

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560426

研究課題名（和文） 触覚センサを用いた食品の物性値測定に関する研究

研究課題名（英文） The study of vibratory tactile sensor for measuring the physical characteristics of foods

研究代表者

工藤 すばる（KUDO SUBARU）

石巻専修大学・理工学部・教授

研究者番号：20214968

研究成果の概要：圧電振動型触覚センサの感度の設計指針を明らかにするために、感度に相当する周波数変化率の近似式を算出し、感度向上の指針を示した。また、触覚センサ用振動子の形状をホーン型にすることで感度の向上が計れることを有限要素法により明らかにした。次に、食品の物性値を簡便に測定するための実験及び解析環境を整えるために、試験片を用いて弾性及び粘弾性特性の測定手法について検討を行った。更に、圧電バイモルフ振動子を用いた新しい構成・検出法の触覚センサを提案した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	800,000	240,000	1,040,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,300,000	390,000	1,690,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：触覚センサ，硬さ測定，振動子，感度，周波数変化率，食品，粘弾性特性，圧電バイモルフ

## 1. 研究開始当初の背景

最近、高齢者用特別用途食品の規格として、硬さと粘度の物性測定値が採用された。今後、食品の安全性や品質管理のためにもその物性値測定は更に重要性を増すと考えられる。現在、食品の物性値測定には高額で高性能な総合物性測定装置（テクスチャー測定器）が使用されており、安価で使いやすい測定器がない状況である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、圧電振動型触覚センサの設計の体系化を行うとともに、食品の物性値

測定に関する基礎的事項を明らかにし、触覚センサの適用の可能性について検討することである。具体的には以下の内容の研究を計画している。

## 3. 研究の方法

## (1) 圧電振動型触覚センサの感度の研究

圧電振動型触覚センサを等価電気機械回路として取り扱い、等価回路解析により感度の近似式を導出する。更に、有限要素シミュレーション技術を用いて振動子の素子設計を行う。

## (2) 物性値測定のための実験及び解析環境の

整備

食品の物性値を簡便に測定するための環境を整えるために、試験片を用いてその弾性及び粘弾性特性の測定手法を実験的に検討する。更に、有限要素法を用いた解析手法について実験結果との比較検討を行う。

(3)新しい構成・構造の触覚センサの提案

定電圧・定周波数で振動子を駆動し、対象物との接触により検出電圧の振幅と位相の変化量から硬さの測定を行う新しい構成の触覚センサの可能性を実験的に検証する。

4. 研究成果

(1) 圧電振動型触覚センサの感度の設計指針

①感度の近似式

振動子の共振角周波数  $\omega_0$  は、その等価質量を  $m_0$  等価スチフネスを  $s$  として  $\omega_0^2 = s/m_0$  と与えられる。いま、振動子先端が軟らかい対象物と接触した場合を考える。この場合、振動子の共振角周波数変化は、近似的に負荷質量効果によるものと考えられるため、負荷質量を  $m_e$  とすると、共振角周波数  $\omega$  は  $\omega^2 = s/(m_0+m_e)$  となる。従って、周波数変化率は

$$\frac{f}{f_0} = \left(1 + \frac{m_e}{m_0}\right)^{-1/2} \quad (1)$$

と与えられ、負荷質量が振動子の等価質量に比べて十分に小さく、 $1 \gg m_e/m_0$  と近似できる場合、 $\Delta f = f - f_0$ 、等価質量係数  $\delta = m_e/M_0$  ( $M_0$ :全質量)として

$$\frac{\Delta f}{f_0} \cong -\frac{m_e}{2m_0} = -\frac{m_e}{2\delta M_0} \quad (2)$$

となる。

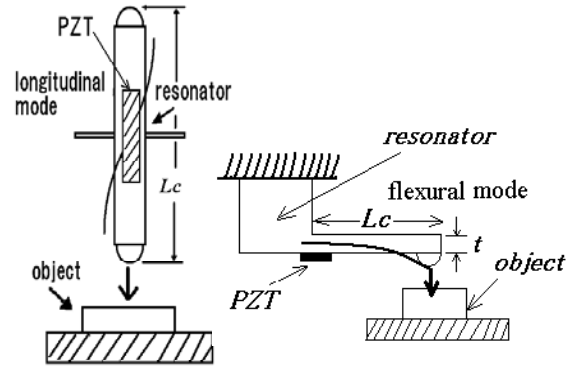
従って、触覚センサの感度に相当する周波数変化率は、等価質量すなわち振動子の質量に反比例する特性を示す。感度を大きくしたい場合、振動子の等価質量を小さくする必要があり、全質量が等しい場合は、等価質量係数  $\delta$  の小さい振動子形状とすることが要求される。

②触覚センサの構成例

図1 (a), (b)は、実験で使用した触覚センサの一例で、それぞれ縦振動子及び横振動片持ち棒を用いた場合である。振動子先端には接触子として半径 1mmの半球 (SUJ-2) が取り付けられている。また、試作した触覚センサの外形寸法を表1に示す。なお、触覚センサとしての特性評価は、表2に示す特性を持つゴム硬度測定用試験片 (柃アクシム製、低硬度タイプ:S1~S3、直径  $D=44\text{mm}$ 、厚さ  $t=10\text{mm}$ )を用いて行った。

③感度の実験結果の一例

図2は、縦振動子を用いた触覚センサの実



(a) 縦振動型 (b) 横振動型  
図1. 触覚センサの構成例

表1. 振動子の外形寸法 (mm).

(a) 縦振動子		
Length : Lc	Width : W	Thickness : t
Composite type	2.0	2.0
18, 25, 33, 50		
PZT type	2.0	0.9
11.3, 16.5, 21		
(b) 横振動片持ち棒		
Arm Length : Lc	Width : W	Thickness : t
11, 18, 25, 33	2.0	0.5, 1.0, 1.5, 2.0

表2. 試験片の材料定数1

Type	S1	S2	S3
Young's modulus(Mpa)	0.04	0.06	0.15
Density(kg/m <sup>3</sup> )	1045	1080	1100

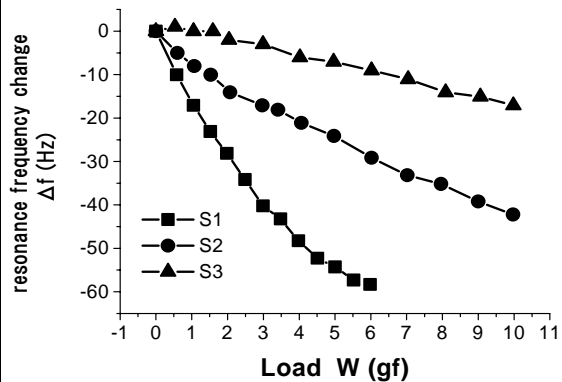


図2. 縦振動子を用いた触覚センサの実験結果の一例 ( $L_c=50\text{mm}$ ,  $f_0=51.55\text{kHz}$ )

験結果の一例である。振動子を対象物に接触させ荷重  $W$  を印加すると、共振周波数は負荷質量効果によって低下する。図中の周波数変化量  $\Delta f (=f_L - f_0)$  は、荷重印加時の共振周波数  $f_L$  と無負荷時の共振周波数  $f_0$  の差と

して示している。振動子の共振周波数は、荷重とともに低下し、ヤング率が小さく軟らかい試験片ほど周波数の低下量は大きくなる。これは、荷重とともに振動子と対象物との接触面積すなわち接触インピーダンスが増すためであり、同一荷重ではヤング率の小さい試験片ほど接触面積が大きいためである。

図3は、縦振動子の質量と触覚センサの周波数変化率すなわち感度の関係をまとめたものである。触覚センサの感度は(2)式で示されるように振動子の質量に反比例することが明らかとなった。従って、縦振動子触覚センサの感度を大きくするためには、質量を小さくし等価質量係数が小さい振動子形状にする必要がある。

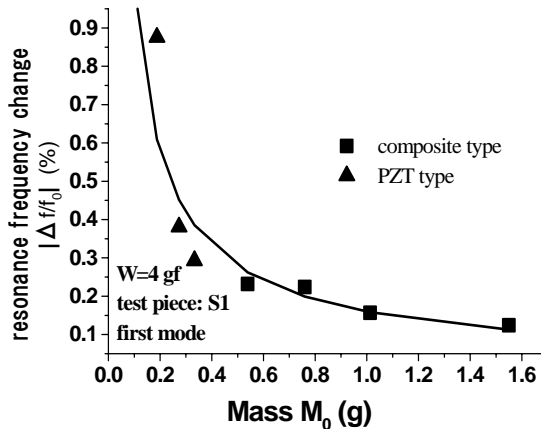


図3. 周波数変化率と振動子質量の関係 1

一方、図4、5は横振動片持ち棒を用いた触覚センサの実験結果である。縦振動子を用いた触覚センサと同様の結果が得られており、感度に相当する周波数変化率は、振動子の振動姿態によらずその等価質量に反比例することが明らかとなった。

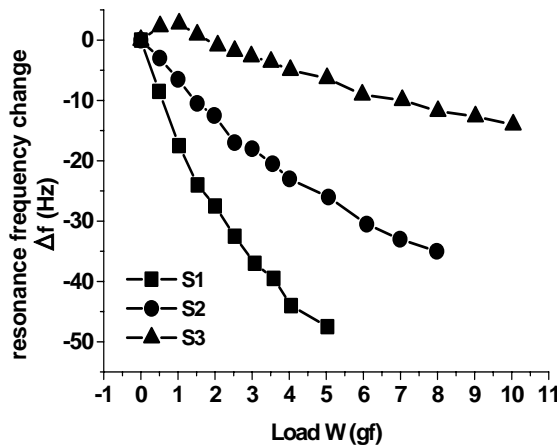


図4. 横振動片持ち棒を用いた触覚センサの実験結果の一例(Lc=11mm, f₀=5.094kHz)

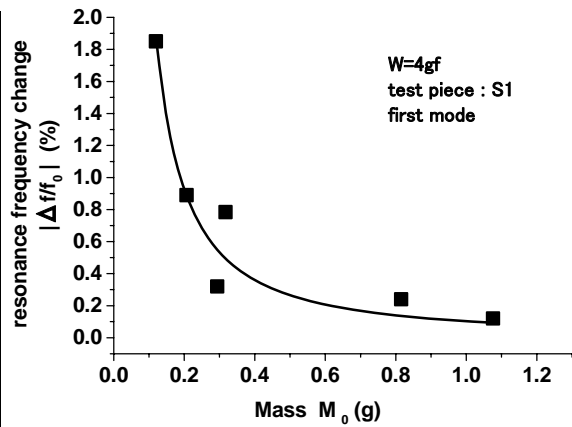


図5. 周波数変化率と振動子質量の関係 2

#### ④高感度化のための振動子形状の検討

縦振動子触覚センサの高感度化のために、図6(a), (b)に示すホーン型縦振動子について検討を行った。触覚センサの感度に相当する等価質量を求めるため、有限要素法を用いて、振動子先端に質量(Δm=0.49mg)を付加し、その共振周波数の変化量を計算した。表3は、図6(a)の構造の振動子の解析結果の一例である。W2=4mmの単純形状の縦振動子の場合、等価質量係数は細棒理論による値に近く、非対称構造になると先端の振動振幅が上下端で異なり、振動振幅の大きな所での等価質量係数は小さな値となった。一方、図7は、図6(b)の形状の縦振動子の等価質量の計算結果の一例である。等価質量の値は、振動子先端部の長さがLA=6mmの時に最も小さく、等価質量係数δも小さな値となった。従って、縦振動子の形状を変化させることにより、触覚センサの感度を向上できることが明らかとなった。

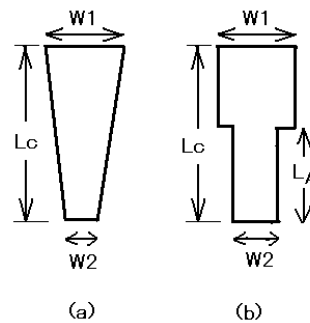


図6. ホーン型縦振動子  
表3. 等価質量の計算結果

(Lc=16mm, W1=4mm, t=2mm, ρ=7900kg/m³)			
W2 (mm)	4.0	2.0	1.0
Equivalent mass m₀ (g)	0.494	0.262	0.158
Total mass M₀ (g)	1.011	0.758	0.632
Equivalent mass coefficient δ	0.49	0.35	0.25

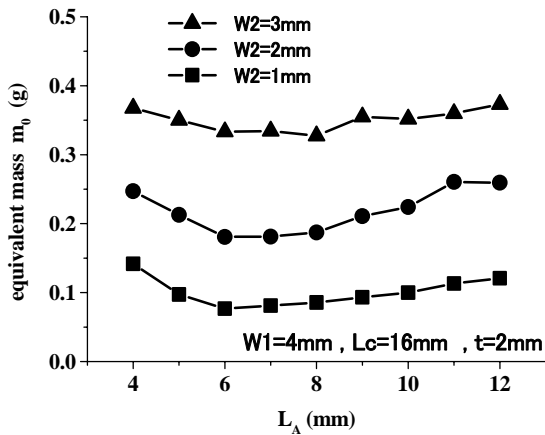


図7. 振動子の等価質量の計算結果

(2) 食品の物性値測定のための基礎検討

触覚センサを用いて、食品や食品素材の弾性及び粘弾性特性を測定するための基礎的事項を明らかにするために、試験片の弾性及び粘弾性特性の測定及び解析手法の検討を行った。

① 試験片の弾性特性

試験片の弾性特性は、島津製小型卓上試験機 EZTest を用いて測定した。図8は、異なる厚さの試験片(表2, S2相当)を一定量押込んだ時(押し込み速度  $v=10\text{mm}/\text{min}$ )の変位-荷重特性の実験結果の一例である。試験片の厚さにより異なる結果が得られたが、歪が10%程度以下では変位と荷重の関係は線形であることが明らかとなった。以下の実験では、試験片の歪が5%以下になる押し込み変位で行なった。

次に、試験片の弾性特性を解析するために、有限要素法による接触解析を行った。図9は、異なる厚さの試験片(S2)に対する変位-荷重特性の解析結果の一例である。図8に示す実験結果と同様の結果が得られており、一定値以上の荷重に対して押し込み変位は飽和する傾向を示した。これは、荷重が大きくなると試験片の下部の影響が現れるためと考えられる。

② 試験片の粘弾性特性

試験片の粘弾性特性の測定法を検討するために、変位荷重の印加速度  $v$  を変化させ実験を行った。図10は、試験片の応力緩和特性の実験結果の一例で、荷重範囲  $d/D \approx 0.32$  ( $d=14\text{mm}$ ) の場合である。ただし、実験装置の性能により印加速度を変化させると押し込み変位が変化するため、治具押し込み後一定時間 ( $t_0=100\text{sec}$ ) 後の変位と荷重の関係を最小2乗法により求めたところ、決定係数  $R^2=0.9956$  で直線近似できたため、 $t_0=100\text{sec}$  での荷重  $W_{100}$  で規格化して示した。図10に示すように、押し込み変位の印加速度により緩和特

性に違いが見られるため、3要素 Maxwell モデルで表した試験片の各定数の速度依存性を求めた。図11は、印加速度と弾性率の関係をもとめたものである。弾性率  $E_e$  は速度に対して減少し、 $E_1$  は増加する傾向を示した。また、 $v=500\text{mm}/\text{min}$  の場合、試験片の各定数の値は  $E_e=0.093\text{MPa}$  ,  $E_1=0.0218\text{MPa}$  ,  $\text{Tr}1=3.3\text{sec}$  と与えられた。

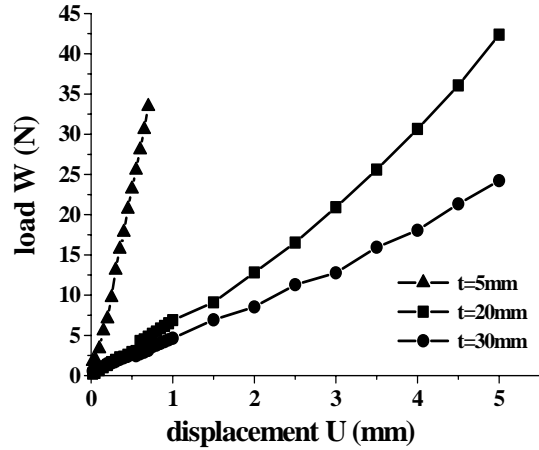


図8. 静的荷重と変位の実験結果

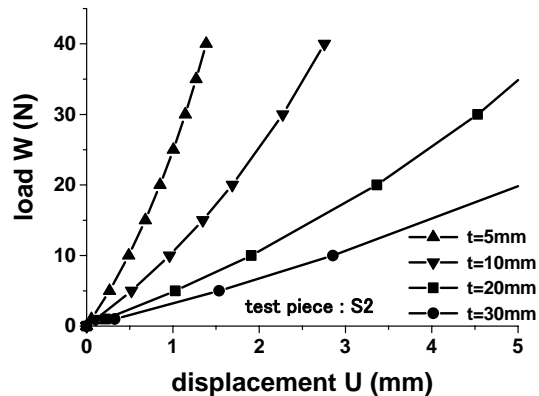


図9. 静的荷重と変位の解析結果

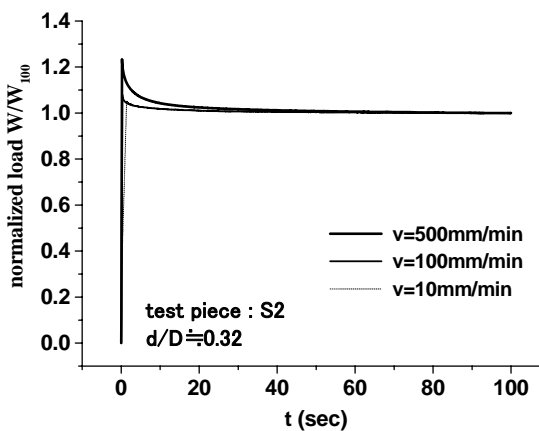


図10. 応力緩和特性の実験結果

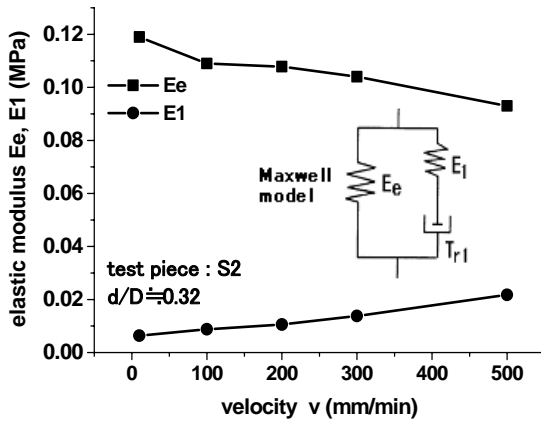


図 11. 弾性定数の印加速度特性

(3) 圧電バイモルフ振動子を用いた触覚センサの基礎検討

① 触覚センサの構成

図 12 は、圧電バイモルフ振動子を用いた触覚センサの構成例である。触覚センサは、薄い板の両面に圧電セラミックスを接着した FDK 製の圧電バイモルフの先端に直径 2 mm の半球状の接触子を取付けた構成とした。圧電バイモルフ振動子の駆動端子を定電圧  $V_d$ ・定周波数で駆動し、対象物との接触により検出電圧  $V_2$  の振幅と位相が変化することにより対象物の硬さを推定する構成である。また、実験には表 4 に示す特性を持つゴム硬度測定用試験片(株アクシム製, 中硬度タイプ: S4~S6, 直径  $D=44\text{mm}$ , 厚さ  $t=10\text{mm}$ )を用いた。

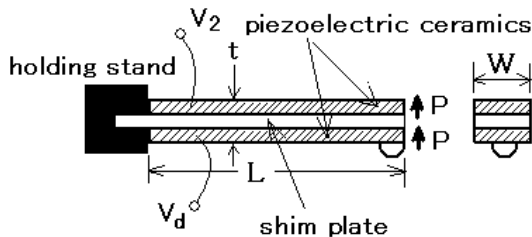


図 12. 圧電バイモルフ振動子を用いた触覚センサ

表 4. 試験片の材料定数 2

Type	S4	S5	S6
Young's modulus (MPa)	0.216	0.386	0.653
Density ( $\text{kg/m}^3$ )	1045	1175	1210

② 触覚センサの特性例

図 13, 14 は、圧電バイモルフ型触覚センサの 1 次モードを利用した場合の検出電圧特性の実験結果の一例で、それぞれ振幅及び位相差特性である。実験は、駆動周波数  $f_d = 445\text{Hz}$ 、駆動電圧  $V_d = 500\text{mV}$  一定で行った。検出電圧の振幅は、対象物との接触により急激に低下し、その後印加荷重とともに緩やか

に低下する傾向を示した。これは、対象物との接触により振動子の共振周波数が変化し、 $Q$  値が低下するためである。また、ヤング率の大きい材料ほど同一荷重での検出電圧の振幅は小さくなった。これは、ヤング率の大きい材質ほど接触による振動子の  $Q$  値の低下量が大きいためと考えられる。一方、検出電圧の位相は図 14 に示すように対象物との接触時に急激に増加し、その後緩やかに減少する傾向を示した。なお、対象物のヤング率の違いによる傾向の差はあまり明らかにはならなかった。

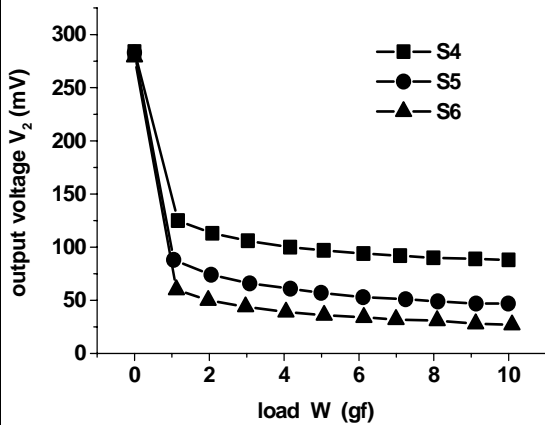


図 13. 荷重に対する出力電圧特性 (1 次モード利用)

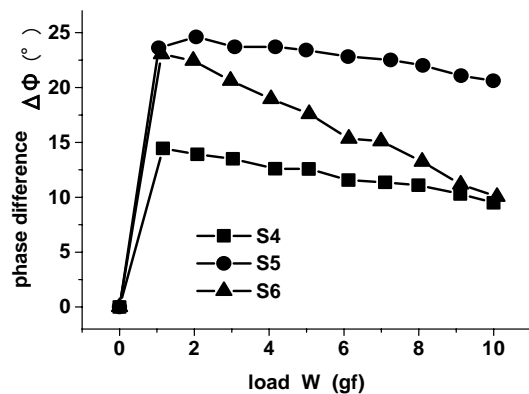


図 14. 荷重と位相差の実験結果 (1 次モード利用)

一方、図 15, 16 は圧電バイモルフ振動子の 2 次モードを利用した触覚センサの実験結果の一例で、それぞれ検出電圧の振幅及び位相差特性である。実験は、駆動周波数  $f_d = 2.481\text{kHz}$ 、駆動電圧  $V_d = 500\text{mV}$  一定で行った。1 次モード利用の場合と同様に、検出電圧の振幅は図 15 に示すように荷重とともに低下する傾向を示した。また、位相差特性は、図 16 に示すように対象物との接触により上昇しその後荷重とともに上昇する傾向を示した。対象物のヤング率の違いによる位相差特性の違いは、1 次モード利用の場合と同様にあまり明らかにはならなかった。

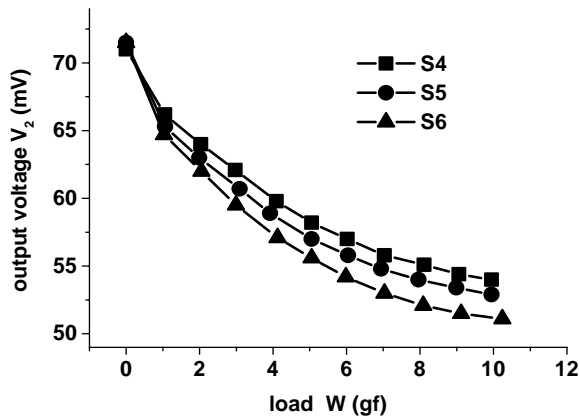


図 15. 荷重と出力電圧の実験結果 (2次モード利用)

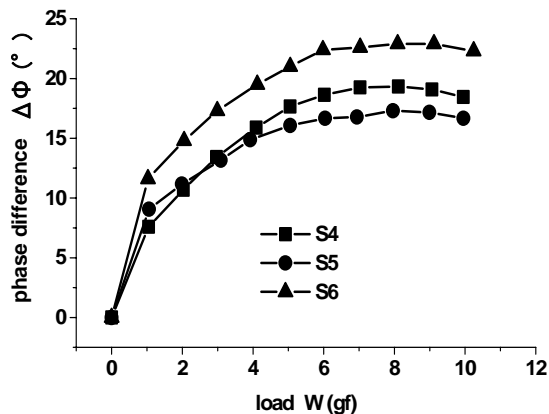


図 16. 荷重と位相差の実験結果 (2次モード利用)

④まとめ

これまで、国内外で種々の方式の触覚センサが提案されているが、それらの特性の相互比較はあまり行われていない。本研究では、振動型触覚センサの設計指針の一部を明らかにすることができ、今後の設計の体系化や特性の相互比較に役立つものと考えられる。更に、本研究で得られた成果は、生体情報を検出するための小型触覚センサの開発や、新しい方式・構成の触覚センサを開発するうえで役立つものと考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Subaru KUDO, Consideration on design of the sensitivity in piezoelectric vibratory tactile sensor, Proceedings of Acoustics '08 Paris, CD-ROM, 2008, 査読無
- ② Subaru KUDO, A Study on the Shape of Longitudinal Bar Resonators used as Piezoelectric Vibratory Tactile Sensors, 29, 105-106, 2008, 査読無
- ③ Subaru KUDO, Sensitivity of Frequency

Change of Piezoelectric Vibratory Tactile Sensor Using Longitudinal-Bar-Type Resonator, Japanese Journal of Applied Physics, 46, 4704-4708, 2007, 査読有

- ④ Subaru KUDO, Study of sensitivity of piezoelectric vibratory tactile sensor using flexural vibration mode, Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, 28, 73-74, 2007, 査読無

[学会発表] (計 7 件)

- ① 工藤すばる, 圧電バイモルフ振動子を用いた振動型触覚センサの基礎検討, 日本音響学会 2009 年春季研究発表会, 2009 年 3 月 17 日, 東京工業大学大岡山キャンパス
- ② 工藤すばる, 圧電振動型触覚センサの振動子形状の検討, 第 29 回超音波エレクトロニクスシンポジウム, 2008 年 11 月 11 日, 仙台市シルバーセンター
- ③ 工藤すばる, 触覚センサ用試験片の粘弾性特性と有限要素法解析, 日本音響学会 2008 年秋季研究発表会, 2008 年 9 月 11 日, 九州大学大橋キャンパス
- ④ 工藤すばる, 圧電触覚センサ用振動子の形状に関する一検討, 日本音響学会 2008 年春季研究発表会, 2008 年 3 月 18 日, 千葉工業大学
- ⑤ 工藤すばる, 圧電触覚センサ用振動子の形状に関する一検討, 電子情報通信学会超音波研究会, 2008 年 1 月 29 日, 関西大学
- ⑥ 工藤すばる, 横振動型触覚センサの感度に関する一考察, 第 28 回超音波エレクトロニクスシンポジウム, 2007 年 1 月 14 日, つくば国際会議場
- ⑦ 工藤すばる, 横振動利用圧電振動型触覚センサの一検討, 日本音響学会 2007 年秋季研究発表会, 2007 年 9 月 19 日, 山梨大学

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

特に無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

工藤 すばる (KUDO SUBARU)  
石巻専修大学・理工学部・教授  
研究者番号: 20214968

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし