

## MEMS マイクロミラーアレイを用いた静電気分布測定

正員 栗山 敏秀<sup>\*a)</sup> 非会員 高辻 渉<sup>\*\*</sup> 正員 伊東 隆喜<sup>\*\*</sup>  
非会員 前田 裕司<sup>\*\*</sup> 非会員 中家 利幸<sup>\*\*\*</sup> 非会員 松井 順<sup>\*\*\*</sup>  
非会員 宮本 佳明<sup>\*\*\*</sup>

### Electrostatic Field Distribution Measurement Using MEMS Micro-mirror Array

Toshihide Kuriyama<sup>\*a)</sup>, Member, Wataru Takatsuji<sup>\*\*</sup>, Non-member, Takaki Itoh<sup>\*\*</sup>, Member, Hiroshi Maeda<sup>\*\*</sup>, Non-member,  
Toshiyuki Nakaie<sup>\*\*\*</sup>, Non-member, Jun Matsui<sup>\*\*\*</sup>, Non-member, Yoshiaki Miyamoto<sup>\*\*\*</sup>, Non-member

(2013年10月12日受付, 2014年5月31日再受付)

Electrostatic field distribution measurement using a silicon micro-mirror array fabricated by Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) process has been presented. The deflection angle of each micro-mirror, which is placed on a spherical surface and is deflected by electrostatic field, was measured optically using a two-dimensional optical scanner and a position sensitive detector (PSD). The obtained electrostatic data showed good agreement with Coulomb's law and the system was applied to measure the electrostatic field distribution of charged substance.

キーワード: 静電気分布, MEMS マイクロミラーアレイ, 2次元光学スキャナー, Position sensitive detector

Keywords: Electrostatic field, MEMS Micro-mirror array, Two-dimensional optical scanner, Position sensitive detector

### 1. まえがき

社会システムの安全・安心において, 電子機器の誤作動は大きな課題である。誤作動を引き起こす原因の一つとして静電気放電 (Electrostatic Discharge: ESD) があり, これは大規模集積回路 (LSI) が高集積化や低電圧化のため, 静電気放電に対する耐性が低くなっていることがある。また, 液晶ディスプレイ (Liquid Crystal Display: LCD) が製造時の帯電によって故障を起こすという事も報告されている。静電気放電による破壊を防ぐ方法の一つは, 帯電物体を除電することであり, そのためにも帯電物体による静電気分布を測定することは重要である。従来, 帯電電圧測定やその分布測定は, 表面電位計やそれを対象物上で機械的に 2 次

元走査することにより行われてきた<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に測定することを目的として, 半導体微細加工技術により作製したマイクロミラー (MEMS マイクロミラー) を用いて非接触静電気分布測定システムを製作し, 実際に適用した結果について述べる。特に, 100mm 角以上の広い面積の静電気分布を測定するのに適した MEMS マイクロミラーアレイの構成と測定のための光学系について報告する。

### 2. 静電気分布測定装置

#### 〈2・1〉 マイクロミラーと静電気分布測定用光学系

帯電物体の静電気分布を測定する方法として, MEMS 技術を用いて製作した 2 本のトーション・バー (捻り梁) で支持されたマイクロミラー (トーション・ミラーと略す) をアレイ状に配置し, マイクロミラーの半面をシールド板で覆うことにより残りの半面に電界が印加されるようにし, 静電気によるトーション・ミラーの捻れ角から静電気分布を測定する方法を採用した。筆者らは, 以前, 複数のトーション・ミラーの角度変化を測定するために, レーザ光を 2 次元光スキャナーにより走査し, それぞれのマイクロミラーからのレーザ光の反射角を測定した<sup>(2)</sup>。この時, 凸レンズと 2 次元光スキャナーの距離を凸レンズの焦点距

a) Correspondence to: Toshihide Kuriyama. E-mail: kuriyama@waka.

kindai.ac.jp

\* 近畿大学

〒649-6493 和歌山県紀の川市西三谷 930

Kinki University

930, Nishimitani, Kinokawa, Wakayama 649-6493, Japan

\*\* 和歌山県工業技術センター

〒649-6261 和歌山市小倉 60

Industrial Technology Center of Wakayama Prefecture

60, Ogura, Wakayama 649-6261, Japan

\*\*\* 阪和電子工業 (株)

〒649-6261 和歌山市大垣内 689-3

Hanwa Electronic Ind. Co., Ltd.

689-3, Ogaito, Wakayama 649-6261, Japan

離に等しく配置することにより、走査されたレーザー光はマイクロミラーに垂直（電界が 0 の場合）に入射し、反射光ビームはビームスプリッターを介して PSD (Position Sensitive Detector) 上に入射し、ビームスポット位置からトーション・ミラーの捻れ角が求められた。この光学系は、トーション・ミラーアレイが作製されたシリコンウェーハをウェーハ状態で使用でき、トーション・ミラーのサイズを小さくすることにより、空間分解能をあげることができるという利点があったが、逆に 100mm 角以上の面積に対し静電気分布を測定する場合、大きな口径の凸レンズや大面積のシリコンウェーハが必要となり、装置の価格や重量の増加が問題になった。

そのため、今回は大面積の測定に適した凸レンズを使用しない光学系を採用した。Fig. 1 に凸レンズを使用した測定光学系(a)と今回の光学系(b)の原理図を比較して示す。

Fig. 1(b)の配置では、トーション・ミラーは球面上にアレイ状に並べられており、レーザー光がマイクロミラーの裏面に垂直に入射し、静電気により傾いたマイクロミラーの傾きは反射光の PSD 上の位置により測定される。

両方の光学系において、トーション・ミラーが静電気により角度  $\varphi$  傾いていれば、反射光の光軸に対する傾き  $\theta$  は

$$\theta = 2\varphi \quad \dots\dots\dots(1)$$

となる。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、

$$d = f \tan \theta \quad \dots\dots\dots(2)$$

となる。ここで、 $f$  は PSD と凸レンズとの距離、あるいは、

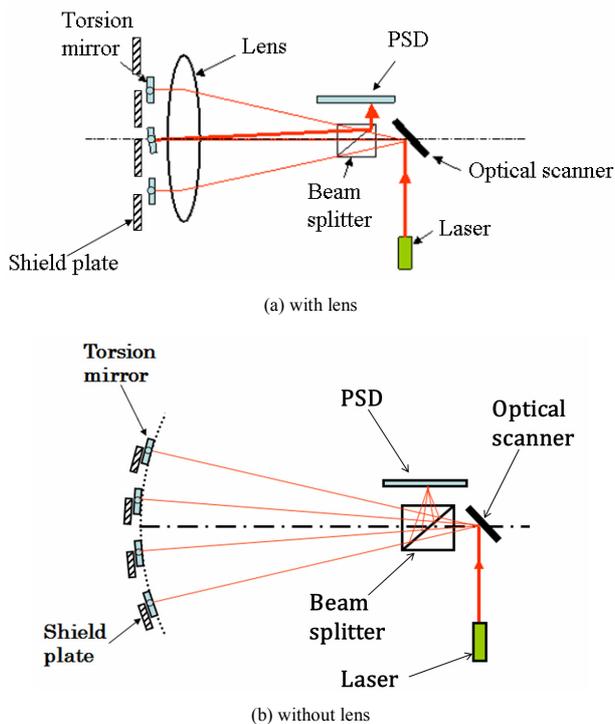


Fig. 1. Optics for electrostatic field measurement

PSD と球面との光学的距離である。(2)式の関係は、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、トーション・ミラーアレイのそれぞれのマイクロミラーの傾きを 2次元 PSD 上の光スポット位置  $d$  により測定することができる。

静電気分測定装置の性能仕様として、帯電物質の測定電圧範囲：100~2kV、測定分解能：10V、測定距離：10mm、測定範囲：100mm 角、測定時間：1 秒以下を目標とした。この光学的な配置により、凸レンズを用いた配置<sup>(2)</sup>に比べ LCD (液晶ディスプレイ) のような広い面積も測定することが可能になる。

〈2-2〉 トーション・ミラーの構造および製造方法

トーション・ミラーの実装に関しては、Fig. 1(a)の光学では、ウェーハ状態のトーション・ミラーアレイを用いることができるのに対し、Fig. 1(b)の光学系では、トーション・ミラーを分離して球面上に搭載する必要があるため、同じ空間分解能を得るためにはマイクロミラーの面積を保ってトーション・ミラー全体の面積を小さくする必要があり、Fig. 2 に示したようにマイクロミラーを蝶々型にしてトーション・バーを一定の長さに保つ構造にした。

この時、製造時におけるトーション部分の破損を防ぐため、Fig. 2 に示すように、複数の補強用梁をトーション・バーと並べて設け強度を増した。

トーション・ミラーは SOI (Silicon on Insulator) ウェーハを用い、Fig. 3 に示す工程で製造された。

Fig. 3 において、フォトレジストをエッチングマスクに

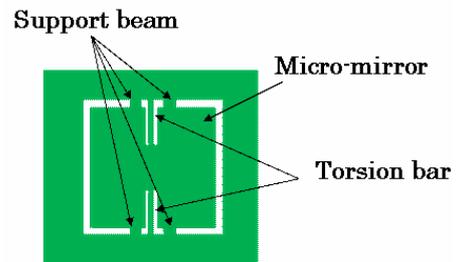


Fig. 2. Torsion-mirror with support beam

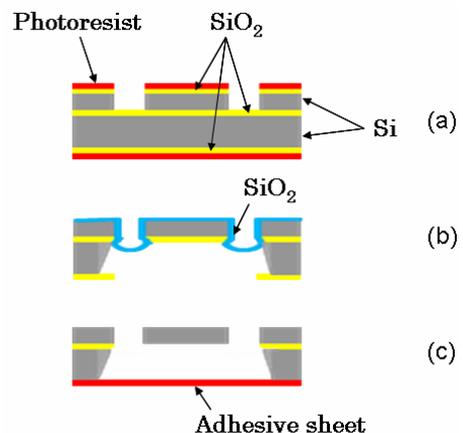


Fig. 3. Fabrication Process of torsion-mirror

用い表面の SiO<sub>2</sub> とシリコン層をドライエッチングした (Fig. 3(a))。その後、裏面から SiO<sub>2</sub> をマスクに用い TMAH (Tetramethylammonium hydroxide) によりトーシヨンの下部にある基板 Si をエッチングにより除去した (Fig. 3 (b))。最後に表面、側面と裏面の SiO<sub>2</sub> をフッ化水素酸溶液により除去し、裏面に熱剥離シートを貼った後、ステルスダイシングを行った (Fig. 3(c))。

この構造および製造方法により、厚さ 20 $\mu$ m、幅 10 $\mu$ m のトーシヨンのミラーで歩留まりが約 80%から約 100%へ、厚さ 20 $\mu$ m、幅 5 $\mu$ m のトーシヨンのミラーで歩留まりが約 14%から約 82%に改善された。

ウェーハから分離されたトーシヨンのミラーは、補強用梁を残したまま陽極接合によりガラス (HOYA 社製 SD2) 製の枠に取り付けられ、その後、ピコ秒レーザー・パルスにより補強用梁を切断し、ミラーが可動するようにした。Fig. 4 に陽極接合されたトーシヨンのミラーの写真を示す。

〈2・3〉 実験装置 完成したトーシヨンのミラーを球面状に取り付ける取り付け枠は、アルミを機械加工して作製した。各トーシヨンのミラーに対して中央に孔が開けられた球面の一部に相当する傾斜面がトーシヨンのミラーの数だけ設けられている。10cm $\times$ 10cm の範囲に 64 個のトーシヨンのミラーが搭載されたトーシヨンのミラーアレイ測定部を Fig. 5 に示す。

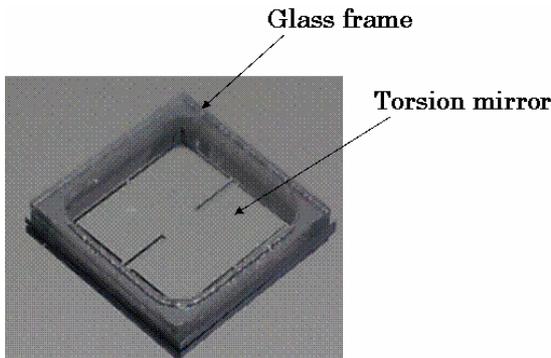


Fig. 4. Torsion-mirror with glass frame

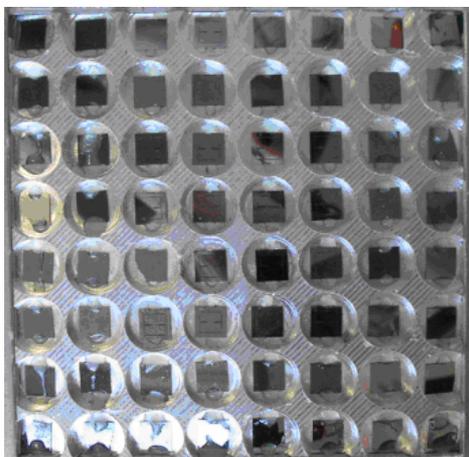


Fig. 5. Measurement frame with torsion-mirror array

この時、各トーシヨンのミラーは Fig. 6 に示す断面図のように、紫外線硬化 (UV) 樹脂の粘性を利用して、中央に孔が開けられた球面の一部に相当する傾斜面上で UV 樹脂の上に浮かべる要領で姿勢制御を行い、ミラー面で反射されたレーザー光が PSD の中央に光が当たるような位置で紫外線照射により固定された。

今回使用したトーシヨンのミラーの傾き測定用の光学系は、Fig. 1 を改良し Fig. 7 に示されるようにトーシヨンのミラーをフレネルレンズ状に配置し、凸レンズを更に加えたものである。この凸レンズの直径は、光学スキャナーを反射して戻ってきた光ビームを通過させればよいので、従来トーシヨンのミラーアレイの手前に凸レンズを設けた場合<sup>(2)</sup>に比べ小さくすることができる。

この配置により、トーシヨンのミラーのアレイはほぼ平面上に並べることができ薄いアルミ板上に搭載できた。

さらに、Fig. 1(b)では PSD 上のスポットの位置が(1)式における  $f$  の値として、トーシヨンのミラーから光スキャナーまでの距離であったのに対し、Fig. 7 では小さな直径の凸レンズの焦点距離  $f$  を大きくすることにより、感度の向上をはかることができる<sup>(3)</sup>。製作した光学系を Fig. 8 に示す。光路長を長くした場合に、装置全体が大きくなるよう凸レンズと PSD の間に 3 個のミラーを置いている。

光スキャナーは 1 次元 MEMS スキャナーをステッピングモータに搭載し、MEMS スキャナーによる水平スキャンとステッピングモータを上下に傾けることによる垂直スキャンにより 2 次元の光走査を実現している。

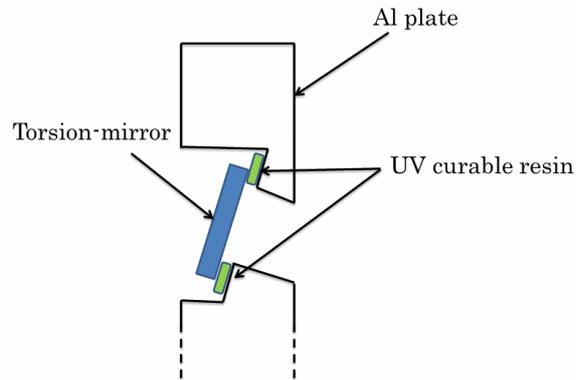


Fig. 6. Setup of torsion-mirror on Al plate

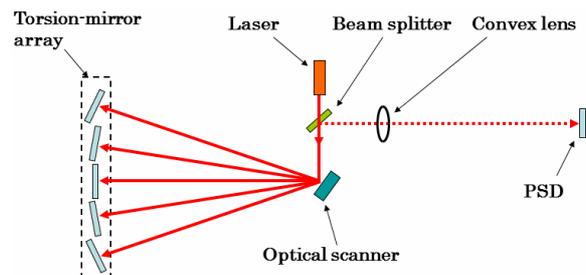


Fig. 7. Optical setup for electrostatic field distribution measurement

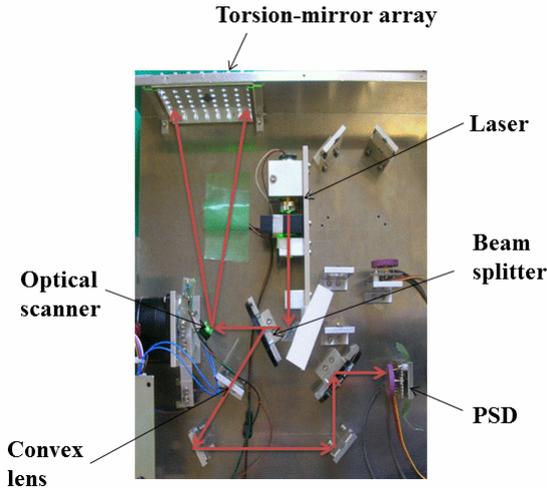


Fig. 8. Photograph of optical measurement setup

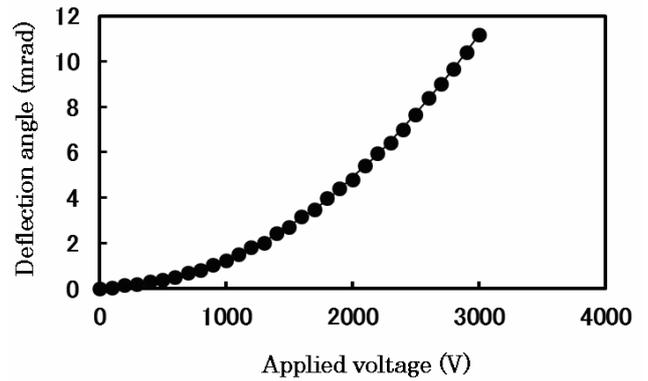


Fig. 9. Applied voltage and micro-mirror deflection

### 3. 実験結果

マイクロミラーの厚さが  $20\mu\text{m}$ 、面積が  $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 、トーション・バーの厚さが  $20\mu\text{m}$ 、長さが  $2\text{mm}$ 、幅が  $10\mu\text{m}$  (実測値は、上のトーション・バーの幅が  $8.69\mu\text{m}$ 、下のトーション・バーの幅が  $8.93\mu\text{m}$ ) のトーション・ミラーを使用し、2次元スキャナーからトーション・ミラーアレイが搭載されている球面までの長さが  $200\text{mm}$  の場合、 $10\text{mm}$  離れた  $75\text{mm} \times 40\text{mm}$  の大きさを持つ平板により電圧を印加した時の中心位置にあるトーション・ミラーによる測定結果 (黒丸) を Fig. 9 に示す。

図中の実線は理論値を示す。ほぼ、理論値と一致していることが分かる<sup>(2)</sup>。また、目標の帯電物質の測定電圧範囲： $100\sim 2\text{kV}$ 、測定分解能： $10\text{V}$  は、測定電圧範囲は  $3\text{kV}$  と広がり高電圧側では測定分解  $10\text{V}$  を達成したが、考察で述べるように低電圧領域では誤差が大きくなった。

測定時間の目標 1 秒以下に関しては、今回、光スキャナーとしてステッピングモータに搭載された 1 次元 MEMS スキャナーを使用したが、ステッピングモータの角度精度は十分であったものの回転の移動に時間がかかり 1 秒以下は実現できなかった。

また、トーション・ミラーを Fig. 10 に示すように球面上の中央部の  $5\text{cm} \times 5\text{cm}$  に  $4 \times 4$  並べて線状の導体の先に設けられた  $10\text{mm} \times 10\text{mm}$  の平板状の帯電物体を  $10\text{mm}$  の距離において  $2\text{kV}$  印加して測定した結果を Fig. 11 に示す。

Fig. 10 において、光ビームの主スキャンが水平方向であるため、マイクロミラーによる反射ビームがそれとは直角方向に静電気力で傾き、PSD で反射ビームの上下方向の位置変化を検出するためにトーション・バーをスキャン方向と同様に水平になるようにトーション・ミラーが配置され、マイクロミラーの半分の面がシールドプレートにより覆われている。Fig. 11 は一点に帯電物体を近づけた場合の各トーション・ミラーの出力の相対的な傾きを表し、一部 (左手前) のトーション・ミラーの出力が大きな誤差を示してい

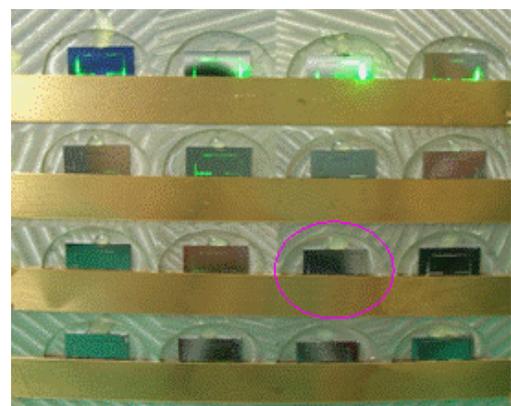


Fig. 10. Torsion-mirror array

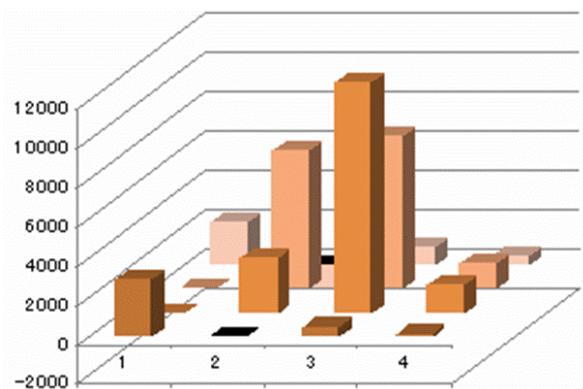


Fig. 11. Torsion-mirror array output distribution

るが、ほぼ凸状の分布を示している。

各トーション・ミラーの較正がなされていない事が対称的な分布からのずれを生んでいるとともに、左手前のトーション・ミラーはトーション・バーが他より細いものが間違っって実装されたため上述のような大きな誤差が発生したものである。

MEMS マイクロミラーアレイを用いた静電気分布測定装置の空間分解能については、従来の大口径の凸レンズを用いた静電気分布測定系で細い導体をスキャンし求め<sup>(2)</sup>半値幅として約  $4.5\text{mm}$  の値を得ており IntelliSense 社のシミュ

レータ IntelliSuite を用いたシミュレーションでも確かめているが、本実験においてもそれから予想される分布とほぼ等しくなっており、大口径の凸レンズを使用しない本実験装置が 100mm 角以上の広い面積の静電気分布測定に適用できることが分かった。

#### 4. 考 察

今回試作したトーション・ミラーを球面上に配置した光学系を持つ静電気分布測定装置 (Fig. 1(b)) は、平面上に配置し凸レンズにより 2 次元走査された光を並行に照射する光学系 (Fig. 1(a))<sup>(2)</sup> と比較してほぼ同等の感度とトーション・ミラーアレイのピッチが得られた。すなわち、測定感度分解能の仕様 10V は高電圧ではほぼ達成できた。しかし、低電圧では感度が帯電電圧の 2 乗に比例するため達成できていない。また、フルスケールでの誤差は、-4.5~+12% の範囲で、これは一般的な表面電位計の測定誤差であるフルスケール誤差 5% とほぼ同等の値である。また、測定時間の短縮のためには測定速度を制限している光スキャナーとして 2 次元 MEMS ミラーの採用を検討している。

これらの結果は等しいトーション・ミラーの傾きに対し、(1)、(2)式で示されたように、PSD 上での反射光スポットの位置は、それぞれ、PSD と球面との距離、あるいは、PSD と凸レンズとの距離で決定されるため、トーション・ミラーが同じであれば、その距離で決まるためである。

また、トーション・ミラーを分離して搭載するため、同じ空間分解能を得るためにはマイクロミラーの面積を保って全体の面積を小さくする必要があり、Fig. 3 に示したようにマイクロミラーを蝶々型にしてトーション・バーを設けた。その結果、空間分解能は、従来とほぼ同等の値となった。左手前のトーション・ミラーは、トーション幅の小さいものが間違っつけられており、明らかに誤差の原因になっており補正が必要であるが、これを除けばほぼ中心が高い分布が得られた。

トーション・ミラーアレイ及びシールド板はアースされており、Fig. 1(a)の場合、アースされた導体平面の距離  $a$  だけ離れた位置にある点電荷  $+q$  は、導体平面の面積が十分大きいとした場合、Fig. 12(a)のようにその電気映像として同じ距離  $a$  の位置に  $-q$  の点電荷を発生する。これに対し、Fig. 12(b)の場合、アースされた導体は原点  $O$ 、半径  $r$  の球面であるため、球面から距離  $a$  だけ離れた位置にある点電荷  $+q$  は、球を仮定すると、球面の内側  $ra/(r+a)$  の位置に  $-rq/(r+a)$  の点電荷を発生することが知られている<sup>(4)</sup>。

今回使用した球面の半径は 20cm であり、帯電物体の位置は 1cm 離れた位置にあるような測定を行っている。この場合、 $a=1\text{cm}$ 、 $r=20\text{cm}$  となり、映像点は  $ra/(r+a)=0.95\text{cm}$ 、電荷は  $-rq/(r+a)=-0.952q$  で、平面の約 95% の値となり 5% 程度の相違におさまる。

上記の議論のようにトーション・ミラーアレイとシールドプレートがアースされている場合、帯電物体が正あるいは負の両方の場合とも引力が働きマイクロミラーは同一方

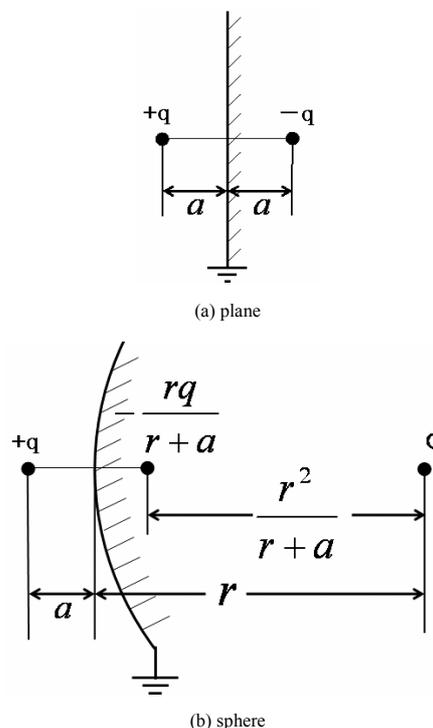


Fig. 12. Charge and image of electrostatic measurement

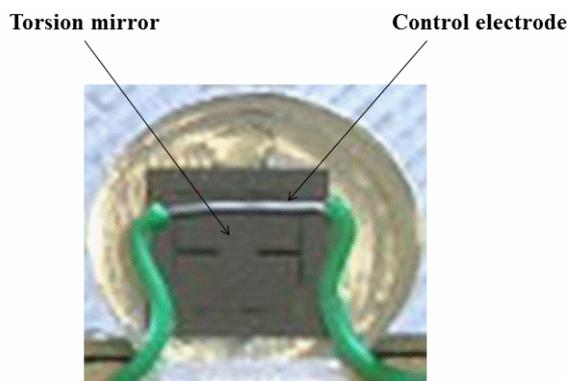


Fig. 13. Charge detection by control electrode

向に傾くため、そのままでは帯電物体の正負の判定ができない。帯電物体の正負を知るために、新たにシールドプレートの開口部の前面に線状のコントロール電極を設け、コントロール電極に電圧が印加された場合のマイクロミラーの傾き変化から帯電物体の正負を判断することを試みた。

Fig. 13 はコントロール電極の効果を調べるために直径 0.3 mm の電極をマイクロ・ミラーから 0.5 mm の距離に設けたもので、この電圧を変化させた時にマイクロミラーに働く力 (反射光の傾き) の変化を測定することにより、帯電物体の極性を知ることの可能性を検討した。測定対象である帯電物体の極性は、帯電物体の電圧に加えて制御電極に正または負の電圧を印加した際のマイクロミラーの傾き変化を測定することにより判定できる。帯電物体の極性と逆の極性の電圧を制御電極に印加するとマイクロミラーの傾きは減少することは帯電物体からの電気力線の終端がマイク

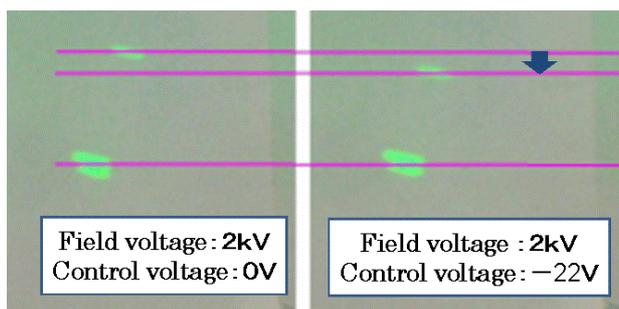


Fig. 14. Charge detection by control electrode

ロミラーよりも制御電極により集中するためであると解釈され、また、帯電物体と同じ極性の電圧を制御電極に印加すると、マイクロミラーの傾きは増加することは制御電極からの電気力線が加わるためであると考えられる。

この結果はシミュレーションによっても確かめられた。

Fig. 14 は緑色のレーザー光を用いコントロール電極の電圧を変化した場合のマイクロ・ミラーからの反射光の PSD 上での位置変化を示したもので、帯電物体の帯電電圧が 2kV において、左図は制御電圧が 0V、右図は制御電圧が -22V の場合である。

図中で最下段の紫色の線上の緑色の反射光パターンは帯電電圧が 0V の場合に相当し、最上段の紫色の線上の緑色の反射光パターンは帯電電圧 2kV で制御電圧が 0V の時の、間の紫色の線上の緑色の反射光パターンは帯電電圧 2kV で制御電圧が -22V に相当する。これより実際の装置において、コントロール電極を設けることにより帯電物体の正負を検出することが確かめられた。

## 5. むすび

捻じり梁 (トーション・バー) で支えられたマイクロミラー (トーション・ミラー) を球面上に 2 次元状に配置し、マイクロミラーの半面をシールド板で覆うことにより帯電物体によりトーション・ミラーが傾く。これを 2 次元光スキャナーと PSD を用いて、各トーション・ミラーの傾きを測定する静電気非接触可視化装置を試作した。従来の凸レンズを用いた光学系に比べ、ほぼ同様の性能が得られ、今後広い面積の測定への適用が可能であることが実証された。また、シールド板近傍に設けられたコントロール電極により、帯電物体の帯電の正負を判定することができることが示された。

## 謝辞

本研究は、経済産業省の平成 24 年度戦略的基盤技術高度化支援事業「MEMS 技術を応用した静電気非接触可視化システムの実用化」として実施された。

## 文 献

(1) 尾崎 宏:「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, pp.14-15 (2007)

(2) T. Kuriyama, T. Aoi, H. Maeda, T. Ito, Y. Ueno, T. Nakaie, N. Matsui, and H. Okumura: "MEMS Micro-Mirror Array for Electrostatic Field Distribution Measurement System", *IEEJ Trans. SM*, Vol.130, No.12, pp.575-579 (2010) (in Japanese)  
栗山敏秀・青井利一・前田裕司・伊東隆喜・上野吉史・中家利幸・松井信近・奥村浩行:「MEMS マイクロミラーアレイによる非接触静電気分布測定システム」, 電学論 E, Vol.130, No.12, pp.575-579 (2010)

(3) T. Kuriyama, T. Aoi, H. Maeda, T. Ito, Y. Ueno, T. Nakaie, N. Matsui, and H. Okumura: "Design of Optical System for Electrostatic Field Distribution Measurement Using Micromirror Array", *Sensors and Materials*, Vol.23, No.7, pp.435-448 (2011)

(4) 若桑光雄:「電磁気学演習」, 昭晃堂, p.128 (1970)

### 栗 山 敏 秀



(正員) 1949 年 2 月 11 日生。1971 年 3 月東京大学工学部物理工学科卒業。1973 年同大修士課程修了。1977 年同大電子工学博士課程修了。同年日本電気中央研究所入社。1981 年から 1 年間ペンシルバニア大学客員研究員。2006 年近畿大学教授。現在に至る。半導体レーザ, 高耐圧 IC, 各種センサ, 環境電磁工学の研究に従事。応用物理学会, 電子情報通信学会各会員。

### 高 辻 渉



(非会員) 1982 年大阪府立大学工学部化学工学科卒業。同年日本ビラー工業 (株) 勤務。1985 年和歌山県工業技術センター入所。2001 年博士 (工学) 取得 (大阪府立大学)。専門: 吸着, 排水処理。

### 伊 東 隆 喜



(正員) 1964 年 12 月 7 日生。1989 年 3 月福井大学工学部応用物理学科卒業。1991 年同大修士課程修了。1998 年同大後期博士課程システム設計工学修了 (工学博士)。1991 年京セラ (株) デバイス開発センター勤務。1997 年和歌山県工業技術センター入所。アモルファス薄膜, 化合物半導体デバイス, 半導体レーザ励起固体レーザ, 組込みシステム, モデル検査, 福祉機器の研究に従事。日本物理学会, 日本応用物理学会, レーザ学会, 米国光学会, 日本公衆衛生学会各会員。

### 前 田 裕 司



(非会員) 1950 年 4 月 19 日生。1978 年 3 月大阪府立大学大学院工学研究科博士課程修了。1982 年 6 月和歌山県工業試験場入所。2011 年 3 月和歌山県工業技術センター電子産業部部長で退職。2011 年 4 月より再任用。自動化・省力化, 画像処理・画像検査などのコンピュータシステムの研究開発に従事。

### 中 家 利 幸



(非会員) 1955 年 5 月 12 日生。1978 年 3 月大阪工業大学工学部電子工学科卒業。同年, 阪和電子工業 (株) 入社。半導体用静電気破壊試験器など信頼性試験器の開発に従事。現在, 高速同期型ノイズシミュレータと静電気可視化装置を開発中。

松 井 順



（非会員）和歌山生。2004年，近畿大学電子工学科卒業。同年阪和電子工業（株）入社。新事業開発に従事。

宮 本 佳 明



（非会員）2009年島根大学電子制御工学科卒業。同年，阪和電子工業（株）入社。静電気可視化装置の開発に従事。

---