

千葉工業大学
博士学位論文

SOI-MEMS 技術による静電容量式マイクロ加速
度センサの最適化に関する研究

平成 31 年 3 月

劉 健男

要旨

加速度センサは MEMS 技術の適用により小型化，低価格化が進み，様々な用途に用いられるようになった。各検出方式の中静電容量式加速度センサは作り易さ，また安定な特性によって主流となっている。これら静電容量式加速度センサでは重りが複数の構造の弾性体で支持されていて，各種の形状が用いられてきた。将来のさらなる小型化・高感度化のためには必ずしも最適な形状が明確にはなっていないように思われる。

一方，感度はビームの長さ，幅や形状にも依存し，それらのパラメータにより共振周波数も大きく変化する。しかしながら，従来技術のビームの折り返し構造は多種多様で，系統的に検討がなされておらず，また重りは比較的大きいという課題があった。そこで本研究では，製造工程が簡易な SOI(Silicon On Insulator)-MEMS 技術を用いた静電容量センサを対象とし，重りを一定として，ビームのパラメータを変化させた時の感度，共振周波数，高次共振モードをシミュレーションにより系統的に求め，各種パラメータによるこれらの特性の依存性を明確化し，最適化する手法の検討を行った。具体的には重りの辺の長さまでビームの長さを延ばすような構成，およびその技術に基づいて，さらに小型化の可能性についての検討を行った。更に高感度，小型化を実現するために静電容量検出方式をベースとした共振形加速度センサの可能性についても検討を行った。

第 4 章では重りの辺の長さまで梁の長さを延ばすような構成についての可能性の検討を行った。まず，シミュレーター IntelliSuite を用いて，重りが一定の場合，構造の片側の梁の長さを $100\ \mu\text{m}$ から $1000\ \mu\text{m}$ まで変化させ，さらに折り返し構造によって，検出軸の変位，他軸感度，共振周波数，高次モードの比について，その依存性を明確にした。重りの辺の長さと同じビーム長さのセンサの高次の共振周波数の基本共振周波数に対する比率は梁の全長が $500\ \mu\text{m}$ 以上であれば高次共振周波数の比は従来形の折り返し構造と比較して 2 倍以上にできることがわかった。同じ梁の全長で重りの寸法が $1\ \text{mm}$ 場合，折り返し 5 回のセンサに対し，2 本梁で折り返しをなくすことにより感度は約 2 倍にすることができる。この時第 1 モードの共振周波数は $680\ \text{Hz}$ から $330\ \text{Hz}$ へと低下するが， $100\ \text{Hz}$ 以下単純な動きの検出，制御には十分に応用できるものと思われ，重りの辺の長さまで梁の長さを延ばすような構成は感度向上に有効であると確認できた。

第 5 章では感度と共振周波数の梁のパラメータ依存性とその構成を検討し，デバイスの小型化のための重りの一辺の長さのビーム長を有する静電容量加速度センサの基本構造設計方法を検討した。重りの辺の長さまで梁の長さを延ばすような構成で，正方形重りの寸法を変更しながら，パラメータを変化させた時の感度，共振周波数，高次共振モードをシミュレーションにより系統的に求め，各種パラメータによるこれらの特性の依存性を明確化し，構造の小型化についての可能性の検討を行った。

重りのサイズが $1000\ \mu\text{m}^2$ 、 $750\ \mu\text{m}^2$ 、および $500\ \mu\text{m}^2$ である 3 種類の MEMS 静電容量型加速度センサの感度および共振周波数について、FEM シミュレーター IntelliSuite を用いて計算した。重りの辺と同じビーム長さ場合、重りの寸法が $1000\ \mu\text{m}^2$ で折り返しビームなしセンサの感度が $476\ \text{mV/G}$ に対し、 $750\ \mu\text{m}^2$ でビーム 1 回折り返しセンサは $452\ \text{mV/G}$ になり、ほぼ同じ感度という結果を得た。一方、 $500\ \mu\text{m}^2$ でビーム 7 回折り返しセンサの感度は $285\ \text{mV/G}$ であり、試作したプロトタイプの実験結果はシミュレート結果とよく一致した。折り返しビーム構造を用いて、重りサイズを低減しながら、性能を維持する手法の有効性を確認することができたと考える。

第 6 章ではさらなる小型化を実現するために、SOI-MEMS 技術を用いた静電駆動の共振型加速度センサにおいて、変位検出用楕歯電極に DC の制御電圧を重畳させることで静電ポテンシャルを発生させて感度を向上させる方式の提案を行い、2 種類のプロトタイプを設計・試作し、制御電圧対共振周波数特性の評価を行った。基準となる重り寸法 $1000\ \mu\text{m}^2$ に対し、2 つタイプのプロトタイプは重り寸法が $750\ \mu\text{m}^2$ と $500\ \mu\text{m}^2$ で、後者については同等の共振周波数と感度を実現するために支持ビームを折り返し構造とした。FEM シミュレーションでは制御電圧を $2\ \text{V}$ 程度とすることで $\pm 1\ \text{G}$ の加速度印加に対して、共振周波数変化が数十%と大幅に変化する特性が得られた。プロトタイプの評価でもほぼ同様な傾向の特性が得られ、提案した方式の有効性を確認することができた。モデル 1 の感度は $105\ \text{Hz/G}$ であり、モデル 2 は $135\ \text{Hz/G}$ の感度を得ることができた。これにより折り返し梁構造が共振型加速度センサの小型化に有効と確認できた。今後応用分野に応じ、適切な周波数応答範囲を設計し、共振型加速度センサの最適化を検討するとともに制御電圧の調整手法の確立を目指していく。

以上、本研究において得られた成果を総括した。小型化・高感度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、SO-MEMS 技術を用いた小型静電容量式加速度センサの最適化手法を示すことができたと考えている。

Abstract

Since MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) sensors were initially commercialized as accelerometers for Airbag systems in the 1990s, they have been widely used for various applications. The common detection mechanisms for accelerometers are piezoelectric, piezoresistive or capacitive. Among them the capacitive type is easy to be produced using the MEMS technology. This study focuses on capacitive micro accelerometers fabricated using a simple SOI-MEMS technology, investigates the dependences of their sensitivities and resonant frequencies on the beam parameters and its configuration, and studies the feasibility of an accelerometer with a beam length as long as the side length of the proof mass. On the other hands we studies the method of designing the structures of capacitive accelerometers with beam lengths as long as the side length of the proof mass for miniaturizing the device by reducing the size of proof mass. Finally, a novel resonant accelerometer, where the resonant frequency is changed by the negative spring constant generated by a displacement of the proof mass in the electrostatic potential between the comb electrodes was proposed and the simulation results of the basic characteristics, the fabrication of the prototypes and the evaluation results were presented.

Chapter 4: A feasibility study on the design techniques for optimizing an accelerometer was carried out in which the individual beam has the same length as the side of the proof mass. The sensitivities (displacement), cross sensitivities, the resonant frequencies and the ratio of the fundamental resonant frequency to that of the higher modes for three types of MEMS capacitive accelerometer, whose proof mass sizes are $1000 \mu\text{m}^2$ were simulated using the FEM simulator "IntelliSuite". The ratio of resonant frequencies of the accelerometer where the beam length is as long as that of the side of the proof mass can be double compared to the conventional folded-beam type accelerometer with $500\mu\text{m}$ beam. In addition, when the proof mass is $1000 \mu\text{m}^2$, and the whole beam length are same, the sensitivity of the accelerometer where the beam length is as long as that of the side of the proof mass could be significantly enhanced about 3 times compared to the conventional 5 times folded-beam type accelerometer. The concept of the beam length as long as the side length of the proof mass structure turned out to be effective to the sensitivity.

Chapter 5: A feasibility study on the design techniques for miniaturizing an accelerometer was carried out in which the individual beam has the same length as the side of the proof mass. The sensitivities and the resonant frequencies for three types of MEMS capacitive accelerometer, whose proof mass sizes are $1000 \mu\text{m}^2$, $750 \mu\text{m}^2$, and $500 \mu\text{m}^2$, were simulated using the FEM simulator "IntelliSuite". Using the design principle where the beam length is as long as that of the side of the proof mass, the sensitivity could be significantly enhanced compared to the conventional folded-beam

type accelerometer. In addition, when the proof mass is reduced, the sensitivity could be increased by folding the beams. Sensors with $750\ \mu\text{m}^2$ proof mass and 2 times folding beam were proposed, where the sensitivity and resonance frequencies were set close to those of reference model A-Type. As to those with $500\ \mu\text{m}^2$ proof mass 7 times folding beam was used, but the sensitivity is half to reference Type A, and the resonance frequency was increased by 2 times. It turned out that accelerometers with a folding beam length as long as the side length of the proof mass are quite effectual when the proof mass is reduced. By combining a beam length as long as the side length of the proof mass and a folding beam structure, the device size of the accelerometer could be successfully reduced.

Chapter 6: Resonant accelerometers using SOI-MEMS techniques were proposed, where electrostatic potential generated by a control DC voltage applied to the sense electrodes. Two types of prototype were fabricated and the dependences of resonant frequency f on the applied control DC voltage were measured. Dimensions of the proof mass of two types of accelerometers are $750\ \mu\text{m}^2$ and $500\ \mu\text{m}^2$, and the latter was provided with folding beams in order to attain the similar resonant frequency and sensitivity. Several tens percents of change in the resonant frequency for the applied acceleration of $\pm 1\ \text{G}$ were obtained with the control voltage of $2\ \text{V}$ by FEM simulation. Measured resonant characteristics of the fabricated prototypes agreed reasonably with the simulated ones. The control voltage, however, was rather smaller than expected, which is caused by the simplified simulation models with smaller number of the electrode pairs. In addition, the miniaturization of the resonant accelerometers by using folding beams turned out to be effective. For applying this technology to specific applications, a method of adjusting the control voltage should be established together with optimization of the resonant frequency and the sensitivity.

目次

第1章 序論	
1.1 研究背景	4
1.2 研究の狙い	8
1.3 本論文の構成	16
第2章 デバイス構造と動作原理	4
2.1 静電容量型加速度センサの動作原理と構造	
2.1.1 静電容量型加速度センサの動作原理.....	17
2.1.2 静電容量型加速度センサの構造	18
2.2 共振型センサの原理と構造	
2.2.1 静電アクチュエータ	20
2.2.2 共振周波数静電チューニング.....	24
2.2.3 今回提案した共振型加速度センサの基本構造	26
第3章 SOI-MUMP 製造プロセスと試作サンプル評価方法	
3.1 センサデバイスの製造プロセス.....	28
3.2 実装プロセス	
3.2.1 センサデバイスの乾燥.....	28
3.2.2 レジストの塗布	36
3.2.3 レジスト洗浄	37
3.2.4 ダイボンド.....	38
3.3 周波数特性の評価方法	
3.3.1 ピックアップセンサについて.....	40

3.3.2	チャージアンプおよび容量計算.....	41
3.4	入出力特性の評価方法.....	43
第4章 重りの長辺に沿ったビームを用いた静電容量型加速度センサ		
4.1	基本構造検討.....	45
4.2	シミュレーションソフトと基本構造のパラメータ	
4.2.1	IntelliSuite とシミュレーションの狙い.....	46
4.2.2	基本構造のパラメータ.....	49
4.3	シミュレーション結果.....	51
4.4	プロトタイプ設計.....	57
4.5	プロトタイプ試作と評価.....	58
4.6	まとめ.....	61
第5章 静電容量型加速度センサの小型化検討		
5.1	基本構造の検討.....	62
5.2	シミュレーション結果.....	64
5.3	プロトタイプのシミュレーション.....	68
5.4	プロトタイプ試作.....	72
5.5	プロトタイプ評価.....	73
5.6	まとめ.....	75
第6章 櫛歯電極間静電ポテンシャルを用いた共振型加速度センサ		
6.1	共振型加速度センサの構成.....	77
6.2	MEMSpice による特性シミュレーション	
6.2.1	MEMSpice について.....	80
6.2.2	シミュレーション結果.....	82

6.3 IntelliSuite によるシミュレーション	
6.3.1 使用する材料, モデル 4.5 プロトタイプ試作と評価	85
6.3.2 共振モード解析結果	88
6.3.3 加速度印加時共振周波数のシミュレーション結果	89
6.3.4 MEMSpice と Intelli Suite の結果の比較	95
6.4 プロトタイプ試作と評価	96
6.5 まとめ	102
第7章 結論	104
謝辞	106
参考文献	107
研究業績	111
Appendix	
Appendix A シミュレーションソフト「Intelli Suite」について	113
Appendix B シミュレーションソフト「MEMSpice」について	128
Appendix C 静電容量型センサの評価回路のレイアウト	134
Appendix D IC について	135
Appendix E IC ソケット(DIP28 セラミックパッケージ)の電路	136
Appendix F 回転ステージのプログラマの使い方について	137
Appendix G ワイヤーボンディング方法	139
Appendix H 加速度ピックアップの取り付け方法	141

第1章 序論

1.1 研究背景

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)加速度センサは 1990 年頃自動車のエアバッグ・システム用として実用化されて以来、携帯電話やゲームコントローラ⁽¹⁾など様々な分野で普及が進み、大きな進歩を遂げてきた。MEMS 技術は主に、インクジェットプリンター用のプリンターヘッド、圧力センサ、光スキャナなど、幅広い分野における多様な製品の高機能化、安全化を支える必要不可欠なデバイスとして応用されている。

MEMS 技術の特長としては以下の 3 点があげられる。

(1) 微細化

MEMS は主に半導体微細加工（一括加工）技術を用いて作るので超小型で、高品質な機構部品が得られるという特長がある。MEMS はデバイスの微細化が可能であるので、小型ケースに収まり、狭い場所で稼働することもでき、携帯機器や複雑な装置内部の保守検査機械などに適している。また、同じセンサやアクチュエータなどの要素をたくさん並べ協働させることで、ひとつの要素では得られない高機能・高性能を引き出すこともできる。

適用分野としては、自動車、情報通信、安全・安心、環境、医療等の分野があり、超小型・高機能な MEMS デバイス（ファイン MEMS）の実用化が進んでいる。MEMS の小型化の利点を活かして既存部品を置き換える単機能デバイスとして、圧力センサ、加速度センサ、インクジェットプリンタヘッドなどの製品が大きな市場を形成している。

フランスの調査会社である Yole Développement の調査⁽¹⁾によれば、図 1.1 のように各種センサのチップサイズは半導体技術の進展とともに着実に小型化が進んでいる。IoT 社会においてはセンサの小型化は必須となる。設置場所の大きさに関する制限が緩和されることにより、あらゆる“モノ”にセンサを設置できるようになるとともに、センサのネットワーク化によりデータ収集やコントロールが可能になり、累乗的な便益の増加がもたらされることが期待されている。

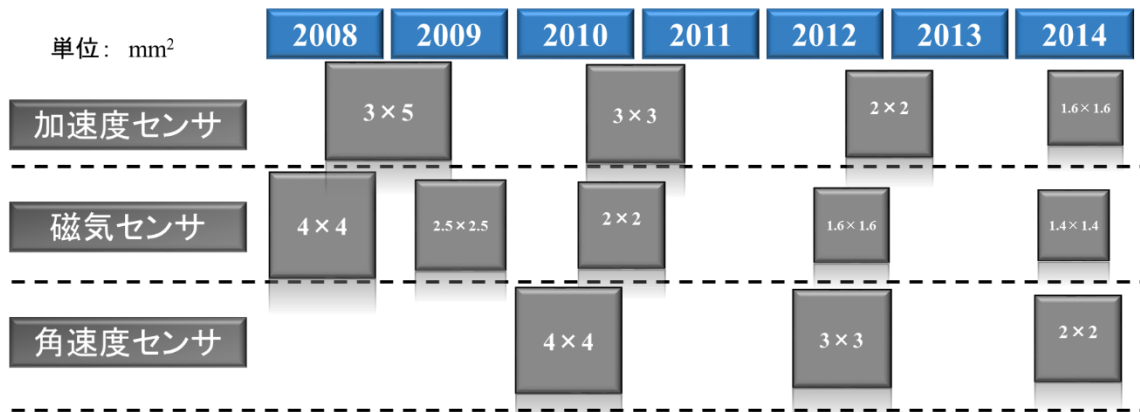


図 1.1 各種センサのチップサイズ推移⁽¹⁾

株式会社セミコンダクタポータル HP, 各種センサのチップサイズ推移;

<https://www.semiconportal.com/archive/editorial/industry/100809-mems.html>

(2) 集積化

また、MEMS は一つの基板にセンサや信号回路、アクチュエータなどが搭載された 3 次元の構造体であり、入出力が電気信号以外にエネルギーや機械変位、物理量など、多岐多様に亘ることも大きな特長と言える。さらには、センサ、電子回路、アクチュエータなどの異なる部品を集積化することができ、賢いデバイスとなる。

(3) 低コスト化

米国の半導体調査会社である IC Insights が 2016 年に実施した調査によるとセンサ販売平均単価は 2011 (平成 23) 年以降、継続的に低下している(図 1.2)⁽²⁾。

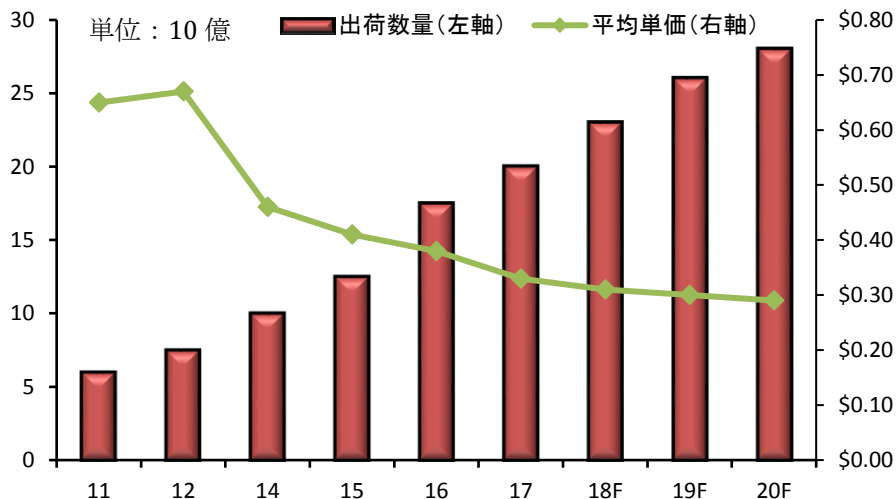


図 1.2 センサの販売平均単価と出荷数値⁽²⁾

公益財団法人ちゅうごく産業創造センターHP, センサの販売平均単価と出荷数値の推移;

<https://cric.jp/jigyonaiyou/research/jishu/pdf/project/h29-1.pdf>

低コスト需要に対応できる技術手段としては、半導体技術があり、バッチプロセスによりひとつの部品を作るのと同じ手間と時間で沢山の構造を同時に作りこむことができ、大量生産による低コスト化も可能となる。

MEMS 技術は以上のような特長があり、社会の様々な場面で活用されている。さらに、社会課題に対応して省エネ効果に寄与するグリーン MEMS センサ、無線通信機能、自立電源及び低消費電力を付与したシステムの開発を「グリーンセンサネットワーク技術開発プロジェクト」(2011-2014 年)が実施された。将来社会を展望すると、MEMS 技術の発展はナノテク材料技術やバイオ技術と融合して、新たなライフスタイルを創出しようる夢のデバイス (MEMS フロンティア未来デバイス ; BEANS) の出現が期待される。環境・エネルギー、健康・医療、快適生活空間などの分野における画期的な製品の登場が我々の生活を豊かにし、同時にわが国産業の国際競争力強化に貢献していくことが大いに期待される。

図 1.3 に加速度センサの検出方式を示す⁽³⁾。一般的に、小型・電子デバイスへ主に採用されているのが「圧電型」⁽⁴⁾「ピエゾ抵抗型」⁽⁵⁻⁶⁾「静電容量型」⁽⁷⁾となっている。

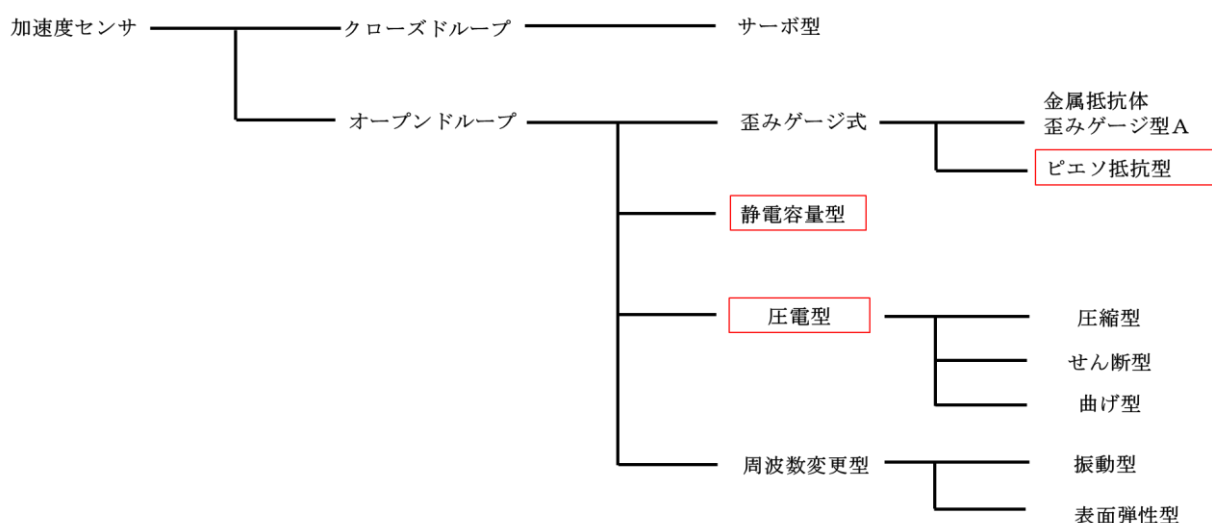


図 1.3 MEMS 技術を用いた加速度センサの種類⁽³⁾

NADEX Magazine HP, 加速度センサの種類と、選定のための特徴比較

<https://nadex-promotion.com/learn/240/>

表 1.1 はその 3 種類の基本特性の比較で、表 1.2 は「圧電型」「ピエゾ抵抗型」「静電容量型」それぞれの代表製品の仕様である。

圧電型は高い周波数計測・高い加速度（衝撃）の計測向きであるが、重力加速度の検出ができなく、ゆっくりした動作の測定は不適である。また、サイズとして比較的に大きいため、狭い空間に設置できないという欠点が挙げられる。


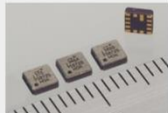

ピエゾ抵抗型式は低周波測定用として広く普及しているが、感度の直線性はやや劣り、共振周波数が低い場合は外部振動による影響がある場合もある。

静電容量型センサは安定した物質で構成され、安定した電気特性、高信頼性を求められる計測に向いている。一方、LSI 製造プロセスとの整合性、大きさ、コスト・パフォーマンス、低消費電力などを考慮した場合、静電容量式加速度センサに優位性があり、近年は主流となっている。

表 1.1 主な検出方式の特性比較表

	静電容量型	ピエゾ抵抗型	圧電型
原理	センサ素子可動部と固定部間の容量変化を検出。	センサ素子可動部と固定部をつなぐバネ部分に配置したピエゾ抵抗素子により、加速度センサによってバネ部に発生した歪みを検出。	圧電性のある物体（圧電体）に力を加えたとき、分極が発生し、電圧が生じる現象のことを圧電効果と呼びます（逆に、電圧を圧電体に加えたときに力が生じる現象のことを逆圧電効果と呼ぶ）。圧電型加速度センサは圧電効果を利用して加速度を計測。
特徴	センサ素子部はSiやガラスなどの安定した物質で構成した、安定した電気特性、高信頼性を求められる計測に向いている。	比較的構造が単純で、素子からの出力が大きい。低周波数計測一般用である。感度の直線性やや劣る。共振周波数が低い場合は外部振動による影響がある場合もある。	広い周波数レンジとダイナミックレンジを持つ、また「静的な現象を測定できない。

表 1.2 「圧電型」「ピエゾ抵抗型」「静電容量型」それぞれの代表製品⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾

検出原理	メーカー・型番	値段	サイズ	感度	応動周波数	加速度レンジ	用途・製品写真
圧電型	TE Connectivity / Model 805	○	11.7×9.1×9.1 mm	100mV/G	10kHz	50～500G	振動検出 
ピエゾ抵抗型	北陸電力 / HAAM-346A	◎ (割り安)	3.0×3.0×1.0 mm	330 mV/G	500Hz	-3G～+3G	携帯機器 
静電容量型	Kionix / KXD94-7138	○	5×5×1.2mm	400 mV/G	800Hz	-5G～+5G	車体制御 

資料⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾

TE CONNECTIVITY HP, 圧電型加速度センサ代表製品⁽⁸⁾ ; <https://www.te.com/jpn-ja/product-805-0500.html>

北陸電気工業株式会社 HP, ピエゾ抵抗型加速度センサ代表製品⁽⁹⁾ ; <https://www.hdk.co.jp/pdf/jpn/i137506.pdf>

Kionix 社 HP, 静電容量型代表製品⁽¹⁰⁾ ; <https://jp.kionix.com/product/KXD94-7138>

1.2 研究の狙い

前節では静電容量式加速度センサの優位性やそれが主流となっていることを述べた。これら静電容量式加速度センサでは慣性質量が複数の構造の弾性体で支持されていて、両持ちビーム方式⁽¹¹⁾⁻⁽¹³⁾、片持ちビーム方式⁽¹⁴⁾、 π ビーム方式⁽¹⁵⁾等が用いられてきた。このうち通常用いられるのは両持ちビーム方式であり、ここではビームの折り返し構成が多用⁽¹⁶⁾⁻⁽¹⁹⁾されているが、将来のさらなる小型化・高感度化のためには必ずしも最適な形状にはなっていないように思われる。静電容量式センサの製造プロセスとしては表面マイクロマシーニング⁽²⁰⁾とバクルマイクロマシーニング⁽²¹⁾があるが、製造プロセスが簡易なこと、その加工精度が高いこと、実装が簡易化されることなどから近年は前者が主流となっている。表面マイクロマシーニングでは薄膜構造体を利用することから慣性質量が十分に大きくできず、必要とされる感度を得ることが大きな課題となっている。感度は慣性質量だけではなく、ビームの長さ、幅や形状にも依存し、それらのパラメータにより共振周波数も大きく変化する。一般に感度はビームの長さの3乗に比例するので感度の観点からはビームは折り返しをせずに直線をする方が有利だが、実際には高次の共振モードやレイアウトの観点から折り返しビームが多く用いられている。

過去の研究では、ビームの構造は多種多様で、系統的に検討がなされておらず、重りが比較的大きく、短いビームの折り返し構造となっているものが多い結果となっている。

静電容量式加速度センサの従来技術構造代表例としては表 1.3 に挙げたようなものがある。これらを従来技術 1~5 として説明する。No. 1~No. 3 までは通常の変位検出方式であり、楡型電極間の差動容量により、加速度を検出する静電容量加速度センサである。No. 4~No. 5 は共振型加速度センサの例であり、共振子に応力が加わることによって、共振周波数が変化していく。

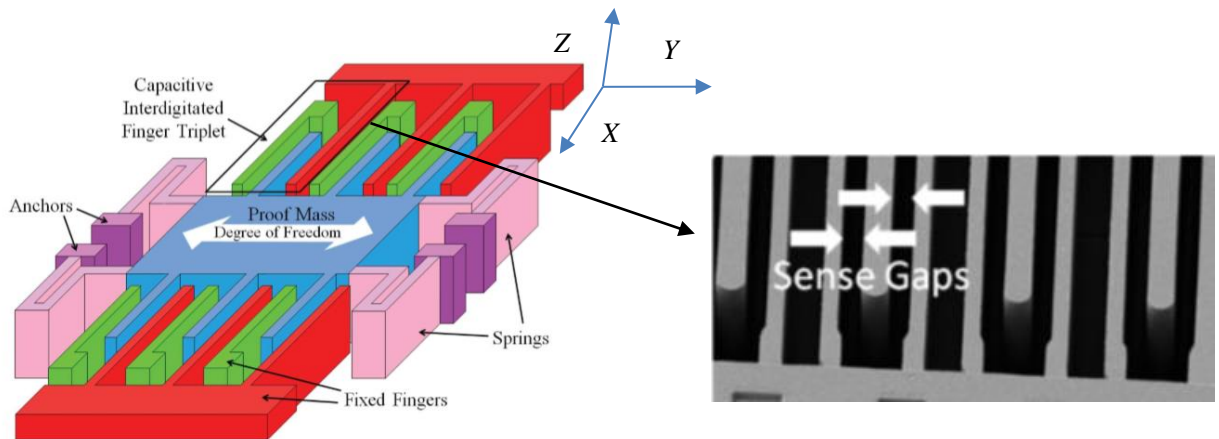
表 1.3 従来技術静電容量式加速度センサの例

No.	1	2	3	4	5
Publication	IEEE SENSORS13 2914-2921(2013) ⁽²²⁾	ISDRS 2007 ⁽²³⁾	IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES 1670-1679(2010) ⁽¹²⁾	TRANSACTIONS 2013 606-609 ⁽²⁴⁾	Sensors and Actuators A 52-60(2017) ⁽²⁵⁾
Author	O. Aydin	F. A. Hassani	C. M. Sun	D. L. Christensen	Y. Yin
Dimension	1D	1D	3D	1D	1D
Resonant Frequency	3.135 kHz	5610 Hz~5590 Hz		10 kHz	
Sensitivity	0.45 pF / G	0.4 μ m / G	39.6 fF / G : X axis 28.5 fF / G : Y axis 15.3 fF / G : Z axis	280 Hz / G	244.15 Hz / G
Size	3.8 \times 2.8 mm ²	0.2 \times 0.5 mm ²	1.78 \times 1.38 mm ²	2 mm ²	15.054 mm ²

a) 従来技術 1

図 1.4(a)は従来技術 1 の模式図である⁽²²⁾。この従来例は 1 軸検出用の静電容量式加速度センサで、全ての機構部品は SOI 基板のデバイス層から構成されている。複数の突出した電極を両側に形成した長方形の重り(青)を両側から 1 対の折り返しビーム(ピンク)で支持する構成となっている。ビームの先端(紫)はアンカー部で、ここで埋め込み酸化膜を介して基板に固定されている。重りに形成された突出した電極の両側にはそれと対向するように固定電極(緑、赤)形成されていて、差動容量を構成している。Y 軸方向に加速度が印加されると重りは右方向に変位し、青・赤間の静電容量は増加し、青・緑間の静電容量は減少することとなる。図 1.4(b)は検出用の楕型電極の SEM 写真である。

表 1.4 にこの加速度センサの寸法と性能を示す。センサのサイズは $3.8 \times 2.8 \text{ mm}^2$ であり、比較的大きい。可動部の素子厚みは $35 \text{ }\mu\text{m}$ であり、楕型電極のギャップは $3 \text{ }\mu\text{m}$ である。1 回折り返し 4 本ビームを用いて、バネ定数は 116 N/m となっている。固有共振周波数は 3135 Hz であり、測定範囲は $\pm 16 \text{ G}$ であり、Y 軸の感度は 0.45 pF/G となっている。



(a) 従来技術 1 の模式図

(b) 従来技術 1 検出楕型電極の SEM 写真

図 1.4 従来技術 1 ⁽²²⁾

表 1.4 従来技術 1 の寸法と性能

Mass of the proof mass	$3.80 \times 10^{-7} \text{ kg}$
Sensor area	$3800 \mu\text{m} \times 2800 \mu\text{m}$
Resonant frequency	3135 Hz
Spring Constant	116 N / m
Proof mass thickness	35 μm
Sensing gap	3 μm
Sense capacitance	0.45 pF / G

b) 従来技術 2

図 1.5(a)に従来技術 2 の構造を示す⁽²³⁾。この従来例は従来技術 1 と同様、1 軸検出用の静電容量式加速度センサで、全ての機構部品は SOI 基板のデバイス層から構成されている。複数の突出した電極を両側に形成した長方形の重りを両側から 1 対の 5 回折り返しビームで支持する構成となっている。ビームの先端はアンカー部で、ここで埋め込み酸化膜を介して基板に固定されている。そのビームの上に図 1.5(b)ように小さいクラックを設けている。クラックはビームでの位置によって、共振周波数が変わることを確認ができた。重りに形成された突出した電極の両側にはそれと対向するように固定電極形成されていて、差動容量を構成している。Y 軸方向に加速度が印加されると重りは上方向変位し、重りの一方の楕型電極間の静電容量は増加し、他方の楕型電極間の静電容量は減少することとなる。

表 1.5 は従来技術例 2 の寸法と性能である。重りのサイズは $0.2 \times 0.5 \text{ mm}^2$ 、Y 軸に 1 G を印加した場合、感度は $0.4 \mu\text{m} / \text{G}$ である。ビームの上に小さいクラックを設けてシミュレーションを実施した結果、共振周波数は 5610 Hz～5590 Hz の範囲で変化し、感度への影響は 1 % 以下であることが確認できた。

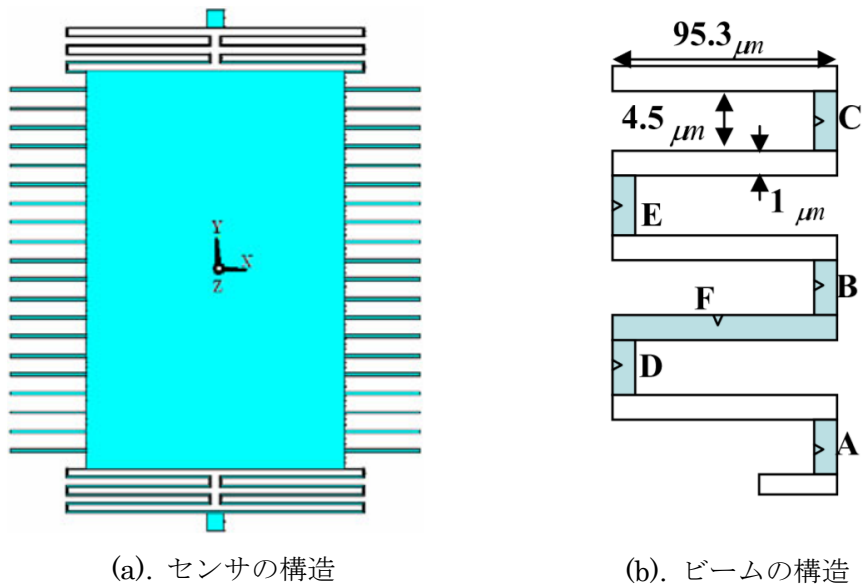


図 1.5 従来技術 2⁽²³⁾

表 1.5 従来技術 2 の寸法と性能

Sensor area	0.2×0.5 mm ²
Beam length(L)	95.3 μm
Beam width(w)	3 μm
Resonance Frequency(with FEM)	5610 Hz～5590 Hz
Static amplified sensitivity(differential)	0.4 μm / G

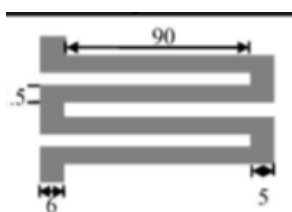
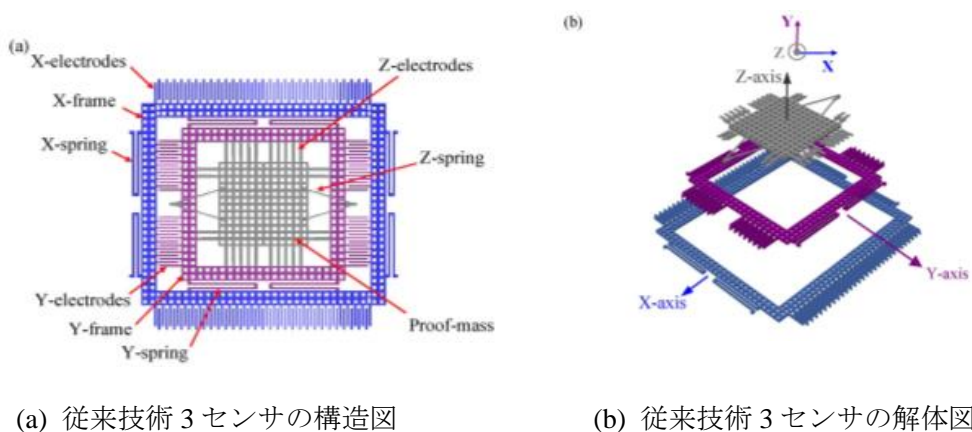
c) 従来技術 3

従来技術 3 は SOI-MEMS 技術を用いて 3 軸検出用の加速度センサである⁽¹²⁾。図 1.6 (a) はセンサの構造図である。図 1.6 (b) は三軸加速度センサの分解図である。中央に正方形重りがあり、重りを取り囲む Y フレームに 2 本の Z スプリングで支持されている。Y フレームはそれを取り囲む X フレームに 4 本の折り返しビームで支持されている。X フレームも 4 本の折り返しビームで基板に接続される構成となっている。X 軸、Y 軸、Z 軸の変位はそれぞれ X フレーム、Y フレーム、重りに形成された楕型電極により静電容量変化を介して検出される。

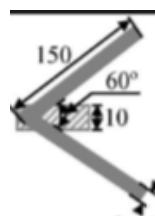
表 1.6 にセンサの設計の寸法と性能を示す。X 軸と Y 軸センサ単体のビーム長は 90 μm で、3 回折り返し 4 本ビームである。Z 軸バネの長さは 150 μm であり、三角の形状となっている。

表 1.6 はこの 3 軸の設計パラメータである。検出方式は差動容量型で、X 検出軸と Y 検

出軸のビームは3回折り返し、全長は $400\ \mu\text{m}$ であり、Z 検出軸のビーム全長は $300\ \mu\text{m}$ である。デバイスの厚みが $7.6\ \mu\text{m}$ 、ビームの幅は $4.8\ \mu\text{m}$ である。1G を印加した場合、X 軸の感度は $0.57\ \text{mV/G}$ であり、Y 軸は $0.25\ \text{mV/G}$ である。Z 軸の感度は $0.19\ \text{mV/G}$ である。また、X 軸の共振周波数は $8.49\ \text{kHz}$ であり、Y 軸は $14.55\ \text{kHz}$ である。Z 軸の共振周波数は $10.05\ \text{kHz}$ である。



(c) X, Y 軸ビーム形状



(d) Z 軸ビーム形状

図 1.6 従来技術 3⁽¹²⁾

表 1.6 従来技術 3 の寸法と性能

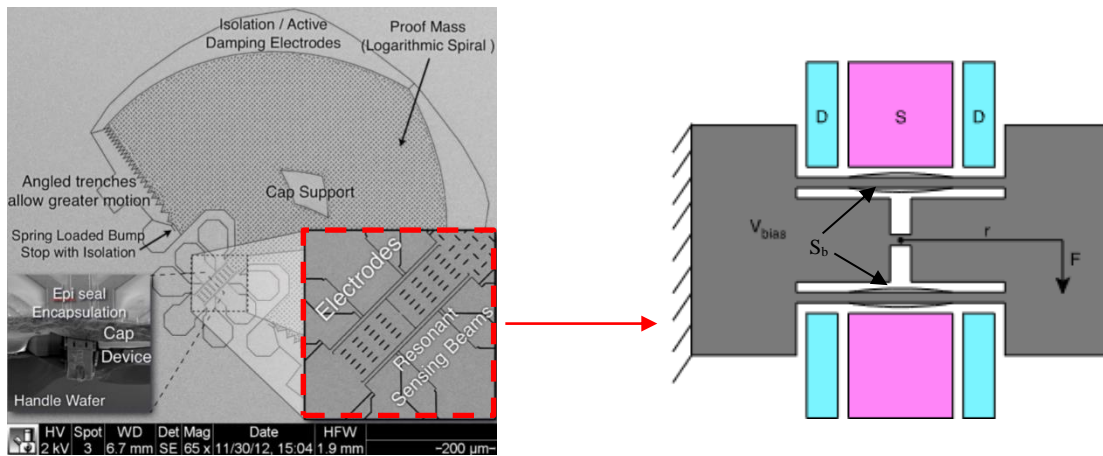
	X, Y 軸方向	Z 軸方向
Top-side proof mass	1.78 × 1.38 mm	
Whole beam length (μm)	400 μm	300 μm
Thickness	7.6 μm	
Width	4.8 μm	
Sensitivity	X 軸 : 0.57 mV / G Y 軸 : 0.25 mV / G	Z 軸 : 0.19 mV / G
Resonance Frequency	X 軸 : 8.49 kHz Y 軸 : 14.55 kHz	Z 軸 : 10.05 kHz

従来技術 1~3 までは通常の変位方検出式である静電容量式加速度センサである。これらの従来技術では比較的大きな重りを折り返しビームで支持するような構成となっているという特徴がある。

d) 従来技術 4

従来技術 4 は静電容量式の共振型加速度センサである⁽²⁴⁾。図 1.7(a)はセンサの SEM 写真である。重りの形状は扇形であり、赤い枠はセンサの感度検知共振子のエリアである。図 1.7(b)は図 1.7(a)の赤い枠において、センサの共振子エリアの構造模式図である。重りは中央のビームに支持されていて、重りの両側に共振用ビームが形成されている。D (青) は信号源であり、S (ピンク) は検出電極である。加速度を印加した時、上側ビームには引張応力がかかり、共振周波数は増加する一方、下側ビームには圧縮応力がかかり、共振周波数は減少する。D に電圧を印加し、静電駆動を行い、その変位を S の容量変化で検出することにより自励共振させる構成となっている。

表 1.7 はそちらセンサの寸法と性能である。共振用ビーム S_b の幅は 3 μm で、長さは 159 μm であり、固有共振周波数は 815 kHz ± 10 kHz である。扇形重りの面積は約 2 mm² であり、センサの感度は 280 Hz / G である。この従来例ではマス・スプリング系に 2 つの静電駆動式共振子を追加する形となっていて、極めて複雑な構成となっている。



(a) センサの SEM 写真

(b) 共振子の構造図

図 1.7 従来技術 4⁽²⁴⁾

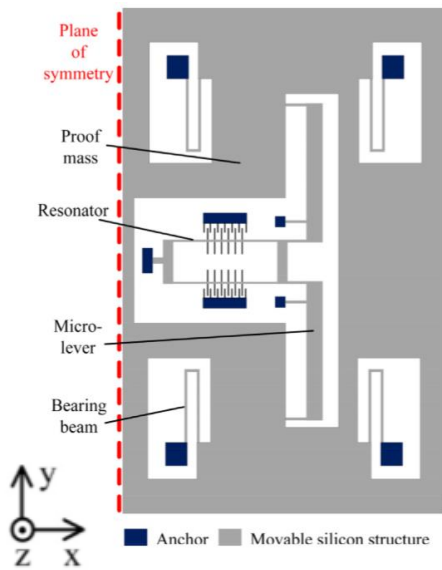
表 1.7 従来技術 4 の寸法と性能

Proof mass	11.38×7.55 mm ²
S _b Beam length (<i>L</i>)	159 μm
S _b Beam width (<i>w</i>)	3.0 μm
S _b Resonance Frequency	815 kHz ±10 kHz
Sensitivity	280 Hz / G

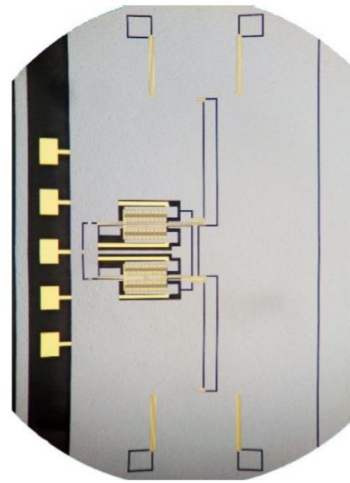
e) 従来技術 5

従来技術 5 は静電容量式の SOI-MEMS 技術による共振型加速度センサである⁽²⁵⁾。図 1.8 (a)はセンサの模式図である。この共振型センサは長方形の重りはその内部をくり抜くように形成された 8 本の折り返しビームで基板に接続されている。共振子は 2 本ビームのフレーム構造になっていて両ビームには変位検出用の楕型電極が設置されている。重りには一段式レバーが接続されていて、加速度印加により重りが変位すると「てこの原理」により増倍した変位を共振子に与えることとなる。このセンサのレイアウトは左右対称となっていて、その半分を図 1.8(a)に示す。共振センサの動作は静電容量楕型電極の励振と、それに対する静電振幅を検出することからなっている。この静電容量式加速度センサの検出軸 *X* に加速度を印加する時、重りが変位し、共振子の一方は引っ張られ、もう一方は圧縮され、ビームに応力が加わることによって、共振周波数は変化していく。

図 1.8 (b)は検出部写真である。表 1.8 はこのセンサの寸法と性能である。重りのサイズは 15.054 mm²であり、センサデバイスの厚みは 25 μm である。重りとつながる一段階レバーの長さは 850 μm であり、幅は 6 μm である。また、重りは 4 本ビームで支持され、それら



(a) センサの模式図



(b) 検出部の顕微鏡写真

図 1.8 従来技術 5⁽²⁵⁾

表 1.8 従来技術 5 の設計寸法と性能

Proof mass	15.054 mm ²
Beam whole length of the DETF (L)	850 μm
Length of the bearing beam	500 μm
Width of the DETF (W)	6 μm
Width of the bearing beam	4 μm
Device thickness	60 μm
Sensitivity	244.15 Hz / G

のビームは1回折り返しで、幅は4 μm であり、1本あたり全長は500 μm である。X軸は検出軸となり、センサの感度は244.15 Hz / Gである。

静電容量式 MEMS 加速度センサの開発例について説明したが、課題として下記が挙げられる：

- ① 重りが比較的大きい。
- ② ビームの折り返し構造が多用されていて、系統的なビーム形状最適化検討がおこなわれていない。
- ③ 共振型加速度センサでは専用の共振ビームとそのためのセンサ、アクチュエーターを追加する構成のため素子エリアが大きく、複雑な構成となっている。

そこで本研究では、製造工程が簡易な SOI-MEMS 技術を用いた静電容量センサを対象とし、重りの寸法を一定として、ビームのパラメータを変化させた時の感度、共振周波数、高次共振モードをシミュレーションにより系統的に求め、各種パラメータによるこれらの特性の依存性を明確化し、設計最適化手法を模索することとした。その中で慣性質量の辺の長さまでビームの長さを延ばすような構成⁽²⁶⁾、およびその技術に基づいてセンサさらに小型化⁽²⁷⁾⁻⁽²⁸⁾の可能性についての検討を行った。更なる従来技術⁽²⁹⁾⁻⁽³⁷⁾を参考にしながら高感度、小型化を実現するために静電容量検出方式をベースとした共振型加速度センサ⁽³⁸⁾の可能性について検討を行った。

1.3 本論文の構成

第 2 章では静電容量型加速度センサ、および共振型加速度センサの基本的な構成、動作原理、デバイスサンプルの構造について述べる。第 3 章では SOI-MUMP 製造プロセス、評価用サンプルおよび評価方法について述べる。第 4 章では重りの長辺に沿ったビームを用いた静電容量センサの変位解析や共振モード解析、検出回路シミュレーションの結果について述べ、実際の試作デバイスの実装、評価装置・評価回路、評価結果について説明する。第 5 章では第 4 章から得た結果をもとに、さらに小型化する検討をした。静電容量センサの変位解析や共振モード解析、検出回路シミュレーションの結果について述べ、実際の試作デバイスの実装、評価装置・評価回路、評価結果について説明する。第 6 章では、共振型加速度センサの変位解析や共振モード解析、検出回路シミュレーションの結果について述べ、実際の試作デバイスの実装方法、評価装置・評価回路、評価結果について説明する。第 7 章では本研究で得られた知見と考察をまとめる。このうち、第 4 章、第 5 章、第 6 章は本学位論文のもととなっている研究業績論文[1], [2], [3]に対応している。

第2章 動作原理とデバイス構造

2.1. 静電容量型加速度センサの動作原理と構造

2.1.1 静電容量型加速度センサの動作原理

ここでは静電容量型の加速度センサの構造および検出原理について、解説する。古典力学のニュートンの法則によると、物体に働く力は以下の式で表すことができる。

$$F = m \times a \quad (2.1)$$

ここで、 F は質量 m の物質に働く力で、 a は加速度である。バネと重りで構成されるシステムを考えた場合に、 F は以下の式で表わすことができる。

$$F = k \times x \quad (2.2)$$

k はバネ定数で x はバネの伸縮距離である。式(2.1)と式(2.2)の連立方程式を解くと加速度 a は以下の式のようにになる。

$$a = \frac{k \times x}{m} \quad (2.3)$$

式(2.3)より、加速度は既知のバネ定数と質量を持った重りの移動距離を計測することで計測が可能であることが分かる。図2.1は加速度の検出原理を図示したものである。

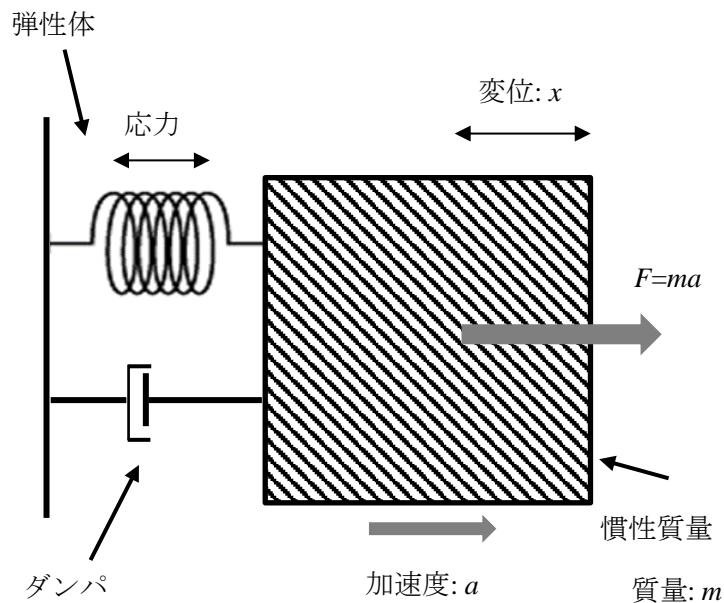


図 2.1 は加速度の検出原理図⁽³⁹⁾

慣性質量の支持構造は必要とされる感度、周波数帯域、検出方向などに応じて、各種各様のものが用いられる。その中代表的なものを図 2.2 に示す。1 軸加速度センサでは比較的感度が取れる片持ち梁や両持ち梁が主に用いられる。ここではビームの構成として振れ共振の影響を低減するために通常平行な 2 本ビーム構成がよく用いられる。3 軸加速度センサにおいては構成が対称な 4 本ビーム方式や圧力センサと同様なダイアフラム構造がよく用いられる。MEMS 加速度センサでは比較的感度が取られる片持ちや両持ち梁が主に用いられている。両方式の感度と共振周波数は以下のようにになる。

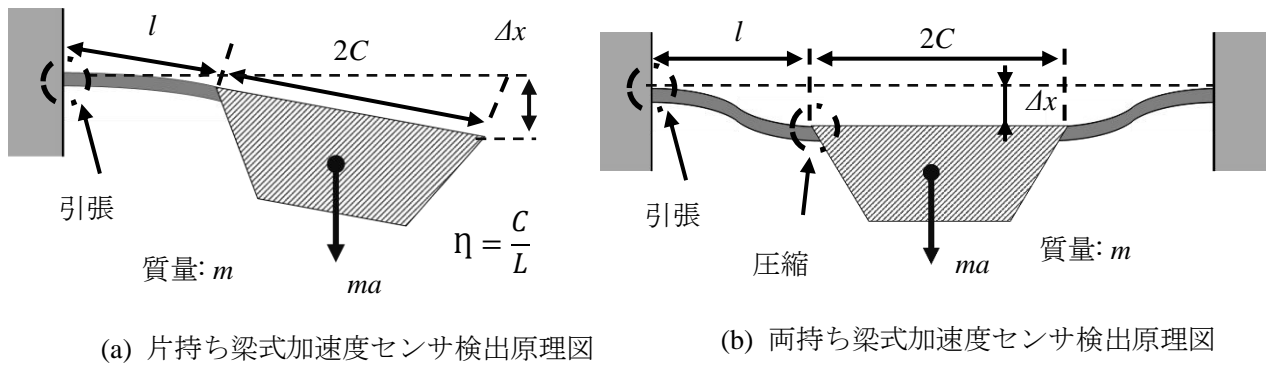


図 2.2 加速度の検出原理図⁽³⁹⁾

加速度を印加した時、重りに変位 Δx が発生する。質点モデルを仮定した場合、この変位 Δx は次式で近似的に与えられる。片持ち梁の場合、最大変位 Δx は次式⁽³⁹⁾で与えられる。

$$\Delta x = \frac{2mal^3}{Ebd^3} \times (2 + 9\eta + 12\eta^2) \quad (2.5)$$

ここで Δx は変位であり、 m は重りの質量、 l はセンサ個々のビームの長さ、 E はヤング率、 b はセンサビームの幅、 d はビームの厚みである。したがって等価的なバネ定数 k は次式のようになる⁽³⁸⁾。

$$k = \frac{d^3bE}{2l^3} \times \frac{1}{2 + 9\eta + 12\eta^2} \quad (2.6)$$

片持ち梁式加速度センサの基本共振周波数 f は次式で与えられる。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Ebd^3}{12ml^3} \frac{2 + 6\eta + 6\eta^2}{\frac{2}{3} + 14\eta + \frac{21}{2}\eta^2 + 14\eta^3 + 8\eta^4}} \quad (2.7)$$

一方、両持ち梁式加速度センサの変位の Δx は次式⁽³⁹⁾で与えられる：

$$\Delta x = \frac{mal^3}{2Ebd^3} \quad (2.8)$$

したがって等価的なバネ定数 k は次式のようにになる。

$$k = \frac{2d^3bE}{l^3} \quad (2.9)$$

この構造体の基本共振周波数 f は次式で与えられる。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2Ebd^3}{ml^3}} \quad (2.10)$$

これらの式により慣性質量が一定の場合、片持ち梁式でも、両持ち梁式でも加速度印加時の変位はビームの長さの3乗に比例する。両持ち梁の場合、折り返しある場合、折り返したビームの本数を n とし、ビーム折り返し回数は $n-1$ とすると、ビーム全長 L は $L=nl$ となる。 $n=1$ の場合、感度は L^3 に比例し、 n の場合、感度は $(L/n)^3 \times n = L^3/n^2$ に比例することとなる。全長 L が一定な場合、ビーム折り返しのないタイプの感度は折り返しのあるタイプに対し、 n^2 倍となる。どのタイプでも共振周波数はビームの長さの $3/2$ 乗に反比例する。感度を向上させるためにはビームの全長が一定の場合、ビームは折り返しをせずに長くするのが有効となることがわかる。同程度の寸法の場合、片持ちビーム方式の方が最大変位が大きく、高感度化がしやすい一方、両持ちビーム式では感度が制御しやすい点や他軸感度・オフセットのキャンセルが容易など多くの利点があるため、両持ち梁式が主に用いられてきた。

2.1.2 静電容量型加速度センサの構造

本研究で想定した加速度センサの基本構造を図2.3に示す。一定の面積を有する慣性質量を2本のビームで対称に支持する両持ちビーム構造になっており、デバイスへの加速度印加による慣性質量の変位を検出するための電極として、差動式楕歯電極を左右に設置している。動作は基板と平行な加速度が印加されるとその方向へ慣性質量が変位し、これによって固定電極との間に形成されている差動の可変容量が増加、または減少する。その容量値変化を測定することで加速度を検出することが出来る。ここで可変容量は容量値を確保するために何対も並列に接続された楕歯構造となっている。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

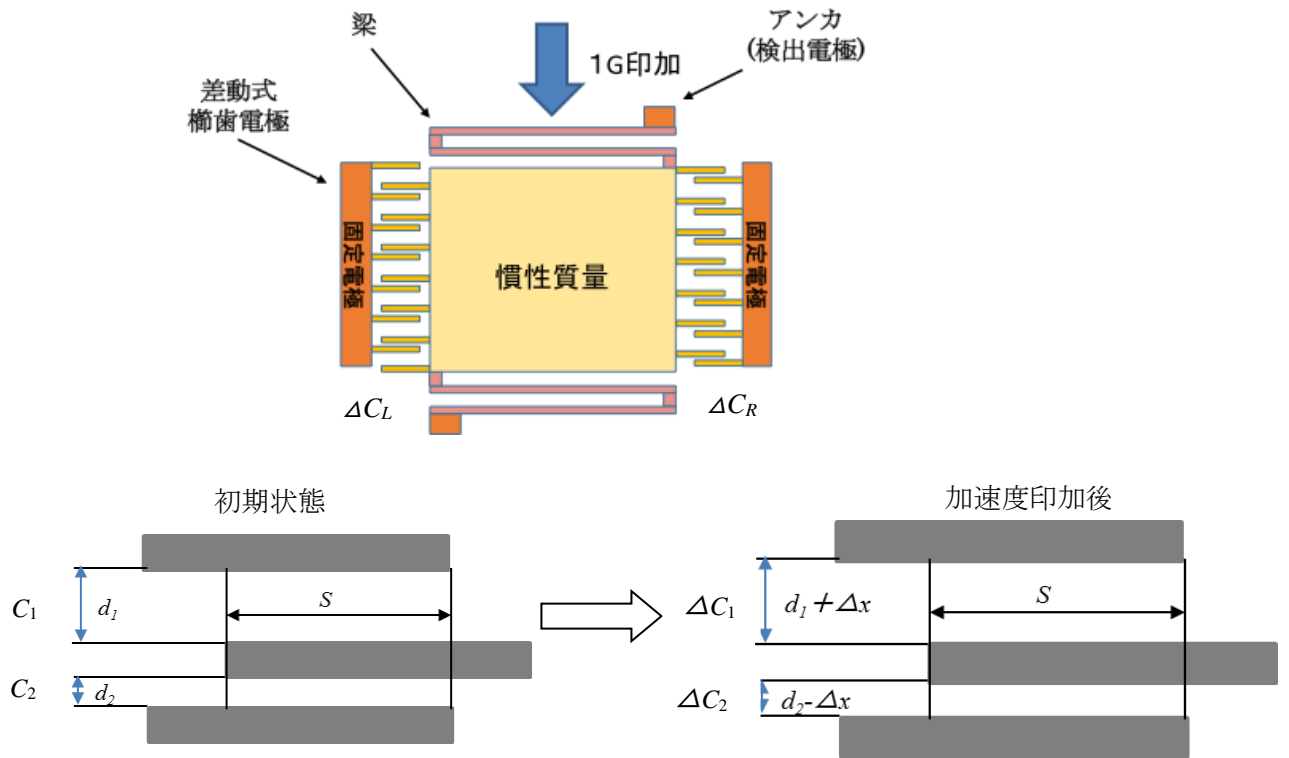


図 2.3 静電容量式センサの差動原理図

一対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、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。検出素子部には加速度によって動く可動部（重り）とバネ、またその動き（移動距離）により静電容量変化を発生させるための櫛歯状電極が形成されており、可動重りに形成された可動電極 1 本当たりにつき、2 本の固定電極に挟まれる形で電極の単位セルを形成している。センサに加速度を印加した時、電極間変位が発生し、容量変化 ΔC は下記ようになる。

$$C = C_1 + C_2 = \varepsilon S \frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2}$$

$$\Delta C = \Delta C_1 + \Delta C_2 = \varepsilon S \times \frac{d_1 + d_2}{(d_1 + \Delta x)(d_2 - \Delta x)} \tag{2.12}$$

$$\Delta C = \Delta C_L + \Delta C_R$$

$$= \varepsilon S \times \left[\frac{(d_1 + d_2)}{(d_1 + \Delta x)(d_2 - \Delta x)} - \frac{d_1 + d_2}{(d_1 - \Delta x)(d_2 + \Delta x)} \right] \tag{2.13}$$

ここで、 d_1, d_2 は楕型電極間のギャップ、 ϵ は空気の誘電率、 S は楕型電極の有効面積である。

2.2 共振型センサの原理と構造

2.2.1 静電アクチュエータ

(a) 基礎

静電アクチュエータでは、電位差を持つ導体間に蓄えられた静電エネルギーによる静電力を利用する。静電力を求める方法にはいくつかの手法があるが、ここでは仮想変位の考え方に基づいて説明することにする。2つの導体がそれぞれ Q と $-Q$ の電荷を持っており、電位差が V であるとき、導体間の静電容量 C に蓄えられる静電エネルギー U_E は次式で与えられる⁽⁴⁰⁾。

$$U_E = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2.14)$$

導体間に働く力は、導体を少し動かした時のエネルギーの変化をもとにして求めることができる。

まず各導体が孤立し、他との静電エネルギーのやり取りがなく、それぞれの電荷が一定に保たれている場合に導体間に働く力を考える。このときの静電力の x 方向成分 F_x は次式で与えられる。

$$F_x = - \left(\frac{\partial U_E}{\partial x} \right)_{Q=\text{一定}} \quad (2.15)$$

一方各導体に電源が接続されていて、それぞれの電位が一定に保たれている場合に導体間に働く力を考える。このときの静電力の x 方向成分 F_x は次式で与えられる。

$$F_x = \left(\frac{\partial U_E}{\partial x} \right)_{V=\text{一定}} \quad (2.16)$$

電荷一定の場合と電位一定の場合において力の符号が違うのは、電位一定の場合には電源からエネルギーが供給されるからである。このときの電源からの供給エネルギーの半分は静電エネルギーの増加に、半分は外部への仕事として使われる。

静電アクチュエータでは制御用電源を接続して電位を制御することが多いが、これは電

位一定の場合を用いて説明できるので以下では電位一定の場合のみ説明する。

(b) 平行平板型

図 2.4 に示すような平行平板型のアクチュエータについて考える。

平行平板電極の寸法を長さ l 、奥行き b 、厚さ h とし平行平板電極間の初期ギャップを g とする。

平行平板電極間の静電容量 C は

$$C = \frac{\epsilon l b}{g} \quad (2.17)$$

と表せる。ここで ϵ は空間の誘電率である。ここでは簡単のため、電極端の電界の乱れや電極表面に形成される絶縁膜の厚さは無視している。平行平板電極間の静電エネルギーは式 (2.14) で表すことができる。

2 枚の平行平板に電圧 V を加えた時の垂直の静電力(図 2.5)は次のように表すことができる。

$$F_y(y) = -\frac{\epsilon l b V^2}{2y^2} \quad (2.18)$$

平板電極の場合、片方の電極が動いてギャップが狭くなると、ギャップの長さの 2 乗に反比例して力の絶対値が増大するという非線形性がある。

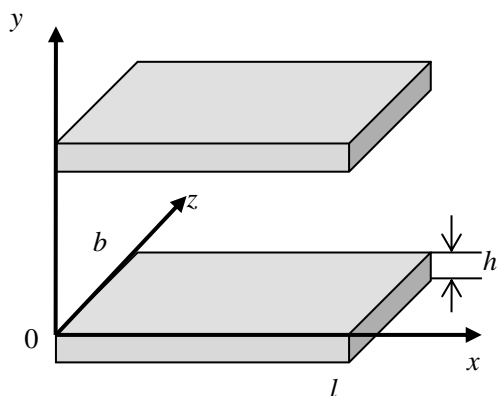


図 2.4 平行平板型のアクチュエータ

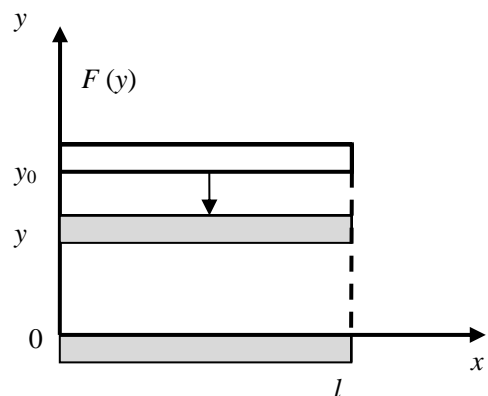


図 2.5 垂直静電力

(c) 櫛歯型

櫛歯型静電アクチュエータでは、2 対の櫛歯を組み合わせた構造に働く静電力を利用して
いる。櫛歯型静電アクチュエータの動作を考える際、固定された平行平板電極間に可動電極
板を挿入した構造が基本となる(図 2.6)。

図 2.4 で示したとおり、電極の寸法を長さ l 、奥行き b 、厚さ h 、平行平板間の初期ギャ
ップを y_0 とする。櫛歯の基本構造の静電容量 C は⁽⁴⁰⁾

$$C = \frac{4\epsilon b(l-x)}{y_0 - h} \quad (2.19)$$

と表すことができる。さらに櫛歯基本構造の静電エネルギー $U_{(x)}$ は

$$U_{(x)} = \frac{2\epsilon b(l-x)V^2}{y_0 - h} \quad (2.20)$$

と表わせる。

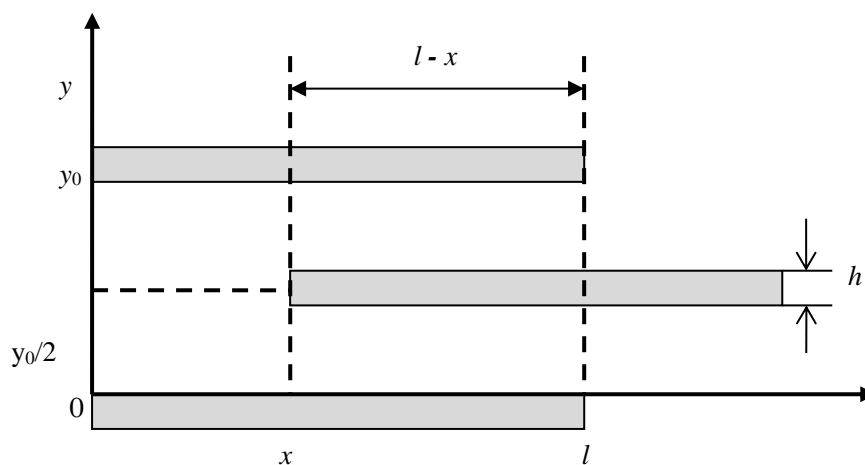


図 2.6 櫛歯の基本構造

櫛歯の基本構造に働く静電力を求めると、電位一定の場合は次式で表わされる。

$$F_x(x) = \frac{2\epsilon b(l-x)V^2}{y_0 - h} \quad (2.21)$$

これらの結果より、櫛歯基本構造に働く力は挿入可動電極の位置に依存しないことが分かる。このことより、非線形性をもつ平行平板型に比べて櫛歯電極型アクチュエータは制御しやすいといえる。また、櫛歯基本構造を複数組み合わせることにより、櫛歯基本構造の個数に比例して静電力を増大させることができる。

2.2.2 共振周波数静電チューニング

静電駆動共振型センサの共振周波数をチューニングする原理として、以下の2つがある。

- (a) 静電力で引っ張ることにより、ビームに応力が加わり、実行的なヤング率が変化する。
- (b) 電圧印加によって生じる静電ポテンシャル中での振動において見かけ上の負のばね定数が発生する。

まず、(a)の原理について説明する。

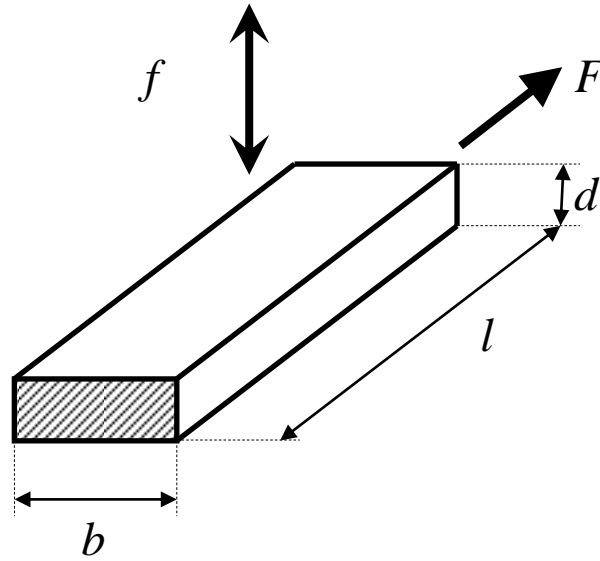


図 2.7 実効的なヤング率の変化

図 2.7 に示すような片端を固定した長さ l , 幅 b , 厚さ d の弾性体の他端に張力 F を印加すると共振周波数 f は次式のように変化する。

$$f = f_0 \left\{ 1 + 0.3 \left(\frac{l}{d} \right)^2 \frac{F}{Ebd} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.22)$$

ここで, f_0 は張力が加わっていない時の共振周波数, E はビームのヤング率である。この原理を用い, 静電力で引っ張ることによりビームに応力を加え, 実効的なヤング率を変化させることで共振周波数を変化させられると考えられる。

次に(b)の原理について説明する。図 2.8 に示すように, 共振子の振動方向と対向する電極に直流電圧 V_c を印加することで, 共振子の変位 Δy とすると式(2.18)より式(2.23)のような静電力が発生する⁽⁴¹⁾。静電力 F_e は, ギャップ間隔の関数であるため, 式(2.24)のような見掛け上の負のばね定数 K_e を生じる。

$$F_e = \frac{\epsilon_0 S V_c^2}{2(\Delta y + y)^3} \quad (2.23)$$

$$K_e = \frac{\partial F_e}{\partial \Delta y} = \frac{\epsilon l b V_c}{(\Delta y + y)^3} \quad (2.24)$$

見掛け上の負のばね定数も考慮し角共振周波数は次式で表わされる。

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K_m + K_e}{M}} \quad (2.25)$$

ここで、 ω_0 は角共振周波数、 K_m はばね定数、 M は質量である。

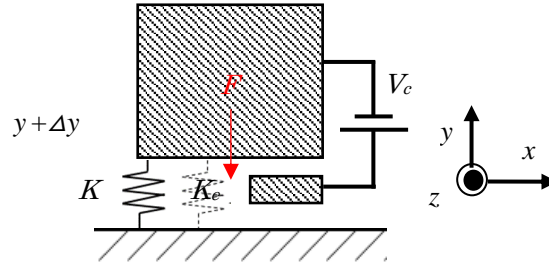


図 2.8 片側電極時の見掛け上の負のばね定数の発生

2.2.3 提案した共振型加速度センサの基本構造

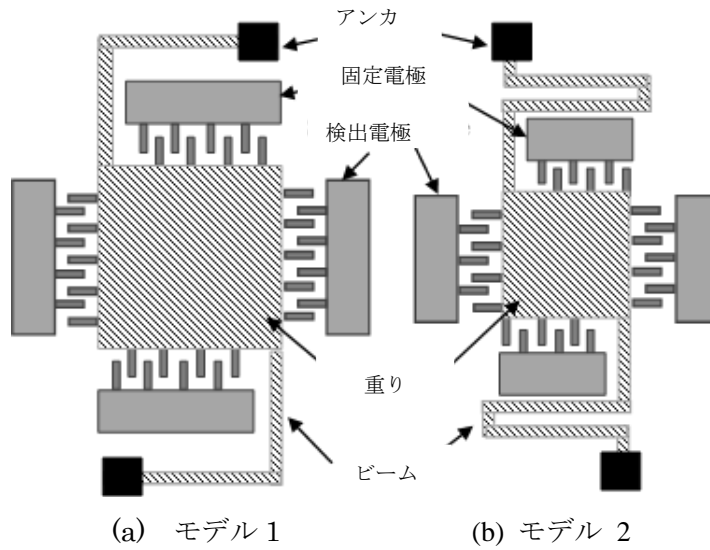


図 2.9 共振型加速度センサの基本構造

今回検討を行った共振型加速度センサの2つのプロトタイプ、モデル1とモデル2の基本構造を示す。小型化を実現するために、モデル1の慣性質量の寸法は従来の1mm□に対して、750μm□に変更し、モデル2はさらにそれを500μm□に縮小した。但し、最低限の感度を確保するために、モデル2はビーム折り返しを4回の設計とした。

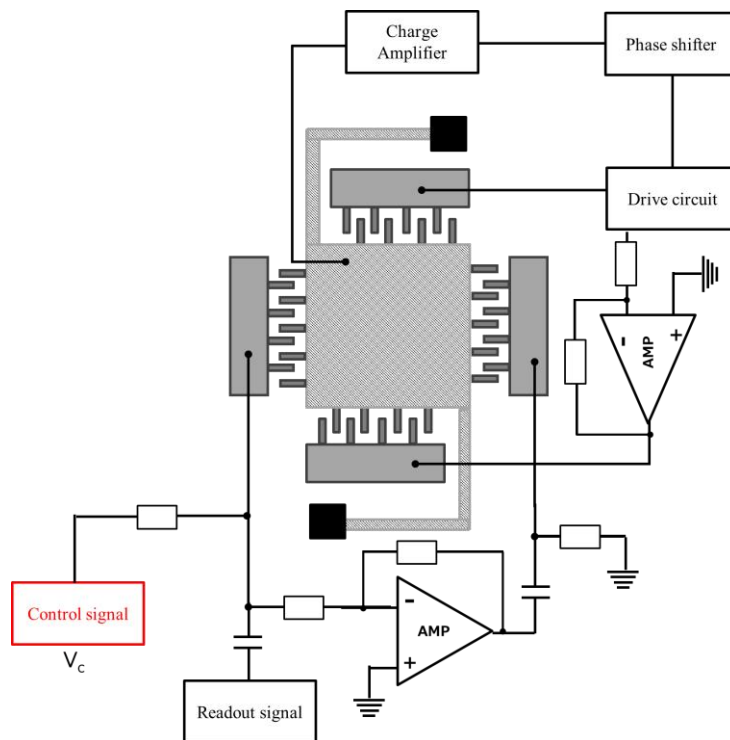


図 2.10 共振型加速度センサのブロック図

図 2.10 はこの検出素子を用いた共振型加速度センサの機能ブロック図である。回路検討を行った静電共振子のプロトタイプの基本構造の駆動用の櫛歯電極に AC 電圧を印加し、静電力によりおもりを上下に振動させ、検出電極により、この振動の変位を電圧に変換し、位相シフトさせてフィードバックすることにより自励共振する系統を構成している。この検出電極の片側に DC の制御電圧 V_c を印加することにより、静電ポテンシャルを形成し、加速度による慣性質量変位で共振周波数が変化する構成としている。

第3章 試作プロセスと試作サンプル評価

3.1 センサデバイスの製造プロセス

マイクロマシニングは大きく2つに分けられる。1つは表面マイクロマシニング，もう1つはバルク・マイクロマシニングである。

表面マイクロマシニングの特徴として犠牲層というものを形成して，その上に構造体を作り，後でこの犠牲層を取り去ることで，梁のように宙に浮いた構造体を作る。表面マイクロマシニングで作った構造体は比較的壊れにくいのだが，構造体が別の構造体や基板に張り付いてしまうという問題がある。

一方バルク・マイクロマシニングでは，結晶異方性エッチングや RIE (reactive ion etching) などの技術で Si を深く削り，圧力センサに使う薄いダイヤフラムや，加速度センサに使う重りをバネで支えた構造などを作る。薄いダイヤフラムは高濃度不純物領域を残す異方性エッチングで作ることもできる。さらに，陽極接合という技術でガラスと Si を張り合わせるのも，バルク・マイクロマシニングの特徴である。

製造プロセスが簡易なこと，その加工精度が高いこと，実装が簡易化されることなどから近年は前者が主流となっている。本論文では，製造工程が簡易な表面マイクロマシニング SOI-MEMS 技術を用いて検討を行った。図 3.1 に素子断面図を示す。これらの構造体は SOI 基板の Si デバイス層から構成されていて，デバイス層の厚みは $25\mu\text{m}$ となっている。

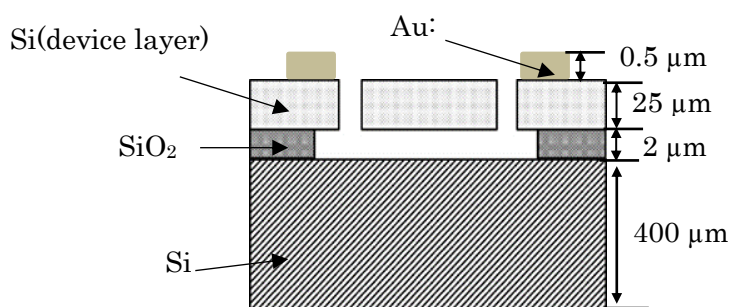


図 3.1 素子断面図

図 3.2 ~ 3.11 に今回用いた MEMS ファウンダリー製造プロセスのフロー図を示す。

1. SiO₂膜を単結晶 Si でサンドイッチした SOI 基板を準備する。



図 3.2 SOI 基板

2. Au 膜を蒸着させる。



図 3.3 Au 膜蒸着(スパッタ)

3. フォトリソグリス(PR)を一定の厚さに塗布する。



図 3.3 フォトリソグリス(PR)塗布

4. 電極のマスクを置いて、紫外線を照射する。

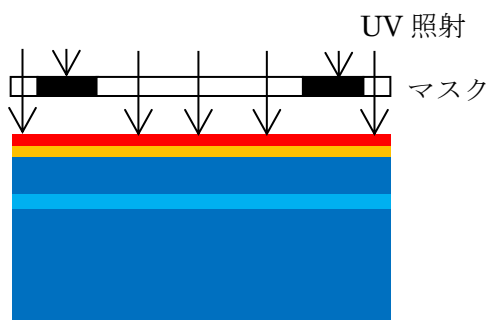


図 3.4 露光(電極マスク)

5. フォトレジストを現像する。



図 3.5 現像(電極)

6. Au をエッチングして，フォトレジストを除去する。



図 3.6 Au エッチ+レジスト除去

7. 再度フォトレジストを一定の厚さに塗布する。



図 3.7 フォトレジスト(PR)塗布

8. 構造のマスクを置いて紫外線を照射する。

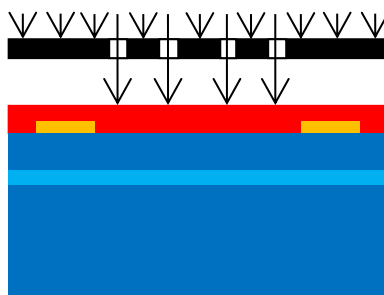


図 3.8 露光(構造マスク)

9. 現像する。

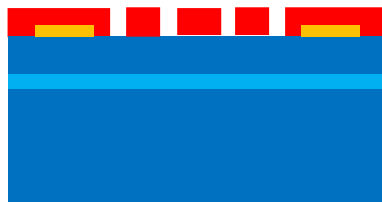


図 3.9 現像(構造)

10. Si をエッチングしてフォトリソを除去する。



図 3.10 Si エッチ+レジスト除去

11. SiO₂膜をエッチングしてマイクロ構造体をリリースして完成となる。



図 3.11 SiO₂エッチ(リリース・エッチ)

3.2 実装プロセス

図 3.12 は述べた前工程プロセスで試作したデバイスを用いて研究室で行った実装工程フロー図である。

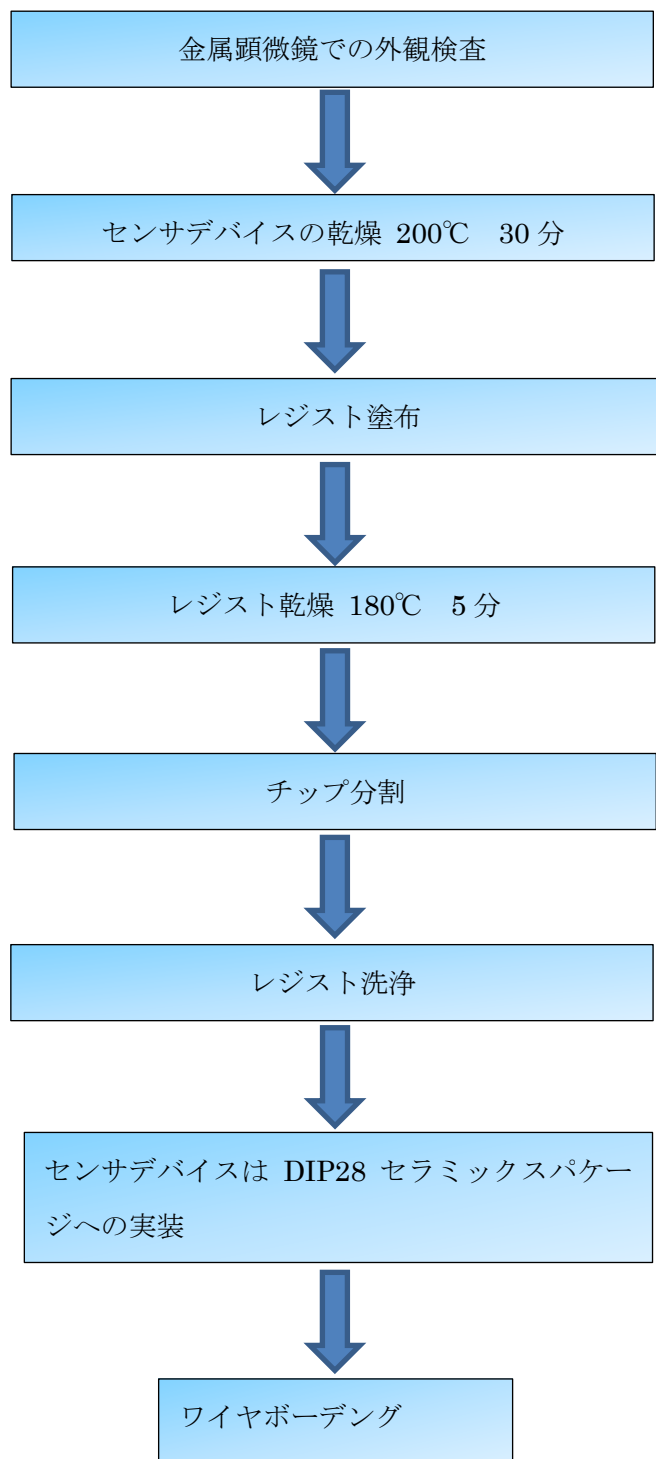


図 3.12 実装プロセスフロー図

3.2.1 センサデバイスの乾燥

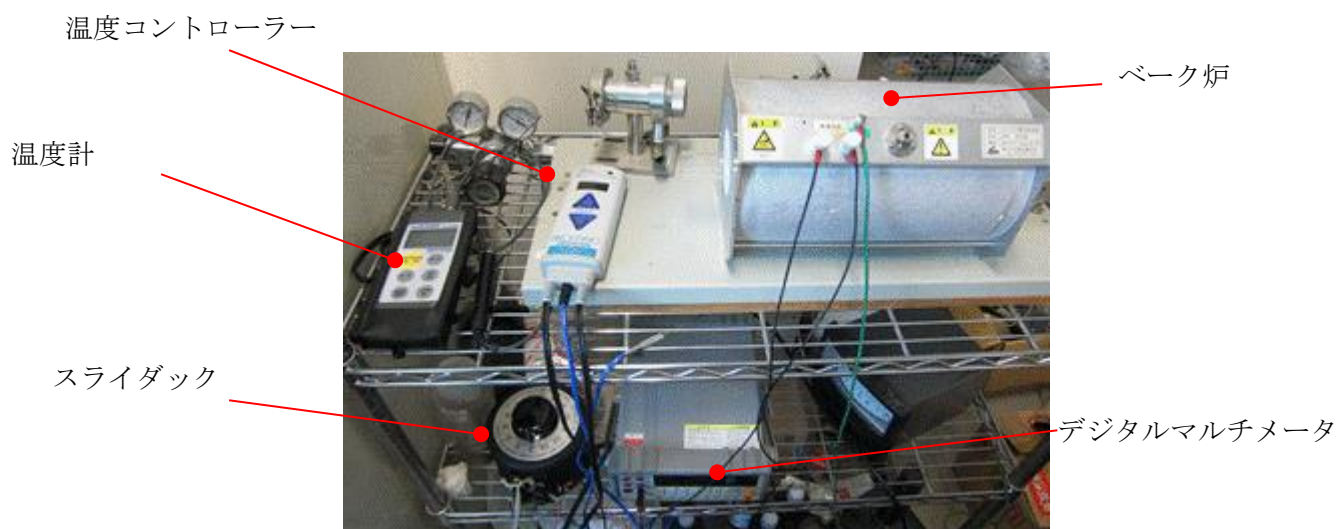


図 3.13 加熱炉のシステムの写真

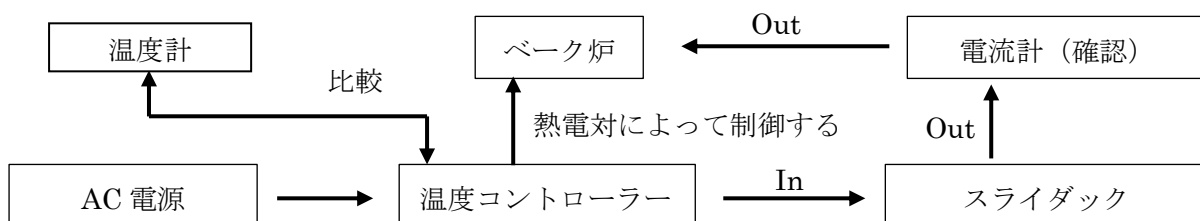


図 3.14 加熱炉システムの仕組み

図 3.13 は電気式の加熱炉システムの写真である。図 3.14 は加熱炉システムの仕組みである。

- ① 初めにドラフターの電源入れスイッチ「on」を押し、温度コントローラーのプラグを差し込む (図 3.15)
- ② デジタルマルチメータの「~A」ボタンを押し、直流⇒交流電流測定にする (図 3.16)



図 3.15 ドラフターのブレーカ



図 3.16 直流変更ボタン

- ③ 温度コントローラーの「Δ」ボタンを押して、温度を設定する（表示の点滅がある）。
 （180～190 °Cに設定する。図 3.17）
- ④ スライダックのダイヤルは「0」⇒「30」Vまでに回す（図 3.18）。



図 3.17 温度コントローラー設定

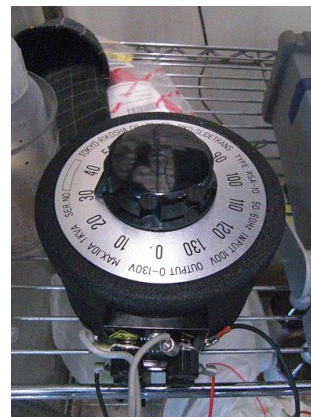
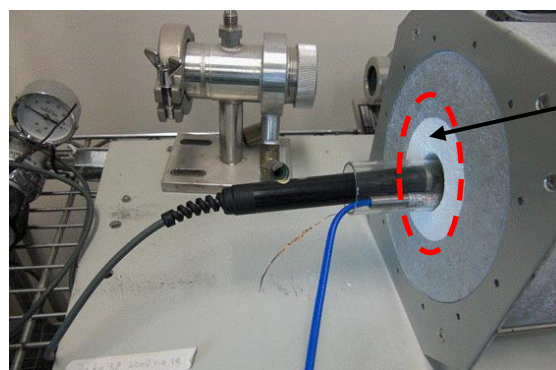


図 3.18 スライダックの電圧調整

- ⑤ 「温度計」と「温度コントローラー」の熱電対をベーク炉内に入れる（図 3.19）。



入り過ぎないように
 注意する，樹脂部分
 が溶けるおそれがある。

図 3.19 熱電対は炉の中に入れる

- ⑥ 温度計の結果によって、温度を 200°Cに設定する。設定温度に上昇するまでに実装
 用具の準備をする。



図 3.20 専用ピンセット



図 3.21 チップトレイ

- ⑦ デバイスの保管ケースの蓋を開け，図 3.20 の専用ピンセットを用いて図 3.21 のチップトレイ上に試作チップを置くこと



図 3.22 分割前チップ外観

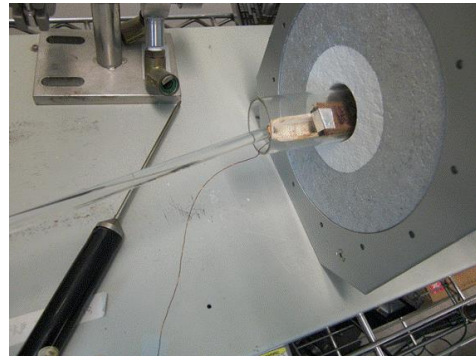


図 3.23 ガラスの使い方

- ⑧ チップを乗せたチップトレイをベーク炉に入れ，ガラス棒でチップトレイを炉の真ん中位置までに押す（図 3.23）。
- ⑨ 図 3.19 のように 「温度計」と「温度コントローラー」の熱電対をベーク炉内にいれ，30分で加熱する。
- ⑩ 加熱終了後，炉内から試作チップを取り出し，十分に熱を冷ましたら台上にキムワイプを載せ，その上にチップを置く。
- ⑪ ベーク炉の温度を 80°C に設定する。

以上の作業は試作チップの乾燥を目的としている。

3.2.2 レジストの塗布

- ① ドラフターの照明，換気扇を起動する。
- ② レジスト剤をプラスチックコップに 1cc~2cc (目安) ぐらいに少量注ぐ (図 3.24)。



図 3.24 レジスト剤 OFPR-800LR



図 3.25 レジスト塗布

- ③ インジェクター(注射器)を用いて試作チップ上にレジスト剤を塗布する (図 3.25)。
※チップ割れ目に塗布しないように
- ④ ベーク炉内温度を 80℃に設定し，20 分間加熱する。尚，この工程はレジスト剤硬化を目的としている。
- ⑤ 20 分間加熱したら一度，炉内から試作チップを取り出して裏返し，再度 80℃で 20 分間加熱する。
- ⑥ 加熱終了後，炉内から試作チップを取り出し，十分熱を冷ましてからゴム手袋をしてチップを 4 等分に分割する。力を入れ方 (図 3.26)



図 3.26 チップ分割力を入れる点 (●)

- ⑦ 分割したチップはトレーの上に置く。(図 3.27)



図 3.27 チップトレー

3.2.3 レジスト洗浄

- ① アセトン, 2-プロパノール, HFE(ハイドロフルオロエーテル)とプラスチックコップ5つを用意し, ドラフト内でアセトンと 2-プロパノールをコップ2つずつ, HFE をコップ1つに注ぐ。

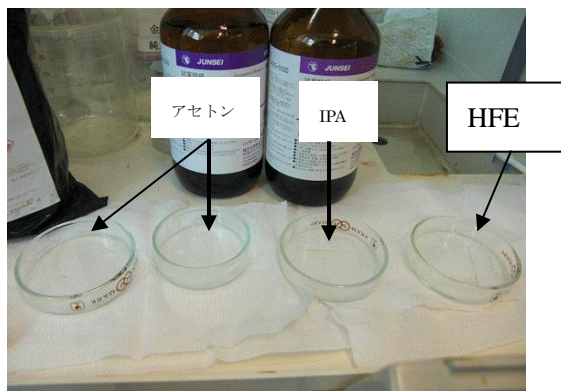
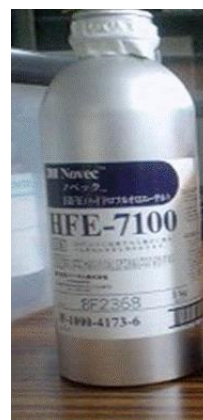


図 3.28 使用薬品外観



使い終わったら, シールを張り, 箱に入れること。

図 3.29 蒸発しやすい HFE-7100

- ② 分割したチップを1枚ずつアセトン, アセトン, 2-プロパノール, HFE の順に浸してレジスト剤を落とす。
- ③ 薬品が乾いたら, チップをトレイへ収容する。
- ④ そして, アセトン, アセトン, 2-プロパノール, HFE 溶剤は有機溶剤回収容器に入れる (図 3.30)。



図 3.30 廃棄用有機溶剤容器

- ⑤ シャーレを綺麗に洗い, キムワイプで拭く。ドラフター内を整理, 整頓してから照明, 換気扇を OFF, 扉を閉める。

以上で分割は終了する。

使用機器リスト：

ベーク炉：アサヒ理化製作所 セラミクス電気筒状炉

サーモスタット：CHINO

デジタルマルチメータ：KENWOOD DUALDISPLAYMULTIMETER

スライダック：松永製作所 SLIDE REGULATOR

使用薬品

IPA：純正化学株式会社 2-プロパノール

アセトン：純正化学株式会社 アセトン

HFE：住友スリーエム株式会社 HFE-7100

3.2.4.ダイボンド

パッケージ(DIP28)上に試作チップを接着するダイボンド工程は下記となる。

- ① DIP28 を用意し足をニッパーで切り取る。
- ② 冷蔵庫からボンド剤 A と B を取り出し、小さな容器の中でボンド剤 A：ボンド剤 B＝2：3 の割合で混ぜ合わせる（爪楊枝 3 本）。



図 3.31 ボンド剤外観

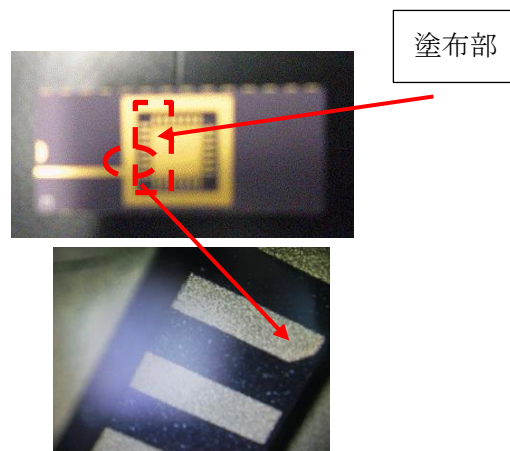


図 3.32 一番ピン電極塗布部

- ③ DIP28 の基板電極上にボンド剤を薄く塗布する。又、1 番ピン電極にもボンド剤を塗布し基板電極と接続する。この際、他のピン電極にボンド剤が付着しないように注意する。
- ④ サーモスタットの電源を入れてダイヤルを調節し、ベーク炉内の温度は 150°C になっていることを確認する。(0⇒30V)
- ⑤ 炉内の温度が 150°C に達したら試作チップを入れて 5 分間に加熱してから DIP28 を取り出してボンド剤を硬化させる。
- ⑥ スライダックのダイヤルを「0」にして、デジタルマルチメータの電源を「Off」、温度コ

ントローラーのプラグを抜いてから換気器のブレーカを落とす。

ダイボンドのプロセスは以上となる。

使用機器

ベーク炉：アサヒ理化製作所 セラミクス電気筒状炉

サーモスタット：CHINO

デジタルマルチメータ：KENWOOD DUALDISPLAYMULTIMETER

スライダック：松永製作所 SLIDE REGULATOR

使用薬品

ボンド剤：米国エポキシテクノロジー社 H20E partA H20E partB

3.3 周波数特性の評価方法

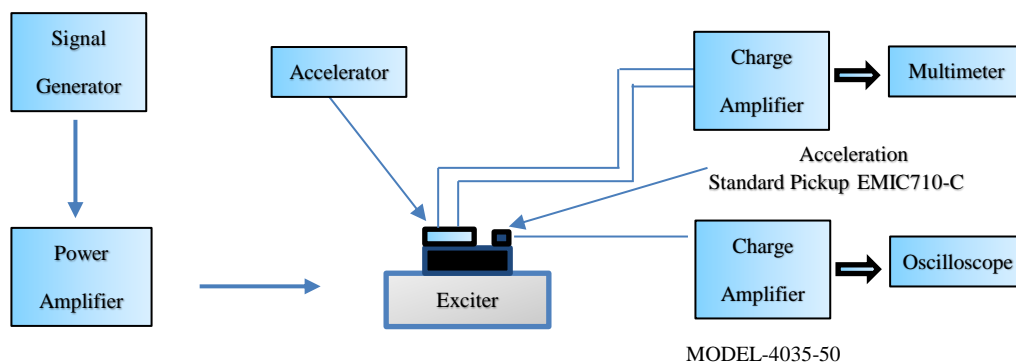


図 3.33 周波数特性測定システム

図 3.33 は周波数特性測定システムブロック図である。信号ジェネレータによって加振機の振動周波数を制御し、ピックアップセンサを用いて必要な加速度と振動周波数をモニターし、加振機の調整を行う。また、測定対象になったセンサの出力を増幅器を通してマルチメータで読む。

3.3.1 ピックアップセンサについて

本研究では加速度の測定のために加速度ピックアップ「EMIC710-C」を用いる。加速度ピックアップ「EMIC710-C」は加速度を電荷に変換して出力する高精度なセンサである。表 3.1 に加速度ピックアップ「EMIC710-C」の仕様を示す。

表 3.1 EMIC710-C ピックアップセンサの仕様

Model	EMIC 710-C
Type	Small/Light Weight
Feature	Vibration measurement and modal analysis on small object
Charge Sensitivity [pC / (m / s ²)]	0.2 ± 20%
Mounted Resonance	Higher than 60 kHz
Frequency Response[Hz]	Up to 20 k
Temperature Range[°C]	-50 to +160

表 3.1 で分かるように加速度ピックアップ「EMIC710-C」は加速度に対応する電荷出力であるため、チャージアンプ「MODEL-4035-50」の電荷検出の入力端子に繋げて利用する。

3.3.2 チャージアンプおよび容量計算

本研究では電荷出力型加速度ピックアップを利用するため、チャージアンプ「MODEL-4035-50」を用いる。チャージアンプ「MODEL-4035-50」は電荷出力型、プリアンプ内蔵型に対応した高精度なチャージアンプである。チャージアンプ「MODEL-4035-50」は検出器から出力された電荷信号を電圧信号に変換するものであるため、チャージアンプを通じた前後の電荷量は変わらないことからピックアップセンサの電荷量が求められる。

チャージアンプの容量 C_0 は設定が可能であり、圧電ピックアップの電荷量 Q が以下の関係式で計算できる。

$$Q = C_0 \times V_0 \quad (3.1)$$

前節で説明した加速度ピックアップ「EMIC710-C」の電荷感度が $0.2 \pm 20\% [\text{pC}/(\text{m}/\text{s}^2)]$ であるため、加速度 a は下記式で求められる。

$$a = Q / (0.2 \pm 20\% (\text{m}/\text{s}^2)) \quad (3.2)$$

3.3.3 小型振動発生器「MODEL512-D」について

本研究で振動実験では安定的な振動が必要であるため、小型振動発生器「MODEL512-D」を用いることにした。小型振動発生器「MODEL512-D」は IT 関連機器・電子デバイスのライン加振検査や振動計ピックアップの校正装置や振動・モーダル解析の加振源など様々な用途に対応する扱いやすい小型加振装置である。表 3.2 は小型振動発生機の仕様である。

表 3.2 小型振動発生機の仕様

Model	512-D
Exciting force Max	49.0 N
Displacement Max	7mm p-p
No-load acceleration Max	272 m / s ²
Movable part quality	0.18 kg
Vibration frequency	2~30 kHz

振動発生機を駆動させるには電力増幅器，標準信号発生器が必要である。標準信号発生器で電力増幅器に信号を入力し，電力増幅器で入力した信号を増幅し，またその信号を振動発生器に入力して振動発生器を駆動させる。

本研究で用いた電力増幅器は「MODEL371-A」である。電力増幅器は信号を増幅する機能を持ち，振動実験でよく使用される振動制御装置である。また，本研究で用いた標準信号発生器はファンクションジェネレータ「FG-274/KN3312869」である。

3.4 入出力特性の評価方法

DIP28 セラミックパッケージを装着した評価回路を回転ステージに固定し、回転させることで印加する重力加速度を変化させた。

図 3.34 に評価セットアップのブロック図、図 3.35 に実際に使用した評価セットアップの写真を示す。静電容量式加速度センサは作成した回路にセットし、AC 信号読みし信号及び駆動用 DC 電圧を評価回路に入力する。また、+VB 言語で構成されたプログラマで回転ステージを 15 度ずつ（約 0.18 g）回転し、静電容量式加速度センサの電圧変化をオシロスコープで読み出す。

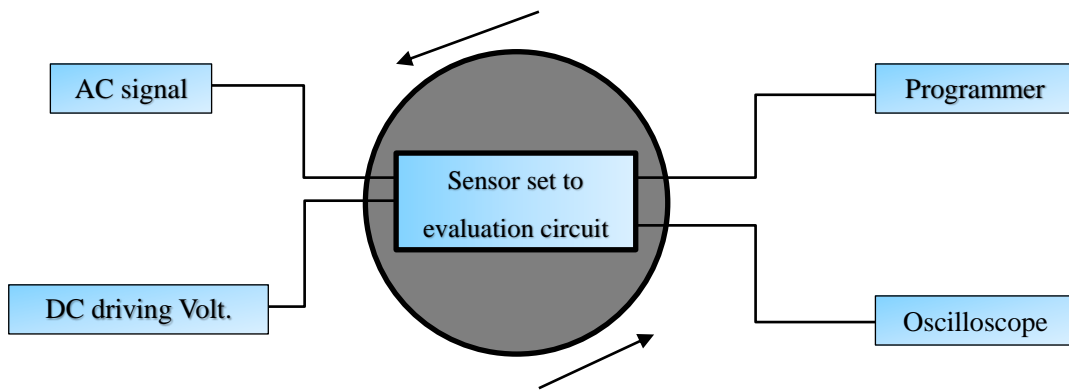


図 3.34 入出力特性評価セットアップのブロック図

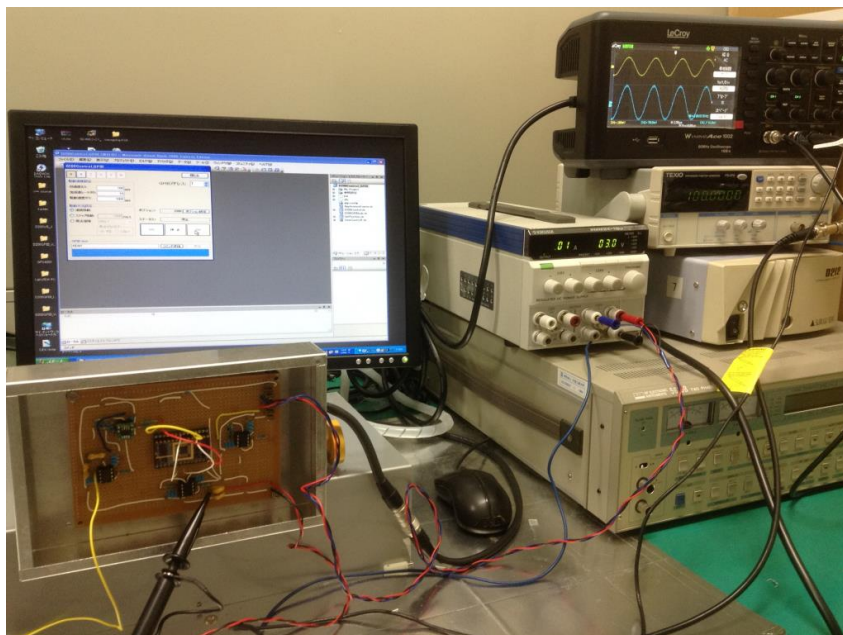


図 3.35 入出力特性評価セットアップの写真

ここ用いたモータシステムとして+VB プログラム「D200C_GBIP」を駆使し、ステップモータコントロールを介して、5組の電磁ブレーキなしモータ「C9582-9015-1」に制御信号を入れ、センサを回転させる。ここで「C9582-9015-1」モータの仕様を表 3.3 に示す。

表 3.3 「C9582-9015-1」モータの仕様

相数	5 相
基本ステップ角	0.36°
励磁最大静止トルク	0.135 N・m
ローター慣性モーメント	$35 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
自重	0.27 kg

第4章 重りの長辺に沿ったビームを用いた静電容量型加速度センサ

序論では表面マイクロマシーニングでは薄膜構造体を利用することから重りが十分に大きくできず、必要とされる感度を得ることが大きな課題となっていると述べた。感度は重りだけでなく、ビームの長さ、幅や形状にも依存し、それらのパラメータにより共振周波数も大きく変化する。一般に感度はビームの長さの3乗に比例するので感度の観点からはビームは折り返しをせずに直線をする方が有利だが、実際には高次の共振モードやレイアウトの観点から折り返しビームが多く用いられている。本章では、製造工程が簡易な SOI-MEMS 技術を用いた静電容量センサを対象とし、重りを一定として、ビームのパラメータを変化させた時の感度、共振周波数、高次共振モードをシミュレーションにより系統的に求め、各種パラメータによるこれらの特性の依存性を明確化し、重りの辺の長さまでビームの長さを延ばすような構成についての可能性の検討を行う。

4.1 基本構造検討

第1章で説明したように、MEMS 加速度センサは重りを両側から2本ビームもしくは4本ビームで支持する構造となっている静電容量式が主流であり、加速度を印加した時、重り変位 Δx が発生する。質点モデルを仮定した場合、この変位 Δx は次式で近似的に与えられる。

$$\Delta x = \frac{mal^3}{2Ebd^3} \quad (4.1)$$

ここでは、 m はセンサの重り、 l は単一ビームの長さ、 b はビームの幅で、 d はビームの厚み、 E は素材のヤング率である。

したがって等価的なバネ定数 k は次式のようになる。

$$k = \frac{2d^3bE}{l^3} \quad (4.2)$$

この構造体の基本共振周波数 f は次式で与えられる。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2Ebd^3}{ml^3}} \quad (4.3)$$

これらの式により慣性質量が一定の場合、両持ち梁式でも加速度印加時の変位はビーム

の長さの3乗に比例する。両持ち梁の場合、折り返しある場合、折り返したビームの本数を n とし、ビーム折り返し回数は $n-1$ とする。ビーム全長は $L=nl$ となる。 $n=1$ の場合、感度は L^3 に比例し、 n の場合、感度は $(L/n)^3 \times n = L^3/n^2$ に比例する。全長 L は一定な場合、ビーム折り返さないタイプの感度は折り返しあるタイプより n^2 倍となる。したがって感度を向上させるためにはビームの全長が一定の場合、ビームは折り返しをせずに長くするのが有効となることがわかる。

4.2 シミュレーションソフトと基本構造のパラメータ

4.2.1 IntellisSuite とシミュレーションの狙い

(1) IntellisSuite

本研究で使用した有限要素法シミュレーションソフトは IntellisSuite で、これは半導体素子の製造工程を利用した MEMS の製造工程の検討から、デバイスの性能評価まで一貫して検討する事を目的とした総合型の設計・解析ソフトウェアである。

基本的な機能として、

① デバイス解析

図 4.1 に示したように、自動 3D メッシュモデル出力やメッシュ編集機能がある IntelliFab / 3DBuilder を用いて、3D メッシュモデル作成でき、そのメッシュの色を使い、材料、電極など異なる機構部品を表示でき、個々の機構部品に対する分析ができる。

また 3D 熱-静電-構造連成解析により、静解析、固有値、動解析モードを用いて温度環境は特性への影響を解析できる。

② 製造プロセス工程の可視化、エッチングモデル作成が作成できること。

- ・マスクデータの入力
- ・各種プロセス条件の入力

Wafer 方向

エッチレートデータ指定

時間、濃度設定

上記製造プロセスのパラメータを入力し、解析すると MEMS プロセスを用いて加工後の形状も確認できる。

(2) シミュレーションの狙い

基本特性である感度と基本モードの共振周波数は単純モデルによる数式でも求めることができるが、単純モデルではビームの折り返し部やねじれの影響など 2 次的効果は全て無

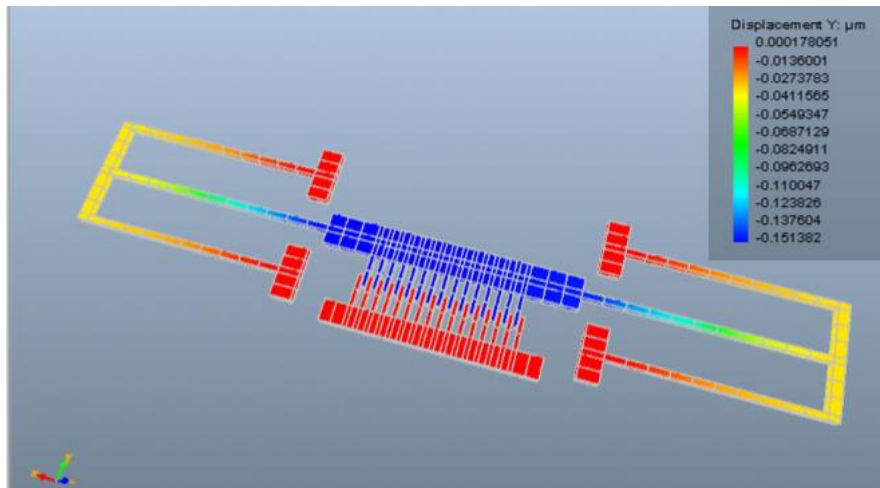


図 4.1 自動 3D メッシュを形成された解析モデル

視しているのので、ある程度の誤差が想定される。そこで、FEM シミュレーションによりそれぞれモデルにおいて単純モデルがどの程度の誤差があるかの確認を行った。さらに単純モデルでは計算することができない高次モードの共振周波数や他軸感度についても FEM シミュレーションにより求めた。

高次モードの共振は衝撃印加などに励振され、システムによってはそれが誤動作を起こす可能性があるのので、その共振周波数を把握しておく必要がある。

他軸感度は検出軸と直向する方向の加速度印加に対して出力が生じる割合でシステムの要求仕様を満足するように設計する必要がある。

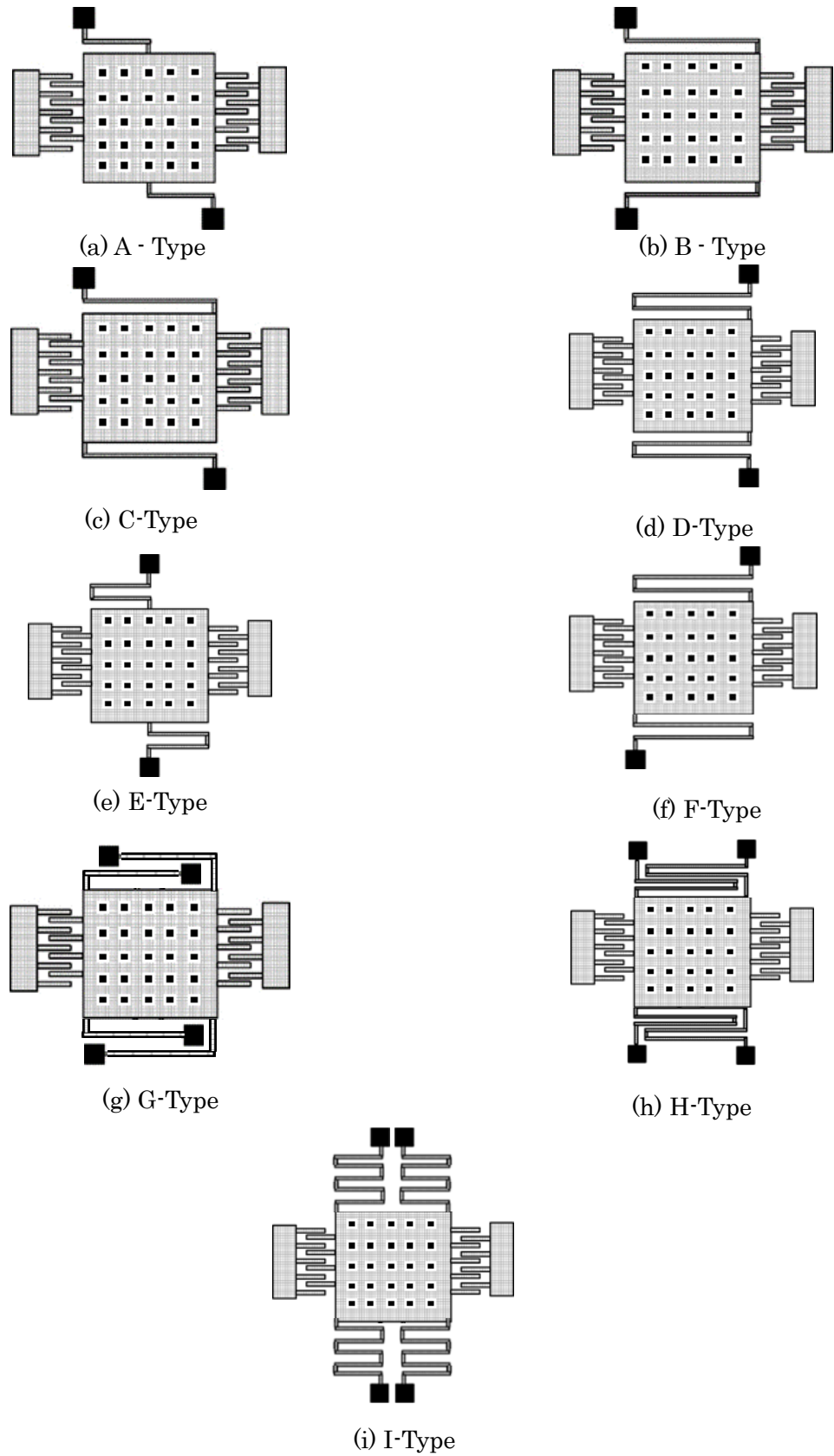


図 4.2 重り 1 辺が 1mm でビームを一辺の半分もしくは一辺の長さにした加速度センサの各種構造

4.2.2 基本構造のパラメータ

重りのサイズを $1000 \times 1000 \mu\text{m}$ 一定とした場合、各センサのビーム形状、またビームと重りの位置関係により、静電容量式加速度センサの特性がどう変化するが調べた。図 4.2 に示すような 9 種類のビーム構造を検討した。

(1) 検討モデル(個々のビーム長さは重りの一辺の長さまで)

・重りを片側から 1 本ずつ、2 本ビームで支持する構造。

(a) A タイプは 2 本ビームで、ビームの支持点は重りの真中に設置されている。

(b) B タイプは 2 本ビームで、ビームの支持点は重りの片側に設置されている。

(c) C タイプは 2 本ビームで、ビームの支持点は重りの両側対称的に設置されている。

(d) D タイプ、(e) E-type、(f) F-type のビームは(a), (b), (c)の 1 回折り返しタイプとなる。

A, B, C タイプにおける 1 本ビームの全長 L (個々ビームの長さ l =全長 L)の長さはそれぞれ $100 \mu\text{m}$, $250 \mu\text{m}$, $500 \mu\text{m}$, $750 \mu\text{m}$, $1000 \mu\text{m}$ に重りの長さまでにビーム長さを伸ばすように設計した。

D, E, F タイプのビームは A, B, C タイプの 1 回折り返すビームで、1 本ビームの全長 L (個々ビームの長さ $l \times 2$ =全長 L)の長さは $200 \mu\text{m}$, $500 \mu\text{m}$, $1000 \mu\text{m}$, $1500 \mu\text{m}$, $2000 \mu\text{m}$ に設計した。

・重りを片側から 2 本ずつ、4 本ビームで支持する構造

(g) G タイプは 4 本ビームで、ビームの支持点は重りの肩に設置されている。

G タイプにおける 1 本ビームの全長 L (個々ビームの長さ l =全長 L)の長さはそれぞれ $100 \mu\text{m}$, $250 \mu\text{m}$, $500 \mu\text{m}$, $750 \mu\text{m}$, $1000 \mu\text{m}$ に重りの長さまでにビーム長さを伸ばすように設計した。

H タイプのビームは G タイプの 1 回折り返すビームで、1 本ビームの全長 L (個々ビームの長さ $l \times 2$ =全長 L)の長さは $200 \mu\text{m}$, $500 \mu\text{m}$, $1000 \mu\text{m}$, $1500 \mu\text{m}$, $2000 \mu\text{m}$ に設計した。

(2) 従来技術(折り返し 4 回で、個々のビーム長さは重りの一辺の半分以下)

(i) I タイプの基本構造は重りを片側から 2 本ずつ、4 本ビームで支持する構造で、第 1 章の従来技術例と同様で、折り返しビームを用いて、各ビーム長さは重りの一辺の半分以下となっている。

Iタイプ構造の個々ビームの長さ l は $50\ \mu\text{m}$, $100\ \mu\text{m}$, $150\ \mu\text{m}$, $200\ \mu\text{m}$, $300\ \mu\text{m}$, $400\ \mu\text{m}$ の6種類でそれぞれ4回折り返し, 全長 L は $250\ \mu\text{m}$, $500\ \mu\text{m}$, $1000\ \mu\text{m}$, $1500\ \mu\text{m}$, $2000\ \mu\text{m}$ の構造となっている。

ビームの幅は $3\ \mu\text{m}$ である。楕型電極のパラメータはキャップ間隔を $2\ \mu\text{m}$, 楕歯対数は各72対とした。これらの構造体はSOI基板のSiデバイス層から構成されていてデバイス層の厚みは $25\ \mu\text{m}$ である。ビームはRIEにより $\langle 110 \rangle$ 方向に形成され, そのヤング率は 168GPa となっている。

4.3 シミュレーション結果

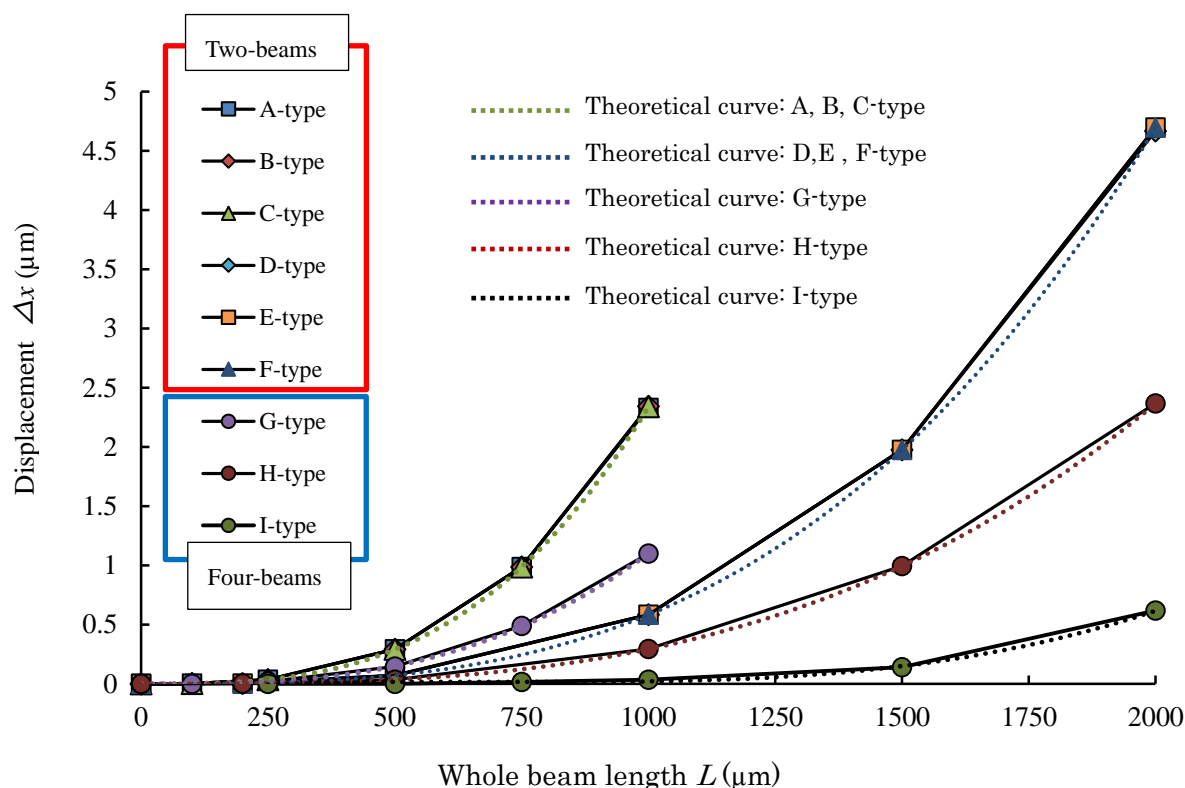


図 4.3 ビーム全長対変位 Δx 特性シミュレーション結果

1G 加速度を印加した時の重りの最大変位の解析を行った。図 4.3 は A, B, C, D, E, F, G, H, I タイプのビーム全長対変位特性のシミュレーション結果である。横軸がビームの全長 L , 縦軸は変位 Δx である。このグラフより以下の知見が得られる。

(1) 最大変位 Δx はビームの支持点と関係がなく、どのタイプも変位 Δx は個々ビームの長さ l に 3 乗に比例する形となっている。

(2) 折り返すビーム構造なら、通常ビーム返しなしタイプより変位 Δx は 2 倍となる。

(3) 折り返しビーム構造でも、折り返すビームなし構造でも、4 本ビームタイプの変位 Δx は 2 本ビームの半分になる。

(4) どのタイプも 2 本ビームタイプに対して 4 回折り返し 4 本ビームの I タイプは全長 L を等しいとした場合、個々のビームの長さ l が $1/5$ となり、変位 Δx は $1/50$ となる。

最大変位 Δx のシミュレーション結果は単純モデルの見積もりとほぼ同じであり、どのタイプにおいても 0.5% 以下となっている。

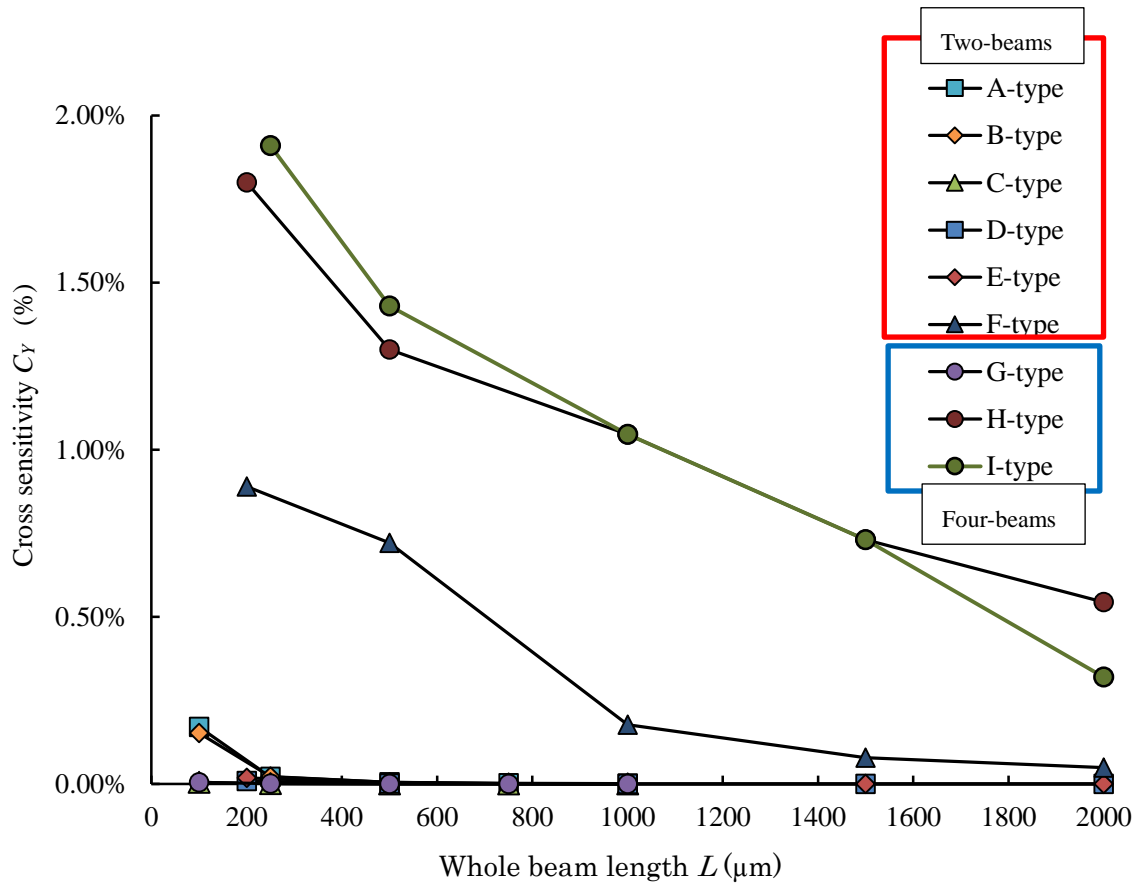


図 4.4 Y 軸他軸感度のシミュレーション結果

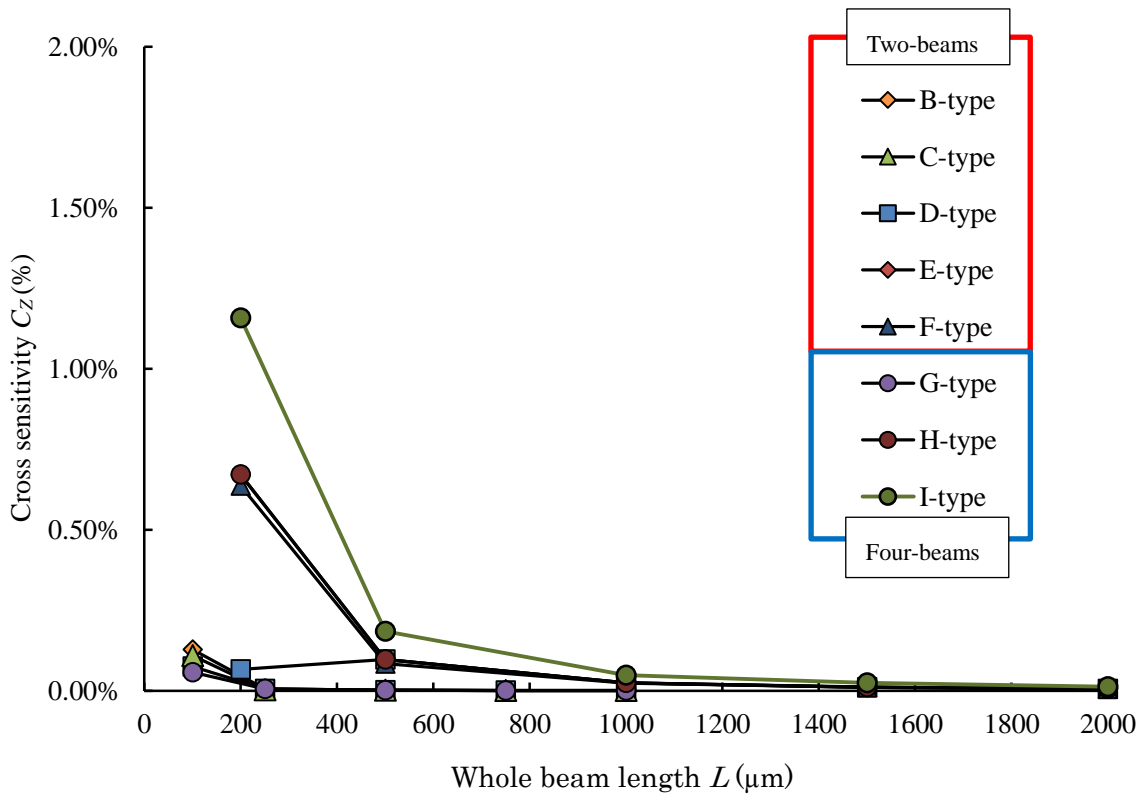


図 4.5 Z 軸他軸感度のシミュレーション結果

図 4.4 は横軸 Y 方向に 1 G を印加した時の Y 軸方向他軸感度 C_Y のシミュレーション結果である。

(1) どんなタイプにおいても、他軸感度 C_Y はビームの全長 L につれて、小さくなっていく傾向がある。

(2) 折り返しビームの H, I タイプの他軸感度 C_Y の値は 2% 以下、F タイプは 1% 以下という結果となった。一方、A~E, G タイプは 0.2% 以下で、無視できるレベルであることが分かった。

図 4.5 はデバイス側 Z 軸に 1 G を印加した時の他軸感度 C_Z である。 Y 軸の他軸感度 C_Y と同様傾向がある。

(1) どんなタイプにおいても、他軸感度 C_Z はビームの全長 L につれて、小さくなっていく傾向がある。

(2) 折り返しビームの I タイプの他軸感度 C_Z は 1.2% 以下であるのに対して、F と H タイプは 0.7% 以下、A~E, G タイプは 0.2% 以下で、無視できるレベルであることが分かった。

図 4.6 は今回検討した加速度センサの共振モードの模式図である。(a) は第 1 次共振モードで変位方向の基本モードと同じである。(b) は第 2 次共振モードで、 X 軸に対し捩じるモードである。(c) は第 3 次共振モードで Z 軸方向の上下並進モードである。

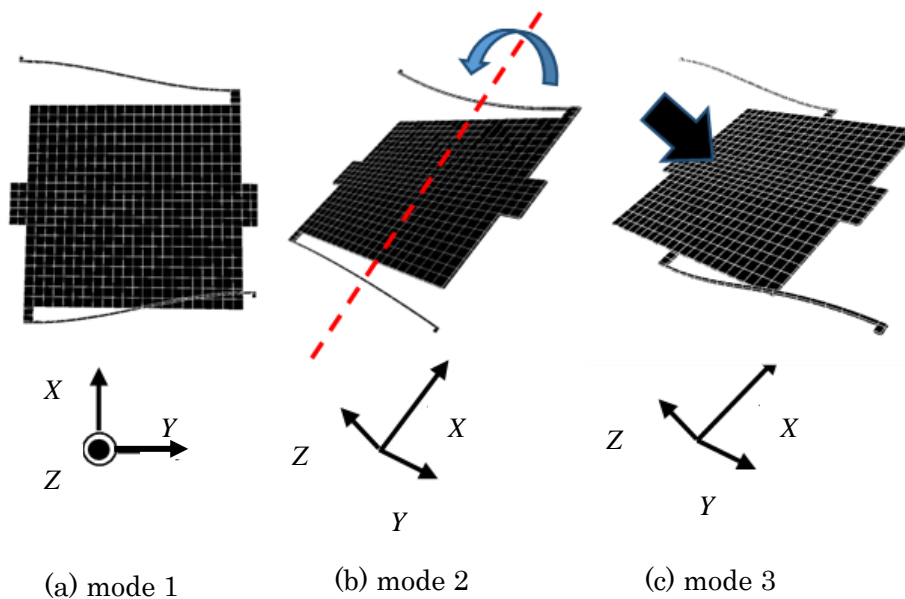


図 4.6 各センサの共振モード模式図

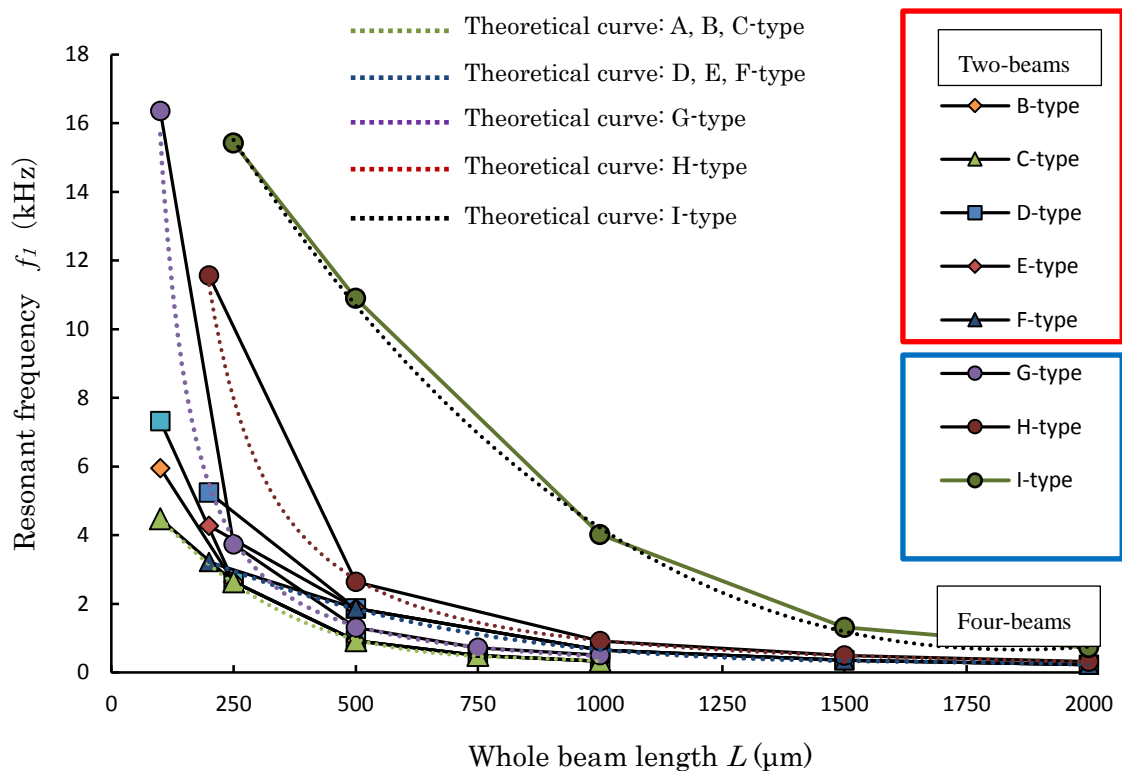


図 4.7 第 1 共振モードのビーム全長対共振周波数 f_1 特性のシミュレーション結果

図 4.7 は第 1 共振モードのビーム全長対共振周波数特性のシミュレーション結果である。

(1) 2 本ビームについて

① ビーム全長 L が $500\mu\text{m}$ 以下の場合、C、F タイプは単純モデルの計算値とほぼ同じで、誤差は 0.5% 以下であるのに対し、A、B、D、E タイプでは誤差は $50\% \sim 100\%$ と大きくズレている。

② ビーム全長 L が $500\mu\text{m}$ 以上の場合、どんなタイプでも第 1 モードの共振周波数 f_1 はどのタイプにおいてもほぼビームの個々 l の $3/2$ 乗に反比例する形になっている。その値は図 4.2 の変位のシミュレーション結果のルートに反比例する形となっており、単純モデルの計算値と一致している

(2) 4 本ビームの場合、ビーム全長 L に依存しない。G、H、I タイプにおいてもほぼビームの個々 l の $3/2$ 乗に反比例する形になっていて、単純モデルの計算値は誤差 0.5% 以下でほぼ一致している。

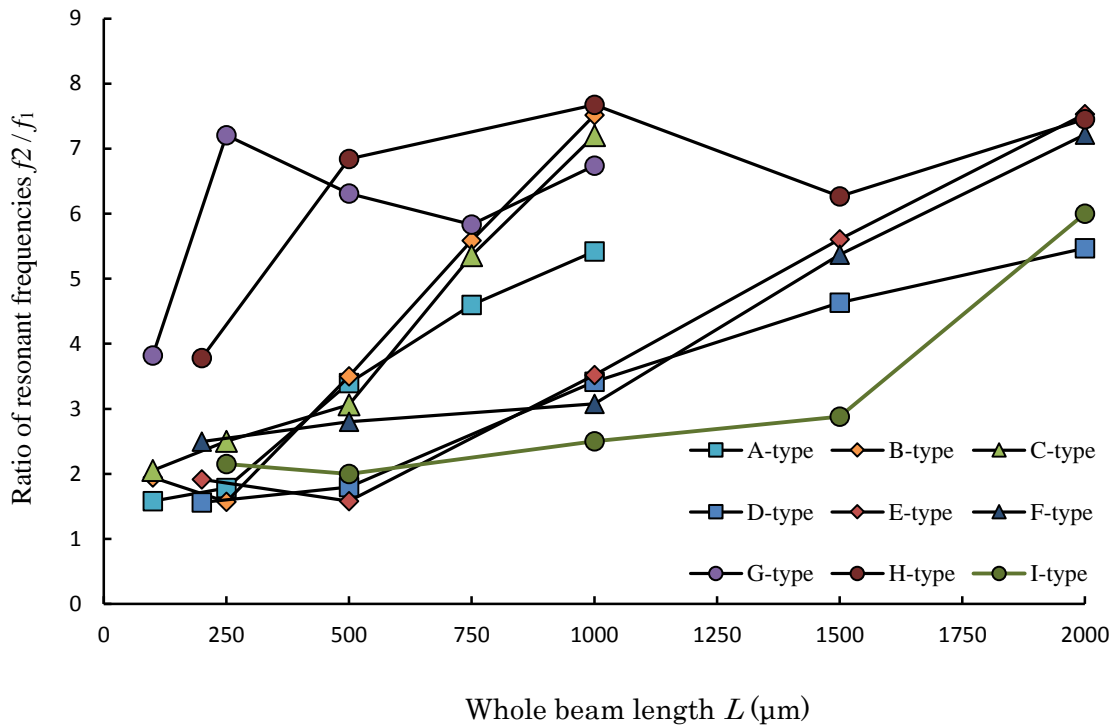


図 4.8 第 2 モード対第 1 モードの共振周波数比 f_2/f_1 のシミュレーション結果

図 4.8 に第 2 モード対第 1 モードの共振周波数比 f_2/f_1 の計算結果を示す。

(1) 4 本ビームの G タイプ, H タイプ, I タイプにおいてはこの比率はビームの全長と関係なく, 2~7 の値となっている。500 μm 以上では 3 以上であるのに対し, その他 2 本ビームタイプではビーム全長の短縮とともに減少する特性となっている。

(2) 2 本ビームの C タイプと F タイプにおいては, ビームの全長が 500 μm 以下になっても比率は 2 以上であるのに対し, A, B, D, E タイプでは 2 以下である。

A タイプ, B タイプ, C タイプ ではビームの全長が 500 μm で 3~4 程度で, 1000 μm で B タイプと C タイプは 7 程度, A タイプは 5 程度という結果となった。

折り返し 2 本ビーム E タイプと F タイプではビームが 750 μm 以上で 2~5 程度で, 2000 μm では 6 程度, D タイプではビームの全長が 750 μm 以上で 2~4 程度で, 2000 μm では 5 程度という結果となった。

(3) A タイプと D タイプに対してその他のタイプの第 2 モード共振周波数が低くなっているのはそれぞれ重りへのビームの接続点が中央寄りになっていること, 4 点支持ではなく 2 点支持になっていることでねじれやすい構造となっているためと思われる。

(4) 500 μm 以上の場合, 高次周波数は十分高いため, センサとして誤動作になる可能性がほぼないと考えられる。

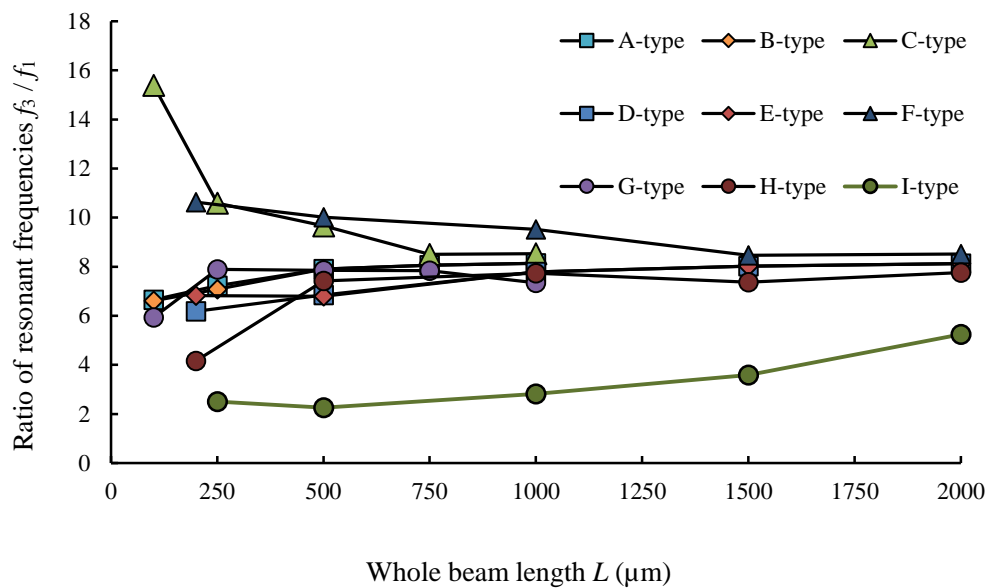


図 4.9 第 3 モード対第 1 モードの共振周波数比 f_3/f_1 のシミュレーション結果

図 4.9 に第 3 モードと第 1 モードの共振周波数の比率 f_3/f_1 のシミュレーション結果を示す。I タイプでは比率が 2~5 であるのに対し、A~H タイプでは全長 L が $200\mu\text{m}$ 以下の場合を除き、6 以上となっている。

ただし I タイプの第 3 モード共振周波数が他のタイプよりも低くなっているのは折り返し回数が多いために Z 軸方向のバネ定数が低下したためと思われる。

また、 $500\mu\text{m}$ 以上の場合、高次周波数は十分高いため、センサとして誤動作になる可能性がほぼないと考えられる。

4.4 プロトタイプ設計

前節の結果に基づき、図 4.10 に示すような I～III タイプの三つの静電容量式加速度センサ基本構造を提案した。1000 μm 口の重りを両側から 1 本ずつ、または 2 本ずつのビームで支持する構造で、三種類のビーム構造を検討した。各デバイスの寸法、設計値を表 4.1 にまとめた。

I タイプは従来技術例の 4 本ビームで、重りの辺の長さの半分以下で折り返し構造となっている。最低限の感度を維持するため、個々のビーム長さ l は 400 μm とし、4 回折り返しビームを用いて、全長 L が 2000 μm となっている。

II タイプと III タイプが今回検討したビーム構造である。ビームの長さは重りの辺の長さとなっている。

II タイプは折り返しなしの 2 本ビームで、前節の C タイプに対応している。ビームの支持点は重りの両側に対称的に設置されている。ビームの全長 L は 1000 μm である。前節シミュレーション結果によって、最大変位 Δx 、第 1 次共振モードの共振周波数は単純モデルの値とほぼ一致し、他軸感度や高次周波数は問題がないと確認され、検証モデルの対象として選定した。

III タイプは折り返し一回の 4 本ビーム、前節の H タイプになる。ビームの支持点は重りの角に設置されている。全長 L は 2000 μm 、ビームの幅は 3 μm である。前節シミュレーション結果によって II タイプと同じ特性を持ち、サンプルの製作プロセス能力を確認するため選定した。

楕型電極のパラメータはキャップ間隔を 2 μm 、楕歯対数は各 72 対とした。

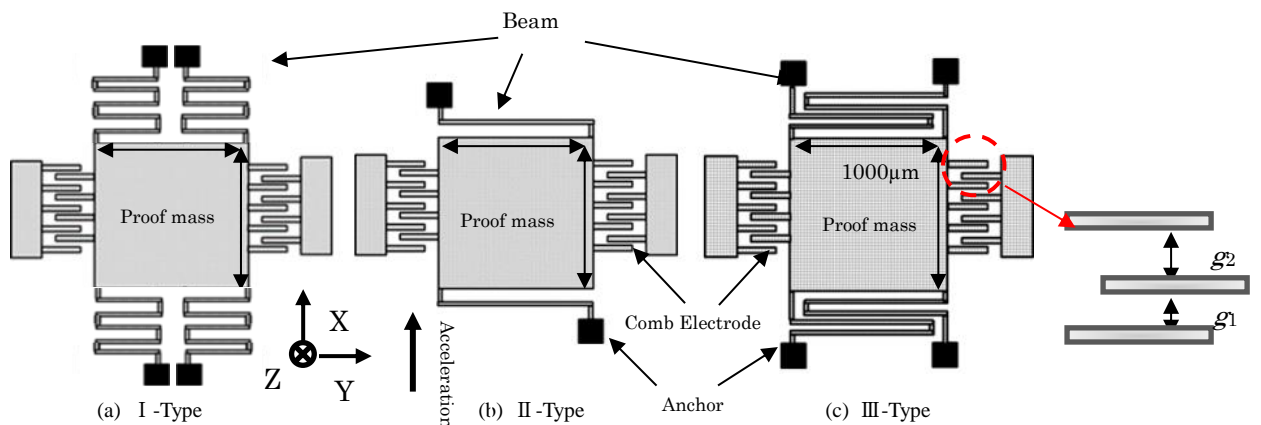


図 4.10 提案した静電容量式センサ基本構造

Table 4.1. Parameters of prototype sensors

model	I -type	II -type	III-type
proof mass m_g (kg)	5.1216E-08		
Whole beam length L (μm)	2000	1000	2000
spring k (N/m)	0.12	0.03	0.03
displacement Δx ($\mu\text{m}/\text{G}$)	0.75	1.66	1.66
gap g (μm)	$g_1=2, g_2=5$		
Young's modulus E (GPa)	168		
density (kg/m^3)	2328		
resonant frequency f (Hz)	725	326	345
Calculated sensitivity (mV)	352.8	591	

4.5 プロトタイプ試作と評価

これら3種類のデバイスについてプロトタイプ的设计を行い、SOI ウェハを用いて試作を行った。作製した4本ビームIタイプと2本ビームIIタイプセンサの1つのビームのSEM写真を図4.11 (a), (b)に示す。4本ビームIIIタイプセンサの2つのビームのSEM写真を図4.11 (c)に示す。残留応力により変形することなく形成できたことが確認できた。

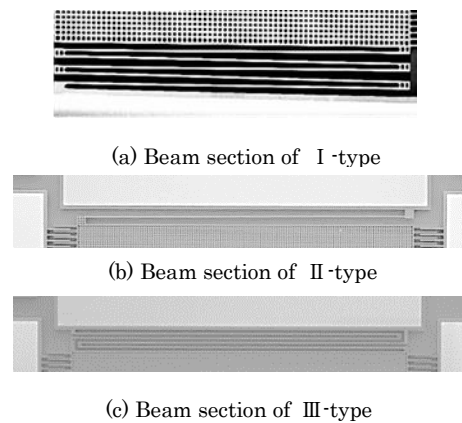


図 4.11 プロトタイプのビーム形状の SEM 写真

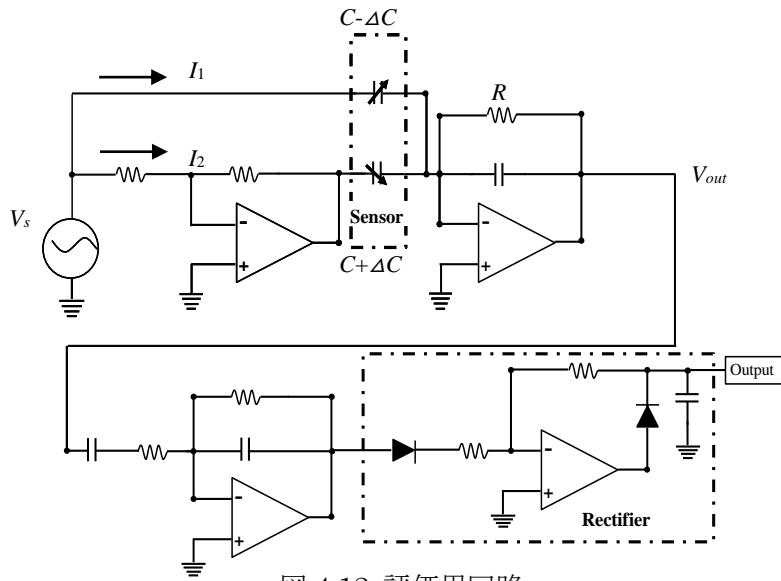


図 4.12 評価用回路

センサ特性を評価するため、図 4.12 に示した回路の製作を行い、センサの感度と共振周数の測定を行った。最初に回転ステージを用いて重力 G に対する感度の評価を行った。重りに 1 G を印加した場合、差動容量式楕型電極間の変位 Δx が発生し、電極間静電容量 C に対し、 ΔC が変化する。出力信号 V_{out} は次式より表される。

$$I_1 = V_s \times j\omega(C + \Delta C) \quad (4.4)$$

$$I_2 = -V_s \times j\omega(C - \Delta C) \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} V_{out} &= -RI_s = -R(I_1 + I_2) \\ &= -R \times V_s \times j\omega 2\Delta C \end{aligned} \quad (4.6)$$

図 4.13 は $+1\text{ G} \sim -1\text{ G}$ 重力を印加した時の出力電圧測定結果である。従来型の I タイプ、4 回折り返し 4 本ビーム式の感度測定結果は 334 mV/G であり、II タイプの 2 本ビーム式加速度センサの結果は 587 mV/G であり、III タイプの折り返しの 4 本ビーム式加速度センサの結果は 560 mV/G であった。これらの結果は単純モデルの計算結果に対し、誤差 10% 以下であり、ほぼ一致することを確認できた。

図 4.14 に加振機を用いて 1 G を印加した時の出力電圧の周波数特性測定結果を示す。50 Hz から 1000 Hz まで加振周波数を掃引した結果、各センサともにわずかな共振ピークを観察することができ、これらの共振周波数が単純モデルによる計算結果に対し、誤差は 10% 以下であり、ほぼ一致することを確認できた。

シミュレーションにより設計した内容が妥当であり、今後このシミュレーション手法を用いて開発を進めることが可能であることを確認することができた。

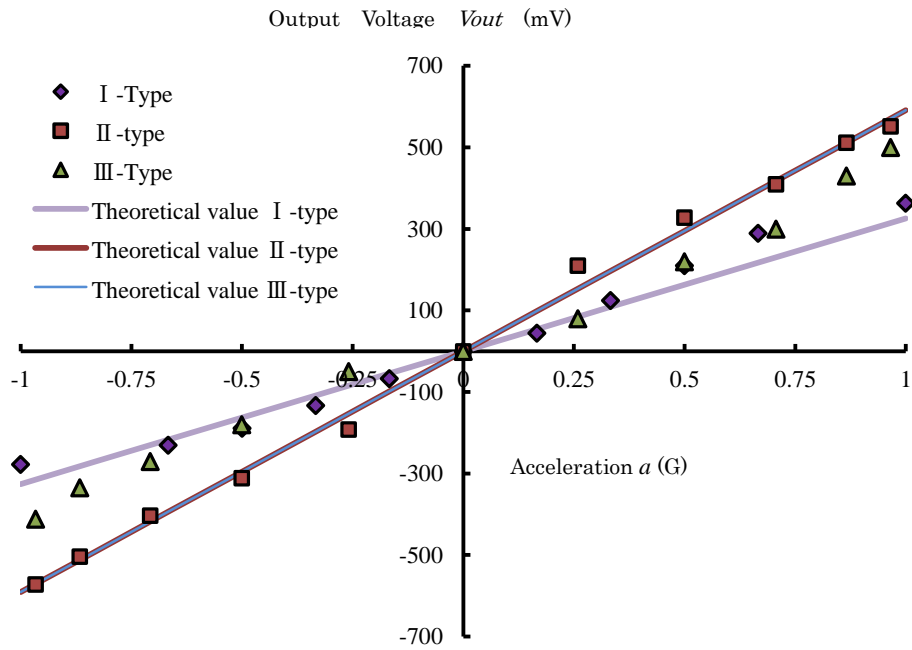


図 4.13 回転ステージ結果

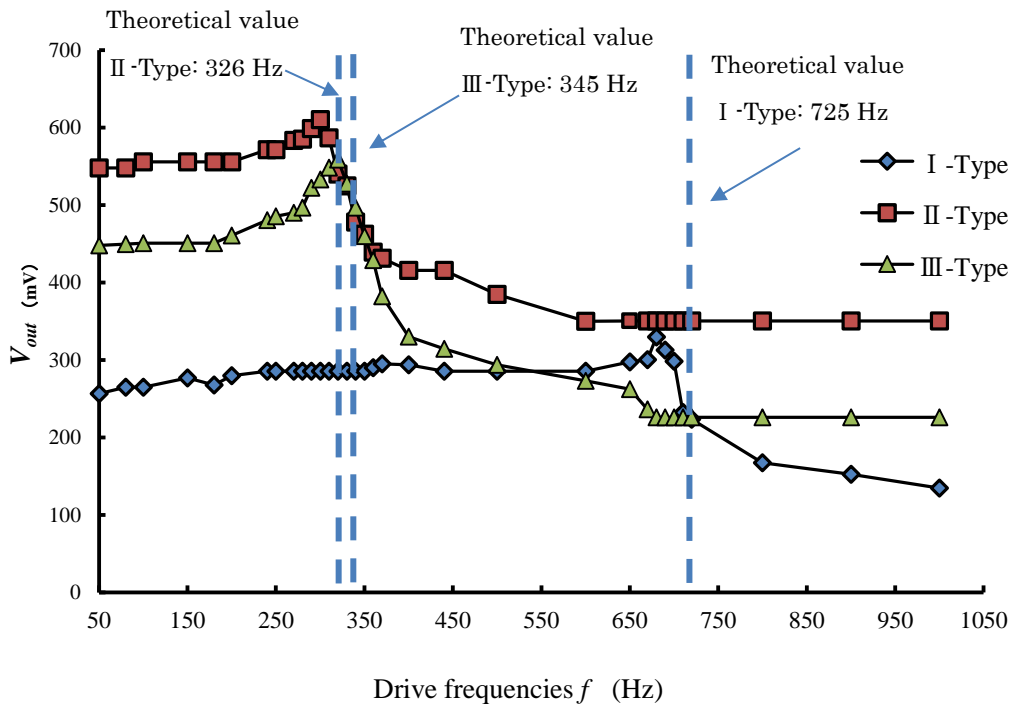


図 4.14 周波数特性測定結果

4.6 まとめ

簡易な SOI を用いた静電容量式 MEMS 加速度センサについて、重りの辺の長さと同じ長さのビームを用いることによる感度向上への有効性の提案を行い、基本特性シミュレーションとプロトタイプ的设计・試作・評価を実施した。シミュレーションによりビーム全長と感度及び共振周波数の関係を求めた。

(1) ビームの全長が同じ場合、ビームは重りとの支持点と関係がなく、検出軸感度はビーム全長 L が増加することによって、 L^3 に比例して増加していく。

(2) 折り返し回数が n 回の場合は個別の梁を用いた場合に対して感度は n 倍となることも確認した。

(3) Y 方向の他軸感度はどの場合でも 2% 以下で折り返しの無い場合には 0.1% にも達しないレベルであることが判明した。一方 Z 方向の他軸感度はどの場合でも 1% 以下で特に折り返しの無い場合は 0.1% 以下となった。

(4) 2 次モード共振周波数の基本モード共振周波数に対する比率 f_2/f_1 は折り返しがなく、ビームの全長 L が 500 μm 以上であれば 2 以上となることが分かった。

(5) 3 次モード共振周波数の基本モード共振周波数に対する比率 f_3/f_1 ビームの全長 L が 500 μm 以上で 6 以上となることがわかった。

また、上記のシミュレーション結果をもって、プロトタイプ的设计、シミュレーション、試作、および評価を行った。

(1) 従来型に対し感度は数倍となるが、共振周波数はそのルート分の 1 となり、簡易モデルによる計算結果にほぼ一致した。これらの内容を確認するためプロトタイプ的设计、試作、評価を行い、ほぼシミュレーション通りの測定結果を得ることができた。

(2) 重りの辺の長さと同じ長さタイプセンサの高次の共振周波数の基本共振周波数に対する比率はビームの全長が 500 μm 以上であれば 2 以上となることが判明した。

同じビーム全長さ、重りの寸法が 1 mm 口の場合、折り返し 4 回のセンサに対し、2 本ビームで折り返しをなくすことにより感度は約 3 倍にすることができる。この時第 1 モードの共振周波数は 680 Hz から 330 Hz へと低下するが、100 Hz 以下単純な動きの検出、制御には十分に利用できるものと思われる。次章では小形化の限界の検討を行うとともに応用分野に合わせて、最適化についても可能性の検討をしていく。

第5章 静電容量型加速度センサの小型化検討

前章では、簡単な SOI-MEMS 技術を使用して製作された静電容量型加速度センサについて、重りの辺の長さと同じ長さのビームを用いることによる感度向上への有効性の提案を行い、シミュレーションによりビームの全長に対する感度と共振周波数の関係を求めた。本章では、前章で得られた知見に基づいてデバイスの小型化のための重りの一辺の長さのビーム長を有する静電容量加速度センサの基本構造設計方法を検討する。前章と同じく、製造工程が簡易な SOI-MEMS 技術を用いた静電容量センサを対象とし、重りの辺の長さまでビームの長さを延ばすような構成で、正方形重りの寸法を変更しながら、パラメータを変化させた時の感度、共振周波数、高次共振モードをシミュレーションにより系統的に求め、各種パラメータによるこれらの特性の依存性を明確化し、小型化の可能性の検討を行う。

5.1 基本構造の検討

前章で説明したように、様々な制約のために、ビームは重りの辺に比べて短い構成が加速度センサ設計に広く使用されているが、ビームの長さを重りの長辺の長さにする事で高感度化できることを示した。本章では、単純な SOI-MEMS 技術を用いて製造された容量性マイクロ加速度センサについて、デバイスの小型化設計技術を明らかにするための検討を行った。特に高次モードの比較的低い共振周波数は、いくつかのアプリケーションでは誤った出力を引き起こす可能性があるため、高次モードの共振周波数を集中的に検討した。

第2章で述べたようにビームの長さが重りの辺の長さと同じ長さであるとき、変位 Δx は個々ビームの長さ l の3乗に比例する。

重りを正方形とし、ビームの長さを重りの一辺の長さと同じとし、折り返さない場合 ($L=l$)、重り一辺及びのビーム長さを Al に増やすと、重りを増加後の静電容量加速度センサの感度は元の感度に対し A の5乗倍になる。

$$\Delta x = \frac{mal^3}{2Ebd^3} \quad (5.1)$$

$$= \frac{(Al)^2 \times \rho \times d \times a(Al)^3}{2Ebd^3} \quad (5.2)$$

ここで Δx は変位であり、 m は重りの質量、 l はセンサ個々のビームの長さ、 E はヤング率、 b はセンサビームの幅、 d はビームと重りデバイスの厚みである。

ビーム折り返しがある場合の変位 Δx は次式のようにになる。

$$F = \Delta x \times k_1 \quad (5.3)$$

$$k_1 = \frac{2d^3bE}{nl^3} \quad (5.4)$$

$$\Delta x = F \times \frac{nl^3}{2d^3bE} \quad (5.5)$$

ここで k_1 はビーム折り返し場合のバネ定数であり、変位 Δx は折り返したビームの本数を n と比例する。

図 5.1 に示すような 5 つのモデルについて検討した。検討したモデルのパラメータは、ビーム幅は $3\mu\text{m}$ である。類似の楕円電極構造を有しており、重りは、(a) 基本である A タイプ： $1000\mu\text{m}\square$ 、(b) B タイプ： $750\mu\text{m}\square$ 、および (c) C タイプ： $500\mu\text{m}\square$ 、(d) D タイプ： $250\mu\text{m}\square$ 、(e) E タイプは $100\mu\text{m}\square$ の 5 種類である。B タイプと C タイプ、D タイプ及び E タイプを研究する目的は、重りが基準 A タイプと比較して小型化されてい

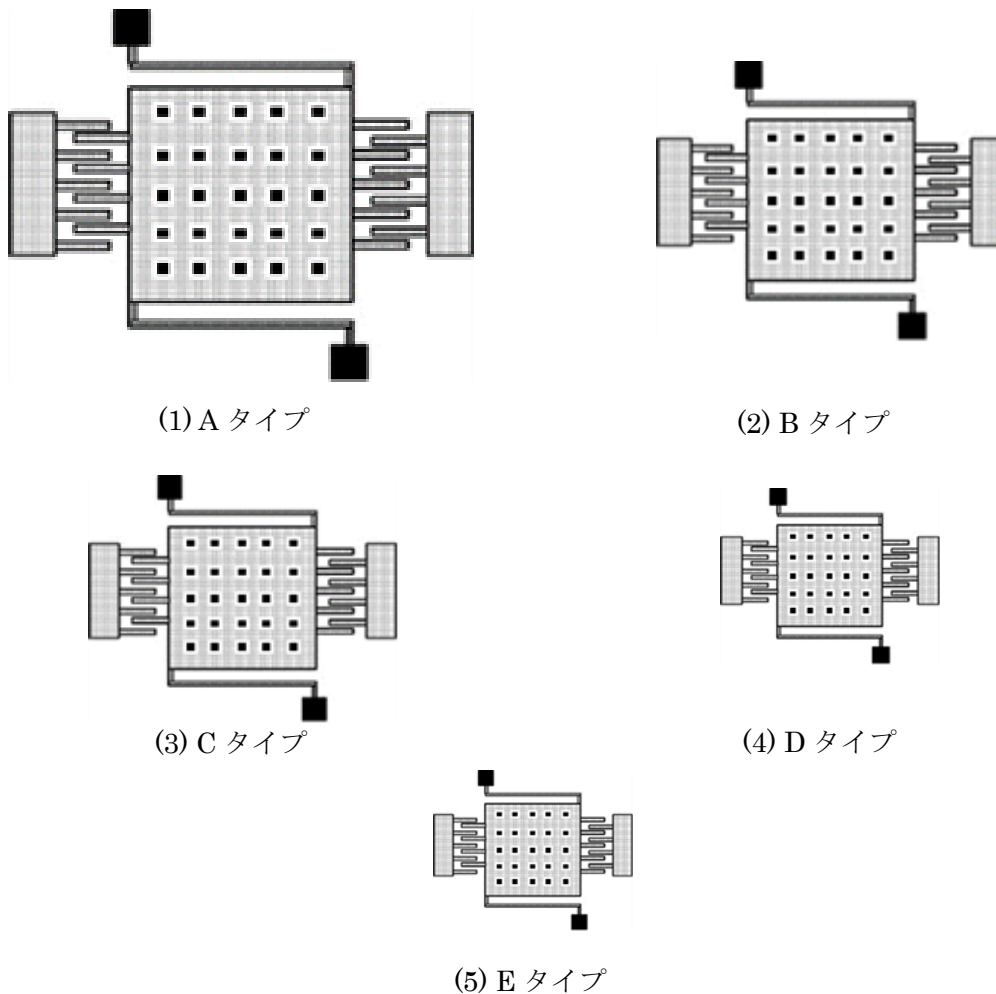


図 5.1 一辺が個々ビームの長さと同じの正方形の重りを有する静電容量加速度センサにおける検討用モデル

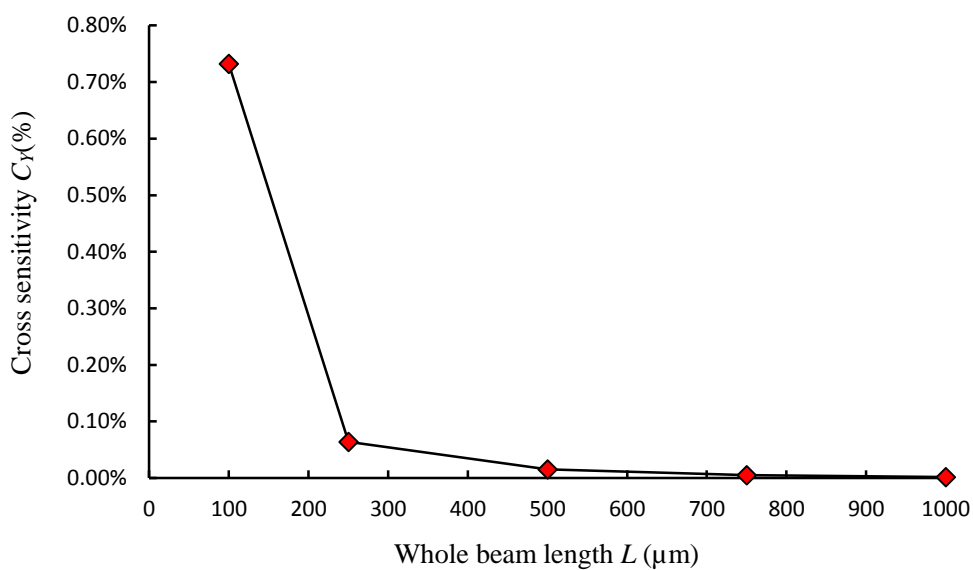


図 5.3 一辺が個々ビームの長さと同じの正方形の重りを有する静電容量加速度センサにおける Y 軸他軸感度のシミュレーション結果

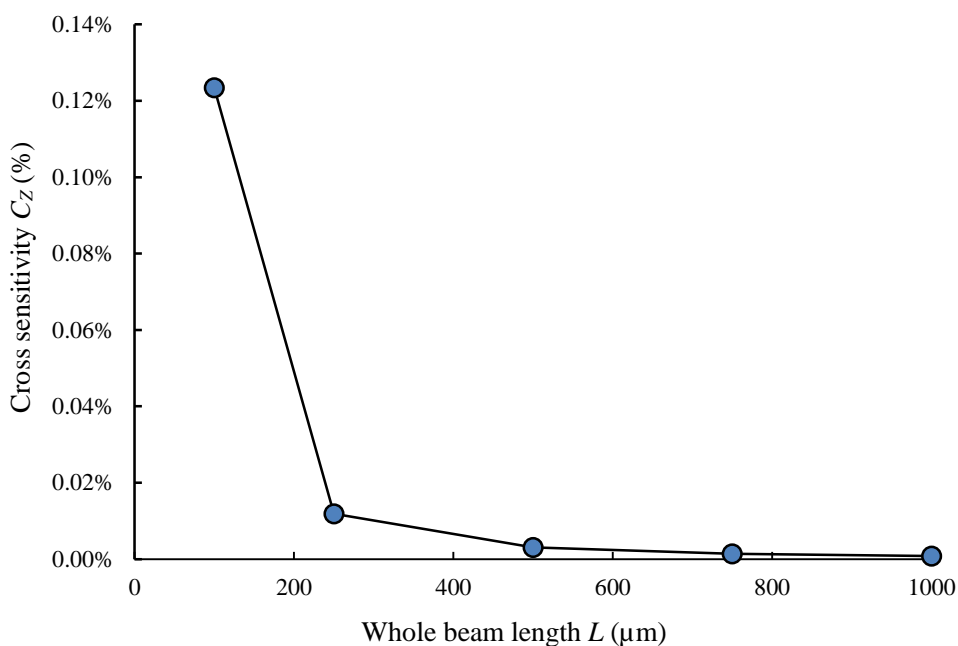


図 5.4 一辺が個々ビームの長さと同じの正方形の重りを有する静電容量加速度センサにおける Z 軸他軸感度のシミュレーション結果

図 5.7 に第 2 モード対第 1 モードの共振周波数比 f_2/f_1 のシミュレーション結果を示す。どのタイプではビーム全長の短縮とともに減少する特性となっていて、ビームの全長 L が $500 \mu\text{m}$ 以上では 6 以上という結果となっている。図 5.8 に第 3 モードと第 1 モードの共振周波数の比率 f_3/f_1 のシミュレーション結果を示す。どんなタイプにおいても 5 以上という結果となっている。

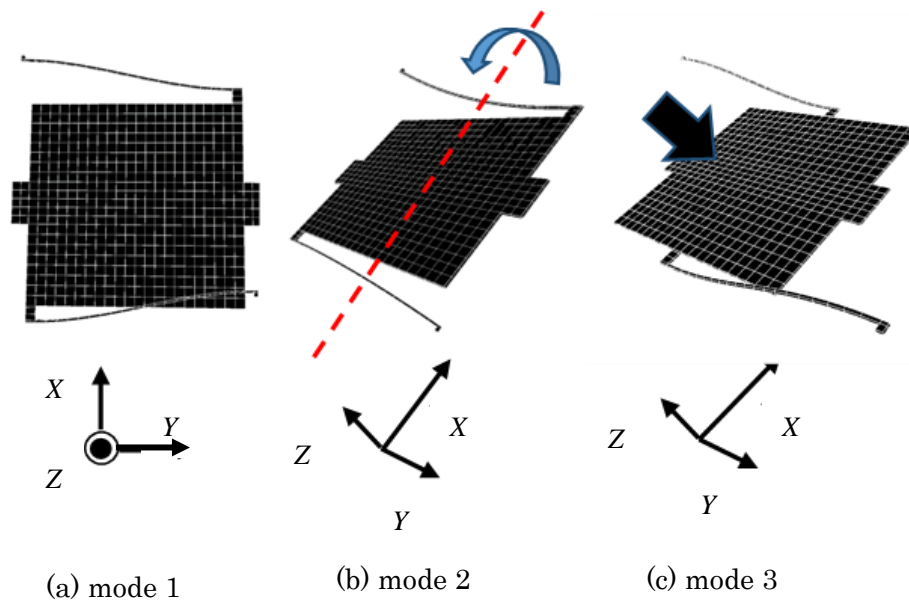


図 5.5 各センサの共振モード模式図

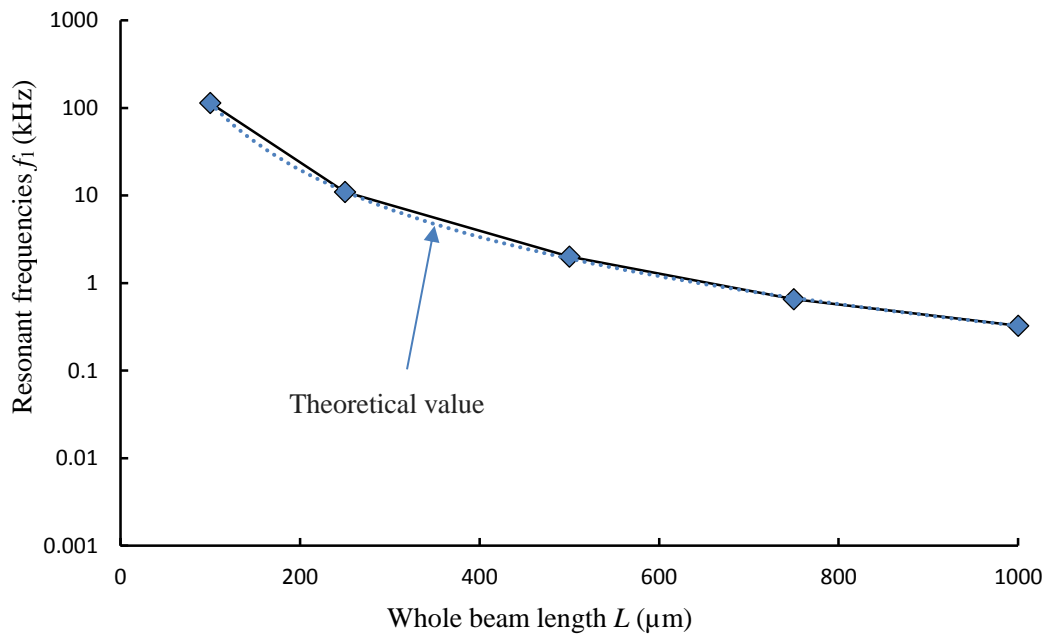


図 5.6 一辺が個々ビームの長さと同じの正方形の重りを有する静電容量加速度センサにおけるビーム全長対共振周波数 f_1 特性シミュレーション結果

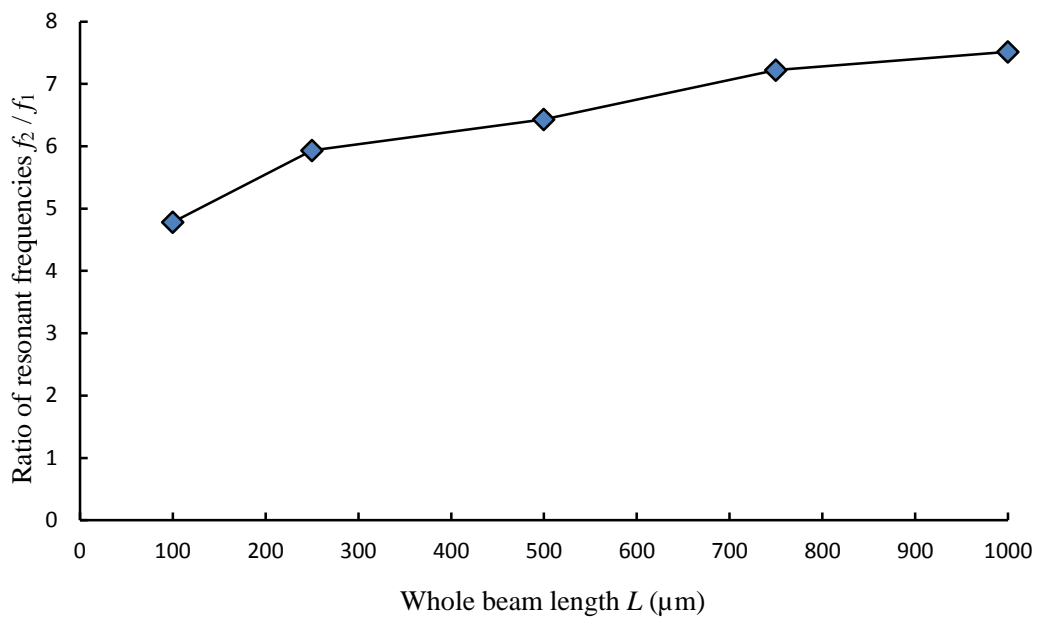


図 5.7 一辺が個々ビームの長さと同じの正方形の重りを有する静電容量加速度センサにおける第 2 モード対第 1 モードの共振周波数比 f_2/f_1 のシミュレーション結果

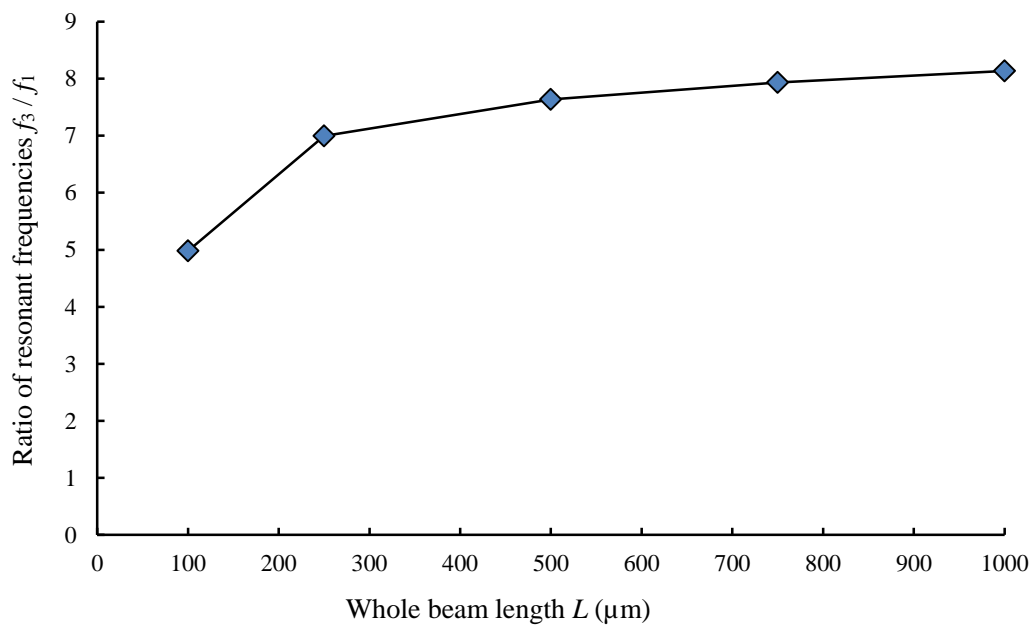


図 5.8 一辺が個々ビームの長さと同じの正方形の重りを有する静電容量加速度センサにおける第 3 モード対第 1 モードの共振周波数比 f_3/f_1 のシミュレーション結果

5.3 プロトタイプのシミュレーション

前節の結果をもとに下記三つのセンサ基本構造を提案した。すべてのタイプで重りを両側から 2 本対称性であるビーム構造となっている。(a)の I タイプ が従来方式の $1000\ \mu\text{m}$ □重りで、ビームは重りの辺の長さと同じ長さの構造となっている。これに対し、(b) の II タイプは $750\ \mu\text{m}$ □重りで、ビームは重りの辺の長さと同じ長さで、折り返しなしおよび折り返しビームの構造となっている。(c)の III タイプは $500\ \mu\text{m}$ □重りで、ビームの長さは重りの辺の長さと同じで、折り返しなしおよび折り返しビームの構造となっている。I タイプ片側ビームの長さは $250\ \mu\text{m}$, $500\ \mu\text{m}$, $750\ \mu\text{m}$, $1000\ \mu\text{m}$ の 4 種類である。折り返しビーム構造によって、II タイプの片側ビームの l は $750\ \mu\text{m}$ であり、それぞれ 1 回, 2 回, 3 回, 折り返しの 3 種類である。折り返しビームの II タイプのそれぞれ全長 L は $1500\ \mu\text{m}$, $2250\ \mu\text{m}$, $3000\ \mu\text{m}$ のビーム構造となる。折り返しビームの III タイプの片側ビームの長さ l は $500\ \mu\text{m}$ をそれぞれ 1 回から 7 回まで折り返し、全長 L は $1000\ \mu\text{m}$, $1500\ \mu\text{m}$, $2000\ \mu\text{m}$, $2500\ \mu\text{m}$, $3000\ \mu\text{m}$, $3500\ \mu\text{m}$, $4000\ \mu\text{m}$ となっている。ビームの幅は $3\ \mu\text{m}$ である。楕型電極のパラメータはキャップ間隔を $2\ \mu\text{m}$, 楕歯対数は各 72 対とした。

最初に、FEM シミュレータ IntelliSuite を用いて、加速度 $1\ \text{G}$ 印加の最大変位を解析した。ビーム全長対変位 Δx 特性のシミュレーション結果を図 5.10 に示す。横軸はビームの全長 L , 縦軸は変位 Δx である。I タイプの変位はビーム長さの 3 乗に比例し、II タイプおよび III タイプの変位はビームの折り返し数に比例し、折り返し数 $(n+1)$ によって増加される。折り返し III 型センサと比較し、折り返さないビームを持つ I 型の全長 L が III 型と同じ場合、計算された変位 Δx は III 型の 14 倍となる。

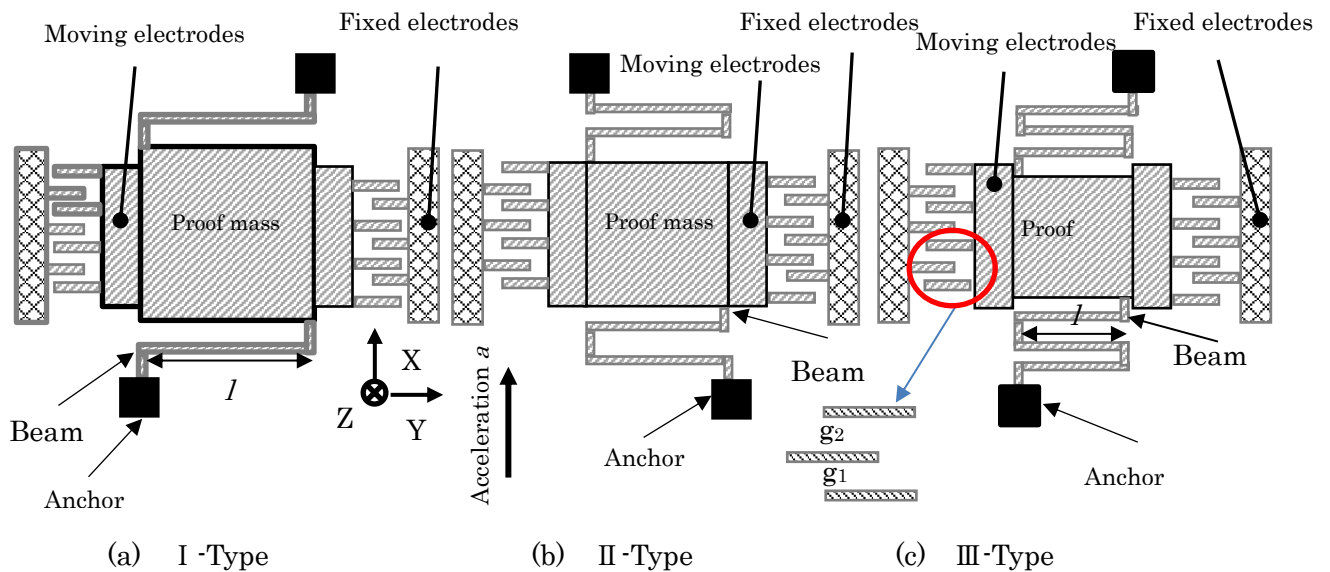


図 5.9 提案した 3 つのプロトタイプの基本構造

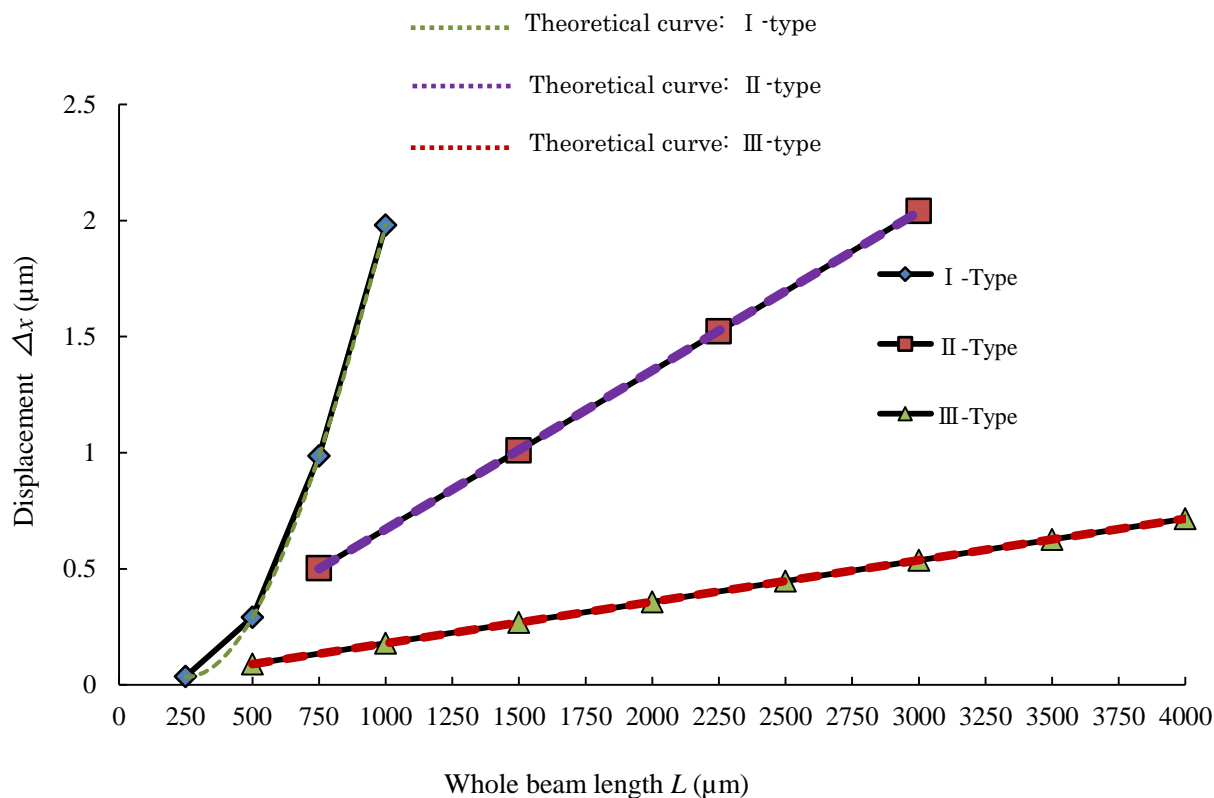


図 5.10 ビーム全長対変位 Δx 特性シミュレーション結果

一方、IIタイプの個別のビームはIIIタイプの3/2倍であり、計算された変位 Δx は5倍大きい。シミュレーションの結果は単純モデルの計算値に対し、誤差0.5%以下ではほぼ一致している。

各モデルの1次共振周波数 f_1 と高次モードの共振周波数 f_2 , f_3 のシミュレーションを行った。

図 5.11 は1次モードの共振周波数 f_1 を示す。横軸はビームの全長 L であり、縦軸は共振周波数 f_1 である。第1次モードの共振周波数 f_1 はビーム全長 L の5乗の平方根に反比例する。シミュレーション結果の値は単純モデルの計算値に対し、誤差0.5%以下ではほぼ一致している。

図 5.12 に第2モード対第1モードの共振周波数比 f_2/f_1 のシミュレーション結果を示す。ここで、 f_2 は第2のモードの共振周波数である。計算された比率は、Iタイプの計算値はビーム全長 L に比例する。それに対し、計算された比率について、II型およびIII型の比がそれぞれ6および5であり、II型およびIII型のビーム全長 L 全体に依存しないことが分かった。これらの結果は、折り返しビーム構造であるII型およびIII型の構造が、折り返しビームを持たないI型よりもねじれにくいことが分かった。

図 5.13 に第3モードと第1モードの共振周波数の比率 f_3/f_1 のシミュレーション結果を示す。IIIタイプの比率は、ビーム全長 L 全体を増加させるにつれて徐々に減少する。II全長タイプはビーム全長 L に依存しない。一方、Iタイプの比率はビームの全長 L が大きくな

ることにつれ 8 から 7 に減少した。Ⅲタイプの Z 軸方向のばね定数はビーム長さ L 全体が増加するにつれて徐々に減少する。これはビームに含まれる折り返し回数が多くなるため、Z 軸方向にねじりやすくなるのが原因と思われる。

これらの共振周波数のシミュレーション結果から、高次の共振周波数について、Ⅱ型およびⅢ型は、第一モードの共振周波数よりも 4 倍以上大きくなり、ビーム全長 $750\mu\text{m}$ を超えなかつたら、その比率はⅠタイプより大きい。また、高次の共振周波数は十分に高いため、誤った出力の可能性はほとんどないと確認された。

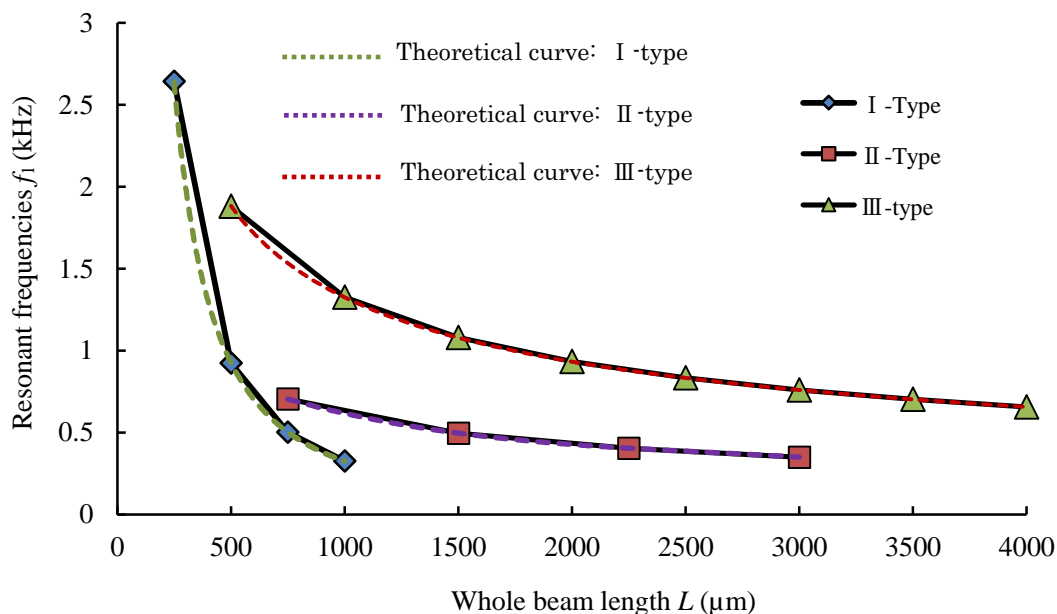


図 5.11 ビーム全長対共振周波数 f_1 特性のシミュレーション結果

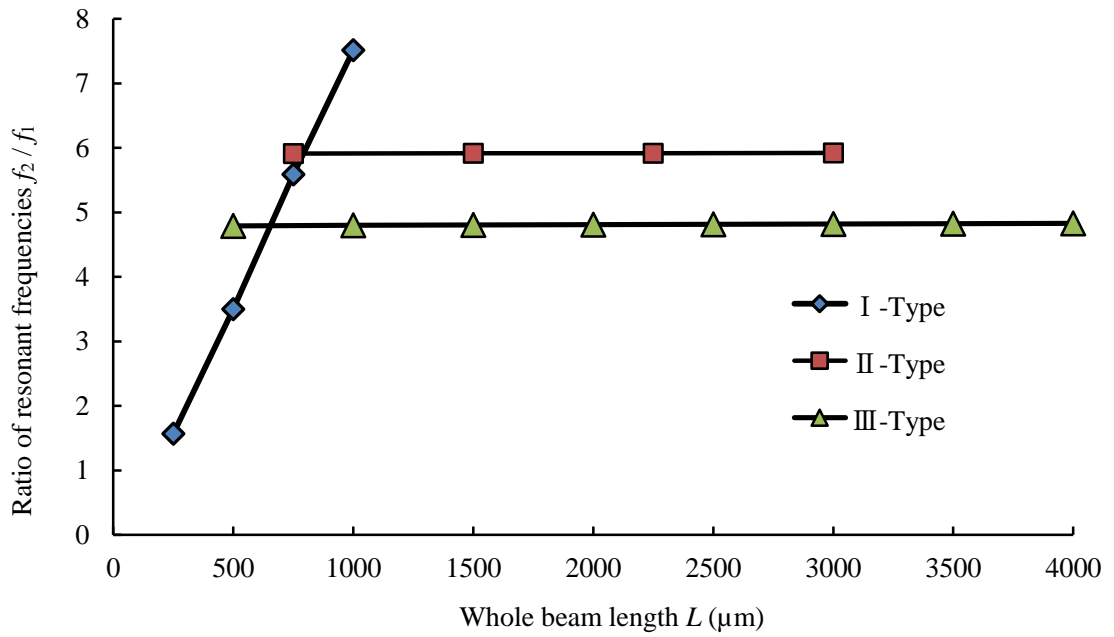


図 5.12 第 2 モード対第 1 モードの共振周波数比 f_2/f_1 のシミュレーション結果

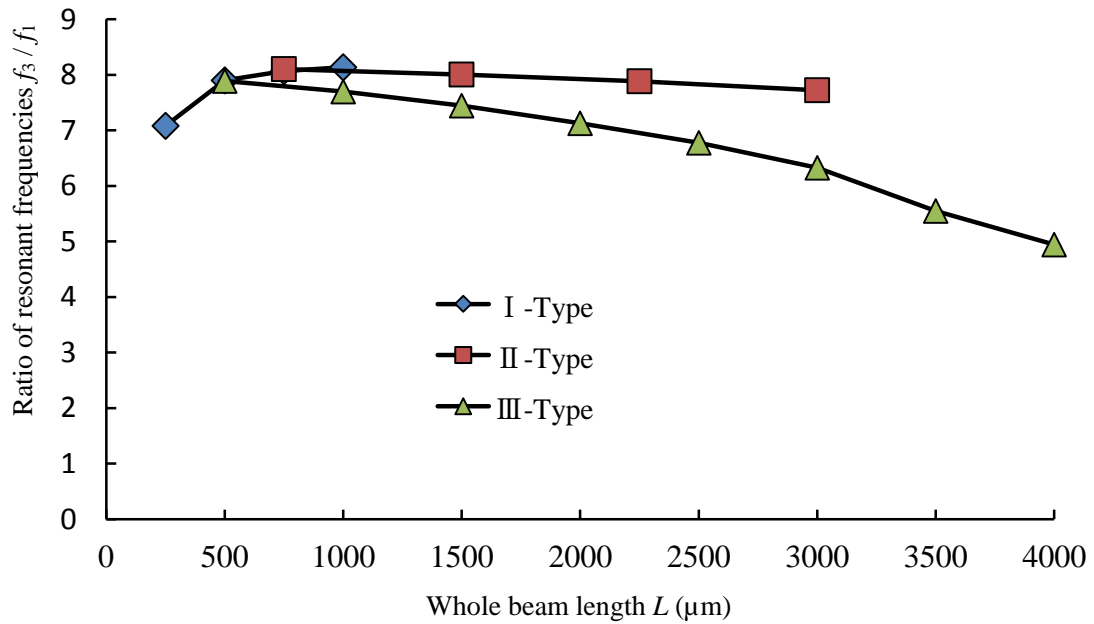


図 5.13 第 3 モード対第 1 モードの共振周波数比 f_3/f_1 のシミュレーション結果

5.4 プロトタイプの試作

3種類のデバイスについてプロトタイプ的设计を行い,SOI ウェハを用いて試作を行った。各デバイスの寸法,設計値を表1にまとめた。作製した各プロトタイプの全体のSEM写真を図5.14(a),(b),(c)に示す。各タイプとも中央にある正方形の重りを重りの上下に設置されたビームで支持する構成となっている。

重りの左右には72対の楕円電極が設けられていて,重りの上下方向の変位を静電容量変化として検出することができる。重りの外周の4つの白い長方形はワイヤボンディング用の電極パッドである。なお,Ⅲタイプでは楕円電極の対数を確保するために重り左右に楕円電極用部材が設けられているが,将来検出回路を同一チップ上に集積する場合には,浮遊容量の問題が無くなるので省略することができると考えている。

Iタイプ,Ⅱタイプ,Ⅲタイプのビームを含めた素子寸法はそれぞれ $1120\times 1000\ \mu\text{m}$, $840\times 750\ \mu\text{m}$, $680\times 500\ \mu\text{m}$ であり,ⅡタイプとⅢタイプの素子寸法はそれぞれIタイプの56.9%,30.3%となっている。

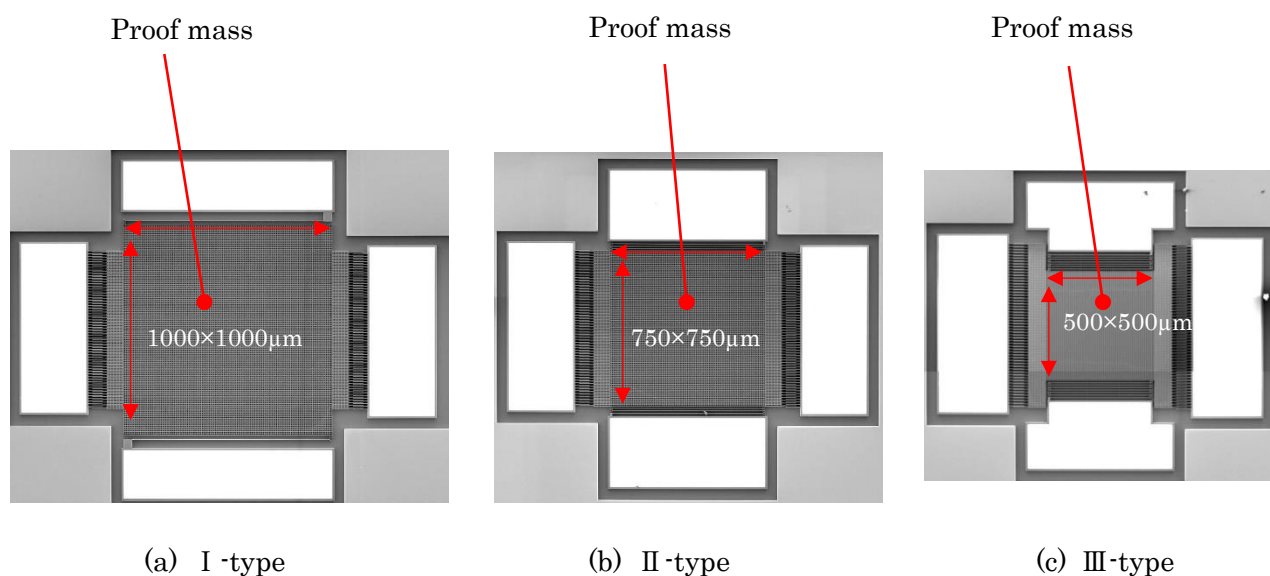


図 5.14 試作したプロトタイプのSEM写真

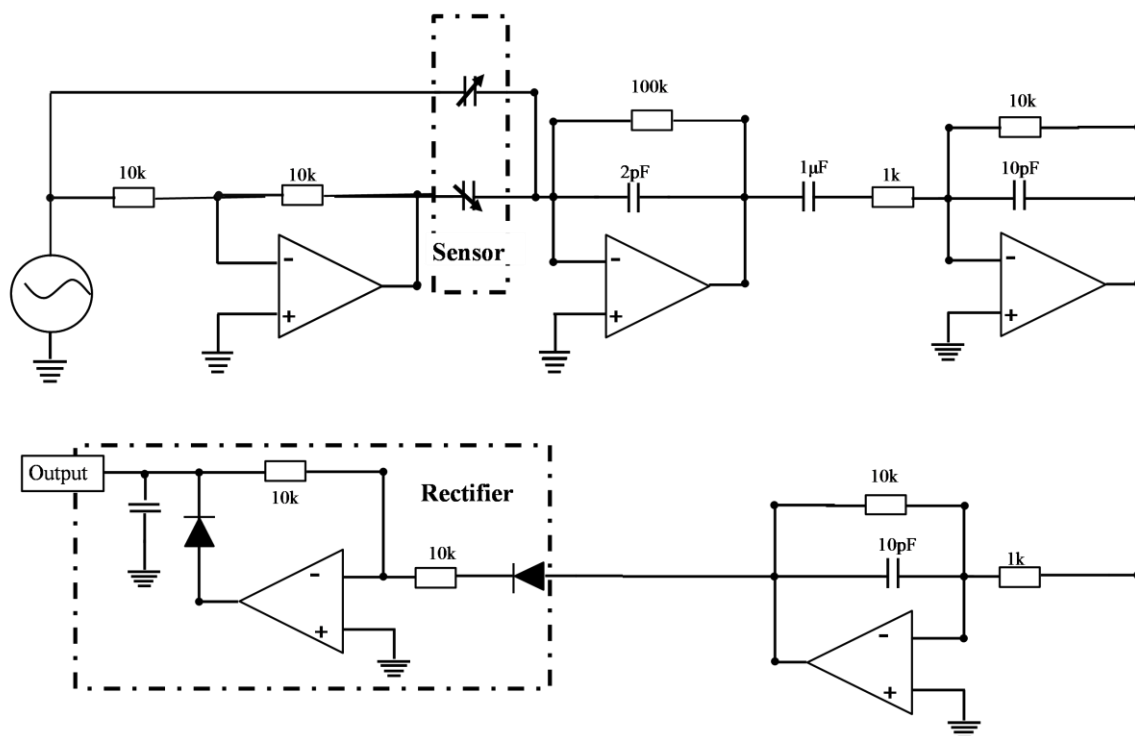


図 5.15 評価回路

Table 5.1 Parameters of prototype sensors

model	I -type	II -type	III-type
proof mass m (kg)	5.12×10^{-8}	4.10×10^{-8}	3.18×10^{-8}
whole beam length L (μm)	1000	2250	4000
spring k (N/m)	0.03	0.04	0.14
displacement Δx ($\mu\text{m}/\text{G}$)	0.75	1.66	1.66
gap g (μm)		$g_1=2, g_2=5$	
Young's modulus E (GPa)		168	
density (kg/m^3)		2328	
resonant frequency f (Hz)	375	349	701
Calculated sensitivity (mV/G)	512.5	505.7	304.4

5.5 プロトタイプ評価

プロトタイプの特性を評価するため、図 5.15 に示した回路を用いてセンサの感度と共振周数の測定を行った。増幅器の出力電圧をダイオードとコンデンサを用いて整流して測定した。容量検出用交流信号は、位相反転回路によって反転され、反転前の交流信号が、検知電極の一方の側に入力される。一方、反転後の交流信号は他方の側に入

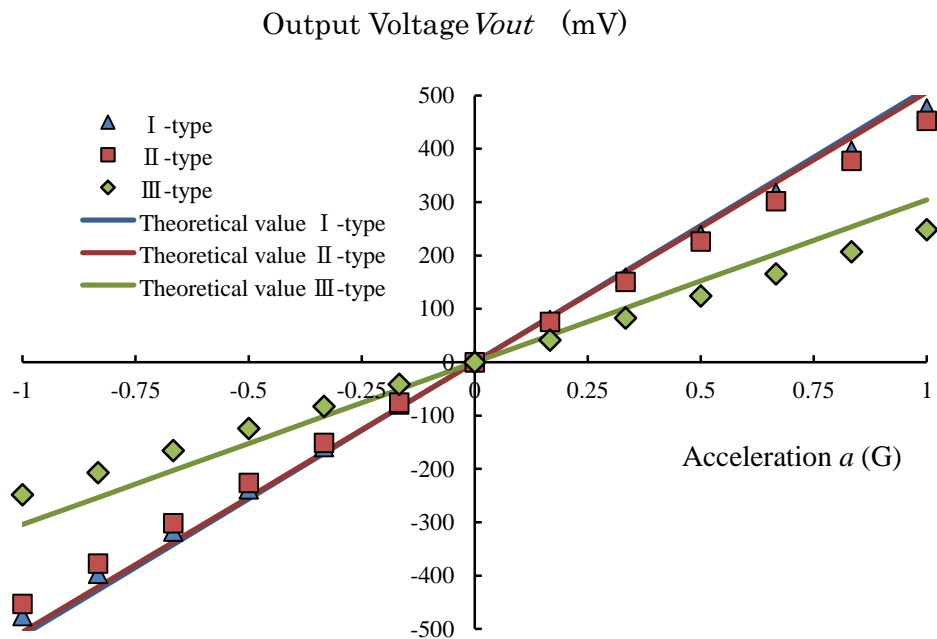


図 5.16 +1G~-1G の加速度印加した出力電圧測定結果

力される。チャージ増幅器の出力信号は、次の増幅回路によって増幅される。出力信号は、全波整流回路によって整流される。またセンサの感度は、回転ステージを用いて、重力加速度 $\pm 1G$ 印加して評価した。図 5.16 は、 $+1G \sim -1G$ の加速度印加した測定出力電圧を示す。A タイプの測定結果は 485mV/G 、3 回折り返しビーム B タイプの測定結果は 463mV/G 、7 回折り返し C タイプの測定結果は 251mV/G である。どちらのタイプでも感度の値は、単純なモデルの計算値に対して、誤差 20% 以下であり、製造バラツキの範囲であると思われる。

図 5.17 に出力電圧周波数特性測定結果を示す。加振機は EMIC 製の 512-D で、最大変位が $\pm 7\text{mm}$ である。加速度 $1G$ (9.8m/s^2) で、周波数を 50Hz から 1kHz まで掃引した。測定を 1 回行い、掃引した基本周波数ステップは 10Hz を上げていった。各タイプとも共振ピークが観察された。I タイプの共振周波数は 340Hz 、出力電圧は 467mV 、II タイプの共振周波数は 370Hz 、出力電圧は 452mV 、III タイプの共振周波数は 680Hz 、出力電圧は 251mV であった。これらの共振周波数は単純モデルによる計算結果に対し、誤差は 10% 以下であり、ほぼ一致することを確認できた。

シミュレーションにより設計した内容が妥当であり、今後このシミュレーション手法を用いて開発を進めることが可能であることを確認することができた。

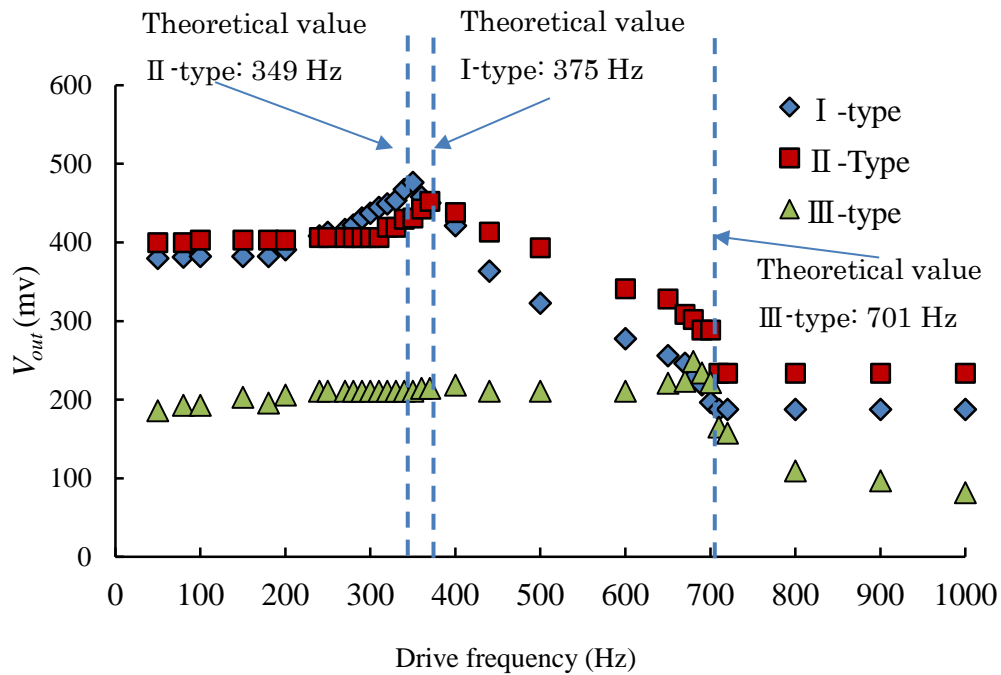


図 5.17 周波数特性測定結果

5.6 まとめ

静電容量加速センサを小型化するための検討を行った。個々のビームを重りの側面と同じ長さにして、プロトタイプ的设计を行った。重りのサイズが $1000 \times 1000 \mu\text{m}$ 、 $750 \times 750 \mu\text{m}$ 、および $500 \times 500 \mu\text{m}$ である 3 種類の MEMS 静電容量型加速度センサの感度および共振周波数を、FEM シミュレータ IntelliSuite を用いて計算した。

(1) 重りを小さくしても、ビームを折り返すことで感度を上げることができた。

(2) $750 \mu\text{m}$ 重りで、ビームを 3 回折り返しされたプロトタイプ II タイプでは感度の計算値は、 $1000 \mu\text{m}$ 重りとはりの折り返し構造なしの標準プロトタイプ I タイプでほぼ等しくなった。

(3) $500 \mu\text{m}$ 重り、7 回折り返しビームを用いたプロトタイプ III タイプの感度は標準プロトタイプ約半分となった。

(4) 重りの辺の長さと同じ長さタイプセンサにけるサイズが縮小されても、折り返しビーム構造に関わらず、センサの他軸感度としては $C_x < 0.1\%$ であり、 $C_z < 0.2\%$ である。

(5) II タイプの共振周波数計算値は I タイプとほぼ同じで、III タイプの共振周波数計算値

は I タイプの共振周波数の 2 倍であった。

(6) 高次モード共振周波比率 f_2/f_1 について、I タイプの計算値はビーム全長 L に比例する。それに対し、II タイプおよび III タイプの比がそれぞれ 6 および 5 であり、II タイプおよび III タイプのビーム全長 L に依存しないことが分かった。これらの結果は、折り返しビーム構造である II タイプおよび III タイプの構造が、折り返しビームを持たない I タイプよりもねじれにくいことを示している。

(7) 第 3 モードと第 1 モードの共振周波数の比率 f_3/f_1 のシミュレーション結果について、III タイプの比率は、ビーム全長 L 全体を増加させるにつれて徐々に減少する。II タイプ全長タイプはビーム全長 L に依存しない。一方、I タイプの比率は、ビームの全長大きくなることにつれ 8 から 7 に減少した。III タイプの Z 軸方向のばね定数は、ビーム長さ L 全体が増加するにつれて徐々に減少する。これは、ビームに含まれる折り返し回数が多くなるビームのため、Z 軸方向にねじりやすくなるのが原因と思われる。

これらの結果をもとにプロトタイプの実設計を行った。I タイプ、II タイプ、III タイプのプロトタイプは、SOI-MEMS 技術を用いて製造され、DIP28 セラミックパッケージに実装し、評価までした。重り辺と同じビーム長さ場合、重りの寸法が $1000\ \mu\text{m}^2$ 、折り返しビームなしセンサの感度 $476\ \text{mV/G}$ に対し、重りが $750\ \mu\text{m}^2$ でビーム 1 回折り返しセンサは $452\ \text{mV/G}$ になり、ほぼ同じ感度結果を得た。一方、重りが $500\ \mu\text{m}^2$ でビーム 7 回折り返しセンサの感度結果は $285\ \text{mV/G}$ であり、測定結果はシミュレート結果とよく一致した。折り返しビーム構造を用いて、重りサイズを低減しながら、性能を維持する手法は有効であることが確認できた。

第 6 章 楕歯電極間静電ポテンシャルを用いた共振型加速度センサ

本章では、更なる高感度、小型化を実現するために静電容量検出方式をベースとした共振型加速度センサの可能性について検討を行った。

6.1 共振型加速度センサの構成

図 6.1 は著者ら⁽⁴¹⁾がかつて検討した共振型加速度センサの 2D Cad レイアウト図である。1 mm²の重りを両側から 2 本ずつのビームで支持している。重りの中央には 860 μm×200 μm の穴が形成されており、その中に感度チューニングを行うための補助電極が設置されている。補助電極と重りのギャップは 2 μm であり、対向長が 800 μm の平行平板電極を形成している。ビームは折り返しており、接続部には R が付くように三角形が形成され、ビーム幅は 3 μm、長さは 380 μm である。重りの左右には駆動用の楕歯電極が、上下には検出用の楕歯電極が形成されている。ビーム及び重りの厚さは 25 μm であり、重りには 3 μm ごとに 4 μm×4 μm のエッチングホールを空けおり、重さは約 32.4 μg となっている。重りのビーム方向の二辺には、それぞれ 30 対の楕歯電極が接続され、基板に固定された対向電極と可変容量を形成している。電極は歯の長さ 70 μm、幅 5 μm、ピッチ 22 μm で固定され、ギャップ 2 μm で 50 μm が対向している。また、2 つの楕歯電極は重りに対して点对称とすることで上下の検出電極が差動容量を構成するようにしている。

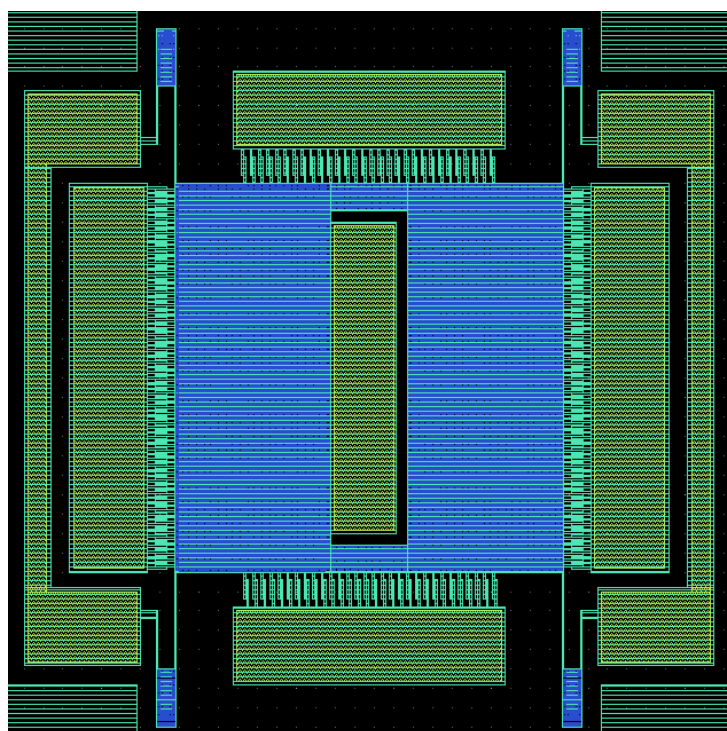


図 6.1 前回モデル共振型加速度センサの 2D Cad レイアウト図

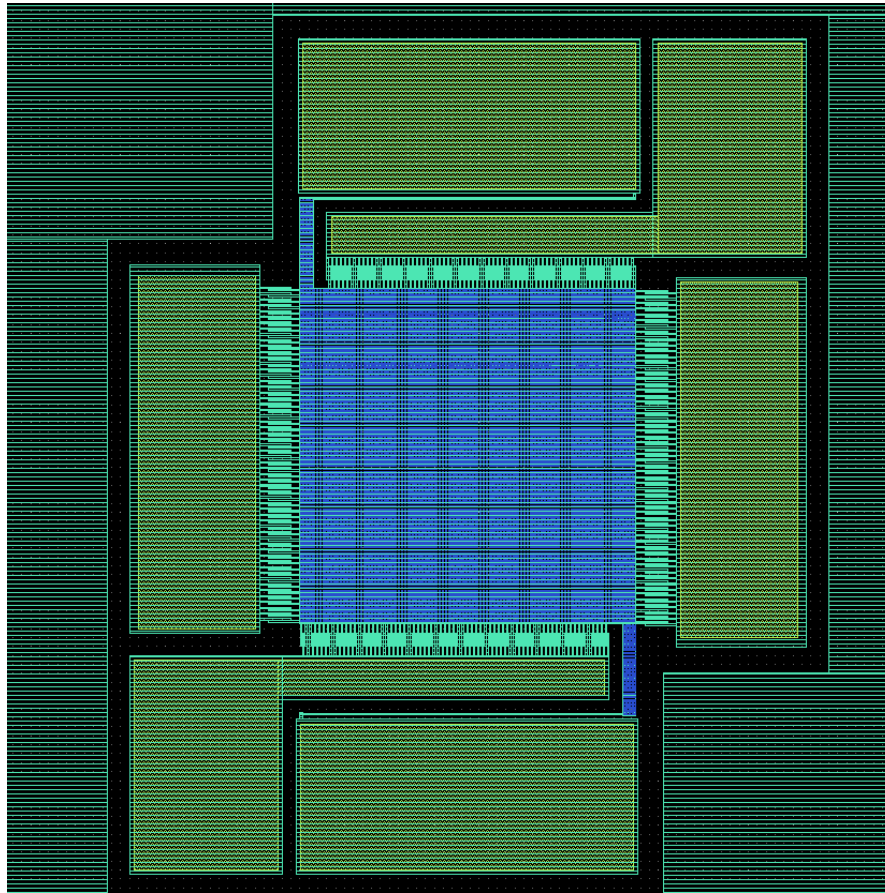


図 6.2 モデル 1 の 2D Cad レイアウト図

重りのビーム方向でない二辺にはそれぞれ 70 対の櫛歯電極が形成され、基板に固定された櫛歯電極にギャップ $2\ \mu\text{m}$ で重りからの電極が挿入されている。電極は歯の長さ $50\ \mu\text{m}$ 、幅 $5\ \mu\text{m}$ で、 $30\ \mu\text{m}$ が対向している。櫛歯電極の全ての接続部には R が付くように三角形の構造がなされている。

図 6.1 の共振型加速度センサでは重りの中に補助電極を形成するためにその質量が減少し、感度が低下する点や補助電極への電気接続が容易ではないという課題があった。そこで補助電極を用いずに検出電極に制御電圧を印加する新しい方式を提案し、検出用櫛歯電極に DC 電圧を印加する方式について検討を行った。

図 6.2 にその 1 つであるモデル 1 の 2D Cad レイアウト図を示す。 $750\ \mu\text{m}$ 角の重りを両側から 1 本ずつのビームで支持している。重りの左右には検出用の櫛歯電極が、上下には駆動用の櫛歯電極が形成されている。ビーム及び重りの厚さは $25\ \mu\text{m}$ であり、重りには $3\ \mu\text{m}$ ごとに $4\ \mu\text{m} \times 4\ \mu\text{m}$ のエッチングホールを空けおり、重さは約 $32.4\ \mu\text{g}$ となっている。

重りの上下には、それぞれ 68 対の櫛歯電極が形成され、基板に固定された対向電極と可変容量を形成している。電極は歯の長さ $50\ \mu\text{m}$ 、幅 $3\ \mu\text{m}$ 、ギャップ $2\ \mu\text{m}$ で $30\ \mu\text{m}$ が対向している。

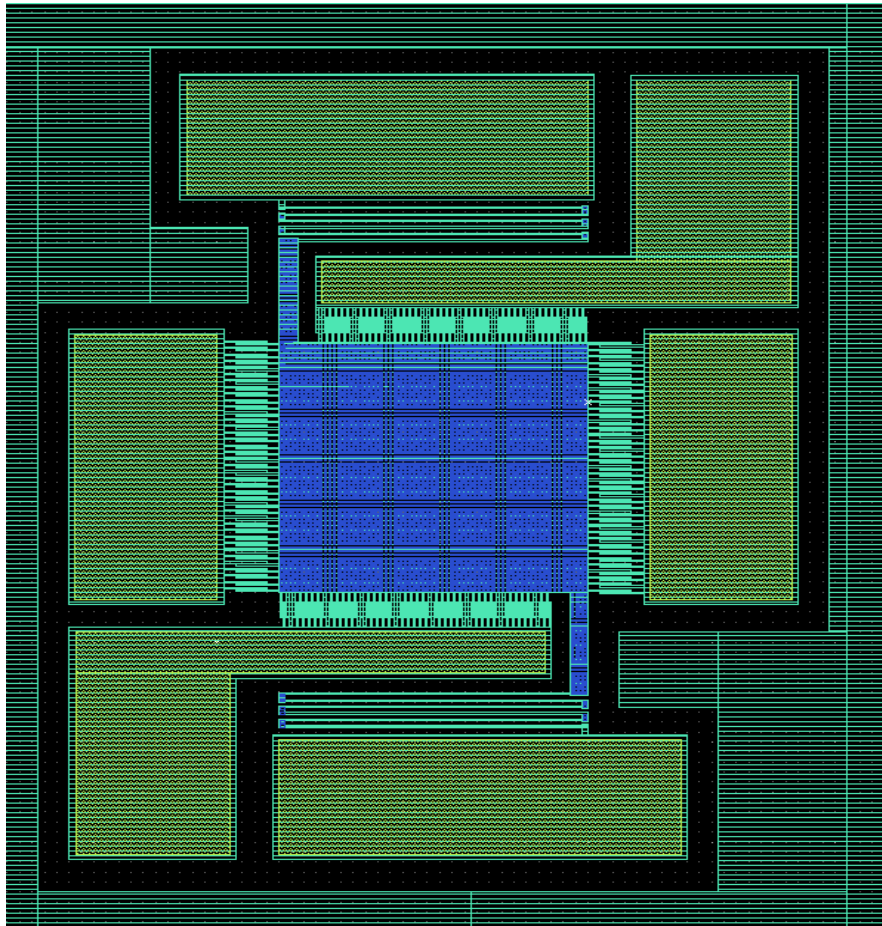


図 6.3 モデル2の2D Cad レイアウト図

重りの左右にはそれぞれ 57 対の楕歯電極が形成され、電極は歯の長さ $70\ \mu\text{m}$ 、幅 $3\ \mu\text{m}$ 、ギャップ $2\ \mu\text{m}$ 、 $5\ \mu\text{m}$ で $50\ \mu\text{m}$ が対向している。

図 6.3 がビーム折り返し 5 回となっているモデル2の2D Cad レイアウト図である。 $500\ \mu\text{m}$ 角の重りを両側から 1 本ずつのビームで支持している。重りの左右には検出用の楕歯電極が、上下には駆動用の楕歯電極が形成されている。ビーム及び重りの厚さは $25\ \mu\text{m}$ であり、重りには $3\ \mu\text{m}$ ごとに $4\ \mu\text{m}\times 4\ \mu\text{m}$ のエッチングホールを空けおり、重さは約 $32.4\ \mu\text{g}$ となっている。

重りの上下には、それぞれ 44 対の楕歯電極が形成され、基板に固定された対向電極と可変容量を形成している。電極は歯の長さ $50\ \mu\text{m}$ 、幅 $3\ \mu\text{m}$ 、ギャップ $2\ \mu\text{m}$ で $30\ \mu\text{m}$ が対向している。

重り左右には、それぞれ 39 対の楕歯電極が形成され、電極は歯の長さ $70\ \mu\text{m}$ 、幅 $3\ \mu\text{m}$ 、ギャップ $2\ \mu\text{m}$ 、 $5\ \mu\text{m}$ で $50\ \mu\text{m}$ が対向している。

駆動用の楕歯電極に電圧を印加し、静電力によりおもりを上下に駆動する。その時の変位を検出用電極で検出し、フィードバックを掛けることにより自励発振を実現する。

6.2 MEMSpice による特性シミュレーション

6.2.1 MEMSpice について

MEMSpice とは、標準的回路シミュレータである SPICE に機械部品を組み込めるようにしたもので、回路的な電圧・電流の出力だけではなく、機械的な変位や共振も計算することができる。MEMSpice では回路を含めた全体シミュレーションができる一方で、FEM シミュレーターのような詳細形状の影響が考慮されないため、ある程度の誤差が想定される。ここでは参考のため、特性シミュレーションを行い、FEM シミュレーターの IntelliSuit の結果と比較を行った。

図 6.4 と図 6.5 はこのソフト用いて、モデル 1 とモデル 2 を作製した結果である。

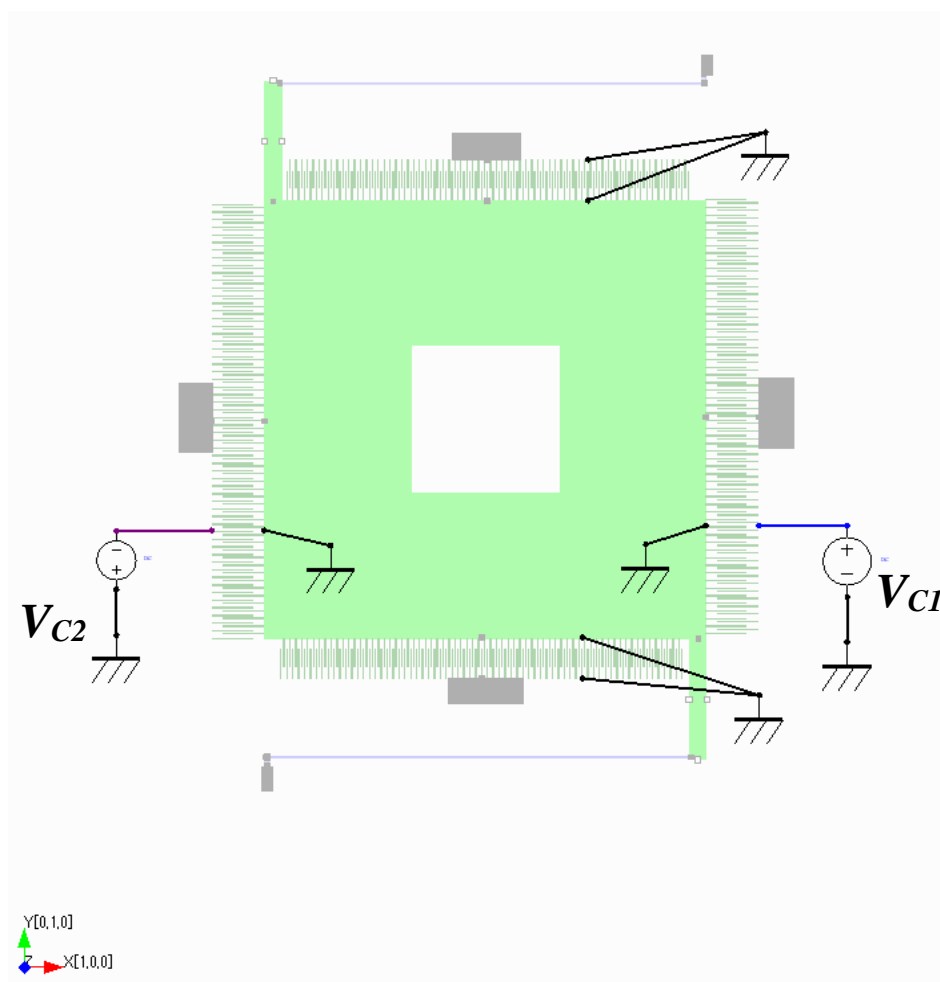


図 6.4 モデル 1 の MEMSpice のモデル

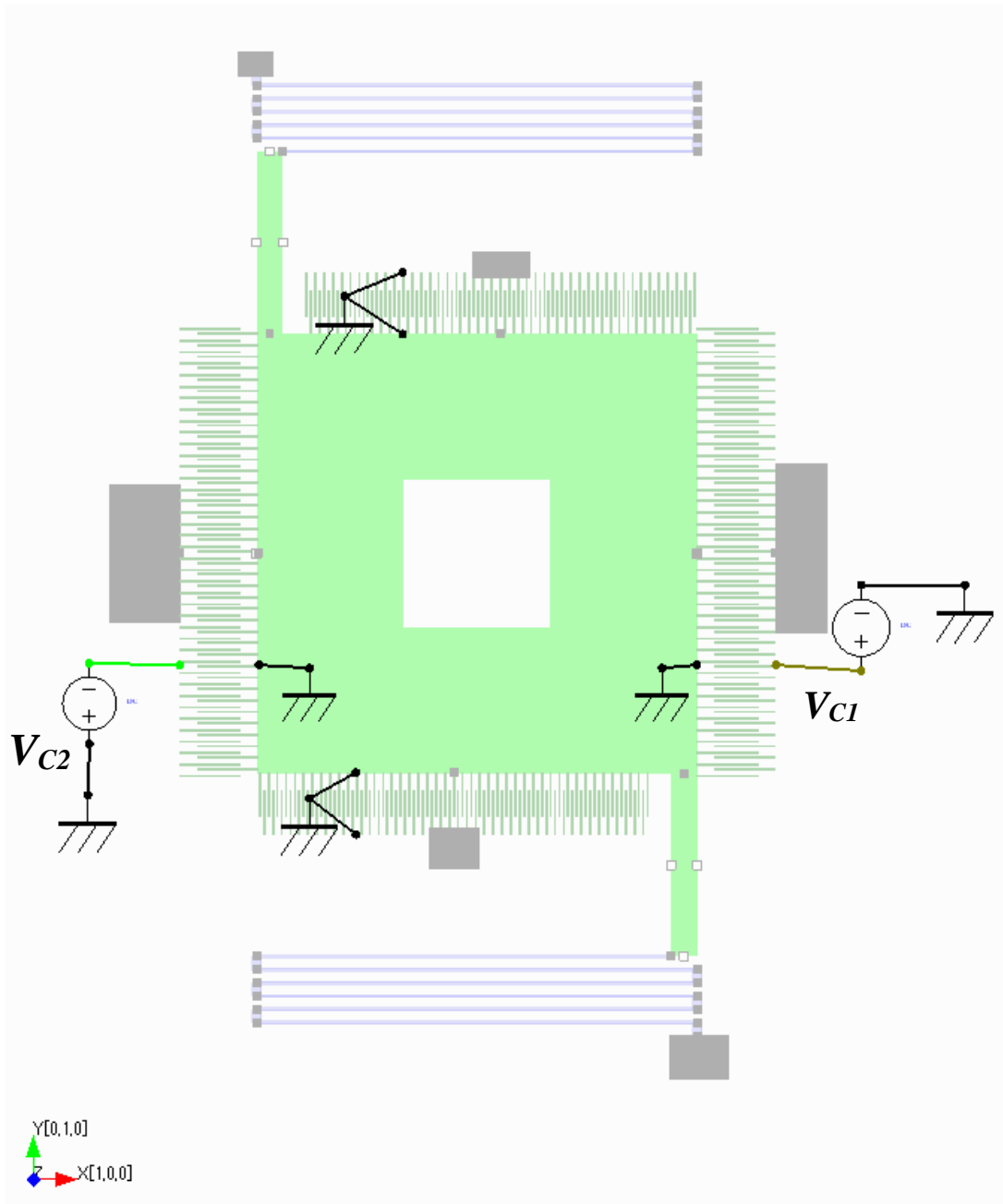


図 6.5 モデル 2 の MEMSpice のモデル

6.2.2 シミュレーション結果

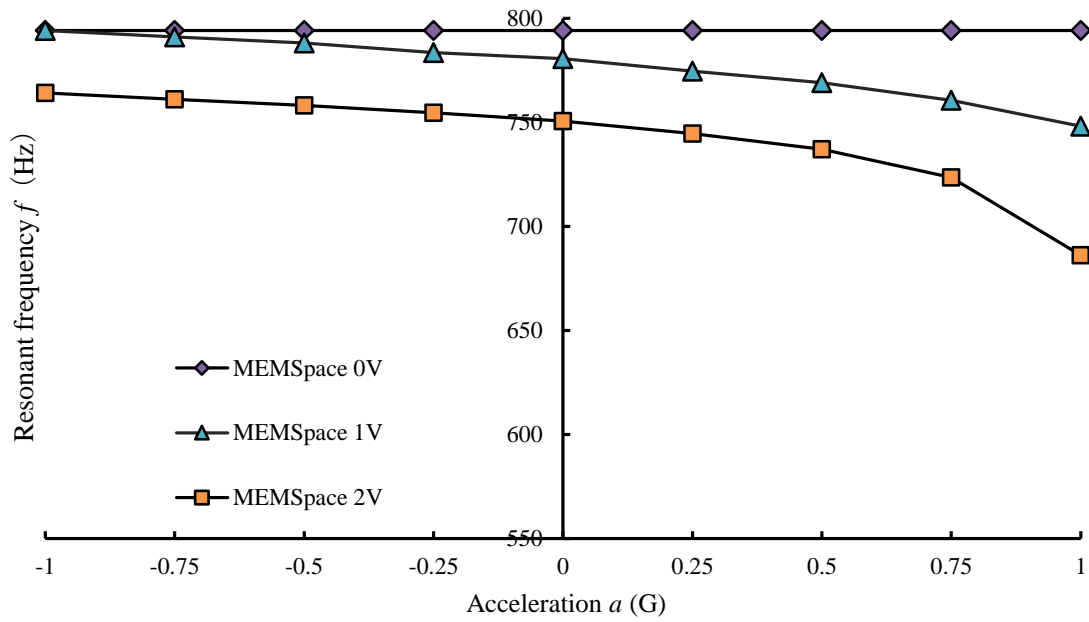


図 6.6 印加加速度 a 対共振周波数 f 特性のシミュレーション結果 (モデル 1)

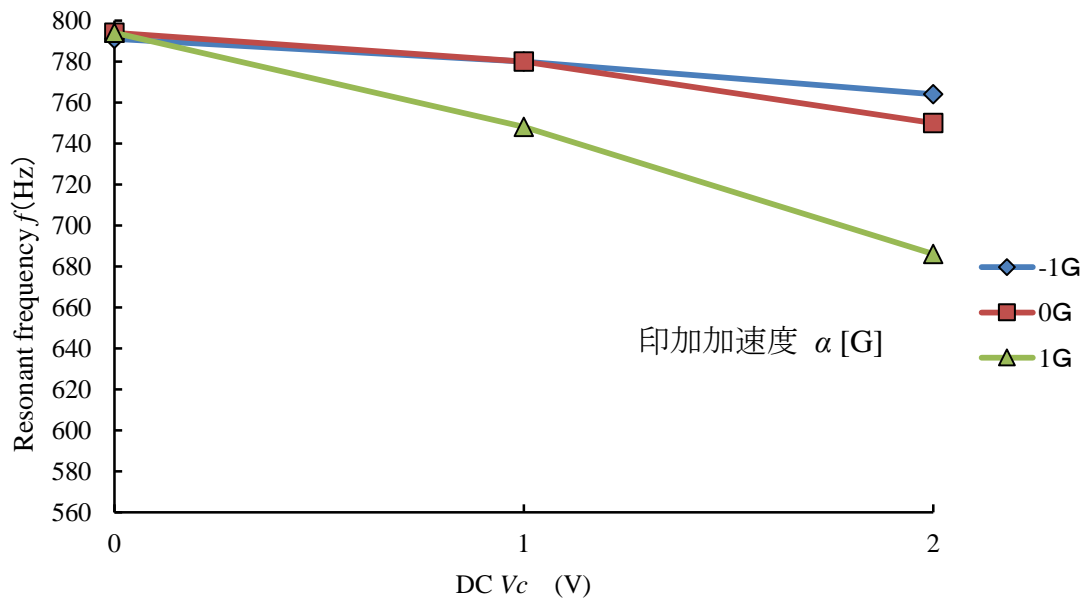


図 6.7 検出電極印加電圧 V_c 対共振周波数 f 特性のシミュレーション結果 (モデル 1)

図 6.6 にモデル 1 の印加加速度 α 対共振周波数 f 特性のシミュレーション結果を示す。

-1 G から +1 G の加速度印加に対して、片方の検出電極印加電圧 V_C が 0 V の場合には共振周波数 f はほとんど変化しないのに対して、片方の検出電極印加電圧 V_C が 2 V の場合には共振周波数 f は 794 Hz から 686 Hz へと約 13.8% 変化する結果が得られた。

図 6.7 にモデル 1 の検出電極印加電圧 V_C 対共振周波数 f 特性のシミュレーション結果を示す。

加速度印加が無い場合には片方の検出電極印加電圧 V_C を 0 V から 2 V へと増加させていく時共振周波数 f は 794 Hz から 760 Hz へと約 4.3% 低下する。-1 G の加速度を印加した場合にはこの共振周波数変化は減少し、+1 G の加速度センサを印加した場合にはこの共振周波数変化は大幅に増加する結果となっている。

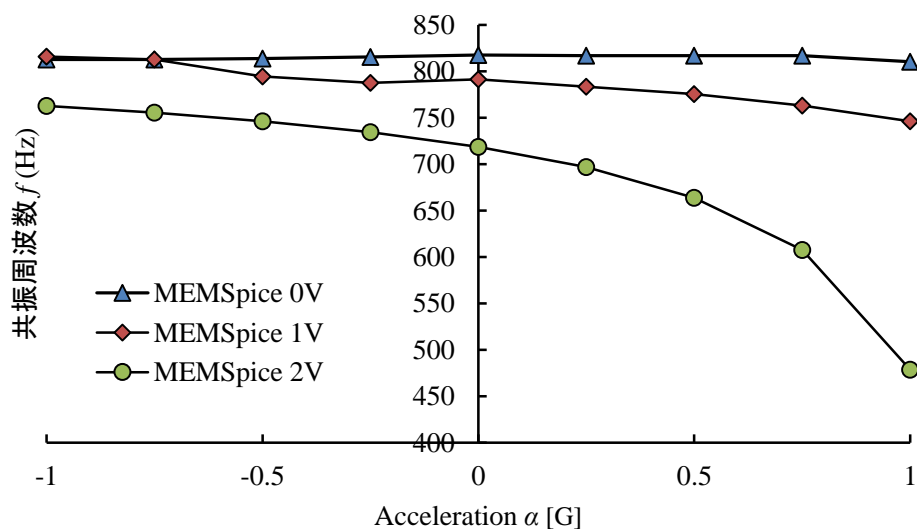


図 6.8 加速度 α 対共振周波数 f 特性のシミュレーション結果(モデル 2)

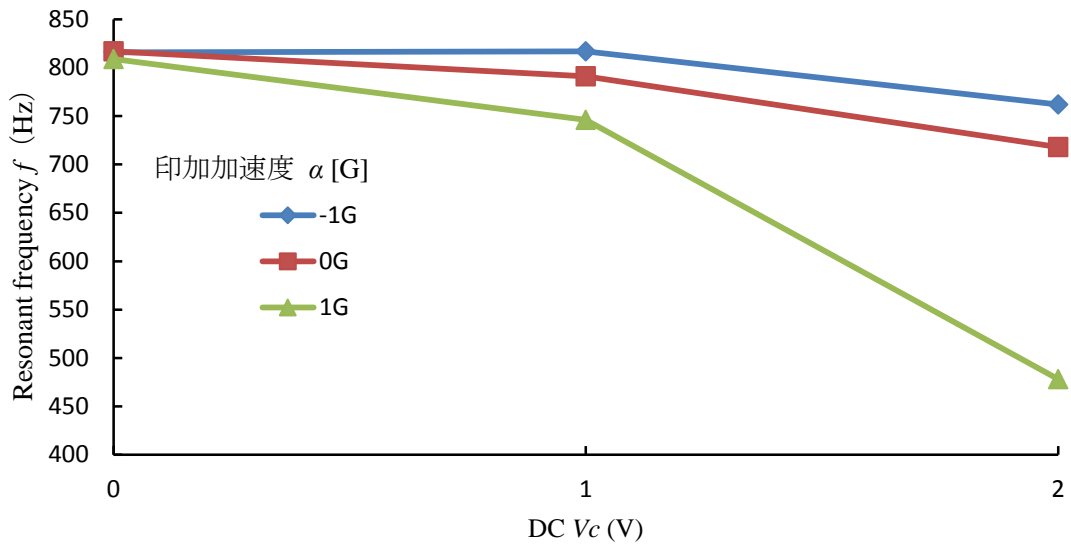


図 6.9 検出電極印加電圧 V_c 対共振周波数 f 特性のシミュレーション結果(モデル 2)

図 6.8 にモデル 2 の印加加速度 α 対共振周波数 f 特性のシミュレーション結果を示す。

-1 G から +1 G の加速度印加に対して、片方の検出電極印加電圧 V_c が 0 V の場合には共振周波数 f はほとんど変化しないのに対して、片方の検出電極印加電圧 V_c が 2 V の場合には共振周波数 f は 800 Hz から 478 Hz へと約 38.8% 変化する結果が得られた。

図 6.9 にモデル 2 の検出電極印加電圧 V_c 対共振周波数 f 特性のシミュレーション結果を示す。

加速度印加が無い場合には片方の検出電極印加電圧 V_c を 0 V から 2 V へと増加させていく時共振周波数 f は 800 Hz から 762 Hz へと約 4.8% 低下する。-1 G の加速度を印加した場合にはこの共振周波数変化は減少し、+1 G の加速度センサを印加した場合にはこの共振周波数変化は大幅に増加する結果となっている。

6.3 IntelliSuite によるシミュレーション

6.3.1 使用する材料, モデル

今回検討した加速度センサの材料はすべて<110>単結晶シリコンのパラメータを使用した。表 4.1 に単結晶シリコン<110>の物性値を載せる。

表 6.1 使用する材料

単結晶シリコン<110>	
密度	2.328 [g/cm ³]
ヤング率	168 [GPa]

今回シミュレーションで使用する加速度センサの2つのモデルの外観図とそれらの構造パラメータを、それぞれ図 6.10 から 6.11, 表 6.2 から 6.3 に示す。

それぞれのモデルでは、重りの一部分となる駆動用の櫛歯に対応する部分をまとめて設置することにより実際の重りに近づけている。また、中央に空いている穴はエッチングホール¹⁾の質量減少分と対応している。

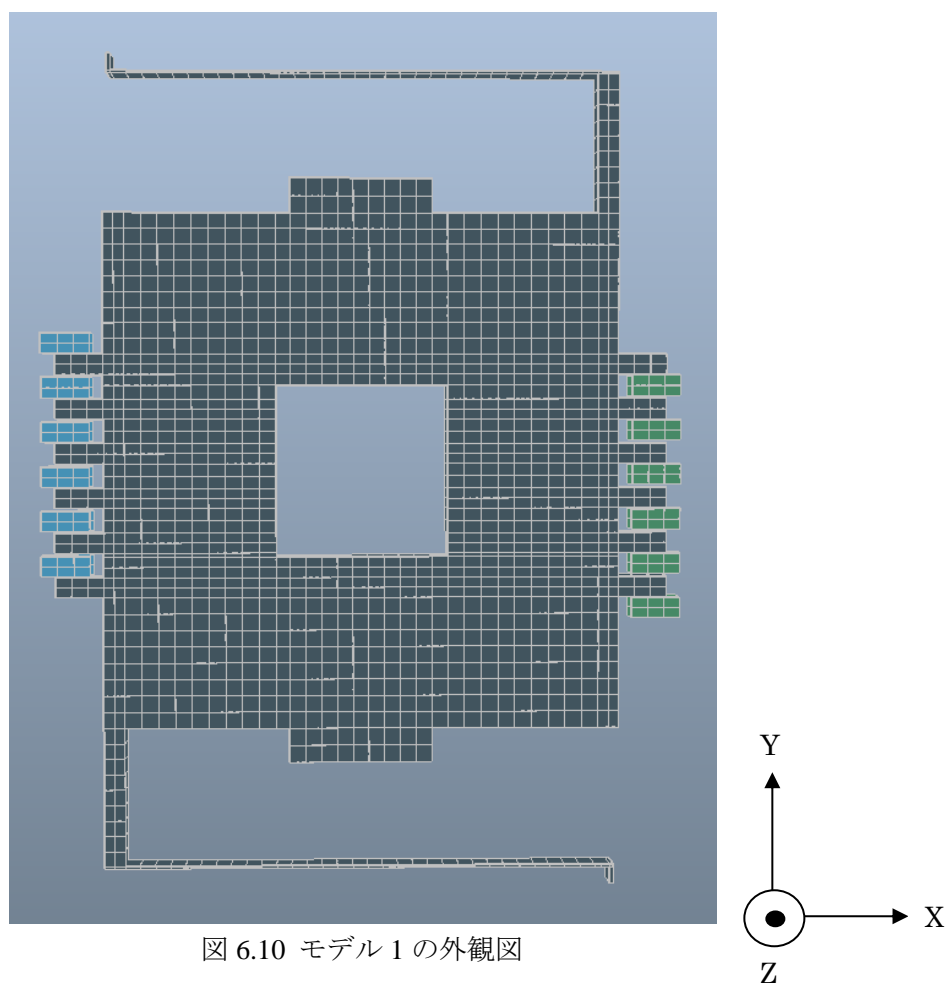


図 6.10 モデル 1 の外観図

表 6.2 モデル 1 の構造パラメータ

全体の厚さ t (μm)	25
ビームの幅 b (μm)	3
ビームの長さ L (μm)	720
重り寸法 $l \times l$ (μm)	750 x 750
ギャップ長 g (μm)	2

モデル 1 は基本となるモデルである。

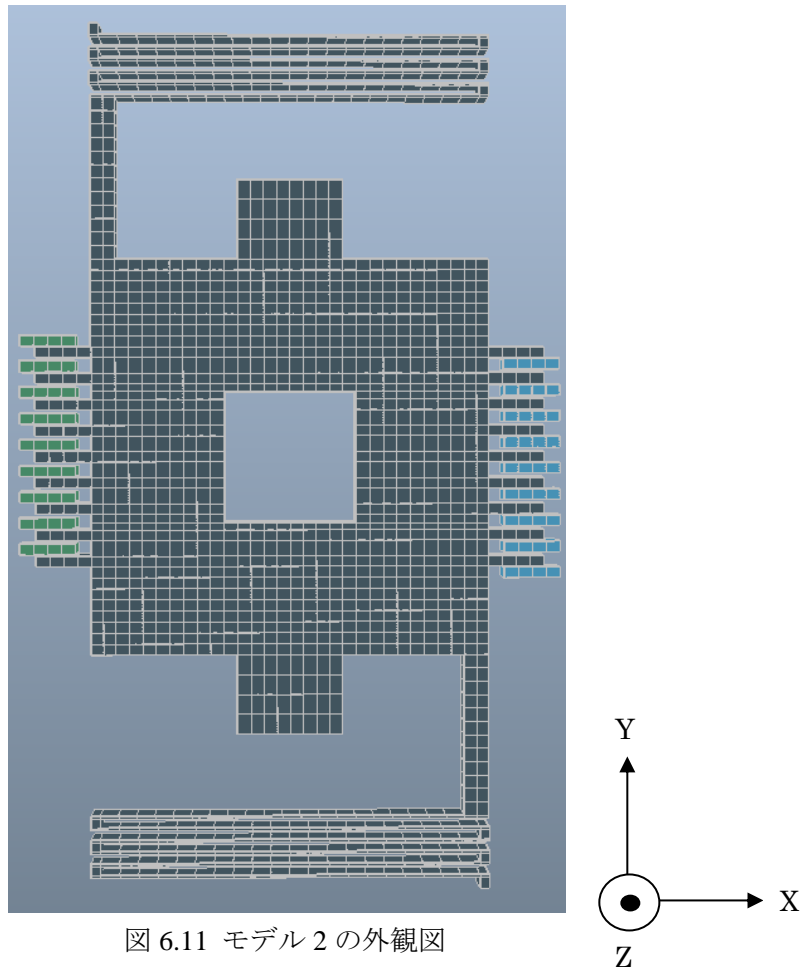


図 6.11 モデル 2 の外観図

表 6.3 モデル 2 の構造パラメータ

全体の厚さ t (μm)	25
ビームの幅 b (μm)	3
ビームの長さ L (μm)	3010
重り寸法 $l \times l$ (μm)	500 x 500
ギャップ長 g (μm)	2

モデル 2 はビームの折り返しを 5 回とし、重りを小さくしたモデルである。

6.3.2 共振モード解析結果

モデル1のFEMによる共振モード解析の結果を示す。

第1次共振モード(mode1)は横並進モードの振動で、約695.071 Hzとなった。

第2次共振モード(mode2)は回転モードの振動で、約4440.23 Hzとなった。

第3次共振モード(mode3)はZ方向振動モードの振動で、約4503.74 Hzとなった。

表 6.4 モデル1の共振モード解析結果

No.	モード	共振周波数 f_r
1	横並進モード(Y方向)	771.82 Hz
2	回転モード	4440.23 Hz
3	Z方向振動モード	4503.74k Hz

モデル2のFEMによる共振モード解析の結果を示す。

第1次共振モード(mode1)は横並進モードの振動で、約729.435 Hzとなった。

第2次共振モード(mode2)は回転モードの振動で、約3439.11 Hzとなった。

第3次共振モード(mode3)はZ方向振動モードの振動で、約3977.27 Hzとなった。

表 6.5 モデル2の共振モード解析結果

No.	モード	共振周波数 f_r
1	横並進モード(Y方向)	789.82 Hz
2	回転モード	3496.11 Hz
3	Z方向振動モード	3977.27k Hz

6.3.3 加速度印加時共振周波数のシミュレーション結果

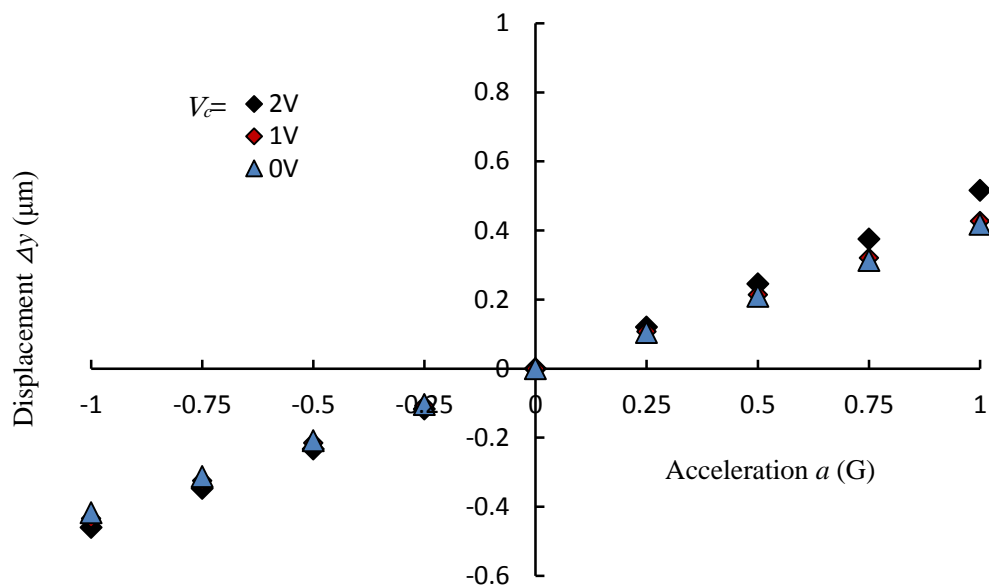


図 6.12 検出電極印加電圧 V_c 対変位 y 特性のシミュレーション結果(モデル 1)

図 6.12 に一方の電極に $V_{c1}=0\sim 2\text{ V}$ を印加し，もう一方の電極に $V_{c2}=0\text{ V}$ を印加したときの検出電極印加電圧 V_c 対変位 y 特性のシミュレーション結果を示す。制御電圧 V_c が 0 V ， $\pm 1\text{ G}$ の印加加速度に対して変位 Δy はモデル 1 は $\pm 0.4\text{ }\mu\text{m}$ 程度であった。図 6.12 においては，どの加速度の時も変位が増加しているのので，動作は正常に行われていることを確認できた。

次に、モデル1において、櫛歯電極の一方に $V_C=V_{C1}=0\sim 2\text{ V}$ の電圧を、もう一方に $V_{C2}=0\text{ V}$ を印加しながら加速度を $1\sim -1\text{ G}$ を Y 軸方向に印加した時の共振周波数をシミュレーションした。結果を以下に示す。

表 6.7 モデル1の共振周波数特性のシミュレーション結果

加速度 α [G]	共振周波数 f [Hz]		
	検出電極 印加電圧 0[V]	検出電極 印加電圧 1[V]	検出電極 印加電圧 2[V]
-1	771.826	771.839	745.493
-0.8	771.826	754.726	743.083
-0.6	771.826	757.75	743.083
-0.4	771.826	759.528	734.895
-0.2	771.826	761.157	726.524
0	771.826	761.157	732.863
0.2	771.826	762.628	737.88
0.4	771.826	771.832	717.647
0.6	771.826	771.832	706.877
0.8	771.826	771.832	692.039
1	771.826	771.832	669.386

表 6.7 にモデル1において一方の電極に $V_C=V_{C1}=0\sim 2\text{ V}$ を印加し、もう一方の電極に $V_{C2}=0\text{ V}$ を印加したときの印加加速度 α 対共振周波数 f 特性のシミュレーション結果の数値を示す。

図 6.13 にモデル1の印加加速度 α 対共振周波数 f 特性のシミュレーション結果を示す。

-1 G から +1 G の加速度印加に対して、片方の検出電極印加電圧 V_C が 0 V の場合には共振周波数 f はほとんど変化しないのに対して、片方の検出電極印加電圧 V_C が 2 V の場合には共振周波数 f は 771 Hz から 669 Hz へと約 13.0% 変化する結果が得られた。

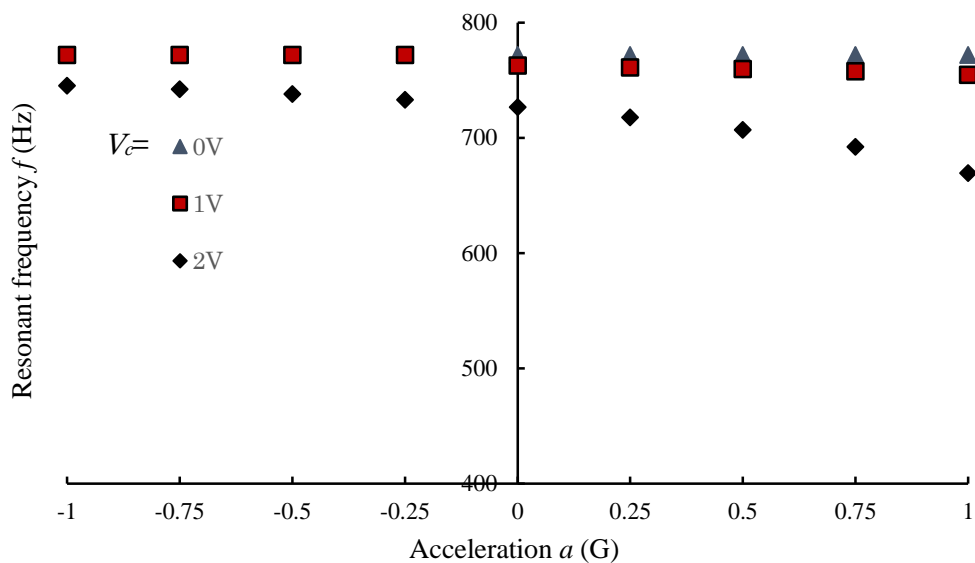


図 6.13 印加加速度 a 対共振周波数 f 特性のシミュレーション結果 (モデル 1)

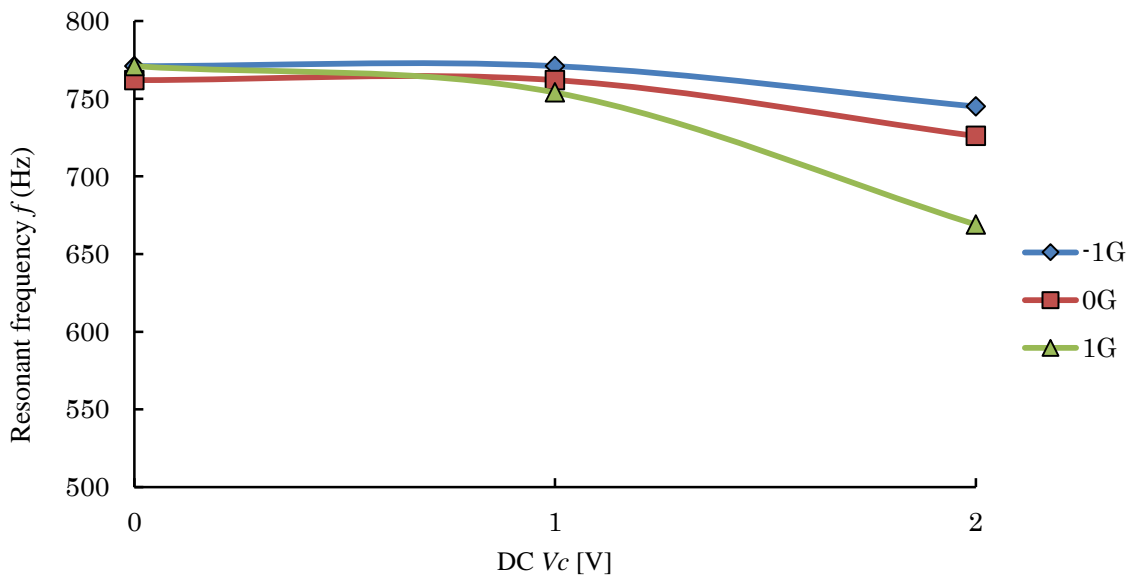


図 6.14 検出電極印加電圧 V_c 対共振周波数 f 特性のシミュレーション結果 (モデル 1)

図 6.14 にモデル 1 の検出電極印加電圧 V_c 対共振周波数 f 特性のシミュレーション結果を示す。加速度印加が無い場合には片方の検出電極印加電圧 V_c を 0 V から 2 V へと増加させていく時共振周波数 f は 771 Hz から 745 Hz へと約 3.4 % 低下する。-1 G の加速度を印加した場合にはこの共振周波数変化は減少し、+1 G の加速度センサを印加した場合にはこの共振周波数変化は大幅に増加する結果となっている。

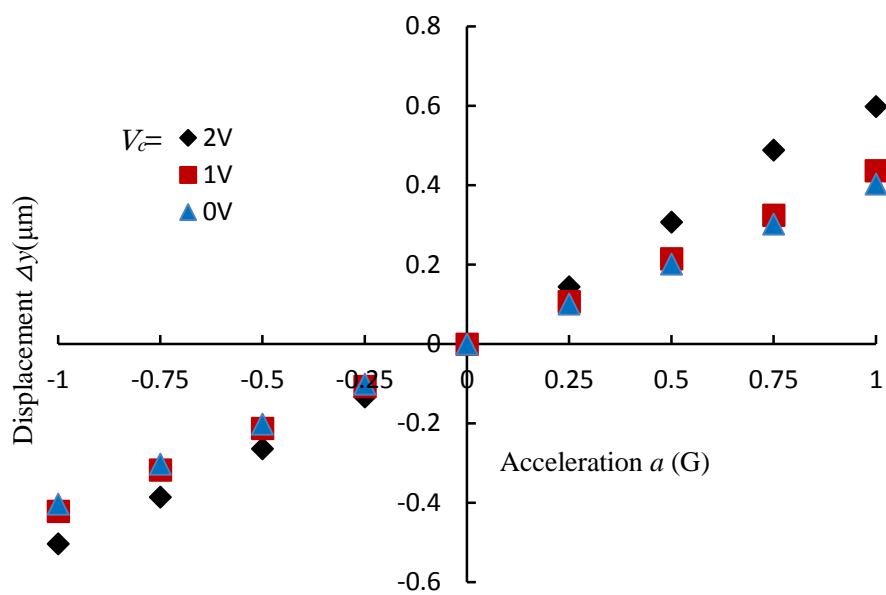


図 6.15 検出電極印加電圧 V_c 対変位 y 特性のシミュレーション結果(モデル 2)

図 6.15 にモデル 2 の一方の電極に $V_c = V_{C1} = 0 \sim 2 \text{ V}$ を印加し，もう一方の電極に $V_{C2} = 0 \text{ V}$ を印加したときの検出電極印加電圧 V_c 対変位 y 特性のシミュレーション結果を示す。モデル 2 とともに $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 程度であった。

表 6.9 モデル 2 の共振周波数特性のシミュレーション結果

加速度 α [G]	共振周波数 f [Hz]		
	検出電極 印加電圧 0[V]	検出電極 印加電圧 0.8[V]	検出電極 印加電圧 2[V]
-1	789.818	789.815	736.653
-0.8	789.818	789.815	729.335
-0.6	789.818	774.436	720.061
-0.4	789.818	771.988	717.061
-0.2	789.818	769.410	708.282
0	789.818	766.132	692.603
0.2	789.818	763.210	670.699
0.4	789.818	762.000	654.478
0.6	789.818	756.49	616.796
0.8	789.818	753.620	583.523
1	789.818	749.092	452.547

表 6.9 にモデル 2 において一方の電極に $V_C=V_{C1}=0\sim 2\text{ V}$ を印加し、もう一方の電極に $V_{C2}=0\text{ V}$ を印加したときの印加加速度 α 対共振周波数 f 特性のシミュレーション結果の数値を示す。

図 6.16 にモデル 2 の印加加速度 α 対共振周波数 f 特性のシミュレーション結果を示す。

-1 G から +1 G の加速度印加にに対して、片方の検出電極印加電圧 V_C が 0 V の場合には共振周波数 f はほとんど変化しないのに対して、片方の検出電極印加電圧 V_C が 2 V の場合には共振周波数 f は 736 Hz から 452 Hz へと約 38.5 % 変化する結果が得られた。

図 6.17 にモデル 2 の検出電極印加電圧 V_C 対共振周波数 f 特性のシミュレーション結果を示す。加速度印加が無い場合には片方の検出電極印加電圧 V_C を 0 V から 2 V へと増加させていく時共振周波数 f は 789 Hz から 737 Hz へと約 6.6 % 低下する。-1 G の加速度を印加した場合にはこの共振周波数変化は減少し、+1 G の加速度センサを印加した場合にはこの共振周波数変化は大幅に増加する結果となっている。

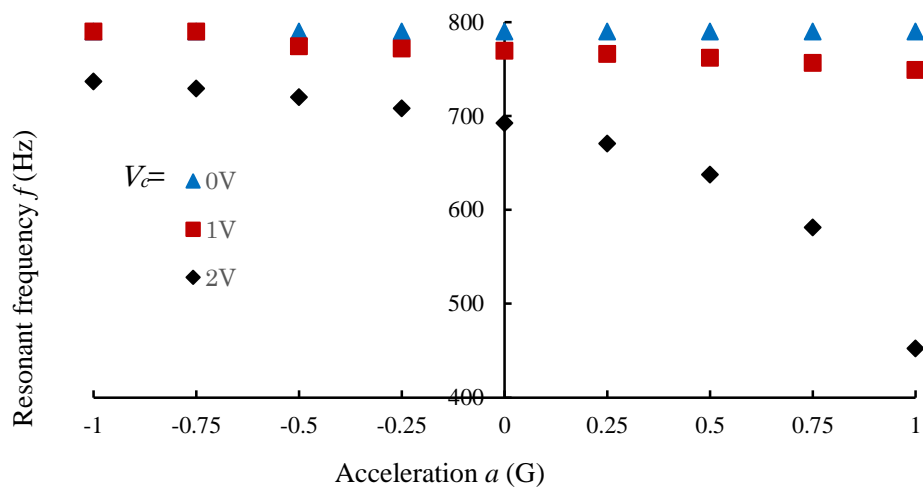


図 6.16 印加加速度 a 対共振周波数 f 特性のシミュレーション結果(モデル 2)

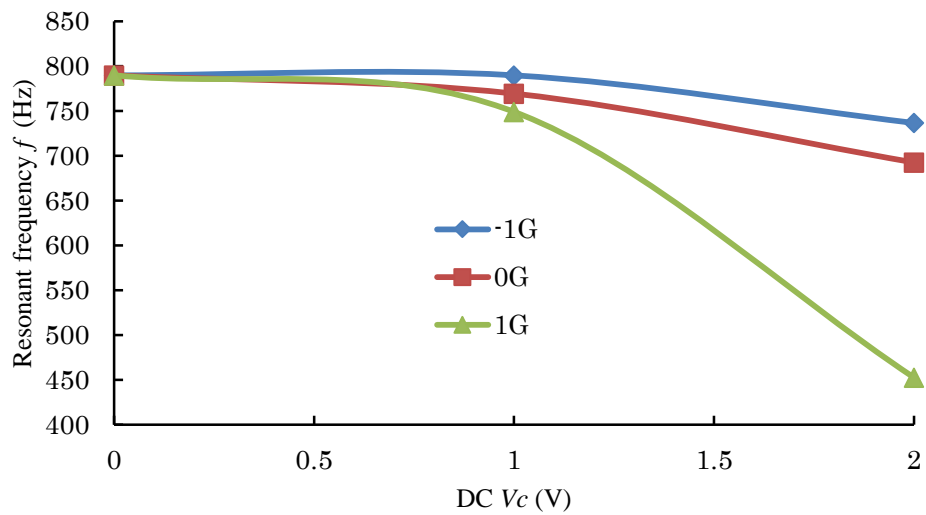
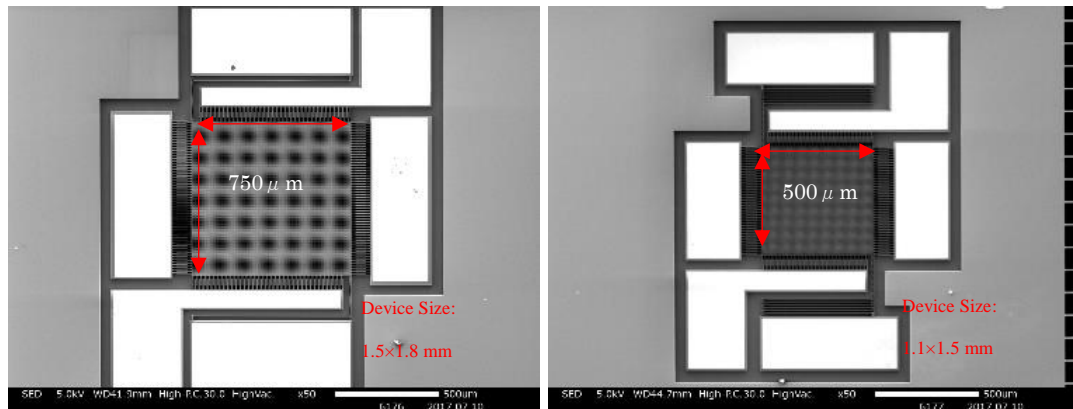


図 6.17 検出電極印加電圧 V_c 対共振周波数 f 特性のシミュレーション結果(モデル 2)

モデル 1, モデル 2 の特性の計測において, 最大電圧を決めた要因は PULL-IN しない限界である。

6.3.5 MEMSpice と Intelli Suite の結果の比較

MEMSpice と Intelli Suite の結果を比較してみると、PULL-IN 電圧に差異はあるが、同じような傾向の特性が出ているのが分かる。制御電圧 V_c を増加させていくと $\pm 1G$ 加速度印加に対して $V_c=2V$ ではモデル 1 は、MEMSpice では $\Delta f/f=13.8\%$ 、IntelliSuite では $\Delta f/f=13.0\%$ となった。一方、モデル 2 は、MEMSpice では $\Delta f/f=38.8\%$ 、IntelliSuite では $\Delta f/f=38.5\%$ となり、両者の違いは 6% 程度であり、ほぼ一致していることが確認できた。



(a) model 1

(b) model 2

図 6.18 試作したプロトタイプ SEM 写真

6.4 プロトタイプ試作と評価

これら 2 種類のモデルについてプロトタイプ的设计を行い, SOI ウェハを用いて試作を行った。作製した各モデルの SEM 写真を図 6.18 (a), (b)に示す。駆動用楕歯電極の対数はモデル 1 が 70 対に対し, モデル 2 は 50 対である。検出容量の楕型電極対数はモデル 1 が 36 対, モデル 2 が 24 対である。

試作チップの周波数特性の評価を行うために, 共振子を振動させるための駆動回路と共振子の振動振幅を測定するための容量検出回路を作製した。駆動回路と容量検出回路を組み合わせた回路図を図 6.19 に示す。この回路を用いて静電チューニング特性を評価した。共振子の検出電極には図の赤い部分の容量検出回路から 100 kHz の AC 電圧を印加し, 重りの変位による差動容量を周波数に依存せさないためチャージアンプで検出する構成となっている。駆動回路は AC 電圧に DC 電圧を重畳させる方法により線形の駆動を行っている。この楕歯電極への DC 電圧重畳による共振特性への影響は平行平板電極の場合の 1%以下であり, 無視できるレベルであると考えられる。

駆動回路楕歯電極に働く静電力は印加電圧の二乗に比例する。そのため, 交流電圧のみを印加した場合には楕歯電極に働く静電力の周波数は印加した交流電圧の周波数の二倍になる。

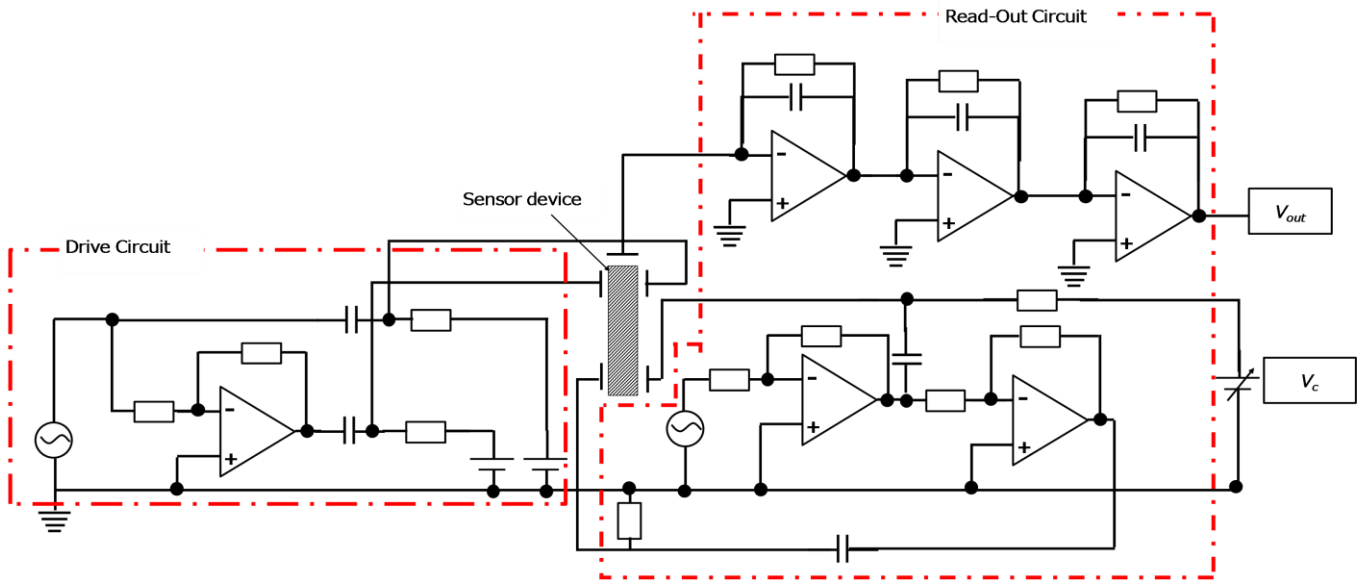


図 6.19 試作したプロトタイプの評価回路

これを避けるために交流電圧に直流電圧を加えるという方法を用いた。交流電圧 $V_a \sin \omega t$ に $V_d = |V_a|$ となる直流電圧 V_d を印加した場合の静電力 F は次式のようなになる。

$$\begin{aligned}
 F &= -\frac{2\epsilon b}{g-h} \left\{ (V_d + V_a \sin \omega t)^2 - (V_d - V_a \sin \omega t)^2 \right\} \\
 &= -8 \frac{\epsilon b}{g-h} V_a V_d \sin \omega t \quad (6.1)
 \end{aligned}$$

よって二乗成分を消去することができ、印加する交流電圧の周波数と楕歯電極に働く静電力の周波数を一致させることができる。本実験で使用した共振子を振動させるための駆動回路を図 6.20 に示す。この回路により交流電圧 V_a と直流電圧 V_d を足し、試作チップの楕歯電極の片側に V_{out1} 、もう片側に反転させた V_{out2} を印加する。

また、差動容量検出回路今回使用した差動容量変化を検出する回路を図 6.21 に示す。

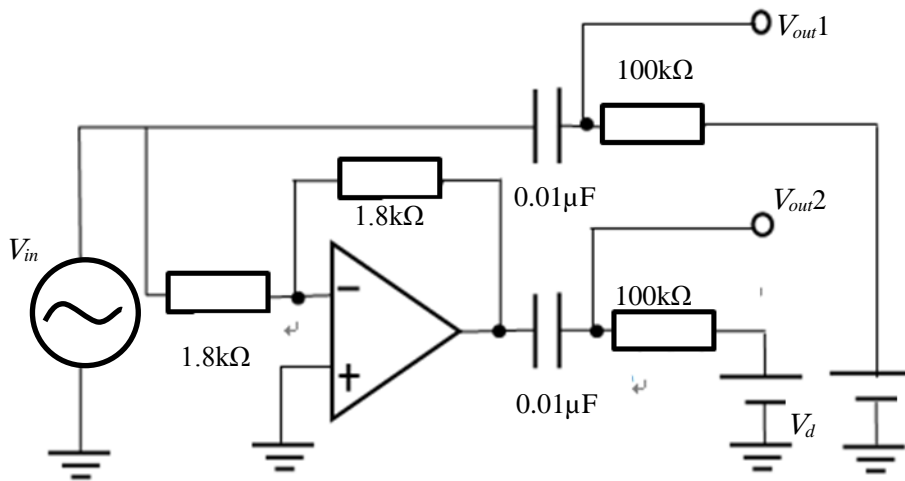


図 6.20 駆動回路

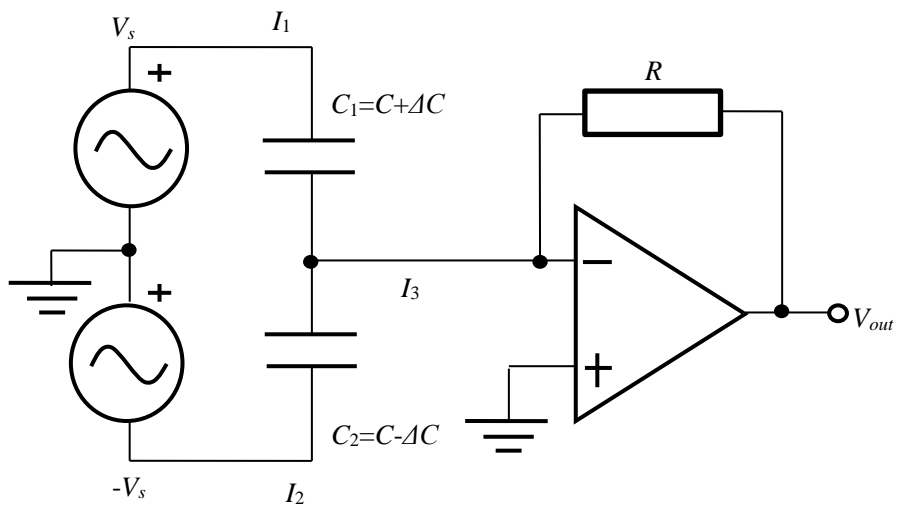


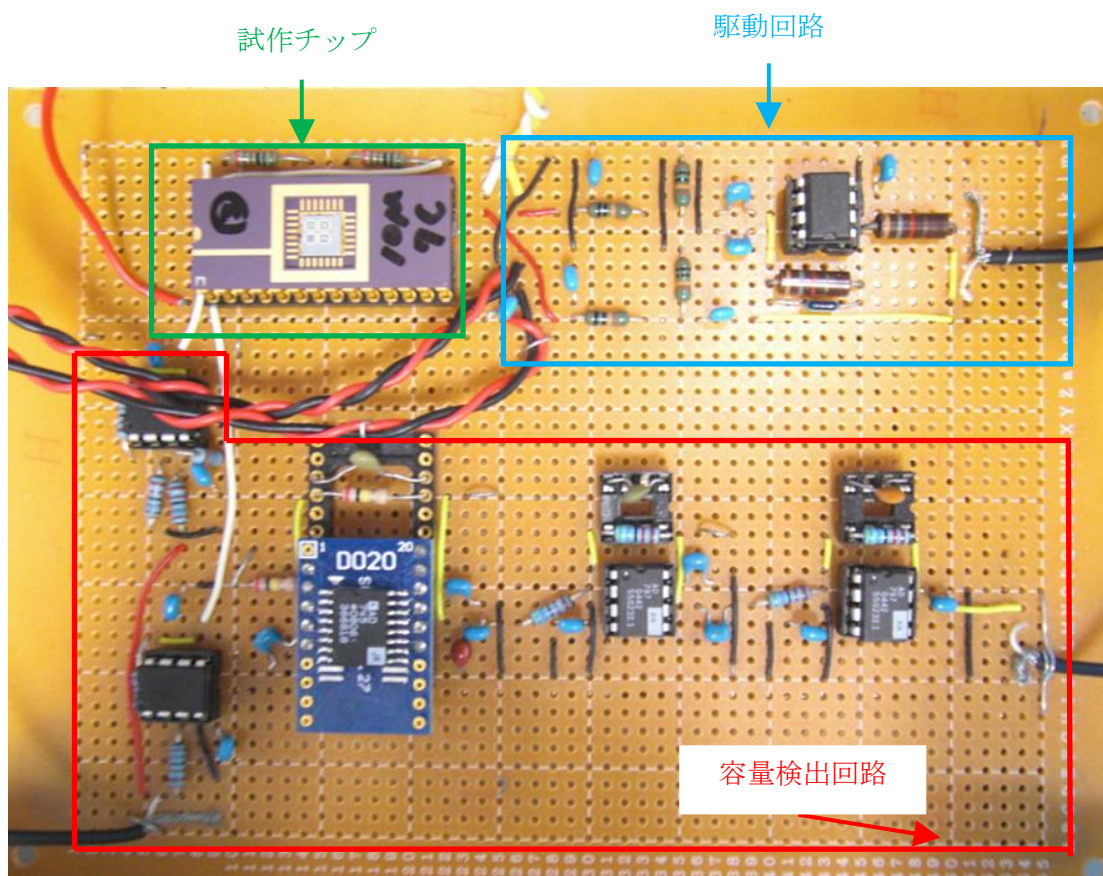
図 6.21 差動容量変化検出回路

出力電圧 V_{out} は以下のようなになる。

$$I_1 = V_s \times j\omega(C + \Delta C) \quad (5.2)$$

$$I_2 = -V_s \times j\omega(C - \Delta C) \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned} V_{out} &= -RI_3 = -R(I_1 + I_2) \quad (5.4) \\ &= -R \times V_s \times j\omega \times 2\Delta C \end{aligned}$$



6.22 試作した信号処理回路の写真

この回路の特徴は、

- ・出力は容量変化の絶対値に比例
- ・出力はキャリア周波数に比例
- ・出力端子-GND間の寄生容量を無視できるである。

本実験では、 $R=200\text{ k}\Omega$ とし、この回路を作製した。

駆動回路と容量検出回路を組込んだ試作回路の写真を図6.22に示す。この回路を用いて静電チューニング特性を評価した。共振子の検出電極には図の赤い部分の容量検出回路から100 kHzのAC電圧を印加し、重りの変位による差動容量を周波数に依存せさないためチャージアンプで検出する構成となっている。青い部分の駆動回路はAC電圧にDC電圧を重畳させる方法により線形の駆動を行っている。

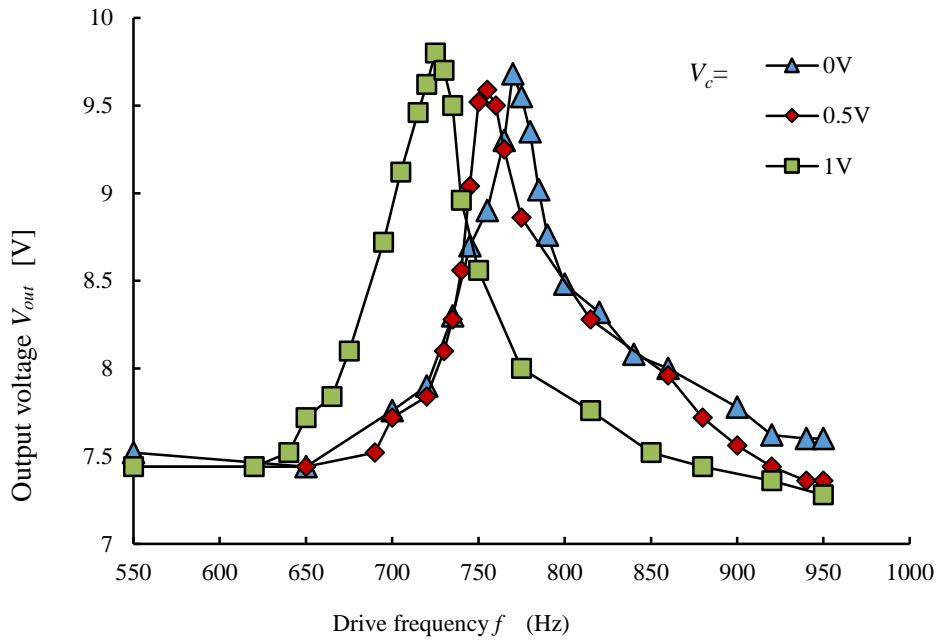


図 6.23 モデル 1 の駆動周波数対出力電圧の測定結果

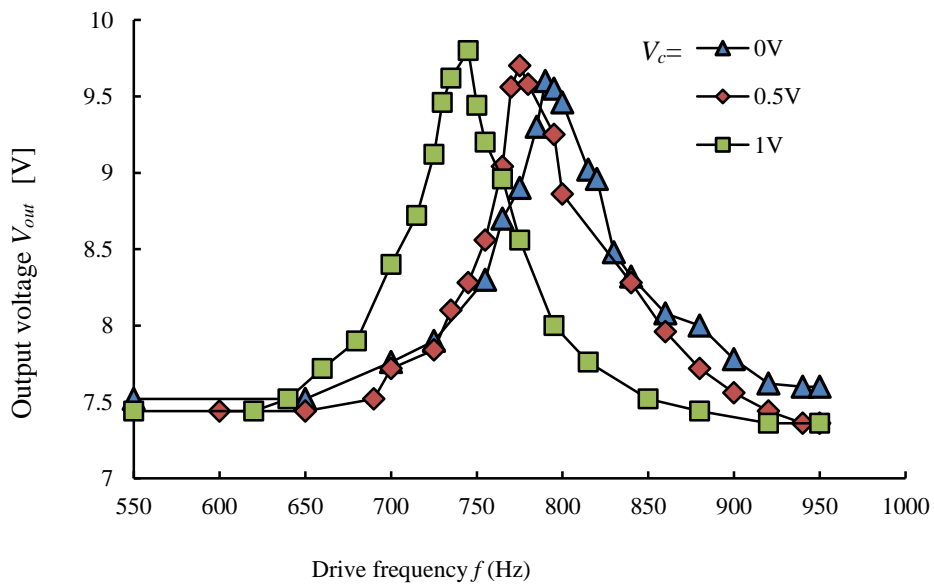


図 6.24 モデル 2 の駆動周波数対出力電圧の測定結果

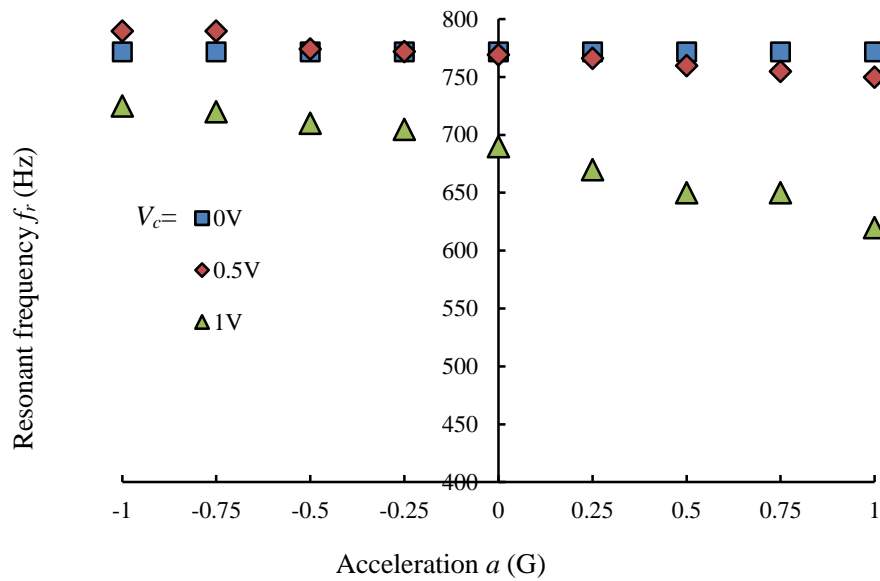


図 6.25 モデル 1 の印加加速度 a 対共振周波数 f_r 特性測定結果

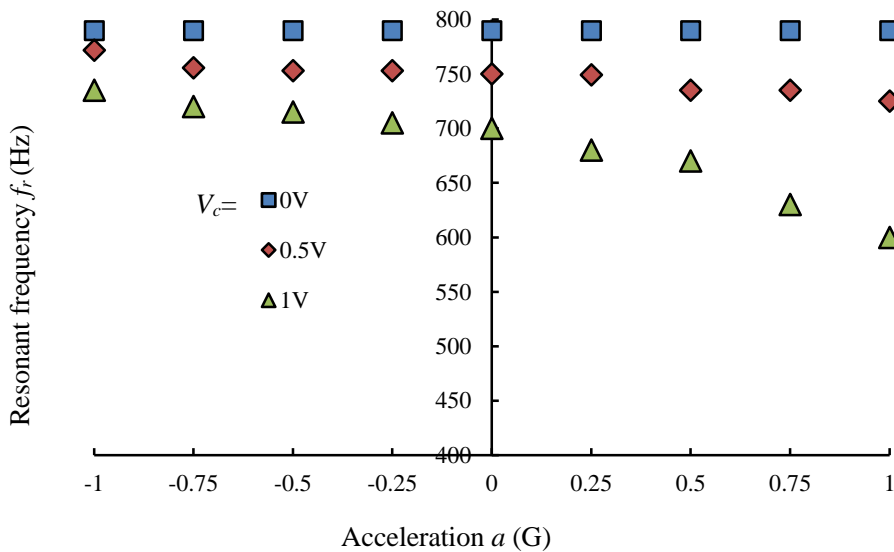


図 6.26 モデル 2 の印加加速度 a 対共振周波数 f_r 特性の測定結果

図6.23, 図6.24 はそれぞれモデル1, モデル2の駆動信号周波数 f 対出力電圧特性の測定結果で, 駆動周波数 f は550 Hzから1 kHzまで掃引している。制御電圧 V_c を増加させていくと共振周波数 f_r は簡易モデルで想定されたように低周波側へシフトしていく特性が得られた。

図 6.25, 図 6.26 にそれぞれモデル 1, モデル 2 の印加加速度 a 対共振周波数 f_r 特性測定結果を示す。両モデルとも制御電圧 V_c を増加させることにより, 共振周波数が低下し, 加速度 a 対共振周波数 f_r 特性は下方シフトしていくと同時に加速度に対する感度が急激に

増加し、シミュレーション結果とは若干数値は異なるが、同様の傾向を得ることができ、簡易モデルで期待した基本動作の確認を行うことができた。また楕型電極に電圧 V_c をさらに増加させていくと 1.2 V 付近から出力が得られなくなった。これが容量検出楕型電極はプルインした為と思われる。

図 6.27 に前回モデルの試作品の共振特性を示す。今回提案した 2 つのモデルでは折り返しビーム構造を用いることで、この結果とほぼ同じ感度を実現している。

シミュレーションにより設計した内容が妥当であり、今後このシミュレーション手法を用いて開発を進めることが可能であることを確認することができた。

6.5 まとめ

SOI-MEMS 技術を用いた静電駆動の共振型加速度センサにおいて、変位検出用楕歯電極に DC の制御電圧を重畳させることで静電ポテンシャルを発生させて感度を向上させる方式の提案を行い、2 種類のプロトタイプを設計・試作し、制御電圧対共振周波数特性の評価を行った。

(1) MEMSpice と IntelliSuite のシミュレーションでは制御電圧を 2 V 程度とすることで ± 1 G の加速度印加に対して、共振周波数変化が数十 % と大幅に変化する特性が得られた。プロトタイプの評価でもほぼ同様な傾向の特性が得られ、提案した方式の有効性を確認することができた。

(2) モデル 1 の感度測定結果 105 Hz / G に対する、モデル 2 の測定結果は 135 Hz / G で、モデル 1 より 19 % 大きい値となった。これにより折り返しビーム構造によって、共振型加速度センサの小型化に有効と確認できた。

今後応用分野に応じ、適切な周波数応答範囲を設計し、共振型加速度センサの最適化を検討するとともに制御電圧の調整手法の確立を目指していく。

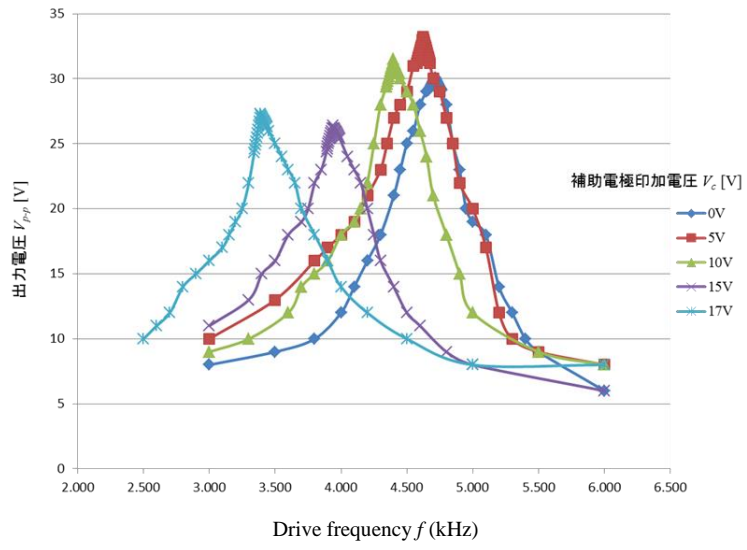


図 6.27 前回モデル試作品の駆動周波数対出力電圧の測定結果

第7章 結論

加速度センサは MEMS 技術の適用により小型化、低価格化が進み、様々な用途に用いられるようになった。静電容量式加速度センサの小型化や設計の最適を実現するために SOI-MEMS 技術をベースにして各種デバイスのシミュレーション検討を行い、プロトタイプの試作、評価を通してその有効性を検証した。

第4章では重りの辺の長さまで梁の長さを延ばすような構成についての可能性の検討を行った。まず、3次元 FEM シミュレーターを用いて、慣性質量が一定な場合、ビームの長さを 100 μm から 1000 μm まで変化させ、さらに折り返し構造によって、検出軸の変位、他軸感度、共振周波数、高次モードの比について、その依存性を明確にした。重りの辺の長さと同じビーム長さのタイプセンサの高次の共振周波数の基本共振周波数に対する比率は梁の全長が 500 μm 以上であれば2以上となることがわかった。同じビーム全長、慣性質量の寸法が 1 mm \square 場合、折り返し4回のセンサに対し、2本梁で折り返しをなくすことにより感度は約3倍にすることができる。この時第1モードの共振周波数は 680 Hz から 330 Hz へと低下するが、100 Hz 以下単純な動きの検出、制御には十分に応用できるものと思われ、慣性質量の辺の長さまで梁の長さを延ばすような構成は感度向上に有効と確認できた。

第5章では、感度と共振周波数の梁のパラメータ依存性とその構成を検討し、デバイスの小型化のための慣性質量の辺の長さのビーム長を有する静電容量加速度センサの基本構造設計方法を検討した。重りの辺の長さまで梁の長さを延ばすような構成で、正方形慣性質量の寸法を変更しながら、パラメータを変化させた時の感度、共振周波数、高次共振モードをシミュレーションにより系統的に求め、各種パラメータによるこれらの特性の依存性を明確化し、構造の検討についての可能性の検討を行った。

慣性質量のサイズが 1000 $\mu\text{m}\square$ 、750 $\mu\text{m}\square$ 、および 500 $\mu\text{m}\square$ である3種類の MEMS 静電容量型加速度センサの感度および共振周波数について、FEM シミュレーター IntelliSuite を用いて計算した。重り辺と同じビーム長さ場合、重りの寸法が 1000 $\mu\text{m}\square$ 、折り返しビームなしセンサの感度 476 mV/G に対し、750 $\mu\text{m}\square$ でビーム1回折り返しセンサは 452 mV/G になり、ほぼ同じ感度結果を得た。一方 500 $\mu\text{m}\square$ ビーム7回折り返しセンサの感度結果は 285 mV/G であり、試作したプロトタイプの測定結果はシミュレート結果とよく一致した。折り返しビーム構造を用いて、重りサイズを低減しながら、性能を維持する手法の有効性を確認することができた。このことより、同性能のセンササイズの低減の可能性が示唆されている。

第6章ではさらなる小型化を実現するために、SOI-MEMS 技術を用いた静電駆動の共振型加速度センサにおいて、変位検出用歯輪電極に DC の制御電圧を重畳させることで静電ポ

テンシャルを発生させて感度を向上させる方式の提案を行い、2種類のプロトタイプを設計・試作し、制御電圧対共振周波数特性の評価を行った。前回型と比較する、 $1000\ \mu\text{m}$ に対し、2つタイプのプロトタイプは慣性質量寸法が $750\ \mu\text{m}$ と $500\ \mu\text{m}$ で、後者については同等の共振周波数と感度を実現するために支持ビームを折り返し構造とした。FEMシミュレーションでは制御電圧を $2\ \text{V}$ 程度とすることで $\pm 1\ \text{G}$ の加速度印加に対して、共振周波数変化が数十%と大幅に変化する特性が得られた。プロトタイプの評価でもほぼ同様な傾向の特性が得られ、提案した方式の有効性を確認することができた。モデル1は $105\ \text{Hz/G}$ であり、モデル2は $135\ \text{Hz/G}$ の感度を得ることができた。これにより折り返し梁構造によって、共振型加速度センサの小型化に有効であると確認できた。今後、応用分野に応じ、適切な周波数応答範囲を設計し、共振型加速度センサの最適化を検討するとともに制御電圧の調整手法の確立を目指していく。

以上、本研究において得られた成果を総括した。小型化・高感度のセンサ形状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、SOI-MEMS技術を用いて小型静電容量式センサのビーム・重り形状や加速度検出方式に関する最適化手法を示すことができたと考えている。

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、指導教官である千葉工業大学 工学研究科教授の室英夫先生に心から感謝いたします。

また、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脇田和樹教授、山本秀和教授、陶良教授、安川雪子准教授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。

研究の初期からいろいろを手伝っていただいた星野敬亮さんに、これまでのご協力を敬意を表するとともに、心より感謝の意を表します。そして、既に卒業され、また在籍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. 株式会社セミコンダクタポータル HP, 各種センサのチップサイズ推移 ;
<https://www.semiconportal.com/archive/editorial/industry/100809-mems.html>
2. 公益財団法人ちゅうごく産業創造センターHP, センサの販売平均単価と出荷数値の推移 ; <https://crirc.jp/jigyonaizou/research/jishu/pdf/project/h29-1.pdf>
3. NADEX Magazine HP, 加速度センサの種類と, 選定のための特徴比較 ;
<https://nadex-promotion.com/learn/240/>
4. A. Bertolini, R. DeSalvo, F. Fidecaro, and A. Takamori: “Monolithic folded pendulum accelerometers for seismic monitoring and active isolation systems”, IEEE Trans.Geosci. Remote Sens. Vol. 44, pp. 273-276 (2006)
5. F.A. Levinzon:”Ultra-low-noise seismic piezoelectric accelerometer with inte-gral FET amplifier”, IEEE/ASME J. Microelectromech, Syst. 12, pp. 2262–2268 (2012)
6. A. Partridge, J. K. Reynolds; B. W. Chui; E. M. Chow, A. M. Fitzgerald, L. Zhang; N. I. Maluf and T. W. Kenny: “A high-performance planar piezoresistive accelerometer”, IEEE/ASME J. Microelectromech, Syst. 9, pp. 58–66 (2000)
7. Y. Li, Q. Zheng, Y. Hu, J. Young: “Micromachined piezoresistive accelerometers based on an asymmetrically gapped cantilever”, IEEE/ASME J. Microelectromech. Syst. 20, pp83–94 (2011)
8. TE CONNECTIVITY HP, 圧電型加速度センサ代表製品 ;
<https://www.te.com/jpn-ja/product-805-0500.html>
9. 北陸電気工業株式会社 HP, ピエゾ抵抗型加速度センサ代表製品 ;
<https://www.hdk.co.jp/pdf/jpn/j137506.pdf>
10. Kionix 社 HP, 静電容量型代表製品 ;
<https://jp.kionix.com/product/KXD94-7138>
11. P. Monajemi, F. Ayazi: “Design optimization and implementation of a micrograv-ity capacitive HARPSS accelerometer”, IEEE Sens. J. 6, pp.39–46 (2006)

12. C. Sun, M. Tsai, Y. Liu, and W. Fang: "Implementation of a Monolithic Single Proof-Mass Tri-Axis Accelerometer Using CMOS-MEMS Technique", IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, Vol. 57, pp.1670-1679 (2010)
13. Y. Wang, and P. Chan: "A Low-Power Highly Sensitive Capacitive Accelerometer IC Using Auto-Zero Time-Multiplexed Differential Technique", IEEE Sensors Journal, Vol. 15, pp.6179-6189 (2015)
14. C. Yeh, and K. Najafi: "CMOS Interface Circuitry for a Low-Voltage Micromachined Tunneling Accelerometer", JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, Vol. 7, pp.6-15 (1998)
15. K. Ishihara, C. F. Yung, A. A. Ayon, and M. A. Schmidt: "An Inertial Sensor Technology Using DRIE and Wafer Bonding with Interconnecting Capability", IEEE JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, Vol. 8, pp.403-408 (1999)
16. F. A. Hassania, A. F. Payamb, M. Fathipourc, and F. Farbizd: "An Adaptive Nonlinear Estimator for the MEMS Capacitive Accelerometer Based on Adaptive Input-Output Feedback Linearization ", ISDRS 2007, College Park, MD, USA (2007)
17. U. Krishnamoorthy, R. H. Olsson, G. R. Bogart, M. S. Baker, D. W. Carr, T. P. Swiler, and P. J. Clews: "In-plane MEMS-based nano-g accelerometer with sub- 1 wavelength optical resonant sensor", Sensors and Actuators, Vol. A 145–146, pp.283–290 (2008)
18. G. Dai, M. Li, X. He, Lianming Du, Beibei Shao, and Wei Su: "Thermal drift analysis using a multiphysics model of bulk silicon MEMS capacitive accelerometer", Sensors and Actuators, Vol. A 172, pp.369-378 (2011)
19. E. H. Sarraf, M. Sharma, and E. Cretu: "Novel band-pass sliding mode control for driving MEMS-based resonators", Sensors and Actuators, Vol. A186, pp.154-162 (2012)
20. J. Chae, H. Kulah, and K. Najafi: "An in-plane high-sensitivity, lownoise, Micro-G silicon accelerometer", Proc. 16th IEEE Int. Conf. Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2003), Kyoto, Japan, pp.466–469 (2003)
21. R. A. Dias, L. Mol, R. F. Wolffenbuttel, E. Cretu, and L. A. Rocha: "Design of a Time-Based

- Micro-g Accelerometer”, IEEE Sensors Journal, Vol. 11, No. 8, pp.1677-1683 (2011)
22. O. Aydin and T. Akin: “Bulk-Micromachined Fully Differential MEMS Accelerometer With Split Interdigitated Fingers”, IEEE Sensors Journal, Vol. 13, NO. 8, pp. 2914-2921 (2013)
 23. F. A. Hassania, A. F. P. M. Fathipour, F. Farbizd: “An Adaptive Nonlinear Estimator for the MEMS Capacitive Accelerometer Based on Adaptive Input-Output Feedback Linearization”, ISDRS, College Park, December 12-14, MD, USA (2007)
 24. D.L. Christensen, C.H. Ahn, V.A. Hong, E.J. Ng, Y. Yang, B.J. Lee, T.W. Kenny: “HERMETICALLY ENCAPSULATED DIFFERENTIAL RESONANT ACCELEROMETER”, Transducers 2013, 16-20 June, Barcelona, SPAIN(2013)
 25. Y. Yin, Z. Fang, F. Han, B. Yan, J. Dong, Q. Wu: “Design and test of a micromachined resonant accelerometer with high scale factor and low noise ”, Sensors and Actuators A Physical, Vol. 268, pp. 52-60 (2017)
 26. J. Liu and H. Muro: “ A Study on Beam Configuration of MEMS Capacitive Accelerometers Fabricated using SOI-MEMS Technologies”, IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines, Vol. 137, No.8, pp. 247-251 (2017)
 27. S. Hirai, K. Terao, T. Suzuki, F. Shimakowa, F. Oohira: “A Scaling Effect Study of MEMS devices for Integration with CMOS Electronics Shintarou” , Proc. 28th Conf. Micro Electro Mechanical Systems (Symposium 2011), Tokyo, Japan, pp.15-18 (2011)
 28. J. Liu and H. Muro: “Miniaturization of MEMS Capacitive Accelerometers Fabricated Using Silicon-on-insulator-MEMS Technology”, Sensors and Materials , Vol. 30, No. 5, pp. 1081–1090 (2018)
 29. C. Comi, A. Corigliano, G. Langfelder, A. Longoni, A. Tocchio, and B. Simoni: “A New Biaxial Silicon Resonant Micro Accelerometer”, MEMS 2011, Cancun, MEXICO, January 23-27, pp. 529-532 (2011)
 30. S.C. Chang, M.W. Putty, D.B. Hicks, C.H. Li. “Resonant-bridge two-axis microaccelerometer”. Sensors and Actuators, Vol. A21-A23, pp. 342-345 (1990)

31. T. A. Roessig, R. T. Howe, A. P. Pisano, and J. H. Smith : “Surface-Micromachined Resonant Accelerometer”, 1997 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators(Transducers’97), pp.16-19 (1997)
32. Y. Matumoto, M. Iwakiri, H. Tanaka, M. Ishida, and T. Nakamura : “A capacitive accelerometer using SDB-SOI structure”, Sensors and Actuators, Vol.A53, pp.267-272 (1996)
33. C. Comi, A. Corigliano, A. Merassi, B. Simoni: “A surface micromachined resonant accelerometer with high resolution”. Proc. 7th European Solid Mechanics Conference, Lisbon, 7-11 September (2009)
34. D. Chen, Z. Wu, Lei, Liu, X. Shi, J. Wang: “An Electromagnetically Excited Silicon Nitride Beam Resonant Accelerometer”. Sensors, vol. 9, pp. 1330-1338 (2009)
35. D.L. Christensen, C.H. Ahn, V.A. Hong, E.J. Ng, Y. Yang, B.J. Lee, and T.W. Kenny: “Hermetically Encapsulated Differential Resonant Accelerometer” , Transducers 2013, Barcelona, SPAIN, 16-20 June, pp. 606-609 (2010)
36. V. Ferrari, et.al, “Silicon resonant accelerometer with electronic, compensation of input-output cross-talk”, Sensors and Actuators, A: Physical, Vol. A123–124, pp.258 (2005)
37. Jie Hu, Chenyang Xue, Wendong Zhang, Jijun, Xiong, Binzhen Zhang, Hui, Qiao, Shang Chen: “A Cantilever Accelerometer Based on Resonant, Tunneling Diode”, International Conference on Mechatronics and Automation, August 5 - 8, Harbin, China (2007)
38. J. Liu, K. Hoshino, H. Muro: ”Resonant Accelerometers using Electrostatic Potential between the Comb Electrodes”, IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines Vol.138 No.6 pp.226-230 (2018)
39. 室英夫, 藍光朗, 石垣武夫, 石森義雄, 岡山努 : 「マイクロセンサ工学」, (技術評論社), 4章 機械量センサ (2009)
40. 藤田博之, 江刺正喜, 勝部昭明, 小西聡, 佐藤一雄, 前中一介 : 「センサ・マイクロマシン工学」, (オーム社), 5章 マイクロアクチュエーターとマイクロマシン(2005)
41. 飯高俊哉, 水口和彦, 室英夫 : 「分割型補助電極を有する Si 共振子の静電チューニング

用テスト素子」, 電気学会論文誌. E, センサ, Vol. 132, No. 5, pp. 127-132 (2012)

研究業績

論文 (査読付き)

1. 劉 健男, 室英夫, “SOI-MEMS 技術による静電容量式 MEMS 加速度センサ”, 電気学会論文誌. E, センサ・マイクロマシン部門誌 137(8), 247-251, 2017
2. Jiannan Liu and Hideo Muro, “Miniaturization of MEMS Capacitive Accelerometers Fabricated Using Silicon-on-insulator-MEMS Technology”, Sens. Mater., Vol. 30, No. 5, 2018, p. 1081-1090.
3. Liu Jiannan , Hoshino Keisuke , Muro Hideo, ” Resonant Accelerometers using Electrostatic Potential between the Comb Electrodes”, 電学論 E 138(6), 226-230, 2018-06-01
4. 星野 敬亮 , 劉 健男 , 室 英夫, “発振器型熱式マイクロ・フローセンサ”, 電気学会論文誌. E, センサ・マイクロマシン部門誌 138(3), 112-116, 2018

学会・研究会

1. 劉 健男, 李 南浩, 播磨 幸一, 高森政聡, 梁 金星, 植田 敏嗣, "高感度傾斜角センサ作製プロセスの改善とその評価", 平成 23 年電気学会全国大会, pp.232, (3-169), 大阪大学, 2011 年 3 月 16 日～3 月 18 日 (東日本大震災の影響により中止, 学会認定発表扱い)
2. 劉 健男, 播磨 幸一, 高森 政聡, 植田 敏嗣, "2 軸静電容量型傾斜角センサの開発と評価", 第 64 回 電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, pp.267, 佐賀大学, 2011 年 9 月 26 日～27 日
3. 劉健男, 播磨幸一, 高森政聡, 植田敏嗣, "二軸容量型傾斜角センサのプロセスの開発と評価", 平成 24 年電気学会全国大会, pp. (3-121), 広島工業大学, 2012 年 3 月 21 日～3 月 23 日
4. 劉 健男, 室英夫, “SOI-MEMS 技術による静電容量式 MEMS 加速度センサにおける梁形状の検討” 第 33 回「センサ・マイクロマシンとその応用システム」シンポジウム, 論

文集, (2016-10-17), 25pm4-PS-050, 平戸文化センター, 2016年10月24日～26日

5. 劉 健男, 室 英夫, “櫛歯電極における静電ポテンシャルを利用した共振型加速度センサの検討”, 第34回「センサ・マイクロマシンとその応用システム」シンポジウム,, 論文集, (2017-10-24), 31am3-PS-45, 広島国際会議, 2017年10月31日～11月2日
6. 劉 健男, 室 英夫, “SOI-MEMS 技術による共振型加速度センサの感度特性シミュレーション”,平成30年電気学会全国大会論文集, (2018-03-05), 3-143, 九州大学, 2018年3月14日 ～ 2018年3月16日
7. 劉 健男, 室 英夫, ” 圧電 MEMS 評価用 TEG の設計・評価”, 第35回「センサ・マイクロマシンとその応用システム」シンポジウム, 札幌市民交流プラザ 2018年10月30日～11月1日.
8. Lee Namho, Koichi Harima, Jiannan Liu, Masaaki Takamori, Jinxing Liang, Toshitsugu Ueda, "Fabrication Process Improvement for High Sensitivity Tilt Sensors", The 27th Sensor Symposium on Sensors, Micromachines and Applied Systems, LN-4, Shimane-ken, Japan, Oct. 2010.

Appendix A シミュレーションソフト「Intelli Suite」について

本研究では, シミュレーションソフト「Intelli Suite」を用いてシミュレーションを行った。「Intelli Suite」とは, 半導体素子の製造工程を利用した MEMS の製造工程の検討から, デバイスの性能評価まで一貫して検討する事を目的とした総合型の設計・解析ソフトウェア

の事である。

シミュレーションソフト「Intelli Suite」の使い方

① 「3D Builder」から「Thermo Electro Mechanical」への移り方

「3D Builder」(図 A.1)で作ったモデルでシミュレーションを行う為には、「Thermo Electro Mechanical」にデータを移行する必要がある。データを移行する為には、まずメニューバーの「File」から「Export to Analysis Module」を選択し、それにより「Check Export Elements」画面が現れる。チェックあり、なし、どちらでも先に進めるが、チェックありで進めると構造の不備がわかるので、慣れないうちはチェックありで進めるほうが良い。「Export to Analysis Module」が現れたら、「Thermo Electro Mechanical」を選択する。すると、保存場所を選ぶ画面が出るのでローカルディスク上にフォルダを作り、名前を付けて保存をする事により、自動的に「Thermo Electro Mechanical」にデータを移行する事が出来る(図 A.2)。このとき付ける名前は半角英数字のみであることに注意する事。

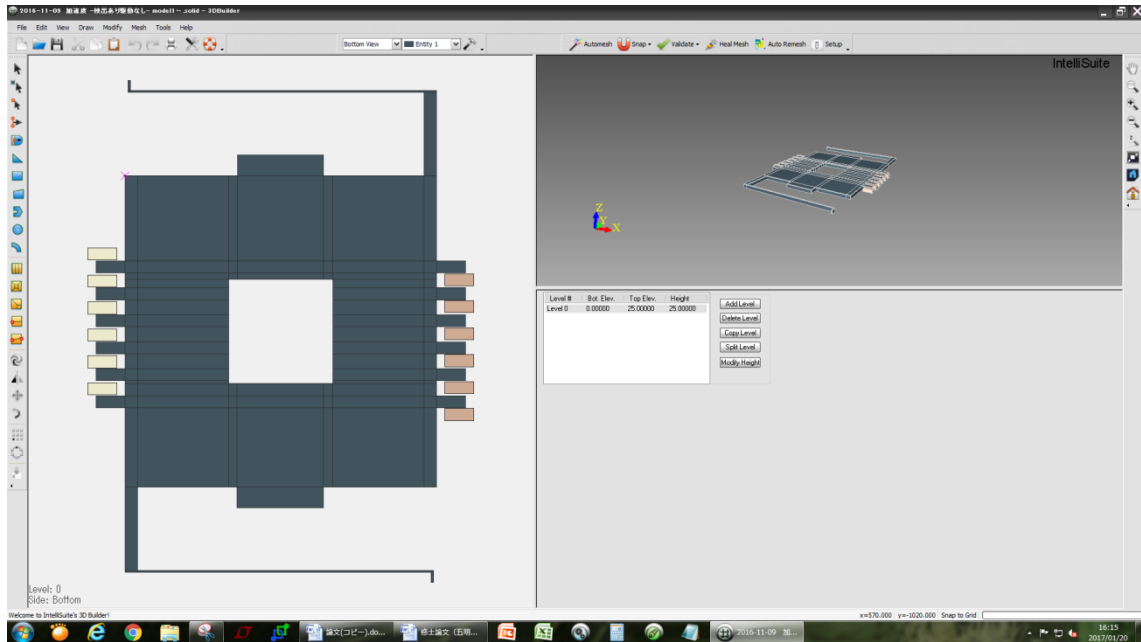


図 A.1 3D Builder 画面

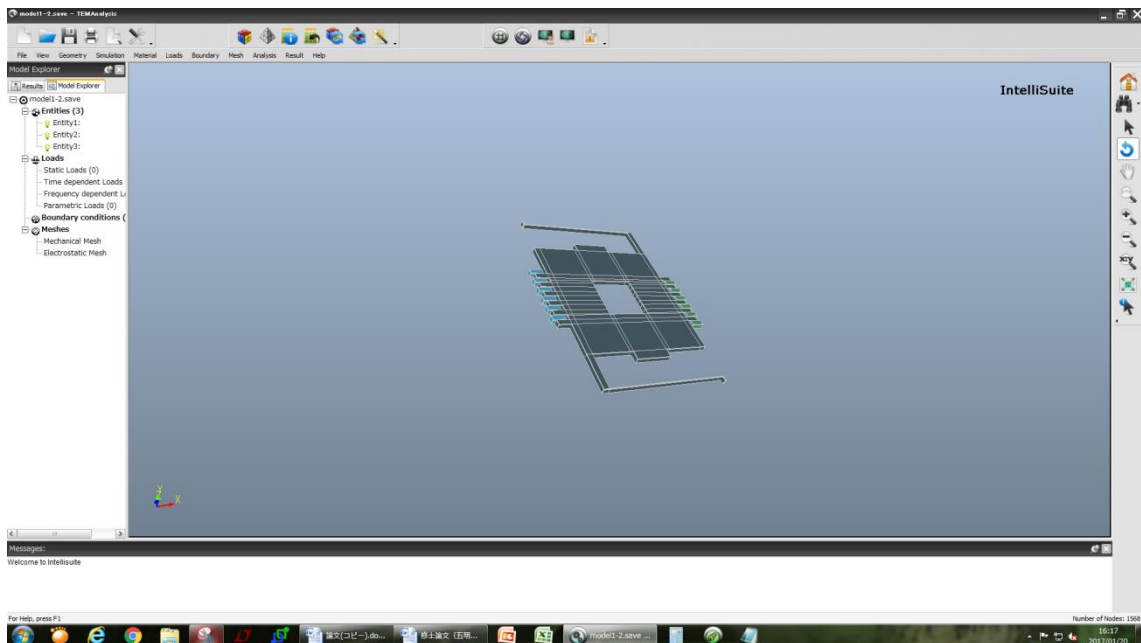


図 A.2 Thermo Electro Mechanical 画面

②変位解析

構造体の変位解析を行う為には、まず設定を入力する。メニューバーの「Simulation」から「Simulation Setting」を選択する。すると、「Simulation Setting」画面が現れるので、シミュレーションの設定を入力する。ここでは、「Calculation Type」の「Static」、「Analysis」の「Stress Displacement」、「Result」の「Last State」、「Displacement」の「Large」、「Start Shape」の「Undeformed」、「Piezo Material」の「No Piezo Material」を選択する。

次に、材料の物質や物性値を変更する。メニューバーの「Material」から「Check/Modify」を選択し、モデルの変更したい部分をクリックする。すると、「Material Manager」画面が現れるので、「Import from MEMaterial」をクリックし、「select a material」の中から「Si_Czochralski_110」を選択する。

次に、モデルの固定箇所を決める。メニューバーの「Boundary」から「Fixed」を選びモデルの固定したい部分をクリックする。ここでは、片持ち梁構造なら1か所、2本梁構造なら2か所、4本梁構造なら4か所の梁の先端部分を固定する。

次に、材料にメッシュを入れる。メニューバーの「Mesh」から「Auto」選択すると、入力した値ごとにメッシュを入れる事が出来る。ここでは100前後の値を入力する。

次に、印加する加速度を入力する。メニューバーの「Loads」から「Acceleration」を選択し、モデルの印加する部分をクリックし、印加する加速度の大きさを入力する。ここでは、片持ち梁構造ではx方向、両持ち梁構造ではy方向に1Gの大きさの加速度を印加する。

全ての条件を入力したら、シミュレーションを開始する。メニューバーの「Analysis」から「Start Static Analysis」を選択すると、解析が始まる。解析が終わったら、メニューバーの「Result」から「Displacement」を選択し、それぞれの方向にどれだけ変位するのかを調べる。以上で変位解析は完了である。

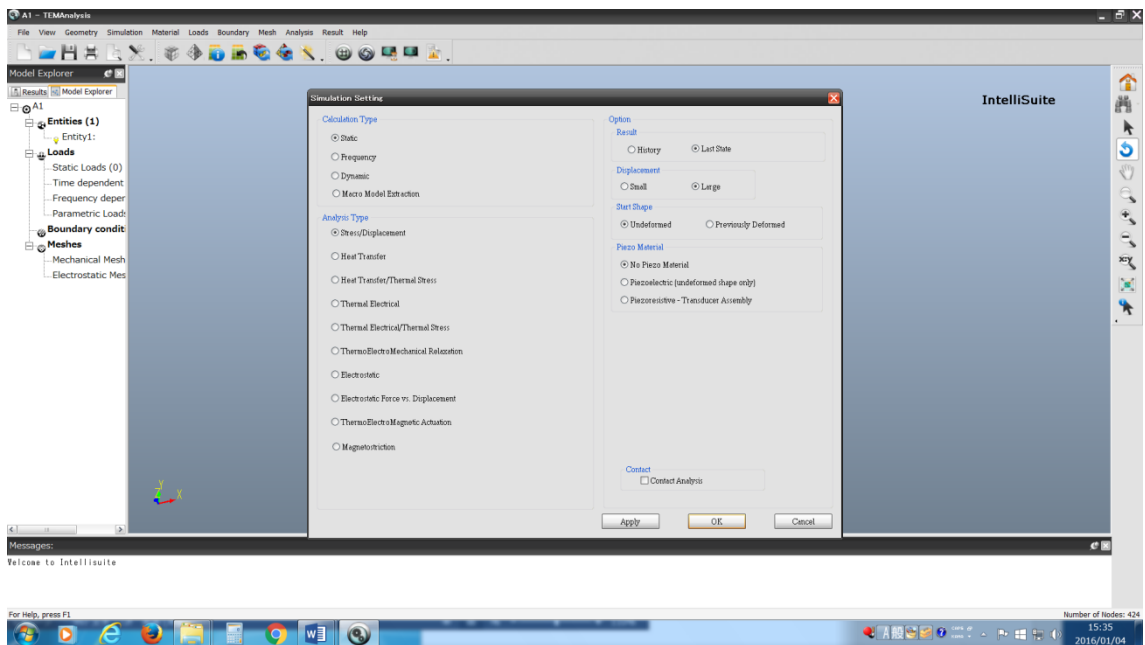


図 A.3 変位解析シミュレーション設定画面

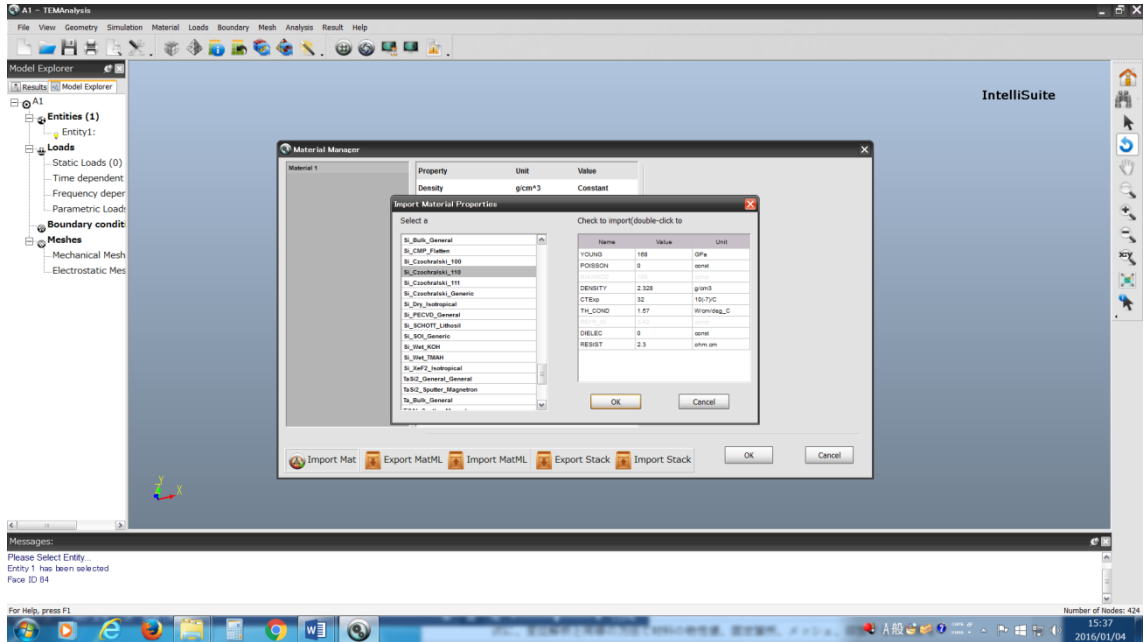


図 A.4 材料定義画面

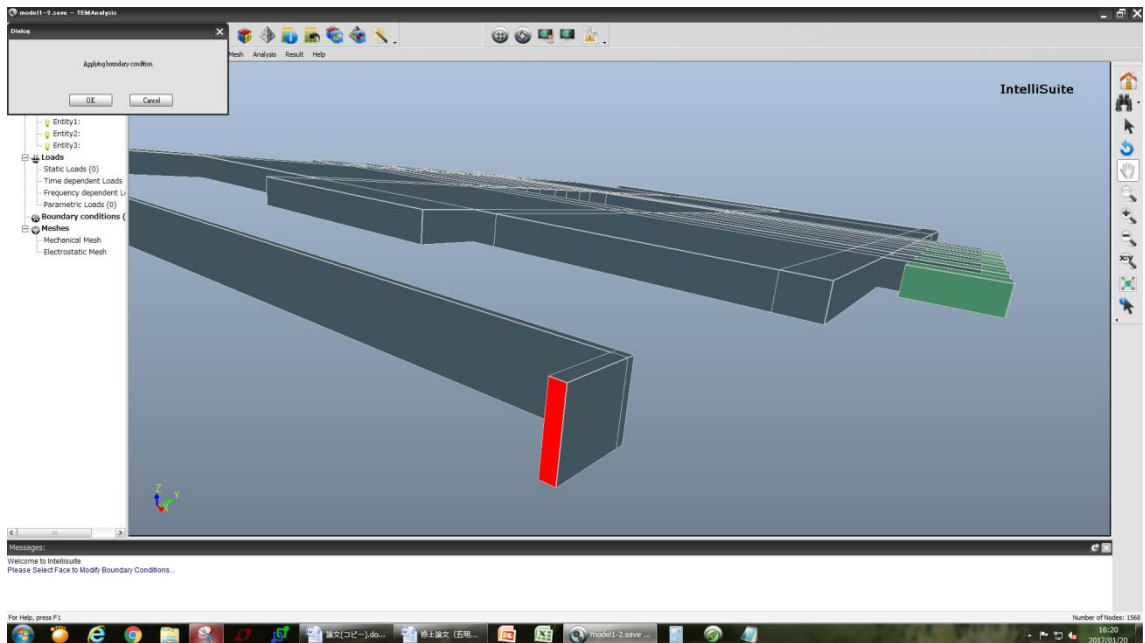


図 A.5 固定箇所選択画面

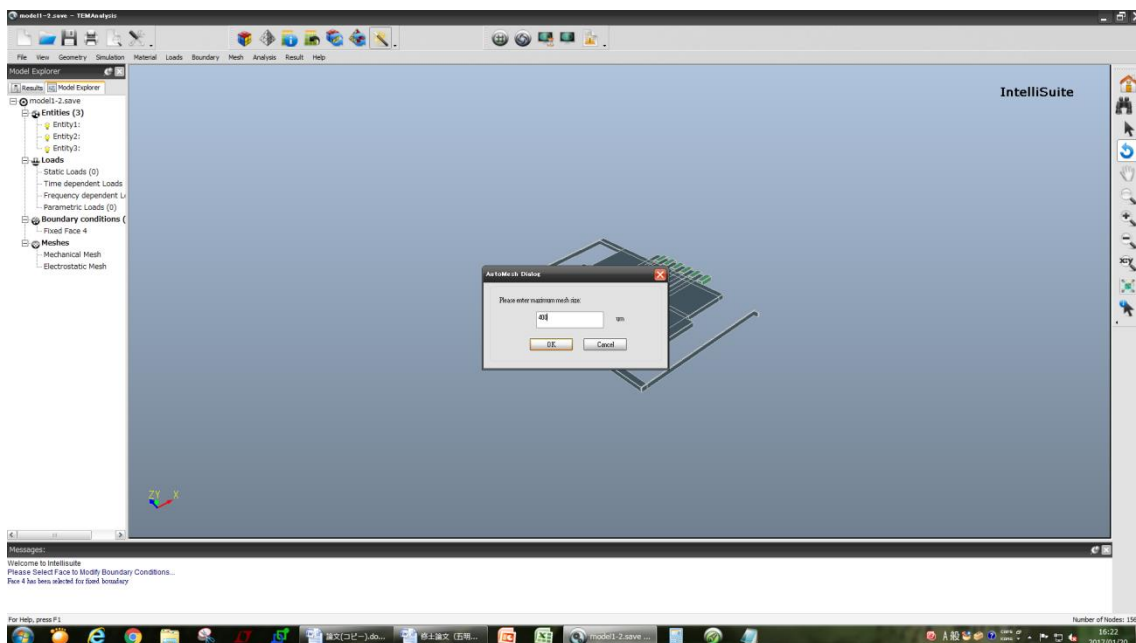


図 A.6 メッシュ入力画面

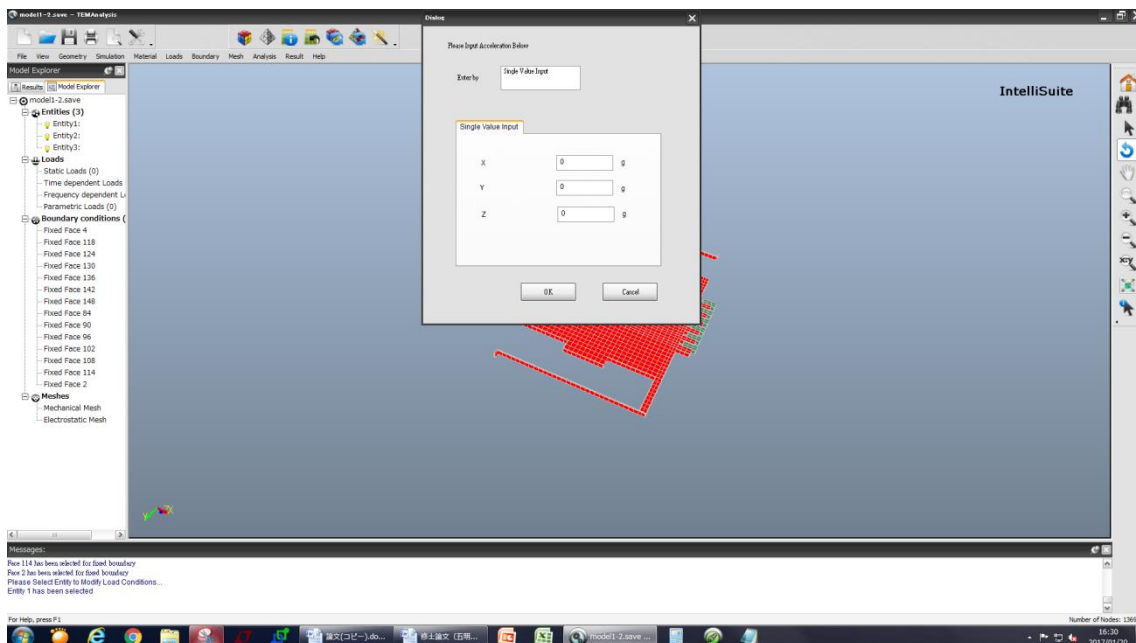


図 A.7 印加加速度定義画面

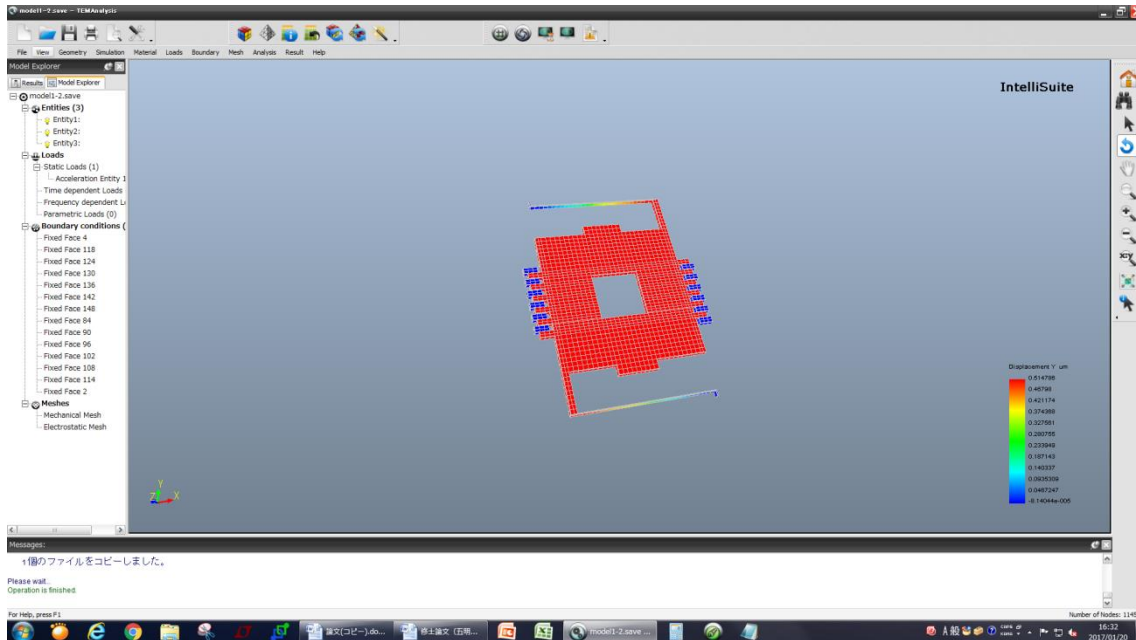


図 A.8 変位解析シミュレーション結果表示画面

③周波数解析(共振モード解析)

構造体の共振周波数を調べる為には、まず設定を入力する。メニューバーの「Simulation」から「Simulation Setting」を選択する。すると、「Simulation Setting」画面が現れるので、シミュレーションの設定を入力する。ここでは、「Calculation Type」の「Frequency」、「Analysis」の「Static Stress」、「Option」の「3」と「0」、「Displacement」の「Large」、「Start Shape」の「Undeformed」、「Piezo Material」の「No Piezo Material」を選択する(図 A.9)。

次に、変位解析と同様の方法で材料の物性値、固定箇所、メッシュ、印加する加速度、電圧を入力する。

ここで静電メッシュの入力の仕方を説明する。静電メッシュを切るにはメニューバーにある「Mesh」を押し、「Remove Elec_mesh」の「All」を押し、ショートカット、もしくはメニューバーにある「Mesh」の「Update Electrical Mesh」を押し。すると画面から構造が消える(図 A.10)。メニューバーの「Boundary」の「Fixed」を選択すると構造が表示される。構造が表示されたらメニューバーの「Mesh」の「Modify Electrical Mesh」の「Pick On Geometry」にチェックを入れる。チェックが入っているのを確認したら、メニューバーの「Mesh」の

「Group Surfaces for Elec_mesh」の「Pick first node」(図 A.11), 「Pick second node」(図 A.12) を選択し, 静電メッシュを切りたい範囲を対角線で選択する。選択できる点はすでに切られているメッシュの交点となる。静電メッシュの範囲を選択したら, メニューバーの「Mesh」の「Group Surfaces for Elec_mesh」の「Group Surfaces」を押す。すると Group Mesh Dialog 画面が表示される(図 A.13)。Factor N (0-30)は現在切られているメッシュを何倍細かく静電メッシュを切るかの数値で 4 を入力し, Element Number は静電を何倍掛けるかの数値。櫛歯構造が多くある場合などは数値を大きくする。今回は 1 のままにし「OK」を押す。赤く表示している所が, 静電メッシュが切られる場所となる(図 A.14)。確認が終わったらショートカット, もしくはメニューバーにある「Mesh」の「Update Electrical Mesh」を押す。作成した静電メッシュが表示される(図 A.15)。これで片側の櫛歯電極の静電メッシュが完了である。どのようにして[メニューバーの「Mesh」の「Modify Electrical Mesh」の「Pick On Geometry」にチェックを入れる。]所からもう一方の櫛歯電極に静電メッシュを切る。両方の櫛歯電極に静電メッシュを切れたら完了である。ここで注意したいのが, 櫛歯の青(もしくは緑)部分のみ静電メッシュを切ると上手く静電力がかからず正確な値が出ない。なので, 慣性質量に付いている櫛歯(グレー部分)も同様にして静電メッシュを必ず切ること。

構造に電圧を加えるときはメニューバーの「Loads」の「Voltage」の「Entity」を押し, 電圧を印加したい構造を選択する。選択をしたら Dialog が表示される。中央のタブの Single Value Input は定電圧を設定でき(図 A.16(a)), Input Value Range は範囲と間隔を設定できる(図 A.16(b))。

荷重を設定するときはメニューバーの「Loads」の「Acceleration」を押し, 加えたい構造を選択する。Dialog が表示されたら各軸に数値を入力する(図 A.17)。

全ての条件を入力したら, シミュレーションを開始する。メニューバーの「Analysis」から「Start Frequency Analysis」を選択すると, 解析が始まる(図 A.18)。終了後, 解析結果を見るにはメニューバーにある「Result」を押し, 出てきた一覧から知りたい結果の項目を選択する。定電圧の共振周波数を見る場合は「Natural Frequency」を選択する。各モードの共振周波数が表示される(図 A.19)。また, 各モードの動きを見たい場合は「Mode Animation」を選び, 見たいモード数と倍率を入力すれば動きをアニメーションで見ることが出来る。電圧を範囲で加えた場合は, 「2D Plot, Electromechanical Analysis」の「X Coordinate」(グラフの x 軸)の「Voltage」にチェックを入れ, 「Y Coordinate」(y 軸)の「Natural Frequency」を押す。Dialog が表示されるので見たいモードを選択し「OK」を押すとグラフが表示される。同様に, 電圧を範囲で加えた時に変位を見たい場合は, 「2D Plot, Electromechanical Analysis」の「X Coordinate」の「Voltage」にチェックを入れ, 「Y Coordinate」の「Y Displacement」(印加加速度と同じ方向に変位するので今回は Y 方向)を押す。すると, 変位のグラフが表示される。グラフの数値を細かく見る場合は, (マウスポインタをグラフの見たい点に持っていくと値が左下に表示されるが正確ではないので)グラフを保存し Wave Runner を立ち上げる。ショートカットもしくはメニューバーの「Chart」の「Import Data Source」を押し先ほど保存した

ファイルを選択し、「Add Chart」を押す。表示された Chart Template Dialog(図 A.20)の Y-signal の Mode (選択したモードが表示される) にチェックを入れ「OK」を押す。グラフが表示されたら「Show Data」を押すと Dialog が表示され各共振周波数を見ることができる(図 A.21)。

以上で周波数解析は完了である。

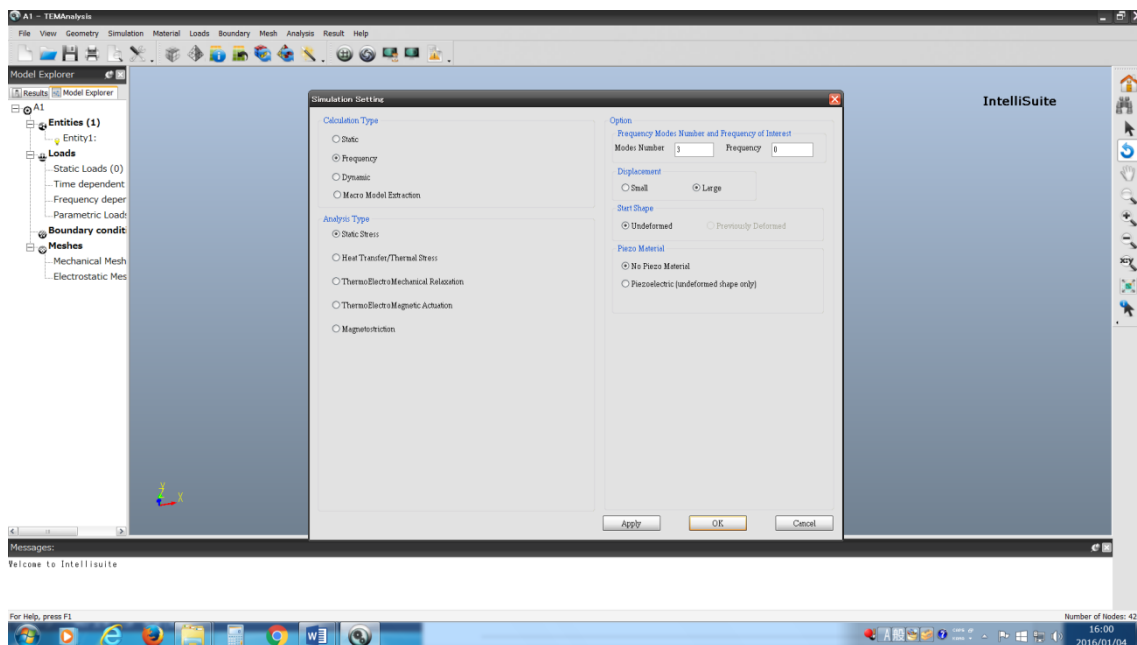


図 A.9 周波数解析シミュレーション設定画面

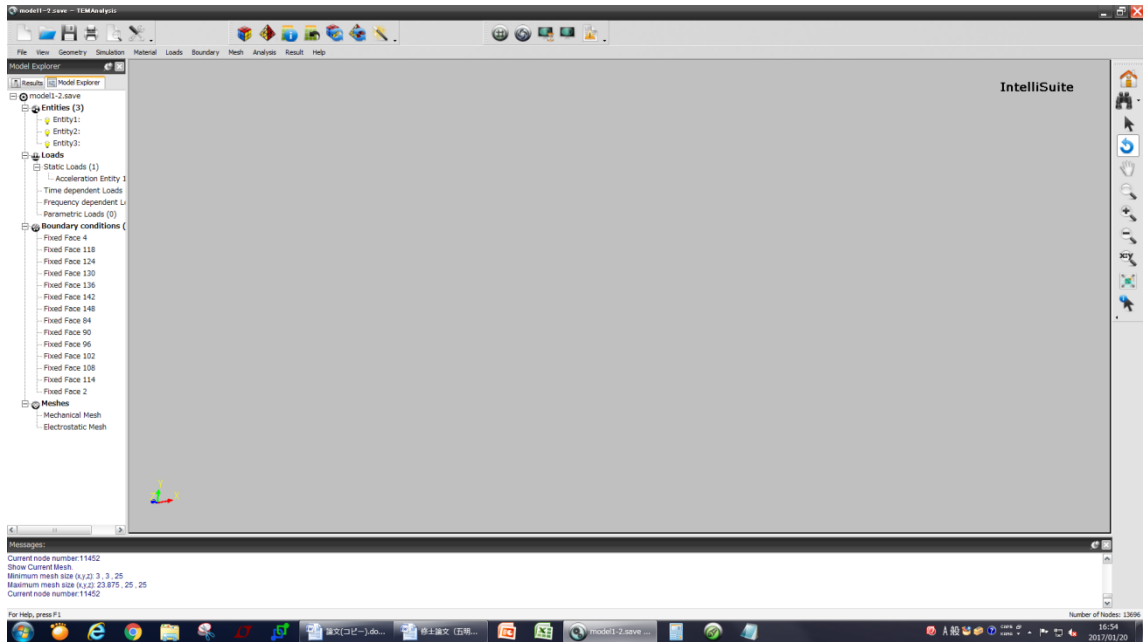


図 A.10 静電メッシュ All Remove Elec_mesh 画面

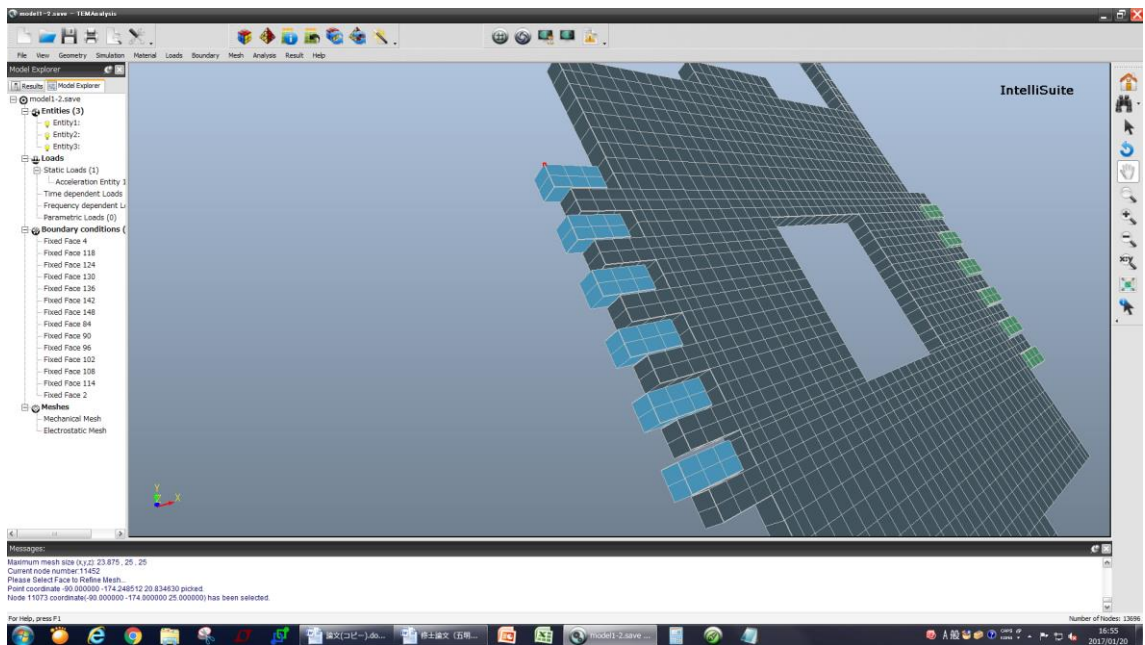


図 A.11 静電メッシュ Pick first node 選択画面

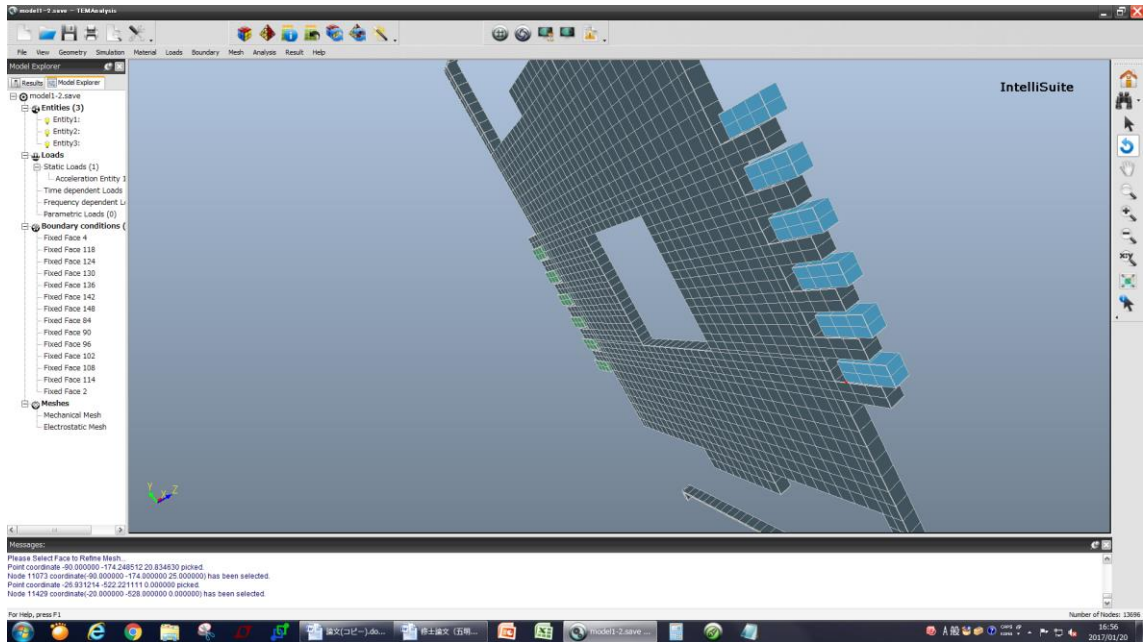


図 A.12 静電メッシュ Pick second node 選択画面

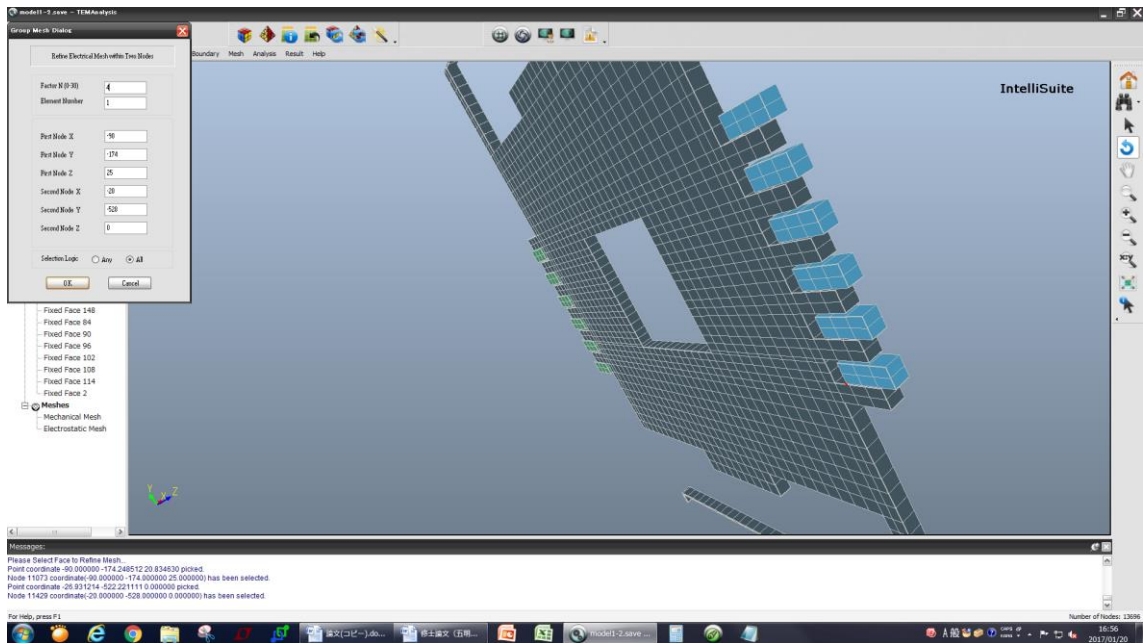


図 A.13 静電メッシュ Group Mesh Dialog 画面

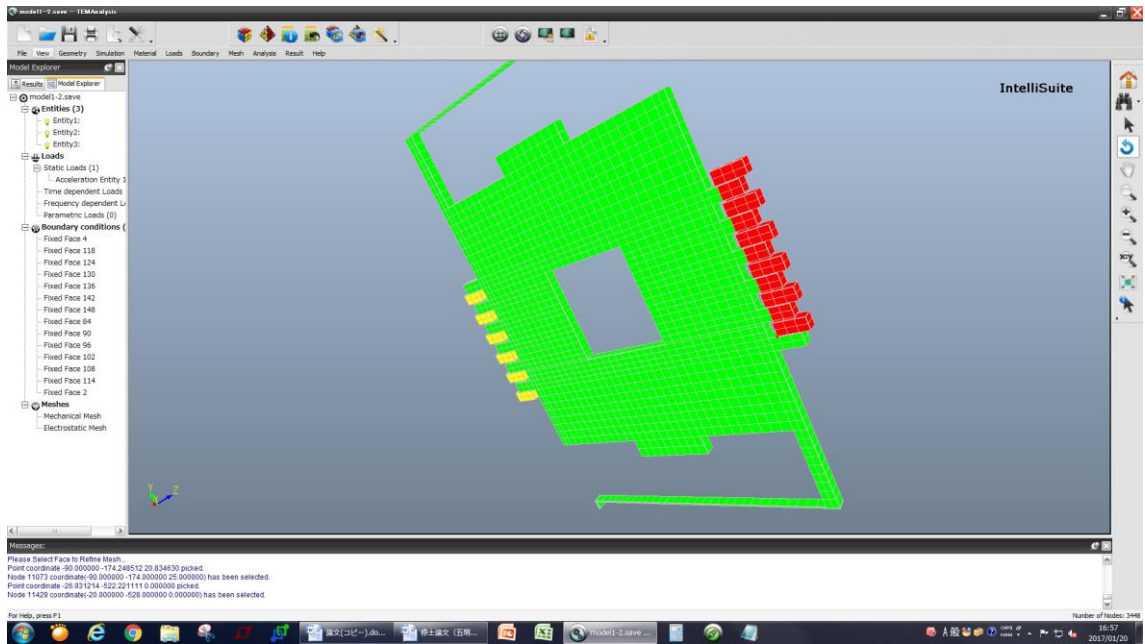


図 A.14 静電メッシュ範囲確認画面

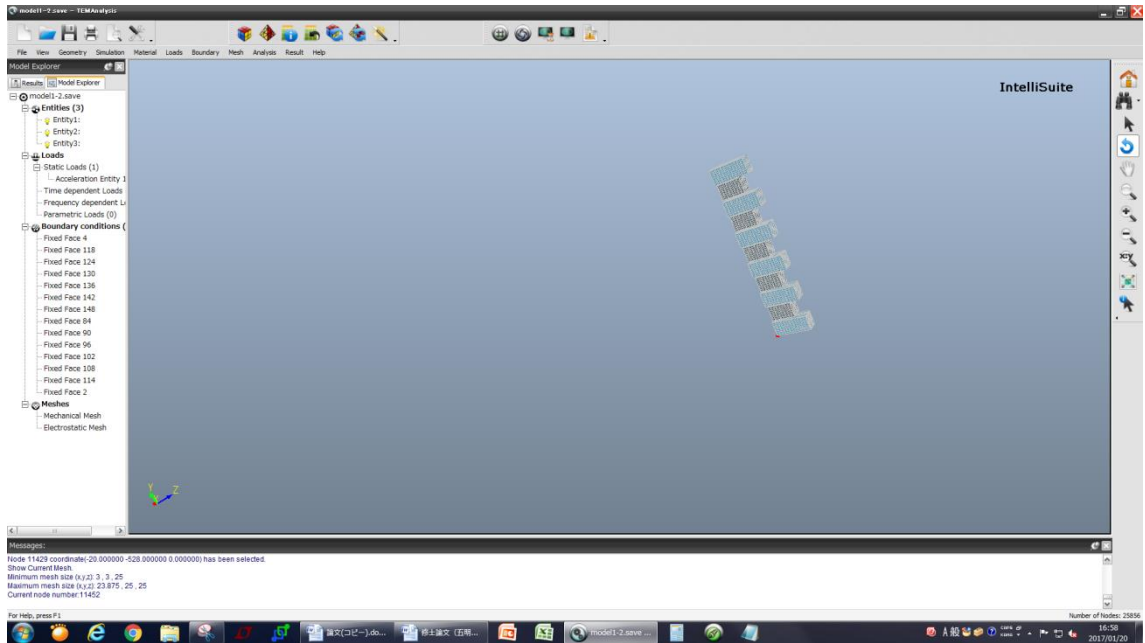
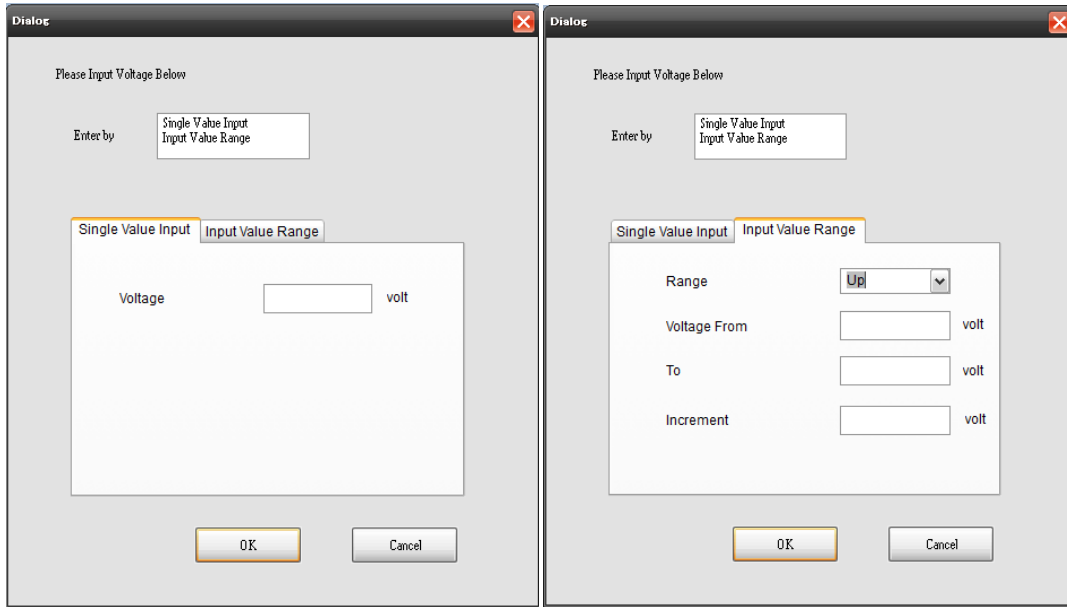


図 A.15 静電メッシュ完了（片側）画面



(a) 定電圧設定

(b) 範囲設定

図 A.16 電圧 Dialog 画面

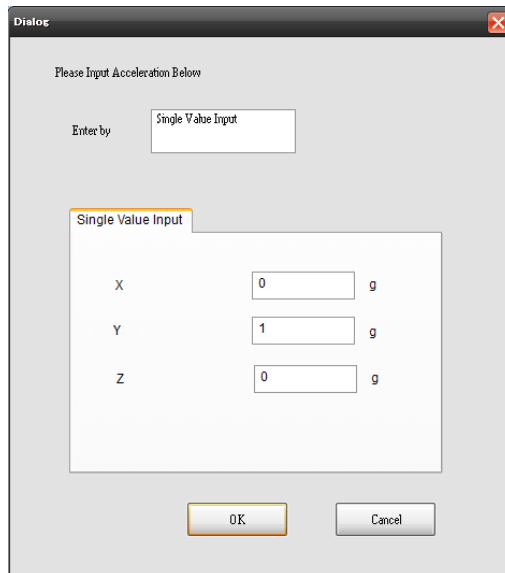


図 A.17 荷重 Dialog 画面

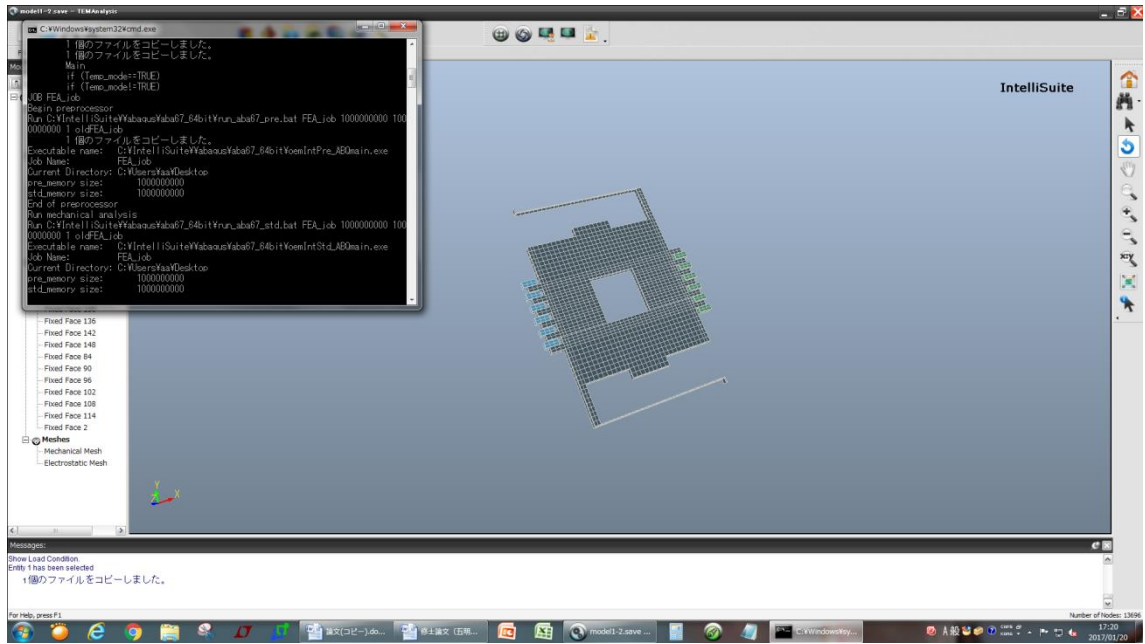


図 A.18 解析画面

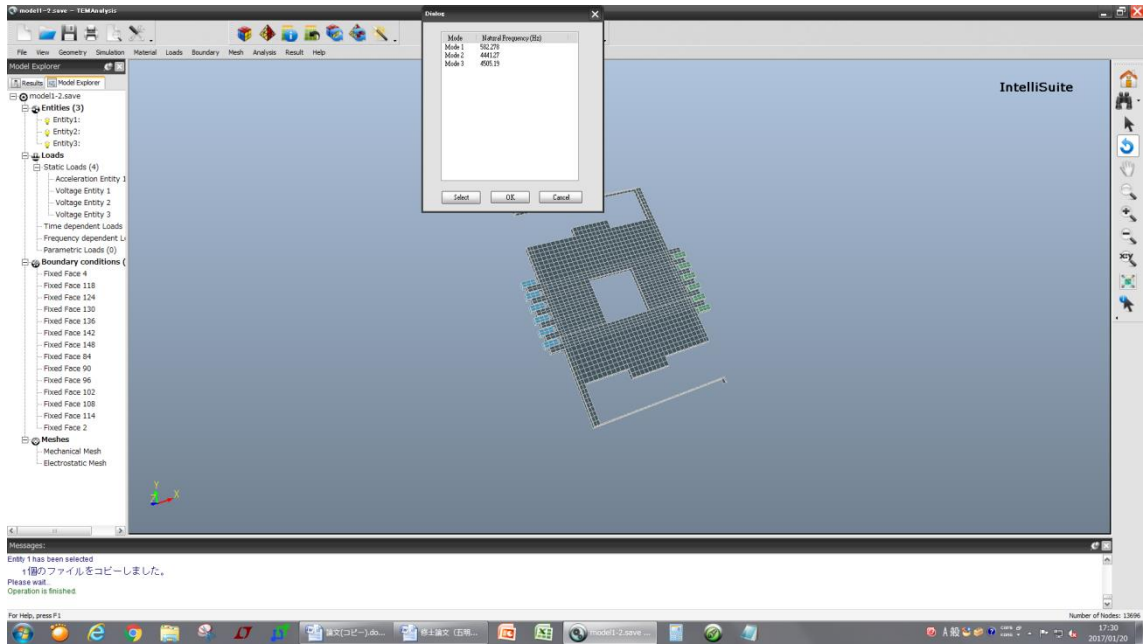


図 A.19 周波数解析シミュレーション結果表示画面

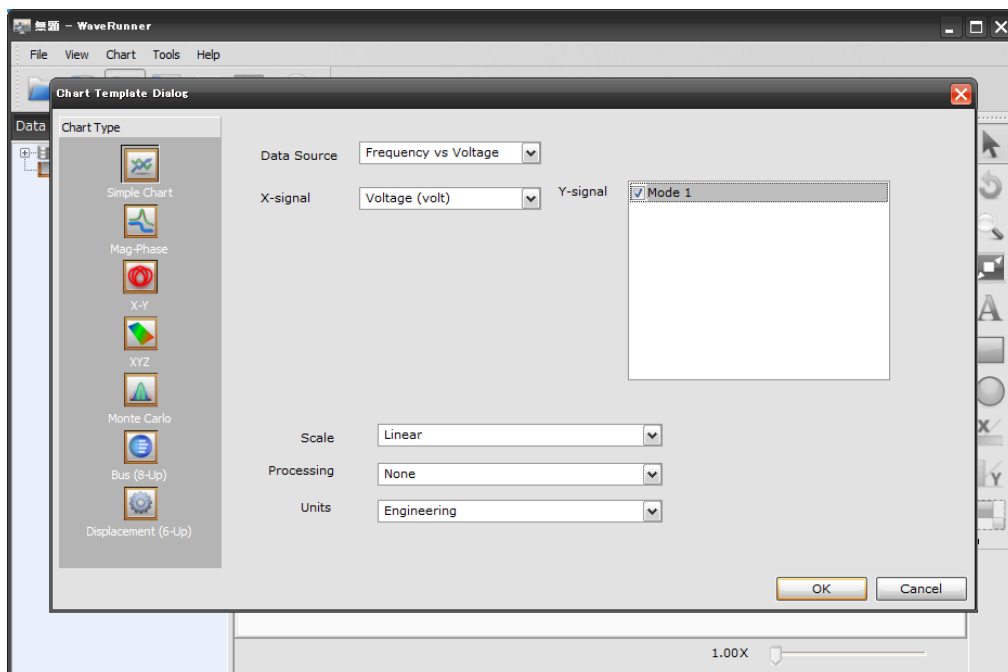


図 A.20 Chart Template Dialog 画面

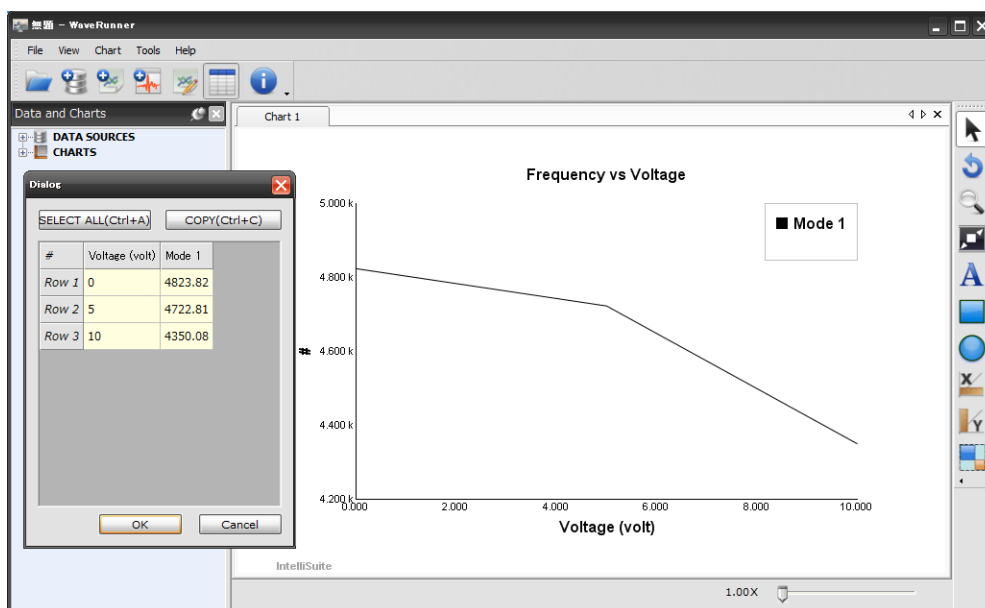


図 A.21 共振周波数確認画面

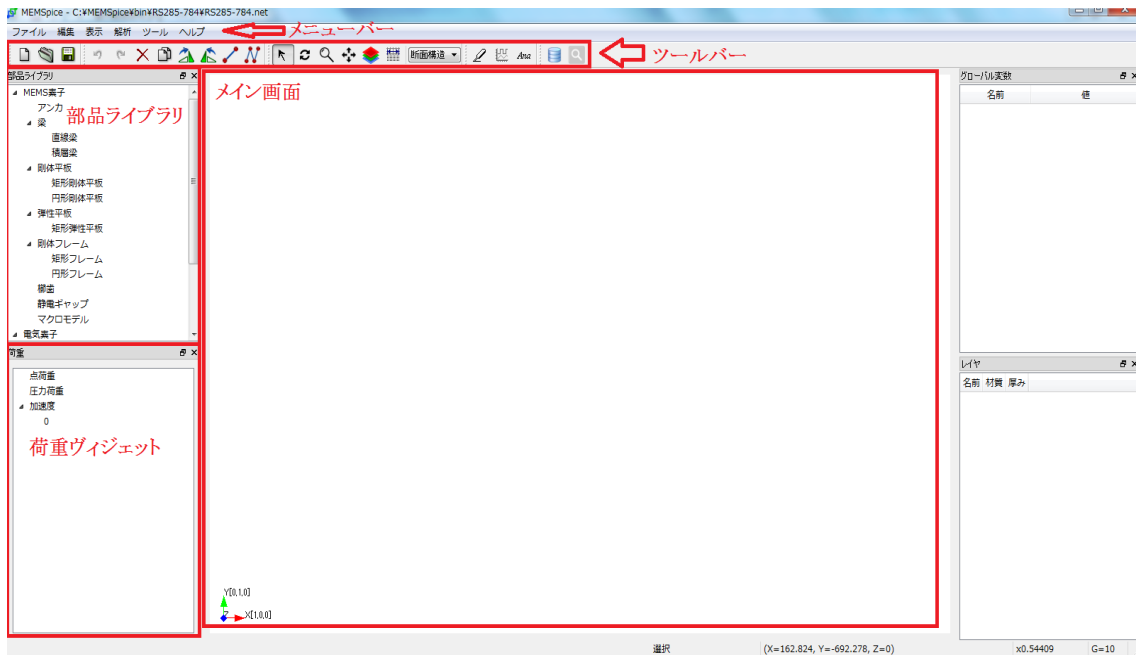
Appendix B シミュレーションソフト「MEMSpice」について

ここでは、「MEMSpice」において素子のシミュレーションにおける重要な動作について、共振周波数を計測する流れに沿って解説していく。

① 操作画面の構成

図1 に、操作画面全体を示す。

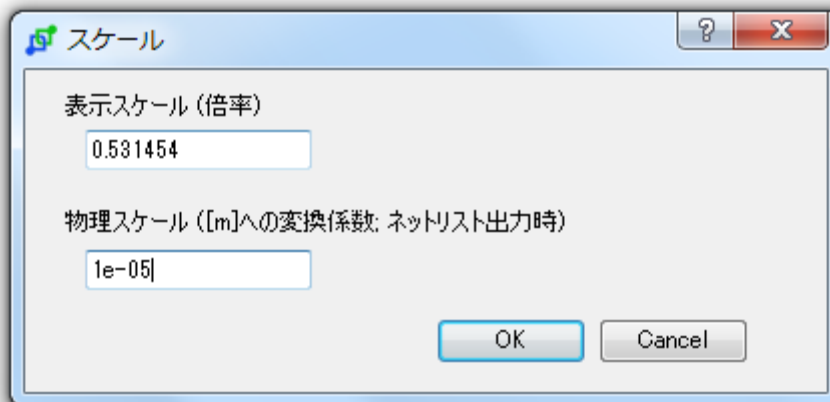
- 「メイン画面」上で、MEMS 素子や電気素子を配置し、モデルを作成する。
- MEMS 素子や電気素子は「部品ライブラリ」に並んでおり、それらの中から選んで「メイン画面」に配置する。
- モデル作成や解析に必要なコマンドは「ツールバー」に並んでいる（マウスカーソルをアイコンの上に置くと、コマンドの説明が表示される）。
 - ・実験における振動や圧力などの負荷は「荷重ウィジェット」内の項目から設定する。



図B.1 操作画面

② 物理スケールについて

「メニューバー」から「表示」-「スケール」を選択し、物理スケール値を変更します。デフォルトは「1e-05 (1 単位=10 μm)」。このスケール値は長さのみに関係するため、その影響を被る設定には注意を払うこと。

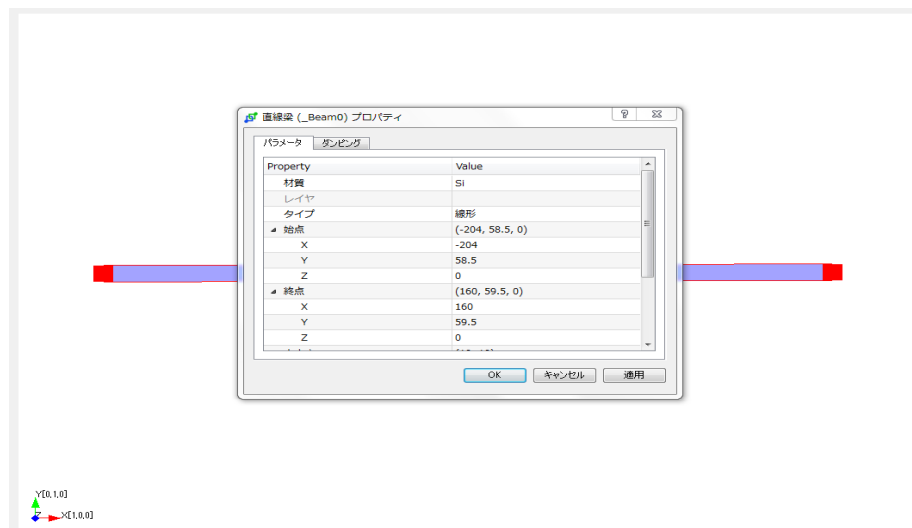


図B.2 スケールの設定画面

③ 直線梁の配置

「部品ライブラリ」から「直線梁」を選択する。マウスを左押ししながらドラッグし、終点でリリースすることによって直線梁を作成する。

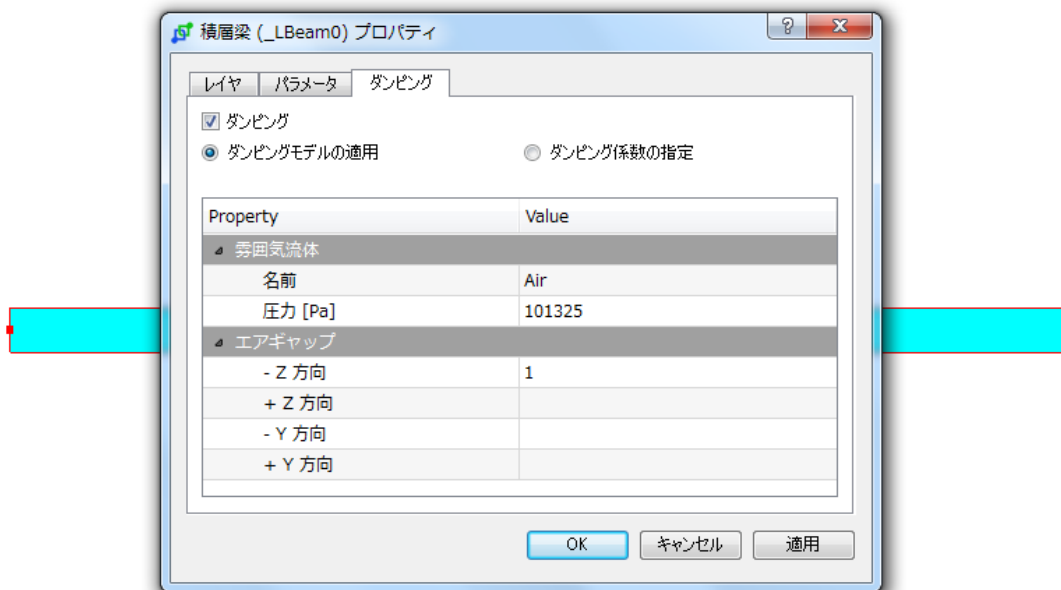
梁の上で右クリックし「プロパティ」を押下すると、「プロパティ」ダイアログが表示される。このダイアログ上で、自分がシミュレーションしたい直線梁の厚み、幅、材質、分極方向を指定していく。



図B.3 直線梁の「プロパティ」ダイアログ

また、MEMSpiceにて「圧電膜」として取り扱われるためには材料データベースにおいて「指定した材質の「圧電定数」が設定されている」と「金属の膜に挟まれている」の二つの条件を満たす必要があり、特に後者は設定し忘れるとシミュレーションを開始することができないため注意が必要である。

レイヤの指定が終わったら、空気摩擦による抵抗力を設定するため「ダンピング」をクリックする。今回はカンチレバーの直下 $10\mu\text{m}$ の位置に基板面があり、雰囲気気圧力は1気圧(101325 Pa)と仮定した画像を添付する。完了したら「OK」を押下する。



図B.4 ダンピングの設定

梁の左端を固定するために部品ライブラリから「アンカ」を選択して、左端に位置する機械節点を覆うように、マウスのプッシュ&ドラッグを用いてアンカを配置する。これで片持ち梁が形成される。



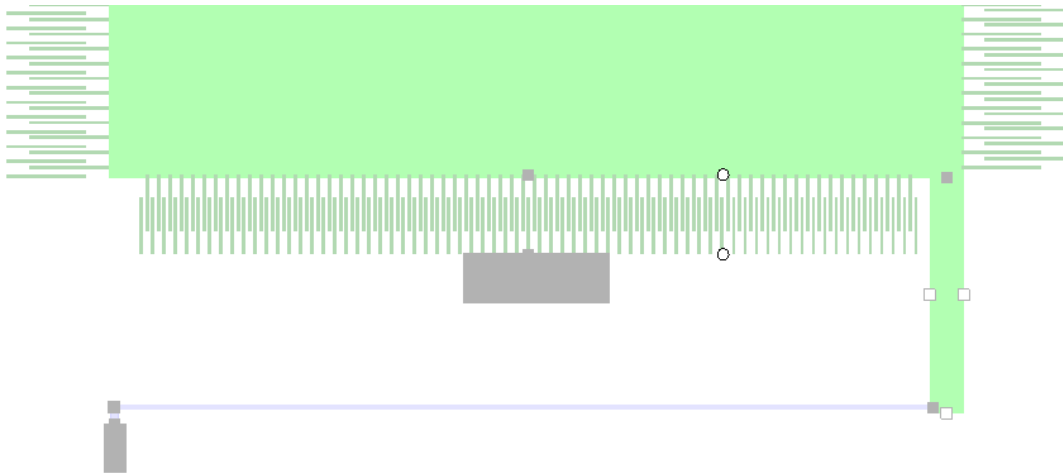
図B.5 アンカの設定

片持ち梁の表示位置を中央に調整したいときは、右クリックをして「自動スケール」を選択する。

④ 接地の配置

シミュレーションを行う際には、電圧の基準(ゼロV)の節点を指定しておく必要がある。

「ツールバー」の「表示モード切替え」コンボボックスをクリックし「断面構造」から「電子回路」に変更する。すると電気節点(o)が表示されるようになる。ツールバーの「拡大」ボタンを押下したのち中央の電気接点にマウскарソルを移動させ、マウスの左ボタンをプッシュしながら上にドラッグ動作をしてズームする。

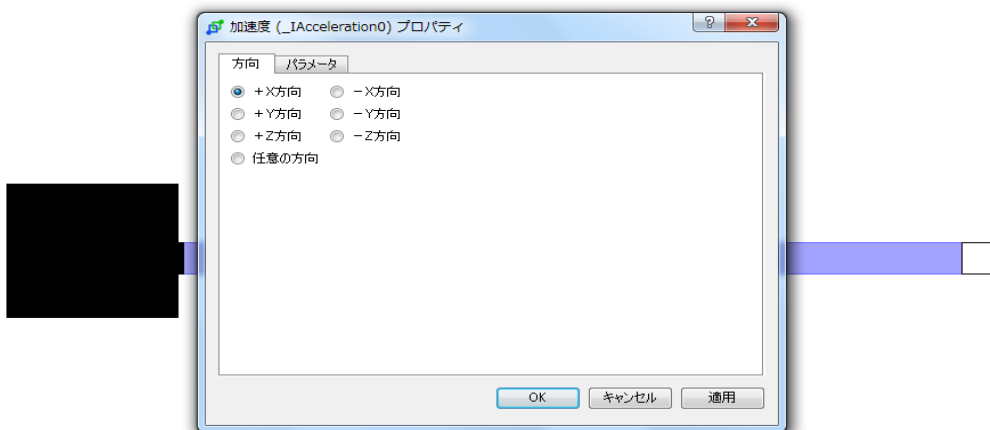


図B.6 モデル1の楕歯電極の電気接点

⑤ 振動加速度の設定

「荷重」ウィジェット上で、「加速度」を選択し、右クリック。その後、「追加」を押下すると「プロパティ」ダイアログが表示される。「方向」タブでは任意の加速度方向を設定する。「パラメータ」タブを押下する。そして振幅 1G の正弦波状の加速度を与えるため、以下のように設定を行う。

□最後に「OK」ボタンを押下する。



図B.7 加速度の「プロパティ」ダイアログ

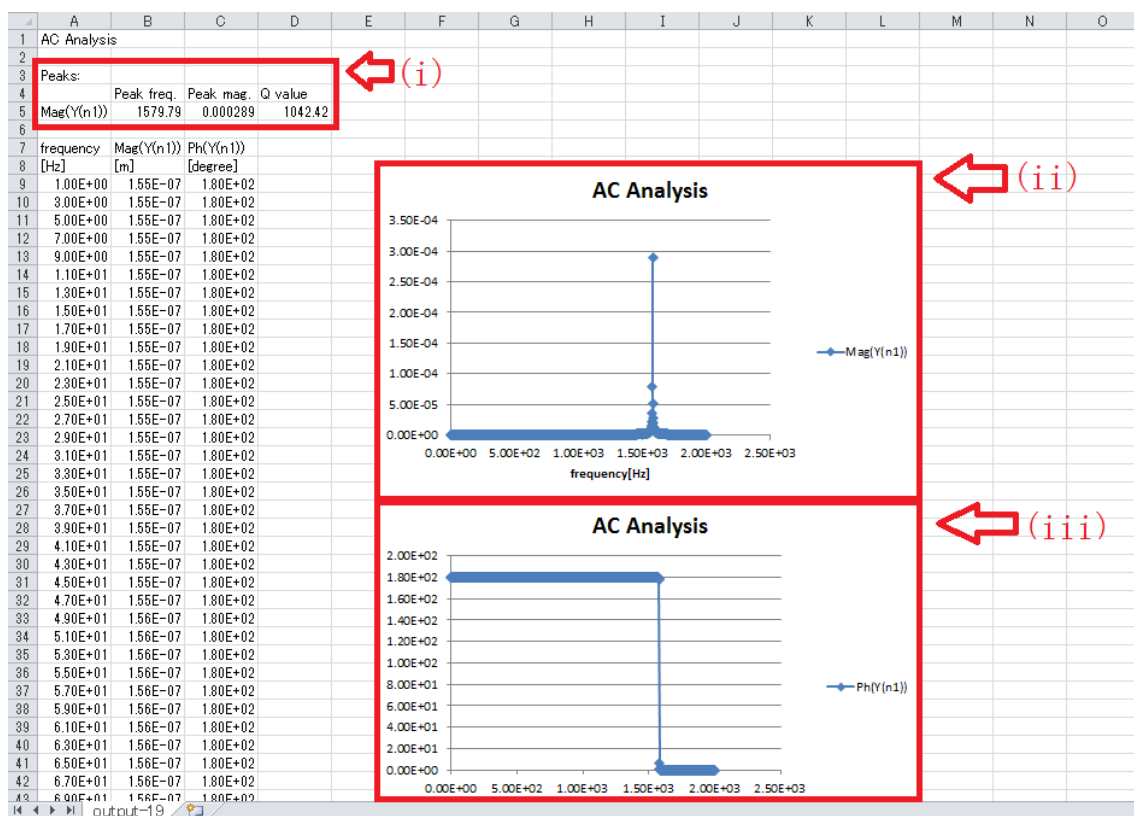
⑥ シミュレーション

「ツールバー」の「解析条件」をクリックし、コンボボックスを「交流小信号解析(AC.)」に設定。点の数は多いほど処理に時間がかかる。開始～終了周波数は、自分がシミュレーションしたい範囲を入力する。設定が終わったら「解析実行」をクリックする。

解析が終了すると「グラフデータの選択」ダイアログが表示される。ここでは「共振周波数」のみを確認するため、加速度の印加した方向に合わせて「変位Y[Y(n1)]」にチェックを入れて「OK」を押下する。

表示されるExcelの表やデータについて(図8)

- (i) ピーク情報 (周波数, 振幅, Q 値)
- (ii) 「周波数」と「両持ち梁の中央部の振動振幅」の関係のグラフ
- (iii) 「周波数」と「位相」の関係のグラフ



図B.8 解析後に出力されるグラフ

Appendix C 静電容量型センサの評価回路のレイアウト

図 C.1 に本研究で使用した評価回路のレイアウト図を示す。評価回路に使用したオペアンプ OP491 の詳細は Appendix C に示す。

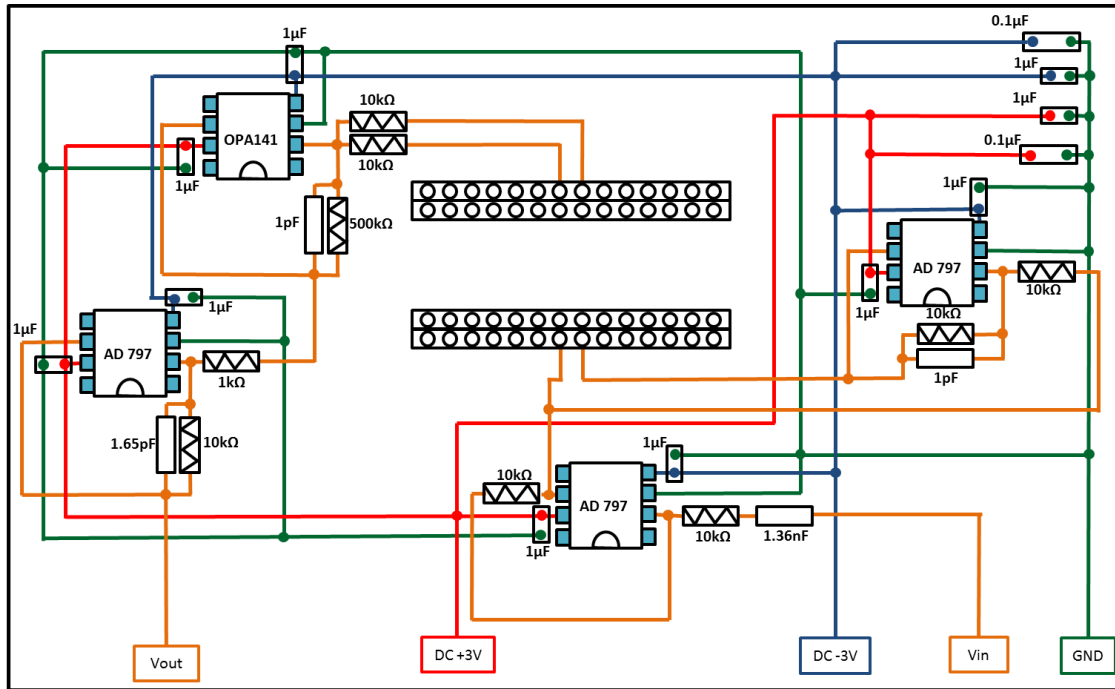



図 C.1 評価回路レイアウト

Appendix D ICについて

本実験で使用した IC (AD797) について以下に説明する。



Ultralow Distortion, Ultralow Noise Op Amp

AD797

FEATURES

- Low noise
- 0.9 nV/√Hz typical (1.2 nV/√Hz maximum) input voltage noise at 1 kHz
- 50 nV p-p input voltage noise, 0.1 Hz to 10 Hz
- Low distortion
- 120 dB total harmonic distortion at 20 kHz
- Excellent ac characteristics
- 800 ns settling time to 16 bits (10 V step)
- 110 MHz gain bandwidth (G = 1000)
- 8 MHz bandwidth (G = 10)
- 280 kHz full power bandwidth at 20 V p-p
- 20 V/μs slew rate
- Excellent dc precision
- 80 μV maximum input offset voltage
- 1.0 μV/°C V_{OS} drift
- Specified for ±5 V and ±15 V power supplies
- High output drive current of 50 mA

APPLICATIONS

- Professional audio preamplifiers
- IR, CCD, and sonar imaging systems
- Spectrum analyzers
- Ultrasound preamplifiers
- Seismic detectors
- Σ-Δ ADC/DAC buffers

PIN CONFIGURATION

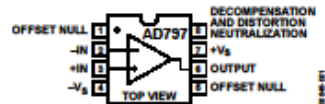


Figure 1. 8-Lead Plastic Dual-In-Line Package [PDIP] and 8-Lead Standard Small Outline Package [SOIC]

GENERAL DESCRIPTION

The AD797 is a very low noise, low distortion operational amplifier ideal for use as a preamplifier. The low noise of 0.9 nV/√Hz and low total harmonic distortion of -120 dB at audio bandwidths give the AD797 the wide dynamic range necessary for preamps in microphones and mixing consoles.

Furthermore, the AD797's excellent slew rate of 20 V/μs and 110 MHz gain bandwidth make it highly suitable for low frequency ultrasound applications.

The AD797 is also useful in infrared (IR) and sonar imaging applications, where the widest dynamic range is necessary. The low distortion and 16-bit settling time of the AD797 make it ideal for buffering the inputs to Σ-Δ ADCs or the outputs of high resolution DACs, especially when the device is used in critical applications such as seismic detection or in spectrum analyzers. Key features such as a 50 mA output current drive and the specified power supply voltage range of ±5 V to ±15 V make the AD797 an excellent general-purpose amplifier.

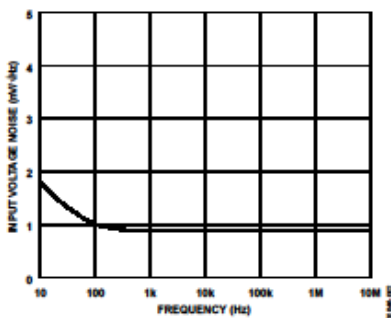


Figure 2. AD797 Voltage Noise Spectral Density

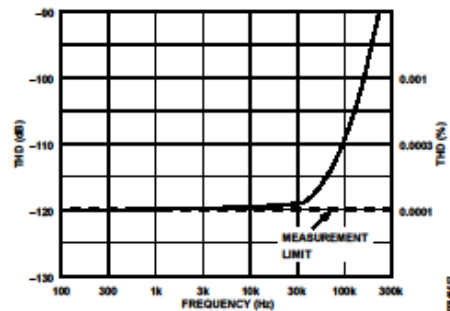


Figure 3. THD vs. Frequency

Rev. G
Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
Tel: 781.329.4700 www.analog.com
Fax: 781.461.3113 ©2008 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

Appendix E IC ソケット (DIP28 セラミックパッケージ) の電路

位置関係

IC ソケット (DIP28 セラミックパッケージ) の電路位置関係を図 E.1 に示す。プロトタイプデバイスモデルの実装はこの電路位置関係を参考に行った。

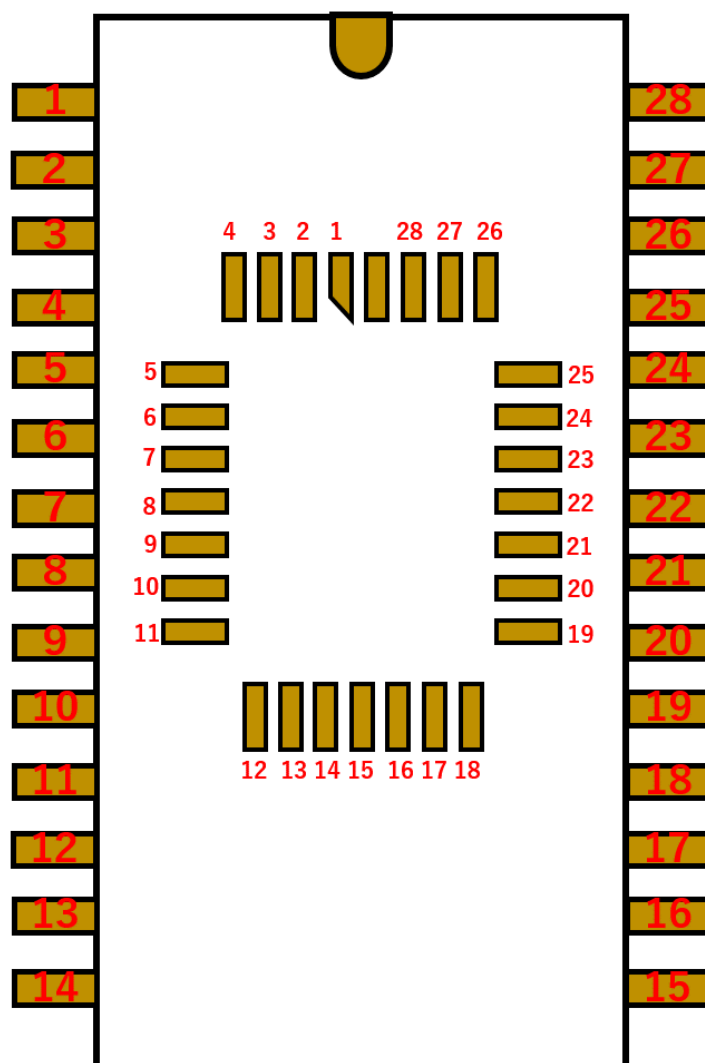


図 E.1 ソケット電路位置関係図

Appendix F 回転ステージのプログラマの使い方について

- 1.D200GPIB_VB2005__J を開く。
- 2.D200Control GPIB.sln を開く。
- 3.デバックを押す。

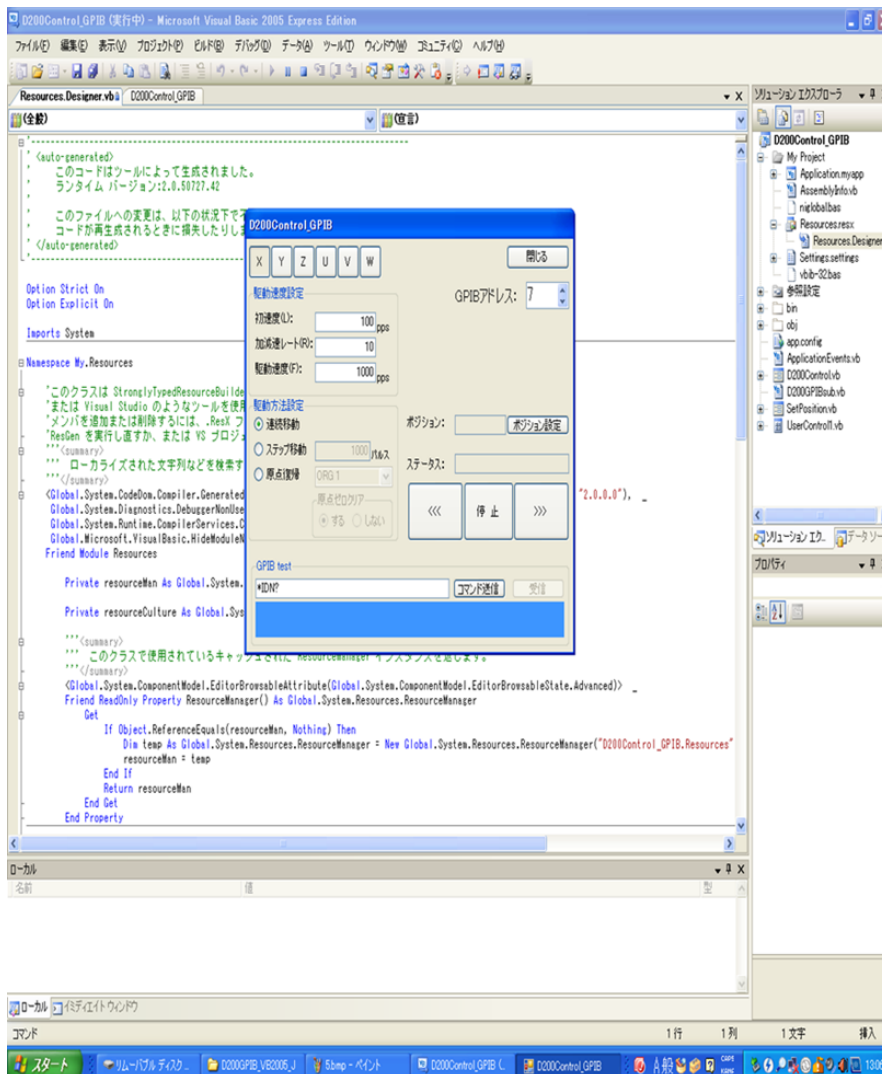


図 F.1 回転ステージのセットアップ

4.図 F.1 のような画面になる。右下の→ボタンを押すと右回転し，←のボタンを押すと左回転する。

5.駆動速度を大きくすると，速く回転し，逆に小さくすると遅く回転する。本実験では主に 2000pps で測定を行った

6.ステップ移動は角度を設定できる。本実験では，15°ずつ動かしたので，4000 パルスに設定した。

Appendix G ワイヤーボンディング方法

ワイヤーボンディングの主な流れ

1, パッケージをホルダにセットし, "MAIN"のスイッチを入れる
2, ワイヤーを通して"LIGHT"と"WIRE CLAMP"のスイッチを入れる
3, 第一ボンド点にボンドする
4, 第二ボンド点にボンドする
5, 3と4を繰り返し, ボンディングする。

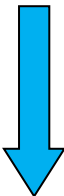


図 G.1 に超音波ワイヤーボンダの外観図を示す。

- 1, パッケージをホルダにセットし, "MAIN"のスイッチを入れる。
- 2, ワイヤーを通して"LIGHT"と"WIRE CLAMP"のスイッチを入れる。
- 3, 第一ボンド点にボンドする。
 - a, 顕微鏡の焦点を合わせる。
 - b, ポジシヨナノブの押ボタンを操作して, ワークを回転させ, ボンディングすべき点が第一ボンドを前方, 第二ボタンを後方として振動子ホーン軸心と並行に並ぶようにする。
 - c, フットスイッチを踏み, そのままに保つとツールは第一サーチレベルに下って停止する。ポジシヨナノブを操作して第一ボンド点をツールの下に位置決めしてフットスイッチをもどすと, ツールは更に下がってワイヤーを第一ボンド点に押し付けると共に超音波振動を加えボンディングする。
- 4, 第二ボンド点にボンドする。
 - a, 第一ボンドを終るとツールは第二トップまで上って停止する。
 - b, 再びフットスイッチを踏み, そのままに保つとツールは第二サーチレベルに移行する。
 - c, ポジシヨナノブを前方に引くとワークが前方に移動し, その結果ワイヤーがスプールから引出される。
 - d, ポジシヨナノブを操作して第二ボンド点をツールの下に位置決めして, フットスイッチをツールにもどすと, ツールは再び下って第二ボンドを行う。
 - e, 第二ボンドを終るとワイヤークランプが閉じ, ワイヤーをクランプして後方に引き, この結果ワイヤーはツールのかかとの位置でカットされる。この後ツールは上昇して最初のトップの位置に戻り, その間に次のボンディングのためにワイヤーが繰り出される。以上によりサイクルが完了する。

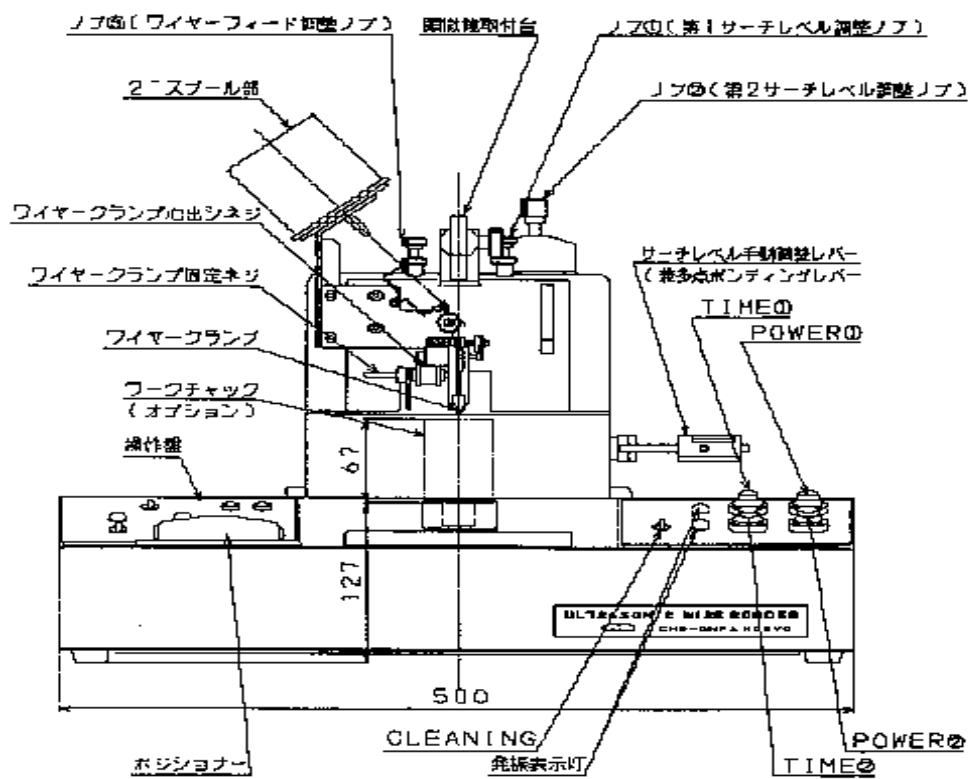


図 G.1 超音波ワイヤーボンダ 外観図

ボンディング条件の設定

加圧力、超音波出力および発振時間の各条件は実験によって定めるが、最適条件の判定は、ボンディング後ワイヤーを垂直上方に静かに引っ張る接合強度試験に多くのボンディングについて行い変形が出来るだけ小さく接合部に隣接する位置(ネック)でワイヤーが切断するような状態を目安とする。

Appendix H 加速度ピックアップの取り付け方法

本研究では接着剤で加速度ピックアップを振動台に取り付ける方法にした。加速度ピックアップを測定対象に取り付ける場合、接触共振という問題がある。加速度ピックアップをマグネットベース、両面テープ、接着剤、ネジ固定などで取り付け、測定対象を基準に加速度ピックアップの出力を見ると、加速度ピックアップ単体の周波数特性と同じ様な周波数特性が選られるが、共振周波数はその取り付け方によりかなり差が生じる場合がある。一般的にはネジ固定、接着剤、マグネットベース、両面テープの順に加速度ピックアップの特性が悪くなる。高い周波数を測定するには加速度ピックアップの取り付けには十分注意が必要である。測定対象と一体で動くことが加速度ピックアップ取り付けの基本になる。

ネジ固定による取り付け方法

加速度ピックアップの最良の取り付け方法は、推奨のネジ固定取り付けを用いることである。ネジによる取り付け方法は、他の方法よりも高い振動伝達率をもたらす。加速度ピックアップは試験構造物の表面とセンサのベース全体が密着するように、規定されたスタッドまたはネジで固定する。取り付けネジは適切な長さで、加速度ピックアップ内側のネジの"Bottoming"（応力に起因する誤差）を防ぐためにフランジと一体化されているものを選択する。取り付けには、再現性の確保とネジの損傷を防ぐためトルクレンチを使用する。接着剤による取り付け方法多くの小型加速度ピックアップは接着剤でしか測定対象物に固定することがある。接着剤が与えるスティフネスが測定性能に影響を与える。接着剤は、通常のネジ固定と同様の強固さは得られない。測定対象部と加速度ピックアップ間での粘性接続が減れば、伝達率は高くなる。取り外す時には溶剤によって接着剤を軟化させてずらすように軽く力を与えて取り外す。小型加速度ピックアップの損傷のほとんどは不適切な取り外しの方法によるものである。

マグネットベースによる取り付け方法

マグネットベースは工業振動測定において一般的に用いられ、測定ポイントを移動するような測定をすばやく行うことができる。ほとんどのマグネットベースは重く、数百 Hz 以下の低い周波数の測定にしか使用できない。工業用に設計された、より重いタイプを用いた場合、周波数応答の悪化は明らかになる。マグネットベースを使用する場合、マグネットベースと加速度ピックアップ及び取り付けている構造物との間の磁力によって、予期しない高レベルの入力が加速度ピックアップに加えて内部電子回路に影響を及ぼす恐れがある。