

氏名	よしだ ゆう さく			
授与学位	吉田 勇 作			
学位記番号	博士 (学術)			
学位授与年月日	学術 (環) 博第 3 1 号			
学位授与の根拠法規	平成 17 年 3 月 25 日			
研究科, 専攻の名称	学位規則第 4 条第 1 項			
学位論文題目	東北大学大学院環境科学研究科 (博士課程) 環境科学専攻			
指導教員	低雑音・広帯域静電容量型マイクロ加速度センサの 設計及び製造方法に関する研究			
論文審査委員	主査	東北大学教授	新妻 弘明	東北大学教授
		東北大学教授	新妻 弘明	東北大学教授
		東北大学教授	佐藤 源之	東北大学助教授
				江刺 正喜
				浅沼 宏

論文内容要旨

第 1 章 緒論

振動計測は、防災工学、自動車工学、鉄道工学、航空宇宙工学、建築・土木工学、地球科学、生物学、機械工学、物理探査工学等、多岐にわたる分野で用いられている。振動計測用のセンサには、計測の容易さから加速度センサが多くの事例で使用されているが、微小振動を検出するような計測には、一般に入力換算ノイズが数 $10\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下の低ノイズ加速度センサが用いられている。

近年、この低ノイズ加速度センサに対して、計測精度向上のためのアレー計測や複数の物理量を同時に計測するためのインテリジェントセンサに対する需要が大きくなりつつある。このような高度な振動計測に従来の加速度センサを利用する場合、その大きさとコストが問題として指摘されてきた。

一方、MEMS 技術による安価で小型な静電容量加速度センサが注目を集め始めているが、このタイプの加速度センサを前述の微小振動計測に応用しようとする、周波数特性は十分に満足するものの、そのノイズレベルは $20\sim 40\text{dB}$ 程度要求より大きいため利用は困難である。この中で、近年、アメリカを中心に MEMS 技術による低ノイズ加速度センサの研究が進められており、約 $0.3\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ の低ノイズを達成した MEMS 技術による加速度センサが市場に出始めるようになってきた。このような背景の中、日本国内においても、MEMS 技術を用いた基礎技術の確立とその産業化が求められるようになってきた。

日本国内の MEMS 技術による低ノイズ加速度センサの開発においては、1993 年に新妻らが提唱した「地下マイクロセンシングプロジェクト」のもと、西澤らにより地下弾性波計測用のマイクロ加速度センサの開発が行われ、このセンサが地下弾性波計測に利用できることが実証された。

この成果は、日本学術振興会及び新エネルギー・産業技術総合開発機構の支援により平成 11 年度産学連携研究開発事業「マイクロ加速度センサを用いた広帯域・高感度地下弾性波検出器の実用化」という形で、株式会社アカシ（現：株式会社ミットヨ）との共同研究へと展開し、実用化を目指した本研究が開始された。

西澤の開発したセンサの実用化においては、設計法の構築の必要性、製品化に向けた MEMS プロセスの開発が指摘されていた。そこで、本研究では、マイクロ加速度センサの設計に関連した現象の理解

とその現象を基にした設計法の構築及び製品のための製造方法の構築を目的とした。設計法の構築では、(1) マイクロ加速度センサの周波数特性評価のための線形近似モデルの構築とその評価、(2) マイクロ加速度センサのノイズ特性評価のための線形近似モデル構築とその評価、(3) 要求される寸法、周波数特性、ノイズレベルを満たすようなセンサの最適設計法の構築、について検討を行うこととした。製品のための製造方法の構築においては、(4) 製品化に耐えうる MEMS プロセスの設計とその実現、について検討を行うこととした。以下、各章ごとの要旨を述べる。

第 2 章 周波数特性の線形近似モデル

本章では、マイクロ加速度センサの線形近似モデルの構築、線形近似モデルを用いた周波数特性の検討、ならびに線形近似モデルの検証について論じた。

まず、円環板振動子のスクイズフィルム効果の解析解を導出し、その解から減衰係数及び空気バネの数式を導出した。これにより、円環板振動子の運動方程式が記述できるようになった。

次に、容量検出回路を用いたフィードバックとその回路構成について検討を加え、それぞれの構成要素を数学的モデルで表した。

その後、以下の特徴を有するマイクロ加速度センサの線形近似モデルを導出した。

- i) すべての要素が設計変数にて記述されている。
- ii) キャリブレーション入力の取り扱いが可能
- iii) キャリブレーション入力と加速度入力による特性の違いが取り扱い可能

上記線形近似モデルを用いて、キャリブレーション入力及び加速度入力に対する伝達関数について考察し、センサの初期容量がアドミッタンスとして働くことにより、これら 2 つの伝達関数に差が生じていることを明らかにした。

最後に、製作したセンサの周波数特性の測定結果と線形近似モデルを用いた数値解析の結果を比較して、このモデルの妥当性を検証した。その結果、誤差は存在するものの、全体としては良い一致を示しており、本モデルが静電容量型マイクロ加速度センサの周波数特性の評価に有効であることが示された。

第 3 章 線形近似モデルによるノイズ特性の評価

本章では、線形近似モデルにノイズ成分を導入したノイズモデルの構築、そのモデルを用いたノイズ特性の検討、ならびにこのモデルの検証を行ったことについて述べた。

まず、円板振動子及び円環振動子に対する低周波域における減衰係数の数式に表れる係数の値を導出し、気体分子の運動による熱雑音について検討を行った。

電子回路のノイズについては、その入力換算ノイズを静電容量の変化として表した。また、実験により本研究で取り扱う容量検出回路のノイズ特性の評価を行い、そのノイズレベルが $0.4 \times 10^{-18} \text{ F}/\sqrt{\text{Hz}}$ であることを示した。

次に、気体分子の運動による熱雑音及び電子回路のノイズを第 2 章で構築した線形近似モデルに組み込むことにより、ノイズモデルの構築を行った。このノイズモデルは、

- i) モデルの構成要素がすべて設計パラメータにより記述されている
- ii) 電子回路の入力換算ノイズを静電容量の変化として表現している

iii) 周波数特性について既にその特性が実際の実験と比較されその妥当性が評価されている等の点が従来モデルと異なる。

さらに、このモデルを用いた数値計算により、圧力が一定の条件下で、ノイズ特性の大きさに極小値を与えるギャップ長が存在することを新たに示すことができた。

線形近似モデルの評価においては、センサ内部が大気圧に保たれているセンサについてそのノイズ特性を実験と比較することにより、その妥当性を示した。さらにセンサ内部の圧力が大気圧のセンサにおいて、そのギャップを変化させることで低周波域におけるノイズの大きさを制御できることを実験により実証した。

本章での理論解析は、センサの内部圧が大気圧よりも低い場合についても取り扱ったが、実験は大気圧に限定されており、大気圧以外での評価がなされていない。そのため、大気圧以外でのモデルの妥当性の評価が今後の課題である。

第4章 線形近似モデルを用いた最適設計法

本章では、まず、ギャップ長、円環振動子の穴径、バネ定数、センサの内部圧、電子回路のフィルタの遮断周波数、電子回路のノイズ、が加速度センサの周波数特性及びノイズ特性に及ぼす影響について線形近似モデルを用いて検討を行った結果について述べた。

ギャップ長、円板振動子の穴径、センサの内部圧を変化させることで、スクイズフィルム効果による共振や固有周波数での共振をなくすことができることを線形近似モデルによる数値計算により示した。また、バネ定数を小さくすると、オーバーダンピングの状態を保ったままゲインを大きくできることを線形近似モデルによる数値計算により示した。

電子回路については、電子回路の入力換算ノイズが大きくなると、高周波域で、気体分子の運動による熱雑音によるノイズよりも大きくなることを数値計算により示した。

次に、上記結果と2章、3章の結果を踏まえ、最適設計法の導出を行ったことについて述べた。また、その手法を実際に運用し、要求仕様を満たすマイクロ加速度センサの設計変数の値を導出したことについて述べた。これにより、本設計手法が実際に運用可能であることを示した。

今後は、実際にセンサの製作を行い、その設計変数の値に対する妥当性の評価が必要であると考えられる。

第5章 マイクロ加速度センサ製造のためのMEMSプロセスの開発

本章では、西澤の提案したプロセスを基本とし、製造の観点からプロセスの問題点を抽出し、その問題点に対する解決方法を提案したことについて述べた。また、問題を解決した後の最終的なプロセスと実際に製作したセンサの評価について述べた。

まず、問題として指摘されてきたレーザ支援エッチング、フィードスルー、パッケージングに関して、解決案を提示し、実際にそのプロセスを行うことで、その有効性を実証した。また、これらの問題を解決した後の最終的なプロセスチャートを示した。このプロセスの変更により、数%の歩留まりであった研究開始当初と比較して、約15倍程度歩留まりが向上した。また、製作日数については、約半分短縮できた。

今後は、より安価なプロセスの開発及び高性能なマイクロ加速度センサのための真空封止等を考慮したプロセスの開発が求められるものと考えられる。

第6章 結論

本研究では、大気圧よりも低い圧力における検証は十分でないものの、線形近似モデルを用いたマイクロ加速度センサの設計に関連した現象の理解とその現象を基にした設計法の検討を行った。これにより、マイクロ加速度センサの設計に対して、ある程度の指針を提示できたと考える。

また、本研究を通して、製品化に耐えうる MEMS プロセスの設計が実現した。そのプロセスは実際の製品に使用されている。

本研究で取り扱ったマイクロ加速度センサは、安価・小型・高性能な特徴を生かして、従来では達成することが困難だった振動計測方法を実現する可能性を秘めている。その可能性を引き出すためには、更なるコストの低減、小型化、高性能化が要求されるものと考えられる。このような要求に対して、本研究の成果は有効活用できるものと考えている。

論文審査結果の要旨

防災工学，地球科学，機械工学，建築・土木工学などの分野で加速度センサを用いた振動計測が多用されている。このなかで，近年，地震計測，地下弾性波計測や構造物振動モニタリングなどのために，小型，高感度，高帯域かつ安価な加速度センサの開発が望まれている。本論文は，このような市場の要求を満たすために，MEMS (Micro ElectroMechanical Systems) 技術による容量型マイクロ加速度センサの実用化のために，マイクロ加速度センサの周波数特性およびノイズ特性に関連する物理現象を解明し，その結果をもとにセンサの最適設計法を構築すること，また，本マイクロセンサ実用化のためのMEMSプロセスを開発することを目標として実施した研究の成果について述べられており，全6章からなる。

第1章は，緒論であり，本論文の背景，目的，目的達成のための課題とそれに対する取り組み方針が述べられている。

第2章では，本マイクロ加速度センサの周波数特性を支配する物理現象に関する検討結果を示し，それをもとに本センサの線形モデルを提示している。ここでは，振動子へのエアダンピング効果の一種であるスクイズフィルム効果について解析解を導出し，センサの形状・寸法が周波数特性に与える影響を評価した結果を示している。また，検出回路の構成と周波数特性の関連を理論的に検討したことについて述べている。さらに，これらをもとに実センサの周波数特性を模擬できる線形モデルを構築したことを述べている。これは，本研究で新たに導出された重要な成果である。

第3章では，本マイクロセンサのノイズ特性について検討し，それを第2章で導出した線形モデルに組み込んだ結果について述べている。ここでは，気体分子の運動に起因するノイズについて数式モデルを導出し，その特徴を明らかにしている。また，電子回路の入力換算ノイズを定量評価する方法を導出したことについて述べている。これらのノイズモデルを第2章で導出した線形モデルに組み込み，センサのノイズ特性を評価したところ，実測データとよく整合する結果が得られ，さらに，各センサ内部圧においてノイズを極小にする最適なギャップ長があることを明らかにしている。これらは重要な知見である。

第4章では第2，3章で得られた成果をもとに，本マイクロセンサの最適設計法について述べている。ここでは，設計のための具体的なフローチャートを提示し，それに従えば所要の特性を有するセンサを設計可能であることを示している。これは広帯域・低雑音センサの設計法の確立に大きく寄与するものである。

第5章では，本センサを製品化するためのMEMSプロセスについて述べている。ここでは，レーザ支援エッチング排除のための新プロセスの導入，無電解メッキによるフィードスルーの開発，SIP型モールドディングによるパッケージング等，著者が開発したプロセスとその有効性について述べている。さらに，これらのプロセスを導入することにより，本マイクロ加速度センサの歩留まりが大幅に向上し，市販可能になったことが記されている。この成果は本センサの実用化に大きく寄与している。

第6章は結論である。

以上，要するに，本論文は，防災，地球科学等において重要な加速度計測のための容量型マイクロ加速度センサの性能に関する物理現象を解明し，その設計および実用化を可能にしたことについて述べており，計測工学ならびに環境科学の発展に寄与するところが少なくない。よって，本論文は博士(学術)の学位論文として合格と認める。

