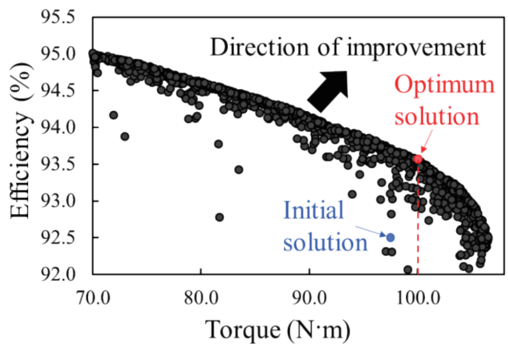


Fig. 10 Distribution of solutions generated by multi-objective genetic algorithm (GA).

Table 1 Comparison of initial and optimum models, along with their torques and efficiencies calculated by 2D linear and 3D models.

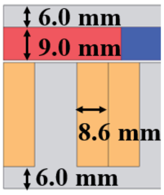
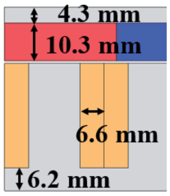
		Initial model	Optimum model
			
Torque (N·m)	2D	97.2	100.1
	3D	92.3	97.4
Efficiency (%)	2D	92.5	93.5
	3D	92.6	93.8

Table 2 Comparison of calculation times of 2D linear and 3D models.

	2D linear model	3D model
Calculation time per case (hours)	0.017 (about 1 minute)	14
Calculation time for 1600 cases (hours)	27	22400 (over 2 years)

ともに最適化によって改善されていることから，2 次元リニアモデルによる最適設計の有用性が了解される．

ここで，トルクが改善した要因は，最適化によって固定子極の極幅が大きくなり，固定子極における磁気飽和が緩和されたためであると考えられる．また，効率が改善した要因は，最適化によってコイル幅が縮小したことで巻線電流が低下し，銅損が減少したためである．

Table 2 に計算時間の比較結果を示す．この表には，1 ケース当たりの計算時間と，今回の寸法最適化に要した総ケース数の計算時間が示されている．2 次元リニアモデルの計算時間を見ると，1 ケース当たり約 1 分，全 1600 ケースで約 27 時間であり，1 日程度で寸法最適化が完了していることがわかる．一方，3 次元モデルの計算時間を見ると，1 ケース当たり約 14 時間であるため，今回の寸法最適化を 3 次元モデルで実行する場合, 2 年以上の時間を要すると推定される．以上により，2 次元リニアモデルの使用により，計算時間が大幅に短縮され，アキシャルギャップ型モータの寸法最適化の実用性が大きく向上することが明らかとなった．

4. まとめ

以上，本論文ではアキシャルギャップ型 PM モータの 3 次元モデルから，これと等価な 2 次元リニアモデルを導出するとともに，導出したモデルを用いて多目的遺伝的アルゴリズム（GA）による寸法最適化を行った．

まず，導出した 2 次元リニアモデルの妥当性を示すため

に，無負荷誘起電圧波形，電流密度対トルク特性，損失内訳および効率を算定し，3 次元モデルの算定結果と比較した．無負荷誘起電圧波形および電流密度対トルク特性については，両者の結果が概ね一致することを明らかにした．一方，鉄損および磁石渦電流損については，2 次元リニアモデルと 3 次元モデルの結果に誤差が認められたが，両者の効率の差異は 1%未満であることから, 導出した 2 次元リニアモデルは実用上十分な精度を有していると結論付けることができた．

次いで，2 次元リニアモデルを用い，トルクおよび効率の最大化を目的関数として，多目的 GA による寸法最適化を行った．その結果，トルク，効率ともに最適化によって改善され，また 2 次元リニアモデルによる最適設計の結果は 3 次元モデルの結果に対してほぼ 5%以内で一致することを明らかにした．さらに，2 次元リニアモデルを用いた寸法最適化解析に要する計算時間は，3 次元モデルを用いる場合よりも大幅に短縮されることが明らかになった．

以上より，2 次元リニアモデルによる実用的な最適設計法を確立することができた．今後は，実機の試作試験を行う予定である．

References

1) M. Aydin, S. Huang, and T. A. Lipo: *2001 Power Engineering Society Summer Meeting*, 1409 (2001).
2) F. Caricchi, F. Crescimbini, and O. Honorati: *IEEE Trans. Energy Convers.*, **14**, 673 (2002).
3) A. Cavagnino, M. Lazzari, F. Profumo, and A. Tenconi: *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **38**, 1517 (2002).
4) M. Aydin, M. Gulec, Y. Demir, B. Akyuz, and E. Yolacan: *2016 XXII International Conference on Electrical Machines*, 1493 (2016).
5) H. Igarashi: Denjikaikaiseki niyoru Saitekisekkei, p. 133 (Morikita Shuppan, Tokyo, 2023) (in Japanese).
6) Z. Wang and G. P. Rangaiah: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **56**, 560 (2017).

2024年10月12日受理，2025年2月14日採録