

MEMS用疲労耐久試験機の開発

荻野重人*

Development of Endurance Tester for MEMS

OGINO Shigeto*

抄録

近年、MEMSの機械的評価の必要性が増しているが、その評価方法・評価測定機は確立されてはいない。MEMS用疲労耐久試験機には高分解能・高剛性・高耐久な微小変位アクチュエータが必須であり、従来からのピエゾアクチュエータでは剛性等から難しい面があった。そこで、変位発生源として超磁歪素子を用い、高剛性であり正確な変位検出機能を持つ微小変位アクチュエータを開発した。そして、このアクチュエータをテストスタンドに取り付け、MEMS用疲労耐久試験機を試作した。

キーワード：MEMS，疲労試験，超磁歪素子

1 はじめに

半導体デバイスプロセス技術の微細化はとどまることなく、日々進化を続けている。この技術を応用して基板のシリコンウェハや薄膜に微小な構造体を作製するマイクロマシニング技術が広く研究されている¹⁾。これを用いて作製した微小なセンサやマイクロマシンはMEMS(Micro Electro Mechanical Systems)と呼ばれていて、近年、実用化も進んできている。

微小サイズでは材料の性質が通常サイズと異なることに注意する必要がある。通常サイズでは脆性材料であるガラスが微小サイズになると、弾性の性質を示すようになり、このことは寸法効果と呼ばれている。そのため、MEMSのような微小構造体になると寸法効果が現われ、通常サイズの材料とは異なった性質を示すようになる。そのため、MEMS材料は予想していたものと異なる

機械的性質になることが考えられ、実際にMEMSの機械的性質を評価するための測定機が必要になる。

MEMS用部材の代表的サイズは0.1～100 μm と想定され、その機械的評価には、アクチュエータ変位量：60 μm 以上、位置分解能：0.01 μm 、駆動周波数：数10Hz、荷重分解能：10 μN が必要で、通常材料試験機に比べ極めて高い精度が必要となる²⁾。

従来からあるピエゾアクチュエータをMEMS用疲労耐久試験機に適用した場合、別途、変位センサが必要になる。高精度な変位センサとして静電容量型変位センサがよく用いられるが、非接触測定方法なため、被測定物との剛性確保が難しく、高い周波数でピエゾアクチュエータを駆動した時、不要振動により正確な測定ができなくなる。さらに、ピエゾアクチュエータの構造上変位センサを同軸上に取り付けることは難しく、アップの原理から考えても精度上不利である。

* 電子情報技術部

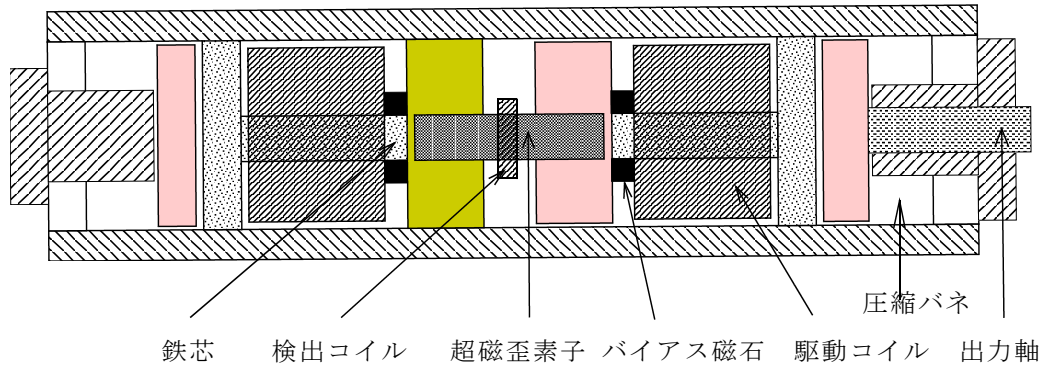


図1 超磁歪アクチュエータ断面図

そこで、当センターが持つ「超磁歪素子の精密位置決め制御技術」を MEMS 用疲労耐久試験機の変位発生アクチュエータに応用した。

2 実験方法

2.1 超磁歪アクチュエータの製作

MEMS 用疲労耐久試験機のためのアクチュエータの製作を行なった。超磁歪素子の両側から電磁石で磁力をかけるようになっており、その変位が出力軸に出力される。圧縮バネ4個 (20kg) により出力軸に予圧がかかるようになっていて剛性を高めている。この駆動コイルの配置により、検出コイルの設置を可能にしており、検出コイルにより超磁歪素子の変位量がモニタリングできるようになっている。超磁歪アクチュエータの全ストローク領域において検出コイルの変位量と実際の変位量を一致させるためには図2の一致領域内³⁾で駆動させる必要がある。そのためには超磁歪素子にあらかじめバイアス磁力をかけ、一致領域内に入れておきこの領域内を駆動コイルで作動させるようにした。

図3のように駆動コイル単体において発生磁力テストを行ない、最適バイアス磁力値・最適駆動電流値の決定を行なった。

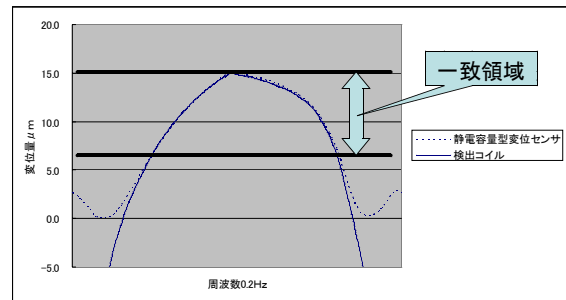


図2 駆動コイルの発生磁力テスト

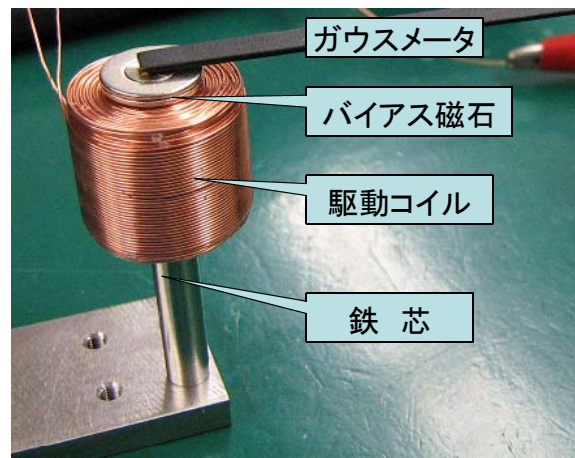


図3 駆動コイルの発生磁力テスト

2.2 超磁歪アクチュエータの特性評価

図4のように静電容量型変位計と超磁歪アクチュエータを対向させ、駆動コイルに±0.7Aの正弦波電流を流した時の静電容量型変位計の変位量を測定した。さらに、1～180Hzまでの振幅の変化を記録し、グラフにプロットした。

また、駆動コイルへ振幅を変えた微小の矩形波を入力し、検出コイルの分解能試験を行なった。

<測定機>

静電容量型非接触微小変位計

(日本A D E社製 MicroSense3401HR-01)

- ・測定フルスケール± 25μm
- ・分解能 0.0025μm
- ・周波数応答 40kHz

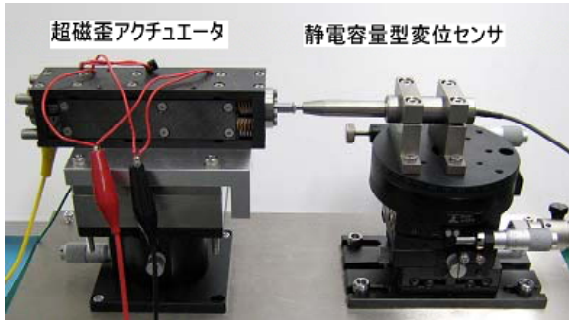


図4 超磁歪アクチュエータ特性試験

2.3 MEMS用疲労耐久試験機の試作

開発した超磁歪アクチュエータを用いて、MEMS用疲労耐久試験機の試作を行なった。MEMSは微小構造体なので、顕微鏡により測定子の位置決めを行なう構造とした。

3 結果及び考察

3.1 超磁歪アクチュエータの製作

超磁歪素子を一致領域の範囲内において駆動させるためには、800 ~ 1600 Gの範囲内³⁾で駆動コイルの磁力を発生させる必要がある。そのため1個当たりの駆動コイル仕様を以下のように決定した。

<駆動コイル1個当たりの仕様>

- ・コイル巻数：900T
- ・コイル抵抗：5.9 Ω
- ・駆動コイル電流値：± 0.35 A
- ・バイアス磁石：発生磁力 1200G (ネオジム Φ 14 × Φ 6 × 2mm)

駆動コイルの発生磁力確認を行なったところ、図5のような結果となった。最少値 765G、最大値 1625G となった。この駆動コイルを超磁歪アクチュエータに用いれば超磁歪素子に片側 1200Gものバイアス磁力をかけることができる。超磁歪

アクチュエータを最大変位量にするときでも、駆動コイルは 400G 発生させるだけでよく、この時の駆動電流はわずか 0.35A となる。さらに、バイアス磁力と反対方向の磁力をかければ打ち消すことができるので、最少変位量にするときは-400G 発生させればよい。このようにすれば、わずか 0.35A (最大) で 800G ~ 1600G の範囲の任意の値とすることができる。さらに、超磁歪アクチュエータの全てのストローク範囲において変位量のモニターが可能になった。

この設定の駆動コイルの発熱量 H は

$$H=R \times I \times I^4$$

であるから、0.72J と低い値に抑えることができ、熱膨張による超磁歪アクチュエータの変位変化を防止することができる。

超磁歪アクチュエータのサイズは 125mm × 34mm × 34mm とコンパクトなアクチュエータとなり、重量も 800 g となっている。

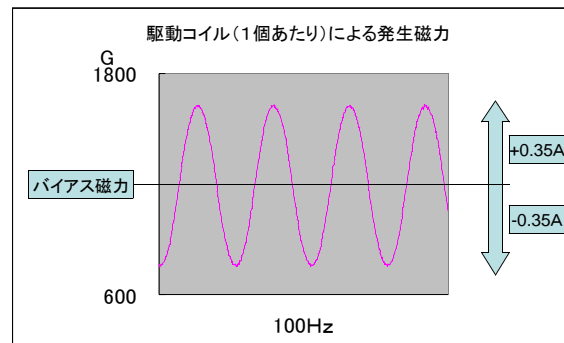


図5 駆動コイルの発生磁力

3.2 超磁歪アクチュエータの特性評価

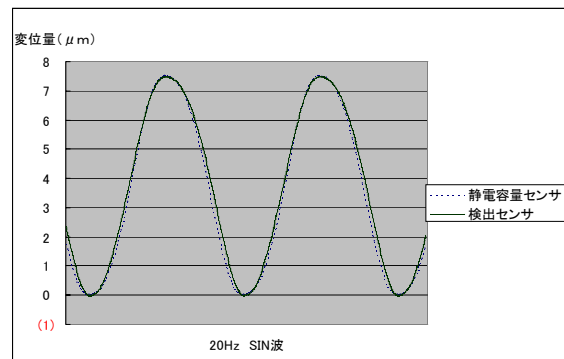


図6 駆動電流±0.7A時の各センサ出力

結果を図6に示す。超磁歪アクチュエータの駆動電流値が $\pm 0.7A$ ($\pm 0.35 A \times 2$ 個の駆動コイル)の時、変位量は最大となり $7.5\mu m$ となった。そして、検出コイル出力と実変位量である静電容量型変位センサの出力が、ほぼ一致しているのが分かる。

次に、周波数の違いによる振幅の変化の結果を図7に示す。超磁歪アクチュエータの振幅が一定の範囲は $70Hz$ までとなっている。 $100Hz$ では $8.0\mu m$ と6%ほど増加していて、 $150Hz$ 付近に共振ポイントがあるのが分かる。これは、超磁歪素子に予圧をかけるための圧縮バネが等ピッチなものを使用しているために、固有振動数が低いだけと考えられる。一般的にバネの固有振動数を上げたい場合、不等ピッチの圧縮バネを用いることが多いので、これに交換することにより応答周波数を上げることが可能になると考えられる。

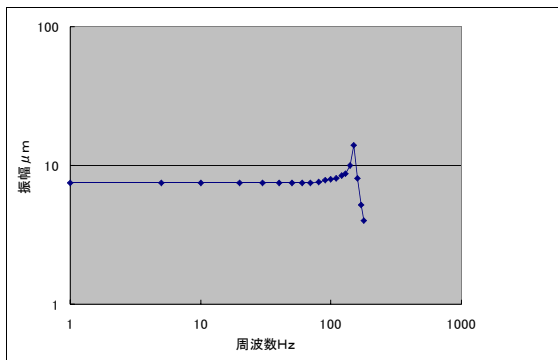


図7 周波数による振幅の変化

検出コイルによる超磁歪アクチュエータの分解能結果を図8に示す。分解能は約 $3nm$ となっている。MEMS用疲労耐久試験機の性能をアピールする上で、分解能は高い方が望ましいが、実用上はMEMS用疲労耐久試験機の想定振幅が $30\mu m$ 以上であるので、 $3nm$ で十分であると考え。実際にMEMS用疲労耐久試験機としてテストを行ない $3nm$ の分解能で不具合が出た場合でも、現在 300 巻の検出コイルの巻数を増やせば分解能の向上は可能である。

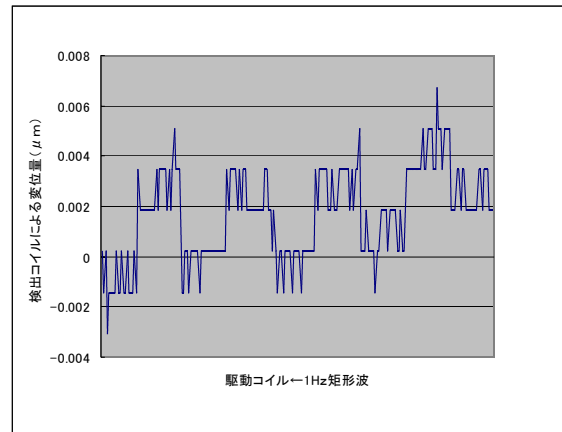


図8 超磁歪アクチュエータの分解能

3.3 MEMS用疲労耐久試験機の試作



図9 MEMS用疲労耐久試験機全体図

図9にMEMS用疲労耐久試験機の全体図を示す。

図10に示すように、超磁歪アクチュエータと荷重計と測定子が同軸線上に配置されている。試料設置ステージが左右にスライドできる構造になっていて左右のそれぞれの停止箇所は、測定子先端と顕微鏡中心が一致するようになっている。顕微鏡により被測定MEMSの測定位置を決め左にスライドすると測定箇所測定子が位置する。この測定子は角度 60° の円錐であり、先端Rは $10\mu m$ である。この測定子により片持ち梁形状の

MEMS 測定試料に振幅のある変位を与え、その時の荷重を読み込むことにより、疲労耐久試験を行なう。

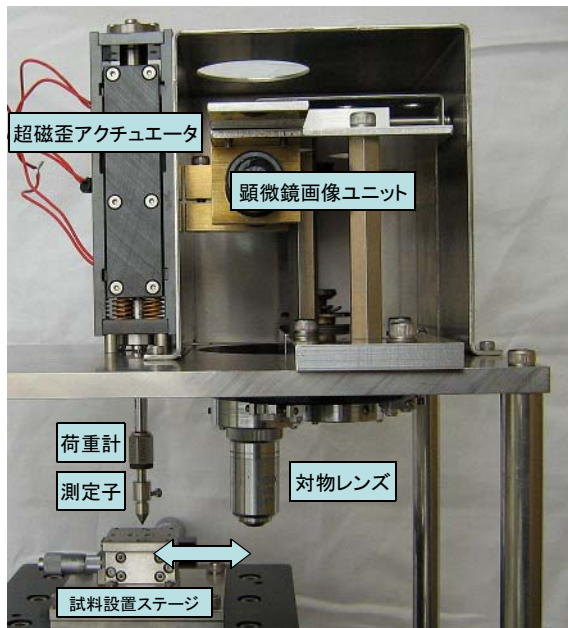


図 10 MEMS 用疲労耐久試験機

4 まとめ

(1) MEMS 用超磁歪アクチュエータの開発

- ①最大変位量 $7.5\mu\text{m}$ の全ての変位量モニタが、可能になった。これにより、変位センサと一体型アクチュエータとすることができた。
- ②応答周波数70Hzを達成しており、現存の電磁アクチュエータ式疲労耐久試験機に比べ、およそ10倍の高速化が可能になった。これにより、試験時間の大幅な短縮をはかることが可能になる。
- ③分解能は3nmであるが、振動の影響を受けないので実使用した場合の分解能は、他の変位センサに比べ優位性が高い。

超磁歪アクチュエータは出力軸に 20kg の予圧がかけられており、この予圧は超磁歪素子はもちろん、超磁歪アクチュエータの変位出力系全てにかかり、剛性の非常に高いものとなっている。その高い剛性の出力系にある超磁歪素子に、重量がわずか 0.04g しかない検出コイルが一体となって

取り付けてあり、超磁歪素子の磁力の変化のみを変位量に換算しているため、振動を拾うことは全くない。このことは、装置自体が数 10Hz で振動している疲労耐久試験機においては絶対的なアドバンテージをもつものである。さらに、アクチュエータ出力軸・超磁歪素子・検出コイルが同軸線上に並んでいるので精度的にも有利である。

(2) MEMS 用疲労耐久試験機の試作

MEMS 用疲労耐久試験機の想定最大振幅量は $60\mu\text{m}$ ほどと考えている。超磁歪アクチュエータ単体の変位量は $7.5\mu\text{m}$ であり変位量は絶対的に不足している。そのため、MEMS 用疲労耐久試験機を実用化するためには、変位拡大機構の開発が大前提となる。現在、拡大機構の原理動作確認を行なっており、次段階として速やかに試作機製作を行なう予定である。そして、試作変位拡大機構をMEMS用疲労耐久試験機に搭載し、実測定テストを行なって行きたい。

参考文献

- 1) 豊田中央研究所 R&D レビュー Vol.34 No.1 (1999.3)
- 2) 高島和希、肥後矢吉、杉浦眞佐、M. V. Swain: MEMS 用ミクロンサイズ超微小材料に対する疲労および破壊靱性評価試験装置の開発、まてりあ, vol.40, no.2, pp.184-186, (2001)
- 3) 荻野重人: 微小変位制御装置およびそれを用いた装置と方法, 特開 2005-331450
- 4) 折笠国光他: 電磁気学, コロナ社, (1987) 29