バルブ形感温磁気アクチュエータの特性解析

An Analysis of the Operations of Valve-Type Temperature-Sensitive Magnetic Actuators

山沢清人・鈴木重光 信州大学工学部, 長野市若里 500 (〒380)

K. Yamasawa and S. Suzuki

Dept. of Electrical Engng., Shinshu Univ., 500 Wakasato, Nagano 380

The operation of valve-type temperature-sensitive magnetic actuators utilizing magnetic compensation alloys are described. The dynamic characteristics of the actuators are analyzed using a finite-element method on the basis of simple assumptions. The calculated values are in good agreement with the experimental ones.

This analytical method is useful for designing an actuator with high performance.

1. はじめに

室温の近くで磁気特性の温度変化が著しい磁性材料いわゆる感温磁性材料^{1),2)}の温度計測機能とエネルギー変換機能を利用した感温磁気アクチュエータはセンサとアクチュエータが一体化構造の高信頼性で省エネルギー形のコントロールデバイスであり、液体あるいは気体の温度制御用パイロットバルブ、大容量の過熱防止用スイッチなど有用な用途が考えられ、種々の研究がなされている^{3),4)}。しかし、その動作特性については系統的研究が十分にはなされていないようである^{5),6)}。

筆者らは感温磁気アクチュエータの設計法の確立に資することを目的とし、現在入手可能な感温磁性材料を用いてバルブ形の磁気アクチュエータを試作し、その動作機構解明の端緒として定常状態における出力特性について定量的な解析を行った。すなわち、簡単な仮定の下に有限要素法により磁気抵抗を計算し、これより磁化特性を求め、可動子変位対駆動力特性及び温度対変位特性などの基礎的な特性を計算し、実験との対応を行った。

その結果、2種類の試作機について動作特性の計算値と実験値は良好な一致を示し、本解析法が感温磁気アクチュエータの設計に有用であることが明らかとなった。

2. 構造と磁気等価回路

Fig. 1は試作のバルブ形感温磁気アクチュエータの構造略図を示すものである⁷⁾。ヨークには純鉄、感温部にはキュリー温度が大略 60°Cの整磁鋼を使用している。可動子は直径 5.4 mmの円柱状の純鉄にテーパをつけた砲弾形である。可動子 A はテーパ角 $\alpha=12.9^\circ$ 、テーパ部の軸長は 3.5 mm であり、可動子 B はテーパ

Fig. 1 Construction of temperature-sensitive magnetic actuator.

が可動子 A のそれより深く、 $\alpha=22.5^\circ$ である。これらの可動子は円滑な動作と密閉性を得るために真ちゅうのチューブ内に格納されている。制動力は可動子の上部に取り付けたロッドにスプリングバネを固定して得ている。また、可動子の変位 x は可動子の先端と固定磁極の先端(テーパ角 $\alpha=45^\circ$ の部分)とが一致した点を原点($x=0$)とし、可動子が磁極より離れる方向を $x>0$ とする。

なお、試作機は感温磁性材料と接する円柱ヨークを永久磁石で置き換えると、永久磁石励磁形のアクチュエータとしても作動する構造となっている。

次に、特性解析に用いる仮定と磁気等価回路について述べる。試作機では感温磁性材料の飽和磁束密度が純鉄のそれと比較して小さく、かつ磁気回路に大きな空隙を有する点を考慮して、感温磁性材料の透磁率と純鉄の透

Fig. 2 Magnetic equivalent circuit.

磁率は磁気未飽和状態では無限大であり、飽和状態では真空の透磁率に等しく、かつ磁気ヒステリシスはないものとする。また、解析は熱的に定常状態における動作について行うものとし、かつ感温磁性材料の温度分布も無視できるものと仮定する。

Fig. 2 は解析に用いる磁気等価回路を示すものである。図中、 $R_1(x)$ は可動子と磁極間の空隙の磁気抵抗であり、可動子の変位 x の関数となる。 $R_2(\theta)$ は感温部の磁気抵抗であり、温度 θ の関数となるが、感温磁性材料が未飽和状態では $R_2(\theta) = 0$ である。 R_3 は内側ヨークと可動子間の空隙の磁気抵抗であり、変位 $x < 5.5$ mm では x に依存しない。 R_4 は可動子を通過後感温部を通らずに漏洩する磁束の磁気抵抗である。また、 NI は励磁起磁力であり、 Φ は $R_1(x)$ を流れる磁束である。

まず可動子と磁極間の磁気抵抗 $R_1(x)$ の計算結果を述べる。 $R_1(x)$ は磁位を用いた有限要素法によって空隙の磁界を計算し^{9),10)}、これより磁気抵抗を算出する。Fig. 3(a) には $R_1(x)$ の計算方法の説明図を示す。今、軸対称 3 次元場における要素番号 K の 1 次三角要素の節点 A, B, C の座標を各々 $(a_r, a_y), (a_r, b_y), (c_r, b_y)$ 、磁位を各々 $\Omega_a, \Omega_b, \Omega_c$ とし、この要素 K に対して半径 r の円筒面 L を考える¹⁰⁾。面 L と要素 K の交点 D と E の座標を各々 $(d_r, d_y), (d_r, e_y)$ とし、面 $l-k$ において中

Fig. 3 Explanation of calculation of $R_1(x)$.
(a) calculating method, (b) magnetic equipotential lines

心軸に垂直な磁界 $H(l, k)$ による¹¹⁾磁束 $\Phi(l, k)$ は次式で示される。

$$\Phi(l, k) = 2\pi d_r (d_y - e_y) \mu_0 \frac{\Omega_b - \Omega_c}{r \ln(c_r/a_r)} \quad (1)$$

上式において、 μ_0 は真空の透磁率である。

ここで、円筒面 L と重なるすべての要素に対して磁束を求め、その和をとれば、磁気抵抗 $R_1(x)$ は、可動子と磁極間の磁位差を Ω_m とし、次式で計算される。

$$R_1(x) = \Omega_m / \left\{ \sum_k \Phi(l, k) \right\} \quad (2)$$

Fig. 3(b) には可動子 A を装着した試作機について、変位 $x = -2$ mm の場合の可動子と磁極間の等磁位線図の計算結果を示す。

Fig. 4 は磁気抵抗 $R_1(x)$ と変位 x の関係を示したものである。図中、実線は磁化特性の立上り部の傾きより求めた実験値である。破線は (2) 式より求めた計算値であるが、磁気抵抗 R_3 は内周ヨークの内半径と軸方向長さ及び可動子半径を既知として計算することができ¹¹⁾、その値は $R_3 = 8.3 \times 10^5 \text{ H}^{-1}$ となる。図を見ると、可動子 A または B のいずれを装着した場合でも計算値は実験値と良好な一致を示すことがわかる。

次に感温部の磁気抵抗 $R_2(\theta)$ を求める。計算を簡単とするために、整磁鋼の磁束密度 B_m の温度依存性を Fig. 5(a) に示すように 2 直線で近似する。すなわち、 $\theta = 40^\circ\text{C}$ の上下において次式のごとく表す。

$$\theta \leq 40^\circ\text{C}; B_m = -5.2 \times 10^{-3} \theta + 0.402 \text{ (T)} \quad (3)$$

$$\theta > 40^\circ\text{C}; B_m = -1.1 \times 10^{-3} \theta + 0.628 \text{ (T)} \quad (4)$$

Fig. 5(b) は感温部の磁気飽和の状態を示す模式図である。磁極を通過した磁束は円柱ヨーク (半径 $r_0 = 4.8$ mm) より感温磁性材料に流入し、外周ヨークに向かって拡散する。このため、円板形の感温磁性材料では円柱ヨークに接する中心部の磁束密度が周辺部のそれと比較して高くなり、磁気飽和は磁束の増加あるいは温度の上昇

Fig. 4 Variation of $R_1(x)$ with rod-position.

Fig. 5 Explanation of calculation of $R_2(\theta)$.
(a) temperature dependence of saturated flux density, (b) sketch of magnetic saturation

に伴ない中心部より周辺部に向って進行するものと考えることが可能となる。今、感温磁性材料の温度は均一であると仮定しているので、この磁気飽和による見掛け上の空隙の半径 r_a は、感温磁性材料の厚さを h として、次式で示される。

$$r_a = \Phi / 2\pi h B_m \quad (5)$$

すなわち、見掛け上の空隙半径が円柱ヨークの半径より大きい場合と小さい場合で感温部の磁気抵抗 $R_2(\theta)$ は次式で表すことができる。

$$r_a > r_0; R_2(\theta) = (1/2 \pi h \mu_0) \cdot \ln(r_a/r_0) \quad (6)$$

$$r_a \leq r_0; R_2(\theta) = 0 \quad (7)$$

上式より、感温部の磁気抵抗は温度と磁束の関数となることがわかる。

また、漏洩磁束の磁気抵抗 R_4 は外周ヨークの内半径と内周ヨークの外半径及び両ヨークの軸方向長さを既知として計算でき、その値は $R_4 = 1.5 \times 10^7 \text{ H}^{-1}$ となる。

3. 動作特性

まず、磁化特性について考察する。感温部において、(7) 式が成り立つような磁気未飽和領域では、磁化特性は次式で示される。

$$\Phi \leq \Phi_0; \Phi = NI / (R_1(x) + R_3) \quad (8)$$

上式において、 Φ_0 を分枝磁束と呼び、その値は(5)式より $2\pi r_0 B_m$ となる。

さらに磁束が増加すると、磁気抵抗 $R_2(\theta)$ は、(6) 式に示すように、磁束 Φ の関数となり、磁化特性は非線形性を示す。すなわち、 $NI = NI_0$ で $\Phi = \Phi_0$ とすると、 NI_0 を越える微小な起磁力増加 $(NI - NI_0)/n$ に対する磁束の増加は次式の漸化式の形で示すことができる。

Fig. 6 Magnetization curve.

$$\Phi > \Phi_0; \Phi_k - \Phi_{k-1} = \frac{(NI - NI_0)/n}{R_1(x) + R_3 + \frac{R_2(\theta) \cdot R_4}{R_2(\theta) + R_4}} \quad (9)$$

Fig. 6 は可動子 B を装着した試作機の温度 $\theta = 40^\circ\text{C}$ における磁化特性を示すものである。図中、実線は可動子と磁極の間に設置した検出コイルによって測定した値であり、破線は (8), (9) 式より求めた計算値である。これを見ると、実験値と計算値は x が小さい場合すなわち可動子と磁極間の距離が小さい場合に比較的良好な一致を示すことがわかる。

次に、可動子変位対駆動力特性を考察する。起磁力を一定とした場合、磁気アクチュエータの磁気的な駆動力 F_m は、仮想仕事の原理より、次式で示される。

$$F_m = \partial W_m' / \partial x \quad (10)$$

上式で $W_m'(x, I, \theta)$ は Fig. 6 の磁化特性より求める磁気随伴エネルギーである。

Fig. 7(a) と (b) は可動子 A と B を装置した試作機の起磁力 $NI = 800 \text{ A}$ とした場合の変位対駆動力特性を示すものである。図中、実線は実験値であり、破線は(10)式を用いて計算した結果を示す。これを見ると、低温及び高温の領域において、両可動子の場合とも計算値は実験値と良好な一致を示すことがわかる。

最後に、可動子の温度対変位特性について考察する。感温磁気アクチュエータの制御動作には駆動力と制動力の平衡のとり方によって比例制御とオンオフ制御の2種があり、その温度対変位特性もスプリングの特性によって異なったものとなる^{4),5)}。Fig. 8 には安定平衡点を利用する比例制御動作を、スプリングを使用せずに一定の制動力 $F_L = 2.0 \text{ N}$ と 2.25 N を与えて、行かせた場合の温度対変位特性を示す。図中、実線の白丸と黒丸は各々可動子 A と B を装着した場合の実験値であり、破線は平衡条件より求めた計算値である。これを見ると、計算

Fig. 7 Relationship between magnetic thrust force and rod-displacement.
(a) rod A, (b) rod B

Fig. 8 Rod-displacement vs. temperature characteristics.

値と実験値は比較的良好な一致を示すこと及び $F_L = 2.0$ N の場合に広い温度範囲で可動子変位が温度に対して直線的に比例し、そのストロークは 2 mm と比較的大きいことが了解される。

4. むすび

以上、バルブ形感温磁気アクチュエータの定常状態における動作特性について簡単な仮定の下に解析を行った結果を述べた。本解析は磁気アクチュエータの構造と材料の磁気特性を既知とし、経験的な定数を用いずに、特性の定量的な考察を可能とするものであり、今後の感温磁気アクチュエータの設計に有用なものと考えられる。

バルブ形感温磁気アクチュエータの製作に際して御助言とご協力をいただいた信州大学工学部神崎勇二教授、山田一教授並びに(株)鷺宮製作所、及び感温磁性材料を提供された東北金属工業(株)に深謝する。

文 献

- 1) K. Murakami: *IEEE Trans. Magn.*, **MGA-1**, 96 (1965).
- 2) K. Murakami and M. Nemoto: *IEEE Trans. Magn.*, **MGA-8**, 387 (1972).
- 3) 木村, 中村: 第 17 回 SICE 学術講演会, S5-2 (1978).
- 4) 山沢: 第 6 回日本応用磁気学会学術講演概要集, 15 pC-13 (1982).
- 5) 山沢: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-82-92 (1982).
- 6) 木村, 中村: 計測自動制御学会論文集, **18**, 912 (1982).
- 7) 鈴木, 山沢: 「電気学会マグネティックス研究会資料」, MAG-83-74 (1983).
- 8) 中田, 高橋: 電気工学の有限要素法, 森北出版, p. 70 (1982).
- 9) 加川: 電気・電子のための有限要素法の実践, オーム社, p. 79 (1982).
- 10) 小貫, 中田, 根本: 現代電気系有限要素法, オーム社, p. 19 (1983).
- 11) 竹山: 電磁気学現象理論, 丸善, p. 375 (1969).

1983 年 12 月 12 日受理, 1984 年 2 月 14 日採録