

## リニアパルスモータとステッピングモータの 特性値の比較

山田 一\* 楡井 雅巳\*\* 川勝 浩司\*\* 相 樹江\*\*  
山本 栄\*\*\* 海老原大樹\*\*\*\* 金 能強\*\*\*\*\*

(昭和62年10月31日受理)

### A Comparison of Characteristic Values between Linear Pulse Motors and Stepping Motors

Hajime YAMADA, Masami NIREI, Koji KAWAKATSU,  
Shu-Jiang XIANG, Sigeru YAMAMOTO, Daiki EBIHARA,  
and Jin-Neng QIANG

The technological level of the linear pulse motors (LPMs) now in practical use relative to rotary stepping motors (STMs), was estimated by comparing both motors with respect to four characteristic values (figure of merits), relating to static performance, which have been adopted for the performance estimation of LPMs. This investigation was motivated by the fact that LPMs are rapidly spreading in the field of OA and information terminal instruments, etc. because of their specific capability of providing linear motions without any mechanical converting mechanisms, whereas STMs, which are the mother machine of LPMs, are now in more frequent use for similar purposes than LPMs. The four characteristic values adopted were the thrust/input ratio, thrust/mass ratio, thrust/volume ratio, and thrust density. Ten kinds of LPMs and 30 kinds of STMs were subjected to the performance comparison, with the conclusion that the static performance of LPMs is equal to or higher than that of STMs. It is pointed out that expansion of the use of LMPs requires development of supporting mechanisms and related technology.

### 1. ま え が き

現在、リニアパルスモータは、OA機器及び情報端末機器等のリニアアクチュエータとして急速に普及しつつある。リニアパルスモータの原形機はステッピングモータではある

---

\* 電気工学科 教授  
\*\* 大学院修士課程 学生  
\*\*\* 榑アマダ 技術研究所 主任  
\*\*\*\* 武蔵工業大学工学部 助教授  
\*\*\*\*\* 中国科学院 助理研究員 (国際協力事業団派遣研修員)

が、両者は1960年代にほぼ同時に独立に誕生している。そして、両者の動作原理は同一であることから、高い位置決め精度をオープンループで実現できるなど共通の利点を持っている。しかし、生産量の観点から眺めるとステッピングモータがリニアパルスモータを圧倒しているのが現状である。

現在製造されているリニアパルスモータの性能が、どの程度ステッピングモータに接近しているかは、両者の研究技術者にとって大変興味のあることと考えられる。そこで、実用化されているリニアパルスモータが技術的にどのようなレベルにあるかを評価するために、リニアパルスモータの特性評価で利用されている特性値の概念<sup>1)</sup>を用いて、リニアパルスモータとステッピングモータ両者の特性を比較することにした。

本論文では、まず静特性における特性値として、推力/入力比、推力/質量比、推力/体積比及び接線応力の4種をとりあげ、リニアパルスモータ10種類とステッピングモータ30種類の性能を比較した結果について述べている。

これら特性値の概念を用いて、現時点で実用化されているリニアパルスモータの特性がステッピングモータへの程度アプローチしているかについて考察することにする。

## 2. 特 性 値

### 2.1 リニアパルスモータの特性値

リニアパルスモータ (Linear Pulse Motor, 以下, LPM と略す) を磁気回路により分類すると、永久磁石形 (Permanent Magnet type, 略称 PM 形) と可変レクタンス形 (Variable Reluctance type, 略称 VR 形) に分けられ、形状により分類すると平板状と円筒状に分けられる。また、相数や巻線方式によっても色々な種類がある。

仕様の違った各種 LPM の性能の良さを示す値として、特性値あるいは性能係数が提案されている<sup>2)</sup>。この特性値としては、以下に述べるものがある。

#### 2.1.1 推力/入力比

LPM を一定電流で励磁し、摩擦がない状態で変位させるのに必要な力を静推力  $F_s$  (以下これを単に推力と呼ぶ) という。推力/入力比は、推力  $F_s$  の最大値と入力電力の比で表し、入力1 [kW] 当りに生ずる推力で示す。

#### 2.1.2 推力/質量比

推力/質量比は、推力  $F_s$  と質量  $M$  の比で表す。ここで質量  $M$  とは、図1に示すように支持機構と推力発生に関係する部分の質量を合せたものを言い、二次側 (固定子) では一次側 (可動子) 全体と対向する部分のみを考える。

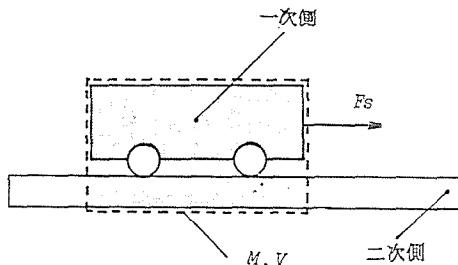


図1 リニアパルスモータの質量 $M$ と体積 $V$ の決め方

#### 2.1.3 推力/体積比

推力/体積比は、推力  $F_s$  と体積  $V$  の比で表す。ここで体積  $V$  [L] とは、推力/質量比の場合と同様に支持機構と推力発生に関係する部分の体積  $V$  で定義される (図1参照)。

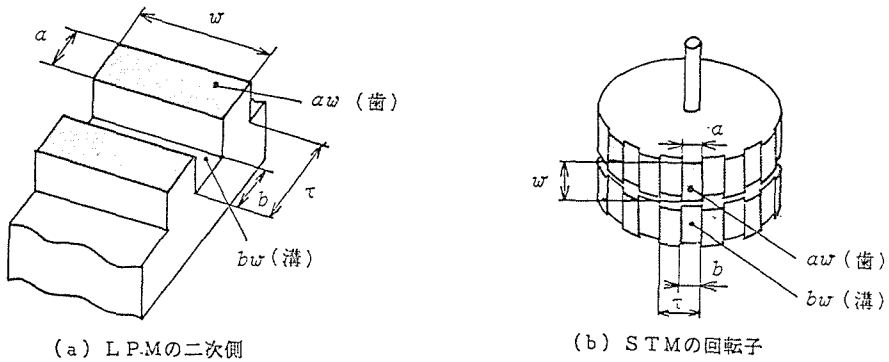


図2 リニアパルスモータ (LPM) とステッピングモータ (STM) の歯・溝両部の構造

### 2.2 接線応力

リニアモータでは、まず磁束が作用する表面積  $A$  で推力  $F$  が発生し、その表面積の接線方向へ推力が発生して対象へと働くこととなる。この発生圧力を、LPM や LIM (リニア誘導モータ) などのリニア電磁アクチュエータでは接線応力 (thrust density) と呼んでいる<sup>3)</sup>。

LPM とステッピングモータ (Stepping Motor, 以下、STM と略す) は動作原理が同じであり、その構造上歯・溝両部を通る磁束により推力が左右される。そこで、磁束が作用する歯・溝両部の表面の単位面積当りに発生する推力を接線応力  $\sigma_s$  として、これを新たな特性値として考える<sup>3)</sup>。

LPM 及び STM の二次側 (非給電部) の歯・溝の構造を図2に示した。同図では便宜上角溝の構造を図2に示した。同図では便宜上角溝を描いてあるが、実際には半円形状の溝が多い。LPM あるいは STM の歯・溝両部の面積  $A, B$  は、それぞれ  $A = aw, B = bw$  [m<sup>2</sup>] として与えられるから、表面の単位面積当りの接線応力  $\sigma_s$  は、次式で与えられる<sup>4)</sup>。

$$\sigma_s = \frac{F_s}{kn(A + B)} = \frac{F_s}{kn(a + b)w} \quad [Pa] \quad (1)$$

ここに、

$F_s$ : 静推力 [N]

$k$ : LPM の極数, あるいは HB 形 STM の極数  $\times 2$

$n$ : LPM あるいは HB 形 STM の一次側 (給電部) の1磁極当たりの歯数

接線応力は、接線応力を発生させるためには溝面積も寄与していると考え、溝面積  $B$  を考慮した特性値である。ただし、歯と溝を一对のものとして考えるために、実際の極幅に溝幅1つの長さを足したものを極幅とする。たとえば、歯数が3ならば極幅は  $3\tau$  として数える。

つまり接線応力は、LPM 又は STM の1つの励磁相から発生した磁束が非励磁相にも回り込み、その磁束が制動力の一部となっていることも考慮されている。

### 2.3 ステッピングモータの特性値

上述した LPM の手法にならない，STM の特性値を計算する場合，そのカタログ値によりモータ外径や質量などは求めることができる．ところが，本論文では STM の推力を回転子外径におけるトルクから求めるため，回転子外径の値が必要となる．そこで，図 3 に示すようにハイブリッド形 (Hybrid type, 以下 HB 形と略す) STM の実機を分解して回転子外径の比率を測定したところ，モータ外径  $D$  の 52% であった．これより，対象とする STM 30 種類の特性値を求める際に回転子外径をすべて  $0.52D$  とした<sup>5)6)</sup>．この外径算出に用いた STM を本論文では基準機 STM と呼ぶことにする．

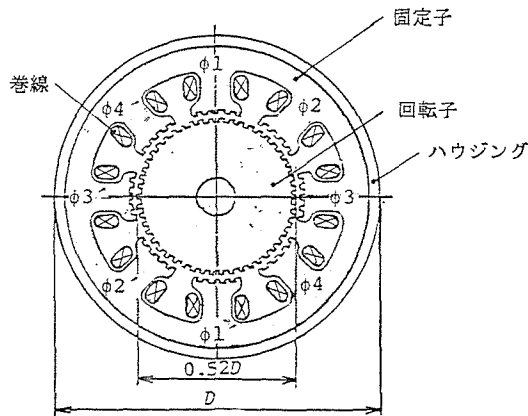


図3 ハイブリッド形ステッピングモータの断面構造  
( $\phi 1, 2, 3, 4, \phi 1', 2', 3', 4'$ : 極)

二相励磁のときの STM の可動子における推力  $F_s$  は，トルク  $T$  [kgf・cm] から次式によって計算した．

$$F_s = \frac{T}{0.52D/2} \times 9.8 \times 10^{-2} = k_1 \frac{T}{D} \quad [N] \quad (2)$$

ここに， $k_1 = 3.769 \times 10^{-1}$  [m/s<sup>2</sup>]

$T$ : 有大静止トルク [kgf・cm]

$D$ : モータ外径 [m]

$0.52D$ : 可動子外径 [m]

$L$ : モータ長さ [m]

カタログ値から求められるのは，二相励磁におけるトルクだけである．二相励磁のトルクは，二つの相により発生するトルクの重ね合わせた値になるため，一相励磁のトルクは便宜上二相励磁のトルクの  $1/\sqrt{2}$  として近似して求め，推力に換算した．

以上により，推力/入力比，推力/体積比，推力/質量比は次式のようなになる．

$$\frac{F_s}{P} = \frac{3.769 \times 10^{-1} \times T/D}{VI \times 10^3} = k^2 \frac{T}{DVI} \quad [N/kW] \quad (3)$$

ここに、 $k_2 = 3.769 \times 10^2$  [m/s<sup>2</sup>]

$$\frac{F_s}{V} = \frac{3.769 \times 10^{-1} \times T/D}{\pi/4 \times D^2 L \times 10^3} = k_3 \frac{T}{D^3 L} \text{ [N/L]} \quad (4)$$

ここに、 $k_3 = 4.799 \times 10^{-4}$  [m/s<sup>2</sup>]

$$\frac{F_s}{M} = \frac{3.769 \times 10^{-1} \times T/D}{M} = k_1 \frac{T}{DM} \text{ [N/kg]} \quad (5)$$

ここに、 $M$ : STM の全質量 [kg]

STM の接線応力  $\sigma_s$  は、前出の式(1)に準じて以下のようになる。

$$\sigma_s = \frac{F_s}{kn(a+b)w} = \frac{F_s}{(2 \times 8) \times 5 \times 17 \times 10^{-6}} = k_4 F_s \text{ [Pa]} \quad (6)$$

ここに、 $k_4 = 7.35 \times 10^2$  [m<sup>-2</sup>],  $k = 2 \times 8$ ,  $n = 5$ ,  $(a+b)w = 17 \times 10^{-6}$  [m<sup>2</sup>]

今回使用した STM は、外径  $D$  により機種が決まっており高さ  $L$  で種類が分かれています。そこで、基準機 STM と同一外径の STM について式(6)の結果をそれぞれの高さ  $L$  で換算し、接線応力を求めた。

### 3. LPM と STM の特性値の比較

#### 3.1 比較の対象とした LPM と STM の仕様

表1 リニアバルスモータ (LPM) の仕様 (合計 10種類)

No.	型式	推力 $F_s$ [N]	ピッチ $\tau$ [mm]	入力 $P$ [W]	質量 $M$ [kg]	体積 $V$ [L]	抵抗 $R$ [ $\Omega$ /相]	抗 相	最大 周波数 [pps]
PM形平板状 LPM									
F 1	SH 3	34.5	1.69	3.49	1.20	0.23	2.42		395
F 2	SH 5	35.0	0.85	1.53	0.92	0.18	1.53		475
F 3	MA 1	29.0	0.85	1.55	0.59	0.06	38.65		405
F 4	KA 2	58.0	3.00	2.97	1.97	0.41	2.97		224
F 5	H34	144.0	1.60	15.55	7.00	1.56	2.70		700
F 6	FA 1	31.0	1.69	2.01	0.78	0.18	2.01		—
PM形円筒状 LPM									
C 1	KG16	26.0	4.00	6.94	0.65	0.22	3.09		—
C 2	KG17	30.0	4.00	6.94	0.65	0.23	3.09		—
C 3	V 2	14.4	2.00	2.69	1.26	0.08	2.69		—
C 4	H25	186.0	4.00	6.04	5.70	1.32	6.04		78

表2 ステッピングモータ (STM) の仕様 (合計 30種類)

No.	型式	トルク $T$ [kgf·cm]	ピッチ $\tau$ [mm]	入力 $P$ [W]	質量 $M$ [kg]	体積 $V$ [L]	抵抗 $R$ [Ω/相]	最大自起動 周波数 [pps]
PM 1~2	PM形	0.18~ 0.21	—	3.96~ 4.27	0.16~0.3	0.053~ 0.058	37.6~ 135.0	120~680
VR 1~9	VR形	0.14~ 4.68	—	8.75~ 78.4	0.11~1.0	0.018~ 0.317	6.5~ 55.0	130~730
HB 1~19	HB形	0.90~ 60	1.7	2.88~ 20.0	0.25~5.7	0.049~ 1.489	0.21~ 17.8	200~580

特性値を求めるのに使用した LPM の仕様を表1に示した。LPM はすべての PM 形であり、平板状 LPM 6種類、円筒状 LPM 4種類の計10種類である。これら LPM の推力が14.4~186 [N] の範囲にあったので、STM はそのトルクから推力を換算して、上記範囲内の推力値を持つ機種を選んだ。表2に本論文で比較の対象とした STM の仕様を示した。これらの STM は PM 形の2種類、VR 形9種類、HB 形19種類の計30種類である。

これらの LPM および STM の推力と入力との関係を比較したのが図4である。同図において、両モータは入力2~80 [W]、推力2~220 [N] の範囲内に存在しており、LPM と HB 形 STM の分布はほぼ同じ傾向にあることがわかる。また、STM の推力の大き

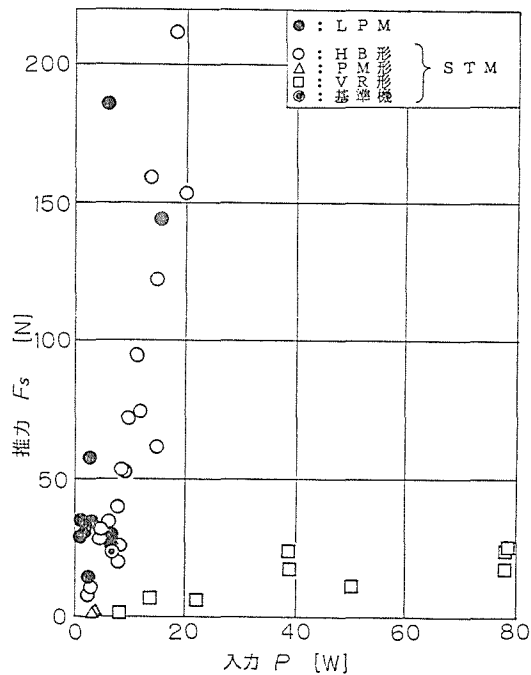


図4 LPM と STM の推力-入力特性の比較

さは、HB形>VR形>PM形となっており、PM形は小型のものに限られている。

### 3.2 リニアパルスモータの推力測定法

上述したように、STMの推力はカタログ値から求めたが、LPMの推力は当研究室の実測値を用いた。

LPMの静推力とは、“LPMを定電流で励磁し、可動子を外力により位置変化させて発生する推力”である。その測定法は、図5に示すように可動子に荷重変換器とポテンシオメータを連結し、送りねじのハンドルを回転して可動子に位置変化を与え、2チャンネルの演算形レコーダ(アナライジングレコーダ)等を用いて推力と変位を同時に測定する。

推力特性は、歯1ピッチ分について可動子を往復させて測定した。推力の往復曲線は、摩擦力に起因する差を生じるが、その平均値を推力曲線とし、本論文では推力値としてその最大値を用いている。

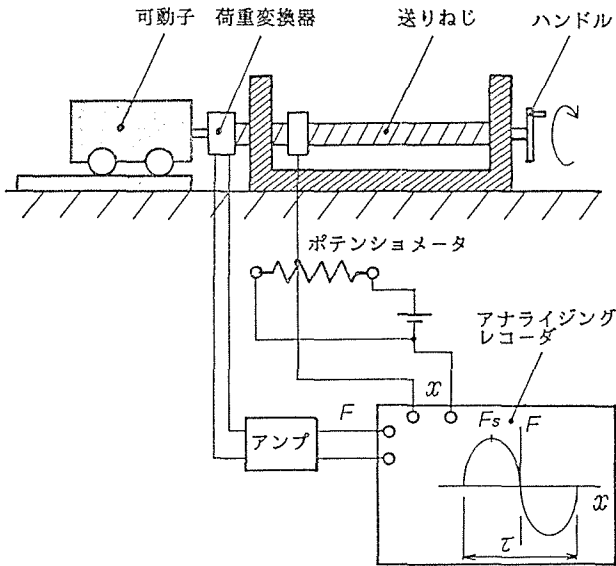


図5 リニアパルスモータの推力測定法

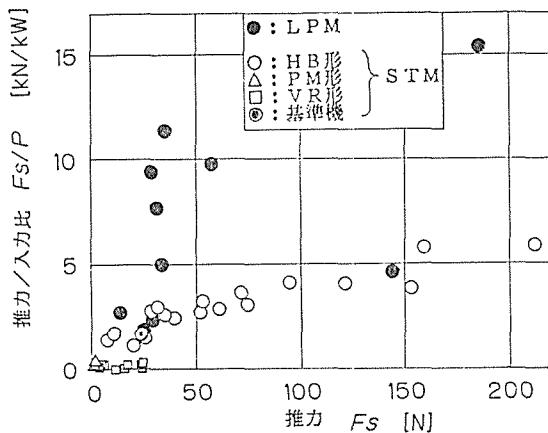


図6 LPMとSTMの推力/入力比の比較

### 3.3 特性値の比較

図6に LPM と STM の推力/入力比の比較を示した。同図から、以下の事項がわかった。

- 1) LPM の推力/入力比が2,160~15,400 [N/kW] の範囲にあるのに対し, STM の推力/入力比は110~5,900 [N/kW] の低い範囲にある。
- 2) LPM の推力/入力比は一般に STM の特性値よりも高く, STM の推力/入力比は6,000 [N/kW] 付近で飽和傾向を示している。

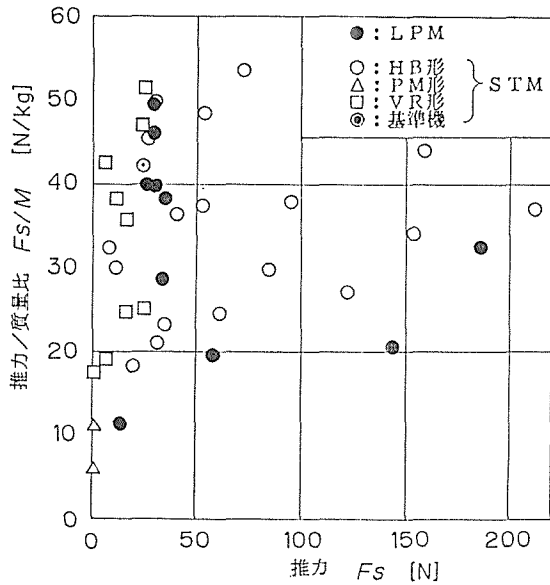


図7 LPM と STM の推力/質量比の比較

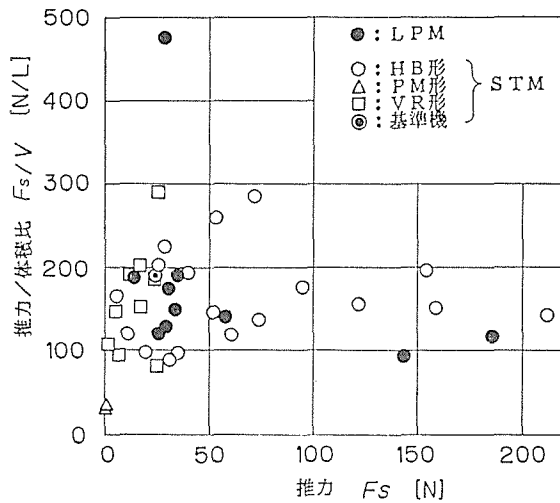


図8 LPM と STM の推力/体積比の比較



3) 両者の推力/入力比の相違は、銅損の大小にも関係していると考えられる。たとえば、LPM の巻線抵抗が 1.5~3.1 [ $\Omega$ /相] (推力 186 [N] のものに限り 6 [ $\Omega$ /相]) の範囲にあるのに対し、STM では HB 形が 1~6 [ $\Omega$ /相]、VR 形で数十~135 [ $\Omega$ /相] の比較的高い抵抗範囲にある。上述した両者の推力/入力比の相違は現在の生産方法にも深い関係があろうと考えられる。

図7には、LPM と STM の推力/質量比の比較を示した。同図において、LPM の推力/質量比は11~50 [N/kg] の範囲にあり、STM の推力/質量比も 5~53 [N/kg] とほぼ同じ範囲にあるので、推力/質量比から両者の優劣を見出すのは難しい。

次に、LPM と STM の推力/体積比の比較を図8に示した。推力1.8~212 [N] の範囲において、推力/体積比は両者ともほぼ30~300 [N/L] の範囲に混在している。現時点において LPM 及び STM とも、推力が比較的大きい120~200 [N] の大推力機は、低推力機よりも推力/体積比が小さくなっている。この原因については、今後検討すべき課題となる。

#### 4. 接線応力の比較

##### 4.1 LPM と STM の接線応力の比較

LPM と STM の接線応力  $\sigma_s$  の一相励磁方式における比較を図9に、二相励磁方式における比較を図10に示した。これらの図から、以下の事項がわかった。

- 1) 一相励磁において接線応力は、図9から LPM で0.9~2.7 [N/cm<sup>2</sup>] (9~27[kPa])、STM で 0.4~1.8 [N/cm<sup>2</sup>] (4~18 [kPa]) である。
- 2) 二相励磁において接線応力は、図10から LPM で1.3~4.6 [N/cm<sup>2</sup>] (13~46 [kPa])、STM で0.6~2.6 [N/cm<sup>2</sup>] (6~26 [kPa]) である。

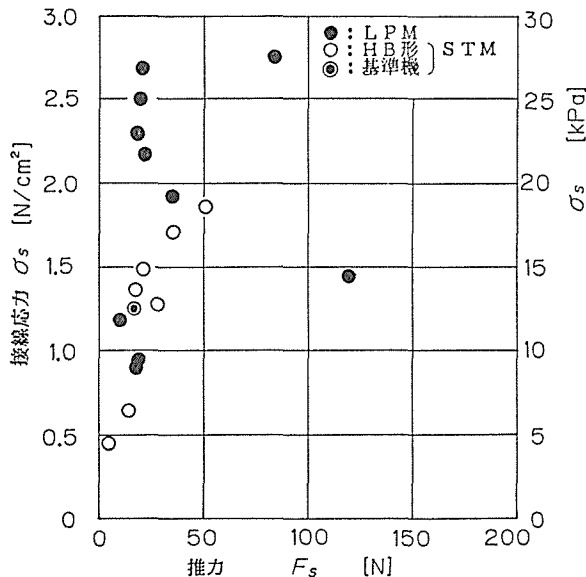


図9 LPM と STM の一相励磁における接線応力の比較

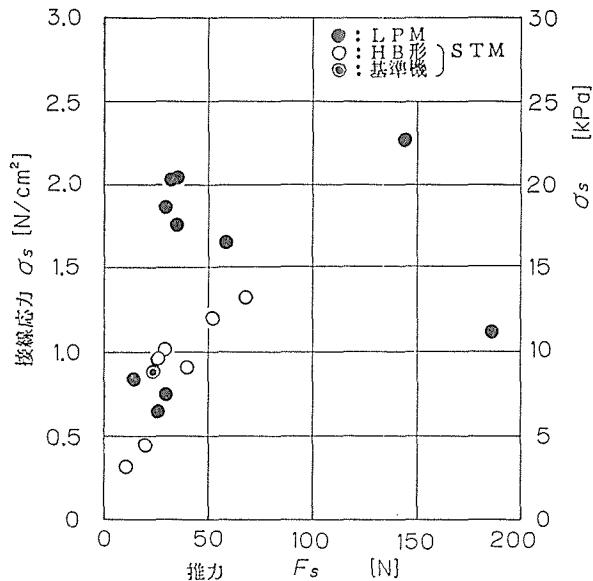


図10 LPMとSTMの二相励磁における接線応力の比較

3) 励磁方式によらず，LPMの接線応力の値はSTMよりも高い値を示している。これは，STMが低価格を実現させるために推力特性をある程度犠牲にしていることにも関連があろう。

4) 一相，二相励磁において，LPMの接線応力はSTMに比べて43～50%大きな値となっている。

#### 4.2 接線応力と単位面積当たり発生する推力の違い

現存するリニアアクチュエータにおいて，接線応力もしくは発生圧力の観点から比較を試みたのが表3である<sup>8)</sup>。同時においてLIM(リニア誘導モータ)，STMとLPMは，約0.02 [MPa] (20 [kPa])である。電磁石では，接線応力というよりも吸着力という方が正しいが，この吸着力は0.5 [MPa]もあってLPMの接線応力の約20倍以上であることを示している。長坂長彦博士は，PM形LPMにおいてその歯部の飽和磁束密度を2 [T]に設定したとき，LPMが出し得る最大接線応力は72 [kPa]が限界であろうと推論している<sup>3)</sup>。



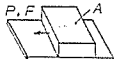

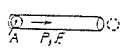
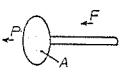

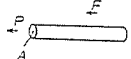
このことから，LPMおよびSTMの接線応力の値はまだ向上出来得るであろうが，電磁石の吸着力には遠く及ばないことが考えられる。

表3には，他のアクチュエータの発生圧力の値も参考までに挙げたが，これらの値はLPMやSTMと比較して桁違いに大きいことがわかる<sup>9)</sup>。動作原理が異なると，接線応力の値は大きく変化してくる。

## 5. あとがき

推力1.8～212 [N]のLPMをほぼ同一推力を発生するSTMと比較した結果，以下の事が判明した。

表3 アクチュエータの：単面積当たりの発生推力の比較

ア ク チ ュ エ ー タ		ア ク チ ュ エ ー タ の 構 造	力	単位面積当たりの 発生推力 [MPa]*
人間の腕力	青 年		筋 力	0.01
	チャンピオン		筋 力	0.13
リニアパルスモータ, ステッピングモータ			電 磁 力 (接線応力)	0.02
電 磁 石			吸 着 力	0.5
ソレノイド形電磁ランチャ			磁 気 力	1
油 圧			伝 達 力	30
圧 電			圧 電 力	35
超 弾 性 合 金 形 状 記 憶 合 金			回 復 力	300
			回 復 力	500

\* 1 [MPa]=10<sup>6</sup> [N/m<sup>2</sup>], 1 [kgf/mm<sup>2</sup>]=10 [MPa]

- 1) LPM の推力/入力比は, 2,160~15,400 [N/kW] の範囲にあり, STM の110~5,900 [N/kW] よりも高い値にある.
- 2) LPM の推力/質量比は, 11~50 [N/kg] であり, STM の 5~53 [N/kg] とほぼ同じ範囲にある.
- 3) LPM の推力/体積比は, 30~300 [N/L] であり, STM と同一の値である.
- 4) 二相励磁において, LPM の接線応力は1.3~4.6 [N/cm<sup>2</sup>] (13~46 [kPa]) であり, STM の0.6~2.6 [N/cm<sup>2</sup>] (6~26 [kPa]) であり, LPM の方が高い範囲にある.

すなわち, 現時点で LPM の性能は技術的に STM とほぼ同一か, それ以上であると言える. しかし, STM が大量生産段階にきており, 材料や加工の面で大幅なコストダウンをされているのに対し, LPM はその一部を除いてまだそこまで到達していないのが現状であろう. また, LPM の各特性は支持機構の良否によって左右されることが多い. したがって, より高性能の LPM を得るためには, 直線運動に適した新しい支持機構の開発も必要であるといえよう.

最後に, 本研究の遂行に当たり大学院生山口昌樹 (現在, ブラザー工業), 村田究 (現在, 椿本チェーン) の両君の尽力があったことを付記し, 感謝する次第である.

## 参 考 文 献

- 1) 電気学会磁気アクチュエータ調査専門委員会編：「リニアモータとその応用」，電気学会，203-205 (1984)
- 2) 山本行雄，山田 一，三輪善一郎，長坂長彦，海老原大樹，岩間明彦，桑原 一：「リニアパルスモータに関する用語及び特性測定法（案）」，電気学会マグネティックス研究会資料，MAG-83-88, 31-40 (1983)
- 3) 長坂長彦：「リニアパルスモータの分類とその性能評価」，IEE Japan, Vol. 107-D, No. 1 (1987)
- 4) H. Yamada, K. Murata, M. Yamamoto, Y. Yamamoto, D. Ebihara: "A Proposal of The Ratio of Thrust to Tooth Area as a New Characteristic Value to Linear Pulse Motor", JIEE, Technical Meeting on Magnetics, MAG-84-103, 65-76 (1984)
- 5) 山田 一，山本 学，飯野雅一：「ステッピングモータにおける推力特性の試算」，電気学会磁気アクチュエータ調査専門委員会資料，No. 29-3 (1979)
- 6) 山田 一，山口昌樹，村田 究，山本 栄：「リニアパルスモータとステッピングモータの特性値の比較」，電気学会全国大会，No. 849, 1029 (1985)
- 7) 山田 一，山口昌樹，村田 究，山本 栄：「リニアパルスモータとステッピングモータの特性値の比較」，電気学会マグネティックス研究会資料，MAG-85-122, 21-29, (1985)
- 8) 山田 一，大平脩一：「油圧と空気圧」，油空圧学会学会誌，第15巻第3号，No. 14-2-129, 175-182 (1984. 5)
- 9) 山田 一，長坂長彦：「システムの新分野への発展性—リニアパルスモータの現在と未来—」，電気学会全国大会，S. 11-3-4 (1987)