

移動支援機器用インホイール磁気ギヤードモータの高効率化

Efficiency Improvement of In-Wheel Magnetic-Geared Motor for Walking Support Machines

伊藤 亘輝[†]・門松 孝尚・中村 健二

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)

K. Ito[†], T. Kadomatsu, and K. Nakamura

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

A magnetic-geared motor that an electric motor and a magnetic gear are magnetically combined has come to attract attention recently. In previous papers, several magnetic-geared motors were presented, and the feasibility and usefulness were demonstrated. However, the efficiencies of those prototype motors are not enough high. In this paper, efficiency improvement of a magnetic-geared motor is investigated from the view point of increasing torque and reducing losses. A prototype motor is designed by using three-dimensional finite element method (3D-FEM). The test results indicate that the efficiency is improved and that the prototype motor can be applied to walking support machines.

Key words: magnetic-geared motor, walking support machines, efficiency improvement

1. はじめに

一般にモータは、所望のトルクと回転数を得るために機械式ギヤと組み合わせて用いられる。しかし、機械式ギヤは歯車同士を接触させて動力を伝達するため、本質的に振動や騒音、摩擦や発塵などの問題がある。また、大容量機になると冷却のために潤滑油系統が必須になり、システムが複雑化し、定期的な保守点検も不可欠になる。

このような問題に対し、近年、磁気ギヤが注目されている¹⁾。磁気ギヤは非接触で増減速ができるため、振動や騒音が小さく、摩擦や発塵がない。また、潤滑油系統も不要であるため、保守性の向上が期待される。しかしながら、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、互いに対向した一部の永久磁石のみが動力伝達に寄与するため、トルク密度が低く、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、他の種類に比べてトルク密度が高く³⁾、効率も高い⁴⁾という特長を有する。さらに、磁石同士の吸引反発力によってトルクを伝達するため、同じトルク発生原理を有する永久磁石同期モータと磁氣的に融合一体化させることができる。したがって、磁気ギヤードモータとして小型化や部品点数の削減が可能になることから、特にモータの搭載スペースに制約がある、移動支援機器や小型車両への適用が期待される。

これまで筆者らは、永久磁石モータと磁束変調型磁気ギヤを磁氣的に一体化した磁気ギヤードモータを複数試作し、実証実験によって、その有用性を示した⁵⁾⁶⁾。また、その一方で、効率についてはさらなる改善の余地があることを明らかにした。

そこで本稿では、3次元有限要素法 (3D-FEM) を用いて、トルク向上と損失低減の両面から磁気ギヤードモータの高効率化について検討を行う。次いで、これらの検討に基づき試作した改良機の実験結果について述べる。最後に、本磁気ギヤードモータの移動支援機器への適用可能性についても評価を行ったので報告する。

2. 磁気ギヤードモータの高効率化に関する検討

2.1 磁気ギヤードモータの構成と原理

Fig. 1 に磁束変調型磁気ギヤの基本構成を示す。本磁気ギヤは、同心円状に配置された内外2つの極数の異なる永久磁石回転子と、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、ポールピースによって磁石磁束を変調することで、ギヤとして動作する。

Fig. 2 に、先に試作した磁気ギヤードモータの構成を示す⁶⁾。本磁気ギヤードモータは、Fig. 1 に示した磁束変調型磁気ギヤの内側回転子の内部に回転磁界を発生させるための電機子を収めた構造を有する。これにより、磁束変調型磁気ギヤの内側回転子が、永久磁石モータの回転子も兼ねることになる。

モータ部は3相9スロット集中巻の固定子 (Stator) と4極対の内側回転子 (Inner rotor) で構成される。磁気ギヤ部は上述の内側回転子と、27極のポールピース (Pole pieces), そして23極対の外側回転子 (Outer rotor) で構成される。なお、固定子鉄心の材質は無方向性ケイ素鋼板、ポールピースの材質は珪粉磁心、磁石材料はNd-Fe-B焼結磁石である。

上述の構成において、モータ部の固定子巻線に3相交流電流を流すと、回転磁界に同期して内側回転子が回転し、ギヤ比5.75 (= 23/4) で減速された出力を外側回転子から取り出すことができる。このとき、出力トルクは5.75倍に増幅される。

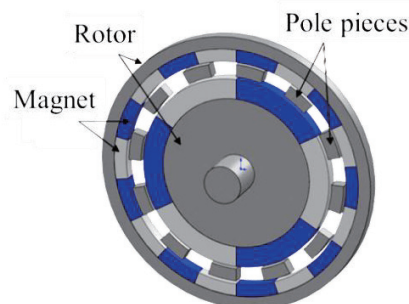


Fig. 1 Basic configuration of a flux-modulated-type magnetic gear.

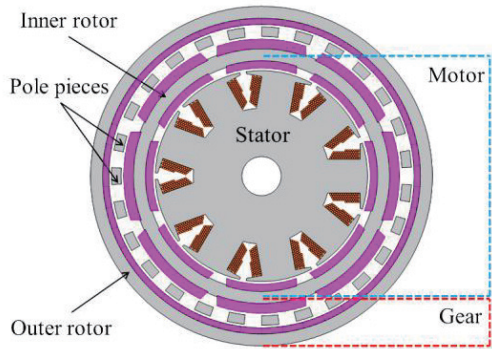


Fig. 2 Basic configuration of a magnetic-g geared motor.

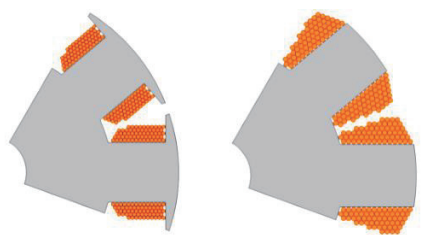
一般に、モータの効率 η は、トルクを T 、損失を W_{loss} とすると、次式で与えられる。

$$\eta = \frac{\omega T}{\omega T + W_{loss}} \quad (1)$$

ここで、 ω は角速度である。上式より、回転数一定の場合、モータの効率を改善するためには、トルクの増大か損失の低減が必要であることがわかる。次節以降では、この考えに基づき、高トルク化と低損失化の両面から効率改善の検討を行う。

2.2 高トルク化に関する検討

本節では、磁気ギヤードモータの高トルク化のため、巻線占積率の向上について検討する。Fig. 3に、従来の半閉スロット構造と、本稿で提案するオープンスロット構造の固定子を示す。従来型では、同図(a)に示す半閉スロット構造の固定子を採用しており、鏝がある分だけ空間利用率が悪くなっていた。そこで改良型では、同図(b)のオープンスロット構造を採用し、巻線占積率を向上することにより高トルク化を図った。Fig. 4に、FEMで計算した電流密度対トルク特性の比較を示す。この図を見ると、電流密度 10 A/mm²時において、オープンスロット構造は半閉スロット構造に対して、トルクが約 1.4 倍に向上したことがわかる。また、Fig. 5に構造変更前後のコギングトルク波形を示す。同図より、構造変



(a) Semi-closed-slot (b) Open-slot
Fig. 3 Winding arrangement in each slot shape.

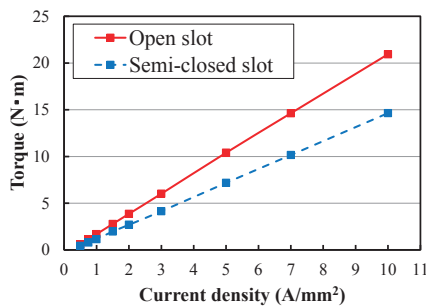


Fig. 4 Torque characteristics in each slot type.

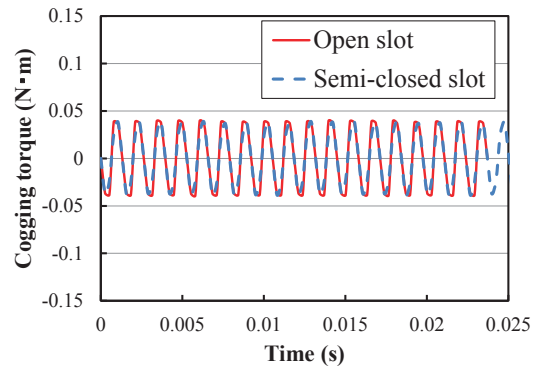


Fig. 5 Cogging torque behavior in each slot type.

更前後ではほぼ同一の波形となり、コギングトルクの変化が非常に小さいことがわかる。

2.3 低損失化に関する検討

本節では、はじめに鉄損の低減方法について述べる。従来機では、固定子および回転子の鉄心は一般的な無方向性ケイ素鋼板を用いた。本稿では、鉄心材料を低鉄損材である 6.5%Si-Fe に変更した場合の鉄損特性を算定する。6.5%Si-Fe は従来のケイ素鋼板よりも Si の含有率が高く、比抵抗が高いため、渦電流の発生を抑制することができる。一方で、飽和磁束密度はやや低いため、トルクの低下が懸念される。Fig. 6に、モータ各部の鉄損の比較を示す。この図から、鉄心材料に 6.5%Si-Fe を採用することで、鉄損が約半減できることがわかる。また、Fig. 7に材料ごとの電流密度対トルク特性の比較を示す。同図より、材料変更によるトルクの低下は僅かであることがわかる。

次に、内側回転子磁石に生じる渦電流損失の低減方法について述べる。Fig. 8に、検討対象とした内側回転子構造を示す。従来機では、同図(a)に示す表面磁石型 (SPM) を採用した。しかし、この構造では、磁石部がギャップ磁束の高調波成分の影響を直接受け、渦電流損失が大きくなってしまふ。そこで、改良機では同図(b)に示すように、磁石を回転子鉄心内部に埋め込んだ埋込磁石型 (IPM) を採用する。Fig. 9に、入力電流 5 A/mm²における渦電流損失の比較結果を示す。この図を見ると、SPMに対して IPM の損失が約 1/4 に低減したことがわかる。これは、磁石を埋め込むことで、高調波磁束が回転子鉄心をバイパスし、磁石内部へ侵入しなくなったためである。

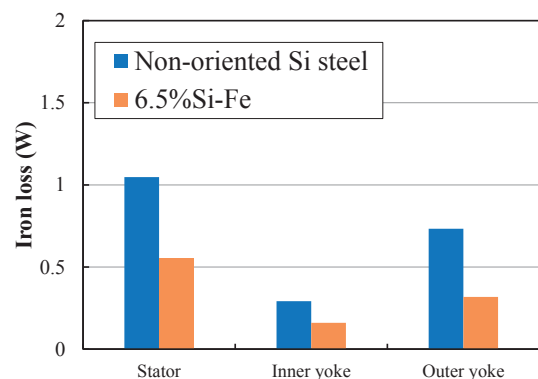


Fig. 6 Comparison of iron losses in each core material.

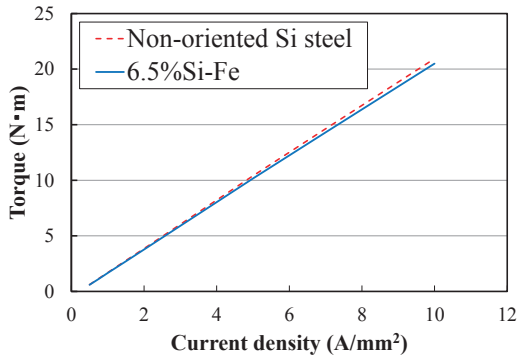


Fig. 7 Comparison of torque characteristics in each core material.

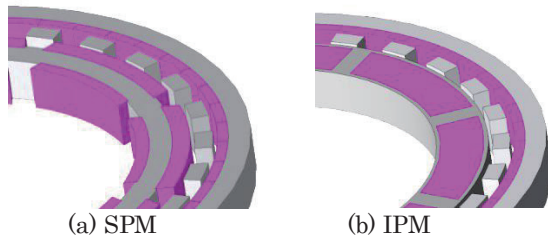


Fig. 8 Inner rotor structure of magnetic-geared motors.

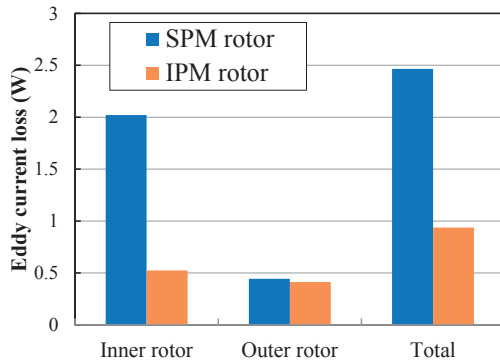


Fig. 9 Eddy current losses in each rotor structure.

2.4 改良型磁気ギヤードモータの設計・解析

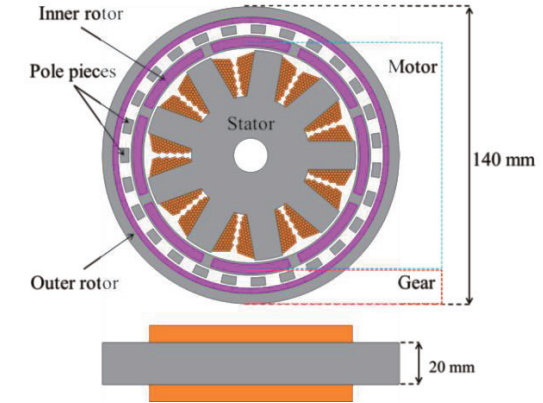
Fig. 10に、前節までの検討に基づき設計した、改良型磁気ギヤードモータの諸元を示す。同図に示すように、本磁気ギヤードモータは高効率化のため、固定子はオープンスロット構造を採用した。その結果、巻線占積率は従来機よりも約9%向上し、約46%となった。また、固定子および回転子の鉄心材料は、低鉄損材である6.5%Si-Feを用いた。そして、磁石渦電流損を低減するため、内側回転子の構造は埋込磁石型とした。なお、ポールピースの材質は圧粉磁心、磁石材料はNd-Fe-B焼結磁石である。

Fig. 11に、従来機と改良機の電流密度対トルク特性の計算結果の比較を示す。この図より、改良機はオープンスロット構造を採用し、巻線占積率が向上した結果、トルク特性が大幅に改善されたことがわかる。なお、電流密度6 A/mm²において、改良機は従来機に対し、トルクが約1.7倍に向上している。

Fig. 12に、従来機と改良機の損失特性の計算結果を示す。ここで、 W_c は銅損、 W_i は固定子、回転子、ポールピースの鉄損、 W_e は永久磁石の渦電流損失である。この図を見ると、前節の検討の結果、改良機は従来機に対してすべての損失が低減していることが

わかる。各損失の低減割合は、負荷トルク15 N·mにおいて、 W_c が約35%、 W_i が約66%、 W_e が約55%であった。

Fig. 13に、従来機および改良機の効率特性の計算結果を示す。トルク特性の向上と損失低減の結果、全領域において効率が改善されたことがわかる。また、計算上の最大効率は、従来機の89.5%に対して改良機は94.4%を達成した。



Inner rotor speed	3162.5 rpm
Outer rotor speed	550 rpm
Number of turns/pole	59 turns
Winding space factor	46.1%
Gap length	1.0 mm × 3
Core material	6.5%Si-Fe
Magnet material	Sintered Nd-Fe-B

Fig. 10 Specifications of the improved magnetic-geared motor.

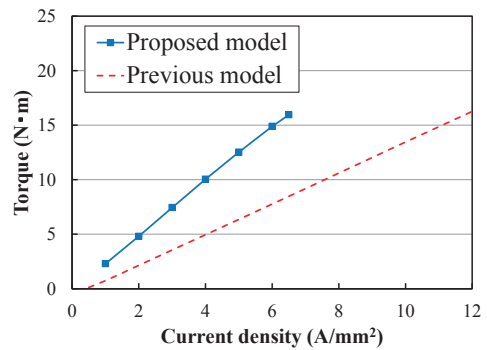


Fig. 11 Comparison of calculated torque characteristics of the previous and proposed magnetic-geared motors.

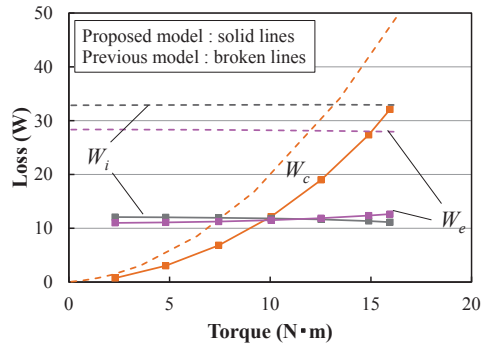


Fig. 12 Comparison of calculated loss characteristics of the previous and proposed magnetic-geared motors.

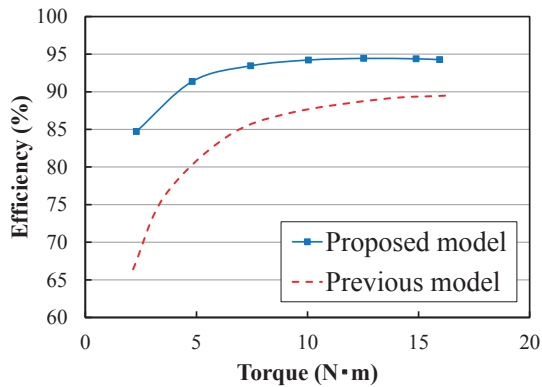


Fig. 13 Comparison of calculated efficiency characteristics of the previous and proposed magnetic-geared motors.

3. 実証実験および移動支援機器への適応可能性評価

3.1 試作機の実証実験の結果

本節では、前章の検討に基づいて試作した、改良型磁気ギヤードモーターの実証実験の結果について述べる。

Fig. 14 に、実験システムの外観を示す。本システムは、磁気ギヤードモーターの試作機、トルクメータ、ヒステリシスブレーキ、スコープコーダ、直流電源、3 相インバータ駆動回路とその補助電源で構成される。

磁気ギヤードモーターは、磁束変調型磁気ギヤと永久磁石同期モーターが一体化した構造を有するため、駆動方法は一般的な永久磁石同期モーターと同様である。したがって、試作機の内側回転子の磁極位置の検出にはホールセンサを使用し、電流ベクトル制御にて駆動した。実験は、磁気ギヤードモーターを一定の回転速度（外側回転子速度 174 rpm）で制御した状態で、ヒステリシスブレーキにて任意の負荷を加え、その時の負荷トルク、回転数、電圧および電流を計測し、各種特性を求めた。

Fig. 15 に、電流密度対トルク特性の実測値を示す。同図中の計算値と比較すると、両者の傾きはほぼ一致しており、設計どおりの性能が得られていることがわかる。誤差については、3D-FEM では考慮できない機械損が主要因であると考えられる。

続いて、Fig. 16 にトルク対効率特性の実測値を示す。この図より、最大効率は、負荷トルク 11 N·m 時の 84.7% であり、先行研究⁹⁾に対して、約 15% の向上を達成した。したがって、本稿で提案した高効率化は有用であることが実証された。

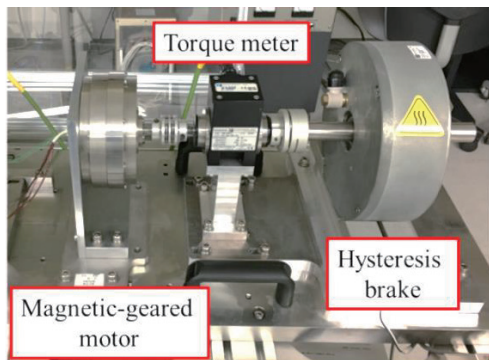


Fig. 14 General view of the experimental setup.

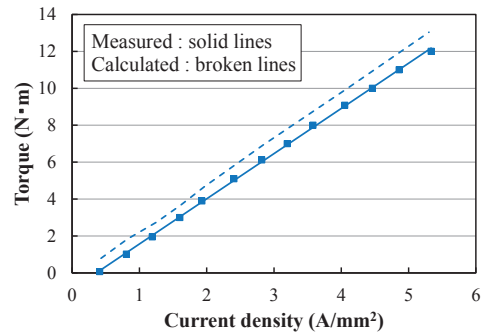


Fig. 15 Torque characteristics of the trial magnetic-geared motor.

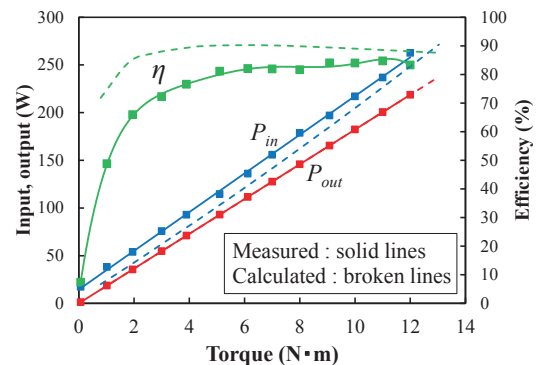


Fig. 16 Efficiency characteristics of the trial magnetic-geared motor.

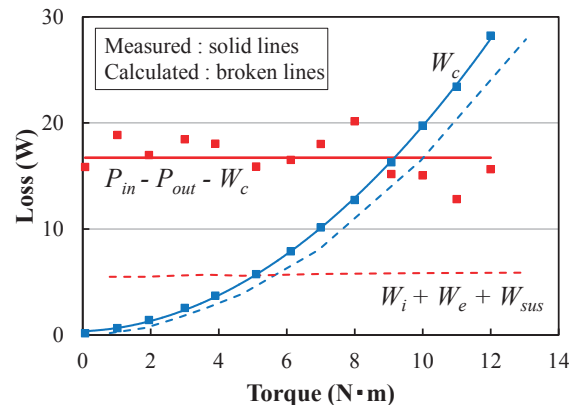


Fig. 17 Loss characteristics of the trial magnetic-geared motor.

Fig. 17 にトルク対損失特性を示す。図中の W_c は銅損、 W_i は固定子および回転子鉄心とポールピースの鉄損の合計値、 W_e が磁石の渦電流損、 W_{sus} が支持部の渦電流損である。結果より、銅損については実測値と計算値が概ね一致していることがわかる。一方、銅損以外の損失に関しては、実測値と計算値で大きな誤差が生じている。これは、上述のとおり、3D-FEM では考慮できない機械損が起因していると考えられる。したがって、今後さらなる高効率化を達成するには、機械損の低減が必要であることがわかる。

3.2 移動支援機器への適用可能性評価

前節において改良機の最大効率を約 85% を達成し、効率の改善が実証された。そこで本節では、試作した磁気ギヤードモーターの移動支援機器への適用可能性評価として、まずは最低限の走行性

能があるかについて検討を行った。

一般的に、移動体の走行抵抗は車がり抵抗、空気抵抗、加速抵抗、勾配抵抗の総和となり、次式で表現される。

$$F_{\text{load}} = \mu_r Mg \cos \theta + Msin \theta + 0.5C_d \rho A v^2 + \frac{(M+M_r)a}{g} \quad (2)$$

Table 1に上式の各パラメータを示す。ここで μ_r は路面状況により定まるタイヤの車がり摩擦抵抗係数、 M は車両総重量、 g は重力加速度、 θ は路面の勾配、 C_d は空気抵抗係数、 ρ は空気密度、 A は全面投影面積、 v は車両速度、 M_r は慣性質量、 a は車両加速度である。また、移動体のタイヤ半径を r とすると、車軸にかかる負荷トルク T_{load} は次式で求まる。

$$T_{\text{load}} = r \times F_{\text{load}} \quad (3)$$

本稿では、(2)式および(3)式を用いて、勾配の異なる良好な路面において、移動支援機器を時速0~6 km/hの範囲で使用した際の、車軸にかかる負荷トルクを算出した。そして、試作した磁気ギヤードモータの速度対トルク特性と、上述の計算結果を比較することで、移動支援機器への適応可能性を評価した。なお、試作機は、移動支援機器の2つのタイヤホイール内に搭載することを想定した。

Fig. 18に、移動支援機器への適用可能性について評価した結果を示す。同図の破線部分は磁気ギヤードモータ2台分の速度対トルク特性を表している。すなわち、この破線で囲まれた範囲の内側が、移動支援機器の動作可能範囲であることを意味する。各勾配の車軸にかかる負荷トルクは、車両速度が低速であるため、ほぼ一定値となっている。また、車軸にかかる負荷トルクは、破線で囲まれた範囲内に収まっている。したがって、路面状況が良好な場合、最大勾配5度において、最高時速6 km/hで、磁気ギヤードモータを搭載した移動支援機器が動作可能であることがわかる。

4. まとめ

以上本稿では、3次元有限要素法を用い、トルク向上と損失低減の両面から磁気ギヤードモータの高効率化について検討を行うとともに、試作した改良機の特長について述べた。また、改良機の移動支援機器への適用可能性についても評価を行った。

高効率化の検討においては、オープンスロット構造、低鉄損材、並びに埋込磁石型回転子を採用することで、トルクの向上と損失の低減を実現し、計算上の最大効率は94.4%を達成した。次いで、改良機の試作試験では、ほぼ設計通りのトルク性能を得るとともに、最大効率では84.7%を達成した。これは従来機に対して、約15%の改善である。なお、計算値よりも効率が低下した要因は、FEMでは考慮できない機械損の影響が主であると考えられる。

さらに、移動支援機器への適応可能性を評価したところ、試作した磁気ギヤードモータ2台を、タイヤホイール内に搭載した移動支援機器は、アスファルト等の良好な路面状況において、十分に適応可能であることが明らかとなった。

今後は、試作機をもう一台製作するとともに、これらを搭載した移動支援機器を製作し、実証実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。

Table 1 Running resistance parameter

Rolling resistance coefficient	μ_r	0.011	
Total weight	M	108	kg
Gravity acceleration	g	9.8	m/s ²
Angle of slope	θ	0,2.5,5	deg
Air resistance coefficient	C_d	1	
Air density	ρ	1.204	kg/m ³
Front projection	A	0.4	m ²
Vehicle speed	v	0~6	km/h
Inertia weight	M_r	8.64	kg
Vehicle acceleration	a	0.1	m/s ²
Wheel radius	r	0.165	m

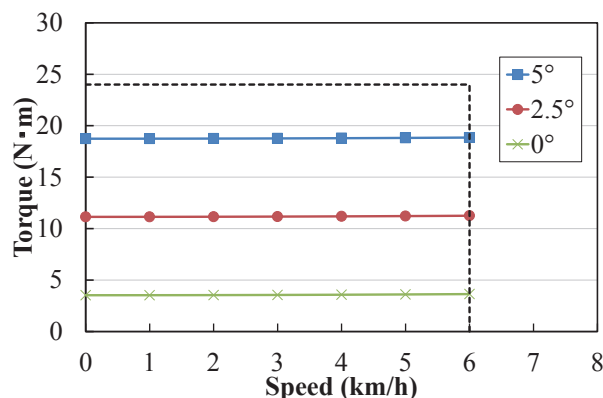


Fig. 18 Evaluation results of applicability for the walking support machines.

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) K. Nakamura, M. Fukuoka, and O. Ichinokura, *J. Appl. Phys.*, **115**, 17A314 (2014).
- 5) K. Nakamura, K. Akimoto, T. Takemae, and O. Ichinokura, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **39**, 29 (2015) (in Japanese).
- 6) K. Nakamura, K. Akimoto, and O. Ichinokura, *The papers of Technical Meeting on "Magnetics"*, *IEEEJ*, MAG-16-37 (2016) (in Japanese).
- 7) Society of Automotive Engineers of Japan: "Jidosha Gijutsu Handbook 10 Sekkei (EV, Hybrid) (2011) (in Japanese).

2018年10月10日受理, 2019年01月06日採録