圧電素子の正・逆圧電効果を利用した静荷重センサの開発

Development of Static Load Sensor utilizing both Direct and Inverse Piezoelectric Effect of Piezoelectric Element

大嶋 和彦^{*1}(正員), 石黒 稜人^{*2}, 尾形 和哉^{*1}

Kazuhiko OSHIMA (Mem.), Ryoto ISHIGURO, Kazuya OGATA

It's possible to measure static load using piezoelectric ceramics by sticking 2 pieces of identical ceramics together. When one of the ceramics is oscillated at its resonant frequency, the other ceramics generates voltage by following up to the motion of the actuator ceramics. When the vibration of the body is suppressed due to the impressed load, the sensor voltage drops according to the magnitude of the load. Vibration analysis proved that the configuration of the vibration of the sensor body is 1st mode bending of a thin circular plate. It's also turned out that the characteristics of the sensor voltage are dominated not by the magnitude of the load but by the contact area of the load with the ceramics. Therefore, introducing the cushion material between the load and the ceramics, which alters the contact area according to the magnitude of the load, will be able to control the sensitivity and the linearity of the sensor voltage to the load.

Keywords: static load sensor, piezoelectric ceramics, smart material, cushion material.

(2019 年 4 月 3 日受付, 2019 年 6 月 11 日再受付, 2019 年 8 月 20 日再々受付)

1 緒言

圧電素子は変形によって電圧を生じるため、薄型・単純構造の特性を活かし、衝撃センサ、音響ピックアップ、加速度センサなどに幅広く用いられている。しかしながら、センサとしては微分型であるため、変形が一定の場合には発生電圧を持続できない[1]。したがって、変形が荷重によるものであれば、圧電素子単体では静荷重を検出することはできない。このため、例えば試料重量の経時変化などをモニタリングしたり、車載シートや就寝用ベッドに埋設して人体の荷重分布から体形や位置・姿勢を推定したりするような荷重の変動に乏しい場合には用いることができない。

現在、力を検出するセンサとしてはひずみゲージ式と圧電式の2種類が主流であるが、上述の理由のため、静的なモニタリングを行う場合には専らひずみゲージ式が用いられている。しかしながら、圧電素子は発生する出力電圧が通常の抵抗式ひずみゲージに比較して非常に大きいので、出力電圧の増幅器などを必要としないなど、計測システムの簡略化やローコスト化に対して大きなメリットを有している[2]。荷重計測に関しては特に近年は既存システムに統合する需要が非常に高く、小型かつ薄型のセンサが望まれており、周辺機

器を含めた圧電式の計測システムのコンパクトさは非常に有効といえる。

本研究は、従来のひずみゲージ式ロードセルに置き換えることができ、なおかつセンサの電圧出力を直接読み取って静荷重を計測するシンプルなシステム構成を目指すものである。

圧電素子を利用して静的な力や圧力を計測する試みとしては、圧電効果の微分特性を積分補償によってゲイン化する逆伝達関数補償法[3]、荷重を球体を介して積層型アクチュエータに印加することで荷重と変位との間に非線形性が生じる現象を利用する手法[4]、圧電フィルムの超音波振動が誘電体を伝播する時間が圧力に依存する性質を利用した手法[5]、共振周波数近傍で励振状態にある圧電素子(圧電振動子)の機械的インピーダンスが外力によって変化する現象を利用する手法[6]-[12]などがある。

これらの手法はそれぞれの計測の目的に適うように考案されたものであり、それぞれにメリット・デメリットを有するが、力を電圧信号の形でセンサ体から直接に取り出せるものは意外に少ない。例えば、逆伝達関数補償法では電荷増幅器が、非線形性を利用する手法ではセンサ出力の増幅器が、超音波特性を利用する手法では波形解析装置が、センサ体の後段にそれぞれ求められる。

圧電振動子を利用する手法は非常に多岐に亘るが、それらは共振周波数の変化を利用するもの[6]-[8]と、

連絡先: 大嶋 和彦, 〒457-8530 名古屋市南区滝春町 10-3, 大同大学 工学部 機械システム工学科,
e-mail: oshima@daido-it.ac.jp

^{*1} 大同大学 ^{*2} 株式会社不二越

共振点近傍の特定の周波数における素子のインピーダンス変化を利用するもの[9]-[12] に大別できる。

どちらの場合も 2 種類の圧電素子を用いて一方を圧電振動子としてセンサ体を励振し、もう一方を共振周波数やインピーダンスの変化を検出するセンサとして用いる場合が多いが、共振周波数の変化を利用する手法は、その変化を計測したりセンサ出力をアクチュエータにフィードバックする発振回路を構成したりするため検出回路は複雑になる。これに対してインピーダンスの変化を利用する手法は、励振電圧振幅を一定に保っておけばセンサ電圧を検出するだけでよい。

ところで、圧電振動子を利用した手法はこれまでに触覚センサの分野で広く研究が行われてきているが、その多くは対象物との接触状態の判別を目的としたものが多く[13]-[15]、力覚（絶対的な力の値）を計測するものは稀であった。これは圧電振動型のセンサは、小さなインピーダンス変化に対しては高感度であるが、ある大きさ以上のインピーダンス変化に対しては非常に低感度であるために、センサ出力がわずかな接触力で飽和してしまい、測定範囲が極めて狭くなってしまいうからである。

このような問題に対して元尾ら[9] や松野ら[10] は圧電振動子の複数の振動モードを利用することにより、測定範囲の広域化と感度の調節を行い、力覚センサとしての利用を実現している。しかしながら、圧電振動子は一般に高次モードになるほど振動振幅が小さくなるため、センサ体から得られる出力電圧が低下する。

本研究は、シンプルなシステム構成を目指す立場からインピーダンスの変化を利用する手法を採用しつつ、大きな出力電圧が得られる 1 次モードのみを利用することとする。1 次モードは一般的に高感度ではあるが、測定範囲が極めて狭い。そこで、形状が荷重によって変化する弾性体を導入し、これを介して荷重をセンサ体に加えることにより、センサ体の機械的インピーダンスが荷重に応じてなだらかに変化するようにして測定範囲の広域化を目指した。

本報告では、2 章で 2 枚の圧電素子を貼り合わせたセンサ体の裸特性を調査する。3 章ではセンサ体の出力電圧がこれと接触する弾性体の面積に応じて変化することを示し、このことを利用した静荷重の計測法を提案する。4 章では弾性体の形状や剛性によって感度や測定範囲などのセンサ電圧特性をコントロールする方法を調査し、5 章では測定精度を評価する。

2 静荷重センサ

2.1 センサ体の製作

本研究では村田製作所製の圧電振動板 7BB-35-3LO を使用した。その形状・寸法を Fig.1 に示す。この振動板は半径方向に分極処理された直径 $\phi 23\text{mm}$ 、厚さ 0.3mm の圧電セラミックスを直径 $\phi 35\text{mm}$ 、厚さ 0.3mm の真鍮円板に接着したもので、通常は圧電ブザーなどに用いられている。

これらを 2 枚、真鍮板側を貼り合わせることでバイモルフ構造のセンサ体を製作した。本研究ではその一方を逆圧電効果を利用した駆動用素子として、他方を圧電効果を利用した検出用素子として利用する。2 枚の振動板の貼り合わせには、検出用素子の駆動用素子への追従性を考慮して、接着層が堅固で粘性が低い金属・炭素繊維用アクリル樹脂系接着剤（セメダイン(株)製メタルロック）を使用した。

Fig.1 Shape and dimension of piezoelectric element.

2.2 静荷重検出の着想

Fig.2 は静荷重センサのセッティングの概要を示す。センサ体は、その外周部分を単純支持するなど、面に垂直な方向の変位が許容できるような支持形態をとるようにする。ここで駆動用素子に交流電圧 v_a を印加すると駆動用素子の圧電素子自体は半径方向に平面内で伸縮しようとするが、それに接着された真鍮板や検出用素子によってこの伸縮が圧電素子の片面側のみ拘束されるため、センサ体全体が厚さ方向にたわむことになり、薄板円板の面に対して垂直な振動を発生する。このとき、検出用素子はこの振動に追従するため、Fig.3 に示すように振動振幅に応じた大きさの電圧信号 v_s を出力する。駆動条件は後に詳述するが、振幅 5Vp-p 、オフセット電圧 2.5V 、周波数 6100Hz の正弦波交流を駆動用素子に印加した時、振幅約 30Vp-p の出力電圧を得た。

この状態で振動面に垂直な方向に荷重 W が印加されたとき、センサ体の振動が荷重の大きさに応じて抑制されるならば、検出用素子からの出力電圧振幅も減少するので、静荷重の検出が期待できる。なお、以降ではこの出力電圧をセンサ電圧と呼ぶ。

Fig.2 Schematic of static load sensor.

Fig.3 Sensor voltage.

2.3 センサ電圧の周波数特性

駆動周波数を決定するために、センサ電圧の周波数特性を調査した。センサ体は外周部分を単純支持し、配線の影響でセンサ体に不要な負荷がかからないように配慮した。

駆動用素子はファンクションジェネレータからの正弦波交流電圧をピエゾドライバを介して励振した。このとき、ピエゾドライバが負の電圧を出力できないため、駆動電圧はオフセット電圧 2.5V をもつ 5Vp-p とした。センサ電圧はボルテージフォロアを介してオシロスコープにより計測した。

測定結果を Fig.4 に示す。センサ電圧は 6100Hz 付近に大きなピークが認められるが、これは次節で説明するように、センサ体の薄板円板としての 1 次モードの共振周波数と考えられる。なお、41000Hz 付近に 2 次モードと思われる共振のピークが観察されたが、その電圧は振幅が 15Vp-p 程度と 1 次モードの約半分であった。

本研究ではセンサの感度を確保するために、駆動周波数をセンサ電圧が最も高いこの共振周波数に設定し

た。以降の実験はすべてこの駆動電圧および周波数で行っている。なお、センサ電圧は駆動電圧にほぼ比例することを予め確認している。

2.4 センサ体の振動状態

Fig.4 に示した共振周波数におけるセンサ体の振動状態を調査するために、レーザ・ドップラ振動計を用いてセンサ体の面に垂直な方向の振動を計測した。

センサ体は電極に接続したリード線をクランプして宙吊りの状態で保持し、駆動用素子を正弦波加振した。レーザ光はセンサ体の直交する 2 つの直径に沿ってスキャンさせた。

計測結果を Fig.5 に示す。センサ体はこの共振周波数において薄板円板の 1 次モード振動を発生していることがわかる。センサ電圧の低下はセンサ体のこのような振動が抑制されるために起こると考えられる。

Fig.4 Frequency characteristics of sensor voltage.

Fig.5 Vibration of sensor body.

3 静荷重センサの基本的特性

3.1 実験装置

試しに Fig.6 に示すように、センサ体を滑り止めシートに載せた状態で励振させ、センサ体を指の腹で押さえてみたところ、出力電圧は Fig.7 に示すように、

押さえる力に応じて減少することが確かめられた。そこで、センサ体に正確な荷重を印加するために Fig.8 に示す荷重印加装置を製作した。

この装置はシリンダ状のケースの下部にセンサ体の外周部分を単純支持し、内部に錘を入れられるような中空構造のピストンをシリンダに差し込むことによって加圧するものである。ピストンのセンサ体との接触部分には、荷重がセンサ体のセラミックス部分全体に均一にかかるように、厚さ 3mm のウレタン樹脂製のシートを貼った。以降ではこのシートをクッション材と称呼する。

なお、センサ体の共振周波数は温度によって 20～30Hz 程度変動するが、それ以上に実験装置のセッティングに敏感であり、圧電素子から出ている配線の取り回しやセンサ体のシリンダ内での配置によって 50Hz 程度変動する。そこで、実験に際してはセッティング

Fig.6 Finger press.

(a) Small load (b) Large load

Fig.7 Sensor voltage with finger press.

Fig.8 Structure of measuring device.

を調整して共振周波数が $6100\text{Hz} \pm 10\text{Hz}$ に収まるようにした。

3.2 センサ電圧を規定する因子

実験結果を Fig.9 に示す。Fig.3 に示したように、無荷重時には 30Vp-p 程度あったセンサ電圧は、無荷重の状態でもわずか 2g 程度のクッション材を載せただけで大きく低下し、そこから荷重を増加させてもそれ以上センサ電圧は下がらなかった。そこで、クッション材の径を指先大にして再度計測してみたところ、センサ電圧は無荷重時で 18Vp-p まで上昇したものの、荷重を増加させてもセンサ電圧の変化は認められなかった。

これらの結果より、センサ電圧は荷重そのものに依存しているのではなく、センサ体とクッション材との接触面積に依存しているのではないかと考えられる。

そこで、Fig.10 に示すように直径の異なる種々のクッション材を用いて同様の実験を行った。その結果を Fig.11 に示す。図より、センサ電圧の荷重による変化は乏しく、同一荷重でも接触面積が変化することでセンサ電圧が変化することから、センサ電圧は接触面積にほぼ規定されることが判明した。センサ体を指の腹で押さえた時に Fig.7 で示したようにセンサ電圧が低下したのは、加圧によって指の腹とセンサ体との接触面積が増加したことによるものと考えられる。

Fig.9 Relation between weight and sensor voltage.

Fig.10 Various size of urethane cushion.

Fig.11 Sensor voltage with different size of cushion.

元尾ら[9]や工藤[16]は、本研究と同様のバイモルフ型センサに一定の大きさの弾性体を介して外力を加えるとき、センサ体をその1次モードで励振した場合には、センサ電圧はわずかな荷重で速やかに低下する高感度領域を経て、それ以降は荷重の増加に関わらずほぼ一定の値を示す低感度領域に移ることを明らかにしている。さらに工藤は、弾性体の剛性によってその一定値が異なることを明らかにしている。Fig.9とFig.11の結果はこれらのことと符合し、クッション材をセンサ体に載せた時点でセンサ電圧特性は低感度領域に推移していると考えられる。また、弾性体であるクッション材の大きさの違いが、剛性の違いに相当するものと考えられる。

3.3 荷重印加時の振動特性

Fig.11の結果を裏付けるために、Fig.10に示したφ7, φ11, φ14mmのクッション材を用いて、異なる静荷重に対するセンサ体の振動を計測した。センサ体を荷重印加装置にセットして駆動用素子を正弦波加振した状態で荷重を印加し、レーザ光をセンサ体の鉛直下方より照射して、2.4節と同様にセンサ体の直径に沿ってスキャンさせた。

計測結果をFig.12に示す。いずれの径においても、印加荷重が異なってもセンサ体の振動変位はほとんど変化せず、径、すなわち接触面積に応じて振動変位が変化することが確かめられた。

3.4 静荷重検出の原理

Fig.11の結果は、センサ体にクッション材が密着することでセンサ体の機械的インピーダンスが変化したことによるものと考えられる。

そこで、センサ体を荷重印加装置に設置して、φ5, φ9, φ13mmのクッション材を当てた状態で、2.3節と同様にセンサ電圧の周波数特性を調査した。

実験結果をFig.13に示す。当初は共振周波数が変化し、駆動周波数6100Hzにおけるセンサ電圧が、その周波数特性のピーク値ではなく、裾野の部分の電圧値に低下することが主因であると推測したが、共振周波数の変化は比較的軽微である。その一方で、接触面積に応じて共振のダンピングが顕著になり、ピーク電圧値そのものが大きく低下することが確認できた。これが接触面積の増加によるセンサ電圧低下の主因であると考えられる。

Fig.14は、Fig.11の各径におけるセンサ電圧の平均値と接触面積との関係求めたものである。センサ電圧が接触面積にほぼ逆比例していることがわかる。したがって、荷重の増加に応じて接触面積が徐々に増加するような形状をクッション材に持たせることができれば、荷重の増加に応じてセンサ電圧が徐々に低下する特性が実現でき、そのようなセンサ電圧特性に基づく静荷重計測が期待できる。これが静荷重検出の着想を基に、クッション材によるセンサ体振動のダンピング特性を利用した静荷重検出の原理となる。

Fig.12 Vibration of sensor body with various cushion size.

Fig.13 Frequency characteristics of sensor voltage.

Fig.14 Relation between contact area and sensor voltage.

4 センサ電圧特性の制御

4.1 クッション材の形状による制御

3.4 節で示唆したセンサ電圧特性を実現するために、Fig.15 に示すような階段状の円柱突起をもつクッション材を製作して、荷重とセンサ電圧との関係を調査した。当初は円錐形状を考えたが、手持ちの工作機械での製作が難しかったため、階段の幅や高さを変えることで種々の円錐形状を疑似的に再現することにした。これらは厚手のアクリル板に NC フライス盤を用いて型を加工し、それに造形用ウレタン樹脂を流し込んで製作した。この樹脂は硬化後にゲル状の粘弾性を持つようになる。なお、荷重に対する接触面積の変化はクッション材の粘弾性とポアソン効果により、クッション材の形状どおりに階段状に離散的に変化するわけではなく、ほぼ連続的に変化する。このことは、平ガラス面に階段形状のクッション材を押し当てて確認しており、先端の段が接触した状態で荷重を増やしていくと、段が潰れて半径方向に膨らむため、次の段がガラス面に接触する以前から接触面積が徐々に大きくなり、接触面積は次の段にほぼ連続的に変化的に変化することが観察された。

実験結果を Fig.16 に示す。いずれの場合も予想した通り、荷重の増加に応じてセンサ電圧が減少することが確かめられた。階段の傾斜が急な①では、荷重の増加に対するセンサ電圧の減少率が小さく、相対的に大きな荷重まで対応できる。それとは対照的に、階段の傾斜が緩やかな③では、荷重の増加に対するセンサ電圧の減少率が大きいため、センサとしての感度は良いものの、対応できる荷重の範囲は相対的に小さい。また、円錐形状を疑似的に階段形状に置き換えたためか、②と③ではセンサ電圧特性に若干の段付きが認められ

る。また、荷重がおおよそ 200~250g 以上の領域では、クッション材はほぼ潰れてセンサ体全体を覆っており、非常に緩慢ではあるが、荷重の増加と共にセンサ電圧が漸減していることが確認できた。これは圧電振動型のセンサの低感度領域の挙動に相当するものと考えられる。

なお、計測は荷重の昇順と減順の両方向で行ったが、荷重に対するセンサ電圧の再現性が良好で、ヒステリシスはほとんど確認できなかった。

以上のように、階段の形状を調整することで、荷重に対するセンサ電圧の変化率を調整できることが確かめられた。ただし、いずれの場合も減少の様態は単調減少ではあるもののリニアではなく、荷重の増加とともにセンサ電圧の変化率は鈍っていく。センサ電圧の変化率はセンサ体とクッション材との接触面積の変化率に依るため、荷重が小さい範囲では接触面積の変

(a) Appearance

(b) Cross section of half part

Fig.15 Stepwise cushion material.

Fig.16 Relation between weight and sensor voltage.

化率を抑え、荷重が増加すると接触面積の変化が大きくなるような形状をクッション材に持たせれば、センサ電圧特性をよりリニアにすることが期待できる。その一例として Fig.17 に示す形状のクッション材を製作し、荷重とセンサ電圧との関係を調査した。

実験結果を Fig.18 に示す。荷重が 200g までの範囲では、センサ電圧を Fig.16 の結果に比較してよりリニアな特性にすることができた。クッション材の形状にさらに検討を加えることにより、さらにリニアなセンサ電圧特性が得られれば、未知の荷重 W に対するセンサ電圧 v_s から簡単な 1 次式を用いて W を求めることが可能となる。

ところで、Fig.18 からはセンサ電圧特性には 200g 付近に認められる折点を境として 2 つの異なるモードが存在すると思われる。すなわち、荷重が 200g 以下の範囲ではセンサ電圧は接触面積に依存しているが、電圧がほぼ下がってきた 200g 以降では、前述のようにクッション材はほぼ潰れてセンサ体全体を覆っており、センサ電圧は荷重に応じて漸減している。本報では、無荷重時における高いセンサ電圧からのダイナミックレンジを有効活用するために、センサ電圧が接触面積に依存するモードに対してのみ検討を加えることとする。

4.2 クッション材の剛性による制御

前節に示した種々のクッション材によって計測できる荷重の範囲は、クッション材が変形してセンサ体を全て覆う状態になるまでの荷重に相当すると考えられる。Fig.16 において③が①に比べて荷重の計測範囲が狭いのは、階段の傾斜が緩やかであることによるが、このようなクッション材でも材質自体の剛性が高ければ、荷重計測範囲を広げることが可能になると予想できる。すなわち、クッション材の剛性を調整することにより、荷重による接触面積の変化量を調整することを介して荷重計測範囲を調整するというアイデアである。

そこで、前節に示した 4 種類のクッション材のそれぞれに対して、同一の形状でより剛性の大きなクッション材を新たに 2 種類ずつ製作して、荷重とセンサ電圧との関係を調査した。

クッション材④に対する実験結果を Fig.19 に示す。どの形状のクッション材でも、剛性が大きければ荷重によるセンサ電圧の変化が小さく、より大きな荷重範囲を計測できることが確かめられた。また、同一形状のクッション材に対して、剛性の異なる 3 種類のセン

サ電圧特性の荷重のスケールを適宜変えると、いずれの形状においても 3 本のセンサ電圧特性が重なることも確認できた。

このように、クッション材の剛性を変えることにより計測荷重の範囲を調整できるため、本センサの実用化にあたっては、センサ電圧特性をリニア化できるようなクッション材の形状を 1 つ決定すれば、様々な計測範囲をもったセンサを容易に製作することができると言える。

なお、造形用ウレタン樹脂には剛性に関する厳密な情報が提供されていないため、丸棒を造形してヤング率を計測したところ、それぞれ、0.010MPa, 0.046 MPa, 0.112 MPa であった。これらは Fig.19 中の Rigidity でそれぞれ low, medium, high と記している。

(a) Appearance (b) Cross section
Fig.17 Mountain shaped cushion material.

Fig.18 Linearized characteristics of sensor voltage.

Fig.19 Sensor voltage with different rigidity of cushion.

5 荷重センサの評価

5.1 荷重表示デバイスの製作

ここまでは、正弦波交流状のセンサ電圧はオシロスコープを用いてその電圧振幅を読み取っている。静荷重の推定にあたっては、読み取った振幅値を Fig.16 や Fig.18 などを用いて荷重に換算することになるが煩雑である。この過程を簡便に行うため、Fig.20 に示すような荷重表示デバイスを製作した。

これは、汎用オペアンプを利用したピークホールド回路によってセンサ電圧を振幅値の直流信号に変換し、マイコンボードでその値を A/D 変換した後、センサ電圧特性に基づいてセンサ電圧から荷重への変換を行う。そして、求められた荷重値を OLED ディスプレイで直読できるようにするものである。

なお、センサ電圧特性、すなわち荷重とセンサ電圧との関係は、センサ単体としてはリニアであることが望ましいが、この表示デバイスを用いれば、これらの関係はマイコン内部でプログラムによって子細にマッピングできるため、必ずしもリニアである必要はないことに注意されたい。

Fig.20 Visualization scheme of estimated static load.

5.2 静荷重センサの精度評価

静荷重センサの計測精度を評価するにあたっては、センサ電圧特性がリニアとなる形状をもつクッション材を使用することが望ましい。現状では Fig.17 に示したクッション材が最も線形性が良いが、Fig.18 に示した特性を用いた場合、Fig.21 に示すように線形近似誤差がそのまま計測誤差として表れてしまう。このときの誤差は最大で 21g であり、センサとしては満足できる精度が得られているとは言い難い。

そこで、前節でも述べたように、センサ電圧特性が荷重表示デバイスのマイコン内部でマッピングできることを利用して、センサ電圧特性を線形近似することなく、計測精度の評価を試みた。使用するセンサ電圧特性は Fig.18 のもので、荷重は 16g おきに 196g まで 13 点の値を用いてマッピングを行った。

実験結果を Fig.22 に示す。推定はマッピングに用いた 13 種類の荷重を順不同で無負荷の状態から印加することを、同一荷重に対して 20 回、計 260 回行い、値のばらつきを調査した。50g 前後の荷重域においては最大で 15g ほどの推定誤差が認められる。この部分ではクッション材が階段状であるためにセンサ体との接触面積が不連続に変化して、同一荷重に対するセンサ電圧の再現性が損なわれたためであると考えられる。この問題は、クッション材の形状を滑らかな円錐状に加工することで解決できると思われる。この部分を除けば、推定した荷重は図中の点線近傍に分布しており、推定がまずまず正しく行われていることがわかる。4.1 節で述べたように、本センサのセンサ電圧の再現性が良好であることが改めて確認できた。

Fig.21 Regression line for accuracy evaluation.

Fig.22 Accuracy evaluation of static load sensor.

6 結言

本研究では、圧電セラミックスの正逆圧電効果を利用した静荷重計測の可能性について検討を加えた。センサ出力に影響を与える要件を調査し、その要件を活用してセンサ出力と荷重との関係をコントロールする方法を検討した。さらに、静荷重センサとしての測定精度を評価した。得られた結果を要約すると以下のようになる。

- (1) センサ体に弾性体のクッション材を介して荷重を加える場合、センサ体の振動は荷重の大きさではなく、センサ体と接触するクッション材の面積に応じてダンピングを受ける。すなわち、センサ電圧はクッション材の面積に規定される。
- (2) 荷重に応じて接触面積が変化するような形状をもつクッション材を導入することにより、センサ電圧を荷重に規定される特性に調整することができる。
- (3) クッション材の剛性を調整し、荷重による接触面積の変化量を調整することで、荷重計測範囲を調整することができる。
- (4) センサ電圧の再現性が高いため、センサ電圧特性のマッピングが正確に実施できれば高精度な静荷重計測が可能である。

以上の結果から、今後の課題としては以下のように考えられる。

- (1) クッション材の形状にさらなる検討を加えて、よりリニアなセンサ電圧特性を追及することにより、マッピングに頼らない静荷重計測を実施する。
- (2) 現状ではクッション材にかなりの厚みがあるため、センサ体自体の薄板形状のメリットが活かされていない。そこで、クッション材の材質にも検討を加え、より薄型のクッション材を開発することで、センサ全体の薄型化を実現する。
- (3) センサ体の振動がクッション材によってダンピングされる微視的なメカニズムを解明する。

以上の課題は、クッション材の形状と材質に関するものであるが、いずれもセンサ体との接触状態が重要な鍵となる。そこで、今後はトライボロジーの知見を活用してセンサ構造の最適化を図り、静荷重センサとしての完成度を高めていきたい。

参考文献

- [1] 古谷, 圧電効果を用いたセンサ, 計測と制御, Vol.45, No.4, pp.296-301, 2006.
- [2] 東京センサ, PIEZO FILM PRODUCT INFORMATION, 東京センサ, pp.2-7, 2001.
- [3] 高岡, 坂口, 森田, 山田, 山口, 圧電素子を用いた電子部品実装装置用力センサの開発, 精密工学会誌, Vol.63, No.5, pp.664-668, 1997.
- [4] 田中, 松瀬, 深海, 弾性非線形性を利用した圧電セラミックアクチュエータの発生圧力センシング, 日本 AEM 学会誌, Vol.10, No.3, pp.320-327, 2002.
- [5] 島田, 木本, 圧力測定のための複合型センサの提案, 電気学会研究会資料 IM, 計測研究会, No.69, pp.21-24, 2010.
- [6] 堅持, 井上, 圧電セラミックスを利用した荷重計測システムの開発, 電子情報通信学会論文誌 C, Vol.J87-C, No.8, pp.660-661, 2004.
- [7] Li X., Kan E., A wireless low-range pressure sensor based on P(VDF-TrFE) piezoelectric resonance, *Sensors and Actuators A:Physical*, Vol.163, No.2, pp.457-463, 2010.
- [8] 田中, 工藤, 遠藤, 深海, ピエゾ誘電効果を利用した力センサ: 準静的な感度を持つ荷重検出法, 電子情報通信学会技術研究報告. US, 超音波 Vol.103, No.167, pp.35-40, 2003.
- [9] 元尾, 新井, 福田, 構造の弾性・粘性変化を利用した圧電振動型触覚センサ, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.3, pp.408-415, 2006.
- [10] 松野, 島, 大島, 小柳, 本吉, 福田, 音叉型圧電振動センサの開発とロボット制御への応用, インテリジェントシステム・シンポジウム講演論文集 2011(21), 167-170, 2011.
- [11] 近藤, 西堀, 長澤, 超音波モータを指に持つロボットハンドの駆動特性: 第3報, 振動量による把持力検出と外乱の影響, 日本機械学会論文集 C, Vol.71, No.704, pp.1327-1333, 2005.
- [12] 大内, 長田, 河西, 圧電素子を利用した力センサの静特性の改善, 精密工学会誌, Vol.67, No.4, pp.683-687, 2001.
- [13] 渡辺, 岩崎, 松村, 江, 圧電振動子による凝着状態の推定と緩和に関する研究, 日本機械学会論文集 C, Vol.75, No.752, pp.964-969, 2009.
- [14] 新井, 元尾, 福田, 桂樹, マイクロピペット操作のための高感度マイクロ触覚センサ, 日本機械学会論文集 C, Vol.70, No.699, pp.3199-3205, 2004.
- [15] Du L., Kwon G., Aria F., Fukuda T., Itoigawa K., Tukahara Y., Structure design of micro touch sensor array, *Sensors and Actuators A*, Vol.107, pp.7-13, 2003.
- [16] Kudo S., Fundamental Study on Vibratory Tactile Sensor Using Piezoelectric Bimorph Resonator, *Proc. of Symposium on Ultrasonic Electronics*, Vol.31, pp.87-88, 2010.