

博士論文審査結果報告書

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

近年の産業機器や製造機器などの高機能・高精度化にともない、微小な傾斜が機器に及ぼす影響が問題視されるようになり、また微小傾斜角測定による機器の精密姿勢制御も行われるようになってきている。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が、これらの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ため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改善が期待されている。

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、具体的なセンサの設計や製造プロセスの開発を行い、試作したセンサの特性についての評価を行っている。

本論文はこれら一連の研究成果をまとめたもので、8章から構成されている。以下に各章毎に要旨を述べる。

第1章では、研究の背景として傾斜角測定の現状と将来性について検討を行っている。はじめに、傾斜角測定の特殊性として加速度測定と傾斜角測定の違いについて整理している。傾斜角測定は微小加速度変化を測定するという意味では加速度測定の一つに分類できるが、高分解能傾斜角測定はその測定量が非常に微小であることから加速度測定とは異なる分野を形成している。そして、加速度測定の分野はシリコンの MEMS 技術が応用された各種製品が市場に提供されているのに対して、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。このように、水準計測という基本物理量を測定する傾斜センサであるにもかかわらず小型・安価・高機能という視点では MEMS 技術は用いられていない。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目的としている。

以上、本章では研究の背景から研究目的までを述べることにより、本研究の意義を明らかにしている。

第2章では、傾斜角センサを開発設計するための基礎データを取得する実験として、センサの材料である水晶の「機械強度特性」ならびにウェットエッチングによる「微細加工の限界」について述べている。報告例が少ない「機械強度」については、微細試料を用いた実験を行い 1000MPa 以上の強度を有すること明らかにしている。また、「微細加工の限界」については、厚さが $100\mu\text{m}$ の水晶ウェハをウェットエッチングにより $2\mu\text{m}$ の幅で加工できることを実験により検証し、設計実用限界の範囲として加工幅 $5\sim 10\mu\text{m}$ を提示している。

以上、本章では設計開発の基礎データである「機械強度特性」と、設計製

造における「微細加工の限界」を実験により求めて、両者について貴重なデータを提供している。

第3章では、具体的な最適設計を行う前の検討事項として、設計の指針となる傾斜角センサの全体構成について検討を行っている。MEMSセンサという視点から、測定検出方法の絞込み、その測定方法を実現するための全体構成の検討、および高S/N比を実現するための差動方式の導入などの考察の結果として、 $5 \times 5 \times 0.1 \text{mm}^3$ 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ている。この検討結果により、次章の具体的な最適設計を行うための設計対象が明確化されている。

第4章では、第3章の検討結果をもとに具体的な設計内容について述べている。基本構成要素であるバネの変位計算式、静電容量検出のための静電容量計算式、そして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全ての関係式を導出して最適解を得るための手順も示している。とくに、差動方式を実現するための電極構成についてはプロセスを考慮した独特のアイデアが盛り込まれており、本センサを実現するためのブレークスルーの一つとなっている。この一連の最適設計の結果として、 $5 \times 5 \times 0.1 \text{mm}^3$ 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結果として導いている。

第5章では、設計した傾斜センサを具体的な「物」として試作する製造プロセスについて述べている。水晶のエッチング加工では例のない微細加工プロセスであることと、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造プロセスも複雑になり、多くのプロセスを経てセンサチップを製作したことを述べている。それらのプロセスの中でも、差動方式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ており、センサ製作のためのキープロセスの一つであることを述べている。そして、製作した水晶のセンサチップをAu-Sn共晶合金の接合によりセラミックパッケージに実装するプロセスも実施している。

以上、一枚の水晶ウェハからスタートして水晶のセンサチップを製作し、さらに実験評価のためにセラミックパッケージに実装するパッケージング工程も実施しており、MEMSセンサ開発試作のための全ての工程を自作プロセスとして開発したことを示している。

第6章では、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について述べている。はじめに、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

ことを確認している。そして、分解能評価実験のために試作した静電容量検出回路と、新た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を示している。高分解能領域の実験では外乱による静電容量検出回路の出力ゆらぎが問題となったが、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、水晶センサチップ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導いている。以上により、第 4 章の設計値が実験データで確認され、本研究の目標が実現できることを示している。

第 7 章では、第 6 章の静的評価に加えて動的特性の解析と評価について述べている。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。このような解析では数値解析 (FEM) が一般的であるが、ここでは境界条件を工夫して運動方程式から理論解析式を導いて制動現象の解析を行っている。さらに、実際の試作センサを用いた実験により解析式の妥当性を検証しており、この解析式の有効性を確認している。このような解析式は制動現象を定性的に分析するのに有効であり、実験結果から定量的な計算にも利用できることを示している。

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ている。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、現在実用化されている汎用センサの中で、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明らかにした。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。

以上を要するに、本論文で得られた知見は、水晶の MEMS 技術を応用することで、傾斜角測定という分野において小型で安価な高分解能傾斜角センサが実現できることを明らかにしたものである。また、本研究で開発された設計手法や製造プロセスは他の水晶 MEMS センサやデバイスの研究に貢献するところ大である。よって本論文は、博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。

2013 年 1 月 8 日

主査	早稲田大学大学院	教授	工学博士 (東京工業大学)	植田敏嗣
	早稲田大学大学院	教授	工学博士 (早稲田大学)	李 義頡
	早稲田大学大学院	教授	工学博士 (アーヘン工科大学)	巽 宏平