

早稲田大学審査学位論文（博士）

MEMS 技術を応用した
水晶高感度傾斜角センサの
最適設計・製造プロセスの研究

幸坂 扶佐夫

早稲田大学大学院情報生産システム研究科

2013 年 2 月

－ 目次 －

第 1 章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 傾斜角測定の特徴	2
1.1.2 加速度センサと傾斜角センサについて	3
1.2 高分解能傾斜角センサの特徴	4
1.2.1 高分解能傾斜角センサの現状	4
1.2.2 高分解能傾斜角センサと MEMS 技術	5
1.3 研究の目的	7
第 2 章 水晶の材料特性	8
2.1 水晶の基本特性について	8
2.2 水晶の機械強度特性測定	9
2.2.1 試験用試料の製作	9
2.2.2 試験方法と最大応力	11
2.2.3 試験結果	13
2.3 水晶の微細加工特性測定	16
2.3.1 実験用フォトマスクの設計製作	16
2.3.2 実験結果と微細加工の限界値	17
2.4 まとめ	20
第 3 章 傾斜角センサ基本構成の検討	21
3.1 測定検出方式の検討	21
3.2 センサ構成案の検討	22
3.3 基本構成と差動検出方式の検討	25
3.4 基本構成のまとめ	26
第 4 章 傾斜角センサの最適設計	27
4.1 バネ部変位特性の解析	27
4.2 静電容量検出部の解析	30
4.2.1 電極部の静電容量計算式の導出	30
4.2.2 差動方式と電極構成の検討	31
4.2.3 非対称櫛歯電極による差動構成の検討	33
4.3 最適設計の検討	36
4.3.1 設計目標値の検討	36
4.3.2 最適設計のためのパラメータ抽出	37

4.3.3 最適設計による計算例	37
4.4 まとめ	40
第 5 章 傾斜角センサの製作	41
5.1 製作プロセスの概要	41
5.1.1 形状加工プロセスと電極形成プロセスの検討	41
5.1.2 製作プロセスの全体フロー図	42
5.2 電極形成のためのキープロセス開発	44
5.2.1 リフトオフ用レジストのパターニング方法	44
5.2.2 水晶エッチング後の Au-Cr 薄膜除去	47
5.2.3 Cr-Au-Cr 3 層薄膜と電極パターン形成方法	47
5.2.4 側面電極分離による静電容量作成	48
5.3 製作プロセスの詳細	49
5.3.1 レジスト露光用フォトマスクの製作	49
5.3.2 水晶エッチング用 Au-Cr 薄膜パターニングプロセス	50
5.3.3 電極パターン形成用リフトオフプロセス	53
5.3.4 静電容量作成のための側面電極分離プロセス	57
5.4 傾斜センサのパッケージング	58
5.4.1 実装方法の検討	58
5.4.2 実装用パッケージの設計試作	59
5.4.3 実装プロセス	60
5.5 まとめ	63
第 6 章 傾斜角センサの評価	64
6.1 評価システムの構築	65
6.1.1 傾斜角校正装置の製作	65
6.1.2 評価用静電容量検出回路の試作	66
6.1.3 評価用センサモジュール作成	68
6.2 傾斜センサの評価	69
6.2.1 変位量測定による基本特性評価	69
6.2.2 測定システムの動作確認評価	70
6.2.3 傾斜センサの傾斜角測定結果	72
6.2.4 測定データの解析評価	74
6.3 まとめ	75

第 7 章 傾斜角センサ動特性の解析評価	76
7.1 FEM による固有振動特性の解析	77
7.1.1 FEM 解析モデルの作成	77
7.1.2 FEM による固有振動モードと固有振動数解析	80
7.2 非平行電極の動特性解析	83
7.2.1 理論解析による解析式の導出	84
7.2.2 解析式を用いた非平行電極の動特性計算	88
7.3 解析式検証のための実験方法検討	91
7.3.1 気体の粘度について	91
7.3.2 過渡応答特性と減衰比	94
7.3.3 実験装置の設計製作	95
7.4 実験結果	97
7.4.1 センサ過渡応答特性の測定	97
7.4.2 測定データと減衰比	98
7.4.3 測定データによる解析式の検証	99
7.5 まとめ	102
第 8 章 結論	103
謝辞	106
参考文献	107
研究業績	109

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

傾斜角は「水平からの傾き角」と説明される。その「水平」については「水面のように傾きがなく平らな状態」ということになり感覚的な表現として用いられる言葉のようである。しかし、物理的な意味合いとしては「重力方向に垂直な面」を水平面と呼び、この「水平面からの傾き角」が傾斜角ということになる。そして、この傾斜角を測定する機器を「傾斜計」または「傾斜角測定器」、その中でも水平かどうかに着目して測定するものを「水準器」と呼び^[1]、それらの測定器の検出部を傾斜角センサと呼ぶことになる。

傾斜角の測定が要求される場合の多くは、水平からの傾きによって生じる重力の正弦成分が問題視される場合である。この重力の正弦成分が建築物や構造物に横方向の力を発生させて変形や歪などの問題につながるために、これまでも 0.001° 以上の分解能を有する高分解能傾斜角センサが開発され、それを組み込んだ傾斜角測定器が商品化されて市場に提供され利用されている。しかし、これらの高分解能傾斜角センサは微小な重力正弦成分を高感度で検出するという測定条件のため、使い方に熟練を要することと構成が複雑になってしまうことから、大きさやコストの面において問題が指摘され改良が期待されている分野である。

従来から、水準器に代表される傾斜角測定は建築の分野や道路・橋梁などの土木分野などで利用されてきているというイメージが強いが、近年の社会産業構造の高度化にともない各種分野で傾斜角の測定が重要視されるようになってきている。たとえば、デジタル機器やモバイル機器の発展にともない、それら機器の高機能化のために機器に内蔵可能な小型傾斜角センサが要求されるようになってきている。また、クレーンや輸送などの産業機器の分野における姿勢監視や姿勢制御用として、そして製造現場においては、高性能機器や小型高性能部品を製造するための製造装置（半導体製造装置や高精度加工装置等）の水平状態を維持管理するために小型高分解能の傾斜センサが求められるようになってきている。

このような背景から、モバイル機器やゲーム機器、カーエレクトロニクス分野においては MEMS (MicroElectroMechanical System) 技術を用いた小型低コストの加速度センサが開発され、これらの加速度センサが傾斜角センサとして利用される例も出てきているが、傾斜角センサの分野では従来からの方式のセンサが使われてきており、とくに微小重力変化を検出する高感度傾斜角センサにおいては小型低コストのセンサは見当たらないのが現状である。

1.1.1 傾斜角測定の特徴

傾斜角は「水平面」言い換えれば「重力方向」が基準になる物理量なので、「温度」や「長さ」や「質量」など他の物理量とは異なり、上位の校正機器（標準器）が存在しない特殊な測定対象であるといえる。そして、角度（rad、deg）の単位についても、[rad]は半径と同じ長さの円弧がなす角、また[deg]は一周の1/360と定義されているだけであり、これも標準器が存在するわけではない。つまり、傾斜角については頼るべき上位機器がない、言い換えると自らの手で精度（確度）を確認検証できる物理量と捉えることもできる。

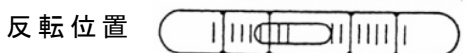
よく知られている気泡管式の水準器を例にすると、図 1-1 のような反転測定法により水準器の水平誤差を検出でき、さらにその水準器を置く定盤の水平も確認できる^[2]。この方法は水準器を扱ったことがある技術者には常識となっており、日常的に測定時には無意識に行っている作業でもある。このように、傾斜角測定においては上位の校正機器を用いることなくゼロ点の自己校正が可能のため、図 1-1 のように一部の水準器では自己校正のための調整機構を設けているものも存在する。

このような特徴から、一般のセンサに要求される「精度」という概念は傾斜角センサの場合は重要視されない傾向があり、精度という仕様より「分解能」あるいは「感度」という仕様が性能を表す指標になっている。

- ・ 水準器が正しく定盤も水平



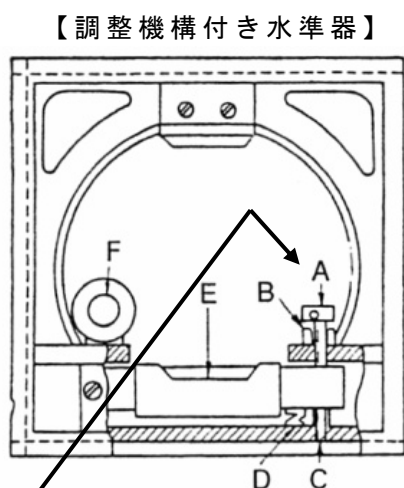
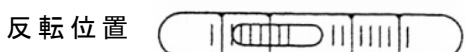
- ・ 水準器が正しく定盤の水平が狂っている



- ・ 定盤が水平で水準器が狂っている



- ・ 水準器も定盤の水平も狂っている



【調整機構付き水準器】
A=調整ねじ、B=ナット、C=気泡管支軸
D=スプリング、E=主気泡管、F=副気泡管

図 1-1 反転測定法による誤差の検出

1.1.2 加速度センサと傾斜角センサについて

従来から傾斜角を測定するセンサとして加速度センサを用いる行為は特に違和感なく行われてきている。気泡管のように零位法的に使われ、且つ目視で利用する機器はセンサとは呼ばないという通念があるのであろう。そして、物理量を電気信号に変換するものをセンサと位置付けた場合「傾斜角測定→重力加速度変化の測定→加速度センサ」という流れになるのも不自然ではない。

傾斜角センサといえども加速度変化を測定していることに変わりはないので加速度センサの範疇に含まれると考えることもできるが、加速度センサの場合は高感度のもので重力 1G (9.8m/s²) のオフセット分を考慮して設計されるのに対して、傾斜角センサは水平面に対するプラスマイナスの角度測定範囲を前提に設計されるという側面からも傾斜角センサと加速度センサの違いが理解できる。これを表にすると表 1-1 のように整理される。

表 1-1 加速度センサと傾斜角センサ

	加速度センサ	傾斜角センサ
特徴	加速度の検出 (加速度～衝撃まで)	傾斜角の検出 (重力加速度の正弦成分)
測定領域	1G より大きい加速度	0.1～0.0001° (～10 ⁻⁶ G)
センサ	種々の方式のセンサ実用化 (MEMS センサも実用化)	特殊な方式のセンサ (MEMS センサは見当たらない)

今、高感度加速度センサに分類される測定範囲 2G の加速度センサについて考察してみる。センサ測定範囲の 10⁻⁴ を分解能と仮定した場合、その値は 2G×10⁻⁴=0.0002G となり、これを傾斜角に換算すると sin⁻¹(0.0002) = 0.01° となる。

一方で、角度の単位として角度秒が最も小さな角度の単位として使われることがある。1 角度秒 = 1° /60' /60" = 0.0003° であることから、角度測定センサの分野においてはこの値が最も小さな値の目安として扱われてきている。

これらの値と各種カタログの値を参考に傾斜角測定のセンサについて分解能という観点から大きく分類すると次のようになる。

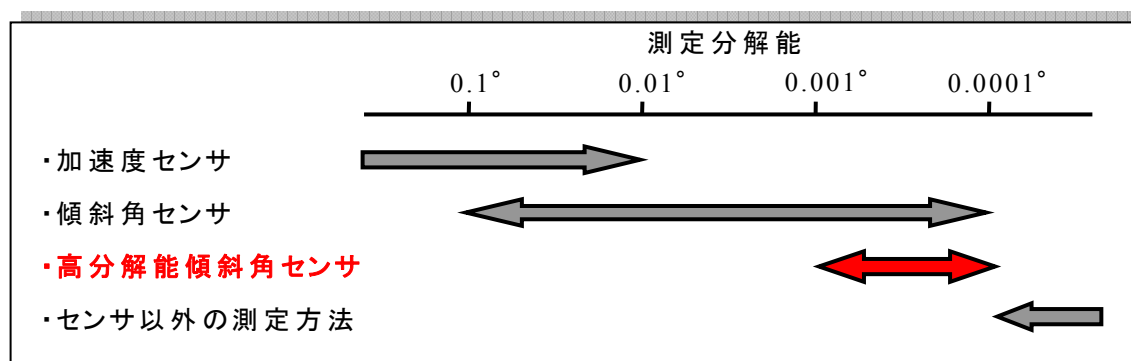


図 1-2 測定分解能とセンサの分類

1.2 高分解能傾斜角センサの特徴

1.2.1 高分解能傾斜角センサの現状

低分解能傾斜角センサの領域は加速度センサの分野と渾然一体となっており、デジタルカメラやモバイル機器に搭載されている水平検出機能やゲーム機器に搭載されている同機能などは MEMS 加速度センサがその機能を担っている。

そのような状況下から、傾斜角センサとして開発商品化されているものは、その大部分が高分解能センサに分類される。代表的な商品例を表 1-2 に示す。

表 1-2 高分解能傾斜センサの商品例

方式	サーボ式	差動容量式	磁気式	気泡式
概観 形状	 日本航空電子  JEWELL	 スプリング式  液封入式		 PASICO  坂本電機
分解能	0.0028° 0.00006°	0.001° 0.001°	0.0005°	0.001° 0.0002°
寸法 [mm]	25×25×H46 79×35×H38	φ 24×H11 67×54×H22	49×49×H25	84×70×H46 φ 50×19
メーカー	日本航空電子 JEWELL	SEIKA	村田機械	PASICO 坂本電機

(1) サーボ式傾斜センサ

傾斜によって振り子が振れるときの変位をコイルや磁気的な方法で検出して、その変位がゼロになるようにフィードバックをかける方式である。フォースバランス式と呼ばれることもある。変位をゼロに保つことにより機械的な摺動部の摩擦や感応部の応力を低減できることから、従来から高精度センサや高信頼性を要求するセンサに採用されることが多い方式である。しかし、フィードバック要素に関わる構成部品が多くなり、複雑で精密な組み立てが必要なため高価になってしまうという問題がある。

(2) 差動容量式傾斜センサ

バネで支えられた可動部の電極と、可動部を挟むように位置する二つの固定電

極の間で構成される二組の静電容量の変化を利用する。また、二組の電極が組み込まれた容器に液体が封止された構造のものもある。いずれも、傾斜角が印加されると一方の静電容量は増加し片方の静電容量は減少する構成になっているので、それぞれの静電容量の差から傾斜角を検出する。コモンモードノイズが検出部で打ち消される差動方式になっているので、種々の外乱が除去できることから高分解能化を実現している。サーボ方式に比べてシンプルな構成であるが、材料や部品精度、各部の組み立て精度など、高度な設計製造ノウハウが要求される。

(3) 磁気式傾斜センサ

振り子の変位を磁気誘導方式により誘導電圧の位相差に変換して、その位相差を時間計測することにより高分解能化を実現している。時間計測という方式をとっているために AD 変換器を用いずに高分解能のデジタル処理が可能だが、本質的には振り子の変位を測定していることになるので、振り子の支持系や検出系の設計や組み立てにはかなりの配慮が必要になる。

(4) 気泡式傾斜センサ

図 1-1 に示す旧来からの気泡管と基本原理は同じであるが、気泡管は目視あるいは光学的な方法で気泡の位置を検出しているのに対して、電氣的に気泡の位置を検出することにより傾斜センサを実現している。方式としては非常に単純であるが、高分解能化のためには気泡の位置を極めて微小なレベルで検出することになるため、気泡が接する容器の表面精度、表面状態、液体の表面張力の影響、それらの温度に対する挙動など、未知のパラメータが多く潜んでおり、高分解能で安定なセンサを実現するためには多大なノウハウが要求されるセンサといえる。

これらの例のように、高分解能センサは重力方向に対する加速度の変化を検出することを基本に研究および開発されてきており、加速度変化が微小であることから高感度を実現するために複雑な構成を強いられている。そして、いずれの例においても「部品」を組み立てて製作する方法という意味では同じであり、小型化と低コスト化という観点からは限界が感じられるのは否めない。

1.2.2 高分解能傾斜角センサと MEMS 技術

小型低コスト化といえ、近年のマイクロ加工技術の進展を背景に製品化が相次いでいる MEMS 技術が上げられる。その MEMS 市場についてはいくつかの統計情報が報告されているが、(財) マイクロマシンセンターでは 2015 年で 1.5 兆円、2020 年で 3.1 兆円に成長すると予想している^[3]。その中でも加速度センサや角速度センサ (ジャイロセンサ) については研究開発に取り組んでいる研究者や企業も多く、特に加速度センサはその市場規模の大きさから大企業が参入して各種 MEMS 製品が提供されている。

1) MEMS 加速度センサの現状

MEMS 加速度センサは測定範囲が 2G 前後の高感度型と呼ばれるものから数百 G という衝撃検出用まで幅広くラインナップされている。その中の高感度型のものについて、主要企業である Analog Devices 社 (ADXL203) と ST Microelectronics 社 (LIS3DH) の製品の仕様を分解能という視点で整理したのが表 1-3 である。

表 1-3 高感度 MEMS 加速度センサの仕様

型名	測定範囲	感度	ノイズ	分解能(傾斜角)
ADXL203	±1.7G	1000 mV/G	1 mV _{rms}	1 mG (=0.057°)
LIS3DH	±2G	1 mG/digit	---	1 mG (=0.057°)

どちらも分解能は 1mG となっており、重力 1G のオフセットが前提の環境下で使用される加速度センサとしては分解能の一つの区切りの値のようである。高感度傾斜角センサに要求される分解能としては二桁ほど足りない値であり、設計の思想を見直さないと高感度センサ化は困難と考えられる。

2) MEMS センサと高感度化について

ここで、MEMS センサと高感度化の関係について検討しておく。メカニカルな方法で検出する加速度センサの場合には、感度の指標として「力とバネの変位」の関係を検討してみるのが定性的に理解しやすい。図 1-3 のように、単純な系について考えてみる。

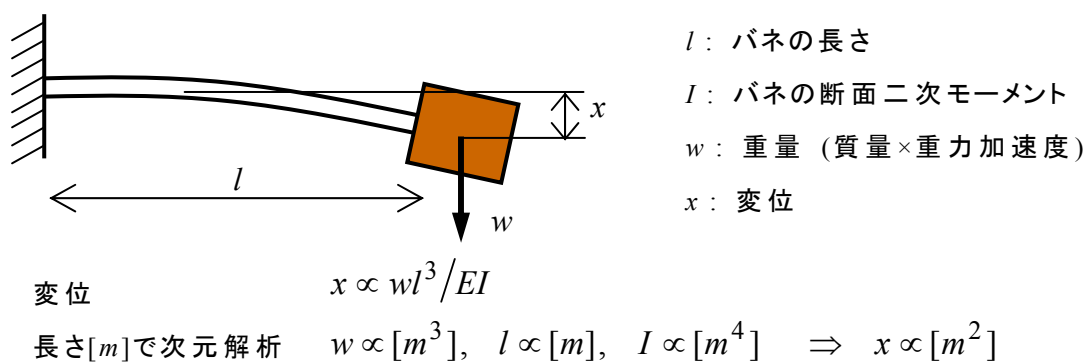


図 1-3 寸法と変位

このように、相似形で寸法を変えると、その変位量は寸法の二乗に比例することになる。つまり、寸法を 1/10 に小型化すると変位量は 1/10 ではなく 1/100 にまで低下してしまうということが定性的に理解できる。

これが MEMS 技術でメカニカルな高感度センサを開発する上での重要なポイントであり、小型高感度化を指向するときの大きな壁になるので設計時には十分な検討を要する必要がある。

1.3 研究の目的

シリコン (Si) を用いた MEMS センサは破竹の勢いでその用途や市場を広げている。その背景には半導体製造技術の進歩と半導体製造装置の高性能化が大きく寄与している。しかし、それら半導体製造装置やその装置を維持管理するためのインフラには膨大な投資が必要となる。したがって、Si の MEMS センサは投資を回収できるだけの大きな市場が不可欠という本質的な宿命を背負っている。MEMS 加速度センサ、角速度センサなど、一つの製品当たりの生産量は数十万個～数百万個という超大量生産が見込めるものを指向することになる。

一方で、MEMS 技術を応用することで小型高性能化が期待されるセンサやデバイスは多く存在するはずであるが、Si の MEMS 製造には向かない中少量生産品の場合にはその恩恵を受けることができないという大きな問題が存在する。

MEMS 技術を用いて微細加工する方法を大きく分類すると、ウェットエッチング技術とドライエッチング技術の二つの方法がある。マイクロマシン技術の黎明期はウェットエッチング加工が主流であったが、Si はエッチング異方性が大きくなく高アスペクト比の微細加工が困難なため、徐々にドライエッチング加工に移行して現在に至っている。

Si のマイクロマシン技術とは別に、水晶のマイクロマシン技術も同様に発展してきている。水晶の場合は時計用の音叉振動子をウェットエッチングで加工することからはじまり、現在では角速度センサや力センサなどいくつかの MEMS 製品がウェットエッチング加工で生産されている。これは、水晶のウェットエッチング異方性が Si に比べて非常に大きいため、ウェットエッチングでも高アスペクト比の加工が可能なが大きく影響している。

ウェットエッチングはドライエッチングに比べると製造装置への投資が小規模ですむため、大量生産だけではなく中小量生産品にも適用可能であることから、種々のセンサやデバイスの MEMS 化の可能性が期待できる。

本研究では、ウェットエッチングで高アスペクト比の微細加工が可能な水晶 MEMS 技術を応用して、MEMS 化が困難と考えられていた高感度傾斜角センサを開発することを目的とした。

具体的には、ウェットエッチングによる水晶微細加工の加工限界を調べるための実験をはじめ、異方性エッチング特有の各種エッチング面がセンサの性能に及ぼす影響を検討すること、そして高感度傾斜角センサの最適設計、ならびに試作評価のためのセンサ製造プロセスの開発を行い、試作したセンサの特性評価をもって高感度傾斜角センサの実現性を示すことを目的とする。

第 2 章 水晶の材料特性

水晶を MEMS センサの材料として採用するためには、水晶の基本的な特性について調べておく必要がある。本章では、単結晶としての α 水晶の「基本特性」をはじめ、メカニカルセンサの設計に欠かせない「水晶の機械強度特性」、および実用レベルで実現可能な水晶の「微細加工特性」について述べる。

2.1 水晶の基本特性について

鉱物としての水晶は宝石や装飾用として珍重されてきたが、1880 年にキュリー兄弟により圧電効果が報告されてから工業用の材料として着目されるようになった。その後、水晶発振器が主要な用途として発展してきて、今日のデジタル時代においては、ほぼ全てのデジタル機器に水晶発振器 (水晶振動子) が搭載されていると言っても過言ではない。そして、水晶は発振器以外にもフィルタや表面弾性波 (SAW : Surface Acoustic Wave) デバイスなど圧電性を利用したもの他に、光軸 (Z 軸) 方向に対する光の旋光性を利用した位相差板などの光学部品、またウェットエッチングにおける異方性を利用した MEMS デバイスなどいろいろな用途に利用されている。さらには、水晶を熔融してガラス状にした熔融石英も、高強度という特性を利用した機能部品、光学的な透明さを利用した光学部品、低線膨張係数という特性を利用した耐熱性部品、等々優れた材料として利用されている。

工業用の人工水晶の育成に成功したのは戦後 1945 年のことである。高温高圧下で育成するため、その育成炉であるオートクレーブの大型化が進み本格的な量産が可能になったのは 1970 年代になってからであり、国際的に人工水晶の品質基準も策定された。国際的には IEC 60758^[4]、国内では JIS C 6704^[5]に「異物許容個数」「エッチチャンネル密度」「赤外線吸収係数」が規定されており、それらの規定にしたがって検査グレード分けされて市場に提供されるようになり、現在では非常に高品質でバラツキのない人工水晶が安定的に供給されるようになっている。

ところで、水晶が発振器に大量に利用されてきているのは、その発振周波数の安定性にある。発振周波数が安定であるためには Q 値が高いことが要求されるが、水晶は Q 値が 10^6 を超える値を示す材料でもある。Q 値とは共振の尖鋭度であるが、物理的な意味としては内部損失の逆数であり、内部損失が非常に小さい材料ということになる。これは、機械材料という視点からは非常に優秀な弾性体であることを意味しており、金属にみられるようなクリープや疲労劣化は無視できるほどに少ない理想的な弾性材料と位置付けられる。

本研究で着目する水晶の特性は圧電性ではなく、Si より大きな異方性を持つ「エッチング異方性」と、この「弾性体」としての優秀な特性である。

2.2 水晶の機械強度特性測定

水晶の機械強度についての報告例は非常に少ない。水晶の工業的な用途が発振器や光学素子などに多く、機械強度が要求されるような分野への応用例が少ないためと考えられる。また、MEMS 技術による水晶デバイスが開発されるようになってきた近年においても、それらは圧電的に微小変位で動作するデバイスが多いため、水晶の応力限界値に言及する必要性が少なかったものと推定される。しかし、本研究は加速度入力に対する変位を検出するセンサであるため、過大な加速度（衝撃）が印加された場合のためにも応力限界値を知っておく必要がある。

機械強度のデータについては、古くは 1928 年に発刊された“International Critical Tables (ICT)”^[6]にその値を見いだすことができる。そして、1992 年に IEEE-UFFC で提示された定数表“The Constants of Alpha Quartz”^[7]の数値も ICT と同じ値であることから、その間は新しい強度データが提供されていないことになる。

一般的に、細いファイバや結晶など内部欠陥が少ない材料では、その強度は表面状態に左右されると考えられる。表面の微小クラックが破壊の起点になる場合が多いことから、表面の微小クラックが少なく且つ表面積の小さい物、つまりマイクロ加工で製作されるような加工方法と加工寸法の試料を用いて測定されたデータがデバイス開発には有用である。したがって、我々はマイクロ加工された微小試料で機械強度測定を行い、これらのデータの有用性を検討した^[8]。

2.2.1 試験用試料の製作

本研究で開発するセンサは、エッチングの異方性を有効に利用するために水晶結晶軸の Z 軸に垂直な面で切り出した Z 板と呼ぶウェハを使用する。

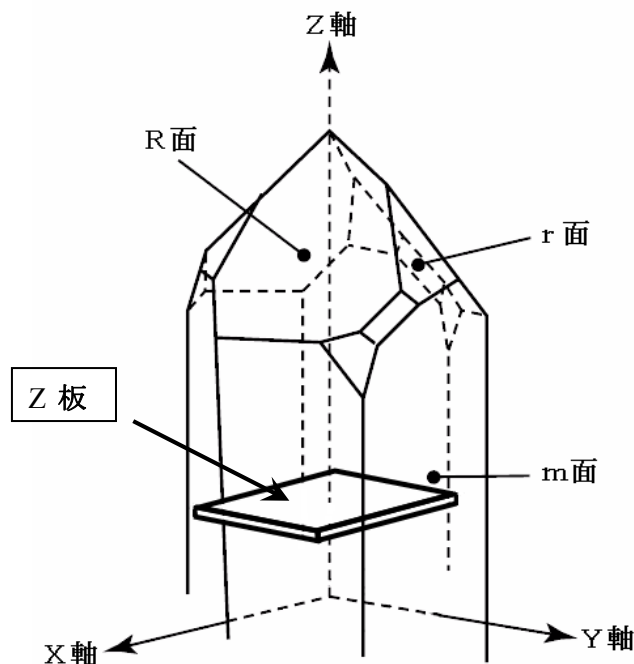


図 2-1 天然水晶と Z 板

その水晶 Z 板ウェハを用いて図 2-2 のプロセスで加工した試験サンプルの形状を図 2-3 に示す。

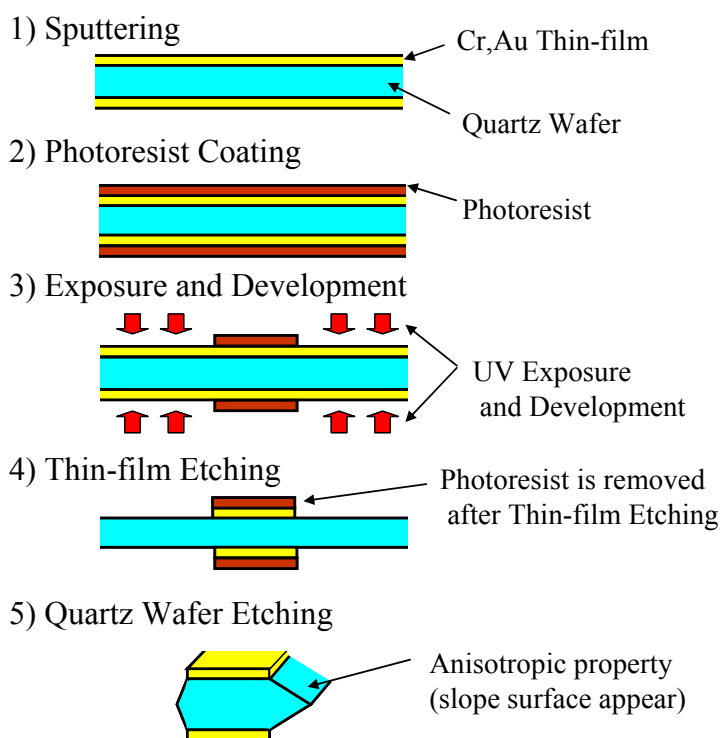


図 2-2 試験サンプルの試作プロセス

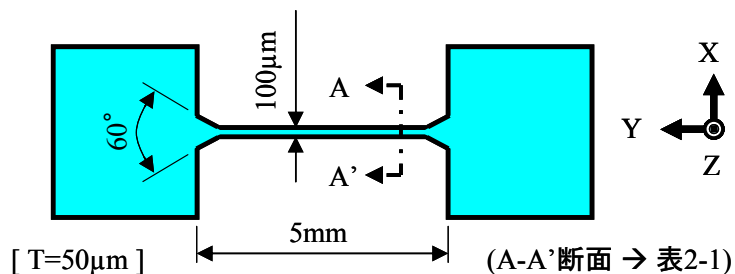


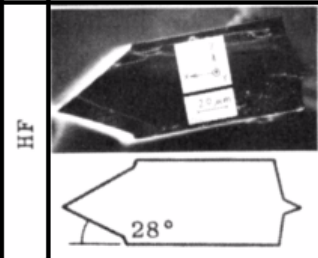
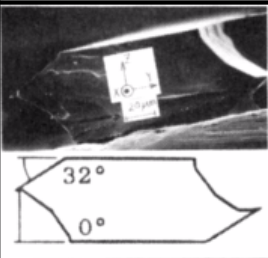
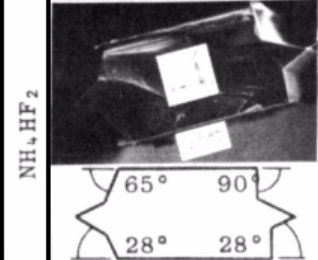
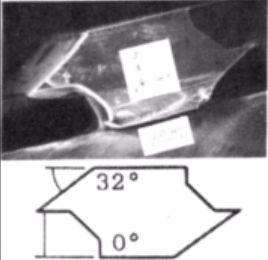
図 2-3 試験サンプルの形状

このプロセスは水晶の加工プロセスとしては最も基本的なものである。本研究で製作したセンサの製作プロセスは後述することになるので、ここでは図 2-2 の基本プロセスについて簡単に触れておく。

- 1) 洗浄した水晶ウェハにスパッタにより Cr と Au の薄膜を付ける
- 2) フォトリソをスピコートする
- 3) 試料形状パターンのフォトマスクと露光機を用いて、レジストを露光して現像液で現像する
- 4) Au と Cr 薄膜を専用のエッチング液でエッチングすると試料形状パターンと同じ Au-Cr の薄膜パターンが形成される
- 5) その後水晶のエッチング液に浸すと Au-Cr の試料形状パターンがマスクとなり、同じ形状の水晶片が図 2-3 のようにエッチング加工できる

使用する水晶エッチング液は弗化水素酸 (HF) と重弗化アンモニウム溶液 (NH_4HF_2) の 2 種類がある。各々のエッチング液では異なったエッチング異方性が現れるので、その断面の走査型電子顕微鏡 (SEM : Scanning Electron Microscope) 写真を表 2-1 に示す^[8]。試料サンプルは弗化水素酸(HF)でエッチングしたものなので、図 2-3 の A-A'断面が表 2-1 の HF & Y-Section になる。

表 2-1 エッチング液と断面形状

	Y-Section	X-Section
HF		
NH_4HF_2		

2.2.2 試験方法と最大応力

強度試験は「引張強度試験」「曲げ強度試験」「ねじり強度試験」の 3 種類について行った。このような微小サンプル用の試験機は見あたらないので、全て自作の試験セットでデータを取得した。

(1) 引張強度試験方法

曲げ強度やねじり強度の試験に比べて引張強度試験は非常に難しい試験である。とくにこのような微小試料では引張荷重以外に曲げ荷重が作用してしまうことが避けられない。図 2-4 のように試料におもりを印加する方法を考え、できるだけ試料への曲げ応力が低減できるように、吊るすためのワイヤには曲げ剛さを無視できるように絹糸を使用した。

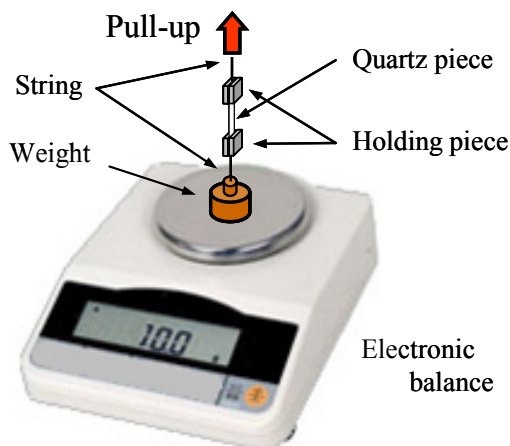


図 2-4 引張強度試験方法

試料に印加される荷重は、電子はかりの重りの減量から得ることができ、引張強度 σ_{max} は次式から求めることができる。

$$\sigma_{max} = \frac{W_{max}}{S} \quad [\text{Pa}] \quad \dots\dots\dots (2-1)$$

W_{max} : 破断時の荷重 [N]

S : 試料の断面積 [m^2]

(2) 曲げ強度試験方法

曲げ強度試験は3点曲げ試験法が一般的であるが、試料片が非常に小さいために、ここでは図 2-5 の方法で試験を行った。研磨されたエッジを有する鉄製の台にマグネットで試料を固定し、自由端をマイクロメータに取り付けたニードルで押し曲げ、試料が破断したときの変位 X_{max} から(2-2)式により最大曲げ応力 σ_{max} を計算する。

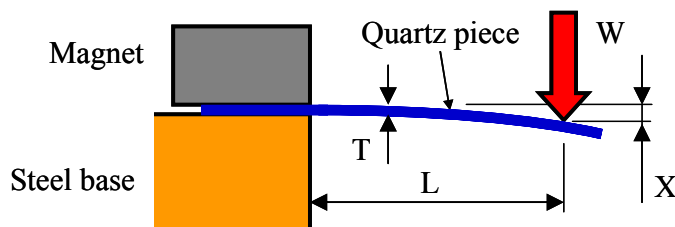


図 2-5 曲げ強度試験方法

$$\sigma_{max} = \frac{3ET}{2L^2} X_{max} \quad [\text{Pa}] \quad \dots\dots\dots (2-2)$$

X_{max} : 破断時の変位 [m]

E : 試料の縦弾性係数 [Pa]

T, L : 試料の厚さと長さ [m]

(3) ねじり強度試験方法

剪断強度に相当する試験であるが、トーションバー型やねじり変位型のデバイスの場合に必要なデータである。図 2-6 のように θ テーブルの回転中心に試料の下部を固定し、上部はスタンドにマグネットで固定した。

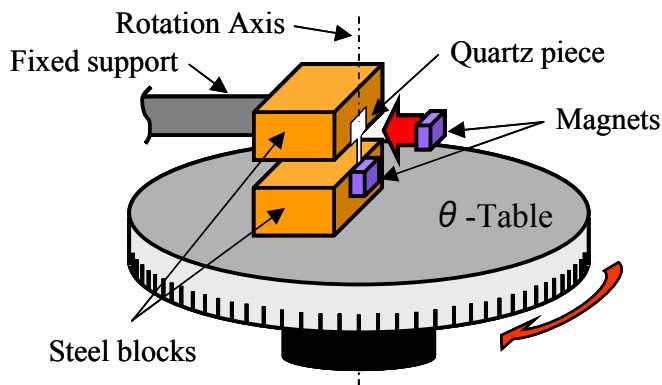


図 2-6 ねじり強度試験方法

試料が破断したときの回転角度から最大剪断応力を計算するが、試料の断面形状 (表 2-1 の HF & Y-Section) では最大応力の計算が困難である。そこで、等価的な矩形断面形状に近似して最大剪断応力を求めた。最大剪断応力 τ_{max} は矩形長辺の中点に発生し(2-3)式で計算できる。

$$\tau_{max} = \frac{8b}{\pi^2} G \theta_{max} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{n^2} \left\{ 1 - \frac{1}{\cosh \frac{n\pi a}{2b}} \right\} \quad [\text{Pa}] \quad \dots\dots\dots (2-3)$$

θ_{max} : 破断時の回転角度 [rad]

G : 試料の横弾性係数 [Pa]

a, b : 試料の短辺と長辺 [m]

2.2.3 試験結果

(1) 引張強度試験結果

図 2-7 に引張強度試験の結果を、図 2-8 に破断部の SEM 写真を示す。

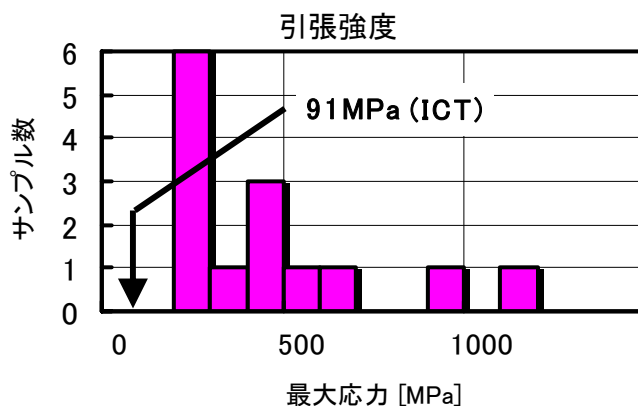


図 2-7 引張強度試験結果

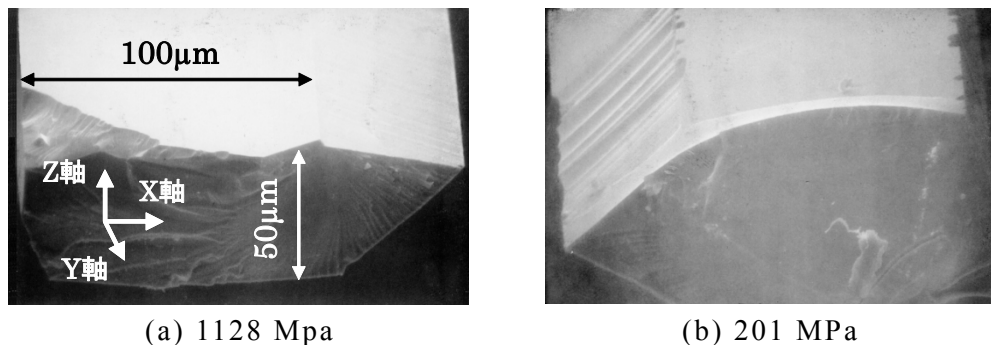


図 2-8 破断部の拡大写真

得られたデータは 201~1130 MPa と大きくばらついたが、ICT の値 91 MPa に比べると大きな値になっている。これら 14 データの中で大きな値のサンプルと小さな値のサンプルの破断部を観察すると、小さな値のサンプルは図 2-8 (b) のように小さな溝状の傷が見られる。これは、水晶エッチング時に Au-Cr のパターン不

良によりギサギサの傷状にエッチングされてしまったためである。したがって、図 2-8 (a)のような良好なエッチングサンプルでは 1000 MPa 以上の強度が期待できるが、これらのデータだけでは確定的な結論を出すことはできない。

(2) 曲げ強度試験結果

図 2-9 に曲げ強度試験の結果を示す。

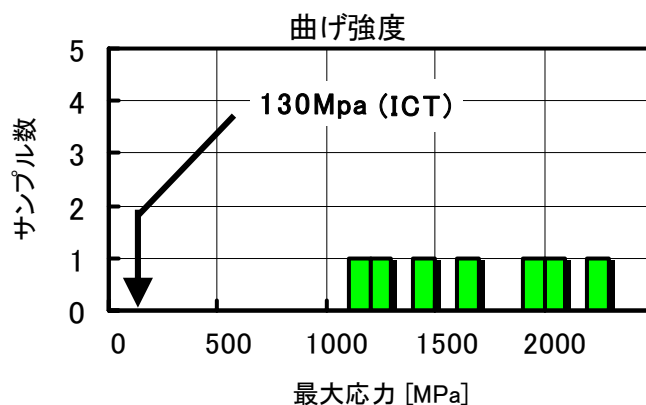


図 2-9 曲げ強度試験結果

全ての試験サンプルが固定部の最大応力発生部で破断していることから、比較的再現性のよい試験が行われたと考えられる。値としては 1100~2200 MPa と非常に大きな値が得られている。ICT の値 130 MPa に比べて約一桁大きな値である。

この試験サンプルの断面を調査した中で図 2-10 に示すものが観察できた。水晶には劈開性はないが、古くから鉱物学者の間では「劈開性はないが r 面で割れることがあるようだ」と言われている。しかし、実験的には確認されておらず「そのようなこともあるようだ」という程度の認識のようである。この写真から角度を測ってミラー指数を求めるとおおよそ(0111)となり、図 2-1 の r 面のミラー指数と一致する。劈開性とは関係ない事象であるが、稀にこのような結晶面が現れることがあるという意味で興味深い写真である。

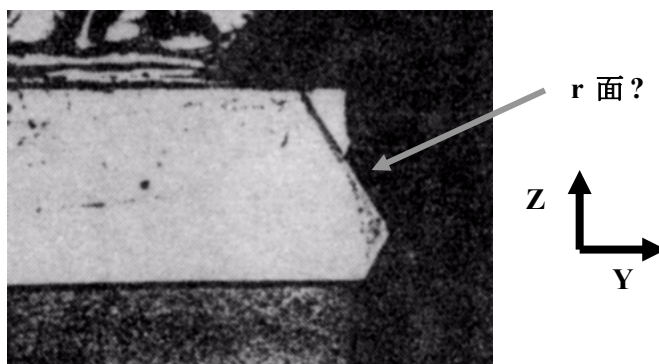


図 2-10 曲げ強度試験破断部

(3) ねじり強度試験結果

図 2-11 にねじり強度試験の結果を、図 2-12 に破断部の SEM 写真を示す。

10 個のサンプルの中で、7 個は図 2-12(a)のように梁端部で破断しているが、3

個は梁端ではなく梁端から離れた梁部で破断していた。通常は応力集中が発生する梁端部で破断するはずなので、梁部で破断した3個については何らかのエッチング不良による傷状の異常部が存在したものと推定される。

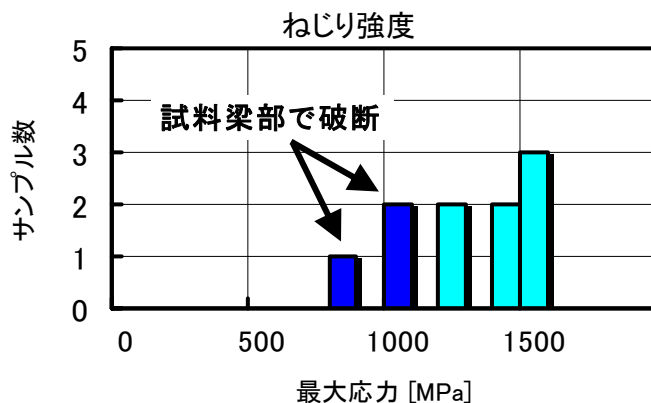
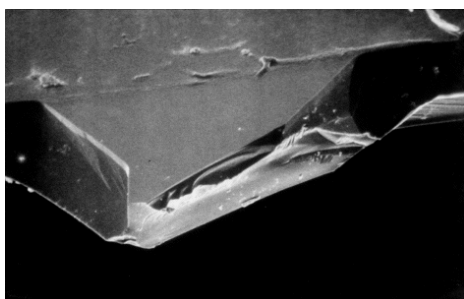
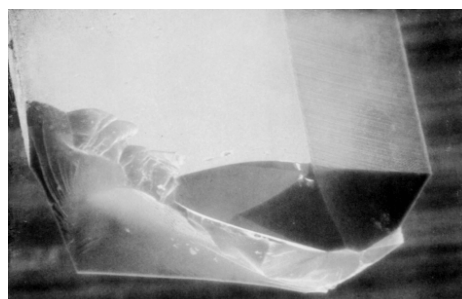


図 2-11 ねじり強度試験結果



(a) 梁端部の破断



(b) 梁部の破断

図 2-12 破断部の拡大写真

以上のように、三種類の強度試験を行った結果として、

- 引張強度試験は試験が難しくデータにバラツキが生じる。
- エッチングの不良により生じた傷状の異常部が強度低下に大きく影響する。

このような傾向が確認できた一方で、試験サンプル程度の寸法で且つエッチング加工で作られた水晶デバイスについては、加工が良好に行われたものについては 1000 Mpa を強度の目安の値として採用できるものと考えられる。

2.3 水晶の微細加工特性測定

水晶の微細加工技術を用いて MEMS センサを開発する上で、実用レベルで加工可能な加工限界を定量的に事前確認しておく必要がある。ここでは、実際の水晶ウェハと加工装置を用いて、ウェハ厚さよりも小さい幅を持つ高アスペクト比の構造体について、その幅をパラメータに露光用マスクの寸法とエッチング加工後の寸法に関して調査を行い、具体的な加工限界を見極める。

2.3.1 実験用フォトマスクの設計製作

水晶のエッチング特性については既にいくつもの研究データがあり、エッチング後の断面形状についても詳細に調べられている^{[9][10]}。しかし、微細構造体をエッチングで加工する場合には、露光用マスクの寸法とエッチング後の水晶構造体の寸法の関係について明らかにする必要があるが、これまでにそのようなデータの報告例はない。基本的な加工プロセスである図 2-2 において、露光用マスクの寸法に対して次の要因により最終的な水晶の寸法が決まる。

(1) 露光現像によるレジストパターンの痩せ細り

露光時に光の回り込みによりマスクの内側に光が入り込むことと、現像時に現像液に未露光のレジストが微量に溶解することにより、マスクパターンに比べてレジストパターンが細くなるのが一般的である。

(2) Au-Cr 薄膜のオーバーエッチング

Au と Cr の薄膜はレジスト膜に覆われていない部分をエッチングにより除去するが、このエッチングプロセスにおいてレジスト膜の下までエッチングが進行するオーバーエッチング現象により、レジストパターンより細い Au-Cr 薄膜パターンになってしまう。

(3) 水晶のエッチング

水晶をエッチングするとき、加工する厚さ方向 (Z 軸方向) に対して垂直の方向 (X 軸方向)、つまり Au-Cr 薄膜の下部にもエッチングが進む。これはエッチング異方性に関する研究データから知ることができる。図 2-13 のように、余分な結晶面がエッチング除去されて高アスペクト比の断面形状ができるまで長時間エッチングを行うと、この X 軸方向のエッチング量は数 μm に至ることになる。

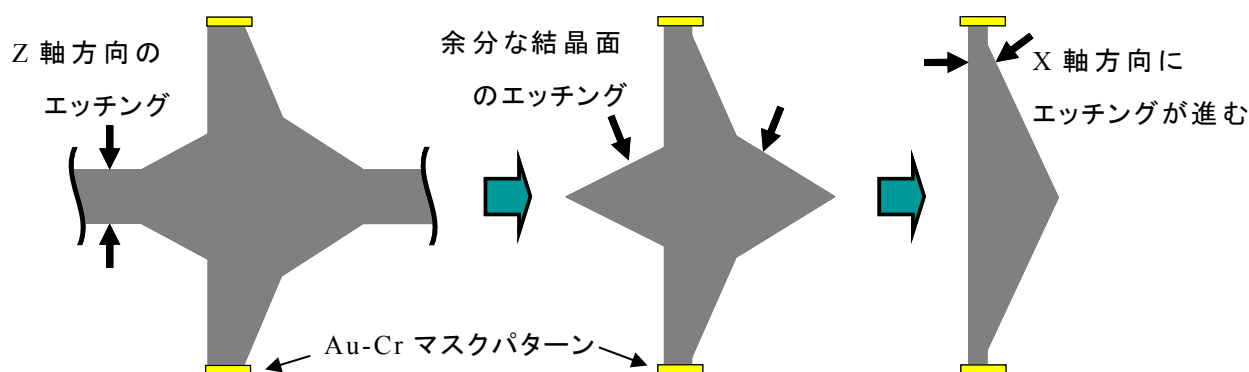


図 2-13 水晶エッチングの進み方

これら(1)(2)の痩せ細りの量は各々 $1\mu\text{m}$ 前後の微小量であり、露光時間や現像時間、またエッチング液の温度やエッチング時間によっても変わることや、 μm オーダーの構造体を扱う機会がなかったことから、これまでは詳細には調べられてこなかった。しかし、本研究では数 μm の構造体を設計する可能性があることから、具体的にマスクを設計製作して水晶のエッチングを行い、エッチング後の水晶の断面寸法をSEMで測定することにより微細加工の特性を定量的に調べた^[11]。

作成したフォトマスクのパターンを図 2-14 に示す。最も重要なパターンは※印のもので、使用する水晶ウェハの厚さが $100\mu\text{m}$ であるのに対して、線状のパターンの幅が水晶エッチング後に $10\mu\text{m}$ となるように予想して数種類の幅のパターンを作っている。その他、センサの設計に必要なと考えられる多くのテストパターンも組み込んである。

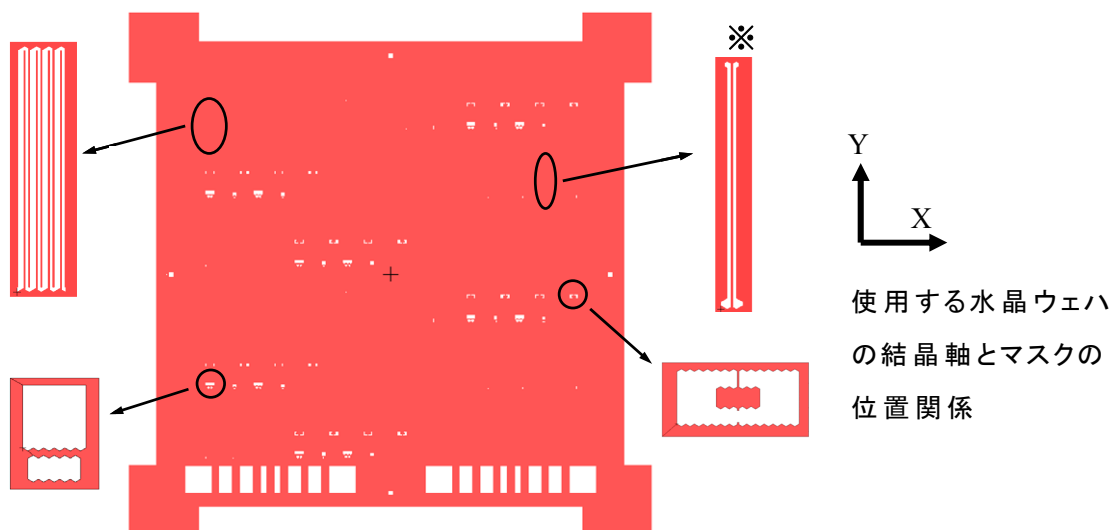


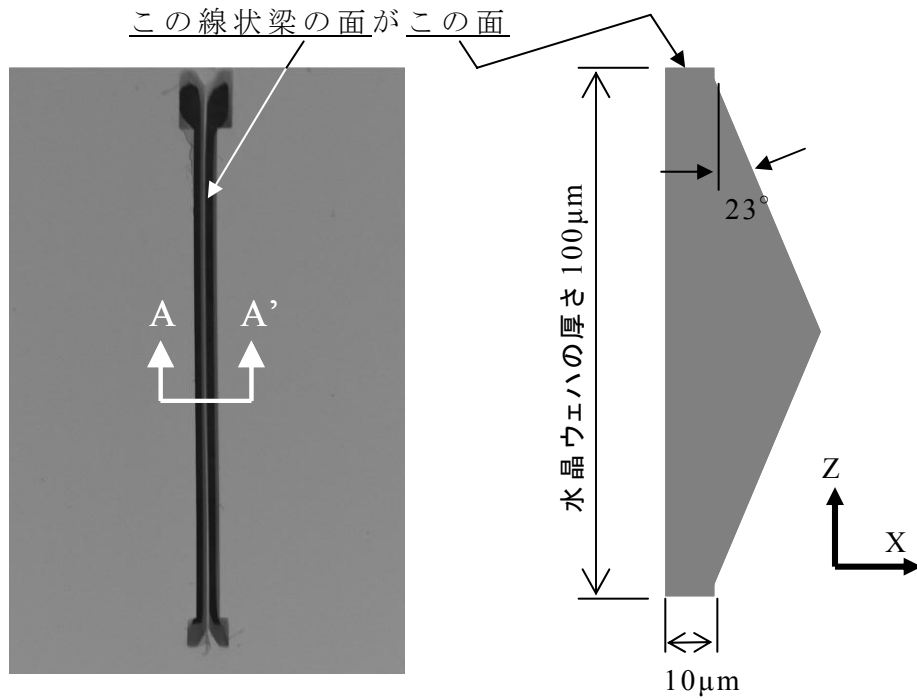
図 2-14 微細加工評価用フォトマスク

2.3.2 実験結果と微細加工の限界値

このマスクを用いて、図 2-2 と同様のプロセスで厚さ $100\mu\text{m}$ の水晶ウェハをエッチング加工した。エッチング液としては高アスペクト比の加工に向いている重弗化アンモニウム溶液(NH_4HF_2)を用いた。

エッチング後の※印部分の拡大写真が図 2-15(a)である。写真紙面に垂直方向の水晶ウェハ厚さが $100\mu\text{m}$ 、写真の左右方向の梁幅が約 $10\mu\text{m}$ 、そして上下方向の梁長さが 2mm である。

そして、この線状の細い梁のY軸に垂直なA-A'断面は、図 2-15(b)のような形状寸法になると予想していた。



(a) 微細梁の拡大写真

(b) 断面寸法の予想図

図 2-15 エッチング後の微細梁

マスクには 16, 14, 12 μm の 3 種類の幅の梁パターンを作っており、その 3 種類についてエッチング後の微細梁の断面を SEM で観測した。(図 2-16)

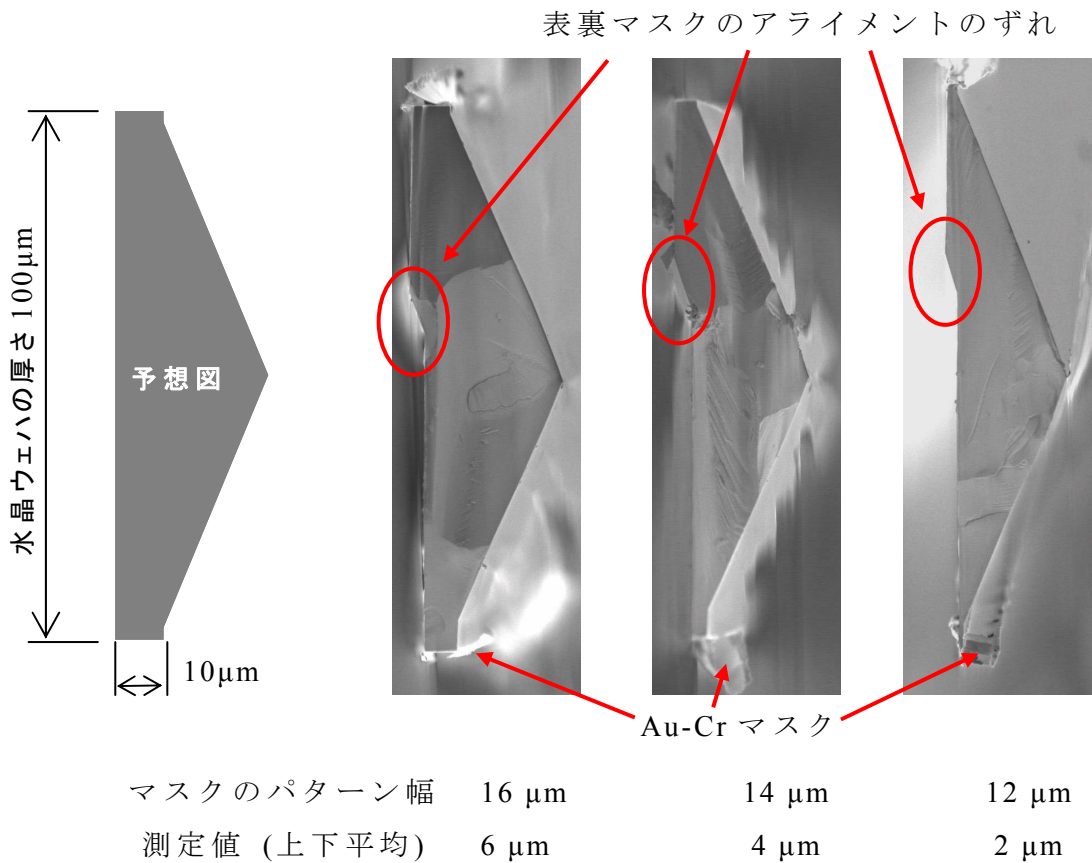


図 2-16 微細エッチング加工による梁断面寸法

表と裏のマスクアライメントに $2\sim 3\ \mu\text{m}$ のずれが生じたために写真のように上下に段差が生じているが、実験の目的から大きな問題はない。

マスクのオーバーエッチングや水晶の X 軸方向エッチング量が予想以上に大きかったために、 $10\ \mu\text{m}$ の仕上がり幅の予想に対して $2\sim 6\ \mu\text{m}$ という結果になったが、この結果から想像以上の高アスペクト比の加工が実現可能であることも判明した。これらのデータから、余分な結晶面のエッチングが終了して図 2-16 のような高アスペクト比の状態まで至るためには、エッチング後の寸法に比べてマスク寸法を約 $10\ \mu\text{m}$ 大きく設計しておく必要があることを示唆している。

実験の再現性を確認するために、幅 $18\ \mu\text{m}$ にマスクを再設計試作して一連の実験を行い SEM で観測した結果が図 2-17 である。表裏のマスクアライメントのずれもなく予想通りの幅 $8\ \mu\text{m}$ の綺麗な梁断面が観測され、実験の再現性、つまり自作プロセスの再現性とその微細加工の限界レベルが確認できた。

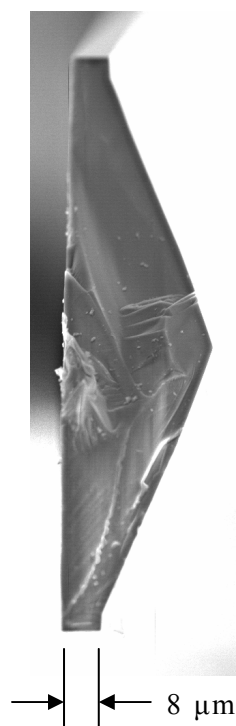


図 2-17 高アスペクト比の梁断面写真

2.4 まとめ

本章では、水晶を MEMS センサの材料として用いる場合の基本的な特性について述べた。

水晶は圧電性を利用した用途が主であるため、その性質を利用したデバイスやセンサの基本的な特性については数え切れないほどの報告例がある。そのためか、水晶の機械的な特性や、異方性エッチングについての研究報告は非常に少ないのが実状である。

ここで述べた機械強度特性については、実験の結果から 1000 MPa を機械強度の目安に設定できることがわかった。メカニカルなセンサやデバイスを開発設計する場合に機械強度は重要な基本データになる。弾性特性を利用するときの許容応力範囲の設定や強度限界設定また疲労破壊特性など、機械的な特性を設計検討するときの基本となるものである。この機械強度データをもとに、いろいろな検討から安全係数を決めて、その安全係数をもとに使用すべき応力範囲を設定するときの基本データになるものである。

また、微細加工特性についても、ケミカルなウェットエッチングという手法では実現性が見えなかった高アスペクト比の加工が可能であることを実験データが示してくれた。エッチング断面形状が二等辺三角形のようになるので、パターン幅を極限まで小さくしても二等辺三角形部分が残ってしまうことや、マスクのアライメント誤差、薄膜のエッチングばらつきなどを考慮すると、実用的な微細パターン幅の限界は水晶エッチング後で 5~10 μm の間が妥当な値と判断できる。

また、これらの実験検討データは本研究のためだけではなく、今後の水晶に係る研究の基礎データとして活用できるものとする。

第3章 傾斜角センサ基本構成の検討

高感度傾斜角センサの具体的な設計に入る前に、どのような方式とどのような構成のセンサを指向するのか検討しておく必要がある。本章では設計計算を行うための具体的な方式と基本構成についての検討結果についてまとめる。

3.1 測定検出方式の検討

第1章において、傾斜角とは「水平面に対する傾き」と述べたが、検出する対象という側面から分類すると次表のように整理することもできる。

表 3-1 傾斜の検出対象での分類

検出対象	検出方法	測定方式例
重力方向	重力方向を探す零位法	気泡式、重錘式
重力加速度変化分	重力加速度の正弦成分	加速度測定
地面や地殻の変動	地点の相対的な変化	大掛かりなシステム

傾斜角を電気信号に変換するためのセンサという視点でこの分類表を見ると、「小型」「高感度」のセンサとしては、前章で述べたように加速度の測定が適しているということが改めて認識できる。

次に、加速度変化を電気信号として検出するための検出方式について検討する。測定対象は加速度であるが、加速度は $[m/s^2]$ という単位をもつ物理量であり、この単位を直接測定する方法は見当たらない。何らかの質量を用意して、加速度により質量に生じる力を検出するという方式になる。この力を検知して電気信号に変換するための測定物理量という視点で分類すると表 3-2 のようになる。

表 3-2 検出方法の分類

測定量	検出方法
歪・応力	歪ゲージ、ピエゾ抵抗、固有振動数、etc
変位	トランス、光、超音波、渦電流、静電容量、etc
温度	温度検出

温度測定という方式は、密封された容器の中の気体に温度差（気体質量差）を与えて、加速度により気体が移動するときの温度変化を検出するという特殊な方法である。Si の MEMS 加速度センサはピエゾ抵抗式か静電容量式と言ってよいほどこの2種類の方式に集中している。小型でシンプルな構成ということから必然的な傾向と考えられる。とくに、熱雑音という測定限界を左右する抵抗体が存在しない静電容量式は MEMS センサにとって非常に優れた検出方法といえる。

本研究で採用する検出方式も静電容量方式とし、高感度化つまり S/N 比を高めるために「差動方式」の構成を取り入れることとする。

3.2 センサ構成案の検討

加速度変化を質量で力として受けとめ、その力で生じる変位を静電容量方式で検出するという構成について具体的な形を想定して特徴を整理してみる。

表 3-3 構成案の外観と特徴の推定

	振子型	団扇型	ねじり型
外観構成			
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・一枚構成 ・静電容量小 → 櫛歯電極化 ・高アスペクト比 → 変位大 	<ul style="list-style-type: none"> ・三枚構成 → 組立難 ・静電容量大 ・厚さ方向変位 → 変位小 	<ul style="list-style-type: none"> ・三枚構成 → 組立難 ・静電容量大 ・ねじりバネ → 変位大

以下の比較検討では、それぞれの構成において外形寸法は 5×5 mm、ウェハの厚さは 100 μm と仮定して概略計算してある。

(1) 振子型

この構成は高アスペクト比のバネ特性を有効活用できる変位方向であり比較の変位は大きい、電極がウェハの厚さ方向の壁面になるため静電容量が小さいという難点がある。そのために図 3-1 のように多数の電極を持つ櫛歯電極が必須となり、差動構成を実現するための電極分離方法は重要な研究課題になる。

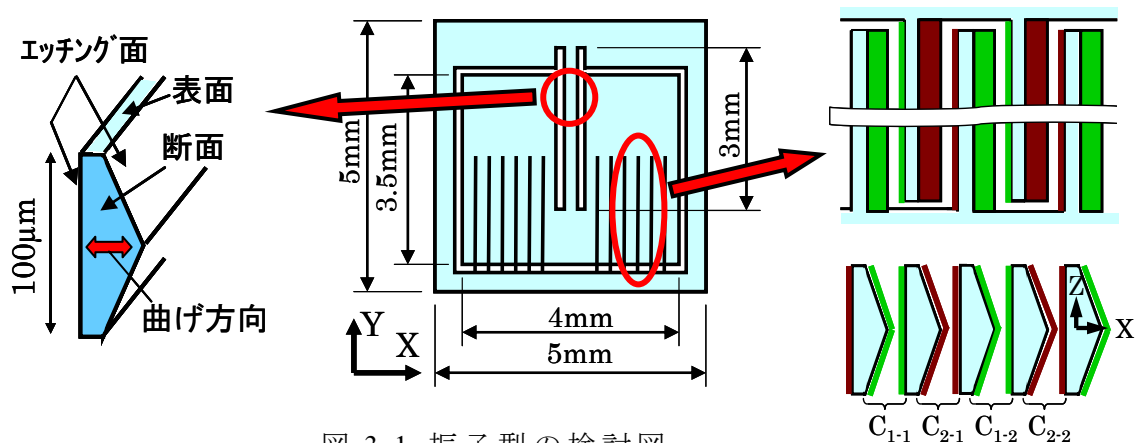


図 3-1 振子型の検討図

(2) 団扇型

静電容量が二枚のウェハの面間で構成されるので大きな静電容量が得られる。板間のギャップは実用レベルとして $5\mu\text{m}$ 程度が想定できるが、差動構成にするためにはこのギャップを維持して三枚構成にする必要がある。電極の外部への引き出し方法に工夫が必要になることに加えて、組立やパッケージングなどコスト的な面でも問題を抱えている。バネの変位方向がウェハの厚さ方向になるために高アスペクト比の特長が生かされないのも性能的な面で問題となる。

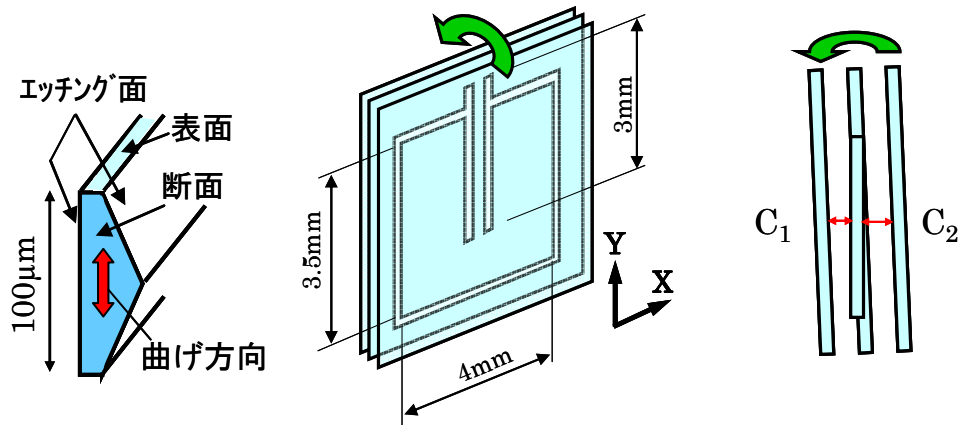


図 3-2 団扇型の検討図

(3) ねじり型

団扇型と同様の三枚構成であり、電極の引き出しや組み立てなどコスト的な問題も同様に抱えている。しかし、バネのねじり変形を利用することで高アスペクト比のバネの利点を活用できるので三種類の中では最もよい特性が期待できる構成案である^[12]。

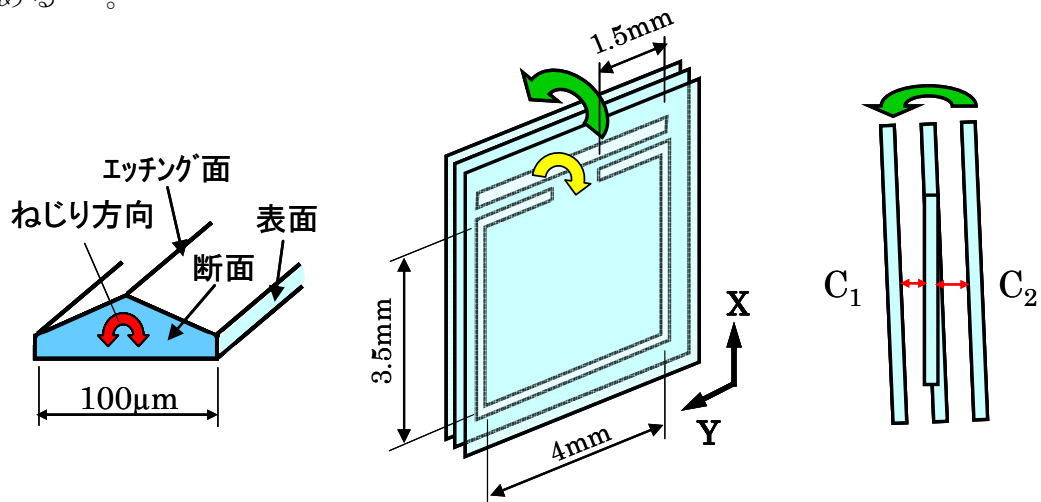


図 3-3 ねじり型の検討図

以上の構成案と各々の寸法をもとに、加速度が印加されていないときの初期容量値 C_0 および 1° の傾斜角が印加されたときの容量変化率 (感度) $\Delta C/C_0$ を概略計算した結果を表 3-4 に示す。最適設計を考慮した計算ではないので、各々の

値の絶対値を議論するのではなく相対比較するためのものである。

表 3-4 概略計算結果

	初期容量値	感度 [$\Delta C/C_0$]
振子型	3～5 pF	1～2% / deg
団扇型	20～30 pF	～1% / deg
ねじり型	20～30 pF	2～3% / deg

予想と同じ傾向を示す値となったが、最も重要な感度については予想に反して大きな違いは出なかった。詳細な最適設計を行えば上記計算結果より改善されると思われるが、基本構成を選択する判断に大きな影響はない。

団扇型は選択肢から除かれるのは明らかとして、振子型とねじり型を比較したときに、数値的な優位性よりも構成がシンプルであるという理由により振子型が選択されるのは疑う余地がないと考える。

しかし、振子型は外見としてはシンプルな構成に見えるが、1片の水晶デバイスに全ての機能を作り込むことになるので、多くの研究課題を抱えている構成であることも明らかである。

3.3 基本構成と差動検出方式の検討

振子型という名称から、センサの重力方向に対する配置は図 3-4(a)のように想像してしまうが、傾斜による重力の正弦成分を検出するという方式から考えると図 3-4(b)の水平配置も同じである。常時印加されている 1G の重力方向が、(a)ではバネに引張応力を与えるのに対して(b)では曲げ応力を与えるという違いはあるが、検出対象が重力の正弦成分であるということについては違いはない。しかし、このセンサのパッケージを考えると、(a)の縦置きに対して(b)は一般の MEMS 製品と同様の平置きのパッケージになるので使い勝手が非常によい。したがって、ここでは(b)の水平配置の構成で検討を進めていくこととする。

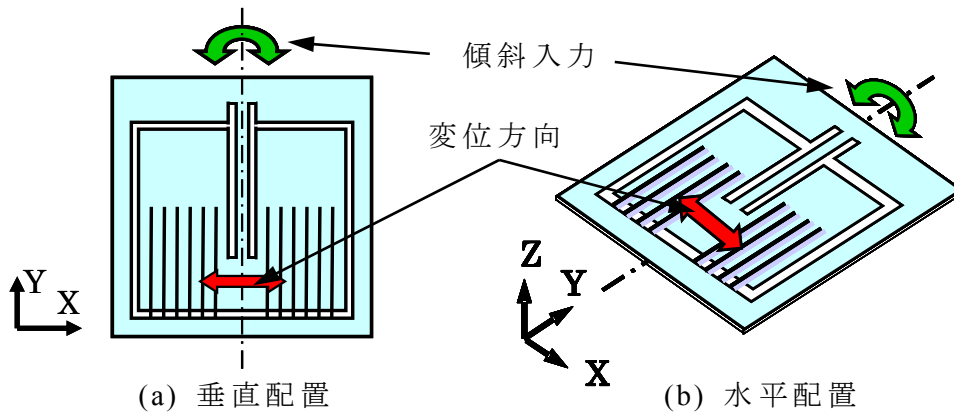


図 3-4 重力方向に対するセンサの配置

もうひとつ、基本構成として検討しておくべきこととして差動方式の構成がある。この差動方式の概念は、一つのセンサの中に一对の対称な検出部を設けて、検出すべき信号に対しては各々の検出部は正負の逆の検出を行い、その他の外乱に対しては同相の検出を行い、両方の「差」をとることにより同相の外乱ノイズ(コモンモードノイズ)を除去する方式である。

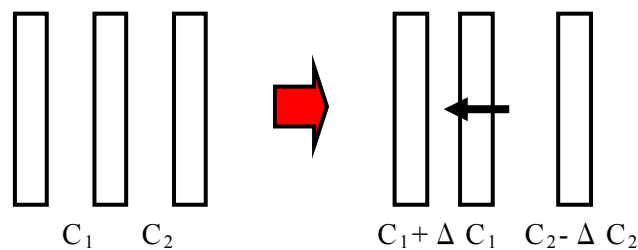


図 3-5 差動構成の概念図

図 3-5 の C_1 と C_2 が対称な構成であるなら $C_1 = C_2 = C_0$ 、 $\Delta C_1 = \Delta C_2 = \Delta C_0$ となるので、
 $C_1 - C_2$ により $C_1 + \Delta C_1 - (C_2 - \Delta C_2) = 2\Delta C_0$ (3-1)

さらに高度な差動処理方式としては

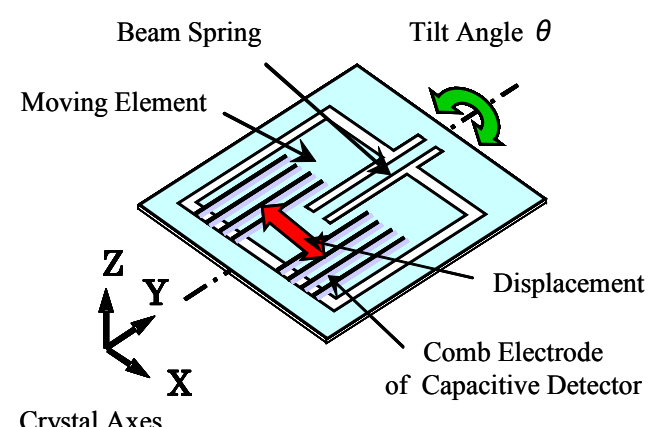
$$\frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \text{ により } \frac{C_1 + \Delta C_1 - (C_2 - \Delta C_2)}{C_1 + \Delta C_1 + (C_2 - \Delta C_2)} = \frac{\Delta C_0}{C_0} \text{ (3-2)}$$

いずれの場合も、 C_1 と C_2 という 2 系統の静電容量を構成する必要があり、静電容量の電極構成には工夫が必要になる。

3.4 基本構成のまとめ

本章では、センサの具体的な開発設計に入る前段階として、センサの全体構成について検討し、設計対象となる構成と設計項目を明確にした。以下にその内容を整理する。

表 3-5 開発対象となる高分解能傾斜角センサの概要

分解能	高分解能傾斜角センサに要求される $0.001 \sim 0.0001^\circ$
外観	
構成要素	<ol style="list-style-type: none"> (1) 櫛歯電極を有する可動部 (2) 可動部に印加される微小加速度を変位に変換する高アスペクト比のバネ (3) 変位を静電容量で検出するための櫛歯電極 (4) 差動構成を実現するための2系統の静電容量 (5) 構成要素を支えるフレーム部
概略寸法	静電容量 $3 \sim 5\text{pF}$ を確保するため $5 \times 5 \times 0.1 \text{ mm}^3$

以上の検討結果をもとに、次章から具体的な設計検討を行う。

第4章 傾斜角センサの最適設計

高感度傾斜角センサの設計は、構成要素の中の「バネ」と「電極」をどのように設計するかにかかっている。本章ではバネの変位特性を求める計算式の導出から、差動方式を実現するための電極構成、そしてそれらを組み合わせたときの感度 ($\Delta C/C$:容量変化率) が最大となるための最適設計の検討について述べる^[13]。

4.1 バネ部変位特性の解析

バネの断面形状と傾斜印加により生じる変位方向を図 4-1 に示す。

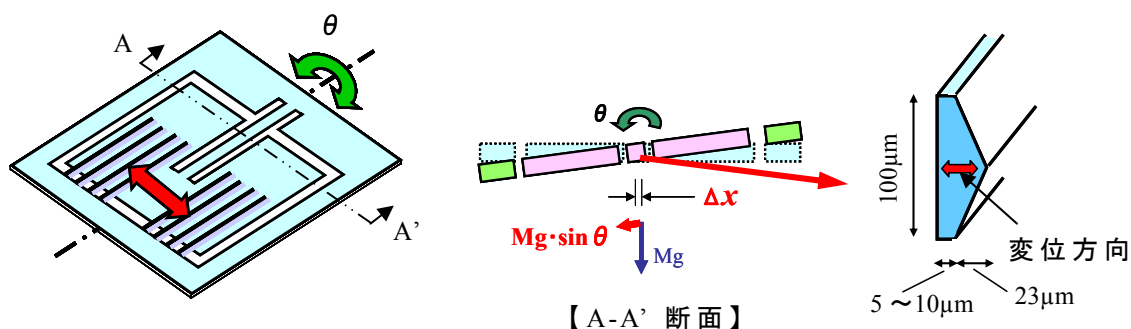


図 4-1 バネの形状と変位方向

バネなどの弾性体の特性を解析する場合、有限要素法 (FEM : Finite Element Method) などの数値解析手法を用いる方法がある。しかし、最適設計などのように各種パラメータを変化させて特性解析を行う場合、FEM ではその計算量が膨大になり、またバネ特性の定性的な理解も困難になるという問題がある。一方で、機械工学においては、断面の変形量が長さに対して無視できるほど小さい場合、つまり断面寸法に対して長さが十分に長い場合は「梁」として扱うことができ、梁の特性は全て解析式で表すことができる。本センサのバネはその断面寸法が数十 μm 程度であるのに対して長さは数 mm になるので「梁」の解析式を用いてバネの特性を解析して問題ない。

さて、機械工学便覧や材料力学公式集に掲載されている梁の解析例は、荷重の印加方法は一点集中かまたは等分布荷重の場合についてである。しかし、本センサの場合は大きな寸法を有する可動部質量がバネ (梁) の先端に付いている構成になっているため、当該解析例は参考にならない。バネの先端の荷重印加点から離れたところに可動部質量の重心が存在する構成になっているのである。つまり、本センサのような構成では片持ち梁の先端に荷重がかかるような単純な場合とは違い、可動部の重量以外に可動部重心位置が梁端に作用するモーメントも考慮しなければならない。

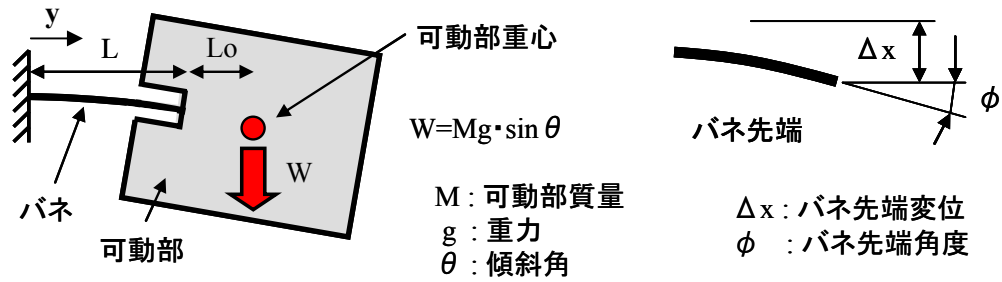


図 4-2 バネと可動部重心の関係

図 4-2 のモデルにおいて、バネ先端の変位 Δx を求めるためには、梁のたわみの基本式に戻って解析する必要がある。はじめに、バネ固定端からバネ長さ方向の座標を y とする。バネのたわみ角 $\phi(y)$ は、荷重 W によるモーメント $M_w(y)$ と可動部重心がバネ先端から L_0 離れていることによって生じるモーメント M_c の和を曲げ剛さ EI で除した「梁の曲率」を長さ方向で積分することにより得られる。

$$\phi(y) = \int_0^y \frac{M_w(y) + M_c}{EI} dy \quad \dots\dots\dots (4-1)$$

E : バネの縦弾性係数 (ヤング率) [N/m^2]

I : バネの断面二次モーメント [m^4]

ここで、 $M_w(y) = W(L-y)$ 、 $M_c = WL_0$ なので(4-1)式の積分結果は(4-2)式となる。

$$\phi(y) = \frac{W}{2EI} \left\{ -y^2 + 2(L+L_0)y \right\} \quad \dots\dots\dots (4-2)$$

そして、バネ先端のたわみ角 ϕ は $y=L$ で得られ(4-3)式になる。

$$\phi = \frac{WL^2}{2EI} \left(1 + 2 \frac{L_0}{L} \right) \quad \dots\dots\dots (4-3)$$

この(4-3)式に $L_0=0$ を代入すると、梁端に荷重が印加されたときのたわみ角の式 (材料力学の公式集に載っている式) と同じになる。そして、 L_0 が「負」つまり重心の位置がバネの先端より (図 4-2 で) 左側になる場合、 $L_0 = -0.5L$ においてバネ先端のたわみ角はゼロになり、 $L_0 < -0.5L$ では上向きなたわみ角になってしまう。そして、先端変位 Δx はたわみ角の積分値なので、 $L_0 < 0$ では変位が減少してしまうということを示唆している。

(4-3)式のたわみ角 ϕ は櫛歯電極の長さ方向の傾き角になるので、静電容量を計算するときに必要な重要な式である。

次に、バネ先端の変位 Δx を求める。変位 $x(y)$ は(4-2)式のたわみ角 $\phi(y)$ を積分することで(4-4)式として得られる。

$$x(y) = \int_0^y \phi(y) dy = \frac{W}{6EI} \left\{ -y^3 + 3(L + L_0)y^2 \right\} \quad \dots\dots\dots (4-4)$$

この(4-4)式は、バネ変位が y の関数として記述されており、バネの固定端から先端までのバネ変位分布をあらわしているの、それをグラフ化したのが図 4-3 である。横軸が y 値で 0=バネ固定端、1=バネ先端、縦軸は下向き変位を負としてある。 $L_0=0$ がバネ先端に荷重が印加された場合の変位分布であることから、この変位を 1 として相対比較の基準にしている。

このグラフが、重心位置が変わることによりバネの変位分布がどのように変化するかを定性的に説明するものである。 L_0 が負になり、 $L_0 = -L$ に至ると変位が逆に、つまり上向きになってしまうのである。ピンセットの端を固定して、もう一方の端を下向きに引っ張ると結合端が上に動くことで確認ができる現象である。本センサのように外形寸法が限定された構成では、単にバネを長くするだけでは変位が大きくなり、可動部質量の重心位置が重要なパラメータになるということがよく理解できる。

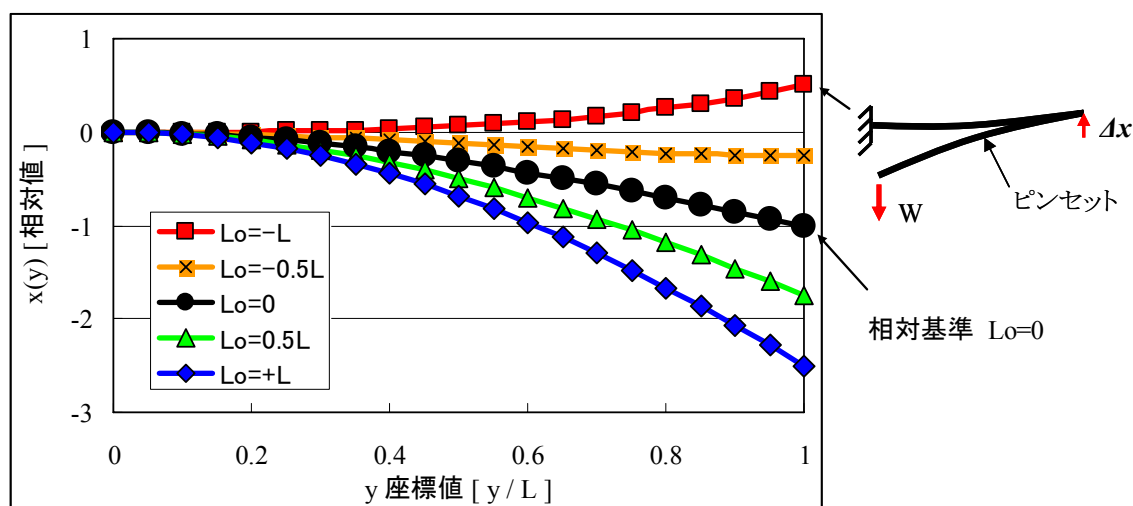


図 4-3 可動部重心位置と梁変位曲線

バネ先端の変位 Δx は図 4-3 の横軸 1 の点であり、(4-4)式に $y=L$ を代入することにより(4-5)式として得られる。

$$\Delta x = \frac{WL^3}{3EI} \left(1 + \frac{3}{2} \frac{L_0}{L} \right) \quad \dots\dots\dots (4-5)$$

以上のように、本構成におけるバネの特性を解析した。実際の設計において重要になる式は(4-3)式と(4-5)式であり、ともに静電容量変化量を求めるときに必要なものである。

4.2 静電容量検出部の解析

ここでは櫛歯電極の解析を行うが、静電容量を求めるための電極は平行電極ではないことと、傾斜角が印加されたときに電極長さ方向に(4-3)式の傾き角 ϕ が発生することも考慮する必要がある。また、差動方式を実現するための電極構成は、製作プロセスと大きく関係するため、製作プロセスについても平行して検討しなければならない大きな課題となる。

4.2.1 電極部の静電容量計算式の導出

櫛歯電極の一对を Y 軸に垂直な断面で拡大表記したのが図 4-4 である。図 2-17 に示したように、櫛歯の壁面は一方が平面でもう片方は二等辺三角形形状のエッチング面となっている。

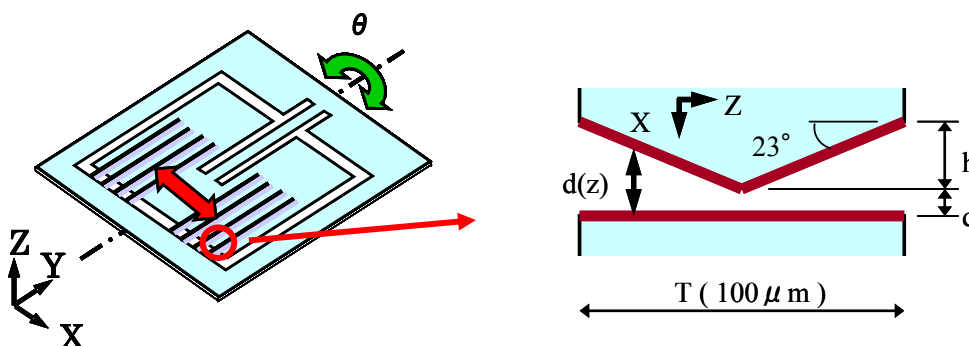


図 4-4 櫛歯電極の拡大断面図

このように、電極面の片方が傾斜をもっているため静電容量を形成するための間隙が Z 方向で変化している。そこで、間隙を $d(z)$ とおいてこの電極対で構成される静電容量の値を求める。

$$d(z) = \frac{h}{T/2}z + d$$

と記述できることから、静電容量は次式となる。

$$C = 2 \int_0^{T/2} \frac{l\epsilon}{d(z)} dz = 2 \int_0^{T/2} \frac{l\epsilon}{\frac{2h}{T}z + d} dz = \frac{Tl\epsilon}{h} \ln\left(\frac{d+h}{d}\right) \dots\dots\dots (4-6)$$

- T, d, h : 図 4-4 の各部寸法 [m]
- l : 電極の長さ [m] (Y 軸方向の電極長さ)
- ϵ : ギャップ間物質の誘電率 [F/m]

そして、この櫛歯電極の間隙は Y 軸方向（電極の長さ方向）に(4-3)式で表される傾き ϕ を有している。

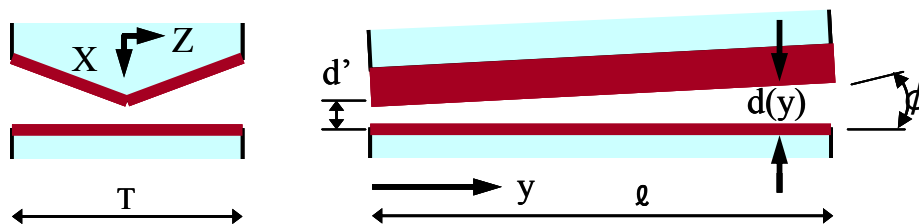


図 4-5 櫛歯電極の長さ方向の傾き

(4-6)式で求めた静電容量式の d が Y 軸方向の関数 $d(y)$ となるので、(4-6)式を y の関数として長さ Y 方向について積分する必要がある。

$$C = \frac{T\varepsilon}{h} \int_0^l \ln\left(\frac{d(y)+h}{d(y)}\right) dy \quad \dots\dots\dots (4-7)$$

ここで

$$d(y) = ay + d'$$

$$d(y) + h = ay + c$$

$$a = \tan\phi, \quad c = d' + h$$

と置くことにより(4-7)式は次のように解くことができる。

$$C = \frac{T\varepsilon}{h} \frac{1}{a} [(ay + c) \ln(ay + c) - (ay + d') \ln(ay + d')] \Big|_0^l \quad \dots\dots\dots (4-8)$$

冗長な式になってしまったが、確認のために、(4-8)式で計算した静電容量値と、(4-7)式を Excel で数値積分により求めた静電容量値を比較して一致することを確認した。(4-8)式では $\phi = 0$ にできないため、その場合は(4-6)式を使用する。

以上により、傾斜角が印加されないときの静電容量値つまり初期容量値は(4-6)式を、傾斜角が印加されたときの静電容量値は(4-8)式で得られ、その差が静電容量変化量 ΔC ということになり、静電容量を求めるための解析式が得られたことになる。

4.2.2 差動方式と電極構成の検討

差動方式の基本的な考え方については 3.3 節で述べたが、その基本構成を櫛歯電極で実現しようとするると図 4-6 のようになってしまう。一つ一つの櫛歯の壁面電極を左右で電氣的に分離する必要があるのである。

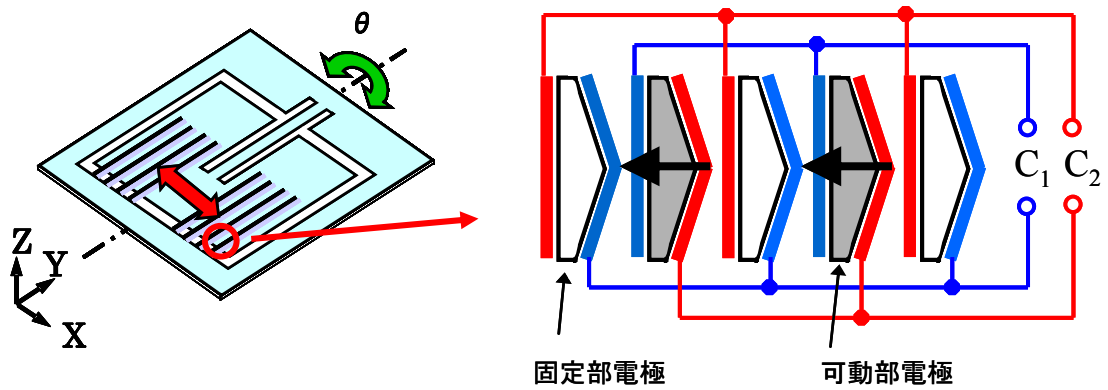


図 4-6 差動方式用電極の基本構成

図 4-6 の基本構成図において、傾斜角が印加されると可動部は左矢印方向に動き、 C_1 の電極間隙は小さくなるので静電容量値は増加し、 C_2 は逆に減少する。差動方式を忠実に構成しているが、このような電極を作るための製作プロセスの工程順序について考察する。

- (1) 水晶エッチング加工の基本プロセスでセンサ外形形状を作成する。

このプロセスによりセンサの形状はできあがる。

- (2) スパッタにより Cr-Au 薄膜を着膜する。

このスパッタにより水晶の表面と水晶エッチングにより出現した側壁面、つまり全ての面に薄膜が付着する。櫛歯電極の側壁面に電極を設けるために不可欠なプロセスである。

- (3) 差動構成用に電極膜をパターンニングして図 4-6 のように分離加工することになるが、この工程が非常に困難なプロセスになる。

- ・水晶エッチング加工後のウェハへのレジストコーティングに通常のスピンコートプロセスが使えない。ディップコーティングやスプレーコーティング等の未知のコーティング方法を開発する必要がある。これらのコーティング技術は世界的にみても非常に高度な研究対象となっており^[15]、市販されている装置の中にも本センサに適用できるものは存在しない。
- ・櫛歯電極が作られているセンサ可動部は、水晶エッチング加工により細いバネで支えられただけの非常に弱い構造体になっている。さらに、この電極の表面分離部の幅は $5\sim 10\ \mu\text{m}$ を想定していることから、露光・現像・薄膜エッチングというプロセスに強度的に耐えられるとは考えられない。
- ・また、幅 $5\sim 10\ \mu\text{m}$ の微細櫛歯電極が数十本も存在することになるので、その中の一箇所でもエッチング不良が生じてしまうと、電気的にはショートとなってしまうことになる。製造歩留まりという観点からも非常に問題が大きい構成である。

このように、将来的にレジストコーティングが可能になったとしても、微細櫛歯電極を持つ本センサにはこの工程手順は適用が困難と考えざるを得ない。

4.2.3 非対象櫛歯電極による差動構成の検討

櫛歯部分での電極分離は現時点では採用が困難という判断から、櫛歯部分での電極分離が不要な構成を検討した。図 4-7 にその概念図を示す。

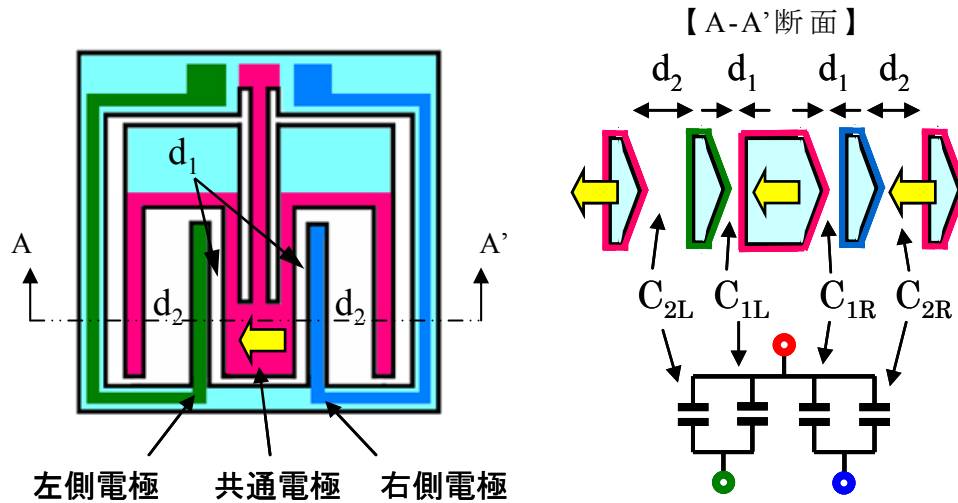


図 4-7 非対象櫛歯電極と差動構成

簡単のために櫛歯電極は左右一対としてある。各櫛歯の薄膜はエッチングせずに全て残してあるので櫛歯の周囲全てが単一の電極になっている。

- ・ 可動部の電極は左右の電極に共通で使用される共通電極である。
- ・ 左側電極櫛歯の左右ギャップは非対称で $d_1 < d_2$ となっている。
- ・ 右側電極櫛歯の左右ギャップも非対称で $d_1 < d_2$ となっている。

センサの中心線に対しては左右対称になっているが、電極櫛歯の左右のギャップは非対称という構成である。ここで、左側電極と共通電極の間で形成される静電容量は d_1 のギャップによる C_{1L} と d_2 のギャップによる C_{2L} の和となる。右側電極も同様に C_{1R} と C_{2R} の和となる。そして、 C_{1L} と C_{1R} 、また C_{2L} と C_{2R} は同じ値なので次のように記述できる。

$$C_{1L} = C_{1R} = C_1$$

$$C_{2L} = C_{2R} = C_2$$

また、傾斜角印加による静電容量の変化量も同様に次のように記述できる。

$$\Delta C_{1L} = -\Delta C_{1R} = \pm \Delta C_1$$

$$-\Delta C_{2L} = \Delta C_{2R} = \pm \Delta C_2$$

いま、可動部が傾斜角印加によって左側に変位すると、左右の静電容量は(4-9)式となる。

$$C_L = C_{1L} + \Delta C_{1L} + C_{2L} - \Delta C_{2L} = C_1 + \Delta C_1 + C_2 - \Delta C_2$$

$$C_R = C_{1R} - \Delta C_{1R} + C_{2R} + \Delta C_{2R} = C_1 - \Delta C_1 + C_2 + \Delta C_2 \quad \dots\dots\dots (4-9)$$

(4-9)式はコモンモード成分が同符号で信号成分が逆符号であり、差動構成が成り立っていることを示している。

これにより、 C_L と C_R の差は次式となる。

$$C_L - C_R = 2(\Delta C_1 - \Delta C_2) \dots\dots\dots (4-10)$$

さらに、高度な差動処理方式では(4-11)式になる。

$$\frac{C_L - C_R}{C_L + C_R} = \frac{\Delta C_1 - \Delta C_2}{C_1 + C_2} \dots\dots\dots (4-11)$$

このように、センサ形状を工夫することで櫛歯電極上での電極分離が不要であり、周囲のフレーム上で電極分離の処理ができる。製作プロセスへの負担を非常に低減できるユニークな電極構成であることが理解できる。

しかし、(4-10)式と(4-11)式からわかるように ΔC_2 は感度を下げる要因になる。 C_2 を小さくすることは d_2 を大きくすることであり、限られたセンサ寸法の中では櫛歯電極の数を減らす方向になり、可動部質量を低下させるとともに初期静電容量値 C_0 も小さくなることにつながる。この傾向を整理すると次のようになる。

◆ギャップ d_2 を大きくすると

- ・(4-11)式から ΔC_2 小 → 感度 (容量変化率) 大
- ・可動部質量小 → 変位小 → 感度小
- ・櫛歯電極数少 → 初期容量値 C_0 小

つまり、 d_2 の値は感度を大きくする方向と小さくする方向の両方に影響し、初期容量値 C_0 にも影響する。したがって、 d_2 の値が感度と初期容量値に及ぼす影響を定量的に把握しておく必要がある。

センサの形状寸法の最適設計については次節で述べるが、その最適設計のパラメータに d_1 と d_2 を含めるとパラメータの数が多くなりすぎて全体像が見えなくなる可能性がある。できるならば、本節において d_1 と d_2 の組み合わせ最適値を見出しておきたいのである。

そこで、次のような相対比較計算を行うことで d_1 と d_2 の最適な組み合わせが存在しないか検討してみた。

表 3-5 から可動部の寸法を 4×4 mmに固定して、 d_1 と d_2 をパラメータとして変化させたときの初期容量値と感度の相対比較計算を行ってみた。感度を求めるための可動部変位量は可動部質量に比例すると簡略化して計算した。 $d_1=5\mu\text{m}$ 、 $d_2=50\mu\text{m}$ の値を相対比較のための基準としてグラフ化したのが図 4-8 である。

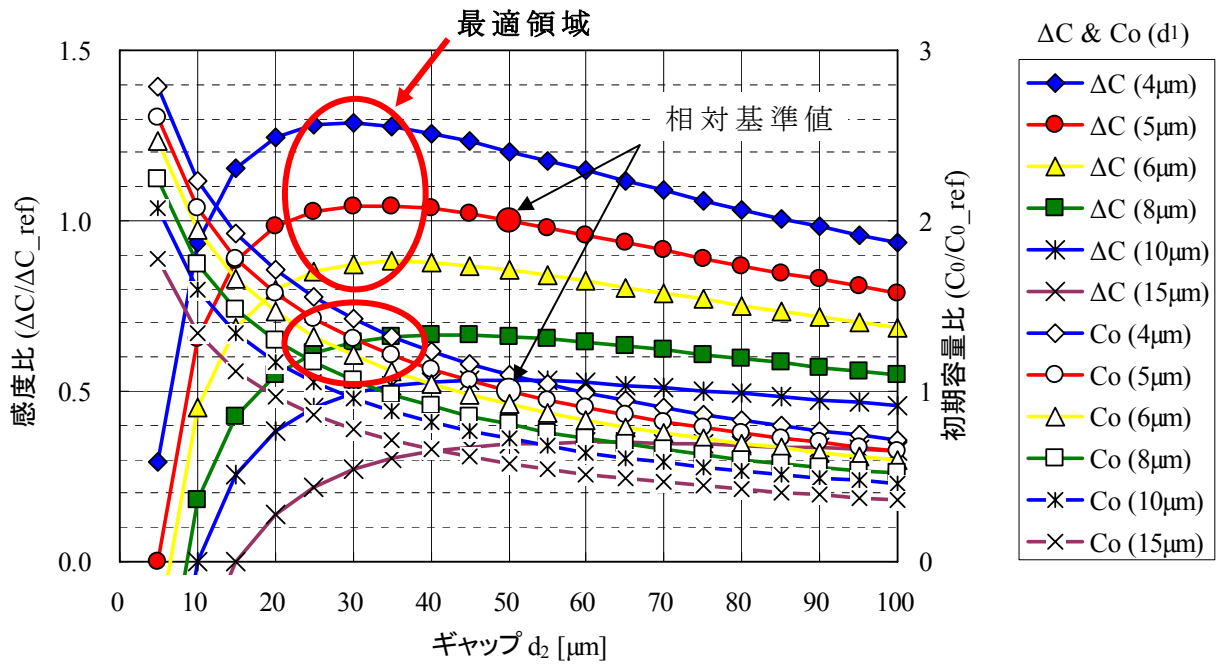


図 4-8 d_1 , d_2 と初期容量・感度の相対関係

横軸の $d_2 \rightarrow$ 大になるとともに櫛歯電極数が減少するために、初期容量値 C_0 も減少しているのは予想通りであるが、感度については $d_2=30\mu\text{m}$ 前後にピークをもち、 $d_2 < 20\mu\text{m}$ では急激に感度が低下するという傾向が読み取れる。

この図 4-8 から、 d_2 は約 $30\mu\text{m}$ で d_1 は小さいほどよいという結論が得られた。しかし、製造上 $d_2=30\mu\text{m}$ は問題ないとしても、 d_1 は無限に小さくはできない。製造プロセスの能力から考えて、 $d_1=5\mu\text{m}$ 、 $d_2=30\mu\text{m}$ の組み合わせを最適なギャップ構成として設定するのがよいと判断できる。

4.3 最適設計の検討

ここまでの検討から、限られた寸法の中に所望の特性を持つセンサを作り込むには、各構成要素の組み合わせに最適な寸法が存在するということがわかってきた。前節では差動構成を実現するための非対称ギャップ櫛歯電極のギャップ d_1 と d_2 に最適値を見出すことができたが、本節ではセンサ全体の形状寸法について最適な値を決定するための最適設計の検討を行う。

4.3.1 設計目標値の検討

高感度傾斜角センサの分解能は $0.001\sim 0.0001^\circ$ とされている。ここで、一例として分解能 0.0001° を実現するために必要なセンサの特性について検討してみる。

(1) 差動構成

Op アンプの差動入力段の場合は CMRR (Common Mode Rejection Ratio) で表されて、その値は $80\sim 120\text{dB}$ におよぶ。しかし、センサにおける差動構成のコモンモード除去比は $20\sim 60\text{dB}$ と想定してよい。Op アンプの場合は差動入力段の Tr の対称性を非常に高精度で作ることができるが、センサの場合はそこまでの対称性は実現できないからである。ここでは、 $20\sim 60\text{dB}$ の中間の値として 40dB を本センサの値に設定することにする。

(2) 静電容量測定分解能

静電容量値を電子回路でどの程度の分解能まで検出できるかという視点である。高精度の静電容量測定機器では $5\sim 6$ 桁 ($100\sim 120\text{dB}$) の表示が可能なものがあるが、センサの検出回路にそれだけの能力を期待するのは無理がある。また、別の視点としては高分解能 AD コンバータの代表例として 16 ビット $\Delta \Sigma$ AD コンバータがある。16 ビット = 2^{16} で 96dB である。これらの値と一般的な実験用電子回路の実力経験値などを勘案して 80dB が妥当な値と考えられる。

(3) センサの目標値

以上の合計値として $40\text{dB}+80\text{dB} = 120\text{dB} = 10^6$ という値をセンサに適用する。これは初期容量値 C_0 の 10^{-6} が 0.0001° に相当する必要があることを意味しており、 1° 換算では C_0 の 10^{-2} 、つまり $\Delta C/C_0 = 1\% \text{ at } 1^\circ$ となる。以上により、センサの設計目標値は表 4-1 のように整理される。

表 4-1 高分解能傾斜角センサの設計目標値

外形寸法	$5 \times 5 \times t0.1 \text{ mm}$
バネの幅	$10 \mu\text{m}$ ($5\sim 10 \mu\text{m}$ で選択可能)
櫛歯電極ギャップ	$d_1 = 5 \mu\text{m}$ 、 $d_2 = 30 \mu\text{m}$
初期静電容量値 (C_0)	$3\sim 5 \text{ pF}$
静電容量変化率 ($\Delta C/C_0$)	1%以上 / 傾斜角 1°

4.3.2 最適設計のためのパラメータの抽出

ここまでで、外形寸法やバネ幅寸法また櫛歯電極のギャップ d_1d_2 などについては各々の検討結果から既に値が決定している。そして、外形が $5 \times 5 \text{ mm}$ なので、バネと可動部を設置できる範囲も限られてしまい、ここではパッケージのことも考慮して外周 0.5 mm を確保し、 $4 \times 4 \text{ mm}$ を設置範囲とした。そうすると、設計においてパラメータとなるのは、次の3項目に絞られることになる。

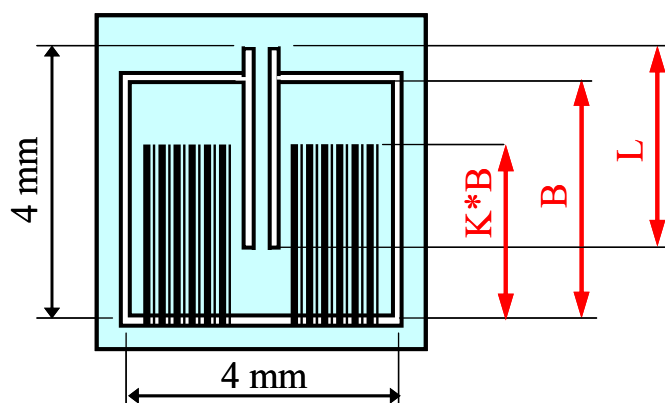


図 4-9 センサ形状と設計パラメータ

L : バネの長さ [m]

B : 可動部の長さ [m]

K : 可動部長さに対する櫛歯電極長さの比

具体的な設計計算としては、これら3パラメータを変数として初期容量値 C_0 と感度 $\Delta C/C_0$ を求めて比較することになる。

4.3.3 最適設計による計算例

設計計算ではバネの変位(4-5)式、バネ先端のたわみ角(4-3)式、そしてそれらの値をもとに計算する静電容量(4-6)と(4-8)式を用いて計算する。

計算した中で、本センサの特徴をよく表している例として $K = 0.55$ の場合の計算結果を図 4-10 に示す。横軸がバネ長 L 、縦軸が可動質量部長 B になっている。

- ・最も感度が高いのは $[0.55L \times 0.5B]$ のポイントで $\Delta C/C_0 = 1.4\%$ であるが、初期容量値は $C_0 = 1.4 \text{ pF}$ と小さい。 $B = 0.5$ で $K = 0.55$ なので、櫛歯電極の長さがかなり短いために C_0 が小さくなっているのである。
- ・そして、 $C_0 > 3 \text{ pF}$ は $B > 0.86$ の領域であるが、 $\Delta C/C_0 > 1\%$ の領域は $L = 0.4$ と $L > 0.95$ の丸印の2ポイント存在する。

$L > 0.4$ とバネを長くすると感度が減少し、 $L = 0.9$ から感度が増加するのである。これは、本センサの構成から必然的に生じてしまう現象なので以下に考察してみる。

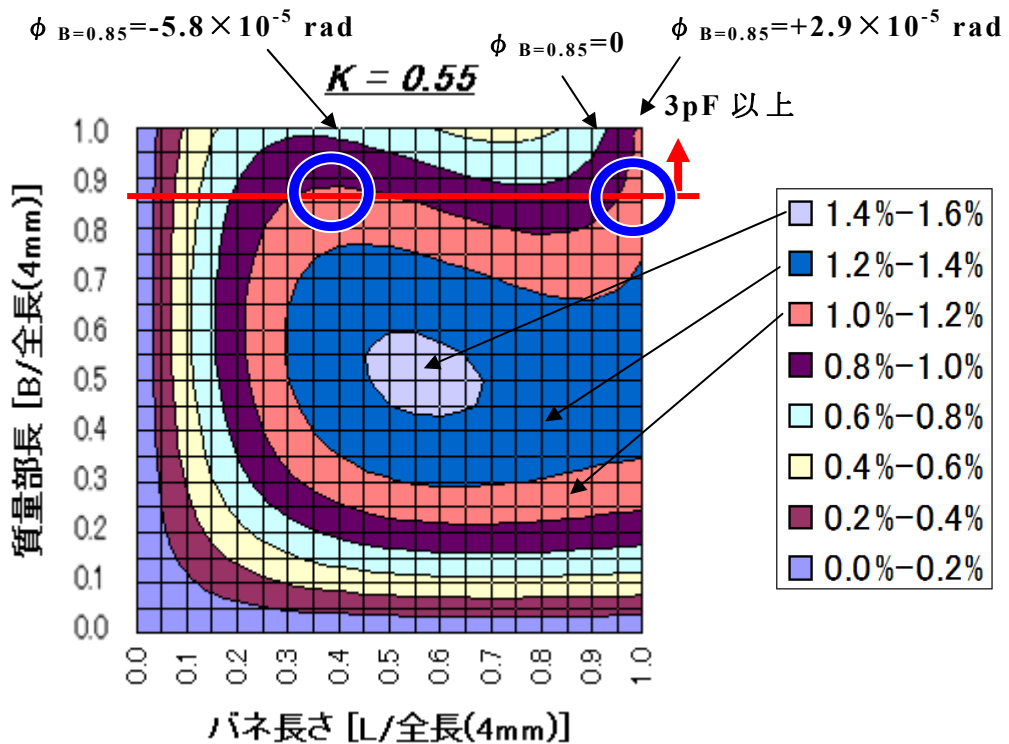


図 4-10 パラメータの値と感度 $\Delta C/C_0$

図 4-10 において、バネ先端のたわみ角 ϕ は図中に記載された値になっている。これを図で示すと図 4-11 のようになる。

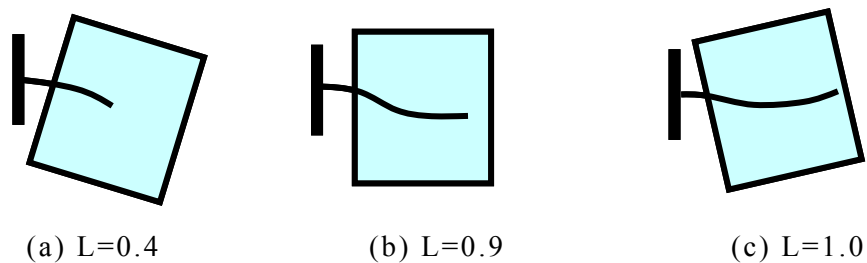


図 4-11 各パラメータと可動部変位の様子

このように、可動部質量の重心位置の違いによってバネ先端のたわみ角も違い、櫛歯電極の長さ方向に傾斜 ϕ が発生してしまうため容量変化率 $\Delta C/C_0$ にも違いが出てくるといふ現象が生じている。

次ページに K の違いによる計算結果を示す。目標である初期容量 $C_0 > 3\text{pF}$ 、感度 $\Delta C/C_0 > 1\%$ をギリギリ実現できる結果となったが、バネの幅は計算に採用した $10\mu\text{m}$ より小さく設計できる余裕 ($5\sim 10\mu\text{m}$ の範囲で設計可能) があるので問題はないと考えてよい。最終的には、これらの計算結果を参照して、目的とするセンサの特性・特長に合致する形状寸法を選択すればよい。

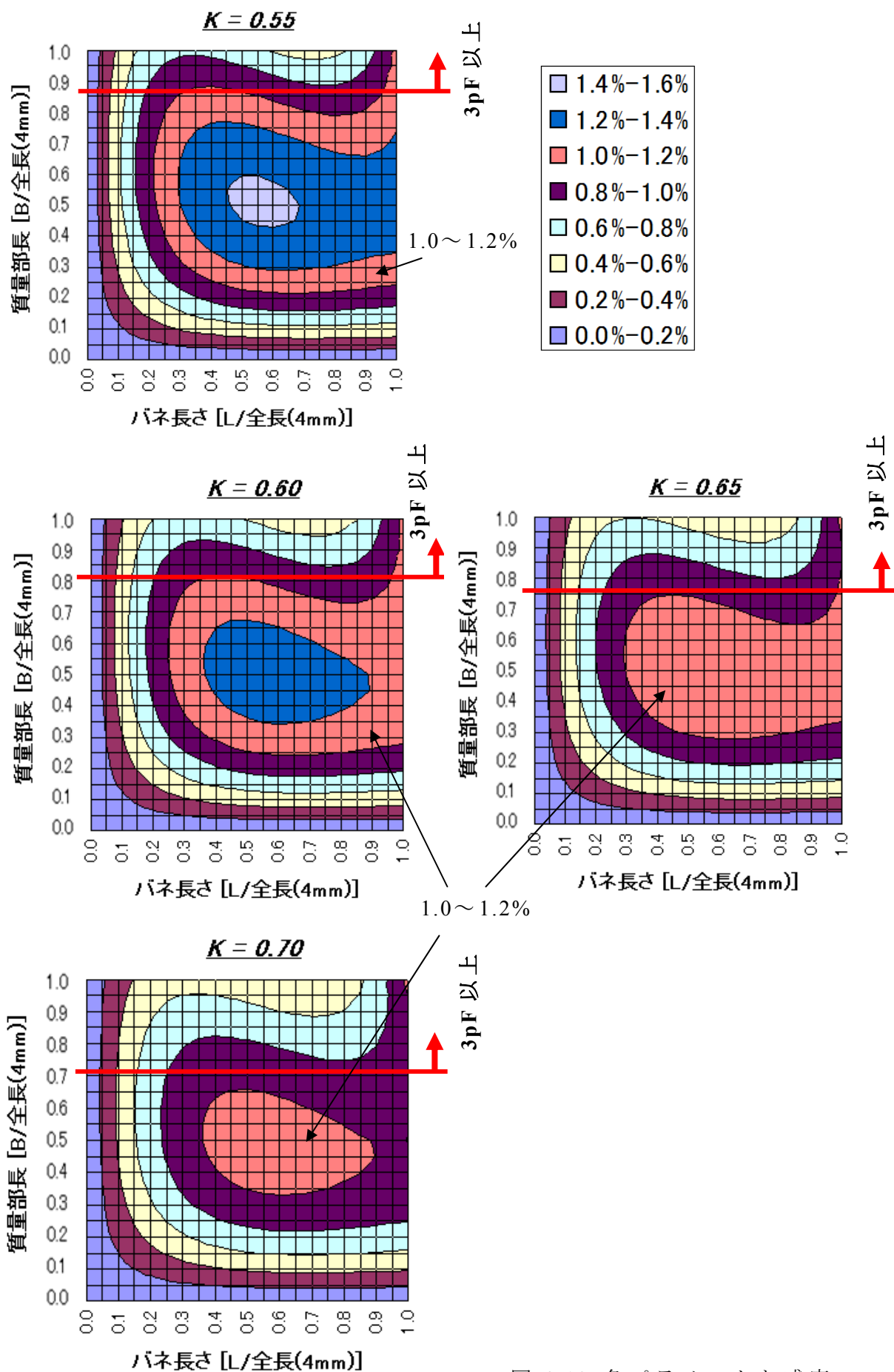


図 4-12 各パラメータと感度

4.4 まとめ

本章では設計計算に関わる解析式を求め、さらに具体的な設計を行うための目標値を決定し、その目標値を実現するための最適設計も試みた。

最適設計の結果として目標値をクリアできる結果を得ることができたが、バネの幅をさらに小さく高感度化できる余裕があることもわかった。このような結果を得ることができたのは、第2章2.3節の「水晶の微細加工特性」の実験検討結果のデータが大きく寄与している。

また、差動構成を実現するための電極分離法については、非対象ギャップ櫛歯電極の構成を考案することにより櫛歯部分での電極分離は不要になったが、フレーム部での電極分離方法についてはまだ未検討であり、次章のセンサ製作のためのプロセス開発において詳細検討すべき大きな課題として残っている。

ここで検討したバネの解析式は、今後このようなメカニカルなセンサを開発する際に利用できる基本的な解析式と位置付けられる。

また、静電容量についても非平行でさらに長さ方向に傾斜を持っている構成について解析したので、これも同様に今後の静電容量の解析の基本として利用できるであろう。

第 5 章 傾斜角センサの製作

本章では第 4 章で設計した傾斜角センサを具体的に実現するための製作プロセスについて述べる。第 2 章で触れた水晶エッチングプロセスは基本プロセスとして運用されてきているが、本センサの場合はその構成の複雑さから新たな製作プロセスの開発が必要になる。ここでは、水晶ウェハの状態から水晶の傾斜角センサ（水晶センサチップ）を製作し、それを評価のためにパッケージに実装するまでの全工程について記述する。

5.1 製作プロセスの概要

本節での製作プロセスとは、パッケージに実装する前までの水晶の傾斜角センサ（水晶センサチップ）製作プロセスのことである。水晶センサチップ製作プロセスは大きく次の 3 工程に分けられる。

- ・ 形状を加工する水晶エッチングプロセス
- ・ 櫛歯電極と配線パターンを作る電極製作プロセス
- ・ ショート状態になっている電極パターンを分離して静電容量を形成するための電極分離プロセス。

しかし、4.2 節で述べたように水晶エッチングプロセスにより形状加工されたウェハに電極配線パターンを作るには困難がある。そのため、新たに電極のパターニング方法を開発し、パターニング後に電極を分離するための方法も検討することにより電極配線パターン製作プロセスを実現した。

詳細プロセスの記述の前に、本節ではプロセスの全体像について述べ、そしてその中のキープロセスについては次の 5.2 節で述べることとする。

5.1.1 形状加工プロセスと電極形成プロセスの検討

4.2 節で触れたように、センサの形状加工後に櫛歯電極部で電極分離のためのフォトリソを行うのは非常に困難である。そのため、4.2 節では櫛歯電極部ではなく周囲のフレーム部で電極を分離するために、非対象ギャップ櫛歯電極の構成を検討し設計を行った。

そこで、具体的にフレーム部で電極を分離するための工程について検討した。

(1) 水晶形状加工プロセス

水晶ウェハ表面にスパッタで Au-Cr 薄膜を着膜し、その Au-Cr 薄膜をセンサ形状にエッチングして、パターニングされた Au-Cr 薄膜をマスクとして水晶をエッチングする基本プロセスである。

(2) 電極用 Au-Cr 薄膜スパッタ

エッチングによりセンサ形状に加工された水晶ウェハのエッチング側壁面に

Au-Cr 薄膜をスパッタにより着膜するためのプロセスである。

(3) フレーム部でのパターン形成

上記スパッタにより、水晶ウェハの表面と側壁面つまり全表面には Au-Cr 薄膜が着くので電氣的には単一の電極となっている。この薄膜を図 4-7 のようにセンサのフレーム部で分離して差動静電容量 C_L 、 C_R を形成する必要がある。

この(3)を実現するためには、大きく分類して 2 種類の方法が考えられる。

- ・ フォトレジストを塗布し、露光現像・薄膜エッチングという一般的な方法
- ・ (2)のスパッタ時に不要な場所に薄膜が付着しないようにする方法

前者のためのレジスト塗布の方法としてスピコートは使用できないので、スプレーコーティング等の新しい手法を開発する必要がある。このスプレーコーティングについては既に研究例もあり^[15]、製品化された装置も販売されている。しかし、本センサのような微細 3D 構造体に使用可能な方法は見あたらない。我々もスプレーコーティングの研究を行っているが^[16]、同様の理由で本センサへの適用は困難な状況にある。

後者についてはさらに大きく 2 つに分類される。

一つ目は、不要箇所に着膜させないためのマスク (Stencil Mask : ステンシルマスク) を使用する方法である。ステンシルは謄写印刷や衣類へのプリントなどに使用される孔版マスクと同じ手法であり、ウェハ上に (金属の) 薄いステンシルマスクを配置して薄膜を付着させる手法である。マスクがウェハに接触しないように工夫する必要があることやマスクとウェハのアライメントにも高い精度が要求される。そして、本センサではエッチング後の側面に膜付けするスパッタ法を採用するためにマスク裏側への回り込みが大きく、微細パターンニングには不向きという本質的な問題もある。

二つ目はリフトオフ法である。白金 (Pt) など実用的なエッチング液が存在しない薄膜のパターニング手法として開発された方法である^{[17][18]}。これは、露光・現像という通常のリソ法により不要部分のパターンをフォトレジストで形成して、着膜後にフォトレジストを溶解除去するときにレジスト上の薄膜も一緒に剥離するという手法である。フォトレジストのエッジ部にオーバーハングを形成するための技術が必要となるが、微細加工に適していることと、我々のリソ技術の延長線上に位置付けられると考えることができるため、我々はこのリフトオフ法を応用することで電極分離のプロセス開発に取り組んだ。

5.1.2 製作プロセスの全体フロー図

製作プロセス全体の流れを整理するために作成したプロセスフローの概要図を図 5-1 に示す。各工程の詳細は 5.3 節に述べる。

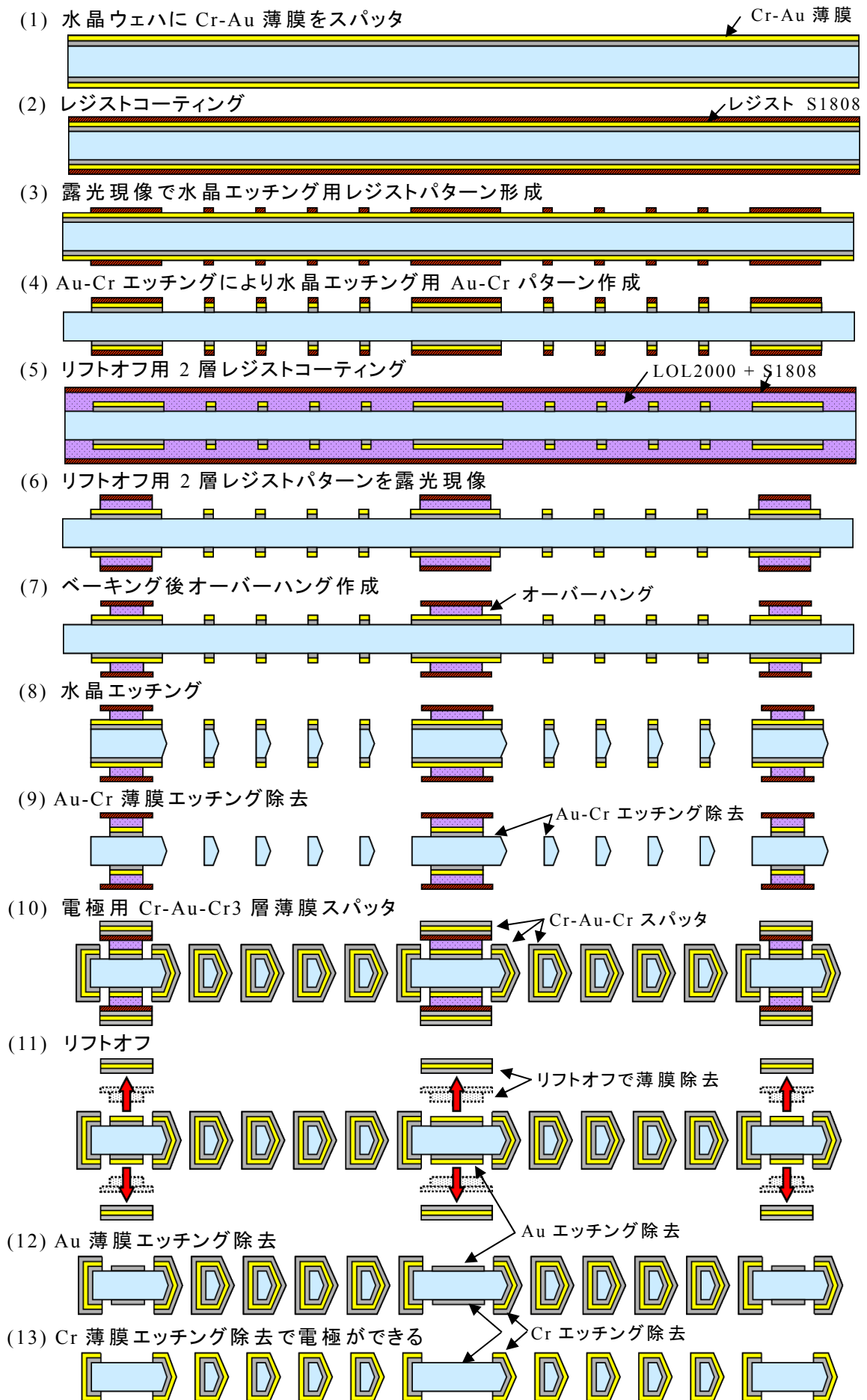


図 5-1 製作プロセスの概要図

5.2 電極形成のためのキーププロセス開発

水晶 MEMS デバイスの製作においては、基本となる水晶エッチングプロセスに加えて各々のデバイスに特有の製作プロセスが必要になる。本節では、本センサに特有のプロセスについて、その開発の経緯と内容について述べる。

5.2.1 リフトオフ用レジストのパターニング方法

フレーム上で電極パターンを分離するための方法としてリフトオフ法を採用する。リフトオフプロセスにおいては図 5-1 の(7)~(11)に記載しているように、薄膜パターンをきれいに剥離するためにはレジストパターンのエッジ部にオーバーハングを作成する必要がある。このオーバーハングを作成する手法には図 5-2 のようにレジスト表面処理法と 2 層レジスト法の 2 種類が知られている。

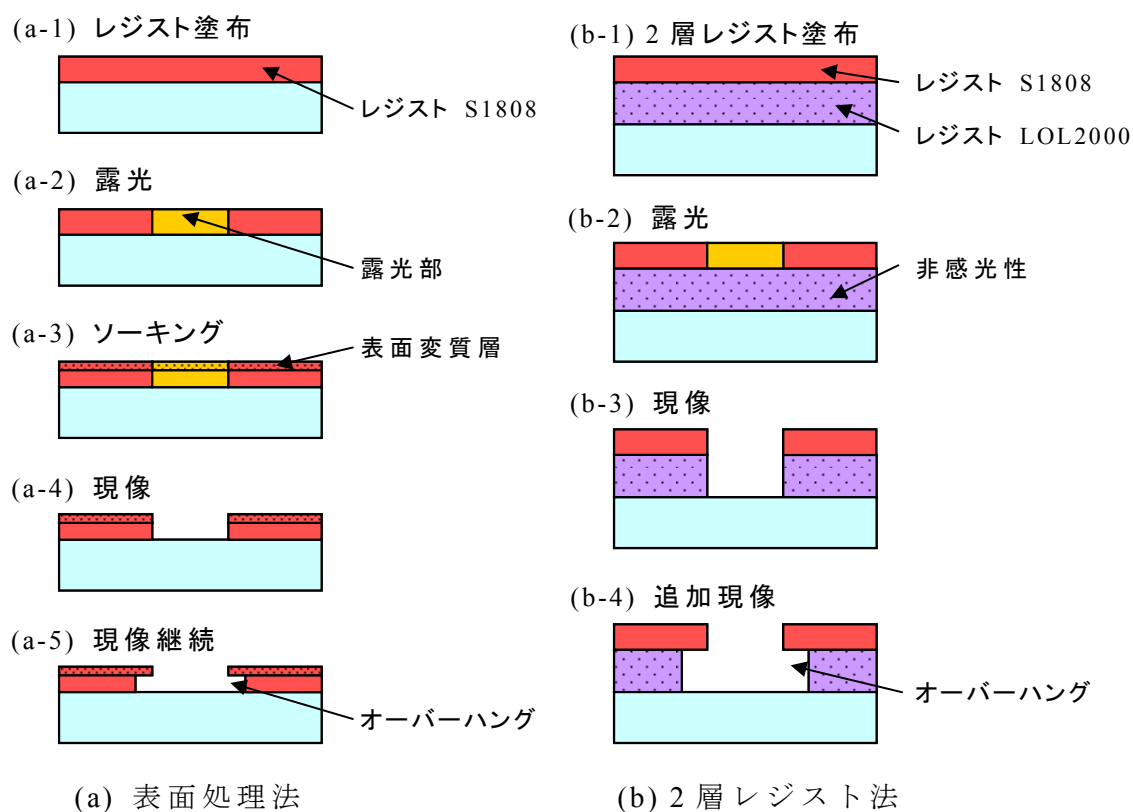


図 5-2 リフトオフ用レジストパターン作成

(1) 表面処理法

旧来から行われてきた手法で^{[17][18]}、図 5-2(a)のようにクロロベンゼン等の薬品に浸す（ソーキング：Soaking）ことでレジスト表面を変質させて現像液に溶解しにくい表面層をつくる。レジストは、露光されなくても現像液に微量ではあるが溶解する。表面変質層は下層のレジスト層より溶解が遅く進行するので、長時間現像液に浸すことでオーバーハングを作成することができる。

図 5-3 にソーキング法（Soaking:5 分, Developing:10 分）で作成したレジストの SEM 写真を示す。オーバーハングは実現できているが、そのオーバーハング量が小さいために、薄い薄膜のリフトオフには使用できても本センサには採用できないと判断される。

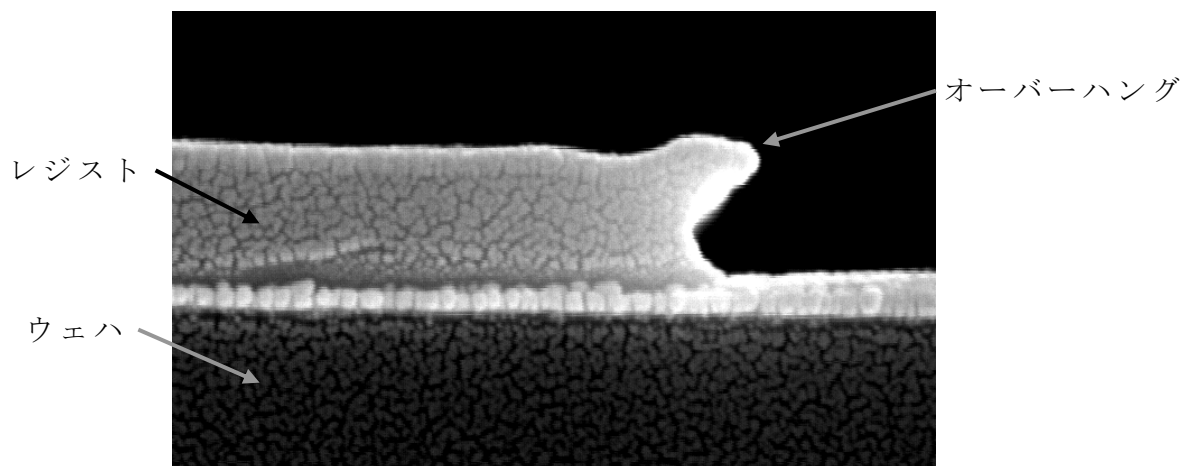


図 5-3 ソーキングにより作成したオーバーハング

(2) 2 層レジスト法

リフトオフ法がいろいろなアプリケーションで利用されるようになってきたことから、リフトオフ専用のレジストがレジストメーカーから供給されるようになってきた。その専用レジストの一つである LOL2000 は感光性を持たないが、現像液に溶解する速度が感光性レジスト (S1808) より速い。この特徴を利用して図 5-2(b) の手順でオーバーハングを作成できる。また、LOL2000 の膜厚を厚くすることで厚い薄膜のアプリケーションや、本センサのようにエッチング後の側面にスパッタするような用途にも適用できるので本センサのプロセスに適している。

図 5-4 に上記方法で作成したオーバーハングの SEM 写真を示す。図 5-3 に比べて、レジスト膜も厚くしっかりしたオーバーハングが観察できる。

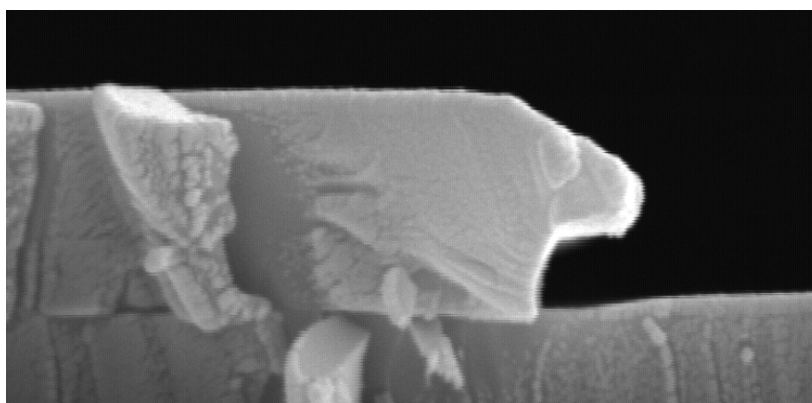


図 5-4 2 層レジスト法により作成したオーバーハング

一方で、本センサのプロセスでは一般的なリフトオフプロセスとは異なる大きな問題を抱えている。図 5-1 の(5)~(11)のプロセスにおいて、一般的なリフトオフでは(7)のオーバーハング作成後に(10)の着膜になるが、本センサの場合は(8)の水晶エッチング工程が存在する。水晶エッチング液は高温の重フッ化アンモニウム飽和水溶液で、レジストを損傷するほどに強い溶液である。したがって、この溶液への耐性を持たせるためにレジストを高温でベーキング処理(150℃×30分)する必要がある。この高温ベーキング処理を行うと、図 5-5 のようにオーバーハング部が収縮変形してしまうという問題が発生してしまう。

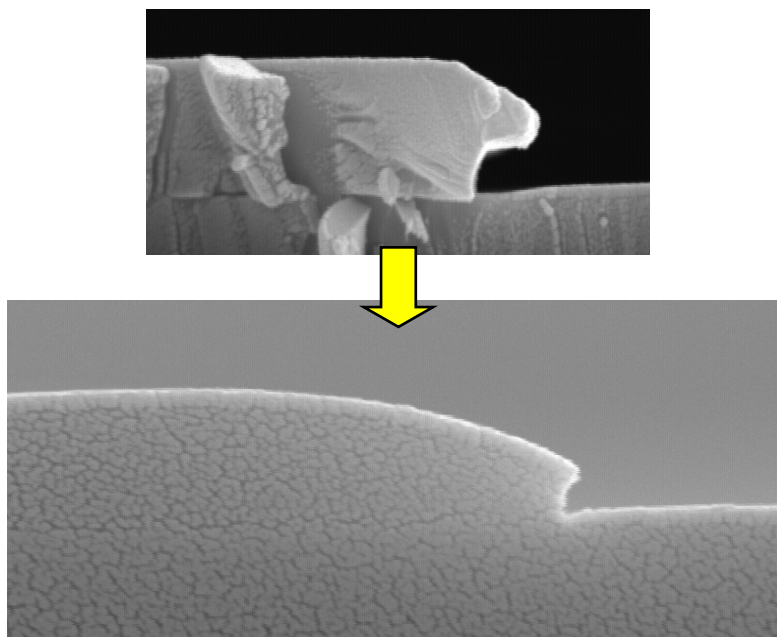


図 5-5 オーバーハング作成後の高温ベーキング処理

そこで、変則的な手順になるが、オーバーハング作成前、つまり図 5-2 の(b-3)と(b-4)の間に高温ベーキング処理を行う方法について実験を行い、実用的なプロセスとして採用できるプロセス条件を確立した^[19]。図 5-6 に SEM 写真を示すが、非常に大きく深いオーバーハングがきれいに作成できていることがわかる。

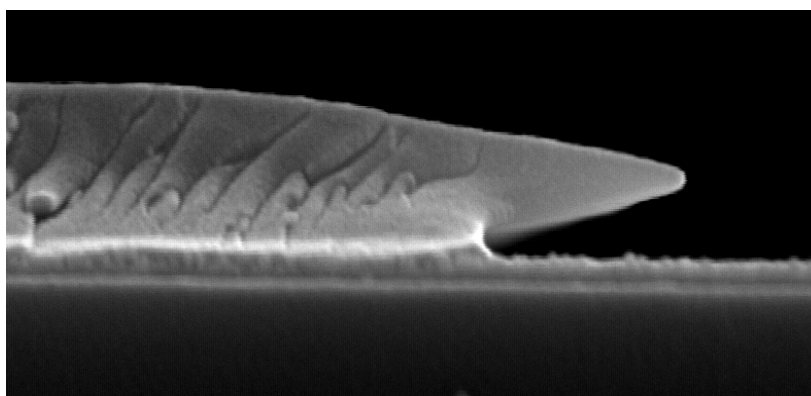


図 5-6 高温ベーキング処理後にオーバーハング作成

5.2.2 水晶エッチング後の Au-Cr 薄膜除去

水晶エッチング後には、水晶の+X と-X 軸方向へのエッチングにより図 5-7 のように Au-Cr 薄膜が迫り出したように残片として残ってしまう（図 5-1 の(8)）。この状態で次工程の電極用薄膜をスパッタすると、この残片が原因で着膜不良や薄膜剥離等の問題が発生する。したがって、電極用薄膜をスパッタする前にこれらの薄膜をエッチング除去する必要がある。この工程が図 5-1 の(9)に該当する。

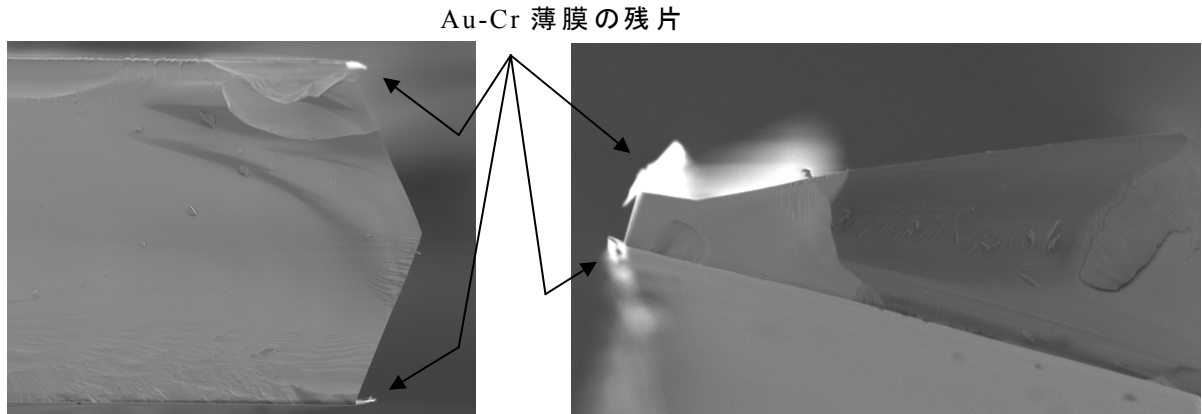


図 5-7 水晶のオーバーエッチングによる Au-Cr 薄膜の残片

5.2.3 Cr-Au-Cr 3 層薄膜と電極パターン形成方法

電極用薄膜は水晶エッチング用薄膜と同様に Au-Cr の 2 層薄膜で構成する。この 2 層薄膜でリフトオフを行うと図 5-8 のようになる。この状態で基本的には電極が分離されて完成となるのだが、分離部のギャップが 1~2 μm と非常に小さく電極ショート危険性を抱えていることは否めない。

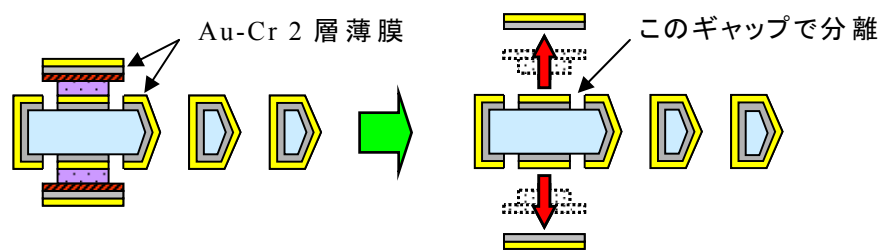


図 5-8 Au-Cr 2 層薄膜によるリフトオフプロセス

そこで、リフトオフレジスト下部の Au-Cr 薄膜をエッチング除去する方法を検討した。比較的単純なプロセスで、Au-Cr にさらに Cr を加えた 3 層構造とし、その Cr 薄膜をマスクとしてレジスト下部の Au-Cr 薄膜をエッチング除去する。

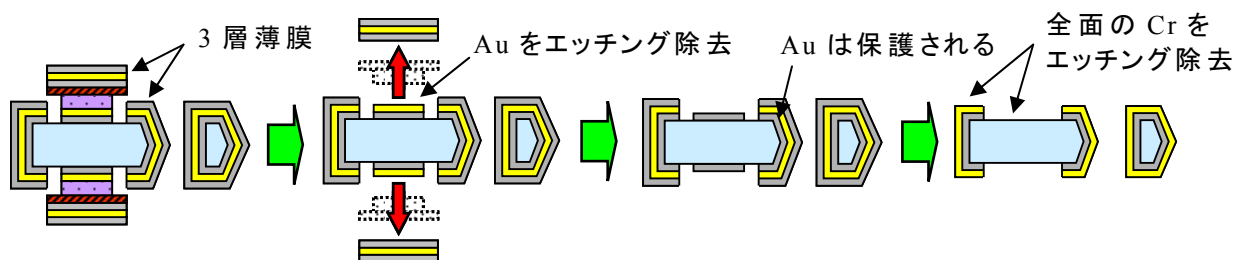


図 5-9 Cr-Au-Cr 3 層薄膜によるリフトオフプロセス

5.2.4 側面電極分離による静電容量作成

リフトオフプロセスで不要な薄膜は除去されて図 5-11 センサ写真のように電極が形成されたように見えるが、これらの電極は水晶エッチング側壁面の薄膜電極で全てつながった状態になっている。リフトオフは水晶ウェハ表面の電極を処理できるが、側面の電極薄膜は全て残っているのである。この側面電極を分離しないと静電容量が分離形成できないことになる。側面電極を局部的に取り除く方法としては、側面電極を局部的にエッチング除去するか、側面電極の一部を機械的に破断除去する方法が考えられる。このような最終段階で薄膜エッチング処理を取り入れるには更に新たなプロセス開発が必要になるので、実験試作という位置付けから後者の機械的な破断で分離する方法を検討した。

機械的に側面の一部を破断除去すればよいので、破断部の形状にこだわる必要はないが、破断しやすいように側面の一部にできるだけ薄い部分を設けるのがよい。しかし、図 5-10 のように、薄いだけではなく破断部の表面電極もリフトオフで除去しておく必要がある。

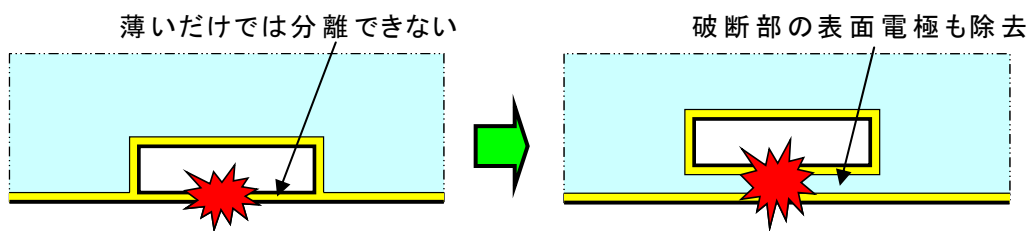


図 5-10 電極分離のための側面破断部

図 5-11 に実際の破断部の写真を示す。図中 a, b, c の 3ヶ所の破断で共通電極と C_L および C_R の 3つの電極に分離される。

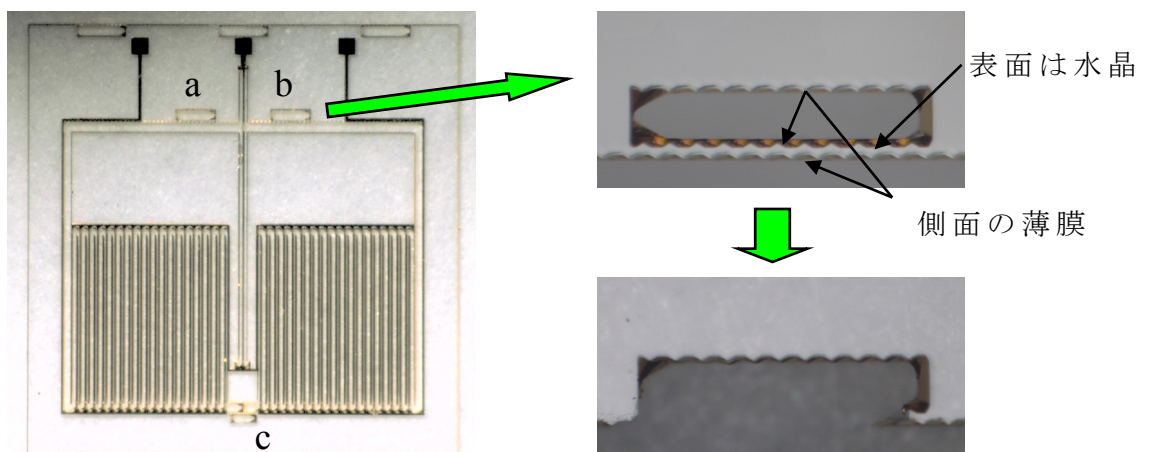


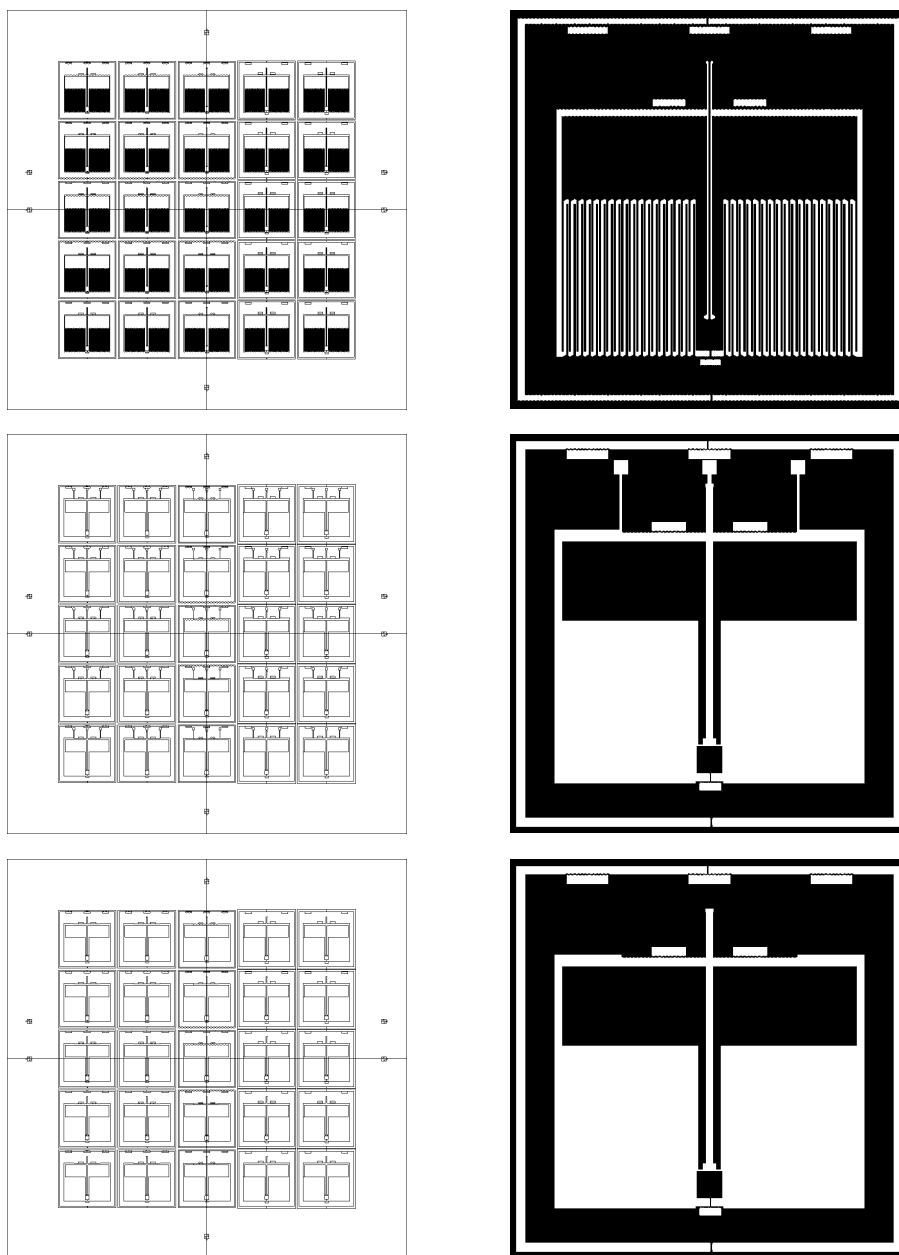
図 5-11 側面破断部の写真

5.3 製作プロセスの詳細

ここでは、傾斜角センサ（水晶センサチップ）製作プロセスの詳細について述べる。本センサは形状加工プロセスから電極形成および電極分離プロセスまで多くのプロセスを経て製作されるため、各プロセス後のウェハおよび薄膜の加工形状について図を用いて詳細に述べる。

5.3.1 レジスト露光用フォトマスクの製作

作成したマスクは以下の3種類である。左側がマスク全体の輪郭図で、右側がその中のセンサ1個についての詳細図であり、黒い部分が露光時の遮光部分で白い部分が透過部分、つまりレジストが露光される部分である。



上から (a)水晶エッチング用 (b)リフトオフ表面用 (c)リフトオフ裏面用
図 5-12 レジスト露光用フォトマスク

図 5-12(a)の水晶エッチング用マスクでは、白い部分の Au-Cr 薄膜がエッチングされて、黒い部分の Au-Cr 薄膜が水晶エッチング用マスクとして残る。そして、白い部分の水晶がエッチングされて黒い部分がセンサ形状として残ることになる。

一方、図 5-12(b)(c)のリフトオフ用マスクでは、スパッタ時に白い部分に薄膜が付着し、黒い部分に付着した薄膜はリフトオフにより除去されるので、水晶エッチング用マスクに比べると白と黒の部分の機能が逆になっている。これらの詳細については次項で述べる。

5.3.2 水晶エッチング用 Au-Cr 薄膜パターンニングプロセス

(1) ウェハ洗浄

スパッタ前のウェハ洗浄は次の工程により行う。硫酸 (H_2SO_4) と過酸化水素水 (H_2O_2) 混合液の強力な酸化作用によりウェハ表面の異物を酸化除去し、Cr 薄膜の付着力を向上させるための重要な工程である。

- ▶ H_2O_2 (200ml)に H_2SO_4 (600ml)を加え硫酸加水液を作成
- ▶ ウェハ入りバスケットを硫酸加水液 ($110 \pm 5^\circ\text{C} \times 15$ 分) に浸して洗浄
- ▶ 水洗と N_2 ガスによる水切り

(2) Cr-Au スパッタリング

ウェハ洗浄後、速やかにスパッタ作業に入る。

- ▶ ウェハをスパッタ用基板ホルダにセット (図 5-13)
 - ▶ スパッタ装置 (SPP430H) の自公転治具に取り付け (同図)
 - ▶ 真空引き後に次の条件でスパッタ (図 5-14)
- Ar 流量 : 50 SCCM
ガス圧 : 2 mTorr
パワーと時間 : Cr 600W×4 分 (300 Å)、Au 400W×15 分 (1500 Å)



図 5-13 基板ホルダとスパッタ装置の自公転治具

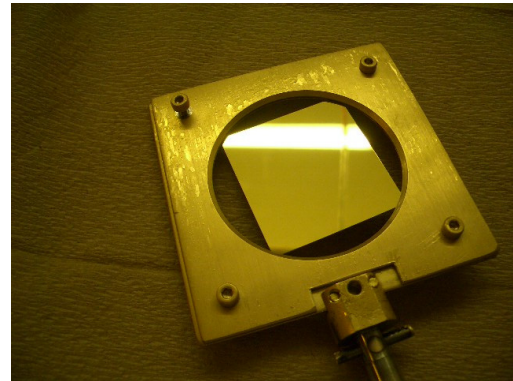


図 5-14 スパッタ装置 SPP430H とスパッタ後のウェハ

(3)水晶エッチング用 Cr-Au 薄膜パターニング

スパッタにより Cr-Au 薄膜が形成されたウェハは次の水晶エッチング用 Au-Cr 薄膜パターニングの工程に入る。

- ▶ レジストのコーティング
 - レジスト液 : S1808+EBR-10A (3:1)
 - コーティング : 2000rpm×10 秒+4000rpm×20 秒
 - プリベーク : 表 90℃×10 分、裏 90℃×15 分
- ▶ 水晶エッチング用マスクを用いた露光 (図 5-15) および現像 (図 5-16)
 - 露光 : 両面露光機 BPA-200 で 8 秒露光
 - 現像 : 現像 1 分
 - ポストベーク : 120℃×30 分
- ▶ Au-Cr 薄膜のエッチング (図 5-17~5-18)
 - Au エッチング : Au エッチング液 (H₂O:860ml+I:50g+KI:200g) で 17 秒
 - Cr エッチング : Cr エッチング液 ((NH₄)₂Ce(NO₃)₆:165g+HClO₄:430g+H₂O→1000ml) で 10 秒
 - レジスト除去 : リムーバ 1112A で 80℃×1 分



図 5-15 両面露光機 BPA-200 と露光時の様子

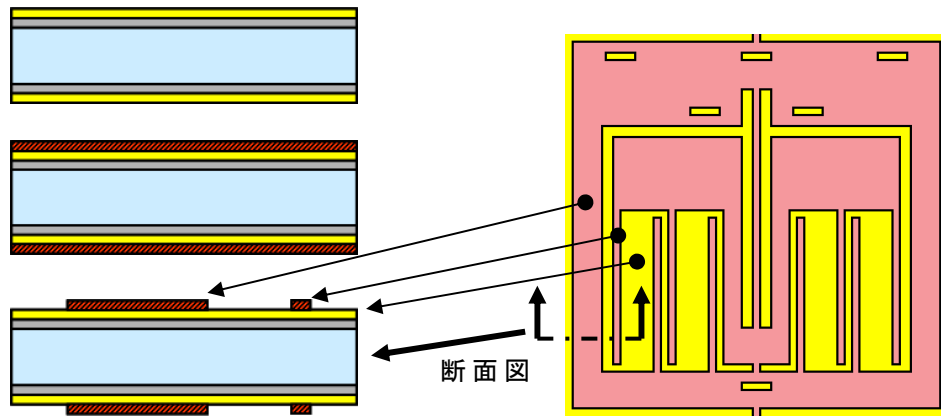


図 5-16 スパッタ・レジストコート・露光現像

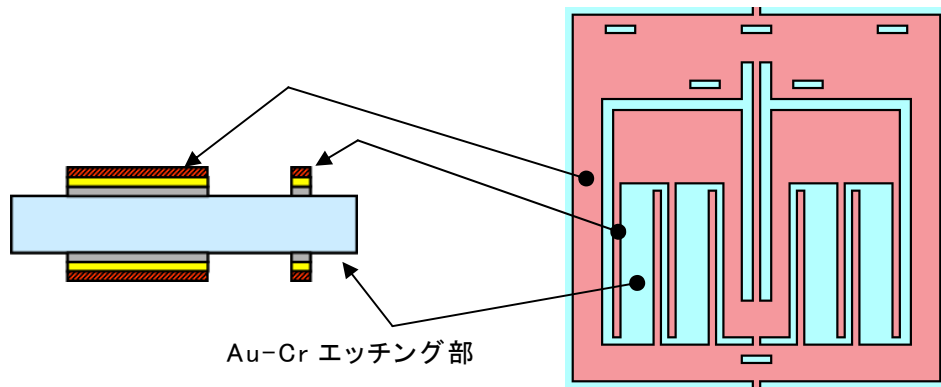
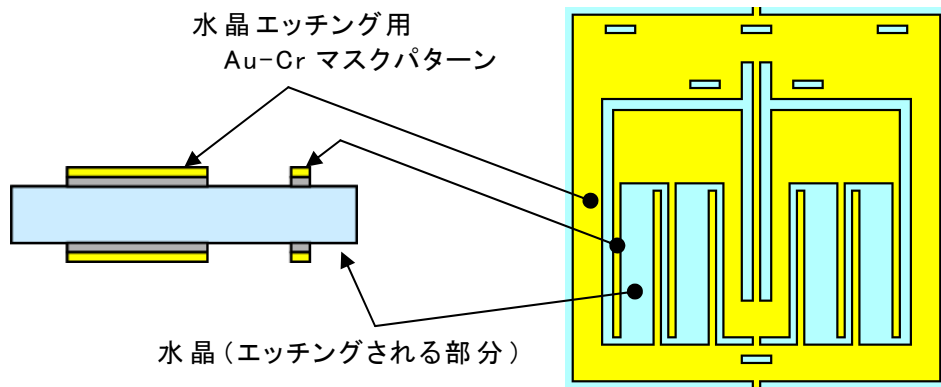


図 5-17 Au-Cr 薄膜エッチング



(水晶エッチング用マスクパターン完成)
図 5-18 Au-Cr 薄膜エッチング後レジスト除去

5.3.3 電極パターン形成用リフトオフプロセス

(1)リフトオフ用レジストパターン形成

水晶エッチング用の Au-Cr パターンが完成した後、水晶をエッチングする前に電極作成用のリフトオフ用レジストパターンを作成する。リフトオフ用レジストパターンが作成できたら、この状態で次工程の水晶エッチングプロセスに移る。水晶エッチング後に Au-Cr 薄膜エッチング除去、Cr-Au-Cr 薄膜スパッタの工程を経てリフトオフ作業に入るので、それまでレジストパターンを傷めないように慎重に扱う必要がある。

- ▶ 2層レジストのコーティング (図 5-19 上段図)
 - LOL2000 : レジスト膜を厚くするため 2 回塗布
表面 3000rpm×30 秒、プリベーク 150°C×5 分
同裏面→同表面→最後の裏面コート後 150°C×30 分
 - S1808 : シンナー EBR-10A は使用しない
表裏面共に 4000 rpm×20 秒、プリベーク 90°C×15 分
- ▶ リフトオフ用パターンの露光現像 (図 5-19 中段図)
 - 露光 : 両面露光機 BPA-200 で 10 秒露光
 - 現像 : 現像 45 秒
 - ポストベーク : 150°C×30 分 ← S1808 の水晶エッチング液耐性向上
- ▶ リフトオフ用オーバーハングの作成 (図 5-19 下段図)
 - 現像処理 : 現像 45 秒 ← この処理でオーバーハングが形成される

※ 太字下線付き がオーバーハングを作るための重要な工程

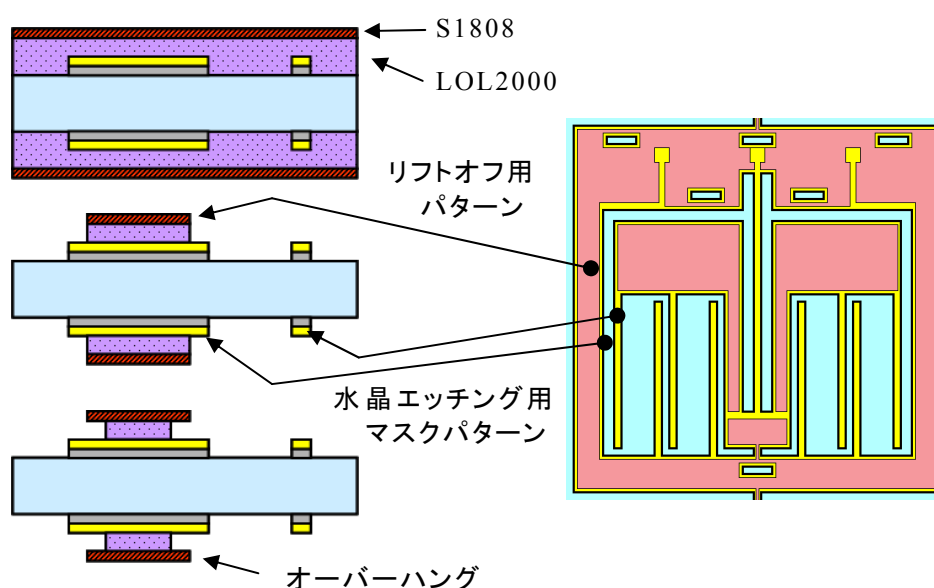


図 5-19 2 層コート・露光現像・オーバーハング作成

(2)水晶エッチング

リフトオフ用レジストパターンが形成された図 5-19 下段図の状態です。ウェハを水晶エッチング液に浸して水晶をエッチングする。これによりリフトオフ用レジストパターンが着いている状態で図 5-20 のようにセンサ形状ができあがる。

▶ 水晶エッチング

エッチング液：重フッ化アンモニウム (NH_4HF_2) 飽和水溶液

エッチング条件： $85 \pm 2^\circ\text{C} \times 65$ 分

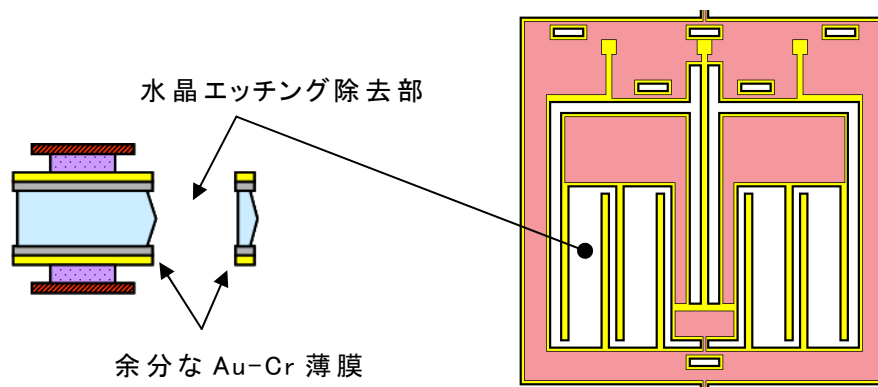


図 5-20 水晶エッチング後の形状

(3)Au-Cr 薄膜エッチング除去

水晶のオーバーエッチングによりはみ出た Au-Cr 薄膜を除去するために、リフトオフ用レジストをマスクに Au-Cr 薄膜をエッチングする。これにより、図 5-21 のように Au-Cr 薄膜が無くなり水晶が現れる。この水晶部分に静電容量用の電極を形成していくことになる。

▶ Au-Cr 薄膜エッチング除去

Au エッチング 20 秒、Cr エッチング 15 秒

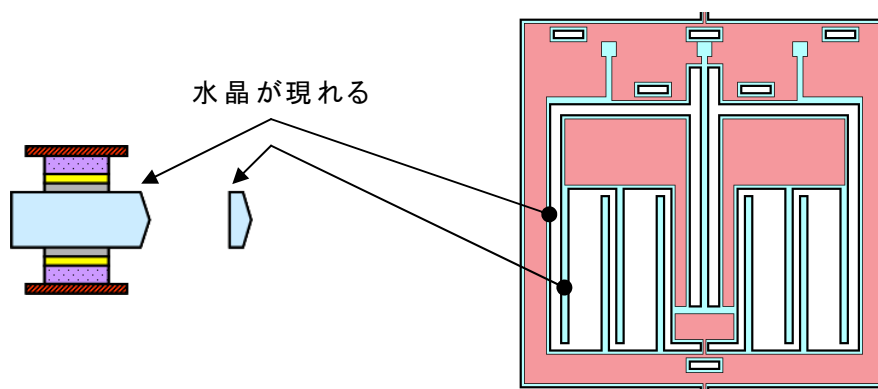


図 5-21 Au-Cr 薄膜のエッチング除去

(4)電極用 Cr-Au-Cr 薄膜スパッタ

電極用に使用する Cr-Au 薄膜に更に Cr 薄膜を加えた 3 層薄膜をスパッタにより着膜する。1 層目の Cr は「つなぎ」の役目なので薄くてよいが、3 層目の Cr は Au エッチング時のマスクとして使用するため厚い膜が必要になる。

▶ Cr-Au-Cr 薄膜のスパッタ

Cr スパッタ : 600W×6 分 (500 Å)

Au スパッタ : 400W×20 分 (2000 Å)

Cr スパッタ : 600W×30 分 (2500 Å)

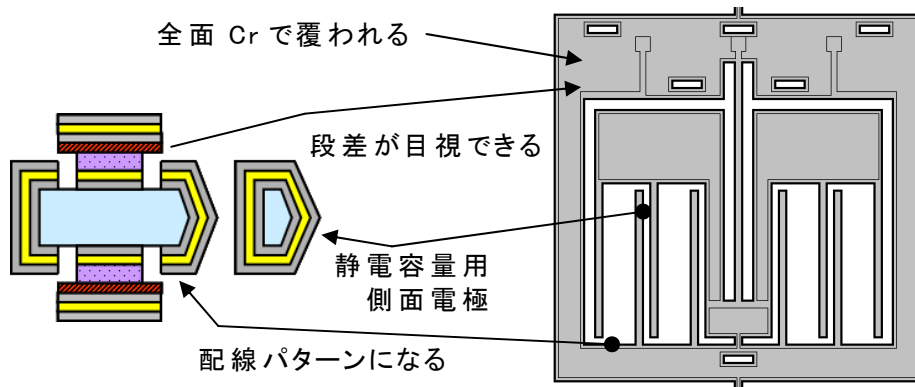


図 5-22 Cr-Au-Cr 3 層薄膜のスパッタ

(5)リフトオフ

リフトオフ用レジストを溶解してレジストと Cr-Au-Cr 薄膜を除去する。レジストの面積が大きいいため、レジスト溶解除去のために長い時間が必要になるが、下の Au 薄膜が現れるかどうかで容易に確認できる。

▶ リフトオフによる Cr-Au-Cr 薄膜の除去

レジスト除去液 : リムーバ 1112A

条件 : 80°C×約 1 時間

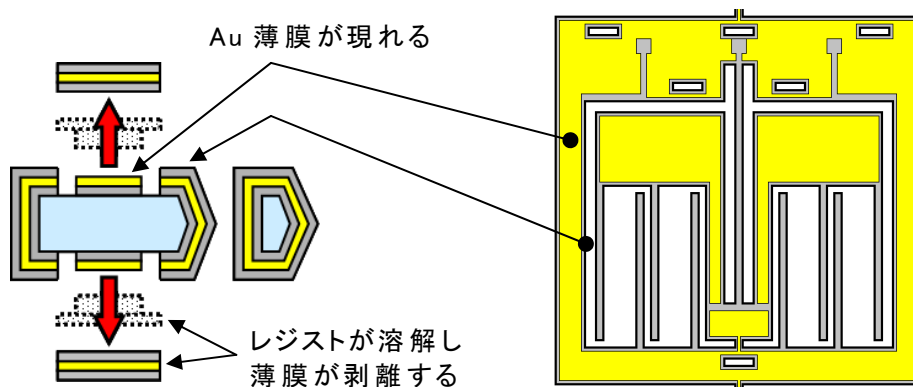


図 5-23 リフトオフによる薄膜剥離

(6)電極形成のための Au-Cr エッチング除去

リフトオフにより現れた Au 薄膜と Cr 薄膜をエッチングで除去する。

➤ Au-Cr 薄膜の除去

Au エッチング 17 秒、Cr エッチング 10 秒

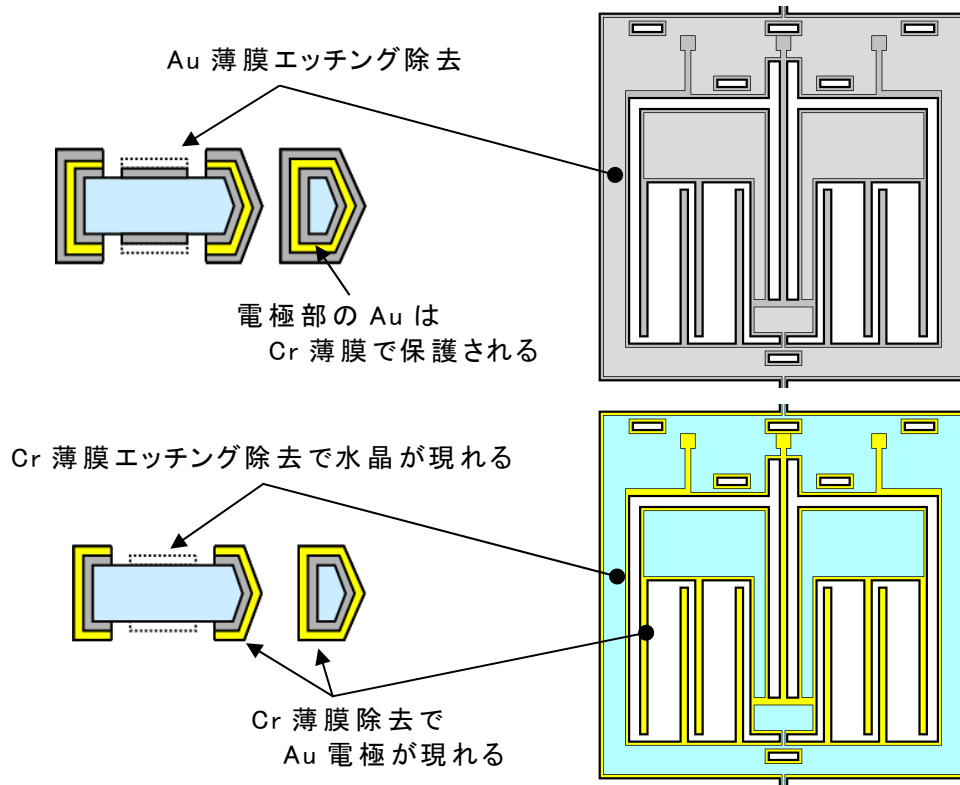


図 5-24 Au-Cr 薄膜エッチング除去

以上のプロセスで水晶センサチップが完成する。この後に側面電極分離のための作業が残っているが、センサチップ製作の基本プロセスは以上で終了となる。完成したセンサチップの写真を図 5-25 に示す。

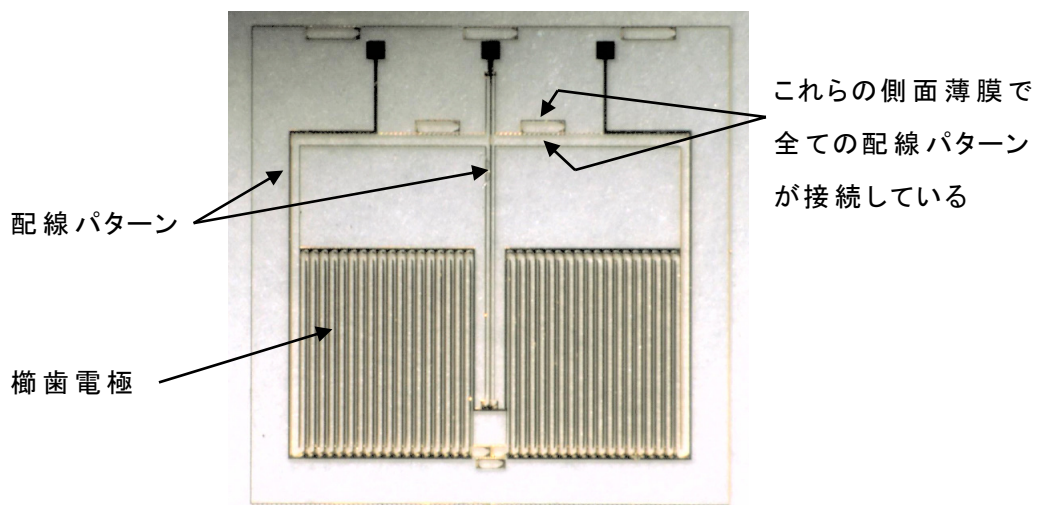


図 5-25 水晶センサチップ

5.3.4 静電容量作成のための側面電極分離プロセス

完成した水晶センサチップはリフトオフプロセスにより電極が形成されているが、水晶のエッチングによりできた側壁面の薄膜は全てつながっていて、電気的には一つの電極の状態であり、個別の静電容量電極にはなっていない。したがって、側面電極分離用に設計してある3ヶ所の破断部を針状の治具で破断することで、共通電極、 C_L と C_R の電極に分離する。

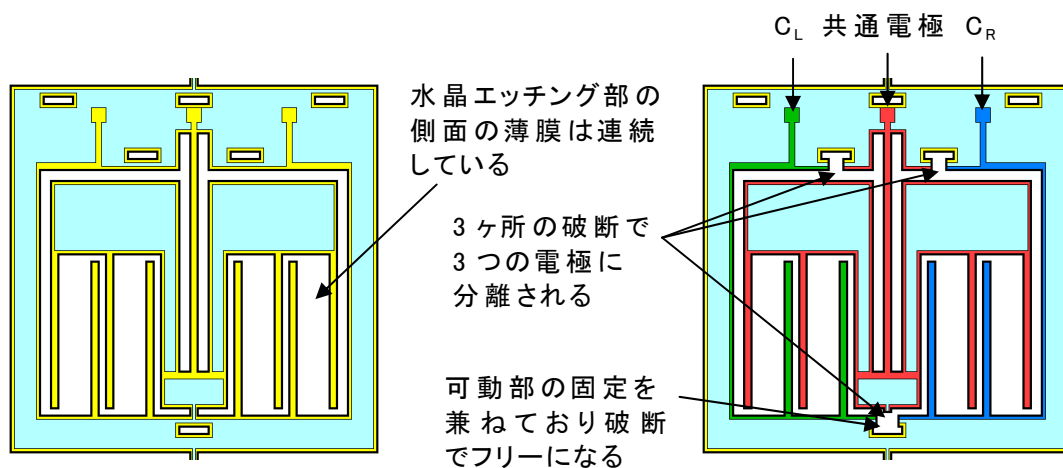


図 5-26 水晶センサチップの電極分離

さらに、水晶センサチップをパッケージに実装するときには、パッケージの配線パターンとセンサチップの外周薄膜が接触して電氣的にショートしてしまうことが予想される。そのため、センサチップ外周も3ヶ所で破断分離できるように設計してある。

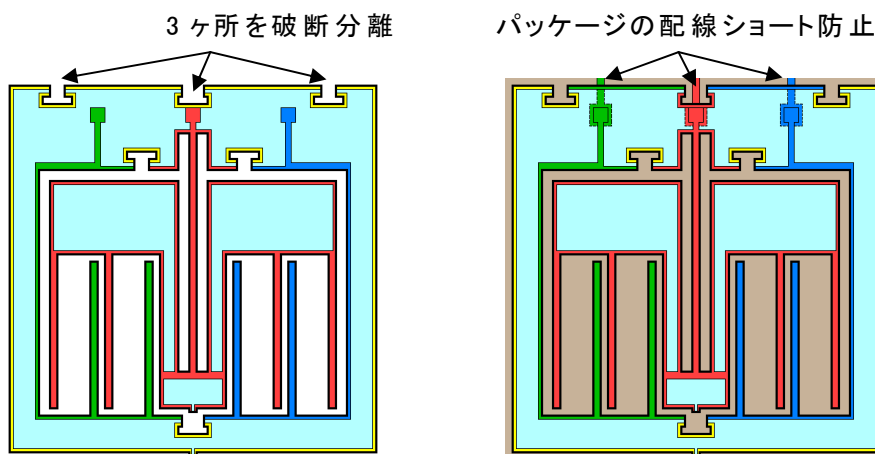


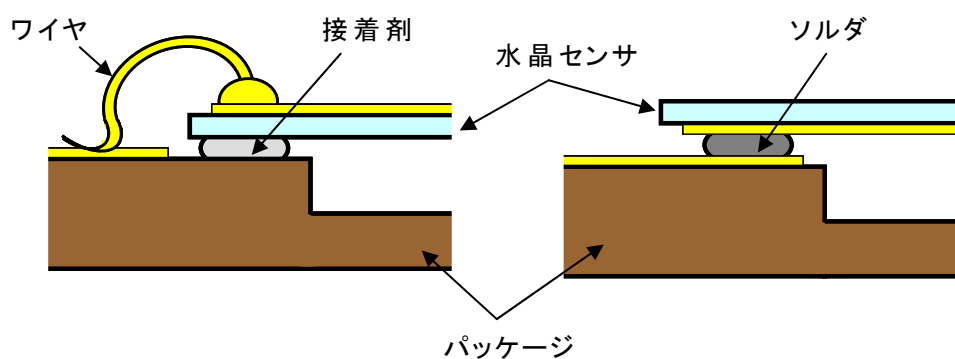
図 5-27 水晶センサチップの外周電極分離

5.4 傾斜角センサのパッケージング

製作した傾斜角センサは水晶が剥き出しの状態であり、ハンドリングや電気的な接続など実験評価のためにはパッケージに実装する必要がある。本節では実装方法の検討をはじめ、試作したパッケージおよびそのパッケージへの実装方法について述べる。

5.4.1 実装方法の検討

実装のためにセンサには Au パッド (Au-Cr スパッタ薄膜) が設けられており、パッケージ側にも Au パッドが設けられている構成において、具体的な実装方法としては次の形態が考えられる。



(a) 接着とボンディング

(b) Au-Au パッドの接合

図 5-28 傾斜角センサの実装案

(1) 常温接着と導電接続

図 5-28 (a)に示すように接着剤を用いてパッケージに固定し、その後ワイヤボンディングか導電ペーストで電気的な接続を行う。または、導電性接着剤で直接 Au パッド同士を接着する。長所は常温または数十℃程度の低温で接着固定できることである。しかし、有機材料での接着であることから信頼性に難があることと、ワイヤボンディングなどの配線による浮遊容量の問題も想定される。これは、あくまでも簡易実験レベルで用いられるものであり、詳細評価のためには信頼性の高い方法に切り替えていかなければならない方式といえる。

(2) ソフトソルダ

融点が比較的低温のソルダである Pb, Sn, In 系合金を用いて図 5-28 (b)のようにセンサ固定と電気接続を同時に行う方法である。合金としては PCB 上への電気部品実装に使われる PbSn ハンダが最もよく知られており、融点が低いこととあわせて合金が比較的柔らかいので残留応力も少ないといわれている。しかし、これらのソフトソルダのほとんどには Pb が含まれており、昨今の Pb フリーの流れに逆行する選択肢になってしまうことは否めない。そして、最も重要な問題としては、これらのソルダを Au パッドに使用すると、パッドの Au がソルダに拡散し

(Au がソルダに溶けて) パッド上の Au が消失して接合不良が生じる「金喰われ」と呼ばれる現象が発生することである。

(3) ハードソルダ

Au 系合金のソルダで、電気伝導・熱伝導が良好で化学的にも安定しており、半導体や MEMS 分野で利用されることが多い。Si, Ge, Sn との合金があり、その配合比率により融点が異なる。その中でも固相温度と液相温度が同じ共晶合金の配合のものが扱いやすい。代表的な Au 系共晶合金ソルダ (共晶ハンダ) を表に示す。

表 5-1 Au 系共晶合金ソルダ

名称	組成	融点
AuSi3.15	Si 3.15%	363 °C
AuGe12	Ge 12%	356 °C
AuSn20	Sn 21%	280 °C
AuSn90	Sn 90%	217 °C

[住友金属鉱山カタログより]

AuSi はその組成から Si チップを実装する場合に多用され、AuGe とともに融点が高いという特徴がある。一方で、Au パッド同士の接合には AuSn が用いられることが多く、融点が比較的低いことから扱いやすいという利点もある。

以上の検討結果から、本センサの実装接合にはハードソルダが良く、その中でも融点が低い AuSn90 を用いて試作することにした。

5.4.2 実装用パッケージの設計試作

IC チップや MEMS チップを実装するための代表的なパッケージングとしてはセラミックパッケージとプラスチックパッケージが考えられる。プラスチックパッケージは低価格という利点があるが、製造ラインが大規模になるため大量の量産を前提としたパッケージング方法であり、湿気やガスが透過することからチップの保護について別途対策をとる必要がある。一方のセラミックパッケージは低線膨張係数・高熱伝導性・低誘電率など優れた特性の他に、シーリング特性にも優れている。しかし、プラスチックパッケージに比べると高価という問題があるが、比較的少量でも製造できるため試作品にも多用される。

本センサ用の試作パッケージにもセラミックパッケージを選択し、試作を容易に進めるためにメーカーの標準パッケージをベースに設計試作した。設計のベースにしたパッケージの仕様を表 5-2 に示す。C-QFN (Ceramic Quad Flat Non-Leaded Package) と呼ばれるリードレスパッケージである。

表 5-2 標準パッケージ仕様

メーカー	型番	材料コード	ピン数	外形寸法	層数
京セラ	KD-DA7069	A440	48	14.22SQ	3

このメーカー標準パッケージに、水晶センサを配置するための段差と配線パターンを引くために厚さ 0.1mm の層を追加して 4 層構造で設計した。設計図面とセンサ実装部の拡大図を図 5-29 に示す。

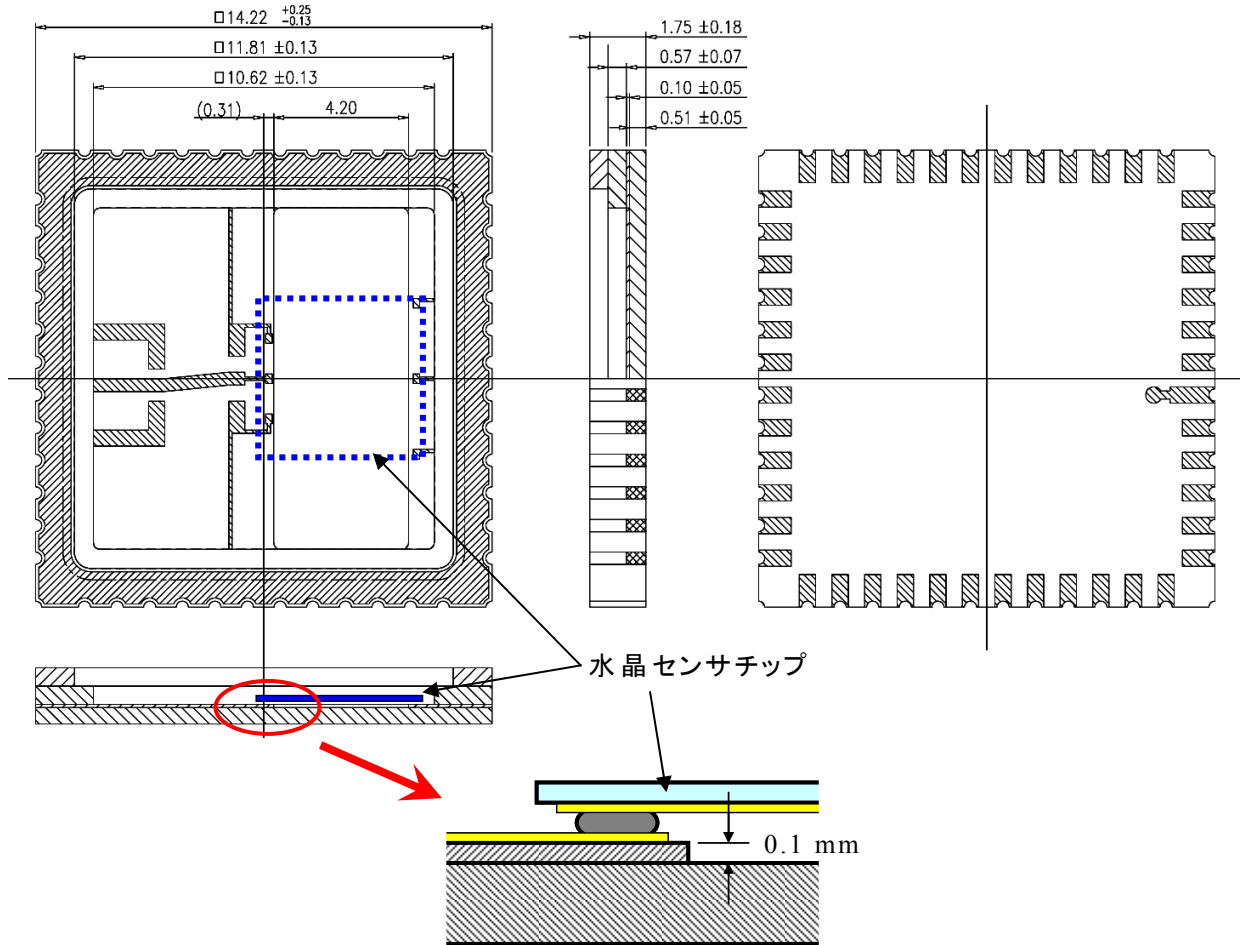


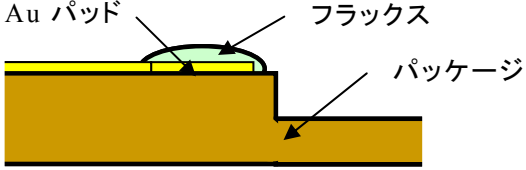
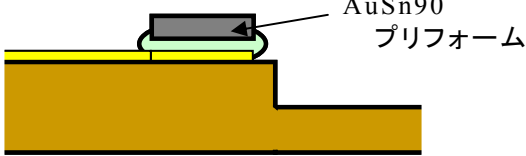
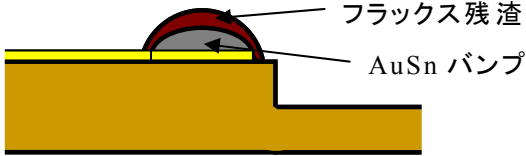
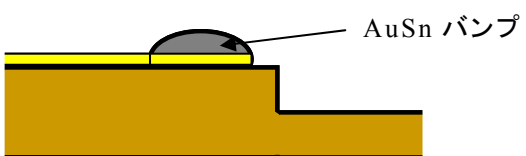
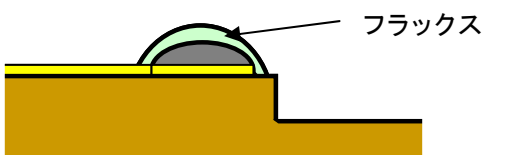
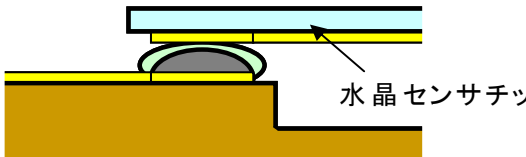
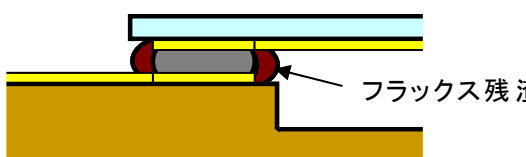
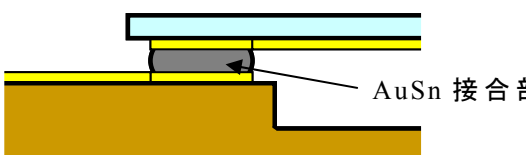
図 5-29 セラミックパッケージ形状寸法

5.4.3 実装プロセス

実際の実装工程を表 5-3 に述べる。

最も注意すべき工程はリフロー時の温度プロファイル管理である。AuSn90 のリフロー温度は 230～240℃が推奨されているが、その前後の温度勾配については各デバイスごとに最適条件を探す必要がある。この温度勾配は接合強度に影響するだけでなく、接合部の残留応力にも大きく影響するので重要である。本工程では接合温度とその時間を管理するにとどまってしまったが、将来的には温度プロファイルの条件を決めるための実験を行う必要があると考える。

表 5-3 実装プロセスフロー

<p>(a)フラックス塗布 パッケージの패드部分にフラックスを塗布する。</p>	
<p>(b) AuSn フィルム配置 AuSn90 のプリフォームフィルムをパッケージの패드部に塗布したフラックス上に置く。</p>	
<p>(c)リフロー 240℃×30sec の条件でリフローする。AuSn プリフォームが溶けて패드上に AuSn バンプが形成される</p>	
<p>(d)フラックス洗浄除去 リフローにより役目を終えたフラックスの残渣を洗浄して除去する。</p>	
<p>(e)フラックス塗布 パッケージに形成された AuSn バンプ部にフラックスを塗布する。</p>	
<p>(f)センサ配置 パッケージの AuSn バンプ部にセンサの패드を位置合わせして置く。</p>	
<p>(g)リフロー 同じく 240℃×30sec の条件でリフローすることでセンサがパッケージに接合される。</p>	
<p>(h)フラックス洗浄除去 最後にフラックスの残渣を洗浄して除去する。</p>	

以上の工程でパッケージされたセンサの写真を図 5-30 に示す。共通電極と左右の静電容量の合計 3 つのパッドで接合されている。そして、側面電極のショートを防ぐための電極パターン分離部も観察することができる。

また、その後実験評価のためにダイオードを実装してガラスカバーを取り付けたものが図 5-31 である。

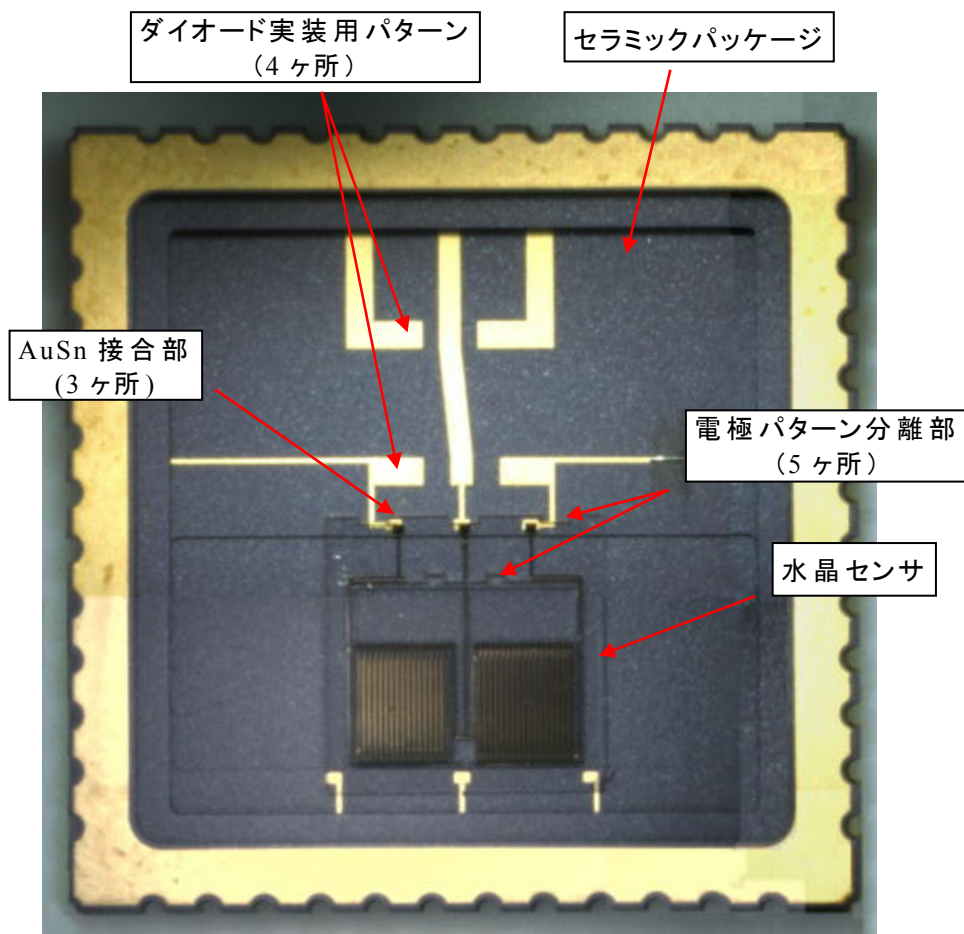


図 5-30 パッケージに実装されたセンサチップ

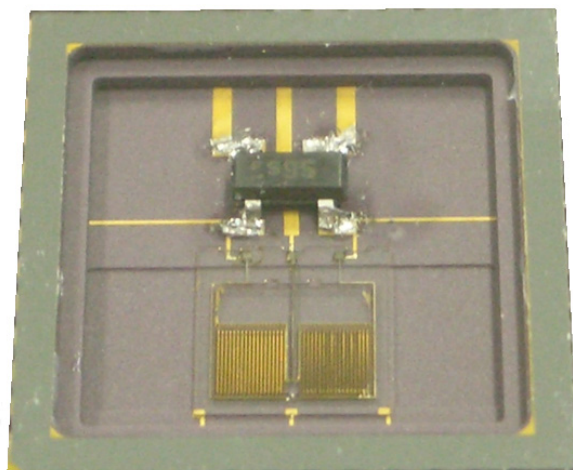


図 5-31 ダイオード実装例

5.5 まとめ

本章では、水晶ウェハの加工から電極作成までの水晶センサチップ製作プロセス、そして完成したセンサチップのパッケージングのプロセスまでの全工程について述べた。

水晶センサチップの製造プロセスでは、水晶の微細エッチング加工に加えて電極形成のためのリフトオフプロセスの開発も行った。これらのプロセス技術は今後の新たな水晶デバイスの研究および開発においてその応用が期待され、デバイスごとの要求に合わせて検討および改良されていくものと考ええる。

一方で、水晶センサチップのパッケージングにおいては、実験評価のためのパッケージングという位置付けで実装を行ったので、細部にわたる検討評価には至っていない。一般的にパッケージング技術は、それ自体が非常に高度な技術分野を形成しており、奥の深い研究対象でもある。したがって、今後の研究課題として以下のことを明らかにしていく必要があると考える。

(1)接合強度

ソルダ材料の選択と温度プロファイルの定量化をもとに接合強度を定量的に測定評価し、再現性のよい接合条件を明確にする。

(2)フラックスレス化

フラックスは残渣を洗浄除去しなければいけないという問題の他に、高温時にガス化してセンサに付着してしまい、それが後々のセンサ特性に影響を及ぼす原因となる。フラックスレス化の技術は高いハードルになるが多くの波及効果が見込まれる研究になると考える。

(3)残留応力

センサとパッケージ材の線膨張係数の違いにより生じる残留応力は避けて通れない重要な問題である^[20]。実装方法およびセンサチップの構造検討を含めて実験検討を進めていく必要がある大きな課題と考える。

(4)低浮遊容量設計

本センサでは非常に微小な静電容量を扱うことになるので、センサの周辺とくにパッケージには低浮遊容量(低寄生容量)の設計が要求される。将来的に、パッケージに IC が実装されるようになると重要な設計課題になってくると考える。

以上のようにパッケージングに関しては多くの重要な課題が残されており、センサの実験データの積み上げと平行して、パッケージングの課題を明らかにしクリアしていくことが期待される。

第 6 章 傾斜角センサの評価

水晶加工プロセスで製作した水晶センサをセラミックパッケージにパッケージングし、傾斜角センサとして評価が可能な構成まで製作できたので、ここでは基本的な特性である傾斜角測定の評価実験を行う。

本センサのような高分解能センサを評価するための測定環境は新たに構築する必要がある。傾斜角を高分解能で測定するための測定装置や、その測定方法については、傾斜角という物理量の性格からその測定方法は限られてくる。

また、センサの信号は静電容量であるが、角度分解能 0.0001° を静電容量の値に換算すると $3\text{pF} \times 10^{-6}$ という極めて微小な値になる。このような微小な静電容量を安定に測定するためには、その実験方法も困難になることが予想され、おそらく試行錯誤を繰り返しながら実験ノウハウを蓄積していくことになると思われる。

本章では、はじめに評価実験を行うための評価システムについて述べる。期待するセンサ分解能である 0.0001° の角度で設定が可能な傾斜角校正装置、センサの静電容量を測定する測定装置、そしてセンサの静電容量を電圧などの電気信号に変換するための静電容量検出回路、また測定データをリアルタイムでデータ処理するためのコンピュータ測定システムなどについて記述する。

つぎに、それらの測定システムを用いて行った傾斜角センサの傾斜角測定評価実験の内容と結果について述べる。

最後にそれらの結果から本センサの現状について整理して今後の研究の方向性についてまとめたい。

6.1 評価システムの構築

パッケージングされた評価用傾斜角センサを測定評価するために構築した評価システムの詳細について述べる。傾斜角校正装置としては 0.0001° の分解能を評価できるように、専用の傾斜角発生ステージを設計製作した。また、センサの静電容量を電圧信号に変換するために評価用として試作した静電容量検出回路の概要についても述べる。

6.1.1 傾斜角校正装置の製作

一般的に、校正や測定を行う場合には高精度の基準器を用いて、校正対象機器と基準器の比較測定により誤差を測定する。したがって、傾斜角の場合も高精度の傾斜角測定器を準備する必要があるように思われる。しかし、傾斜角は「水平」からの傾きであるため、水平を高分解能で測定確認できる水準器があれば、傾きについては高精度傾斜角測定器ではなく別の方法で実現できる。

いま、剛性が高く、片端が回転可能な軸受で支えられていて、もう一方の端が回転軸を中心に上下に回転移動が可能で、その上下移動量を測定するマイクロメータを備えたステージを考える。

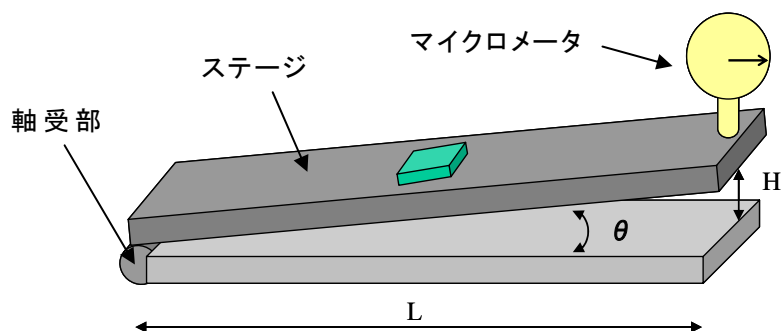


図 6-1 傾斜角校正装置の概念図

回転軸の軸受部に与圧型ボールベアリングなどのガタ（遊び）のないものを採用すれば、傾斜角の設定分解能は測定端のマイクロメータの分解能で決まることになる。たとえば、ステージの長さを $L=1\text{m}$ として、マイクロメータの測定分解能を $\Delta H=0.1\mu\text{m}$ と仮定すれば、傾斜角は $\tan^{-1}(0.1\mu\text{m}/1\text{m}) = 5^\circ \times 10^{-6} = 0.000005^\circ$ の分解能で設定できることがわかる。そして、この傾斜角の増減を繰り返して、傾斜角 0° を設定した時の水平度を高分解能水準器で反転測定すればこのステージの安定性と再現性を確認できることになる。(反転測定法については 1.1.1 傾斜角の測定を参照)

図 6-2 に実際の傾斜角校正装置の写真を示す。全体はセラミック製定盤の上に設置されている。構成としては、図 6-1 の概念図と同じく、精密軸受で支えられた傾斜ステージ、そのステージの高さを設定するための精密自動アクチュエータ、

そして高さ測定用のマイクロメータ、また水平を確認するための水準器が横に置かれている。

傾斜ステージの長さは 500mm であり、高さ測定用のマイクロメータは $0.1\mu\text{m}$ の測定分解能を有している。そして、高さ設定用の精密自動アクチュエータは 0.00002° の分解能で傾斜角を設定できるようにサブミクロンの動作が可能なものを使用している。

Z 軸の自動ステージも取り付けてあるので、二軸測定など他の用途にも使用できる。アクチュエータの運転制御用ドライバやマイクロメータは全てコンピュータに接続できるので、コンピュータ指令で運転ができる構成にもなっている。

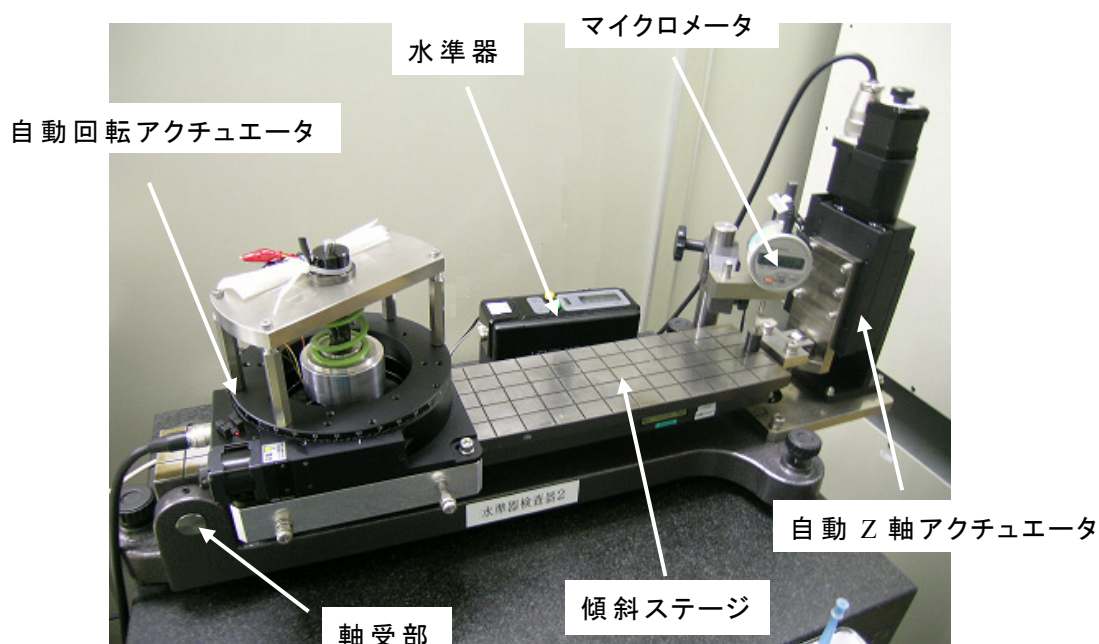


図 6-2 傾斜角校正装置の外観写真

センサをセットして実験を開始してからシステム全体の安定性や再現性を確認したところ、周囲温度変化（室温変化）の影響を受けている様子が見られたために、定盤を含むシステム一式を空調で温度管理されている恒温室に移動し再設置した。

6.1.2 評価用静電容量検出回路の試作

傾斜角校正装置にセンサをセットして測定を行うためには、センサの静電容量を電圧信号に変換する静電容量検出回路が必要になる。電圧信号であれば、電圧測定器（マルチメータ）を用いて測定ができ、コンピュータへのデータ取り込みも非常に容易である。

研究室内では微小静電容量を差動検出するための差動検出回路の研究が行われている^[21]。その回路方式を用いて傾斜角センサの評価用に検出回路を試作したので、その内容について以下に述べる。

(1) 回路方式

回路方式としてはダイオードを用いたダイオードブリッジ方式の差動容量検出回路である。図 6-3 に構成図を示す。静電容量検出部は 4 個のダイオードで形成されたブリッジであり、そのダイオードブリッジの中心に傾斜角センサ (C_L , C_R) を接続する。

動作原理を簡単に述べる。 V_{in} の交流電圧印加により C_L と C_R には充放電が繰り返される。 V_{in} が正のときは D_1 と D_3 を介して C_L と C_R に電流が流入し、 V_{in} が負のときは D_2 と D_4 を介して C_L と C_R から電流が流出する。そして、 C_L と C_R に差ができるると各々の充放電電流にも差が発生する。その電流の差は静電容量の差に比例しており、その差電流が抵抗を介して電圧として出力される構成になっていると理解してよい。

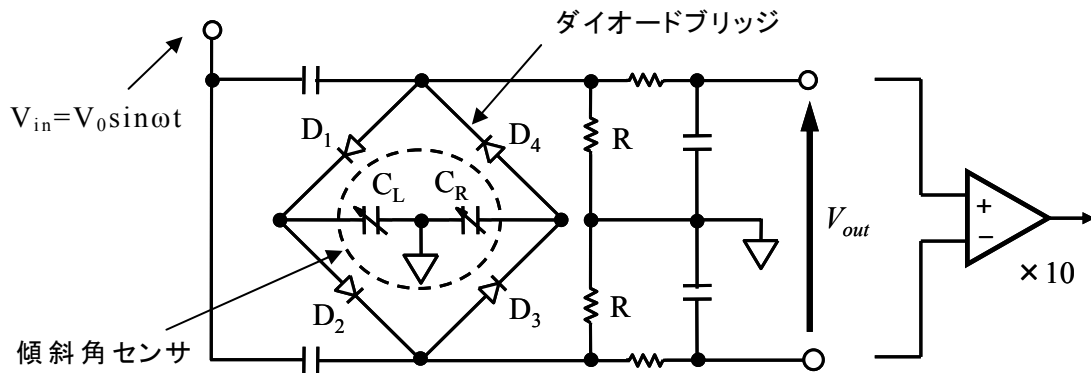


図 6-3 静電容量検出回路

(2) 出力電圧

静電容量 C_L , C_R と出力電圧 V_{out} の関係を式で表すと (6-1) 式のようなになる。 V_f はダイオードのフォワード電圧、 C_0 は傾斜角ゼロのときのセンサ初期容量 ($C_0 = C_L = C_R$) である。

$$V_{out} = \frac{2(V_0 - V_f) C_L - C_R}{1 + \frac{1}{4fC_0R} C_L + C_R} \dots\dots\dots (6-1)$$

試作した検出回路の出力電圧 V_{out} は傾斜角センサに 1° の傾斜角を与えたとき、つまり初期容量値 $C_0 \cong 3\text{pF}$ の 1% 変化で約 15~20mV になるように設計してある。そして、後段の Op アンプで 10 倍に増幅されるので、 1° の傾斜角で 150~200mV の出力になる。 0.0001° 換算で約 20 μV になるので、Op アンプの動作範囲としても問題ない電圧と判断できる。

6.1.3 評価用センサモジュール作成

パッケージされた傾斜センサと前項の検出回路をリード線で結線するような構成では安定に実験ができるとは考えられない。両方を一つの基板 (PCB) に実装して安定に使用できるようにモジュール化する必要がある。

モジュール作成用に約 50×50mm の PCB を作成した。ハンドメイド的な手作品なので、CAD 設計品とは異なり配線パターンも手書きパターンで作ってある。しかし、ワイヤ配線ではないので配線が動いたりするような不具合は発生しない。

この PCB にセンサパッケージと検出回路を実装したのが図 6-4 である。そして、傾斜ステージに安定して置くように、PCB 基板はアルミのベース板にネジ固定してある。

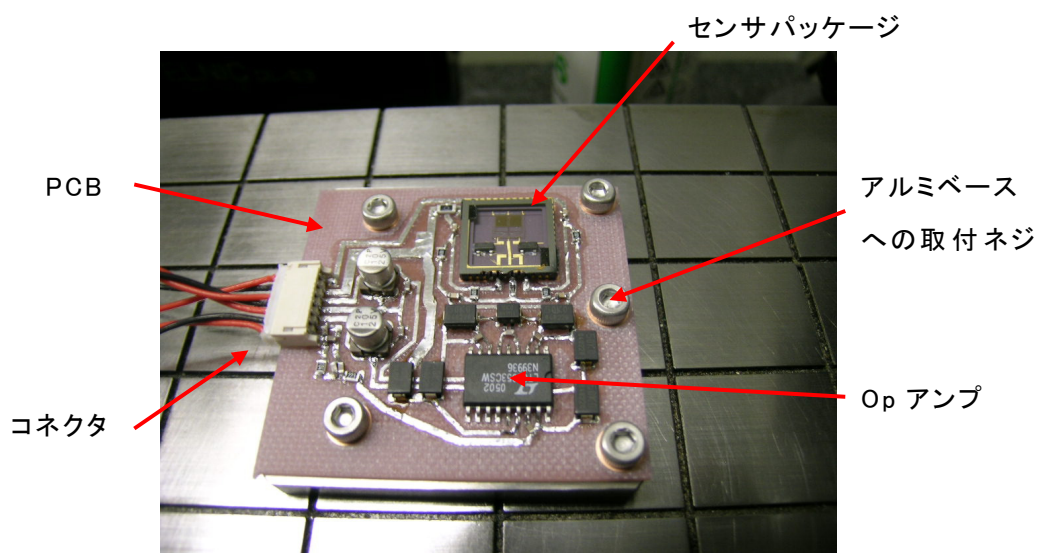


図 6-4 傾斜ステージ上のセンサモジュール

6.2 傾斜センサの評価

評価用サンプルと評価システムが構築できたので、実際の測定評価を行った。極めて微小な静電容量を扱う実験なので、安定なデータが得られるまでは紆余曲折があったが以下にその結果について述べる。

6.2.1 変位置測定による基本特性評価

静電容量検出回路を用いた測定に入る前に、図 5-30 の水晶デバイス単体について傾斜と変位の関係を測定した。静電容量測定器 (LCR メータ) を用いて C_L と C_R の値を測定するとともに、光学顕微鏡下で傾斜角を印加する前後の電極間隙を測定してその差から可動部の変位測定を行った。

変位を測定した部位は図 6-5 のようにバネ先端と同じ位置の電極間隙である。設計計算ではバネ先端の変位を計算により求めているので比較できる。光学顕微鏡で測定するにはあまりに変位量が小さいので、測定では 10° の傾斜を与えて数十回の測定を行い、その平均値の $1/10$ を 1° での変位置とした。

初期容量と変位の測定結果を表 6-1 に示す。

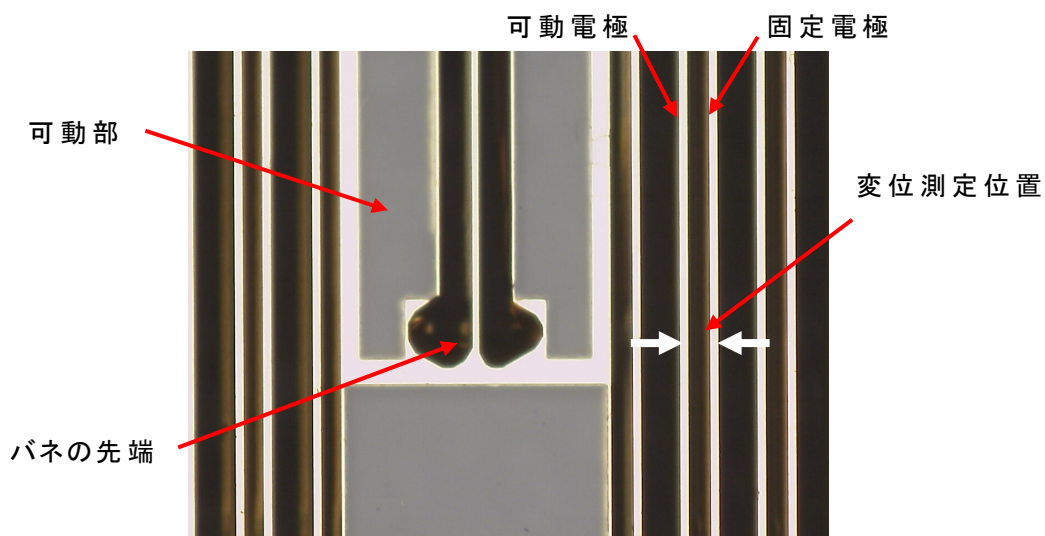


図 6-5 変位置測定位置

表 6-1 センサ単体の特性測定値

	C_L [pF]	C_R [pF]	変位置量 [$\mu\text{m}/1^\circ$]
設計値	3.1	3.1	0.18
測定値	3.29	3.38	0.23

静電容量は設計値より若干大きい値になっているが、パッケージの配線容量などの浮遊容量が存在するので大きめの値になってしまうのは避けられない。この程度の違いであれば、ほぼ設計通りの値と判断して問題ないと思われる。

一方で、変位量は設計値より約 28%大きな値になっている。バネの幅がオーバーエッチングで設計値より小さくなっていることが予想されるが、既に組み立てられた本センサのバネ幅を $1\mu\text{m}$ の分解能で測定するのは困難である。そこで、本センサが作られたウェハ上に同時に作られていた別のセンサを SEM で測定したところ幅は約 $8\mu\text{m}$ であった。本センサも同じく $8\mu\text{m}$ であると仮定して変位量を設計計算により求めると、設計値 $10\mu\text{m}$ に比べて変位量は 29%増加するという結果になり、測定結果と同等の値になることが確認できた。

このように、これらのセンサ単体の測定結果から、設計と製作プロセスの妥当性が確認されたと判断してよいと考える。

ところで、上記計算結果からわかるようにバネ幅が $1\mu\text{m}$ 変化すると変位量は 14~15%変わってしまうことになる。Au-Cr のエッチングや水晶のエッチングのときに、その日のエッチング液の状態により、前回のエッチング結果に比べてオーバーエッチング量で $\pm 1\mu\text{m}$ 程度のバラツキが生じるのはよく経験するところである。そして、このオーバーエッチング量 $\pm 1\mu\text{m}$ はパターン幅に換算すると 2 倍の $\pm 2\mu\text{m}$ に相当するので、上記のように設計値 $10\mu\text{m}$ に対して約 $8\mu\text{m}$ のバネ幅になってしまうのも不思議ではなく、現状では 20~30%の感度の違いは製作プロセスのバラツキで発生すると考えるべきである。

6.2.2 測定システムの動作確認評価

傾斜角校正装置を用いて測定している様子を図 6-6 に示す。

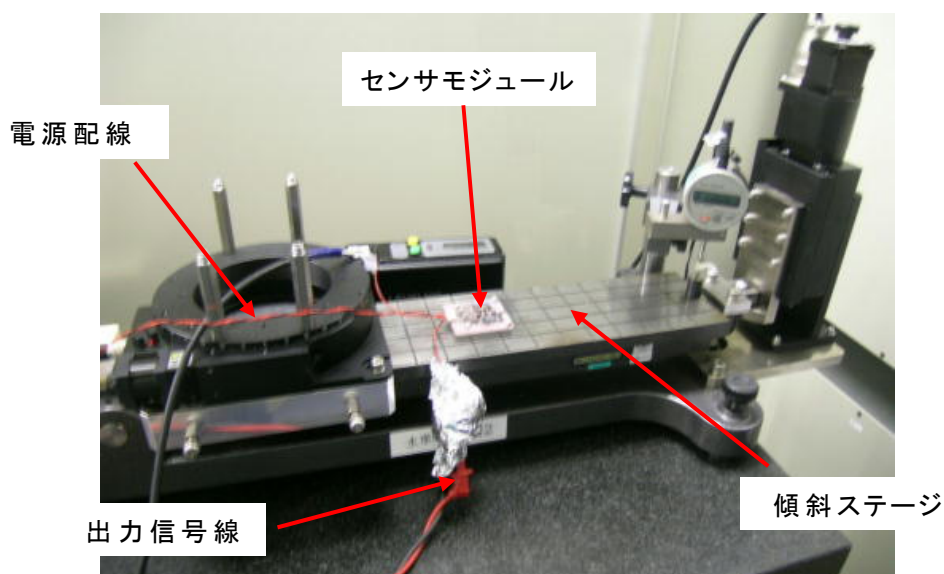


図 6-6 測定システム

図 6-6 のように、傾斜角校正装置にセンサモジュールをセットして、センサモジュールの出力信号は電圧測定器に接続してコンピュータでデータ採取を行うような測定システムになっている。

図 6-6 の写真ではセンサモジュールが目視できるが、このような状態では出力信号が安定しないので、実際の測定時には箱で覆って空調の風や人の移動による空気の乱れの影響を受けないようにしている。さらには、装置が設置されている恒温室への人の出入りによっても出力の安定性が影響を受けるため、測定時には入室者（測定者）が一人だけになり、出力信号が安定になるのを待ってから測定するという非常に気を使う測定を強いられた。

はじめに、傾斜角と出力電圧の関係を測定した。水準器を用いて水平を確認した後、傾斜角を $\pm 1^\circ$ の範囲で変化させ、そのときの出力電圧を測定記録した。その結果を図 6-7 に示す。

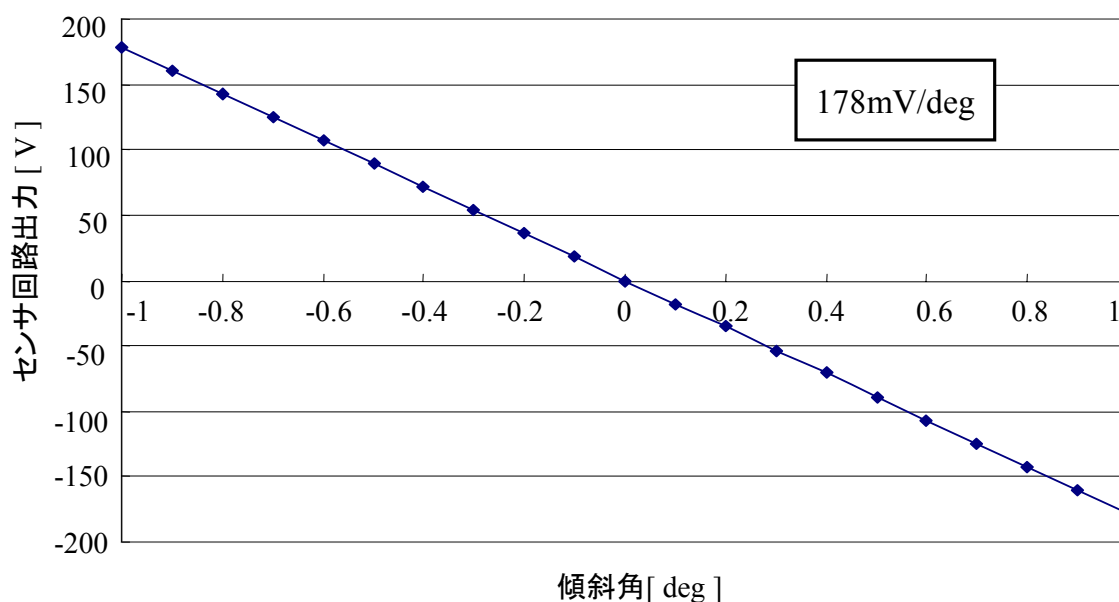


図 6-7 傾斜角－出力電圧

図 6-7 では、傾斜角と出力電圧は直線比例関係にあり、特に問題となる異常は見られなかった。角度増加にともなって出力電圧が低下しているのは特に意味はない。傾斜角校正装置の角度に対して傾斜センサの位置関係が反転しているだけであり、傾斜角と出力電圧の感度を知るためには問題はない。150~200mV という予想に対して、178mV/ $^\circ$ というデータが得られた。この値が以降のデータに感度係数として利用されることになる。

次に、測定器をコンピュータに接続して、 0.1° ステップで傾斜角を変化させたときの出力電圧データをコンピュータで連続データとして取得したものを図 6-8 に示す。

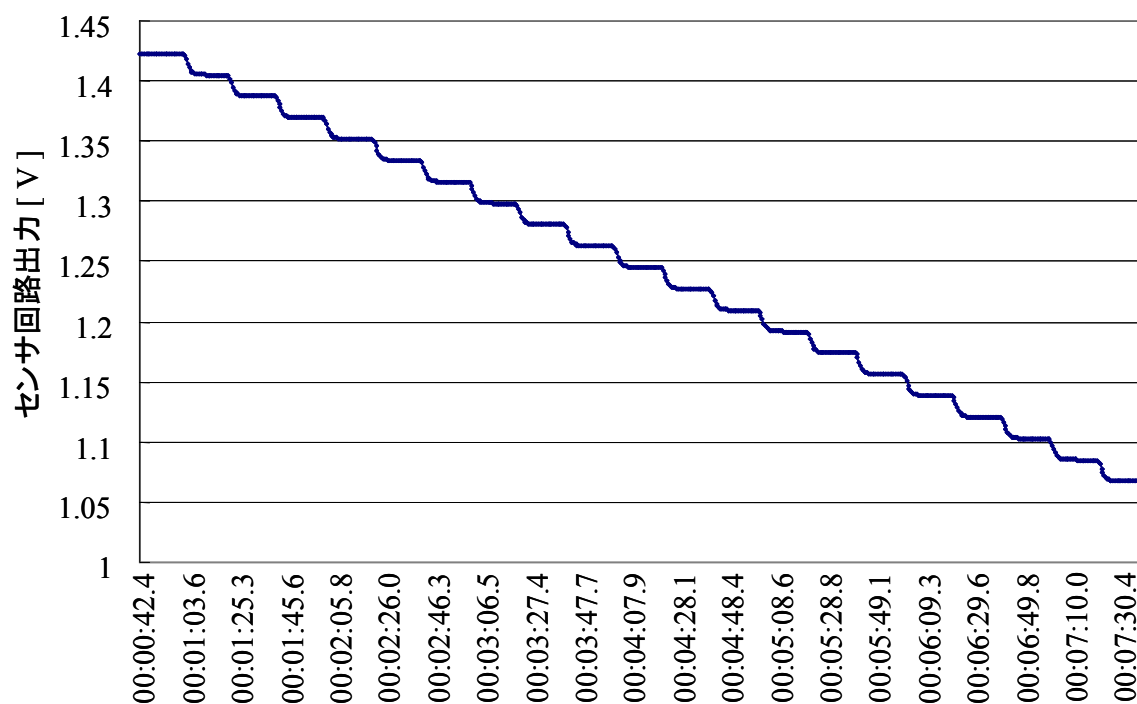


図 6-8 傾斜角 0.1deg ステップ

縦軸がセンサ出力電圧であり、横軸はコンピュータでデータを取得したときからの経過時間である。アクチュエータが動作し始めると傾斜角が変化を始め、センサ出力も下がり始める。そして、アクチュエータが 0.1° の傾斜設定を終えて動作が停止するとセンサ出力も安定になるという様子がよくわかる。

0.1° ステップあたり 17.8mV の電圧変化で階段状に変化していて、校正装置の傾斜角設定機能とセンサモジュール出力電圧の間にとくに問題は見られない。

以上により、測定システムの動作に異常がないことを確認できたので、以降詳細な測定を行った。

6.2.3 傾斜センサの傾斜角測定結果

高分解能傾斜角センサの測定分解能としては $0.001\sim 0.0001^\circ$ が目安であり、 0.0001° が実現可能かどうかという視点で設計評価を行ってきている。ここでは、このような分解能領域における測定評価を行う。

図 6-9 に傾斜角設定ステップが 0.002° の場合の測定結果を示す。

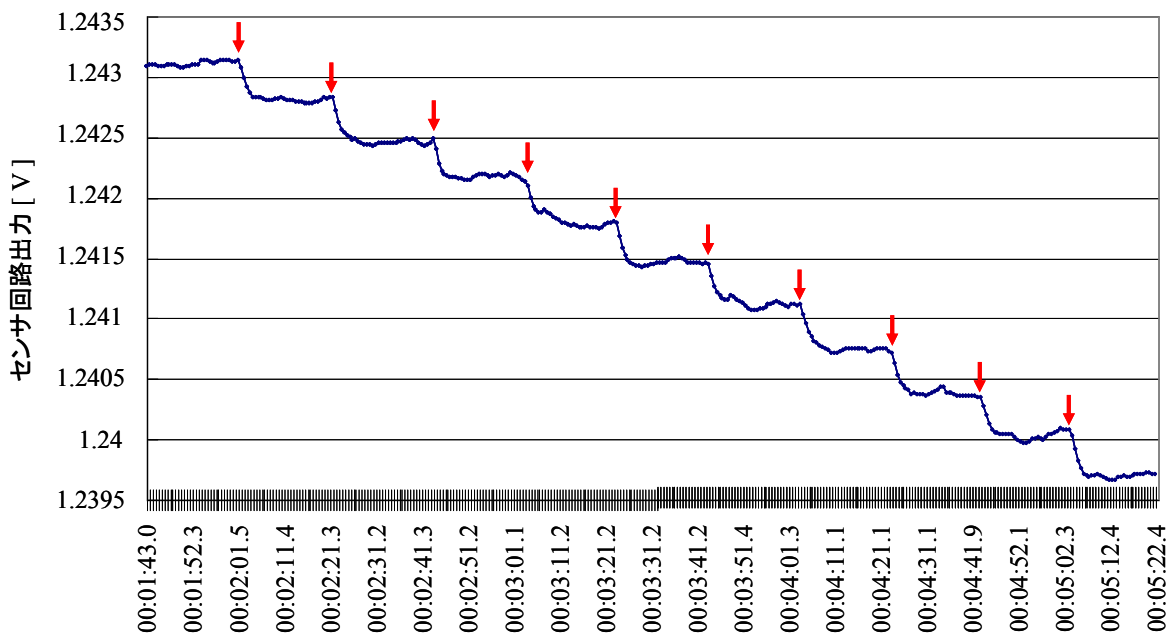


図 6-9 傾斜角 0.002deg ステップ

図中の矢印が傾斜角の設定を変えた始めたポイントである。 0.002° でステップ状に変化しているのはよくわかるが、ステップ変化後に安定せずゆらいでいることも観察できる。

さらに角度ステップを小さく設定して 0.001° ステップで測定を行った結果を図 6-10 に示す。同様に矢印がステップ変化開始位置である。図 6-9 のグラフに比べて縦軸を拡大してあるのでゆらぎの状況がよくわかる。

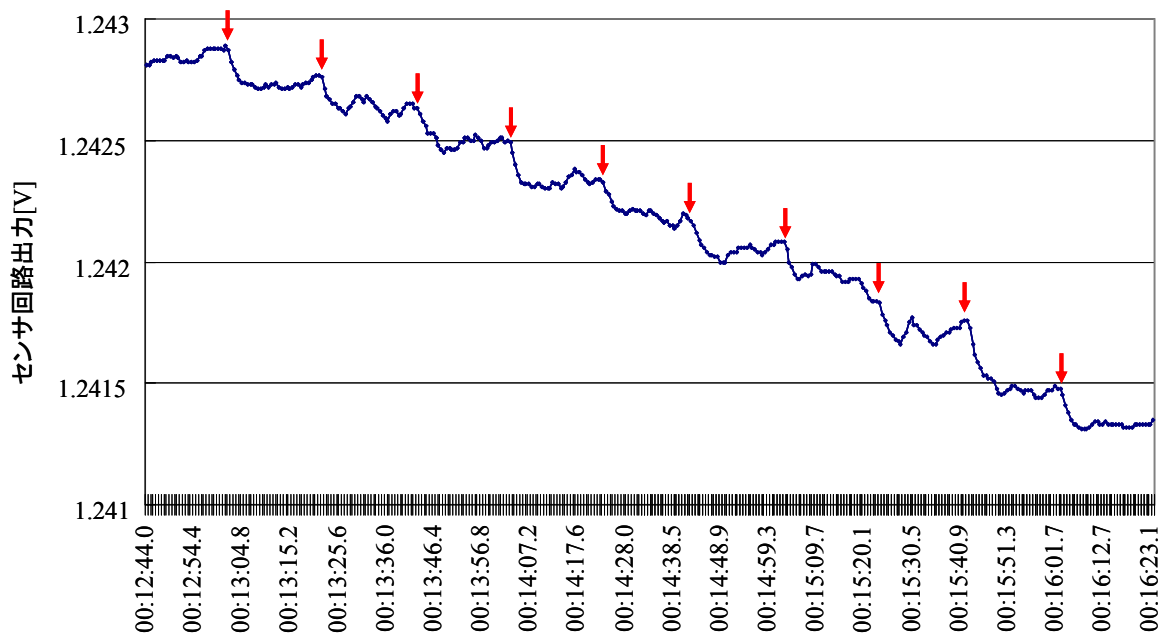


図 6-10 傾斜角 0.001deg ステップ

これらのゆらぎは常時観測される現象で、次のような要因でそのゆらぎが影響を受けることがわかっている。

- ・室温が変化したとき
- ・近くで人が歩き回ったとき
- ・センサモジュールのケーブルに触れたとき
- ・センサモジュールに手をかざしたとき
- ・その他

温度や振動や浮遊容量と電磁波など、いろいろな外乱でゆらぎが影響を受けているので、本実験構成では避けられない現象であると判断した。

6.2.4 測定データの解析評価

このようなゆらぎが存在する測定データをもとに、センサの分解能について検討してみる。

図 6-9 と図 6-10 のグラフを見てわかるように、ゆらぎは観察されてもグラフデータの線の太さは大きくない。いわゆる S/N を決めるホワイトノイズ的なノイズは非常に低いレベルにあることがわかる。このことから、ゆらぎの要因は「温度ゆらぎ」と「1/f ノイズ」と推定でき、とくに前者の温度については、その影響を受ける対象が多岐にわたるために、ディスクリット部品で構成している検出回路については原因を特定するのは困難である。

そこで、図 6-9 と図 6-10 で得られたデータの時間軸上でのゆらぎについて、その標準偏差 σ を求めた。そして、その標準偏差 σ を電圧感度で除して角度換算したのが表 6-2 である。

表 6-2 標準偏差と角度分解能

ゆらぎの標準偏差 [σ]	電圧感度 [mV/deg]	角度分解能 [deg]
22 [μ V]	178 [mV/deg]	0.00012°

標準偏差を分解能に置き換えるとその値は 0.00012° となり、高分解能傾斜角センサの目安として考えていた 0.0001° と同等の値が得られた。この 0.00012° という値は、検出回路の温度ゆらぎを含んだ値なので、センサ単体の性能としては十分に 0.0001° の分解能を有していると考えられる。

6.3 まとめ

設計製作したセンサの傾斜角入力に対する実験評価を行った。

電気信号による評価の前に光学顕微鏡で傾斜による変位を測定し、その結果が設計値とよく一致することを確認した。

次に、センサの静電容量を電圧信号に変換するための差動検出回路を試作し、センサを搭載したセンサモジュールを組み立てて、別途製作した傾斜角評価システムを用いて傾斜角に対する実験評価を行った。

実験評価においては、センサモジュールの出力ゆらぎのために、傾斜角とセンサ出力の直接比較測定としては、分解能 0.0001° レベルでデータを取得するまでには至らなかった。しかし、得られたデータをもとに統計処理を行うことで標準偏差として 0.00012° という分解能を示すデータであることを確認した。

この評価において「ゆらぎ」という問題が提起されたが、そのゆらぎの大きさは静電容量値で $\sigma = 4 \times 10^{-6}$ [pF] という極めて小さな値であり、実験的に確認できただけでも多くの外乱に影響されるものであることがわかっている。

この 4×10^{-6} [pF] という値に比べて、たとえばセンサを搭載しているパッケージの寄生容量や、試作した差動検出回路の PCB 上での浮遊容量などは桁違いに大きいことは疑う余地がない。そして、それらの寄生容量や浮遊容量が温度や電磁波などの外乱の影響を受ければ、それらがセンサモジュールの出力に現れることになる。このような考察から言えることとしては、現在のディスクリート部品を組み合わせたセンサモジュールの構成では、影響を受ける外乱を一つ一つ探して潰していく方法は解決策にはならない。

MEMS センサは、その信号処理回路が LSI 化されることを前提として設計されることが多い。本センサ（水晶センサ部）についても初段の信号変換回路はディスクリート回路ではなく IC チップと組み合わされて評価されるべきものと考えられる。それにより、前記のような寄生容量や浮遊容量の影響が少ないセンサモジュールが構成され、ゆらぎについても再現性よく評価が進められるものと考えられる。

第7章 傾斜角センサ動特性の解析評価

このようなメカニカルなセンサ、とくにバネと質量で構成されるセンサの場合は固有振動数での共振という現象が必ず発生する。この固有振動数の値が使用周波数帯域を制限し、固有振動数での共振現象を抑えるための制動（ダンピング）処理も不可欠になる。そして、このダンピング処理によりセンサの使用周波数帯域を決めることになり、また使用周波数帯域の設定は S/N の値にも大きく影響してくることになる。

本章では、はじめに動特性を解析するための基礎データとして本センサの共振振動モードの解析を行う。共振振動モードはダンピングの検討を行うためには不可欠の情報であり、どのようなダンピング処理を行う必要があるのかという指針を与えてくれる。共振振動モードの解析では、FEM による固有値解析を行いセンサの固有振動モードを数値計算により求める。

この共振振動モードの中の基本振動モードは櫛歯電極が対向電極に向かう方向であると予想されるので、その場合は Squeeze film damping 効果と呼ばれるダンピング制動力が生じていることが考えられる。この制動力は電極間の流体（空気）の粘性により生じており流体力学の問題として解析されるべきものであるが、その解析が困難であることから所望のダンピング特性が得られるまで実験評価と設計試作を繰り返すという作業に陥りやすい。

この制動力は MEMS センサの分野ではよく議論されている現象であるが、流体力学としては非線形微分方程式を扱うことになるため解析厳密解が得られず、もっぱら数値解析に頼っているのが一般的である。

本センサの電極部は櫛歯構成になっており、流体の運動を二次元の問題として扱うことができれば、解析近似解が得られる可能性がある。ここでは、境界条件を工夫することにより理論解析から近似解を求めて、その近似解がどの程度まで現象と一致するのか実験により検証する。

7.1 FEM による固有振動特性の解析

センサの固有振動の振動モード解析を行う。FEM による固有値解析であるが、使用した FEM 解析プログラムは LINUX 上で動作する「FEMLEEG」である^[22]。要素数が 1000 点までに限定されているが、振動モード解析には十分である。

7.1.1 FEM 解析モデルの作成

解析には試作開発して動作が確認されている次図の寸法のものを使用した。

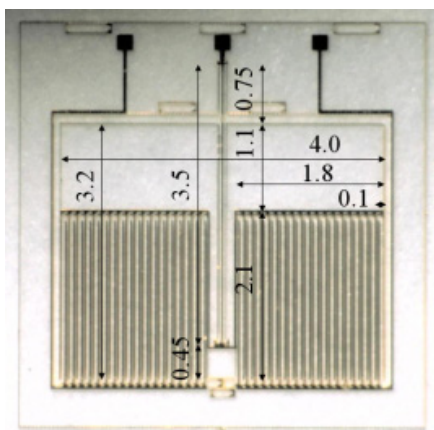


図 7-1 FEM 解析に使用したセンサ

(1) 計算用物理量

要素数が限られていることから断面形状は矩形とした。バネ部は断面二次モーメントが等価になる矩形断面寸法、電極部は質量が等価になる矩形断面寸法を計算により求めた。また、ねじり振動モード用のねじり剛性については、エッチング断面をもつ梁のねじり剛性を FEM により計算し、それと等価なねじり剛性の矩形断面寸法を求めて使用した。

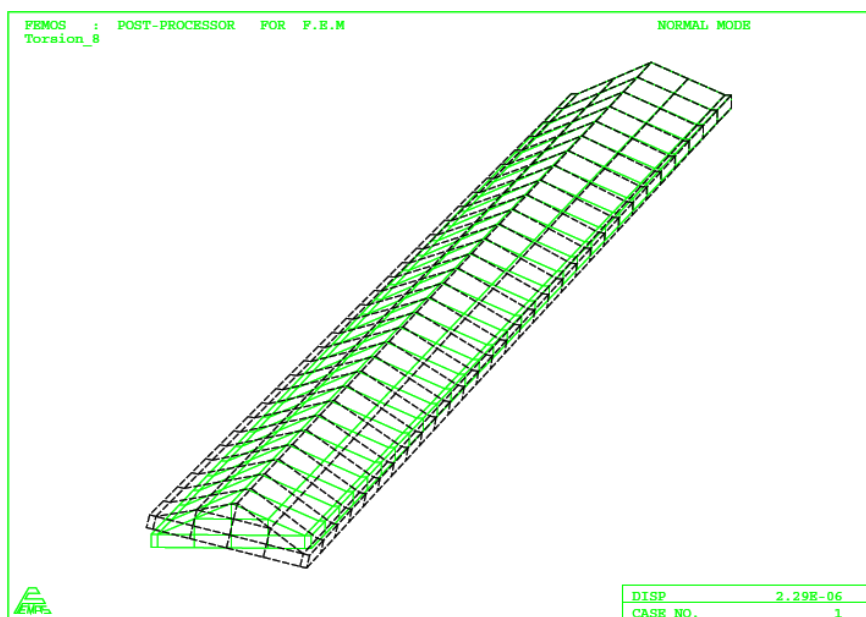


図 7-2 ねじり剛性の計算モデル

以上の事前検討後、FEM 解析プログラムに入力した数値を表 7-1 に示す。

表 7-1 FEM プログラムに入力した物理量

ヤング率 (E)	$7.83 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$	1/S ₂₂ の値
縦弾性係数 (G)	$5.01 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$	1/S ₅₅ の値
密度 (ρ)	$2.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	
バネ断面寸法 (矩形断面に換算)	^B 20μm × ^T 100μm	X 軸方向変位の振動モード用
	^B 12μm × ^T 100μm	Z 軸方向変位の振動モード用
	^B 19μm × ^T 100μm	Y 軸回りのねじり振動モード用
電極部断面寸法	^B 20μm × ^T 100μm	電極ピッチ 100μm で入力

(2) FEM 解析モデルと予備解析

前述の寸法をもとに作成した 3 次元メッシュモデルが図 7-3 である。要素数 195 個、接点数 776 点である。

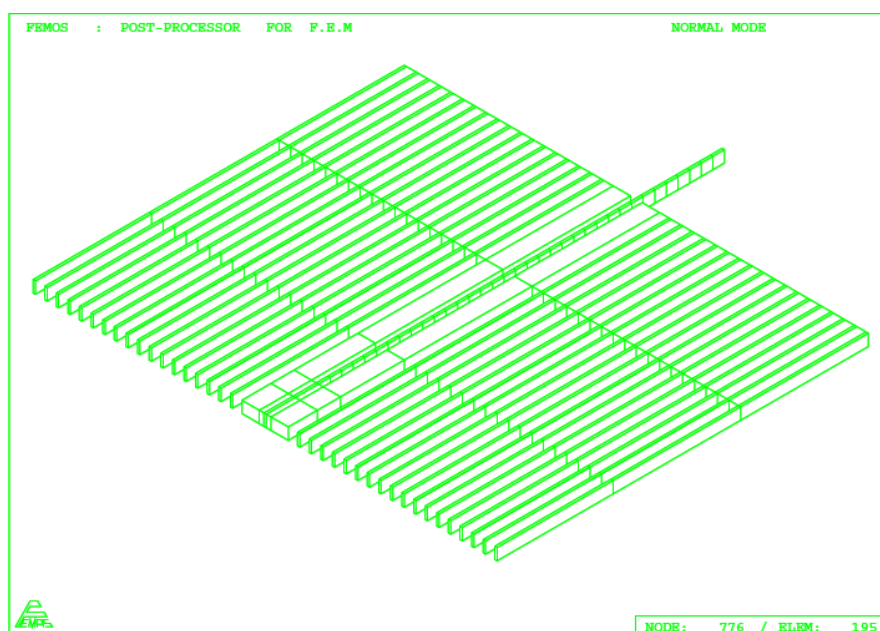


図 7-3 解析用 3 次元モデル

このモデルに 1° の傾斜角を入力したときのバネの変位曲線が図 7-4 であり、解析式(4-4)式で求めた変位曲線形状と非常によく一致し、またバネ先端の変位量 0.234μm も解析式(4-5)で計算した値 0.237μm とよく一致した。(解析式でのバネ変位曲図 4-3 とは縦軸の符号が逆になっている。)

バネ固定部のたわみ角に比べてバネ先端のたわみ角が逆方向に、つまり曲線全体が S 字カーブになっているのは、可動部の重心位置がバネ先端より内側になっているためである。図 4-3 の $L_0 = -0.5L$ に近い状態である。

これらの静的解析結果から、本モデルが解析モデルとして問題ないことが確認できた。

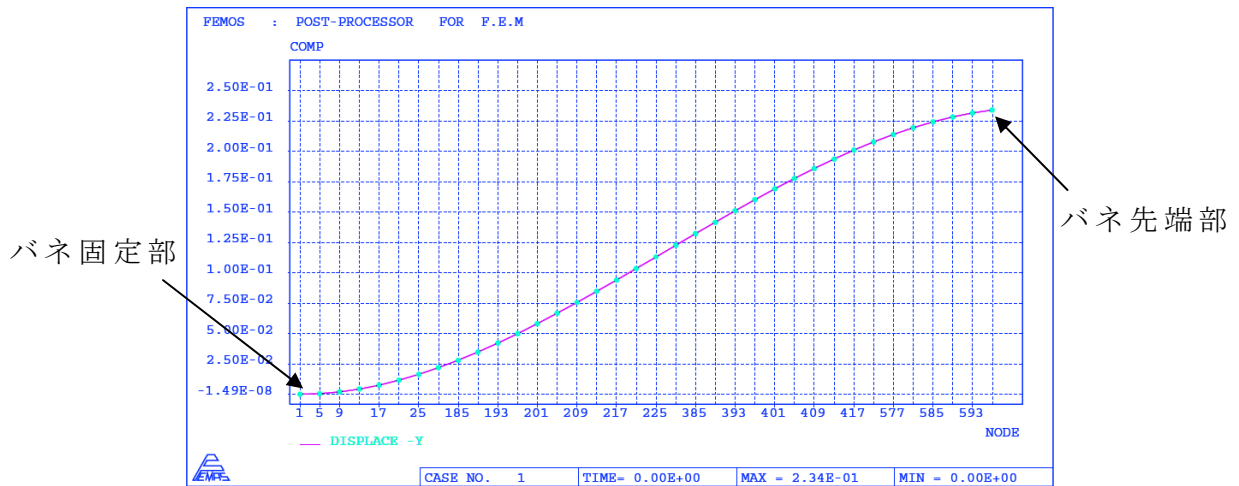
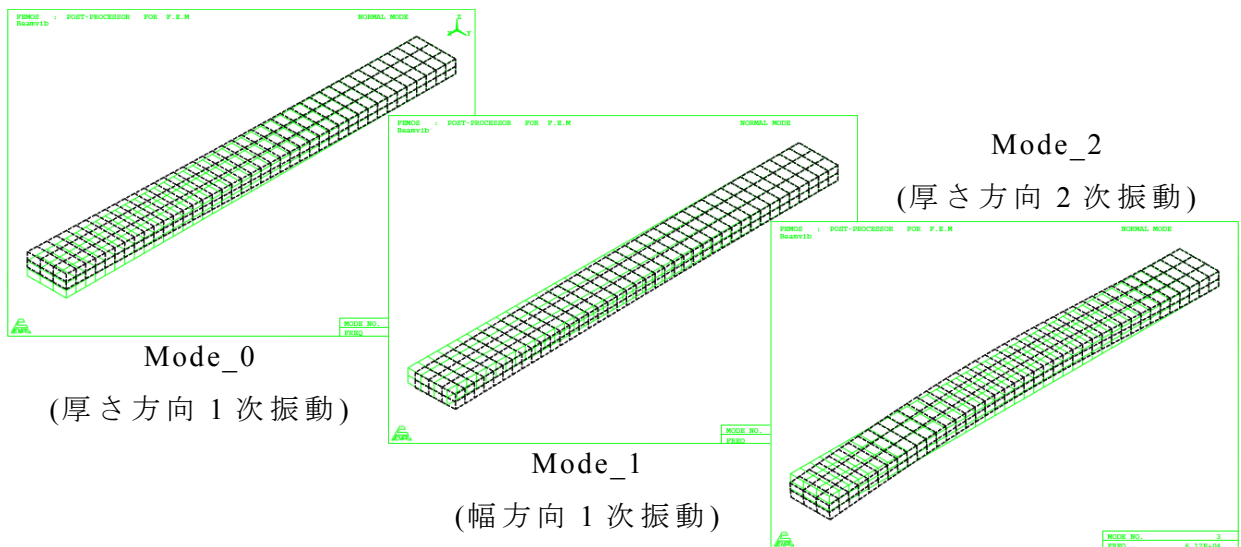


図 7-4 バネの変位曲線

つぎに、振動解析の妥当性を確認するために、片持梁 ($0.3 \times 0.1 \times 3 \text{ mm}$) について本 FEM での解析結果と、横振動梁の解析式で求めた結果を比較した。



	Mode_0	Mode_1	Mode_2
FEM	9.81 kHz	29.2 kHz	61.2 kHz
解析式	9.76 kHz	29.3 kHz	61.1 kHz

図 7-5 片持梁の固有振動数比較

以上から、本プログラムに設定した各物理量を用いた静弾性解析、および振動解析としての固有値解析の双方について問題のないことが確認できた。

7.1.2 FEMによる固有振動モードと固有振動数解析

振動モード解析を行ったところ、5個の振動モードが存在することがわかり、いずれもバネと質量で構成される一自由度振動系の振動モードであった。

(1) 基本振動モード

図 7-6 に示すように、可動部の面内に振動変位する基本振動モードである。バネの変位曲線は静的な変位曲線とほぼ同じであり、固有振動数は 148Hz という計算結果が得られた。この振動がダンピング解析に必要な振動モードである。

櫛歯電極が対向電極に向かって変位するため、電極間の流体（空気）が押し出されることにより、その流体の粘性が抵抗となって制動力を発生することになる。

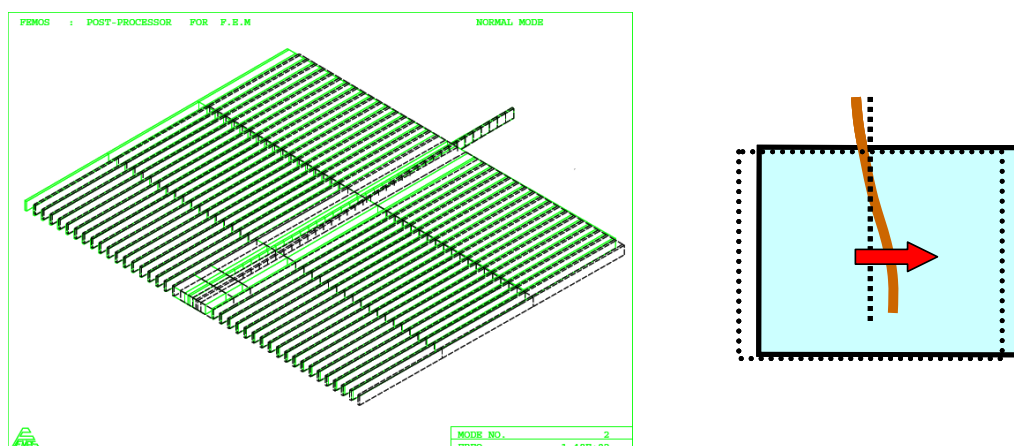


図 7-6 基本振動モード

(2) 逆位相モード

基本振動モードに比べて、バネと可動部の変位方向が逆になっている逆位相モードと呼ばれる振動モードである。振動解析においては必ずこのような逆位相の振動モードが得られる。実際の現象においては、このような逆位相の励起は難しいので、発生しても非常に振幅の小さいスプリアス的な振動になることが多い。

可動部の回転慣性が質量に加わるためと思われるが、固有振動数は 99Hz と基本モードより小さい値になっている。

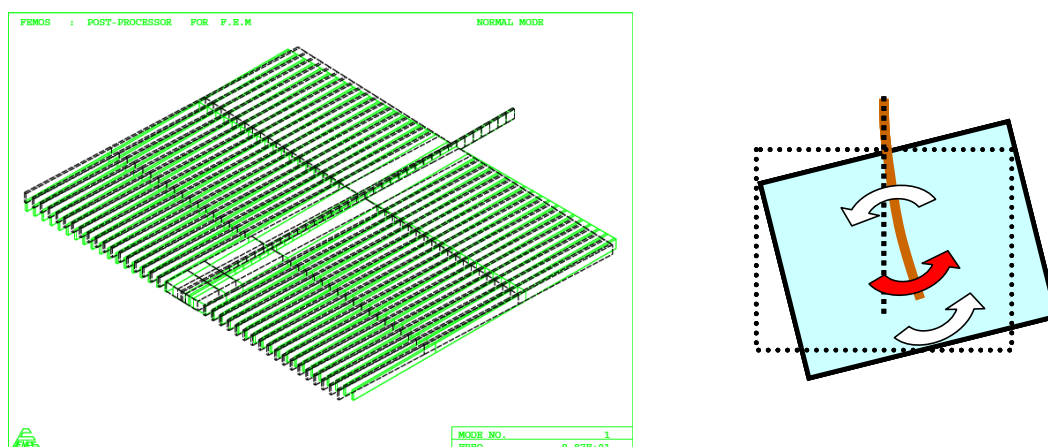


図 7-7 逆位相モード

(3) ねじり振動モード

バネがねじれる振動モードである。この振動モードでは、センサの差動検出の原理から検出信号は出力されないことになる。(4.3.1項(1)で述べたように差動構成が完全ではないので、小さいながらも検出信号は出力される。)

固有振動数は 195Hz という値が得られた。

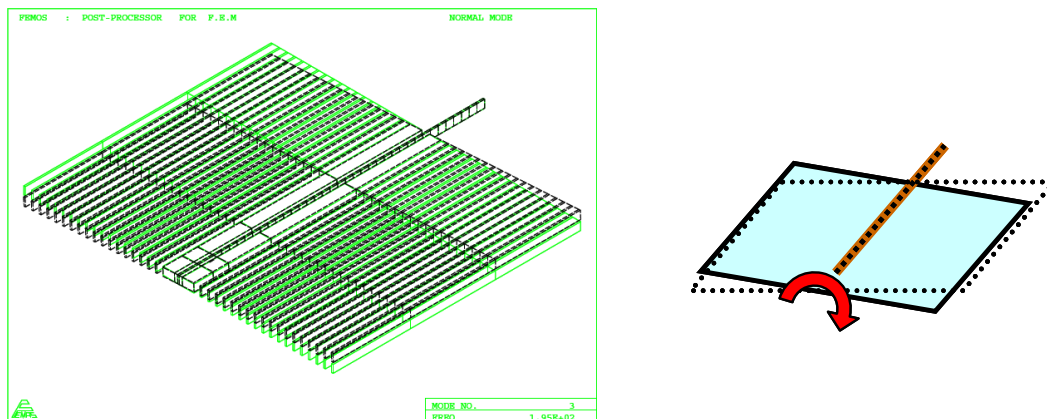
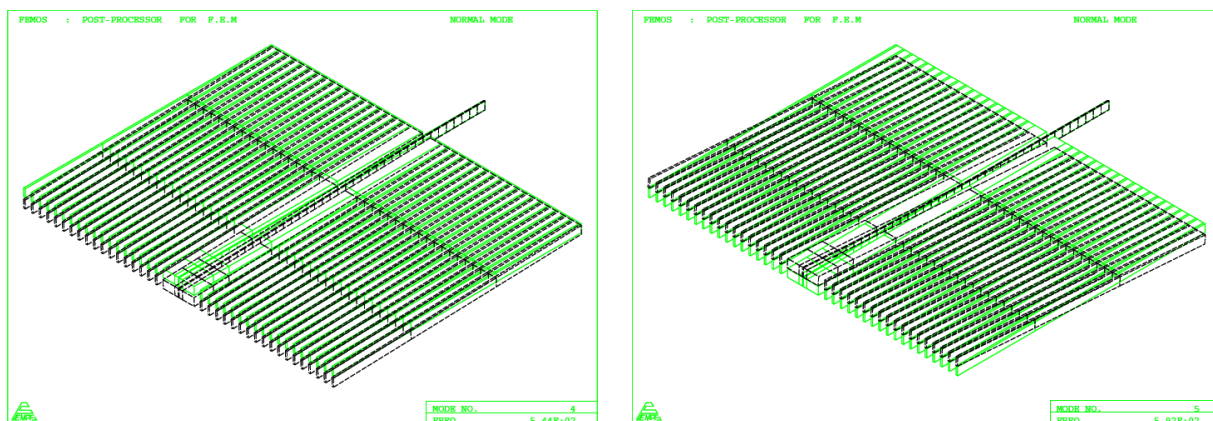


図 7-8 ねじり振動モード

(4) 板厚方向基本モードと逆位相モード

バネが板厚方向に変位する、つまり(1)の基本振動モードに対して垂直方向に変位する振動モードである。この振動モードも差動構成の原理から検出信号はほとんど出力されない。

基本モード (544Hz) と同様に逆位相の振動モード (592Hz) が解析結果として得られた。



(a) 板厚方向基本モード

(b) 逆位相モード

図 7-9 板厚方向振動モード

FEM 解析により振動モードの解析を行い、基本振動モードとその固有振動数が得られ、その基本モードが動的解析つまりダンピング解析の対象と考えてよいことがわかった。同時に、静的な応力解析も計算することができ、バネの荷重-変位曲線が解析式の結果と一致するという結果も得られた。

FEM 解析の結果を表 7-2 に示す。

表 7-2 FEM 解析結果

振動モード	固有振動数
(1) 基本振動モード	144 Hz
(2) 基本振動逆位相モード	99 Hz
(3) ねじり振動モード	195Hz
(4) 板厚方向基本振動モード	544 Hz
(5) 板厚方向逆位相モード	592 Hz

7.2 非平行電極の動特性解析

微小な間隙を有するメカニカルなデバイスでは、その応答特性は微小な間隙の流体抵抗に影響されることが知られている。この現象は Squeeze film damping 効果と呼ばれており古くから研究が行われている^[23]。そして、MEMS デバイスの微細化にともない、MEMS 分野でも重要な研究対象として取り込まれるようになってきた^[24]。これらの解析には粘性流体の運動方程式である Navier-Stokes 方程式を用いるが、この方程式は特殊な場合を除いて解析解を得ることができないために数値計算により解析するのが一般的になっている^{[25][26]}。

図 7-10 に示すように本センサの櫛歯電極は 2 種類の間隙を有しており、それぞれの櫛歯間の空気粘性により動特性に影響を受けているはずである。(注：本節で使用する座標軸は流体の流れ方向を X 軸とするため、他の章節で用いられている水晶の結晶軸の表記とは異なる。)

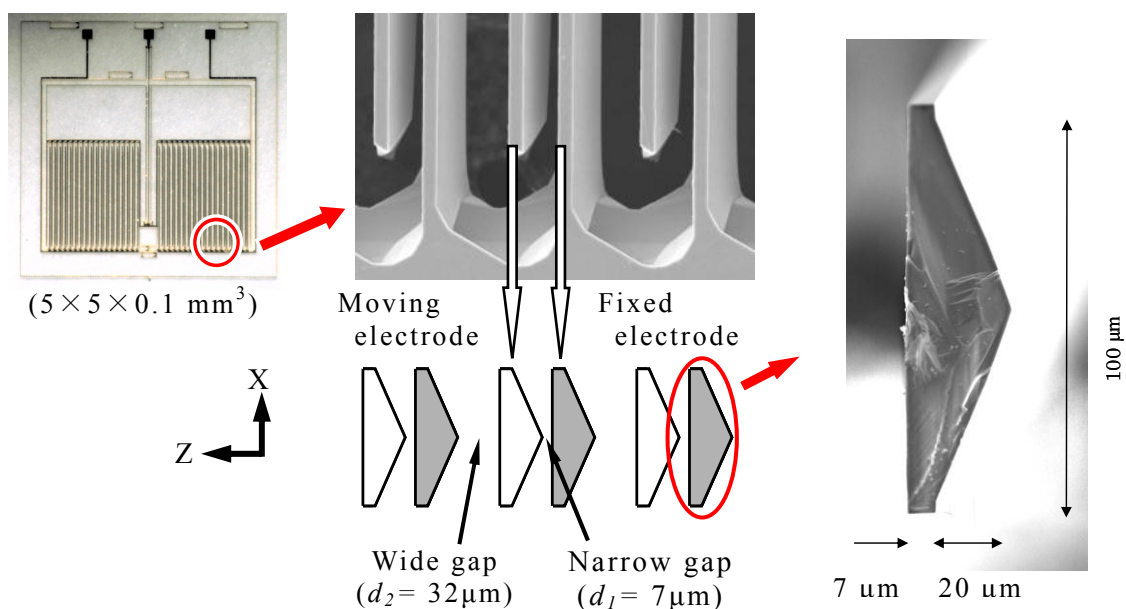


図 7-10 櫛歯電極部の断面図

電極の対向面が平行平板の関係にあれば Navier-Stokes 方程式から解析式を得ることができるが、櫛歯電極の対向面であるエッチング壁面は傾斜面になっているために解析解を得ることができないと考えられてきた。ここでは、境界条件を工夫することにより Navier-Stokes 方程式から、図 7-10 の非平行櫛歯電極間の流体運動を解析的に求める。

7.2.1 理論解析による解析式の導出

Navier-Stokes 方程式は粘性流体の運動方程式として有名であるが、特殊な場合を除いて解析解が得られないことでもよく知られている。この Navier-Stokes 方程式は偏微分方程式で表すと煩雑になるのでベクトル表記で(7-1)式に記述する。

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \mathbf{F} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{1}{3} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) + \nabla^2 \mathbf{u} \right) \quad \dots\dots\dots (7-1)$$

この式は [運動量変化=外力項+圧力項+体積粘性項+粘性項] として流体の運動が記述されており、本センサのように固有振動数が低く、流体を非圧縮性として扱ってよい場合は体積粘性項がなくなり(7-2)式となる。

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \mathbf{F} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{u} \quad \dots\dots\dots (7-2)$$

ここで、図 7-11 のように Y 方向に十分に長い非平行平板間の X 方向に粘性流体が流れるモデルを考える。板間の間隙 d は X 方向で変化するので $d(x)$ とする。

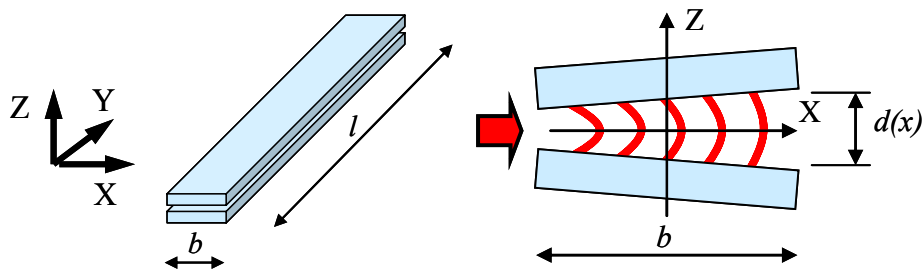


図 7-11 非平行平板のモデル

幅 b に比べて長さ l が十分に長い場合 Y 方向流れは無視できて二次元流れになるため、(7-2)式の y 成分はなくなり(7-2)式は(7-3)式のように記述できる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (7-3)$$

- u, w : 流体速度の x, z 方向成分
- F_x, F_z : 流体への作用外力
- p, ρ, μ : 流体の圧力、密度と粘度

本モデルの構成から(a)と(b)の条件が設定でき、X方向の流れに対してZ方向の流れは小さく無視できると仮定すると(c)の条件が設定できる。そして、これらの

条件から(d)の条件も導かれ、(7-3)式は(7-4)式のように簡単化される。ただし、(c)の仮定をもとに得られる解は近似解であるため、その有効性については実験により検証する必要がある。

- | | |
|---------------------------|---------------------------------------|
| (a) 外系からの作用力はないと考えてよい | $F \rightarrow 0$ |
| (b) 定常流である | $\partial/\partial t \rightarrow 0$ |
| (c) Z方向の流れはない | $w \rightarrow 0$ |
| (d) 非圧縮流れ、Y方向流れ=0、Z方向流れ=0 | $\partial u/\partial x \rightarrow 0$ |

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad \dots\dots\dots (7-4)$$

(7-4)式は速度成分 u と圧力分布 p の関係を表しており、この方程式を解くことにより u と p の関係式を導くことができる。(7-4)式を u について二回積分して速度分布 $u(z)$ を求める。

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} z + C1$$

$Z = 0$ (板間中央) で $\partial u/\partial z = 0 \rightarrow C1 = 0$

$$u = -\frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} z^2 + C2$$

$Z = d(x)/2$ (板表面) で $u = 0 \rightarrow C2 = -\frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} \left(\frac{d(x)}{2}\right)^2$

$$u(z) = -\frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} \left\{ \left(\frac{d(x)}{2}\right)^2 - z^2 \right\} \quad \dots\dots\dots (7-5)$$

(7-5)式は、X方向の流速が図 7-11 のように Z方向に放物線状の速度分布をもつことを意味している。

(7-5)式は XZ 面内での 2次元の関係式であるが、Y方向の長さを l として Z方向で積分すれば板全面において流れる流体の流量 Q と圧力分布の関係式が(7-6)式として求めることができる。

$$Q = -\frac{d(x)^3 l}{12\mu} \frac{dp}{dx} \quad \dots\dots\dots (7-6)$$

以上から、図 7-11 のモデルにおいて、板間を流れる流体の流量が与えられれば圧力分布が得られ、その圧力分布を板全面にわたって積分することで力(制動力)が得られることになる。

それでは、センサの櫛歯電極について間隙が時間的に変化する場合、つまり Z 方向に速度変位をもつときに生じる制動力について検討する。

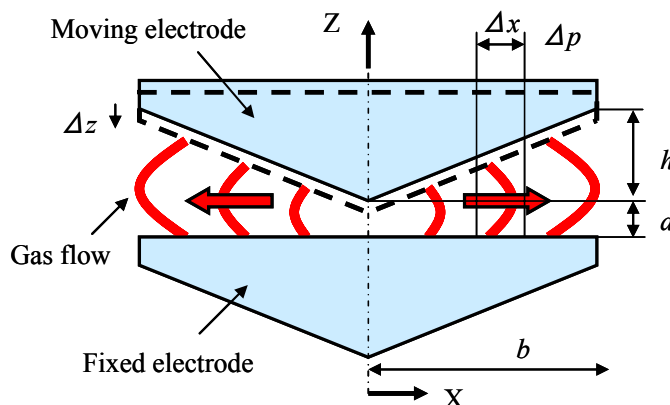


図 7-12 櫛歯電極の断面図

センサ櫛歯電極断面形状の図 7-12 において、微小部分 Δx を移動する流量 Q と差圧 Δp との関係は(7-6)式のように表されるが、このモデルでは流量 Q が時間 t と位置 x の関数として記述される。 Δx の区間で発生する流量 ΔQ は単位時間当たりの体積変化であるため、位置 x での流量 $Q(x)$ は(7-7)式のように求まる。

$$\Delta Q = \ell \Delta x \frac{dz}{dt} \rightarrow Q(x) = \ell \frac{dz}{dt} x \quad \dots\dots\dots (7-7)$$

この $Q(x)$ を(7-6)式に代入して、X 方向の圧力分布 $p(x)$ で記述すると(7-8)式となる。 $p(x)$ が負で記述されているのは、流れの上流側 (x が負) の圧力が高いことを意味している。

$$\ell \frac{dz}{dt} x = -\frac{d(x)^3 \ell}{12\mu} \frac{dp}{dx}$$

$$p(x) = -12\mu \frac{dz}{dt} \int \frac{x}{d(x)^3} dx \quad \dots\dots\dots (7-8)$$

そして、図 7-12 から $d(x)$ は次のように表されるので、

$$d(x) = \frac{h}{b}|x| + d$$

$x=b$ で $p(x)=0$ の条件で(7-8)式を積分すると最終的に $p(x)$ は (7-9)式として得られる。この $p(x)$ が電極間の流体の状態を定性的に説明する重要な式となる。

$$p(x) = 12\mu \frac{1}{2\left(\frac{h}{b}\right)^2} \left[\frac{2\frac{h}{b}|x| + d}{\left(\frac{h}{b}|x| + d\right)^2} - \frac{2h + d}{(h + d)^2} \right] \frac{dz}{dt} \quad \dots\dots\dots (7-9)$$

この(7-9)式で表される圧力分布 $p(x)$ を電極板全面にわたって積分する、言い換えると圧力に面積をかけることで制動力 F を得ることができる。

$$F = \ell \int_{-b}^b p(x) dx = 12\ell\mu \frac{2 \cdot \ln\left(1 + \frac{h}{d}\right) - \frac{(2d+3h)h}{(d+h)^2}}{\left(\frac{h}{b}\right)^3} \frac{dz}{dt} \dots\dots\dots (7-10)$$

(7-10)式は速度 dz/dt に比例する制動力であり、振動の運動方程式における粘性項、つまり制動係数 c を意味している ((7-21)式を参照)。したがって、本解析結果から本センサの制動係数 c は一対の電極について次のように記述できる。

$$c = 12\ell\mu \frac{2 \cdot \ln\left(1 + \frac{h}{d}\right) - \frac{(2d+3h)h}{(d+h)^2}}{\left(\frac{h}{b}\right)^3} \dots\dots\dots (7-11)$$

以上のように、本センサの非平行櫛歯電極間の流体運動について、境界条件を工夫することで Navier-Stokes 方程式から解析的に電極間の圧力分布 $p(x)$ の近似解(7-9)式を求めることができた。そして、その圧力分布 $p(x)$ をもとにセンサの制動係数 c (7-11)式を得ることができた。

本センサの非平行櫛歯電極における粘性流体の制動現象については(7-9)式の圧力分布 $p(x)$ が定性的な理解を与えてくれる。また、(7-11)式の制動係数 c は確認実験において測定される減衰比データとの比較のために用いられることになる。

【参考】

参考までに、間隙= d 、板全幅= $2b$ の平行平板の解は(7-12)(7-13)式となる。

$$p(x) = -\frac{6\mu}{d^3} (x^2 - b^2) \frac{dz}{dt} \dots\dots\dots (7-12)$$

$$c = \frac{8b^3\ell\mu}{d^3} \dots\dots\dots (7-13)$$

7.2.2 解析式を用いた非平行電極の動特性計算

得られた解析式を用いてセンサ櫛歯電極について非平行電極の制動特性を解析する。

(1) 圧力分布

はじめに、電極間圧力分布 $p(x)$ の (7-9)式を用いて非平行電極の傾斜面の影響を調べる。試作したセンサの寸法近傍での定量的な解析計算を行うために、計算に使用するセンサの代表寸法を表 7-3 にまとめる。

表 7-3 試作センサの代表寸法

電極の幅($T=2b$) & 長さ(l)	1.0×10^{-4} & 2.1×10^{-3} m
電極ギャップ(d_1) & 高さ(h)	7×10^{-6} & 2.0×10^{-5} m
空気の粘度 (μ)	1.8×10^{-5} Pa·s

これらの値を(7-9)式に代入して電極の幅方向 (板厚 T 方向) の圧力分布を計算した。(7-9)式で $h=0\mu\text{m}$ は計算できないので h に非常に小さい値 ($h \rightarrow 0\mu\text{m}$) を代入して計算した。この $h \rightarrow 0\mu\text{m}$ の圧力分布曲線は、参考として記述した平行平板の(7-12)式の計算結果と一致することを確認した。

傾斜面の角度が変化した場合の様子を比較するために、平均ギャップを $(d_1+h/2)=17\mu\text{m}$ と一定にして h をパラメータに計算した結果を図 7-13 に示す。平行平板 ($h=0\mu\text{m}$) に比べて、センサの場合 ($h=20\mu\text{m}$, $d_1=7\mu\text{m}$) は中点 ($x=0\mu\text{m}$) から端方向 (板表裏面) に向かうにつれて急激に圧力が低下していく様子がよく理解できる。また、 $h=30\mu\text{m}$ では $d=2\mu\text{m}$ なので、中点付近の圧力が極端に大きくなっている様子も見てとれる。

また、 $h=20\mu\text{m}$ に固定して d をパラメータに計算した結果が図 7-14 である。 h はエッチング異方性の特性により決まるため、この計算結果が実際のセンサ設計には有用である。製作の可否は別として、 $d=1\mu\text{m}$ では中点での圧力は試作センサ $d_1=7\mu\text{m}$ より一桁大きな値になっている。

以上のように、解析式を用いて板間の粘性流体 (空気) による圧力分布を計算により求めた。この圧力分布を電極板全面にわたって積分することで制動力が得られるので、本センサのようなエッチング傾斜面を有する電極について、その制動特性に関する電極板間の現象は図 7-13 と図 7-14 により定性的に理解することができる。

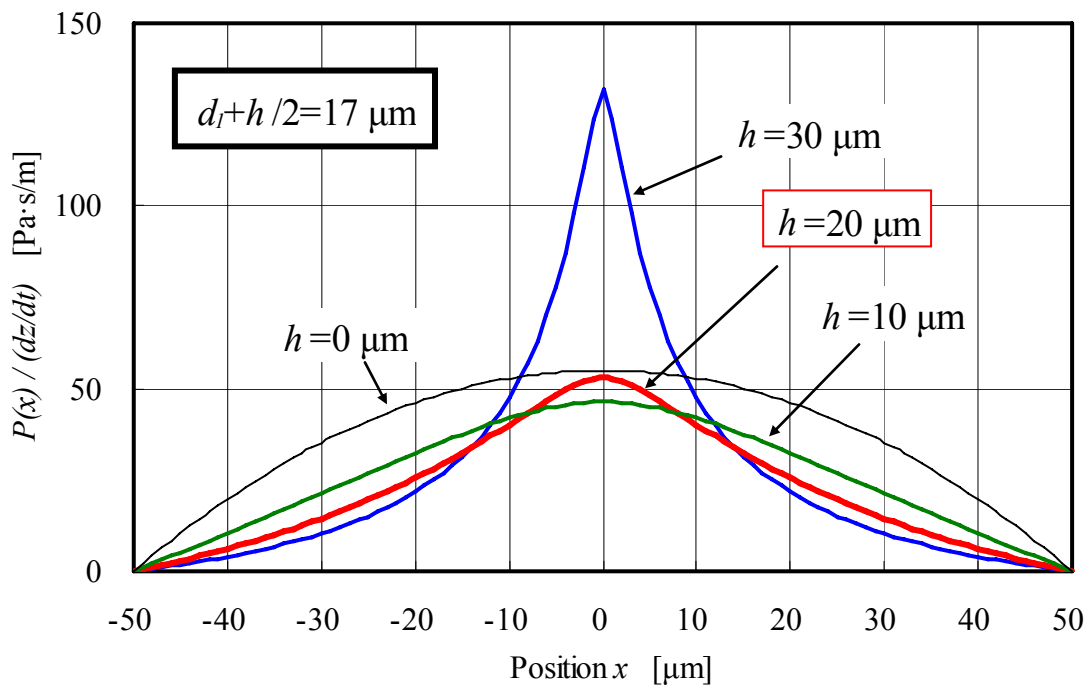


図 7-13 電極幅方向の圧力分布計算結果 (パラメータ=h)

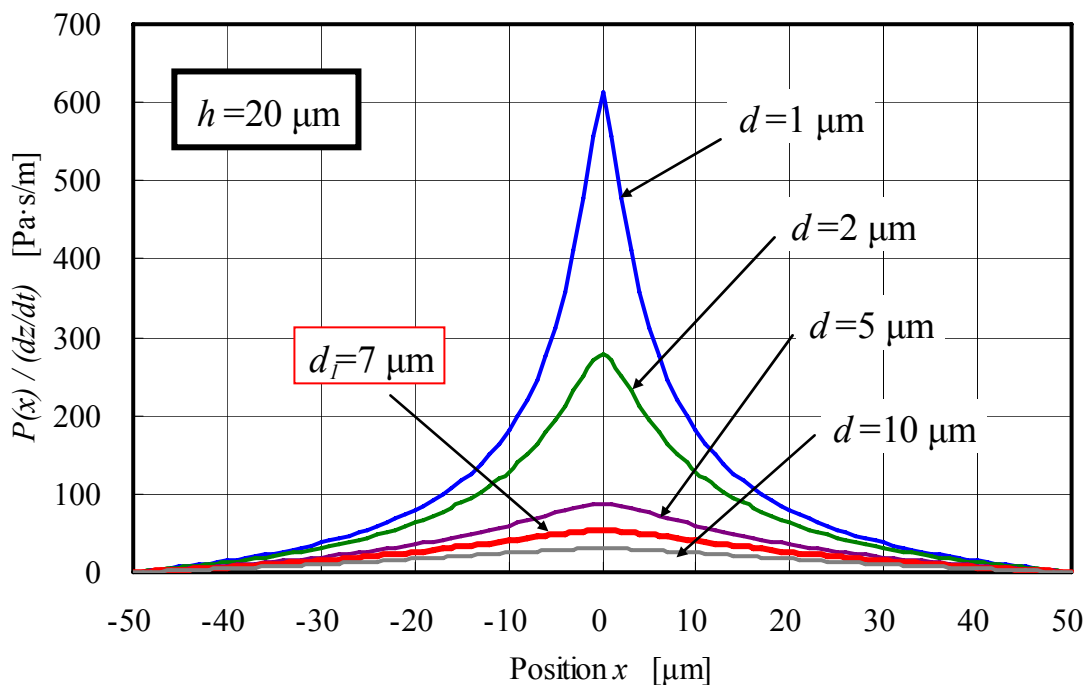


図 7-14 電極幅方向の圧力分布計算結果 (パラメータ=d)

(2) センサの減衰比の計算例

制動係数 c は(7-11)式を用いて計算できる。そして、一自由度振動系における減衰比は $\zeta=c/c_c$ であり、臨界制動係数 c_c は $c_c=2m\omega_0$ で与えられる (詳細については 7.3.2 過渡応答特性に記載)。したがって表 7-4 のセンサ緒元を例に計算すると、センサの制動係数 c および減衰比 ζ として同表 7-4 の値が得られる。

表 7-4 試作センサの緒元と計算結果例

電極間ギャップ(d_1 & d_2)	7×10^{-6} & 3.2×10^{-5} m
電極傾斜部の高さ(h)	2.0×10^{-5} m
電極の幅($T=2b$)	1.0×10^{-4} m
電極の長さ(l)	2.1×10^{-3} m
電極数	36 対
可動部質量	1.8×10^{-6} kg
固有振動数 (ω_0 =FEM 計算値)	148 Hz
臨界制動係数 ($c_c=2m\omega_0$)	3.3×10^{-3}
空気の粘度 (μ)	1.8×10^{-5} Pa·s
制動係数計算値 (c)	1.8×10^{-4} N·s/m
減衰比計算値 ($\zeta=c/c_c$)	0.055

このように、解析式を用いて、電極間隙の空気により生じる制動力を計算により求めて、その結果と FEM で求めた固有振動数の値から センサの減衰比 $\zeta=0.055$ を解析的に求めることができた。

次節では、ここで得られた解析結果について実験によりその有効性を検証評価する。

7.3 解析式検証のための実験方法検討

理論解析により得られた解析式は境界条件を工夫することにより得られた近似解であるため、実験によりその有効性を確認する必要がある。

実験では、パラメータとして流体の粘度を変えて実験を行う。気体について、粘度の高い順に代表的なものを表 7-5 に示すが、粘度の違いは 3 倍程度とそれほど大きくはない。

表 7-5 主な気体の粘度 (単位 : [Pa·s] at 20°C)

アルゴン	Ar	2.2×10^{-5}
酸素	O ₂	2.0×10^{-5}
空気	Air	1.8×10^{-5}
二酸化炭素	CO ₂	1.5×10^{-5}
アンモニア	NH ₃	1.0×10^{-5}
水素	H ₂	8.8×10^{-6}
ヘキサン	C ₆ H ₁₄	6.5×10^{-6}
水 (液体)	H ₂ O	1.3×10^{-3}

したがって、解析解との定量的な比較のために、取り扱いが容易な空気(Air)に加えて水素(H₂)を用いた 2 種類の気体で実験を行い、さらに広い粘度範囲での挙動を調べるために、空気の圧力を変化させる方法を採用する。そのため、圧力を変えて実験を行うときに必要となる気体の粘性と圧力の関係について、その性質を明確にしておく必要がある。

また、実験ではセンサの減衰比のデータを測定収集する。センサの過渡応答出力波形データから減衰比を求めるために、センサの過渡応答特性つまり一自由度振動系の過渡応答特性と減衰比の関係を明確にしておく必要がある。

7.3.1 気体の粘度について

気体の粘性係数は温度の上昇とともに高くなり、そして圧力には影響されないといわれており、液体とは異なる振る舞いを呈することが知られている。これは、気体の粘性係数は気体分子の運動に支配されていることに起因しているためであり、気体の粘性についてその性質を理解するためには「気体分子運動論」による考察が不可欠となる^{[27][28]}。

よく知られるように、流体の粘性係数は次式で定義される。

$$F = \eta \frac{du}{dz} \dots\dots\dots (7-14)$$

F : z 軸に垂直で du/dz の速度勾配をもつ二面間に生じる剪断力

η : 粘性係数

(1) 気体の圧力が高い場合

装置やデバイスの代表寸法（検討対象となる寸法で、ここでは電極間隙 d ）が気体の平均自由行程 λ に対して十分に大きい場合は、Maxwell の速度分布則をもとに、相対速度を有する平行二面間に入出入りする気体分子の運動量の差によって生じる力が(7-14)式に等しいという解析から気体の粘性係数が導かれる。

$$\eta = \frac{1}{3} mn\bar{v}\lambda \quad \dots\dots\dots (7-15)$$

m : 気体分子の質量

n : 単位体積中の分子数

\bar{v} : 分子の平均速度 $\bar{v} = \sqrt{\frac{8\kappa_B T}{\pi m}}$ κ_B : ボルツマン定数 (1.38×10^{-23} J/K)

λ : 平均自由行程 $\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}n\sigma^2}$ σ : 分子直径

そして、全ての分子が同一の速度をもつと仮定すると平均自由行程は(7-16)式となり、常温の空気では(7-17)式が使用される。

$$\lambda = \frac{3}{4n\sigma^2} \quad [m] \quad \dots\dots\dots (7-16)$$

$$\lambda = \frac{6.6 \times 10^{-3}}{p} \quad [m] \quad \dots\dots\dots (7-17)$$

(7-15)式は理想的なモデルの場合で、実際の気体では次式が実験値と一致するとされている。

$$\eta = \frac{1}{2} mn\bar{v}\lambda = \frac{1}{\sigma^2} \sqrt{\frac{m\kappa_B T}{\pi^3}} \quad \dots\dots\dots (7-18)$$

この(7-18)式から、気体の粘性係数は分子数 n つまり圧力には依存せず、温度の上昇とともに粘度が高くなるという一般論が説明できる。

(2) 気体圧力が低い場合

ところが、気体の圧力が極端に低くなり、平均自由行程 λ が代表寸法 d より大きくなってくると、分子が壁面から対向する壁面に直接飛行するようになり、分子間の衝突現象が支配する(7-18)式が成立しなくなる。分子間衝突により生じていた速度勾配 (du/dz) が存在しなくなるので(7-14)式の定義が崩れるのである。このような低圧領域では、速度 u の気体分子が、衝突する壁面に運動量 mu を与えるという「自由分子粘性」の概念で論じられることになる。その運動量によって壁面に作用する力 F は(7-19)式で与えられる。

$$F = \frac{1}{4} n \bar{v} m u \quad \dots\dots\dots (7-19)$$

$n\bar{v}/4$: 面に衝突する分子数
 mu : 衝突する分子が面に与える運動量

そして、 $p=n\kappa_B T \rightarrow n=p/\kappa_B T$ と $\bar{v}=\sqrt{8\kappa_B T/\pi m}$ から(7-19)式は次のように表される。

$$F = \sqrt{\frac{m}{2\pi\kappa_B T}} pu = \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} pu, \quad \eta_0 = \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} \Rightarrow F = \eta_0 pu \quad \dots\dots\dots (7-20)$$

M : 気体のモル質量
 R : 気体定数 (8.31 J/ mol· K)
 η_0 : 自由分子粘性係数

このように、気体の圧力が高い場合は粘性係数が圧力に依存しなかったのに対して、気体の平均自由行程 λ が代表寸法 d より大きくなる低圧下の自由分子粘性領域では剪断力は圧力に比例することになる^[29]。

(3) 実験方法の検討

空気の圧力を変えて実験を行うには、センサの代表寸法つまり電極間ギャップ d より空気の平均自由行程 λ が大きくなるまで圧力を下げる必要がある。これを定性的な図で表すと図 7-15 のようになると推測できる。

平行平板の場合には、そのギャップの寸法と同程度の平均自由行程になる圧力 P を境に、その圧力より十分に高い圧力では空気の粘度は圧力に依存せず、その圧力より十分に低い領域では圧力に比例して空気の粘度が低下する。

ところが、本センサは電極間ギャップが傾斜面になっている。図 7-13 や図 7-14 のように最もギャップが小さい $d_1=7\mu\text{m}$ の部分が支配的になるが、最もギャップが大きくなる $d_1+h=27\mu\text{m}$ についても考慮しておく必要がある。

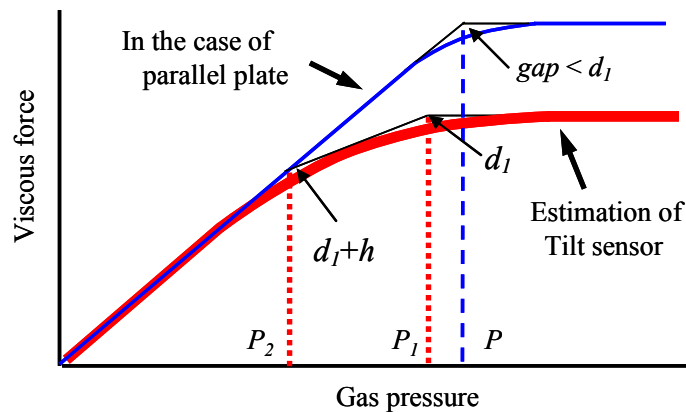


図 7-15 気体圧力と粘度の関係

常温空気の平均自由行程と圧力の関係は(7-17)式で与えられるので、センサのギャップ $d_1=7\mu\text{m}$ と $d_1+h=27\mu\text{m}$ に等しい平均自由行程になる圧力はおおよ次のようになる。

- ・ $d_1=7\mu\text{m}$ $\rightarrow P_1 = 940 \text{ [Pa]}$ ($\leftarrow 6.6 \times 10^{-3} / 7 \times 10^{-6}$)
- ・ $d_1+h=27\mu\text{m}$ $\rightarrow P_2 = 240 \text{ [Pa]}$

したがって、 P_2 より十分に低い圧力、たとえば一桁程度低い圧力として 10Pa ($=1\text{atm} \times 10^{-4} = 10^{-4}\text{Torr}$) 程度まで下げられる能力が実験装置に要求されるので、専用の「実験用真空装置」を用意する必要があることがわかった。

7.3.2 過渡応答特性と減衰比

センサの減衰比を調べる方法としては、センサのステップ応答やインパルス応答などの過渡応答特性を測定するのが簡便である。本センサは FEM の解析から一自由度振動系と考えてよい。一自由度系の過渡応答特性は解析的に求められるので、その解析結果とセンサの過渡応答測定データを比較して減衰比を調べられる。

粘性項を持つ一自由度振動系のモデルは図 7-16 であり、その運動方程式はよく知られているように(7-21)式で表される。

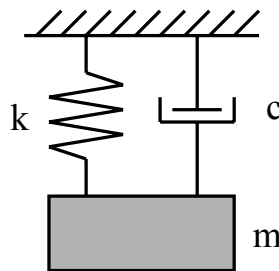


図 7-16 一自由度振動系のモデル

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = F \quad \dots\dots\dots (7-21)$$

$$\omega_0 = \sqrt{k/m}$$

$$c_c = 2\sqrt{mk} = 2m\omega_0$$

$$\zeta = c/c_c \quad , \quad \omega_d = \omega_0 \sqrt{1-\zeta^2}$$

7.1 節で解析的に求めた(7-11)式の c がこの運動方程式の c であり、同じく臨界制動係数 c_c や減衰比 ζ も上記で表されるものである。この運動方程式は減衰比 $\zeta=1$ を境に異なる解が得られる。

(1) $\zeta < 1$ の場合

応答特性は(7-22)式で表される減衰振動になり、初期位相 ϕ の値により初期変位が異なり図 7-17(a)のような減衰振動波形になる。

$$\begin{aligned}
 x &= e^{-\zeta\omega_0 t} (A \cos \omega_d t + B \sin \omega_d t) \\
 &= x_0 e^{-\zeta\omega_0 t} \cos(\omega_d t - \phi)
 \end{aligned}
 \tag{7-22}$$

(2) $\zeta=1$ の場合

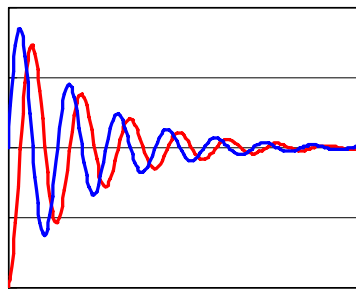
$\zeta=1$ は臨界制動と呼ばれ、減衰振動やオーバーシュートがなくなる。

$$x = (A + Bt)e^{-\omega_0 t}
 \tag{7-23}$$

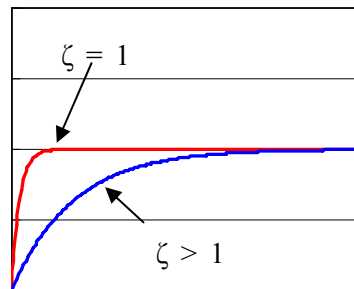
(3) $\zeta > 1$ の場合

オーバードampingの状態であり、 ζ が大きくなるにつれて応答が遅くなる。周波数軸で見ると帯域が低くなる方向であり、応答は遅くなるがノイズ帯域も狭くなるので S/N 比の向上に役立つ方向である。 $\zeta=1$ の(7-23)式、 $\zeta > 1$ の(7-24)式の応答波形例を図 7-17(b)に示す。

$$x = e^{-\zeta\omega_0 t} \left(A e^{\omega_0 \sqrt{\zeta^2 - 1} t} + B e^{-\omega_0 \sqrt{\zeta^2 - 1} t} \right)
 \tag{7-24}$$



(a) $\zeta < 1$



(b) $\zeta=1$ & $\zeta > 1$

図 7-17 一自由度振動系の過渡応答波形

これらの式から得られる応答波形と実験の応答波形データを比較分析することにより、センサの制動係数 c や減衰比 ζ を実験データから求めることができる。

7.3.3 実験装置の設計製作

評価用のセンサは第 6 章の評価に用いたものを使用するが、水素ガスの置換や減圧測定のための装置は別途準備する必要がある。10Pa 程度までの減圧が可能で、センサへの電源供給およびセンサ信号の取り出しも可能な装置である。

ある程度の真空度が実現できればバルブを用いることで水素ガスへの置換は容易である。しかし、大気圧から 10Pa 程度までの圧力が調整可能で、測定時にはその圧力を安定に維持する機能が必要なため一般的な真空容器では無理がある。

安定な実験を行うために図 7-18 に示す真空チャンバを設計製作した。真空ポンプへの接続ポートと、外部リーク用ポートの二つのバルブで水素ガス置換と圧力

調整が可能な構造になっている。とくに、外部リーク用 Inlet Valve は微調整が可能なニードルバルブを用いて圧力調整を容易にしている。

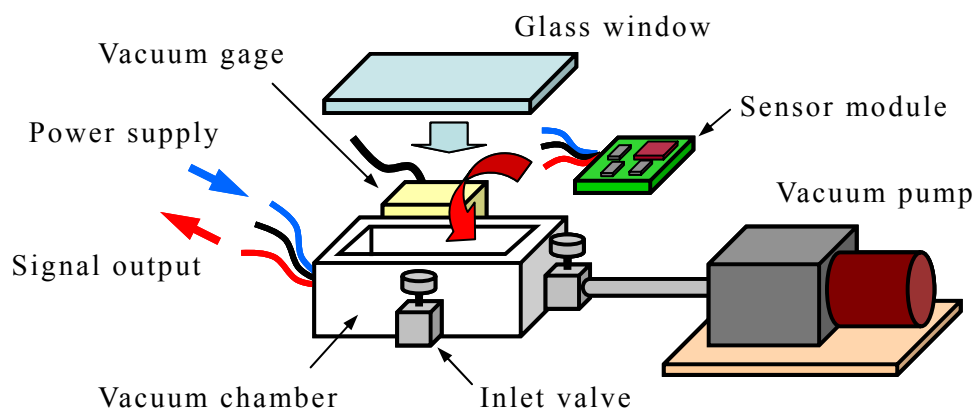


図 7-18 減圧装置の構成

図 7-19 が製作した真空チャンバを組立調整している写真である。真空チャンバにセンサモジュールをセットし、電気信号用ポートのコネクタで結線を行う。ガラス窓を取り付けた後真空ポンプを稼動し、真空ゲージで圧力をモニタしながらバルブで圧力を調整する。大気圧から 10Pa 程度まで圧力の調整維持が可能なことを確認した後に実験に供した。

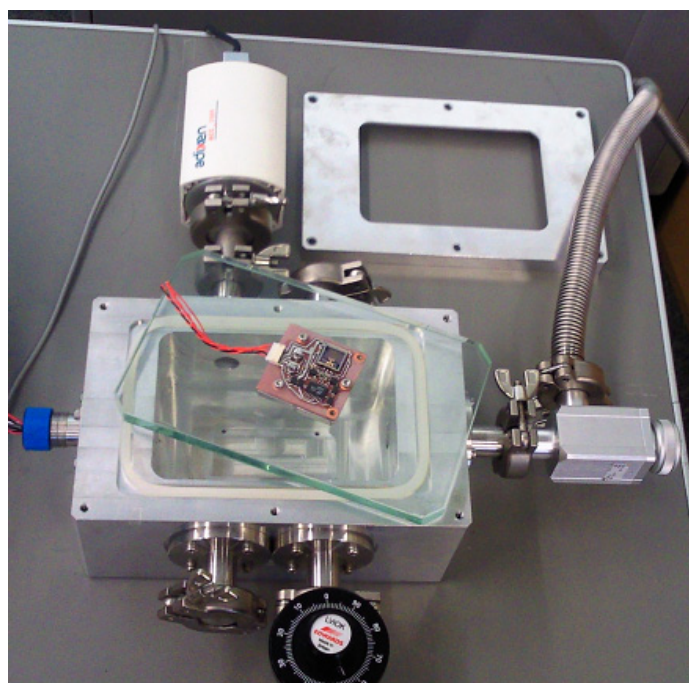


図 7-19 真空チャンバの組立調整

7.4 実験結果

本節では、具体的な測定方法と測定データについて述べ、その測定データの解析から減衰比を算出し、そして測定した減衰比と解析結果を比較することにより解析解の有効性について調べる。

7.4.1 センサ過渡応答特性の測定

はじめに、実験に使用するセンサの固有振動数を FFT 解析により調べた。センサからの出力振動波形データを FFT アナライザで解析して三つの共振点を確認した。表 7-6 に測定値と FEM 解析値を示すが、両者の比較から 144Hz の共振点が基本振動モードであると判断できた。

表 7-6 センサの固有振動数

測定値	FEM 解析値	振動モード
96Hz	99Hz	逆位相モード
144Hz	148Hz	基本振動モード
192Hz	195Hz	ねじり振動モード

センサの過渡応答特性測定にあたっては、このセンサを真空チャンバにセットして、真空チャンバを木製ハンマで軽くたたくことでセンサにインパルス入力を与えた。センサの出力波形信号をデジタルオシロスコープで測定記録し、そのデータをコンピュータに入力して、コンピュータ上で減衰比の算出を行った。

実験の信頼性を確認するために、波形データを測定した後に実験セットを一旦分解して元に戻し、再度組立セッティングを行い同じ手法で波形データの測定を行う。この作業を数回繰り返して同じデータが得られたことで実験再現性の確認を行った。

図 7-20 に実験セット全体の写真を、図 7-21 にデータ測定状況の写真を示す。



図 7-20 実験セット全体の写真

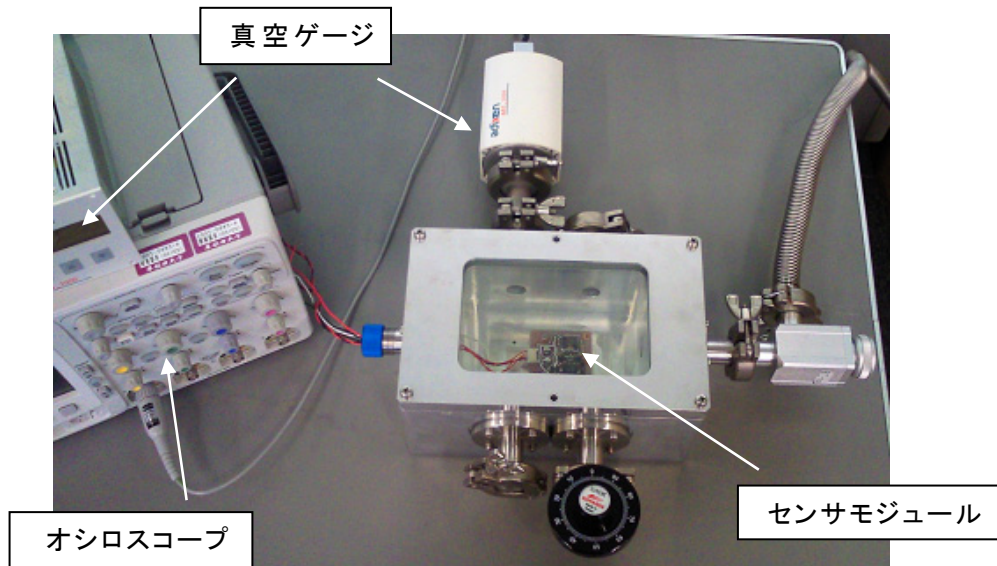


図 7-21 測定時の写真

7.4.2 測定データと減衰比

測定データであるセンサの出力波形の例を図 7-22(a)に示す。横軸が時間[s]で縦軸が出力電圧である。このデータは空気 100Pa のときの出力波形であり、比較のために解析式(7-22)式で計算した波形も図 7-22(b)に示す。

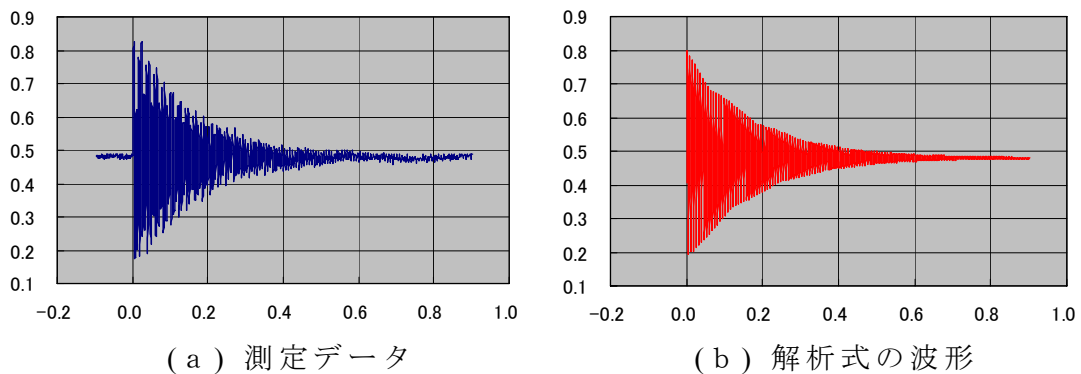


図 7-22 データ比較による減衰比の測定

この測定波形データから次の手順で減衰比を求めた。

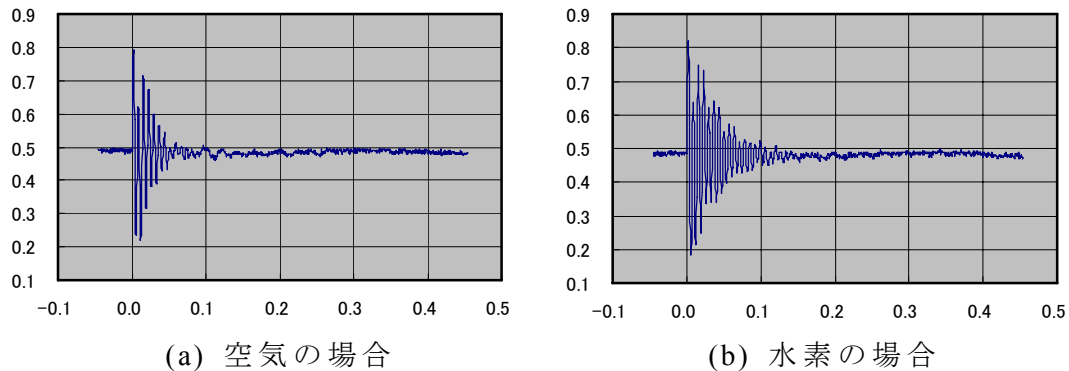
- ・ 測定波形データの包絡線から減衰時間 (時定数) を求める。
- ・ 解析式(7-22)式に適切な減衰比を入力して、その計算出力波形から同様に減衰時間を求める。
- ・ 解析式計算出力波形の減衰時間が測定データの減衰時間と同じになるときに解析式に入力した減衰比を測定データの減衰比とする。

この例では、減衰比は $\zeta=0.0060\sim 0.0065$ の範囲で同じと判断できたので 0.0063 を測定データの減衰比とした。測定データは目的とする共振周波数成分以外にいろいろな外乱により波形が歪んでいるので、このように包絡線から時定数を求める方法が再現性のよい結果をもたらしてくれる。

7.4.3 測定データによる解析式の検証

(1) 空気と水素による実験

大気圧下において、空気の場合と、真空置換により水素ガスに置換した雰囲気における減衰波形データを測定した。図 7-23 にそれぞれの測定減衰波形データを示す。



7-23 空気と水素による測定データ (大気圧)

それぞれの測定データから前項の方法で求めた減衰比の実験値、および表 7-4 と同様に解析式から計算した解析値を表 7-7 に示す。

表 7-7 実験値と解析値の比較

気体	解析値	実験値
空気	0.055	0.06
水素	0.027	0.03

実験測定の再現性を考慮して実験値の有効桁数は一桁に丸めてあるが、空気と水素ともに実験値は解析値に非常によく一致していると判断できる。この結果から、7.2 節で求めた解析式は境界条件を工夫して求めた近似解ではあるが、本センサのように傾斜面を有する電極間の流体制動特性を解析する上で非常に有効であることが確認できた。

(2) 減圧実験

空気と水素の実験で解析解の定量的な検証ができたが、より広い粘性領域での挙動を調べるために空気を減圧して減衰比を求める実験を行った。

7.3.1 項で検討したように、本センサの場合は 940Pa より十分に高い圧力から減衰比の低下が始まり、240Pa より低い領域では圧力の低下に比例して減衰比も低下していくことが予想される。

実験では、大気圧(100000Pa)から 20Pa まで約 20 点の測定データを採取した。

図 7-24 に測定データの例を示すが、（真空度が高く）低圧になるにしたがって、減衰振動の減衰時間が長くなっていることがよくわかる。

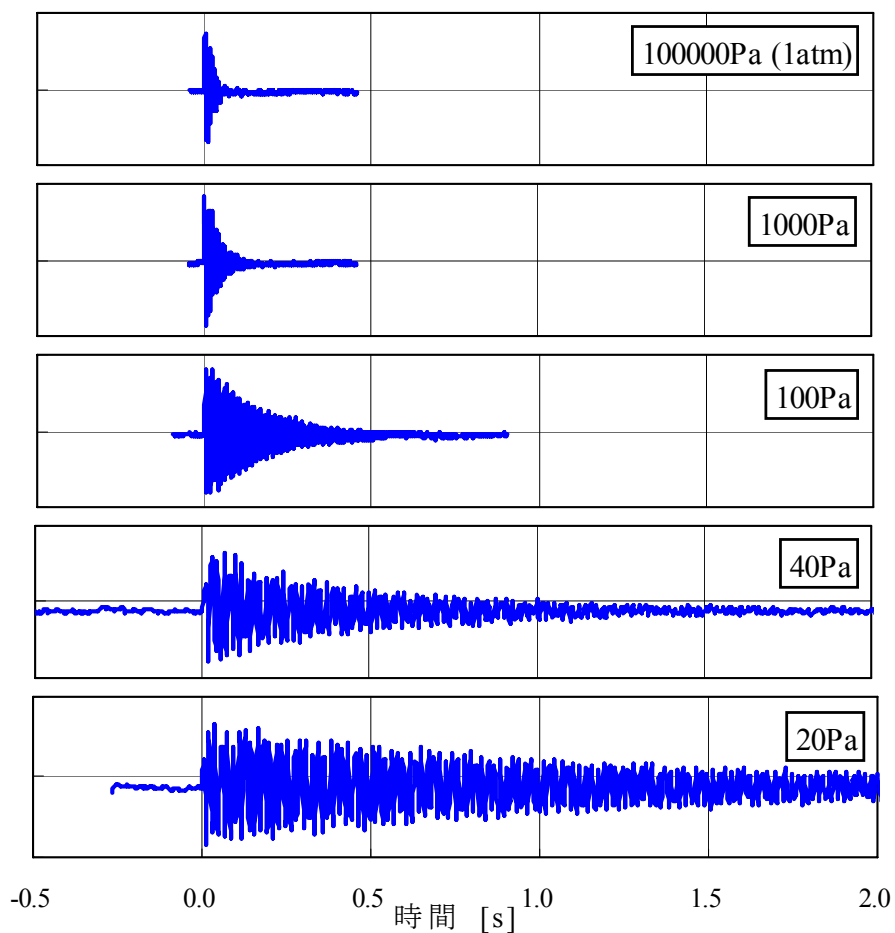


図 7-24 減圧時の減衰波形データ

以上の全測定データについて減衰比を求めてグラフ化したのが図 7-25 である。大気圧から 20000Pa (0.2atm) までは減衰比は $\zeta=0.06$ と一定であり、2000Pa 付近から急激に減衰比が低下している様子が読み取れる。

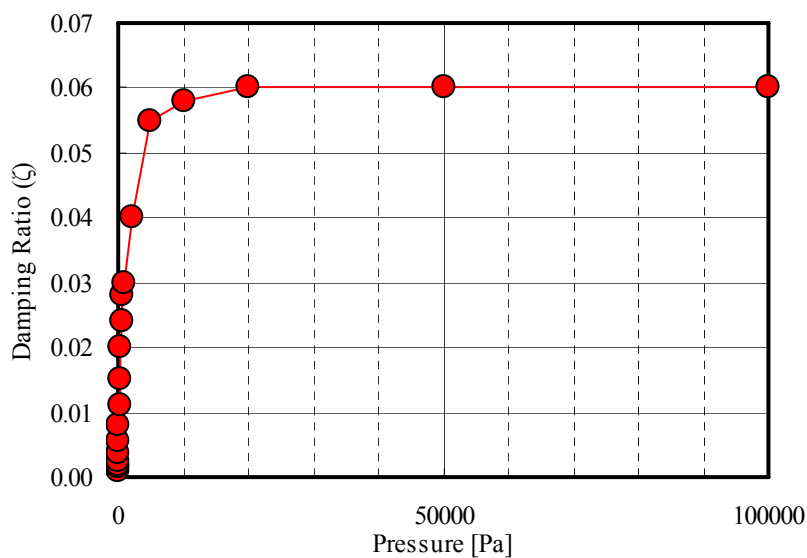


図 7-25 減衰比測定データ

図 7-25 を両対数グラフに書き直したものが図 7-26 である。

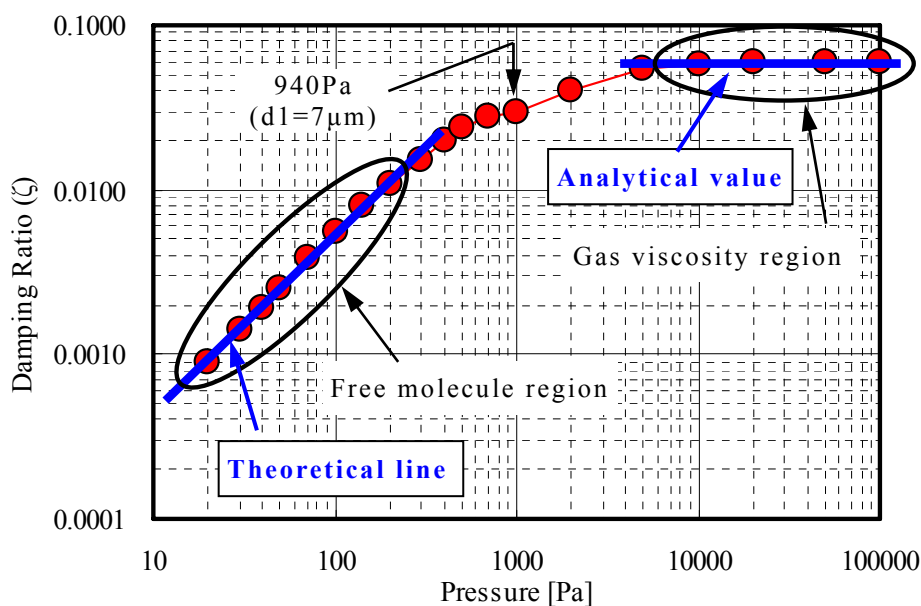


図 7-26 減衰比測定データ (両対数グラフ)

このグラフから、空気の粘性は次の 3 領域に分類できることが実験データからも説明できる。

1) 気体粘性の領域 (10000Pa ~)

(面間距離) ≫ (気体の平均自由行程) の領域では、気体の粘性は圧力に依存しない一定の値を示す。

2) 平均自由行程の領域 (200~10000Pa)

(面間距離) ≃ (平均自由行程) では、気体の粘性が 1) から 3) へ変わる遷移領域であり、本センサの場合は 10000~200Pa という広い範囲にわたって本領域が存在していると考えてよい。

3) 分子粘性の領域 (~200Pa)

(面間距離) ≪ (平均自由行程) の領域では、気体の粘性は圧力に比例して低下し、センサの減衰比も同様に低下する。

以上のように、気体の粘性に関する 7.3.1 項の予想が実験データで確認できただけでなく、大気圧の空気粘度から二桁近く小さい粘性領域に至るまで、センサの減衰比が理論線^[29]に一致して低下するということが確認できた。

7.5 まとめ

MEMS デバイスのダンピング解析については数値解析(FEM)が主流となっており、本センサのように非平行平板電極の場合は数値解析以外の解析手段は困難と考えていた。しかし、本章では微分方程式から近似解ではあるが解析式を導くことができた。そして、解析解の有効性を検証するために実験を行い、解析解と実験データがよく一致することが確認できた。

この制動現象に関する解析解によりセンサの動特性を定性的に理解することができるようになり、さらに定量的な計算の用途にも有用であることが実験的に確認できた。このような解析手法は、今後のセンサ設計や実験評価など他の研究にとっても有効な方法になると考える。

また、本章で述べた FEM 解析結果はセンサの振動特性を理解するための重要なデータになり、また動特性評価のために構築した実験手法も今後のいろいろな研究の参考になるものと思われる。

第 8 章 結論

水晶の MEMS 技術を応用した高感度傾斜角センサの研究について述べてきた。

高感度傾斜角測定という分野は単なる加速度測定とは異なり、非常に奥の深い測定分野であることを新たに認識させられるところからスタートして、基本特性の検討から構成の検討、設計、試作、評価という一連の研究を行った。予想に違わず随所に非常に高いレベルの研究を強いられたが、結果としては目標とした高分解能の実現性が確認され、多くの研究成果を残すことができたものとする。

以下に本論文の成果についてまとめる。

第 1 章 序論

本章では、研究の対象である傾斜角測定について、その現状と将来性について検討し本研究の目的を明確にした。

はじめに、傾斜角測定の特殊性について整理し、加速度測定と傾斜角測定の違いを明確にした。傾斜角測定は微小加速度変化を測定するという意味では加速度測定の一つに分類できるが、高分解能傾斜角測定はその測定量が非常に微小であることから加速度測定とは異なる分野を形成している。加速度測定の分野は MEMS 技術が応用されて各種製品が市場に提供されている。しかし、高分解能傾斜角測定の製品は高精度部品と高精度組立を基本とした従来技術の製品が市場に提供され続けているのが現状である。したがって、この分野において、水晶の MEMS 技術を応用することにより小型高分解能傾斜角センサが実現可能であることを示すことを研究の目的とした。

第 2 章 水晶の材料特性

本章では、具体的な傾斜センサの検討を行う前に、本研究の基本材料である水晶の材料特性について実験を行い報告した。水晶の圧電特性や異方性エッチング特性の基本的なデータは諸研究で明らかにされている。しかし、本研究で対象とする高感度センサを実現するためには、従来にない微小で高アスペクト比の構造体をウェットエッチング加工で製作する必要があり、またそのような微小構造体の機械強度に関する基礎データも必要になる。そのためには、水晶の微小試料を用いた場合の「機械強度データ」、ならびにウェットエッチング加工による微細加工の限界を見極めるための「微細エッチング加工の特性」も明らかにしておく必要がある。ここでは、それらの基礎データを得るために、実験によりデータを取得してそれらの限界領域を定量的に示した。

第3章 傾斜角センサ基本構成の検討

本章では、設計検討を行うために必要なセンサの基本構成について検討した。検出方法の明確化や、センサの構成や形状について、また高分解能化を実現するための方式について検討を行い、開発するセンサの基本構成と基本性能について設計開発の指針となる概要をまとめた。

第4章 傾斜角センサの最適設計

前章の基本構成案をもとに具体的な設計計算を行った。構成を一言で述べると差動容量検出型の微小加速度検出センサとも呼べる。そのため、基本構成要素であるバネ（梁）の変位計算式、静電容量を求めるための静電容量計算式、差動検出を実現するための差動構成とその定量的な計算検討結果などセンサの特性を計算するための計算式を導出して、最適解を得るための手順も示すことができた。この一連の検討結果として、 $5 \times 5 \times 0.1 \text{mm}$ の水晶チップ内に全ての要素が構成でき、 0.0001° の高分解能センサが実現可能であることを設計計算の結果として明らかにすることができた。

第5章 傾斜角センサの製作

本章では、設計したセンサを具体的な「物」として作り上げる水晶加工プロセスの内容について記述した。水晶の加工についてはこれまでも多くの報告があるが、水晶のエッチング加工としてはまだ例のない微細加工プロセスであることから、第2章の微細加工特性のデータを活用した。また、本プロセスでは差動構成を実現するための電極分離プロセスとして新しい手法によるリフトオフプロセスの開発も行った。そして、製作した水晶チップをセラミックパッケージに実装するために、一般的に使用されるハンダや導電性接着剤ではなく、信頼性の高いAu-Sn共晶合金による接合を行った。これらの一連の加工プロセスは今後の水晶微細加工の標準プロセスとして活用できるものと考えている。

第6章 傾斜角センサの評価

試作したセンサの基本特性である傾斜角に対する評価実験を行った。実験のために試作した評価システムの構成について述べるとともに、その測定システムで評価したセンサの測定結果について記述した。高分解能領域の実験は困難を極め、センサ出力のゆらぎが分解能を見極める上での障害となったが、センサ出力のゆらぎの標準偏差が分解能と等価と考えてデータ処理を行い、 0.00012° という分解能を得ることができた。これは目標分解能 0.0001° とほぼ同等の値である。

このゆらぎについては検出回路の問題を含むことから、今後の研究の進展の過程で明らかにされていくべきものと考えている。

第7章 傾斜角センサ動特性の解析評価

最後に、解析が困難と考えていたセンサの動特性についてまとめることができた。本センサのようなメカニカルセンサでは共振現象が必ず発生し、その共振現象と制動対策を検討するために動特性の解析が不可欠になる。Si の MEMA センサでも同様の解析が行われているが、その手法は数値解析 (FEM) によるものがほとんどである。とくに本センサのような異方性エッチングを利用したデバイスではエッチング面と呼ばれる傾斜面が生じるので、この傾斜面のために解析式を求めるのは困難で数値解析以外の解析手法はないと思われていた。

ここでは、流体の運動方程式をもとに境界条件を工夫することで解析近似解を得ることができた。そして、その近似解の有効性を確認するために実験を行い、実験結果からもその有効性が確認できた。この解析手法は現象を定性的に説明してくれ、さらに定量的な計算にも利用できることから、今後の各種デバイスやセンサの研究に大きなツールとして貢献してくれるものと考えられる。

以上、本論文における各章の成果を総括した。高感度傾斜角センサの基本構想から構成検討・設計製作・特性評価という一連の研究を行い、水晶の MEMS 技術を用いて傾斜測定としては最高クラスの性能を有するセンサが実現可能であることを示すことができた。

本論文はセンサの開発企画から目標設定、設計、試作、評価までセンサ開発の全プロセスを歩んだと言える内容になっている。そういう意味で、今後センサ研究に取り組もうとする若い研究者にとって、センサ研究の開発過程を理解するための参考になってくれるものと期待したい。

そして、本研究では微小量の検出ということから出力電圧の「ゆらぎ」という問題がクローズアップされることになった。このゆらぎという現象は、測定の分野においては古くから測定限界との関連性という視点で重要視されてきた。「温度ゆらぎ」「 $1/f$ ゆらぎ」「ブラウン運動」等々、極限現象として興味深い研究対象である。本センサにおいても、検出回路の IC 化が進められた上で、今後この問題をセンサデバイスの重要な課題として研究が進められていくことを期待する。

また、動特性の評価において得られた各種データ、とくに真空下でのセンサの挙動に関するデータは多くの情報を提供している。今後のいろいろな研究の基礎データとして利用されるだけでなく、新しい研究のテーマも内在しているものと思われる。

これらのことを含めて、本論文が今後の水晶 MEMS センサの研究に役立ってくれることを期待して結びとする。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、多くの方々のご理解とご協力ご指導をうけたまわりました。

本研究を遂行するにあたり、研究を始めるきっかけを与えていただいたことをはじめ、研究の過程において終始暖かいご指導と激励、また社会人学生であることに対するお心遣いなども含めてご指導いただいた、指導教官である早稲田大学大学院情報生産システム研究科教授の植田敏嗣先生に深謝の意を表します。

また、研究員や学生との間に多くの議論の機会を与えていただいたことにも深く感謝いたします。

そして、本論文の審査をしていただいた本研究科教授の李義頡先生、ならびに巽宏平先生には貴重な助言を戴きましたことに深く感謝いたします。

研究の初期から水晶加工プロセスの実務を一手に担っていただいた梁金星研究員（現：中国南京 東南大学准教授）とは終始研究の内容について議論しながら微細加工プロセスを立ち上げてきました。これまでのご努力に敬意を表するとともに、心より感謝の意を表します。

(株)坂本電機製作所の國友建氏には、実験を進めるにあたり実験装置や実験治具の設計製作に協力いただき、また傾斜計の実務に対する知見を与えていただいたことに感謝いたします。

そして、既に卒業されています、松尾高博氏、播磨幸一氏をはじめ、多くの学生の皆様にご協力いただいたことに感謝いたします。

最後に、これまで影ながら応援してくれた妻に感謝します。

参考文献

- [1] (財) 日本規格協会：精密水準器 (Precision Levels), JIS B7510 - 1993,
- [2] 香住浩伸：やさしい測定学, pp.171-175, 科学図書出版
- [3] (財) マイクロマシンセンター：MEMS 関連市場の現状と将来予測について, 2012年3月
- [4] International Electrotechnical Commission: Synthetic quartz crystal - Specifications and guidelines for use, IEC 60758 Edition 4.0, 2008.11
- [5] (財) 日本規格協会：人工水晶 (Synthetic quartz crystal), JIS C6704 - 2009
- [6] International Critical Tables : Mechanical and Thermal Properties of The Various Forms of Silica, pp.20-22, 1928, MaGRAW-HILL BOOK COMPANY Inc.
- [7] R. W. Ward : “The Constants of Alpha Quartz”, IEEE-UFFC, 14th Piezoelectric Devices Conference and Exhibition, Sept. 15-17, 1992
- [8] F. Kohsaka, J. Liang and T. Ueda: “Mechanical Strength of Quartz Micromechanical Devices”, Proceeding of the 21st Sensor Symposium, pp.225-228, October 2004
- [9] 植田敏嗣, 幸坂扶佐夫, 飯野俊雄, 山崎大輔：“水晶のエッチング形状の予測法とそのデバイスへの応用”, 計測自動制御学会論文誌, Vol.23, No.12, pp.1233-1238, 1987年12月
- [10] C. Hedlund, U. Lindberg, U. Bucht and J. Soderkvist : “Anisotropic etching of Z-cut quartz”, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol.3, No.2, pp.65-73, 1993
- [11] J. Liang, F. Kosaka, T. Matsuo and T. Ueda : “Wet Etched High Aspect Ratio Microstructures on Quartz for MEMS Applications”, IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines, Vol.127, No.7, pp.337-342, July 2007
- [12] 植田敏嗣, 幸坂扶佐夫, 山崎大輔, 林尚典：“水晶マイクロマシニングを利用した高感度マイクロフォン”, 電気学会論文誌 E, Vol.121, No.12, pp.629-635, 2001年12月
- [13] F. Kohsaka, J. Liang, T. Matsuo and T. Ueda : “High Sensitive Tilt Sensor for Quartz Micromachining”, IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines, Vol.127, No.10, pp.431-436, October 2007
- [14] (社) 日本機械学会：“機械工学便覧 基礎編 材料力学 第3章 はりの曲げ”, 2005年
- [15] 佐々木実, 熊川真一郎, 羽一博：“立体的マイクロマシニングのためのレジストスプレーコーティング”, 電学論 E, 122 巻, 5 号, pp.235-243, 2002年

- [16] 井上幸寛, 幸坂扶佐夫, 梁金星, 植田敏嗣 : “スプレー法による両面レジストコーティングの検討”, 平成 17 年 度電気関係学会九州支部連合大会, 04-2P-08, p168, 2005 年
- [17] R. M. Halverson, M. W. MacIntyre and W. T. Motsiff : “The Mechanism of Single-Step Liftoff with Chlorobenzene in a Diazo-Type Resist”, IBM J. RES. DEVELOP. Vol. 26, No. 5, pp.590-595, 1982
- [18] G. G. Collins and C. W. Halsted : “Process Control of the Chlorobenzene Single-Step Liftoff Process with a Diazo-Type Resist”, IBM J. RES. DEVELOP, Vol. 26, No. 5, pp.596-604, 1982
- [19] J. Liang, F. Kosaka, T. Matsuo and T. Ueda : “A Novel lift off process and its application for capacitive tilt sensor”, The 5th IEEE Conference on Sensors, Daegu Korea, pp.1422-1425, October 2006
- [20] 植田敏嗣, 幸坂扶佐夫, 飯野俊雄, 山崎大輔 : “水晶温度計 (3) - 広範囲温度計プローブ”, 計測自動制御学会学術講演会, JS-8-2, p109, 1986 年 7 月
- [21] T. Matsuo, J. Liang, J. Pawlat and T. Ueda : “High Frequency Drive of a Diode-bridge Type Differential Capacitance Detection Circuit”, Proceeding of the 23rd Sensor Symposium, pp.287-290, 2006
- [22] (株) ホクトシステム : FEMLEEG 有限要素法解析システム
- [23] W. S. Griffin, H. H. Richardson, and S. Yamanami : “A study of fluid squeeze-film damping”, ASME Journal of Basic Engineering, pp.451-456 (1966)
- [24] J. B. Starr : “Squeeze-film damping in solid-state accelerometers”, Solid-State Sensors and Actuators Workshop, Hilton Head Island, SC, pp.44-47 (1990)
- [25] Y. J. Yang and S. D. Senturia : “Numerical simulation of compressible squeezed-film damping”, Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, SC, pp.76-79 (1996)
- [26] T. Veijola, H. Kuisma, J. Lahdenpera and T. Ryhanen : “Equivalent-circuit model of the squeezed gas film in a silicon accelerometer”, Sensors and Actuators, A48, pp.239-248 (1995)
- [27] T. A. Delchar (石川和雄 訳) : ”真空技術とその物理”, 丸善
- [28] J. F. O’Hanlon (野田保, 斉藤弥八, 奥谷剛 訳) : “真空技術マニュアル”, 産業図書
- [29] 国分清秀, 平田正紘, 小野雅敏, 村上寛, 戸田義継 : “水晶振動子を用いた摩擦真空計の理論”, 真空, Vol.29, No.2, pp.101-113, 1985

研究業績

学術誌原著論文

1. Fusao Kohsaka, Jinxing Liang, and Toshitsugu Ueda, “Damping Characteristics of Quartz Tilt Sensor with Nonparallel Comb Electrode”, IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines, Vol.133, No.2, pp.37-41, February 2013
2. Jinxing Liang, Fusao Kohsaka, Takahiro Matsuo, Xuefeng Li, Ken Kunitomo, and Toshitsugu Ueda, “Development of Highly Integrated Quartz Micro-Electro-Mechanical System Tilt Sensor”, Japanese Journal of Applied Physics 48, pp. 06FK10_1-4, June 2009
3. Jinxing Liang, Fusao Kohsaka, Takahiro Matsuo, Xuefeng Li, Toshitsugu Ueda, “Improved bi-layer lift-off process for MEMS applications”, Microelectronic Engineering Vol.85, Issue 5-6, pp.1000-1003, February 2008
4. Jinxing Liang, Takahiro Matsuo, Fusao Kohsaka, Xuefeng Li, Ken Kunitomo and Toshitsugu Ueda, “Fabrication of Two-Axis Quartz MEMS-Based Capacitive Tilt Sensor”, IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines, Vol.128, No.3, pp.85-90, March 2008
5. Fusao Kohsaka, Jinxing Liang, Takahiro Matsuo and Toshitsugu Ueda, “High Sensitive Tilt Sensor for Quartz Micromachining”, IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines, Vol.127, No.10, pp.431-436, October 2007
6. Jinxing Liang, Fusao Kosaka, Takahiro Matsuo and Toshitsugu Ueda, “Wet Etched High Aspect Ratio Microstructures on Quartz for MEMS Applications”, IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines, Vol.127, No.7, pp.337-342, July 2007
7. 植田敏嗣, 幸坂扶佐夫, 山崎大輔, 林尚典, “水晶マイクロマシニングを利用した高感度マイクロフォン”, 電気学会論文誌 E, Vol.121, No.12, pp.629-635, 2001年 12月

8. 植田敏嗣, 幸坂扶佐夫, 飯野俊雄, 山崎大輔, “水晶のエッチング形状の予測法とそのデバイスへの応用”, 計測自動制御学会論文誌, Vol.23, No.12, pp.1233-1238, 1987年12月
9. 植田敏嗣, 幸坂扶佐夫, 飯野俊雄, 山崎大輔, “音叉振動子を用いた水晶温度センサ”, 計測自動制御学会論文誌, Vol.23, No.11, pp.1117-1122, 1987年12月

査読のある国際会議・シンポジウム論文

1. Jinxing Liang, Fusao Kohsaka, Xuefeng Li, Ken Kunitomo and Toshitsugu Ueda, “CHARACTERIZATION OF A QUARTZ MEMS TILT SENSOR WITH 0.001° PRECISION”, The 15th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators & Microsystems (Transducers 2009), pp.308-310, June 2009
2. Jinxing Liang, Fusao Kohsaka, Xuefeng Li, Ken Kunitomo and Toshitsugu Ueda, “High integrated quartz MEMS capacitive tilt sensor”, Proc. of 21st International Microprocesses and Nanotechnology Conference, pp. 490-491, October 2008
3. Takahiro Matsuo, Jinxing Liang, Fusao Kohsaka, Toyoki Tagushi and Toshitsugu Ueda, “Tilt Sensor System Using MEMS Device and CMOS Technology”, Proceedings of The 24th Sensor Symposium, Micromachine and Applied Systems, pp.272-275, October 2007
4. Jinxing Liang, Takahiro Matsuo, Fusao Kosaka, Xuefeng Li and Toshitsugu Ueda, “Fabrication of Two-axis Quartz MEMS-based Capacitive Tilt Sensor”, Proceedings of the 24th Sensor Symposium on Sensors, Micromachines and Applied System, pp.391-395, October 2007
5. Jinxing Liang, Fusao Kohsaka, Takahiro Matsuo, Xuefeng Li and Toshitsugu Ueda, “Improved bi-layer lift off process for 3D patterning”, 33rd International Conference on Micro- and Nano-Engineering 2007, Copenhagen Denmark, P-PAT-5, MNE 2007, pp.703-704, September 2007.

6. T. Matsuo, J. Pawlat, J. Liang, F. Kohsaka, T. Ueda, "Microfabrication process and power supply for tilt measurement device", 28th ICPIG, Prague Czech Republic, pp.810-812, July 2007
7. Jinxing Liang, Fusao Kosaka, Takahiro Matsuo and Toshitsugu Ueda, "A Novel lift off process and its application for capacitive tilt sensor", The 5th IEEE Conference on Sensors, Daegu Korea, pp.1422-1425, October 2006
8. Jinxing Liang, Fusao Kosaka, Takahiro Matsuo and Toshitsugu Ueda, "Deep Wet Etching of Z Cut Quartz Wafer for MEMS Applications", Proceedings of The 23rd Sensor Symposium, Micromachine and Applied Systems, pp.31-35, October 2006
9. Toshitsugu Ueda, Fusao Kohsaka, TILT SENSOR USING QUARTZ MEMS TECHNOLOGY, 2005 International Symposium on Nano Science and Technology, Tainan Taiwan, pp.8-9, November 2005
10. Fusao Kohsaka, Jinxing Liang and Toshitsugu Ueda, "High Sensitive Tilt Sensor for Quartz Micromachining", Proceeding of the 22nd Sensor Symposium, pp.371-374, October 2005
11. Fusao Kohsaka, Jinxing Liang and Toshitsugu Ueda, "Mechanical Strength of Quartz Micromechanical Devices", Proceeding of the 21st Sensor Symposium, pp.225-228, October 2004
12. Toshitsugu Ueda, Fusao Kohsaka, Toshio Iino and Daisuke Yamazaki, "Temperature Sensor Using Quartz Tuning Fork Resonator", Proc. of The 40th Annual Frequency Control Symposium, pp.224-229, 1986
13. Toshitsugu Ueda, Fusao Kohsaka, Toshio Iino and Daisuke Yamazaki, "Quartz Crystal Micromechanical Devices", The 3rd International Conference on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'85), pp.113-116, 1985

講演論文

1. 井上 幸寛, 幸坂 扶佐夫, 梁金星, 植田 敏嗣, “スプレー法による両面レジストコーティングの検討”, 平成 17 年度電気関係学会九州支部連合大会, p163, 2005 年
2. 幸坂 扶佐夫, 梁 金星, 植田 敏嗣, “水晶を用いた高感度傾斜角センサの検討”, 平成 17 年電気学会全国大会講演論文集, p222 (2005)