

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」

研究開発成果等報告書

平成25年 5月

委託者 近畿経済産業局

委託先 公益財団法人わかやま産業振興財団

目 次

第1章 研究開発の概要	
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	(1)
1-2 研究体制	(2)
1-3 成果概要	(4)
1-4 当該研究開発の連絡窓口	(4)
第2章 本論	
(2-1) シリコンMEMS加工の安定	
2-1-1 MEMS加工プロセス (平成22年度)	(5)
2-1-2 MEMS形状の最適化 (平成22年度)	(6)
2-1-3 MEMSミラーの感度特性 (平成23年度)	(7)
2-1-4 MEMSミラーのマイクロファブリケーション技術の確立 (平成24年度)	(10)
2-1-5 レーザ微細加工システム (平成22年度)	(11)
2-1-6 レーザトリミング加工 (平成23年度)	(12)
2-1-7 精密三次元レーザ加工 (平成24年度)	(12)
(2-2) デモができる製品の完成	
2-2-1 光学系の感度向上 (平成23～24年度)	(12)
2-2-2 光学系の無レンズ化 (平成23～24年度)	(12)
2-2-3 誘導帯電電極の設計 (平成24年度)	(13)
2-2-4 エアダンピング設計 (平成24年度)	(14)
2-2-5 制御電極による対象物体の帯電物体の極性判定 (平成24年度)	(15)
2-2-6 デバイスのモジュール化 (平成24年度)	(16)
2-2-7 MEMS光スキャナ (平成24年度)	(16)
2-2-8 簡易型測定器 (静電気非接触可視化検査機器) 製作 (平成22年度)	(18)
2-2-9 電気測定量と被測定物の重ね表示 (平成22～23年度)	(18)
2-2-10 信号処理アルゴリズムの改良 (平成23～24年度)	(19)
2-2-11 ワンチップ型デモ機の製作 (平成23年度)	(23)
2-2-12 静電気可視化装置の試作 (平成23～24年度)	(23)
(2-3) 測定精度確認と改良	
2-3-1 校正方法の確立 (平成24年度)	(25)
2-3-2 使いやすい装置に仕上げる (平成24年度)	(26)
第3章 全体総括	(27)

第1章 研究開発の概要

半導体の組立工場や液晶パネル工場では製品トラブルの原因となる静電破壊の高速検査化、問題箇所可視化などが求められている。

本事業では、従来の表面電位センサでは電荷が蓄積さえるためオフセット値が変化するという問題を解決するために、電荷量により MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) トーション・ミラーがねじれるという原理を用いた電荷量測定型アレイ静電センサ (MEMSM ミラー) の研究開発を行った。さらに、光学コテ法によるアレイ面の計測技術と組込みシステムを組合せた静電気非接触可視化検査技術に取組み、計測時間の短縮、測定面積の広範囲化、精度向上を目指した。

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

【研究開発の背景】

現在、半導体工場では、半導体デバイスが受ける静電気放電の原因である静電気帯電量を測定するため、表面電位計による測定を行っている。情報関連産業、自動車、電機をはじめとして半導体の需要業界からは、半導体の高精度・低価格化のニーズが高まっている。このニーズに対応するためには、静電対策機器においては、検査の高速化、問題箇所の把握方法などの性能を向上させる必要がある。

【研究目的】

本研究開発は、MEMS (マイクロマシン) 技術を活用した静電気非接触可視化検査技術を開発し、現状の表面電位計に替わる新たな静電対策機器の実用化を目的とする。

【目標】

具体的には、焦点距離 300 mm の光学系で、PSD (Position Sensitive Detector) 面の変位量 2 mm が確保できて (MEMS 回転変位約 0.4°) 歩留まりがウェハで 90%、分離で 99% 以上を達成できる MEMS 加工技術を確立して、以下のスペックを満たす装置の開発を目指した。

・MEMS 加工技術

成果：半導体プロセスにより MEMSM ミラーが厚さ $20\ \mu\text{m}$ 、トーション幅 $10\ \mu\text{m}$ のトーション・ミラー (高感度のために蝶々型の特殊形状) において、ウェハで歩留まり 100%、切り離しても 100% となった。光コテ法による感度測定でも距離 300 mm において、印加電圧 0V に対する印加電圧 2000V の反射光位置の変位が 5mm となった。当初目標を達成した。

・測定範囲 : 100~2kV

成果：測定範囲 100~5kV と当初目標を達成した。

・測定分解能 : 10V

成果：印加電圧 1000V 以上において測定分解能 10V を達成した。

・測定距離 : 10 mm

成果：達成した。

・測定範囲 : 100 mm 角

成果：達成した。

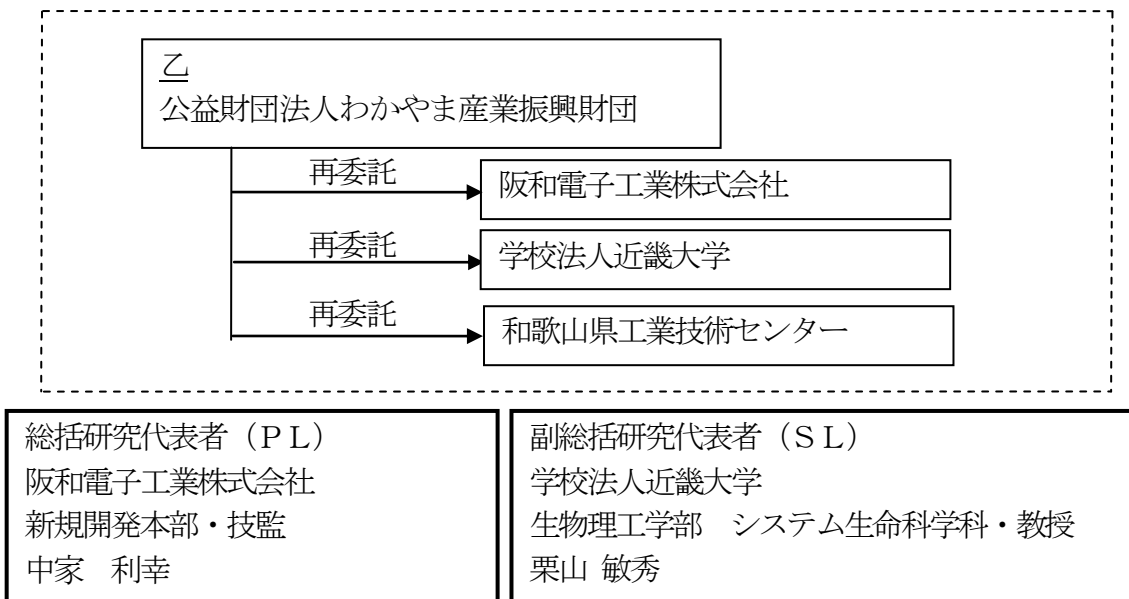
・測定時間 : 1 秒以下

成果：組込みシステムとしては達成した。光スキャナの走査時間が 5~6 秒かかり今後の課題である。

1-2 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

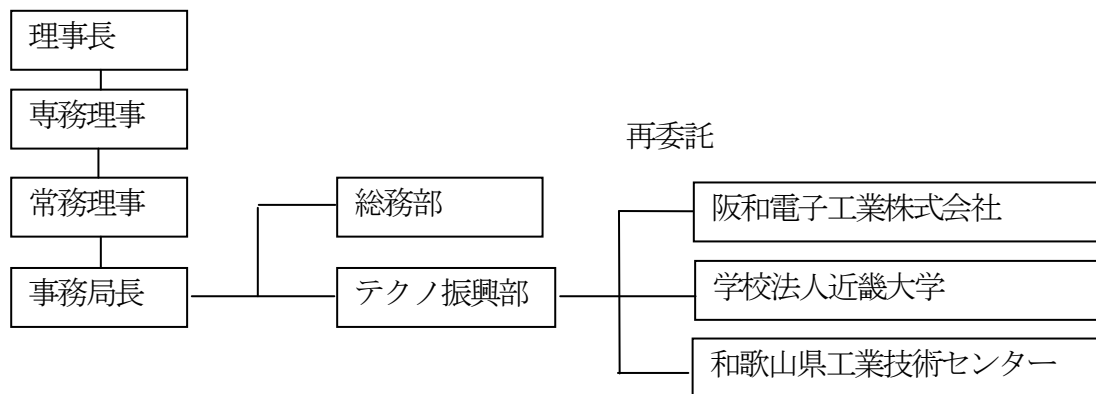
1) 研究組織 (全体)



2) 管理体制

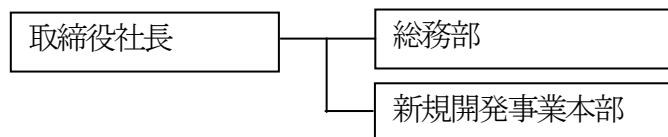
① 事業管理機関

[公益財団法人わかやま産業振興財団]

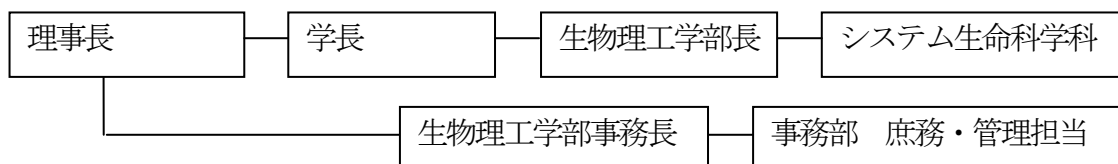


② (再委託先)

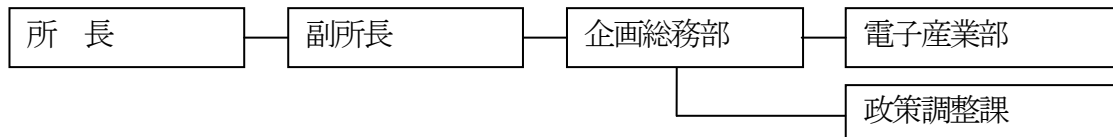
阪和電子工業株式会社



学校法人近畿大学



和歌山県工業技術センター



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】 公益財団法人わかやま産業振興財団

管理員

氏名	所属・役職
三井 誠	テクノ振興部 部長
大平 美穂	テクノ振興部 テクノ振興班 班長
山西 妃早子	テクノ振興部 テクノ振興班 主任
西前 浩平	テクノ振興部 テクノ振興班 主査
田尻 智子	テクノ振興部 テクノ振興班 主事
吉村 ルリ子	テクノ振興部 テクノ振興班 主事
杉本 五月	テクノ振興部 テクノ振興班 事務補助員
南宅 芳彦	総務部 班長

【再委託先】

阪和電子工業株式会社

氏名	所属・役職
中家 利幸	新規開発事業本部 技監
松井 順	新規開発事業本部 研究員
宮本 佳明	新規開発事業本部 研究員

学校法人近畿大学

氏名	所属・役職
栗山 敏秀	生物理工学部 システム生命科学科 教授

和歌山県工業技術センター

氏名	所属・役職
高辻 渉	電子産業部 部長
伊東 隆喜	電子産業部 主査研究員
前田 裕司	電子産業部 副主査研究員

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

公益財団法人わかやま産業振興財団

(経理担当者) テクノ振興部 テクノ振興班 班長 大平 美穂

(業務管理者) テクノ振興部 部長 三井 誠

(再委託先)

阪和電子工業株式会社

(経理担当者) 総務部 総務課 係長 西出 陽一

(業務管理者) 新規開発事業本部 技監 中家 利幸

学校法人近畿大学

(経理担当者) 事務部 庶務・管理担当 中井 智賀

(業務管理者) 生物理工学部学部長 細井 美彦

和歌山県工業技術センター

(経理担当者) 企画総務部 政策調整課 主査 中山 裕之

(業務管理者) 副所長 前田 育克

1-3 成果概要

(1) シリコン MEMS 加工の安定

【成果】

目標感度を得るために MEMS ミラーの形状最適化を行い、ミラー面積とトーシヨン幅の形状と関係から求まる最適形状、蝶々型形状であることを発見した。

半導体プロセスにより MEMSM ミラーが厚さ $20\mu\text{m}$ 、トーシヨン幅 $10\mu\text{m}$ のトーシヨン・ミラー（高感度のために蝶々型の特殊形状）において、ウェハで歩留まり 100%、切り離しでも 100%を達成した。レーザ微細加工技術の開発を行い、トーシヨン幅 $5\mu\text{m}$ に対し $2\mu\text{m}$ のレーザトリミング技術を確立し、保護用の補強機構の切断も達成できた。さらに、レーザ加工により半導体と特性が同等な低コスト MEMS を開発した。

【今後の課題】

レーザ加工 MEMS での量産化

(2) デモができる製品の完成

【成果】

光コテ法での課題であるレンズのゴーストを解消するために、MEMS ミラーをフレネルレンズ状に配置することで、無レンズ化に成功した。被測定物画像を記憶させておいて、画像処理を行うことで、静電気測定量と被測定物の重ね表示を実現した。静電気の可視化はプラスの静電気帯電は赤、マイナスは青で帯電を濃淡で行うことができる。

【今後の課題】

外乱（主に風）の影響を防ぐ対策

帯電物体（被測定物）とトーシヨン・ミラーとの間に誘導体電電極を配置する方法を検討したが、誘導体電電極が帯電してしまうため、その対策方法が見つからず、GND 電極のエアダンピング効果を利用することとした。

システムの 2 レンジ化

光源が平行光線を出せていないのが原因と考えられるが、10 倍の PSD 上に焦点を結ぶことが出来なかった。光学系を再検討する。

(3) 測定精度確認と改良

【成果】

日々高まる顧客ニーズを拾い上げ更なる装置の改良を行うために、MEMS 型のような可動部を持たない静電容量結合方式センサを開発し、これを搭載した静電気可視化装置を開発した。展示会などでワンセンサ MEMS 型静電気センサとともに PR し、市場調査を行った。これらの活動から静電気可視化のニーズは当初目標とした半導体産業だけでなく、印刷、自動車、食品、航空機といった幅広い分野にあることがわかった。

【今後の課題】

静電気の可視化は世界初のため校正方法には未開の部分あり、さらになる研究が必要である。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

阪和電子工業株式会社 中家 利幸

TEL: 073-477-4435

FAX: 073-477-3445

E-mail: toshin@hanwa-ei.co.jp

第2章 本論

(2-1) シリコンMEMS加工の安定

2-1-1 MEMS加工プロセス (平成22年度)

MEMSによく採用されている、SOI(Silicon On Insulator)構造のウェハを使って「半導体加工プロセス」によるセンサ開発に取り組んでいるが、失敗に終わっていた。MEMSが大型であるため、応力が原因であると考えており、プロセスの途中で割れてしまうものである。MEMSの基本構造は図1-1(a)である。SOIウェハは図1-1(b)の構造で、活性層/BOX層/支持層からなる。活性層が薄いため支持層が補強の役目を果たし、BOX層は活性層又は支持層のエッチングを止める役目を果たし、活性層と支持層は異なる形を作ることが出来るものである。

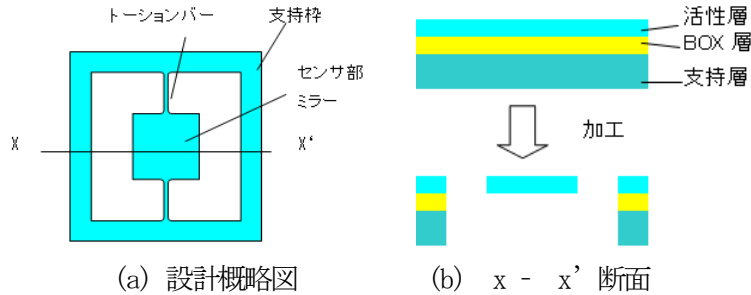


図1-1 MEMS加工形状

過去に試したプロセスは、

- 活性層 RIE (Reactive Ion Etching: 反応性イオンエッチング) → 支持層 RIE → BOX 層除去
- 支持層 RIE → 活性層 RIE → BOX 層 Et (エッチング)
- 活性層 RIE → BOX 層除去 → 支持層 RIE
- 活性層 RIE → 支持層エッチ Et → BOX 層 Et

であるが、いずれも支持層エッチングで失敗した。

今回は外注先を変更するとともに過去の失敗第一の原因であると考えられるウェハの応力を緩和する目的でダミーパターンを入れて抜きパターンを少なくすることとマスクとなる酸化膜の厚みをBOX層に合わせて応力の釣り合いをとる方法を試みた。使用したSOIウェハのBOX層はシリコンを酸化した SiO_2 で O_2 が加わったため膨張してバイメタルのように変形しようとするが応力であり、図1-2(a)のように活性層と支持層で挟まれていると問題ないが、プロセス途中で図1-2(b)のように活性層とBOX層との応力のために壊れてしまうと考えられるためである。今回は図1-2(b')のように最終のBOX層除去で落ちてしまう「ダミーパターン」を入れて応力による歪みを少なくする対策を行った。

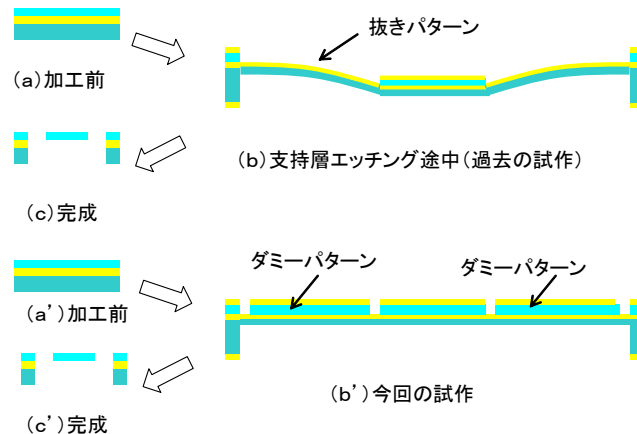


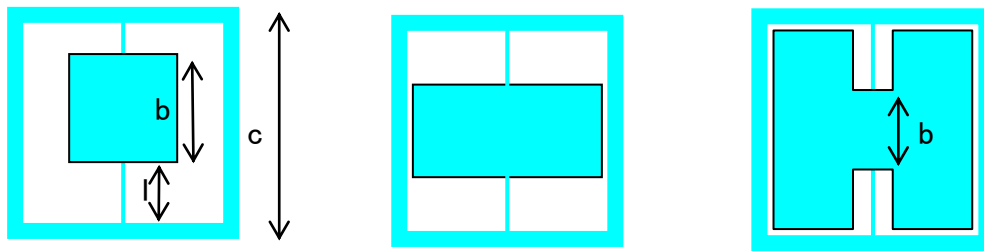
図1-2 MEMS加工プロセス

2-1-2 MEMS 形状の最適化 (平成 22 年度)

トーシオン・ミラーについては(K. E. Petersen, “Silicon torsional scanning mirror”, IBM J. Res. Develop. , vol. 24, p. 631, 1980) の文献によると、トーシオンバーが捻れる角度 ϕ は (1) と示されている。

$$\phi = \frac{\epsilon_0 V^2 l b^3 (1 + \nu)}{16KE d^2 t^4} A \quad (1-1)$$

ここで、 t はトーシオンバーの直径、 l はトーシオンバーの 1 本の長さ、 b はミラー一辺の長さ、 ν はポアッソン比、 K はトーシオンバーの形状によって決まる定数、 E はヤング率、 d は帯電物体とセンサ間距離、 A は面積修正因子 ($A \approx 0.8$) である。



(a) センサが正方形の場合 (b) センサが長方形の場合 (c) センサが蝶々形の場合

図 1-3 トーシオン・ミラー形状

センサが正方形の場合は (1) 式をそのまま使い、支持枠の内径を一定値 c とすると $2l+b=c$ となるので、 $l=(c-b)/2$ を代入すると、

$$\phi = \frac{\epsilon_0 V^2 (c-b)/2 b^3 (1 + \nu)}{16KE d^2 t^4} A \quad (2)$$

となり、 ϕ が最大となるのは $b = 3c/4$ で、2式に代入すると

$$\phi = \frac{\epsilon_0 V^2 (27/512) c^4 (1 + \nu)}{16KE d^2 t^4} A \quad (2)'$$

となる。

センサが長方形の場合、回転力はミラー面積に比例 (b/c) するので回転力の最大値を (b/c) 倍すれば良く

$$\phi = \frac{\epsilon_0 V^2 (c-b)/2 c^3 (b/c) (1 + \nu)}{16KE d^2 t^4} A \quad (3)$$

となり、 ϕ が最大となるのは $b=c/2$ で

$$\phi = \frac{\epsilon_0 V^2 (c^4/8) (1 + \nu)}{16KE d^2 t^4} A \quad (3)'$$

ある。

センサが蝶々形は回転力が最大値のままとなるので、

$$\phi = \frac{\epsilon_0 V^2 (c-b)/2 c^3 (1+\nu)}{16KEd^2 t^4} \quad \text{A} \quad (4)$$

となり、 ϕ が最大となるのは $b = 0$ で、

$$\phi = \frac{\epsilon_0 V^2 (c^4/2) (1+\nu)}{16KEd^2 t^4} \quad \text{A} \quad (4)'$$

ある。

(2)' ~ (4)' で順位をつけると、(2)' < (3)' < (4)' で

$$(2)' : (3)' : (4)' = 27 : 64 : 256 \approx 1 : 2 : 10 \quad (5)$$

となり、蝶々形は圧倒的に感度が高い。

感度測定方法を図 1-4 に示す。GND 電極はミラーの片側をふさいで静電気力をもう片側だけに働かせて回転力を得るために必要であるが、この結果からセンサにできるだけ近づけて 1/4 のところに配置するのが効果的であることが分かった。

MEMS 形状は計算値と実験値が一致から蝶々形と決まった。

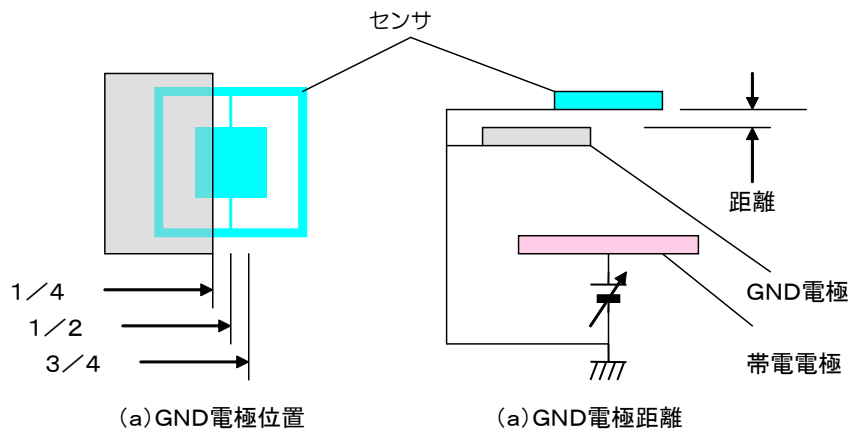


図 1-4 GND 電極位置と距離

2-1-3 MEMS ミラーの感度特性 (平成 23 年度)

活性層 $20 \mu\text{m}$ 、トーシヨン幅 $10 \mu\text{m}$ の MEMS ミラーの感度特性を測定し、シミュレーション結果との比較検討を行った。

図 1-5 は MEMS ミラーの帯電による捻れ測定の概略図である。レーザー光と PSD と MEMS ミラーとの距離は 200mm とした。図 1-6 はセンサに対するグラウンド電極の配置図を示す。グラウンド電極幅 (開放幅) に対するセンサ感度特性を調べた。図 1-7 に示すように IntelliSuite (v8.63) でシミュレーションを行った。グラウンド電極幅 (開放幅) に対するセンサ感度の依存性を計測値と計算値で比較したのが図 1-8 である。グラウンド電極幅は 2.875mm が最適値であることがわかった。さらに、MEMS ミラーの感度特性を測定、シミュレーション結果との比較検討を行った。図 1-9 に結果を示す。2 つのトーシヨンの幅を上下として示した。表 1-1 は感度誤差のばらつきを示す。測定領域 600V 以上から 3000V 以下において目標の 20% 以内になっていることがわかる。測定領域が 600V 以下の低電圧域で感度誤差が大きかったのは測定系にも課題あると考えられる。これらの実験のために補強をレーザーにより切断した。切断による特性への影響は補強がないサンプルの特性評価とシミュレーションとの比較からわかった。

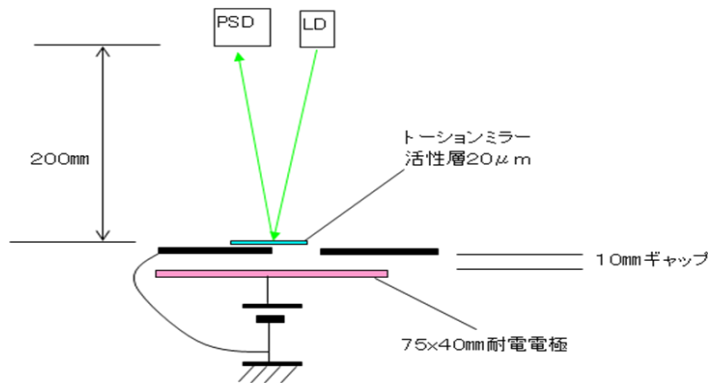
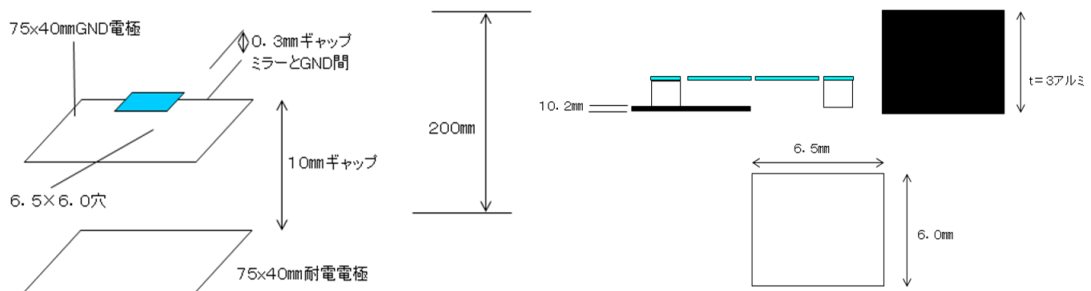


図1-5 MEMS ミラーの帯電による捻れ測定の概略図



(a) センサとグラウンド電極の隙間 (b) センサに対するグラウンド電極の配置図

図1-6 センサに対するグラウンド電極の配置図

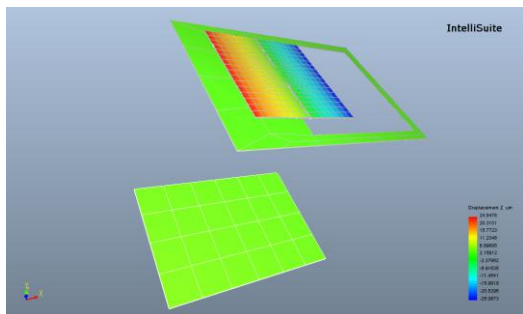


図1-7 シミュレーション結果

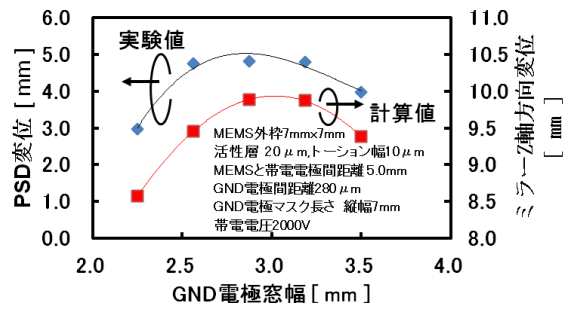
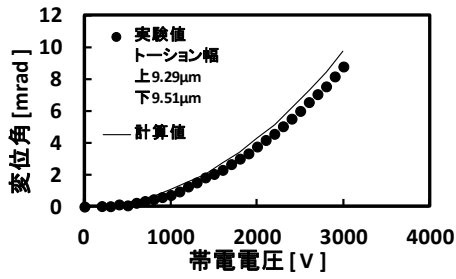
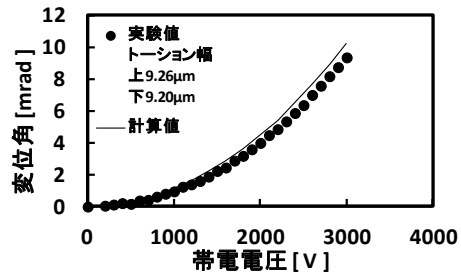


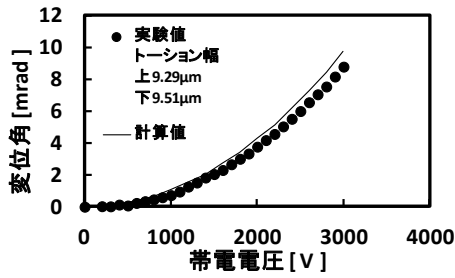
図1-8 電極幅（開放幅）に対するセンサ感度の依存性



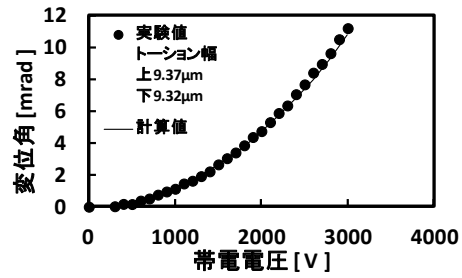
(a) サンプル1



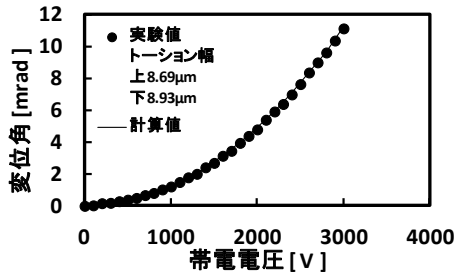
(b) サンプル2



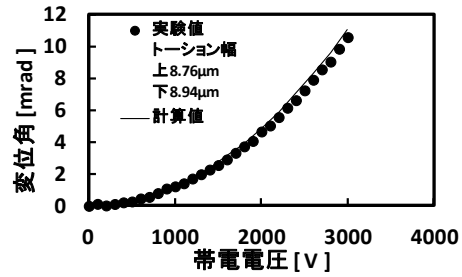
(c) サンプル3



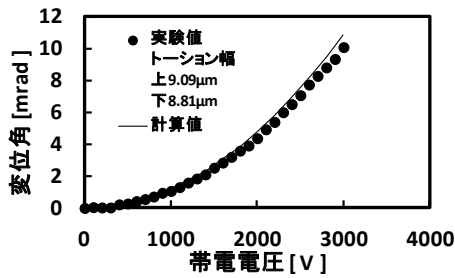
(d) サンプル4



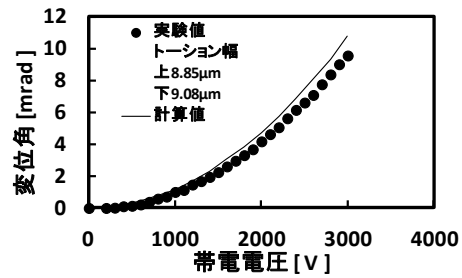
(e) サンプル5



(g) サンプル6



(g) サンプル7



(h) サンプル8

図1-9 帯電電圧に対するセンサの変位角

表1-1 感度誤差のばらつき (%)

サンプル番号	計測電圧域 [V]		
	0~600	600~3000	0~3000
1	11.7	10.7	11.9
2	13.8	11.2	6.6
3	27.7	16.9	17.6
4	67.2	0.4	12.5
5	103.8	1.3	20
6	8.9	2.2	4.3
7	2.9	6.5	6.3
8	62.1	16.2	23.2

電極の移動距離とミラーの傾きの関係をシミュレーションしたのが図 1-10 である。同様な配置において実験に求められた結果を図 1-11 に示す。シミュレーション結果と実験結果が良く一致することがわかった。

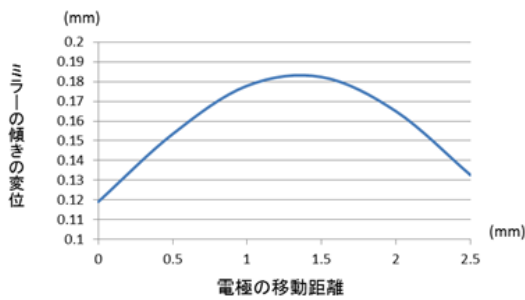


図 1-10 電極の移動に対する傾きの変位

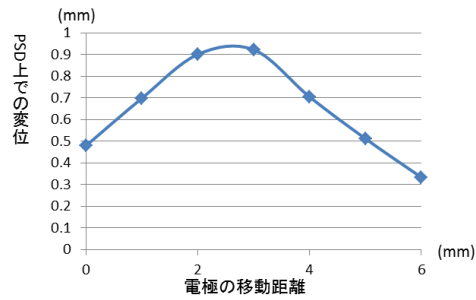
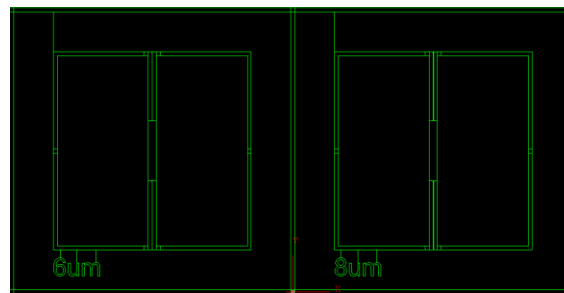


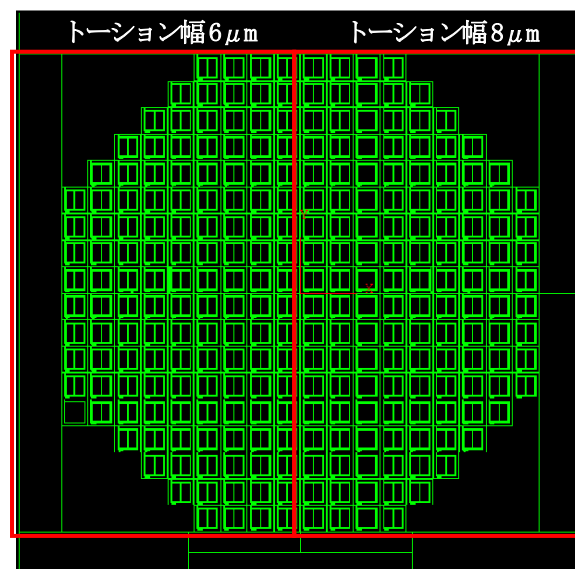
図 1-11 電極の移動に対する PSD 上での変位の実験値

2-1-4 MEMS ミラーのマイクロファブリケーション技術の確立 (平成 24 年度)

MEMS 加工プロセスを確立するために、以上の実験結果と解析をもとに、実用静電気感度が得られるトーシヨン幅 $8\mu\text{m}$ と $6\mu\text{m}$ に対し補強付 MEMS ミラーを試作した (図 1-12)。設計と特性シミュレーションには IntelliSuite(IntelliSense 社, Ver. 8.7)を用いた。さらに、トーシヨン付け根の補強形状を変更することで強度を増強した。



(a) フォトマスクデバイス形状



(b) フォトマスク全体

図 1-12 フォトマスク

表 1-2 は平成 24 年度試作の歩留まりを示す。活性層厚み 20 μm 、トーション幅 8 μm において歩留まり 98%を達成した。さらに、ステルスダイシングは損傷率 0%であった。後述する補強切断において損傷率 0%であった。

表 1-2 平成 24 年度試作歩留まり

活性層厚み	トーション幅			
	6 μm		8 μm	
	完全品	実用品	完全品	実用品
20 μm	約 70% (92/132)	約 70% (93/132)	約 95% (126/132)	約 98% (130/132)
15 μm	約 75% (99/132)	約 84% (111/132)	約 81% (108/132)	約 90% (120/132)

2-1-5 レーザ微細加工システム (平成 22 年度)

レーザ微細加工システムを開発した。レーザ加工システムの構成機器は次の通りである。

- 1) 低出力微細加工用ピコ秒レーザ (Time-Bandwidthw 社製、Duettino-SHG)
- 2) 高精度 XY ステージ (Aerotech 社製、ANT130-160)
- 3) 手動バリアブルアッテネータ (Newport 社製、935-10)
- 4) 光学ベンチ (日本防振社製、AS-1510-TS)
- 5) バリアブルアッテネータ (Newport 社製、M-935-3-OPT)
- 6) シャッターユニット (NM Laser Producta 社製、LST200 と CX2250)

表 1-3 はレーザ加工システムの特長である。光学系の設計はレーザ加工面においてビーム直径、27 μm ($1/e^2$)、レイリー長は $\pm 236 \mu\text{m}$ となるように行った。尚、低出力微細加工用ピコ秒レーザはパルストレイン内のパルスを任意制御できる。レーザ加工は最初にサンプルを位置決めカメラの視野内の所定位置に置き、加工位置を設定した。次にレーザ出力、パルス繰り返し周波数、パルストレインを設定した。レーザ加工は高精度 XY ステージの制御画面よりステージ移動速度、加工形状、シャッターユニットの開閉位置をプログラミングして行った。その際、レーザ強度はバリアブルアッテネータで調整した。焦点距離は加工サンプルの溝が最も小さくなるように調整した。また、切断の位置決め精度は $\pm 0.05 \mu\text{m}$ で定めることができた。

表 1-3 レーザ加工システムの特長

低出力微細加工用ピコ秒レーザの特長	
レーザ出力波長	1064nm と 532nm
パルス幅	9.5ps
出力エネルギー	Max. 200 μJ @1064nm, Max. 100 μJ @532nm
パルス繰り返し周波数	Single~8.2MHz@1064nm 1.26~8.2MHz@532nm
パルスエネルギー安定性	0.5%rms 以下
ビーム拡がりの安定性	40 $\mu\text{rad}/^\circ\text{C}$ 以下
M ²	1.3 未満 (発振周波数に関わらず)
パルストレイン内パルスの任意制御	可能
高精度 XY ステージの特長	
ストローク	160mm
位置決め分解能	3nm
繰り返し位置決め精度	50nm
真直度	水平 250nm、垂直方向 500nm
サンプル保持	真空ステージ
駆動制御	パーソナルコンピューターによるプログラム制御

2-1-6 レーザトリミング加工 (平成 23 年度)

ピコ秒レーザ加工システムを用いて極薄シリコンのトリミング加工研究を行った。溝加幅は一定の照射回数以上では切断幅は変化するが一定となることがわかった。加工レートは同一エネルギーでは加工速度を変えることで $6.6\mu\text{m}/\text{回}\sim 4\mu\text{m}/\text{回}$ と可変できることがわかった。これらの知見を応用することで、目標の位置決め精度 $0.5\mu\text{m}$ でトリミング幅 $10\mu\text{m}$ の精密加工技術を確立できた。さらに、保護用の補強機構の切断と感度調節用トリミングも達成できた。

2-1-7 精密三次元レーザ加工 (平成 24 年度)

MEMS の感度調整、補強切断、レーザ加工 MEMS の作製のためにピコ秒レーザ加工システムへレーザ照射の高速断続が可能なパルスピッカーと光軸に対して深さ方向への微細加工をするために精密 Z 軸ステージを追加した。加工条件は切断断面画像の切り込み深さから求めた。

厚さ $15\mu\text{m}$ の極薄シリコンへレーザ加工を行い、図 1-12 に示した高感度 MEMS ミラーと同形状を作製した。図 1-13 はレーザ加工 MEMS 画像を示し、活性層 $15\mu\text{m}$ 、トーションバー $10\mu\text{m}$ 設計の半導体プロセス製とほぼ同等の性能が得られた。SOI 基板から作製した支持層と極薄シリコンからなるサンプルへレーザ加工を行い、半導体プロセス製とほぼ同等かつ低コストを実現した。



図 1-13 レーザ加工 MEMS 画像

(2-2) デモができる製品の完成

2-2-1 光学系の感度向上 (平成 23~24 年度)

非接触静電気測定の高感度化の一つの方法として、マイクロミラーの傾きを検出する光学系に拡大機構を付け加える方法がある。マイクロミラー・アレイを凹面鏡の形状で配置する光学系においても、拡大光学系を適用することにより、高感度化を達成できる。

2-2-2 光学系の無レンズ化 (平成 23~24 年度)

静電気非微視化システムの実用化の開発において、一点から出たレーザ光線をアレイ状に配置した MEMS ミラーで反射させ、再度一点に集めることが重要な課題である。これはレンズを使用することで、実現可能なことは分かっているが、大口径で精度の良いレンズは高価で重量が大きくなるために実用的ではない。また、本研究の解決すべき問題点として、レンズの収差があり、表面での反射で精度が悪くなることが挙げられる。

本事業着手以前の実験では焦点距離 200mm の非球面レンズを使っても PSD 上で約 5mm のずれが生じている。素子ごとに校正は行っているが、有効エリアが狭くなることにより、ダイナミックレンジが小さくなり、測定精度の低下を招く結果となっている。レンズには収差の他に表面で光が入り出す

際、反射の影響で、レンズ中央付近で迷光（ゴーストフレア）が PSD に入り、これも測定精度の低下を招いている。

解決策として、図 2-1 に示したように MEMS ミラーを球面上に配置することでレンズを無くすことが可能である。球面状に配置する為には固定枠の精密加工、或いは角度を調節する機構が必要であり、専用の固定枠を製作する加工装置が必要になった。図 2-2 は加工装置に示す。機械精度が得られやすいトラニオン方式を採用した。

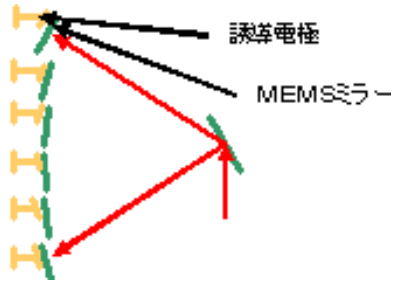


図 2-1 MEMS ミラーの球面状配置



図 2-2 レンズ無しミラー組立治具

光テコ法での MEMS ミラーの検れ検出誤差を求めるために光線軌跡シミュレーションを行った。MEMS ミラーは 8 行 8 列に並べ、帯電によるトーシヨンのねじれを光コテ法による計測する。ねじれの高感度検出のために拡大光学系を用いる。光が MEMS ミラーに当たる位置を正確に計算して MEMS ミラー貼り付け面の形状を計算し、専用治具を製作した。

MEMS ミラー固定枠の製作を行った。MEMS ミラー固定面加工方法はつぎのように行った。材料角の回転 (A 軸) とスキャン角の回転 (B 軸) で、MEMS ミラー固定面の中心をフライス加工の中心となるように移動させることにより、MEMS ミラー固定面のフライス加工が可能となる。スキャナのレーザー光源の移動角度は読取角度と共に 1.8° 刻みと定義されていることを前提にフライス加工へ反映した。

また、スキャナからのレーザー光源の通過穴が必要であり、フライス加工を行う前に MEMS ミラー固定面の中心へ 5mm のエンドミル(DLC-LS-ALHEM3B5)による穴加工を行った後、2mm のエンドミル(DLC-ALHEM2R2)による 16×16 センサの MEMS ミラー固定面の加工を行った。MEMS ミラー固定枠の固定面加工位置を図 2-3 に示す。A から P までのフライス加工面が 4 面あり、計 64 面となる。

光がミラーに当たる位置を正確に計算してミラー貼り付け面での精度が 0.2 mm 以下となる MEMS ミラー固定枠を製作できた。

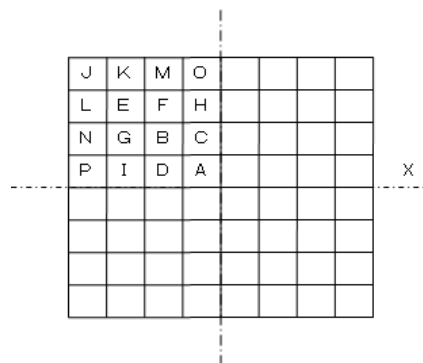


図 2-3 ミラー固定枠 接着面加工

2-2-3 誘導帯電電極の設計 (平成 24 年度)

MEMS ミラーは風による外乱の影響を受けやすいので封止する検討を行った。図 2-4 は金属電極への誘

導帯電を介してMEMS ミラー動かす方法で平成23年度報告したとおり有効な手段であるが感度が下がると、金属電極が帯電してしまうことの対策を検討したが解が見つからなかった。

もう一つの案として誘電体をMEMS ミラーの前に配置することを検討した。図2-5は実験の様子を模式したもので、色々な誘電体で試してみたがMEMS ミラーは反応しなかった。

以上、考えられる手段でMEMS ミラーの封止を検討したが、何れも採用できないと判断した。



(a) 模式図

(b) 実施例 (23年度報告)

図2-5 誘電体を用いた誘導帯電の実験

図2-4 平成23年度報告の誘導帯電の実験

2-2-4 エアダンピング設計 (平成24年度)

MEMS ミラーを用いた静電気分布測定において、振り梁で支えられたマイクロミラーは振動や気流(風)など静電気力以外の外乱によりその動きが影響されるという課題がある。振動に関しては、マイクロミラーはその構造が対称性にすぐれているためあまり影響を受けないが、気流に関しては、マイクロミラーの半面はシールド板で覆われているものの、残りの半面が表にさらされているため、影響を受けやすい。

この気流の影響を減少して、精度の良い測定を行うために、マイクロミラーとシールド板を近づけ、それらに挟まれた空気層を利用したエアダンピングが利用できる。ここでは、エアダンピングの効果について解析をおこなった。図2-6は、解析のモデルである。振り梁で支えられたマイクロミラーの半分の面が、その上のシールド板と面しており、その間の空気層がエアダンピングの効果をもつ。

マイクロミラーの半面とシールド板の間の空気層によるダンピングは、粘性減衰として取り扱うことができ、マイクロミラーの運動は両端固定の振り梁の中央部にマイクロミラーが取り付けられた系は、振り梁の回転ばね定数を K 、マイクロミラーの慣性モーメントを I 、粘性減衰モーメントの係数を c 、梁の捻じれ角を θ 、外部からの振り梁モーメントを $F(t)$ として、次の運動方程式で記述される。

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + c \frac{d\theta}{dt} + K\theta = F(t) \quad (2-1)$$

一般的な外力に対する応答は、上記のような線型微分方程式においては、単位インパルスによる応答に対し重ね合わせの方法を用いることにより求めることができる。したがって、単位インパルスに対する応答を求めることができれば、エアダンピングの効果の解析ができることになる。

この場合の運動方程式は、次式で与えられる。

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + c \frac{d\theta}{dt} + K\theta = 0 \quad (2-2)$$

初期条件として、 $t=0$ において、 $\theta(0)=0$ 、および、インパルスとして単位の振り梁モーメントの力積が与えられるため、 $I \frac{d\theta(0)}{dt}=1$ 、すなわち、 $\frac{d\theta(0)}{dt}=1/I$ として解は次のようになり、規格化された減衰係数をパラメータとして、図2-7のような変化をする。

$$\theta(t) = \frac{1}{I\omega_0\sqrt{1-\zeta^2}} \exp(-\zeta\omega_0 t) \sin \sqrt{1-\zeta^2} \omega_0 t \quad (2-3)$$

ここで、 ω_0 は共振周波数、 ζ は規格化された減衰定数で、以下の式で与えられる。

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{I}} \quad , \quad c_c = 2\sqrt{IK} \quad , \quad \zeta = \frac{c}{c_c} \quad (2-4)$$

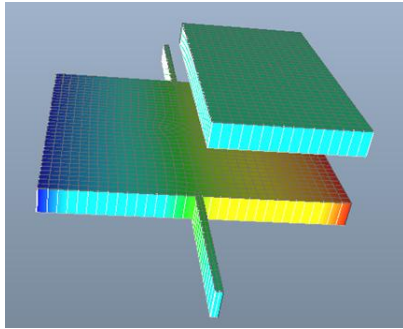


図2-6 エアダンピングの解析モデル

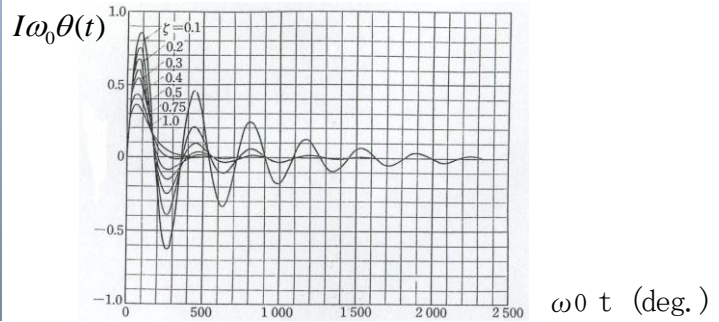


図2-7 エアダンピングがある場合のインパルス応答

2-2-5 制御電極による対象物体の帯電物体の極性判定 (平成24年度)

帯電物体によりマイクロミラーに働く力は、シールド板とマイクロミラーが接地されているため、帯電物体が+あるいは-の両方の帯電状態において、引力となる。したがって、帯電の大きさは測定できるが、帯電物体の極性 (+, -) はそのままでは判定できない。

これを解決する手段の一つとして、マイクロミラーの前面に制御電極を設け、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方法を提案した。図2-8にモデル図を示す。

制御電極 (Control electrode) は、挟み梁に対し直角方向にシールド板の前面に設置されている。測定対象である帯電物体の極性により、制御電極に例えば+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、帯電物体の極性を判定することがシミュレーション結果から分かった。制御電極の取り付け方向は、図2-1のように挟み梁に直角方向に設置する以外に、シールド板の解放部に挟み梁に並行方向に設置しても良く、同様の結果が得られる。

図2-9に制御電極のシミュレーション結果を示す。帯電を200V、マイクロミラーとShieldプレートの間隔は500 μ m、Shieldプレートと制御電極の間隔は200 μ m、制御電極と帯電電極の間隔は1mmとした。200 μ m、制御電極の印加電圧を-20Vから20Vまで変化させると、マイクロミラーが変位し、帯電が1000Vではマイクロミラー最大12.6 μ m変位することがわかり、感度を十分保つことができる。

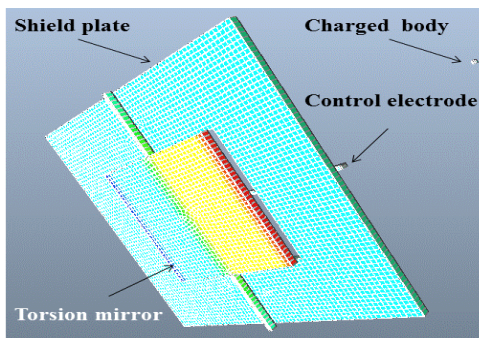


図2-8 制御電極が設けられたマイクロミラー

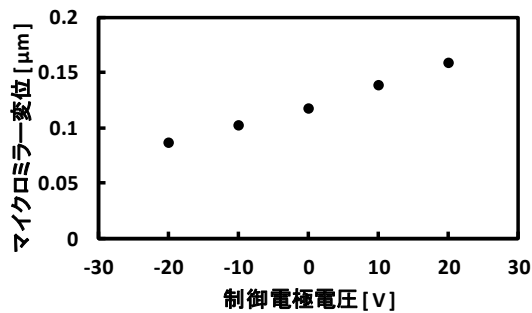


図2-9 制御電極のシミュレーション結果

2-2-6 デバイスのモジュール化 (平成 24 年度)

陽極接合は半導体デバイスの実装のためによく使われている。原理は半導体とガラスを重ね、半導体を陽極、ガラスを陰極側にして高温で高電圧をかけると、ガラス側はNa+イオンが移動し、半導体とガラスの界面でSiO₂とSiとが共有結合し接合に至る。

試料は活性層 20 μm のトーション幅 6 μm と 8 μm の MEMS ミラー (平成 24 年度試作)、ガラスは HOYA 社製 SD2) である。図 2-10 は接合サンプルを示す。以上より、ミラーの保護と外乱防止を兼ねる GND 電極、誘導帯電電極、読み取り面封止材を Si で構成するデバイスモジュール化技術を確立した。

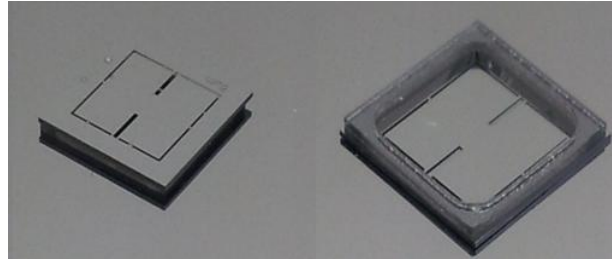


図 2-10 接合画像

2-2-7 MEMS 光スキャナ (平成 24 年度)

MEMS スキャナとステッピングモータを用いた光スキャナをさらに小型化するために、光ビームの X 方向、Y 方向への走査を一つの素子で実現できる MEMS 光スキャナについて製作をおこなった。この光スキャナは、1 方向の機械的振動で 2 次元スキャンを実現させるため 2 軸ジンバル構造の非対称マイクロミラーでできている。

今回試作した非対称マイクロミラーの構造を図 2-11 に示す。加工は本プロジェクトで導入したレーザ加工機によりおこなった。中心部のミラー部分にはシリコンを鏡として貼り付け、また、加工したリン青銅の枠部分を非対称にするために銅板をワイヤー放電加工機で加工し、枠に貼り付けた。

次に、リン青銅を基準にし、マイクロミラー部分にシリコンを、枠部分に銅を貼り付けた構造物のシミュレーションを行った (図 2-12)。IntelliSuite の Blueprint、3DBuilder で構造物の 3 次元設計を行い、設計した物を IntelliSuite の ThermoElectroMechanical を使用して振動モードの解析を行った。各材料のパラメータを次のように設定した。リン青銅のヤング率を 112.7GPa、ポアソン比を 0.38、密度を 8.80g/cm³、シリコンのヤング率を 170GPa、ポアソン比を 0.26、密度を 2.3g/cm³、銅のヤング率を 117GPa、ポアソン比を 0.32、密度を 8.93g/cm³ として解析を行った。シミュレーション結果を図 2-11 に示す。その結果、マイクロミラー部分の共振周波数は 168.99Hz で、枠部分の共振周波数は 7.4809Hz であった。

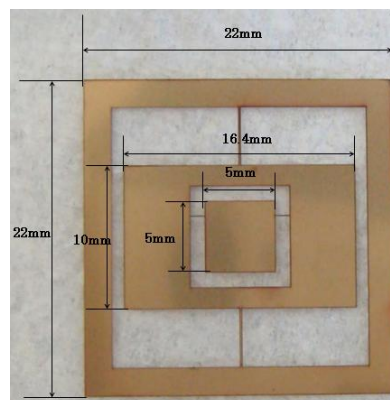
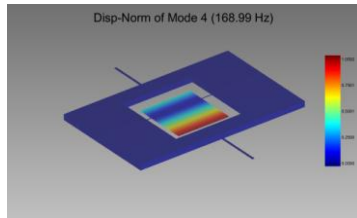
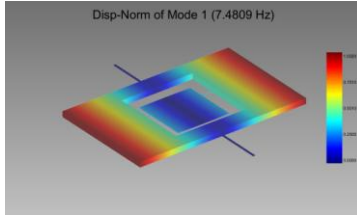


図 2-11 2 次元光スキャナの構造



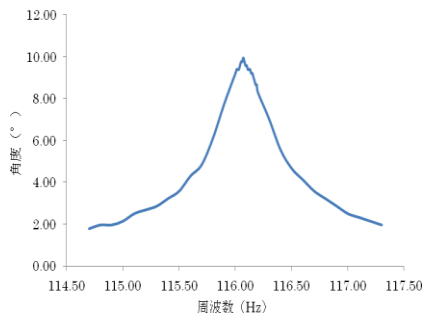
(a) マイクロミラー部分の解析結果



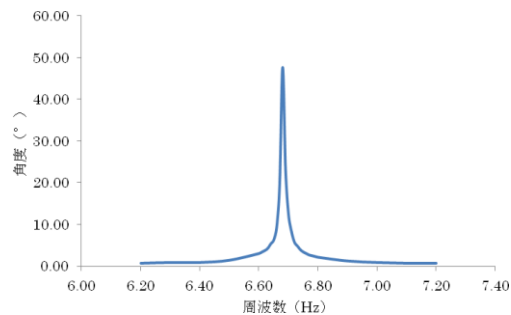
(b) 枠部分の解析結果

図2-12 非対称マイクロミラーのシミュレーション結果

実際に製作した2次元スキャナの特性を測定するために、それぞれの共振周波数で振動させ、レーザ光をマイクロミラーに照射し、反射光の位置の変化から傾きを求めた。振動しているマイクロミラーにレーザ光を照射し160mm先のスクリーンに映し、反射光により表示された光の線の振幅を測定し、共振周波数を調べた。この結果を図2-13に示す。グラフを見てわかるように、マイクロミラー部分の共振周波数は116.07Hzで、最大振れ角は9.95°であった。枠部分の共振周波数は6.68Hzで、最大振れ角は47.65°であった。



(a) マイクロミラー部分の振じり振動特性



(b) 枠部分の振じり振動特性

図2-13 振じり振動特性

次に、製作した2次元光スキャナをGY-1アクティブ・コンタクト・スピーカー(FOSTEX)を励振用に使い、振動部をマイクロミラーの共振周波数信号と枠の共振周波数信号を重畳させて駆動した。コンタクト・スピーカーに非対称マイクロミラーを設置したものを図2-14に示し、これを駆動させた結果を図2-15に示す。



図2-14 2次元光スキャナの駆動装置

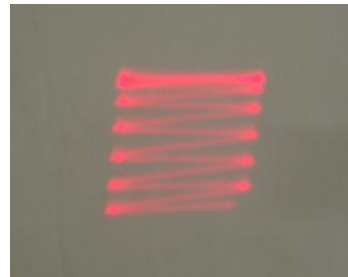


図2-15 2次元光スキャナによる光の走査

図 2-15 から分かるようにレーザー光が 2 次的に走査されている。現状ではマイクロミラーと枠の共振周波数の比を 16 倍にしているため、スキャンは片側方向だけをとれば 8 本（実質的には 5～6 本）の走査が実現されているだけであるが、さらにこの比を大きくすることにより、細かいスキャンが可能になる。

また、今回試作した 2 次元スキャナの大きさは、22mm 角とそれほど小さくなっていないが、今後、すべてシリコンで製作し、マイクロミラー部分も 1～2mm 角にすることが可能なので、より小さい 2 次元スキャナを実現できる可能性がある。

今年度開発したマイクロミラーを静電気可視化装置へ搭載するために実験を行った結果、マイクロミラーの振幅は駆動条件とともに空気などによる減衰に影響され、また、位相も駆動電気信号系および駆動機械振動系により変化するため、光ビームの位置（方向）を光センサで検出する必要があることがわかった。そのため、光センサによるフィードバックが不要な 2 次元光スキャナとして、ステップモータと MEMS ミラーを組み合わせた 2 次元光スキャナの小型化を再検討した。

2-2-8 簡易型測定器（静電気非接触可視化検査機器）製作（平成 22 年度）

図 2-16 に示す簡易型測定器の製作を行った。これの使用目的は研究している MEMS センサが開発できるまでの間に制御ソフトを完成させるためのデバッグ用と、完成した「静電気非接触可視化システム」のアプリケーションを充実させるためである。この簡易型測定器は 30 秒に一回程度のリセットで使用でき使用目的は達成できるものであるが、湿度が高いとすぐにリセットする必要があることが分かった。

簡易型測定器は電気測定量と被測定物の重ね表示の際のデバッグ用と興味を持たれているお客様に見て頂いて意見を伺うために使用した。見て頂いた方は今までに無かっただけに、リアルタイムで見えることに「おもしろい」と言って頂けた。ニーズがあることは確信でき、「測定距離を 50 mm 以上にして欲しい」「測定スピードを速く」「棒状にして欲しい」「分解能をもっと細かく」などの意見を出して頂き、完成を期待されている。

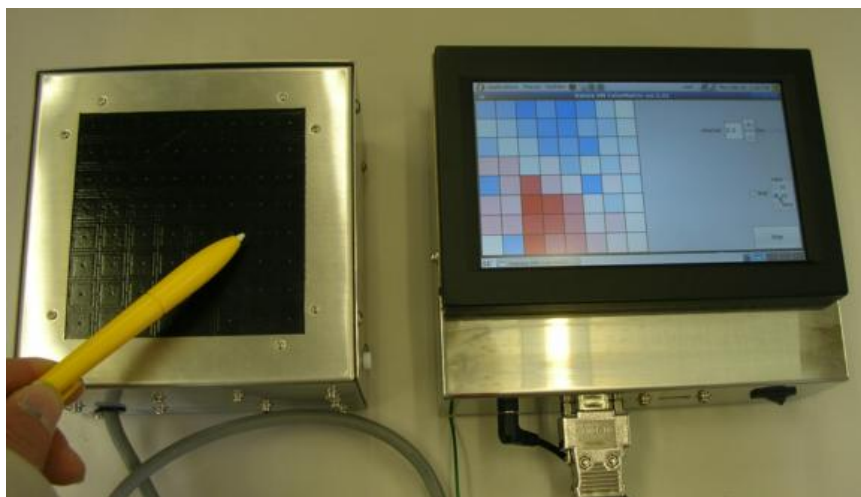


図 2-16 簡易型測定器の動作例

2-2-9 電気測定量と被測定物の重ね表示（平成 22～23 年度）

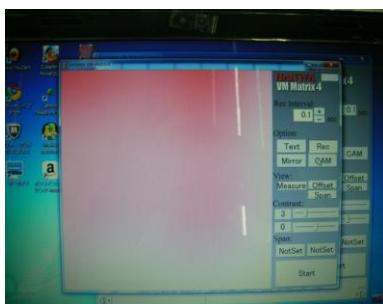
カラーカメラの映像信号と対応した静電気分布画像との映像合成技術の検証ができた（図 2-17）。今回はカラーカメラの映像は実時間であるが、静電気分布画像は静止画である。

動画の静電気測定量と実時間の被測定物の重ね表示は、予め一定距離で撮影した後、測定物に近づ

けて、予め撮影した画像を拡大して静電気測定値に色を付けて重ね表示するための制御ソフトは完成し、プロトタイプの静電気分布測定器に組み込んだ（図 2-18）。また、その測定器重ね表示の妥当も検証した。



図 2-17 50%重み付き加算



(a) 重ね合わせ前



(b) 実画像と重ね合わせ後

図 2-18 静電気分布画像

2-2-10 信号処理アルゴリズムの改良（平成 23～24 年度）

ハードウェア処理

MEMS ミラー搭載静電気可視化装置の製作にあたり信号処理技術を開発した。コアとなる集積回路にはFPGA(Field Programmable Gate Array)を用いた。

構成は FPGA と A/D 変換素子からなる。図 2-19 に 1 行の読み取りタイミングを示し、1 センサ (MEMS ミラー) あたり 4 回の読み取りと 1 行あたり 4 回のスキャンを行って加算することで読み取り精度の向上を図っている。図 2-20 に信号処理のブロック図を示し、1 倍と 10 倍用の PSD 信号を ADC (Analog Digital Converter) 変換した後にデータ処理して Y 方向の変位を検出している。Y 方向の変位は、PSD からの 4 信号より、中心からのずれ ΔY は

$$\Delta Y = ((X_2 + Y_2) - (X_1 + Y_1)) / (X_1 + Y_1 + X_2 + Y_2) \quad (2-5)$$

で求まり、PSD の辺長の 1/2 を乗じると中心からずれた距離 (mm) が求まる。今回使用した S1880 (浜松ホトニクス製) は辺長が 14 mm であり、

$$Y = 7 \times ((X_2 + Y_2) - (X_1 + Y_1)) / (X_1 + Y_1 + X_2 + Y_2) \text{ (mm)} \quad (2-6)$$

となる。

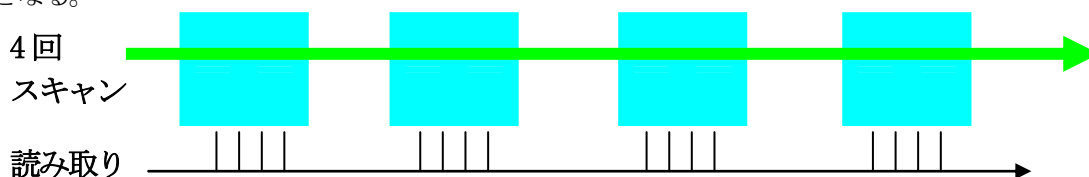


図 2-19 読み取りタイミング

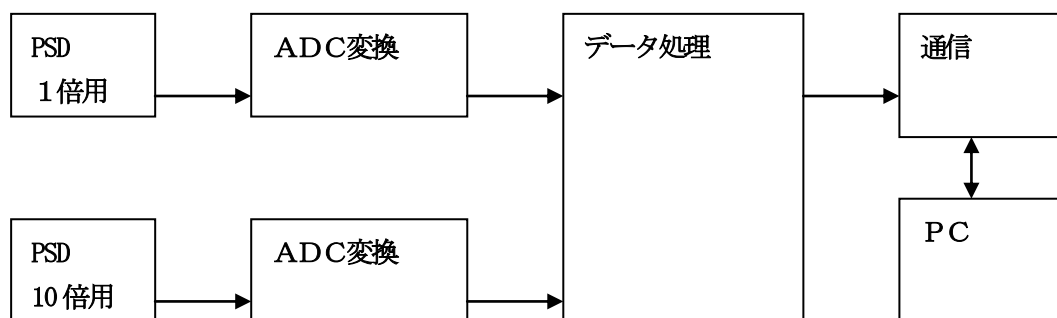


図 2-20 信号処理

図 2-21 に図 2-20 のデータ処理部のブロック図を示し、データ処理には Xilinx 社の Spartan6 という FPGA を使用した。(2-5) 式の計算と 1 センサに対する読み取り 16 回分の加算を行い 16bit の変位データを得る目的である。12bit の ADC からの信号を $1/2$ 倍して 12bit 加算でオーバーフローしないようにして、(2-5) 式の除算結果が 1 以下となるためあらかじめ被除数を 2^{10} 倍し、16 回分の加算とで合計 2^{15} 倍となる。

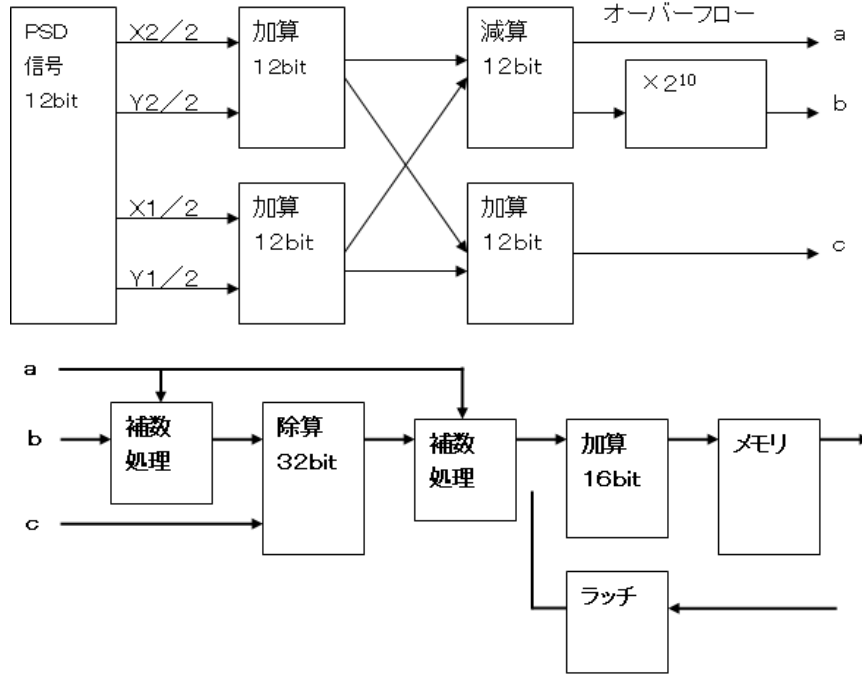


図 2-21 データ処理

図 2-22 に主な信号波形を示し、図 2-23 に 1 行分の信号波形を示す。

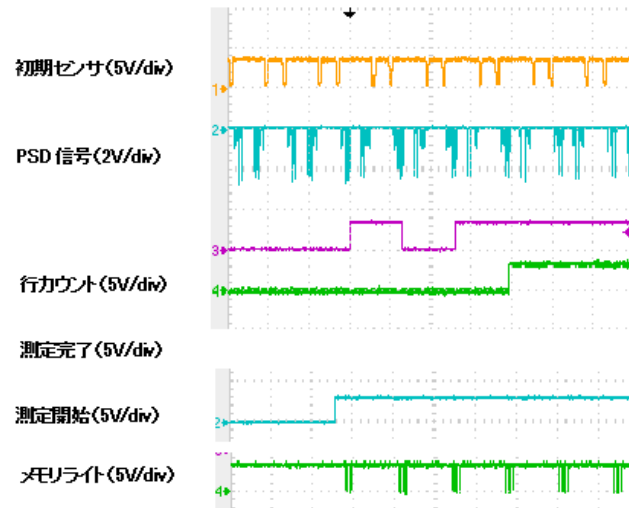


図 2-22 主な信号波形 (25mS/div)

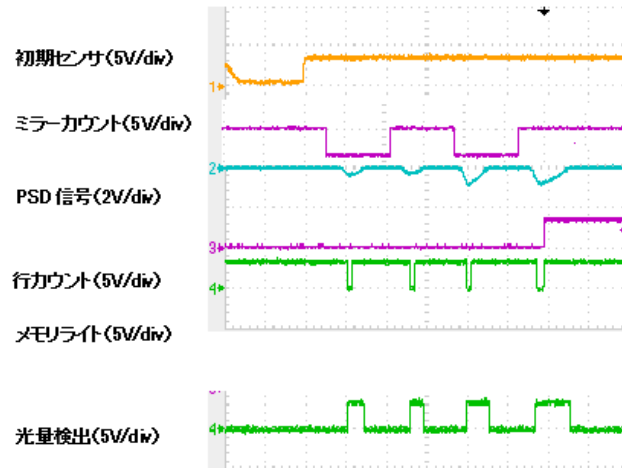


図 2-23 主な信号波形 (25ms/div)

各信号について説明する。

1. 初期センサ

レーザスキャン開始を知らせる信号で1列目の手前に付けた光センサからの信号で、一定時間内に2回の検出を行うことで往復の判定を行い、初期信号とする。

2. PSD 信号

4信号の内、X1 信号を示したものである。

3. 測定開始

スキャナより行移動が完了したときに受ける信号である。

4. ミラーカウント

初期信号よりタイマーカウントを行っている。

5. 行カウント

ミラーカウント3かつ4回測定後カウントアップしている。

6. 光量検出

PSD 変位計算式の $(X1+y1+X2+Y2)$ が一定量を 2 回連続で超えたときに出す信号で、検出後4回分の読み取りデータを加算記憶している。

7. メモリライト

記憶中を示す信号でL レベルの間に4回の信号処理と加算記憶を行う。

以上より FPGA のハードウェアでの信号処理技術を確立した。

ソフト CPU 処理

ハードマクロは高速動作には適しているが、信号計測や複雑な演算が必要な処理には適しているとは言えない。最近、Xilinx 社からアナログインターフェースが内蔵された Kintex-7 が発売されている。この FPGA にはアナログ機能 (XADC) とプログラマブルロジックを組合せた AMS (Analog mix signal) 技術が搭載されており、FPGA 内で信号処理ができるようになっている。XADC アーキテクチャの主な特長は次の通りである。

- ・ 2 個の 12 ビット、1MSPS のアナログコンバーター (ADC) 、アナログ信号帯域幅 500kHz 以上
- ・ 最大 17 個のユーザーコンフィギュレーション可能なアナログ入力
- ・ オンチップリファレンスまたは外部リファレンスを選択可能
- ・ 単極、双極、差動の幅広いアナログ入力が可能

- ・ JTAG を介して連続的に ADC の計測結果にアクセス

Kintex-7 はロジックセル多いため多機能回路ができ、ブロック RAM が多いため演算処理が Spartan-6 の約 7 倍高速といった特徴がある。

FPAG の組込み CPU の開発には Xilinx 社のソフト CPU (MicroBlaze) 開発ソフトを用いた。使用したデザインツールと機能は次の通りである。

Xilinx EDK (Embedded Development Kit)

- ・ XPS : Xilinx Platform Studio。MicroBlaze や PowerPC プロセッサを使用したエンベデッドプロセッサシステムのハードウェアを開発するための環境
- ・ SDK : ソフトウェア開発キット。ソフトウェアアプリケーションプロジェクトの開発環境

Xilinx PlanAhead : RTL デザインのインポート、コンパイル、設計を行う RTL 開発および解析環境
開発もとの Xilinx には XADC を MicroBlaze に組込んだ実績がなかった。今回、XPS の IP ペリフェラルを、PlanAhead へ RTL としてインポートし、周辺回路を含めて回路として Implementation し Bitstream を生成して SDK へ出力、SDK でソフトを組み込む方法を用いた。

図 2-24 は FPGA の信号処理アルゴリズムを示す。二次元 PSD (位置検出素子) からの計測データは位置データへの変換後に平方根を計算するといった測定分解能の均一化を図る感度補正処理を行った。計測データの平均化のために各 MEMS で 16 回の計測を行った。PC 側の静電気可視化処理ソフトは FPGA へ信号送信命令・停止信を配信し、それを受けて FPGA は計測データをテキストで PC 側へ出力する。

可視化装置への組み込みをハードウェアとソフト CPU で比較した、ソフト CPU において MEMS8x8 配列の信号測定時間 1 秒以下を達成した。

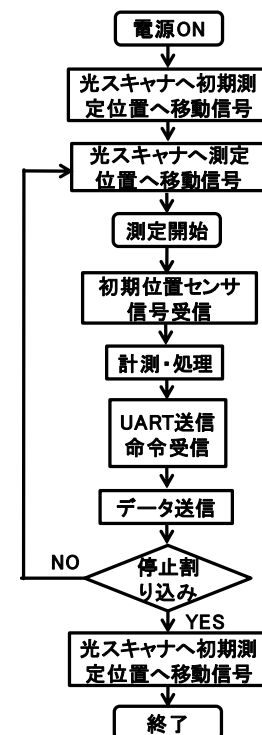


図 2-24 SDK の信号処理アルゴリズム

2-2-11 ワンチップ型デモ機の製作 (平成 23 年度)

図 2-25 の試作機は MEMS トーション・ミラーで反射させた LD (Laser Diode) 光の PSD 受光面の入射位置を電圧に変換して ADC と CPU で処理して電圧値として表示出来るようになっている。用いた MEMS トーション・ミラーは活性層 $20\mu\text{m}$ 、外枠 $7\text{mm}\times 7\text{mm}$ 、トーションバー幅 $9\mu\text{m}$ の高感度 MEMS ミラーである。トーション・ミラーが捻れる角度は電圧の 2 乗となるので表示の前に平方根処理している。このセンサは小型化出来ることと容量結合方式のように OP アンプを使わないのでオフセットのずれが無いことが利点である。図 2-26 に距離 10mm の 1000V で校正した測定結果を示す。横軸は印加電圧 (kV) に対し縦軸が測定電圧 (V) である。測定域は 1400V であった。

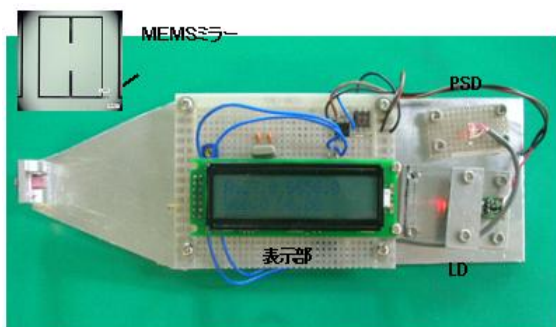


図 2-25 電荷量測定型静電センサ試作機

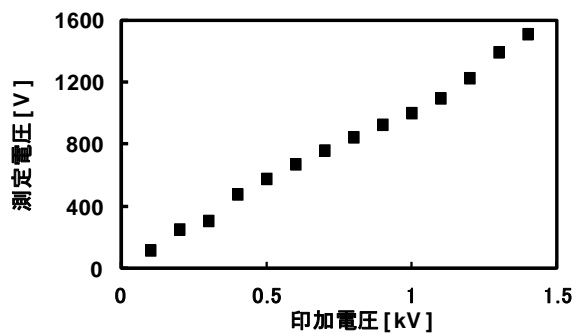


図 2-26 測定電圧

2-2-12 静電気可視化装置の試作 (平成 23~24 年度)

図 2-27 が組み立てた画像、図 2-28 は 8×8 状 MEMS センサ固定画像である。

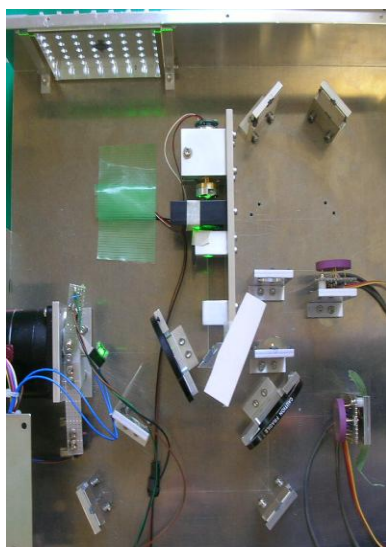


図 2-27 組み立て完成画像

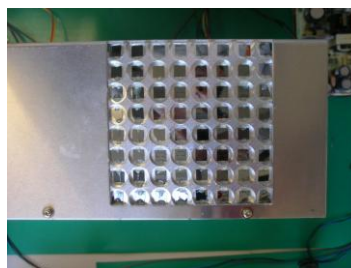


図 2-28 8×8 状 MEMS センサ固定画像

図 2-29 は $100\text{mm}\times 100\text{mm}$ の静電気可視化測定結果である。MEMS ミラー面に GND 電極をつけ、帯電体を 10mm 離れた位置に置き、 0V から最大 5kV で帯電した。帯電電圧に対応して静電気分布が変化することがわかる。

330	150	210	270	270	90	60	150
270	300	210	360	300	60	210	180
420	420	480	750	990	630	180	180
450	600	960	1770	2070	1320	360	300
270	390	180	1500	1740	90	150	0
120	300	480	330	210	300	270	30
300	300	180	90	210	420	240	270
300	630	180	360	660	570	660	180

(a) 1kV

300	30	270	330	480	150	120	300
210	210	90	270	180	270	330	120
360	330	1200	1710	2100	1380	120	270
210	630	1860	4140	5160	2430	360	420
390	330	1380	4200	4890	1830	210	60
150	420	930	1410	1530	780	300	330
420	180	240	180	150	570	210	300
420	450	90	330	360	180	270	390

(b) 5kV

图 2-29 静電気測定例

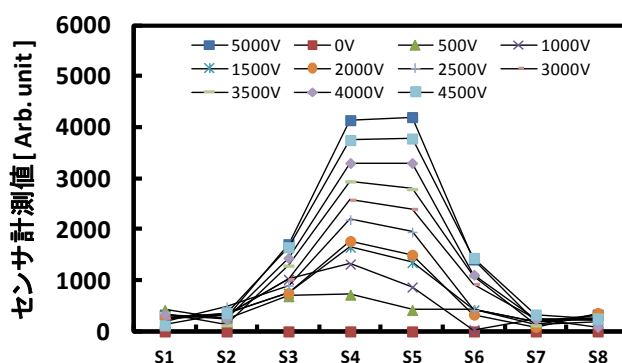
(2-3) 測定精度確認と改良

2-3-1 校正方法の確立 (平成 24 年度)

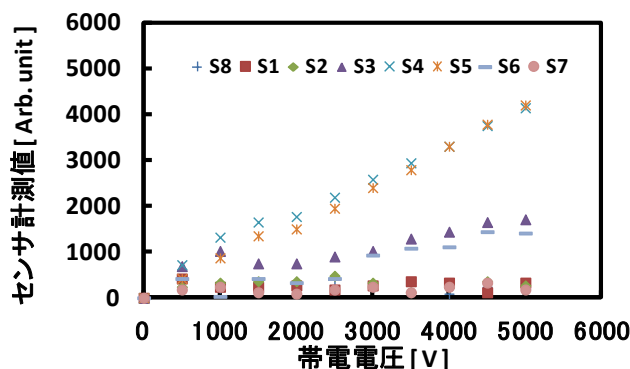
表 3-1 は図 2-29 の 4 列目に着目して 1 行目から S1-S8 としてグラフ化したもので、これをグラフで表したのが図 3-1(a)で、理論的に測定感度 (MEMS トーションミラーのねじれ角度) が測定電荷量の 2 乗に比例することが分かっていたので、PSD での変位量の平方根を求め、感度補正として定数を乗じたものである。図 3-1(b)の帯電体付近 (S4 と S5) では直線と見られる結果が得られたことで、校正は最大電圧での感度補正定数を求めればよいことが確認できた。また、測定精度に関しては、表 3-2 で求めたフルスケールに対する誤差が S4 では最大で 12%、S5 で-4.5%、となることが確認できた。この値は一般的な表面電位計の測定誤差は 5%F. S. であることからほぼ満足できると考えられる。S4 の誤差が大きいのは初期値の測定精度に起因すると考えられるので今後の改良点の一つである。

表 3-1 4 列目に着目した測定結果

センサ\電圧	0	500V	1000V	1500V	2000V	2500V	3000V	3500V	4000V	4500V	5000V
S1	0	420	240	240	270	180	270	360	330	120	330
S2	0	240	330	360	360	480	330	120	240	360	270
S3	0	690	1020	750	750	900	1020	1290	1440	1650	1710
S4	0	720	1320	1650	1770	2190	2580	2940	3300	3750	4140
S5	0	420	870	1350	1500	1950	2400	2790	3300	3780	4200
S6	0	420	30	420	330	420	930	1080	1110	1440	1410
S7	0	180	240	120	90	180	240	120	240	330	180
S8	0	240	210	180	360	270	240	330	90	240	330



(a) 電圧別



(b) センサ別

図 3-1 測定結果

表 3-2 帯電体付近での測定誤差

S4 データ	0	705	1323	1650	1782	2178	2586	2937	3294	3759	4137
基準値	0	414	828	1242	1656	2070	2484	2898	3312	3726	4140
誤差	0	291	495	408	126	108	102	39	-18	33	-3
誤差(%)	0	7.03	12	9.86	3.05	2.61	2.47	0.94	-0.4	0.8	-0.1
S5 データ	0	426	861	1335	1491	1962	2400	2802	3306	3786	4191
基準値	0	420	840	1260	1680	2100	2520	2940	3360	3780	4200
誤差	0	6	21	75	-189	-138	-120	-138	-54	6	-9
誤差(%)	0	0.14	0.5	1.79	-4.5	-3.3	-2.9	-3.3	-1.3	0.14	-0.2

2-3-2 使いやすい装置に仕上げる（平成 24 年度）

静電気の帯電量を可視化する装置として従来は表面電位計を X-Y 方向に走査して 2 次元表示するものであったが、本装置の開発でリアルタイム表示が可能となり、持ち運び可能なため使いやすくなった。

第3章 全体総括

本研究で全く新しい電荷量測定型アレイ静電センサ (MEMSM ミラー) の開発ができた。この静電気センサを組み込むことで持ち運び可能な静電気非接触可視化システムが完成できた。開発した静電気非接触可視化システムにより 100mm×100mm の領域において静電気分布を可視化することに成功した。今後、小型軽量化や外乱 (主に風) 対策、測定精度と測定スピードの向上など今後の課題が残っているが概ね当初目標を達成した。簡易型測定器 (静電気非接触可視化検査機器) による市場動向調査から、商品化への期待が極めて高く、引き続き製品化に向け研究を続ける。本研究により、レーザによるミクロンオーダーの微細加工技術、光を使った微少変位角度測定技術、構造計算及び加工シミュレーション技術、高度なゲートアレイ設計技術などが確立できた。今後、これらの技術を応用した幅広い商品開発が期待できる。