

柔らかい力覚センサの開発*

(第1報, センサの構造と基本特性)

長南 征二^{*1}, 江 鐘 偉^{*1}
井 林 純^{*2}, 佐藤 正行^{*3}

Development of Soft Tactile Sensor

(1st Report, Fundamental Structure and Characteristics of the Sensor)

Seiji CHONAN, Zhong-Wei JIANG,
Jun IBAYASHI and Masayuki SATO

This paper presents a study of the characteristics of a soft sensor that has the sense of human skin. The sensor is composed of two rectangular rubber sheets and a strain gauge inserted between the interface of the two sheets. The sensor is an application of Poisson's effect, which is a peculiar characteristic of the elastic medium. The normal force applied to the surface of the sensor contracts the rubber sheets in the normal direction. At the same time, the force expands the medium in the horizontal direction, which results in a horizontal strain proportional to the normal force applied. Thus, the magnitude of the applied force can be determined by measuring the output of the strain gauge that is placed horizontally between the rubber sheets. Characteristics of the sensor are measured for various combination of the two rubber sheets with different hardness and thickness. It is shown that the soft sensor proposed is effective for measurement of both concentrated and distributed applied loads. Further more, it is found that the hysteretic loop of the stress-strain curve is reduced and the linearity of the sensor is improved by placing copper foil between the two rubber sheets.

Key Words: Human Interface, Soft Sensor, Rubber, Strain Gauge, Poisson's Effect

1. 緒 言

頸椎損傷により手足の麻痺した患者に対しコンピュータ制御された電気信号を筋肉に負荷, 本来の機能を再現させる試みが現在鋭意進められている⁽¹⁾⁽²⁾。頸椎損傷による麻痺とは, 脳の運動指令信号が頸の神経損傷部で遮断され末端神経まで到達しないことから生ずる麻痺である。これに対して本治療法は, 正常に機能する手足の筋電図に模したコンピュータ制御信号を発生, 手足の末梢神経に電気信号として供給し麻痺した手足に本来の動きを再現させるもので, 例えば患者の麻痺した手に容器を持たせることに成功している⁽¹⁾⁽²⁾。しかしながら本治療法は未だ完全ではなく, 電気刺激で手を動かすことはできるが手に皮膚感覚が無い場合容器を握んでいるという実感を患者に与えないこと, また市販の力センサの多くが手に装着しても

把持動作の支障となる形状を有するため現状ではセンサ無し制御を行っている等, 問題を抱えている。把持力の調整は筋肉への印加電圧を種々変えて力を測定, 各容器の把持に必要な電圧強度を求めオープンループ制御にて筋肉に負荷, 実現している。把持力を状況に応じ適宜変更するためには実時間で測定した把持力を目標値と比較, それらの差を零とするいわゆるクローズドループ制御法が有効であるが, 指や手のひらのように力を感知しながらかつ把持動作も担えるセンサが指先に導入できればその実現は可能となる。現在見られる力センサ⁽³⁾の多くは外壁が金属であり, また対象物とは点接触を前提としたスポットセンサである。これらセンサは金属表面の突起で対象物の荷重を受け, さらに内部の薄肉ダイヤフラムに接着したひずみゲージ出力から荷重の大きさを決めている。このような, 外壁が金属であり対象物と点接触を仮定したセンサは, 患者の手と対象物間に置かれ把持動作を担うセンサとしては好ましい形状ではない。把持動作に介入するセンサとしては(1)センサ表面が人間の指や手のひらの

* 原稿受付 平成6年4月4日。

*¹ 正員, 東北大学工学部 (〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)。*² 学生員, 東北大学大学院。*³ 東北大学大学院。

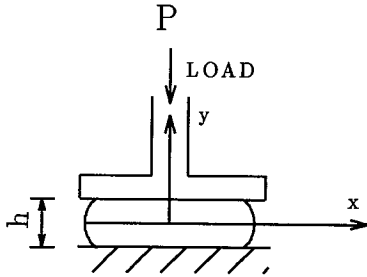


図1 柔軟センサの原理図

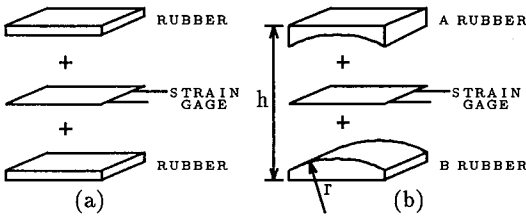


図2 柔軟センサの構造

ように柔らかいこと、(2)対象物と面接触であること、(3)微小荷重が測定可能であること等の要件を満たす必要がある。本研究は上記3要件を満たすセンサとして、ひずみゲージと軟質ゴム、さらに銅製薄板からなる柔軟センサを作成し、その基本特性を実験にて検討したものである。本センサは母材のゴム表面に荷重を加えると、ポアソン効果によりゴム内部に水平方向ひずみが表面荷重に比例して現れる点に着目、ゴム内に表面と平行に置かれたひずみゲージ出力から荷重の大きさを特定するものである。ゴムとひずみゲージの組合せを種々変え荷重に対するゲージ出力を測定したところ、対象物と点接触および面接触したいずれの状態でもセンサ出力に再現性があること、かつ手と対象物間に置かれても把持動作には支障を来さないこと、さらに微小力測定用のセンサとしても十分な精度を有することが分かった。

2. 柔軟力覚センサの原理と構造

柔軟センサの原理を簡単に説明するため、図1のように滑らかな平板上に置かれた厚さ h 、断面積 A の弾性体の平面応力状態での変形を考える。弾性体表面に荷重 P が作用した場合弾性体内の y 方向縦ひずみ ϵ_y は

$$\epsilon_y = \Delta h/h, \dots\dots\dots (1)$$

ここに Δh は弾性体の y 方向の縮みを表す。一方、

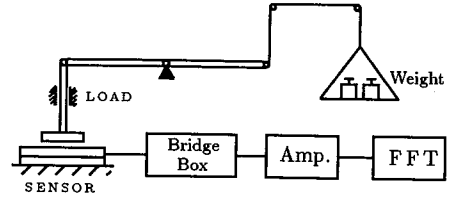
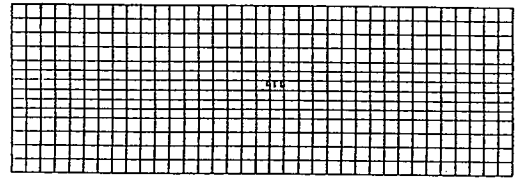
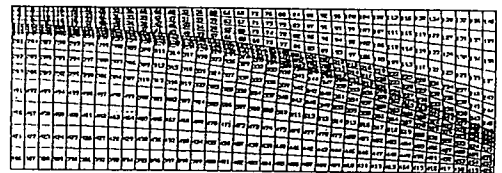


図3 実験システム



(a) 曲率を持たないセンサ



(b) 曲率をもつセンサ

図4 センサのFEM解析モデル

弾性体内の x 方向横ひずみ ϵ_x は次式で与えられる。

$$\epsilon_x = -\nu\epsilon_y, \dots\dots\dots (2)$$

ここに ν はポアソン比を表す。弾性体のヤング率を E とすると

$$\epsilon_y = P/AE, \dots\dots\dots (3)$$

式(2), (3)より ϵ_y を消去し変形すると

$$P = -(AE/\nu)\epsilon_x, \dots\dots\dots (4)$$

式(4)より、弾性体内の水平方向ひずみ ϵ_x を測定することで表面に加わる荷重 P を特定できることがわかる。

図2(a)はひずみゲージの両側を、母材である平面ゴムではさみ接着した柔軟センサを示す。ひずみゲージには低弾性材用ゲージ(共和電業, SKF-2657)を、センサ母材には厚さが1, 3, 5mm, 硬度(JIS)が41, 51, 61の計9種類の軟質ゴムを使用した。また接着剤には当該ひずみゲージ指定の接着剤(共和電業, EC-30)を使用した。一般に、ゴムはひずみが大きく非線形性を伴うが、非線形性補正のため母材のゴムに曲面を設け

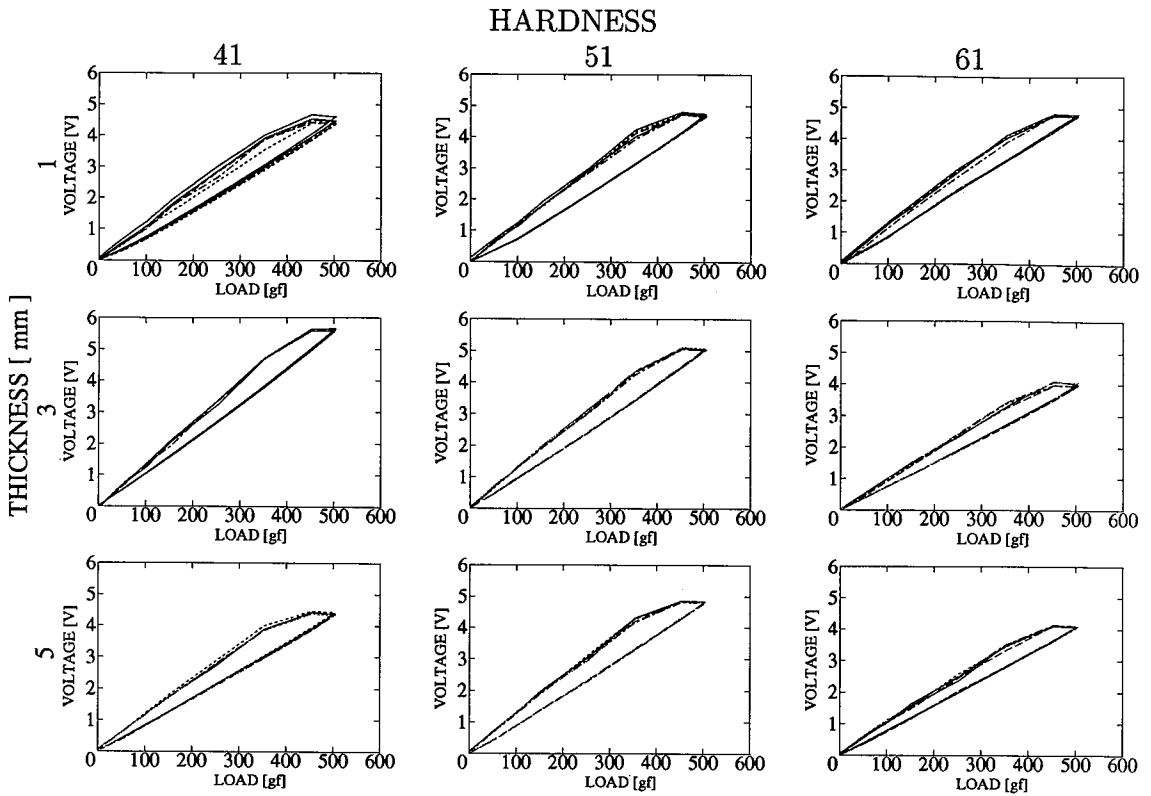


図5 母材ゴムの厚さと硬さが異なる各センサに点荷重を加える場合の出力応答

その間にひずみゲージをはさみ込んだ図2(b)のタイプのセンサも試作し出力特性を調べた。センサの形状パラメータとしては曲率半径 r を $r = 45, 65, 135\text{mm}$ とし、センサ全体の厚さを $h = 8\text{mm}$ とした。また、図2(b)ではセンサ上下でゴムの形状が違うため、以下中央に向け凹のゴムをAゴム、凸のゴムをBゴムと呼ぶことにする。

3. 実験方法及びFEM解析

図3に実験装置のブロック図を示す。製作したセンサの片面を固定面に接着し、自由面側より荷重を加えた。以下、固定面側のゴムをベースゴム、荷重が加えられる自由面側のゴムを表面ゴムと呼ぶことにする。センサに対する荷重の負荷体としては直径4.4mmの丸棒の先端、および十分大きなアクリルの平板の2通りを使用した。前者による荷重を点荷重、後者による荷重を面荷重と呼ぶことにする。点荷重に対しては曲げによる変形とポアソン効果による変形が同時に生じるが、面荷重の場合はポアソン効果による変形のみとなる。以下、センサに荷重を加えて母材ゴムを変形

させ、生じたひずみを母材に埋めこんだひずみゲージで測定⁽⁴⁾、FFTアナライザ(エー・アンド・デイ、AD-3524型)によりデータ処理を行った。荷重は数グラムまたは数十グラムずつ増やしてゆき、荷重が最大設定荷重まで達した後同様に除荷を行った。また除荷が終わった後にゼロ調整を行い、次回測定の基準値とした。なお、測定に際して荷重の方向がセンサ面に対して垂直となるように注意し、また荷重を加える際にはセンサに衝撃を与えないよう注意し、荷重と出力電圧の関係を同一条件でいずれも5回ずつ測定した。

一方、数値シミュレーションにおいては⁽⁵⁾⁽⁶⁾、図2のように製作したセンサをそれぞれ図4のように大きく3層(表面ゴム、歪みゲージ、ベースゴム)に分け、メーカー(東海ゴム工業)が開発したゴム専用FEMソフトを用いて解析を行った。数値計算ではゴムを超弾性体材料として取扱い、ひずみゲージとゴムとの接着剤の影響は無視し、紙面に垂直方向の変形を無視した2次元問題として取り扱った。また、ゴムは非圧縮性で等方性超弾性体と考え、ゴムのひずみエネルギー関数 W は次のMooney-Rivlin⁽⁵⁾式で近似した。

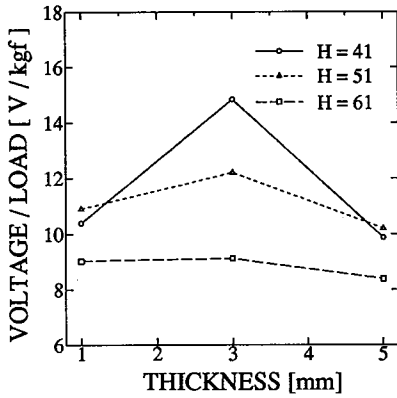


図6 センサ母材の厚さと出力比 (出力電圧/荷重) の関係

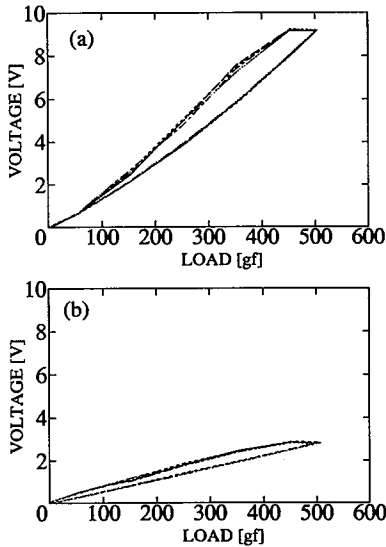


図7 センサの表面とベース母材の厚さが異なる場合の出力関係, (a) 表面厚さ 1mm, ベース 5mm; (b) 表面厚さ 5mm, ベース 1mm

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3), \dots\dots\dots (5)$$

ここに I_1 と I_2 は第1, 第2ひずみ主不変量, C_{10} , C_{01} は材料定数である。なお, 材料定数 C_{01} , C_{10} の値は, ゴム (天然ゴム) について $C_{01} = 3.352 \text{ kgf/cm}^2$, $C_{10} = 1.29 \text{ kgf/cm}^2$, ひずみゲージ (共和電業, SKF-2657) については $C_{01} = 13333.3 \text{ kgf/cm}^2$, $C_{10} = 0.0 \text{ kgf/cm}^2$ を用いた⁽⁷⁾⁽⁸⁾。さらに計算においては荷重が点荷重, 面荷重になるようにそれぞれ荷重条件を強制変位で与えた。荷重は数ステップに分けて負荷し, 1ステップ増加するごとにひずみゲージの挿入された層のひずみを計算し荷重とひずみの関係を調べた。

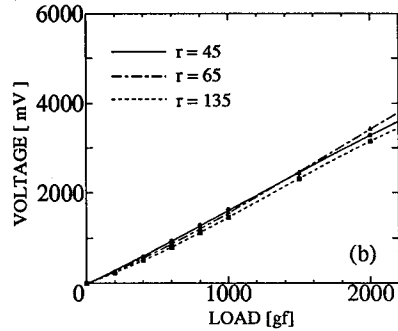
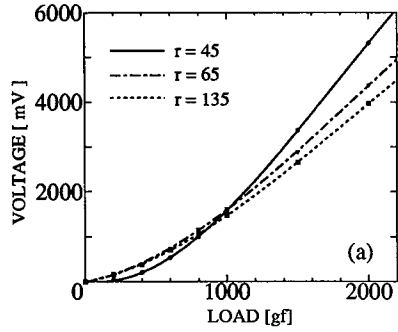


図8 母材ゴムに曲率を持たせた (a) A ゴム及び (b) B ゴムを表面に用いた場合の出力応答

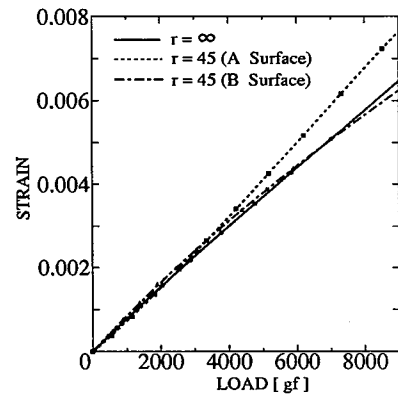


図9 センサのひずみと点荷重の関係 (FEM 解析)

4. 結果および考察

4.1 点荷重に対するセンサの応答

4.1.1 平面ゴムの場合

図5は表面とベースに硬さ H と厚さ h が同じゴムを用いたセンサにつき荷重を 500g 重まで 5 回負荷・除荷したときの荷重に対するセンサ出力の変化を示したものである。横方向に母材ゴムの硬さ, 縦方向に厚さの小さい順に測定結果を配置している。図よりセンサ

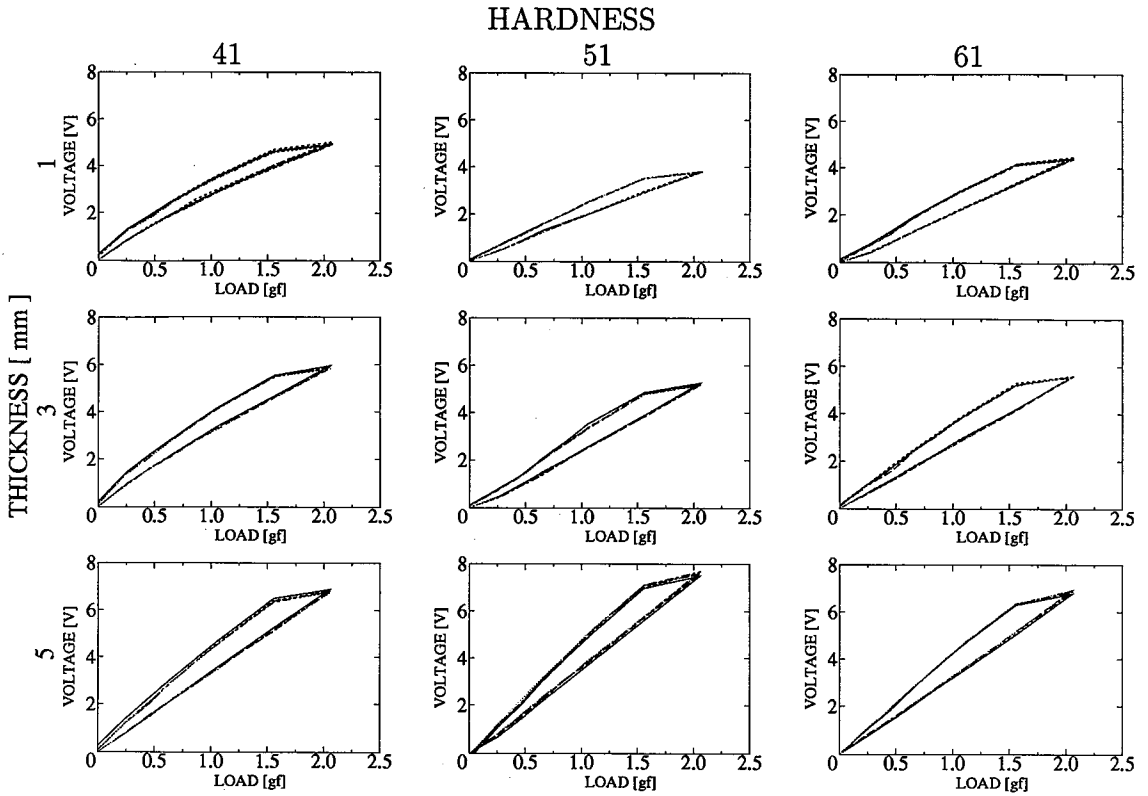


図 10 母材ゴムの厚さと硬さが異なる各センサに面荷重を加える場合の出力応答

出力にはゴムの非線形性によるヒステリシスが見られるものの、全体としては線形特性が支配的である。また、母材のゴムが薄いと除荷時の出力応答にばらつきが見られ再現性が悪くなることがわかる。図6は2kg重(19.6N)までの負荷過程における単位荷重当たりの平均出力電圧とゴム厚さ h の関係を示したものである。図より、ゴムが柔らかいほどセンサ出力が大きく、ゴムが硬いと厚さの影響を受けにくいことがわかる。またそれぞれの硬さについて上下ゴムの厚さが3mmの場合に最も高い出力電圧が得られている。

次に表面とベースに硬さが同じ(硬度41)で厚さが異なる(1mmと5mm)ゴムを用いたセンサを試作し、その出力特性を調べた。結果を図7に示す。図(a)は表面に1mm、ベースに5mm、図(b)は逆に表面に5mm、ベースに1mmのゴムを用いた場合のセンサ出力を示したものである。図より表面に薄く、ベースに厚いゴムを用いた方が大きな出力電圧が得られることがわかる。これは次のように説明される。点荷重の場合は曲げによる変形が大きいため、表面に薄いゴムを用いた方が変形が直接ゲージに伝わりやすいが、表面に厚い

ゴムを置くと曲げによる変形がゲージに伝わりにくくなりポアソン効果による伸縮変形だけとなるので全体として出力電圧が小さくなる。またベースが厚ければひずみゲージが十分に変形する余裕があるが、ベースが薄いとゲージの変形は制限され拘束されてしまう。したがって一般に、表面に薄く、ベースに厚いゴムを使用したほうがセンサとしての出力応答が得られやすいと言える。

4.1.2 曲面ゴムの場合

以上の結果によりゴムを母材とした柔軟センサは非線形特性を有することが示されたが以下では上下のゴムに円弧に近い曲面を与え、その間にひずみゲージをはさむことで、センサの非線形性が改善できるかどうか検討する。ゴム面の曲率半径 r はそれぞれ $r = 45, 65, 135\text{mm}$ とし、センサ全体の厚さが $h = 8\text{mm}$ のセンサを試作し特性を計測した。図8にそれぞれ、センサ表面にAゴムを用いた場合(図a)と、Bゴムを用いた場合(図b)の負荷時の出力応答を示す。図より、Aゴムを表面に用いた場合、荷重の増加とともに出力電

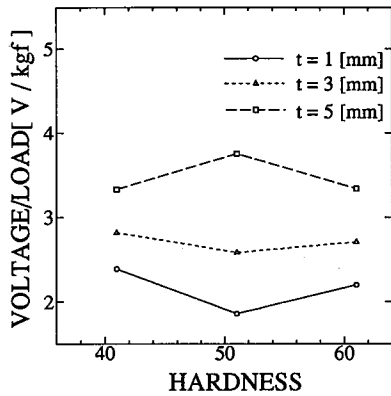


図 11 センサ母材の硬さと出力比 (出力電圧/荷重) の関係

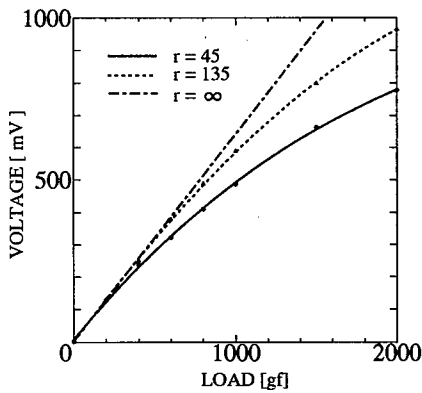


図 12 母材ゴムに曲率を持たせた場合のセンサの出力応答

圧の勾配が大きくなり、また曲率半径が $r = 135, 65, 45\text{mm}$ と小さくなるにつれて曲線が下側に凹となっていくのが分かる。Bゴムの表面に用いた場合は線形性が見られ傾きがほぼ一定になっているが、曲率 r が大きくなるにつれ荷重の増加に対する出力電圧の割合が減少する傾向にあることが分かる。従って、ゴムの形状を変えることでセンサ出力の非線形性および感度を改善できることが言える。

4.1.3 FEMによる計算結果

ここで一例として、ゴムの曲率 $r = 45\text{mm}$ 、厚さ $h = 8\text{mm}$ のセンサについて FEM 数値解析を行った結果を示す。図 9 は点荷重を負荷した場合のゲージのひずみ出力と荷重の関係を示すものであり、0.05% ひずみは約 1V の出力電圧に相当する。図中の実線はセ

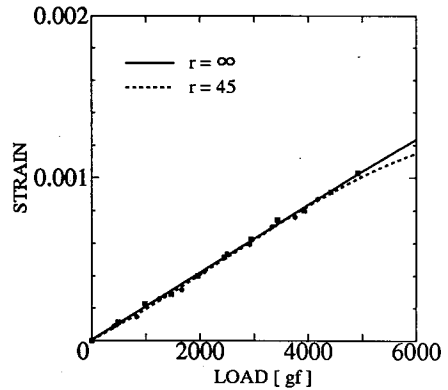


図 13 センサのひずみと面荷重の関係 (FEM 解析)

ンサ母材に曲率のない平面ゴムを使用した場合、破線は曲率を持つ A ゴムを表面に置いた場合、鎖線は B ゴムを表面に置いた場合の結果である。図より実験結果と似た傾向が得られていることがわかる。これよりセンサ形状の設計は FEM 解析法を用いて行うことが可能であることが言える。

4.2 面荷重に対するセンサ応答

4.2.1 平面ゴムの場合

面荷重をセンサに与える場合その変形はポアソン効果による変形のみとなるため、ひずみゲージに生じる変形はかなり小さくなる。この場合、小さな荷重ではセンサ出力がかなり不安定となるので改善方法としてセンサにあらかじめ数百グラムの荷重を加えた状態を基準とし測定を行った。図 10 は 2kg 重 (19.6N) まで荷重を加えたときの荷重とセンサ出力の関係を示す。図よりセンサに加える荷重がある程度大きければ、点荷重と同様な応答が得られることがわかる。ゴムが柔らかく薄いとセンサ出力に大きな非線形性が見られる。図 11 は 2kg 重 (19.6N) までの負荷過程における単位荷重当たりの平均出力電圧とゴムの硬さ H の関係を示したものである。図よりセンサ出力はゴムの硬さにあまり影響されず、ゴムが厚くなるに従い大きな出力電圧の得られることがわかる。これはゴムが厚いとポアソン効果による変形も大きくなるためである。

ここに、点荷重の場合と同様、表面とベースに厚さの異なるゴムを用いた場合についても面荷重負荷実験を行ったが、いずれのゴムを表面またはベースに置いても厚さ方向中心からのゲージまでの距離は等しくなるため両センサのゲージ変形量はほぼ等しくなる。こ

のため、面荷重に対して両センサとも出力はほぼ同様な結果となった。

4.2.2 曲面ゴムの場合

前節の曲面ゴムを有するセンサに面荷重実験を行った。2kg重(19.6N)まで負荷に対する荷重と出力電圧の測定データ5回を平均したものを図12に示す。図中の一点鎖線は曲率半径 r が無限大すなわち平面の場合、破線は $r = 135\text{mm}$ 、実線は $r = 45\text{mm}$ の場合の結果である。図より、ゴム表面に曲率をもたせることによってセンサ出力が変化し、曲率半径が大きいほど応答が直線に近づくことが分かる。つまりひずみゲージが挿入されている部分が平面に近いほど応答が直線に近くなることがわかる。これに対応するFEM計算結果を図13に示す。計算結果をみると、ゴム表面に曲率をもたせると、センサの出力に非線形特性が大きく現れてくる傾向は実験結果と同様であることがわかる。

以上に得られた点荷重と面荷重の場合の結果を比較してみると、点荷重の方が感度が高い。これは、変形の図を見てわかるように、点荷重の場合、面荷重と違って曲げ変形が生じているためと思われる。またこれらより、点荷重においてAのゴムを表面に用いた場合、荷重を増やしていくと出力電圧の勾配が大きくなっていく(図4.7(a))理由として、次のようなことが考えられる。Aのゴムを表面にした場合荷重が加えられる部分を見ると、表面のゴムは薄くベースのゴムは厚くなっている。この場合、点荷重による曲げ変形も伝わりやすく、ベースが厚いので歪ゲージが変形しやすい。よって、荷重を加えていくと元の曲面よりさらに曲率の大きい曲面になり、歪ゲージにかかる応力が増大し、応答が前に述べたような曲線になるとと思われる。逆にBのゴムを表面にした場合、表面のゴムは厚くベースのゴムは薄くなっている。この場合は、曲げ変形は伝わりにくくかつ歪ゲージも変形しにくい。よって曲率半径 r を変えても応答はあまり変化しないと思われる。

4.3 市販されているセンサとの比較

本研究で製作したソフトセンサの中で最も優れたもの(表面・ベース共に硬度51、厚さ3mmの平面ゴム)を選び、点荷重に対して市販されているセンサとの出力の比較を行った。比較には半導体小形荷重変換器(T社製)と圧電ゴムを用いた可変抵抗スイッチ(Y社製)の2種類のセンサを使用した。図14(a,c)に自作したセンサ、図14(b,d)に市販センサの応答を示す。なおT社製のセンサは定格が最大1kg重(9.8N)であ

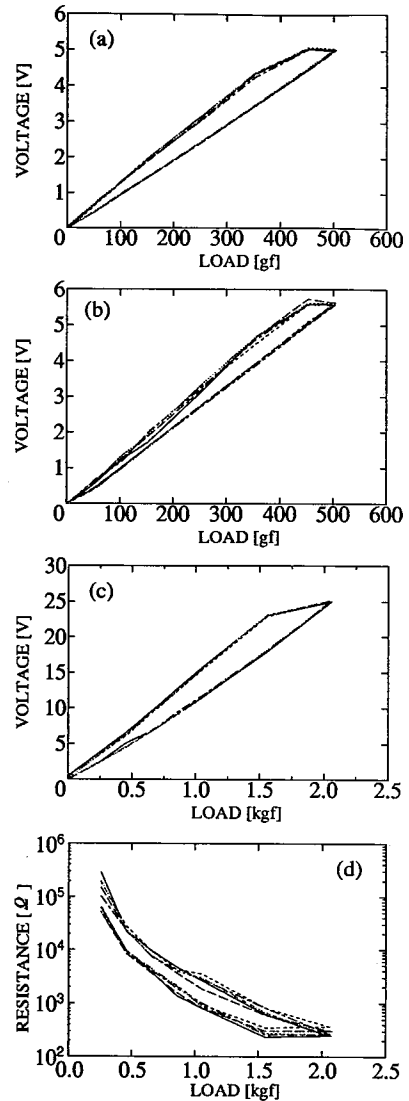


図14 市販力センサとの比較。(a),(c)自作したセンサ,(b)T社製センサ,(d)Y社製センサ。

るので、500g重(4.9N)まで荷重を加えたときの結果を比較し、またY社製センサは小さな荷重では応答しないため2kg重(19.6N)まで荷重を加え、そのときのセンサの抵抗変化を測定した。図14より、開発したセンサはT社製のものとほぼ同様な出力を示す。またY社製のものよりは精度が優れていることがわかる。本センサは広い荷重の範囲で安定した応答が得られることが特長である。比較に用いたセンサはいずれも受感部が点接触であるため、本センサの出力も点荷重を加えた場合につき比較を行っているが、前節に示した

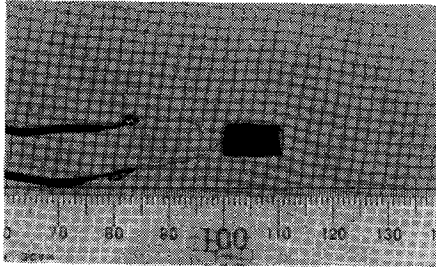


図 15 半導体歪みゲージを用いた微細力センサ

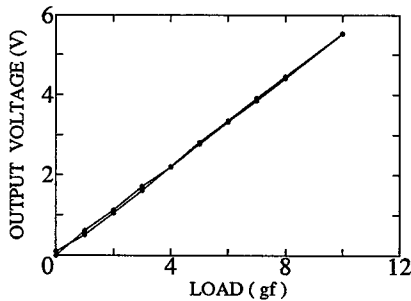


図 16 微細力センサの出力応答

ように面荷重に対しても安定した出力が得られることを考えると、今後改良を重ねることにより本センサは十分実用化できることが可能であると思われる。

5. 半導体歪みゲージを用いた微細力ソフトセンサ

上記の結果で明らかのように低弾性材料用ひずみゲージを用いた場合はセンサの感度は数十グラム重～数百グラム重で与えられる。ところでロボットフィンガに微小な柔らかい対象物を把持させる場合は把持力を微妙に制御する必要があるが、そのためには微細力の計測可能な高精度柔軟接触センサが不可欠である。そこで、ここでは上記のソフトセンサの構造をさらに発展させ高感度半導体ひずみゲージ (KYOWA KSP-2-E4) を導入して微細力測定用ソフトセンサの製作を試みた。試作したセンサは、厚さ 0.1mm の銅板に半導体ひずみゲージを貼りつけ、それをベースのクッションゴム (厚さ 3mm, 幅 5mm, 長さ 9mm) に接着し、さらに表面に保護用の薄肉ゴムシートを貼合わせたものである (図 15)。本センサの出力特性は高感度の上皿天秤 (感度 1mg) を用いて測定した。測定方法は、まず天秤の一方の皿に接触棒を取り付けセンサと接触させ、他方の皿に垂錘 1g づつを乗せてセンサの出力を測定した。結果の一例を図 16 に示す。図より、本センサは 1g 重オーダーの精度を有することが分かる。また、薄銅板の挿入により負荷と除荷時の出力にほとん

どヒステリシスが見られなくなり出力の線形特性が保障されていることが分かる。

6. 結 言

1. センサの出力特性を高めるためにはベースに厚いゴム、表面に薄いゴムを用いたほうがより効果的である。また、母材のゴムの形状によってセンサの出力特性が異なってくるので、ゴムの形状を変えることでセンサ出力を変えることができる。
2. FEM解析で得られた結果は実験結果と良好に対応しており、FEM理論解析によりセンサの形状設計が可能である。
3. 市販されているセンサと本研究で試作したセンサの出力特性の比較を行い、安定した良好な測定結果の得られることを確認した。
4. 高感度半導体ひずみゲージを用いることで、微細接触力の計測が可能となる。

本センサは母材であるゴムにひずみゲージを埋めこみ接着したもので、構造が簡単で柔軟性があり、対象物とは点接触に加え任意の面接触が可能であるなど従来の固体センサにはない特長を有する。今後改良を加えることでロボット指先に置かれる把持動作可能な力覚センサとして十分実用化が可能である。

最後に、本研究の実施にあたりご助力いただいた東海ゴム工業株式会社に感謝の意を表す。また、本研究は平成4年度文部省科学研究費補助金 (一般研究 (C)) の助成を受けて行ったことを記す。

文 献

- (1) 星宮望・半田康延, 機能的電気刺激, BME, 2-11(1988), 705-714.
- (2) Hosimiya N., Naito A., Yajima M. and Handa Y., A Multichannel FES System for the Restoration of Motor Functions in High Spinal Cord Injury Patients, IEEE Trans. on Biomedical Engineering, 36-7(1989), 754-760.
- (3) 計量管理協会, 計測センサ利用技術調査研究委員会: センサの原理と使い方, コロナ出版, 1984.
- (4) 松井邦彦, センサ応用回路の設計・製作, CQ出版, 1990.
- (5) オーディン J.T., 非線形連続体の有限要素法 1・2, 培風館, 1980.
- (6) 三好俊郎, 有限要素法入門, 培風館, 1978.
- (7) 日本材料試験協会, 材料試験便覧, 丸善, 1957.
- (8) 日本規格協会, 非金属材料データブック, 平文社, 1985.