

セグメント構造アウターロータ型高速 PM モータの効率改善に関する検討

Efficiency Improvement of Outer-Rotor-type High-Speed PM motor with Segmented-shaped Rotor

櫻井 将[†], 中村 健二

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)

S. Sakurai[†], K. Nakamura

Tohoku University, Graduate School of Engineering, 6-6-11 Aoba Aramaki Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan

Cooling fans are widely used in communication base station servers because they have a good balance between cooling performance and cost. Nowadays, cooling fans are required to be improved their cooling performance. Thus, the output power and efficiency of the fan motors should be improved. In a previous paper, a novel segment PM motor was proposed, which has segmented cores and permanent magnets in the rotor. The proposed PM motor has large torque and less eddy current loss in magnets. The prototype tests clarified that the proposed PM motor has higher power and efficiency than a conventional fan motor. However, the measured mechanical loss was larger than the expected one. This paper presents a simple method for estimating the mechanical loss of the proposed PM motor. Furthermore, the mechanical loss improvement by the lightweight of the rotor core and case is discussed.

Key words: Permanent magnet (PM) motor, segmented-shaped rotor, mechanical loss, cooling fan

1. はじめに

第5世代移動通信システム(5G)の進展とともに、情報通信量が大幅に増加しており、これを高速に処理するために通信基地局サーバの増強が進められている。具体的には、CPUの性能向上や並列処理、サーバの高密度化が行われている。一方、性能向上や高密度化に伴い、サーバ内部の局所発熱が深刻化しており、冷却装置の性能向上が喫緊の課題となっている。

種々の冷却装置の中で、冷却ファンは大量生産による低コスト化が可能であり、冷却性能も比較的高いため、サーバの冷却装置として幅広く利用されている。冷却ファンの性能向上には、風量と風圧の増大が必要であるが、そのためには駆動用モータの高出力化が必須である。一方、モータの高速回転化、高トルク化により、モータ自体の発熱増加も想定されることから、損失の低減、すなわち高効率化も必要不可欠である。しかし、従来の冷却ファン用モータは低コスト化が最優先事項であり、高性能化・高効率化に関する検討は少ない^{1)~3)}。さらに、冷却ファンの羽根が取り付けやすいように、アウターロータ型が一般的であるため、回転子鉄心の形状自由度が低いという設計上の難点もある。

上述の問題に対して、筆者らは、冷却ファン用の永久磁石(PM)モータの高出力化と高効率化を両立するため、鉄心と磁石を分割し、周方向に配置したセグメント構造のPMモータを提案した。提案構造は、鉄心が表面に大きく露出することで、 q 軸インダクタンスが従来のPMモータより増加し、リラクタンストルクが増大する。さらに、従来の構造では d 軸は磁石中央を向くが、提案構造は鉄心中央を向くため、電機子磁束が磁石にほとんど流入せず、磁石渦電流損が非常に小さい。これにより、ネオジム焼結磁石の利用、およびそれに伴うマグネットトルクの増加が期待

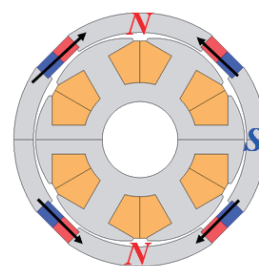
できる。先行研究では、従来構造のPMモータと比較した結果、セグメント構造のPMモータの方が高出力、高効率になることが明らかとなった⁴⁾。一方、実証試験の結果からは、機械損が想定よりも大きい可能性が示されたことから、機械損の測定と低減が課題として残った。

そこで本論文では、試作したセグメントPMモータの機械損を推定する方法について述べるとともに、その妥当性について実験検証を行う。また、検証結果に基づき、効率改善に関する検討も行ったので報告する。

2. セグメントPMモータの基本構成と先行研究の結果

2.1 セグメントPMモータの基本構成

Fig. 1に、先行研究で提案したセグメントPMモータの基本構成と諸元を示す。固定子は、3相6スロットの集中巻である。回転子は、一般的な冷却ファン用モータと同じアウターロータ型であるが、周方向に並んだ磁石と鉄心からなるセグメント構造を有する。提案構造は磁氣的突極性を有することから、マグネットトルクに加えてリラクタンストルクも利用できる。また、磁石渦電流損の抑制、ネオジム焼結磁石によるマグネットトルクの増大が可能であり、高出力・高効率が実現できる。



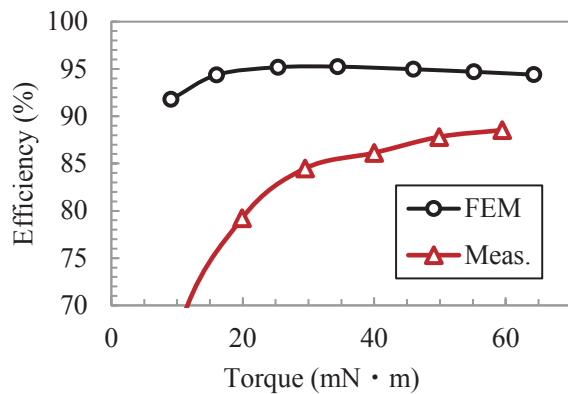
Motor diameter	40 mm
Stack length	20 mm
Rotational speed	30000 rpm
Rated torque	60 mN·m
Material of magnet	Sintered Nd-Fe-B
Amount of magnet	1597.1 mm ³
Material of iron core	10JNEX900
Current phase angle	15 deg

Fig. 1 Specifications of a prototype segment PM motor.

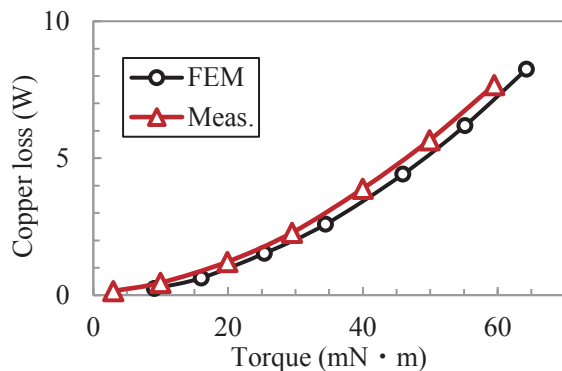
Corresponding author: S. Sakurai (e-mail: sho.sakurai.q2@dc.tohoku.ac.jp).

2. 2 先行研究の試作試験の結果⁴⁾

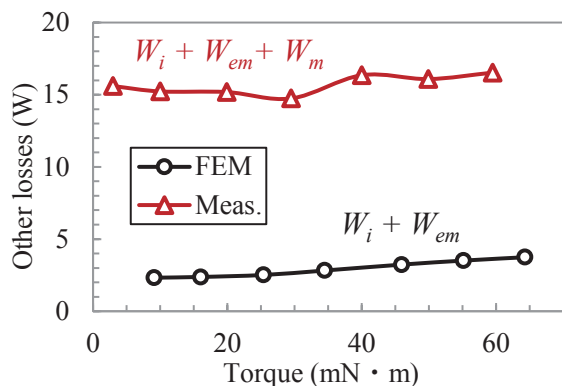
先行研究で行った試作試験の結果について述べる。Fig. 2(a)に効率, (b)に銅損, (c)にその他の損失を示す。同図(a)の効率を見ると, 有限要素法 (FEM) で求めた効率に対して, 実測値が大きく低下していることがわかる。この原因を特定するため, 損失特性を比較すると, 同図(b)の銅損は良好に一致していることがわかる。一方, 同図(c)のその他の損失 (鉄損 W_i , 磁石渦電流損 W_{em} , 機械損 W_m を含む) を見ると, 約 13 W の差が生じている。これは FEM では機械損を無視しているためであり, ここから機械損の測定と低減が本モータの効率改善に必須であることがわかる。



(a) Efficiency



(b) Copper loss



(c) Iron, eddy current, and mechanical loss

Fig. 2 Comparison of measured and calculated characteristics of the prototype segment PM motor.

3. セグメント PM モータの機械損推定

本章では, 試作したセグメント PM モータの機械損の推定を行う。一般に, PM モータの機械損の実測は, 磁石由来の損失が生じるため, 脱磁などの手間があり, 誘導モータやリラクタンスモータなどの磁石レスモータと比べると煩雑である。そこで本論文では, 機械損は軸受けにかかる荷重に比例すると仮定し, シャフトのみ, およびシャフトとケースのみの機械損をそれぞれ測定し, その差分から軸受けにかかる荷重と機械損の関係性を求め, ここから試作機の機械損の推定を試みた。

ここで, 軸受で発生する摩擦トルク M および機械損 W_m は, 次式で与えられる⁵⁾。

$$M = \mu P \frac{d}{2} \quad (1)$$

上式中の μ は摩擦係数, P は荷重, d は軸受内径である。

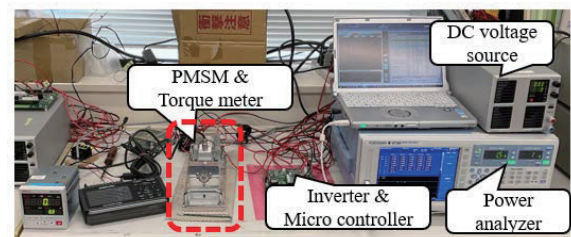
また, 機械損は次式のように摩擦トルクと回転速度 n の積で与えられる。

$$W_m = 0.105 \times 10^{-6} M n \quad (2)$$

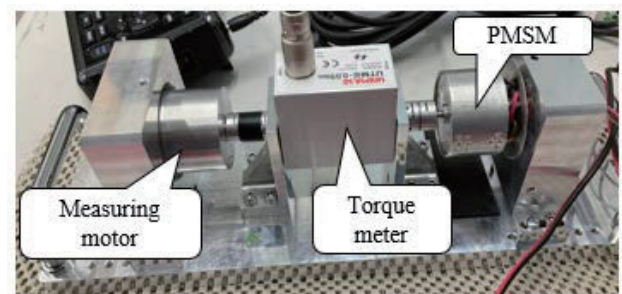
したがって, (1)式, (2)式より, 測定において同一の軸受を用いれば, 摩擦係数 μ と軸受内径 d は等しい値となるため, 摩擦トルクおよび機械損は荷重に比例することが了解される。

Fig. 3 に, 機械損測定システムを示す。同図(b)に示すように, 被測定モータを他のモータ (PMSM) で駆動し, トルクメータで速度とトルクを読み取ることで機械入力, すなわち機械損を測定する。

Fig. 4 に回転子がシャフトのみの被測定モータを示す。本モータのシャフトや軸受けは, セグメント PM モータの試作機と同一である。シャフトの重量は 10.3 g であり, こ



(a) The overall view of the experimental setup



(b) The measuring motor, PMSM, and torque meter

Fig. 3 Experimental setup for measuring the mechanical loss of the prototype segment PM motor.

れが2つの軸受けに荷重としてかかっている。なお、軸受はどちらも深溝玉軸受である。

Fig. 5に、シャフトのみの回転速度対機械損の実測値を示す。機械損が回転数増加に伴い増加しており、30,000 rpm時の機械損は約1.1 Wであった。

続いて、先ほどの被測定モータに、Fig. 6の回転子ケースを取り付けて測定した。なお、回転子ケースの重量は44.9 gであり、シャフトと合わせて55.2 gの荷重が軸受けにかかる。

Fig. 7に、シャフトに回転子ケースを取り付けた場合の回転速度対機械損の実測値を示す。シャフトのみよりも機械損が増加し、30,000 rpm時の機械損は約7.2 Wとなった。すなわち、重量44.9 gの増加で機械損は約6.1 W増加したことがわかる。したがって、例えば30,000 rpm時の荷重と機械損の関係は1 g当たり約0.1358 Wと求まる。

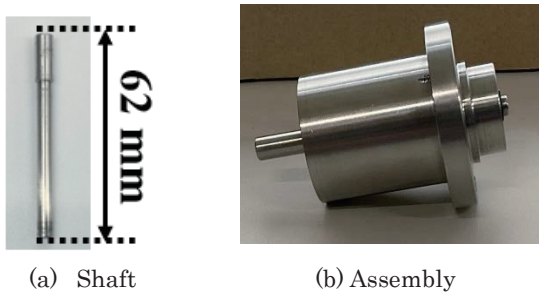


Fig. 4 Appearance of the measuring motor used for mechanical loss measurement (Shaft only).

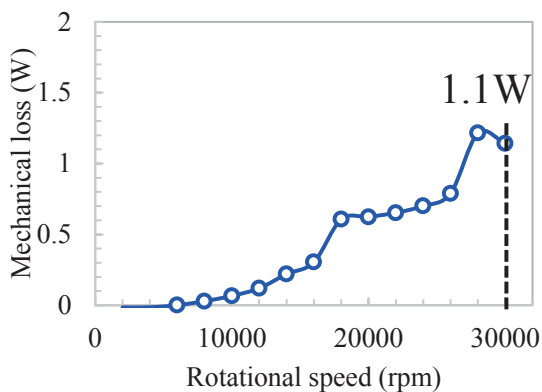


Fig. 5 Rotational speed vs mechanical loss (Shaft only).

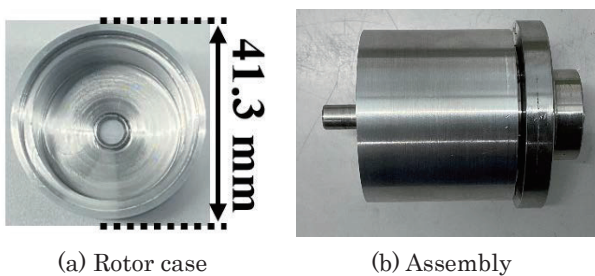


Fig. 6 Appearance of the measuring motor used for mechanical loss measurement (Shaft + rotor case).

以上の2つの実験の結果から、各回転速度で同様の関係を求め、この関係からセグメントPMモータの機械損を推定した。

Fig. 8に、セグメントPMモータの回転子を示す。回転子の全重量は112.5 gであり、ここからセグメントPMモータの機械損を算定した。Fig. 9に算定した機械損を示す。この図を見ると、30,000 rpm時に約15 Wの機械損が生じることがわかる。ここで、Fig. 2(c)に示したセグメントPMモータの損失の誤差は約13 Wであったことから、本推定方法がおおよそ妥当であることが了解される。

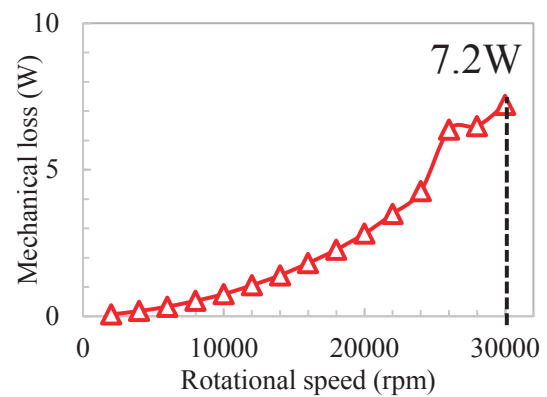


Fig. 7 Rotational speed vs mechanical loss (Shaft + rotor case).



Fig. 8 Appearance of the rotor of the prototype segment PM motor.

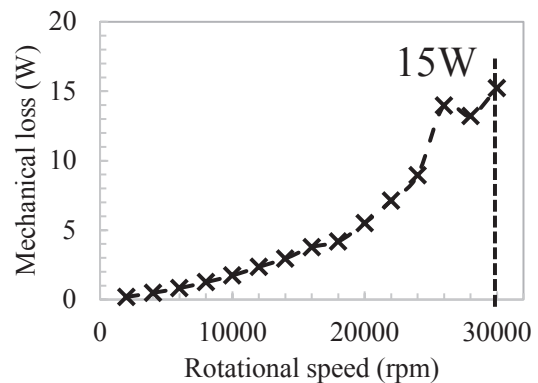


Fig. 9 Estimated rotational speed vs mechanical loss of the prototype segment PM motor.

4. 軽量化による機械損低減

前章の検討により、提案した機械損の推定方法が妥当であることが明らかになるとともに、試作機の損失増大、効率低下の要因は機械損であることが明らかとなった。そこで本章では、機械損の低減について種々検討を行う。具体的には、機械損は重量に比例するという前章までの仮定に基づき、回転子を構成する部品を軽量化することで、高効率化を試みた。

Fig. 10 には、各部品の重量の比に基づき、機械損の内訳を求めた結果を示す。各部品の重量は、部品の体積と材料の密度から求めた。この図を見ると、機械損は重量の大きいケースと回転子鉄心がほとんどを占めていることがわかる。以下では、これら2つの部品の軽量化について検討する。

まず始めに、回転子鉄心の軽量化について述べる。Fig. 11 に、先行研究のセグメント PM モータの磁束線図と磁束密度コンターを示す。セグメント PM モータは、回転子鉄心の両側から磁石磁束が流れ込み、固定子側に渡るため、回転子外側の磁束密度が低い。すなわち、回転子鉄心の外周側を削ってもモータ特性への影響は小さいとされる。そこで本検討では、回転子鉄心の外周側を 0.5 mm~2.5 mm の間で削った場合の特性を算定し、影響がほとんどない中

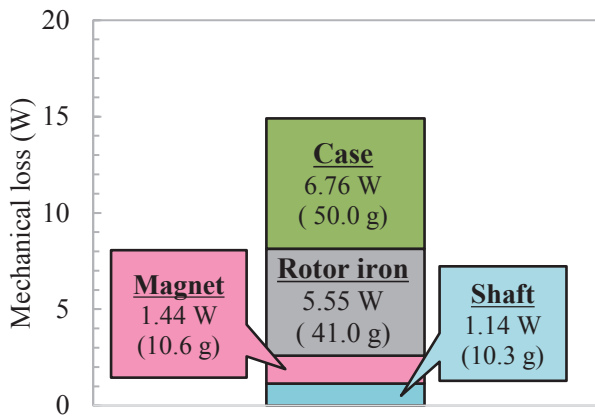


Fig. 10 Mechanical loss breakdown.

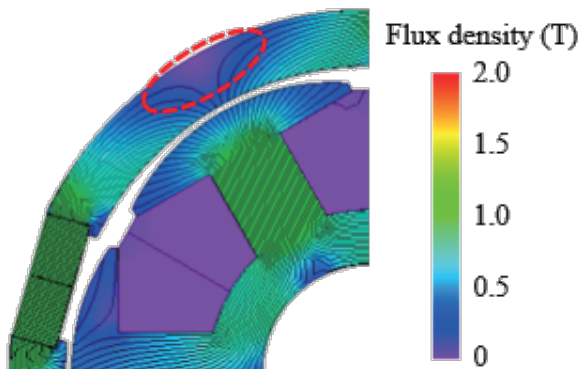


Fig. 11 Flux lines and contour diagram of flux density of the previous segment PM motor.

で最も軽量化できる 1.1 mm を採用した。

Fig. 12 に、上述の回転子鉄心の外周側を削ったモータの磁束線図と磁束密度コンター図を示す。この図より、回転子鉄心の磁束密度は最大でも 1.1 T 以下に抑えられていることがわかる。また、Fig. 13(a) のとおりトルク特性への影響はほぼ無いことがわかる。同図(b)は、回転子鉄心の

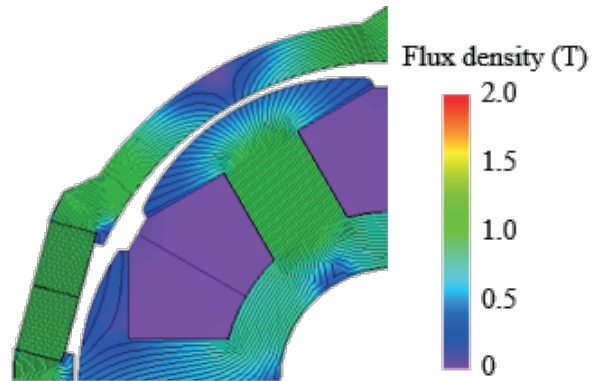
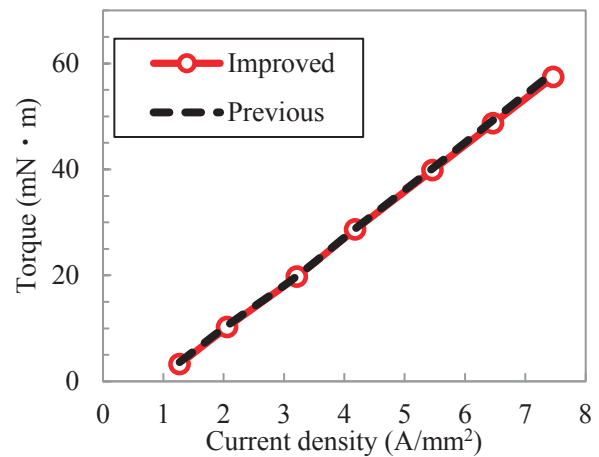
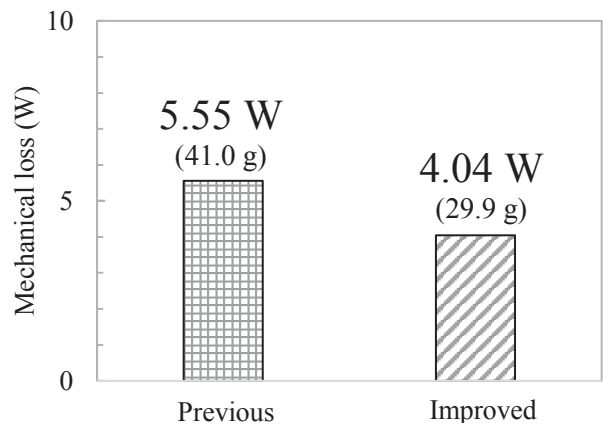


Fig. 12 Flux lines and contour diagram of flux density of the improved segment PM motor.



(a) Comparison of torque characteristics



(b) Comparison of estimated mechanical losses

Fig. 13 Comparison of torque and mechanical loss of the previous and improved segment PM motors.

軽量化による機械損低減の効果を示しており、約 1.5 W の損失低減が期待できる。

次いで、ケースの軽量化について述べる。本論文では、Fig. 14(a)に示すように、ステンレス製の回転子ケースの一部をくり抜くことで軽量化する方法と、同図(b)に示すように、ケースの材料を炭素繊維強化プラスチック (CFRP) に置き換える方法について比較を行った。

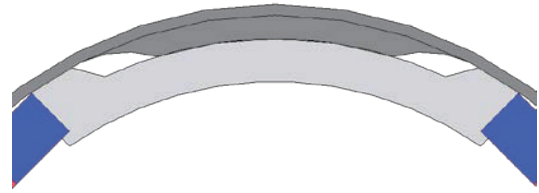
Fig. 15 に、回転子ケースの軽量化による機械損低減の効果を示す。この図を見ると、CFRP への置き換えの効果は極めて高いことが明らかである。

以上の検討結果に基づき、回転子鉄心の外周側を削り、かつ回転子ケースをCFRPに置き換えたセグメントPMモータの効率を試算した。Fig. 16 に、本セグメントPMモータを示す。同図に示すように、回転子鉄心とケースの間

に生じた隙間は、CFRP のケース側に凸部を設けることで埋めている。



(a) Improved rotor of the segment PM motor



(b) Enlarged view

Fig. 16 Schematic diagram of the segment PM motor after lightweight.



(a) Stainless case with punching



(b) CFRP case

Fig. 14 Appearance of rotor case.

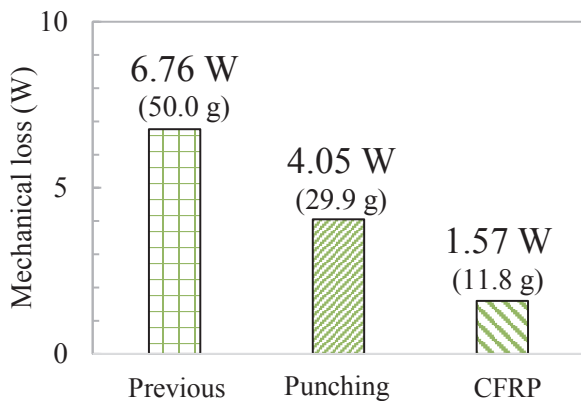
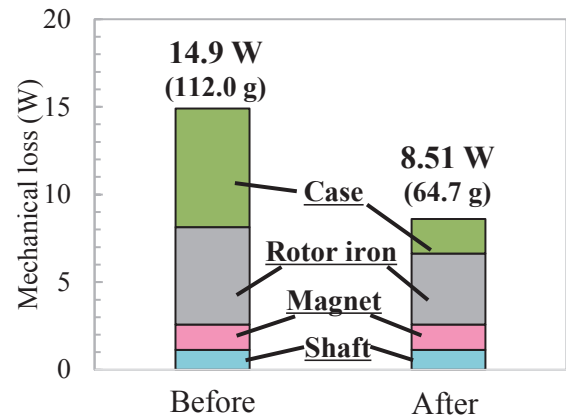
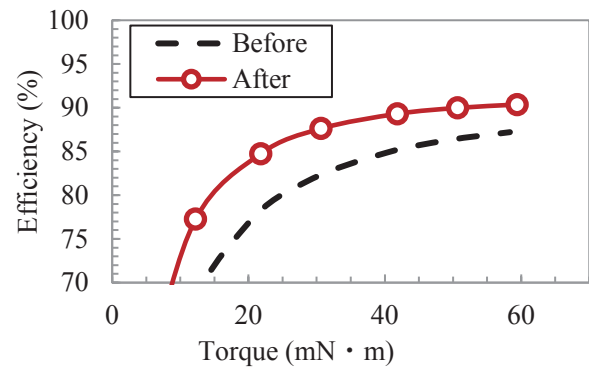


Fig. 15 Comparison of estimated mechanical losses.



(a) Comparison of estimated mechanical losses



(b) Efficiency

Fig. 17 Comparison of characteristics of the segment PM motor before and after lightweight.

Fig. 17(a)に、軽量化前後の機械損の比較を示す。軽量化により機械損が40%以上低減可能であることがわかる。同図(b)は効率の比較である。軽量化により、効率が全体的に改善され、最高効率は90.3%に達することが見積もられた。今後は、改良機の実証実験を行う予定である。

5. まとめ

本論文では、先行研究で試作したセグメントPMモータの機械損を推定する方法について述べるとともに、その妥当性について実験検証を行った。通常、PMモータの機械損を測定することは必ずしも容易では無いが、本論文では、機械損は軸受けにかかる荷重に比例すると仮定し、シャフトのみ、およびシャフトとケースのみの回転子の機械損の差分から軸受けにかかる荷重と機械損の関係を求め、ここから試作機の機械損を推定した。その結果、30,000 rpm時の機械損は約15 Wと推定され、損失の実測値と計算値の誤差13Wとおおよそ等しいことが明らかとなった。

次いで、上述の検討結果に基づき、回転子の軽量化による機械損の低減について種々検討を行った。セグメントPMモータでは、回転子鉄心の外周部をある程度削ってもモータ特性に与える影響は小さいことに着目し、磁気回路

として不要な部分を削ることで軽量化を図るとともに、回転子ケースを炭素繊維強化プラスチック(CFRP)に置き換えることで、さらに軽量化を図った。これらのアイデアを取り入れることで、機械損は40%以上低減され、最高効率は90%を上回ることが試算された。

今後は、改良機の実証実験を行う予定である。

謝辞 本研究は JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム (JPMJSP2114) の支援を受けたものです。

References

- 1) J. F. Gieras, D. Chojnowski, and P. Mikulski: *IEEE IEMDC*, 624 (2015).
- 2) Chun-Lung Chiu, Yie-Tone Chen, You-Len Liang, and Ruey-Hsun Lian: *IEEE Trans. Magn.*, **46**, 1123 (2010).
- 3) A. Lelkes, J. Krottsch, R. W. DeDoncker: *IEEE Industry Applications Conference (37th IAS Annual Meeting)*, 2036 (2002).
- 4) S. Sakurai, U Uchiyama, K. Nakamura: *T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)*, **6**, 69 (2022).
- 5) NTN korogarizikuuke sougoukatarogu, Cat. No. 2203/J, p. A-100 (2022).

2022年10月20日受理, 2022年12月6日再受理, 2022年12月14日採録