

## アモルファス合金を適用した埋込磁石型磁気ギヤの特性

## Characteristics of Interior Permanent Magnet Magnetic Gear made of Amorphous Alloy

水穴 裕真<sup>a)†</sup>・中村 健二<sup>a)</sup>・鈴木 雄真<sup>b)</sup>・大石 悠平<sup>b)</sup>・立谷 雄一<sup>b)</sup>・操谷 欽吾<sup>b)</sup><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)<sup>b)</sup> ㈱プロスパイン, 宮城県大崎市松山次橋新千刈田 117 (〒987-1305)Y. Mizuana<sup>a)†</sup>, K. Nakamura<sup>a)</sup>, Y. Suzuki<sup>b)</sup>, Y. Oishi<sup>b)</sup>, Y. Tachiya<sup>b)</sup>, and K. Kuritani<sup>b)</sup><sup>a)</sup> Tohoku University, Graduate School of Engineering, 6-6-11 Aoba Aramaki Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan<sup>b)</sup> Prospine Co., Ltd., 117 Shinsengarida, Matsuyamatsugihashi, Osaki, Miyagi, Japan

Magnetic gears can transmit torque without any mechanical contacts. Hence, vibration and acoustic noise caused thereby are very low, and maintainability is high. Various types of magnetic gears have been proposed. Among them, a flux-modulated type magnetic gear has higher torque density in comparison with conventional magnetic gears. In a previous paper, an interior permanent magnet (IPM) flux-modulated type magnetic gear was proposed in order to reduce eddy current loss in the magnets. However, reduction of iron loss is also important to further improve the efficiency. This paper discusses characteristics of the IPM magnetic gear made of amorphous alloy by using finite element method (FEM). In addition, the prototyped gear is tested. The results reveal that amorphous alloy contributes to improve both efficiency and torque.

**Key words** : Flux-modulated type magnetic gear, interior permanent magnet (IPM), amorphous alloy

## 1. はじめに

機械式ギヤは、歯数の異なる歯車を 2 つ以上組み合わせで構成され、増減速や正逆転、並びに動力分割など、様々な動力の変換と伝達が可能である。現在、機械式ギヤは民生、運輸、産業などあらゆる分野で利用されており、動力伝達を行う上で重要な機械要素の一つとなっている。しかし、機械式ギヤは歯車同士を接触させることで動力伝達を行うため、振動や騒音、接触部での摩耗や発熱などの問題が指摘される。また、大容量機の場合、接触部の冷却や摩耗低減のための潤滑油系統が必須となる。そのため、システムが大型化・複雑化し、定期的な保守も不可欠となる。

これらの問題に対し、近年、永久磁石を利用した磁気ギヤが注目されている<sup>1)</sup>。磁気ギヤは非接触で動力伝達可能であり、機械式ギヤと比べて振動や騒音が小さく、摩耗や発塵がない。また、潤滑油系統も不要であり、優れた保守性を有する。しかし、一般的な磁気ギヤは、機械式ギヤの歯を単純に永久磁石で置き換えた構造を有し、互いに対向した磁石のみが動力伝達に寄与するため、トルク密度や効率が低く、実用には遠い存在であった。

これに対し、磁束変調型磁気ギヤ<sup>2)</sup>は、内外 2 つの永久磁石回転子と、その間に挟まれたポールピースと呼ばれる複数の固定子磁極片から構成され、磁石磁束をポールピースにより変調することによって、ギヤとして動作する。磁束変調型磁気ギヤは、すべての回転子磁石が動力伝達に寄与するため、他種の磁気ギヤと比べてトルク密度が高く<sup>3)</sup>、実用化が最も期待されている。

磁束変調型磁気ギヤの実用化には、さらなるトルク向上と損失低減の両立が不可欠である。先に筆者らは、埋込磁石 (IPM) 構造による磁石渦電流損の低減<sup>4)</sup>、並びに磁気ブリッジの位置や磁石形状の工夫によるトルク性能の向上<sup>5)</sup>などに関して検討を行ってきた。一方で、さらなる高効率化には、鉄損の低減も必須であることを明らかにした。

そこで本稿では、軟磁性材料の中でも鉄損が極めて小さいアモルファス合金に着目した。なお、表面磁石 (SPM) 型やリラクタンス型の磁気ギヤに関しては、アモルファス合金を用いることで効率を改善した報告例がある<sup>6)</sup>。本稿では、これを IPM 型の磁気ギヤに用いた場合の特性について、有限要素法 (FEM) 並びに実機試験により検討を行ったので報告する。

## 2. 磁束変調型磁気ギヤの基本構成と動作原理

Fig. 1 に、磁束変調型磁気ギヤの基本構成を示す。磁束変調型磁気ギヤは、同心円状に配置された極対数の異なる内外 2 つの永久磁石回転子と、その間に挟まれたポールピースと呼ばれる周方向に等間隔に配置された複数の固定子磁極片から構成される。以下、本磁気ギヤの動作原理を述べる。

Fig. 2 に、内側回転子の永久磁石からポールピースを介して、外側ギャップに作られる磁束分布を模式的に示す。同図のように、永久磁石の起磁力分布が正弦波状であると仮定すると、起磁力は次式で表される。

$$f_h(\theta, t) = F_{ah} \cos\{p_h(\theta - \omega_h t)\} \quad (1)$$

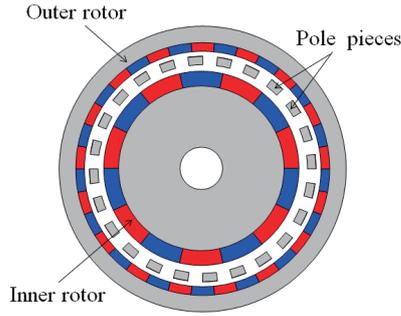


Fig. 1 Basic configuration of a flux-modulated type magnetic gear.

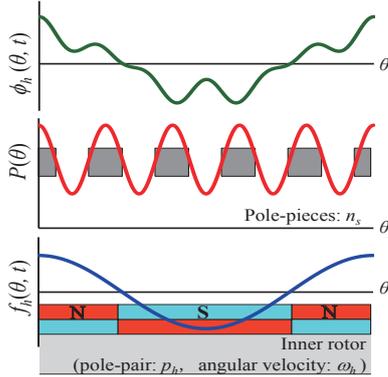


Fig. 2 Outside gap flux generated by the inside magnet's MMF and the pole-pieces.

ここで、 $F_{ah}$ は内側回転子の磁石起磁力の振幅、 $p_h$ と $\omega_h$ はそれぞれ内側回転子の極対数と角速度である。

ポールピースのパーミアンス分布  $P(\theta)$ についても正弦波状であると仮定すれば、ポールピースの極数  $n_s$  を用いて、次式で表される。

$$P(\theta) = \lambda_d + \lambda_a \cos(n_s \theta) \quad (2)$$

ここで、 $\lambda_d$ と $\lambda_a$ はそれぞれポールピースのパーミアンス分布の平均値と振幅である。

以上から、外側ギャップに作られる磁束分布  $\phi_h(\theta, t)$  は、(1)式と(2)式の積として、以下のように導出される。

$$\begin{aligned} \phi_h(\theta, t) &= F_{ah} \lambda_d \cos\{p_h(\theta - \omega_h t)\} \\ &+ \frac{1}{2} F_{ah} \lambda_a \cos\left\{(n_s + p_h)\left(\theta - \frac{p_h}{n_s + p_h} \omega_h t\right)\right\} \\ &+ \frac{1}{2} F_{ah} \lambda_a \cos\left\{(n_s - p_h)\left(\theta - \frac{-p_h}{n_s - p_h} \omega_h t\right)\right\} \end{aligned} \quad (3)$$

(3)式より、外側ギャップに現れる磁束には、内側回転子の極対数  $p_h$  と同じ次数の基本波成分に加えて、 $(n_s + p_h)$  と  $(n_s - p_h)$  の2つの変調成分が存在することが了解される。これらの成分の回転速度はそれぞれ  $p_h \omega_h / (n_s + p_h)$ 、 $-p_h \omega_h / (n_s - p_h)$  である。したがって、外側回転子の極対数  $p_l$  を  $(n_s + p_h)$ 、もしくは  $(n_s - p_h)$  のいずれかに選べば、外側回転子は以下の速度で同期して回転する。

$$\omega_l = \pm \frac{p_h \omega_h}{n_s \pm p_h} = \pm \frac{p_h}{p_l} \omega_h \quad (4)$$

なお、(3)式を見ると、ポールピースで変調された2つの成分  $(n_s + p_h)$  と  $(n_s - p_h)$  の振幅は等しいが、実際は、永久磁石の起磁力分布およびパーミアンスの空間分布は、正弦波ではなく矩形波に近いので、高調波の影響により、 $(n_s - p_h)$  の成分の振幅の方が大きくなる。したがって、通常、磁束変調型磁気ギヤの外側回転子の極対数は  $p_l = n_s - p_h$  になるように選択する。

### 3. アモルファス合金を用いた IPM 磁気ギヤの特性算定

#### 3.1 IPM 磁気ギヤの諸元

Fig. 3 に、考察に用いた IPM 磁気ギヤの基本構成を示す。また、Table 1 は諸元である。同図に示すように、内外回転子の永久磁石はスポーク状に埋め込まれている。また、トルク向上の観点から、磁気ブリッジは一般的なギャップ側ではなく、バックヨーク側に設けられている<sup>5)</sup>。磁石材料は Nd-Fe-B 焼結磁石である。以下では、低鉄損材料であるアモルファス合金に着目し、回転子鉄心 (Core) を無方向性ケイ素鋼板 (35A250) かアモルファス合金 (Amorphous)、ポールピース (PP) を圧粉磁心 (SMC) かアモルファス合金 (Amorphous) とした場合の特性の比較を行った。なお、今回用いたアモルファス合金は日立金属製の 2605HB1M である。

#### 3.2 3D-FEM 特性算定結果

Fig. 4 に、3D-FEM で求めた、外側回転子の最大トルク、鉄損、効率の算定結果を示す。なお、この時の内側回転子 (高速側) の回転数は 300 rpm である。

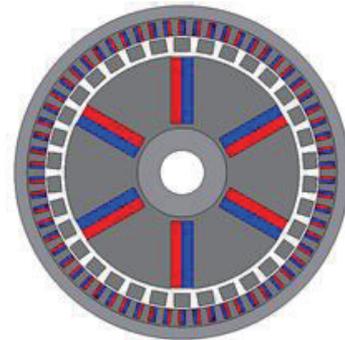


Fig. 3 Basic configuration of IPM magnetic gear.

Table 1 Specifications of the IPM magnetic gear.

Gear ratio	10.33
Outer diameter	150 mm
Axial length	25 mm
Inner air gap	2 mm
Outer air gap	1 mm
Inner pole-pairs	3
Outer pole-pairs	31
Number of pole-pieces	34

Fig. 4 (a) を見ると、回転子鉄心にケイ素鋼板 (35A250) を用いた場合の最大トルクは  $18.5 \text{ N}\cdot\text{m}$  であるのに対して、アモルファス合金を用いた場合の最大トルクはそれぞれ  $20.1 \text{ N}\cdot\text{m}$  (PP : SMC),  $19.8 \text{ N}\cdot\text{m}$  (PP : Amorphous) である。一般に、アモルファス合金はケイ素鋼板と比べて飽和磁束密度が低いにも関わらず、鉄心材料にアモルファス合金を用いることでトルクが向上していることがわかる。これは、飽和磁束密度が低いことで、磁気ブリッジがより小さい磁束で飽和し、その分だけギャップ側へ流れ込む有効磁束が増加したためだと考えられる。Fig. 5 に、回転子鉄心の材料をケイ素鋼板およびアモルファス合金にした場合の磁束密度コンター図を示す。なお、このときのポールピース材は圧粉磁心 (SMC) である。同図より、鉄心材料にアモルファス合金を用いた方が、磁気ブリッジの磁気飽和がより低い磁束密度で生じていることがわかる。さらに、Fig. 6 (b) の空隙磁束密度の高調波成分を見ると、回転子鉄心の材料をケイ素鋼板からアモルファス合金に変更したとき、外側ギャップ磁束の 31 次成分、すなわち外側回転子と同期してトルク伝達に寄与する成分が増加していることがわかる。

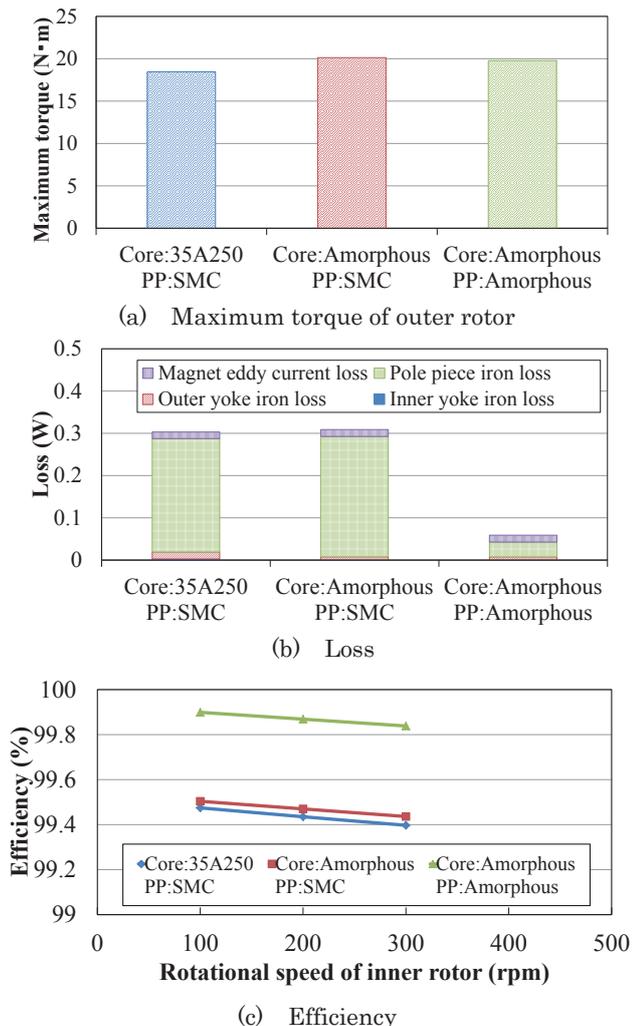


Fig. 4 Comparison of calculated torque, loss, and efficiency of the IPM magnetic gears.

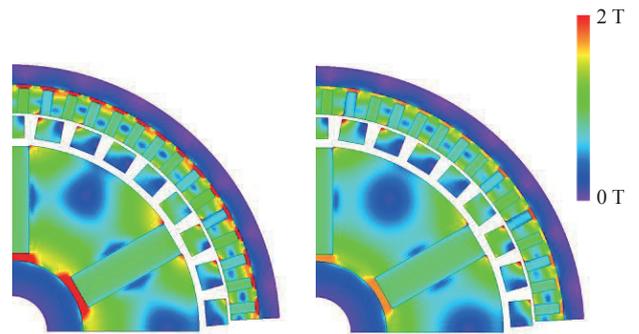


Fig. 5 Flux density contour map (left : 35A250, right : Amorphous).

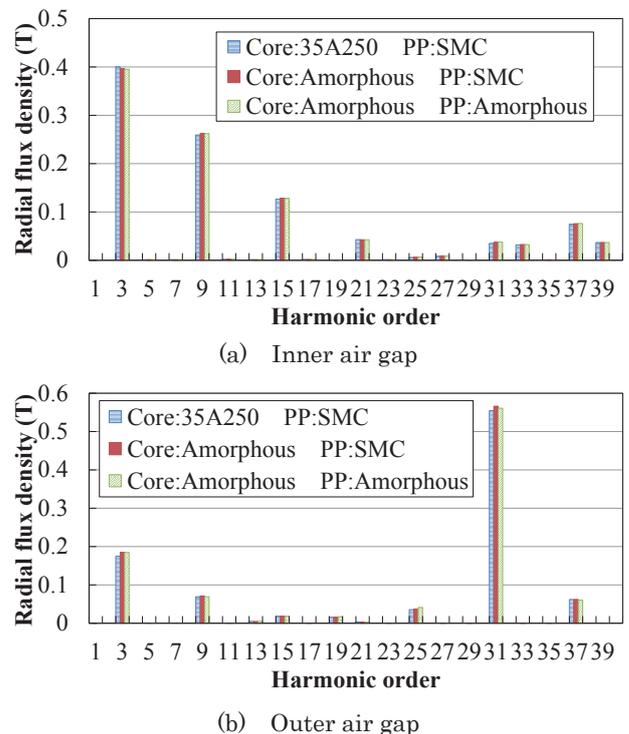


Fig. 6 Harmonic contents of the flux density of air gap.

次いで、Fig. 4 (b) を見ると、ポールピースで生じる鉄損が最も大きいことがわかる。したがって、ポールピースにアモルファス合金を用いることによって、鉄損が大幅に低減される。

Fig. 4 (c) は、効率の算定結果である。なお、磁気ギャの機械出力  $P_{out}$  および効率  $\eta$  は、以下の式を用いて算出した。

$$P_{out} = \omega_h \bar{\tau}_h \quad (5)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + W_i + W_e} \times 100 (\%) \quad (6)$$

ここで、 $\omega_h$ 、 $\bar{\tau}_h$  はそれぞれ内側回転子の回転角速度とトルクの平均値、 $W_i$  は回転子鉄心とポールピースの鉄損の総和、 $W_e$  は永久磁石および非磁性ヨークの渦電流損失の総和である。この図を見ると、回転子鉄心とポールピースの両方に

アモルファス合金を用いた場合が最も効率が高いことがわかる。これは、回転子鉄心にアモルファスを用いたことで伝達トルクが増加したことで、ポールピースにアモルファス合金を用いたことで鉄損を大幅に低減できたことが要因である。

#### 4. アモルファス合金を用いた IPM 磁気ギヤの試作試験

前章の算定結果に基づき、実証機の試作試験を行った。Fig. 7 に、実験装置の外観を示す。入力側には、サーボモータを接続し、磁気ギヤを任意の速度で回転させる。出力側には、ヒステリシスブレーキを接続し、所望の負荷トルクを印加する。入力軸および出力軸にはそれぞれトルクメータを接続し、内外回転子の回転速度、並びに入出力トルクを測定する。入力側を低速・大トルクの外側回転子、出力側を高速・低トルクの内側回転子とし、磁気ギヤを増速動作させて実験を行った。

Fig. 8 に、外側回転子の最大トルクの測定結果を示す。なお、測定時の内側回転子の回転数は 300 rpm である。この図を見ると、回転子鉄心にケイ素鋼板を用いた場合の最大トルクは  $15.8 \text{ N}\cdot\text{m}$  であるのに対して、アモルファス合金を用いた場合の最大トルクはそれぞれ  $18.1 \text{ N}\cdot\text{m}$  (PP:SMC),  $17.9 \text{ N}\cdot\text{m}$  (PP:Amorphous) である。したがって、回転子鉄心にアモルファス合金を用いた IPM 磁気ギヤの方が高いトルクが得られており、Fig. 4 (a) の 3D-FEM による算定結果と同様の結果が得られていることがわかる。

Fig. 9 に、効率の測定結果を示す。なお、内側回転子の回転数は、同図 (a) が 300 rpm、同図 (b) が 1000 rpm である。また、出力トルクは最大トルクで規格化している。これらの図を見ると、回転子鉄心およびポールピースにアモルファスを用いた方が高効率であることがわかる。特に、高速低負荷領域において、効率の改善が認められる。

#### 5. まとめ

以上、本稿では、軟磁性材料の中でも鉄損が極めて小さい、アモルファス合金を埋込磁石型 (IPM) 磁気ギヤの鉄心材料として用いた場合の特性に関して、有限要素法による電磁界解析、並びに試作機による実証実験の両面から検討を行った。

有限要素法による電磁界解析の結果から、飽和磁束密度の低いアモルファス合金を回転子鉄心に採用することで、磁気ブリッジがより低い磁束密度で飽和するため、ギャップ側に流れ込む有効磁束が増加し、トルクが向上することを明らかにした。さらに、ポールピース材としてアモルファス合金を用いることで、鉄損が大幅に減少し、効率が向上することを明らかにした。

また実機試験においても、有限要素法の解析結果と同様に、回転子鉄心の材料をケイ素鋼板からアモルファス合金に変更することで、最大トルクが向上した。効率についても、回転子鉄心およびポールピースにアモルファス合金を

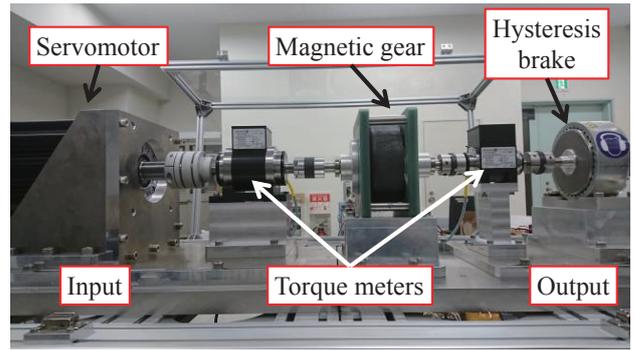


Fig. 7 Experimental setup.

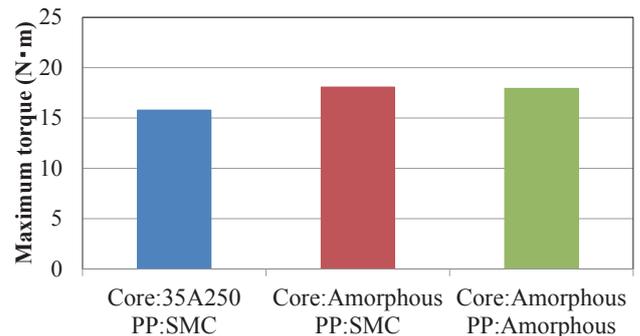
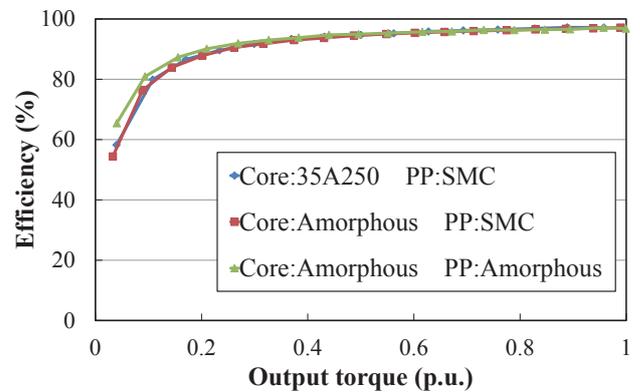
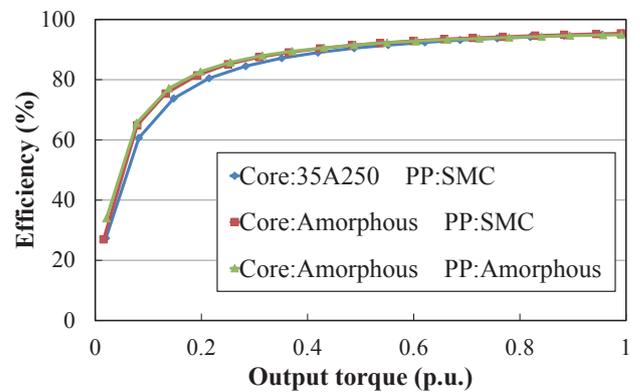


Fig. 8 Comparison of measured outer rotor maximum torque of the prototype IPM magnetic gears.



(a) Inner rotational speed: 300 rpm



(b) Inner rotational speed: 1000 rpm

Fig. 9 Comparison of measured efficiency of the prototype IPM magnetic gears.

用いた方が，特に高速低負荷領域において効率が改善することを明らかにした．

今後は，本稿で検討した磁気ギヤと発電機を組み合わせたシステムに関する特性評価を行う予定である．

なお，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) F. T. Jørgensen, P. O. Rasmussen, and T. O. Andersen: “Magnetic gears – a Review”, Summer Seminar on Nordic Network for Multi Disciplinary Optimized Electric Drives (2003).
- 2) T. B. Martin, Jr.: “Magnetic transmission”, U.S. Patent 3378710 (1968).
- 3) K. Atallah and D. Howe, *IEEE Trans. Magn.*, **37**, 2844 (2001).
- 4) T. Ikeda, K. Nakamura, and O. Ichinokura, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **34**, 380 (2010) (in Japanese).
- 5) Y. Mizuana, K. Nakamura, Y. Suzuki, Y. Oishi, Y. Tachiya, and K. Kuritani, *T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)*, **3**, 74 (2019)
- 6) K. Aiso, K. Akatsu, and Y. Aoyama, *IEEE Trans. IA*, **55**, 2690 (2019)

2019年10月01日受理, 2019年11月13日採録