

超磁歪アクチュエータに関する研究

Byungjin Yoo, Masato Hirano, Katsuhiko Hirata

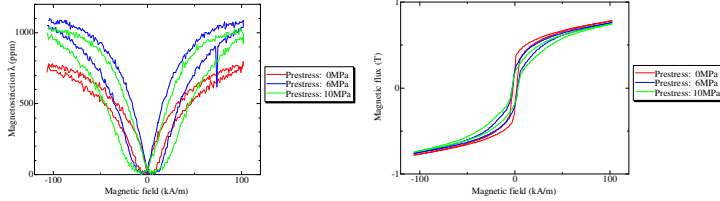
Department of Adaptive Machine Systems, Graduate School of Engineering, Osaka University, Osaka, 565-0871, Japan

Introduction

近年、コンピュータの計算性能の目眩しい発展とともに超磁歪アクチュエータの設計において数値解析による期待が高まっている。従来まで様々な研究が行われてきたが、今まで有効な解析手法はほとんどない。

本研究では、超磁歪材料の磁歪定数と透磁率の非線形性を考慮した、磁界と構造解析が連成された、有限要素法による解析手法の研究を行う。

提案手法の妥当性を確認するため実測結果との比較検証を行う。



Nonlinearity of GMM properties

Analysis Method

Magnetic Field Analysis

磁界解析ではマクスウェルの方程式を磁気ベクトルポテンシャルAを用いて解析を行う。

$$\nabla \times (\nu \nabla \times A) = J_0 + \nu_0 (\nabla \times M) \quad (1)$$

ν : the magnetic reluctivity
 ν_0 : the reluctivity of the vacuum
 J_0 : the exciting current density
 A : the magnetic vector potential
 M : the magnetization of permanent magnet

Mechanical Analysis

構造解析では以下の力の釣り合い式を用いて解析を行う。

$$-\nabla \cdot T = -\nabla \cdot (cS) = -\nabla \cdot (c \nabla u) = b \quad (2)$$

T : the stress tensor
 b : the elastic body force per unit of volume
 c : the stiffness matrix
 S : the strain
 u : the displacement

Modified Equilibrium Equation using Maxwell Stress Tensor

超磁歪材料の解析を行う際には、電磁力に応じたマクスウェルの応力を考慮する必要がある。式(3)のマクスウェルの応力テンソルを用いて力の釣り合い式を書きなおすと式(4)のように書けることができる。

$$T_M = H \otimes B - \frac{\mu_0}{2} (H \cdot H) I \quad (3)$$

$$-\nabla \cdot T = -\nabla \cdot (T_{mech} + T_M) = b_{mech} \quad (4)$$

Constitutive Equations of GMM

本来、超磁歪素子の物理的な特性を表わす式として以下の磁歪素子の磁気・機械変換式が存在する。

$$S = s^H T_{mech} + d^t H \quad (5)$$

$$B = d T_{mech} + \mu^t H \quad (6)$$

ここで、 S はひずみ、 s^H はコンプライアンスマトリックス、 d^t はカップリングマトリックス、 μ^t は透磁率、上付文字 t は転置行列、上付文字 H, T は一定磁界下、一定応力下を意味する。

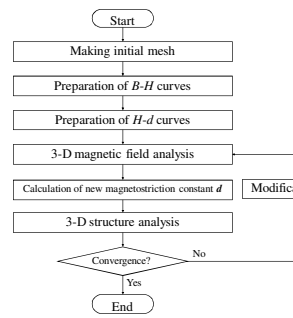
これらの式を解析を行いやすくするために以下のようにひずみと磁束によって応力と磁界があらわされるように変換する。

$$T_{mech} = [c^H - gh^t] S - gv^s B = c^B S + hB \quad (7)$$

$$H = -v^s g^t S + v^s B = h^t S + v^s B \quad (8)$$

ここで、 $g = c^H d^t$ 、 $h^t = -v^s g^t$ 、 $c^B = c^H - gh^t$ である。

Flowchart for analysis

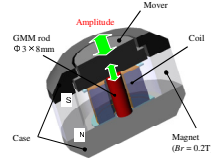


本研究では超磁歪材料の磁歪定数と透磁率の非線形性を考慮することにあたり、実測結果に基づいた磁歪定数と透磁率のデータを用いた。以下の手順に従い解析を行う。

- (1) 解析モデルのメッシュ作成
 - (2) 超磁歪材料の磁歪定数と透磁率のデータを準備する。
 - (3) 3-D 磁界解析を行う。
 - (4) 磁界解析で求められた値を用い、各接点での磁歪定数を計算する。
 - (5) 求められた磁歪定数を用い、構造解析を行う。
- もし計算が収束しなかったら透磁率を再計算し、磁界解析を行う。

Analyzed Model and Condition

Analyzed Model

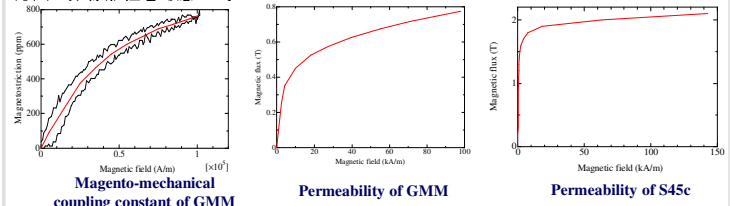


Cross-section view of the analyzed model

Prototype of GMM actuator

Analysis Condition

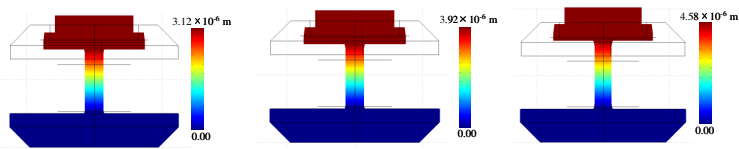
本解析では超磁歪材料の磁歪定数と透磁率の非線形性を考慮する方法として、6次補間関数を用い近似した。また、アクチュエータのヨーク材であるS45Cの透磁率に関しても同様な方法で非線形性を考慮した。



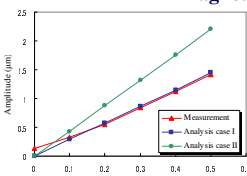
1本解析では超磁歪材料の磁歪定数と透磁率の非線形性考慮の影響を調べるために2つの解析条件で解析を行った。まず、解析条件Iは磁歪定数と透磁率の非線形性を考慮し解析を行った。次に、磁歪定数を従来の解析方法であった一定の値($d_{33}=1.45 \times 10^{-8}$ m/A)を用いた場合の解析条件IIを用いた。両方の解析条件においてコイルに入力電流として0Aから0.5Aを励磁させ、磁気ひずみ量の解析を行った。

Analyzed Result

解析結果より、解析条件Iにおいて超磁歪アクチュエータの振幅は入力電流0.5Aの時、1.46 μ mが予測される。



Magnetostriction contour of analysis case I



Comparison between calculated and measured results

解析結果より、超磁歪材料の非線形性を考慮した解析条件Iが実験結果と良い一致を示していることがわかる。また、磁歪定数を一定の値にした解析条件IIは実測結果と大きく異なる結果が得られた。

提案手法の妥当性を確認した

Conclusion

- 超磁歪アクチュエータの振幅量を予測するため磁気と構造が連成になった解析手法を提案した。
- 超磁歪材料の非線形性を考慮した解析条件と線形と仮定した解析条件を用い解析を行った。
- 実測結果と解析結果の比較より、超磁歪材料の非線形性を考慮した解析条件が実測と良い一致を示していることから、提案手法の妥当性を確認した。