三次元磁場解析による各種HB型ステッピングモータ特性解析

正員 榎本 裕治* 非会員 牧 晃司*
 正員 宮田 健治* 終身会員 大西 和夫**
 正員 坂本 正文** 非会員 虻川 俊美**

Characteristics Analysis on Various Kinds of Hybrid Stepping Motors Using 3D Finite Element Method

Yuji Enomoto*, Member, Kohji Maki*, Non-member, Kenji Miyata*, Member, Kazuo Oonishi**, Life Member,
 Masafumi Sakamoto**, Member, Toshimi Abukawa**, Non-member

We have presented a powerful scheme of investigating hybrid stepping motor characteristics by using 3D finite element method. A linear magnetic field analysis is effectively applicable to predict relative performance of several motors in an extremely short computing time. The waveforms of cogging torque by linear and nonlinear analysis resemble each other, while the wave amplitude in the linear analysis is about 2 times larger than one in the nonlinear analysis in the presented example. The overestimation factor of cogging torque is approximately constant for the same material composition.

キーワード：ハイブリッド (HB) 型ステッピングモータ, 三次元磁場解析, コギングトルク, 小歯配列

Keywords: hybrid stepping motor, 3D finite element method, cogging torque, teeth arrangement

1. まえがき

永久磁石ハイブリッド型 (以下 HB 型と呼ぶ) ステッピングモータは, FA 機器や OA 機器の精密位置決め用途に多く使用され, それぞれの方式で高性能化の検討^{(1)~(8)}がなされている。近年では, 3 相駆動方式などが開発^{(7)~(13)}され, インクジェットプリンタ等の OA 家電にも普及が拡大してきている。このため, このモータへの要求は, 位置決めに加え, 一定速度, 高速動作が求められるようになってきており, さらに, 低振動, 低騒音化も重要なポイントとなっている。これらの要求を満たすモータ特性としては,

- ① コイル鎖交磁束が大きく, かつ正弦波状である。
- ② コギングトルクが小さい。
- ③ インダクタンスが小さい。
- ④ 損失, 特に鉄損が小さい。

ことが重要視される。しかし, HB 型ステッピングモータの

磁気回路構成は, 三次元的で複雑であるため簡単に計算することが難しく, ギャップが極端に狭く複雑形状のため試作検討も困難で, 最適形状の検討を行うことができなかった。

モータの電磁気現象を把握して物理現象を定量的に評価し, 設計パラメータの最適化やアイデア創出を行う上で, 有限要素法による磁場解析は極めて有用である。HB 型ステッピングモータでは磁場が三次元的に変化するため, 三次元解析が必須となる。三次元解析は, 要素数が膨大となるため, 計算時間がかかるという問題があったが^{(14)~(16)}, 計算機能力の向上により 20 万要素程度であれば線形解析で数十分/1 ステップ程度で計算が可能となってきた。

本研究は, 三次元磁場解析を用いてのステッピングモータ特性予測計算が実測の特性と一致することを確認し, その特性予測計算をモータ設計に適用する有効な方法を得ることを目的とする。

2. 対象機

本報告の対象機は HB 型ステッピングモータである。一般的に現在の市場において HB 型ステッピングモータは, 2 相機, 5 相機が主流となっている。その性能は, 2 相機は大トルクであるが振動, 騒音が大きく制御性が悪く, 5 相機は, 低トルクであるが, 位置決め精度等の制御性に優れ, 振動, 騒音が少ないという特徴を持っている。3 相機はその中間の特性を有する。50 枚歯の同じ回転子を有する場合

* (株) 日立製作所 日立研究所

〒319-1292 茨城県日立市大みか町七丁目 1 番 1 号
 Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.
 1-1, Omika-cho 7-chome, Hitachi-shi, Ibaraki-ken, 319-1292 Japan

** 日本サーボ株式会社

〒376-0011 群馬県桐生市相生町 3-93
 Japan Servo Co., Ltd.
 3-93, Aioi-cho, Kiryu-shi, Gunma-ken, 376-0011 Japan

の各種ステッピングモータの形状と回路の比較を図1に示す。3相機はコスト面においてトランジスタ数が最も少なくなる構成であるため、優位にある。それぞれのモータは、産業用、OA機器用途の他、低コスト化が問題となる自動車用モータ、家電用モータなど幅広い分野に、用途に合わせて適用範囲が拡大している状況にある。

図2には最も一般的である2相8スロットHB型ステッピングモータの構造を示す。回転子、固定子は積層鋼板で構成され、ともに小歯極を多数持つ構造となっている。固定子と回転子のギャップは製造上問題が無い程度に小さい。回転子は上下のコアで永久磁石を挟み込み、上下のコアは小歯極の1/2ピッチずれた位置関係となっている。このため、永久磁石のN極から出て固定子No.3ポール手前側の回転子コアから出た磁束が固定子側に入り、No.1ポール奥側の回転子コアから永久磁石に戻るという三次元的な磁気

回路を形成する。

3. 三次元磁場解析による特性解析

本章では、2相HB型ステッピングモータを対象として、三次元磁場解析により、コギングトルク、鎖交磁束等のモータ特性を計算する場合の解析条件設定方法、及び実測と計算結果の比較検証結果について述べる。

〈3・1〉 解析条件の検討

(1) メッシュ依存性

まず、HB型ステッピングモータの三次元解析を行うのに必要なメッシュの粗さについて検討を行った。評価項目としてはコギングトルクの計算結果を用いた。コギングトルクの計算は、狭い空気ギャップ部分の磁束密度の計算精度に強く依存する。図3にバーニア構造(後述)を採用した2相HB型ステッピングモータのコギングトルク計算をメッシュの粗さを変更して計算した結果を示す。このモータの実測コギングトルクは約0.9°周期で振動する波形となっているのに対し、粗メッシュ(周方向分割幅0.3°)では周期0.6°のコギングトルク波形となっている。また、周方向分割幅0.225°のメッシュで計算した結果も0.9°周期に近づいているが、歪のある波形となっている。周方向分割幅0.15°にするとコギングトルクの周期は0.9°となり、ほぼ実測の波形と同一の結果が得られた。これより、このモータの解析には、空気ギャップ部分のメッシュ分割幅をコギングトルクの周期の1/6以下にする必要があるといえる。また、空気ギャップ部の分割幅を密メッシュとすると、ステータ、ロータの小歯極先端部も同様に密メッシュにする必要があるが、計算機のメモリ容量、計算速度を考慮して全体の要素数が多くなりすぎないように、不要な部分のメッシュを粗くするなど注意してモデルを作成する必要がある。作成したメッシュ分割図を図4に示す。反転周期境界を用いて全体の1/4をモデル化し、要素数は約14万とした。

なお、コイル鎖交磁束については、ギャップ部のメッシュの粗さに関わらず解析結果がほぼ完全に一致することは確認済である。

Phase	Structure of Stator Core (Pole Number)	Circuit Composition
2 Phase	(8 Pole)	Transistor Number:8
3 Phase	(6 Pole) (12 Pole)	Transistor Number:6
5 Phase	(10 Pole)	Transistor Number:10

図1 各種ステッピングモータの固定子コア形状と駆動回路構成の比較

Fig.1. Comparison of the structure and circuit composition of the various kind of hybrid stepping motors.

図2 HB型ステッピングモータ構造(2相機)

Fig.2. Structure of hybrid stepping motors (2-Phase)

図3 各種分割幅におけるコギングトルク計算結果

Fig.3. Calculation results of cogging torque.

図4 メッシュ分割図

Fig. 4. Finite element model.

(2) 積層方向のモデル化

HB型ステッピングモータでは、三次元的な磁路に磁束が流れるため、積層銅板の積層方向のモデル化が重要である。実際のコアは、表面に絶縁層があり、使用している35A600の珪素鋼板の積層占積率はカタログ値では96%となっている。よって、径方向と積層方向の透磁率の違いをモデル化する必要がある。文献(15)ではギャップ要素によるモデル化を行っているが、コギングトルクに影響は無い結果となっている。しかし、等価ギャップが大きくなると考えると占積率の影響が出ると推測できる。本稿ではコアを異方性材料として積層方向の透磁率のみコア占積率:S.F. (stacking factor) に応じて変更することで近似することにし、扁平な要素を作ることなく解析を行うことにした。

図5にS.F.を変更してコギングトルクを計算した結果を示す。この計算結果は、計算時間短縮のため、材料特性を線形として計算し、比較を行った結果である。

誘起電圧の計算結果、コギングトルクの計算結果ともS.F.に比例して増加する結果となった。実際の積層鉄心のコア占積率は、約95~97%程度であり、この程度でのモデル化が妥当と考える。

(3) 磁石のモデル化

次に磁石のモデル化について検討を行った。磁石は、ステッピングモータ組立後に着磁を行っており、着磁状態にばらつきを持っていると考えられる。また、磁石の材質、製造ロットの違いによっても磁束密度が変化する。そこで、磁石の残留磁束密度の違いを着磁率 (M.R.: Magnetization

図5 コア占積率S.F.を考慮したモータ特性計算結果

Fig. 5. Calculation results of motor characteristics in consideration of S.F.

図6 磁石BH特性の着磁率モデル化

Fig. 6. Permanent magnet modeling.

図7 磁石着磁率を考慮したモータ特性計算結果

Fig. 7. Calculation results of motor characteristics in consideration of magnetization rate.

Rate) として、これを変化させた場合のモータ特性への影響を調査した。磁石の動作領域は線形部分のみのため、線形モデルとした。実際のモデル化は、図6に示すように、傾きを一定として、Y切片を変更して80%~100%の着磁率を検討した。実際の着磁では一様に磁化が弱いことは考えにくい、全体での平均での磁束密度をモデル化するこ

(a) Calculation Result of Cogging Torque

(b) Calculation Result of Induced Voltage

図8 モータ特性計算結果

Fig. 8. Calculation results of cogging torque and induced voltage

図9 線形計算と非線形計算の比較

Fig. 9. Comparison of cogging torque in linear and nonlinear analyses.

図10 最適バーニア角度の計算結果

Fig. 10. Calculation results of the optimal vernier angle of motor.

とにした。この着磁率モデルで計算した磁束密度とコギングトルク、誘起電圧の関係を図7に示す。計算の結果、誘起電圧、コギングトルクは着磁率にほぼ比例して増加することがわかった。このことは、磁束変化量に応じて出力が変化するモータの原理に矛盾が無い。

〈3・2〉モータ特性解析結果 上述した解析条件を用いて2相8スロットHB型ステッピングモータのコギングトルク、誘起電圧を計算し、試作したモータ特性の実測結果と比較した結果を図8に示す。この評価には、基本のコギングトルク成分が比較しやすくするため、バーニア構造を採用していないモータを対象とした。また、計算条件は、図4に示したモデルを用い、ギャップの周方向分割幅を 0.15° 、S.F. = 97%、M.R. = 100%として非線形反復計算を行った。その結果、コギングトルク、誘起電圧とも、周期、振幅、波形形状においてはほぼ実測と同等の結果となった。計算時間は、クロック周波数552MHzのWSを用いて340hr/25ステップを要した。

4. 計算時間短縮化の検討

実際にステッピングモータ設計を行う場合には、歯幅寸法、バーニア角度（後述）、磁石材料などの様々なパラメータを検討し、選定する必要がある。しかし、三次元磁場解析での特性予測が1ケースあたり半月もかかるのでは実際の設計ツールとしては利用不可能である。よって、計算時間を大幅に短縮する必要がある。

計算時間の短縮には、計算機能力向上や要素数の削減が効果的であるが、現在の研究環境、計算条件を大きく変更しないことが望ましい。そこで筆者らは非線形反復計算に時

間がかかっていることに着目し、線形計算のみで計算する方法を検討した。珪素鋼板の材料特性を $\mu_r = 1,000$ の線形モデルとして近似して計算したコギングトルク計算結果を図9に示す。その結果は、非線形モデルで計算した場合に比べて約2倍の振幅となるが、その周期、波形形状は類似していることがわかった。また、その計算時間は7h/25ステップと非線形計算の約1/50であった。

実際の特性を比較評価し、相対的な違いを見る上では線形解析の方が計算時間の面で有利である。また、図9に示したように線形解析と非線形解析の違いはコギングトルク等の絶対値であり、波形形状は類似しているため、線形計算したものに係数（図9の場合は0.5程度）を掛けることでほぼ非線形計算値と同等の結果を得ることができた。この係数は、材料の組合せ、モータ体格等によって決まり、同種のモータでは、この係数によって非線形計算結果に近づくと考えられる。図10に2相8スロットステッピングモータのバーニア角度とコギングトルクの関係を線形モデルと非線形モデルで計算した結果を示す。バーニア角度とは、ステッピングモータのコギングトルクを低減するために回転子の歯ピッチに対して固定子の磁歯ピッチをある角度だけずらして高調波成分を除去する手法を用いる場合の小極歯間角度である。

図10の結果より、コギングトルクが最小となる最適バーニア角度等を求める場合においても、その最適値は線形計

算と非線形計算で共に 6.9 (deg) となり、一致することがわかった。また、全ての結果の絶対値も、線形計算と非線形計算の結果は係数 0.47 で一致した。これは、ギャップ磁束密度の総和が等しく、分布の違いのみの影響であるためと推測する。以上より、HB 型ステッピングモータの高性能化の検討は、線形解析を用いて模擬する手法が有効であるといえる。その際、事前に解析条件による計算値と実測値の係数の把握は重要である。

5. 各種ステッピングモータの解析

〈5・1〉対象機と解析モデル 前章までの検討により、三次元磁場解析を用いることにより、モータ特性の予測が可能であることがわかった。そこで、第 2 章で紹介した多種の HB 型モータの得失比較を三次元磁場解析を用いて行うことにした。回転子の構造、ギャップ幅、固定子外径は全て同一のモータである。モータ解析条件は、2 相機の解析条件と同等とし、ギャップの周方向分割幅を 0.15°, S.F.

図 11 メッシュ分割図 (5 相)

Fig. 11. Finite element model (5-Phase).

図 12 各種モータのコギングトルク計算結果

Fig. 12. Cogging torque calculation results of the various kinds of hybrid stepping motors.

表 1 各種モータの得失比較

Table 1. Comparison of the various kinds of motors.

Motor Type	2P-8S	3P-12S	3P-6S	5P-10S
Element Number	145566	145782	159220	161140
Calculation Time(hr/25step)	340	280	420	380
Cogging Torque T (mN·m)	36	24	26	4.0
Linear Calculation T (mN·m)	79	57	59	6.5
Period of Cogging Torque(deg)	1.8	1.2	1.2	0.72
Induced Voltage E (Vrms)	4.2	1.8	4.1	1.4
Suitable Angle(deg)	6.9	6.9	7.05	—
Measurement Value T (mN·m)	35	20	20	3.0
Measurement Value E (Vrms)	4.375	1.97	4.092	1.216

= 97%, M.R. = 100%として非線形計算によるコギングトルク、誘起電圧の計算を行った。3 相 6 スロット機、5 相 10 スロット機については、境界条件の設定より 1/2 モデルとしたため、要素数削減のために積層方向の要素数を 10 段とし、全体の要素数を 20 万以下とした。モデルの一例として 5 相機のメッシュ分割図を図 11 に示す。

〈5・2〉コギングトルク、誘起電圧解析結果 対象機についてコギングトルクを計算した結果を図 12 に示す。また、計算結果、実測結果による得失比較を表 1 に示す。結果より、対象機のコギングトルク、誘起電圧計算結果は、振幅、周期ともほぼ実測と一致した。また、コア材料の材料特性を $\mu_r = 1,000$ として線形計算を行った結果も、コギングトルクの値は、全てのモデルで同等の係数 (0.5 程度) で非線形計算結果を予測することも確認できた。また、それぞれのモータにバーニア小歯極ピッチを採用した場合のコギングトルク計算でも理論値⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾通りの最適角度となることが確認できた。

得失比較の結果、相数が多くなるほどコギングトルクは小さくでき、5 相機はバーニア無しでもコギングトルクが充分小さいことがわかった。また、誘起電圧の比較から、3 相 6 スロット機は高出力化が期待でき、バーニアによってコギングトルクを小さく出来ることも考慮すると最もモータ性能として優れていると推測できる。

6. おわりに

永久磁石ハイブリッド型ステッピングモータの高性能化を目的として、三次元磁場解析を用いた特性予測計算の妥当性評価と実際の計算を行った。その結果、計算結果が実測の特性と一致することを確認し、各種の HB 型ステッピングモータの評価を実現することができた。また、線形解析結果が、非線形解析結果と一定の係数関係にあることを確認し、高速評価に有効であることが確認できた。

HB 型ステッピングモータ解析を行う場合に必要解析条件設定方法及び、コギングトルク、誘起電圧計算方法に関し下記の知見を得た。

(1) HB 型ステッピングモータのコギングトルク計算では、ギャップ周辺の要素分割を細かくしなければ、実際のモータのコギングトルクを周期、大きさまで高精度に計算できないことがわかった。本研究対象では分割幅をコギングトルク周期の 1/6 以下にすることで実測と一致する。

(2) 本モデルでは積層方向のモデル化は、コア占積率 (S.F.) を考慮し、S.F. = 0.95~0.97 とすることで実測のコギングトルク、誘起電圧と一致する。

(3) 磁石の残留磁束密度の変化 (着磁率) に比例してコギングトルク、誘起電圧などの出力が変化することを三次元の大規模磁場解析によっても計算できることを確認した。

(4) 同一材料の組合せ、同一構造 (モータ体格、ギャップ幅など) のモータにおいては、材料特性を線形として計算した結果は非線形計算と相関関係となる。

(5) 上記の計算条件を設定することで、2 相、3 相、5

相ステッピングモータのコギングトルク、誘起電圧とも実測と同じ周期、大きさの計算結果が得ることができた。
(平成 14 年 11 月 11 日受付, 平成 15 年 2 月 13 日再受付)

文 献

- (1) M. Sakamoto and A. Tozune: "A Method of Correction of Torque Harmonics in Hybrid Stepping Motor", *T. IEE Japan*, Vol.114-D, No.12, pp.1269-1276 (1994-12)(in Japanese)
坂本正文・戸恒 明:「ハイブリッド形ステッピングモータの高調波トルクの低減法」, 電学論 D, **114**, 12, pp.1269-1276 (1994-12)
- (2) 坂本正文:「リング磁石回転子, 積層鉄心形ステッピングモータ」, 日本能率協会, モータ技術シンポジウム A-2-3 (1997)
- (3) 六波羅憲綱・山田 修・水永紀之:「HB 型ステッピングモータの低振動化」, 第 7 回品質工学研究発表大会論文, No.27 (1999)
- (4) T. Watanabe: "Performance Improvement of Stepping Motors", *Proceedings of the 2000 Japan Industry Applications Society Conference*, Vol.1 pp.15-18 (2000)(in Japanese)
渡辺利彦:「ステッピングモータの高性能化」, 平成 12 年電気学会 D 部門全国大会シンポジウム, **1**, pp.15-18 (2000)
- (5) K. Oonishi: "Investigation on Stator Teeth Arrangement for Minimizing Cogging Torque and Linkage Flux Distortion in Hybrid Stepping Motors", *Proc. of the 2000 Japan Industry Appl. Soc. Conference*, Vol.3, pp.1329-1334 (2000) (in Japanese)
大西和夫:「HB 型ステッピングモータのコギングトルクと鎖交磁束歪を最小化するステータ歯配列の検討」, 平 12 電気学会産業応用部門全国大会, **3**, pp.1329-1334 (2000)
- (6) M. Sakamoto, Y. Okumatu, and A. Kawamura: "Discussion on the Relation between the Maximum Speed and the Inductance of Two-Phase HB-Type Stepping Motor", *2001 National Convention Record IEE Japan*, Vol.5, No.26 (2001) (in Japanese)
坂本国弘・奥松美宏・河村篤男:「2 相 HB 形の最高速度との関係についての実験的考察」, 平 13 電気学会全大, 5-026 (2001)
- (7) 坂本正文・戸恒 明:「3 相 HB 形について」, 平 5 電気学会全大, No.898 (1993)
- (8) M. Sakamoto and A. Tozune: "A New Type 3-Phase Stepping Motor", *T. IEE Japan*, Vol.115-D, No.2 (1995-2) (in Japanese)
坂本正文・戸恒 明:「新形式 3 相ステッピングモータ」, 電学論 D, **115**, 2 (1995-2)
- (9) K. Oonishi: "Development of Three-Phase HIB-Type Stepping Motors", *T. IEE Japan*, Vol.116-D, No.5 (1996-5) (in Japanese)
大西和夫・坂本正文:「3 相 HB 型ステッピングモータの開発」, 電学論 D, **116**, 5 (1996-5)
- (10) M. Sakamoto: *Development of New Type 3-Phase Permanent Magnet Stepping Motor*, SMIC, Seoul University (1996)
- (11) 坂本正文:「高分解能 3 相 HB 形ステッピングモータ」, 日本能率協会, モータ技術シンポジウム A-1-3 (1996)
- (12) K. Oonishi: "Investigation on Stator Core Structure in Three Phase Hybrid Stepping Motors", *Proc. of the 2001 Japan Industry Appl. Soc. Conf.*, Vol.1, pp.531-534, (2001) (in Japanese)
大西和夫:「3 相ハイブリッド形ステッピングモータのステータ鉄心構造の検討」, 平 13 電気学会 D 部門全大, No.79 (2001)
- (13) M. Sakamoto: *Characteristics Comparison in Winding Connections for 3-Phase Permanent Magnet Stepping Motor*, SMIC, Tokyo (1999)
- (14) Ki-Chae Lim: "Characteristic Analysis of 5-phase Hybrid Stepping Motor Considering the Saturation Effect", *IEEE Trans. on Mag.*, Vol.37, No.5, pp.3518-3521 (2001-5)
- (15) Y. Kawase, T. Yamaguchi, T. Masuda, H. Domeki, and M. Kobori: "Torque Characteristics Analysis of Hybrid Stepping Motor Using 3-D Finite Element Method", *IEE of Japan*, RM-02-11 (2002) (in Japanese)
河瀬順洋・山口 忠・増田達哉・百目鬼英雄・小堀 勝:「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」, 電気学会回転機研究会研資, RM-02-11 (2002)
- (16) 河瀬順洋:「永久磁石モータのコギングトルク解析技術」, 日本能率協会, 磁気応用技術シンポジウム H3-3 (2002)

榎 本 裕 治 (正員) 1968 年 8 月 4 日生。1987 年 3 月愛媛県立松山工業高等学校電子科卒業。同年 (株) 日立製作所入社。1991 年 3 月日立京浜工業専門学院情報制御工学科研究科卒業。生産技術研究所にて自動化システム, 電機機器の生産技術研究に従事。2001 年 2 月より同社日立研究所勤務。モータの設計, 生産技術に関する研究に従事。精密工学会会員。

宮 田 健 治 (正員) 1957 年 1 月 5 日生。1981 年 3 月東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 修士課程修了。同年 4 月 (株) 日立製作所入社。日立研究所勤務。電磁界数値解析に関する研究に従事。現在, 同所主任研究員。工学博士。日本物理学会会員。

牧 晃 司 (非会員) 1971 年 3 月 13 日生。1995 年 3 月東京大学大学院理学系研究科物理学専攻修士課程修了。1997 年 3 月東京大学大学院理学系研究科物理学専攻博士課程中退。同年 4 月 (株) 日立製作所入社。日立研究所勤務。電磁界数値解析に関する研究に従事。日本物理学会会員。

大 西 和 夫 (終身会員) 1958 年 3 月京都大学工学部卒業。同年 (株) 日立製作所入社。日立研究所, 本社等で回転機とパワーエレクトロニクス関係の研究開発を担当。1985 年に日本サーボ (株) に移り, 研究所長, 常務取締役を歴任。現在同社技術顧問。計測自動制御学会, システム制御情報学会会員。

坂 本 正 文 (正員) 1965 年 3 月群馬大学電気工学科卒業, 同年 4 月, 日本サーボ (株) へ入社。小形同期モータ, 及び, 各種のステッピングモータの開発, 設計に従事し, 現在, 技師長。工学博士。

蛇 川 俊 美 (非会員) 1965 年 3 月秋田県立大館工業高校電気科卒業。同年 (株) 日立製作所入社。多賀工場, 日立研究所, 自動車機器事業部で回転機の研究を担当。1997 年に日本サーボ (株) 研究所に移り, 現在に至る。