リニアモータの支持機構として直線軸受を用いた場合の軸受特性

正員 水 野 勉 (アマダ)
 正員 山 本 栄 (アジア金属)
 正員 山 田 一 (信州大)

Kinetic Behavior of Linear Motion Bearings Applied Linear Motor

Tsutomu Mizuno, Member (Amada Co., Ltd.), Shigeru Yamamoto, Member (Asia Metal Industry Co., Ltd.), Hajime Yamada, Member (Shinshu University)

This paper deals with the kinetic behavior of linear motion bearings applied a permanent magnet type linear synchronous motor (LSM). It is necessary to make clear normal force characteristics of the LSM, because the normal force acts on the bearings and influences the life time of the bearings. Static thrust and normal force characteristics of the LSM were investigated from both sides of theory and experiment, and the nominal life of the bearings was investigated through the experimental transit. The results are as follows:

(1) The static thrust is 450 N, and the normal force is 2.9 kN at exciting current 8.8 A. The normal force increases in proportion to exciting current, and shows constant value for displacement. The error of calculated value through finite element method is found within 20% of measured value of normal force.

(2) The acceleration arising from the bearings themselves is over 50 m/s². The maximum variable load generated by the acceleration reaches to 1.1 kN, and namely the ratio of the variable load is equal to 38% of the normal force.

(3) The nominal life of the bearings is calculated in 4,100 km with empirical load factor. In the test for durability, the LSM is driven in reciprocating motion at maximum speed 2 m/s, stroke length of 800 mm. The distance of the test with periodic lubrication has been found over 16,000 km. It will be necessary to reconsider the load factor of the linear motion bearings.

キーワード：リニアモータ，永久磁石形リニア同期モータ，直線軸受，垂直力，変動荷重，有限要素法

1. ま え が き

リニアモータの支持機構を考慮する際，最も大きな課題は，連続的に運動する可動子のエアギャップを長期間安定して保持しなければならないことである。

片側式リニアモータに用いられる支持機構には，垂直力が作用するため，垂直力と支持機構について検討する必要がある。垂直力を軽減するために，両側式や円筒状リニアモータも検討されている⁽¹⁾。しかし，リ

ニアモータの機械装置への固定方法などに難点があり，長ストローク化は困難である。

著者らは，FA 機器の高速化に伴い，高速・高精度位置決め能力を有し，長ストローク化が容易な片側式の永久磁石形リニア同期モータ (Permanent Magnet Type Linear Synchronous Motor, 以下 LSM) に着目して，永久磁石形 LSM のサーボ化を行い，その推力特性⁽²⁾⁽³⁾および垂直力特性を検討してきた⁽⁴⁾。

本論文は，リニアモータの支持機構として直線軸受

を使用する場合の留意点について述べ、更に走行実験を行った結果について考察したもので、以下の項目を明かにしようとするものである。

- (1) LSMの垂直力特性について、実測と有限要素法(以下、FEM)による解析の両面から検討する。
- (2) 直線軸受に作用する加速度を測定することで、直線軸受に加わる変動荷重を明確にする。
- (3) 直線軸受の走行実験を行い、経験的に得られている荷重係数を用いた軸受寿命の計算値と、実走行距離を比較することで荷重係数について検討する。

2. 直線軸受に作用する荷重とLSMの構造

〈2・1〉 直線軸受に作用する荷重と定格寿命

図1は片側式リニアモータの直線軸受に作用する荷重を表したものである。直線軸受はボール循環式直線軸受で、軸受ブロックと軸受レールから構成されている。同図中に示すように直線軸受には、リニアモータの垂直力 F_z と変動荷重 F_a および自重 F_w が作用する。

変動荷重は、直線軸受に外部から作用するものと直線軸受自身が発生するものに大別される。本論文は、直線軸受自身が発生する変動荷重について着目している。直線軸受自身が発生する変動荷重は、転動するボールが軸受ブロックと軸受レール間のサーキュラーク溝を通過するときに、ボールに作用する荷重が変化することによって生ずる。この変動荷重は、加速度 a_z を発生させる。

変動荷重の最大値 F_a および自重 F_w は、それぞれ次式から求めることができる。

$$F_a = (m_m + m_L) \times a_z \quad (\text{N}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$F_w = (m_m + m_L) \times a_g \quad (\text{N}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 m_m 、 m_L ：可動子質量と積載質量(kg)、 a_z ：軸受に作用する加速度の最大値

(m/s^2)、 a_g ：重力加速度(=9.8 m/s^2)

図1に示したように、2本の軸受レール上に配置された4個の軸受ブロックで荷重を受ける場合、軸受ブロック1個あたりに作用する荷重 P_m と直線軸受の定格寿命 L_b は、次式で与えられている⁽⁶⁾。

$$P_m = (F_z + F_a + F_w) / 4 \quad (\text{N}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$L_b = 50 \left(\frac{f_c C}{f_w P_m} \right)^3 \quad (\text{km}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 C ：直線軸受の基本動定格荷重(N)、 f_c ：接触係数、 f_w ：荷重係数

上式において、基本動定格荷重 C は、1個の軸受ブロックで運転したとき、直線軸受の定格寿命が $L_b = 50 \text{ km}$ となるような、大きさの変動しない荷重のことである。また、接触係数は1本の軸受レール内に2個の軸受ブロックを近接して配置する場合の補正係数で $f_c = 0.81$ である。更に、荷重係数 f_w は、変動荷重が正確に求められない場合用いる補正係数で、経験的に1~3.5の範囲にあり、移動速度2 m/s 以上では $f_w = 3$ とされている⁽⁵⁾。

〈2・2〉 永久磁石形LSMの構造 図2は永久磁石形LSMの構造と直線軸受に作用する垂直力を表したものである。(a)図は永久磁石形LSMの正面図で、(b)図は側面図である。一次側は可動子で、電磁鋼板が積層された電機子鉄心に分布巻かれた三相巻線が施されており、6極構造となっている。二次側(固定子)のヨークには、一次側と対面する面がN、S交互になるように永久磁石が配置されている。

直線軸受はボール循環式直線軸受で、軸受レールと軸受ブロックから構成されており、この直線軸受にLSMの垂直力が作用する。直線軸受により、一次側と二次側間のギャップの長さは、0.7 mm に保たれている。

ブラケットを介して、一次側フレームに固定された回転形エンコーダのシャフトにはピニオンが取り付けられており、ラックとピニオンの作用により直線/回転運動変換をし、回転形エンコーダで可動子の位置検出を行っている。

表1に永久磁石形LSMの仕様を示す。同表に示すように、ボールピッチ τ は40 mm 、スロットピッチ τ_s は6.667 mm である。

永久磁石形LSMをサーボモータとして応用するためには大きな推力が要求され、また直線軸受の耐久性の観点から、軸受に作用する垂直力が小さく、かつ励磁電流の変化と一次側の移動に伴う垂直力の変動も少ないことが望ましい。

ギャップの長さを大きくすることで垂直力を軽減す

図1 直線軸受に作用する荷重

Fig.1. The loads acting on the linear motion bearings.

(a) 正面図

(b) 側面図

図 2 永久磁石形 LSM の構造
Fig. 2. Structure of a permanent magnet type LSM.

表 1 永久磁石形 LSM の仕様
Table 1. Specifications of the LSM.

項 目	記号	数値
一次側 (固定子)	相数	m 3 相
	極数	P 6 極
	コイル巻数	N 216 回
	スロットピッチ	τ_s 6.667 mm
	電機子鉄心の積層厚さ	L 68 mm
二次側 (固定子)	電機子鉄心の長さ	l 243 mm
	ボールピッチ	τ 40 mm
	磁石の厚さ	H 3 mm
	磁石幅	W 34 mm
ギャップの長さ		g 0.7~1.1 mm

ることができるが、これに伴い推力も減少する。そこで表 1 に示したように、ギャップの長さを 0.7~1.1 mm および励磁電流を 0~8.8 A の範囲で変化させ、ギャップの長さとお励磁電流が静推力および垂直力に与える影響について検討する。

〈2・3〉 駆動回路の構成 図 3 に LSM の駆動回路の構成を示す。駆動回路は大別して、「位置速度制御部」と「電流制御部」から構成されている。回転形

図 3 LSM の駆動回路の構成
Fig. 3. Constitution of a driving circuit for LSM.

エンコーダの位置信号は、それぞれの制御部にフィードバックされる。位置速度制御部は、位置指令および位置信号に基づき電流指令を算出し電流制御部に与える。電流制御部は、一次側の変位 x に対応して変化する三相正弦波を作り、この三相正弦波と電流指令の大きさに比例した三相正弦波電流 I_u, I_v, I_w は、各コイルに供給され、それぞれ次式で与えられる。

$$I_u = \sqrt{2}I \sin\left(\frac{\pi}{\tau}x\right) \quad (\text{A}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$I_v = \sqrt{2}I \sin\frac{\pi}{\tau}\left(x + \frac{2}{3}\tau\right) \quad (\text{A}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$I_w = \sqrt{2}I \sin\frac{\pi}{\tau}\left(x - \frac{2}{3}\tau\right) \quad (\text{A}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 I : 励磁電流 (A), τ : ボールピッチ (m), x : 変位 (m)

3. 垂直力特性

〈3・1〉 有限要素法による静推力と垂直力の解析

静推力 F_x の表現式は、二次元非線形場の FEM (ベクトルポテンシャル法) を用いて導出され、各相の発生推力とディテント力の和として以下のように表される⁽³⁾。

$$F_x = -\frac{\sqrt{2}\pi}{\tau}NI \left\{ \sin\left(\frac{\pi}{\tau}x\right) \sum_{n=1}^{\infty} nK_{wn}\Phi_n \times \sin\left(\frac{\pi}{\tau}nx\right) + \sin\frac{\pi}{\tau}\left(x + \frac{2}{3}\tau\right) \times \sum_{n=1}^{\infty} nK_{wn}\Phi_n \sin\frac{\pi}{\tau}n\left(x + \frac{2}{3}\tau\right) + \sin\frac{\pi}{\tau}\left(x - \frac{2}{3}\tau\right) \times \sum_{n=1}^{\infty} nK_{wn}\Phi_n \sin\frac{\pi}{\tau}n\left(x - \frac{2}{3}\tau\right) \right\} + \sum_{n=1}^{\infty} F_{dn} \sin\left(\frac{\pi}{\tau}nx\right) \quad (\text{N}) \quad \dots\dots\dots (8)$$

(a) 平均静推力のギャップ依存性
(励磁電流 $I=3.5$ A)

(b) 垂直力のギャップ依存性
(励磁電流 $I=0$ A, 変位 $x=0$ mm)

図4 平均静推力と垂直力のギャップ依存性
Fig. 4. Dependence of the static thrust and normal force on the gap length.

ここに、 N :一相当りのコイル巻数、 K_{wn} :第 n 次高調波成分の巻線係数、 Φ_n :鎖交磁束の第 n 次成分 (Wb)、 F_{dn} :ディテント力の第 n 次成分 (N)

更に、平均静推力 $\bar{F}_x$ を下式で定義する。

$$\bar{F}_x = (F_{\max} + F_{\min})/2 \quad (\text{N}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $F_{\max}$:静推力 F_x の最大値 (N)、

$F_{\min}$:静推力 F_x の最小値 (N)

垂直力 F_z は、可動子全体を含む領域で、FEMを用いてギャップの磁束分布を求め、次にマクスウェルの応力法で計算した。

〈3・2〉 垂直力特性 永久磁石形 LSM には大きな静推力が要求され、また直線軸受の耐久性の観点から、軸受に作用する垂直力が小さく、かつ励磁電流の変化および可動子の移動に伴う垂直力の変動も少ないことが望ましい。垂直力の変動は、軸受に衝撃として作用し軸受の寿命を低下させる要因の一つであるた

(a) 垂直力の励磁電流依存性
(変位 $x=0$ mm)

(b) 垂直力の変位依存性
(励磁電流 $I=8.8$ A)

図5 垂直力の励磁電流と変位依存性
(ギャップの長さ $g=0.7$ mm)

Fig. 5. Dependence of the normal force on the exciting current and displacement.

め⁽⁶⁾、垂直力の大きさとその変動を求めておくことは重要なことである。ギャップの長さを大きくすることで垂直力を軽減できるが、推力も減少してしまう。

そこで、以下に示す項目に対して検討を行った。

- (1) 平均静推力と垂直力のギャップ依存性。
- (2) 励磁電流と一次側可動子の変位に対する垂直力の変化。

図4は、平均静推力と垂直力のギャップ依存性である。(a)図は励磁電流 $I=3.5$ A における平均静推力のギャップ依存性である。同図中に示した平均静推力の実測値は、ギャップの長さに反比例している。FEMによる計算値は、まず(8)式により静推力を求め、次に(9)式で平均静推力を求めたものである。FEM計算値の計算誤差は、実測値に対して8%である。

(b)図は励磁電流 $I=0$ A, 変位 $x=0$ mm における垂直力のギャップ依存性である。垂直力の実測値は、ギャップの長さの二乗に反比例している。FEM計算値はマクスウェルの応力法で求めたもので、計算誤差は実測値に対して 20% である。垂直力の計算誤差が大きな値となったのは、一次側の側面からの漏れ磁束を考慮していないためであると考えられる。

図 5 はギャップの長さ $g=0.7$ mm における垂直力の励磁電流と変位依存性である。(a)図は垂直力の励磁電流依存性で、垂直力は励磁電流に比例して増加し、電流を 0 から 8.8 A に変化させることで垂直力は、2.7 kN から 2.9 kN に約 7% 増加している。励磁電流 8.8 A における平均静推力は 450 N で⁽⁹⁾、垂直力は静推力の 6.4 倍となった。

(b)図は励磁電流 8.8 A における垂直力の変位依存性である。同図は、変位によらず垂直力が 2.9 kN と一定であることを示している。図 5 に示した FEM 計算値の計算誤差は約 20% である。

4. 直線軸受に作用する荷重と走行実験

〈4・1〉 直線軸受に作用する変動荷重 LSM に用いた直線軸受の仕様を表 2 に示す⁽⁵⁾。この直線軸受はボール循環式玉軸受で、基本動定格荷重 12.5 kN、軸受に用いられているボールの直径は 3.175 mm である。

垂直力の変動と直線軸受自身が発生する変動荷重を明確にするために、直線軸受に作用する加速度を測定した。

図 6 は、一次側可動子を速度 2 m/s で駆動した場合の直線軸受に作用する加速度の実測値である。これは、軸受ブロックの真上の一次側フレームに加速度ピックアップを瞬間接着材で固定し、垂直力方向の加速度を測定したものである。このときのギャップの長さは 0.7 mm である。

図 6 (a) は加速度波形で、その最大値は 50 m/s^2 以上にも達している。(b)図は加速度のパワースペクトラムである。加速度のパワースペクトラムは、周波数 316 Hz の成分が最も大きく、またこの周波数の高調

波が主な成分となっている。更に、加速度の基本波周波数は、転動するボールが軸受ブロックと軸受レール間のサーキュラーク溝 (図 1 参照) を通過するときに、ボールに作用する荷重が変化することで発生する振動の周波数 315 Hz と一致する。このことから垂直力方向の加速度は、直線軸受が発生するものであることがわかる。

なお、ボールピッチ $\tau=40$ mm およびスロットピッチ $\tau_s=6.667$ mm に起因する垂直力の変動成分、すなわち周波数 50,300 Hz の加速度の成分は少ない。このことは、図 5 に示したように、一次側可動子の変位による垂直力の変動が少ないことを裏付けている。

表 3 は直線軸受に作用する荷重である。変動荷重の最大値 F_a は、(1)式に可動子質量と積載質量の和 22 kg および直線軸受に作用する加速度の最大値 50 m/s^2 を代入して求めた。同表に示すように、直線軸

(a) 加速度波形

(b) 加速度のパワースペクトラム

図 6 直線軸受に作用する加速度
Fig. 6. Acceleration waveforms acting on the linear motion bearings.

表 2 直線軸受の仕様

Table 2. Specifications of the linear motion bearings.

項目	記号	数値
基本動定格荷重	C	12.5 kN
基本静定格荷重	C_0	25.2 kN
ボールの直径	d_b	3.175 mm

表 3 直線軸受に作用する荷重

Tabl 3. The loads acting on the linear motion bearings.

項目	記号	数値
垂直力	F_z	2.9 kN
変動荷重	F_a	1.1 kN
自重	F_w	0.2 kN

図 7 走行実験に用いた LSM の速度パターン
(最高速度 2 m/s)

Fig. 7. A speed pattern of the LSM for experimental transit.

受自身が発生する変動荷重の最大値は、1.1 kN で、垂直力 2.9 kN (励磁電流 8.8 A) に対して 38% と大きな値となった。

〈4・2〉 直線軸受の走行実験 図 7 は直線軸受の走行実験に用いた速度パターンである。加速度 10 m/s²、最高速度 2 m/s、1 サイクルの移動距離 1.6 m、1 サイクル 2.8 秒の駆動を行った。

また、走行実験は室温 25°C の恒温室でゴミが軸受に作用しない良好な環境条件で実施した。走行距離 500 km ごとにグリース⁽⁷⁾を軸受に給油し、LSM の速度波形、励磁電流波形を測定した。約 1 年間の連続運転を実施し、16,000 km の走行実験を行った結果、これら測定値の変化および軸受の剥離現象は認められず、実用上まだ耐久性があることを確認した。

図 8 は荷重係数に依存する直線軸受の定格寿命の計算値である。同図中に示した“変動荷重を考慮”は表 3 に示した直線軸受に作用する荷重を(4)式に代入して求めた。また、“変動荷重を考慮しない”は、変動荷重の最大値を $F_a=0$ N、すなわち垂直力と自重だけから算出したものである。

リニアモータの設計時に変動荷重を正確に算出することは困難であるから、図 8 の“変動荷重を考慮しない”に示した特性から直線軸受の定格寿命を推定することになる。この場合、移動速度 2 m/s で経験的に得られている荷重係数 $f_w=3^{(8)}$ を用いると定格寿命の計算値は 4,100 km となった。しかし、走行実験によれば直線軸受の定格寿命は、16,000 km 以上である。この走行距離は、荷重係数の経験値 $f_w=3$ を用いた定格寿命計算値 4,100 km の 3.9 倍である。また、図 8 中に示したように、走行距離 16,000 km は、荷重係数 1.9 に相当する。

更に、図 8 の“変動荷重を考慮”に示した直線軸受

図 8 荷重係数に依存する直線軸受の定格寿命の計算値

Fig. 8. Dependence of the calculated value of nominal life on the load factor of the linear motion bearings.

の定格寿命の計算値では、走行距離 16,000 km は荷重係数 1.4 となった。

このように、経験的に得られている荷重係数を用いると直線軸受の定格寿命の計算値が大きな範囲にばらつくことになる。従って、今後はこの荷重係数の再検討が必要となろう。

5. あとがき

本論文では、リニアモータの支持機構として直線軸受を用いる場合の留意点について述べた。直線軸受に作用する LSM の垂直力と直線軸受自身が発生する変動荷重について検討し、走行実験を行った。本論文で得られた結果を要約すると以下ようになる。

(1) LSM の励磁電流 8.8 A における平均静推力は 450 N、垂直力は 2.9 kN であり、垂直力は平均静推力の 6.4 倍であった。また、垂直力は励磁電流に比例して増加するが、変位によらず一定であった。更に、FEM による垂直力の計算誤差は 20% で、一次側可動子側面からの漏れ磁束も考慮する必要があることがわかった。

(2) 直線軸受の構造に起因して軸受自身が発生する加速度は 50 m/s² 以上であり、またこの加速度による変動荷重の最大値は 1.1 kN で垂直力の 38% であった。

(3) 移動速度から経験的に得られている荷重係数 $f_w=3$ を用いた場合の直線軸受の定格寿命計算値は、4,100 km であった。しかし、走行実験により 16,000 km 以上の耐久性があることを確認した。設計段階で

定格寿命を高精度で推定するためには、荷重係数について多くの機関で再検討の必要がありそうである。

最後に、本研究について熱心な御討論をいただいた電気学会搬送システム用リニアモータ調査専門委員会(委員長 武蔵工業大学 海老原助教授)の各委員に対して深謝の意を表する。

(平成3年10月8日受付, 同4年5月20日再受付)

文 献

- (1) 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, 6 (平元)
- (2) 水野・小俣: 「永久磁石形 LSM の静推力解析」, 電気学会リニアドライブ研資, LD-90-28, p. 1 (平2)
- (3) 水野・山田: 「永久磁石形リニア同期モータの静推力特性」, 電学論 D, 111, 482 (平3-6)
- (4) 水野・山本: 「リニア同期モータに用いた循環式玉軸受の走行実験報告」, 電気学会マグネティックス・リニアドライブ合同研資, MAG-91-34; LD-91-8, p. 69 (平3)
- (5) 「直動システム」, THK(株)カタログ, No. 100-1, p. 16 (平元)
- (6) 日本潤滑学会 編: 潤滑ハンドブック, p. 695(昭62)養賢堂
- (7) 「AFC グリース」, THK(株)カタログ, No. 93-1 (昭63)

水 野 勉 (正員)

昭和33年6月生。58年3月信州大学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)アマダ入社。同社技術研究所にてリニアモータの工作機械、板金機械への応用に関する研究開発に従事。

山 本 栄 (正員)

昭和24年9月生。53年東京商船大学大学院商船学専攻修士課程修了。同年4月(株)アマダ入社。塑性加工およびリニアモータの研究後、平成元年アジア金属工業に移籍、現在に至る。

山 田 一 (正員)

昭和8年4月生。34年東京工業大学大学院修士課程修了。34年信州大学工学部電気工学科助手, 41年同助教授, 59年同教授。工学博士。磁気回路解析を研究の中心に据えてリニアモータ, 磁気センサと電磁型人工心臓の研究に従事。「日本国際賞」推薦委員, 広島大学医学部教授(併任)。