

円筒状磁石可動形リニア振動アクチュエータの静推力特性

Static Thrust Characteristics of a Cylindrical Moving-Magnet-Type Linear Oscillatory Actuator

高野 豊・黄 于凱・松本好司・水野 勉・山口昌樹*・山田 一

信州大学工学部, 長野市若里 500 (☎380-8553)

*東京農工大学, 東京都小金井市中町 2-24-16 (☎184-8588)

Y. Takano, Y. Huang, K. Matsumoto, T. Mizuno, M. Yamaguchi,* and H. Yamada

Faculty of Engineering, Shinshu University, 500 Wakasato, Nagano 380-8553

*Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16 Nakamachi, Koganei-shi, Tokyo 184-8588

This paper deals with the static thrust characteristics of a cylindrical moving-magnet-type linear oscillatory actuator (LOA). The influences of the LOA size on the static thrust are investigated. The conclusions are as follows: (1) the maximum static thrust of the LOA occurs at $x=2.5$ mm (the thrust constant is 3 N/A); (2) the thrust values calculated by the finite element method (FEM) show good agreement with the measured results, and the error is within 4 percent; and (3) the thrust of the LOA is mainly produced in the mover at the center and at two sides; and (4) the simulation of the static thrust by FEM, only adjusting either the outer diameter of the LOA to within the range from 8 to 16 mm or the diameter of permanent magnet from 3 to 8 mm, shows that the specifications of the prototype LOA are reasonable.

Key words: linear motor, cylindrical moving-magnet-type linear oscillatory actuator, static thrust, mechanical time constant

1. ま え が き

筆者らはリニア振動アクチュエータ (Linear Oscillatory Actuator: 以下 LOA と略す) の小型化と高推力化を目指して研究開発を行ってきた。LOA を可動子の種類で分類すると、コイル可動形、鉄心可動形、磁石可動形に大別される。コイル可動形 LOA は慣性が小さいので、位置決め装置などには適しているが、給電線が必要であり、この給電線の耐久性などの問題が指摘されている¹⁾。磁石可動形 LOA は永久磁石を可動子として用いることにより高推力で小型化が可能である。これまで LOA を駆動源としたコンプレッサやポンプが多く開発されてきた^{1), 2)}。本論文では円筒状磁石可動形 LOA について以下の事項を述べる。

- (1) LOA の磁束分布と静推力分布
- (2) LOA の静推力特性
- (3) LOA の寸法が静推力に与える影響

2. LOA の構造と動作原理

2.1 LOA の構造

Fig. 1 には磁石可動形 LOA の構造を示した。可動子として 2 個の円筒状の永久磁石を使用し、それぞれの N 極が対向するように鋼製のポールピースで連結され、中央を非磁性体のシャフトが貫通している³⁾。固定子には 3 個のコイルが直列に

配列され、中央のコイルと両側のコイルの巻き方向は反対となるように巻かれている。アウトヨークには渦電流を抑制するためにスリットを設けている。

Table 1 には磁石可動形 LOA の主な仕様を示した。外径寸法は $\phi 11 \times 25$ mm であり、体積は 2.5 mL である。アウトヨークの材質は SPCC であり、ポールピースには SUM24L、サイドヨークには非磁性体を使用している。

2.2 LOA の動作原理

Fig. 2 には磁石可動形 LOA の永久磁石から発生する磁束の流れを示した。永久磁石から発生した磁束はポールピースから中央のコイルに流れ、アウトヨーク、両側のコイルを通り、永久磁石へと戻るループを形成している。また同図に示す方向に電流を流すと、フレミングの左手の法則により、コイルに左方向の力が生ずる。コイルは固定されているために反作用の原理により可動子が右方向に動く。静推力 F_s は次式で与えられ

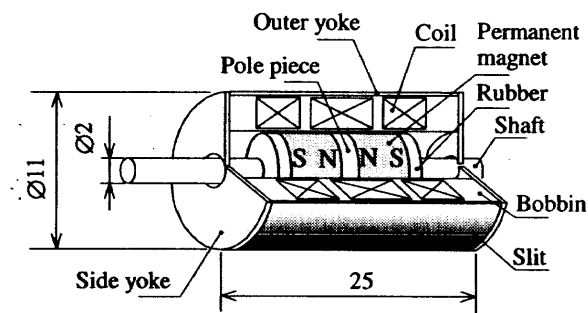


Fig. 1 Structure of a moving-magnet-type LOA (unit: mm).

Table 1 Principal specifications of the LOA

Item	Value	[unit]	Item	Material
Size	$\phi 11 \times 25$	[mm]	Outer yoke	SPCC
Volume	2.5	[mL]	Pole piece	SUM24L
Mass	14.3	[g]		
			Permanent magnet	
Material	NEO REC-34H		Resistance	20.5 [Ω]
Coercive force	827	[kA/m]	Diameter	$\phi 0.15$ [mm]
Residual flux density	1.15	[T]	Stroke	5 [mm]
			Air gap	0.1 [mm]

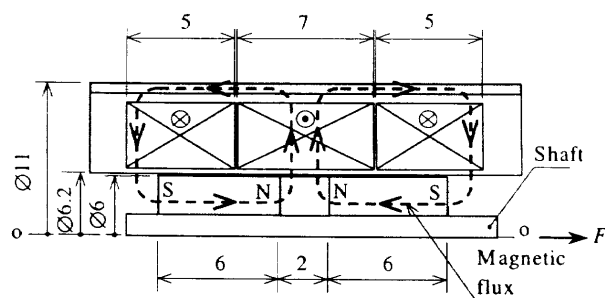


Fig. 2 Magnetic flux of the LOA (unit: mm).

る⁴⁾.

$$F_s = lB \times I \quad [\text{N}] \quad (1)$$

ここに、 l : コイルの長さ [m], B : コイルを通る磁束密度の径方向成分 [T], I : 電流 [A]

よって、コイルに交番電圧を印加することにより可動子に往復運動を与えることができる。

3. LOA の静推力特性

3.1 磁束密度分布と静推力分布

有限要素法 (Finite Element Method: 以下 FEM と略す) を用い、LOA を軸対称、円筒座標のモデルに置き換えて、二次元静磁場解析を行った。Table 2 には磁界解析に使用したモデルの解析条件を示した。

磁石可動形 LOA の推力は式 (1) により、磁束密度の値とコイルに流す電流値を用い、コイルの各要素に発生する推力 F_e は次式により求められる⁵⁾。

$$F_s = \sum_{e=1}^N F_e = \sum_{e=1}^N 2\pi r_e \Delta B_e \times j \quad [\text{N}] \quad (2)$$

ここに、 N : コイル部分の全要素数 = 1548, r_e : 各要素までの半径 [m], Δ : 各要素の面積 = $2 \times 10^{-8} \text{ [m}^2\text{]}$, B_e : 各要素の径方向成分の磁束密度 [T], j : 電流密度 [A/m^2]

Fig. 3 には各要素に発生する推力 F_e を示した。同図の Z 座標は LOA の軸方向、 r 座標は LOA の半径方向であり、図中にはコイルの位置ならびに変位 x に対応した可動子の位置を合わせて示した。同図より可動子の中央と両端において大きな推力が発生していることがわかる。また、変位 $x=0$ および $x=5 \text{ mm}$ においては、中央のコイルと両側のコイルの向き合う所で逆方向の推力が発生していることがわかる。

3.2 静推力の実測値と計算値との比較

Fig. 4 には磁石可動形 LOA に流れる電流を 0, 0.2, 0.4, 0.6 A としたときの各変位における静推力 F_s の実測値と FEM による計算値を示した。変位 $x=0, x=5 \text{ mm}$ における実測値と計算値の誤差は可動子のゴムとサイドヨークとの接触が原因であると考えられる。変位 $x=2.5 \text{ mm}$, 電流 $I=0.6 \text{ A}$ のとき実測値と計算値はそれぞれ 1.8 N と 1.87 N で、最大計算誤差は 3.9% となった。また、ディテント力はほぼ 0 N であった。電流を大きくすると、変位 $x=2.5 \text{ mm}$ で静推力は、ピークをもつような傾向を示した。

Fig. 5 には可動子を変位 $x=2.5 \text{ mm}$ に固定した場合の電流に対する静推力 F_s の実測値と FEM による計算値を示した。式 (1) により推力定数 K_t は次式で求められる。

Table 2 Analysis conditions

Item	value	[unit]
Space factor K_p	46	%
Coercive force H_c	827	[kA/m]
Residual flux density B_r	1.15	[T]
Maximum energy product $(BH)_{\max}$	247	[kJ/m ³]

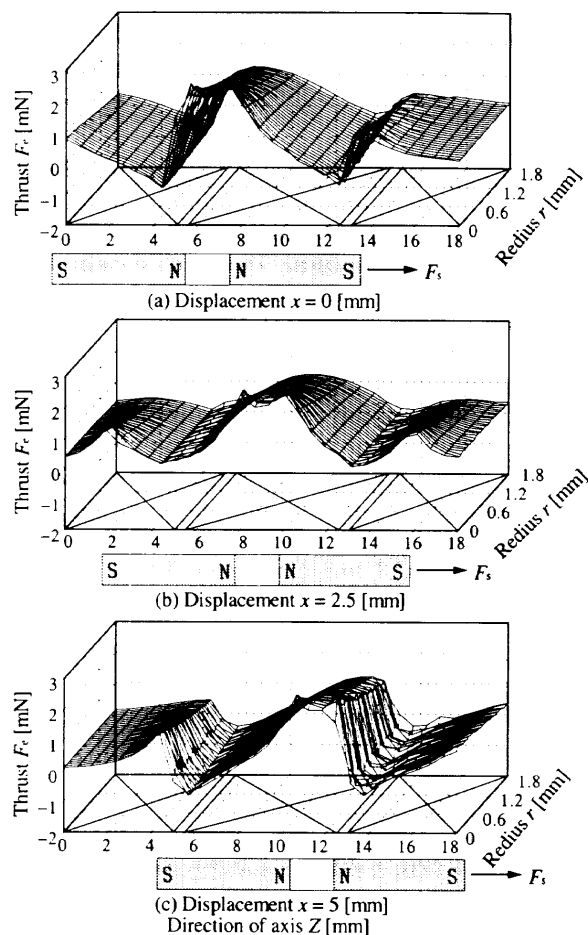


Fig. 3 Distribution of the static thrust density in the coil calculated by the FEM (current $I=0.4 \text{ A}$).

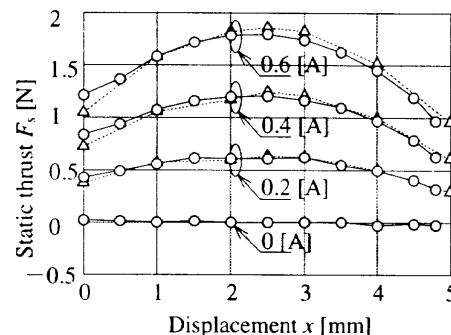


Fig. 4 Static thrust F_s vs. displacement x characteristics of the LOA (solid lines show measured values and broken lines show calculated values).

$$K_f = lB = \frac{F_s}{I} \quad [\text{N/A}] \quad (3)$$

上式を用いて算出した磁石可動形 LOA の推力定数は 3 N/A であった。

4. LOA の寸法が静推力に与える影響

4.1 LOA の解析条件

LOA の小型化および高推力・高速駆動を実現するためには、静磁力と静推力/体積比を大きくかつ機械的時定数を小さくすることが必要である。そこで、LOA のアウトヨークの厚さを 0.3 mm 一定とし、シャフトの寸法一定 ($\phi 2$ mm) の条件下で以下の 2 通りの解析を行って、永久磁石とコイルの直径の最適な比例関係を見いだすことができると考えた。

- (1) LOA の外形寸法 ($\phi 11 \times 25$ mm) を一定として、可動子の外径を変化させた場合
- (2) 可動子の外径 ($\phi 6 \times 3.9$ mm) を一定として、LOA の外形寸法を変化させた場合

Fig. 6 には解析モデルを示した。同図に示した数値は一定値であり、その他の変数はパラメータである。

LOA の体積 V は次式で与えられる。

$$V = \pi r_o^2 \times l \quad [\text{m}^3] \quad (4)$$

ここに、 r_o : LOA の外径寸法、 l : LOA の長さ (= 25 mm 一定)

上式を用いて LOA の寸法を変化させた場合の静推力/体積比を算出した。

機械的時定数 T_m は次式で与えられる⁶⁾。

$$T_m = \frac{mR}{K_f^2} \quad [\text{s}] \quad (5)$$

ここに、 K_f : 推力定数

可動子の質量 m は次式で与えられる。

$$m = \pi(r_m^2 - r_s^2)(l_m \alpha_m + l_h \alpha_h) + m_s \quad [\text{kg}] \quad (6)$$

ここに、 r_m : 可動子の半径 [m]、 r_s : シャフトの半径 [m]、 l_m : 永久磁石の長さ (= 12 mm)、 l_h : ポールピースの長さ (= 2 mm)、 α_m : 永久磁石の密度 ($= 7.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)、 α_h : ポールピースの密度 ($= 7.56 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)、 m_s : シャフトの質量 ($= 1 \times 10^{-3} \text{ kg}$)

抵抗 R は次式のように示される。

$$R = \rho \frac{l_w}{A_w} \quad [\Omega] \quad (7)$$

ここに、 ρ : 巻線の抵抗率 ($= 1.72 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$)、 l_w : 巻線の長さ [mm]、 A_w : 巻線の断面積 ($= 0.017 \text{ mm}^2$)

コイルの平均半径 r_a をコイルの外径半径 r_e と内径半径 r_i の和の平均としたとき、巻線の長さ l_w は次式で与えられる。

$$l_w = 2\pi r_a N = \pi(r_e + r_i)N \quad [\text{m}] \quad (8)$$

ここに、 r_a : コイルの平均半径 [m]、 N : 巻数、 r_e : コイルの外径半径 [m]、 r_i : コイルの内径半径 [m]

市販品の占積率 $K_p = 46\%$ を採用し、巻線の断面積 $A_w = 0.017 \text{ mm}^2$ の条件下で巻数 N は次式から与えられる。

$$N = \frac{K_p A_c}{A_w} \quad (9)$$

ここに、 A_c : コイルの断面積 ($= 17 \times w \text{ mm}^2$)、 w : コイルの

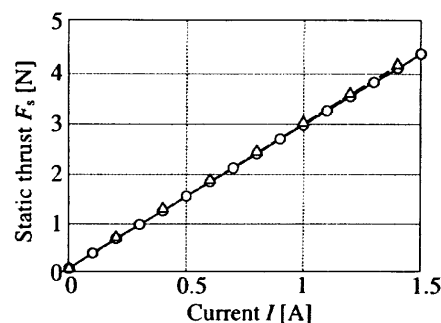


Fig. 5 Static thrust F_s vs. current I characteristics of the LOA (displacement $x = 2.5$ mm, solid line: measured, broken line: calculated).

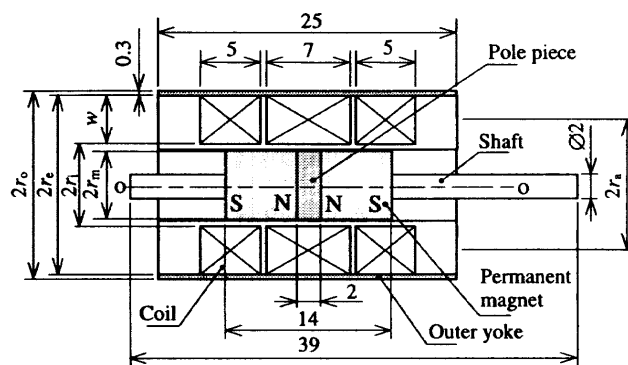


Fig. 6 Structure of the analysis model.

巻幅

推力定数 K_f は式 (3) に示したように、電流 I に依存する。そこで、同電力 $P = 3.27 \text{ W}$ を一定の条件とした場合の電流は次式で与えられる。

$$I = \sqrt{P/R} \quad [\text{A}] \quad (10)$$

式 (4)~(10) を用いて、LOA の寸法を変化させた場合の静推力および機械的時定数を算出した。

4.2 一定の外形寸法の下での静推力特性

LOA の外形寸法を一定としておき、可動子の外径 r_m を 1 mm ずつ増やしたときの静推力への影響を FEM で解析した。Fig. 7 には静推力、静推力/体積比、機械的時定数を示した。市販品の可動子の外径は 6 mm である。一定の外形寸法の下で LOA の静推力と機械的時定数について検討した。その結果、可動子の直径を現状の $\phi 6$ mm から $\phi 8$ mm にすると静推力は 1.23 N から 1.4 N に増加するが、機械的時定数も 20% 程度増加することがわかった。

永久磁石の直径の増加によりコイルに作用する磁束密度が増える。しかし、外形寸法が一定の条件下ではコイルの断面積が減り、巻数も少なくなるので、推力は二次曲線となり、永久磁石の直径 $\phi 8$ mm の場合に静推力が最大値となった。さらに、機械的時定数 T_m は式 (5) に示したように、可動子の質量 m とコイルの抵抗 R の積に比例し、推力定数 K_f の二乗に反比例する。永久磁石の直径の増加に従って、可動子の質量 m と推力定数 K_f は増加するが、逆にコイルの抵抗が減少する。したがって、機械的時定数 T_m は永久磁石の直径 $2r_m$ に対して二次曲線となり、永久磁石の直径 $r_m = \phi 6$ mm の場合に機械的時定数 T_m が最小値となった。以上により静推力、静推力/体積比

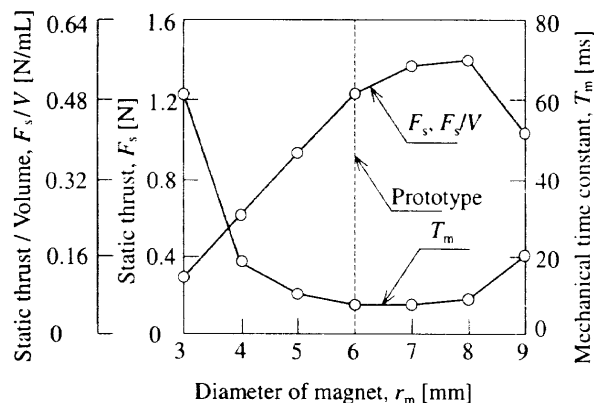


Fig. 7 Dependence of the static thrust F_s , mechanical time constant T_m , and static thrust/volume F_s/V on the diameter of the magnet (input power $P_i = 3.27$ W).

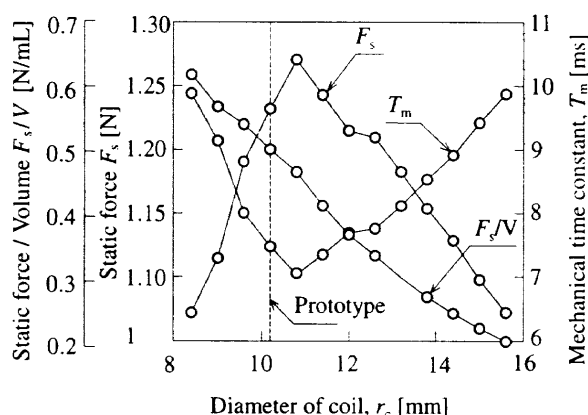


Fig. 8 Dependence of the static thrust F_s , mechanical time constant T_m , and static thrust/volume F_s/V on the diameter of the coil (input power $P_i = 3.27$ W).

と機械的時定数から考えると最適な永久磁石の直径は $\phi 6$ mm である。この場合、LOA のコイルの直径 $2r_c$ と永久磁石の直径 $2r_m$ の比は約 1:0.56 に相当している。

4.3 外形寸法を変化させた場合の静推力特性

LOA のコイルの内径 $2r_i = 6.4$ mm および可動子の外径を現状の $\phi 6$ mm の一定条件下で LOA のコイルの外形寸法を変化させた場合の静推力特性について検討した。Fig. 8 にはコイルの各形状における静推力/体積比、機械的時定数、および静推力を示した。市販品のコイルの外径は、 $\phi 10.2$ mm である。同図よりコイルの外形寸法を現状の $\phi 10.2$ mm から $\phi 10.8$ mm に大きくした場合の静推力と機械的時定数は、それぞれ 1.27 N と 7.03 ms であり、市販品よりも静推力は 3% 増加、機械的時定数は 0.5 ms 減少させることができることが了解さ

れる。しかし、静推力/入力比は 7% 減少する結果となった。

永久磁石の寸法が一定の条件下で、コイルの外径を増やすとコイルの巻数が増え、永久磁石の磁束と鎖交する電流が増える。しかし、同入力電力が一定の条件下でコイルの巻数が増やすとコイルの抵抗が大きくなり、電流が減少するので、推力は二次曲線となる。また、機械的時定数もコイルの直径 r_c に対して二次曲線となる。永久磁石の外径寸法を一定でコイルの直径 $2r_c$ を変化させた場合、LOA のコイルの直径 $2r_c$ と永久磁石の直径 $2r_m$ の比は 1:0.59 である。

5. あとがき

磁石可動形 LOA の静推力特性について述べた。本論文で以下の事項を明らかにした。

- 1) 変位 2.5 mm のとき、最大静推力が生じ、そのときの推力定数 3 N/A であった。静推力分布により、推力の発生箇所は可動子の両端と中央であることが判明した。
- 2) 電流 $I = 0.2 \sim 0.6$ A の範囲における静推力特性において、実測値と FEM による計算値の最大誤差は 4% 以内であった。
- 3) LOA のコイルの外径だけを 8~16 mm に変化させた場合と、可動子の外径寸法だけを 3~8 mm に変化させた場合の 2通りの静推力特性を FEM により求めた。小形高推力の面から考えると最適な永久磁石とコイルの直径の比は約 1:0.56~0.59 の範囲であると考えられる。市販品の外径寸法と可動子の外径寸法は 1:0.56 であるから市販品の永久磁石とコイルの直径の比は妥当であることを確認した。

謝 辞 本研究に貴重な助言を寄せられた TDK 株式会社金属磁石開発部 平林康之部長、大山貴俊氏に感謝を表すしである。

文 献

- 1) 山田 一：リニアモータ応用ハンドブック, pp. 354-355 (工業調査会, 1986)。
- 2) H. Matsuki, Y. Yamakata, N. Chubachi, S. Nitta, H. Hashimoto: Transcutaneous DC-DC Converter for Totally Implantable, 32, pp. 5118-5120 (1996)。
- 3) TDK 金属磁石事業部: REC (レック) ブランジャ (1995 年 4 月 1 日)。
- 4) 山田 一: R&D のための磁気回路の計算法, pp. 130-131 (トリケップス, 1987)。
- 5) 中田高義, 伊藤昭吉, 河瀬順洋: 有限要素法による交直電磁石の設計と応用, pp. 55-62 (森北出版社, 1991)。
- 6) 山田 一: 産業用リニアモータ, p. 43 (工業調査会, 1981)。

1997 年 10 月 27 日受理, 1998 年 2 月 2 日採録