

平成 26 年 5 月 27 日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360113

研究課題名(和文) 感光性ポリマーを用いた低コスト、大偏向角駆動MEMSミラーの研究

研究課題名(英文) Research on low-cost and large deflection angle MEMS mirrors using photo-sensitive polymer materials.

研究代表者

大平 文和(OOHIRA, FUMIKAZU)

香川大学・学内共同利用施設等・教授

研究者番号：80325315

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円、(間接経費) 4,230,000円

研究成果の概要(和文)：MEMミラーデバイスの低コスト化と大偏向角化を目指し、ポリマー材料を用いたデバイス構造の提案と実現技術を研究した。構成は、感光性ポリマーを用いた電磁駆動型ミラーと、磁性粒子を含有したSU-8を用いた外部磁気駆動型ミラーである。ポリマーの機械的特性を評価しこれに基づきデバイス設計を行った。その結果、簡易化プロセスにより低コスト化が可能で、静的駆動偏向角は20度以上可能であることを示し、目標を達成できる技術を実現した。

研究成果の概要(英文)：The new constructions of the MEMS mirror devices using polymer materials are proposed, and the technologies to realize the devices are examined. Two types of the devices are proposed, one is an electro-magnetic driven type device and the other is an outer magnetic driven type device using SU-8 containing micro magnetic particles. The devices are designed based on the evaluated polymer mechanical properties. As the results, the low cost fabrication was achieved owing to the simplified process and the large optical deflection angle more than 20 degrees was also achieved.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：マイクロマシン マイクロミラー MEMS ポリマーデバイス マイクロファブリケーション 知能機械システム マイクロメカトロニクス

### 1. 研究開始当初の背景

MEMS ミラーは、光スイッチやディスプレイ等、多方面の用途に向けて研究・開発が行われてきた。これにより実用的なデバイスが実現され、世界で広く使用される状況にある。しかし、それらデバイスは基本的にシリコン基板を用いており、そのデバイス作製に当たっては深掘りドライエッチング技術等を用いていた。このため、材料コストが高いこと、およびプロセスに多くの時間と手間がかかるとともに高価なプロセス装置が必要であることから、低コスト化に限界があった。さらに、ミラー駆動において弾性ヒンジの部分は従来のシリコンでは高い剛性のために、大偏向角駆動には大きな駆動力が必要である等の課題があった。

以上のように、MEMS ミラーにおいては、低コスト化および大偏向角化に向けて、新しいデバイス構造とその作製技術が必要とされていた。

### 2. 研究の目的

本研究では、提案者がこれまで蓄積してきた MEMS デバイス設計技術、微細構造プロセス技術、ポリマー応用技術、磁性材料応用技術、微細部品評価技術を基盤として、特に感光性ポリマー材料を用いた MEMS ミラーを提案、研究する。

これにより、従来の課題であったコストと偏向角についてブレークスルー技術を開発する。最終的に、従来よりも大幅な低コスト化と大偏向角駆動が可能な MEMS ミラーの実現を目指す。

### 3. 研究の方法

MEMS ミラーの大幅な低コスト化と大偏向角度駆動の実現に向け、提案者は以下を提案した。一点目は、シリコン基板を用いないデバイス構造であり、二点目は感光性ポリマーを用いる構成である。具体的には、シリコン基板ではなくガラス基板を用いることにより、シリコン基板自体の高コストの課題や、シリコンを深掘りするための工程やプロセス装置の高コストの課題を解決することが出来る。また、感光性ポリマーは、フォトリソプロセスだけで簡単に形状形成が可能であるため、エッチングプロセスなどの工程の簡易化が図れる。さらに、シリコンの高剛性に起因する偏向角度の課題を解決できる。

以上のコンセプトに基づき、低コスト化と大偏向角化を目指して、次の2構成の MEMS ミラーデバイスを提案する。

(1) 感光性ポリマーを用いた電磁駆動型ミラー

(2) 磁性粒子を含有した SU-8 材料を用いた外部磁気駆動型ミラー

(1) についての構成や特徴、また課題等は次の通りである。

構成としては、基板にガラス板を用い、可

動部に感光性ポリイミド (TORAY: Photoneece PW-1270) や SU-8 を用いて製作するローレンツ駆動型のポリマー MEMS ミラーである。

提案するポリマー MEMS ミラーを図 1 に示す。デバイスの特徴は以下である。基板材料には従来のシリコンウェハに代わりガラス基板を用いる。シリコンを用いないため深掘りエッチング装置が不要であり、フォトリソグラフィとウェットエッチング等の簡便な工程で実現できる。また、可動部のトーションバーには、シリコンに比べて低剛性でプロセスが容易なポリマー (感光性ポリイミド、SU-8) を用いるため、大偏向角駆動が期待できる。駆動方式はローレンツ力を利用した電磁駆動である。非共振状態での大偏向角化を実現するために、大きな発生力を得られるよう配線をコイル形状とし多層に配置する。

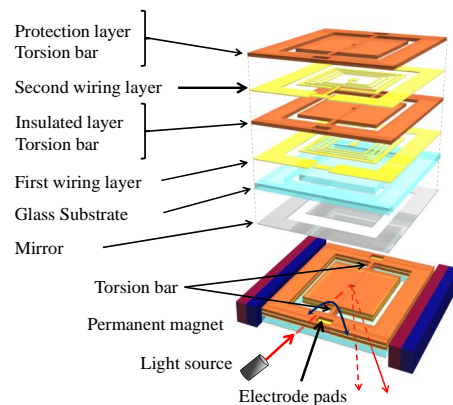


図1 提案するポリマーMEMSミラーデバイス

作製方法としては、ガラス基板へのポリマーの塗布とフォトリソグラフィ、また配線層の形成とパターニング等である。

一方、課題としては、作製プロセス条件の最適化、および適切な材料の選定が必要である。そこで、従来から様々な部品に適用されているポリイミド、およびレジストとして実績のある SU-8 を用いた構成を検討した。

ここで、SU-8 や感光性ポリイミドなどの高分子材料をアクチュエータなどに応用した場合の、微小部材の機械的特性や使用環境における信頼性などに関する報告は少ない。したがって、これら機械的特性の評価が必要である。

本研究では、可動部に用いる感光性ポリイミド等につきミリスケールの引張試験片を作製し、実際の使用環境温度を想定して、-50 ~ 300 で機械的特性を評価した。この値に基づき、汎用工学シミュレーションソフトウェア COMSOL により FEM 解析を行い、大偏向角が可能な構造設計を行った。

本デバイスは基本的にポリマーを用いるため、クリープやヤング率の変化等が懸念される。従って、厳密な駆動角度の制御には、偏向角度を検出するセンサーとこれを用いた駆動制御が必要となる。このため作製が簡

単な誘導起電力を利用したセンサーデバイスを一括形成する構成を考案し、作製、評価した。

(2) についての構成や特徴、また課題等は次の通りである。

構成としては、図2に示すように、ガラス基板表面にCr膜を形成しミラー面とし、裏面には磁性微粒子を含む感光性材料SU-8を塗布する。(PNCと呼ぶ)。この下部に電磁石を配置し、電流により発生する磁力で上部のミラーを駆動する方式である。

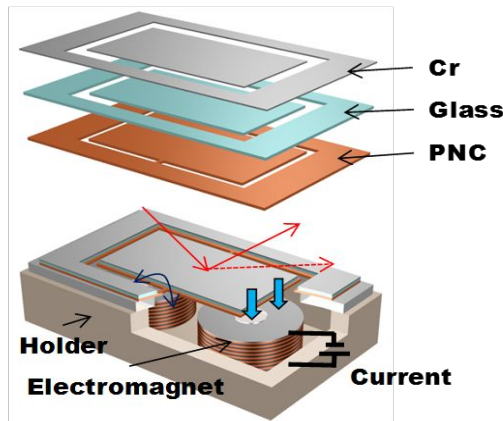


図2 磁性粒子を含有したSU-8材料を用いた外部磁気駆動型ミラーの構成

作製方法としては、ガラス基板にミラー面となるCrを製膜し、その後ミラー面をフォトリソとウェットエッチングによりパターンニングする。次に、裏面にPNCを塗布し、トーションバー部と駆動膜を同時にパターンニングする。最後に、フッ酸によりガラス部をエッチングする。このように、ドライエッチング装置を用いずフォトリソグラフィとウェットエッチングの極めて簡単な工程で実現できる。駆動には外部の電磁石を用いるため、ミラー部への配線等のプロセスも不要である。

本構成でミラーを二次元に駆動するため、図3に示す構成を考案した。ミラー部の支持ヒンジを、つづら折りのミアング構造とし、かつミラー駆動用の電磁石を4箇所配置する構造とした。これにより、2枠構造にすることなくミラーの二次元駆動が可能となる。

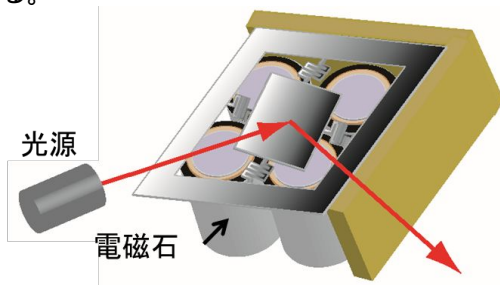


図3 二次元型電磁駆動ミラーの構成

一方、課題としては、ヒンジ材料として磁性微粒子を含むSU-8を用いるため、この材料の高アスペクト比の形状形成可能なプロセス条件の最適化、および機械的特性や信頼性評価が必要である。このため、本材料の機械的特性試験等を行い、適用の可能性を評価した。

これらの結果を用いて、ヒンジ部の構成やデバイス各部の設計を行った。

#### 4. 研究成果

各構成のデバイスにつき下記の成果を得た。

##### (1) 感光性ポリマーを用いた電磁駆動型ミラー

図4に感光性ポリイミドを用いて作製したミラーデバイスを示す。図のように、多層配線を形成したデバイスを実現することができた。

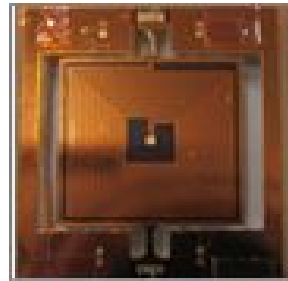
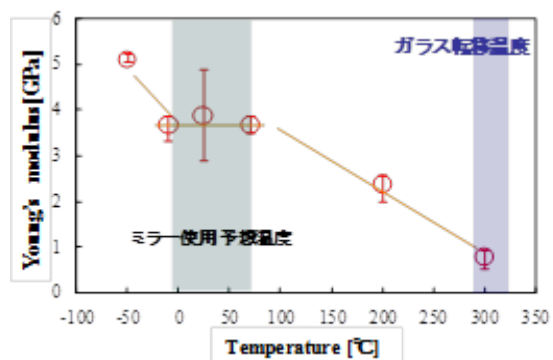


図4 ポリイミドで作製したデバイス

用いた材料の機械的特性を評価した結果を図5に示す。引張試験より、室温でのヤング率と引張強度の平均値はそれぞれ3.905GPa, 0.122GPaであり、温度上昇とともに徐々に低下した。特に、感光性ポリイミドのガラス転移温度約320℃近くでは、ヤング率は室温の5分の1程度、また引張強度は4分の1程度までそれぞれ大きく減少した。ミラーの使用予想温度である-10℃から70℃の範囲では、ヤング率および引張強度の平均値には大きな変化はなかった。



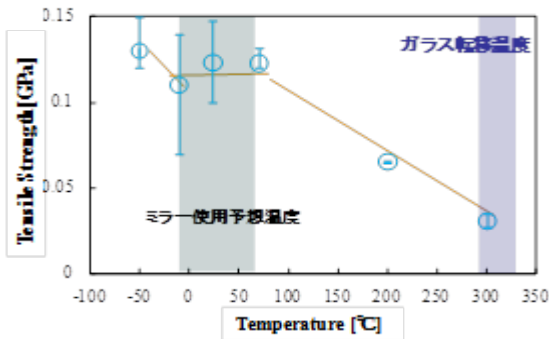


図5 温度によるヤング率と引張り強度の変化

作製したミラーデバイスの駆動特性を評価した。トーションバーの長さが 1500  $\mu\text{m}$ 、1800  $\mu\text{m}$  のデバイスにおいて、それぞれ光学角度  $\pm 30$  度と  $\pm 40$  度の大幅な角度を確認した。製作したデバイスのトーションバー部はポリマーと金属の層構造となっている。この層構造をモデル化し、ミラーに力を加えた時の変位量を FEM 解析により求めた。光学偏向角度が 25 度の時のトーションバーに生じるミーゼス応力値は、感光性ポリイミドの一般的な弾性限に比べ約 1/10 と十分小さな値であり、偏向角 25 度で十分弾性域内での変形であることを確認した。

さらに、ポリイミドだけでなく、感光性材料として、SU-8 を用いたミラーデバイスも検討した。構成は、基本的に上記のポリイミドと同様である。作製したデバイスを図 6 に示す。このように、SU-8 を用いたミラーデバイスも実現することができた。

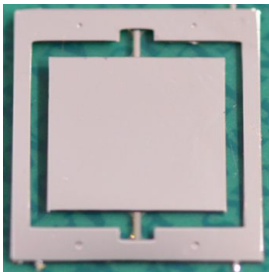


図6 SU-8 を用いたミラーデバイス

この SU-8 で作製したミラーデバイスにつき、静的駆動特性を評価した。その結果を図 7 に示す。作製したミラーは、駆動電流が 3.5 mA で、30 度の偏向角が得られた。

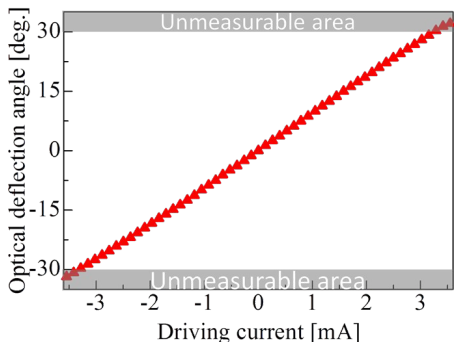


図7 ミラーデバイスの静的駆動特性

一方、ポリマー材料を用いることによりクリーブ等の現象が懸念されるため、角度を検出してフィードバック制御するセンサーを本ミラーデバイスに集積化することを検討した。センサー構成は、センサーコイルをミラー面に形成し、これによりミラーの回転による誘導起電力を検出してその回転角度を把握する。

この集積したセンサーを設計、作製し、その特性を評価した。30Hz 非共振駆動時のセンサーからは入力信号から若干遅れた同周波数の波形が見られ良好に機能していた。しかし信号が小さく低速・低振幅での駆動時センサー信号にはノイズが多く含まれていた。そこで信号処理の方法としてロックイン検知を行った。30Hz 駆動時の駆動振幅を変化させた際のセンサー信号振幅の検出結果を図 8 に示す。センサーからは光学偏向角に対し線形増加する信号振幅が得られた。これにより、光学偏向角の変化をモニタリングすることができ、集積化したセンサーのデータ処理により、得られた信号でフィードバック制御が可能であることを示した。

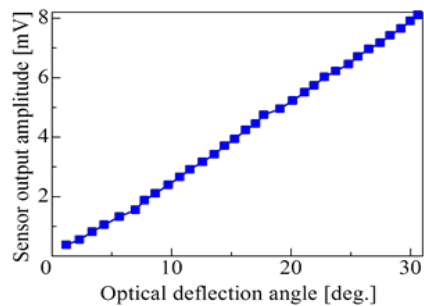


図8 信号の検出結果

(2) 磁性粒子を含有した SU-8 材料を用いた外部磁気駆動型ミラー

磁性粒子含有 SU-8 につき、電磁石による吸引力の評価を行った。磁性材料として酸化鉄を用い、粒子サイズをパラメータとして評価した。図 9 に示すように、電磁石と磁性膜の距離による吸引力の値が得られ、これを用いてミラーデバイスの設計を行った。

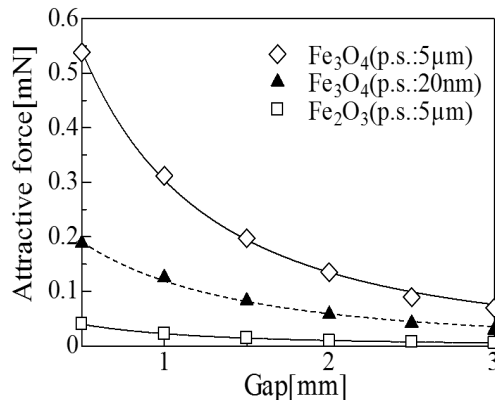


図9 ミラーと電磁石の距離による吸引力

また、磁性粒子の含有濃度による材料のヤング率や破断応力等の評価を行った。その結果、図10に示すように、今回の測定範囲内では、微粒子径や含有率は、ヤング率へ大きな影響はしないこと、一方、微粒子の含有率が高くなると破断応力は低下する傾向があることが明らかとなった。

これらデータを用いてデバイスに用いる材料や含有率等を決定した。

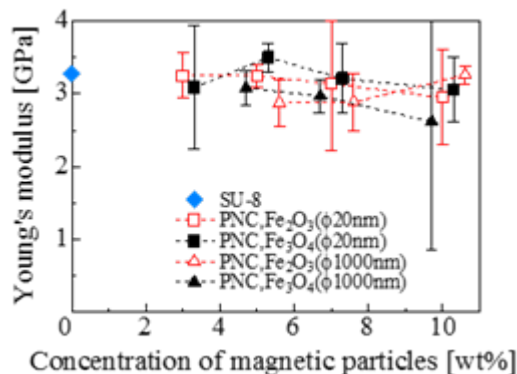


図10 酸化鉄を含有した SU-8 のヤング率の変化

さらに、二次元駆動のため図11に示すミアンダ構造ヒンジの設計を行い、大偏向角が得られる構造パラメータを決定した。本構成につき FEM 解析を行い、以下の設計条件で、このヒンジ部にかかる応力は、本材料の破断応力以下であることを示した。L1=L2=500  $\mu$ m、W=200  $\mu$ m、S=300  $\mu$ m、H=1000  $\mu$ m、折り返し数 N=3。

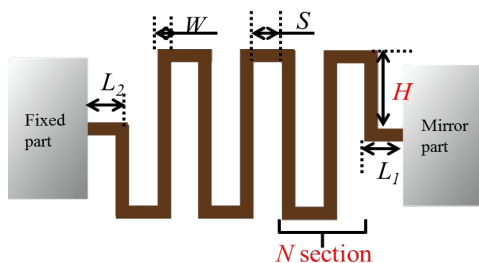


図11 ヒンジ部の構成

これらの設計パラメータに基づき、提案した作製プロセスで作製したミラーデバイスを図12に示す。図のように良好なミラーデバイスを実現できた。このデバイスのミラー面の反りは15  $\mu$ m、表面粗さ Ra は41 nmであった。

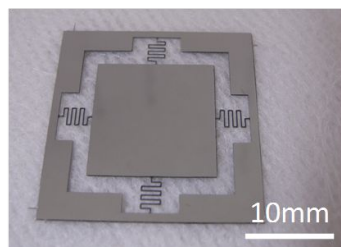


図12 作製したミラーデバイス

作製したデバイスにつき静的な駆動特性を評価した。図13に示すように、二次元で約20度の偏向角度が得られた。このとき、ヒンジ部のせん断応力は材料の弾性範囲内である。

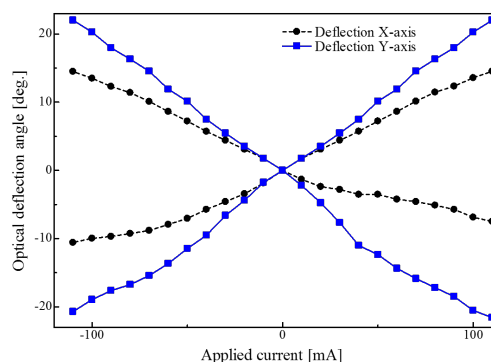


図13 二次元の静的駆動特性の評価結果

以上のように、本研究目標である、低コスト化と大偏向角化が可能なミラーデバイスを実現する基本技術を確認した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1件)

1. T. Morikaku, Y. Kaibara, M. Inoue, T. Miura, T. Suzuki, F. Oohira, S. Inoue, and T. Namazu, Influences of Pretreatment and Hard Baking on Mechanical Reliability of SU-8 Microstructures, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol.23, 105016 (10pp), 2013. (査読有) DOI; 10.1088/0960-1317/23/10/105016

〔学会発表〕(計 15件)

国際学会 7件

1. H. Yamashita, K. Terao, H. Takao, F. Shimokawa, F. Oohira, and T. Suzuki, Integration of Angular Rate Sensor on Large Deflection Polymer-MEMS Mirror, IEEE Optical MEMS & Nanophotonics Conference [OMN2013], pp.69-70, 2013/8/18-22, Kanazawa, Japan (査読有)
2. J. Suzuki, T. Miura, K. Terao, H. Takao, F. Shimokawa, T. Namazu, F. Oohira, and T. Suzuki, Dual-Axis Polymer-MEMS Mirror Made of Photosensitive Nanocomposite, IEEE Optical MEMS & Nanophotonics Conference [OMN2013], pp.101-102, 2013/8/18-22, Kanazawa, Japan (査読有)
3. T. Nakahara, J. Suzuki, Y. Hosokawa, Y. Ueda, K. Terao, H. Takao, F. Shimokawa, F. Oohira, H. Miyagawa, H. Kotera and T. Suzuki,

Improvement of Processing Reproducibility for a Magnetic-Driven Microstructure Made of Photosensitive Nanocomposite, IEEE Optical MEMS & Nanophotonics Conference [OMN2012], 2012/08/06~2012/08/09, Banff, Alberta, Canada. (査読有)

4. T. Morikaku, Y. Kaibara, M. Inoue, T. Miura, T. Suzuki, F. Oohira, and T. Namazu, Influence of Pre-treatment Condition on the Strength of SU-8 Micro Structures, APCOT 2012 (2012/7/9) (査読有)

5. T. Miura, T. Suzuki, K. Terao, H. Takao, F. Oohira, Y. Kaibara, and T. Namazu, FEM analysis of a polymer MEMS mirror using photosensitive nanocomposite, JSME International Workshop on Micro/Nano-Engineering(2011/12/17-18), ROHM Plaza, Kyoto, (査読有)

6. Osamu Sasaki, Kyouhei Terao, Takaaki Suzuki, Hidekuni Takao, Fumikazu Oohira, Yoshinori Kaibara, Takahiro Namazu, Design and Fabrication of polymer MEMS Mirror Based on the Mechanical Characteristic Evaluation of Polyimide Materials, 16th International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics [OMN2011] 2011/8/8-11, Istanbul, TURKEY, (査読有)

7. T. Miura, T. Suzuki, K. Terao, H. Takao, F. Oohira, Y. Kaibara, and T. Namazu, Fabrication and evaluation of polymer MEMS mirror based on the mechanical characteristic of polymer containing magnetic particles, IEEE Optical-MEMS 2011(2011/8/8-11), Istanbul, Turkey, (査読有)

国内学会 8件

#### 8. 鈴木孝明:

3次元UVリソグラフィとそのバイオ応用、第1回 HANAMIST(調和ナノマイクロシステム技術研究会)、平成25年12月18日(キャンパスプラザ京都)(査読無)

9. 山下紘史、寺尾京平、高尾英邦、下川房男、大平文和、鈴木孝明:

Si/Polymer ヒンジを組み合わせた2軸 Hybrid-MEMS ミラー、電気学会 第30回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム [URL], 6PM3-PSS-120, 2013/11/5-7, 仙台国際センター(宮城県仙台市)(査読有)

10. 山下紘史、寺尾京平、高尾英邦、下川房男、大平文和、鈴木孝明:

角度センサを集積したポリマーMEMS ミラーの駆動評価、日本機械学会 2013年度年次大会 [JSME 2013], J161021, 2013/9/9, 岡山大学津島キャンパス(岡山県)(査読無)

11. 鈴木淳也、三浦卓也、寺尾京平、高尾英邦、下川房男、生津資大、森角寿之、大平文和、鈴木孝明:

吸引駆動型ポリマーMEMS ミラーの駆動特性に関する有限要素解析、日本機械学会 2013年度年次大会 [JSME 2013], J161011, 2013/9/9, 岡山大学津島キャンパス(岡山県)(査読無)

12. 山下紘史、寺尾京平、高尾英邦、下川房男、大平文和、鈴木孝明:

Polymer-MEMS ミラーへのセンサ集積化に関する研究、日本機械学会 情報・知能・精密機器部門講演会 [IIP 2013]、2013年3月21日~2013年03月22日、東洋大学、東京都(査読無)

13. 三浦卓也、鈴木孝明、寺尾京平、高尾英邦、下川房男、生津資大、森角寿之、大平文和:

感光性ナノコンジットを用いた磁気駆動型ポリマーMEMS ミラーの駆動特性評価、電気学会 E 部門 第29回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム(2012/10/22-24)、北九州国際会議場(福岡)(査読有)

14. 佐々木修、鈴木孝明、寺尾京平、高尾英邦、下川房男、貝原吉智、生津資大、大平文和:

使用温度下におけるトーションバーの機械強度評価に基づくポリマーMEMS ミラーの設計と評価、電気学会 第28回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム、2011/9/26-27 タワーホール船堀(東京都)(査読有)

15. 森角寿之、貝原吉智、生津資大、井上雅俊、三浦卓也、鈴木孝明、大平文和、井上尚三、吉木啓介:

MEMS ミラーデバイスの信頼性のための SU-8 微小構造体の機械特性評価、精密工学会 2011 年度秋季大会 学術講演会(2011/9/20-9/22)、金沢大学(石川県)(査読無)

〔その他〕

1. 展示会:

nano tech 2014 国際ナノテクノロジー総合展・技術会議、2014年1月29日-1月31日(nano tech 実行委員会)、四国 TLO ブース

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

大平 文和(OOHIRA FUMIKAZU)

香川大学・社会連携知的財産センター教授、研究者番号:80325315

(2)研究分担者

鈴木 孝明(SUZUKI TAKAAKI)

香川大学・工学部・准教授

研究者番号:10378797

(3)研究分担者

生津 資大(NAMAZU TAKAHIRO)

兵庫県立大学・工学(系)研究科・准教授、研究者番号:90347526