

## 小型円筒リニアモータの推力と高調波歪みに関する研究と考察

## Study and consideration on Thrust and Harmonic distortion of small Cylinder Linear Synchronous Motor

仲岩浩一(正員)\*<sup>1</sup>, 脇若弘之\*<sup>2</sup> (正員), 田代晋久\*<sup>2</sup>(正員)

Koichi Nakaiwa(Mem.), Hiroyuki Wakiwaka (Mem.), Kunihisa Tashiro (Mem.)

In recent years, the miniaturization of a linear motor has progressed by the chip mounter the miniaturization of a conveying machine, or the loading demand to a special use. There is a case where a smooth drive is required in it. It is important to take into account the influence of the Total Harmonic Distortion (THD) in the design of a linear motor. the THD of three magnet array were checked. At Halbach array which pursued high thrust density, the fundamental cause and effect relationship between the THD from fluctuating a Halbach array aspect ratio and the induction voltage was checked. At Cylinder Linear Synchronous Motor (CLSM) of small size ( $\phi 10$ ) and high thrust density, I showed means to reduce the THD.

Keywords: THD, CLSM, Radial array, Magnetic ring array, Halbach array

## 1 緒言

近年リニアモータは、チップマウンタや搬送装置の小型化、或いは特殊用途への搭載要求が有り、小型化が進んできた。また、用途によって要求は異なるものの、高推力密度、耐環境性、低コスト、滑らかな駆動といった要求が挙げられる。各要求への対策として、様々な研究・提案も成されてきている[1-3]。

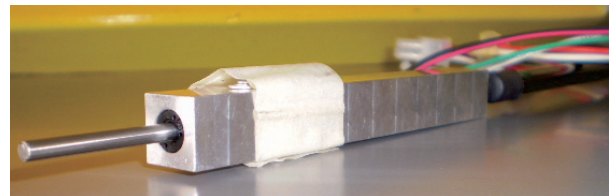
本論文では、高推力密度(省スペース)及び滑らかな駆動に着目した。推力は、磁石面積やコイルの容量といったモータの体積に依存する為、小型化に伴う推力低下は著しいものがある。限られたスペースにおいて、より高い推力密度を得る事は容易ではない。

また、リニアモータの設計をする上では、歪率の影響を考慮する事も非常に重要である。歪率は波形歪みの程度を表すもので、基本波の実効値に対する歪み波に含まれる全高調波の実効値の比である。歪率が高くなると電流実効値も増える為、電力が $I^2R$ で増加する。高推力重視のリニアモータを設計する上で、振動や過熱の点から、誘起電圧波形の歪率をいかに低くできるかが、ポイントとなる。

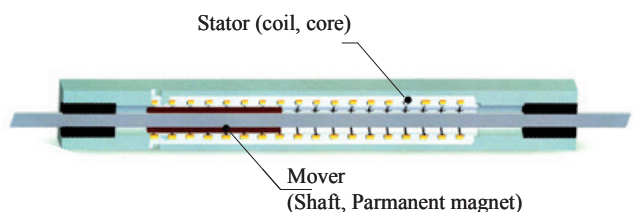
今回、3種類の円筒リニア同期モータにおいて、推力発生部位の密度を同一とした上で、有限要素法による推力と歪率の算出と比較を行ったのち、歪率低減についての検討を行った。

## 2 提案リニアモータの構成

今回の円筒リニア同期モータ(以下 CLSM)の概略(外観及び基本構造)を図1に示す。巻線側を固定子とし、軸及び永久磁石側を可動子とする構成である。可動子永久磁石は Ne-Fe-B( $B_r=1.29T$ )を使用、固定子コアは無方向性電磁鋼板(35H300)を用いる。コイルは3相一体構造で、これを励磁することによって、推進力を得る。



(a) Over view of CLSM



(b) Basic structure of CLSM

Fig.1 A configuration of CLSM.

連絡先: 仲岩 浩一, 〒395-8515 長野県飯田市大休 1879,  
多摩川精機株式会社 技術品質統括部  
e-mail: koichi-nakaiwa@tamagawa-seiki.co.jp

\*<sup>1</sup>多摩川精機株式会社 \*<sup>2</sup>信州大学工学部

図 1 の部分的な構造を図 2 に示す。リニアモータの外径は  $\phi 10$  で、1 スロットあたりの巻線は 38 回である。スロット数は 18 で、ストロークは 30mm である。3 種類の磁石配列における可動子の体積は一定である。

尚、磁性リング配列については、近年の磁石高騰化の背景による、磁石量低減を目的とした配列である。表 1 に詳細仕様を示す。

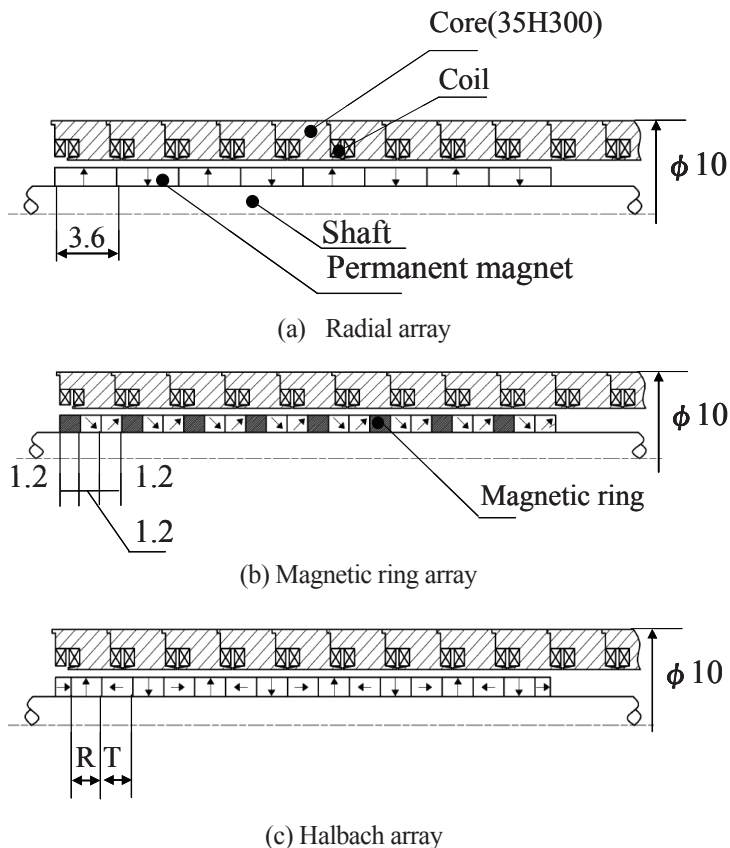


Fig.2 Sectional structure of CLSM.

Table 1 Detailed specification.

Type	Radial array	Magnetic ring array	Halbach array
Item			
Voltage	24V		
External dimensions	12mm		
stroke	30mm		
Number of magnet	8	16	24
Number of pole & slot	8pole-18slot		
Number of phase	3		
Structure of magnet	Radial magnet	Radial & Thrust magnet + magnetic ring	Radial & Thrust magnet
shaft material	magnetic	non-magnetic	

### 3 有限要素法

#### 3.1 解析条件

有限要素法による解析モデルを図 3 に示す。材料の非線形性を考慮し、永久磁石の減磁曲線を 11 点、固定子コア(35H300)の B-H 曲線を 29 点で近似する。要素数は、170000 である[4]。

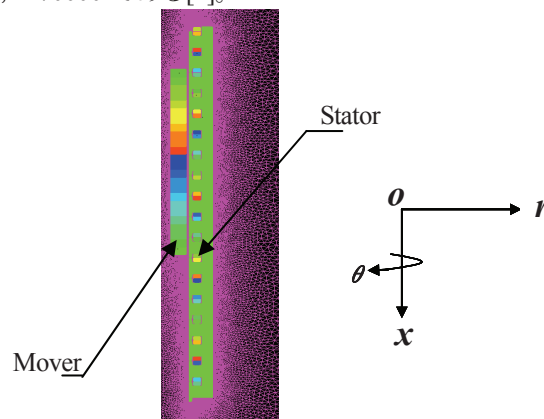


Fig.3 Analysis model.

### 3.2 推力計算

表 2 に示すのは、推力計算における寸法パラメータの抜粋である。図 4 および図 5 に、その構造を示す。固定子については、バックヨーク厚さ、歯幅、歯先厚さ、開口幅等、可動子については可動子外径  $\phi 5.2$  ならびに可動子内径  $\phi 3$  を固定とした。エアギャップは、可動子外径と固定子内径間の寸法である。ハルバツハ配列についてはストローク分配置した永久磁石群において、ストロークを固定とした上で、ラジアル配向磁石とスラスト配向磁石の比率を変動させる。始めに、各磁石配列ともに最も推力が高くなる寸法を求めた。尚、可動子の体積は 3 種類の配列ともに同体積とし、磁石の使用量は、ラジアル配列とハルバツハ配列を同体積とした。磁性リング配列については、推力が最も高くなるように磁石使用量と磁性リング使用量を変動させた。

(表 3 に結果を示す。)

Table 2 Parameter of design dimensions.

	Item	Symbol	Unit
Stator	Width of teeth	$w$	[mm]
	Thickness of back yoke	$t_y$	[mm]
	Thickness of tip 1	$t_{ha}$	[mm]
	Thickness of tip 2	$t_{hb}$	[mm]
	Width of tip	$l_m$	[mm]
	Width of opening	$l_o$	[mm]
Mover	Air gap	$g_p$	[mm]
	Pole pitch	$P_p$	[mm]
	Radial orientation magnet	$R$	[mm]
	Thrust orientation magnet	$T$	[mm]

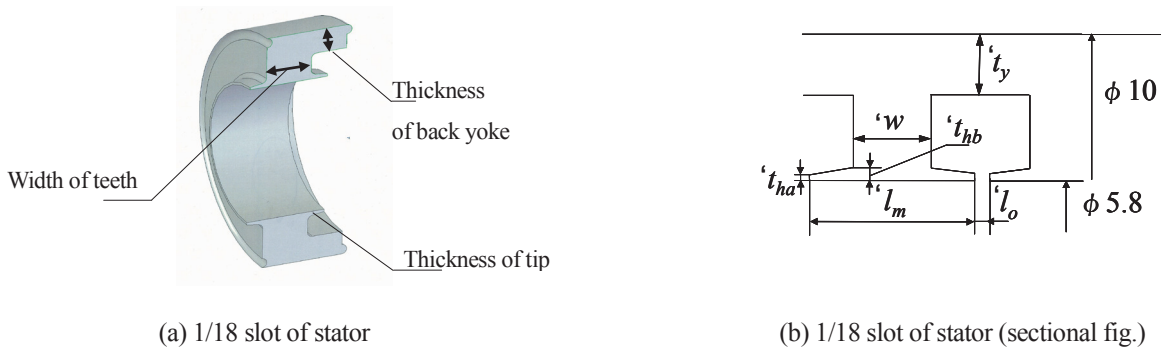


Fig.4 Structure of stator.

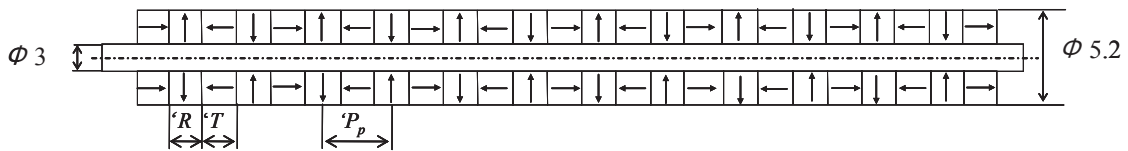


Fig.5 Structure of mover.

### 3.3 歪率計算

歪率は、波形歪みの程度を表すものであるが、本解析においても、波形に含まれる全高調波成分 ( $V_2 \sim V_n$ ) の実効値の総和と基本波 ( $V_1$ ) の実効値の比として定義する[5]。

この時の歪波電圧を、

$$v(t) = V_o + \sum_n V_n \sin(n \omega t - \theta_n) \quad (1)$$

で表し、その実効値  $|V|$  を、

$$|V| = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \quad (2)$$

$$|V| = \sqrt{V_o^2 + |V_1|^2 + |V_2|^2 + |V_3|^2 + \dots} \quad (3)$$

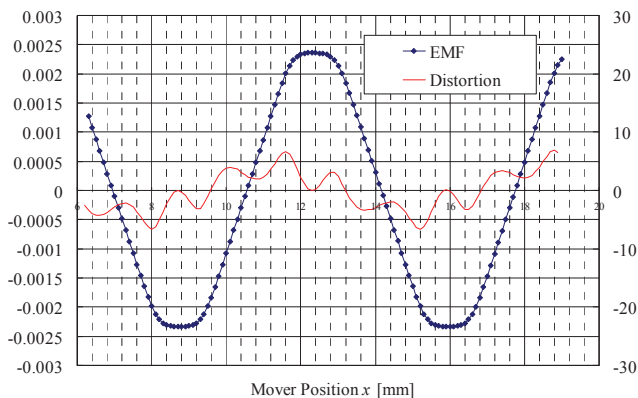
とする。

また高調波歪率は、

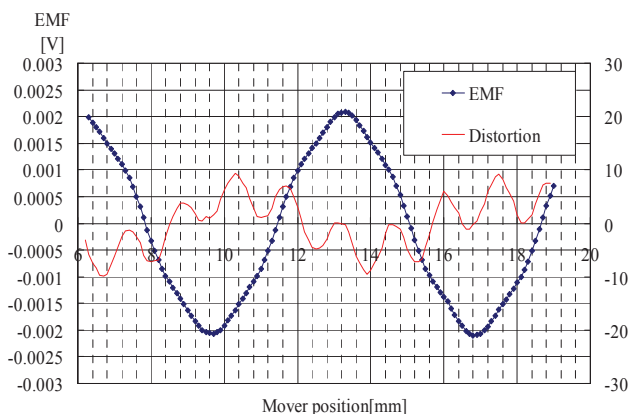
$$D = \sqrt{\frac{|V_2|^2 + |V_3|^2 + \dots}{|V_1|^2}} \quad (4)$$

で表す。

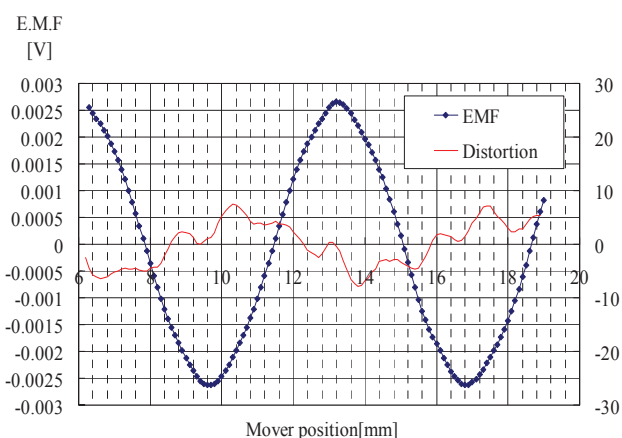
ここで、 $V_1$ は基本波、 $V_2$ は2次高調波、 $V_3$ は3次高調波である。誘起電圧(EMF)と歪みの計算結果を図6に示す。



(a) Radial array



(b) Magnetic ring array



(c) Halbach array

Fig.6 Calculated value of the EMF wave and the Distortion.

表3に3.2項で求めた推力を含めた一連の計算結果を示す。磁性リング配列が最もEMFが低く、歪率が最も高い。逆に最も歪率が低いのはラジアル配列である。ハルバッハ配列は最もEMFが高く、推力密度も高いが、歪率はラジアル配列よりも高い。

Table 3 Series of results.

Type	Radial array	Magnetic ring array	Halbach array	
Item [Unit]				
EMF[V]	0.002378	0.002076	0.002670	
THD[%]	6.39	10.85	9.11	
Thrust [N]	at 1.5A	3.95 (3.98)	3.71 (3.76)	4.70 (4.75)
Thrust constant density [N <sup>2</sup> /W·m <sup>3</sup> ×10 <sup>6</sup> ]	0.098	0.092	0.115	

※括弧内は測定値

### 3.4 歪率低減

次に、歪率低減について検討する。本項では、ハルバッハ配列において、磁石のアスペクト比を変動させることによる歪率の低減についてまとめる。 $R$ はラジアル配向磁石、 $T$ はスラスト配向磁石である(図7参照)。3.2項では、最も推力が高くなる寸法が、 $R$  2:  $T$ であったが、これを基本寸法とし、アスペクト比を変動させることで歪率を算出した。尚、ハルバッハ配列の歪率の指標としては、最も歪率が低い結果となったラジアル配列の歪率以下の値とする。

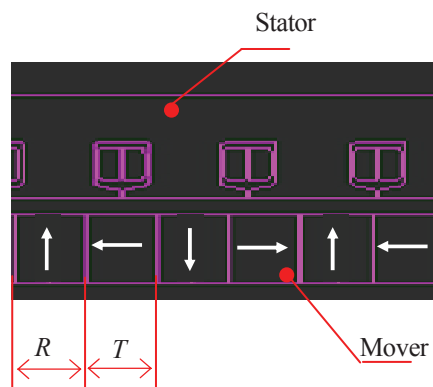


Fig.7 Schematic diagram of aspect ratio.

ここで,

CASE I (Base) . . . . . R 2 : 1 T  
 CASE II . . . . . R 1 : 1 T  
 CASE III . . . . . R 5 : 1 T  
 CASE IV . . . . . R 1 : 5 T  
 CASE V . . . . . R 1 : 2 T  
 とする。

実際は、0.1mm 刻みで磁石寸法(比率)変動させたが、細かな比率変動では変化が少ない為、ここでは5つのケースを抜粋する。

計算結果を表4に示す。アスペクト比の変動によって、THDは最大10%低減した。CaseVが最も歪率が低く、これはエアギャップ中の磁束密度分布の空間高調波が、最も抑制された為である。

Table 4 Calculated results of aspect change.

Type Item [Unit]	Case I (Bass)	Case II	Case III	Case IV	Case V
EMF[V]	0.002670	0.002618	0.002511	0.001813	0.002639
THD[%]	9.11	8.68	9.05	9.91	6.38

#### 4 結言

今回、3種類の外径φ10円筒リニアモータにおけるEMFならびに推力及び推力密度とTHDの結果を示した。今回の配列における特性の優劣は下記の通りである。

・EMF

優 ハルバツハ配列>ラジアル配列>磁性リング配列 劣

・歪率

優 ハルバツハ配列≧ラジアル配列>磁性リング配列 劣

小型化に伴う推力密度を維持する為には、ハルバツハ配列が有効な手段である一方で、THDは高くなる。磁石のアスペクト比を変動させる事により、推力低下を抑えつつ、THDが低減することを示した。

(2014年2月4日受付)

#### 参考文献

[1] Nan-Chyuan Tsai, Chao-Wen Chiang, Design and analysis of magnetically drive actuator applied for linear compressor, Mechatronics 20 The Science of Intelligent Mechines, pp.596-603,2010.  
 [2] K.Nakaiwa, A.Yamada, K.Tashiro, H.Wakiwaka, COMPARISON OF THRUST CHARACTERISTICS OF PENCIL SIZE CYLINDER TYPE LINEAR MOTOR WITH DIFFERENT MAGNET ARRAY, Journal of the Japan society of applied electro magnetics and mechanics, pp.481-484, 2009.  
 [3] K.Nakaiwa, H.Wakiwaka, K.Tashiro, Thrust characteristic comparison of Interior magnet type pencil size cylinder linear motor, Journal of the Japan society of applied electro magnetics and mechanics, pp.509-512, 2011.  
 [4] 小久江幸二, 楡井雅巳, 城下健治, 有限要素法電磁界解析自動化ツールの開発, 第19回MAGDAコンファレンス in 札幌, 電磁現象および電磁力に関するコンファレンス講演論文集, pp. 629-632 2010.  
 [5] Koichi Nakaiwa ,Hiroyuki Wakiwaka, Analysis of Distortion Factor of Three Phase Linear Synchronous Motor, PIERS Proceedings, pp.584-588, March25-28, Taipei, 2013.