薄形永久磁石の保磁力の検討

Considerations on the Coercive Force of Thin Permanent Magnets

脇若 弘之・加藤 久幸*・江澤 光晴*・伊藤 治雄**・福田 直紀**・松廣 勝仁**

信州大学工学部電気電子工学科, 長野市若里 4-17-1 (〒380-8553)

* 信州大学大学院工学系研究科, 長野市若里 4-17-1 (〒380-8553)

** 帝国通信工業, 川崎市中区荻宿 335 (〒211-0022)

H. Wakiwaka, H. Kato*, M. Ezawa*, H. Ito**, N. Fukuda**, and K. Matsuhiro**

Faculty of Engineering, Shinshu Univ., 4-17-1 Wakasato, Nagano-shi 380-8553

* Graduate School of Science and Technology, Shinshu Univ., 4-17-1 Wakasato, Nagano-shi 380-8553

** Teikoku Tsushin Kogyo Co., Ltd., 335 Nakahara-ku Kariyado, Kawasaki 211-0022

(2000 年 10 月 6 日受理, 2001 年 1 月 24 日採録)

Recently, thin-type permanent magnet have been increasingly used to reduce the size of motors and actuators. However, the characteristics of a permanent magnet deteriorate when it is thinned. The demagnetization of a magnet leads to a design that miniaturized the motor and actuator. We developed a low power, thin linear oscillatory actuator (LOA) for cellular phones. A thin-type permanent magnet is used for the LOA. The characteristics of the LOA might be adversely affected by demagnetization of a thin-type permanent magnet. This paper describes (1) the structure and operating principle of the LOA for cellular phones, (2) considerations on the coercive force based on the thrust characteristics of the LOA, and (3) considerations of coercive force based on measurement of the magnetic flux density.

Key words: thin permanent magnet, demagnetization, linear oscillatory actuator, cellular phone, thin oscillatory actuator, thrust characteristic, magnetic flux density, coercive force

1 まえがき

近年のモータ、アクチュエータやセンサの小形化に伴い、使用される永久磁石は小形のものが増えてきた。しかし、永久磁石は小形化する事で、磁気特性が劣化と言われている¹⁾。磁石の磁気特性の劣化により、モータ、アクチュエータにおいて目標とする特性が得られないことがある。

我々は、リニア振動アクチュエータ (linear oscillatory actuator, 以下 LOA と略す) を携帯電話の着信用バイブレータとして用いることを検討している。携帯電話の小形化と共に、着信用バイブレータには小形・薄形化、低消費電力化が要求されている。そこで、現行の振動モータに比べ薄形化が容易な LOA を、着信用バイブレータとして開発している。我々の研究で、携帯電話用 LOA の薄形化は進み、4.0 mm の厚さにする事が出来た。それに伴い、携帯電話用 LOA で使用する永久磁石は、着磁方向の厚さが 2.0 mm の薄形永久磁石を使用している。一般に、永久磁石は磁気回路に組み込んだ状態で着磁すれば、特性の劣化は少ないといわれている。ここで開発した LOA は、永久磁石を着磁してから磁気回路に組み込む必要があり、そのため、磁石の特性が見かけ上劣化し、LOA の特性に影響が出る。そこで本論文では、携帯電話用 LOA の推力特性の計算値と実測値の比較から、薄形永久磁石の保磁力値の扱いについて検討を行った。また、開

磁路・閉磁路で薄形永久磁石の磁束密度を測定した。そして、磁束密度の実測値と計算値の比較から永久磁石の保磁力値の扱いについて検討を行った。なお、本論文においては、永久磁石の透磁率を 1 と仮定して検討を行っている。以下に本論文の内容を示す。

- (1) 携帯電話用 LOA の動作原理
- (2) LOA の推力特性による保磁力値の扱いの検討
- (3) 磁束密度の測定による保磁力の扱いの検討

2 携帯電話用 LOA の動作原理

Fig. 1 に、携帯電話用 LOA の構造を示した。ストローク方向に対して垂直に着磁された永久磁石と、永久磁石の上部の可動子ヨーク、下部のセンタヨークで構成される。固定子は、固定子ヨークとヨークに巻きつけたコイル、ねじりコイルバネ、バネを固定するプラスチックからなる。可動子は、ストローク方向に平行に移動できるように 2 本のねじりコイルバネにより支持され、バネの共振を利用して振動する。

Fig. 2 に、携帯電話用 LOA の推力特性を示した。LOA の推力 F_x は磁気力 F_m とバネの弾性力 F_s に分けられる。バネの弾性力によって推力特性が可動子変位に対して負の傾きを持つことで、バネの共振を利用して振動することができる。磁気力はディテント力 F_d とコイル電流に比例する力 F_c に分けられる。LOA に作用する磁気力 F_m は次式となる。

$$F_m = F_c + F_d = K_f I + K_{ms} x \quad [\text{N}] \quad (1)$$

ここに、 K_f : 推力定数 [N/A], I : コイル電流 [A], K_{ms} : 磁気バネ定数 [N/m]

Fig. 1 Structure of the LOA for cellular phones (unit: mm).

Fig. 2 Thrust characteristics of the LOA for cellular phones.

3 LOA の推力特性による保磁力の扱いの検討

3.1 測定方法

Fig. 3 に、推力特性の測定方法を示した。測定の再現性を得るためねじりコイルバネは取り外し、固定子のみをロードセルに固定した状態で、磁気力だけの推力を測定した。次式に示した変換式によって、ロードセルの出力 E_0 から推力 F を求める。

$$F = -\alpha E_0 \quad [\text{N}] \quad (2)$$

ここに、 α : ロードセルの変換係数 (= 0.197) [N/V]

3.2 推力特性の実測値と計算値の比較

Fig. 4 に、携帯電話用 LOA の推力特性の、実測値と計算値の比較を示した。計算値は、市販の有限要素法 (FEM) による磁界解析ソフト (JMAG Studio Ver. 1.3 : 日本総合研究所製) を使用して算出した。本解析ソフトにおいて、永久磁石は磁化 (単位: A/m) を用いて条件設定を行う。FEM において、LOA に使用している厚さ 2.0 mm の Nd-Fe-B 磁石 N45M の磁化 (保磁力) を、カタログ値 1024 kA/m より 34 % 小さい 675 kA/m として計算した。推力特性の計算値は、実測値によく一致した。実測値と計算値の誤差は、推力定数の中心部で 9.8 %, 端部で 10.1 % となった。よって、厚さ 2.0 mm の N45M の保磁力を、カタログ値より 34 % 小さい 675 kA/m と見なす事で、携帯電話用 LOA の推力定数を一致させることが出来た。

Fig. 3 Method of measuring thrust characteristics.

Fig. 4 Comparison of the calculated and measured values of the thrust characteristics of the LOA.

4 磁束密度の測定による見かけ上の保磁力

4.1 開磁路における磁束密度の実測値と計算値の比較

4.1.1 測定方法

Fig. 5 に、薄形永久磁石の磁束密度の測定方法を示した。表 1 に、磁束密度の測定に用いた薄形永久磁石の仕様を示した。開磁路での磁束密度の測定であるため、永久磁石を治具に固定し、 x 軸上の z 方向の磁束密度 B_z をホールプローブで測定した。永久磁石の中心を $x = 0$ mm として $x = 5$ mm まで測定した。磁石からのギャップを z 方向に 0.5 mm 一定とした。磁束密度の測定には、携帯電話用 LOA に使用している Nd-Fe-B 磁石 N45M (信越化学工業製) を用いた。着磁方向の厚さが 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm 3.0 mm の厚さのものを用意し、厚さによる影響も検討した。

Fig. 5 Method of measuring the magnet flux density of a thin permanent magnet (unit : mm).

Table 1 Specifications of the permanent magnet.

Items	Nd-Fe-B Magnet N45M (Shinnetsu Chemical Industry)	
Length	4.4 mm	
Width	3.5 mm	
Thickness	3.0, 2.5, 2.0, 1.5, 1.0 mm	
Permeability	1 (Assumption)	
Coercive force	1024 kA/m	

4.1.2 磁束密度の実測値と計算値の比較

Fig. 6 に、厚さ 3.0 mm における Nd-Fe-B 磁石 N45M の z 方向の磁束密度 B_z の実測値と計算値の比較を示した。計算値は、市販の有限要素法 (FEM) による磁界解析ソフト (JMAG Studio Ver. 1.3 : 日本総合研究所製) を使用して算出した。解析条件は 2 次元静解析であり、N45M の保磁力は、カタログ値の 1024 kA/m を使用した。また、磁束密度の測定に使用したホールプローブの面積を考慮して、FEM による計算値を 1.0 mm で平均している。

永久磁石の中心における z 方向の磁束密度 B_z は、実測値が 307 mT、計算値が、312 mT であり、実測値と計算値の誤差は、1.6 % と非常に小さかった。これにより、厚さ 3.0 mm の Nd-Fe-B 磁石 N45M の中心での保磁力は、カタログ値の 1024 kA/m と見なすことができる。永久磁石の端部に行くにしたがって、 B_z は小さくなった。そこで、図中の斜線の部分のようなグラフの面積で比較した。面積の大きさの実測値は、計算値における面積の大きさより 24.7 % 小さくなった。このことから、N45M における測定範囲全体の保磁力は、カタログ値 1024 kA/m よりも 24.7 % 小さい 771 kA/m と扱うことが妥当と考えられる。

Fig. 7 に、開磁路で磁束密度を測定した時の、Nd-Fe-B 磁石 N45M の厚さ h による見かけ上の保磁力の変化を示した。これは、永久磁石中心の磁束密度から推定した保磁力と、実測値と計算値でグラフの面積を比較して推定した保磁力のグラフである。永久磁石中心の磁束密度から推定した保磁力では、磁石着磁方向の厚さによらず、ほぼカタログ値どおりの値が得られていることが分かった。しかし、グラフの面積を比較して推定した保磁力は、カタログ値に比べ小さくなる傾向を示した。FEM において、保磁力を最大で 36.9 % 小さく考えないと、磁束密度における実測値と計算値の誤差が大きくなった。また、磁石の着磁方向が薄くなることによって、ほぼ線形に保磁力が減少しているように見なす必要があることがわかった。

4.2 閉磁路における磁束密度の実測値と計算値の比較

4.2.1 測定方法

Fig. 6 Comparison of the measured and calculated values of the magnetic density of an Nd-Fe-B magnet N45M (opened path, permanent magnet : 3 mm in thickness).

Fig. 7 Coercive force in relation to the thickness of the Nd-Fe-B magnet N45M (opened path).

Fig. 8 に、閉磁路における磁束密度の測定方法を示した。ケイ素鋼板 50H350 を用いて Fig. 8 のようなヨークを作製した。永久磁石とヨークのギャップに、ホールプローブのホール素子を挿入して、 z 方向の磁束密度 B_z を測定する。永久磁石の中心を $x = 0$ mm として、0.5 mm おきに $x = 5$ mm まで測定する。磁石からのギャップを z 方向に 0.5 mm 一定とした。

4.2.2 磁束密度の実測値と計算値の比較

Fig. 9 に、厚さ 3.0 mm における Nd-Fe-B 磁石 N45M の z 方向の磁束密度 B_z の実測値と計算値の比較を示した。解析における N45M の保磁力は、カタログ値 1024 kA/m と、720 kA/m である。また、磁束密度の測定に使用したホールプローブの面積を考慮して、計算により得た磁束密度の値を、1.0 mm 分の長さの値で平均している。

Nd-Fe-B 磁石 N45M の中心 ($x = 0$) における z 方向の磁束密度 B_z は、実測値が 521 mT となった。FEM において、保磁力を 750 kA/m として計算すると、N45M の中心における B_z は 529 mT であった。実測値と計算値の誤差は 1.5 % であった。これより、永久磁石中心での磁束密度だけで考えると、厚さ 3.0 mm の Nd-Fe-B 磁石 N45M の保磁力は、カタログ値より 29.7 % 小さい 720 kA/m と見なすことができる。永久磁石の端部に行くにしたがって、磁束密度は

Fig. 8 Method of measuring the magnetic flux density with closed path (unit : mm).

Fig. 9 Comparison of the measured and calculated values of the magnetic density of an Nd-Fe-B magnet N45M (closed path, permanent magnet : 3 mm in thickness).

Table 2 Coercive force in relation to the thickness of the thin permanent magnet.

Items	Thickness of N45M l_h (mm)				
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
Coercive force by magnetic density [kA/m]	625 (-39.0)	645 (-37.0)	675 (-34.1)	700 (-31.6)	720 (-29.7)
Coercive force by graph area [kA/m]	495 (-51.7)	510 (-50.2)	525 (-48.7)	555 (-45.8)	575 (-43.8)

(-) Difference from catalog value (1024 kA/m)

小さくなった。そこで、図中の斜線の部分のように、面積を比較した。その結果、FEMにおいて保磁力を 575 kA/m として計算すると、面積の大きさの実測値と計算値は、0.9 % の誤差で一致した。このことから、厚さ 3.0 mm の Nd-Fe-B 磁石 N45M において、測定範囲全体での保磁力は、カタログ値 1024 kA/m よりも 43.8 % 小さい 575 kA/m と見なすことが妥当と考えられる。

Fig. 10 に、Nd-Fe-B 磁石 N45M の厚さ l_h による見かけ上の保磁力の変化を示した。これは、永久磁石中心の磁束密度から推定した保磁力と、実測値と計算値でグラフの面積の比較から推定した保磁力のグラフである。どちらの保磁力の推定値においても、カタログ値から大きく減少している。FEM において、保磁力を最大で 51.7 % 小さく考えないと、磁束密度における実測値と計算値の誤差が大きくなった。また、磁石の着磁方向が薄くなることによって、ほぼ線形に保磁力が減少しているように見なす必要があることがわかった。

第 3 章の検討の結果、厚さ 2.0 mm の N45M を用いた携帯電話用 LOA の推力特性において、実測値と計算値が良く一致する保磁力の値は、675 kA/m であった。これは、本節の検討で得られた、厚さ 2.0 mm において、永久磁石中心の磁束密度から推定した保磁力と同じ値である。このことから、本節の結果である、磁石中心の磁束密度から推定した保磁力の値を用いることで、実物との誤差が少ないアクチュエータを、解析上で設計できると考えられる。

Fig. 10 Coercive force in relation to the thickness of the Nd-Fe-B magnet N45M (closed path).

5 あとがき

本論文で明らかにしたことを以下にまとめた。

- (1) 携帯電話用 LOA の推力特性において、実測値と計算値の比較を行った。LOA に使用している厚さ 2.0 mm の N45M の保磁力を、カタログ値より 34 % 小さい 675 kA/m と見なす事で、携帯電話用 LOA の推力定数を一致させることが出来た。
- (2) Nd-Fe-B 磁石 N45M の磁束密度を開磁路で測定した。永久磁石中心においては、磁束密度の実測値と、カタログ値の保磁力を用いて計算した磁束密度の値が、ほぼ一致した。しかし、グラフの面積は実測値のほうが小さく、計算値よりも約 30 % 小さくなった。
- (3) Nd-Fe-B 磁石 N45M の磁束密度を閉磁路で測定した。永久磁石中心の磁束密度から推定した保磁力の値よりも、グラフの面積の比較から推定した保磁力の値のほうが、カタログ値からの減少が大きかった。保磁力を 30 % から 50 % 小さく見なすことで、磁束密度の実測値と計算値は一致した。

第 3 章の検討の結果、厚さ 2.0 mm の N45M を用いた携帯電話用 LOA の推力特性において、実測値と計算値が良く一致する保磁力の値は、675 kA/m であった。これは、4.2 節の検討で得られた、厚さ 2.0 mm において、永久磁石中心の磁束密度から推定した保磁力と同じ値である。このことから、4.2 節の結果である、磁石中心の磁束密度から推定した保磁力の値を用いることで、実物との誤差が少ないアクチュエータを、解析上で設計できると考えられる。

文 献

- 1) 大橋 健, 宮田 浩二: 永久磁石から見た最近のモータ, アクチュエータ, 日本応用磁気学会第 84 回研究会資料, 84-4, pp.22-24, 1994.
- 2) 脇若 弘之, 加藤 久幸, 江澤 光晴, 伊藤 治雄, 福田 直紀, 松廣 勝仁: 携帯電話用リニア振動アクチュエータにおける小形永久磁石の保磁力の検討, 平成 12 年 電気学会全国大会講演論文集, vol.5, p2035, 2000.