

同軸型MnAlC磁石リニアサーボモータの試作

高須 一郎 *1・加藤 信行 *2

MnAlC Magnet Coaxial Type Linear Servo Motor

Ichiro Takasu and Nobuyuki Kato

Synopsis: The linear servo motor with MnAlC magnets was introduced. It was designed as a coaxial type linear motor using Fleming law. As for magnetising factors, magnetising voltage, magnetising pitch and coil structure were studied. It was found that narrower coil width than magnetising pitch could produce magnetised trapezoid shape waveform whilst magnets magnetised by coil which has same width with magnetising pitch has peak shape. Characteristics of the coaxial linear servo motor using magnets whose magnetised waveforms are sine shape and trapezoid shape is also examined. The linear motor with magnetised trapezoid shape waveform has bigger thrust than the motor with sine shape waveform.

Key words: linear motor; MnAlC magnet; coaxial; Fleming law; thrust; initial time; encoder resolution; sine; trapezoid; waveform.

1. 概要

リニアサーボモータは、外磁型と内磁型に大別される。外磁型では、磁石と駆動コイルは一般に対向に配置され、移動距離全般にわたって一様な磁場を得ることが困難であり、また、磁石と駆動コイルとの距離を制御することが困難である。磁場の利用効率においても、原理的に内磁型の方が良いことが知られている¹⁾。しかし、従来、外磁型で使用できる強力な磁石はあるが、内磁型に適用できるタイプの永久磁石は無かった。

内磁型のリニアサーボモータに要求されることは、長尺の磁石を製造できること、径方向へ磁力線が湧き出るよう着磁できること、また、その磁束密度の分布が磁石の径方向に対して一様であることなどである。従来、この条件を満たす磁石は存在しなかった。

一方、MnAlC磁石は、(1) 温間押出加工によって押出方向に一軸異方性の磁石となる^{2, 3)}、(2) 長尺の磁石ができる、さらに、(3) 自由な着磁パターンをとれるという特長を持っている⁴⁾。これらの特長は、内磁型リニアモータに対して特に有効なものである。また、本磁石は径方向に一様な磁力分布を形成することが容易であり⁵⁾、リニアモータの制御とその滑らかな動作に対しても大きな利点を有している。

近年、直進運動は、複写機、自動ドア、XYテーブル等の様々な機器に使われ、また、FA化に伴い工場内の物の輸

送、位置決め等の色々な場所に使用されている。その方式には、回転モータとボールねじあるいはベルトを組み合わせたものおよびリニアモータを直接の駆動源としたもの等がある⁶⁾。しかし、リニアモータは、高価格、取扱い難のため用途が非常に限定されると言われているが、小型・低価格であり、かつ取扱いの容易なリニアモータができれば、その市場は計り知れないものがあると思われる。

そこで、MnAlC磁石の新規用途開拓の一環として、自由なパターンに着磁できる、また、長尺の磁石ができるというMnAlC磁石の特長に着目し、それらを活かした、他に例を見ないシンプルな構造のリニアモータを考案し、試作した。そして、MnAlC磁石を本システムに適用した場合の特性について評価するとともに、モータの動作特性への着磁波形の影響についても調査した。

1・1 システムの概要

今回試作したMnAlC磁石リニアサーボモータの概要をFig.1に示す。駆動部には、三相の駆動コイルを配置し、輪切り状にステップ着磁した磁石にシャフト機能を持たせる事で、シンプル化を図っている。リニアエンコーダ部には、位置検出用のリニアスケールとして、板状のプラスチック磁石(幅:10mm, 厚さ:2mm)を200 μ mピッチで着磁したものをを用い、MR素子によって位置を検出している。また、駆動コイルの外側に、磁石と平行にヨークを取り付けて駆動コイル近傍の磁束密度を向上させ、推力の向上を図っている。また、これにより、外部への磁束の漏洩を大幅

*1 技術研究所、Ph.D.

*2 技術研究所 新材料・粉末研究G

に低減させた構造となっている。MnAlCシャフト磁石と駆動コイルとの摺動による金属粉末発生は、駆動コイルピン両端に取り付けたハウジングに樹脂軸受をかん合することにより抑制するよう配慮している。ドライバには、市販のACサーボドライバを用い、パラメータを一部変更して使用した。

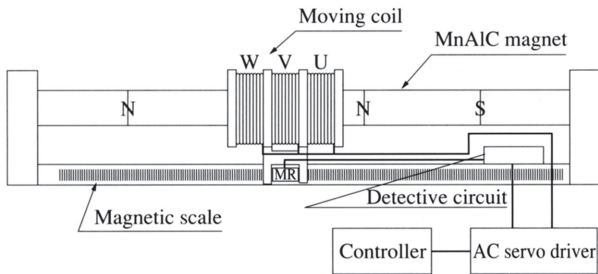


Fig. 1. Schematic diagram of the MnAlC magnet linear servo motor.

1・2 駆動部

リニアモータの駆動部の推力発生原理は、一般に知られているように、Flemingの左手の法則によるものである(Fig.2)。図に示す通り、磁界中に置かれた導体に電流を流すと磁界と導体の間に相対的な電磁力が発生し、これが推力となる。この推力Fは、(1)式で表される。

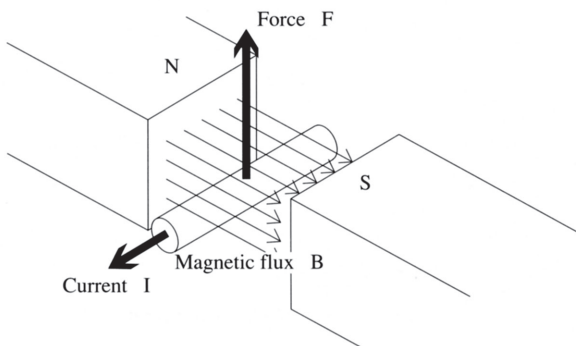


Fig. 2. Principle of movement.

$$F = B \cdot I \cdot L [N] \quad (1)$$

- ここで、 F : 電磁力 (推力) [N]
- B : 磁束密度 [T]
- I : 電流 [A]
- L : 磁界中にある導体の有効長 [m]

MnAlC磁石は、押出加工により ϵ 相格子の磁化容易軸〔001〕方向〕が押出し方向に配向するという性質を有している。その分布状態をFig.3に示す。MnAlC磁石は、単一方向に100%配向しているのではなく、図のような磁場分布を有している。この配向特性を活かして各種の着磁パタ

ーンが開発されている。特に、ステップ着磁は、軸方向と径方向の磁気特性をフルに活用して、長尺棒状磁石の表面に一定ピッチで強力な磁束を発生させるように考案したものである。Fig.4に、ステップ着磁を行うための着磁コイルと得られる着磁波形を示した。

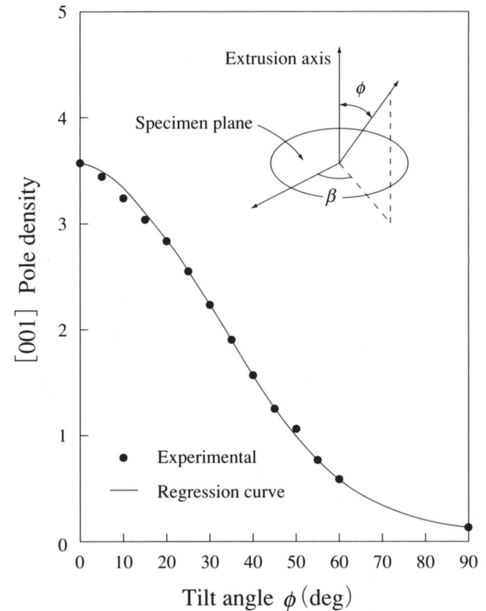


Fig.3. Distribution of (001) pole density as a function of tilt angle in an extruded MnAlC magnet. 4)

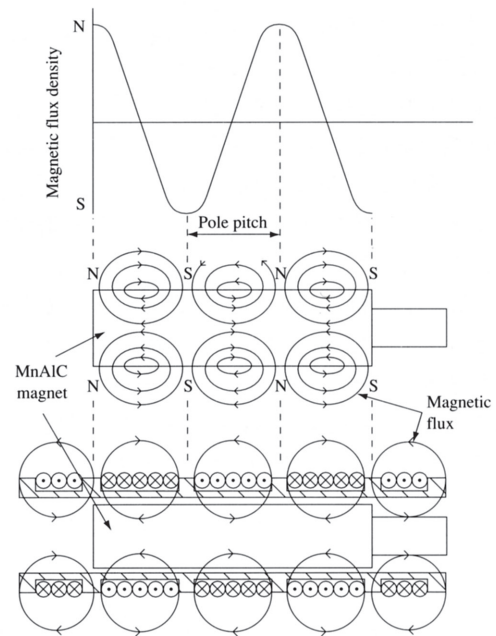


Fig.4. Schematic diagram of the step type magnetising coil and its waveform.

このMnAlC磁石を利用した本システムは、MnAlC押出磁石の異方性の特徴 (Fig.3に示したように軸方向のみではなく径方向にも異方性の分布を持っている)を活かして、

Fig.5のように導体を円周上に配置することにより、導体のほぼ全長を磁界中におくことができ、有効長≒導体全長となり、非常に効率良く推力を得ることができる。ただし、導体が磁界中を移動することにより、導体にFlemingの右手の法則に従って起電力が発生する。この起電力は、導体の移動を妨げる方向に働くため逆起電力と呼ばれ、導体の移動速度に比例する。この逆起電力を考慮すると、速度 v (m/sec) における推力 F_v は、印加電圧による推力から逆起電力による推力分を差し引いた値となり、(2) 式によって表される。

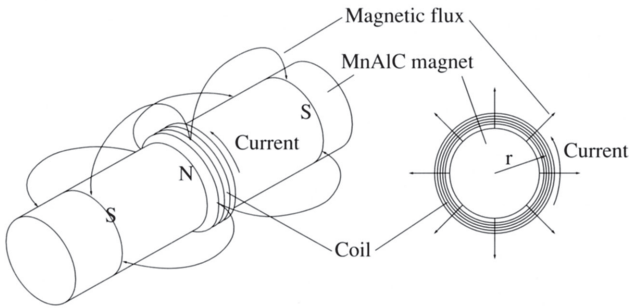


Fig. 5. Magnetic field diagram of the linear servo motor.

$$F_v = \frac{B \cdot L \cdot E_s}{R} - \frac{v \cdot B^2 \cdot L^2}{R} \quad (2)$$

E_s : 印加電圧 [V]
 R : 導体の電気抵抗 [Ω]

(2) 式から分かるように、本リニアサーボモータでは、起動時に推力が最大になり、速度の増加と共に速度に比例した逆起電力が発生し、推力が直線的に低下する。また、この逆起電力による推力の低下は、導体の有効長の2乗に比例する。従って、高速で使用する場合は、導体を太くし巻数を減らして導体の有効長を短くし、電流を増加させることで、推力の低下を軽減することができる。

また、連続的に推力を発生させるために磁石のN-S極間着磁ピッチの1/3ピッチ幅で三相のコイルを巻いてY結線し、それぞれのコイルにFig.6に示すような120°位相の異なる電流を流すことにより連続して推力を発生させることができる。Fig.7にその様子を模式的に示す。

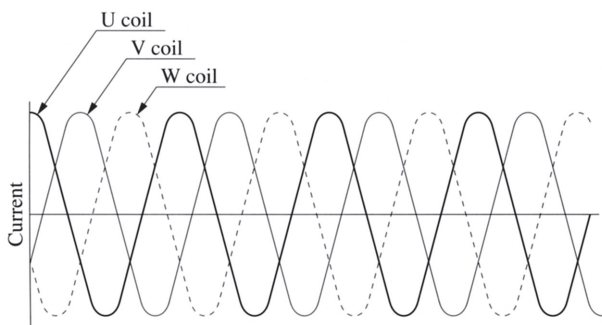


Fig.6. Current waveforms for the linear servo motor.

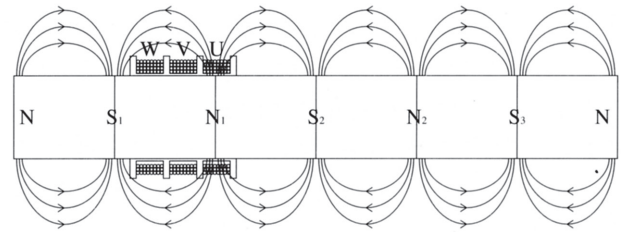


Fig.7. Schematic diagram of coil movements.

本リニアサーボモータでは、推力の向上を図るため駆動コイルの外周にヨークを配置している。このことにより、MnAlC磁石より発生した磁束を駆動コイル周辺に効率良く集めることができ、結果的に(1)式における磁束密度を上げることができ、推力向上が図れる。

1・3 リニアエンコーダ部

リニア直流モータの位置決め精度は、機械的加工精度のみに依存するのではなく、エンコーダ部の分解能にも大きく依存する。一般的にリニアエンコーダは、高価であるが、今回のリニアサーボモータには、安価でシンプルであることを主眼としてリニアエンコーダを考案した。その構造の模式図をFig.8に示す。

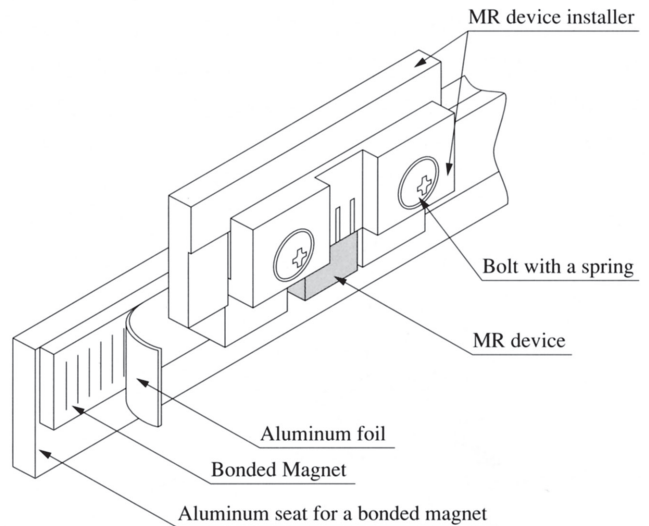


Fig.8. Schematic illustration of the linear encoder.

厚み2mm、幅10mmのプラマグにN-S極間を200 μmピッチで着磁し、MR素子取付台と接する表面を、耐磨耗性のためにアルミニウム箔でカバーした。樹脂製のMR素子取付部品とアルミニウム箔とをその接触が極低圧力になるようにスプリングで押さえ、MR素子とプラマグ着磁面との距離が常に一定になるような構造とした。

プラマグの着磁ピッチとブリッジ結合されたMR素子の位置関係とMR素子出力波形、およびアンプ部ライン出力波形をFig.9に示す。

この方式で、波長の8分の1 (λ/8) の分解能が得られる。今回は簡易的に、λを400 μmとしたので、分解能は50 μmとなる。

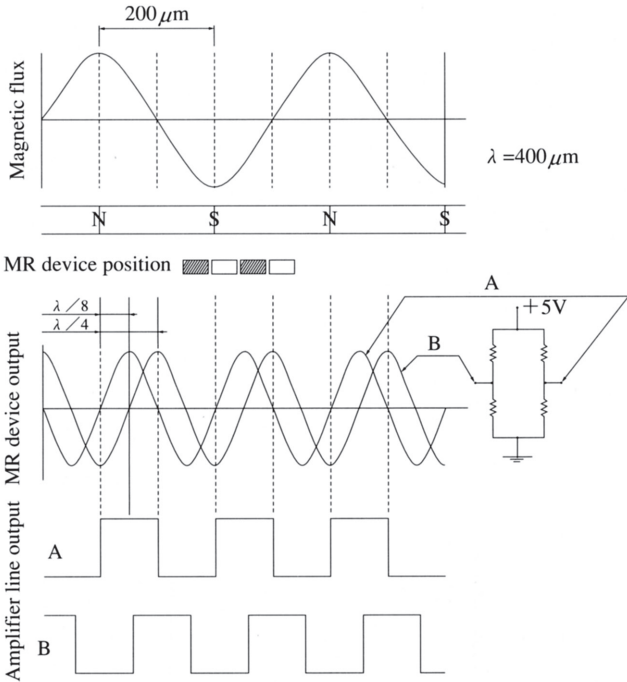


Fig.9. Voltage waveform of linear scale outputs.

2. 着磁波形の検討

リニアモータに使用される磁石に求められる磁気性能は、その値が高だけでなく、駆動制御の面から適した着磁波形が要求される。そこで、MnAlC磁石に施されるステップ着磁について、コイル形状および印加電圧等の着磁条件と着磁波形の関係を調べ、サーボモータとしての磁気回路を構成する際の最適着磁波形を検討した。

2・1 着磁波形と特性

コイルへの印加電圧を変えて着磁した磁石の表面磁束密度のピーク値は、ある電圧で飽和する。コイルによって着磁挙動の多少の差異 (Fig.10 曲線A,B,C) があるが、顕著な傾向は見られず、同様の着磁傾向を示した。

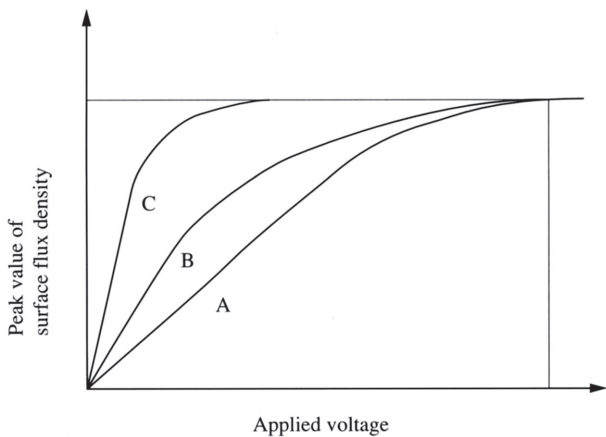


Fig.10. Relationship between applied voltage and the peak values of surface flux densities.

着磁ピッチと着磁された磁石の表面磁束密度との関係を Fig.11 に示す。図に示す通り、着磁ピッチと磁石直径の比が1.5以上になると磁束密度が飽和する傾向があることが分かる。また、この時の磁束密度は、B-Hカーブ上のBdと近い値を示していた。これらのことより、着磁ピッチは、磁石直径の1.5倍以上で十分であることが分かる。

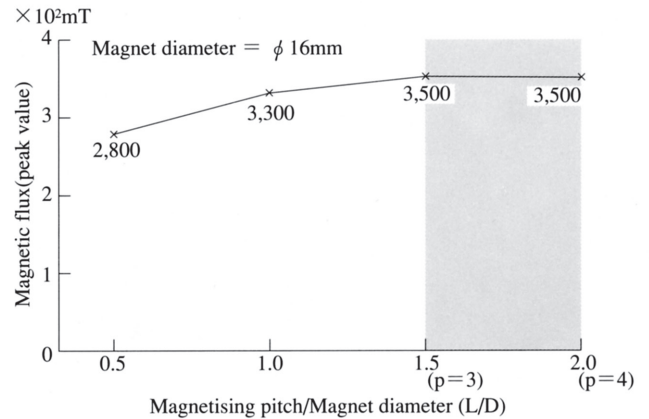


Fig.11. Relationship between magnetising pitch/diameter of a magnet and surface flux density.

2・2 台形波の検討

着磁ピッチに対するコイルの巻幅の影響について調べた。ここで、巻幅は、着磁ピッチに対して25%から100%まで変化させた。その結果を Fig.12 に示した。着磁波形の評価指標として、着磁後の磁束密度のピーク値および着磁波形の半値幅を用いた。すなわち、着磁波形の半値幅が大きく、磁束密度のピーク値が小さいことは、波形がブロードであることを示す。これを見ると、コイル幅を狭くすると、磁束密度のピーク値が下がり、半値幅が増加する傾向があり、コイル幅を狭くすることにより波形がブロードになることを示している。

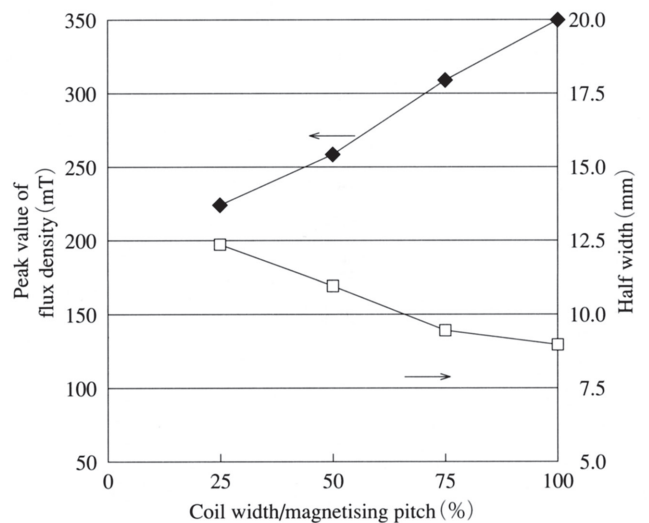


Fig.12. Effect of ratio of coil width/magnetising pitch on the peak value and the half-width of flux density.

また、着磁ピッチに対するコイル幅の比が異なる場合の着磁電圧と波形の関係について調べた。Fig.13に着磁ピッチと同じ幅のコイルおよび25%の幅のコイルについて、それぞれ着磁印加電圧と着磁波形の関係について比較して示した。着磁ピッチ全長にわたって着磁コイルを巻いた場合、着磁波形は、三角波であり、電圧の増加に伴いピーク値が増大する傾向を示した。一方、着磁ピッチの25%幅コイルの場合、低電圧では、台形となり、電圧の増加に伴いsine波となる傾向を示した。

上記の結果から、Fig.13に示したように、着磁幅 (pitch) よりも狭いコイル幅 (coil width) を用いることにより、波形をブロードにすることができることが分かった。その原因として以下のことが考えられる。すなわち、着磁幅全体にコイルを巻いた場合、ピッチ全長にわたって磁石の軸方向に磁場が発生する。その結果、両方向から磁力線が衝突したように磁力線分布が形成され、狭い領域より磁束が径方向に湧き出してくるように着磁される。このため、狭い幅から磁力線が湧き出し、ピークを持った着磁波形となる。これに対して、着磁ピッチ幅の一部にコイルを巻いた場合には、コイルの巻いてある部分には磁石の軸方向の磁力線が発生し、コイルの巻いてない部分では、その向きが徐々に径方向に傾いた形の磁力線となる。MnAlC磁石押出材は、径方向にもある程度の磁化容易成分を残しているため、このような磁力線分布内に置かれると、軸方向だけでなく径方向にも着磁される。このため、磁束密度分布はブロードとなり、台形型の着磁波形に近づく。

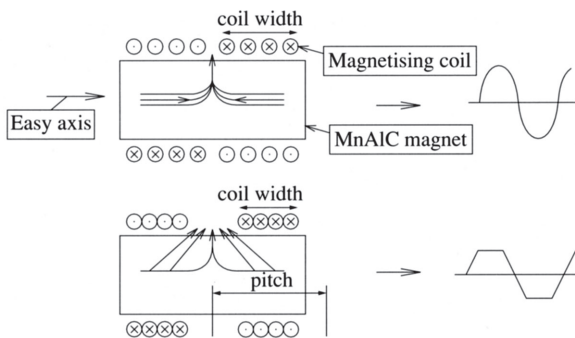


Fig.13. Schematic illustration of the effect of coil width.

3. 着磁波形のモータ特性への影響

3・1 リニアモータの基本特性

リニアモータに要求される性能は、用途により異なるが、一般に、次の3つの特性で評価される。

- ① 推力 (リニアモータの規模の指標)
- ② 立ち上がり時間 (制御系からの信号に対してどの位の時間で所定の速度に達するかを評価するための指標)
- ③ 速度変動特性 (定速度運転に対して、速度ムラのないことを表す指標)

3・2 sine波によるモータ特性

sine波状に着磁したMnAlC磁石を軸として使用した時のモータ特性を下記に述べる。

今回の実験では、速度変動性および立ち上がり時間を評価するために、モータの速度カーブを様々なパラメータで測定した。Fig.14とFig.15に速度と立ち上がり時間との関係および速度と速度変動についてその結果をそれぞれ示した。

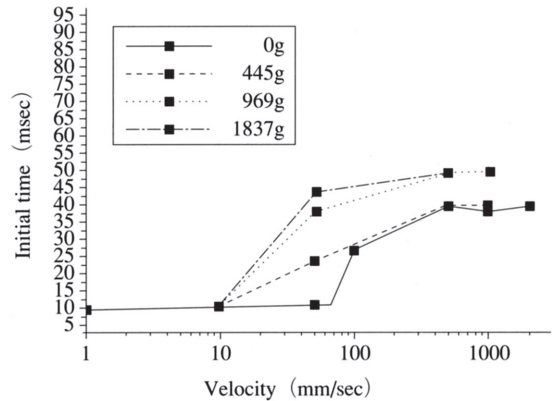


Fig.14. Relationship between speed and initial time of the linear motor (sine curve) .

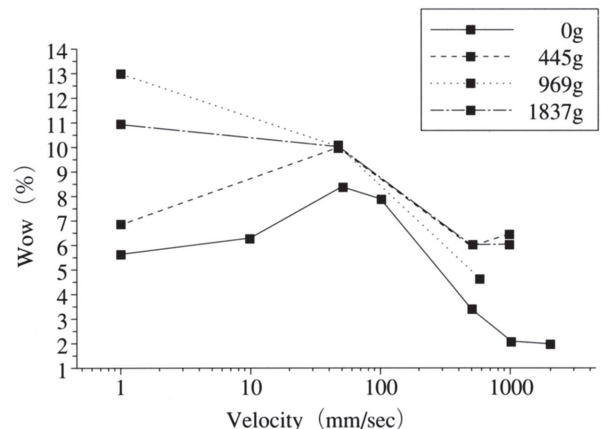


Fig.15. Relationship between speed and ratio of speed change of the linear motor (sine curve) .

これらは、 $\phi 25\text{mm} \times 300\text{mm}$ のMnAlC磁石に30mmピッチで (ステップ着磁) 着磁したものである。最高速度は、2200mm/secであった。電流を増やせばさらに速度を上げることは可能と思われるが、コイルの加熱の問題があり、空冷状態では、この辺りが限界であると考えられる。

モータ始動時の推力について、動き始めの荷重測定により評価した。これにより本システムでは、推力40Nを得た。また、Fig.14から分かる通り、立ち上がり時間については速度が速くなるほど長くなる傾向があり、速度10mm/secでは10msec、速度1000mm/secでは40msecであった。速度変動特性 (Fig.15) については、立ち上がり時間の傾向の逆となり、速度が速くなるほど小さくなる傾向が見られた。推力と立ち上がり時間について、同クラスのリニアモータの能力としては満足なものであった。

3・3 台形波によるモータ特性

台形波状に着磁したMnAlC磁石を軸として使用した時のモータ特性について下記に述べる。

今回の実験に使用したMnAlC磁石の着磁波形を、Fig.16に比較して示す。総面積は両者ほぼ同じであるが、台形波の方がsine波に比べて山の頂上付近が広がっていることが分かる。

得られたリニアモータの特性について、両者を比較してTable 1に示した。

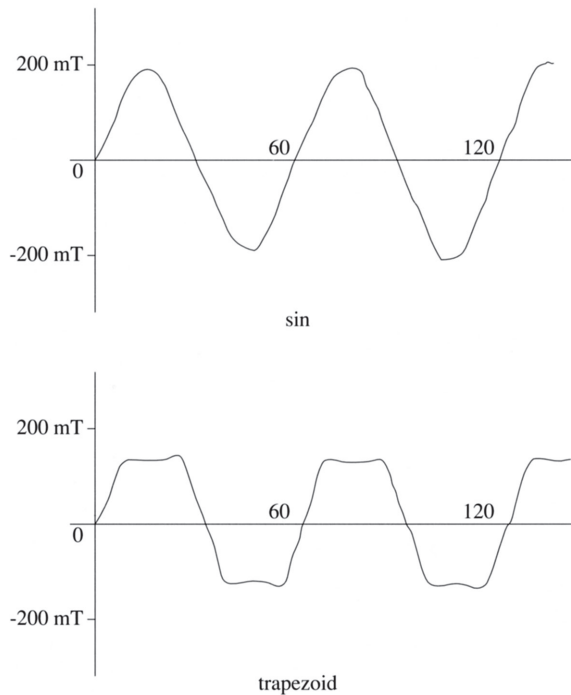


Fig.16. Magnetising waveforms for the MnAlC magnets
((1) sine waveform, (2) trapezoid waveform) .

Table 1. Characteristics of the MnAlC magnet linear servo motor.

		Magnetised waveform	
		trapezoid	sin
MnAlC magnet diameter (mm)		φ25	φ25
Initial time (msec)	10mm/sec* 1000mm/sec*	10 50	10 40
Thrust (N)		47	40 (41)
Maximum velocity (mm/sec)		2200	2200
Encoder resolution (μm)		50	50

* motor speed

台形波状に着磁したMnAlC磁石を用いることにより、高速時も立ち上がり時間が若干長くなるが、推力は15%程度向上する。この最大推力が向上するのは、推力の計算式

(1) 式と駆動コイルが磁石表面からある距離の位置にあることから考えて、台形波形の方が比較的長い距離で、高い磁束密度が得られているためと考えられる。

4. おわりに

MnAlC磁石の新規用途として試作された本同軸型磁石リニアサーボモータは、Table 1に示すような特性を持ったものであることが分かった。また、MnAlC磁石を用いることにより、効率が良くとされる内磁型の構造をとることができ、このシンプル構造で、磁石の周りの磁束密度が一定であるという利点から、制御がしやすく、立ち上がり時間の短いモータの可能性が見出された。量産についての諸課題は、モータ製造メーカーに委ねるとして、その基本特性が得られたと考える。

磁石材料は、磁気回路を構成する部品のみならず、広範な用途に用いられるアイテムとして位置付けられるに至っている。高性能タイプと安価なタイプの磁石が混在している中で、当社では、MnAlC磁石を、単に磁気エネルギー供給物としてだけでなく、磁気性能以外の性能も併せ持った機能材料として着目し、取り組んでいる。このリニアサーボモータもこのような展開の一つとしてMnAlC磁石の新規用途に大きく期待できるものと考えられる。長尺のMnAlC磁石を作製することができる、自由な着磁パターンがとれる、磁石の長さ方向だけでなく径方向にもある程度磁気異方性を持っている、という特徴は、このリニアサーボモータという用途に対しても、大きな利点であると考えられる。

謝 辞

本研究を行うにあたり、松下電子部品株式会社、石川高吉氏にご指導ならびにご協力いただきました。ここに記して深く謝意を表します。

文 献

- 1) 白木学,宮尾修美: 図解リニアサーボモータとシステム設計, 総合電子出版, (1986), 18
- 2) N.Ohtani, N.Kato, S.Kojima, K.Kojima, Y.Sakamoto, M.Tsukahara and T.Kubo: IEEE Trans.Mag.,MAG-13 (5) (1977), 1328-1330
- 3) A.Yanagitani, A.Okawa and Y.Tanaka: Material Science and Engineering A, 182 (1994), 1355-1358
- 4) Y.Sakamoto, A.Ibata, S.Kojima: MRS Int.Met. on Advanced Materials, (1989), 139-153
- 5) 小島滋,小島清司: 日本金属学会誌, 20 (1981), 183
- 6) 日経メカニカル別冊, モータ全活用術, (1990), 93