



Title	圧電体薄膜を利用したマイクロメカニカル素子に関する研究
Author(s)	山下, 馨
Citation	大阪大学, 2002, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/2655
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

圧電体薄膜を利用した マイクロメカニカル素子に関する研究

2002 年 1 月

山下 馨

大阪大学 大学院基礎工学研究科

圧電体薄膜を利用した マイクロメカニカル素子に関する研究

2002 年 1 月

山 下 馨

大阪大学 大学院基礎工学研究科

内容梗概

本論文は、著者が大阪大学大学院基礎工学研究科において行なった、シリコンマイクロマシニングによる構造と強誘電体薄膜の圧電効果を利用したマイクロメカニカル素子に関する研究の成果をまとめたものである。

まず、一方の基本技術となるバルクマイクロマシニングにおいて、マイクロメカニカル素子の構造となる薄板構造作製の最適化を行なった。固体ソース BN を用いた高濃度拡散により p^+ -Si 層を形成し、EPW を用いた異方性エッチングによりシリコンダイアフラム構造を作製した。拡散工程において固体ソースの熱処理過程を最適化し、拡散後に表面処理を施す後工程を付加することにより、異方性エッチングの過程で破壊することなく極薄ダイアフラムを安定的に作製することを可能とした。また、エッチングキャビティと極薄ダイアフラム構造をを利用して、気体の赤外吸収による熱膨張を静電容量的に検出する赤外線マイクロセンサを作製した。作製したマイクロセンサにおいて赤外光量に比例した出力を得、これまで小型化が困難であったゴーレイセル型赤外線センサのマイクロ化に成功した。さらに、キャビティ内にガスを封入して赤外吸収を増すことにより感度を向上させ、またガスの赤外吸収スペクトルに応じてセンサ応答を変化させることを示した。これを用いて、複数の種類のガス封入センサを組み合わせることによってガスセンサを構成し、センサ毎の出力値およびそれらの相対値の組合せから、赤外光路上の雰囲気ガス種を識別することが可能であることを示した。

次に、もう一方の基本技術である圧電体薄膜について、低コストで均一な薄膜が得られるゾルゲル法により PZT 薄膜を作製し、結晶性、強誘電性および圧電性評価を行なった。ゾルゲル反応過程の熱分析より適切な乾燥、結晶化アニール温度を選択し、それらの工程間の塗布回数を最適化することにより、センサ・アクチュエータ応用に必要とされる厚さまで堆積し良好な特性の薄膜を得た。製膜時において、初回アニール層の厚みを制御することにより結晶配向を (100) から (111) へ変化させ得ることを示した。配向制御した薄膜の強誘電性は、残留分極値において $(111) > (100)$ となり、分極量の比は結晶軸と分極軸の方向の関係から説明できた。また薄膜全体の配向性がこの初期アニール層によって制御さ

れることを見出し、結晶配向性を保ったまま再現性良く厚膜化することに成功した。また新たな評価方法として、バルク基板上での薄膜自体の圧電性を簡便に測定する方法を独自に考案した。カンチレバー状に固定した基板の減衰振動を利用し、たわみと圧電出力電圧から圧電定数を算出するので、特殊な応力加振装置を必要とせず、また基板に比べて薄膜の曲げ剛性が十分小さいので、基板や薄膜材料の弾性定数の影響を受けずに評価できる。これを用いて、(111) 配向膜において圧電性を評価した。ポーリングにより大きく圧電性が改善され、as-deposited の十倍近い圧電定数が得られることを見出した。2.2 μm 厚の膜において、最適なポーリング条件によりバルクセラミックスの約半分に達する良好な圧電性を示し、センサ、アクチュエータへの応用に十分な性能の膜が得られた。またポーリングにおいて、印加電界に対する圧電性の改善傾向が、 P - E ヒステリシスループにおける残留分極比の変化とよく一致していることを見出し、強誘電体としての分極の整列がそのまま圧電性の改善に現れていることを示した。

さらに、これらマイクロマシニング技術と圧電体を組み合わせて、光により駆動されるアクチュエータを提案した。 p^+ 層を単に構造材としてだけでなく、太陽電池の p 型層として利用し、構造と機能を両立したマイクロ構造について検討し、遠隔駆動可能な光駆動アクチュエータを構成し得ることを示した。試作した p^+/n -Si 太陽電池と、PVDF 圧電体膜を組み合わせたダイアフラムおよびカンチレバー構造の振動型アクチュエータにおいて、チョッピング光照射により遠隔駆動できることを示した。さらに、光駆動時の照射強度およびチョッピング周波数によりアクチュエータの駆動特性を制御可能であることを示し、特にチョッピング周波数の制御により複数のアクチュエータを選択的に駆動できることを示した。

最後に、これらマイクロマシニング技術と圧電体を組み合わせて、空中で使用する超音波マイクロアレイセンサを作製した。超音波の指向性と伝搬距離に対する考察から使用周波数を 100~200 kHz とし、素子構造とアレイ配置を設計した。また、SOI ウェハを用いたダイアフラム構造の作製とゾルゲル PZT 薄膜の製膜順序を検討し、歩留まり良くアレイセンサを作製し得るプロセスを開発した。これにより、市販の単一素子バルクセンサとほぼ同一面積のチップに 37 素子をアレイ化することに成功した。超音波マイクロセンサ

において、単一素子の特性としては、共振周波数 176 kHz においてバルクセラミックスセンサを越える -39.5 dB (1 V/Pa $\equiv 0$ dB) の感度を得た。また距離計測においても 2 m の距離で誤差 1% 以内、センサ出力波形においては 20 dB 以上の S/N 比を得、距離計測においても十分な性能を持つことを確認した。アレイセンサの特性としては、18 素子リングアレイにおいて立体形状計測に十分な指向性を得た。またこの鋭い指向性を利用して、アレイセンサを機械的に走査することにより明瞭な立体形状計測画像を得た。さらに、ポーリングによる周波数チューニングにより、アレイを構成する各素子毎の特性を揃える方法を開発した。また、これを用いて特性を揃えたセンサアレイを用いて、一発の超音波の送受信により複数物体の認識が可能であることを示した。

以上により、マイクロマシニングと機能性材料を用いたマイクロメカニカルデバイスの可能性、有用性を明らかにした。

目次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景および目的	1
1.2 本論文の構成	3
第2章 Siバルクマイクロマシニングとこれを利用した赤外検知型ガスセンサ	7
2.1 はじめに	7
2.2 シリコンバルクマイクロマシニング	7
2.2.1 シリコンの結晶異方性エッチング	7
2.2.2 p^+ -Si によるエッチストップ層の作製	11
2.3 マイクロキャビティを利用した赤外検知型ガスセンサ	15
2.3.1 センサ構造と作製プロセス	16
2.3.2 センサ応答の静特性解析	17
2.3.3 赤外光照射応答特性	19
2.3.4 ガス封入による特性修飾	23
2.3.5 雰囲気ガス種識別センサ	25
2.4 まとめ	25
第3章 ゼルゲル PZT 薄膜の作製と圧電性評価	27
3.1 はじめに	27
3.2 強誘電体 PZT の圧電性と組成選択	27
3.3 ゼルゲル製膜法	30
3.3.1 ゼルゲル PZT 薄膜の配向性制御	33
3.3.2 ゼルゲル PZT 薄膜の厚膜化	38
3.4 バルク基板上薄膜の圧電性評価	41

3.4.1	薄膜の圧電評価方法	41
3.4.2	ポーリングによる圧電性改善効果	46
3.5	まとめ	50
第4章	太陽電池と圧電体を複合化した光駆動振動型アクチュエータ	51
4.1	はじめに	51
4.2	光駆動振動型アクチュエータ	53
4.3	p^+/n -Si 太陽電池の特性	54
4.4	圧電体を利用した光駆動振動型アクチュエータの駆動特性	56
4.5	まとめ	58
第5章	Si ダイアフラム上 PZT 薄膜を利用した超音波マイクロアレイセンサ	59
5.1	はじめに	59
5.2	空中用超音波の使用周波数	59
5.3	PZT 薄膜を用いた超音波マイクロセンサ	61
5.3.1	センサ構造	61
5.3.2	センサ作製プロセス	66
5.3.3	センサ単素子の基礎特性	69
5.3.4	アレイセンサの特性	73
5.3.5	機械的走査による立体形状計測	74
5.4	超音波マイクロアレイセンサを用いた電子走査による物体認識	77
5.4.1	疑似アレイを用いた物体認識	79
5.4.2	リニアアレイを用いた電子走査による複数物体認識	83
5.5	まとめ	92
第6章	結論	93
	参考文献	97
付録	超音波センサアレイの指向性	103
	謝辞	109

第1章 序論

1.1 本研究の背景および目的

いまから十数年前、大きさ僅か $100\ \mu\text{m}$ のギアやジョイント、クランク等を作製し実際に動かすことが出来るということをカリフォルニア大学や Bell 研究所の研究者らが示して以来、微小構造体、微小機械の実現としてのマイクロマシンの研究が爆発的に発展してきた [1-7]. これは、それまでに培われてきたシリコン集積回路のプロセス技術を、回路ではなく複雑で微細な構造を作るために利用することにより実現されてきた. 最初に実現された構造は、ポリシリコンで構造を作り絶縁層の SiO_2 を犠牲層としてエッチングし、微小な隙間を形成して静電引力で構造体を駆動し、あるいは静電容量で構造体変位を検知するというものであった. これは、集積回路作製技術の直接の延長で実現可能であり、非常に広く用いられるようになった. 構造体をシリコンウェハの表面近傍で形成するので「表面マイクロマシニング」と呼ばれる. 一方では、LIGA に代表されるような高アスペクト比構造の作製技術 (HARMST; High Aspect Ratio Micro Structure Technology) を用い、立体的な構造が作られるようになったが、その構造はやはり垂直方向に微小な間隙を形成して、静電引力駆動、静電容量検知といった手法がとられている. これらの手法の特徴は、構造が持つ特徴、すなわち微小な間隙を持つという構造そのものがもつ特性を用いた手法であり、いかに複雑で巧妙、微細な構造を作るかが性能の決め手となる. これらの技術により、それまで特殊大型機器や軍事用に限られていた加速度センサ、ジャイロといった慣性センサが小型化・低価格化されて民生用のカーナビゲーションシステムやゲーム機に利用されたり、また微小ミラーアレイデバイスの実現により非常に明るくコントラストの高いプロジェクタが実用化され始める等、我々の生活に深く関わる製品にまで応用され始めている.

静電方式における発展に比較して、マイクロマシンの黎明期には大いなる期待とともに研究開発されていた電磁力、磁気歪み、熱膨張、形状記憶合金といった方式は、かなり開

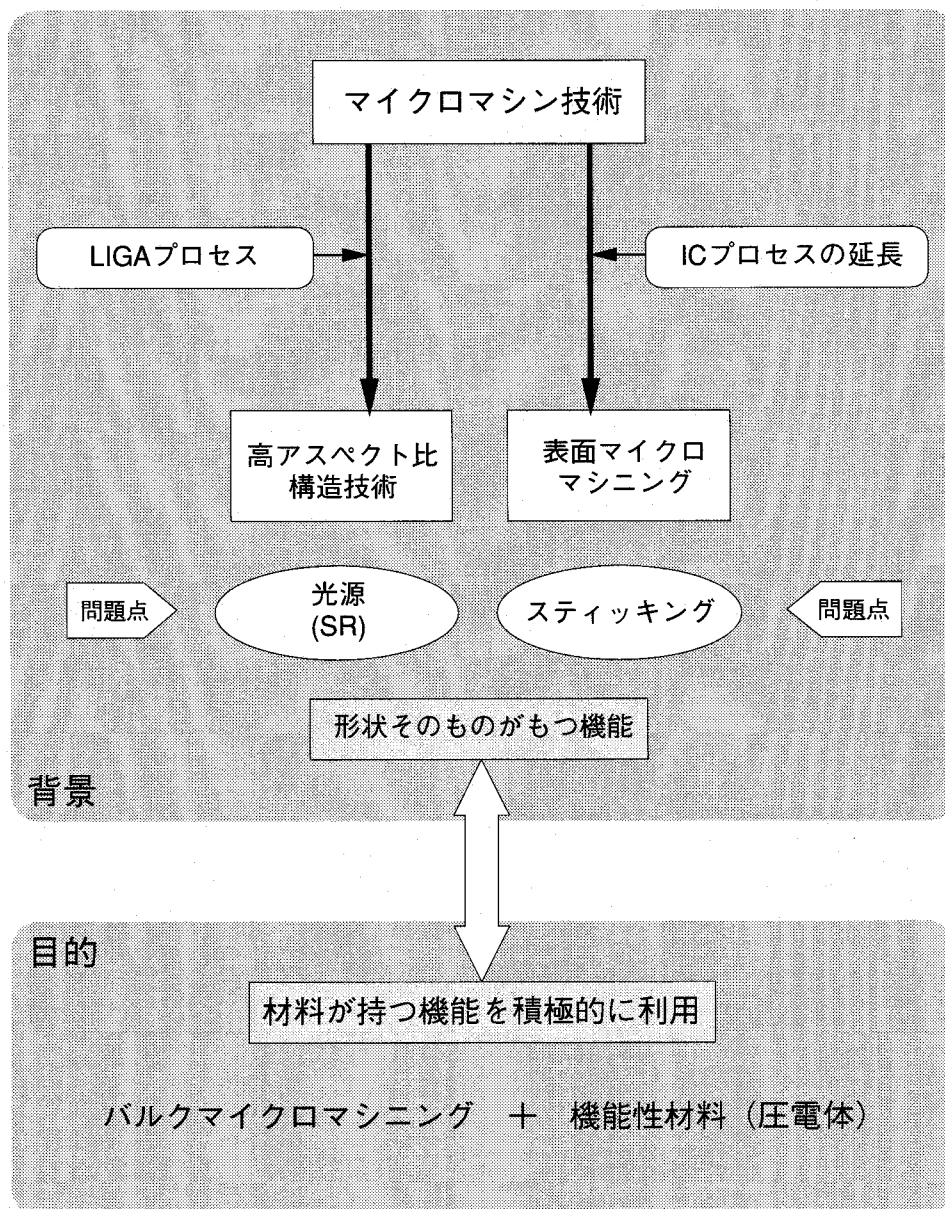


図 1.1 本研究の背景および目的

発が遅れているのが現状である。ここで、前者の静電方式が構造の妙によりその機能を発現しているのに対し、後者の方式は材料が本来持つ機能に着目したものといえる。前者の方式が発達した理由を、「形さえ決まってしまう材料はなんでも良い」と極言できるとすれば、シリコンを材料とするマイクロマシン構造体 [2] が、半導体集積回路微細化技術とともに発展してきたことが理解し易いであろう。

しかしながら、形状の妙を以って機能を発現する静電方式デバイスも、さらなる高性能

化・高機能化の要求の前に、問題点が出てきているのも事実である。表面マイクロマシニングの場合におけるスティッキングの問題、および HARMST における露光光源の問題である。前者は、微小ギャップを隔てて対向する構造同士が、液体の表面張力や構造の内部応力によって接触・接合してしまう問題であり、構造・プロセスを更に複雑にする要因となる。また後者は、深い露光に用いる極単波長光源、特に SR (Synchrotron Radiation) のために極めて大規模な設備が必要とされる問題で、“持たざる”研究機関のこの分野への参入を妨げる原因となっている。

そこで本研究では、超微細加工のみに頼らず材料が本来持つ機能を積極的に利用したマイクロデバイスについて提案し、基本技術の確立とこれら技術を応用したデバイスを実現し評価することを目的とする。具体的には、構造としてはバルクマイクロマシニングによる単純な薄板構造（ダイアフラム）を用い、機能性材料として圧電体薄膜を組み合わせる。圧電体はそれ自身が電気・機械変換を行なうので、微小ギャップを隔てた対向電極は必要なく、原理的にスティッキング・フリーである。また、複雑な構造を用いなくても機能性材料の特性改善によりシステム全体の性能を上げることが期待できる。

以上の本研究の背景並びに目的を模式的に図 1.1 に示す。

1.2 本論文の構成

本論文の構成を図 1.2 に示す。先に述べたように、本論文の主要部分は要素技術としてのバルクマイクロマシニングと圧電体薄膜の作製評価、およびこれら要素技術を組み合わせたアクチュエータ、センサの作製評価という 4 つの構成要素からなる。それぞれが第 2 章～第 5 章に対応しており、最後に第 6 章で結論をまとめる。

以下に各章の内容を要約する。

第 2 章 Si バルクマイクロマシニングとこれを利用した赤外検知型ガスセンサ

本章では、シリコンのバルクマイクロマシニング技術、特に異方性エッチングによる形状形成とエッチストップ層による構造体作製技術について述べる。また、バルクマイクロマシニング形状をマイクロキャビティとして利用して Golay-cell 型赤外線センサをマイクロ化し、さらに赤外検知型ガス識別センサとしての応用について述べる。

第3章 ゾルゲル PZT 薄膜の作製と圧電性評価

本章では、機能性材料としての圧電体 PZT 薄膜のゾルゲル法による製膜とその特性評価について述べる。厚膜化するための積層方法を最適化し、センサ・アクチュエータ材料として必要とされる膜厚まで堆積した薄膜について、良好な結晶性・電気的特性を有することを示す。また薄膜材料としての圧電性を簡便に評価する方法を考案し、これによりゾルゲル PZT 薄膜の圧電性を評価して、その改善方法について述べる。

第4章 太陽電池と圧電体を複合化した光駆動振動型アクチュエータ

本章では、第2章で作製した p^+ -Si 層を単なる構造材としてだけでなく、太陽電池の p 型層として利用し、構造と機能を両立したマイクロ構造について提案する。さらに、圧電体膜と組み合わせて光照射により駆動されるアクチュエータ構造を作製し、その駆動特性を示す。

第5章 Si ダイアフラム上 PZT 薄膜を利用した超音波マイクロアレイセンサ

本章では、第2章で述べたマイクロ構造と第3章で述べたゾルゲル PZT 薄膜を組み合わせた、超音波マイクロアレイセンサについて述べる。まず、空中超音波を用いたアレイセンシングにおいて、使用周波数の設計方針を示し、これに基づきセンサ素子の構造を決定する。次にマイクロ構造作製と PZT 製膜を組み合わせる際の最適なセンサ作製プロセスを示し、実際に作製したセンサ素子の基礎特性を評価する。また、アレイセンサとしての性能を評価し、鋭い指向性を利用して立体形状計測が可能であることを示す。さらに、センサ素子毎の特性のバラツキを効果的に修正する方法を示し、これにより電子走査を用いて複数物体の認識が可能であることを示す。

第6章 結論

本章では、第2章から第5章までの研究成果を総括し、本研究で得られた主要な結論を要約する。

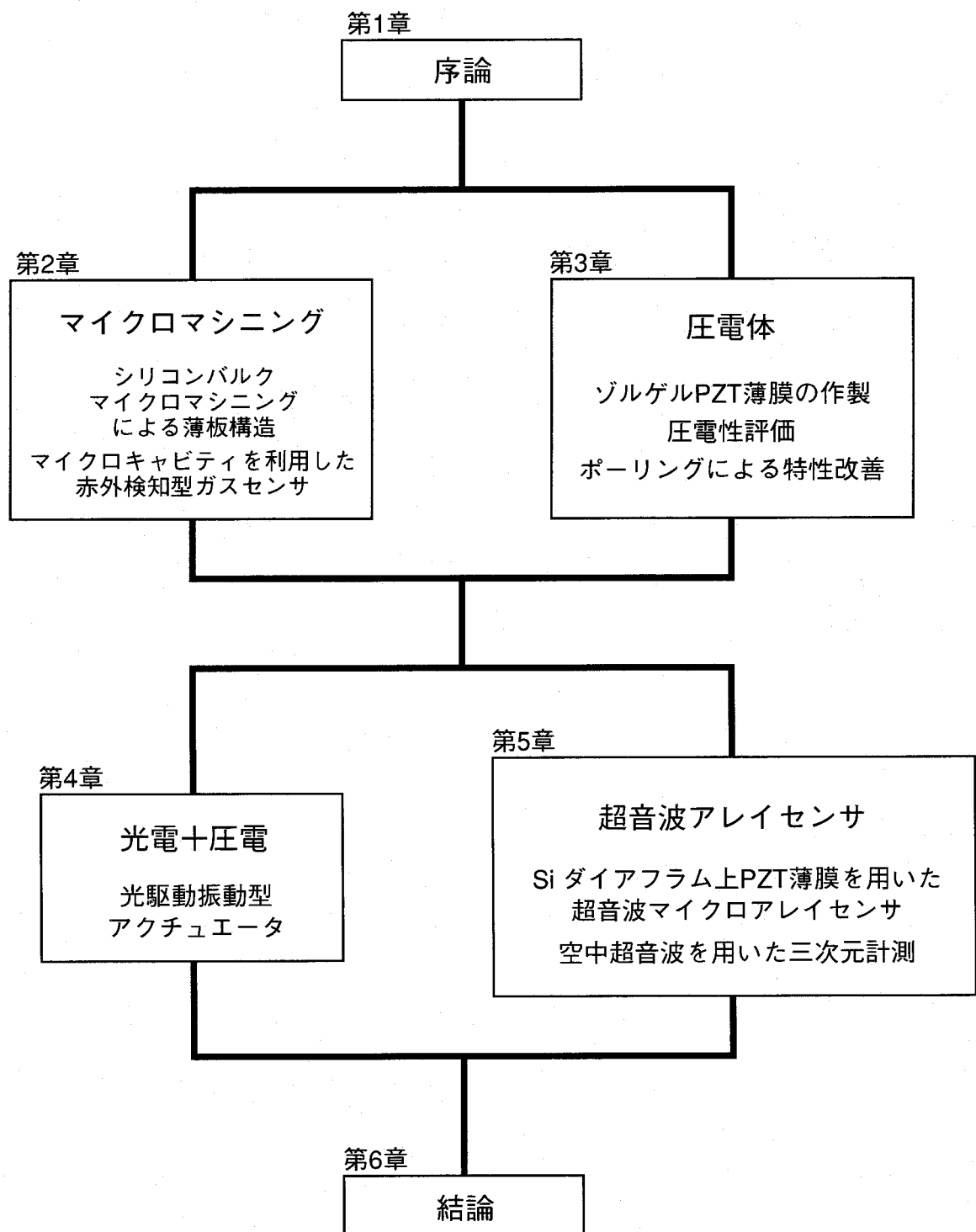


図 1.2 本論文の構成

第2章 Siバルクマイクロマシニングと これを利用した赤外検知型ガス センサ

2.1 はじめに

ある種のアルカリ溶液は，結晶シリコンをエッチングする速度が結晶方向に対して大きく異なり，(111)面のエッチング速度が他の面の数十から数百分の一と，非常にエッチングされにくいという性質を持つ．これらの液は SiO_2 や高濃度に不純物をドーピングした結晶シリコンに対してもエッチング速度が小さくなるため，エッチング速度の異方性と組み合わせることにより様々な構造を作製することができ，マイクロマシニングにおいて重要な基礎技術の一つである．

本章では，シリコンのバルクマイクロマシニング，特に異方性エッチングによる形状形成とエッチストップ層による構造体作製技術の最適化について述べ，さらにこのエッチング形状をマイクロキャビティとして利用した赤外線センサとそのガス種識別センサへの応用について述べる．

2.2 シリコンバルクマイクロマシニング

2.2.1 シリコンの結晶異方性エッチング

図 2.1 に示すシリコンの結晶構造を見ると，結晶表面の原子に対する結晶内部の隣接原子との結合手が，(100)面では 2 本であるのに対し，(111)面では 3 本である．エッチング反応はこの隣接原子との結合手を断ち切らねばならないので，(100)面に比べて(111)面がエッチングされ難くなることが理解できる [8]．図 2.2 はあるマスクパターンを用いて Si(100) ウェハに異方性エッチングを行なった時のエッチング形状を示している．(100)面

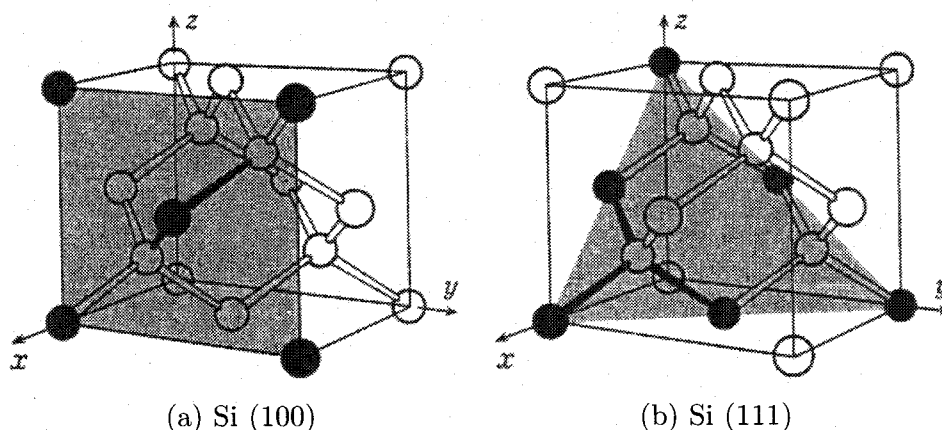


図 2.1 シリコンの結晶構造の模式図. (a) (100) 面では表面原子に対する結晶内部の隣接原子との結合手が 2 本であるのに対し, (b) (111) 面ではこれが 3 本である.

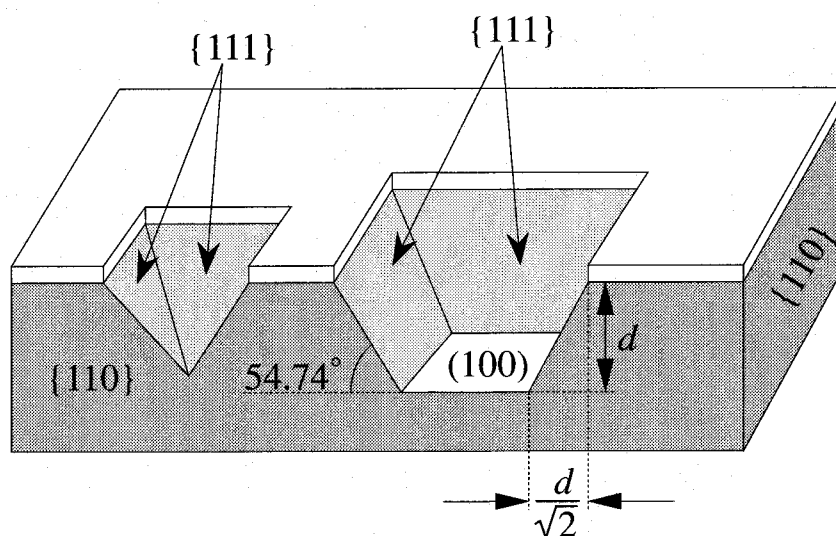


図 2.2 Si (100) ウェハの異方性エッチング形状。〈100〉に平行な辺を持つ長方形の開口部を有するマスクを用いて異方性エッチングされた時の形状を示す。

が先にエッチングされるため、時間が経過するにつれて {111} 面で囲まれた形状が出現する。マスク開口部が小さい時は、{111} 面で囲まれた逆ピラミッド形状が出来上がった時点でエッチングがほぼ停止する。マスク開口部が大きい時は、更に深くエッチングが進み、やがてウェハの裏面に達するエッチングホールを作ることができる。通常、ウェハの裏面もマスクで覆われているので、マスク材料だけからなる薄板構造を容易に作製することができる。ここでエッチングホールの側面がウェハ面に対してなす角度は、{111} 面と {100} 面の交差する角度、すなわち $\tan^{-1} \sqrt{2} \simeq 54.74^\circ$ となり、深さ d におけるエッ

表 2.1 主な Si 異方性エッチング用エッチャントの比較

	Si(100) etching speed [$\mu\text{m}/\text{min}$]	Si(100):(111) etching speed ratio	SiO ₂ etching speed [nm/min]	Misc.
KOH	1.4~2.5	400 : 1	9.6	alkali metal
EPW ¹⁾	1.0~1.2	35 : 1	0.2	
TMAH ²⁾	1.0~1.4	30 : 1	0.4	expensive
Hydrazine ³⁾	2			surface rough, toxic
NH ₄ OH	0.5	25 : 1		

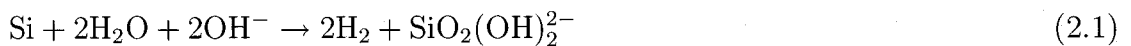
¹⁾ $\text{H}_2\text{N}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{NH}_2 + o-\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O}$ (*Ethylenediamine+Pyrocatechol+Water*)
EDP と書かれる.

²⁾ $\text{N}(\text{CH}_3)_4\text{OH}$ (*Tetramethyleammonium Hydroxide*)

³⁾ $\text{H}_2\text{N}=\text{NH}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

エッチング底面は、マスク開口部より $\sqrt{2}d$ だけ小さくなる。この形状は、結晶の各面方位の角度によって決まるので、原理的には幾何学的に非常に高い精度で形状を作製することができる。

表 2.1 にシリコン異方性エッチングに用いられる主な溶液の比較を示す [9, 10]. これらはいずれもアルカリ溶液であり、シリコンのエッチングは主として次のような式で表される反応で進み、 $\text{SiO}_2(\text{OH})_2^{2-}$ の錯イオンとして溶解する。



これらのエッチング液の中では KOH は最もエッチングの異方性が高く、またエッチング速度も大きいので形状作製が早くできるが、SiO₂ のエッチング速度も大きく、ウェハをほぼ貫通するようなエッチングを行なう場合、通常の熱酸化膜でマスクを形成するのが困難で SiN_x 等をマスクに用いなければならない。また、アルカリ金属の K を含むので汚染の問題からシリコンプロセスとの両立が難しい。ヒドラジンも比較的エッチング速度が大きいですが、エッチング底面にマイクロピラミッドが発生し易いため平坦な構造を作りやすく、また発ガン性が指摘され取り扱いに十分注意する必要がある。EPW (EDP と書かれる) や TMAH はこれらの問題があまりなく、シリコンプロセスと組み合わせてよく用いられる。

表 2.2 シリコン異方性エッチングの精度比較. 1 μm 厚の熱酸化膜をマスクとして $\phi 2$ インチ Si ウェハに 196 個のエッチングホール (1.25 mm 角) を作製した際の, EPW と TMAH におけるエッチング形状を比較した.

	サイドエッチ量	底部サイズ	エッチング深さ	(111) 面角度
EPW	7.3 ~ 18 μm	963 ~ 975 μm	200 ~ 225 μm	54.8 ~ 56.3°
TMAH	40 ~ 79 μm	991 ~ 1021 μm	253 ~ 263 μm	58.3 ~ 60.6°

マイクロセンサ, マイクロアクチュエータのための薄板構造 (ダイアフラム) を作製するには, 先に述べたようにウェハをほぼ貫通するエッチングを行ない, ウェハ裏面のマスク層でエッチングを停止することにより形成する. エッチングを停止するためのマスク層としては, SiO_2 や SiN_x が用いられるが, これらは通常アモルファスであり, センサ・アクチュエータの構造を形作る材料としては, 構造的強度の面 (プロセス途中での破壊し易さ) から, また機械的特性の面 (振動駆動・検出時の共振の Q 値や残留応力) から問題がある. 理想的には構造材料として, 機械的強度に優れた単結晶シリコンを用いたい. そこで本研究では二つの方法で単結晶シリコンを用いた薄板構造を作製した. ひとつは, 異方性エッチング速度の不純物濃度依存性を利用したエッチストップ層を用いるもので, 次節で述べる p^+ -Si 層を用いる方法である. もうひとつは, SOI (Silicon On Insulator) ウェハを用いて中間酸化膜層でエッチングを停止し, 活性層で薄板構造を構成する方法である. 特に SIMOX (Separation by IMplanted OXygen) ではない貼り合わせの SOI ウェハを用いれば, 活性層は純粋な (イオンダメージ等を受けていない) 単結晶シリコンであり, 構造材としては理想的である. SOI ウェハによる薄板構造を用いたマイクロセンサについては第 5 章で述べる.

実際にマイクロセンサ・マイクロアクチュエータの構造を作製する際には, その幾何学的寸法精度が非常に重要である. 異方性エッチングでは, 単結晶シリコンの結晶面方位の角度によってエッチング構造が決まるので, 原理的には幾何学的に正確なエッチング形状となるはずであるが, 実際には, エッチング液の場所による温度差やエッチング生成溶解物の分布ムラ等によりエッチング速度にバラツキが生じる. また, 結晶異方性が大きいといってもその比は無限大ではなく, 露出した (111) 面はゆっくりとだがエッチングされてゆき, 構造誤差となる. さらに, マスク材料に対するエッチング速度の差も形状誤

差の要因となる．そこで，先に述べたエッチング液のうち最も良く用いられる EPW と TMAH について，基本的なエッチング精度の比較を行なった．エッチング対象としては，直径 2 インチ，厚さ 300 μm のシリコン基板を用い，厚さ 1 μm の熱酸化膜をマスクとして一辺 1.25 mm の正方形エッチングホールを 196 個パターンニングし，基板貫通の手前 2 時間でエッチングを終了してエッチング形状を比較した．比較項目としては，エッチング開口部のサイドエッチ量，エッチング底部の大きさ，エッチング深さおよび側面の角度とした．エッチングの条件としては，それぞれ最も良好なエッチング形状が得られるとされている条件を用いた．EPW では $E [\text{ml}] : P [\text{g}] : W [\text{ml}] = 17 : 3 : 8$ でエッチング温度 114°C，TMAH では濃度 22%wt でエッチング温度 104°C とした．各比較項目についての結果を表 2.2 に示す．一見して，TMAH ではサイドエッチ量が大きいことがわかる．これは SiO_2 のエッチング速度が速いことに起因すると考えられるが，単にサイドエッチ量自体が大きいだけでなくバラツキも大きく（EPW の 0.85% に対して TMAH は 3.1%）なっていることが分かる．またこれに伴い底部のサイズのバラツキも大きくなっている．エッチング深さのバラツキは TMAH の方が小さいが，最終的にエッチストップ層でエッチングが停止することを考えると，深さのバラツキに起因する構造のバラツキは (100) 面と (111) 面のエッチング速度の比 (1/35) に還元されるため大差ないと考えられる．最後に (111) 面の角度を見ると，TMAH では理論的な傾きよりもかなり急峻になっており，またその角度バラツキも大きいことが分かる．

以上の比較より，TMAH よりも EPW を用いた方が精度の良い形状形成が可能であると考えられる．また，TMAH による異方性エッチングでは，高濃度に不純物をドーピングした層 (p^+ -Si) でもエッチングが停止しにくいという報告 [11] もあり，この場合には薄板構造の作製に TMAH を使用することができない．したがって，以降，異方性エッチングのエッチング液としては EPW を用いることとした．

2.2.2 p^+ -Si によるエッチストップ層の作製

異方性エッチング液のエッチング速度は，シリコン中の不純物濃度によっても影響を受ける．図 2.3 は高濃度にボロンをドーピングした場合の，ボロン濃度に対するエッチング速度の依存性を示している [14]． 10^{19} cm^{-3} 台の後半から一桁以上エッチング速度が遅くなっ

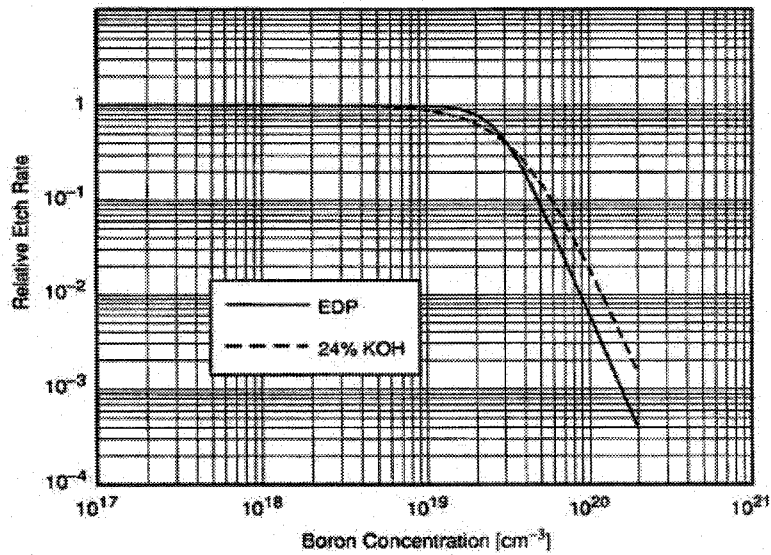
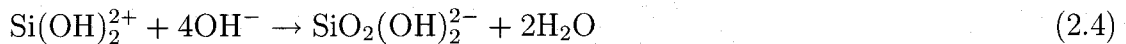


図 2.3 EDP と KOH を用いた場合の異方性エッチング相対速度のボロン濃度依存性

ていることが分かる．これは， p^+ 層からのホールの供給によりエッチング反応が妨げられることが原因と考えられている．式 (2.1) は，詳しくは次の三段階の反応を経る [13]．



p^+ -Si 層では式 (2.2) の右辺で生成した電子が高濃度のホールと再結合することにより消滅して式 (2.3) の反応が進まないため，エッチング速度が遅くなると考えられている．

p^+ -Si 層を作製する方法としては，熱拡散法とイオン注入法が広く用いられている．半導体集積回路のプロセスとしてはイオン注入が主流になりつつあるが，エッチストップ用の高濃度拡散のための注入には非常に時間がかかる．また，イオン注入は装置自体が高価で大がかりであり，メンテナンスも非常に大変である．ここでは，簡便に短時間に高濃度拡散層を作製できる，固体ソース BN (Boron Nitride) を用いた熱拡散を行なうこととした．図 2.4 に拡散炉の概略を示す．使用した BN は電気化学工業社製 UA タイプで高濃度拡散用である．外見は白色のセラミックスで，その名の通りの窒化硼素を主成分としバインダとして酸化アルミニウムを含む．

BN はそのままではボロンソースとならないので，まず炉中に BN だけを入れた状態で

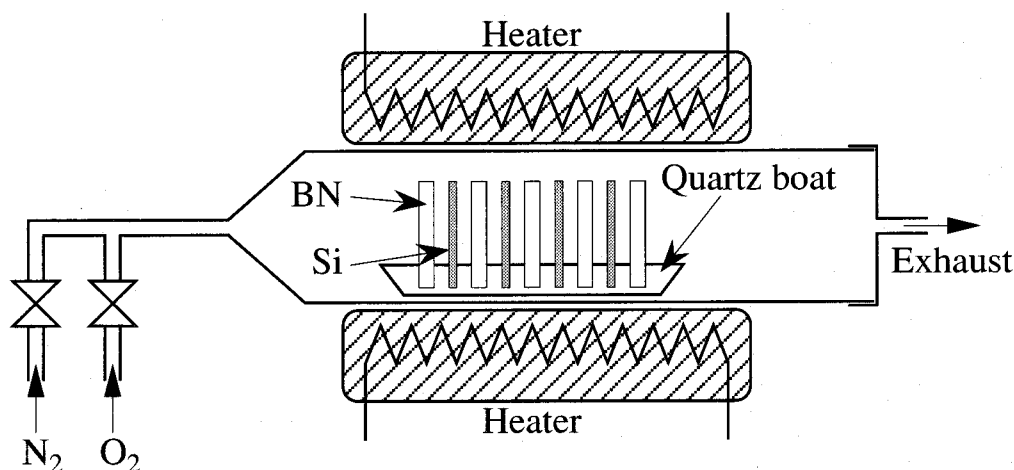
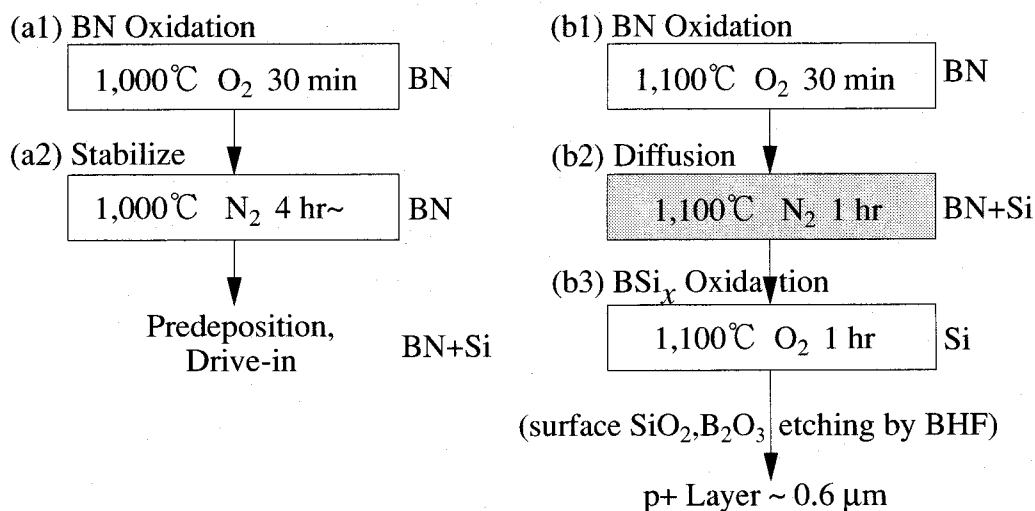


図 2.4 固体ソース BN を用いた p⁺ 拡散炉の概略図



(a) 通常の半導体集積回路用の工程 (b) 異方性エッチングストップ p⁺-Si 用の工程

図 2.5 BN を用いたボロン拡散の工程

温度を上げ酸素を導入することにより BN 自体を酸化して表面に B_2O_3 を析出させる。次に拡散対象であるシリコンウェハを BN とともに炉内に入れ、窒素雰囲気中高温で B_2O_3 を昇華させてシリコン上に堆積させる（プリデポジション）。その後シリコンウェハのみを炉内に入れ、窒素雰囲気中高温で表面に堆積した B_2O_3 をシリコン中へ拡散させる（ドライブイン）。通常の半導体集積回路用の拡散層を作製する際には、1000°C 程度で BN を酸化し 1000°C 程度の窒素雰囲気中で 4 時間から 24 時間安定化した後、ウェハプロセスのプリデポジション、ドライブイン工程に供する。この拡散工程のフローを図 2.5(a) に示す。(a2) の安定化工程が必要とされるのは、酸化直後の BN からは過剰なボロンが放出

され半導体集積回路用の拡散層としては拡散量を制御し難いためである。しかしながら、異方性エッチングのエッチストップ層に用いるためには 10^{20} cm^{-3} にも及ぶ高濃度拡散層を必要とする。実際に図 2.5(a) の工程で拡散を行なったところ、異方性エッチングに耐える拡散層を作製することはできなかった。そこで、高濃度拡散には初期の過剰なボロンが必要であると考え、安定化の工程を経ず BN 酸化直後にシリコン上に拡散することとした。図 2.5(b) にこの工程のフローを示す。高濃度拡散工程では、昇華した B_2O_3 が気相で運ばれシリコン表面に堆積するとともにシリコン内部への拡散が起こり、プリデポジションとドライブインを同時に行なっている状況と考えられる。この工程を用いることにより、実際に異方性エッチングに耐える $\text{p}^+\text{-Si}$ 層を作製することができた。しかしながら、高温で高濃度の拡散を行なうため、シリコンウェハ表面に Si と B が直接化合した SiB_x の層が形成されることがあった。この層は酸やアルカリのエッチングでは取り除くことができず、また異方性エッチングの途中でウェハから部分的に剥がれ落ちてウェハ表面を汚染する原因となった。そこで、(b2) の工程の後に拡散済のシリコンウェハのみを炉内に入れ 1100°C 酸素雰囲気とすることにより表面の BSi_x の酸化を試みた。実際にこの (b3) の工程の後シリコンウェハを BHF (バッファード弗酸) で処理したところ、表面の異層はきれいにエッチングされて $\text{p}^+\text{-Si}$ 表面を露出させることができた。よって、(b3) の工程により直接化合していたボロンとシリコンがそれぞれボロンガラス B_2O_3 とシリカガラス SiO_2 の混合物となって BHF によりエッチングされたものと考えられる。

以上のような拡散工程の最適化により、安定して $\text{p}^+\text{-Si}$ 層を形成することができた。この $\text{p}^+\text{-Si}$ 層をエッチストップとして (100)Si ウェハに実際に異方性エッチングを行ない薄板構造を形成した。作製した構造の SEM 像を図 2.5 に示す。エッチング孔側面が (111) 面であり、底部が $\text{p}^+\text{-Si}$ 層である。 p^+ 層の厚みは約 $0.6 \mu\text{m}$ であった。このように、構造物として単結晶シリコンを用いることにより、非常に薄い構造をウェットエッチング中にも破壊されずに形成することができる。また、ボロンのイオン半径がシリコンより小さいため、 $\text{p}^+\text{-Si}$ 層では若干の引張り応力が働いている。このため全辺固定のたわみのないメンブ레인構造となっていることも、エッチング中の破壊を免れている要因の一つであると考えられる。このような非常に薄い構造は、外力によって容易にたわませることができるので、非常に感度の高い機械力センサを実現できることが期待される。次節では、このメンブ레인を用いたセンサについて述べる。

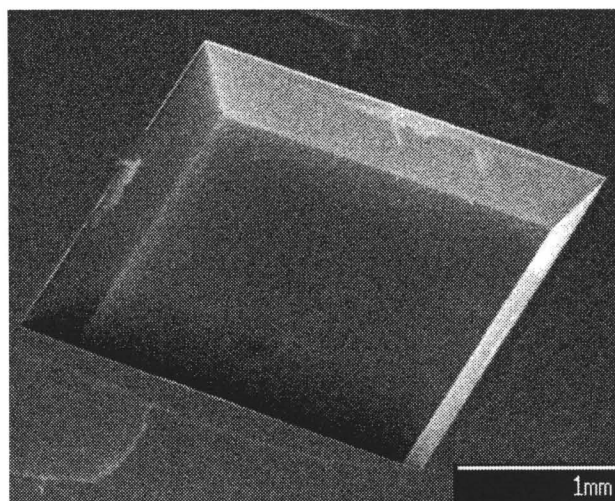


図 2.6 p^+ 層をエッチストップとして EPW による異方性エッチングで作製した $0.6\ \mu\text{m}$ 厚シリコンダイアフラムの SEM 像

2.3 マイクロキャビティを利用した赤外検知型ガスセンサ

近年，防犯用人体検知やガス洩れ検知，あるいはリモートセンシングへの応用のための室温動作可能な赤外線センサが注目されている．熱型の赤外線センサは量子型に比べて，冷却が不要であり感度の波長依存性が無いといった特徴を持ちこれらの応用に最適である．熱型赤外線センサにはサーモパイルやボロメータ，焦電センサおよびゴーレイセル (Golay cell) がある．前者三種はシリコンマイクロマシニングと薄膜作製技術を駆使してマイクロ化が行なわれている [16–22] が，これに対してゴーレイセルは極最近までマイクロ化が試みられていなかった．ゴーレイセルはガスチャンバと薄いダイアフラムを持ち，入射赤外光によるガスの体積膨張をダイアフラムの変形としてとらえ，光テコによりこれを検知するものである．このセンサは赤外線領域の広帯域に感度を持ち，また比較的高感度であるという特徴を有するが，ガスチャンバのもつ大きな体積のため，これまで小型化が困難であった．

最近，いくつかの小型化されたゴーレイセル型センサが発表された．これらはシリコンマイクロマシニングを用いて作製されたトンネル電流検知型変位検出センサ [23]，あるいは静電容量検知型センサ [24–26] であるが，前者は構造敏感性が高過ぎるという欠点がある．本節では，シリコンマイクロマシニング技術を用いてキャビティを作製し，静電容量検知型の小型ゴーレイセル型赤外線センサと，そのガスチャンバを利用したガス種識別

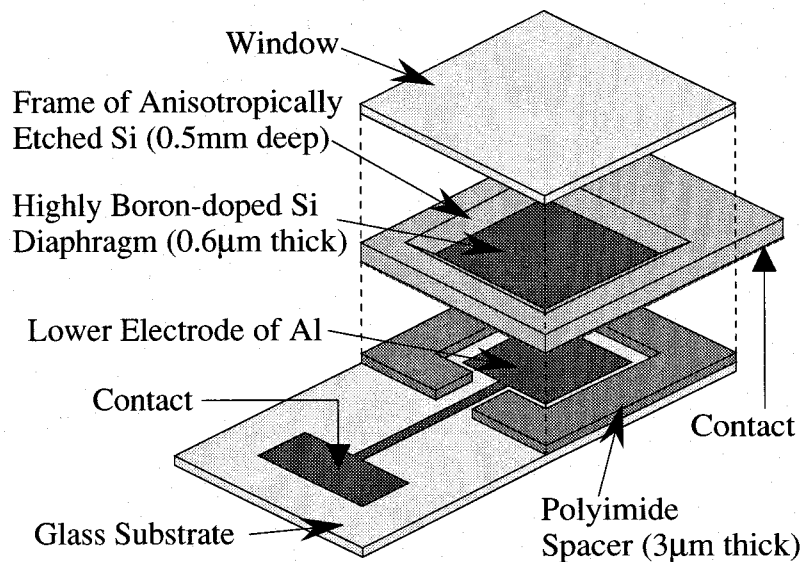


図 2.7 マイクロキャビティを利用した赤外線センサの構造

センサについて述べる。

2.3.1 センサ構造と作製プロセス

図 2.7 にセンサの構造を示す。センサは赤外透過用の窓，ガスチャンバおよび平行平板コンデンサの三層構造からなる。中央層でチャンバを構成するキャビティは，前節で述べたように (100) シリコンウェハを EPW を用いた異方性エッチングにより形成し，高濃度 p^+ 層でエッチストップすることにより $0.6\ \mu\text{m}$ の薄いダイアフラムを形成した。この p^+ 層は高い導電率を持つため，平行平板コンデンサの一方の電極としての役割を果たす。キャビティの開口は $4 \times 4\ \text{mm}^2$ ，ダイアフラムの大きさは $3.3 \times 3.3\ \text{mm}^2$ でキャビティの深さは $525\ \mu\text{m}$ である。作製したダイアフラムは非常に薄く，チャンバ内の気体の膨張により容易にたわむため，ガラス基板上に形成した対向電極との間でコンデンサを形成し，気体の体積変化をキャパシタンス変化としてとらえることが出来る。以下に，センサの作製プロセスを記す。

- (1) 2.2 節で示した熱拡散およびエッチングの工程により， p^+ -Si による薄いダイアフラム構造を形成する。
- (2) ガラス基板上に抵抗加熱真空蒸着法を用いてアルミニウム薄膜を作製し，フォトリ

ソグラフィ、燐酸・硝酸を用いたエッチングを行ない、平行平板コンデンサの対向電極を形成する。

- (3) 同ガラス基板上に、コンデンサギャップおよび接着のためのポリイミド層を形成する。3,000 rpm, 30 秒のスピンコートの後オープンにて 85°C で 30 分間プリベイクする。その後、通常のポジレジストを用いたフォトリソグラフィによりパターンニングを行なう。ポストベイク前のポリイミドはポジレジストの現像液でエッチングされるので、レジストの現像時にそのままエッチングを行なう。エッチング完了後、アセトンでレジストを剥離する。
- (4) ポリイミドのポストベイクの際に、シリコンキャビティ基板とガラス基板を接着して平行平板コンデンサを形成する。ホットプレート上に、(3) のガラス基板上、(1) のシリコン基板および接着用の重り (300 gf/cm²) を設置し、300°C で 30 分間ポストベイクを行ない接着する。
- (5) 窓層をシリコンフレームに接着してキャビティを密封する。窓材には、赤外透過性の良いシリコン基板を用いた。またガス封入時には、使用するガスの飽和蒸気中で密封することによりガスを封入した。

2.3.2 センサ応答の静特性解析

赤外線センサの断面構造と検知原理の説明を図 2.8 に示す。センサ応答について、熱膨張によるダイアフラムの変位を計算することにより基本的な静特性解析を行なった。ここで、チャンバ中の気体は理想気体とし、赤外光吸収にともなう熱膨張によりダイアフラムに一樣な圧力を生じるものとする。

赤外光が入射し、チャンバ内の気体の温度 T 、圧力 P および体積 V が平衡状態 (T_0, P_0, V_0) から微小に変化することにより

$$\left. \begin{array}{l} T_0 \rightarrow T_0 + \Delta T \\ P_0 \rightarrow P_0 + \Delta P \\ V_0 \rightarrow V_0 + \Delta V \end{array} \right\} \quad (2.5)$$

となったとすると、理想気体の状態方程式 $PV = nRT$ より

$$\frac{\Delta T}{T_0} = \frac{\Delta P}{P_0} + \frac{\Delta V}{V_0} \quad (2.6)$$

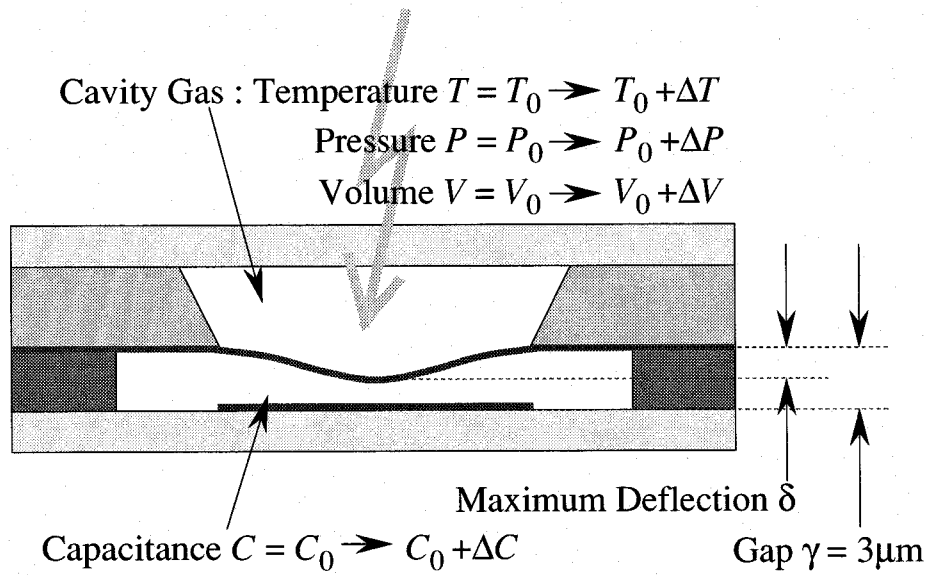


図 2.8 赤外線センサの断面構造と検知原理の説明図

と近似できる．一方，一様な圧力を受けてたわむ四辺固定の正方形ダイアフラムのたわみ形状は，Ritz の方法により次式で近似できる [27]．

$$w(x, y) = \frac{0.383P}{16a^4K} \left(x^2 - \frac{a^2}{4} \right)^2 \left(y^2 - \frac{a^2}{4} \right)^2 \quad (2.7)$$

ここで $w(x, y)$ はダイアフラム上の位置 (x, y) におけるたわみ量（ダイアフラムの中心に原点をおく）， a はダイアフラムの一辺の長さである．また K はダイアフラムの曲げ剛性で，ヤング率 E ，ポアソン比 ν および厚さ t を用いて

$$K = \frac{Et^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (2.8)$$

と表される．

式 (2.7) を用いると，チャンバ内の体積変化 ΔV およびキャパシタンス C が

$$\Delta V = \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-a/2}^{a/2} w(x, y) dx dy \quad (2.9)$$

および

$$C = \epsilon_0 \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-a/2}^{a/2} \frac{dx dy}{(\gamma - w(x, y))} \quad (2.10)$$

と表される．ここで γ はコンデンサギャップである．

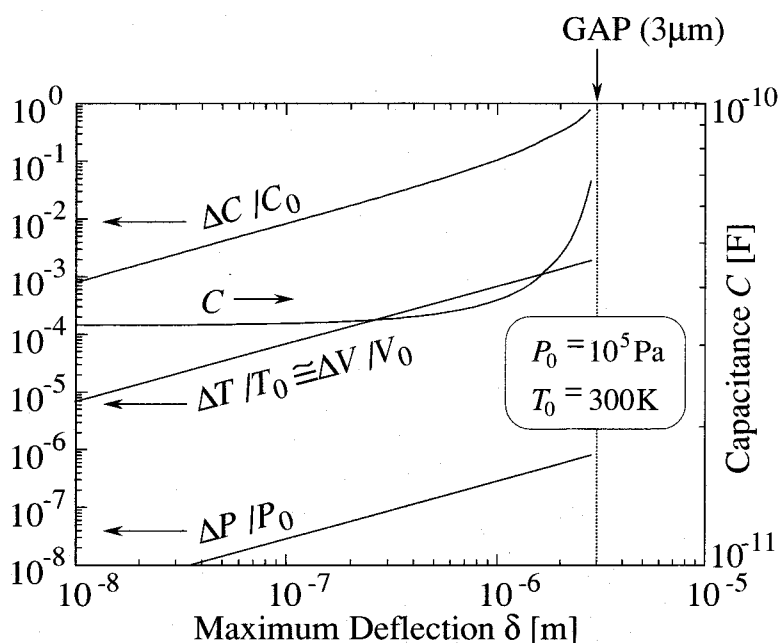


図 2.9 静特性解析の結果. キャビティ内気体の圧力変化 ($\Delta P/P_0$) は体積変化 ($\Delta V/V_0$) や温度変化 ($\Delta T/T_0$) に比べて無視でき, 温度変化が直接体積変化に結び付き静電容量変化 ($\Delta C/C_0$) として検出される.

図 2.9 に解析結果を示す. ここで横軸の δ はダイアフラムの最大たわみ量, すなわちダイアフラム中心でのたわみ $w(0,0)$ を表す. 気体の平衡状態での温度および圧力は, 常温・常圧 ($T_0 = 300 \text{ K}$, $P_0 = 10^5 \text{ Pa}$) とした. 図 2.9 より圧力変化は, 温度変化および体積変化に比べて無視でき ($\Delta P/P_0 \simeq 10^{-3} \times \Delta T/T_0$, $10^{-3} \times \Delta V/V_0$), 温度変化が直接体積変化に結び付いていることが分かる.

キャパシタンスの変化 $\Delta C/C_0$ は, 最大たわみ量 $1 \mu\text{m}$ 程度までの範囲では温度変化 $\Delta T/T_0$ にほぼ比例している. たわみが $1 \mu\text{m}$ を越えると, ダイアフラム中心部付近の領域でのキャパシタンスが支配的になるため, 応答は非線形となる. 初期容量 32 pF に対して, 0.2 K の温度変化につき 10% の容量変化, すなわち 3.2 pF の容量変化が見込まれる.

2.3.3 赤外光照射応答特性

センサの特性評価のため, 二種類の構造のセンサを作製しそれぞれについて測定系を構成した. 図 2.10 にその測定系とデバイスの構造を示す. タイプ A のデバイスは, 図 2.7

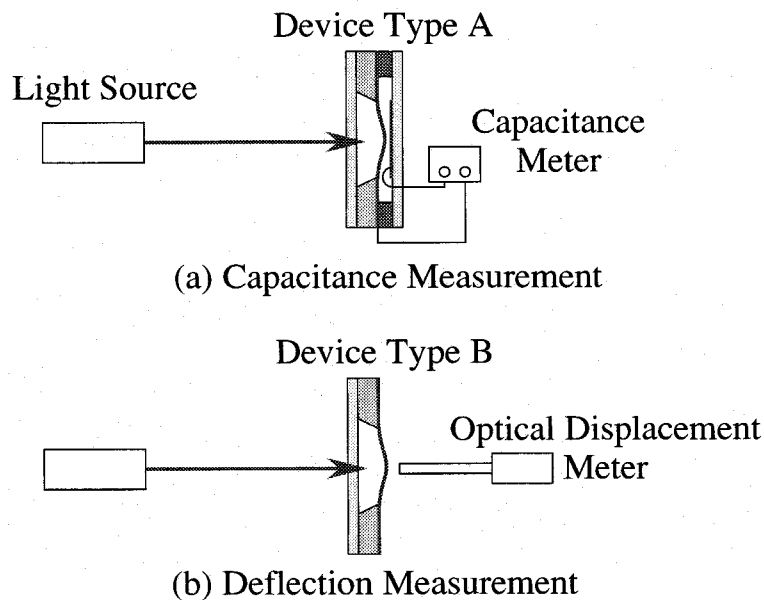


図 2.10 センサの赤外光応答特性を測定するためのデバイス構造とその測定系. (a) タイプ A デバイスは対向電極を持ち、静電容量変化を測定する. (b) タイプ B デバイスは対向電極を取り除き、ダイアフラムの変位を光学式変位計で測定する.

に示したものと同一静電容量検知型のセンサで、赤外光照射に対する応答をキャパシタンスメータで測定した. タイプ B のデバイスは、タイプ A のデバイスから対向電極を取り去ったもので、チャンバそのものの特性を評価するためにダイアフラムのたわみを直接測定できるようにしたものである. 赤外光照射に対する応答は、非接触の光学式変位計により測定した. ここでの測定において、チャンバ内気体および雰囲気はいずれも全て大気である.

パルス赤外光照射時の応答を図 2.11 に示す. 光源には波長 $10.6 \mu\text{m}$ の CO_2 レーザを用い、 6 W/cm^2 の強度で 180 ms 照射した. これによる容量変化は約 50% で、温度変化に換算すると 0.4 K に相当する. またこの応答の際、ダイアフラムは $1 \mu\text{m}$ を越えて変位しており非線形な静電容量応答の領域に入っているため、容量変化率に飽和する傾向が見られない.

一様な連続赤外光照射に対する応答を図 2.12 に示す. 光源には同じく CO_2 レーザを用い、センサの容量応答が温度に対して線形となる領域での光強度とした. 線形領域では、一様な光照射に伴い容量変化が飽和する傾向を見せる. 容量の時間変化率は照射光強度にほぼ比例し、赤外線センサとしての動作が確認された.

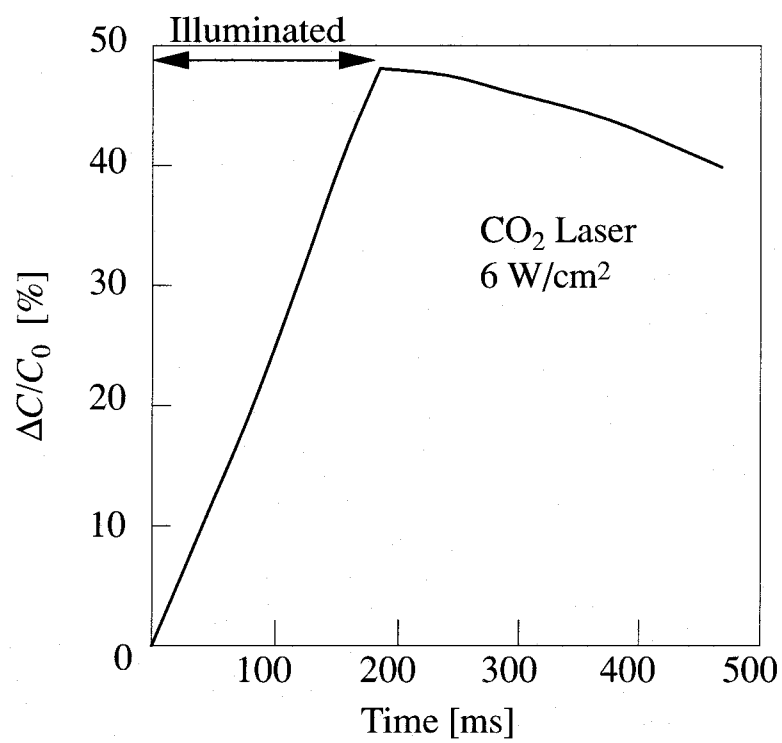


図 2.11 パルス赤外光照射によるタイプ A デバイスの応答

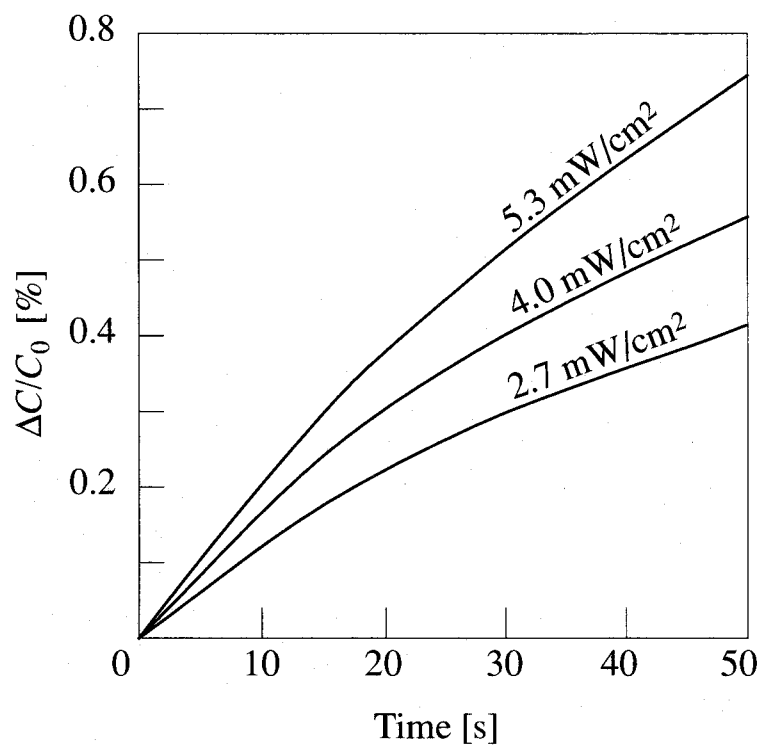


図 2.12 一様な連続赤外光照射によるタイプ A デバイスの応答の照射光強度依存性.

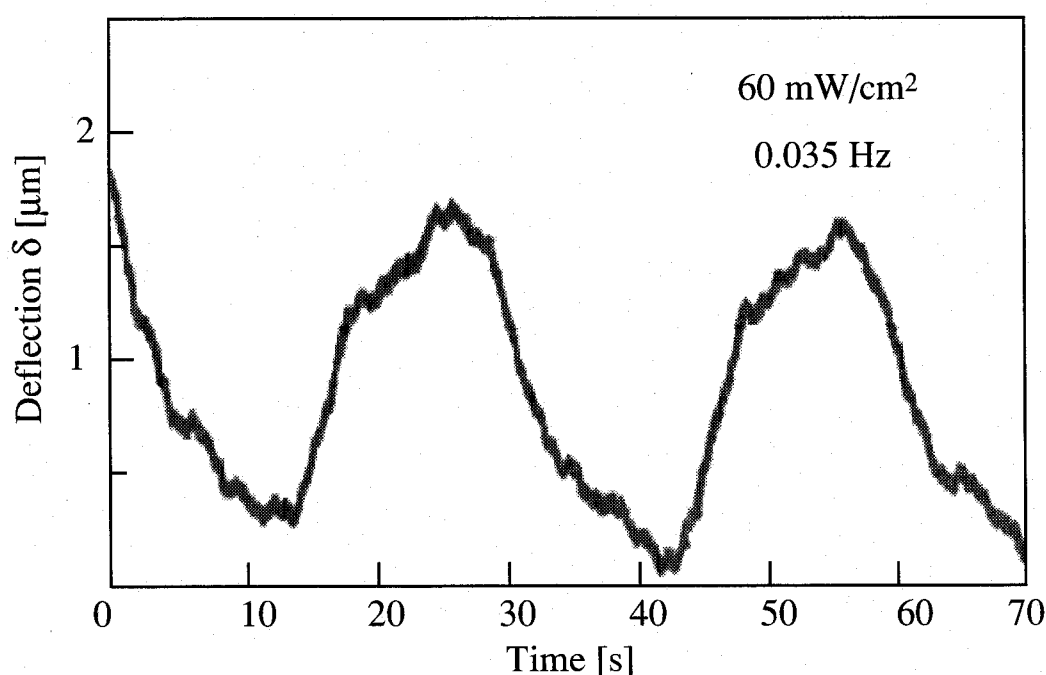


図 2.13 チョッピング光照射時のタイプ B デバイスの応答

次に、赤外線センサとしての感度の評価を試みた．図 2.13 にチョッピング赤外光照射時のタイプ B デバイスの応答を示す．光源には 300 W Xe ランプを使用し，ND フィルタを用いて光強度を減衰した．センサ上での照射光強度は 60 mW/cm^2 ，チョッピング周波数は 0.35 Hz である．応答波形から求めた雑音等価パワー (NEP; Noise Equivalent Power) は $5.3 \times 10^{-4} \text{ W}$ ，検出能 D^* は $1.3 \times 10^3 \text{ cm}\sqrt{\text{Hz}}/\text{W}$ となった．これらは，他の赤外線センサと比較するとかなり低感度ということになるが，これは，光学式変位計のノイズ（変位に換算して $0.02 \text{ }\mu\text{m}$ ）が含まれているためである．すなわち，これら NEP ならびに D^* の値は測定系に起因する要素が大きく，センサ感度の下限を与えるものと考えられる．また，タイプ B デバイスを用いた測定において，赤外入射窓を取り除いて赤外光照射に対するダイアフラムの変位を測定したところ，その変位は光学式変位系のノイズレベルと同等以下であることを確認した．これより，ダイアフラムのたわみはダイアフラム自身の熱膨張によるものではなく，チャンバ内の気体の熱膨張によるものであることが分かる．

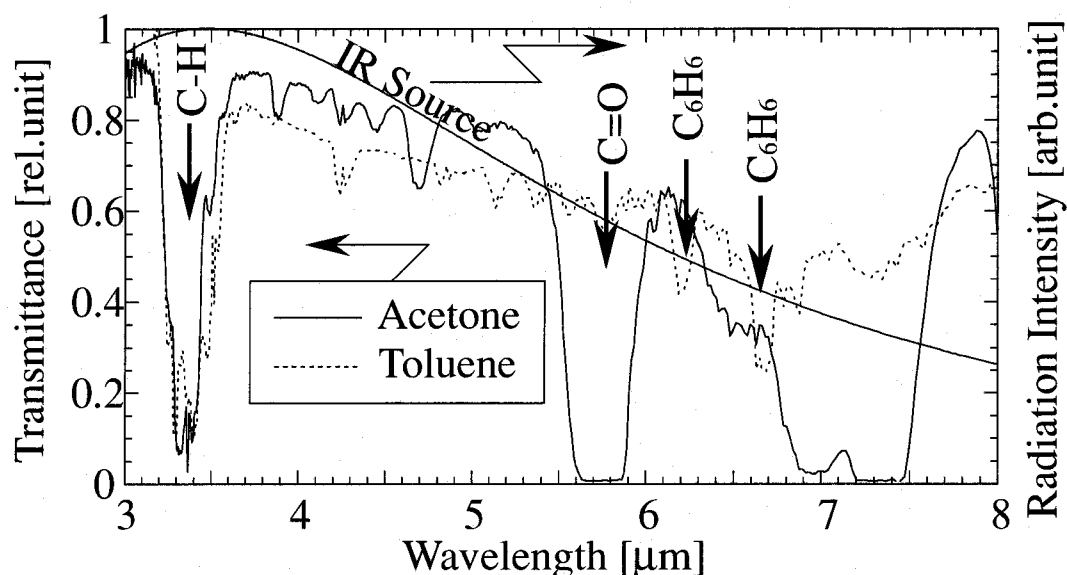


図 2.14 アセトンおよびトルエンの赤外吸収スペクトル（測定値）と 550°C における黒体輻射スペクトル（計算値）

2.3.4 ガス封入による特性修飾

センサのチャンバ内にガスを封入することにより、ガスの赤外吸収スペクトルに応じてセンサの応答を変えることができる。ここでは、典型的な吸収スペクトルを持つ有機溶媒のアセトン (CH_3COCH_3) およびトルエン ($\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$) 蒸気を封入した二種類のアセトンセンサとトルエンセンサを作製した。また光源としては、黒体輻射に近いブロードなスペクトルを持つ SiC ヒータを用いた。図 2.14 にアセトンとトルエンの赤外吸収スペクトルおよび 550°C における黒体輻射のスペクトル（計算値）を示す。これら有機ガスは、近赤外から赤外域に分子振動に起因する吸収ピークを持つ。二種のガスが共通して持つ 3.3 μm 付近の吸収ピークは C-H の伸縮によるもの [28] で、550°C の黒体輻射光源のスペクトルのピークはこれらのガスの吸収ピークによく一致する。

アセトンおよびトルエン封入センサと、通常の大気封入センサ（タイプ B デバイス）の赤外光照射応答を図 2.15 に示す。光源は 550°C の SiC ヒータを用い、20 mW/cm^2 の一様光を照射した。各センサは、封入ガスの総赤外吸収量に対応した応答を示している。

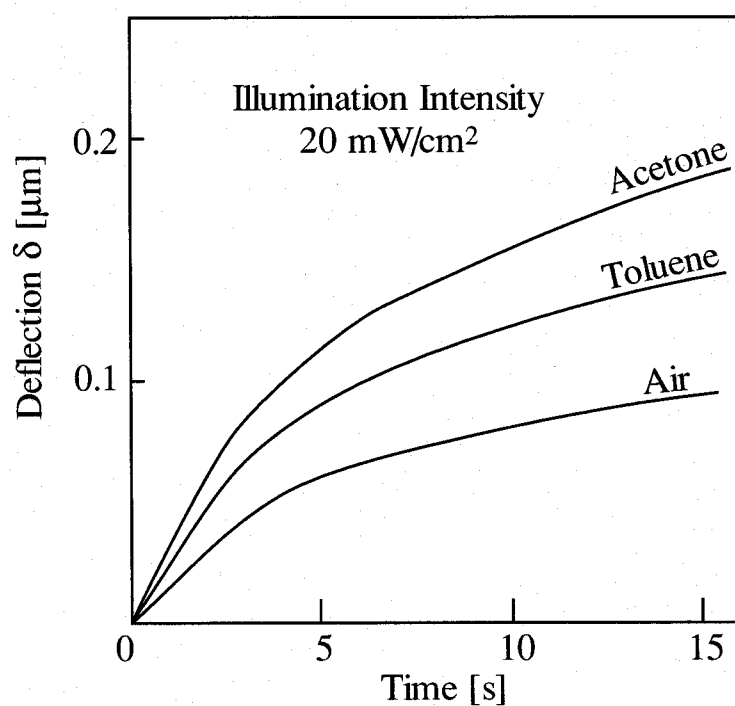


図 2.15 アセトンおよびトルエン封入センサならびに通常の大気封入センサの赤外光照射に対する応答

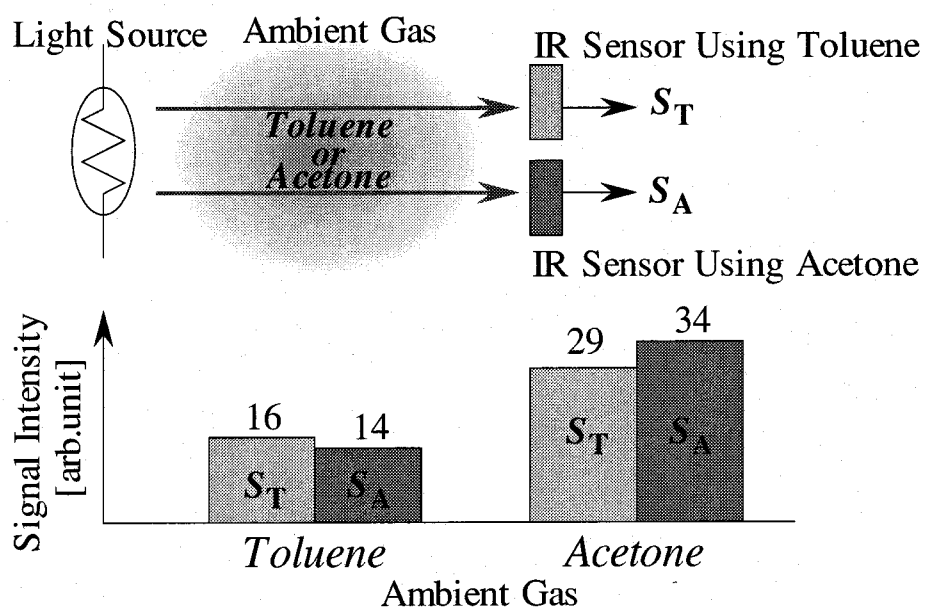


図 2.16 アセトンセンサとトルエンセンサを用いた雰囲気ガスの選択的検知. 赤外光路上の雰囲気と同種のガスを封入したセンサの出力は相対的に小さくなるので、複数のガス封入センサを組み合わせることにより雰囲気ガス種を識別することができる.

2.3.5 雰囲気ガス種識別センサ

異なるガスを封入した複数のセンサを組み合わせ、それらのセンサ出力のパターンから、一切の光学フィルタや分光器なしで赤外光路上のガス種を識別することができる。図 2.16 に、アセトンセンサとトルエンセンサを組み合わせた雰囲気ガスの選択的検知の模式図とセンサ出力パターンを示す。センサ出力強度の S_A および S_T は、それぞれアセトンセンサと空気センサの出力値の差およびトルエンセンサと空気センサの出力値の差を示す。センサからの出力値の組合せは赤外光路上のガスの吸収スペクトルの特徴を反映している。トルエンは、ベンゼン環の振動による吸収ピークを $6.3\ \mu\text{m}$ および $6.5\ \mu\text{m}$ 付近に持ち、また、アセトンは $\text{C}=\text{O}$ の伸縮振動に対応する吸収ピークを $5.8\ \mu\text{m}$ 付近に持つ [28]。雰囲気ガスと同種のガスを封入したセンサの出力は、異種のガスを封入したセンサより小さくなるので、それらの組合せから雰囲気ガス種を同定することができる。

2.4 まとめ

本章では、基本技術となるバルクマイクロマシニングにおいて、マイクロメカニカル素子の構造となる薄板構造作製の最適化を行なった。固体ソース BN を用いた高濃度拡散により $\text{p}^+\text{-Si}$ 層を形成し、EPW を用いた異方性エッチングによりシリコンダイアフラム構造を作製した。拡散工程において固体ソースの熱処理過程を最適化し、拡散後に表面処理を施す後工程を付加することにより、異方性エッチングの過程で破壊することもなく極薄ダイアフラムを安定的に作製することを可能とした。また、エッチングキャビティと極薄ダイアフラム構造をを利用して、気体の赤外吸収による熱膨張を静電容量的に検出する赤外線マイクロセンサを作製した。作製したマイクロセンサにおいて赤外光量に比例した出力を得、これまで小型化が困難であったゴーレイセル型赤外線センサのマイクロ化に成功した。さらに、キャビティ内にガスを封入して赤外吸収を増すことにより感度を向上させ、またガスの赤外吸収スペクトルに応じてセンサ応答を変化させることを示した。これを用いて、複数の種類のガス封入センサを組み合わせることによってガスセンサを構成し、センサ毎の出力値およびそれらの相対値の組合せから、赤外光路上の雰囲気ガス種を識別することが可能であることを示した。

第3章 ギルゲル PZT 薄膜の作製と 圧電性評価

3.1 はじめに

PZT は PbTiO_3 と PbZrO_3 の固溶体の陽イオンの頭文字をとったもので、元は商標登録された名称である。表 3.1 に示すように、PZT は他の材料と比較して非常に高い圧電生を持ち [29], PbTiO_3 と PbZrO_3 の比率を変えることにより物性を多様に変えられる点で極めて優れた材料で、現在でも新しいデバイスを開発する時には圧電材料として組み込まれることが多い。PZT は発見されてから既に半世紀近くが経過しているが、総合的な圧電特性および経済性から判断して最も優れていると考えられる。

本章では、優秀な圧電材料である PZT を、簡便に均質な膜を形成し得るギルゲル法を用いて製膜し、その特性を評価する。またバルク基板上的の薄膜自体の圧電定数を評価する方法を開発し、作製したギルゲル PZT 薄膜の圧電性を評価するとともにこれを改善する方法について述べる。

3.2 強誘電体 PZT の圧電性と組成選択

結晶学によれば、全ての結晶はその対称性により 32 の結晶族（点群）に分類される。このうち 11 の結晶族は中心対称性を持ち、残りの 21 は対称中心を持たないことが知ら

表 3.1 各種圧電材料の比較。代表的な figure of merit として圧電 d_{33} 定数と電気機械結合係数 k_{33} について示している。

	Quartz	CdS	ZnO	AlN	LiNbO ₃	LiTaO ₃	BaTiO ₃	PZT	PVDF	P(VDF/TrFE)
d_{33} [pC/N]	3.8	9.7	11.7	5	16.2	9.2	191	293	12.4	52
k_{33}	0.1	0.26	0.47	0.33	0.17	0.14	0.5	0.67	0.12	0.3

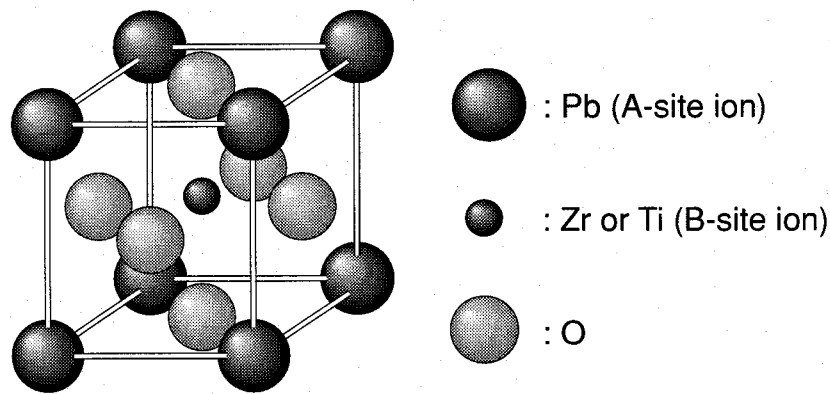


図 3.1 PZT のペロブスカイト結晶構造の模式図

れている．対称中心を持たない結晶族のうち 20 の結晶族では応力を加えると電気分極が発生することが知られており，これを圧電効果 (piezoelectric effect) と呼ぶ．圧電性を持つ 20 の結晶族のうち 10 のものは，電界を印加しなくても電気分極を生じ，自発分極を持つ．通常は空気中のイオンが表面に付着したり，あるいは結晶の持つ電気伝導のために表面には電荷が現れていないが，自発分極の大きさが温度の関数であることから，結晶の温度が変化すると自発分極が変化し，その変化分に相当する電荷が表面に現れる．この現象を焦電効果 (pyroelectric effect) と呼ぶ．さらに焦電効果を持つ物質のうち，外部電界の印加により絶縁破壊に至る前に自発分極の向きを反転できるものがあり，この性質を強誘電性 (ferroelectricity) と呼ぶ．したがって誘電体の分類上，強誘電体は最も小さな集合をなし，強誘電体であればそれは必ず圧電体であるということになる．圧電体であるか，焦電体であるかということは，その結晶の対称性によって決まる性質であるが，強誘電体であるかどうかは結晶の対称性だけでは決められず，さらなる結晶構造の特性が関わってくる．しかしながら，強誘電体の圧電性はその強誘電性と密接に結び付いている．後に示す 3.4.2 節の結果はこの結び付きの例である．

PZT は，一般にペロブスカイト (perovskite; CaTiO_3) と呼ばれる結晶構造を持つ．結晶構造の概略を図 3.1 に示す． ABO_3 の一般式で表されるペロブスカイト構造において，原子半径の大きい陽イオン (A) を頂点とすると，原子半径の小さい陽イオン (B) が体心に，酸素イオン (O) が面心に位置する．この構造を持つ強誘電体はキュリー温度以下において変位型相転位を起こし，強誘電相では，B サイトイオンが相対的に格子の中心からずれた位置にエネルギーの安定点を持つ．そのため格子は対称な立方晶とならずに正方晶や

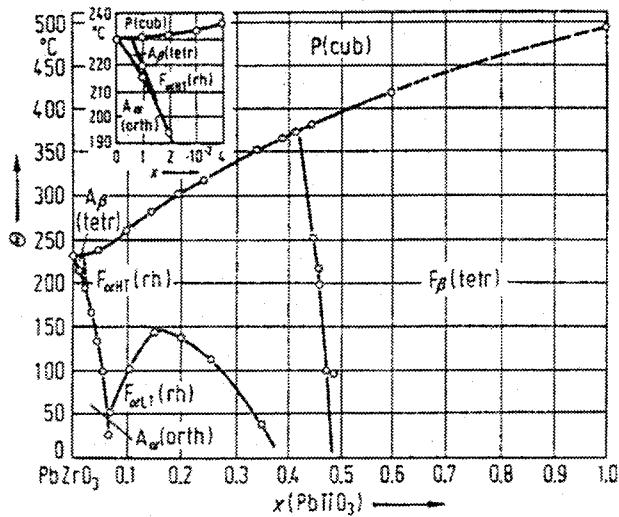


図 3.2 PZT の相図. 室温では $\text{Zr} : \text{Ti} = 52 : 48$ 付近に, Tr-rich 側で正方晶, Zr-rich 側で菱面体晶となる組成的相境界が存在する.

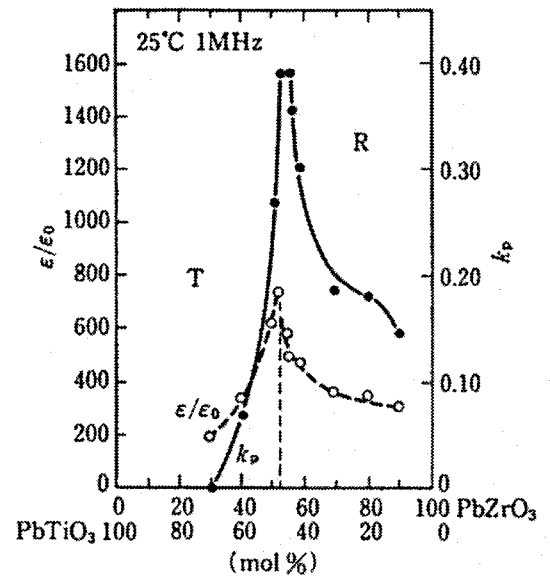


図 3.3 PZT 組成による誘電率 ϵ/ϵ_0 および電気機械結合係数 k_p の変化

菱面体晶となる。安定点は異なる 2 点が存在し, ある一定値 (抗電界) 以上の電界を加えることにより, 安定状態を任意に変えることができる。ペロブスカイト型 PZT 強誘電体では, B サイトイオンであり大きな電荷量を持つチタン (Ti^{4+}) やジルコニウム (Zr^{4+}) が酸素八面体中で大きな距離を変位するため, 顕著な強誘電性が発現することになる。

PZT は強誘電性の PbTiO_3 と反強誘電性の PbZrO_3 の固溶体で, これらの成分比率を変えることにより, 容易にその結晶系ならびに各種の特性を変化させることができる。図 3.2 に PZT の相図を示す [30]。強誘電相では $\text{Zr} : \text{Ti} = 52 : 48$ の組成的相境界 (morphotropic phase boundary; MPB) を境にして, Zr と Ti の割合と温度によって異なる結晶構造を示す。Ti 含有量が多い側では正方晶となり, Zr 含有量が多い側では菱面体晶となる。通常はこの MPB の近傍数%の範囲で正方晶と菱面体晶が混在している。また, 図 3.3 に示すように, この MPB 付近では誘電率や電気機械結合係数が極大値を示し, 同様に弾性コンプライアンス定数も極大値を示すことが知られている。これは, MPB において結晶構造が不安定になるためと考えられており, これら極大の特性を利用して, 圧電性をはじめ種々の応用では MPB 付近の組成のものが使われる。本研究においても, $\text{Zr}:\text{Ti} = 52:48$ の MPB 組成の PZT を用いる。

3.3 ゼルゲル製膜法

電子デバイスに使用される機能性薄膜の作製方法は、従来はスパッタ等の物理的製膜法が多く用いられてきたが、セラミックス材料は少なくとも2元素以上の酸化物であることが多く、これを化学量論的に正確に組成制御しながら製膜することは難しく、多くの時間と労力を費やす必要があった。また近年、これらの欠点を補う化学的製膜法として、良好な特性の薄膜を得る方法として注目されているものに MOCVD 法がある。これは製膜時の材料供給を制御することにより薄膜の組成を制御できるが、真空装置以外にも非常に大がかりで複雑な装置類を必要とし、また有機金属を気相あるいは液相で輸送するため、再現性良く薄膜を作製するためには装置のメンテナンスに非常に気を付けなければならない等の問題点がある。

一方ゾルゲル法とは有機金属あるいは無機金属化合物から生成するゾル（液中に固体コロイドが分散したもの）を溶液として、溶液中での化合物の加水分解、重縮合反応を進ませてゲル（ゾルが流動性を失い網目状構造を形成した固体）化し、ゲルを熱分解・酸化させることで酸化物固体を作製する方法である。ゾルゲル法による薄膜形成には、スピコート法、ディップコート法、スプレイ法等があるが、単にゾルゲル法というとスピコート法を用いたゾルゲル法を意味することが多く、複合金属アルコキシド溶液を加水分解と重縮合等により粘度調整した前駆体溶液を、スピコートによって製膜し（ゲル膜）、熱処理で結晶化させる製膜プロセスのことである。ゾルゲル法は他の製膜法に比べて、大規模な真空装置等を必要としない極めて簡便な方法であり、多成分系であっても組成制御が再現性良くできる、開発期間が短く組成検討や複数の金属イオンを検討する新材料の研究に向く、大面積で均一な薄膜が低コストで製膜できる、といった数多くのメリットを有

表 3.2 PZT ゼルゲル前駆体溶液の組成

溶媒	2-メトキシエタノール
Pb 成分	酢酸鉛 3 水和物
Zr 成分	Zr ノルマルブトキシド
Ti 成分	Ti イソプロポキシド
PZT 組成	Pb : Zr : Ti = 115 : 52 : 48
濃度	Pb _{1.15} Zr _{0.52} Ti _{0.48} O _{3.15} として 15%wt

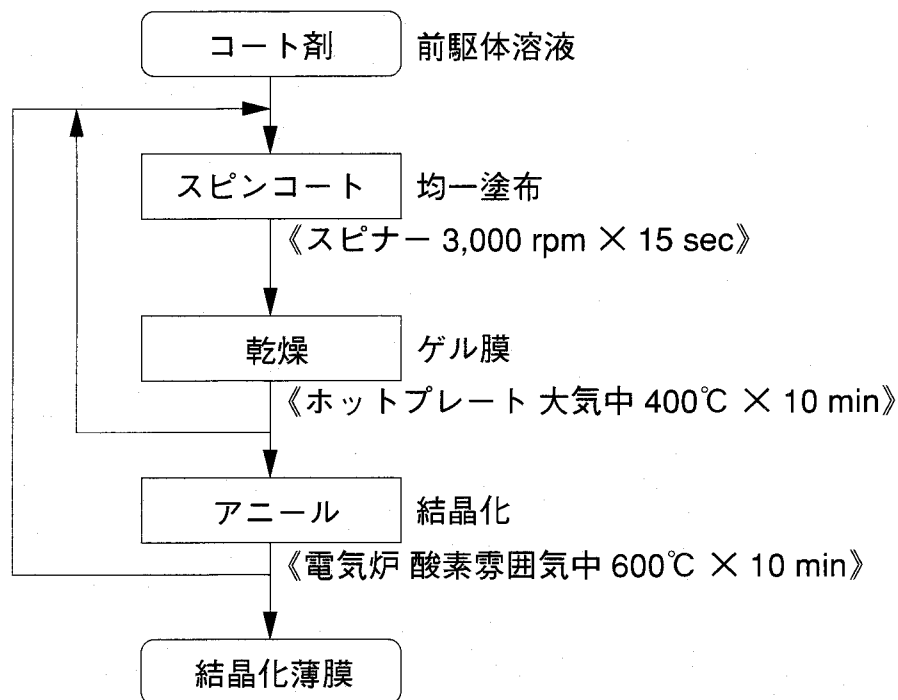


図 3.4 ゼルゲル法による PZT 薄膜の作製プロセス

する．材料組成の検討や新材料探索といった基礎研究から，量産化技術までをカバーできる極めて有効な薄膜作製技術である．

本研究で用いたゾルゲル製膜法のプロセスを図 3.4 に示す．前駆体溶液をスピncコートにより基板上に均一に塗布した後，有機溶媒の蒸発・熱分解（以降「乾燥 (drying)」と呼ぶ）によりゲル化する．ゲル化した膜の上には更に続けてスピncコート可能であり，このプロセスを何度か繰り返して膜厚を増す．その後，積層したゲル膜を高温でアニールすることにより結晶化する（以降「アニール (annealing)」と呼ぶ）．圧電センサ・アクチュエータの用途には，1~2 μm 程度以上の膜厚が必要とされるため，必要に応じて上記プロセスを繰り返して所望の膜厚を得る．ここで，乾燥，アニール工程の温度とそれぞれの繰り返し回数の組合せがプロセスパラメータとして重要である．まず，各工程の温度を決定するために，ゾルゲル前駆体液の温度に対する挙動を明らかにした．使用したゾルゲル液の溶液組成を表 3.2 に示す．Zr : Ti 比は 52 : 48 の相境界のものを扱い，Pb は高温アニール時の蒸発を考慮して 15% 過剰としてある．ゾルゲル液の示差熱分析 (DTA; Differential Thermal Analysis) の結果を図 3.5 に示す [33]．DTA 曲線より 298.8~328.9°C に大きな発熱ピークが確認でき，有機物の分解が進行していることが分かる．分解が進み，DTA 曲

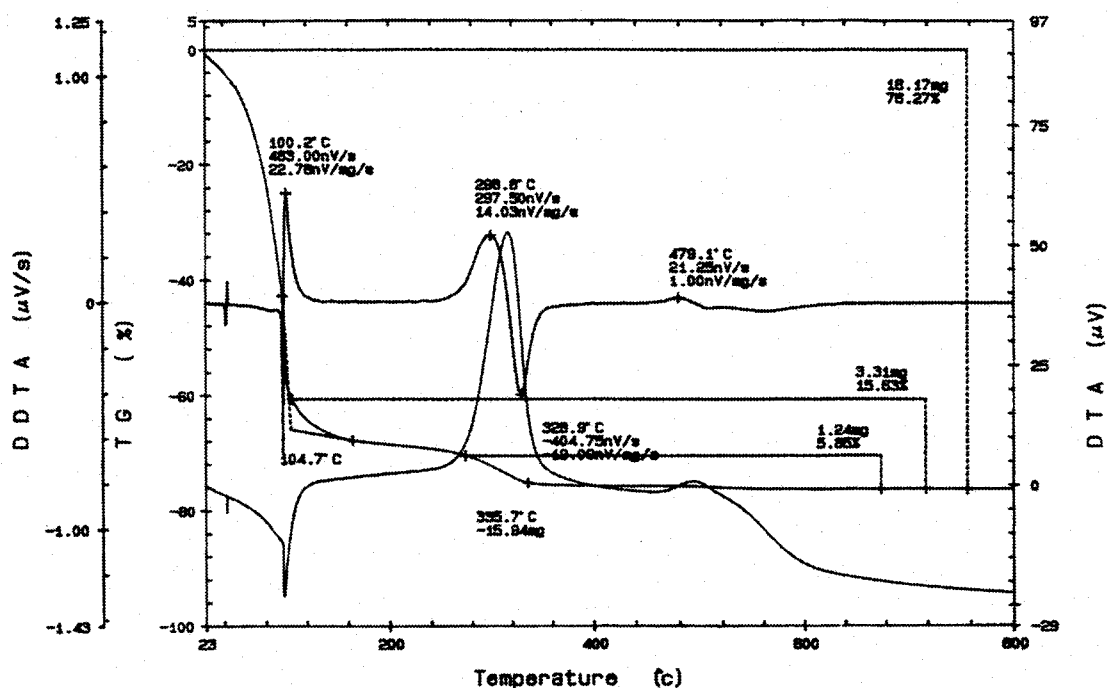


図 3.5 PZT ゾルゲル液の示差熱分析結果

線が平坦となる 400°C を有機物の分解が完了した温度と考え、これを「乾燥温度」とした。また DDTA 曲線において 479.8°C に PZT 結晶化に伴うピークが確認でき、その後結晶化が進んで DTA 曲線が平坦になる 600°C を結晶化が完了した温度と考え、これを「アニール温度」とした。

これらを基に、乾燥工程は 400°C ホットプレート上で 10 分間とし、アニール工程は酸素雰囲気中 600°C 電気炉で 10 分間とした。アニール工程での雰囲気酸素は、高温での薄膜からの酸素の脱離を補うためであり、炉内を純酸素で置換した後サンプルを導入し、アニール中も流量 1 l/min で酸素を供給し続けた。

図 3.6 に電気特性・圧電性評価用サンプルの形状を示す。基板としては、1 μm の酸化膜付き (100) シリコンウェハ (厚さ 525 μm) を用い、下部電極として rf スパッタリングにより Pt/Ti (200 nm/20 nm) を製膜した。これにゾルゲル法により PZT 薄膜を堆積した。膜厚は 700 nm~2.2 μm までのものを作製した。上部電極としては rf スパッタリングにより Pt(200 nm) を堆積し、リフトオフにより直径 1 mm の円形とした。また、下部電極とのコンタクトのためには、弗硝酸 ($\text{HF} : \text{HNO}_3 : \text{H}_2\text{O} = 1 : 1 : 100$) を用いて PZT をエッチングした。

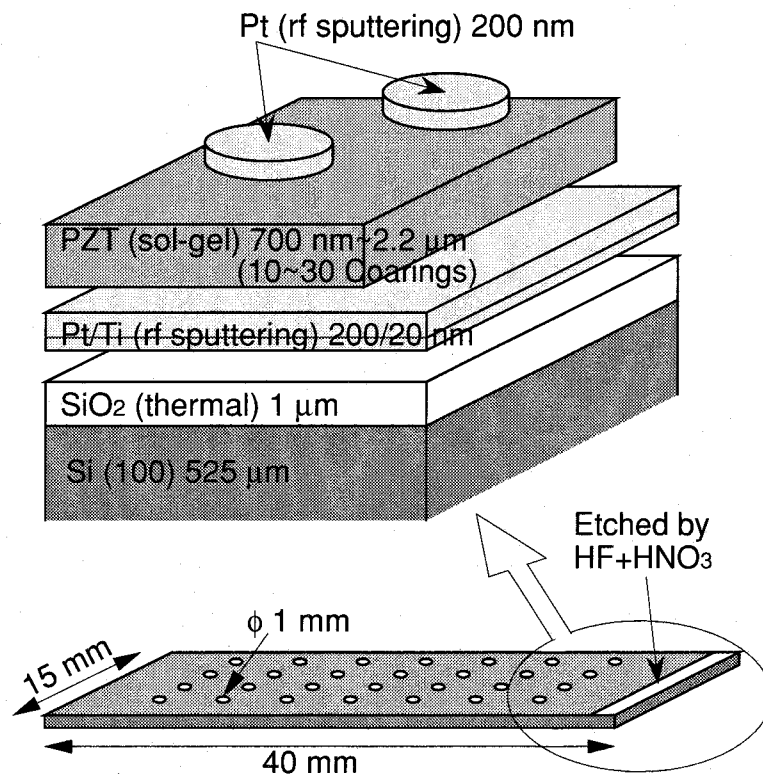


図 3.6 ギルゲル PZT 薄膜の電気特性・圧電性評価用サンプルの形状

3.3.1 ギルゲル PZT 薄膜の配向性制御

ギルゲル法で所望の膜厚の薄膜を得るには、先に述べた「塗布→乾燥→結晶化アニール」の工程を繰り返す。プロセスの簡略化の観点からは、所望の膜厚まで「塗布・乾燥」のみを繰り返す、最後に結晶化アニールを施すというものが一番簡便である（乾燥を行わずに塗布のみを繰り返しても、溶剤によって滴下液と基板上の塗布液が混合するので、スピコートにより滴下液がほとんど基板外に飛び去り膜厚は増えない）。しかしながら、多孔質のゲル膜が結晶化により緻密化する際には大きな体積収縮を伴うので、基板近傍と最表層では応力の掛かり方が大きく異なり、結晶性に少なからぬ影響を与えられと考える。そこで、初回のアニールまでのゲル膜の膜厚、すなわち塗布・乾燥工程の回数を変化させて、初回アニール後の結晶性を比較した。この際、スピコートの回転数は 3,000 rpm とした。このとき塗布一回当たりの膜厚は約 70 nm（アニール後）である。初回結晶化アニール後の XRD パターンを比較したものを図 3.7 に示す。なおここでは 5 回塗布までしか示していないが、6 回以上塗布乾燥のみを繰り返すと基板面全体の PZT 薄

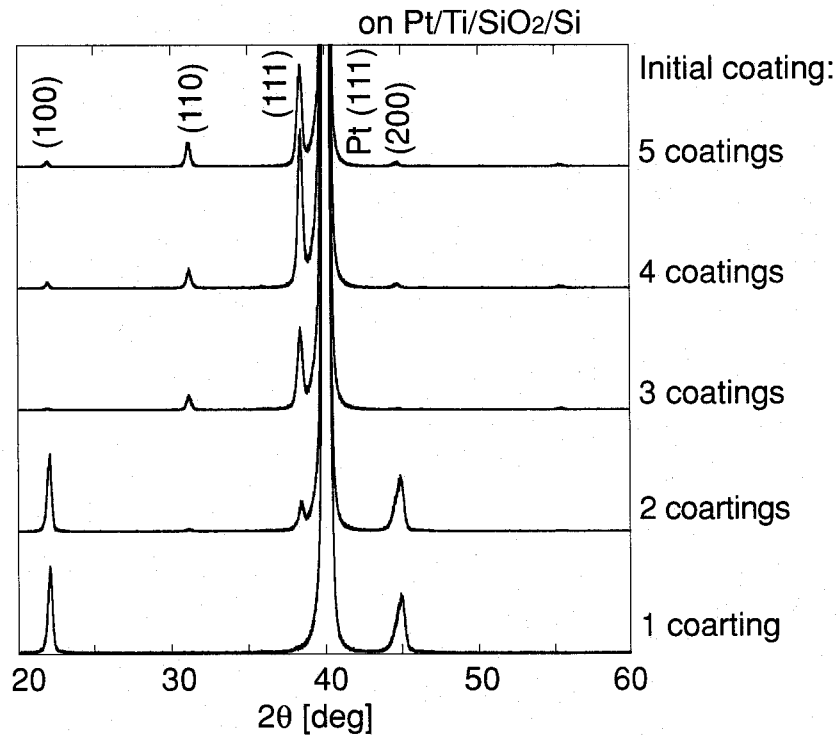


図 3.7 初回アニールまでの塗布回数を変えた時の、結晶化アニール後の XRD パターンの比較. 2 回塗布までは (100) 配向, 3 回塗布以上で (111) 配向となる.

膜にクラックが生じ、クラック片の周辺から剥離が起こるためそれ以上の厚さの均一な膜を得ることができなかった. これは、薄膜の膜厚方向での結晶化時の応力の差が大きくなり過ぎたためと考えられる.

図 3.7 より、アニールまでの塗布乾燥回数が 2 回までは (100) 配向であるが、3 回以上塗布乾燥を繰り返した後にアニールを行なうと (111) 配向となることが分かる. ゲル膜の膜厚が薄い場合には基板の影響を強く受けると考えると、ゲル膜が薄い場合に (111) 配向、厚い場合には他の配向となるはずであるが、図 3.7 の結果はこれとは逆の結果となっている. 今のところはっきりとした原因は解明されていないが、この傾向は非常に再現性が良く、塗布回数により PZT の配向性を制御できることを示している. さらに、塗布回数を変えて一度アニールを行ない、配向性を確定した後は、その上に更に塗布・乾燥・アニールを繰り返して厚膜化しても初回アニール後の配向性を保つことが分かった. そのようにして $1.2\ \mu\text{m}$ まで厚膜化した PZT の XRD パターンを図 3.8 に示す. サンプル (a) は、「塗布・乾燥」1 回の次にアニールを行なって (100) 配向を確定した後、「塗布・乾燥」4 回

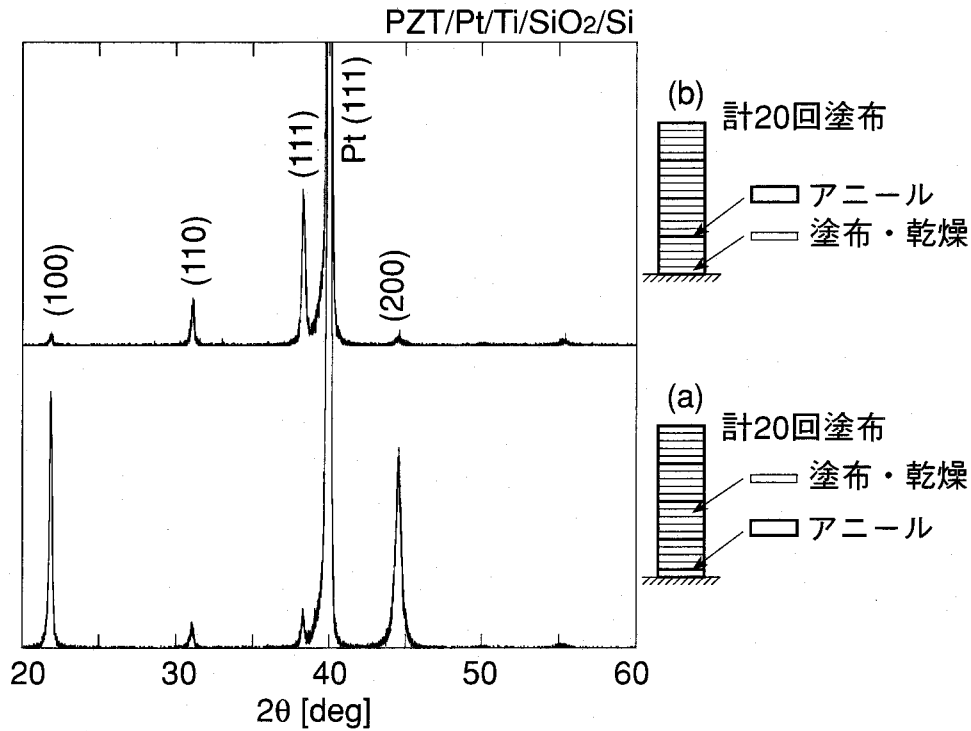


図 3.8 初回アニールにより配向性を確定し，その上にさらに堆積して厚膜化した PZT 薄膜の XRD パターン．サンプル (a) は初回アニールによって (100) 配向を確定し，サンプル (b) は (111) 配向を確定して厚膜化を行なった．塗布回数はそれぞれ合計 20 回である．

+ アニール 1 回を行ない，続いて『「塗布・乾燥」5 回 + アニール 1 回』を 3 回行ない計 20 回塗布としたもの．またサンプル (b) は「塗布・乾燥」5 回の次にアニールを行なって (111) 配向を確定した後，『「塗布・乾燥」5 回 + アニール 1 回』を 3 回行ない同じく計 20 回塗布としたものである．このように，初期層の結晶配向を制御することで，薄膜全体の配向性を変えることができる．

次に，この (100) 優先配向膜（サンプル (a)）および (111) 優先配向膜（サンプル (b)）について，強誘電特性を比較した．これらの膜の P - E ヒステリシスを図 3.9 に示す．これより (111) 配向膜の方が飽和分極，残留分極共に (100) 配向膜より大きいことが分かる．残留分極値で比較すると $P_{r(111)} : P_{r(100)} = 1.8 : 1$ となる．これは，(100) 配向膜では (111) 配向膜に比べて，分極軸が基板面に対して比較的ねているためであると考えられる．

これをもう少し詳しく検討する．PZT は，MPB 付近では正方晶と菱面体晶の結晶が混在していると考えられるが，正方晶では分極軸は $\langle 001 \rangle$ 方向であり，菱面体晶では分極軸

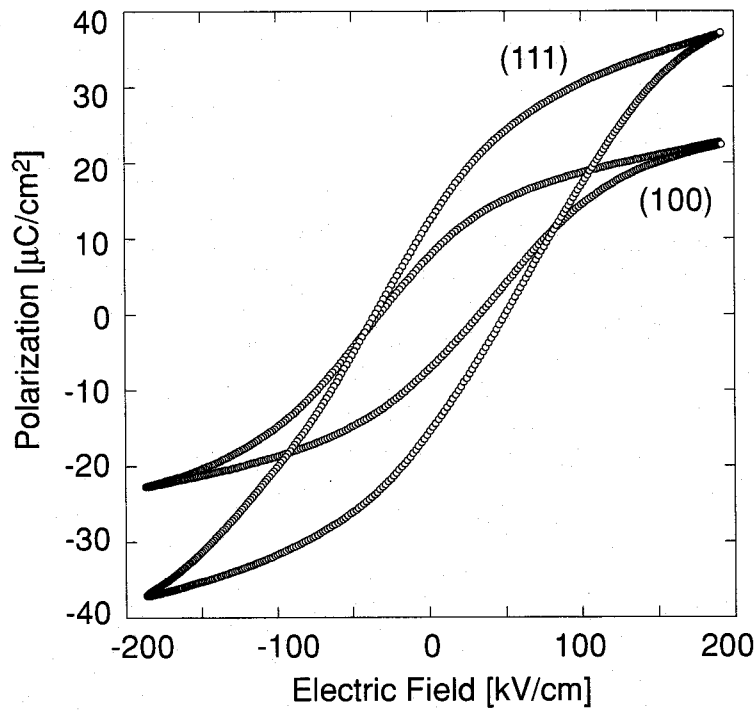


図 3.9 (100) および (111) 優先配向膜の P - E ヒステリシスカーブ

表 3.3 配向方向と分極軸のなす角の余弦の値

配向方向 (hkl)	正方晶 $p_{\tau\langle hkl \rangle}$ (分極軸: $\langle 001 \rangle$)	菱面体晶 $p_{\rho\langle hkl \rangle}$ (分極軸: $\langle 111 \rangle$)
(100)	0	$1/\sqrt{5} \simeq 0.477$
(110)	0	$2/\sqrt{5} \simeq 0.632$
(111)	$1/\sqrt{5} \simeq 0.477$	1

は $\langle 111 \rangle$ 方向である．図 3.8 より，XRD による主なピークは (100), (110) および (111) であるので，各結晶がこれらの方位に配向した場合の分極量の，基板法線方向成分を考えてみる．各配向膜のトータルの分極量は，これら各方位における各結晶についての分極量の和となると考えるのである．このとき，分極量の相対値 P は

$$P = \tau \left(\sum_{(hkl)} p_{\tau\langle hkl \rangle} I_{(hkl)} \right) + \rho \left(\sum_{(hkl)} p_{\rho\langle hkl \rangle} I_{(hkl)} \right) \quad (3.1)$$

と表せる．ここで $I_{(hkl)}$ は XRD ピーク (hkl) の相対強度， τ, ρ はそれぞれ正方晶，菱面体晶の存在比， $p_{\tau\langle hkl \rangle}, p_{\rho\langle hkl \rangle}$ はそれぞれ正方晶および菱面体晶の分極軸の $\langle hkl \rangle$ 方位成分である．

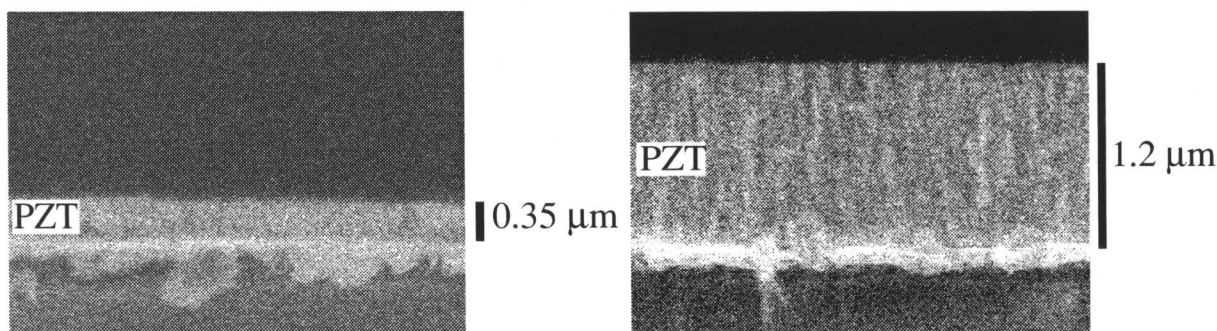


図 3.10 堆積途中のゾルゲル PZT 薄膜の断面 SEM 像．塗り重ねてゆくプロセスにもかかわらず，層状の構造は見られず連続的に成長していることが分かる．

各配向方向と分極軸のなす角の余弦の値，すなわち $p_{\tau\langle hkl \rangle}$, $p_{\rho\langle hkl \rangle}$ を表 3.3 に示す．ここでは簡単のため，正方晶および菱面体晶の結晶形を立方体で近似している．実際には，正方晶の PZT は (001) 軸が長い直方体であり，また菱面体晶の頂点の角度は直角ではないが，正方晶の結晶軸長の差は 2% 以下，菱面体晶の頂角の直角からのずれは $20'$ であり立方体と近似しても差し支えない．また， $I_{(hkl)}$ は図 3.8 のピーク強度を粉末における測定値 (JCPDF) のピーク強度で割って規格化して求めた．

表 3.3 より，(100) 配向では (111) 配向より分極の配向成分（基板の法線方向成分）が小さいことが分かる．これが，(100) 配向では分極が比較的に弱まっていることを表している．実際に，(100) 配向膜と (111) 配向膜の相対分極量を求めてみると，正方晶と菱面体晶の存在比 $\tau:\rho$ をどのように仮定しても (111) 配向の方が分極量が大きくなった．逆に，相対分極量の比が図 3.9 の残留分極値の比 1 : 1.8 に等しいと仮定すると，正方晶と菱面体晶の存在比 $\tau:\rho$ が求められる．実際に値を代入すると $\tau:\rho = 0.78:0.22$ となった．一般に，PZT 薄膜は経験的に正方晶のものができやすく菱面体晶のものができにくいとされており，この考察における正方晶の存在比 78% という値は妥当なものといえるであろう．

以上のように，(111) 配向膜は (100) 配向膜より良好な電気特性を有することが分かったので，以降の作製プロセスでは (111) 配向膜を作製することとした．

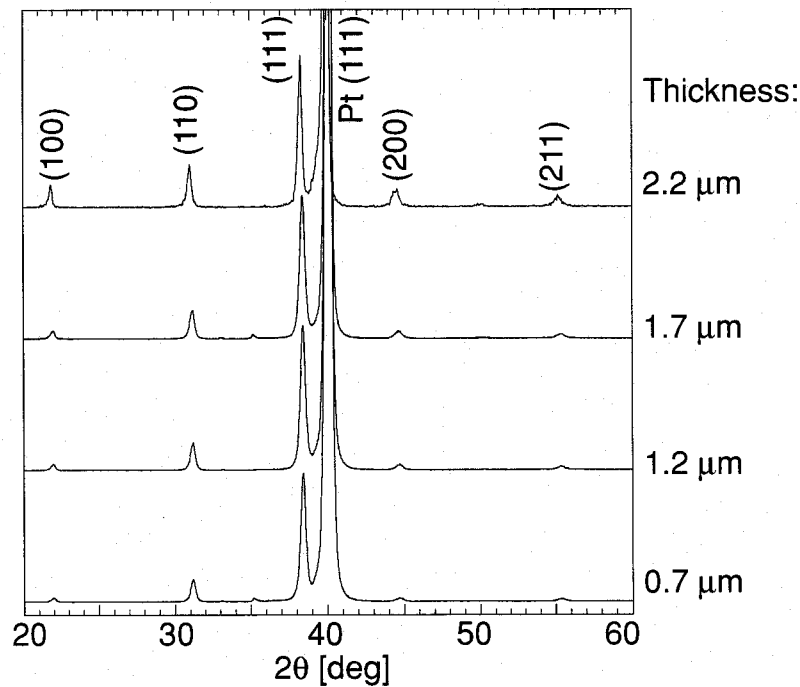


図 3.11 厚膜化した際の各膜厚における XRD パターン

3.3.2 ゾルゲル PZT 薄膜の厚膜化

圧電センサ・アクチュエータの応用には、 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 程度以上の膜厚が必要とされる。そこで、ゾルゲル法により PZT 薄膜を厚膜化した際の、結晶性ならびに電気特性を評価した。製膜プロセスは、前節で述べた (111) 配向膜のプロセスとし、初回アニール前に 5 層塗布して (111) 配向を確定した後、さらに塗布・乾燥・アニール工程を繰り返して厚膜化した。膜厚にして約 $700 \text{ nm} \sim 2.2 \mu\text{m}$ のものを作製した。堆積途中の PZT 薄膜の断面 SEM 像を図 3.10 に示す。断面 SEM 像を見る限り、塗り重ねによる層状境界構造は見られず連続的に成長していることが分かる。 $1.2 \mu\text{m}$ の膜厚では、はっきりと柱状構造が確認できる。

厚膜化した際の結晶性について、各膜厚における XRD パターンを図 3.11 に示す。膜厚 $2.2 \mu\text{m}$ に至るまで (111) 優先配向で良好な結晶性を保っていることが分かる。図 3.12 に膜厚の増加に伴う (111) 面方位の相対配向度の変化を示す。ここで (111) 相対配向度 $\bar{I}_{(111)}$

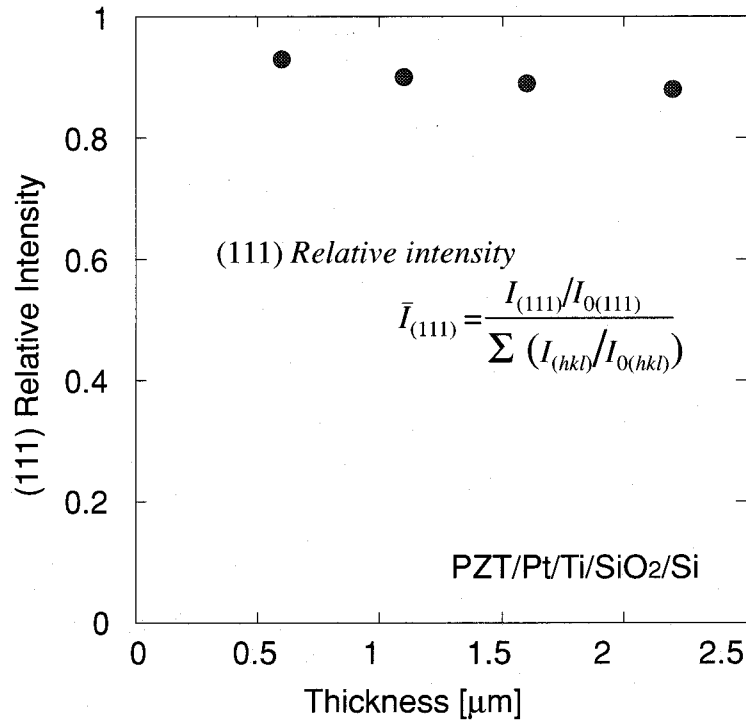


図 3.12 (111) 面の相対配向度の膜厚依存性

は,

$$\bar{I}_{(111)} = \frac{I_{(111)}/I_{0(111)}}{\sum_{(hkl)} (I_{(hkl)}/I_{0(hkl)})} \quad (3.2)$$

で求めた．ここで $I_{(hkl)}$ は図 3.11 の面方位 (hkl) の XRD ピークの値， $I_{0(hkl)}$ は粉末における測定結果 (JCPDF) の面方位 (hkl) の XRD ピークの値である．図 3.12 より，膜厚の増加と共に若干配向度は下がるものの 2.2 μm でも 90%以上の配向度を保ち，良好な結晶性が得られていることが分かる．

つぎに，厚膜化に対する強誘電特性の変化を評価した． P - E ヒステリシスカーブの膜厚依存性を図 3.13 に示す．膜厚と共に残留分極，飽和分極共に増大し，抗電界は若干減少する．残留分極値 P_r と抗電界 E_c について，膜厚に対する依存性をプロットしたものを図 3.14 に示す．膜厚と共に P_r は増加するが，1.5 μm 辺りから飽和する傾向が見られる．これは，膜厚が厚くなるに従い基板界面近傍に存在する分極固定層の影響が相対的に小さくなり，本来の強誘電性に近付くためと考えられる．

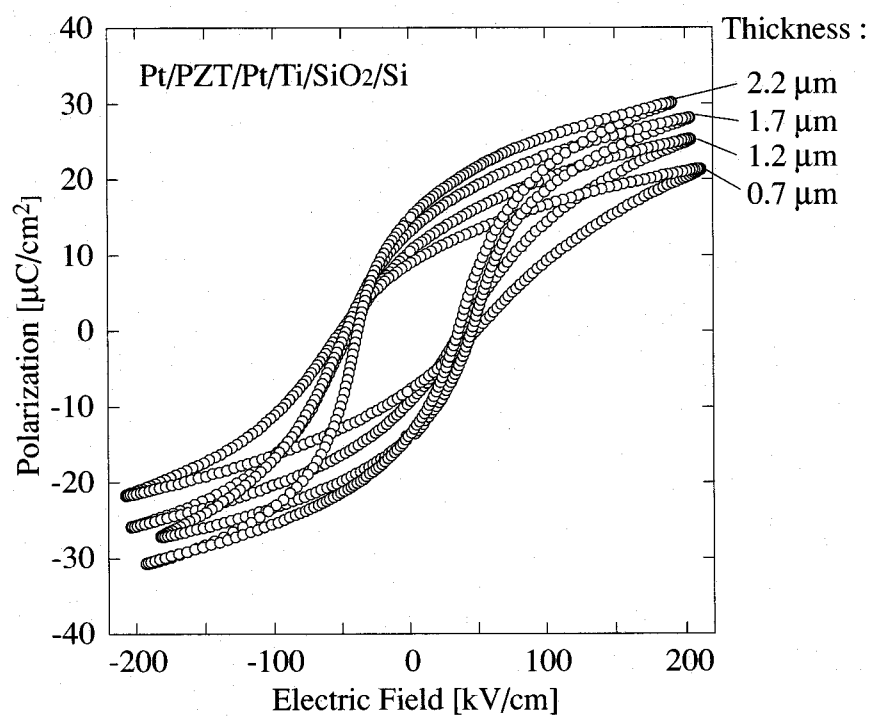


図 3.13 P - E ヒステリシスの膜厚依存性

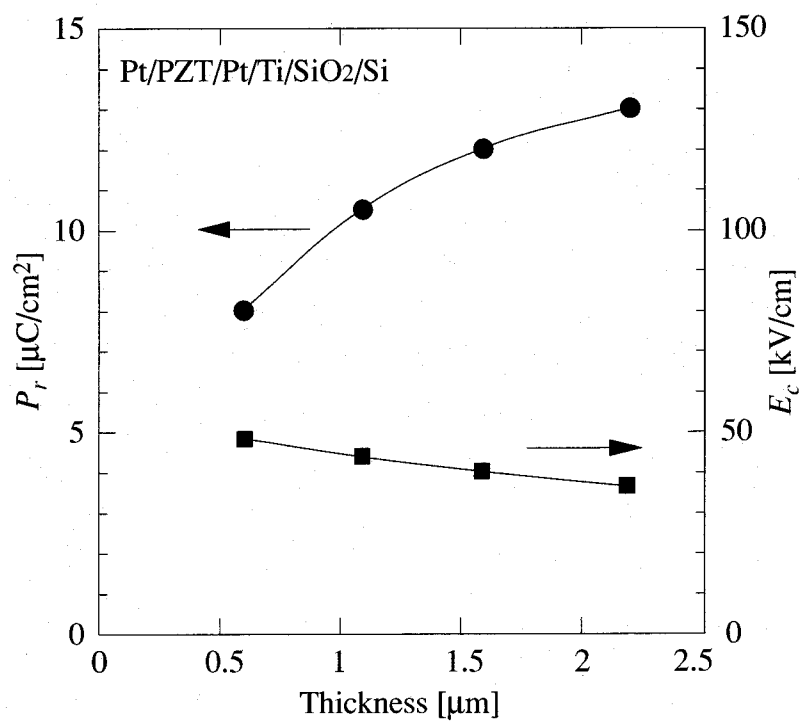


図 3.14 残留分極 P_r と抗電界 E_c の膜厚依存性

3.4 バルク基板上薄膜の圧電性評価

バルクの圧電セラミックスの評価法は、既に確立され広く用いられている方法がある。米国では IEEE Standard 176-1978 [34], わが国では電子材料工業会規格 EMAS-6001~6006 [35], また国際的には IEC Standard Publication 483 1st edition [36] として制定されている。これに対し、薄膜自体の圧電性の評価方法は、特にこれといった決め手の手法というものがなく、作製されるそれぞれのデバイス構造上での特性評価に留まっている。薄膜の圧電性はデバイスの性能に大きな影響を与えるが、バルク材料と異なり薄膜自体の特性は成長条件により大きく異なるため種々の製膜条件で得られた薄膜の圧電特性を測定する必要がある。しかし従来の方法では多数同一条件で測定することは容易ではない。本節では、基板の材料定数に影響されにくく、簡便で再現性良く多数のサンプルを容易に測定することができる薄膜圧電性の測定方法を提案する。また、この方法によりシリコン基板上に製膜したゾルゲル PZT 薄膜の圧電性を測定し、ポーリングによる圧電性の改善と強誘電性の関連について明らかにする。

3.4.1 薄膜の圧電評価方法

図 3.15 に圧電定数の測定系を示す。サンプルは片端を固定して片持ち梁状とし、自由端を静かに変位させてから解放することで固有振動数による減衰振動を生じ、梁のたわみ変位波形と圧電膜からの出力電圧波形から圧電定数を算出する。固定方法は単純に上下からサンプルを挟み込んでネジ止めするだけのものである。この固定端のネジ止めの強弱やバランスによって固定端の境界条件が変化するが、減衰振動の測定波形から正しい境界条件が得られているかどうかを確認することができる。このように簡便なセットアップで測定系を構成できるので、通常電気特性測定用の構造のサンプルを使用することができ、製膜のパラメータを変えた多数の膜を手軽に同一条件で測定することができる。また機械的入力としてたわみを測定しているので、入力として応力を測定する場合 [37] と異なり共振点での測定が可能であり、梁の固有振動が利用できるため、外部の加振源を必要としない。なお、上部電極へのコンタクトは金線をボンディングすることにより行なったが、金線は十分細く梁の自由振動に影響を与えないことを確認している。

固有振動数で振動している長さ l の片持ち梁のたわみ形状 $\zeta(x)$ (固定端からの距離 x

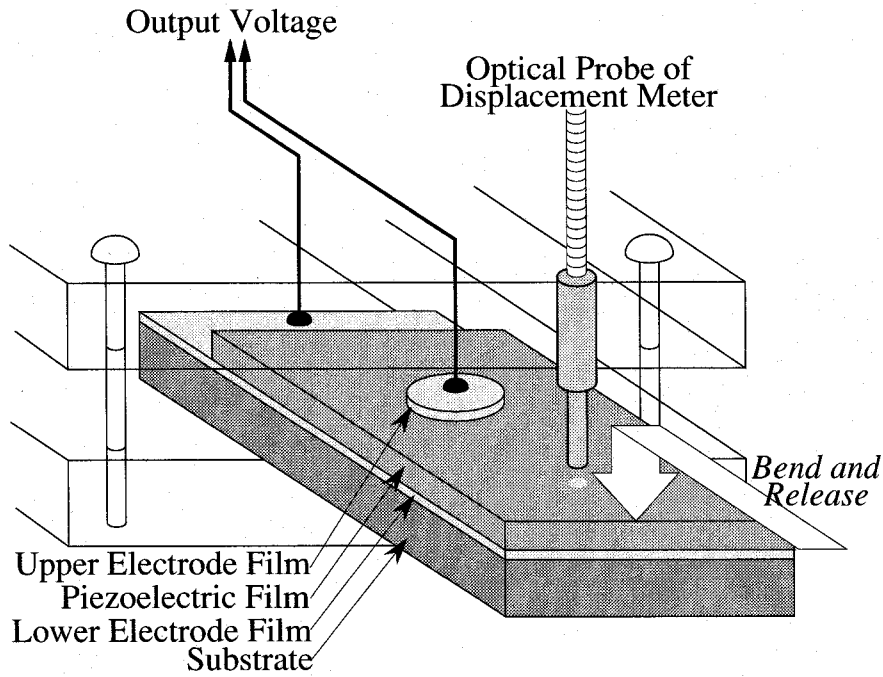


図 3.15 バルク基板上薄膜の圧電性評価測定系の模式図

におけるたわみ変位) は比例定数 k を用いて式 (3.4) で与えられる [38].

$$\zeta(x) = kZ(x), \quad (3.3)$$

$$Z(x) \equiv \cosh \frac{\lambda x}{l} - \cos \frac{\lambda x}{l} - \alpha \left(\sinh \frac{\lambda x}{l} - \sin \frac{\lambda x}{l} \right) \quad (3.4)$$

ただし

$$\lambda \simeq 1.875 \quad (\cosh \lambda \cos \lambda + 1 = 0), \quad (3.5)$$

$$\alpha = \frac{\cosh \lambda + \cos \lambda}{\sinh \lambda + \sin \lambda} \simeq 0.7341 \quad (3.6)$$

である．梁全体がこのたわみ形状で変形しているならば，梁上の一点でのたわみ変位を測定することにより，上部電極の位置での曲率 $d^2\zeta/dx^2$ から電極位置での圧電体の長さ方向の歪みを求めることができる．この歪みと厚み方向の発生電圧の比から圧電 h_{31} 定数が求まる．

サンプルの各部の寸法およびたわみ変位の測定位置が図 3.16 に示すものであるとき，圧電基本式 h -form から，圧電体内の厚み方向の積分および電極面積 A_e での積分を行なって

$$V = h_{31} \cdot tt_0 \int_{A_e} \frac{d^2\zeta}{dx^2} dA_e / A_e \quad (3.7)$$

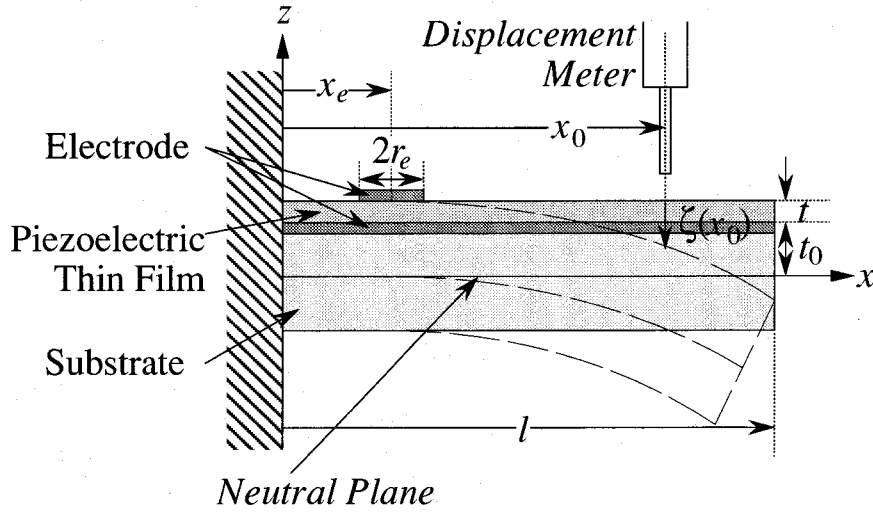


図 3.16 解析モデルの模式図．測定値であるたわみ $\zeta(x_0)$ と出力電圧 V 以外に必要なパラメータは寸法のみである．

が得られる．ただし，ここでは基板の厚みに比べて圧電体の厚みが十分小さい ($t \ll t_0$) ことを利用して，梁の力学的形状が基板のみで決定されると近似している．

一方，たわみの測定値 $\zeta_0 = \zeta(x_0)$ を用いて，式 (3.4) の比例定数 k は $k = \zeta_0/Z(x_0)$ と表されるから，これを式 (3.7) に代入して

$$V = h_{31} \cdot t t_0 \frac{\zeta_0}{Z(x_0)} \int_{A_e} \frac{d^2 Z(x)}{dx^2} dA_e / A_e \quad (3.8)$$

となる．電極が半径 r_e の円するとき，右辺の積分は Bessel 関数 $J_1(x)$, $I_1(x)$ を用いて

$$\int_{A_e} \frac{d^2 Z(x)}{dx^2} dA_e = 2A_e \frac{\lambda}{r_e l} Z_e \quad (3.9)$$

となる．ただし

$$Z_e = \left(\cosh \frac{\lambda x_e}{l} - \alpha \sinh \frac{\lambda x_e}{l} \right) I_1 \left(\frac{\lambda r_e}{l} \right) + \left(\cos \frac{\lambda x_e}{l} - \alpha \sin \frac{\lambda x_e}{l} \right) J_1 \left(\frac{\lambda r_e}{l} \right) \quad (3.10)$$

と表されるから， h_{31} が次式のようにになる．

$$h_{31} = \kappa \frac{r_e l}{2\lambda t t_0 \zeta_0} V \quad (3.11)$$

ここで

$$\kappa \equiv \frac{Z(x_0)}{Z_e}$$

表 3.4 圧電定数の算出に必要な定数

l	梁の長さ
$2t_0$	基板部分の厚さ（下部電極を含む）
t	圧電体の厚さ ($t \ll t_0$)
x_0	変位測定点の位置
x_e	電極の中心の位置
r_e	電極の半径

$$= \frac{\cosh \frac{\lambda x_0}{l} - \cos \frac{\lambda x_0}{l} - \alpha \left(\sinh \frac{\lambda x_0}{l} - \sin \frac{\lambda x_0}{l} \right)}{\left(\cosh \frac{\lambda x_e}{l} - \alpha \cos \frac{\lambda x_e}{l} \right) I_1 \left(\frac{\lambda r_e}{l} \right) + \left(\cos \frac{\lambda x_e}{l} - \alpha \sin \frac{\lambda x_e}{l} \right) J_1 \left(\frac{\lambda r_e}{l} \right)} \quad (3.12)$$

である．各変数の定義は表 3.4 に示す．

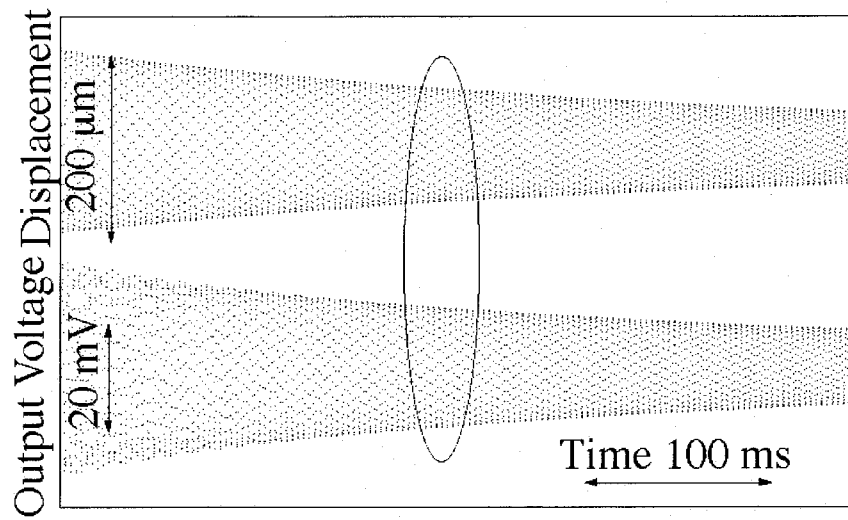
この計算中 $t \ll t_0$ とする近似は，基板のみの曲げ剛性を考え圧電体（および電極）の曲げ剛性を無視していることになるが，この時の誤差は，厚みの比が $t/t_0 \simeq 0.001$ のオーダーで誤差 $\simeq (3Et)/(2E_0t_0)$ 程度（ E, E_0 はそれぞれ圧電体，基板のヤング率）である．Si 基板上的 PZT 薄膜の場合，Si のヤング率が 170 GPa, PZT のヤング率が 42~72 GPa 程度である [39, 40] ので，Si 基板の厚み 525 μm , PZT 薄膜の厚み 1 μm とするとこの場合の誤差は 0.2% 以下である．このように，梁の変形が基板のみで決定されとする近似が成り立つならば，式 (3.11) に示すように，測定される圧電定数は基板材料や圧電体の材料定数（ヤング率）によらず，幾何学的な寸法だけを係数として求めることができる．

実際の測定では，図 3.17 に示すように梁のたわみ変位と圧電体からの出力電圧の減衰振動波形が得られる．これらの時間波形をそれぞれ

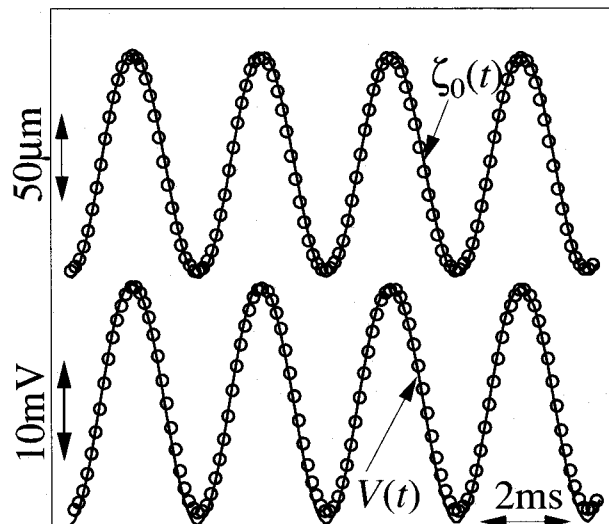
$$\left. \begin{aligned} \zeta_0(t) &= A_\zeta \exp(-B_\zeta t) \sin(F_\zeta t - D_\zeta) + C_\zeta \\ V(t) &= A_V \exp(-B_V t) \sin(F_V t - D_V) + C_V \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

と仮定し，安定した減衰振動波形が得られている部分の測定値をフィッティングすることによりパラメータ $A_{\zeta, V} \sim F_{\zeta, V}$ が得られる．ここで，フィッティングにおいては Levenberg-Marquardt のアルゴリズムを用い [42]，また収束を早めるために F_ζ, F_V の初期値として波形をフーリエ変換 [42] して求めた共振周波数を用いた．

このパラメータのうち A_ζ/A_V から式 (3.11) の右辺 ζ_0/V の絶対値を得，また D_ζ, D_V を比較することにより ζ_0/V の符号を得る．この測定値 ζ_0/V より圧電 h_{31} が得られる．



(a) 測定波形の例



(b) フィッティングの様子

図 3.17 測定波形の減衰振動へのパラメータフィッティング. 減衰振動の測定波形 (a) の中央部を拡大して (b) に示している. 測定値の○印に対して減衰振動曲線をフィッティングした結果が実線 $\zeta_0(t)$ および $V(t)$ である.

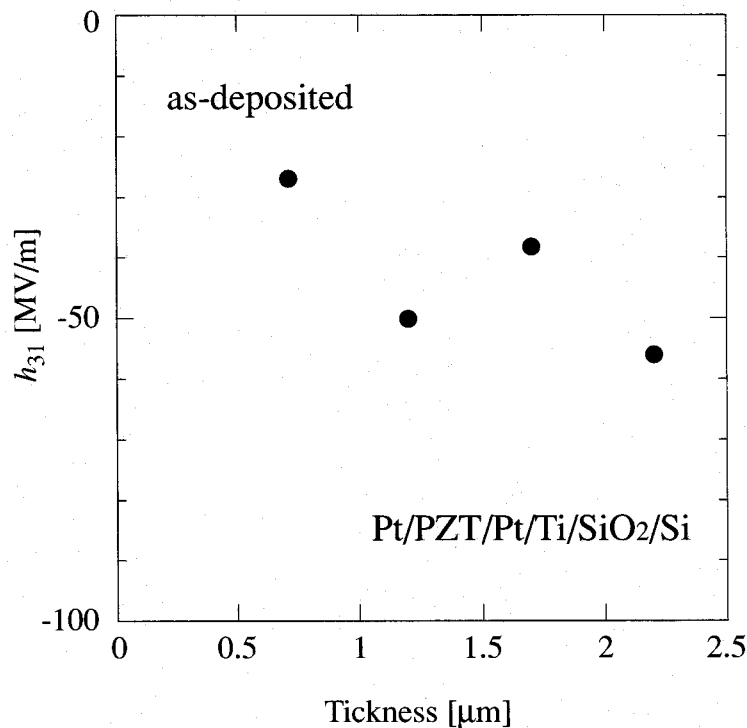


図 3.18 ギルゲル PZT 薄膜の as-deposited における h_{31} の膜厚依存性

3.4.2 ポーリングによる圧電性改善効果

前節で述べた評価法を用いて、ギルゲル法により製膜した PZT 薄膜の圧電性を評価した。図 3.18 に as-deposited の圧電定数 h_{31} の膜厚依存性を示す。製膜直後には、膜厚が厚くなるにつれて若干絶対値が大きくなるが、明らかな依存性は認められないように見える。 h_{31} の値は $-25 \sim -55$ MV/m でバルクセラミックスの 5% 程度の値である。

次に、これら薄膜にポーリングを行なうことにより圧電性の改善を試みた。室温で 1 分間直流電界を印加し、その直後に h_{31} 測定を行なった。ポーリング電界に対する h_{31} の依存性を図 3.19 に示す。正負両方向のポーリング電界印加に対して h_{31} の絶対値が増大しており、 $100 \sim 150$ kV/cm 程度以上の電界で飽和する傾向にある。このように、ポーリングによって圧電性は as-deposited のときの十倍近い値にまで改善される。

このようにして十分なポーリング電界を印加して圧電性を飽和させたときの h_{31} の値の膜厚依存性を図 3.20 に示す。製膜直後の h_{31} の値には明らかな膜厚依存性は見られなかったが、ポーリングにより飽和させた後の h_{31} は膜厚とともに増加し、 $1.5 \mu\text{m}$ 程度から飽和する傾向を見せる。また、膜厚 $2.2 \mu\text{m}$ の膜において、ポーリング電界 200 kV/cm で

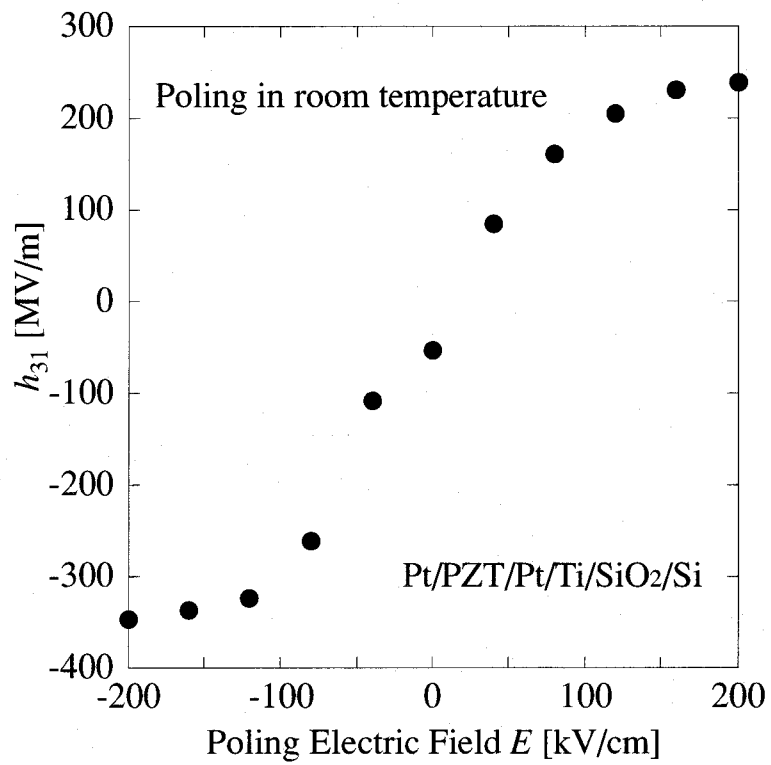


図 3.19 ゾルゲル PZT 薄膜における h_{31} のポーリング電界依存性

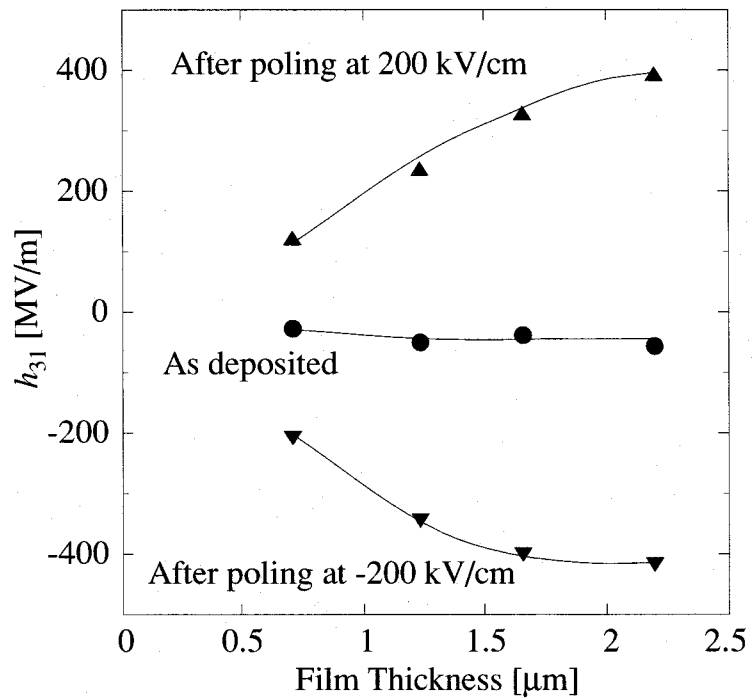


図 3.20 ゾルゲル PZT 薄膜における製膜直後および正・負ポーリングによる飽和後の h_{31} の膜厚依存性

$h_{31} = 400 \text{ MV/m}$ を得ている．この値はバルクセラミックスの約半分におよぶ値であり，良好な圧電性を示す膜であるといえる．

ここで，図 3.20 の膜厚に対する圧電性の飽和傾向は，図 3.14 の膜厚に対する分極量の依存性と同様の傾向にあるように思われる．また図 3.19 のポーリング電界依存性の曲線は P - E ヒステリシスループのそれと非常に良く似ている．これらより，ポーリングによる圧電性の改善と，印加電界に対する強誘電体としての分極量の変化の間に深い関係が示唆される．そこで，これらの間の関係を定量的に考察するために，ポーリングによる分極量変化を測定した．分極量の指標として，図 3.21 に示す P_+ , P_- , P_0 を用いて残留分極比 α を定義した．あるポーリング電界 E を印加した後の残留分極値を P_0 とし，ヒステリシスが十分飽和する電界を印加した後の残留分極値（通常のヒステリシスループで言うところの P_r ）に対する比で α を

$$\alpha \equiv \frac{(P_0 - P_-) - P_r}{P_r} \quad (3.14)$$

と定義する．なお，式 (3.14) はヒステリシスの非対称性を考慮に入れた定義で，ヒステリシスが対称であれば $\alpha = P_0/P_r$ である．実際の α の測定は，電界ポーリング直後に P - E ヒステリシスを測定することにより行なった．すなわち，ポーリング電界 E 印加後のヒステリシス曲線の開始位置を P_0 とし，一周のヒステリシスを描き終った縦軸切片から P_r (P_+ , P_-) を求めた．

ポーリング電界に対する分極比 α の依存性を図 3.22 に示す．比較のため h_{31} の依存性を同時に示している．残留分極比と h_{31} のポーリング電界に対する傾向が良く一致していることが分かる．このことから，ゾルゲル PZT 薄膜において強誘電体としての分極の整列がそのまま圧電性の向上に結び付いていることが分かる．

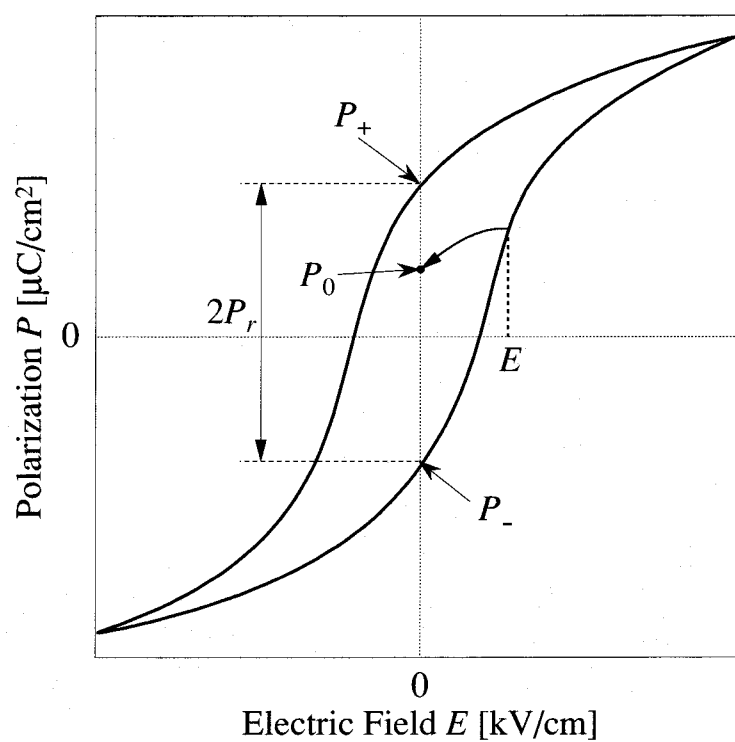


図 3.21 残留分極比 α の定義に用いるヒステリシスループの説明図

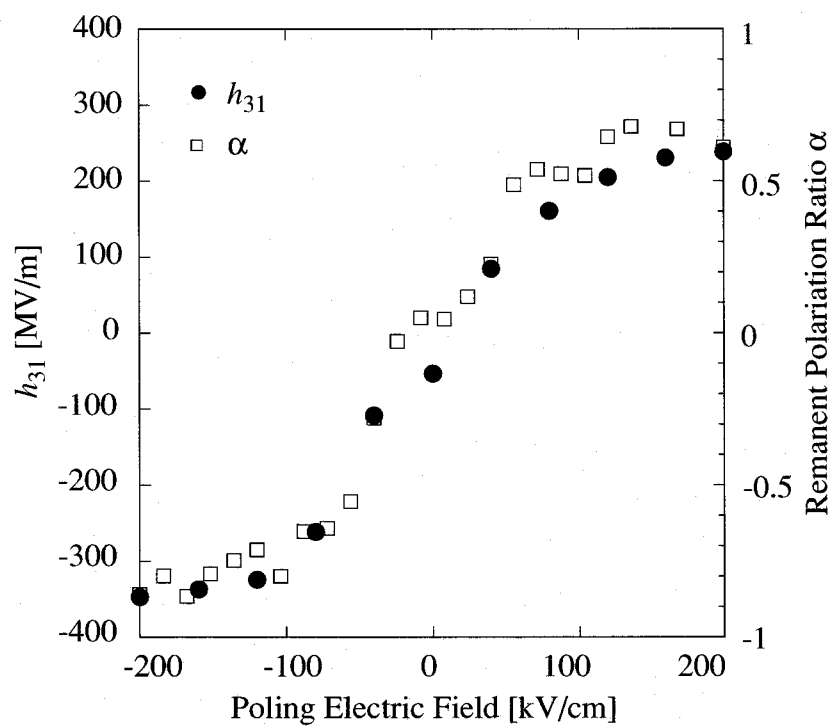


図 3.22 分極比 α のポーリング電界依存性および h_{31} との比較

3.5 まとめ

本章では、Pt/Ti/SiO₂/Si 基板上にゾルゲル法により PZT 薄膜を作製し、センサ・アクチュエータ応用に必要とされる 2 μ m まで厚膜化して結晶性、強誘電性および圧電性評価を行なった。

ゾルゲル反応過程の熱分析より適切な乾燥、結晶化アニール温度を選択し、それらの工程間の塗布回数を最適化することにより、センサ・アクチュエータ応用に必要とされる厚さまで堆積し良好な特性の薄膜を得た。製膜時において、初回アニール層の厚みを制御することにより結晶配向を (100) から (111) へ変化させ得ることを示した。配向制御した薄膜の強誘電性は、残留分極値において (111)>(100) となり、分極量の比は結晶軸と分極軸の方向の関係から説明できた。また薄膜全体の配向性はこの初期アニール層によって制御されることを見出し、結晶配向性を保ったまま再現性良く厚膜化することに成功した。また新たな評価方法として、バルク基板上での薄膜自体の圧電性を簡便に測定する方法を開発した。カンチレバー状に固定した基板の減衰振動を利用し、たわみと圧電出力電圧から圧電定数を算出するので、特殊な応力加振装置を必要とせず、また基板に比べて薄膜の曲げ剛性が十分小さいので、基板や薄膜材料の弾性定数の影響を受けずに評価できる。これを用いて、(111) 配向膜において圧電性を評価した。ポーリングにより大きく圧電性が改善され、as-deposited の十倍近い圧電定数が得られることを見出した。2.2 μ m 厚の膜において、最適なポーリング条件によりバルクセラミックスの約半分に達する良好な圧電性を示し、センサ、アクチュエータへの応用に十分な性能の膜が得られた。またポーリングにおいて、印加電界に対する圧電性の改善傾向が、 P - E ヒステリシスループにおける残留分極比の変化とよく一致していることを見出し、強誘電体としての分極の整列がそのまま圧電性の改善に現れていることを示した。

第4章 太陽電池と圧電体を複合化した光駆動振動型アクチュエータ

4.1 はじめに

本章では、第2章で述べた p^+ -Si 層を単なる構造材としてだけでなく、太陽電池の p 型層として利用し、構造と機能を両立したマイクロ構造について提案する。さらに、圧電体膜と組み合わせて光照射により駆動されるアクチュエータ構造を作製し、その駆動特性を示す。

自走型マイクロロボットは、ケーブルによる繋がりを持たず無線で制御・エネルギー供給可能なアクチュエータを必要とする。特に飛翔型マイクロロボットでは無線の条件は必須である。これまでいくつかのリモートコントロールによるマイクロロボットが研究されてきており、振動場を利用したもの [43] あるいは磁場を利用してエネルギー供給を行なうものの [44] があるが、これらはロボットの行動範囲全体に振動場あるいは磁場を形成しなければならず、マイクロマシンシステムの適用には限界がある。

本章では、光で制御・エネルギー供給されるマイクロアクチュエータを提案する。照射光にレーザを用いることにより遠距離でも減衰することなく駆動でき、ロボットの行動範囲に関わらず光源は既存の小型のもので良い。また、散乱光で動作させれば、直接光が届かないような入り組んだ環境でも用いることができる。本章で提案するアクチュエータは、太陽電池と圧電体膜を組み合わせたモノモルフ構造をとる。ここで太陽電池には、シリコン異方性エッチングのエッチストップ層として用いられる p^+ 層を利用する。通常 p^+ -Si 層は構造体として用いられるが、ここではそれだけでなく p/n 接合太陽電池の p 層としても利用する。これにより構造がコンパクトになり作製プロセスも簡略化される。

図 4.1 に光駆動アクチュエータの概念図を示す。外部からの光照射により太陽電池部で電圧を生じ、それを圧電体に膜厚方向に印加する。全ての結晶系の圧電体において圧電 d_{31} 定数は零でないので、膜厚方向に印された電圧に対して面内方向の伸縮を生じる。一

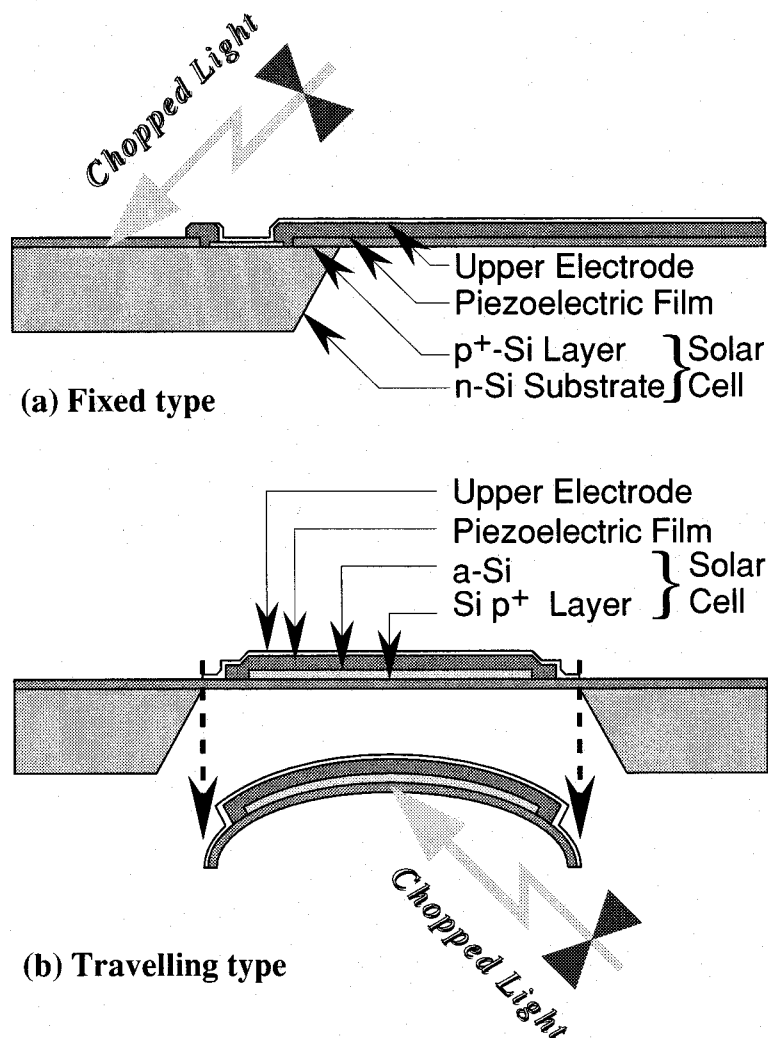


図 4.1 p^+/n -Si 太陽電池を用いた光駆動アクチュエータの概念図

方，太陽電池部は伸縮しないので，このモノモルフ構造が全体としてたわむことになる．照射光をモノモルフの共振周波数に一致させることにより，大振幅でアクチュエータを駆動することができる．この構造で特徴的なのは p^+ -Si 層の役割であり，(1) アクチュエータの構造体，(2) 電極，(3) 太陽電池の p 型層の三つの機能を果たす．図 4.1(a) は基板固定型のデバイスの断面構造である． p^+ -Si と基板の n -Si が p^+/n 接合を形成し，太陽電池として動作する．太陽電池部へのチョッピング光照射によりモノモルフカンチレバーを振動駆動する．このタイプのデバイスは，光－光チョッパやプローブ顕微鏡のタッピングカンチレバーに利用できる．図 4.1(b) は自走型デバイスを実現するモデルである．基板部分が存在しないので， n 層あるいは i/n 層としてアモルファスシリコン薄膜を用いて太

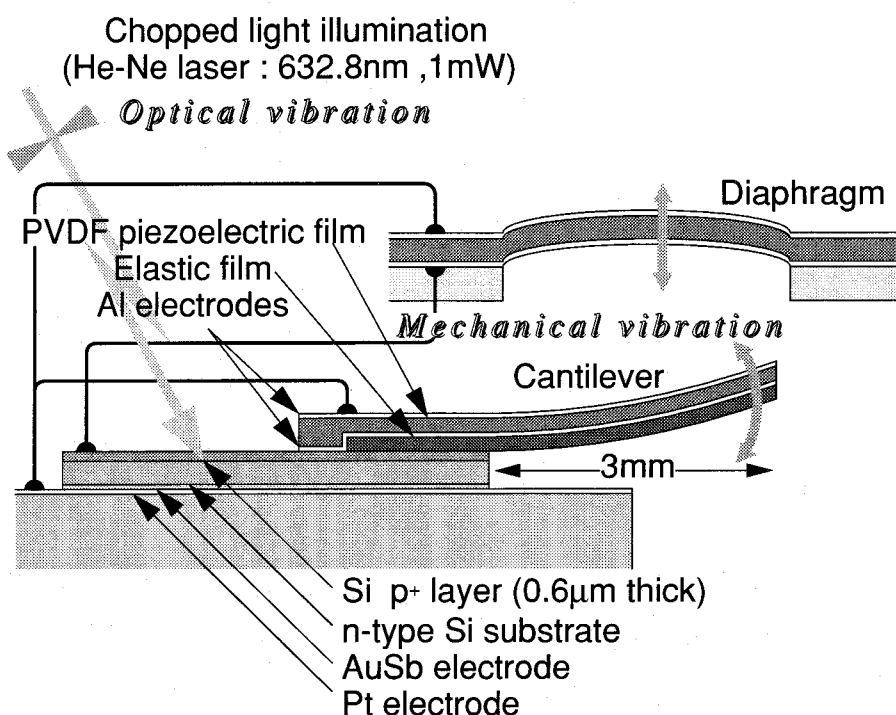


図 4.2 光駆動振動型アクチュエータ試作デバイスの構造図

陽電池を構成する．基板から分離したモノモルフは各層の製膜時の熱膨張率の差に起因する内部応力によりアーチ型に変形する．振動する非対象アーチ型のアクチュエータは自走マイクロロボットに利用できる [45]．

本章では，この p^+/n 太陽電池と圧電体の組合せによるアクチュエータの基礎特性を明らかにするため，実際にミニチュアタイプの光駆動アクチュエータを作製してその特性を測定した．

4.2 光駆動振動型アクチュエータ

作製した特性測定用のカンチレバー型およびダイアフラム型ミニチュアサイズアクチュエータの構造を図 4.2 に示す．モノモルフカンチレバーは 3 mm 角の正方形で，30 μm 厚の PVDF 圧電フィルムと 45 μm 厚のセロファンからなる．PVDF フィルムは両面に電極としてアルミニウムを蒸着している．ダイアフラム型アクチュエータは，アルミニウム板に形成した直径 3 mm の円形の開口部に PVDF フィルムを接着して作製した．太陽電池部は，抵抗率 100 Ωcm の n 型シリコン基板に，第 2 章で述べた高濃度のボロンドープに

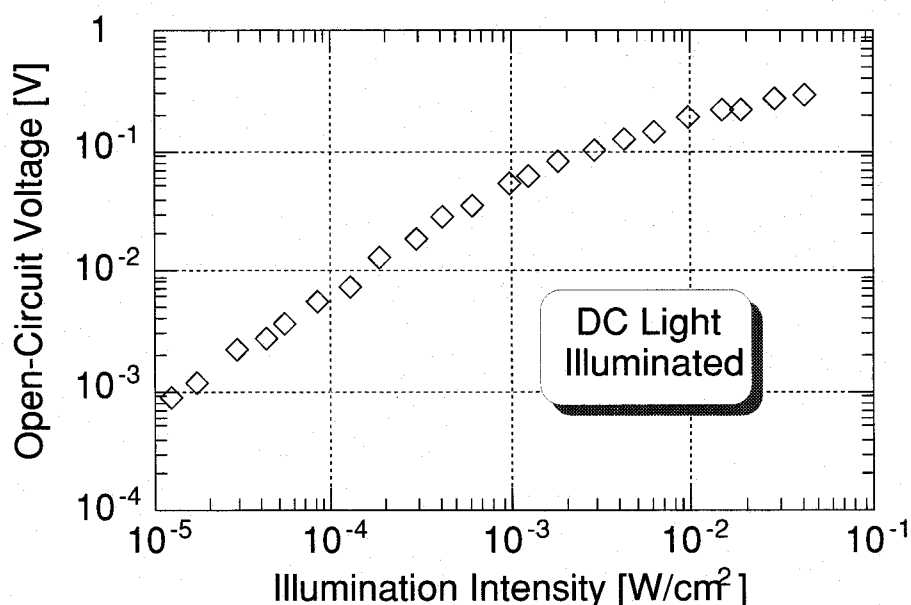


図 4.3 p⁺/n-Si 太陽電池部の開放電圧の照射光強度依存性

より厚さ 0.6 μm の p⁺ 層を形成して作製した。また、n 型基板の裏面にはオーミックコンタクトのために AuSb 薄膜を抵抗加熱真空蒸着により形成した。最後に、これらアキュエータと太陽電池部を白金電極を形成したガラス基板上に設置し、配線を行なった。

4.3 p⁺/n-Si 太陽電池の特性

光源には出力 1 mW の He-Ne レーザを用いた。光強度は最大 43.2 mW/cm² で、強度依存性測定時には ND フィルタを用いて照射強度を調節し、またチョッピング周波数依存性測定時には機械式チョッパを用いた。

一様光照射時の、開放電圧の光強度依存性を図 4.3 に示す。1 mW/cm² 以下の低強度領域では、開放電圧は照射光強度にほぼ比例するが、1 mW/cm² 程度を越える強度では飽和する傾向を見せる。40 mW/cm² 照射時で発生電圧は 360 mV である。この光強度に対する飽和特性は、チョッピング光照射による振動駆動時に、背景光の強度が強い場合駆動特性の劣化をまねくことを意味する。

理想的な p/n 接合に光を照射しない時（暗時）に流れる電流 I_d は接合に加わる電圧を

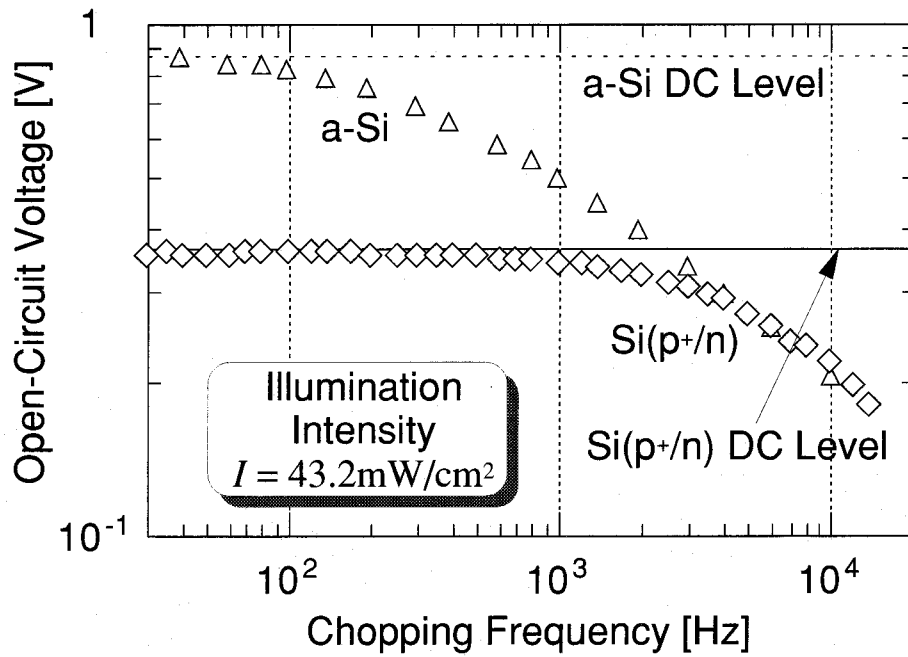


図 4.4 p^+/n -Si 太陽電池部の開放電圧の照射光チョッピング周波数依存性

V , 逆方向飽和電流を I_0 として

$$I_d = I_0 \left(\exp \frac{eV}{kT} - 1 \right) \quad (4.1)$$

である．光を照射した時，生成された電子・正孔対による光電流を I_p として，外部回路を流れる電流 I は

$$I = I_d - I_p \quad (4.2)$$

で表される．すなわち，光照射時の電流・電圧特性は暗時の特性を $-I_p$ だけ平行移動したものとなる．開放電圧 V_{oc} は $I = 0$ となる電圧 V で与えられるから，

$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \ln \left(1 + \frac{I_p}{I_d} \right) \quad (4.3)$$

となる． I_p は入射光強度に比例して増加するから， V_{oc} は入射光強度が弱い時にはほぼ I_p に比例するが，光強度が強くなると $\ln I_p$ に比例するという特性を示し，これが図 4.3 の飽和傾向の特性を表している（したがって，実際には飽和しているわけではない）．

次に，チョッピング光照射時の発生電圧の周波数依存性を図 4.4 に示す．電圧は，チョッピングにおける照射時と非照射時の差を表している．1 kHz 程度まではほぼ DC での発

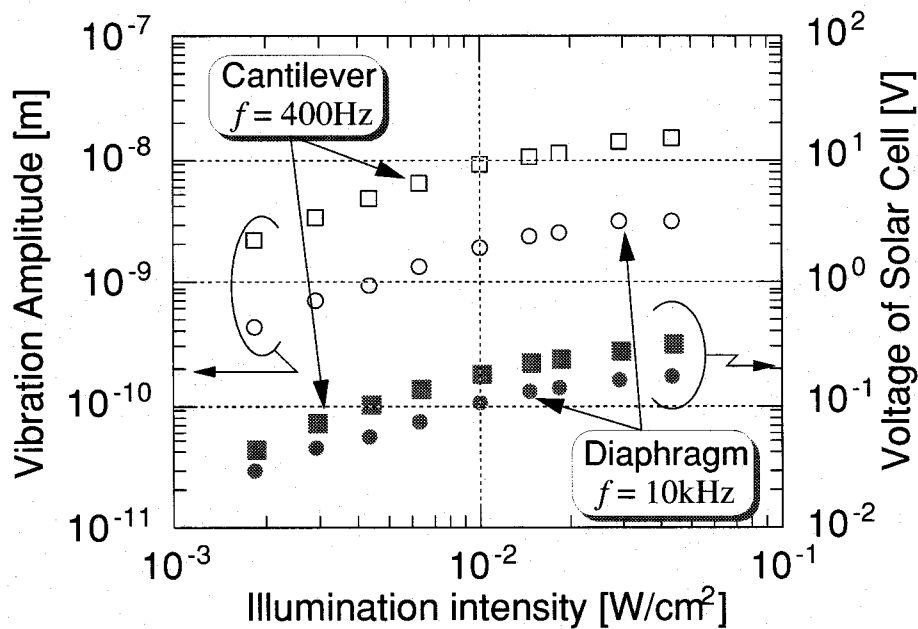


図 4.5 アクチュエータ振動振幅の照射光強度依存性

生電圧 360 mV を維持するが、1 kHz を越える辺りから周波数と共に減少する．図 4.4 に比較のために、アモルファスシリコン太陽電池の特性も示している．DC での発生電圧はアモルファスシリコン太陽電池の方が高く約 860 mV であるが、やはり周波数と共にその値は減少し、3 kHz 以上の周波数では p^+/n 太陽電池とほぼ同様の値を示す．発生電圧の時間波形の観測より、この周波数に対する発生電圧の低下は非照射時の電圧低下の遅れが原因であり、これは光生成キャリアの拡散によるものであると考えられる．

4.4 圧電体を利用した光駆動振動型アクチュエータの駆動特性

次に、太陽電池部をアクチュエータに接続してチョッピング光照射により振動駆動を行った．図 4.5 に、各アクチュエータの共振周波数における発生電圧とアクチュエータ振動振幅の照射光強度依存性を示す．カンチレバー型アクチュエータは共振周波数 400 Hz、ダイアフラム型アクチュエータは 10 kHz である．光強度に対する発生電圧は図 4.3 とほぼ同様の傾向を見せ、アクチュエータの振動振幅は発生電圧にほぼ比例している．これにより、照射光強度によりアクチュエータの振動振幅を制御できることが分かる．また、

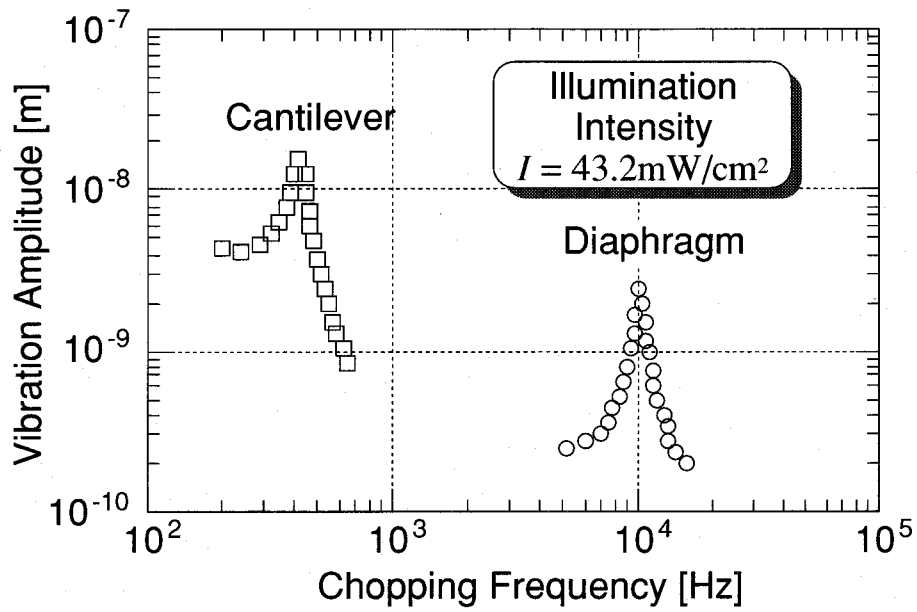


図 4.6 アクチュエータ振動振幅の照射光周波数依存性. 共振周波数の違いを利用して選択的にアクチュエータを駆動できる.

図 4.5 の発生電圧が図 4.3 とほぼ同じ値であることから, この太陽電池はこれらアクチュエータを駆動するのに十分なパワーを持っていることが分かる.

図 4.6 にアクチュエータ振動振幅のチョッピング周波数依存性を示す. 43.2 mW/cm^2 照射時で, カンチレバー型アクチュエータは 400 Hz にピークを持ち振動振幅 16 nm , ダイアフラム型アクチュエータは 10 kHz にピークを持ち振動振幅 2.8 nm を得た. これらの共振ピークは, 外部電源からの電圧印加による駆動時の共振ピークと一致している. このように, チョッピング周波数を制御することにより, 複数のアクチュエータを選択的に駆動することができる.

平板のたわみ振動による共振周波数 f は次の式で与えられる.

$$f = \frac{\alpha}{a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho h}} \quad (4.4)$$

ここで, a は一辺の長さ (正方形の場合) あるいは半径 (円形の場合), D は曲げ剛性, ρ は体積質量密度, h は厚さ, α は形状に依存する定数で,

$$\alpha = \begin{cases} 0.556 & (\text{正方形カンチレバー}) \\ 10.21 & (\text{円形ダイアフラム}) \end{cases} \quad (4.5)$$

である [46] [48]. 曲げ剛性 D は一般に

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (4.6)$$

で与えられ, ここに E はヤング率, ν はポアソン比である [46]. これより, 実際に作製した各アクチュエータの共振周波数の理論値を求めると,

$$f_c = 359 [\text{Hz}] \quad (\text{カンチレバー型アクチュエータ}), \quad (4.7)$$

$$f_d = 9.53 [\text{kHz}] \quad (\text{ダイアフラム型アクチュエータ}) \quad (4.8)$$

となり, 実測の共振ピーク周波数が理論値と良く一致していることが分かる.

4.5 まとめ

本章では, マイクロマシニング技術と圧電体を組み合わせて, 光により駆動されるアクチュエータを提案した. p^+ 層を単に構造材としてだけでなく, 太陽電池の p 型層として利用し, 構造と機能を両立したマイクロ構造について検討し, 遠隔駆動可能な光駆動アクチュエータを構成し得ることを示した. 試作した $p^+/n\text{-Si}$ 太陽電池と, PVDF 圧電体膜を組み合わせたダイアフラムおよびカンチレバー構造の振動型アクチュエータにおいて, チョッピング光照射により遠隔駆動できることを示した. さらに, 光駆動時の照射強度およびチョッピング周波数によりアクチュエータの駆動特性を制御可能であることを示し, 特にチョッピング周波数の制御により複数のアクチュエータを選択的に駆動できることを示した.

第5章 Siダイアフラム上PZT薄膜を利用した超音波マイクロアレイセンサ

5.1 はじめに

近年，無人搬送ロボットや自動車用の障害物検知（バックソナー）あるいは視覚障害者の杖のインテリジェント化等のために，空気中で使用する小型超音波センサが注目を集めている．超音波は光に比べて伝搬速度が遅いため距離計測が容易であり，また反射波形の信号処理の工夫によりイルカやコウモリが行っているような，外界認識や対象物の素材の識別等も可能であると期待されている．さらに，電子走査が容易でありアレイ化することによって三次元計測が可能で，対象物の立体画像を得ることができる．しかし，これまでのバルク・セラミックスの超音波センサでは，1～2 cm 程度の大きさの中への十分なアレイ化および信号処理回路との集積化は容易ではない．Si 基板の上に超音波センサ素子をアレイ化して作製し，信号処理回路と一体化できれば，一切の機械的可動部無しで，ワンチップで三次元情報を出力するインテリジェントセンサが可能となる．

本章では，最終的にはアナログ信号処理回路と同一基板上に集積化可能で，電子走査による三次元計測を目的とした，空気中で使用する超音波アレイセンサについて述べ，ゾル・ゲル PZT 薄膜を圧電層として用い SOI 基板上に作製した，超音波マイクロアレイセンサの設計，構造と作製プロセスおよびその特性評価について述べる．

5.2 空中用超音波の使用周波数

センサの素子を設計するにあたり，まず使用する超音波の周波数を決定する必要がある．一般に，気体による音波の吸収はほぼ周波数の二乗に比例して大きくなることが知られている [51, 52]．すなわち，使用する超音波の周波数を上げると，急速にその伝搬距離が短くなることになる．一方，アレイセンサとしての指向性は，波長に対するアレイの大

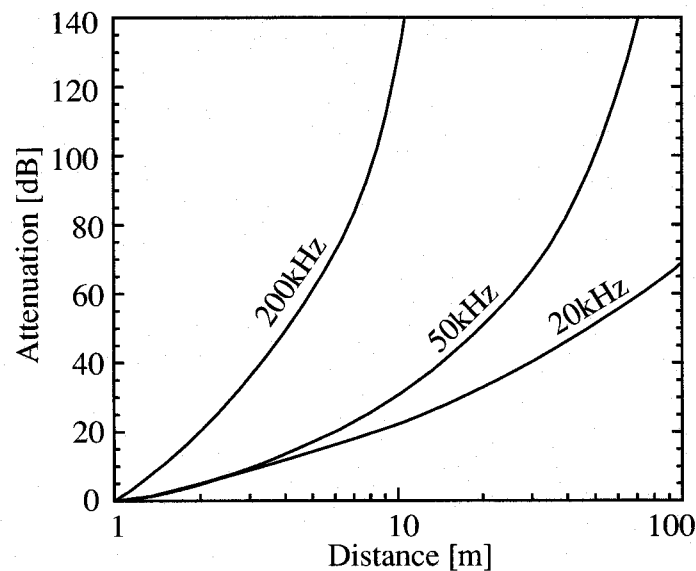


図 5.1 超音波の空中での距離に対する減衰量の周波数に対する比較

表 5.1 アレイの指向性の計算例. リニアアレイセンサの大きさに対するメインローブの半値幅を示す (付録参照).

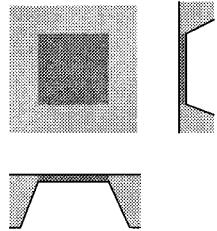
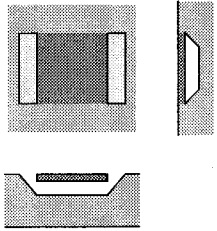
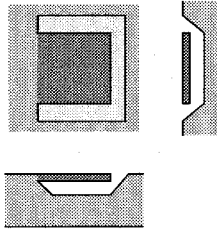
	$\phi 10\text{ mm}$	$\phi 20\text{ mm}$	$\phi 50\text{ mm}$
50 kHz	48.5°	23.7°	9.42°
100 kHz	23.7°	11.8°	4.71°
200 kHz	11.8°	5.88°	2.35°
500 kHz	4.71°	2.35°	0.94°

きさの比に比例して鋭くなる. すなわち, 使用する超音波の周波数を下げると, それだけ角度分解能が悪くなることになる.

もしセンサアレイのサイズに制限がないのならいくらでも大きなアレイを作製して低い周波数の超音波を用いれば良いのであるが, 実際にはそうはいかない. アプリケーションからくる制約によってチップサイズ (アレイサイズ) の上限が決まれば, 超音波の到達距離と角度分解能は互いにトレードオフの関係にある.

先に述べたような, 無人搬送ロボットや自動車のバックソナーあるいは視覚障害者用白杖のインテリジェント化といったアプリケーションでは, チップサイズは数 cm 程度以下に制限されるであろう. このとき, 使用超音波の周波数に対する適用可能距離 (超音波伝

表 5.2 感音部の薄板構造の比較

ダイアフラム	ブリッジ	カンチレバー
		
(1) 表面からのエッチング不可 (2) 表面開口部無し →機械的強度大 (handling 容易), 構造完成後もスピコート可	(3) 表面からの異方性エッチング可 (4) 表面開口部有り →機械的強度小 (プロセス途中破壊の危険大), 構造完成後はスピコート不可	

搬距離 [53]) と角度分解能 (指向性メインローブの半値幅) を図 5.1 および表 5.1 に示す。図 5.1 より, 周波数 200 kHz では約 1 m の距離で 1/10 に減衰することがわかり, これらのアプリケーションにとっては伝搬距離の面で限界の周波数といえる。一方指向角については, これらアプリケーションにおいては $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 程度が必要とされ, チップサイズ 2~3 cm 程度以下とすると周波数の下限としては 100 kHz 程度となろう。

以上の考察から, 使用する超音波の周波数は 100 ~ 200 kHz 程度と設定した。

5.3 PZT 薄膜を用いた超音波マイクロセンサ

5.3.1 センサ構造

薄膜センサの感音部の薄板構造としては, 表 5.2 に示すようなダイアフラム (四辺固定), ブリッジ (二辺固定) あるいはカンチレバー (一辺固定) の形状が一般によく用いられる。これらの薄板構造は, その材質および寸法が同じであれば, 正方形板においてそれぞれの共振周波数 f_d, f_b, f_c が

$$f_d : f_b : f_c = 35.99 : 22.37 : 3.494$$

という関係にある [48]。また, 同じ形状については共振周波数は一辺の長さの二乗に反比例して低くなる [54]。したがって, 共振周波数が同じであれば, ダイアフラムよりブリッジ, ブリッジよりカンチレバーの方が小型の素子を作製することができ, それだけ限られたチップ面積に多数の素子からなるアレイを構成できることになる。

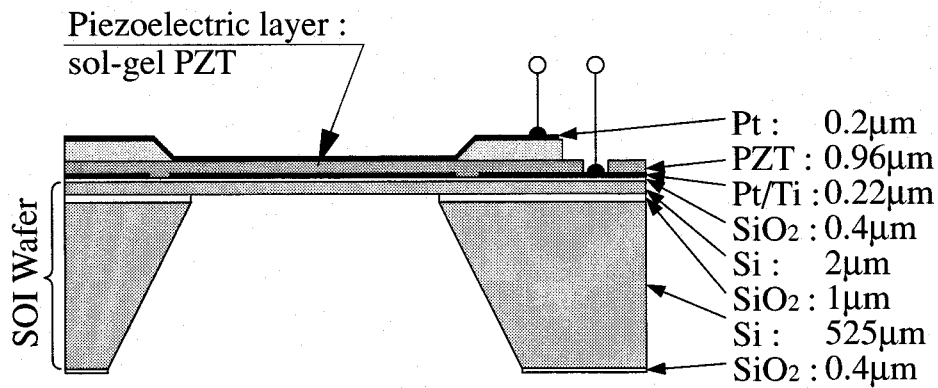


図 5.2 超音波マイクロセンサー素子の断面構造図

しかしながら、

- シリコンの異方性エッチングを利用したバルクマイクロマシニングによりこれら薄板構造を作る.
- 圧電層として、第3章で述べた良好な圧電性を有するゾル・ゲル PZT 薄膜が有効である.

というプロセス上の要求、および

- アレイの一部でも不良部分があると、そのチップ全体の機能が失われる

というアレイセンサ（特に合成開口型）の問題点に対処するためには、

- 異方性エッチングが完了したダイアフラム上に、ポストプロセスとしてゾル・ゲル法により圧電層を製膜する

というプロセスが最も作製歩留まりが高いと考えられる．そこで本プロセスではこの方針でセンサを作製することとした．センサー素子の構造の断面図を図 5.2 に示す．

一辺の長さ a [m] の正方形ダイアフラムの共振周波数 f_r [Hz] は次式により求めることができる [48]．

$$f_r = \frac{\alpha}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{(1-\nu^2)\rho t a^4}} \quad (5.1)$$

表 5.3 ダイアフラムの共振周波数を決める各変数

変数	単位	意味
α		振動モードによる係数. 正方形板の最低次では $\alpha \simeq 35.99$ となる [48].
ν		ダイアフラム全体のポアソン比 (ここでは 0.3) [55].
t	[m]	ダイアフラムの全厚. $t = \sum_{i=1}^N t_i$
t_i	[m]	第 i 層の膜厚.
ρ	[kg/m ³]	ダイアフラム全体の体積質量密度. $\rho = (\sum_{i=1}^N \rho_i t_i) / t$
ρ_i	[kg/m ³]	第 i 層の材料の密度.
E_i	[Pa]	第 i 層の材料のヤング率.
h_i	[m]	第 i 層の高さ. $h_i = \sum_{j=1}^{i-1} t_j, h_0 = 0$

表 5.4 センサ素子のダイアフラムを構成する各物質の材料定数

物質	ヤング率 [GPa]	密度 [10 ³ kg/m ³]
Si	167	2.33
SiO ₂	72	2.30
Ti	162	4.50
Pt	168	21.4
PZT	120	7.60

各変数の意味は表 5.3 に示す. ここで K [Nm] はダイアフラムの曲げ剛性で

$$K = \sum_{i=1}^N E_i \int_{h_{i-1}}^{h_i} \left(z - \frac{\sum_{j=1}^N E_j \int_{h_{j-1}}^{h_j} \zeta d\zeta}{\sum_{j=1}^N E_j t_j} \right)^2 dz \quad (5.2)$$

である [55]. ダイアフラムの一辺の長さを 0.5 mm ないし 0.6 mm とすると, 式 (5.1) から図 5.2 に示す構造の共振周波数を求めると,

$$f_r = \begin{cases} 147 \text{ [kHz]} & (a = 0.5 \text{ [mm]}) \\ 102 \text{ [kHz]} & (a = 0.6 \text{ [mm]}) \end{cases} \quad (5.3)$$

となる. このとき, 表 5.4 の値を用いた. なお, これらの値はすべてバルクでの材料定数であるので, 実際に作製した薄膜で構成されるセンサではこの値からずれる可能性がある.

アレイのサイズは, 実際には特定のアプリケーション毎に決まるチップサイズから制限を受ける. ここでは, 先に述べたアプリケーションに対して包括的に適用し得るチップサ

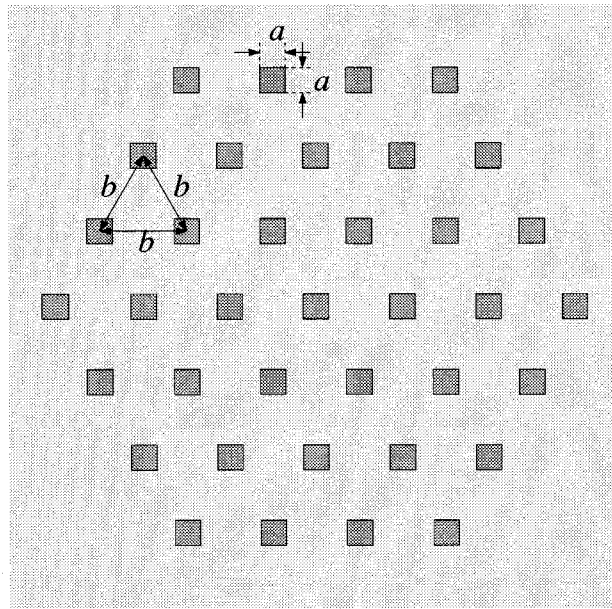


図 5.3 アレイセンサの素子配置

イズとして、TO-79 金属パッケージを基準サイズとした。このパッケージは、ピンが 0.1 インチ間隔で並んでおり、縦横 9 本で「口」の字形を作っているので、ピン中心で 0.8 インチ角 = 20.32 mm 角となり、搭載可能なチップサイズは 19 mm 程度となる。ほぼ腕時計に収まるサイズである。これらの点を考慮して、図 5.3 に示すようなリングアレイの配置とした。素子のサイズは $a = 0.5 \text{ mm}$ および $a = 0.6 \text{ mm}$ の二種類を作製した。各素子は、正六角形の各頂点、中心および辺の等分点に配置されており、隣接素子間隔は $b = 1.7 \text{ mm}$ および $b = 2.2 \text{ mm}$ とした。ここで素子サイズと素子間隔の組合せについては、リングアレイによる鋭い指向性を目的とした $a = 0.5 \text{ mm}$, $b = 2.2 \text{ mm}$ のものと、グレーティングローブの影響なく電子走査可能な $a = 0.6 \text{ mm}$, $b = 1.7 \text{ mm}$ のものの二種類とした。素子サイズおよび間隔と指向性およびグレーティングローブの関係に関する議論は付録に記す。

図 5.3 のアレイ配置により、最大で三重リングプラス中心で合計 37 素子のアレイを構成できる。このような構成にしておけば、たとえ各素子の特性がばらついていても、比較的特性の揃った一群の素子を選ぶことによって、リニアアレイや小規模なリングアレイを構成して特性評価を行なうこともできる。

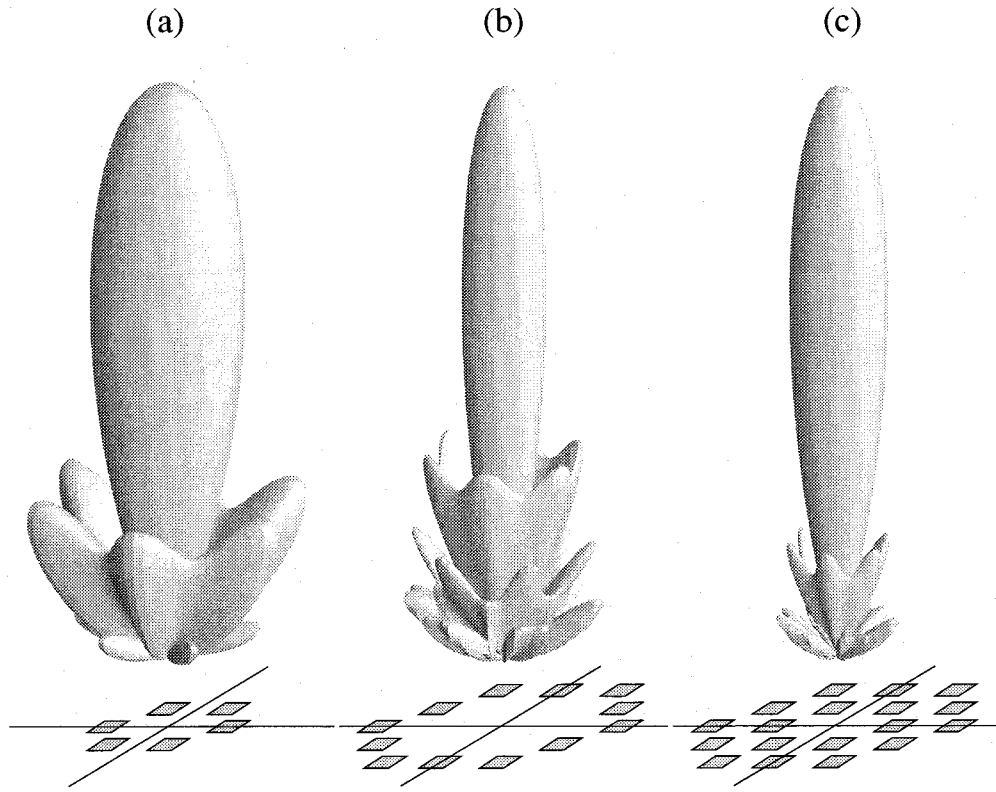


図 5.4 リングアレイの指向性パターン．計算値を極座標表示している．

一般に、 x - y 平面上に x 軸・ y 軸に平行な辺を持つ一辺の長さ a の正方形の素子からなるアレイについて、その (θ, ϕ) 方向（極座標表示）から音波が入射した際のアレイ全体としての相対音圧 $F(\theta, \phi)$ を求めてみると、付録に示すものと同様にして

$$F(\theta, \phi) = \frac{1}{a^2} \left| \sum_{i=1}^N \int_{y_i-a/2}^{y_i+a/2} \int_{x_i-a/2}^{x_i+a/2} \cos \theta e^{j\kappa r \sin \theta \cos(\phi-\psi)} dx dy \right|, \quad (5.4)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad \psi = \tan^{-1} \frac{y}{x}$$

と表されることがわかる．ここで、 (x_i, y_i) は i 番目の素子の中心位置、 κ は超音波の波数である．

図 5.3 ($b = 2.2$ mm) の配置で実際に 150 kHz の超音波が入射した場合の指向性の計算値を図 5.4 に示す．なお、式 (5.4) の積分において、被積分関数の原始関数は初等関数で解析的に表すことができなかったため、数値積分により値を求めている．6 素子ではメインローブの広がりが大きいが、12 素子になるとかなり鋭くなっている．また、18 素子と更に素子数を増やすとサイドローブが小さく押えられている．これは、リニアアレイの場合

合と同様の傾向であり、アレイのサイズ（直径）を大きくするほどメインローブが鋭くなり、素子間の間隔を狭くすることでサイドローブが軽減される。18 素子の二重リングアレイにおいて、メインローブの半値幅は 26.5° 、サイドローブ比（メインローブに対する最大のサイドローブとの比）は 22.5% である。あらゆるアプリケーションにとって十分鋭い指向性であるとは言えないが、このアレイ配置ならば作製したチップ 1 枚につき 7 通りの二重リングアレイの選択肢があり、プロセス歩留まりに過度の要求をしなくても実用的な評価チップとしてのアレイを構成できるというメリットがある。

5.3.2 センサ作製プロセス

図 5.5 にセンサ作製プロセスを示す。前節で考察したように、薄板構造をダイアフラム構造とし、圧電層としてスピコートによる製膜ゾル・ゲル法を用いる。圧電層の形成は異方性エッチングが完了した後である。

- (a) 出発基板として市販の SOI ウェハ（活性層 $2.2\ \mu\text{m}$ 、酸化膜層 $1\ \mu\text{m}$ ）を用いる。4 インチ基板 1 枚を 2 インチ相当の八角形 2 枚にダイシングして用いる。2 インチ相当 1 ウェハ当たり 4 チップを配置している。
- (b) 異方性エッチング時のマスク用および下部電極間の絶縁のためにウェハ両面を熱酸化する。炉内温度 $1,000^\circ\text{C}$ にて、最初 $\text{O}_2\ 5.0\ \text{l/min}$ のみで 5 分間ドライ酸化した後 $\text{O}_2\ 5.0\ \text{l/min} + \text{H}_2\ 4.5\ \text{l/min}$ で 90 分ウェット酸化する。酸化膜厚は $0.38 \sim 0.44\ \mu\text{m}$ で、EPW による異方性エッチングに十分耐える厚さである。
- (c) 下部電極として Pt/Ti を rf スパッタ装置により製膜する。Ar ガス流量 $44\ \text{sccm}$ 、 $1\ \text{Pa}$ 雰囲気において、まず Ti を $500\ \text{W}$ で 1 分、次に Pt を $200\ \text{W}$ で 10 分スパッタすることにより、それぞれ膜厚 $0.02\ \mu\text{m}$ および $0.2\ \mu\text{m}$ を得る。フォトレジストによるリフトオフによりパターンニングするため製膜時に加熱することはできないが、作製した膜を XRD により評価すると Pt(111) 単一配向で PZT 薄膜の下部電極として十分良質の薄膜が形成されることを確認している。

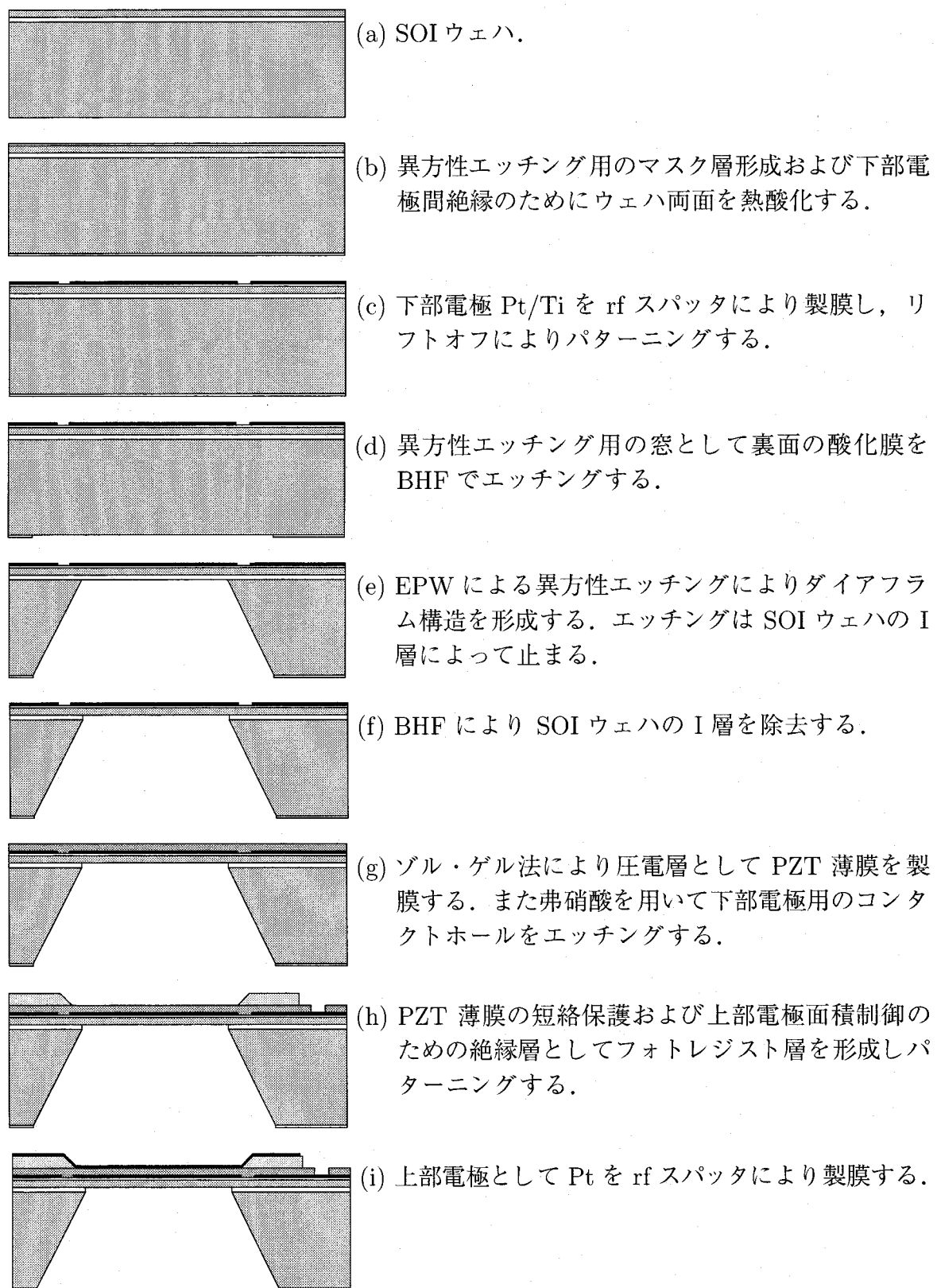


図 5.5 超音波マイクロアレイセンサの作製プロセス

- (d) 異方性エッチング用の窓として裏面の酸化膜を BHF でエッチングする。この際、裏面の窓のパターンが表面のセンサ用ダイアフラムの下部電極パターンと正確に重なるように、両面マスクアライナによりパターン合わせを行なう。
- (e) 異方性エッチングによりダイアフラム構造を形成する。エッチャントとしては 2.2 節で述べた EPW を用い、114°C で 8 ～ 10 時間エッチングを行なう。ウェハ内の各エッチホールで、エッチングレートが若干ばらついたが、SOI 構造の I 層でエッチングはほぼ停止するので、最もエッチングレートの遅いエッチホールに合わせてエッチングを行なうことにより、ダイアフラム構造を完成した。
- (f) SOI 構造の I 層は上述の異方性エッチングの停止層として不可欠であるが、最終的な構造としては内部応力の原因となり得るので、異方性エッチング終了後除去する必要がある。通常の熱酸化膜であるので、BHF によりエッチングすることで除去する。
- (g) ゼル・ゲル法により圧電層として PZT 薄膜を製膜する。圧電層製膜後下部電極のコンタクトホールとして PZT を弗硝酸 ($\text{HF} : \text{HNO}_3 : \text{H}_2\text{O} = 1 : 1 : 100$) でエッチングする。1 μm の厚みの PZT をエッチングするのに要する時間は 10 ～ 30 秒で、この際のサイドエッチ量は 5 ～ 10 μm である。
- (h) PZT 薄膜の短絡保護および上部電極の面積制御のための絶縁層としてフォトレジスト層を形成してパターニングする。フォトレジストの対有機溶媒耐性を上げるために、ポストベイクにて 120°C から 200°C まで徐々に温度を上げ硬化させる。これによりレジストはアセトンにほとんど溶解しなくなる。
- (i) 上部電極として Pt を rf スパッタ装置により製膜する。製膜条件は工程 (c) と同じで膜厚 0.2 μm である。センサ素子の上部電極としては工程 (h) のフォトレジスト層で電極形状を形成しているので特にパターニングを必要としない。また、工程 (h) での高温のベイクによりレジストの段差部に十分緩やかなテーパが生じるので、上部電極が断線することはない。なお、下部電極コンタクトホール上のマスキングには耐熱性カプトンテープを使用する。

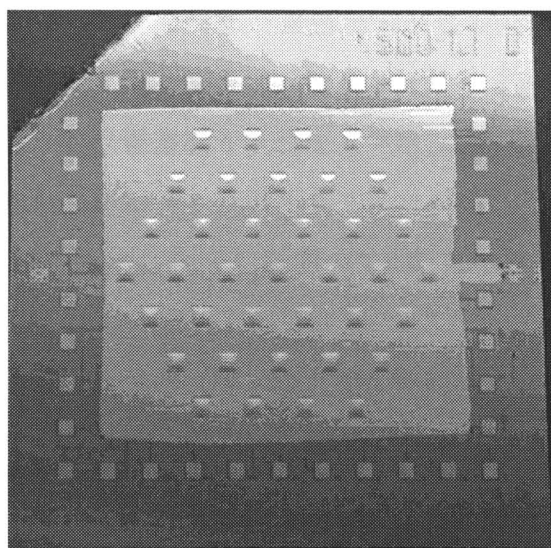
以上のプロセスでセンサを作製した後、八角形の 2 インチ相当ウェハをダイシングし 4 チップを分離して、パッケージに固定し各電極をボンディングしてセンサチップを完成する。ダイシング直後のセンサチップの写真を図 5.6 に示す。また、下部電極用のマスクパターンを図 5.7 に示す。ダイアフラムおよび下部電極コンタクト用パッドは 0.5 mm 角なので図 5.6(a) の写真でもはっきりと確認できるが、図 5.7 の配線は太さ 20 μm なのでこの写真では確認できない。

大きさの比較のため、一般によく使われている、バルク PZT を用いた市販のセンサの写真を同一縮尺で図 5.8 に示す。市販のバルク単一素子センサのパッケージサイズの中に、本研究ののセンサアレイ全体がすっぽり入ってしまう大きさである。

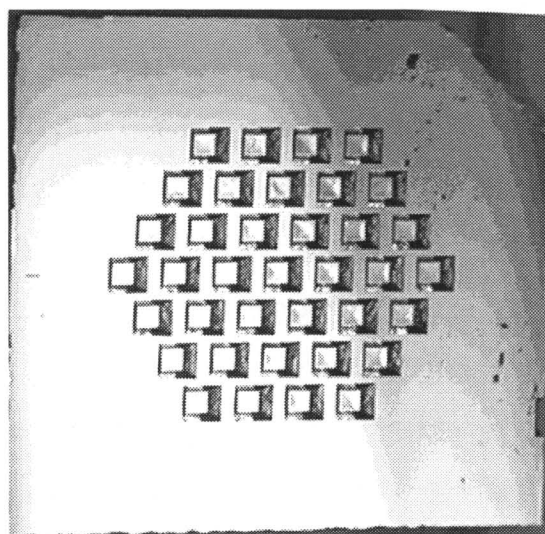
5.3.3 センサ単素子の基礎特性

作製したセンサの周波数特性を図 5.9 に示す。音源としては市販の圧電セラミック型超音波スピーカを用い、連続正弦波の周波数を徐々に変えながらセンサ出力をロックインアンプで測定した。共振点は約 176 kHz で、設計の 150 kHz (147 kHz) とは若干異なるが、これは各薄膜の材料定数、特に PZT の材料定数が計算に使用したバルクでの値と異なるためと考えられる。この測定において、共振点でのセンサ位置での音圧は 0.12 Pa であったので、センサ感度は $1 \text{ V/Pa} \equiv 0 \text{ dB}$ を基準として -39.5 dB 、また共振の Q 値は約 250 である。なお、この感度は市販のバルクセンサ (200 kHz 用で -54 dB 以上 [53]) を上回るものである。

センサ素子構造上 PZT 薄膜の有効誘電率の周波数依存性を図 5.10 に示す。誘電率の測定は LCR メータを使用し、印加交流振幅 50 mV で測定した。誘電率の値は約 700 で 5 MHz 付近まではほぼ平坦な特性を示すが、176 kHz 付近に共振ピークを持つ。この共振点は超音波照射による出力電圧の共振ピークとほぼ一致するため、図 5.9 のセンサ出力が圧電体の電気機械結合によるものであることが確認できる。



(a) センサチップ表面写真



(b) センサチップ裏面写真

図 5.6 超音波アレイセンサチップのダイシング直後の写真

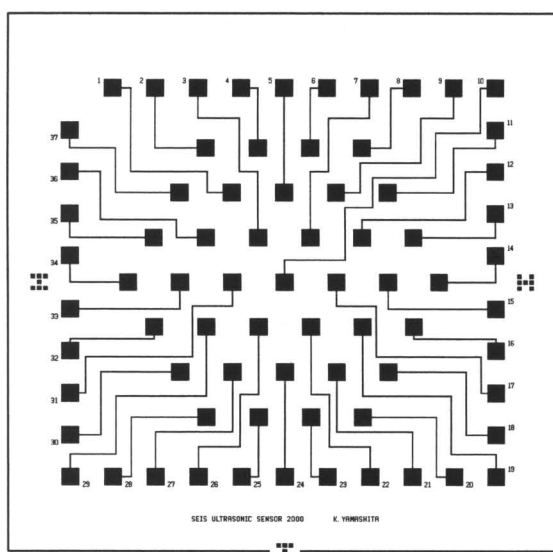


図 5.7 下部電極用マスクパターン



図 5.8 市販のバルクセンサの例

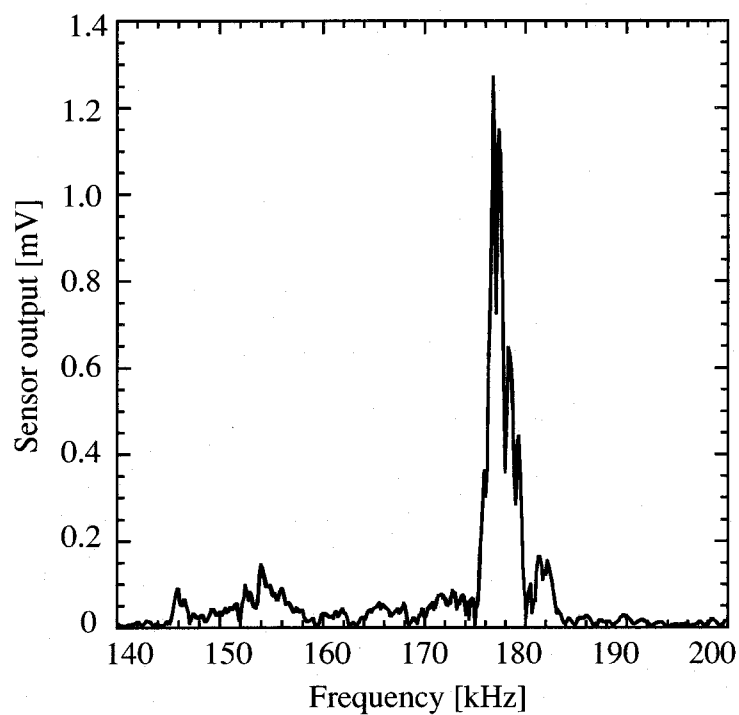


図 5.9 連続超音波に対するセンサ出力電圧の周波数依存性

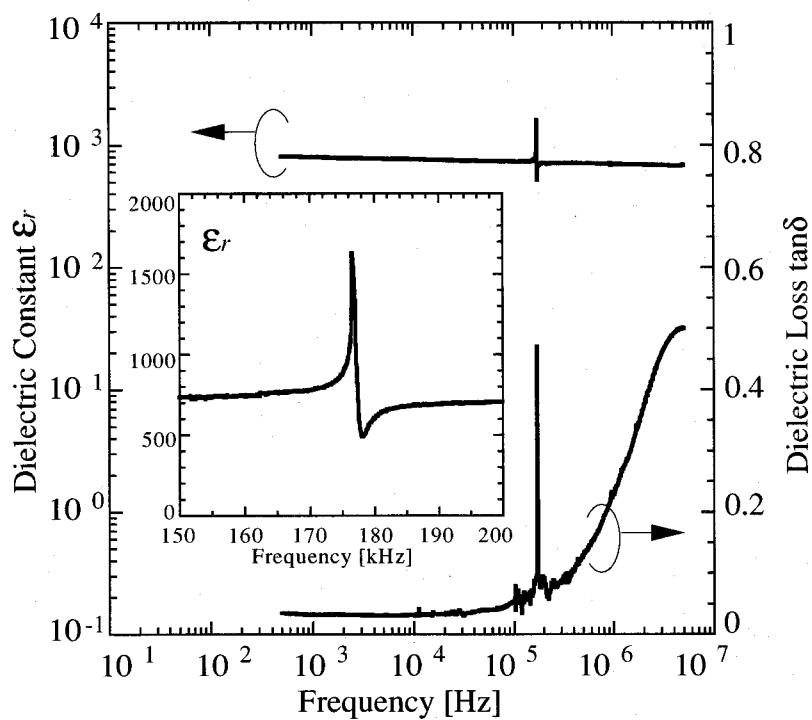


図 5.10 センサ素子上 PZT 薄膜の有効誘電率の周波数特性。電気機械結合を含めた素子全体の電気的インピーダンスを用いて、直列等価回路素子としてのキャパシタンスおよび抵抗から誘電率および誘電損失を求めた。

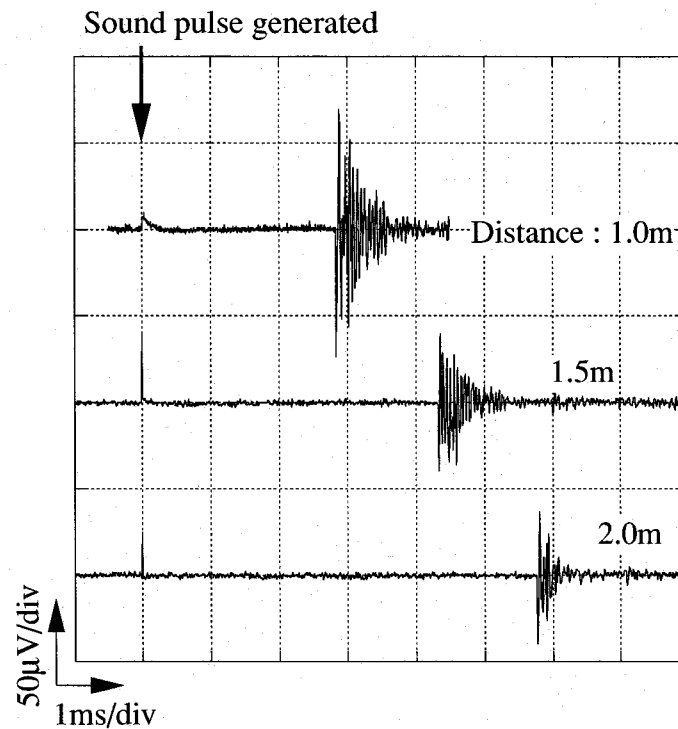


図 5.11 パルス超音波に対するセンサ出力波形

つぎに、パルス音源からのバースト波受信によるセンサ出力波形の観測と音源までの距離測定について実験を行なった。実際の超音波受信波形を図 5.11 に示す。音源には火花放電を利用したパルス音源 [56] を用い、センサの出力波形はアンプで増幅してデジタルオシロスコープで観測した。センサとパルス音源の距離を 1 m, 1.5 m, 2 m と変えて測定したときの波形を図に示しており、各波形についてパルス音波発生の特点を揃えてある。2 m の距離でも $S/N = 15.3$ (23.7 dB) と距離計測に十分な信号対雑音比が得られている。

センサ出力波形の立ち上がり部分の振幅とその点までの遅延時間を音源からの距離を変えて測定したものを図 5.12 に示す。遅延時間はほぼ距離に比例し誤差は 1%以内である。また使用した火花放電音源はほぼ理想的な点音源とみなせる [57] ため、出力振幅は距離の二乗に反比例する曲線によく乗っている。

音源から発生している超音波はバースト波であるが、センサの出力はバースト波消失以降も減衰振動が長く引き続く波形となっている。これはセンサの機械的 Q 値が高いためである。減衰振動を短くするためには、振動のダンパを入れて機械的 Q 値を下げる必要があるが、これはそのまま感度を低下させることにつながるため、一概にただダンパを入

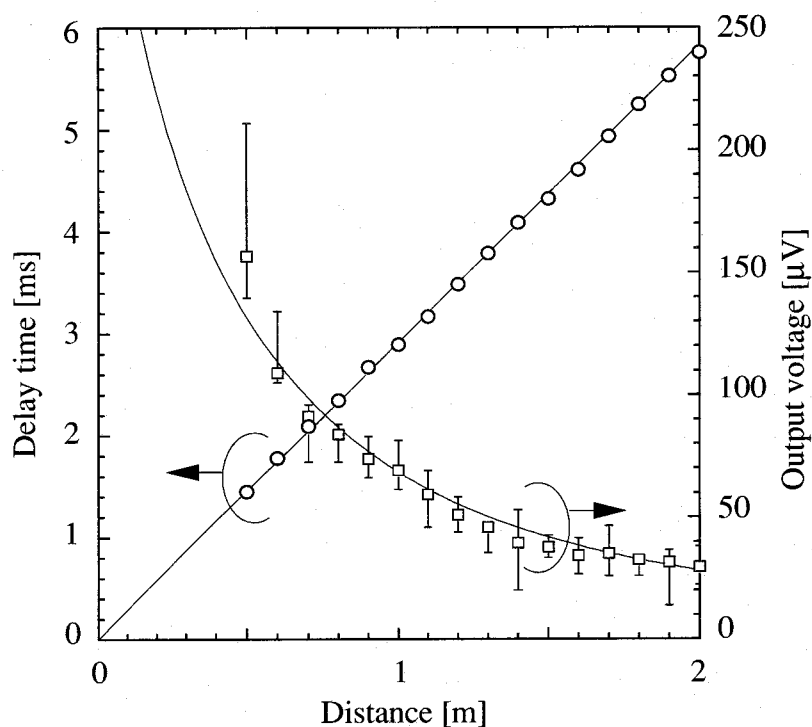


図 5.12 センサ出力波形の振幅と遅延時間の音源からの距離依存性

れば良いというわけではない。またアレイの指向角内の複数の距離の物体からの信号を必要とする際には、この減衰振動部は問題となる可能性があるが、まずは最初に到達したバースト波を以って、最も近い物体のみを検知することとすれば、図 5.11 の鋭い立ち上がりを利用して容易に距離計測を行なうことができる。

5.3.4 アレイセンサの特性

図 5.4 に示した 6, 12, 18 素子の配置について実際に作製したセンサでアレイを構成し、ステージでセンサの方向を回転させながら連続超音波を照射して、アレイの指向性を測定した。測定結果を図 5.13 に示す。入射方向に対する相対感度を極座標表示している。図 5.4 での傾向と同様に、アレイのサイズ（直径）を大きくするほどメインローブが鋭くなり、素子間の間隔を狭くすることでサイドローブが軽減されることが分かる。18 素子の二重リングアレイにおいて、メインローブの半値幅は 19.5° 、サイドローブ比（メインローブに対する最大のサイドローブとの比）は 34% であった。サイドローブ比に関しては理論値より大きな値となったが、メインローブの半値幅は理論値より狭く、より鋭い指向性

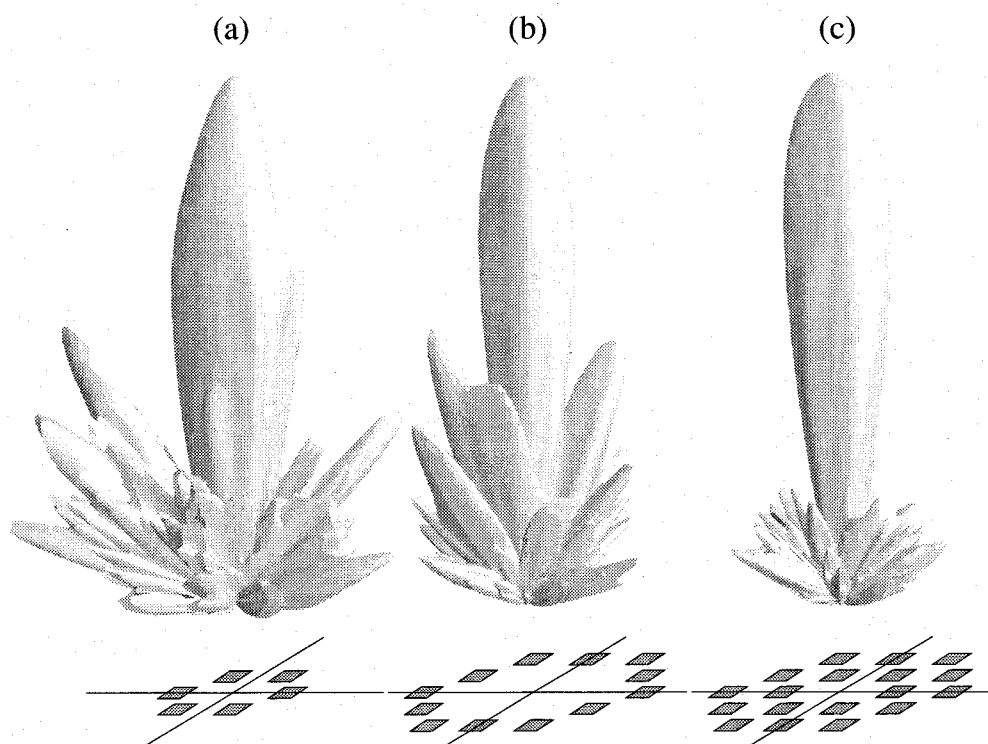


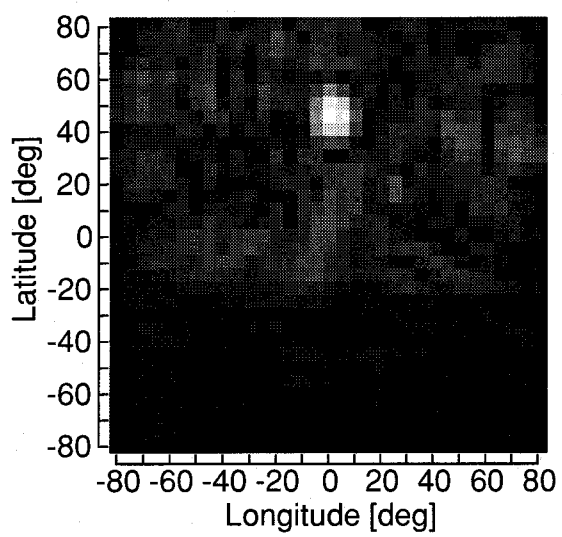
図 5.13 作製したアレイセンサの指向性パターン

が得られた。これは、各素子毎に感度や共振周波数に若干のバラツキがあることが原因と思われる。これにより、メインローブ、サイドローブとも理論値より鋭く peaky になったため考えられる。

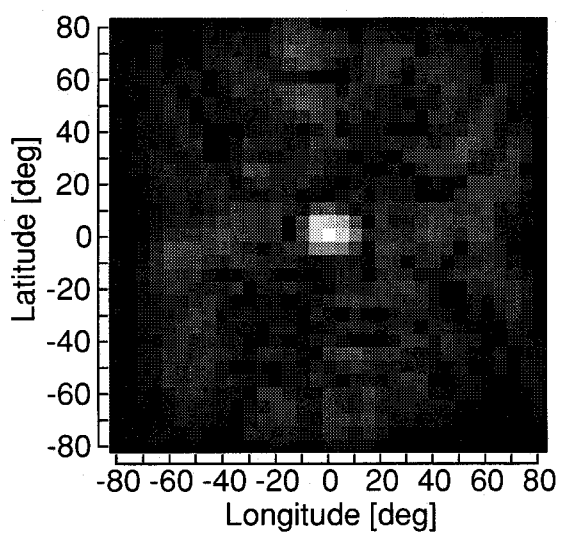
次に、18 素子リングアレイにて移動する音源の画像化を試みた。その画像を図 5.14 に示す。方位角、仰角を経度、緯度として、入射方向に対する音波の相対強度をグレイスケールで表している。これらはそれぞれセンサに対して正面上方→真正面→正面下方と音源を移動させたもので、音源の移動の様子をとらえていることがわかる。

5.3.5 機械的走査による立体形状計測

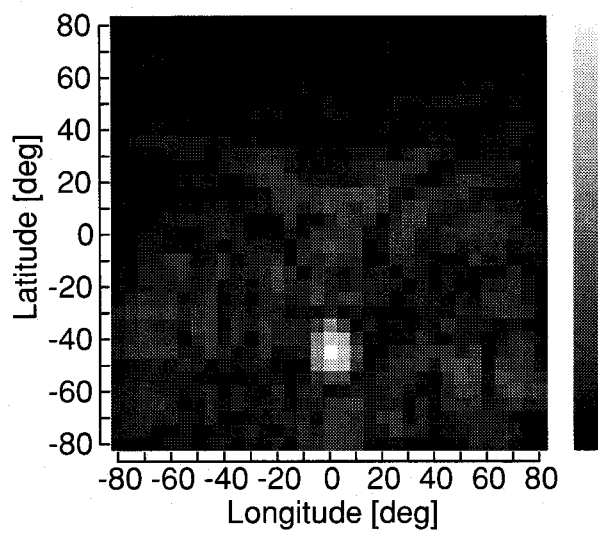
作製したアレイセンサを縦・横 (x - y 平面内) にスキャンしながら反射波の超音波伝搬時間 (z 方向距離) を測定することにより、立体形状計測を行なった。測定系の概略を図 5.15 に示す。測定対象としては、文字の形に形成した金属板を用いた。“PZT” の三つの文字を壁の手前 55 mm, 30 mm, 70 mm の位置に固定している。 x - y 方向にはそれぞれ 10 mm の間隔でスキャンを行なった。各文字の大きさは 150 mm×250 mm で文字の太



(a) 音源位置斜め上方



(b) 音源位置真正面



(c) 音源位置斜め下方

図 5.14 上下移動する点音源の超音波強度画像

さは 60 mm である。計測された三次元画像を図 5.16 に示す。測定された三次元画像ではやや大きくなりまたセンサに近いほど大きくとらえられている。これは、アレイセンサの指向性が広がりを持つためであると考えられる。このアレイセンサを用いて、文字の形および壁からの距離の違いが十分認識できることがわかる。

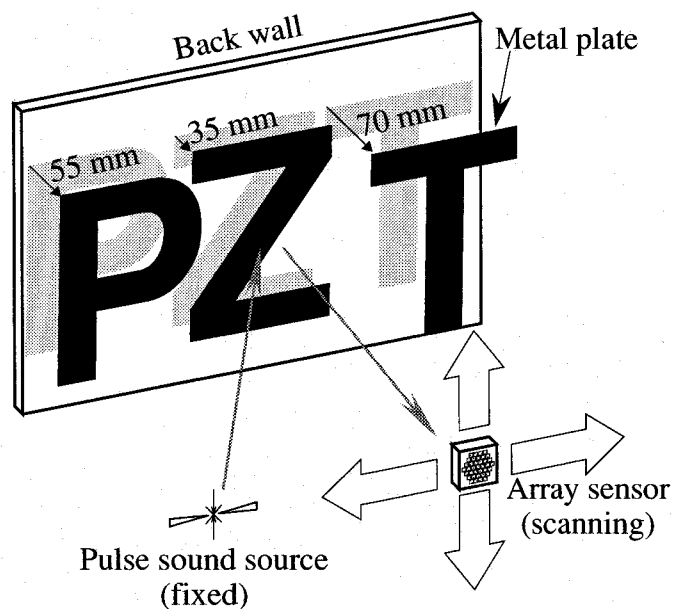


図 5.15 機械的走査による立体形状計測の模式図

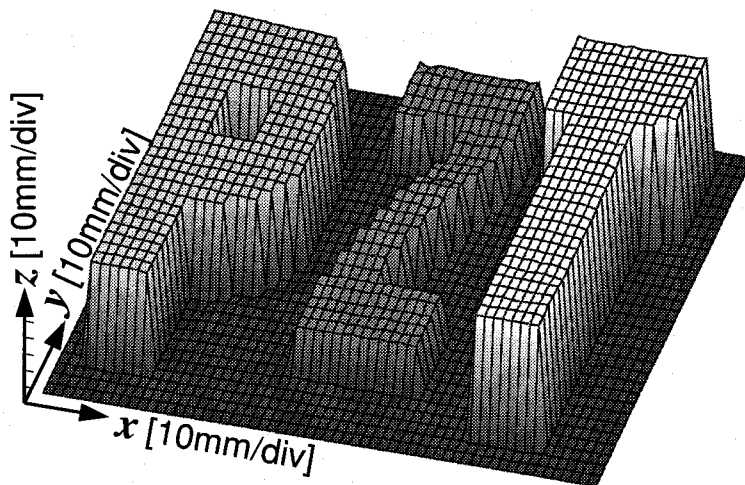


図 5.16 立体形状計測画像。センサの各スキャン位置での対象物までの距離をマッピングし、立体形状を再構成している。

5.4 超音波マイクロアレイセンサを用いた電子走査による物体認識

前節で得られた立体形状計測画像は、センサを二次元的に走査して得られたものであるが、アレイセンサでは各素子からの出力信号を処理することにより、センサ自身は固定したままで電氣的に計測方位を走査することができる。特に、小型機器への搭載を考えた場合、機械的走査部をなくすことは必須である。ここでは、前節で作製した超音波マイクロアレイセンサを用いて、電子走査による物体認識について述べる。

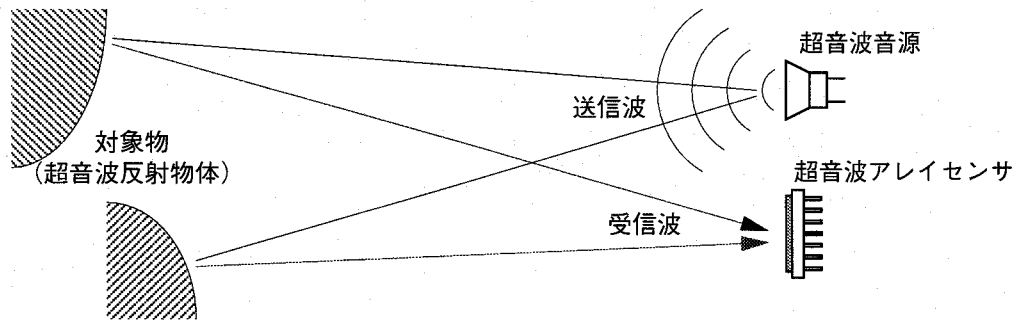
図 5.17 に超音波計測における、遅延加算による受信波走査の概念を示す。図 5.17(a) に示すように、センサの側に設置した音源から超音波を発し、対象物に反射して帰ってきた超音波をセンサで受信することにより、対象物を認識する。このとき、超音波のセンサへの各入射方向における伝搬時間（音源から発信してからセンサに戻るまでの時間）から、各方向における対象物の距離の分布（奥行き方向距離）を計測する。

ここで、センサには同時にあらゆる方向から音波が入射するが、この中から特定の方向の信号を取り出して処理しなければならない。この特定の方向成分を取り出す処理の概要を図 5.17(b) に、また具体的な波形の例を図 5.17(c) に示す。

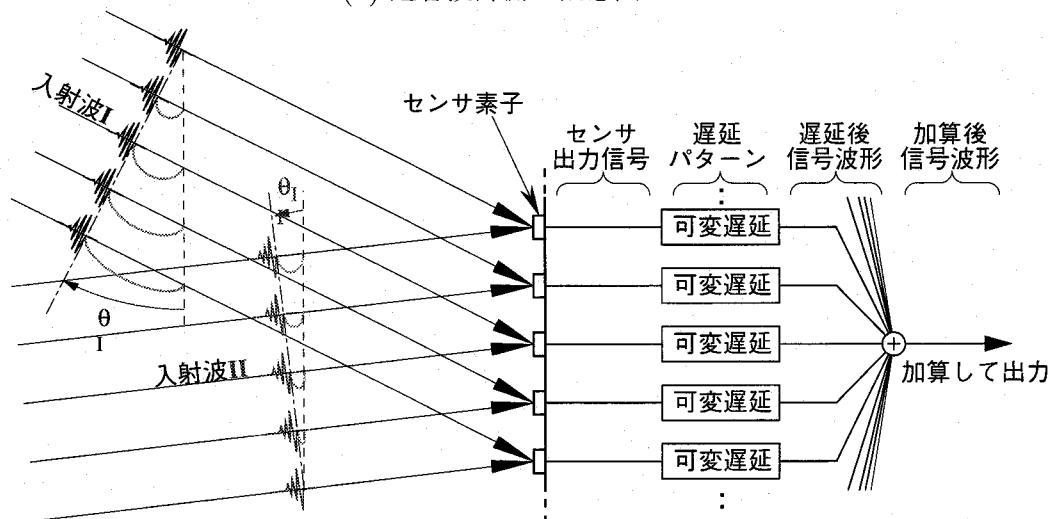
図 5.17(b) の入射波 I は、アレイの面に対して、角度 θ_I をもってセンサアレイに到達する。そのため、センサの出力信号は図 5.17(c) に示すように各アレイ毎の時間遅れをもった波形となる。これを、角度 θ_I に対応する遅延パターン (I) に設定した可変遅延部を通すことにより、遅延後の波形 (I) に示すように入射波 I の位相を揃えることができる。これらの信号を加算することにより、加算後の波形 (I) に示すように、入射波 I の波形のみを他の波形に比べて非常に大きく（素子数倍して）取り出すことができる。

入射波 II についても全く同様に、角度 θ_{II} に対応する遅延パターン (II) を用いることにより、加算後の波形 (II) に示すように入射波 II のみを大きく取り出すことができる。

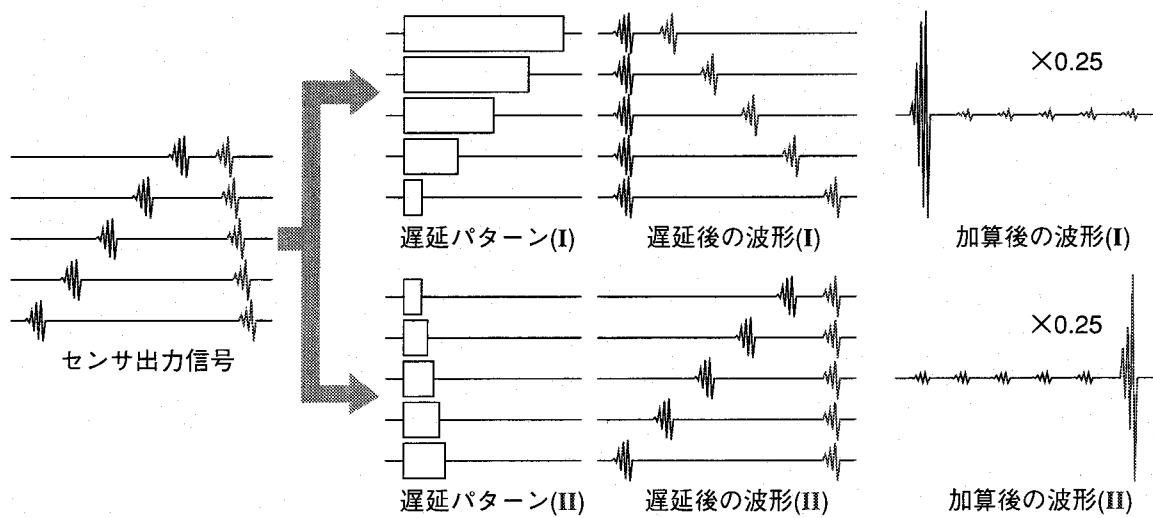
このように、受信側の可変遅延部のパターンを変化させて遅延加算することにより、機械的な可動部なしで角度方向に走査することができる。



(a) 超音波計測の概念図



(b) 入射波とセンサアレイおよび遅延加算系の模式図



(c) 遅延加算における各処理部での波形の模式図

図 5.17 超音波計測における遅延加算による電子走査の概念図

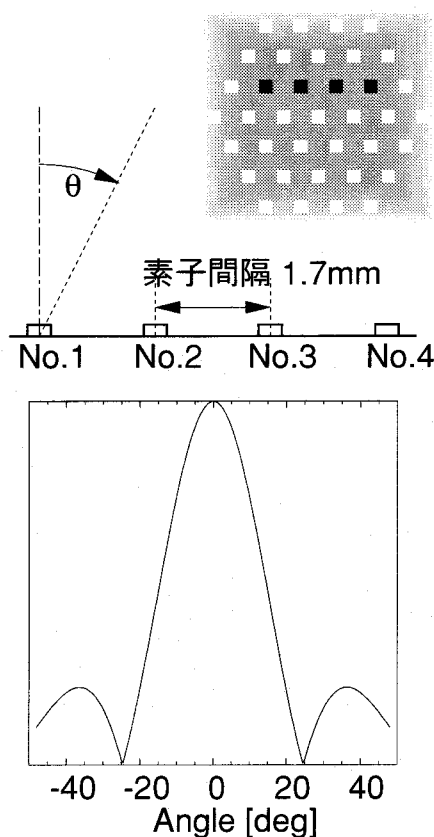


図 5.18 電子走査のための4素子リニア疑似アレイの配置と指向性

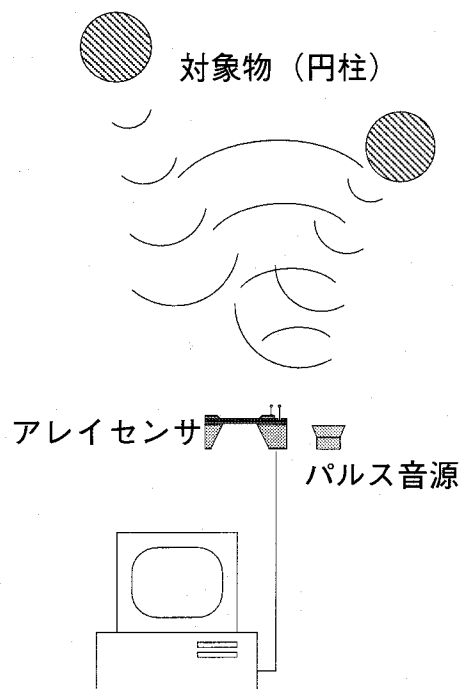


図 5.19 疑似アレイを用いた電子走査による物体認識の測定系の模式図

5.4.1 疑似アレイを用いた物体認識

今回作製したセンサを用いて、原理的に遅延加算による電子走査が可能であるかどうかを、疑似アレイを用いて検証した。ここで疑似アレイとは、実際にチップ上に配列された複数素子を用いてアレイを構成するのではなく、単一の素子のみを用い、その位置を変えながら超音波送受信を行ない、それによって得られた受信波形を基にして電子走査を行なうものである。疑似アレイを用いることにより、アレイの各素子間の特性のバラツキ（感度、共振周波数ならびに減衰率）に左右されることなく、遅延加算による電子走査そのものの原理検証ができる。この場合、実際には一回の超音波送受信で全ての素子の受信波形が得られるところを、疑似アレイの場合は複数回の超音波送受信による波形を用いることになるので、各送受信時の超音波波形そのもののバラツキが問題になる。実際に超音波発振波形を測定したところ、各発振間で波形自体には大きな変化はなく、また各発振毎の超音波強度自体を標準マイクを用いて校正することにより、実際のアレイセンサを十分エ

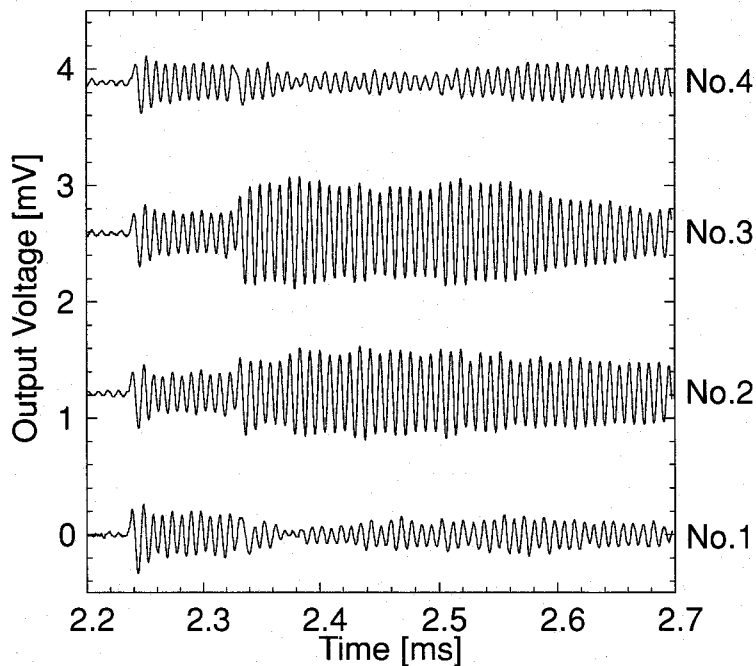


図 5.20 疑似アレイでの各素子の受信波形

ミュレートできることを確認した。

今回疑似アレイに用いたアレイの配置を図 5.18 に示す。素子には $600\ \mu\text{m}$ 角，共振周波数 $100\ \text{kHz}$ のものを使い，素子間隔も $1.7\ \text{mm}$ とした。この場合の指向性の計算値を図 5.18 に示す。半値幅は約 28° であるので， 30° 程度以上離れた物体を分離できる指向性をもつ。測定に用いた物体とセンサの配置の模式図を図 5.19 に示す。対象物としては金属製の円柱を用いた。測定に際し，センサは自動ステージに固定して，コンピュータ制御によりパルス超音波の発振と受信波形の取り込みおよびステージの移動を繰返し，最終的に得られた全波形を用いて計算により遅延加算を行ない，物体認識を試みた。

実際に各素子から出力された受信波形を図 5.20 に示す。二物体からの反射波形が合成されたものが各素子から出力されるが，対象物との位置関係の違いにより二波が干渉し，素子毎に大きく異なる出力が得られている。図 5.20 の各波形をコンピュータに取り込み，計算により遅延加算を行なった波形を図 5.21 に示す。計算上は角度 2° 毎に遅延加算を行なったが，図には代表的な方位角に対する出力波形を示している。この出力波形からだけでも，正面左側と右側に異なる距離に物体が存在することが示唆される。

実際に物体の配置を再構成するには，角方位角毎に，物体が存在するかどうか，存在するとすればどれくらいの距離に存在するかを判定して行く。判定基準としては，図 5.22 に

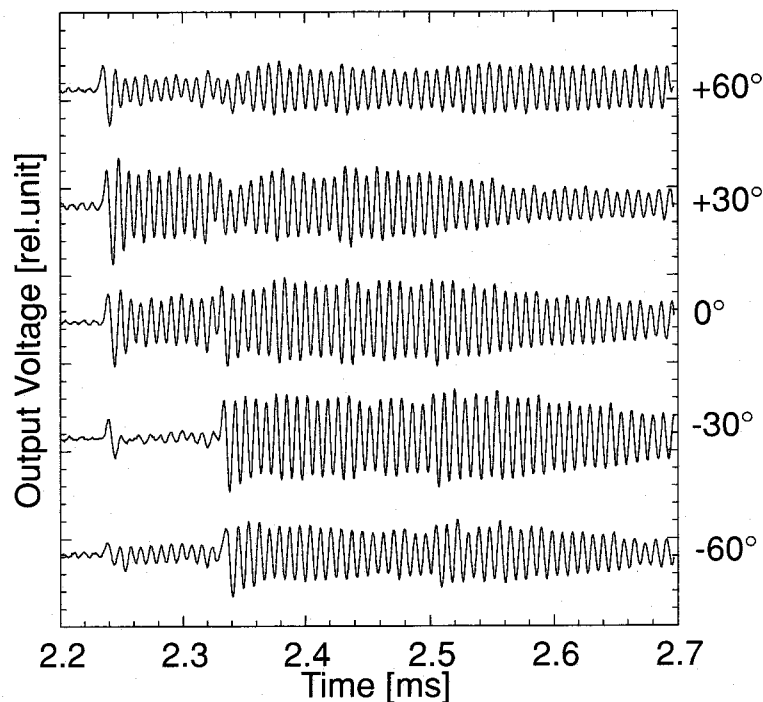


図 5.21 疑似アレイでの遅延加算後の波形．疑似アレイの出力を 0° および $\pm 30^\circ, \pm 60^\circ$ に電子走査した際の遅延加算後の波形を示す．

示すように反射波の最大振幅とそれを与える遅延時間を用いる．反射波の最大振幅が物体が存在する確からしさを与え，遅延時間が物体までの距離を与える．図 5.22 の最大振幅と遅延時間を角方位角毎にプロットしたものを図 5.23 に示す．ここでの物体存在の判定条件は，最大振幅についてある閾値を定め，そのその閾値を越える領域での極大値の点をもって物体が存在することとした．これにより，二方向 $\pm 12^\circ$ に物体が存在することが分かる．またそれらの方向の物体までの距離はそれぞれ 39.8 cm および 38 cm である．これを方位角と距離について極座標表示したものを図 5.24 に示す．これにより，実験系での物体配置が再構成されていることが分かる．

ここで，物体認識に際しての最大振幅に対する閾値の取り方には，厳密には任意性が伴う．実際に特定のアプリケーションにおける特定の対象物に対する物体認識では，あらかじめ様々な配置に対して予備測定を行ない，適切な閾値を求めておく必要があるのはもちろんである．しかしながら本節で目的とする物体認識の検証実験としては，図 5.23 において，ある特定の閾値を決定し得るということが重要である．

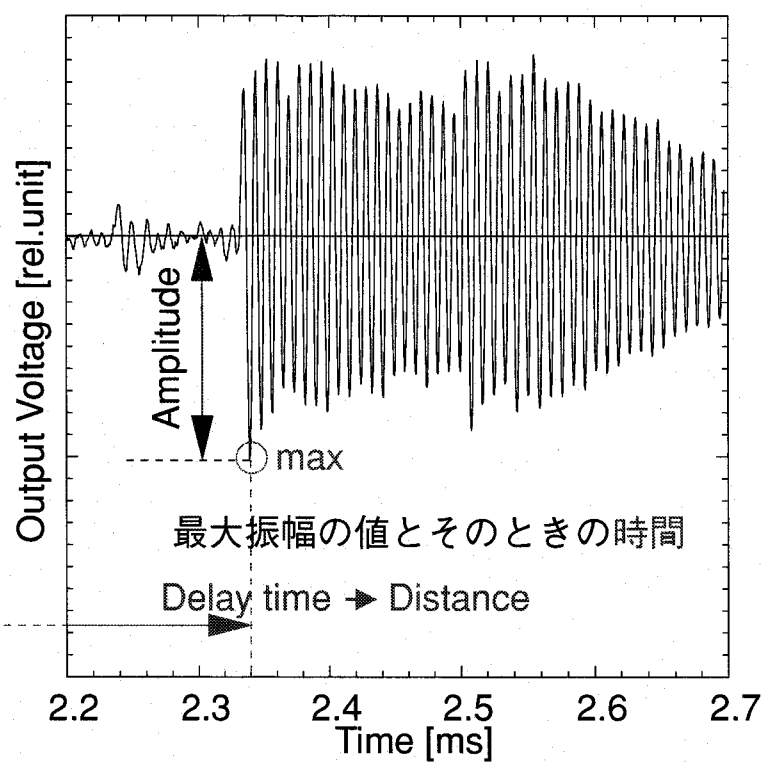


図 5.22 遅延加算後の波形からの物体認識の基準．反射波形の振幅最大値で物体存在の可能性を評価し，その点までの遅延時間から物体までの距離を評価する．

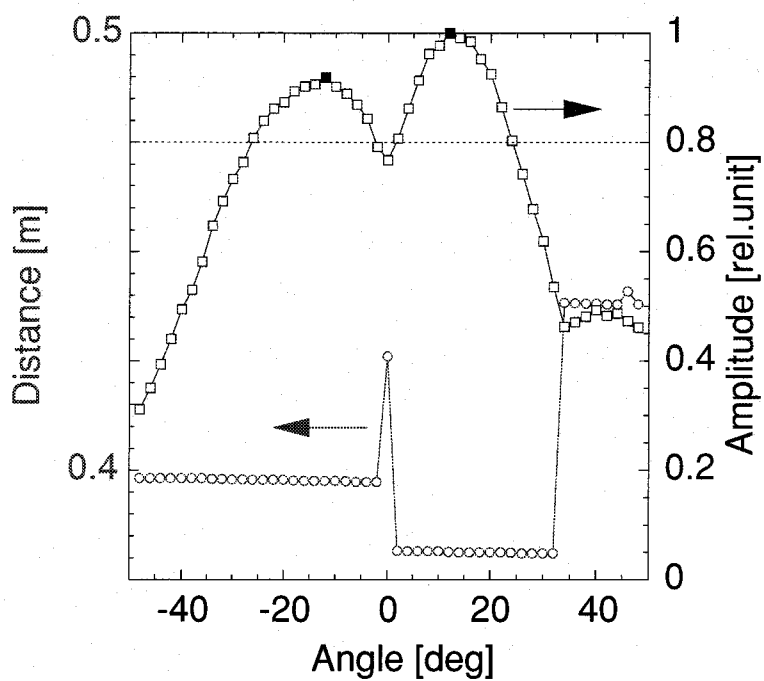


図 5.23 疑似アレイでの，反射波形の最大振幅と遅延時間の電子走査方位依存性

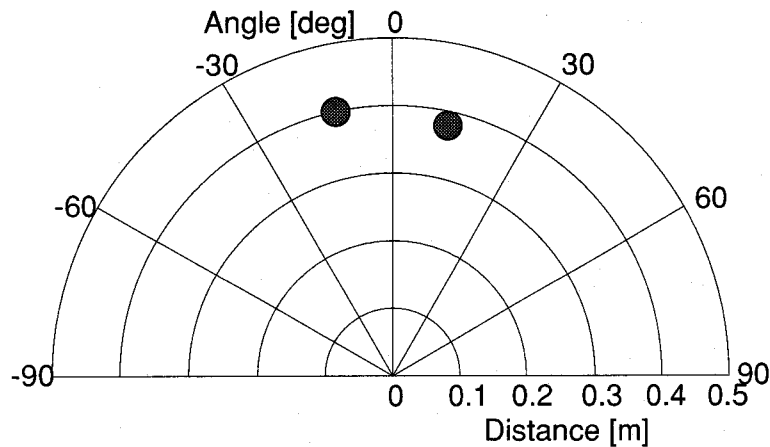


図 5.24 疑似アレイでの電子走査により再構成された物体配置

5.4.2 リニアアレイを用いた電子走査による複数物体認識

前節の疑似アレイによる検証実験により，超音波マイクロセンサを用いて原理的に物体認識が可能であることが分かった．本節では，実際のチップ上のアレイセンサを用いて物体認識を試みる．使用するアレイセンサは前節で用いたものと同様， $600\text{ }\mu\text{m}$ 角，共振周波数 100 kHz ，素子間隔 1.7 mm で，素子の配置は図 5.18 と同じである．また，センサ，音源と物体配置も図 5.19 と同様であるが，今回は実アレイを用いるのでセンサを移動させることはなく，一発の超音波送受信で得られる各素子からの出力信号をコンピュータに取り込み，計算により遅延加算を行なった．

各素子からの出力波形を図 5.25 に示す．前節の図 5.20 と同様に，二物体からの反射波が明瞭に見られる．これを遅延加算した後の波形を図 5.26 に示す．疑似アレイの場合と異なり，各角度における振幅ピークが複雑に出現し，特定の位置に物体が存在するかのようには見えない．図 5.22 と同様にして，実際に図 5.26 から最大振幅と遅延時間を各方位角毎にプロットすると図 5.27 となる．はっきりとした最大振幅のピークが認められず，特定の閾値を決めることができない．したがって，図 5.27 からは物体配置の再構成は不可能である．

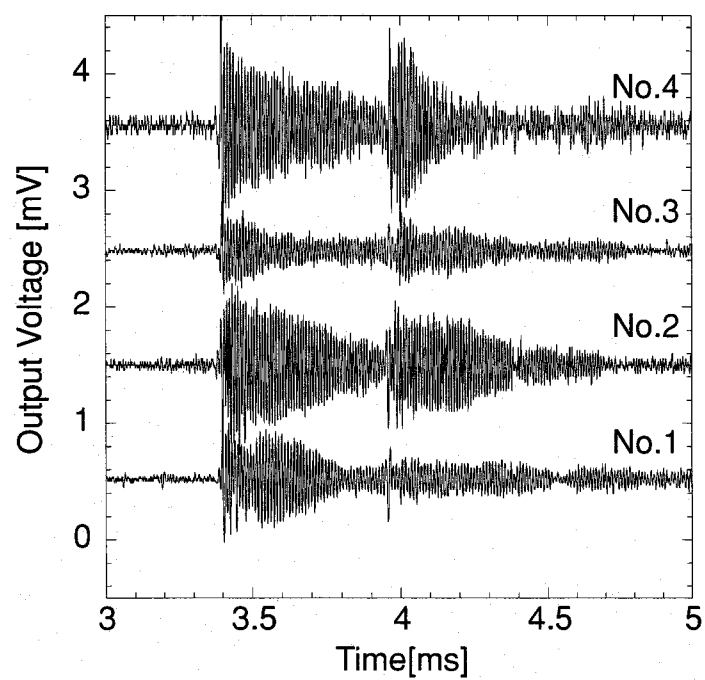


図 5.25 リニアアレイでの各素子の受信波形

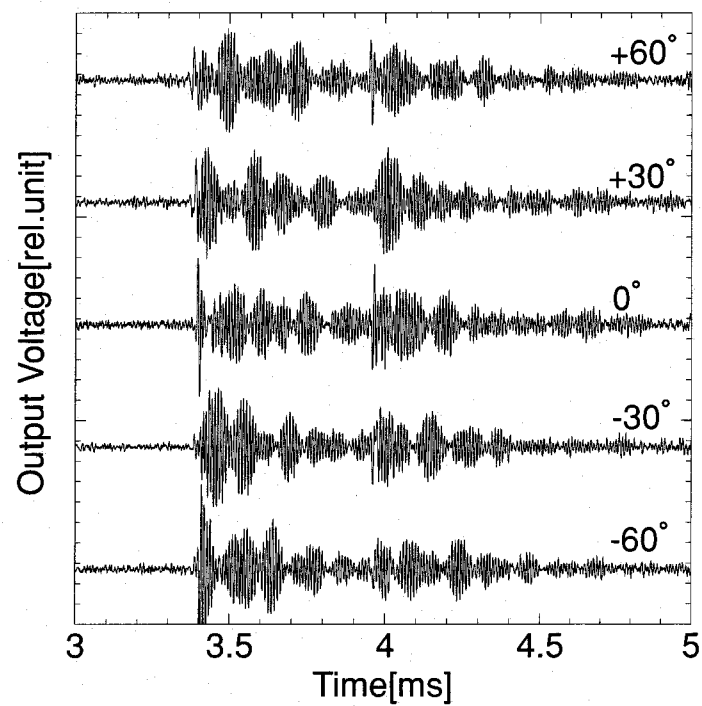


図 5.26 リニアアレイでの遅延加算後の波形. リニアアレイの出力を 0° および $\pm 30^\circ$, $\pm 60^\circ$ に電子走査した際の遅延加算後の波形を示す.

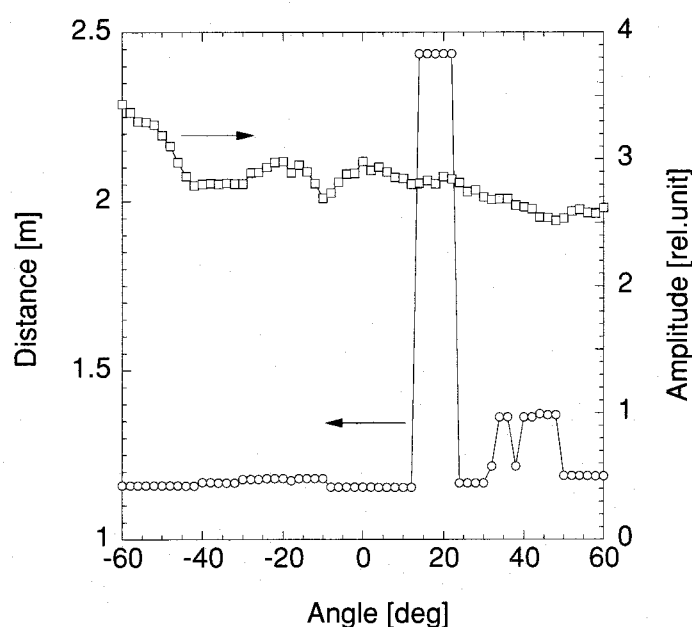


図 5.27 リニアアレイでの，最大振幅と遅延時間の電子走査方位依存性

ここで，物体認識が不可能になった原因を考察する．図 5.25 では 3.4 ms 付近および 4 ms 付近に大きな反射波があり，これらの遅延時間に対応する場所に反射物体が存在すると推定できるが，図 5.26 ではこれらの位置以外にも多くの反射波形が出現しているように見える．しかし，これを詳しく見ると物体による反射に伴う鋭い立ち上がりは 3.4 ms および 4 ms 付近のものだけで，他のピーク波形は立ち上がりが鈍った形になっていることが分かり，うなりの現象が起きていることを示唆する．実際に図 5.25 の波形をフーリエ変換して，各素子の共振周波数を求めたところ，表 5.5 に示す値となり，素子間で最大 12.1 kHz の差があることが分かった．これは，図 5.26 に見られるうなりの周期約 0.083 ms に良く一致する．

遅延加算による電子走査では，特定の方向からの入射波が，波面とアレイ面とのなす角度に由来する素子毎へ到着時間差のために位相ずれを生じ，これを電子的にずれと逆向き

表 5.5 受信波形（図 5.25）から求めたリニアアレイ各素子の共振周波数

No.1	No.2	No.3	No.4
95.4 kHz	107.5 kHz	97.7 kHz	100.1 kHz
(周波数分解能 61 Hz)			

に補正することにより特定方向成分を取り出すことが可能になる．ところが，各素子から出力される信号の周波数が揃っていない場合，反射波の立ち上がり付近では各素子間で正しい位相関係にあっても，完全に減衰し終えるまでに各素子間の周波数差に由来する位相ずれが生じ，本来打ち消し合うべき波が消えずに残ったり，あるいは同位相で強め合うはずの波が逆に消えてしまうといったことが起こる．各素子間の周波数差が顕著な場合は，この現象がうなりとなって図 5.26 のような波形を生じたものと考えられる．

このうなりの現象を回避する方法は二つ考えられる．一つは，減衰を非常に急峻にすることにより，大きな位相ずれが生じる前に完全に減衰させてしまうこと，もう一つは素子毎の共振周波数を一致させることである．前者は，センサの機械的 Q 値を非常に小さくすることを意味し，換言すれば共振を利用しないということになる．しかしながら現状のセンサは共振を利用して大振幅を得ることにより大きな出力を取り出しているため， Q 値を下げることは感度の低下を意味する．現状でセンサ出力が $100\ \mu\text{V}$ のオーダーなので，感度の低下を招くと S/N 的に検出が難しくなってくる．そこで，ここでは後者の共振周波数を一致させる方法を検討する．

ダイアフラム上に強誘電体を製膜した構造において，バイアス電圧を印加することによりその共振周波数を変化させ得ることが知られている [58]．図 5.10 に誘電率の周波数特性を示した素子について，バイアス電圧に対するキャパシタンス周波数特性の変化を図 5.28 に示す．バイアス電圧は $0\ \text{V} \rightarrow 10\ \text{V}$, $10\ \text{V} \rightarrow 0\ \text{V}$, $0\ \text{V} \rightarrow -10\ \text{V}$, $-10\ \text{V} \rightarrow 0\ \text{V}$ と印加した．バイアス電圧に対して共振周波数がシフトしている様子が分かる．また， $10\ \text{V} \rightarrow 0\ \text{V}$ および $-10\ \text{V} \rightarrow 0\ \text{V}$ のバイアス電圧変化に対しては共振周波数は一様に上昇しているが， $0\ \text{V} \rightarrow 10\ \text{V}$ および $0\ \text{V} \rightarrow -10\ \text{V}$ に対しては，共振周波数は一旦上昇した後下降している．この共振点の周波数の変化をバイアス電圧に対してプロットしたものを図 5.29 に示す．二つの山のあるヒステリシスを描き，その様子は図 5.30 に示す C - V カーブと同様の变化であることが分かる．

このように，バイアス電圧を印加することにより共振周波数を調整することができるが，アレイセンサとしての測定の際にバイアス電圧を印加したままで用いることは，センサ出力の測定回路系を複雑にし，また長時間の直流電界の印加は PZT 薄膜にダメージを与えることになる．

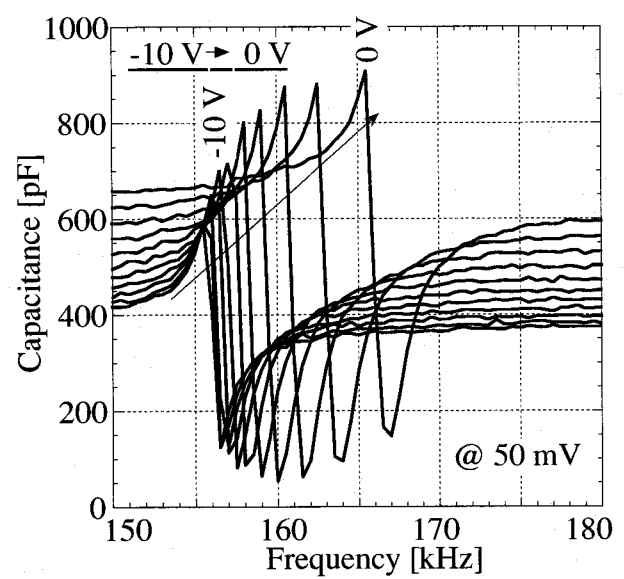
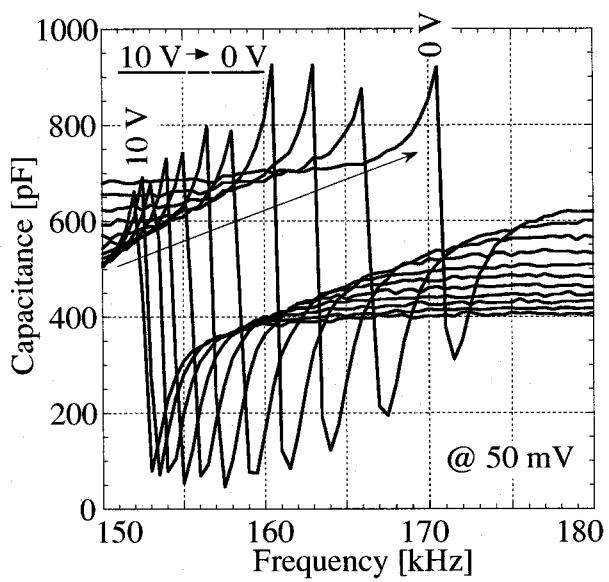
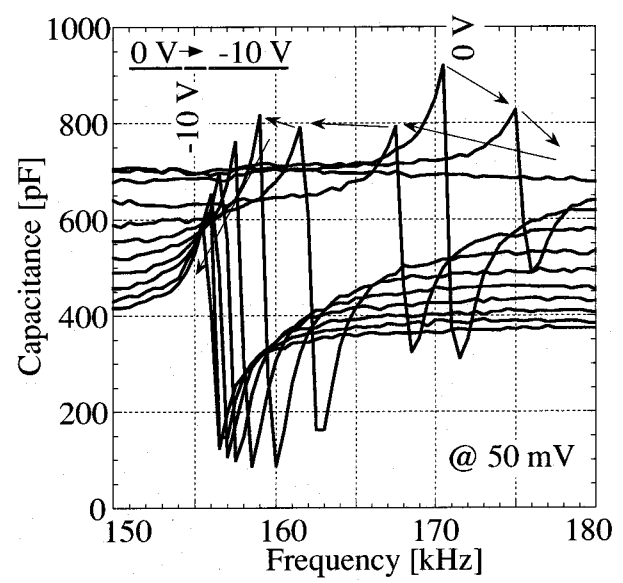
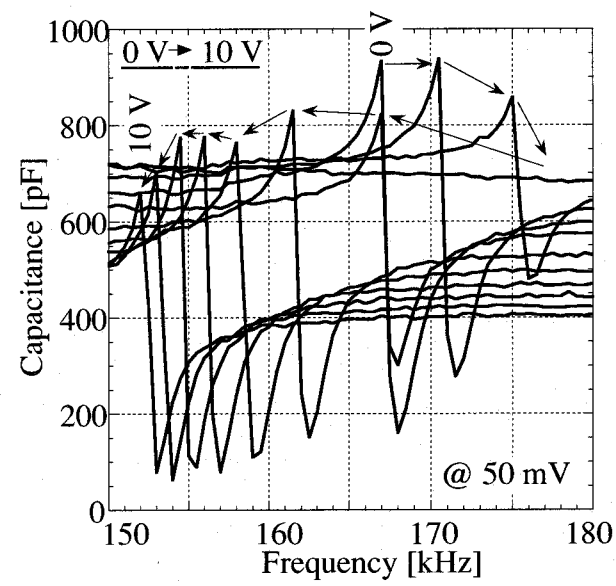


図 5.28 センサ素子のキャパシタンス周波数特性のバイアス電圧依存性

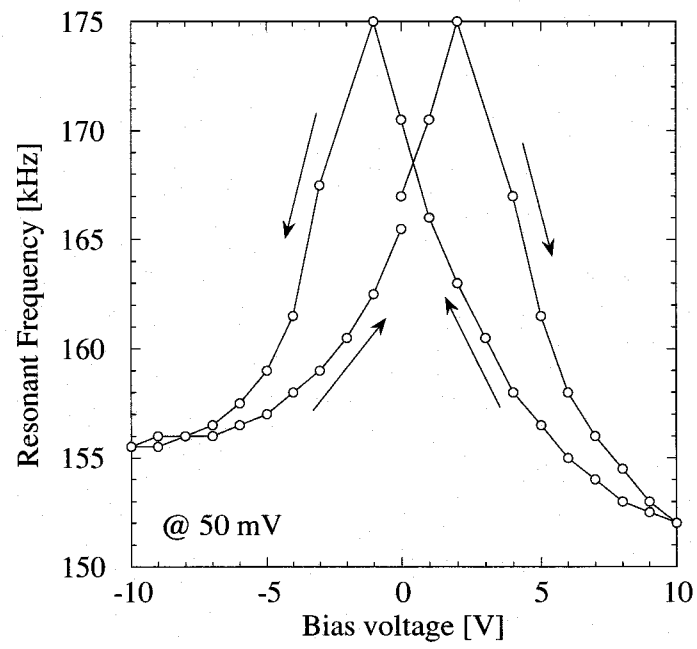


図 5.29 センサ素子のキャパシタンス共振点のバイアス電圧依存性

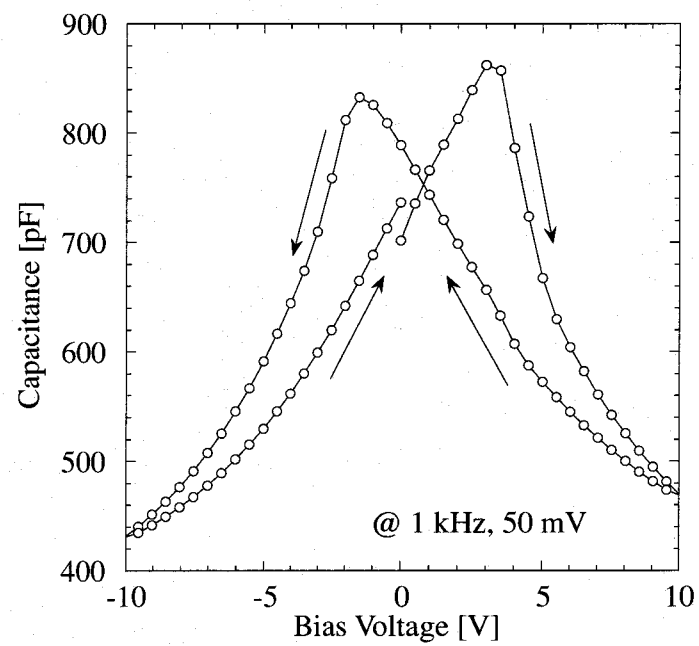


図 5.30 センサ素子のキャパシタンスのバイアス電圧依存性

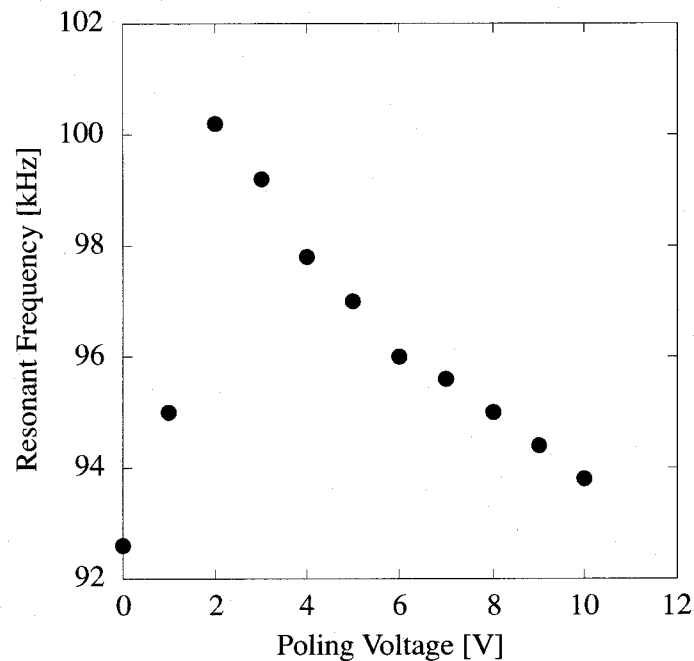


図 5.31 センサ素子の共振周波数のポーリング電界依存性

そこで，バイアス電界印加時と同様の効果を，ポーリングによって得ることを試みた．各電界において 1 分間ポーリングを行なった後，パルス超音波を照射してその出力信号をフーリエ変換することによりそのピーク周波数から共振周波数を求めた．センサ素子の機械的共振周波数のポーリング電界依存性を図 5.31 に示す．バイアス電界依存性と同様のカーブを描くことが分かる．これにより，直流電界を印加し続けなくても共振周波数をチューニングすることができる．これを用いて，実際にアレイセンサの各素子をチューニングして，共振周波数を揃えたアレイを構成し，遅延加算による電子走査を試みた．素子の配置は図 5.18 と同様，またセンサ，音源と物体配置も図 5.19 と同様とした．周波数チューニング後の各素子からの出力波形を図 5.32 に示す．これまで同様二物体からの反射波が明瞭にとらえられている．次にこれら波形を用いて遅延加算を行なった波形を図 5.33 に示す．共振周波数が揃っているので，うなりを生ずることもなく，疑似アレイの場合と同様に物体の存在が示唆される波形となる．

各走査角度毎の波形の最大振幅と遅延時間を図 5.34 に示す．二物体の存在を示す最大振幅値のピークが明瞭に確認でき，最大値の 80%をもって容易に閾値を決めることができる．図 5.34 を基にして物体配置の再構成を行なった結果を図 5.35 に示す．疑似アレイの場合と同様の，測定系における物体配置が正しく再構成されていることが分かる．

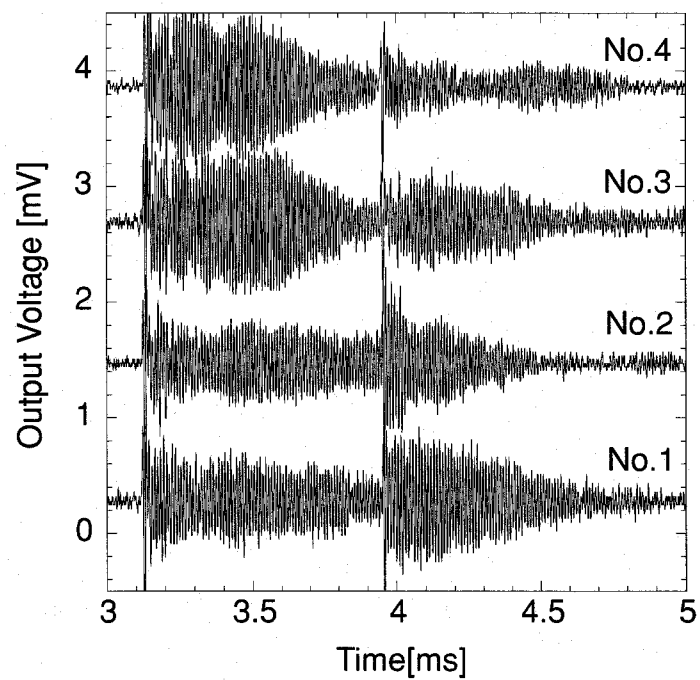


図 5.32 周波数チューニング済のリニアアレイでの各素子の受信波形

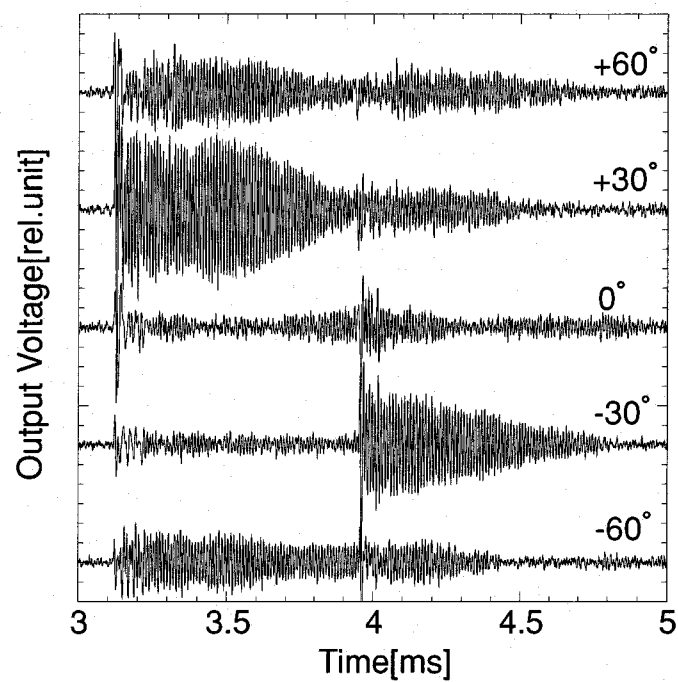


図 5.33 周波数チューニング済のリニアアレイでの遅延加算後の波形. アレイの出力を 0° および $\pm 30^\circ$, $\pm 60^\circ$ に電子走査した際の遅延加算後の波形を示す.

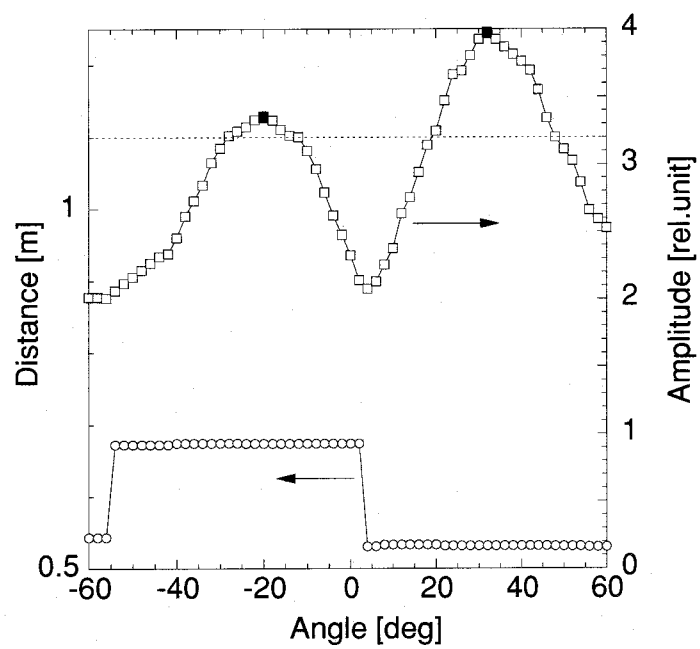


図 5.34 周波数チューニング済のリニアアレイでの、反射波形の最大振幅と遅延時間の電子走査方位依存性

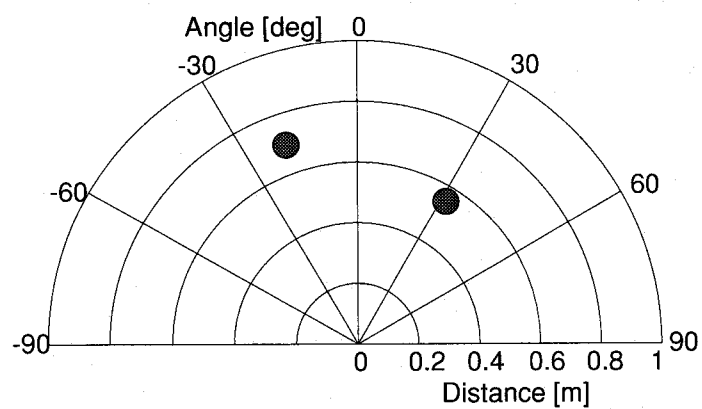


図 5.35 周波数チューニング済リニアアレイでの電子走査により再構成された物体配置

5.5 まとめ

本章では、マイクロマシニング技術と圧電体を組み合わせて、空中で使用する超音波マイクロアレイセンサを作製、評価した。

超音波の指向性と伝搬距離に対する考察から使用周波数を 100~200 kHz とし、素子構造とアレイ配置を設計した。また、SOI ウェハを用いたダイアフラム構造の作製とゾルゲル PZT 薄膜の製膜順序を検討し、歩留まり良くアレイセンサを作製し得るプロセスを考案した。これにより、市販の単一素子バルクセンサとほぼ同一面積のチップに 37 素子のアレイ化することに成功した。超音波マイクロセンサにおいて、単一素子の特性としては、共振周波数 176 kHz においてバルクセラミックスセンサを越える -39.5 dB ($1 \text{ V/Pa} \equiv 0 \text{ dB}$) の感度を得た。また距離計測においても 2 m の距離で誤差 1% 以内、センサ出力波形においては 20 dB 以上の S/N 比を得、距離計測においても十分な性能を持つことを確認した。アレイセンサの特性としては、18 素子リングアレイにおいて立体形状計測に十分な指向性を得た。またこの鋭い指向性を利用して、アレイセンサを機械的に走査することにより明瞭な立体形状計測画像を得た。さらに、ポーリングによる周波数チューニングにより、アレイを構成する各素子毎の特性を揃える方法を考案した。また、これを用いて特性を揃えたセンサアレイを用いて、一発の超音波の送受信で電子走査により複数物体の認識が可能であることを示した。

第6章 結論

本論文では，超微細加工のみに頼らず材料が本来持つ機能を積極的に利用したマイクロメカニカルデバイスとしてシリコンバルクマイクロマシニングと圧電体薄膜を組み合わせたマイクロメカニカルデバイスを提案し，その作製のための基本技術の確立と，応用デバイスとしてのセンサ，アクチュエータの試作と評価を行ってきた。

本研究で得られた主要な結果を以下に総括する。

- (1) 固体ソース BN を用いた高濃度拡散により p^+ -Si 層を形成し，EPW を用いた異方性エッチングによりシリコンダイアフラム構造を作製した．拡散工程において固体ソースの熱処理過程を最適化し，拡散後に表面処理を施す後工程を付加することにより，異方性エッチングの過程で破壊することなく厚さ $0.6\ \mu\text{m}$ の極薄ダイアフラムを安定的に作製することを可能とした．
- (2) エッチングキャビティと極薄ダイアフラム構造をを利用して，気体の赤外吸収による熱膨張を静電容量的に検出する赤外線マイクロセンサを作製した．作製したマイクロセンサにおいて赤外光量に比例した出力を得，これまで小型化が困難であったゴーレイセル型赤外線センサの小型化に成功した．
- (3) キャビティ内にガスを封入して赤外吸収を増すことにより感度の向上させ，またガスの赤外吸収スペクトルに応じてセンサ応答を変化させることを示した．
- (4) 複数の種類のガス封入センサを組み合わせることによってガスセンサを構成し，センサ毎の出力値およびそれらの相対値の組合せから，赤外光路上の雰囲気ガス種を識別することが可能であることを示した．

- (5) Pt/Ti/SiO₂/Si 基板上にゾルゲル法により PZT 薄膜を作製し、結晶性、強誘電性および圧電性評価を行なった。ゾルゲル反応過程の熱分析より適切な乾燥、結晶化アニール温度を選択し、それらの工程間の塗布回数を最適化することにより、センサ・アクチュエータ応用に必要とされる 2 μ m まで厚膜化して良好な特性の薄膜を得た。
- (6) ゾルゲル PZT 薄膜の製膜において、初回アニール層の厚みを制御することにより結晶配向を (100) から (111) へ変化させ得ることを示した。配向制御した薄膜の強誘電性は、残留分極値において (111)>(100) となり、分極量の比は結晶軸と分極軸の方向の関係から説明できた。また薄膜全体の配向性がこの初期アニール層によって制御されることを見出し、結晶配向性を保ったまま再現性良く厚膜化することに成功した。
- (7) バルク基板上での薄膜自体の圧電性を簡便に測定する方法を考案した。カンチレバー状に固定した基板の減衰振動を利用したわみと圧電出力電圧から圧電定数を算出するので、特殊な応力加振装置を必要とせず、また基板に比べて薄膜の曲げ剛性が十分小さいので、基板や薄膜材料の弾性定数の影響を受けずに評価できる方法である。
- (8) ゾルゲル PZT (111) 配向膜において、圧電性を評価した。ポーリングにより大きく圧電性が改善され、as-deposited の十倍近い圧電定数が得られることを見出した。2.2 μ m 厚の膜において、200 kV/cm のポーリングにより $h_{31} = 400$ MV/m を得た。これはバルクセラミックスの約半分に達する良好な値であり、センサ、アクチュエータへの応用に十分な性能の膜が得られた。
- (9) ゾルゲル PZT 薄膜のポーリングにおいて、印加電界に対する圧電性の改善傾向が、 P - E ヒステリシスループにおける残留分極比の変化とよく一致していることを見出し、強誘電体としての分極の整列がそのまま圧電性の改善に現れていることを示した。
- (10) p⁺-Si 層を単に構造材としてだけでなく、太陽電池の p 型層として利用し、構造と機能を両立したマイクロ構造について提案した。特に圧電体薄膜と組み合わせることにより、遠隔駆動可能な光駆動アクチュエータを構成し得ることを示した。

- (11) p^+/n -Si 太陽電池と、PVDF 圧電体膜を組み合わせたダイアフラムおよびカンチレバー構造の振動型アクチュエータを試作し、チョッピング光照射により遠隔駆動できることを示した。
- (12) 光駆動時の照射強度およびチョッピング周波数によりアクチュエータの駆動特性を制御可能であることを示した。特に、チョッピング周波数の制御により複数のアクチュエータを選択的に駆動できることを示した。
- (13) SOI ウェハを用いたダイアフラム構造上にゾルゲル PZT 薄膜を製膜し、超音波マイクロアレイセンサを作製した。超音波の指向性と伝搬距離に対する考察から使用周波数を 100~200 kHz とし、素子構造とアレイ配置を設計した。また、ダイアフラム構造の作製とゾルゲル PZT 薄膜の製膜順序を検討し、歩留まり良くアレイセンサを作製し得るプロセスを考案した。これにより、市販の単一素子バルクセンサとほぼ同一面積のチップに 37 素子をアレイ化することに成功した。
- (14) 超音波マイクロセンサにおいて、単一素子の特性としては、共振周波数 176 kHz においてバルクセラミックスセンサを越える -39.5 dB (1 V/Pa $\equiv 0$ dB) の感度を得た。また距離計測においても 2 m の距離で誤差 1% 以内、センサ出力波形においては 20 dB 以上の S/N 比を得、距離計測においても十分な性能を持つことを確認した。
- (15) アレイセンサの特性としては、18 素子リングアレイにおいて立体形状計測に十分な指向性半値幅 19.5° 、サイドローブ比 34% を得た。またこの鋭い指向性を利用して、アレイセンサを機械的に走査することにより明瞭な立体形状計測画像を得た。
- (16) ポーリングによる周波数チューニングにより、アレイを構成する各素子毎の特性を揃える方法を考案した。また、これを用いて特性を揃えたセンサアレイを用いて、一発の超音波の送受信で電子走査により複数物体の認識が可能であることを示した。

以上により、マイクロマシニングと機能性材料を組み合わせたマイクロメカニカルデバイスの可能性、有用性を明らかにした。

参考文献

- [1] K. Gabriel, J. Jarvis, W. Trimmer, A report on the Emerging Field of Microdynamics, Report of the National Science Foundation Workshop on Microelectromechanical Systems Research (1988).
- [2] L. S. Fan, IEEE Trans. Electron Devices, **ED-35** (1988) 724.
- [3] P. Greiff, B. Boxenhorn, T. King, L. Niles, Proc. Transducers '91 (1991) 966.
- [4] N. Yazdi, F. Ayazi, K. Najafi, Proc. IEEE, **86** (1998) 1640.
- [5] K. Maenaka, T. Shiozawa, Sensors and Actuators A: Physical, **43** (1994) 72.
- [6] J. Choi, K. Minami, M. Esashi, Tehc. Dig. of the 13th Sensor Symp. (1995) 177.
- [7] T. Fujita, T. Mizuno, R. Kenny, K. Maenaka, M. Maeda, Dig. of Tech. Papers Transducers '97 (1997) 887.
- [8] 江差 正喜, 藤田 博之, 五十嵐 伊勢美, 杉山 進, マイクロマシーニングとマイクロメカトロニクス, 培風館, (1992)
- [9] K. E. Petersen, Proc. IEEE (1982) 420.
- [10] U. Schnakenberg, W. Benecke, B. Lochel, Proc. Transducers '89, **2** (1989) 1031
- [11] (財)大阪府研究開発型企业振興財団, 大阪府先導的事業 スーパーアイ・イメージセンサ研究プロジェクト平成8年度研究報告書 (1997).
- [12] A. Bohg, J. Electrochim., Soc., (1971) 401.
- [13] H. seidel, Tec. Digest IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop (1990) 86.

- [14] G. L. Kuhn, C. J. Rhee, J. Electrochem. Soc., (1973) 1563.
- [15] X. -P. Wu, Q. -H. Wu, W. H. Ko, Sensors and Actuators, **9** (1986) 333.
- [16] W. Radford, D. Murphy, A. Finch, K. Hay, A. Kennedy, M. Ray, A. Sayed, J. Wyles, R. Wyles, J. Varesi, E. Moody, F. Cheung, SPIE, Infrared Technology and Applications XXV, **3498**, (1999) 119.
- [17] J. Brady, T. Schimert, D. Ratcliff, R. Gooch, B. Ritchey, P. McCardel, K. Rachels, S. Ropson, M. Wand, M. Weinstein, J. Wynn, SPIE, Infrared Technology and Applications XXV, **3498** (1999) 161.
- [18] R. Owen, J. Belcher, H. Beratan, S. Frank, SPIE, Infrared Detectors and Focal Plane Arrays IV, **2746** (1996) 101.
- [19] Y. Takada, M. Ikari, S. Kiriara, K. Uchizawa, R. Taniguchi, The 16th Sensor Symposium, (1998) 231.
- [20] R. Watton, P. Manning, SPIE, Infrared Technology and Applications XXIV, **3436** (1998) 541.
- [21] J. F. Belcher, C. M. Hanson, H. R. Beratan, K. R. Udayakumar, K. L. Soch, SPIE, Infrared Technology and Applications XXIV, **3436** (1998) 611.
- [22] M. Noda, K. Hashimoto, R. Kubo, H. Tanaka, T. Mukaigawa, H. Xu, M. Okuyama, Sensors and Actuators A: Physical, **77** (1999) 39.
- [23] T. W. Kenny, J. K. Reynolds, J. A. Podeseck, E. C. Vote, L. M. Miller, H. K. Rockstad and W. J. Kaiser, Rev. Sci. Instrum., **67** (1996) 112.
- [24] J.-B. Chèvrier, K. Baert and T. Slater, J. Micromech. Microeng., **5** (1995) 193.
- [25] K. Yamashita, A. Murata, M. Okuyama, Proc. Transducers '97, **2** (1997) 1067.
- [26] K. Yamashita, A. Murata, M. Okuyama, Sensors and Actuators: A. Physical, **66** (1998) 29.

- [27] C. L. Dym and I. H. Shames, Solid Mechanics: A Variational Approach, McGraw-Hill, Inc., New York (1973).
- [28] 国立天文台 編, 理科年表, 丸善 (2001)
- [29] D. F. Nelson ed, Piezoelectric, pyroelectric and related constants, Landolt Börnstein numerical data and functiona relationships in science and technology, Springer, **3-29** (1993).
- [30] D. Berlincourt, IEEE Trans. Sonics Ultrason., SU **13** (1966) 220.
- [31] X. Li, K. Yamashita, T. Tanaka, Y. Suzuki, M. Okuyama, Sensors and Actuators: A. Physical, **82**, (1999) 265.
- [32] X. Li, K. Yamashita, T. Tanaka, Y. Suzuki, M. Okuyama, Proc. Trandcuers '99, **2** (1999).
- [33] 木島 健, 鉛系並びにビスマス系酸化物強誘電体材料の薄膜化とその配向性に関する研究, 東京理科大学博士学位論文 (1999).
- [34] IEEE Standard 176-1978, IEEE (1978).
- [35] 電子材料工業会規格 EMAS-6006, 電子材料工業会 (1985).
- [36] IEC Standard Publication 483, 1st edition, IEC (1976).
- [37] M. Toyama, R. Kubo, E. Takata, K. Tanaka and K. Ohwada, Sensors and Actuators A: Physical, **45** (1994) 125.
- [38] 近藤恭平, 振動論, 培風館 (1993)
- [39] Y. Oba, M. Miyauchi, T. Tsurumi and M. Daimon, Jpn. J. Appl. Phys., **32** (1993) 4095.
- [40] D. A. Berlincourt, C. Cmolik and H. Jaffe, Proc. IRE, **48** (1960) 220.
- [41] T. Ikeda, J. Acoust. Soc. Jpn., **23** (1967) 300.

- [42] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, Numerical Recipes in C, Cambridge University Press (1988).
- [43] T. Yasuda, I. Shimoyama and H. Miura, Proc. 7th Intern'l Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, (1994) 42.
- [44] T. Honda, K. I. Arai and M. Yamaguchi, Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop (1994) 51.
- [45] T. Hayashi, Technical Paper of the Inst. of Electronics and Communication Engineers of Japan, **US84-8** (1984) 25.
- [46] 谷口 修, 田村 章義, 工業振動学, コロナ社, (1977).
- [47] S. P. Timoshenko, D. H. Young, W. Weaver Jr., Vibration Problems in Engineering, John Wiley & Sons, Inc., (1984).
- [48] D. Young, Journal of Applied Mechanics, **17** (1950) 448.
- [49] K. Yamashita, H. Katata, M. Okuyama, H. Miyoshi, G. Kato, S. Aoyagi, Y. Suzuki, Proc. Transducers '01, **1** (2001) 114.
- [50] K. Yamashita, H. Katata, M. Okuyama, H. Miyoshi, G. Kato, S. Aoyagi, Y. Suzuki, Sensors and Actuators: A. Physical, **97** (2002).
- [51] 実吉 純一 他 監修, 超音波技術便覧, 日刊工業新聞社 (1960).
- [52] G. Lindstedt and G. Olsson, Techniques, Components and Instruments, Applications. Selected papers from the 3rd IFAC Symposium (1993) 35.
- [53] 谷腰 欣司, 超音波とその使い方, 日刊工業新聞社 (1998).
- [54] 近藤 恭平, [工学基礎] 振動論, 培風館 (1993).
- [55] 平 修二 監修, 現代 材料力学, オーム社 (1992).
- [56] 青柳 誠司, 超音波センサのロボット計測への応用, 精密工学会誌 **62**, (1996) 373.

- [57] 青柳 誠司, 超音波によるロボットの3次元位置・姿勢計測 (第2報) 精密工学会誌
61, (1995) 273.
- [58] P. Muralt, A. Kholkin, M. Kohli, M. Maeder, Sensors and Actuators: A. Physical,
53 (1996) 398.

付 録 超音波センサアレイの指向性

素子幅 a , 素子周期 b , 総素子数 N のリニアアレイセンサ（アレイの方向を x 軸にとる）に対して，法線から θ 傾いた ξ 方向から強度 F_0 , 波長 λ （波数 $\kappa = 2\pi/\lambda$ ），速度 c （角周波数 $\omega = 2\pi c/\lambda$ ）の音波 $F_0 e^{j(\kappa\xi - \omega t)}$ が入射した場合を考える．ここで音波は平面波とする．アレイと入射音波の幾何学的関係を図 A.1 に示す．

音波は縦波であるから，素子に対する音波による振動強度は法線成分 $F_0 \cos \theta$ である． ξ 方向における位相差は $x \sin \theta$ であるから，アレイ面上位置 x での音圧は $F_0 \cos \theta \cdot e^{j(\kappa x \sin \theta - \omega t)}$ で表される．

各素子について，角度 ϕ 方向からの入射波面の到達時間差

$$\Delta t \equiv \frac{b \sin \phi}{c} \quad (\text{A.1})$$

だけ順に遅らせて信号を検出するものとする， n 番目の素子上での平均音圧は

$$F_n = F_0 \cos \theta \cdot \frac{1}{a} \int_{nb}^{nb+a} e^{j(\kappa x \sin \theta - \omega n \Delta t)} dx \quad (\text{A.2})$$

となる．したがってアレイ全体では

$$\begin{aligned} F &= \sum_{n=0}^{N-1} F_n \\ &= F_0 \cos \theta \cdot \frac{1}{a} \sum_{n=0}^{N-1} \int_{nb}^{nb+a} e^{j(\kappa x \sin \theta - \omega n \Delta t)} dx \\ &= F_0 \cos \theta \cdot \frac{1}{j\kappa a \sin \theta} \sum_{n=0}^{N-1} \left[e^{j\{\kappa(nb+a) \sin \theta - \omega n \Delta t\}} - e^{j\{\kappa a \sin \theta - \omega n \Delta t\}} \right] \\ &= F_0 \cos \theta \cdot \frac{e^{j\kappa a \sin \theta} - 1}{j\kappa a \sin \theta} \sum_{n=0}^{N-1} e^{jn(\kappa b \sin \theta - \omega \Delta t)} \end{aligned}$$

ここで $2p = \kappa a \sin \theta$, $2q = \kappa b \sin \theta$ とおくと，

$$F = F_0 \cos \theta \cdot \frac{e^{j2p} - 1}{j2p} \sum_{n=0}^{N-1} e^{jn(2q - \omega \Delta t)}$$

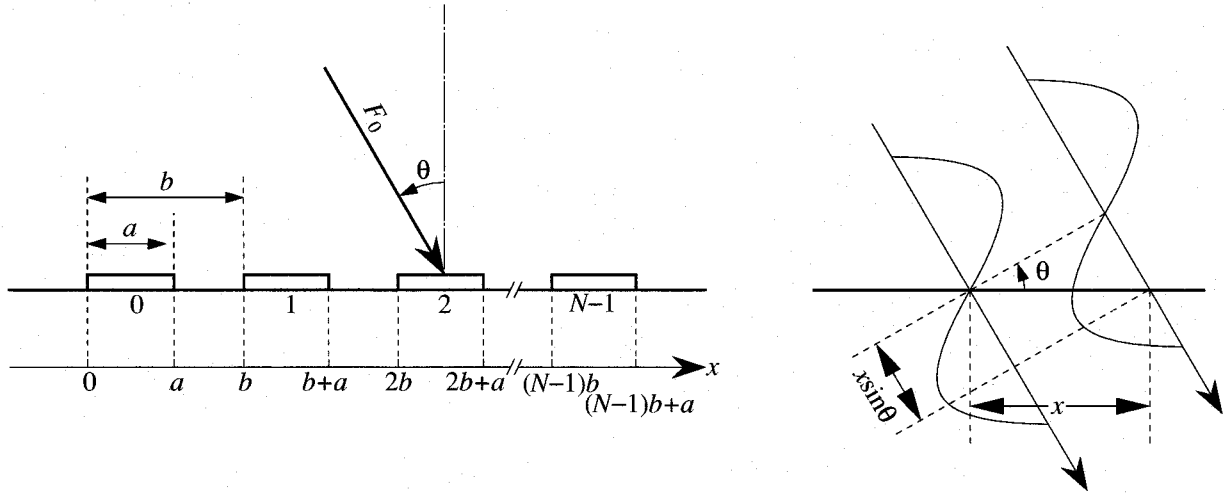


図 A.1 リニアアレイと入射超音波の幾何学的関係図

また、 Σ の中身を等比数列の和の公式 $\sum_{n=0}^{N-1} r^n = \frac{r^N - 1}{r - 1}$ を用いて書き直すと、

$$F = F_0 \cos \theta \cdot \frac{e^{j2p} - 1}{j2p} \cdot \frac{e^{jN(2q - \omega \Delta t)} - 1}{e^{j(2q - \omega \Delta t)} - 1}$$

さらに $e^{j2x} - 1 = e^{jx}(e^{jx} - e^{-jx}) = e^{jx} \cdot 2j \sin x$ を用いて整理すると、

$$F = F_0 \cos \theta \cdot \frac{\sin p}{p} \cdot \frac{\sin\{N(q - \omega \Delta t/2)\}}{\sin(q - \omega \Delta t/2)} \cdot e^{j\{p + (N-1)(q - \omega \Delta t/2)\}}$$

ここで、 $\text{sinc } x = (\sin x)/x$, $\text{sinn}(n, x) = \sin(nx)/\sin x$ の表記を用いると、強度の絶対値は

$$|F| = F_0 \cdot \cos \theta \cdot |\text{sinc } p| \cdot |\text{sinn}(N, q - \omega \Delta t/2)| \quad (\text{A.3})$$

$$\text{ただし } 2p = \kappa a \sin \theta, \quad 2q = \kappa b \sin \theta \quad (-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2) \quad (\text{A.4})$$

と表される。

以下、素子幅 a , 素子周期 b と波長 λ の関係からアレイの指向性を議論するに当たり、波長を単位として測った長さ $\alpha \equiv a/\lambda$, $\beta \equiv b/\lambda$ を導入する。これを用いると式 (A.4) は

$$p = \pi \alpha \sin \theta \quad (\text{ただし } \alpha = a/\lambda; \quad -\pi \alpha \leq p \leq \pi \alpha) \quad (\text{A.5})$$

$$q = \pi \beta \sin \theta \quad (\text{ただし } \beta = b/\lambda; \quad -\pi \beta \leq q \leq \pi \beta) \quad (\text{A.6})$$

$$(-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2)$$

と表される。

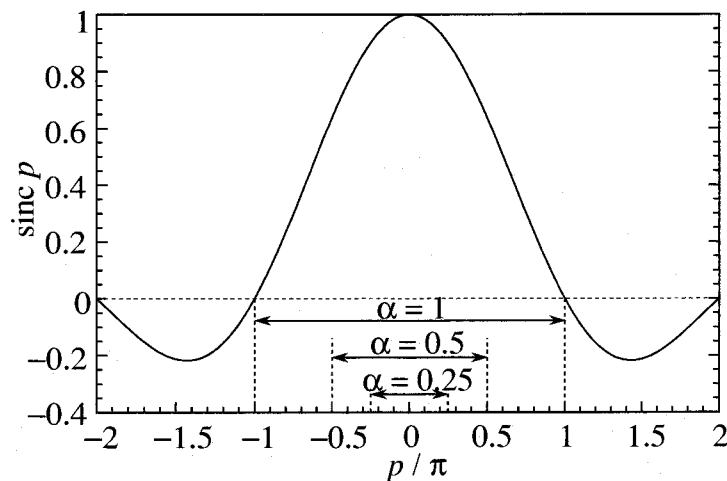


図 A.2 $\text{sinc } p$ のグラフ. マイクロセンサでは通常 $\alpha \ll 1$ であるから $\text{sinc } p = 1$ とみなしても良い.

指向性「特性」の評価 式 (A.3) において, 右辺第三項は各素子自体の大きさ, 第四項はアレイの素子数と周期の長さを反映している. そこで, これらの項がアレイ全体の指向性にどのように影響を与えるかを以下で考察する. 式 (A.3) の右辺第三および第四項の $\text{sinc } p$ および $\text{sinn}(n, q)$ のグラフをそれぞれ図 A.2 および図 A.3 に示す.

素子幅の効果 θ が $-\pi/2$ から $\pi/2$ まで変わるとき, p/π は $-\alpha$ から α まで変化する. 図 A.2 には $\alpha = 1, 0.5, 0.25$ のときの p/π の変化範囲を $\text{sinc } p$ のグラフに書き入れている.

$\alpha = 1$ のとき, $p/\pi = \pm 1$ (すなわち $\theta = \pm\pi/2$) で $\text{sinc } p = 0$ となっていることが分かる. これは, ちょうど一波長分の波が素子全体にわたって作用していることになり, 素子全体で積分すればちょうど 0 となることを表している. $\alpha > 1$ とすれば $|\theta| < \pi/2$ でもこの状態が起こる. このことは, θ の大きな値に対して感度が小さくなること, すなわち $\theta = 0$ の方向に対して指向性が上がることを意味する. よって素子幅を, 波長を越えて更に大きくすることにより, 単一素子でも指向性が鋭くなることを示している. 逆に, 複数素子でアレイセンサを構成して電子走査を行なう際には, 側方の感度が θ の増加とともに急速に低下し, 視野が狭くなることを示している.

(マイクロ) アレイセンサを構成する場合は, 通常素子幅は波長に比べて (十分) 小さくすることが多い. 前述とは逆に $\alpha < 1$ の場合を考えると, $\text{sinc } p$ の変化は小さくなり $\theta = \pm\pi/2$ でも $\text{sinc } p$ は 0 とならない. さらに, α が 1 より十分小さければ, 指向性は α

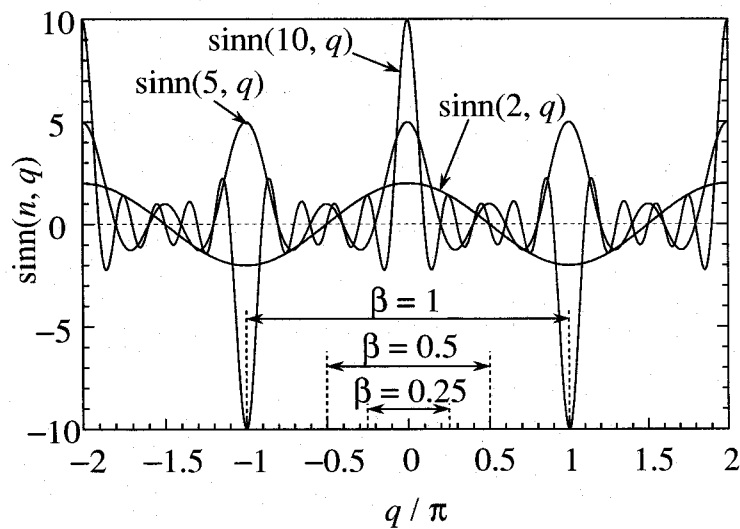


図 A.3 $\text{sinn}(n, q)$ のグラフ. $q = 0$ のピークがメインローブを表し, $q = n\pi$ (n は整数, $n \neq 0$) のピークがグレーティングローブを表す.

の影響を受けない. 例えば, 周波数 150 kHz の超音波に対して素子サイズを 0.5 mm とすると, $\alpha = 0.22$ となるので $\text{sinc } p > 0.922$ となり, 指向性はコサインカーブから 8 % も変化しないことが分かる.

素子周期の効果 θ が $-\pi/2$ から $\pi/2$ まで変わるとき, q/π は $-\beta$ から β まで変化する. 図 A.3 には $\beta = 1, 0.5, 0.25$ のときの q/π の変化範囲を $\text{sinn}(n, q)$ のグラフに書き入れている.

関数 sinn は分子に $\sin(nq)$ があるので, n の値に応じて $1/n$ の周期で振動する. またその絶対値は $q/\pi = \text{整数}$ で最大値を取るが, このとき n が偶数の場合は q/π の奇偶に応じて負・正のピークになり, n が奇数の場合は常に正のピークとなる. 細かく ($1/n$ の周期で) 振動している各ピークがサイドローブとなり, q/π が (0 でない) 整数である点でのピークがグレーティングローブとなって観測される. q/π が ± 1 以上になると必ずグレーティングローブが発生する. したがって, グレーティングローブを防ぐには $\beta < 1$ とすることが必要である.

さらに、電子スキャンを行なうことを考えると $\text{sinn}(n, q)$ ではなく $\text{sinn}(n, q - \omega\Delta t/2)$ の変化を考慮に入れる必要がある。

$$\frac{\omega\Delta t}{2} = \pi/\lambda \cdot b \sin \phi = \pi\beta \sin \phi \quad (\text{A.7})$$

であるから、

$$q - \frac{\omega\Delta t}{2} = \pi\beta \sin \theta - \pi\beta \sin \phi \quad (\text{A.8})$$

$$= \pi\beta(\sin \theta - \sin \phi) \quad (\text{A.9})$$

と書ける。 ϕ の値の範囲は、最大スキャン角度を $\phi_{\max}$ として $|\phi| \leq \phi_{\max}$ 、また $|\theta| \leq \pi/2$ である。よって、グレーティングローブを防ぐ必要条件は

$$\begin{aligned} |\pi\beta(\sin \theta - \sin \phi)| &< \pi \\ \beta &< \frac{1}{|\sin \theta - \sin \phi|} \\ &\leq \frac{1}{|1 + \sin \phi_{\max}|} \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

となる。スキャン角度を最大の 90° までとるならば、このための条件は

$$\beta < 1/2 \quad (\text{A.11})$$

となる。

メインローブの先鋭度 メインローブの「鋭さ」を求める。この鋭さを表す指標として通常は半値幅を用いるが、これは主に $\text{sinn}(N, q)$ の形に支配される。 $\text{sinn}(N, 0) = N$ だから、半値幅を与える q (これを q_0 とおく) は

$$\text{sinn}(N, q_0) = N/2 \quad (\text{A.12})$$

の最小の解である。

これは超越方程式でその解は解析的に表せないので、数値計算により解を求めた。 $N = 2$ 以上の整数についての結果を図 A.4 に示す。 N が増えるにしたがって q_0 は単調に減少するが、それらの積 Nq_0 は一定値 (1.8955) に収束する。

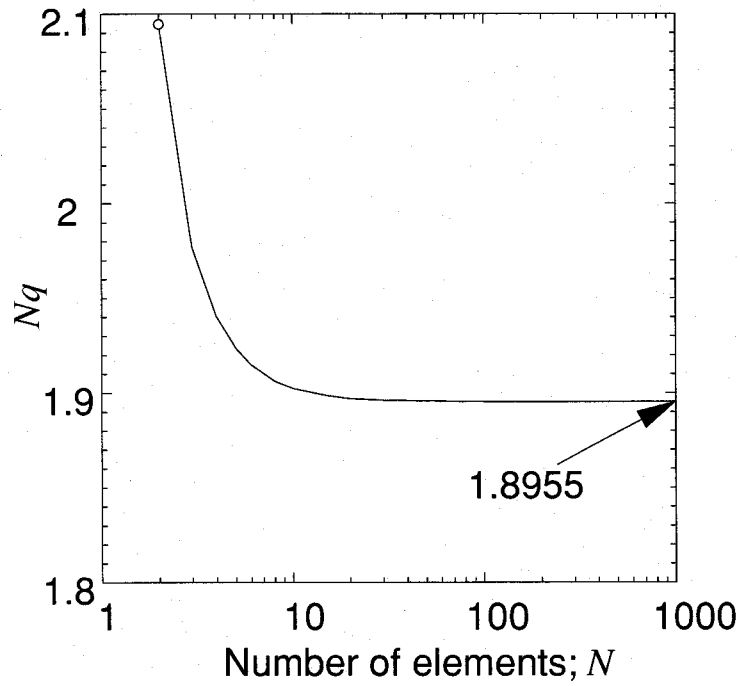


図 A.4 メインローブの半値幅を与える q の値のプロット． q 自体は素子数に対して単調に減少するが、積 Nq は一定値に収束する．

図 A.4 より $N \geq 10$ ではその値はほぼ一定であることがわかる．この結果を用いて半値幅 $2\theta_0$ を求めると、式 (A.6) より

$$2\theta_0 = 2 \sin^{-1} \left(\frac{1.8955}{\pi N \beta} \right) = 2 \sin^{-1} \left(\frac{0.60335}{N \beta} \right) \quad (\text{A.13})$$

となる．ここで、波長を単位として測ったアレイの開口径を A とすれば、 $A = (N - 1)\beta$ であるから、 $N \gg 1$ において半値幅はほぼ開口径 A に反比例することが分かる．表 5.1 に示した値は式 (A.13) より求めている．

謝辞

本論文をまとめるにあたり，御親切なる御指導と御鞭撻を賜りました 大阪大学 大学院基礎工学研究科 奥山雅則教授に心から御礼申し上げます。大阪大学 大学院基礎工学研究科 小林猛教授，岡本博明教授，野田実助教授には御懇切なる御教示と御鞭撻を賜わり，厚く御礼申し上げます。本研究遂行において御教示いただきました大阪大学 大学院基礎工学研究科 蒲生健次教授，山本錠彦教授，小林哲郎教授，占部伸二教授，高井幹夫教授 に深く感謝いたします。

大阪大学 濱川圭弘 名誉教授（現立命館大学教授）には，当時他分野の院生であった著者を暖かく研究室に迎え入れていただき，御激励と共に御指導と御鞭撻を賜りました。心から感謝いたします。

大阪大学 白江公輔 名誉教授には，博士後期過程進学の道を開いてくださり，常に御激励を賜りました。深く感謝いたします。

大阪大学 大学院基礎工学研究科 服部公則助教授，外山利彦助手，金島岳助手には日頃から御激励，御指導，御討論いただきました。心から感謝いたします。また実験を遂行するにあたり，日頃からあらゆる技術的御指導，御援助をいただいた 大阪大学 大学院基礎工学研究科 佐田千年長 技官に感謝いたします。

本研究の一部は，大阪府先導的研究事業「スーパーアイ・イメージセンサ研究プロジェクト」のもとに行なわれました。立体感覚イメージンググループのグループリーダーとして御指導，御鞭撻いただきました 大阪府立産業技術総合研究所 材料技術部長 鈴木義彦氏に厚く御礼申し上げます。大阪府立産業技術総合研究所 主任研究員 井上幸二氏，研究員 田中恒久氏，村上修一氏，李欣山氏（現セイコーエプソン），Arporn Teeramongkonrasmee 氏（現 Chulalongkorn 大学）には実験装置の使用に便宜を図っていただき，またデバイス作製プロセスの検討において御指導，御討論いただきました。心から感謝いたします。関西大学 工学部 青柳誠司助教授には超音波応用計測につきまして御指導，御討論いた

きました。深く感謝いたします。プロセス上のノウハウから研究生活一般に至るまで、常に有益な話題を提供していただき励ましていただきました。大阪府産業振興機構 有田滋氏、大阪府立産業技術総合研究所 土谷明氏、大阪大学後に大阪府立産業技術総合研究所 許華平氏（現 Tronto 大学）、株式会社村田製作所 久保竜一氏、ホーチキ株式会社 向川友徳氏、長島哲也氏、中井健人氏、松下電気産業株式会社 橋本和彦氏、愛知時計電機株式会社 溝脇功氏、今井敏活氏、株式会社三社電機製作所 左右田裕氏、山本浩史氏、日本特殊陶業株式会社 水野卓也氏、住友金属工業株式会社 駒井正嗣氏、姫路工業大学 工学部 前中一介助教授、藤田孝之助手をはじめ、スーパーアイ・イメージセンサプロジェクトのメンバー各位に感謝いたします。

本研究に多大なる御協力をいただいた、大阪大学 大学院基礎工学研究科 奥山研究室 中村昌宏君（現ソニー）、村田明士君（現IBM）、加藤文彦君（現住友銀行）、久野昇豊君（現キーエンス）、清元智文君（現住友金属工業）、村上歴君、新木将義君（現ソニー）、石田博君（現本田技研工業）、宮本裕孝君（現松下電器産業）、澤田明宏君（現高井研究室 修士2年生）、村松崇君（現オムロン）、池谷太一君、堅田広司君（現北陸電力）、修士2年生 福永寿朗君、修士1年生 村上英之君、学部4年生 鈴木未央君、関西大学 大学院工学部研究科 三好弘巳君（現村田製作所）、岸本博吉君（現三菱電機）、中村裕一君、修士2年生 加藤元郎君に感謝いたします。

本論文の作成にあたり、様々な御助言をいただき励ましていただきました 大阪大学 大学院基礎工学研究科 村田博司講師に感謝いたします。日頃から研究者として、また教育者として、同輩の立場から公私に渡り熱心に御議論いただきました 大阪大学 大学院基礎工学研究科 高原淳一助手に感謝いたします。

本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたっては、大阪大学 基礎工学部 濱川研究室、大阪大学 大学院基礎工学研究科 奥山研究室、岡本研究室の諸先輩や同輩、後輩の方々ならびに在学生、研究員、秘書の方々に本当にお世話になりました。心から御礼申し上げます。

研究業績目録

学術論文

- [1] K. Yamashita, A. Murata, M. Okuyama, “Miniaturized infrared sensor using silicon diaphragm based on Golay-cell”, *Sensors and Actuators: A. Physical*, **66** (1998) 29.
- [2] X. Li, K. Yamashita, T. Tanaka, Y. Suzuki, M. Okuyama, “Structural and Electrical Properties of Highly Oriented PZT Thin Films Deposited by Facing Target Sputtering”, *Sensors and Actuators: A. Physical*, **82** (1999) 265.
- [3] Z. Wei, H. Xu, K. Yamashita, M. Okuyama, “Low Temperature Crystallization of Metal Organic Decomposition BaTiO₃ Thin Film by Hydrothermal Annealing”, *Japaneses Journal of Applied Physics*, **39** (2000) 4217.
- [4] M. Sohgawa, M. Agata, T. Kanashima, K. Yamashita, K. Eriguchi, A. Fujimoto, M. Okuyama, “Nondestructive and Contactless Monitoring Technique of Si Surface Stress by Photoreflectance”, *Japanese Journal of Applied Physics*, **40** (2001) 5539.
- [5] K. Yamashita, H. Katata, M. Okuyama, H. Miyoshi, G. Kato, S. Aoyagi, Y. Suzuki, “Ultrasonic Micro Array Sensor Using PZT Thin Film”, *Transactions of Institute of Electric Engineers of Japan* (Submitted).
- [6] Z. Wei, K. Yamashita, M. Okuyama, “Preparation of PbZr_{0.52}Ti_{0.48} Thin Films at Low-Temperature of Less than 400°C by Hydrothermal Treatment Following Sol-Gel Deposition”, *Japanese Journal of Applied Physics*, **40** (2001)

- [7] K. Yamashita, H. Katata, M. Okuyama, H. Miyoshi, G. Kato, S. Aoyagi, Y. Suzuki, “Arrayed ultrasonic microsensors with high directivity for in-air use using PZT thin film on silicon diaphragms”, *Sensors and Actuators: A. Physical*, **97** (2002).

(以下、本論文とは直接関係しないもの)

- [8] M. Okuyama, M. Noda, K. Yamashita, “A low-temperature preparation of ferroelectric $\text{Sr}_x\text{Bi}_{2+y}\text{Ta}_2\text{O}_9$ thin film and its application to metal-ferroelectric-semiconductor structure”, *Materials Science in Semiconductor Processing*, **2** (1999) 239.
- [9] 中井 宏明, 渡辺 睦, 三宅 啓夫, 高田 敬輔, 山下 馨, 新盛 英世, 石原 謙, 「動画像による呼吸モニタリングシステム」, 電子情報通信学会論文誌 D-II, **J83-D-II**, No.1 (2000) 280.
- [10] K. Yamashita, T. Nagashima, S. Hatta, R. Kajihara, Y. Hamakawa, M. Okuyama, “Wave-length-differential imaging for extraction of characteristic spectra”, *Sensors and Actuators A: Physical*, **97** (2002).

国際会議

- [1] K. Yamashita, A. Murata, M. Okuyama, “Golay-Cell Type of Miniaturized Infrared Sensor Using Si-Diaphragm”, *International Conference on Solid State Sensors and Actuators (Transducers '97)*, Chicago (1997).
- [2] X. Li, K. Yamashita, T. Tanaka, Y. Suzuki, M. Okuyama, “Structural and Electrical Properties of Highly Oriented PZT Thin Films Deposited by Facing Target Sputtering”, *International Conference on Solid Stat Sensors and Actuators (Transducers '99)*, Sendai (1999).
- [3] Z. Wei, H. Xu, K. Yamashita, M. Okuyama, “Low-temperature Preparation of BaTiO_3 Thin Film by MOD and Hydrothermal Treatment”, *The 4th International Conference on Thin Films Physics and Applications*, Shanghai (2000).

- [4] M. Sougawa, T. Kanashima, M. Agata, K. Yamashita, M. Okuyama, A. Fujimoto, K. Eriguchi, “Non-Destructive and Contactless Monitoring Technique of Si Surface Stress by Photoreflectance”, Extended Abstract of the 2000 International Conference on Solid State Devices and Materials, Sendai (2000).
 - [5] K. Yamashita, H. Katata, M. Okuyama, H. Miyoshi, G. Kato, S. Aoyagi, Y. Suzuki, “High-Directivity Array of Ultrasonic Micro Sensor Using PZT Thin Film on Si Diaphragm”, International Conference on Solid State Sensors and Actuators (Transducers '01/Eurosensory XV), Munich (2001).
- (以下、本論文とは直接関係しないもの)
- [6] K. Ishihara, T. Furukawa, K. Yoshii, K. Chihara, K. Yamashita, K. Shirae, K. Masuda, “Path Lines in Blood Flow Using High Speed Digital Subtraction Echography”, IEEE 1992 Ultrasonics Symposium, Tucson (1992).
 - [7] T. Nagakura, K. Yamashita, Y. Ooe, K. Masuda, H. Otsuka, K. Yamada, K. Ishihara, T. Furukawa, “The design for the osmotic valve system fabricated with silicon process for glucose concentration control”, World congress on Medical Physics and Biomedical engineering, Nice (1997).
 - [8] T. Nagakura, S. Maruo, K. Masuda, Y. Inoue, K. Murakami, K. Yamashita, Y. Ooe, K. Ishihara, K. Ikuta, T. Furukawa, “Study on micro-osmotic valve for insulin injection system in treatment of diabetes mellitus”, Eurosensory 13th, The 13th European Conference on Solid-State Transducers, (1999).
 - [9] K. Yamashita, T. Nagashima, S. Hatta, R. Kajihara, Y. Hamakawa, M. Okuyama, “Wave-length-Differential Imaging Using Variable Interferometer and Visualization of Gas Flow”, International Conference on Solid State Sensors and Actuators (Transducers '01/Eurosensory XV), Munich (2001).

国内研究会・シンポジウム

- [1] 奥山 雅則, 山下 馨, 濱川 圭弘, “Si 微小カンチレバー上強誘電体薄膜を用いた超音波センサおよび赤外線センサ”, 次世代センサ協議会 マイクロ理工学研究会 マイクロマシーニング研究会 合同研究会, 大阪 (1993).
- [2] K. Yamashita, A. Murata, M. Okumura, Y. Hamakawa, “Wireless Actuator Driven by Light Illumination”, The 13th Sensor Symposium, Tokyo (1995).
- [3] A. Murata, K. Yamashita, M. Okuyama, Y. Hamakawa, “Capacitance-Detection Type of Infrared Sensor using Si-Diaphragm”, The 14th Sensor Symposium, Kawasaki (1996).
- [4] 山下 馨, 奥山 雅則, 西野 仁, 西村 孝之, 「PZT 薄膜の圧電性評価」, 平成9年度電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会, 東京 (1997).
- [5] M. Okuyama, Y. Matsumuro, T. Kiyomoto, Y. Morikawa, H. Xu, K. Yamashita, M. Noda, “Low Temperature Preparation of $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ and PZT Thin Films and Their Functional Devices”, Technical Report of IEICE, ED97-211, Japan (1998).
- [6] H. Miyoshi, S. Aoyagi, X. Li, A. Teeramongkontasmee, T. Tanaka, Y. Suzuki, K. Yamashita, M. Okuyama, “Preparation of a Highly Oriented PZT Thick Film by a Multi-layer Formation Process and Fabrication of a Micro Ultrasonic Sensor”, The 17th Sensor Symposium, Kawasaki (2000).
- [7] K. Yamashita H. Katata, A. Sawada, M. Okuyama, “Ring Arrayed Ultrasonic Micro Sensor Using PZT Thin Film”, The 17th Sensor Symposium, Kawasaki (2000).
- [8] 堅田 広司, 山下 馨, 奥山 雅則, 三好 弘巳, 加藤 元朗, 青柳 誠司, 鈴木 義彦, 「PZT 薄膜を用いたアレイ型超音波マイクロセンサ」, 平成12年度電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会, 東京 (2000).

- [9] A. Teeramongkonrasmee, H. Miyoshi, K. Yamashita, T. Tanaka, S. Aoyagi, Y. Suzuki, M. Okuyama, K. Inoue, “Highly Oriented PZT Films Prepared by Multi-step Process and Its Applications to Ultrasonic Sensors”, 平成 12 年度 電気学会センサ・マイクロマシン準部門総合研究会, 東京 (2000).
 - [10] 田中 恒久, 有田 滋, 若生 綾子, 青柳 誠司, 前田 達徳, 土谷 明, 井上 幸二, 鈴木 義彦, 山下 馨, 奥山 雅則, 「マイクロアレイ超音波センサ用 BBD 半導体集積回路の開発」, 平成 12 年度 電気学会センサ・マイクロマシン準部門総合研究会, 東京 (2000).
 - [11] K. Yamashita, H. Katata, T. Fukunaga, M. Okuyama, H. Miyoshi, G. Kato, S. Aoyagi, Y. Suzuki, “Ultrasonic Micro Array Sensor Using PZT Thin Film”, The 18th Sensor Symposium, Kawasaki (2001).
 - [12] 莫 要武, 田中 恒久, 有田 滋, 土谷 明, 井上 幸二, 山下 馨, 鈴木 義彦, “Integrated Signal Processing System Based on Bucket Brigade Device for Micro-machined Ultrasonic Sensor Array”, 平成 13 年度 電気学会センサ・マイクロマシン準部門総合研究会, 東京 (2001).
- (以下、本論文とは直接関係しないもの)
- [13] 辻本 浩章, 山下 馨, 白江 公輔, 「磁気発振増幅器の発振特性とそのセンサーへの応用」, 電気学会マグネティックス研究会, (1990).
 - [14] 羽下 哲司, 山下 馨, 辻本 浩章, 白江 公輔, 「磁気ニューロンの多段接続について」, 電気学会マグネティックス研究会, (1990).
 - [15] 清野 真二郎, 真溪 歩, 山下 馨, 吉田 満, 古川 久生, 白江 公輔, 「薄膜グラディオメータによる等磁界図の構成 (II) —回転楕円体モデルの場合—」, 電気学会マグネティックス研究会, 福岡 (1991).
 - [16] 山下 馨, 清野 真二郎, 真溪 歩, 吉田 満, 古川 久生, 白江 公輔, 「信号源推定の方法に関する検討」, 電気学会マグネティックス研究会, 福岡 (1991).

- [17] 清野 真二郎, 山下 馨, 吉田 満, 古川 久生, 白江 公輔,「生体磁気の接線成分計測による法線成分の合成」, 電気学会マグネティックス研究会, 八戸 (1991).
- [18] 吉田 満, 清野 真二郎, 山下 馨, 大西 弘幸, 古川 久生, 白江 公輔,「並列型マルチチャネル SQUID システムの研究」, 電気学会マグネティックス研究会, 八戸 (1991).
- [19] 山下 馨, 清野 真二郎, 吉田 満, 古川 久生, 白江 公輔,「脳磁界信号源推定における頭部形状の影響」, 電気学会マグネティックス研究会, 八戸 (1991).
- [20] 梶田 晃司, 石原 謙, 古川 俊之, 吉井 謙, 山下 馨, 前田 肇, 児玉 慎三,「超音波ビームの音場分布を考慮した超解像診断の基礎検討」, 第13回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, (1992).
- [21] 吉井 謙, 千原 国宏, 石原 謙, 古川 俊之, 梶田 晃司, 山下 馨, 白江 公輔,「高速度超音波断層像での血中反射体抽出による血流の可視化」, 第13回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, (1992).
- [22] 長島 哲也, 山下 馨, 奥山 雅則,「波長可変フィルタを用いた微分スペクトルイメージセンサ」, 平成9年度 電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会, 東京 (1997).
- [23] 山下 馨, 長島 哲也, 濱川 圭弘, 奥山 雅則,「微分スペクトルイメージングにおける波長可変干渉フィルタの制御性向上による特性改善」, 平成10年度 電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会, 東京 (1998).
- [24] T. Nagashima, K. Yamashita, M. Okuyama, S. Hatta, R. Kajihara, Y. Hamakawa, “Characteristic Spectral Image Provided by Wavelehgth-Differential Imaging System”, The 18th Sensor Symposium, Kawasaki (2001).