

## シリコン製マイクロミラーを用いた静電気分布測定装置の開発

栗山 敏秀<sup>1</sup>, 青井 利一<sup>2</sup>, 前田 裕司<sup>3</sup>, 伊東 隆喜<sup>3</sup>, 上野 吉史<sup>3</sup>,  
中家 利幸<sup>4</sup>, 松井 信近<sup>4</sup>, 奥村 浩行<sup>4</sup>

## 要旨

冬季に、自動車のドアや玄関の金属製ノブに手が触れた瞬間、「パチッ」と火花が飛んで痛みを感じた、という事はよく経験する。これは、身体にたまった静電気が金属との間で放電したためで、この時、身体の電圧は 10,000 ボルト以上になっている。カミナリも、よく知られているように、雲が帯電（静電気を帯びること）し、雲と雲、雲と地面などの間で放電する現象である。

我々は、医療、福祉、そして生活の向上に貢献したいと願い、人体の帯電を含め、さまざまな静電気を測定する技術を開発している。とくに、最近の LSI（集積回路）や液晶パネルにおいて、静電気により壊れるという現象が頻繁に起こっており、人体だけではなくモノ同士の接触、剥離による静電気の発生にも取り組んでいる。静電気は目に見えないので対策が困難であるが、これを見ることができるとすれば、それを防ぐ設計や対策に役立つと考えられる。今回、シリコン・マイクロマシーニング技術（半導体製造技術などによりシリコンを微細加工する技術）を用いシリコン製マイクロミラーを製作し、これを光学的な手段と組み合わせるとして静電気を測定する装置を開発し、摩擦帯電装置を用いた人体の帯電モデルについて適用した。

## 1. 緒論

古代ギリシャ、ローマ時代から、琥珀を摩擦すると糸くずやホコリを吸い付けることが知られており、琥珀を意味する古代ギリシャ語の「エレクトロン」は、現代では「電子」を意味する言葉として使われている。このように静電気は、電気に関わる古から知られた現象であるが、江戸時代には平賀源内の「百人おどし」のような見世物になり、現代においてはレーザープリンターなどの乾式複写機、リサイクルにおける静電選別など、広く応用されている。しかし、一方で静電気は電子機器の故障を引き起こす大きな原因となっており、人体の帯電もその一つである。

社会システム、特に医療や福祉における安全・安心において、電子機器の誤作動は大きな課題であるが、最近の電子機器を構成する大規模集積回路(LSI)は、高集積化や低電圧化のため電磁干渉に対する耐性(Electromagnetic Immunity)や静電気放電(Electrostatic Discharge: ESD)に対する耐性が低くなっている。このため、静電気による誤作動の原因究明や対策のため、LSI の製造工程、あるいは、使用時に静電気破壊を起こす周辺物体の帯電電圧測定やその分布測定が重要な技術となっている。従来、静電気測定は表面電位計を用いて行われ、それを対象物上で機械的に2次元走査することにより静電気分布の測定が行われてきた<sup>(1)</sup>が、機械的な走査は時間がかかり、その間に帯電状況が変化するという問題があった。

本研究では、静電気分布を非接触で短時間測定することが可能な静電気分布測定装置を、アレイ状に配置した静電気により傾くシリコン製マイクロミラーと、それぞれのマイクロミラーの傾きを測定する2次元光スキャナーとレンズ、ビームスプリッター、PSD(Position Sensitive Detector)からなる光学系により構成し、性能を測定したので報告する。

原稿受付 2010年12月22日

1. 近畿大学生物理工学部システム生命科学科, 〒649-6493 和歌山県紀の川市西三谷 930
2. 近畿大学大学院 機械制御工学専攻, 〒649-6493 和歌山県紀の川市西三谷 930
3. 和歌山県工業技術センター, 〒649-6261 和歌山市小倉 60
4. 阪和電子工業株式会社, 〒649-6261 和歌山市大垣内 689-3

## 2. 静電気分布測定装置

### 2. 1 静電気測定の原理

フランス人のクーロンは、1785年、水晶の捻じり秤をもちい静電気力による力を測定し、静電気力が距離の二乗に反比例することを発見した。これが有名な「クーロンの法則」である。今回試作した静電気分布測定装置も、クーロンの実験と同じように静電気力による物体の変位を用いている。そのため、静電気の検出部の構造としては、帯電物体による可動部の変位（傾き変化）を光学的に測定するために、ミラーを支える可動部の形状として、カンチレバー（片持ち梁）構造とトーションバー（捻じり梁）構造の2つが候補となる。図1（a）はカンチレバー構造のミラー、図1（b）はトーションバー構造のミラーを示す。それぞれの構造において、ミラーの変位の様子を矢印で示した。また、図中の小さな長方形は、支持点を示している。

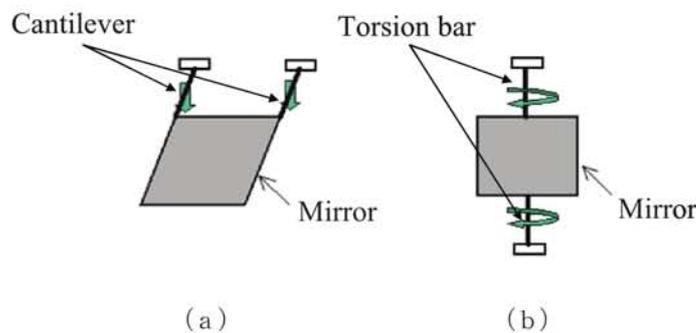


図1 可動ミラーの支持構造

このうち（a）のカンチレバー構造は、ミラーを支える梁を細く、長くすることにより感度を向上できるが、同時に外部からの振動のような機械的な外乱にも影響されやすくなる。このため、対称構造をもつため外乱に強い（b）のトーションバー構造を採用することにした。この場合、ミラーの片方の半分は金属板を用いて静電遮蔽し、他方の半分だけに静電気力が作用し、ミラーが捻じれる動作を利用する。

ミラーを支持するトーションバーの捻じり剛性  $K$  は、

$$K = \pi G d^4 / 32 L \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 $G$  は剛性率、 $d$  はトーションバーの直径、 $L$  はトーションバーの1本の長さである。この式から分かるように、 $K$  はトーションバーの直径の4乗に比例し長さの1乗に反比例するため、トーションバーを細く長くすることにより、感度の向上が可能となる。特に、その太さによって感度が大きく変化することが特長である。

ミラーの材質として、ステンレススチールなどの金属も検討したが、薄くて平坦度の良いミラーを製作することは困難であるため、LSIの材料である半導体シリコンを利用した。シリコンは半導体プロセスにより平坦度の良いウェハが製作されており、これからミラーを切り出した。上記の構造は、MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) 技術で支持部を含めトーションバーとミラーを一体化することが可能である。

### 2. 2 変位量（ミラーの捻じれ角）の検出方法

帯電物体の静電気分布を測定するために、上記のトーションバー構造のミラー（トーション・ミラーと略す）をアレイ状に配置し、それぞれの捻じれ角を測定する必要がある。トーション・ミラーアレイのそれぞれのミラーの角度変化を測定するために、レーザ光を2次元スキャナーをもちいて走査し、それぞれのミラーからのレーザ光の反射角の変化を、光スポットの位置を測定できる PSD (Position Sensitive

Detector) で検出する下図の光学系を考案した。

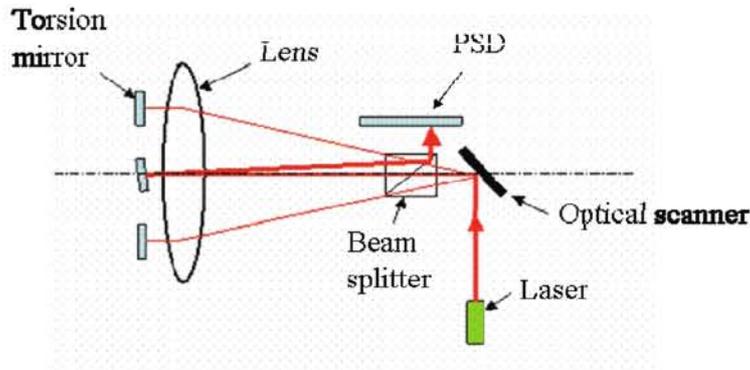


図2 静電気分布測定用光学系

光学系の設計原理は、凸レンズと2次元スキャナーの距離  $L_1$ 、および、凸レンズとビームスプリッタを介した PSD までの距離  $L_2$  を、凸レンズの焦点距離  $f$  と等しくすることである。すなわち、

$$L_1 = L_2 = f \quad (2)$$

が成立するように配置する。

この光学系において、レーザ光を2次元スキャナーの反射面に焦点を結ぶように入射させると、スキャンされたレーザ光は、凸レンズを通過すると平行光（光軸に対して平行、かつ、ビームそのものが平行光）となり、トーシヨン・ミラーに垂直に入射する。トーシヨン・ミラーが静電気により角度  $\phi$  傾いていれば、反射光の光軸に対する傾き  $\theta$  は、 $\theta = 2\phi$  となる。

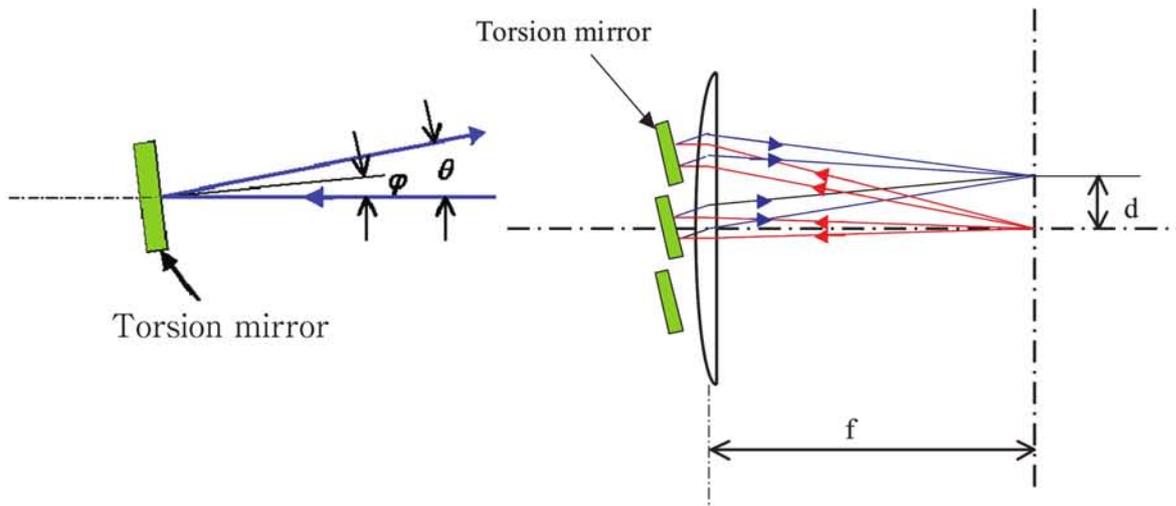


図3 トーシヨン・ミラーの傾き測定の原理

凸レンズを通過した傾き角度  $\theta$  の反射光は、PSDの位置で焦点を結び、その中心からの位置（変位）  $d$  は、結像原理より

$$d = f \tan \theta \quad (3)$$

となる。式（3）の関係は、2次元スキャナーで走査されるすべての光ビームに対して成立するため、トーシヨン・ミラーアレイのそれぞれのミラーの傾きを PSD 上の光スポット位置  $d$  により測定することが

できる。

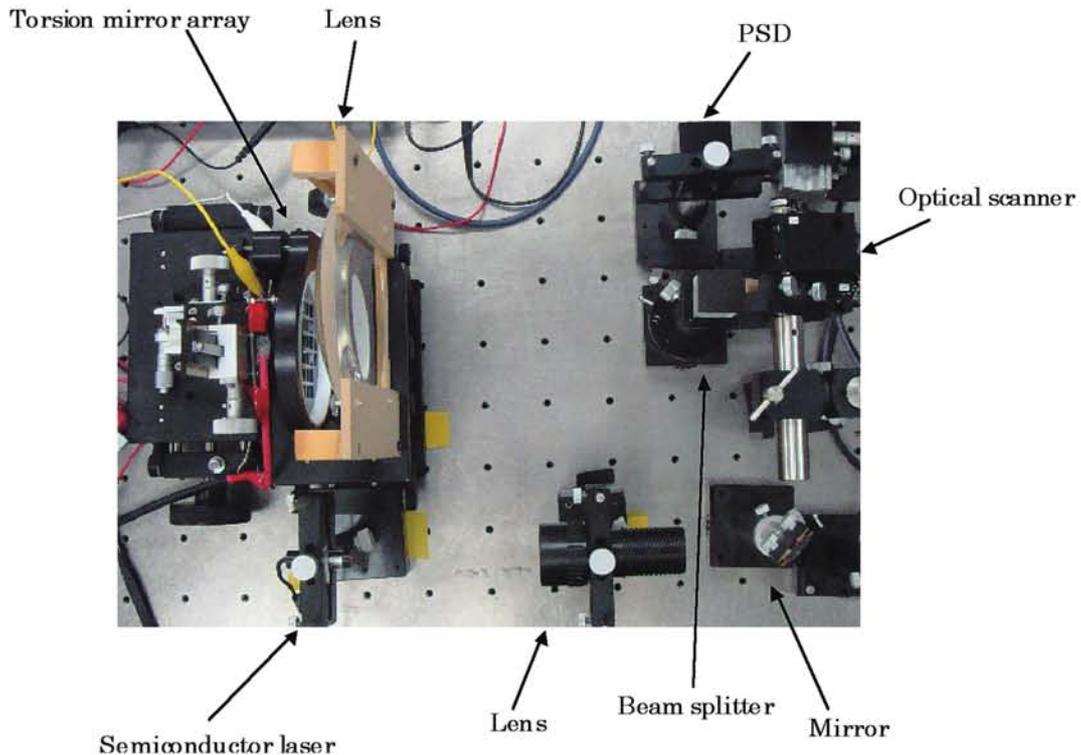


図4 静電気測定装置

図4は、図2に相当する光学系の写真で、光源として赤色半導体レーザ（波長：650nm）、2次元光スキャナーとしてガルバノミラーを用いた光スキャナーを用いている。

2次元スキャナーとしては、(イ) ポリゴンミラー（水平スキャン）+共振型トーション・ミラー（垂直スキャン）、(ロ) 回転するポリゴンミラー自身の傾斜、(ハ) ガルバノミラー・スキャナー（x軸+y軸）の3つの方式を検討した。

(イ) と (ハ) は、2個のミラーを用いてそれぞれ水平方向と垂直方向に光ビームをスキャンする方式で、(ロ) は1個のポリゴンミラーを回転しながら、上下に振ることにより2次元スキャンする方式である。

(イ) は、ポリゴンミラーで高速に水平スキャンを行い、これを共振型トーション・ミラーで上下に垂直スキャンを行う方法である。(ロ) は、ポリゴンミラー自身を回転させながら、レーザ光の光軸を中心にして上下に振る方法で、1個のポリゴンミラーで2次元スキャンすることができる。(ハ) は通常の2次元ガルバノミラー・スキャナーで使用される方式である。

この他、最近ではMEMS技術による2次元スキャナー（1枚のミラーを2種類のジンバル構造で支え、x方向とy方向にスキャン）を使用する方式がある。今回は、トーション・ミラーアレイの傾きを検出する光学系として、(ロ) の方式を最初に用いたが、最終的には(ハ) の方式を用いた。これは、ガルバノミラー・スキャナーが確立された技術であり、静電気測定の感度や精度を検討するための光学系として適していると考えられるためである。

図4において、直径4インチのウェハを用いて作製されたトーション・ミラーアレイは角度調節できるホルダーに固定され、高電圧電源のグラウンドに電氣的に接続されている。トーション・ミラーアレイの直前にはエドモンド・オプティクス社製の大口径平凸コンデンサーレンズ（外径150mm、焦点距離300mm）

が設置されている。半導体レーザー（発振波長 630nm, 出力 1mW）のビームは、一旦凸レンズとミラーで 2 次元光スキャナー（ケンブリッジテクノロジー社ガルバノスキャナユニット 6215H）の水平スキャン用ミラー上に焦点を結んだ後、2 次元スキャンされ、ビームスプリッタ（キューブ型非偏光ビームスプリッタ）を通過しコンデンサーレンズによって光軸に対し並行光線になり、各トーション・ミラーに入射する。反射されたレーザー・ビームはビームスプリッタにより、PSD（浜松ホトニクス社製 C10443-02）に入射しそのスポット位置が測定される。

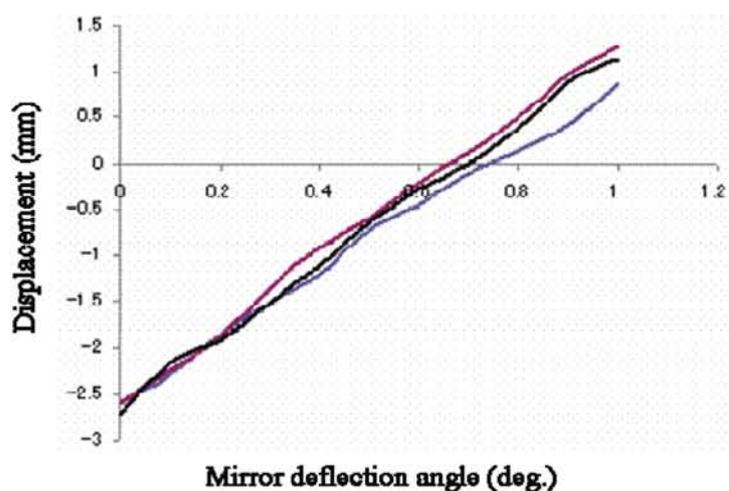


図5 ミラーの傾斜角と PSD 上のレーザースポットの変位

光学系のレンズの収差や光学部品での不要な反射による迷光の影響を調べるために、マイクロミラーの位置に通常の光学ミラーを置き、その傾斜角と PSD 上でのレーザースポットの位置変化を調べた。その結果を図5に示す。青線はレンズの中央を通る光線、赤線は中央から 2cm の位置を通る光線、黒色は中央から 4cm の位置を通る光線に対するデータである。中央付近では、ほぼ、傾斜角に比例したレーザースポットの変位が得られていることが分かる。

### 2. 3 シリコン製マイクロミラー

図6に静電気分布測定に使用したシリコン製マイクロミラー（トーション・ミラー）を示す。シリコン

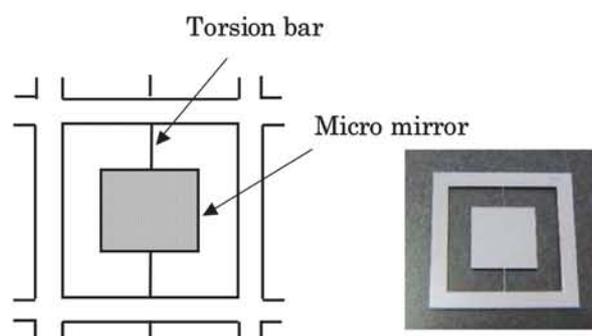


図6 トーションミラーの構造と写真

製の捻じれ梁（トーション・バー）で支えられた構造を持ち、トーション・ミラーの寸法は、トーション・

バーの厚さ 20 $\mu\text{m}$ 、幅 20 $\mu\text{m}$ 、長さ 2mm で、マイクロミラーの寸法は厚さ 20 $\mu\text{m}$ 、幅 5mm、長さ 5mm であり、MEMS 技術により SOI(Silicon on Insulator)基板を用いて作製された。マイクロミラーの片面だけに静電気を印加することにより、トーシヨン・ミラーは図 1(b)に示したようにトーシヨン・バーを軸にして捻じれる。図 1(b)は、トーシヨン・バーの形状が丸棒であったが、実際に作製したトーシヨン・バーの断面はほぼ正方形となっている。これに対する扱いは、次節で議論する。

#### 2. 4 マイクロミラーによる静電気測定

トーシヨン・バー構造をもつミラーが静電気力によりトルクを受け、捻れる角度に関しては、Petersen が定式化している<sup>(2, 3)</sup>。すなわち、ミラーに働くトルク  $T$  は、電圧  $V$  が印加された時、ミラーの半分の面積に対し静電気力を積分することにより求まる。

$$T = \int_0^{b/2} F(x)xdx \cong \frac{\epsilon_0 V^2 b^3}{16d^2} \quad (4)$$

ここで、 $F(x)$  はミラーの中心から  $x$  の距離の点に働く静電気力であり、これに距離  $x$  を掛けて積分することによりトルクが求まる。 $\epsilon_0$  は真空の誘電率、 $V$  は印加電圧、 $b$  はミラーの幅、 $d$  はミラーと電圧を印加する電極との距離である。

また、トルク  $T$  によりトーシヨン・バーが捻れる角度  $\phi$  は、

$$\phi = \frac{T(l/2)}{G(Kt^4)} \cong \frac{\epsilon_0 V^2 l b^3 (1+\nu)}{16KE d^2 t^4} A \quad (5)$$

で与えられる。ここで、 $l$ 、 $t$  はそれぞれトーシヨン・バーの長さ、幅（直方体）、 $G$  は剛性率、 $\nu$  はポアソン比、 $K$  はトーシヨン・バーの形状によって決まる定数 ( $K \approx 0.24$ )、 $E$  はヤング率、 $A$  は面積修正因子 ( $A \approx 0.8$ ) である。表 1 に今回使用したトーシヨンミラーのパラメータを示す<sup>(4)</sup>。

表 1 トーシヨン・ミラーの設計パラメータ

Dielectric constant	$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ [F/m]
Young's modulus	$E = 190$ [GPa]
Poisson's ratio	$\nu = 0.09$
Density	$\rho = 2.32$ [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]
K (rectangular shape)	0.24
A (correction factor)	0.8
Mirror width	$b = 5$ [mm]
Distance	$d = 10$ [mm]

1つのトーシヨン・ミラーにレーザー光を当て、外部から高圧電源を用いて電圧を印加した場合の反射レーザー光の変位  $d$  の値を図 7 に示す。縦軸は、PSD 上のレーザースポット位置の変化である。トーシヨン・ミラーの傾きが小さい時  $\tan \theta \approx \theta$  となり、印加電圧のほぼ 2 乗に比例して増加することが分かり、(5)式に示した電圧依存性が確かめられた。

この静電気測定システムを人体に応用するために、空間分解能の測定を行った。マイクロ・ミラーの片面に静電気が印加されるように、トーシヨン・ミラーアレイのレンズと反対側に各マイクロ・ミラーが半分露出する窓が開けられた銅板（厚さ 0.5mm）を設けた。高電圧電源に針金を接続し、この針金をミラー

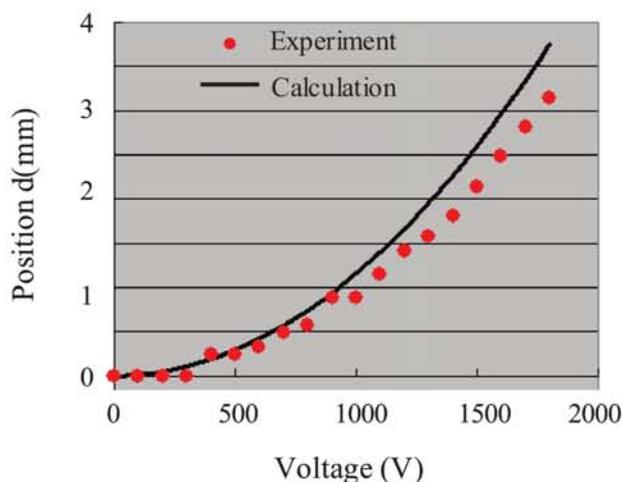


図7 静電気電圧と変位

に直角に配置し、針金を 2.5mm 離して銅板により半分覆われたマイクロミラーアレイに沿って動かし、一つのトーション・ミラーの反射信号を測定することにより、空間分解能を調べた (図 8)。この時、図中には表示していないが、電源と針金の間に  $10\text{M}\Omega$  の抵抗を挿入し、万一の感電に備えた。図 9 は、一つのトーション・ミラーによって測定される出力分布を示す。これより、空間分解能として半値幅約 4.5mm が得られた。

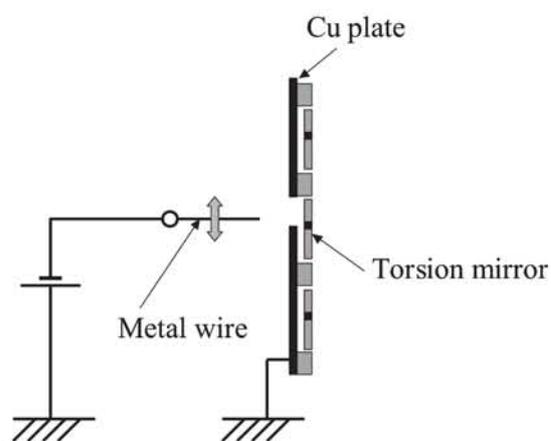


図8 静電気分布の測定系 (空間分解能)

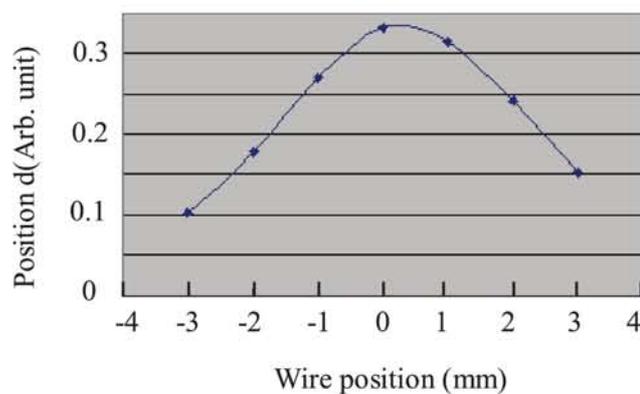


図9 空間分解能の測定結果

また、人体の帯電を模擬した図 10 に示す摩擦帯電発生器 (エレキテル、学研、大人の科学 Vol.22 の付録) による静電気を図 8 の測定系を用い、針状電極に発生する電圧と分布を測定したところ、高電圧電源を用いた場合と同様の出力分布と約 3,000V の電圧値が得られ、さらに、時間と共に電圧が減衰することが観測された。

また、放電が起こった場合、マイクロミラーが左右に振れることが反射レーザー光のスポットにより観測された。

これより、本研究で作製した非接触静電気分布測定システムは、装置や摩擦帯電による静電気分布を測定できることが確認された。

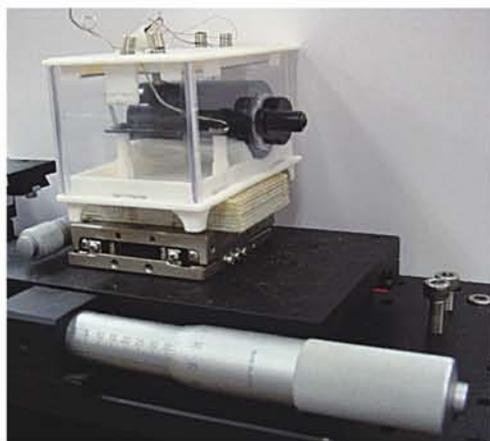


図10 摩擦帯電発生装置

今後、静電気分布測定装置を用い、人体の帯電発生の様子や金属に指を近づけていった場合の電界の強度分布変化を調べ、放電メカニズムの解明を行うとともに、静電気発生を防止する方法の開発に役立つ予定である。

また、シリコン製マイクロミラーは、半導体技術を用いるためにミラーに大きさやトーション・バーの幅を小さくでき、多数のミラーを並べて空間分解能を高くでき、より細かい分布を測定することが可能である。

### 3. 結論

半導体製造技術で製作したシリコン製トーション・ミラーのアレイと2次元光スキャナーとPSDを用いたミラー傾き測定により、ミラーの傾きが電圧の2乗に比例すると言う理論を確かめることができた。また、複数のトーション・ミラーを並べることで帯電分布が測定できることが分かり、人体への応用の初期実験として摩擦帯電の状況を調べ、帯電の様子を測定することができた。

この静電気分布測定装置は、人体の帯電による電子機器の破壊を防ぐのに有用であると考えられる。

### 4. 謝辞

本研究は、独立行政法人科学技術振興機構の受託研究「MEMS技術を応用した静電気非接触可視化システムの開発」として行ったものである。ここに感謝いたします。

### 5. 参考文献

- (1) 尾前 宏 (2007) 静電気帯電分布可視化システムの開発, 鹿児島県工業技術センター研究成果発表会予稿集, 14-15
- (2) Petersen K. E. (1980) Silicon Torsional Scanning Mirror. IBM J. RES. DEVELOP., Vol.24, No.5, 631-637
- (3) Petersen K. E. (1982) Silicon Torsional Mirror. Proc. IEEE, Vol.70, No.5, 61
- (4) 山田恵三、栗山敏秀 (2009) 非対称シリコン・マイクロミラーを用いたためがね型網膜ディスプレイ, 電気学会論文誌E, Vol.129, NO.2, 35-40

### 英文抄録

#### Silicon Micro-mirror Array for Electrostatic Field Distribution Measurement System

Toshihide Kuriyama<sup>1</sup>, Toshikazu Aoi<sup>2</sup>, Hiroshi Maeda<sup>3</sup>, Takaki Itoh<sup>3</sup>, Yoshifumi Ueno<sup>3</sup>, Toshiyuki Nakaie<sup>4</sup>,  
Nobutika Matsui<sup>4</sup>, Hiroyuki Okumura<sup>4</sup>

A silicon micro-mirror array fabricated by MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) process has been made for an electrostatic field distribution measurement system. Each silicon micro-mirror is suspended by two thin torsion bars, which is made by semiconductor process. Deflection of each micro-mirror is measured optically by using an optical scanner and PSD (Position Sensitive Detector). The electrostatic field distribution measurement system is applied to a human body model.

1,2. Department of Biomedical Engineering, Kinki University, Wakayama 649-6493, Japan

3 Industrial Technology Center of Wakayama Prefecture, 60 Ogura, Wakayama City, 649-6261

4. Hanwa Electronic Ind. Co., Ltd., 689-3 Ogaito, Wakayama City, 649-6261