三次元有限要素法による ハイブリッド形ステッピングモータのトルク特性解析

正員 河瀬 順洋* 正員 山口 忠*
 学生員 増田 達哉* 正員 百目鬼 英雄**
 非会員 小堀 勝**

Torque Characteristics Analysis of Hybrid Stepping Motor Using 3-D Finite Element Method

Yoshihiro Kawase*, Member, Tadashi Yamaguchi*, Member, Tatsuya Masuda*, Student Member,
 Hideo Domeki**, Member, Masaru Kobori**, Non-member

Hybrid stepping motors are widely used for various electric instruments because of high torque, high accuracy and small step angle. It is necessary for the optimum design of hybrid stepping motors to analyze torque characteristics accurately. In this paper, a hybrid stepping motor is analyzed using the 3-D finite element method taking into account the rotation of the armature. The effects of the interlaminar gap in the core on the torque characteristics are clarified using the gap elements. The validity of our method is clarified by comparison between the calculated results and measured ones.

キーワード：三次元有限要素法，ハイブリッド形ステッピングモータ，ギャップ要素

Keywords: 3-D finite element method, hybrid stepping motor, gap element

1. はじめに

ハイブリッド形ステッピングモータは高精度、高トルク、小ステップ角で駆動するといった特徴があるため、FA 機器等に広く使用されている。ステッピングモータは低いパルス周波数で駆動するとステップ状に回転・停止を繰り返す。このときの無負荷時の停止点を安定点と呼ぶ。ステッピングモータは、この安定点からずらそうとする外力に対して強い反発力を示すので、フィードバックを用いない位置決め制御が容易であるという特徴を有している⁽¹⁾。また、無励磁状態での位置トルクであるディテントトルク特性を求めることは、位置決め制御に重要である。さらに、ステッピングモータの特性の一つにスティフネストルク特性がある。これは、任意のコイルに定格電流を流した状態での位置トルクであり、励磁状態における安定点近傍での保持トルクを知る上で重要である⁽²⁾。しかしながら、ハイブリッ

ド形ステッピングモータは複雑な形状を有し、また、軸方向に磁化された磁石を有するため、磁束が三次元的に分布する。そのため、本質的に三次元磁界解析が必要であるが、これまでに数値解析的検討が行われた例のほとんどは二次元もしくは近似三次元であり⁽³⁾⁽⁴⁾、三次元解析が望まれている。また、ハイブリッド形ステッピングモータのように積層鉄心を用いており、積層鉄心に垂直な磁束の成分を多く有するモデルでは、積層鉄心間のギャップ（層間ギャップ）の影響が大きいと考えられる。

そこで我々は、層間ギャップの影響をギャップ要素を用いて考慮した三次元有限要素法を用いて、ハイブリッド形ステッピングモータのディテントトルク特性およびスティフネストルク特性を解析し、計算値と実測値を比較検討した。以上より、ハイブリッド形ステッピングモータのように磁束の積層方向成分が多いモデルでは、ギャップ要素⁽⁵⁾を用いて積層鉄心間にある層間ギャップの影響を考慮する本手法は有用であることを明らかにした。

2. 解析手法

〈2・1〉有限要素法による電流分布解析 後述の解析モデルではコイル端を有するため、次式を基礎方程式とする電流分布解析を行い、コイル中を流れる励磁電流の方向ベクトルを求める⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

* 岐阜大学工学部応用情報学科

〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1

Department of Information Science, Gifu University.

1-1, Yanagido, Gifu-shi, 501-1193

** オリエンタルモーター（株）技術研究所

〒277-8530 千葉県柏市篠籠田 1400

Research & Development Center, Oriental Motor Co., Ltd.

1400, Shikoda, Kashiwa-shi, Chiba, 277-8530

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\sigma} \operatorname{rot} \mathbf{T}\right)=0, \quad \mathbf{J}_0=\operatorname{rot} \mathbf{T}, \quad \oint \mathbf{T} d s=I_0$$

..... (1)

ここで、 σ は導電率、 $\mathbf{T}$ は電流ベクトルポテンシャル、 $\mathbf{J}_0$ は励磁電流密度、 I_0 は電流値である。

〈2・2〉有限要素法による磁界解析 磁界解析のための基礎方程式は、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⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

$$\operatorname{rot}(\nu \operatorname{rot} \mathbf{A})=\mathbf{J}_0+\nu_0 \operatorname{rot} \mathbf{M} \cdots \cdots (2)$$

ここで、 ν は磁気抵抗率、 ν_0 は真空の磁気抵抗率、 $\mathbf{J}_0$ は強制電流密度、 $\mathbf{M}$ は磁化である。

マトリクスの解法には ICCG 法を使用し、鉄心の非線形性の考慮にはニュートン・ラプソン法を使用した。

〈2・3〉積層方向の磁気特性のギャップ要素を用いた解析法 積層鉄心を用いたモータを精度良く解析するためには、積層鉄心間にある層間ギャップの影響を考慮すべきである。しかし、有限要素法を用いてこのギャップを表現しようとすると、極端に扁平な要素ができる。このため、従来、積層鉄心間にある層間ギャップは無視されて解析されてきた。しかし、ハイブリッド形ステッピングモータのように積層鉄心に垂直な磁束の成分を多く有するモデルでは層間ギャップを無視することができない。そこで、ギャップ長が非常に小さな場合には、ギャップ中の磁束がほぼ垂直に通ると仮定すると、三次元ギャップ領域を二次元要素（これをギャップ要素と呼ぶ）で近似することができ、扁平な要素を作ることなく解析を行うことができる。

(2) 式にガラーキン法を適用し、ベクトル公式およびストークスの定理を用いて変形すると、ギャップ要素の残差方程式は次式となる⁽⁵⁾。

$$G_i=D \iint_{S_g} \operatorname{rot} N_i\left(\nu_0 \operatorname{rot} \mathbf{A}\right) d S \cdots \cdots (3)$$

ここで、 D はギャップ長、 N_i は補関数、 S_g はギャップ要素に対応する領域を示す。

ギャップ要素を用いて解析する場合は、通常の係数マトリクスに、(3) 式を離散化することによって得られたギャップ要素に関する係数マトリクスを追加するだけでよい⁽⁵⁾。

3. 解析モデルおよび解析条件

図 1 に、解析に用いた二相ハイブリッド形ステッピングモータを示す。解析領域は、モデルの周方向の対称性により全体の 1/2 とした。回転子部分には、50 枚の小歯がついており、半ピッチずれた上下 2 枚の鉄心に z 軸方向に磁化された永久磁石を有する構造となっている。一方、固定子は 8 スロットとなっており、ティース先端に等間隔ピッチ (7.2 度) の小歯を有している。本ステッピングモータを二相バイポーラ駆動で制御する場合、1 電気角を 4 等分するため、機械角 1.8 度 ($=7.2/4$) がステップ角となる。また、固定子の直径が 86 mm であるのに対し、エアギャップ

(b) stator

(c) rotor

(i) upper core (ii) lower core
(d) rotor position (rotation angle = 0 deg.)

図 1 解析モデル (1/2 領域)

Fig. 1. Analyzed model.

図 2 分割図

Fig. 2. 3-D meshes.

図3 解析に用いたギャップ要素の挿入位置

Fig. 3. Insert positions of gap elements.

は $75\mu\text{m}$ と非常に小さくなっている。図2に分割図を示す。要素数は約120万である。エアギャップ部は径方向には6分割、周方向に1800分割している。

回転子鉄心および固定子鉄心は、けい素鋼板を z 軸方向に積層しているため、ギャップ要素を考慮した解析時には図3に示すように、積層方向の要素間毎にギャップ要素を設けた。すなわち、回転子鉄心および固定子鉄心の積層鉄心全体に対する鉄心の割合(占積率:本モデルでは96%)を考慮して、固定子鉄心ではギャップ長 0.09mm のギャップ要素を4つ、また、上部および下部の回転子鉄心ではギャップ長 0.10mm のギャップ要素をそれぞれ2つずつ設けた。なお、永久磁石の磁化は 1.26T とした。

4. 解析結果

〈4・1〉ディテントトルク特性解析 本節では、無励磁状態で回転子を回転させ、位置決め制御に重要であるディテントトルク特性を求めた。また、ギャップ要素を設けた場合と設けない場合におけるディテントトルク特性の計算値と実測値の比較を行った。図4にギャップ要素を設けない場合の、また、図5にギャップ要素を設けた場合の磁束密度ベクトル分布を示す。

図よりギャップ要素を設けることにより z 軸方向への磁束が通りにくくなり、固定子鉄心により多くの磁束が回り込んでいることがわかる。

図6にディテントトルク特性を示す。図より、ギャップ要素を設けた場合も設けない場合も実測値と同様の傾向を表していることがわかる。本モデルでは、無励磁の状態でも回転子および固定子の小歯の磁束密度が高く飽和状態にあるため、ギャップ要素の有無による小歯周辺の磁束の変化はほとんどなく、このことから、ディテントトルクはギャップ近傍の磁束分布の影響が大きく、固定子鉄心中の磁束分布にはほとんど依存しないので、ギャップ要素の影響が現れないと考えられる。したがって、本モデルではギャップ要素の有無はディテントトルクにはほとんど影響しないが、固定子中の磁束分布に関しては大きく影響していることがわかる。

〈4・2〉スティフネストルク特性解析 本節では、励磁状態における安定点近傍での保持トルクを知る上で重要であるスティフネストルク特性を求めた。図7に励磁電流の方向を示す。本解析では、まず、コイルAでのみ励磁を行

(a) O-A section

(b) O-B section

(c) section α ($z = 4.5\text{mm}$)

(d) section β ($z = 0.0\text{mm}$)

(e) section γ ($z = -4.5\text{mm}$)

図4 磁束密度ベクトル分布 (ギャップ要素なし)

Fig. 4. Distributions of flux density vectors (without gap elements, rotation angle = 0deg.).

(a) O-A section

(b) O-B section

(c) section α ($z = 4.5$ mm) (d) section β ($z = 0.0$ mm) (e) section γ ($z = -4.5$ mm)

図5 磁束密度ベクトル分布 (ギャップ要素あり)
Fig. 5. Distributions of flux density vectors (with gap elements, rotation angle = 0 deg.).

図6 ディテントトルク特性

Fig. 6. Detent torque characteristics.

図7 励磁電流の方向

Fig. 7. Directions of exciting currents.

う一相励磁時のスティフネストルク特性を、ギャップ要素を設けた場合と設けない場合において求め、実測値との比較を行った。次に、図7のコイルAとコイルBで励磁を行う二相励磁についてもスティフネストルク特性を求めた。

図8にギャップ要素を設けない場合の、また、図9にギャップ要素を設けた場合の一相励磁時における磁束密度ベクトル分布を示す。図より、ディテントトルクの解析時と同様に、ギャップ要素を設けることにより z 軸方向への磁束が通りにくくなり、固定子鉄心により多くの磁束が回り込んでいることがわかる。また、ギャップ要素を設けない場合では、電流を流すことによってコイルが作る磁界の影響を受け、ディテントトルク解析時の固定子鉄心内 (図4(c)~(e)) に対応する断面 (図8(c)~(e)) の磁束密度ベクトルの向きがそれぞれ反転していることがわかる。一方、ギャップ要素を設けた場合には、ディテントトルク解析時の回転子鉄心の z 軸方向中央 (図5(d)) に対応する断面 (図9(d)) ではコイルが作る磁界の影響を受け、磁束密度ベクトルの向きが反転するが、ディテントトルク解析時の上部および下部の回転子鉄心と向かい合う固定子鉄心 (図5(c) および (e)) に対応する断面 (図9(c) および (e)) では、磁束密度ベクトルの向きが反転することではなく、部分的に磁束密度ベクトルの大きさが変化していることがわかる。図10に一相励磁時におけるスティフネストルク特性を示す。図より、ギャップ要素を設けないと計算値と実測値がかなり異なるが、ギャップ要素を設けることにより計算値が実測値とよく一致することがわかる。このトルク特性の違いは、励磁電流により磁束は固定子鉄心に発生するので、固定子

図 8 磁束密度ベクトル分布 (ギャップ要素なし)
Fig. 8. Distributions of flux density vectors (without gap elements, rotation angle = 0 deg.).

図 9 磁束密度ベクトル分布 (ギャップ要素あり)
Fig. 9. Distributions of flux density vectors (with gap elements, rotation angle = 0 deg.).

図 10 スティフネストルク特性 (一相励磁時)

Fig. 10. Stiffness torque characteristics (1-phase excitation).

図 11 スティフネストルク特性 (二相励磁時, ギャップ要素あり)

Fig. 11. Stiffness torque characteristic (2-phase excitation, with gap elements).

図 12 入力電流波形

Fig. 12. Input current waveforms.

鉄心中の磁束分布がトルクに大きく影響するためと考えられる。したがって、スティフネストルクの値を正確に求めるためには、層間ギャップを考慮する必要があることがわかる。

図 11 にギャップ要素を設けた場合の二相励磁時におけるスティフネストルク特性を示す。

〈4・3〉 定常トルク特性解析 本節では、電流入力を行った場合の定常トルク特性について解析を行った。図 12 に入力電流波形を示す。図に示すように、90 度位相がずれている二相正弦波交流電流を電気角と機械角が同期するようにコイルに流した。図 13 に定常トルク波形を示す。図

図 13 定常トルク特性

Fig. 13. Torque characteristic at steady state.

表 1 解析諸元

Table 1. Discretization data and CPU time.

number of elements	1,196,514
number of nodes	218,148
number of edges	1,451,997
number of unknowns	1,341,162
average number of non-linear iterations	15
time steps	9
CPU time [hours]	269

Computer used: Pentium 4 1.9GHz PC

に示すように、機械角 1.8 度周期のディテントトルクの高調波成分が現れており、妥当な結果であることがわかる。また、平均トルクは 0.246 N·m, 最大トルクは 0.307 N·m となった。表 1 に解析諸元を示す。

5. まとめ

三次元有限要素法を用いて、ハイブリッド形ステッピングモータを解析対象とし、ディテントトルク特性およびスティフネストルク特性を解析し、計算値と実測値との比較を行った。本モデルにおいて、ディテントトルク特性については、ギャップ要素の有無にかかわらず、実測値と同様の傾向を表した結果が得られたが、固定子鉄心中の磁束分布に関しては大きく異なることがわかった。また、スティフネストルク特性については、ギャップ要素を設けないと計算値と実測値がかなり異なり、ギャップ要素を設けるとよく一致することがわかった。したがって、本モータのように磁束の積層方向成分が多いモデルでは、ギャップ要素を用いる本解析手法は有用であることが明らかになった。(平成 14 年 4 月 18 日受付, 平成 14 年 10 月 24 日再受付)

文 献

- (1) Y. Sekine, et. al.: "Electrical Engineering Handbook", *IEE Japan* (1988) (in Japanese)
関根泰次他: 電気工学ハンドブック, 電気学会 (1988)
- (2) 百目鬼英雄: ステッピングモータの使い方, 工業調査会 (1993)
- (3) M. Jufer and G. Heine: "Hybrid Stepping Motor - 25 Years of Development", *Proceedings of Twenty-Fifth Annual Symposium Incremental Motion Control Systems & Devices*, pp.307-316 (1995)
- (4) Ch. Kuert and M. Jufer: "Modeling of Hybrid Stepping Motors", *Proc. ICEM2000*, pp.1461-1465 (2000)
- (5) N. Nakata, N. Takahashi, K. Fujiwara, and Y. Shiraki: "3-D Magnetic Field Analysis Using Special Elements", *IEEE Trans. Mag.*, Vol.26, No.5, pp.2379-2381 (1990)
- (6) Y. Kawase and S. Ito: "New Practical Analysis of Electrical and Electric Apparatus by 3-D Finite Element Method", Morikita Publishing Co. (1997) (in Japanese)
河瀬順洋・伊藤昭吉: 最新三次元有限要素法による電気・電子機器の実用解析, 森北出版 (1997)
- (7) S. Ito and Y. Kawase: "Computer Aided Engineering of Electric and Electronic Apparatus Using Finite Element Method", Morikita Publishing Co. (2000) (in Japanese)
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)

河 瀬 順 洋

(正員) 1956年4月24日生まれ。1981年3月岡山大学大学院電気工学専攻修士課程修了。同年4月同大学電気工学科助手。1985年4月岐阜大学工学部電気工学科助手。1988年6月同学部電子情報工学科助教授。1997年11月同学部応用情報学科教授, 現在に至る。工学博士。1985年電気学会論文賞, 1989年電子情報通信学会東海支部創立50周年記念奨励賞受賞。IEEE 会員他。

山 口 忠

(正員) 1968年7月3日生まれ。1996年3月岐阜大学大学院工学研究科電子情報システム工学専攻博士後期課程修了。同年4月中部大学電気工学科助手。1998年4月同講師。1999年10月岐阜大学工学部応用情報学科講師, 現在に至る。工学博士。IEEE 会員他。

増 田 達 哉 (学生員) 1977年11月20日生まれ。2000年3月岐阜大学工学部電子情報工学科卒業。2002年3月岐阜大学大学院工学研究科電子情報工学専攻博士前期課程修了。同年4月愛知電機(株)入社, 現在に至る。

百目鬼 英 雄 (正員) 1953年6月26日生まれ。1977年3月武蔵工業大学電気工学科卒業。1983年オリエンタルモーター(株)入社。現在, 同社技術研究所研究部部長。1988年真空協会技術賞受賞。工学博士。

小 堀 勝 (非会員) 1959年1月6日生まれ。1983年3月筑波大学第1学群自然科学類卒業。同年4月オリエンタルモーター(株)入社, 現在に至る。