

学術論文
------

## 大きいモータ定数をもつ磁石可動形リニア振動アクチュエータの設計

### A design of a moving-magnet-type linear oscillatory actuator having large motor constant

水野 勉	(信州大学)	宇津野 良	(信州大学)
高井 正樹	(信州大学)	八重樫拓也	(信州大学)
山本 秀夫	(松下冷機)	渋谷 浩洋	(松下冷機)
山田 一	(博士国際協同研究所)		

Tsutomu MIZUNO	Member
Makoto UTSUNO	Student Member
Masaki TAKAI	
Takuya YAEGASHI	
Hideo YAMAMOTO	
Kouyou SHIBUYA	
Hajime YAMADA	Member

A Linear Oscillatory Actuator (LOA) for compressor is required for having the high efficiency and the large motor constant. This paper describes the relation of motor constant and dimensions of the yoke, and the design of the LOA having large motor constant. Permeance method and FEM are used in the design of LOA. The following results are obtained; (1) the motor constant of  $45 \text{ N}/\sqrt{\text{W}}$  is obtained, under the thickness of inner yoke and outer yoke are 6 mm and 12 mm respectively. (2) the motor constant is independent on the height of slot. (3) the motor constant per yoke volume is examined into other linear motors.

*Key Words:* Linear oscillatory actuator (LOA), motor constant, yoke dimension, permeance analysis method, finite element method (FEM).

#### 1 まえがき

将来の冷蔵庫のコンプレッサの駆動源として、磁石可動形リニア振動アクチュエータ (Linear Oscillatory Actuator, 以下 LOA と略記) が有望であり、この LOA には小形で、かつ高効率、大きいモータ定数をもつことが求められる [1].

現在までに、LOA における設計法には、パーミアンス法や有限要素法 (FEM) を用いた方法が報告されている [2][3]. モータ定数とヨーク寸法との関係を数

式的に表すことが可能なパーミアンス法を用いることにより、事前に概略的な計算を行って主な特性を求め、その後、非線形 FEM により詳細な特性を求めることができる。

本論文では、リニア同期モータ (LSM) の一変種でもある LOA をとりあげ、大きいモータ定数を得るための以下の事項について述べている。

- (1) 磁石可動形 LOA の基本構造
- (2) パーミアンス法と FEM を用いた LOA の設計
- (3) 大きいモータ定数をもつヨーク寸法の検討

連絡先: 水野勉, 〒380-8553 長野県長野市若里 4-17-1, 信州大学 工学部, e-mail: mizunot@gipwc.shinshu-u.ac.jp

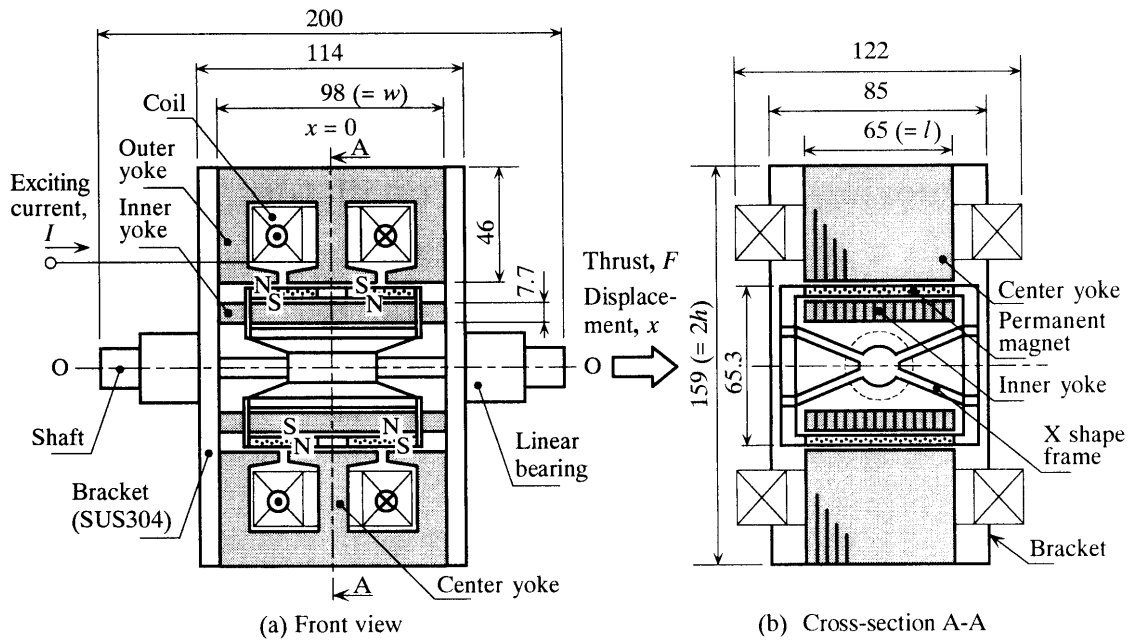


Fig. 1 Basic structure of a moving-magnet-type linear oscillatory actuator (unit is mm).

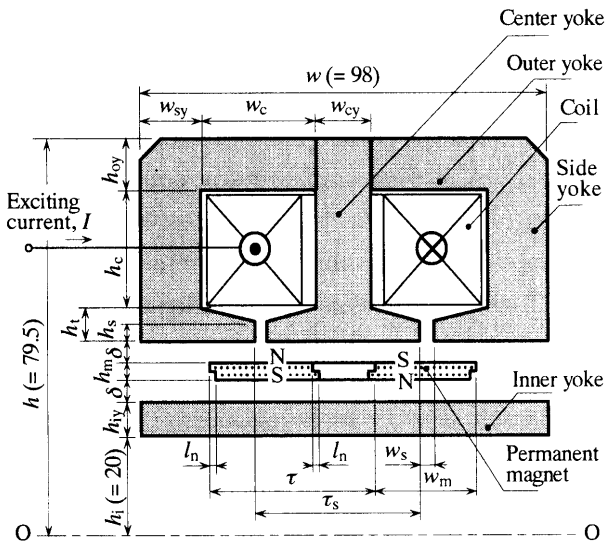


Fig. 2 Structure parameter of the moving-magnet-type linear oscillatory actuator (unit is mm).

## 2 磁石可動形 LOA の基本構造

Fig.1に本解析対象である磁石可動形 LOA の基本構造を示した。本 LOA は上下対称の構造であり、ヨーク、永久磁石、コイルおよびブラケット (SUS304) から構成されている。ヨークは無方向性電磁鋼板 35H440(磁界の強さ  $H=5 \text{ kA/m}$  において、磁束密度  $B=1.7 \text{ T}$ ) の積層材を、永久磁石には Nd-Fe-B 磁石 (NEOMAX-38H, 保磁力  $H_c=963 \text{ kA/m}$ ) を用いている。上下の

Table 1 Constant and variable parameters of the LOA in the calculation for motor constant.

	Item	Symbol	Value [Unit]
Constant	Dimensions	$h \times w \times l$	79.5×98×65 [mm]
	Height from origin to inner yoke	$h_i$	20 [mm]
	Length of air gap	$\delta$	0.85 [mm]
	Thickness of magnet	$h_m$	4.1 [mm]
	Width of magnet	$w_m$	25 [mm]
	Pole pitch	$\tau$	39.9 [mm]
	Slot pitch	$\tau_s$	39.9 [mm]
	Notch	$l_n$	1.5 [mm]
	Space factor of coil	$\xi$	0.59
Variable	Height of slot	$h_s$	0.5 - 6 [mm]
	Slot width	$w_s$	0.5 - 6 [mm]
	Thickness of inner yoke	$h_{iy}$	2 - 12 [mm]
	Thickness of outer yoke	$h_{oy}$	12 - 14 [mm]
	Width of side yoke	$w_{sy}$	12 - 14 [mm]
	Width of center yoke	$w_{cy}$	12.5 - 17.8 [mm]
	Height of teeth	$h_t$	5.9 - 8.5 [mm]

コイルは、1 個あたりの巻数  $N=680$  回のものが並列接続されており、合成直流抵抗は  $R_{dc}=2.4 \Omega$  である。また、本 LOA に要求される最大推力は 100 N である。

Fig.2 に LOA の寸法パラメータを示した。本論文では、これらの寸法パラメータのうち、ヨーク寸法とコイル断面積について検討を行う。Table 1 に固

定パラメータと可変パラメータの一覧を示した。固定パラメータの数値は以下のとおりである。外形寸法  $h \times w \times l = 79.5 \times 98 \times 65$  mm, 中心からインナヨークまでの高さ  $h_i = 20$  mm, エアギャップの長さ  $\delta = 0.85$  mm, 磁石の厚さ  $h_m = 4.1$  mm, 磁石の幅  $w_m = 25$  mm, ポールピッチ  $\tau = 39.9$  mm, スロットピッチ  $\tau_s = 39.9$  mm, 切かき  $l_n = 1.5$  mm, コイルの占積率  $\xi = 0.59$  を一定としている。

### 3 パーミアンス法によるヨーク寸法の数式化

パーミアンス法は非線形解析が困難であるが、各緒元を数式的に表すことが可能である。それに対してFEMは、詳細な非線形解析を行うことは可能であるが、効率的な設計を行うためには、ある程度の指針が必要となる。本論文では、両手法を併用して設計を行うこととする。

本章では、パーミアンス法を用いた磁気回路解析による、LOAのヨーク寸法の概略的な計算について述べる。その結果に基づいて行うFEMを用いた詳細な計算については、次章で述べることとする。計算の条件として、ヨークの透磁率は無限大として、この部分の磁気抵抗は考慮しない。

Fig.3に永久磁石による磁束  $\Phi_m$  を計算するためのパーミアンスモデルを示した。同図からパーミアンス  $P_1, P_2$  を用いることにより、本LOAに関して次式が成立する(寸法の記号は、Fig.2参照)。

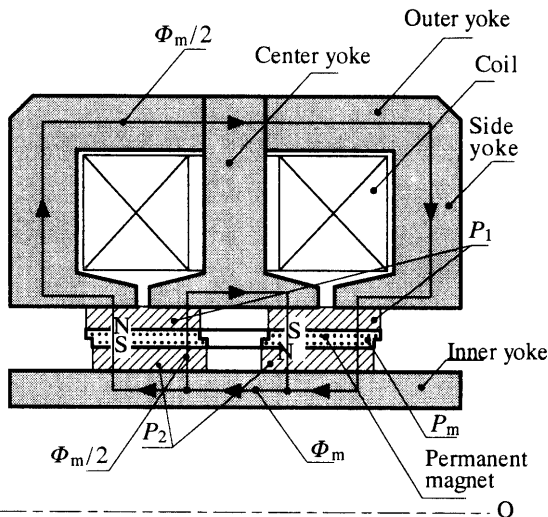


Fig. 3 Permeance model for calculation of the magnetic flux,  $\Phi_m$ , due to the permanent magnets (unit is mm).

$$\Phi_m = F_m / \left( \frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_2} + \frac{1}{P_m} \right) \quad [\text{Wb}] \quad (1)$$

$$F_m = H_c h_m \quad [\text{A}] \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_2} + \frac{1}{P_m} \\ &= \frac{(2\delta + h_m)(5\delta\tau_s + w_s\tau_s) - w_s^2(\delta + h_m)}{\mu_0 w_m l (5\delta\tau_s + w_s\tau - w_s^2)} \quad [\text{H}^{-1}] \quad (3) \end{aligned}$$

ここに、 $F_m$ : 永久磁石の起磁力 [A],  $H_c$ : 永久磁石の保磁力 ( $=963 \times 10^3$ ) [A/m],  $h_m$ : 永久磁石の厚さ [m],  $\delta$ : エアギャップの長さ [m],  $\tau_s$ : スロットピッチ ( $=39.9 \times 10^{-3}$ ) [m],  $w_s$ : スロット開口幅 [m],  $\mu_0$ : 真空の透磁率 ( $=4\pi \times 10^{-7}$ ) [H/m],  $w_m$ : 永久磁石の幅 ( $=25 \times 10^{-3}$ ) [m],  $l$ : ヨークの積層厚さ ( $=65 \times 10^{-3}$ ) [m]

式(1)~式(3)から、エアギャップ中の平均磁束密度  $B$  は次式を用いて求めることができる。

$$B = \frac{\Phi_m}{w_m l} \quad [\text{T}] \quad (4)$$

励磁電流  $I$  をコイルに流した場合、上下のコイルは並列接続されているので、1個あたりのコイルに流れる電流は  $I/2$  となる。また、LOAの構造は上下対称であるので、LOAの全静推力を求めるには2倍する必要がある。Flemingの左手則からLOAの静推力  $F_s$  を求めると次式となる。

$$\begin{aligned} F_s &= 2pNLB \frac{I}{2} \\ &= K_f I \quad [\text{N}] \quad (5) \end{aligned}$$

ここに、 $p$ : 極数 ( $=2$ ),  $N$ : コイル1個あたりの巻数 ( $=680$ ) [回],  $L=l$ : 磁束密度が作用するコイルの長さ [m],  $K_f = pNLB$ : 推力定数 [N/A]

また、コイル1個あたりの巻数  $N$  と並列接続されたコイルの合成直流抵抗  $R_{dc}$  は、それぞれ次式となる。

$$N = \frac{\xi A_c}{\pi (d/2)^2} \quad [\text{回}] \quad (6)$$

$$R_{dc} = \frac{1}{2} \frac{\xi A_c l_c}{\sigma \pi^2 (d/2)^4} \quad [\Omega] \quad (7)$$

ここに、 $\xi$ : コイルの占積率 ( $=0.59$ ),  $A_c = h_c w_c$ : コイルの断面積 [m<sup>2</sup>],  $d$ : 導線の線径 ( $=0.9 \times 10^{-3}$ )

[m],  $l_c$ : 導線 1 巻あたりの平均長さ [m],  $\sigma$ : 導線 (銅) の導電率 ( $=5.67 \times 10^7$ ) [S/m]

LOA の評価指標として, 次式で定義されるモータ定数  $K_m$  [4] を採用する. 式 (5)~式 (7) を用いることにより,  $K_m$  は次式のようになる.

$$K_m = \frac{K_f}{\sqrt{R_{dc}}} = \frac{p\Phi_m}{w_m} \sqrt{\frac{2\sigma\xi A_c}{l_c}} \quad [\text{N}/\sqrt{\text{W}}] \quad (8)$$

Fig.4 に励磁電流  $I$  による磁束  $\Phi_{i1}$ ,  $\Phi_{i2}$  を求めるためのパーミアンスモデルを示した. 同図中に示したパーミアンス  $P_3 \sim P_7$  を用いて,  $\Phi_{i1}$ ,  $\Phi_{i2}$  は次式のようになる (寸法の記号は, Fig.2 参照).

$$\begin{aligned} \Phi_{i1} &= \frac{1}{2} NI (P_3 + P_4 + P_5) \\ &= \frac{1}{2} \mu_0 l NI \left( 0.528 + \frac{h_s}{w_s} \right) \quad [\text{Wb}] \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{i2} &= \frac{1}{2} NI \frac{P_6 P_7}{2P_6 + P_7} \\ &= \frac{1}{4} \mu_0 l NI \frac{(w - \tau_s - w_s)(\tau_s - w_s)}{(2w - \tau_s - 3w_s)(2\delta + h_m)} \quad [\text{Wb}] \quad (10) \end{aligned}$$

ここに,  $h_s$ : スロットの高さ [m],  $w$ : ヨークの幅 [m]

モータ定数  $K_m$  は式 (8) に示したように, 永久磁石

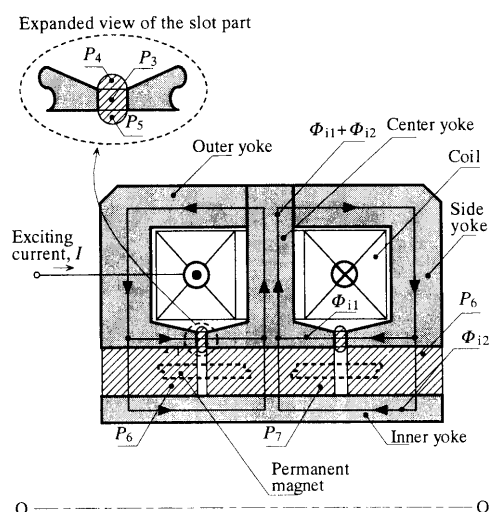


Fig. 4 Permeance model for calculation of the magnetic flux,  $\Phi_{i1}$ ,  $\Phi_{i2}$ , due to the exciting current (unit is mm).

による磁束  $\Phi_m$  とコイル断面積  $A_c (=h_c w_c)$  の関数である. LOA の外形寸法が一定の条件下では,  $K_m$  の向上に必要である  $\Phi_m$  と  $A_c$  とを同時に大きくすることが困難である. たとえば, インナヨークの厚さ  $h_{iy}$  を小さくするとインナヨークの磁気飽和により  $\Phi_m$  が減少する. しかしコイルの高さ  $h_c$  (すなわち  $A_c$ ) は大きくなる. 逆に  $h_{iy}$  を大きくすると  $\Phi_m$  は増大するが,  $h_c$  (すなわち  $A_c$ ) は小さくなる. したがって,  $K_m$  に与える影響に対して,  $h_{iy}$  と  $h_c$  はトレードオフの関係にある. そこで,  $h_{iy}$  とアウトヨークの厚さ  $h_{oy}$  および  $h_c$  はそれぞれ独立なパラメータとして扱うことにする. なお, サイドヨークの幅  $w_{sy}$ , アウトヨークの厚さ  $h_{oy}$ , センタヨークの幅  $w_{cy}$ , および歯の高さ  $h_t$  は, 各部の磁束密度が一致するように寸法を決めることとする.

Fig.2 と Fig.3 における各磁束の流れおよび各ヨーク部の磁束密度が一致するという条件より, 各ヨーク部の寸法の関係式は次式で与えられる.

$$w_{sy} = h_{oy} \quad [\text{m}] \quad (11)$$

$$w_{cy} = \frac{\Phi_m + 2(\Phi_{i1} + \Phi_{i2})}{\Phi_m + \Phi_{i1} + \Phi_{i2}} h_{oy} \quad [\text{m}] \quad (12)$$

$$h_t = \frac{\Phi_m + 2\Phi_{i1}}{2(\Phi_m + \Phi_{i1} + \Phi_{i2})} h_{oy} \quad [\text{m}] \quad (13)$$

コイルの高さ  $h_c$ , および幅  $w_c$  は次式により計算できる.

$$h_c = h - h_i - h_{iy} - 2\delta - h_m - h_t - h_{oy} \quad [\text{m}] \quad (14)$$

$$w_c = \frac{w - 2w_{sy} - w_{cy}}{2} \quad [\text{m}] \quad (15)$$

ヨーク寸法を決定する際, 式 (9), 式 (10) において起磁力  $NI$  を設定する必要がある. 本論文では, 式 (5) から求めた, 静推力  $F_s = 100$  N 発生時の起磁力  $NI = 904$  A を採用した.

#### 4 有限要素法によるヨーク寸法の検討

本章では, パーミアンス法を用いた概略的な計算に基づいて, FEM(二次元非線形解析) による詳細な計算について述べる.

##### 4.1 ヨーク寸法とモータ定数との関係

Fig.5 にアウトヨークの厚さ  $h_{oy}$  をパラメータとする, インナヨークの厚さ  $h_{iy}$  に依存するモータ定数  $K_m$

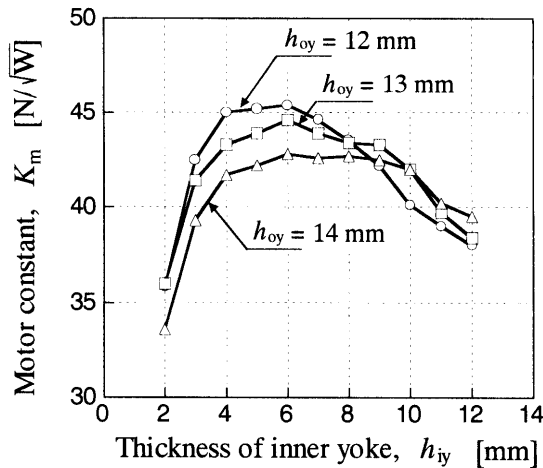


Fig. 5 Dependency of the motor constant,  $K_m$ , upon the thickness,  $h_{iy}$ , of the inner yoke ( $x=0$  mm,  $w_s=3$  mm,  $h_s=4.5$  mm).

のFEMによる計算結果を示した。  $w_{sy}$ ,  $w_{cy}$ ,  $h_t$ ,  $h_c$ , および  $w_c$  は式(11)~式(15)から決定した。スロット開口幅, 高さは試作機と同じ  $w_s=3$  mm,  $h_s=4.5$  mmとした。  $h_{iy}$  が減少するに従い  $K_m$  は増大して,  $h_{iy}=6$  mmでピークを迎えた。  $h_{iy} < 6$  mmでは,  $K_m$  が減少する結果となった。この原因は,  $h_{iy}$  を小さくすることでコイル断面積  $A_c$  を大きくできるが, 逆にインナヨークに磁気飽和が発生して永久磁石による磁束  $\Phi_m$  が減少, これらの結果として  $K_m$  が減少したと考えられる。  $h_{oy}=12$  mm,  $h_{iy}=6$  mmにおいて,  $K_m$  は  $45$  N/√Wとなった。

Fig.6にスロット幅  $w_s$  に依存するモータ定数  $K_m$  を示した。  $w_s$  が大きくなるに従い  $K_m$  が増加する傾向を示した。  $w_s=3$  mm付近から増加の程度が緩慢になった。  $w_s > 4$  mmでは, 可動子がストローク端に到達した場合, 永久磁石の端部がスロットの下部に位置して, その結果, 推力リプルが大きくなり, 推力-変位特性の平坦化が望めなくなる。そのため,  $w_s=3$  mm程度が最適と考えられる。

Fig.7にモータ定数  $K_m$  -スロット高さ  $h_s$  特性を示した。  $h_s$  に対して  $K_m$  は平坦な特性となり, 依存性は見られなかった。

#### 4.2 大きいモータ定数をもつ LOA 設計の検討

Table 2は試作機 LOA と本論文において述べた手法により設計した LOA の寸法パラメータの比較である [5]。試作機と設計した LOA の各ヨーク寸法は, 1~2 mm程度の違いが見られた。パーミアンス法, お

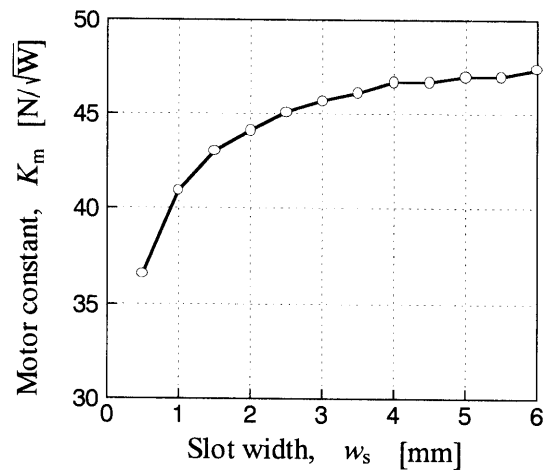


Fig. 6 Dependency of the motor constant,  $K_m$ , upon the slot width,  $w_s$  ( $x=0$  mm,  $h_{iy}=6$  mm,  $h_{oy}=12$  mm).

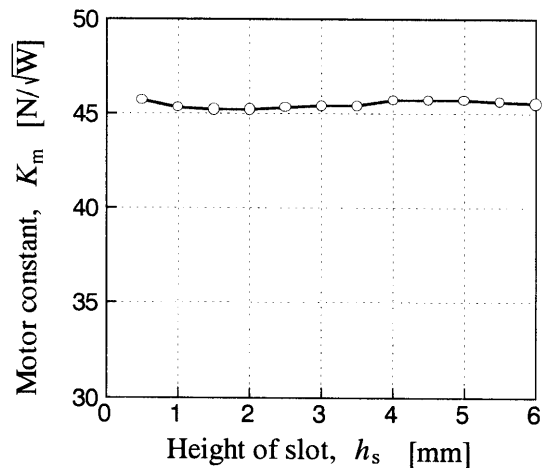


Fig. 7 Dependency of the motor constant,  $K_m$ , upon the slot height,  $h_s$  ( $x=0$  mm,  $h_{iy}=6$  mm,  $h_{oy}=12$  mm).

よび FEM により求めた試作機の推力定数はそれぞれ  $K_f=75$  N/A と  $71$  N/Aであった。また実測値  $K_f=70$  N/A と比較して計算誤差は, それぞれ 7% と 1%であった。さらに設計した LOA のモータ定数は  $45$  N/√Wである。

Table 3にリニアサーボモータ [6] と設計した LOA の性能の比較を示した。本 LOA は LSM の一変種であるため, LSM と見なして比較を行う。モータ定数はモータ寸法に大きく依存しており, 一般にモータ寸法が大きいほど大きなモータ定数をもっている。同表中にはヨーク寸法も示してある。同表中のリニアサーボモータは片側式であるが, 本 LOA は上下対称の両側式である。したがって, ヨーク寸法を 2 倍すること

Table 2 Demension of the trial machine and the designed machine.

Item	Symbol	Trial machine	Designed machine
Thickness of outer yoke	$h_{oy}$	12.0 [mm]	12.0 [mm]
Thickness of inner yoke	$h_{iy}$	7.7 [mm]	6.0 [mm]
Width of side yoke	$w_{sy}$	14.5 [mm]	12.0 [mm]
Width of center yoke	$w_{cy}$	13.5 [mm]	12.6 [mm]
Height of teeth	$h_t$	7.5 [mm]	6.4 [mm]
Height of coil	$h_c$	26.5 [mm]	29.3 [mm]
Width of coil	$w_c$	27.8 [mm]	30.7 [mm]
Thrust constant	$K_f$	70 [N/A]	80 [N/A]
DC resistance	$R_{dc}$	2.4 [ $\Omega$ ]	3.1 [ $\Omega$ ]
Motor constant	$K_m$	45 [N/ $\sqrt{W}$ ]	45 [N/ $\sqrt{W}$ ]

Table 3 Performance comparisons of the linear motor for linear servo system [6] and designed machine.

Item	Symbol	Unit	LIM	LSM	HD type LSM	Designed machine
Dimensions of yoke	$h \times w \times l$	mm	49.5 × 50 × 222	27 × 50 × 160	40 × 79 × 290	47.7 × 98 × 65 × 2
Mass of yoke and coil	$M$	kg	4.29	1.89	6.47	2.40
Rated current	$I_r$	A	4.0	1.03	16.9	—
Rated thrust	$F_r$	N	48	139	880	—
Thrust constant	$K_f$	N/A	12	135	52	80
Motor constant	$K_m$	N/ $\sqrt{W}$	5.36	15	68	45
Yoke volume	$V$	L	0.55	0.22	0.92	0.61
Motor constant/Yoke volume	$K_m/V$	N/( $\sqrt{W} \cdot L$ )	9.7	68.2	73.9	73.8

により片側式と見なして比較を行う。本 LOA と高力密度リニア同期モータ (HD type LSM) のヨーク体積  $V$  は、それぞれ 0.61 L と 0.92 L であり、本 LOA のヨーク体積は HD type LSM の 66 % と小形である。また、本 LOA と HD type LSM の  $K_m/V$  は、それぞれ 73.8 N/( $\sqrt{W} \cdot L$ )、73.9 N/( $\sqrt{W} \cdot L$ ) である。すなわち、本 LOA は小形でありながら大きいモータ定数をもっている。リニア誘導モータ (LIM、ベクトル制御) や磁石可動形リニア同期モータ (LSM) と比較しても大きな値である。本手法を用いることにより、大きいモータ定数をもつ LOA の設計ができた。

## 5 あとがき

本論文では、大きいモータ定数が得られる磁石可動形 LOA のヨーク寸法について、パーミアンス法と FEM を用いて設計を行った。結果を以下にまとめた。

### (1) モータ定数 $K_m$ とインナヨークの厚さ $h_{iy}$

インナヨークの厚さ  $h_{iy}$  が磁気飽和するほどに  $h_{iy}$  を薄くしても  $K_m$  が向上する範囲があることがわかった。 $K_m$  は  $h_{iy}=6$  mm、かつアウト

ヨークの厚さ  $h_{oy}=12$  mm の場合に最大となり、 $K_m=45$  N/ $\sqrt{W}$  となった。

### (2) モータ定数 $K_m$ とスロット開口幅 $w_s$

$w_s$  の増加に従い  $K_m$  は大きくなった。しかし、 $w_s$  の増加は推力リップルの増加にもつながるため、このことを考慮して設計する必要がある。また、 $K_m$  のスロット高さ  $h_s$  に対する依存性は見られなかった。

### (3) ヨーク体積あたりのモータ定数 $K_m/V$ の比較

本論文で述べた手法によって LOA を設計した結果、ヨークの単位体積あたりのモータ定数は  $K_m/V=73.8$  N/( $\sqrt{W} \cdot L$ ) となった。得られた  $K_m/V$  の大きさは、小形ながら高力密度リニア同期モータと等しく、大きなモータ定数となった。

(2001 年 7 月 11 日受付)

## 参考文献

- [1] Nicholas R. van der Walt, Reuven Unger, Linear compressors - a maturing technology, *International Appliance Technical Conference*, (1994), pp.1-6.

- [2] 植田哲司, 富樫仁夫, 岸本圭司, 安富文夫, バネ特性を有するリニア振動アクチュエータ, 平成 12 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, Vol.3, (2000), pp.1151-1152.
- [3] 水野勉, 岩垂光宏, 望月大, 安西哲也, 小山勝巳, 山田一, 磁石可動形リニア直流モータの一設計手法, 日本応用磁気学会誌, Vol.24, No.4-2 (2000), pp.959-962.
- [4] 長坂長彦, 制御用小形電動機 -最近の進歩と展望-, 電気学会誌, Vol.110, No.3 (1990), pp.195-202.
- [5] 水野勉, 八重樫拓也, 山本秀夫, 渋谷浩洋, 山田一, コンプレッサに用いる磁石可動形リニア振動アクチュエータの静推力特性, 電気学会リニアドライブ研究会資料, No.LD-00-43, (2000), pp.19-23.
- [6] 村口洋介, 中川洋, 新谷勉, 前田豊, 荻田充二, リニアサーボ用リニアモータの性能比較, 電気学会リニアドライブ研究会資料, No.LD-97-41, (1997), pp.19-23.