

学術論文

固体高分子電解質を用いた曲率センサの特性評価

Characterization of a Curvature Sensor using a Solid Polymer Electrolyte

大槻 学^{*1}, 奥山 武志^{*2} (正員), 田中 真美^{*1} (正員)

Manabu OTSUKI, Takesi OKUYAMA (Mem.), Mami TANAKA (Mem.)

This paper describes a development of a curvature sensor using a solid polymer electrolyte (SPE) film. The sensor has a basic structure that the SPE film is sandwiched between thin carbon films. Each carbon film is coated with Ag paste and they are covered with polymer films. SPE film has a good flexibility, and can be used in air. In previous research, we clarified output response to deformation of SPE sensor and the relationship between sensor output and sensor curvature. In this paper, in order to obtain the output characteristics of the curvature sensor, the influence of the position of partial deformation on the sensor output and the relationship between the sensor output and the area size of the deformed part in the SPE film was investigated. As a result, it is found that the output is independent of the position where deformation is applied and that the sensor output voltage has a proportional relation with the area size of the deformation part. Moreover these findings suggest that the sensor output is related to the average of the curvature of the measured surface.

Key Words : sensor, solid polymer electrolyte, functional polymer, curvature.

1 緒言

近年, PVDF フィルムやイオン導電性高分子 (Ionic Polymer-Metal Composites, IPMC) などの機能性高分子が注目され, 様々なアクチュエータやセンサの研究開発が行われている[1]。一般的に, 機能性高分子は軽量で, 柔軟性, 加工性に優れるなどの利点があり, 特に, 低電圧で大きな変位を得られる IPMC は, 医療分野をはじめとする様々な分野で注目されている[2,3]。また, IPMC はセンサとしても研究されているが, 湿潤状態でしか安定駆動できない欠点がある。

空気中で利用できる機能性高分子として, 固体高分子電解質(Solid Polymer Electrolyte, SPE) の利用が注目されている。SPE は, IPMC と同様に電圧を印加することで, 曲げ変化を生じるポリマーフィルムである。現在, SPE をアクチュエータとして利用する研究[4]は行われているが, センサとして用いられている研究はほとんどない。我々の研究グループでは, SPE のセンサへの応用を目指し, そのセンサ特性の評価を行っており, その結果, 曲げ変化に対し出力電圧が発生することを確認し, センサの曲率と出力電圧が比例関係であることがわかり, 曲率センサとして有望であること

が明らかになった[5]。詳細な原理は未だ十分に明らかにされていないが, 曲げ変化に対し発生する出力電圧は, 曲げ変化により SPE 素子内部にイオンの濃度差が生じることにより発生する, 電極間の電位差に起因すると現在考えられる[6]。

以上に鑑み, 本研究では, SPE 曲率センサの詳細な特性評価を行う。具体的には, まず, センサ出力に対するセンサの向きの影響を検証する。次に, 部分的な曲げ変化に対するセンサ出力を計測し, センサ素子内の曲げ変化を加えた位置及び面積とセンサ出力との関係を評価する。

2 曲率センサの概要

Fig. 1 に曲率センサの構造を示す。SPE 膜の両面を炭素電極で被覆し, 炭素電極に銀ペーストを塗り, それらを保護フィルムで覆った構造となっている。炭素電極および銀ペーストで被覆した部分をセンサ素子部とし, その大きさは 20×20mm である。また, 把持部

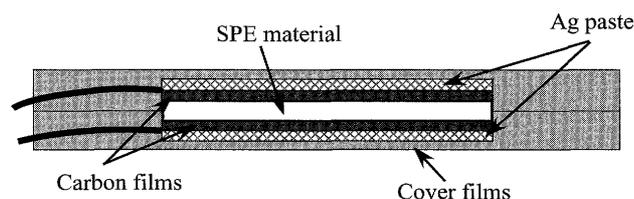


Fig. 1 Structure of SPE sensor.

連絡先: 大槻 学, 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-04, 東北大学大学院医工学研究科,

e-mail: otsuki@rose.mech.tohoku.co.jp

^{*1} 東北大学大学院医工学研究科 ^{*2} 東北大学大学院工学研究科

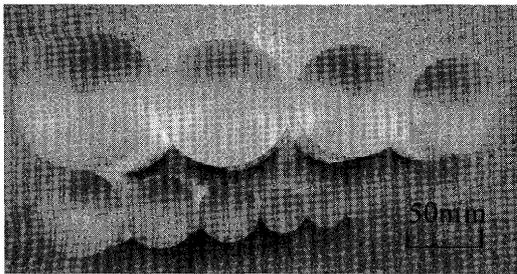


Fig. 2 Measurement samples.

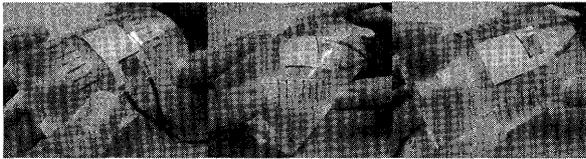
(a) 0 rad (b) $\pi/4$ rad (c) $\pi/2$ rad

Fig. 3 Measurement of angle dependence.

として、0.5mm 厚の塩化ビニールフィルムを外枠 60×60mm、内枠 40×40mm で切り取ったものを取り付けている。実験では、本センサを対象曲面に沿わせてその出力を計測する。

3 方向依存性実験

SPE は、原理的に異方性の有無が確認されていないため、本センサが異方性を持つかどうかを検証する。

3.1 測定条件

測定対象には Fig. 2 に示す曲率半径 10mm から 50mm の 10 種類のアクリル円柱を用いる。アクリル円柱の中心軸に対するセンサの基準線の角度をセンサの回転角度と定義し、Fig. 3 に示すように、0, $\pi/4$, $\pi/2$ (rad) の 3 種類について測定を行う。それぞれの場合で測定対象にセンサを沿わせて 10 秒程度保持し、その間の出力電圧を計測する。出力電圧は、データロガー (KEYENCE 製 NR-500, ST04, 入力インピーダンス $1M\Omega$) で収集し、サンプリング周波数は 100Hz とした。また、SPE 素子の両面に接続した電極のうち、曲面と接触する側の電極をデータロガーのグランド電極に接続した。各条件で、5 回計測を行う。

3.2 実験結果

曲率半径 10mm のサンプルをセンサ角 0 rad で計測した出力波形の一例を Fig. 4 に示す。実験では 15 秒付近の出力の立ち上がり部分でセンサを測定対象に沿わせ始め、30 秒付近の落ち込み部分で測定対象から離している。SPE センサは手で操作するため、出力波形

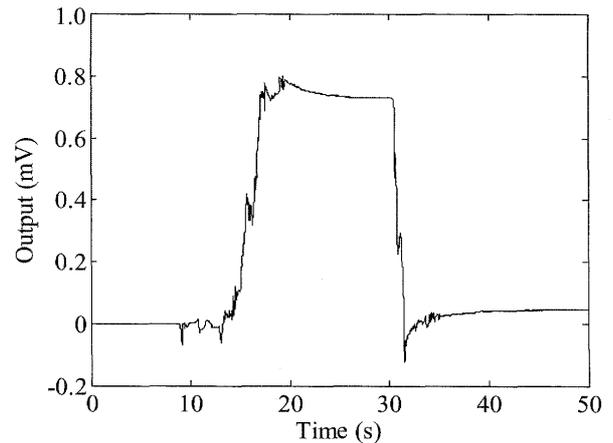


Fig. 4 Response of the curvature sensor to measure the curve of 10 mm radius.

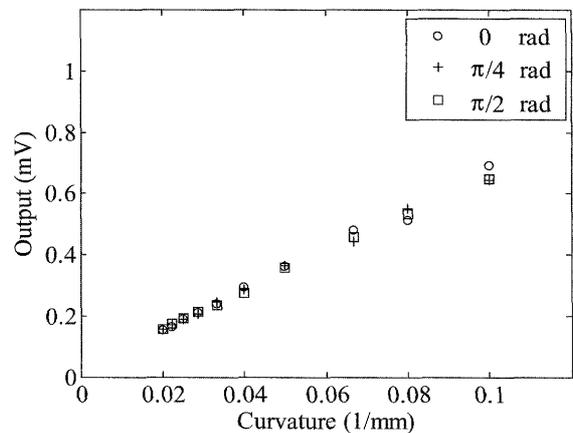


Fig. 5 Relationship between sensor output and curvature for each angle.

の過渡応答は一樣でないが、センサをしばらく保持し、静的状態を保つとセンサ出力は一定値に収束する。この静的な状態における出力を評価に用いるため、その出力が得られる区間を選定するための基準点を次のように定義した。出力波形の立ち上がりから落ち込みまでの区間において、出力波形の一階微分が -0.005mV/s より大きく、二階微分の絶対値が 0.001mV/s^2 以下となる時間を基準点とする。それぞれの出力波形に対して基準点直後の 100 点のデータより平均を求め、5 回の試行でそれらを平均した値を計測値とする。この計測値と曲率の関係を Fig. 5 に示す。曲率とセンサ出力は比例関係にあることが確認でき、センサの回転角度による出力の違いはなく、センサ出力は曲率のみに依存し、センサの回転角度には依存しないことがわかった。

4 部分曲面に対するセンサ出力特性評価

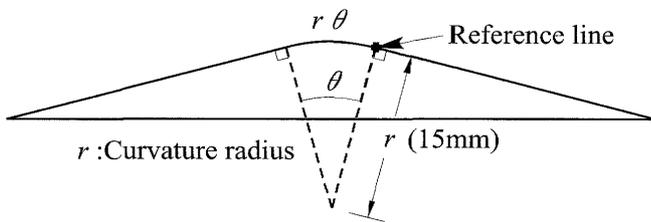
4.1 測定対象の概要

センサに一樣でない曲げ変形を加えた際のセンサ出力特性を評価するために、Fig. 6 に示すような曲面と平面からなるサンプルを作製した。このサンプルは、曲率半径 15mm の曲面とその 2 つの接平面からなる。曲面部と一方の平面部の境界には基準線を設けている。曲面部の大きさは 3 種類あり、それぞれの特性を Table 1 に示す。Fig. 6(b) には $\theta = \pi/6$ のサンプル a の写真を示す。

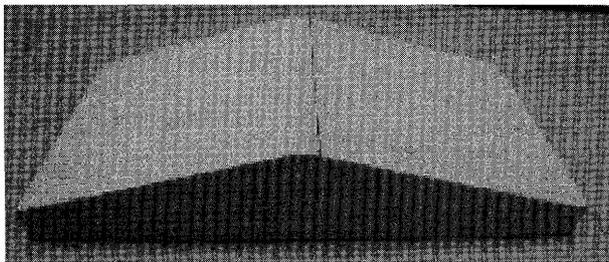
また、Fig. 7 に示すようにセンサには 7 本の目盛り線を設け、サンプルとセンサの位置関係の目安とした。センサの目盛りは、Fig. 7 のようにセンサ素子の中心を 0mm とし、両側に 4mm 間隔でそれぞれ 3 本の線を設け、-12mm から 12mm までとした。以下、サンプルの基準線と X mm の目盛り線を重ねた状態をセンサ位置 X mm と呼ぶ。つまり、サンプルの基準線とセンサ素子の中心線が重なった状態をセンサ位置 0mm という。

4.2 曲面の位置とセンサ出力の関係

サンプル a, b を用いて、曲げ変形が加えられる位置によるセンサ出力への影響を検討する。



(a) Cross section of sample.



(b) Sample a: $\theta = \pi/6$

Fig. 6 Flat-curve-flat sample.

Table 1 Property of samples.

Sample name	a	b	c
Angle of the arc: θ (rad)	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/2$
Length of the arc: $r\theta$ (mm)	7.85	11.8	23.6

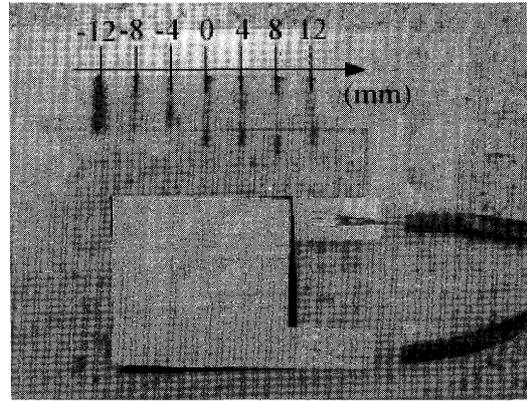


Fig. 7 Scale lines on the sensor.

4.2.1 実験方法

サンプル a を用いた場合、センサ位置 0mm では、基準線より曲面側にあるセンサ素子の長さ $L=10$ mm が、曲面部の円周方向の長さ $r\theta=7.85$ mm より長くなり、センサ素子が曲面部を完全に覆うことになる。同様にセンサ位置 4mm ($L=14$ mm), 8mm ($L=18$ mm)においても、センサ素子が曲面部を完全に覆うこととなる。これらの 3 点では、センサ素子上に加えられる曲げ変形量は一定で、曲げ変形が加えられる位置のみが変化することとなる。

また、サンプル b ($r\theta=11.8$ mm)を用いた場合も、センサ位置 4mm, 8mm では、曲げ変形が加えられる位置のみが変化する。

これらの 5 種類の位置でそれぞれのサンプルに対し計測を行い、位置による影響を評価する。実験では、各位置でセンサをサンプルに沿わせて 20 秒程度保持し、その間の出力電圧を計測する。その他の測定条件は第 3 章と同様である。各測定条件で 5 回計測する。

4.2.2 実験結果

得られた出力より、保持している 20 秒間の区間の中で、出力の安定した 10 秒から 15 秒の出力電圧から平均を求める。さらにそれらを 5 回の試行で平均して計測値とし、Fig. 8 に示す。この結果から、曲げ変形量が一定の場合、曲げ変形を加えられる位置はセンサ出力に影響しないことがわかった。しかし、サンプル a, b それぞれの計測値を比較すると、曲げ変形量に応じて出力が変化していることから、次節で詳細に検討する。

4.3 曲げ変形を加える面積の影響

曲面部に沿わせるセンサ素子の面積を変化させ、面積とセンサ出力の関係を評価する。

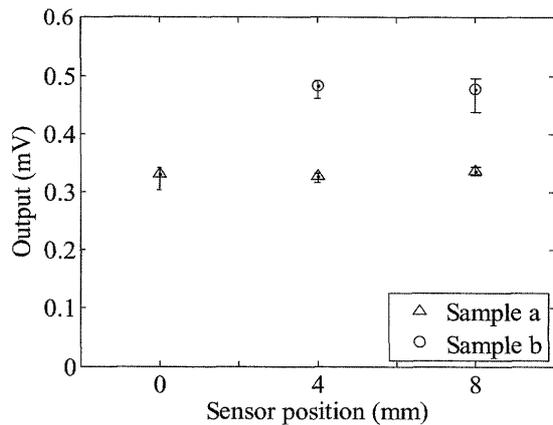


Fig. 8 Relationship between sensor output and sensor position.

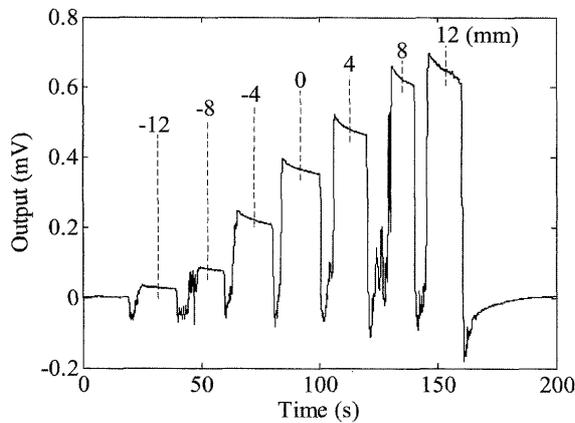


Fig. 9 Sensor output waveform using sample c.

Table 2 Percentage of sensor area over reference line.

Sensor position (mm)	-12	-8	-4	0	4	8	12
Area of the sensor on the curve: $L \times 20$ (mm^2)	0	40	120	200	280	360	400
Percentage of sensor area on the curve to the all (%)	0	10	30	50	70	90	100

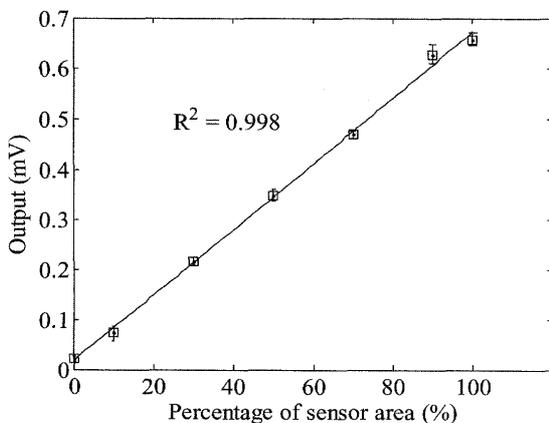


Fig. 10 Relationship between sensor output and percentage of sensor area added bending deformation.

4.3.1 実験方法

サンプル c を用いて, -12mm から 12mm までの 7 点において順に計測を行い, 曲げ変形の曲率は変化させず曲げ変形が加えられる面積を徐々に増加させる実験を行った。センサ位置と曲げ変形が加えられる面積, およびそのセンサ素子全体に対する面積比率を Table 2 に示す。実験では, 各点でサンプルの曲面部に沿わせて 20 秒程度保持し出力を計測する。各条件で 5 回計測する。その他の測定条件は第 3 章と同様である。

4.3.2 実験結果

得られた出力波形の一例を Fig. 9 に示す。波形の評価方法として, Fig. 9 に示すように, 20 秒毎にセンサの位置が変化しているため, 各 20 秒間の区間において, 出力が安定している 12 秒から 17 秒の出力電圧を平均し, さらにそれらを 5 回の試行で平均したものを計測値とする。Fig. 10 に Table 2 に示した面積の割合と計測値の関係を示す。

この結果から, 曲げ変形が加えられるセンサ素子面積の割合が増加するにつれて, センサ出力も増加することがわかった。また, 面積の割合とセンサ出力の関係は比例関係であることがわかった。

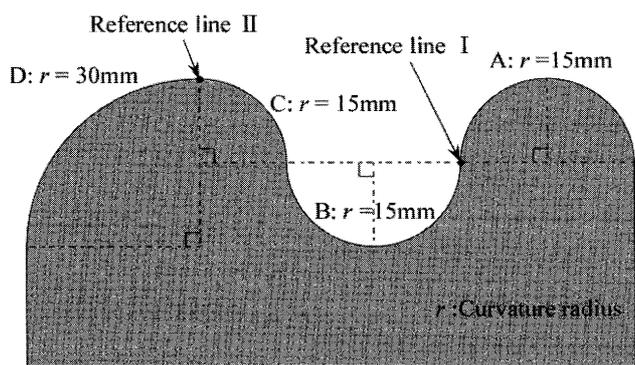
5 組み合わせ曲面に対するセンサ出力特性評価

第 4.3 節の実験では, 曲面部, 平面部を組み合わせた対象を用いたが, 本節では, より複雑な曲面同士を組み合わせた対象の計測を行い, より詳細にセンサ素子上の曲げ変形と出力の関係を調査する。

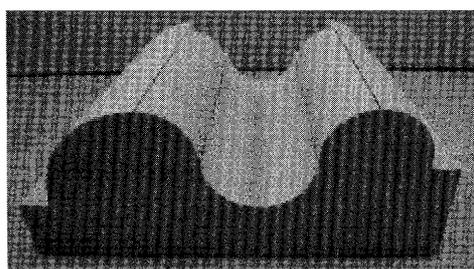
5.1 測定対象の概要および実験方法

本実験で用いるサンプル d の概要を Fig. 11 に示す。サンプル d は, 曲面部 A, B, C の曲率半径が 15mm , 曲面部 D の曲率半径は 30mm であり, それらの曲面が滑らかに接合されている。曲面 A, C, D は凸曲面で, B は凹曲面であり, それぞれの曲面部の円周方向の長さは A, B, D が 47.1mm , C が 23.6mm である。曲面部 A と曲面部 B の境界, および曲面部 C と曲面部 D の境界には基準線 I, II がそれぞれ設けてある。基準線の位置を決定するため, サンプル d には奥面に段差を設けてあるが, 測定対象曲面はセンササイズより十分大きく, 奥面段差部にセンサが沿うことなく出力を計測することが可能である。

実験では, 基準線 I および II を用いて, それぞれ曲面部 A から B へ, および曲面部 C から D へセンサを



(a) Cross section.



(b) Photograph.

Fig. 11 Measurement sample d.

動かして計測を行う。計測方法は第 4.3 節と同様にセンサの各位置を基準線に合わせて出力を計測する。各測定条件で 5 回計測する。

5.2 実験結果

基準線 II を用いた曲面部 C から D への計測で得られた出力波形の一例を Fig. 12 に示す。曲面部 A から B および曲面部 C から D の計測それぞれについて第 4.3 節と同様に計測値を求め、Fig. 13 にまとめる。ただし横軸は、基準線 I を越えて曲面部 B 側にあるセンサ素子面積の全体に対する割合、または基準線 II を越えて曲面部 D 側にあるセンサ素子面積の割合である。どちらの場合も、面積の比率に対してセンサ出力が比例関係にあることがわかる。

曲面部 A と B の組み合わせの場合に注目すると、同じ曲率の曲面の凹凸を組み合わせた測定曲面となっている。面積の割合が 50% の場合、凸面と凹面の面積が等しくなる。この場合のセンサ出力は 0mV であった。本センサは、測定対象曲面が凹曲面か凸曲面かによって、出力電圧の正負が逆転する性質を持っており、凸変形によって生じた電圧と凹変形によって生じた電圧が打ち消し合ったと考えられる。

ここで、凸曲面部の曲率を正とし、凹曲面部の曲率は負とし、センサ素子全体に加えられている曲げ変形

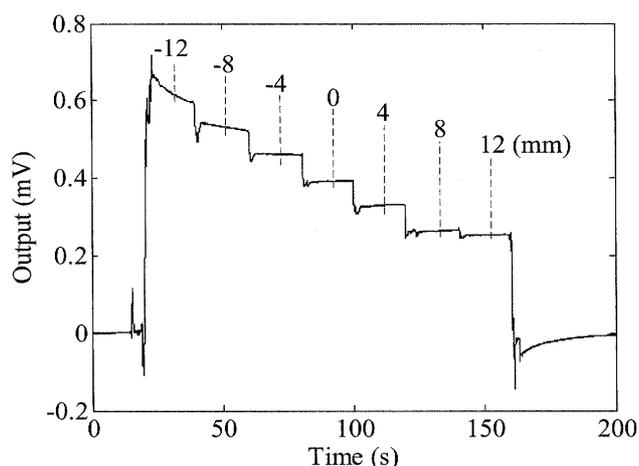


Fig. 12 Response of sensor output to measure curve C to D on sample d.

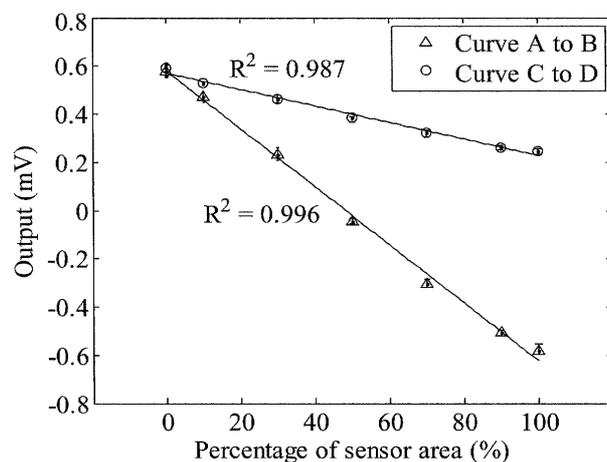


Fig. 13 Relationships between sensor output and percentage of sensor area added bending deformation.

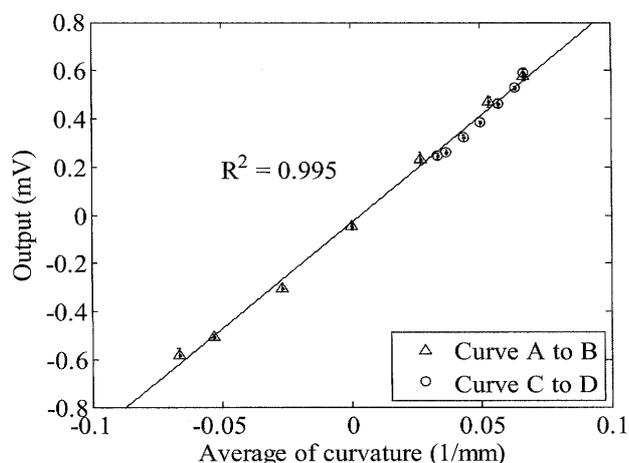


Fig. 14 Relationship between sensor output and average of curvature.

の平均曲率 ρ_{av} を次式のように定義する。

$$\rho_{av} = \sum_{n=1}^N C_n \rho_n \quad (1)$$

$$\sum_{n=1}^N C_n = 1 \quad (2)$$

ここで、 N はセンサ素子に加えられている曲げ変形の曲率の数、 ρ_n は n 番目の曲げ変形の曲率、 C_n はその曲げ変形の面積分率である。本実験の場合、 $N=2$ である。この平均曲率を用いて Fig. 13 の結果を整理し直すと Fig. 14 のようになる。横軸が平均曲率、縦軸がセンサ出力である。以前の研究[5]で示した一様な曲率変形を加えたときと同様に、平均曲率とセンサ出力は次式のような比例関係にあることがわかった。

$$V = \alpha(C_1 \rho_1 + C_2 \rho_2) = \alpha \rho_{av} \quad (3)$$

ここで、 α はセンサの特性を表す係数である。

以上より、本センサを用いることで対象物の平均曲率を計測可能であることがわかった。

6 結言

本研究では、固体高分子電解質を用いた曲率センサを作製し、その特性評価を行った。その結果、本センサでは、センサ出力はセンサの回転角度に依存しないこと、センサ素子内に生じる曲げ変形の位置によるセンサ出力への影響がないことを示した。さらに、センサ素子全体に複数の曲率の曲げ変形を加えた場合、センサ出力はその平均曲率に依存することを明らかにした。

謝辞

本研究を進めるに当たり、センサ材料を提供して頂いた(株)クラレ須郷望氏、小宮良太氏に対し、ここに感謝の意を表します。

(2010年4月6日受付)

参考文献

- [1] M. Shahinpoor *et al.*, "Ionic Polymer-Metal Composites (IPMC) As Biomimetic Sensors and Actuators," *Proceedings of SPIE's 5th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, No.3324-3327, pp.1-17, 1998.
- [2] Y. Nakabo *et al.*, "Increase of Bending Response in IPMC Dynamics Given Uniform Input I: Analysis of Bending Response of Snake-Like Swimming Robot using IPMC," *Transactions of ISICIE*, Vol.19, No.8, pp.319-326, 2006.

- [3] M. Konyo *et al.*, "Artificial Tactile Feeling Display Using Soft Gel Actuators," *Proceedings of 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.3416-3421, 2000.
- [4] M. S. Cho *et al.*, "An electroactive conducting polymer actuator based on NBR/RTIL solid polymer electrolyte," *Smart Materials and Structures*, Vol.16, pp.237-242, 2007.
- [5] T. Okuyama *et al.*, "Development of a curvature sensor using a solid polymer electrolyte," *Proceedings of the 2009 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment*, No. 09-204, pp.315-316, 2009.
- [6] S. Saito *et al.*, "Development of a soft actuator using a photocurable ion gel," *J. Miromech. Microeng.*, 19, 035005 2009.