

磁石埋め込み型リニア同期モータの推力密度の限界

The Maximum Thrust Density of Interior Permanent Magnet Linear Synchronous Motor

M. Norhisam・脇若 弘之・神谷 昭範

矢島 久志*・田村 和也*・藤原 伸広*・細野 正行*・高田 進*

信州大学工学部電気電子工学科, 長野県長野市若里 4-17-1 (〒380-8553)

*SMC 株式会社, 茨城県筑波郡谷和原村絹の台 4-2-2 (〒300-2493)

M. Norhisam, H. Wakiwaka, A. Kamiya,

H. Yajima*, K. Tamura*, N. Fujiwara*, M. Hosono* and S. Takada*

Faculty of Engineering, Shinshu University, 4-17-1 Wakasato, Nagano city, Nagano 380-8553

*SMC Corporation, 4-2-2 Kinunodai, Yawara village, Tukuba district, Ibaragi 300-2493

Linear motors have been applied in a wide range of fields in the recent years. A linear motor differs from a rotation motor, which has a simple structure and is easy to miniaturize. For office and factory automation, however, the small size and high thrust of linear motor are required. This paper discusses the maximum thrust density of a proposed Interior Permanent Magnet Linear Synchronous Motor (IP-LSM). To estimate the maximum thrust density of the IP-LSM, we studied the expression of the thrust density. The law of conservation of energy was used to clarify the relationship between motor size and the expression for thrust density. The estimated maximum thrust density is $1.2 \times 10^6 \text{ N/m}^3$. The thrust density of the proposed IP-LSM is 30% less than the estimated maximum value. The thrust constant density of the proposed IP-LSM, however, is 3.6 times larger than that of the MG-LSM¹⁾.

Key words: linear motor, IP-LSM, thrust density expression, maximum thrust density.

1. はじめに

近年, リニアモータは, 広い分野で応用されている。OA や FA の分野では小形, 高推力リニアモータが求められる。我々は高推力が可能な新しい構成の磁石埋め込み型リニア同期モータ²⁾ (Interior Permanent Magnet Linear Synchronous Motor 以下 IP-LSM と略す) を提案した。本論文では IP-LSM の推力密度限界値を推定するため, IP-LSM の推力密度式を検討した。IP-LSM の寸法, 材料特性の関係を明らかにし, エネルギーの保存則を用いて推力密度式³⁾を導出した。得られた推力密度式を用いて, IP-LSM の設計条件を考慮して IP-LSM の推力を最大にするモータの寸法, 材料特性の影響を検討した。

本論文の内容を以下に示す。

- (1) IP-LSM の基本構造と動作原理,
- (2) 推力密度式の算出,
- (3) IP-LSM の推力密度限界,
- (4) 試作した IP-LSM の特性比較。

2. IP-LSM の基本構造と動作原理

2.1 IP-LSM の構造

Fig. 1 に, IP-LSM の基本構造を示した。IP-LSM の固定部は固定ヨークとコイルから構成されている。可動部は可動ヨークと可動磁石から構成されている。三相のコイルは固定ヨーク内に埋め込まれており, 各相において集中巻とした。可動磁石は可動ヨークに埋め込まれている。永久磁石はストローク方向に着磁されている。固定部は可動部の上下に設置されている。可動ヨーク, 固定ヨークの材質は一般構造用圧延材 SS400 ($B_s = 1.8 \text{ T}$, $H_s = 10 \text{ kA/m}$) を用いる。永久磁石はエネルギー積が高い希土類 (Nd) 磁石 ($BH_{\max} = 374 \text{ kJ/m}^3$) を用いる。

2.2 IP-LSM の動作原理

IP-LSM の永久磁石から発生した磁束はギャップを通り, 固定ヨークに流れ込む。コイルに電流を流すとコイル電流による磁束はギャップ内の磁気エネルギーを変化させる。よって, 可動部に力が発生し, 推力となる。コイル電流の流れ方向を切り替えることによって可動部が連続的に移動する。

Fig. 2 に, 二相励磁した場合のコイル電流のタイミングチャートを示した。コイル電流はプラス, マイナス方向に切り替えて加える必要がある。

また, 広く一般に知られている PM 形 LPM と異なって, 本論文で提案の永久磁石が可動子に埋め込まれている IP-LSM の場合は, コイル AB 相に電流を流した時, AB 相の歯先に発生した推力は同じ方向となり, 推力の逆向きの力は作用しないので大推力が期待できる。

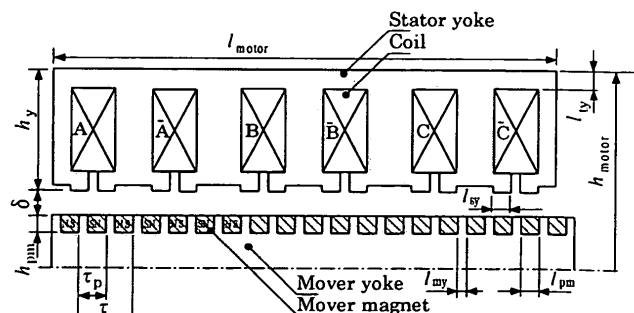


Fig. 1 Basic structure of IP-LSM.

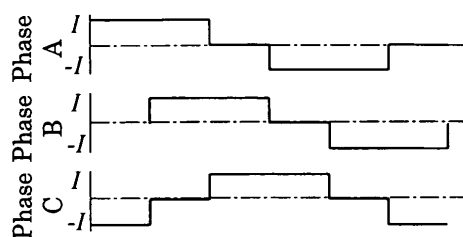


Fig. 2 Time chart of input current of IP-LSM(2-phase).

3. 推力密度式の算出

3.1 各寸法の関係

Fig. 3 に、IP-LSM の推力を考慮する上でその基礎構造を示した。各ヨークの厚さは l_y である。固定ヨークと永久磁石の高さはそれぞれ h_y , h_{pm} とした。ピッチの長さは τ とした。また、IP-LSM の奥行き幅は L である。

永久磁石から発生した磁束は Fig. 3 のようにヨーク以外に漏れないと仮定した。また、固定ヨークと可動ヨークに流れる磁束の比率は、ギャップが十分小さいという仮定から 1 : 1 とした。

コイルの電磁エネルギーを計算するため、コイルの断面積 A_{co} と各寸法の間を明確にする。コイルの断面積は次式となる。

$$A_{co} = (\tau_p - l_{ty}) \times (h_y - l_{ty}) \quad [m^2] \quad (1)$$

磁束の連続性によりモータの寸法と材料特性の間を明確にできる。ヨークの厚さと材料特性の間は次式となる。ただし、 $B_d / B_s < 1$ である。

$$B_s \times l_{ty} = B_d / 2 \times h_{pm} \quad [Wb/m] \quad (2)$$

$$l_{ty} = \frac{B_d}{2B_s} \times h_{pm} \quad [m] \quad (3)$$

ここに、 B_d : 永久磁石の動作点 [T],

B_s : ヨークの飽和磁束密度 [T]

式 (3) を式 (1) に代入するとコイル断面積と各寸法、材料特性の間は次式に展開できる。

$$A_{co} = \left(\tau_p - \frac{B_d}{2B_s} h_{pm} \right) \times \left(h_y - \frac{B_d}{2B_s} h_{pm} \right) \quad [m^2] \quad (4)$$

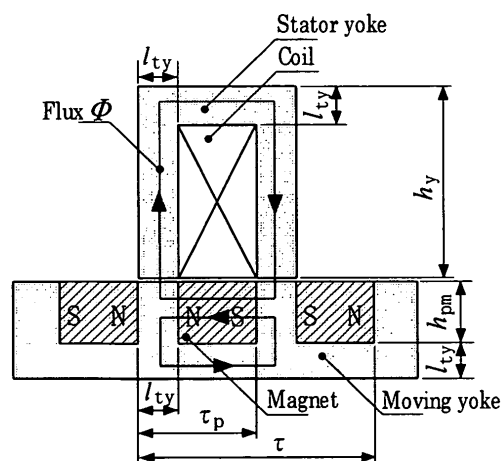


Fig. 3 IP-LSM parameters.

固定ヨークに流れる永久磁石から発生した全磁束 Φ は次式で与えられる。

$$\Phi = B_d / 2 \times h_{pm} \times L \quad [Wb] \quad (5)$$

また、コイルの起磁力 NI は式 (6) で与えられる。そして、式 (4) を式 (6) に代入するとコイル起磁力は式 (7) のように展開できる。

$$NI = J_d \times \xi \times A_{co} \quad [A] \quad (6)$$

$$NI = J_d \times \xi \times \left(\tau_p - \frac{B_d}{2B_s} h_{pm} \right) \times \left(h_y - \frac{B_d}{2B_s} h_{pm} \right) \quad [A] \quad (7)$$

ここに、 J_d : 電流密度 [A/m²],

ξ : コイルの占積率

3.2 推力密度式

コイルに電流を流すとコイルの起磁力により発生する電磁エネルギー E_m は次式で与えられる。

$$E_m = 2 \times \Phi \times NI \quad [J] \quad (8)$$

コイルによる電磁エネルギー E_m と平均推力 F_{av} の関係は次式となる。ただし、 $\tau = 2 \tau_p$ である。

$$E_m = F_{av} \times \tau \quad [J] \quad (9)$$

式 (5), (7), (8), (9) を展開すると平均推力式 F_{av} が得られる。

$$F_{av} = \frac{\Phi \times NI}{\tau_p} \quad [N] \quad (10)$$

$$= B_d / 2 \times J_d \times L \times \xi \times \frac{h_{pm}}{\tau_p} \times \left(\tau_p - \frac{B_d}{2B_s} h_{pm} \right) \times \left(h_y - \frac{B_d}{2B_s} h_{pm} \right) \quad [N] \quad (11)$$

IP-LSM の全体積 V_m は次式で与えられる。ここで、ギャップはモータ全体の寸法より十分に小さいため無視した。

$$V_m = (\tau_p + l_{ty}) \times (h_y + h_{pm} + l_{ty}) \times L \\ = \left(\tau_p + \frac{B_d}{2B_s} h_{pm} \right) \times \left(h_y + h_{pm} + \frac{B_d}{2B_s} h_{pm} \right) \times L \quad [m^3] \quad (12)$$

推力密度は F_{av} / V_m のことより、式 (11), (12) を展開すると推力密度は次式となる。

$$\frac{F_{av}}{V_m} = B_s \times J_d \times \xi \times \left(\frac{h_{pm}}{\tau_p} \right) \times \left(\frac{B_d}{2B_s} \right) \\ \times \left\{ \frac{\left(\tau_p - \frac{B_d}{2B_s} h_{pm} \right) \times \left(h_y - \frac{B_d}{2B_s} h_{pm} \right)}{\left(\tau_p + \frac{B_d}{2B_s} h_{pm} \right) \times \left(h_y + h_{pm} + \frac{B_d}{2B_s} h_{pm} \right)} \right\} \quad [N/m^3] \quad (13)$$

式 (13) より、推力密度は主に、ヨークの飽和磁束密度 B_s 、電流密度 J_d 、モータの寸法と材料特性による影響が

大きいことが分かった。式 (13) の () 内を推力密度係数 k_g として以下の式のように定義した³⁾。

$$k_g = \left(\frac{h_{pm}}{\tau_p} \right) \times \left(\frac{B_d}{2B_s} \right) \times \left\{ \frac{\left(\tau_p - \frac{B_d}{2B_s} h_{pm} \right) \times \left(h_y - \frac{B_d}{2B_s} h_{pm} \right)}{\left(\tau_p + \frac{B_d}{2B_s} h_{pm} \right) \times \left(h_y + h_{pm} + \frac{B_d}{2B_s} h_{pm} \right)} \right\} \quad (14)$$

3.2 IP-LSM の推力密度限界

IP-LSM の推力密度限界を検討するため、推力密度係数 k_g を計算し、寸法と材料特性が、IP-LSM の推力密度に与える影響を検討する。以下の計算はピッチ $\tau_p = 6 \text{ mm}$ ($\tau_p = 3 \text{ mm}$)、飽和磁束密度 $B_s = 1.8 \text{ T}$ を一定値とした。

Fig. 4 に、固定ヨークの高さが推力密度係数 k_g に与える影響を示した。固定ヨークの高さを大きくすると推力密度係数は飽和傾向を示した。固定ヨークの高さ h_y はある値以上に大きくしても推力密度が大きくなることが分かった。永久磁石の高さ h_{pm} が 3.0 mm の時、推力密度係数が約 0.16 と最大値であった。

Fig. 5 に、永久磁石の高さが推力密度係数 k_g に与える影響を示した。永久磁石の高さに対して推力密度係数 k_g は極大値を示した。永久磁石の高さ h_{pm} が 2 mm から 3 mm の間では推力密度係数 k_g が最大となった。固定ヨークの高さが大きいほど推力密度係数 k_g の最大値となる永久磁石の高さが 2 mm 付近から 3 mm 付近に変化した。

Fig. 6 に、永久磁石の動作点が推力密度係数 k_g に与える影響を示した。永久磁石の動作点 B_d によって極大値になることが分かった。実際の永久磁石の B_d は、ほぼ 2 T 以下であることを考慮すると、永久磁石の高さ h_{pm} の値は、 2 mm とすることが良いことが分かった。

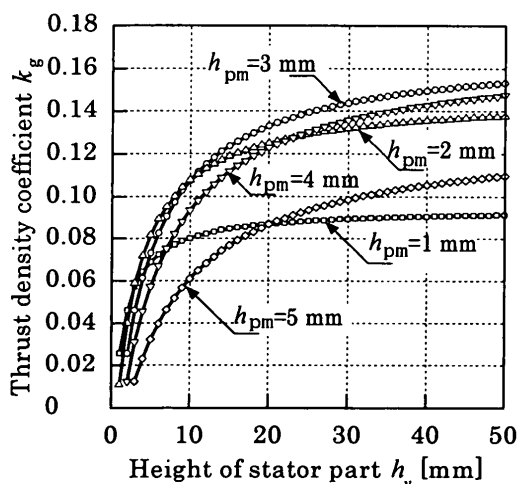


Fig.4 Influence of height of stator yoke h_y on the thrust density coefficient k_g ($\tau_p = 3 \text{ mm}$, $B_d = 1.3 \text{ T}$, $B_s = 1.8 \text{ T}$).

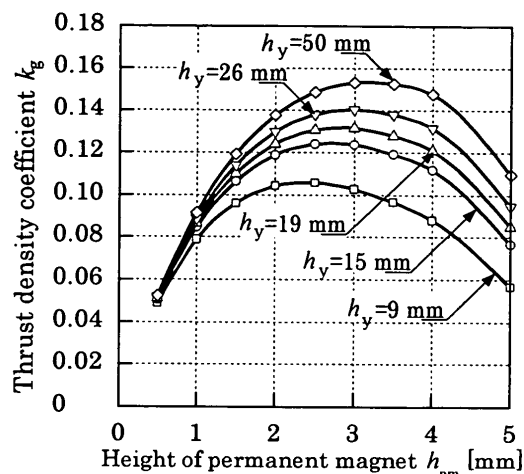


Fig. 5 Influence of height of permanent magnet h_{pm} on the thrust density coefficient k_g ($\tau_p = 3 \text{ mm}$, $B_d = 1.3 \text{ T}$, $B_s = 1.8 \text{ T}$)

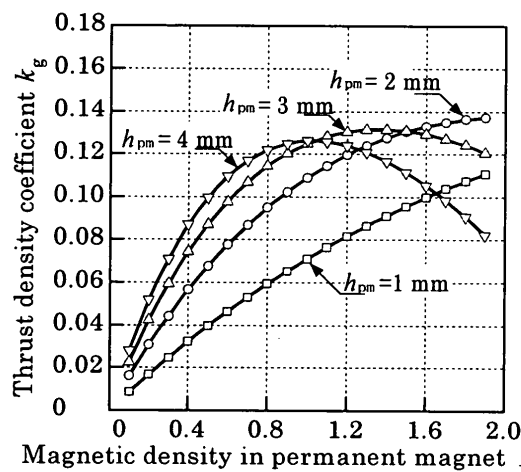


Fig. 6 Influence of magnetic density in permanent magnet B_d on the thrust density coefficient k_g ($\tau_p = 3 \text{ mm}$, $B_s = 1.8 \text{ T}$, $h_y = 19 \text{ mm}$)

以上の計算結果から IP-LSM の寸法 (固定ヨークの高さ h_y 、永久磁石の高さ h_{pm}) を大きくしても推力密度係数 k_g は極大値をとるため大きくならないことが分かった。また、材料特性の良い永久磁石を使用しても、最適な寸法を適用しない限り、推力密度が大きくなることが分かった。半ピッチ $\tau_p = 3 \text{ mm}$ 、飽和磁束密度 $B_s = 1.8 \text{ T}$ の時、推力密度係数 k_g の限界値は 0.16 になった。

4. IP-LSM の特性比較

4.1 IP-LSM の試作例

Table 1 に、試作した IP-LSM の寸法をまとめた。各寸法は FEM により最適化したものである⁴⁾。長さ $l_{motor} = 56 \text{ mm}$ 、高さ $h_{motor} = 50 \text{ mm}$ 、幅 $t_{motor} = 50 \text{ mm}$ である。固定ヨークの高さ $h_y = 19 \text{ mm}$ 、永久磁石の高さ $h_{pm} = 2 \text{ mm}$ 、ヨークの厚さ $l_{ty} = 2 \text{ mm}$ 、ギャップの長さは 0.2 mm である。また、FEM より永久磁石の動作点は $B_d = 1.0 \text{ T}$ であった。

Table 1 Specifications for prototype IP-LSM.

Item [Unit]	Symbol	Value
Motor length [mm]	L_{motor}	56
Motor height [mm]	h_{motor}	50
Motor width [mm]	t_{motor}	50
Half of one pitch [mm]	τ_p	3
Stator yoke Height [mm]	h_y	19
Magnet height [mm]	h_{pm}	2
Gap length [mm]	δ	0.2
Magnetic density in magnet [T]	B_d	1.0

ディテント力を小さくするため、可動部の歯幅 l_{my} と固定部の歯幅 l_{sy} はそれぞれ 1.2 mm, 2.4 mm とした。

IP-LSM の推力密度限界の推定値は $1.2 \times 10^6 \text{ N/m}^3$ ($P = 20 \text{ W}$, $J_d = 5.9 \text{ A/m}^2$, $B_s = 1.8 \text{ T}$, $\xi = 0.7$, $k_g = 0.16$) であった。試作した IP-LSM に入力電力 $P = 20 \text{ W}$, 二相励磁 (AB 相) とした時、発生した推力は 119 N であった。IP-LSM のモータ体積 $V_m = 140 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ であり、試作した IP-LSM の推力密度は $0.85 \times 10^6 \text{ N/m}^3$ となった。推力密度限界の推定値より約 30% 小さかった。その原因として、磁石の減磁、ギャップの違い、ヨークにおける磁気飽和などが考えられる。

4.2 IP-LSM の特性比較

Table 2 に、試作した IP-LSM と他の LSM の特性比較を示した。ここで、HD-LSM は、S 社の高力密度形リニアモータ⁵⁾であり、MG-LSM は、Y 社のマグナギャップリニアモータである¹⁾。いずれも、従来のリニア同期モータ (LSM) に比べ性能が高いと評価されている。これらの LSM と IP-LSM を比較した結果、IP-LSM の体積、入力電力は他の LSM と比べ小さいが、発生した最大推力は 119 N と大きかった。IP-LSM のモータ定数 K_m は HD-LSM の 2 倍であった。

推力定数密度 G は推力/入力電力比と推力/体積比の積で以下の式で与えられる。

$$G = \frac{F}{P} \times \frac{F}{V_m} = \frac{F^2}{PV_m} = \frac{K_m^2}{V_m} \quad [\text{N}^2/\text{W} \cdot \text{m}^3] \quad (15)$$

IP-LSM の推力定数密度 G は他の LSM より大きいこ

Table 2 Comparison of characteristics of IP-LSM, HD-LSM, and MG-LSM

Item [Unit]	Symbol	IP-LSM	HD-LSM ⁵⁾	MG-LSM ¹⁾
Motor volume [mm ³]	V_m	140	264	320
Input power [W]	P	20	75	249
Maximum thrust [N]	F	119	114	330
Thrust constant [N/A]	K_f	300	60	55
Motor constant [N/W]	K_m	26.6	13.2	20.9
Thrust constant density [N ² /W · m ³]	$G \times 10^6$	5.1	0.66	1.4

とが分かった。MG-LSM と比べ約 3.6 倍大きかった。

5. あとがき

本論文では、体積と入力電力を考慮した IP-LSM の推力の増加の検討を行った。IP-LSM の推力密度を推定するため推力密度式を導出した。推力密度式により各寸法と材料特性による影響を検討した。検討した結果、以下のことが分かった。

- (1) IP-LSM の固定部の高さを大きくするほど推力密度は飽和傾向を示した。また、材料特性の良い永久磁石を使用しても、最適な寸法を適用しない限り、推力密度が大きくなることが分かった。
- (2) 半ピッチ 3 mm の時、推力密度係数の最大値は 0.16 であった。推定した IP-LSM の推力密度限界は $1.2 \times 10^6 \text{ N/m}^3$ であった。
- (3) 試作した IP-LSM の推力密度は $0.85 \times 10^6 \text{ N/m}^3$ であった。推定した推力密度限界より約 30% 小さかった。
- (4) 試作した IP-LSM の特性は他の LSM より大きいことが確認できた。IP-LSM の推力定数密度は MG-LSM より約 3.6 倍大きかった。

今後の課題として、磁石の減磁、ギャップの違い、ヨークにおける磁気飽和などを考慮し、簡易設計に役立つ推力密度式を導出する。

文 献

- 1) T. Shikayama, Y. Tsutsui : *YASUKAWA TECHNICAL REVIEW*, 64, 3, 177 (2000).
- 2) H. Wakiwaka, M. Norhisam, A. Kamiya, H. Yajima, K. Tamura, N. Fujiwara, M. Hosono and S. Takada : *Proc. ISEM-Tokyo*, 563 (2001).
- 3) N. Nagasaka : *Symp. Motor Tech.*, 1 (1992).
- 4) M. Norhisam, A. Kamiya, H. Yajima, K. Tamura, N. Fujiwara, M. Hosono and S. Takada : *Proc. LDIA2001*, 269 (2001).
- 5) H. Nakagawa, M. Karita et. Al : *SHINKO ELECTRIC Technical Report*, 40, 3, 54 (1998).

2001 年 10 月 9 日受理, 2002 年 1 月 17 日採録