3種類の磁性材料からなるリニア電磁ソレノイドの静推力解析

Satatic Thrust Analysis of a Linear Electromagnetic Solenoid Composed of Three Magnetic Materials

山田 一・木原 秀・高橋太喜彦*

信州大学工学部, 長野市若里 500 (〒380)

*高橋電機(株), 岡谷市神明町 2-5-5 (〒394)

H. Yamada, S. Kihara, and T. Takahashi*

Faculty of Engineering, Shinshu University, 500, Wakasato, Nagano 380

*Takahashi Electric Co., Ltd., 2-5-5, Shinmei-cho, Okaya 394

In general, a linear electromagnetic solenoid (LES) is composed of multiple magnetic materials. This paper deals with thrust simulation of LESs, taking account of the magnetization of each magnetic material.

1. Thrust simulation of a standard LES composed of two magnetic materials with almost the same magnetization approximated the measured values within an error of $\pm 4.5\%$. Thrust simulation of a standard LES composed of a single magnetic material approximated the measured values with the same error.

2. Thrust simulation of a gas-interrupted LES composed of three magnetic materials approximated the measured values within an error of $\pm 3\%$. However, thrust simulation a LES composed of a single magnetic material resulted in an error of $\pm 17\%$ with respect to the measured values.

Key words: linear electromagnetic solenoid (LES), FEM, magnetic material, gap, mover, stator

1. ま え が き

リニア電磁ソレノイド (Linear Electromagnetic Solenoid, LES) の有限要素法による推力解析は, 各方面で研究が行われており, 常に「古くて新しい」問題を提供している^{1)~4)}. 一般に, LES は複数の磁性材料で構成されているが, その推力特性は, 1種類の磁性材料からなるものとして解析した例が多い.

本論文では, 複数の磁性材料から構成されている LES を, それぞれの磁性材料を考慮して, FEM を用いて静推力を解析した次の3項目について述べる.

1) 標準形 LES において, すべての磁性材料を考慮したモデルと1種類からなるモデルの静推力特性の計算値と実測値の比較

2) ガス遮断形 LES において, すべての磁性材料を考慮したモデルと1種類からなるモデルの静推力特性の計算値と実測値の比較

3) ガス遮断形 LES の始動推力を向上させるために, ギャップを変更したときの静推力の計算結果

2. 磁性材料の特性と計算方法

2.1 磁性材料の特性

Fig. 1 には, 2種類の LES の数値解析に用いた3種類の磁性材料の初期磁化曲線を示した⁵⁾. 測定試料はすべて同一寸法の環状磁心であり, 励磁巻数, 検出巻数の回数をそれぞれ 200 [回], 30 [回] として, 演算記録計にて求めた.

Table 1 には, 3種類の磁性材料の化学成分を示した⁶⁾. SUM24L (硫黄複合快削鋼) と SPCC-SD (冷間圧延鋼板) は,

Fig. 1 DC magnetization characteristics of three magnetic materials (measured).

Table 1 Principal chemical compositions of three magnetic materials

Item		Magnetic material		
Designation		SPCC-SD	SUM24L	SUS430
Material		Cold rolled steel	Free-cutting steel	Stainless steel
Chemical composition ⁶⁾ [%]	C	≤ 0.12	≤ 0.15	≤ 0.05
	Si	—	—	≤ 1.00
	Mn	≤ 0.50	0.85—1.15	≤ 2.00
	P	≤ 0.04	0.04—0.09	≤ 0.05
	S	≤ 0.045	0.26—0.35	≥ 0.15
	Pb	—	0.10—0.35	0.10—0.30
	Te	—	—	≤ 0.08
B_m^* [T]		1.64	1.58	1.34

*Magnetic field strength $H_m = 5$ [kA/m].

SUS430（フェライト系ステンレス鋼板）と比較して非磁性である炭素、マンガンなどの含有量が少ないために、最大磁界 $H_m=5$ [kA/m] における最大磁束密度 B_m は高い。それらの最大磁束密度は、それぞれ SPCC-SD は 1.64 [T]、SUM24L は 1.58 [T]、SUS430 は 1.34 [T] であった。

2.2 静推力のシミュレーション

LES の静推力-変位特性の数値解析には、FEM でシミュレーションを行った。アクチュエータの解析では、磁気飽和と漏れ磁束が問題となり、それらを考慮できる磁化電流法を用いて、Maxwell の応力式から静推力を求めた。その際磁性材料の磁化特性と電流密度の入力が必要不可欠となる。したがって、Fig. 1 で示した直流磁化特性を B - H 特性から B - $M(B)$ 特性に変換して FEM に入力する。その変換式を以下に示した。

$$M(B) = \frac{B}{\mu_0} - H = \frac{B}{\mu_0} \left(1 - \frac{1}{\mu_r}\right) \quad (0 \leq H \leq H_s) \quad [\text{A/m}] \quad (1)$$

$$M(B) = \frac{B_s}{\mu_0} - H_s (= \text{const}) \quad (H \geq H_s) \quad [\text{A/m}] \quad (2)$$

ここに、 $M(B)$: 初期磁化特性の磁化 [A/m]

B : 初期磁化特性の磁束密度 [T]

μ_0 : 真空の透磁率 [H/m]

μ_r : 材質の比透磁率

H : 磁界の強さ [A/m]

H_s : 飽和磁界の強さ [A/m]

B_s : 飽和磁束密度 [T]

Fig. 2 には、3 種類の B - $M(B)$ 特性を示した。実験では $H=5$ [kA/m] における最大磁束密度を飽和磁束密度として扱った。

LES の静推力を求めるために、以下の計算を行った。

まず、電流により生じる磁束密度 B_1 [T] はビオ・サバールの式から求められる。

$$B_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\Omega} \frac{\mathbf{J} \times \mathbf{R}}{R^3} d\Omega \quad [\text{T}] \quad (3)$$

ここに、 Ω : 電流の存在する領域

$\mathbf{J}$: 起磁力の形状による電流密度 [A/m²]

$\mathbf{R}$: 積分点を起点とした位置ベクトル

B - $M(B)$ 特性と B_1 から各要素の磁化 M [A/m] は、以下の式から求めた。

$$\mathbf{M} = M(B) \frac{\mathbf{B}_1}{B} \quad [\text{A/m}] \quad (4)$$

ただし、等方性磁性体としているので $M(0)=0$ が成立

各要素のベクトルを考慮した磁束密度 $\mathbf{B}$ [T]、推力作用面の推力 $\mathbf{F}$ [N] は以下の式から求められる⁷⁾。

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\Omega} \frac{3(\mathbf{M} \cdot \mathbf{R})\mathbf{R} - R^2\mathbf{M}}{R^5} d\Omega \quad [\text{T}] \quad (5)$$

$$\mathbf{F} = \frac{1}{\mu_0} \int_{\Omega} \left\{ (\mathbf{B} \cdot \mathbf{n})\mathbf{B} - \frac{1}{2} |\mathbf{B}|^2 \mathbf{n} \right\} dA \quad [\text{N}] \quad (6)$$

ここに、 $\mathbf{n}$: 推力作用面の法線ベクトル

A : 推力作用面 [m²]

したがって、LES の静推力 F_s は、上式の推力 $\mathbf{F}$ の可動子進行方向成分の総和となる。

Fig. 2 Characteristics of the flux density B vs. magnetization $M(B)$ for three magnetic materials.

Fig. 3 Structure of a standard LES (mm units).

Table 2 Principal specifications of the standard LES

Item	Value	[unit]
Mass		
Mover	11.7	[g]
Stator	3.2	[g]
Yoke	36.4	[g]
Coil		
Number of turns	4050	
Diameter of wire	Ø0.15	[mm]
Resistance	170	[Ω]
Gap	0.35	[mm]
Power supply	24	[V]

3. リニア電磁ソレノイドの推力シミュレーション

3.1 標準型 LES の静推力特性

自動販売機などの製品払出し装置に汎用品として利用されている標準形 LES の構造は、Fig. 3 に示したように、可動子と固定子には SUM24L を、ヨークには SPCC-SD の計 2 種類の磁性材料が用いられている。この LES を 2 次元静解析で解析するために、軸対称円筒座標系に置き換え、要素数 11,766、節点数 12,000 とした。

Table 2 には、標準形 LES の仕様を示した。この LES の可動子の質量は 11.7 [g] であり、固定子 3.2 [g] と比較してかなり大きくなっている。

Fig. 4 には、定格電流 $I=141$ [mA] における標準形 LES の静推力特性の実測値と計算値の比較を示した。2 種類の磁性材料を考慮した計算値は、実測値と比較して誤差 $\pm 4.5\%$ 以内で

Fig. 4 Characteristics of the static thrust F_s vs. displacement x for the standard LES ($I=141$ [mA]).

Fig. 5 Basic structure of the gas-interrupted LES (mm units).

Table 3 Principal specifications of the gas-interrupted LES

Item	Value	[unit]
Mass	Mover A	9.0 [g]
	Mover B	1.3 [g]
	Stator	12.9 [g]
	Yoke	86.4 [g]
Coil	Number of turns	860
	Diameter of wire	Ø0.40 [mm]
	Resistance	6.5 [Ω]
Gap	0.4	[mm]
Power supply	3	[V]

一致した。

LESが1種類の磁性材料(SUM24L)のみとした計算曲線は、上述の2種類の磁性材料を考慮した計算曲線とほぼ重なってしまった。このことは、LESを構成している可動子(SUM24L)、固定子(SUM24L)、およびヨーク(SPCC-SD)の磁化特性がFig. 2に示してあるようにほぼ同一のときは、LESが1種類の磁性材料から構成されているものとして取扱っても十分に推力シミュレーションができることを意味している。

3.2 ガス遮断形の LES の構造

ガス遮断形 LES は、Fig. 5 に示すような構造となっており、家庭用湯沸し器のガス遮断装置として用いられている。安全面から湯沸し器を使用しているときは常に励磁状態であり、緊急

Fig. 6 Structure of the gas-interrupted LES, used for calculation (mm units).

Fig. 7 Characteristics of the static thrust F_s vs. displacement x for the gas-interrupted LES ($I=400$ [mA]).

時にはバネの力で復帰してガスを止める。また可動子 A、B の間にスプリングを入れて消音化させている。

本 LES は 3 種類の磁性材料、すなわち可動子 A の SUM24L、可動子 B と固定子の SUS430、ヨークの SPCC-SD から構成されている。Table 1 から明らかのように、飽和磁束密度の低い SUS430 が使用されている。

Table 3 には、ガス遮断形 LES の仕様を示した。本 LES は乾電池 3 [V] 駆動であり、可動子は応答性の良さとある程度の振動でも復帰しないように内部を空洞にして、その質量を 10.3 [g] と軽量化している。

3.3 ガス遮断形 LES の静推力特性

Fig. 6 には、ガス遮断形 LES の計算モデルの構造を示した。可動子 A の先端角度は 10° であるため、標準形 LES と同等な形状の可動子では推力作用面が大きくなり、磁化された可動子の復帰にはかなりの推力が必要になる。そのため本 LES は作用面が小さくなるように、可動子に出張りを付けた複雑な構造をしているため、モデルの要素数は、13,984、節点数は 14,227 と比較的多めになった。

Fig. 7 には、定格電流 $I=400$ [mA] におけるガス遮断形 LES の静推力特性の実測値と計算値の比較を示した、まず 3 種類の磁性材料を考慮した計算値は、実測値と比較して誤差 $\pm 3\%$ 以内で一致した。次に磁性材料を 1 種類(SUM24L)のみとした計算値は、実測値に対して誤差 $\pm 17\%$ となった。したがって磁化特性の異なる磁性材料で構成されているガス遮断

Fig. 8 Part of the gas-interrupted LES.

Fig. 9 Dependency of the static thrust characteristics of the gas-interrupted LES on the length of the gaps (calculated, $I=400$ [mA]).

形 LES の場合は、全構成材料の磁化特性を考慮しなければ、十分な推力シミュレーションができないことが明らかとなった。

4. ガス遮断形 LES の推力向上

ガス遮断形 LES では、乾電池駆動のために省電力化が必要になる。起磁力一定のまま形状や材質を変更させて吸引時の始動推力を向上させることは、推力を現状モデルと同じにしたときに励磁電流を低くすることができる可能性がある⁸⁾。しかし、Fig. 7 に示したように磁性材料を SUS430 から SUM24L にしても、吸引時の始動推力はほとんど向上しない。そこでギャップの変更を行った。

Fig. 8 には、ギャップ δ を変えたガス遮断形 LES の部分構造を示した。ギャップのパーマランスは、可動子と固定子間のエアギャップと同様に無視できないほどの大きな値を持つ。し

たがって、そのエネルギーのロスを小さくするために、現状のギャップの長さを 0.4 [mm] から試作可能な 0.065 [mm] まで小さくしたモデルを作成した。

Fig. 9 には、ギャップを変更したガス遮断形 LES の静推力特性（3 種類の磁性材料を考慮）を示した。始動推力にあたる変位 $x=1.4$ [mm] の静推力は、 4.0 [N] から 5.6 [N] と 40% 向上する可能性があることが明らかになった。

5. あとがき

本論文で明らかになった事項をまとめると、以下のようになる。

- 1) 磁化特性がほぼ同一の 2 種類の磁性材料で構成されている標準形 LES の静推力の計算値は、誤差 $\pm 4.5\%$ で実測値に近似した。本 LES を 1 種類の磁性材料から構成しているとした場合も計算誤差は同程度であった。
- 2) 磁化特性がそれぞれ異なる 3 種類の磁性材料で構成されているガス遮断形 LES の静推力の計算値は、誤差 $\pm 3\%$ で実測値と近似した。しかし 1 種類の磁性材料からなる LES とした場合の静推力の計算値は、実測値に対して誤差 $\pm 17\%$ となった。
- 3) 本シミュレーションを用いて、ガス遮断形 LES の可動子とヨーク間のギャップの長さを 0.4 [mm] から 0.065 [mm] に小さくした場合、吸引時の始動推力は、40% 向上する可能性があることが明らかになった。

文 献

- 1) 沢 孝一郎, 鯉淵綱一, 石野裕嗣, 津村高志: 電学論 D, **112**, 45 (1992).
- 2) 河瀬順洋, 村井由宏, 伊藤昭吉: 電学論 D, **109**, 500 (1989).
- 3) 河瀬順洋, 菊池春秀: 電学論 D, **113**, 995 (1993).
- 4) 天沼克之, 榊 陽: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-92-144 (1992).
- 5) 鈴木健治, 脇若弘之, 水野 勉, 宮沢永次郎, 山田 一: 電気学会リニアドライブ研究会資料, LD-94-23 (1994).
- 6) 日本規格協会編: JIS ハンドブック 鉄鋼, p. 545 (日本規格協会, 東京, 1991).
- 7) 野瀬由喜男, 川原敦志, 大戸基道, 梶島武文: 電気学会 静止器・回転機合同研究会資料, SA-92-31, RM-92-66 (1992).
- 8) 山田 一, 木原 秀, 山口昌樹, 中川浩良, 萩原勝夫: 日本応用磁気学会誌, **18**, 539 (1994).

1994 年 10 月 14 日受理, 1995 年 1 月 20 日採録