高分子圧電フィルムを用いた静的ひずみ分布の測定*

(測定原理および円孔付平板に対する検討)

勝 見 圭 介^{*1}, 琵琶 志 朗^{*2}
松 本 英 治^{*3}, 柴 田 俊 忍^{*2}

Measurement of Static Strain Distribution Using Piezoelectric Polymer Film (Principle and Application to a Holed Plate)

Keisuke KATSUMI, Shiro BIWA,
Eiji MATSUMOTO and Toshinobu SHIBATA

The objective of the present study is to exploit the feasibility of piezoelectric polymer film sensors to evaluate in-plane strain distributions of structural components. In contrast to ordinary use of piezoelectric films as strain and strain-rate sensors detecting electric charges and currents through electrodes, the proposed strategy consists of directly measuring the distribution of electric potentials induced in the piezoelectric film mounted on the surface of a structural component in loading. The stress and strain distributions are determined from the measured potentials taking into account the piezoelectric constitutive law of film materials. As an illustrative example, thin films of polarized polyvinylidene fluoride (PVDF) are mounted on a holed elastic plate subjected to in-plane loading, and the induced potential distributions are measured on the film surface by an electrostatic voltmeter of non-contact type. It is demonstrated that the determined strain distributions are in fair conformity with those analytically predicted.

Key Words: Piezoelectricity, Polyvinylidene Fluoride (PVDF), High Polymer Materials, Sensor, Strain Measurement, Stress Concentration

1. 緒 言

近年、インテリジェント材料、あるいは知的材料・構造といった概念が広まりつつある。これらは材料自身あるいは構造にセンサ機能、コントロール機能、アクチュエータ機能といった知的な機能を与えようとするものであり、さまざまな分野で研究が進められている⁽¹⁾⁽²⁾。その鍵を握る技術の一つに圧電材料を利用した構造部材のひずみ・ひずみ速度のセンシング技術がある^{(3)~(7)}。このうち、Egashira と Shinya⁽⁶⁾ は、アルミニウム板表面に高分子圧電材料であるポリフッ化ビニリデン(以下、PVDF)やフッ化ビニリデンと三フッ化エチレンの共重合体をコーティングし、応力集中部のひずみの検出・計測に成功している。

構造部材の健全性を非破壊的に把握するにあたっては、ひずみの分布パターンを計測することが有効な情報をもたらすことが多いと考えられる。そこで本研究では、PVDF フィルムを構造材料に貼付し、表面の静的なひずみの分布を測定することを試みた。また、圧

電体の線形構成式よりその特性を検討した。

2. PVDF フィルムの ひずみ-表面電位関係式

2・1 ポリフッ化ビニリデン(PVDF) 圧電性とは応力あるいはひずみを加えると分極を生じる性質のことであり、力学的エネルギーを電気的エネルギーへと変換するものである。こういった圧電性を有する材料の代表的なものにセラミック圧電材料と高分子圧電材料がある。高分子圧電材料はセラミック圧電材料に比べ軽量、柔軟性に富む、加工性がよい、化学的安定性に優れているといった利点があり⁽⁸⁾、知的構造におけるセンサ材料として有望視されている。

PVDF は顕著な圧電性を有する代表的な高分子圧電材料の一つである。PVDF の圧電性はその結晶構造により大きく変化する。通常、圧電材料として PVDF を用いるときは、大きな圧電性を有する β 形結晶を得るために延伸、分極処理がなされる。以下、構造物表面に貼り付けてセンサとして用いることを想定し、一軸延伸、分極処理を施されたフィルム状の PVDF について考える。図 1 に示すように延伸方向を 1 軸、分極方向(厚さ方向)を 3 軸、これらと垂直に 2 軸とする。本研究で用いた PVDF フィルム(呉羽化

* 原稿受付 1997 年 3 月 25 日。

^{*1} 京都大学大学院(〒606 01 京都市左京区吉田本町)。

^{*2} 正員、京都大学大学院工学研究科。

^{*3} 正員、京都大学大学院エネルギー科学研究科。

学)の材料定数の典型的な値⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾を表1に示す。比較のため代表的なセラミック圧電材料であるPZTの材料定数⁽⁹⁾もあわせて示した。これからわかるとおり、PVDFはPZTに比べ軽量かつ柔軟性に優れている。この特徴は、計測対象のひずみ状態を乱すことなく測定する際に長所となる。

PVDFフィルムをひずみセンサとして用いるとき、多くの場合フィルム両面に電極を設け、両電極間に閉じた回路が作られる。そして、回路内を流れる電流等を測定することで加えられたひずみあるいは応力が求められる。しかし、この方法では電極に生じる電荷が回路を通じて流れてしまい、静的なひずみや応力を測定することは難しい。また、得られるひずみや応力の値は電極面積内での平均値となる。本研究では電極を片面だけに設け、各点でフィルム両面の電位差を測定することで、静的なひずみ分布を求めることを試みた。以下では圧電体の線形構成式よりPVDFフィルムのひずみ-表面電位関係式を求める。

2.2 PVDFフィルムのひずみ-表面電位関係式

圧電材料の線形構成式⁽¹¹⁾は次式で表される。

$$\mathbf{D} = \mathbf{e}\mathbf{S} + \epsilon\mathbf{E}, \quad \mathbf{T} = \mathbf{c}\mathbf{S} - \mathbf{e}^T\mathbf{E} \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに $\mathbf{D}$ は電気変位、 $\mathbf{E}$ は電場、 $\mathbf{S}$ はひずみ、 $\mathbf{T}$ は応力、 ϵ は $\mathbf{S}$ 一定での誘電率、 $\mathbf{c}$ は $\mathbf{E}$ 一定での弾性定数である。 $\mathbf{e}$ は圧電 $\mathbf{e}$ 定数と呼ばれるもので、この圧電 $\mathbf{e}$ 定数により力学的な物理量と電気的な物理量が相互に結びつけられている。力学的な添字を11→1, 22→2, 33→3, 23→4, 31→5, 12→6と置き換え、応力およびひずみをベクトル表示すると、図1に示した対称性を有するPVDFの圧電定数および弾性定数は次の形で表される。

$$[\mathbf{e}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{24} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdots \cdots (2)$$

Fig. 1 PVDF film

$$[\mathbf{c}] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \cdots \cdots (3)$$

フィルム下面(法線が3軸方向と逆の向きを示す面)に電極を有するPVDFフィルムを考える。PVDF内に真電荷が存在しないとすると、Maxwell方程式($\text{div } \mathbf{D} = 0$)より空気中との境界条件から $D_3 = 0$ となる。下面に電極を有し、十分に薄いことから、 E_1, E_2 は十分に小さく無視できるとする。このとき式(1), (2), (3)より次の2式が導かれる。

$$\sum_{i=1}^3 e_{3i} S_i + \epsilon_{33} E_3 = 0 \quad \cdots \cdots (4)$$

$$\sum_{i=1}^3 c_{3i} S_i - e_{33} E_3 = 0 \quad \cdots \cdots (5)$$

ここで、 $S_i (i=1, 2, 3)$ はフィルムの対称軸に関するひずみ成分である。

PVDFフィルムの厚さを d とすると、フィルム上下面の電位差 V は、

$$V = -dE_3 \quad \cdots \cdots (6)$$

と表される。式(4), (5), (6)より S_3, E_3 を消去すると、PVDFフィルムの上下面に生じる電位差 V は平面内のひずみ S_1, S_2 を用いて次式のように表される。

$$V = \frac{d}{\epsilon_{33}(1+k_t^2)} (\tilde{e}_{31} S_1 + \tilde{e}_{32} S_2) \quad \cdots \cdots (7)$$

ここで $\tilde{e}_{3i} = e_{3i} - (c_{3i}/c_{33})e_{33} (i=1, 2)$ とした。また k_t は $k_t = e_{33}/\sqrt{\epsilon_{33}c_{33}}$ で表されるPVDFの電気機械結合定数である。

構造物表面にPVDFフィルムを貼り付け平面内のひずみを測定することを想定する。PVDFフィルムは十分に薄く、剛性が低いことから、PVDFフィルムの平面内のひずみ S_1, S_2 は構造物の面内ひずみによって拘束される。構造物表面に任意の方位に x - y 座

Table 1 Characteristic material constants

	PVDF	PZT
Density (10^3kg/m^3)	1.78	7.5
Stiffness (10^9N/m^2)	3.0	83.3
Relative dielectric constant	13	1200
Piezoelectric constant e (10^{-2}coul/m^2)	9	920
Coupling constant (%)	15	30.8

標を設けると、PVDF フィルムの表面電位は構造物内の x 軸方向垂直ひずみ S_x , y 軸方向垂直ひずみ S_y , せん断ひずみ S_{xy} の一次結合により表され、それぞれの係数は構造物の x - y 座標系と PVDF フィルムの 1 軸, 2 軸とがなす角度 θ に依存する。このとき、

$$\left. \begin{aligned} e'_{31}(\theta) &= \bar{e}_{31} \cos^2 \theta + \bar{e}_{32} \sin^2 \theta \\ e'_{32}(\theta) &= \bar{e}_{31} \sin^2 \theta + \bar{e}_{32} \cos^2 \theta \\ e'_{36}(\theta) &= (\bar{e}_{31} - \bar{e}_{32}) \cos \theta \sin \theta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

と置くと、表面電位 $V(\theta)$ は、座標系の変換則により

$$V(\theta) = \frac{d}{\epsilon_{33}(1+k_t^2)} \{ e'_{31}(\theta) S_x + e'_{32}(\theta) S_y + e'_{36}(\theta) S_{xy} \} \dots\dots\dots (9)$$

と表される。このことから、適当な三つの異なる θ で表面電位を測定することで、平面内のひずみ S_x , S_y , S_{xy} を求めることができる。そのための条件は次式となる。

$$\begin{vmatrix} e'_{31}(\theta_1) & e'_{32}(\theta_1) & e'_{36}(\theta_1) \\ e'_{31}(\theta_2) & e'_{32}(\theta_2) & e'_{36}(\theta_2) \\ e'_{31}(\theta_3) & e'_{32}(\theta_3) & e'_{36}(\theta_3) \end{vmatrix} \neq 0 \dots\dots\dots (10)$$

特に、 $\theta=0$ と $\theta=\pi/2$ では、せん断ひずみ S_{xy} の影

Fig. 2 Relation between voltage and strain under uniaxial load

Fig. 3 PVDF films mounted on a holed plate

響がなくなり、 S_x , S_y は次式で求められる。

$$S_x = \frac{\epsilon_{33}(1+k_t^2)}{d(\bar{e}_{31}^2 - \bar{e}_{32}^2)} \{ \bar{e}_{31} V(0) - \bar{e}_{32} V(\pi/2) \} \dots\dots\dots (11)$$

$$S_y = \frac{\epsilon_{33}(1+k_t^2)}{d(\bar{e}_{31}^2 - \bar{e}_{32}^2)} \{ \bar{e}_{31} V(\pi/2) - \bar{e}_{32} V(0) \} \dots\dots\dots (12)$$

実際に式(11), (12)を用いてひずみ S_x , S_y を求めるためには、比例係数の値が必要となる。これらの係数は、PVDF フィルムをある材料に貼り付け、1 軸方向, 2 軸方向にそれぞれ単軸引張試験を行うことで求められる。1 軸方向単軸引張りの場合、貼り付けられた材料のポアソン比を ν とすると $S_y = -\nu S_x$, $S_{xy} = 0$ であるから、

$$V(0) = \frac{d}{\epsilon_{33}(1+k_t^2)} (\bar{e}_{31} - \nu \bar{e}_{32}) S_x \dots\dots\dots (13)$$

となる。同様に 2 軸方向単軸引張りの場合、

$$V(\pi/2) = \frac{d}{\epsilon_{33}(1+k_t^2)} (\bar{e}_{32} - \nu \bar{e}_{31}) S_y \dots\dots\dots (14)$$

となる。そこで、アクリル樹脂の試験片(ヤング率: 3400 MPa, ポアソン比: 0.39)に本研究で用いた PVDF フィルム(厚さ 30 μm , 呉羽化学)を貼り付け、1 軸方向, 2 軸方向にそれぞれ単軸引張試験を行った。その結果を図 2 に示す。3 種の異なるひずみ速度で単軸引張試験を行ったが、表面電位はひずみ速度によらず、ひずみと線形関係にあることを示している。この結果と式(13), (14)より以下の係数が求められる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\bar{e}_{31}}{\epsilon_{33}(1+k_t^2)} &= 1.91 \times 10^4 [\text{V}] \\ \frac{d\bar{e}_{32}}{\epsilon_{33}(1+k_t^2)} &= 9.81 \times 10^3 [\text{V}] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

これらの係数は貼り付ける構造物によらず、PVDF フィルムによって決まる係数である。1 軸方向, 2 軸方向で係数が大きく異なるのは、延伸処理による影響

Fig. 4 Measurement system

であり、これらの比は延伸率によって大きく変化する⁽¹²⁾。

3. 実験方法

試験片および実験装置の概略を図3および図4に示す。矩形板のアクリル樹脂試験片(長さ64 mm×幅30 mm×厚さ10 mm)の中央に直径12 mmの円孔を開けた。以下、原点を試験片の中央に、 x 軸を長手方向に、 y 軸を幅方向に持つ座標系を設定する。 x 軸方向と1軸方向が一致するものと、 $\pi/2$ の角度をなすものの2枚のPVDFフィルム(厚さ30 μm , 呉羽化学)をそれぞれ試験片の表と裏に貼り付けた。PVDFフィルムには片面にアルミニウム電極が蒸着されており、電極面が試験片と接するように貼り付けた。このときフィルムは円孔部分を覆い隠すように貼られている。

この試験片の x 軸方向に約0.05%の圧縮ひずみを与え、表面電位の分布を測定した。圧縮面の整合性を良くするため厚さ3 mmのゴム板を介して圧縮した。表面電位の測定には表面電位計(Trek Inc., ESVM-model-344)を用いた。測定は、①図5の斜線部で示

Fig. 5 Measured region

Fig. 6 Distribution of electric potential $V(0)$

した20 mm×26 mmの範囲($-14 \text{ mm} \leq x \leq 6 \text{ mm}$, $-13 \text{ mm} \leq y \leq 13 \text{ mm}$)において1 mm間隔の格子点、合計567点、および②図5の格子線部で示した5 mm×5 mmの範囲($0 \text{ mm} \leq x \leq 5 \text{ mm}$, $6 \text{ mm} \leq y \leq 11 \text{ mm}$)において0.25 mm間隔の格子点、合計441点で行った。フィルム上でプローブをスキャンし、各点における表面電位を非接触で測定した。

PVDFフィルムは自発分極や焦電性、あるいはPVDFフィルムを貼り付ける際に生じる残留ひずみ等の影響で無負荷状態でも表面電位の分布を有するので、無負荷時と圧縮時でそれぞれ表面電位の分布を測定し、その変化量をひずみの算出に用いた。

4. 実験結果および考察

範囲①において測定されたPVDFフィルムの表面電位分布を図6, 7に示す。1軸方向が圧縮方向(x 軸方向)に一致するPVDFフィルムの表面電位分布 $V(0)$ を図6に、1軸方向が圧縮方向(x 軸方向)と垂直なPVDFフィルムの表面電位分布 $V(\pi/2)$ を図7に示した。

負荷が圧縮であることに対応して、両図においては符号を反転して電位を示した。図6では、表面電位 $V(0)$ は y 軸上の円孔端部で二つの極小値(上に凸に見える部分)を、 x 軸上の端部で極大値(下に凸)を示している。また、図7の表面電位 $V(\pi/2)$ は、円孔上部で他の部分に比べて下に窪んだパターンを示している。その他の測定範囲では両者ともに顕著な極大、極小はなくなだらかな表面電位分布を示している。測定結果に見られる多少の乱れの原因としては、フィルム貼り付け時に生じる接着面の不備(空泡、ほこりの存在や接着層厚さの不均一)、あるいはスキャンによる位置の誤差等が考えられる。

これらの表面電位分布より算出された x 軸方向のひずみ分布 S_x を図8に、 y 軸方向のひずみ分布 S_y を

Fig. 7 Distribution of electric potential $V(\pi/2)$

Fig. 8 Strain distribution S_x

Fig. 9 Strain distribution S_y

Fig. 10 Strain distribution S_x

図9に示す。比較のため Howland⁽¹³⁾ による二次元弾性理論解をあわせて示した。実験では測定範囲内の格子点すべてで PVDF フィルムの表面電位分布を測定しているため、円孔の上部にあたる部分でもひずみ分布が算出されているが、これは貼り付けた部材のひずみには無関係の値である。ひずみ分布の形状の比較を容易にするために、弾性解析解の円孔部を実験値の該

Fig. 11 Strain distributions along the y -axis

当部分とほぼ同じ一定値のひずみで埋めた。

S_x , S_y どちらのひずみ分布も弾性解析解と実験値が非常に似通った形状を示している。 S_x のひずみ分布では円孔近傍でのひずみの極大、極小部分がはっきりと測定されている。また、円孔から離れた部分での比較的ひずみのこう配の小さな分布も良く再現されて

いる。 S_y のひずみ分布についても同様なことがいえる。

しかし、 S_x のひずみ分布における極小部分(図8で上向きのピークを示す部分)で比較的大きな誤差を生じている。これをさらに検討するため、範囲②における表面電位分布測定から求められたひずみ分布 S_x およびHowlandによる弾性解析解を図10に示す。比較的ひずみのこう配が小さい範囲では、実験値と理論値に大きな差はないが、ひずみのこう配が大きくなるにつれて実験値と理論値との差が大きくなっていることがわかる。さらに、図10における y 軸上($x=0$)での x 軸方向のひずみ分布 S_x の実験値および理論値の値を図11に示した。また、同じ y 軸上における y 軸方向垂直ひずみ分布 S_y の実験値および弾性解析解の値も合わせて示した。

x 軸方向のひずみ S_x については、分布がなだらかなところでは実験値と理論値との間にほとんど差はないが、ひずみが急激に変化するところほど差が大きくなっていることがわかる。図11で最もひずみが集中している点では、二次元弾性解析解のひずみ分布では十分遠方に与えられたひずみの約3.6倍のひずみが現れているが、実験により求められたひずみ分布では約2.6倍の値しか得られていない。これは、表面電位計のプロブの空間分解能が直径2 mm程度であり、得られる表面電位の値がその領域内の表面電位をある重みをつけて平均化したものとなっているからであると考えられる。

y 軸方向のひずみ S_y も弾性解析解と実験値がよく対応している。ひずみ分布の形状としては、やはりひずみ分布のこう配の大きいところでは弾性解析解よりも実験値の方がこう配が小さくなっている。しかし、ひずみの値としては、妥当な精度で測定できているといえる。

本研究ではPVDFフィルムを用いてひずみ分布を求めることを試みたが、PVDFフィルムを貼り付けた構造物の弾性特性が既知であれば、求められたひずみ分布を用いて構造物の平面内の応力分布も簡単に算出できる。

5. 結 言

本研究では、フィルム状のPVDFを静的なひずみ分布を求めるセンサとして用いることを試みた。その結果、実験により弾性解析解とよく対応したひずみ分布の形状が得られた。ひずみこう配が大きい領域では誤差が若干認められたものの、比較的なだらかなひずみ分布を示す部分ではひずみ分布がほぼ再現された。このことにより、PVDFフィルムの静的ひずみ分布を測定するセンサとしての有効性が示された。PVDFフィルムの貼り付け方、あるいは貼り付け後の処理により無応力時に生じている表面電位分布を消すこと、表面電位の測定法の改善による空間分解能および精度の向上が今後の課題である。

文 献

- (1) 谷 順二, 知的複合材料と適応設計, インテリジェント材料, 3-3 (1993), 6-11.
- (2) Crawley, E. F., Intelligent structures for aerospace: a technology overview and assessment, *AIAA J.*, 32-8 (1994), 1689-1699.
- (3) Lee, C.-K. (Tzou, H. S. and Anderson, G. L. 編), Piezoelectric laminates: theory and experiments for distributed sensors and actuators, *Intelligent Structural Systems*, (1992), 75-167, Kluwer Academic Publishers.
- (4) Tzou, H. S., *Piezoelectric Shells*, (1993), 1, Kluwer Academic Publishers.
- (5) 江草茂則・岩沢直純, 超先進構造・材料としての知的材料(11)圧電性塗料, 機械の研究, 45-5 (1993), 602-606.
- (6) Egashira, M. and Shinya, N., Local strain sensing using piezoelectric polymer, *J. Intell. Mater. Sys. Struct.*, 4 (1993), 558-560.
- (7) Zhang, H., Galea, S. C., Chiu, W. K. and Lam, Y. C., An investigation of thin PVDF films as fluctuating-strain-measuring and damage-monitoring devices, *Smart Mater. Struct.*, 2 (1993), 208-216.
- (8) Sessler, G. M., Piezoelectricity in polyvinylidene-fluoride, *J. Acoust. Soc. Am.*, 70-6 (1981), 1596-1608.
- (9) KF ピエゾフィルムカタログ, 呉羽化学工業(株).
- (10) 中村謙一・寺本嘉吉・村山直廣, PVDF; ポリフッ化ビニリデン, 固体物理, 18-6 (1983), 344-350.
- (11) Ikeda, T., *Fundamentals of Piezoelectricity*, (1990), 15, Oxford Science Publication.
- (12) Tasaka, S. and Miyata, S., The origin of piezoelectricity in poly (vinylidene fluoride), *Ferroelectrics*, 32 (1981), 17-23.
- (13) Howland, R. C. J., On the stresses in the neighbourhood of a circular hole in a strip under tension, *Phil. Trans. R. Soc.*, A 229 (1930), 48-86.