

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, 66-71 (2025)

<Paper>

フェライト磁石を併用したセグメント構造 アウターロータ型 PM モータのトルク脈動低減に関する検討

Reduction of Torque Ripple for Outer-Rotor-type Segment PM motor with Ferrite Magnet

櫻井将[†]・吉田征弘・田島克文 秋田大学,秋田県秋田市手形学園町1-1(〒010-0851)

S. Sakurai, Y.Yoshida, and K.Tajima

Akita University, 1-1 Tegata Gakuen-matchi, Akita-shi, Akita 010-0852, Japan

Drones have been used for limited purposes such as aerial photography and pesticide spraying, but now they are expected to be used for logistics and transportation. On the other hand, the drones are operated for a short time about 40 to 60 minutes, and they have a low payload weight of less than 10 kg. To improve these, the battery capacity can be increased, but the weight is also increased and the payload weight is decreased. So, improvement of the motor is necessary. This paper presented a novel outer-rotor-type permanent magnet (PM) motor with a segment-shaped rotor for high power density and low cost. It can be used a magnet flux effectively because it has backyoke iron, and improving output can be expected. However, the torque ripple is increased. So, the improvement of torque ripple is proved using an asymmetry rotor and Ferrite magnet.

Key words: PM motor, Torque ripple, Segmented rotor, Ferrite magnet

1. はじめに

従来、ドローンは空撮や農薬散布など限定的な用途で使われて きたが、現在は物流・運搬用、高所の監視、さらには通信基地局を 装備したものが開発されてきた. このような活用領域の拡大に伴 い、ドローンによる国内市場は、2020年度の828億円から2025年 度には4360億円と大幅拡大が予測されている¹⁾. さらに、令和4 年12月から目視外飛行(レベル4飛行)を可能とする制度ができ、 大きな追い風となっている。ドローンを使ったビジネスは今後も 大きく拡大していくとともに、人手不足などの社会課題の解決も 期待されている。一方、今現在のドローンは駆動時間が40~60分 程度と短く、積載重量の10kg以下と少ない. これらに対し、バッ テリ容量増大で駆動時間延長が実現できる一方、重量が増加する ため、運搬できる貨物重量が減少してしまう. したがって、上記の 課題解決には、駆動モータの高性能化が必須である.

ドローンの駆動モータには永久磁石同期 (PM) モータが利用さ れ、ケース表面に磁石を貼り付けた表面磁石 (SPM) 型がほとんど で採用されている³⁾. 一方、回転子にバックヨークがないため、磁 石磁束を有効に利用できず、ネオジム焼結磁石を多量使用するこ とで磁束を確保している. ネオジム焼結磁石は高価なレアアース を多量に含んでいるため、コスト増大につながる. さらに、SPM 型 で電気抵抗の小さいネオジム焼結磁石を使っているため、高調波 駆動時の渦電流損が危惧される. 今後、さらなる市場拡大が予見さ れているドローンにおいて、高出力密度化と同時にコスト増大の 問題を解決することは非常に重要である.

本論文では、先行研究にて、高トルク化および磁石使用量と渦電 流損低減を実現したセグメント (Segment PM)構造³⁾を適用するこ とで、高出力化と省レアアース化による低コスト化が期待できる と考え、ドローンモータの Segment PM の可能性について探るとと もに、トルク脈動低減について検討した。

2. セグメント構造アウターロータ型 PM モータについて

2.1 セグメントPM モータの基本構成

Fig.1にSPM, Segment PM の外観をそれぞれ示す. Segment PM は回転子鉄心と磁石が周方向に分割,配置した構造となっており、着磁も周方向にされている.これにより、d軸が鉄心中央部に配置される.これにより、鉄心が表面に大きく露出することで、電機子磁束が鉄心に流れ込み、磁石にほとんど鎖交しないことで、磁石部の渦電流損低減が期待できる.さらに、鉄心がバックヨークの役割を果たすことで、磁石磁束を有効に利用できる.

Table.1に設計モータの諸元を示す.同モータは先行研究およ び市販モータを参考に、モータ外形、負荷を決めている.14極12 スロットPMモータであり、定格速度8000 rpm、定格トルク 0.2 N・m である.それぞれのモータの異なる部分は2点ある.まず、 Segment PM は磁石表面積を増やすため、磁石の径方向長を大き くしている.このとき、Segment PM の焼結磁石の体積(使用量) は、SPM に対し、約6割低減している.その分、固定子が内側に 縮小され、コイル窓面積が減少している.次にコイル占積率を一定 としており、Segment PM はコイル窓面積減少に伴い巻線径が小 さくなっている.これら2つのモータについて、有限要素法(FEM) を用いて算定し、比較を行った.

2.2 FEMによる特性算定および比較

Fig. 2 に電流密度対トルク特性を示す.電流位相角は0 deg で 算定している.同図を見ると,磁石体積が大きく減った Segment PM が SPM と同等のトルク特性となっていることがわかる.ま た,同電流密度において、巻線径の小さい Segment PM は電流値 も小さくなっている.磁石量,電流が小さい状態で SPM と同等以 上のトルク特性が得られていることから、Segment PM では磁石 磁束を有効利用できているといえる.

Fig. 3 に無負荷時と定格負荷時のトルク脈動を示す. 同図が示 すように、SPM に対し、Segment PM の脈動が大きくなり、Peak-Peak 値で約2倍になっている. この要因について、トルク波形を

Corresponding author: S. Sakurai (e-mail:sakurai@gipc.akita-u.ac.jp).



Fig. 1 Schematic diagram of PM motors

Table. 1 Specification of PM motors.		
	Segment PM	SPM
Motor diameter	40.0 mm	
Stack length	20.0 mm	
Rotor speed	80000 rpm	
Target torque	0.2 N·m	
Number of turns/pole	10 turns / pole	
Winding diameter	0.955 mm	1.066 mm
Magnet pole pairs	7	
Gap length	0.35 mm	
Magnet length	3.1 mm	$1.85\mathrm{mm}$
Material of magnet	Sintered Nd-Fe-B	
Material of iron core	0.2 mm silicon	
Amount of magnet	1595 mm^3	3917 mm^3



極ごとに算定し、そこから考察した.

Fig. 4 に算定,比較する部位を示す. 1 極対分を対象とし,SPM での算定部位を基準とするため,Segment PM では q 軸で算定箇 所を切り替えている.Fig. 5 に算定部位のトルク波形を示す.同 図(a)は SPM のトルク波形であり,トルクが正の領域において, 3つの脈動が見える.これは磁石が周方向に長いことにより,1つ の磁石が2つのティース間にわたって対向する.このとき,それぞれのティースにおいて磁石磁束が短絡するが,回転子位置により,吸引・反発が交互に発生するため3つの脈動が得られたといえる.これによって,AとBの合成トルク脈動の最大値が抑制されている.これに対し,同図(b)の Segment PM を見ると,こちらは正の







領域で1つだけとなっている. Segment PM は SPM と比べ, 磁 石の周方向長が非常に小さいため, ティース1か所で磁束が短絡 し, その部分で吸引のみが発生する. そのため, 脈動が1つだけと なり, 脈動の最大値も大きくなったと推察している.

以上,ドローン用モータへの Segment PM 適用について検討した. 焼結磁石の体積(使用量)を6割低減しながらも,同トルクを得られることがわかった.一方,磁石磁束の短絡伴い,トルク脈動が2倍以上増えており,改善が必須ということがわかった

3. フェライト磁石併用によるトルク脈動低減

前章の結果より, Segment PM の適用によって、省レアアース 化が実現できる一方、トルク脈動に課題があることがわかった.本 章では、トルク脈動改善のため、Segment PM の非対称回転子化 とともに、フェライト磁石の併用について検討した.

3.1 フェライト磁石併用および非対称回転子について

通常,非対称回転子は,各磁極の回転子鉄心表面の形状を少し変 えることで,異なるトルク脈動が発生,互いに打ち消し合うことで, 脈動が改善する⁴⁻⁵.一方,Segment PM では回転子鉄心が薄く, 単純に鉄心表面を削っただけでは,出力低下につながる恐れがあ る.そこで,磁石の見込み角を変更することで非対称回転子とした. また,焼結磁石のまま,見込み角を拡大させるとさらに磁束が増え, さらなる磁気飽和によるトルク脈動悪化,鉄損増大などが危惧さ れる.そこで,磁極の1つを安価なフェライト磁石とし,フェライ ト磁石の見込み角を拡大することで,磁石磁束を抑制しつつ,非対 称回転子構造とした.

Fig. 6 に非対称回転子の構造を示す. 同図は焼結磁石の見込み 角を基準に、フェライト磁石の見込み角を1倍、2倍としてモデル である. 同図(a)では、q 軸から鉄心までの距離が同一のため、ト ルク脈動も同じ波形になるといえる. これに対し、同図(b)のよう に見込み角を変化させることで、異なるトルク脈動の合成による、 改善が期待できる. そこで、トルク脈動がもっとも改善できるフェ ライト磁石の見込み角について検討を行った.

3.2 トルク脈動の比較

Fig. 7 に定格トルク付近の脈動を示す. なお、「Nd only」は、 Fig. 5(b)の「Segment PM」の波形である. また、非対称回転子 モデルは定格トルクとするため 7A/mm²、電流位相角は 0 deg で 算定、比較している. 同図を見ると、単純にフェライト磁石を併用 した「1.0 p.u.」において、トルク脈動が低減できているとともに、 2種の磁石を併用していることにより、トルク脈動の最大値が周 期ごとに交互に出ていることがわかる. さらに見込み角を拡大し ていくと、トルク脈動が低減していき、「2.0 p.u.」でトルク幅が 最小となった. Table. 2 にトルクリップルを示す. 焼結磁石 のみの場合と比較し、トルク脈動が 1/4 まで低減できてい る. このときの磁束密度コンターを比較した. Fig. 8 に磁 束密度コンターの比較を示す. 同図が示すように、フェラ イト磁石を併用することで、回転子、固定子ともに磁気飽 和が改善できている. 特に固定子極部、ティース先端部で 磁束密度が低減できており、これに伴って、トルクリプル



(a) 1.0 p.u. open angle of ferrite magnet (Symmetry rotor)





Fig. 6 Comparison of rotor structure



Table. 2 Comparison of torque ripple

	Torque ripple	
	(Peak-to-peak value)	
Nd only	0.038 N·m	
1.0 p.u.	0.017 N·m	
1.5 p.u.	0.019 N·m	
2.0 p.u.	0.010 N·m	



Fig. 8 Comparison of flux density counter plot

が低減できたといえる.

3.3 磁極ごとのトルク脈動算定および比較

次に磁極対1つ分を対象に、トルク脈動の算定,比較から、トル ク脈動改善の要因分析を行った

Fig. 9 に磁極ごとのトルク,それらを合成したトルク脈 動を示す.同図(a)を見ると,見込み角が同等の場合,各磁 極のトルク波形は同じ形となっている.一方,Fig.5(b)と 比較すると,最大値が抑制されており,これにより,トル ク脈動が改善されたことがわかる.さらに同図(b),(c)と見 込み角を増やしていくと,トルク波形の位相が一致すると ともに,正のトルクで波形が少しずつ歪んでいる.なお, トルクが正負にオフセットしている要因について,節点力 が原因と考察している.Fig.10に見込み角 2.0 p.u.のベク トルプロットを示す.磁極 B において,磁石磁束が隣り合 う磁極(AおよびC)からBに向かって短絡している.こ れにより,回転子鉄心の端部において,回転方向に節点力 が発生している.反対に,磁極Aにおいては,反対方向に 節点力が発生している.これにより,トルクが正にオフセ ットしていると考えられる.

次に「Nd only」と「2.0 p.u.」における7極対分の合成 トルクと、それらをすべて足し合わせた出力トルクを比較 し、出力トルクの脈動改善の要因を見た. Fig. 11 に合成ト ルクおよび出力トルク波形の比較を示す. なお要因分析の ため、図中において、出力トルクの最大、最小値部分から 下線を、脈動低減に重要なポイントをそれぞれ表示してい る.まず、出力トルク最大時で見ると、同図(a)では、負ト ルクにおいて、トルク波形の盛り上がっている部分(凸部) が存在しており、負トルクが小さくなっている.また、磁 石磁束に起因して正トルクが大きいため、出力トルク脈動 を抑制できていないといえる.これに対し、同図(b)では負 トルクの盛り上がりがないことで負トルクが大きく、フェ



Fig. 9 Comparison of each torque waveform at 7A/mm² (Asymmetry rotor model)



ライト磁石併用により、正トルクは小さい.そのため、出 カトルク波形の最大値を抑制することができている.次に 出カトルク最小時で見る.同図(a)では、重なっている2つ の負トルクが大きくでていることで、出カトルク波形の最 小値も引き下げられている.これに対し、同図(b)では重な っている負トルクが小さくなっており、出カトルクの最小 値を押上げることができたと考えられる.従って、提案す



るフェライト磁石併用モデルでは, 負トルクが出力トルク の脈動最大時は大きく, 最小時は小さくなったことにより, トルク脈動の改善が実現できた.

4. モータ特性の比較

フェライト磁石併用および非対称回転子構造の適用により, Segment PMのトルク脈動が改善できることがわかった. 最後に モータ特性について, 比較を行った.

Fig. 12 に電流密度対トルク特性を示す.フェライト磁石併用 は、SPM から焼結磁石量が約8割減少しているため、他モデルよ り小さくなった.一方、同電流密度でトルク減少を約2割に抑制 できているため、磁石使用量を調整することで、トルク悪化を改善 できるといえる.

Fig. 13 に銅損特性を示す.トルク特性悪化に伴い,フェ ライト併用モデルでは,銅損がわずかに増大している.

Fig. 14 に鉄損特性を示す.フェライト磁石併用モデルでは,磁束密度が低下していることに起因して,鉄損が SPM, Segment PM より改善している.



Fig. 12 Current density versus torque



Fig. 13 Torque versus copper loss



Fig. 14 Torque versus iron loss

Fig. 15 に磁石渦電流損特性を示す. Segment PM とす ることで SPM 時より, 渦電流損が低減できていることが わかる.また,フェライト併用とすることでさらに低減し ており,高周波領域でさらなる低減が期待できる

Fig. 16 に効率特性を示す. 各モデルともに最大効率は約 94.3%となっている. このとき, フェライト磁石併用モデル では, 鉄損, 磁石渦電流損の低減に伴い, 低トルク域で高 効率となっていることから, 高速回転域で有利な設計であ るといえる.

Fig. 17 にトルク脈動を示す. 焼結磁石のみの場合, コギ ングトルク, トルクリップルともに, 大きな脈動が発生し ている. これに対し, フェライト磁石併用とすることで, SPM と同程度の脈動に改善することができた.



Fig. 15 Torque versus eddy current loss in magnets



Fig. 16 Torque versus efficiency



5. 結言

以上,本論文ではドローンモータへの Segment PM の適 用および,フェライト併用によるトルク脈動改善について 検討を行った.

まず,先行研究の形状をもとに,Segment PM を適用し たトルク特性を算定した.その結果,焼結磁石の使用量を 半減させながらも同トルクが得られており,SPM 時よりも 磁石磁束を有効に活用できることがわかった.一方,磁石 磁束が1か所だけで短絡することで,トルク脈動が大きく 増大した.高精度な姿勢制御が求められるドローンにおい て,改善が必須であることが明らかとなった.

次いで、トルク脈動改善のため、フェライト磁石併用に よる非対称回転子構造について検討を行った.結果、焼結 磁石に対し、フェライト磁石の見込み角を2倍とすること で、トルク脈動を改善できた.これは各磁極対で発生する 負の合成トルクのが、出力トルク脈動最大時では大きく、 反対に出力トルク脈動最小時は小さくなることで、タイミ ング良く脈動を抑制できるようになっていたためである. また、トルク特性は約2割低減したが、焼結磁石の使用量 は SPM 時から約8割低減しており、省レアアース化に非常に効果的であることがわかった.

今後は、焼結磁石の見込み角増大によるトルク増大と、 提案構造の高速回転化について取り組む予定である.

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP23K19110 の助成を受けたものです.

References

- 1) https://lfb.mof.go.jp/kantou/keichou/20211112_doron.pdf
- 2) T. Ishikawa: J.Jpn.Soc.Appl.Electromagn.Mech., 30, 282 (2022)
- S. Sakurai, U Uchiyama, K. Nakamura: T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues), 6, 69 (2022).
- 4) K. Hiramoto, Y. Takeda, M. Sanada, S. Morimoto : *IEEJ Trans. IA*, **124**, 208 (2004).
- 5) M. Ito, S. Sugimoto, A. Takahashi, S. Tamiya, T. Kushida: IEEJ *Trans IA*, **141**, 445 (2021)

2024年10月20日受理, 2024年11月9日採録