

埋込磁石型磁気ギヤの性能向上に関する検討

Performance Improvement of Interior Permanent Magnet Magnetic Gear

水穴 裕真^{a)†}・中村 健二^{a)}・鈴木 雄真^{b)}・大石 悠平^{b)}・立谷 雄一^{b)}・操谷 欽吾^{b)}^{a)} 東北大学 大学院工学研究科, 仙台市青葉荒巻字青葉 6-6-11 (〒980-8579)^{b)} ㈱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^{a)†}, K. Nakamura^{a)}, Y. Suzuki^{b)}, Y. Oishi^{b)}, Y. Tachiya^{b)}, and K. Kuritani^{b)}^{a)} Tohoku University, Graduate School of Engineering, 6-6-11 Aoba Aramaki Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan^{b)} Prospine Co., Ltd., 117 Shinsengarida, Matsuyamatsugihashi, Osaki, Miyagi, Japan

Magnetic gears can change the speed and torque without any mechanical contacts. Therefore, it has a low vibration and acoustic noise, and maintenance-free operation. Several kinds of magnetic gears were proposed. Among them, a flux-modulated type magnetic gear has higher torque density than other kinds of magnetic gears. In a previous paper, an interior permanent magnet (IPM) structure was presented. It was demonstrated by finite element analysis (FEM) that eddy current loss in the magnets can be reduced remarkably. This paper describes the comparison of the IPM structure with surface permanent magnet (SPM) structure in experiment and discusses a performance improvement of the IPM gear from the view point of the rotor structure.

Key words: Flux-modulated type magnetic gear, interior permanent magnet (IPM), eddy current loss

1. はじめに

機械式ギヤは、歯数の異なる歯車を 2 つ以上組み合わせて構成され、増速や減速、正転や逆転、回転軸の向きの変更、並びに動力分割など、多種多様な動力の伝達が可能である。現在、機械式ギヤは様々な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て動力伝達を行うため、振動や騒音、接触部での摩擦や発熱などの問題が生じる。さらに、大容量機の場合、接触部の冷却や摩擦低減のための潤滑油システムが必須となるため、システムが複雑化し、定期的な保守点検も必要となる。

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¹⁾。磁気ギヤは非接触で動力伝達可能であるため、機械式ギヤと比べて振動や騒音が小さく、摩擦や発塵がない。加えて、潤滑油システムも不要であり、保守性に優れる。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に置き換えた構造であり、互いに対向した永久磁石同士でしか動力の伝達が行われないため、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²⁾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で構成され、磁石磁束をポールピースにより変調することで、ギヤとして動作する。磁束変調型磁気ギヤは、すべての永久磁石が動力伝達に寄与するため、他の磁気ギヤと比べてトルク密度が高く³⁾、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が、このうち損失については、非同期的な高調波磁束に由来する磁石渦電流損の低減が必須である。

上記の問題に対し、先に筆者らは、回転子鉄心に永久磁石をスポーク状に埋め込んだ磁気ギヤを提案し⁴⁾、3次元有限要素法(3D-FEM)による電磁界解析により、磁石渦電流損が大幅に低減されることを明らかにした。ただし、鉄損など、それ以外の損失に関する検討はなく、また実機による検証も行われていない。そこで本稿では、この埋込磁石型(Interior permanent magnet: IPM)磁気ギヤについて、詳細な損失の分析と実証実験を行うとともに、さらなる性能向上に向けた検討を行ったので報告する。

2. 磁束変調型磁気ギヤの動作原理

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。

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

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

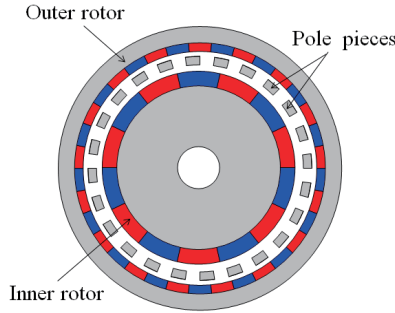


Fig. 1 Basic configuration of a flux-modulated type magnetic gear.

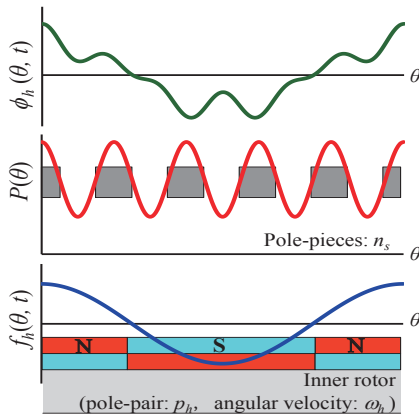


Fig. 2 Outside gap flux generated by the inside magnet's MMF and the pole-pieces.

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、次式で表すことができる。

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

ここで、 λ_d と λ_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、次式のように求まる。

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

(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 と同じ次数の成分に加えて、 $(n_s + p_h)$ と $(n_s - p_h)$ の2つの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、並びにパーミアンスの空間分布は、正弦波ではなく台形波に近いため、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. 表面磁石型と埋込磁石型の磁気ギヤの比較

3.1 表面磁石型と埋込磁石型の磁気ギヤの特性算定

Fig. 3 に、IPM 磁気ギヤと表面磁石型 (Surface Permanent Magnet: SPM) 磁気ギヤの基本構成を示す。また、Table 1 に諸元を示す。内外回転子の極対数はそれぞれ3と31であり、極対数の比からギヤ比は10.33となる。ポールピースおよび回転子鉄心の材質は、それぞれ圧粉磁心および無方向性ケイ素鋼板であり、磁石材料はNd-Fe-B焼結磁石である。磁気ギヤの直径は150 mm、軸長は25 mm、ポールピースと内外回転子の間のギャップ長はそれぞれ2 mmと1 mmである。

IPM 磁気ギヤは、内外回転子磁石をスポーク状に埋め込み、幅1 mmの磁気ブリッジをギャップ側に設けた構造となっている。また、磁石磁束の短絡を防止するため、バックヨークに非磁性のステンレスを用いている。なお、両者の全磁石体積は等しくなるように設計した。

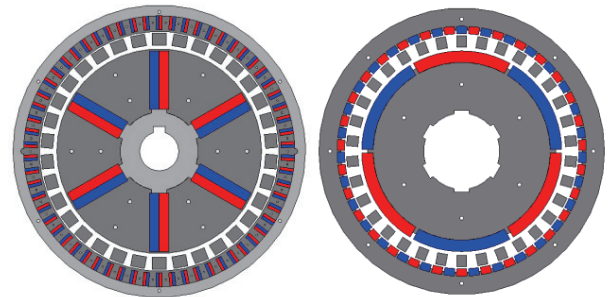


Fig. 3 Basic configuration of two kinds of magnetic gears (left: IPM-type, right: SPM-type).

Table 1 Specifications of the magnetic gears.

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 に、3D-FEM による両磁気ギヤの特性算定結果を示す。このとき、内側回転子の回転数は 300 rpm である。

同図(a)の総損失を見ると、IPM 磁気ギヤの方が SPM 磁気ギヤよりも小さいことがわかる。また、低速領域であることから、渦電流損よりも鉄心の鉄損が支配的になっていることがわかる。なお、同図を見ると、IPM 磁気ギヤの渦電流損の方が、SPM 磁気ギヤよりも若干大きいことがわかるが、これは IPM の場合は磁石渦電流損に加えて、バックヨークに用いた非磁性ステンレスで生じる渦電流損も考慮したためである。

次いで、同図(b)の鉄損の内訳を見ると、IPM 磁気ギヤでは外側回転子鉄心の鉄損が大きく減少しており、これが総損失が減少した主たる要因であることがわかる。

同図(c)は両磁気ギヤの効率特性である。本稿では、磁気ギヤの機械出力 P_{out} および効率 η 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、 ω_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 は内外回転子鉄心とポールピースの鉄損の和、 W_e は永久磁石および非磁性ヨークの渦電流損失の和である。この図を見ると、すべての回転数において、SPM 磁気ギヤよりも IPM 磁気ギヤの方が高効率であるという結果が得られた。

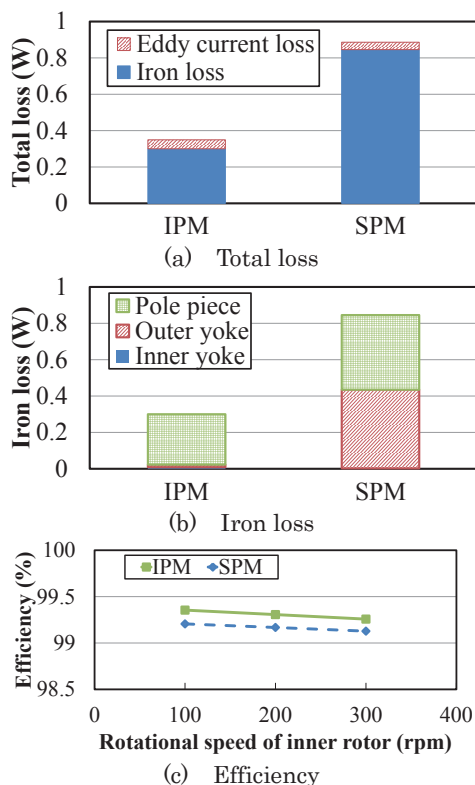


Fig. 4 Comparison of the total loss, iron loss, and efficiency of the SPM and IPM magnetic gears.

3.2 実機検証

前節の算定結果に基づき、実機検証を行った。Fig. 5 に、実験装置の外観を示す。サーボモータにより磁気ギヤを任意の速度で回転させ、ヒステリシスブレーキを出力側に接続して所望の負荷トルクを印加する。入力軸と出力軸のそれぞれにトルクメータを接続し、内外回転子の速度およびトルクを測定する。入力を低速大トルクの外側回転子、出力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. 6 に、低速側 20 rpm 時の効率および外側回転子の最大トルクの比較結果を示す。なお、最大トルクを測定する際は、磁石渦電流損などの過渡的な影響を抑えるため、低速側を数 rpm 程度の極めて遅い速度で定回転させ、徐々に負荷をかけながら、脱調する瞬間のトルクを測定した。

同図(a)より、すべての領域で IPM 磁気ギヤの方が効率が低いことが了解され、実機においても IPM 磁気ギヤは高効率であることが明らかになった。

一方で、同図(b)の最大トルクを見ると、IPM 磁気ギヤのトルクは SPM 磁気ギヤの半分以下であることがわかる。次章では、トルク低下の原因とその対策について考察する。

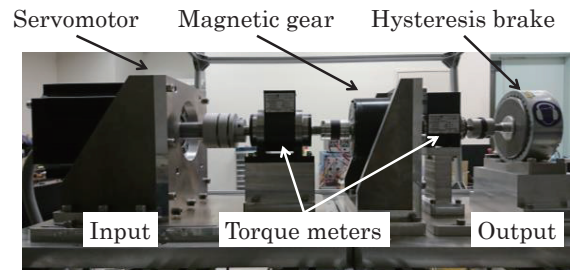


Fig. 5 Experimental setup.

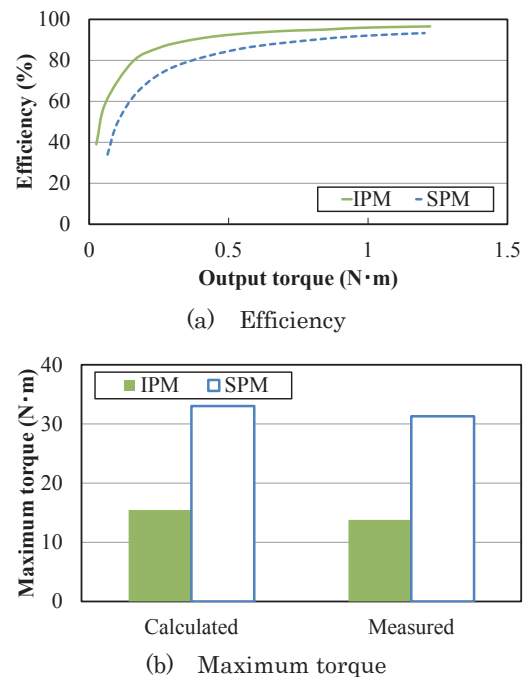


Fig. 6 Comparison of maximum torque and efficiency of the prototype SPM and IPM magnetic gears.

4. 埋込磁石型磁気ギヤのトルク向上に関する検討

4.1 トルク低下の原因とその対策

Fig. 7は、スポーク形 IPM 磁気ギヤの磁束密度ベクトル図である。この図を見ると、磁石磁束の一部が磁気ブリッジに漏れていることがわかる。これにより有効磁束が減少し、トルクの低下を招いていると考えられる。そこで、Fig. 8に示すように、磁気ブリッジをギャップ側ではなく、非磁性ヨーク側に設けることで、有効磁束の増加を図った。ただし、スポーク形状のまま磁気ブリッジを非磁性ヨーク側に設けると、遠心力で磁石が飛散する恐れがあるため、同図に示すように、磁石を台形にした。

Fig. 9に、本稿で提案する IPM 磁気ギヤ (Trapezoid) の諸元を示す。磁気ブリッジの幅は、内側が 2 mm、外側が 1 mm である。なお、磁石を台形にしたことで、スポーク形と比べて、磁石量は 1.64 倍に増えている。

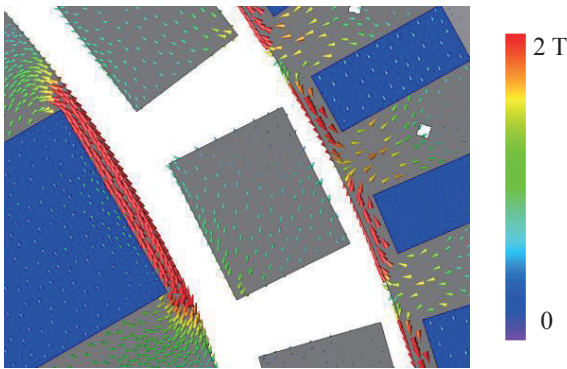


Fig. 7 Flux density distribution of the IPM magnetic gear (Spoke).

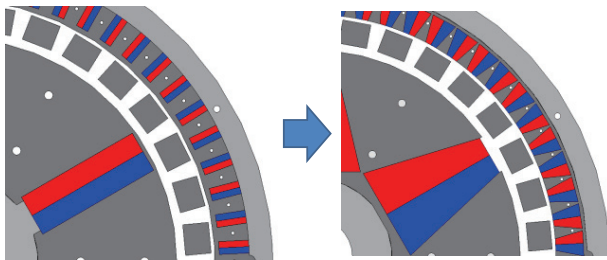


Fig. 8 Rotor structure for torque improvement.

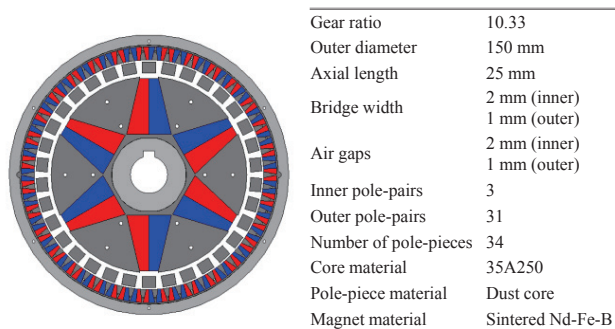


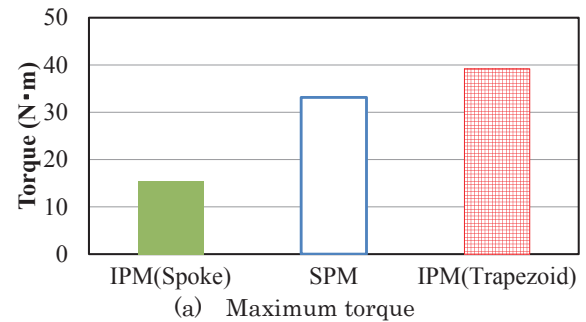
Fig. 9 Specifications of the proposed IPM magnetic gear (Trapezoid).

4.2 特性の比較

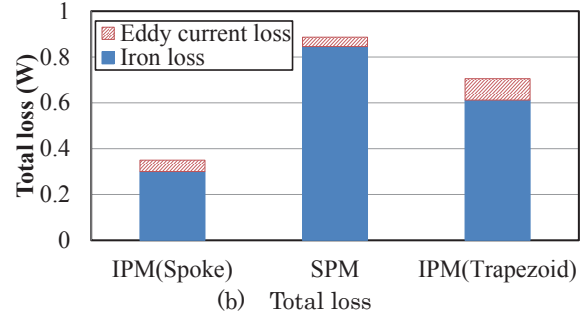
Fig. 10 に、各磁気ギヤの特性算定結果を示す。同図(a)より、IPM (Trapezoid) の最大トルクは 39.2 N·m であり、SPM 磁気ギヤを上回っていることがわかる。これは、磁気ブリッジの位置を変更したことで有効磁束を増加させたことに加え、回転子磁石の形状を台形にして磁石量を増加させたためである。

同図(b)の総損失および同図(c)の鉄損の内訳を見ると、IPM (Trapezoid) は IPM (Spoke) よりも損失が増えたが、SPM よりも低く抑えられていることがわかる。

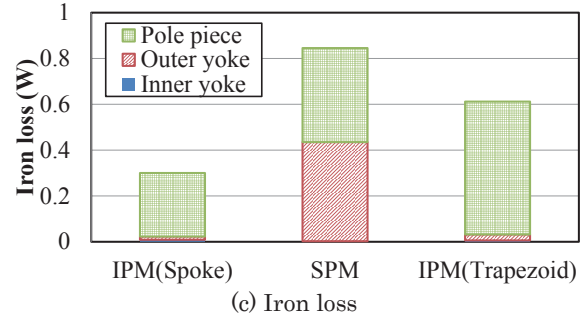
同図(d)に効率を示す。この図を見ると、すべての領域で IPM (Trapezoid) が最も効率が高いことがわかる。これは



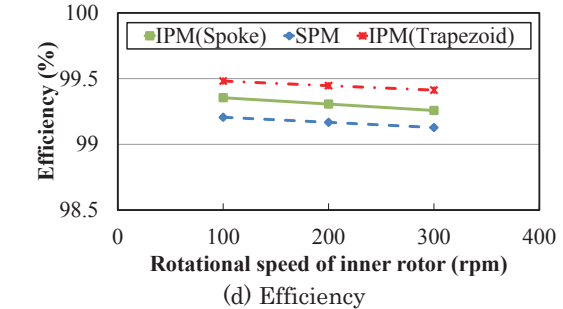
(a) Maximum torque



(b) Total loss



(c) Iron loss



(d) Efficiency

Fig. 10 Comparison of the maximum torque and total loss and iron losses and efficiency of the magnetic gears.

埋込磁石構造を採用したことで鉄損が減少したことに加え、磁気ブリッジの位置を変更して有効磁束を増加させるとともに磁石形状を台形にして磁石量を増やしたことで、SPMを上回るトルクを得ることができたためである。

5. まとめ

以上、本稿ではIPM磁気ギヤについて、詳細な損失の解析と実証実験を行うとともに、さらなる性能向上に向けた検討を行った。

今回検討を行った比較的低速な速度領域では、IPM化による効率改善は、外側回転子鉄心の鉄損減少が主たる要因であることが明らかになった。なお、先行研究⁴⁾では、IPM化により、磁石渦電流損が大幅に低減され、効率が向上することが示唆されていたが、バックヨークに用いる非磁性ステンレスに生じる渦電流損まで含めると、逆に増加することも明らかになった。

次いで、実証実験によって、IPM磁気ギヤはSPM磁気ギヤと比べて効率が高いことが明らかになった。一方で、トルクは劣ることが判明したため、原因の調査を行ったところ、磁気ブリッジによる漏れ磁束が主たる要因であることが明らかになった。

そこで本稿では、磁気ブリッジを非磁性ヨーク側に設け、磁石形状を台形にした回転子構造を提案した。3D-FEMによる解析結果より、提案したIPM磁気ギヤは、スポーク形のIPM磁気ギヤおよびSPM磁気ギヤと比べ、トルクおよび効率が優れていることが明らかとなった。

今後は、コスト削減を目的として、磁石量をどの程度減らせば、SPM磁気ギヤと同等のトルク性能を実現できるかについて検討するとともに、本稿で提案したIPM磁気ギヤの試作試験を行う予定である。

なお、本研究の一部はJSPS科研費 基盤(B)JP16H04310の助成を受け行った。

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).

2018年 10月 11日受理, 2019年 01月 06日採録