

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 4月19日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22656064

研究課題名（和文） 車載用デュアルロータ型永久磁石リラクタンسジェネレータの開発

研究課題名（英文） Development of dual-rotor-type permanent magnet reluctance generator adapting for car

研究代表者

中村 健二 (NAKAMURA KENJI)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：70323061

研究成果の概要（和文）：2010年度は、有限要素法（FEM）を用いて、デュアルロータ型永久磁石リラクタンスジェネレータ（PMRG）の解析を行った。その結果、外側と内側のロータを電気角で180度位相をずらした構成にすると、トルクの高調波成分が打ち消しあって、コギングトルクが約1/2になることが明らかになった。ただし出力の向上は認められなかった。そこで2011年度は、PMRGと磁気ギアを組み合わせた小型高出力な発電システムの構築を目指し、高速でも高効率な磁気ギアの解析・設計を行った。その結果、極異方性ボンド磁石を用いた磁気ギアが非常に優れた特性を有することを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In 2010, characteristics of a dual-rotor-type permanent magnet reluctance generator (PMRG) are examined by using finite element method (FEM). As a result, cogging torque is reduced to half since harmonic contents of torque of both rotors are canceled when inside and outside rotors have differential phase angle of 180 electrical degrees each other. However, output power was not improved. In 2011, to establish the compact and high power generation system comprising a combination of the PMRG and a magnetic gear, the high performance magnetic gear is designed. As a results, it was clear that the magnetic gear used a polar-anisotropic bonded magnet has desirable features.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,200,000	0	2,200,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	270,000	3,370,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学，電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：永久磁石リラクタンスジェネレータ，磁気ギア，極異方性磁石，ボンド磁石，ハイブリット自動車，電気自動車

## 1. 研究開始当初の背景

環境問題や省資源に対する関心が、全世界で急速に高まっている。自動車業界においても、日米欧の主要メーカーが相次いで、ハイブリット自動車（HV）を市場に投入しており、

今後この動きはますます加速されることが予想される。一方、自動車は人や物を運ぶ輸送手段であることから、HVであっても従来のガソリン自動車並みのキャビンスペースと価格が求められる。そのため、HVの核と

なるモータやジェネレータでさえも、小型化と低コスト化は避けて通れない。

現在、HV にはエネルギー密度の高い希土類磁石を用いた永久磁石同期機が用いられているが、エンジンの直近に配置する必要があるため、熱に弱い希土類磁石を冷却する装置が必要である。加えて、希土類磁石は導電率が高いため、うず電流によって自ら発熱する問題も指摘される。したがって、今度さらなる小型・高出力密度化を達成するためには、希土類磁石の冷却とうず電流の問題を解決する必要がある。

上記の課題に対して、先に本研究者は、固定子に永久磁石と出力巻線を有する永久磁石リラクタンスジェネレータ (PMRG) を考案した。本発電機は、回転子に永久磁石を有する従来の発電機よりも冷却が容易である。また、回転子は鉄心のみで構成されるため、構造が単純で堅牢であり、製造コストの低減が期待される。加えて、磁石内部の磁束は時間変動しないため、うず電流が発生することも無い。

以上のように、PMRG は車載用の発電機として、望ましい特長を多数有しているが、その一方で突極構造に起因するトルクリプルと、一般的な磁石発電機と比較して出力が小さいといった課題がある。

## 2. 研究の目的

本研究では、上述の2つの課題を一度に解決する手段として、固定子内外に2つの回転子を有する、いわゆるデュアルロータ構造のPMRGを新たに提案し、その有用性を明らかにする。

また、PMRGと磁気ギアを組み合わせた小型高出力な発電システムの構築を目指し、高速でも高効率な磁気ギアの解析・設計を行った。

## 3. 研究の方法

本研究では、主に有限要素法 (FEM) による電磁界解析により、デュアルロータ型PMRGおよび磁気ギアの動作解析を行った。それぞれの方法は以下の通りである。

- (1) デュアルロータ型PMRGの回転子構成に関する検討
- (2) 極異方性ボンド磁石を用いた磁気ギアに関する検討

## 4. 研究成果

(1) デュアルロータ型PMRGの回転子構成に関する検討

図1に、考察に用いたデュアルロータ型PMRGの基本構成を示す。相数は2、固定子極12極、内外の回転子の極数はともに16極である。本デュアルロータ型PMRGは、以下の

特長を有する。

- ① 内外の回転子の空間的位相が電気角で180度異なる (機械角では $3.75^\circ$ )。これにより、突極構造に起因したトルクリプルを打ち消すことができる。
- ② 巻線を極では無くヨークに施す。これにより、図1の発電機の場合、相数が2、コイル数は8となり、元々のシングルロータ構造 (3相、12コイル) よりも、さらに相数とコイル数を削減できる。
- ③ 固定子極・ヨーク形状を工夫することで、トロイダル巻線を施せるようにする。これにより、巻線占積率の向上、すなわち出力密度が向上する。

図1のデュアルロータ構造PMRGについて、有限要素法 (FEM) を用いて、トルク波形の算定を行った。

図2に、算定したトルク波形を示す。同図中には従来のシングルロータ構造のPMRGのトルク波形も併せて示している。この図を見ると、内外の回転子の空間的位相を電気角で180度異なるように配置することで、トルクの高調波成分 (具体的には奇数次成分) が打ち消し合い、脈動が小さくなっていることがわかる。

一方、出力については、従来の3相機から2相機へと変更になったため、ほとんど向上

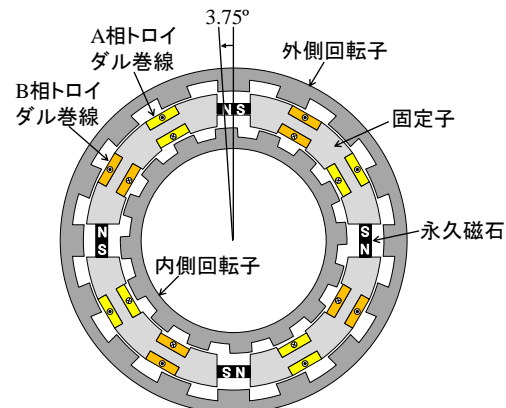


図1 デュアルロータ型PMRGの基本構成

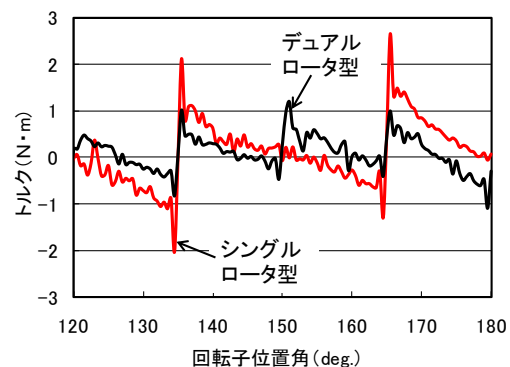


図2 シングルロータ構造とデュアルロータ構造のコギングトルクの比較

しなかった。PMRGの小型高出力化のためには、動作周波数を高める、すなわち回転数を増加させることが有効である。そこで本研究では、PMRGと磁気ギアを組み合わせることで、発電システムの小型・高出力化を目指すべく検討を行った。この際、最も重要になるのが、小型・高効率な磁気ギアの実現である。

## (2) 極異方性ボンド磁石を用いた磁気ギアに関する基礎検討

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、それらの中でも、近年、図3の遊星型磁気ギアが注目されている。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。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。しかしながら一方で、磁石磁束の変調で生じる非同期的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、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。

そこで本研究では、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。

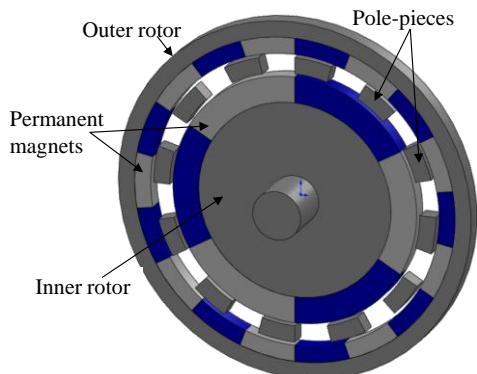


図3 遊星型磁気ギアの基本構成

図4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のが容易に想像される。

そこで本研究では、図5(a)に示す極異方性着磁に着目した。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。

図6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

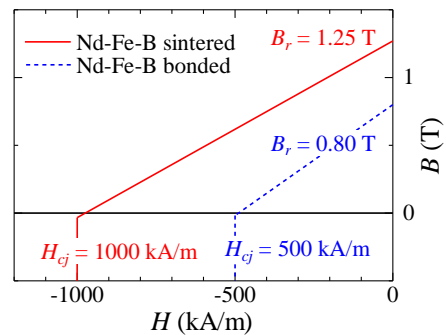
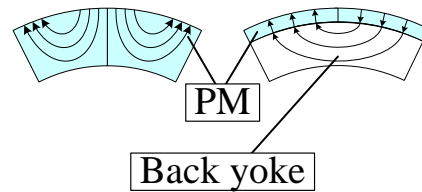
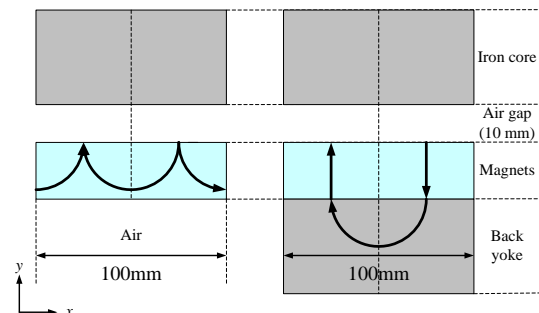


図4 希土類焼結磁石とボンド磁石の減磁曲線の比較



(a)極異方性 (b)ラジアル異方性

図5 磁束線図の比較



(a)極異方性 (b)ラジアル異方性

図6 解析モデル

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, 積み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。

図 7 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,  $\mu_r$  は永久磁石のリコイル比透磁率であり,  $\mu_0$  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。

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, 図 7(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。

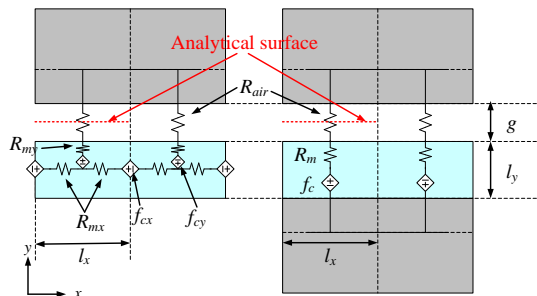
$$R_m = l_y / (\mu_r \mu_0 l_x D) \quad (6)$$

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比較を行った。



(a)極異方性 (b)ラジアル異方性

図 7 磁気回路モデル

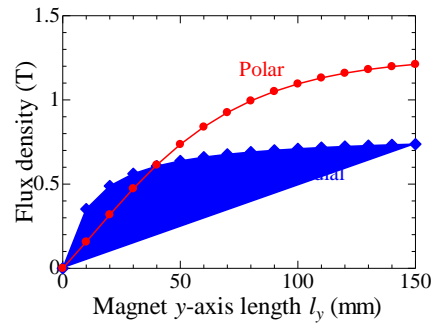


図 8 ギャップ磁束密度の比較

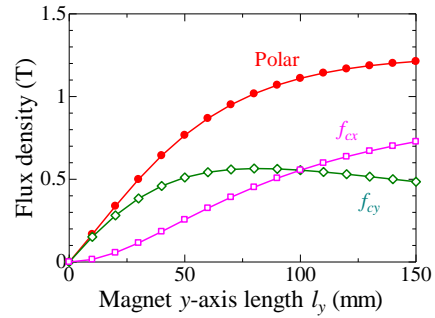


図 9 起磁力の径方向および周方向成分に由来する磁束の比較

図 8 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, 図 7(a)に示した極異方性磁石の 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。

図 9 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

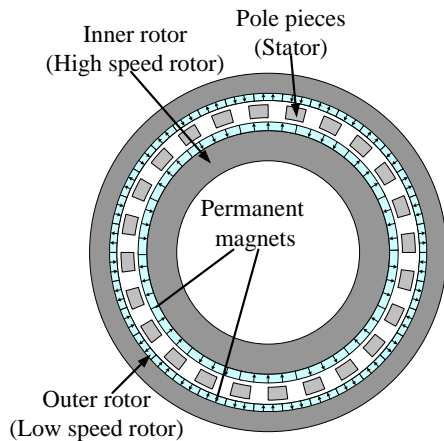
上述の考察により, 極異方性磁石を用いることで, 一般的なラジアル異方性磁石に対して, ギャップ磁束密度が向上することを示した。したがって, 従来のラジアル異方性焼結



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。ここでは、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。

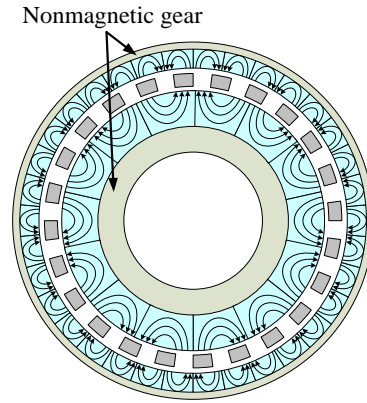
図 10 に、比較対象としたラジアル異方性焼結磁石を用いた磁気ギアの諸元を示す。また、図 11 に極異方性ボンド磁石を用いた磁気ギアの諸元を示す。両磁気ギアの体格、極対数は同一とした。本磁気ギアは、図 10 の磁気ギアの回転子の永久磁石とバックヨークを、極異方性ボンド磁石で置き換えている。なお、磁石支持のため、両回転子のバックヨークには非磁性金属を用いる。

図 12 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。



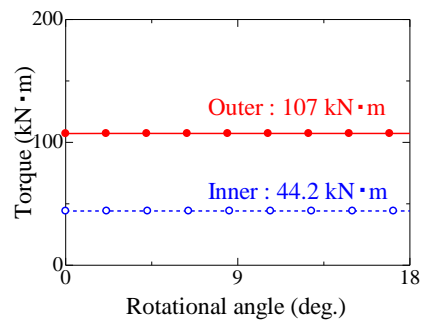
Magnetic gear	
Inner magnet pole-pair :	7
Outer magnet pole-pair :	17
Pole-pieces :	24
Gear ratio :	1 : 2.4286
Diameter of outer rotor :	1300 mm
Stack length :	1000 mm
Core material :	35A300
Pole pieces material :	6.5%Si steel
Permanent magnet	
Material :	Nd-Fe-B Sintered
Residual magnetic flux density :	1.25 T
Coercive force :	975 kA/m

図 10 ラジアル異方性希土類焼結磁石を用いた磁気ギアの諸元

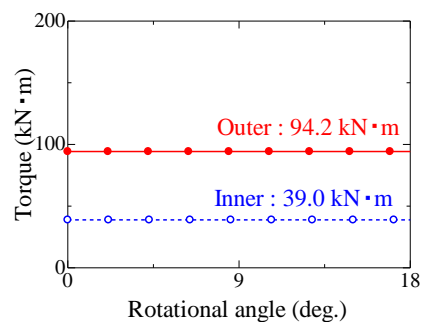


Magnetic gear	
Inner magnet pole-pair :	7
Outer magnet pole-pair :	17
Pole-pieces :	24
Gear ratio :	1 : 2.4286
Diameter of outer rotor :	1300 mm
Stack length :	1000 mm
Pole pieces material :	6.5%Si steel
Permanent magnet	
Material :	Nd-Fe-B bonded
Residual magnetic flux density :	0.80 T
Coercive force :	500 kA/m

図 11 極異方性希土類ボンド磁石を用いた磁気ギアの諸元



(a)極異方性磁石



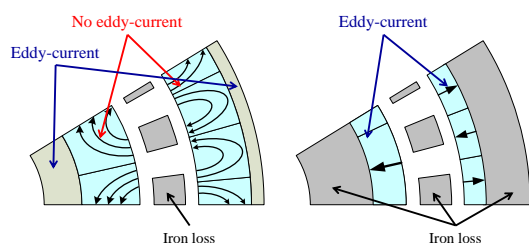
(b)ラジアル異方性磁石

図 12 トルクの計算波形

続いて両磁気ギアの損失の算定を行った。図 13 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。

以上のようにして算定した両磁気ギアの機械出力、損失および効率を表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%低減できることがわかる。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が得られる可能性がある。



(a)極異方性 (b)ラジアル異方性  
図13 損失を考慮した箇所

表1 両磁気ギアの損失および効率の比較

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

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- 福岡道成, 中村健二, 一ノ倉理, 極異方性ボンド磁石を用いた磁気ギアに関する検討, 日本磁気学会誌, 査読有, 36巻, 2012, 123-126

[学会発表] (計4件)

- 福岡道成, 中村健二, 一ノ倉理, 極異方性ボンド磁石を用いた磁気ギアに関する検

討, 日本磁気学会学術講演会, 2011年9月29日, 朱鷺メッセ(新潟県)

- 福岡道成, 中村健二, 一ノ倉理, 極異方性ボンド磁石を用いた磁気ギアの性能向上に関する検討, 電気学会マグネティックス研究会, 2011年9月16日, 九州大学(福岡県)
- 福岡道成, 中村健二, 一ノ倉理, 極異方性ボンド磁石を用いた磁気ギアに関する一考察, 電気関係学会東北支部連合大会, 2011年8月25日, 東北学院大学(宮城県)
- 福岡道成, 中村健二, 一ノ倉理, 表面磁石型磁気ギア的设计法に関する一考察, スピニクス特別研究会, 2010年10月29日, 日立市

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中村 健二 (NAKAMURA KENJI)  
東北大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 70323061

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号: