

## 磁束変調型磁気ギヤの空隙磁束密度波形の実測と分析

# Measurement and Analysis of Air Gap Flux Density Waveforms of Flux-Modulated-type Magnetic Gears

岡崎晃洋<sup>a)</sup>・角貴則<sup>a)</sup>・中村健二<sup>a)†</sup>・進士智一<sup>b)</sup>・武田啓司<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> TDK(株), 東京都中央区日本橋 2-5-1 (〒103-6128)

A. Okazaki<sup>a)</sup>, T. Sumi<sup>a)</sup>, K. Nakamura<sup>a)†</sup>, T. Shinji<sup>b)</sup>, and K. Takeda<sup>b)</sup>

<sup>a)</sup> Tohoku University, Graduate School of Engineering, 6-6-11 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan

<sup>b)</sup> TDK Corporation, 2-5-1 Nihonbashi, Chuo-ku, Tokyo, 103-6128, Japan

Magnetic gears, which can transmit power without any mechanical contact, offer lower vibration and acoustic noise compared with conventional mechanical gears. They also have an advantage in terms of maintenance. Among the various types of magnetic gears, the flux-modulated-type magnetic gear has recently garnered attention because of its higher torque density and efficiency. This gear consists of concentric inner and outer rotors and pole pieces placed between two rotors and works as a gear based on flux modulation theory. Therefore, measurement and analysis of the modulated fluxes in the air gaps are essential since these fluxes directly contribute to torque and efficiency. This paper presents a system for measuring flux density waveforms in the air gap of the flux-modulated-type magnetic gear. The measured waveforms are compared with those calculated using a finite element method (FEM).

**Key words:** flux-modulated-type magnetic gear, air gap flux density

### 1. はじめに

歯車同士の接触によって動力を伝達する機械式ギヤは、回転速度の増減速、正転・逆転や回転軸の向きの変更など様々な動作が可能であり、あらゆる産業で用いられる重要な機械要素の一つである。しかしながら、機械的な接触を伴うため、本質的に振動や騒音が発生し、歯車の摩耗や発熱が避けられない。特に、大容量機では摩耗と発熱の低減のため、潤滑油系統が必須であり、定期的なメンテナンスが不可欠となる。

上述の問題を抱える機械式ギヤに対して、磁力によって非接触で増減速可能な磁気ギヤは振動や騒音が小さく、摩耗や発塵がない。したがって、潤滑油系統が不要となるため、保守性に優れる。

磁気ギヤには様々な種類があるが<sup>1) - 3)</sup>、その中でも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 2 つの永久磁石回転子とその間に配置されたポールピースと呼ばれる磁極片から構成され、すべての磁石が常にトルク伝達に寄与することからトルク密度と効率がよく、実用化が最も期待されている<sup>4) - 7)</sup>。

磁束変調型磁気ギヤは、一方の磁石回転子の磁束がポールピースで変調され、他方の磁石回転子と同期して動作する。このとき、内外 2 つの空隙には変調された磁束の成分に加えて、磁石回転子の極対数に由来する次数成分、さらに磁石の着磁やポールピース形状などに起因する次数成分も存在するため、空隙磁束密度波形は多くの高調波成分を含んだ歪み波となる。ここで磁気ギヤの脱調トルクやトルク脈動、並びに鉄損や磁石渦電流損は、内外 2 つの空隙に生じる磁束に大きく依存することから、空隙磁束密度波形とその周波数成分を正確に把握することは極めて重要である。しかしながら、同心円状にある 2 つの空隙磁束密度波形を実測することは必ずしも容易ではない。

そこで本論文では、内外回転子とポールピースが着脱可能な磁気ギヤを試作するとともに、内外 2 つの空隙磁束密度波形を同時

に観測可能な測定系を構築した。また、測定された内外磁石の磁束密度波形やポールピースで変調された磁束密度波形を、有限要素法 (FEM) の算定結果と比較して妥当性を検証した。さらに、空隙磁束密度波形を周波数分析し、脱調トルクとの関係についても検討したので報告する。

### 2. 試作磁気ギヤと空隙磁束密度波形の測定系

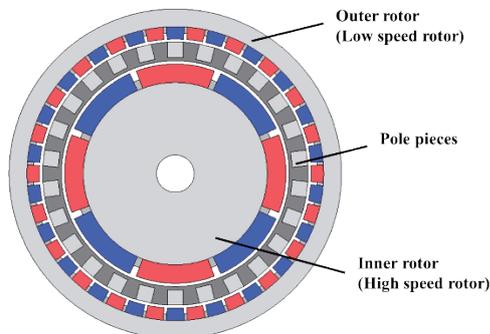
Fig. 1 に、考察対象とした磁束変調型磁気ギヤの諸元を示す。高速側回転子の極対数が 4、低速側回転子の極対数が 22 であることから、ギヤ比は 5.5 である。本磁気ギヤの直径は 106 mm、軸長は 15 mm であり、外側回転子とポールピースの間のギャップ長が 1 mm、ポールピースと内側回転子の間のギャップ長が 2 mm である。各回転子のバックヨークとポールピースには無方向性ケイ素鋼板 (35A250) を使用しており、磁石材料は Nd-Fe-B 焼結磁石である。なお、回転子磁石はパラレル着磁されている。

Fig. 2 に、試作機の外観を示す。本試作機は、様々な条件での空隙磁束密度波形の測定を行うため、内外回転子とポールピースが着脱可能な構成を有している。

Fig. 3 および Fig. 4 に、磁気ギヤの空隙磁束密度波形の測定系の外観と構成図を示す。Fig. 3 に示すように、本試作機は片持ち構造であり、Fig. 2 に示したアクリルカバーを外すことで、内外 2 つの空隙にホールセンサを挿入して空隙磁束密度を測ることができる。ホールセンサは基板に取り付けられており、基板は固定台を介して円盤に取り付けられている。したがって、円盤ごととホールセンサを回転させることで、内外 2 つの空隙の任意の角度の磁束密度を測定することができる。また、円盤の回転角度はロータリエンコーダによって測定されていることから、ホールセンサで測定した空隙磁束密度と回転角度を同時にロガーに取り込むことで、回転角度に対する空隙磁束密度、すなわち空隙磁束密度波形を測定することができる。本測定系において、ホールセンサは楕

Corresponding author: K. Nakamura (e-mail: kenji.nakamura@tohoku.ac.jp).

旭化成エレクトロニクスの HG-0C14 を用いた。また、ロータリエンコーダは(株)マイクロテック・ラボラトリーのMES-30-360PC, ロガーは(株)グラフテックのGL220 を用いた。なお、端効果を抑えるため、ホールセンサは Fig. 4 に示すように軸方向の中央に配置した。



Gear ratio	5.5
Outer diameter	106 mm
Axial length	15 mm
Air gaps	2 mm (Inner side) 1 mm (Outer side)
Inner rotor pole-pairs	4
Outer rotor pole-pairs	22
Number of pole pieces	26
Rotor core material	35A250
Pole-piece material	
Magnet material	Sintered Nd-Fe-B

Fig. 1 Specifications of flux-modulated-type magnetic gear.

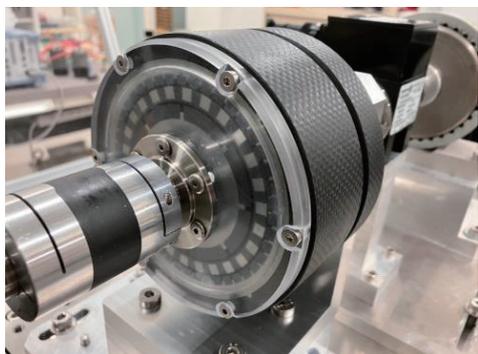


Fig. 2 Prototype magnetic gear.

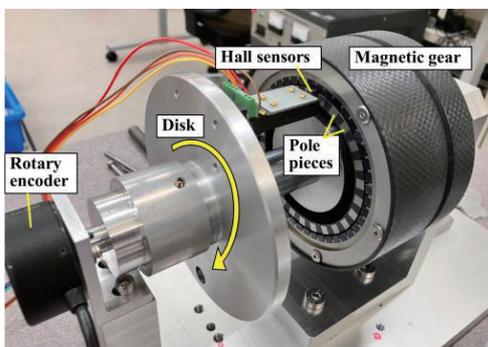


Fig. 3 Appearance of system for measuring air gap flux density waveforms.

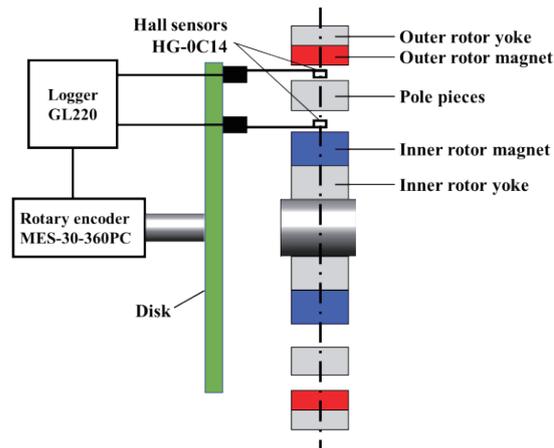


Fig. 4 Configuration of system for measuring system for air gap flux density waveforms.

### 3. 空隙磁束密度波形と脱調トルクの測定結果

#### 3.1 空隙磁束密度波形の測定条件

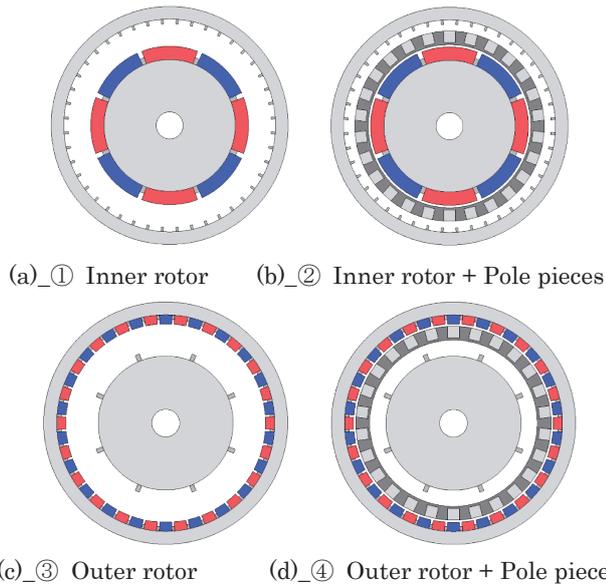
前章で述べたとおり、本試作ギヤは内外回転子とポールピースを自由に着脱できる構造を有することから、ギヤの構成を種々変えることで、各回転子磁石の磁束密度波形やポールピースで変調された磁束密度波形を個別に測定することができる。そこで本章では、様々な条件で測定した空隙磁束密度波形を、2次元および3次元の有限要素法の結果と比較する。なお、FEMには(株)JSOLの電磁界解析ソフトJMAG-Designer ver. 21.2を用いた。

Table 1に、各磁気ギヤの構成と、そのときに測定される空隙磁束密度波形の種類を示す。Fig. 5は、Table 1の測定条件①～④に対応する磁気ギヤの構成である。条件①では、内側回転子のみが存在する状態であることから、内側回転子磁石のみによって生じる磁束密度波形を測定することができる。条件②では、条件①にポールピースを追加した構成であることから、内側回転子磁石の磁束がポールピースで変調された後の磁束密度波形を測定することができる。

また同様に、条件③では、外側回転子のみが存在する状態であることから、外側回転子磁石のみによって生じる磁束密度波形を測定することができる。そして条件④では、条件③にポールピースを追加した構成であることから、外側回転子磁石の磁束がポールピースで変調された後の磁束密度波形を測定することができる。

Table 1 Measurement conditions for air gap flux density waveform.

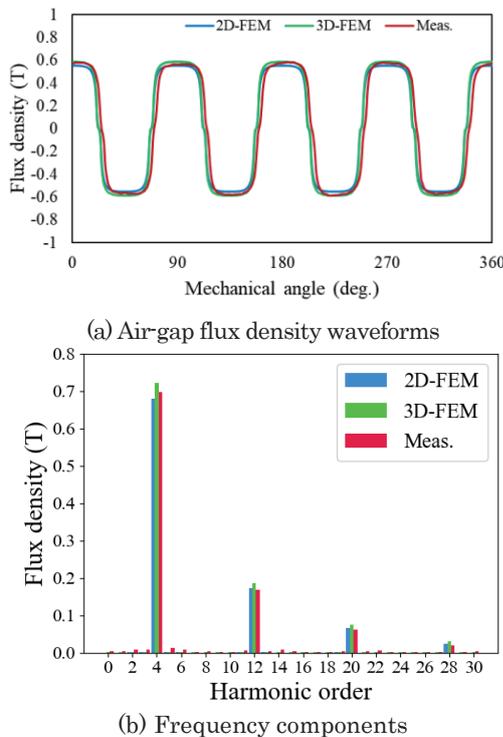
	Inner rotor	Pole pieces	Outer rotor	Measurement items
①	○	—	—	Flux density of the inner rotor magnets
②	○	○	—	Modulated flux density of the inner rotor magnets
③	—	—	○	Flux density of the outer rotor magnets
④	—	○	○	Modulated flux density of the outer rotor magnets



**Fig. 5** Configurations of magnetic gear according to measurement conditions.

### 3.2 内側回転子の磁石磁束と変調磁束の測定結果

Fig. 6(a) に、Table 1 の条件①の空隙磁束密度波形の測定結果を示す。併せて、同条件の 2D-FEM および 3D-FEM の算定結果を示す。この図を見ると、1 回転で 4 周期分の波形が得られており、内側回転子の極対数 4 と一致していることがわかる。また、3 者の波形はよく一致している。同図(b)は、各々の波形を高速フーリエ変換 (FFT) した結果である。基本波である 4 次成分のみでなく、高調波成分についてもよく一致していることがわかる。Table 2 は、



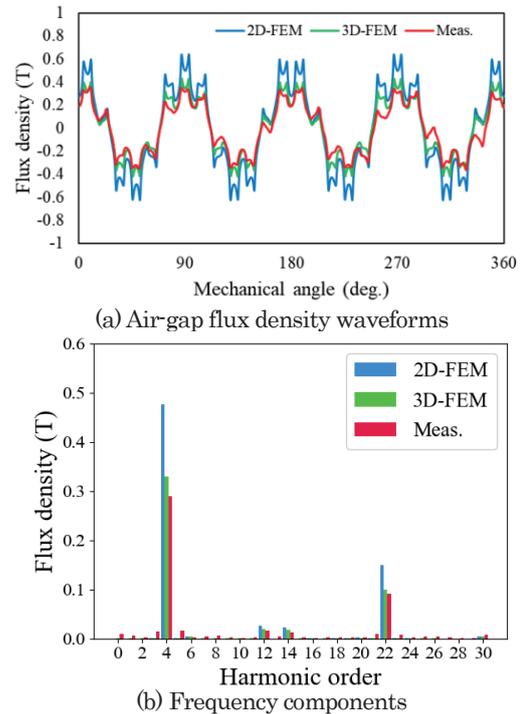
**Fig. 6** Air-gap flux density waveforms and their frequency components for condition 1.

**Table 2** Comparison of 4<sup>th</sup> harmonic components of air-gap flux density waveforms (condition 1).

	2D-FEM	3D-FEM	Meas.
4th harmonic component (p.u.)	0.97	1.03	1.00

3 者の 4 次成分について実測値で規格化したものである。この図を見ると、FEM の誤差は $\pm 3\%$ であり、精度よく算定できていることが了解される。

次いで、Fig. 7(a)には Table 1 の条件②の空隙磁束密度波形の測定結果を示す。すなわち、内側回転子磁石の磁束がポールピースによって変調された後の磁束密度波形である。この図を見ると、内側回転子の極対数に由来する 4 次成分をベースにして、そこに高調波成分が重畳していることがわかる。また、3 者の傾向はよく一致しているが、2D-FEM の波形は実測波形および 3D-FEM の波形よりも振幅が大きく、誤差が大きい。この原因は、2D-FEM では軸方向の漏れ磁束が無視されるためである。Table 1 に示した条件①においては、Fig. 5(a)の回転子磁石表面の磁束を測定したのに対して、条件②では Fig. 5(b)のポールピースの外周側の磁束を測定したため、条件②の方が軸方向の漏れ磁束の影響を受けやすい。特に、本試作機は軸長が 15 mm しかなく、偏平構造であることから、軸方向の漏れ磁束の影響がより大きく、そのため、2D-FEM の誤差が大きくなったと考えられる。



**Fig. 7** Air-gap flux density waveforms and their frequency components for condition 2.

**Table 3** Comparison of 22nd harmonic components of air-gap flux density waveforms (condition 2).

	2D-FEM	3D-FEM	Meas.
22nd harmonic component (p.u.)	1.63	1.08	1.00

Fig. 7(b)には、3者の波形をFFTした結果を示す。この図を見ると、4次成分の次に大きいのが22次成分であることがわかるが、これは内側回転子磁石の磁束がポールピースによって変調されたことで現れた成分である。また、これが外側回転子の極対数22に等しいことから、トルクの伝達に寄与する重要な成分である。この結果についても、2D-FEMの誤差は大きいですが、3D-FEMと実測値はよく一致している。Table 3の規格化した22次成分を見ると、その誤差は8%であることがわかる。

### 3.3 内側回転子の磁石磁束と変調磁束の測定結果

Fig. 8(a)に、Table 1の条件③の空隙磁束密度波形を示す。この図を見ると、1回転で22周期分の波形が得られており、外側回転子の極対数22と一致していることがわかる。3者の波形を比較しやすくするため、同図(b)に3周期分の拡大図を示す。この図より、3者の波形はよく一致していることがわかる。同図(c)のFFTの結果を見ても、3者はよく一致している。Table 4の規格化した22次成分を見ると、3D-FEMと実測値は完全に一致しており、2D-FEMについても誤差は4%であることがわかる

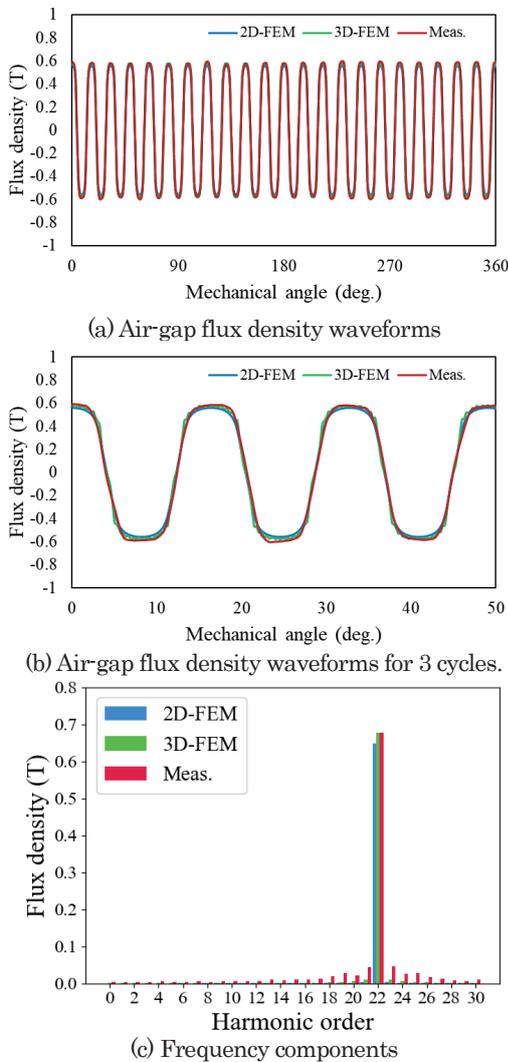


Fig. 8 Air-gap flux density waveforms and their frequency components for condition 3.

Table 4 Comparison of 22nd harmonic components of air-gap flux density waveforms (condition 3).

	2D-FEM	3D-FEM	Meas.
22nd harmonic component (p.u.)	0.96	1.00	1.00

次いで、Fig. 9(a)にはTable 1の条件④の空隙磁束密度波形の測定結果を示す。すなわち、外側回転子磁石の磁束がポールピースによって変調された後の磁束密度波形である。この図を見ると、Fig. 8(a)の波形には存在しなかった4次成分が変調後の波形には確認できる。また、2D-FEMの誤差が大きいですが、この原因は先述の条件②と同様に、2D-FEMでは軸方向の漏れ磁束が無視されるためである。Table 1に示した条件③においては、Fig. 5(c)の回転子磁石表面の磁束を測定したのに対して、条件④ではFig. 5(d)のポールピースの内周側の磁束を測定したため、条件④の方が軸方向の漏れ磁束の影響を受けやすく、2D-FEMの誤差が大きくなったと考えられる。

Fig. 9(b)には、3者の波形をFFTした結果を示す。この図を見ると、Fig. 8(c)には存在しなかった4次成分が、変調後には現れていることがわかる。この4次成分が内側回転子の極対数4と等しいことから、トルクの伝達に寄与する。Table 5の規格化した4次成分を見ると、2D-FEMの誤差は大きいですが、3D-FEMの誤差は10%であり、精度は十分に高いと言える。

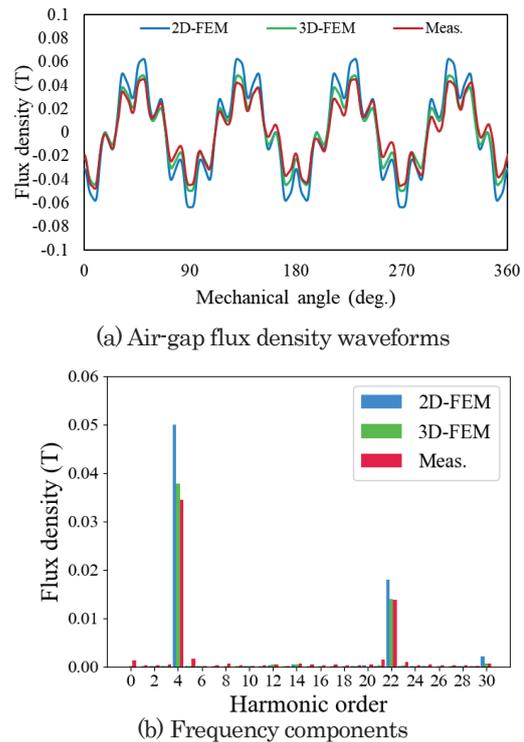


Fig. 9 Air-gap flux density waveforms and their frequency components for condition 4.

Table 5 Comparison of 4th harmonic components of air-gap flux density waveforms (condition 4).

	2D-FEM	3D-FEM	Meas.
4th harmonic component (p.u.)	1.45	1.10	1.00

### 3.4 脱調トルクの比較

本節では、2D-FEM および 3D-FEM で求めた磁気ギヤの脱調トルクと、実測した脱調トルクの比較を行う。

Fig. 10 に、試作ギヤの実験システムを示す。サーボモータによって磁気ギヤの外側（低速側）回転子を任意の速度で駆動し、内側（高速側）回転子に接続したヒステリシスブレーキによって任意の負荷を印加する。磁気ギヤのトルクと回転数は、内外双方の回転子の軸に接続された 2 台のトルクメータを用いて測定する。

Fig. 11 に、脱調トルクの測定結果を示す。このときの外側回転子の回転数は 15 rpm の極低速とした。ヒステリシスブレーキを用いて、負荷をステップ状に徐々に増やしていき、脱調した瞬間のトルクを読み取る。同図より、外側回転子の脱調トルクの実測値は  $7.65 \text{ N}\cdot\text{m}$  であった。

Fig. 12 に、外側回転子の脱調トルクの算定結果を示す。FEM においては、一方の回転子を静止させた状態のまま、他方を回転させることで、負荷角に対するトルクの変化を算定することができる。この図を見ると、一般的な同期機と同じように負荷角 90 度でトルクは最大となり、その時の値は 2D-FEM が  $13.1 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、3D-FEM が  $9.03 \text{ N}\cdot\text{m}$  であった。

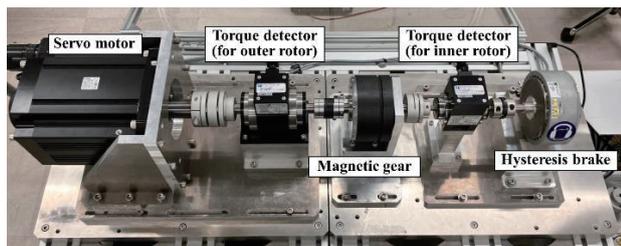


Fig. 10 Experimental system with magnetic gear.

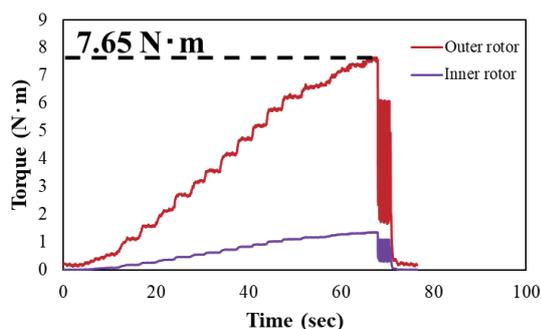


Fig. 11 Measured stall torque of the inner and outer rotors.

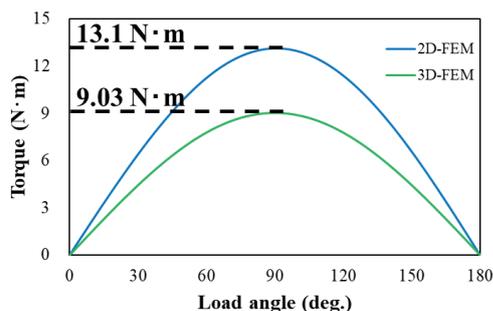


Fig. 12 Calculated static torque of the outer rotor.

Table 6 Comparison of stall torque of the outer rotor.

	2D-FEM	3D-FEM	Meas.
Stall torque of the outer rotor (p.u.)	1.71	1.18	1.00

Table 6 に、実測値で規格化した外側回転子の脱調トルクを示す。実測値と 3D-FEM の誤差は 18% であった。これに対して、Table 3 と Table 5 に示したトルクに寄与する変調磁束の誤差はそれぞれ 8% と 10% であり、その積は 19% であったことから、磁束密度の誤差とトルクの誤差はほぼ一致することが明らかとなった。すなわち、磁束変調型磁気ギヤにおいて、空隙磁束密度の変調成分を正確に把握することは重要である。

### 4. まとめ

以上本論文では、磁束変調型磁気ギヤの内外 2 つの空隙磁束密度を様々な条件で測定することを目的として、内外回転子とポールピースが自由に着脱可能な磁気ギヤを試作するとともに、内外 2 つの空隙磁束密度波形を同時に観測可能な測定系を構築した。また、測定された内外回転子磁石の磁束密度波形やポールピースで変調された磁束密度波形を、FEM の算定結果と比較して妥当性を検証した。

その結果、様々な条件で測定した空隙磁束密度波形は 3D-FEM の計算結果と誤差 10% 以内で一致することが明らかとなった。一方、2D-FEM は誤差が大きいが、これは軸方向の漏れ磁束が原因である。特に、今回試作した磁気ギヤの軸長は短く、偏平構造であったことから、軸方向の漏れ磁束の影響をより大きく受けたと考えられる。

また脱調トルクについても 3 者で比較を行った結果、脱調トルクの誤差率は、内外空隙磁束密度波形の周波数成分のうちトルクに寄与する成分の誤差率の積とおおよそ一致することが明らかとなった。したがって、磁束変調型磁気ギヤにおいて、空隙磁束密度波形を正確に把握することは重要であることが実証された。

今後は、空隙磁束密度波形とトルクリプルの関係、並びに鉄損の関係などを明らかにし、磁束変調型磁気ギヤの性能向上に活かす予定である。

**謝辞** 本研究で用いた磁気ギヤおよび空隙磁束密度の測定系の製作、並びに実験に際しては、株式会社プロスパイン様に多大なご協力を頂きました。ここに謝意を表します。

### References

- 1) Y. D. Yao, D. R. Huang, C. C. Hsieh, D. Y. Chiang, S. J. Wang, and T. F. Ying: *IEEE Trans. Magn.*, **32**, 5061 (1996).
- 2) S. Kikuchi and K. Tsurumoto: *IEEE Trans. Magn.*, **29**, 2923 (1993).
- 3) C.C. Huang, M.C. Tsai, D.G. Dorrell, and B.J. Lin: *IEEE Trans. Magn.*, **44**, 403 (2008).
- 4) K. Atallah and D. Howe: *IEEE Trans. Magn.*, **37**, 2844 (2001).
- 5) K. Nakamura, M. Fukuoka, and O. Ichinokura: *J. Appl. Phys.*, **115**, 17A314 (2014).
- 6) Y. Mizuana, K. Nakamura, Y. Suzuki, Y. Oishi, Y. Tachiya, and K. Kuritani: *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, **64**, 771 (2020).
- 7) Y. Mizuana, K. Nakamura, Y. Suzuki, Y. Oishi, Y. Tachiya, and K. Kuritani: *J. Mag. Soc. Jpn.*, **45**, 50 (2021).

2023年10月10日受理, 2023年11月30日採録