

硬さ情報検出用高性能圧電振動型触覚センサの研究

石巻専修大学・理工学部・情報電子工学科
工藤すばる

1. まえがき

最近、圧電振動型の触覚センサを用いて対象物の硬さ軟らかさの情報を測定する研究が行われている。この触覚センサは、小型・軽量で *in vivo* 測定が可能である等の長所を有するため広く研究が行われている。これまで、縦振動子、音さ型振動子、片持棒振動子、平板のエッジモード等、種々の構造のものが提案されている。これらの触覚センサは、圧電振動子を対象物に接触させた時に、その接触インピーダンスが変化することにより、振動子の共振周波数や共振尖鋭度(Q 値)が変化する現象を利用している。しかし、触覚センサの測定精度等を評価するための標準試験片を入手するの困難な現状である。また、種々の構造・構成の触覚センサが提案されてはいるが、支持条件等に優れた高性能・高安定な触覚センサは得られていない。

本報告は、対象物の硬さ情報を検出するための新しい構造・構成の圧電振動型触覚センサの研究結果についてまとめたものである。まず、触覚センサの測定精度等を評価するための標準試験片について述べる。次いで、支持特性に優れた新しい構造の三脚音さ振動子を用いた触覚センサについて報告する。更に、周波数変化型力センサを一体化した高性能触覚センサについて提案する。

2. 触覚センサ用標準試験片の粘弾性特性[1]~[3]

本章では、触覚センサ用標準試験片の設計・試作を行うために有限要素法を用いて試験片の粘弾性特性を解析する手法について検討する。

2.1 試験片の粘弾性特性と物理モデル

図1は、シリコンゴム試験片(直径D=10mm, 厚さt=5mm)を電磁ソレノイドにより0.2mm(歪4%)押し込んだ時の実験結果である。この応力緩和特性を図2(a)に示す3要素Maxwellモデルで近似し、表1に示す各定数を算出した。なお、表中のヤング率E₀は共振法による別の実験結果から求めたものである。

2.2 有限要素法による粘弾性特性の解析

有限要素法を用いてシリコンゴム等の粘弾性特性を解析するためには、図2(b)の有限要素モデルに示すように体積成分とせん断成分に展開する必要がある。まず、物理モデルと有限要素法モデルの各定数の関係を求める。既に求められているように、図2(a)の3要素Maxwellモデルの緩和弾性率 E(t) は

$$E(t) = E_e + E_1 \exp(-t/T_{r1}) \quad (1)$$

で与えられる。また、図2(b)のモデルにおける単軸の緩和弾性率 E_F(t) は次式で求められる。

$$E_F(t) = \frac{9Ke(Ge + G_1)}{3Ke + Ge + G_1} \left[\frac{c}{a} + \left(1 - \frac{c}{a}\right) \exp(-at) \right] \quad (2)$$

ここに、

$$a = \frac{3Ke + Ge}{(3Ke + Ge + G_1)T_1}, \quad c = \frac{3Ge}{(Ge + G_1)T_1}$$

である。

従って、(1), (2)式が等しいとして

$$Ge = \frac{3KeE_e}{9Ke - E_e}, \quad T_1 = Tr_1 \left(1 - \frac{E_1}{9Ke - E_e}\right),$$

$$G_1 = \frac{27Ke^2 E_1}{[9Ke - (E_1 + E_e)](9Ke - E_e)} \quad (3)$$

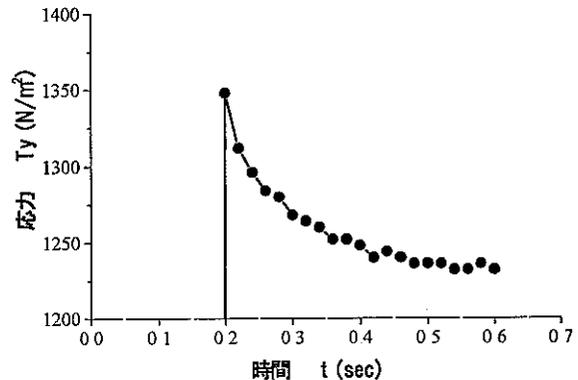


図1. 試作試験片の応力緩和特性の実験結果

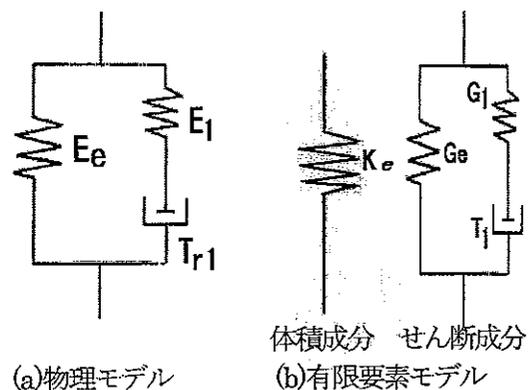


図2. 粘弾性モデル

表1. 試作試験片の材料定数

| | |
|---------------|---------------------|
| $E_e(N/m^2)$ | 3.08×10^4 |
| $E_1(N/m^2)$ | 0.261×10^4 |
| $T_{r1}(sec)$ | 0.0953 |
| $E_0(N/m^2)$ | 5.9×10^4 |

表2. 有限要素法解析のための各定数

| | |
|----------------|----------------------|
| $G_e(N/m^2)$ | 1.03×10^4 |
| $G_1(N/m^2)$ | 0.0877×10^4 |
| $T_1(sec)$ | 0.0953 |
| $K_e(N/m^2)$ | 9.83×10^5 |
| $\rho(kg/m^3)$ | 1020 |

が得られる。また、図2(b)の体積弾性率 K_e はヤング率を E_0 ポアソン比を σ として

$$K_e = \frac{E_0}{3(1-2\sigma)} \quad (4)$$

とした。

2.3 解析結果

2.3.1 解析モデルと境界条件

図3は解析に用いた有限要素モデルとその分割図である。ここでは、簡単のために軸対象モデルを使用した。解析はモデルの上部に強制変位 $U_{y0}=0.05 \sim 0.25mm$ (歪 1~5%)を与え、底部の境界条件はy方向変位のみ固定し、 $U_y=0, U_x=U_z \neq 0$ とした。なお、有限要素法解析はサイバネット社のANSYS(Ver.5.7)を用いて行った。

2.3.2 応力緩和特性

図4は、 $U_{y0}=0.2mm$ (歪 4%)一定の強制変位を与えた場合の応力の緩和特性の計算結果である。実験結果及び解析結果はよく一致しており本解析手法の妥当性が検証された。また、歪を1~5%まで変化させて計算を行ったが、応力と歪の比である弾性率に違いは見られなかった。

2.3.3 動的粘弾性特性

図5(a),(b)は、正弦波歪(歪振幅1%)に対する応力の周波数特性すなわち動的粘弾性特性の解析結果の一例で、それぞれ応力の振幅および歪と応力の位相差の周波数特性を示している。図中の実線は実験結果より求めた表1及び図2(a)のモデルを用いて計算した結果である。実験結果をもとに算出した特性と有限要素法により解析した値は一致しており、本試料の場合、応力は周波数10Hz以上で一定値となり、位相差は周波数2Hz程度で最大値 2.3° を示すことが明らかとなった。

2.4 むすび

本章では、試作したシリコンゴム試験片の粘弾性特性を有限要素法を用いて解析するための手法の検討を行った。解析結果は実験結果とよく一致することから本解析手法の妥当性が検証された。

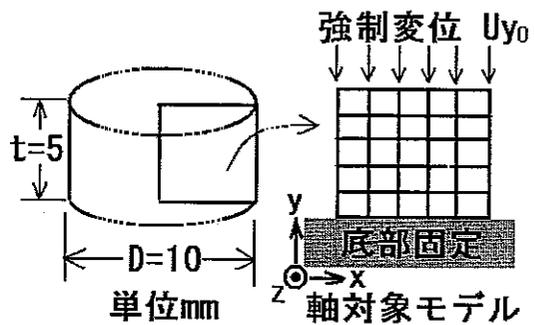


図3. 有限要素法解析モデル

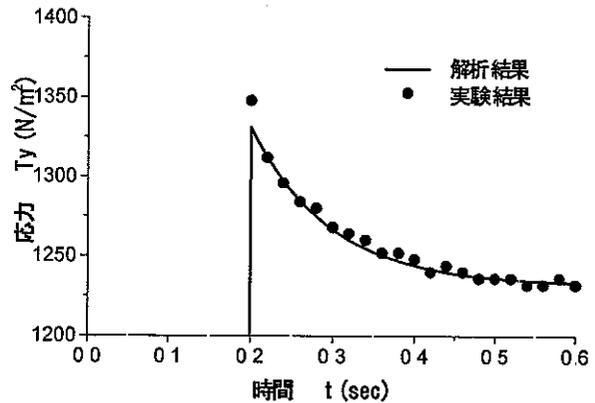
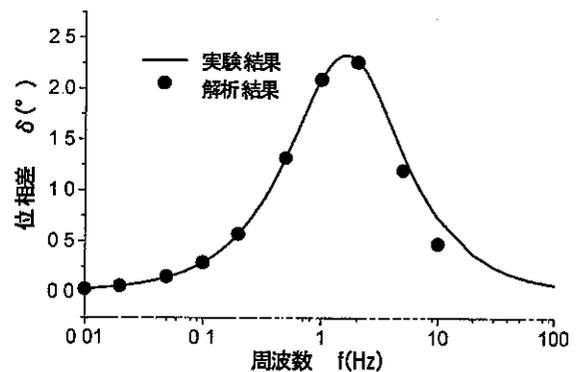
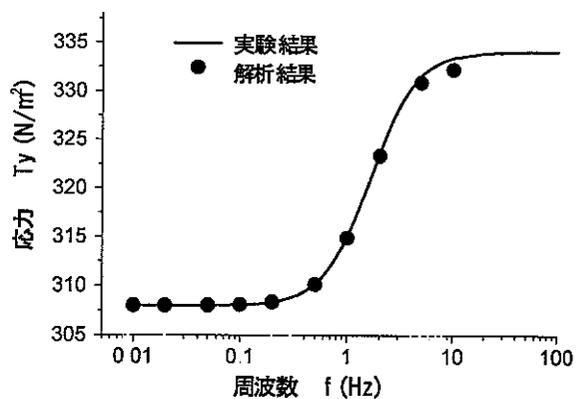


図4. 応力緩和特性の解析結果



(a) 応力の振幅特性



(b) 歪と応力の位相差特性

図5. 動的粘弾性特性の解析結果

3. 三脚音さ振動子を用いた触覚センサの提案[4]~[6]

本章では、支持特性に優れた三脚音さ振動子を用いた新しい構造の触覚センサについて検討する。まず、有限要素法解析により三脚音さ振動子の構造及び外形寸法を決定する。次いで、試作した振動子及び触覚センサとしての特性を実験的に検証する。

3.1 構造と振動モード

図6は、ここで考察の対象とする触覚センサ用三脚音さ振動子の外形図、また、図7(a)~(c)は触覚センサとしての構成例及び振動モードである。図7(b),(c)に示すように、三脚音さ振動子が横振動1次あるいは2次モードで振動している状態で、図7(a)のように対象物に接触させる。接触により接触部の音響インピーダンスが変化し、振動子の共振周波数及びQ値が変化するため触覚センサとして利用できる。

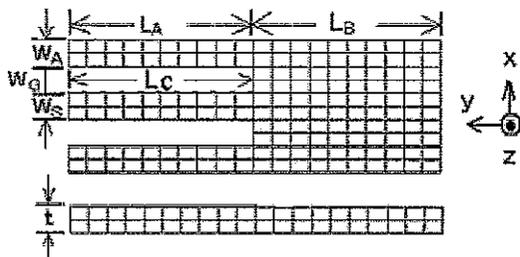
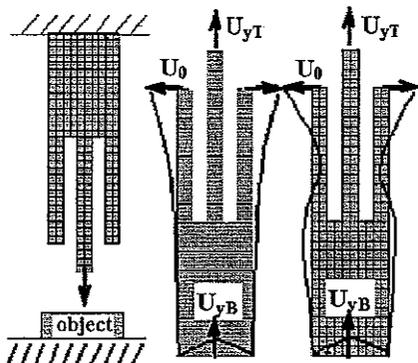


図6. 三脚音さ振動子



(a)構成 (b)1次モード (c)2次モード

図7 触覚センサの構成と振動モード

3.2 振動子の形状の検討

支持固定により振動子の特性が変化しない外形寸法を求めめるために有限要素法を用いて支持部振動変位の解析を行った。解析により求められた各部寸法の一例を表3、4(単位:mm)に示す。

表3. 1次モード利用三脚音さ振動子の各部寸法

| | | | |
|-------|----|-----------|---|
| L_A | 14 | $W_A=W_S$ | 2 |
| L_B | 8 | W_G | 1 |
| L_C | 16 | t | 2 |

表4. 2次モード利用三脚音さ振動子の各部寸法

| | | | |
|-------|------|---------|-----|
| L_A | 14 | W_A | 3.2 |
| L_B | 6.94 | W_G | 1 |
| L_C | 22 | $W_S=t$ | 2 |

3.3 振動子としての特性

実験に用いた試料は、ワイヤ放電加工機により試作した三脚音さ振動子(SUS304系)の外側アームの根元に圧電セラミックス($2 \times 2 \times 0.34 \text{mm}^3$ 又は $7 \times 2 \times 0.34 \text{mm}^3$, Nepec21)を接着して製作した。なお、振動子にはベース底部に支持固定部を設けてある。

表5は、横振動1次モード利用三脚音さ振動子の共振周波数及びQ値の実験結果である。共振周波数の解析結果と実験結果の差は2%程度でよく一致しているが、支持固定による共振周波数変化率に関しては、実験結果は解析結果の約10倍の値となり、Q値の低下も12%程度となった。一方、表6は、横振動2次モード利用三脚音さ振動子の実験結果である。解析結果と実験結果の共振周波数の差は1%以下であり、支持固定による影響は1次モード利用の場合と同程度の実験結果であった。次に、これら2種類の三脚音さ振動子を用いて触覚センサとしての特性の検討を行った。

表5. 1次モード利用三脚音さ振動子の実験結果

| | 自由 | 固定 | 変化率 |
|---------------------|---------|---------|--------------|
| 共振周波数(Hz) (解析結果) | 7124.88 | 7125.03 | 21(ppm) |
| 共振周波数(Hz) (実験結果) | 7238.0 | 7239.75 | 242 (ppm) |
| Q値(実験結果) | 2400 | 2100 | 12.5% |

表6. 2次モード利用三脚音さ振動子の実験結果

| | 自由 | 固定 | 変化率 |
|----------------------|--------|--------|--------------|
| 共振周波数(kHz) (解析結果) | 52.348 | 52.349 | 19 (ppm) |
| 共振周波数(kHz) (実験結果) | 52.183 | 52.173 | 192 (ppm) |
| Q値(実験結果) | 1400 | 1300 | 7.1% |

3.4 触覚センサとしての特性

3.4.1 1次モード利用の場合

図8、9は、1次モード利用三脚音さ振動子の触覚センサとしての特性例で、それぞれ荷重に対する共振周波数及びコンダクタンスの変化を示している。なお、実験に用いた標準ゴム試験片A型($40 \times 80 \times 12 \text{mm}^3$, 高分子計器製, A1, A2)のデュロメータ硬さはそれぞれ48, 75であった。荷重に対する共振周波数の変化量は、どちらの試験片においても0.5Hz(69ppm)以下であるが、コンダクタンス G_m は荷重によって図9のように変化し、硬い試験片(A2)ほど変化量は大きい結果が得られた。従って、一定荷重で振動子のコンダクタンスあるいは共振抵抗の変化量を測定することにより、対象物の硬さを測定できる可能性がある。

3.4.2 2次モード利用の場合

図10及び図11は、2次モード利用三脚音さ振動子

の触覚センサとしての特性の実験結果である。共振周波数($f_0/f_0=52.173\text{kHz}$)は、荷重に対して図10のように低下する。一定荷重時の共振周波数の低下量は軟らかい試験片(A1)ほど大きい。一方、振動子のQ値は図11に示すように対象物に接触すると半分程度に低下し、荷重を変えてもあまり変化せず試験片による差も見られなかった。従って、2次モード利用の場合は共振周波数の変化量を測定することにより対象物の硬さ軟らかさを測定できる可能性がある。

これらの実験結果の違いは、三脚音さ振動子の接触部の振動変位の違いによるものと考えられる。有限要素法の解析結果から、横振動1次モード利用の図7(b)の場合、 $U_{yT}/U_0 \approx 5 \times 10^{-3}$ であるのに対し、2次モード利用の図7(c)の場合 $U_{yT}/U_0 \approx -0.74$ であることがわかった。

3.5 むすび

本章では、三脚音さ振動子を用いた新しい構造の触覚センサを提案した。提案した三脚音さ振動子を有限要素法を用いて解析し、支持特性に優れた寸法形状の検討を行った。更に、試作した触覚センサの特性を実験的に検討し触覚センサとして使用できる可能性を示した。

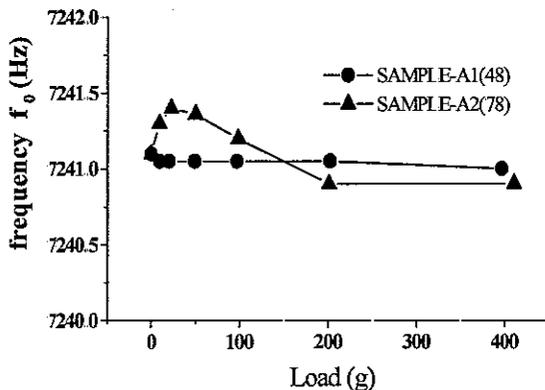


図8. 荷重に対する共振周波数の実験結果 (横振動1次モード利用の場合)

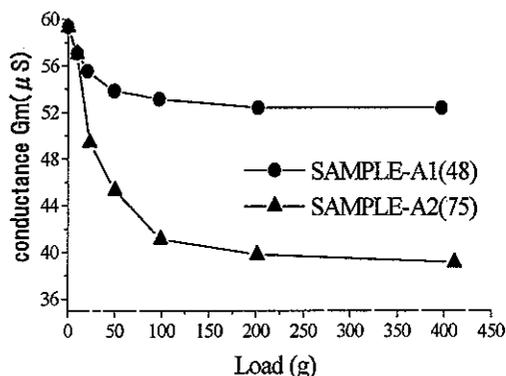


図9. 荷重に対するコンダクタンスの実験結果 (横振動1次モード利用の場合)

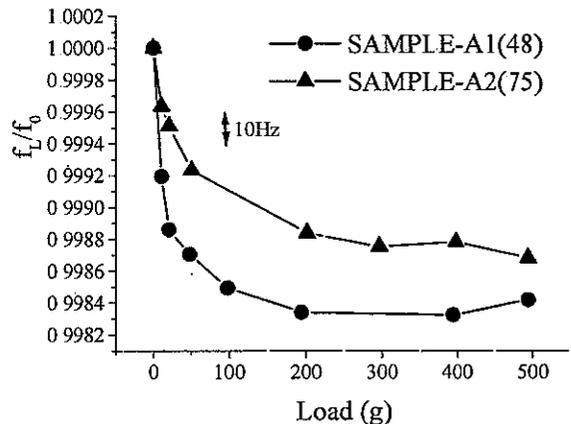


図10. 荷重に対する共振周波数変化の実験結果 (横振動2次モード利用の場合)

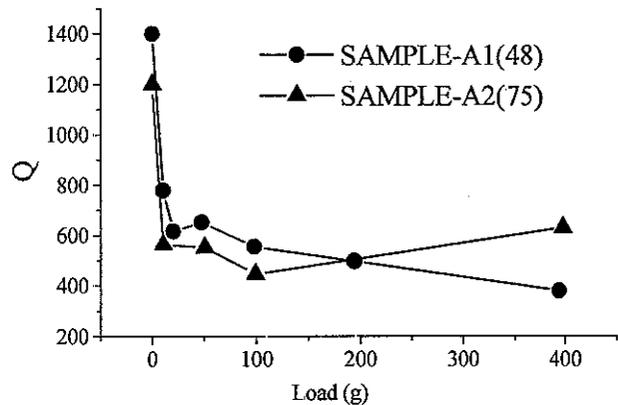


図11. 荷重に対するQ値の実験結果 (横振動2次モード利用の場合)

4. カセンサ一体化型触覚センサの検討[7],[8]

触覚センサの特性は、センサ先端部と対象物との接触力によって変化するため、通常、変位あるいは力を測定する別のセンサを併用するのが一般的である。本章では、周波数変化型のカセンサと触覚センサを一体化した高性能な触覚センサについて検討する。

4.1 構成

図12は、周波数変化型カセンサ一体型の縦振動子触覚センサの外形図、図13(a)~(c)はそれぞれ構成例、カセンサ及び触覚センサの振動モードである。図13(b)に示すように、ロ型振動子が横振動1次モードで振動している状態で図13(a)に示すように対象物に接触させると、その接触力により共振周波数が変化する。また、同図13(c)に示すように縦振動子が1次モードで振動している状態で対象物に接触させると、縦振動子先端との接触により共振周波数が変化するため触覚センサとして利用できる。なお、表7、8は以下の振動解析でを使用した外形寸法及び材料定数である。

表7. 振動子の外形寸法例(単位: mm)

| | | | |
|----|----|----|----|
| L | 55 | Wa | 可変 |
| La | 1 | Wb | 2 |
| Lb | 30 | Wc | 2 |
| Lc | 31 | T | 2 |

表8. 材料定数

| | |
|----------------|---|
| ヤング率E | 1.99×10^{11} (N/m ²) |
| ポアソン比 σ | 0.34 |
| 密度 ρ | 7.9×10^3 (kg/m ³) |

4.2 解析結果

4.2.1 支持固定による周波数変化率の解析結果

図14は、支持固定によるロ型振動子の周波数変化率の解析結果の一例である。アーム幅Waが小さい程振動子の共振周波数 f_0 は低下し支持固定の影響 $|\Delta f/f_0|$ は小さくなる。

4.2.2 カセンサとしての感度の解析結果

図15は、周波数変化型力センサの感度の解析結果である。感度は、アーム幅Waが小さくなるほど増加する。4.2.1及び4.2.2の解析結果並びに振動子の試作に用いる放電加工機の使用条件等を考慮して、アーム幅は $Wa=0.5\text{mm}$ とした。

4.3 実験結果

4.3.1 振動子としての実験結果

放電加工機により試作した振動子(SUS304系)の両アーム及び縦振動子の中央部に圧電セラミック(2mm×10mm×0.34mm, Nepec21)を接着し実験試料を作成した。表9(a), (b)は振動子としての実験結果の一例である。共振周波数 f_{free} , f_{clamp} の解析結果と実験結果の差はどちらの振動モードも3%前後である。また、支持固定による周波数変化率は、(a)横振動モードでは解析値968ppmに対し、実験値1251ppmでありQ値の低下も少ない。しかし、(b)縦振動モードにおいては解析値1ppm以下に対し、実験値359ppmと大きな差となりQ値も半分程度に低下した。

表9. 振動子としての実験結果

(a) 横振動モードの実験結果

| | f_{free} (Hz) | f_{clamp} (Hz) | Q_{free} | Q_{clamp} |
|------|------------------------|-------------------------|-------------------|--------------------|
| 解析結果 | 3099 | 3096 | | |
| 実験結果 | 3002 | 2999 | 273 | 240 |
| 差 | 3.23% | 3.23% | | |

(b) 縦振動モードの実験結果

| | f_{free} (kHz) | f_{clamp} (kHz) | Q_{free} | Q_{clamp} |
|------|-------------------------|--------------------------|-------------------|--------------------|
| 解析結果 | 81.174 | 81.174 | | |
| 実験結果 | 83.63 | 83.6 | 1115 | 668 |
| 差 | 2.93% | 2.90% | | |

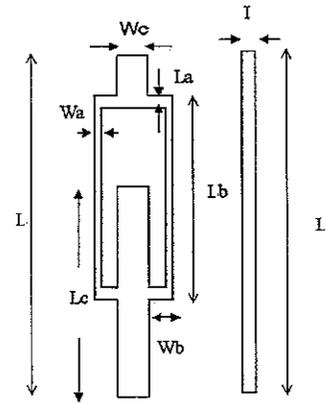


図12. カセンサ一体型触覚センサ

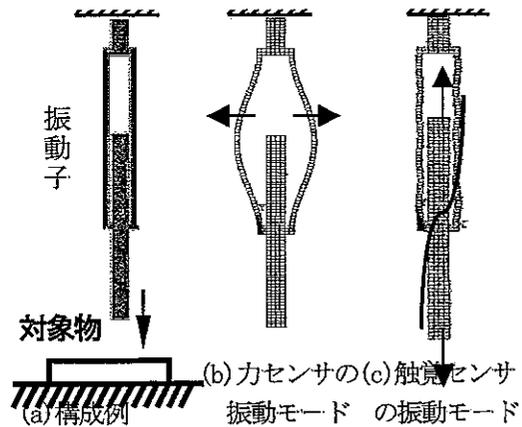


図13. 構造と振動モード

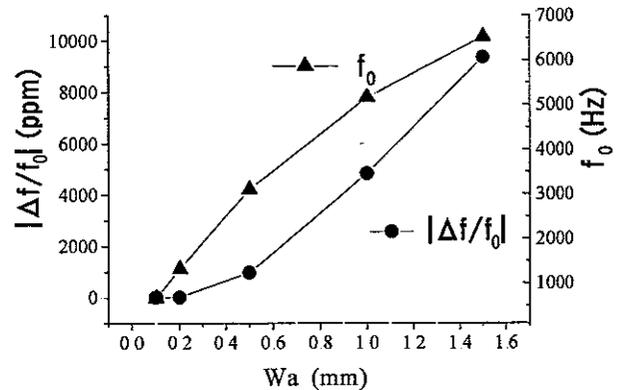


図14. 共振周波数変化率の解析結果

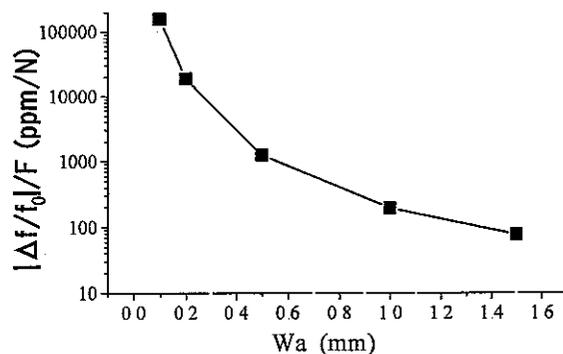


図15. カセンサの感度の解析結果

4.3.2 カセンサ及び触覚センサとしての特性

図16(a), (b)は、カセンサ及び触覚センサとしての特性の一例である。図16(a)に示すように横振動の共振周波数は荷重に対し直線的に減少する。カセンサとしての感度は実験から -643 [ppm/N]であり、有限要素法による解析結果 -1227 [ppm/N]と比べると約1/2の値であった。これは接着した圧電セラミックによりアームの実効的な厚さが増加したためである。一方、図16(b)は、縦振動子の先端に対象物を接触させた場合の共振周波数変化を測定したものである。ここでは、対象物として高分子計器(株)製の標準ゴム試験片(Sample 1, 2)を用いた。なお、この試験片のデュロメータ硬さは、それぞれ48(Sample1), 75(Sample2)であった。図16(b)に示すように、荷重を加えることにより縦振動子の共振周波数は減少し、その変化量は軟らかい(Sample1)ものほど大きくなること明らかとなり触覚センサとして動作することを確認した。

4.4 むすび

本章では、提案した周波数変化型力センサを一体化した縦振動子触覚センサを有限要素法を用いて振動解析を行うとともに、カセンサの感度の解析を行った。また、試作した触覚センサについて実験的検討を行いその特性を明らかにした。

5. まとめ

触覚センサは、対象物の硬さ軟らかさの情報を検出するセンサであり、(1)一般産業用としてゴムやプラスチックの品質管理や食品の品質管理への応用、(2)医療用として肌の弾力や歯の硬さの測定、また、乳がんや肝臓がん等の生体情報計測用として、その実用化が期待されている。本研究では、新しい構造・構成の高性能な圧電振動型触覚センサを開発するために、コンピュータシミュレーション技術を用いてその実用化の可能性を検討した。

以下に本研究で得られた成果を要約する。

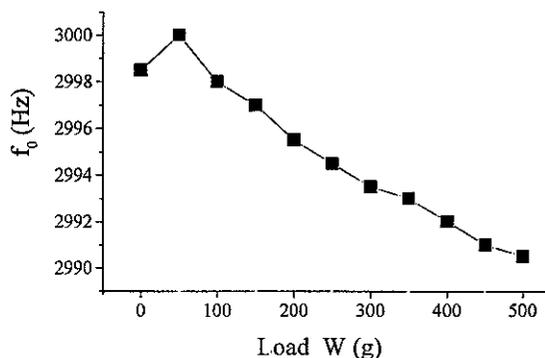
- (1) 触覚センサの精度等を評価するための試験片の粘弾性特性をシミュレーションするための手法を明らかにした。本手法を用いることで、試験片の特性の外形寸法依存性等を知ることができる。
- (2) 支持構造に優れた三脚音さ振動子を用いた新しい構造の触覚センサを提案し、実験的に検証した。この触覚センサは、横振動1次及び2次モードで駆動が可能であり、接触部の振動振幅の違いから触覚センサとしての特性は異なることが明らかとなった。
- (3) カセンサを一体化した高性能な触覚センサを提案し、実験的にも検証した。このカセンサ及び触覚センサは、出力は周波数変化型であるのでデジタル処理に適しているという利点を有している。

本研究で得られた圧電振動型触覚センサの高性能化

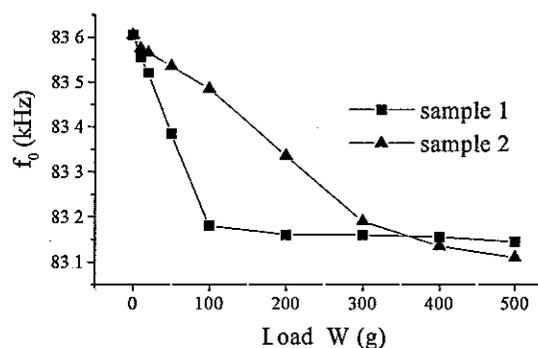
に関する研究成果は、高感度高安定な触覚センサを開発するために役立つものと考えられる。

謝 辞

本研究を行うにあたり触覚センサについて種々御討論いただいた、仙台電波高専青柳良二助教授ならびに(株)アクシム吉田哲男所長に感謝申し上げます。また、振動しに関して御助言いただいた石巻専修大学理工学部若月昇教授並びに菅原澄夫教授に感謝いたします。



(a) カセンサとしての特性例



(b) 触覚センサとしての特性例

図16. カセンサ及び触覚センサの実験結果

文 献

- [1] 工藤他, "触覚センサ用粘弾性試験片の有限要素シミュレーション," 音響学会講論集, No.3-P-14, pp.1089-1090(2003.9).
- [2] S.Kudo et al, "Finite Element Analysis of Viscoelasticity of Test Pieces for Tactile Sensor," Jpn.J Appl.Phys, 43, Part1, No.5B, pp.3045-3046(2004).
- [3] 工藤他, "触覚センサ用試験片とその粘弾性特性の有限要素法解析," 超音波テクノ, Vol.16, No.3, pp.94-97(2004.5-6).
- [4] 工藤, "触覚センサ用三脚音さ振動子の一考察," 音響学会講論集, No.2-Q-25, pp.1051-1052(2004.3).
- [5] S.Kudo, "Finite Element Analysis of Trident Type Tuning Fork Resonator Used as Tactile Sensor", Proc. ICA2004, pp.1-651-652 (April, 2004)
- [6] 工藤, "三脚音さ振動子を用いた触覚センサの構成の検討," 音響学会講論集, No.2-9-15, pp.1207-1208(2004.9).
- [7] 工藤, "周波数変化型力センサを一体化した縦振動子触覚センサの振動解析と実験的検討", 第21回誘電体応用会議論文集, pp.197-198.(2004.5)
- [8] 工藤, "周波数変化型力センサを一体化した縦振動子触覚センサの基礎検討," 信学技法, No.US2004-49, pp.7-12(2004.9).