

生体を把持対象としたロボットハンド用MEMSデバイスの研究

竹下, 俊弘

<https://doi.org/10.15017/1654680>

出版情報：九州大学, 2015, 博士（工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：全文ファイル公表済



平成 27 年度 博士論文

生体を把持対象としたロボット ハンド用 MEMS デバイスの研究

指導教員 澤田廉士

九州大学大学院 システム生命科学専攻

学籍番号 3SL11028E

竹下俊弘



目次

1. 緒言	1
1.1 高齢化社会	1
1.2 研究背景	3
1.3 研究目的	5
1.4 論文概要	6
2 光センサチップ	8
2.1 研究背景	8
2.2 光センサチップ	9
2.2.1 光センサチップ構造、設計	10
2.2.2 シミュレーション	12
2.2.3 作製	21
2.3 光センサチップの変位測定時における特性評価	28
2.4 圧電アクチュエータ用変位拡大機構の変位コントロール	31
2.4.1 圧電アクチュエータ用変位拡大機構	31
2.4.2 実験と結果	34
2.4.3 考察	38
2.5 光センサチップの高機能化	38
2.5.1 CMOS プロセス	38
2.5.2 温度センサ内蔵型光センサチップ	40
2.5.2.1 温度センサ	41
2.5.2.2 光センサチップの温度依存性	43
2.5.2.3 直線変位測定の温度補正方法と結果	44
2.5.2.4 直線変位測定の温度補正方法と結果	49
2.5.2.4 考察	52
2.5.3 初段増幅回路内蔵型光センサチップ	53
2.5.3.1 オペアンプ内蔵光センサチップのデザイン	53
2.5.3.2 実験と結果	55
2.5.3.3 考察と今後	57
2.6 結言	58

3. 二軸せん断力センサ	62
3.1 研究背景	63
3.2 金属フレームせん断力センサ	64
3.2.1 金属フレーム構造	65
3.2.2 実験と結果	67
3.2.3 考察	69
3.3 弾性ゴムフレームせん断力センサ	70
3.3.1 弾性ゴムフレーム構造	71
3.3.2 実験と結果	73
3.3.3 考察	77
3.4 二軸せん断力センサの高機能化デバイス	78
3.4.1 DMD 露光機を用いたマイクロレンズ作製	80
3.4.1.1 研究背景	80
3.4.1.2 作製方法	81
3.4.1.3 露光マスク設計	84
3.4.1.4 作製結果	87
3.4.1.5 考察	90
3.4.2 MEMS レンズアクチュエータデバイス	90
3.4.2.1 変形シミュレーション手法	91
3.4.2.2 カンチレバーデバイスの変形	94
3.4.2.2.1 シミュレーション結果	95
3.4.2.2.2 計算結果	96
3.4.2.2.3 実験結果	99
3.4.2.2.4 結果と考察	101
3.4.2.3 MEMS アクチュエータ変形シミュレーションと結果と考察	103
3.4.3 MEMS レンズアクチュエータ評価と応用	105
3.4.3.1 圧電定数の算出	105
3.4.3.2 MEMS レンズアクチュエータ動作確認実験	107
3.4.3.3 MEMS レンズアクチュエータ光学計算	110
3.4.3.4 MEMS レンズアクチュエータのせん断力センサへの応用実験	112
3.4.3.5 結果・考察	114
3.5 結言	115
4. マイクロエンコーダチップとナノインプリント回折格子スケール	120
4.1 研究背景	120
4.2 マイクロエンコーダチップ	122

4.2.1	マイクロエンコーダチップ構造	123
4.2.2	マイクロエンコーダ測定原理	124
4.3	ナノインプリント技術	125
4.3.1	回転回折格子スケール構造	127
4.3.2	作製方法	128
4.3.3	形状評価	129
4.4	実験	134
4.5	考察	137
4.6	結言	138
5.	結言	141
	謝辞	144
	付録	146

1. 緒言

1.1 高齢化社会

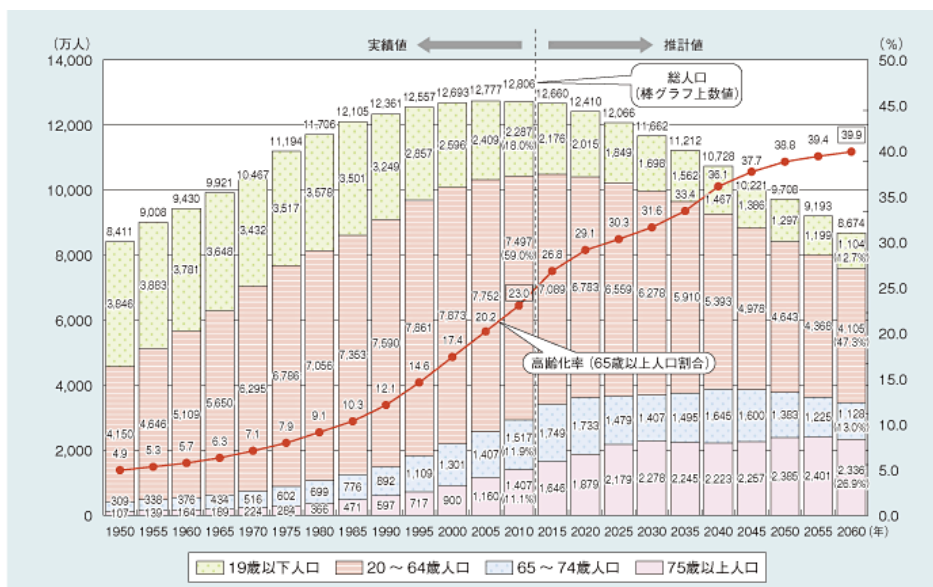


図 1.1 高齢化の推移と将来推計

日本では高齢化が進み、65歳以上の高齢者の数が年々増加している⁽¹⁾。総務省の調査した高齢化の推移と将来推計を図 1.1 に示す。この調査によると、2015 年では総人口に対して 65 歳以上の高齢者比率は 26.8%である。その後「団塊の世代」(昭和 22 年～昭和 24 年)と言われる世代が高齢者になり、2035 年には 33.4%で 3 人に 1 人、2060 年には 39.9%に達し、国民の 2.5 人に 1 人は高齢者になると予測されている。図 1.2 に各国の高齢化の予測をしめす。現在 G7 やアジア圏においても日本の高齢化率は非常に高く、世界に例を見ない早さで高齢化が進行しているが、今後、世界的にも高齢化は進行し、特にアジア圏での高齢化は日本を上回るスピードで進行すると予測されている。世界規模の高齢化率は 2010 年では 7.6%であったのに対し、2060 年には 18.3%までに増加する見込みとなっている⁽²⁾。

高齢化の問題点は様々あるが、看護師や医師などの医療業界の人材不足、社会保障費の増大、介護負担の増大、生産年齢人口の減少が挙げられる。その中でも特に重大な問題が介護従事者の不足問題である。厚生労働省の推計によると、2000 年の介護保険制度が創設された当時の介護職員数は約 55 万人であったのに対し、2013 年には約 171 万人までに増加した。さらに 2025 年には約 248 万人の介護従事者が必要になると推計されている。しかし、少子化が進むなか、生産年齢人口が減少し、2025 年において約 30 万人の介護職員不足が発生すると予測されている⁽³⁾。これに伴い要介護者の増加によって国の介護費用の負担増加、

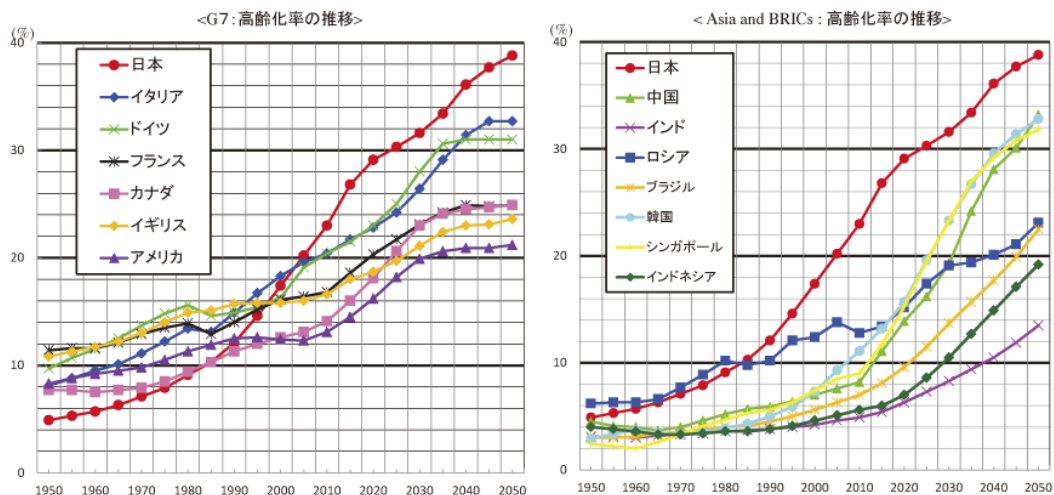


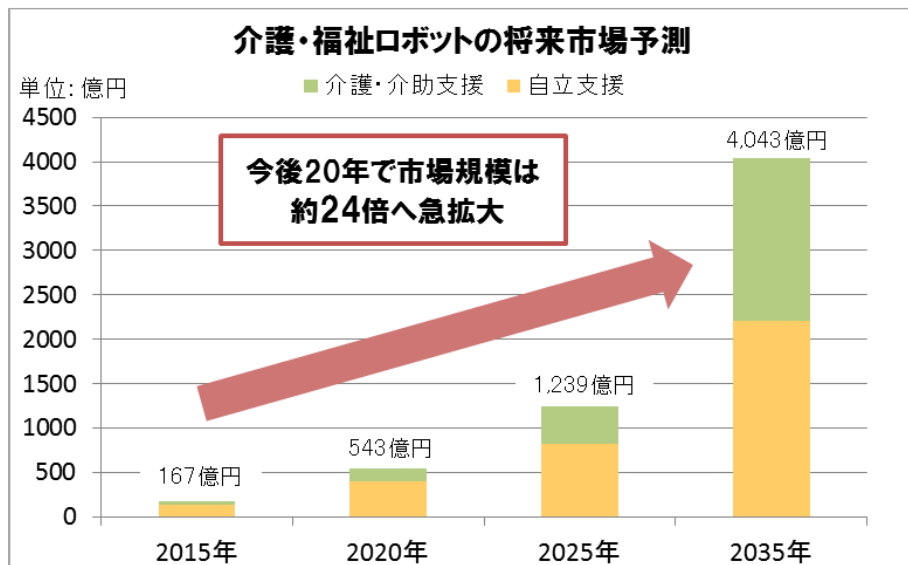
図 1.2 各国の高齢化の予測



図 1.3 介護用ロボット

また介護職員不足による親族の肉体的、精神的負担の増加など、さらなる問題を発生させると予想される。

このような問題を解決するために期待されているのが介護・福祉用ロボットである(図 1.3)。介護・福祉用ロボットとは要介護者の排泄・入浴・食事・移乗などの日常生活をサポートするためのロボットであり、介護従事者の負担軽減・不足対策、介護を受ける個人の尊厳の保持、国の介護費用負担軽減など、多くのメリットが期待できる。図 1.4 に経済産業省が発表した介護ロボットの将来市場予測を示す。この報告によると、2015 年 167 億円であった介護・福祉ロボットの市場は 2020 年には 543 億円、2025 年には 1239 億円、2035 年には 4043 億円となり、今後 20 年で約 24 倍にまで急成長すると予測されており日本の経済発展という観点においても期待されている分野である⁽⁴⁾。



※出所: 経済産業省、NEDO 2035年に向けたロボット産業将来市場予測より

図 1.

1.4 介護・福祉ロボットの将来市場予測

1.2 研究背景

産業用ロボットと介護・福祉用ロボットの大きな違いは人間を対象とすることにある。産業用ロボットにおいても操作者が工場で働く人間の事故が考えられるが、多くの場合、作業従事者は安全訓練を受け、注意しながら作業を行っているため、大きな人的ミスがないかぎり重大な事故にはなりにくい。しかし介護・福祉ロボットはロボットが扱う対象が人間であるため、産業用ロボットよりも安全の担保が重要となる。例えば要介護者を抱きかかえるような場合では、対象が滑らないようにしっかりと支えなければならない反面、力を加えすぎると対象にけがをさせてしまう恐れがある。このように、人間が行うような優しく繊細な動きが介護・福祉ロボットには求められる。図 1.5 に介護用ロボットを選ぶ際の重視点のアンケート結果を示す⁽⁶⁾。この調査によると「操作が簡単」が 74.4%「価格が安い」が 68.6%「安全認証の取得」が 54.6%となっている。操作が簡単であることはロボットのインターフェイスの問題であるが、安全で繊細な動きをするロボットを安価に作製することは難しい。ロボットはセンサの塊だと言われる通り、多くの種類のセンサがロボットには内蔵されている。特に人間のような優しく繊細でやさしい動きをロボットで実現するためには、多数のセンサを内蔵する必要がある。しかし、多くのセンサを内蔵するとロボットの価格が上昇してしまう。このような二つの要件を満たす技術として注目されているのが、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)技術である。MEMS 技術とは機械要素部品やセンサなどを電子回路とともに一つのシリコン基板、ガラス基板、有機材料状に集積化し

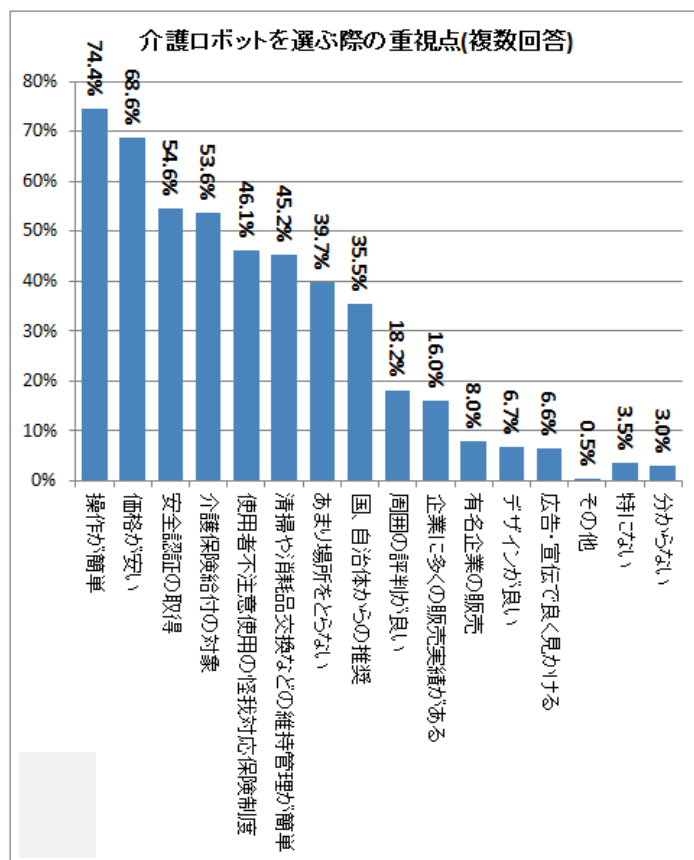


図 1.5 介護ロボットを選ぶ際の重視点

たデバイスを作製する技術のことで、小型・高性能なデバイスを大量、安価に作製することのできる技術である。そのため、多くのセンサを一つの機械の中に内蔵しなければならないロボット分野とは非常に相性の良い技術である。我々はこの技術に注目し、人間とロボットの共存を最終目標として、介護用ロボットに内蔵する用途の MEMS センサの研究開発を行ってきた。

1.3 研究目的

本研究の目的は生体などを把持対象としたロボットハンドなどに内蔵可能な小型なセンサを開発することである。我々は3種類の小型センサの研究開発を行った。一つはロボット内で小さなスペースに内蔵できる圧電アクチュエータ用の位置決めセンサ。次に繊細なロボットハンドの動作を可能にする小型力覚センサ。最後にロボット内で多く使用されるアクチュエータであるモーター用の回転角、回転角速度センサ(ロータリーエンコーダ)である(図 1.6)。

ある対象を滑らないようにかつ繊細に把持するという動きを実現しようとしたとき、まず把持対象に負荷される力を測定する必要がある。つまり人間の皮膚や感覚に相当するセ

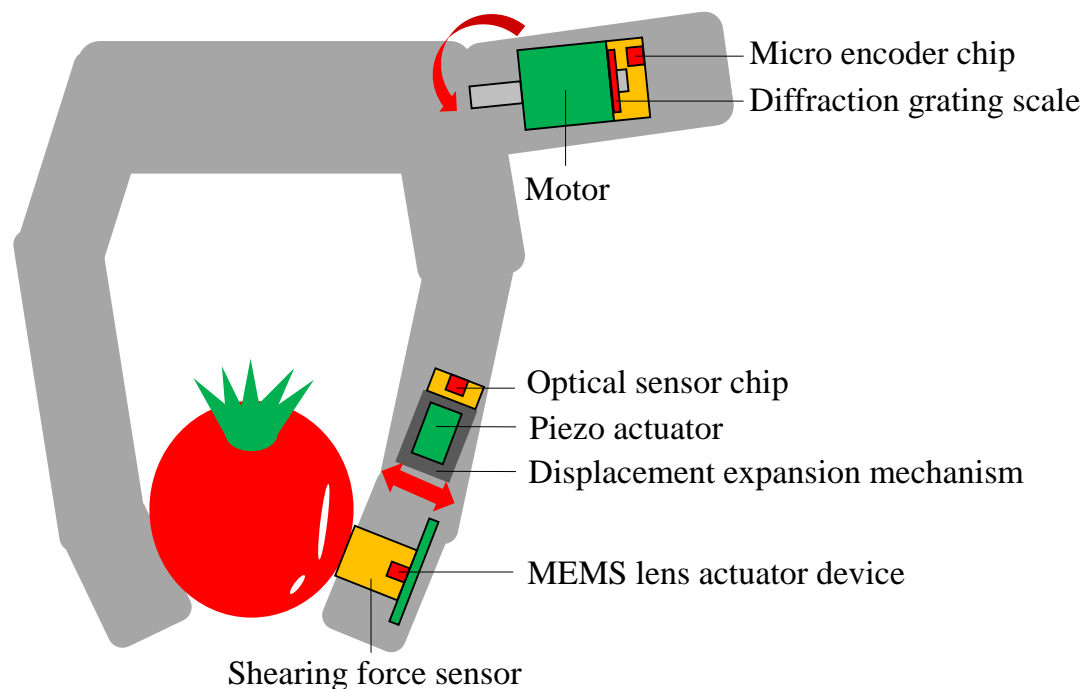


図 1.6 ロボットハンドと MEMS センサ内蔵イメージ

ンサである。それが開発した小型力覚センサである。しかしこのセンサのみでは繊細に対象を把持するのに不十分である。対象に力がかかりすぎている時、あるいはロボットハンドから滑ってしまうような時、負荷される力を調整しなければならない。人間では筋肉にあたる部分であり、人間では無意識に把持力を調整することが可能であるが、ロボットの場合センサを用いてコントロールしなければならない。そのセンサが圧電アクチュエータやモーター用の位置決めセンサやロータリーエンコーダである。

1.4 論文概要

本論文は全 5 章で構成されている。本章以降の章の概要は以下に示す通りである。第 2 章では圧電アクチュエータ用の位置決めセンサの研究開発に関して記す。このセンサでは我々が開発した光センサチップという光学式センサを用いており、このセンサチップは測定対象の変位を測定する変位センサとして使用可能である。本章では光センサチップの設計、作製、評価について述べたのち、圧電アクチュエータの位置決め制御を行う実験を行った。その後温度センサ内蔵型、増幅器内蔵型など光センサチップの高機能化に関して述べる。第 3 章ではこの光センサチップを用いたせん断力センサに関して述べる。このせん断力センサの特徴は小型、二軸方向のせん断力を分離して測定可能、センサ性能(測定範囲、分解能)を簡単に調整できるという特徴を持つ。またこのせん断力センサのさらなる高機能化を可能にする MEMS 光スキャナーに関して述べる。このデバイスはマイクロレンズと

MEMS デバイス部で構成されており、それぞれの設計、作製、評価に関して述べる。第 4 章では我々が開発したマイクロエンコーダに関して述べる。特にマイクロエンコーダは回転スケールとセンサ部とで構成されているが、我々は回転スケールをナノインプリント技術を用いることで、従来よりも高精度、高生産性のある作製方法を提案した。また作製した回転回折格子スケールとマイクロエンコーダを組み合わせることで回転角測定の実験を行い、その結果に関して考察を述べる。第 5 章にて本論文のまとめを行い、最後に謝辞を述べ、本論文を締めくくる。

参考文献

- [1]内閣府 平成 24 年度版高齢化社会白書” http://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2012/zenbun/s1_1_1_02.html”
- [2] 総務省 ICT 超高齢社会構想会議報告書 国際連合”World Population Prospects:The 2012 Revision”
- [3]厚生労働省第 4 回社会保障審議会福祉部会福祉人材確保専門委員会 介護人材需給推計(暫定値)の検証結果
- [4]経済産業省 NEDO 2035 年に向けたロボット産業将来市場予測
- [5]総務省 介護ロボットに関する特別世論調査 集計表 7(Q6)介護ロボットを選ぶ際の重視点

2. 光センサチップ

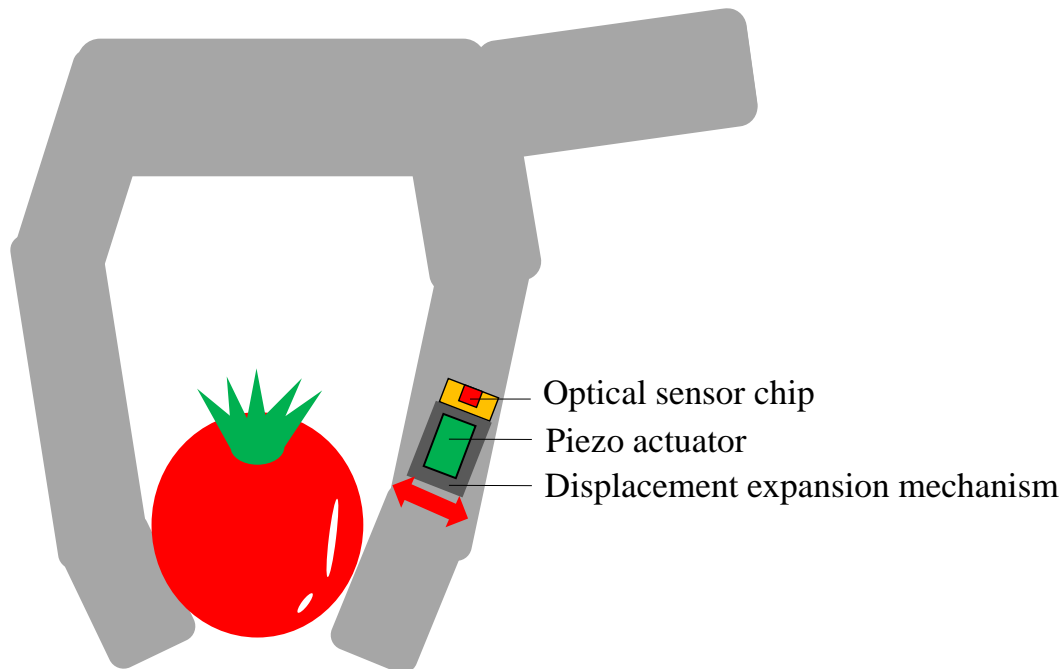


図 2.1 圧電アクチュエータと変位測定センサを内蔵したロボットハンドイメージ

本章ではロボットハンド用アクチュエータとして使用される圧電アクチュエータの位置決めセンサの研究開発について述べる。本章で記すセンサをロボットハンドに内蔵したときのイメージ図を図 2.1 に示す。まず研究背景について述べ、その後我々が開発した光センサチップについて説明する。本センサチップは小型(3[mm]×3[mm])でありながら、測定対象となる位置や二軸回りの傾きを測定することができる。その後、開発した光センサチップを用いた圧電アクチュエータの位置決めに関して述べる。この光センサチップを用いることで圧電素子の位置決め精度が向上する。最後に光センサチップの高機能化についての研究開発に関して述べ、本章を締めくくる。

2.1 研究背景

ロボットハンドは将来、生体工学や医学関連に応用され、生体などの壊れやすい対象を把持する動きが求められる。このような現状を鑑み、近年様々なロボットハンド、グリッパーの研究がなされている。ロボットハンドのアクチュエータとして電磁モータ^{6,7)}や形状記憶合金⁸⁾を用いたロボットハンドが報告されているが、ロボットハンドの指先に内蔵するような用途を考えたとき、これらのアクチュエータではシステムが大きくなりやすくこのような用途には不向きである。

そこで我々が注目したアクチュエータが圧電素子である。圧電素子は電圧をかけると体積が変化する特性を持つアクチュエータで、電磁式、空圧式、油圧式アクチュエータなどの他のアクチュエータと比較して、変位精度が高い、発生力が大きい、応答速度が速い、エネルギー効率が高いなどの特徴がある。圧電素子の変位量は非常に微細であり、数[nm]～数百[μm]の動作を行うことができるので、微小な作動が求められる半導体製造装置など精密機械装置での位置制御用途で応用が進められてきた。また、圧電素子は小型化が容易である、低消費電力化に優位である、発熱やノイズが極めて小さく安全性に優れているなどの特徴より、ロボットハンド用アクチュエータとして研究開発が行われている^(9, 10)。

しかし、圧電素子にはヒステリシス、また温度依存性による非直線性がある⁽¹¹⁻¹⁴⁾。これらの要素は圧電アクチュエータの変位精度を悪化させる要因となる。圧電アクチュエータは変位量が小さいため変位拡大機構により変位を拡大して使用されるが⁽¹⁰⁾そのようにすると、ヒステリシスや温度依存性の影響が大きく表れる。それゆえに圧電アクチュエータには変位コントロールが必要である。圧電アクチュエータの位置コントロールに関する研究はすでに報告されている^(15, 16)。例えばひずみゲージを用いたものや光干渉測定器を用いたものがあるが、精度や測定器自体の大きさの問題がある。

本研究では圧電アクチュエータ用の変位拡大機構を作製し変位の拡大を行い、さらにヒステリシスの影響を取り除くために拡大機構内に我々が研究開発した小型変位センサを組み込み、位置コントロールを行った。光センサチップを用いた変位センサは小型であることや煩雑なアライメントが必要ないという特徴があるため、既存の製品にも応用が期待できる。

2.2 光センサチップ

まず我々が研究開発した光センサチップとその光センサチップを用いた変位測定に関して述べる。測定対象の変位を測定する変位センサは変位のみでなく、時間微分することで対象の速度や加速度、また弾性体などと組み合わせることで力覚センサとして使用することができ、多くの物理現象をセンシングできる非常に重要なセンサである。変位を測定する非接触センサとして渦電流式⁽¹⁷⁻²⁰⁾、超音波式⁽²¹⁻²³⁾、光学式が測定原理として挙げられるが、渦電流式は周囲環境の電場の影響を受けやすくロボットなどの数多くの電子部品が搭載される環境においては使用が難しい。また超音波式は応答速度が比較的遅く、ロボットハンドなど高速応答が求められる使用方法には向かない。ロボットへの応用を考えたとき、光学式センサは応答性や耐環境性、また測定精度という点で渦電流式や超音波式と比較して優位であるが、一般的に光学式センサは小型化が難しいという欠点がある。

そこで我々は MEMS 技術を用いた小型簡単構造の変位センサの研究を行った。我々の開発した光センサチップは測定原理としてレーザー三角測量法を用いた。参照光を必要とするような干渉型センサと違い、非常にシンプルな構造にすることが可能であるため、この

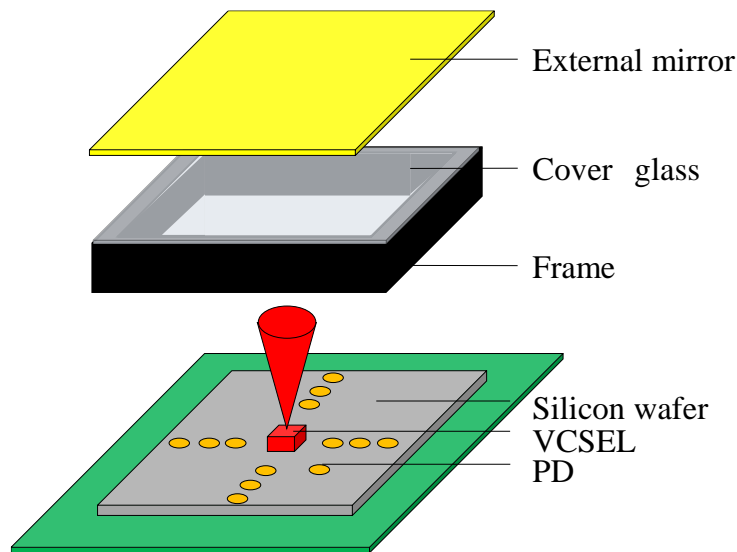


図 2.2 光センサチップ構造模式図

測定原理は小型化に向いている^(24, 25). また我々の開発した光センサチップは光ファイバーを用いないという特徴を持つ. 光ファイバーを用いた変位測定器は研究開発されており⁽²⁶⁻²⁸⁾, 測定部に光ファイバーの先端を取り付けるだけなので測定部にスペースがなくても容易に変位を測定することが可能である. しかし, 光ファイバーの根本にある光源や受光部の小型化は難しく, また光ファイバーは振動による影響を受けやすいため, 大きく可動するロボットハンド内部のアクチュエータ用センサとしては不向きである.

本項では小型簡単構造という特徴を有し, ロボットハンド内のアクチュエータの変位を測定する応用に適した小型変位センサの研究開発に関して述べる. 従来我々は光センサチップの研究開発の発表を行ったが⁽²⁹⁾, 非常に小型ではあるものの, 特に受光素子である PD の煩雑なアライメントが必要であったため, 簡単構造とは言えない. また従来センサは 1 軸方向の直線変位と 1 軸周りの回轉變位を測定可能であったが, 測定対象の平面を測定するという考えにおいて 1 軸方向の直線変位と 2 軸周りの回轉變位を測定できる方が望ましい. 以上のことから PD の煩雑なアライメントがなく, また 1 軸方向の直線変位と 2 軸周りの回轉變位を測定できるセンサの研究開発を行った.

2.2.1 光センサチップ構造, 設計

図 2.2 は光センサチップを用いた小型変位センサの構造の模式図である. 本センサは光を用いた光学式のセンサであり, VCSEL(Vertical Cavity Surface Emitting Laser)というレーザーチップと複数の PD が集積化された Si チップがから構成されている. VCSEL が光センサチップの中心にボンディングされており, 複数個の PD はセンサチップの中心を中心とした 3

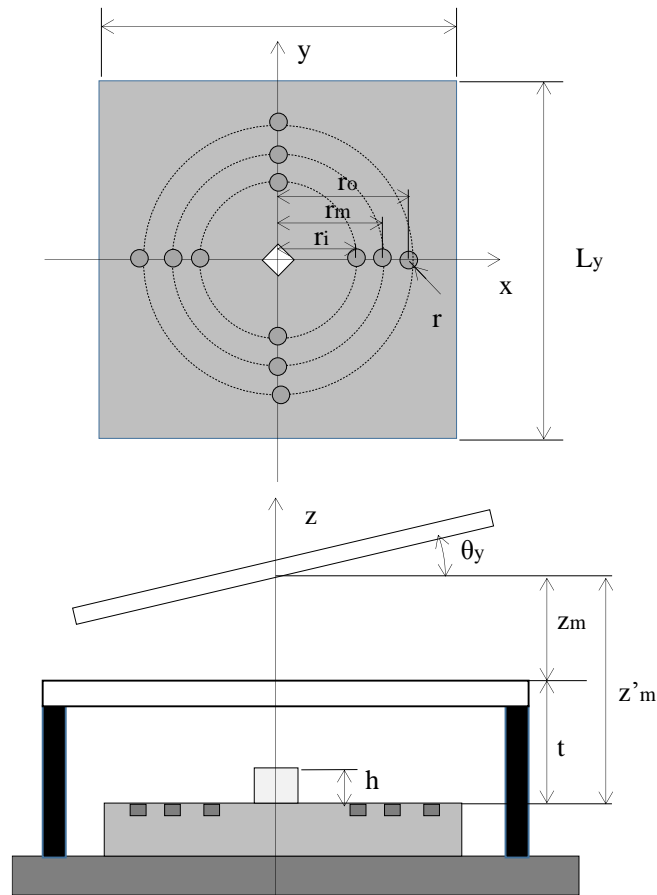


図 2.3 光センサチップデザイン

つの同心円上に配置されている。一番内側の同心円上に配置されている PD を $PD_{A1}, PD_{B1}, PD_{C1}, PD_{D1}$ 、二番目の同心円上の PD を $PD_{A2}, PD_{B2}, PD_{C2}, PD_{D2}$ 、一番外側の同心円上の PD を $PD_{A3}, PD_{B3}, PD_{C3}, PD_{D3}$ 、とする。本センサは光の反射を用いて変位測定を行うため、外部ミラーを必要とする。そのため測定時には測定対象の測定面に外部ミラーを張り付けることで変位の測定を行う。図 2.3 に光センサチップの各寸法を示す。光センサチップの全体のサイズ($L_x \times L_y$)は $3[\text{mm}] \times 3[\text{mm}]$ である。光センサチップの中心から内側 PD、中間 PD、外側 PD までの距離、つまり同心円のそれぞれの半径はそれぞれ、 $r_i=650[\mu\text{m}]$ 、 $r_m=800[\mu\text{m}]$ 、 $r_o=950[\mu\text{m}]$ である。PD は円形であり、その半径 r は $60[\mu\text{m}]$ である。VCSEL の高さ h は $200[\mu\text{m}]$ 、センサチップ表面からガラスカバー表面までの距離 t は $1300[\mu\text{m}]$ 、である。また測定する変位に関して、光センサチップ表面から外部ミラーまでの距離を z_m 、ミラーの x 軸回りの回転角度を θ_x 、ミラーの y 軸回りの回転角度を θ_y と定義する。

次に測定原理について述べる。本センサは外部ミラーの一軸方向の直線変位と 2 軸周りの回転変位を測定する。図 2.4 に測定原理のイメージ図を示す。図 2.4(a)は直線変位測定、図 2.4(b)は回転角変位測定のイメージ図である。光センサチップの中心に配置された VCSEL

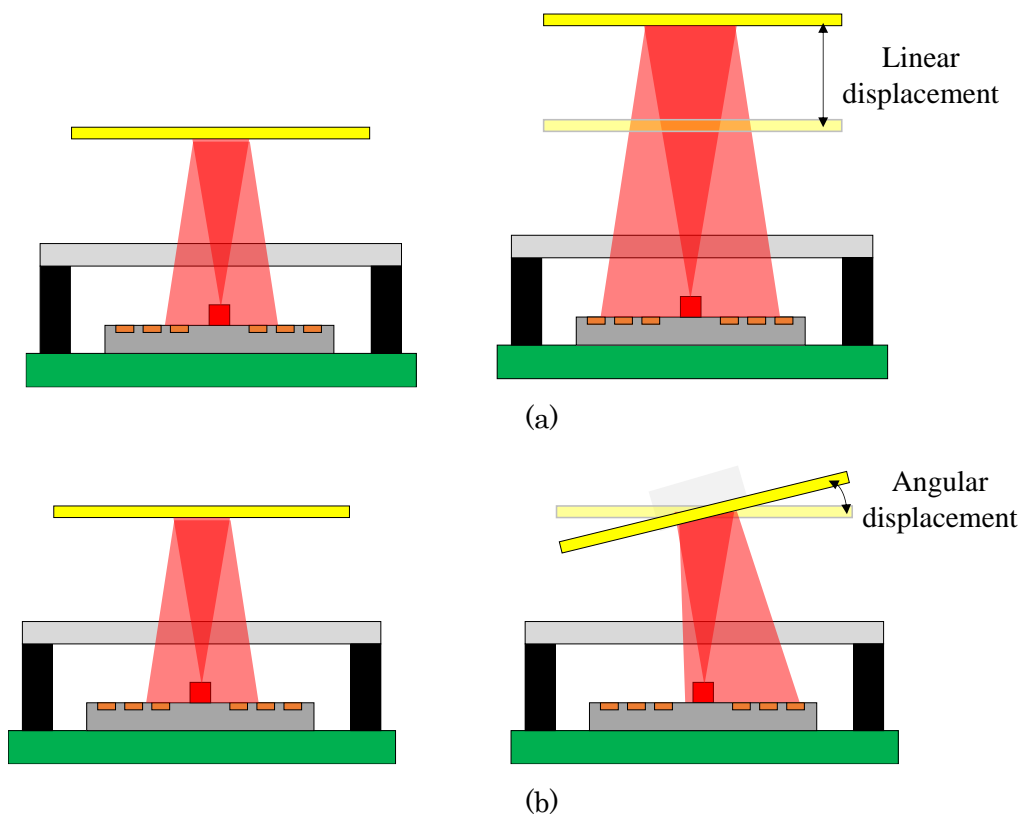


図 2.4 光センサチップ測定原理(a)直線変位測定(b)回転角変位測定

から光センサチップの法線方向にレーザーが照射される。レーザーは封止用のカバーガラスを通過した後、外部ミラーで反射し、その後光センサチップ上に戻ってくる。この時センサチップ上のスポットはある光の強度分布を有している。この強度分布によって、各 PD から信号が出力される。図 2.4(a)のように、外部ミラーがセンサチップ表面の法線方向に直線移動すると、光センサチップ上のビームスポットの径が変わり、結果的に各 PD の出力が変化する。対して図 2.4(b)のように、外部ミラーが x 軸、あるいは y 軸回りに回転すると光センサチップ上のビームスポットの中心位置が移動し、同様に各 PD の出力が変化する。各 PD の出力の変化から外部ミラーの変位を測定する原理となっている。

2.2.2 シミュレーション

本研究で開発したセンサは、上述の通り、外部ミラーの直線変位と回転変位を測定することができる。本項では直線と数値計算ソフトを用いたシミュレーションに関して述べる。数値計算ソフトとして Mathematica(Wolfram Research)というソフトを用いた。図 2.5 に幾何光学の断面図を示す。ただし図 2.5 内の z'_m はセンサ表面からの距離 z_m (図 2.3)を用いて以下の式で定義する。

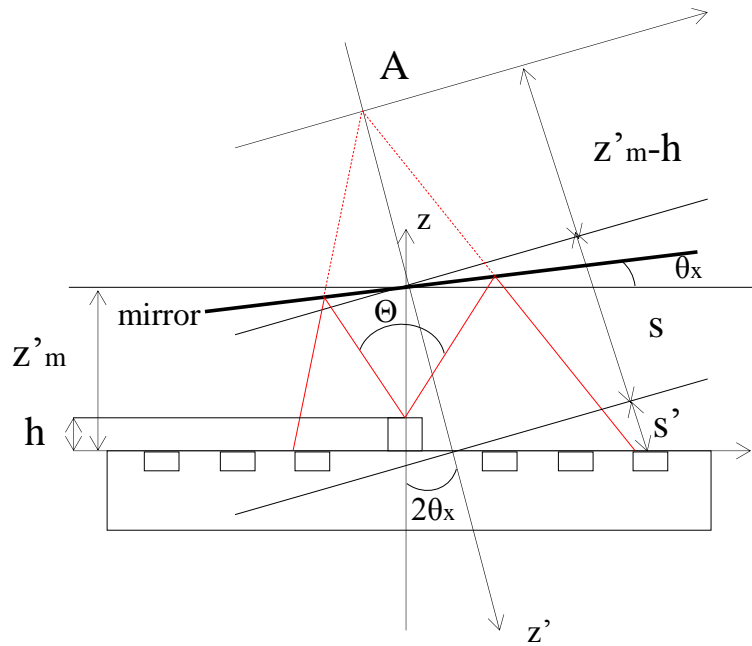


図 2.5 光センサチップ数値シミュレーションモデル

$$z'_m = z_m + t \quad (2.1)$$

VCSEL から出た光はミラーで鏡面反射されセンサの光検出面上に戻ってくる。解析ではミラーは光を完全に鏡面反射すると仮定し、反射による減衰はないと仮定した条件で行った。この時、VCSEL の中心から照射された後、外部ミラーで反射し、センサチップ上に照射する光強度は図 2.5 中の点 A から照射された光強度と一致する。点 A を原点とする $x' - y' - z'$ 直交座標系と、PD 検出面上に $x - y$ 座標系をとる。外部ミラーが θ_x, θ_y 傾いているとき、その平面は以下の式で表される。

$$z = x \tan \theta_x + y \tan \theta_y + z_m \quad (2.2)$$

なお z_m は光センサチップの表面から外部ミラーまでの距離である。この平面の法線ベクトルは

$$(\tan \theta_x, \tan \theta_y, -1) \quad (2.3)$$

となる。入射光と反射光のなす角は、入射光と反射面の法線ベクトルのなす角の 2 倍になるため、反射光の光線ベクトルはこの法線ベクトルを用いて、以下の式で表される。

$$\left(\tan \theta_x, \tan \theta_y, \frac{-\tan \varphi}{\tan(2 \varphi)} \right) \quad (2.4)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\sqrt{(\tan \theta_x)^2 + (\tan \theta_y)^2} \right) \quad (2.5)$$

この時, x-y 平面上のビームスポットの中心座標を (x_c, y_c) とすると

$$x_c = \tan \theta_x \frac{z_m \tan(2 \varphi)}{\tan \varphi} \quad (2.6)$$

$$y_c = \tan \theta_y \frac{z_m \tan(2 \varphi)}{\tan \varphi} \quad (2.7)$$

となる. この解析の目的は, PD に入射する光パワーとミラー位置 $(z_m, \theta_x, \theta_y)$ との関係を求めることである. そこで, まず PD の光検出面(x - y 平面) 上の光強度分布 $I(x, y)$ を求める VCSEL の中心からビームが照射される. VCSEL のビームプロファイルをガウシアン分布と仮定する. 実際に使用した VCSEL もビームプロファイルがガウシアン分布に近いものを使用している. この光束密度は以下の式で表される.

$$I(x, y, z) = \frac{2 P}{\pi \omega} \exp \left(-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega^2} \right) \quad (2.8)$$

$$\omega = z \tan \frac{\Theta}{2} \quad (2.9)$$

$I(x, y, z)$ は点 A から照射した光の座標 (x, y, z) における光強度である. それぞれ光センサチップの中心を原点とした座標である. z' は VCSEL の照射点からの距離である. P は光線中心の強度, Θ はビーム全角幅を示している. ビーム全角幅とは, ビーム半幅(bean half-width: 光強度が中心強度に対して $1/e^2=0.135335$ まで低下する半径方向の距離) の拡がり角を意味している. ただし, z がレイリー領域よりも十分に大きいと仮定している. A 点から (x_c, y_c) 距離 s は以下の式で表される.

$$s = \sqrt{z_m'^2 + x_c^2 + y_c^2} \quad (2.10)$$

x-y 面に入射する入射光と垂直に交わる面は以下の式で表される.

$$z = x \tan(2 \theta_x) + y \tan(2 \theta_y) - (x_c \tan 2 \theta_x + y_c \tan 2 \theta_y) \quad (2.11)$$

x-y 平面上の任意の点(x,y)からこの平面まで距離 s' とすると

$$s' = \frac{x \tan(2 \theta_x) + y \tan(2 \theta_y) - (x_c \tan 2 \theta_x + y_c \tan 2 \theta_y)}{\sqrt{(\tan(2 \theta_x))^2 + (\tan(2 \theta_y))^2 + 1}} \quad (2.12)$$

となる. x-y 平面に入射する光の光束強度分布における距離 z' は x-y 平面の座標(x,y)に依存する. それは入射光が x-y 平面に対して傾いているためである. そのため,

$$z' = z'_m - h + s + s' \quad (2.13)$$

となる. また x',y' は x-y 平面では以下の式で表される.

$$x' = (x - x_c) \tan(2 \theta_x) \quad (2.14)$$

$$y' = (y - y_c) \tan(2 \theta_y) \quad (2.15)$$

以上より, まとめると, PD 平面上つまり x-y 平面上における光束強度分布はセンサチップとミラー間距離 z_m を用いて

$$I'(x,y) = \frac{2 P}{\pi \omega} \exp\left(-\frac{2(x'^2 + y'^2)}{\omega^2}\right) \quad (2.16)$$

$$\omega = z' \tan \frac{\theta}{2} \quad (2.17)$$

ただし

$$z' = z'_m - h + s + s' \quad (2.13)$$

$$x' = (x - x_c) \tan(2 \theta_x) \quad (2.14)$$

$$y' = (y - y_c) \tan(2 \theta_y) \quad (2.15)$$

となる. なお z_m, x_c, y_c, s, s' はそれぞれ(2.1)(2.5), (2.6), (2.9), (2.11)で表される. 関数 I(x,y) は, x'-y' 平面上で z' 軸方向に向かう光の強度を表している. x-y 平面上に垂直に通過する強度とするためには, この式に cos(2 φ) を掛けあわせる必要がある. すなわち, x-y 平面を垂

直に通過する光強度 $I(x,y)$ は,

$$I(x,y) = I'(x,y) \cos(2\varphi) \quad (2.18)$$

と表される. 以上で PD の光検出面に垂直に通過する光の強度分布 $I(x,y)$ が求められた. 強度分布 $I(x,y)$ を, PD の光検出部面積で積分することによって PD に入射する光のエネルギーが求められる. 各 PD の光検出領域を $\Omega_{A1}, \Omega_{A2}, \Omega_{A3}, \Omega_{B1}, \Omega_{B2}, \Omega_{B3}, \Omega_{C1}, \Omega_{C2}, \Omega_{C3}, \Omega_{D1}, \Omega_{D2}, \Omega_{D3}$, とすると,

$$\Omega_{A1} = (x,y) |x^2 + (y - r_i)^2| \leq r^2 \quad (2.19)$$

$$\Omega_{A2} = (x,y) |x^2 + (y - r_m)^2| \leq r^2 \quad (2.20)$$

$$\Omega_{A3} = (x,y) |x^2 + (y - r_o)^2| \leq r^2 \quad (2.21)$$

$$\Omega_{B1} = (x,y) |(x + r_i)^2 + y^2| \leq r^2 \quad (2.22)$$

$$\Omega_{B2} = (x,y) |(x + r_m)^2 + y^2| \leq r^2 \quad (2.23)$$

$$\Omega_{B3} = (x,y) |(x + r_o)^2 + y^2| \leq r^2 \quad (2.24)$$

$$\Omega_{C1} = (x,y) |x^2 + (y + r_i)^2| \leq r^2 \quad (2.25)$$

$$\Omega_{C2} = (x,y) |x^2 + (y + r_m)^2| \leq r^2 \quad (2.26)$$

$$\Omega_{C3} = (x,y) |x^2 + (y + r_o)^2| \leq r^2 \quad (2.27)$$

$$\Omega_{D1} = (x,y) |(x - r_i)^2 + y^2| \leq r^2 \quad (2.28)$$

$$\Omega_{D2} = (x,y) |(x - r_m)^2 + y^2| \leq r^2 \quad (2.29)$$

$$\Omega_{D3} = (x,y) |(x - r_o)^2 + y^2| \leq r^2 \quad (2.30)$$

となる. $x-y$ 平面上の面積を Ω で表すと, PD_n に入射する光強度 P_n はそれぞれ, 以下のようにして求められる.

$$P_n = \int_{\Omega_n} I(x,y)d\Omega \quad (2.31)$$

となる。この論理計算では、式の導出を簡単にするため、カバーガラスの存在を無視している。カバーガラスが存在する場合は、屈折率の差から、センサ上でのビームスポットの形状が多少変化することが予想されるが、その変化は微小であると考えられ、センサの基本的な特性に関しては大きな違いは無いと考えている

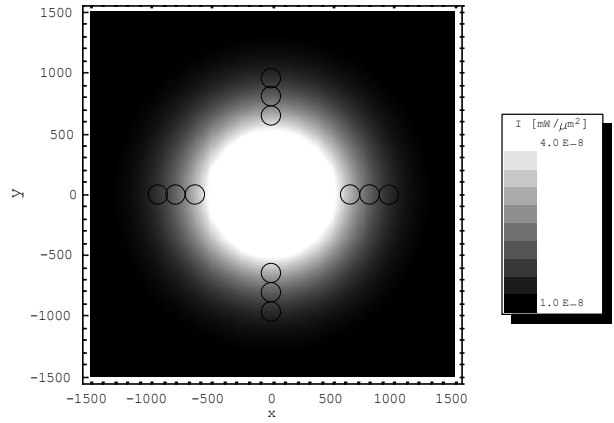
次に光センサチップ上の光強度分布のシミュレーションを行った。まずミラーを直線移動させた場合の計算を行った。図 2.6 に、ミラーとセンサのガラスカバー表面の距離 z_m を 2000[μm], 3000[μm], 4000[μm], また $\theta_x=0[\text{deg.}]$, $\theta_y=0[\text{deg.}]$ のときのセンサチップ表面上での光強度分布 $I(x,y)$ の等高線図を描いた結果を示す。等高線図内の円は、PD の光受光部を表している。シミュレーション結果より、 z_m の増加により、スポット径が広がり、PD 上の光強度が変化していくことがわかる。同様にミラーを回轉變位させた場合の計算を行った。図 2.7 にその結果を示す。ミラーの回転角 θ , $z_m=2000[\mu\text{m}]$ で $\theta_x=-2.5[\text{deg.}]$, $0[\text{deg.}]$, $2.5[\text{deg.}]$, $\theta_y=-1.5[\text{deg.}]$, $0[\text{deg.}]$, $1.5[\text{deg.}]$ のそれぞれの場合について光強度分布 $I(x,y)$ の等高線図を描いた。回転角測定は先ほども触れたように、ミラーの傾きによって各 PD の出力信号に差が生じることを利用したものの原理であるため、外部ミラーが傾いた場合、センサに戻ってくる反射光のビームスポットの中心位置が移動し、光強度の最大値を示す位置がセンサの中心部からずれる。ビーム断面の強度分布はガウス分布に従うため、ビームの中心に近いほど光強度は強くなる。そのため、ミラーが傾き距離が近くなった PD はより大きな光強度を受け取ることとなり、逆に遠ざかった PD はビームスポットから離れるのでより小さい光強度しか受け取れなくなる。このことを利用し回転角度測定を行う。次に信号処理に関して述べる。直線変位測定のための信号を S_{inner} , S_{middle} , S_{outer} を以下の式で定義した。

$$S_{\text{inner}} = P_{A1} + P_{B1} + P_{C1} + P_{D1} \quad (2.32)$$

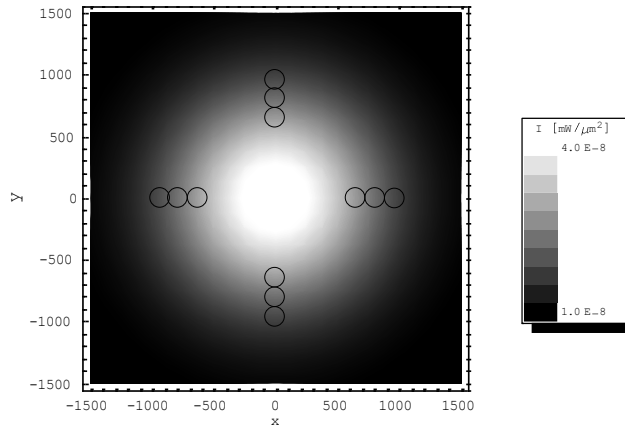
$$S_{\text{middle}} = P_{A2} + P_{B2} + P_{C2} + P_{D2} \quad (2.33)$$

$$S_{\text{outer}} = P_{A3} + P_{B3} + P_{C3} + P_{D3} \quad (2.34)$$

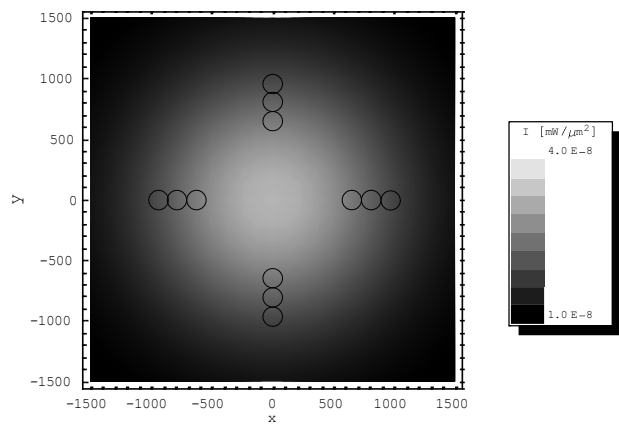
このように信号を足し合わせることで、直線変位測定時の微小な角度変化の影響を除去することができる。図 2.8 に $z_m=0\sim 6000[\mu\text{m}]$ の時の S_{inner} , S_{middle} , S_{outer} を示す。初期状態から直線移動するにつれて出力電圧が上昇し、ある位置でピーク値をとり、その後出力電圧が減少する



(a)



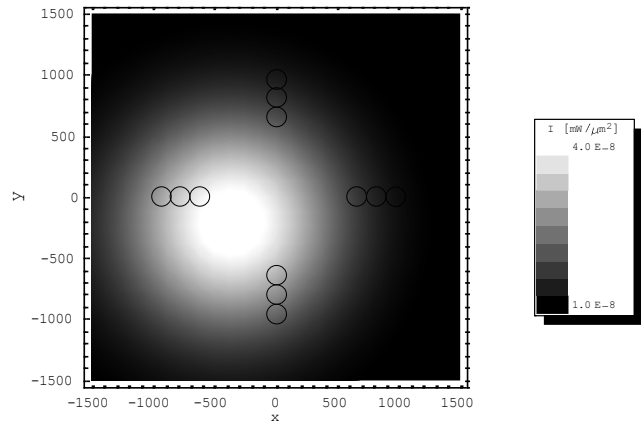
(b)



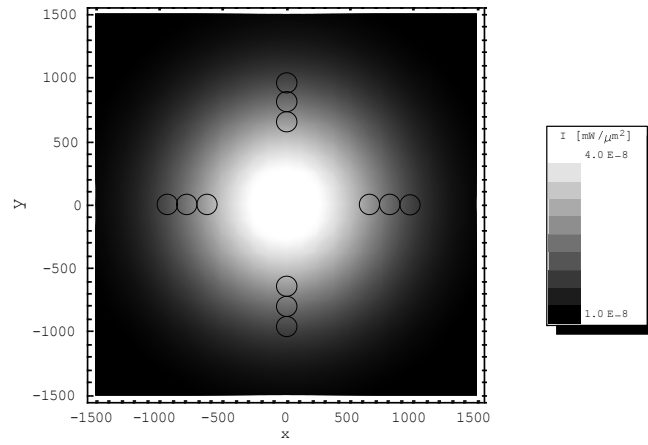
(c)

図 2.6 直線変位シミュレーション結果

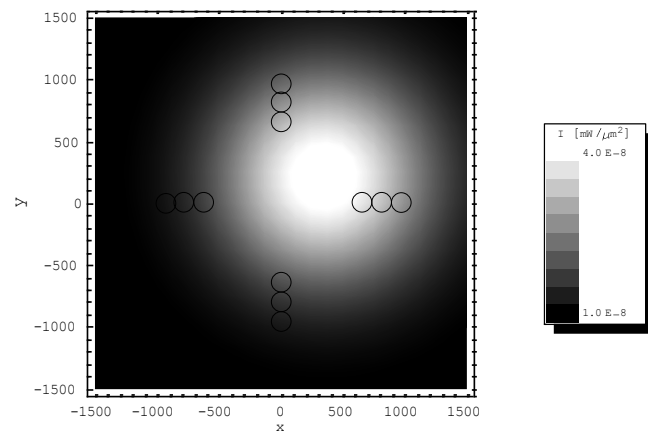
(a) $z_m=1000[\mu\text{m}]$ (b) $z_m=2000[\mu\text{m}]$ (c) $z_m=3000[\mu\text{m}]$



(a)



(b)



(c)

図 2.7 回転角変位シミュレーション結果(a) $\theta_x=-2.5[\text{deg.}]$, $\theta_y=-1.5[\text{deg.}]$
 (b) $\theta_x=0[\text{deg.}]$, $\theta_y=0[\text{deg.}]$ (c) $\theta_x=2.5[\text{deg.}]$, $\theta_y=1.5[\text{deg.}]$

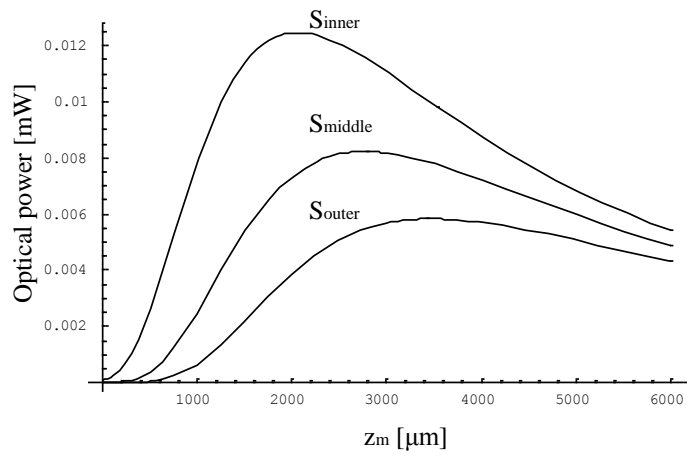
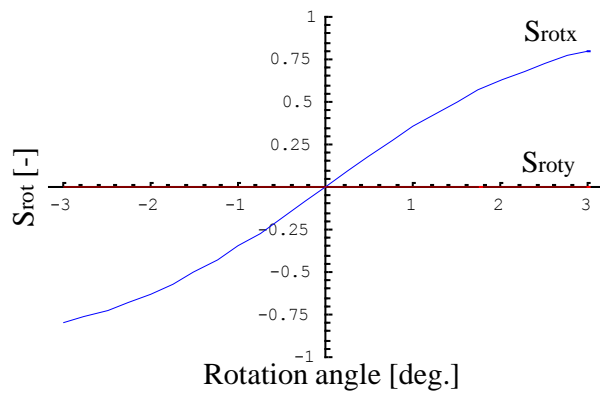
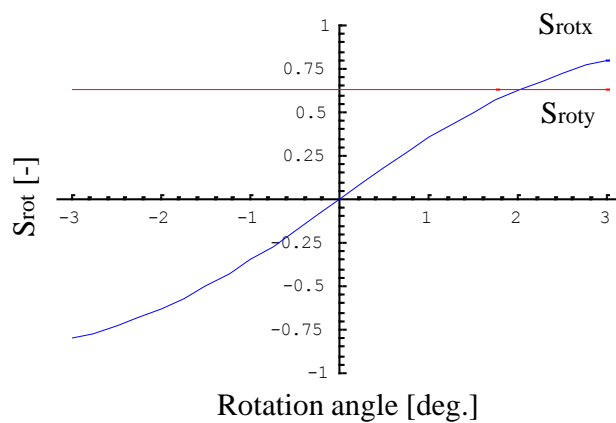


図 2.8 直線変位出力信号シミュレーション結果



(a)



(b)

図 2.9 回転角変位出力信号シミュレーション結果
 (a) $\theta_x = -3 \sim 3[\text{deg.}]$, $\theta_y = 0[\text{deg.}]$ (b) $\theta_x = -3 \sim 3[\text{deg.}]$, $\theta_y = 2[\text{deg.}]$

という信号となる。また PD の位置が VCSEL 中心から離れるにつれて出力電圧は小さくなる。ピーク値の前後に直線部分があり、この直線部分が測定範囲となる。ピーク前を **Front Slope**、ピーク後を **Back Slope** とする。**Front Slope** は高分解能の測定に向いており、**Back Slope** は測定範囲の広いことが期待できる。また本センサの分解能は信号の直線部分の傾きに依存し信号が大きいほど傾きが大きくなるため、 S_{inner} が最も分解能が良いと考えられる。次に回転角度測定の信号処理に関して述べる。y 軸回りの回転角度測定のための信号を S_{rotx} 、x 軸回りの回転角度測定のための信号を S_{roty} とする。それぞれ以下の式で表す。

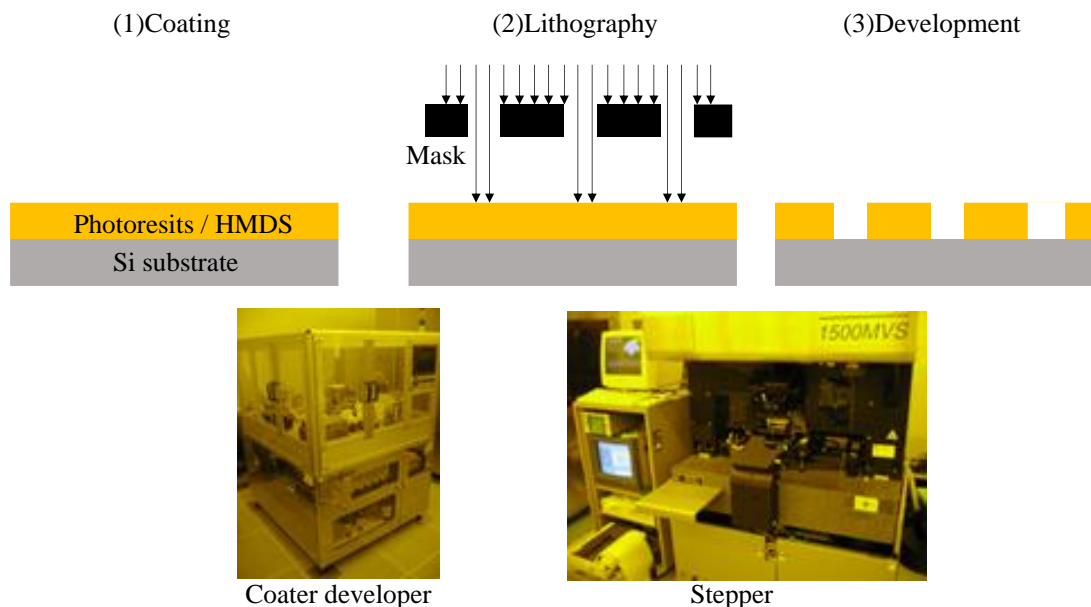
$$S_{\text{rotx}} = \frac{P_{D1} - P_{B1}}{P_{D1} + P_{B1}} \quad (2.35)$$

$$S_{\text{roty}} = \frac{P_{A1} - P_{C1}}{P_{A1} + P_{C1}} \quad (2.36)$$

この式を用いることで θ_x と θ_y の回転角度を分離して測定することができる。ミラーを傾けたときの S_{rotx} 、 S_{roty} の結果を図 2.9 に示す。図 2.9(a)は $\theta_x=0[\text{deg.}]$ で θ_y を $-3\sim 3[\text{deg.}]$ 傾けたときの信号である。 S_{rotx} は 0 のままであり、 S_{roty} の信号が大きく変化している。図 2.9(b)は $\theta_x=3\sim 3[\text{deg.}]$ 、 $\theta_y=2[\text{deg.}]$ に傾けた際の信号である。 S_{rotx} 、 S_{roty} それぞれ変化しており、傾きの方向に対応している。これらの結果からこのセンサが傾きの方向を分離してそれぞれ測定することができるといえる。

2.2.3 作製

次に光センサチップの作製方法に関して述べる。本センサチップは北九州学術研究都市共同研究開発センターの装置を用いて作製した。まず図 2.10 に基本的なフォトリソグラフィの模式図と実際に使用した装置を示す。フォトリソグラフィとは光に対して感光性を持つフォトレジストと呼ばれる物質を表面に塗布し、フォトマスクと言われる基板に描かれた素子・回路パターンを焼き付けることにより、露光されている部分と露光されていない部分からなるパターンを生成する技術のことである。使用した装置は主にコーターディベロッパー(CB-50, リソテック)とステッパー(1500MVS, Ultratech)である。コーターディベロッパーは、フォトレジストの塗布、ベーク、現像を行うことのできる装置である。またステッパーはレチクルと呼ばれるフォトマスクを用いて、そのフォトマスクに描かれたパターンを投影レンズで縮小し、ウェハに投影する装置である。まずコーターディベロッパーを用いて、HMDS(hexamethyldisilazane)と呼ばれるプライマーの塗布を行う。プライマーはウェハの表面改善を行い、その後塗布するフォトレジストの密着性を向上させる働きを持つ。その後フォトレジストの塗布を行う。使用したフォトレジストはポジ型と呼ばれるも



<https://www.ksrp.or.jp/shisetsu/semicon1.html>

図 2.10 リソグラフィープロセス

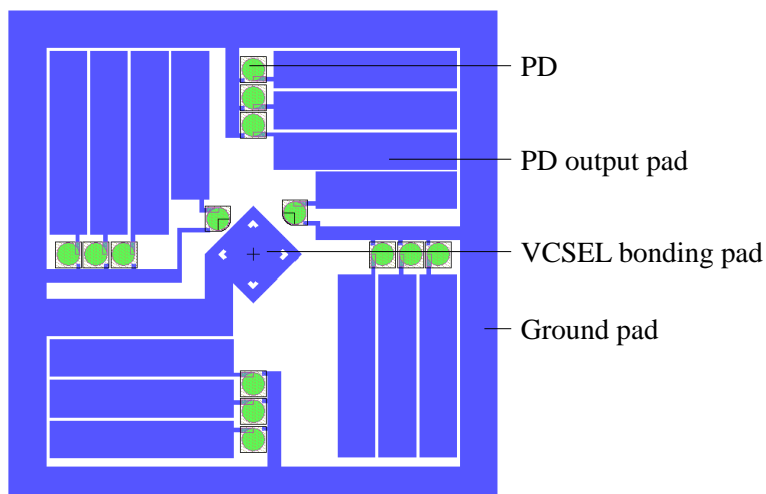


図 2.11 光センサチップフォトマスクデータ

ので、感光した部分が現像液に溶解しやすくなる性質を持つ。逆に感光した部分が現像液に溶解しにくくなるフォトリソをネガ型と呼ぶ。プライマー、フォトリソの塗布はスピナーコーティングという方法で行う。スピナーコーティングは回転台にウェハを固定し、その表面にプライマーやフォトリソを垂らし、回転台を回転させることで塗布を行う方法である。回転台の回転時間・速度をコントロールすることで膜厚の調整することが可能である。その後、コーターディベロッパー内のホットプレート上にウェハを置くことでレ

ジスト内の溶媒を蒸発させるプリベークという工程を行う。次にステッパーを用いてパターンの露光を行う。あらかじめウェハにアライメントマークと呼ばれる位置合わせ用のマークを形成し、そのアライメントマークの形状をステッパーに読み込ませる。ウェハ上のアライメントマークとマスク上のアライメントマークが一致するように、ウェハ側のステージを微調整し、その場所に露光を行うことで、高精度に位置合わせを行った露光を行うことが可能となる。その後、再度コーターディベロッパーを用いてフォトレジストの現像を行う。現像を行うことで、ステッパーで感光した部分が現像液に溶解し、フォトマスクのパターンが浮き出る。最後にホットプレートを用いてポストベークを行い、フォトレジストの焼き固めを行う。以上がフォトリソグラフィーの基本的な工程である。

次に光センサチップの作製プロセスについて述べる。基本的には上述のフォトリソグラフィーの後、イオン注入・エッチング・スパッタなどの工程を行い、その後フォトレジストを除去するという工程を繰り返す。図 2.11 に使用したマスクデータを示す。中央にあるアルミ膜が VCSEL をボンディングするためのパッドとアライメントマークである。また周辺に配置している四角のアルミ膜がワイヤーボンディング用のパッドである。このパッドと PCB 基板をワイヤーディングし、PD の出力を取り出す。図 2.12 に PD 周辺のプロセスフローを示す。ただし、フォトリソグラフィーの工程は繰り返しになるため省略する。

- (1)アセトンでウェハ表面の希 HF を用いてウェハに形成された自然酸化膜を除去する。
- (2)酸化炉(IX-200 武蔵工業)を用いて下敷き酸化膜を形成し、その後プラズマ CVD(PD-220 samco)で窒化膜を堆積する。この下敷き酸化膜は引っ張り応力を持つ窒化膜と Si ウェハとのバッファ層として機能するとともに、イオン注入時の表面保護膜の役割を有する。
- (3)フォトリソグラフィーで n ウェル領域のパターニングを行い、RIE(Reactive Ion Etching)装置(RIE-10NR, Samco)を用いて窒化膜のエッチングを行う。
- (4)中電流型イオン注入装置(IMX-3500, ULVAC)を用いてイオンの注入を行う。本作製では n 型半導体形成のために P, p 型半導体形成のために B を使用した。N ウェル形成のために P を注入する
- (5)熱酸化(アンモニア酸化)を行い選択した領域の酸化を行う。窒化膜が堆積された部分は酸素を透過しないため、選択的な酸化を行うことが可能となる。
- (6)RIE 装置を用いて窒化膜のエッチングを行う
- (7)p ウェル領域のイオン注入を行う。選択酸化を実施した領域がマスクとなり、n ウェル領域以外に B を注入する。
- (8)BHF(Buffered HF)を用いて選択酸化領域の酸化膜を剥離する。
- (9)熱酸化(アンモニア酸化)を行い、全面の酸化を行う。
- (10)フォトリソグラフィーでアクティブ領域の酸化膜のドライエッチングを行い、その後保護酸化膜の形成を行う。
- (11)n-select 領域に P を高濃度に注入する。
- (12)p-select 領域に B を高濃度に注入する。

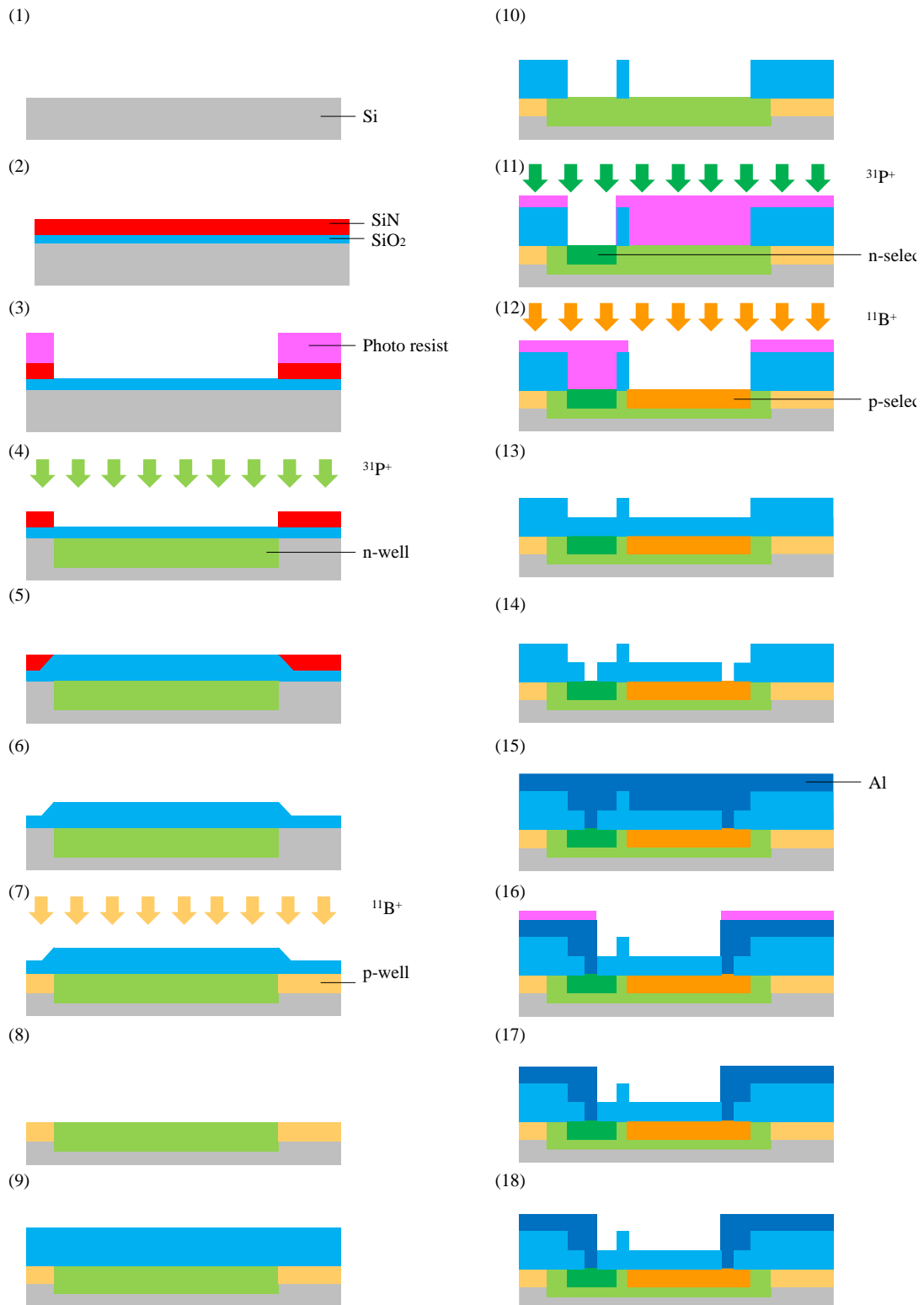


図 2.12 光センサチップ作製プロセス

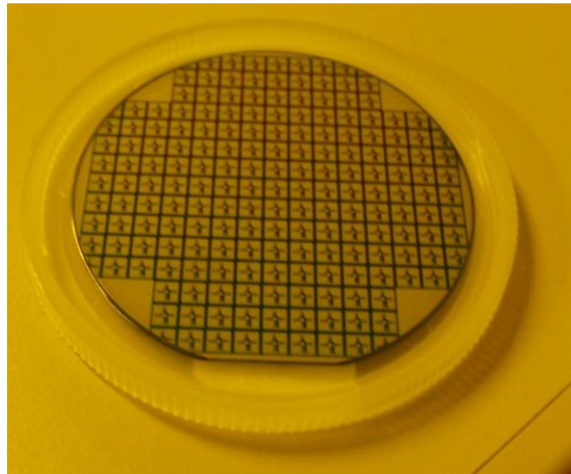


図 2.13 光センサチップ(ダイシング前)

(13)プラズマ CVD を用いて酸化膜を堆積する。その後窒素雰囲気下でアニールを行い、絶縁膜の強化を行う

(14)コンタクト領域のフォトリソグラフィ、RIE 装置を用いたエッチングを行い、via を形成する。

(15)スパッタ装置を用いて、全面にアルミ膜を成膜する。

(16)フォトリソグラフィを行い、配線領域のエッチングを行う。リン酸を用いてエッチングした後、フォトレジストを除去する。

(17)窒素雰囲気中でシンタリングを行い、アルミ膜とシリコンを界面で合金化させ良好なコンタクトを実現させる。

(18)バックグラインド、ダイシングを行い、チップ化する。

以上のプロセスで光センサチップの作製を行う。作製した PD は表面実装型の PN フォトダイオードである。p 領域と n 領域の界面を空乏層と呼ぶ。光エネルギーによって空乏層で生成された電子は n 領域へ、正孔は p 領域へ流れ、外部回路に電流として出力される。表面実装化することで、陽極・陰極ともに表面から取り出すことができる。また後述する MOS トランジスタと作製プロセスと同時に作製することが可能となる。図 2.13 に作製した光センサチップのダイシング前のウェハを示す。

次にアセンブリに関して述べる。図 2.14 にアセンブリのプロセスの模式図を示す。まず、形成した VCSEL 用のパッドに導電性ペースト(ドータイト)を塗布し、その上に VCSEL を置き、パッドに形成したアライメントマークをもとに位置合わせを行う。また PCB 基板にも導電性ペーストを塗布し、光センサチップを配置する。次に加熱炉に入れ、120[°C] 一時間加熱し、導電性ペーストを硬化させる。その後ワイヤーボンディングを行う。ワイヤーには金ワイヤー(20[μm]φ)を用いた。ワイヤーボンディング装置に光センサチップをボンディングした PCB 基板を固定し、ワイヤーが接着しやすくなるようヒーターで光センサチップと PCB 基板を加熱し、各パッドと VCSEL のワイヤーボンディングを行う。最後にカバーガ

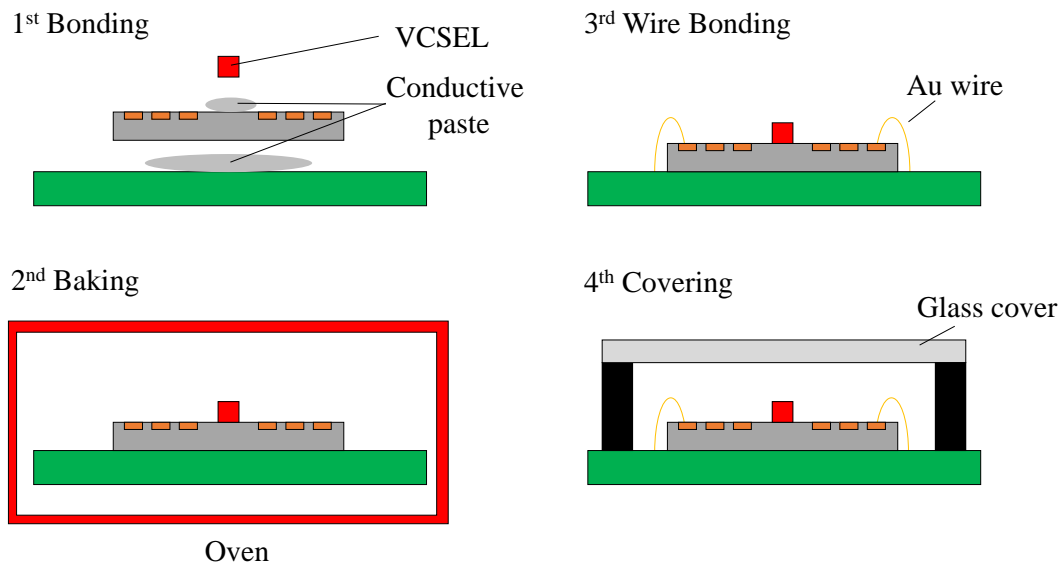


図 2.14 光センサチップアセンブリプロセス

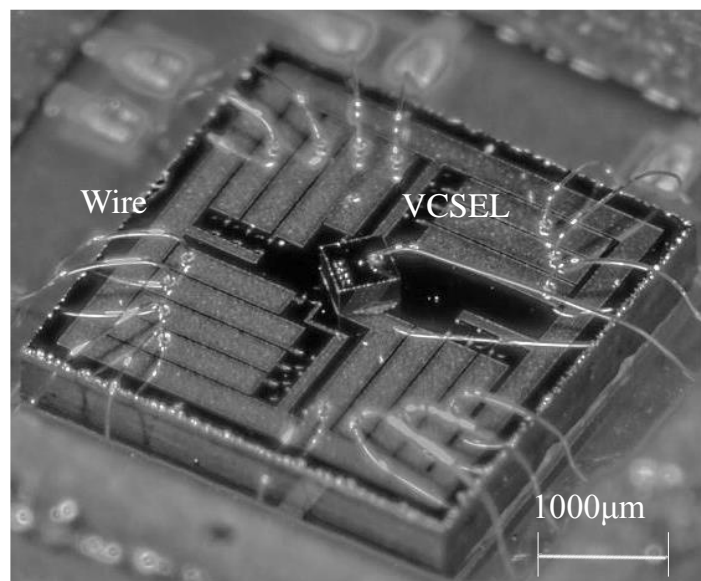


図 2.15 光センサチップ SEM 画像

ラスで光センサチップを保護する。図 2.15 は作製した光センサチップの写真である。撮影のために、カバーガラスが無い状態で撮影を行った。光センサチップのサイズは 3[mm]角と非常に小型であり、またアライメントは VCSEL のボンディングの時に必要なだけで、一般的な光センサに必要な光学素子(レンズ,回折格子,分光器など)の煩雑なアライメントの必要がない。また非常に簡単な構造である。

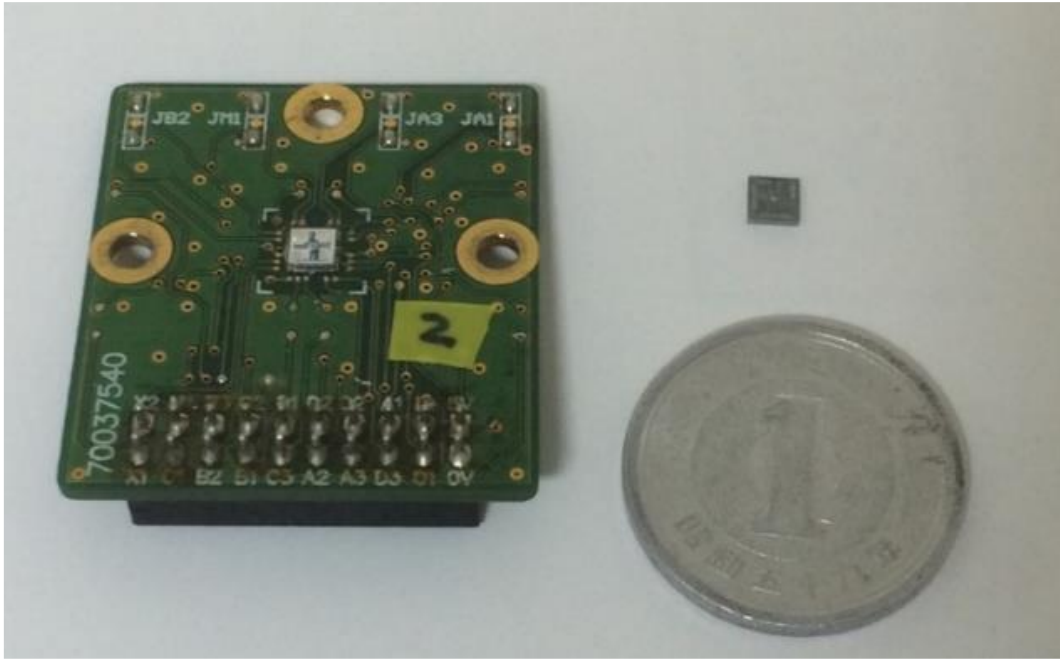


図 2.16 基板実装後光センサチップ

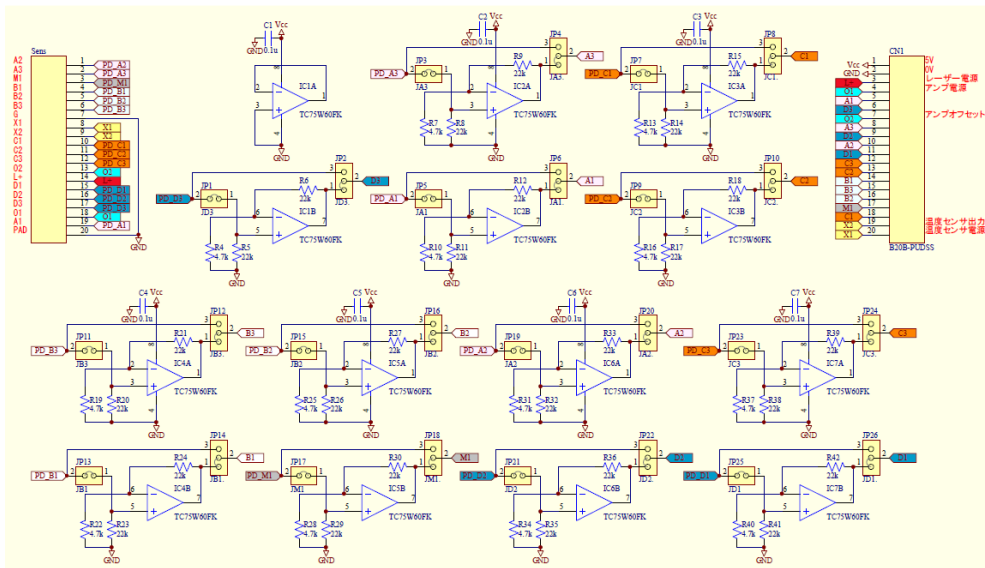


図 2.17 増幅回路図

図 2.16 は PCB 基板も含めた光センサチップである. 各 PD の出力電流は外部抵抗で電圧変換されたのち, 基板上に実装された増幅回路で増幅される. 図 2.17 に増幅回路の回路図を示す. オペアンプ(TC75W60FK, 東芝セミコンダクター&ストレージ社)を使用した非反転増幅回路であり, 5.68 倍の増幅を行った. PCB 基板には 20 個の入出力端子があり, 増幅後の PD 出力の出力端子, VCSEL 電源端子, オペアンプ電源端子, 共通グラウンド端子となっている.

2.3 光センサチップの変位測定時における特性評価

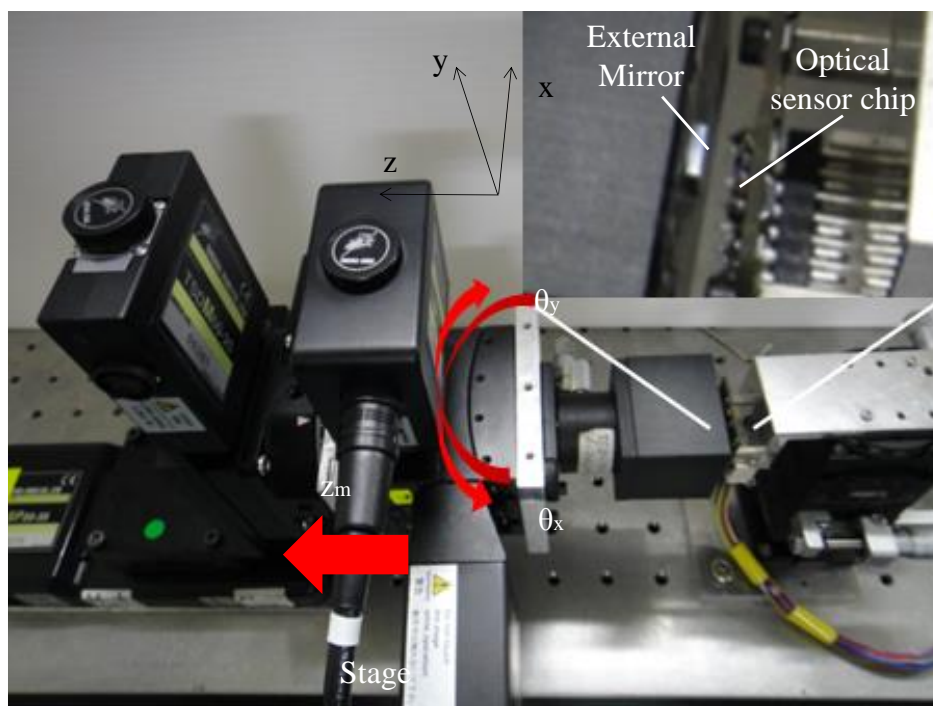


図 2.18 光センサチップ実験系

次に作製した光センサチップの変位測定の特性評価を行った。まず実験系に関して述べる。図 2.18 に実験系を示す。光センサチップは手動ステージで作製した治具に取り付けられている。外部ミラーは自動ステージ(シグマ光機)で作製した自動ステージに張り付けられており、光センサチップに対面するように配置した。自動ステージは x, y, z 軸の直線移動, $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ の回転移動が行える。外部ミラーの表面が θ_x, θ_y の回転中心になるよう、外部ミラーの位置合わせを行っている。自動ステージコントローラは LabVIEW (National Instruments) に接続されており、LabVIEW に移動量、移動速度を入力することで、等速で直線移動、回転移動を行う。また光センサチップの出力電圧も LabVIEW で測定を行っている。実験系は防振台の上に組み立てており、微小な振動による信号のゆらぎを防止している。VCSEL を 7 [mA] の定電流駆し、またオペアンプには 5[V] の定電圧を印可した。また室温下で実験を行った。この状態を初期状態とする。

まず直線変位測定の実験を行った。初期状態から z 方向に外部ミラーを直線移動 ($z_m=0[\mu\text{m}] \sim 4000[\mu\text{m}]$) させた際の信号を取得した。図 2.19 は $S_{\text{inner}}, S_{\text{middle}}, S_{\text{outer}}$ の信号を示している。初期状態から直線移動するにつれて出力電圧が上昇し、ある位置でピーク値をとり、その後出力電圧が減少するという信号となる。また PD の位置が VCSEL 中心から離れるにつれて出力電圧は小さくなる。ピーク値の前後に直線部分があり、この直線部分が測定範囲となる。ピーク前の直線部分を Front Slope、ピーク後の直線部分を Back Slope とする。Front Slope は直線の傾きが大きいため高分解能の測定に向いており、Back Slope は直線部分

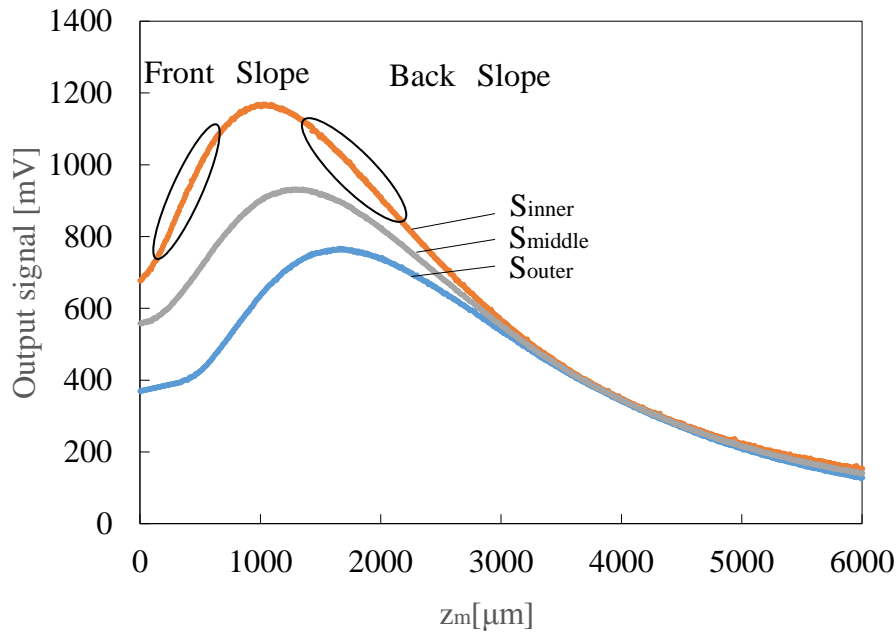
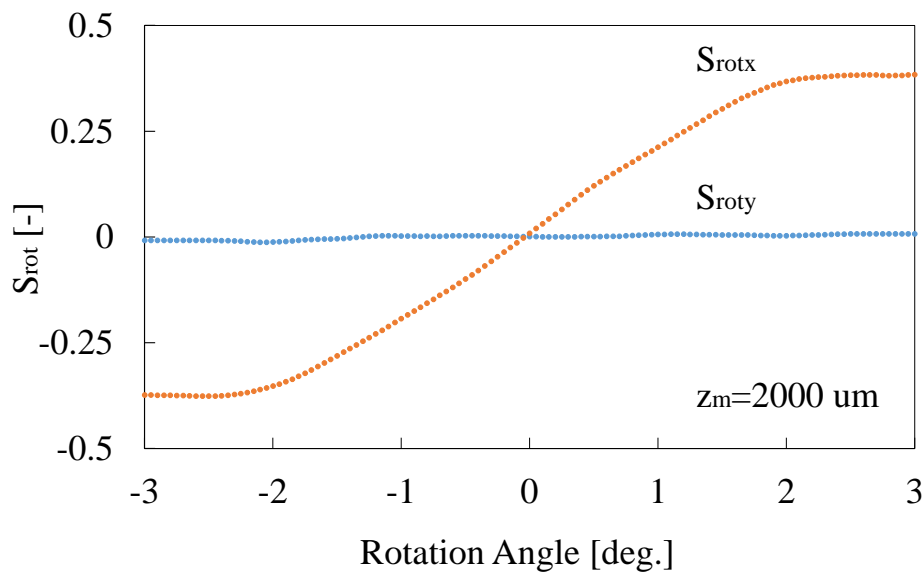


図 2.19 直線変位測定実験結果

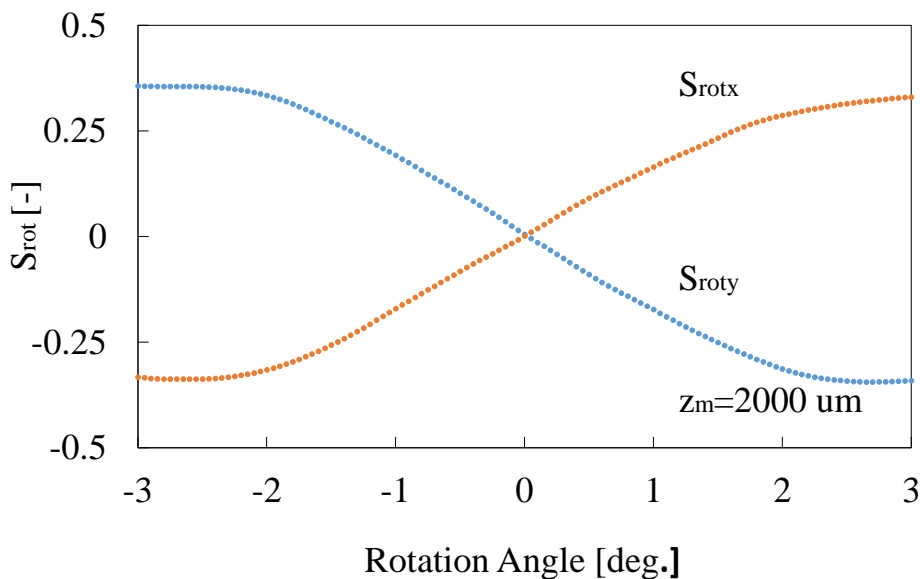
が長いこと測定範囲の広いことが期待できる。また本センサの分解能は信号の直線部分の傾きに依存し信号が大きいほど傾きが大きくなるため、 S_{inner} が最も分解能が良いと考えられる。出力電圧から S_{inner} の Front Slope における電氣的分解能を計算すると 1.33% Full Scale (測定範囲 100 [μm]時)であった。

次に回転変位の実験を行った。外部ミラーを傾けたときの S_{rotx} , S_{roty} を測定する。測定結果を図にしめす。図 2.20(a)は $\theta_y=0[\text{deg.}]$ で θ_x を $-3\sim 3[\text{deg.}]$ 傾けたときの信号である。 S_{roty} はほぼ 0 のままであり、 S_{rotx} の信号が大きく変化している。また図 2.20(b)は $\theta_x=3\sim -3[\text{deg.}]$, $\theta_y=-3\sim 3[\text{deg.}]$ に傾けた際の信号である。 S_{rotx} , S_{roty} それぞれ変化しており、傾きの方向に対応している。これらの結果からこのセンサが傾きの方向を分離してそれぞれ測定することができるといえる。この時の S_{rotx} のセンサの角度測定分解能を計算すると 1.60 % F.S(測定範囲 $\pm 1.5[\text{deg.}]$)であった。

以上の結果から本センサは 1 軸の直線変位、と 2 軸周りの回転角度をそれぞれ測定することができる。センサの分解能に関して、検出用 PD で生じた信号が初段のアンプに達するまでの配線でノイズがのってしまい、そのノイズがセンサの分解能を悪化させていると考えられる。この問題を改善方法として PD と初段アンプの距離を近づけることが挙げられる。後述するが PD とオペアンプをセンサチップ上にモノリシックに作り込むことで PD と初段アンプの距離を近づけることが可能となり、さらなる高精度化と小型化も期待できる。さらに分解能を低下させる要因としてボンディングワイヤーによる光の反射の影響が考え



(a)



(b)

図 2.20 回転角測定実験結果

(a) $\theta_x = -3 \sim 3$ [deg.], $\theta_y = 0$ [deg.] (b) $\theta_x = -3 \sim 3$ [deg.], $\theta_y = 3 \sim -3$ [deg.]

られる。本センサではミラーで反射してその後直接 PD に照射する光を利用している。しかし、ミラーと PD 面の間にワイヤーが存在しているため、ミラーで反射したのちワイヤーで乱反射し PD で検出されるという光が存在する恐れがある。このため、PD とオペアンプを同時に作り込むということはセンサの精度やリニアリティの改善に有効であると考えられる。さらに温度変化による PD, VCSEL の特性変化もセンサの精度悪化の原因となる。特に

光素子は温度変化による影響を受けやすく、温度補償は光センサにとって重要な意味を持つ。温度補償をする手法として、常に VCSEL の出力をモニターし温度に対して変化した VCSEL 出力を一定になるように制御する APC(Automatic Power Control)制御を行う方法とセンサチップ内に温度センサを組み込み実際の温度を測定し、その温度に応じた補正係数を算出する方法とが挙げられる。後者の方法の温度補償に関して 2.5.2 にて述べる。

2.4 圧電アクチュエータ用変位拡大機構の変位コントロール

2.4.1 圧電アクチュエータ用変位拡大機構

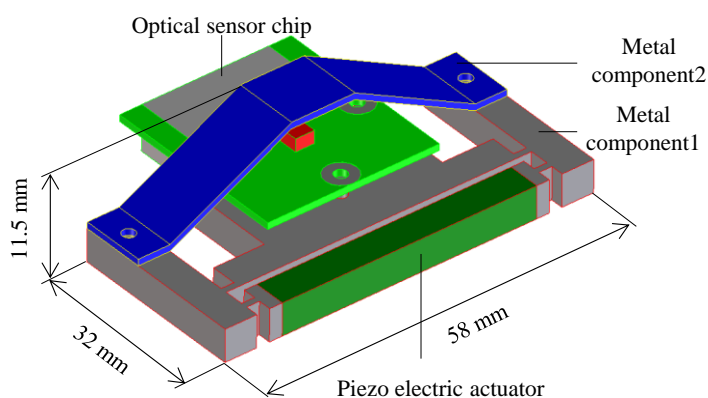


図 2.21 圧電アクチュエータ変位拡大機構模式図

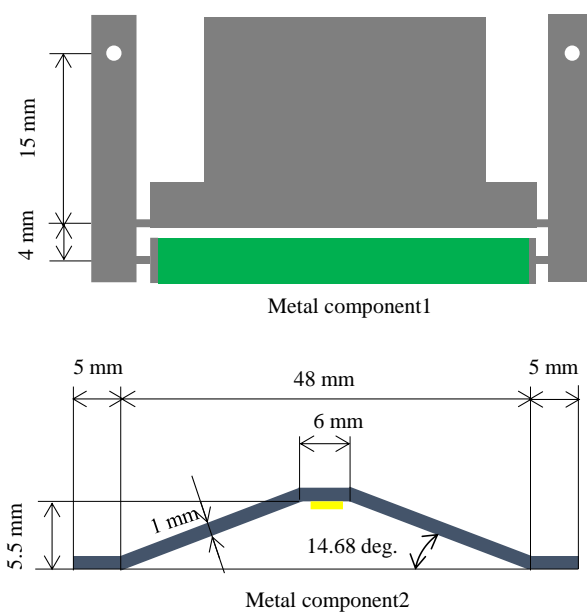


図 2.22 圧電アクチュエータ変位拡大機構デザイン

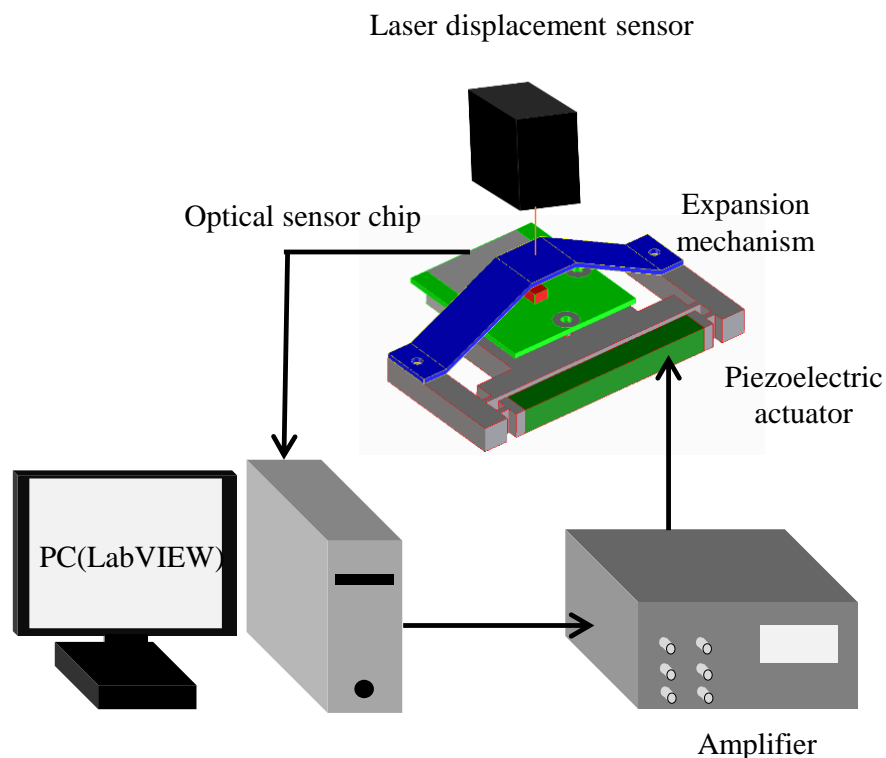


図 2.23 圧電アクチュエータ変位制御実験系

次に光センサチップを用いた圧電アクチュエータの位置決めコントロールの実験に関して述べる。本実験の目的は圧電アクチュエータが有するヒステレシスの影響による変位誤差を、我々が開発した光センサチップを用いて制御することである。図 2.21 に作製した光センサチップ内蔵の圧電アクチュエータ用変位拡大機構を示す。また金属部品 1,2 の寸法を図 2.22 に示す。本機構は圧電アクチュエータ、光センサチップ、金属部品 1、金属部品 2 の 4 つの部品から構成されている。金属部品 1、金属部品 2 の材質はステンレスである。図 2.21 のように圧電アクチュエータ(AE0203D44H40F, NEC-Tokin)は金属部品 1 では挟み込まれており、また金属部品 1 は金属部品 2 にねじで固定されている。光センサチップも同様に金属部品 1 に固定されている。金属部品 2 の天井背面に変位測定用の外部ミラーを接着している。外部ミラーは Si 基盤に Cr を蒸着し作製しており、光センサチップの位置がミラーの真下にくるよう位置の調整を行っている。光センサチップの直線変位測定範囲に合わせてセンサ表面からミラー面までの距離が 3000[μm]になるように調整している。部品間の遊びをなくすために圧電と金属部品 1 接着剤で固定されている。同様に金属部品 1 と金属部品 2 はそれぞれネジで固定したのち接着剤で固定されている。この原理により圧電の変位が拡大されてステージの変位となる。

実験系を図 2.23 に示す。コンピュータの USB 端子から圧電アクチュエータをコントロー

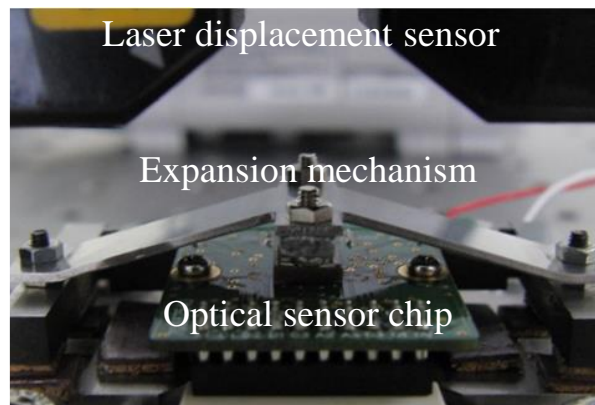
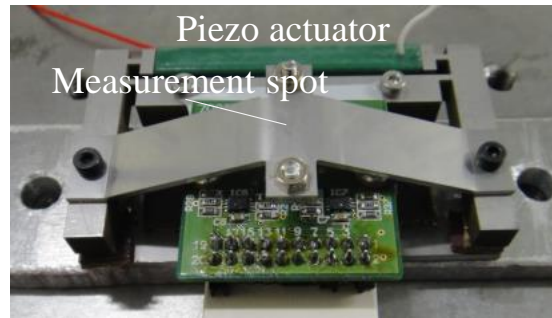
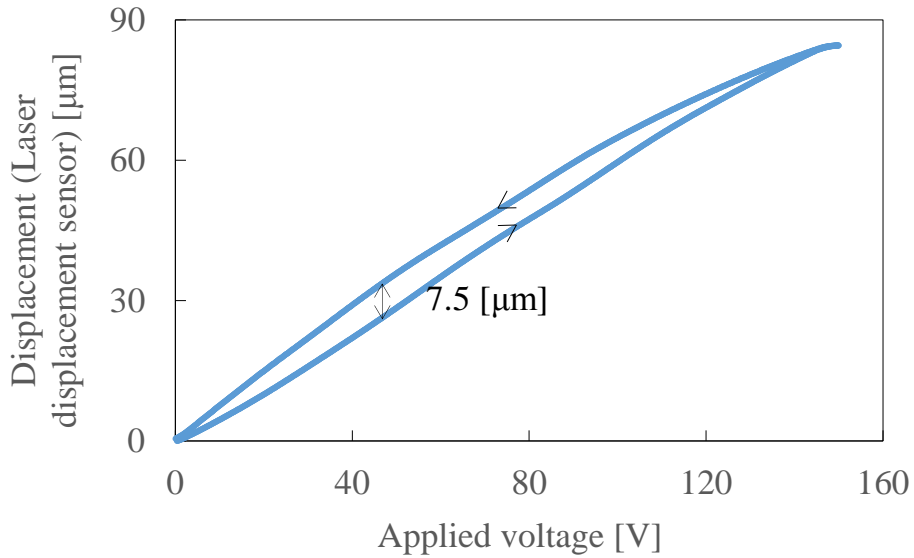


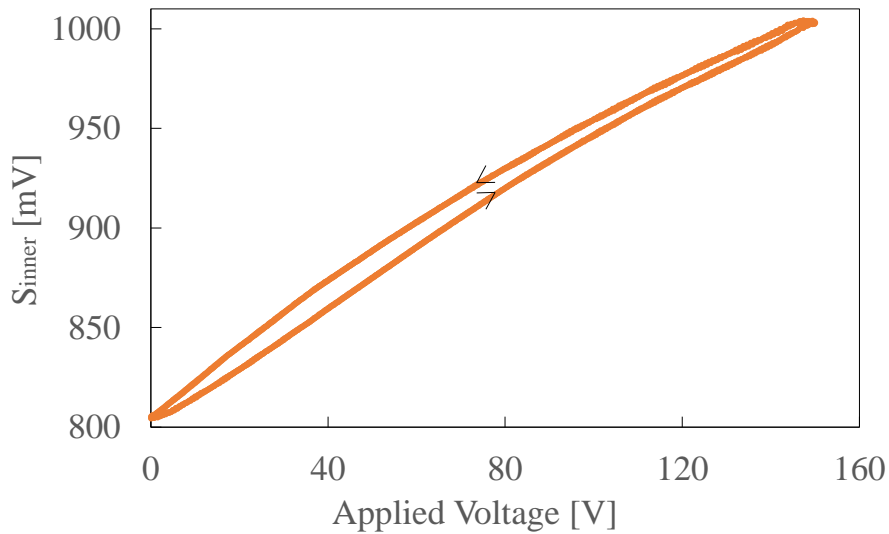
図 2.24 圧電アクチュエータ変位拡大機構

ルする電圧を出力する。USB 端子からの出力電圧は最大で 5[V]であるため，出力された電圧を圧電アクチュエータ用の電圧増幅器を通して増幅し，圧電アクチュエータに印可する。増幅器で 30 倍に電圧を増幅するため，最大で 150[V]の電圧が圧電素子に印加される。光センサチップの出力はコンピュータに入っている。ソフト LabVIEW を使用してデータを取得している。変位センサの裏側にはレーザー変位計(LK-G15, KEYENCE)を配置し，ステージの変位を 0.1 [μm]の分解能で測定している。図 2.24 に実際に作製した圧電拡大機構を示す。変位拡大機構の上部に配置したレーザー変位計を用いて変位拡大機構の変位量を測定している。変位拡大機構の精密な動き実現するためには，この圧電アクチュエータのヒステレシスを取り除く必要がある。しかし図 2.24 からわかるように一般的に販売されているレーザー変位計は非常に大きく，小型の拡大機構に埋め込む用途には向いていない。対して，我々が開発した光センサチップは非常に小型であるため，実験系のような小さなスペースに埋め込む用途に適していることがわかる。

2.4.2 実験と結果



(a)



(b)

図 2.25(a)レーザー変位計出力(b)光センサチップ出力

まず、この実験系のヒステリシス特性の取得と、光センサチップの校正を行う実験を行った。圧電に印加する電圧を $0[\text{V}] \rightarrow 150[\text{V}] \rightarrow 0[\text{V}]$ と連続的に変化させた時の変位量をレーザー変位計と光センサチップを用いて測定した。印加電圧は $0.05 [\text{Hz}]$ の三角波形状である。温度は室温であり、防振台の上に実験系を置き、実験を行った。

図 2.25(a)にレーザー変位計の信号を示す。図 2.25(a)の結果より、印可電圧が $150 [\text{V}]$ の時変

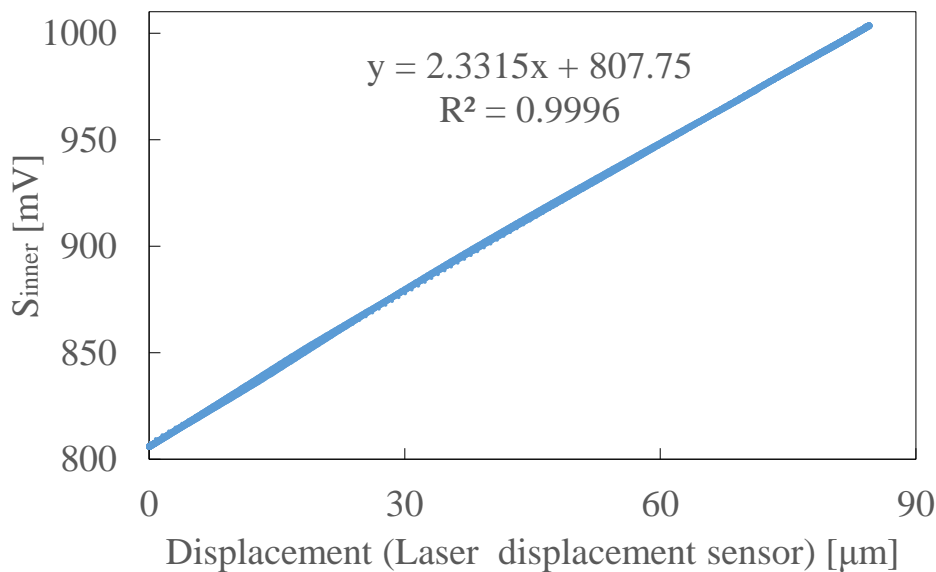


図 2.26 レーザー変位計出力と光センサチップ出力の関係

位拡大機構の変位が $96.2[\mu\text{m}]$ であった。使用した圧電アクチュエータは $150[\text{V}]$ 印可時、 $42.0[\mu\text{m}]$ の最大変位を有するため、拡大機構により約 2.29 倍、変位が拡大されていることがわかる。また実験結果により、印可する電圧の上昇時、下降時でヒステリシス特性があることが分かる。つまり同じ電圧を印可しても、その電圧に達するまでの履歴により圧電アクチュエータが発生する変位が異なることを意味する。これは圧電アクチュエータの変位誤差の大きな原因となる。圧電アクチュエータのヒステリシスにより最大で $7.5[\mu\text{m}]$ の変位誤差が発生している。また図 2.25(b)に光センサチップで取得した信号を示す。高分解能で測定するために S_{inner} を用いた。本ステージの変位量は約 $96[\mu\text{m}]$ であったため測定範囲も十分である。光センサチップの位置はミラー面との距離が S_{inner} の BackSlope の中心になるように調整されている。結果より、変位をレーザー変位計同様ヒステリシスが確認できる。また S_{inner} とレーザー変位計の変位量のグラフを図 2.26 に示す。グラフからわかるように測定位置の変位に対して直線の信号が得られている。この信号を直線近似したところ、傾き $-2.33[\text{mV}/\mu\text{m}]$ であり、R 二乗値は 0.9996 である。以上により、圧電アクチュエータのヒステリシス特性の確認、また光センサチップ用のキャリブレーション信号の取得が完了した。

次に上述の信号から制御用のプログラムの作成を行い、その制御プログラムを行った実験結果について述べる。まず制御プログラムを LabVIEW を用いて作成した。図 2.27 にプログラムのプロトコルを示す。プログラムの内容はある設定した目標値に対して、光センサチップで取得した変位情報をもとに印可電圧をコントロールするものとなっている。あらかじめ取得している特性で、変位センサ出力の変化の目標値を決める。目標値は以下の式で算出している

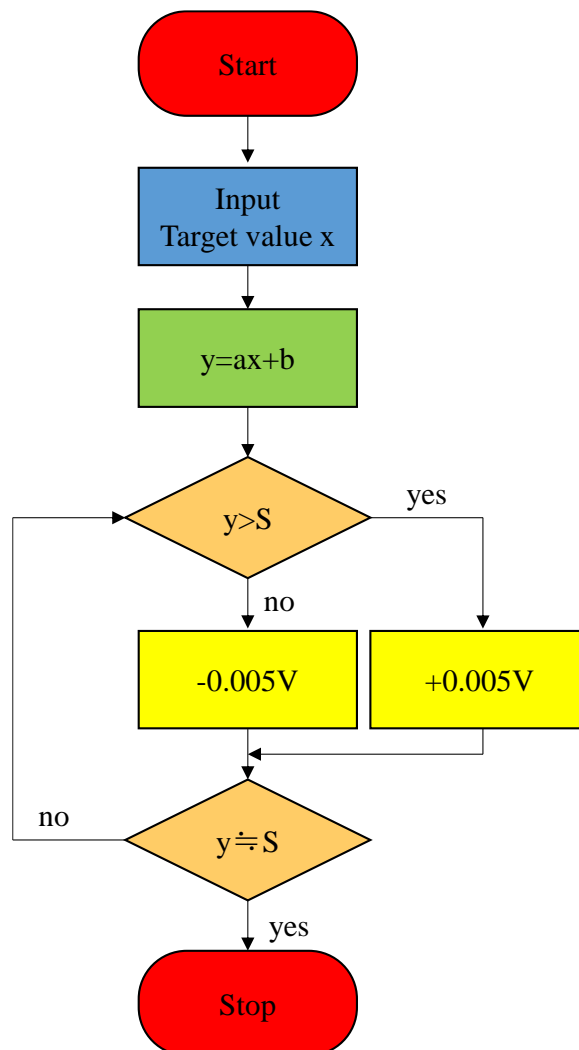


図 2.27 位置決め制御プロトコル

$$y = ax + b \quad (2.37)$$

y は目標値, a, b は図 2.26 で得られた近似直線の傾きと切片, x は変位量である. 図 2.26 の結果より, $a=2.3315$, $b=807.75$ となる. 光センサチップの出力が目標値になるように常に印加電圧を自動的に調整する. 光センサチップによる変位コントロールの評価のために, 変位拡大機構の位置をレーザー変位センサを用いて測定する. 図 2.28 は実験中のレーザー変位と光センサチップの出力をしめす. それぞれ目標値を入力したとき, 出力が変化しているのがわかる. 光センサチップの出力が計算した目標値まで到達するまで変化し, 同様にレーザー変位計の出力も変化する. 目標値に達すると, 一定の値となる. 十分時間を待ち, 再度目標値を入力する. 実験結果より $10[\mu\text{m}]$ 刻みの入力に対して, レーザー変位計の出力が

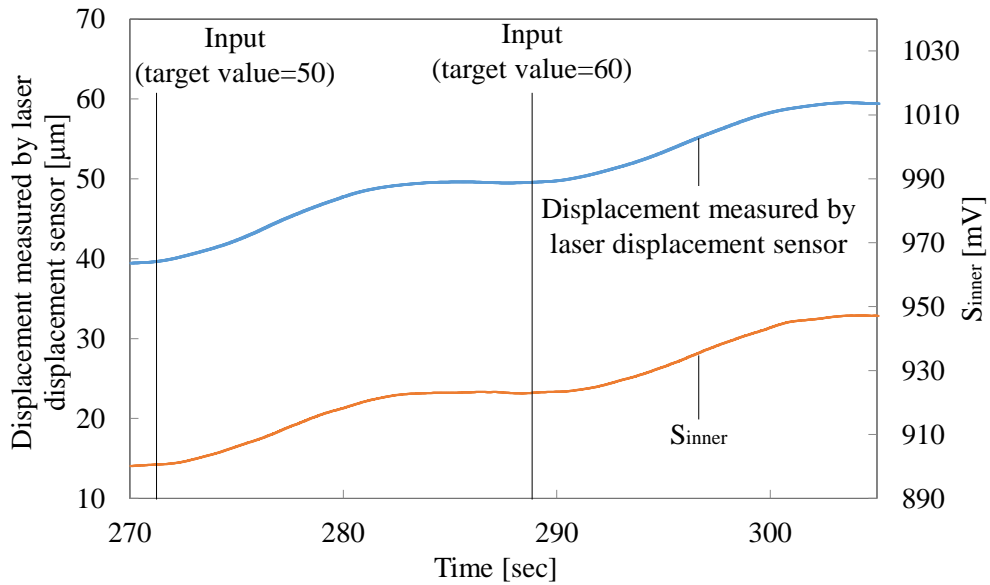


図 2.28 実験時のレーザー変位計出力と光センサチップ出力

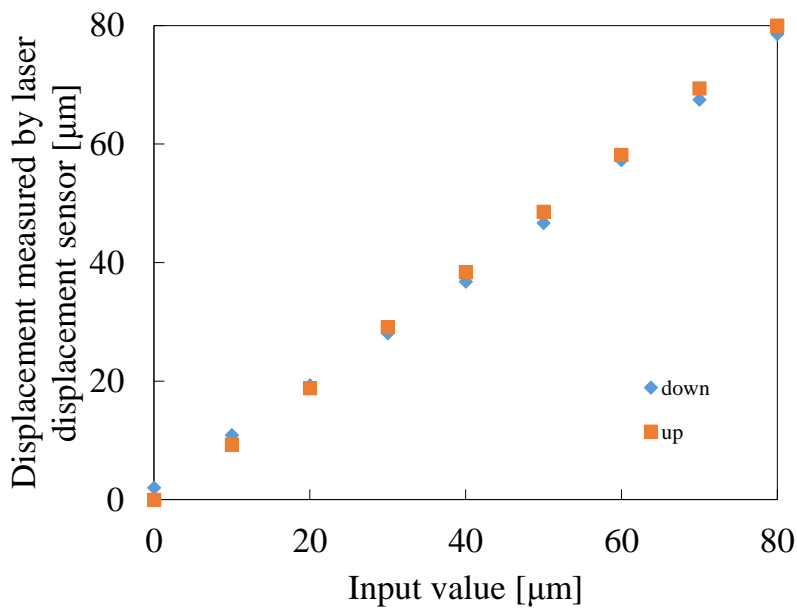


図 2.29 位置決め制御後のレーザー変位計出力

約 $10[\mu\text{m}]$ 変化していることがわかる。図 2.29 は入力値を増加させた時と減少させたときのレーザー変位計の出力をしめす。同じ入力に対して上昇・下降時で信号のばらつきがあるが、ヒステリシスカーブは確認できなかった。上昇・下降時におけるヒステリシスの最大誤差は $1.9[\mu\text{m}]$ (目標位置 $50[\mu\text{m}]$ 時)であった。しかし目標値を実際にコントロールした位置との誤差は最大で $3.3[\mu\text{m}]$ であった。以上の結果に関して考察を行う。

2.4.3 考察

実験結果よりヒステレシスによる信号のズレは $1.9[\mu\text{m}]$ と、制御無しのヒステレシスによる変位誤差 $7.5[\mu\text{m}]$ と比較して減少していることがわかる。この結果によりヒステレシスによる変位誤差を我々が開発した光センサチップを用いて除去できていることがわかる。しかし目標値と出力に最大で $3.3[\mu\text{m}]$ の差がある。この原因として測定部の傾きの影響が考えられる。光センサチップの電氣的分解能は図 2.19 より $1.33\%F.S$ (測定範囲 $100[\mu\text{m}]$)つまり $1.33[\mu\text{m}]$ であるが、この値は測定対象が光センサチップに対して正対した状態で変位したときの値である。本実験系では金属部品 1, 2 の作製精度により、変位発生時、微小な傾きが発生することが予測される。この傾きが変位の目標値と実験値の誤差になっていると考えられる。我々の光センサチップは各 PD の出力を用いることにより 2 軸の傾き角度を測定することも可能であるため、各 PD の出力から傾きの影響を除去することができると期待できる。

2.5 光センサチップの高機能化

次に光センサチップの高機能化について述べる。先述の通り、光センサチップの PD は CMOS トランジスタとともに作製することが可能である。COMS トランジスタを PD とともにモノリシックに作製することで、温度センサやオペアンプを PD とともに作製することができる。まず CMOS 作製プロセスに関して述べた後、そのプロセスで作製した光センサチップの 2 つ高機能化に関して述べる。一つは温度センサ内蔵型光センサチップの作製と変位測定温度補償に関して、もう一つは増幅器内蔵型光センサチップの作製と高分解能化に関してである。

2.5.1 CMOS プロセス

CMOS プロセスに関して述べる。図 2.30 に CMOS 周辺の作製プロセスを示す。作製は北九州学術研究都市共同研究開発センターの装置を用いて行った。

- (1)アセトンでウェハ表面の希 HF を用いてウェハに形成された自然酸化膜を除去する。
- (2)酸化炉を用いて下敷き酸化膜を形成する。
- (3)フォトリソグラフィで n ウェル領域のパターニングを行い、P をイオン注入することで n ウェル領域を形成する。
- (4) フォトリソグラフィで p ウェル領域のパターニングを行い、B をイオン注入することで p ウェル領域を形成する。
- (5)プラズマ CVD により窒化膜の堆積を行う。この窒化膜は選択酸化のマスクとしての役割を果たす。窒化膜堆積後、ウェルの引き伸ばし拡散を実施する。

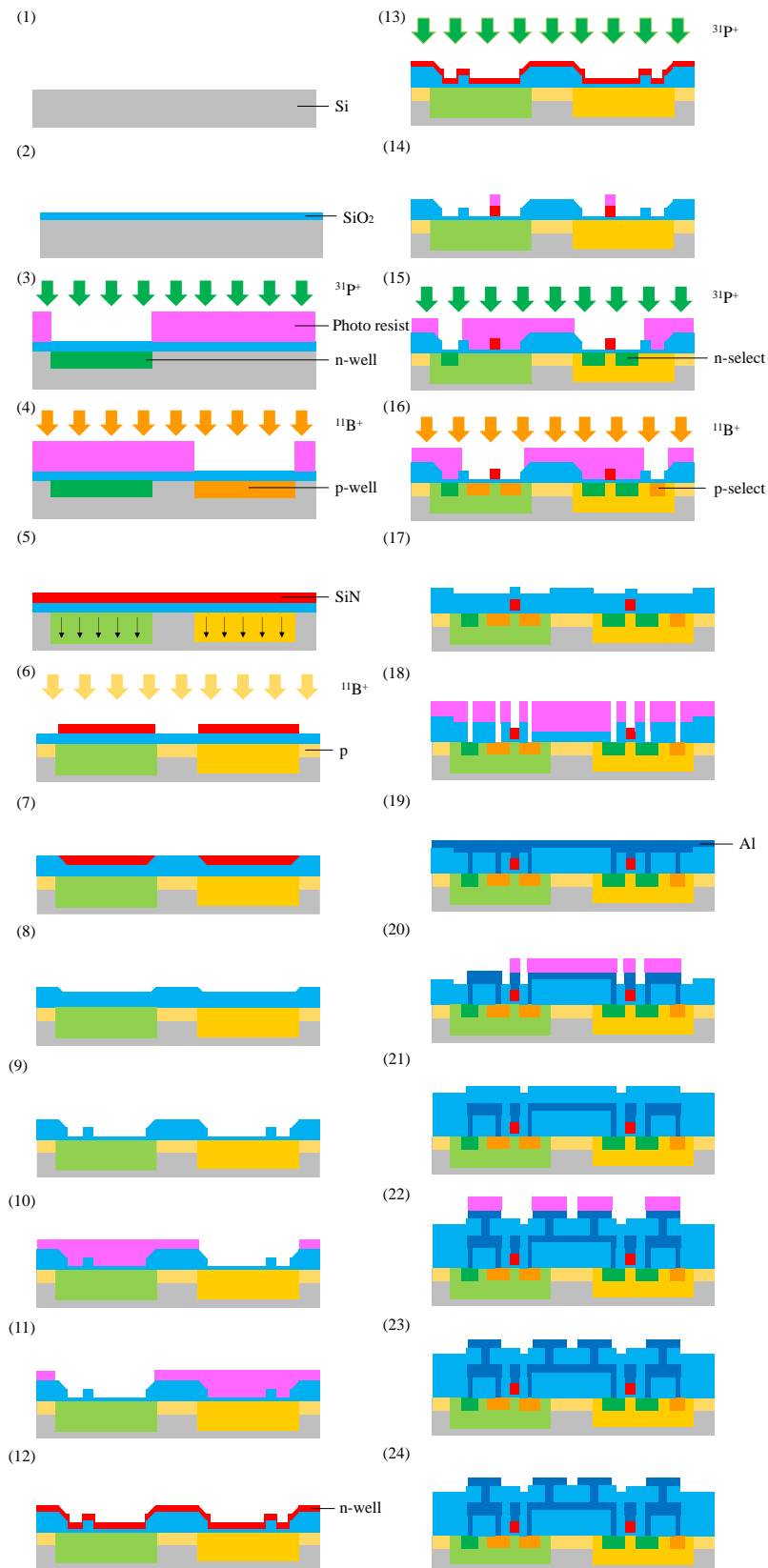


図 2.30 光センサチップ作製プロセス(CMOS プロセス)

- (6)素子分離イオン注入を行う領域のレジストパターニングを行い, B の注入を行う.
 - (7)熱酸化(アンモニア酸化)により選択酸化を実施する. 窒化膜が堆積されている箇所は酸素を通さないため選択的に酸化することができる.
 - (8)窒化膜を RIE で除去した後, フィールド酸化を実施する.
 - (9)アクティブ領域のフォトリソグラフィ, 酸化膜のエッチングを行い, ゲート酸化を行う.
 - (10)nMOSFET の V_{th} 調整用レジストパターニング, イオン注入を行う.
 - (11)pMOSFET の V_{th} 調整用レジストパターニング, イオン注入を行う.
 - (12)減圧 CVD により, ウェハ全面にポリシリコン膜を堆積させる.
 - (13)ポリシリコン膜に導電性を付与するために P イオンを注入する.
 - (14)ゲート配線領域のフォトリソグラフィの後, ポリシリコン膜のエッチングを行う.
 - (15)n-select 領域のフォトリソグラフィの後, P を高濃度に注入する.
 - (16)p-select 領域のフォトリソグラフィの後, B を高濃度に注入する.
 - (17)プラズマ CVD により, 層間絶縁膜(SiO_2)を堆積する. その後, 電気炉でアニール処理, 注入不純物の活性化, CVD 膜の引締めを実施する.
 - (18)コンタクト領域のフォトリソグラフィを行い, RIE で酸化膜のエッチングを行う.
 - (19)希 HF 洗浄後, Al をスパッタにより, 堆積させる.
 - (20)第一配線領域のフォトリソグラフィの後, 混酸により Al のウェットエッチングを行う.
 - (21)プラズマ CVD により, 下層層間絶縁膜を全面堆積後, 水ガラスを回転塗布する. その後ベーキングを行い, 水ガラスを硬化させ, さらにその上に上層層間絶縁膜を全面堆積する.
 - (22)第二配線領域のフォトリソグラフィの後, 混酸により Al のウェットエッチングを行う.
 - (23)窒素雰囲気中でシンタリングを行い, アルミ膜とシリコンを界面で合金化させ良好なコンタクトを実現させる.
 - (24)バックグラインド, ダイシングを行い, チップ化する.
- 以上のプロセスで CMOS トランジスタ内蔵光センサチップの作製を行った.

2.5.2 温度センサ内蔵型光センサチップ

まず温度センサを用いた温度補償に関して述べる. 光素子は温度依存性を有しており, 特に VCSEL や PD などの発光素子, 受光素子は温度変化に対して大きな影響を受けるため, 我々のセンサは温度変化の影響を大きく受ける. これらの影響はセンサの精度を悪化させる原因となるため, 温度補正を行うことで, センサの性能を補償する必要がある.

2.5.2.1 温度センサ

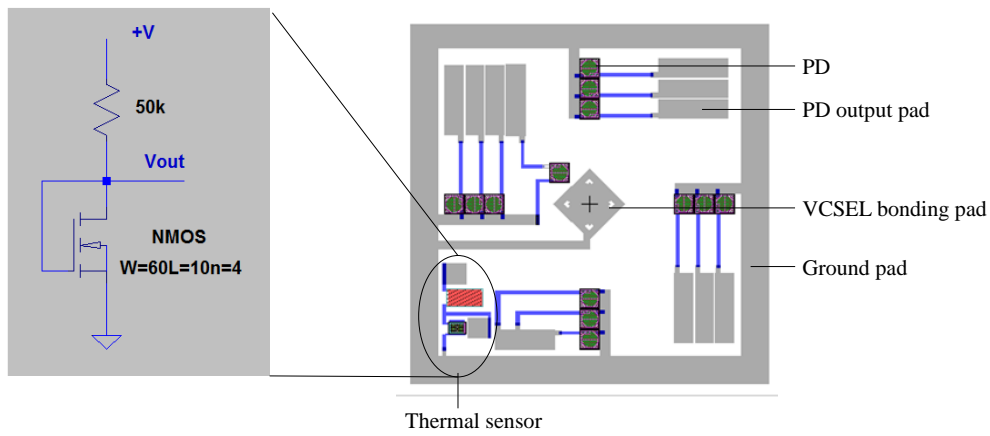


図 2.31 温度センサ内蔵型光センサチップマスクデータと温度センサ等価回路図

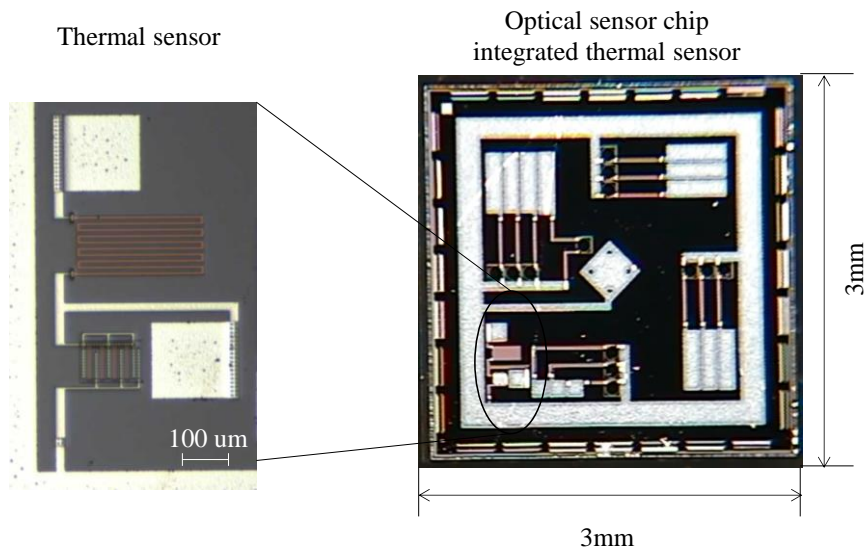


図 2.32 温度センサ内蔵型光センサチップ

まず使用したマスクデータと温度センサ部の等価回路図を図 2.31 に示す. 中心に VCSEL のボンディング用パッドを配置し, その同心円状に検出用 PD を 12 個配置してある. PD の VCSEL からの距離, また PD の面積, またチップ全体の寸法などは図 2.3 の寸法と同様である. 図 2.31 の左下部に温度センサを内蔵した. 温度センサは抵抗と NMOS トランジスタから構成されており, 抵抗と NMOS トランジスタの温度依存性の差を利用して温度を測定する原理となっている. 温度センサの電源電圧として +V に電圧を印可し, V_{out} から出力電圧を得る. また実際に作製した温度センサ内蔵光センサチップを図 2.32 に示す. このように温度センサをチップに内蔵することにより, 実際に VCSEL や PD 付近の温度を直接測定することが可能になる.

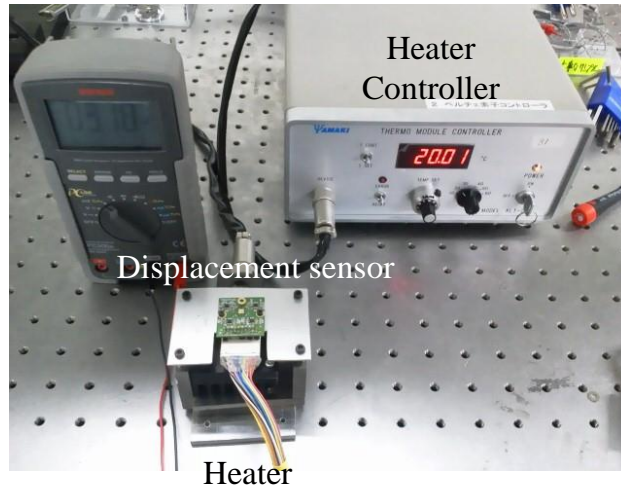


図 2.34 温度センサ評価実験系

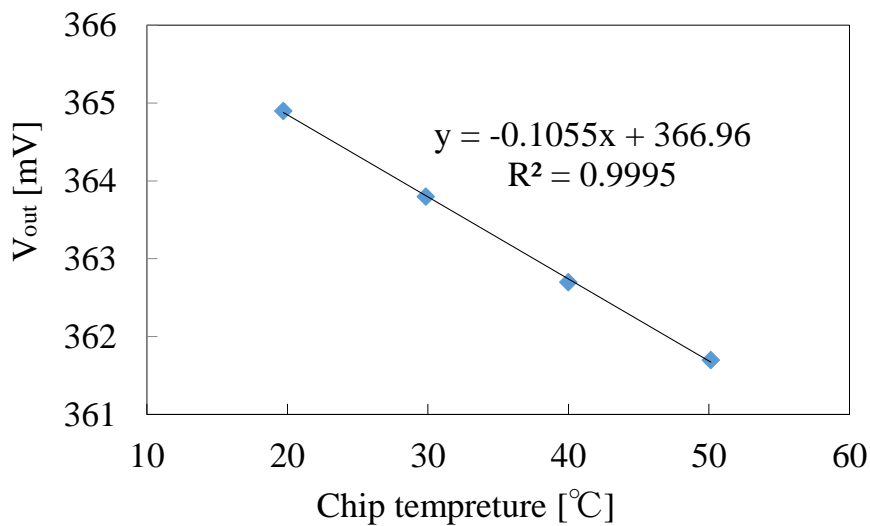


図 2.34 温度センサ出力

次に作製した温度センサの特性評価を行った。図 2.33 に実験系を示す。ペルチェ素子を用いたヒーターに、温度センサ内蔵光センサチップをボンディングした PCB 基板を接触した状態で固定する。ヒーターの温度は温度コントローラーで調整する。電源電圧として+V に 500[mV]を印可し、ヒーターの温度を 20[°C], 30[°C], 40[°C], 50[°C]と変えた時の V_{out} の出力電圧を測定した。実験は室温下(23 [°C])で行った。実験結果を図 2.34 に示す。温度変化に対して直線的に変化しており、その信号の R 二乗値は 0.995 となり高い線形性を持つことがわかる。この結果から内蔵した温度センサを用いて温度を測定可能であることが示された。

2.5.2.2 光センサチップ温度依存性

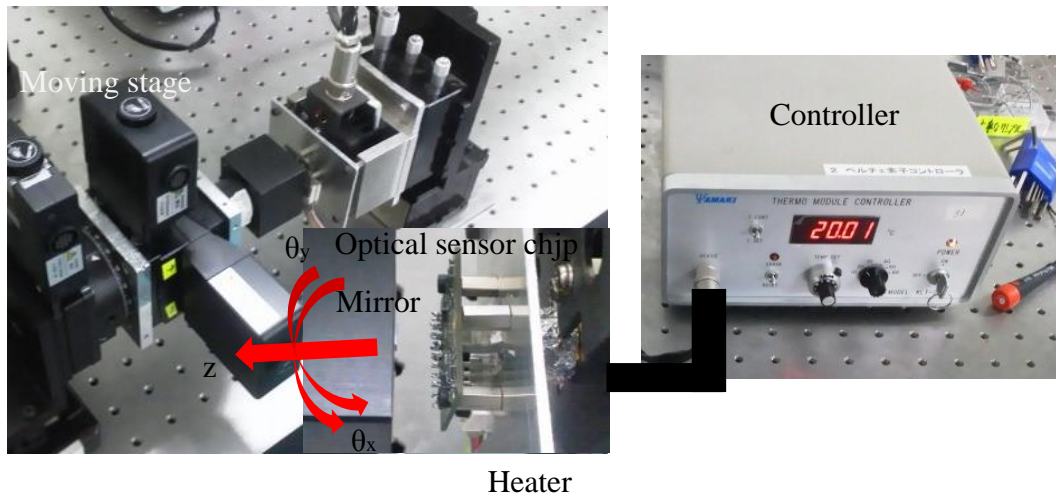


図 2.35 光センサチップ温度依存性評価実験系

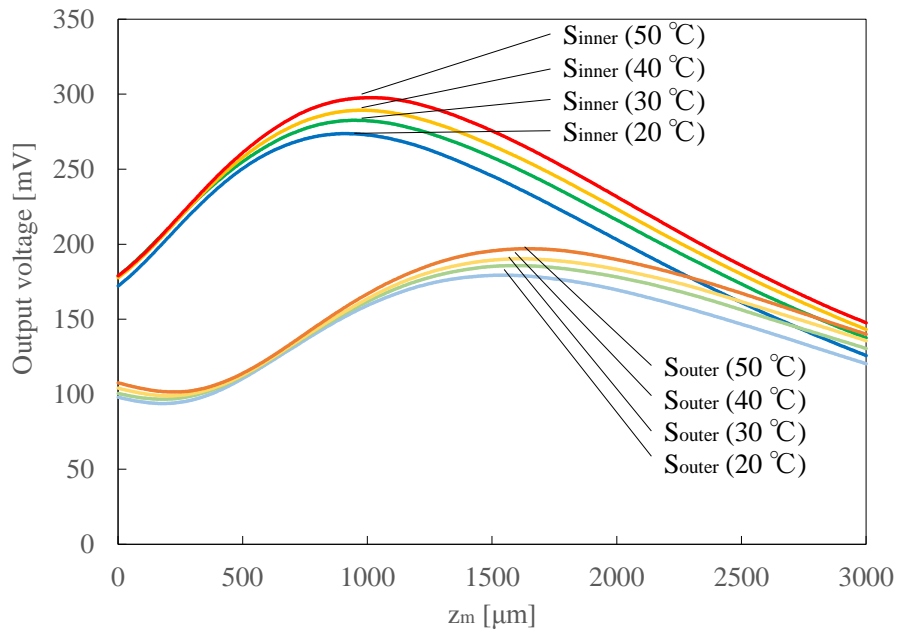


図 2.36 直線変位測定時における温度依存性実験結果

次に温度補正の方法に関して述べる。まず光センサチップの直線変位、回転変位測定における温度変化に対する影響を調べる実験を行った。実験系を図 2.35 に示す。実験系は図 2.17 とほぼ同じであるが、光センサチップの背面に温度センサ評価で用いたヒーターを配置し、光センサチップの温度を温度コントローラーで調整できるようになっている。実験結

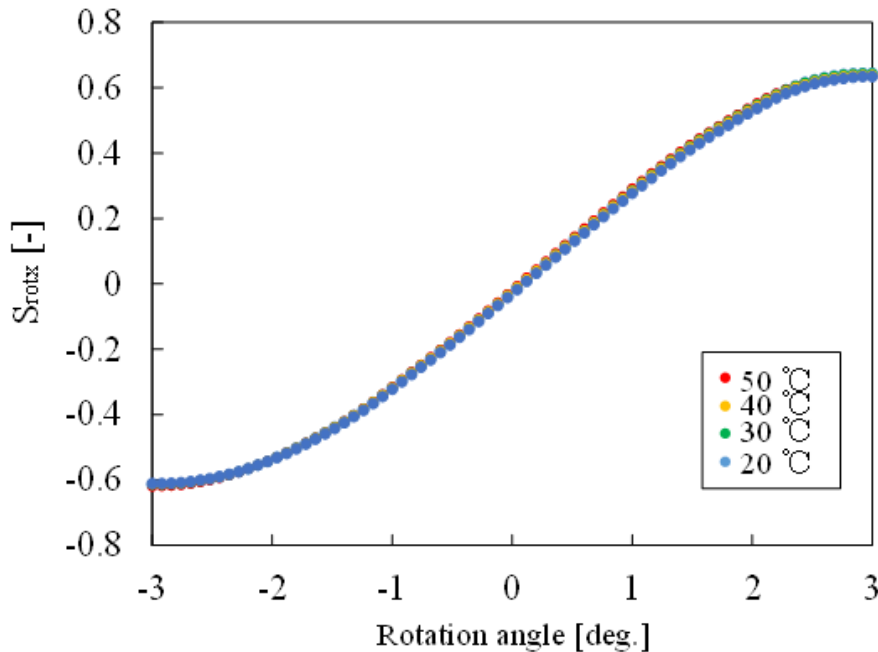


図 2.37 回転角変位測定時における温度依存性実験結果

果を図 2.36, 図 2.37 に示す. 図 2.36 は外部ミラーを直線変位させたときの S_{inner}, S_{outer} をヒーター温度 20[°C], 30[°C], 40[°C], 50[°C]それぞれの条件で測定したものである. 同様に図 2.37 は外部ミラーを回転変位させたときの S_{rotx}, S_{roty} をヒーター温度 20[°C], 30[°C], 40[°C], 50[°C]それぞれの条件で測定したものである. 直線変位測定に関して S_{inner} の Front Slope における温度依存性を評価したところ, 2.27[$\mu\text{m}/^\circ\text{C}$](測定範囲 100[μm])であった. 同様に回転変位測定に関して, S_{rotx} における温度依存性を評価したところ, 0.055 [deg./°C](測定範囲 ± 1 [deg.])であった. このように温度によりセンサの性能が変化することが示された.

2.5.2.3 直線変位測定の温度補正方法と結果

次に温度補正の方法に関して述べる. 温度補正は上述の実験で得られたデータをもとに補正関数を算出し, その補正関数を用いて温度補償を行う方法を用いた. 温度センサを用いて測定したチップ温度 T を変数とする補正関数とすることで, 常に測定信号の温度補正を行うことが可能となる. 補正関数は直線変位測定, 回転変位測定それぞれに関して求めた.

まず直線変位測定の補正関数に関して, 3つの補正関数を定義した. それぞれ A_z, B_z, C_z とする. A_z は VCSEL の照射角度に関する補正, B_z は信号のオフセット電圧に関する補正, C_z は PD 感度に関する補正である. 補正係数の決定に使用した信号を図 2.38 にまとめる. それぞれ 20[°C], 30[°C], 40[°C], 50[°C] の, 位置 $z_m=0$ [μm] における S_{inner}, S_{outer} の信号

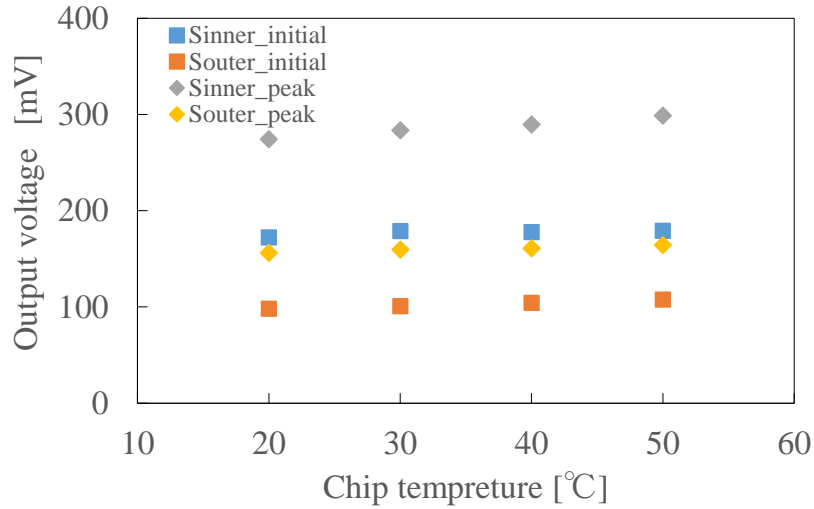


図 2.38 Sinner_initial, Souter_initial, Sinner_peak, Souter_peak

を $S_{\text{inner_initial}}$, $S_{\text{outer_initial}}$, 位置 $z_m=930[\mu\text{m}]$ における S_{inner} , S_{outer} の信号を $S_{\text{inner_peak}}$, $S_{\text{outer_peak}}$ とする. なお $z_m=930[\mu\text{m}]$ の位置は $20[^\circ\text{C}]$ における S_{inner} のピーク位置である. まず A_z の算出に関して述べる. チップ温度 $20[^\circ\text{C}]$ における照射角度 $\Theta(=16.9[\text{deg.}])$ とし, 外部ミラーの傾きがないとき, VCSEL から照射された光の VCSEL 中心からの距離 r における光強度分布は式(3.7)を変形して以下の式で表される.

$$I(r, z) = \frac{2 P}{\pi \omega} \exp\left(-\frac{2 r^2}{\omega^2}\right) \quad (2.38)$$

$$\omega = z \tan \frac{\Theta}{2} \quad (2.39)$$

また光センサチップが任意の温度 T に温度変化したとき, 照射角度 Θ が $\Theta+\Theta'$ に変化したと仮定すると温度 T における光強度分布 $I'(r, z)$ とビームスポット径 ω' は以下の式で表される.

$$I'(r, z) = \frac{2 P}{\pi \omega'} \exp\left(-\frac{2 r^2}{\omega'^2}\right) \quad (2.40)$$

$$\omega' = z \tan \frac{(\Theta + \Theta')}{2} \quad (2.41)$$

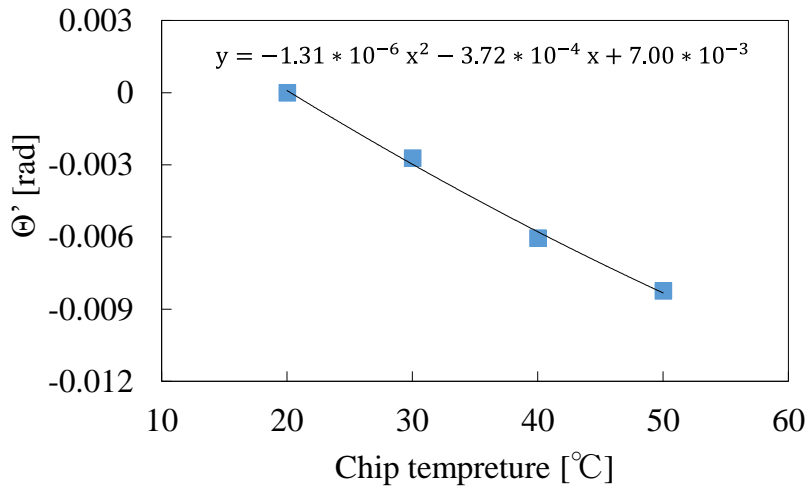


図 2.39 Θ'計算結果と近似曲線

S_{inner} の信号は $r=r_i=650[\mu\text{m}]$, S_{outer} の信号は $r=r_o=950[\mu\text{m}]$ における信号であり, 基準温度 $20[^\circ\text{C}]$ 時の S_{inner} , S_{outer} の光強度を P_i, P_o , 温度 $T[^\circ\text{C}]$ 時の S_{inner} , S_{outer} の光強度を P_i', P_o' として, Θ' を表すと

$$\Theta' = 2 \tan^{-1} \left(\frac{(A-1) \tan \frac{\Theta}{2}}{A(\tan \frac{\Theta}{2})^2 + 1} \right) \quad (2.42)$$

となる.ただし

$$A = \sqrt{\frac{\ln\left(\frac{P_i}{P_o}\right)}{\ln\left(\frac{P_i'}{P_o'}\right)}} \quad (2.43)$$

となる. 温度 $20[^\circ\text{C}]$ の照射角度 Θ を基準として, S_{inner_peak} および S_{outer_peak} を用いて Θ' を算出した. 結果を図 2.39 示す. この時, 二次近似曲線は式(3.43)となる.

$$\Theta' = -1.31 \times 10^{-6} T^2 - 3.72 \times 10^{-4} T + 7.00 \times 10^{-3} \quad (2.44)$$

この近似曲線を用いて補正係数 A_2 は以下の式で定義した.

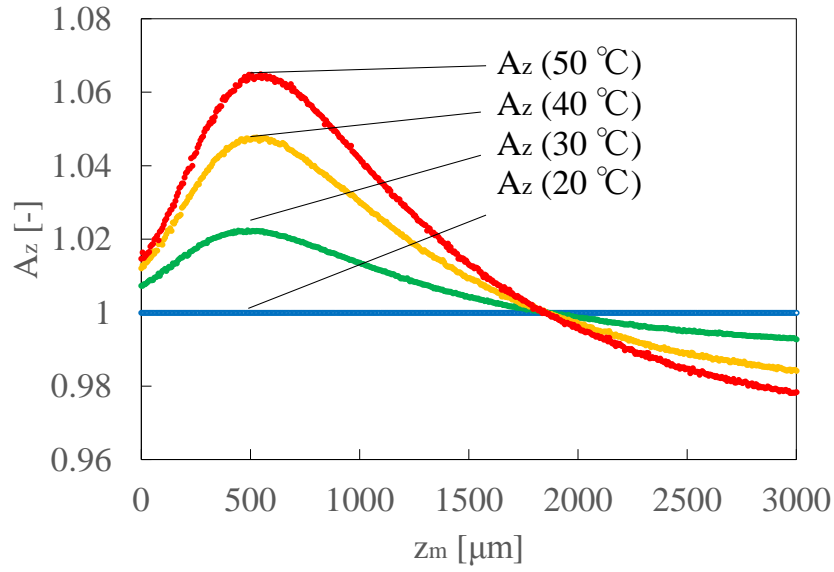


図 2.40 補正関数 A_z

$$A_z = \frac{I(r, z)}{I'(r, z)} = \frac{\tan\left(\frac{\theta + \theta'}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} \exp\left(\frac{-2r_1^2}{\left(z \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^2} + \frac{2r_1^2}{\left(z \tan\left(\frac{\theta + \theta'}{2}\right)\right)^2}\right) \quad (2.45)$$

ただし、任意の位置 z はその位置における S_{inner} と S_{outer} の出力 P_i' , P_o' を用いて以下の式で表される。

$$z = \sqrt{\frac{-2r_1^2 + 2r_o^2}{\left(\tan\left(\frac{\theta + \theta'}{2}\right)\right)^2 \text{Ln}\left(\frac{P_i'}{P_o'}\right)}} \quad (2.46)$$

となる。 A_z は任意の温度の S_{inner} の出力信号, S_{outer} の出力信号, そして温度センサで求められた温度 T を用いて決定される。図 2.40 に温度 20[°C], 30[°C], 40[°C], 50[°C] における A_z を示す。 A_z は z_m に依存して変化するため, 同じ温度条件においても, A_z は変化する。次に B_z に関して述べる。図 2.41 に以下の式であらわされた数値を示す。

$$B'_z = S_{\text{inner_initial}} \times A_z \quad (2.47)$$

この結果より初期位置 ($z_m=0[\mu\text{m}]$) にて温度変化により出力電圧が変化していることがわか

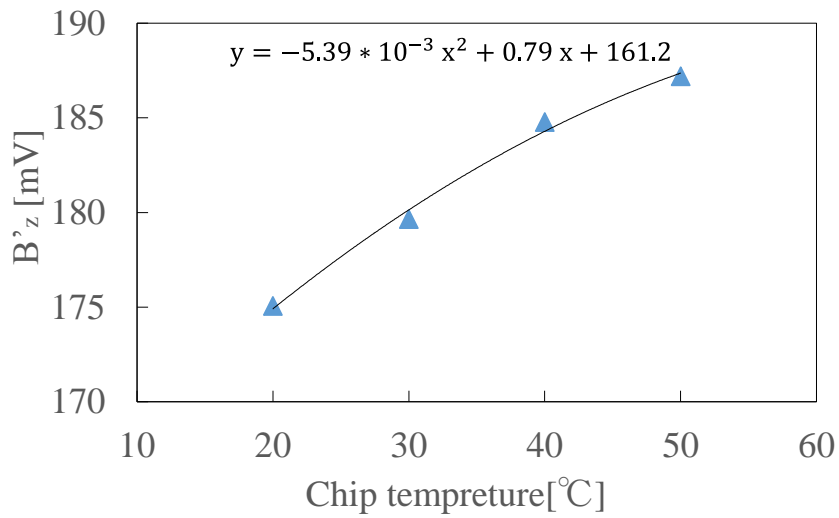


図 2.41 B'_z 計算結果と近似曲線

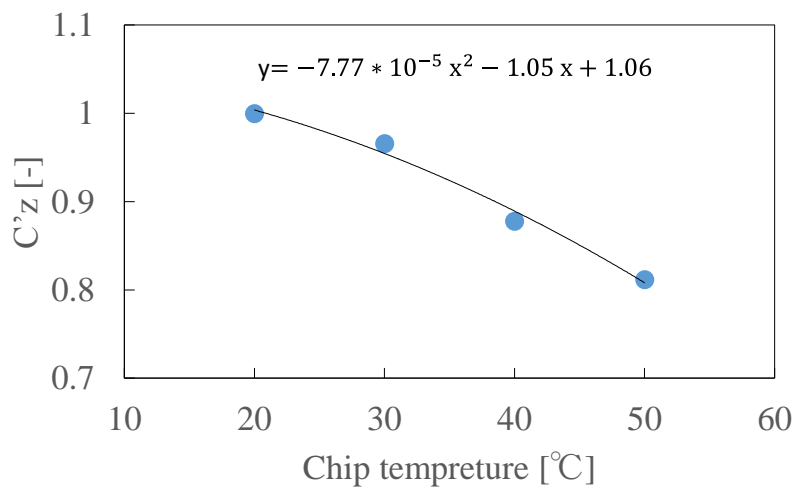


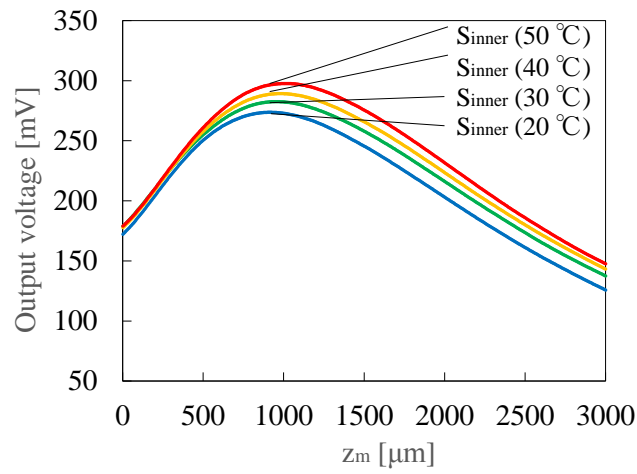
図 2.42 C'_z 計算結果と近似曲線

る. この影響を打ち消す補正関数が B_z であるため, 式(2.47)の近似直線を補正関数と定義する. B_z は以下の式で表される.

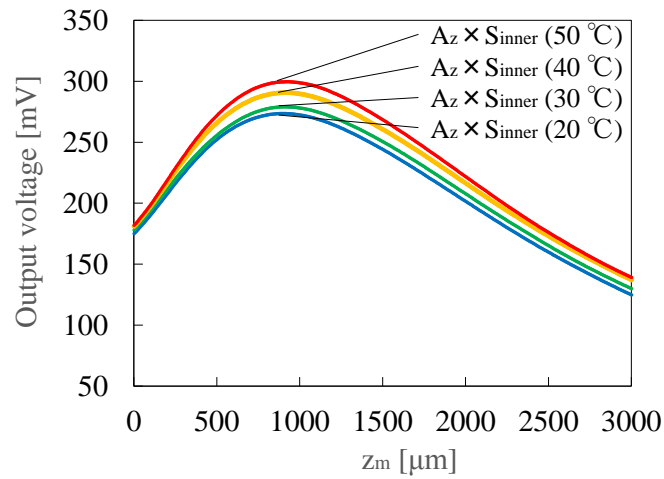
$$B_z = -5.39 \times 10^{-3} T^2 + 0.79 T + 161.2 \quad (2.48)$$

最後に C_z に関して述べる. 図 2.42 に以下の式で表された数値のプロットした結果を示す.

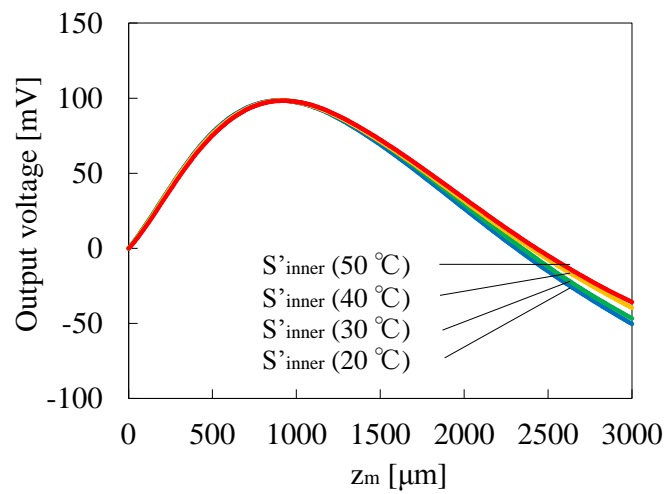
$$C'_z = \frac{1}{S_{\text{inner}}^{\text{initial}} \times A_z - B_z} \times \frac{1}{C'_{z_{20}^{\circ\text{C}}}} \quad (2.49)$$



(a)



(b)



(c)

図 2.43 (a)補正前信号(b) A_z 補正後信号(c) C_z 補正後信号

ただし、 $C'_{z,20^{\circ}\text{C}}$ は $T=20[^{\circ}\text{C}]$ における C'_z の値であり、この値で正規化している。また C'_z の近似曲線を図 2.42 に示す。この結果より、ピーク位置($z_m=930[\mu\text{m}]$)にて温度変化により出力電圧が変化していることがわかる。この影響を打ち消す関数が C_z であるため、近似 C_z は以下の式で表される。

$$C_z = -7.77 \times 10^{-5} T^2 - 1.05 T + 1.06 \quad (2.50)$$

以上により、補正関数 A_z, B_z, C_z が定義された。これらの補正関数は任意の温度 T , 任意の位置における $S_{\text{inner}}, S_{\text{outer}}$ の出力電圧を用いているため、補正関数を定義したあらゆる温度、位置において決定される。補正後の S_{inner} の信号 S'_{inner} は以下の式で定義される。

$$S'_{\text{inner}} = (A_z \times S_{\text{inner}} - B_z) \times C_z \quad (2.51)$$

図 2.43 にこれらの補正係数を用いた補正結果のグラフを示す。図 2.43(b)は補正前、図 2.43(b)は A_z の補正後、図 2.43(c)は B_z, C_z の補正後のグラフとなる。図 2.43(c)の Front slope において温度依存性を算出すると $0.13 [\mu\text{m}/\text{deg.}]$ (測定範囲 $100[\mu\text{m}]$)となっており、補正前の $2.27 [\mu\text{m}/\text{deg.}]$ (測定範囲 $100[\mu\text{m}]$)と比較すると温度依存性が約 $1/17$ となっている。結果の考察は後述する。

2.5.2.4 回転角度測定 of 温度補正方法と結果

次に回転角測定 of 温度補正に関して述べる。直線変位の補正関数と同様に S_{rotx} に関して $A_{\text{rotx}}, B_{\text{rotx}}$ の補正係数を決定した。補正係数の決定に使用した信号を図 2.44 にまとめる。それぞれ $20[^{\circ}\text{C}], 30[^{\circ}\text{C}], 40[^{\circ}\text{C}], 50[^{\circ}\text{C}]$ の、角度 $\theta=0[\text{deg.}]$ における S_{rotx} の信号を $S_{\text{rotx_initial}}$ 、角度 $\theta=3.0[\text{deg.}]$ における S_{rotx} の信号を $S_{\text{rotx_3 deg.}}$ とする。

まず A_{rotx} に関して述べる。図 2.45 に $S_{\text{rotx_initial}}$ をプロットした結果とそれぞれの近似直線を示す。この結果より初期位置($\theta=0[\text{deg.}]$)にて温度変化により出力信号が変化していることがわかる。この影響を打ち消す補正関数が A_{rotx} であるため、それぞれは以下の式で表される。

$$A_{\text{rotx}} = -2.86 \times 10^{-5} T - 9.46 \times 10^{-3} \quad (2.52)$$

次に B_{rotx} に関して述べる。図 2.45 に以下の式で表された値をプロットした結果を示す。

$$B'_{\text{rotx}} = \frac{1}{S_{\text{rotx_3 deg.}} - A_{\text{rotx}}} \quad (2.53)$$

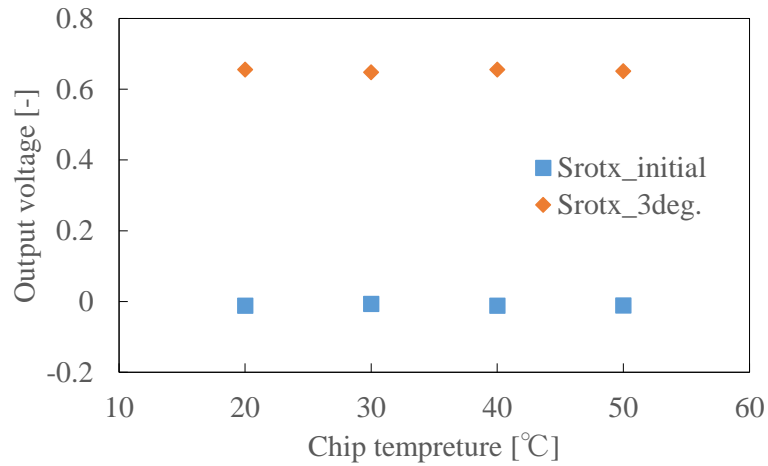


図 2.44 $S_{rotx_initial}$, S_{rotx_3} [deg.]

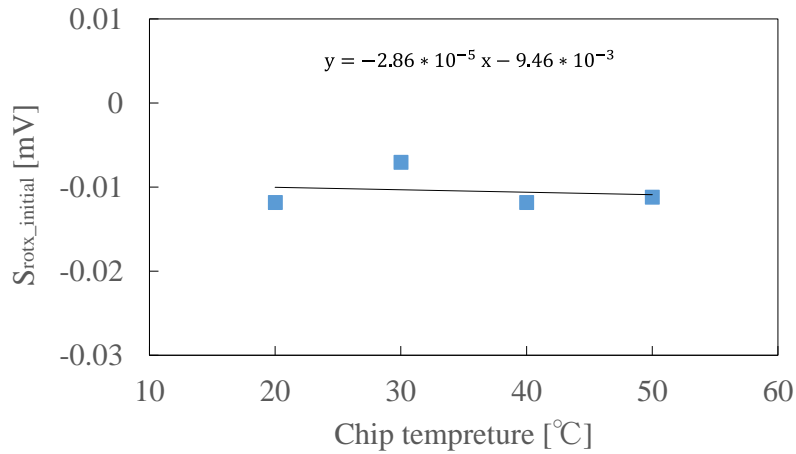


図 2.45 $S_{rotx_initial}$ と近似直線

この結果より、ピーク位置($\theta_x=3$ [deg.])にて温度変化により出力電圧が変化していることがわかる。この影響を打ち消す係数が B_{rotx} であるため、それぞれは以下の式で表される。 B'_{rotx} の $T=20$ [°C]の値に関して正規化した数値の逆数と、その近似直線を式(2.53)に示す。

$$B_{rotx} = -9.16 \times 10^{-5} T + 1.001 \quad (2.54)$$

以上により、補正関数 A_{rotx} , B_{rotx} が定義された。これらの補正関数は任意の温度 T [°C]において決定される。補正後の S_{rotx} の信号 S'_{rotx} は以下の式で定義される。

$$S'_{rotx} = A_{rotx} \times S_{rotx} - B_{rotx} \quad (2.55)$$

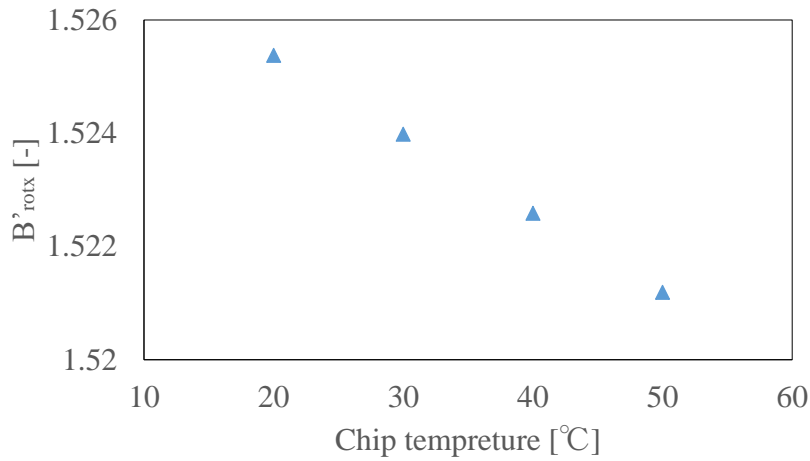


図 2.46 B'_{rotx} 計算結果

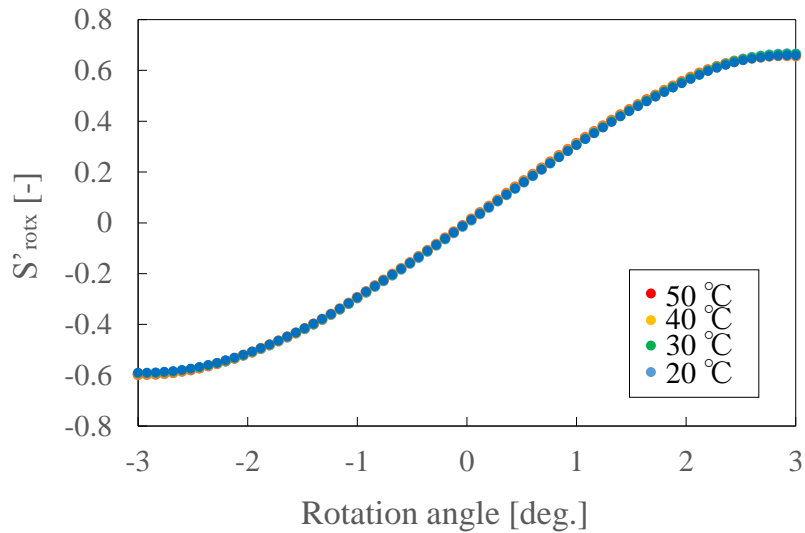


図 2.47 温度補正後 S'_{rotx}

図 2.47 にこれらの補正係数を用いた補正結果のグラフを示す。図 2.47 の角度範囲 ± 1 [deg.]において温度依存性を算出すると $0.49[\text{deg./}^\circ\text{C}]$ (測定範囲 ± 1 [deg.])となっており、補正前の $0.55[\text{deg./}^\circ\text{C}]$ (測定範囲 ± 1 [deg.])と比較すると温度依存性が微小にだが、低減されている。同様の方法で S_{roty} についても温度補正を行うことが可能である。

2.5.2.4 考察

温度補正の結果に関して考察を行う。まず直線変位補正に関して、温度センサを用いることで Front slope において温度依存性が $2.27 [\mu\text{m}/^\circ\text{C}]$ から $0.13 [\mu\text{m}/^\circ\text{C}]$ まで低減することに成功した。しかし図 2.43(c)の結果よりピーク位置までは各温度の信号はそろっているが、ピ

一ク位置以降の信号は徐々にばらつきが大きくなっていることがわかる。この原因として考えられるのが A_z の補正係数の誤差によるものだと考えられる。 A_z の補正係数は測定対象であるミラーまでの距離 z_m に依存しているが、距離が離れるにつれて、特に S_{outer} の信号が微小になっていき、その数値から求められる A_z の精度が距離 z_m に応じて低下していくためであると考えられる。対策としては、今回は A_z の補正係数はピーク値から算出したが、例えば $z_m=3000[\mu\text{m}]$ の位置においても補正係数を算出し、その補正係数を追加するという方法が考えられる。

次に回転角度測定の温度補正結果に関して述べる。温度補正により温度依存性が $0.55 [\text{deg./}^\circ\text{C}]$ (測定範囲 $\pm 1 [\text{deg.}]$)から $0.49 [\text{deg./}^\circ\text{C}]$ (測定範囲 $\pm 1 [\text{deg.}]$)となっているが、直線変位測定の温度依存性補正結果と比較して補正効果が小さい。これはもともと角度測定の信号が温度の影響を受けにくいことに起因していると考えられる。 S_{rotx} の信号算出方法は(2.35), (2.36)に定義されている。 S_{rotx} は相当する各 PD の出力電圧の比を用いている。そのため、温度により各 PD の出力電圧は変化するが、同心円状に配置されている PD の温度による出力変化量が同一の場合、その変化は打ち消される。以上より温度補正前の信号である程度温度依存性が除去されているため、補正の影響が小さくなっていると考えられる。

なお本研究のデバイスは、北九州学術研究都市の共同研究開発センターで開催された「第4回 ユニーク・自作チップ・コンテスト in ひびきの」において試作したものである。

2.5.3 初段増幅回路内蔵型光センサチップ

次に初段増幅回路を内蔵した光センサチップの特性評価に関して述べる。従来の光センサチップでは、電気信号を増幅する回路を外部に設けているが、センサチップには PD が計 9 つ配置されており、各 PD に対して 1 つの増幅器が必要となるため、結果的に増幅器を含めた全体のセンササイズが大きくなってしまふ。また PD の信号源から外部の増幅器まで配線の距離が長く、雰囲気電磁波により、信号に電気ノイズがのり易く、結果的にこれが分解能の低下の原因となりうる。これらの問題を解決するために、増幅器を内蔵した光センサチップの作製と評価を行った。

2.5.3.1 オペアンプ内蔵光センサチップのデザイン

図 2.48 に作製したチップのマスクデータの設計図を示す。センサ内には検出用 PD が 8 個とモニター用 PD が 1 個配置されており、それぞれの出力が内蔵したオペアンプを用いた非反転増幅回路に接続されている。増幅後の信号は AI パッドから外部に取り出される。チップの中心には VCSEL ボンディング用パッドがあり、チップ完成後、VCSEL のダイボンディングを行う。またチップ温度を測定するために温度センサが 1 個配置されている。

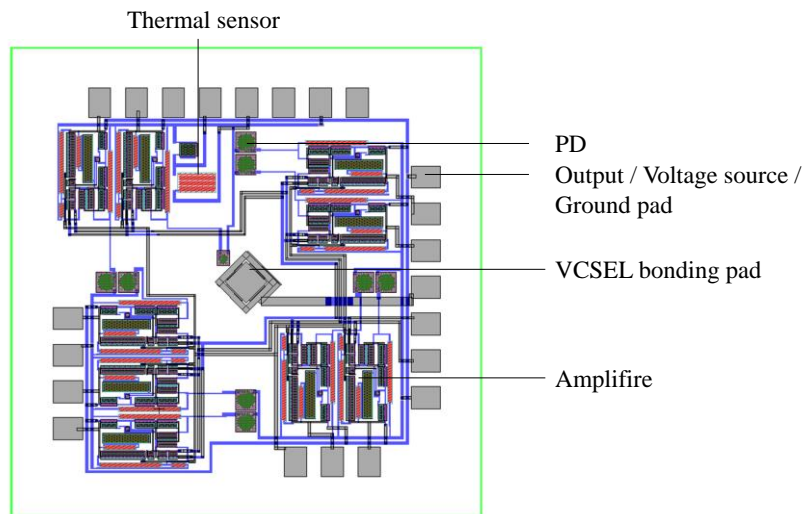


図 2.48 初段増幅器内蔵型光センサチップマスクデータ

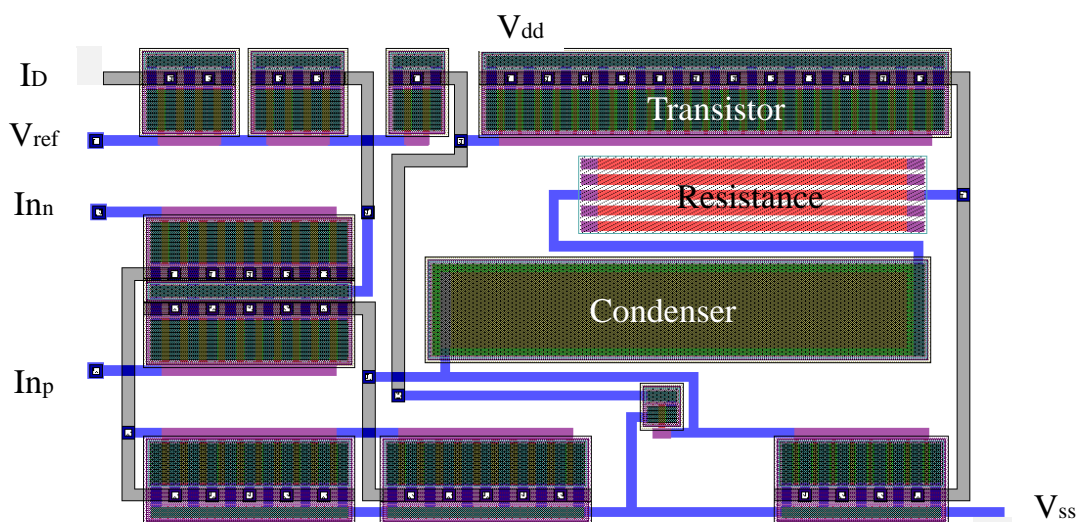


図 2.49 オペアンプ部マスクデータ

図 2.49 図にオペアンプ部のマスクデータ詳細，図 2.50 にオペアンプの内部回路図を示す．NMOS, PMOS, コンデンサ, 抵抗を組み合わせて作製しており，図内の W , L , n はそれぞれ MOS のゲート幅[μm]，ゲート長さ[μm]，ゲート数である．また温度センサの回路は図 2.31 と同様である．図 2.51 に作製した光センサチップの SEM 画像である．センサ中央にボンディングされているのが VCSEL である．この後各パッドと VCSEL にワイヤーボンディングを行い完成となる．

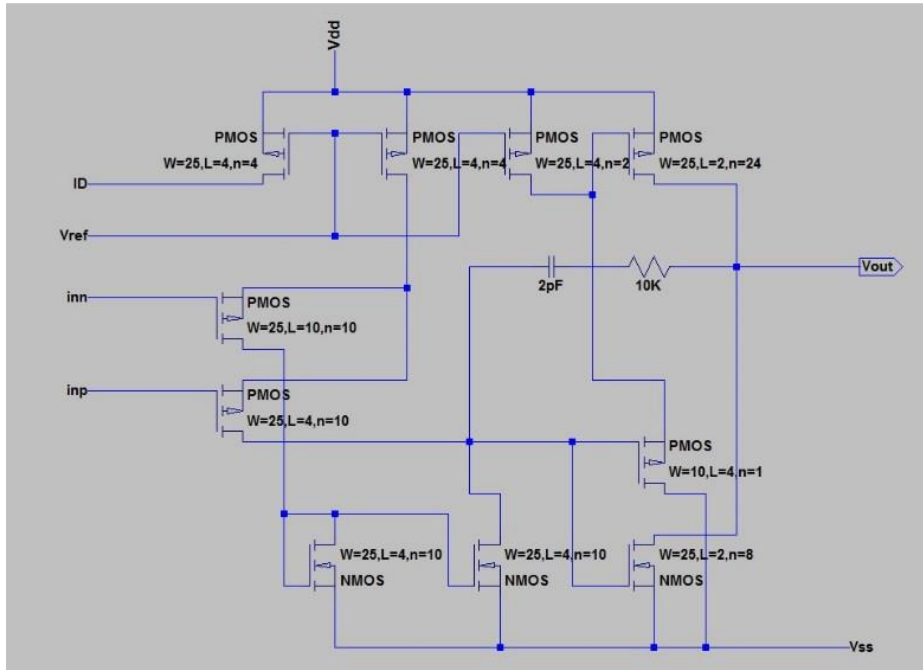


図 2.50 オペアンプ内部等価回路図

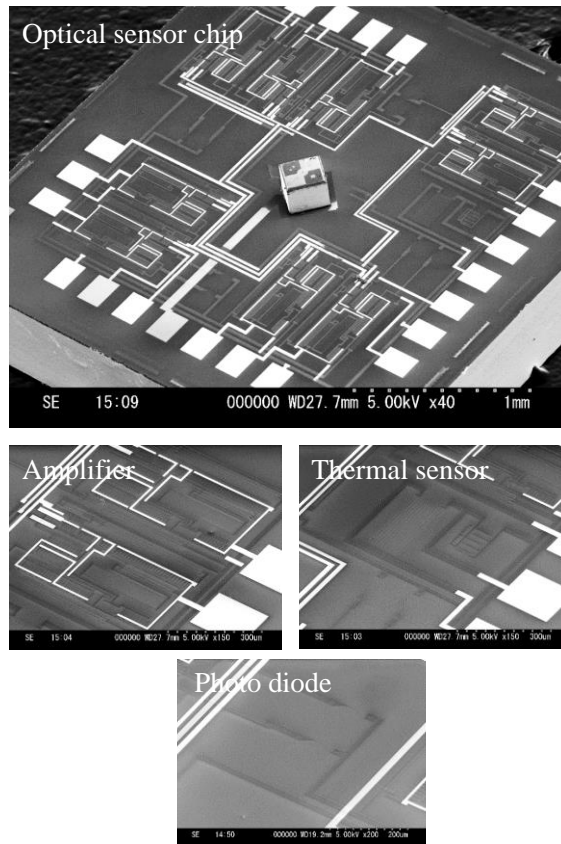


図 2.51 初段増幅器内蔵型光センサチップ SEM 画像

2.5.3.2 実験と結果

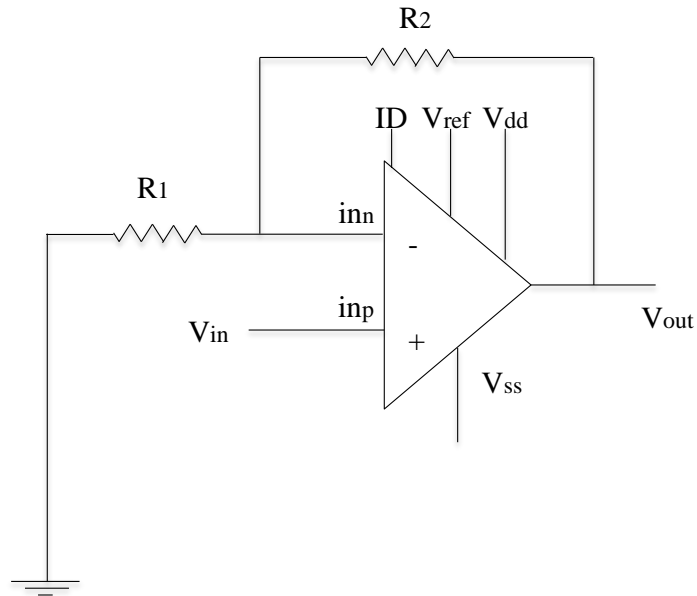


図 2.52 外部信号増幅等価回路図

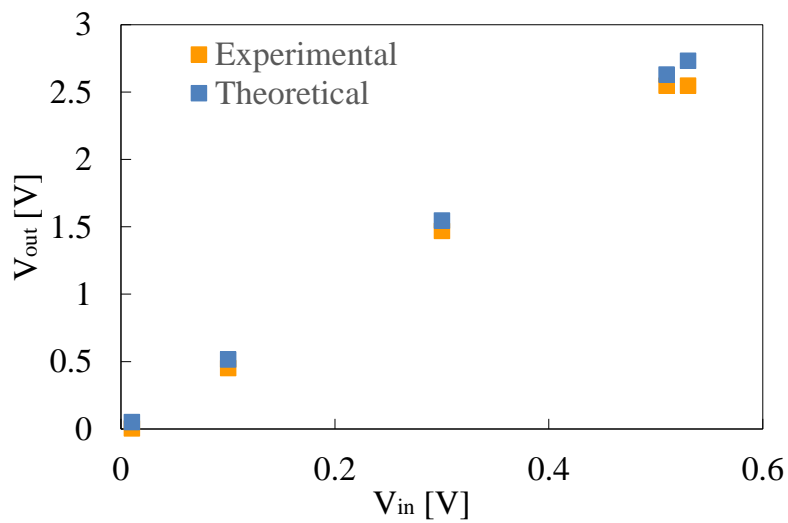


図 2.53 信号増幅実験結果

まず作製した増幅回路の基礎実験を行った. 図 2.52 は作製した増幅回路の回路図である. オペアンプには電源端子が 4 つあり, それぞれ $ID=0.8$ [V], $V_{ref}=1.8$ [V], $V_{dd}=2.7$ [V], $V_{ss}=-2.7$ [V] の電圧を印加する. オペアンプの外部には抵抗が配置されており, 非反転増幅回路となっている. 非反転増幅回路の出力電圧 V_{out} は入力電圧 V_{in} と抵抗 R_1 と R_2 により

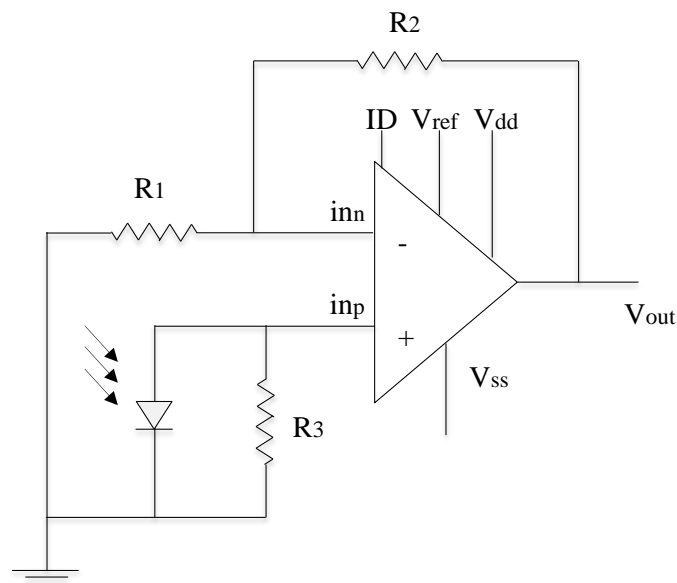


図 2.54 PD 出力増幅等価回路図

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \times V_{in} \quad (2.56)$$

の式で表される. $R_1=4.8[\text{k}\Omega]$, $R_2=20[\text{k}\Omega]$ であるため,

$$V_{out} = 5.16 \times V_{in} \quad (2.57)$$

となり理論的には入力電圧の 5.16 倍の電圧が出力される. V_{in} に電源をつなぎ V_{in} を変化させた時の V_{out} の出力電圧を測定した. 測定結果を図 2.53 にしめす. V_{in} の入力電圧の約 4.9 倍が出力されており, 設計通りに電圧が増幅されていることが確認できる. ただし, オペアンプの電源電圧が 2.7[V]であるため, それ以上の電圧を出力できず, 出力電圧が飽和してしまう. 光センサチップとして使用した場合の入力電圧は 100 [mV]以下なので, 出力電圧が飽和することはないと考えられる.

次に光センサチップとして使用した際の特性評価を行った. 図 2.54 は PD 周辺と増幅回路の回路図である. PD で光によって誘起された電流が抵抗で電圧に変換されオペアンプの inp に入力される. 増幅回路によって増幅された信号が V_{out} として出力される. 次に実際に VCSEL 光を反射させたときの増幅回路の有無による S/N 比の比較を行った. 外部ミラーを一定の位置で固定してそのときの PD の増幅回路入力前の信号, 増幅後の信号を取得し, その信号の S/N 比を計算した. 図 2.55 はその信号である. S/N 比は出力電圧の平均値と電気ノイズの標準偏差の比を dB に変換して算出した. 増幅前の信号の S/N 比は 46.7[dB]に対して,

増幅後の信号の S/N 比は 49.5[dB]となった.

2.5.3.3 考察

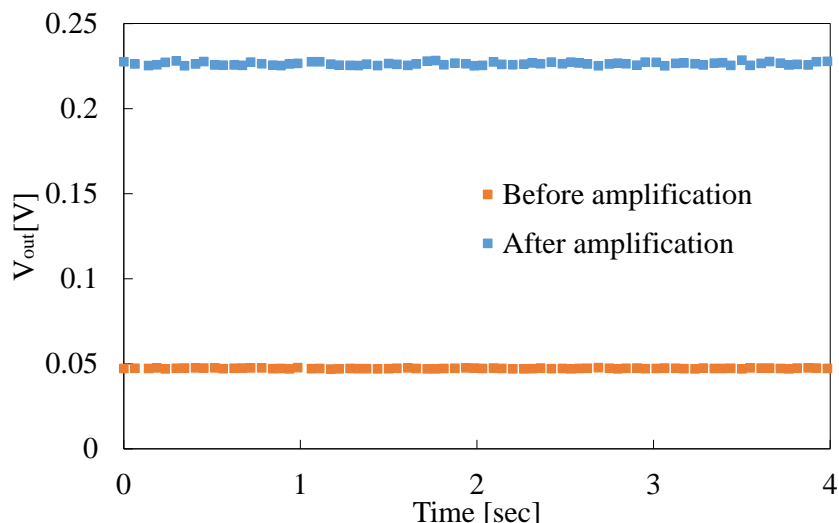


図 2.55 PD 出力増幅実験結果

VCSEL 光を用いた特性評価に関して S/N 比が向上する結果が得られた. この S/N 比は電気分解能に換算すると, 1.37 倍の分解能向上が見込める. 本実験は実験室環境で行ったが, 実際に本センサを応用した場合, センサ周囲には他の電子部品が多数配置されることになり, 雰囲気電磁波による影響はさらに大きくなると予想でき, 増幅器による分解能への影響は本実験結果よりも大きくなると考えられる.

今回の作製では設計のミスにより複数の PD の出力電圧が得られず, 変位センサとして直線変位測定, 回転変位測定の評価が行うことができなかった. そのため, 本論文の報告ではオペアンプの特性評価と期待できる性能に関して述べるにとどめる. なお本研究のデバイスは, 北九州学術研究都市の共同研究開発センターで開催された「第 5 回 ユニーク・自作チップ・コンテスト in ひびきの」において試作したものである.

2.6 結言

本章では直線変位, 回転角変位を測定可能な光センサチップの開発, 応用, 高機能化に関して述べた. 光センサチップは非常に小型簡単構造であり, また光学素子の部品点数が少ないという特徴を有する. さらに複数個の PD を用いることにより多軸方向の変位の測定に成功した. 次にこの光センサチップを用いた圧電アクチュエータの位置決めセンサとして用いた実験に関して述べた. 圧電アクチュエータはヒステシス特性により精密な位置決

めが難しく、高精度、高分解能の位置決めセンサが必要となる。実験結果より圧電アクチュエータの変位拡大機構の微小な隙間に光センサチップを内蔵し、位置決め制御を行うことにより、ヒステレシス特性による位置誤差を $7.5[\mu\text{m}]$ から $1.9[\mu\text{m}]$ へと減少させることに成功した。光センサチップは小型であり、細かなアライメントの必要がないという特徴から既製品にも容易に応用できるため、非常に有用であると考えられる。

次に光センサチップの高機能化に関して述べた。具体的に温度センサ内蔵、初段アンプ内蔵として光センサチップの中に他のデバイスを集積化した。温度センサ内蔵型に関してはその温度センサの出力を用いて、光センサチップの温度依存性を直線変位測定時 $2.27[\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}]$ から $0.13[\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}]$ に、回転変位測定時 $0.55[\text{deg.}/^{\circ}\text{C}]$ から $0.49[\text{deg.}/^{\circ}\text{C}]$ へと、減少させることに成功した。また初段アンプ内蔵型に関しては、初段アンプをチップに内蔵することで PD の出力電圧の S/N 比を $46.7[\text{dB}]$ から $49.5[\text{dB}]$ へと改善させることに成功した。S/N 比の向上は直接的にセンサの分解能の向上につながるため非常に有用であり、また光センサチップ自体の劇的な小型化につながる。本報告で述べた作製方法を用いることで、初段アンプ内蔵型光センサチップの直線変位、回転角変位の測定が可能となる。

参考文献

- [6] P. Dario and G. Buttazzo, “An Anthropomorphic Robot Finger for Investigation artificial Tactile Perception”, *Int. J. Rob. Res.*, vol.6, no.3 (1987) pp.25-48.
- [7]J. K. Salisbury and J. J. Craig, “Articulate hand: Force Control and Kinematic Issues”, *Int. J. Rob. Res.*, vol.1, no.1 (1982) pp.4-17.
- [8]K. Ikura, D. C. Beard, S. Ho and H. Moiin, “Direct Stiffness and Force Control of a Shape Memory Alloy Actuator and Application to Miniature Clean Gripper”, *ASME Winter Annual Meeting*, vol.14 (1989) pp.241-246.
- [9]涌井伸二, “圧電素子を使った微動機構に対する高速位置決めの手法” *日本機械学会論文集*, 63 卷, 612 号 (1997) pp.117-124.
- [10]江鐘偉, 長南征二, 佐藤正行, “積層型圧電素子で駆動されるソフトハンドリング・グリッパ” *日本機械学会論文集*, 62 卷, 595 号 (1996) pp.110-117.
- [11]C. V. Newcomb and I. Flinn, “Improving The Linearity of Piezoelectric Ceramic Actuators”, *Electron. Lett.* vol.18 (1982) pp.442-444.
- [12] A. Ochi, S. Takahashi, S. Tagami, “Temperature characteristics for multilayer piezoelectric ceramic actuator”, *J. Appl. Phys.* vol.24 (1985) pp.209–212.
- [13] C. Jer Lin and S. Ren Yang, “Precise positioning of piezo-actuated stages using hysteresis-observer based control”, *Mechatronics*, vol.16 (2006) pp.417-426.
- [14]S. Hung Chang, C. Kai Tseng and H. Chan Chien, “An Ultra-Precision $XY\theta_z$ Piezo-Micropositioner Part I: Design and Analysis”, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol.46, no.4 (1999) pp.897-905.
- [15]A. E. Holman, W. Chr. Heerens and F. Tuinstra, “Using capacitive sensors for in situ calibration of displacements in a piezo-driven translation stage of an STM”, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol.36 (1993) pp.37-42.
- [16]Y. Tien Liu and H. Toshiro, “Precision positioning device utilizing impact force of combined piezo-pneumatic actuator”, *IEEE/ASME Trans. Mechatron*, vol.6 (2001) pp.467-473.
- [17]Gui Yun Tian, “design and implementation of distributed measurement systems using fieldbus-based intelligent sensors”, *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, vol.50, no.5 (2011) pp.1197-1202,
- [18]T. Mizuno, “Extending the Linearity Range of Eddy-Current Displacement Sensor With Magnetoplated Wire”, *IEEE transactions on magnetics*, vol. 43, no. 2 (2007) pp.543-548
- [19]M. R. Nabavi and S. Nihtianov, “A Low-Power Interface for Eddy Current Displacement Sensors in Sub-Micron Applications” *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Victoria*, (2008) pp .17-20.
- [20]M. R. Nabavi and S. Nihtianov, “A Novel “Interface for Eddy Current Displacement Sensors”

- IEEE transaction on Instrumentation and Measurement, vol. 58, no. 5 (1995) pp.1623-1632.
- [21]O. Oralkan, X. Jin, F. L. Degertekin and B. T. Khuri-Yakub, "Simulation and Experimental Characterization of a 2-D Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer Array Element", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency control, vol. 6, no.6 (1999) pp.1337-1340.
- [22]A. Carullo and M. Parvis, "An ultrasonic sensor for distance measurement in automotive applications", IEEE Sensors Journal, vol.1, no.2 (2001) pp.143-147.
- [23]N. A. Hall, W. Lee and F. L. Degertekin, "Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers with Diffraction-Based Integrated Optical Displacement Detection", IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, vol.50, no.11 (2003) pp.1570-1580.
- [24]S. Chen, B. Mulgrew and P. M. Grant, "A clustering technique for digital communications channel equalization using radial basis function networks," IEEE Trans. Neural Networks, vol.4 (1993) pp. 570–578.
- [25]J. Clark, M. Wallace and L. Pronzato, "Measuring Range using a Triangulation Sensor with Variable Geometry", IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 14, no. 1 (1998) pp.60-68.
- [26]C. Massimo, "Laser-Triangulation Optical-Correlation Sensor for ROV Slow Motion Estimation", IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol.31, no.3 (2006) pp.711-727.
- [27]T. Wang, S. Sheng and Z. Yang, "High precision displacement sensor using a low-finesse fiber-optic Fabry-Perot interferometer" Sensors and Actuators A: Physical, vol.69 (1998) pp.134–138.
- [28]J. B. Faria, "A theoretical analysis of the bifurcated fiber bundle displacement sensor" IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol.47, no. 3 (1998) pp.742-747.
- [29]I. Itaru Ishikawa, R. Sawada, E. Higurashi, S. Sanada and D. Chino, "Integrated micro-displacement sensor that measures tilting angle and linear movement of an external mirror" Sensors and Actuators A: Physical. vol.138 (2007) pp.269–275.

3. 二軸せん断力センサ

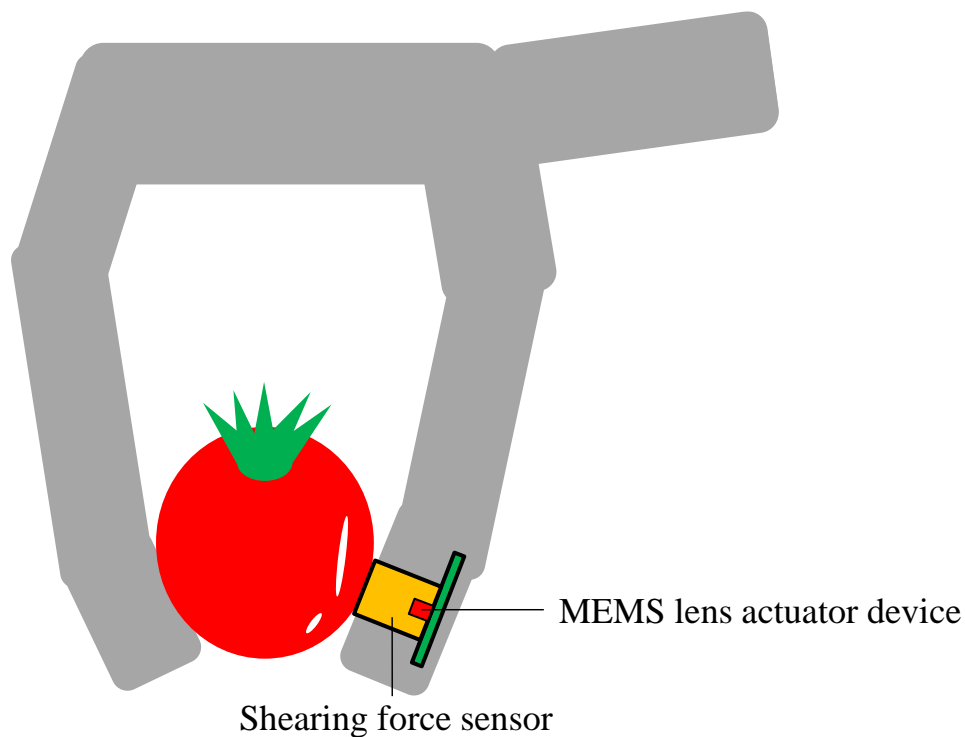


図 3.1 力覚センサを内蔵したロボットハンドイメージ

本章ではロボットハンド用せん断力センサの研究開発について述べる。図 3.1 に本章で述べるセンサをロボットハンドに内蔵したときのイメージ図を示す。まず本章では本研究の研究背景について述べる。その後、我々が開発したせん断力センサに関して述べる。本センサは前章で述べた光センサチップを応用したセンサであり二軸方向のせん断力を測定可能である。検出部である光センサチップと受力部であるフレームで構成されており、本研究ではこのフレームを金属と、弾性ゴムを用いて作製し、それぞれ二種類のせん断力センサに関して評価実験を行った。特に弾性ゴムを用いたせん断力センサは $6[\text{mm}] \times 6[\text{mm}]$ 厚さ $8[\text{mm}]$ と小型であり、受力部と検出部が力学的に分離されているという特徴を有する。また本センサは二軸方向のせん断力を分離して測定可能である。

その後、せん断力センサの高機能化を目的とした MEMS レンズアクチュエータデバイスの研究開発に関して述べる。まず研究背景について述べた後、マイクロレンズの作製に関して述べる。マイクロレンズは DMD 露光装置というマスクレス露光かつグレースケール露光ができる露光装置を使用することで、様々な形状のマイクロレンズをマスクを使用することなく、高精度で作製することができる。次に MEMS レンズアクチュエータのアクチュエータ部となる MEMS アクチュエータの作製を行った。特に薄膜の内部応力によって発生

する MEMS デバイスの変形を低減するためにシミュレーションを行い、その結果を設計にフィードバックすることで変形の小さなデバイスの作製を行った。最後に MEMS レンズアクチュエータの動作確認、そしてこの MEMS レンズアクチュエータを光センサチップと組み合わせ、せん断力センサの高機能化に関する実験と評価を行った。

3.1 研究背景

力覚センサとは受力部に負荷されている力を測定するセンサであり、ロボット産業のみならず、様々な分野において小型な力覚センサの開発が求められている。例えば医療機器の分野では、力覚センサを褥瘡の検知のために使用できないか期待されている。褥瘡とは寝たきりや麻痺などで体位を変えることができない人に見られる症状で、圧迫・せん断を受けることで体の組織が壊死してしまう状態である。近年の高齢化により、患者数が増加しており、褥瘡を検知できるセンサの開発が求められている⁽³⁰⁾。

力覚センサは測定する力の方向によって 2 種類に分けられる。それは測定面に垂直な力を測定する圧力センサと、測定面に平行な力を測定するせん断力センサである。圧力センサ開発例と比較して、せん断力センサの数は多くない。しかし、せん断力は滑りという現象にも密接にかかわりがあるため、せん断力を測定することで多くの情報を得ることができる。ロボット産業においては、ロボットハンドなどの微小なスペースに埋め込めるような小型のせん断力センサが求められている。柔らかい対象を把持するとき、把持対象が滑らないように、かつ最低限の力で対象を把持するような繊細な動きが求められる。しかし圧力センサは対象に負荷される圧力は測定できるが、すべりは検知できない。そこでせん断力センサと圧力センサを組み合わせることで、繊細な把持動作の実現が期待できる。

現在、 piezo 抵抗式^(31, 32)、静電容量式^(33, 34)、歪み抵抗式⁽³⁵⁻³⁸⁾、光学式⁽⁴⁰⁻⁴²⁾を用いたせん断力センサが研究開発されている。表 3.1 にそれぞれの方式の力覚センサの構造比較をまとめる。我々の開発したせん断力センサの特徴は受力部と検出部が力学的に分離されており、容易に取り換え可能であるという点にある。例えば圧電抵抗式、歪抵抗式は力によって検出部である piezo 抵抗や抵抗が変形することにより負荷されている力を測定するため、原理的に受力部と検出部の分離は不可能である。同様に静電式や透過型光学式の場合は直接的には検出部が変形しないが、光学素子やその配線が負荷される力の影響を受ける。CCD 型光学式においては、検出部に相当する CCD カメラは力学的な影響を受けないものの、受力部の取り換えが困難な構造となっている。対して我々が開発したせん断力センサは受力部と検出部が力学的に分離されており、また受力部の取り換えが容易な構造となっている⁽⁴³⁾。多くの力覚センサにおいてセンサの測定範囲や分解能などの性能は受力部の弾性率やポアソン比などの物性に大きく依存する。そのため、この受力部を容易に取り換え可能であるという特徴は、そのままセンサの性能の可変化につながり、そのセンサの汎用性を向上させる。特に把持対象が明確に決まっていないロボットハンドに内蔵する力覚センサにおい

表 3.1 力覚センサ構造比較

<p>圧電抵抗式</p>	<p>静電式</p>	<p>歪抵抗式</p>
<p>参考文献番号[32]</p>	<p>参考文献番号[35]</p>	<p>参考文献番号[38]</p>
<p>光学式(透過型)</p>	<p>光学式(CCD)</p>	<p>光学式</p>
<p>参考文献番号[39]</p>	<p>参考文献番号[40]</p>	<p>参考文献番号[43]</p>

では、このように汎用性の高いセンサが望まれる。また検出部が小型化すると、検出部が繊細でかつ力に対して壊れやすくなるという問題が発生するが、受力部と検出部が分離されているため、我々のセンサはそのような問題を気にする必要がない。

以前我々が報告したせん断力センサ⁽⁴³⁾では一軸方向のみのせん断力の測定にとどまり、二軸方向のせん断力測定、また、性能の可変化に関しては報告を行っていない。そこで本項では、二軸方向のせん断力測定と、性能の可変化ができる小型せん断力センサの研究開発に関して述べる。

3.2 金属フレームせん断力センサ

まず光センサチップを用いてせん断力測定が可能か確認するため、大きめの金属フレームを用いて実験を行った。本項ではその実験に関して述べる。図 3.2 に我々が考案した 2 軸せん断力センサの写真である。それぞれ大きく二つの部品に分かれており、金属フレームと光センサチップ部とに分かれている。金属フレームで 2 軸方向のせん断力を 2 軸の回転の傾きに変換し、その構造の傾き角度をセンサで測定することで、2 軸方向のせん断力を測定することが可能となる。光センサチップの角度測定に関しては第 2 章で述べたため、この章では割愛する。

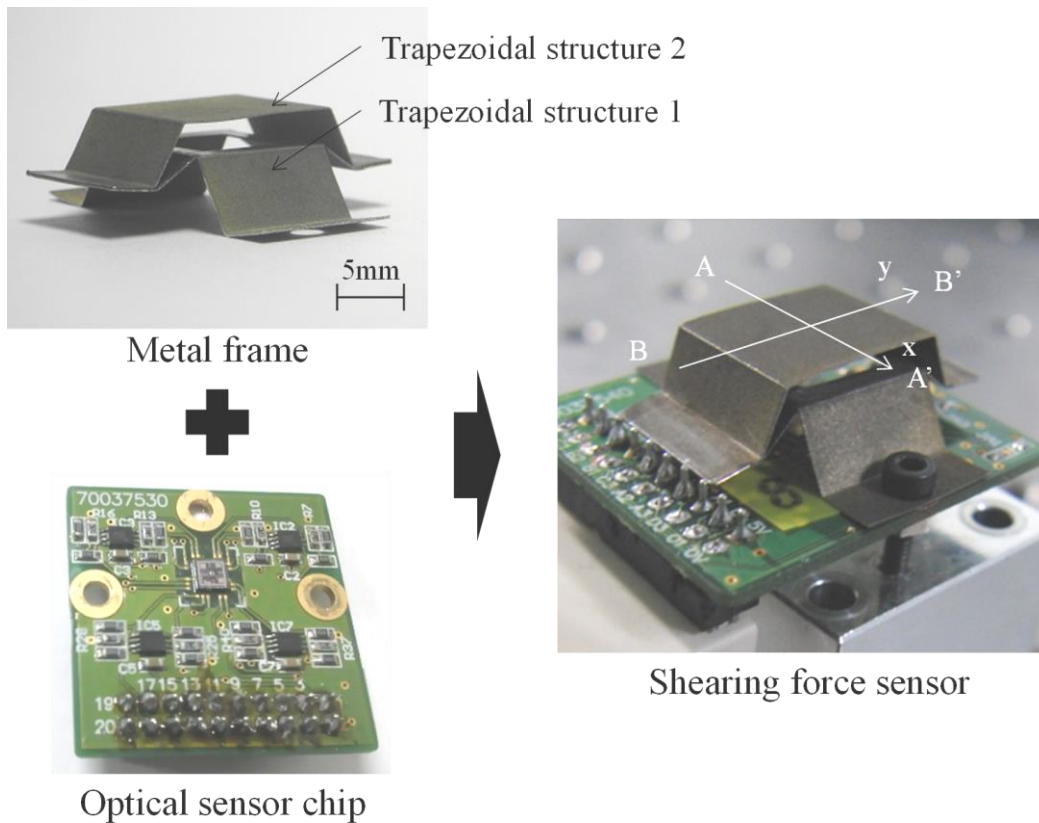


図 3.2 金属フレームを用いたせん断力センサ

3.2.1 金属フレーム構造

図 3.3 にせん断力の測定原理の模式図を示す。金属フレームは下部台形フレーム(台形フレーム 1)と上部台形フレーム(台形フレーム 2)とで構成されている。台形フレーム 1 の天井には正方形の穴を形成しており、光センサチップの VCSEL から照射されたレーザー光はその穴を通過し台形 2 の裏面に設置している外部ミラーで反射する。台形フレーム 1 と台形フレーム 2 は溶接によって接合されている。次に測定原理に関して述べる。まず台形フレーム 2 の表面に x 方向のせん断力が負荷されると台形フレーム 1 が図 3.3(a)のように変形し、結果的に外部ミラーが y 軸回りに回転する。同様に台形フレーム 2 の表面に y 方向のせん断力が負荷されると台形フレーム 2 が図 3.3(b)のように変形し、結果的に外部ミラーが x 軸回りに回転する。この構造では x 軸方向のせん断力は台形フレーム 2 の形状に影響を与えにくく、また y 軸方向のせん断力はフレーム 1 の形状に影響を与えにくいため、それぞ

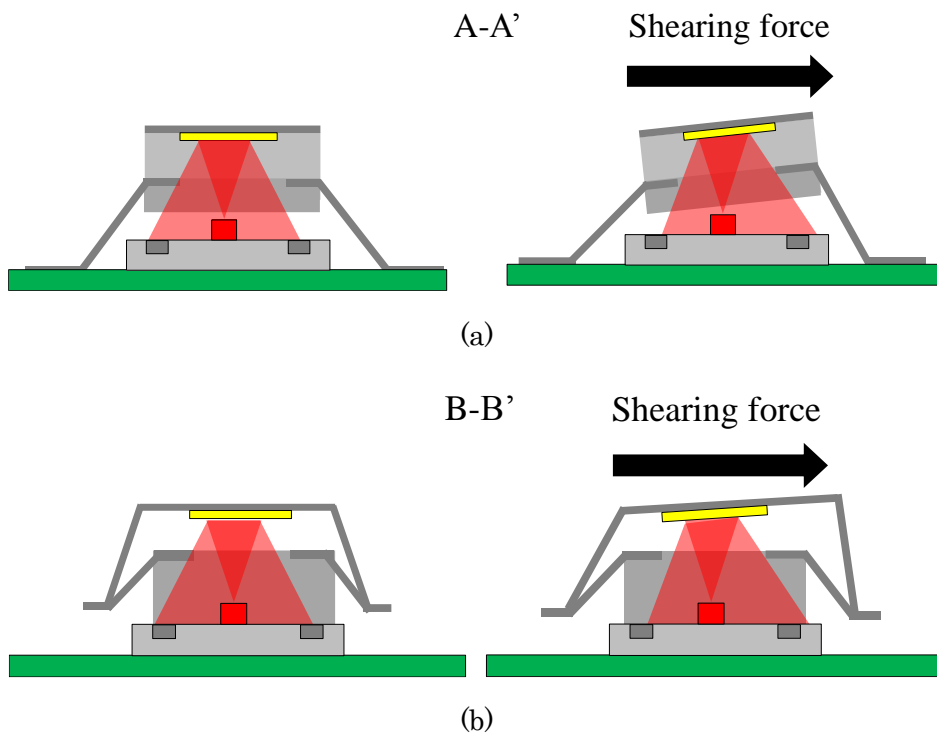


図 3.3 金属フレームを用いたせん断力センサ測定原理模式図

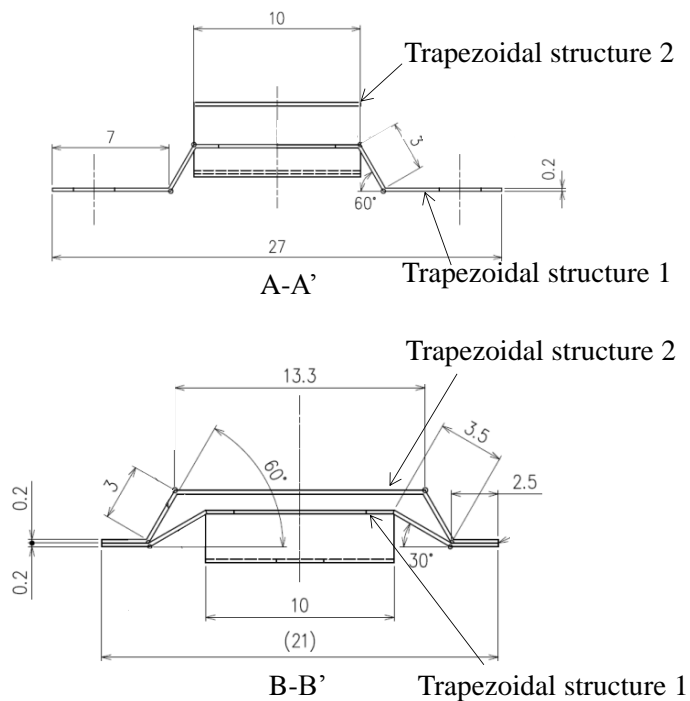


図 3.4 金属フレーム寸法

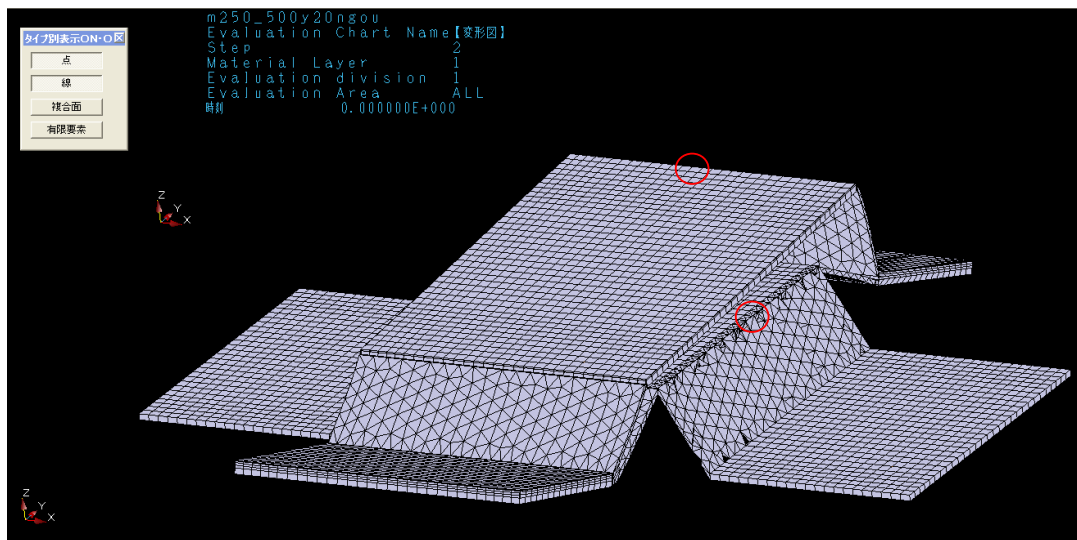


図 3.5 金属フレーム変形シミュレーション結果

れの方のせん断力を対応する軸の回転に分離して変換することが可能となる。外部ミラーの二軸回りの傾きを光センサチップを用いて、検知、測定を行う。図 3.4 に金属フレームのデザインと寸法を示す。材質はステンレスである。構造は初段アンプ基盤にねじで取り付ける。

作製した金属フレームの変形シミュレーションを有限要素解析ソフト(MEMSONE)を用いて行った。構造の弾性変形範囲がせん断力の測定範囲である。図 3.5 は y 方向に 20 [N]せん断力を印加した際の台形フレームの変形図である。原理通り変形していることがわかる。また x 方向, y 方向の+方向にせん断力を印加した際のミーゼス応力が最大になる点をそれぞれ図内に示す。それぞれ変形する台形フレームの付け根に最大ミーゼス応力が負荷される。x 方向, y 方向にそれぞれ 20 [N]負荷した際の最大ミーゼス応力はそれぞれ 235.1[MPa], 103.1[MPa]であった。ステンレスの降伏応力が 255[MPa]であるため、約 20 [N]の範囲において x 方向, y 方向それぞれ弾性域で測定が可能である。

3.2.2 実験と結果

次にせん断力センサの特性評価に関する実験とその結果に関して述べる。まず図 3.5 に実験系を示す。台形フレームの表面に実験用の天板を張り付けている。天板にはワイヤーの一端が取り付けられている。ワイヤーの取り付け位置とせん断力センサ表面は位置合わせされており、負荷するせん断力により、せん断力センサの表面にトルクがかからないようになっている。ワイヤーの另一端はプーリーを通して荷重センサ(RX-5, AIKOH Engineering)に

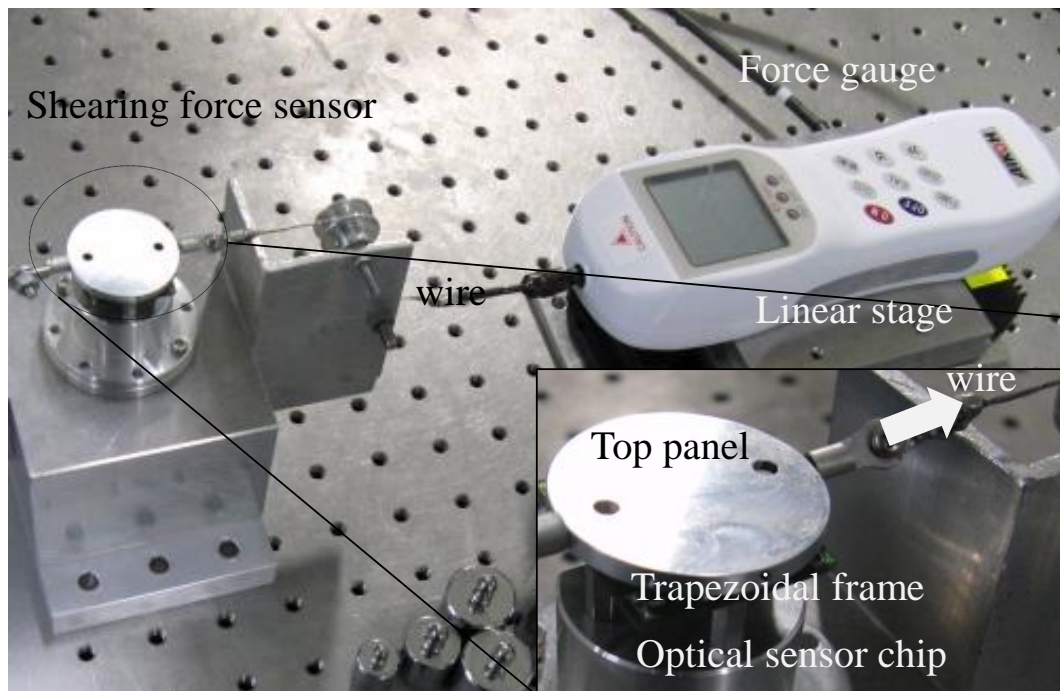
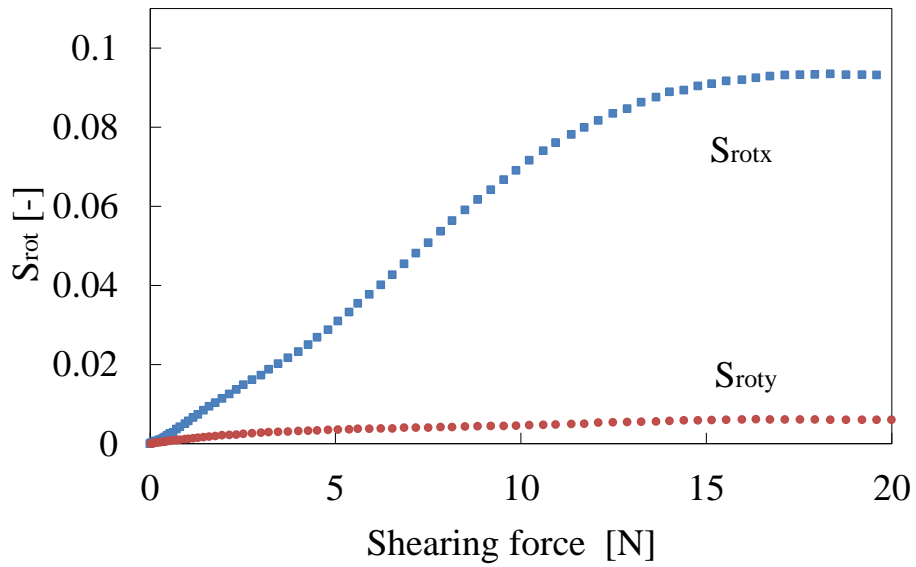


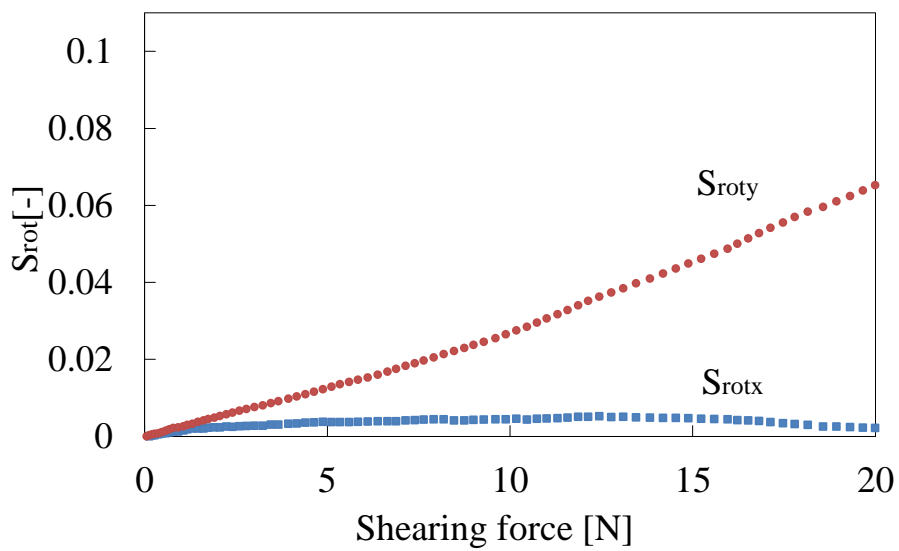
図 3.5 金属フレームを用いたせん断力センサ評価実験系

接続されている。荷重センサは移動ステージに固定されており、移動ステージの位置を動かすことにより、ワイヤーの張力を変化させ、せん断力センサに力を負荷する。その際の張力を荷重センサを用いて測定を行う。測定には LabVIEW(National Instrument)を用いた。

せん断力センサは治具に固定されており、この治具は光センサチップを中心に 90° 刻みで回転できるようになっている。カバーフレームのワッシャーの厚さを変えることで、ミラー面までの距離は $z_m=2000$ [μm]となるように調整している。センサの信号は初段のアンプ基盤で増幅された後、それぞれの信号をローパスフィルター通して LabVIEW で測定する。負荷しているせん断力とせん断力センサの出力は同期して測定を行った。実験条件に関して、x 軸, y 軸方向それぞれに $0\sim 20$ [N]のせん断力を負荷し VCSEL は $6[\text{mA}]$ で定電流駆動し、室温下で実験を行った。また実験系は防振台の上に配置されている。図 3.6 に実験結果をしめす。図 3.6(a)は x 軸方向に $0\sim 20$ [N], y 軸方向に 0 [N]負荷した際の S_{rotx} , S_{roty} の信号、図 3.6(b)は x 軸方向に 0 N, y 軸方向に $0\sim 20$ N 印加した際の S_{rotx} , S_{roty} の信号をしめす。図 3.6(a)の実験結果に関して、 S_{rotx} は荷重が増加するにつれて線形に上昇し、その後収束する。線形範囲の直線近似した直線の傾きは 0.0069 [-/N](測定範囲 $0\sim 10$ [N])である。また S_{roty} は S_{rotx} に比べて小さいが荷重が大きくなるにつれて信号が変化している。同様に図 3.6(b)の実験結果に関して、 S_{roty} は荷重が増加するにつれて線形に上昇し、直線近似した直線の傾きは 0.0031 [-/N]である。また図 3.6(a)の S_{rotx} とは違いある値に収束しない。また S_{roty} は S_{rotx} に比べて小さいが、図 3.6(a)同様に荷重が大きくなるにつれて信号が変化する結果が得られた。



(a)



(b)

図 3.6 実験結果せん断力(a)x 軸方向負荷時(b)y 軸方向負荷時

3.2.3 考察

図 3.6(a)の S_{rotx} に関して、ある値に収束している。図 2.20 に対応させると S_{rotx} は 0.1[-]以下であるため変位センサの測定領域内である。よって荷重に対して角度の変形量が収束していったと考えられる。弾性領域内では荷重に対して線形で変形するが、台形フレームであるため、構造の変形とミラーの傾きがかならずしも線形になるとはかぎらない。図 3.6(b)

の S_{roty} に関して、信号が図 3.6(b)の S_{rotx} よりも小さくまた 20[N]まで線形に増加する。これは構造の変形のしやすさが方向によって違うため起きていると考えられる。方向によって変形のしやすさが違うのは台形フレームが 2 重構造になっているためである。本センサでは x 軸方向の力は下段台形フレームの変形、y 軸方向の力は上段台形フレームの変形にそれぞれ対応している。図 3.5 のシミュレーション結果より、x 軸方向の方にせん断力を負荷したほうが、y 軸方向にせん断力を負荷したときよりも最大ミーゼス応力が高く、台形フレームの変形が大きいことがわかる。そのため、せん断力の負荷方向によって出力信号の変化傾きの違いが生じ、結果的に同じせん断力を負荷しても x 軸方向と y 軸方向で信号の差異が生じたと考えられる。また図 3.6(a)の S_{roty} 、図 3.6(b)の S_{rotx} に関して、理想的には信号は 0[-]のままであるが、負荷荷重に対して微小な信号の変化が見られる。これは負荷方向とセンサの軸のずれにより生じていると考えられる。x 方向にせん断力を負荷していたとしても、負荷方向の軸がセンサの x 方向と少しでもずれていれば y 方向成分の荷重が発生してしまい、その信号が S_{roty} として測定される。

以上のように光センサチップを用いて二軸方向のせん断力を原理的に測定できることを示した。しかし金属フレームはサイズが 13×21.3 [mm]と大きく、また金属フレームの構造も複雑であるため、実用化には難しい。そのため、金属フレームではなく、弾性ゴムフレームせん断力センサの開発を行った。

3.3 弾性ゴムフレームせん断力センサ

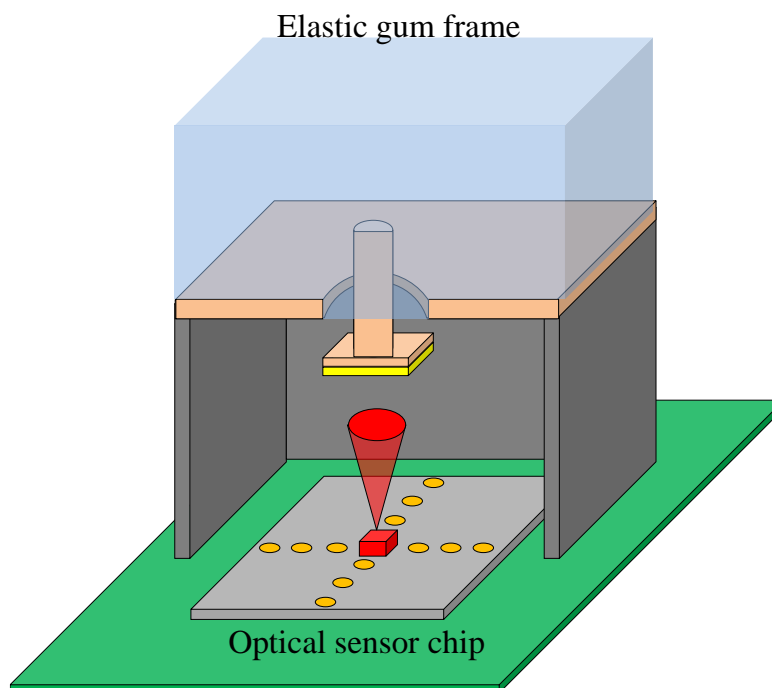


図 3.7 弾性ゴムフレームを用いたせん断力センサ模式図

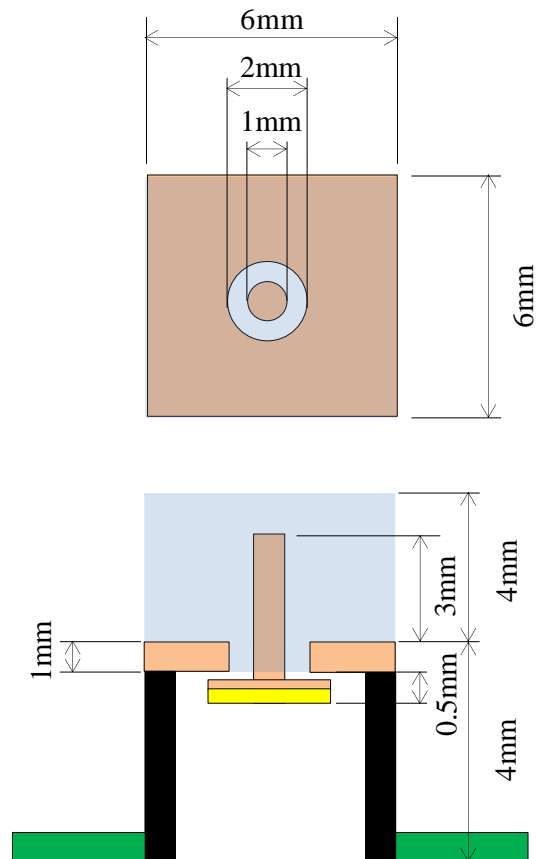


図 3.8 弾性ゴムフレーム寸法

表 3.2 弾性ゴム物性

Material characteristics	Frame 1	Frame 2	Frame 3
Poisson's ratio [-]	0.5	0.5	0.38
Transverse Elasticity Coefficient [MPa]	0.17	0.29	0.52

3.3.1 弾性ゴムフレーム構造

ロボットハンドなどの小さなスペースに内蔵する用途を目的としたさらに小型のせん断力センサの研究開発を行った。図 3.7 に弾性ゴムフレームを用いたせん断力センサのイメージ図を示す。このセンサも上述の金属フレームを用いたせん断力センサと同様に、光センサチップと弾性ゴムフレームで構成されている。図 3.8 に作製した弾性ゴムフレームの寸法を示す。骨組みとなる部分は 3D プリンターで作製した。その後、樹脂で骨組みを埋めることにより、弾性ゴムフレームを作製した。樹脂は 3 種類用いた。3 種類の樹脂の物性を

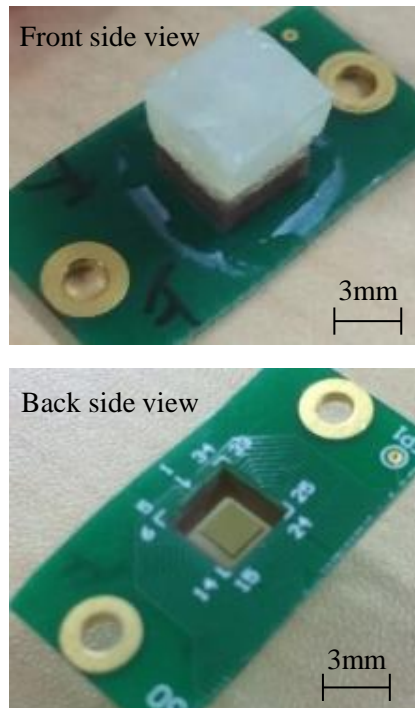


図 3.9 弾性ゴムフレーム

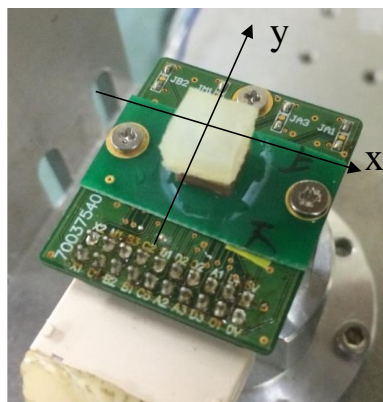


図 3.10 弾性ゴムフレームを用いたせん断力センサ

表 3.2 にまとめ、それぞれフレーム 1、フレーム 2、フレーム 3 とする。樹脂の硬化後、弾性ゴムフレームの天井に外部ミラーを取り付ける。図 3.9 に作製した弾性ゴムフレーム(フレーム 2)を示す。構造体は光センサチップ基板に取り付けるために、別の PCB 基板に接着し、その後、ネジで光センサチップ基板と固定する。図 3.10 に作製したせん断力センサを示す。図 3.10 に弾性ゴムフレームを用いた測定原理の模式図を示す。図 3.11 は x 軸方向のせん断力センサの断面図である。せん断力が負荷されると樹脂がせん断変形し、樹脂に埋まっている円筒形状の棒が傾く。せん断力に応じて、軸棒は支点部を中心に回転するが、結果としてその先端についているミラーに傾きが生じる。その変形を光センサチップを用いて測定

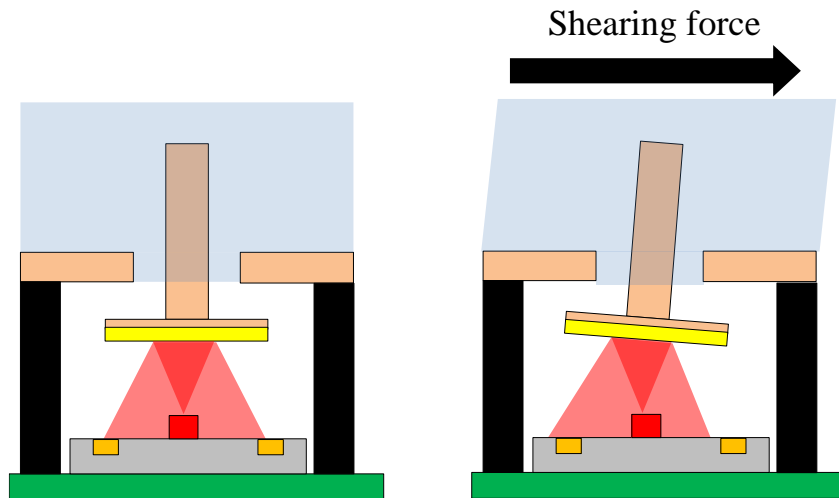


図 3.11 弾性ゴムフレームを用いたせん断力センサ測定原理模式図

する。このセンサの特徴は、力が負荷される部分と、検出部が力学的に分離されているところである。結果として、微細で繊細な検出部に力が負荷されることがなく、耐久性を高めることが期待できる。さらに、このセンサの性能はフレームの構造に大きく依存している。フレームに取り換えることで、光センサチップを変えることなく、センサの性能を可変化することができる。

3.3.2 実験と結果

実験系を図 3.12 に示す。計算機、せん断力負荷装置、せん断力センサで構成されている。コンピュータには LabVIEW がインストールされており、せん断力発生装置の自動ステージに接続されている。LabVIEW から自動ステージがある一定距離、一軸方向に自動的に移動ように信号を送る。フォースゲージには圧力センサが取り付けられている。フォースゲージ (Rx-5, AIKOH Engineering), 圧力センサ (FlexiForce, ニッタ株式会社), せん断力センサの出力電圧は LabVIEW により測定される。圧力センサの表面がせん断力センサに接触するよう、z 軸ステージを調整する。その時の接触圧を圧力センサで測定する。圧力センサと、せん断力センサの表面が接触した状態で自動ステージを動かすと、せん断力センサに移動距離に応じたせん断力が負荷される。その時のフォースゲージとせん断力センサの出力を計算機で測定する。表面にずれが発生しないように、取り外し可能な接着剤で圧力センサとせん断力センサの表面を固めている。

上記の実験系を用いて 2 つの実験を行った。一つ目は 2 軸方向のせん断力測定を確認するための実験。二つめはフレームを変えることでセンサ性能を可変化できるか確認するた

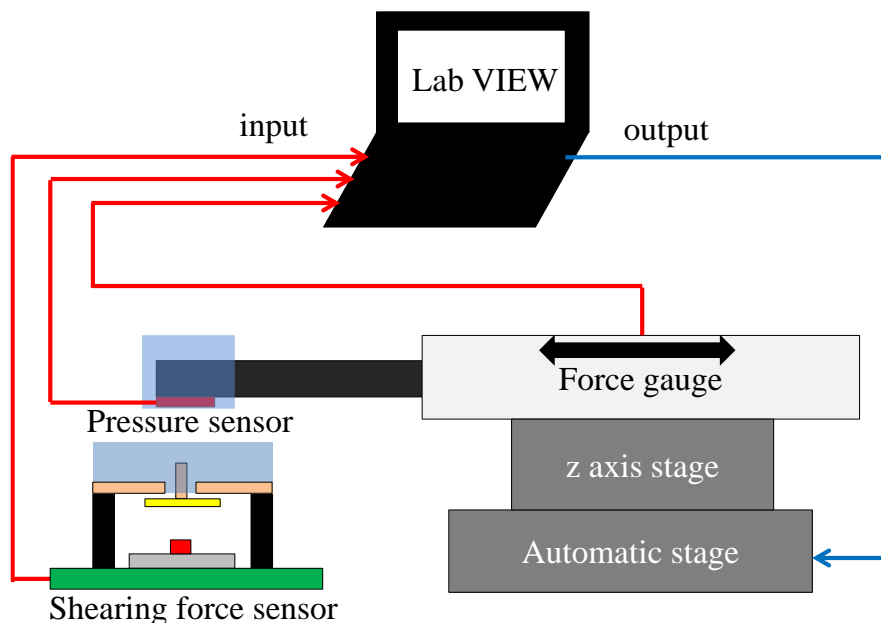


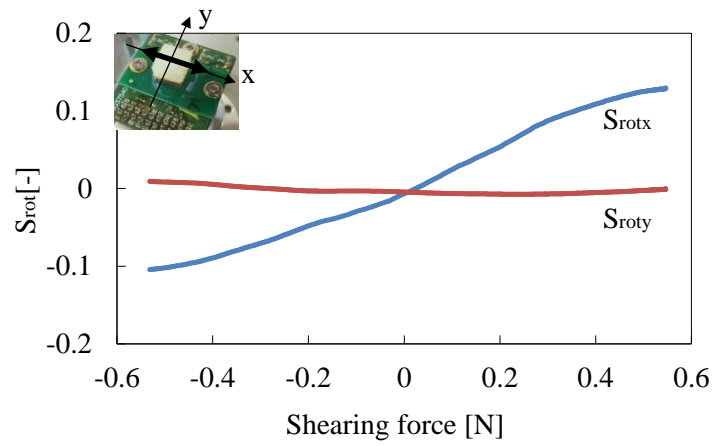
図 3.12 弾性ゴムを用いたせん断力センサ実験系

めの実験である。

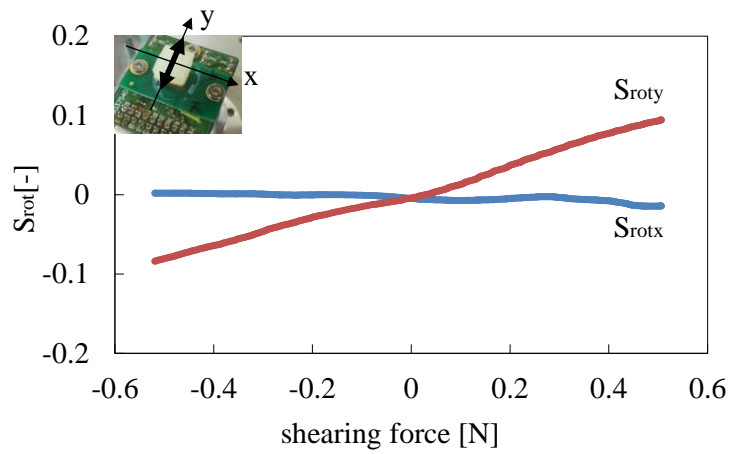
まず一つ目の実験に関して、述べる使用した弾性フレームはフレーム 2 である。せん断力負荷部を z 軸手動ステージを接触圧が 2.3[N]になるまで下げる。その状態で移動ステージを x 軸方向に前後に移動させる。同様の実験を y 軸方向, 135°軸方向に対しても行う。

図 3.13(a)は x 軸方向に, 図 3.13(b)は y 軸方向に, 図 3.13(c)は 135°軸方向にせん断力を負荷したときの S_{rotx} , S_{roty} の値である。せん断力の大きさは ± 0.5 [N]である。

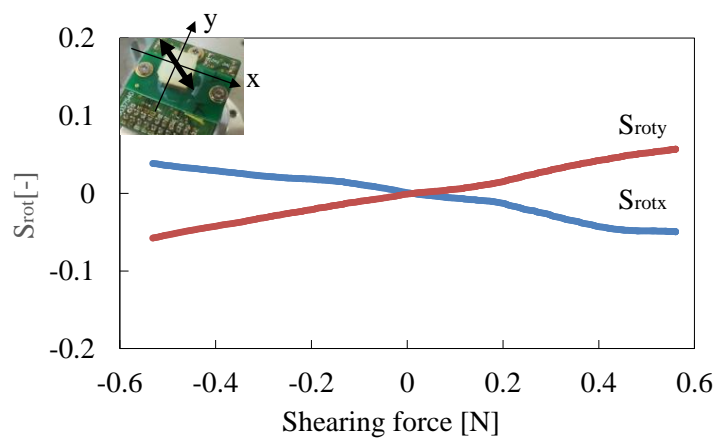
x 軸方向にせん断力を負荷すると S_{rotx} は直線的に変化するが, S_{roty} はほぼ変化しない。逆に y 軸方向にせん断力を負荷すると S_{roty} は直線的に変化するが, S_{rotx} はほぼ変化しない。図 3.13(a)の結果より, S_{rotx} の分解能を算出すると, 0.070[N] (測定範囲 ± 0.5 [N])であった。同様に図 3.13(b)の S_{roty} から分解能を計算すると 0.063 [N](測定範囲 ± 0.5 [N])であった。また図 3.13(a)の S_{roty} , 図 3.13(b)の S_{rotx} の ± 0.6 [N]の範囲における最大値はそれぞれ 0.0073[-], 0.0121[-]であり, せん断力に換算すると, 0.036 [N], 0.059[N]に相当する。これらの値はそれ



(a)



(b)



(c)

図 3.13 せん断力(a)x 軸方向負荷時(b)y 軸方向負荷時(c)135° 方向負荷時実験結果

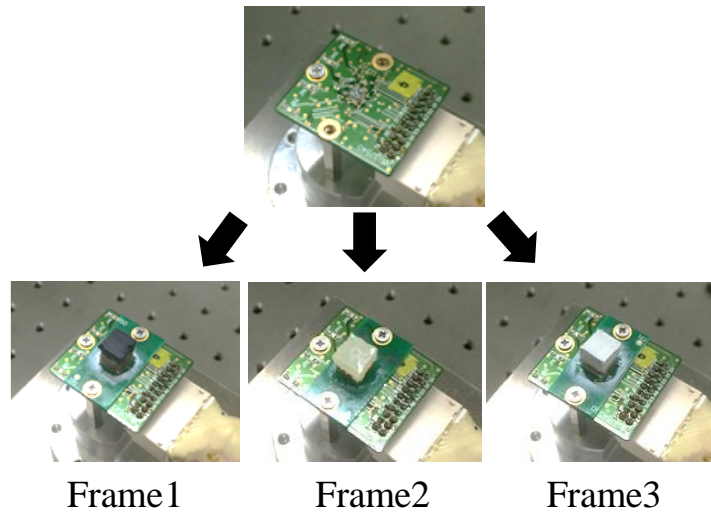


図 3.14 各種弾性ゴムフレームを用いたせん断力センサ

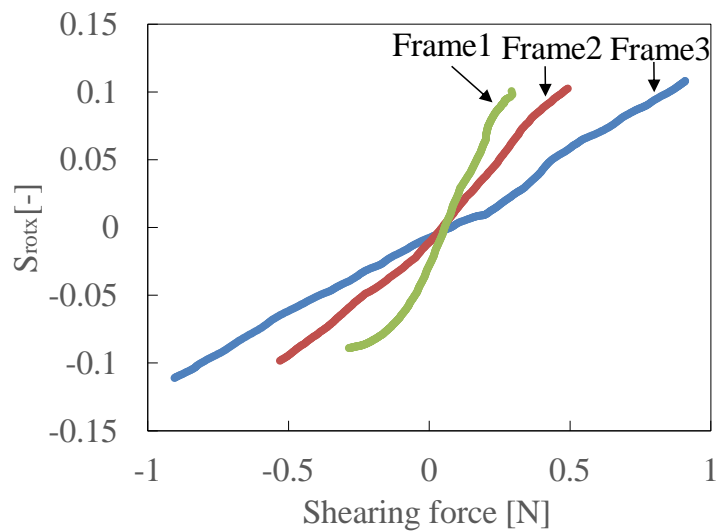


図 3.15 各種弾性ゴムを用いたせん断力センサ出力

ぞれの信号の電気分解能の値よりも、十分に小さいといえる。以上の結果より、2 軸方向のせん断力を分離して測定可能であるといえる。また図 3.13(c)の 135°方向にせん断力を負荷すると、 S_{rotx} , S_{roty} どちらも信号が変化していることがわかる。しかしそれぞれの変化量は x 軸のみにせん断力を負荷した時の結果(図 3.12(a)), y 軸のみにせん断力を負荷した時の結果(図 3.12(b))と比べて小さい。これらの結果は 4.3.3 にて考察を行う。

次に二つ目の実験に関して述べる。実験条件は実験 1 と同様であるが、弾性ゴムフレームをフレーム 1, フレーム 2, フレーム 3 を使用した。フレーム 1 が最もヤング率が低く、フレーム 3 が最もヤング率が高い。フレームは図 3.14 のように簡単に取り換えることができる。

その時のそれぞれの S_{rotx} の信号を図 3.15 に示す. 実験結果より, センサの性能が大きくフレームに依存していることがわかる. フレーム 1 が最も力に対して信号の変化が大きく, またフレーム 3 が最も力に対して直線範囲が広い. それぞれの信号を直線近似したその傾きはフレーム 1, フレーム 2, フレーム 3 を用いた場合それぞれ, $0.380[-/N]$, $0.204[-/N]$, $0.06[-/N]$ という結果が得られた. 以上の結果より, フレームを変えるとこでせん断力センサの性能を可変化できることを示した. この結果に関しても 4.3.3 にて考察を行う.

3.3.3 考察

結果に関して考察する. まず一つ目の実験の結果に関して述べる. 図 3.12(a), 図 3.12(b)の信号より, S_{rotx} , S_{roty} の信号を分離できてはいるが, 完全に信号を分離できていない. この結果に関して, これはフレームの作製精度による影響であると考えられる. 例えば x 軸方向にせん断力を負荷した際も, フレームの作製精度により, x 軸回りの微小なミラーの傾きが生じてしまい, それが S_{roty} の変化として生じていると考えられる. この弾性ゴムフレームは骨組みは 3D プリンターで作製したものの, そのあとの樹脂の充填作業, 成形作業など手作業であったため, それらが弾性ゴムフレームの作製精度の低下の原因となる. 作製精度を向上させることで, この変化を低減することが可能であると考えられる. また X 軸方向と y 軸方向のセンサ出力に関して, 直線部分の傾きが違う. これは PD の受光感度や暗電流によるオフセット電圧のばらつきによるものだと考えられる. 感度やオフセット電圧をキャリブレーションすることにより改善が期待できる.

次に図 3.12(c)の結果に関して考察する. 例えば 135° 方向に $0.5[N]$ のせん断力を負荷されたとき, x 軸方向には $0.5 \times \cos(135[\text{deg.}]) = -0.35[N]$, 負荷されることになる. そのため x 軸のみに負荷したときより, 信号が $\cos(135[\text{deg.}]) = -0.71$ 倍になると予測できる. しかし実験結果では, x 軸のみに $0.5[N]$ 負荷した時と, 135° 軸方向に $0.5[N]$ 負荷したときの, S_{rotx} はそれぞれ $0.102[-]$, $0.055[-]$ となり, 比は 0.54 倍である. この差はフレームの形状によるものだと考えられる. 立方体の表面にせん断力を負荷するとき, 負荷する方向によって, 中心部のたわみ量に違いが生じる. この差がミラーの傾きとなっていると考えられる. 弾性ゴムフレームを円筒にすることによって形状による方向の依存を除去することが可能になると考えられる. 最後に実験 2 の結果に関して考察を行う. フレームの依存性に関して, フレーム 1, フレーム 2, フレーム 3 の信号の傾きはそれぞれ $0.380 [-/N]$, $0.204 [-/N]$, $0.120 [-/N]$ となっているため, フレーム 1 を基準として傾きの逆数の割合を計算すると, $1:1.71:3.12$ となる. , また樹脂の横弾性係数の比は $1:1.70:3.06$ であった. このように弾性ゴムの横弾性係数が大きくとセンサ出力の傾きが定性的に一致していることがわかる. この結果からフレーム 1 は高感度センサとして, フレーム 3 は広範囲測定センサとして使用が期待できる.

3.4 二軸せん断力の高機能化デバイス

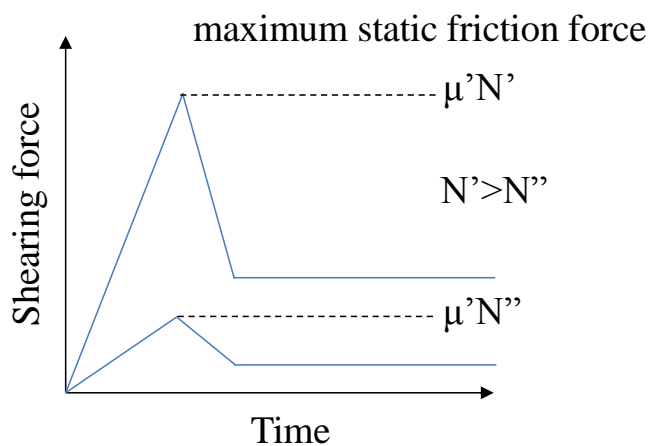


図 3.16 滑りとせん断力

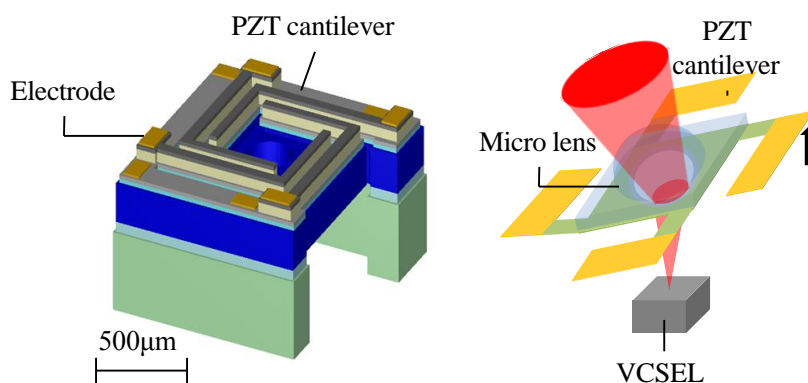


図 3.17 MEMS レンズアクチュエータデバイス模式図

3.3 で述べた通り、我々の開発したせん断力センサは弾性ゴムフレームの種類を変えることによりセンサ性能を可変化することが可能であるが、そのためにはその都度、弾性ゴムフレームを取り換えなければならず、対象を把持している間にセンサの性能を可変化することはできない。しかしせん断力のみならず、滑りの検知を行うことを考えたとき、把持対象の物性や表面状態が既知でないことが多く、その対象に負荷する把持力(対象に対して垂直方向の力)により最大静止摩擦力、つまり検知したいせん断力の大きさが変わる(図 3.16)。物性や表面状態が分からない対象を、滑りが発生せず、また可能な限り小さな把持力で把持するような非常に繊細な動作を可能にするためには力覚センサの性能を測定中に可変化することで実現できるのではないかと考え、そのための MEMS デバイスの作製を行った。

図 3.17 に MEMS レンズアクチュエータの模式図を示す。マイクロレンズと MEMS アク

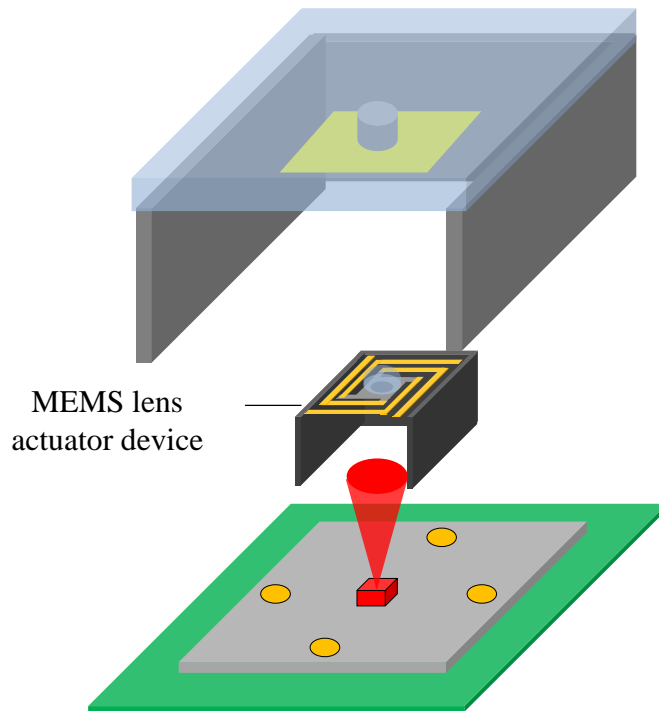


図 3.18 MEMS レンズアクチュエータデバイスの光センサチップへの応用模式図

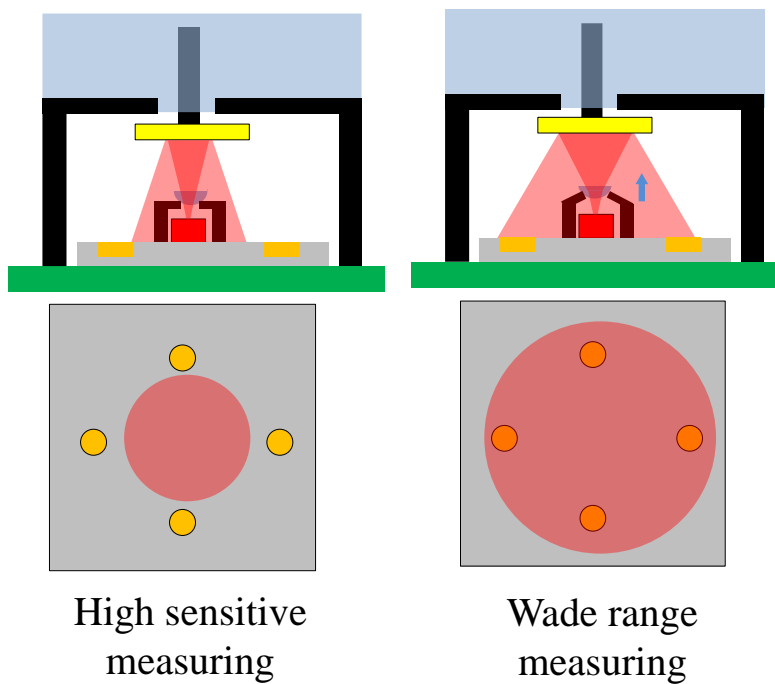


図 3.19 性能可変化の原理模式図

チュエータを組み合わせた新規的な構造である。マイクロレンズは 4 つの L 字カンチレバーで支えられており、L 字カンチレバーはそれぞれ独立して動く。L 字カンチレバーにはピ

エゾ特性を有する PZT(Piezoelectric zirconate titanate)に電圧を印可することにより、レンズを直線移動、回転させ、結果的にそのレンズを透過する光の焦点位置を移動させることができる。また図 3.18 に光センサチップと MEMS レンズアクチュエータデバイスを組み合わせた模式図を示す。VCSEL と外部ミラーを天井に張り付けた弾性ゴムフレームとの間に配置する。図 3.19 にせん断力センサの性能可変性の原理について述べる。L 字型レンズアクチュエータに電圧を印可前後の光センサチップ上のビームプロファイルを示す。電圧を印可することによって、マイクロレンズの焦点位置が変わる。焦点位置が変わると図のように光センサチップ上のビームプロファイルのスポット径が変化する。光センサチップの回転角測定時における信号の変化はビームスポット径に依存しているため、スポット径が大きい時は大きな回転角度の測定が可能であり、またスポット径が小さい時は微小な回転角度に対して大きな信号の変化が得られる。以上のことにより、MEMS レンズアクチュエータデバイスに印可する電圧を調整することにより、せん断力センサの性能を可変性することが可能であると予測できる。このようなデバイスを内蔵できるのも、受力部と検出部が分離されているという特徴のためである。

本章では石英レンズの作製と MEMS アクチュエータ部それぞれの開発に関して述べた後、MEMS レンズアクチュエータデバイスの評価の実験に関して述べる。

3.4.1 DMD 露光機を用いたマイクロレンズ作製

まず我々が作製した透過型光スキャナーに使用したマイクロレンズの作製に関して述べる。透過型の光スキャナーは報告されているが、レンズの材料として PDMS、フォトレジスト、そして Si などが用いられている⁽⁴⁴⁻⁴⁷⁾。しかしレンズの材料という点において石英ガラスが多く用いられているが、シリコンや樹脂材料はでは石英ガラスの光学特性や耐熱性、耐腐食性という点において石英レンズと比較して劣る。特に光センサチップを用いたせん断力センサにおいて、光強度の変化でせん断力に関わる信号を出力するため、レンズの透過による光強度の減衰は直接的に分解能の低下につながる。そこで我々は石英レンズを用いた新規的な光スキャナデバイスの研究開発を行った。

3.4.1.1 研究背景

マイクロレンズの作製には DMD 露光装置(Nikon)という装置を用いた。DMD(Digital mirror device) は、マイクロミラーが多数配置されているデバイスである。DMD は超小型プロジェクターなどさまざまな応用が期待されている。この DMD を用いた露光機が DMD 露光装置である。DMD 露光装置はマスクレスでグレースケール露光が可能である。マスクレス露光が可能であるため、露光マスクのコストが抑えられ、低価格で様々な形状のレンズを設計することが可能となる。またグレースケール露光が可能であることから、凸レンズだけで

なく、凹レンズ、非球面レンズなどの作製も容易に行うことが可能となる。DMD 露光装置は同様のマスクレス露光器であるレーザー描画装置と比較して、分解能は低いが、スループットが高い。我々が使用した DMD 露光機の最低分解能は $1[\mu\text{m}]$ であり、マイクロレンズの作製においては十分の分解能である。また多品種のレンズを作製するという点を考えると、スループットが高い方が望ましい。

DMD 露光装置を用いたレンズ作製はすでに研究されている。K. Totsu ら⁽⁴⁴⁾は Si 基板にグレースケール露光を行い、レンズ形状を作製している。K. Zhong^(45, 46)らはレンズ形状に露光し、そのパターンを型に PDMS の凹面レンズを作製している。X. Ding⁽⁴⁷⁾らは DMD の回折光でレンズ形状のレジストを作製している。

しかし DMD 露光装置を用いた石英レンズ作製の報告はまだされていない。また凸面レンズの作製の報告にとどまっており、その他の形状のマイクロレンズの作製に関しては報告されていない。

そこで我々は DMD 露光装置を用いて、石英基板ガラスに凸面、凹面のマイクロレンズの作製を行った。また DMD 露光装置の特徴を活かしたレンズの形状補正方法に関するも述べる。

3.4.1.2 作製方法

図 3.20 に DMD 露光機の写真と構成を示す。LED から出た光が DMD(テキサスインスツルメンツ)で反射する。このとき DMD は制御され、露光画像を作成する。反射光はレンズで集光された後、基板表面に照射される。LED の光の波長は $430[\text{nm}]$ (g 線)である。DMD 部には 1024×768 のミラーがあり、それぞれ独立して制御されている。対物レンズは 10 倍、100 倍と切り替えが可能である。10 倍と 100 倍で解像度とワンショットの露光範囲はそれぞれ $1024[\mu\text{m}] \times 768[\mu\text{m}]$, $102.4[\mu\text{m}] \times 76.8[\mu\text{m}]$ である。ワンショットでそれぞれの範囲の露光が可能であるため、EB 露光器などの線描写露光器にくらべて高速な露光が可能である。基板のステージ位置、DMD はコンピュータでコントロールされる。x-y ステージの移動分解能は $20[\text{nm}]$ である。マスクデータとして、Bitmap, GDS II, DXF のいずれかのデータを準備する必要がある。この画像をコンピュータに読み込ませることで、DMD が各ピクセルに応じたミラーを制御し、画像が生成される。

図 3.21 に DMD 露光装置を用いたグレースケール露光のイメージ図を示す。ミラー状態が ON の場合 g 線がレジストに照射される。逆にミラー状態 OFF の場合 g 線はレジストに照射されない。すべてのミラーの ON, OFF 状態は PC で制御可能である。このオンとオフの時間の割合はそのミラーに対応するマスクデータのピクセルのグレースケールレベルに依存する。DOSE 量は露光時間と光の強度によってきまるが、LED 光の強度は一定であるため、DOSE 量は露光時間によって決まる。そのため各ミラーの ON 状態、OFF 状態の時間の割合

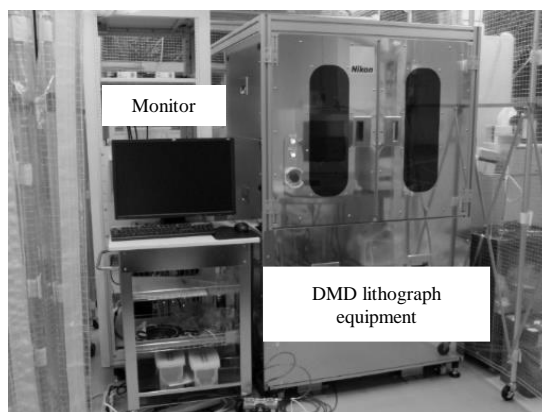
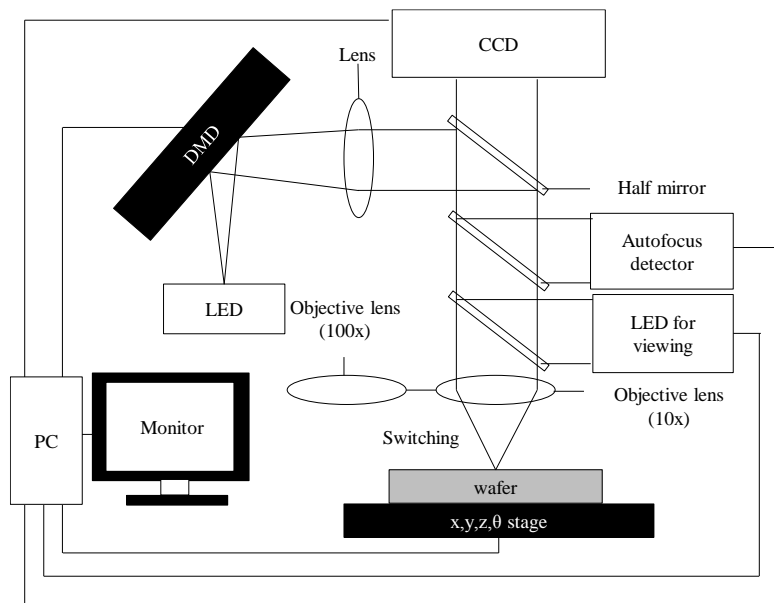


図 3.20 DMD 露光装置内部構造と外観

を変えることで、結果的に各場所の DOSE 量を任意に調整することが可能となる。

次に作製プロセスに関して述べる。まずフォトレジストをガラス基板に塗布する。図 3.22 に作製プロセスを示す。はじめにレジストの密着性を改善するために HMDS を塗布する。その後、AZ-P4903(AZ materials)を用いて、レジストをスピコートする。このレジストは高粘度である。レジストの厚さは約 $6[\mu\text{m}]$ である。その後 $50[^\circ\text{C}]3[\text{min}]$, $105[^\circ\text{C}]5[\text{min}]$ ホットプレートでプリベークを行う。二度に分けて行うことで、厚さ方向に対して、ベークのムラがないようにするためである。次に DMD 露光装置を用いてグレースケール露光を行う。あらかじめ露光条件出しを行っておく。露光条件出しの結果より、255 階調のとき露光時間が $620[\text{msec}]$ が最適値であるという結果が得られた。レンズのマスクデータの設計に関しては次章に述べる。露光したウェハを現像する。現像液には 400K Developer(AZ materials)を使用した。現像後ポストベークとして、 $100[^\circ\text{C}]3[\text{min}]$ で加熱し、最後にドライエッチング(MUC-21RV-APS-SE, 住友精密工業)を行う。フォトレジストとガラスのエッチング比が違うため

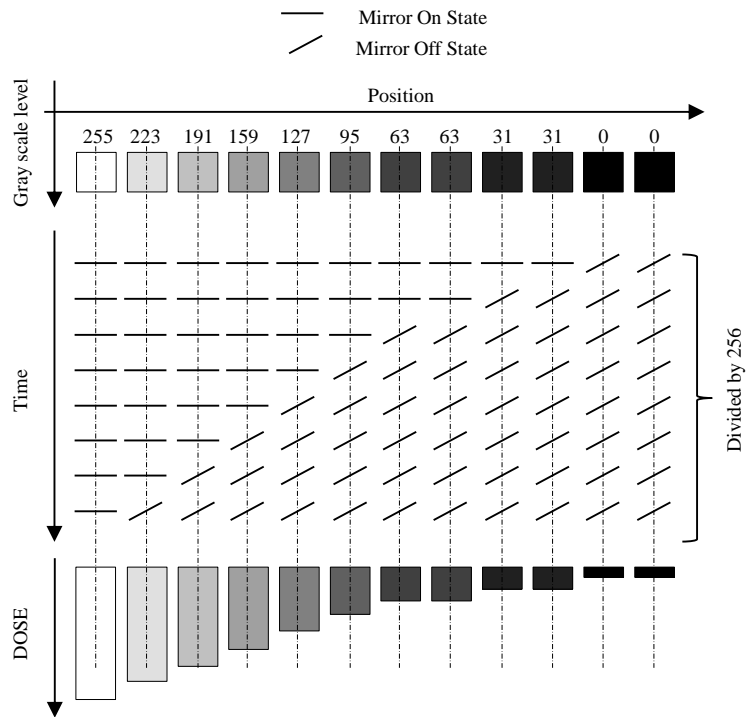


図 3.21 DMD を用いたグレースケール露光模式図

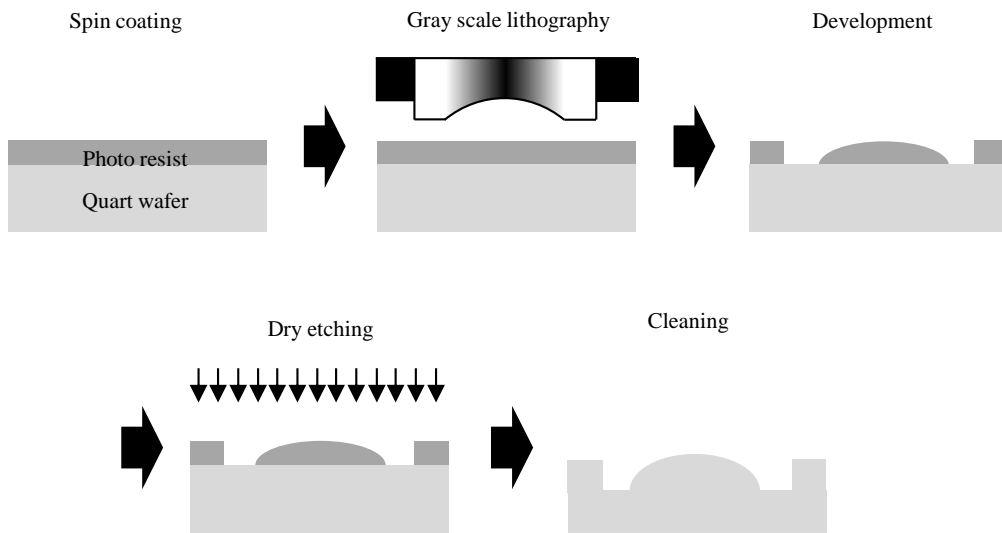


図 3.22 マイクロレンズ作製プロセス

レジスト形状が高さ方向に拡張された形状が転写される。各プロセスの条件を表 3.3 にまとめる。

表 3.3 マイクロレンズ作製条件

Process	Work	Equipment, material	Condition
Spin coating	HMDS coating	HMDS	2000 [rpm]
	PR coating	AZ-p4903	Thickness 6[μm]
	Pre bake	Hot plate	50 [$^{\circ}\text{C}$]-3 [min] 105 [$^{\circ}\text{C}$]-5 [min]
Lithography	Expose	DMD lithography equipment	DOSE 620 [msec] AF -180 [-]
Development	development	400K Developer	5 [min]
	Post bake		100 [$^{\circ}\text{C}$]-3[min]
Etching	Dry etching	MUC-21 RV-APS-SE	Gas C4E8,He 30 [min]
Cleaning	Ashing	Samco RIE	Gas O ₂ 10 [min]

3.4.1.3 露光マスク設計

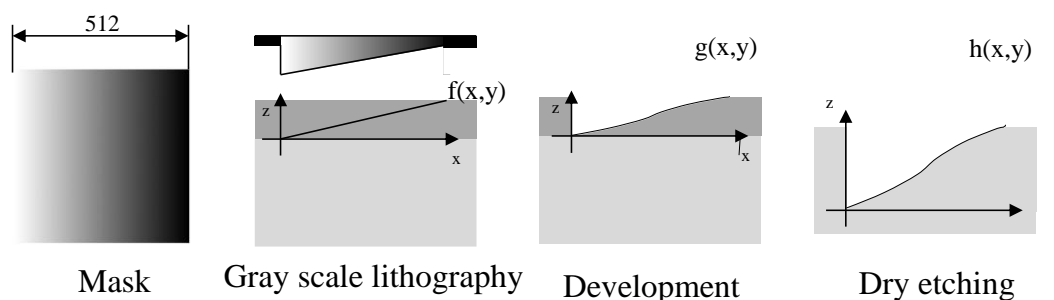


図 3.23 斜面形状と各測定結果の関数

マイクロレンズの作製において、レンズ形状はそのレンズの光学特性を決定する重要な要素であるため、レンズの形状コントロールは非常に重要である。しかし完全に目的と同形状のグレースケールマスクを用意しても、作製誤差によって、グレースケールマスクの設計形状と実際に作製したレンズの形状との間に誤差が生じる。そのため、作製したいレンズ形状に合わせて、露光画像を補正しなければならない。我々は図 3.23 のように、露光量が直線的に変化するようなマスクデータを用いて、露光を行い、各工程の形状を測定結果を得て、その結果をマスクデータにフィードバックすることで、高精度なマイクロレンズの作製を行った。f(x)は露光量に対して感光するレジストが線形であると仮定したときに得られる理想的な現像後のレジスト形状、g(x)は実際の現像後のレジスト形状、h(x)はドライエッチング後のガラス形状である。

$f(x)$ と $g(x)$ の差はレジストの DOSE 量と現像後のレジスト高さの非線形性により生じる。また $g(x)$ と $h(x)$ との差はレジストとガラスのエッチングの速度差により生じる。露光量は y 方向には変化しないため、露光量、形状、は x のみに依存する。図 3.24 にそれぞれの測定結果をしめす。露光量を直線的に増加させるマスクデータであるため $f(x)$ は一次関数で表される。 $g(x)$ と $h(x)$ は数点の測定データを 3 次関数で近似する。それぞれ

$$f(x) = 1.19 \times 10^{-2}x \quad (3.1)$$

$$g(x) = -4.84 \times 10^{-8}x^3 + 3.94 \times 10^{-5}x^2 + 4.35 \times 10^{-3}x - 4.7510^{-2} \quad (3.2)$$

$$h(x) = -9.68 \times 10^{-8}x^3 + 7.90 \times 10^{-5}x^2 + 8.33 \times 10^{-3}x - 8.68 \times 10^{-2} \quad (3.3)$$

である。まずこの結果よりドライエッチングのレジストとガラスのエッチング比 r_{pg} を以下の式(3.4)を用いて算出すると、

$$r_{pg} = \frac{1}{512} \int_0^{512} \frac{h(x)}{g(x)} dx = 1.97 \quad (3.4)$$

となる。次にレンズの形状の補正を行う関数を求める。プロセスによる誤差が全くないとした場合、理想的な斜面の形状は

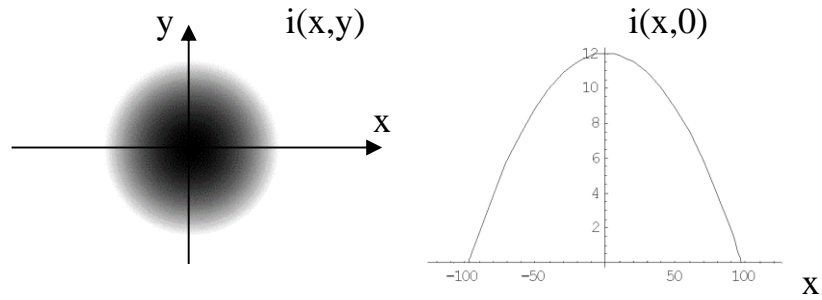
$$z = r_{pg} f(x) \quad (3.5)$$

であらわされる。しかし、実際の形状は $h(x)$ であるためその誤差 $error$ とすると

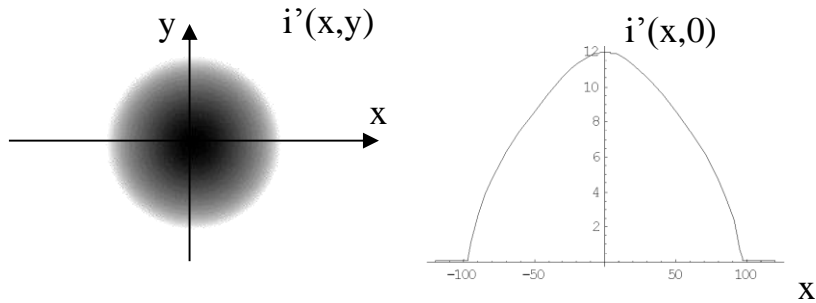
$$error = h(x) - r_{pg}f(x) \quad (3.6)$$

となる。この誤差を無くするように補正関数を決定する。任意場所における理想的な斜面の高さ z を変数として変換すると、補正関数 $c(z)$ は以下の式であらわされる。

$$c(z) = r_{pg}f(x) - h(x) \quad (3.7)$$



(a)



(b)

図 3.25 マスクデータとマスクデータの断面形状(a)補正無し(b)補正有り

ただし

$$x = \frac{f^{-1}(z)}{r_{pg}} \quad (3.8)$$

であるため,

$$c(z) = 7.51 \times 10^{-3} z^3 + 0.14 z^2 + 0.64 \times 10^{-3} z - 8.68 \times 10^{-2} \quad (3.9)$$

この補正関数を用いて、マイクロレンズの設計を行った。作製するレンズの曲率半径 r 、レンズの高さ t としたとき、このマイクロレンズの形状 $i(x, y)$ は以下の式であらわされる。

$$i(x, y) = \sqrt{r^2 - x^2 - y^2} - (r - t) \quad \text{ただし} \quad (i(x, y) \geq 0) \quad (3.10)$$

また前述した補正関数で補正したマイクロレンズの形状 $i'(x, y)$ は以下の式で表される。

$$i'(x,y) = i(x,y) + c(i(x,y)) \quad (3.11)$$

式(3.10), 式(3.11)を用いて補正無し, 補正有りそれぞれのマスクデータの設計を行った. 図 3.25(a), (b)にマスクデータのコンター図とその断面形状を示す. 設計に使用したソフトは **Mathematica** である. 補正なしのマスクデータはきれいな円弧形状であるのに対し, 補正ありのマスクデータはやや歪んだ円形になっていることがわかる. これは補正係数のため高さ方向 z に関して補正されているためである. このマスクデータを用いてマイクロレンズの作製を行った.

3.4.1.4 作製結果

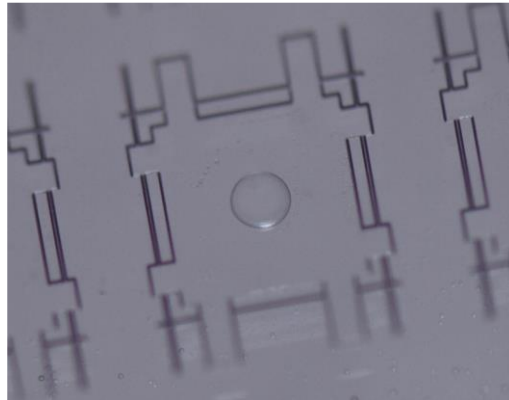
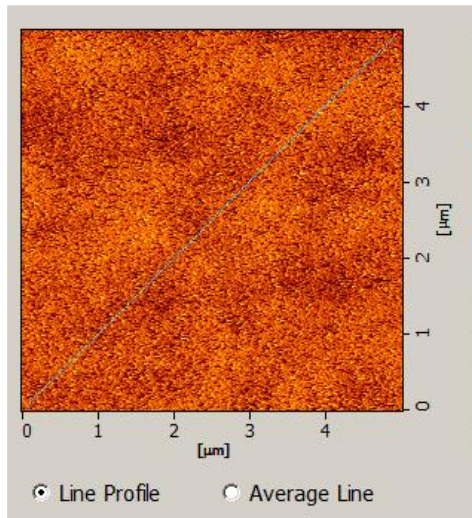
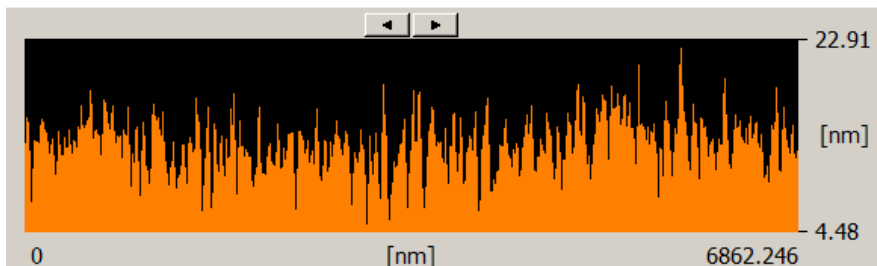


図 3.26 作製したマイクロレンズ

作製したマイクロレンズの写真を図 3.26 に示す. マイクロレンズは図内の中心の円形状の構造であり, 周辺の構造はダイシング用のアライメントマークである. レンズに表面粗さはもっとも重要なパラメータのなかの一つである. 表面粗さを低減するには 3 つの重要な要素がある. 一つ目は露光時のフォーカスの位置である. フォーカスの位置がジャストフォーカスだと, 設計通りのレジスト形状が露光されるが, 現像後のフォトレジストの表面粗さが悪くなる. これは **DMD** のミラーとミラーの間隙が構造として残ってしまうためである. 二つ目はポストバークの条件である. ポストバークするとレジストの表面粗さが改善されるが, 温度が高すぎるとレジストが大きく変形してしまう. 三つ目はドライエッチングの圧力, 温度, ガス比などの条件である. この条件が最適化されていないと, 表面粗さが大きくなってしまう. 作製したマイクロレンズの表面粗さの測定を **AFM(Atomic Force Microscope)**を用いて行った. 図 3.27(a)(b)はその範囲の表面状態のコンター図と断面図である. なお, レンズの曲面を測定しているため, この結果は 3 次元の傾き補正を行っている. 測定範囲は $5[\mu\text{m}] \times 5[\mu\text{m}]$ である. この測定結果より, $S_a=2.83[\text{nm}]$ となった. 一般的なレンズ表面の表面粗さは約 $15[\text{nm}]$ 以下であるため, 十分なレンズ面になっていることが分かる.



(a)



(b)

図 3.27 AFM によるマイクロレンズ表面粗さ測定結果
 (a)測定部コンター図(b)測定部断面図

次に作製したマイクロレンズの形状評価を行った。図 3.28 は補正無しのマイクロレンズと補正有りのマイクロレンズのコンター図である。また図 3.29 は補正あり、補正なしのマイクロレンズの形状と設計値とグラフである。補正なしの凸レンズの形状は、内側のほうは設計値よりもレンズの厚さが厚くなっている。しかし外側に行くにつれて、ある点で設計値と交差した後、設計値よりも薄くなっている。補正ありのレンズは凸レンズの内側のほうが若干設計よりも厚くなっているが、その誤差は補正なしの凸レンズよりも小さい。図 3.30 にその設計値との誤差を示す。補正なしの場合は誤差が最大で $1.37[\mu\text{m}]$ であるのに対して、補正ありの場合は誤差が最大で $0.49[\mu\text{m}]$ である。この結果に関して 3.4.5 にて考察を行う。

またこのプロセスでは複数のレンズを同一プロセスで作製することが可能である。図 3.31 に複数形状のマイクロレンズを同一基板に作製した結果とそれぞれの形状測定結果を示す。作製したレンズは凸面レンズ $r=150, 270, 400[\mu\text{m}]$ 、凹面レンズ $r=150, 270, 400[\mu\text{m}]$ である。補正関数 $c(z)$ は z にのみ依存するため、どのようなデザインのレンズにも応用可能である。

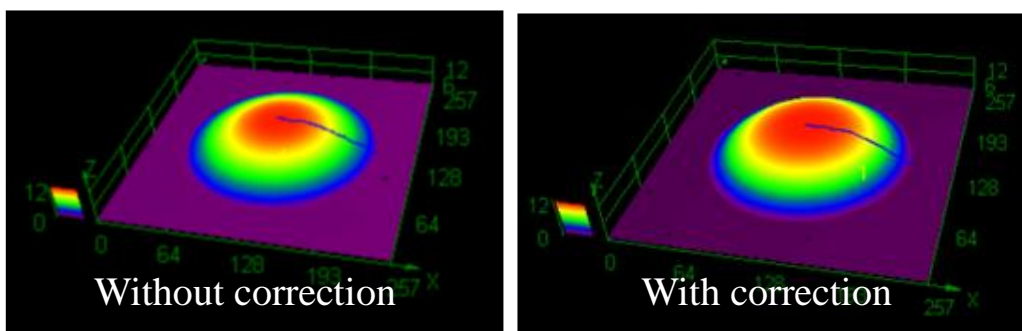


図 3.28 マイクロレンズ形状測定コンター図

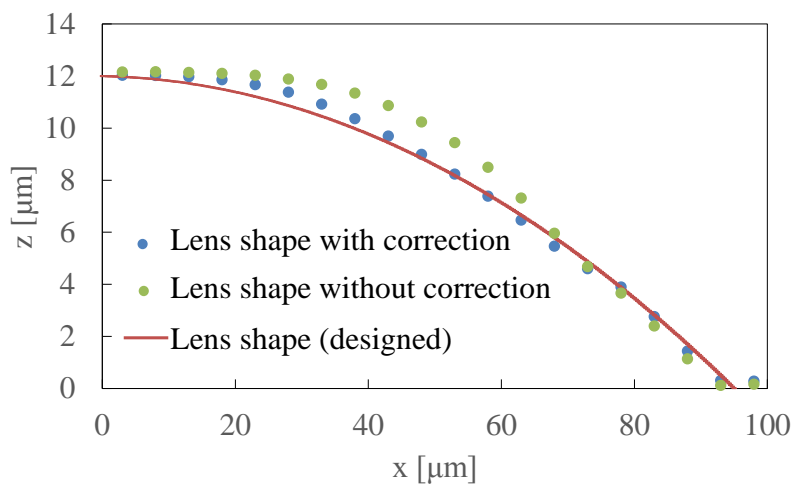


図 3.29 マイクロレンズ形状測定結果比較

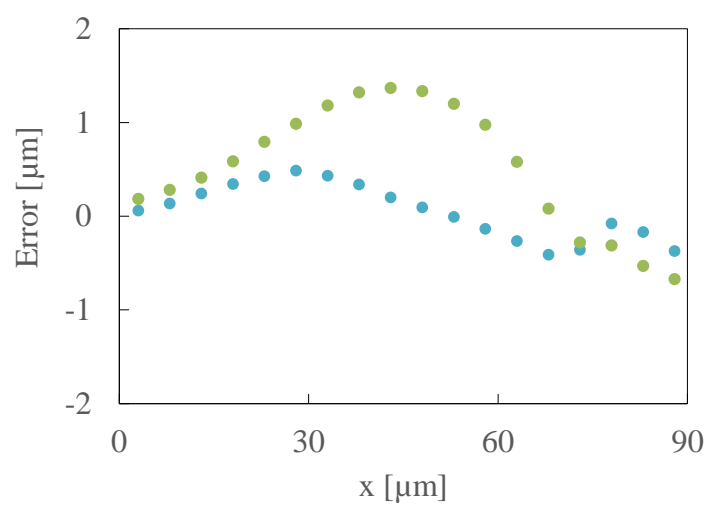


図 3.30 マイクロレンズ形状誤差比較

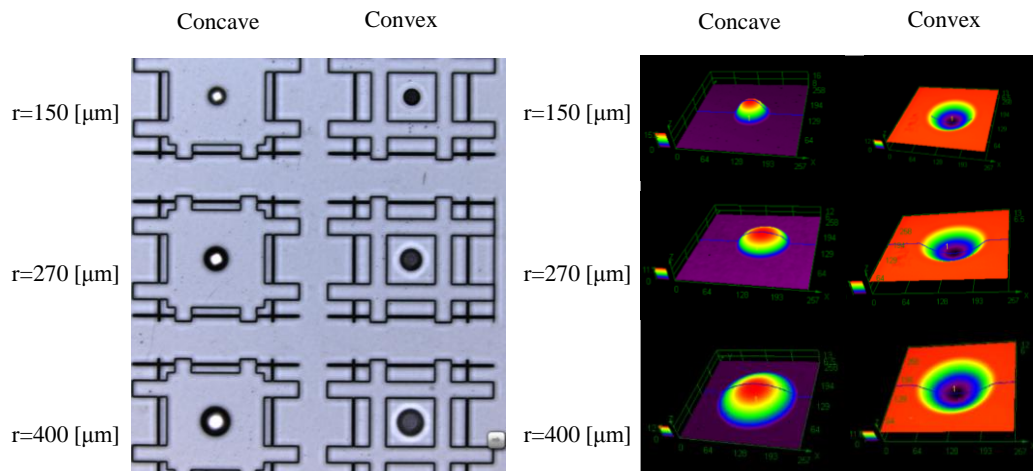


図 3.31 各種形状マイクロレンズと形状測定結果

3.4.1.5 考察

まずレンズ形状の設計値との誤差に関して考察する. 補正関数をマスクデータにフィードバックすることでレンズ形状誤差を小さくすることに成功した. さらに誤差を小さくするためには今回の実験結果をもとに補正関数を修正することで可能となる. DMD 露光装置はマスクレス露光が可能のため, このようにマスクデータを微調整しようとしてもその分のコストがかからないという点においてもマイクロレンズのような微細な加工に適している. また作製したマイクロレンズ形状に関して, 今回は凹面レンズ, 凸面レンズの作製を行ったが, マスクデータを変えることで, フレネルレンズや, 非球面レンズなどの作製も可能である. レンズアクチュエータデバイスの必要性能に合わせて, 自由にマイクロレンズを作製可能であると考えられる.

以上のように DMD 露光装置を用いたマイクロレンズの作製に関して述べた. マスクデータを補正することで, マイクロレンズの形状精度を良好にし, また表面粗さも十分レンズ表面の石英マイクロレンズの作製に成功した. さらに同一基板上に様々な形状のマイクロレンズを同時に作製可能であることを示した.

3.4.2 MEMS レンズアクチュエータデバイス

次に MEMS アクチュエータデバイスの作製に関して述べる. MEMS レンズアクチュエータのアクチュエータの駆動原理として piezoelectric (48, 49), electrostatic (50, 51), electromagnetic (52, 53) などが報告されているが, piezoelectric の利点の低消費電力, 高速応答性は光スキャナーとして大きな利点となる. そのため我々は piezoelectric 素子である PZT を用いた MEMS アクチュエータデバイス

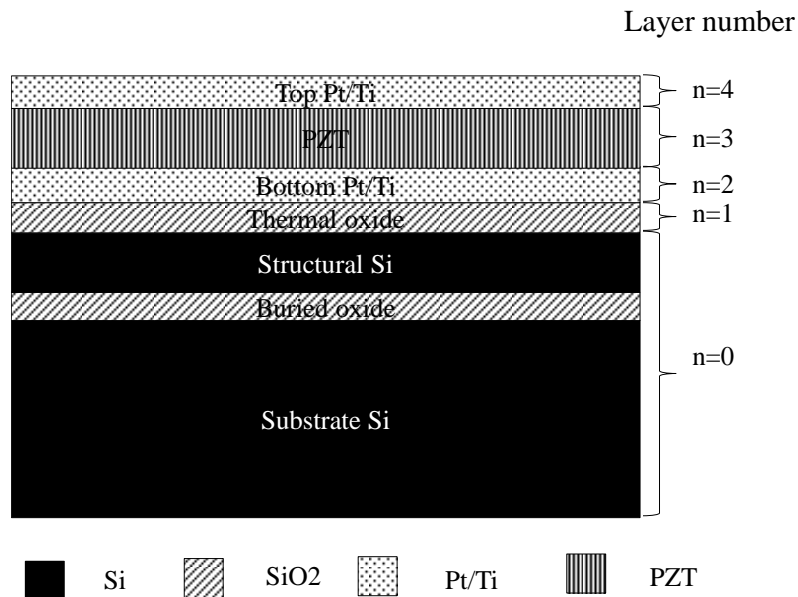


図 3.32 薄膜成膜後の SOI ウェハ断面図

の作製を行った。しかし PZT に限らず一般的に薄膜を基盤に成膜すると内部応力が発生し基盤が変形してしまう。変形したウェハを用いて MEMS デバイスを作製すると、薄膜の内部応力により、MEMS デバイスも大きく変形してしまう。特にレンズを用いた光スキャナーにおいてレンズの位置合わせはそのデバイスの光学特性を左右するため、非常に重要である。そのため、MEMS アクチュエータデバイスの内部応力による変形を低減することが求められる。そこで我々は FEM(Finite Element Method)を用いて MEMS アクチュエータデバイスの変形を予測し、それを設計にフィードバックすることで変形の無い MEMS アクチュエータの作製方法を提案した。

3.4.2.1 変形シミュレーション手法

まず MEMS デバイスの変形シミュレーション方法に関して述べる。MEMS デバイスの変形を FEM で予測する方法は研究されている。FEM を用いて変形を再現する際、境界条件として内部応力を用いる方法と、仮想温度を用いる方法がある。特にスカラー値である仮想温度を用いる方法はベクトル値である内部応力を用いる方法よりも条件の設定が単純になるため、図 3.17 のような複雑な構造のデバイスに対して簡単に応用できる。そのため我々は仮想温度を境界条件とするシミュレーション方法を提案した。

MEMS レンズアクチュエータの作製のために、4inch サイズの SOI 基板に Pt/Ti/PZT/Pt/Ti/SiO₂ の薄膜を成膜した。図 3.32 に薄膜を成膜した SOI 基板の断面図を示す。PZT を上部 Pt/Ti 膜と下部 Pt/Ti 膜で挟む構造となっており、それぞれが PZT 膜に電圧を印

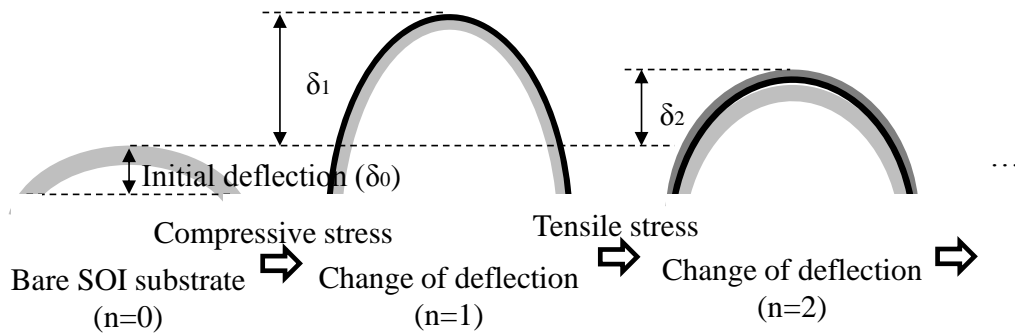


図 3.33 ウェハ反り模式図

表 3.4 薄膜の物性

	Thermal expansion coefficient [$\times 10^{-6}$ m/m $^{\circ}$ C]	Elastic modulus [GPa]	Poisson's ratio [-]
Top Pt/Ti	8.8	168	0.38
PZT	6.7	61	0.39
Bottom Pt/Ti	8.8	168	0.38
SiO ₂ (Thermal oxide)	0.5	70	0.20
Si (Structural silicon)	2.6	190	0.27
SiO ₂ (Buried oxide)	0.5	70	0.20
Si (Substrate silicon)	2.6	190	0.27

可するための電極となっている。またそれぞれの薄膜を layer n とする。基板、薄膜の物性を表 3.4 にまとめる。図 3.33 に薄膜形成による SOI 基板の変形の模式図を示す。SOI ウェハが変形したときのウェハの縁と中心位置の高さのギャップを反り量とする。薄膜が圧縮応力を発生させるとウェハは凸形状に変形し、逆に引っ張り応力を発生させるとウェハは凹形状に変形する。図 3.33 のように薄膜形成前の SOI ウェハの反り量を δ_0 とし、この値を基準として、薄膜 n を形成したときの反り量を δ_n と定義した。我々は 2 枚の SOI ウェハ(wafer A, wafer B)を用いて薄膜形成、シミュレーション、MEMS デバイス(カンチレバーデバイス、アクチュエータデバイス)の作製を行った。

MEMS デバイスの反り量を予測するために、初めに ANSYS を用いたウェハそのシミュレーションを行った。シミュレーションのプロセスは以下の通りである。

- ①ウェハ反りを測定する
- ②解析結果が測定結果に合うように温度条件 $T_{d0} \sim T_{d4}$ を合わせこむ
- ③その時の $T_{d0} \sim T_{d4}$ を求める
- ④求めた $T_{d0} \sim T_{d4}$ を用いて、デバイスの変形シミュレーションを行う

SOI5-U52	1 st Step (n=0)		2 nd Step (n=1)		3 rd Step (n=2)		4 th Step (n=3)		5 th Step (n=4)	
δ_n (Experimental result)	δ_0		δ_1		δ_2		δ_3		δ_4	
Simulation Model										
Boundary condition	T_d [°C]	T [°C]	T_d [°C]	T [°C]	T_d [°C]	T [°C]	T_d [°C]	T [°C]	T_d [°C]	T [°C]
Top Pt/Ti									T_{d4}	0
PZT							T_{d3}	0	T_{d3}	0
Bottom Pt/Ti					T_{d2}	0	T_{d2}	0	T_{d2}	0
SiO ₂ (Thermal oxide)			T_{d1}	0	T_{d1}	0	T_{d1}	0	T_{d1}	0
Si (Structural Si)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SiO ₂ (Buried oxide)	T_{d0}	0	T_{d0}	0	T_{d0}	0	T_{d0}	0	T_{d0}	0
Si (Substrate Si)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
δ (Simulated result)	δ_0		δ_1		δ_2		δ_3		δ_4	
T_{dn} [°C] (result)	T_{d0}		T_{d1}		T_{d2}		T_{d3}		T_{d4}	

図 3.34 SOI ウェハ反り再現シミュレーションプロセス

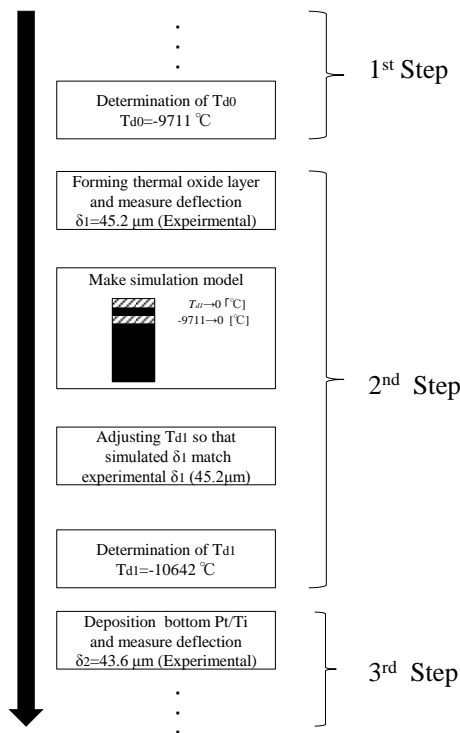


図 3.35 SOI ウェハ反り再現シミュレーションプロセスサンプル

という流れでシミュレーションを行う。我々はその境界条件を各層の仮想温度変化として設定した。この方法では仮想温度変化による熱膨張が各材料によって違うことを利用して、反りを再現する。図 3.34 は SOI ウェハの反り再現シミュレーションのプロセスフロー、図 3.35 に例として wefer A の 2nd step のシミュレーションプロセスを示す。1st step で基準の反り量である $\delta_0 (=45.2)$ を再現し、その仮想温度条件 $T_{d1} (= -9711 [°C])$ が得られる。次に熱酸化膜

を形成したときのウェハの反り変化量 $\delta_1 (=47.2 [\mu\text{m}])$ を測定する. ANSYS を用いて熱酸化膜を形成したウェハモデルを作成する. 解析結果の δ_1 が実験結果の $\delta_1 (47.2 [\mu\text{m}])$ になるように, T_{d2} を調整し, その時の $T_{d2} (-10642 [^\circ\text{C}])$ を得る. このとき T_{d1} は 1st step で求めた値を用いる. このようなプロセスを 3 層目, 4 層目, 5 層目と繰り返し行うことで, n 層における仮想温度条件 T_{dn} を求める.

3.4.2.2 カンチレバーデバイスの変形

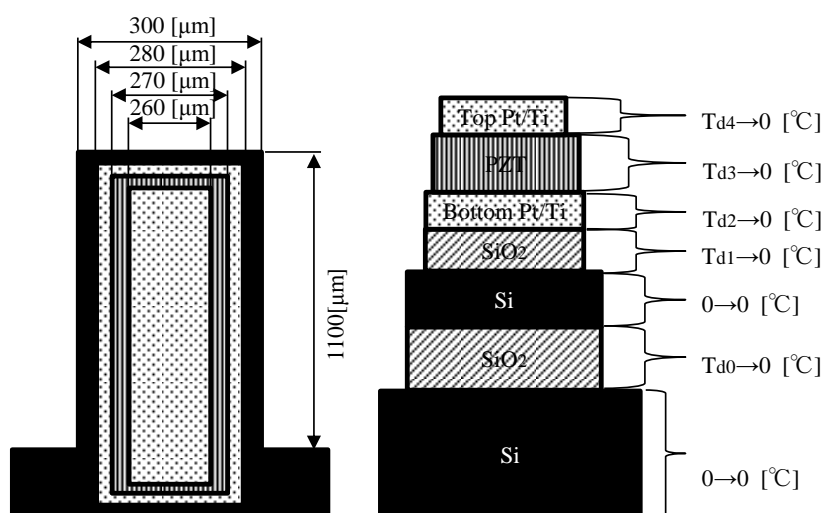


図 3.36 カンチレバーデバイスの形状と境界条件

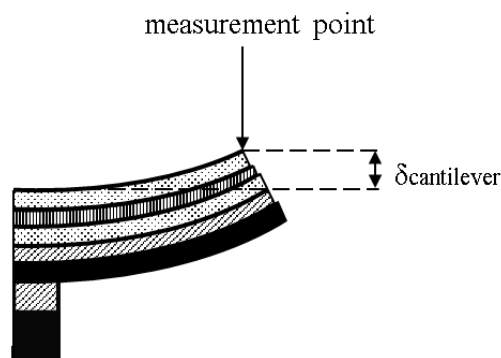


図 3.37 カンチレバーデバイスの測定点

まず我々は単純なモデルであるカンチレバーデバイスの変形のシミュレーションに関して述べる. またウェハの変形から求められる理論的なカンチレバーデバイスの変形量の計算を行い, シミュレーション結果, 計算結果, 実験結果の比較を行った. この目的は上述のシミュレーション方法が, 理論的, 実験的に妥当であるかの確認である. またこのカンチレバーデバイスはアクチュエータデバイスの特性を決定する PZT の圧電定数を測定するためのデバイスとして使用する.

図 3.36 にカンチレバーデバイスのデザインを示す。カンチレバーデバイスの構造体 Si の長さ
と幅はそれぞれ 1100[μm], 300[μm]である。また上部 Pt/Ti と PZT, PZT と下部 Pt/Ti 間には
それぞれ 5[μm]のマーヅンを設けてある。カンチレバーデバイスの変形として図 3.37 に示
すように、上部 Pt/Ti 層の先端の位置に変位量を $\delta_{\text{cantilever}}$ として定義した。

3.4.2.2.1 シミュレーション結果

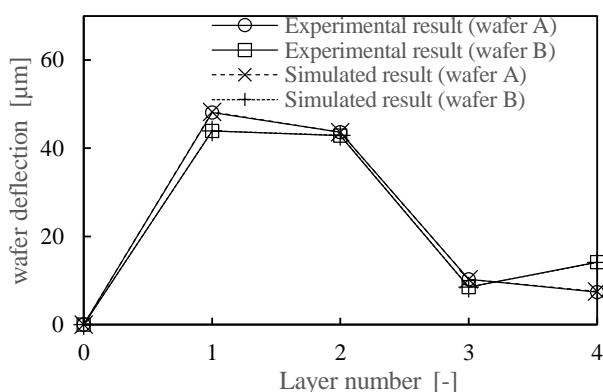


図 3.38 SOI ウェハ反り履歴

表 3.5 薄膜の形成条件

				wafer A		
Layer	Material	Role	Method	Deposition temp °C	Thickness nm	Deflection μm
n=4	Top Pt/Ti	Top electrode	Sputter	250	115	$\delta_4=7.4$
n=3	PZT	Piezoelectrics	CSD	650	1800	$\delta_3=10.3$
n=2	Bottom Pt/Ti	Bottom electrode	Sputter	200	100	$\delta_2=43.6$
n=1	SiO ₂	Barrier	Oxidation	1100	1500	$\delta_1=45.2$
n=0	SOI wafer	Bare SOI wafer				$\delta_0=47.2$
				wafer B		
Layer	Material	Role	Method	Deposition temp °C	Thickness nm	Deflection μm
n=4	Top Pt/Ti	Top electrode	Sputter	135	115	$\delta_4=14.1$
n=3	PZT	Piezoelectrics	CSD	650	1940	$\delta_3=8.5$
n=2	Bottom Pt/Ti	Bottom electrode	Sputter	200	100	$\delta_2=42.9$
n=1	SiO ₂	Barrier	Oxidation	1100	1500	$\delta_1=43.9$

wafer A と wafer B それぞれに対して、薄膜を形成したときの反りの変形量の測定を行った。
薄膜の形成条件を表 3.5 にまとめる。熱酸化膜は熱酸化炉でドライ酸化することで形成した。
PZT は SCD(Chemical solution deposition), Pt/Ti はスパッタの方法で形成した。ウェハの反り
量の変化は薄膜応力測定装置 (FLX-2320-S, Toho technology)を用いて測定を行った。

表 3.6 境界条件(シミュレーション結果)

Simulated	Wafer A	Wafer B
Td4 [°C]	95	-182
Td3 [°C]	258	247
Td2 [°C]	146	38
Td1 [°C]	-10642	-9788
Td0 [°C]	-9711	-9461

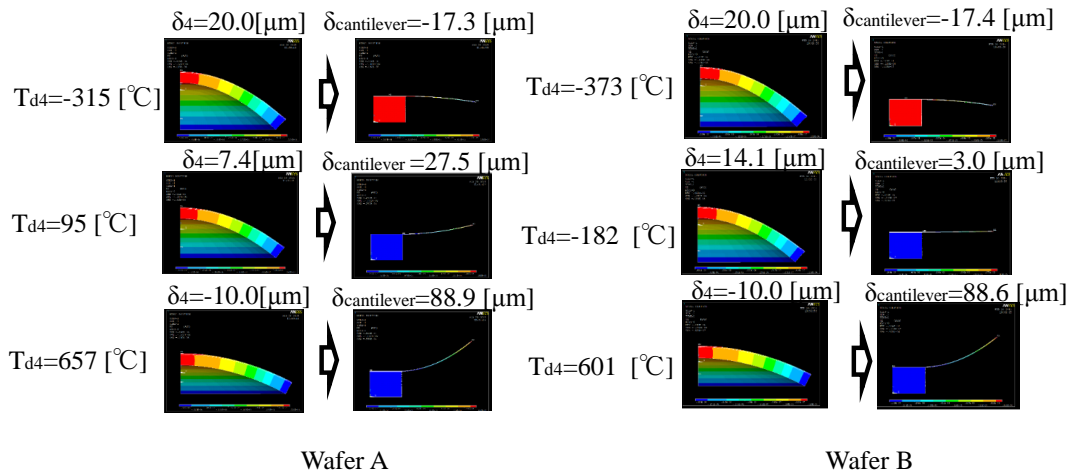


図 3.39 SOI ウェハとカンチレバーデバイスのシミュレーション結果

図 3.38 に実験結果から得られた δ_n とシミュレーションから得られた δ_n の履歴を示す. 表 3.6 にシミュレーションに用いた wafer A と wafer B の T_{d4} をまとめる. 実験結果の δ_n と同じ値になるように温度条件を調整しているため, 当然シミュレーション結果の δ_n は実験結果と一致する. 図 3.39 に δ_4 と $\delta_{\text{cantilever}}$ の変形シミュレーションの結果を示す. δ_4 を変化させるために温度条件 T_{d4} を調整した. 上部 Pt/Ti の温度条件(T_{d4})が低いとカンチレバーデバイスは下向きに変形し, また上部 Pt/Ti の温度条件(T_{d4})が高いとカンチレバーデバイスは上向きに変形する. この結果を図 3.44 に計算結果, 実験結果とともにまとめる.

3.4.2.2.2 計算結果

次にカンチレバーデバイスの変形量の計算結果に関して述べる. ウェハの反りから内部応力を算出する方法は Stony によって報告されている⁽⁵⁴⁾. また Stony の式は多くの研究者

表 3.7 境界条件(計算結果)

calculated	Wafer A	Wafer B
Td4 [°C]	96	-183
Td3 [°C]	249	239
Td2 [°C]	60	40
Td1 [°C]	-10049	-9768
Td0 [°C]	-9615	-9327

により研究され、複合膜⁽⁵⁵⁾、応力の不均一条件⁽⁵⁶⁾など様々な条件において使用できるよう拡張されている。まず n 層目の薄膜塗布後のウェハの曲率半径は幾何学的に以下の式であらわされる。

$$r_0 = \frac{L_w^2}{2\delta_0} \quad (3.12)$$

$$r_n = \frac{L_w^2}{2(\delta_0 + \delta_n)} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (3.13)$$

この式において L_w はウェハの反り測定範囲の半径である。今回使用した測定装置では $L_w=79.84$ [mm] である。次に複合膜の成膜された時のウェハの曲率半径と温度変化の関係は Sarhan によって報告されている⁽⁵⁵⁾。ただし、我々のシミュレーション方法では基板の温度変化と薄膜の温度変化が同じではないので、以下の式であらわされる。

$$\frac{1}{r_n} - \frac{1}{r_{n-1}} = \frac{6E_n t_n (\alpha_n T_{dn} - \alpha_s T_{ds})}{E_s t_s^2} \quad (3.14)$$

この式では E_n は n 層目の薄膜のヤング率、 t_n は n 層目の薄膜の厚さ、 α_n は n 層目の薄膜の熱膨張係数、 T_{dn} は n 層目の温度変化量を意味する。同様に E_s は基板のヤング率、 t_s は基盤の厚さ、 α_s は基板の熱膨張係数、 T_{ds} は基板の温度変化である。なお我々のシミュレーションにおいては $T_{ds}=0$ であるため、本計算でも $T_{ds}=0$ とする。この式(3.14)を用いて理論的な温度条件 T_{dn} が各層のウェハの曲率半径 r_n から求められる。この計算結果を表 3.7 にまとめる。次に作製したカンチレバーデバイスの変形量と温度条件の関係は以下の式であらわされる。

$$\{\varepsilon\} = [K]\{P\} \quad (3.15)$$

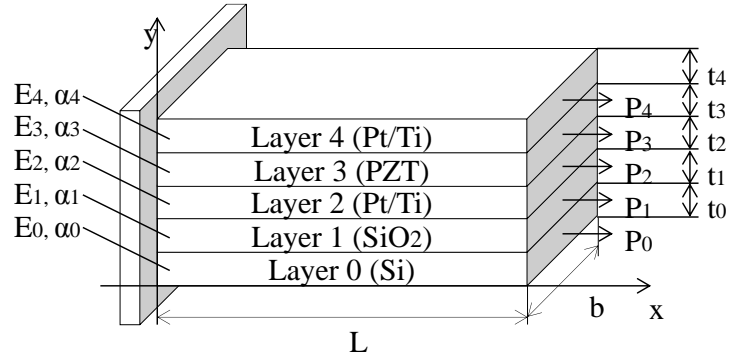


図 3.40 計算モデル

ただし,

$$\{P\}^t = \left\{ P_4 \ P_3 \ P_2 \ P_1 \ P_0 \ \frac{1}{R} \right\} \quad (3.16)$$

$$\{\varepsilon\}^t = \{ \alpha_4 T_{d4} - \alpha_3 T_{d3} \quad \alpha_3 T_{d3} - \alpha_2 T_{d2} \quad \alpha_2 T_{d2} - \alpha_1 T_{d1} \quad \alpha_1 T_{d1} - \alpha_0 T_{d0} \quad 0 \quad 0 \} \quad (3.17)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} \frac{1}{bt_4 E_4} & -\frac{1}{bt_3 E_3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{t_4 + t_3}{2} \\ 0 & \frac{1}{bt_3 E_3} & -\frac{1}{bt_2 E_2} & 0 & 0 & -\frac{t_3 + t_2}{2} \\ 0 & 0 & \frac{1}{bt_2 E_2} & -\frac{1}{bt_1 E_1} & 0 & -\frac{t_2 + t_1}{2} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{bt_1 E_1} & -\frac{1}{bt_0 E_0} & -\frac{t_1 + t_0}{2} \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ \bar{y} - \frac{t_4}{2} & \bar{y} - t_4 - \frac{t_3}{2} & \bar{y} - t_4 - t_3 - \frac{t_2}{2} & \bar{y} - t_4 - t_3 - t_2 - \frac{t_1}{2} & \bar{y} - t_4 - t_3 - t_2 - t_1 - \frac{t_0}{2} & Y \end{bmatrix}$$

(3.18)

$$Y = \sum_{i=0}^4 E_i I_i \quad (3.19)$$

この式は Oda らによって報告されている⁽⁵⁷⁾. この計算のモデルを図 3.40 に示す. この式において P_n , R , b , I_n , \bar{y} はそれぞれ n 層目の薄膜の軸力, カンチレバーデバイスの曲率半径, カンチレバーの幅, n 層目の断面二次モーメント, 任意の y の座標である. ただし, \bar{y} は本計算においては打ち消されるため, 計算結果に影響を与えない. 温度条件 T_{dn} は式(3.14)により与えられ, また各材料の物性や寸法はすでに与えられているため, 式(5.15)より $\{P\}$ とその

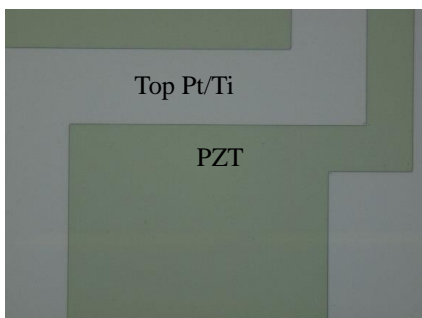
要素である R が求められる。カンチレバーデバイスの曲率半径がカンチレバーデバイスの長さに対して十分大きいとき、 $\delta_{\text{cantilever}}$ は R を用いて以下の式で表される。

$$\delta_{\text{cantilever}} = \frac{L^2}{2R} \quad (3.20)$$

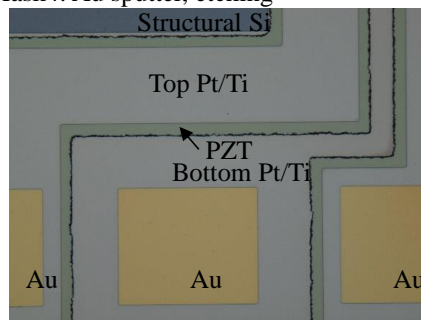
以上の計算により、 δ_4 から温度条件 Td_4 、カンチレバーデバイスの曲率半径が求まり、最終的に $\delta_{\text{cantilever}}$ が求まる。この結果をシミュレーション結果、実験結果とともに図 3.44 に示す。

3.4.2.2.3 実験結果

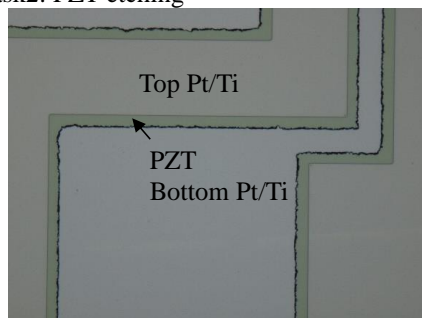
Mask1: Top Pt/Ti etching



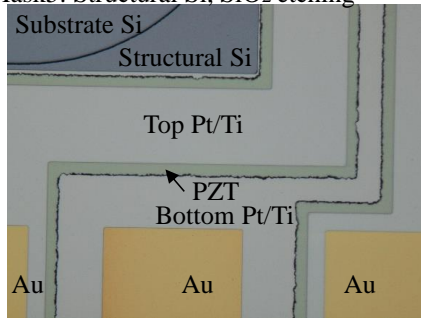
Mask4: Au sputter, etching



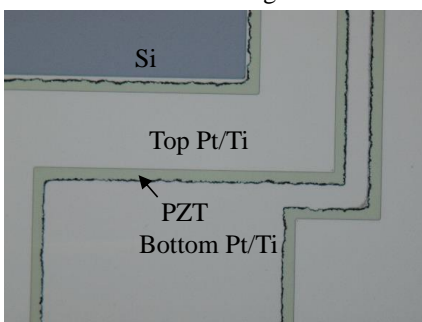
Mask2: PZT etching



Mask5: Structural Si, SiO2 etching



Mask3: Bottom Pt/Ti etching



Mask6: Back side (Substrate Si) etching

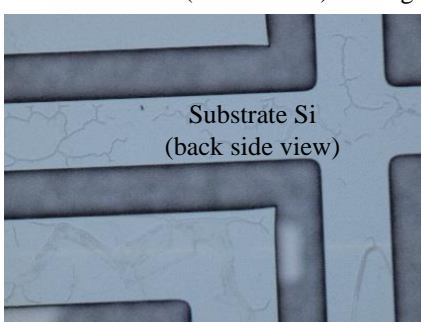


図 3.41 MEMS カンチレバーデバイス周辺の各プロセス後の写真

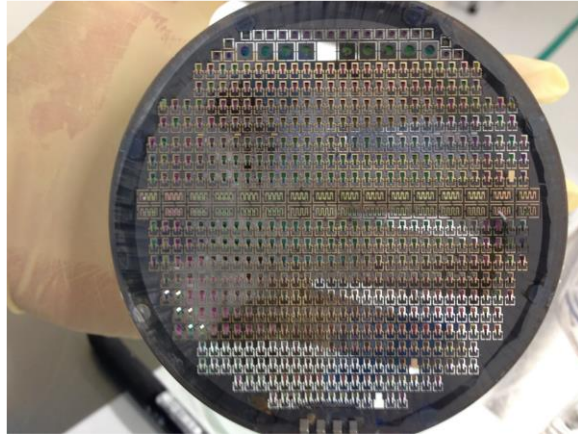
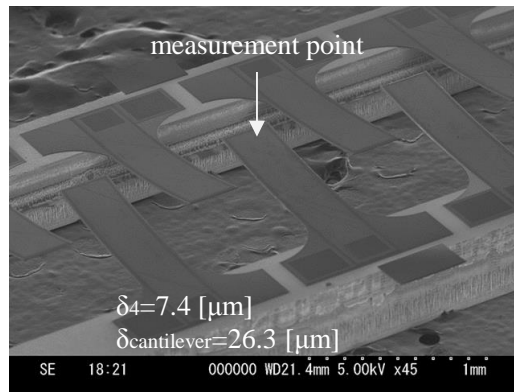
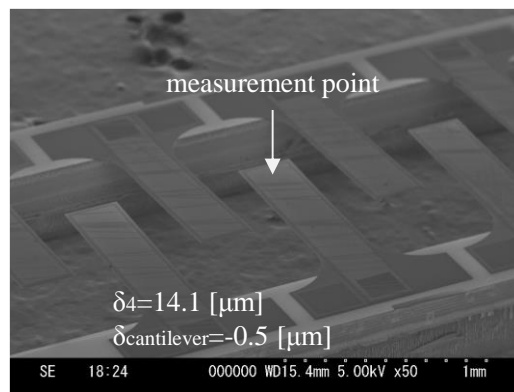


図 3.42 プロセス完了後の SOI ウェハ



(a)



(b)

図 3.43 MEMS カンチレバーデバイス SEM 画像(a)wafer A(b)wafer b

最後に実際に作製したカンチレバーデバイスの変形の測定を行った。カンチレバーデバ

イスの作製プロセスを付録 1 にまとめる。本作製プロセスは小林ら^(58, 59)によって確立されたものであり、フォトマスクを 6 枚使用する。それぞれ、上部 Pt/Ti エッチング、PZT エッチング、下部 Pt/Ti エッチング、パッド用 Au エッチング、構造体 Si、熱酸化膜エッチング、バックサイド(基板 Si)、インシュレータ—酸化膜エッチング用の計 6 枚である。それぞれのプロセス後のカンチレバーデバイス根本部の図 3.41 に示す。また図 3.42 にプロセス後のウェハを示す。図 3.43 に作製したカンチレバーデバイスの SEM 画像を示す。図 3.43(a)は wafer A を用いて作製したカンチレバーデバイス。図 3.43(b)は wafer B を用いて作製したカンチレバーデバイスである。特に図 3.43(a)の写真からカンチレバーデバイスが上向きに変形しているのが観察できる。カンチレバーデバイスの変形を x, y, z 手動ステージ付き顕微鏡を用いて測定を行った。測定は測定点のみではなく、カンチレバーデバイスの枠や根本からカンチレバーデバイスの傾きを算出し、測定点の変形量のみの算出を行った。測定は wafer A wafer B それぞれ 8 本のカンチレバーデバイスで行った。この結果を図 3.44 にシミュレーション結果、計算結果とともにまとめる。

3.4.2.2.4 考察

図 3.44 に δ_4 と $\delta_{\text{cantilever}}$ の関係のシミュレーション結果、計算結果、実験結果を示す。シミュレーション結果、計算結果はその結果の近似直線、実験結果は実測した値をプロットした。wafer A に関して、 $\delta_4=7.4[\mu\text{m}]$ であり、その時の $\delta_{\text{cantilever}}$ のシミュレーション結果、計算結果、実験結果はそれぞれ $27.5[\mu\text{m}]$, $12.7[\mu\text{m}]$, $26.3[\mu\text{m}]$ である。また wafer B に関して、 $\delta_4=14.1[\mu\text{m}]$ であり、この時の $\delta_{\text{cantilever}}$ のシミュレーション結果、計算結果、実験結果はそれぞれ、 $2.98[\mu\text{m}]$, $-10.3[\mu\text{m}]$, $-0.45[\mu\text{m}]$ であった。

まずシミュレーション結果と実験結果の近似直線に関して考察を行う。シミュレーション結果、計算結果ともに wafer A と wafer B の近似直線がほぼ一致していることがわかる。この結果は wafer A wafer B とともに PZT の成膜まではほぼ同等条件で薄膜を成膜しており、またその $\delta_0\text{-}\delta_3$ を再現するように解析条件 $T_{d0}\text{-}T_{d3}$ を決定している。そのため wafer A と wafer B の δ_4 が同じになるような温度条件 T_{d4} を用いたとき、 $\delta_{\text{cantilever}}$ も近い値となるのは妥当であると考えられる。微妙な誤差は wafer A と wafer B の初期反りの差、PZT 薄膜厚さの差などにより生じていると考えられる。

またシミュレーション結果と計算結果の誤差に関して考察する。wafer A のシミュレーション結果の近似直線の式は

$$\delta_{\text{cantilever}} = -3.54 \times \delta_4 + 53.19 \quad (3.21)$$

wafer A の計算結果の近似直線の式は

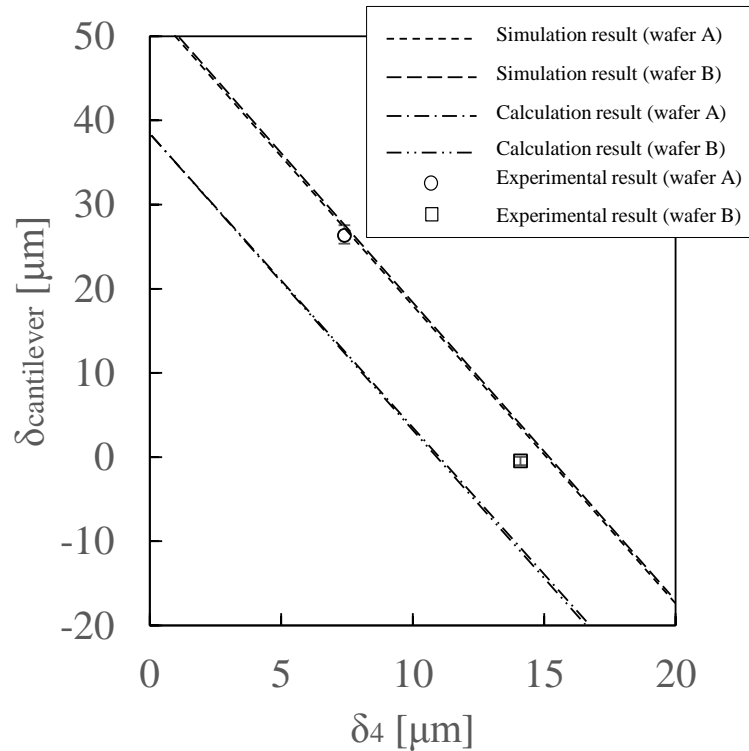


図 3.44 カンチレバーデバイスのシミュレーション結果, 計算結果, 実験結果

$$\delta_{\text{cantilever}} = -3.50 \times \delta_4 + 38.66 \quad (3.22)$$

となる. この式を比較すると, 切片で約 14.5 [μm]の誤差があるものの, δ₄の変化に対する傾きがほぼ同じ値となっており, シミュレーション結果と計算結果が定性的に一致しているといえる. シミュレーション結果と計算結果の誤差の要因として考えられる要因としてシミュレーションモデル, 作製モデルの違いが挙げられる. 計算モデルは計算の単純化のために薄膜間のマージンを無視したモデルで計算を行った. しかし, シミュレーションモデルには実際に作製するデザインと合わせるために薄膜間のマージンを設けているため, この差が計算結果とシミュレーション結果の誤差の要因であると考えられる.

次にシミュレーション結果と実験結果に関して考察する. 長さ 1100[μm]のカンチレバーに対して, シミュレーション結果と実験結果の誤差が wafer A で 1.2[μm], wafer B で 3.5[μm]という値は十分小さく, 精度よくカンチレバーデバイスの変形のシミュレーションができていると考えられる. この結果より, このシミュレーション方法を用いて, 上部 Pt/Ti による反り変形量 δ₄ が任意の値の時, MEMS カンチレバーデバイスの変形量が精度よく予測できることを示した. δ₄は上部 Pt/Ti の実際の成膜温度や厚さを変えることで制御可能である.

3.4.2.3 アクチュエータデバイスの変形シミュレーションと実験結果, 考察

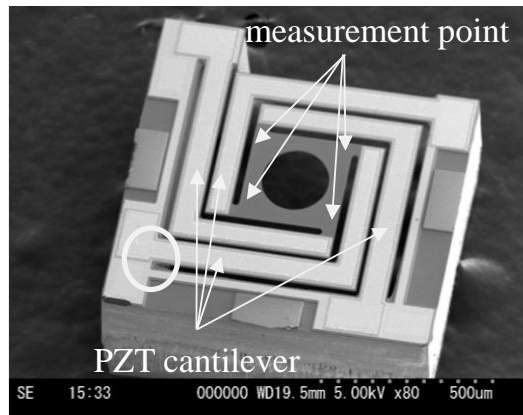


図 3.45 アクチュエータデバイス SEM 画像

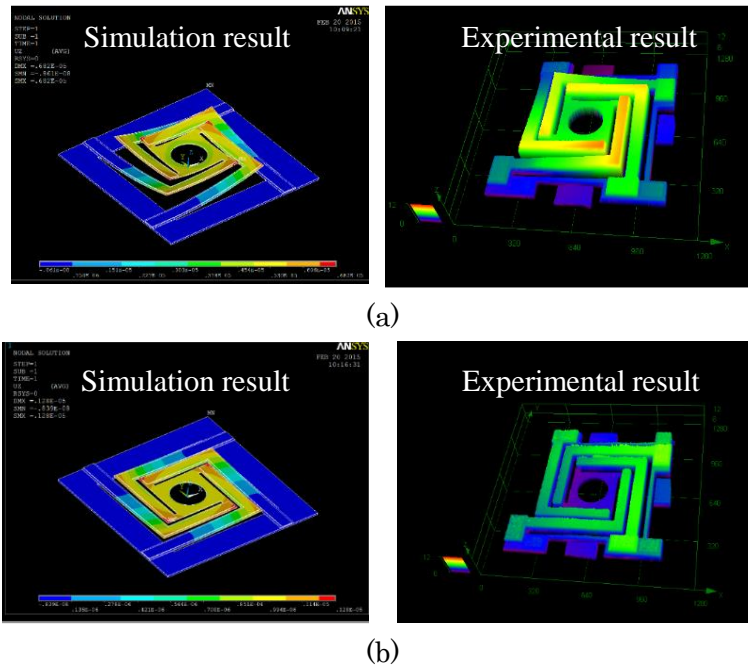


図 3.46 MEMS アクチュエータデバイスのシミュレーション結果, 実験結果
(a)wafer A(b)wafer B

次に MEMS アクチュエータデバイスの変形のシミュレーション結果と実験結果に関して述べる。まず図 3.45 に作製した MEMS アクチュエータの SEM 画像を示す。作製プロセスはカンチレバーデバイスの作製と同等のプロセスを用いて作製した。

図 3.46 にこの MEMS アクチュエータデバイスの変形シミュレーションの結果と実際に作製した MEMS アクチュエータデバイスの変形の測定結果を図示する。シミュレーション

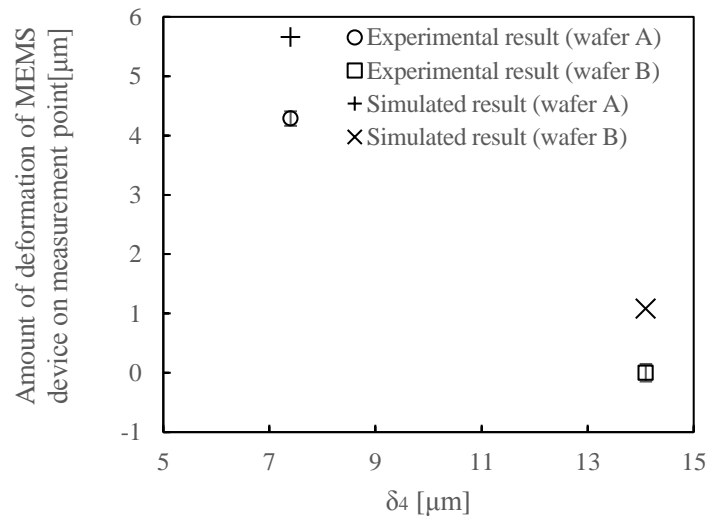


図 3.47 MEMS アクチュエータデバイスの変形シミュレーション結果, 実験結果

方法は 3.4.1 章で述べた方法で行った. 各層の温度条件はカンチレバーデバイスの温度条件 (表 3.6) を用いた. 図 3.46(a) は wafer A のシミュレーション結果, 実験結果, 図 3.46(b) は wafer B のシミュレーション結果, 実験結果である. 図よりシミュレーション結果においても実験結果においても, wafer B の方が, wafer A の変形の方が変形が大きいことがわかる. 測定点は図 3.47 の 4 点の測定を行い, wafer A, wafer B のシミュレーション結果, 実験結果である. それぞれ変形量に対して wafer A, wafer B のシミュレーション結果は 5.66[μm], 1.08[μm]であった. また実験結果では変形量の平均値は wafer A, wafer B それぞれ 4.29[μm], 0.01[μm]であった. 図 3.31 に測定点における変形量とウェハの変形量 δ_4 の関係のグラフを図示する. wafer A と wafer B のシミュレーション結果と実験結果の誤差はそれぞれ 1.4[μm], 1.1[μm]である.

このシミュレーション結果と実験結果の誤差に関して考察を行う. この誤差の原因としてシミュレーションで用いた各層の物性や厚さの値と, 実際の値との誤差が考えられる. 特にカンチレバーデバイスや MEMS アクチュエータデバイスの反りの変形においては薄膜の厚さは変形量に対して三乗で効くため, 厚さの誤差は非常に重要なパラメータとなる. また物性の一つであるヤング率も変形に大きな影響を与える. しかし実際にこれらの値を正確に測定することは困難であるため, これらの誤差が変形の誤差に繋がるのが考えられる.

また作製プロセス精度によるものが誤差原因として考えられる. 特に図 3.45 から L 字カンチレバーの根本部では, カンチレバーと Si 基盤の枠が若干繋がっている. このような微妙な作製プロセスによるエラーが実験値とシミュレーションの誤差の原因であると考えられる. しかしこの光スキャナーの測定点の上下方向の変位量は約 15[μm]になるよう設計してあるため, 可動範囲に対して誤差は十分小さいといえる. シミュレーションの結果から,

δ_4 は最適値は15.6[μm]であると決まった. waferB の δ_4 は, 14.1[μm]という最適値に近い値のとき, wafer B のデバイスの変形量は実験値で0.01[μm]であり, 非常に変形量の少ない結果が得られている.

我々が開発したシミュレーション手法を用いることにより変形のないMEMS デバイスの作製が可能であり, かつその変形がコントロール可能であることを示した.

3.4.3 MEMS レンズアクチュエータ評価と応用

次に作製したMEMS レンズアクチュエータの動作確認と光センサチップへの応用実験に関して述べる.

3.4.3.1 圧電定数の算出

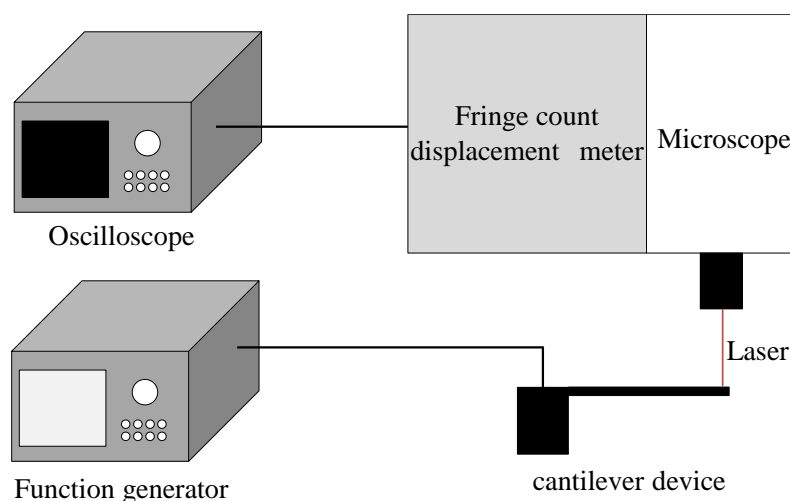


図 3.48 カンチレバーデバイスを用いた圧電定数算出の実験系模式図

まず本項では成膜した PZT 薄膜の圧電定数を求めるために, 作製したカンチレバーデバイスを用いた実験を行った. カンチレバーデバイスは wafer B を用いて作製したデバイスを用いた. 圧電定数とは圧電歪定数と呼ばれ, 応力 0 の状態で電圧を印可した時の歪の大きさを表し, 方向により d_{31} , d_{33} , d_{31} と呼ばれる. 今回は d_{31} の算出を行った. 実験にはフリンジカウンタ変位計(AT1100, グラフテック株式会社)を用いた. 実験系を図 3.48 に示す. ファンクションジェネレータから特定の周波数の交流電圧をカンチレバーデバイスに印可すると, その周波数でカンチレバーデバイスが振動する. その振動の変位をフリンジカウンタ変位計で測定し, その結果をオシロスコープで出力する. 駆動周波数を 1010.11[Hz]とし, 印可電圧は印可電圧幅を V_{pp} , オフセット電圧 V_{offset} の電圧である. ただし, V_{offset} は V_{pp} の半分の電圧とし, 常に正の電圧が印可する. また 1010.11[Hz]はカンチレバーデバイスの共振周波数

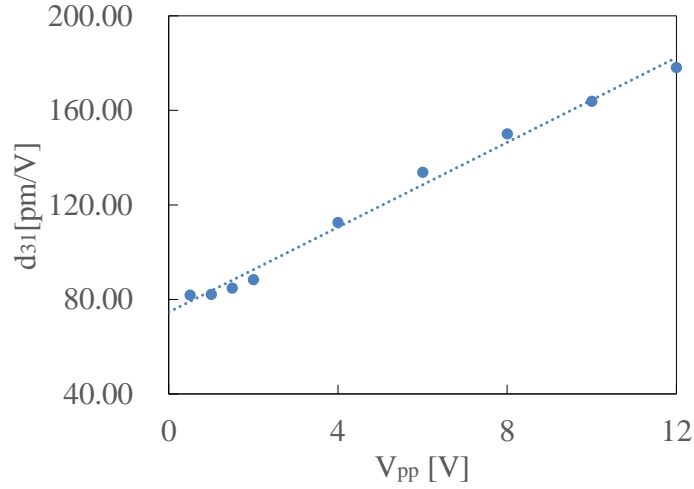


図 3.49 d_{31} 算出結果

とその定数倍にならないように調整を行った値である。実験の前に分極処理を行った。分極処理とは自発分極の向きを揃える処理で、圧電特性の向上のために一般的に行われる処理である。今回は 20 [V]の直流電圧を 2 分間印可という条件で処理した。圧電定数 d_{31} は以下の式を用いて算出を行った⁽⁶⁰⁾。

$$d_{31} = \frac{K\delta}{3L^2ABV} \quad (3.23)$$

$$K = (s_{11}^{Si})^2 (h_{PZT})^4 + 4s_{11}^{Si}s_{11}^{PZT}h_{Si}(h_{PZT})^3 + 6s_{11}^{Si}s_{11}^{PZT}(h_{Si})^2(h_{PZT})^2 + 4s_{11}^{Si}s_{11}^{PZT}h_{PZT}(h_{Si})^3 + (s_{11}^{PZT})^2(h_{Si})^4 \quad (3.24)$$

$$A = s_{11}^{Si}s_{11}^{PZT}(s_{11}^{PZT}h_{Si} + s_{11}^{Si}h_{PZT}) \quad (3.25)$$

$$B = \frac{h_{Si}(h_{Si} + h_{PZT})}{(s_{11}^{PZT}h_{Si} + s_{11}^{Si}h_{PZT})} \quad (3.26)$$

ここで δ はカンチレバーデバイスの先端の変位量を、 L はカンチレバーの長さ(1.1[mm])を、 V は駆動電圧(= V_{pp})を、 h_{Si} , h_{PZT} はそれぞれ Si (4.9[μm])と PZT(1.92[μm])の各膜厚を、 s_{11}^{Si} , s_{11}^{PZT} はそれぞれ Si(5.9×10^{-12} [GPa $^{-1}$])と PZT(1.43×10^{-11} [GPa $^{-1}$])の弾性コンプライアンスを表す。印可電圧と求めた圧電定数 d_{31} の計算結果をプロットしたグラフとその近似直線を図 3.49 に示す。図に示すように印可電圧により圧電定数 d_{31} が変化していることがわかる。これは電圧を印可したときに発生する PZT 結晶の歪の向きの割合が印可電圧に依存していることに起因すると考えられる。分極処理により、PZT 結晶の向きは揃えられているものの、

すべての結晶の向きが揃っているわけではない。このようなランダムな方向を向いている結晶は印可電圧により、歪を発生させるとともに、その歪の方向を変える。圧電素子の発生させる歪は結晶の向きの総和で決定するため、これらのランダムな方向を向いている結晶の動きにより、算出される圧電定数に違いが生じていると考えられる。

以上のように本作製で使用した PZT 薄膜の d_{31} の算出を行った。算出した圧電定数は後述する MEMS レンズアクチュエータデバイスの動作シミュレーションに用いる。

3.4.3.2 MEMS レンズアクチュエータ動作確認実験

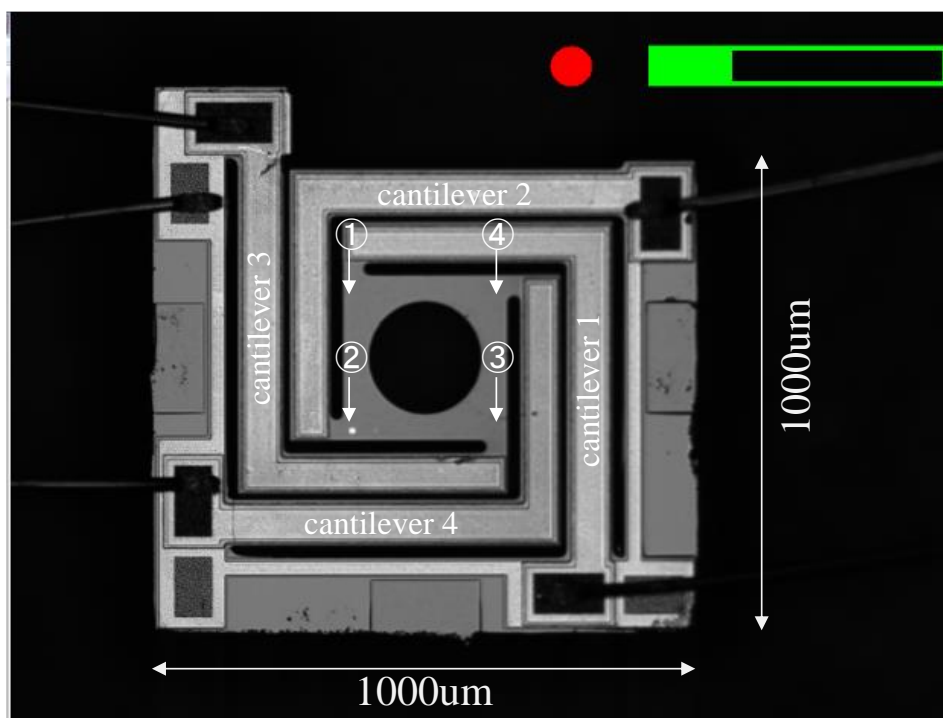


図 3.50 ワイヤーボンディング後の MEMS アクチュエータデバイス

次に MEMS レンズアクチュエータの動作実験とシミュレーションを行った、まず動作実験に関して述べる。MEMS レンズアクチュエータは 4 本の L 字型カンチレバーに電圧を印可することにより中央部にボンディングするレンズを駆動させる。図 3.50 にワイヤーボンディング後の MEMS レンズアクチュエータデバイスの写真を示す。MEMS レンズアクチュエータデバイスのサイズは $1[\text{mm}] \times 1[\text{mm}]$ となっている。L 字型カンチレバーをそれぞれ、cantilever 1, cantilever 2, cantilever 3, cantilever 4 とする。また測定位置①②③④を図 3.32 内に示す。測定点はその番号のカンチレバーがレンズボンディング部に接続されている接続点としている。動作確認のために、レーザードップラ振動計(PSN-500, Polytec)を使用した。

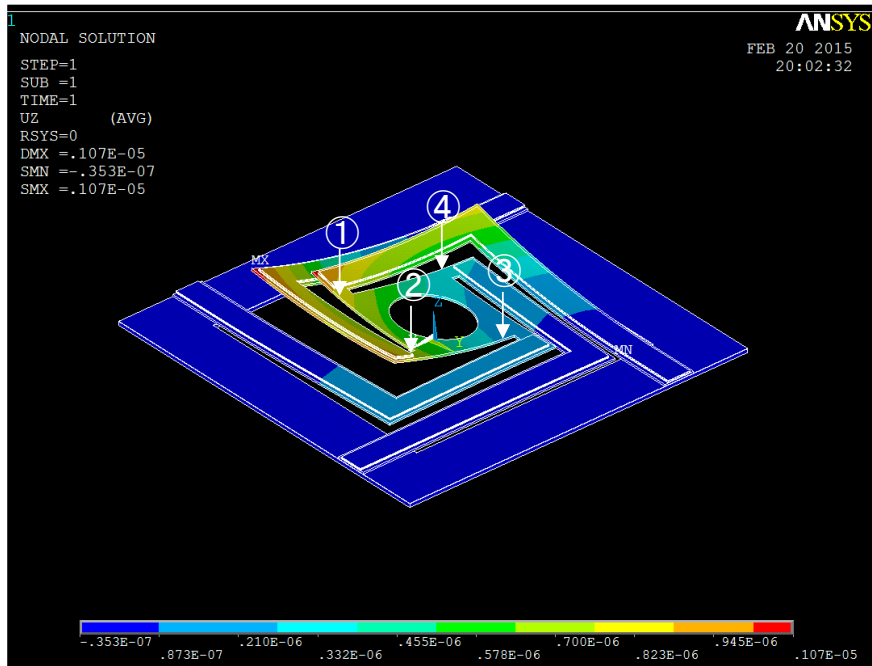


図 3.51 cantilever 1, cantilever 2 に $V_{pp}=10V$ 印可時の MEMS レンズアクチュエータ動作シミュレーション結果

本装置は測定対象の振動速度を測定する装置であり、測定時間で積分することにより測定部の変位を算出することができる。まず cantilever 1 と cantilever 2 に同じ電圧(V_{pp})を印可し、cantilever 3 と cantilever 4 には電圧を印可しないという条件で変位の測定を行った。印可電圧は交流電圧であり、振幅 V_{pp} 、オフセット電圧 V_{offset} とし、 V_{offset} は常に V_{pp} の半分の電圧になるように調整した。印可電圧周波数は 10[Hz]とし、 $V_{pp}=3[V]$ 、6[V]、10[V]それぞれのときの変位量の測定を行った。実験結果はシミュレーション結果とともに図 3.52 に示す。

次にシミュレーションに関して述べる。シミュレーションには ANSYS を用いた。シミュレーションのモデルは図 3.46 と同じモデルを用いた。上部 Pt/Ti に直流電圧 V_{pp} 、=3[V]、6[V]、10[V]下部 Pt/Ti に 0V を印可したときの図 3.46 の測定点に相当する位置の変位量をシミュレーション結果より求めた。シミュレーションの際 PZT の物性として d_{31} 、 d_{32} 、 d_{33} を入力する必要がある。 d_{31} は図 3.49 の結果を用いて算出した。PZT 薄膜が等方性を有していると仮定したとき、 $d_{31}=d_{32}=d_{33}/2$ と近似できるため、この近似を用いて d_{32} 、 d_{33} を算出した⁽⁶¹⁾。よって圧電定数 d_{31} と d_{33} はそれぞれ $V_{pp} = 3[V]$ のとき $d_{31} = -101.5[\text{pm/V}]$ 、 $V_{pp}=6V$ のとき $d_{31}=-128.5[\text{pm/V}]$ 、 $V_{pp} = 10[V]$ のとき $d_{31} = -164. [\text{pm/V}]$ とし、その値から算出された d_{32} 、 d_{33} を使用した。図 3.51 に $V_{pp}=10[V]$ の時の MEMS レンズアクチュエータの変形シミュレーション結果を示す。電圧を印可したカンチレバー(cantilever 1, cantilever 2)の接続されている箇所を持ち上がり電圧を印可していないカンチレバー(cantilever 3, cantilever 4)の接続されている箇所は変位が小さいことがわかる。測定箇所①②③④の変位量と印可電圧 V_{pp} の関係の実験結果とシミュレーション結果を図 3.52 に示す。この結果より各点の変位量の実験値とシ

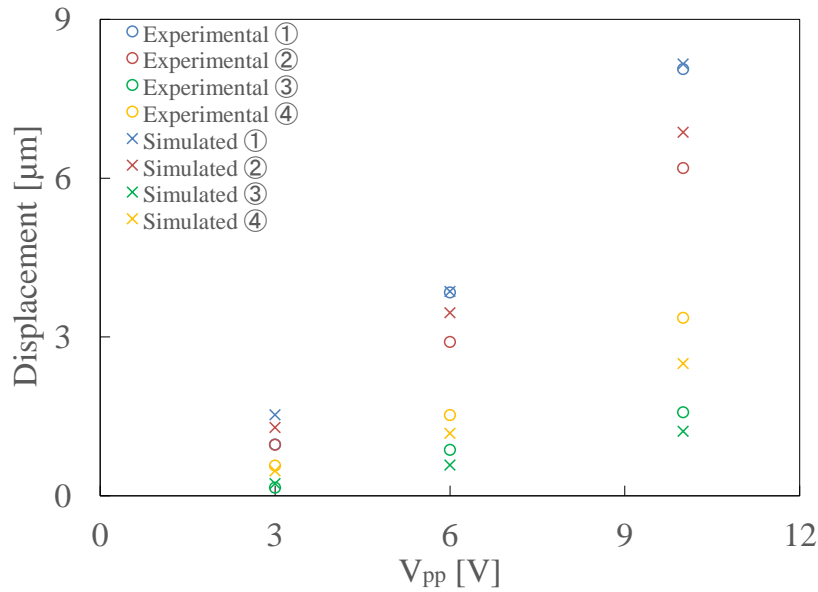


図 3.52 印可電圧の変化による測定点の変位量の
実験結果とシミュレーション結果

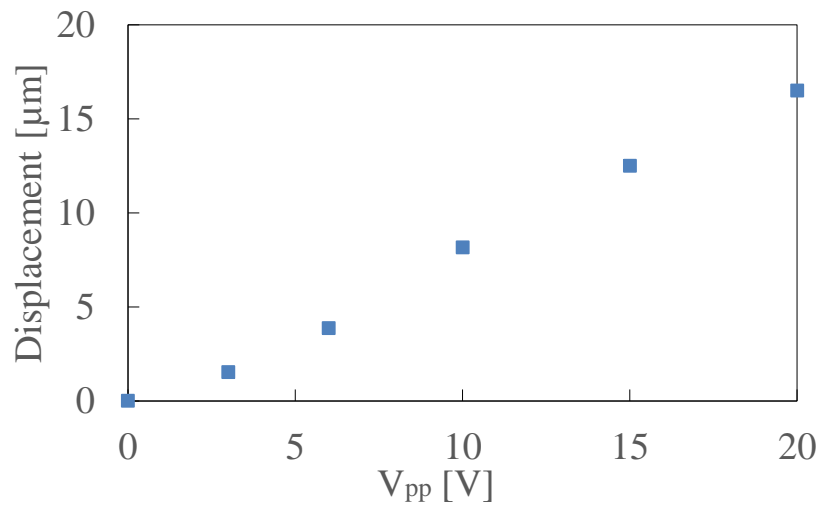


図 3.53 印可電圧の変化による測定点の変位量の
実験結果とシミュレーション結果

シミュレーション値がほぼ一致している結果が得られ、シミュレーションと実験の整合性が得られていることを示した。

次にすべてのカンチレバー(cantilever 1, cantilever 2, cantilever 3, cantilever 4)に同じ電圧 V_{pp} を印可した時の実験結果を図 3.53 に示す。 V_{pp} の最大値は 20[V]とし、測定部①②③④の変位量の平均値をプロットした。実験結果より印可電圧 V_{pp} の増加により変位量も増加し、 $V_{pp}=20$ [V]のとき、16.5[μm]の変位が得られる結果が得られた。せん断力センサに応用する際

はこのように全てのカンチレバーに同電圧を印可することで駆動する。

3.4.3.3 MEMS レンズアクチュエータ光学計算

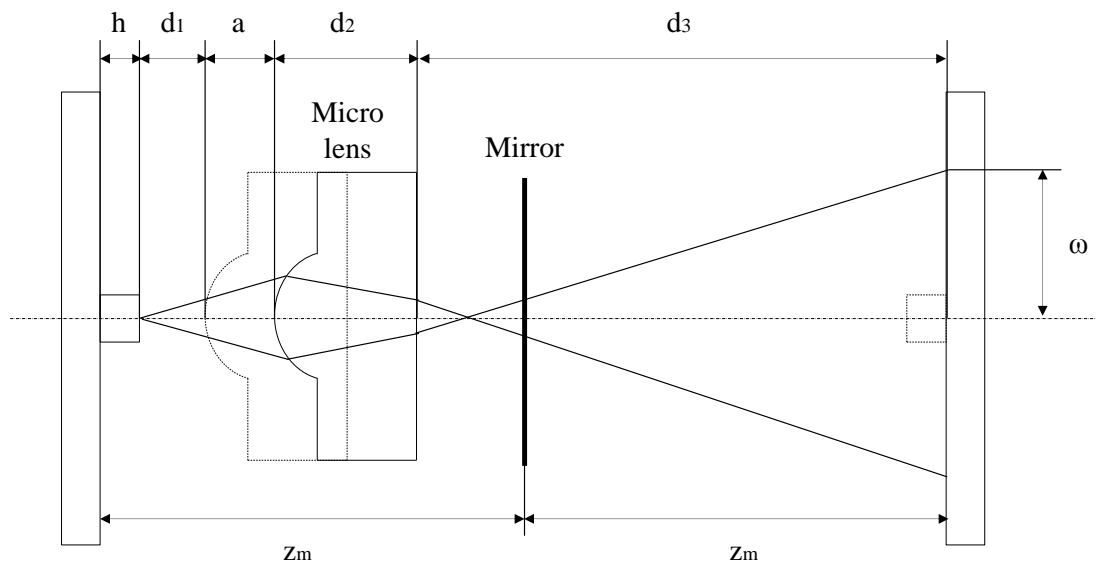


図 3.54 光線追跡計算モデル

次にレンズアクチュエータの光学計算に関して述べる。レンズを上下方向に動かしたときに、ビームスポット径がどのように変化するか計算を行った。図 3.54 に計算モデルを示す。計算には光線追跡を用いて、ある光線の軌跡を計算する。図 3.54 内の行列 A, B, C, D, E はそれぞれ、自由空間の通過(d_1)、球面界面の通過(空気→凸レンズ)、自由空間の通過(d_2)、平面界面の通過(ガラス→空気)、自由空間の通過(d_3)の光線行列であり、それぞれ以下の行列で表せられる。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & d_1 + a \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_2 - n_1}{n_2 R} & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

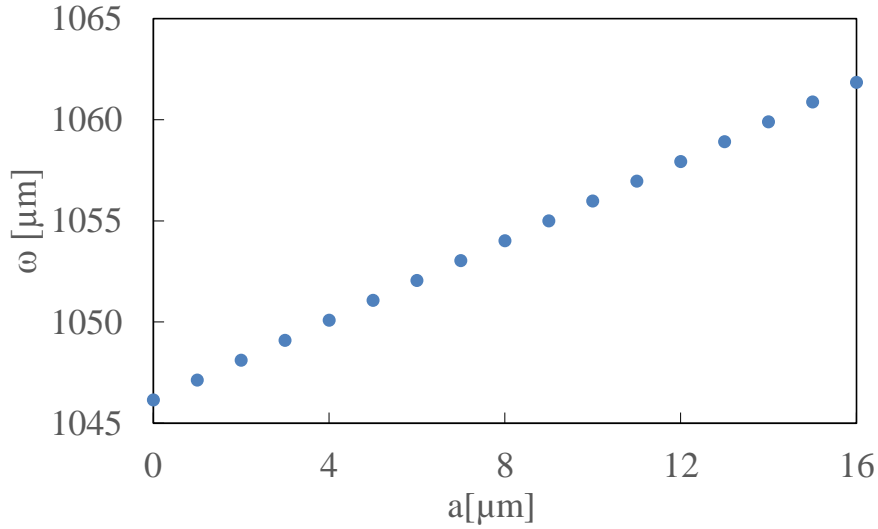


図 3.55 光線追跡計算結果

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{n_2}{n_1} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 2z_m - (h + d_1 + a + d_2) \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

a , n_1 , n_2 , R , h , ω はそれぞれレンズ移動量, 空気の屈折率(1.000[-]), 石英ガラス屈折率(1.439[-]), レンズ曲率半径(150[μm]), VCSEL 高さ(200[μm]), 光センサチップ上のスポット半径である. VCSEL 光の $1/e^2$ 角の光の光線追跡を行うと, 光センサチップ上の光線は光線行列 A, B, C, D, E を用いて以下の式で表せされる.

$$\begin{bmatrix} r_o \\ r_o' \end{bmatrix} = \text{EDCBA} \begin{bmatrix} 0 \\ \tan\left(\frac{\Theta}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

ただし Θ は VCSEL の $1/e^2$ 角の値(16.9[deg.])である. また r_o , r_o' は光学素子を通過後の中心軸からの距離, 光線の傾きを示す. 図 3.54 より r_o の値は ω に相当する. 図 3.55 に a を変数としたときの, ω の計算結果を示す. a は図 3.53 の実験結果より, 16[μm]まで変化させた. 計算結果より, a が大きくなるにつれて, 光センサチップ上のスポット径が直線的に大きくなっていることがわかる. この結果より, 理論的にレンズアクチュエータを用いて光センサチップ上のビームスポット径を変化できることを示した.

3.4.3.4 MEMS レンズアクチュエータのせん断力センサへの応用実験

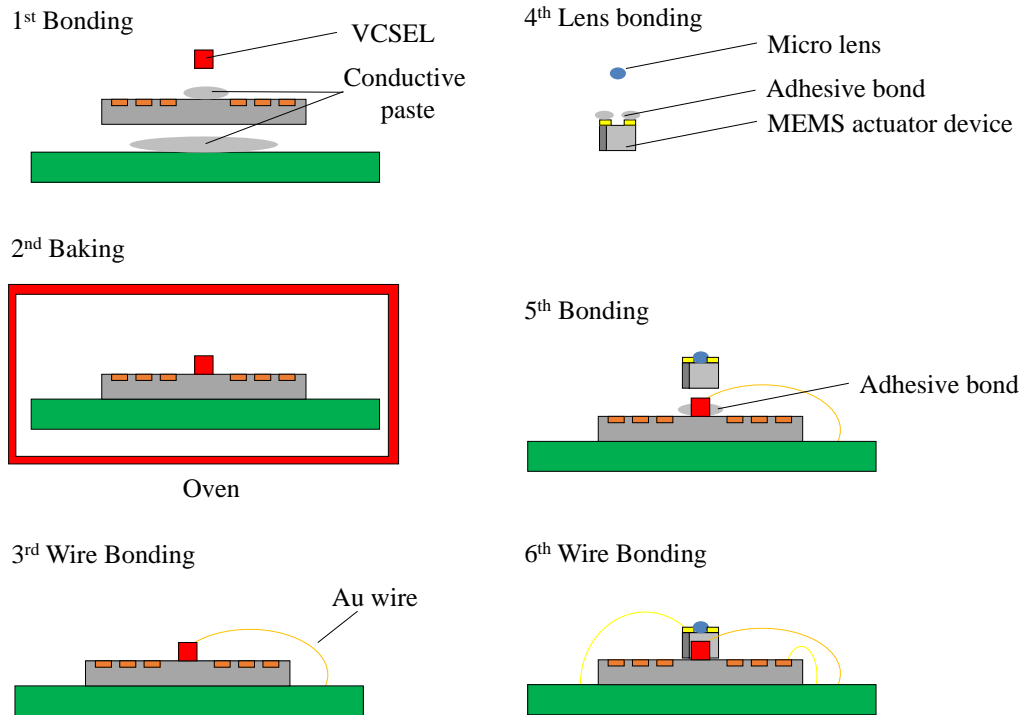


図 3.56 光センサチップと MEMS レンズアクチュエータデバイスアセンブリプロセス

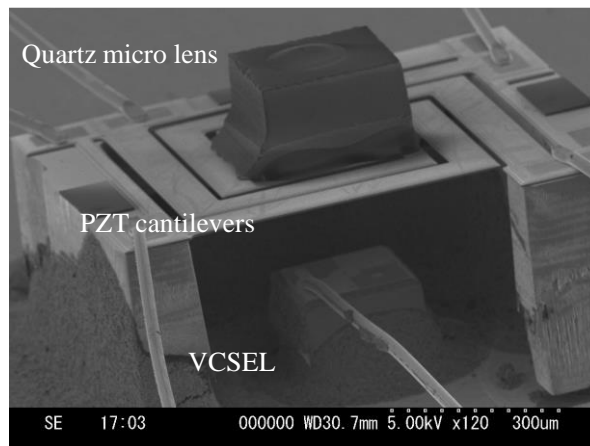


図 3.57 MEMS レンズアクチュエータデバイス SEM 画像

次に光センサチップと組み合わせて性能を可変化できるかの確認実験を行った。まず光センサチップと MEMS レンズアクチュエータのアセンブリプロセスを図 3.56 に示す。手順

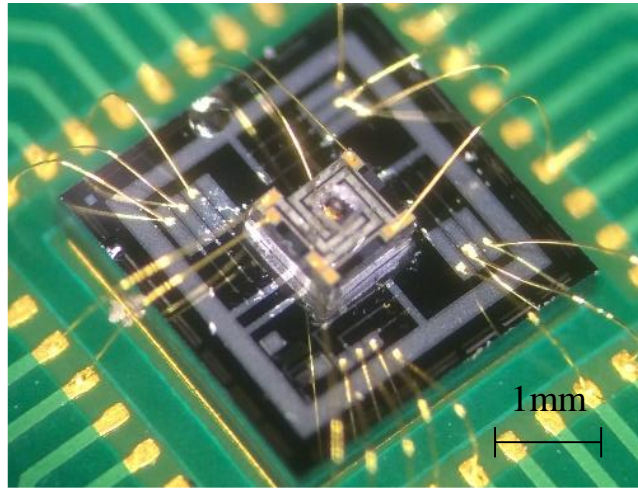


図 3.58 光センサチップと MEMS レンズアクチュエータアセンブリ後写真

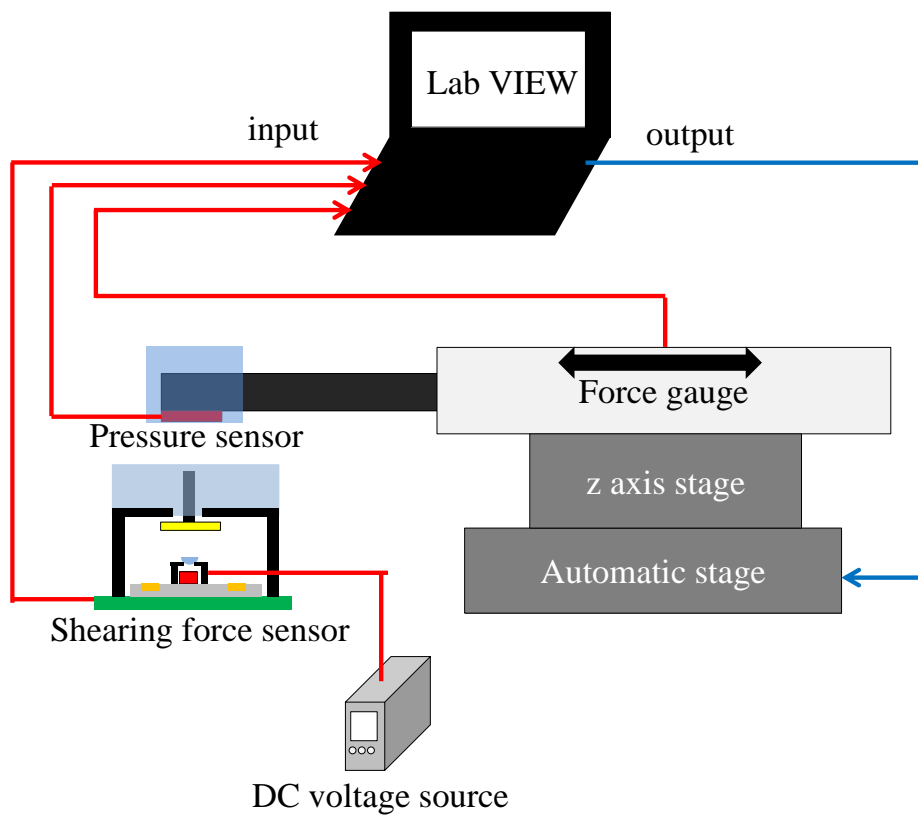


図 3.59 MEMS レンズアクチュエータ内蔵せん断力センサ実験系

4, 手順 5 で用いた接着剤は紫外線硬化型(MOS-Cure mini 365, U-VIX)であり, 光学素子接着用途のもので高透過性を有する. 図 3.57 に作製したデバイスの MEMS レンズアクチュエータ部の SEM 画像を示す. 本画像においては凸面レンズを用いており, 画像撮影のために凸

面部が表面にあるが、実際に使用したサンプルはレンズ部を裏になるようにボンディングを行った。これは VCSEL の照射光の広がり角を考慮し、レンズ部に確実に光が入射するようにしたためである。また図 3.58 にアセンブリ後の光センサチップの全体像を示す。光センサチップは温度センサ内蔵型光センサチップを用いた。

次に実験に関して述べる。光センサチップに前項で述べた弾性ゴムフレームをかぶせ、実験を行った。使用した弾性ゴムフレームは前項におけるフレーム 2 を使用した。実験系を図 3.59 に示す。図 3.12 とほぼ変わらないが、MEMS レンズアクチュエータ用の電源を追加した点、光センサチップの初段増幅器を光センサチップ用基板とは別に配置した点が相違点となる。実験系の構造、動作に関しては 3.3.2 にて述べたので割愛する。MEMS レンズアクチュエータの L 字型カンチレバー 1, 2, 3, 4 すべてに同電圧を印可し、それぞれの印可電圧において、せん断力を負荷したときの光センサチップの信号を取得した。電圧は 0, 4, 8, 12, 16, 20 [V] の直流電圧である。せん断力は x 軸方向に負荷し、その時の信号 S_{rotx} を取得した。

3.4.3.5 結果・考察

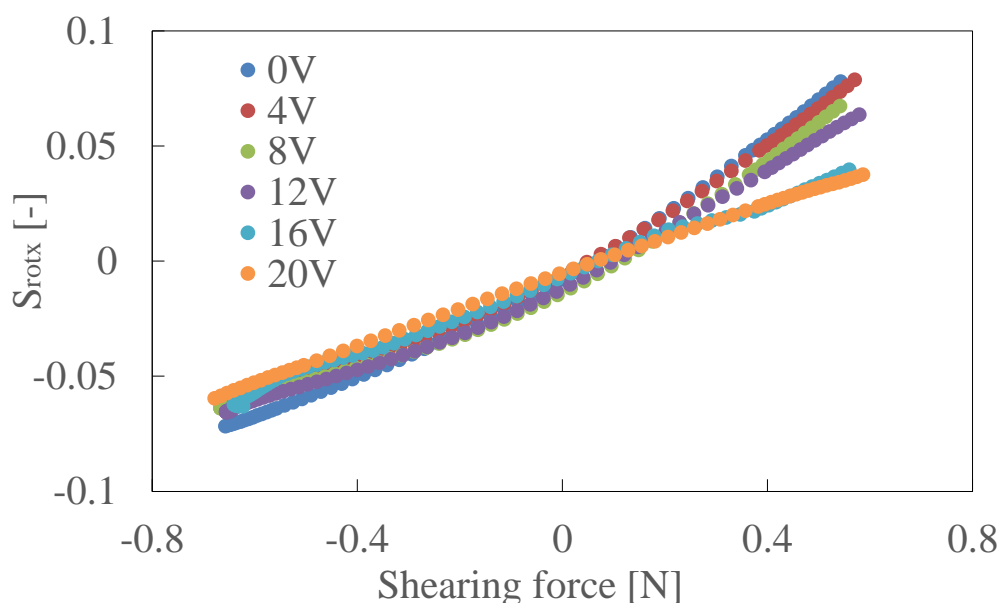


図 3.60 MEMS レンズアクチュエータのせん断力センサへの応用実験結果

実験結果を図 3.60 に示す。まず負荷したせん断力に対してそれぞれの電圧で信号が変化していることがわかる。また各信号から近似直線を算出し、その傾きと切片を算出した結果を図 3.61 に示す。傾きに関して、印可電圧の増加により、近似直線の傾きが小さくなる結果が得られた。

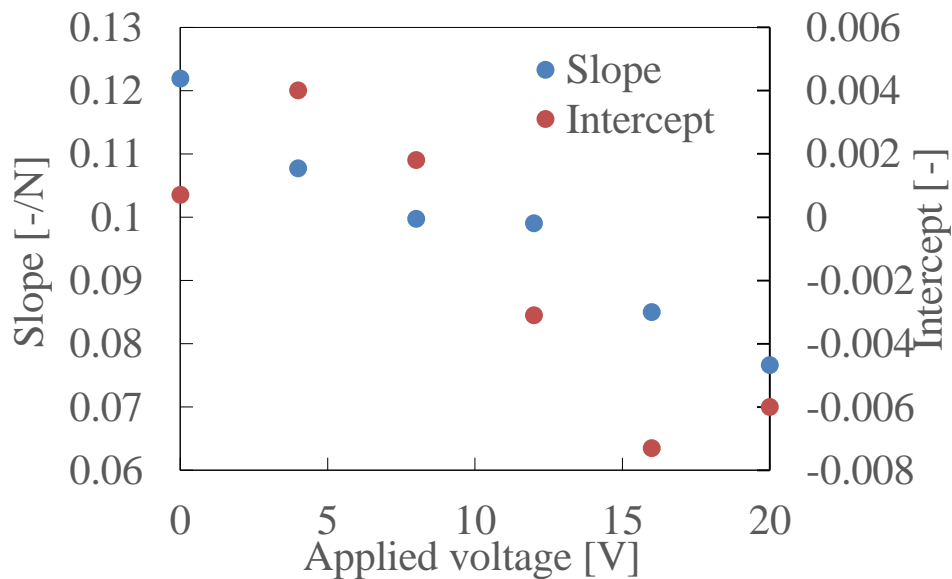


図 3.61 近似直線の傾きと切片

以上の結果に関して考察を行う。まず近似直線の傾きの変化に対して考察する。図 3.55 より、MEMS レンズアクチュエータにより、マイクロレンズを上方向に動かすと、光センサーチップ上のビームプロファイル径は大きくなる。ビームスポット径が大きくなると、ミラーの傾きにより発生するビームスポットの中心位置が移動したときの、PD の信号変化量は小さくなり、結果としてミラーの傾きに対しての信号(S_{rotx})の変化の傾きが小さくなる。印可電圧の増加によりマイクロレンズは上方向に動くため、信号の傾きが小さくなると予測したが、その結果と定性的に合致する実験結果が得られた。つぎに、切片に関して考察する。切片は上下方向にばらついているが、この結果はレンズの傾きにより発生していると考えられる。L 字型カンチレバー4 本にはすべて同じ電圧を印可しているが、同電圧を印可してもカンチレバーの変位量が作製精度などにより誤差が発生すると考えられる。その結果、マイクロレンズがレンズ面を水平に保ったまま上方向に動くのではなく、電圧により微小に傾きながら上方向に動き、その結果、近似直線の切片のばらつきが生じたのだと考えられる。しかし微小な切片の変化は各カンチレバーに印可する電圧をそれぞれ調整することで補正可能なため、補正することでこの問題は解決できると考えられる。

以上の結果より、MEMS アクチュエータデバイスに印可する電圧を調整することで、得られる信号を変えることが可能であることを示した。

3.5 結言

以上のように小型かつ二軸方向のせん断力を測定できる力覚センサの研究開発を行った。

特に弾性ゴムフレームを用いたせん断力センサはセンササイズが 6[mm]×6[mm]厚さ 8[mm]と非常に小型である。このセンサは測定範囲や分解能などの性能が弾性ゴムの物性に大きく依存しているため、弾性ゴムの材質を変えた弾性ゴムフレームを用いることでセンサの性能を可変化できる特徴を持つ。このように性能を可変化できる特徴は受力部である弾性ゴムフレームと検出部である光センサチップが物理的に分離されているという特徴により可能となる。特に生体用のロボットハンドを応用先として考えたとき、把持対象になる物体の範囲は広い。そのためこのようにセンサの性能を簡単に可変化できるセンサは非常に汎用性が高いと考えられる。

また開発したせん断力センサの高機能化を可能とする MEMS レンズアクチュエータデバイスの作製とその応用実験に関して述べた。マイクロレンズは DMD 露光装置という装置を用いることにより、レンズ形状を高精度にコントロールしながら多品種のマイクロレンズを一括に作製できることを示した。この結果により、高品質な石英マイクロレンズを自由に設計できる手法を示した。次に MEMS アクチュエータデバイスの作製を行った。薄膜の内部応力によって生じる MEMS デバイスの変形をシミュレーションし、設計にフィードバックすることにより、変形のない MEMS デバイスの設計方法を提案した。また実際に作製したところ、ほぼ変形のない MEMS アクチュエータデバイスの作製に成功し、この手法が有用であることを示した。最後に作製した MEMS レンズアクチュエータデバイスのせん断力センサへの応用の実験を行った。実験により、せん断力センサの信号を可変化できることを示した。

今回の報告では二軸のせん断力の測定が可能である点、弾性体フレームを取り換えることで性能を可変化できる点、MEMS レンズアクチュエータを用いてせん断力センサの性能を可変化できる点の報告を行った。将来的に実用化にむけて、応用先に合わせて可変化の範囲を最適化する必要がある。しかし第 2 章と本章で報告した、光センサチップ形状、弾性ゴムフレームの物性、レンズ形状、MEMS アクチュエータデバイスの性能など、それぞれのシミュレーション手法、作製手法を用いることで、応用先に合わせた幅広い設計・作製が可能であると考えられる。本センサはロボットハンドに内蔵する用途として研究開発を行ったが、先述したような、ベッドに内蔵し、褥瘡の防止に使用するなどの応用など、小型・高機能という特徴を活かした広い応用が考えられるため、非常に有用であると期待できる。

参考文献

- [30] <http://www.mayoclinic.com/health-information> (2013/04/03)
- [31] B. Sateesh, M. A. Michael, E. E. Adcock, "Two-axis direct fluid shear stress sensor", patent US7921731, 2011-04-12.
- [32] H. K. Lee, J. Chung, S. I. Chang and E. Yoon, "Normal and shear force measurement using a flexible polymer tactile sensor with embedded multiple apacitors", *J Microelectromech*, vol.17, no. 4 (2008) pp.934-942.
- [33] H. K. Lee, S. I. Chang and E. Yoon, "A Flexible Polymer Tactile Sensor: Fabrication and Modular Expandability for Large Area Deployment", *Jounal of Microelectromechanical Systems*, vol.15, no.16 (2006) pp.1681-1686.
- [34] H. K. Lee, C. Jaehoon, S. I. Chang and E. Yoon, "Normal and Shear Force Measurement Using a Flexible Polymer Tactile Sensor With Embedded Multiple Capacitors", *Jounal of Microelectromechanical Systems*, vol.17, no.4 (2008) pp.934-942.
- [35] L. Wang and D. J. Beebe, "A silicon-based shear force sensor: development and characterization ", *Sens. Actuators A, Phys.*, vol.84 (2000) pp.33-44.
- [36] K. Kim, K. R. Lee, Y. K. Kim and D. S. Lee, "3-axes flexible tactile sensor fabricated by Si micromachining and packaging technology" *Proc. of IEEE International MEMS Conference 2006*, (2006) pp. 678-681.
- [37] B. J. Kane, M. R. Cutkosky and G. T. A. Kovacs, "A traction stress sensor array for use in high-resolution robotic tactile imaging", *IEEE J. Microelectromech. Syst.*, vol.9, no.4 (2000) pp.425-434.
- [38] T. Mei, W. J. Li, Y. Ge, Y. Chen, L. Ni and M. H. Chan, "An integrated MEMS three-dimensional tactile sensor with large force range", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 80, no.2 (2000) pp.155-162.
- [39] J. Missinne, E. Bosmany, B. V. Hoe, G. V. Steenberge, P. V. Daeley and J. Vanfleteren, "Embedded Flexible Optical Shear Sensor", *IEEE Sensors Conference (2010)* pp.987-990.
- [40] M. Ohka, Y. Mituya, S. Takeuchi, H. Ishihara and O. Kamekawa "A three-axis optical tactile sensor (FEM contact analyses and sensing experiments using a large-sized tactile sensor)", *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (1995)* pp. 817-824.
- [41] A. H Dietzel, M. M. Koetse, H. F. M. Schoo and M. M. Koetse, "Optical sensor for measuring a force distribution", *European patent EP2195628A1*, 2010-10-07.
- [42] G. Palli, L. Moriello, U. Scarcia and C. Melchiorri, "Development of an optoelectronic 6-axis force/torque sensor forrobotic applications" *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 220 (2014) pp. 333-346.
- [43] T. Iwasaki, T. Takeshita, Y. Arinaga, K. Uemura, H. Ando, S. Takeuchi, M. Furue, E. Higurashi and R. Sawada, "Shearing force measurement device with a built-in integrated micro

- displacement sensor” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol.221 (2015) pp.1-8.
- [44] K. Totsu, K. Fujishiro, S. Tanaka and M. Esashi “Fabrication of three – dimensional micro structure using maskless gray-scale lithography” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol.130 (2006) pp.387-392
- [45] K. Zhong, Y. Gao, F. Li, Z. Zhang and N. Luo, “Fabrication of PDMS microlens array by digital maskless grayscale lithography and replica molding technique”, *Optik*, vol.125 (2014) pp.2413-2416.
- [46] K. Zhong, Y. Gao, F. Li, N. Luo and W. Zhang, “Fabrication of continuous relief micro-optical elements using real-time maskless lithography technique based on DMD”, *Optics & Laser technology*, vol.56 (2014) pp.367-371.
- [47] X. Y. Ding, Y. X. Ren, L. Gong, Z. X. Fang and R. D. Lu, “Microscopic lithography with pixelated diffraction of a digital micro-mirror device for micro-lens fabrication” *Applied Optics*, vol.53, no.24 (2014) pp.5307-5311.
- [48] T. Kobayashi, J. Tsuru and R. Maeda, “Fabrication of Optical Micro Scanner Driven by PZT Actuators”, *Japanese Journal of Applied Physics*, vol.44, no.9 (2005) pp.7078-7082.
- [49] K. H. Koha, T. Kobayashi, F. L. Hsiao and C. Lee, “Characterization of piezoelectric PZT beam actuators for driving 2D scanning micromirrors”, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol.162 (2010) pp.336-347
- [50] K. Petroza, E. Ollier, H. Grateaub and P. Mottiera “Integrated silica micro-opto-electromechanical steering device for laser beam scanning”, vol.73 (1999) pp.117-121.
- [51] J. M. Zara and S. W. Smith, “Optical scanner using a MEMS actuator”, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol.102 (2002) pp.176-184.
- [52] H. Miyajima, N. Asaoka, T. Isokawa, M. Ogata, Y. Aoki, M. Imai, O. Fujimori, M. Katashiro and K. Natsumoto, “A MEMS electromagnetic optical scanner for a commercial confocal laser scanning microscope”, vol. 12 (2003) pp.243-251
- [53] C. M. Sun, C. L. Wu, C. Wang, C. I. Chang, M. C. Yip and W. Fang, “Implementation of Complementary Metal–Oxide–Semiconductor Microelectromechanical Systems Lorentz Force Two Axis Angular Actuator”, *Japanese Journal of Applied Physics*, vol.51 (2012) 06FL09.
- [54] G. Stoney, “The tension of metallic films deposited by electrolysis” *Proceedings of the Royal Society of London. Series A Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, vol.82 (1909) pp.172-175.
- [55] C. H. Hsueh, “Modeling of elastic deformation of multilayers due to residual stresses and external bending”, *J. Appl. Phys.* vol.91 (2002) pp.9652-9656.
- [56] Y. Huang and A. J. Rosakis, “Extension of Stoney’s Formula to Arbitrary Temperature Distributions in Thin Film/Substrate Systems” *Jour. Appl. Mech.*, vol. 74 (2007) pp.1225-1233.
- [57] O. Juhachi and A. Shingo “Analysis of Stress and Deflection of Printed Plate Board Using Multilayered Beam Theory”, *Transactions of the JSME*, vol.59 (1933) pp.1777-1782.

- [58] T Kobayashi, J. Tsaur and R Maeda, "Fabrication of Optical Micro Scanner Driven by PZT Actuator", Jpn. J. Appl. Phys. vol.44, no.9 (2005) pp.7078-7082.
- [59] T. Kobayashi, S. Oyama, M. Takahashi and R. Maeda, "Microelectromechanical Systems-Based Electrostatic Field Sensors Using Pb(Zr, Ti)O₃ Thin Films", Jpn. J. Appl. Phys., no.9 (2005) pp.7533-7536.
- [60] J. G. Smits and W. S. Choi, "The constituent equations of piezoelectric heterogeneous bimorphs", IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, vol.3 (1991) pp.1275-1278.
- [60] 竹中慎, 高嶋一登, 堀江聡, 向井利春, 石田謙司, 上田裕清 "有機強誘電体触覚センサの圧電特性 - 基板拘束が圧電特性に及ぼす影響の数値解析 -" 第29回日本ロボット学会学術講演会 (2011) RSJ2011AC3L2-4

4. マイクロエンコーダチップとナノインプリント回転回折格子スケール

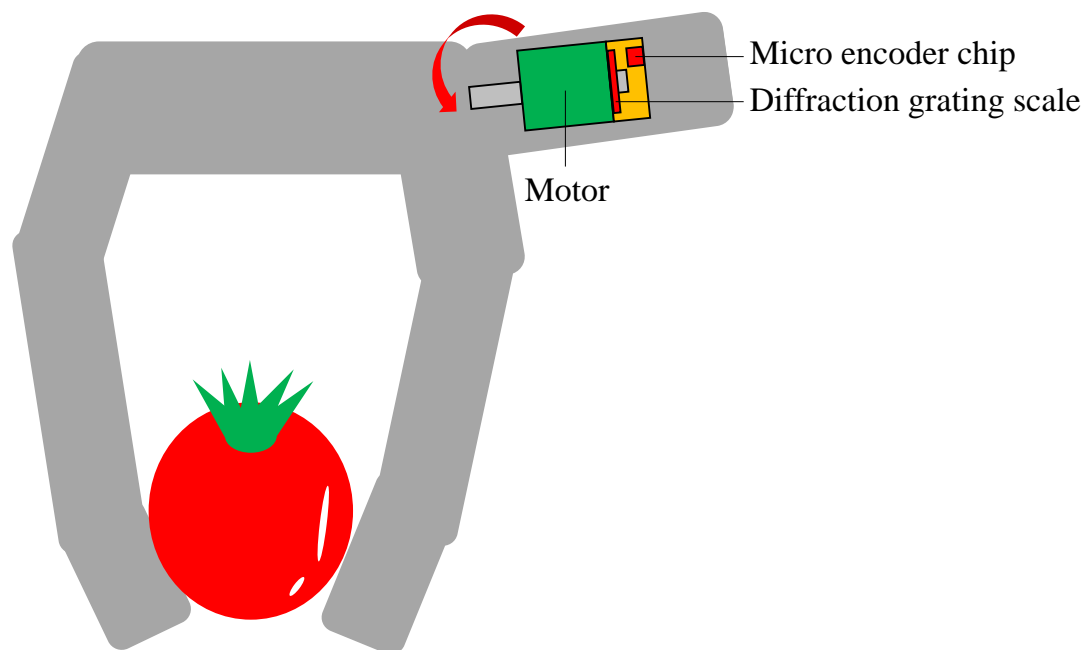


図 4.1 マイクロエンコーダを内蔵したロボットハンドイメージ

本章では我々が研究開発したマイクロエンコーダに関して述べる。本章で記すセンサをロボットハンドに内蔵したときのイメージ図を図 4.1 に示す。まず研究背景について述べ、その後我々が研究開発を行っているマイクロエンコーダについて述べる。特に本研究においてはロータリーエンコーダの部品である回転回折格子に重点を置き報告を行う。その後作製したセンサを用いた実験を行い、その結果に関して考察を行う。最後に本章のまとめと今後について述べ本章を締めくくる。

4.1 研究背景

エンコーダとは測定対象の移動距離を測定するセンサとして広く使用されている。特にロータリーエンコーダという形でモーター内に組み込まれ、モーターの回転量、回転速度などを精密に測定するセンサとして使用される。ロボットの駆動装置としてステッピングモーター、サーボモーター、超音波モーターなど、様々なモーターが広く使用されているが⁽⁶²⁾、ロボットの小型化、高機能化に伴い、モーターは勿論、モーターを精度よくコントロー

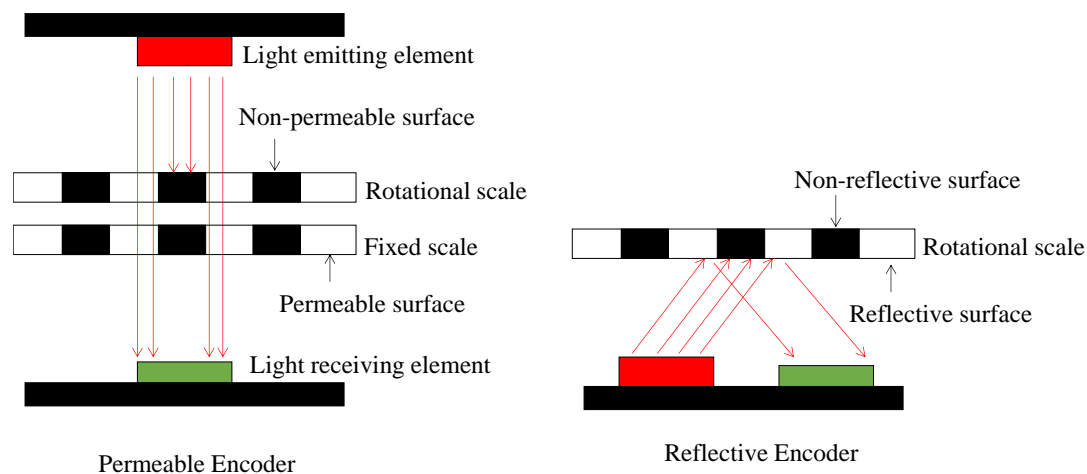


図 4.2 光透過式と光反射式のロータリーエンコーダ

ルするためのロータリーエンコーダの小型化が求められている。そこで我々はロボットハンド内のような小さなスペースに内蔵可能なロータリーエンコーダの研究開発を行った。

エンコーダは大きく分けて磁気式、光学式に分けられる。磁気式は比較的安価、低消費電力という長所を有するが、光学式と比較して信号精度が劣る短所がある。また光学式は信号精度や耐環境性は高いが、大型・高価になるという欠点を持つ。ただ昨今の技術進歩により高品質のレーザーや光学素子の低価格化が進み、また磁気式はレアメタルを使用するため、今後の価格変動が不透明ということもあり、光学式エンコーダがより広く使用されている⁽⁶³⁻⁶⁵⁾。一般的な光透過式と光反射式のロータリーエンコーダの模式図を図 4.2 に示す。透過式では回転するスリット板と固定スリットがあり、それら二枚のスリットを挟んで前後に発光素子と受光素子が配置されている構造となっている。対して反射式の場合、回転スリットの片面に発光素子と受光素子が配置されている構造となっている。ロボットに多数内蔵するというのを考えたとき、センササイズはより小型であることが望まれる。このように考えたとき、構造的に小型化しやすい反射型エンコーダが有利である。

我々は MEMS 技術を用いたマイクロエンコーダチップの研究開発を行った⁽⁶⁶⁻⁶⁸⁾。光学式エンコーダの場合、様々な発光素子、受光素子、レンズ、スケールなど多数の光学素子を配置しなければならず、構造が煩雑になりやすいというデメリットを有する。実際に MEMS 技術を用いたマイクロエンコーダにおいても部分的に MEMS 化し小型化に成功しているが、光源や受光素子を別に設けており、すべてがワンチップ化されているわけではない^(69, 70)。そこで我々は MEMS 技術にパッケージング技術を応用することにより、様々な光学素子、電気素子をワンチップ(2.8[mm]×2.8[mm] 厚さ 1[mm])に集積化し、劇的な小型サイズのエンコーダチップの開発を行った。この技術により、小型化のみならず、エンコーダチップの信頼性向上や大量生産を容易にするなど様々なメリットが得られる⁽⁷¹⁾。

またロータリーエンコーダの構成要素である回転回折格子スケールは、エンコーダ自体のサイズや性能を決定する非常に重要な部品であり、いかに高精度で安価に作製できるか

が重要となる。そこで我々はナノインプリント技術を用いて回転回折格子の作製を行った。ナノインプリント技術とはマイクロ、ナノサイズのパターンが形成された型となるモールドに樹脂を押し付け、そのパターンを樹脂に転写する技術であり、Chou らによって 1995 年提案された^(72, 73)。従来、微細な回折格子は機械加工や露光とドライエッチングなどを用いて作製されていたが、ナノインプリント技術を用いることで低コストでパターンが形成でき、またプロセスの工程も少ないため簡易な装置で容易に製造が可能となる。ただし、回転回折格子の場合、回折格子だけでなく、モーターなどの回転軸に接続するような貫通穴の作製が必要となるが、貫通穴と回転回折格子の軸精度が悪いと、モーター回転時回折格子の軸ぶれが発生し、測定精度の悪化の原因となる。しかし微細なパターンを樹脂に転写した後、職人によって精密な位置合わせを行い機械加工で貫通穴を形成するという従来方法をとると、生産性の低下、コストの増大の原因となり、ナノインプリント技術のメリットが打ち消されてしまう⁽⁷⁴⁾。そこで我々はナノインプリントと機械加工の工程を同時に行うことができる新規的な加工方法を提案した。

4.2 マイクロエンコーダチップ

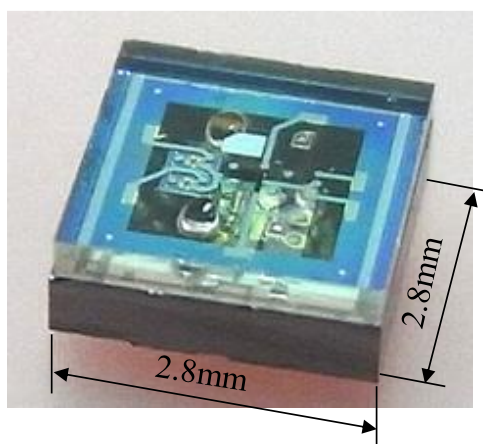


図 4.3 マイクロエンコーダチップ

図 4.3 に作製したマイクロエンコーダチップを示す。センサのサイズは 2.8[mm]×2.8[mm] となっている。大きく分けて Si 基盤とガラス基板に分かれており、2 枚の基板に光学素子を配置した後、基板を張り合わせ、その後ダイシングを行う、ウェハレベルパッケージングという技術を用いている。この技術を用いることでチップごとでの複雑なアライメントの必要がなくなり、生産性を向上させることが可能となる。

4.2.1 マイクロエンコーダチップ構造

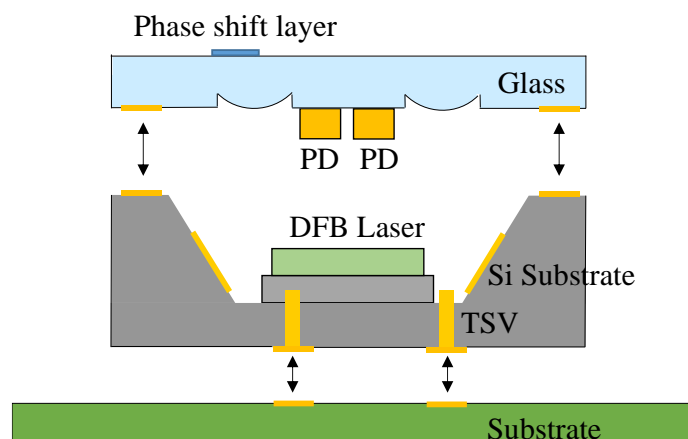


図 4.4 マイクロエンコーダチップ構造模式図

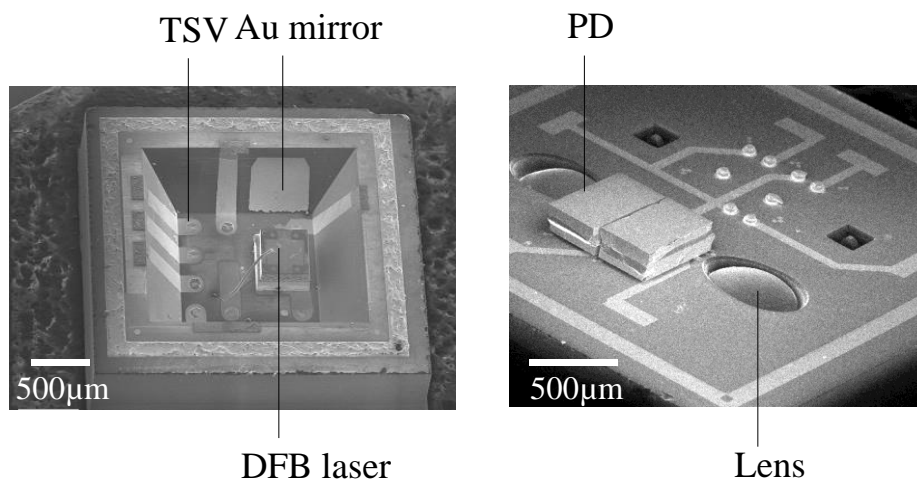


図 4.5 マイクロエンコーダチップ SEM 画像

我々が開発したマイクロエンコーダチップの構造に関して述べる．図 4.4 にマイクロエンコーダチップの断面図の模式図を示す．まず Si 基板側の構造に関して，Si 基板にウェットエッチングでキャビティ構造を作る．そのキャビティの底面に DFB レーザーがボンディングされている．さらに底面には TSV(Through Silicon Via)が形成されており，Si チップの裏面に電極が形成されている．このようにすることで電極をチップ外に出すことができ，またチップ内の封止が可能となる．また Si チップのキャビティの斜面には反射膜，導電用として Au 膜が形成されている．次にガラス基板に関して述べる．ガラス基板にはドライエッチングで非球面レンズが形成されている．非球面レンズは 2 つあるが，片方の非球面レンズの裏面には光の波長を 1/4 波長分ずらす位相シフト膜を配置している．またガラス基板の中心には

複数個の PD(Photo Diode)が配置されている。この PD が受光素子となる。Si 基板の表面とガラス基板の表面に電極があり、ウェハレベルパッケージングの際、それぞれの電極が導通するようになる。PD の出力はガラス表面→ガラス表面電極→Si 表面電極→キャビティ斜面→キャビティ底面→TSV→外部と導通し、外部に取り出される。このように複雑な構造を MEMS 技術、ウェハレベルパッケージング技術、TSV 技術などを用いてワンチップ化することにより非常に小さなセンサチップの作製に成功した。図 4.5 にマイクロエンコーダチップの内部構造とガラス基板の SEM 画像を示す。

4.2.2 マイクロエンコーダ測定原理

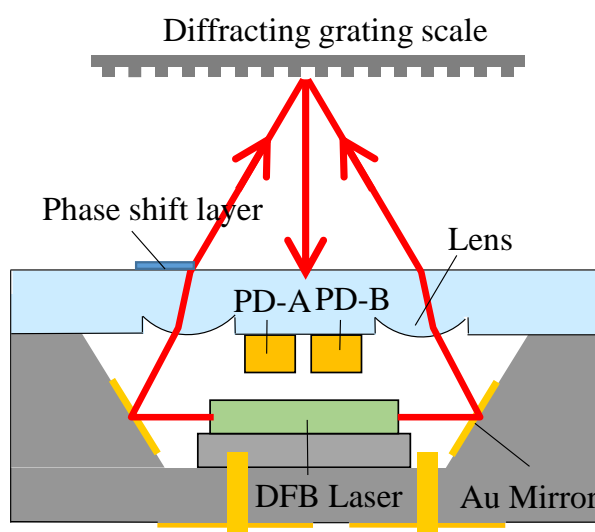


図 4.6 マイクロエンコーダチップ測定イメージ

次にマイクロエンコーダチップの測定原理に関して述べる。図 4.6 に測定時のマイクロエンコーダチップの断面図を示す。まず DFB レーザーからレーザー光がキャビティの方向に照射される。キャビティに形成した反射膜で反射したレーザー光はガラス基板に形成したレンズで集光されたのち、回転スケールに入射する。この時片方の光路の光のみ 1/4 波長位相シフト膜を通過するため、左右での位相が 1/4 波長分ずれる。この 2 つの光が回転スケールに照射する。回転スケールは回折格子となっており、回折現象が生じる。光が回折した際の強め合いの角度は以下の式であらわされる。

$$\sin\theta = \frac{m\lambda}{d} \quad (4.1)$$

d は回折格子のピッチ、 λ は光の波長である。 $m=0$ の時の強め合いの光を 0 次回折光、 $m=1$ の

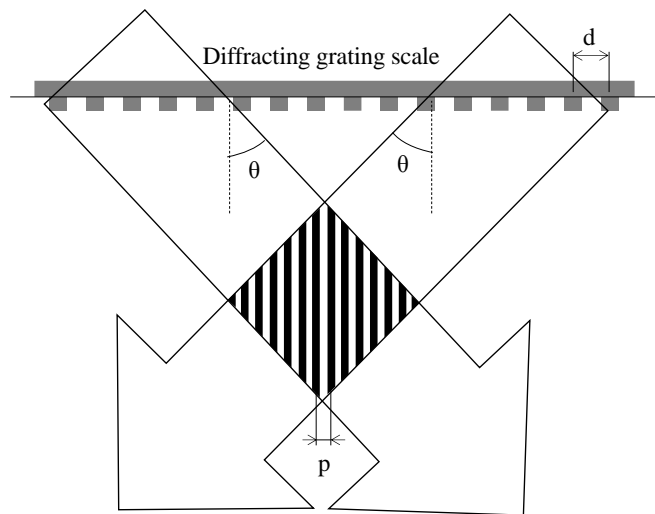


図 4.7 回折光干渉イメージ

時の強め合いの光を 1 次回折光と呼ぶ. 図 4.7 に回折光の干渉の模式図を示す. 回折光の干渉のピッチ p とすると, p は波長 λ と回折角 θ を用いて以下の式で表せられる.

$$p = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (4.2)$$

式(4.1), 式(4.2)から回折格子のピッチ d と m 次回折光の干渉の強め合いのピッチ p は以下の式で表される

$$p = \frac{d}{2m} \quad (m = 0, 1, 2, 3 \dots) \quad (4.3)$$

作製したマイクロエンコーダでは, 1 次回折光が PD に入射するように PD や回折格子を設計している. 回転スケールが移動すると, 強め合い, 弱め合いの位置が移動するため, PD 上での光強度が変化し, その変化に応じて PD の出力も強弱を繰り返す. 式(4.3)より回折格子 1 ピッチの動きに対して 2 ピッチ分の出力信号が得られる. この信号の変化から, 回転スケールの移動量を測定する原理となっている. また位相シフト膜を通過しない光路の光と, 通過する光路の光の 1 次回折光が入射する PD をそれぞれ PD-A, PD-B として, 2 相の出力を得る. これは回転スケールの移動方向を検知するためである.

4.3 ナノインプリント技術

ナノインプリント技術の転写プロセスは大きく分けて熱式ナノインプリント, UV 式ナノ

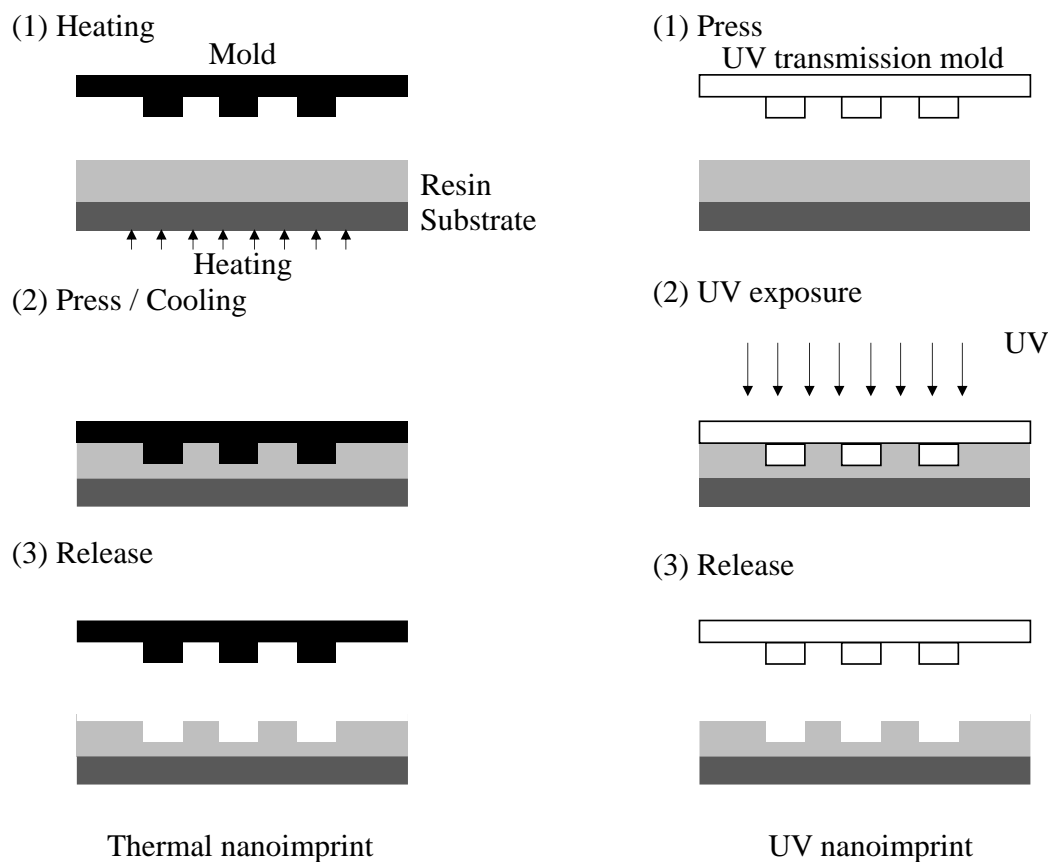


図 4.8 熱式ナノインプリントと UV 式ナノインプリント

インプリントに分類される。図 4.8 に基本的な熱式ナノインプリント, UV 式ナノインプリントのプロセスフローを示す。熱式ナノインプリントは熱可塑性樹脂をガラス転移温度まで昇温しその樹脂にモールドを押し付けパターンの転写を行う。その後樹脂をガラス転移温度以下まで冷却し樹脂を硬化させる。その後、モールドを基盤から引き離す。熱式ナノインプリントは UV 式と比較し安価で、材料自由度が高いなどの利点がある。UV 式ナノインプリントは基板上に液体の光硬化性樹脂を塗布し、樹脂に透明モールドを押し当てパターンを転写する。その後、モールドの背面から紫外線を照射することで光硬化性樹脂を硬化し、モールドを基板から引き離す。熱式と比較して転写精度が高く、加熱冷却工程がないためハイスループットである。しかし、熱式ナノインプリントと比較して樹脂が高価になる点、また装置が複雑、高価になるというデメリットがある。今回我々が作製する回転回折格子スケールはパターンピッチが 3.2[μm]と比較的大きなパターンであるため、熱式ナノインプリントの転写精度で十分であり、またマイクロエンコーダという応用先を考慮すると安価に作製できる製造方法のほうが望ましい。以上より回折格子の作製に熱式ナノインプリント技術を採用した。

4.3.1 回轉回折格子スケール

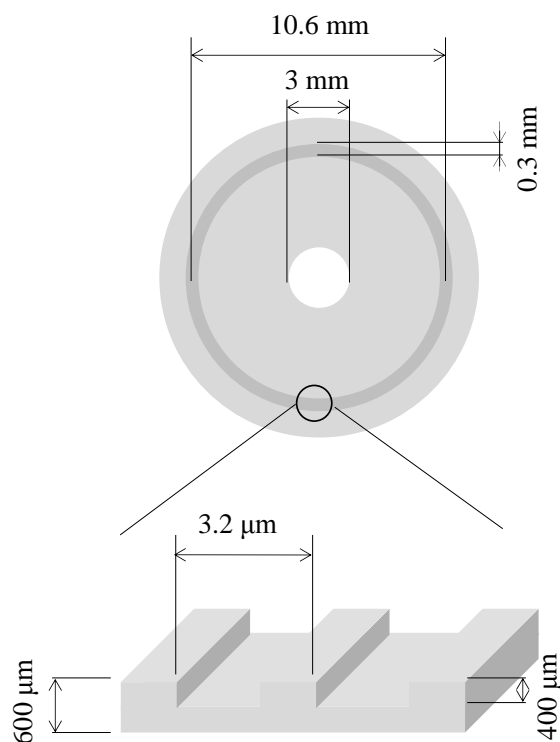


図 4.9 回轉回折格子寸法

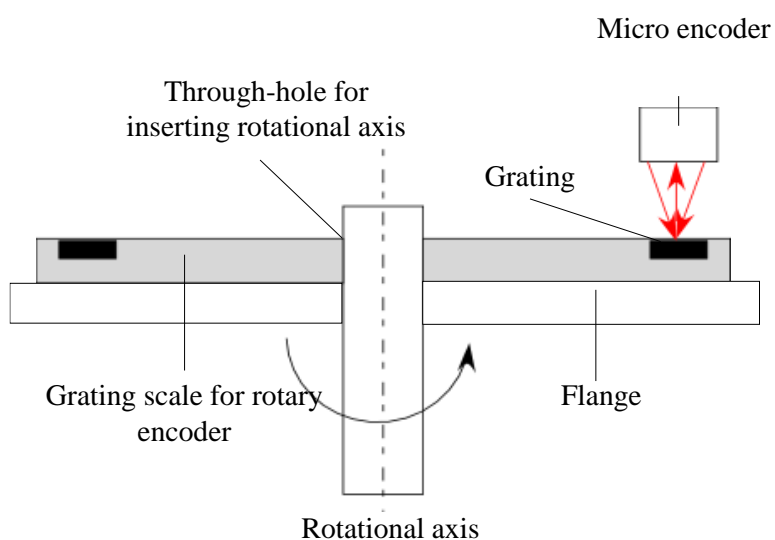


図 4.10 ロータリーエンコーダと回轉回折格子模式図

まず作製する回轉回折格子の寸法を図 4.9 に示す. スケールの形状は円形であり, 厚さ 0.6[mm]である. 材料は PMMA(Polymethyl methacrylate)という樹脂材料を用いた. スケール

の中心に直径 3[mm]の回転軸挿入用の貫通穴があり、その中心から半径 5.3[mm]の位置に回折格子パターンが 10125 ピッチ分形成されている。回折格子のピッチは 3.2[μm]、回折格子高さは 0.4[mm]、幅は 0.3[mm]となっている。図 4.10 に使用時の模式図を示す。回折格子パターンに対面するようにマイクロエンコーダチップを配置する。また回折格子は回転軸に挿入され、回転軸とともに回転する。この時問題になるのが、マイクロエンコーダチップと回折格子パターンの表面の距離、また回折格子位置のずれである。つまり回転スケールが回転した際の面ブレと偏心である。我々が研究開発したマイクロエンコーダの場合、面ブレ、偏心の許容範囲は 10[μm]、3[μm]となっているため、この許容範囲におさまるよう、回転スケールを作製しなければならない。

4.3.2 作製方法

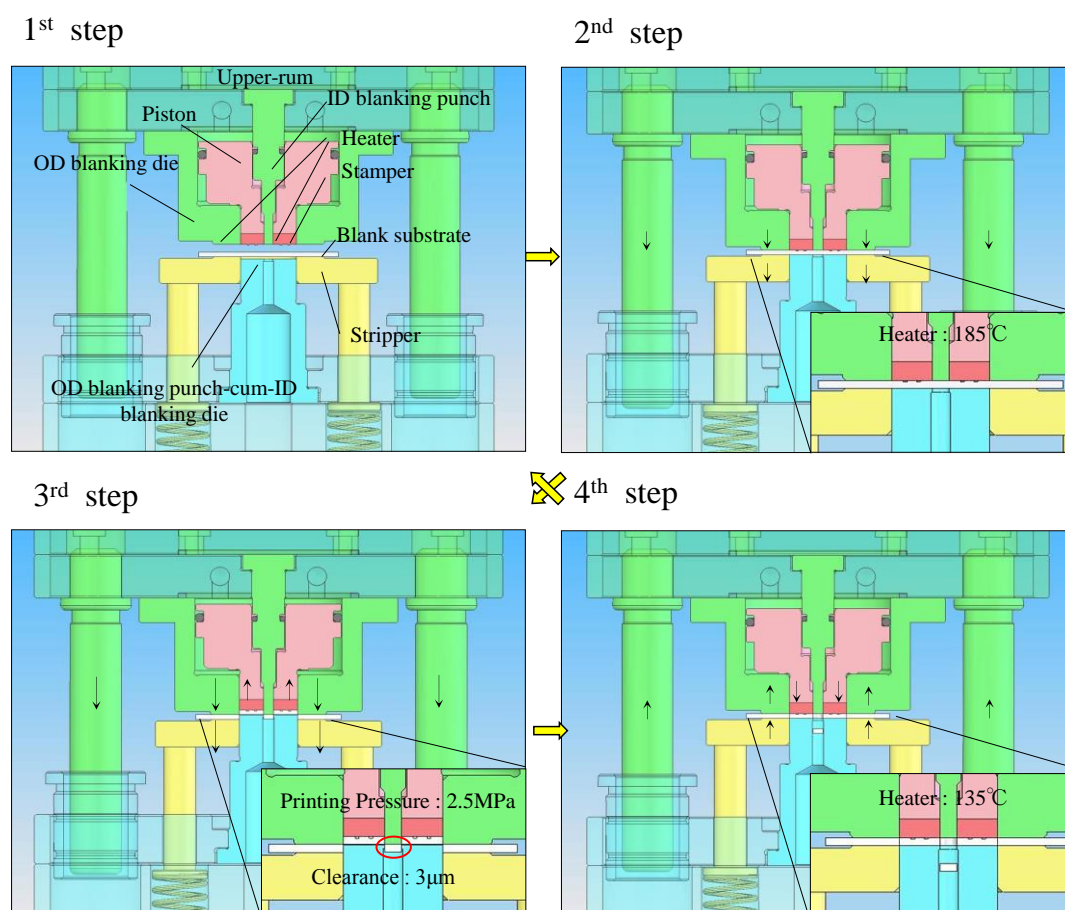


図 4.11 回転回折格子作製プロセス

次に回転回折格子の作製方法について述べる。図 4.11 に作製方法プロセスを示す。大きく分けて 4 つのプロセスで作製を行う。

① 準備

最初にプレス成型状態にして、まず金型を樹脂のガラス転移温度付近に昇温し、ピストンの背面には低圧エアをはる。そこへブランク基板を差し込む。

② 昇温工程

プレスを降下させ、上型がブランク基板と接してストリッパのバネ力がかかる位置で中間保持する。この保持時間を調節してブランク基板に熱を伝え、打抜きに最適な温度まで昇温する。

③ プレス工程

プレスをさらに降下させ下死点にもっていくと上型は降下し、ストリッパは基板を介して押し下げられ、ピストンは基板を介して押し上げられるので図 4.11 のように成形基板の内・外径が同時にカットされる。この状態のまま、ピストン背面の圧力を高圧エアに切り替え保持する。この保持時間とエア圧で樹脂へのパターン転写を行う。パターン転写はエア圧 2.5[MPa]、保持時間 180[sec]で行う。パターン中心と貫通穴中心は高精度に位置合わせされているが、内径抜きパンチとスタンパー内径には、3[μm]のクリアランスがあるため、最大で 3[μm]の中心ずれが発生する可能性がある。その後、基板周辺部品を冷やす冷却工程に入る。

④ 取り出し

プレスの上昇を開始する。するとブランク基板は、ストリッパのバネ力で押し上げられ、成形基板はピストン力で押し下げられるため、一旦打ち抜かれた成形基板が再度ブランク基板の中に押し込まれ一体となる。さらにプレスを①の型開状態まで上昇させ、ブランク基板をピンセットで取り出す。

このようにステップ③においてパターンニング工程と機械加工工程を同時に行うことにより、生産性の向上と高精度な軸中心の位置合わせを実現した。

4.3.3 形状評価

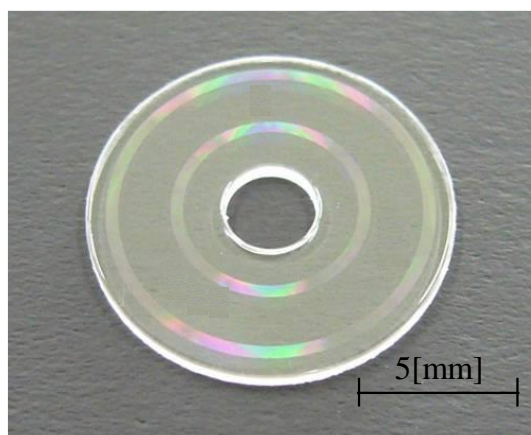


図 4.12 ナノインプリント回転回折格子スケール

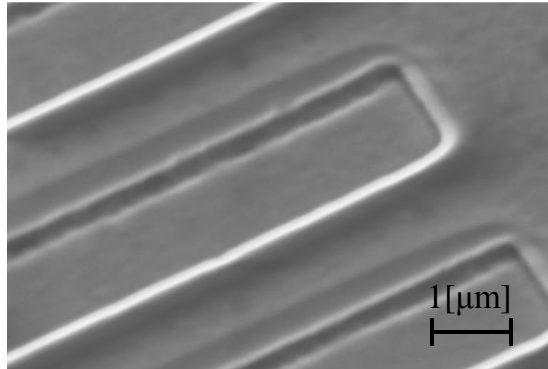


図 4.13 回転回折格子スケール回折格子パターン部 SEM 画像

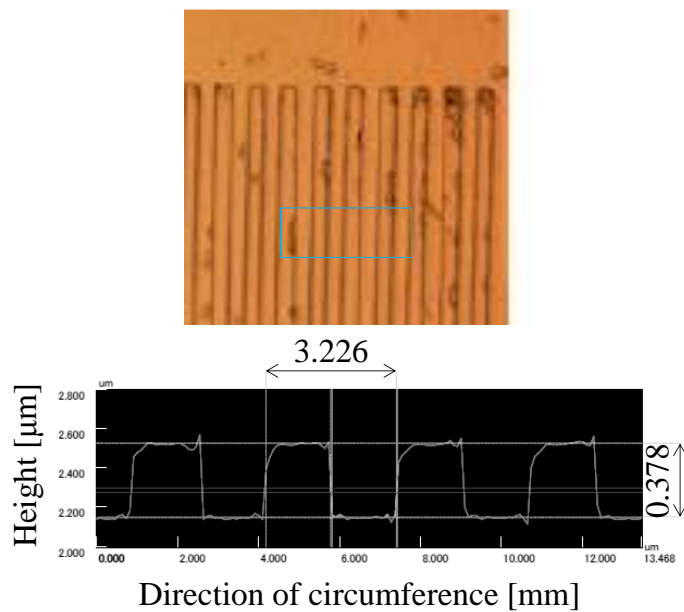
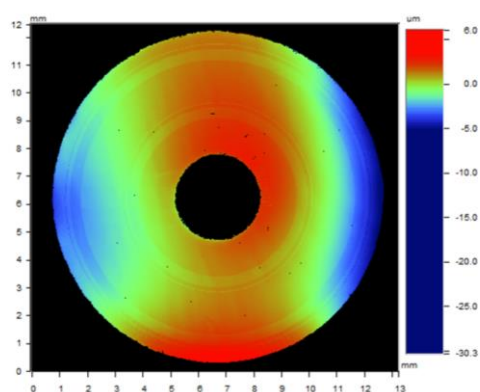
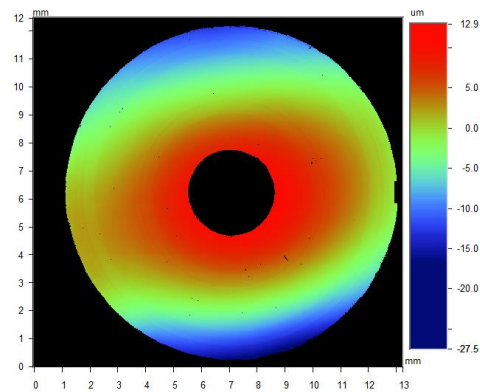


図 4.14 回転回折格子スケール回折格子パターン部レーザー測定器測定結果

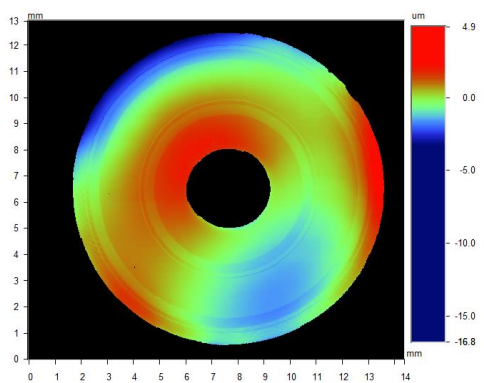
図 4.12 に作製した回転スケールを示す。貫通穴，内側の回転回折格子パターン，外側の回折格子パターンがそれぞれ確認できる。また図 4.13 に回折格子部分の SEM(Scanning electron microscope)(SS-550, Simazu corp)画像を示す。パターン形成後，型を抜きやすくするため型をテーパ状にしてあるため，SEM 画像のように回折格子の凸部の端がテーパ状になっている。この SEM 画像から分かるように回折格子の表面はきれいになっている。回折格子が設計どおりに作成できているか確認するためにレーザー顕微鏡で回折格子パターンの形状を測定した。図 4.14 は回折格子の一部分の測定結果を示している。測定結果より回折格子のピッチは $3.226[\mu\text{m}]$ ，回折格子の高さは $0.378[\mu\text{m}]$ であった。設計値では回折格子ピッチは $3.2[\mu\text{m}]$ ，回折格子高さ $0.4[\mu\text{m}]$ であるため，設計値とほぼ同じ形状で転写されていることが確認できる。



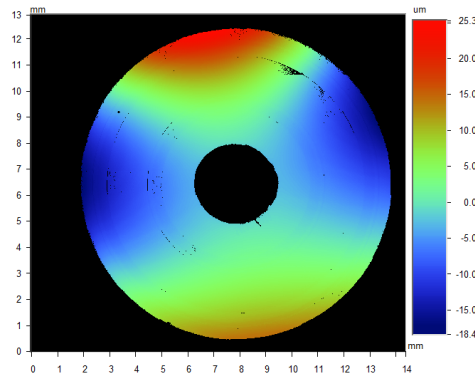
Sample 1



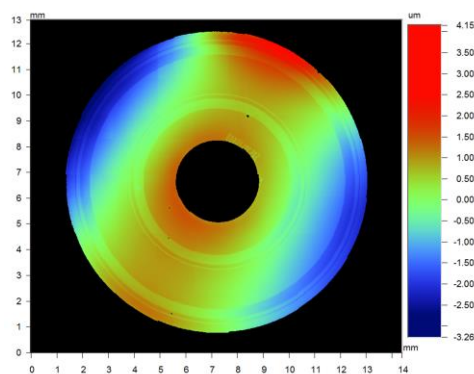
Sample 2



Sample 3



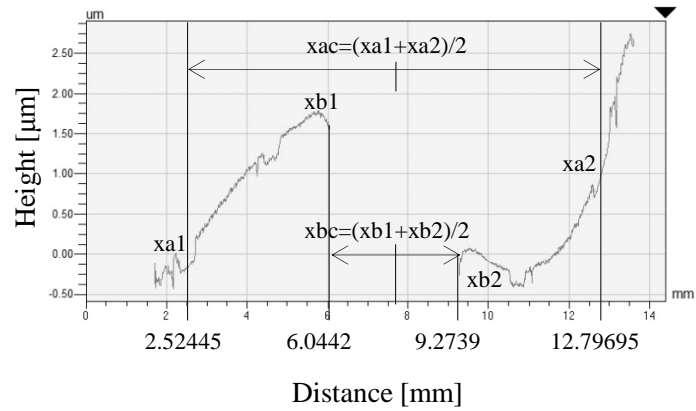
Sample 4



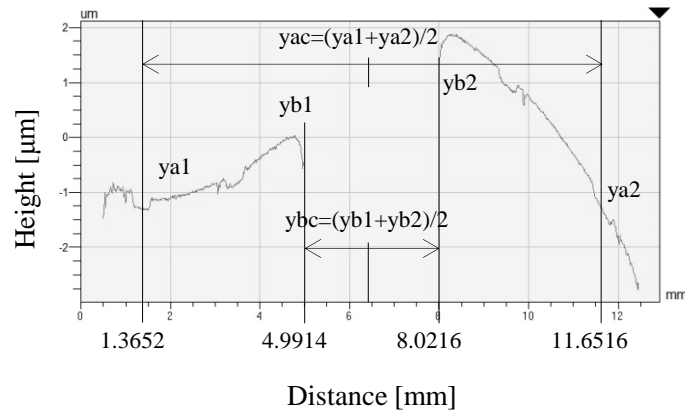
Sample 5

図 4.15 回転回折格子スケール変形測定結果

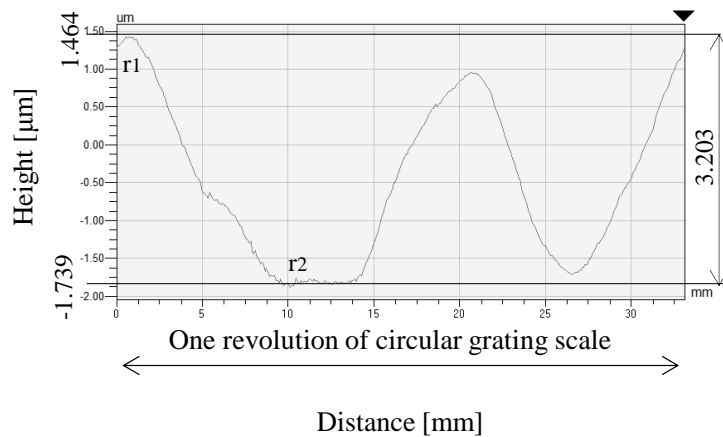
次に回転スケールの全体の形状評価を行った。この測定の目的は作製した回転回折格子の貫通穴中心とパターン中心の誤差、また面ブレを評価することである。測定器として非接触三次元段差測定器(WykoNT9300, Veeco)を使用した。この装置を使用することで、数 nm



(a)



(b)



(c)

図 4.16 Sample3 変形測定結果(a)x 軸断面図(b)y 軸断面図(c)r 軸断面図

オーダーで広範囲の表面形状を一括に測定できる。原理は装置内の平面原器を透過した光と測定対象で反射した光を干渉させその干渉縞から測定対象の構造を測定するものとなっ

ている。サンプルは軸に挿入せず、平板においた状態で測定を行った。図 4.15 に 5 つのサンプルの形状の z 軸方向の段差のコンター図を示す。

また図 4.16(a)(b)(c)に Sample 3 の x 軸, y 軸, r 軸の断面形状のグラフをそれぞれ示す。図 4.16(a)において x_{a1} , x_{a2} は x ライン上の外側の回折格子パターンを中心の位置, x_{b1} , x_{b2} は x ライン上の回転軸の穴の円周上の位置を示している。同様に図 4.16(b)において y_{a1} , y_{a2} は y ライン上の外側の回折格子パターンを中心の位置, y_{b1} , y_{b2} は y ライン上の回転軸の穴の円周上の位置を示している。回転軸中心座標(x_{ac} , y_{ac}), 回折格子パターンを中心座標(x_{bc} , y_{bc}), とすると

$$x_{ac} = \frac{(x_{a1} + x_{a2})}{2} \quad (4.4)$$

$$y_{ac} = \frac{(y_{a1} + y_{a2})}{2} \quad (4.5)$$

$$x_{bc} = \frac{(x_{b1} + x_{b2})}{2} \quad (4.6)$$

$$y_{bc} = \frac{(y_{b1} + y_{b2})}{2} \quad (4.7)$$

$$\text{Center error} = \sqrt{(x_{ac} - x_{bc})^2 + (y_{ac} - y_{bc})^2} \quad (4.8)$$

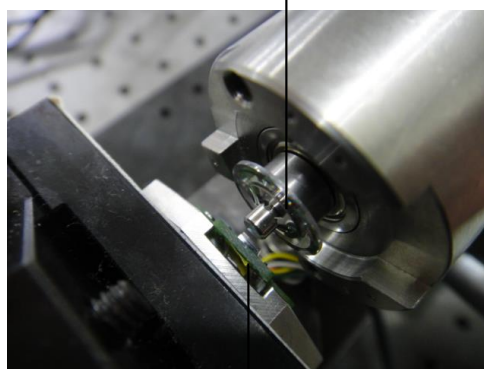
となる。この sample の場合, $x_{ac}=7.66[\mu\text{m}]$, $y_{ac}=6.51[\mu\text{m}]$, $x_{bc}=7.66[\mu\text{m}]$, $y_{bc}=6.51[\mu\text{m}]$ であり, 回転軸とパターンのずれは Center error=2.484 $[\mu\text{m}]$ であった。3.0 $[\mu\text{m}]$ 以下である。この結果により中心ずれが作成時の最大クリアランスである 3 $[\mu\text{m}]$ 以上でないことが示されている。次に図 4.16(c)に関して, 外側の回折格子上一周する線(r 軸)上の段差を示している。この測定結果より最も高い点 r_1 , もっとも低い点 r_2 とすると $r_1=1.46 [\mu\text{m}]$, $r_2=-1.74 [\mu\text{m}]$ となる。この結果よりこの Sample3 の面ブレは最大で 3.23 $[\mu\text{m}]$ となる。5 つのサンプルに関して測定を行った。結果を表 4.1 にまとめる。この結果に関して, 4.5 にて考察を行う。

表 4.1 回転回折格子変形量

	Center error [μm]	Difference in height [μm]
Sample 1	2.93	5.97
Sample 2	3.05	13.79
Sample 3	2.48	3.23
Sample 4	8.29	30.25
Sample 5	2.32	4.02

4.4 実験

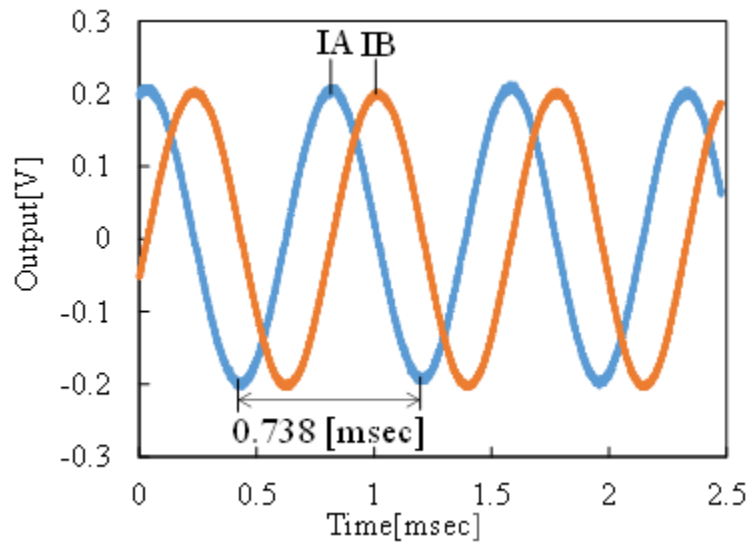
Diffracting Grating scale



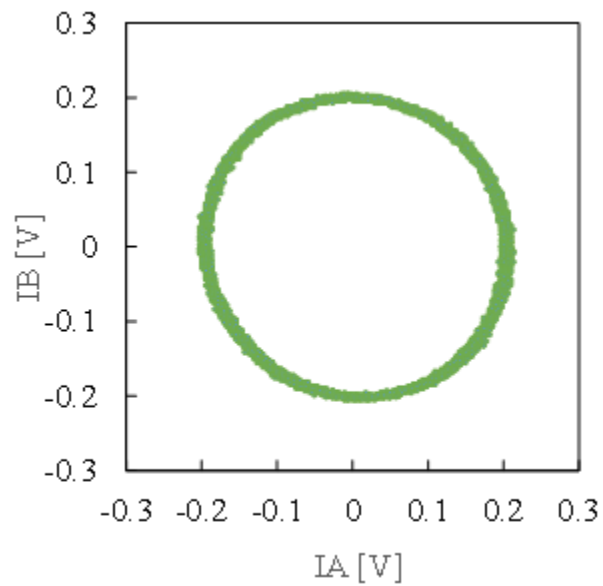
MEMS Encored

図 4.17 マイクロエンコーダと回転回折格子スケール実験系

次にマイクロエンコーダチップと回転回折格子スケールを用いて回転角度を測定する実験を行った。実験系を図 4.17 に示す。回転回折格子スケールは回転軸に挿入されている。回転軸は軸受けで支えられており、また背面にあるモーターに取り付けられている。モータ



(a)

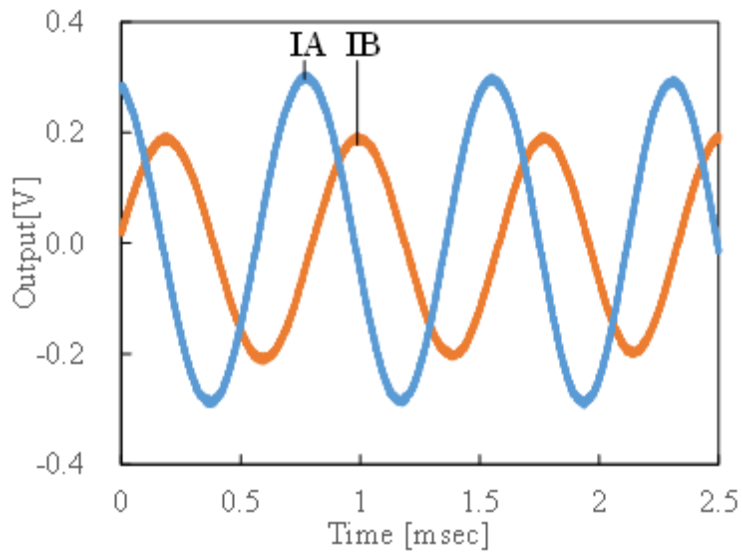


(b)

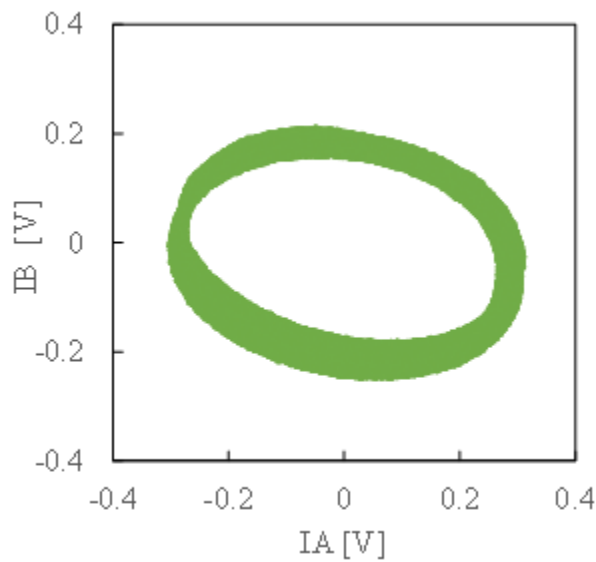
図 4.18 回転回折格子スケール Sample3 使用時の実験結果
(a)A 相 B 相信号(b)リサーチカーブ

一の回転速度は 4[rpm]で回転させた。回転回折格子スケールに正対するようにマイクロエンコーダチップを配置する。マイクロエンコーダチップは手動ステージ固定されており、手動ステージで 6 軸の位置合わせを行う。マイクロエンコーダチップは増幅器が実装されている PCB 基板に実装されている

実験結果を図 4.18(a)(b)に示す。図 4.18(a)は回転軸を回転させた際の A 相, B 相の出力信



(a)



(b)

図 4.19 回転回折格子スケール Sample4 使用時の実験結果

(a)A 相 B 相信号(b)リサーチカーブ

号の一部である。IA は A 相の出力電圧，IB は B 相の出力電圧を意味する。結果より A 相，B 相信号それぞれ綺麗なサインカーブの信号が得られている，B 相の信号は位相シフト膜を通過しているため，A 相の信号と比べて $1/4\pi$ だけ位相がずれていることがわかる。回折格子パターンには 10125 ピッチの回折格子が形成されている。先述の通り，ピッチ 1 つ分移動したさい，2 周期分の A 相，B 相それぞれの信号が出力されるため，出力信号 1 周期分の信号は

$$\frac{360 [\text{deg.}]}{10125 \times 2 [\text{pitch}]} = 0.0178 [\text{deg.}] \quad (4.9)$$

に相当する。図 4.18(a)の結果より、図内の信号一周期の時間は 0.738 [msec]である。この結果よりモーターの回転角速度は

$$\frac{0.0178 [\text{deg.}]}{360 [\text{deg.}] \times 0.738 \times 10^{-3} [\text{sec}]} \times 60 [\text{sec}] = 4.02 [\text{rpm}] \quad (4.10)$$

となり、実験系のモーター回転角速度 4[rpm]とほぼ同じ値となる。以上のように、回転角度、回転角速度を求めることが可能である。また図 4.18(b)は A 相と B 相のリサージュカーブを示す。横軸は A 相出力、縦軸は B 相の出力を意味している。信号は理想的な円形になっており、A 相と B 相が設計通り $1/4\pi$ ズレて出力されていることがわかる。

同様に Sample 4 を用いて実験を行った。実験結果を図 4.19 に示す。図 4.19(a)は A 相 B 相の信号、図 4.19(b)はそのリサージュカーブである。それぞれの結果に関して 4.5 にて考察を行う。

4.5 考察

まずナノインプリント技術を用いた回転回折格子スケールの形状に関して考察を行う。表 4.1 の結果に関して、Sample 1, 2, 3, 5 に関しては軸中心のずれが 3[μm]程度かそれ以下となったが、Sample 4 のみ 8.29 [μm]と軸中心のずれが 3[μm]以上と大きい。この要因として考えられるのが、回転回折格子スケールの反りである。図 4.15 のように、サンプルごとにばらつきがあるものの全ての回転回折格子スケールが倉型に変形していることがわかる。特に Sample 4 はその変形が著しく、この変形が中心精度に大きく影響を及ぼしていると考えられる。ナノインプリント時の変形の大きな原因は昇温、冷却過程の熱変形によるものが大きい。我々は熱式ナノインプリントで回折格子パターンを形成しているが、プリント時、ブランク基板をガラス転移温度まで昇温し、プリントを行い、その後金型をつけたまま冷却するが、冷却時の温度変化により基盤が熱収縮する。この時基板に内部応力が発生する。その後金型をはずすと内部応力と金型の力のつり合いが取れなくなるため、結果として、基板に微小な変形があらわれると考えられる。実際に Sample 3 を用いたリサージュカーブと Sample 4 を用いたリサージュカーブを比較すると、Sample 4 を用いたリサージュカーブのほうが、円がゆがみ、またリサージュカーブの軌跡がばらついていることがわかる。これも上記のように回折格子表面の変形により発生していると考えられる。

対策としては UV 式ナノインプリントにする、またはフランジに押し付けて固定するという方法が考えられる。UV 式ナノインプリントの場合、UV を用いて硬化させるため熱変化が

なく、上述のような熱膨張、熱収縮による内部応力の発生を避けられる。しかし、装置が複雑化する点、また樹脂自体が高価になる点が欠点として挙げられる。マイクロエンコーダチップの回転回折格子スケールとしての応用を考えると、許容範囲を超えているサンプルはあるものの、その変形量も非常に大きいというものではないため、熱式ナノインプリントで十分であると考えられる。しかしそれ以上の作製精度が求められる場合、UV 式ナノインプリントを用いた方が良い。フランジに押し付けて固定する方法は最も簡易的な変形対策である。回転軸に形成したフランジに、接着剤を用いて回折格子スケールを押し付け、固定する。基板の厚さのばらつきは小さいと考えられるため、この方法で表面形状のばらつきを抑制できると考えられる。

次に得られた信号に関して考察する。一般的なスリット型のスケールを用いたエンコーダの場合、信号はパルス波形状となる⁽⁶⁴⁾。この場合、出力信号は High, Low の 2 つの出力の状態しかない。スリット型のスケールを用いたエンコーダの場合、スケール数を増やすことによって、出力信号の High, Low のピッチを増やし、回転角度測定の分解能を高くしている。しかし、このようにした場合、スケール枚数が増えるだけでなく、エンコーダ自体のサイズも大きくなってしまう。対して、回折型スケールを用いたエンコーダの場合は図4,18(a)の実験結果に示されている通り、表面形状の変形が小さい回転回折格子を使用すると、非常にきれいなサイン波形状の信号が得られている。このようにピークとピークの間の状態の信号が得られれば、その間の信号をアナログ的に分解することで、一枚のスケールを用いるだけで、高分解能化することができる。そのため、本センサの分解能は式(4. . 6)で示した値よりさらに高くなることが期待できる。

4.6 結言

ロボットのアクチュエータとしてモーターは広く使用されている。そのモーターの回転角制御を行うセンサとしてエンコーダが使用されている。生体を把持するような繊細な動きを実現するためには多くの可動部が必要であり、その数のモーターとエンコーダが必要となる。しかしロボットハンドのような小さなスペースにこれらを内蔵するためにはモーターやセンサを小型化する必要がある。エンコーダはセンサ部となるエンコーダチップと回転軸とともに回転する回転スケールとから構成されている。我々はこの両方の研究開発を行った。

本章ではマイクロエンコーダチップとナノインプリント技術を用いた回転回折格子スケールについて述べた。マイクロエンコーダチップは MEMS 技術、ウェハレベルパッケージング技術、TSV 技術を用いることで、多くの光学素子、電子デバイスをワンチップ(2.8[mm]×2.8[mm])内に収めた。MEMS 技術を用いることで、Si 基板のキャビティ斜面に反射ミラーを形成したり、また封止用のガラス基板にマイクロレンズを形成したりと、Si 基板、ガラス基板を上手に加工することで部品点数は少なく、かつ高機能なデバイスの作製に成功した。

またナノインプリント技術と機械加工技術を用いてロータリーエンコーダ用の回転回折格子スケールを作製した。従来、回折格子のパターニングと回転軸を挿入するための貫通穴を別工程で形成することが一般的であったが、この方法では職人による軸の位置合わせが必要であり、生産効率が悪い。そのため我々は回折格子パターンと貫通穴を同時に形成する新規的な加工方法を提案した。作製した回転回折格子スケールの作製精度の評価を行ったところ、開発したマイクロエンコーダスケールとして十分実用に足る作製精度であることが確認できた。最後にマイクロエンコーダと回転回折格子スケールを用いて回転角度測定の実験を行った。結果、変形の小さな回転回折格子スケールを用いることで、良好なサイン波信号、また A 相 B 相のリサージュカーブが得られ、回転角度測定が可能であることを実証した。

今後は、本研究で開発したマイクロエンコーダチップと回転回折格子スケールを用いたエンコーダの実用化を目指す。実用化の課題となるのが、センサの温度特性・測定精度分解能・消費電力・応答速度などの評価である。特にレーザーチップや PD を使用しているためセンサ性能は温度変化によって変化する。そのためレーザーチップ出力のモニタリングなどの温度補償が必要となる。ただこれらの技術はすでに確立された技術を応用できるため、我々の研究開発した技術と組み合わせることで実用化できると考えている。

参考文献

- [62]堀田智章, “エンコーダの基礎から応用” <http://ednjapan.com/edn/articles/1204/19/news006.html>
- [63] 越智玉樹, “光の回折・干渉現象を応用したエンコーダ”計測と制御, vol.45, no.4 (2006) pp.318-322.
- [64]牧野内進, 今井享, 渡邊昭宏, 大原徹雄, 涌井伸二, “スキャン光学エンコーダに関する一研究 レーザ干渉によるスキャン光学系と位相同期検波による高分解能位置センサー”, 精密工学会誌, vol 75, no.10 (2009) pp.1255-1259.
- [65]藤田光悦, 中山智晴, 松添雄二, “最近のエンコーダ技術”, 富士時報, vol.72, no.4 (1999) pp.228-232.
- [66]R. Sawada, E. Higurashi and T. Ito, “An Accelerometer Incorporating “An accelerometer incorporating a micro-laser encoder for a wide measurable range [for earthquake detection]”, Optical MEMS, (2000) pp.145-146.
- [67]R. Sawada, E. Higurashi, T. Ito, O. Ohguchi, M. Tsubamoto, “Monolithically integrated micro-laser encoder”, Applied Optics, vol.38, no.33 (2000) pp.6866-6873.
- [68]R. Ssawada, E. Higurashi, O. Ohguchi, Y. Jin, “Long-Life Micro-Laser Encoder, Long-Life Micro-Laser Encoder”, Proc. of IEEE The Thirteenth MEMS' 2000, (2000) pp.491-495.
- [69] X. J. Zhang, S. Zappe, R. W. Bernstein, O. Sahin, C. C. Chen, M. Fish, M. P. Scott and O. Solgaard, “Micromachined silicon force sensor based on diffractive optical encoders for characterization of microinjection”, Sensors and Actuators A: Physical, vol. 114 (2004) pp.197-203.
- [70] X. Zhang, “Silicon microsurgeryforce sensor based on diffractive optical MEMS encoders”, Sensor Review, vol24 (2004) pp.37-41
- [71]日暮栄治, 須賀唯知, “低温接合技術と高機能センサへの応用”スマートプロセス学会誌, vol.1, no.3 (2012) pp.106-113.
- [72] S. Y. Chou, P. R. Krauss, P. J. Renstrom, “Nanoimprint lithography”, J. Vac. Sci. Technol. vol.14, no.6 (1996) pp.4129-4133.
- [73] S. Y. Chou, P. R. Krauss, P. J. Renstrom, “Imprint of sub - 25 nm vias and trenches in polymers”, Appl. Phys. Lett, vol.67 (1995) pp.3114-3116.
- [74] M. Inokuchi, Y. Sakamoto, T. Abe, T. Akase, K. Dote and R. Sawada, “Application of Nanoimprint to the Fabrication of Rotary Gratings”, International Microprocesses and Nanotechnology (MNC), (2008) pp.641-644.

5. 結言

本研究では生体を把持対象としたロボットハンド、あるいはロボットハンドの指先に内蔵可能な MEMS デバイスの研究開発に関して述べた。生体などを把持対象する繊細な把持動作をロボットで実現するためには、アクチュエータとなる piezo アクチュエータ(第 2 章)やモーター(第 4 章)の制御用センサ、また実際に把持対象に負荷される力を測定可能な力覚センサの開発(第 3 章)が必要である。

本論文は全 5 章で構成されている。第 1 章では本研究の研究背景や意義に関して述べる。特に日本国内のみならず全世界的に起きている高齢化のなかで、生体を対象とする介護用ロボットの需要が増加していく予測に関して述べ、その中で本研究の意義を主張した。

第 2 章では光センサチップの開発、光センサチップを用いた圧電アクチュエータの制御、光センサチップの高機能化に関して述べた。光センサチップは小型(3[mm]×3[mm])、簡単構造、部品点数が少ないという特徴を有する。特に複数個の PD をワンチップに集積化することにより、光センサにある煩雑なアライメントをする必要がない。次にこの光センサチップを用いた piezo アクチュエータの位置決め制御実験を行った。piezo アクチュエータはヒステリシス特性を有し、より精密な動作を行うためにはセンサを用いた位置決め制御が必要となる。実験から光センサチップを用いて位置決め制御を行うことにより、ヒステリシスによる位置誤差を減少する結果が得られた。その後温度センサ内蔵型光センサチップ、初段アンプ内蔵型光センサチップの研究開発に関して述べた。このセンサチップは CMOS プロセスを用いることで、センサチップ上に CMOS トランジスタを構成することにより、温度センサ(サーモトランジスタ)やオペアンプを作製が可能となったため実現した。温度センサ内蔵型光センサチップに関してはその温度センサの出力を用いて、補正係数を決定し、その補正係数を用いることで直線変位測定、回転角変位測定両方に関して温度依存性を減少させることに成功した。また初段アンプ内蔵型光センサチップに関しては、初段アンプをチップに内蔵することで PD の出力電圧の S/N 比つまり光センサチップの電気的分解能を向上させることに成功した。

第 3 章では小型せん断力センサの研究開発に関して述べた。本センサは受力部と検出部から構成されており、検出部には第 2 章の光センサチップを用いた。受力部にはステンレスで作製した金属フレームと弾性ゴムを用いた弾性ゴムフレームを用いた。特に弾性ゴムフレームを用いたせん断力センサはセンサ自体のサイズが 6[mm]×6[mm] 厚さ 8[mm]とロボットハンドの指先に内蔵できるように小さなセンサとなっている。このセンサの特徴として受力部と検出部が物理的に分離されており、繊細な検出部が力を受けないという特徴がある。またセンサの性能が弾性ゴムフレームの物性に大きく依存するため、受力部のみを変えることでセンサの性能を大きく変えることが可能になる。実際に実験を行うことにより二軸方向のせん断力を分離して測定可能であること、また弾性ゴムフレームを変える

ことによりセンサ性能を変えることが可能であることを示した。

またこのせん断力センサの高機能化を目的とした MEMS レンズアクチュエータの研究開発に関して述べた。本デバイスはせん断力センサの分解能、測定範囲を弾性ゴムフレームを変えることなく可変化することが可能である。この MEMS レンズアクチュエータはマイクロレンズと MEMS アクチュエータデバイスの 2 つから構成されている。まずマイクロレンズの作製に関して述べた。このマイクロレンズは DMD 露光装置というマスクレス露光かつグレースケール露光が可能な装置を用いて作製した。この装置を用いることによりマスク形状を細かく調整し、結果的に高精度にレンズ形状をコントロールできることを示した。またにより様々な形状のマイクロレンズを同一基板上に作製できることを示した。次に MEMS アクチュエータデバイスの作製に関して述べた。MEMS アクチュエータデバイスは成膜した piezoelectric 薄膜(PZT)に電圧を印可することで動作させる。このような薄膜を用いた MEMS デバイスの場合、薄膜と基板の間に発生する内部応力とその内部応力により発生する変形が大きな問題となる。特に MEMS レンズアクチュエータのように光を扱うデバイスの場合、マイクロレンズの位置誤差はそのデバイスの性能を決めるため、非常に大きな問題となる。そのため FEM ソフトウェアを用いて MEMS アクチュエータデバイスの変形の予測を行い、その結果を設計にフィードバックすることで内部応力の力のつり合いをとり、変形のない MEMS アクチュエータデバイスの設計を行った。実際に作製したところ、変形が小さなデバイスの作製に成功し、またその変形がコントロール可能であることを示した。次にこの作製で用いた PZT の圧電定数の測定を行い、その結果をもとに MEMS アクチュエータデバイスの動作シミュレーションを行った。その後実際に作製したデバイスを用いて実験を行い、シミュレーション結果と比較したところ、シミュレーションと実験結果がほぼ一致する結果が得られた。最後に作製した MEMS レンズアクチュエータを光センサチップと組み合わせることでせん断力センサの性能を可変化できることを示した。

第 5 章では MEMS 技術を用いたマイクロエンコーダチップ、またナノインプリント技術を用いた回折格子スケールの作製に関して述べた。マイクロエンコーダチップは MEMS 技術のみならず、高度なパッケージング技術を用いることで、ワンチップ(2.8[mm]×2.8[mm])のなかに発光素子、受光素子、レンズ、ミラー、位相シフト膜、配線など多くの光学素子、電子素子を内蔵することに成功した。回折格子スケールに関しては、ナノインプリントと機械加工をほぼ同時に行う新規的な作製方法により、回折パターンとモーターの回転軸を挿入する貫通穴を高精度に位置合わせしながら作製することに成功した。最後にマイクロエンコーダチップと回折格子スケールを組み合わせることで回転角、回転角速度の測定する実験を行い、実際に回転角、回転角速度を測定可能であることを示した。

以上のように本研究では生体などを把持対象としたロボットハンドやロボットハンドの指先に内蔵可能な MEMS センサの研究開発を行った。本研究で示した通り、ロボットの繊細な動きを実現しようとするだけでも、様々なセンサを用いる必要がある。しかしロボットは我々が研究対象とした把持動作を行うだけではない。例えば介護用ロボットにおいて

は人を検知したり、移動したり、話したり、様々な動作があり、そのためのセンサが必要となる。つまりロボットの高機能化につれて小型のセンサが大量に必要になると考えられる。このような現状を考えると、MEMS センサは小型、高性能、大量生産可能という面で非常に優れていることがわかる。本研究ではマイクロエンコーダ、光センサチップ、レンズアクチュエータ計3つの MEMS センサ、MEMS デバイスの研究内容に関して報告を行ったが、この研究で得られた様々な知見は他の MEMS デバイスの研究開発に役立つと自負している。介護用ロボットの開発のみならず、より住みやすい社会を実現するために、本研究が活かされると幸いである。

謝辞

本研究を行うにあたり、ご指導、ご鞭撻を頂きました、工学研究院機械工学部門の澤田廉士教授、野上大史助教に謹んで感謝の意を表します。澤田教授には研究内容だけでなく、私が将来のことで悩んだ際、心優しく励まし、またサポートしていただき本当に良い指導教官に巡り会えたと感じております。野上大史助教には助教になる前から研究室の先輩として様々な相談にのっていただき、公私ともに良くしていただきました。改めて御礼申し上げます。また工藤奨教授、澤江義則教授には私の学位審査の副査を行っていただき、この場を借りて御礼申し上げます。

ナノインプリント回折格子とマイクロエンコーダの作製に関して、サンプルの作製などを支援して頂いたエクストコム株式会社千野忠男様、また研究内容に関してご助言頂いた東京大学日暮栄治准教授には特に御礼申し上げます。

小型光センサチップの研究開発に関して、光センサチップの作製に際し、研究施設を使用させていただいた北九州学術研究都市共同研究開発センターの皆様には大変お世話になりました。特に共同研究開発センターの安藤秀幸様には私が学部4年生の時からご助言、ご指導いただき、本当にありがとうございます。

小型せん断力センサの研究開発に関しては株式会社安川電機の有永雄司様には実際にロボットハンドに内蔵を想定したセンサの形や性能に関するご助言をいただきました。ロボットの専門家からアドバイスをいただくことで、実用に足るセンサの研究開発に取り組むことができたと感じております。

光スキャナデバイスの研究開発に関して、マイクロレンズの作製の際、株式会社ニコン柴田浩匡様、産業技術総合研究所岩崎渉様には特にお世話になりました。DMD 露光装置の使用方法やエラーの対応、またマイクロレンズ作製の非常に重要なご助言をいただきました。MEMS アクチュエータの作製に関しては産業技術総合研究所の MEMS プロセス用のクリーンルームを使用させていただいた集積マイクロシステム研究センター前田龍太郎様、廣島洋様、また研究内容に関して多大なるご支援をいただいた小林健様、牧本なつみ様には厚く御礼申し上げます。

ナノ・マイクロ医工学研究室の秘書の小山郁子様には書類の遅れなどで何度も迷惑をかけたと思います。申し訳ございませんでした。そして、研究室の多くの先輩方、後輩方、研究だけでなく、研究室のイベントなど、とても楽しく、有意義な時間を過ごすことができました。また共同研究を行っており、ナノ・マイクロ医工学研究室に在室しておりました富士電機株式会社石河範明様、田口電機工業株式会社日高昌則様、京セラ株式会社樋口剛司様には企業で行う研究を体験させていただき、有意義なお話をたくさん聞かせていただきました。

この様に私は本研究室での 6 年間の研究を通じて感謝の意を伝えたい方々が非常に多いです。研究を行っていく上でこのような人間関係は非常に大切であり、私の財産だと思っています。この事をご教授いただき、さらに、多くの経験ができる機会を与えて下さった澤田廉士教授には再度厚く御礼申し上げます。

最後に、長い学生生活を支えてくれた家族、そして両親に心から感謝します。

付録

A.1 作製レシピ

本デバイス製作は、下記に示す製作プロセスレシピにて行った。

Mask1 上部 Pt/Ti イオンエッチング			
工程	操作	装置	条件
フォトリソ	ウェハ乾燥	ホットプレート	120°C3min
	レジスト塗布 (AZ-P4330)	スピコート	5sec-1000rpm5sec- 5sec-3000rpm45sec
	プリバーク	ホットプレート	100°C3min
	露光	マスクアライナ	0-80-18sec
	現像 (AZ-400K)	ドラフタ	70sec
	ポストバーク	ホットプレート	120°C7min
上部 Pt/Ti ドライ エッチング	ドライエッチング	イオンミリング	Ar 7sccm 5min
レジスト除去	アッシング	RIE	O ₂ 100sccm 3min

Mask2 PZT ウェットエッチング			
工程	操作	装置	条件
フォトリソ	ウェハ乾燥	ホットプレート	120°C3min
	レジスト塗布 (AZ-P4330)	スピコート	5sec-1000rpm5sec- 5sec-3000rpm45sec
	プリバーク	ホットプレート	100°C3min
	露光	マスクアライナ	0-80-20sec
	現像 (AZ-400K)	ドラフタ	70sec
	ポストバーク	ホットプレート	120°C5min
PZT エッチング	ウェットエッチング (アデカケミルカ W)	ドラフタ	30sec×5 回
レジスト除去	レジスト剥離	ドラフタ	アセトン 10min IPA 1min

Mask3 下部 Pt/Ti イオンエッチング			
工程	操作	装置	条件
フォトリソ	ウェハ乾燥	ホットプレート	120°C3min
	レジスト塗布 (AZ-P4330)	スピコート	5sec-1000rpm5sec- 5sec-2000rpm45sec
	プリバーク	ホットプレート	100°C2min
	露光	マスクアライナ	0-80-20sec
	現像 (AZ-400K)	ドラフト	93sec
	ポストバーク	ホットプレート	120°C15min
上部 Pt/Ti ドライ エッチング	ドライエッチング	イオンミリング	Ar 7sccm 5min
酸化膜エッチング	ドライエッチング	RIE	CHF ₃ 30sccm60min
レジスト除去	アッシング	RIE	O ₂ 100sccm 3min

Mask4 Au パッド形成			
工程	操作	装置	条件
Au 全面スパッタ	スパッタ	スパッタ	Au 250W 7min
フォトリソ	ウェハ乾燥	ホットプレート	120°C7min
	レジスト塗布 (AZ-P4330)	スピコート	5sec-1000rpm5sec- 5sec-3000rpm45sec
	プリベーク	ホットプレート	100°C3min
	露光	マスクアライナ	0-80-30sec
	現像 (AZ-400K)	ドラフタ	75sec
	ポストベーク	ホットプレート	120°C5min
Au ウェットエッチング	ウェットエッチング (AURUM304)	ドラフタ	7min30sec
レジスト除去	アッシング	ドラフタ	アセトン 10min IPA 1min
Au 密着	乾燥	ホットプレート	120°C7min

Mask5 構造体 Si-BOX エッチング			
工程	操作	装置	条件
フォトリソ	ウェハ乾燥	ホットプレート	120°C3min
	レジスト塗布 (AZ-P4330)	スピコート	5sec-1000rpm5sec- 5sec-2000rpm45sec
	プリベーク	ホットプレート	100°C2min
	露光	マスクアライナ	0-80-35sec
	現像 (AZ-400K)	ドラフト	1min40sec
	ポストベーク	ホットプレート	120°C15min
Si エッチング	ドライエッチング	STS2	36 サイクル
BOX エッチング	ドライエッチング	RIE	CHF ₃ 30sccm50min
レジスト除去	アッシング	RIE	O ₂ 100sccm 10min

Mask6 バックサイドメタルマスク形成			
工程	操作	装置	条件
フォトリソ	ウェハ乾燥	ホットプレート	120°C5min
	HMDS コート	スピコート	350rpm5sec- 1500rpm20sec
	レジスト塗布 (AZ-P4903)	スピコート	5sec-1000rpm5sec- 5sec-1500rpm20sec
	プリベーク	ホットプレート	50°C3min- 105°C5min
	露光	マスクアライナ	0-80-35sec
	現像 (AZ-400K)	ドラフタ	6min30sec
	ポストベーク	ホットプレート	120°C3min
レジスト除去	レジスト剥離	ドラフタ	アセトン 10min IPA 1min
	アッシング	RIE	O ₂ 100sccm 10min
Si 基板貫通 エッチング	ウェハ表面保護	スピコート	5sec-1000rpm5sec- 5s-2000rpm45sec
	ベーク	ホットプレート	90°C2min
	オイルコート		
	ウェハ貼り合わせ	スピコート	
Si エッチング	ウェハ冷却	STS2	冷却温度 10°C
	エッチング動作	STS2	485 サイクル
チップ処理	チップリリース	ドラフタ	一晚
	チップリリース	ドラフタ	IPA リンス
裏面 SiO ₂ エッチング	エッチング	RIE	CHF ₃ 30sccm50min
裏面レジスト エッチング	エッチング	RIE	O ₂ 100sccm 10min
表面レジスト エッチング	エッチング	RIE	O ₂ 100sccm 10min

