

リニア直流モータに用いる磁性材料の直流バイアス特性

DC-Bias Characteristics of Magnetic Materials for a Linear DC Motor

宮下利仁・唐 玉琪・水野 勉・梶岡守正*・伊東茂司**・山田 一

信州大学工学部, 長野市若里 500 (〒380)

*東京航空計器(株), 東京都狛江市和泉本町 1-35-1 (〒201)

**日本理工商事(株), 東京都板橋区蓮根 2-13-1 (〒174)

T. Miyashita, Y. Tang, T. Mizuno, M. Kajioka,* S. Ito,** H. Yamada

Faculty of Engineering, Shinshu University, 500 Wakasato, Nagano 380

*Tokyo Kokukeiki Co., Ltd., 1-35-1 Izumihonmachi, Komae, Tokyo 201

**Nihon Riko Shoji Co., Ltd., 2-13-1 Hasune, Itabashi-ku, Tokyo 174

This paper describes the dc-bias characteristics of five magnetic materials used in a linear dc motor (LDM): three block materials—carbon steel (S45C), pure iron (SUYB1) and cast iron (FCD450), and two laminated materials—non-oriented silicon steel sheets (35H440) and oriented silicon steel sheets (23ZH100). The following conclusions are reached: (1) When the dc bias H_{dc} is in the range from 1 to 5 kA/m, the electrical time constant T_e of the five magnetic materials decreases. (2) In the same range, the incremental resistance ΔR of the block materials decreases, while ΔR of the laminated materials tends to increase. (3) 23ZH100 has the lowest values of T_e and ΔR among the five magnetic materials.

Key words: linear dc motor, magnetic materials, dc bias, electrical time constant, iron loss

1. ま え が き

リニア直流モータ (Linear DC Motor: 以下, LDM と略記) の高推力化のためにはコイルに作用する磁束密度を大きくする必要があり, 飽和磁束密度の高い磁性材料が要望される. また高応答化のためには LDM の電気的時定数 T_e が小さいことが望ましい. さらに LDM の効率向上のためには, 鉄損の小さい材料を選択する必要がある¹⁾. LDM の構造から磁性材料であるヨーク部には永久磁石による直流磁界がバイアスされている. このことから LDM の設計時には, さまざまな磁性材料の直流バイアス特性のデータが必要となる. 本論文では, 機械構造用炭素鋼 (炭素鋼), 電磁軟鉄 (純鉄), 球状黒鉛鉄製品, 無方向性電磁鋼帯, および方向性電磁鋼帯 (けい素鋼) の計 5 種類の磁性材料を取り上げ, 以下の事項について述べる.

- (1) 各磁性材料のインダクタンス L , 抵抗 R , および電気的時定数 T_e の直流バイアス特性
- (2) 各磁性材料の特性比較 (T_e - ΔR 特性)

2. LDM の構造とインダクタンス, 抵抗の測定方法

Fig. 1 は推力定数 35 [N/A], 交流 60 [Hz] 程度まで駆動可能な LDM (以下, LDM-35 と称す) の構造である. LDM-35 は永久磁石の磁束とコイル電流とが鎖交することでフレミングの左手則により推力が発生する. 磁束の流れに着目するとヨーク

には永久磁石による直流磁界がバイアスされ, その上にコイルの作る交流磁束が流れる. このことから LDM-35 のインダクタンス L や抵抗 R は磁性材料の種類と直流バイアス条件で変化する. LDM-35 の L, R の測定には FFT アナライザを用いて利得係数, 位相を測定し (Fig. 3 参照), L, R の直列回路としてコイルの伝達関数 $G_s(j\omega)$ を求め, 以下の式で L, R をそれぞれ計算した²⁾.

$$G_s(j\omega) = \frac{R_s}{R + R_s + j\omega L} = G(\cos \phi + j \sin \phi) \quad (1)$$

$$L = -\frac{R_s}{2\pi f G} \sin \phi \quad [\text{H}] \quad (2)$$

$$R = \frac{R_s}{G} \cos \phi - R_s \quad [\Omega] \quad (3)$$

ここに, ω : 角周波数 [rad/s], f : 周波数 [Hz], R_s : 標準抵抗 [Ω], G : 利得係数, ϕ : 位相 [$^\circ$]

また, 上式により求めた L, R から LDM の電気的時定数 T_e は次式で与えられる.

$$T_e = \frac{L}{R} \quad [\text{s}] \quad (4)$$

以上に示した式により求めた LDM-35 の $f=1\sim 100$ [Hz] の範囲における L, R, T_e を Fig. 2 に示した. 周波数の増加に伴って L, T_e は減少し, R は増加した. L の減少は透磁率の減少に起因し, 抵抗の増加分 $\Delta R (=R_{dc}, R_{dc}$: コイルの直流抵抗 [Ω]) については式 (1)~(3) から次式のようになる.

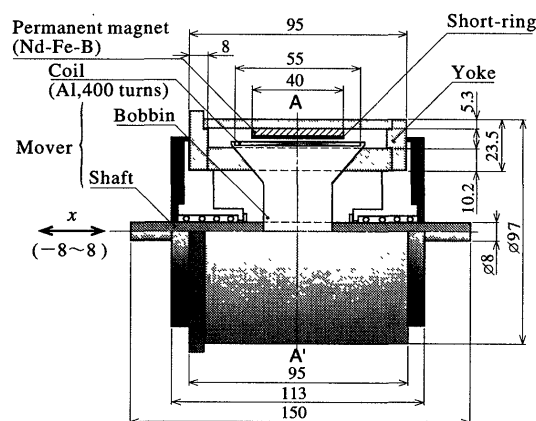


Fig. 1 Structure of the LDM (LDM-35) (unit: mm).

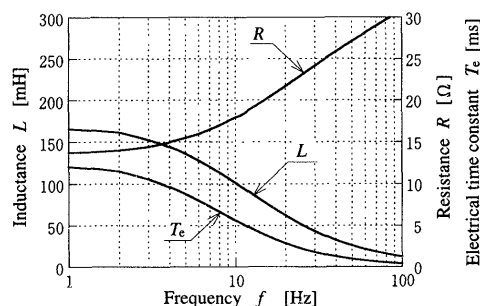


Fig. 2 Frequency dependence of the inductance L , resistance R , and electrical time constant T_e of LDM-35 (current, $I=1$ [A]).

$$\begin{aligned}
 R_{dc} + \Delta R &= \frac{R_s}{G} \cos \phi - R_s \\
 &= \sqrt{(R + R_s)^2 + \omega^2 L^2} \cos \phi - R_s \\
 &= |Z| \cos \phi - R_s \quad [\Omega]
 \end{aligned} \quad (5)$$

インピーダンスの絶対値は $|Z|=E/I$ の関係から、式 (5) の辺々に電流の 2 乗 I^2 を乗じて下式を得る。

$$\Delta R I^2 = E I \cos \phi - R_{dc} I^2 - R_s I^2 \quad [W] \quad (6)$$

ここに、 E : 電圧の実効値 [V], I : 電流の実効値 [A]

ただし、上式の展開過程において電圧と電流の波形は共に正弦波と仮定している。

上式から抵抗の増加分 ΔR に I^2 を乗じた値は、鉄損を示していることがわかる。

3. 各磁性材料の L , R , および T_e の直流バイアス特性

3.1 測定試料

測定試料の材質を Table 1 および Table 2 に示した^{3), 4)}。炭素鋼 (S45C), 純鉄 (SUYB1), 鋳鉄品 (FCD450) の 3 種類はブロック材, 無方向性けい素鋼 (35H440, 板厚 0.35 [mm]), 方向性けい素鋼 (23ZH100, 板厚 0.23 [mm]) の 2 種類は巻鉄心とし、計 5 種類の磁性材料を用意した。実験に使用した測定試料は、すべて外径 $\phi 30$, 内径 $\phi 20$, 厚さ 10 [mm] の環状磁心とし、巻線の巻数は測定側 200 回, 直流バイアス側 500 回で統一

Table 1 Principal specifications of three magnetic materials

Item	Magnetic material		
Designation	S45C	SUYB1	FCD450
Material	Carbon steel	Pure iron	Cast iron
Heat treatment (Yes or No)	No	Yes	No
Flux density* [T]	1.57	1.80	1.31
Resistivity [$\mu\Omega \cdot m$]	0.15	0.1	0.54–1.14

*The magnetic field strength H_m is 5 [kA/m].

Table 2 Principal specifications of the laminated magnetic materials

Designation	Material	Space factor %	Resistivity [$\mu\Omega \cdot m$]	Flux density* [T]
35H440	Non-oriented silicon steel	95.0	0.39	1.70
23ZH100	Grain-oriented silicon steel	94.5	0.50	1.99

*The magnetic field strength H_m is 5 [kA/m].

した。また測定側巻数の抵抗はほぼ 1 [Ω] とした (0.990 ~ 1.082 [Ω])。

3.2 各磁性材料の L , R , および T_e 。

各磁性材料の L , R の測定は Fig. 3 のように直流バイアス側の巻線に直流電流を流し、その状態で LDM と同様に FFT アナライザを用いて測定を行った。同一寸法の LDM をさまざまな磁性材料で製作した場合、磁性材料の特性比較を行うためには永久磁石の直流磁界とコイルの交流磁界を測定条件にする必要がある。そこで今回は交流磁界 $H_{ac}=0.5$ [kA/m], 直流磁界 $H_{dc}=1$, および 5 [kA/m] を測定条件とし、周波数 1~100 [Hz] の範囲で測定した。ただし、直流バイアス側の巻数には誘導電流を抑制するために直列に抵抗を接続した。抵抗値は直流電源の最大電圧が 120 [V] であることから $H_{dc}=1$ [kA/m] では 740 [Ω], 5 [kA/m] では 140 [Ω] とした。

Fig. 4 には各磁性材料の L の周波数依存性を示した。すべての材料は、周波数の増加に伴って L が低下した。また、 $H_{dc}=1$

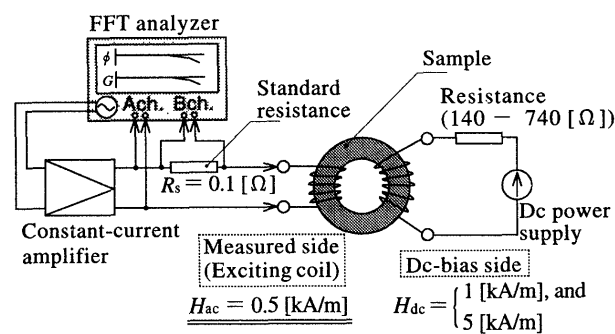


Fig. 3 Method for measuring the inductance and resistance.

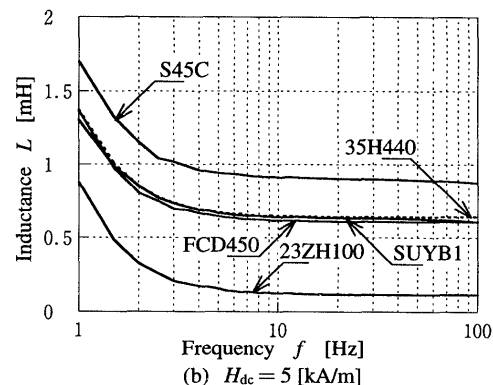
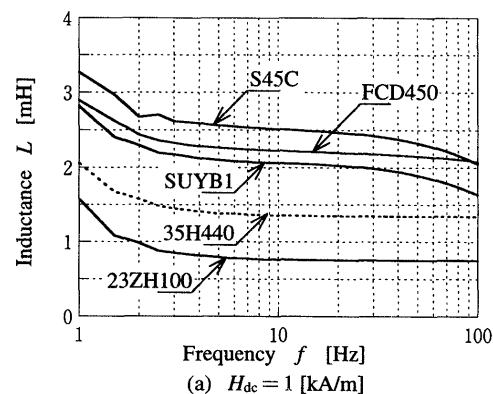


Fig. 4 Frequency dependence of the inductance L of the five magnetic materials ($H_{ac}=0.5$ [kA/m]).

[kA/m] から 5[kA/m] にすることですべての材料の L は低下した。これは磁気飽和の影響で透磁率の低下に起因していると考えられる。また 5 種類の中で 23ZH100 の L は最も低く、 $H_{dc}=1$ [kA/m] の 100 [Hz] 付近で FCD450 の L が最も大きくなったが、その他の領域では S45C が最も大きくなった。また SUYB1, FCD450, 35H440 の L は $H_{dc}=5$ [kA/m] においてはほぼ同値となった。

Fig. 5 は、各磁性材料の ΔR の周波数依存性をまとめたものである。すべての材料は周波数の増加に伴って ΔR は増加した。 ΔR の増加は式 (6) から鉄損の増加に対応する。5 種類の中で H_{dc} が変化しても 23ZH100 の ΔR が最も小さく、続いて 35H440 が小さかった。これはけい素鋼（積層）の特徴である鉄損が小さいことを示している。またブロック材の中では 30 [Hz] 以上の領域において FCD450 の ΔR が最も小さかった。これは FCD450 の抵抗率が最も大きいことから (Table 1) 他のブロック材と比べて渦電流損が最小となったことを意味している。

Fig. 6 は各磁性材料の T_e の周波数依存性である。 T_e の増大は駆動電流の立上がり速度を低下させるので LDM の高応答化には T_e が小さいことが望ましい。Fig. 6 から 5 種類の磁性材料の中で 23ZH100 の T_e は最も小さいことがわかった。しかし、 $H_{dc}=1$ [kA/m] において 23ZH100 以外の材料は周波数によって T_e の大小関係が変化した。30 [Hz] 程度までは S45C が最も大きかったが、それ以上の周波数領域では FCD450 が最も大きくなった。さらに、80 [Hz] 程度までは SUYB1 より 35H440 の方が小さかったが、それ以上の周波数領域ではその関係は逆になった。 $H_{dc}=5$ [kA/m] において SUYB1, FCD450, 35H440 の T_e はほぼ同様な特性となった。

4. 各磁性材料の T_e - ΔR 特性

4.1 電気的時定数 T_e

Fig. 7 には 5 種類の磁性材料の T_e - ΔR 特性を示した。直流バイアス $H_{dc}=1$ [kA/m] から 5[kA/m] に大きくすることで、5 種類の磁性材料の T_e は低下し、50 [Hz] において S45C, SUYB1, FCD450, 35H440, 23ZH100 はそれぞれ 57.1, 62.3, 69.6, 53.0, 84.8% の低下となった。このことから直流バイアスにより磁気飽和させることで T_e は小さくできることがわかった。

4.2 抵抗の増加分 ΔR

$H_{dc}=1$ [kA/m] から 5[kA/m] にすることで、 ΔR はブロック材で減少、けい素鋼で増加した。なお、50 [Hz] において S45C, SUYB1, FCD450 はそれぞれ 57.4, 64.3, 51.7% の減少、35H440, 23ZH100 はそれぞれ 25.0, 33.1% の増加となった。この原因は単純に鉄損の増減では説明できず、直流バイアス側に流れる誘導電流の影響⁵⁾や交流励磁に定電流アンプを用いたので励磁電圧の歪みの影響も考えられる。

4.3 各磁性材料の比較

LDM に適した材料は T_e , ΔR が共に小さいことが望ましい。5 種類の磁性材料の中で、23ZH100 が T_e と ΔR 共に最も小さく、LDM にとって最適な材料であることが明らかとなった。なお、 $f=50$ [Hz], $H_{dc}=5$ [kA/m] における 23ZH100 の T_e と

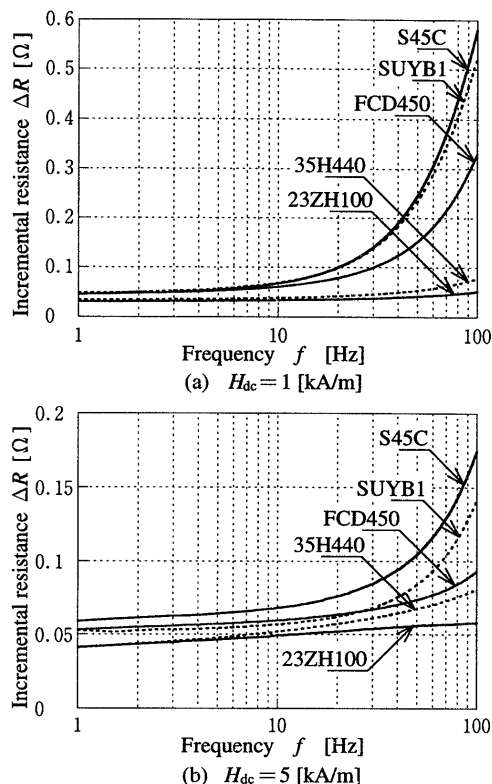


Fig. 5 Frequency dependence of the incremental resistance ΔR of the five magnetic materials ($H_{ac}=0.5$ [kA/m]).

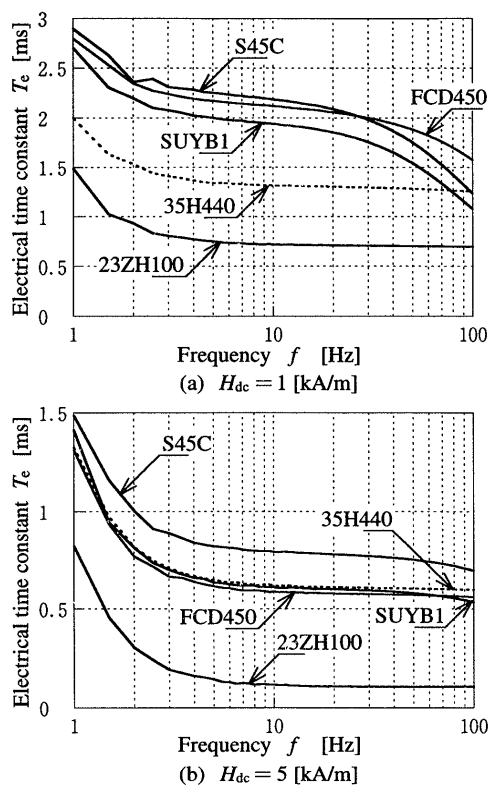


Fig. 6 Frequency dependence of the electrical time constant T_e of the five magnetic materials ($H_{ac}=0.5$ [kA/m]).

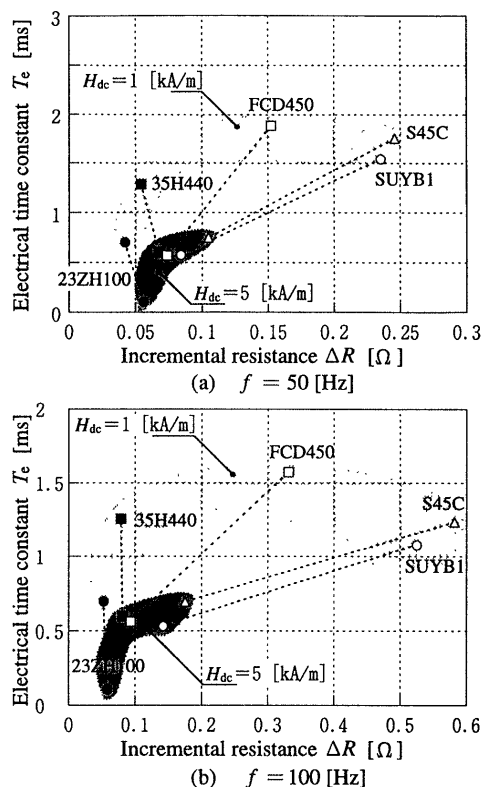


Fig. 7 Characteristics of the electrical time constant T_e versus the incremental resistance ΔR .

ΔR は S45C の 14.2%, 53.5%, SUYB1 の 18.4%, 66.7%, FCD450 の 18.7%, 76.0%, 35H440 の 17.7%, 82.9% の値であった。また, $H_{dc}=5$ [kA/m] において, FCD450 と 35H440 はほぼ同程度の値となった。しかし, Table 1, 2 から磁界の強さ 5 [kA/m] 時の初期磁化曲線の磁束密度は FCD450 が 1.31 [T], 35H440 が 1.7 [T] であり, 35H440 の方がより適した材料と言える。

5. ま と め

炭素鋼 (S45C), 純鉄 (SUYB1), 鋳鉄品 (FCD450), 無方向性

けい素鋼 (35H440), および方向性けい素鋼 (23ZH100) の計 5 種類の磁性材料について, 電氣的時定数 T_e , 抵抗の増加分 ΔR を検討した結果を以下にまとめた。

(1) 5 種類の磁性材料の T_e は, $H_{dc}=1$ [kA/m] から 5 [kA/m] に大きくすることで, すべて低下した。例えば, $f=50$ [Hz] の場合, S45C, SUYB1, FCD450, 35H440, および 23ZH100 はそれぞれ 57.1, 62.3, 69.6, 53.0, 84.8% の低下となった。このことから永久磁石の直流磁界によりヨークを磁気飽和させることで T_e を小さくすることができる。

(2) T_e - ΔR 特性から 5 種類の磁性材料の中で 23ZH100 の T_e と ΔR が最も小さくなった。このことから LDM にとって 23ZH100 は最も適した材料であることが明らかとなり, 現在, 方向性けい素鋼を使用した LDM がほとんどないことから, これは大きな知見となった。なお, $f=50$ [Hz], $H_{dc}=5$ [kA/m] における 23ZH100 の T_e と ΔR は S45C の 14.2% と 53.5%, SUYB1 の 18.4% と 66.7%, FCD450 の 18.7% と 76.0%, 35H440 の 17.7% と 82.9% であった。

(3) ΔR は $H_{dc}=1$ [kA/m] から 5 [kA/m] にすると, S45C, SUYB1, FCD450 では低下, 35H440, 23ZH100 では増加した。この原因には測定方法の問題が含まれているので, この詳細な検討は今後の課題として残された。

文 献

- 1) 宮下利仁, 唐 玉琪, 矢島久志, 水野 勉, 山田 一: 電気学会リニアドライブ研究会資料, LD-96-46, 41-50 (1996).
- 2) 山田 一: リニアモータ応用ハンドブック, p. 559 (工業調査会, 東京, 1986).
- 3) 山田 一, 鈴木健治, 水野 勉, 脇若弘之, 宮沢永次郎, 小林学: 電学論 D, 115, 301 (1995).
- 4) T. Mizuno, T. Anzai, K. Suzuki, and H. Yamada: The First International Symposium on Linear Drives for Industry Applications, pp. 219-222 (LDIA '95, Nagasaki), (1995).
- 5) 新谷邦弘, 斎藤弘一, 宮沢永次郎: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-96-107, 37-46 (1996).

1996 年 10 月 15 日受理, 1997 年 1 月 16 日採録