

ピエゾセンサーを用いた樹木のひずみ計測

石丸 和宏* 浅葉 建汰** 清水 恭平***

Measuring the Strain of the Tree with Piezo Film Sensors

Kazuhiro ISHIMARU, Kenta ASABA, Kyohei SHIMIZU

ABSTRACT

Piezo film sensors have high sensitive and can measure high frequency. In this paper, adaptability of piezo film sensors are investigated by measuring the strains of a tree under free vibration (Hz). This sensor has been proved to be good for measuring the high frequency strains, but not yet tree trains of a few hertz. In this experiment, dynamic tests were conducted on a tree specimen attached by an acrylic plate, which was bonded with a piezo film sensor and a wire strain gauge.

The results showed that the piezo film sensor could measure the noise caused by sap flow in the tree when the acrylic plate with the sensors was attached near the tree. It can be concluded that the sensor should be attached a few centimeters apart from a tree in order to measure the strains of a tree with piezo film sensors.

KEY WORDS: Pezo film sensor、strain、vibration、wire strain gauge

1. はじめに

近年、構造物の維持管理や地震対策のため廉価の振動計測装置を用いたモニタリングに関する研究¹⁾³⁾が行われている。明石高専石丸研究室においても地震により力を受ける構造部材のひずみを計測するため、ピエゾセンサーを用いた自立型のひずみ計測装置の開発に関する研究を行ってきた⁴⁾⁵⁾。その結果、ピエゾセンサーは周波数が 15Hz～数 kHz の範囲においてひずみ計測が可能であることを確認している。今回、このピエゾセンサーを利用し、風害リスクの推定のため、樹木の自由振動領域のひずみ計測に対する有効性を確認する。これまで樹木の計測に関し、鈴木ら⁶⁾⁷⁾はひずみゲージを利用していたが、そのためには大きなバッテリーを含む計測機器を対象の樹木まで運ぶ必要があった。このピエゾセンサーは省電力であり、今回の実験

でピエゾセンサーの有効性が確認できれば、簡単な回路を加えるだけで自立型のひずみ観測装置が可能になり、同時に多数の樹木のひずみ計測ができるようになる。

したがって、本研究では、まず計測対象となる樹木の自由振動領域である数 Hz～15Hz までのひずみ計測の有効性を確認し、次に実際にピエゾセンサーを樹木に貼り付け、ひずみ計測に対するピエゾセンサーの有効性を確認する。

2. 振動実験概要

2・1 ピエゾセンサー

圧電材料は応力あるいはひずみがかかると分極を生じる性質を持ち、力学的エネルギーを電氣的エネルギーへと変換するものである。この性質を有する材料は天然材料では電気石、水晶などであり、その他の材料としてはセラミック圧電材料と高分子圧電材料がある。

*都市システム工学科 **川田工業(株) ***東海旅客鉄道(株)

その高分子圧電材料の中で、ポリフッ化ピリニデン(以下、PVDF) は顕著な圧電性を有する高分子圧電材料の代表的なものの一つである。本研究ではひずみ計測時にひずみ状態を乱すことなく測定するために、軽量、柔軟性に富み、加工性がよい PVDF を取り扱う。延伸方向にひずみを受け取ると 2 枚の金属板間に電極が発生(分極)し、ひずみの変化速度に比例して電荷を発生する性質を持つ。その電荷を集積し、チャージアンプで電圧に変化させることでひずみを計測するものである。

この piezo センサー (Measurement Specialties 社製 LDT0-028K、写真 1 参照) を用いたひずみ計測は、その特性から従来のひずみゲージを用いたひずみ計測方法に対して次のような利点がある。

- (1) ひずみゲージに比べ省電力での計測が可能
- (2) データ収集前のゼロ点調整が不要
- (3) 良好な応答性

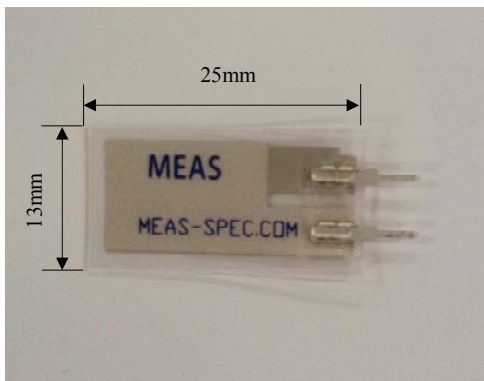


写真 1 用いた piezo センサー

2.2 実験装置

本実験で用いた振動台 (写真 2) は、IMV 社のロングストローク低域振動試験装置 (CVL-40-100) である。振動台の仕様を表 1 に示す。この振動台は電動であり、

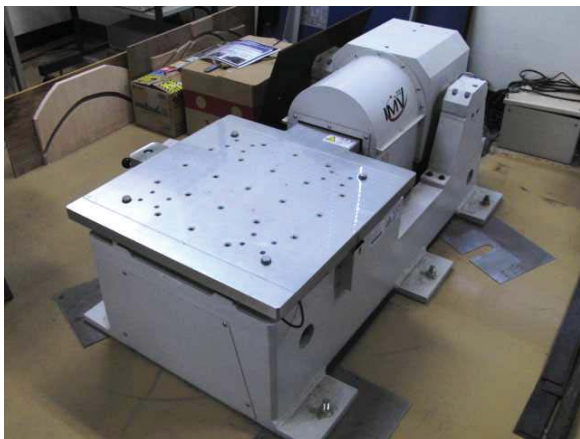


写真 2 振動台

表 1 の数値の範囲内で、入力した地震波形などを再現することができる。

2.3 実験方法

数 Hz から 15Hz の動ひずみ計測に対する piezo センサーの有効性を確認するため、アクリル板にひずみゲージと piezo センサーを隣接して貼り付け、それを図 1 に示すように振動台に設置する。振動台の加速度は振動台の加速度は 3.5m/s^2 とし、周波数範囲を 2Hz から 14Hz に 1Hz ごとに変化させ、それぞれ計測した。計測条件は、チャージアンプ・動ひずみ計測器ともにローパスフィルターなし、サンプリング周波数は 1kHz とした。

表 1 振動台の仕様

名前		ロングストローク低域振動試験装置
型番		CVL-40-100
加振力	正弦波	400N
	実測波	400N
最大加速度		7.2m/s^2
最大速度		50cm/s
最大変位		100mmp-p
可動部質量		55kg
振動数範囲		2~100Hz
最大搭載質量		300kg
振動台寸法		600×600mm
環境条件	温度	0~40°C
	湿度	0~85%RH

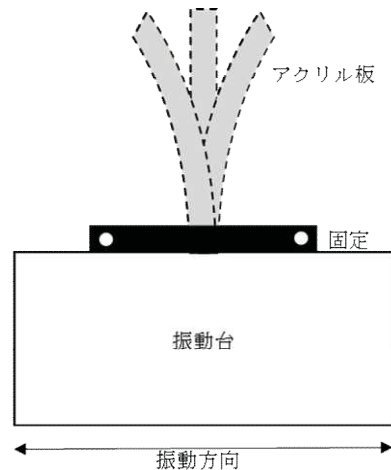


図 1 振動実験概略図

3. 実験結果および考察

3.1 実験結果

図 2 に、アクリル板を振動させた際の 2Hz 時のひずみ応答図を示す。piezo センサーから得られる波形は動ひずみに比例して出力する電荷をチャージアンプで増幅した電圧 (以下、出力電圧) で表されるため、piezo センサーの縦軸は電圧[V]、ひずみゲージのそれは

ひずみ、横軸はいずれも時間[sec]である。一般にひずみゲージで小さなひずみを計測する場合には動ひずみ計の感度を上げるが、S/N (Signal-to-Noise) 比が小さくなるため、ノイズの影響が大きくなりその改善のためにフィルターをかけなければならない。しかし、ピエゾセンサーの場合はローパスフィルターをかけなくても S/N 比が大きく、またひずみゲージではみられるノイズも、ピエゾセンサーではほとんど見られない。これらのひずみ波形はノイズの有無に違いはあるが、応答の時刻はほぼ一致しており、またその波形もほぼ同じである。次に、図 3 に同じ時間のピエゾセンサーの出力電圧とひずみゲージのひずみをプロットした相関図を示す。縦軸は電圧[V]、横軸はひずみである。図

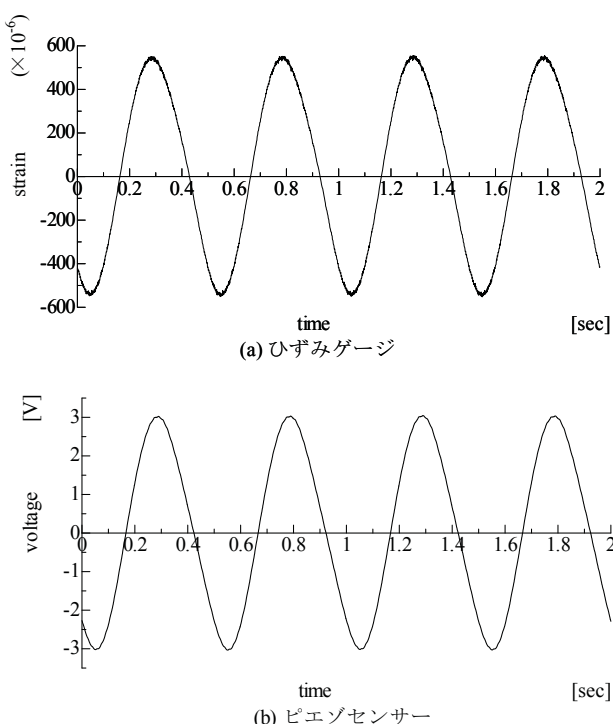


図 2 ひずみ応答曲線 (周波数 2Hz)

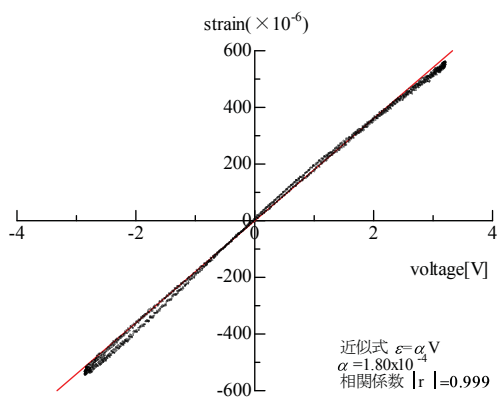


図 3 ひずみとピエゾセンサー相関図 (2Hz)

において、少し楕円のような箇所が見られるが、これはひずみゲージとピエゾセンサーの若干の時間のずれによる影響であり、出力電圧とひずみの相関係数は 0.999 を示し、両者には強い相関がある。その他の今回行った各周波数での実験においても相関係数は 0.995 以上を示していた。したがって、ピエゾセンサーは今回対象の 2Hz~14Hz の振動においても適用できるものと考えられる。なお、図中の直線は、最小二乗法により $\epsilon = \alpha V$ として求めたプロットの近似線 (原点を通過する) である。以後、この直線の傾きを α (ひずみ/出力電圧) とし、各周波数の出力特性値とする。図 4 に 2~14Hz まで 1Hz ごとの周波数と α の関係を示す。横軸は周波数[Hz]、縦軸は出力特性値 α [1/V]である。図において周波数が高くなるにしたがって、特性値 α がわずかに小さくなっている。周波数が 100Hz を超えるまではピエゾセンサーの出力は、周波数が高くなるにつれ大きくなることわかっており⁹⁾、これを本研究で用いた指標 α で表すと” α (=ひずみ/出力電荷) が小さくなる”。すなわち、プロットが右下がり分布することは、ピエゾセンサーの特性と一致している。これにより、周波数変化によって特性値 α がわずかにばらついているものの、このばらつきは微小なものであり、その精度としては出力電圧 1[V]あたり数 μ ひずみのばらつきを示し、ひずみゲージの測定精度を考慮しても実用上問題ないレベルであると考えられる。

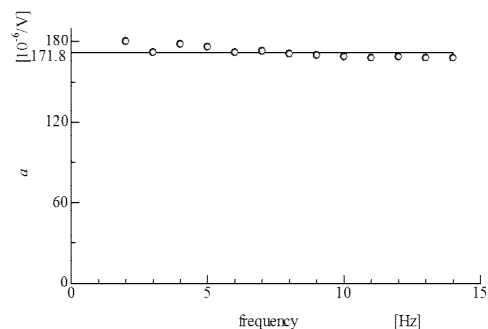


図 4 周波数と出力特性値との関係

4. ピエゾセンサーを用いた樹木のひずみ計測

4.1 計測方法

ここでは、樹木のひずみを計るために計測器を貼り付け、ピエゾセンサーの有効性を確認する。計測条件は、チャージアンプ・動ひずみ計測器ともにローパスフィルターなし、サンプリング周波数は 1[kHz]とした。

(1) 金属板を用いた計測器

本実験で用いた金属板の計測器は、森林総研が使用していた計測器 (写真 3) を模して作成した (図 5)。

森林総研の計測器はひずみゲージのみだが、本実験では Piezo センサーとひずみゲージによる動ひずみの応答を比較するために、Piezo センサーとひずみゲージを隣接して貼り付けた。事前に、計測器の有効性を確認するために金属板の片方を固定し手で振動を与えたところ、図 6 に示す Piezo センサーの波形においては値がマイナスから 0V にゆっくりと戻る挙動が見られた。原因としては、Piezo センサーと金属板間にも電荷が帯電したことが考えられる。Piezo センサーは、電荷を蓄積および放出する働きがあるコンデンサの原理を応用したものであり、空気あるいは絶縁体を挟んだ 2 枚の金属板に圧力を加えると電荷が蓄えられる。Piezo センサーは金属板に接着しているが、この金属板と Piezo センサーとの間のわずかな隙間でコンデンサと同様の現象が起き、その隙間に帯電された電荷が波形として現れたと考えられる。



写真 3 森林総研が使用している計測器

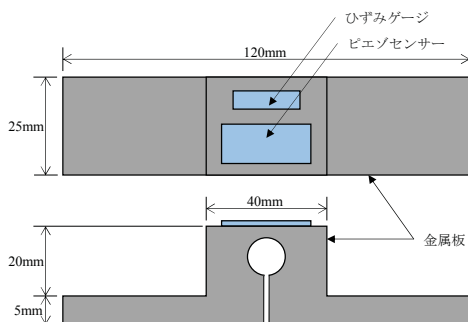
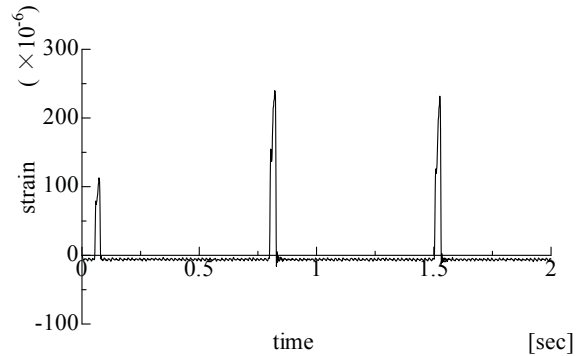


図 5 金属板で作成した計測器

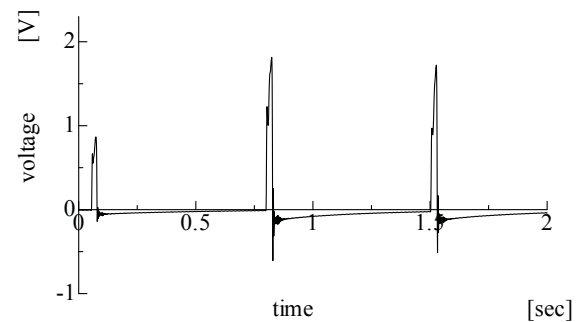
(2) アクリル板を用いた計測器

前項のことを踏まえ、金属板ではなくアクリル板を用いた計測器 (図 7) で樹木の測定を行った。その結果、図 8 に示すように Piezo センサーからの波形にお

いてノイズが発生した。センサーが樹木に近づくと Piezo センサーの感度が高いために、樹木の生体反応と思われる電気信号を拾うようであるが、今回の計測では判然としない。確認のために、樹木に近づけた Piezo センサーをオシロスコープに接続すると、センサーに変動を与えていないにもかかわらず波形が検出された (写真 4)。



(a) ひずみゲージ



(b) ピエゾセンサー

図 6 金属板を用いたひずみ応答曲線

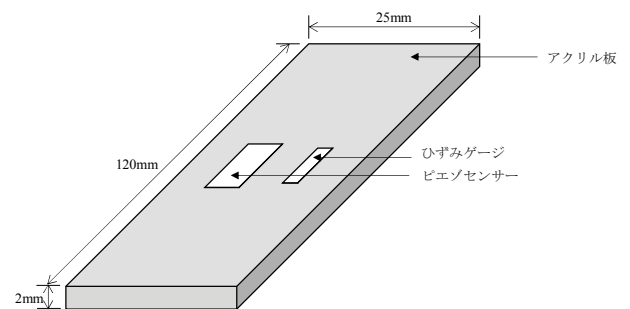
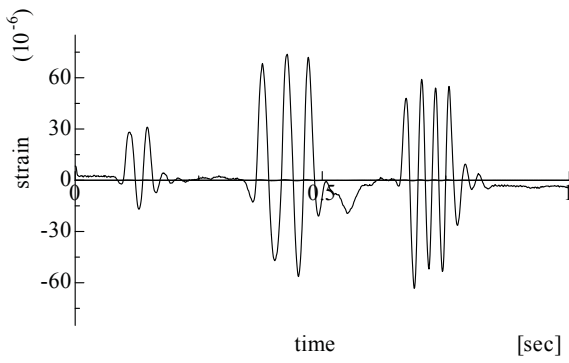


図 7 アクリル板を用いた計測器

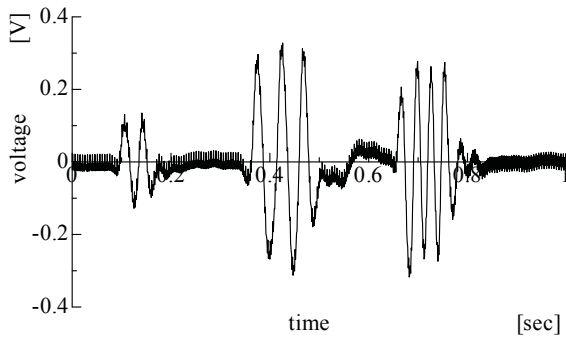
(3) サイコウッドを用いた計測器

Piezo センサーは金属に直接貼ることおよび電気信号を発するものを対象として計測する場合、ひずみの信号以外のものも感知することがわかった。したがって、図 9 のように Piezo センサーを取り付けている部分は樹木から離すように計測器を作成した。

図 10 に、計測器を貼り付け、樹木を揺らした際のひ

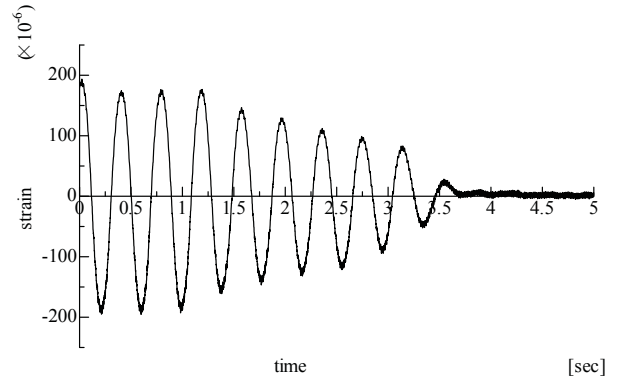


(a) ひずみゲージ

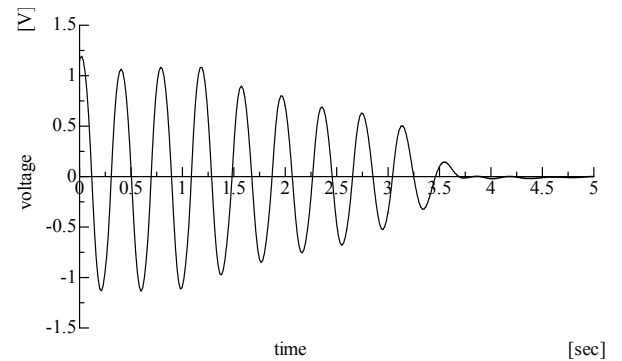


(b) ピエゾセンサー

図8 アクリル板を用いた樹木のひずみ応答曲線



(a) ひずみゲージ



(b) ピエゾセンサー

図10 ひずみ応答曲線

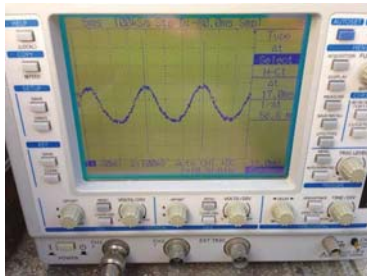


写真4 オシロスコープの出力結果

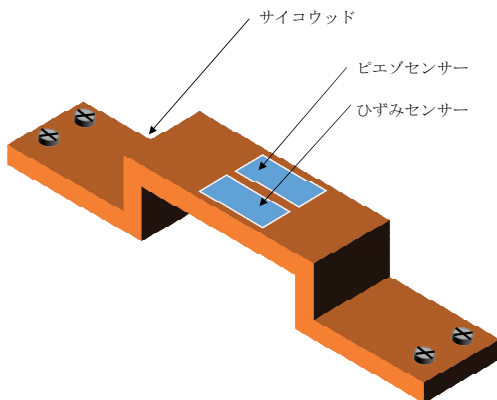


図9 サイコウッドを用いた計測

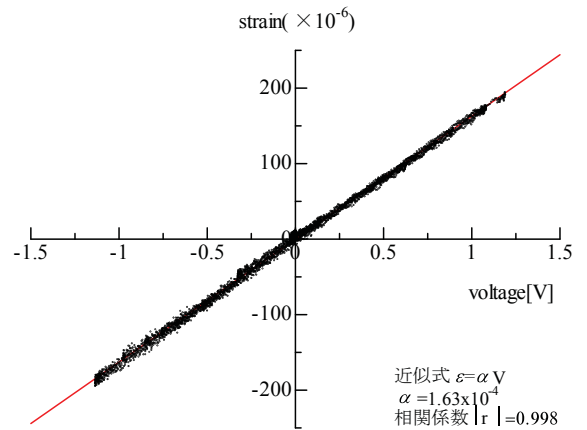


図11 ひずみゲージとピエゾセンサーのひずみ-電圧
相関図

ずみ応答図を示す。縦軸はそれぞれ電圧[V]、ひずみ、横軸は時間[sec]である。また、(a)はひずみゲージ、(b)はピエゾセンサーの応答図である。本実験においても振動台を用いた振動実験と同様に、ひずみゲージとピエゾセンサーの応答時刻はほぼ一致しており、またその波形形状もほぼ同じであった。図11に、ピエゾセンサーの出力電圧とひずみゲージのひずみの相関関係を示す。縦軸は電圧[V]、横軸はひずみである。図におい

て、ひずみゲージとピエゾセンサーの若干の位置の違いや樹木のノイズによる影響があるが、ほぼ線形の関係であり、出力電圧とひずみの相関係数は 0.998 を示し、両者には強い相関がある。したがって、ピエゾセンサーは今回の計測器を使うことで樹木のひずみ計測に適用できるものと考えられる。

本研究では、ピエゾセンサーを用いて各周波数において振動実験を行い、ピエゾセンサーのひずみ計測時の周波数特性について考察した。この実験から得られた結論を以下に示す。

1. ピエゾセンサーは2~14Hz の範囲では、ひずみゲージの動ひずみの応答を再現することができる。
2. 今回の実験では、周波数の変化は出力特性値にほとんど影響せず、その値は周波数に関係なくほぼ一定であるため、ピエゾセンサーを用いたひずみ計測は有効であることがわかった。
3. ピエゾセンサーを金属板に貼ることは、ピエゾセンサーの構造上適切ではない。
4. ピエゾセンサーを用いて樹木のひずみ計測を行う場合、樹木との距離を十分にとる必要がある。
5. 3、4 を考慮すればピエゾセンサーは樹木のひずみに有効である。

謝辞

福島高専電気工学科豊島晋先生には、計測機器の特性などの電気に関する知識について丁寧なご指導を頂きました。また、明石高専技術教育支援センターの方々には測定機器の作成等多大なる助力をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 川谷充郎、金哲佑、尾崎隆弥、利波立秋、塚本昌彦、藤田直生、南靖彦：橋梁振動モニタリングのための無線センサノード開発と実橋適用性検討、応用力学論文集、Vol. 13、pp. 1009-1016、2010.
- 2) 矢部明人、宮本文穂、磯田聡史、谷信幸：路線バスによる中小橋梁モニタリング手法の開発、土木学会論文集 F4 (建設マネジメント)、Vol. 69、No. 2、pp. 102-120、2013.
- 3) 小幡卓司：圧電素子を用いた損傷同定モニタリングシステムの実験的研究、構造工学論文集、Vol. 60A、pp. 165-174、2013.
- 4) 石丸和宏、加藤慎吾：圧電素子を用いたひずみセンサーの開発に関する研究、明石工業高等専門学校研究紀要、pp. 101-106、2003.
- 5) 石丸和宏、加藤慎吾：ピエゾセンサーの特性に関する一考察、明石工業高等専門学校専攻科特別研究、2005.
- 6) 鈴木覚、野口宏典、後藤義明、吉武孝、坂本知己：海岸クロマツ林における樹木の動揺の特徴、海岸林学会誌、pp. 97-102、2010.
- 7) 鈴木覚、坂本知己、野口宏典、井道裕史：風によって材木に作用する回転モーメントの測定手法の開発、日本海岸林学会、pp. 1-6、2014.
- 8) Measurement Specialties, Inc. Sensor Products Division : Piezo Film Sensors Technical Manual, Measurement Specialties, Inc., pp. 1-18, 1999.