

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：11301
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2021～2023
課題番号：21H01302
研究課題名（和文）磁氣的相互作用を考慮した磁気ギヤードモータのトルク式導出と小型電気自動車への応用

研究課題名（英文）Derivation of torque equation for magnetic-geared motors considering magnetic interaction and application to small-scale electric vehicles

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） 13,100,000円

研究成果の概要（和文）：磁気ギヤと永久磁石モータを融合一体化させた磁気ギヤードモータは小型かつ偏平な構造に適し、低速大トルク化できることから、インホイールドライブ方式の電気自動車への応用が期待される。本研究では、モータ部と磁気ギヤ部の磁氣的相互作用を考慮したトルク式を導出し、トルクや効率を向上可能な駆動方法を明らかにするとともに、小型電気自動車への応用を想定した500N・m級の大型の磁気ギヤードモータの解析設計・試作試験を行い、トルク密度83N・m/Lを達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁氣的相互作用を考慮した磁気ギヤードモータのトルク式導出し、トルクや効率を向上可能な駆動方法を明らかにしたことは、今後の磁気ギヤードモータの分野のさらなる発展につながるため、学術的意義は高いと判断できる。また、小型電気自動車への応用を想定した500N・m級の大型の磁気ギヤードモータの実証実験が成功したことは、今後の産業応用につながる成果であるため、社会的意義も極めて高いと考える。

研究成果の概要（英文）：The magnetic-geared motors, which integrate a permanent magnet (PM) motor with a magnetic gear, are suitable for small and flat structures and can achieve high torque at low speeds. Thus, it is expected to be applied to in-wheel drive electric vehicles. In this study, a torque equation that takes into account the magnetic interaction between the PM motor and the magnetic gear is derived to clarify the drive method that can improve torque and efficiency. Moreover, analytical design and prototype tests of a large-scale 500 N-m class magnetic-geared motor for application to small-scale electric vehicles are conducted. Torque density of 83 N-m/L was achieved by the prototype magnetic-geared motor.

研究分野：電気機器工学

キーワード：磁気ギヤードモータ 磁氣的相互作用 電気自動車 インホイールドライブ方式

1. 研究開始当初の背景

近年、地球環境問題に対する関心の高まりや原油価格の高騰により、環境にやさしく、かつ燃費の良い自動車の需要が全世界で急激に伸びている。このような背景の下、モータのみで走行する、いわゆる純電気自動車の普及への期待は極めて大きい。モータは内燃機関と比較して、停止状態から広い速度範囲にわたって大きなトルクを発生でき、制御応答も一桁以上速いため、このような特長を活かした構造として、モータをホイール内に設置し、クラッチやプロペラシャフトなどの機械式の伝達機構を廃して各車輪を駆動する、インホイールドライブ方式が次世代の電気自動車の駆動方式として注目されている。この方式では、従来の駆動方式と比較して伝達機構が大幅に簡素化されるため、機械損失の低減、静粛性や保守性の向上、各輪独立制御による走行性能の向上が期待される。加えて、モータをホイール内に設置することから車内空間を広くでき、車体設計の自由度も向上するなどのメリットがある。しかしながら一方で、ホイール内の極めて限られたスペースの中で、自動車を駆動し得るだけの大きなトルクを発生できるモータを開発することは容易では無い。そのため、現状では、インホイールモータでも機械式のギヤを併用する方式や、モータの一部だけがホイール内に入った構造などが採用されている。そのため、前述のインホイールドライブ方式のメリットのうち、低機械損失、静粛性、保守性、広い車内空間については、その特長を最大限引き出せていないのが現状である。これに対して、近年、磁気ギヤと永久磁石モータを融合一体化させた磁気ギヤードモータが注目されている。磁気ギヤは、モータの出力を非接触で増減速できるため、機械式ギヤで問題となる摩耗や発塵がなく、振動や騒音を大幅に抑制可能であり、保守性に優れる。また、トルク発生原理が永久磁石モータと同一であるため、磁氣的に融合一体化することが可能であり、磁気ギヤ単体と比較して体格の増加がほとんどない。そのため、機械式のギヤードモータやダイレクトドライブモータよりも、高トルク密度を達成可能であり、100 N·m/L 以上のトルク密度を達成した例もある。このように、磁気ギヤードモータは小型化、低速大トルク化でき、保守性にも優れることから、インホイールドライブ方式の電気自動車への応用が期待される。

これまでの多くの文献では、磁気ギヤードモータの出力トルクは、永久磁石モータの発生トルクに磁気ギヤのギヤ比を乗じたものとされてきた。その一方で、磁気ギヤードモータの諸定数や最大トルクが、磁気ギヤ部とモータ部の磁氣的な相互作用によって変化することを指摘した報告も一部にあり、申請者らが実施した検証実験においても、電流位相角によって、磁気ギヤードモータの最大トルクが $\pm 8\%$ も変化することが明らかになった。したがって、従来のトルク式では磁気ギヤードモータの特性を表現するのは難しいと考えられる。しかしながら、申請者の知る限り、モータ部と磁気ギヤ部の磁氣的相互作用を考慮したトルク式について、詳細な検討がされた事例はほとんどない。仮に、本研究により磁氣的相互作用を考慮したトルク式を導出することができれば、磁気ギヤードモータに適した新しい制御法を確立できると考える。これまで、磁気ギヤードモータは回転子が表面磁石型であったことから、電流位相角を 0 度に制御する、いわゆる「 $i_d = 0$ 制御」が一般的であったが、電流位相角を積極的に制御することで、10% 近くトルクを増減できることは、特に幅広いトルク速度範囲が要求される電気自動車への応用に適していると考えられる。

2. 研究の目的

以上述べたように、磁気ギヤと永久磁石モータを融合一体化させた磁気ギヤードモータは小型かつ偏平な構造に適し、低速大トルク化できることから、インホイールドライブ方式の電気自動車への応用が期待される。しかし、モータ部と磁気ギヤ部の磁氣的相互作用を考慮したトルク式が未だ明らかにされていないことから、最適制御法が不明である。そこで本研究では、磁気ギヤードモータについて、磁氣的相互作用を考慮したトルク式の導出と妥当性の検証を行うとともに、これに基づく新しい制御法を提案することを目的とする。さらに、小型の電気自動車への実装と走行試験を行うことで、磁気ギヤードモータの有用性を明らかにする。

3. 研究の方法

・磁氣的相互作用を考慮した新しいトルク式の導出

先に述べたとおり、これまで磁気ギヤードモータの出力トルクは、永久磁石モータの発生トルクに磁気ギヤのギヤ比を乗じたものとされてきた。これに対して、研究代表者は磁気ギヤ部とモータ部の磁氣的な相互作用によって、最大トルクが変化することを見だし、トルク式を導出した。まずは有限要素法を用いて、導出した式の妥当性を検証する。次いで、現有の磁気ギヤードモータを用いて、実測値と比較検証を行う。

・磁氣的相互作用を考慮した新しい制御法の確立

上述の磁氣的相互作用を考慮したトルク式を導出することができれば、これに基づく新しい磁気ギヤードモータの制御法を確立できると考える。なお、制御法の検討には MATLAB/Simulink

を用いる。

・小型電気自動車への実装と走行試験

10 kW 級の磁気ギヤードモータとその駆動回路を試作し、モータ単体の特性を評価するとともに、電気自動車に実装して走行試験を行う。

4. 研究成果

(1) 磁氣的相互作用を考慮したトルク式の導出および妥当性検証

図1に、検討対象とする埋込磁石型磁気ギヤードモータ (IPMMGM) の諸元を示す。直径が140 mm, コイルエンドを含めた軸長が36 mm であり, モータ部と磁気ギヤ部が1つの高速回転子 (HSR) を共有している。また, 計3つのエアギャップ長はすべて1.0 mm である。モータ部は3相9スロット集中巻の固定子と4極対の高速回転子 (HSR) で構成される。磁気ギヤ部は4極対の高速回転子 (HSR), 27極のポールピース (PP), 23極対の低速回転子 (LSR) で構成され, 磁気ギヤ部は2つの回転子磁石の磁束をPPによって変調することで, ギヤとして動作する。なお, 本稿ではPPを固定して用いるため, ギヤ比はLSRの極対数とHSRの極対数より5.75 (= 23/4) となる。

図2にIPMMGMの模式図を示す。同図において, 破線は変調磁束を表し, 矢印は磁極の向きを表す。図中の ψ_{mh} は, HSRの磁石磁束 ψ_h がPPによって変調された磁束である。また, IPMMGMでは電機子電流 I_a による磁束 ψ_a もPPで変調され, ψ_{ma} が現れる。したがって, LSRに作用するトルクは, LSRの磁石磁束 ψ_l と2つの変調磁束 ψ_{mh} , ψ_{ma} の相互作用で生じると考えられる。以下の考察では, 変調磁束 ψ_{mh} を基準とした d - q 軸を d_{mh} , q_{mh} とし, LSRの磁石磁束 ψ_l を基準とした d - q 軸を d_l , q_l とする。

図3に, 内部相差角 δ , 電流位相角 β で定常回転しているときの d_l - q_l 座標系におけるIPMMGMのベクトル図を示す。内部相差角は δ であるため, 同図のとおり, ψ_l と ψ_{mh} の位相差は δ となる。また, 図中の I_{ma} は図2の変調磁束 ψ_{ma} に相当する電機子電流であり, ベクトル制御されているため, q_{mh} との位相差は β となる。このベクトル図より, IPMMGMのトルク式は以下のように求まる。

$$T = p_l(\psi_l + \psi_{mh}) \times I_{ma} \quad (1)$$

$$= p_l \psi_l I_{ma} \cos(\delta + \beta) + p_l \psi_{mh} I_{ma} \cos \beta$$

ここで, p_l はLSRの極対数である。図3のベクトル図と(1)式からIPMMGMのトルクは, LSRの磁石磁束 ψ_l とHSRの変調磁束 ψ_{mh} の合成磁束に, 変調磁束 ψ_{ma} に相当する電機子電流 I_{ma} が作用することで生じることがわかる。つまり, 磁氣的相互作用の影響で, IPMMGMは電機子電流の振幅や位相により, 出力トルクが変化することを意味している。この考えに基づき, (1)式を見ると, 第1項はLSRの磁石磁束が電流位相角 β により弱めまたは強められることを表現しており, 同様に第2項はHSRの磁石磁束が電流位相角 β により弱めまたは強められることを表現していることが了解される。ただし, (1)式で示したトルク式では, 電機子巻線に鎖交しない ψ_l や, 変調磁束 ψ_{ma} に相当する電機子電流 I_{ma} を直接同定することが難しい。そこで, 次に示すようにトルク式の簡略化を行った。

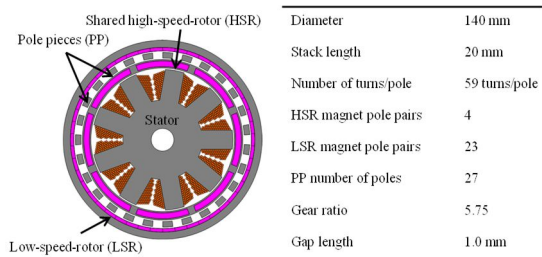


図1 埋込磁石型磁気ギヤードモータの諸元

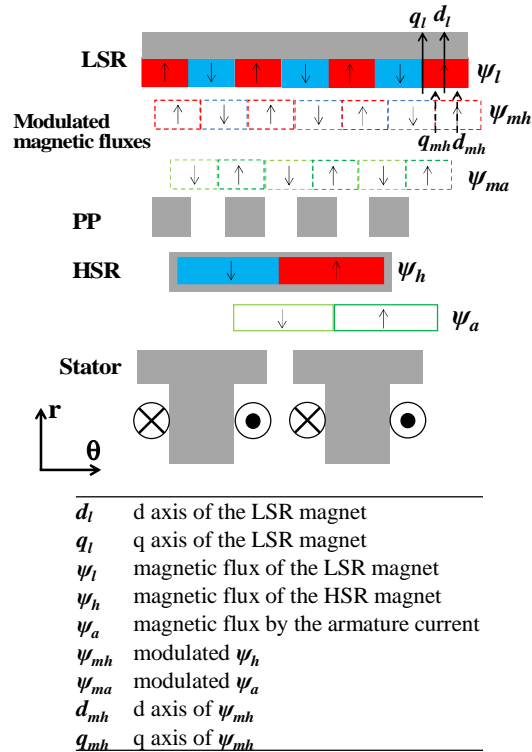


図2 埋込磁石型磁気ギヤードモータの模式図

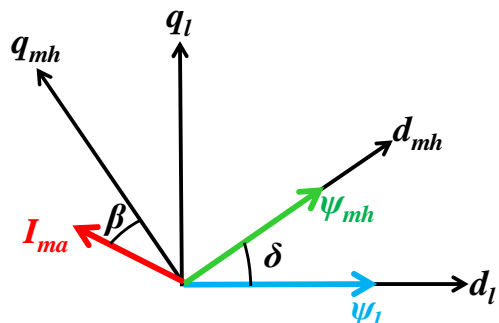


図3 埋込磁石型磁気ギヤードモータのベクトル図

$$T = \frac{3}{\sqrt{2}} (p_l \psi'_{l_{max}} I_{a_{rms}} \cos(\delta + \beta) + p_h \psi_{h_{max}} I_{a_{rms}} \cos \beta) \quad (2)$$

ここで $\psi'_{l_{max}}$ は PP によって変調された LSR の磁石磁束のうち、電機子巻線に鎖交する磁束の最大値であり、 $I_{a_{rms}}$ は電機子電流 I_a の実効値である。また、 $\psi_{h_{max}}$ は HSR の磁石磁束 ψ_h の最大値である。これらのパラメータはすべて有限要素法などを用いて求めることができる。

次いで、(2)式のパラメータを2次元有限要素法を用いて同定した後、図4に示す磁気ギヤードモータの試作機を用いて、トルク式の妥当性を検証した。

図5に、電流位相角対脱調トルク特性の実測値を示す。また比較のため、同図中に(2)式のトルク式による算定値をプロットしている。この図を見ると、実測値とトルク式による算定値は良好に一致しており、提案トルク式の妥当性が実証された。なお、電流位相角の絶対値が大きい領域で誤差が生じるのは、トルク式のパラメータ同定に2次元有限要素法を用いており、軸方向の漏れ磁束が考慮されていないことが一因であると考えられる。

(2) 500 N・m 級磁気ギヤードモータの試作試験

前節において、磁氣的相互作用を考慮したトルク式を導出し、その妥当性を実証することができたことから、電気自動車への適用を想定した500 N・m級の磁気ギヤードモータの試作試験を行った。

表1に、磁気ギヤードモータの設計目標を示す。外径寸法が直径380 mm、軸長が50 mmで目標トルクは500 N・m、電流実効値130 A、電流密度10 A/mm²、線間電圧の最大値が334 Vである。2次元有限要素法を用いて、磁気ギヤードモータのギヤ比、並びに各部寸法の最適化を行った。

図6に、設計した磁気ギヤードモータの諸元を示す。外径寸法は直径380 mm、軸長50 mmである。LSR磁石、PP、HSR磁石の径方向長はそれぞれ、6 mm、11 mm、13 mmである。極対数はLSR磁石が25極対、HSR磁石が3極対、PPの極数が28極である。磁石材料はネオジウム焼結磁石(N40SH)、鉄心材料は厚さ0.35 mmの無方向性ケイ素鋼板(35H300)である。

図7に試作機のLSR、HSR、PP、固定子と実験装置の外観を示す。LSR鉄心は、ケースを取り付けるため、8カ所の突起が設けられている。また、HSR鉄心は、ケースと接続する都合上、磁石に対して4 mm オーバーハングしている。PPの支持にはCFRPを用いており、CFRPホルダの溝にPPを挿入して接着固定している。また、固定子巻線とコアには熱電対を設置した。組み立て後の試作機の総重量は130 kgであり、同図に示すように試作機はカップリングを介して直接パウダ

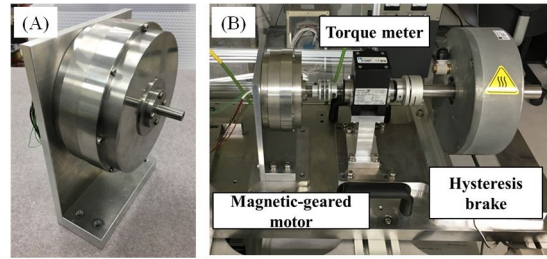


図4 試作機と実験装置の外観

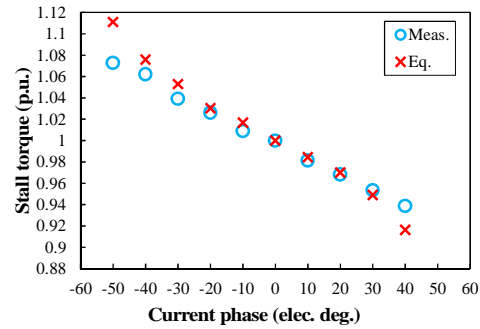
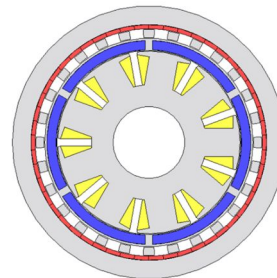


図5 電流位相角対脱調トルク特性の比較

表1 設計目標

Diameter	380 mm
Axial length	50 mm
Output torque	500 N・m
Input current	130 Arms
Current density	10 A/mm ²
Max. line voltage	334 V



Diameter	mm	380
Axial length	mm	50
LSR yoke radial length	mm	26
LSR magnets radial length	mm	6
PP radial length	mm	11
PP ratio		0.44
HSR magnets radial length	mm	13
Embedding depth of HSR magnets (PP side / Stator side)	mm	3.0/1.0
Shaft diameter	mm	100
Each air gap length	mm	1.0
No. of Pole pair of HSR magnets		3
No. of Pole pieces		28
No. of Pole pair of LSR magnets		25
Gear ratio		8.33
No. of slots		9
Winding diameter	mm	1.0
No. of turns per slot (No. of parallel)	turns	9(18)
Winding space factor	%	47.4
Permanent magnet material		N40SH
Iron core material		35H300

図6 設計した磁気ギヤードモータの諸元

ブレーキへ接続している。パウダブレーキは最大トルク 1200 N·m、最高回転数 2000 rpm が測定上限である MAGTROL 社製の 4PB15-DG-6000 を用いた。

図 7 に、脱調トルクの測定結果を示す。図中には比較のため、3次元有限要素法による算定結果も示している。同図より、実測の脱調トルクは 456 N·m、有限要素法の脱調トルクは 509 N·m であることがわかる。実測の脱調トルクが 3D-FEM より 10% 低下した理由は、機械損や鉄損、磁石渦損の影響などが原因として考えられる。

図 8 に、電流密度対トルク特性の比較を示す。3次元有限要素法による算定結果と実測結果の傾きが良好に一致していることがわかる。425 N·m 時の電流密度は 7.0 A/mm²、電流実効値は 99 Arms である。

図 9 に効率の比較結果を示す。ここで実測結果は次式から効率を算定した。

$$\eta = \frac{\omega_o T_o}{P_i} \times 100 (\%) \quad (3)$$

上式の P_i は電気入力、 ω_o と T_o は出力側の回転角速度とトルクである。

一方、有限要素法は次式から効率を算定した。

$$\eta = \frac{\omega_o T_o}{W_c + W_i + W_{em} + \omega_o T_o} \times 100 (\%) \quad (4)$$

上式の W_c 、 W_i 、および W_{em} は、各々銅損、鉄損、磁石の渦電流損である。なお、機械損は無視した。

この図を見ると、効率は 100 ~ 250 N·m の間で最大となり、400 N·m 以上の高負荷側は減少することがわかる。有限要素法の最大効率は 88.5%、実験の最大効率は 250 N·m 時の 78.2% であった。

次いで、図 10 に電流位相角に対するトルク密度を示す。この図を見ると、遅れ電流位相角の場合は脱調トルクが増加し、進み電流位相角の場合は脱調トルクが減少していることがわかる。これは前節で示した図 5 と傾向が一致しており、大型機においても磁気的相互作用を利用することで、最大トルクを増大できることが明らかとなった。なお、試作機のトルク密度は 83 N·m/L を達成した。

以上のことから本研究は所期の目的を達成したと考える。

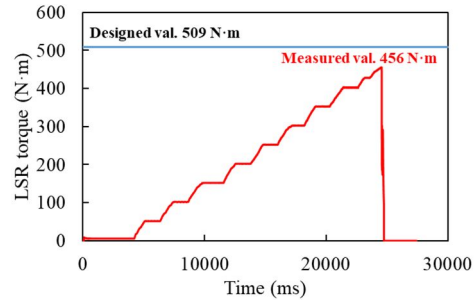


図 7 脱調トルクの測定結果

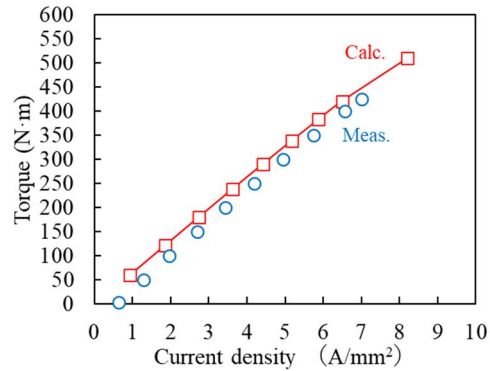


図 8 電流密度対トルク特性

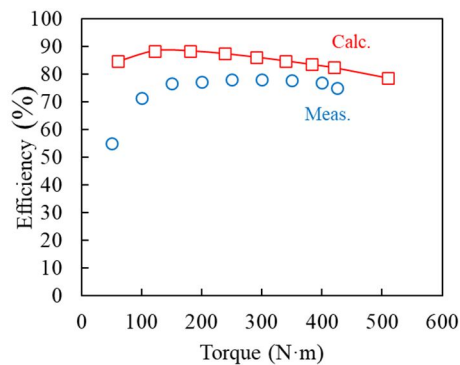


図 9 効率特性

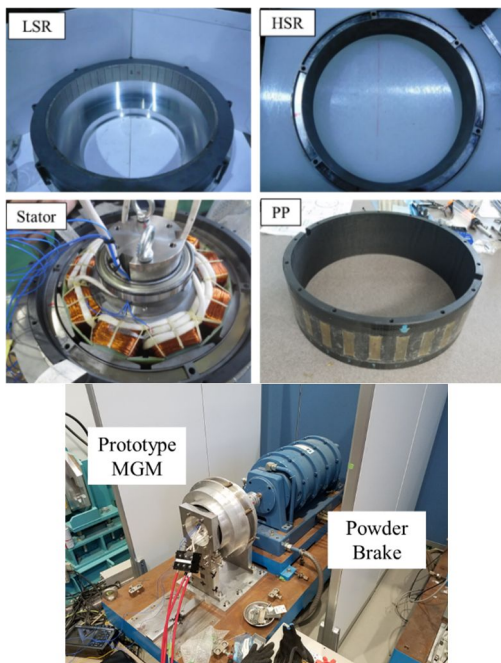


図 6 試作機の各部と実験装置の外観

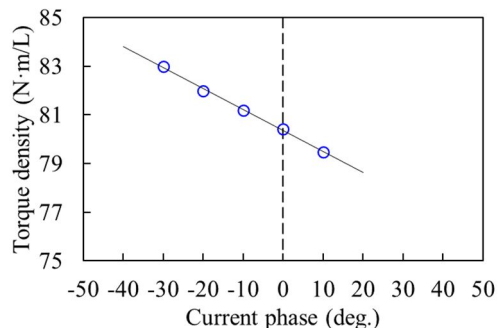


図 10 電流位相角に対するトルク密度

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 伊藤巨輝、中村健二	4. 巻 7
2. 論文標題 小型EV用インホイール磁気ギヤードSRモータの提案	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本磁気学会論文特集号	6. 最初と最後の頁 55-60
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20819/msj.tmsj.23TR506	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Ito Koki, Nakamura Kenji	4. 巻 10
2. 論文標題 Proposal and Verification of Torque Equation of IPM-Type Magnetic-Geared Motor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 612~617
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieej.jia.20012813	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Ito K., Nakamura K.	4. 巻 46
2. 論文標題 A Consideration of Efficiency and Power Factor of IPM-type Magnetic-Geared Motor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the Magnetics Society of Japan	6. 最初と最後の頁 16~21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3379/msjmag.2201R004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Iwaki Keigo, Ito Koki, Nakamura Kenji	4. 巻 59
2. 論文標題 A Novel Magnetic-Geared Motor Combining Magnetic Gear and SR Motor	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMAG.2023.3276873	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Iwaki Keigo, Ito Koki, Nakamura Kenji	4. 巻 59
2. 論文標題 Experimental Verification of Torque Density Improvement by Magnetic Interaction in 500 N・m IPM-Type Magnetic-Geared Motor	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2023.3291372	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 伊藤 巨輝, 中村 健二
2. 発表標題 小型EV用インホイール磁気ギヤードSRモータの提案
3. 学会等名 日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤 巨輝, 中村 健二, 伊藤 誠, 高畑 良一, 高橋 暁史
2. 発表標題 500 N・m級磁気ギヤードモータの試作試験
3. 学会等名 電気学会回転機研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤 巨輝, 中村 健二
2. 発表標題 磁気ギヤとSRモータを融合一体化した磁気ギヤードモータ
3. 学会等名 電気学会MAG/MD/LD合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Ito, K. Nakamura
2. 発表標題 Influence of Magnetic Interaction on Power Factor and Efficiency of IPM-Type Magnetic-Geared Motor
3. 学会等名 INTERMAG 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤亘輝, 中村健二
2. 発表標題 埋込磁石型磁気ギヤードモータの力率・効率に関する一考察
3. 学会等名 日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤亘輝, 中村健二
2. 発表標題 磁氣的相互作用が埋込磁石型磁気ギヤードモータの特性に与える影響
3. 学会等名 電気学会回轉機研究会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------