

学位論文

3次元微細構造体の創成加工
に関する研究

主指導教員 楠川量啓
副指導教員 河田耕一 成沢 忠
井上喜雄 松井 敏

2007年 6月15日

大学院 工学研究科
基盤工学コース 基盤工学専攻
学籍番号 1036004

佐藤健夫

3次元微細構造体の創成加工に関する研究 目次

第1章 緒言	……1
1.1 はじめに	……1
1.2 本研究の必要性と位置づけ	……1
1.3 3次元微細加工の現状	……3
1.4 本研究の概要	……7
第2章 マイクロ放電加工による微細形状創成の研究	……9
・要旨	……10
2.1 マイクロ放電加工の原理	……10
2.2 マイクロ放電加工用電極	……13
2.3 マイクロ放電加工による形状創成	……15
2.4 5軸NCマイクロ放電加工機による複合形状加工	……22
2.5 結論	……24
第3章 電解・ポリシ複合加工による表面仕上げの研究	……25
・要旨	……26
3.1 電解・ポリシ複合加工の原理	……26
3.2 電解加工と複合加工の比較	……27
3.3 電解・ポリシ複合加工の加工特性	……28
3.4 形状精度と仕上げ面精度	……30
3.5 放電・電解複合加工機による高度仕上げ加工	……31
3.6 結論	……34
第4章 立体円筒MEMSプロセス加工によるマイクロウォブル モータの研究	……35
・要旨	……36
4.1 静電ウォブルモータの駆動原理	……36
4.2 従来のウォブルモータの加工技術とその特徴	……38
4.3 マイクロウォブルモータの立体MEMS加工プロセス	……39
4.4 マイクロウォブルモータの評価技術	……46
4.5 結論	……55

第5章 平面MEMSプロセスによる振動型加速度センサの研究	58
・要旨	59
5.1 振動型加速度センサの位置づけ	59
5.2 振動型加速度センサの原理および構造検討	59
5.3 振動型加速度センサの特性解析	61
5.4 拡大モデルによる原理検証	68
5.5 20倍モデルの製作と評価	83
5.6 拡大モデルのまとめ	93
5.7 平面MEMSプロセスによる振動型加速度センサの基礎検討	94
5.8 平面MEMSプロセスによる振動型加速度センサの製作と評価	106
5.9 結論	123
第6章 結言	126
6.1 マイクロ放電加工による微細形状創成の研究のまとめ	127
6.2 電解・ポリシ複合加工による表面仕上げの研究のまとめ	127
6.3 立体円筒MEMESプロセス加工による静電マイクロ ウォブルモータの研究のまとめ	128
6.4 平面MEMSプロセスによる振動型加速度センサの研究のまとめ	128
6.5 おわりに	130
・研究論文・報文、学会講演、研究会講演リスト	131
・特許リスト	136
・謝辞	137

第1章 緒言

1.1 はじめに

エレクトロニクス製品では、半導体技術を初めとする加工プロセス技術の進展によって、小型化と高集積化が急速に進んでいる。一方メカニズムを主体とした製品においては小型化の方向を目指しているとはいえ、その進展は革新的ではなかった。しかしながら、半導体プロセスを用いてシリコン基板上にリンク機構¹⁾や、静電モータ²⁾が作られたことを契機として、革新的な小型機械、いわゆるMEMS (Micro Electro-Mechanical System)の研究が多方面で行われてきた。

半導体プロセスによるMEMS製作は、駆動回路の同時作りこみが可能で、量産性にも優れるが、反面、露光プロセスを経るため、薄厚加工にとどまり、3次元的な加工、あるいは血管内に入るような細長い機構を加工することは困難である。

一方、放電加工は、量産性は半導体プロセスに劣るものの、放電エネルギーを微小化することによって、サブミクロンオーダの仕上げ面あらし、母性原理に基づいた高い形状寸法で微細形状を加工することが可能であり、金属を中心としたMEMSデバイスの製作では有力な技術³⁾となっている。

この2つの異なる加工方法の長所を融合させ、形状精度、仕上げ面粗さ、剛性の高い3次元微細構造体の創成加工について、マイクロウォブルモータ、加速度センサなどのMEMSデバイスの製作を通じ、実用性の考察を行いながら研究を行った。

1.2 本研究の必要性和位置づけ

図1-1に示すように、マイクロな機構部品 / デバイスに対する加工技術には2つの開発トレンドがあると考えられる。

1つは右上の領域に示すような汎用加工技術の高精度・微細化によるアプローチであり、ダウンサイジングによりミリからサブミリにかけての機構部品やデバイスの実現をはかろうとするものである。例えば図中右上に示した腕時計に組み込まれたセイコー社製マイクロ発電機などがその代表である。

もう1つは左下の領域に示した半導体製造技術をベースとした数百 μm 以下のマイクロセンサに代表される高集積、多機能なデバイスを実現する加工技術開発である。具体的な事例としては、図中、中央下に示した高輝度型のプロジェクタに使用されているTI社製のDMD (Digital Mirror Device: アレー状に配された $15\mu\text{m}$ 角の反射ミラーが静電力で駆動され高速に光のON-OFFを行う)などがある。

図1-1の中央部は半導体製造技術と汎用加工技術の中間寸法領域で、平面寸法が

ミリからサブミリ、高さ方向の寸法も同じミリからサブミリという寸法領域である。すなわち3次元の微細加工が必要とされる領域である。この領域は十分な厚みを有したマイクロ機構部品が実現できるため、マイクロでありながら実用に耐えうる強度を持ち、発生力の大きいデバイスが実現できる可能性の高い領域である。

欧米では、通常半導体集積回路の加工技術を用いて作られたデバイスをMEMS (Micro Electro-Mechanical System)と呼ぶが、日本では微細加工技術を追求して従来の機械を微小化したものも含めたマイクロマシンという広義の表現が多く使われる。

マイクロマシンは大きさが1mm以下の微小機械と定義されるが、その実現のためには、図1-1に示す中間領域が非常に重要である。従来の機械構造材料だけではなくSiなどの半導体材料を含めた広範な材料の使用、汎用の精密加工技術のマイクロ化とともに、半導体製造プロセス技術を組み合わせるなど新しい3次元微細加工技術の確立が必要である。

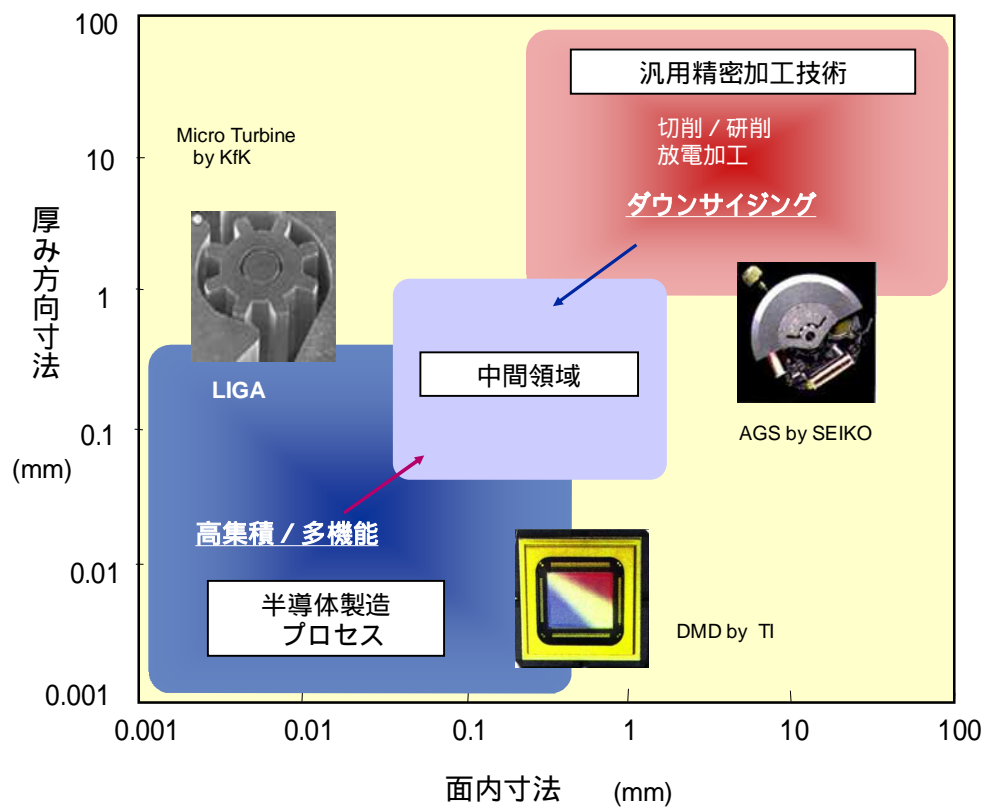


図1-1 マイクロ加工の2つのトレンド

1.3 3次元微細加工の現状と本研究との関連

1.3.1 マイクロ放電加工による微細構造体の加工

マイクロ放電加工は、導電性を有する広範な材料に対して加工が可能であり、サブミクロンの仕上面粗さと優れた形状精度が得られる。そのため微細形状創成が求められるマイクロマシンの加工技術として大いに期待されている。

放電加工の加工原理は、絶縁液中で加工電極とワークとの間に電圧を加えながら、互いの電極を近づけ放電を生じさせ、ワークを溶融除去し、ワークの溶融によりギャップが広がった分だけ電極を送る。この繰返しにより最終的に加工電極の形状がワークに転写され、加工が行われるものである。

マイクロ放電加工も同様の加工原理に基づくものであるが、放電回路に工夫をすることで、従来の放電加工の1/100程度、すなわち 10^{-6} から 10^{-7} Jまで放電エネルギーを小さくし、サブミクロンの仕上面粗さとミクロンオーダの加工精度を実現したものである。マイクロ放電加工による加工例を図1-2に示す。この図からわかるように以下の特徴がある。

(1)非接触加工

放電加工は、非接触加工であり、加工電極およびワークに加わる力が小さいため曲面や極薄板への高精度加工が可能である。図1-2に左上に示したマイクロタービンロータのように、微小径円筒に対し斜めにグループを形成するようなことが可能である。

(2)広範な加工対象

導電性のある材料であれば機械的な硬さに左右されず加工が可能である。金属はも

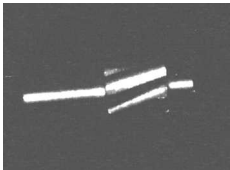
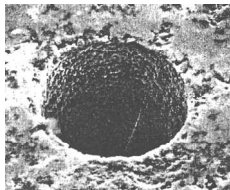
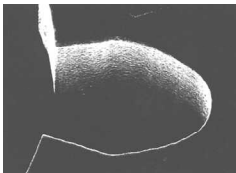
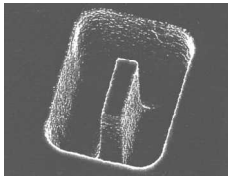
非接触加工	広範な加工対象
 <p>ロータ外形 950um, 軸径300um マイクロタービン用ロータ</p>	 <p>直径50um 焼結体ダイヤモンドへの穴加工</p>
優れた加工面粗さ	
 <p>最良0.1umRmax ギア金型の壁面</p>	 <p>15x15x50um Siへの垂直梁加工</p>

図1-2 微細放電加工の特徴

もちろん、焼結体ダイヤモンドのようにバインダが導電性を持つもの、比抵抗によって加工の容易さが異なるが、Siのような半導体材料も加工が可能である。

また穴径に対する深さの比でアスペクト比を定義すると5倍程度までは容易に加工することができる。

(3) 優れた加工面粗さ

放電エネルギーを微小化することにより最良0.1 μmの加工面粗さが得られるとともに図1-2左下のギア金型の壁面からわかるようにバリのないシャープなエッジの加工が行える。このような特徴を有するため、マイクロノズルの穴加工はもとよりサブミリ領域のマイクロ機構部品の創成加工や、モールド金型、プレス金型など広い分野への適用が開始されている。

1.3.2 半導体プロセスによるMEMS加工⁶⁾

1.3.2.1 半導体プロセスによるマイクロマシンの歴史

1970年頃からスタンフォード大学・電気工学科で、シリコン上に薄いダイアフラムを形成した圧力センサーやガスクロマトグラフの分析装置をシリコン上に集積化する研究が行われており、これがマイクロマシンの先駆けとなった。

1980年代後半にはカリフォルニア大学・バークレー校のR.S.Mullerや東北大学の江刺正喜などからマイクロマシニング技術が発表され一躍注目された。これを契機にMEMS (Micro Electro-Mechanical Systems)という言葉が生まれ各国で研究され始めた。当初は微小電気機械システムが中心であったが、1990年代に入ってから光技術の導入も始まった。情報通信分野における光情報通信の接続・交換のあらゆる場面でマイクロマシニングの応用が始まっている。

1.3.2.2 半導体プロセスによるマイクロマシンの応用分野

マイクロマシンの応用として、特に大きな市場が期待されているのが産業用と医療である。産業用における利用としては、各種プラントの配管系統や航空エンジンのメンテナンスなどに、また医療用としては、人間の体を切開せずに診断や治療を実現するものとして期待されている。カメラやはさみ、レーザーなどを組み込んだ極細のカテーテルが実現できれば、切開部を最小限に抑えながら手術するマイクロサージェリーが可能になる。微量の液体を送り出すポンプは、糖尿病の治療などに期待される。

マイクロマシンの駆動方法は、静電駆動、電磁駆動、形状記憶合金、化合物半導体をベースにした光熱駆動、太陽電池などを利用した光起電力、ピエゾ効果を使う圧電素子などいろいろな駆動法がある。

(1) センサへの応用

センサは対象となる物理量(エネルギー)を電気信号に変換するデバイスである。現在、圧力センサ、加速度センサなどが製品化されている。モトローラ社やアナログ・デバイセズ社は1980年の初期のころからマイクロマシン・センサーの開発に取り組んでいる。加速度センサーについては1993年アナログデバイセズ社より初めてマイクロマシン・センサが製品化された。アナログデバイセズ社の加速度センサーは多結晶シリコンの重りをバネで支えた構造⁴⁾である。

マイクロマシン技術で作ったセンサの最大の利点は、それが極めて小さいことと言える。集積回路と同じバッチ処理で大量生産できるため量産規模が大きくなりコスト低減が可能である。

(2) アクチュエータへの応用

アクチュエータは電気信号(エネルギー)を物理量に変換するデバイスである。電気信号を微小な機械的変位や高速の運動に変換できる。ミクロン単位の変位は光学的なアクチュエータとしても使える。マイクロアクチュエータに影響する支配的な力は、原子間吸引力(ファンデルワールスカ)と粘性抵抗である。駆動させるエネルギーは、電磁エネルギーよりも表面積に比例する静電エネルギーのほうが向いている。駆動方法としては静電駆動の他に形状記憶合金を使う方法、ピエゾ効果を使う方法、熱膨張を使う方法などいろいろなタイプが提案されている。

(3) 光制御への応用

この分野ではディスプレイ関係とネットワーク関係への応用が多い。

光ファイバーによる大容量・高速通信用として持たれる光スイッチや光アッテネータ、高密度波長分割多重(DWDM: dense wavelength division multiplexing)向けにマイクロマシニングによる1~100 μ mマイクロアクチュエータやマイクロミラーが用いられている。光の波長と同程度の動作距離や大きさを有するので、マイクロマシンは光ときわめてよく相互作用をする。半導体マイクロマシン技術では、たくさんのデバイスを反復して多数並べることが容易で、高速に制御することが可能である。

マイクロミラーへの適用は、非線形光学効果や熱光学効果に基づく固体デバイスに比べ、特性が波長に依存しないという特徴を有する。

例えば、テキサス・インスツルメント社が開発したデジタルマイクロミラーデバイス(DMD)と呼ばれる投射ディスプレイ用マイクロマシン⁵⁾では、画素数に対応する何百万もの微小可動ミラー(15 μ m角)をRAM上に作り、ミラーの向きを高速(10 μ sec程度)に変えて反射光を高速に制御し、反射する時間の長さで明るさを調節している。

1.3.2.3 半導体プロセス加工(マイクロマシーニング)

シリコン等の半導体に対する加工法は、大きく2種類に分類される。

1つはバルク・マイクロマシーニングで、これはウェーハの段階でバルクのシリコン等の半導体に溝・穴・構造物などを化学処理によって製造する方法である。この方法では反応性イオン・エッチング(RIE)などで深くエッチングしたり、あるいは陽極接合によるガラスの張り合わせなどをして立体的な構造を実現している。アスペクト比の高い加工が特徴である。

もう1つは、サーフェイス・マイクロマシーニングで、シリコン等の半導体基板の上に薄膜により層を作り特定の部分をエッチングして必要な構造を作っていく方法で従来のLSIプロセスが生かせる。機械的に動く構造やちょうつがいなどで立てられる構造の製作実例もある。

この他にLIGAプロセスがある。このプロセスはアスペクト比(加工幅と深さの比)の大きな形状を作る技術で、ドイツのKFKで開発された。数百 μm の感光性フィルムを用い、透過性のよい硬X線でパターンを転写することで深い孔を作り金属メッキにより構造を作り上げるものである。

表1-1にマイクロマシーニングの各種加工法とその特徴を示す。

表1-1 マイクロマシーニングの各種加工法とその特徴

加工法	特徴	対象材料	応用例
異方性ウェットエッチング	単結晶Siの結晶方位面で決まる正確な立体構造	単結晶Si	感圧膜、平滑ミラー、V溝
異方性ドライエッチング	マスクパターンに応じた自由な形状を持つ立体構造	Si	マイクロアクチュエータ、各種立体構造
表面マイクロマシーニング	CMOSプロセスとの整合性があり、極微細構造製作向き	Si基板上への各種薄膜形成	各種センサ
LIGAプロセス	X線リソグラフィーによる高アスペクト加工	金属(メッキ)	立体マイクロ構造

以上マイクロ放電加工および半導体プロセス加工について述べてきたが、サブミリ領域における機械システムは、従来の機械加工の延長のみでは実現不可能であり、これらを進化させた技術の融合によって新しいマイクロ機械システムが実現できると確信して、本研究を実施した。

1.4 本研究の概要

本研究の流れを図1-3に示す。

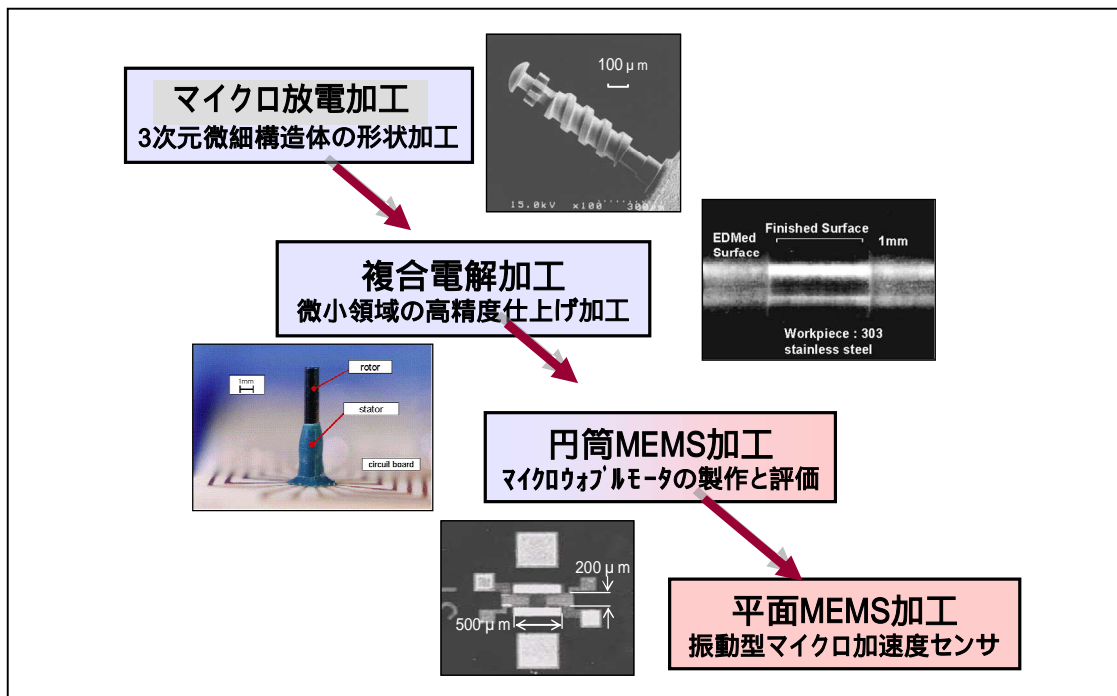


図1-3 本研究の流れ

1.4.1 マイクロ放電加工による微細形状創成の研究

放電エネルギーを極限まで低減したマイクロ放電加工に基づき、3次元の微細形状創成について研究を行った。加工原理として放電加工を用いているため、加工される形状は、電極消耗に伴う加工誤差が生ずる。そのため加工電極の移動軌跡の制御だけではなく、低消耗の放電加工条件を見いだすとともに、あらかじめ実験で求めた電極走査量に対する消耗量を補正值として取り込むことで、高精度の微細3次元加工を実現した。

直径300 μm のリンボリユート歯車形状の $\pm 3 \mu\text{m}$ 以内の加工および円筒への微細構造の加工等により、実用性を検証した。

1.4.2 電解・ポリシ複合加工による表面仕上げの研究

マイクロマシン領域におけるコンポーネントに対して、さらなる加工面仕上げの向上を図るためアルミナ砥粒を混合した電解複合加工の研究を行った。

加工のメカニズムとして、加工電極近傍に凝縮したアルミナ砥粒が、電極の回転に付随し高速運動することで、電解加工と機械的ポリシングが同時に進行し、形状精度を

損なうことなく仕上げ面あらさの向上が可能であることを明らかにした。また本方法とNC微細放電加工機を組み合わせることで選択的エリアに対し、加工から仕上げまで一貫して行い、マイクロウォブルモータのロータを想定した円筒の加工エリアにおいて32nmRzの仕上げ面粗さが得た。マイクロマシン領域における仕上げ加工法としての有用性を検証した。

1.4.3 立体円筒MEMSプロセス加工によるマイクロウォブルモータの研究

円筒基板に薄膜を形成する円筒積層プロセスを研究し、出力軸径1mm、外径1.4mmのマイクロ静電ウォブルモータの製作を行い、マイクロマシン向けデバイスの製作用プロセスとしての有効性を明らかにした。

また従来評価方法が確立されていなかった静電ウォブルモータにおける重要パラメータであるロータ・ステータギャップ、出力トルクについて、ウォブリングモーションの解析から、定量化する測定手法を確立し、ロータ・ステータの表面状態を直接SEMで観察することにより、設計値と実験評価値との乖離の原因究明を試み、3種類の欠陥がトルク劣化の原因であることを明らかにした。

1.4.4 平面MEMSプロセスによる振動型加速度センサの研究

平面MEMSプロセス加工による振動型のマイクロ加速度センサについて研究を行った。小型化に伴う出力低下を補う高感度化の課題に対し、印加される加速度変化を構造体の固有振動数の変化として検出する高感度な振動型の加速度センサを発案し、

- (1) 拡大モデルによる原理検証
 - (2) シミュレーションに基づくダウンサイジング時の加速度センサの性能見極め
 - (3) MEMSプロセスによる等倍モデルの試作とその特性評価
- を行いそのポテンシャルと実用化にむけた課題を明らかにした。

参考文献

- 1) Bustillo,J.M.Howe, et al. :Surface micromachining for microelectromechanical systems, Proc. IEEE MEMS, 1998, 1552-1574
- 2) S. C. Jacobsen,et al. :The Wobble Motor: An Electrostatic, Planetary Armature, Microactuator, Proc. IEEE. MEMS, 1989, 17-24
- 3) 佐藤健夫 :マイクロ放電加工による形状創成, 精密工学会誌 Vol.61, No.10, 1995, 1369-1374
- 4) iMEMS®加速度センサー : www.analog.com/jp/cat/0,2878,764,00.html
- 5) DMD : www.tij.co.jp/jrd/dlp/docs/index.htm
- 6) 半導体マイクロマシン技術 : www.homepage3.nifty.com/circuit/dokusou/tokukyo23.pdf/

第2章

マイクロ放電加工による 微細形状創成の研究

第2章 マイクロ放電加工による微細形状創成の研究

要旨

浮遊容量を極限まで低減し、単発あたりの放電エネルギーを $10^{-6}\text{J} \sim 10^{-7}\text{J}$ まで小さくした微細放電加工技術の研究を進め、本技術をベースに5軸のNC微細放電加工機を製作した。5軸は、ワーク移動のための(X, Y, Z軸)とワークの回転(C軸)と電極の上下動(Z)である。

微細放電加工による形状創成は、数十 μm 径の円筒を加工電極としてミーリング加工と同じ要領でワークを放電加工する。異常放電や短絡を少なくするため加工電極は3000rpm程度に高速回転させている。

加工される形状は、ワークに対する電極の移動軌跡となるが、電極消耗に伴う加工誤差が生ずる。そのため移動軌跡の制御だけではなく、いかに電極の消耗を小さくして加工するかがポイントとなる。低消費の放電加工条件を見いだすとともに、あらかじめ実験で求めた電極走査量に対する消費量を補正值として取り込むことで高精度加工を実現した。

このような条件下で加工を行うことで、SUS304のワークに対し、ピッチ円直径300 μm 、歯厚100 μm のインポリュート歯形創成を形状精度 $\pm 3\mu\text{m}$ 以下で実現するとともにC軸とXYZ軸の制御を同期させて行うことで直径155 μm の円筒にねじ構造、歯車形状、端面の球面加工などを複合した3次元微細構造の形成を可能とした。

2.1 微細放電加工の原理

放電加工は、液中において電極とワークとの間に電圧を加えながら、互いの電極を近づけ放電を生じさせ、ワークを溶融除去する。ワークの溶融によりギャップが広がった分だけ電極を送る。この繰返しにより最終的に加工電極の形状がワークに転写され、加工が行われる。

マイクロ放電加工も同様の加工原理に基づくものであるが、放電回路に工夫をすることで、従来の放電加工の1/100程度、すなわち 10^{-6} から 10^{-7}J まで放電エネルギーを小さくし、サブミクロンの仕上面粗さとミクロンオーダの加工精度を実現したものである。

本研究で用いた微細放電加工の回路を図2-1に示す。単發放電あたりのエネルギーを極小に押さえ、かつ放電の繰返し周波数を上げる必要があるため古典的ではあるが、RC放電回路を採用した。

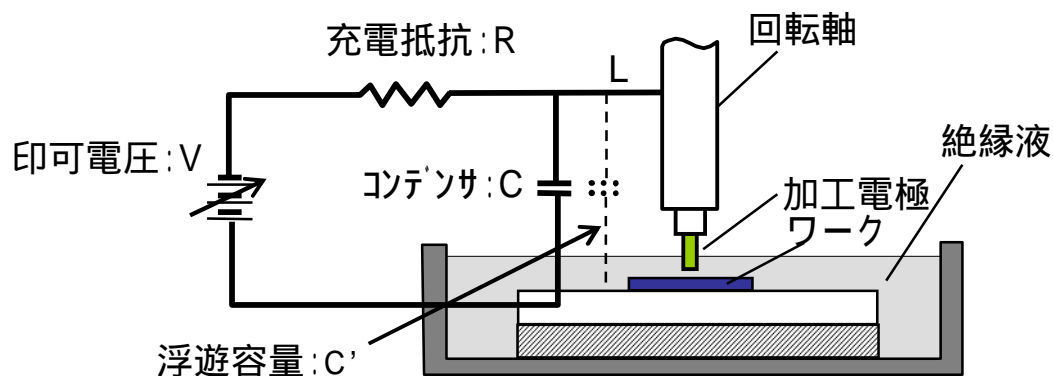


図2-1 放電回路(RC回路)構成

RC回路を用いた場合の単発放電エネルギー E (J)は、絶縁破壊電圧が低い場合下式で与えられる

$$E = 1/2 \cdot (C + C') \cdot V^2 \quad \dots\dots (2.1)$$

- ここで
- C : 放電回路におけるコンデンサ容量[F]
 - C' : 放電回路における浮遊容量[F]
 - L : インダクタンス[H]
 - V : 印可電圧[V]

放電エネルギーはコンデンサ容量 C あるいは印可電圧 V を変化させることにより制御が可能である。しかしながら、電圧 V が高すぎると電極消耗が極端に大きくなり、逆に小さすぎると放電が不安定となるため、適用電圧の範囲は限られる。このため、主としてコンデンサ容量 C によりエネルギーの制御を行うが、実際には、図2-1示すように構成部品間で構成される浮遊容量 C' が回路に挿入したコンデンサ容量 C に加わり、この合成容量が加工を行う上で実際の容量となる。微細加工領域では、使用する放電エネルギーを $10^{-6} \sim 10^{-7}$ Jまで小さくする必要があり、合成容量が数十から数百pFの範囲となる。

従って浮遊容量をどれだけ低減できるかが、放電エネルギーの微小限度を決定する。図2-2に放電回路中の金属部品を極力小型化するとともに、電極支持部分にセラミックを使用することなどで浮遊容量を極限まで低減し、微細加工用に開発した加工機を示す。



図 2-2 微細放電加工機

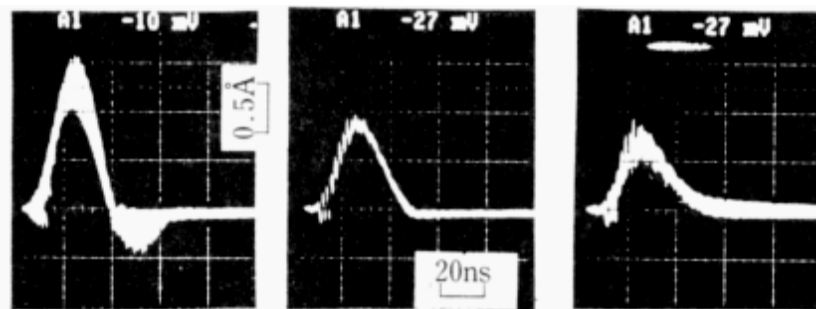
微細放電加工と汎用の型彫放電加工の特性を表 2-1 に示す。

表 2-1 汎用加工と微細放電加工の比較

	形彫放電加工	微細放電加工
放電パルスエネルギー	$10^{-2} \sim 10^{-5} \text{J}$	$10^{-5} \sim 10^{-7} \text{J}$
ピーク電流	数A ~ 数10A	数100mA ~ 数A
放電パルス幅	$10^{-6} \sim 10^{-7} \text{sec}$	$10^{-7} \sim 10^{-8} \text{sec}$
放電サイクル	数100KHz	数100KHz ~ 数MHz
仕上げ面あらさ	数 $\mu\text{m Rz}$	1 $\mu\text{m Rz}$ 以下
放電ギャップ	数 $\mu\text{m} \sim$ 数10 μm	1 ~ 数 μm

また、加工材料を変化させた時の放電パルス波形を図 2-3 に、仕上げ面粗さを図 2-4 に示す。20nsecレベルの短パルス放電であることがわかる。また図 2-4 の左側には、直径 30 μm の加工穴の壁面状態を示す。壁面の粗さを直接測定できないため、右側に示すようにブロックと対抗放電させ、これを触針式の粗さ計(タリサーフ)にて測定した。コンデンサ容量 10pF では 0.1 $\mu\text{m Rz}$ のきわめて良好な仕上げ面粗さとなっている。

コンデンサ容量: 220pF



ワーク 超合金 焼結ダイヤモンド フェライト

図2-3 微細放電加工における放電電流波形 (電流プローブによる測定)

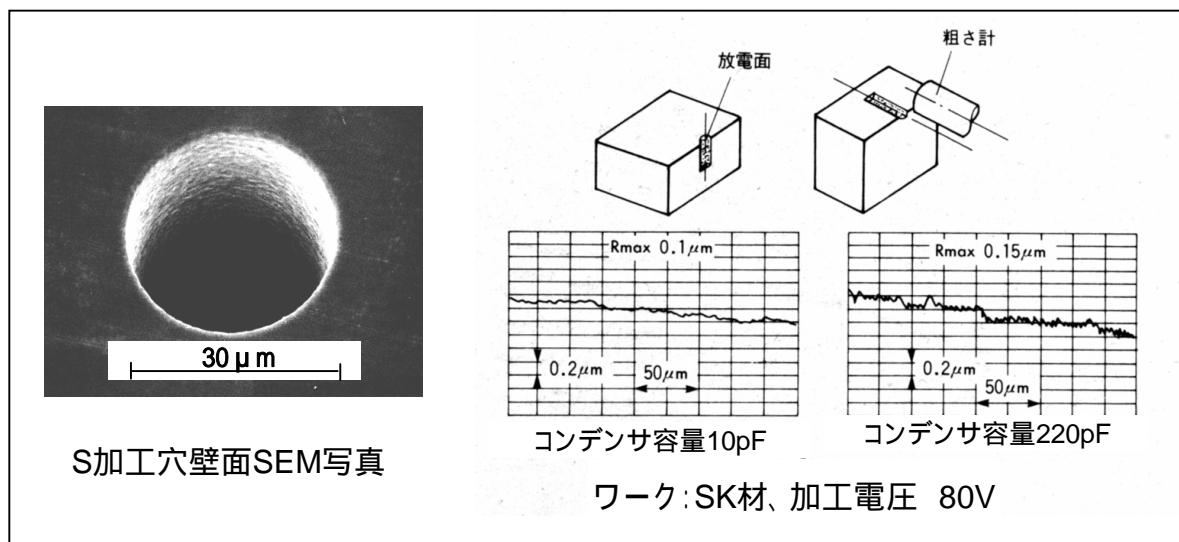
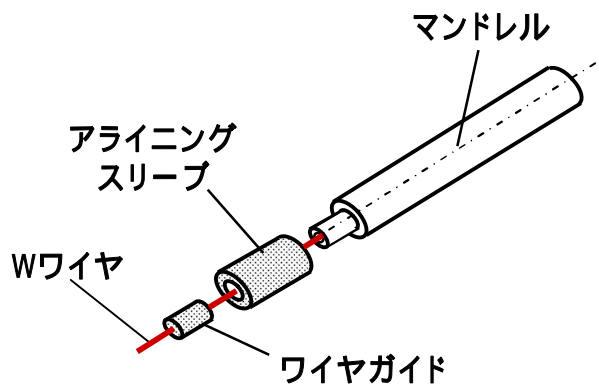


図2-4 微細放電加工における表面粗さ

2.2 微細放電加工用電極

直径1mm以下の電極は、切削加工が困難なため、電極材料には、タングステン線を用いた。必要な長さに切断して加熱処理によりカーリングを除去し、銅メッキを施し1mm程度まで太くした。先端部を硝酸による電解エッチングで除去したものを使用して実験を進めた。

しかしながら、取り付け誤差が大きく、またワイヤの真円度も良くないために、安定した加工精度を維持できなかった。そのため図2-5に示す電極構造を考案し、図2-6に示すように成形用ブロックと回転する電極を対向させ、電極側を+、対向ブロック側を-とした通常の加工とは逆の極性、すなわち逆放電による成形を行うことで直径5 μmまでの電極を用意することを可能とした。



加工電極	純タングステン
電極保持	セラミック キャピラリー
保持ギャップ	1 μm 以下 (光ファイバーコネク タ技術を応用)

図2-5 加工電極構造

実際の電極成形は以下のプロセスで行う。電極の成形は、長さ方向と径方向の2段階で行う。長さ方向の成形は減少寸法を一定の割合で分割し、4回の繰り返し成形を行い、先端をフラットに仕上げ、径方向の成形は、真の減少代を放電の開始位置より求める自己チェック方式で高精度化している。図2-7を用い径方向の成形を説明する。

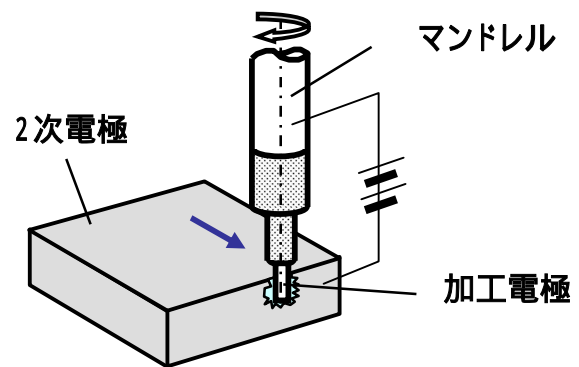


図2-6 平面ブロックを電極成形

A点における放電の開始位置を D_0 を第1

回目の成形開始点とし、互いに放電させながら、 R_1 だけ成形ブロックを加工電極側へ送る。

ブロックを用いた成形の場合には、2次電極のブロックも消耗するためA点の波線のようにになり、電極の減少代が必ずしも R_1 とならない。そのため一旦ブロックを加工電極より引き離し、B点へ移動し、再度放電開始位置 D_n を読み、真の減少量 R を D_0-D_n として求め、 $R=R_1$ となるまで成形動作を繰り返す。通常 N は2~4で収束する。

図2-8に径方向自動成形時の加工精度を示す。縦軸は入力した電極の減少半径と実際に減少した半径の偏差、横軸は仕上がり電極径である。

電極材料は純タングステン線 128 μm 、成形ブロックはSK-5、ブロックの移動速度は1 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 、短絡後退式の送り制御とした。本図からわかるように、入力値に対し $+2 \mu\text{m}$ $-0 \mu\text{m}$ 以内の精度で加工されていることがわかる。

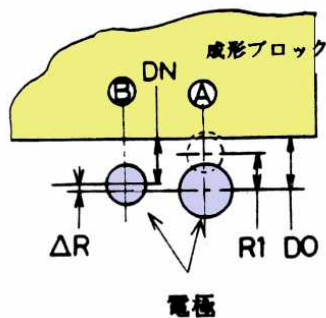
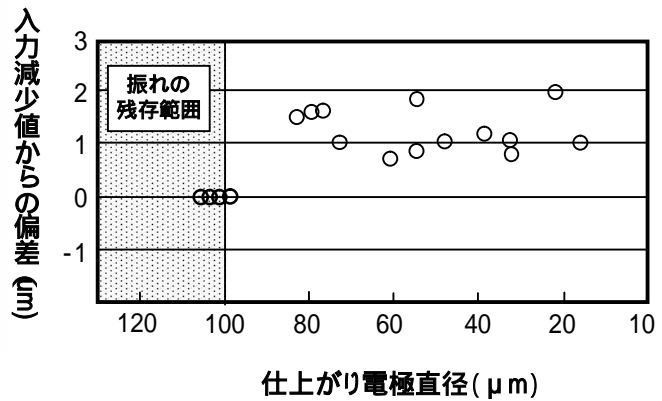


図2-7 径方向の自動成形



図2-8 自動成形後の加工電極



加工条件

印可電圧 80V コンデンサ容量 100pF

電極回転数 3600rpm 電極材料 W 125 μm

テーブル送り速度 1 μm/sec

図2-9 径方向自動成形時の加工精度

2.3 マイクロ放電加工による形状創成

前述したように加工形状は電極形状の転写となるが、加工電極を回転させながらワークまたは電極をNC制御により移動させることでミリング加工と同様な3次元加工が可能となる。この場合電極の運動方法により2種類の加工に分類される。

非常に細かなピッチでオーバーラップさせながら穴加工を繰り返し、所望の形状を創成するPoint-to-pointの方法……図2-10

電極を創成すべき形状の輪郭線に沿って移動して加工を行うContinuous-pathによる方法……図2-11

いずれの場合においても創成される工作物の寸法精度は、主として電極の消耗に依存する。

最も単純な加工例である直線スリットを例にとり、具体的に説明する。

の加工では、工作物厚さに対し、電極の送り込みの量を大きくし、常に電極の径方向の消耗の生じていない部分を用いて加工が可能である。このため電極の長さ方向の消耗を管理すれば、穴加工のつなぎの部分の形状を除き、加工部の幅方向の寸法精度を確保することができる。

の場合は、ワークに対し電極を一定深さまで送った後、電極側面とワークの間で放電させながら所定のパスを移動させることになる。このため電極消耗は主として径方向に生じる。低消耗条件下で加工しても、電極消耗を完全には無視できないため、必要に応じて電極の成形を繰り返し、加工を行う必要がある。

このような電極の消耗の特徴を踏まえ、3次元の複雑形状を加工する場合には、
 の加工を組み合わせながら行うことが必要になる。すなわち、まず の深さ方向に
 繰り返す加工によって概略の形状を創成し、次に の工具の連続移動により で生じ
 ている電極消耗に伴い加工寸法が変動する消耗量を把握し、これを加工条件へフィード
 バックすることで高精度の形状創成を実現する。

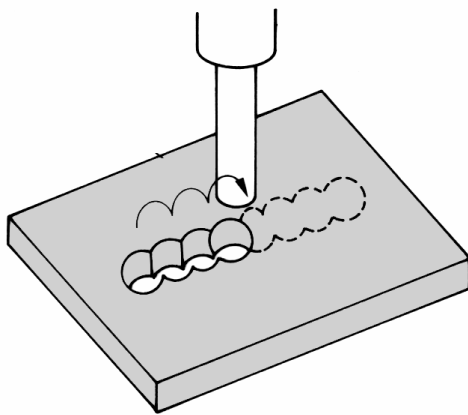


図2-10 Point to Pointの加工

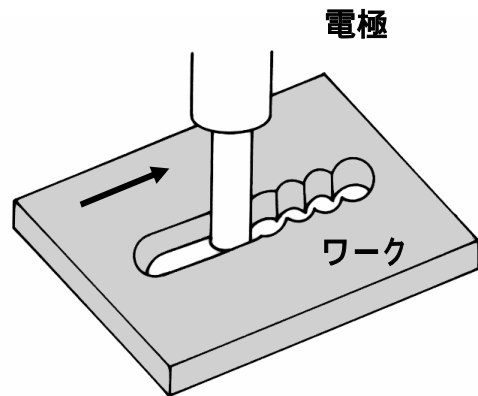
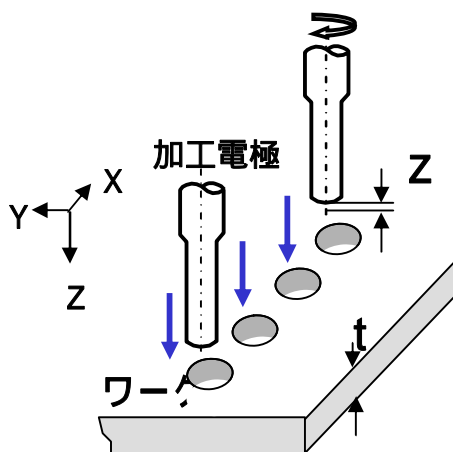


図2-11 Continuous-pathの加工

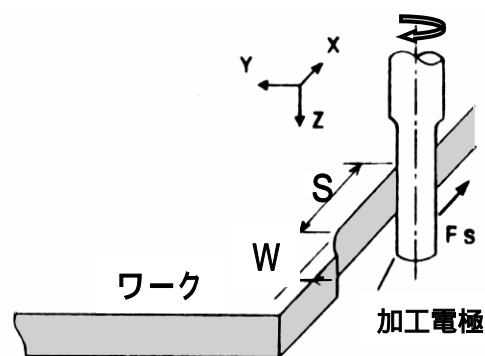
2.3.1 加工条件と電極消耗

下記の2つの長さ方向および径方向の電極消耗モデルにおける電極消耗量を実験に
 て求めた。長さ消耗は、図2-14より加工電圧70V近傍がもっとも少なく5%程度である。
 この条件下ではコンデンサ容量の影響は比較的少ない。また径方向の消耗量測定結
 果を図2-15に示す。



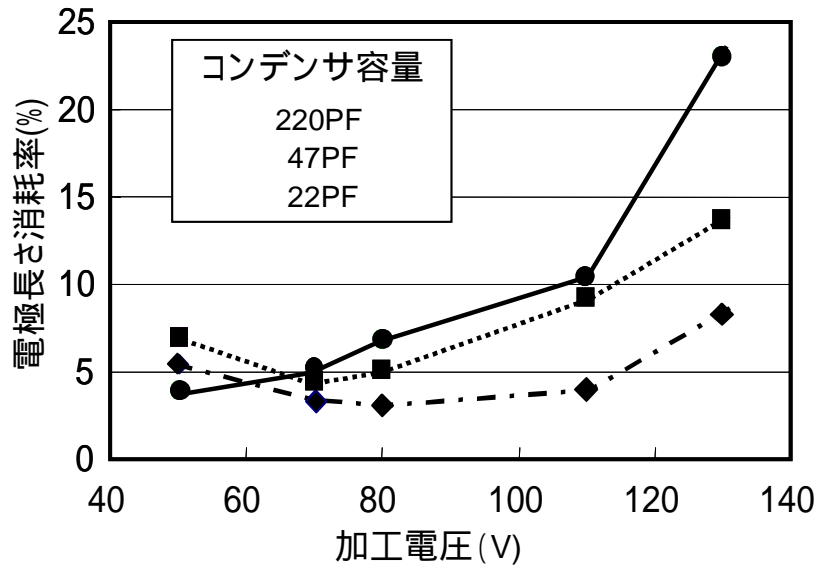
$$\text{長さ消耗率} = z / t \times 100 (\%)$$

図2-12 長さ方向の電極消耗モデル



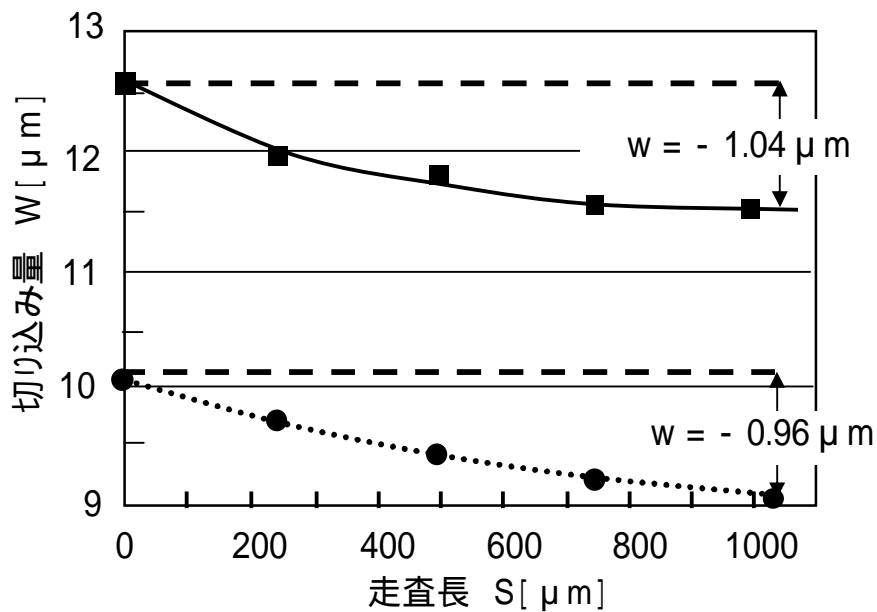
S:電極走査長、W:切り込み量

図2-13 径方向の電極消耗モデル



加工条件	加工電圧 : 50 ~ 130V
加工電極 : 純タングステン、30 μm	コンデンサ容量 : 22PF ~ 220PF
ワーク : SUS304 t 50 μm	電極回転数 : 3600rpm
加工液 : 三井EDS	Z軸送り速度 : 2 μm/s

図2-14 加工電圧 / コンデンサ容量と電極長さ消耗率



加工条件	加工電圧 : 75V
加工電極 : 純タングステン、30 μm	コンデンサ容量 : 10pF
ワーク : SUS304 t 100 μm	電極回転数 : 3600rpm
加工液 : 三井EDS	走査速度 : 1 μm/sec

図2-15 Continuousパス加工における電極消耗

初期切り込み量が $12.5\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ において、 1mm 走査後の加工形状誤差 W は $1\ \mu\text{m}$ 程度である。また 1mm 走査後の電極消耗比はいずれも 1.1% であった。

この結果から、形状創成は、まず電極消耗は大きいですが、加工速度が速い条件下でPoint to pointで粗加工を行い、仕上げ代を残し、続いてContinuous-path加工で、形状誤差 W および消耗比の小さい範囲で側面の仕上げ加工を行う。仕上げ加工の際にさらに誤差の補正も加えることで高精度な金型形状創成が可能であると考えられる。

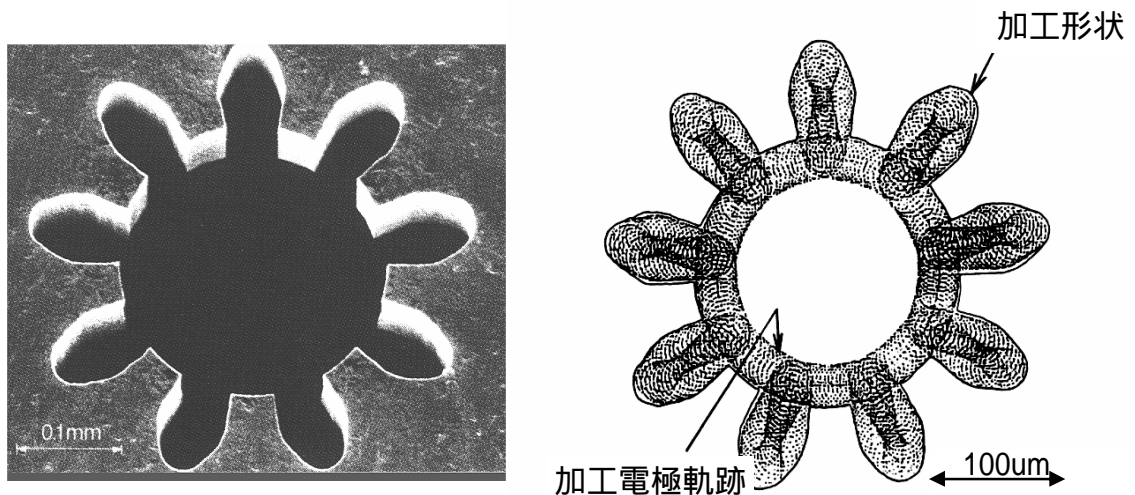
2.3.2 インボリュート歯車の加工

ピッチ円径 0.3mm インボリュート平歯車用金型をSUS304基板に加工した。

$24\ \mu\text{m}$ の加工電極によりPoint to pointで形状の粗加工を行い、仕上げは $31\ \mu\text{m}$ の加工電極を用いた側面加工で行った。加工条件は図2-15から求めた走査長に対し、 1.1% の径方向消耗条件を用い、歯形周囲を1周するごとに工具電極をZ方向に送り込み、消耗していない電極側面を用いて複数回加工し、電極消耗による加工形状誤差 W の低減を試みた。

ワーク移動用のXYテーブルは、送り分解能は $0.1\ \mu\text{m}$ 、位置決め精度 $1\ \mu\text{m}$ である。加工したインボリュートギア金型とその形状精度の測定結果を図2-16に示す。

図からわかるように形状精度は $\pm 3\ \mu\text{m}$ である。



- | | |
|----------|---|
| 1) 粗加工 | $24\ \mu\text{m}$ 電極による連続穴加工 |
| 2) 仕上げ加工 | $31\ \mu\text{m}$ 電極による側面加工
(側面加工長 2.4mm)を4回繰り返し |

ピッチ円直径: $300\ \mu\text{m}$ 、歯数:9、材質:SUS304 $t\ 100\ \mu\text{m}$ 、加工精度 $\pm 3\ \mu\text{m}$

図2-16 インボリュートギア金型

2.3.3 マイクロシザーズの加工

医療用のマイクロサージェリーを想定して微小サイズのはさみを製作を試みた。図2-17に示すように50 μm 厚のワークを角度30 $^\circ$ にて傾けたままワークテーブルに保持し、貫通の溝加工を施した。加工電極は、Z方向に1 $\mu\text{m}/\text{sec}$ で送りながら、ワークテーブルをY方向へ1 $\mu\text{m}/\text{sec}$ にて幅2mm間を揺動させ加工を行った。ボトムのエッジがはさみの切歯になる。

SUS304およびチタンへ加工したエッジをカミソリの刃と比較したSEM写真を市販の図2-18に示す。ほぼ同等の刃先が得られている。またコンデンサ容量を変化させて加工をおこない、エッジの先鋭度の比較を行った。結果を図2-19に示す。

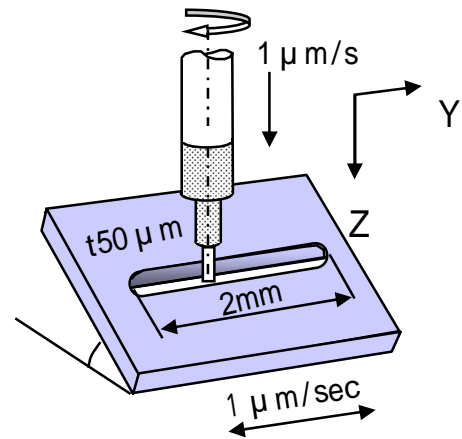
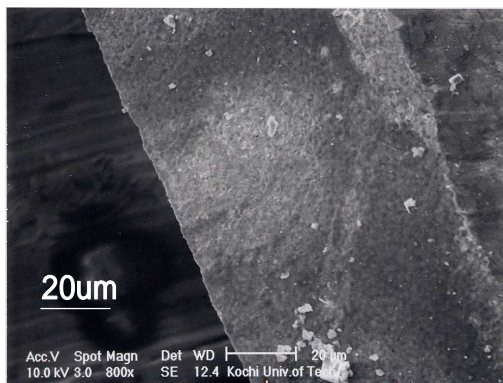
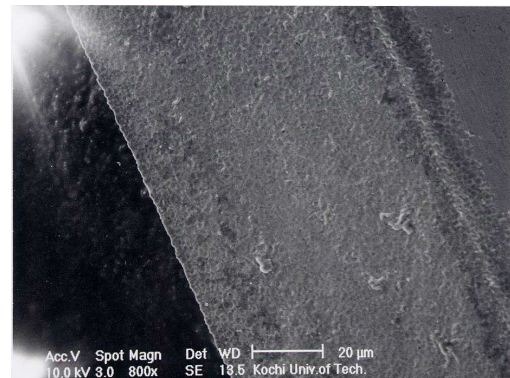


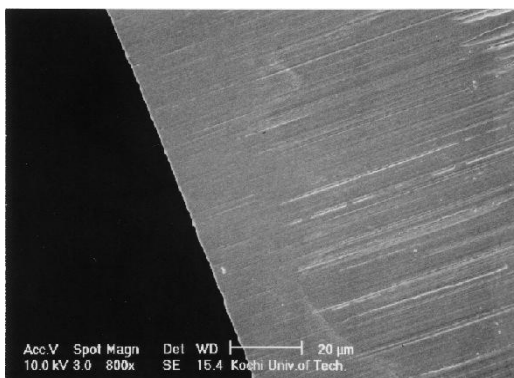
図2-17 溝加工による刃先の形成



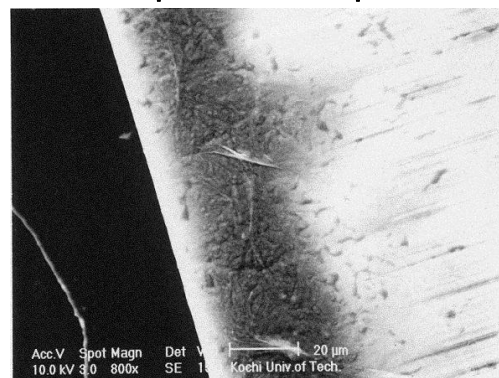
304 Stainless steel
capacitance:10pF



Titanium
capacitance:10pF



Conventional razor (Stainless steel)



Conventional razor (Carbon steel)

図2-18 加工した刃先と市販のカミソリとの比較

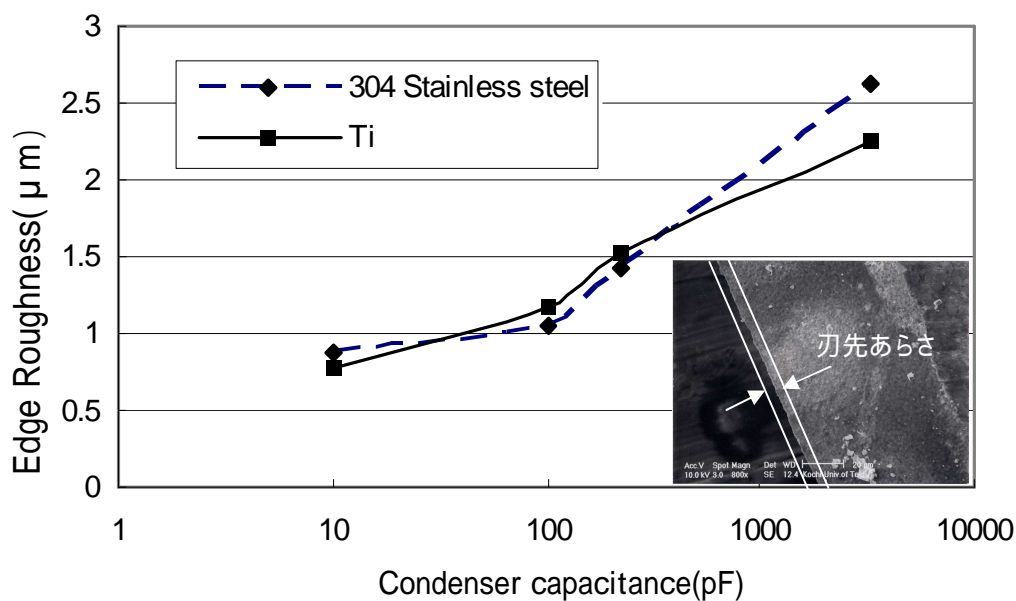


図2-19 コンデンサ容量とエッジの粗さ

コンデンサ容量10pFの加工条件では1μm以下の刃先粗さが得られている。ことがわかる。

図2-20には溝加工により形成したエッジを連続穴加工にて切断し、2つを組み合わせることでアセンブルした用いた加工した刃先長が2mmのマイクロシザーズを示す。このように、ワークを傾斜させた溝加工により、微細放電加工で刃先の形成が可能であり、マイクロサージェリー向けのツールへの応用が可能であることを明らかにした。

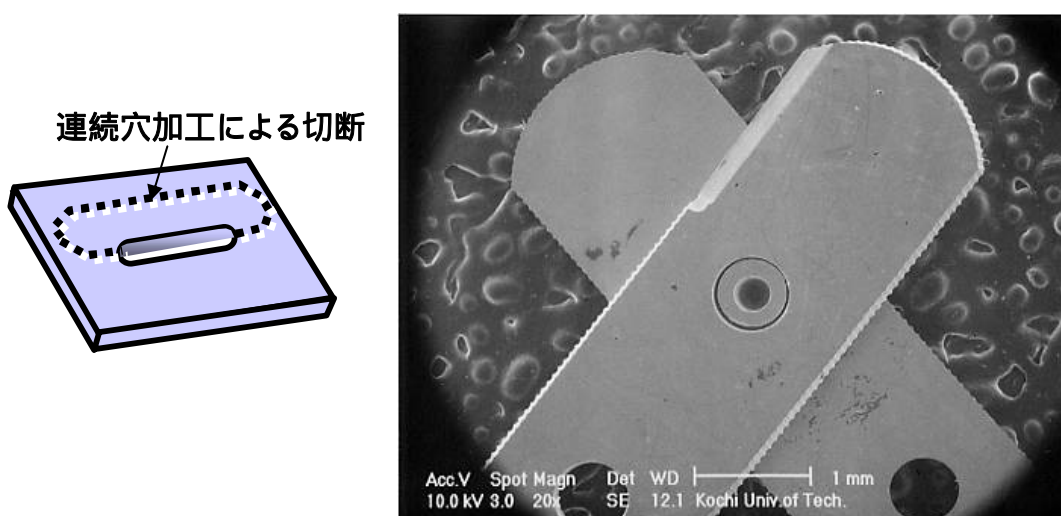


図2-20 マイクロシザーズ

2.3.4 シリコンウェハの加工

通常シリコンウェハの高アスペクト比加工には化学的加工である異方性エッチングがよく用いられる。しかしながらシリコンの結晶方位によるエッチングレート差を利用して、いるため加工形状に制約がある。結晶方位に依存しない加工法により3次元的な機構を製作できれば、半導体プロセスと組み合わせて、複雑な機構と制御回路を同一基板上に形成することが可能になる。

図2-21はマイクロ放電加工により板厚 $100\mu\text{m}$ の比抵抗値 0.02 cm のP型<111>シリコンウェハとステンレス鋼(SUS304)に対し、種々の穴径を加工した場合の加工時間を示す。

この図からわかるようにシリコンウェハに対してもステンレス鋼と同じように加工ができていることがわかる。

比抵抗 1 cm 以下のシリコンウェハは結晶方位、P型、N型の種類を問わず良好な加工性を示すことを実験から確認している。

図2-22にはシリコンウェハに幅 $20\mu\text{m}$

の平行板ばねを形成した例を示す。

幅 $20\mu\text{m}$ に対し高さ $310\mu\text{m}$ の高アス

ペクト比の加工と直方体の構造体を実現できている。

このようにマイクロ放電加工ではシリコンの異方性エッチングとは異なり、シリコンの結晶方位に依存しない加工が可能である。

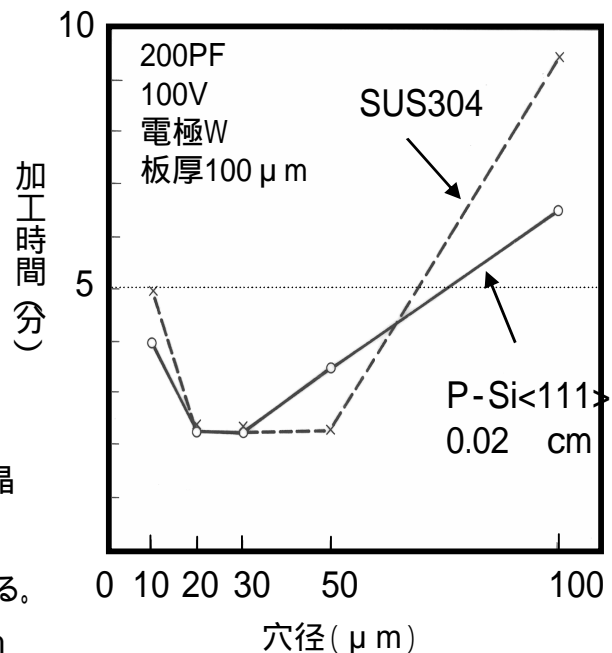


図2-21 Siとステンレス鋼の加工時間比較

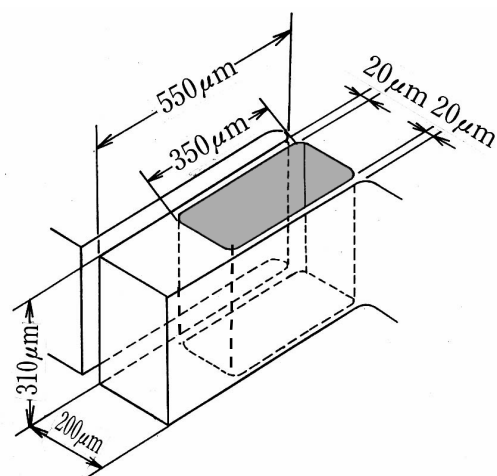
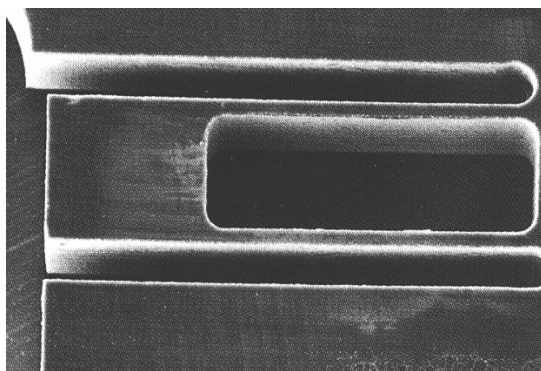


図2-22 放電加工によるSiの高アスペクト比加工

2.4 5軸NC微細放電加工機

浮遊容量を極限まで低減し、単発あたりの放電エネルギーを $10^{-6}\text{J} \sim 10^{-7}\text{J}$ まで小さくした微細放電加工技術に基づき、5軸のNC 微細放電加工機を製作した。5軸は、ワーク移動のための(X,Y, 軸)とワークの回転(C軸)と電極の上下動(Z)である。

図2-23にその構造図を示す。

微細放電加工による形状創成は、数十 μm 径の円筒を加工電極としてミーリング加工と同じ要領でワークを放電加工する。

ワークが円筒形状の場合は、C軸機構へチャックし、回転させながら加工することが可能である。回転速度と制御および角度割り出しによる位置決めが可能となっている。

図2-24に開発した5軸NC微細放電装置により加工した微細構造体の加工例を示す。本加工例では、直径 $155\mu\text{m}$ のSK材の円筒に対し、4種類の微細構造を作り込んでいる。

先端部の半球構造、歯車形状、多面体、ねじ構造である。

異常放電や短絡を少なくするため加工電極は3000rpm程度に高速回転させながら行った。各加工形状ともに良好に加工できていることがわかる。

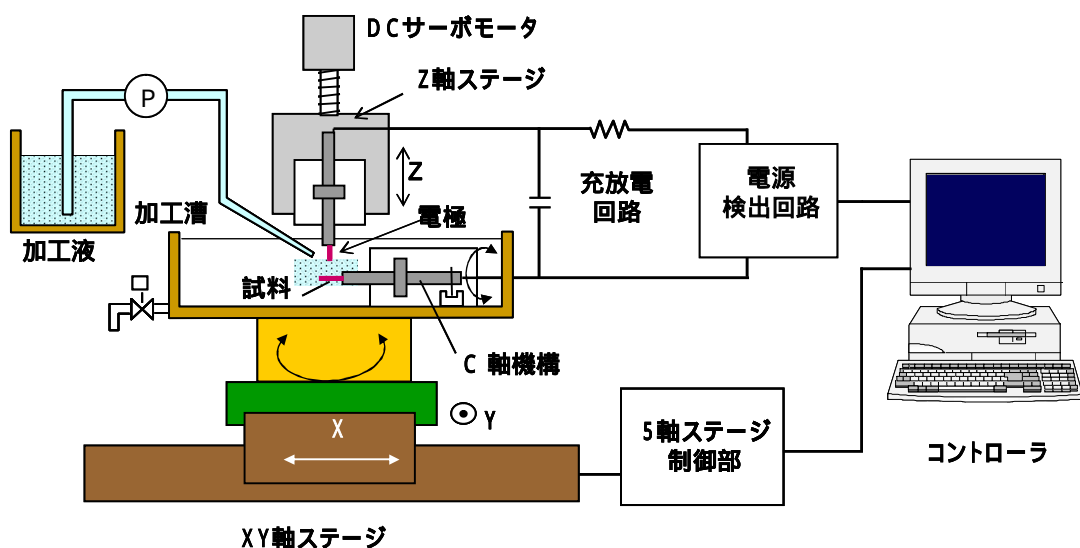
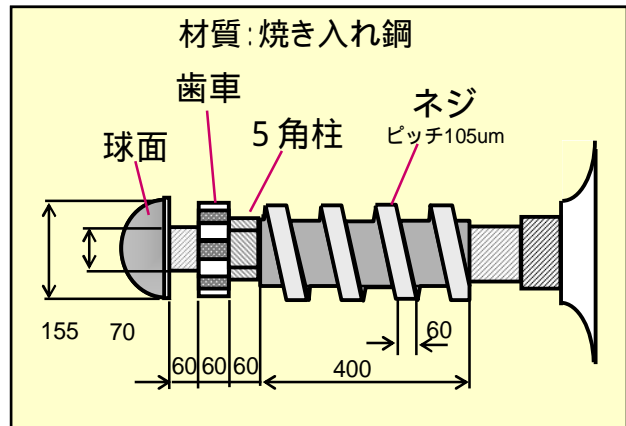
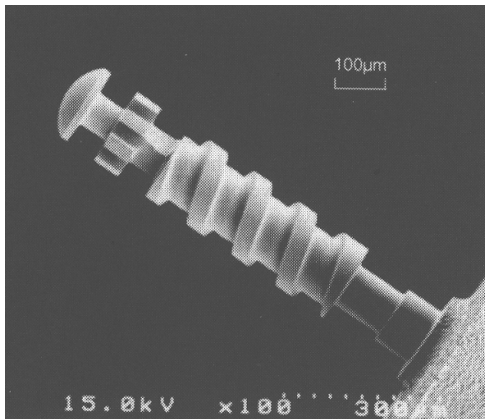
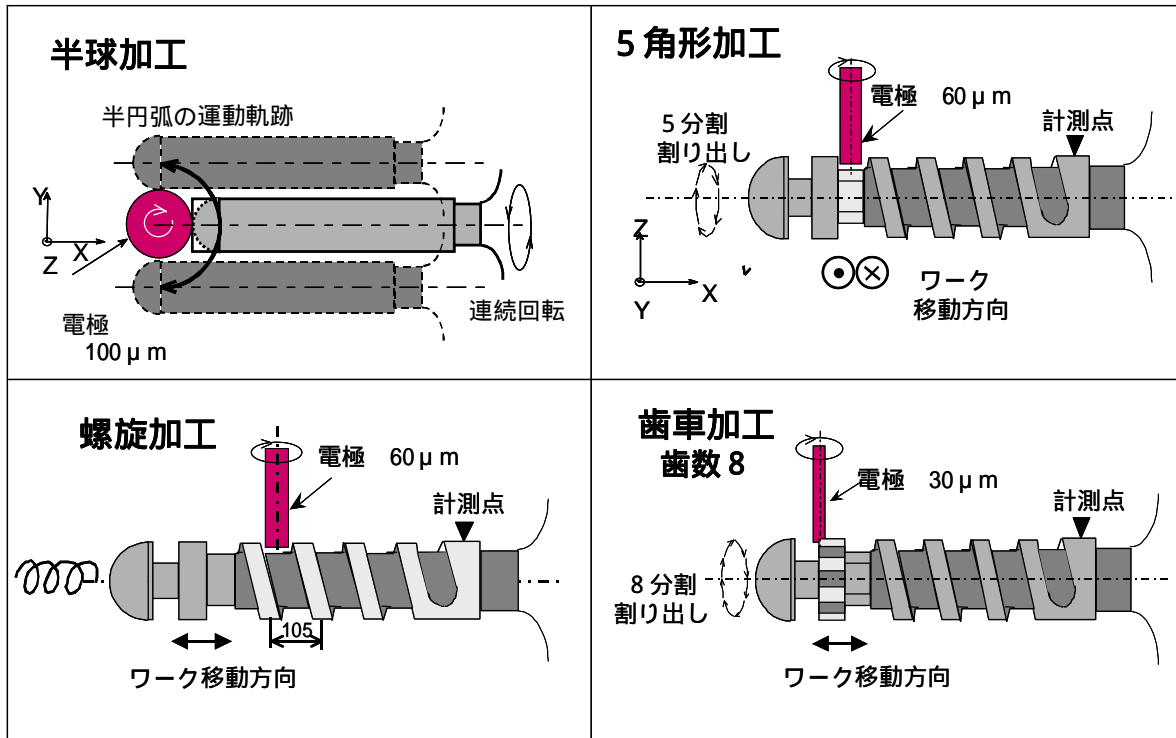


図2-23 5軸放電加工機



加工形状



各形状の創成方法

図 2 - 2 4 微小径円筒への3次元微細形状加工例

2.5 結論

- (1) 電極低消耗加工条件、Continuousパス加工における走査長と電極消耗量の関係を加工条件へフィードバックすることで、直径300 μm のインポリュート歯車を形状精度3 μm で加工し、微細放電加工による微細構造形成が可能であることを明らかにした。
- (2) 厚み方向への電極送りを併用したContinuousパス加工を刃先加工へ適用し、市販の剃刀歯と同等のシャープネスが得られることを明らかにし、マイクロシザーズなどの医療用途への適用可能性を明らかにした。
- (3) 本技術をベースにワーク移動のためのXY 軸とワークの回転(C軸)と電極上下動Zの5軸構成の円筒加工NC微細放電加工機を製作した。
C軸とXYZ軸の制御を同期させて行うことで微細径の円筒状ワークにねじ構造、歯車形状、端面の球面加工など3次元微細構造の形成が可能であることを実証した。

参考文献

- 1) 堀,佐藤,他:マイクロ遊星減速機の試作,1990年度精密工学会秋期論文集,1990,pp67-68
- 2) 金子,土屋:円筒電極による三次元制御放電加工(第5報),電気加工学会誌,1984,pp1838
- 3) T. Masaki . et al. : Micro Electro-Discharge Machining and its Applications . Proc. IEEE MEMS , Feb. , 1990 , pp21-26
- 4) 佐藤優美,他:マイクロ放電加工,機械の研究,46,1,1994,pp77
- 5) 正木 健:微細放電加工技術,National Tech. Rep. , 39,5,1993,pp33
- 6) 中村邦彦,他:マイクロ放電加工による型彫りに関する研究,1992年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集,1992,pp679
- 7) T. Masuzawa et.al. : Wire Electro-discharge Grinding for Micro Machining , Ann . CIRP , 34 , 1 , 1985, pp431
- 8) 樋口俊郎,他 :マイクロメカニカルシステム,フジテクノシステム,1992,pp 13

第3章

電解・ポリシ複合加工による 表面仕上げの研究

第3章 電解・ポリシ複合加工による表面仕上げの研究

要旨

マイクロマシンにおけるマイクロ機構部品の組立の単純化と低摩擦コンタクトのため、複雑な3次元微細構造を良好な仕上げ面粗さで創成する加工法が期待されている。マクロ領域に対しては、機械的加工、研磨加工、電解加工およびこれらの複合による仕上げ加工が存在するが、これらの方法を微細構造へ適用することは困難であった。研磨加工に関しては、ツール自身を小型化することが困難であるばかりでなく、ツールとワークの間の圧力を制御することが困難であること。非接触で行われる電解研磨加工は、仕上げ加工として優れるが、仕上げ面粗さはマイクロ放電加工と同等レベルであり、電解液中に浸された構造体のエッジに対する電解集中により形状精度を悪化させてしまう欠点などがあるためである。

一方マイクロ放電加工技術は、3次元形状のマイクロコンポーネントを創成する高い能力があるが、仕上げ面粗さは、最良で $0.1\ \mu\text{mRz}$ であり、マイクロマシン領域における部品としての摩擦および摩耗の観点からは、さらに高い仕上げ精度が要求されている。このように、現在までのところマイクロコンポーネントに対する均一にかつ精密に仕上げる加工法は確立されていなかった。

上記問題を解決するため電解液にアルミナの微粒子を混合し、微細径の電極を用いた電解複合加工の研究を行った。本加工法により 32nm の仕上げ面粗さが得られるとともに、3次元構造体の特定エリアに対し、仕上げ加工を実施できることを明らかにした。

3.1 電解ポリシ複合加工の原理

微小構造体を形状精度を維持しつつ高精度に仕上げするためには、マイクロエリアに対し、仕上げ代(除去量)を最小で加工を行い、マイクロエリアの拡張によって構造体全体の仕上げを行う加工法が望まれる。

そのため、微細電極を用いた電解加工(ECM)をベースに、微細砥粒による研磨仕上げ加工を併用した新しい加工法を提案し、実現へ向けを検討を行った。この仕上げ加工は、ツールとワークが非接触であることが特徴である。本加工法の原理を図3-1に示す。

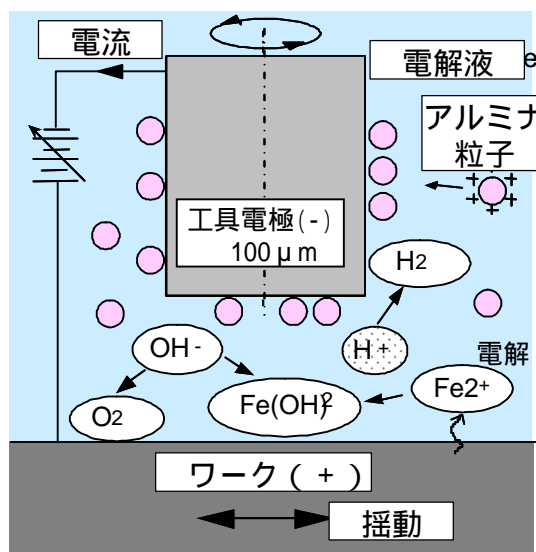


図3-1 電解複合加工の加工原理

電解加工の工具電極は、マイクロ放電加工の加工電極である超合金製の単純円筒を用いた。工具電極の底面はフラットに、側面は、振れが無いようにマイクロ放電加工で仕上げた。ワークは、表面を放電加工により平坦化したステンレスである。

電解液は、5% (重量比) でアルミナ砥粒を混合したコロイダル水溶液である。電解液は、微細構造体に対して過度の電解が発生しないように10K cmの比抵抗にした。

電解液中でワークを正極として加工電極を負極として近接させ電圧を印可するとワークから加工電極へ電流が流れる。結果として金属分解現象が発生する。電極を回転させながらワークを繰り返してトラバースさせることにより、電解加工されるエリアが広がるとともに、アルミナ砥粒も電解液とともに、これらの動きに伴い動くことになる。ワークのトラバース領域の表面が、金属析出による電解加工および揺動するアルミナ砥粒による機械研磨により表面が仕上げられる。

3.2 電解加工と複合加工の比較

図3-2は、SUS304の仕上げ面を比較したもので左側よりマイクロ放電加工、砥粒なしの低伝導性電解液を用いたECM、新たに発案した複合仕上げ加工によるものである。初期状態はいずれも放電加工による仕上げ面である。ECM加工および新加工法の加工条件は、アルミナ砥粒の混合以外は全く同じである。図3-2の加工面の比較からECMは、放電加工によるクレータ除去には効果的であるが、放電加工の仕上げ面精度を大きく上回る仕上げ面粗さが得られていない。

一方新加工法では、32nmRzの仕上げ面精度が得られており、新加工法が明らかに仕上げ面向上に効果的であることを示している。

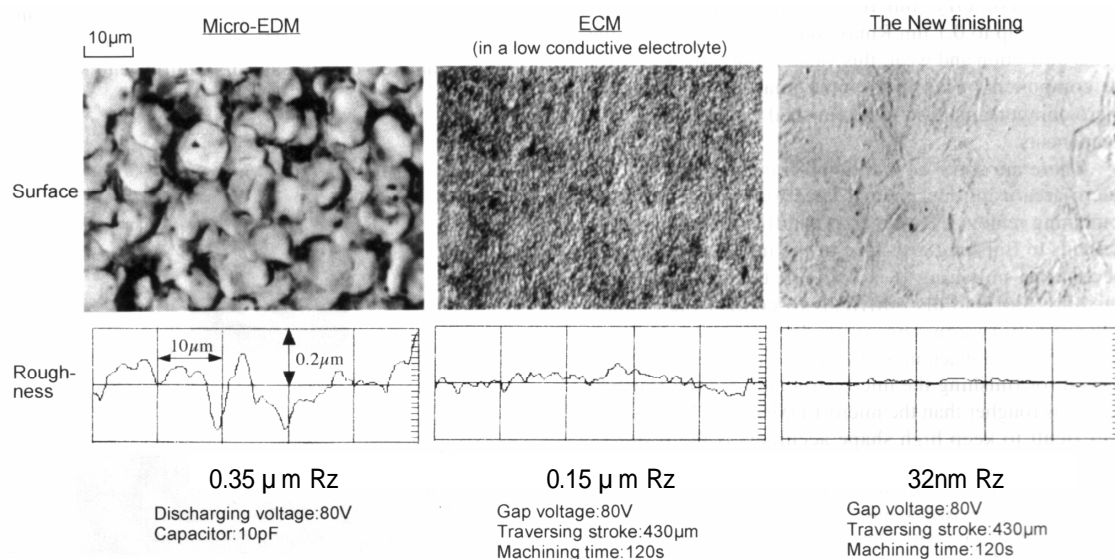


図3-2 SUS304に対する加工表面粗さの比較

3.3 電解・ポリシ複合加工の加工特性

仕上げ加工中に、図3-3に示すようにアルミナ砥粒が加工電極周辺に凝集するのが観察される。この現象は、電解液中のアルミナ砥粒がプラスに帯電することによって引き起こされる電気泳動によるものである。図3-4に示すように電解液中の電極の側面がアルミナ砥粒の塊に覆われている。

この現象下では、発生するガスのためにアルミナ砥粒は、電極下部を覆うことはできないが、電極にまとわりつき、回転とともに移動するアルミナ砥粒の塊が機械研磨の効率を上げていると考えられる。ワーク表面から溶出した金属水酸化物が表面を粗くする析出物となるが、アルミナ砥粒の塊により金属水酸化物を除去することで図3-2の右図に示すような良好な仕上げ面粗さが得られるものと推察する。これらから、電解加工と砥粒による研磨加工の複合加工で表面仕上げがなされていると判断できる。

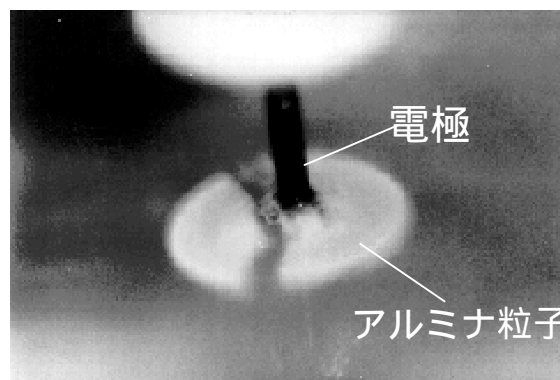


図3-3 電極周囲へ凝縮するアルミナ砥粒

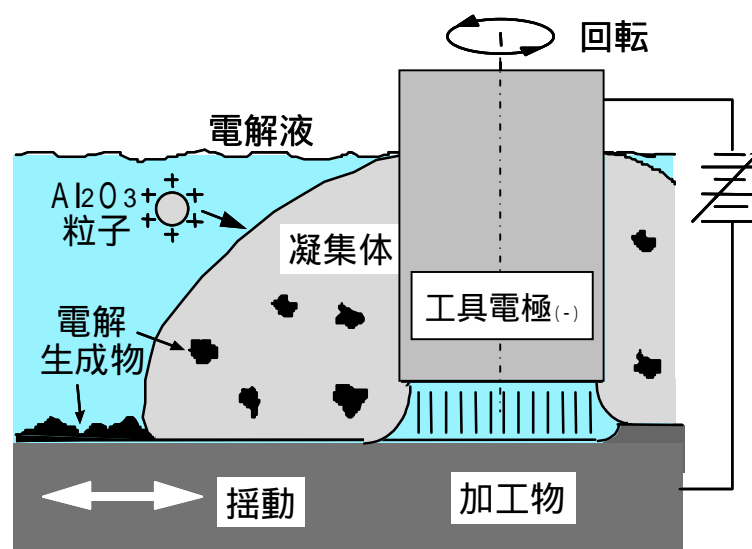


図3-4 電極周辺のアルミナ砥粒の状況(断面図)

マイクロ放電加工やその他の加工により創成されたマイクロ形状の精度を損なわずに、表面粗さを最小とするためには、除去深さは、浅ければ、浅いほど良い。

図3-5は、ECMと新加工法において700 μm のトラバースを120秒間行った後、得られた粗さと深さの関係を印可電圧をパラメータとして示した。この実験において印可電圧は、放電加工へ移行してしまうため80Vを上限とした。加工電圧が80Vの時、新加工法は、最小の仕上げ面粗さを示し、ECMの粗さを下回る。さらに新加工法による加工深さは、ECMによるものより少ない。これらの結果は、開発した仕上げ法は、仕上げ面精度、除去量の観点から微細構造体の表面仕上げに良好な特性を有していることがわかる。

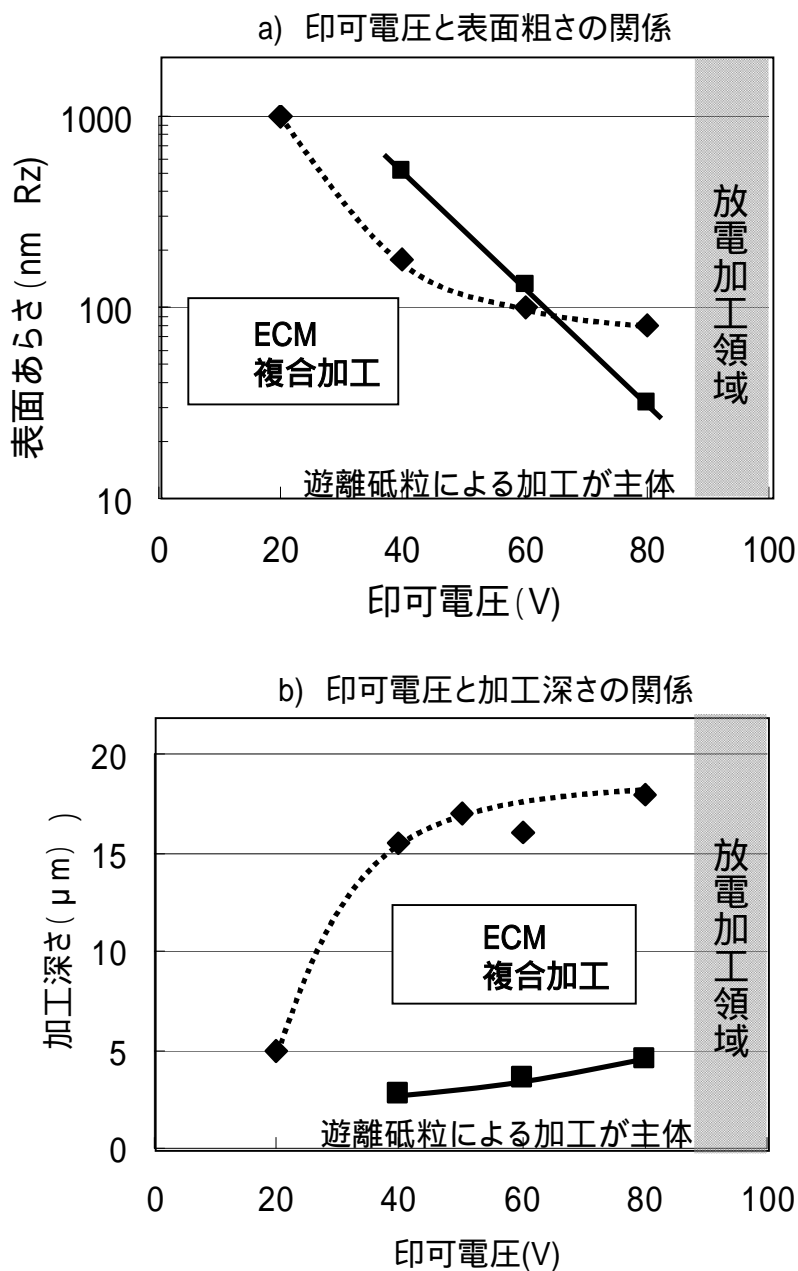


図3-5 印可電圧と表面粗さおよび加工深さの関係

3.4 形状精度と仕上げ面精度

直径100 μm の工具電極を回転させながら、430 μm の幅にわたってトラバースさせ本加工法により仕上げ加工を行った。ワークはSUS304、加工時間は120秒とした。

図3-6に示すように折り返しが入る両端を除く中央部の250 μm にわたって0.11 μm の平坦度が得られた。これはマイクロ放電加工における精度と同等である。

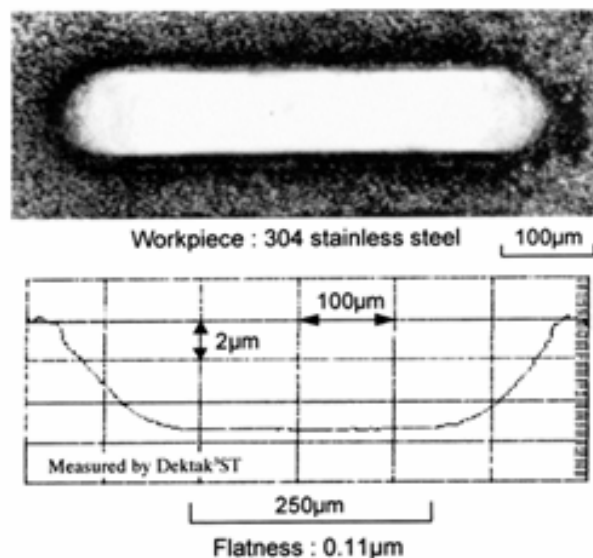


図3-6 トラバースによる仕上げ加工

加工時間と表面粗さの関係を図3-7に示す。30秒ごとに表面仕上げ状態を観察し、加工の進展を表面性状(顕微鏡写真)と粗さで表現した。図中、中央のグラフは粗さの時間変化であり、対応する時間での観察写真を周囲に配している。

加工開始後30秒では表面に多くのピットが観察される。これらのピットは電極とワークとの間に生ずる不均一な電流分配によるものと推察されが、これらのピットにより表面粗さは悪化する。

仕上げ時間が60秒から120秒へかかるとピットは、次第に消滅し、表面粗さも大幅に向上する。

グラフから60秒までは粗さが悪化しているが、60秒以降は明らかに改善しており、120秒後には本実験値の最良値である32nmの仕上げ面粗さに到達している。180秒まで加工時間を延ばしてもこれ以上の向上は見られなかった。2分程度の短時間の仕上げ加工はECMの優れた点である。

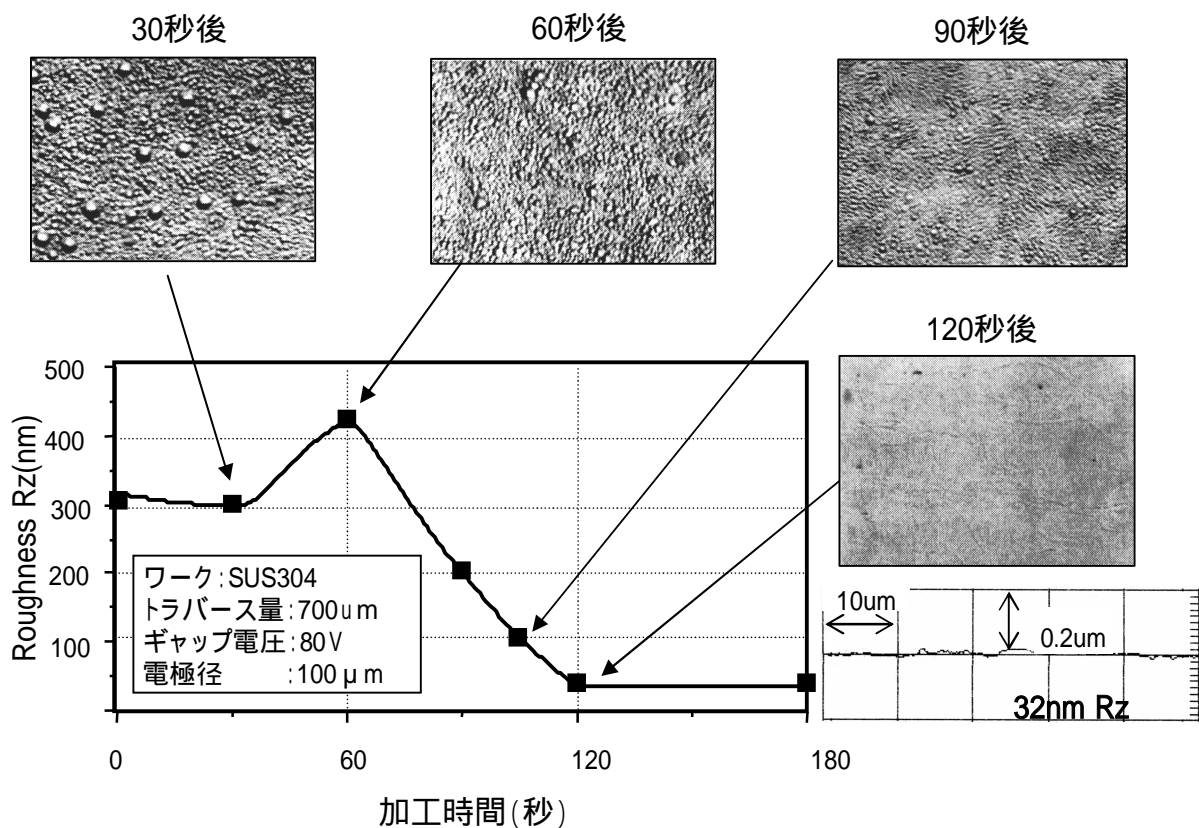


図3-7 加工時間と表面仕上げ粗さ

3.5 放電・電解複合加工機による高度仕上げ加工

複雑なマイクロ3次元構造体の仕上げ加工には、工具およびワークの高精度位置決めが必要である。そのためワークを持ち変えることなくマイクロ放電加工から仕上げ加工へ移行し、なおかつ同一の工具電極を使用することができれば誤差を発生すること無く仕上げ加工が可能である。

このようなコンセプトのもと3次元マイクロ放電加工および複合仕上げ加工を行う加工装置を開発した。図3-8に複合加工装置の構成図を示す。5軸の位置決め機構を採用することでワークを多方向から加工することが可能となっている。5軸の位置決め機構は、X、Y、およびワーク回転のC軸さらに電極の位置決めのためのZ軸である。軸はX、Y平面と直交しており、C軸は平行となっている。軸の回転機構は、X、Yステージにマウントされているが、加工槽および加工槽に固定されているC軸の回転機構ごと回転するようになっている。電解加工と放電加工の切り替えは加工液および回路の切り替えて行う。

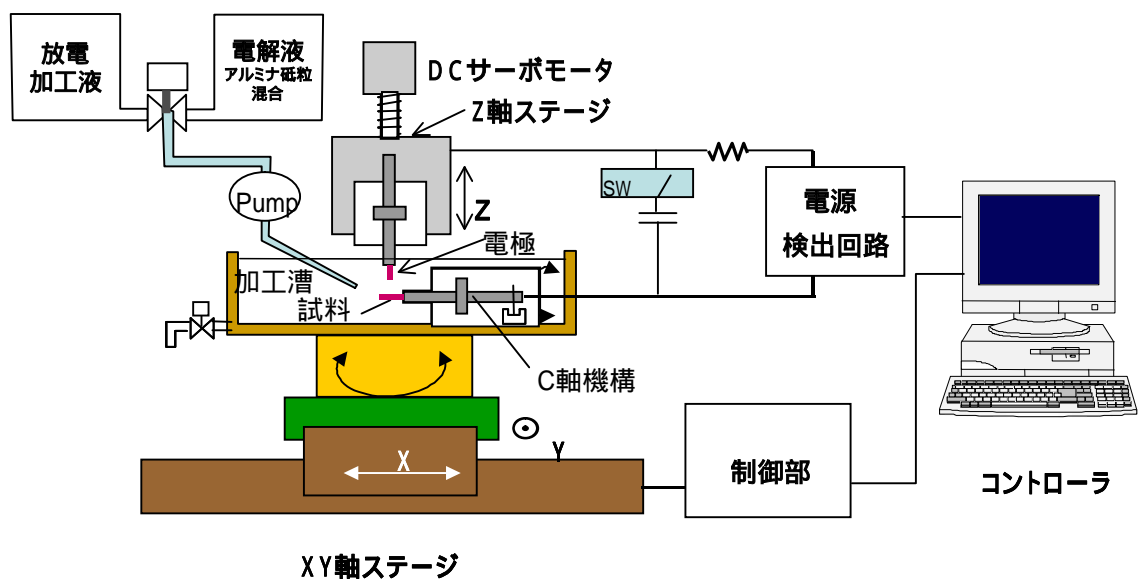


図3-8 加工装置の構成

本加工機において放電加工電源から電解加工電源に、放電加工液から電解液に入れ替えることにより、形状加工から仕上げ加工までの連続プロセスが可能である。放電加工液および電解液は電極とワークとの間へ細径ノズルより滴下することで供給する。そのため、放電加工用の電極がそのまま仕上げ工具として使用が可能となり、工具ワーク間の相対位置精度を保つことができる。

このような3次元のマイクロ構造体の仕上げ加工を行うための基礎検討として円筒表面の仕上げ加工を行った。

マイクロ放電加工により直径940 μm の円筒表面加工を行った後、図3-9に示すように新加工法による表面仕上げ加工を適用した。

仕上げ加工は、ワークを高速回転させながら1mmにわたって加工電極に対し繰り返しトラバースさせた。加工電極はZ方向を固定で行った。

図3-10は仕上げ加工を行った円筒の顕微鏡写真である。適用部が鏡面に近い状態で仕上がっており、円筒度は0.4 μm である。

本結果は、図3-11に示すような先端部にミラーを形成したシャフトへ直接本仕上げ加工を適用することで、マイクロウォブルモータのロータとして使用可能な表面精度に仕上げることができる。次章の円筒積層プロセスとの組み合わせことで、図3-12に示す探傷センサなどへの適用が可能となる。

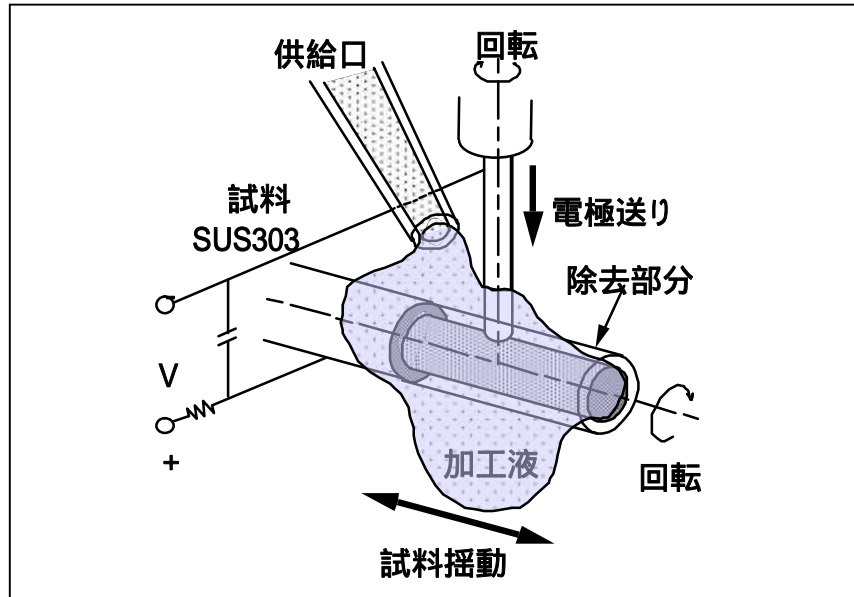


図3-9 複合加工装置での仕上げ加工

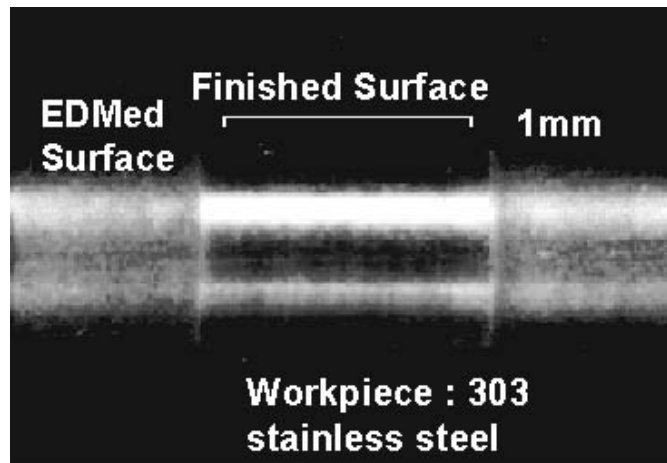


図3-10 仕上げ部顕微鏡写真

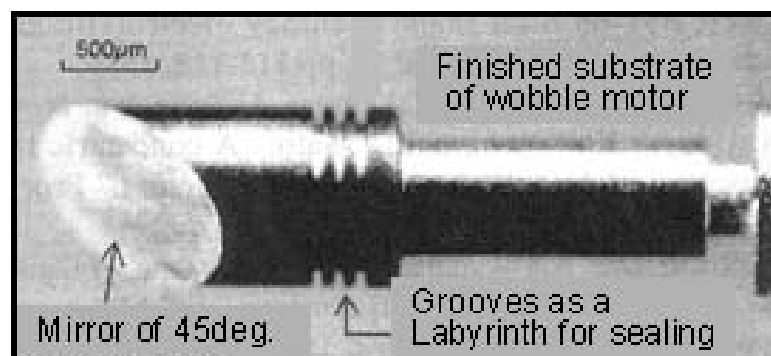


図3-11 マイクロ構造体の加工例

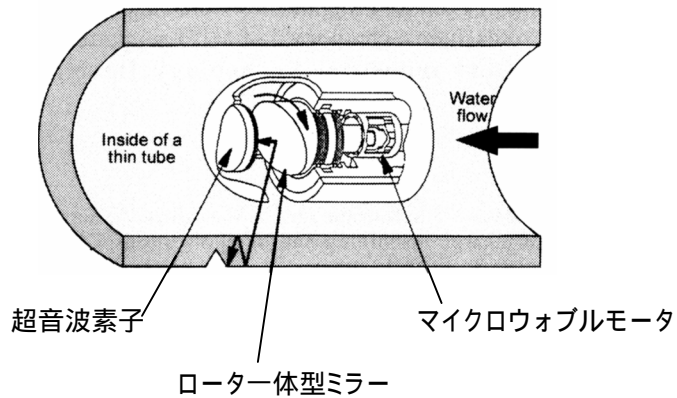


図3-12 細径管の超音波探傷システムへの応用

3.6 結論

- 1) マイクロ放電加工や電解加工単独では得られない約30nmRzの表面粗さが得られることを明らかにした。

これは、加工電極近傍に凝縮したアルミナ砥粒が、電極の回転に付随し高速運動することで、機械的ポリシングが同時に進行するためと考えられる。加工の主体は、機械的ポリシングであり、形状精度を損なうことなく仕上げ面粗さが向上している。

- 2) また本方法とNCマイクロ放電加工機を組み合わせることで選択的エリアに対し、加工から仕上げまで一貫して行うことが可能になった。
次章に述べるマイクロウォブルモータのロータを想定した円筒面の仕上げ加工を行い、目標の仕上げ面粗さが得られることを確認した。

参考文献

- 1) T.Masaki, K.Kawata and T.Masuzawa :Micro electro-discharge machining and its applications, Proc. IEEEMEMS, 1990, pp.21-26
- 2) Y.Kimoto, H.Kamada, H.Morooka and Y.Kakino : Research on high shape accuracy electrolytic-abrasive mirror finishing, Proc. ISEM,1989.pp.115-118,
- 3) K.Nakamura, K.Takahala, A.Adachi, A.Ono, H.Ogura,and S.Aoki : An electrostatic micro wobble motor for nondestructive testing, Proc. International Micromachine Symposium, 1995, pp. 147-150

第4章

立体円筒MEMSプロセス加工による マイクロウォブルモータの研究

第4章 立体円筒MEMSプロセス加工による マイクロウォブルモータの研究

要旨

円筒基板に薄膜を形成する立体円筒MEMSプロセスを研究し、本加工プロセスを用い出力軸径1mm、外径1.4mmのマイクロ静電ウォブルモータの製作を行い、プロセスの有効性を検証した。

立体円筒MEMSプロセスは、円筒基板の上に犠牲層を含む種々の薄膜を同心円状に形成し、ロータからステータまでを一括して作り上げ、最終工程で犠牲層を除去する新しい加工方法であり、ロータとステータを組み立てることなくモータを製作することができる。

また従来評価方法が確立されていなかったマイクロ静電ウォブルモータにおける重要パラメータであるロータ・ステータギャップ、出力トルクについて、ウォブリングモーションの解析から、定量化する測定方法を確立した。ロータ・ステータの表面状態を直接SEMで観察することで、設計値と実験評価値との乖離の原因究明を試み、3種類の欠陥がトルク劣化の原因であることを明らかにした。

本研究による製作技術および評価技術によりサブミリ領域におけるモータ開発の一層の加速が期待される。

4.1 静電ウォブルモータの駆動原理

現在市販されているモータの多くが電磁力を用いて駆動するのに対して、今回製作したウォブルモータは、静電力を利用して駆動するタイプのモータである。図4-1に静電ウォブルモータの回転原理を示す。

ロータ上には誘電体膜が形成されており、ロータをアース電位としたときに、ステータ電極に順番に電圧を印加していくと、ロータは静電力によりステータ電極に順次引き付けられ回転を始める。ロータの1点に注目する(図の 印)、ステータに印可した電圧が一回転したときに、ステータ内径とロータ外径の円周の差に相当する角度だけロータが回転することになる。

すなわちモータの回転数 N (rotation/min)は、次式で与えられる。

$$N = 60 \cdot f / (G \cdot P) \quad \dots\dots(4.1)$$

ここで、 f : 駆動周波数(Hz)

G : モータの減速比

P : ステータ電極数

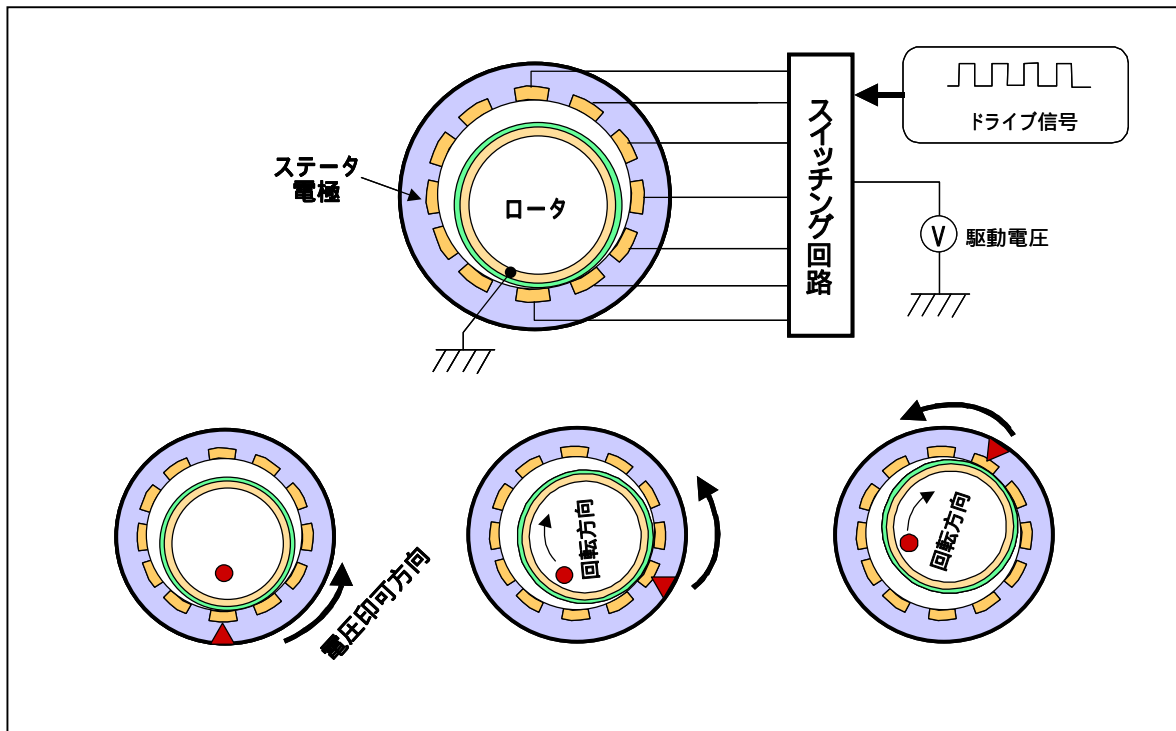


図4-1 ウォブルモータの動作原理

このとき、モータの減速比Gは(2)式で与えられる。

$$G = D_0 / (D_i - D_0) \quad \dots\dots(4.2)$$

ただし、 D_0 :ロータ外径

D_i :ステータ内径

(4.1)式はモータが減速機構を内蔵していることを示している。

またモータの静トルク T_r は、図4-2に示すように各部を定義すると、次式により近似できる²⁾。

$$T_r(\theta) = \epsilon_0 \cdot r \cdot L \cdot V^2 \cdot G(\theta) / 2 \quad \dots\dots(4.3)$$

ただし、 θ :ロータ・ステータの接点と、電圧印加ステータ電極との相対角

ϵ_0 :真空の誘電率

r :誘電体の比誘電率

L :ステータ電極長

V :印加電圧

$G(\theta)$:正規化トルク

(4.3)式において、 L 、 G 、 $()$ は構造体自身の幾何学形状、 V は与える電圧、 r は使用する材料でそれぞれ決定されるパラメータである。

計算のためのパラメータ

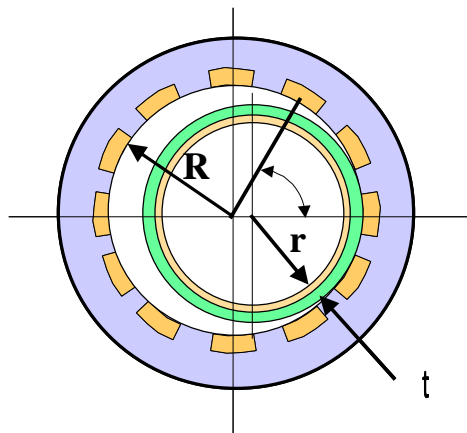


図4-2 計算のためのパラメータ

4.2 従来のウォブルモータの加工技術とその特徴

静電モータは、電磁モータのようにロータの外側に巻線を配置する必要がなく、構造的に減速機構が内蔵されているため、マイクロマシン用の超小型モータとして有望視されており、その研究についてこれまでにいくつか報告されている。それらを製作方法により分類したものを表4-1に示す。

表4-1 マイクロウォブルモータの製作方法の比較

	シリコンプロセス	機械加工	開発した加工技術
利点	<ul style="list-style-type: none"> ロータとステータの組立行程が不要 (アセンブリレス) 小型量産に適している 	<ul style="list-style-type: none"> 長軸のモータが可能 出力トルク 大 ($10^{-7} \text{N}\cdot\text{m}$程度) 出力の取り出し容易 	<ul style="list-style-type: none"> ロータとステータの組立行程が不要 (アセンブリレス) 小型かつ長軸のモータの実現が可能 出力の取り出し容易 (微細形状加工を行ったシャフトをロータとして使用可能)
欠点	<ul style="list-style-type: none"> 深さ方向の加工に不利 出力トルク小 ($10^{-10} \sim 10^{-11} \text{N}\cdot\text{m}$) 出力の取り出しが困難 	<ul style="list-style-type: none"> 小型化、量産化が困難 ロータとステータの組立行程が必要 	
	ロータ直径120 μm 厚さ7 μm 50V 10000rpm  東京大学 藤田	ロータ直径500 μm 外径1.6mm 長さ 5mm  Utah大学	ロータ 1mm 外径1.4mm 長さ5mm  松下技研

ウォブルモータの製作方法は、半導体加工技術を応用したものと、汎用加工を用いたものとに大別できる。

たとえば、MITではLSIプロセスでロータ直径100 μm のモータの試作に成功している³⁾ KfKは高トルク化を目指し、LIGAプロセスによりロータ直径125 μm 、ステータ長として100 μm のモータを試作した⁴⁾。これらは、半導体加工技術を応用したものである。

一方、Utah大学では、放電加工を用いて直径1.6mm、ステータ長5mmのモータを試作し、MITと比較して1万倍大きい $10^{-7}\text{N}\cdot\text{m}$ のトルクを実現した⁵⁾。オムロンは、直径9mm、長さ20mmで $10^{-3}\text{N}\cdot\text{m}$ のトルクを示すモータを開発している⁶⁾。これらは、汎用機械加工技術と位置付けることができる。

薄膜加工技術を用いた場合の利点は、数百 μm 程度までの小型化が容易に実現でき、犠牲層エッチング技術を用いているため、ロータとステータの組立を不要にし、犠牲層の厚みによってモータの減速比を精密に制御できることがあげられる。その反面、トルクは極めて小さく、外部デバイスに対する動力伝達は非常に困難である。一方、汎用の加工技術で作られたモータは、トルクや外部への発生力伝達の面からは有利であるが、ロータとステータ間のギャップ管理や組立の必要性から、小型化には限界がある。いずれのモータ製作方法も一長一短があり、実用可能なマイクロモータを実現するには課題が多かった。

4.3 マイクロウォブルモータの立体MEMES加工プロセス

薄膜加工技術でつくられるモータと汎用加工技術でつくられるモータの双方の利点を兼ね備えた加工プロセスについて研究を行った。

図4-3に、本研究で対象とした立体円筒MEMSプロセスの概念図を示す。円筒積層プロセスとは、基板として円筒母材を使用し、その基板の上に犠牲層を含む複数の薄膜を同心円状に形成し、最終工程で犠牲層膜のみを選択的に除去することによって、ロータとステータを分離しモータを完成させる製作方法である。

この製作方法は、犠牲層エッチング技術を採用しているため、減速比の精密な管理ができ、ロータとステータの組立を必要としないモータ作製方法となっているため、モータの小型化に適している。またアキシャル方向に長いモータのため、ステータ長を長くすることができ、高トルクの出力が期待できる。

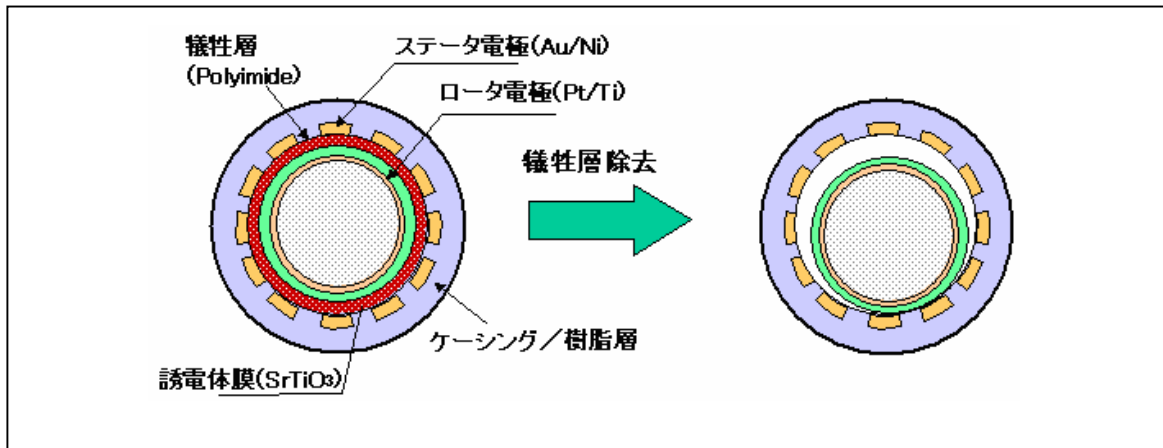


図4-3 立体円筒MEMSプロセスの概念図

4.3.1 立体円筒MEMSプロセスのフロー

図4-4に、円筒積層プロセスのフローを示す。以下、この図をもとに各工程について説明する。

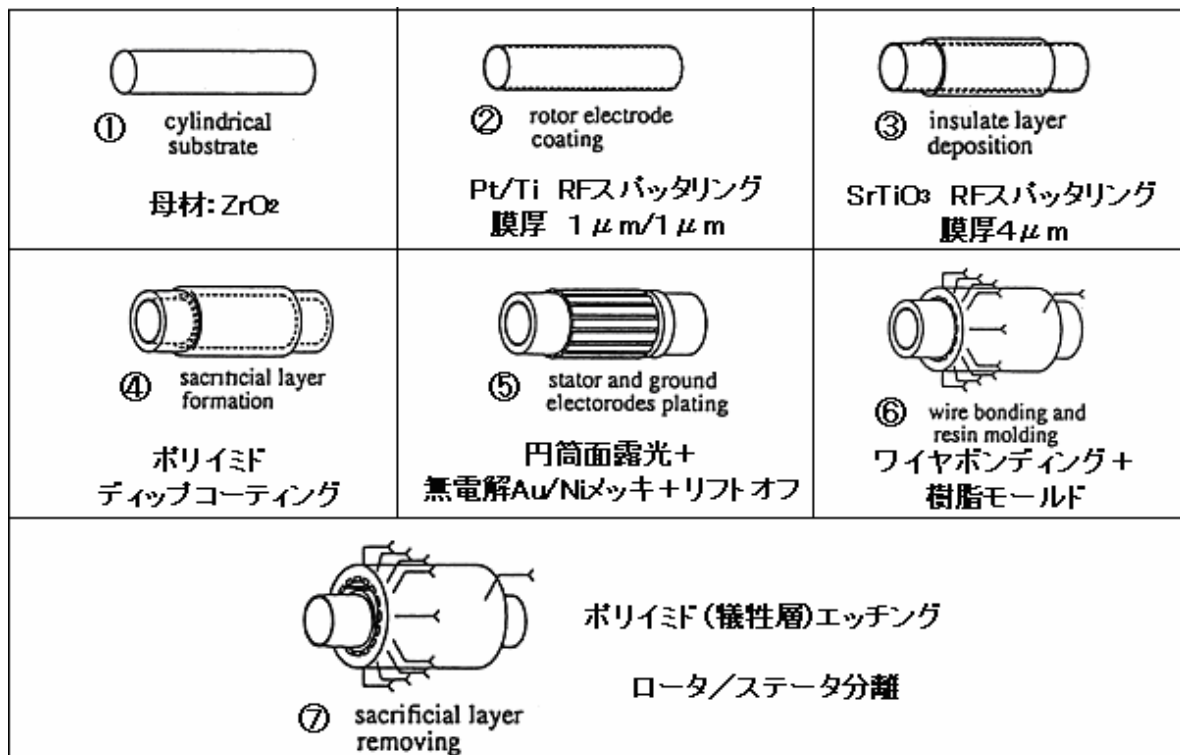


図4-4 立体円筒MEMSプロセスのフロー

円筒母材加工工程

円筒基板は、回転軸としての円筒度と、積層薄膜の基板としての面粗さの確保が要求される。この円筒基板には、マイクロ放電加工などで製作する円筒の先端部に対し超音波ミラーやグループ加工等を施した多段シャフトの使用を検討しているが、今回の製作においては、製作プロセスの見極めの観点から、円筒基板として市販の直径1mm、長さ15mm、表面粗さ20nmRa、真円度 $1\mu\text{m}$ 以下に仕上げた ZrO_2 ピンを使用した。

ロータ電極形成工程

円筒基板が絶縁物であるため、ロータ電極としてPt/Ti膜をRFマグネトロンスパッタ装置で、円筒基板を回転させながら成膜した。Pt/Tiの膜厚は $0.6\mu\text{m}$ である。

誘電体膜形成工程

ウォブルモータにおいて、誘電体膜の比誘電率 ϵ_r は(4.3)式で示したように、モータのトルクを支配する重要なパラメータである。報告されているウォブルモータでは、誘電体膜としてシリコン酸化膜($\epsilon_r = 4$)やアルマイト($\epsilon_r = 9$)などが使用されているが、今回はバルクでの比誘電率が200以上ある SrTiO_3 を使用した。 SrTiO_3 は、キュリーポイントが室温以下にあり、室温では常誘電性を示す強誘電体材料であるため、電界を取り除いた際、分極が残らず、静電力を駆動源とするアクチュエータに適した材料である。 SrTiO_3 を円筒基板上に薄膜形成するため、汎用のRFマグネトロンスパッタ装置(SPF-210H)に、図4-5に示すような改造を加え、円筒面誘電体膜形成装置とした。基板はランプによって加熱され、スピードコントロールモータによって回転運動を行う。また、 SrTiO_3 は比較的エッチングが難しいことから、メタルマスクを使用し、成膜を行った。モータにおける SrTiO_3 の膜厚を $4\mu\text{m}$ としたが、測定周波数1kHzで比誘電率119を得ている。

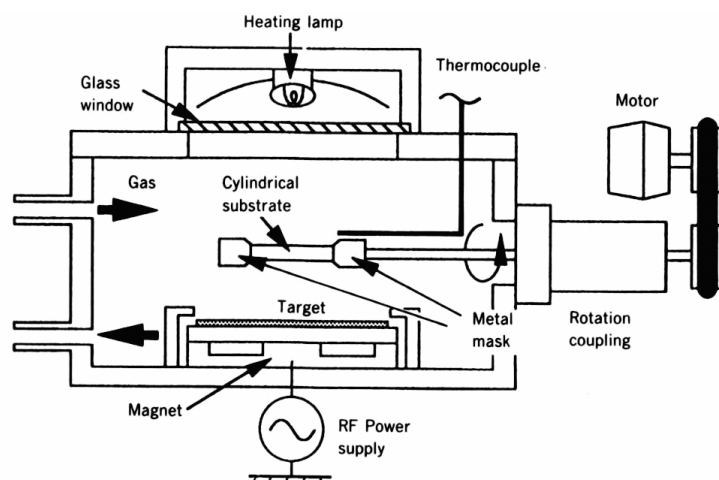


図4-5 円筒面誘電体膜形成装置

犠牲層形成工程

犠牲層は最終的には除去される膜であり、この犠牲層の膜厚が、ロータとステータ間のギャップとなり、(4.2)式のGで示されるモータの減速比を決定する。従来の犠牲層技術においては、CVDなどの成膜装置でシリコン酸化膜等の材料が用いられている。しかしながら、ウォブルモータ用の犠牲層としては、円筒基板に対し数 μm ～数十 μm オーダの膜厚と、mmオーダの長手方向に対する均一な成膜が必要なことから、従来の犠牲層形成技術は適さない。そこで、 μm オーダの膜形成が容易なポリイミドを犠牲層材料として選択し、円筒積層膜用のディップコーティング装置を試作して犠牲層を形成した。ディップコーティング法は、形成する膜厚の制御が、おおむね試料の引上げ速度と、コーティング材料の粘度で調整できるので、十数 μm オーダ近辺の膜形成に適している。なお、後述する円筒面露光工程におけるレジスト膜形成も、本装置を用いて形成している。

ポリイミドの粘度が $3\text{Pa}\cdot\text{s}$ のときの、引上げ速度と形成されるポリイミドの膜厚の関係を図4-6に示す。図よりポリイミド厚 $2\mu\text{m}$ 以上において、良好に膜厚制御が可能なのがわかる。ポリイミド膜の長手方向の均一性は、円筒基板の両端にダミー基板を用いることで確保した。得られたポリイミド膜の長手方向の均一性を図4-7に示す。

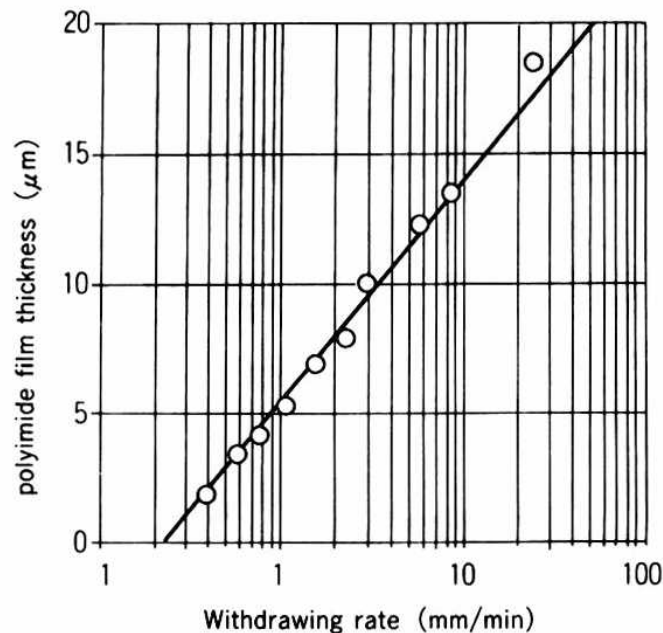


図4-6 引き上げ速度とポリイミド膜厚の関係

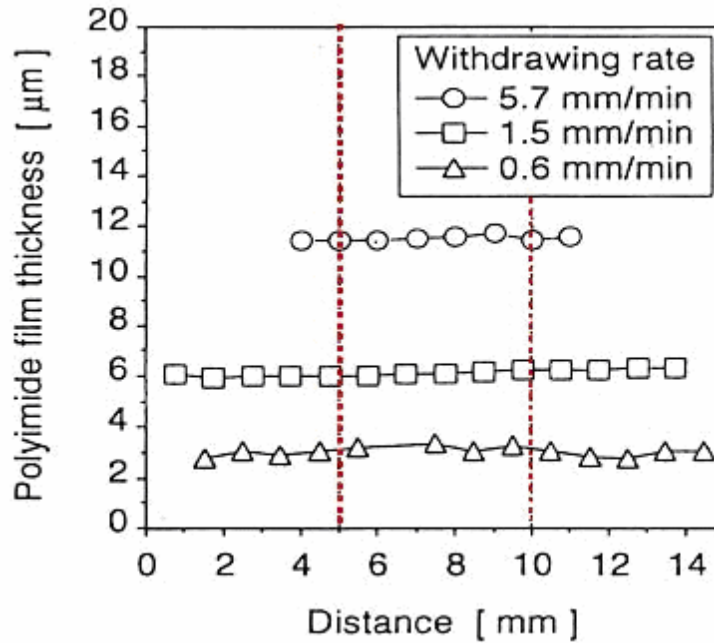


図4-7 ポリイミド膜厚の長手方向分布

ステータ・グランド電極形成工程

ステータおよびグランド電極は、ディッピング装置でホトレジスト膜を塗布し、円筒面露光用に開発したコンタクト露光器でパターニングを行い、無電界めっきによってNi/Au膜を約5 μm堆積させた後、レジスト膜をリフトオフすることにより形成した。図4-8に、開発した円筒面露光装置を示す。

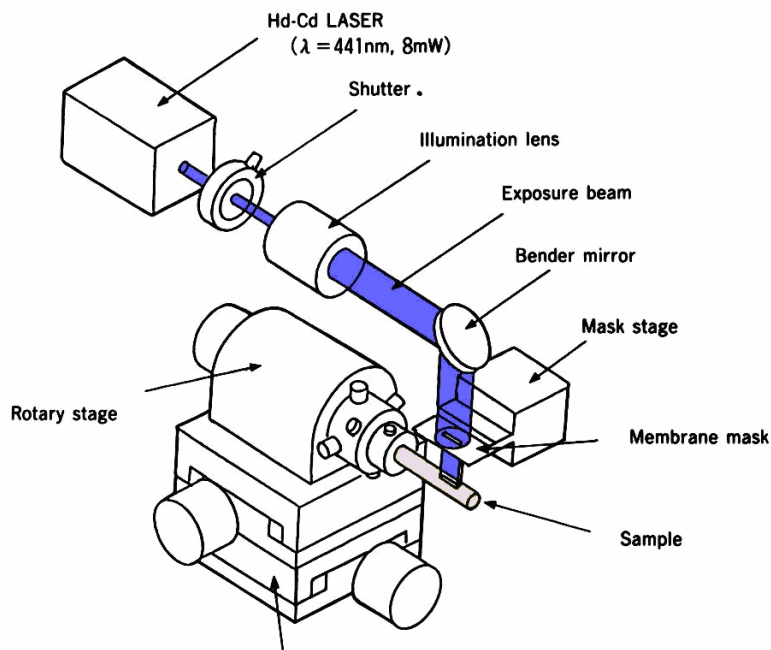


図4-8 開発した円筒面露光装置

試作したモータにおいては、1mm径の円筒基板に対し、16極のステータ電極を形成している。形成したステータとグランド電極の外観を図4-9に示す。ステータ電極は、幅160 μm 、長さ5mmで、電極間隔は約30 μm である。ステータの電極長Lは、(4.3)式で示したように、モータのトルクを決めるパラメータである。試作したモータの加工方法は、円筒基板の軸方向に対してステータ電極を形成できるため、静電力を発生させる面積を大きくとることができ、高トルク化に適しているといえる。

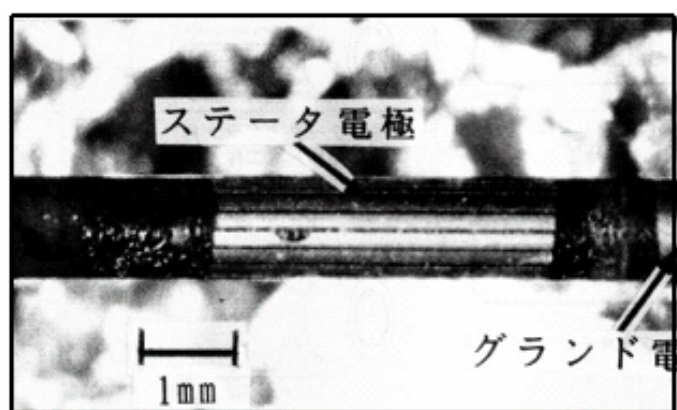


図4-9 形成したステータとグランド電極の外観

配線および樹脂モールド工程

上記工程で形成された各電極と中継基板間を、30 μm のAuワイヤで接続した後、エポキシ系の樹脂で外周をモールドした。この工程でモータの外径は決定されるが、試作したモータの外径は1.4mmである。

犠牲層除去工程

ロータとステータ間のギャップは、犠牲層であるポリイミド膜をブチロラクトンにより溶解除去することによって生み出した。本開発の犠牲層は、一般の犠牲層と比べて極めて高アスペクト(膜厚に対して長手方向に長い)の膜であるため、犠牲層除去レートを高めることが課題であった。本開発では、ポリイミド溶解時に超音波のアシストを加えることにより、除去レートの短縮をはかった。図4-10に、超音波アシストを用いない場合の除去レートと、超音波アシストを用いた場合の除去レートの比較を示す。

本図より、超音波アシストを加えない場合には長手方向5mm以上になると犠牲層の除去が困難になるのに対し、超音波アシストを加えることにより除去レートを飛躍的に向上できることがわかる。この理由は、超音波が溶解されたポリイミドを吐き出し、ポリイミド膜に対して新鮮な除去溶剤を供給しているためと考えられる。

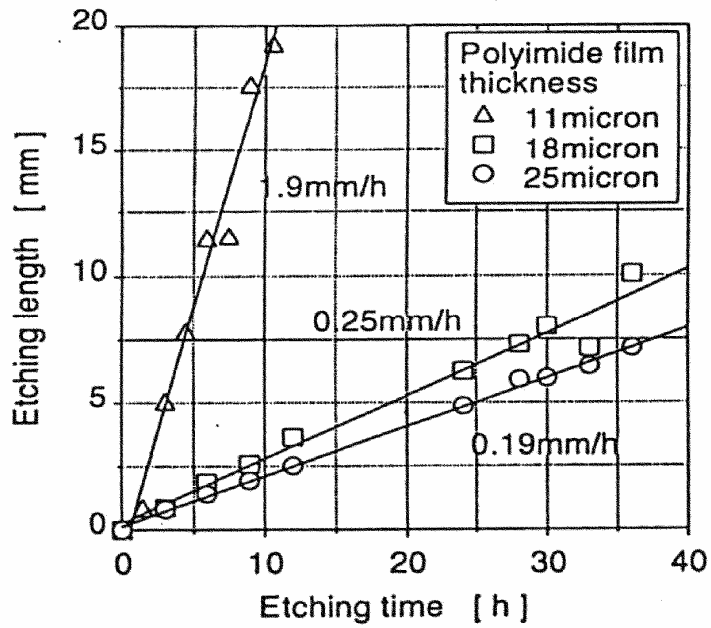


図4-10 犠牲層の除去レートの比較

4.3.2 マイクロウォブルモータの製作

円筒積層プロセスの有効性を検証するため、出力軸径1mm、外径1.4mm、駆動周波数1.5kHzで回転数200r/minのウォブルモータを製作した。

図4-11に、犠牲層除去前のモータ断面写真と、図4-12に完成後のモータ全体写真を示す。図4-11より、各薄膜が良好に積層されていることがわかる。

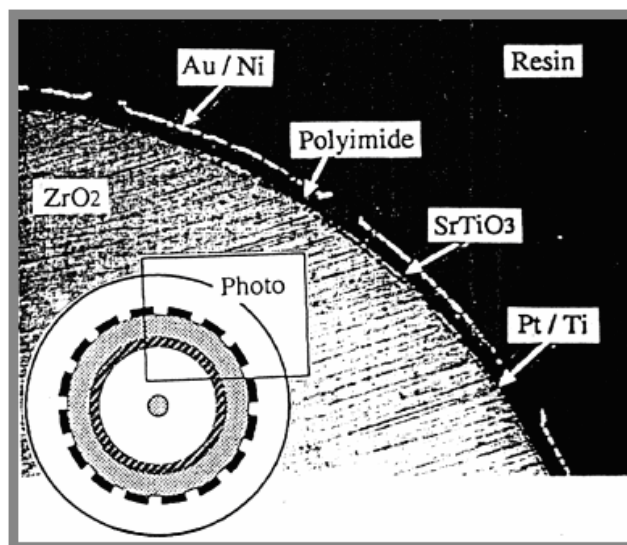


図4-11 犠牲層除去前の断面写真

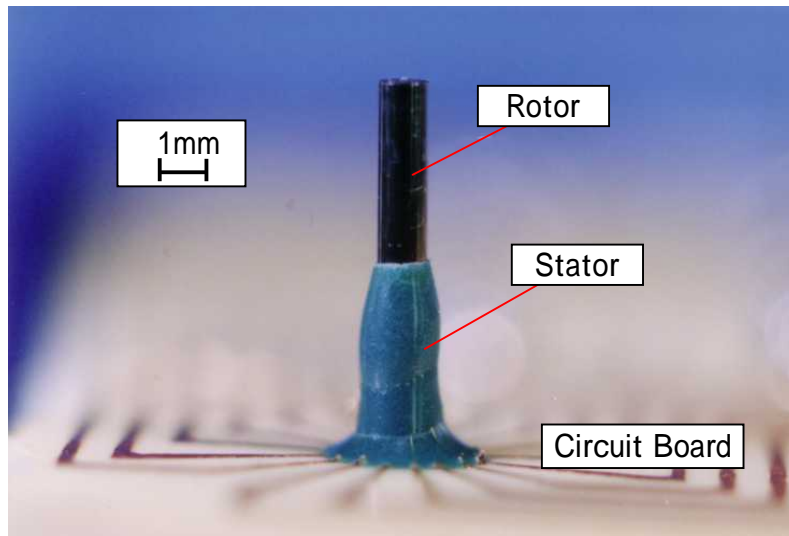


図4-12 完成後のマイクロウォブルモータ

4.4 マイクロウォブルモータの評価技術

4.4.1 製作仕様

立体円筒MEMSプロセスにより製作したモータの設計仕様を表4-2にまとめた。

表4-2 製作したモータの設計仕様

rotor	Outer radius	504.5um Including metal and insulate layer)
	length	15mm
	m aterial	ZrO ₂
	mass	76mg
	Moment of inertia	$9.9 \times 10^{-12} \text{kg} \cdot \text{m}$
insulator	thickness	3.9um
	Specific dielectric constant	100
Sacrificial layer	thickness	19.7um
stator	Inner radius	524.3um
	Electrode length	3.5mm
	Number of poles	16
Gear ritio	25.6	

4.4.2 マイクロウォブルモータの評価装置

本製作モータの特性評価用に製作した測定装置の構造を図4-13に示す。

ロータ上面には、回転測定用にアルミニウム薄板を取り付け、先端 $R=35\mu\text{m}$ のピボットでロータの底面を支えている。ファイバー型光電センサをアルミ薄板へ照射することで、1回転あたり1パルスを得ることで回転速度を測定する。

ロータのウォブリング運動は、直交して配置したレーザ三角測量センサによってXおよびY方向各々が同時に測定される。

本評価においては、モータの姿勢を直立としたためロータは、板ガラスプレートで支持したが、モータを水平に置いた場合はピボット軸受の必要はない。

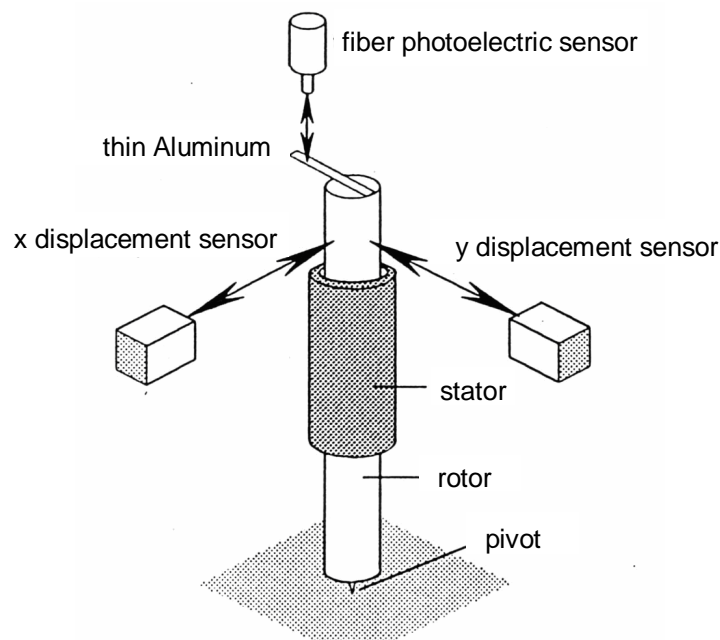


図4-13 特性評価用に製作した測定装置の構造

4.4.3 回転速度の評価

まず最初に、回転速度を測定し、モータの安定動作範囲を明らかにした。

図4-14は、印可電圧を100Vから250Vまで変えながら、駆動のパルス周波数とモータ回転速度の関係をプロットしたものである。設計値と示した実線は、設計値から求めた駆動周波数とロータ回転数の理論値 $N = 60 / (16 \times 25.6) \times f$ を示している。

実験値漸近線と示した実線は、後述の実験から求めた実際のギア比もとにした修正理論直線である。

修正理論直線をもとに考察すると、1kHz以下の低い駆動周波数に対しては、ロータ回転数はほぼ追従(比例)しているが、これより高い周波数領域では、モータの同期がとれなくなるとともに、回転数が理想値より低くなっている。印可電圧が高いほど、両者の比例関係は、広く範囲で維持されており、高い駆動電圧がより安定した回転を実現することがわかる。

実際のできあがり値は設計値から75%ほど低い値を示している。回転数は(4.2)式で与えられるようにギア比に異存する。このため、ステータ側を手動で回転させロータの回転数を実測することでギア比を詳細に求める実験を行った。

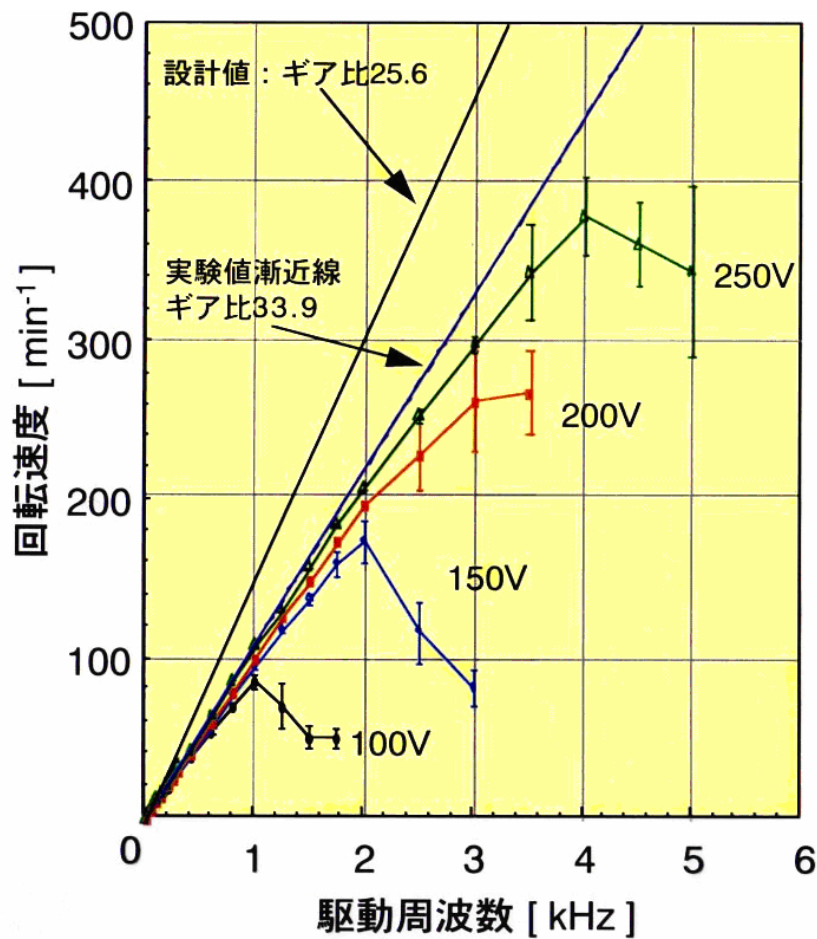


図4-14 駆動のパルス周波数とモータ回転速度の関係

実験では、モータは水平に保持し、両者間にスリップが発生しないようにステータをゆっくりと回転させ、ロータが重力により転がることで回転させた。図4-15はステータ回転数に対するロータ回転数を示す。両者の関係からギア比を求めるとギア比は、33.9になる。この値から、(4.2)式を用い逆算すると実際の平均ギャップは設計値より5 μm 小さい14.9 μm であると推察される。このことから、製造工程の中にロータ・ステータギャップが狭くなっていると推察される。

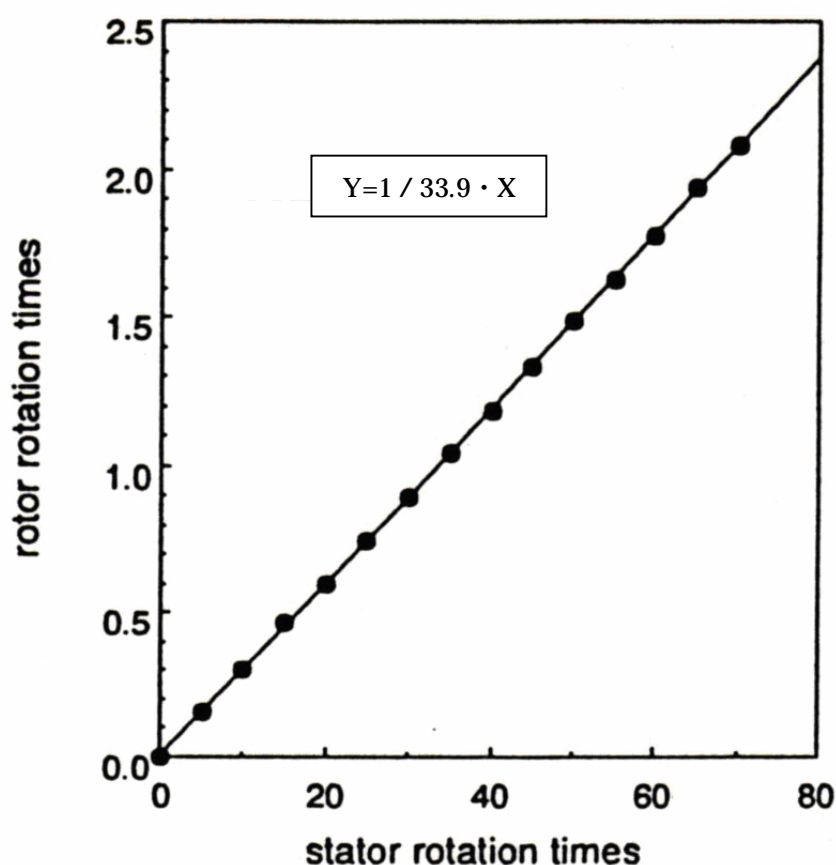


図4-15 ギア比の測定結果

4.4.4 ウォブリング特性の評価

ウォブリング特性の測定条件として250Vの印可電圧と200Hzの駆動周波数を採用した。本条件下ではロータは、駆動のパルス周波数に同期して回転し、スリップを引き起こさないと判断した。

図4-16にレーザ変位計で測定したロータの中心位置をドットで表示した。また、設計値から計算した理想軌跡を実線で表示した。

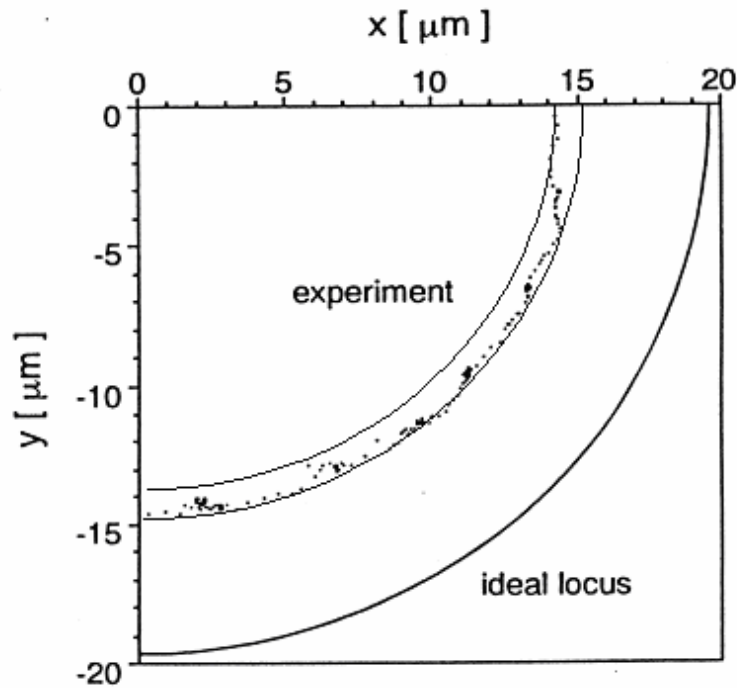


図4-16 レーザ変位計によるロータ中心位置測定結果

本測定で求めたウォブリング半径は約 $15\ \mu\text{m}$ であり、理想軌跡との差は $5\ \mu\text{m}$ である。この結果は、ギア比の測定から求めた平均ギャップと一致する。すなわち本測定結果は、正確にロータ・ステータ間のギャップが測定されていることを示している。さらに、図4-16中の軌道測定の再現性は非常に高く、軌跡の揺らぎそれ自体がロータとステータの表面の接触状態を示していると考えられる。図中の中心軌跡の揺らぎは $1\ \mu\text{m}$ 以内であり、このことから表面の粗さはほぼ $1\ \mu\text{m}$ であると推察される。

4.4.5 静電気力による発生トルク

図4-17は、等角写像近似¹¹⁾によって計算された理論的な静電気力による発生トルクを示す。水平軸はロータ接触点に対する印可電圧が加えられている電極の角度をとっている。

印可電圧 250V とした。このとき他の電極およびロータはアース電位である。

ロータがあるステータ電極から別の電極へ移る場合の起動トルクは $1.7 \times 10^{-5}\ \text{N}\cdot\text{m}$ ($\theta = 22.5^\circ$)で、最大トルク $3.2 \times 10^{-4}\ \text{N}\cdot\text{m}$ は、 $\theta = 9^\circ$ で得られる。

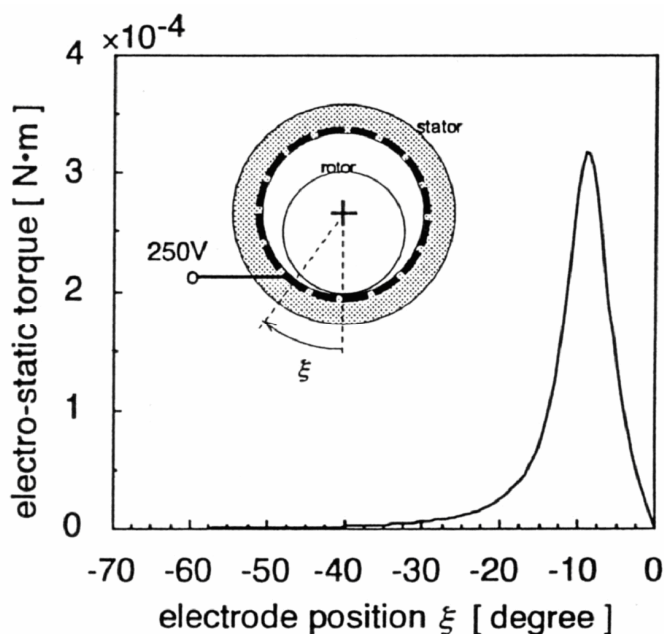


図4-17 欠陥を考慮した電極位置と静電静止トルクとの関係

4.4.6 動トルクの評価

図4-16は駆動電圧250V、駆動周波数200Hzにおけるウォブリング運動の時間的変化をxおよびy方向の変位としてプロットしたものである。このような低い周波数においては、本図に示すようにロータがステップ的に動作しているため、数値微分することでロータの角加速度が計算できる。角加速が求まると動トルクは、下式で計算できる。

$$T = G \cdot I_p \cdot d^2 / dt^2 \quad \dots\dots(4.4)$$

ここで d^2 / dt^2 : 角加速度

I_p : 慣性モーメント

G : ギア比

実験から求めた角加速度をもとに上式から最大動トルクを計算した。結果を表4-2に示す。

表4-2 計算結果

	ピボット支持の場合	ピボットなしの場合
最大トルク	$1.0 \times 10^{-7} \text{N} \cdot \text{m}$	$1.3 \times 10^{-7} \text{N} \cdot \text{m}$

図4-17の中で計算した理論的静電気力による発生トルクと比較して、大きな劣化を示している。

この値の信頼度を確認するために、トルクの直接測定を試みた。図4-18に示すようにロータに加わる静電トルクとバランスする重量を実測し、最大静止トルクを求めた。本方式による測定では最大静止トルクは $2.0 \times 10^{-7} \text{ N}\cdot\text{m}$ であった。この結果は、表4-2に示したウォブリング測定から導いた値とほぼ一致し、ウォブリング運動から最大動トルクを求め方法が妥当であることを検証した。

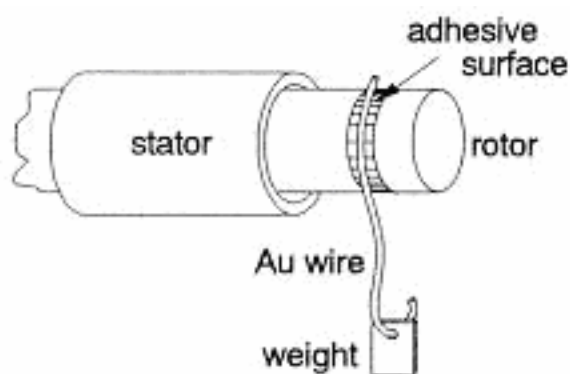


図4-18 トルクの直接測定

4.4.7 表面状態の考察

図4-16に示したロータ中心位置の軌跡は、明らかにステータの実際の内部半径が $5 \mu\text{m}$ ほど設計値より小さく、その内部のプロファイルにはおおよそ $1 \mu\text{m}$ 凸凹があることを示している。ステータの内部の表面状態を直接観察するために、ステータを割りSEMによって観察した。図4-19は犠牲層が除去された直後のステータ内部表面のSEM写真である。犠牲層除去直後の電極およびステータ樹脂のあらさは、電子線3D分析からおのおの $0.07 \mu\text{m}$ および $0.09 \mu\text{mRa}$ である。

図4-20に、モータを数時間運転した後の表面状態のSEM写真を示すが、欠陥があちこち見受けられる。同様に電子線3D分析を使用して、表面の粗さを検査し、欠陥が、3つのタイプに分類されることがわかった。

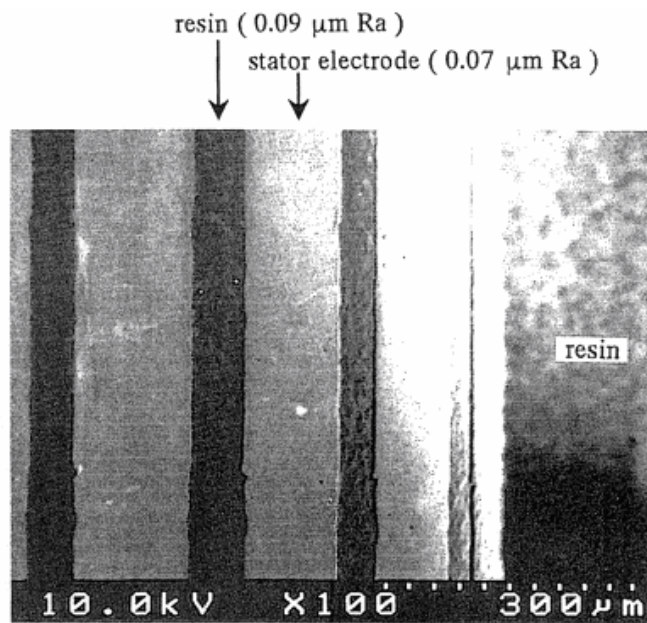


図4-19 犠牲層が除去された直後のステータ内部表面のSEM写真

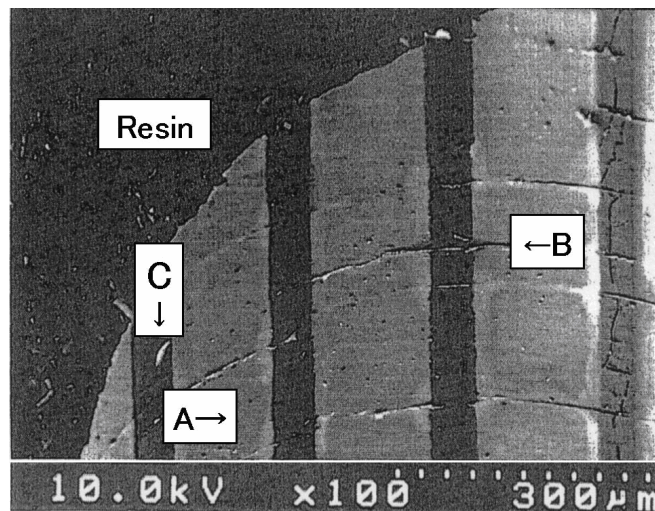


図4-20 運転後のステータ内部表面のSEM写真

欠陥A(ステータ電極およびステータ樹脂の間の境界に沿って走っている)は、 $0.5\ \mu\text{m}$ 高さの樹脂のバリである。この欠陥は、ステータ電極を形成するリフトオフプロセスに起因すると考える。図4-21にリフトオフプロセスにより電極が分離された後のモータの断面図を示すが、薄い電極の端がわずかにポリイミド層から突き出していることが確認される。この欠陥は、ステータを形成する樹脂が電極端に沿って十分に満たされない場所に生じるものと考えられる。

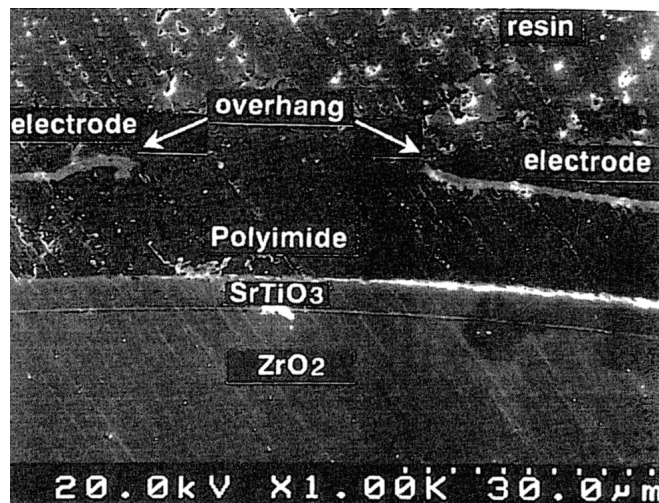


図4-21 リフトオフプロセスにより電極が分離された後のモータの断面図

欠陥B(ステータおよび樹脂を横断して走る)は高さ約 $0.5\mu\text{m}$ である。この種の欠陥は図4-19からわかるようにオペレーション前には全く存在しない。そのためモータ駆動後に空気中に存在するちりやゴミをモータが巻き込むことによるスクラッチ、あるいはステータ樹脂の応力緩和による収縮により引き起こされていると考察する。

その他の欠陥として、ステータの内部から引き裂かれたように見える小さい約 $1 - 2\mu\text{m}$ の小片(例えば図中のC)がある。このタイプも、オペレーション前の状態では観察されない。ウォブリング運動により、ステータ樹脂が削り取られて発生している可能性が高く、ステータの耐久性向上が課題である。

4.4.8 トルク劣化に関する考察

図4-20に示した欠陥のサイズは、 $0.5\mu\text{m} \sim 2.0\mu\text{m}$ であり、図4-16に示したロータのウォブリング軌跡から予測された粗さ $1\mu\text{m}$ と一致する。

このステータ内部のプロファイルとトルク減少の関係について考察する。

ステータ内径の縮小および欠陥が発生トルクに及ぼす影響を考察するために、ロータ・ステータの接触が高さ h の欠陥によって妨げられている単純なモデルを仮定し、等角写像方法によって再度静電気力による発生トルクを計算した。図4-22に電極位置

と 250V 印可時の静電静止トルクとの関係を、欠陥の高さがおのおの $0, 1, 3$ および $5\mu\text{m}$ の場合について計算した結果をプロットした。

トルクは、高さ h によりかなり敏感に変化する。 $1\mu\text{m}$ のこぼこは、 $1/10$ 程度のトルク減少を引き起こし、ロータがステータ電極より $5\mu\text{m}$ 離れた場合は、

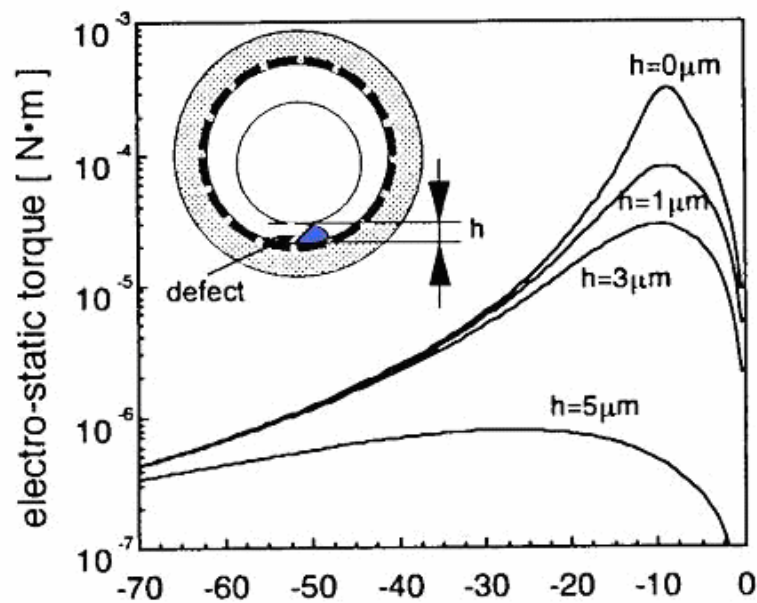


図4-2.2 欠陥を考慮した電極位置と静電静止トルクとの関係

トルクは $1 \times 10^{-6} \text{ N}\cdot\text{m}$ 以下に急激に減少し、今回の測定トルクと同じレベルとなる。ロータのウォブリング軌跡から求めた表面あさは $1 \mu\text{m}$ であり、SEMで観察したステータ表面の凹凸も $0.5 \sim 2 \mu\text{m}$ であるため、これらの結果から今回のトルクレベルまでの減少は説明できない。

ステータ内径の $5 \mu\text{m}$ ほどの収縮に伴う、 $h = 5 \mu\text{m}$ に相当する凹凸は観察できなかったが、ステータ樹脂中の応力開放によって引き起こされている収縮と考えられるため、局所的に生じていることも考えられる。

この現象は、成型されたステータ樹脂厚の不均一性とも相関があると思われ、高トルク化の観点からさらなる解析を進めたい。

4.5 結論

- (1) 立体円筒MEMSプロセスの研究を行い、ロータ直径 1 mm 、モータ外形 1.4 mm 、電極長 2 mm のマイクロウォブルモータを製作し、プロセスの有効性を実証した。
- (2) マイクロウォブルモータの性能評価技術の研究を行い、従来評価方法が確立されていなかった静電ウォブルモータにおける重要パラメータであるロータ・ステータギャップ、出力トルクについて、ウォブリングモーションの解析から、定量化する測定プロセ

スを確立した。

(3)製作したマイクロウォブルモータは、 $1.0 \times 10^{-7} \text{N} \cdot \text{m}$ の発生トルクが得られた。

(4)発生トルクとシミュレーション結果との差分について上記評価技術により考察を行い、ステータケースの樹脂収縮による数ミクロンのステータ/ロータ間のギャップ変動および回転中に発生するコンタミが出力トルクに大きく影響していることを明らかにした。

立体円筒MEMSプロセスは、従来の製作方法に比べて以下に示す3つの優位点を有す。

モータの出力軸となる円筒基板は、機械強度の優れる構造材料の使用が可能で、軸端にグループやキー溝等の加工を行うことにより、外部デバイスとのインタフェースが実現できる。

犠牲層エッチング技術の採用により、ロータとステータの組立が不要であり、微小機械の製作が容易となる。

静電力を発生させる面積を大きくとれるので、マイクロ化した場合においても高トルク化が期待できる。

このため、今後の電子部品、通信機器、家電製品等の小型化、高密度化に貢献することが期待できる。

参考文献

1) H.Ogura,et al. : A concentric build-up process to fabricate practical wobble motors, Proc. IEEE MEMS,1994, pp.114-118

2) R.Mahadevan, : Analytical modeling of electro-static structures, Proc. IEEE MEMS,1990, pp 120-127

3) M.Mehregany,et al. : Operation of micro-fabricated harmonic and ordinary Side-Drive Motors, Proc. IEEE MEMS,1990, pp 1-8

4) U.Wallrabe,et al. : Theoretical and experimental results of an electrostatic micro motor with large gear ratio fabricated by LIGA process, Proc. IEEE MEMS,1992, pp 139-140

5) S.C.Jacobsen,et al. : The wobble motor: An electrostatic planetary armature Microactuator, Proc. IEEE MEMS, 1989, pp17-24

6) T.Yada, et.al. : Development of wobble motor, Transaction,1992, pp1628-1633

- 7) H.Ogura, et al. : A Concentric Build-up Process to Fabricate Practical Wobble Motors, Proc. IEEE MEMS, 1994, pp.114-118.
- 8) U. Wallrabe, et al. : Friction measurements on LIGA-processed microstructures, Journal of Micromechanics and Microengineering, vol.4-1, 1994, pp.14-22
- 9) V.R. Dhuler et al. : A Comparative Study of Bearing Design and Operational Environments for Harmonic Side-Drive Micromotors, Proc. IEEE MEMS, 1992, pp.171-176
- 10) U. Wallrabe, et al. : Design rules and test of electrostatic micromotors made by the LIGA process, Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 4-1, 1994, pp.40-45
- 11) R. Mahadevan,et.al. : Analytical Modelling of Electrostatic Structures, Proc. IEEE MEMS,1990, pp.120-127

第5章

平面MEMSプロセスによる 振動型加速度センサの研究

第5章 平面MEMSプロセスによる振動型加速度センサの研究

要旨

力学量を検出するセンサは、小型化、低コスト化、高信頼性実現のためにバルク型から半導体プロセスを応用したMEMSセンサへ移行している。力学センサの一つである加速度センサも、抵抗値変化や静電容量変化により加速度を検出するタイプのものが、SiのMEMSにより実用に供されるようになってきている。しかしながら、小型化に伴う出力低下を補う高感度化が依然として課題となっている。

振動型は、構造体の固有振動数の変化を検出するものであり、小型化した場合においても加速度の高感度検出が可能と考えられる。

本研究では、筆者らが考案した共振型の加速度センサについて、

- 1) シミュレーションに基づくダウンサイジング時の加速度センサの性能見極め
- 2) 拡大モデルによる原理検証
- 3) MEMSプロセスによる等倍モデルの試作とその特性評価

のステップで研究を進め、そのポテンシャルと実用化にむけた課題を明らかにした。

5.1 振動型加速度センサの位置づけ(従来型加速度センサとの対比)

従来の加速度センサについての比較・評価を表5-1に示す。大別すると圧電方式と半導体方式に分類される。

圧電方式は自動車用のサスペンション、エアバック両方に商用化されているが、DC成分の検出ができない、バルクの圧電体を使用しているため小型化が困難という欠点がある。

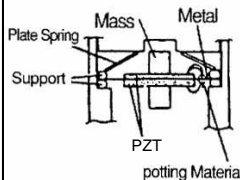
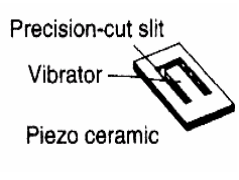
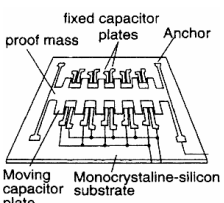
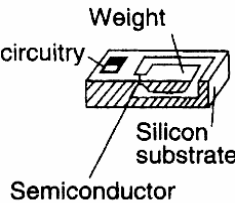
一方、半導体方式は歪ゲージタイプ、静電容量タイプで実用化が進むが、小型化、量産面で優れるものの、感度が十分でなく、高いS/Nが取りにくいという欠点がある。

圧電方式のセンサの高感度性をいかしつつ、低G領域でも安定な出力を得ることを可能するため共振型の加速度センサに着目した。

5.2 共振型加速度センサの原理および構造検討

本研究で考案した共振型加速度センサの原理を説明する。センサの構成は、加速度などの外力が加わることによってたわみ変形を生ずる梁部、梁のたわみ変形による張力変化で共振周波数の変化を生じるダイヤフラム、ダイヤフラムを振動させるための励振体、ダイヤフラムの振動を電気信号に変換する受信部の4つの部分から構成される。

表5-1 各種加速度センサの比較

		圧電方式		半導体方式	
構造		ディスク 周辺固定方式	片持梁方式	容量方式	歪み抵抗方式
					
評価	検出範囲	DCは、不可		DCから検出可能	
	感度	中	中	小	小
	温度特性	難	中	中	中
	自己診断機能	良	容易	中	難
	耐落下衝撃	良	難	良	難

すなわち加速度で生ずる梁のたわみ変形をダイヤフラムの共振周波数の変化として捕え、加速度の検出を行うものである。

具体構造は、図5-1に示すように、片持ち梁上に矩形のダイヤフラムが両端固定の状態では設置されている。感度を向上させるために加速度が加わったときに梁の歪み量が最大になる根本にダイヤフラムは配置されている。ダイヤフラムは、梁の中立面から上方にあることから、梁のたわみによりダイヤフラムが伸縮することで、ダイヤフラムに張力・圧縮力が発生しダイヤフラムの共振周波数が変化することになる。また、ダイヤフラムの固定端付近には、受信及び励振用として2つの圧電素子が設けられており、一方の圧電素子にダイヤフラムの共振周波数の正弦波を入力し、ダイヤフラムを励振する。ダイヤフラムの振動によってセンシング用の圧電素子に応力が加わり、そこで振動が電気信号に変換される。

入力信号と出力信号間の位相差比較等の信号処理により共振周波数の変化をモニターし加速度を感知する。

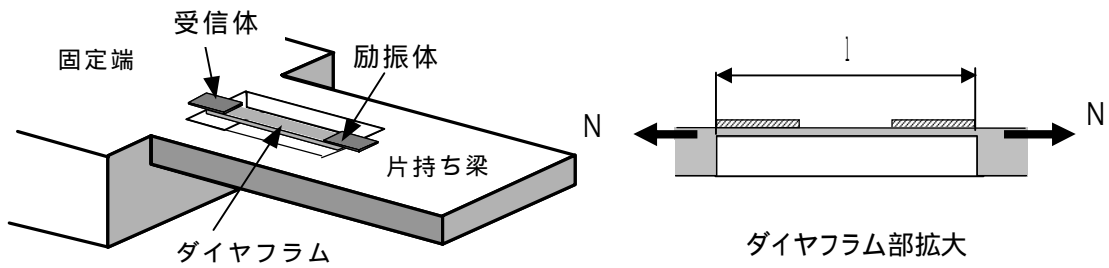


図5-1 考案した共振型加速度センサ構造

5.3 共振型加速度センサの特性解析

5.3.1 梁部構造と検出感度

梁部は加速度の大きさを、ダイヤフラムに加わる張力を通じてダイヤフラムの共振周波数変化に変換する部分であり、加速度センサ感度を決定する重要な役割を担う。ここでは、ダイヤフラムのデザインと加速度の定性的な関係を求める。

よく知られているように、両端固定の長さ l 、重さ m の均一な弦に張力 T が加わったときの i 番目の共振周波数は

$$f_i = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T}{m \cdot l}} \cdot i \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad \dots (5.1)$$

で表わされる。

長さ比べ厚みが十分薄く、幅比べ長さが十分長い(つまりテープ状)両端固定のダイヤフラムの共振周波数は、力学的には弦や膜の振動と同様であると推測されるので、ダイヤフラムの質量を m 、長さを l 、張力を N とすると、共振周波数は

$$f \propto \sqrt{\frac{N}{m \cdot l}} \quad \dots (5.2)$$

のような関数形をもつと思われる。ところが、ダイヤフラムの弾性変形を考慮すると、弦や膜とは異なり張力がゼロであっても弾性変形による内部応力により振動する。座屈が生じない限り圧力が加わっても振動現象は生じるため、弾性振動を考慮した場合の共振周波数は、上式と若干異なり、

$$f \propto \sqrt{\frac{N}{m \cdot l} + \dots} \quad \dots (5.3)$$

のように振る舞うと推測される。

さて、共振周波数の変化によって加速度を検知する場合のセンサの分解能は、加速度 [G] の変化に対する周波数の増分であるので、 $[df/dg]$ で表わされる。加速度がゼロ付近の $[df/dg]$ をもってセンサ分解能を定義すると、加速度によって変化するのは張力だけであるので、(5.3)式より

$$\frac{df}{dg_{g=0}} \propto \frac{1}{m \cdot l \sqrt{\quad}} \frac{dN}{dg_{g=0}} \quad \dots\dots (5.4)$$

となる。(5.4)式の因子 $1/(m \cdot l \sqrt{\quad})$ はダイアフラムの構造によってのみ決定される定数であるので、ダイアフラムの構造・寸法かかわらない限り、結局センサの分解能は

$$\frac{df}{dg_{g=0}} \propto \frac{dN}{dg_{g=0}} \quad \dots\dots (5.5)$$

で与えられることになる。

次に、梁部の構造と加速度と張力の関係を見積もる。

梁部は図5-2に記したように、単一厚みの矩形の片持ち梁である。梁の固定端付近にはダイアフラム形成の際の窓が存在する。ダイアフラム厚さが梁の厚みに比べ十分薄く無視できるとすると、ダイアフラムに加わる張力N は次式で与えられる。

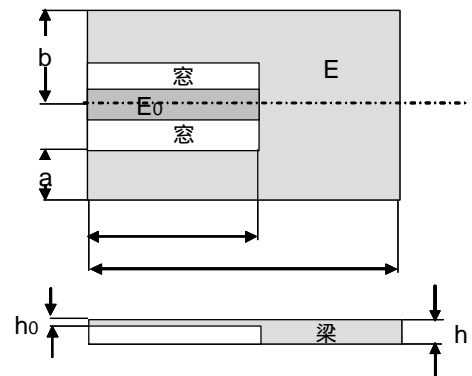


図 5-2 梁部の構成

$$N = \frac{W}{2 \cdot l} \frac{E_0}{E} \cdot g \cdot b \left(\frac{W}{2 \cdot l} \right)^2 (h - h_0) h_0 h \quad \dots\dots (5.6)$$

(ただし $I = \frac{1}{6} a \cdot h^3$)

ここで、Wはダイアフラムの幅、Iは梁の断面2次モーメント、梁とダイアフラムのヤング率をそれぞれE、E₀、ρは梁を構成する物質の密度、gは加速度の大きさ、aは梁の窓部分の幅、bは梁の幅の1/2、Lはダイアフラムの長さ、lは梁の長さ、hは梁の厚み、h₀はダイアフラムの厚みである。梁の厚みに比べダイアフラムが十分薄いと、上式は

$$N = 3 W \frac{E_0}{E} \left(\frac{b}{a} \right) \left(\frac{W}{2 \cdot l} \right)^2 \left(\frac{h_0}{h} \right) g \quad \dots\dots (5.7)$$

と近似できるため、梁部にのみ関係する項のみ抽出すると分解能は

$$\frac{df}{dg}_{g=0} \propto \frac{1}{E} \left(\frac{b}{a}\right) \cdot \left(-\right)^2 \left(\frac{1}{h}\right) \dots\dots(5.8)$$

(5.8)式より、分解能は梁部の諸元の変化によって表5-2に示す関係があることがわかる。

表 5-2 分解能と梁の諸元

諸元	分解能との関係
密度	比例
ヤング率	反比例
b / a	比例
-	2乗に比例
厚み	反比例

5.3.2 共振周波数とダイアフラムの諸元との関係

ダイアフラムの各部分の寸法が変化した場合の共振周波数の変化を数値的に求める。共振周波数は固有値方程式を数値的に解くことによって求められる。数値計算には「Mathematica」を使用した。

計算では、あるダイアフラムのモデルを設定し、そのモデルの

拡大率(全体を等倍率で拡大)

ダイアフラムの幅

ダイアフラムの厚さ

密度

ヤング率(正確には定数 $\hat{E} = E / (1 - \nu^2)$) :ポアソン比

を変化させた場合、1次共振周波数がどのように振る舞うかを求めた。計算結果は、1次共振周波数に関するもののみを掲げるとどめたが、高次の共振周波数においても上記の変数の変化に対する振る舞いはそのまま当てはまる。

計算で用いた基準のダイアフラムのモデルの諸元を図5-3に示す。

以降の実験で用いた拡大モデルは、基準のダイアフラムと同じ材料、寸法を20倍に比例拡大して製作した。

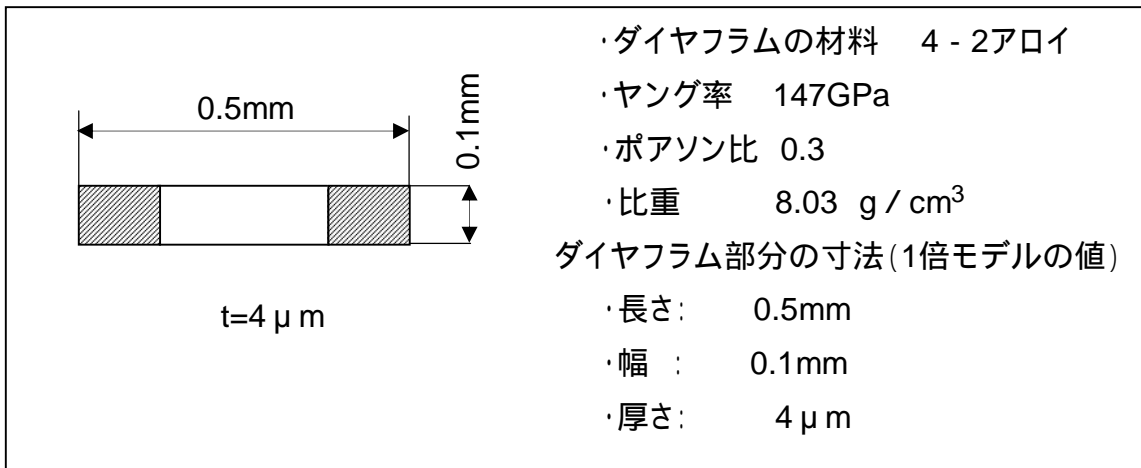


図5-3 ダイヤフラムの諸元

5.3.2.1 1次共振周波数と拡大率との関係

図5-4に計算結果を示す。1次共振周波数は、拡大率と反比例の関係にあることがわかる。

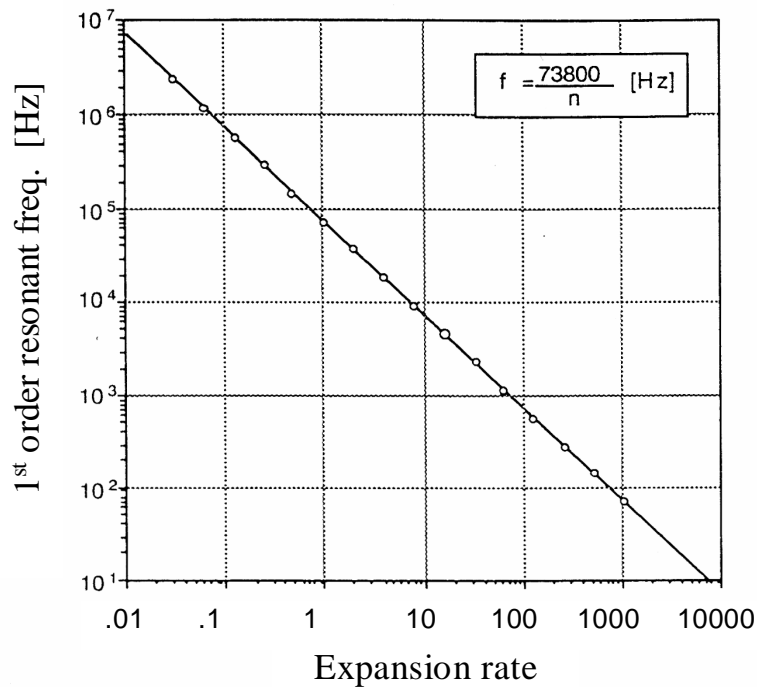


図5-4 1次共振周波数と拡大率の関係

5.3.2.2 1次共振周波数とダイヤフラムの幅との関係

図5-5に計算結果を示す。横軸は、ダイヤフラム部分の幅と長さの比をとっている。1次共振周波数はダイヤフラム部分の幅に無関係であることがわかる。ただし、計算においては自由端の効果、つまりダイヤフラムの幅に平行した振動については考慮していない。

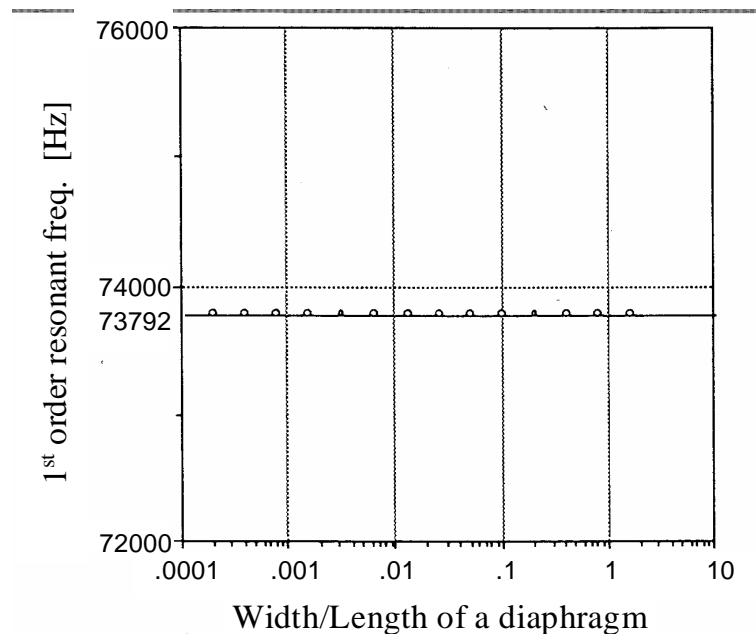


図5-5 1次共振周波数とダイヤフラムの幅との関係

5.3.2.3 1次共振周波数とダイヤフラムの厚さとの関係

計算結果を図5-6に示す。横軸は、ダイヤフラム部分の厚さと長さの比をとってある。1次共振周波数はダイヤフラム部分の厚さに比例していることがかる。

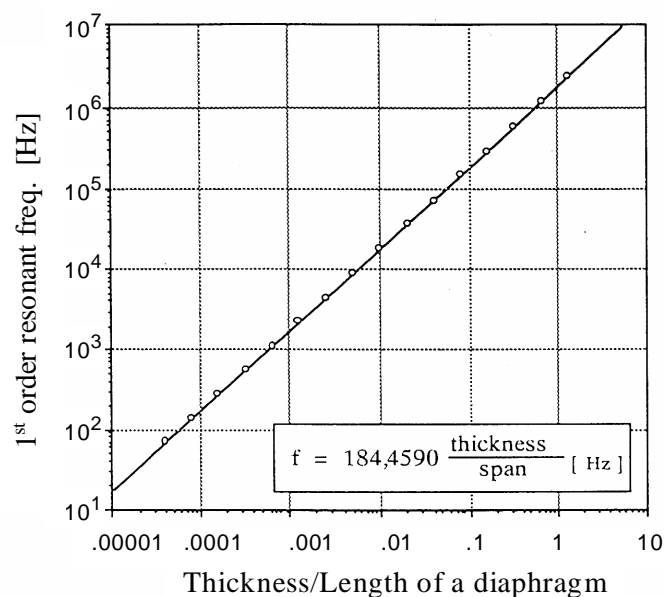


図5-6 1次共振周波数とダイヤフラムの厚さとの関係

5.3.2.4 1次共振周波数と密度との関係

計算結果を図5-7に示す。1次共振周波数は密度の1/2乗に反比例していることがわかる。

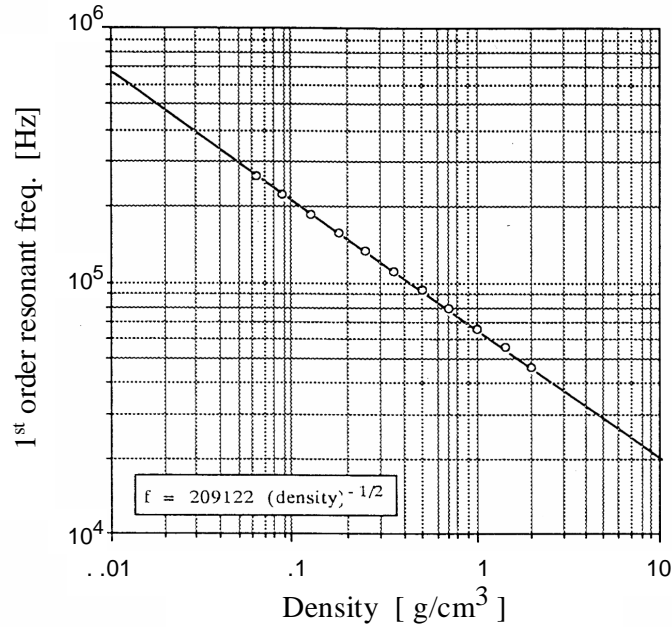


図5-7 1次共振周波数と密度との関係

5.3.2.5 1次共振周波数と定数Eとの関係

定数Eはヤング率をE, ポアソン比を ν とするとき、 $\hat{E} = E / (1 - \nu^2)$ で表わされる。図5-8より、1次共振周波数は定数Eの1/2乗に比例していることがわかる。

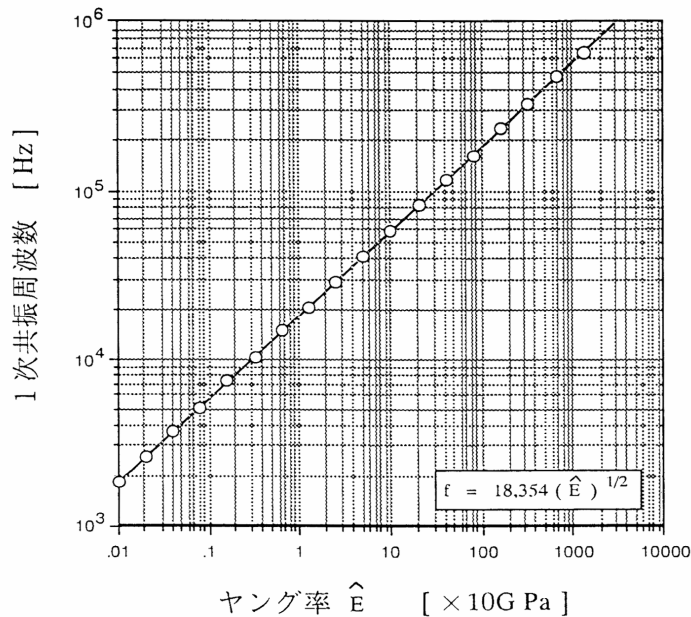


図5-8 1次共振周波数と定数Eとの関係

5.3.2.6 共振周波数とダイヤフラムの諸元との関係のまとめ

以上まとめると、ダイヤフラムの各変数と1次共振周波数の関係は表5-3のようになる。

表5-3 1次共振周波数とダイヤフラムの諸元との関係

諸元	共振周波数との関係
拡大率	反比例
幅	無関係
厚さ	比例
密度	1 / 2乗に反比例
ヤング率 $\hat{E} = E / (1 - \nu^2)$	1 / 2乗に比例

すなわち、幅 W_0 、厚さ T_0 、密度 ρ_0 の等倍ダイヤフラムモデルの1次共振周波数を f_0 とすると、拡大率 n 、幅 W 、厚さ T 、密度 ρ 、強度 E のダイヤフラムの共振周波数 f は、次式で表現されることになる。

$$f = f_0 \cdot \left(\frac{1}{n} \right) \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right) \sqrt{\frac{\left(\frac{\hat{E}}{\hat{E}_0} \right)}{\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)}} \quad \dots\dots(5.9)$$

図5-3に示す等倍のダイヤフラムの諸元を代入すると上式は次のように簡単になる

$$f = 203.5 \cdot \frac{T [\mu m]}{n} \sqrt{\frac{\hat{E} [GPa]}{[\rho / cm^3]}} \quad \dots\dots(5.10)$$

(5.10)式に表5-3に示す諸元を各変数に代入することで、共振周波数が求められる。

5.3.2.7 解析結果の考察

本構造の加速度センサを微小化する場合、最初から微小なセンサを製作できたとしても、そのサイズによっては的確な評価実験が困難になることが十分予想される。

まず既存の評価法が適応可能な素材とサイズでモデルを製作し、その評価結果に基づいて徐々にモデルのスケールダウンと素材選択を図るほうが、設計の見通しがつきやすい上に問題点が明確になると思われる。

以上述べた解析結果は、任意の材料を用い、異なるサイズのモデルの評価実験から得られた結果を、最終目的とするサイズと素材のモデルにフィードバックする考え方を示している。

すなわち、本来目標とするサイズの何倍も大きなモデルで、しかも素材が異なる場合において、そのモデルから得られた共振周波数や分解能から本来のサイズのセンサの性能を推測することが可能となる。

5.4 拡大モデルによる原理検証

5.4.1 振動型加速度センサの構造設計

拡大モデルとして、2タイプを試作した。図5-9に試作した拡大モデルの形状を示す。材料は4-2アロイ、平面寸法は、等倍モデルの20倍を想定した。

ダイヤフラム部の長さはいずれも10mmで作製したが、振動モードの差を見るためタイプAはピエゾ素子が梁部に1mm程重なるように、タイプBはピエゾ素子が梁部と重ならず、ダイヤフラムのエッジにピエゾ素子の端部が揃うように配置した。各エレメントは接着により一体化している。

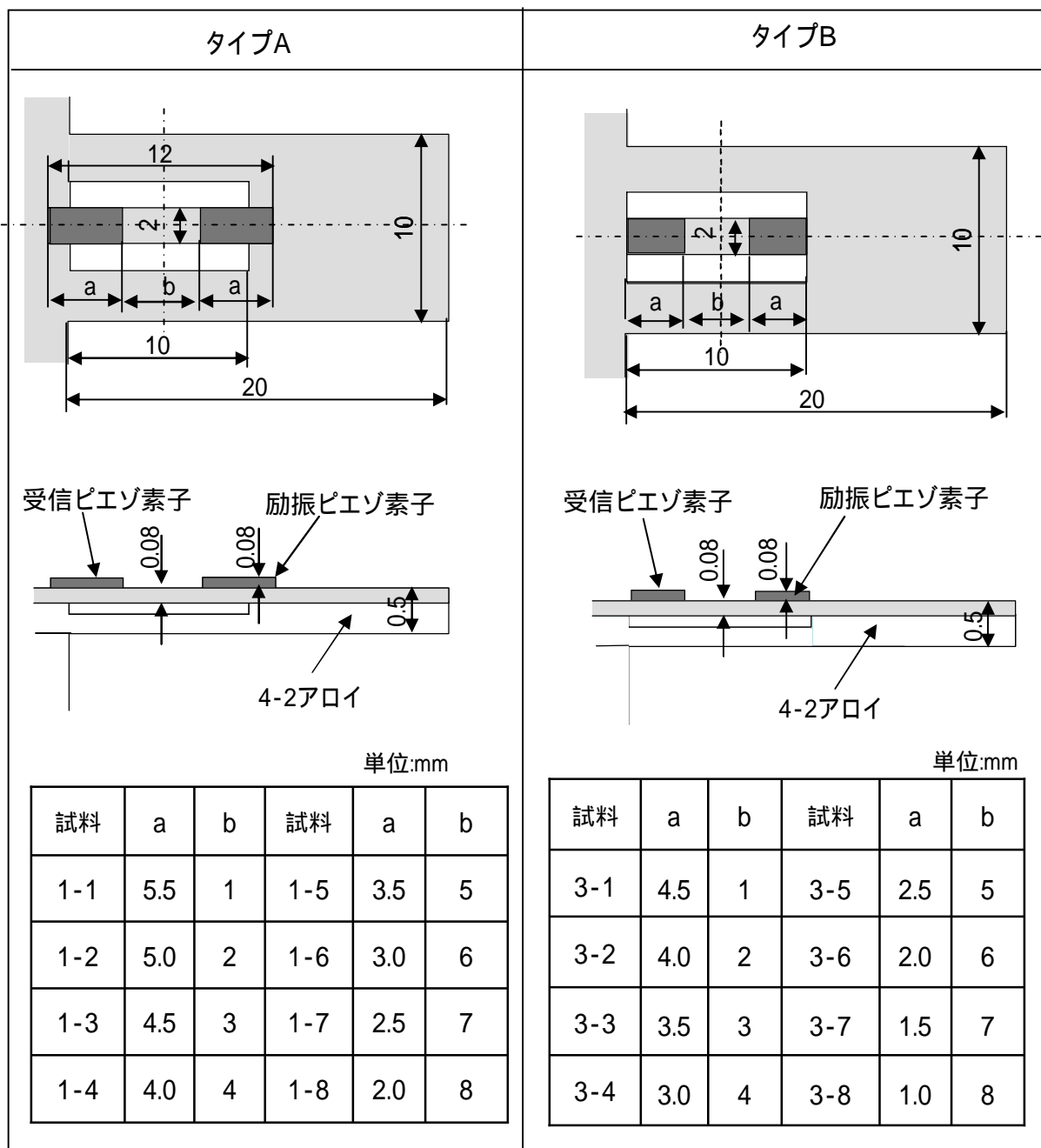


図5-9 20倍 拡大モデル形状

2タイプのモデルについてピエゾ長:aおよびピエゾ間の長さ:bをパラメータとして共振周波数をスペクトラムアナライザ(Tektronix 製)を用い測定した。励振電圧は4Vp-pである。測定結果を図5-10に示す。

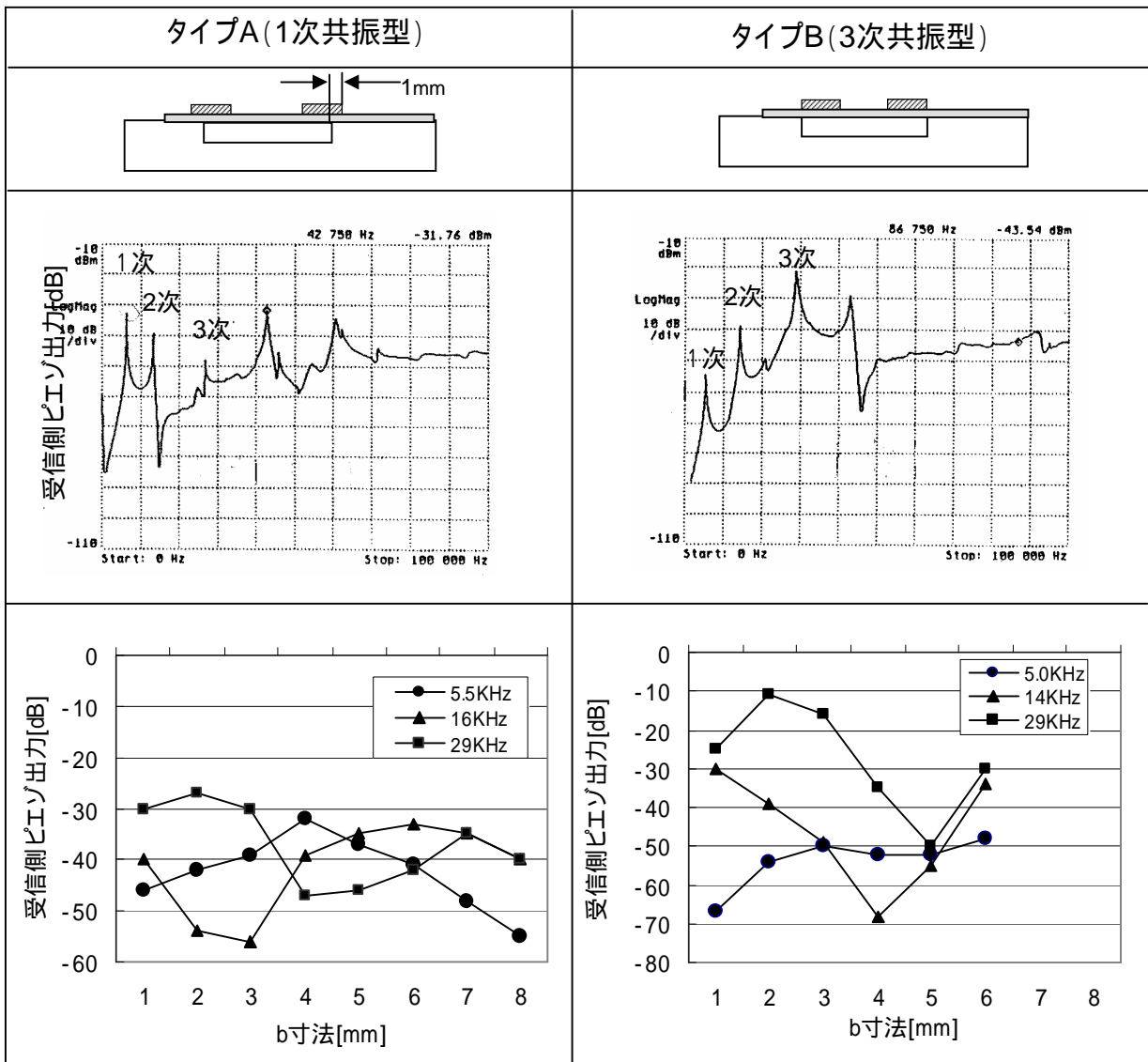


図5-10 拡大モデルの振動特性測定(スペクトラムアナライザによる測定)

各タイプとも、ダイヤフラムの振動を受信側のピエゾで良好に検出できており、いずれも、5KHz近傍、14KHz近傍、29KHz近傍に1次、2次、3次の共振点を有している。

タイプBは受信側ピエゾの出力から明らかに3次共振の感度が高く、3次共振モデルとしての適正がある。寸法最適値としては、 $b=2\text{mm}$ である。

タイプAは1次の共振が高く取れており、1次共振周波数でのセンシングに適正があると考えられる。寸法最適値としては、 $b=4\text{mm}$ である。

拡大モデルタイプBについて計算から求めた各モードの共振周波数と実際に測定した共振周波数の対比を行った。結果を表5-4に示す。

表5-4 共振周波数の実験値と計算値の対比

次数	計算値 [Hz]	実験値 [Hz]	ずれ[%] (計算値-実験値) × 100 / 実験値
1	3,688	5,500	-33
2	10,167	14,000	-27
3	19,931	29,000	-31
4	32,947	42,000	-22

実験値は計算値に対し30%程度低い値を示しているが、傾向として一致しており、振動型の加速度センサとして基本となるダイヤフラム部は良好に機能していることが確認できた。

図5-10中段に示す周波数レスポンスの測定結果は、梁の共振が吸収されるように、梁部の両端を強制的に固定して測定したものである。図5-11に梁の片端部を固定せずに取得したデータを示すが、この場合は、丸印で示す図5-10に示したタイプA、Bの周波数レスポンス測定にないいくつかの共振点が現れている。

試作形状について有限要素法による解析を行った結果を図5-12に示すが、梁自身の共振モードとして曲げモードとねじれモードが存在することが確認できた。梁の形状がおもり部の厚み変化がなく、ストレートな形状であるため、ダイヤフラム部の共振点以外に梁部の共振が検出されていると考えられる。

このため梁の共振の影響を低減させるための梁寸法やダイヤフラム厚など他のパラメータについても最適化が必要である。

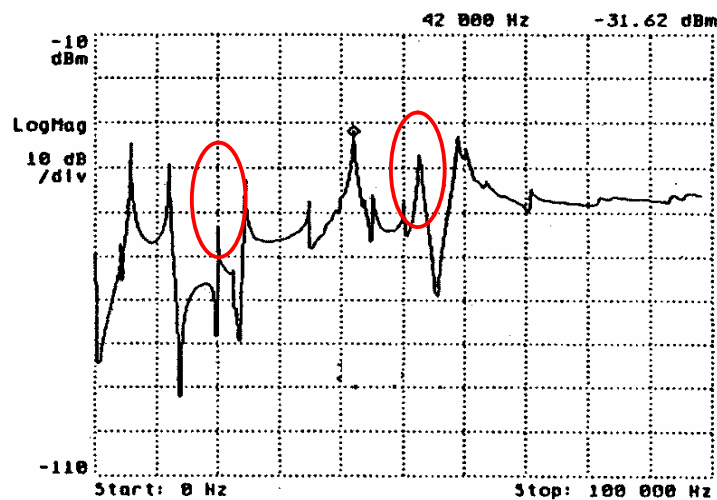


図5-11 梁部片端部の固定が無い場合の周波数レスポンス

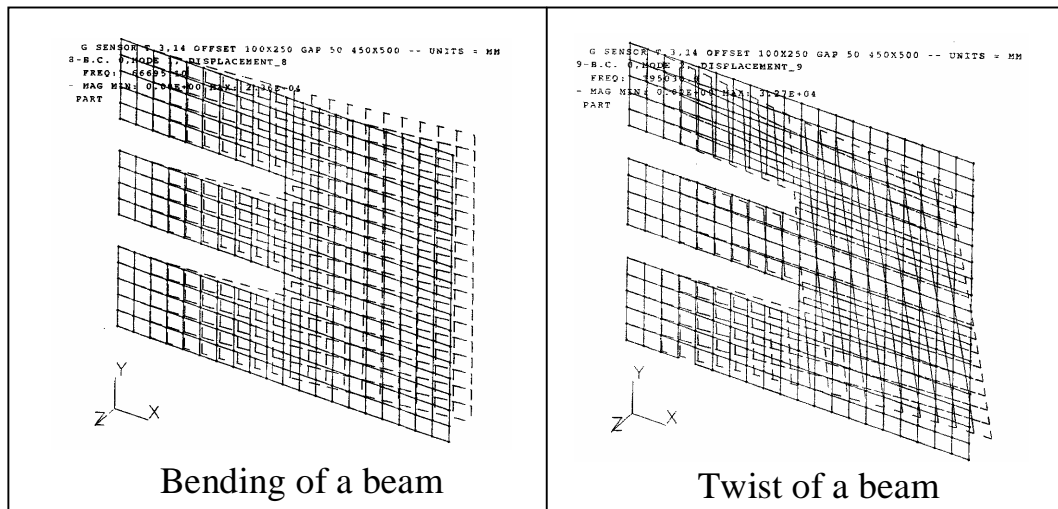


図5-12 有限要素法による梁部振動モード解析

5.4.2 全体構造の最適化

前節までの実験によって、他励振動するダイヤフラムの共振周波数を圧電素子により受信することができることを明らかにした。しかしながら、加速度によって変化する共振点の振動モードが明かではなく、具体的に加速度センサーとして機能できるかどうか検証する必要がある。

そこで、要素をダイヤフラム部分と梁部分に分け、まずダイヤフラムの共振点を明らかにし、次にダイヤフラムを梁と一体化して、加速度の印可時に、ダイヤフラムの共振周波数がどのように変化するかを検討した。

5.4.2.1 ダイヤフラム部の最適化

(1) 振動板厚みの検討

評価モデルの形状および測定法を図5-13に示す。

- ・ダイヤフラムを平板とし、振動状態を考え易くした。
- ・ピエゾは製作上の理由で、 $3 \times 1.8\text{mm}$ の平板とした。

また、厚みの影響を把握するため表5-5に示すようにダイヤフラム部および母材部について厚さの異なる3種類を用意した。

- ・ダイヤフラムは固定台にワックスで固定し、両端固定状態を想定した構成をとった。
- ・ダイヤフラムの振動長は、10mmに固定した。

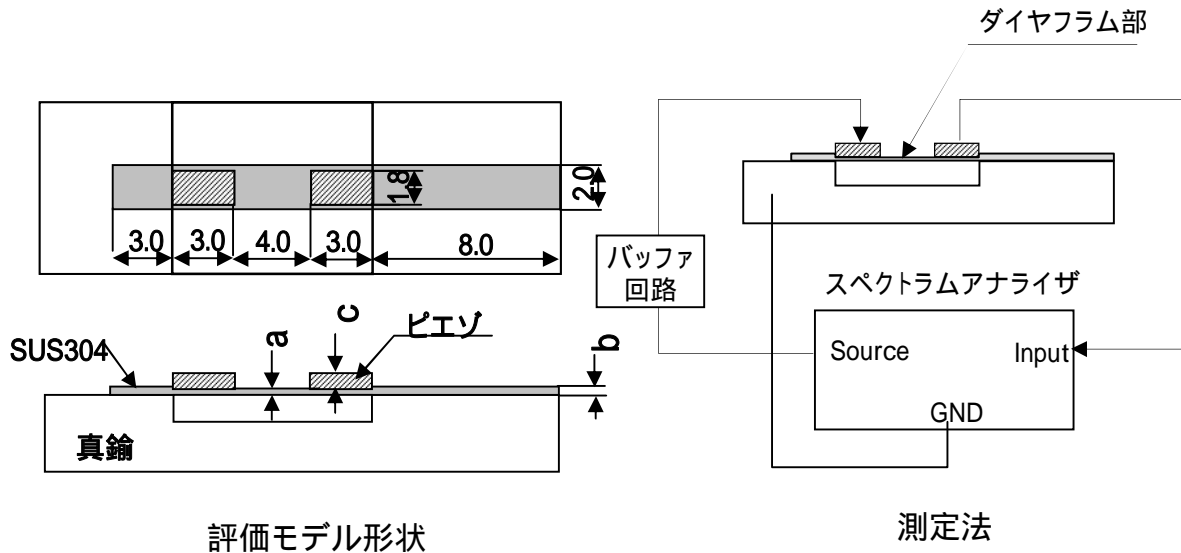


図5-13 評価モデル形状および測定方法

表5-5 各種パラメータ

単位:mm

試料名	a	b	c
	ダイヤフラム厚み	母材厚み	圧電材厚み
1	0.03	0.05	0.2
2	0.065	0.1	0.2
3	0.125	0.15	0.2

受信素子からの出力とダイヤフラムの共振点を表5-6にまとめた。

また、試料2の代表的な振動特性を図5-14に示す。

表5-6からわかるように試料2(ダイヤフラム厚み0.065mm、ピエゾ厚200 μ m)が各共振点で良好な感度とピークを持っている。

今後ダイヤフラムについては、試料2の寸法を標準とする。

表5-6 ダイアフラムの共振点と出力

試料	共振点と出力(入力0.4Vp-p)					
	共振点	出力	共振点	出力	共振点	出力
1	11kHz	-80dBm	24kHz	-78dBm	44.7kHz	-64dBm
2	22kHz	-66dBm	45kHz	-57dBm	70kHz	-48dBm
3	37kHz	-78dBm	65kHz	-75dBm	88kHz	-78dBm

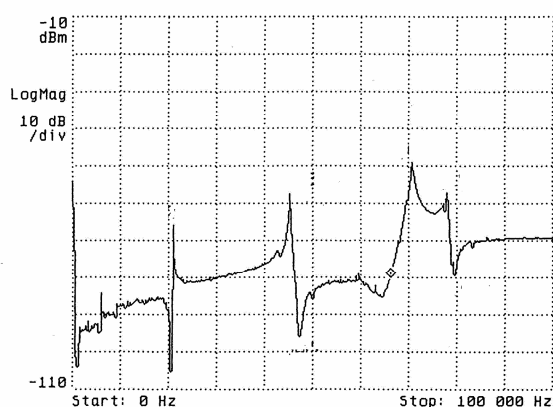


図5-14 試料2の代表的振動特性

(2) ダイアフラム部の製作精度

試料2について製作精度を確認するため振動特性を3個のサンプルにて確認した。結果を表5-7に示す。22kHz付近の共振点は、約1.3kHz(5.57%)のばらつきがあった。試料2の寸法誤差(材料寸法、製作誤差(どげ位置、接着層等))、両端固定誤差(固定状態、たるみ状態等)がばらつきの原因と考えられ、実モデルの製作に当たっては寸法精度に十分に留意する必要がある。

表5-7 試料2の3サンプルの共振周波数ばらつき

試料2	共振周波数 [KHz]	備考
2-1	22.923	1.276KHz 5.57%
2-2	22.413	
2-3	21.646	

(3) ダイアフラム部の荷重特性

試料2を使用し、直接端部に慣性マスをのせ単位重量あたりの検出感度測定を行った。共振周波数は、試料2の共振周波数である22KHzにフォーカスした。

図5-15に示すように加速度が増加する共に共振周波数が下がる傾向が認められる。本来は、(5.10)式のように張力の増大とともに共振周波数が高くなるはずであるが、共振点が下がる傾向が見られた。

ピエゾからピエゾ部分で梁全体の動きと独立した振動が生じていれば、共振点は上昇すると想定されるが、そのような振動モードが見いだせなかったため、今回使用した振動モードは、おもりを含めた片持ち梁全体の振動を検出している可能性が高いと判断する。

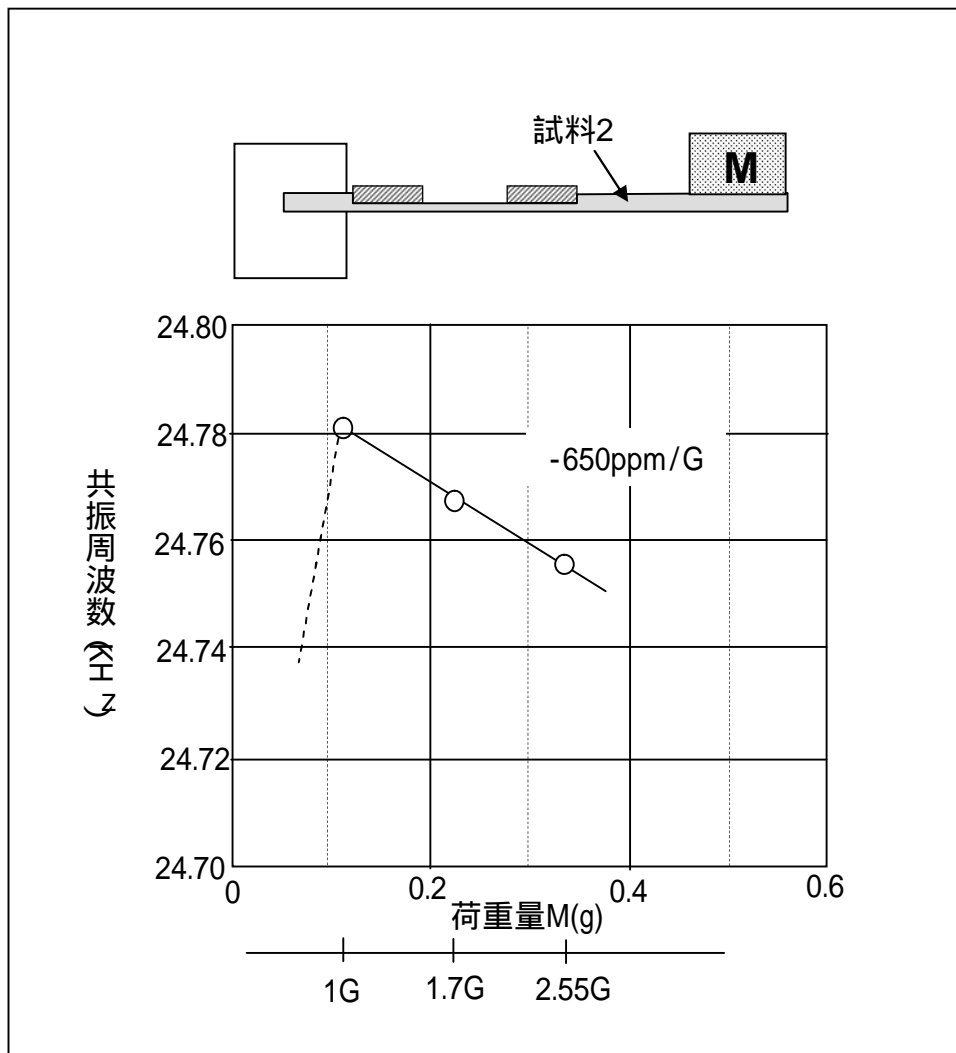


図5-15 試料2による単純片持ち梁実験

(4) ダイアフラム部の温度特性

図5-16に示すようにホットプレート上に試料2を置き、各温度における共振周波数の変化を求めた。内部温度計と外部温度計の差を表5-8に示すが、測定は外部温度計の値を用いた。

結果を図5-17に示すが、共振周波数は、26 ~ 69 までほぼリニアに変化している。傾きは、 -2.82Hz/deg で -305ppm/deg の変化である。この変化量は、圧電素子の温度特性の -300ppm/deg へ非常に近いため、今回の結果はほぼ圧電素子の温度特性そのものを測定していると考えられる。

加速度センサとして実用化するためには、温度による変化を相殺させるような構造検討、電氣的な補正方法等の温度補償手段が必要である。

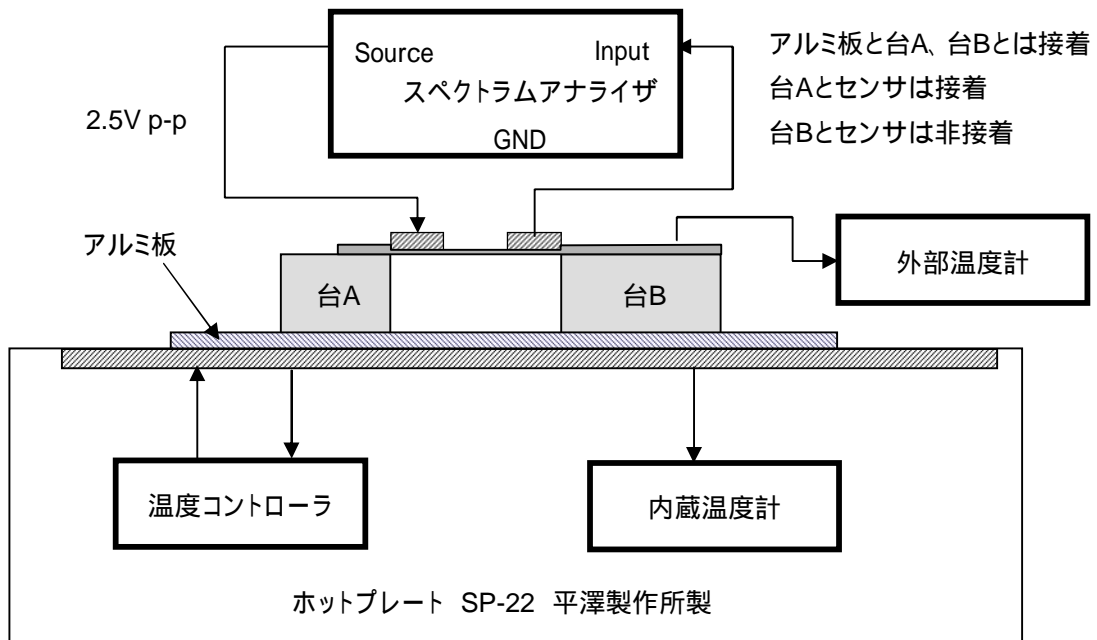


図5-16 ダイアフラム部の温度特性の測定方法

表5-8 内部温度計と外部温度計の温度差

内蔵温度計 (プレート温度)	40	60	80	85	90	100
外部温度計 (センサ温度)	40	54	69	72	75.5	82.5

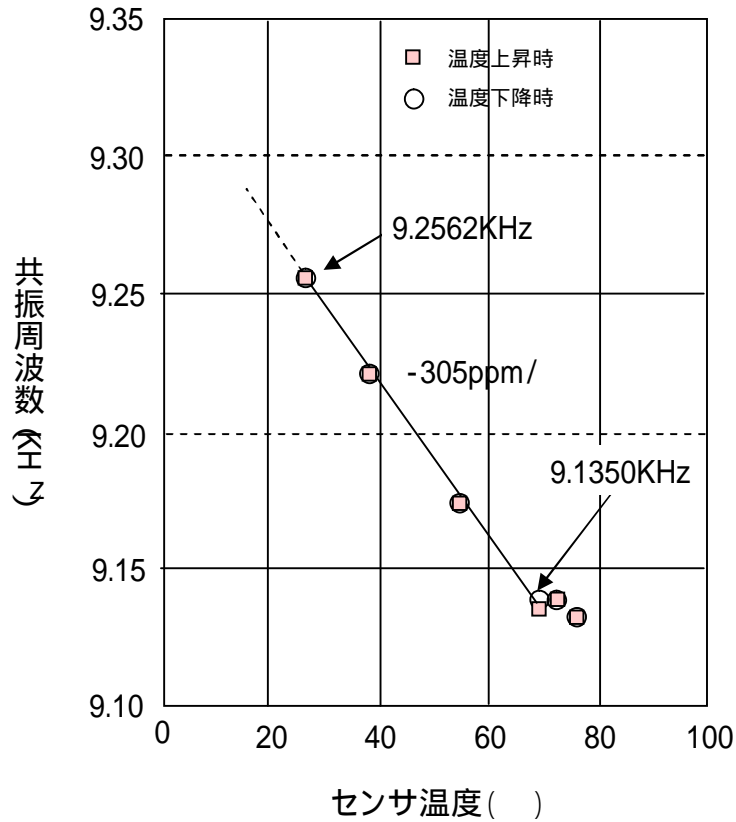


図5-17 ダイアフラム部の温度特性

5.4.2.2 梁部を含めた形状の最適化

図5-18に示すように試料2と梁を組み合わせたセンサ構造体を形成し、全体形状の最適化を検討した。パラメータとして表5-9に示すように梁の厚みを変化させ、スペクトラムアナライザで駆動周波数をスイープさせて共振特性を評価した。

また慣性質量Mを変化させ加速度慣性質量と検出感度の関係性を評価した。

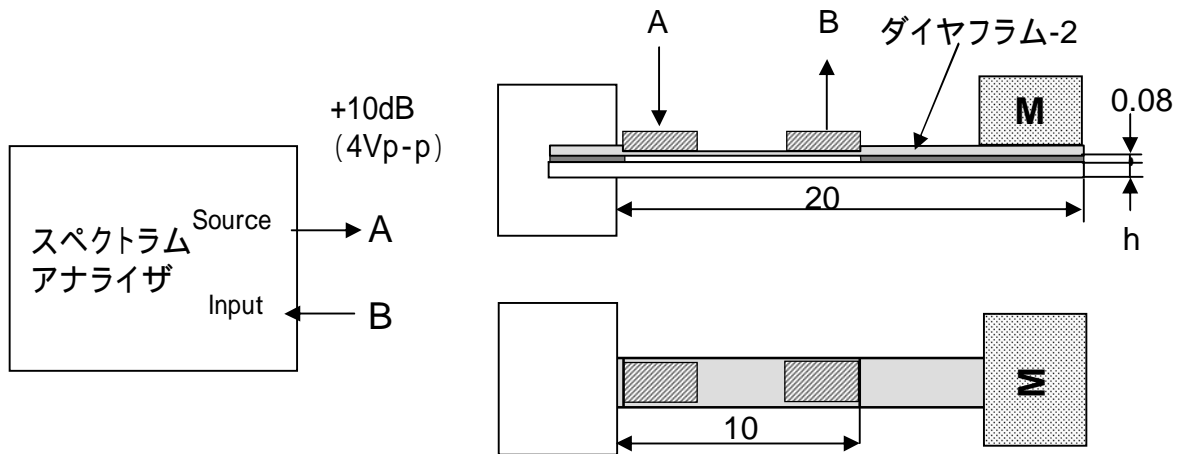


図5-18 ダイアフラムと梁を組み合わせたセンサー構造体

表5-9 梁部厚の条件

試料名	梁厚 h (mm)	センサー部 質量(g)
10	0.30	0.06
11	0.45	0.09
12	0.60	0.12

(1) 梁部の厚みの検討

図5-19に試料2(ダイヤフラムのみ)の共振特性、図5-20に試料12(ダイヤフラム+梁部)の共振特性を示す。また表5-10には、表5-9に示す梁部厚さの異なる試料について共振周波数および出力を測定した結果を示す。

各試料は、梁部の厚さに関係なく試料2(ダイヤフラム)の21kHz、45kHzの共振点を持っており、この共振点変化を使用することにより、加速度の検出が可能であることが確認できた。21kHz以下に現れている共振点は、梁部自身のものであると思われる。

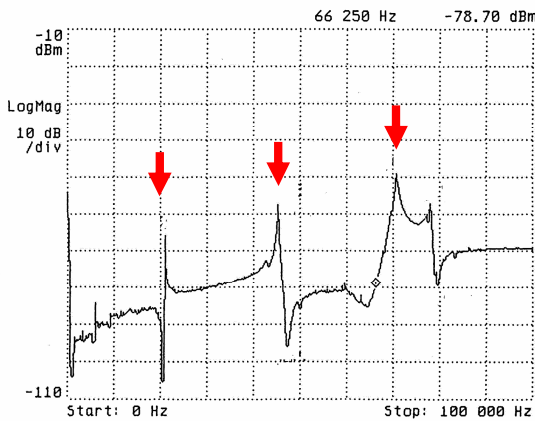


図5-19 試料2の共振特性(参考)

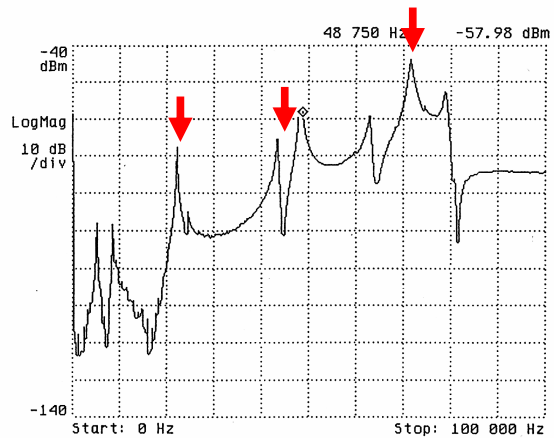


図5-20 試料12の共振特性(荷重0)

表5-10測定結果

試料名	共振点と出力					
	共振点	出力	共振点	出力	共振点	出力
試料2	11kHz	-80dBm	21kHz	-66dBm	45kHz	-57dBm
試料10	6,10kHz	-80dBm	21kHz	-63dBm	48kHz	-50dBm
試料11	5, 10, 14kHz	-80 ~ -90dBm	22kHz	-70dBm	48kHz	-55dBm
試料12	5,14kHz	-80dBm	22kHz	-67dBm	48kHz	-58dBm

(2) 梁部を含めた加速度の検出感度

慣性質量を最大4gまで変化させ、ダイヤフラムの20KHz近傍の共振周波数の変化を計測した。結果を表5-11および図5-21に示す。きれいな比例関係にはなっていないが、慣性マスの増大により共振周波数は増加傾向にあることが確認される。

図5-22に示すように試料をゴニオメータに取り付け、姿勢を垂直から水平まで変化させることで1G以内の感度と f/G (1Gの感度) を求めた。慣性質量が0.62gにおける各試料共振周波数の変化を図5-23に、試料12の慣性質量を変化させた場合の共振周波数の変化を図5-24に示す。

表5-11 測定結果

試料	慣性質量(g)	共振周波数 f_0 (KHz)	f/G (Hz/G)	$f/G/f_0$ ppm	感度 dBm
試料10 0.3mm 0.06g	0	21.609	3.0	139	-64
	0.62	22.320	95.0	4256	-67
	1.77	22.530	305.0	13538	-67
試料11 0.45mm 0.09g	0	22.314	1.5	67	-71
	0.62	22.014	36.0	1635	-70
	1.77	22.356	80.5	3601	-68
	2.92	22.346	104.0	4654	-70
試料12 0.6mm 0.12g	0				
	0.62	22.150	30.0	1354	-64
	1.77	22.215	70.0	3151	-64
	4.07	22.335	195.0	8731	-64

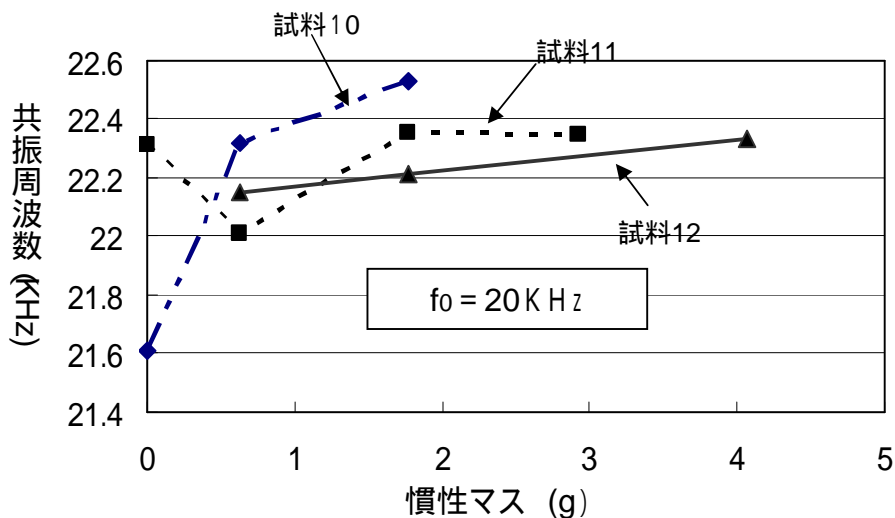


図5-21 慣性マスによる共振周波数の変化

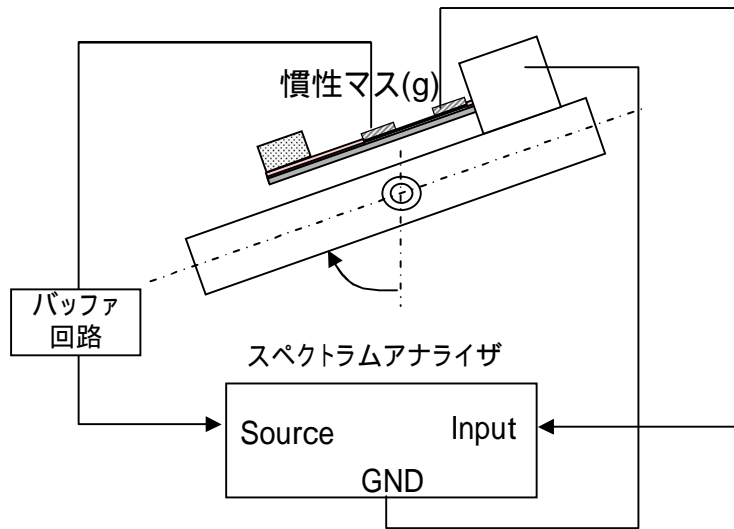
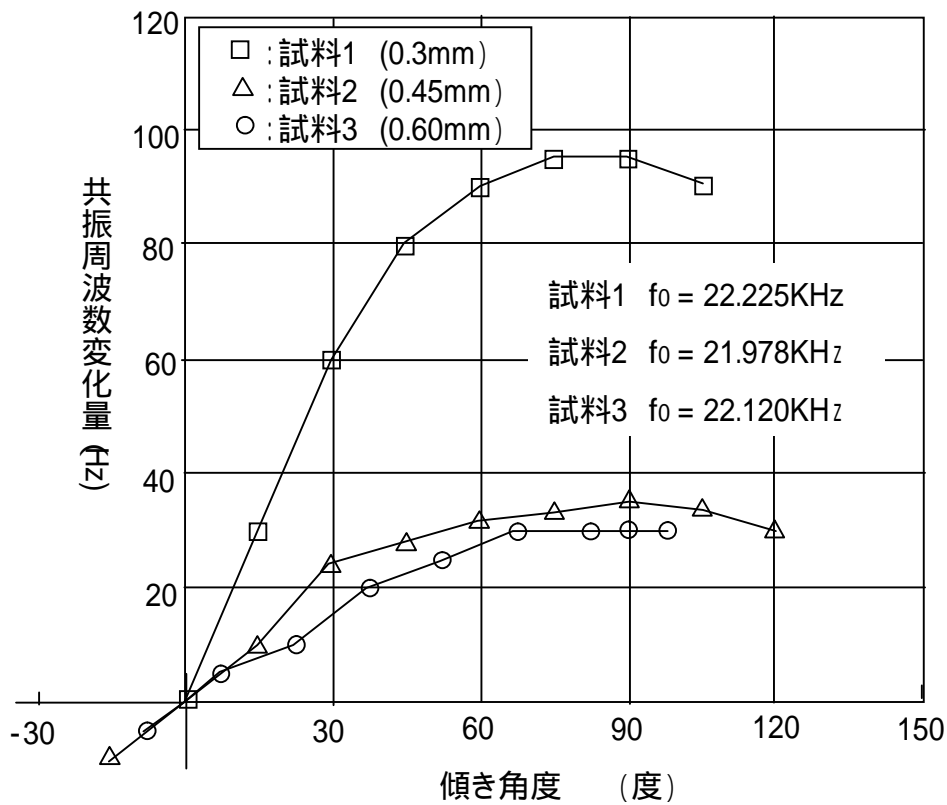
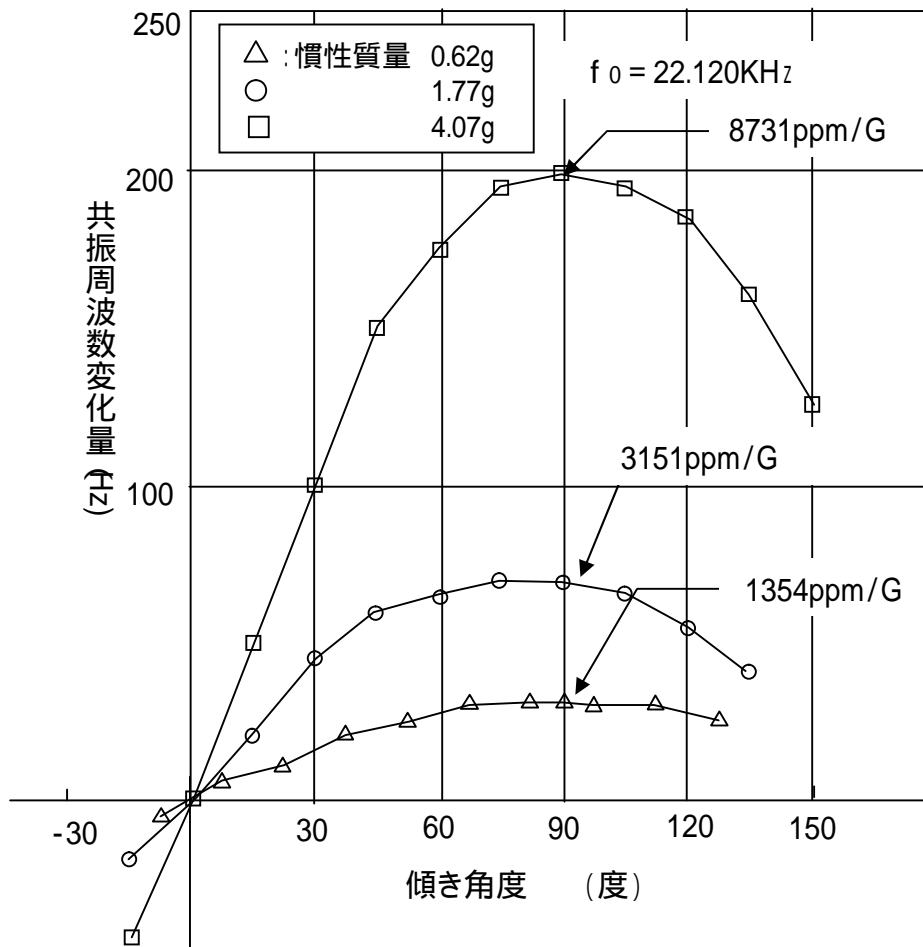


図5-22 1G以内の感度測定方法



荷重 0.62gにおける各試料の共振周波数特性

図5-23 傾き角度 - 共振周波数変化量



試料12 (梁部厚0.6mm)におけるの共振周波数特性

図5-24 傾き角度 - 共振周波数変化量

上記結果より本方式は、0-1Gの範囲においても十分な感度を有することがわかった。また感度の調整を慣性マスの大きさによって変化させることを確認した。

次に、慣性マスを増加させ、等価印可加速度を増加させセンサの広域感度を測定した。

結果を図5-25に示す。慣性マスが45g、加速度換算値で70Gまでは線形性を保っており、この線形性の範囲内では周波数変化から加速度への換算が有効に行える。

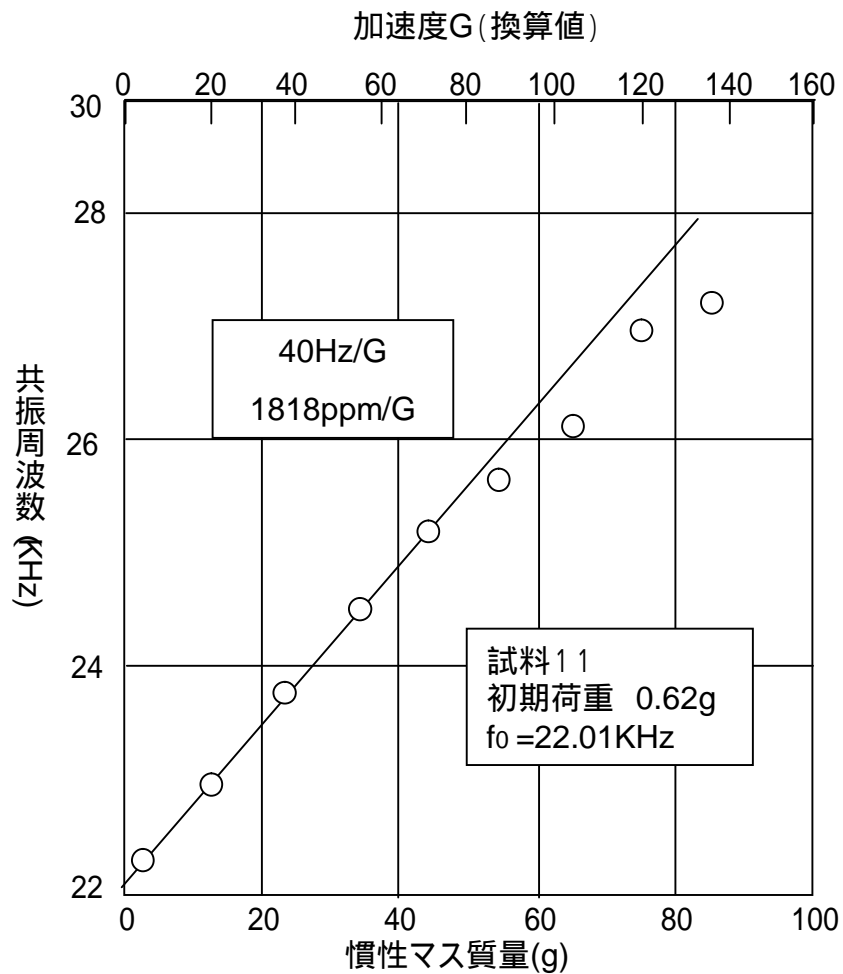


図5-25 慣性マスの範囲を拡大した特性測定

5.4.3 拡大モデルにおける原理検証のまとめ

今回、ダイヤフラム部の共振周波数変化を利用して、加速度を検出できることがわかった。

感度的にも梁部の質量に対して、5～10倍の質量の慣性マスを設ければ、1000ppm以上の感度を得られ、感度の高い方式であることがわかった。

ただし線形性に課題があり、こちらは、センサ構造体の最適化と測定方法の高精度化で対応を進める。

5.5 20倍モデルの製作と性能評価

5.5.1 20倍モデルの製作寸法

全節までの評価により

ダイヤフラム部： 長さ10mm、幅2.0mm、厚み0.065mm …… 試料2の構造

ピエゾ： 長さ3mm、幅1.8mm、厚み0.08～0.2mm …… 試料2の構造

梁部： 長さ20mm、厚み0.4mm(ダイヤフラム部0.32mm) …… 試料10の構造
と定め、図5-26 に示す構造体を20倍モデルとして製作した。

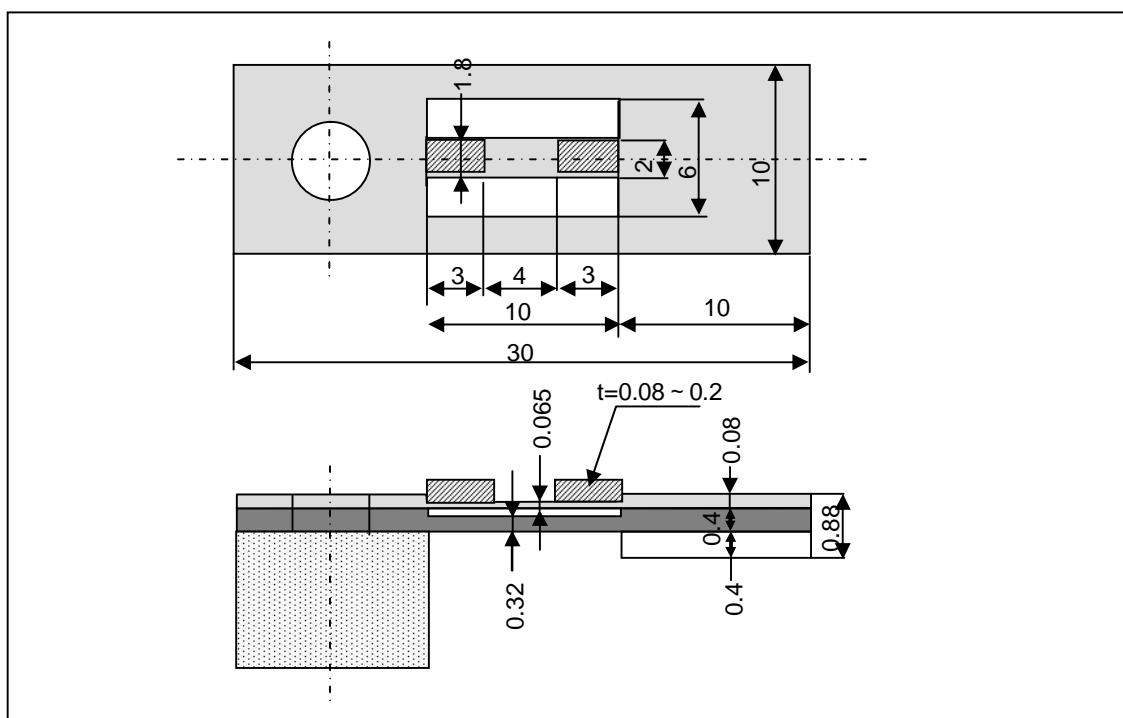


図5-26 加速度センサ20倍モデル(3次共振型)

5.5.2 ピエゾ素子の厚さの確定

図5-26の20倍モデル加速度センサのピエゾ厚みの最終決定を行うため4種の厚みのピエゾを用意し、

出力信号のスペクトルの測定し、共振周波数を測定した。

各共振周波数における振動の様子を測定し、モードの確定を行った。

5.5.2.1 実験方法

ピエゾ素子の厚みは80 μ m, 100 μ m, 150 μ m, 200 μ mの4種類を用意した。受信, 送信ピエゾは両方とも同一の厚みとし、対称型のモデルを用いて実験を行なった。ダイヤフラム部分の厚みは88 μ m, 材質は梁部分, ダイヤフラム部分とも4-2アロイである。

スペクトルアナライザを用い、1Hz～100kHzの領域において、受信ピエゾの出力、加速度センサのダイヤフラム中央の変位量の周波数特性を測定した。入力信号は正弦波信号、4V(pp)である。変位量の測定はドップラー振動計(KIENICE社製)を使用した。

ピエゾ厚の異なる20倍モデルのダイヤフラムの中心線上の変位を長手方向にマッピングし、測定した共振周波数における振動の様子を観察した。

5.5.2.2 実験結果

図5-27に20倍モデルの振動特性を示す。図の左側は、レーザドップラー振動計からの変位特性、右側が受信側ピエゾからの出力特性である。きれいな共振と出力が得られていることがわかる。100kHzまでの領域において、出力信号に多くのピークが見られるが、次節(5.5.2.3)の測定結果より共振周波数を1次から4次共振周波数まで特定することができた。

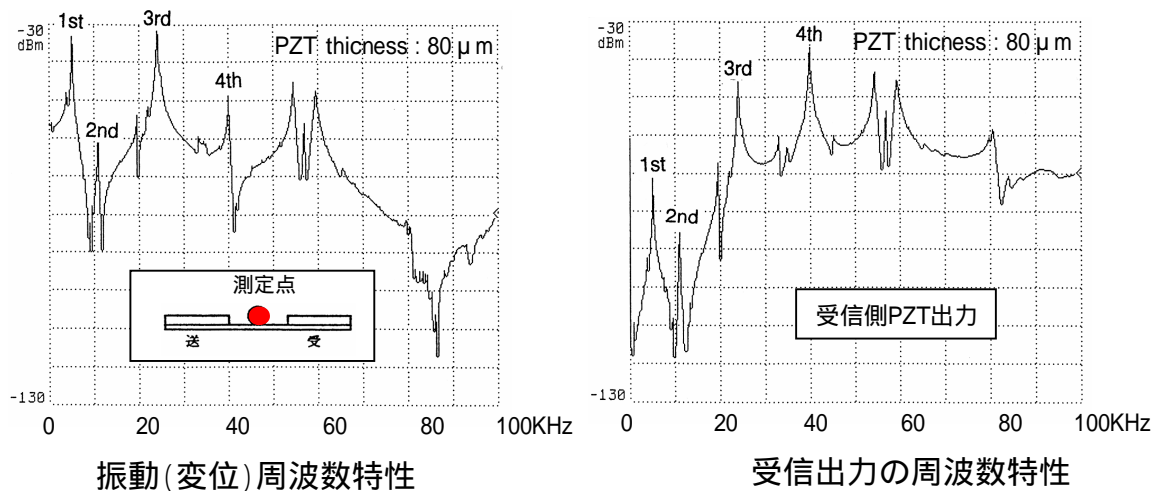


図5-27 20倍モデルの振動特性

5.5.2.3 ピエゾ厚に関する考察

ピエゾ厚80、100、150、200 μm の共振周波数におけるダイヤフラムの変位を図5-28に示す。ピエゾ厚が増すほど一次共振におけるダイヤフラムの変位が小さくなるとともに出力も低下している。

この図から振動モードについて考察すると以下のことがわかった。

同じ次数の変位を比較すると、ピエゾが厚くなるほど変位は小さくなる。

変位の大きさを比較するとピエゾの厚みによらず、1次、3次、4次、2次の順となる。

ダイヤフラムの共振周波数以外に観察される出力のピーク、例えば、80 μm [19.64kHz]、150 μm [4.044kHz]、200 μm [20.36kHz]のモードを測定すると、受信ピエゾ側のダイヤフラムの末端において変位が0になっておらず、梁の共振であると推測される。

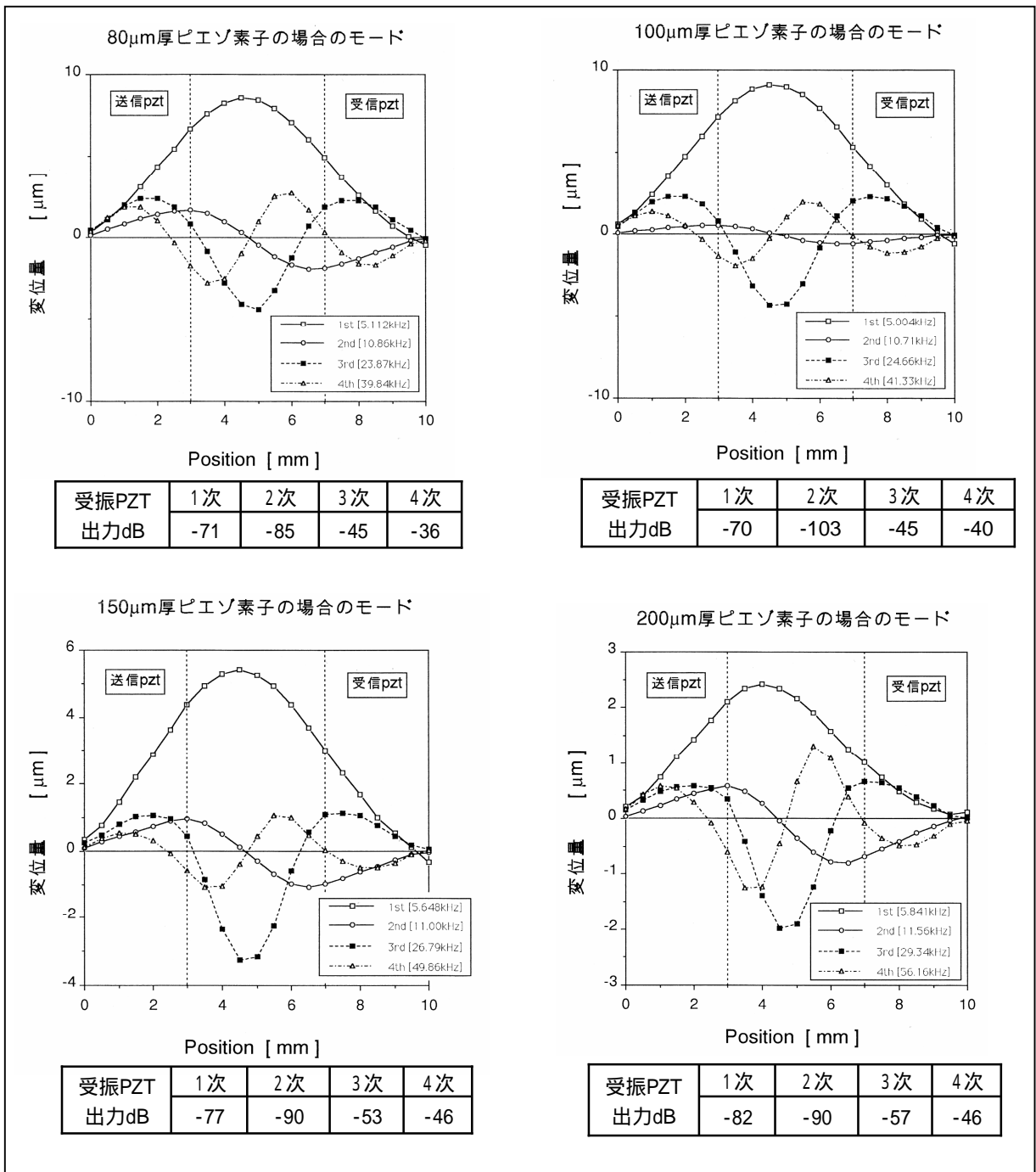


図5-28 各ピエゾ厚におけるダイヤフラムの変位

また図5-29にピエゾ厚に対する各次数の共振周波数変化を示す。この図からわかるようにダイヤフラムの共振周波数はピエゾが厚くなるほど、高くなるが、振動モードはピエゾ厚みに依存せず、1次から4次までが同様に観察された。

ピエゾ厚については、本構造は3次の共振型モデルであるため、3次の出力の最大となるピエゾ厚が最適と考えられる。すなわち80ないし100 μmが最適と判断する。

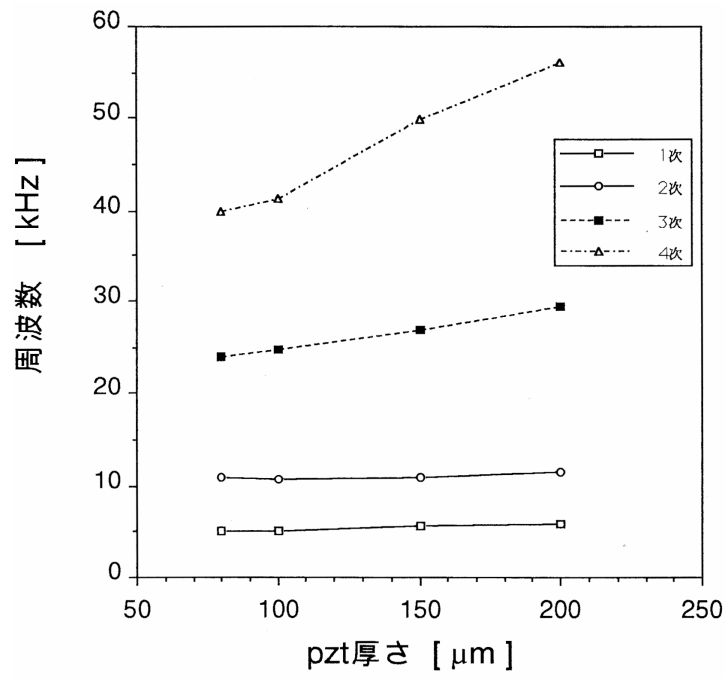


図5-29 ピエゾ厚みの変化に対する各次数の共振周波数変化

5.5.3 駆動・検出回路の検討

本方式の検出回路として適用可能な方式を表5-12にまとめた。この中から位相差のフィードバックにより高精度制御が可能なPLL型に絞り詳細な検討を行った。

表5-12 振動型加速度センサの適用可能検出回路

方式	長所	短所	評価
周波数スイープ型	広変化量の検出が可能	高速スイープ(100Hz以上)では検出精度劣化 鋸歯状波発生器の出力レベル精度要す	×
瞬間励振型	同期がとれるのでデジタル制御が容易	共振波形の時間幅が一様でない。 ノイズ成分が比較的大きい 回路が少し複雑	
位相検出型	高速応答(1msec以内) 高感度(11.8%/G)	周波数変動範囲の限定による検出範囲の限定または低感度化。(拡大モデル2は、検出範囲 $\pm 4G$)	
PLL型	フィードバック方式のため系が安定 直線性が良い (応答性は低下)	応答性と直線性が、相反する(高周波化により、応答性は改善可能) 回路が少し複雑 高Gでは共振点がずれる	
発信型	回路が比較的簡単 直線性が良い (1% FS以内)	積分するため出力にリップルが生じる。リップルを押さえると応答性が下がる (高周波化により低減の可能性あり) 強い衝撃で振動モード変化の可能性あり。	

5.5.3.1 振動型センサーの位相変化(PLL制御のベースとなる位相変化の測定)
 駆動/検出回路を検討するための測定セットアップを図5-30に示す。試料は、前節
 で評価した20倍モデルを使用した。

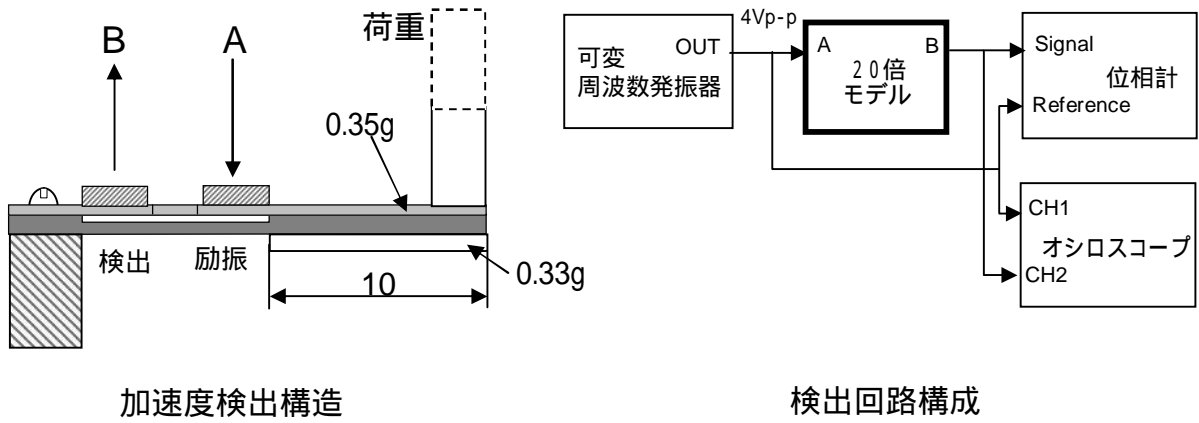


図5-30 測定セットアップ

(1) 実験1

周波数を21.066KHzから21.666KHzまでスイープし、位相角の変化を見た。結果を
 図5-31に示す。検出信号は共振周波数で最大となり、それ以外では検出信号レベ
 ルは低下している。

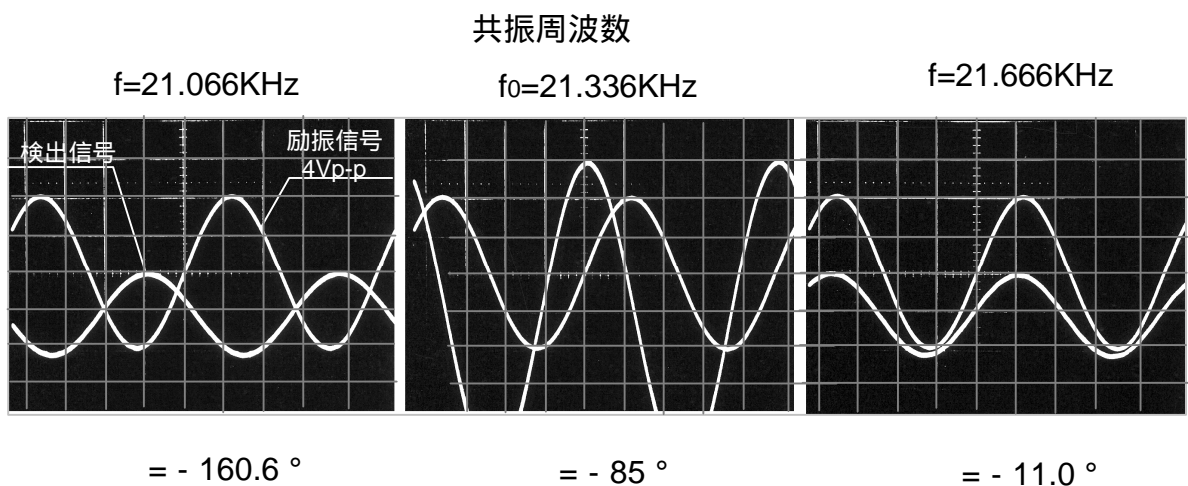


図5-31 周波数スイープによる位相角および出力の変化

(2) 実験2

駆動周波数を21.358KHzに固定し、そのときの荷重と位相の関係を測定した。

結果を表5-13 および図5-32にまとめた。

図5-32に示した荷重量と位相角の関係より両者の関係は、0～4Gがリニアな範囲と見なすことができる。一方周波数 - 位相角グラフよりリニアな周波数範囲は約155Hz (位相変化量90～95度)であり、これをGに換算すると8G (247Hz/14.7G=19155/19=8.2)程度となり±4Gと考えるとほぼ一致する。

位相角変化量は1Gで85deg、5Gで125degであるから10deg/Gとなる。

また感度は、10/85=118000ppm/G となり、共振周波数の変化885ppm/Gと比較すると、位相検出は非常に高感度である。

表5-13 荷重と位相変化の関係

荷重 (g)	全体の荷重 (g)	加速度換算値 (G)	位相 (degree)	備考
0	0.68	1.0	85 °	f0=21.358KHz
3.6	4.28	6.3	133 °	参考 21.436K
7.2	7.88	11.6	154 °	21.529K
10.8	11.48	16.9	160.5 °	21.615K
14.4	15.08	22.2	163.4 °	21.70K

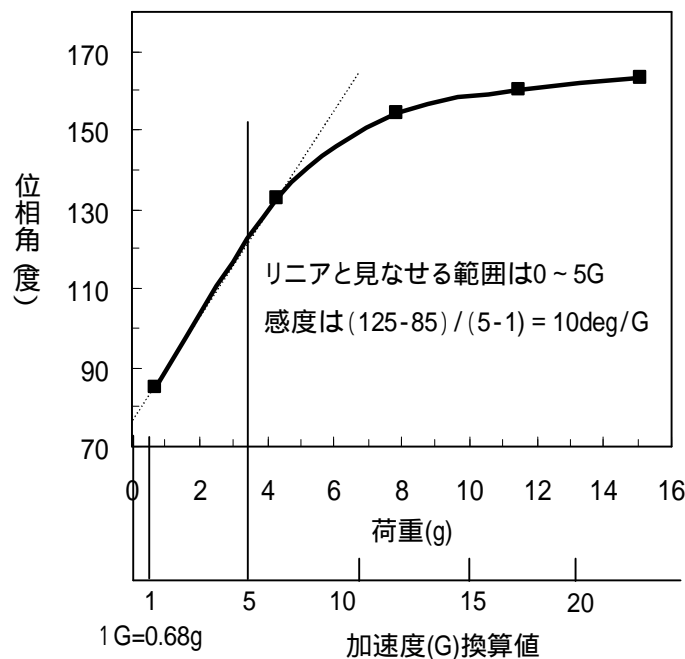
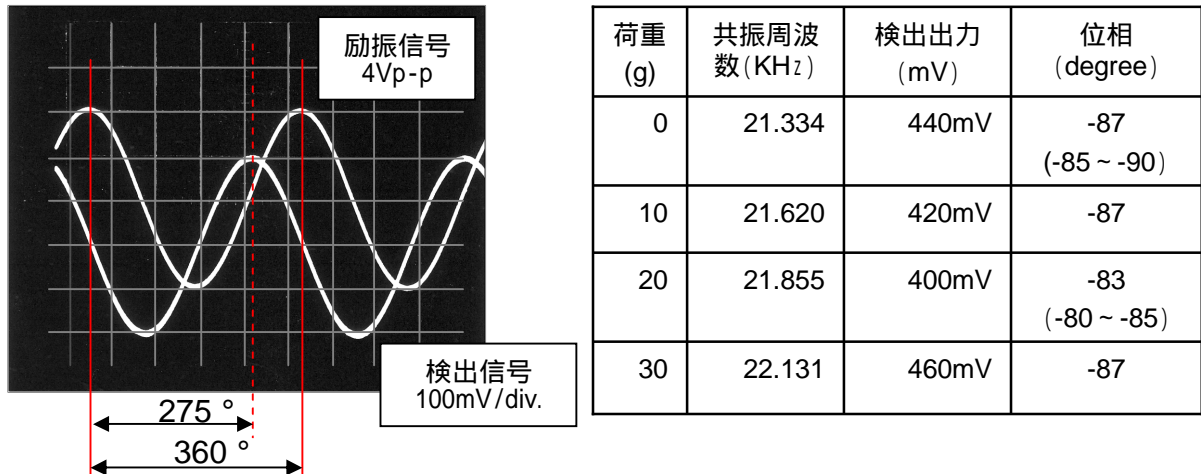


図5-32 荷重と位相変化

(3) 実験3 荷重を変化させた時の共振周波数と位相

図5-33に示すように荷重の増加とともに共振周波数は高くなる。しかしながら共振点における励振信号と検出信号との位相差は -87° でほぼ一定である。位相差を -87° に保つことができれば、常にダイヤフラム部の振動は、共振周波数に固定できることになる。



拡大モデル2 共振周波数での波形

荷重による共振周波数、出力、位相角変化

図5-33 荷重と共振周波数変化と位相の関係

以上の結果をまとめると 共振周波数と位相角は図5-34に示す関係にあることがわかる。すなわち荷重(加速度)が大きくなるほど共振周波数 f_0 は高くなるが、位相差は変化しない特性を示す。

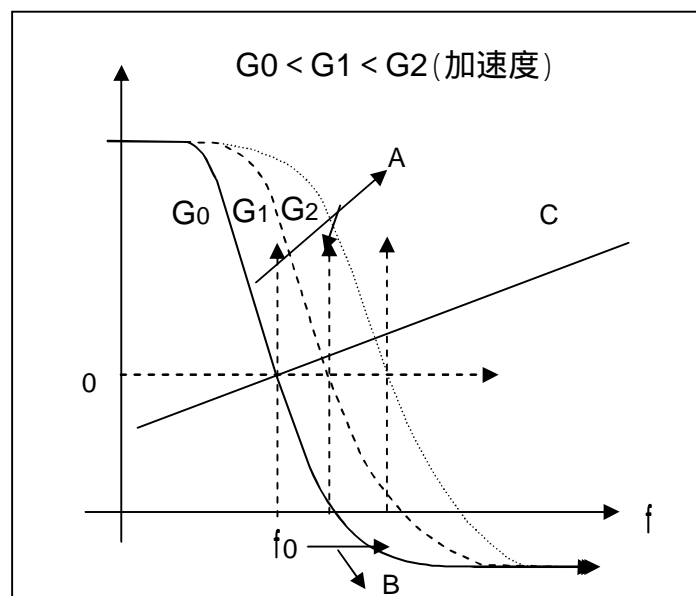


図5-34 共振周波数と位相角の関係

5.5.3.2 PLLによる加速度検出回路

共振点においては、常に位相角が一定であることが前節の実験で確認できたため、5-35図に示すPLL回路(Phase Lock Loop)で加速度の検出を行うことにした。すなわちVCOから励振素子を駆動する周波数と受信素子から検出されるダイヤフラムの振動周波数の位相を位相比較器で比較し、差分の電圧をVCOへフィードバックし、常にダイヤフラム自身の共振周波数にロックするように制御する。この時のフィードバック電圧をモニタすることで加速度の変化量へ換算を行う。

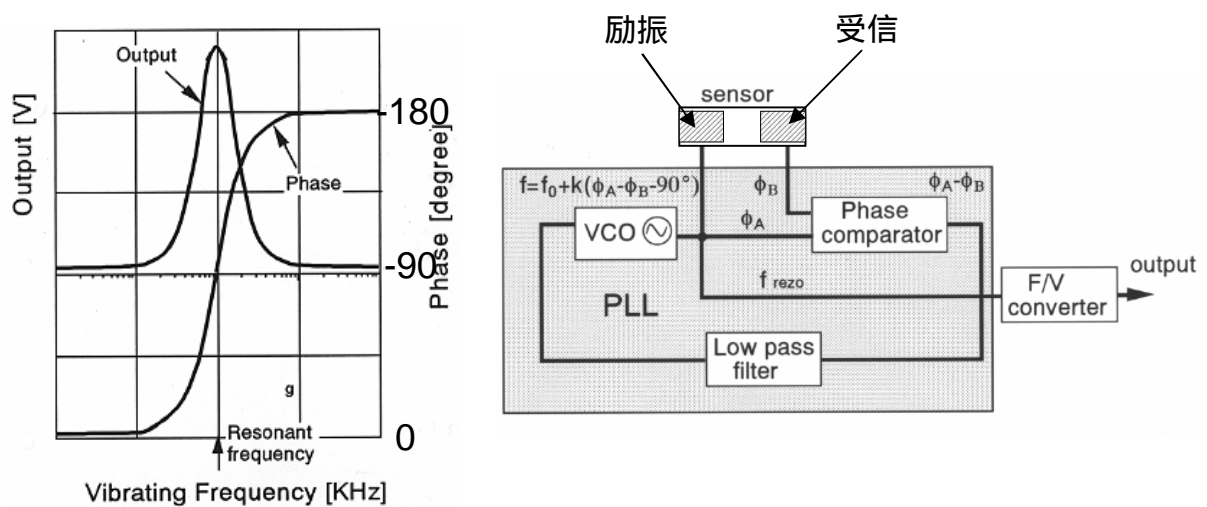


図5-35 PLLによる加速度検出回路

5.5.4 20倍モデルの性能評価

20倍モデルとPLL検出回路を組み合わせ加速度の検出感度評価を行った。感度評価は静荷重を印可することで測定するDC特性評価とボイスコイル加振によるAC特性評価の2通りを行った。

図5-36に静荷重を印可した場合の周波数変化の測定結果を示す。

VCO電圧[V]と励振周波数 f [KHz]の関係は、 $f = 1.76V + 18.74$ [KHz]である。

測定はLPFの時定数を1msecと100msecの場合について行ったが、1G当たりの周波数変化量は17.5Hz/Gの特性を示している。荷重0の時の共振周波数は21.32KHzであるので、820ppm/Gの感度である。図5-37にボイスコイル型の加振器に20倍モデルを取り付け、加振器の周波数をスイープさせた時のセンサ回路出力を示す。

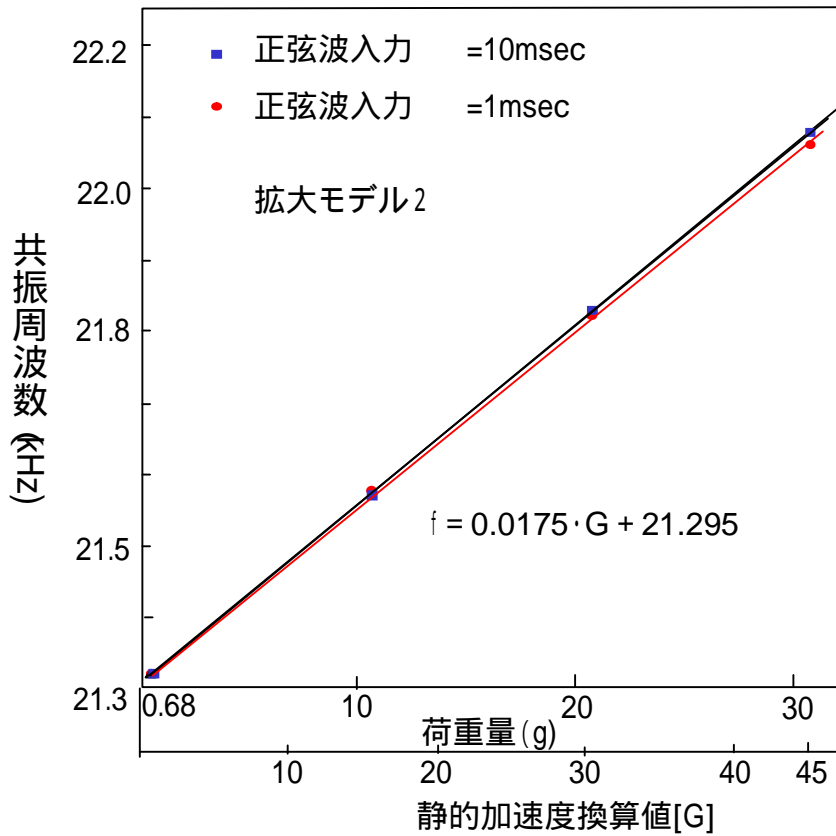


図5-36 PLL回路によるセンサの荷重特性

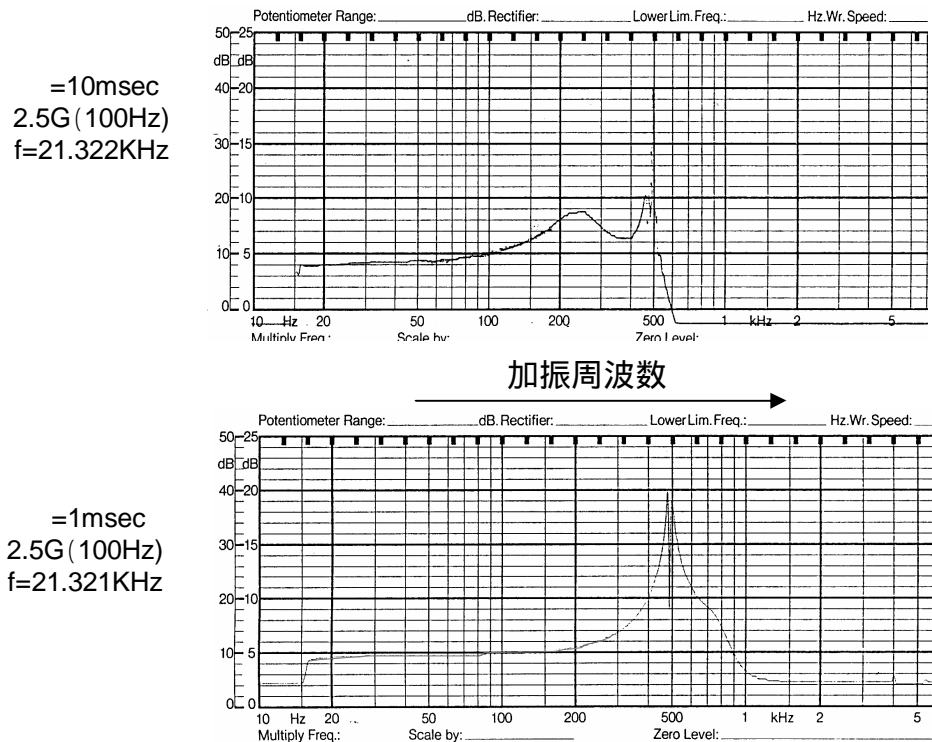


図5-37 センサのAC加振時の周波数特性

この図からわかるように周波数レスポンスは時定数1msecが優れており、200Hzまでフラットな特性が得られている。

AC加振周波数を100Hzに固定して印可交番加速度を変化させ、センサのAC特性を評価した。結果を図5-38に示す。加速度とPLL回路の位相平滑出力は線形性1%以内の良好な比例関係にあり、周波数変化は、平滑回路の出力(VCO入力)の変化として測定可能であることがわかる。

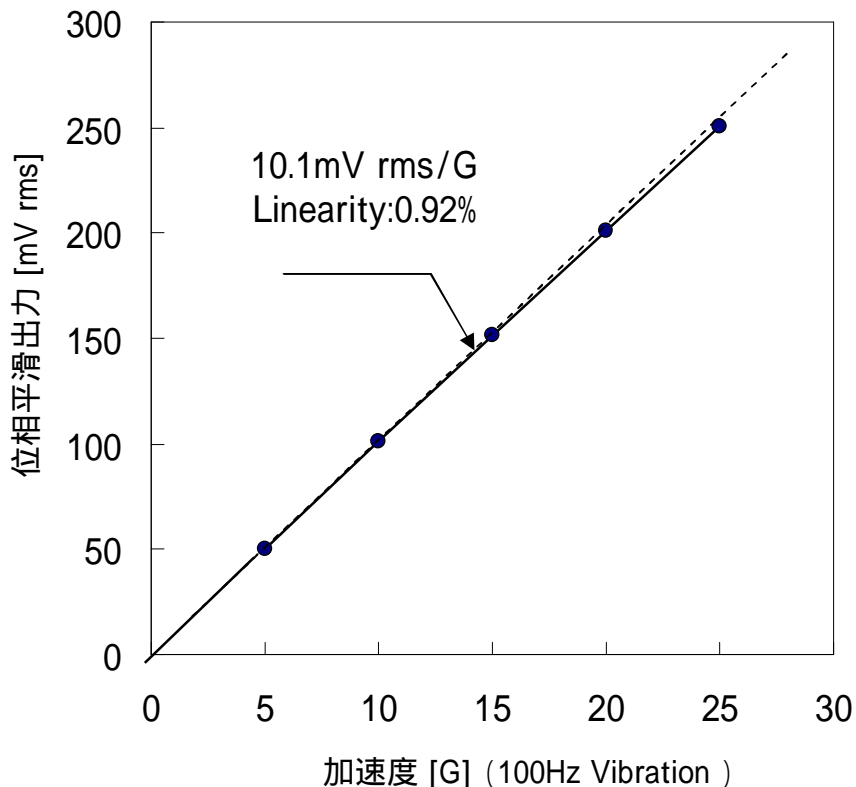


図5-38 加速度(AC加振)とPLL回路の平滑出力周波数特性

5.6 拡大モデルのまとめ

梁部およびダイヤフラム部を4-2アロイで構成し、圧電体としてPZTを用いて20倍モデルを試作し、特性を評価した。

励振入力10dB(4Vp-p)に対し、受信出力-25dB。3次共振周波数21.327KHz(1次共振周波数は5.25KHz)に対し、886ppm/Gの検出感度が得られた。

また温度特性はほぼPZTの温度特性そのままの-305ppm/°Cであり、本方式が振動型の加速度センサとして有効であることが検証できた。

拡大モデルの設計値及び知見をもとにMEMSプロセスによる振動型加速度センサの小型化の研究を進める。

5 . 7

平面MEMSによる振動型 加速度センサの基礎検討

5.7 平面MEMSプロセスによる振動型加速度センサの基礎検討

4-2アロイおよびPZTを用いた20倍モデルの構造をSi基板の上にダウンサイジングして形成する。

ダイヤフラムや梁の構造形成のためにSiの異方性エッチング技術、励振・受信の圧電体はZnOの薄膜形成技術等のMEMSプロセスを用い、Si基板の上に図5-39に示す構造の作り込みを行なった。今回製作する等倍モデルと20倍モデルの諸元を表5-14にまとめた。

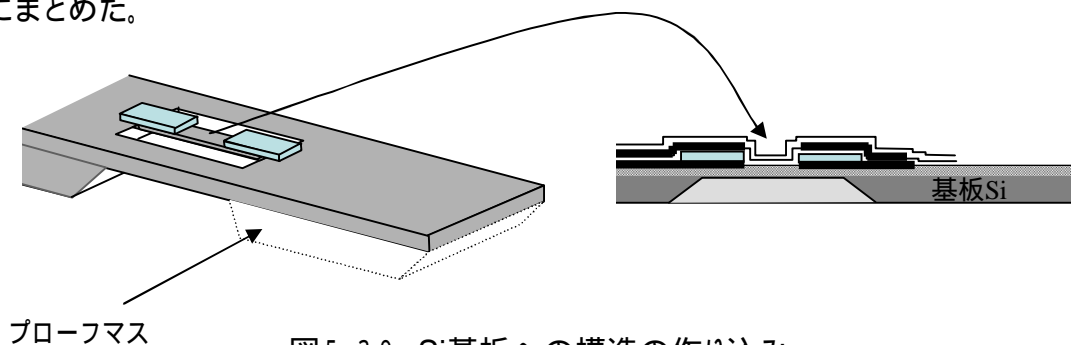


図5-39 Si基板への構造の作り込み

表5-14 20倍モデルと等倍モデルの諸元

	20倍モデル	等倍モデル
一次共振周波数	5.5KHz近傍	170KHz近傍
梁材料	4-2アロイ	Si
ダイヤフラム材料	4-2アロイ	Si
ダイヤフラム長さ	10mm	500 μ m
ダイヤフラム厚	65 μ m	4 μ m
圧電材料	PZT	ZnO
圧電材厚	80 μ から 100 μ m	2 μ m

センサーの試作にあたっては、プロセス技術の確立を行いながら行う必要があるため、まずトランスデューサ部のみの試作を行い、基本特性が得られるかどうか確認しながら進めた。

5.7.1 トランスデューサ部の試作

等倍モデルのトランスデューサ部の形状を図5-40に示す。用いたSiの基板厚は300 μ m、ダイヤフラムは、長さ500 μ m、厚さ4 μ mである。圧電膜の位置により、1次共振と3次共振の2タイプを作製した。

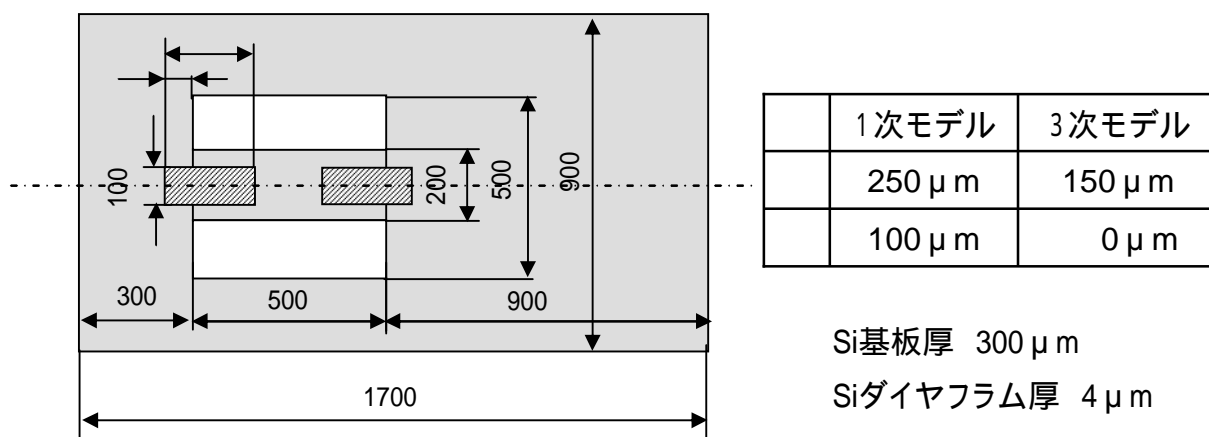


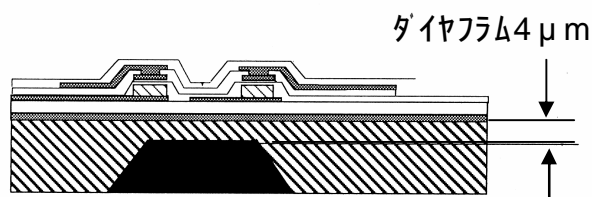
図5-40 等倍モデルのトランスデューサ部の平面形状

5.7.1.1 トランスデューサ部の試作1

図5-41のレーヤ構成のトランスデューサを以下のプロセスに基づき試作を行った。

製作プロセス

- エッチストップ形成
- ボロン拡散4um
- ベタアース形成 (Alスパッタ)
- 絶縁層形成 (SiO₂ CVD)
- 下部電極形成 (Alスパッタ)
- 圧電膜形成 (ZnO スパッタ)
- 保護膜形成 (SiO₂ CVD)
- 上部電極形成 (Alスパッタ)
- 絶縁層形成 (SiO₂ CVD)
- 上部配線形成 (Alスパッタ)
- 保護膜形成 (SiO₂ CVD)
- 裏面より異方性エッチング



レーヤ構造 (設計値)		
全体保護	SiO ₂	1.0um
上部電極	Al/W	1.0um
絶縁層	SiO ₂	1.0um
取出電極	Al	0.6um
保護膜	(SiO ₂	(0.5um)
圧電体	ZnO	2.0um
下部電極	Al	0.6um
絶縁層	SiO ₂	3.0um
ベタアース	Al	0.5um
ダイヤフラム	Si(p)	4.0um

図5-41レーヤ構成

(1) 試作1の結果

浮遊容量を低減するためベタアース層を設けたが、プロセス的に不十分で、ショート、断線が多く、評価サンプルが限られた。試作したトランスデューサの等価回路を図5-42に示す。また試作サンプルの内、代表的なサンプルの電気特性を図5-41

に示す。

抵抗値やコンデンサ容量がばらつき、レーザドプラ計による測定でダイヤフラムの振動は確認できたが、ダイヤフラムの振動を受信側の圧電体で検出できたのはサンプルは、6-4のみであった。

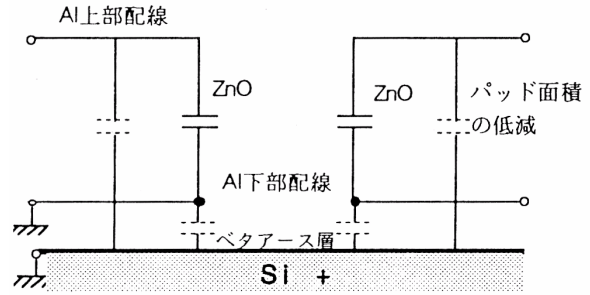


図5-42 試作トランスデューサの等価回路

表5-15 トランスデューサ部試作1におけるサンプルの電気特性

センサ		抵抗(DC)	抵抗(AC) 100KHz	コンデンサ 容量	損失	備考
6-1 1次モデル	励振側	18M	7.3k	2.2pF	-83°	駆動電圧 10Vp-p 振動変位 -34dB(2.4nm) 1次タイプ f0 = 249KHz
	受信側	16M	777k	2.0pF	-71°	
6-2 1次モデル	励振側	6.2	4	32μF (Ser.)	+0.7°	駆動電圧 10Vp-p 振動変位 -30dB(4nm) 3次タイプ f0 = 350KHz
	受信側	180k	460k	4PF (Para.) 2.4pF	-44°	
6-3 1次モデル	励振側	450k	376k	2.5pF	-37°	駆動電圧 10Vp-p 振動変位 -45dB (0.7nm) 1次タイプ f0 = 260KHz
	受信側		779k	2.0pF	-70°	
6-4 1次モデル	励振側	5.4 k	1.8k	9.0pF	-0.6°	駆動電圧 10Vp-pで 振動変位 -13dB(27nm) 受信側出力 -54dB Q = 500 1次タイプ f0 = 260KHz
	受信側	11M	231k	5.3pF	-51°	

図5-43に試料6-3および試料6-4の振動および受信特性を示す。

試料6-3ではダイヤフラムの1次共振が350KHzにあることが認められる。振幅は3nmと非常に小さいため、受信出力は得られていない。(受信側の抵抗が であるため、断線も考えられる)

試料6-4は、ダイヤフラムの1次共振点が259KHzにあり、振幅が27nmと良好に振動している。受信出力は、-59dBである。

(2) 試作1の考察

1) トランスデューサ構造の有効性の確認

試料6-4において、10Vp-p励振でダイヤフラムの振動振幅 -13dB(27nm)、受信出力 -54dB(2.6mV)、Q = 500が得られ、トランスデューサとしての動作が確認できた。しかしながら他の試料では、断線、ショートあるいは圧電膜特性の不十分さで受信出力が得られず、歩留まりが大きな課題である。

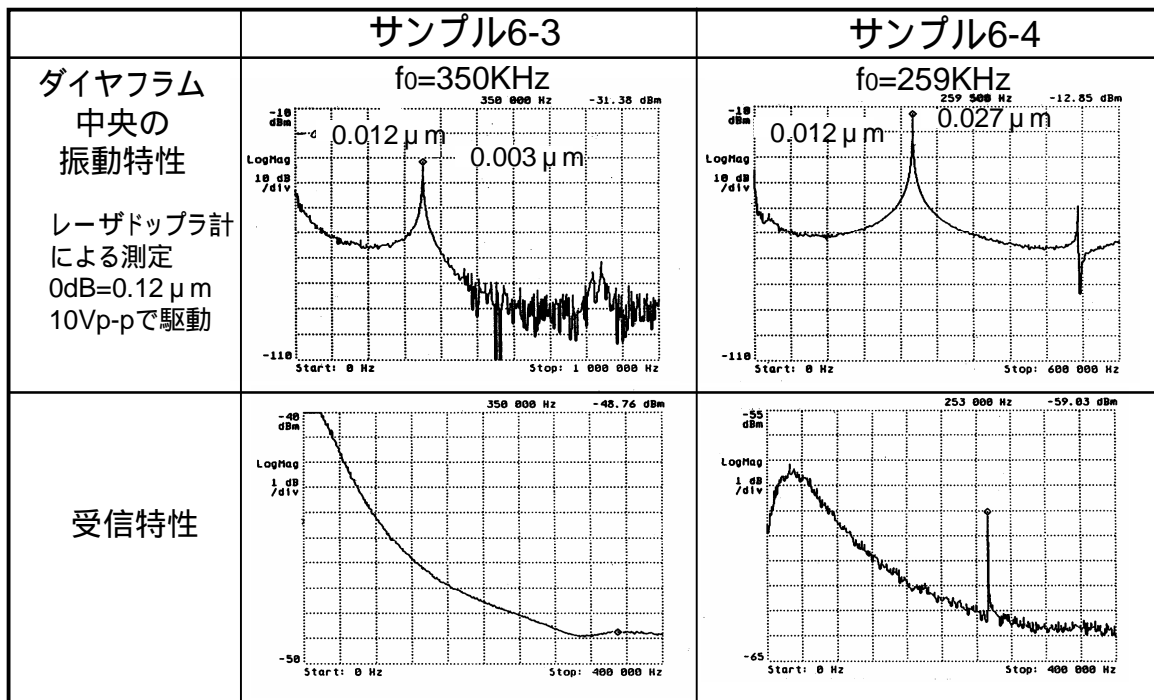


図5-43 試料6-3、6-4の振動および受信特性

2) ダイアフラムの振幅が小さい原因

確認できたダイアフラムの最大変位は27nm、他の試料は数nmレベルの変位であった。原因としては、以下の要素が考えられる。

圧電膜厚のウェハ内ばらつき

ZnOに対するSiO₂保護膜、Al配線の形成が不十分

下部電極と上部電極間の電流リーク

送信側と受信側の容量結合

3) 受信側感度が低い原因

静電容量が40pFではダイアフラムの振動が40nmであっても検出できていない。

上部電極とSi基板間の浮遊容量が大きすぎる

ベタアース層の採用で浮遊容量は低減されるもののアニールヒロックによる短絡の発生

段差によるZnO上部Al配線の断線

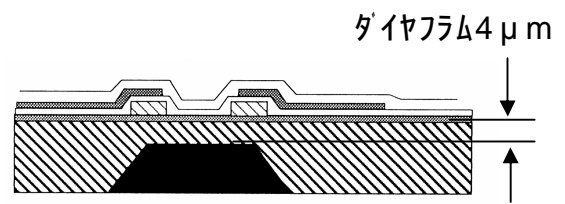
などが、振動を検出できない要因として考えられる。

4) 対策

良好にプロセスされた試料は、振動型のトランスデューサとして機能することがわかった。しかしながら拡大モデルと比較して、出力が小さく、歩留まりも課題である。各層の膜厚の最適化、プロセスの簡略化を行い、出力の増大、歩留まり向上を図る。

5.7.1.2 トランスデューサ部の試作2

加工精度、プロセス精度不足をカバーするため、ベタアース層、取り出し電極など省略可能なプロセスを省略することで構造を簡略化し、以下の製作プロセスで試作をおこなった。簡略化したレーヤ構造を図5-44に、等価回路を図5-45に示す。本構造でベタアースと同様の効果を得ることができている。



レーヤ構造(設計値)		
全体保護	SiO ₂	1.0μm
上部電極	AL	0.5μm
絶縁層	SiO ₂	1.0μm
圧電体	ZnO	2.0μm
下部電極	Al	0.5μm
糸部	Si(p)	4.0μm

製作プロセス

- エッチストップ層形成
- ボロン熱拡散4 μm
- 下部電極形成(Al スパッタ)
- 圧電薄膜形成(ZnO スパッタ)
- 絶縁膜形成(SiO₂ CVD)
- 上部配線形成(Al スパッタ)
- 保護膜形成(SiO₂ CVD)
- 異方性エッチング

図5-44 試作2におけるレーヤ構造

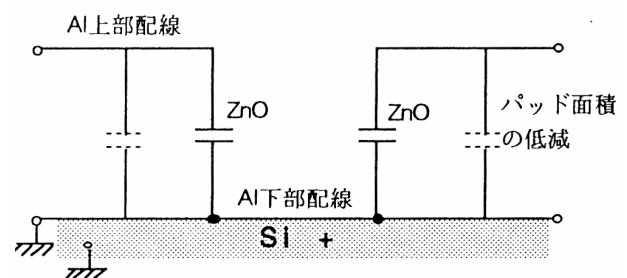
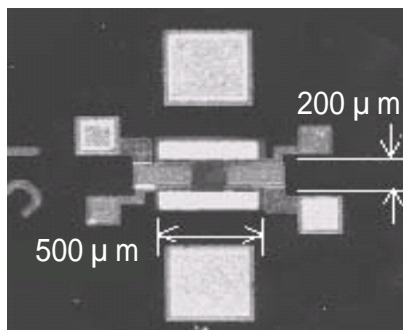


図5-45 等価回路

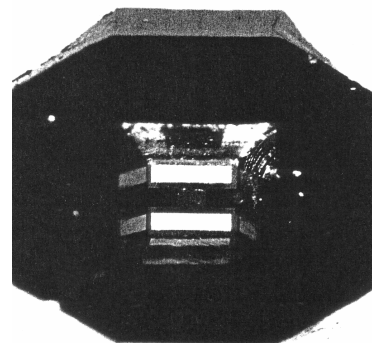
(1) 試作2の評価結果

1) 試作サンプルの外観

試作サンプルの上面からの外観を図5-46の左側に、下面からの写真を右側に示す。下面から異方性エッチにより高アスペクトの加工がなされている様子がわかる。Al下部電極面積を増やしたため、サイドエッチなどによるパターン損傷は低減し、形状精度が向上している。



上面からの外観



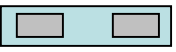
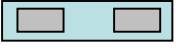
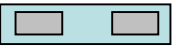
下面からの外観

図5-46 試作サンプル(トランスデューサ部)の外観

2) 電気特性

配線間の容量、インピーダンス、損失を表5-16に示す。コンデンサ容量、損失ともばらつきが低減され良好な値である。

表5-16 トランスデューサ部試作2におけるサンプルの電気特性

サンプル		コンデンサ容量 [pF]	損失 [deg]	インピーダンス []	共振点 [KHz]	出力値 [dBm]	Q	ZnO、電極形状
10-3	励振側	3.11	0.8	511	176.6	-47	136	
	受信側	2.98	0.8	534				
10-4	励振側	3.03	0.9	526	173.0	-42	244	
	受信側	3.00	0.8	530				
10-5	励振側	2.97	1.5	535	157.9	-45	158	
	受信側	2.96	1.5	538				

3) 励振特性

サンプル10-4 について印可電圧を4Vp-pから1Vp-pまで変化させたときの振動状態をレーザドプラ干渉計で測定した。結果を図5-47示す。各々173KHzに共振ピークが認められる。駆動電圧が4Vではピークの山割れが観察されるが、この時の振幅は、0.1 μmであり、試作1で確認したレベルと比較して3倍以上の振幅が得られている。

4) センシング特性

図5-48に印可電圧:4Vp-p(10dBm)で駆動した場合のサンプル10-3、10-4、10-5の受信特性を示す。共振周波数にばらつきはあるものの、いずれも-30dBレベルの良好な受信状態を示している。

5) センシング広域特性

サンプル10-40について、スペクトラムアナライザを用い、0Hzから5MHzまで周波数をスイープしたときの受信特性を図5-49に示す。励振側の入力4Vp-p:10dBm相当である。高次モードまでの複数の共振周波数が観察される。

図5-49右側には1次共振周波数近傍の周波数拡大を示すが、1次共振周波数は170KHzで-25dBm、共振、反共振の差55dBmが得られた。きれいなピークとなっており、安定なセンシングが可能なレベルである。

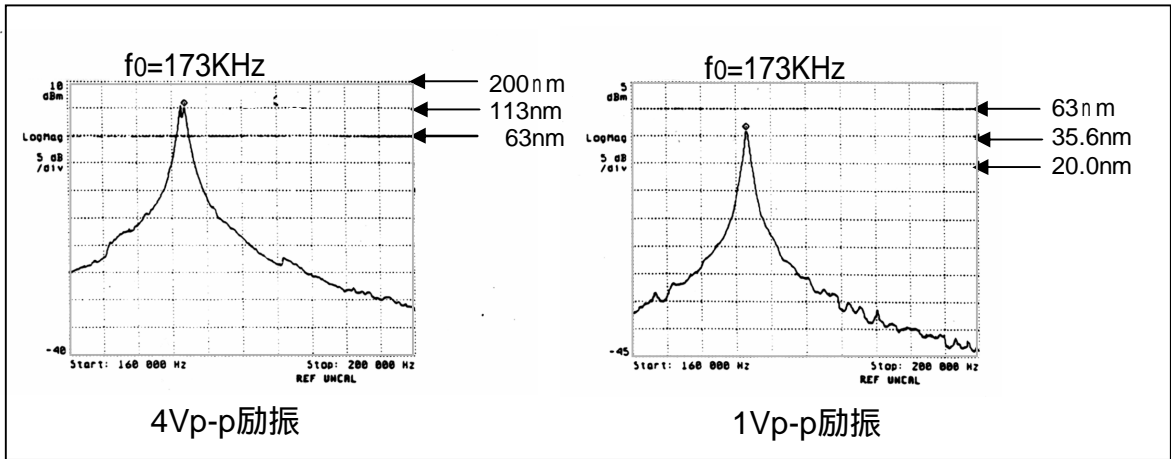


図5-47 サンプル10-4の振動特性
(励振電圧を変化させ、ダイヤフラム中央の変位量を測定)

励振側印可電圧: 4 Vp-p (10 dBm)
 スペアナ入力インピーダンス: 1 M
 センサ入力バッファ回路電源: $\pm 2.5 \text{ V}$
 センサ入力バッファ回路入力抵抗: 529 K
 サンプル10-1 40 形状A $Q=212$

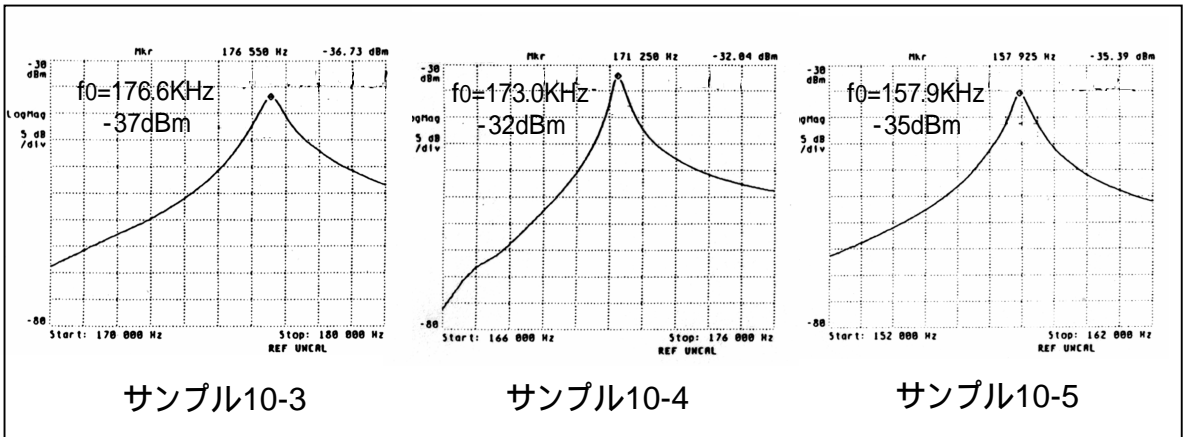


図5-48 各サンプルの受信出力(励振電圧 4 Vp-p)

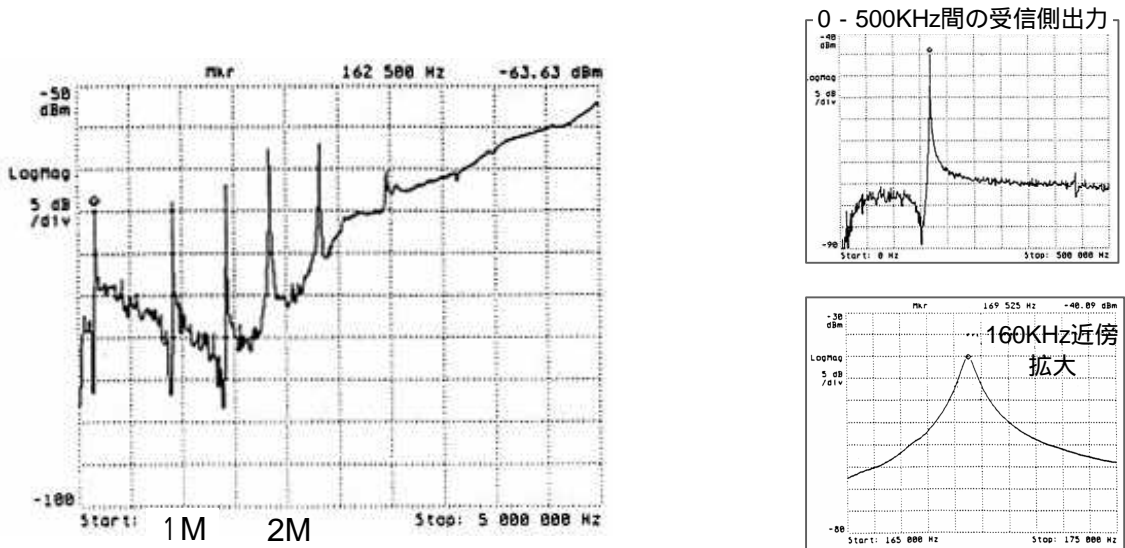


図5-49 0 Hz から 5 MHz までの受信特性

6) PLL制御の検討

サンプル10-4を用い、駆動周波数をスイープし、出力レベルと位相変化の関係を測定した。励振信号と受信の出力信号をオシロスコープで比較した結果を図5-50に示す。出力は、共振周波数173KHzで最大となっている。この時の位相差は約 -90° である。励振周波数が171KHzから175KHzまで変化する間で位相はほぼ $-180^\circ \sim 0^\circ$ の変化をしている。

このようにPLL制御するに十分な出力と位相変化が得られている。

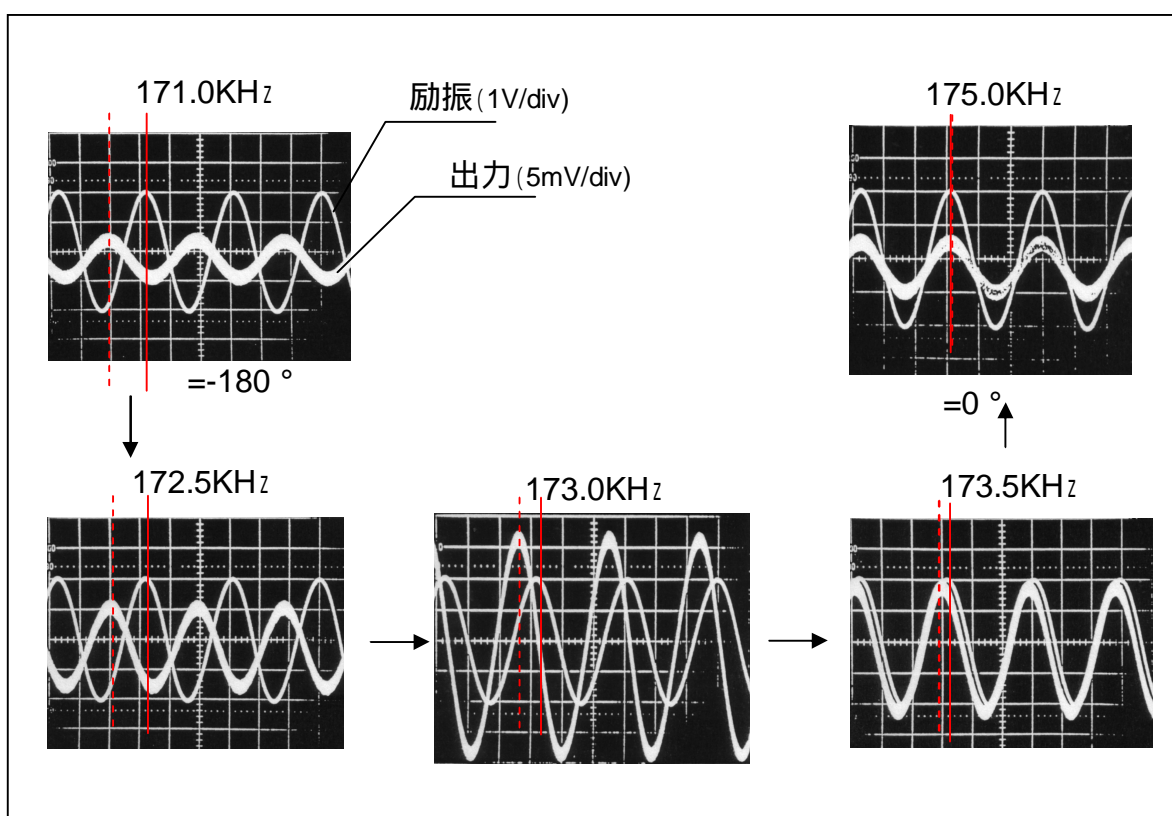


図5-50 励振信号と受信出力信号の比較

7) 周波数ばらつきに関する検討

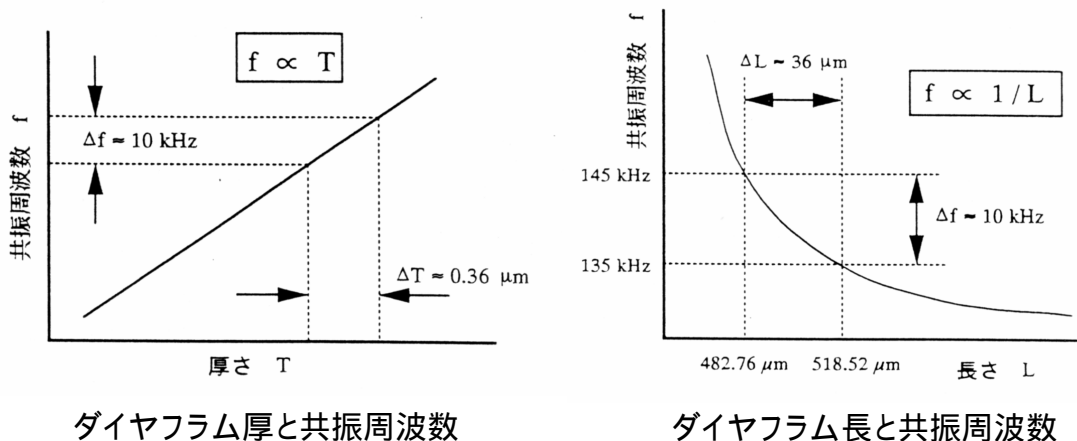
試作2のサンプルにおいて周波数が数KHzから数+KHzばらついている。その原因を推定した。採用したプロセスから考えられる原因は、ダイヤフラム厚およびダイヤフラムの長さばらつきと考えられる。周波数のばらつきからプロセス誤差を定量化した。

ダイヤフラム分の厚さのバラツキ

共振周波数とダイヤフラム分の厚みは比例関係にあるので、1次共振周波数140kHzであるとする、共振周波数が10kHzずれる為には、ダイヤフラム分の厚さに約 $0.38 \mu\text{m}$ の誤差があることになる。この関係を図5-51に図示する。

ダイヤフラム分の長さのバラツキ

共振周波数とダイヤフラム分の長さは反比例関係にあるので、1次共振周波数が140 kHzであるとすると、共振周波数が10 kHz ずれる為には、下図のようにダイヤフラム分の長さに約36 μm の誤差があることになる。



ダイヤフラム厚と共振周波数

ダイヤフラム長と共振周波数

図5-51 共振周波数のずれとダイヤフラム厚とダイヤフラム長さの関係

5.7.1.3 トランスデューサ部のまとめ

試作2のトランスデューサ構造およびプロセス条件で、歩留まりが十分ではないが、動作するサンプルが安定に作り込めるようになった。

ダイヤフラムの寸法誤差によると思われる周波数のばらつきに付いては、センサ構造体を造り込むプロセスの中で改善を進める。

5.7.2 ZnO圧電膜の形成

ZnOの薄膜はRFスパッタによってAl(下部電極)を下地として形成する。

形成する場合のパラメータとして

基板温度

Ar混合ガス圧

RF入力

等があるが、これらをうまく制御して配向性の高いZnO膜を形成する必要がある。

表5-17に2種類の形成条件を示す。

表5-17 ZnO膜形成条件

	条件1	条件2
膜形成	RFスパッタリング	RFスパッタリング
基板	Al(0.6 μm) / Si(100)	Al(0.6 μm) / Si(100)
基板温度	220	300
ガス圧	5×10^{-3} torr (Ar:O ₂ = 3:3sccm)	1×10^{-1} torr (Ar:O ₂ = 5:5sccm)
RF入力	150W	100W

条件1でZnO膜を形成した時の膜面のSEM写真を図5-52にX線回折により配向度を測定した結果を図5-53に示す。

SEM写真から粒子がこまく、成膜状態は疎であることがわかる。また配向については、複数の角度にピークが存在し、圧電膜としての機能が困難と判断される。

実際のセンサとしてくみ上げ評価においても、ダイヤフラムの励振ができなかった。

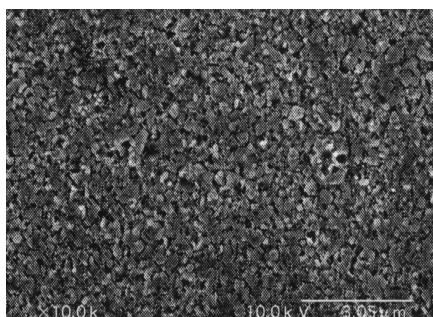


図5-52 条件1での成膜状態

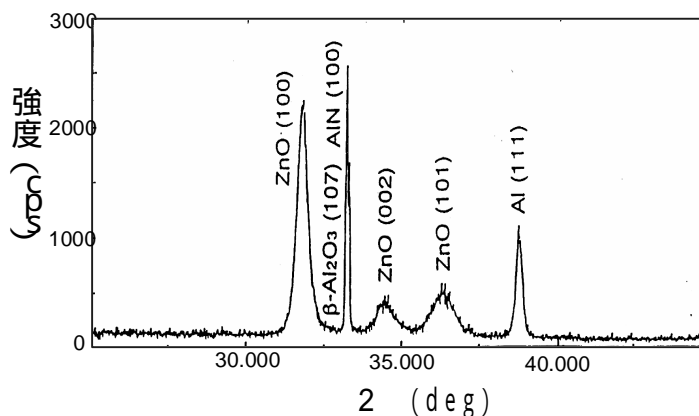


図5-53 ZnO膜のX線回折による配向度測定

一方条件2での圧電膜の形成は、膜面のSEM写真を図5-54に示すが、非常に緻密である。X線回折による測定でも図5-55に示すように配向度0.85度と良好な結果が得られた。

またこの条件でダイヤモンド上に形成したZnO膜の断面をSEM観察した写真を図5-56に示すが、基板に垂直に立ち上がっていることがわかる。

また図5-57は、本状態で成膜されたトランスデューサのダイヤモンド中央点の変位を測定したものであるが、0.1 μm以上の振幅が得られており、圧電膜として良好に機能している。

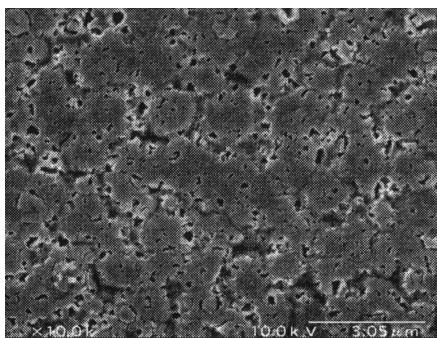


図5-54 条件2における膜面性状

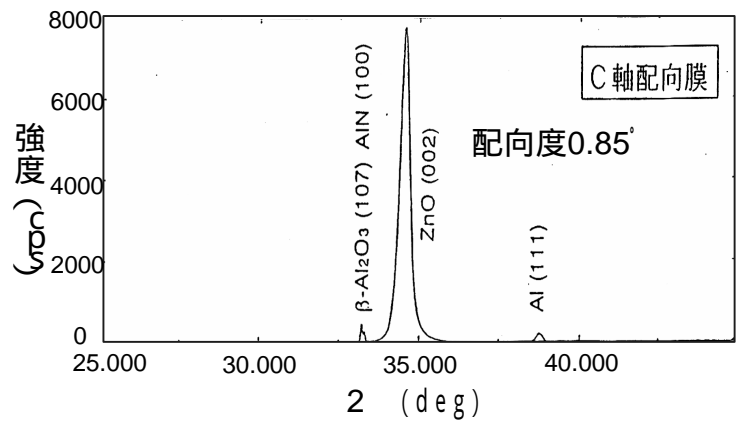


図5-55 ZnO膜のX線回折測定

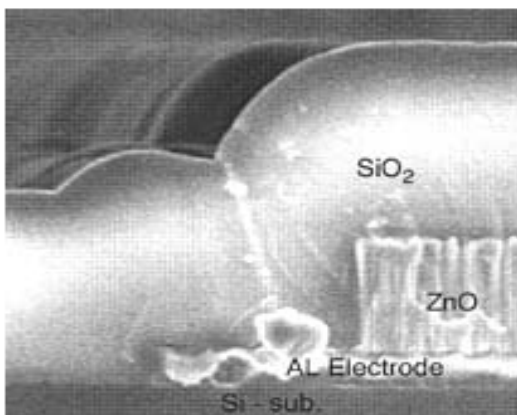


図5-56ダイヤモンド断面SEM写真

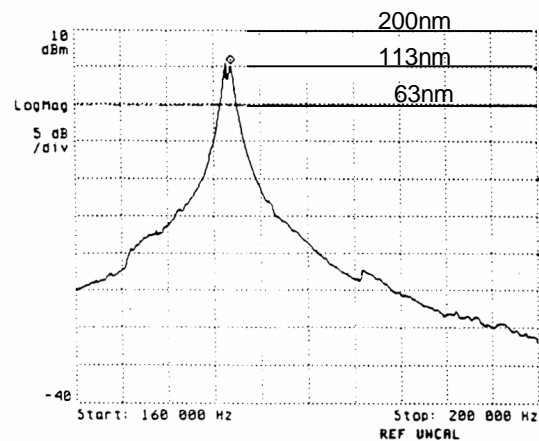


図5-57ダイヤモンドの変位(励振4Vp-p)

5.8 平面MEMSプロセスによる振動型加速度センサーの製作と評価

5.8.1 センサー構造と感度

加速度センサの構造と主要なパラメータを図5-58に示す。これらのパラメータをもとに加速度に対する感度とセンサ構造の関係を明らかにする

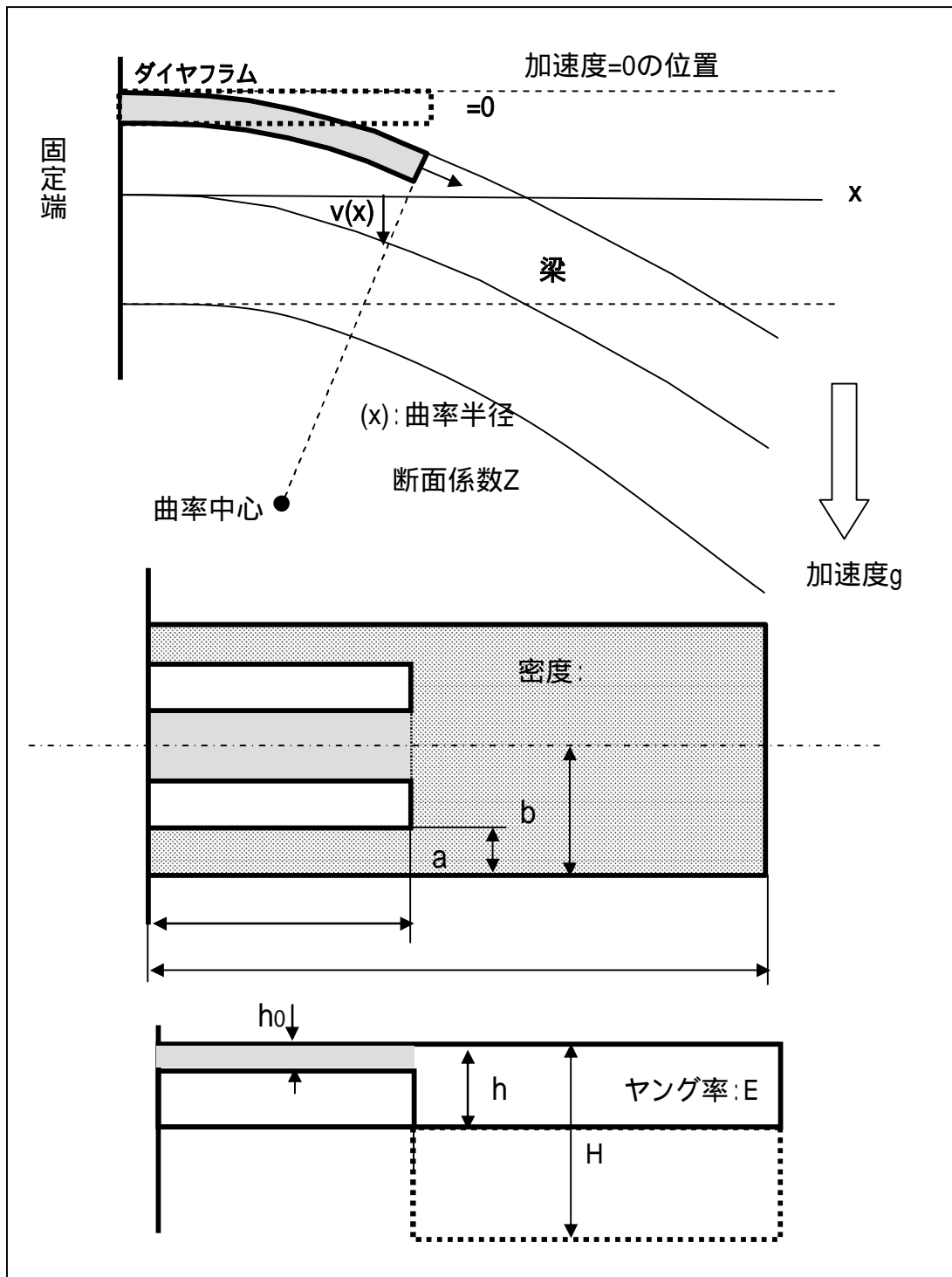


図5-58 感度計算のパラメータ

ダイヤフラムのたわみ量 $y(x)$ とおくと

$$y''(x) = \frac{M(x)}{EI(x)} \quad \dots (5.11)$$

E : 梁のヤング率

$M(x)$: 位置 x での曲げモーメント

$I(x)$: 位置 x での断面2次モーメント

位置 x での曲げモーメント $M(x)$ は下式で与えられる。

$$M(x) = b \cdot h(x - a)^2 \cdot g \quad \dots (5.12)$$

位置 x での断面2次モーメント $I(x)$

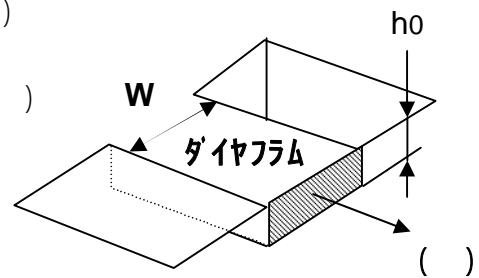
$$I(x) = \frac{1}{6} a \cdot h^3 \quad \dots (5.13)$$

位置 x (ダイヤフラムの固定端) での垂直応力 $\sigma(x)$

$$\sigma(x) = E_0 \frac{1}{h(x)}$$

$$\frac{1}{h(x)} = y''(x)$$

$$\sigma(x) = E_0 \cdot y''(x) \quad \dots (5.14)$$



ダイヤフラムの張力

$$N = \int \sigma(x) dS$$

以上の式を用いるとダイヤフラムの張力 N は

$$N = \frac{W}{2 \cdot I} b (x - a)^2 (h - h_0) h \cdot h_0 \frac{E_0}{E} \cdot g \quad \dots (5.15)$$

ダイヤフラムの寸法が不変であるとする

$$N \propto g \left(\frac{1}{E}\right) \left(\frac{b}{a}\right) (x - a)^2 \left(\frac{1}{h}\right) \quad \dots (5.16)$$

ダイヤフラムの固有振動数 f と張力 N の関係は、

$$f \propto \sqrt{C_1 N + C_2}$$

感度 df/dg は

$$\frac{df}{dg} \propto \frac{dN}{dg} \cdot \frac{df}{dN} \quad \dots (5.17)$$

ダイヤフラムの寸法が不変な場合のセンサー感度は下式で与えられる。

$$\frac{df}{dg} \propto \frac{dN}{dg} \propto \left(\frac{1}{E} \right) \left(\frac{b}{a} \right) \left(- \right)^2 \left(\frac{1}{h} \right) \quad \dots (5.18)$$

梁の長さの2乗にほぼ比例
梁の厚みに反比例

図5-58に示すように梁先端の質量を増加させた場合の感度は、下式で与えられ、H/hだけ感度が向上する。

$$\frac{df}{dg} \propto \frac{dN}{dg} \propto \left(\frac{1}{E} \right) \left(\frac{b}{a} \right) \left(- \right)^2 \left(\frac{1}{h} \right) \left(\frac{H}{h} \right) \quad \dots (5.19)$$

5.8.2 加速度センサーの製作

5.8.2.1 2重拡散によるセンサの製作

前節までの試作により、トランスデューサとしての作り込みが確立できたため、加速度センサーとしての構造体の試作を行った。

トランスデューサ部の寸法は図5-40そのままに、厚み14 μm、幅900 μm、長さ1350 μmの梁部を形成し、図5-59に示す加速度センサ構造体とした。

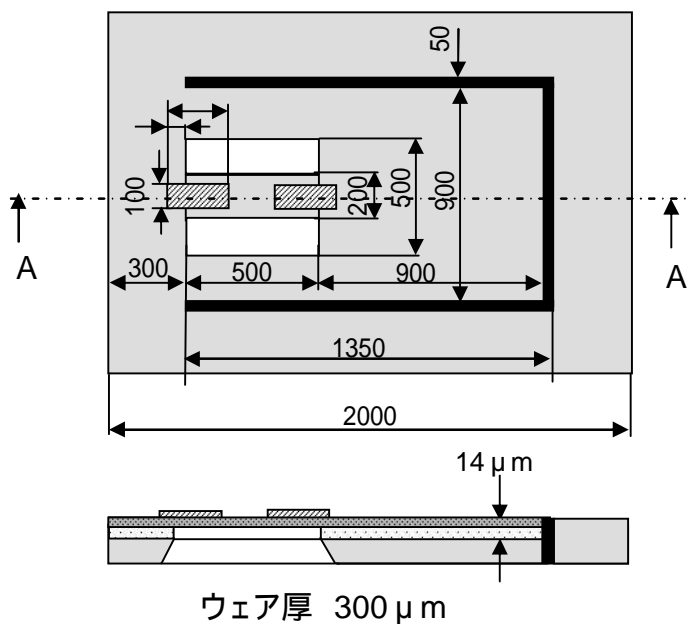


図5-59 加速度センサの形状 (A-A断面)

製作プロセスを図5-60に示す。ウェア上面よりボロンの2重拡散を行い、エッチストップ層の厚みを $4\mu\text{m}$ と $14\mu\text{m}$ に制御し、(Si上面側の電極形成、圧電膜形成、絶縁膜形成は、トランスデューサの試作2と同じ条件で行ったため記載を省略)、この後裏面に SiO_2 のマスクを形成し、裏面よりKOHによるウェットエッチングを行い、梁部およびダイヤフラムの同時形成を行った。

試作したセンサー構造体上面の顕微鏡写真を図5-61に示す。

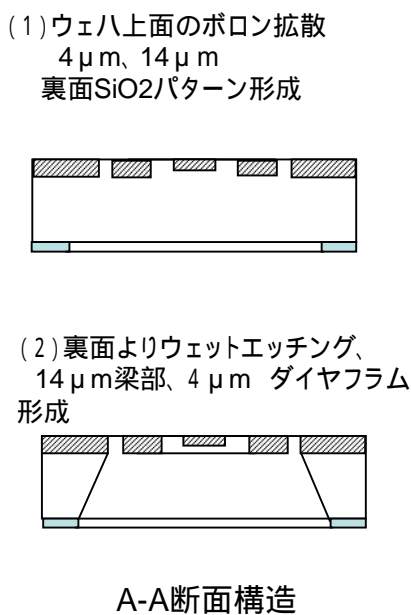


図5-60 Si加工のプロセス

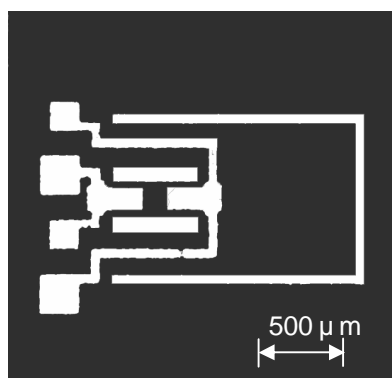


図5-61 試作センサの顕微鏡写真

製作した加速度センサーの、ダイヤフラムおよび梁部の振動をレーザドプラ計により測定した。結果を図5-62に示す。また比較対象として試作2のサンプルの測定結果を図5-63に示す。これらからわかるように梁部の厚みが $14\mu\text{m}$ の場合、ダイヤフラムにおいても多くの振動モード5,40,120,140,170,215KHz他が観察される。これは、圧電体の励振により梁部全体が振動していると考えられる。

梁部が薄いことで感度的には有利であるが、ダイヤフラムのみモードが分離できず、加速度センサ構造体としては不適當と判断した。

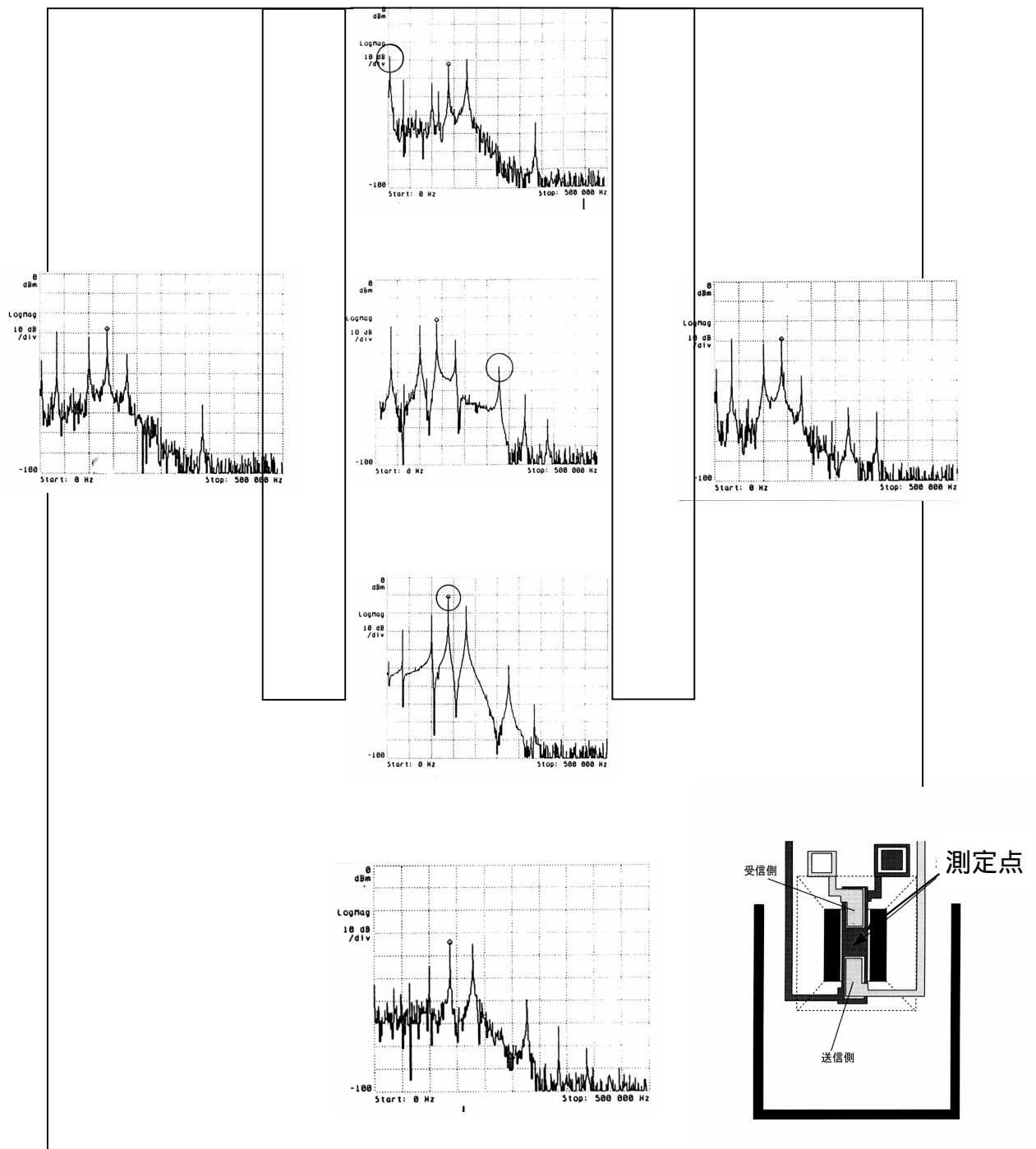


図5-62 製作した加速度センサのダイヤフラムおよび梁部の振動

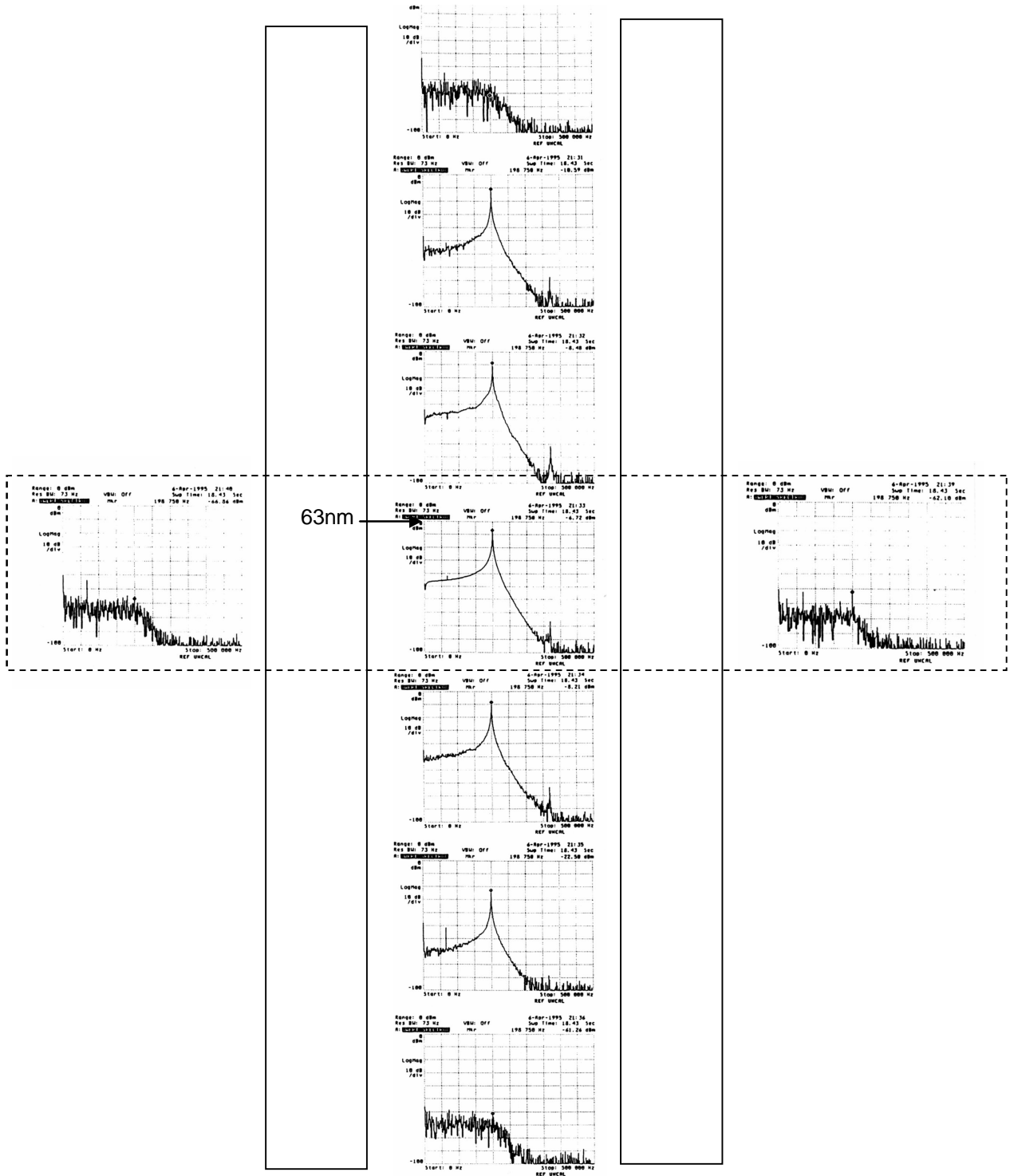


図5-63 トランスデューサ試作2のサンプルの振動変位測定結果

5.8.2.2 梁厚100 μm センサの製作

梁厚14 μm ではダイヤフラムと梁部が同時に振動し、ダイヤフラムの振動のみを取り出すことが困難なため、梁部の厚みを100 μm に変更した。また感度を得るため梁の長さは、(5.18)、(5.19)式をもとに5200 μm とした。

全体形状を図5-64に示す。ボロンの熱拡散を100 μm とすることは不可能であるため、図5-65に示すプロセスを採用した。すなわちボロンドープ層は4 μm だけとし、裏面より200 μm を初期形成マスクによりウェットエッチングし、一旦加工を中止、レジストを塗布し、ダイヤフラム加工用のマスクを形成し、再度ウェットエッチングを行いセンサ構造を加工した。この後、ダイシングによりチップを切断することで、ダイヤフラム4 μm 、周辺部厚100 μm の加速度センサー構造体を作成した。

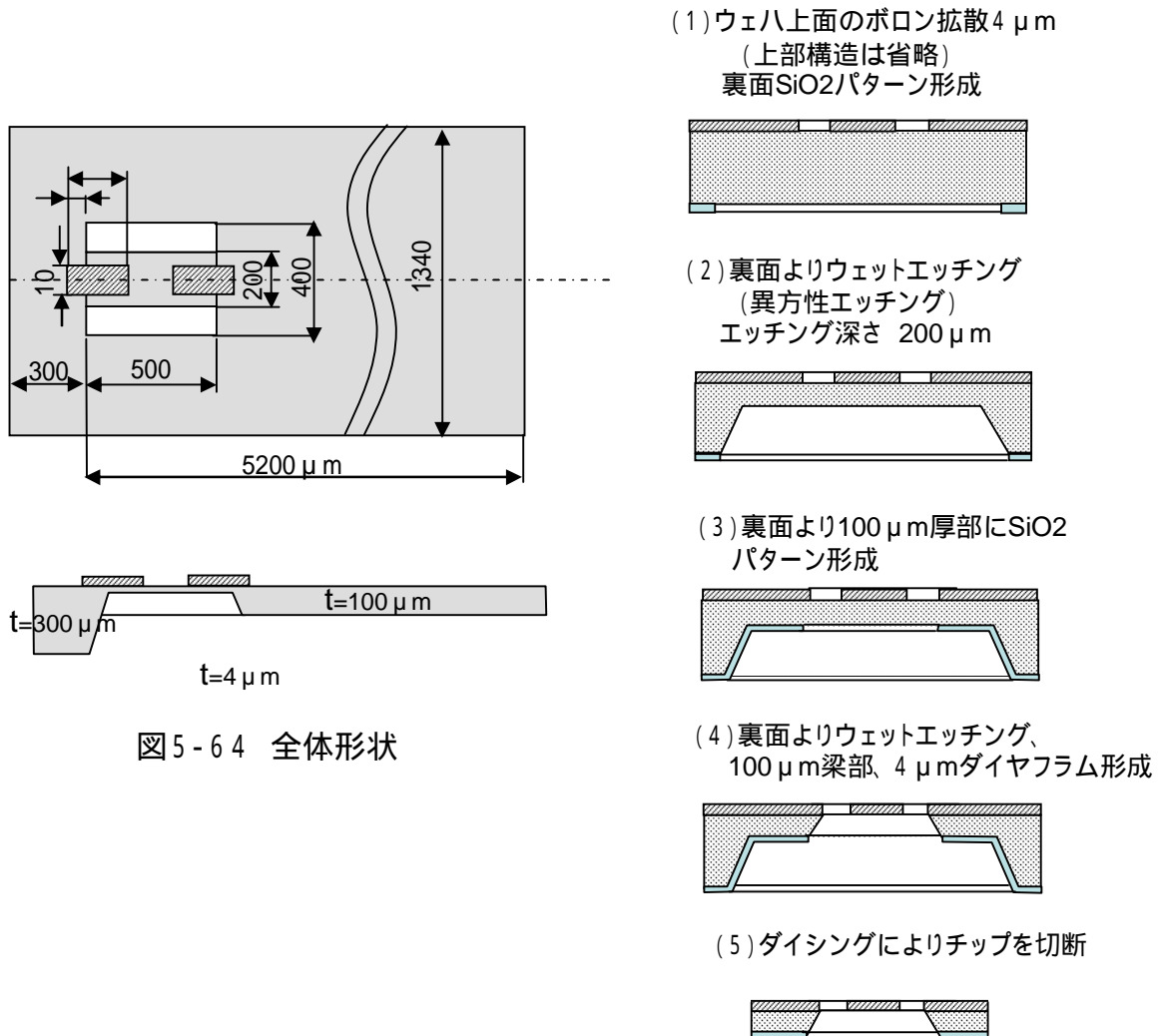


図5-64 全体形状

図5-65 100 μm 梁の加工プロセス

トランスデューサ部の形状はロット10と同形状でセンサ構造体をロット15とロット16の試作を行った。製作条件のまとめを表5-18に示す。

表5-18 製作条件のまとめ

ロットNo. 工程		ロット10	ロット15	ロット16
拡散 (深) 14 μm		なし	なし	なし
拡散 (浅) 4 μm		あり	あり	あり
下部電極Al		0.6 μm	0.6 μm	なし
圧電膜 ZnO	(01)	中:1.75 μm 端:1.19 μm	中:1.40 μm 端:1.32 μm	中:1.05 μm 端:0.93 μm
	(02)	未測定 (01)と同条件	中:1.27 μm 端:1.23 μm	中:1.00 μm 端:0.88 μm
	(03)	中:1.25 μm 端:0.80 μm	中:1.24 μm 端:1.08 μm	
	(04)	未測定 (03)と同条件	中:1.30 μm 端:1.12 μm	
層間絶縁膜 SiO ₂		1.0 μm	1.0 μm	1.0 μm
アルミ配線Al		0.6 μm	0.6 μm	0.6 μm
保護絶縁膜 SiO ₂		1.0 μm	1.0 μm	1.0 μm
ウェットエッチ1		300 μm 貫通	200 μm エッチ	200 μm エッチ
ウェットエッチ2		なし	100 μm 貫通	100 μm 貫通
ダイシング		なし	あり	あり
ZnOデポ 条件	R F パワー	100W	200W	200W
	温度	300	300	300
	ガス圧	1.0E -1 torr	1.0E -1 torr	1.0E -1 torr
	デポレート	1.1nm/min	5.7nm/min	5.7nm/min
Remarks		トランスデューサ部の み試作	ZnOデポ時のウエハ 押さえをリングから板 バネに変更	→

膜厚: ZnO膜は実測値、その他は設計値

新プロセスにより試作した加速度センサーの顕微鏡写真を図5-66に示す。

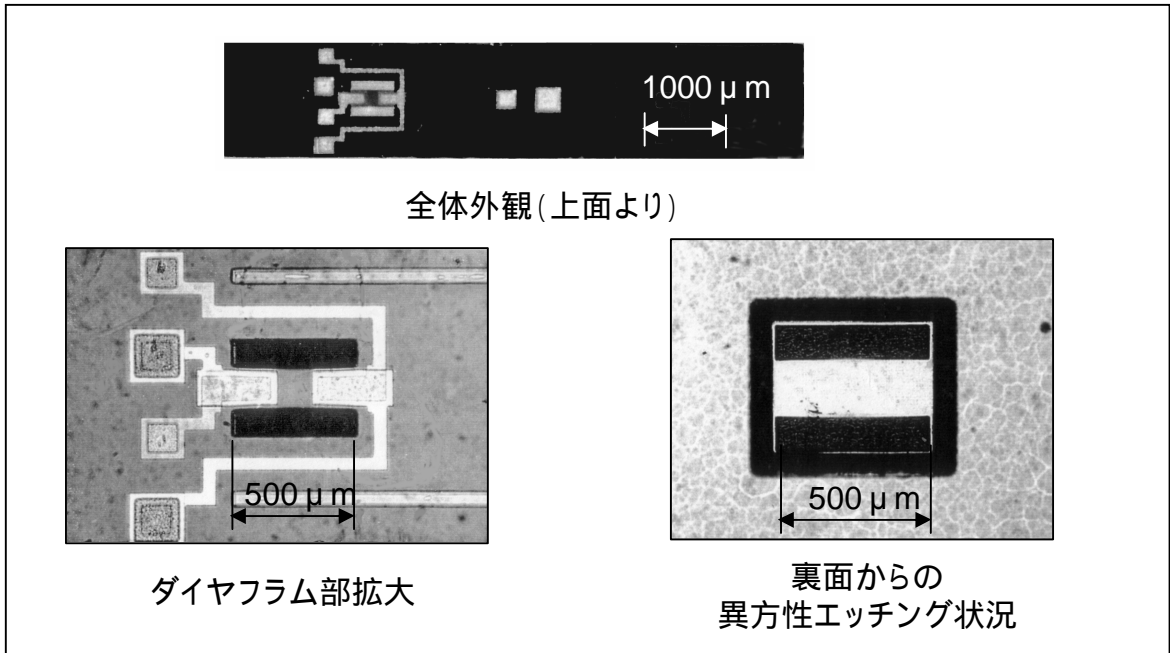


図5-66 試作センサの微鏡写真

試作した加速度センサーのダイヤフラム部および周辺の振動レベルを測定した。結果を図5-67に示す。ダイヤフラム部と梁部の比較でわかるようにダイヤフラムが梁部と独立に振動していることがわかる。

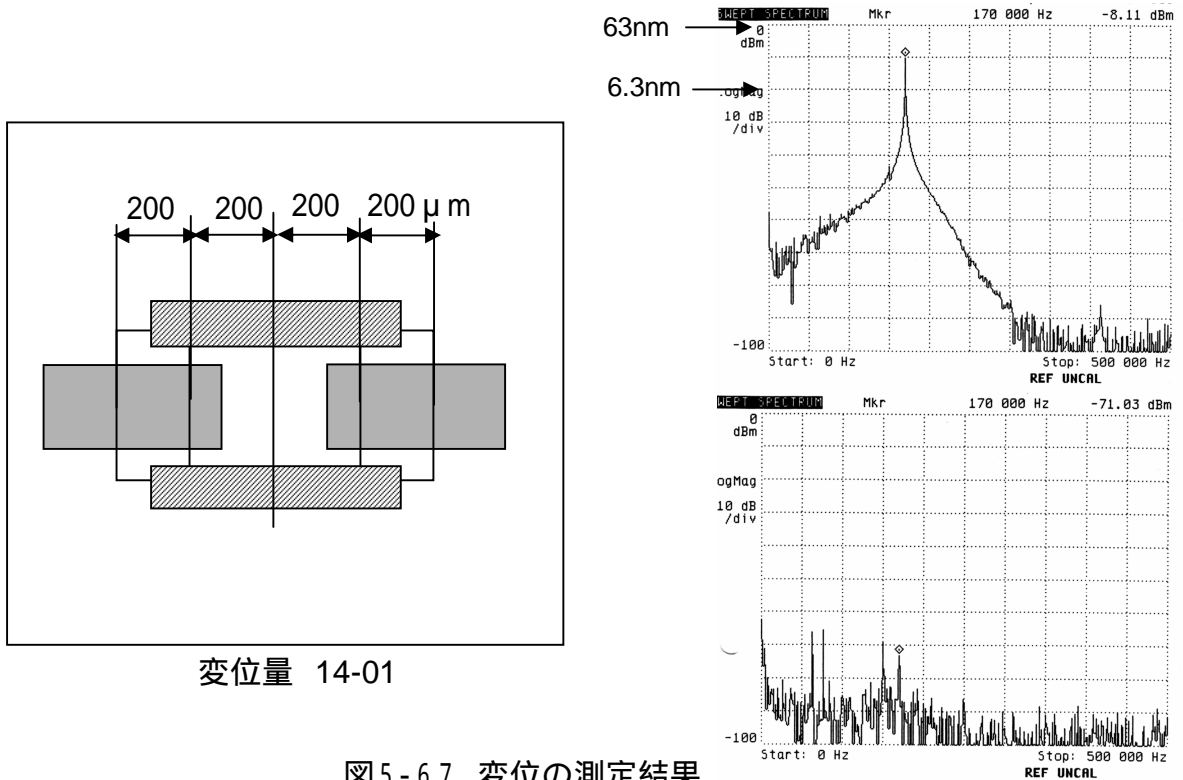


図5-67 変位の測定結果

5.8.3 MEMSプロセスにより製作した加速度センサの評価

5.8.3.1 加速度と周波数変化

試作ロット15、16のサンプルをAC加振した。その結果を図5-68、図5-69に示す。ブルーファス有りの場合、1Gあたり200Hz以上の周波数変化が得られ、またその符号も加速度が増加すると周波数が高くなるという本来の設計値通りの結果が得られた。

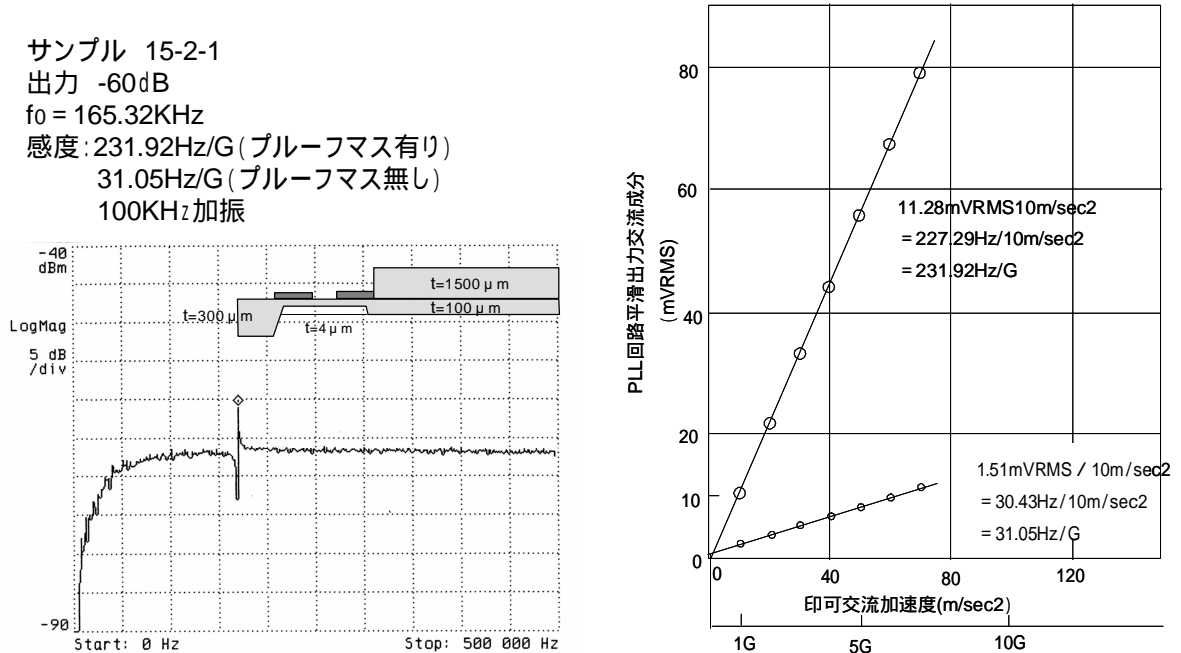


図5-68 ロット15の加速度検出特性

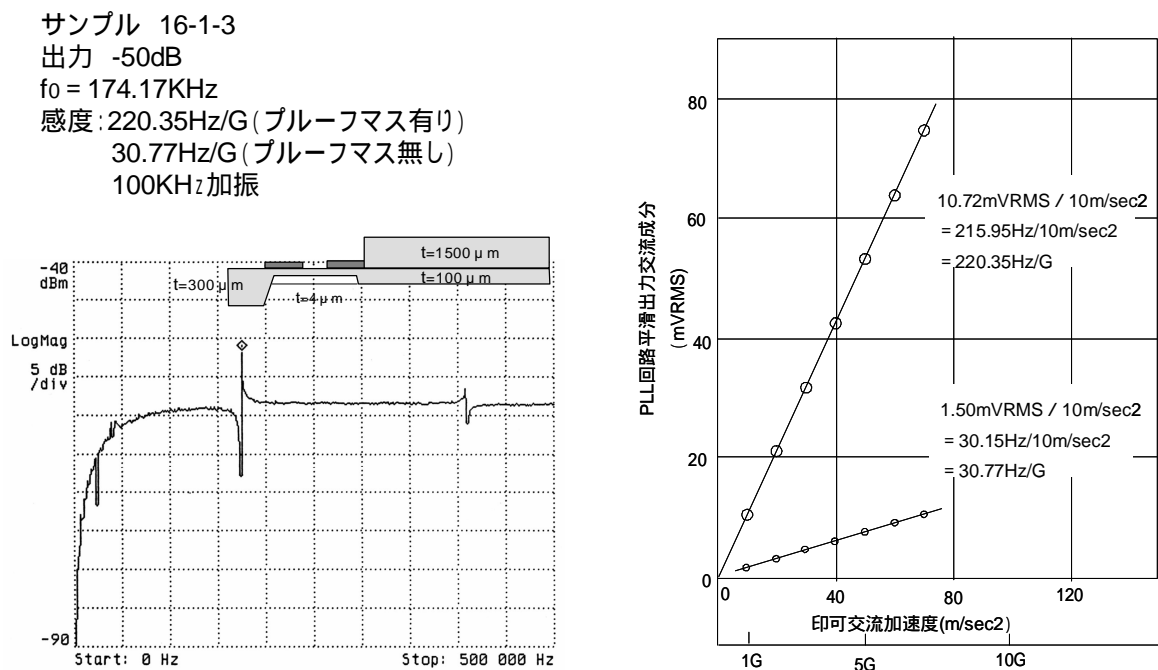


図5-69 ロット16の加速度検出特性

5.8.3.2 温度特性

ダイヤフラム部の振動数は下式で近似的に与えられる。

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{T}{\rho}} \quad \dots (5.20)$$

ここで l :ダイヤフラムの長さ、 T :ダイヤフラムに働く張力、 ρ :ダイヤフラム密度
 温度 t におけるダイヤフラムの振動数は、ダイヤフラム20 における長さを l_0 、膨張係数
 とすると下式のように表現できる。

$$f(t) = \frac{1}{2l_0(1+\alpha(t-20))} \sqrt{\frac{T}{\rho}} \quad \dots (5.21)$$

温度変化に対する周波数変化(温度特性)は

$$\frac{df}{dt} = -\frac{\alpha}{2l_0(1+\alpha(t-20))^2} \sqrt{\frac{T}{\rho}} \quad \dots (5.22)$$

Siの熱膨張係数 $\alpha = 2.4 \times 10^{-6}$ 、 $l_0 = 500 \mu m$ 、 $f_{20} = 200 \text{ KHz}$ とすると20 における
 温度特性は

$$\frac{df}{dt} = -\frac{2.4 \times 10^{-6}}{2 \times 0.5} \times 2 \times 10^5 = -0.48 \text{ Hz/deg} \quad \dots (5.23)$$

サンプル16-1-3について測定した結果を5-70に示す。拡大モデルと同様に、温度
 上昇に伴い、共振周波数が下がる特性が確認できた。変化率は約80 Hz / degであった。
 特性は一致するものの、実験値と計算値の差が大きく存在するのは、圧電体等の温度
 特性が考慮されていないことに起因していると推察する。

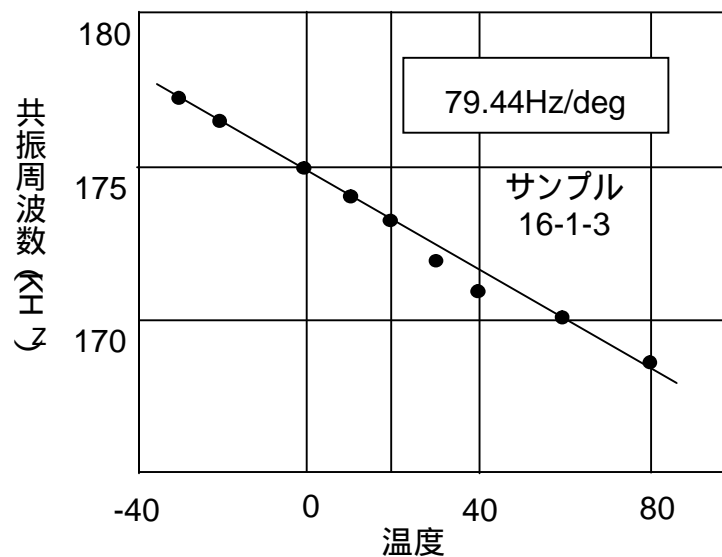


図5-70 温度特性の測定結果

5.8.3.3 ダイアフラム振幅と出力レベル

励振側の圧電素子に入力した電圧に対し、受信側から得られる電圧は、ロット10は-30dBから-40dBが得られた。しかしながら、ロット15,16では-50dB ~ -60dBと大きく減少した。

出力と変位の比較を図5-71に示す。

レーザドプラ計による振幅はロット10とロット15では4dBしか変化がないため、全体の結合効率が変化していると考えられる。

ダイアフラムの振動レベルと比較して全体の出力が小さい原因として、受信側の圧電体に十分な歪みが加わっていないことが考えられる。

このため各ロットにおける膜厚分布及び裏面から観察したダイアフラムの長さの測定を行った。その結果ダイアフラムの長さとお出力についてかなりの相関が得られた。

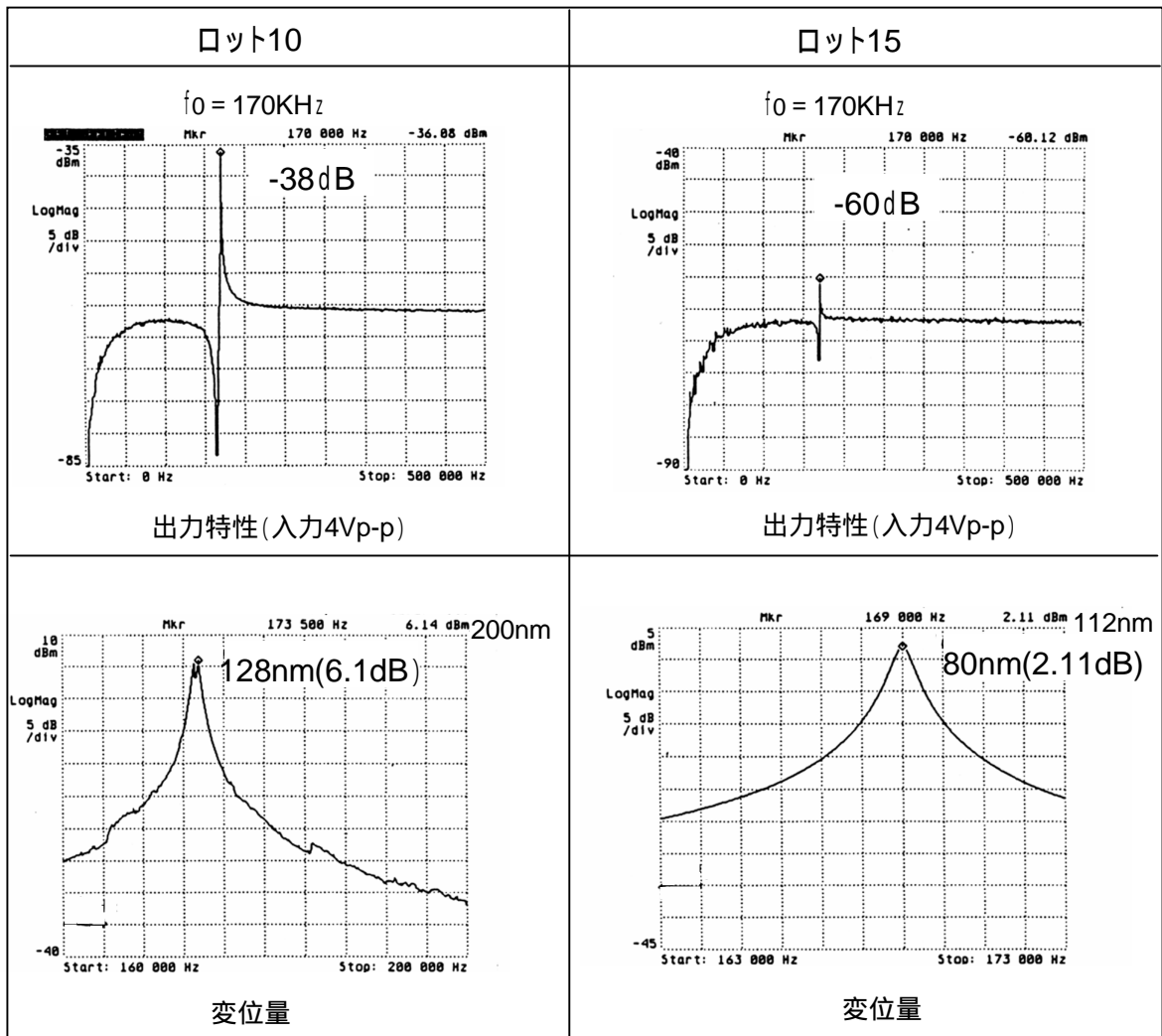


図5-71 出力および変位量の比較

ロット15についてダイヤフラム長を測定し、受信出力との対比を行った。
 デイヤフラム長は図5-72に示すようにSiの裏面から工具顕微鏡で測定した。
 結果を図5-73に示す。

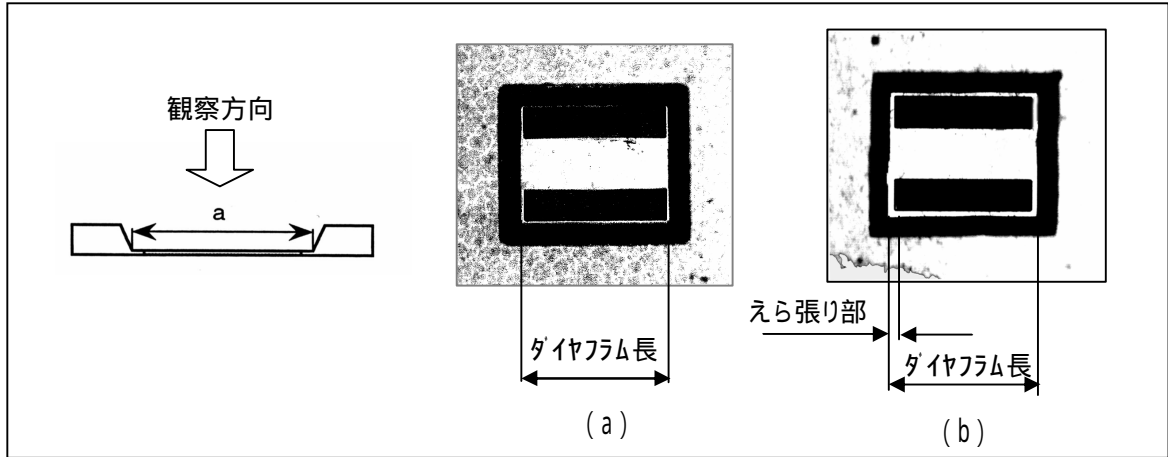


図5-72 デイヤフラム長の測定

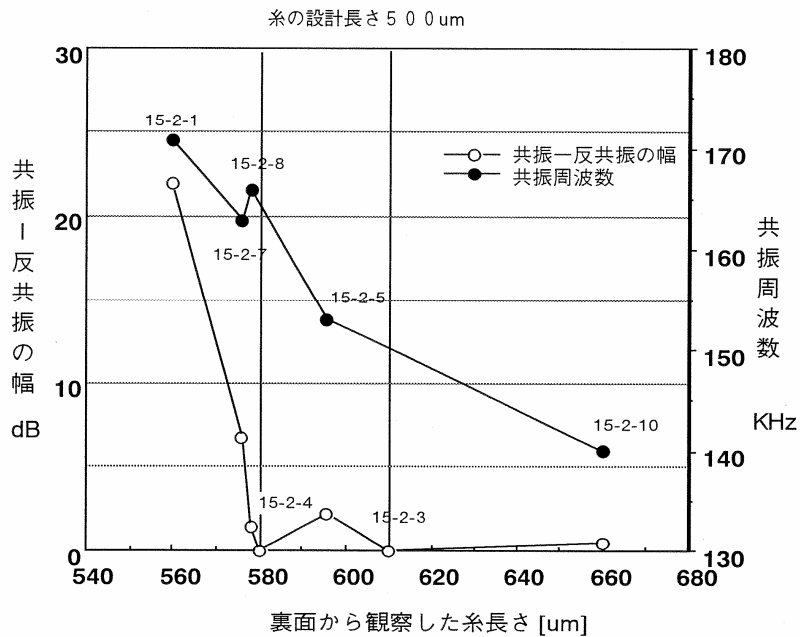


図5-73 ロット15におけるダイヤフラムの長さとお出力の関係

図5-73にダイヤフラムの長さとお出力の関係を示す。この図からわかるようにダイヤフラム長が長くなるほど出力が低下していることがわかる。これは、ダイヤフラム長が長くなると図5-72の(b)のようにえら張り部が大きくなる。このえら張り部がダイヤフラムの振動に対してダンパとして働くためと考えられる。

5.8.4 改良センサの評価

加速度検出に関しては良好な直線性を得ることが出来たが、ダイヤフラム部のえら張りが主原因と考えられる受信感度劣化の改善のため、以下の3点の対策を盛り込み、センサの製作を行った。(ロット17)

- 1) マスク修正(配線面積縮小、異方性マスク寸法最適化)を行うことによるえら張り部低減による出力向上
- 2) 上部電極面積の縮小による浮遊容量低減
- 3) ZnO配置位置の最適化による梁振動伝達の効率化

改良センサの各評価結果を以下述べる。

5.8.4.1 ダイヤフラムの長さ

図5-74に示すようにロット17ではダイヤフラムの長さが500 μm にそろうようになった。それに伴いロット15と比較して出力も40dB以上増大している。

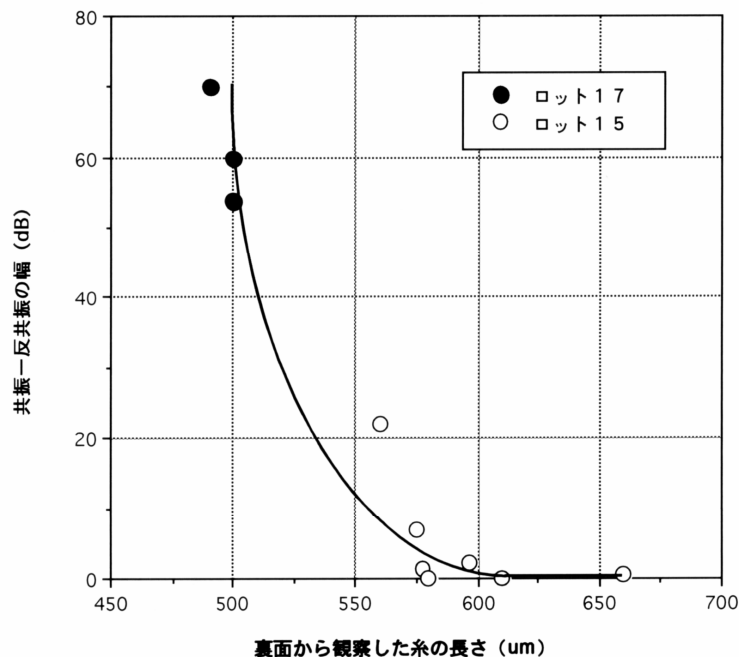


図5-74 ダイヤフラムの長さとお出力の関係

5.8.4.2 センサ出力

試作センサの励振側へ4Vp-pの入力を与え受信側からの出力をみた。図5-75に結果を示す。1次共振周波数の周辺にノイズのないきれいな振動モードである。

1次共振周波数170KHzで-25dBの出力を得た。この出力は、PZTのバルク材を用いた拡大モデル同等の出力である。Q値は212である。

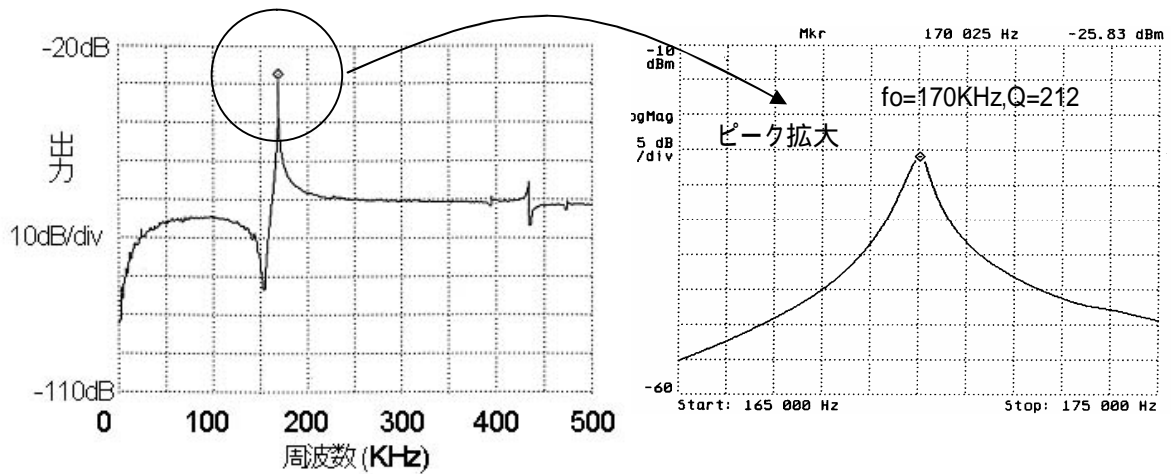


図5-75 センサの出力特性

5.8.4.3 センサ感度特性

図5-76には、異なるウェハ上に形成した3つのセンサをボイスコイル型の加振器で加速度を印可し、周波数変化を測定した結果を示す。検出はPLL回路で行い、PLLの平滑出力から加速度を求めた。設計値の214Hz/Gに近い感度特性が得られている。

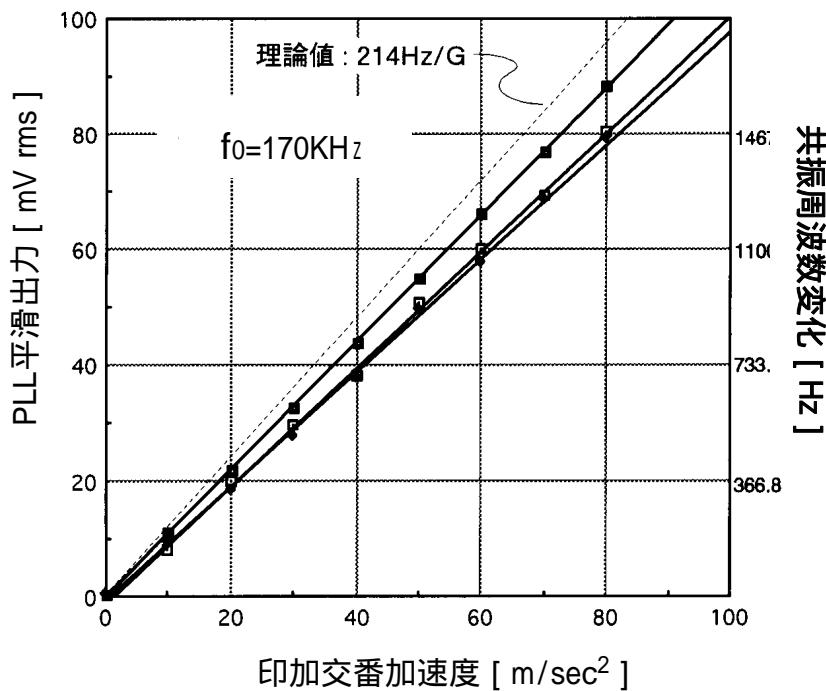


図5-76 印可加速度と周波数変化

センサの姿勢を水平から垂直へ傾けて0 - 1Gまでの共振周波数の変化を測定した。結果を図5-77に示す。低Gの領域でもリニアリティ1%以内が実現されている。

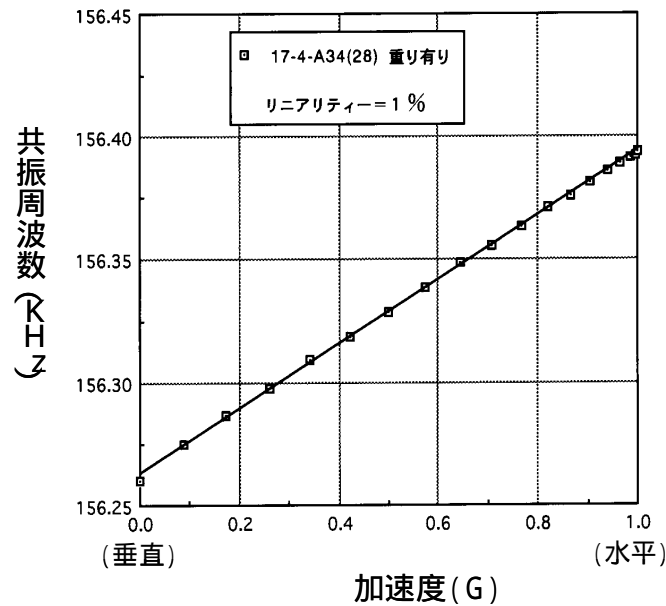


図5-77 0-1Gにおける共振周波数の変化

5.8.4.4 温度特性

ロット17の中から3個のサンプルについて-40 から+80 まで温度を変化させ、1次共振周波数の変化を測定した。結果を図5-78に示す。個々の1次共振周波数が異なっているため、単純に比較できないが、本来は温度上昇に伴い周波数が減少する傾向を示すはずが、下凸の2次曲線の特性をしめしている。

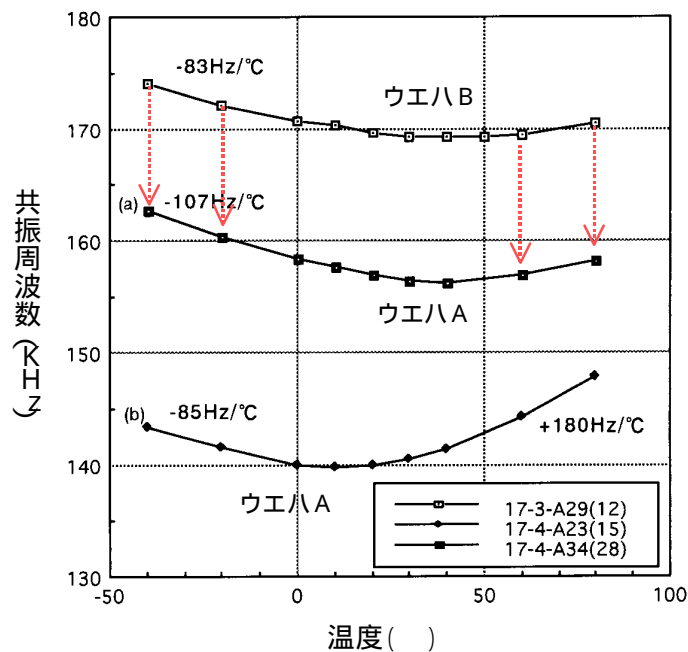


図5-78 ロット17サンプルの温度特性

5.8.4.5 共振周波数および温度特性のばらつきの考察

マスクサイズの変更によりダイヤフラムの機械的寸法はかなり精度を確保できるようになったが、依然共振周波数、温度特性などばらつきが存在する。

特性のばらつき原因を考察するため、ダイヤフラム形状をWYKO社の3次元プロファイラーにより計測した。結果を図5-79に示す。この図はダイヤフラム部を下方から見た図になっている。サンプルBはほぼ平坦な形状であるが、サンプルAは幅方向にも長手方向にも凸形状になっている。膜形成条件によっては、Siダイヤフラム上のZnO、Al、SiO₂膜の界面に生ずる残留応力がダイヤフラムに堤状の形状変化を引き起こす。特に短辺方向の堤状変化は、ダイヤフラムの剛性を変化させ振動特性を左右する。このように出来上がりのダイヤフラムの形状管理が、周波数変化を用いるセンサーの場合には非常に重要な要素である。

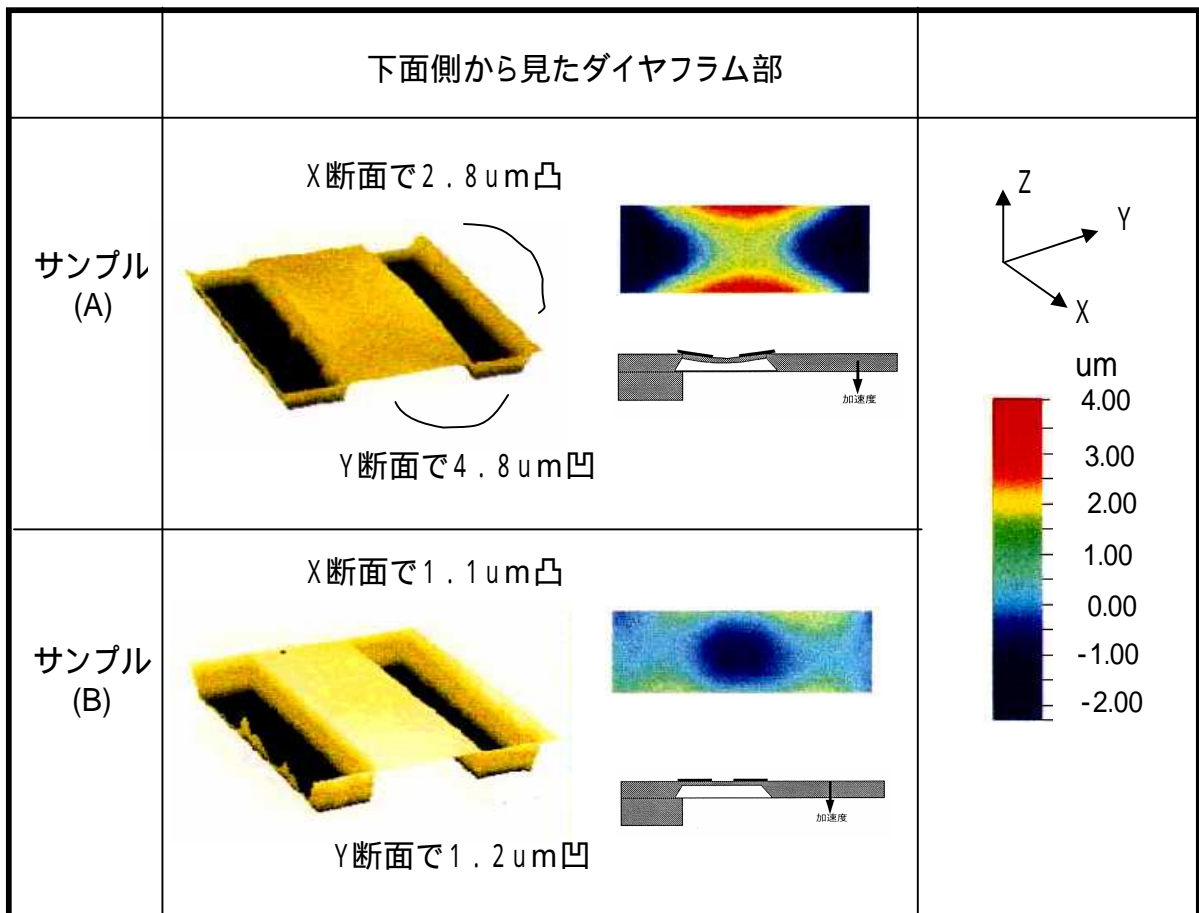


図5-79 ダイヤフラムの形状精度

5.9 結論

筆者らが考案した共振型の加速度センサについて

- (1) シミュレーションに基づくダウンサイジング時の加速度センサの性能見極め
- (2) 拡大モデルによる原理検証
- (3) MEMSプロセス(異方性エッチングによるSiの高アスペクト比加工、ZnOの圧電薄膜形成などの組み合わせ加工)による等倍モデルの試作とその特性評価のステップで研究を行い、そのポテンシャルと実用化にむけた課題を明らかにした。

拡大モデルに関しては、梁部およびダイヤフラム部を4-2アロイで構成し、圧電体としてPZTを用いて20倍モデルを試作し、特性を評価した。励振入力10dB(4Vp-p)に対し、受信出力-25dB、3次共振周波数21.327KHz(1次共振周波数は5.25KHz)に対し、886ppm/Gの検出感度が得られた。また温度特性はほぼPZTの温度特性そのままの-305ppm/°Cであり、本方式が加速度センサとして有効であることが確認できた。この結果およびシミュレーションに基づき、厚さ4 μ m、長500 μ mのダイヤフラムを有す、Si製等倍モデルをMEMSプロセスを用い製作を行った。

MEMSプロセスによる等倍モデルに関しては、Siの梁部の厚みは、初回の試作においては、ボロンの2段拡散により14 μ mのエッチストップ層を形成し、裏面よりの異方性エッチングを行うことで、厚み14 μ mの梁部を形成した。梁部の厚みが少ないため、ダイヤフラムの励振で梁も同様に振動してしまい、センサとして必要な受信感度が得られなかった。

このためダイヤフラム部が独立に振動するように梁部の厚みを100 μ mに変更するとともにプロセスパラメータの最適化を図りながら試作を進めた。この結果、ダイヤフラムの一次共振周波数は、 \pm 20KHz程度ばらつきがあるものの安定的に励振、受信が可能となった。

一方受信出力のばらつきは、圧電体膜(ZnO)の配向性、ダイヤフラム部のえら張り部の2つが影響を及ぼしていることを究明した。このため、ZnO膜のデポレートの最適化、異方性エッチングマスクサイズ変更等のプロセス改善により、加工精度を上げ、励振側への入力10dB(4Vp-p)に対し、受信側の出力-30dBという拡大モデルと同等の出力を得ることに成功した。

対策後のサンプルにおいて加速度の検出実験を行い、1次共振周波数170KHzのサンプルに関して、ほぼ設計値通りの1135ppm/Gの加速度検出感度と0-1Gの領域においても1%以下の直線性を得ることができた。このようにダウンサイジングした場合にお

いても加速度センサとして十分な感度を有していることを明らかにした。

試作センサは、-30 ~ 80 間で-100Hz/deg ~ +180Hz/degの温度特性(温度変化による共振周波数の変化)を示している。複数サンプルのダイヤフラム部分の形状をWYKO社のプロファイルメータを使い測定したところ各々が異なる曲率を持った形状となっていることが観察された。ダイヤフラムを変形させている残留歪みの程度が、各サンプルの温度特性に影響を与えていると考えられる。

参考文献

- 1) L.M. Roylance and J.B. Angell, IEEE Trans. on Electron Devices, ED-26, 1979, pp 1911-1917
- 2) S. Suzuki et.al.:Sensors and Actuators, A21-A23, 1990, pp 316-319
- 3) K.Yamada, and T.Kuriyama, Transducers'91, 1991, pp 655-658
- 4) H.Seidel, R.Cottinger and J.Schlk, Transducers'95, 1995, pp 597-600

第6章

結言

第6章 結言

6.1 マイクロ放電加工による微細形状創成の研究のまとめ

浮遊容量を極限まで低減し、単発あたりの放電エネルギーを $10^{-6}\text{J} \sim 10^{-7}\text{J}$ まで小さくしたマイクロ放電加工技術の研究を進め、本技術をベースに5軸のNCマイクロ放電加工機を製作した。5軸は、ワーク移動のための(X,Y, 軸)とワークの回転(C軸)と電極の上下動(Z軸)である。

マイクロ放電加工による形状創成は、数十 μm 径の円筒を加工電極としてミーリング加工と同じ要領でワークを放電加工する。異常放電や短絡を少なくするため加工電極は3,000rpm程度に高速回転させている。

加工される形状は、ワークに対する電極の移動軌跡となるが、電極消耗に伴う加工誤差が生ずる。そのため移動軌跡の制御だけではなく、いかに電極の消耗を小さくして加工するかがポイントとなる。低消耗の放電加工条件を見いだすとともに、あらかじめ実験で求めた電極走査量に対する消耗量を補正值として取り込むことで、高精度加工を実現した。

このような条件下で加工を行い、SUS304のワークに対し、ピッチ円直径300 μm 、歯厚100 μm のインポリュート歯形創成を形状精度 $\pm 3\mu\text{m}$ 以下で実現するとともにC軸とXYZ軸の制御を同期させて行うことで直径155 μm の円筒に対し、ねじ構造、歯車形状、端面の球面加工などを複合した3次元微細構造の形成を可能とした。

6.2 電解・ポリシ複合加工による表面仕上げの研究のまとめ

マイクロ放電加工で得られる仕上げ面あさは0.1 $\mu\text{m Rz}$ 程度が限界であるが、さらなる仕上げ面の向上を実現するため、電解加工およびポリシング加工の複合加工による表面仕上げの研究を行った。

本加工は、アルミナ砥粒を含んだ電解液を用いて電解加工を行う。電界を印可することにより電解研磨が始まるが、同時に溶液中のアルミナ砥粒が+に帯電し、回転する加工電極(-)近傍に凝縮する。このため電解研磨と電極回転に付随し高速運動するアルミナ砥粒による機械的ポリシングが同時に進行する複合加工効果により、マイクロ放電加工や汎用の電解加工単独では得られない32nm Rzの表面あさが得られることを明らかにした。

また本仕上げ方法とNCマイクロ放電加工機を組み合わせることで選択的エリアに対し、加工から仕上げまで一貫して行うことが可能になる。マイクロウォブルモータのロー

タを想定し、SUS303に対し、円筒面加工を行い、目標の仕上げ面あらかさが得られることを検証した。

6.3 立体円筒MEMSプロセス加工による静電マイクロウォブルモータの研究のまとめ

半導体プロセスによってSi基板上に形成する静電マイクロウォブルモータは、多くの報告例があるが、動力を外部へ取り出すためのインタフェースの困難さ、軸方向の電極長さが取れないため発生トルクが少ない等の理由で動力源としての実用が困難であった。軸方向に十分な電極長さを有したマイクロウォブルモータの製作を可能とするため、円筒状母材(モータのロータとなる)に対し、同心円状に絶縁膜、導電膜の形成、円筒面へのパターン露光による電極形成、ロータ/ステータ間ギャップの形成のための犠牲層エッチングからなる立体円筒MEMSプロセスを発案し、マイクロ静電ウォブルモータの製作を行った。本プロセスは、ロータからステータまでを一括して作り上げ、最終工程で犠牲層を除去し、ロータとステータを分離しモータとして完成するものであり、アセンブリレスを実現している。

本プロセスを適用し、ロータ直径1mm、外形1.4mm、電極長2mmの静電マイクロウォブルモータを製作した。回転数は、駆動周波数1.5kHzで200rpm、動トルクは $1.0 \times 10^{-7} \text{N} \cdot \text{m}$ を得た。本トルクは、Siの静電ウォブルモータと比較して1000倍以上の値であり、MEMS機器への展開が期待できる。

さらに従来未確立であったサブミリ領域におけるウォブルモータの評価方法の研究を行い、重要パラメータであるロータ/ステータ間ギャップ、出力トルクについて、レーザ変位計によるウォブリングモーションの解析から、定量化する測定手法を確立した。

また、ロータ/ステータの表面状態を直接SEMで観察することで、発生トルク的设计値と実験評価値との乖離の原因究明を試み、3種類の欠陥がトルク劣化の原因であることを明らかにした。

6.4 平面MEMSプロセスによる振動型加速度センサの研究のまとめ

力学量を検出するセンサは、小型化、低コスト化、高信頼性実現のためにバルク型から半導体プロセスを応用したMEMSセンサへ移行している。力学センサの一つである加速度センサも、抵抗値変化や静電容量変化により加速度を検出するタイプのものが、SiベースのMEMSにより実用に供されるようになってきている。しかしながら、小型化に伴う出力低下を補う高感度化が依然として課題となっている。

振動型は、構造体の固有振動数の変化を検出するものであり、小型化した場合においても加速度の高感度検出が可能と考えられる。

本研究では、筆者らが考案した共振型の加速度センサについて、

- (1) シミュレーションに基づくダウンサイジング時の加速度センサの性能見極め
 - (2) 拡大モデルによる原理検証
 - (3) MEMSプロセス(異方性エッチングによるSiの高アスペクト比加工、ZnOの圧電薄膜形成などの組み合わせ加工)による等倍モデルの試作とその特性評価
- のステップで研究を行い、そのポテンシャルと実用化に向けた課題を明らかにした。

考案した共振型加速度センサは、片持ち梁の支持端近傍にダイヤフラムを形成し、加速度による梁のたわみに伴うダイヤフラムに加わる張力の変化をダイヤフラムの固有振動数の変化として捉え、加速度を検出するものである。ダイヤフラムの一端には、圧電体による励振体を配し、他端には同じ圧電体による受信体を配し、ダイヤフラムの振動周波数をPLL回路により常に共振周波数へロックするように制御する。加速度は、この時のPLL回路のVCOへの入力電圧を測定することで算出する。

20倍の拡大モデルを梁部およびダイヤフラム部を4-2アロイで構成し、圧電体としてPZTを用いて試作し、特性を評価した。励振入力10dB(4Vp-p)に対し、受信出力-25dB、3次共振周波数21.327KHz(1次共振周波数は5.25KHz)に対し886ppm/Gの検出感度が得られた。また温度特性はほぼPZTの温度特性そのままの-305ppm/degであり、本方式が加速度センサとして有効であることが確認できた。

本結果およびシミュレーションに基づき、厚さ4 μ m、長500 μ mのダイヤフラムを有す、Si製等倍モデルをMEMSプロセスを用い製作を行った。

Siの梁部の厚みは、初回の試作においては、ボロンの2段拡散により14 μ mのエッチストップ層を形成し、裏面よりの異方性エッチングを行うことで、厚み14 μ mの梁部を形成した。梁部の厚みが少ないため、ダイヤフラムの励振で梁も同様に振動してしまい、センサとして必要な受信感度が得られなかった。

このためダイヤフラム部が独立に振動するように梁部の厚みを100 μ mに変更するとともにプロセスパラメータの最適化を図りながら試作を進めた。

この結果、ダイヤフラムの一次共振周波数は、 \pm 20KHz程度ばらつきがあるものの安定的に励振、受信が可能となった。

一方受信出力のばらつきは、圧電体膜(ZnO)の配向性、ダイヤフラム部のえら張り部の2つが影響を及ぼしていることを究明した。このため、ZnO膜のデポレートの最適化、異方性エッチングマスクサイズ変更等のプロセス改善により、加工精度を上げ、励振側への入力10dB(4Vp-p)に対し、受信側の出力-30dBという拡大モデルと同等の出力を得ることに成功した。

対策後のサンプルにおいて加速度の検出実験を行い、1次共振周波数170KHzのサンプルに関して、ほぼ設計値通りの1135ppm/Gの加速度検出感度と0-1Gの領域

においても1%以下の直線性を得ることができた。このようにダウンサイジングした場合においても加速度センサとして十分な感度を有していることを明らかにした。

試作センサは、-30 ~ 80 間で-100Hz/deg ~ +180Hz/degの温度特性(温度変化による共振周波数の変化)を示している。複数サンプルのダイヤフラム部分の形状をWYKO社のプロファイルメータを使い測定したところ各々が異なる曲率を持った形状となっていることが観察された。ダイヤフラムを変形させている残留歪みの程度が、各サンプルの温度特性に影響を与えていると考えられる。

6.5 おわりに

形状精度、仕上げ面粗さ、剛性、生産性に優れる3次元微細構造体創成技術の確立を目的とし、マイクロ放電加工による微細形状創成、電解・ポリシ複合加工による表面仕上げの研究、さらに立体円筒MEMSプロセスの研究とマイクロウォブルモータへの応用に関する研究、平面MEMSプロセスによる振動型加速度センサの研究を行い、各々の加工方法の有用性検証にとどまらず微小機械の製作を通じ、研究成果のマイクロマシンへの適用の可能性ならびに課題を明らかにした。

マイクロマシンは、アクチュエータやセンサと機械構造体が一体になったものが究極の姿である。マイクロ放電加工およびその複合加工により、構造体の基本構造を形成し、その基本構造上に平面および立体MEMSプロセスにより圧電体や電極パターンが一体形成されるプロセスが本格的に実用化されることで、広範な領域へ適用可能なマイクロマシンが実現されると確信する。

本研究に関する研究論文・報文、学会講演、研究会講演

1. マイクロ放電加工関連

研究論文・報文

- 1) 佐藤健夫, 河田耕一, 水谷武: 微細放電加工機 MG-ED01 電気加工学会誌, (1985)
- 2) T.Sato, T.Mizutani, K.Yonemochi and K.Kawata: The development of an electrodischarge machine for micro-hole boring, Precision Engineering VOL.8, NO.3, P163-168, (1986)
- 3) 佐藤健夫, 水谷武, 正木健, 山本正樹: 放電加工による微細穴加工および微細細ポンチの成形, 精密工学会誌 Vol.55, No6, P989-994, (1989)
- 4) 佐藤健夫: マイクロ放電加工による形状創成, 精密工学会誌 Vol.61, No.10, P1369-1374, (1995)
- 5) Koichi Kawata, Takeshi Masaki, Takeo Sato and Takahisa Masuzawa: Accuracy of Micro-electrodischarge Machining,, Proc. International Conference on Precision Engineering, Taipei, Vol.2, P597-602, (1997).
- 6) T. Sato, K. Kawata, M. Yamaoka and H. Nakasuka: Microsurgery tools manufactured by electrodischarge machining, Proc. of the international conference on leading edge manufacturing in 21st century, Niigata, P989-994, (2003)

学会講演, 研究会講演

- 1) 佐藤健夫, 丸山祐二: 微細穴の放電加工, 昭和55年度精密工学会秋期大会学術講演会講演論文集, P137-138, (1980)
- 2) 佐藤健夫, 河田耕一, 増沢隆久: 微細穴の放電加工について電気加工技術, Vol.4, NO.7, P18-23, (1981)
- 3) 佐藤健夫, 水谷武, 松下久人, 丸山祐二, 河田耕一: 微小穴放電加工昭和58年度精密工学会秋期大会学術講演会講演論文集, P361-362, (1983)
- 4) 佐藤健夫, 水谷武, 松下久人, 河田耕一: 微細穴放電加工機の開発電気加工技術, Vol.8, NO.20, P13-18, (1984)
- 5) 佐藤健夫: 微細放電加工技術について: 電気加工技術, Vol.8, NO.21, P3-6, (1984)

- 6) 佐藤健夫, 水谷武, 松下久人, 河田耕一: 数値制御による放電微細加工, 昭和60年度精機学会春期大会学術講演会講演論文集, P483-484, (1985)
- 7) 佐藤健夫, 田中明美, 米持勝利, 水谷武, 河田耕一: 放電加工による微細加工, 電気加工技術, Vol.10, (1986)
- 8) T. Masaki, K. Kawata, T. Sato, T. Mizutani, K. Yonemochi, A. Shibuya, T. Masuzawa: Micro Electro-discharge Machining, International Symposium for Electro-Machining, (1989)
- 9) 河田耕一, 西村一仁, 広瀬和也, 田中律子, 寺田研一郎, 佐藤健夫: ダイヤモンドの微細放電加工, 2000年度精密工学会中国四国支部・九州支部共催学術講演会講演論文集, P37-38, (2000)
- 10) 寺田研一郎, 山岡正和, 佐藤健夫, 河田耕一: 環境調和性を考慮した微細放電加工技術の開発, 2000年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, P260, (2000)
- 11) 山岡正和, 寺田研一郎, 佐藤健夫, 河田耕一: 各種金属材料における微細放電加工特性, 2001年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, P259, (2001)
- 12) 河田耕一, 藤村秀樹, 山岡正和, 掛水大介, 西村一仁, 寺田研一郎, 佐藤健夫: ダイヤモンドの放電加工, 2002年度精密工学会中国四国支部徳島地方学術講演会, (2002).
- 13) 河田耕一, 山本明, 山岡正和, 中須賀元, 奥村亮, 佐藤健夫: マイクロ刃物の製作と評価, 2002年度精密工学会中国四国支部徳島地方学術講演会, (2002)
- 14) 河田耕一, 佐藤健夫, 西村一仁, 寺田研一郎, 掛水大介, 江南: 単結晶ダイヤモンドの微細放電加工, 電気加工学会全国大会, P61-64, (2002).
- 15) 山岡正和, 河田耕一, 奥村亮, 佐藤健夫: 体内手術用マイクロ刃物の開発, 第7回精密工学会知能メカトロニクスワークショップ, P39-44, (2002)
- 16) 掛水大介, 寺田研一郎, 河田耕一, 西村一仁, 佐藤健夫: ダイヤモンドの微細放電加工(第2報)-加工特性-, 2002年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, P635, (2002)

- 17) 寺田研一郎, 河田耕一, 佐藤健夫, 西村一仁, 広瀬和也, 田中律子: ダイヤモンドの微細放電加工(第1報)-加工の可能性-, 2002年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, P634, (2002)
- 18) 山岡正和, 奥村亮, 河田耕一, 佐藤健夫: 微細放電加工によるマイクロ刃物の製作, 2002年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, P625, (2002)
- 19) 山本明, 河田耕一, 佐藤健夫: マイクロ電気メスの試作と実験, 2003年度精密工学会岡山地方学術講演会講演論文集, P49-50, (2003)
- 20) 藤村秀樹, 河田耕一, 佐藤健夫, 大熊光春, 西村一仁: 高硬度材料の微細放電加工, 第8回精密工学会知能メカトロニクスワークショップ講演論文集, P18-23, (2003)
- 21) 中須賀元, 山本明, 山岡正和, 佐藤健夫, 河田耕一: 微細放電加工によるマイクロ手術器具, 2003年度精密工学会春季大会学術講演会, (2003)

2. 立体MEMSプロセス関連

研究論文・報文

- 1) K. Nakamura, H. Ogura, S. Maeda, U. Sangawa, S. Aoki, T.Sato: Concentric Build-up Process to Fabricate Practical Wobble Motors, Proc. IEEE MEMS, P114-118, (1994)
- 2) K. Nakamura, H. Ogura, S. Maeda, U. Sangawa, S. Aoki, T.Sato : Evaluation of the micro Wobble Motor fabricated by Concentric Build-up Process, Proc. IEEE MEMS, (1995)
- 3) Kenichi Takahata, Shinichiro Aoki, Takeo Sato: Fine surface Finishing Method for 3-Dimensional Micro Surface, Proc. IEEE MEMS, (1996)
- 4) Kenichi Takahata, Shinichiro Aoki, Takeo Sato: Fine surface Finishing Method for 3-Dimensional Micro Surface, IEICE TRANS. ELECTRON., VOL..E80C, NO.2, P 291-296, (1997)

学会講演, 研究会講演

- 1) 高畑憲一, 青木新一郎, 佐藤健夫: 微小部品の表面仕上げ法に関する研究, 1995年度電気加工学会全国大会, (1995)
- 2) 佐藤健夫: マイクロウォブルモータとその応用, MEMS産業応用シンポジウム「マイクロモータ・アクチュエータの新技术と産業利用」, (1996)

3. 平面MEMSプロセス関連

研究論文・報文

- 1) 佐藤健夫、河田耕一、楠川量啓、寒川潮：振動型マイクロ加速度センサに関する研究(第1報)、精密工学会誌 投稿中(原稿受付 2007年8月24日)
- 2) 佐藤健夫、河田耕一、楠川量啓、寒川潮：振動型マイクロ加速度センサに関する研究(第2報)、精密工学会誌 投稿中(原稿受付 2007年8月24日)
- 3) K. Koga, S. Aoki, M. Yamamoto, T. Sato: High Performance SOR X-Ray Stepper, J. Vac. Sci. Technol. B, Vol.8, No6, P1633-1637, (1990)
- 4) M. Yamamoto, H. Takeuchi, Y. Sugiyama, S. Aoki, T.Sato: New Alignment System for Excimer Laser Lithography, Int. J. Japan Soc. Prec. Eng., Vol.26. No.1, P60-61, (1992)
- 5) 寒川潮, 竹内宏之, 山本正樹, 杉山吉幸, 青木新一郎, 佐藤健夫, 長野寛之, 山下一博, 笹子勝, KrFエキシマレーザ露光装置用TTRアライメント系の開発, 精密工学会誌Vol.60. No.4, P535-538, (1995)

学会講演, 研究会講演

- 1) 佐藤健夫, 寒川潮, 清水紀智, 岩澤利幸, 三浦真芳 高橋寿平: 平糸電話方式による加速度検出構造体の開発, 1998年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, P545, (1998)
- 2) 佐藤健夫, 河田耕一, 寒川潮, 清水紀智, 岩澤利幸, 三浦真芳: 糸電話方式による加速度検出構造体の開発, 第4回精密工学会知能メカトロニクスワークショップP96-97, (1999).
- 3) 古賀啓介, 上野厚, 野村登, 佐藤健夫, 荒木信博: サブミクロン解像光学系における照明系コヒーレンシーの解析, SDM研究会講演会, (1987)
- 4) 古賀啓介, 上野厚, 野村登, 佐藤健夫, 荒木信博: サブミクロン解像光学系における照明系コヒーレンシーの解析, 秋期応用物理学会学術講演会, (1987)
- 5) 佐藤健夫, 荒木信博, 青木新一郎, 二宮敬虔, 他: 人工衛星搭載用スターセンサーレンズ, 1988年度精密工学会春期大会学術講演会講演論文, (1988)
- 6) 荒木信博, 佐藤健夫, 古賀啓介, 野村登遠紫外光リソグラフィーにおける投影光学系, 春期応用物理学関連連合講演会, (1988)
- 7) 荒木信博, 佐藤健夫, 野村登, 中川秀夫, 古賀啓介, 笹子勝: ArFエキシマレーザリソグラフィレンズ, 春期応用物理学関連連合講演会, (1989)

- 8) 山口勝正, 佐藤健夫, 青木新一郎, 山本正樹, 野村登, 山下一博: ホログラフィーアライメントへの光ヘテロダインの応用, 秋期応用物理学会学連合講演会
- 9) 長野寛之, 青木新一郎, 山本正樹, 山口勝正, 佐藤健夫縦型アライメントステージの開発1990年度精密工学会春期大会学術講演会論文集, (1990)
- 10) 山本正樹, 竹内宏之, 杉山吉幸, 青木新一郎, 佐藤健夫: ホログラフィーアライメントの高精度化検討, 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1990)
- 11) 岩澤利幸, 竹内宏之, 山本正樹, 佐藤健夫: エキシマレーザによる高精度位置ずれ検出1991年度精密工学会春期大会学術講演会論文集, (1991)
- 12) 佐藤健夫, 杉山吉幸, 岩澤利幸, 竹内宏之, 山本正樹: エキシマレーザによるサブハーフミクロンリソグラフィ(5)アライメント, 春期応用物理学関連連合講演会(1991)
- 13) T. Sato, S. Aoki, T. Miyata, T. Ono, M. Yamamoto: KrF Excimer Laser Lithography System for Sub-Half Micron Devices, 4th Micro Process Conference Digest of Papers, P72, (1991)
- 14) 佐藤健夫, 杉山吉幸, 岩澤利幸, 堀内直也, 山中圭一郎, 竹内宏之, 他: エキシマレーザによるによるサブハーフミクロンリソグラフィ(8)露光システム, 秋期応用物理学関連連合講演会(1991)
- 15) 寒川潮, 竹内宏之, 山本正樹, 杉山吉幸, 青木新一郎, 佐藤健夫, 久保圭司: 光ファイバーを用いた光ヘテロダイン干渉計の開発, 1992年度精密工学会春期大会学術講演会論文集, (1992)
- 16) Y. Nakanisi, M. Yamamoto, H. Takeuchi, S. Aoki, T. Sato, et al., Evaluation of TTR Alignment for Excimer Laser Stepper, 36th International Symposium on Electron, Ion, Photon Beams, (1992)

以上

特許

1. 国内出願

登録No.1410426 「微細放電加工装置」 他142件

2. 海外出願

USP4771157 「微小穴放電加工装置」 他69件

謝辞

本論文は、筆者が松下技研(株)超機構研究所および高知工科大学大学院において研究を行ったものをまとめたものである。

本研究の遂行に当たり、高知工科大学名誉教授の河田耕一先生には、精密機構、微細加工全般に渡りご指導をいただきました。特にマイクロ放電加工については、研究の当初から貴重なご助言をいただき、世界で初めてマイクロ放電加工機を商用化することができました。こころより御礼申し上げます。

本論文をまとめるにあたり、多くの貴重なご意見とご指導をいただくとともに、学位論文を審査いただきました高知工科大学の楠川量啓教授、成沢忠教授、井上喜雄教授、松井 敏 教授に厚く御礼申し上げます。特に楠川先生には、主査として細部にわたるご指導をいただきました。

マイクロ放電加工の研究においては、東京大学 工学部の増沢隆久教授、正木技研の正木健氏にご指導とご協力をいただきました。

電解複合加工の研究においては、高畑憲一氏に実験の第一線を担っていただきました。

マイクロウォブルモータの研究は、設計、試作、評価をプロジェクトチームとして推進したもので、青木新一郎氏、小倉洋氏、中村邦彦氏の協力無しには成し遂げられませんでした。

振動型加速度センサの研究は、松下通信工業株式会社(現松下電器産業(株)オートモーティブシステム社)からの委託が研究のスタートでした。浅野勝吾氏にはMEMSプロセスの応用として大変良いテーマをいただきました。またこの研究は、三浦眞芳氏、寒川潮氏、清水紀智氏、岩澤利幸氏、前田修子氏と一緒に進めさせていただきました。

このように多くの方々の協力、ご指導のもとに本研究論文をまとめることができました。本当にありがとうございました。

また松下電器産業(株)中尾研究所の花村静雄上席理事、現在筆者が所属するパナソニックモバイルコミュニケーションズ(株)の脇 治社長および技術企画グループの各位には執筆にあたって激励をいただきました。厚く御礼申し上げます。

最後に8年間にわたり、終始見守り、励ましてくれた妻および子供達に感謝します。