小型 2 次元光走査機構の開発*

(第 2 報, 低電圧駆動, 大走査角化を目的とする 2 自由度板ばね振動子の高性能化)

後 藤 博 史^{*1}, 池 田 正 哲^{*2}
坂 田 稔^{*2}, 今 伸 行 一^{*2}

Development of Miniature Two-Dimensional Optical Scanner (2nd Report, Improvement of Two-Dimensional Leaf Spring Resonator for Low Voltage Drive and Wide Scanning Angle)

Hiroshi GOTO, Masaaki IKEDA,
Minoru SAKATA and Kohichi IMANAKA

We describe the improvement of a miniature two dimensional optical scanner for wide area optical scanning and low voltage driving. First, the bending and torsional fracture stresses of a fine leaf spring made of single crystal silicon were experimentally determined. They were 1 GPa for bending fracture and 0.3 GPa for torsional fracture, and a fatigue fracture tendency was also observed. Based on the determined fracture stresses, an improved two dimensional fine leaf spring resonator, wherein the wing part of the previous resonator was removed to reduce air resistance, was developed. Also, an additional mass was put on the mirror to create torsional and bending moments. Secondly, the shape of a moonie actuator, which magnifies the transverse strain of a piezoactuator more than 10 times, was optimized by FEM analysis to produce a large displacement with a low voltage drive. Consequently, a miniature two dimensional optical scanner 5 mm × 10 mm × 2.2 mm in size was developed, which can scan from forty degrees to eighty degrees with a 15 volt drive.

Key Words: Optical Scanner, Piezoelectric Actuator, Micromachining, Two Degrees of Freedom, Resonator, Silicon, Resonance Vibration, Q Value, FEM, Fracture Stress

1. はじめに

半導体レーザ, 光ファイバ, 微小光学素子技術の進展にともなって, 光学装置の小型化, 高性能化, 低価格化が急速に進展している. こうしたなかで光センサの分野においては, 小型化と検出性能の向上と同時に, バーコードリーダで代表されるように検出情報の多次元化への取り組みが図られてきている. このために, 光センサの投光, 受光光学系の小型化や高性能化のほかに, 光を多方向に走査する走査機構の小型化が必要となっている. こうしたことからわれわれは, 2 自由度板ばね振動子を 1 つの圧電アクチュエータで共振駆動して光を 2 次元に走査する新しい原理の小型 2 次元光走査機構を開発し, その基本特性について第 1 報で報告した¹⁾.

この光走査機構を走査型光センサとして実用化するためには, 走査角度を大きくして検出可能な範囲を広

くすること, および走査機構の駆動源を小型化すると同時に駆動電圧を低減し走査機構全体の小型化と電源の小型化を図ること, の 2 点が必要である. そのため本報では, まず単結晶シリコンでできている 2 自由度板ばね振動子の心臓部である板ばねの破壊強度を求める実験方法と実験結果を述べ, 板ばね振動子設計における破壊強度設計基準を示す. 次に, 走査角度を拡大し高感度化するための空気抵抗を低減した 2 自由度板ばね振動子設計法と, 駆動電圧を低減するための新しい圧電アクチュエータの構成と試作実験結果について述べる. 最後にこれらの改良を加えた小型 2 次元光走査機構の性能実験結果について述べる.

2. 単結晶シリコン板ばねの破壊応力

2.1 単結晶シリコン板ばねの形状 図 1 に前報で開発した小型 2 次元光走査機構を示す. この機構の 2 自由度振動子は厚さ 150 μm の単結晶シリコンでできしており, その板ばね部分の平面写真を図 2 に示す. この板ばねは, 全体形状を直方体とするためにウエーハ面を (1 1 0) 面とし, 板ばね側面が (1 1 1) 面となるように水酸化カリウム水溶液中で異方性エッチング

* 原稿受付 1995 年 12 月 18 日.

^{*1} 正員, オムロン(株)中央研究所(〒300 42 つくば市和台 45).

^{*2} オムロン(株)中央研究所.

して製作した。しかし異方性の影響によって図2で明らかなようにその根元には左右で角度の異なる傾斜部ができた。この根元部分の写真を図3(a),(b)に示す。図3(a)は単結晶シリコンの鏡面が残っている表側から見たもの、図3(b)はエッチングによって表面が粗くなりシリコン結晶粒が見える裏側から見たものである。この図からも明らかなように、この傾斜部は単結晶シリコン基板表面に対して直角に形成されているのではなく、ある角度をもって斜めに形成されていることがわかる。

なお、板ばねの主軸方向は上述のような結晶面配置から $[1 \ -1 \ 2]$ となる。

2.2 単結晶シリコン板ばねの破壊状態と破壊応力の求め方 単結晶シリコン板ばねの、曲げおよびねじりによる破断面の代表的形状を図4(a),(b)に示す。曲げ変形においては、図4(a)に示すようにほとんどの試料片が板ばねの根元からシリコンのへき界面に沿って破壊した。曲げ変形では、はりの根元に最大引っ張り応力が加わるため、この根元から破壊したものと考えられる。さ

らに、このはりの根元部分から前節で述べた傾斜部が始まるため、断面形状の変化による応力集中も発生していると考えられる。一方ねじり変形では、破壊箇所はばらつき、その破断面形状も図4(b)のようにへき界面に沿ったものではなかった。これは、ねじり変形でははりの表面全体に均一なせん断応力が加わるために、クラックやエッチングによる表面荒れにより最も応力が集中する箇所から破壊したことによるものと考えられる。このように板ばねの曲げ変形およびねじり変形による破壊では、断面形状の変化、クラック、あるいはエッチングによる表面荒れなどによる応力集中が生じていると考えられるが、これらを考慮することは素材の単結晶シリコンが異方性であることもあって極めて困難である。またここでは異方性エッチングで製作したシリコン板ばねの設計の目安となる破壊応力を求めることが目的であるので、実際の2自由度板ばね振動子をそのまま用いて曲げ変形とねじり変形を与え、応力集中を考慮しないで板ばねが破壊したときの変形量から単純に材料力学的に求められる応力を破壊応力とすることとした。

Fig. 1 Miniature two dimensional optical scanner (1)

Fig. 2 Shape of a fine leaf spring.

Fig. 3 The etched state of a leaf spring base, (a)from the mirror surface side, (b)from etched surface side.

Fig. 4 Example of fractured single-crystal silicon leaf springs, (a)Bending fracture, (b)Torsional fracture.

以上の前提のもとに実験を行なって次に述べる方法で破壊応力を求めた。2自由度板ばね振動子の曲げ、またはねじりの共振周波数で圧電素子を駆動し、板ばね振動子を共振振動させる。圧電素子の加振振幅を徐々に増加させていき、振動子板ばね部が破壊した時の振動子の曲げ振動振幅 θ_B 、またはねじり振動振幅 θ_T を振動子で反射した光の走査幅から求める。求めた振動振幅からそのとき板ばねに生じていた曲げ応力 σ_B 、またはねじり応力 σ_T を式(1)から求める。

$$\sigma_B = \frac{Eb\theta_B}{l}$$

$$\sigma_T = \frac{Gbk_2\theta_T}{lk_1} \quad (1)$$

ここで、 l は板ばねの長さ、 b は厚さ、 k_1 、 k_2 は板ばね断面形状で決まる定数で、たとえば板ばねの幅と厚さの比が2の場合には $k_1=0.2459$ 、 $k_2=0.2287$ である⁽¹²⁾。また、 E 、 G は材料の応力作用軸方向に関する縦弾性係数、横弾性係数であり、次の式(2)⁽¹²⁾から求められる。

$$\frac{1}{E} = S_{11} - 2 \left\{ (S_{11} - S_{12}) - \frac{1}{2} S_{44} \right\} (l_1^2 l_2^2 + l_2^2 l_3^2 + l_1^2 l_3^2) \quad (2)$$

$$\frac{1}{G} = S_{44} + 4 \left\{ (S_{11} - S_{12}) - \frac{1}{2} S_{44} \right\} (l_1^2 l_2^2 + l_2^2 l_3^2 + l_1^2 l_3^2)$$

ここで l_1 、 l_2 、 l_3 は、応力軸の結晶座標軸に対する方向余弦、 S_{11} 、 S_{12} 、 S_{44} は単結晶シリコンのコンプライアンスである。このコンプライアンス S_{ij} 、 $i, j=1 \sim 6$ とステイフネス $[C_{ij}]$ 、 $i, j=1 \sim 6$ との間の関係式(3)⁽¹³⁾より、また単結晶シリコンの $[100]$ 結晶軸に対するステイフネステンソル $[C_{ij}]$ (GPa)、 $i, j=1 \sim 6$ は式(4)から求められる。

$$S_{11} = \frac{(C_{11} + C_{12})}{(C_{11} - C_{12})(C_{11} + 2C_{12})}$$

$$S_{12} = \frac{-C_{12}}{(C_{11} - C_{12})(C_{11} + 2C_{12})} \quad (3)$$

$$S_{44} = \frac{1}{C_{44}}$$

$$\begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_6 \\ t_3 \end{bmatrix} = [C_{ij}] \begin{bmatrix} e_1 \\ \vdots \\ e_6 \\ g_3 \end{bmatrix}$$

$$[C_{ij}] = \begin{bmatrix} 166 & 64 & 64 & 0 & 0 & 0 \\ 64 & 166 & 64 & 0 & 0 & 0 \\ 64 & 64 & 166 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 80 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 80 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 80 \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.3 単結晶シリコン板ばねの破壊応力 表1に、光学顕微鏡と電気マイクロメータを用いて測定した2自由度板ばね振動子の板ばね部分の寸法を示す。これらの値と前節に述べた式から破壊応力を求めた。

曲げ変形に関する破壊応力 σ_B を図5(a)に、ねじり変形に関する破壊応力 σ_T を図5(b)に示す。曲げ変形に関しては、破壊応力は1GPaから3GPaの範囲でばらつき、平均値は2GPaとなった。また、板ばねの長さ、厚さに関する破壊応力への依存性は見られなかった。一方ねじり変形に関しては、およそ0.3GPaから0.65GPaの範囲でばらつき、その平均値は0.4GPaとなった。また曲げ変形と同様に板ばね形状の破壊応力への依存性は見られなかった。なお、試料の不足からねじりの2.65mmのデータは取れなかった。

以上の結果から、 (110) 方位の単結晶シリコン板ばねの応力は、曲げ方向で1GPa以下、ねじり方向で0.3GPa以下にすることが破壊しないために不可欠であることがわかった。

この得られた応力値から、単結晶シリコンの板ばねが破壊しないための寸法について検討した。光の走査角度を40度および60度として、曲げ応力およびねじり応力がそれぞれ1GPa、0.3GPaを越えない板ばねの長さ l と厚さ t の関係を図6(a)、図6(b)に示した。それぞれの直線の下側が安全領域である。なお、ねじり変形に関しては断面形状を正方形とした。このときの k_1 と k_2

Table 1 Dimension of tested leaf springs.

Dimension of Leaf Spring	Measured Results (mm)
Length	1.15, 1.65, 2.15, 2.65
Width	0.027, 0.048, 0.068
Thickness	0.07, 0.095

Fig. 5 Experimental fracture stresses, (a) Bending, (b) Torsional.

の値はそれぞれ $k_1=0.2082$, $k_2=0.1406$ である。図6の結果から板ばねを破壊しないようにするには、できるだけ長く細くすることが必要であり、例えば厚さ $100\mu\text{m}$ の場合には 5mm 以上の長さが必要となる。

なお本研究での板ばねは、根元形状に不連続面があることやエッチング面の表面荒れにより局部的な応力集中を生じている可能性が非常に高い。そのため強度向上には、これらの応力集中を生じさせない板ばね形状の検討や加工精度の向上が重要であると言える。

次に、単結晶シリコン板ばねの疲労について検討した。マニピレータで強制的に曲げ変形を与え、加える歪み速度を変化させて、歪み速度と破壊応力の相関を調べた。その結果を図7に示す。破壊応力は歪み速度の増加とともに増大する傾向が見られた。この図から動的疲労の度合いを表す n 値⁽⁵⁾を求めると約1.4となり、疲労破壊しにくい素材である窒化珪素の n 値50~100に比べ約1/4~1/6となり、疲労破壊しやすいガラス材の n 値20とほぼ類似の値となった。このことは、歪み速度によって応力腐食割れによる破壊の進展が影響を受けることを示しており、単結晶シリコン板ばねが疲労破壊しやすい傾向にあることがわかった。

Fig.6. Relationship between the fracture stress and dimension of a leaf spring, (a)for bending ($\sigma_B < 1\text{GPa}$), (b) for torsional ($\sigma_T < 0.3\text{GPa}$).

Fig.7. Relationship between strain velocity and fracture stress.

3. 2自由度板ばね振動子の高感度・大走査角化

3.1 空気抵抗の軽減による走査角度の拡大 前報で、2自由度板ばね振動子は走査角度が大きくなるほど空気抵抗の影響を大きく受けること、そのため圧電アクチュエータの加振振幅を大きくしても走査角度がそれほど大きくならず、曲げ方向で16度、ねじり方向で10度にとどまることを報告した。したがって、同じような走査性能を持つポリゴンスキャナやガルバノスキャナと同等の40度~60度に走査角度を拡大するには、空気抵抗を受けにくい振動子形状とすることが必要である。

図8に示した2自由度板ばね振動子の“羽”部の空気抵抗 C は次式で求められる。

$$C = \frac{1}{2} C_d \rho \int v^2 dA$$

$$= \frac{1}{6} C_d \rho A r_0^2 \omega^2 \quad (5)$$

ここで、 C_d ；物体の形状で決まる空力定数、 ρ ；空気の密度、 A ；羽部面積、 r_0 ；羽部長さ、 ω ；羽部の回転角速度である。

式(5)から、羽部が受ける空気抵抗を少なくするには、気体密度を下げる、面積を小さくする、羽部長さを短くする、あるいは移動速度を遅くする方法があることがわかる。しかし空気の密度を下げる、すなわ

Fig. 8 Improved fine leaf spring resonator with two degrees of freedom.

ち振動子を真空中に設けることはパッケージングが複雑になり、部品コストも高くなるので実用的ではない。また移動速度を遅くする、すなわち走査速度を遅くすることは高速性を損なうので好ましくない。これらのことから、ここでは図8に示すように振動時に空気を横切る速度が最も速くなり空気抵抗の影響を受ける羽部を全部振動子から削除し、T軸を回転対象軸とする振動ミラー部のみの構成とした。そして振動ミラー部裏面におもりを設けることでB軸回りおよびT軸回りに回転トルクを発生させることとした。元の形状のままで10mm×12mmの羽部を除去するだけで、振動子の受ける空気抵抗はB軸回りで1/3以下に、T軸回りで1/100以下に軽減することができる。なおおもりは、振動子の異方性エッチングの際に振動ミラー部裏面のエッチングをコントロールし、おもり相当分の単結晶シリコン素材を一部に残すことで付加する方法を採用した。

3.2 高感度化 少ない振動子加振量で大きな振動振幅が得られるように2自由度板ばね振動子の感度について検討する。図8の振動子において振動ミラー部の寸法を d_x, d_y 、質量を m_0 、板ばねの寸法を l, b, t 、振動ミラー部に設けるおもりの質量を m とし、その重心位置を $p(x, y)$ とする。そして圧電アクチュエータにより振動子を曲げおよびねじりの共振振動数 ω_B, ω_T で加振しているとする。そうすると、振動子の共振振幅 θ_B, θ_T はそれぞれ次式で与えられる。

$$\theta_B = Q_B \Delta \theta_B, \quad \theta_T = Q_T \Delta \theta_T \quad (6)$$

ここに Q_B, Q_T は、曲げ振動およびねじり振動に関する振動子のQ値で、それぞれ

$$Q_B = \frac{\sqrt{J_B K_B}}{c_B}, \quad Q_T = \frac{\sqrt{J_T K_T}}{c_T} \quad (7)$$

で与えられる。 (J_B, J_T) 、 (K_B, K_T) 、および (c_B, c_T) は、それぞれ曲げ振動とねじり振動に関する振動子の慣性モーメント、ばね定数、および等価粘性減衰係数である。また $\Delta \theta_B, \Delta \theta_T$ は、圧電アクチュエータの加振によって振動子に発生するB軸回り、およびT軸回りの回転トルクによる静的回転変位でそれぞれ次式で与えられる。

$$\Delta \theta_B = \frac{T_B}{K_B}, \quad \Delta \theta_T = \frac{T_T}{K_T} \quad (8)$$

ここで圧電アクチュエータの加振変位を曲げ振動およびねじり振動に関してそれぞれ $A_0 \sin \omega_B t$ 、 $A_0 \sin \omega_T t$ 、

とすると回転トルクの大きさ T_B および T_T は次式で与えられる。

$$T_B = m \left\{ y + \frac{l}{k} \left(l_s + \frac{d_y}{2} \right) \right\} A_0 \omega_B^2$$

$$T_T = m x A_0 \omega_T^2 \quad (9)$$

ここに、 $l/k = m_0/m$ である。またB軸回りおよびT軸回りの慣性モーメント J_B, J_T はそれぞれ次式で与えられる。

$$J_B = \frac{m_0 d_y^2}{3} + m_0 l_s^2 + m y^2$$

$$J_T = \frac{m_0 d_x^2}{12} + m x^2 \quad (10)$$

$\omega_B^2 = K_B/J_B$ 、 $\omega_T^2 = K_T/J_T$ 、および式(7)～(10)を式(6)に代入すると共振振幅 θ_B, θ_T は最終的に次のようになる。

$$\theta_B = S_B \cdot A_0, \quad \theta_T = S_T \cdot A_0$$

ここに S_B, S_T は振動子の曲げ振動およびねじり振動に関する感度(共振振動数における動倍率)であり、それぞれ次式で与えられる。

$$S_B = \frac{1}{c_B} \sqrt{\frac{m \left\{ y + \frac{l}{k} \left(l_s + \frac{d_y}{2} \right) \right\}^2 K_B}{\frac{l}{k} \left(\frac{d_y^2}{3} + l_s^2 \right) + y^2}}$$

$$S_T = \frac{1}{c_T} \sqrt{\frac{K_T}{\frac{l}{m} + \frac{d_x^2}{12 m k x^2}}} \quad (11)$$

式(11)から、減衰係数 c_B, c_T を振動子形状や振動振幅、さらに速度によらず一定であると仮定すると、感度 S_B, S_T を高めるためには板ばねの剛性 K_B, K_T を大きくする、おもりの質量 m を大きくする、おもりの重心位置 (x, y) をB軸、T軸より離す、という方法をとればよいことがわかる。

3.3 改良型振動子 2.3節で求めた破壊応力と板ばねの寸法、および3.1節、3.2節での検討結果を踏まえて光走査角度を60度以上として改良型2自由度板ばね振動子を設計した。その諸元を表2に示す。なお振動

Table 2. Dimension of an improved resonator with two degrees of freedom.

Mirror Size (mm)		2.5 x 3.5
Leaf Spring	Length (mm)	3
	Width (mm)	0.07
	Thickness (mm)	0.07

子に付加するおもりは、シリコン基板から一体で形成し、厚さ $300\mu\text{m}$ 以内とした。なお重心位置は $(1.45\text{mm}, 4.25\text{mm})$ であった。この振動子におけるT軸およびB軸回りの回転振動の共振周波数を計算すると、T軸回りが 183Hz 、B軸回りが 64Hz となった。

次に設計した2自由度板ばね振動子をシリコンウエーハから異方性エッチングで製作し、実験を行なった。その結果、T軸回りの回転振動の共振振動数が 190Hz 、B軸回りの共振振動数が 57Hz となり、計算値とよく一致した。また圧電アクチュエータをそれぞれの回転軸まわりの共振振動数で加振したときの加振振幅と走査角度の関係を図9に示す。加振振幅 $5\mu\text{m}$ でT軸回りに 30 度、B軸回りに 63 度の走査角度が得られ、大走査角化が図れた。また、前報の2自由度板ばね振動子に比べT軸回りで約4倍、B軸回りで約5倍の高感度化ができた。

4. 小型圧電アクチュエータによる低電圧駆動化

4.1 ムーニー型圧電アクチュエータ 小型2次元光走査機構の実用化には、走査角度の拡大とともに2自由度板ばね振動子の駆動用アクチュエータの小型化、低電圧化が重要である。前報では、アクチュエータに $5\text{mm}\times 5\text{mm}\times 10\text{mm}$ の積層型圧電素子を用い 100V 以上の

Fig. 9 Scanning characteristic of an improved resonator.

Fig. 10 Moonie type piezoelectric actuator, (a) before deformation, (b) after deformation.

電圧で駆動していたが、ここでは変位拡大機構を設けた圧電アクチュエータを用いることにより、アクチュエータ部の小型化と駆動電圧の低電圧化を試みた。

図10に改良を加えたムーニー型圧電アクチュエータ¹⁶⁾を示す。この圧電アクチュエータは、 $5\text{mm}\times 5\text{mm}\times 2\text{mm}$ の積層型圧電素子の両面に、中央に空洞を設けたムーニープレートと呼ばれる薄板を接合した構成である。このアクチュエータでは、圧電素子に電圧を加えたときに発生する電界方向(厚み方向)の歪みによってムーニープレートを図10のように屈曲変形させ、電界方向へ歪みを拡大して出力するもので、その変位出力 d は次式で与えられる

$$d = d_{33}E + kd_{31}E \quad (12)$$

ここで、 d_{33} は電界方向の圧電定数、 d_{31} は電界に直交する方向の圧電定数、 E は加える電界強度、および k はムーニープレートによる歪み拡大係数である。一般に、圧電素子の圧電定数 d_{31} は d_{33} の約1/3であるが、電界に直角な方向への歪みをムーニープレートで10倍以上に拡大することができるので、全体の変位量はこの方向の歪みに支配される。したがってムーニー型圧電アクチュエータでは、変位量を増加させるために積層数を増やし素子を厚くする必要はなく、薄型化が図れる構成となっている。

4.2 ムーニープレートの最適化 ムーニープレートの断面寸法を図11に示す。外形 $5\text{mm}\times 5\text{mm}$ のムーニープレート中心から半径 R の位置に幅 0.2mm 、深さ t の円形のスリット(溝)を設け、中央薄肉部の半径 r と厚さ h を仮定する。この寸法 R 、 t 、 r 、 h を変化させたときのムーニープレート中心部の変位を計算し、最大となる条件を有限要素解析により求めた。なお、ムーニープレートに与える $d_{31}E$ の値に相当する入力歪み量は各辺 $2\mu\text{m}$ とし、ムーニープレートの材質はアルミニウムとし、縦弾性係数 $G=70\text{GPa}$ を用いた。変位量解析結果

Fig. 11 Analysis model of a moonie plate.

を図12(a)から(d)に示す。図12(a)から R が大きいほど、つまりスリットを外周に設けるほど変位が増大していること、図12(b)から、深さ t が 0.2mm 以下の範囲ではスリットの深さ t が大きいほど変位が増大すること、図12(c)から、プレート薄肉部の厚さ h を薄くするほど大きな変位が得られていること、図12(d)から、中央に設ける薄肉部の半径 r には最適値が存在し、 $0.4\text{mm} \sim 0.6\text{mm}$ の範囲で最大となること、がそれぞれがわかる。

以上の解析結果をもとに決定したムーニープレート形状を図13に示す。板材は一般に入手可能な $50\mu\text{m}$ 厚のアルミニウム薄板材とし、圧電アクチュエータの歪みをプレートに加えたときに応力が集中する4辺の中心部に切り欠きを設けた。また、振動子に接合する部分として中心部に 0.8mm 四方の平坦部を設けた。この形状のムーニープレート1枚の変位量を計算すると、各辺 $2\mu\text{m}$ の変位に対して $30.9\mu\text{m}$ となった。

4.3 改良ムーニー型圧電アクチュエータの出力変位

厚さ $50\mu\text{m}$ のアルミ薄板を図13の形状にプレス加工したムーニープレートを、圧電素子の両面に接合して改良ムーニー型圧電アクチュエータを製作した。圧電素子へは高出力増幅器により電圧を印加し、変位測定には静電容量型センサ(測定分解能 10nm 、測定レンジ $100\mu\text{m}$)を用いた。

測定結果を図14に示す。電圧 60V で約 $23\mu\text{m}$ の変位が得られた。この値は、解析値の $61.8\mu\text{m}$ に対して小さくなっているが、これは実際の圧電素子の歪み量が、解析時に用いた $2\mu\text{m}$ ではなく $0.9\mu\text{m}$ であったことと、

Fig. 12 FEM analysis results of moonie plate deformation. Parameter: (a) Slit position R , (b) Slit depth t , (c) Thickness of center part h , (d) Radius of center part r .

接着によりムーニープレートを接合したために完全に歪みをプレートに伝達できなかったことによるものと考えられる。これらの結果から式(12)の歪み拡大係数 k を求めると、約2.3となった。

また、このアクチュエータの固有振動数は 1kHz 以上となり、 1kHz 以下の共振周波数を持つ光走査機構の振動子の加振が可能になったことがわかった。

5. 新しい低電圧駆動、大走査角化 小型2次元光走査機構

3章で述べた新しい2自由度板ばね振動子、4章で述べた改良ムーニー型圧電アクチュエータを用いて低電圧駆動、大走査角化した2次元光走査機構を製作し、その走査性能実験を行なった。

図15に、圧電アクチュエータの駆動電圧と走査機構の光走査角度との関係を示す。振動子のT軸回り、B軸回りの回転振動に対する共振周波数 190Hz 、 57Hz で

Fig. 13 Shape of an improved moonie plate.

Fig. 14 Displacement of a moonie actuator.

Fig. 15 Scanning characteristic of an improved miniature two dimensional scanner.

アクチュエータを加振したとき、電圧15VでT軸回りに40度、B軸回りに80度の走査角度が得られ前報の走査機構に対して1/30以下の低電圧化が図れた。

表3に本走査機構の性能を前報の走査機構と対比してまとめた。振動子の改良とムーニー型圧電アクチュエータの適用により、走査角度の拡大と駆動電圧の低減が図れ、走査速度(共振周波数)や立ち上がり時間も前機構と同等の性能が得られ、光センサ用小型走査機構として十分な性能が得られた。

Table 3. The comparison of scanning characteristics between the improved two dimensional scanner and the previously reported scanner.

	Improved Scanner Torsional / Bend	Previous Scanner Torsional / Bend
Frequency (Hz)	190 / 57	121 / 288
Maximum Angle (deg.)	50 / 83	10 / 16
Sensitivity (deg./v)	3 / 6.3	0.1 / 0.14
Response Time (sec)	1 / 2	1.7 / 1

6. 結論

小型2次元光走査機構の低電圧駆動化と走査角度の拡大を図るために、単結晶シリコン板ばねの破壊応力を実験で求め、その強度をもとに2自由度板ばね振動子を改良し、またムーニー型圧電アクチュエータを改良して駆動源に用いた。得られた結果は次のとおりである。

(1) 単結晶シリコン板ばねの破壊応力は、曲げ変形で1GPa、ねじり変形で0.3GPaであった。板ばねの破壊を防ぐにはこの値以下になるようばね寸法を決定する必要がある。また、単結晶シリコンから製作した板ばねにおいて、応力腐食割れにともなう疲労劣化の現象が観察された。

(2) 振動子を高感度化するには、振動回転軸から遠い位置にある振動部を削除して空気抵抗を減少させ、おもりにより慣性モーメントを与える構成が効果的である。また、そのおもりはできる限り回転軸から離れた位置に設けることが好ましい。

(3) ムーニープレートは薄くして形状を最適化することにより、約23 μ mの変位と約23の歪み拡大係数が得られた。

(4) 改良した小型2次元光走査機構により、15Vの電圧で40度～80度の走査角度が実現できた。前報に比べ1/30以下の低電圧駆動化と所望の大走査角化が図れた。また、光走査機構全体も5mmx10mmx2.2mmと小型化できた。

本研究の一部は、通商産業省工業技術院の産業科学技術研究開発制度に基づく「マイクロマシン技術の研究開発」の一環として、NEDOから委託を受けた(財)マイクロマシンセンターの再委託業務として、オムロン(株)が実施したものである。

また、本論文をまとめるに際し、多大なご助言をいただいた東京工業大学工学部機械知能システム学科の林巖教授、シリコン破壊応力についてご指導いただいた東京工業大学工学部無機材料工学科の松尾陽太郎助教授に感謝申し上げます。また、ムーニー型圧電アクチュエータについてご討論いただいたペンシルバニア州立大学材質工学研究所の内野研三教授にもあわせて感謝申し上げます。

参考文献

- (1) 後藤博史, 加守田裕樹, 今仲行一, "小型2次元光走査機構の開発, 第1報", 日本機械学会論文集(C編), 62巻, 596号, pp.1640-1647(1996-4).
- (2) 機械工学便覧, 日本機械学会編, 改訂第6版, 第4編材料力学.
- (3) 井形直弘, 材料強度学, 培風館, p.10.
- (4) 松尾陽太郎, 木村脩七, "耐火物・セラミックスにおける機械的性質の評価理論/評価法 その2", 耐火物, Vol.45, No.7, pp.402-407(1993).
- (5) 西田俊彦, 安田榮一, セラミックスの力学的特性評価, 日刊工業新聞社, p.202.
- (6) Y.Suwawara, K.Onitsuka, S.Yoshikawa, Q.Xu, R.E.Newnham, and K.Uchino, "Metal-Ceramic Composite Actuators", J. Am. Ceram. Soc., Vol.75, No.4, pp.996-998(1992).