

超磁歪素子の高周波印加電圧に対する渦電流特性評価

EVALUATION OF EDDY CURRENT CHARACTERISTIC FOR APPLIED HIGH FREQUENCY VOLTAGE TO THE GIANT MAGNETROSTRICTIVE MATERIAL

菅澤 昌之¹⁾, 荒井 政大²⁾
Masayuki Sugasawa, Masahiro ARAI

- 1) ソニーイーエムシーエス株式会社 (〒108-0075 東京都港区港南 1-7-1, E-mail : Masayuki.Sugasawa@jp.sony.com)
2) 信州大学工学部機械システム工学科 (〒380-8553 長野市若里 4-17-1, E-mail : arai@shinshu-u.ac.jp)

The giant magnetostrictive material (GMM) has some characteristics of very large strain of more than 1000ppm, high energy density, and high responsibility. So it is expected to be used for fine positioning device or braking system, and so on. Micro actuator using this equipped with iron yoke and winding coil, therefore, has advantages over PZT type, in simple low voltage driving, high robustness and wide temperature operation range. This paper describes the performance of some divided elements improved the loss of eddy current for applied high frequency voltage to the GMM. The eddy current problem occurred in high frequency driving will be reduced with the size. Quantitative analysis of high frequency dynamic power loss in GMM is calculated by finite element method. Especially divided element counts are depended on skin effect. The calculated results based on the theory shows the effect of dividing the element of GMM.

Key Words: Electromagnetic Field Analysis, Giant Magnetostrictive Material, Finite Element Method, Eddy current

1. 緒 論

我々の日常生活に使用する機器には、多くのアクチュエータ (actuator) が使われている。それは時代の進歩と共にますます増加の傾向にある。ここでアクチュエータとは、電気、流体、化学的なエネルギーを運動エネルギーに変換するデバイスである。

製品に汎用的に用いられるアクチュエータといえば、電磁気力を利用したソレノイドアクチュエータが挙げられる。ソレノイドアクチュエータはその制御性の良さ、高信頼性、取り扱いの容易さ、そしてコストの面からいって最も優れたアクチュエータといえる。しかし、そのような優れた特性を有する反面、以下のような克服すべき課題もいくつか残されている。

- ・ 小型化に伴う回転トルクの低下が著しい。
- ・ 小型化に伴い高回転型のアクチュエータとなることから、比較的大きな減速比をもった減速系が必要になる。

このため電磁気力に代わる新しい原理のアクチュエータとして、静電気力を利用した静電アクチュエータや空気圧、機能性流体、形状記憶合金を利用するもの、さらには、圧電素子や超磁歪素子を用いるアクチュエータ⁽¹⁾など、さまざまなアクチュエータが研究され、実用化されている。

近年、携帯電話やデジタルカメラといったモバイル機器の小型化・軽量化に伴い、位置決めや振動子として用いられるマイクロアクチュエータの需要が年々高まっている⁽²⁾。特に民生用の小型電子機器類では、各種部品類に極めて厳しい性能要

求が課せられており、高い運動性、耐熱性、耐久性、低消費電力特性など、さまざまな特性が要求される。

このような用途では、ボイスコイルモータや DC モータ等の電磁式アクチュエータが現在のところ主流であるが、微小変化ながら大きな発生駆動力を有し、高い周波数での駆動が可能な圧電材料や磁歪材料は、従来から革新的なマイクロメカニズムを実現する機能性材料として注目されている。またこれらの固体アクチュエータは、その優れた振動特性から超音波モータ、マイクロポンプ、インジェクタ、スピーカーといった多種多様な用途への利用が期待されている。しかしながら、これら固体系マイクロアクチュエータの実用化に際しては、それらが脆性材料であるため、加工が難しいといった問題の他、比較的高い駆動電圧を必要とするなど、現状では種々の課題を有している。

超磁歪材料においては、高周波のパルス電圧を印加した場合に渦電流が発生することが知られている⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。この渦電流によって駆動電圧の損失が発生し、結果的に駆動に必要なエネルギーの損失が生じる⁽⁵⁾。よって、超磁歪アクチュエータの動特性を改善し、駆動効率を高めるためには、超磁歪素子に発生する渦電流をいかにして抑制するかが必要となる。

そこで、本研究では、有限要素法⁽⁶⁾による超磁歪アクチュエータの電磁場に関する数値シミュレーションを実施し、駆動コイルに与える電圧と超磁歪材料に発生する渦電流との関係について、渦電流損失の計算結果をもとに定量的な考察を行った。超磁性材料に絶縁スリットを設けることにより、磁性材表面にて発生する渦電流を効果的に抑制できることを示すとともに、各種スリットパターンと発生する渦電流の関係を数値シミュレーションを用いて定量的に明らかにした。

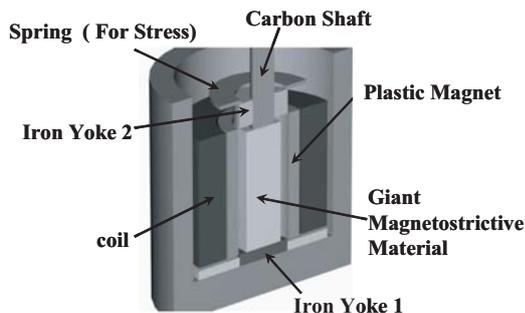


Fig.1 An example figure of magnetostrictive actuator.

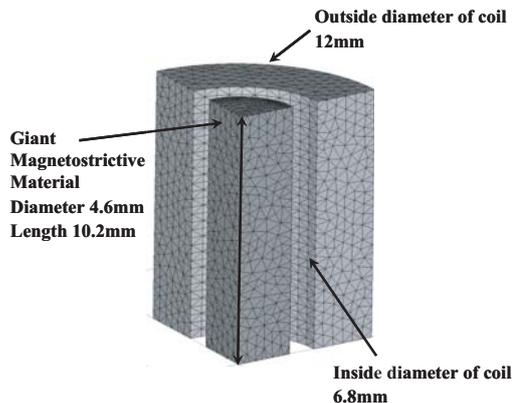


Fig.2 FEM model of magnetostrictive actuator.

2. 超磁歪アクチュエータ

磁界を加えると歪を生じる磁性材料を磁歪材料と呼ぶ。純 Ni, Fe-Ni 系合金, Fe-Co 系合金, Ni や Zn を添加したフェライトなどが用いられ、その磁歪量は数十 ppm 程度である。超磁歪材料は 1963 年に S.Legvold, J.Alstad, J.Rhyné らによって、希土類元素であるテルビウム (Tb) やディスプロシウム (Dy) が極低温で巨大な磁歪を有することが発見されたことに始まる。それ以降、世界中で研究が行われた結果、1972 年に A.E.Clark や H.T.Savage らによって希土類元素と鉄の合金 (金属間化合物) で常温でも従来の磁歪材料に比べ 2 桁程度大きな 1000ppm レベルの巨大磁歪が発見された。現在では、テルビウム、ディスプロシウム等の合金からなる Terfenol-D⁽⁷⁾ をはじめとしてさまざまな磁歪材料がアクチュエータ用の材料として検討されている。

Fig.1 に超磁歪アクチュエータのモデル図を示す。超磁歪アクチュエータの基本構造は、磁界を発生させるためのコイル、その磁界を効果的に超磁歪素子に伝達するためのバイアスマグネット、超磁歪材料で構成される。コイルにて発生する磁界が変化に伴い、ジュール効果によって超磁歪素子に伸縮駆動が発生する。

高周波電圧をコイルに印加した場合、レンツの法則に従い、超磁歪材料に渦電流が発生する⁽³⁾⁽⁴⁾。渦電流には周波数依存性があり、周波数が高くなると、表皮効果がより顕著となり、素子表面上に電流が流れる傾向が強くなる。この渦電流のジュール損失を低減させるため、超磁歪素子長手方向に絶縁スリットを設ける方法が検討されている。本論文では、絶縁スリットの数が増えるにつれて渦電流のジュール損失に及ぼす影響、さらには電流の周波数変化にともなう渦電流特性の変化について数値シミュレーションを用いた考察を実施する。

3. 解析理論

超磁歪素子に発生する渦電流の解析に際しては、コイルに印加される電圧、すなわちコイルの電流値を計算条件として与え、その際に超磁歪素子に発生する渦電流、さらには渦電流により生じるエネルギー損失を見積もることが重要となる。以下、解析に必要な基礎理論について簡単に述べる。

まず、超磁歪素子の表層を流れる渦電流 J_e は次式により与えられる。

$$J_e = -\sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) \quad (1)$$

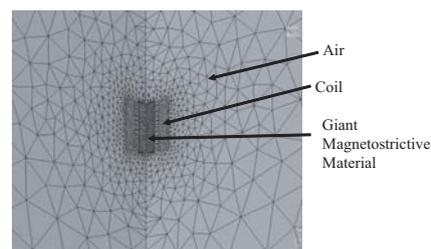


Fig.3 Element division for the air field.

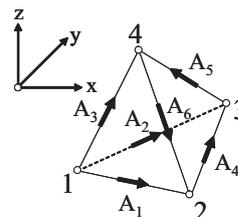


Fig.4 3D side-type linear element.

ここで A は磁気ベクトルポテンシャル、 ϕ は電気スカラーポテンシャル、 σ は超磁歪素子の導電率を表す。コイルに流れる電流を J_0 とすれば、総電流量は J_0 と J_e の和になるから、磁気ベクトルポテンシャル A とのあいだに、

$$\nabla \times (\nu \nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}_0 - \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) \quad (2)$$

なる関係式が成立する。ただし、 ν は透磁率 μ を用いて $\nu = 1/\mu$ と定義される。また、電荷の連続性を考慮すると、渦電流 J_e 、磁気ベクトルポテンシャル A 、電気スカラーポテンシャル ϕ の間に次式が成立する。

$$\nabla J_e = \nabla \left\{ -\sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) \right\} = 0 \quad (3)$$

よって式 (2)(3) を連立して解けば、外部磁場に対して発生する渦電流 J_e ならびに渦電流 J_e より超磁歪材料にて発生するジュール損失を求めることができる。

4. 解析モデル

Fig.1 で示される超磁歪アクチュエータを、Fig.2 のような簡易的なモデルに置き換えて解析を行う。簡易モデルは超磁歪材料とコイルのみからなり、解析モデルの軸対称性を考慮し、全体の 1/4 部分のみをモデル化した。

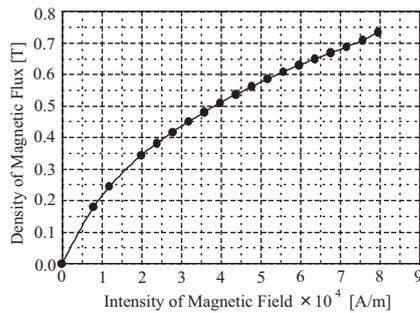


Fig.5 Relation between intensity of magnetic field and density of magnetic flux.

有限要素法を適用するにあたり、超磁歪材料およびコイル部を Fig.3 のように 3 次元 4 面体要素を用いて分割した。また、外部磁場の作用領域に関しては、コイル外径の 5 倍の領域を対象として Fig.3 に示すように要素分割を行った。なお、解析には汎用電磁界解析ソフトウェア JMAG¹ を用いた。

ところで、電磁界解析、特に渦電流の解析では、一般に未知物理量を要素辺上に定義するタイプの要素(辺要素)⁽⁸⁾が持ち入れられることが多い。そこで本研究の FEM 解析では、Fig.4 に示されるような 4 面体における 6 つの辺上に物理変数を定義するタイプの辺要素を用いて解析を行った。

コイルは外径 12[mm]、内径 6.8[mm]、高さ 10.2[mm] であり、コイルの巻き数を 200、抵抗値を 3[Ω] とした。また、超磁歪材料の半径は 4.6[mm] とし、その電気抵抗率は 60×10^{-8} [Ωm] とした。なお、超磁歪材料においては一般に透磁率は一定でなく、磁界 H と磁束密度 B の関係は非線形となる。本論文では ETERMA 社製の超磁歪素子の実測データをもとに、磁界 H と磁束密度 B の関係を Fig.5 のように与えた。

超磁歪素子に誘導される渦電流抑制効果を確認するため、Fig.6 に示すように、超磁歪素子内に絶縁スリットを設けることとする。またコイルに印加する電圧は振幅 50[V]、周波数 10kHz、100kHz、1MHz の sin 波形として与えた。計算は sin 波形 2 周期分の時間について行い、解析全時間を 48 ステップに離散化して数値計算を行った。なお、有限要素への分割に際しては、渦電流の表皮効果を考慮し、Fig.7 に示されるように超磁歪材料の表面部分をより細かく分割した。

5. 数値計算結果

はじめに、渦電流の表皮効果について検討する。電流(磁場)の周波数を f 、超磁歪材料の電気抵抗率を ρ 、透磁率を μ とすると、渦電流における電流浸透深さ δ は以下の式で与えられる。

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0 \mu_r}} \quad (4)$$

ただし、 μ_0 は真空の透磁率、 μ_r は超磁歪材料の比透磁率である。この電流浸透深さは、導体表面にて発生する渦電流が約 0.368 倍に減少する深さとして定義される。

例えば、 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ [H/m]、 $\mu_r = 8.0$ 、 $\rho = 60 \times 10^{-8}$ [Ωm] として 100Hz から 1MHz までの電流浸透深さを計算すると、Table 1 のようになる。すなわち、周波数が高くなるほど渦電流の表皮効果が顕著となることがわかる。

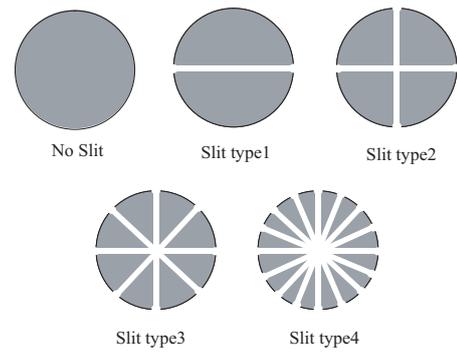


Fig.6 FEM model of magnetostrictive material with slit.

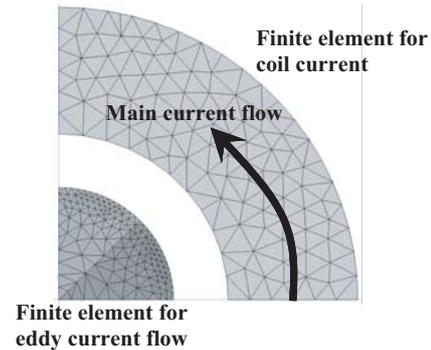


Fig.7 Cross section of FEM model.

Table 1 Thickness of eddy current.

Frequency	100Hz	1kHz	10kHz	100kHz	1MHz
Eddy current thickness[mm]	13.78	4.539	1.378	0.436	0.138

外部コイルに印加する電圧周波数 10kHz の場合について、スリット無しの磁歪素子および Slit Type 3 の磁歪素子における内部の渦電流分布の解析結果が Fig.8, Fig.9 である。なお、両図ともに計算ステップ 8($t = 29.2[\mu\text{s}]$) の場合の結果を図示した。これら 2 つのベクトル図に示されているように、スリットを設けることにより超磁歪素子内部における渦電流の発生が抑制されていることが確認できる。

電圧周波数が 10kHz、100kHz、1MHz の場合について、超磁歪材料のジュール損失を計算した結果を Fig.10 から Fig.12 に示す。10kHz および 100kHz については No Slit および Slit Type 1 から Type 3 までの結果を示している。最も高周波の 1MHz の結果についてのみ、Slit Type 4 の結果を併記した。

周波数 100kHz 以下の結果をみる限り、絶縁スリットを設けることによってジュール損失は抑制されていることが確認できる。総じて絶縁スリット数を増やした場合のほうがジュール損失は小さくなる傾向になるが、電圧周波数が高くなるに伴って表皮効果が顕著に現れるようになり、結果として絶縁スリットの効果は小さくなっている。この傾向は周波数 1MHz になるとより顕著となり、Fig.12 を見る限り、Slit Type 1, 2, 3 の場合は絶縁スリット導入の効果がほとんどみられない。

Table 1 に示すように、1MHz 程度の高周波電圧を印加する場合、渦電流は主に表層の 0.14mm 程度の部分に流れることになる。すなわち、絶縁スリット内部にて渦電流が遮断されず、素子の表層に沿って電流が流れる傾向が強くなり、結果としてジュール損失の抑制効果が失われると考えられる。

¹ JMAG は株式会社日本総合研究所の登録商標である。
<http://http://www.jri.co.jp/pro-eng/jmag/>

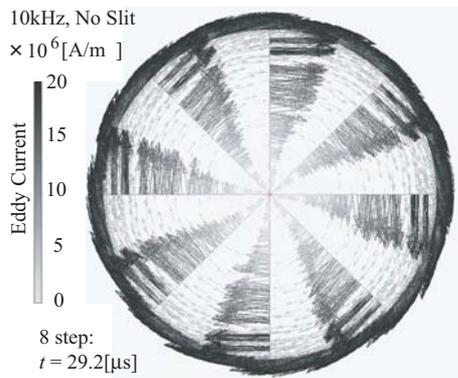


Fig.8 Distribution of eddy current (10kHz, No Slit).

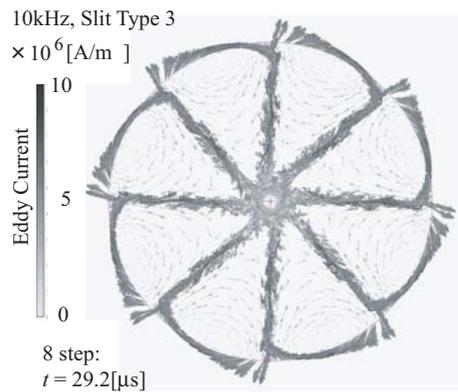


Fig.9 Distribution of eddy current (10kHz, Slit type 3).

ただし、高周波電流 (1MHz) の場合においても、Fig.12 を見る限り、Slit Type 4 ではジュール損失を最大で約 50%程度低減できていることがわかる。絶縁スリット数を増加させると、導体部分における表層の相対面積比が小さくなり、導体内部の絶縁分割部で消費される渦電流が増加する。その結果として高い周波数においてもジュール損失を抑制できるものと考えられる。

6. 結 論

本研究では、有限要素法による超磁歪アクチュエータの電磁場に関する数値シミュレーションを実施し、駆動コイルに与える電流周波数と超磁歪材料に発生する渦電流との関係について、渦電流損失の計算結果をもとに定量的な考察を行った。

渦電流によるジュール損失は、超磁性材料に絶縁スリットを設けることにより抑制可能であるが、コイルへの印加電圧の周波数が高くなるほど、絶縁スリットが損失を抑える効果は小さくなる。しかしながら、円周方向のスリット間隔を電流の周波数に応じて細かくすることで、各導体部分の表面積の相対比率を小さくでき、結果的に高周波電圧が印加された場合についてもジュール損失の抑制効果が期待できることを明らかにした。

謝 辞

本論文の作成に際しては、日本総研ソリューションズ成田氏、森長氏に計算法に関する貴重なアドバイスを頂いた。また、GMM テック株式会社森社長には、ETREMA 社の超磁歪素子特性データに関して貴重な助言を頂いた。ここに記して厚く謝意を表する。

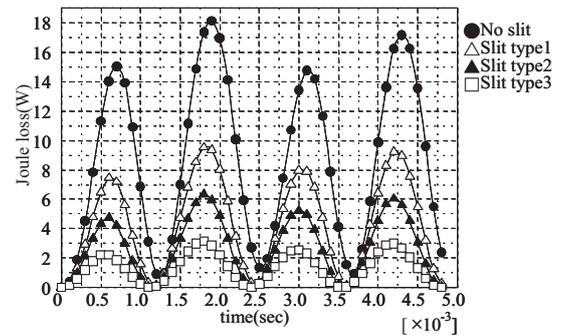


Fig.10 Joule energy loss with 10kHz current.

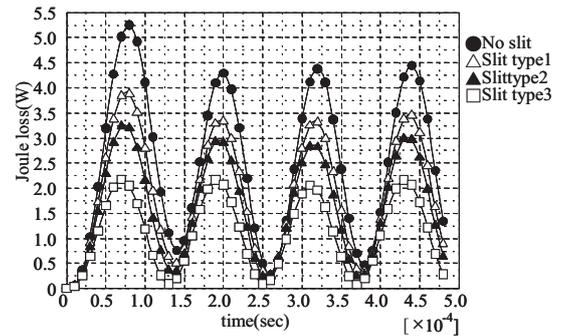


Fig.11 Joule energy loss with 100kHz current.

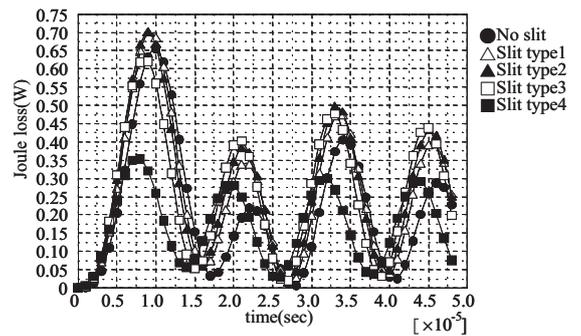


Fig.12 Joule energy loss with 1MHz current.

参考文献

- (1) 森輝夫, 超磁歪アクチュエータ, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.3, 1997, pp.334-337.
- (2) 開道力, モータ技術実用ハンドブック, 日刊工業, 2001, pp.442-447.
- (3) 河瀬順洋, 中村雅憲, 永久磁石電動機の磁石中のうず電流, 東洋電機技報, Vol.110, 2004, pp.41-6.
- (4) 藤田萩乃, 石橋一久, 境界積分方程式による薄導体板のうず電流解析, 日本 AEM 学会, Vol.15, No.2, 2007, pp.P107-112.
- (5) Y. Sakaki, M. Yoshida and T. Sato, Formula for dynamic power loss in ferrite cores taking into account displacement current, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.29, No.6, 1993, pp.3517-3519.
- (6) 高橋則雄, 三次元有限要素法 (磁界解析技術の基礎), 電気学会, 2006, pp.8-10.
- (7) 超磁歪材料 ETREMA Terfenol-D, 株式会社モリテックス, http://www.moritex.co.jp/home/zigyo.main_d022.html.
- (8) 小貫 天, 若尾 真治, 3 次元渦電流場に対する辺要素を用いた有限要素・境界要素結合解法の適用, 日本シミュレーション学会, 11-3, (1992), pp.221-227.
- (9) 電磁界解析ソフトウェア JMAG, 日本総研ソリューションズ, <http://http://www.jri.co.jp/pro-eng/jmag/> (JMAG は株式会社日本総合研究所の登録商標)。
- (10) 山崎克巳, インバータ駆動時のモータ損失解析, 磁気応用シンポジウム, モータ設計者のための磁界解析技術, 2006, pp.B3-1-2 - B3-1-20.