

# クロスポール型フラックスリバーサルモータに関する基礎検討

## Basic Examination of Cross-Pole-Type Flux-Reversal Motor

于 越<sup>†</sup>・中村健二

<sup>a)</sup>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)

Y. Yu<sup>†</sup>, K. Nakamura

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

In recent years, electrification has been promoted as part of the measures toward global warming, and demand for power-saving and high-efficiency motors is increasing. Among the various types of motors, permanent magnet synchronous motors (PMSMs) are used in various fields, such as electric vehicles and home appliances. However, PMSMs have issues with mechanical strength and cost. In comparison, flux reversal motors (FRMs) have a simple reluctance rotor, and a stator with armature windings and permanent magnets. Due to the high torque density of FRMs the same as PMSMs, they are expected to be used in multiple applications such as for electric vehicles and wind power generations. However, the conventional FRM has a problem with large eddy current loss in magnets. This paper presents a novel FRM with a cross-shaped stator pole that reduces the eddy current loss. The usefulness of the proposed FRM is proved by a three-dimensional finite element method (3D-FEM).

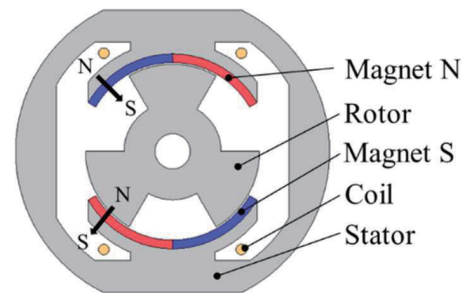
**Key words:** flux reversal motor (FRM), cross-shaped stator pole, eddy current loss in magnets.

### 1. はじめに

地球温暖化対策の一環として、近年、様々な分野で電動化が推進されており、モータの需要は益々高まっている。一方、我が国の総発電電力の 50~60%がモータで消費されている現状から、モータの省電力・高効率化に対する要求も年々強まっている<sup>1)</sup>。このような背景から、各種モータの中でも特に高効率・高出力である永久磁石同期モータ (PMSM) が、電気自動車や家電製品などの幅広い分野で応用されている。しかし、PMSM は機械強度やコストなどについて課題が残るため、構造が簡単で堅牢、かつ製造が容易で高性能なモータの開発が望まれる。

上述の課題に対して、筆者らはフラックスリバーサルモータ (FRM) に着目している。Fig. 1 は、1997 年に英国グラスゴー大学の Miller 氏らの研究グループにより、初めて提案された単相 FRM である<sup>2)</sup>。この図からわかるように、FRM は二重突極機的一种である。永久磁石が固定子側に配置される点では、二重突極永久磁石モータ (DSPMM)<sup>3)</sup>と同じであるが、DSPMM は固定子ヨークに永久磁石が配置されるため、巻線鎖交磁束の変化はユニポーラとなる。一方、FRM は同図のように、固定子極先端に永久磁石が配置されるため、巻線鎖交磁束の変化はバイポーラになる。これにより、FRM は一般的な PMSM と同等の出力が期待される。また、回転子に磁石を配置しないため、機械強度や製作性の面で有利であり、またイナーシャが小さく、高速応答に優れる。しかしながら一方で、固定子極先端に張り付けられた磁石に電機子磁束が流れ込むため、磁石渦電流損が大きい問題が指摘される。

本論文では、固定子極形状を工夫し、電機子磁束が磁石に直接流入し難い、新しい構造の FRM を提案するとともに、



Magnetization direction (black vector): radial

Fig. 1 Single phase FRM.

有限要素法 (FEM) を用いて提案する FRM の諸特性を算定したので報告する。

本論文では、まず FRM の基本構成と動作原理について述べた後、3D-FEM を用いて、提案する FRM の磁石渦電流損を算定し、従来機と比較することで提案機の優位性について明らかにする。さらに、磁石分割による渦電流の低減効果についても検証する。

### 2. FRM の特徴および動作原理

#### 2.1 FRM の特徴

FRM は、スイッチトリラクタンスモータ (SRM) や DSPMM と同じ、二重突極機である。Fig. 2 に、各種モータの起磁力と磁束の動作範囲の比較を示す。同図(a)の SRM は起磁力も磁束もユニポーラであるため、動作領域は第 1 象限内に限られる。同図(b)の DSPMM は、起磁力はバイポーラであるが、磁束がユニポーラであるため、動作領域は第 1 象限と第 2 象限に収まる。これらに対して、同図(c)の FRM は起磁力も磁束もバイポーラであるため、一般的な PMSM と同様に、動作領域がすべての象限に広がる。ここで同図中の破線で囲まれる面積が磁気随伴エネルギー $W'$ に相当し、モータのトルク  $T$  は次式で与えられることから、

責任著者：于越  
(mail : [yu.yue.r1@dc.tohoku.ac.jp](mailto:yu.yue.r1@dc.tohoku.ac.jp))

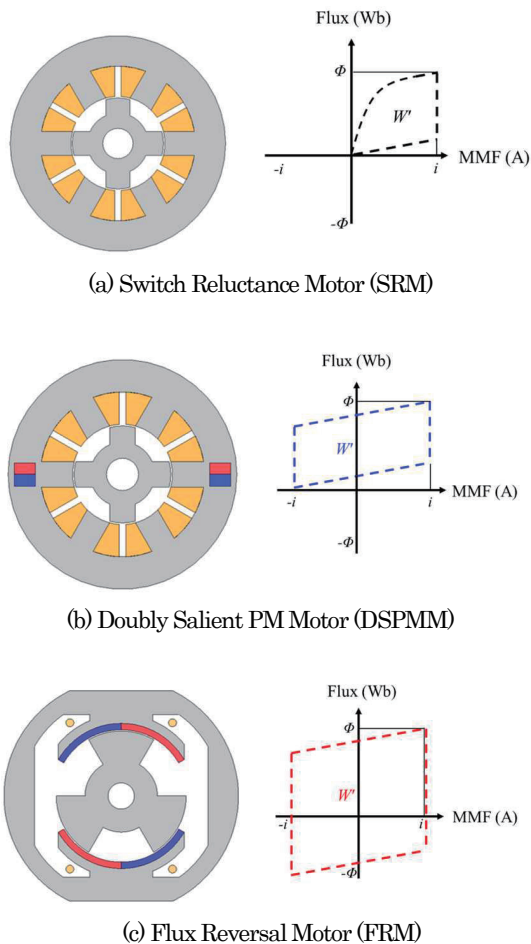


Fig. 2 Comparison of flux-MMF diagram of SRM, DSPMM, FRM.

$$T = \frac{\partial W'(i, \theta)}{\partial \theta} \dots \dots \dots (1)$$

すべての象限を利用できる FRM のトルクが本質的に大きくなることが了解される。

### 2.2 FRM の動作原理

Fig. 3 に、回転子位置角 0 度～120 度における磁石磁束の概略的な流れを示す。Fig. 4 は電機子鎖交磁束であり、図中の (a)～(e) までの記号は、Fig. 3 の各図の記号と一致している。まず回転子位置角 0 度の磁束の流れを見ると、鎖交磁束は磁石磁束が正負で打ち消し合ってゼロになることがわかる。次いで、30 度では図を上から下に流れる磁束によって、鎖交磁束が正の最大となる。60 度では、ちょうど 0 度の時の回転子を上下逆さまにした位置となるため、同様に打ち消し合ってゼロになる。90 度では、30 度の時とは逆に下から上に流れる磁束によって、鎖交磁束が負の最大となる。最後に、120 度は 0 度と同じ位置に戻るため、鎖交磁束はゼロになる。このように FRM は、磁石自体は回転しないが、突極構造の回転子が回転することで、磁石磁束の流れが正負に変化する、すなわちバイポーラになることが了解される。

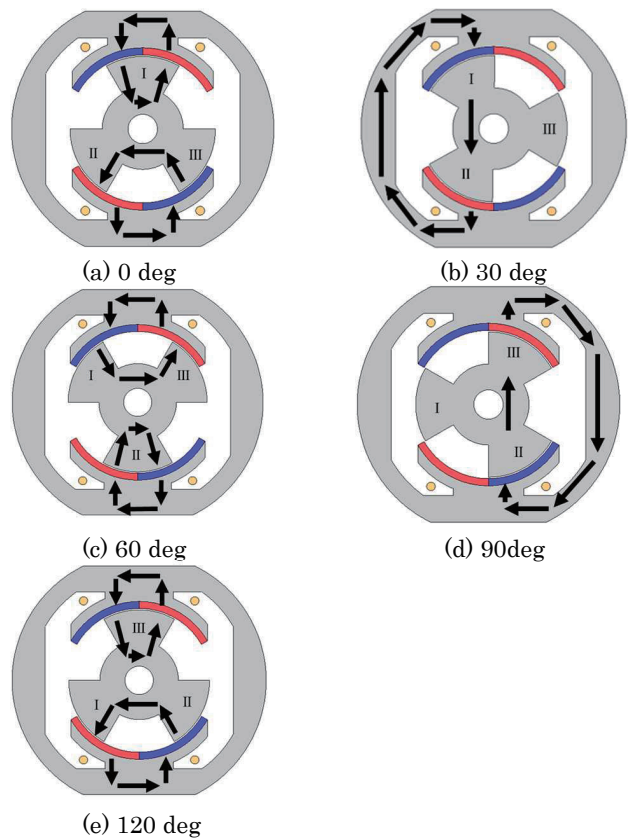


Fig. 3 Flux flow diagram of single-phase FRM.

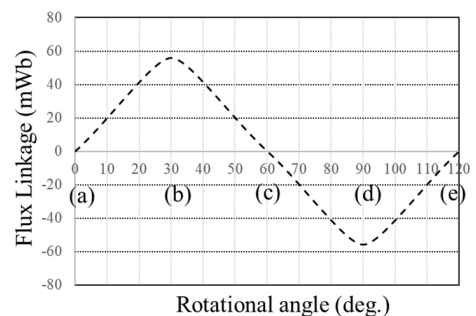


Fig. 4 Flux linkage waveform of single-phase FRM.

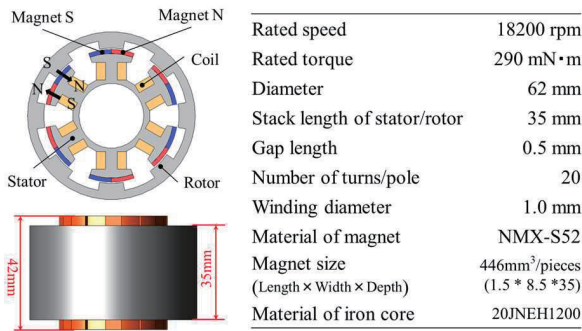
### 3. クロスポール型 FRM の特性算定

#### 3.1 従来 FRM の特性

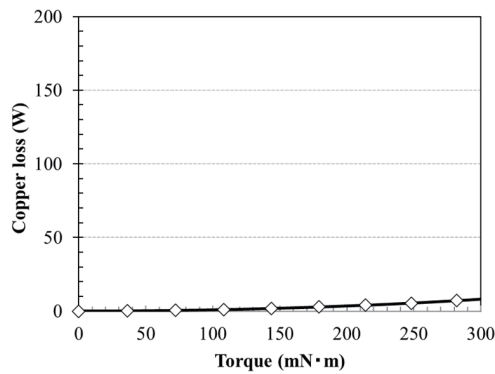
Fig. 5 に、従来の 3 相アウターロータ型 FRM の諸元を示す。本節では、3 次元有限要素法 (3D-FEM) を用いて、従来機の問題点を明らかにする。なお、FEM には (株)JSOL 製の電磁界解析プログラム JMAG Designer 21.0 を用いた。

Fig. 6(a) に銅損、同図(b) に鉄損、そして同図(c) に磁石渦電流損の計算値を示す。なお、固定子極先端に張り付けた 2 つの磁石は電氣的に絶縁されているものとした。これらの図を見ると、まず銅損に対して、鉄損と磁石渦電流損が非常に大きいことがわかる。さらに、これらの損失の中では、磁石渦電流損が約 142 W と最も大きく、全損失の約 67% を占めている。

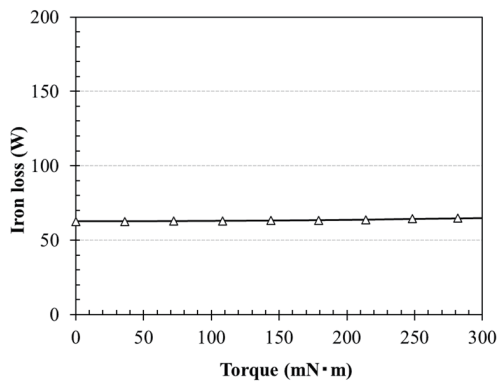
Fig. 7(b) に、FEM において磁石を空気に置き換え、同図(a) の電流を U 相に流した際の磁束線図、すなわち電機子電流由



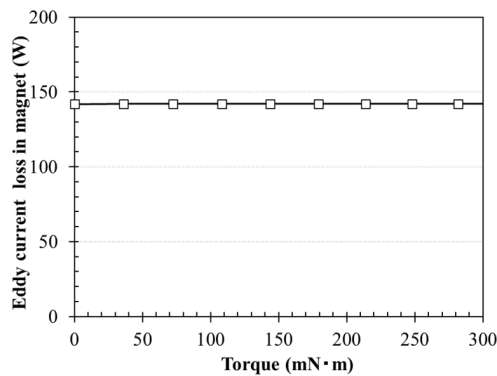
Magnetization direction (black vector): radial  
**Fig. 5** Specifications of a conventional FRM.



(a) Copper loss

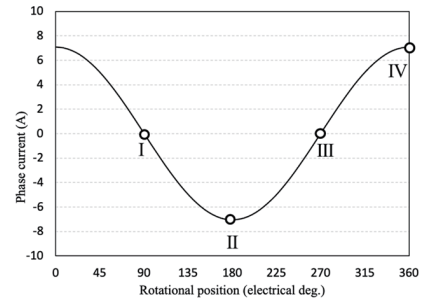


(b) Iron loss

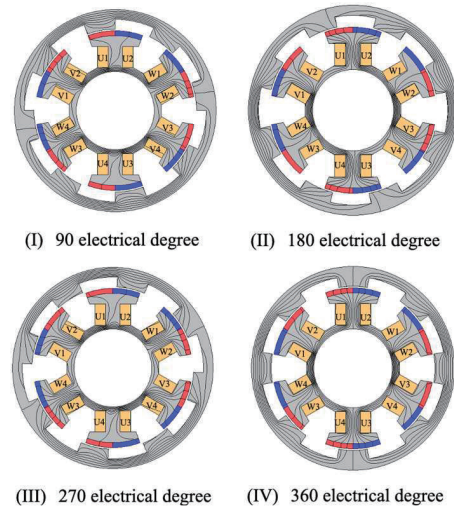


(c) Eddy current loss in magnet

**Fig. 6** Calculated characteristics of the conventional FRM.



(a) U-phase current



(III) 270 electrical degree (IV) 360 electrical degree

(b) Flux line variation in 90, 180, 270, 360 deg.

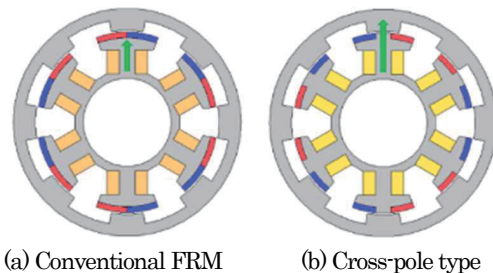
**Fig. 7** Armature flux lines of a conventional FRM.

来の磁束線図を示す。この図を見ると、固定子極先端に張り付けられた磁石に対して、ほぼすべての電機子磁束が流れ込んでいることがわかり、磁石渦電流損を低減するためには、電機子磁束が磁石に直接流入しない構造的な工夫が必要であることが了解される。

### 3.2 クロスポール型 FRM の特性

前節で明らかになった問題に対して、本論文では Fig. 8(b) に示すクロスポール型 FRM を提案する。本 FRM は、固定子極の形状を十字形にすることで、電機子磁束が透磁率の高い鉄心の方を流れ、磁石への流入を防ぐ効果が期待される。

Fig. 9 に、考察に用いたクロスポール型 FRM を示す。従来機と比較するため、本 FRM の基本的な諸元は Fig. 5 に示した従来機と等しい。ただし、磁石使用量は従来機から約 24% 減少している。以降では、3D-FEM を用いて、提案する FRM の諸特性を算定し、従来機と比較する。



(a) Conventional FRM (b) Cross-pole type

**Fig. 8** Comparison of conventional and cross-pole type FRMs.



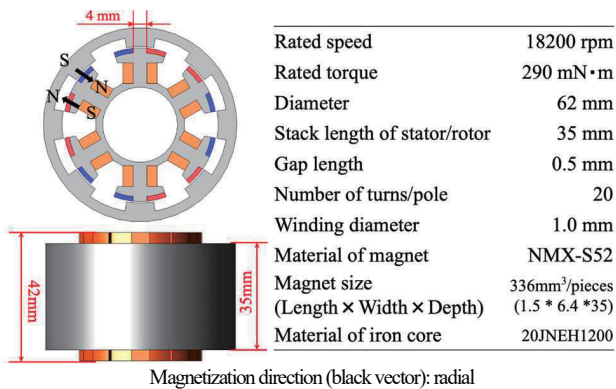


Fig. 9 Specifications of cross-pole type FRM.

Fig. 10 に、提案機と従来機の出力の比較を示す。このときの回転数は定格の 18200 rpm である。Fig. 11 は電流密度対トルク特性の比較である。この図を見ると、磁石使用量を減らしても、提案機の出力およびトルクは従来機とほぼ等しいことがわかる。

Fig. 12 に渦電流損失値の比較を示す。この図より、提案機の磁石渦電流損は、従来機に対して約 60%低減したことがわかる。Fig. 13 に、渦電流損密度コンターの比較を示す。この図からも、提案機の方が磁石渦電流損が小さくなっていることがわかる。その結果、効率も Fig. 14 に示すように大きく向上した。以上より、本論文で提案したクロスポール型 FRM の有用性が明らかになった。

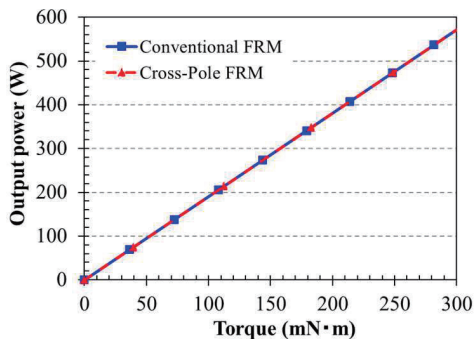


Fig. 10 Comparison of output power between the conventional and cross-pole type FRMs.

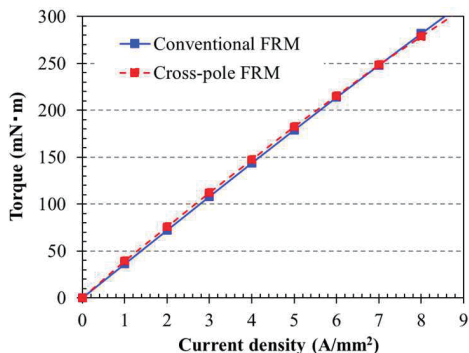


Fig. 11 Comparison of torque between the conventional and the cross-pole type FRMs.

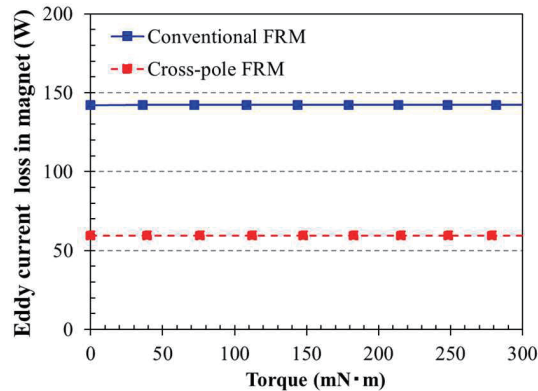


Fig. 12 Comparison of eddy current loss in magnets between the conventional and cross-pole type FRMs.

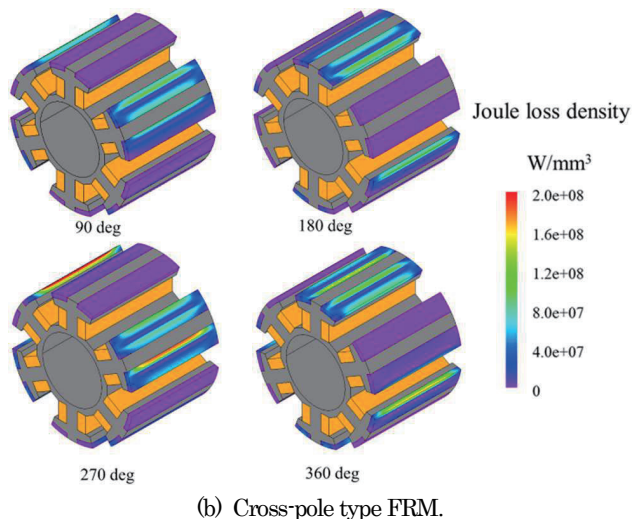
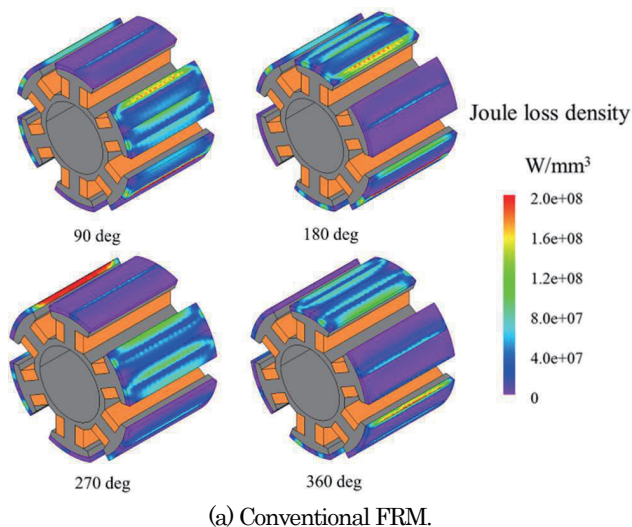


Fig.13 Comparison of contour diagram of eddy current loss density between the conventional and cross-pole type FRMs.

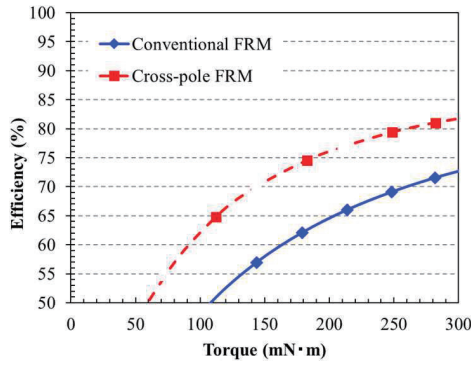


Fig. 14 Comparison of efficiency between the conventional and cross-pole type FRMs.

### 3.3 磁石分割による磁石渦電流損の低減

前節の検討により、FRMの固定子極形状を十字形にすることで、電機子磁束が透磁率の高い鉄心の方を流れ、磁石渦電流損が大幅に低減されることが明らかとなった。ただし、他の損失と比較すると、未だ磁石渦電流損の割合は大きい。そこで本節では、磁石渦電流損の低減策として広く一般に知られている磁石分割<sup>4)</sup>について検討を行った。

Fig. 15に、検討した2種類の磁石分割を示す。同図(a)は周方向に各磁石を2等分しており、同図(b)は軸方向に各磁石を2等分している。なお、一般的なPMSMでは、分割や組み立てのし易さから、同図(b)の軸方向分割が採用されるケースが多い。

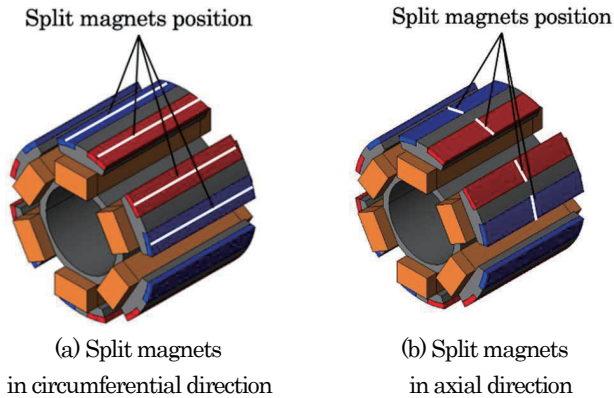


Fig. 15 Two different type of split magnets of cross-pole type FRM.

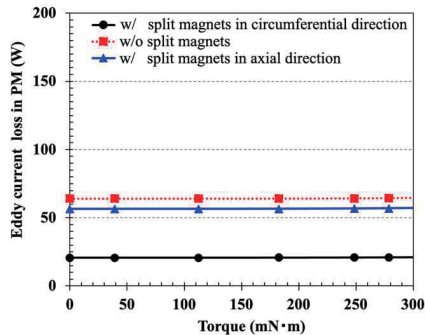


Fig. 16 Comparison of eddy current loss in magnets of cross-pole type FRMs with and without split magnets.

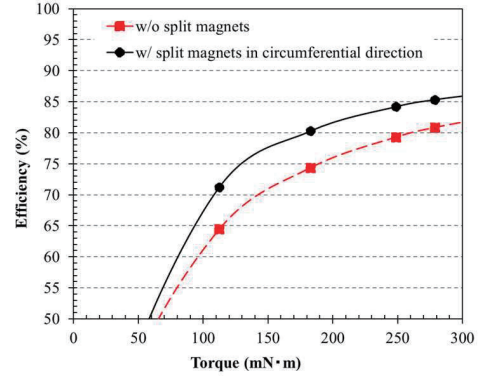


Fig. 17 Comparison of efficiency of cross-pole type FRMs with and without split magnets.

Fig. 16に、3D-FEMで求めた磁石渦電流損の比較を示す。この図を見ると、軸方向分割では渦電流損はあまり低減されない一方で、周方向分割では1/3程度まで大幅に低減されることがわかる。

Fig. 17は効率の算定結果である。周方向分割の効果により、さらに磁石渦電流損が低減されたため、効率がさらに全体的に向上したことが了解される。

## 4. まとめ

以上、本論文ではFRMの磁石渦電流損の低減を目指し、固定子極の形状を十字形にした新しいクロスポール型FRMを提案した。これにより、電機子磁束が透磁率の高い鉄心の流れ、磁石への流入を防ぐ効果が得られる。3D-FEMによる算定の結果、従来のFRMと同等のトルクを有しながら、磁石渦電流損は約60%低減可能であることが明らかとなった。

さらに、磁石分割による渦電流損の低減効果についても検討を行った。その結果、FRMの場合は軸方向に磁石を分割するよりも、周方向に分割をした方がより大きな損失低減効果が得られることが明らかとなった。今後は、分割方向による渦電流の低減効果の違いについて、詳細な分析を行うとともに、クロスポール型FRMの試作試験を行う予定である。

謝辞 本研究の一部は東北大学人工知能エレクトロニクス卓越大学院プログラムの支援を得て行われたものである。

## References

- 1) *Top Runner Motor*, JEMA, (2013) (in Japanese).
- 2) Rajesh P. Deodhar, Svante Andersson, Ion Boldea, and Timothy J. E. Miller: *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **33**, 4. (1997).
- 3) Yuefeng Liao, Feng Liang, and Thomas A. Lipo: *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **31**, 5. (1995).
- 4) Daoud Ouamara, and Frederic Dubas: *MDPI MCA.*, **24**, 3 (2019).

2022年10月21日受理, 2023年02月06日採録