

パーミアンスの変位による 電磁力の計算

木村 昭穂*

The Calculation of the Electromagnetic Force
by the Permeance Variation

Akio KIMURA

Abstract

An application of finite element method for the calculation of the electromagnetic force is proposed. The electromagnetic force is determined by utilizing the permeances and flux densities on the lines in the air gap forming elements. This paper describes the calculation of the electromagnetic force, and its verification through the construction of the magnet system, which is permanent magnet.

1. はじめに

最近、OA、FA機器の駆動源としてのアクチュエータは、小型化、高性能化が要求されている。アクチュエータの試作、実験を繰り返し行ない改良をするには、多くの時間と労力を要する。この労力を削減する為に、数値解法による特性解析シミュレーションの重要性が増している。特に、有限要素法による数値解析は、実験値ともよく一致するので広く利用され、大きな役割を担っている。アクチュエータの特性を表わす電磁力、トルクの計算にも有限要素法が利用されている。電磁力、トルクの計算には、一般的にエネルギー変位法¹⁾、マクスウエルの応力法^{2)~5)}が用いられている。また最近、磁化電流法⁶⁾なる方法が提案され用いられている。

本研究は、これに加えてもう一つの手法を提案するもので、有限要素法により磁束密度を求め、パーミアンスを算定し、このパーミアンスと磁束密度から電磁力を算出する方法である。また、エネルギー変位法同様に二度計算を要するが、磁気回路及び波形を基にした解析手法であるので判りやすいという点がある。本手法の妥当性について従来の計算方法との比較検討を行なった。

平成元年12月15日受理

*八戸工業大学 情報システム工学研究所講師

2 電磁力の計算

磁性体が y 方向に微小変位したとき、微小体積に蓄えられる磁気エネルギーを $dW(y)$ とする。磁気エネルギーは、磁束及び磁気抵抗を用いてあらわすと、次式のように表わされる。

$$dW(y) = \phi(y)^2 R(y) \quad \dots (1)$$

ただし、 $\phi(y)$ は磁束、 $R(y)$ は磁気抵抗である。

また、磁気エネルギーを起磁力及びパーミアンスを用いて表わすことにする。起磁力 $U(y)$ 、パーミアンス $\psi(y)$ を磁束及び磁気抵抗を用いて表わすと、次式のようになる。

$$U(y) = \phi(y) R(y) \quad \dots (2)$$

$$\psi(y) = \frac{1}{R(y)} \quad \dots (3)$$

(1) 式を起磁力 $U(y)$ 、パーミアンス $\psi(y)$ を用いて表わすと、次式のようになる。

$$dW(y) = \frac{1}{2} U(y)^2 \psi(y) \quad \dots (4)$$

また、(4) 式の起磁力 $U(y)$ の 2 乗を磁束密度分布 $B_g(x)$ 、ギャップ長 L_g を用いて表わすと、次式のようになる。

$$U(y)^2 = \frac{L_g^2 B_g^2(x)}{\mu_0^2} \quad \dots (5)$$

(4) 式は、(3)、(5) 式より次式のように表わされる。

$$dW(y) = \frac{L_g^2 B_g^2(x)}{2 \mu_0^2} \psi(y) \quad \dots (6)$$

起磁力が一定であると仮定すると、ギャップ部の磁束密度は磁石と磁性体間では大きく、それ以外では小さくなる。また、パーミアンスも同様に磁束密度の大きいところでは大きく、磁束密度の小さいところでは小さくなる。このような事よりパーミアンスは、ギャップ部の磁束密度分布に比例するこ

とが出来る。そこで、微小変位におけるギャップ部の磁束密度の最大値を求めた後に、最大値でギャップ部の磁束密度を割りその絶対値を取る。これを、パーミアンス分布 $A(x)$ とし、次式のように表わす。但し、磁束密度の最大値は、変位前の最大値と変位後の最大値とを比較し、大きい方をこのときの最大値とする。図1は、磁石と磁性体間のギャップ部の磁束密度とパーミアンス分布 $A(x)$ を示したものである。

$$A(x) = \left| \frac{B_g(x)}{B_{max}} \right| \quad \dots (7)$$

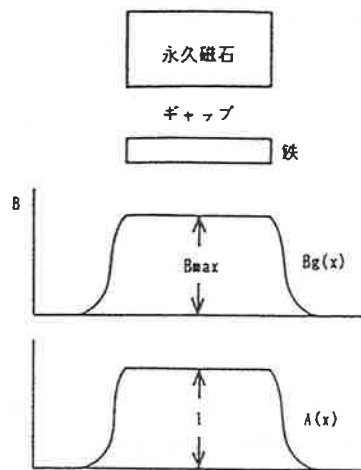


図1 磁束密度とパーミアンスの関係

但し、 $B_g(x)$ は、微小変位 Δy のときの x 方向に対する磁束密度分布であり、 $B_g(x) = \sqrt{B_x^2(x) + B_y^2(x)}$ のように表わされる。

$$\psi(y) = \frac{\mu_0 d s}{L g} A(x) \quad \dots (8)$$

上式がギャップ部のパーミアンス分布を示すものとする。但し、 $d s$ は微小面積で $d s = d z d x$ である。

$$dW(y) = \frac{B_g(x)^2 L g}{2 \mu_0} A(x) d z d x \quad \dots (9)$$

微小変位 Δx における磁気エネルギーは、次式のようになる。但し、磁性体の Z 方向の長さは一様であるものとし、その長さを L_z とする。

これより、空隙部に蓄えられる全磁気エネルギーは、次式のように表わされる。

$$W(y) = \int_0^x \frac{L_z L g}{2 \mu_0} B_g(x)^2 A(x) d x \quad \dots (10)$$

磁性体間の磁気回路に蓄えられる磁気エネルギーは、磁性体の変位に応じて変動する。この変動より電磁力と磁気エネルギーの間には、次のような関係が成立する。

$$F(y) = \frac{\partial W(y)}{\partial y} \quad \dots (11)$$

よって(11)式は、(10)式より次のように表わされる。

$$F(y) = \frac{\partial}{\partial y} \int_0^x \frac{Lz Lg}{2 \mu_0} Bg(x)^2 A(x) dx \quad \dots (12)$$

ここで、ギャップ長 Lg を微小変位におけるギャップ長 Δy に置き換える。 ∂y は微小変位 Δy としても差し支えないものとする、(12)式は次式のように表わされる。

$$F(y) = \frac{Lz}{2 \mu_0} \int_0^x Bg(x)^2 A(x) dx \quad \dots (13)$$

3 有限要素法による電磁力の計算

有限要素法による解析結果を基に各部の磁束密度を算出する。解析対象物が x 方向に Δy だけ移動したときのパーミアンスの差を求める。このとき Δy だけ移動する間の力は、以下の式によって算出できる。

$$F = \frac{Lz}{2 \mu_0} \sum_{i=1}^{Ne} Bg_i^2 (A_{2i} - A_{1i}) \Delta x_i \quad \dots (14)$$

但し、 A_{2i} : 変位が Δy のときの値、 A_{1i} : 変位が Δy 前の値

Δx_i : 要素節点間の x 方向の座標の差

Ne : 要素数

解析対象物が x 方向に Δx だけ移動したときの電磁力の計算は、(14)式の Δx_i の部分を Δy_i と置き換えることにより算出できる。

4. 解析結果

図2は、電磁力の計算に用いた電磁石の構成図⁸⁾を示したものである。図3は、図2の(a)図の中心より片側半分の要素の分割を示したものである。図4は、ギャップ長が2mmの時の磁束分布を示したものである。殆どの磁束が、固定側や磁石及び可変側をとおうして流れており、漏れ磁束が極めて少ないことがいえる。図5は、電磁力の計算結果を示したものである。

これよりパーミアンスの変化による方法は、エネルギー変位法、マクスウェルの応力法と同様の計算結果が得られることがいえる。図6は、ギャップ長に対するパーミアンスの値を示したものである。理論値と計算値が良くの一致しており、パーミアンスの算定が妥当であることがいえる。このようなことより、電磁力の計算方法として有用であることがいえる。またギャップ長が大きくなるに従ってパーミアンスの値が減少している。これは、図5のギャップの変化に対する電磁力の傾向と似ている。電磁力は(14)式から判るように、パーミアンスに左右されることがいえる。

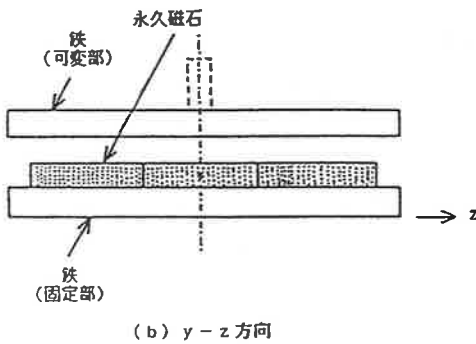
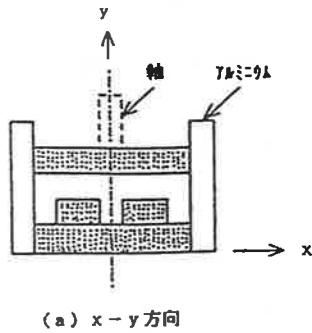


図2 磁石の構造図

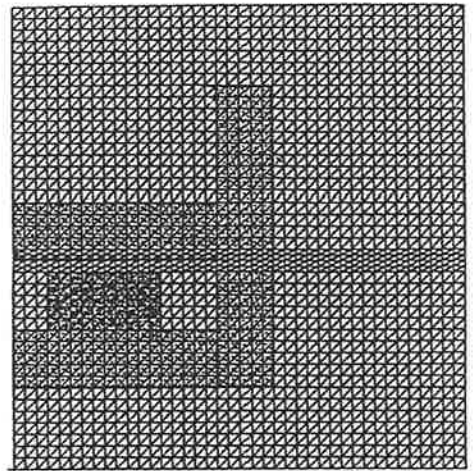


図3 要素分割図

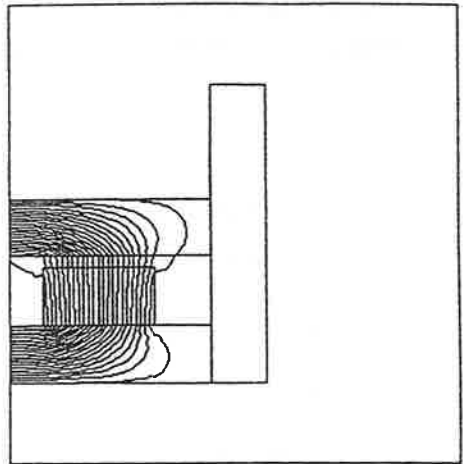


図4 磁束密度分布

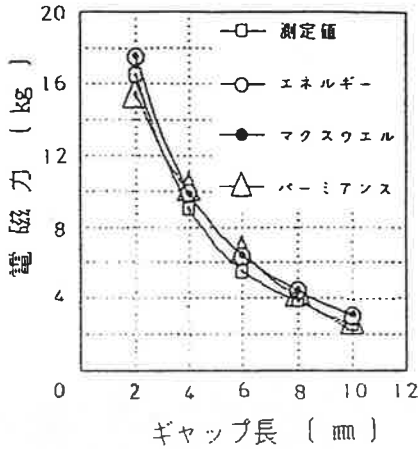


図5 電磁力の計算

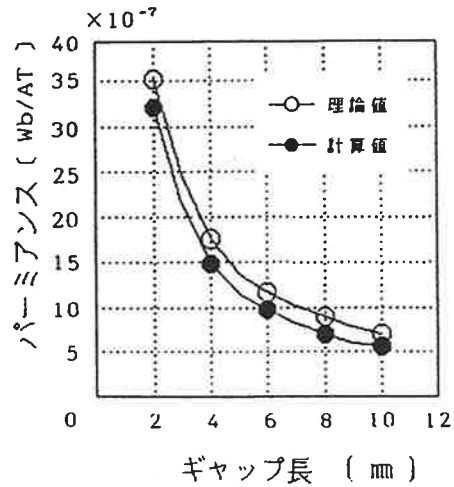


図6 パーミアンスの比較

5. むすび

有限要素法による磁界解析を基に電磁力の計算をする方法として、パーミアンスの変化による方法の概要を紹介した。パーミアンスの変化による電磁力の計算結果は、他の手法による計算結果や測定値と良く一致し、有効な一手法であることがいえる。また、パーミアンスの傾向より電磁力の傾向を知ることが可能である。本手法は、磁気回路を基にした解析手法であるので判りやすい事や、理論値との比較検討がし易いという点がある。エネルギー変位法同様に二度計算をしなければならないが、領域全体の計算を行わないので、計算の所要時間が短縮できる。また、他の手法と本手法を比較することにより、その妥当性を明らかにした。今後の課題として、分割が電磁力の計算の精度に与える影響についても行なうことが必要である。

参考文献

- 1) 沢、山崎：仮想変位法の原理に基づく有限要素法による電磁力の計算、昭和62 電気学会全国大会No.748
- 2) 加川、村山：BASICによる電気・電子有限要素法、科学技術出版
- 3) 村山、村井、加川：有限要素法による電磁力の計算精度向上のための二、三の考察、日本シミュレーション学会、第9回計算電気・電子工学シンポジウムI-17、昭和63
- 4) 中田、高橋：有限要素法によるトルク解析の精度向上、昭和59、電気学会全国大会634
- 5) 中田、高橋：磁束密度の計算精度の計算誤差とトルクの精度、昭和60、

電気学会全国大会 696

- 6) 椋島、河原、野瀬：磁化電流による力計算法、昭和61 電気学会全国大会No.755
- 7) 木村、加川、村井、松坂：有限要素法による直流マイクロモータの磁界/トルク解析、日本シミュレーション学会、第10回計算電気・電子工学シンポジウムI-18、平成元年
- 8) M.Ito and F.Tajima and H.Kanazawa : "EVALUATION OF CALCULATING METHODS " pp.103-106