

# 曲げ加工機の高精度化と省エネ化のための 油圧駆動システムに関する研究

信州大学 工学部 電気電子工学科

助教授 水野 勉

(平成 11 年度研究開発助成 AF-99004)

キーワード：プレスブレーキ，直動バルブ，リニア直流モータ

## 1. 研究の背景

コイル可動形リニア直流モータ(LDM)を用いた直動バルブ(LSV)がすでに開発され，油圧駆動式パンチプレスやプレスブレーキの高速化・高精度化・省エネ化に貢献している<sup>1)2)</sup>。

曲げ加工機のテーブルの動作は，(1) 高速アプローチ，(2) 曲げ加工，(3) 高速リターン，に分類できる。高速アプローチおよび高速リターン動作では，テーブルを駆動するだけなので低圧・大流量を印加するだけでよい。また曲げ加工時は低速で大推力が必要であるため，高圧・小流量で済む。したがって，動作状態に応じて2つの圧力と2つの流量を選択的に印加（以下，2圧力2流量制御）すれば，省エネ化を実現することができる。

大型プレスブレーキに用いる油圧サーボ弁の制御流量は，上記のLSVよりも大きく，かつ駆動部に作用する流体力も大きくなる。したがって，大型プレスブレーキに用いるリニアモータには，大推力化が要求されている。

一般に，コイル可動形LDMは可動子の質量が小さいため，高応答を実現しやすい。しかし，発生推力を大きくするためには，永久磁石を多量に使う必要があり，コスト高となる。そこで，筆者らは永久磁石の使用量が少なくても良い磁石可動形LDMの開発を行ってきた<sup>3)</sup>。永久磁石可動形LDMの欠点として，コイル可動形LDMと比較して機械的時定数が大きくなる傾向にある。油圧サーボバルブに用いる磁石可動形LDMの高応答化を実現するためには，電気的時定数と機械的時定数を低減する必要がある<sup>4)</sup>。LDMにおける電気的時定数および機械的時定数はコイルの直流抵抗 $R$ ，コイルのインダクタンス $L$ ，可動子の質量 $m$ ，推力定数 $K_f$ （速度起電力定数）を用いて正規化した値であることから，他のLDMとの特性比較をすることができるばかりでなく，回転形モータとの比較を行うこともでき，実用上重要な特性値の一つである。

本報告書では，曲げ加工機の高精度化と省エネ化のためのサーボ弁と2圧力2流量制御用切換弁に用いる磁石可動形LDMの以下の事項について述べる。

- (1) LDMの高応答化設計手法
- (2) LDMの静特性
- (3) LDMの動特性

## 2. LDMの高応答化設計手法

### 2.1. LDMの構造

図1に円筒状磁石可動形LDMの基本構造を示した。要求仕様として，LDMの外形寸法は $\square 78 \times 150 \text{ mm}$ 以内，ストローク $\pm 5 \text{ mm}$ となっている。永久磁石はロッド周辺に配置し，4つのコイルは直列に接続した。固定子と可動子の材質は共にS10C（機械構造用炭素鋼）である。

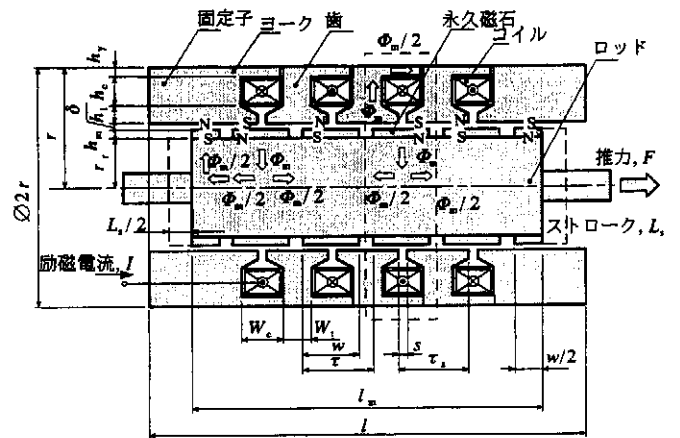


図1 円筒状磁石可動形LDMの基本構造

### 2.2. 電気的・機械的時定数の表現式

等価磁気回路法は有限要素法や境界要素法などと比較して簡素であり，かつ有効な方法である<sup>5)</sup>。ここではパーミアンス法を用いたLDMの磁気回路解析を行った。機械的時定数 $T_m$ は下式で与えられる<sup>6)</sup>。

$$T_m = \frac{mR}{K_f^2} = \frac{m l_c p \rho \tau^2}{\xi A_c (p+1)^2 \Phi_m^2} = \frac{m l_c p \rho}{4\pi \xi A_c (p+1)^2 (r + h_m + \delta/2)^2 B^2} \quad [s] \quad (1)$$

$$K_m = \frac{K_f}{\sqrt{R}} = \frac{\Phi_m}{\tau} \sqrt{\frac{\rho \xi A_c (p+1)^2}{l_c p}} \quad [N/\sqrt{W}] \quad (2)$$

ここに、 $m$ : 可動子の質量 [kg],  $R$ : コイルの直流抵抗 [ $\Omega$ ],  $K_t$ : 推力定数 [N/A],  $l_c$ : 1巻きあたりの巻線の平均長さ [m],  $p$ : 極数,  $\rho$ : 巻線 (銅) の抵抗率 [ $\Omega/m$ ],  $\tau$ : 極歯ピッチ [m],  $\zeta$ : 占積率,  $A_c$ : コイルの断面積 [ $m^2$ ],  $\Phi_m$ : 永久磁石1極あたりの磁束 [Wb],  $r_r$ : ロッドの半径 [m],  $h_m$ : 永久磁石の厚さ [m],  $\delta$ : エアギャップの長さ [m],  $B$ : ギャップの磁束密度 [T]

上式の機械的時定数  $T_m$  とモータ定数  $K_m$  とは次式に示す関係があり、この関係は回転モータにおいても成立している<sup>9)</sup>。

$$K_m^2 = m / T_m \quad [N^2 / W] \quad (3)$$

磁気等価回路より、自己インダクタンスおよび相互インダクタンスが得られ、4つのコイルを直列に接続した場合のコイルのインダクタンス  $L$  は、LDM 内部のパーマンス  $P_1 \sim P_9$  を用いて次式で表される<sup>9)</sup>。

$$L = n^2 \left\{ 4(P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5) + \frac{4P_6(P_7 + P_8 + P_9) + 2P_6^2}{3P_6 + 2(P_7 + P_8 + P_9)} \right\} \quad [H] \quad (4)$$

また電気的時定数  $T_e$  は次式で表される<sup>9)</sup>。

$$T_e = \frac{L}{R} = \frac{\zeta A_c}{4\rho l_c} \left\{ 4(P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5) + \frac{4P_6(P_7 + P_8 + P_9) + 2P_6^2}{3P_6 + 2(P_7 + P_8 + P_9)} \right\} \quad [s] \quad (5)$$

### 2.3. 高応答な磁石可動形 LDM の設計

#### 2.3.1 LDM の設計仕様

1997 年に試作した試作機 (LDM 97) の問題点は応答性にあり、応答性の向上のためには、電気的時定数の低減が必要であった。

電気的時定数の低減に主眼をおき今回新たに設計した磁石可動形 LDM (以下、LDM 00 と略記) の設計仕様は以下のとおりである。

- (1) LDM の外形寸法とストローク
  - 1) 外形寸法は  $78 \times 150$  mm 以下
  - 2) ストローク  $L_s$ : 10 mm
  - 3) 最大推力  $F_m$ : 400 N
  - 4) 負荷の質量: 700 g
- (2) サーボンプ (PWM 方式インバータ)
  - 1) 出力電圧  $V$ : 88 V
  - 2) 最大出力電流  $I_m$ : 10 A

#### 2.3.2 機械的・電気的時定数と構造寸法との関係

設計仕様に基づいた LDM 00 の設計方針は次のようになる。

- (1) 推力定数  $K_t$  が LDM 97 の 60.7 N/A に対し、LDM 00 では 40 N/A 程度に抑えることにより、巻線スペースを小さくして電気的時定数  $T_e$  を低減する。
- (2) ストローク  $L_s$  が  $\pm 7.5$  mm から  $\pm 5$  mm になったため、

磁極ピッチ  $\tau$  を 24 mm から 20 mm と小さくして、可動子の長さ  $l_m$  を短かくする。そのため、外形寸法を小さくでき、可動子の質量  $m$  を低減できる。

- (3) ロッドの磁束密度を LDM 97 より大きくしてロッドとヨークを磁気飽和させるようにして、コイルのインダクタンス  $L$  を減少させる。またロッドが細くなることで機械的時定数  $T_m$  の減少も望める。

以上の設計方針に基づき、図 2 に示した特性計算のフローチャートの流れに従い設計を行った。

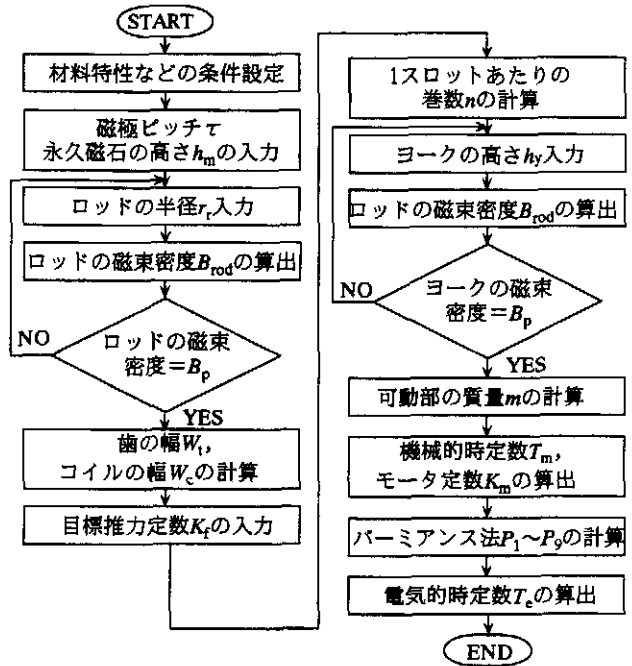


図 2 LDM の設計フローチャート

その手順は以下のようになる。

- (1) 材料特性、磁極ピッチ  $\tau$  などを設定
- (2) 永久磁石の厚さ  $h_m$  を入力
- (3) ロッドの磁束密度が  $B_p$  となるようにロッドの半径  $r_r$  を求める
- (4) 目標推力定数  $K_t$  を入力、コイル巻数  $n$  の算出
- (5) 歯の幅  $W_t$ 、ヨークの高さ  $h_y$  を算出
- (6) 電気的時定数  $T_e$ 、機械的時定数  $T_m$  などの特性値の算出

まず設計仕様において最大推力  $F_m = 400$  N、サーボンプの最大出力電流  $I_m = 10$  A であることから推力定数  $K_t = 45$  N/A とする。

次に最適条件としてロッド、ヨーク、歯部の永久磁石による磁束密度 (動作点)  $B_{rod}$ ,  $B_y$ ,  $B_t$  に次式の関係が成り立つように各寸法を設定する。

$$B_{rod} = B_y = B_t = B_p \quad [T] \quad (6)$$

ここに、 $B_p$ : 永久磁石の磁束による磁束密度 (動作点) (= 1.35 T に設定 (ロッド、ヨーク材 S45C の飽和磁束密度  $B_s = 1.72$  T ( $H = 5$  kA/m) の 80%))

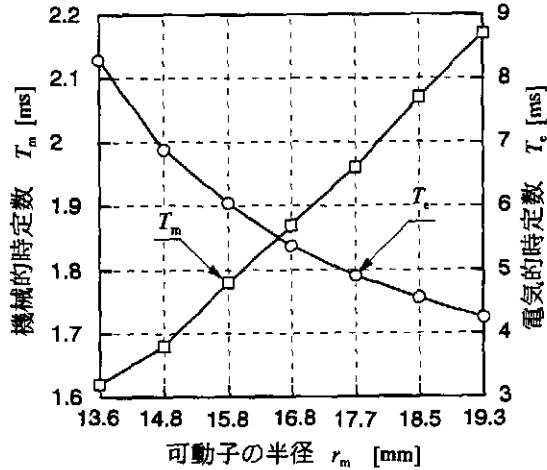


図3 機械的時定数，電氣的時定数—可動子の半径特性  
(磁極ピッチ  $\tau = 20$  mm, スロット開口幅  $s = 4$  mm)

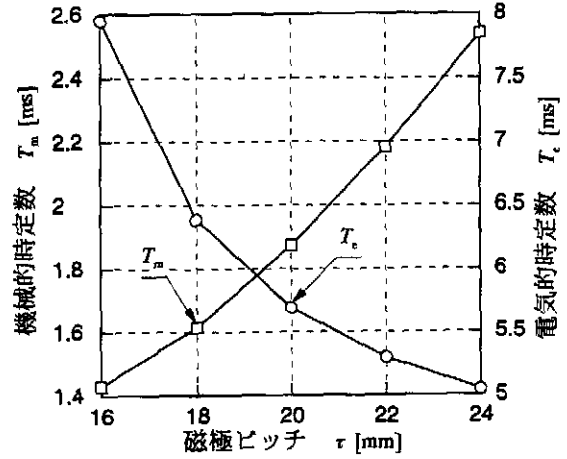


図4 機械的時定数，電氣的時定数—磁極ピッチ特性  
(永久磁石の厚さ  $h_m = 3.5$  mm, スロット開口幅  $s = 4$  mm)

推力定数  $K_t = 45$  N/A一定および式(6)の条件下において、可動子の半径  $r_m$  (永久磁石の厚さ  $h_m$ ) を変化させた場合の機械的時定数  $T_m$  と電氣的時定数  $T_e$  を図3に示した。

磁極ピッチ  $\tau$  を変化させた場合の機械的時定数  $T_m$  と電氣的時定数  $T_e$  を図4に示した。永久磁石の厚さ  $h_m$  が大きくなると永久磁石の質量が大きくなる。すると式(6)の条件から可動子ロッドの半径  $r_r$  も大きくなり、永久磁石とロッドの質量の和である可動子の質量  $m$  が大きくなる。したがって永久磁石の厚さ  $h_m$  を大きくすることで可動子の質量  $m$  が大きくなるため、式(1)に示した表現式から、機械的時定数  $T_m$  が増加する。電氣的時定数  $T_e$  については可動子の半径  $r_m$  (永久磁石の厚さ  $h_m$ ) が大きくなるにしたがってコイルの起磁力からみたギャップのパーミアンス  $P$  が減少、また巻線スペースの断面積  $A_c$  が小さくなって式(5)か

ら電氣的時定数  $T_e$  が減少する。

図5にパーミアンス法を用いて設計した磁石可動形LDMの構造を示した。図3と図4の結果より、可動子の半径  $r_m = 16.8$  mm, 磁極ピッチ  $\tau = 20$  mmとした。

可動子の半径  $r_m = 16.8$  mm, 磁極ピッチ  $\tau = 20$  mmのLDMは、機械的時定数  $T_m = 1.9$  ms, 電氣的時定数  $T_e = 5.4$  msとなる。また、負荷質量700gを考慮した機械的時定数は  $T_m = 1.9$  msとなり電氣的時定数  $T_e = 5.4$  msと一致するようになった。

パーミアンス法を用いて設計した磁石可動形LDMのLDM 97とLDM 00との機械的仕様の比較を表1に示した。LDM 00の外形寸法は  $\square 66.4 \times 120$  mm, 可動子の質量  $m$  は745gである。

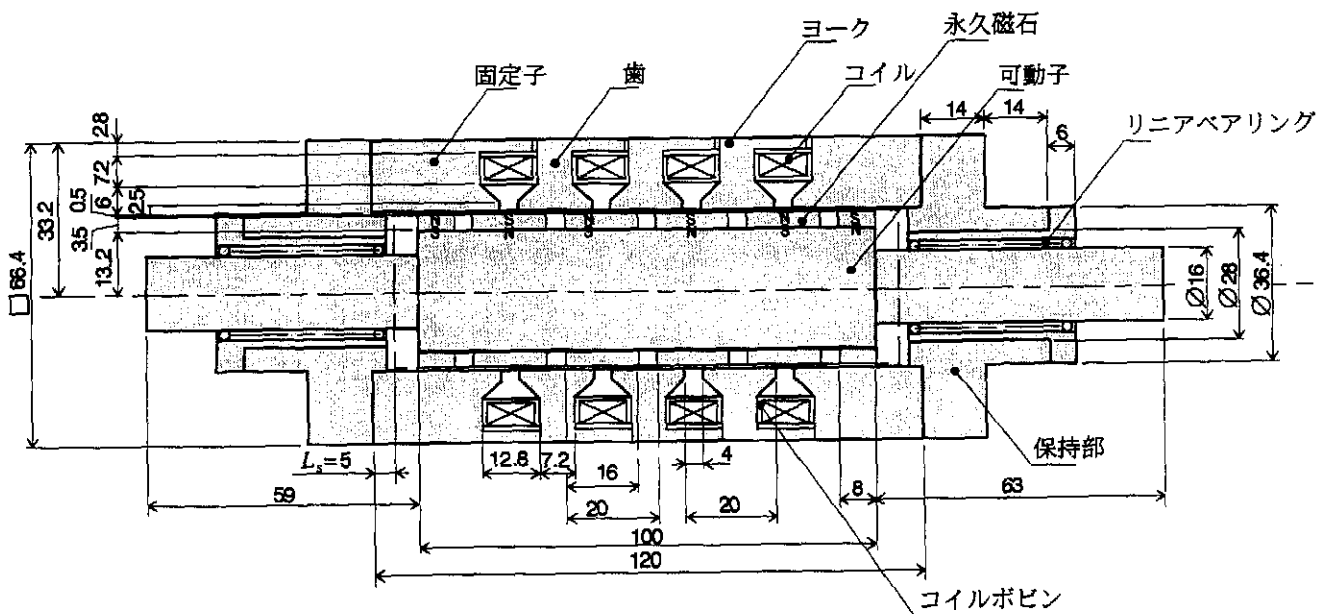


図5 パーミアンス法を用いて設計した磁石可動形LDMの構造 (単位: mm)

表1 LDM 00とLDM 97との機械的仕様の比較

機械的項目	記号[単位]	LDM 00	LDM 97
LDMの固定子の長さ	$l$ [mm]	120	150
LDMの外径半径	$r$ [mm]	37	39
可動子の長さ	$l_m$ [mm]	100	120
極数	$p$	4	4
磁極ピッチ	$\tau$ [mm]	24	20
スロットピッチ	$\tau_s$ [mm]	24	20
ロッドの半径	$r_r$ [mm]	13.3	15.8
歯の幅	$W_t$ [mm]	7.6	10
歯の高さ	$h_t$ [mm]	6	6
スロット開口幅	$s$ [mm]	4	3
ギャップの長さ	$\delta$ [mm]	0.5	0.5
磁石の幅	$W_m$ [mm]	16	19.2
磁石の材質		Nd-Fe-B magnet	
残留磁束密度 (20 °C)	$B_r$ [T]	1.17	
保磁力 (20°C)	$H_c$ [kA/m]	- 903	
固定子とロッドの材質		S10C	
可動子の質量	$m$ [g]	745	1097
コイルの巻数	$n$ [回/slot]	120	156

### 3. LDMの静特性

図6にLDM 00の静推力-変位特性を示した。同図中にパーミアンス法と有限要素法(FEM, Ansoft社製)を用いて計算した静推力の変位特性を示した。推力定数 $K_f$ の実測値は41.2 N/A, FEMによる計算値は43.4 N/Aとなった。パーミアンス法で計算した推力定数が45.0 N/Aであったことから, FEMの計算のほうが3.5%小さな値となった。これはパーミアンス法が磁気飽和を考慮していないためであると考えられる。

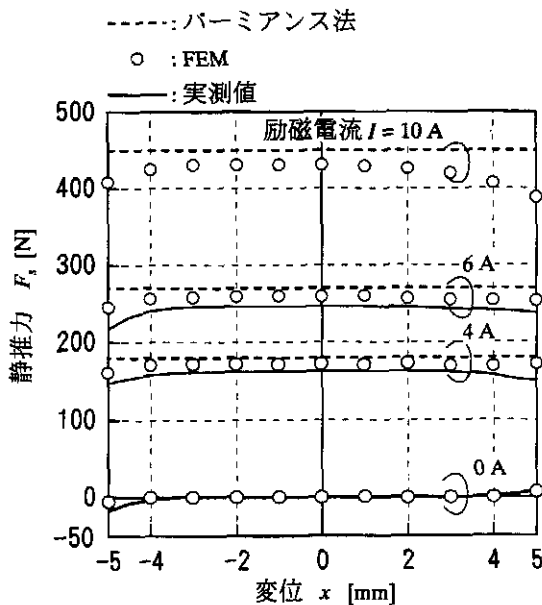


図6 LDM 00の静推力-変位特性

図7に変位 $x = 0$  mmの場合の静推力の電流特性を示した。スロット開口幅を広げるとコイルの起磁力からみたパーミアンスが減少して電氣的時定数の低減が望める。しかしスロット開口幅を広げるとストローク端部におけるディテント力が大きくなる。これらのことも考慮して, スロット開口幅を $s = 4$  mmとしてある。LDM 00の推力定数の実測値は $K_f = 43.0$  N/Aとなった。

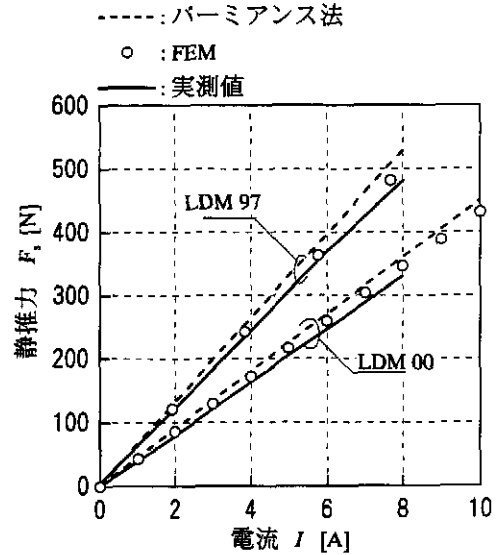


図7 LDM 00とLDM 97の静推力-励磁電流特性 ( $x = 0$  mm)

図8にLDM 00とLDM 97における, 最終電流が2 Aとなるような電圧を印加した場合の電流のステップ応答を示した。FEMによる計算は, 二次元渦電流解析(円筒座標系)で行った。図中に示したように, LDM 00の場合, 実測, パーミアンス法およびFEMから求めた電氣的時定数はそれぞれ $T_e = 4.2, 6.2, 4.6$  msとなった。

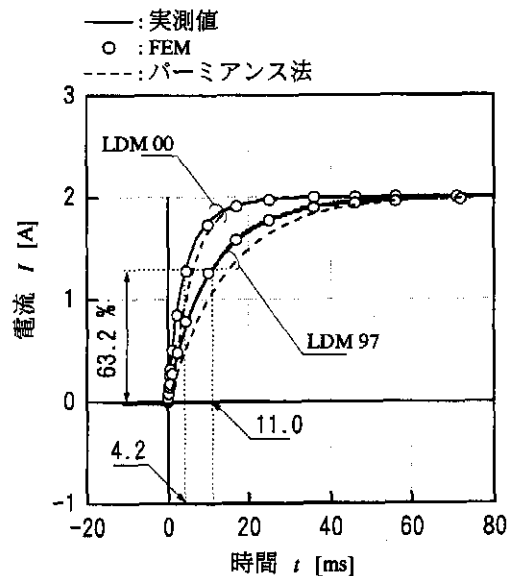


図8 LDM 00とLDM 97の電流のステップ応答 ( $E = 10.2, 10.8$  V)

表2 LDM 00とLDM 97の基本特性

特性値	記号[単位]	LDM 00			LDM 97		
		パーミアンス法	FEM	実測値	パーミアンス法	FEM	実測値
コイルの直流抵抗	$R$ [ $\Omega$ ]	5.1	5.1*	5.1	5.4	5.4*	5.4
コイルのインダクタンス	$L$ [mH]	31.6	23.5	21.8**	98.0	51.9	62.7**
推力定数	$K_f$ [N/A]	45.0	43.4	43.0	62.8	61.3	60.7
機械的時定数	$T_m$ [ms]	1.9	2.0	2.1***	1.5	1.6	1.7***
電気的時定数	$T_e$ [ms]	6.2	4.6	4.2	18.1	9.6	11.0
モータ定数	$K_m$ [N/ $\sqrt{W}$ ]	19.9	19.2	18.9	27.0	26.4	25.4

\* パーミアンス法による計算値  
 \*\*  $L = R \times T_e$  [H]より計算(式5)  
 \*\*\*  $T_m = mR / K_f^2$  [s]より算出(式1)

表2にLDM 00とLDM 97の基本特性を示した。LDM 00では巻線スペースの断面積を減少させ、さらにロッドを細くすることでLDMのパーミアンスを減少できコイルのインダクタンス $L$ が減少した。パーミアンス法による計算値のほうがFEMによる計算値より大きな値となった。パーミアンス法では渦電流を考慮していないため渦電流の影響を考慮しているFEMの計算値が小さくなったと考えられる。

#### 4. LDMの動特性

##### 4.1 制御系の構成

図9はLDMの制御ブロックであり、制御系は比例制御系で構成されている。差動トランスで検出した可動子の変位を制御装置にフィードバックして、さらに可動子の変位を不完全微分することで速度信号を得た。

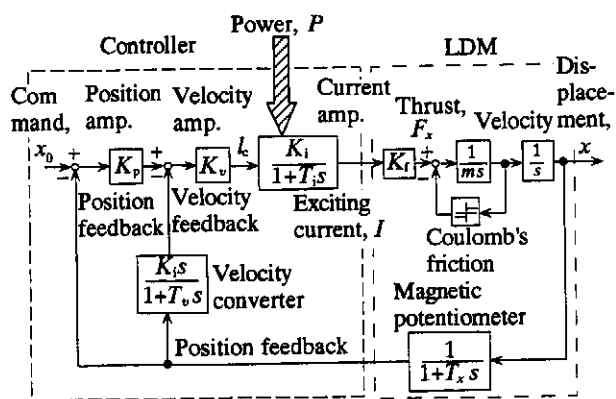


図9 LDMのサーボ制御ブロック

図10はLDM 00のサーボ制御した場合のステップ応答である。同図は変位指令 $x_0 = \pm 5$  mm (定格ストローク)を与えた場合のステップ応答であり、可動子の変位を測定したものである。変位の制限時間は6 msで、ダンピング特性も良好である。

図11はLDM 00の周波数応答である。同図は可動子の変位指令 $x_0 = \pm 0.1$  mm (定格ストロークの $\pm 2\%$ )を

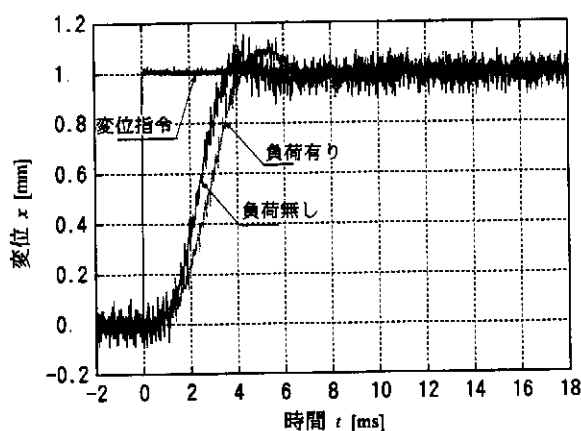


図10 LDM 00のサーボ制御した場合のステップ応答 (変位指令 $x_0 = \pm 5$  mm, 負荷 700 g)

与えた場合の可動子の応答を測定したものである。90°位相遅れ周波数は93 Hzであり、この周波数におけるゲインは-5.0 dBで高速・高応答であることを示している。また、90 Hzより大きな周波数において、ゲイン $G$ 、位相 $\phi$ とも急激に小さくなっている。この原因は図9に示した電流アンプの駆動電圧が小さいためであり、LDMの駆動電圧を大きくすれば、さらに高速・高応答化が期待できよう。

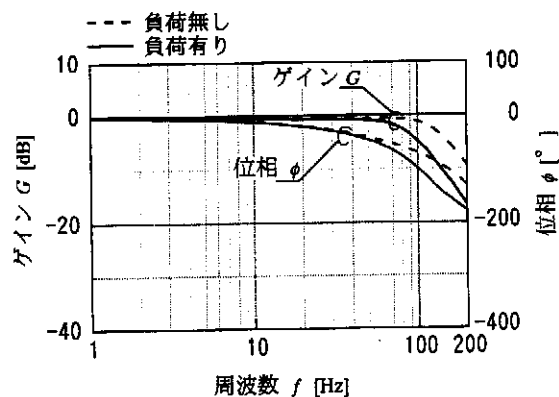


図11 LDM 00の周波数応答 (変位指令 $x_0 = \pm 0.1$  mm, 負荷 700 g)

表3 LDM 00とLDM 97の動特性比較

項目	LDM 00	LDM 97
整定時間	6 ms ( $x_0 = \pm 5$ mm, 定格ストローク)	14 ms ( $x_0 = \pm 7.5$ mm, 定格ストローク)
周波数応答 (90°位相遅れ周波数)	93 Hz ( $x_0 = \pm 0.1$ mm, 定格ストロークの $\pm 2\%$ )	79 Hz ( $x_0 = \pm 0.1$ mm, 定格ストロークの $\pm 1.3\%$ )

表3はLDM 00とLDM 97の動特性比較である。

LDM 00の整定時間と周波数応答はそれぞれ6 msと93 Hzであった。一方、LDM 97は、それぞれ14 msと79 Hzである。LDM 00は、LDM 97と比較して2.3倍の高応答化を実現した。

プレスブレーキの直動バルブとしては、応答周波数100 Hz程度(変位指令 $x_0 = \pm 0.1$  mm)、2圧力2流量制御用の切替弁としては整定時間10 ms程度が必要である。

本研究によって、設計・試作したLDM 00は、上記の仕様をほぼ満足している。

## 5. 結論

本研究では、曲げ加工機の高応答化と省エネ化のための直動バルブに用いる磁石可動形LDMの検討を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 磁石可動形LDMの機械的・電氣的時定数の表現式を用いて、高応答なLDMの設計手法を確立した。
- (2) 直動バルブを想定したLDMの動特性を測定した。その結果、整定時間は、6 ms(変位指令 $x_0 = \pm 5$  mm, 定格ストローク)、周波数応答は93 Hz(90°位相遅れ、変位指令 $x_0 = \pm 0.1$  mm, 定格ストロークの $\pm 2\%$ )であり、プレスブレーキのサーボ弁として十分な応答性を有することを確認した。

本研究は(財)天田金属加工機械技術振興財団の研究助成により行われたものであり、関係各位に感謝の意を表す次第である。

## 参考文献

- 1) 安西 哲也：リニアアクチュエータの板金加工機械への応用に関する研究，信州大学学位論文，109p., 1996.
- 2) 小山 勝巳：リニアアクチュエータの曲げ加工機への応用に関する研究，信州大学学位論文，109p., 1998.
- 3) 水野 勉，安西 哲也，北村 利光，中村 明，宮下 利人，山田 一：磁石可動形リニア直流モータの静推力特性，日本応用磁気学会誌 Vol. 21, No. 4-2, pp. 837-840, 1997.
- 4) 山田 一：リニアモータとその応用，工業調査会，p. 43, 1981.
- 5) S.A.Nasar, C.Chen Magnet circuit analysis of a tubular permanent linear alternator, Electric Machines and Power Systems, Vol. 13, pp. 361-371, 1987.
- 6) 水野 勉，岩垂 光宏，小山 勝巳，安西 哲也，山田 一：磁石可動形リニア直流モータの字定数とスロット開口幅との関係，第22回日本応用磁気学会学術講演概要集，p. 435, 1998.
- 7) 長坂 長彦：制御用小型電動機，電気学会誌，Vol. 110, No. 3, pp. 195-202, 1990.
- 8) 水野 勉，岩垂 光宏，小山 勝巳，安西 哲也，楡井 雅巳，山田 一：磁石可動形リニア直流モータの電氣的時定数，電気学会論文誌，Vol. 119-D, pp. 328-330, 1999.
- 9) 水野 勉，岩垂 光宏，小山 勝巳，安西 哲也，山田 一：磁石可動形リニア直流モータの高応答化，日本応用磁気学会誌，Vol. 23, pp. 1681-1684, 1999.