

三次元有限要素法を用いた小形コアレスモータの特性解析

3-D Finite Element Analysis of a Miniature Coreless Motor

中橋 鮎香* 中嶋 乃* 遠山 和久**
Ayuka NAKAHASHI Osamu NAKASHIMA Kazuhisa TOUYAMA

要　　旨

近年、携帯機器の発達に伴って、小形モータの更なる小形化・高性能化が望まれている。しかし、小形コアレスモータにおいては、各部位の形状・サイズの制約が多く、形状やサイズ変更による高性能化が困難である。

そこで本報告では、ペンタゴン結線のコイルを用いた小形コアレスモータを解析対象とし、三次元有限要素法を用いて磁界解析を行った。各部位を構成する材質を変えることによって高性能化が望めるかどうかを検証した。

ABSTRACT

Recently, it is desired to miniaturize and improve capabilities of miniature motors, accompanied by development of portable devices. However, it is strongly difficult to develop of miniature coreless motors by changing parts shape or size with constraint.

In this paper, Miniature coreless motor with the pentagon connection is analyzed using the 3-D finite element method. The effects of the material of the parts on the characteristics of the torque and the current are clarified.

* リコーエレメックス株式会社 技術統括室

Technology Management Office, Ricoh Elemex Corp.

** リコーエレメックスエーティー株式会社 製造部

Engineer Section, Ricoh Elemex AT Corp.

1. 背景と目的

近年、携帯機器の発達に伴って、小形モータの更なる小型化・高性能化が望まれている。一方、弊社は精密加工技術を得意としており、その技術力を活かして、多方面に応用展開可能な小形モータの開発に取り組む事となった。

ここで、超細型の小形モータとして、コアレスモータがよく使用されている。コアレスモータとは、コイル鉄芯がなく、ハウジングにて磁気回路を構成し、界磁用永久磁石より発せられる磁束と、コイルへの通電により生じる磁界の磁気的吸引力・反発力により回転する。

しかし、小形コアレスモータ¹⁾においては、各部位の形状・サイズの制約が多く、形状やサイズ変更による高性能化が困難である。

そこで本報告では、ペンタゴン結線のコイルを用いた小形コアレスモータを解析対象とし、三次元有限要素法を用いて磁界解析し、各部位を構成する材質を変えることによって高性能化が望めるかどうかを検証した。

2. 技術

2-1 解析手法

2-1-1 有限要素法による磁界解析

永久磁石を考慮した磁界の基礎方程式は、マクスウェルの電磁方程式より磁気ベクトルポテンシャル \mathbf{A} を用いて次式で表される²⁾。

$$\text{rot}(\nu \text{ rot } \mathbf{A}) = \mathbf{J}_0 + \nu_0 \text{ rot } \mathbf{M} \quad \dots \quad (1)$$

ここで、 ν は磁気抵抗率、 \mathbf{J}_0 は強制電流密度、 ν_0 は真空中の磁気抵抗率、 \mathbf{M} は永久磁石の磁化である。

2-1-2 電気回路方程式との連立

本報告で解析したモータのコイルはペンタゴン結線であり、Fig.1に示すように常に直列接続された2つの

コイルと3つのコイルが並列に接続された回路となる。その5つのコイルの組み合わせは、整流子によって回転子の回転とともに変化する。Fig.1(a)に示すpattern1では、コイルa, bの直列接続とコイルe, d, cの直列接続が並列に接続された回路となり、このときの電圧に関する方程式は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} E_{ab} &= V_0 - (R_a + R_b)I_{ab} - \frac{d\Psi_a}{dt} - \frac{d\Psi_b}{dt} = 0 \\ E_{edc} &= V_0 - (R_e + R_d + R_c)I_{edc} - \frac{d\Psi_e}{dt} - \frac{d\Psi_d}{dt} - \frac{d\Psi_c}{dt} = 0 \\ I_0 &= I_{ab} + I_{edc} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、 $R_a \sim R_e$ はそれぞれコイルa～eの巻線抵抗、 $\Psi_a \sim \Psi_e$ はそれぞれコイルa～eの総鎖交磁束数、 I_0 は電源電流、 V_0 は電源電圧、 I_{ab} はコイルa, bを流れる電流、 I_{edc} はコイルe, d, cを流れる電流、 E_{ab} はコイルa, b間にかかる電圧、 E_{edc} はコイルe, d, c間にかかる電圧である。

回転子が回転すると、Fig.1(b)に示すpattern2のように、左側のブラシはpattern1同様に整流子Cに接続されたままであるが、右側のブラシは整流子Aから整流子Eに切り替わる。この場合、コイルe, a, bの直列接続とコイルd, cの直列接続が並列に接続された回路となり、電圧に関する方程式は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} E_{eab} &= V_0 - (R_e + R_a + R_b)I_{eab} - \frac{d\Psi_e}{dt} - \frac{d\Psi_a}{dt} - \frac{d\Psi_b}{dt} = 0 \\ E_{dc} &= V_0 - (R_d + R_c)I_{dc} - \frac{d\Psi_d}{dt} - \frac{d\Psi_c}{dt} = 0 \\ I_0 &= I_{eab} + I_{dc} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

さらにFig.1(c)に示すpattern3では、右側のブラシはpattern2同様に整流子Eに接続されたままであるが、左側のブラシは整流子Cから整流子Bに切り替わる。この場合、コイルe, aの直列接続とコイルd, c, bの直列接続が並列に接続された回路となり、電圧に関する方程式は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} E_{ea} &= V_0 - (R_e + R_a)I_{ea} - \frac{d\Psi_e}{dt} - \frac{d\Psi_a}{dt} = 0 \\ E_{deb} &= V_0 - (R_d + R_c + R_b)I_{deb} - \frac{d\Psi_d}{dt} - \frac{d\Psi_c}{dt} - \frac{d\Psi_b}{dt} = 0 \\ I_0 &= I_{ea} + I_{deb} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

さらにFig.1(d)に示すpattern4では、左側のブラシはpattern3同様に整流子Bに接続されたままであるが、右側のブラシは整流子Eから整流子Dに切り替わる。この場合、コイルd, e, aの直列接続とコイルc, bの直列接続が並列に接続された回路となり、電圧に関する方程式は次式で表される。

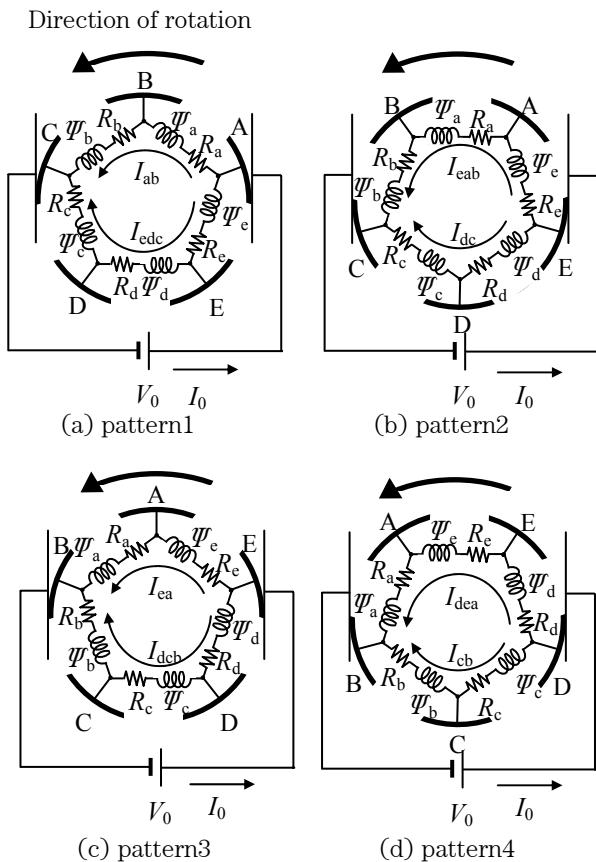


Fig.1 Pentagon connection.

$$\left. \begin{aligned} E_{dea} &= V_0 - (R_d + R_e + R_a)I_{dea} - \frac{d\Psi_d}{dt} - \frac{d\Psi_e}{dt} - \frac{d\Psi_a}{dt} = 0 \\ E_{cb} &= V_0 - (R_c + R_b)I_{cb} - \frac{d\Psi_c}{dt} - \frac{d\Psi_b}{dt} = 0 \\ I_0 &= I_{dea} + I_{cb} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

以上のように、回転子が1回転する間に切り替えが10回行われる。

2-1-3 トルクの算出法

回転子に働くトルクは節点力法を用いて求めた。節点力法は、磁性体内の各節点に働く力の和を求めることにより磁性体全体に働く力を計算する方法であり、電磁力 \mathbf{F} は次式で表される。

$$\mathbf{F} = \sum_{\Omega} \mathbf{F}_n, \quad \mathbf{F}_n = - \int_V (\mathbf{T} \operatorname{grad} N_n) dV \quad \dots\dots (6)$$

ここで、 Ω は力を求めたい物体に含まれる全節点である。 \mathbf{F}_n は有限要素法における各節点 n に働く力であり、 V は節点 n を含む要素の総体積、 \mathbf{T} は応力テンソル、 N_n は節点 n を含む要素の補間関数である。

節点力法は、マクスウェルの応力法のような閉曲面の設定が不要で、局所的な電磁力の検討が容易であるという利点を有する³⁾。

2-2 解析モデルおよび解析条件

Fig.2に解析モデルを示す。図は空気とコイルを除き1/2領域で示しているが、実際の解析領域は1/1領域である。回転子領域は、コイル、コミュータプレートおよびシャフトである。Fig.3に三次元分割図を示す。2-1-2節で述べたように、機械角36°毎に電圧（定格電圧3.0V）を印加するコイルの組み合わせを切り替えた。永久磁石には、x軸方向に一様に0.6Tの磁化を与えた。

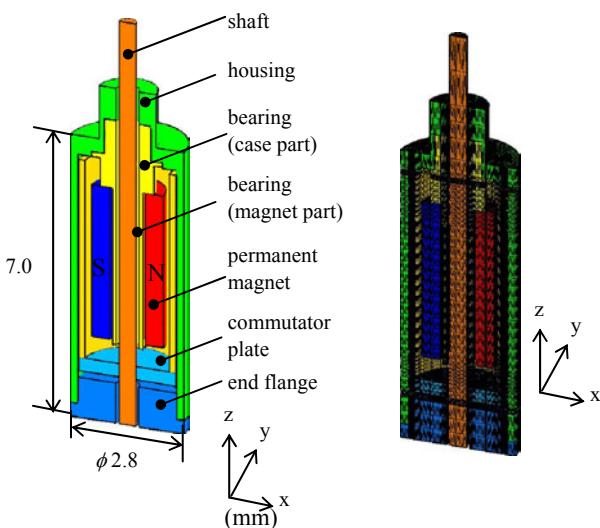


Fig.2 Analyzed model.

Fig.3 3-D finite element mesh.

Fig.4に本報告で検討した材質条件を示す。ハウジングはどの条件においても磁性体であり、シャフト、軸受ケース部および軸受磁石部の材質を図に示す5パターンの条件において解析を行い、電流特性およびトルク特性を比較した。

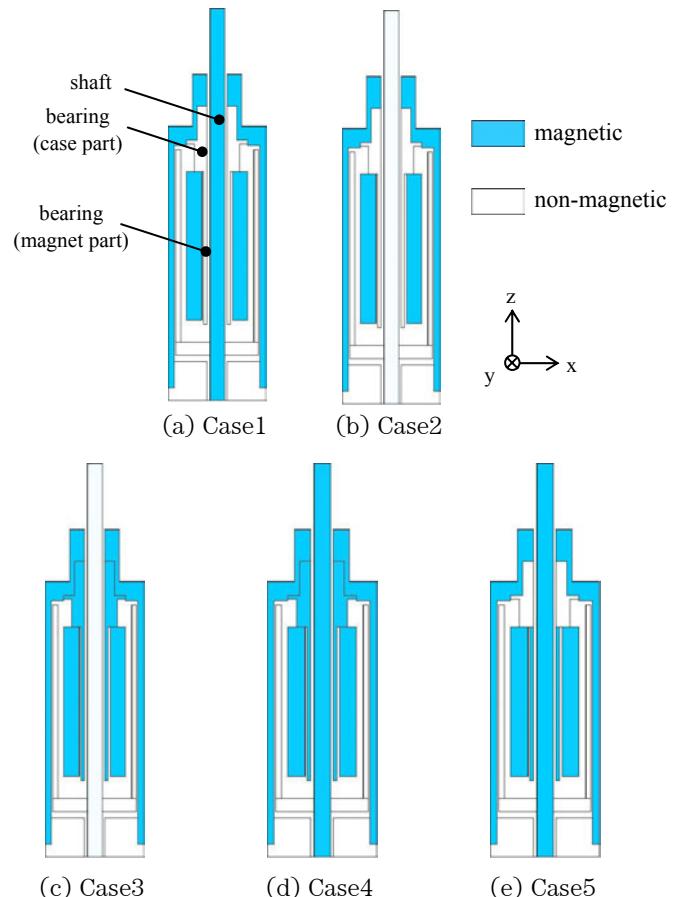


Fig.4 Material conditions.

Table 1に解析条件を示す。

Table 1 Analysis conditions.

Number of pole pairs	1
Magnetization of permanent magnet (T)	0.6
Rotation speed (min^{-1})	30,000
Voltage (V)	3.0
Coil resistance (Ω/coil)	66.7
Number of coil turns (turn/coil)	77

2-3 解析結果と検討

Fig.5に磁束密度ベクトル分布 ($y=0\text{mm}$ 断面) を示す。Case1, 2では磁束がシャフト中を横切るのに対し、Case3～5では磁束がシャフト中を横切らないことがわかる。これは、Case3～5では磁性体である軸受磁石部を磁束が通るためである。なお、Case4, 5ではシャフトが磁性体であるがシャフト中を磁束が横切らないの

は、軸受磁石部とシャフトの間にギャップがあるためである。

また、Case3, 4ではCase1, 2, 5と比較して、軸受ケース部が磁性体であるため軸受ケース部の磁束密度が高くなる。さらに、Case5は他のモデルと比較して、軸受ケース部と軸受磁石部との境界を通る磁束が少ないことがわかる。これは、軸受磁石部が磁性体であり、かつ永久磁石の上面の高さと軸受磁石部の上面の高さが等しいため、軸受ケース部と軸受磁石部との境界においてz軸方向へ通る磁束が少なくなったためであると考えられる。

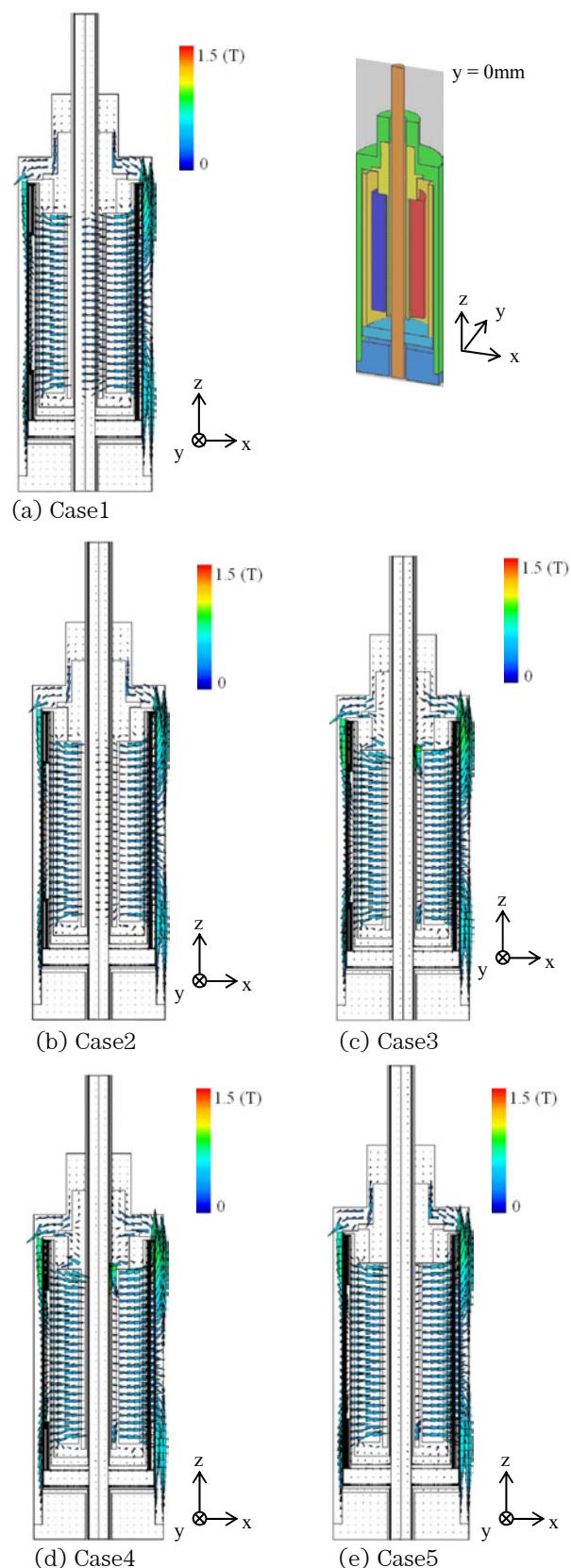


Fig.5 Distributions of flux density vectors ($y=0\text{mm}$) .

Fig.6に磁束密度ベクトル分布（永久磁石中央断面 ($z = 4\text{mm}$)) を示す。Case1, 2では磁束がシャフト中を横切るのに対し、Case3～5は、軸受磁石部が磁性体であり、かつ、シャフトと軸受磁石部間にギャップがあるため、シャフトを避けるように軸受磁石部を磁束が通っている。また、Case3～5はCase1, 2と比較してハウジングの磁束密度が高い。これは、軸受磁石部を磁性体にすることによって、永久磁石、ハウジング、軸受磁石部を通る磁気回路の抵抗が小さくなつたためであると考えられる。

Fig.7に電源電流波形を示す。回転子が1回転する間にコイルの切り替えが10回行われるため、電流波形の周期は 36° となる。また、電源電流の平均値は、Case1, 2と比較してCase3～5の方が小さい。さらに、Case2が最も大きく、他の条件よりも逆起電力が小さいことがわかる。

Fig.8にトルク波形を示す。前述と同様に、回転子が1回転する間にコイルの切り替えが10回行われるため、トルク波形の周期は 36° となる。また、平均トルクはCase1, 2と比較してCase3～5の方が大きく、Case2が最も小さい。また、どの条件においてもトルクリップルの大きさはほぼ同じである。

Fig.7, 8より、電源電流の平均値が小さく、平均トルクが大きいCase3～5が効率のよい条件であることがわかる。これは、Case3～5が他の条件と比較して永久磁石、ハウジング、軸受磁石部を通る磁気回路の抵抗が小さくなつたためであると考えられる。また、電源電流の平均値が最も小さいにもかかわらず、平均トルクが大きいことから、コイルによる磁界よりも、永久磁石による磁界の方がトルクに及ぼす影響が大きいと考えられる。

Table 2に解析諸元を示す。

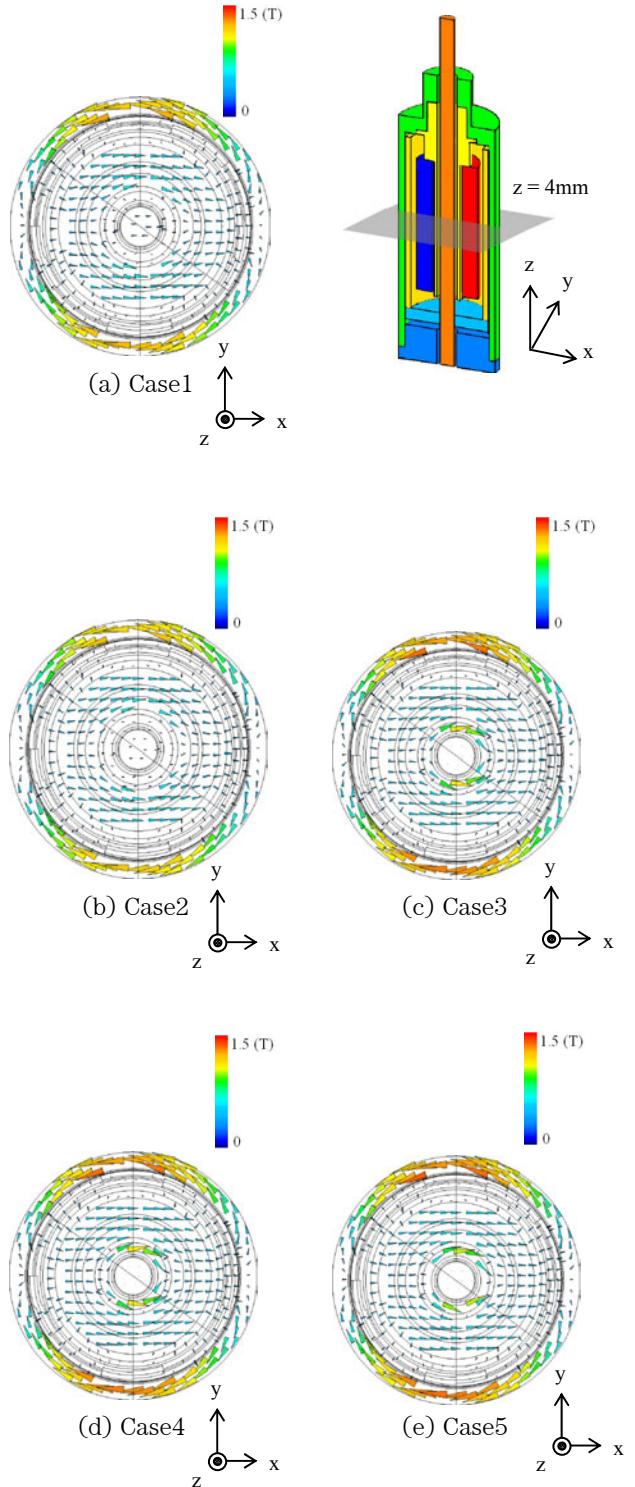


Fig.6 Distributions of flux density vectors ($z=4\text{mm}$) .

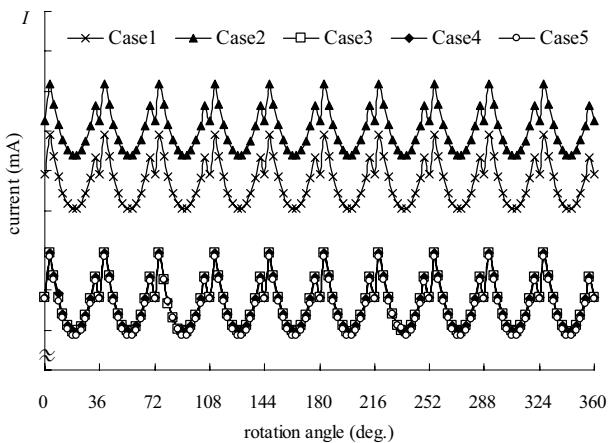


Fig.7 Waveforms of Current.

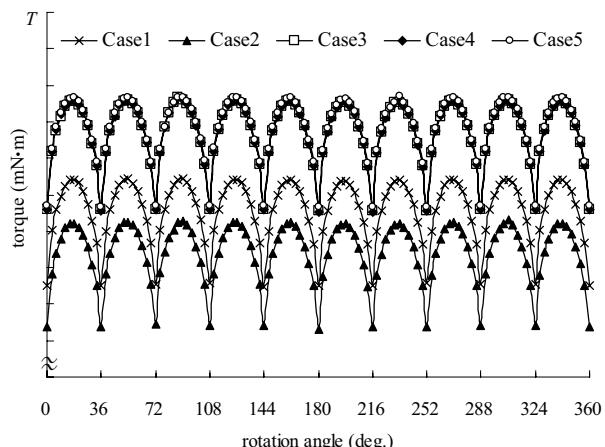


Fig.8 Waveforms of Torque.

Table 2 Discretization data and CPU time.

Number of elements	2,468,880
Number of nodes	422,455
Number of edges	2,913,054
Number of unknown variables	2,847,896
Number of time steps	241
Total CPU time (hours)	265

Computer used: Core2 Duo 2.66GHz (64bit)PC

3.まとめ

本報告では、ペンタゴン結線のコイルを用いた小形コアレスモータを解析対象として、三次元有限要素法を用いて磁界解析を行い、各部位を構成する材質が電

流特性およびトルク特性に及ぼす影響について比較を行った。その結果、軸受磁石部を磁性体で構成することにより、電流値が小さくなり、平均トルクが大きくなることがわかった。

謝辞

本研究の実施において、共同研究先である岐阜大学河瀬・山口研究室に多大なご指導、ご支援を頂きましたことを深く感謝いたします。また、関係者の方々に尽力いただきました。ここに深くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 河瀬順洋、中橋鮎香、他：電気学会回転機研究会資料、回転機研究会 RM-08-108～130, (2008) , pp.7-11.
- 2) 河瀬順洋、他：電気学会回転機研究会資料、回転機研究会 RM-07-49～69, (2008) , pp.49-52.
- 3) 伊藤昭吉、河瀬順洋：最新有限要素法による電気・電子機器のCAE, 森北出版, (2000) .
- 4) A. Kameari: Local force calculation in 3D FEM with edge elements, International Journal of Applied Electromagnetics in Materials, vol. 3, pp.231-240 (1993).