

## 学術論文

## 永久磁石埋込形リニア同期モータのプルイン推力特性

## Pull-in Thrust Characteristics of Interior Permanent Magnet Linear Synchronous Motor

脇若 弘之<sup>\*1</sup>(正員), 下川 恭佑<sup>\*1</sup>, 関 国強<sup>\*1</sup>(学生員), 矢島 久志<sup>\*2</sup>, 藤原 伸広<sup>\*2</sup>

Hiroyuki Wakiwaka (Mem.), Kyosuke Shimokawa, Kunitake Seki (Stu. Mem.), Hisashi Yajima, Nobuhiro Fujiwara

Linear drives are used in various fields in the industry such as Factory Automations. Therefore, we must select appropriate linear motors for the applications, and it is important to know the performance of the linear motor. Linear pulse motor (LPM) is considered one of linear synchronous motors (LSM) with concentrated winding and open-loop pulse driven. There are pull-in, pull-out thrust characteristics and maximum start stop pulse rate to evaluate a LPM. We measured pull-in characteristic of LSM with driven as LPM. We propose the measurement method of the pull-in characteristics using pneumatics and the calculation expression of pull-in characteristics, compare the calculation expression with the measurement result.

*Keywords:* linear synchronous motor, kinetic characteristics, load, pneumatics, inertia.

## 1 緒言

リニアモータドライブはFA機器を始め、産業界の様々な分野で実用化されている[1]。そのため、その機器に適したリニアモータを選定する必要がある、そのためにはリニアモータの性能を把握することが重要となる。

リニアパルスモータ(LPM)は、リニア同期モータ(LSM)の1種であり、集中巻のLSMを開ループでパルス駆動した時の別称とすることができる。LPMの動特性は、プルイン特性、プルアウト特性、自起動周波数などで表されている。本論文ではLSMをLPMと同様な駆動方法を用いて、プルイン特性の測定を行う。プルイン特性は動特性であるため、LSMには負荷を与え、駆動させる必要がある。今までその負荷には重量物やバネなどが用いられてきたが、それらには負荷の慣性力の影響、バネによる共振、負荷の変動などそれぞれ問題があった。

本論文では、最初に、それらの問題点の少ない負荷として、空気圧を用いたプルイン特性の測定方法を提案し、その測定結果を示す。次に、モータのプルイン特性を表す実験式を提案し、測定結果との比較を行い、その実験式の妥当性を検証する。

## 2 永久磁石埋込形リニア同期モータ

## 2.1 LSMの構成と仕様

Fig. 1に、永久磁石埋込形リニア同期モータの構造を示した。磁石埋込形リニア同期モータ(以下、IP-LSM)は永久磁石の埋め込まれたヨーク側が可動部であり、その寸法は $10 \times 186 \times 50 \text{ mm}^3$ である。コイルの埋め込まれた固定部は可動部の両側に配置されている。可動部を含めた推力発生部位の体積は $42 \times 56 \times 50 \text{ mm}^3$ (空隙を除く)である。コイルは三相の集中巻で、電気角 $1/3\pi$ ずつずらして埋め込まれている。

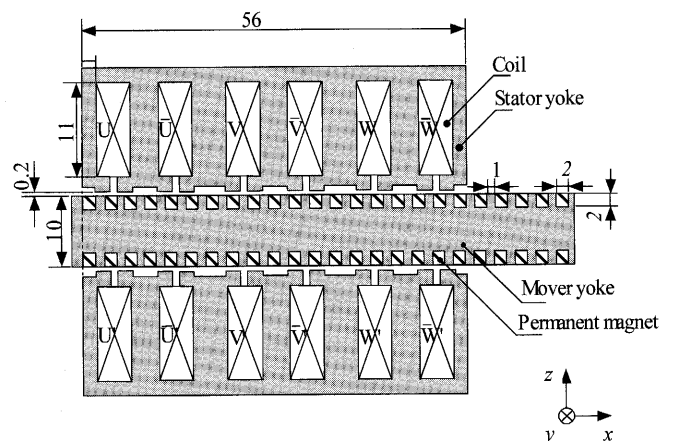


Fig. 1 Structure of interior permanent magnet linear synchronous motor.

連絡先: 脇若 弘之, 〒380-8553 長野県長野市若里 4-17-1, 信州大学工学部電気電子工学科,  
e-mail: wakiwak@gipwc.shinshu-u.ac.jp  
<sup>\*1</sup>信州大学 <sup>\*2</sup>SMC 株式会社

Table 1 Specification of IP-LSM.

Items	Values
Stator armature size	42×56×50 mm <sup>3</sup>
Mover size	10×186×50 mm <sup>3</sup>
Mover mass	680 g
Number of turns (coil)	646 turns/coil
Resistance at 1 phase	31.2 Ω/coil
Maximum thrust	
1 phase (10W)	63.5 N
2 phase (20W)	87.2 N
Thrust constant	218 N/A
Motor constant	19.5 N/W <sup>0.5</sup>

本モータは同期モータとして設計を行ったが、本測定では開ループ制御により駆動させるため、位置検出のセンサなどは取り付けられていない。

Table 1 に、IP-LSM の仕様を示した。IP-LSM は使用電源容量を 20 W とし設計した。コイル仕様は各コイル 646 回巻、31.2 Ω であり、入力電力 20 W において、各コイルの励磁電流は 0.4 A である。

静推力は変位により正弦波状に変動し、6 ステップ（1 ステップは 1 mm）で 1 周期となる。最大静推力は一相励磁（10 W）で 63.5 N、二相励磁（20 W）で 87.2 N である。

## 2.2 モータ定数

設計の異なるモータ間での特性比較のための指標としてモータ定数がある。モータ定数はモータの抵抗損に対する推力の大きさを示す定数であり、以下のように定義されている[2]。

$$K_m = \frac{K_f \cdot I}{\sqrt{R \cdot I^2}} = \frac{K_f}{\sqrt{R}} \quad (1)$$

ここで、 $K_m$  はモータ定数 [N/√W]、 $K_f$  は推力定数 [N/A]、 $I$  は電流 [A]、 $R$  は抵抗 [Ω] である。

モータ定数が大きい程、抵抗損に対する推力が大きいため、起動時の加速度は大きくなる。本モータのモータ定数は 19.5 N/W<sup>0.5</sup> であり、HD 形 LSM [3]、マグナギャップ形 LSM [3] と並び、大きなモータ定数を有するリニアモータである。

## 2.3 駆動方式

IP-LSM の励磁タイミングは Programmable Logic Controller (KV700 : KEY-ENCE) により制御される。PLC には外部よりパルス信号が入力されており、その信号の周波数によりモータの速度制御を行っている。

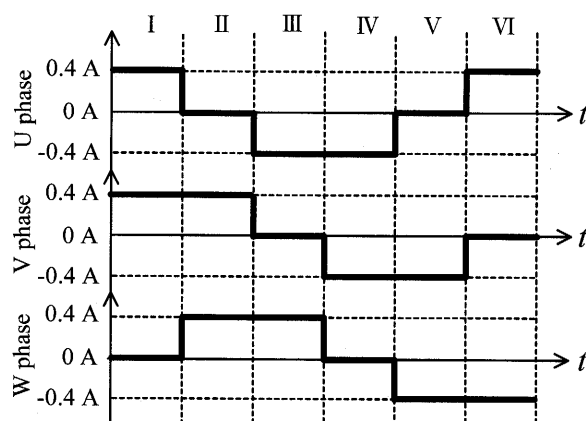


Fig. 2 2 phase mode sequence.

PLC より出力された指令信号は定電流増幅器 (LAA00-X032 : SMC) に与えられ、増幅器からモータに電流が励磁される。この時の励磁電流は矩形波で与えられる。定電流増幅器は電流フィードバックを行い、電圧 48 V の PWM 制御を行っている。

本測定ではモータの励磁方法は二相励磁を用いている。Fig 2 に、二相励磁シーケンスを示した。二相励磁ではそれぞれのタイミングにおいてコイル二相分に電流が励磁されており、各コイルの励磁電流は 0.4 A (20 W) となるように設定している。本モータは 1 ステップが 1 mm であるため、励磁タイミングごとにモータは 1 mm ずつ変位する。指令速度に対し、モータの変位が追従できない時、モータは脱調する。

## 3 プルイン特性の測定方法

### 3.1 動特性の測定に用いられる負荷

動推力の測定では、負荷を与えながら、モータを駆動させる必要がある。以下に、今まで動推力の測定に用いられてきた負荷を示し、その問題点をまとめる[4]。

- (1) 重量物を引き上げる時の重力
- (2) 重量物を積載させ、変位する時の慣性力
- (3) バネの張力
- (4) 水の流体抵抗
- (5) 他のリニアモータの推力
- (6) シリンダの摩擦力

負荷 (1) (2) (5) では、重量物、負荷モータを変位させる時、その負荷の慣性がモータの動作に影響を与えるため、モータ単体の動作を得ることが困難となる。また、モータ可動部の質量に対し、負荷の質量が

大きくなる程、負荷の慣性はそのモータの動作に与える影響は大きくなる。

負荷 (3) では、負荷質量が小さく、負荷の慣性の影響は小さいが、モータの変位により、その負荷に変動が生じる。

負荷 (4) も同様に、負荷質量が小さく、負荷の慣性の影響は小さいが、モータの速度により、その負荷に変動が生じる。

負荷 (6) では、シリンダの摩擦に静摩擦と動摩擦が存在するため、モータの始動前と駆動時で負荷の大きさが変わる。

モータに対する負荷は負荷自身の慣性の影響が小さいこと、モータの動作による変動が小さいことが望ましい。よって、より厳密な動推力の測定を行うためには、負荷は負荷自身の質量が小さく、安定した負荷推力を与えられることが必要となる。そこで、負荷に空気圧シリンダを用いることとした。

Fig. 3 に、空気圧シリンダの構造を示した。これは摩擦力 1 N 以下の低摩擦タイプのシリンダ (MQTL25-100D : SMC) である。本シリンダはピストン質量 155 g とモータ可動部の質量の 1/4 以下であり、モータへの慣性の影響は小さい。本測定ではシリンダのヘッド側に空気を供給し、その空気圧によるピストンを押す力がモータの負荷となる。

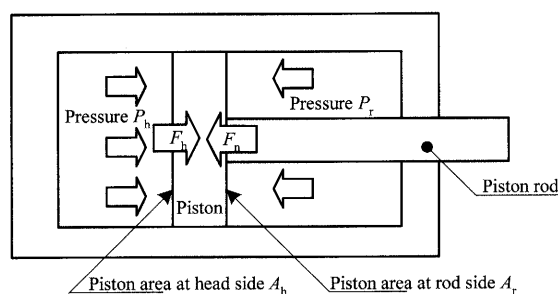


Fig. 3 Structure of air cylinder.

### 3.2 測定ブロック

Fig. 4 に、プルイン特性測定ブロックを示した。モータは、2.2 項で述べたように、PLC に外部から与えたパルス信号の周波数で駆動速度を制御している。モータ可動部はロードセル (荷重変換器) を介して、シリンダピストンに接続されている。モータが駆動している時にシリンダとモータとの間に生じた力が動推力となる。

この時、モータを停止した状態から脱調せずに駆動した時の、起動時の推力をプルイン推力と呼び、モータが駆動している状態から負荷を大きくした時の、モータが脱調する直前の推力をプリアウト推力と呼ぶ。

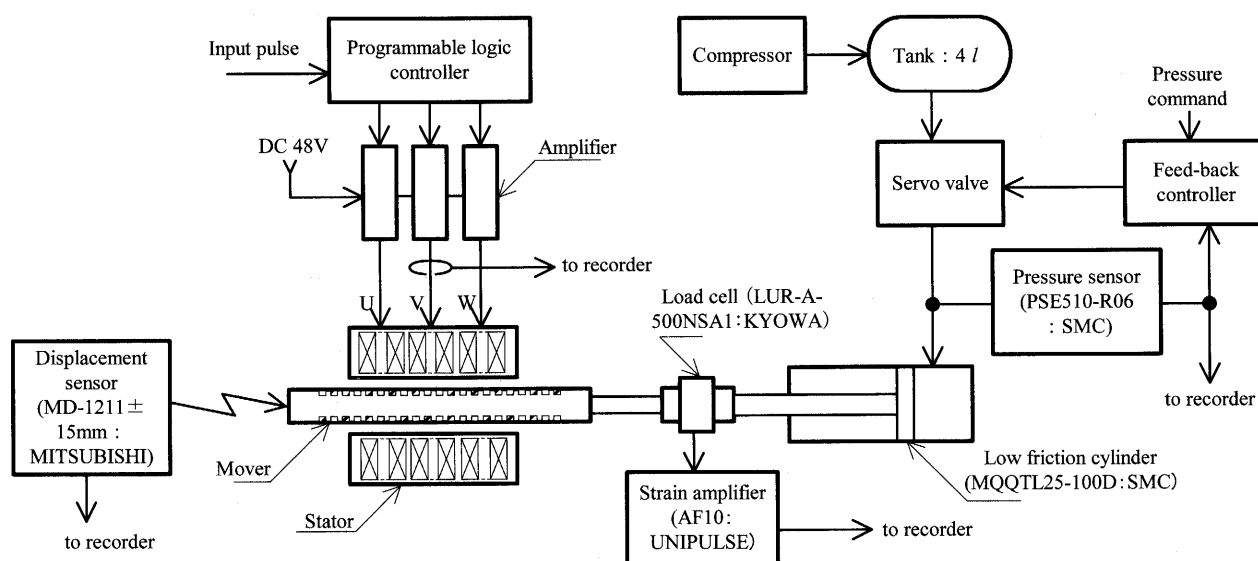


Fig. 4 Measurement block for Pull-in characteristics.

測定では動推力と同時に、V相電流、変位、シリンダ内の空気圧の測定も行う。測定は以下の手順で行う。

- (1) IP-LSMに電流を励磁し、始動位置に保持する。
- (2) シリンダに空気を供給し、空気圧負荷を与える。
- (3) PLCより信号を与え、モータを駆動させる。
- (4) この時のモータ始動時の動推力を測定する。
- (5) 手順(1)～(4)を数回繰り返す。
- (6) 負荷空気圧、モータ速度を変え、手順(1)～(5)を行う。

なお、モータはストッパーを用いて、始動位置が変わらないように調整している。

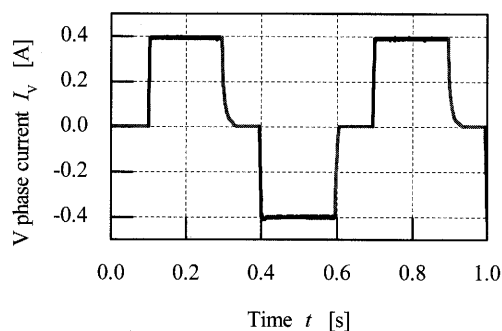
### 3.3 動推力特性

Fig. 5に、空気圧負荷を与えた時の始動時の波形を示した。図は入力電力20W、指令速度0.01 m/s、二相励磁における波形である。駆動前の保持している状態では、LSMにはFig.2の時間VIの電流を励磁している。Fig. 5(a)のV相電流波形から、指令速度が0.01 m/sであるため、0.1 sごとに励磁電流が切り替わっていることがわかる。

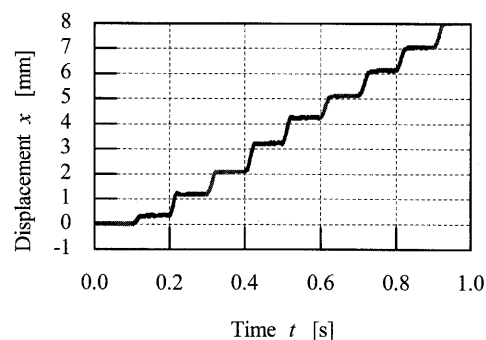
(b)の変位波形において、1ステップ目の変位が1 mmに達していないのはモータに負荷が与えられているため、モータの安定点が押し戻され、変位が小さくなったと考えられる。しかし、2ステップ目以降も同様に安定点が押し戻されているため、モータは相対的に約1 mm変位していることが確認できる。また、負荷を与えた状態では、慣性が大きい時に顕著となるダンピング特性は表れていない[5]。しかし、無負荷状態においては、0.3 mm程度の戻り量がある。

(c)の動推力波形の時間0 sを見ると、LSMには63 N程度の力が与えられていることがわかる。これがシリンダより与えられた空気圧負荷の大きさである。モータが変位する時に、動推力が空気圧負荷よりも5 N程大きくなっている。モータには空気圧負荷を押し返す推力とモータ可動部が加速するための推力が発生し、その差として表れる動推力リップルがモータを加速させるための推力になると考えられる。本測定では、このモータ始動時の動推力リップルの最大値をプライン推力としている。

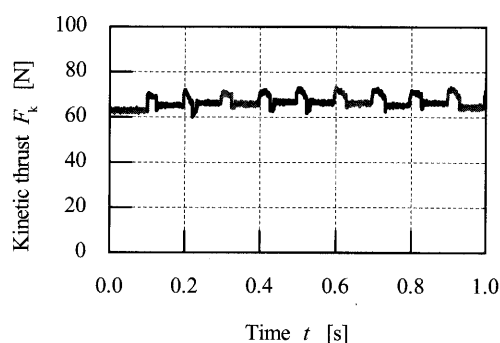
(d)の空気圧負荷波形から、モータを駆動した時、空気圧負荷が10%以内で変動していることがわかる。シリンダを用いた空気圧負荷では負荷の慣性の影響が小さく、高い安定性が得られた。



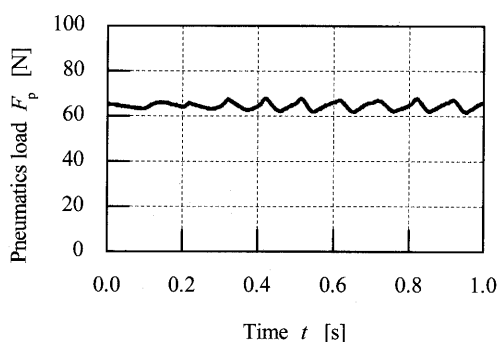
(a) V phase current



(b) Displacement



(c) Kinetic thrust



(d) Pneumatics load

Fig. 5 Stating waveform with pneumatics load (2 phase mode, Velocity : 0.01 m/s, Power : 20 W)

### 3.4 プルイン推力特性

Fig.6に、プルイン推力特性を示した。プルイン推力は動推力波形において、モータ始動時の動推力リップルの最大値を抽出している。無負荷の時、速度 0.3 m/s まで脱調せずに駆動することができるため、本 LSM の自起動速度 (周波数) は 0.3 m/s (300 Hz) である。プルイン特性は速度 0.03 m/s において極大値を示している。速度 0.04 m/s 以下ではモータは階段状に変位しており、モータは変位するために十分な推力が得られている。したがって、この極大値はプルイン推力のばらつきにより生じたと考えられる。速度 0.04 m/s 以下において、プルイン推力の平均値に対する変動率は 5 % 以下であった。

プルイン推力はモータの指令速度が大きくなる程、小さくなるのがわかる。これはモータへの指令速度が大きくなる程、電流の励磁周波数が大きくなり、鉄損が大きくなるためであると考えられる[6]。

## 4 プルイン特性の考察

### 4.1 プルイン特性の計算式

3.3 項で述べたように、モータの駆動時において、モータから発生した推力の一部はモータを加速させるための推力になる。モータを加速させるための推力を有効推力と呼ぶこととする。

有効推力はモータから発生した推力、すなわち、静推力からモータの駆動時の抵抗 (負荷) を差し引いた値になると考えられ、以下の式で表される。

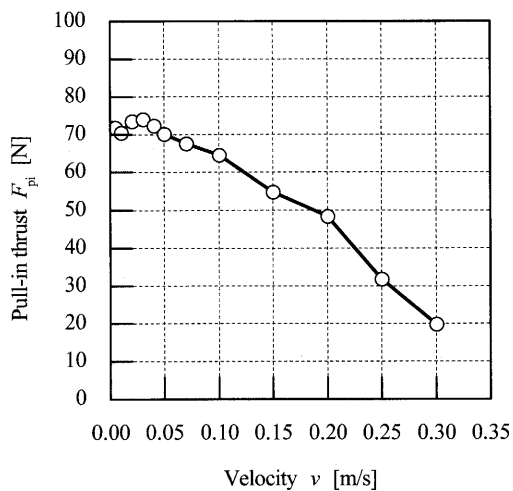


Fig. 6 Pull-in thrust characteristics  
(2 phase mode, Power : 20 W)

$$F_e = F_s - F_L - F_{sf} - F_d - m_c a \quad (2)$$

ここで、 $F_e$ は有効推力 [N],  $F_L$ は負荷 [N],  $F_{sf}$ は静摩擦係数 [N],  $F_d$ はシリンダの減衰力 [N],  $m_c$ はシリンダ質量 [kg],  $a$ は加速度 [ $m/s^2$ ]である。

シリンダの減衰力はピストンとシリンダの相対運動により生ずる抵抗力であり、速度に比例した値となる[7]。シリンダの減衰力は以下の式で表される。

$$F_d = c \cdot v \quad (3)$$

ここで、 $c$ は粘性減衰係数 [N/(m/s)],  $v$ は速度 [m/s]である。

モータの駆動時において、有効推力が可動部にした仕事は可動部の運動エネルギーとなるため、モータが脱調せずに動作するためには以下の関係を満たす必要がある[8]。

$$\frac{1}{2} M v^2 \leq \int_0^{x'} F_e dx = \overline{F_e} x' \quad (4)$$

ここで、 $M$ は全可動部位の質量 [kg],  $x'$ は変位 [m],  $\overline{F_e}$ は平均有効推力 [N]である。

上式 (2) ~ (4) から負荷  $F_L$  について導くと以下の式が得られる。

$$F_L \leq \overline{F_s} - F_{sf} - F_d - m_c \overline{a} - \frac{1}{2} \frac{M v^2}{x'} \quad (5)$$

ここで、 $\overline{F_s}$ は各変位における静推力の平均値 [N],  $\overline{a}$ は加速度の平均値 [ $m/s^2$ ]である。

この負荷  $F_L$  の最大値がプルイン推力と同等の値となるため、プルイン特性を表す式は以下ようになる。

$$F_{pi} = F_L = \overline{F_s} - F_{sf} - F_d - m_c \overline{a} - \frac{1}{2} \frac{M v^2}{x'} \quad (6)$$

### 4.2 計算値と実測値の比較

Fig. 7に、計算値と実測値の比較を示した。計算式は前項の式 (6) を用いている。実測から各変位における静推力の平均値には 79 N, 静摩擦力には 7 N を代入している。粘性減衰係数の測定は行えていないため、ここでは 0, 30 N/(m/s) とした時の計算を行っている。速度はモータに与えた指令速度を代入している。負荷の慣性力は小さいものであるため、無視している。全可動部位の質量は LSM 可動部, シリンダピストン, ロードセルの質量の総和とし、1 kg としている。変位

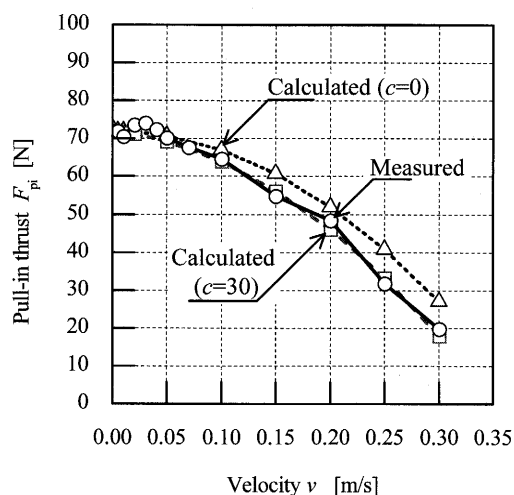


Fig. 7 Comparison of calculated and measured value (2 phase mode, Power : 20 W)

は1ステップ分, 1 mmを代入している。

粘性減衰係数を  $0 \text{ N/(m/s)}$ とした時, 計算式は実測より, 大きな値となった。指令速度  $0.25 \text{ m/s}$  では,  $10 \text{ N}$ 以上大きくなった。粘性減衰係数を  $30 \text{ N/(m/s)}$ とした時では, 速度  $0.20 \text{ m/s}$ 以下では  $5\%$ 以内で一致した。速度  $0.30 \text{ m/s}$ では  $9\%$ 以内で一致し, 計算式は実測値とよく一致した。

## 5 結言

本論文で述べた事項について, 以下にまとめる。

- (1) 負荷に空気圧を用いた動推力の測定方法を提案した。空気圧負荷では, 負荷の慣性の影響が小さく, 負荷の変動の小さいことを確認した。モータ駆動時の負荷の変動率は  $10\%$ 以下であった。負荷の変動率はより空気容量の大きいシリンダを用いることでさらなる低減が期待できる。
- (2) プルイン推力特性を表す実験式を示した。適切な粘性減衰係数を与えることで, 計算式と実測値は  $9\%$ 以内で一致した。速度によりプルイン推力が小さくなる要因は, 速度が大きくなるとモータを駆動させるためのエネルギーの比率が大きくなるためであると考えられる。

(2005年2月15日受付, 2005年11月25日再受付)

## 参考文献

- [1] モータ技術実用ハンドブック編集委員会 編, モータ技術実用ハンドブック, 日刊工業新聞社, pp.781-784, 2001.
- [2] 電気学会, リニアモータ技術とその応用に関する用語,

電気学会技術報告 第911号, p.36, 2003.

- [3] 水野, 小林, 村口, 汎用化が進むリニアドライブの現状, 電気学会リニアドライブ研究会資料, LD-03-36, pp.13-18, 2003.
- [4] 脇若, 矢島, 下川, 藤原, 高田, 空気圧を使った小形リニアモータの特性測定用負荷の提案, 電気学会リニアドライブ研究会資料, LD-04-39, pp.1-6, 2004.
- [5] 坂本, ステッピングモータの使い方, オーム社, pp.104, 123, 2003.
- [6] 山田, 小林, 渡辺, 水野, 山口, リニアパルスモータの動推力解析, 日本応用磁器学会誌, Vol.20, No.2, pp.617-620, 1996.
- [7] 黒須, 機械振動の基礎, パワー社, pp.24-26, 1979.
- [8] 和田, 力学のききどころ, 岩波書店, p.18, 1996.