

令和元年5月30日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04310

研究課題名(和文) 移動支援機器用インホイール型磁気ギアードモータの開発

研究課題名(英文) Development of in-wheel magnetic-gear motor for walking support machines

研究代表者

中村 健二 (NAKAMURA, Kenji)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：70323061

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、移動支援機器用のインホイール磁気ギアードモータの開発を目的として、モータの高効率化と適用可能性評価を行った。その結果、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た。この成果に基づき、磁気ギアードモータの実証機の試作・試験を行ったところ、ほぼ設計通りのトルク性能を得るとともに、最大効率は84.7%を達成した。さらに、移動支援機器への適応可能性を評価したところ、試作した磁気ギアードモータを搭載した移動支援機器は、十分な走行性能を有することが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在市販のギアードモータは、ほぼすべてが機械式ギアを採用しているが、本研究によって極めて効率の高い磁気ギアードモータの実用可能性が示されたことから、これに関連する企業の研究開発に良い影響を与えることができる。また、学術的な視点から見ても、2種類以上の回転機を融合一体化する研究、並びにそのような回転機を制御する研究など、本研究の成果によって、新しい展開を回転機の分野に与えることができる。さらに将来、本研究の成果をきっかけとして、高性能な移動支援機器の普及が進むことは、超高齢化社会を迎える我が国にとって極めて重要である。

研究成果の概要(英文)：This study discussed efficiency improvement and feasibility study of in-wheel magnetic-gear motor for walking support machines. As a result, both torque increasing and loss decreasing were achieved by employing open-slot structure, low-loss core material, and interior permanent magnet rotor. Based on the results, the magnetic-gear motor was prototyped and tested. The test results demonstrated that desired torque can be obtained, and the maximum efficiency reached to 84.7%. Furthermore, it was proved that the prototype motor can be applied to walking support machines.

研究分野：電気機器工学

キーワード：磁気ギアードモータ 移動支援機器 インホイールモータ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

日本の少子高齢化は、他の先進国と比べて急速に進んでいる。国立社会保障・人口問題研究所の「日本の将来推定人口(平成24年1月推計)」によると、今後、我が国の総人口は減少する見通しであり、2010年の1億2,806万人から約40年後には1億人を下回ると見込まれている。一方、これに対して、65歳以上の高齢人口は増加し、その構成比で見ると、2010年の23%から約40年後には35%を上回ることが予想されている。これは近い将来、3人に1人以上が高齢者となることを意味している。このように、今後、総人口に対する高齢者の割合が増加して行く我が国にとって、高齢者の日常生活における様々な負担を軽減し、自立した生活を支援することは極めて重要である。

日常生活における支援には、家事支援や外出支援などがあるが、この中でも外出支援は高齢者と地域社会をつなぐ重要な役割を担っている。したがって、高齢者が自らの意思で外出、移動するためのツールとして、『移動支援機器』の普及が望まれている。特に、モータ等の動力を持つ物は登坂能力や運搬能力に優れるため、高齢者の負担軽減に加えて行動範囲をさらに広げる効果も期待される。しかしながら、モータによる重量増大や荷台スペース減少の問題があるため、小型軽量のモータの開発と配置の工夫が必要不可欠である。

このような課題に対し、配置を工夫して荷台スペースを最大限確保することを考えると、移動支援機器のタイヤホイール内にモータを搭載する、いわゆるインホイールモータ方式が最良であると言える。しかしながら一方で、モータは極めて狭小かつ偏平なホイール内に収めなければならないことから、厳しい性能が要求される。特に、移動支援機器の場合は、モータの最高回転数が約100 r/min(人の歩く速度1 m/sに相当)と低速でありながら、歩道の凹凸や段差を乗り越えるために、時として平地走行時の5倍以上のトルクを発生させなければならない。ここで、このような低速かつ大トルクが要求される用途の場合には、モータと機械式ギアを組み合わせて、所望の回転数とトルクを得る方法が考えられるが、移動支援機器のタイヤは一般に小さく、ホイール内のスペースは極めて偏平であるため、機械式ギアを収める空間的余裕はほとんど無い。一方、モータを多極化して、ギアレスでタイヤを駆動する方法も考えられるが、この場合、モータ自体が大型化するため、ホイール内のスペースに収めることはやはり困難である。

2. 研究の目的

そこで本研究では、磁束変調型磁気ギアに着目した。磁束変調型磁気ギアは内外2つの磁石回転子と、その間に挟まれたポールピースと呼ばれる固定子鉄片で構成され、ポールピースによって磁石磁束を変調することで、ギアとして動作する。この磁気ギアは、機械式ギアとは異なり、トルク発生原理が永久磁石モータと同じであることから、モータと磁気ギアを融合一体化させた磁気ギアードモータが実現できる。

以上より、本研究では永久磁石モータと磁束変調型磁気ギアを融合一体化させた、低速大トルクで効率の高いインホイール型磁気ギアードモータの開発と、これを用いた移動支援機器の試作・試験を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

平成28年度においては、まず想定する移動支援機器の要求仕様を満足する磁気ギアードモータの解析・設計を行った。設計に際しては、モータ部とギア部を切り離して行うことで設計の効率化を図った。次いで、設計した磁気ギアードモータの試作・試験を行った。

平成29年度においては、前年度の磁気ギアードモータの実証試験の結果に基づき、改良機の設計・試作を行った。設計に際しては、特に効率の向上に主眼を置き、最高効率90%以上を目指した。

平成30年度においては、まず改良機のトルク特性と試作する移動支援機器の形状・寸法等から求まる走行抵抗を用いて、移動支援機器として十分な走行性能を有するか適用可能性評価を行った。次いで、改良機をもう一台試作し、計2台を実装した移動支援機器の製作を行った。

4. 研究成果

(1) 磁気ギアードモータの高効率化の方針

図1に磁束変調型磁気ギアの基本構成を示す。本磁気ギアは、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、ギアとして動作する。図2に、先に試作した磁気ギアードモータの構成を示す。本磁気ギアードモータは、図1に示した磁束変調型磁気ギア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、磁束変調型磁気ギアの内側回転子が、永久磁石モータの回転子も兼ねることになる。

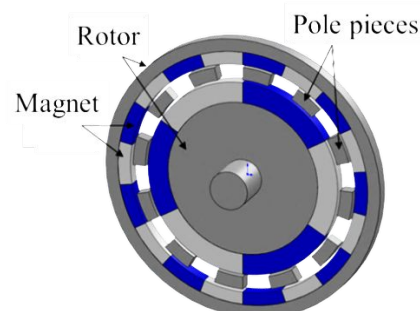


図1 磁束変調型磁気ギアの基本構成

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。磁気ギア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圧粉磁心, 磁石材料は Nd-Fe-B 焼結磁石である。このような構成において, 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。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。

$$\eta = \frac{\omega T}{\omega T + W_{loss}}$$

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, トルクの増大と損失の低減が必要であることがわかる。これ以降では, 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) 高トルク化に関する検討

ここでは, 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。図 3 に, 従来の半閉スロット構造と, 本研究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, 罫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。図 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。

(3) 低損失化に関する検討

ここでは, 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。図 5 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。

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。図 6 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受け, 渦電流損失が大きくなってしまった。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。図 7 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。

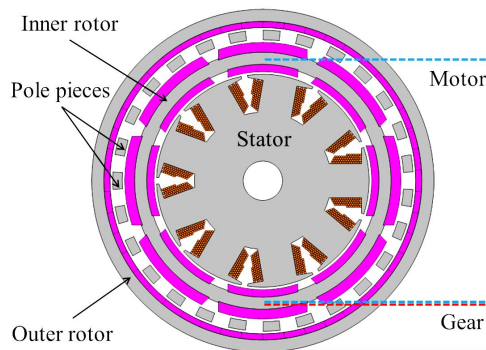
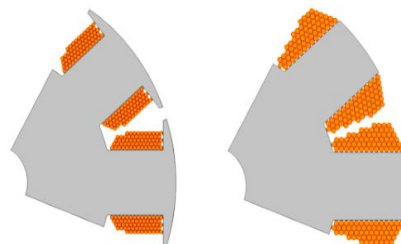


図 2 先に試作した磁気ギヤードモータ



(a) 半閉スロット (b) オープンスロット

図 3 固定子スロット構造の比較

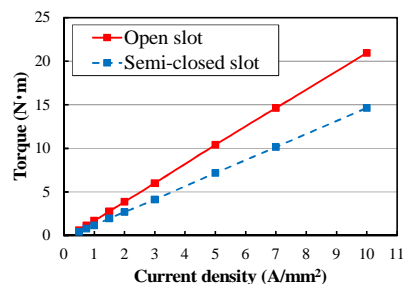


図 4 電流密度対トルク特性の計算値

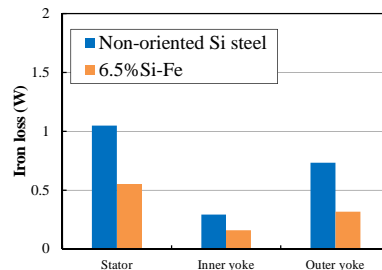
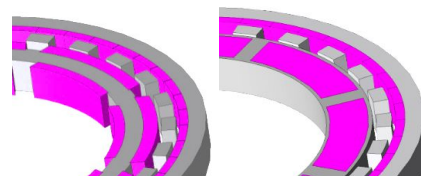


図 5 モータ各部の損失の計算値



(a) SPM (b) IPM

図 6 モータ各部の損失の計算値

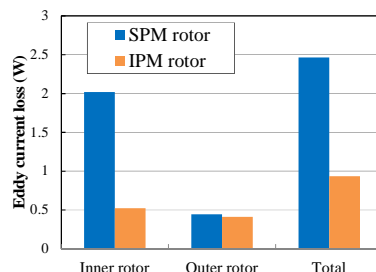
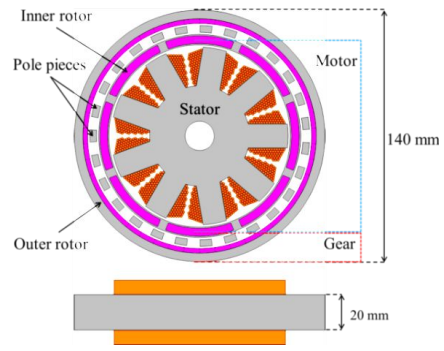


図 7 渦電流損失の比較

(4)改良機の解析・設計

図 8 に、前節までの検討に基づき設計した、改良型磁気ギアードモータの諸元を示す。同図に示すように、本磁気ギア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。



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

図 8 改良機の諸元

図 9 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。

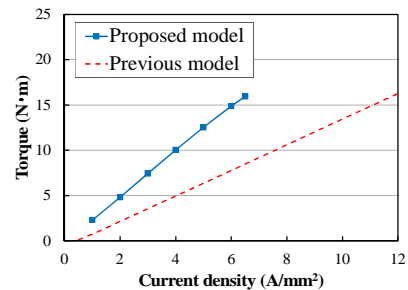


図 9 トルクの計算値の比較

図 10 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。

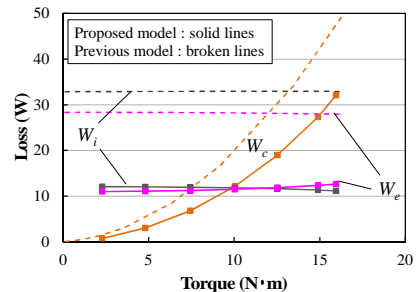


図 10 損失の計算値の比較

図 11 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。

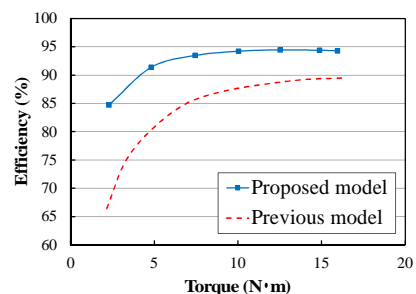


図 11 効率の計算値の比較

(5)試作試験結果

ここでは、これまでの検討に基づいて試作した、改良型磁気ギアードモータの実証実験の結果について述べる。図 12 に、実験システムの外観を示す。本システムは、磁気ギアードモータの試作機、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。磁気ギアードモータは、磁束変調型磁気ギアと永久磁石同期モータ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、磁気ギアードモータを一定の回転速度（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。

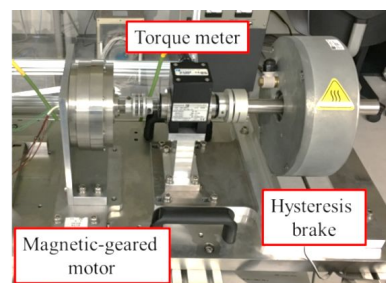


図 12 実験システムの外観

図 13 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、図 14 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、先行研究に対して、約 15% の向上を達成した。したがって、本研究で提案した高効率化は有用であることが実証された。

図 15 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_{stator} 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。

(6) 移動支援機器への適用可能性評価

これまでの検討によって、改良機の最大効率は約85%を達成し、効率の改善が実証された。そこで、試作した磁気ギアードモータ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転がり抵抗、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。

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

表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転がり摩擦抵抗係数、 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。

$$T_{load} = r \times F_{load}$$

本研究では、これらの式を用いて、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、試作した磁気ギア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用可能性を評価した。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。

図16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アードモータ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、磁気ギア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。

(7) まとめ

以上、トルク向上と損失低減の両面から磁気ギアードモータの高効率化について検討を行うとともに、試作した改良機の実績について述べた。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用可能性を評価したところ、試作した磁気ギアードモータ2台を、タイヤホイール内に搭載した移動支援機器は十分な走行性能を有することが明らかとなった。今後は、これらの検討結果に基づき製作した移動支援機器の走行試験を行う予定である。

磁気ギアードモータを移動支援機器用インホイールモータとして応用する試みは、申請者の

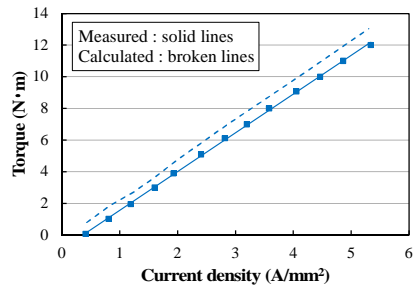


図13 トルク特性の実測値

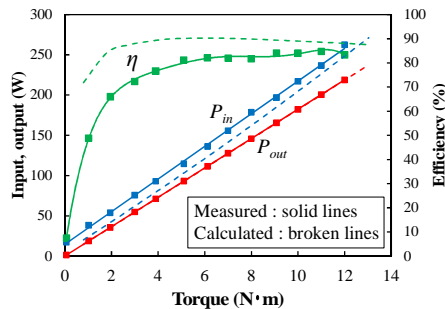


図14 効率特性の実測値

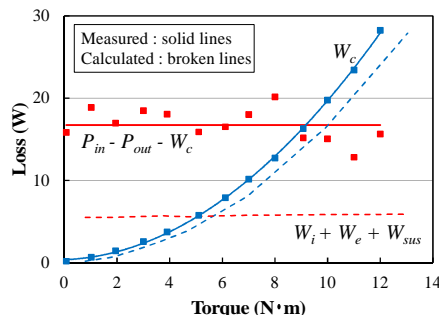


図15 損失特性の実測値

表1 走行抵抗のパラメータ

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

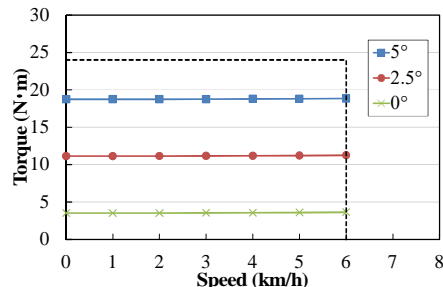


図16 適用可能性評価結果

知る限り国内外を問わず、これに類する研究報告はまだ無い。また、磁気ギヤードモータ単体の性能を見ても、実機効率で 85%を達成した報告例もないことから、本研究成果が当該分野に与えるインパクトは少なからず大きいと思われる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

伊藤巨輝, 門松孝尚, 中村健二, 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, 日本磁気学会論文特集号, 査読有, Vol. 3, 2019, pp. 69-73
DOI:10.20819/msjtsmj.19TR314

〔学会発表〕(計9件)

伊藤巨輝, 移動支援機器用インホイール磁気ギヤードモータの試作・試験, 電気学会回転機研究会, 2018

伊藤巨輝, 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, 日本磁気学会学術講演会, 2018

K. Nakamura, Efficiency Improvement of Magnetic-Geared Motor by Open-Slot and Interior Permanent Magnet Structure, INTERMAG 2018, 2018

門松孝尚, 磁束変調型磁気ギヤードモータの高効率化と実証実験, 電気学会マグネティックス研究会, 2018

門松孝尚, 支持部材を含む磁気ギヤードモータの損失分析, スピニクス特別研究会, 2017

門松孝尚, Housing Loss Analysis of Magnetic-Geared Motor, 電気関係学会東北支部連合大会, 2017

門松孝尚, 磁気ギヤードモータの高性能化に関する検討, スピニクス特別研究会資料, 2016

門松孝尚, 磁束変調型磁気ギヤードモータの高効率化に関する検討, 電気学会マグネティックス研究会資料, 2016

門松孝尚, 埋込磁石型磁気ギヤードモータに関する基礎検討, 電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, 2016

6. 研究組織

(1)研究分担者：なし

(2)研究協力者：なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。