ステッピング形サーフェスモータにおける三次元近似解析

正 員 海老原 大 樹 (武蔵工大)

学生員 渡 延 隆 (武蔵工大)

正 員 和多田 雅 哉 (武蔵工大)

Approximated Three-dimensional Analysis of Stepping Surface Motor

Daiki Ebihara, Member, Takashi Watanobe, Student Member, Masaya Watada, Member (Musashi Institute of Technology)

Surface Motor (SFM) was proposed to realize bi-directional direct drive with single body. Static thrust force obtained in the prime design, however, is not sufficient for practical application. Method of numerical analysis for designing the actuator is needed for the improvement and further optimization. Finite element analysis is commonly used for these purposes. Two-dimensional analysis is not applicable for SFM, because the planer distribution of the permanent magnet and the locus of the mover inductor both affect the thrust characteristics. Three-dimensional analysis needs much calculation time and data storage capacity, and is not suitable for iterative calculation in the optimizing process. The intermediate scheme of these analysis is consequently needed.

This paper first describes the basic structure of SFM, and then the limitation of two-dimensional analysis. Approximated three-dimensional analysis is proposed on the basis of these studies. Three-dimensional structure of the inductor, surface distribution of the permanent magnet and the interaction between the inductors and the stator are taken into account in the approximation, and the results of the two-dimensional analysis are corrected. Thrust characteristics calculated by the method are compared with the experimental results, and the accuracy and the feasibility of the scheme are proved.

キーワード：リニアモータ，サーフェスモータ，最適設計，有限要素法，三次元近似解析，2方向駆動

1. ま え が き

従来，機械の直線運動を得るためには，回転型モータとギヤなどに依存した，回転-直線運動変換メカニズムを用いた間接ドライブ方式が主流であった。しかし近年では，OA 機器や FA 機器の仕様の高度化が要求されてきており，この間接ドライブ方式では，可動部の位置決め精度がギヤのバックラッシュなどにより限定されるばかりでなく，経年変化による精度の劣化が生じてしまうなどの問題がある。この対処法として直接的に直線運動が得られるリニアモータの利用が有効となってきたこと，その研究とともに実用化も進んできている⁽¹⁾。

例えば，2方向直線駆動装置の応用として X-Y 駆動システムが挙げられるが，OA 機器の X-Y プロッタ，レコーダや FA 機器における X-Y ステージ，直交座標ロボットなど各方面で利用されている^{(2)~(4)}。この場合において，X, Y 方向の駆動にそれぞれリニアモータを用いた事例も多い。代表的なものとして，空気浮上装置を用いた X-Y

プロッタが製品化された例が報告されている^{(5)~(8)}。この製品はサーフェスモータと呼称されているが，本質的にサーフェスモータとは，1台のモータで平面駆動が可能なものとする。リニア誘導モータを利用して検討された事例もある⁽⁹⁾が，分岐装置を主目的としていたため，サーフェスモータのサーボ性としての位置決め機能については言及されていなかった。

そこで筆者らは，このような状況をふまえ，1台の移動子で平面駆動が可能であり，構造が簡単なサーフェスモータ (Surface Motor, 以下 SFM と略記) を考案し，試作機を製作した⁽¹⁰⁾。また，駆動に際しての供給電流の定式化により，各種の平面動作を行えることも実証されている⁽¹¹⁾。しかしながら，この SFM は推力不足などの諸問題を含んでおり，実用化に向けて改善の必要がある。そこで，解析の面から検討し最適設計を行うことを考えた。そのためには，まず解析手法の確立が必要となる。

SFM の発生推力を解析するにあたっては，有限要素法 (Finite Element Method, 以下 FEM と略記) を用いた磁

界解析⁽¹²⁾を基盤とした。しかし、SFMの磁束は三次元に複雑に分布しているため、従来確立している二次元解析では妥当性が得られなかった⁽¹³⁾。また、最適設計のための解析手法であるので、汎用性という点で計算機容量などの問題⁽¹⁴⁾も考慮しなければならない。

そこで、SFMの最適設計のための解析手法として、三次元解析に準拠した三次元近似解析についての検討を行った。その際、FEMの二次元解析において、SFMの形状、磁界分布を電磁気学的補正として加味した⁽¹³⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁹⁾。さらに、この手法の推力解析としての妥当性について、実験的な検証を行った^{(17)~(19)}。

本論文では、まずSFMの基本構造について述べる。次に、FEMの二次元解析をSFMに適用した場合について述べ、これを基盤とした三次元近似解析の検討について述べる。最後に、基礎実験により三次元近似解析の検証を行い、SFMの最適設計のための解析手法の確立について論議するものである。

図 1 SFMの基本構造
Fig. 1. Basic structure of SFM.

表 1 SFMの仕様
Table 1. Specifications of SFM.

Item		Value [unit]
Stator	Size	160×160 mm
	Pitch τ	4 mm
	Magnet Size	4×4 mm
	Thickness	2 mm
	Material	Nd-Fe-B
	Back Iron Thickness	2 mm
	Material	Fe
Mover	Truck Size	83×59.6 mm
	Material	Bakelite
	Number of Inductors	8
	Inductor Material	Fe
	Number of Turns	900 turn
	Magnetomotive Force	315 A
	Winding Resistance	17 Ω
	Excitation Method	Bipolar
	Stroke (X×Y)	100×116 mm
	Gap Length	0.98 mm

2. サーフェスマータの基本構造

図1にSFMの基本構造を、また表1に仕様を示す。SFMのステータは、バックアイアン上にネオジ鉄ボロン磁石のN極・S極を、交互に格子状に配置した構造となっている。一方、ムーバは8個のインダクタをベークライトの台車に組み込んだ構造となっている。この8個のインダクタは、それぞれ励磁コイルが巻き付けられており、磁気的に独立した配置となっている。ムーバの支持機構としては、X、Y 2組のベアリングレール機構を採用している。SFMの基本動作は、PM型リニアパルスモータの動作原理と同じである⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

3. サーフェスマータにおける二次元解析

SFMの解析手法を確立させるにあたり、まず従来より確立されているFEMの二次元解析をとりあげる。

FEMの二次元解析は、磁気ベクトルポテンシャルを用いて磁束密度分布を求めるものである⁽¹²⁾。SFMの場合、移動子はインダクタを8個搭載しているが、それぞれ磁気的に独立しているので、インダクタ1個を基本解析領域として、そこから移動子全体へと考え方を進める。すなわち、解析領域としては図2のようになる。なお、この二次元解析の設定は、モータの形状などが同図の状態ではY方向に一樣としている。

FEMにより磁束密度分布が求まると、ギャップ中の分布の値を(1)式を用いることにより、インダクタ1個の静推力を求めることができる。(1)式は、マクスウェルの応力式により求められた静推力の計算式である。このとき、離散化電流を考慮した磁束密度により計算する⁽¹⁵⁾。

$$F_x = \frac{1}{\mu_0} \iint B_x B_z dx dy \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 F_x : X方向静推力 [N], B_x : ギャップ中のX方向磁束密度 [T], B_z : ギャップ中のZ方向磁束密度 [T], μ_0 : 真空の透磁率 [H/m]

なお、この二次元解析によって得られる静推力特性は、実測結果と比較して定量的にも定性的にも違っており、

図 2 SFMの解析領域
Fig. 2. Analytical region of SFM.

FEMの二次元解析は、SFMの解析手法として妥当でないことがわかっている⁽¹³⁾。そこで筆者らは、本来複雑にX, Y, Zに分布している磁束による推力への影響を、簡単な(1)式の係数成分に等価置換する方法で論議する。その具体的内容を次章以降に述べる。

4. サーフェスマータにおける三次元近似解析

FEMの二次元解析に妥当性が得られなかったが、計算機容量や計算時間などの問題⁽¹⁴⁾を考慮して、この二次元解析を基盤とした三次元近似を行う。その際、実機と二次元解析の違いを電磁気学的に検討し、近似していく。

近似を行うにあたっては、まず図3に示す実機と二次元解析モデルに着目する。なお、両者とも永久磁石とインダクタ1個について示している。同図(a)は、SFM実機を表わしており、同図(b)は、前章の二次元解析の設定に基づいてモデル化したものである。そこで、同図から、形状、磁束のふるまいについて考慮して三次元近似を行う。検討項目としては、SFMの構成要素を考え、以下の3項とし、磁束密度もしくは磁束で論議する。

- (1) インダクタの取り扱い
- (2) 永久磁石の取り扱い
- (3) インダクタの永久磁石の相互作用

また、以上の論議は変位 $y=0$ が前提となって展開される。しかし、SFMはX-Y駆動モータであるので、Y方向にも駆動する。そこで、二次元解析では取り扱うことが不可能な、変位 y に対する特性についても検討する。

〈4・1〉 インダクタの取り扱い 図3(a)の実機と(b)

図3 実機と二次元解析モデル
Fig. 3. Real machine and 2D analytical model.

の二次元解析モデルの違いにおいて、インダクタの磁氣的ふるまいを加味して、その発生磁束を三次元近似する。ここではその形状、特に起磁力形状に着目する。

図3においてインダクタ起磁力のみに着目すると、図4の簡略モデルで表現できる。なお、論議すべき磁束密度は、ギャップ中の値であるが、インダクタ中心に発生する磁束が、高透磁率材である軟鉄を通して磁極部分にそのまま誘導されていると仮定し、図4に示す位置で検討する。

まず図4における両者の磁束密度を、ビオ・サバルの法則を用いて求める。実機、二次元解析モデルのそれぞれの起磁力を I_r [A]、 I_a [A]とすると、それぞれの発生磁束密度 B_r [T]、 B_a [T]は次のようになる。

$$B_r = \frac{\mu_0 I_r}{2r} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$B_a = \frac{\mu_0 I_a}{\pi r} \quad \dots\dots\dots (3)$$

(2)、(3)式より、近似を行うには、この2式が等しくなればよいので、

$$I_a = \frac{\pi}{2} I_r \quad \dots\dots\dots (4)$$

という関係が得られる。すなわち、解析における起磁力を $\pi/2$ 倍する⁽¹³⁾⁽¹⁶⁾。

〈4・2〉 永久磁石の取り扱い 図3(a)の実機と(b)の二次元解析モデルの違いにおいて、永久磁石周辺の磁束密度分布について三次元近似する。ここでは、二次元解析モデルのY方向の設定に着目する。

図3において、永久磁石のみに着目すると、実機がN極・S極を格子状に配置しているのに対し、二次元解析モデルではY方向に板状の配置となっている。これは、磁束の分布もY方向に一樣であることを表わしており、実

図4 実機と二次元解析モデルの簡略モデル
Fig. 4. Schematic diagrams of real machine and 2D analytical model.

機の磁束密度分布と違うことがわかる。実際に Z 方向磁束密度の Y 方向分布を測定してみると、解析値が一定値をとるのに対し、実測値は設定ギャップにおいて正弦波分布となる⁽¹³⁾。

このような違いは、(1)式における Y 方向積分に關与している。そこで磁束密度の Y 方向分布を正弦波関数として近似を行う⁽¹³⁾⁽¹⁶⁾。

〈4・3〉 インダクタと永久磁石の相互作用 これまでに、インダクタ、永久磁石それぞれの磁束密度について三次元近似を行ったが、ここではその両者の相互関係について近似を行う。

インダクタと永久磁石間に働く磁氣的相互作用を考えるため、実機と二次元解析モデルを片側のインダクタ磁極周辺について簡略化すると、図 5 のようになる。同図(b)より、二次元解析モデルではインダクタ磁極からの磁束が矢印で示したように X 方向のみに分布しているのに対して、同図(a)より、実機では永久磁石の格子状配置に起因して Y 方向に分布する磁束があると考えられる。そこで、この Y 方向に分布する磁束を三次元近似に加味する。

インダクタ磁極の励磁電流が存在しない状況でも、永久磁石磁束の磁氣経路として同様に考えられる。

Y 方向に分布する磁束を考慮するうえで、実機においてギャップ長に対する磁束について検討すると、インダクタの磁極と永久磁石を磁荷に近似することにより、(5)式

(a) 実機

(b) 二次元解析モデル

図 5 片側インダクタ磁極周辺の簡略モデル
Fig. 5. Schematic diagrams around inductor pole.

が得られる⁽¹⁹⁾。

$$\phi \propto \frac{1}{g^2} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、インダクタ変位 $x=0, y=0$ におけるギャップ長 g を、任意の x, y における磁極間距離 r に置き換えると、次式のような関係となる。

$$\phi \propto \frac{1}{r^2} \dots\dots\dots (6)$$

三次元近似に考慮する際、この(6)式の関係を用いて Y 方向に分布する磁束を加味する。まずインダクタと吸引する永久磁石との磁氣的相互作用について、図 6 のような永久磁石上のインダクタから考える。同図は①～⑨で表わした 9 枚の永久磁石とインダクタ磁極を示しており、インダクタが⑤の永久磁石と完全対向状態で安定するものとする。このときインダクタは奇数番号で示した N 極の永久磁石と吸引力が作用し、偶数番号で示した S 極の磁石と反発する。

インダクタと吸引する永久磁石は図 6 において①、⑤、⑦の三つである。この三つの磁石に対し、磁極間距離をそれぞれ r_{i1}, r_{i5}, r_{i7} とすると、①、⑤、⑦の磁石からの磁束 $\phi_{i1}, \phi_{i5}, \phi_{i7}$ の割合は、(6)式から次のように表わされる。

$$\phi_{i1} : \phi_{i5} : \phi_{i7} = \frac{1}{r_{i1}^2} : \frac{1}{r_{i5}^2} : \frac{1}{r_{i7}^2} \dots\dots\dots (7)$$

二次元解析では Y 方向に分布する磁束成分が考慮されていないが、いま、4・1 節での起磁力補正により発生磁束は等しいとすると、二次元解析における Y 方向磁束成分を差し引けばよい。そこで、発生磁束を $\phi_{i1}, \phi_{i5}, \phi_{i7}$ の総和と考え、発生磁束に対する Y 方向磁束成分を差し引いた割合 $\vec{\alpha}$ を求めると、(7)式より次式のようになる。

$$\vec{\alpha} = \frac{\frac{1}{r_{i1}^2} + \frac{1}{r_{i5}^2} + \frac{1}{r_{i7}^2} - \frac{1}{r_{i1}^2} \sin \theta_1 - \frac{1}{r_{i7}^2} \sin \theta_7}{\frac{1}{r_{i1}^2} + \frac{1}{r_{i5}^2} + \frac{1}{r_{i7}^2}} \dots\dots\dots (8)$$

次に、インダクタと吸引している永久磁石に着目し、Y

図 6 インダクタへの磁束
Fig. 6. Flux toward inductor pole.

図 7 永久磁石への磁束
Fig. 7. Flux toward permanent magnet.

方向磁束を考慮する。図 7 において、⑤の永久磁石には、インダクタと②、④、⑥、⑧の永久磁石から吸引力が作用する。⑤の永久磁石との磁極間距離をそれぞれ r_{52} , r_{54} , r_{56} , r_{58} とし、発生磁束に対する Y 方向磁束成分を差し引いた割合 β を計算する。

$$\beta = \frac{\frac{1}{r_{52}^2} + \frac{1}{r_{54}^2} + \frac{1}{r_{56}^2}}{\frac{1}{r_{52}^2} + \frac{1}{r_{54}^2} + \frac{1}{r_{56}^2} + \frac{1}{r_{58}^2}} \dots\dots\dots (9)$$

そして、求めた $\vec{a}$ と β を FEM の二次元解析で計算した磁束密度 $\vec{B}$ に乗じることで、永久磁束とインダクタの吸引による磁束密度成分を求める。さらに反発する磁石においても同様に、(7)式から Y 方向磁束成分を考慮した割合 $\vec{a}$, β を求め、磁束密度に乗じて反発による磁束密度成分を求める。最後に、吸引による磁束密度成分と反発による磁束密度成分を重ね合わせることで三次元近似を行う。

なお、これらの理論ではインダクタも永久磁石も 1 点で近似しているが、実際にはインダクタ磁極、永久磁石表面に関して面積分を行っている⁽¹⁹⁾。

したがって、(1)式の静推力計算式は以下のように表現することができる。

$$F_x = \frac{1}{\mu_0} \iint (a_x \cdot \beta_x \cdot B_x) (a_z \cdot \beta_z \cdot B_z) dx dy \dots\dots\dots (10)$$

＜4・4＞ 変位 y に対する静推力特性 前節までの三次元近似は、変位 $y=0$ を前提としたものであった。しかしながら、SFM は X 方向だけでなく Y 方向にも駆動するため、Y 方向に変位した状態についても考慮する必要がある。そこで、二次元解析では取り扱うことのできない、変位 y に対する特性について考える。

変位 $y=0$, $y=\tau$ におけるインダクタ配置を、それぞれ図 8 (a), (b) に示す。両者を比較すると、インダクタ磁極と対向する永久磁石の極性が反対になっているだけである。同図(a)の変位 $y=0$ の状態で、発生推力としてインダクタに主に作用しているのは $y=0$ で示したライン上の

(a) 変位 $y=0$

(b) 変位 $y=\tau$

(c) 変位 $0 < y < \tau$

図 8 インダクタ配置

Fig. 8. Arrangement of inductor pole.

永久磁石である。また、同図(b)の変位 $y=\tau$ の状態では、 $y=\tau$ で示したライン上の永久磁石である。これに対し、同図(c)の変位が $0 < y < \tau$ の状態では、 $y=0$, $y=\tau$ のライン上の永久磁石双方がインダクタに作用していると考えられる。そこで、変位が $0 < y < \tau$ の静推力特性は、 $y=0$, $y=\tau$ の静推力特性の重ね合わせから求める。

推力の重ね合わせにおいては、変位 y によりその配分の重みを決めることになる。実験的に検証したところ、SFM においては変位 y に比例した配分が適していることがわかった。実際には、変位 $y=0$ における推力を $F_x(0)$, $y=\tau$ における推力を $F_x(\tau)$ とすると、変位 y における推力 $F_x(y)$ は、(11)式により求まる。

$$F_x(y) = \frac{\tau-y}{\tau} F_x(0) + \frac{y}{\tau} F_x(\tau) \dots\dots\dots (11)$$

(a) 実測結果

(b) 解析結果

図 9 変位 $y=0$ における静推力特性
Fig. 9. Static thrust characteristic on displacement $y=0$.

図 10 変位 y -静推力特性

Fig. 10. Static thrust force versus displacement y characteristic.

5. 三次元近似解析の実験的検証

前述した三次元近似解析の理論を用いて静推力解析を行い、その妥当性について実験により検証する。図 9 に変位

$y=0$ における静推力特性を示す。(a)が実測結果、(b)が三次元近似の解析結果である。同図をみると、定量的にも定性的にもほぼ一致していることが確認できる。

次に、変位 y をパラメータとした静推力特性について測定および三次元近似解析を行い、発生推力の変位 y に対する特性を示すと、図 10 のようになる。同図より、実用運転範囲の $\tau/4$ 以内では、10%の誤差程度で一致しており、最適設計としての解析手法としては十分な結果が得られたといえる。よってここに、SFM の最適設計のための解析手法の確立が確認されたと判断できる。

6. あとがき

1 台の移動子で、X-Y 駆動が可能なダイレクトドライブ型 SFM が考案され、試作機が製作された。しかしながら、この SFM は推力不足の問題を含んでおり、その改善のため、解析の面から検討することを考えた。そこで、まず解析手法を確立しなければならないが、SFM の磁束は複雑に分布しており、FEM の二次元解析では妥当性が得られなかった。また、最適設計としての解析手法であるので、計算機容量や計算時間の問題も考慮しなければならない。

そこで、FEM の二次元解析を基盤とした三次元近似解析について検討を行った。その際、SFM の構成要素から、インダクタ、永久磁石、それらの相互作用の 3 項に分類して考え、近似を行った。まずインダクタでは、その形状として特に起磁力に着目して補正を行い、永久磁石では、その磁束密度の Y 方向分布に着目し、正弦波近似を行った。そして、インダクタと永久磁石の相互作用では、両者を磁荷近似することで、二次元解析ではあつかうことのできない Y 方向磁束を考慮した。

またインダクタが Y 方向に変位した場合についても推力の重ね合わせで考え、三次元近似の理論にとりいれた。

以上のような三次元近似解析に対し、実験的に検証を行ったところ、静推力の解析として十分な妥当性が得られ、SFM の最適設計としての解析手法の確立がなされたと判断できた。今後、従来の無駄の多い実験的手法による設計に代わって、この解析手法を用いることで、SFM の推力不足の問題が改善されることが期待される。

最後に、実験装置の製作に多大なる御協力をいただいた信越化学工業(株)の新保恭太郎氏に感謝の意を表する次第である。また、本研究の遂行にあたり、熱心な御討論をいただいた本学 鳥居肅助手、および実験に協力された本学修士課程 1 年 高橋友勝君に謝意を表す。

(平成 6 年 4 月 21 日受付、同 6 年 8 月 11 日再受付)

文 献

- (1) 電気学会リニア電磁駆動システム調査専門委員会：「リニア電磁駆動システムの現状と応用技術」，電気学会技報 (II 部)，No. 314，p. 44 (平成)
- (2) 電気学会磁気アクチュエータ調査専門委員会：「リニアモータとその応用」，p. 104：123 (昭 59)

- (3) 山田：「リニアモータ応用ハンドブック」, p.173; 266; 284 (昭61) 工業調査会
- (4) 正田：「リニアドライブ技術とその応用」, p.64; 200 (平3) オーム社
- (5) B. A. Sawyer: "Magnetic Positioning Drive", U. S. Patent 3, 376, 578 (1968)
- (6) 鴨原：「XY自動製図機における静圧空気軸受」, 精密機械, 50, 807 (昭59-5)
- (7) 電気学会磁気アクチュエータ調査専門委員会：「リニアモータとその応用」, p.104 (昭59)
- (8) 山田：「リニアモータ応用ハンドブック」, p.288 (昭61) 工業調査会
- (9) 大平・川西・正田：「X-Yリニア誘導モータを用いた分岐装置の制御特性」, 電学論D, 108, 469 (昭58-2)
- (10) D. Ebihara & M. Watada: "Study of a Basic Structure of Surface Actuator", *IEEE Trans. Magn.*, 25, 3916 (1989)
- (11) 海老原・和多田・東野：「4相ステッピングサーフェスモータの基本構造とその駆動方式」, 電学論D, 111, 654 (平3-8)
- (12) 中田・高橋：「電気工学の有限要素法」, (昭57) 森北出版
- (13) 海老原・渡延・和多田：「サーフェスモータの特性解析」, 電気学会, 第3回リニアドライブ若手研究者シンポジウム資料, No. 3, p.12 (平3)
- (14) 中田・藤原：「計算機の進歩」, 平成5年電気学会全大, S.13-2
- (15) G. Henneberger, Ph. K. Sattler & D. Shen: "Force Calculation with Analytical Accuracy in the Finite Element Based Computational Magnetostatics", *IEEE Trans. Magn.*, 27, 4254 (1991)
- (16) D. Ebihara, T. Watanobe & M. Watada: "Characteristic Analysis of Surface Motor", *IEEE Trans. Magn.*, 28, 3033 (1992)
- (17) 渡延・和多田・海老原・新保：「サーフェスモータの解析手法」, 日本機械学会, 第5回電磁力関連のダイナミックスシンポジウム, No. 332, p.668 (平5)
- (18) D. Ebihara, T. Watanobe, M. Watada & K. Simbo: "Development of Corrective Method on Surface Motor Analysis", *JIASC'93*, International Sessions of 7th Annual Conference, Proc., J93-27, p.113 (1993)
- (19) 渡延・和多田・鳥居・高橋・新保・海老原：「サーフェスモータにおける3次元近似解析」, 電気学会リニアドライブ研資, LD-94-12, p.9 (平6)

海老原 大 樹 (正員)

1938年11月21日生。62年武蔵工業大学卒業。67年同大学電気工学科助手, 74年同講師, 87年同助教授, 93年4月同教授, 現在にいたる。各種リニアモータの磁界解析および開発に関する研究に従事。工学博士。IEEE 会員, 日本 AEM 学会会員。

渡 延 隆 (学生員)

1968年3月19日生。91年3月武蔵工業大学電気電子工学科卒業。94年3月同大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月(株)リコー入社, 現在にいたる。

和多田 雅 哉 (正員)

1961年9月4日生。84年3月武蔵工業大学電気工学科卒業。同年4月(株)アマダ入社。技術研究所にてリニアアクチュエータの研究開発に従事。88年4月武蔵工業大学電気電子工学科技術員。91年同技士補, 現在にいたる。IEEE 会員, 日本 AEM 学会会員。