

# 超精密機械加工とその評価技術

## - 超磁歪アクチュエータの温度補償に関する研究 -

菊池 誠\* 小石川勝男\*

### 1. 緒言

本研究は、超磁歪アクチュエータの温度上昇による変位ドリフトを簡易な方法で抑制する一方法を提案する。この方法の基本概念は、超磁歪材料の熱膨張を、対向させた熱膨張材料と加熱用コイルにより打ち消すことであり、著者らは、そのシステムの試作実験とシミュレーションにより、その特性と有効性の確認を試みた。その結果、システムが超磁歪効果の長所を損なわずに、熱膨張による変位ドリフトを抑制できることを確認した。

小さな磁界変化に対応して0.1%以上材料の伸縮が起こる超磁歪材料(以下、GMA という)をアクチュエータとして利用した場合、励磁コイルで発生するジュール熱や渦電流により GMA 内部に発生する熱で GMA が熱膨張する。1) これを防止する為、従来は励磁コイルや GMA 周辺の温度を一定に保つ必要があった。しかし、アクチュエータの小型化や用途の多様化を考慮すると、冷却媒体を利用する恒温装置は高い安定性を実現できる反面、占有容積、重量、部品数の点から問題がある。

本研究は、システムが物理的に破壊しない温度環境内で、熱膨張による変位ドリフトの影響を受け難いアクチュエータの温度補償システムについて提案する。

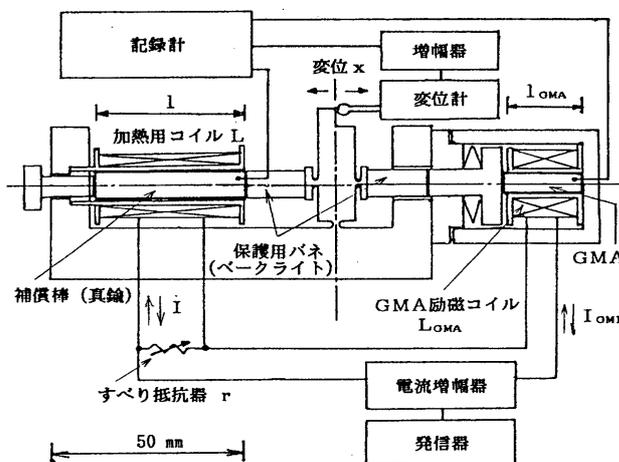


図1 熱膨張補償型超磁歪アクチュエータ  
実験システムの概略

### 2. 温度補償のしくみ

アクチュエータの温度を制御しない場合、アクチュエータの変位には、温度変化に対応した GMA の熱膨張と磁歪効果による伸縮を加算した量が現れる。そこで、図1に示す熱膨張だけを打ち消すシステムを考える。GMA 励磁コイル  $L_{GMA}$  に電流を流すと、GMA が磁歪すると同時に熱膨張する。

この時、GMA は保護用弾性体(ベークライト製)を加圧し、フレームに支点を介して取り付けられた棒(S45C 製)の中間部を

\*機械金属部

押す。これと対向して、磁歪効果のない補償棒(真鍮製)と加熱用コイルLで加熱器を構成しLGMALのコイルに流す電流IGMALを電氣的に設定することでGMAの熱膨張は打ち消され、GMAによる磁歪だけが変位xに現れる。(以下、この考えを基礎とする超磁歪アクチュエータを熱膨張補償型超磁歪アクチュエータという)

### 3. 温度補償の実験

図2に試作したシステムの外観を示す。実際に試作したシステムを使用し、抵抗値rを計算で設定し、正弦波(振幅0~1A,周波数1Hz)入力として補償前、補償後の変位xを測定した。

さらに、システムの入力信号の周波数変動に対する補償性能(図4)、入力信号の振幅変動に対する補償性能(図5)を調べた。この時、補償性能を評価する為に誤差関数εを次式で定義する。

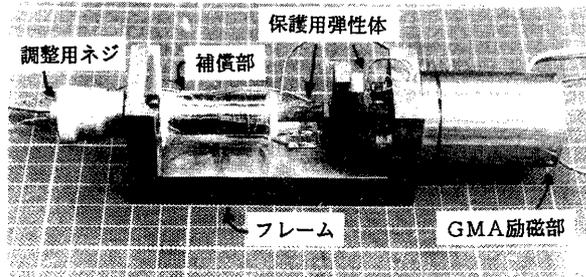


図2 熱膨張補償型超磁歪アクチュエータの実験モデル

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{e_o^2 + e_v^2}}{e} \quad (1)$$

ここでeoは図3(C)の理想特性からの行き過ぎ量、euはt=1600secの理想特性との差、eは理想特性における平均値を意味している。

次に、抵抗値rを簡単に計算する為に次の条件を仮定した。「GMA励磁部と補償部とは熱的に影響がない」、「システムの温度上昇は物理的に破壊しない程度」、「GMAと補償棒の熱伝導率はほぼ等しい」とした。基本概念から、GMAの熱膨張と補償器の熱膨張がくバランスするように、図1のコイルLc琳とコイルLに電力を供給する。このときの滑り抵抗器(0.3~140 )の抵抗値rは次式で与えられる。

$$r = \frac{R}{\sqrt{\frac{m_G C_G \alpha l R \eta_G}{m C \alpha l_G R_G \eta} - 1}} \quad (2)$$

ただし、Rは加熱用コイルLの直流抵抗、mG, CG, G, lC, フフGはGMAの質量、比熱、線膨張率、長さ及びGMA励磁コイル損失であり、m・C, , 1, #は補償棒の質量、比熱、線膨張率、長さ及び加熱用コイル損失である。実験では、理論値としてr=5.0を採用している。実験結果を図3に示す。実験には電流増幅器(HOKUTO DENKO Ltd.製HCP-301H)、データレコーダ(YOKOGAWA製mode1 3655E)、発信器(NF回路設計ブロック社製1732)、静電容量形変位計(東京精密製MODELE-MD-M)、計測用増幅器(著者ら製作、利得20dB)を使用した。

#### 4. 結果と考察

図3 (A)はGMAの温度, (B)は補償棒の温度を示している。(A)のa, (B)のaから条件(1)を満足することが理解できる。また, (C)のa, b, cは測定した値の移動平均処理結果である。(C)のaは補償前の変位 $x$ の値を示しており, GMAの熱膨張により変位 $x$ がドリフトしている。対し, 抵抗値 $r$ を理論値とした(C)のbは補償後の変位 $x$ の値を示しており, 定常状態ではドリフトが抑制されている。さらに, (C)のcは抵抗値 $r$ を理論値から微調整した結果を示し, (C)のbと比較してさらにドリフトが減少していることが理解できる。また, 過渡状態では(C)のb, cに行き過ぎが見られる。これは, GMAと補償棒の熱伝導率( $\lambda_{GMA}=2.5W/mK$ ,  $\lambda_{棒}=106W/mK$ )<sup>3)</sup>が異なる為, 条件(3)を満足しなかった為と考えられる。そこで, 過渡特性を調べる為, 後にシミュレーションを行った。

図4は, 入力信号の周波数変動が補償性能に与える影響を示している。周波数が10Hzまでは誤差にあまり影響しないが, 100Hzでは誤差は減少している。図5は, 入力信号の振幅変動が補償性能に与える影響を示している。電流の振幅が大きくなると誤差も増加している。原因は, コイル $L_{GMA}$ コ

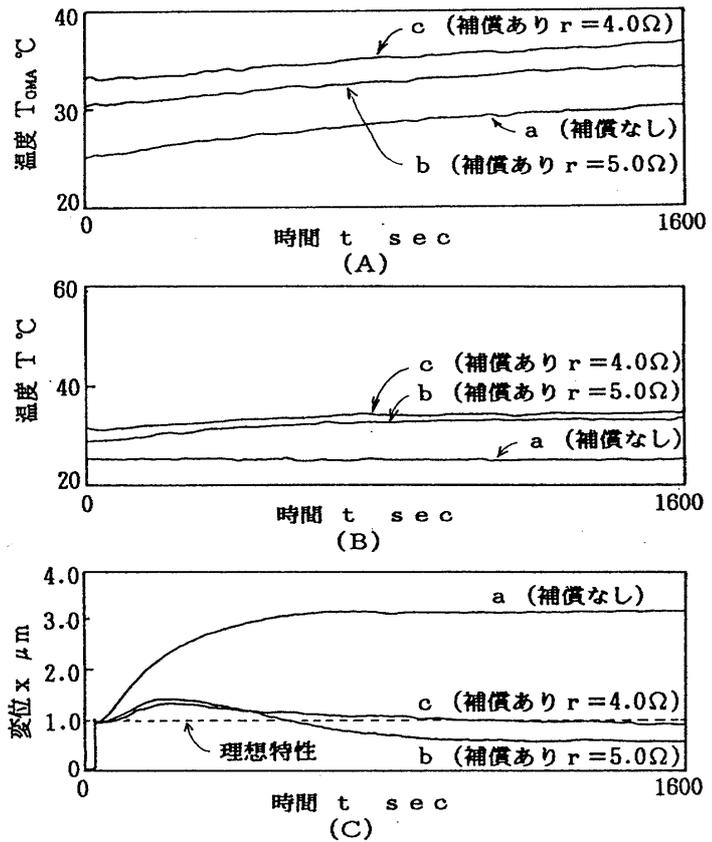


図3 熱膨張補償の効果(GMA及び補償棒の温度と変位 $x$ の時間的变化, 条件:  $I_{GMA, r-p}=1A$  一定,  $f=1Hz$  正弦波)

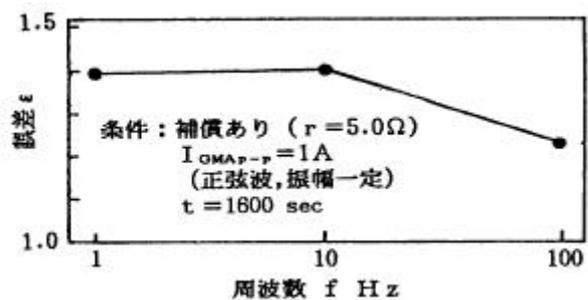


図4 入力信号の周波数変動が誤差に及ぼす影響

イルLの損失

が電流振幅によって変動する為と推測できる。

### 5. 過渡状態のシミュレーション

条件 が成立しない場合を仮定し,GMAと補償棒の熱膨張を2次元の有限要素法4)で各々計算し,その差から変位 $x$ の値を計算した。実際,材料が円柱形である為両端面は均一膨張せず,最大長を示す端平面上の場所が変化する。この為,変位 $x$ は,単に線膨張として計算した値とは異なる。ここでは,境界条件は,内部からの発熱が無い横長矩形断面で,周囲温度 $25^{\circ}\text{C}$ ,下上端面から一定の熱量が供給されると仮定した。その結果を図6に示す。これは,図3(C)b, cの過渡状態の傾向とほぼ一致している。

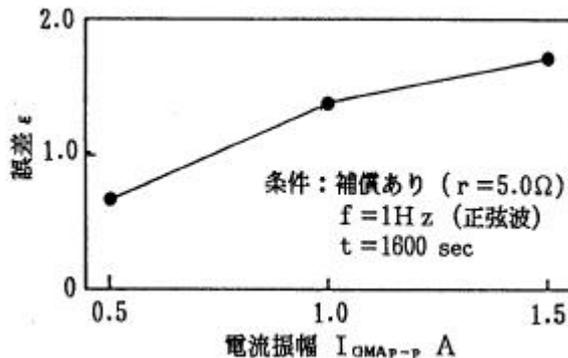


図5 入力信号の電流振幅が誤差に及ぼす影

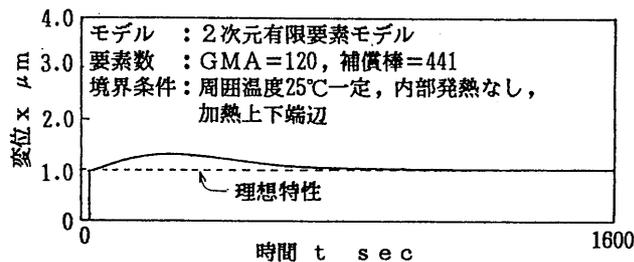


図6 システムの過渡特性の考慮した変位 $x$ のシミュレーション

### 6. 結言

本研究で提案した温度補償法は,恒温装置を使用しない簡易的なものではあるが,電氣的に平衡がとれる利点もあり,小型軽量で大きな磁歪を得る熱膨張補償型超磁歪アクチュエータの温度補償法として,実験結果から,その効果が確認できた。さらに,過渡状態の特性にGMAと補償棒の熱伝導率が影響していることがシミュレーションより確認できた。今後は,電氣的に過渡特性を制御することで安定性を高めると共に小型化,高剛性化が課題である。

#### 参考文献

- 1) 江田 弘他3名:「超磁歪アクチュエータに関する研究」精密工学会,57,3,(1991),532
- 2) 電気工学会編:電気工学ハンドブック,(1978)
- 3) 国立天文台編:理科年表,丸善,(1990)
- 4) 小竹,土方:「熱と流れ」,丸善,(1988)