

# 磁性線材を適用したシングルステータ ダブルアキシアルギャップ PM モータ

宇佐美 和明\* 野口 季彦 (静岡大学)

## Single Stator with Double Axial-Gap PM Motor Employing Ferromagnetic Wire

Kazuaki Usami\*, Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

In general, an axial-gap permanent magnet (PM) motor employs soft magnetic composite (SMC) for the stator cores. Complicated shape of the stator cores with three-dimensional magnetic circuits can easily be achieved with the SMC, but the poor magnetic permeability of the SMC is a major concern. This paper proposes a new structure of the stator cores of the axial-gap PM motor, which introduces use of ferromagnetic wires to compose the stator cores. Operation characteristics such as the delivered torque and the eddy current loss of the motor are examined through three-dimensional electromagnetic field analyses, which proves feasibility of the proposed approach.

キーワード：永久磁石同期モータ，アキシアルギャップモータ，磁性線材，アモルファス，磁性材料 (PMSM, axial-gap motor, ferromagnetic wire, amorphous, ferromagnetic material)

### 1. はじめに

筆者らは Fig. 1 のようなシングルステータダブルアキシアルギャップ PM モータのコア材料と構造について検討してきた。このようなアキシアルギャップモータはステータの磁路が三次元となるため、一般的に磁性材料として SMC (Soft Magnetic Composite) が広く用いられている。しかし、SMC は磁性鉄粉の製造に高度な技術を必要とするため、一般に高価で製造時に大型のプレス機も必要とする。そこで、シングルステータダブルアキシアルギャップ PM モータのステータ内磁束が軸方向に交番するだけであることに着目し、ステータコアの新構造を提案する。ステータコアに磁性線材を束ねたものを用いることで、磁性材料としての特性と製造面での優位性を両立することを目的とする。以降、新構造のステータコア材料として磁性線材を想定する。磁性線材は構造が単純であるため、アキシアルギャップモータで使用が難しかったアモルファスなどの新素材を用いることができる。本稿では磁性線材の材料や構造の観点から種々の検討を行い、提案するコア材料と構造がモータの運転特性に与える影響を明らかにしたので報告する。

### 2. ステータコアの渦電流損発生原因

#### 〈2・1〉 渦電流経路

ここで検討するダブルアキシアルギャップ PM モータの磁束は中央に置かれたステータコアを軸方向に流れるため、交番磁界によって発生する渦電流はコア断面を環状に

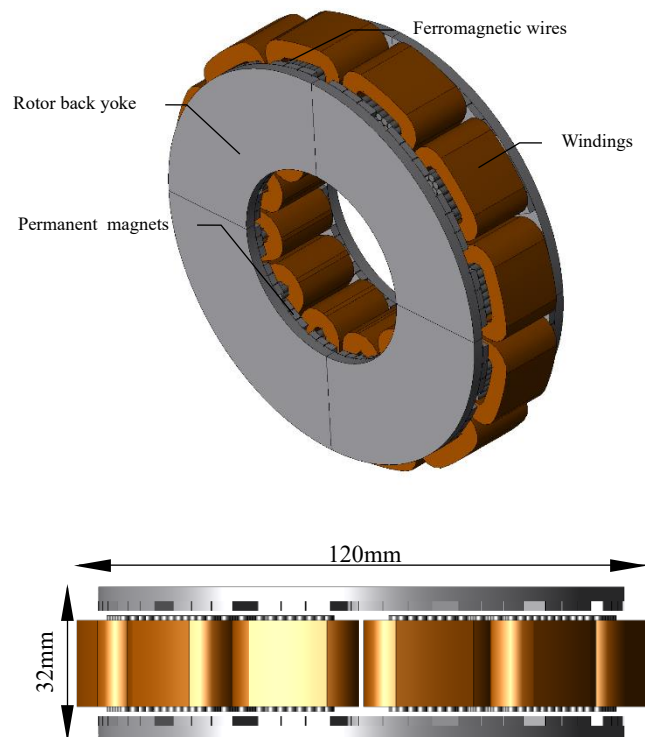


Fig. 1. Overview of investigated motor.

流れる。ステータコアが導電性のブロック材の場合はその最外周を渦電流が流れる。磁性線材を束ねてダブルアキシアルギャップ PM モータのステータコアに適用した場合

は、それぞれの磁性線材の断面に沿って渦電流が流れる。SMC を利用した場合は磁性粉粒中に渦電流が流れ、いずれの場合も鉄損としてモータの効率を劣化させる大きな要因となる。

### 〈2・2〉 渦電流損の低減方法

渦電流の低減には渦電流経路を小さくすることが有効である。電磁鋼板の場合は磁性板材の表面を絶縁し、積み重ねることで板材断面に流れる磁束で生ずる渦電流の経路を小さくし渦電流損の低減を図っている。SMC は導電性の磁性粉粒を絶縁コーティングすることで渦電流経路を小さくしている。SMC は粉粒を絶縁コーティングしているため、磁束の方向にかかわらず磁気特性が等方性をもつ一方、非磁性体であるコーティングが磁性粉粒の全方向を覆っているため透磁率が低くなりやすく、飽和磁束密度も電磁鋼板と比較して劣る。シングルステータダブルアキシヤルギャップ PM モータのステータコアは磁束の流れが一定方向であるため、渦電流が生じない経路である軸方向の絶縁をする必要がない。そのため、Fig.2 の円柱や角柱のような断面をもつ線材を束ねた構造とすることによって磁束方向の磁気特性の劣化が少ない材料を作ることができる。

Fig.3 はステータコアに流れる渦電流密度をベクトルプロットしたものである。青色（小さなコーン）の部分は電流密度が小さく、赤色（大きなコーン）の部分は電流密度が大きい。ただし、モデルごとに電流密度のスケールを調整して表示している。ステータコアを分割しない場合は大きな渦電流経路が生じており、分割した場合はそれぞれの線材断面を環状に渦電流が流れていることが確認できる。また、線材の断面を小さくすると、渦電流の経路も小さくなっていることが確認できる。渦電流を小さくするには材料の電気抵抗率を上げるとともに線材の断面積を小さくすることが有効である。

## 3. 三次元電磁界解析の諸条件

### 〈3・1〉 解析モデルの諸条件

電磁界解析ソフト JMAG Designer 18.1™ を用いて解析を行った。前述の Fig.1 が解析対象とするモータである。解析対象の磁気回路の直径は 120 mm、厚さは 32 mm、出力は 1 kW で、スロットコンビネーションは 12s16p の SPM モータである。q 軸のみに通電し、電流値は 4.0 Arms/phase で回転数は 3000 r/min とする。また、永久磁石は NMX-S45SH（日立金属）で、温度は高温下での運転が想定されるため 120℃ として解析した。モータ特性の基準は Hogan 700HR-5P（SMC）を用いたブロックモデルである。ステータコアの構造を 5 種類（ブロック、円柱 2.0mm、角柱 2.0mm、円柱 1.0mm、角柱 1.0mm）とステータコアの材料を 5 種類（SUY-1 純鉄、S45C 炭素鋼、JFE スチール 50JN400 電磁鋼板、JFE スチール 50JN1300 電磁鋼板、日立金属 YEP-2V パーマンジュール）の計 25 通りで解析を行った。なお、本検討はステータコア構造によるトルク特性と渦電流損についての検討であるため、ロータバックヨークの材料はすべてのモデ

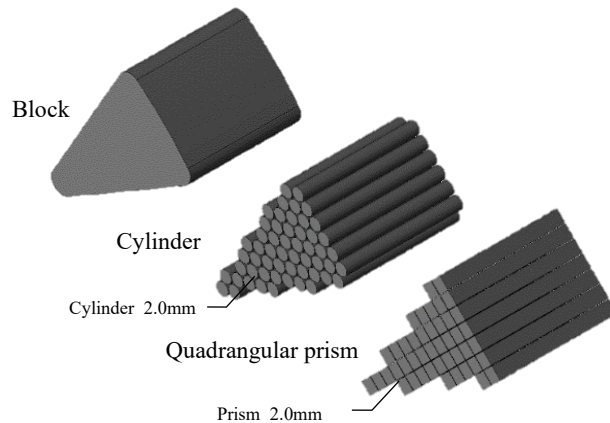


Fig. 2. Overview of stator core structures.

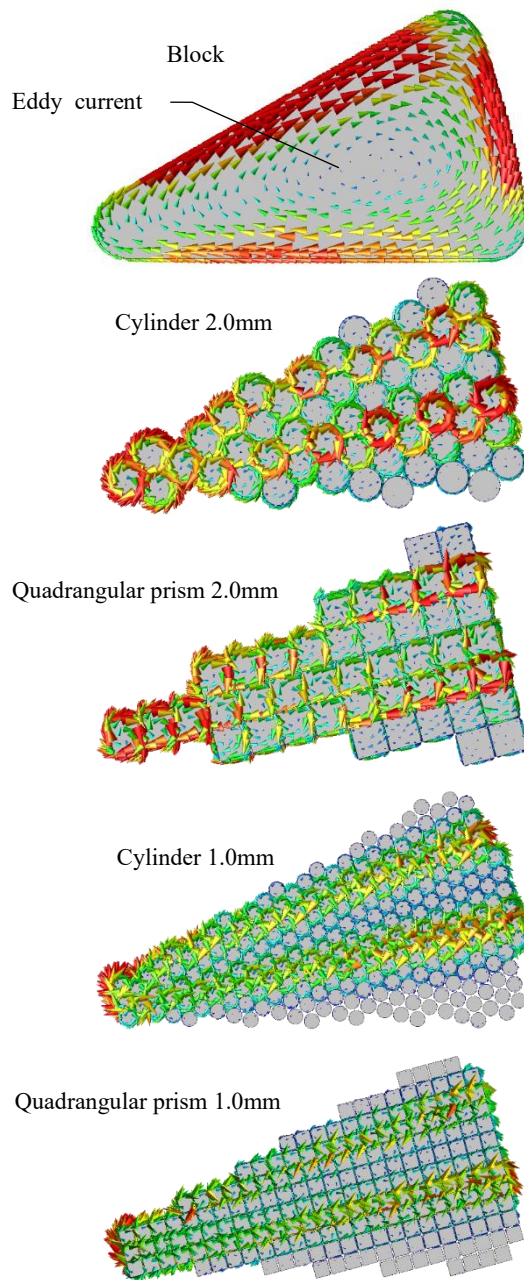


Fig. 3. Vector plot of eddy current density.

ルで共通の 700HR-5P としており、ロータバックヨーク、ステータコアのヒステリシス損は考慮しない。解析メッシュについては十分な事前検討を行い、必要な解析精度が得られるメッシュサイズを採用している。1 モデルあたり 300～400 万要素である。

### 〈3・2〉 ステータコアの占積率

ブロックモデルのステータコアの空間に占める絶縁材料を含む各材料の割合を 100 %としたときの各モデルの占積率を Table. 1 に示す。すべてのモデルで表面の絶縁被膜の厚さは一定としており、円柱モデルでは磁性線材を倭積みしている。線材の断面積が大きいとコア外周部に無駄な空間が生ずるため占積率が著しく低下するが、線材の断面積を小さくすることによって角柱 1.0 mm モデルでは占積率を 83.1 %まで改善することができる。占積率の向上には線材断面積を小さくすることが有効である。

### 〈3・3〉 材料の電気抵抗率

Table. 2 に各材料の電気抵抗率を示す。鉄基アモルファスである 2605SA1 以外の電気抵抗率は JMAG Designer 18.1™ の材料データから引用した。電気抵抗率は渦電流損に大きく関与し、渦電流損は電気抵抗率に反比例するため、電気抵抗率の大きな材料を用いることが望ましい。SUY-1 の電気抵抗率が最も小さく 0.12  $\mu\Omega\text{m}$  である。一方、0.5 mm 厚の電磁鋼板である 50JN1300 の電気抵抗率が 0.47  $\mu\Omega\text{m}$  で、SUY-1 と比較しておよそ 4 倍となっている。また、2605SA1 の電気抵抗率は 1.3  $\mu\Omega\text{m}$  で SUY-1 と比較して 11 倍程度の抵抗率をもっており、渦電流損の低減が期待できる。

### 〈3・4〉 材料の磁気特性

Fig. 4 に各材料の磁気特性を示す。2605SA1 以外の材料の磁気特性は JMAG Designer 18.1™ の材料データから引用した。基準モデルの材料は 700HR 5P であり、他の材料と比較して初期透磁率が低いことが確認できる。飽和磁束密度では YEP-2V が最も大きく 2.2 T 以上である。2605SA1 の飽和磁束密度は 1.5 T であるが、初期透磁率が最も高くヒステリシス損が極めて小さいため高周波駆動に適している。

## 4. 解析結果

### 〈4・1〉 トルク特性の比較

Fig. 5 に各モデルの平均トルク比較結果を示す。SMC 以外の材料を用いたブロックモデルは渦電流損が過大で、トルクが負値をとるモデルもあったため、そのようなモデルは非表示とした。トルク特性は飽和磁束密度も影響するが、それ以上に電気抵抗率が大きく関係する。YEP-2V は飽和磁束密度が大きいですが、電気抵抗率が 50JN400 より低いため、平均トルクとしては同程度となる。そのため飽和磁束密度の大きな YEP-2V に特段の優位性は確認できなかった。以上の検討結果から、磁性線材の材料には電気抵抗率が大きな材料を用いることを優先させるべきと思われる。

基準モデルの 700HR 5P との比較ではどのモデルもトルク特性が劣っている。しかし筆者らは 700HR 5P を用いてアキシシャルギャップ PM モータを試作した実績があるが、現実

Table. 1. Space factors of stator core.

Stator core structure	Stator core space factor
Block	100%
Cylinder 2.0mm	66.8%
Quadrangular prism 2.0mm	68.1%
Cylinder 1.0mm	78.0%
Quadrangular prism 1.0mm	83.1%

Table. 2. Electrical resistivity of stator core.

SUY-1	S45C	50JN400	50JN1300	YEP-2V	2605SA1
0.12 $\mu\Omega\text{m}$	0.21 $\mu\Omega\text{m}$	0.47 $\mu\Omega\text{m}$	0.15 $\mu\Omega\text{m}$	0.39 $\mu\Omega\text{m}$	1.3 $\mu\Omega\text{m}$

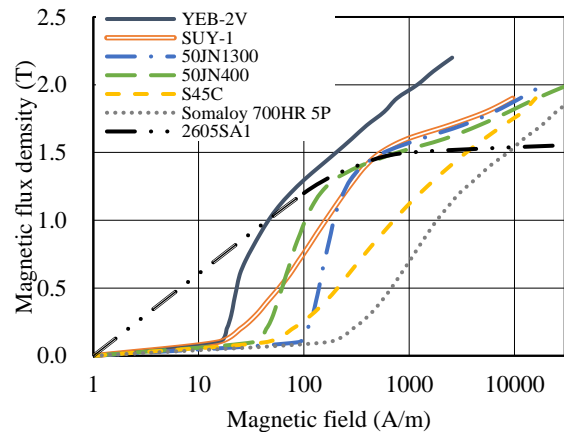


Fig. 4. Magnetic characteristics of stator core material.

的な磁気特性はカタログ公称値の 90%未満であり、磁気特性の劣化によってトルクがおおよそ 5%低下することもあった。また、SMC の内部は理論上、電気抵抗率が大きく渦電流損が小さいはずであるが、表面処理によっては表面の抵抗率が低下し渦電流が生じることが判明している。そのため、トルク特性が最も高い円柱 1.0mm, YEP-2V モデルで基準モデルと比較して 6%の平均トルク減少となっているが、占積率が 78.0 %であることを考慮すると、平均トルクの減少度合いは少なく、良好な結果が得られたと考える。

### 〈4・2〉 ステータコアの渦電流損の比較

Fig. 6 にステータコアの渦電流損に関する比較結果を示す。ブロックモデルは渦電流経路が大きく 800～2000 W の渦電流損が発生する。そのため、グラフでは数値の表示を省略した。円柱や角柱の 1.0 mm モデルは 2.0 mm モデルと比較して渦電流損が 1/3 程度低減している。理論的には磁性材料の断面寸法を 1/2 にすると損失は 1/4 に低減するが、1/3 程度の低減にとどまった。断面寸法が大きなモデルは渦電流が断面の外側に集中して流れる傾向にあり、中心部は電流が小さく電流密度が不均一になるためと考えられる。

材料ごとの渦電流損は概ね電気抵抗率に反比例している。理論的には電気抵抗率に反比例するが、実際は SUY-1 を基準とした電気抵抗率から計算される理論値よりも 15%損失が大きくなった。電気抵抗率の大きな 50JN400 や YEP-2V で誤差が大きく、理論値よりも 20～30%の損失増加がみられた。

### 〈4・3〉 永久磁石の渦電流損の比較

Fig. 7に永久磁石の渦電流損に関する比較結果を示す。磁性線材を用いたステータ構造や材料による永久磁石渦電流損の違いはわずかに見られる程度であった。しかし、全体的にブロックモデルと比較して他のモデルは永久磁石の渦電流損が大きくなる傾向にある。磁性線材は線材断面に対して垂直方向以外の磁束を通しづらく、永久磁石からの磁束を線材断面に対して垂直に流す傾向が SMC よりも強い。そのため永久磁石からステータコアへ達する磁束の変化率が SMC と比較して大きくなるため、マグネットの渦電流損がわずかに増加したと考えられる。

## 5. まとめ

本稿では磁性線材の材料と構造について検討し、トルク特性やステータコア、永久磁石の渦電流損について明らかにした。ステータコアのメッシュを細かくする必要があるため、解析時間が膨大になる問題や、線材の入手性の問題があるが、磁性線材のステータコアへの適用は大きな利点を有している。磁性線材を切断して結束するだけで比較的簡単にステータコアを製造でき、大型のプレス機や特殊な製法で作られた材料を必要としないため、低コストを実現できる。本稿では解析時間の観点から  $\phi 1\sim 2\text{ mm}$  の材料を用いて解析を行ったが、 $\phi 0.2\sim 0.5\text{ mm}$  の材料を用いることで占積率が更に向上するとともに渦電流損の低減が期待できる。解析より線材の断面寸法が 1/2 になると渦電流損が 1/3 になると推測できるため、50JN400 や YEP-2V の  $\phi 0.5\text{ mm}$  線材を用いてステータコアを作れば渦電流損は 10 W 程度となり、SMC の実測で確認された損失と同程度となる。また、導電率の大きな SUY-1 でも  $\phi 0.2\text{ mm}$  とすることができれば渦電流損を 10 W 程度に抑えることができる。

磁性線材を用いたモデルは SMC を用いたモデルよりもトルク特性が劣る結果となったが、SMC は磁気特性の劣化や材料表面の渦電流損の考慮を行っていないことを考慮すると、磁性線材は更なる微細化と占積率の向上によってトルク特性が SMC のモデルより上回る可能性が大いにある。また、本稿ではモータの駆動条件としてステータコアの磁束密度が高い動作点を選択したが、動作点の変更やヒステリシス損を考慮することでアモルファスの優位性が高くなるため、更なる高周波駆動と低損失化の実現が期待できる。

## 文 献

- (1) K.Takishima, K.Sakai: "Starting Characteristics of Axial and Radial Type Ultra-Lightweight Motors Based on Magnetic Resonance Coupling", IEEJ J. Industry Applications, vol. 8, no. 3, pp. 471-479 (2019)
- (2) S. Morimoto, Y. Asano, T. Kosaka, and Y. Enomoto, "Recent Technical Trends in PMSM", in Proc. IPEC-2014, pp.1997-2003 (2014)
- (3) J.A. Tapia, F. Leonardi, and T.A. Lipo: "Consequent-pole Permanent-Magnet Machine with Extended Field-Weakening Capability", IEEE Trans. on IA., Vol. 39, No. 39, pp. 1704-1709 (2003)

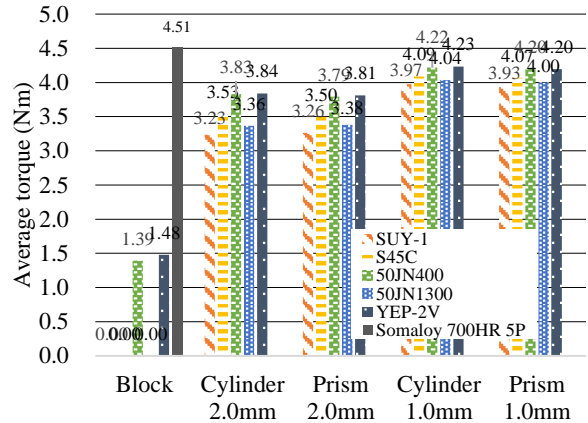


Fig. 5. Average torque comparison.

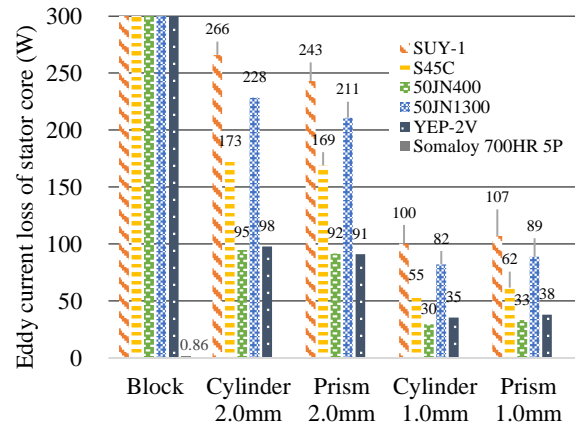


Fig. 6. Eddy current loss of the stator core.

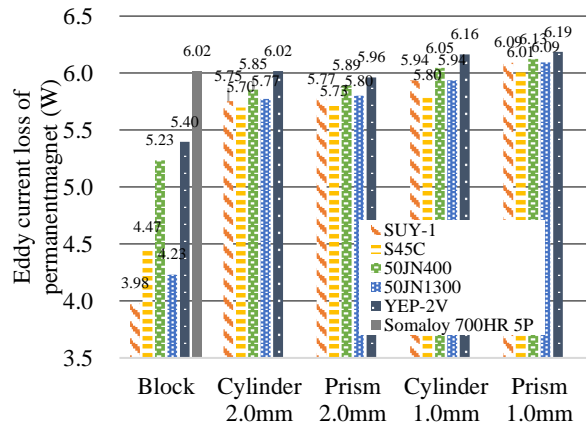


Fig. 7. Eddy current loss of permanent magnet.

- (4) 榎本・王・正木・相馬: 「鉄基アモルファス鉄心を適用したアキシヤルギャップモータの大容量化」日本 AEM 学会誌 Vol. 21, No.2 (2013)
- (5) 神山・野口・服部・山田・横山: 「高トルク密度車載用モータの開発」平成 29 年電気学会全国大会, No.5-004, pp.7-8 (2017)
- (6) 三浦・茅野・竹本・小笠原: 「次世代ハイブリッド自動車用フェライト磁石アキシヤルギャップモータの提案」半導体電力変換研究会, Vol.149, No. SPC-09-159, pp.59-64 (2009)