

圧電ポリマーを用いた膜構造のための低剛性センサーの開発 に関する基礎的研究

An Experimental Research for a Low Stiffness PVDF Sensor for Membrane Structures

榎本 信隆*・川口 健一*

Nobutaka KASHIMOTO and Ken'ichi KAWAGUCHI

1. はじめに

近年、構造物のアクティブ制御に対する研究が広範囲の工学分野で進んでおり、建築分野でも構造の制御に関する研究が数多くなされている。膜構造は面内方向への張力の導入によって面外剛性を得る張力安定構造であり、膜を支持するケーブル長の制御による膜構造の剛性、形態の制御が考えられる。

膜構造に対しこの様な制御を可能とするためには膜材料の変形、応力状態を詳細に把握する必要がある。しかし、膜は材料の剛性の低さのため従来のセンサーではセンサー自体の剛性の影響が無視できず、有効なセンシング法が無いのが現状である。本報告では膜の歪の測定を念頭に置いたスマート材料を用いた低剛性センサーの開発について報告する。

2. 膜構造の応力・歪制御

膜材は軽量で柔軟であることから仮設構造物から大規模構造物まで建築において広く用いられており、宇宙構造においても大規模構造物の需要の増大に伴い膜構造の応用が考えられている。膜構造の制御として例えば図1に示すような構造において境界ケーブルに取りつけたアクチュエーターによってケーブルの変位を制御することにより膜の応力・歪を制御する方法が考えられる。ケーブルの張力制御による構造の位置制御¹⁾、振動制御²⁾に関する研究は散見されるが膜構造に拡張した研究は見られない。しかしながら、膜構造の制御を行うためには膜の応力・歪の正確な測定を可能とするセンサーの開発が不可欠であり、本報告では膜の歪センサーの開発に焦点を絞って報告する。

3. 圧電ポリマー

圧電材料は歪と電界の関係が線形でセンサー/アクチュ

*東京大学生産技術研究所 第5部

エーターとしてモデル化がしやすく、圧電係数の温度依存性が低いなどの優れた特徴を持ち、代表的なスマート材料として知られている。圧電ポリマーは高分子系の圧電材料であり、剛性が低く、柔軟性に富むためセンサーに適した材料である。また、容易に任意形状にカットできるため、特定のモードのみを観測/制御するモードセンサー、モードアクチュエーターの開発例などもあり^{3), 4)}、応用性の広い材料である。この材料は誘電体であり、面内方向に歪/応力が加わったときに面外方向に生じる電圧を取り出すために材料の両面に電極を接着あるいは蒸着して用いる。

本研究では代表的な圧電ポリマーである PVDF (ポリフッ化ビニリデン) を用いた。

4. 測定方法

2節で述べた膜構造の制御への応用を目標として PVDF センサーを用いた測定実験を行った (6節)。測定方法としては閉回路測定、開回路測定の2手法を採用比較した。

4.1 閉回路測定

センサー両面の電極が短絡している場合、センサーの誘起する電圧に対して電荷の移動が生じ、PVDF はコンデンサーとしての性質を持つ。ここで両電極の間に抵抗を介せば RC 回路が形成される。この測定法は抵抗に生じる電圧を測定する手法である。RC 回路を形成しているため出力電圧は歪の変化率にほぼ比例する。

4.2 開回路測定

本手法は Katsumi ら⁵⁾によって、測定面に電極を蒸着しない PVDF センサーを用いて測定対象の変位分布を測定する方法に応用されている。PVDF を回路につなぐず、表面電位計を用いてセンサー表面の電位を非接触で測定する方法である。測定対象との接着面側には電極を貼って電位の基準面とする。電極を蒸着しない場合は測定点の歪に比例した電圧が観測され、センサー領域での局所的な歪分布を求められるが、電極を蒸着した場合にはセンサー領域での

研 究 速 報

歪の平均値に比例した電圧が出力される。

本実験では、両面に電極が蒸着された PVDF フィルムを用いる。また、開回路測定としてプローブを試験体に取りつけ、PVDF の誘起する電圧を直接測定する方法と、PVDF 測定面を銅板に遠隔接続してこの銅板表面の電位を測定する方法を提案している。

5. センサー方程式

圧電方程式はアインシュタインの規約を用いれば (1) 式で表される。添え字は $x \rightarrow 1, y \rightarrow 2, z \rightarrow 3, xy \rightarrow 6$ である。

$$D_i = d_{ip}\sigma_q + \epsilon_{ik}^o E_k \dots\dots\dots (1-a)$$

$$\epsilon_p = s_{pq}^E \sigma_q + d_{ip} E_i \dots\dots\dots (1-b)$$

ここに、 D : 電束密度, E : 電界, ϵ : 歪, σ : 応力, d : 圧電歪係数, s : 弾性コンプライアンス, ϵ : 誘電率である。

(1-a) 式は電気的な関係式に、圧電材料に応力が加えられたときに生じる電界/電束密度が加わったセンサーとしての式、(1-b) 式は力学的な歪-応力関係式に、圧電材料に電界が印加されたときに生じる歪/応力の項が加えられたアクチュエーターとしての式と解釈できる。

PVDF は厚さ 10 ~ 数百 μm 程度であり、面外方向の応力は考慮しない平面応力問題と考えられる。面内方向は力学的には等方性とみなせるが電気的には異方性である。

圧電方程式と力学的、電気的諸式を用いれば、4 節で示した各測定方法に対するセンサー方程式が導出される。

■閉回路測定

$$\frac{1}{R} \int V_m dt + \frac{\epsilon_{33} S}{h} V_m = \phi_x \int_S \Delta \epsilon_x dS + \phi_y \int_S \Delta \epsilon_y dS + \phi_{xy} \int_S \Delta \gamma_{xy} dS \dots\dots (2)$$

■開回路測定

$$V_m = \frac{h}{\epsilon_{33} S} \left(\phi_x \int_S \epsilon_x dS + \phi_y \int_S \epsilon_y dS + \phi_{xy} \int_S \gamma_{xy} dS \right) \dots (3)$$

ここに、

$$\begin{aligned} \phi_x &= \frac{Y}{1-\nu^2} \left((d_{31} + d_{32}\nu) \cos^2\theta + (d_{31}\nu + d_{32}) \sin^2\theta \right) \\ \phi_y &= \frac{Y}{1-\nu^2} \left((d_{31} + d_{32}\nu) \sin^2\theta + (d_{31}\nu + d_{32}) \cos^2\theta \right) \\ \phi_{xy} &= \frac{Y}{2(1+\nu)} (d_{31} - d_{32}) \sin 2\theta \dots\dots (4) \end{aligned}$$

であり、 R は抵抗値、 S はセンサー有効面積、 h は厚さ、 Y はヤング率、 ν はポアソン比を示す。ただし、いずれも PVDF 両面に電極が貼られている場合に対応している。

$\phi_x, \phi_y, \phi_{xy}$ は歪に対する感度とも言える係数であり、測定対象に対する PVDF の接着角度 θ の変数となっている。図 2 に各係数と角度の関係を示す。 $\theta = 0, 90^\circ$ ではせん断歪に対する感度がないことが分かる。

式 (2), (3) から分かるように、1 つのセンサーの出力電圧に対して 3 方向の歪が含まれる。従って歪を得るためには、接着方向の異なる 3 つのセンサーから得られる連立方程式を解く必要がある。

6. 実 験

まず最初に PVDF のセンサーとしての性質および性能を調べるためにアクリル試験体を用いた実験を行った。次いでアクリル試験体による実験から得られた所見を元に膜の歪の測定を試みた。

6.1 アクリル試験体を用いた歪の測定

本実験では閉回路測定、開回路測定の両方を用いて実験し、PVDF の性質を調べた。

試験体としてアクリル板 (125 × 150 × 2 mm) を用い、片側を固定して反対側の自由端部に鉛直方向の荷重をかけ、PVDF センサーと参照センサーとしての歪ゲージから試験体に生じる歪を測定した。図 3 に歪ゲージおよび PVDF の接着位置を、図 4 に試験体のセットアップ状況を示す。接着剤には瞬間接着剤を用いた。

閉回路測定では PVDF センサーの両面の電極を直接レコーダに接続して測定した。レコーダの内部抵抗は 100 k Ω 、サンプリング時間は 1 m 秒で測定した。本測定法より得られたデータから求めた歪を図 6, 図 7 に示す。

図 6 より PVDF センサーは振動に良く対応することが分かる。また、歪の変化が小さい場合にはセンサー自体の出力電圧は数 mV と非常に小さいにもかかわらず (図 7)、歪ゲージのデータに良好に対応したデータが得られており、このような単純なセットアップのみでも良好に測定できることが確認された。

開回路測定では表面電位計 (Trek 社 MB 320 : 図 5) を用いた。図 8, 図 9 に示すように、開回路測定でも良好な結果が得られた。両図とも振動では PVDF データは歪ゲージのデータに対して時間ずれがあることが分かるが、これは実際の電圧の変化に対する表面電位計の追従の遅れ、すなわちスルーレートによるものである。図 7 では振動部分で PVDF データがゲージデータよりも大きくなっている。

これらのデータは遠隔測定によるものであり、PVDF 表面を直接測定した場合と同程度の歪が得られることからここで提案した遠隔測定法の有効性が確認された。

以上、両測定法を比較すると、開回路測定は歪に比例した値を出力するために閉回路測定よりも歪ゲージとの対応

は安定していたが、スルーレートが存在する。これに対し、閉回路測定では、ノイズの混入した離散データを積分処理するため、出力データより求めた歪にはばらつきがあり、不良なデータも閉回路測定に比べ多かった。しかし、振動

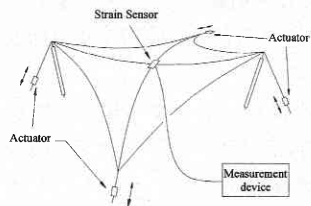


図1 膜構造の歪, 応力制御

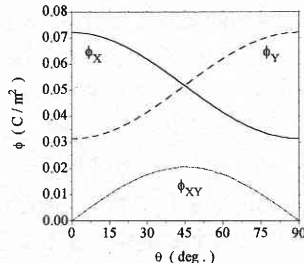


図2 phi の変化

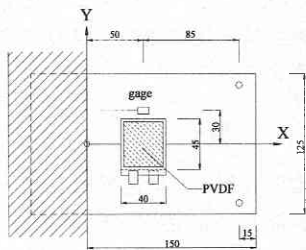


図3 試験体平面図

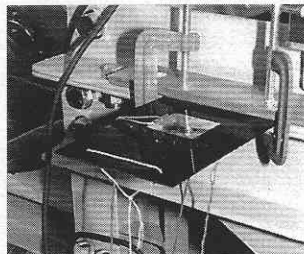


図4 試験体のセットアップ

表1 圧電材料の諸定数

	カタログ値	設定値	単位
厚さ	h	30	μm
圧電係数	d ₃₁	20-30	*10 ⁻¹² C/N
	d ₃₂	3-4	3.92 *10 ⁻¹² C/N
ヤング率	Y	2-3	*10 ⁹ N/m ²
ポアソン比	ν	0.3	
比誘電率	ε ₃₃ /ε ₀	13-14	13

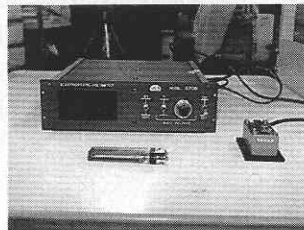


図5 表面電位計とプローブ

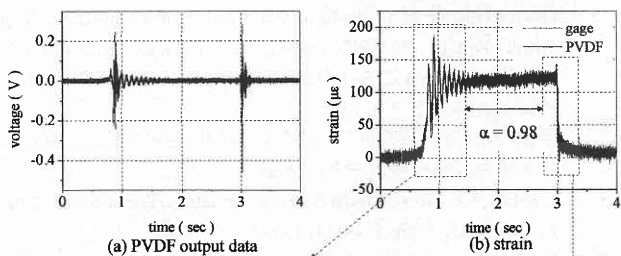
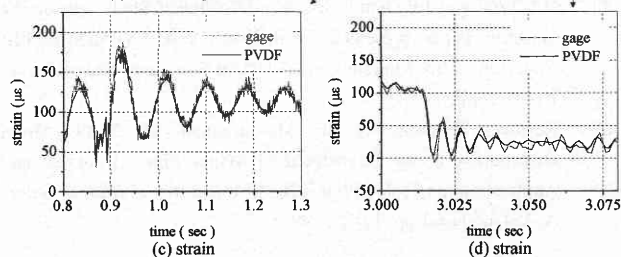


図6 閉回路測定1



部では出力電圧も大きいため、対応が良かった。

図10はセンサーを完全接着せず、両辺のみで接着したPVDFセンサー（以下2辺接着）から求めた歪であり、閉回路測定を用いた。(a)では歪ゲージとの対応は良好であるが、(a)より数日後に測定した(b)では測定の前半部でずれが生じている。これは時間の経過および繰り返しの実験による接着の劣化が原因として考えられる。

また、弾性接着剤で全面接着した場合には、歪の波形はゲージデータに対応するが、値は閉回路測定で歪ゲージの0.88、閉回路測定で0.84（いずれも平均値）であった。

6.2 膜の歪測定

膜の歪を測定する際には接着層の剛性に注意する必要がある

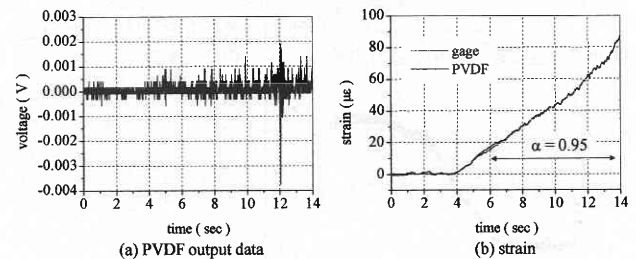


図7 閉回路測定2

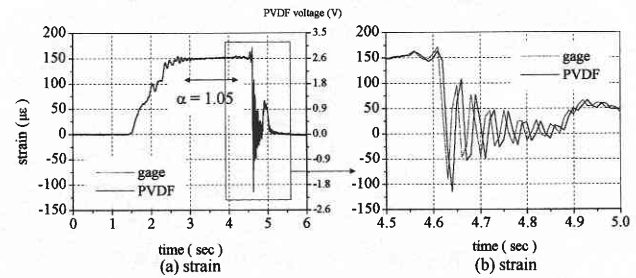


図8 開回路測定1

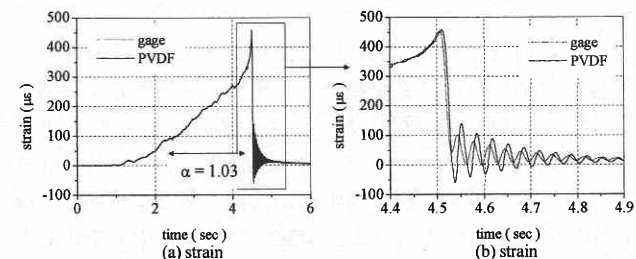


図9 開回路測定2

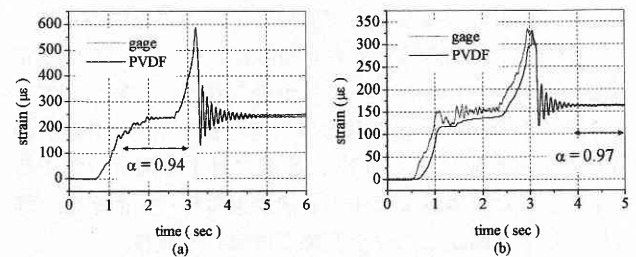


図10 2辺接着した場合の閉回路測定

研究速報

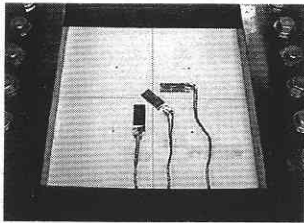


図11 試験体および固定状況

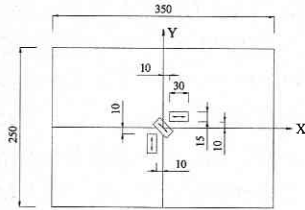


図12 センサー接着位置

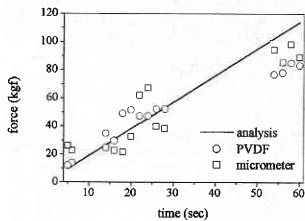


図13 2辺接着時の電圧値の比較

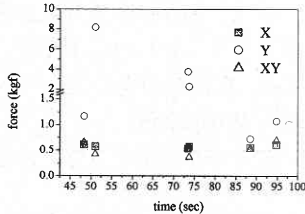


図14 弾性接着剤使用時の電圧値の比較

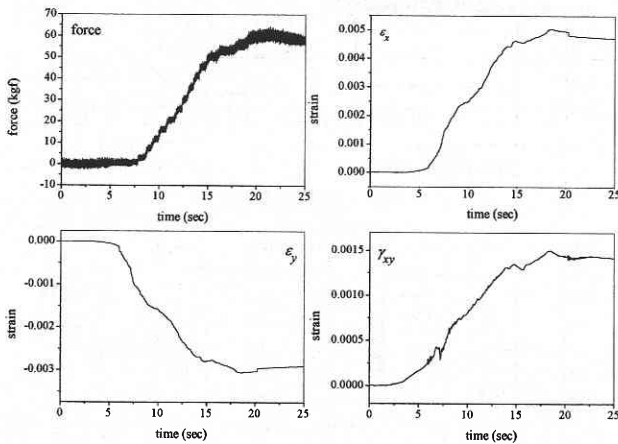


図15 閉回路測定より求めた歪の時刻歴変化

荷重の小さい場合はPVDFより求めた値にはばらつきがあるが、荷重が60 kgf程度の場合にはPVDFおよびノギスのデータは良く対応している。ただし、解析値とは荷重が小さい時に対応が良い。

弾性接着剤を用いてPVDFを接着した試験体による実験では閉回路測定を用い、3センサーの出力を同時に測定して3方向の歪を求めた。図14にPVDFデータから求めた歪の、ノギスより求まる歪に対する比を、図15に閉回路測定より求めた歪の変化を示す。

各方向の歪とも時刻歴データはロードセルの出力と類似した波形をしており、閉回路測定(サンプリング時間1ms)で有効に測定できることが確認された。しかし、X方向に接着したPVDFでは歪の値がノギスの値に比べて6割程度であり、Y方向、せん断(XY)方向ともうまく測定できてない。これは弾性接着剤の接着層の剛性が膜の剛性に影響を及ぼしているためと考えられる。

7. 結 論

本研究では膜の歪の測定を念頭に置いた低剛性センサーを開発した。実験より閉回路、開回路測定のいずれの場合でも歪を正確に測定できることが確認された。また、実測定では重要になると考えられる速度の遅い歪の変化に対して、閉回路測定でも6~8 με/sec程度の歪速度までは測定できた。出力電圧値を検討する限り、本実験の環境でも3~4 με/sec程度までは測定可能であると考えられるが、測定時のノイズを除去できればさらにゆっくりとした歪の変化にも対応できると考えられる。

(2000年2月10日受理)

参 考 文 献

- 1) Dryver Huston, et al: Position Stabilization of a Guyed Antenna Tower, Part of the SPIE Conference on Smart Structures and Integrated Systems, San Deigo, California, pp. 70-79, March 1998.
- 2) 関根功治「張力の時間変化による膜面の振動制御」東京大学工学系研究科修士論文, 1986.
- 3) C.K.Lee, F.C.Moon: Modal Sensors/Actuators, Transactions of the ASME, Vol. 57, pp. 434-441, 1990.6.
- 4) H.S.Tzou and J.P.Zhong: Spatially Distributed Shell Convolver Sensor, Paper presented at the ADPA/AIAA/ASME/SPIE Conf. On Active Materials and Adaptive Structures-Session 5, pp. 75-80, 1992.
- 5) Keisuke Katsumi, et al: Measurement of Static Strain Distribution Using Piezoelectric Polymer Film (Principle and Application to a Holed Plate), JSME International Journal, Series A, Vol.42, No. 1 pp. 11-16, 1999.

ある。本研究では6.1で示した2辺接着(瞬間接着剤)と弾性接着剤を用いて完全接着した場合の2種類の試験体を用意し、一軸引張試験における歪の測定を行った。図11に後者の試験体のセットアップ状況を、図12にセンサーの接着位置を示す。膜の固定部にはロードセルがあり、膜に作用する荷重が得られる。実験では試験体中央を中心とする正方形領域の辺、対角線の長さを電子ノギスを用いて測定し、正方形の変形から参照値としての歪を求めた。

2辺接着による実験では開回路測定を行った。この測定方法では1つのPVDFデータしか得られないため、ノギスより求めた歪から予想される出力電圧値を求め、PVDFの出力電圧と比較した。図13に荷重に対する両者の電圧値を示す。また、実験モデルの有限要素解析(平面応力、等方性)により同定した歪を直線で併記してある。