

高分子圧電フィルムを用いた探傷のモニタリング

Monitor of searching damage with polymer piezoelectric high-polymer film

京都大学大学院 橋村 知 Tomo HASHIMURA

京都大学大学院 松本 英治 Eiji MATSUMOTO Member

京都大学大学院 琵琶 志朗 Shiro BIWA Member

In order to detect back surface defects in a plate, the surface strain distribution is visualized by use of piezoelectric thin film. When the plate with a back surface defect is deformed, the resultant strain distribution in the front surface reflects the defect. Such surface strain distribution can be obtained from the electric potential distribution on the piezoelectric film mounted on the front surface. The purpose of this paper is to detect the defects by measuring the electric potential distribution on the piezoelectric film. When piezoelectric films are laminated, sum of principal strain distribution or the shear strain distribution can be obtained

Keywords: Piezoelectricity, polyvinylidene fluoride(PVDF), sensor, strain distribution, electric potential, back surface defect

1. 緒言

圧電材料には主に圧電セラミックス、高分子圧電材料があり、圧電セラミックスは電界印加により生じる応力が大きいため、主にアクチュエータ材料として用いられることが多い。一方高分子圧電材料は、軽量である、剛性が低く柔軟性に富む、加工性がよく任意の形状のものを作成できる、化学的安定性に優れている、力学的な入力に対する感度がよいといった特徴を持ち、センサとして期待されている。

本研究では代表的な高分子圧電材料である PVDF フィルムをセンサとして用い欠陥を検出する場合について実験を行い調べた。

2. PVDF フィルムの表面電位ーひずみ関係

2.1 PVDF フィルムの基礎的性質

下面に接地したアルミ電極を有する十分薄い PVDF フィルムが面内で変形する場合を考えると、平面応力状態とみなすことができる。以下では PVDF 内に真電荷 ρ が存在しないと仮定し、あらかじめ存在する焦電性による電位は変形によって生ずる電位変化だけに注

目するので無視することにする。

文献[4]によれば、フィルムの上面の電位 V は次のようにフィルム内のひずみ成分で表すことができる。すなわち、Fig.1 のように延伸方向に第 1 軸、分極方向(厚さ方向)に第 3 軸、これらと垂直な方向に第 2 軸をとると

$$V = p_1 S_1 + p_2 S_2 \quad (1)$$

ここで、 $k=1,2$ に対して

$$p_k = \frac{d(c_{33}e_{3k} - c_{3k}e_{33})}{(c_{33}\varepsilon_3 + e_{33}^2)} \quad (2)$$

上式では、応力テンソルとひずみテンソルの添え字を $11 \rightarrow 1, 22 \rightarrow 2, 33 \rightarrow 3, 23 \rightarrow 4, 31 \rightarrow 5, 12 \rightarrow 6$ と変換して、6 次元空間のベクトルとして表してある。S はひずみ、 ε はひずみ一定での誘電率、c は電場一定での弾性定数、e は 3 階のテンソルで圧電 e 定数と呼ばれる定数である。d はフィルムの厚さである。式 (1) の係数はあらかじめ単軸引っ張り試験を行って求められており、その結果は次の通りである[6]。

$$p_1 = 1.91 \times 10^4, p_2 = 9.81 \times 10^3 \quad [V] \quad (3)$$

連絡先：松本英治、〒606-8501、京都市左京区吉田本町、

京都大学大学院エネルギー科学研究所、e-mail:

matumoto@energy.kyoto-u.ac.jp

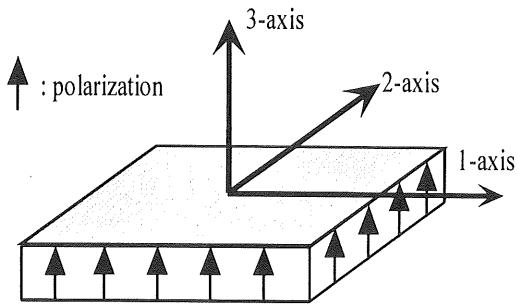


Fig. 1 Coordinate system in PVDF film.

構造物表面に電極面が接するように PVDF フィルムを貼り付けて平面上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 は構造物表面の平面内のひずみによって拘束される。構造物表面に x - y 座標を設け、 x 軸方向の垂直ひずみを S_x , y 軸方向の垂直ひずみを S_y , せん断ひずみを S_{xy} と表すとする。このとき、構造物表面の x - y 座標の x 軸と PVDF フィルムの第 1 軸(延伸方向)とが角度 θ をなす場合に PVDF フィルムの上下面に現れる電位差 $V(\theta)$ は、座標変換によるひずみ成分の変換公式を用いて次式で表される。

$$V(\theta) = (p_1 \cos^2 \theta + p_2 \sin^2 \theta)S_x + (p_1 \sin^2 \theta + p_2 \cos^2 \theta)S_y + [(p_1 - p_2)\sin 2\theta]S_{xy} \quad (4)$$

とくに $\theta=0^\circ$ のときには、電位差はせん断ひずみ S_{xy} の寄与が消えて次式のように垂直ひずみで表すことができる。

$$V(0^\circ) = p_1 S_x + p_2 S_y \quad (5)$$

構造物表面にひずみ分布がある場合には式(4),(5)は、構造物の各点における電位を表している。すなわち、構造物表面のひずみ分布により PVDF フィルム上に電位の分布が生じ、それを測定することでひずみ分布に関する情報を得ることができる。

2.2 欠陥の影響による表面電位分布の測定

本実験では、応力下の欠陥の影響によって生じる試

Table 3.1 Material constants of acrylic plate.

Elastic modulus E [MPa]	Poisson's ratio ν
3400	0.39

験片表面のひずみ分布が試験片表面に貼付した PVDF フィルム上の電位分布に与える影響を調べる。試験片の応力-ひずみ関係や PVDF フィルムの構成式は線形関係が成り立つような変形の範囲を仮定しているので、できるだけ大きなひずみが得られる高分子材料(アクリル)を試験片に選んだ。アクリルの主な材料定数の値を Table 1 に示す。試験片として使用したアクリル板は長さ 75mm × 幅 30mm × 厚さ 10mm のものである。欠陥として試験片の中央には幅方向に長さ 12mm × 幅 3mm × 深さ 7mm のスリットを入れた。フィルムを 30mm × 30mm の大きさに切り、電極面がアクリル板と接するように、エポキシ系接着剤を用いて貼付した。

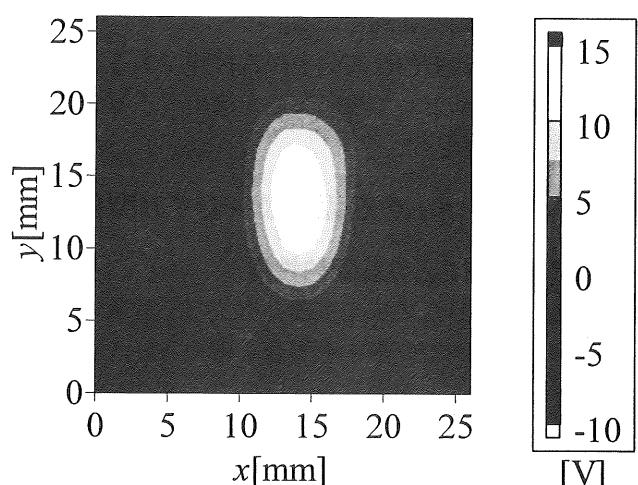
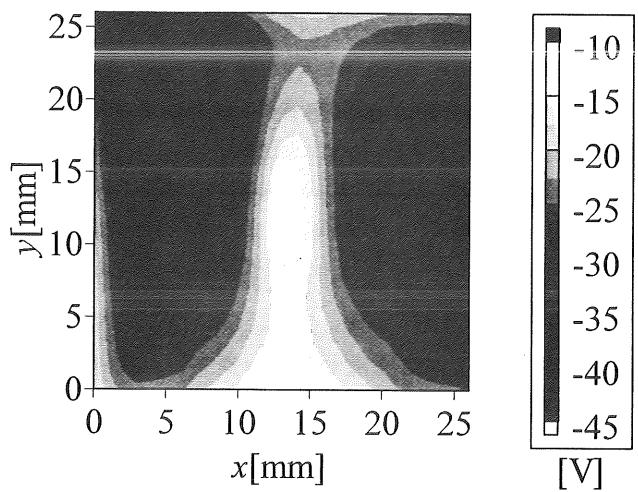


Fig. 3 Distribution of electric potential V for an elongation direction parallel to y -axis.

荷重方法は万力を用いて長さ方向 (x 軸方向) の平均的な圧縮ひずみが 0.2% となるような状態で固定した。なお圧縮に際してはアクリル板の粘弾性的性質を考慮し圧縮後数分間おいてから測定を行った。なお、フィルム上の電位測定には表面電位計(TREK ジャパン, ESVM-model-344)を用いた。圧縮荷重を与える前後の表面電位の変化量を求めて焦電性の影響を除いた変形により生じた電位とした。

2.3 実験結果及び考察

フィルムの延伸方向と圧縮方向を一致させた場合の表面電位分布を Fig.2, 延伸方向と圧縮方向のなす角が 90° をなす場合の表面電位分布を Fig.3 に示す。なお表面電位の値は正値ならば引っ張りひずみ、負値ならば圧縮ひずみを表している。電位分布の特徴としては欠陥部と非欠陥部の境目で大きく電位が変化しており、電位分布と欠陥の形状が対応していることが分かる。しかし、貼付する方向により表面電位分布が異なっており欠陥を検出できない場合があると考えられる。

3. 積層した PVDF フィルムの性質

3.1 積層した PVDF フィルムの電位ーひずみ関係

前章では単層の PVDF フィルムの表面電位ーひずみ関係について述べた。PVDF フィルムを 2 枚重ねて積層した場合、フィルムの最上面に表れる表面電位分布は 2 枚のフィルムそれぞれに表れる表面電位分布を足し合わせたものと等しい。上に積層するフィルムの分極方向を下のフィルムの分極方向と一致させて延伸方向を下のフィルムの延伸方向から 90° 回転させて積層したとき、この積層したフィルムは垂直ひずみに対して等方的な感度を持ち、積層したフィルムの表面電位ーひずみ関係は次式で表される[4]。

$$\begin{aligned} V'(\theta) &= V(\theta) + V(\theta + 90^\circ) \\ &= (p_1 + p_2)(S_x + S_y) \end{aligned} \quad (5)$$

このフィルム上の電位を測定すれば、構造物の垂直ひずみの和、あるいは主ひずみの和が測定できる。

PVDF フィルムの分極方向を逆にしたとき、表面に現れる電位分布は式(4)の逆符号になっている。そこで分極方向を逆にして延伸方向を 90° 回転させて上と同様に 2 枚のフィルムを積層したとき、積層したフィルムの上下面の電位差を $V''(\theta)$ とすると

$$\begin{aligned} V''(\theta) &= V(\theta) - V(\theta + 90^\circ) \\ &= (p_1 - p_2)\{(S_x - S_y)\cos 2\theta + 2S_{xy}\sin 2\theta\} \end{aligned} \quad (6)$$

となり、 θ に依存する関数となる。ここで $\theta = 45^\circ$ とすると式(6)は

$$V''(45^\circ) = 2(p_1 - p_2)S_{xy} \quad (7)$$

と表される。このとき x, y 方向の垂直ひずみ S_x, S_y の寄与はなくなり、せん断ひずみ S_{xy} のみで表される。したがって、上のように積層したフィルムの電位差を測定すれば、下のフィルムの延伸方向から -45° 回転した座標におけるせん断ひずみ分布を得ることができ、さらに測定した領域におけるせん断応力の様子が分かる。このように積層したフィルムがせん断ひずみを測定できる方向をせん断ひずみの感度方向と呼ぶ。

3.2 積層した PVDF フィルムによる主ひずみの和及びせん断ひずみの測定

本実験では、積層して主ひずみの和を測定できる PVDF フィルムとせん断ひずみを測定できる PVDF フィルムを用いて 2.2 節で用いたアクリル試験片と同様の試験片表面の主ひずみの和及びせん断ひずみ分布を測定する。なお荷重方法は 2.2 節と同様にした。

3.3 実験結果及び考察

主ひずみの和を測定できる PVDF フィルムを用いた場合の表面電位分布を Fig.4 に示す。貼付する方向を変えて貼付してもほぼ同様の表面電位分布のパターンが現れており、この積層させた PVDF フィルムの感度に等方性があることが確認された。単層のフィルムでは貼付する方向により欠陥を検出できない場合があつたがこの積層したフィルムは任意の方向に貼付しても一定の効果があることが示された。

せん断ひずみの感度方向を圧縮方向と一致させた場合、せん断ひずみにより生ずる表面電位分布の実験結果を Fig.5 に示す。表面電位分布の等電位線のパターンは対称性をもっており試験片の中心から斜めの位置で大きなせん断応力が生じており、 x 軸、 y 軸それぞれについてせん断ひずみの値の符号が逆転している。またせん断ひずみの感度方向と圧縮方向が 45° の角度をなす場合、せん断ひずみにより生じる表面電位分布を Fig.6 に示す。Fig.6 を見るとスリットの直上ではなく、その横側においてせん断ひずみが大きくなっている。スリット周辺においてせん断ひずみ分布は大きく

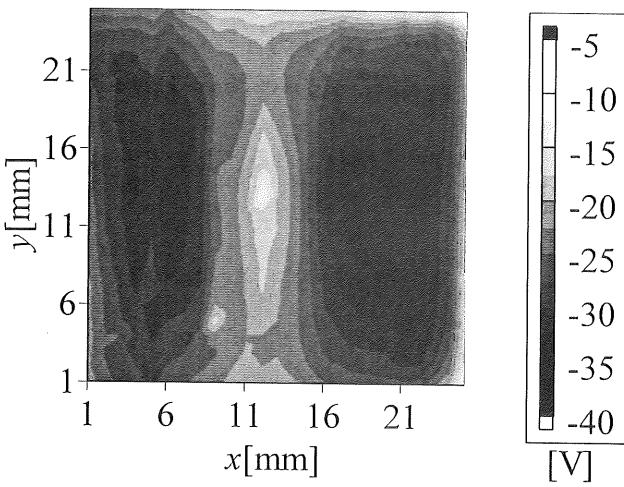


Fig.4 Distribution of electric potential for sum of principal strain.

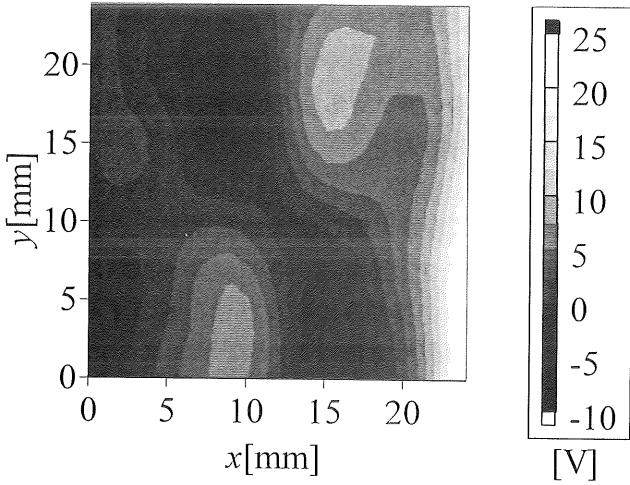


Fig.5 Distribution of electric potential for shear strain.

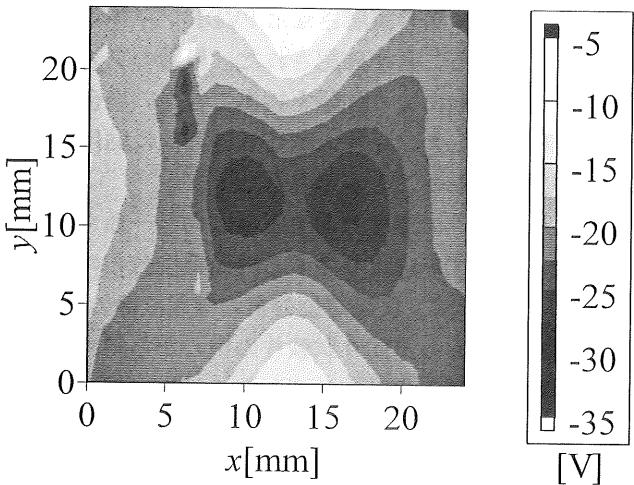


Fig.6 Distribution of electric potential for a shear strain.

変化しているが欠陥の形状を推定することは難しい。しかしながら圧縮方向と 45° の角をなす方向のせん断ひずみが特に大きくなっていることが分かる。試験

片背面のスリットは試験片表面のせん断ひずみ分布に影響を与え、欠陥の存在を示唆している。したがって構造物表面のせん断ひずみを測定することでは、背面のき裂などの微小な欠陥を検出することはできないが、比較的大きな背面の欠陥においてはその存在を示す手がかりとなり得る。しかしながら形状を同定することは困難であることが分かった。

4. 結言

本研究では代表的な高分子圧電材料であるPVDFフィルムを用いて欠陥の検出について調べた。得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 背面に欠陥を持つ板材の表面にPVDFフィルムを貼付して圧縮下のもとフィルム上の電位分布を測定することにより背面の欠陥を検出できることが示された。
- 2) PVDFフィルムの延伸方向を 90° 回転させて積層したフィルムは貼付する方向に依存しない感度を持つことが示された。感度の等方性という長所があり欠陥の検出に非常に有効である。
- 3) PVDFフィルムの分極方向を逆にして、延伸方向を 90° 回転させて積層したフィルムはせん断ひずみを求めることができるのが分かった。従来、構造物表面のせん断ひずみを求める場合、ひずみゲージを用いて、広い範囲の平均した値を求めることがしかできなかった。しかし、この積層したPVDFフィルムを用いることで、構造物表面の一点一点におけるせん断ひずみを求めることができる。

今後の課題としてPVDFフィルムを用いた欠陥の検出方法の有効性について、様々な場合についてシミュレーション、及び実験を行う必要がある。

参考文献

- [1] E. Matsumoto, Y. Omoto, K. Iguchi and T. Shibata, Visualization of strain distribution by piezoelectric thin film, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics 18, 2000, pp. 305-308.
- [2] 大本, 琵琶, 松本, 柴田, 高分子圧電フィルムを用いた静的ひずみ分布測定に基づく板材背面の欠陥の検出及び欠陥形状の同定の試み, 日本機械学会関西支部 第72回定期総会講演会講演論文集, NO.974-1, 1997, pp.1103.