

主論文の要約

論文題目 **Miniaturized Wide-range Load Sensor
Using Quartz Crystal Resonator**
(水晶振動子を用いた小型ワイドレンジ荷
重センサ)

氏名 室崎 裕一

論文内容の要約

現在、荷重センサは多くの分野で使用されている。その使用用途は、生体医療の分野や産業の分野など幅広い。ここで、ワイドレンジかつ高感度な計測が可能な荷重センサを実現することで、例えば、体重を計測しながらも心臓の鼓動による微小荷重変動の計測が可能になるなど更なる用途拡大が期待される。また、高感度・ワイドレンジ・高速かつ長時間計測が可能な荷重センサをマニピュレータの力覚フィードバックに用いることで、人体の組織に対して、引っ張るなど大きな力を要する作業における荷重計測から傷つけないように微小な荷重を判断することで、マニピュレータを用いた手術の安全性を高めることができると考えられる。これらの応用を実現させるためには、高感度、ワイドレンジ、高剛性（高速計測が可能）、長時間安定（長時間計測が可能）かつ小型で安価な荷重センサが必要とされている。従来広く用いられているひずみゲージ式センサ、静電容量式センサ、磁気式センサなど様々な荷重センサの高感度・ワイドレンジ・高速応答・小型化に関する研究もなされているが、その全てを満たす荷重センサは未だ実現されていない。ここで、ATカット水晶振動子(QCR)は高い時間安定性および温度安定性をもった発振出力信号を得ることができ、発振周波数が水晶振動子に加えられた外力に正確に比例した変化をする性質をもつ。このことから、荷重センサとして用いることで、高精度、長期安定性計測が可能といった優れた特性を示す。一方で、曲げ応力に弱く、荷重センサとしての使用においては水晶振動子を安定に保持し、荷重を伝達するための保持機構が必要となる。保持機構の提案により、ATカット水晶振動子を用いた荷重センサ(水晶振動式荷重センサ)に関していくつかの研究が行われてきたが、水晶振動式荷重センサの実用化はまだ行われていない。幅広い分野でのセン

サ応用を実現させるためには、計測系を含めたセンサの低コスト化、幅広い計測範囲への適応（高感度センサと高耐荷重センサの実現）が重要な課題であると考えられる。そこで、本論文では、水晶振動子荷重センサの小型化を実現するための製作方法の提案、高感度化を実現するためのセンサ設計の提案、小型でありながらも高耐荷重を有するセンサを実現させるためのセンサ構造の提案、およびセンシングシステムの小型・簡略化を行った。また、製作した水晶振動子荷重センサおよび計測系を用いた脈波・呼吸・体動といった生体信号の計測に取り組んだ。

各章の概要は以下の通りである。

2章では、水晶および水晶振動子の特性について述べ、ATカット水晶振動子の荷重センサとしての特性を示した。水晶は圧電素子の一つであり、欠陥が少ない結晶材料であることから、優れた機械特性および電気特性を有している。このため、水晶振動子は損失の少ない発振特性（高いQ値）を有しており、非常に安定した周波数出力を得られることができる。このためICや時計のクロックとして広く使用されている。中でも、ATカット水晶振動子は室温付近で温度変動に対する高い周波数安定性を示す。さらに、発振周波数が外力に対して高い線形性をもって変動する。ATカット水晶振動子を荷重センサとして使用することで高分解能を有した荷重センサを実現できる。

3章では、水晶振動子荷重センサの実用化に向けて、低コスト化を目的としたセンサの小型化およびの組立の簡略化を行った。また、医療の分野における、マニピュレータの力覚フィードバックへの応用や、バイオの分野でのマイクロマニピュレーションの力覚フィードバックへの応用のためには、センサの更なる小型・高感度化が求められるため、センサの高感度化するための設計を行った。水晶荷重センサの製作において、従来の水晶振動式荷重センサでは、水晶振動子を保持機構にはめ込んで組立を行う必要があるために水晶振動子と保持機構間に隙間があり、低負荷範囲における計測不可領域と非線形性が存在した。その対策として、接着剤による固定が行われていたが、接着剤を用いることで、クリープおよびヒステリシスが増加する。また、接着剤を用いたセンサの組立において、水晶表面への接着剤の付着が水晶振動子の特性を著しく低下させる恐れがある。このため、接着剤を用いずに線形性を確保する方法として保持機構に予荷重を与えることで、水晶振動子と保持機構の隙間を埋める方法が提案されている。しかし、予荷重を与えるためにネジ機構を有するパッケージングを用いた締め付けの機構などが必要となる。また、予荷重を付加する際にねじり方向の力を低減するためのベアリング等が必要となるため、部品点数の増加、組立の難しさからコストの削減および小型化が困難であった。また、主要部品を機械加工により製作する場合、加工精度が不足するため、更なる小型・高感度化は望めなかった。そこで本研究では、シリコンの微細加工により、板バネを有した保持機構部品を形成し、水晶振動子の両面に接合する、ギャップのない一体化構造を提案した。これにより、予荷重を負荷するためのねじ機構

を有したパッケージが不要となり、センサの大幅な小型化が実現した。また、シリコンの微細加工技術により、微細な板バネ構造を形成することで、高感度な水晶振動式荷重センサを実現した。

4章では、小型かつ高耐荷重を有する水晶振動式荷重センサを提案した。3章においては、水晶振動式荷重センサの高感度化について示した。これに対して、高耐荷重を有するセンサを実現させることで、高感度側から高耐荷重側まで幅広い荷重範囲での荷重センサの応用が可能になり、その応用範囲を拡大することができる。例えば、高耐荷重の水晶振動式荷重センサを実現させることで、例えば、人の体重などの高付加荷重を計測しながらも、心臓の鼓動による微小な荷重変動まで含めて計測することが可能になる。水晶振動子の破壊はその薄型の構造から座屈応力に起因していると考えられる。このため、水晶振動子の四辺を保持層により、安定に固定することで、水晶振動子の座屈が起こりにくい構造を提案した。また、水晶振動子の薄型化を行い、保持層を厚いブロック状の形状とすることで伝達効率を低下させる設計とした。これにより、小型でありながらも耐荷重を有するセンサを実現させることが可能となる。製作したセンサのサイズは高さ 2mm、幅 2mm、奥行き 1.04mm となった。また、基本特性を評価した結果、600 N の耐荷重を有しており、その計測分解能は 0.4 mN であった。よって、 10^6 の計測レンジを実現した。

5章では、水晶振動式荷重センサの計測システムである周波数カウンタの小型化を行った。一般的に AT カット水晶振動子の出力信号は数十 MHz の周波数帯で高い安定性(出力変動 1 Hz 以下)をもつ。ここで、水晶振動式荷重センサの出力は周波数の変動で与えられるため、高感度計測を行うためには、高精度な周波数計測精度が求められるためカウンタの小型化が困難であった。周波数計測の精度はその桁数によるために、計測周波数を低減させることで周波数カウンタに求められる計測精度を下げるができる。これにより、簡易な周波数カウンタでの計測が可能となり、計測システムの小型化および低価格化を実現できると考えられる。本研究では、2つのセンサの出力電圧をミキサ（アナログ乗算回路）により掛け合わせる差動法を用いて計測システムを構築した。2つの周波数出力を掛け合わせた後に、ローパスフィルタをかけることで、その2つの周波数出力の周波数差を有する周波数信号を得ることができる。また、一方のセンサを荷重計測に用い、もう一方のセンサをリファレンスとして用いることで、温度変動に対する出力の変動を低減することができる。差動法を適応するために製作したセンユニットは2つのセンサおよび発振回路、アナログ乗算回路、ローパスフィルタを基板上に有する。また、小型周波数カウンタの製作には汎用マイコン（PIC）を用いることで安価な計測システムとなり、市販の周波数カウンタと比較して大幅な小型化を実現した。

6章では、製作した水晶振動式荷重センサの有用性を示すために、荷重センサを用いた生体

信号計測に取り組んだ。製作した計測システムおよびセンサにより、小型でありながらも 600 N の耐荷重を有し、かつ高分解能な荷重センサを実現した。製作したセンサを椅子の座面に組み込むことで、脈波、呼吸、着座や立上りといった動作による荷重変動を計測できた。また、センサをボードの 4 辺に配置し、体重計測を行うことで、体重と脈波の同時計測が可能であることを示した。

7 章では、本論文のまとめと今後の展望について述べた。本稿で提案した AT カット水晶振動子を用いた荷重センサは、微細加工技術を用いることで、組立の簡略化、バッチプロセスによる一括形成を可能にした。また、センサの小型化を行うことで、安価にセンサを製作することが可能になった。更に、差動法を用いることで、周波数カウンタの簡略化を可能とし、安価でありながらも高感度かつ公計測範囲を有する小型な荷重計測系を構築できた。日常における生体信号計測だけでなく、様々な応用への使用が期待される。