

リニア直流モータのヒステリシス損に関する検討

Considerations on Hysteresis Loss in a Linear Dc Motor

唐 玉琪, *水野 勉, **山本 秀夫, **渋谷 浩洋, *山田 一

信州大学大学院工学系研究科, 長野市若里 500 (〒380-8553)

*信州大学工学部電気電子工学科, 長野市若里 500 (〒380-8553)

**松下冷機株式会社, 大阪府東大阪市高井田本通 3-22 (〒577-8501)

Y. Tang, *T. Mizuno, **H. Yamamoto, **K. Shibuya, and *H. Yamada

Graduate School, Shinshu University, 500 Wakasato, Nagano 380-8553

*Faculty of Engineering, Shinshu University, 500 Wakasato, Nagano 380-8553

** Matsushita Refrigeration Co., Ltd., 3-22 Hondori, Takaida, Osaka 577-8501

(1998 年 10 月 14 日受理, 1999 年 1 月 21 日採録)

This paper presents a method for calculating the hysteresis loss in a linear dc motor (LDM). The main findings are as follows: (1) under dc bias magnetization, the hysteresis loss of the toroidal pure-iron core increases; (2) under the influence of the dc bias magnetization, the approximate relationship between the hysteresis loss and the maximum magnetic flux density changes from an exponential function to a polynomial one; and (3) the hysteresis loss of the LDM can be calculated from the measured values of the hysteresis loss of the toroidal pure-iron core under dc bias magnetization, and the error of the calculated results is 20.7%.

Key words: linear dc motor (LDM), toroidal pure-iron core, dc bias, hysteresis loss

1. まえがき

リニア直流モータ(Linear DC Motor: 以下 LDM と略記)を高速・高周波かつ高効率で駆動するためには鉄損の理論的及び実験的な考察が不可欠である¹⁾。電磁鋼板における直流バイアスが磁化特性に与える影響に関する研究がなされているが²⁾, 直流バイアスが純鉄の鉄損に与える影響についてはまだ不明な点が多い。

そこで, まず, 純鉄環状磁心に直流バイアスを印加した場合の直流ヒステリシス損を実測した。次に, この実測値を用いて LDM のヒステリシス損の計算を行った以下の内容を述べる。

- (1) LDM の構造と磁束分布
- (2) 純鉄環状磁心のマイナーループとヒステリシス損の測定
- (3) LDM のヒステリシス損の計算

2. LDM の構造および磁束分布

2.1 LDM の構造

Fig. 1 は円筒状コイル可動形 LDM の基本構造であり, LDM の外形寸法は $\phi 170 \times 120 \text{ mm}$, $\phi 50 \text{ mm}$ が軸受のスペースとなっている。純鉄から構成されているヨークには永久磁石による直流バイアスが作用している。コイルによって発生する磁束を測

定するために, LDM のインナヨークに 5 ケ所, サイドヨークとアウトヨークにそれぞれ 2 ケ所にさぐりコイルを巻いている。すなわち, Fig. 1 に示したようにインナヨークの中央に巻いている No. 1 から時計方向に No. 9 までのさぐりコイルを巻いた。

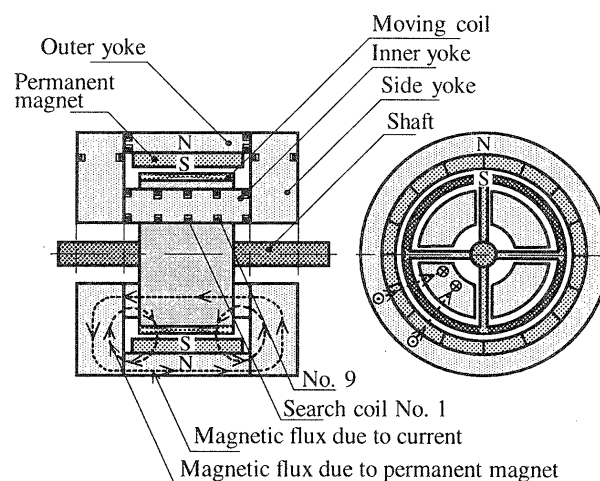


Fig. 1 General structure of the linear dc motor (LDM).

LDM のヨークに形成されるマイナーループは初期磁化曲線上で動作するものと仮定して, その概念および該当する諸量を Fig. 2 に示したようにする。永久磁石による直流バイアスの磁界の強さ H_k に対応する磁束密度 B_k が発生し, コイル電流からの磁界の強さ H によってマイナーループが形成され, その平均の磁束密度の振幅を B とした。

LDM の基本仕様を Table 1 にまとめてあり, ヨークの体積は 2175 cm^3 である。

2.2 永久磁石によって発生するヨークの磁束分布

LDM のヨークに作用している永久磁石による磁束を直接測定することが困難であったので, FEM (非線形二次元円筒座標系有限要素法)を用いて磁束分布を求めた。その磁束分布の妥当性を確認するために LDM の静推力-励磁電流特性の実測値と FEM 計算結果の比較を行った。励磁電流 1 A における静推力の実測値は 96 N, FEM による計算値は 111 N であり, 実測

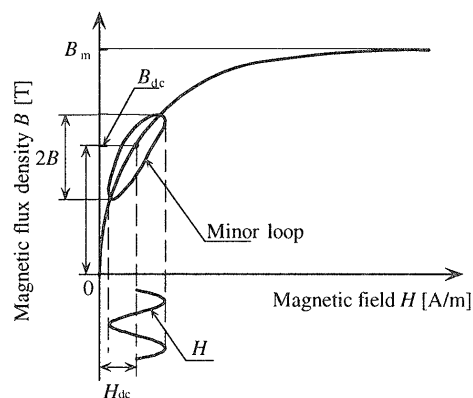


Fig. 2 Minor loop in the LDM.

Table 1 Specifications of the LDM.

Item	Symbol	Value	[unit]
Stroke	s	20	[mm]
Number of turns	N	400	[turns]
Permanent magnet	Nd-Fe-B (NEOMAX-38H) $(H_c = -915 \text{ [kA/m]}, B_r = 1.21 \text{ [T]})$ $(BH)_{\max} = 287 \text{ [kJ/m}^3\text{]}$		
Material for yoke	Pure iron (SUY)		
Volume of yoke		2175	[cm ³]
Volume of LDM		2724	[cm ³]

値に対する計算誤差は 15.6 %となった。この誤差の原因は二次元 FEM 計算では可動子を動かすために設けられているインナヨークの 4 分割を考慮できないこと、および永久磁石を 1 つの円筒として計算したためであると考えられる。

FEM 計算により、永久磁石によるヨークの磁束密度が分布特性を持つことがわかった。後述する LDM のヒステリシス損の算出を簡便化するために、ヨークの磁束密度の平均値 B_{dc} を以下のように求めた。まず、各々のさぐりコイルを巻いている位置に対応する断面の磁束密度を求め、次に、各さぐりコイルでの磁束密度を加算平均した。計算結果は、永久磁石によるヨークの磁束密度の平均値は $B_{dc} = 1 \text{ T}$ であった。後述する純鉄の初期磁化特性に示したように磁界の強さ 270 A/m において $B_{dc} = 1 \text{ T}$ が得られる (Fig. 5 参照)。そこで、マイナーループの動作点は初期磁化曲線上で動作するとの仮定に基づいて、ヨークに作用している直流バイアス H_{dc} を 270 A/m と算定した。

2.3 コイルの電流によって発生する磁束分布

コイルの電流によって発生する磁束分布の測定は、LDM の可動子を変位 $x = 0 \text{ mm}$ に拘束して、さぐりコイルに誘起した電圧を積分することで行った。測定条件は定電圧モード、駆動周波数 $f = 50 \text{ Hz}$ 、電圧の実効値 $V = 55 \text{ V}$ とした。磁束密度分布の一例を Fig. 3 に示した。コイルの電流による磁束密度は、インナヨークが一番大きく(さぐりコイル No. 1)、続いてサイドヨーク(No. 5)、アウトヨーク(No. 6)となった。最も大きな磁束密度はインナヨーク(No. 1)の 0.1 T であった。

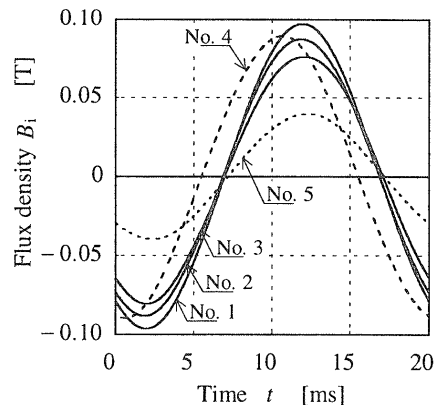


Fig. 3 Distribution of the flux density due to the current (nos. 1-5 represent search coils).

3. 純鉄環状磁心のヒステリシス損

3.1 純鉄環状磁心のヒステリシス損の測定方法

Fig. 4 には純鉄環状磁心の主な仕様と測定原理を示した。直流磁化特性自動記録装置を用いて、ヒステリシスループの囲む面積を算出することで環状磁心の直流ヒステリシス損を測定した。まず、純鉄環状磁心を脱磁してから、直流電源の定電流モードで直流バイアス H_{dc} を徐々に印加した。次に、直流磁化特性自動記録装置により磁界の強さ H をかけ、マイナーループ特性を測定した。また、同時にフラクスメータを用いて直流バイアス H_{dc} より発生した B_{dc} を確認した。

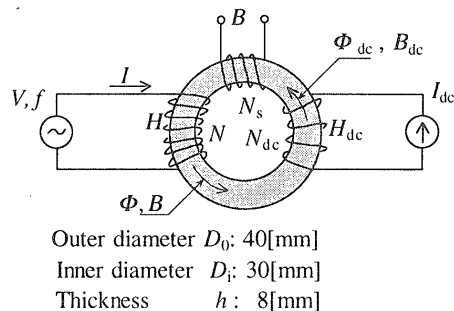
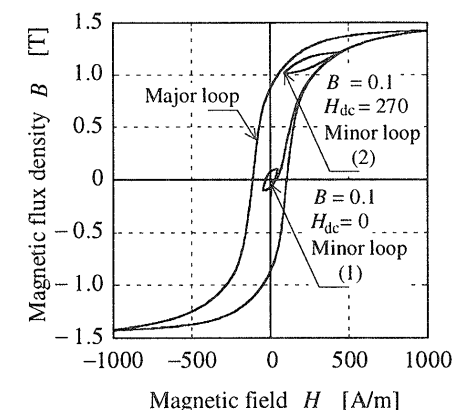


Fig. 4 Specification and principle of measurement for the toroidal pure-iron core.

3.2 純鉄環状磁心のマイナーループ

純鉄環状磁心のメジャーLOOPとマイナーループの比較を Fig. 5 に示した。同図 (a) のメジャーLOOPは、磁界の強さ $\pm 1 \text{ kA/m}$ を印加した場合の特性であり、マイナーループ (1) と (2) はそれぞれ直流バイアス $H_{dc} = 0$ および 270 A/m を印加し、さらに磁束密度 $B = 0.1 \text{ T}$ (Fig. 2 参照) となるように測定した。また、同図 (b) と (c) はマイナーループ (1), (2) をそれぞれ拡大表示したものである。磁束密度 $B = 0.1 \text{ T}$ を得るための直流バイアス H_{dc} を印加した場合と H_{dc} を印加していない場合の磁界の強さ H はそれぞれ 182 A/m と 46 A/m となり、ヒステリシス損はそれぞれ $23.9, 9.6 \text{ J/m}^3$ となった。



(a) Two minor loops in the major loop

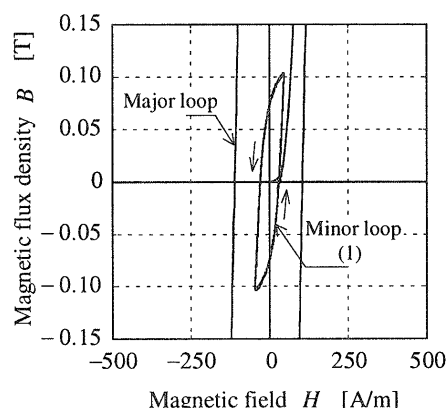
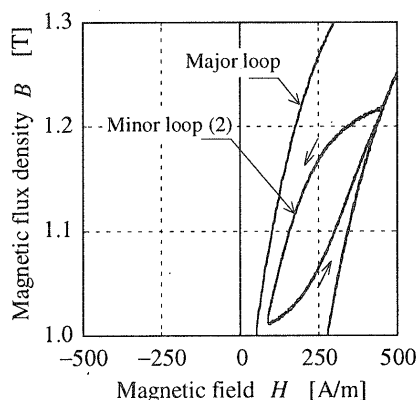

(b) Minor loop (1): $H_{dc} = 0$ [A/m], $B = 0.1$ [T]

(c) Minor loop (2): $H_{dc} = 270$ [A/m], $B = 0.1$ [T]

Fig. 5 Comparison of the major and minor loops of the toroidal pure-iron core.

Table 2 に、マイナーループ (1), (2) のヒステリシス損とメジャーロープのヒステリシス損との比率をまとめて示した。

Table 2 Hysteresis loss W_h of each loop.

	Major	Minor (1)	Minor (2)
Hysteresis loss W_h [J/m ³]	657.5	9.6	23.9
	100%	1.5%	3.6%

3.3 ヒステリシス損の測定結果

Fig. 6 には直流バイアス H_{dc} を印加していない場合のマイナーループのヒステリシス損 W_h —磁束密度 B および H_{dc} を印加した場合のマイナーループのヒステリシス損 W_h' —磁束密度 B 特性を示した。同図における磁束密度 B は Fig. 2 に示したように磁束密度の変化の 1/2 を意味している。LDM の永久磁石による直流バイアス H_{dc} は 270 A/m であったので、 H_{dc} が 270 A/m の場合のヒステリシス損の測定を行った。同図に示したように、ヒステリシス損は H_{dc} を印加したほうが印加していない場合より大きな値となった。これは磁性材料の磁化過程の変化によるものであると考えられる³⁾。また、磁束密度 B が大きくなると、 H_{dc} を印加したヒステリシス損は、直流バイアスのない場合 ($H_{dc} = 0$) の値に近づいた。これは磁束密度 B が増加すると、磁気飽和領域に入り、ヒステリシスループの形状がメジャーロープに近づいていくためである。

直流バイアス H_{dc} を印加していない場合のヒステリシス損 W_h と磁束密度 B について、以下の近似式が得られた。

$$W_h = \beta B^\gamma \quad [\text{J/m}^3] \quad (1)$$

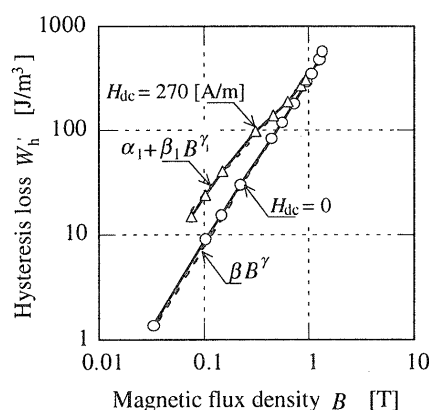
ここに、ヒステリシス係数 $\beta = 307.8$, 乗数 $\gamma = 1.6$

$H_{dc} = 270$ A/m を印加した場合、ヒステリシス損 W_h' —磁束密度 B の関係を式 (2) で近似してみる。右辺の第 1 項は H_{dc} に対応する成分を表現した定数であり、第 2 項は従来の直流バイアスのない場合のヒステリシス損の近似式である。

$$W_h' = \alpha_1 + \beta_1 B^{\gamma_1} \quad [\text{J/m}^3] \quad (2)$$

ここに、ヒステリシス係数 $\alpha_1 = -3.71$, $\beta_1 = 326.5$, 乗数 $\gamma_1 = 1.07$

Fig. 6 に式 (1), (2) から求めた近似値をそれぞれ示した。


Fig. 6 Hysteresis loss dependence of the exciting magnetic flux density on the toroidal pure-iron core.

4. LDM のヒステリシス損の計算

4.1 LDM の鉄損の測定

鉄損 W_i は渦電流損 W_e とヒステリシス損 W_h からなり、その関係を以下に示した。

$$W_i = W_h + W_e = w_h B^{1.6} f + w_e B^2 f^2 \quad [\text{W}] \quad (3)$$

ここに、 B : 最大磁束密度 [T], f : 周波数 [Hz], w_h : ヒステリシス損係数, w_c : 渦電流損係数

式 (3) は、一定の B の条件下において渦電流損およびヒステリシス損を分離できることを示している。

Fig. 7 には鉄損の測定結果を示した。測定条件は、まず、可動子を変位 $x=0$ mm に拘束して、定電圧モードで周波数 50 Hz、電圧の実効値 55 V で LDM を駆動して、インナヨークの中央に巻いたさぐりコイル (No.1) から検出した磁束密度が $B_i = 0.1$ T となるようにした。次に、周波数 f および入力電圧を変化させて、 $B_i = 0.1$ T となるように調整した。これらの場合の入力電力 W と銅損 W_c を測定して、入力電力から銅損を引いて鉄損を求めた。周波数 50 Hz 場合の鉄損の実測値は 24.9 W であった。

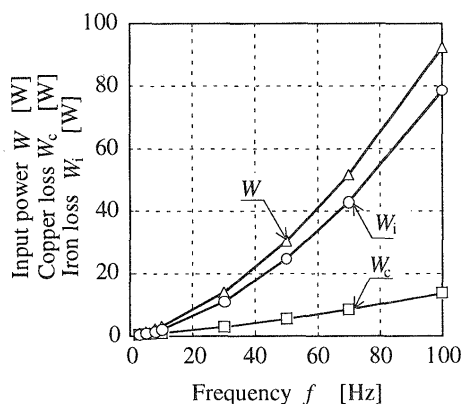


Fig. 7 Measured results of the iron loss dependence on the frequency.

4.2 LDM の鉄損の分離とヒステリシス損の計算

式 (3) に基づいて、鉄損 W_i を周波数 f で割って、鉄損分離を行った。その結果を Fig. 8 に示した。また、鉄損分離の結果から、式 (4) の鉄損と渦電流損、ヒステリシス損に関する近似式 $F(f)$ が得られた。

$$F(f) = 0.081 + 0.021f^{0.76} \quad [\text{W/Hz}] \quad (4)$$

$F(f)$ により求めた周波数 $f=50$ Hz における LDM の渦電流損とヒステリシス損は、それぞれ 20.5 と 4.1 W となった。

ヒステリシス損はヒステリシスループの囲む面積に周波数 f と体積 V とをかけて、次式で与えられる。

$$W_h = Vf \int_{-B}^B H dB \quad [\text{W}] \quad (5)$$

$H_{dc} = 270$ A/m, $B = 0.1$ T における純鉄環状磁心の直流ヒステリシス損の実測値 (23.9 J/m^3) を式 (5) に代入して求めた周波数 $f=50$ Hz における LDM のヒステリシス損は 3.25 W であり、実測値の 4.1 W より小さく、計算誤差は 20.7 % となった。磁束の磁路にエアギャップがある場合には、エアギャップがない場合と比較して、大きな起磁力を必要とし、かつ損失も大きくなる。本 LDM のヨークは 2 分割されており、ヨーク間にエアギャップが存在している。これが計算誤差の要因と考えられる。

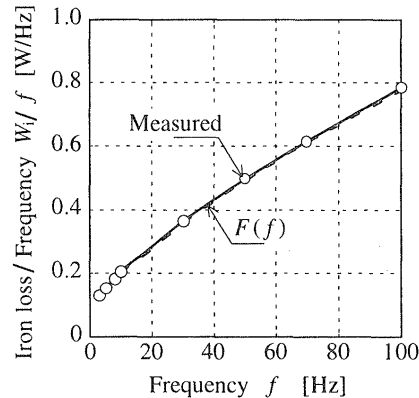


Fig. 8 Prediction of the hysteresis and eddy current loss from the measured iron loss.

5. あとがき

直流バイアス H_{dc} を印加した純鉄環状磁心のヒステリシス損を検討した。さらに、その実測値を用いて、LDM のヒステリシス損の計算を行った結果、以下のことがわかった。

(1) 直流バイアス $H_{dc} = 0$, 270 A/m を印加し、さらに、磁束密度 $B = 0.1$ T を作用させた場合の純鉄環状磁心のヒステリシス損は、それぞれ 9.6 と 23.9 J/m^3 となった。すなわち、 H_{dc} の影響で純鉄環状磁心のマイナーループのヒステリシス損は増加した。

(2) 直流バイアスを印加した場合のヒステリシス損と最大磁束密度との関係は H_{dc} の成分を含めた多項式で近似できる。

(3) 直流バイアスを印加した場合の純鉄環状磁心のヒステリシス損の実測値を用いた周波数 50 Hz における LDM ヒステリシス損の計算値は 3.25 W となり、実測値 4.1 W に対して、計算誤差は 20.7% となった。簡便なヒステリシス損の計算手法の有効性を確認した。

文献

- 1) Yoichi Hayashi, TJE Miller: A new approach to calculating core losses in the SRM, IEEE ISA Annual meeting, pp.322-328, October 1994.
- 2) 新谷 邦弘, 齊藤 弘一, 宮沢 永次郎: 直流偏磁下でのけい素鋼板の交流磁気特性解析, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-96-107, pp.37-46 (1996).
- 3) 内田 祐介, 増本 進吾, 中野 正基, 福永 博俊, 太田 幸彦, 掛橋 英典, 小笠原 宏: 直流偏磁状態下におけるフェライトの磁気特性(II), 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-96-109, pp.55-62(1996).