

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656180

研究課題名(和文) 極異方性 Sm-Fe-N ボンド磁石を用いた大トルクモータの開発

研究課題名(英文) Development of a large torque motor using a polar anisotropic Sm-Fe-N bonded magnet

研究代表者

中村 健二 (Nakamura, Kenji)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70323061

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000 円、(間接経費) 900,000 円

研究成果の概要(和文)：2012年度は、極異方性 Sm-Fe-N ボンド磁石を用いたアウトロータ型 SPM モータの最適構成について検討を行った。その結果、磁石1極当たりの幅と長さの比を2:1に保ち、多極化することで、従来のネオジム磁石モータとほぼ同等のトルクが得られることが明らかになった。

2013年度は、さらなるトルク向上を目指し、IPMモータについて検討を行った。その結果、回転子を2層フラックスバリア形にし、1層目に少量のネオジム磁石を入れ、2層目に Sm-Fe-N ボンド磁石よりもさらに磁束密度の小さいフェライト磁石を用いたとしても、従来のネオジム磁石モータに対して、約1.2倍のトルクが得られることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：In 2012, we examined the optimum configuration of an outer rotor type surface permanent magnet (SPM) motor using a polar anisotropic Sm-Fe-N bonded magnet by using finite element method (FEM). As a result, it was clear that the proposed SPM motor exhibits the same torque as a conventional Nd-Fe-B sintered magnet motor when the number of pole-pairs is increased up to 40 while keeping a ratio of width and length per one magnet 2:1.

In 2013, to further increase the torque, we investigated an interior permanent magnet (IPM) structure. As a result, it was clear that the proposed IPM motor demonstrates 1.2 times larger torque than a conventional Nd-Fe-B sintered magnet motor, when the IPM rotor has two-layer flux-barrier structure which has small amount of Nd-Fe-B sintered magnet in the first layer, while the large amount of ferrite magnet (it has less flux density than Sm-Fe-N bonded magnet) in the second layer.

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：永久磁石モータ 省レアアース 電気自動車

1. 研究開始当初の背景

環境問題に対する関心が、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が、相次いでハイブリッド電気自動車 (HEV) や電気自動車 (EV) 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、HEV や EV 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要求される。したがって、HEV や EV の核となるモータでさえも、小型・大トルク化と低コスト化は避けて通れない。そのため、HEV・EV 用のモータには、現在世界最強の磁石である Nd-Fe-B 焼結磁石が用いられているが、その原料の中で、レアアースと呼ばれるネオジウム (Nd) とジスプロシウム (Dy) は、希土類鉱石中の含有量が少なく、また特定の国に偏在しているため、価格高騰や供給不安など、資源リスクの高い元素になっている。

このような背景から、現在、まったく異なる元素を用いた新しい磁石の開発が進められており、その中でも Sm-Fe-N ボンド磁石が最も期待をされている。しかしながら、Sm-Fe-N ボンド磁石の残留磁束密度と保磁力は、いずれも Nd-Fe-B 焼結磁石の 5~6 割程度であるため、磁石の単純な置き換えで所望の特性を得ることは不可能である。

2. 研究の目的

本研究では、極異方性 Sm-Fe-N ボンド磁石に着目し、これに適した永久磁石モータの構成を明らかにするとともに、従来の Nd-Fe-B 焼結磁石を用いたモータと同等以上のトルクが得られることを明らかにする。

また上記の当初目的に加え、Sm-Fe-N ボンド磁石よりもさらに磁束密度の小さいフェライト磁石を用いて、従来の Nd-Fe-B 焼結磁石を用いたモータと同等以上のトルクが得られるモータの開発も目指す。

3. 研究の方法

2012 年度においては、極異方性 Sm-Fe-N ボンド磁石を用いたアウターロータ型表面磁石 (SPM) モータについて、現状の Nd-Fe-B 焼結磁石を用いたモータと同等以上のトルクが得られるモータ構成を明らかにする。具体的には、有限要素法 (FEM) を用い、極異方性配向において、最も磁束密度を高めることができる極数、磁石形状、磁石配置について検討を行う。

2013 年度においては、さらなるトルク向上を目指して、埋込磁石 (IPM) 型について検討を行う。なお磁石には、Sm-Fe-N ボンド磁石よりもさらに磁束密度の小さいフェライト磁石を用いる。前年度と同様に、FEM を用いて解析・設計を行うとともに、実機による実証実験も行う。

4. 研究成果

(1) 極異方性 Sm-Fe-N ボンド磁石を用いたアウターロータ型表面磁石 (SPM) モータの磁石長に関する検討

図 1 に、考察に用いた極異方性 Sm-Fe-N ボンド磁石を用いたアウターロータ型 SPM モータを示す。同図のモータについて、磁石長を変化させた時のトルクの変化を、FEM を用いて計算する。なお、ロータの内径は 93 mm、バックヨークは 10 mm で固定した。

図 2 に、磁石長対トルク特性を示す。比較のため、同図の橙色実線として、ラジアル異方性磁石でバックヨーク有する一般的な SPM モータのトルクと、赤色実線として、極異方性磁石でバックヨークが無いモータのトルクを示す。この図を見ると、まず磁石長が 20 mm 以下では、バックヨークを有するモータのトルクが大きいことがわかる。一方、磁石長が 20 mm 以上になると、ラジアル異方性磁石の SPM モータのトルクはほぼ飽和するのに対して、極異方性磁石の SPM モータでは、上昇は緩やかであるが、トルクが増加し続けていることが了解される。また、バックヨークの有無による差はほとんど無くなっている。

次いで、図 3 に、図 2 で示したトルクをモータ体積で割ったトルク密度を示す。この図を見ると、3 者いずれにおいても、最適な磁石長があることがわかる。また、先ほどのト

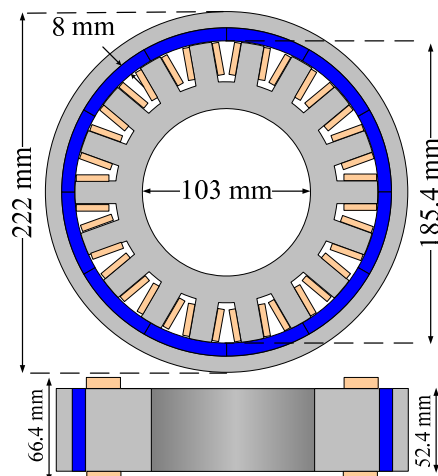


図 1 極異方性 Sm-Fe-N ボンド磁石を用いたアウターロータ型 SPM モータの形状・寸法

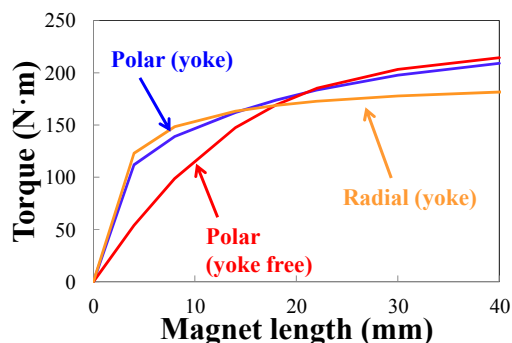


図 2 磁石長対トルク特性

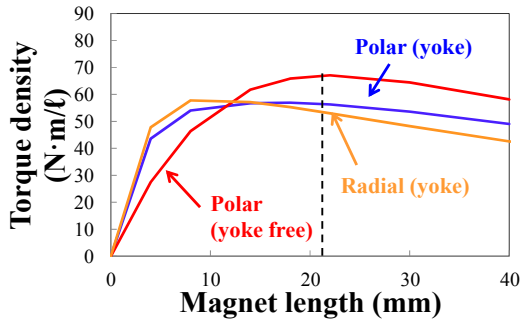


図3 磁石長対トルク密度特性

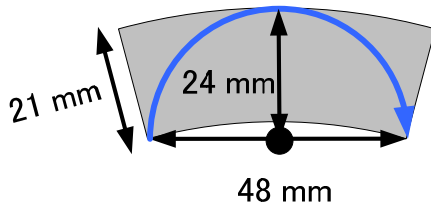


図4 磁石長 21 mm のときの磁石 1 極あたりの形状・寸法

トルク特性では、極異方性磁石のバックヨークがある場合、ない場合でほぼ同一の特性であったが、トルク密度特性で見た場合には、バックヨークがない方が、モータ体格が小さくなるため、バックヨークがある場合よりも優れた特性を示していることがわかる。

また図4として、トルク密度が最大となった磁石長 21 mm のときの磁石 1 極あたりの形状を示す。この図より、磁石の両端を結ぶ円弧がちょうど磁石内に収まる、すなわち縦と横の比率が約 1:2 になっていることがわかる。

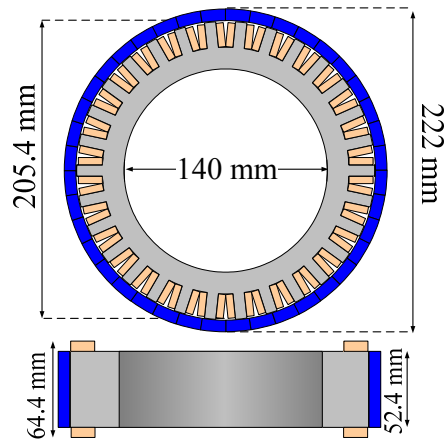
(2) 極異方性 Sm-Fe-N ボンド磁石を用いたアウターロータ型 SPM モータの多極化に関する検討

前節の検討で、極異方性 Sm-Fe-N ボンド磁石を用いたアウターロータ型 SPM モータにおいては、バックヨークが不要であること、磁石 1 極あたりの縦横の比は 1:2 が最適であることが明らかになった。これらに基づき、モータの多極化による、磁石使用量の削減と従来の Nd-Fe-B 焼結磁石を用いたモータとの比較を行う。

図5に、設計した極数 40 の極異方性 Sm-Fe-N ボンド磁石を用いた SPM モータの諸元を示す。磁石 1 極あたりの寸法は、縦が約 8 mm、横が約 16 mm である。

図6に、比較対象としたラジアル異方性 Nd-Fe-B 焼結磁石を用いた SPM モータ (12 極) の諸元を示す。一般的なラジアル異方性 Nd-Fe-B 焼結磁石を用いる場合には、バックヨークが必要であることから、これを含めた体格が図5のモータと同一になるように設計した。

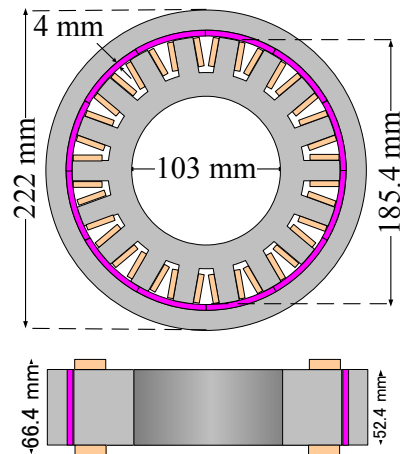
図7に、両モータの電流対トルク特性を示す。この図を見ると、極異方性 Sm-Fe-N ボン



Number of poles	40
Number of slots	30
Diameter	222mm
Axial length	66.4 mm
Gap length	0.3 mm
Number of turns / pole	29 turns
Winding resistance / pole	0.035 Ω

Magnet material	Sm-Fe-N
Coercive force	520 kA/m
Residual magnetic flux density	0.74 T
Recoil permeability	1.13
Thickness	8 mm

図5 極異方性 Sm-Fe-N ボンド磁石を用いた多極 SPM モータ (40 極) の諸元



Number of poles	12
Number of slots	18
Diameter	222mm
Axial length	66.4mm
Gap length	0.3 mm
Number of turns / pole	50 turns
Winding resistance / pole	0.059 Ω

Magnet material	Nd-Fe-B	Sm-Fe-N
Coercive force	975 kA/m	520 kA/m
Residual magnetic flux density	1.25 T	0.74 T
Recoil permeability	1.037	1.13
Thickness	4 mm	8 mm 18 mm

図6 ラジアル異方性 Nd-Fe-B 焼結磁石を用いた SPM モータ (12 極) の諸元

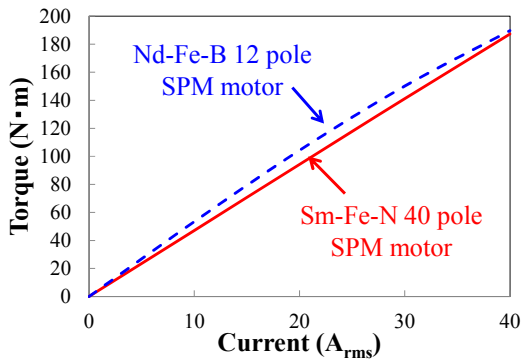


図7 電流対トルク特性の比較

ド磁石を用いたモータは、通常のラジアル異方性 Nd-Fe-B 焼結磁石を用いたモータとほぼ同等のトルクが得られていることがわかる。

(3) 2012 年度の成果のまとめ

以上、FEM を用いて、極異方性 Sm-Fe-N ボンド磁石を用いたアウターロータ型 SPM モータの最適構成について検討を行った。

その結果、磁石 1 極当たりの縦横比を 1:2 に保ちながら、多極化することで、一般的な Nd-Fe-B 焼結磁石を用いたモータとほぼ同等のトルクが得られることが明らかになった。

(4) 埋込磁石 (IPM) 型アウターロータモータに関する検討

上述の 2012 年度の成果からのさらなるトルク向上を目指して、2013 年度は埋込磁石 (IPM) 型について検討を行った。

図 8 に、一般的な磁石を V 字に配置したアウターロータ型 IPM モータの諸元を示す。磁石材料は Nd-Fe-B 焼結磁石である。

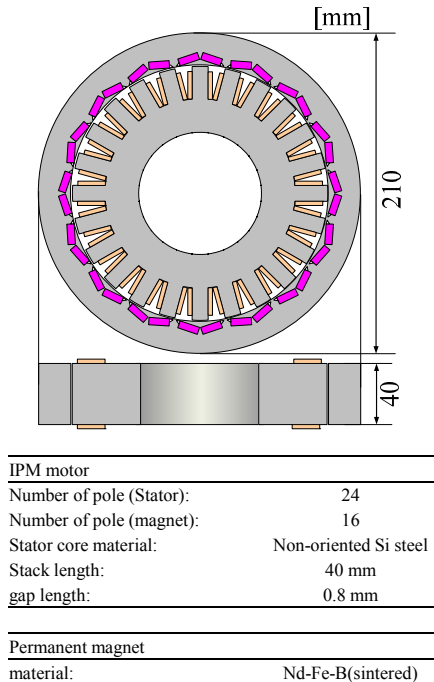
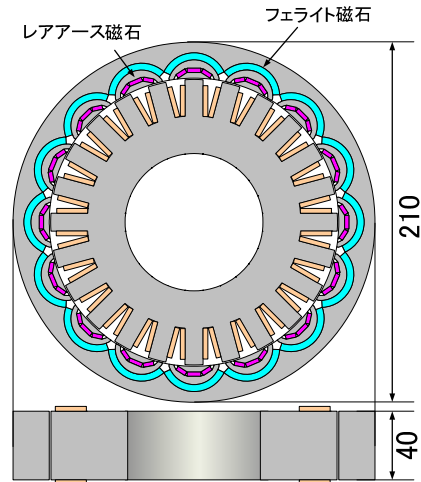


図8 アウターロータ型 IPM モータの諸元

これに対して、図 9 に提案するフラックスバリア型アウターロータ IPM モータの諸元を示す。回転子は、2 層のフラックスバリア構造を採用し、電機子反作用が強い 1 層目に少量の Nd-Fe-B 焼結磁石を配置し、電機子反作用が相対的に弱い 2 層目にフェライト磁石を配置する。これによって、Nd-Fe-B 焼結磁石の削減により減少することが予想されるトルクを、フェライト磁石で補うことを狙う。なお、図 8 のモータの Nd-Fe-B 焼結磁石の使用量に対して、提案モータの使用量は約 1/2 である。

図 10 に、FEM を用いて算定した電流密度対トルク特性を示す。また表 1 に、両モータの磁石使用量および最大トルクを示す。



IPM motor	
Number of pole (Stator):	24
Number of pole (magnet):	16
Stator core material:	Non-oriented Si steel
Stack length:	40mm
gap length:	0.8mm
Permanent magnet	
material(inner layer):	Nd-Fe-B(sintered)
material(outer layer):	ferrite

図9 フラックスバリア型アウターロータ IPM モータの諸元

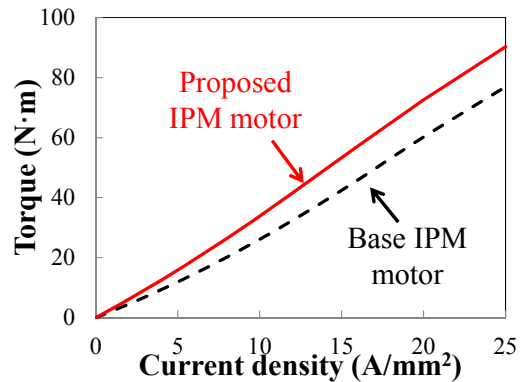


図10 電流密度対トルク特性の比較

表 1 磁石使用量および最大トルク

		Base IPM motor	Proposed IPM motor
magnet volume (mm ³)	Rare-earth	55.4	31
	Ferrite	0.0	101
Maximum torque at 20 A/mm ² (N·m)		60.2	72.5

この図を見ると、電流密度 20 A/mm²において、フラックスバリア型 IPM モータは V 字配列 IPM モータに比べ約 1.2 倍のトルクが得られていることがわかる。このことから、フラックスバリア型 IPM モータは、希土類磁石量が半分程度にも関わらず、トルク特性が向上しているといえる。

(5) 実証実験の結果

上述のシミュレーション結果に基づき、フラックスバリア型 IPM モータを試作した。図 11 に実験システムの構成を、図 12 に外観を示す。

図 11 の DSP と Inverter を用いて、試作機を電流ベクトル制御する。また Dynamo meter を用いて任意の負荷を印加する。電圧、電流等は Power meter で測定し、トルクと回転数は Torque meter で測定する。

主な実験条件は、直流電圧 V_{dc} が 100 V であり、電流ベクトル制御時の電流位相角 β は、0 deg とした。

図 13 に、電流密度対トルク特性を示す。ここで、シンボルは実測値、実線は FEM による計算値である。この図を見ると、両者はほぼ良好に一致しており、設計通りの特性が得られたことがわかる。なお、電流密度が大きくなるにつれて、両者の差が広がる傾向にあるが、これは FEM では励磁電流に含まれる高調波や機械損を無視していることが原因と考えられる。

次いで、図 14 に電流密度対効率特性を示す。効率についても、定性的な傾向は良く一致していることがわかる。

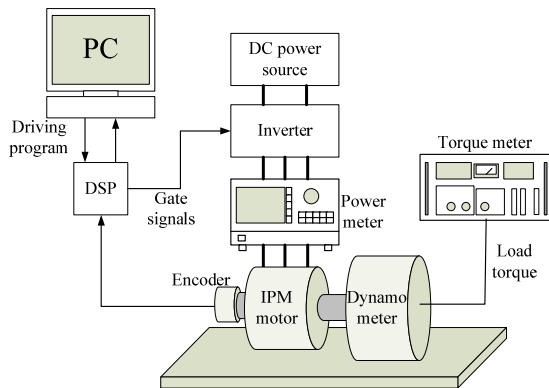


図 11 実験システム構成

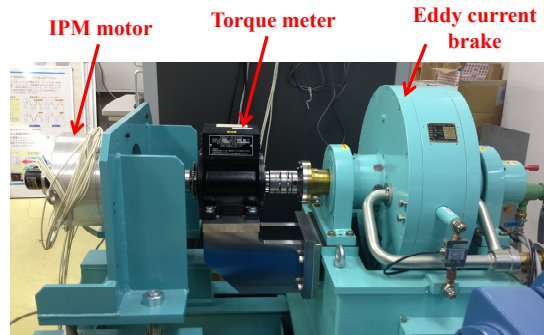


図 12 実験システムの外観

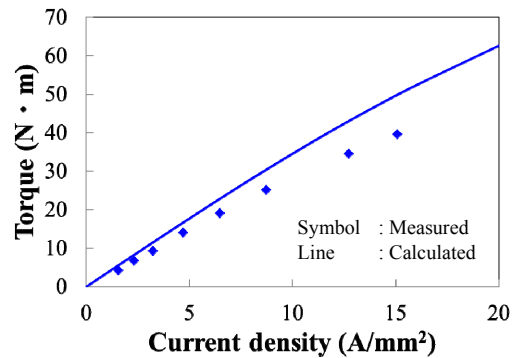


図 13 電流密度対トルク特性の実測値と計算値

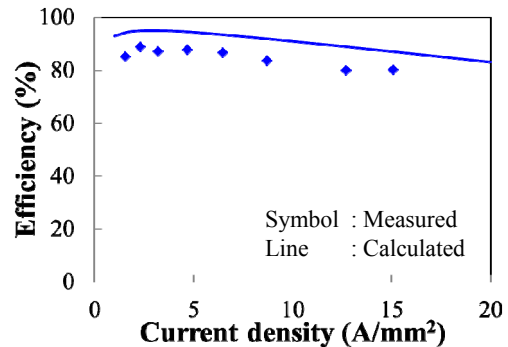


図 14 電流密度対効率特性の実測値と計算値

(6) 2013 年度の成果のまとめ

以上、前年度からのさらなるトルク向上を目指して、IPM 型について検討を行った。

その結果、回転子を 2 層フラックスバリア構造とし、1 層目に少量の Nd-Fe-B 焼結磁石を入れ、2 層目に Sm-Fe-N ボンド磁石よりもさらに磁束密度の小さいフェライト磁石を用いたとしても、従来の Nd-Fe-B 焼結磁石を用いたモータに対して、約半分の Nd-Fe-B 焼結磁石の使用量に関わらず、約 1.2 倍のトルクが得られることを明らかにした。また実機を試作し、シミュレーションで得られた結論を実証した。

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)

1. S. Ishii, Y. Hasegawa, K. Nakamura, O. Ichinokura, Novel Flux Barrier type Outer Rotor IPM Motor with Rare-earth and Ferrite Magnets, Journal of the Magnetism Society of Japan, 査読有, Vol. 37, 2013, pp. 259-263
DOI:10.3379/msjmag.1305R004

[学会発表] (計 2 件)

1. K. Nakamura, S. Ishii, Y. Hasegawa, O. Ichinokura, Novel Interior Permanent Magnet Motor with Rare-Earth and Ferrite Magnets in a Flux-Barrier type Outer Rotor, INTERMAG 2014, 2014 年 5 月 8 日, ドイツ・ドレスデン
2. 石井聡一, 長谷川祐, 中村健二, 一ノ倉理, 希土類磁石とフェライト磁石を併用したフラックスバリア型アウターロータ IPM モータの基礎特性, 電気学会 A 部門大会, 2012 年 9 月 20 日, 秋田

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 :