

## 技術論文

異なった材質で作られた2種類のリニア直流モータの  
モータ定数についての考察

## Considerations on Motor Constant of Two Linear DC Motors Which Made of Different Materials

水野 勉<sup>\*1</sup>(正員), 河合 正範<sup>\*1</sup>, 土屋 文昭<sup>\*1</sup>, 西川 健太郎<sup>\*1</sup>, 小林 学<sup>\*2</sup>Tsutomu MIZUNO(Mem.), Masanori KAWAI, Fumiaki TSUCHIYA, Kentaro NISHIKAWA,  
Manabu KOBAYASHI

A motor constant  $K_m$  is generally used as one of the figures of merit in a linear motor. An evaluation of only motor constant  $K_m$  is not sufficient because copper loss and iron loss occur in the drive of Linear DC Motor (LDM). The iron loss of the LDM also depends on the magnetic characteristics of the yoke material. This paper describes the comparison of the motor constant  $K_m$  between two LDMs made of non-laminate material (1% silicon steel) and laminated material (35H250). Maximum values of motor constant considering iron loss  $K'_m$  at 50Hz of two LDMs are 2.8 and 3.4 N/ $\sqrt{W}$  respectively.  $K_m$  and  $K'_m$  depend on the yoke materials.

**Keywords:** linear DC motor, dc bias, 1% silicon steel, laminated material, iron loss, motor constant, motor constant considering iron loss.

## 1 まえがき

推力と銅損の平方根との比で求められるモータ定数  $K_m$  は評価指数の1つとして一般的に用いられており、リニア直流モータ(LDM)においても重要な意味をもっている。しかし、LDMの駆動時において、LDMの損失は銅損だけではなく鉄損も発生するためにモータ定数だけの評価では不十分である。銅損および鉄損は永久磁石によって印加される直流バイアスやヨーク材質に依存している。そこで著者らはLDMに印加される直流バイアスとLDMを構成するヨークの材質および鉄損を考慮したモータ定数  $K'_m$  について検討してきた[1]。

本論文ではヨーク材質に非積層材(1%ケイ素鋼)と積層材(35H250)を用いたLDMのモータ定数  $K_m$  と  $K'_m$  について検討している。本論文で述べる事項を以下に示した。

- (1) ヨーク材質の違いによるモータ定数の比較
- (2) 鉄損を考慮したモータ定数に関する考察

## 2 LDMの基本構造と磁氣的動作点

## 2.1 LDMの基本構造

Fig. 1にコイル可動形LDMの基本構造を示してあり、LDMの固定子はヨークおよび永久磁石によって構成されている。可動子であるコイルの可動方向はFig. 1に示したようにx方向である。

Table 1にコイル可動形LDMの仕様を示した。ヨークの材質には非積層材(1%けい素鋼)と積層材(35H250)をそれぞれ用いた。厚さの異なる3種類の永久磁石を用いて直流バイアスがモータ定数  $K_m$  と鉄損も考慮したモータ定数  $K'_m$  に与える影響について検討を行った。

## 2.2 LDMの磁氣的動作点

Fig. 2にLDMのヨークの磁化特性を示した。LDMの磁氣的動作点は永久磁石から発生する直流バイアスによって決定される。LDMのコイルに正弦波電流を流すと  $H_{dc} + \Delta H \sin 2\pi f t$  で示した小さなB-Hループ(マイナループ)が形成される[2]。マイナループを囲う面積が鉄損  $W_i$  であり、次式で表される[2]。

$$W_i = V f \oint H dB \quad (w) \quad (1)$$

連絡先: 水野 勉, 〒380-8553 長野市若里 4-17-1, 信州大学 工学部,

e-mail: mizunot@gipwc.shinshu-u.ac.jp

\*1 信州大学 \*2 三菱電機

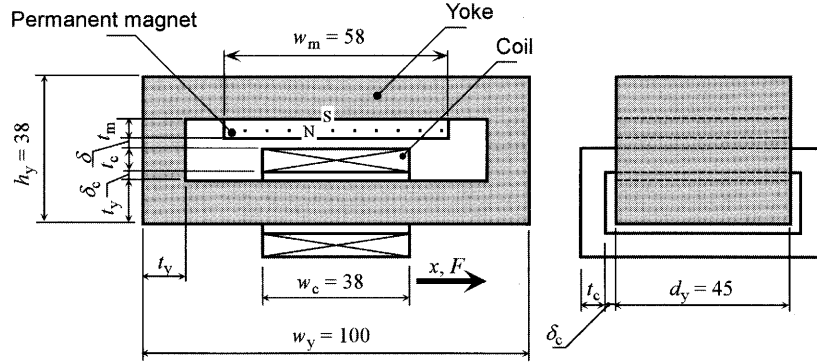


Fig. 1 Basic structure of a moving-coil-type LDM (unit is mm).

Table 1 Specifications of two LDMs.

| Item               | Symbol                         | Value   | (Unit)   |                                   |
|--------------------|--------------------------------|---|--|-----------------------------------|
| Yoke               | Size                           | $h_y \times w_y \times d_y$   | $38 \times 100 \times 45$ (mm)   |                                   |
|                    | Thickness                      | $t_y$   | 11 (mm)  |                                   |
|                    | Volume                         | $V$   | 114.84 (cm <sup>3</sup> )  |                                   |
|                    | Material                       | Non-laminated material  | 1% silicon steel (without heat treatment)<br>Electric conductivity of yoke $\sigma = 3.84 \times 10^6$ (S/m) |                                   |
| Laminated material |                                | 35H250<br>Electric conductivity of yoke $\sigma = 1.74 \times 10^6$ (S/m) |  |                                   |
| Stroke             | $l_s$                          | 20  | (mm)   |                                   |
| Length of gap      | $\delta$                       | 1   | (mm)   |                                   |
|                    | $\delta_c$                     | 4   | (mm)   |                                   |
| Permanent magnet   | Thickness                      | $t_m$   | 5   7   9 (mm)   |                                   |
|                    | Width                          | $w_m$   | 58 (mm)  |                                   |
|                    | Material                       |   | Nd-Fe-B  |                                   |
|                    | Residual magnetic flux density | $B_r$   | 1.21   | (T)                               |
|                    | Coercive force                 | $H_c$   | 915  | (kA/m)                            |
|                    | Maximum energy product         | $(BH)_{max}$  | 290  | (kJ/m <sup>3</sup> )<br>(38 MGOe) |
| Coil               | Thickness                      | $t_c$   | 6   4   2 (mm)   |                                   |
|                    | Width                          | $w_c$   | 38 (mm)  |                                   |
|                    | Number of turns                | $N$   | 580   387   193 (turn)   |                                   |
|                    | Diameter                       | $d$   | 0.5 (mm)   |                                   |
|                    | Material                       |   | copper   |                                   |

ここに、 $V$ :ヨークの体積 (m<sup>3</sup>),  $f$ :周波数 (Hz),  $H$ :磁界の強さ (A/m),  $B$ :磁束密度 (T)である。

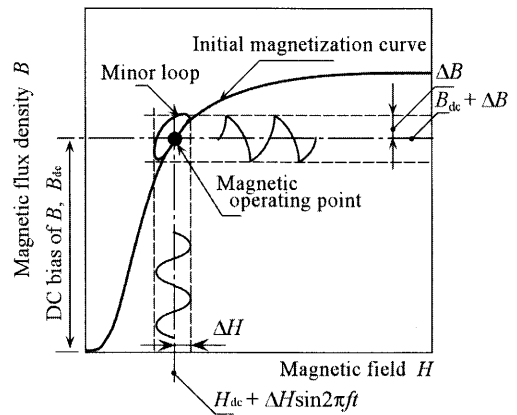


Fig. 2 Initial magnetization curve having a minor loop in the yoke.

### 3 LDMの直流バイアスと静推力

永久磁石から発生するギャップ部の磁束密度  $B_d$ , コイルの巻数  $N$ , コイルの直流抵抗  $R$ , および直流バイアス  $B_{dc}$  はパーミアンス法を用いてそれぞれ次式で与えられる[1]。

$$B_d = \frac{\Phi_m}{w_m d_y} = \frac{\mu_0 H_c}{h_y - 2t_y} t_m \quad (\text{T}) \quad (2)$$

$$N = \zeta \frac{w_c t_c}{\pi (d/2)^2} = \zeta \frac{w_c}{\pi (d/2)^2} (h_y - 2t_y - \delta - \delta_c - t_m) \quad (3)$$

$$R = N \rho \frac{l_c}{\pi (d/2)^2} = \frac{\rho \zeta w_c l_c}{(\pi (d/2)^2)^2} (h_y - 2t_y - \delta - \delta_c - t_m) \quad (\Omega) \quad (4)$$

$$B_{dc} = \left( 1 - \frac{w_m}{2(w_y + h_y - 2t_y)} \right) \frac{\mu_0 w_m H_c t_m}{2t_y (h_y - 2t_y)} \quad (T) \quad (5)$$

ここに、 $\Phi_m$ : 磁束 (Wb),  $w_m$ : 永久磁石の幅 (m),  $d_y$ : ヨークの奥行き (m),  $\mu_0$ : 真空の透磁率 (=  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m),  $H_c$ : 保磁力 (A/m),  $h_y$ : ヨークの高さ (m),  $t_y$ : ヨークの厚さ (m),  $t_m$ : 永久磁石の厚さ (m),  $\zeta$ : コイルの占積率 (= 0.5),  $w_c$ : コイルの幅 (m),  $t_c$ : コイルの厚さ (m),  $d$ : コイルの線径 (m),  $d$ : 永久磁石とコイルとのギャップの長さ (m),  $d_c$ : コイル内側とヨークとのギャップの長さ (m),  $\rho$ : 抵抗率 (=  $1.71 \times 10^{-8}$  Wm),  $l_c$ : コイルの平均長さ (m),  $w_y$ : ヨークの幅 (m) である。

また、LDMの推力  $F$  はフレミングの左手則を用いて算出でき、LDMの銅損  $W_c$ , 推力  $F$  および推力定数  $K_f$  をそれぞれ下式に示した[1]。

$$W_c = RI^2 \quad (W) \quad (6)$$

$$F = K_f I = NB_\delta d_y I \quad (N) \quad (7)$$

$$K_f = NB_\delta d_y = \frac{\zeta w_c \mu_0 H_c d_y}{\pi (h_y - 2t_y) (d/2)^2} \times (h_y - 2t_y - \delta - \delta_c - t_m) t_m \quad (N/A) \quad (8)$$

ここに、 $I$ : 励磁電流 (A),  $d_y$ : ヨークの奥行き (m) である。

Fig. 3に有限要素法 (以下、FEMと略記、アンソフト製Maxwell 2D field simulator 8) を用いて得られた励磁電流  $I = 0$  A におけるLDMの磁束密度分布を示した。同図に示したように磁束密度は不均一となっており、磁束密度が最も大きくなっているのはヨークと永久磁石の端部の接触部であった。

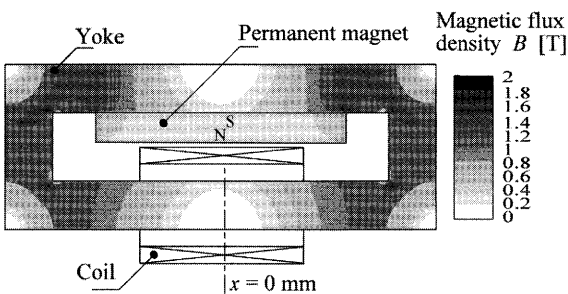


Fig. 3 Magnetic flux density distribution in the LDM with yoke made of non-laminated material (1% silicon steel, calculated by FEM,  $x = 0$  mm, exciting current  $I = 0$  A, thickness of a permanent magnet  $t_m = 7$  mm).

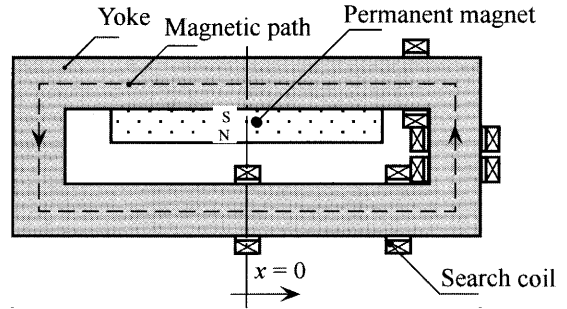


Fig. 4 Arrangement of the search coils.

Fig. 4にさぐりコイルの配置を示した。同図に示したように、磁路に沿ってさぐりコイルをそれぞれ  $x = 0, 39, 50, 66, 77$  mmの位置に配置した。FEMから求めたヨークの磁束密度の平均値はヨークの各部に施したさぐりコイル (5ヶ所) を用いて磁束密度を測定した値の平均値と一致した[1]。したがって、本論文ではFEMから求めたヨークの磁束密度の平均値を直流バイアス  $B_{dc}$  と定義する。

Fig. 5にLDMのヨークの磁束密度-永久磁石の厚さ特性を示した。パーミアンス法では式(5)を用いて直流バイアス  $B_{dc}$  を算出した。同図に示したように直流バイアスは永久磁石の厚さに比例している。Fig. 6にLDMの推力定数、コイルの巻数およびギャップ部の磁束密度-直流バイアス特性を示した。本論文では実用性を考慮して、磁石の厚さを変えることで直流バイアスを変化させている。また、永久磁石の厚さごとに巻数を設定して検討を行った。パーミアンス法では式(2)と(3)および(8)を用いて求めた。同図に示したようにLDMの静特性は直流バイアスに依存している。

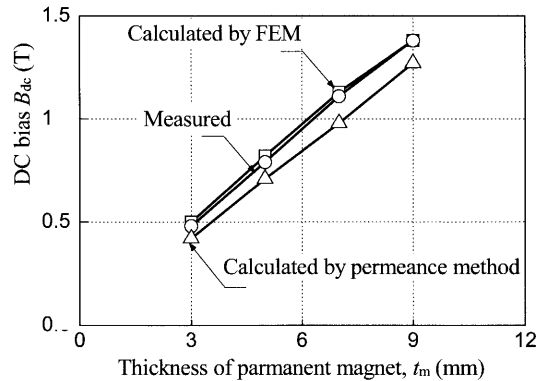


Fig. 5 DC bias vs. thickness of permanent magnet characteristics of the LDM.

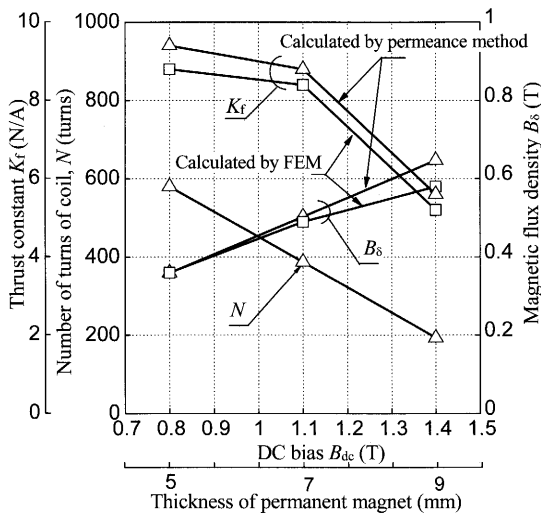


Fig. 6 Thrust constant vs. dc bias characteristics of the LDM (calculated by permeance method and FEM).

4 鉄損とモータ定数

4.1 モータ定数と鉄損を考慮したモータ定数

モータ定数  $K_m$  は下式で定義されている。

$$K_m = \frac{F}{\sqrt{W_c}} = \frac{K_f I}{\sqrt{R I^2}} = \frac{K_f}{\sqrt{R}} \quad (\text{N/A}) \quad (9)$$

モータ定数は推力 / (銅損の平方根) の比, つまり推力定数 / (コイルの直流抵抗の平方根) の比で求められるのでLDMの静特性を評価する上で有用である。しかし, モータ定数  $K_m$  はLDMの駆動時にLDMに生ずる鉄損を考慮していない。そこで, 鉄損も考慮したモータ定数  $K'_m$  を次式で定義する[3]。

$$K'_m = \frac{F}{\sqrt{W_i + W_c}} \quad (\text{N}/\sqrt{\text{W}}) \quad (10)$$

ここで,  $W_i$ : 鉄損 (W) である。

4.2 鉄損とモータ定数との関係

Fig. 7に拘束試験におけるLDMの鉄損測定ブロックを示した。入力電力と鉄損は次式で与えられる[4]。

$$P_i = f \int_0^T v i dt \quad (\text{W}) \quad (11)$$

$$W_i = P_i - W_c \quad (\text{W}) \quad (12)$$

ここで,  $v$ : 電圧 (V),  $T$ : 周期 (s),  $t$ : 時間 (s) である。

LDMの駆動周波数範囲は一般的にDC~50 Hzであるため, 本論文では周波数  $f = 30, 50$  Hzで測定した。また, LDMの推力  $F$  はコイルの温度上昇を考慮して  $F = 5$  N一定とした。

Fig. 8 にヨーク材質に非積層材 (1%けい素鋼) を用

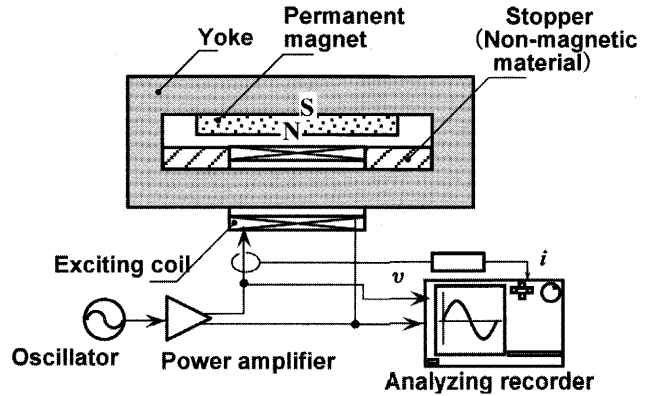


Fig. 7 Block diagram of measurement for iron loss of the LDM under the lock test.

いたLDMの鉄損, 銅損—直流バイアス特性を示した。なお, 同図中に示したFEM計算では渦電流損だけを求めたものである。銅損は直流バイアスが1.1Tの場合に最小値2Wとなった。鉄損は直流バイアスの増加に伴って減少する傾向となった。これは, 推力  $F = 5$  N一定の条件下で測定しているためであり, 直流バイアスの増加に伴って磁界の強さの振幅, つまり起磁力が小さくなるためである。また, 周波数が大きいほど鉄損は大きくなる傾向となった。

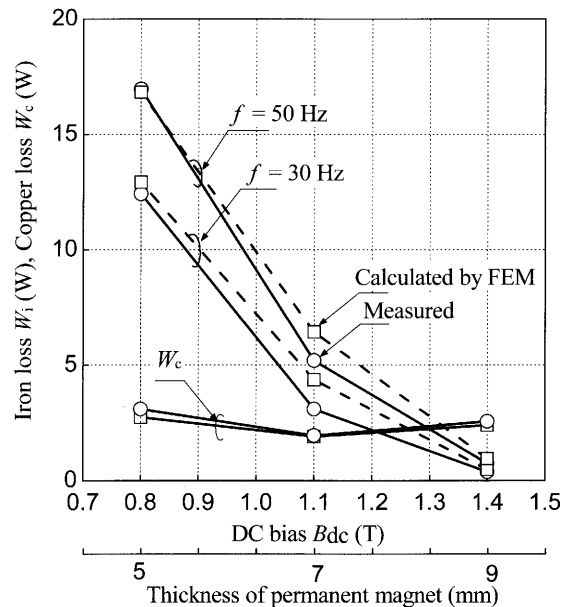


Fig. 8 Iron loss and copper loss vs. dc bias characteristics of the LDM with yoke made of non-laminated material (1% silicon steel, thrust  $F = 5$  N).

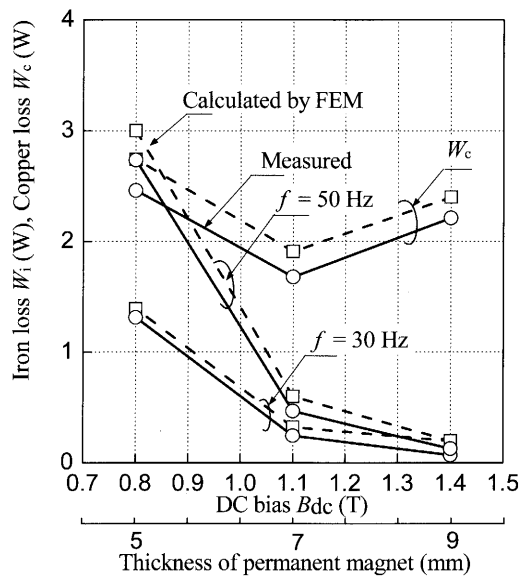


Fig. 9 Iron loss and copper loss vs. dc bias characteristics of the LDM with yoke made of laminated material (35H250, thrust  $F = 5$  N).

Fig. 9にLDMのヨークに積層材 (35H250)を用いた場合の鉄損、銅損—直流バイアス特性を示した。非積層材 (1%けい素鋼)を用いた場合と同様に直流バイアスの増加に伴って鉄損は減少した。非積層材 (1%けい素鋼)と比較すると鉄損は小さな値となった。

Fig. 10にLDMのヨークに非積層材 (1%けい素鋼)を用いた場合の2つのモータ定数 $K_m$ と $K'_m$ を示した。モータ定数 $K_m$ は直流バイアス $B_{dc} = 1.1$  Tの場合に最大となる傾向となった。また、実測値とFEMおよびパーミアンス法の計算値は、それぞれ3.5と3.6および3.8  $N/\sqrt{W}$ となった。また、計算誤差は、それぞれ3と9%となった。一方、鉄損も考慮したモータ定数 $K'_m$ は直流バイアスに対して増加しており、直流バイアス $B_{dc} = 1.4$  Tを超えると従来のモータ定数 $K_m$ に漸近した。

Fig. 11にLDMのヨークに積層材 (35H250)を用いた場合の2つのモータ定数 $K_m$ と $K'_m$ を示した。2つのモータ定数 $K_m$ と $K'_m$ は直流バイアスが1.1 Tで最大となる傾向となった。周波数 $f = 30, 50$  Hzにおける $K'_m$ は、それぞれ3.5と3.3  $N/\sqrt{W}$ となった。

Table 2にLDMの諸特性を示した。鉄損も考慮したモータ定数 $K'_m$ が最大となる直流バイアスは非積層材 (1%けい素鋼)で1.4 T, 積層材 (35H250)で1.1 Tとなり、材質の違いにより異なる結果となった。Fig. 8, Fig. 9に示したように材質の違いによってLDMの鉄損は大きく異なる。したがって、非積層材のように鉄損が大

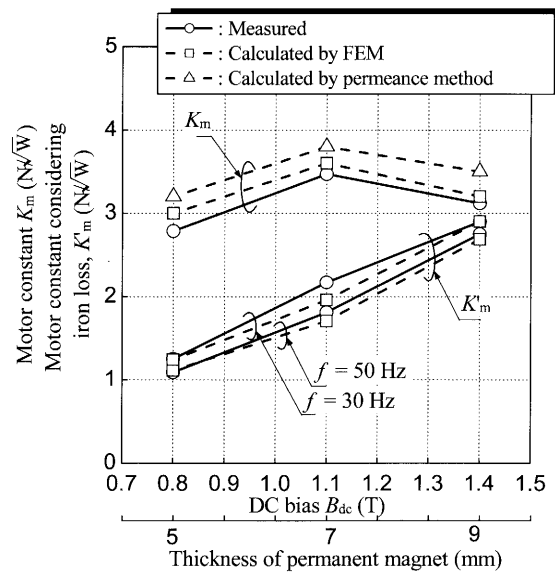


Fig. 10 Two motor constants vs. dc bias characteristics of the LDM with made of laminated material (35H250, thrust  $F = 5$  N).

きなヨーク材をもつ LDM ではモータ定数が最大となる直流バイアスよりも大きな直流バイアスを用いることで銅損と鉄損との和を低減できる。また、積層材のように鉄損が小さなヨーク材をもつ LDM ではモータ定数が最大となる直流バイアスを印加すればよいことが分かった。

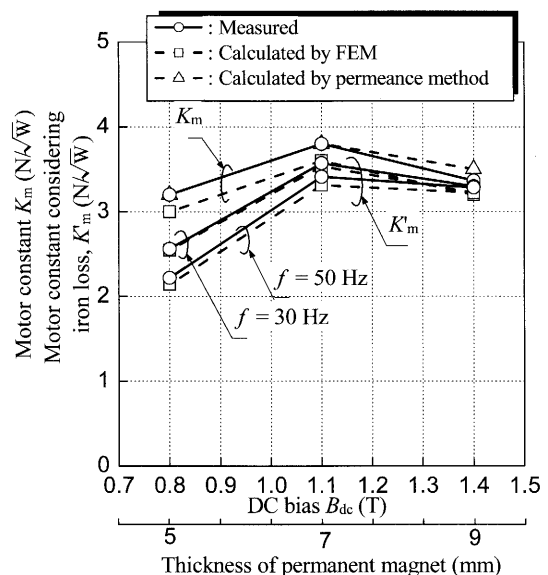


Fig. 11 Two motor constants vs. dc bias characteristics of the LDM with made of non-laminated material (1% silicon steel, thrust  $F = 5$  N).

Table 2 Basic characteristics of two LDMs.

| Item   |                                      |                     |            | Symbol   | Value |     |     | (Unit)           |     |                  |  |
|--|--------------------------------------|---------------------|------------|----------|-------|-----|-----|------------------|-----|------------------|--|
| Thickness of permanent magnet                |                                      |                     |            | $t_m$    | 5     | 7   | 9   | (mm)             |     |                  |  |
| DC bias                                      |                                      |                     |            | $B_{dc}$ | 0.8   | 1.1 | 1.4 | (T)              |     |                  |  |
| Number of turns of coil                      |                                      |                     |            | $N$      | 580   | 387 | 193 | (turns)          |     |                  |  |
| Resistance of coil                           |                                      |                     |            | $R$      | 8.5   | 5.4 | 2.6 | ( $\Omega$ )     |     |                  |  |
| Non-laminated Material<br>(1% silicon steel) | Thrust constant                      |                     |            | $K_f$    | 8.1   | 8   | 5.1 | (N/A)            |     |                  |  |
|  | Motor constant                       |                     |            | $K_m$    | 2.8   | 3.5 | 3.2 | ( $N/\sqrt{W}$ ) |     |                  |  |
|  | Motor constant considering iron loss | Frequency $f=30$ Hz | Measured   | $K_m^*$  | 1.2   | 2.2 | 2.9 | (N/ $\sqrt{W}$ ) |     |                  |  |
|  |                                      |                     | Calculated |          | 1.2   | 2.0 | 2.9 |                  |     |                  |  |
|  |                                      | Frequency $f=50$ Hz | Measured   |          | 1.1   | 1.8 | 2.8 |                  |     |                  |  |
|  |                                      |                     | Calculated |          | 1.1   | 1.7 | 2.7 |                  |     |                  |  |
| Thrust constant                              |                                      |                     |            | $K_f$    | 9.1   | 8.8 | 5.5 | (N/A)            |     |                  |  |
| Motor constant                               |                                      |                     |            | $K_m$    | 3.2   | 3.8 | 3.4 | ( $N/\sqrt{W}$ ) |     |                  |  |
| Laminated Material<br>(35H250)               | Motor constant considering iron loss | Frequency $f=30$ Hz | Measured   | $K_m^*$  | 2.6   | 3.6 | 3.3 | (N/ $\sqrt{W}$ ) |     |                  |  |
|  |                                      |                     | Calculated |          | 2.5   | 3.5 | 3.2 |                  |     |                  |  |
|  |                                      | Frequency $f=50$ Hz | Measured   |          | 2.2   | 3.4 | 3.3 |                  |     |                  |  |
|  |                                      |                     | Calculated |          | 2.1   | 3.3 | 3.2 |                  |     |                  |  |
|  | Thrust constant                      |                     |            |          | $K_f$ | 9.1 | 8.8 |                  | 5.5 | (N/A)            |  |
|  | Motor constant                       |                     |            |          | $K_m$ | 3.2 | 3.8 |                  | 3.4 | ( $N/\sqrt{W}$ ) |  |

## 5 あとがき

本論文で得られた結果を以下に示した。

### (1) ヨーク材質の違いによるモータ定数の比較

LDMのモータ定数 $K_m$ はヨーク材質に依存せず、直流バイアス1.1 Tの場合に最大をとる傾向となり、非積層材(1%けい素鋼)と積層材(35H250)でそれぞれ3.5と3.8  $N/\sqrt{W}$ であった。

### (2) 鉄損を考慮したモータ定数に関する考察

直流バイアスが、非積層材(1%けい素鋼)で1.4 T、積層材(35H250)では1.1 Tの場合に、鉄損を考慮したモータ定数 $K_m^*$ が最大となる傾向となった。周波数 $f=50$  Hzにおける $K_m^*$ の最大値は、それぞれ2.8と3.4  $N/\sqrt{W}$ であり材質に依存する結果となった。すなわち、非積層材でヨークを構成する場合には、モータ定数 $K_m$ が最大となる直流バイアスよりも大きな直流バイアスを印加することで銅損と鉄損の和を低減でき、鉄損を考慮したモータ定数 $K_m^*$ を大きくすることが可能である。なお、積層材でヨークを構成する場合には、モータ定数 $K_m$ が大きくなる直流バイアスを印加すればよいことが分かった。

(2004年12月10日受付)

## 参考文献

- [1] T. Mizuno, K. Nishikawa, M. Utsuno, M. Kobayashi and H. Yamada, A new estimation of linear dc motor based on motor constant considering iron loss, *Linear Drive Industry Applications, LDIA2003*, pp. 446-449, 2003.
- [2] 唐玉琪, 水野勉, 小山勝巳, 渋谷浩洋, 山田一, リニアモータのヒステリシス損に関する検討, 日本応用磁気学会誌, Vol. 23, No. 4-2, pp. 1685-1688, 1999.
- [3] 大西和夫, 銅損と鉄損を考慮した集中巻永久磁石モータの出力評価, 電気学会論文誌D, Vol. 119-D, No. 3, pp. 399-404, 1999.
- [4] C. F. Foo, D. M. Zhang and H. Saotome, Calculation of Iron Losses in Ferrite Toroids Using FEM and Complex Vectors, *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol.33, No. 5, pp. 3451-3453, 1999.