

早稲田大学大学院情報生産システム研究科

博士論文概要

論文題目

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

申請者

幸坂 扶佐夫

情報生産システム工学専攻
センシングシステム研究

2013 年 2 月

傾斜角測定が要求される場合の多くは、水平からの傾きによって生じる重力の正弦成分が問題視される場合である。この重力の正弦成分が建造物・産業機器・製造装置などに横方向の力を与え、歪や変形などの問題が生じることから重要な問題として扱われてきている。そのため、 0.001° 以上の分解能を有する高分解能傾斜角センサが開発され、それを組み込んだ傾斜角測定器が市場に提供されている。しかし、これら高分解能傾斜角センサは微小な重力正弦成分を高感度で検出するという性格から使い方に熟練を要することや、構成が複雑なことから大きさやコストの面での問題が指摘されている。

シリコン (Si) を用いた MEMS センサは破竹の勢いでその用途や市場を広げており、モバイル・ゲーム・カーエレクトロニクスなどの分野に小型低コストの加速度センサが提供され、それらが傾斜角センサとして利用される例も出てきている。しかし、高感度傾斜角センサは中少量生産のため Si の MEMS 製造に適していないので、MEMS 技術による高性能化から取り残されている分野でもある。

本研究では、水晶の MEMS 技術を応用した小型高分解能傾斜角センサの実現性を明らかにするために、水晶のウェットエッチングによる微細加工の限界を調べるとともに、異方性エッチング特有の各種エッチング面がセンサの性能に及ぼす影響を考慮した最適設計や製造プロセスの開発を行い、試作した傾斜角センサの特性について評価を行っている。

本論文はこれらの研究成果をまとめたものであり、傾斜センサの調査から目標設定、設計製作、特性評価、解析検討までの 8 章で構成されている。以下に論文各章の概要について述べる。

第 1 章 序論

本章では、研究の対象である傾斜角測定について、その現状と将来性について検討し本研究の目的を明確にした。はじめに、傾斜角測定の特殊性について整理し、加速度測定と傾斜角測定の違いを整理した。傾斜角測定は微小加速度変化を測定するという意味では加速度測定の一つに分類できるが、高分解能傾斜角測定はその測定量が非常に微小であるため加速度測定とは異なる分野を形成している。加速度測定の分野はシリコン MEMS 技術が応用された各種製品が市場に提供されている。しかし、高分解能傾斜角測定の製品は高精度部品と高精度組立を基本とした従来技術の製品が市場に提供されているのが現状である。このように、水準測定という基本物理量を測定する傾斜角センサであるにもかかわらず小型・安価・高機能という MEMS 技術の恩恵に授かっていない。ここでは、ウェットエッチングによる高アスペクト比の微細加工が可能な水晶 MEMS 技術の特長を応用して、MEMS 化が困難と考えられていた高感度傾斜角センサを実現することを研究の目的とした。

第 2 章 水晶の材料特性

本章では、具体的な傾斜センサの検討を行う前に、本研究の基本材料である水晶の特性について報告した。水晶の圧電特性や異方性エッチング特性の基本的なデータは諸研究で明らかにされている。しかし、本研究では高感度センサを実現するために従来にない微小で高アスペクト比の構造体をウェットエッチング加工で製作する必要がある。そのためには、ウェットエッチング加工による微細加工の限界を見極めるための「微細エッチング加工の特性」を明らかにする必要があり、また微小構造体における「水晶の機械強度特性」がメカニカルセンサを設計するときの基礎データとして必要になる。ここでは、それらの基礎データを得るために、実験によりデータを取得してそれらの限界領域を定量的に示した。

第 3 章 傾斜角センサ基本構成の検討

本章では、具体的な最適設計を行う前の検討事項として、センサの基本構成について検討した。MEMS センサという視点から、センサの測定検出方式の検討をはじめ、その測定方式を実現するための構成や形状、また高い S/N 比を実現するための差動方式についての検討も行った。その結果、 $5 \times 5 \times 0.1 \text{ mm}^3$ の寸法の水晶チップに全ての機能を搭載する傾斜角センサの全体構成を示し、設計開発の指針となる全体構成の概要をまとめた。

第 4 章 傾斜角センサの最適設計

第 3 章の全体構成案をもとに具体的な設計計算を行った。構成を一言で述べると差動容量検出型の微小加速度検出センサとも呼べる。そのため、基本構成要素であるバネ（梁）の変位計算式、静電容量を求めるための静電容量計算式、差動検出を実現するための差動構成とその定量的な計算検討結果などセンサの特性を計算するための計算式を導出して、最適解を得るための手順も示すことができた。この一連の設計検討結果として、 $5 \times 5 \times 0.1 \text{ mm}$ の一片の水晶チップ内に全ての構成要素を作り込み、 0.0001° の高分解能センサが実現可能であることを設計計算の結果として明らかにすることができた。

第 5 章 傾斜角センサの製作

本章では、設計したセンサを具体的な「物」に製作するための微細加工プロセスについて記述した。一片の水晶チップに全ての機能が盛り込まれているので、製作プロセスも複雑になる。水晶のエッチング加工ではまだ例のない微細加工プロセスであることから第 2 章の微細加工特性のデータを活用し、また差動構成を実現するための電極分離プロセスとして新しい手法によるリフトオフプロセスの開発も行った。そして、製作した水晶センサチップをセラミックパッケージに実装するために、信頼性の高い Au-Sn 共晶合金による接合を行った。

このように、一枚の水晶ウェハから水晶センサチップを製作しパッケージングまで実施した一連の加工プロセスは、今後の水晶 MEMS センサ・デバイス研究試作の標準プロセスとして活用されるものと考ええる。

第 6 章 傾斜角センサの評価

試作したセンサの基本特性である傾斜角に対する評価実験を行った。光学顕微鏡を用いて傾斜角とセンサ変位の関係を測定して、水晶のセンサチップの特性として測定値と設計値が一致することを確認した。そして、実験のために製作した評価システムの構成について述べるとともに、その測定システムで評価したセンサの測定結果について報告した。高分解能領域の実験では評価システムの出力のゆらぎがセンサの分解能を見極める上での大きな障害となったが、そのゆらぎの標準偏差が分解能で 0.00012° という値に相当したことから、センサの性能としては十分に目標分解能 0.0001° をクリアできるという結論を得ることができた。このゆらぎについては検出回路の問題を含むことから、今後の研究の進展の過程で明らかにされていくべきものと考ええる。

第 7 章 傾斜角センサ動特性の解析評価

第 6 章の静的評価に続いて動的評価について検討を行い、解析が困難と考えていたセンサの動特性についてまとめることができた。本センサのようなメカニカルセンサでは共振現象が必ず発生し、その共振現象と制動対策を検討するために動特性の解析が不可欠になる。Si の MEMA センサでも同様の解析が行われているが、その手法は数値解析 (FEM) によるのが一般的である。とくに本センサでは異方性エッチングによる傾斜面が生じるので解析式を求めるのは困難で数値解析以外の解析手法はないと思われていたが、流体の運動方程式をもとに境界条件を工夫することで解析近似解を得ることができた。そして、その近似解の有効性を確認するために実験を行い、実験結果からもその有効性が確認できた。この解析手法は現象を定性的に説明してくれ、さらに定量的な計算にも利用できることから今後の MEMS センサの研究に役立つものと考ええる。

以上から、第 8 章では結論として本論文における各章の成果について概説した。高感度傾斜角センサの基本構想から構成検討・設計製作・特性評価という一連の研究を行い、水晶の MEMS 技術を用いて傾斜測定として最高クラスの性能を有するセンサが実現可能であることを示すことができた。

本研究が高感度傾斜センサの実用化に結びついてくれることと、これらの成果が今後の水晶 MEMS センサの研究に役立ってくれることを期待して結びとしている。