Examination of Magnetic Gear using Polar Anisotropic Bonded Magnet

M. Fukuoka, K. Nakamura, and O. Ichinokura

Graduate School of Engineering, Tohoku University, 6-6-05 Aoba Aramaki Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan

Magnetic gears can transmit torque without mechanical contact. They therefore have low vibration and acoustic noise, and are low maintenance in comparison with conventional mechanical gears. Various types of magnetic gears have been introduced. A planetary type magnetic gear has attracted interest recently because of its higher transmission torque compared to other types, and it is expected to be put into practical use. However, it is necessary to reduce the eddy current loss caused by harmonic fluxes in the air gap. This paper presents a magnetic gear using polar anisotropic Nd-Fe-B bonded magnets in which the eddy current is rarely induced.

Key words: magnetic gear, polar anisotropic magnet, bonded magnet, eddy current loss

極異方性ボンド磁石を用いた磁気ギアに関する検討

福岡道成・中村健二・一ノ倉理

東北大学 大学院工学研究科, 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05 (〒980-8579)

1. はじめに

地球温暖化の原因となる大気汚染物質の削減, ならびに省エネルギー対策のため, 風力, 水力, 波力, 地熱, バイオマスなどの再生可能エネルギーの活用が望まれている. ここで一般に, これらの電源の動力源と, 接続される発電機の回転数は異なるため, ギアを用いて所望の回転数まで増減速する必要がある. そのため, ギアには小型, 高出力, 高効率, 低保守, 低騒音であることが強く望まれる. しかしながら, 現在広く一般に用いられている機械式ギアは接点を有するため, 接触部からの騒音や潤滑油系統が必要であること, また部品点数の多さによる保守管理の複雑化といった問題が指摘される. これに対して, 磁気ギアは非接触で動力を伝達することができるため, 振動・騒音が小さく, また部品の摩耗が無いことから, 信頼性・保守性の向上が期待される.

これまで様々な種類の磁気ギアが提案されているが¹⁻³⁾, それらの中でも, 近年, Fig. 1 の遊星型磁気ギア⁴⁾が注目されている. 遊星型磁気ギアは, 同心円状に配置された内外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固定子で構成されており, このポールピースによって, 磁石磁束を変調することでギアとして動作する⁵⁾. ここで, 他の種類の磁気ギアは入力側と出力側の回転子のある一部分のみを使用してトルクを伝達しているのに対し, 遊星型磁気ギアは, 内外の回転子表面に張り付けられたすべての磁石がトルクの伝達に寄与するため, 他の磁気ギアに対し

てトルク密度が高い^{5,6)}. しかしながら一方で, 磁石磁束の変調で生じる非同期の高調波磁束によって, 回転子磁石には渦電流損が生じることが指摘されており⁷⁾, 今後の実用化のためには, 磁石渦電流損の低減が必要不可欠である.

そこで本稿では, 性質上, 渦電流がほとんど生じないボンド磁石に着目した. ただし, ボンド磁石の磁気特性は, 一般的な焼結磁石に対して劣ることが知られており, 単純な置き換えでは所望のトルクを得ることはできない. そこで極異方性着磁に着目し, 従来のラジアル異方性着磁の磁石と特性の比較を行うとともに, 極異方性着磁されたボンド磁石を適用した磁気ギアの特性について, 有限要素法 (FEM) を用いて検討を行ったので報告する.

2. 極異方性ボンド磁石の特性

2.1 焼結磁石とボンド磁石の磁気特性の比較

Fig. 2 に, 広く一般に用いられている希土類焼結磁石と, 本稿での検討に用いる希土類ボンド磁石の磁気特性を示す. 材質は Nd-Fe-B であり, 焼結磁石およびボンド磁石の残留磁束密度 B_r はそれぞれ 1.25 T, 0.8 T である. また, 保磁力 H_c はそれぞれ 975 kA/m, 500 kA/m である. この図を見ると, ボンド磁石の磁気特性は焼結磁石の約 6 割程度であることがわかる. したがって, 同形状・同寸法の磁気ギアの磁石を単純にボンド磁石に置き換えた場合, 仮に磁石渦電流損をゼロにできたとしても, 伝達トルクは小さくなるということが容易に想像される.

そこで本稿では, Fig. 3(a)に示す極異方性着磁に着目する. 同図(b)に示す一般的なラジアル異方性着磁に対して, 極異方性着磁で

Fig. 1 Basic structure of planetary type magnetic gear 5), 6).

Fig. 2 Demagnetization curves of Nd-Fe-B sintered and bonded magnets.

は磁石磁束が一方の面に集中するため、磁石磁束が増加、回転子ヨークが不要などの特長を有する。以下、簡単な磁気回路を用いて、ラジアル異方性磁石と極異方性磁石の特性の比較を行う。

2.2 ラジアル異方性磁石と極異方性磁石の特性比較

Fig. 4 に、考察に用いた解析モデルを示す。永久磁石の材質は Nd-Fe-B であり、残留磁束密度 B_r 、保磁力 H_c はそれぞれ、0.8 T、500 kA/m である。磁石 1 極対の x 軸方向の長さは 100 mm であり、永久磁石と鉄心の間に設けたギャップの長さは 10 mm である。鉄心の透磁率は無限大とし、積厚方向への漏れ磁束は無視する。また、同図(a)の極異方性磁石の解析モデルでは、磁束は磁石内で円弧状に流れると仮定し、バックヨークは無視する。

Fig. 5 に、上述の仮定に基づき導出した磁気回路モデルを示す。同図(a)において、永久磁石の内部磁気抵抗 R_{mx} および R_{my} は、次式で与えられる。

$$R_{mx} = l_x / (2\mu_r \mu_0 l_y D) \quad (1)$$

$$R_{my} = l_y / (2\mu_r \mu_0 l_x D) \quad (2)$$

ここで、 l_x および l_y は、それぞれ磁石の x 軸および y 軸方向の長さであり、 D は積み厚である。また、 μ_r は永久磁石のリコイル比透磁率であり、 μ_0 は真空の透磁率である。

次いで、ギャップの磁気抵抗 R_{air} は、次式で与えられる。

$$R_{air} = g / (\mu_0 l_x D) \quad (3)$$

ここで、 g はギャップ長である。

(a) Polar magnet (b) Radial magnet

Fig. 3 Lines of magnetic force of magnets.

(a) Polar magnet (b) Radial magnet

Fig. 4 Analytical models of polar and radial magnets.

(a) Polar magnet (b) Radial magnet

Fig. 5 Magnetic circuit models of polar and radial magnets.

また、永久磁石の起磁力 f_{cx} および f_{cy} は、次式で表される。

$$f_{cx} = H_c l_x / 2 \quad (4)$$

$$f_{cy} = H_c l_y / 2 \quad (5)$$

ここで、 H_c は磁石の保磁力である。

一方、Fig. 5(b)のラジアル異方性磁石の磁気回路モデルにおいて、永久磁石の内部磁気抵抗 R_m は、次式で与えられる。

$$R_m = l_y / (\mu_r \mu_0 l_x D) \quad (6)$$

また、ギャップの磁気抵抗 R_{air} は、(3)式で与えられる。

次いで、永久磁石の起磁力 f_c は、次式で表される。

$$f_c = H_c l_y \quad (7)$$

以上のようにして導出した磁気回路モデルを用いて、磁石の y 軸方向の長さ l_y に対するギャップ磁束密度を計算し、極異方性磁石とラジアル異方性磁石の特性を比較する。

Fig. 6 に、磁石の y 軸方向の長さ l_y に対するギャップ磁束密度の算定結果を示す。この図を見ると、ラジアル異方性磁石の場合、 l_y の増大に伴い、ギャップ磁束密度はある一定値に漸近することがわかる。これは(6)式と(7)式から明らかのように、起磁力 f_c と内部磁気抵抗 R_m がともに、磁石の長さ l_y に比例するためである。

一方、極異方性磁石の場合は l_y が増大しても、ギャップ磁束密度はある一定値に近づくことはなく、徐々に上昇し続けることがわかる。ここで、Fig. 5(a)に示した極異方磁石の2つの起磁力 f_{cx} 、 f_{cy} について、各々の起磁力に由来する磁束を求めた。Fig. 7 に、起磁力 f_{cx} および f_{cy} にそれぞれ由来するギャップ磁束密度の算定結果を示す。このうち、図中の f_{cx} に由来するギャップ磁束密度を見ると、 l_y に対して単調に増加し続けていることがわかる。これは、(4)式の f_{cx} は l_y に対して一定であるのに対し、(1)式の内部磁気抵抗 R_{mx} は l_y に反比例するためである。以上のことから、極異方性磁石は磁石長を長くすることで、ラジアル異方性磁石の特性を上回ることが了解される。

3. 極異方性ボンド磁石を用いた磁気ギアの特性

3.1 トルク特性

前章の考察により、極異方性磁石を用いることで、一般的なラジアル異方性磁石に対して、ギャップ磁束密度が向上することを

Fig. 6 Gap flux density calculated by magnetic circuit.

Fig. 7 Division of magnetomotive force of polar anisotropic magnet.

示した。したがって、従来のラジアル異方性焼結磁石を採用した磁気ギアに対して、極異方性ボンド磁石で置き換えることで、トルクを保ちつつ、損失の低減が期待される。本節では、従来のラジアル異方性焼結磁石と、極異方性ボンド磁石を用いた磁気ギアの伝達トルクと損失について比較を行う。なお、磁気ギアの特性格算定には、汎用の有限要素法（FEM）プログラムである JMAG-Studio を用いた。

Fig. 8 に、比較対象としたラジアル異方性焼結磁石を用いた磁気ギアの諸元を示す。内外の回転子の極対数は、それぞれ 7 と 17 であり、その間に配置されたポールピースの極数は 24 である。永久磁石の材料は Nd-Fe-B の焼結磁石であり、ポールピースの材質は 6.5%Si 鋼板、両回転子のバックヨークの材質は、無方向性ケイ素鋼板である。同図の磁気ギアのギア比は、内側（高速側）と外側（低速側）の回転子の極対数の比で決まる⁹⁾。すなわち、1:2.4286 である。本磁気ギアにおいて、特性を決める重要なパラメータである永久磁石ならびにポールピースの寸法は、最適化されている⁷⁾。

Fig. 9 に、極異方性ボンド磁石を用いた磁気ギアの諸元を示す。Fig. 8 の磁気ギアと比較するため、体格、極対数は同一とした。本磁気ギアは、Fig. 8 に示した磁気ギアの回転子の永久磁石とバックヨークを、極異方性ボンド磁石で置き換えている。なお、磁石支持のため、両回転子のバックヨークには非磁性金属を用いる。

Fig. 10 に、極異方性ボンド磁石およびラジアル異方性焼結磁石を用いた、磁気ギアの伝達トルク最大時の波形を示す。これらの図を見ると、極異方性ボンド磁石を用いた磁気ギアは、ラジアル異方性焼結磁石を用いた磁気ギアと比較して、伝達トルクが約 13% 向上していることがわかる。これは前章で考察したように、極異方性磁石は、ラジアル異方性磁石と比べて、磁石磁束が一方の面に集中し、ギャップ磁束密度が高くなるためであると考えられる。

Fig. 8 Structure and specifications of magnetic gear using radial anisotropic Nd-Fe-B sintered magnets.

Fig. 9 Structure and specifications of magnetic gear using polar anisotropic Nd-Fe-B bonded magnets.

3.2 出力・損失および効率の算定

前節の検討により、極異方性ボンド磁石を用いた磁気ギアは、従来のラジアル異方性焼結磁石を用いた磁気ギアと同等以上のトルクが得られることが示された。次いで、本節では永久磁石および鉄心で生じる損失の解析を行う。

Fig. 11 に、本検討で考慮した磁気ギアの損失を示す。同図(a)の極異方性ボンド磁石を用いた磁気ギアでは、導電体である非磁性ヨークの渦電流損と、ポールピースの鉄損を考慮した。なお、ボンド磁石の導電率は、焼結磁石と比較して、無視できるほど小さいため、ボンド磁石の渦電流損は無視した。一方、同図(b)のラジアル異方性焼結磁石を用いた磁気ギアでは、磁石の渦電流損と、回転子ヨークおよびポールピースの鉄損を考慮した。

本稿において、磁気ギアの効率は、次式を用いて算出する。

$$\eta = P_{out} / (P_{out} + W_{eddy} + W_{iron}) \quad (8)$$

ここで、 W_{iron} は鉄心の鉄損、 W_{eddy} は永久磁石および非磁性ヨークの渦電流損であり、 P_{out} は磁気ギアの機械出力である。以下、それぞれの損失と機械出力の算定手法について述べる。

まず 2 次元 FEM による鉄損の算定について述べる。一般に、磁束密度波形が正弦波である場合、鉄心の鉄損 W_{iron} は、次のサインメツツの実験式で与えられる。

$$W_{iron} = A_h f B_m^2 + A_e f^2 B_m^2 \quad (9)$$

式中の f は周波数、 B_m は最大磁束密度、 A_h および A_e は、ヒステリシス損係数および渦電流損係数である。なお、実際の磁束波形は高調波を含んだ歪み波となるため、2 次元 FEM で求めた磁束密度波形をフーリエ解析し、(9)式より各次高調波成分の鉄損を求め、それらの和を全体の鉄損とする。

次いで、3 次元 FEM による永久磁石および非磁性ヨークの渦電流損算定について述べる。汎用の FEM プログラムである JMAG-Studio において、渦電流を考慮した電磁界解析の基礎方程式は、次式で与えられる。

$$\text{rot}(\text{vrot} \mathbf{A}) = \mathbf{J}_0 - \sigma(\partial \mathbf{A} / \partial t) + \text{grad} \phi \quad (10)$$

上式中の $\mathbf{A}$ および ϕ は、それぞれベクトルポテンシャルとスカラー

Fig. 10 Torque waveforms calculated by FEM.

Fig. 11 Illustrations of magnets considering magnetic gear loss.

ポテンシャルである。 ν は磁気抵抗率、 J_0 は強制電流密度、 σ は導電率である。

ここで、 Fig. 8 および Fig. 9 の磁気ギアの積み厚は 1000 mm であるが、厚さ 1000 mm のボンド磁石および焼結磁石を作ることとは不可能であるため、実際に製作可能な厚み 5 mm の磁石を、積み厚方向に 200 枚積み重ねると仮定し、解析を行った。なお、これらの積み重ねられた磁石同士は、電気的に絶縁されており、また周方向に隣接する磁石同士も、電気的に絶縁されていると仮定した。

非磁性ヨークおよび磁石に流れる渦電流は表皮効果の影響を受ける。表皮厚さ d は、次式で表される。

$$d = 1/\sqrt{\sigma f \mu \pi} \quad (11)$$

ここで、定格回転時に回転子の永久磁石に流れる磁束の基本周波数は、内側で 2.91 kHz、外側で 1.2 kHz である。極異方性ボンド磁石を用いた磁気ギアでは、非磁性ヨークの導電率 $\sigma = 8.40 \times 10^5$ S/m と、透磁率 $\mu = 1.0 \times 4\pi \times 10^{-7}$ H/m を用いて、それぞれの表皮厚さは内側で約 11 mm、外側で約 16 mm と求まる。したがって、Fig. 12(a) に示すように、非磁性ヨークとボンド磁石が接する面から表皮深さ以上の領域を、十分に細かいメッシュで分割し、表皮効果を考慮できるようにした。

一方、ラジアル異方性焼結磁石を用いた磁気ギアでは、焼結磁石の導電率 $\sigma = 6.67 \times 10^5$ S/m と透磁率 $\mu = 1.037 \times 4\pi \times 10^{-7}$ H/m を用いて、それぞれの表皮厚さは内側で約 12 mm、外側で約 18 mm と求まる。したがって、同様に同図(b)に示すように、磁石表面から表皮深さ以上の領域を細かくメッシュ分割した。

最後に、磁気ギアの機械出力の算定について述べる。磁気ギアの機械出力 P_{out} は、上述の渦電流を考慮した 3 次元 FEM 解析により得られた出力側のトルク τ (N・m) と回転数 n (r/min) を用いて、次式で与えられる。

$$P_{out} = 2\pi n \tau / 60 \quad (12)$$

本稿において、出力側の定格回転数は 3,000 r/min である。

以上のようにして算定した両磁気ギアの機械出力、損失および効率を Table 1 に示す。この表を見ると、極異方性ボンド磁石を用いることで、磁気ギアで生じる損失を約 80% 低減することが可能

Table 1 Comparison of losses and efficiency of magnetic gears.

		Polar anisotropic bonded magnets	Radial anisotropic sintered magnets
Output power		33.7 MW	29.6 MW
Loss	Inner	0.5 kW (Nonmagnetic yoke)	326 kW (Magnets 323kW, Yoke 2kW)
	Outer	135 kW (Nonmagnetic yoke)	409 kW (Magnets 353kW, Yoke 56kW)
	Pole	18 kW (6.5% Si Steel)	28 kW (6.5% Si Steel)
	Total	154 kW	763 kW
Efficiency		99.5 %	97.4 %

であることがわかる。また、磁気ギアの効率は、従来のラジアル異方性焼結磁石を用いた磁気ギアで 97.4%、極異方性ボンド磁石を用いた磁気ギアで 99.5% となった。現在広く一般に用いられている機械式ギアの効率は、高いもので 95%~98% であるため、極異方性ボンド磁石を採用することで、機械式ギアよりも高い伝達効率を得られる可能性がある。

4. まとめ

以上、本稿では極異方性ボンド磁石を用いた磁気ギアの特長について、有限要素法 (FEM) を用いて検討を行った。

まず初めに、極異方性着磁されたボンド磁石の特性について、簡単な磁気回路を用いて考察を行った。その結果、極異方性磁石は磁石長を長くすることで、従来のラジアル異方性磁石の特性を上回ることが明らかになった。

次いで、極異方性ボンド磁石を適用した磁気ギアのトルク特性について評価を行った。その結果、ボンド磁石の磁気特性は焼結磁石に劣るが、極異方性着磁を採用することで、同等以上のトルクが得られることが明らかになった。

最後に、磁気ギアの損失と効率について検討を行った。極異方性ボンド磁石を採用することで、従来の焼結磁石を用いた磁気ギアに対して、損失が約 80% 低減され、効率が 99.5% に達することが示された。

今後は、極異方性ボンド磁石を用いた磁気ギアを試作し、実機試験を行うことで、本磁気ギアの有用性を実証する予定である。なお、本研究の一部は、科学研究費補助金若手研究 A (22686028) の交付を得て行った。

References

- 1) D. E. Hesmondhalgh and D. Tipping: "A multielement magnetic gear", *IEE Proc. Elect. Power Appl.*, **127**, 129 (1980).
- 2) K. Tsurumoto and S. Kikuchi: "A new magnetic gear using permanent magnet", *IEEE Trans. Magn.*, **23**, 3622 (1987).
- 3) K. Ikuta, S. Makita, and S. Arimoto: "Non-contact magnetic gear for micro transmission mechanism", *Proc. IEEE Conf. on Micro electromechanical systems (MEMS '91)*, p.125 (1991).
- 4) T. B. Martin, Jr.: "Magnetic transmission," U.S. Patent 3,378,710, Apr. 16 (1968).
- 5) K. Atallah and D. Howe: "A Novel High-Performance Magnetic Gear", *IEEE Trans. Magn.*, **37**, 2844 (2001).
- 6) K. Atallah, S. D. Calverley, and D. Howe: "Design, analysis and realization of a high-performance magnetic gear", *IEE Proc. Elect. Power Appl.*, **151**, 135 (2004).
- 7) Tetsuya Ikeda, Kenji Nakamura, Osamu Ichinokura: "Consideration of Rotor Structure in Permanent-Magnet Magnetic Gears", *J. Magn. Soc. Jpn.*, **33**, 130 (2009).

2011年10月21日受理, 2011年12月13日採録

Fig. 12 FEM model around gap considering skin effect.