

高分子圧電フィルムを用いた円管内壁欠陥の測定とシミュレーション

Measurement and Simulation of Detection of Defects on Inner Wall of Cylindrical Pipe by Piezoelectric High-polymer Film.

京都大学エネルギー科学研究科 高橋 俊文 Toshibumi TAKAHASHI Student
京都大学エネルギー科学研究科 松本 英治 Eiji MATSUMOTO Member

Piezoelectric thin film has been used to visualize back surface defects in plates. When the plate with a back surface defect is deformed, the resultant strain distribution in the front surface reflects the shape of the defect. Such surface strain distribution can be measured by scanning the electrostatic voltmeter over the piezoelectric film mounted on the front surface. In view of significant troubles of nuclear power plants due to defect in pipes such as cracks and wastages, new nondestructive techniques are expected to detect such invisible defects. Visualization of back-surface defects by piezoelectric thin film is one of promising nondestructive techniques applicable to on-site and on-line monitoring. Then, the purpose of this paper is to detect defects on inner wall of cylindrical pipe from potential distribution on piezoelectric thin film mounted on outer surface.

Keywords: Piezoelectricity, Polyvinylidene Fluoride(PVDF), Sensor, Strain Distribution, Electric Potential

1. 緒言

非破壊検査技術は構造物を長期にわたって安全に活用するための技術として注目されている。新たな非破壊検査技術の一つとして、高分子圧電フィルム(PVDF フィルム)を用いた探傷法がある。PVDF フィルムは軽量かつ低剛性で、力学的な入力に対する感度が良く、センサとして期待されている。これまでの研究で、勝見ら[1]は背面に欠陥を持つ板材の表面に PVDF フィルムを貼付し、PVDF フィルム上の電位分布を測定することで表面ひずみの分布を調べ、欠陥の検出、およびその形状の同定をおこなった。知識ら[2]は PVDF フィルムを積層することにより感度の向上及び等方的な感度を得ることに成功している。また山本ら[3]は得られた表面電位分布から特徴量を抽出し、欠陥深さの同定を試みている。

上記の研究では板材における背面欠陥の検出を対象としていたが、発電所や化学プラント設備などにおいてき裂や減肉などの欠陥によるトラブルが多く発生していることから、配管内部の欠陥の検出にフィルムを応用することが重要な課題となっている。そ

ここで、本研究では円管内壁に存在する減肉の影響によって円管内壁に生じる変形分布を PVDF フィルム上の表面電位分布より検出し、さらに減肉の程度を判定する手法を開発するために、実験およびシミュレーションを行う。

2. PVDF フィルム表面電位—ひずみ関係

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 内に真電荷が存在しないと仮定し、焦電性による電位をあらかじめ除いた圧電性による電圧変化だけに注目する。

フィルムの上面の電位 V は文献[4]より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 のようにフィルムの延伸方向に第 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

$$p_k = \frac{d(c_{33}e_{3k} - c_{3k}e_{33})}{(c_{33}e_3 + e_{33}^2)} \quad (2)$$

上式において、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

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科,
e-mail: matumoto@energy.kyoto-u.ac.jp,
TEL: 075-753-3565

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係数, e は圧電 e 定数を含む 3 階のテンソル, d はフィルムの厚さである。 PVDF フィルム (呉羽化学) に対しては, 単軸引っ張り試験により式(1)の係数はすでに求められており, その結果は次の通りである。

$$p_1 = 3.19 \times 10^4, p_2 = 1.63 \times 10^4 \quad (3)$$

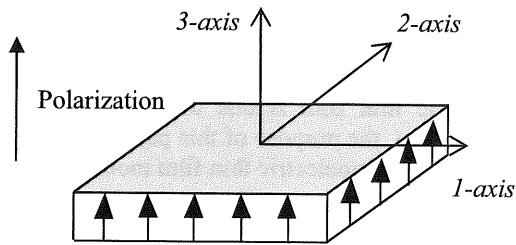


Fig. 1 Coordinate system in PVDF film.

PVDF フィルムをその電極面が接するように構造物表面に貼り付けて, 面上のひずみを測定することを想定する。 PVDF フィルムの平面内のひずみを 1 軸方向, 2 軸方向のひずみ S_1, S_2 で表し, PVDF フィルムは十分に薄く, 剛性が低いことからこれらのひずみは構造物表面のひずみによって拘束されると考えられる。 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。 このとき, 構造物表面の 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, 次式のように表される [2]。

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

上式は角度 θ に依存しており, 特に $\theta=0^\circ, 90^\circ$ のときには, フィルムの上下面に生じる電位差 V 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 S_x, S_y だけで表すことができる。

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

$$V(90^\circ) = p_2 S_x + p_1 S_y \quad (6)$$

両式とも材料表面の任意の方向にフィルムを貼付した場合, 表面の電位差は延伸方向と垂直方向のひずみにそれぞれ p_1, p_2 をかけて得られることを示している。

次に積層した PVDF フィルムの表面電位とひずみの関係を示す。 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現れる表面電位分布は 2 枚のフィルムのそれぞれに現れる表面電位分布を足し合わせたものに等しい。 上の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, 延伸方向を下のフィルムから 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つ。 すなわち, 積層したフィルムの表面電位-ひずみ関係は次式で表される。

$$\begin{aligned} V'(\theta) = & V(\theta) + V(\theta + 90^\circ) \\ = & (p_1 + p_2)(S_x + S_y) \end{aligned} \quad (7)$$

PVDF フィルムが単層の場合, PVDF フィルムの貼付する角度によって感度が異なるが, 前述のようにフィルムを積層すれば貼付する角度に関係なく同じ感度で欠陥形状を推定できる。

3. 表面電位分布の測定

3.1 表面電位の測定

長さ 50[mm], 外半径 20[mm], 肉厚 3[mm], ポアソン比 0.39, ヤング率 3.4[GPa] のアクリル円管に, 模擬欠陥として内壁にそれぞれ深さ 0mm, 1.0mm, 1.5mm, 2.0mm, 2.5mm, の円周方向の減肉欠陥を作成した 5 つの試験片を用意する。 円管の外面に, 円周方向 50[mm], 軸方向 45[mm], 厚さ 40[μ m] の等方的な感度を持つように積層させた PVDF フィルムを貼付した。

この円管に軸方向の平均ひずみが 0.2% となるように負荷を加え, アクリルの粘弾性的性質を考慮して, 圧縮後数分間を経過した後で表面電位測定を行った。 焦電性の影響を除き変形だけにより生じた電位を求めるために, 圧縮荷重を与える前後での表面電位の変化量を求めた。

本手法の妥当性を検証するために, 汎用有限要素解析ソフト ANSYS を用いて同じ条件における試験片表面のひずみ分布を求め, 式(7)を用いて電位分布に換算して実験値と比較, 検討をおこなう。

3.2 実験およびシミュレーション結果と考察

上記の実験によって得られた表面電位分布と、シミュレーションにより得られた表面電位分布を以下の Fig.2, Fig.3 に示す. 紙面の都合上今回の実験の中で最も深い欠陥深さ2.5mmの試験片の結果と最も浅い欠陥深さ1.0mmの結果のみ載せたが、他の深さでも同様の結果となった. 白線が欠陥のおおよその位置と形状を表す. 欠陥部周辺で電位が急激に変化しており、電位勾配の大きい部分が欠陥の形状を表すような分布となっている. このことから積層させることにより等方的な感度を持たせたフィルムが円管状構造物内壁に存在する様々な深さの欠陥の検出や形状の推定に有効であることが分かった. また実験結果とシミュレーション結果と比較してみると電位分布のパターンは同様の結果となっており、特に欠陥が深いほど実験とシミュレーションが似た結果となった.

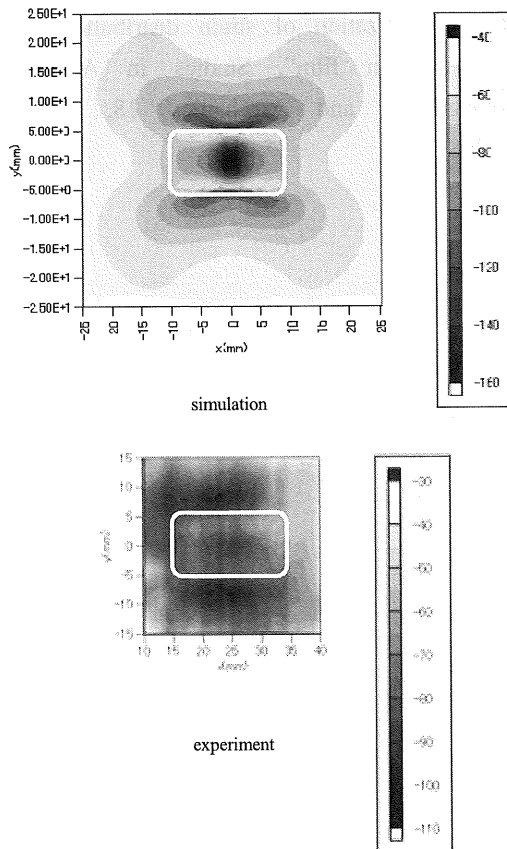


Fig.2 Electrical potential distribution (2.5mm defect depth).

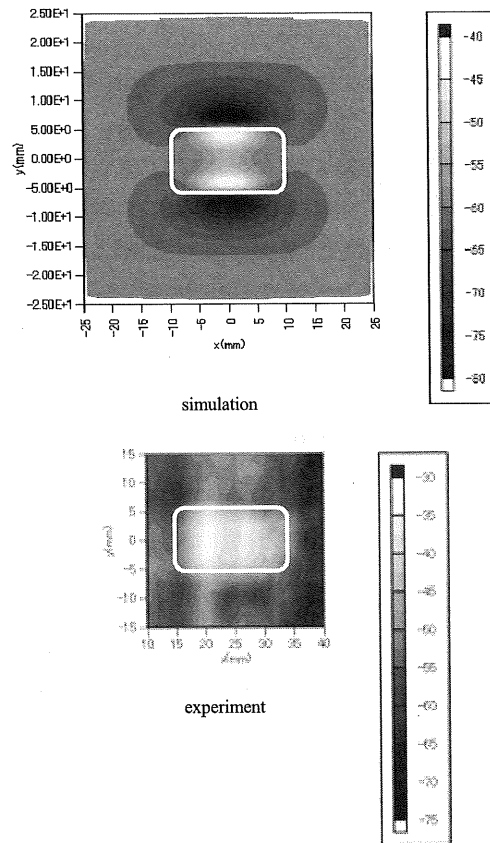


Fig.3 Electrical potential distribution (1.0mm defect depth).

さらに電位分布の極小値つまり最も大きいひずみが生じている部分の電位と欠陥深さの関係を求めた. シミュレーションで得た電位分布の極小値と欠陥深さの関係を Fig.4 に示す. 実験は複数回行い各回で得られた値がばらついているため深さごとに平均を取り欠陥深さとの関係を Fig.5 に示す. 実験とシミュレーションの結果はほぼ同様な結果となった. すなわち、一定の圧力をかけたとき欠陥の深さが深くなるにつれて最大のひずみが大きくなり電位の極小値の絶対値が大きくなるという関係が得られた. この結果から、減肉の範囲や形状などを特定した上で、電位分布の極小値からその深さを同定できる可能性があることが示唆される.

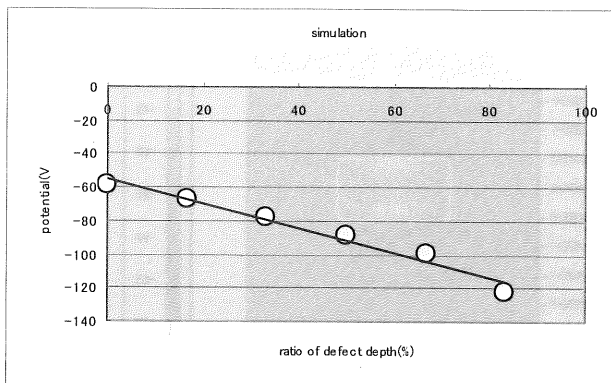


Fig.4 Relation between normalized defect depth and minimum voltage (simulation).

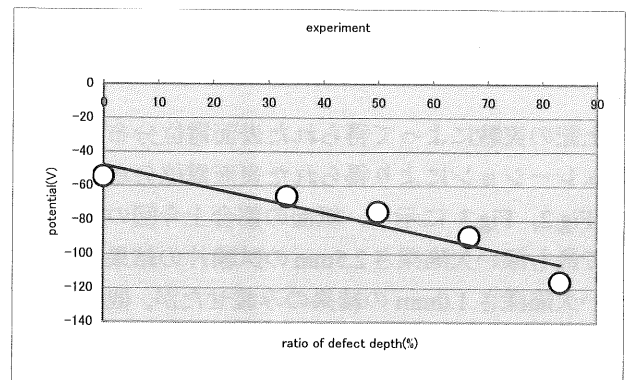


Fig.5 Relation between normalized defect depth and averaged minimum voltage (experiment).

4. 結言

本研究で得られた結果は以下の通りである。

- 1) 試験片に圧縮荷重をかけた場合、試験片に貼付した積層した PVDF フィルムの表面電位を測定することで減肉状の円管内壁欠陥の位置や開口部の形状の推定が可能であることがわかった。特に欠陥が深いほど実験とシミュレーションに近い結果となった。
- 2) 圧縮荷重をかけた場合、減肉の深さに比例して電位分布の極小値が低くなることを示した。この結果から電位分布を測定することにより減肉の深さが推定できる可能性があることがわかった。

参考文献

- [1] 勝見圭介、琵琶志朗、松本英治、柴田俊忍、“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）”、日本機械学会論文集、Vol.64A, No.617、1998、pp.215-220.
- [2] 知識淳悟、駒米勇二、松本英治、“積層した高分子圧電フィルムによる背面欠陥の形状の推定”、日本 AEM 学会誌、Vol.10, No.4、2002、pp.372-377.

- [3] A. Yamamoto and S. Biwa and E. Matsumoto, “Sizing of Back-Surface Flaws by Piezoelectric Highpolymer Film”, *The 3D International Conference of Sensing Technology (ICST2008)*, in press.
- [4] E. Matsumoto and Y. Omoto and K. Iguchi and T. Shibata, “Visualization of strain distribution by piezoelectric thin film”, *Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics* 18, 2000, pp.305-308.