

## 強制振動による逆磁歪効果型ひずみセンサの特性評価

## Evaluating characteristics of strain sensor using inverse-magnetostrictive effect caused by forced vibration

曾良大輔<sup>†</sup>・ 栢修一郎・ 石山和志

東北大学電気通信研究所, 仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980-8577)

D. Sora<sup>†</sup>, S. Hashi, K. IshiyamaResearch Institute of Electrical Communication, Tohoku Univ., *Katahira 2-1-1, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan*

Our laboratory has been researching the application of strain sensors using the inverse-magnetostrictive effect to vibration sensors for the health diagnosis of aging infrastructure. The sensor is formed by FeSiB and Mo thin film on Si substrate, and has a three-layer structure. In previous research, vibration characteristics were evaluated by free-vibrating a sensor using a cantilever with one side of the sensor substrate fixed. As a result, a mechanical resonance point due to the cantilever structure appeared in the evaluated characteristics. On the other hand, by applying a stress directly to the strain sensor from the outside and causing the strain sensor to vibrate, it is considered that a higher frequency vibration can be detected than before. Therefore, in this study, we tried to evaluate the characteristics of the sensor as a strain sensor by bonding the sensor substrate to the piezoelectric element and forcedly vibrating it. As a result, we were able to confirm the sensor output at frequencies below 2 kHz by forcibly vibrating the sensor. From the above, it was shown that the reverse magnetostrictive strain sensor can be used as a vibration sensor even at a frequency of several kHz due to the forced vibration by the piezoelectric element.

**Key words:** inverse-magnetostrictive effect, strain sensor, vibration sensor, forced vibration, magnetic thin film

## 1. はじめに

近年、橋梁等の老朽化インフラの対策が大きな問題となっており、その健全性の診断方法として、センサネットワークなどのICTを用いた振動特性のモニタリングが研究されている<sup>2,3)</sup>。その振動センサに用いるため、我々は逆磁歪効果を用いたひずみセンサを振動センサへと応用する研究を行ってきた<sup>4)</sup>。他の振動センサは圧電材料を用いた振動センサ<sup>5)</sup>、金属ひずみゲージ<sup>6)</sup>などが存在する。逆磁歪効果型ひずみセンサと他の振動センサの性能比較を以下に示す。応力に対して電気(磁気)エネルギーに変換する特性として電気(磁気)機械結合特性が存在するが、PZTに代表される圧電材料の電気機械結合係数は $\sim 0.77$ 程度であり、それに対して磁性材料である $\text{Fe}_{72}\text{Si}_{14}\text{B}_{14}$ (以下FeSiB)の磁気機械結合係数は $0.75^{8)}$ 、またFeSiBCアモルファスリボンにおいて磁気機械結合係数 $0.96^{10)}$ という数値が示されていることから、磁性材料がセンサを構成する材料として優れている。また、ひずみ感度(ゲージ率、ひずみに対する抵抗・インピーダンス変化率)に着目した際、金属ひずみゲージはひずみ感度が2程度<sup>9)</sup>であるのに対し逆磁歪効果型センサのひずみ感度は数千~一万を示している<sup>4)</sup>。先行研究においては、ひずみセンサ基板の片側を固定してカンチレバー構造とし、自由端を変位させることでセンサにひずみを印加していた。振動特性の計測の際はカンチレバーを固定したジグごと加振器を用いて自由振動させることで評価を行った。その結果、Fig. 1に示すように、カンチレバーを自由振動させたことによる機械的共振点が現れた特性が得られた。自由振動による振動特性は、100 Hz以下の低周波帯域のみにおいて測定が行われていたが、我々が作製したセンサに通電している磁性材料の励磁用のキャリア電流の周波数は150 MHz程度であるため、理論上は数MHzの振動にも応答ができると考えられる。そこで、センサを自由振動させるのではなく、外部からの応力によってひずみを印加する手法による特性を示す

ことにより、従来より広い周波数帯域においてセンサを用いることができるのではないかと考えた。本研究では、センサを圧電素子に接着し、圧電素子に電界を印加することで静的なひずみ印加、または強制振動させることでひずみセンサの特性を評価することを試みた。

## 2. 実験方法

## 2.1 素子構造及び動作原理

センサ形状をFig. 2に示す。センサは厚さ200  $\mu\text{m}$ のSi基板上に成膜した金属薄膜であり、1ターンミアンダ形状の厚さ1  $\mu\text{m}$ のMo導体層を磁歪材料である厚さ1  $\mu\text{m}$ のFeSiB短冊状磁性層で上下から挟んだ三層構造となっている。

本センサの基本的な動作原理として、磁歪薄膜の逆磁歪効果を用いている。センサ素子の積層構造部分の断面模式図をFig. 3(a)~(d)に示す。初期状態として、印加ひずみゼロの時、薄膜長手方向に磁気異方性が誘導された状態(Fig. 3(a))を基準に考える。そこから徐々に圧縮ひずみを印加していくにつれてFig. 3(b)~(d)に示すように、磁気異方性が見かけ上消失した後に幅方向を向くようになる。上記のように磁気異方性が変化することで磁歪膜の幅方向透磁率が変化し、導体層に高周波電流を通電することでひずみ変化をインピーダンス変化として検出することが可能となる。

## 2.2 センサ素子作製

センサ素子は8.5 mm $\times$ 25 mm、厚さ200  $\mu\text{m}$ のSi基板上に薄膜をRFスパッタ法、及びリフトオフ法を用いて作製した。成膜後に360  $^{\circ}\text{C}$ で120分回転磁界中熱処理(240 kA/m)を行うことで、熱処理後の残留応力を利用してセンサ素子の長手方向に異方性を誘導した。熱処理後にダイシングソーを用いて基板を切断し、素子の個片化を行った。

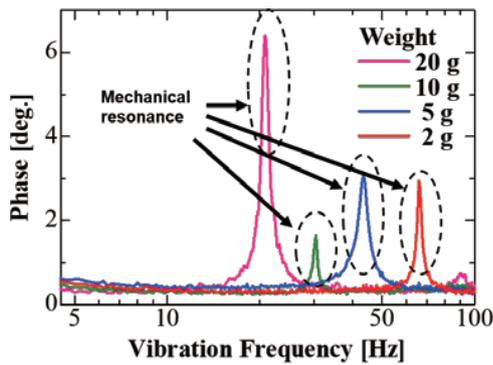


Fig. 1 Characteristic evaluation results for free vibration<sup>4)</sup>.

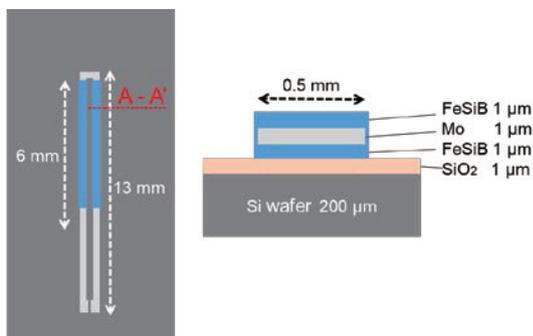


Fig. 2 Schematics of sensor structure.

### 2.3 圧電素子によるひずみ印加方法

本研究で用いたセンサは、逆磁歪効果を用いたセンサのため、素子長手方向に対する一軸のひずみが印加された際のみについて考慮しており、素子長手と幅方向に同時に同じひずみが加わった場合、磁気異方性の変化が起こらずインピーダンスの変化として検出することができない。本研究では、面内様に伸縮する円板形状の圧電素子を用いた。センサの基板形状を長方形とすることで、圧電素子による応力を印加した際に長手と幅方向で基板上の薄膜に加わるひずみに異方性が生じるものと考えた。よって、Fig. 4に示すようにセンサ基板と同形状(8.5 mm×25 mm, 厚さ 200 μm)のSi基板を圧電素子(直径 50 mm, 厚さ 4 mm)に接着し、圧電素子に 5 Hz 交流電圧を印加することで、長手及び幅方向に対するひずみを三軸ひずみゲージを用いて測定した。

### 2.4 圧電素子によるひずみ印加時の静特性及び動特性測定

作製したセンサを Fig. 5 に示すように圧電素子に接着剤を用いて接着し測定を行った。静特性は圧電素子に -1 kV ~ +1 kV まで直流電圧を印加し、センサのインピーダンス位相変化をネットワークアナライザによる反射法を用いて測定した。比較として、Fig. 6 で示すようにセンサ片側を固定したカンチレバーとし、自由端をマイクロメータヘッドで変位させたときのインピーダンスの位相変化を同様にネットワークアナライザによる反射法により測定した。動特性は圧電素子に交流電圧 200 V<sub>pp</sub> を印加し、電圧の周波数に対するセンサのインピーダンス位相変化を、位相検波回

路<sup>4)</sup>を用いて測定した。比較として、Fig. 7 に示すように圧電素子に直接ひずみゲージを接着し、圧電素子に 200 V<sub>pp</sub> の交流電圧を印加することによる振動特性の測定を行った。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 ひずみゲージの長方形基板に対するひずみ測定

圧電素子への印加電圧に対する基板長手と幅方向に対するひずみ測定結果を Fig. 8 に、長手と幅方向のひずみの差分を Fig. 9 に示す。Fig. 8 では圧電素子への印加電圧が増加するにつれてひずみゲージによる検出量がおおよそ比例的に増加しており、Fig. 9 に示される長手と幅方向への検出ひずみの差分も同様に印加電圧に比例していることが確認できる。この結果から、圧電素子によるセンサ基板への印加ひずみには異方性が存在することが確認された。Fig. 9 より圧電素子に 1 kV 印加した場合、センサ基板には長手方向に約 11.5 ppm のひずみを印加できると見積もれる。

### 3.2 静特性測定結果

圧電素子への印加電圧に対するインピーダンスの位相変化を Fig. 10 に示す。またカンチレバー状態での位相変化の測定結果を Fig. 11 に示す。3.1 の結果から、圧電素子に 1 kV 印加した際、センサには長手方向一軸に 11.5 ppm ひずみであろうとの見積もりより、縦軸の位相変化を同縮尺にして比較を行った。Fig. 10 より、圧電素子でセンサをひずませた際の印加電圧 -1 kV ~ +1 kV までの位相変化量は 0.3 deg.、Fig. 11 から、カンチレバー状態では -11.5 ~ +11.5 ppm までの位相変化量は 1.2 deg. という結果となった。カンチレバー状態での測定結果が圧電素子を用いた場合に比べて傾きが緩やかになった(感度が低下)原因として、ネットワークアナライザへの接続方法の違いが考えられる。カンチレバー状態での測定の際は高周波プローブを用いているのに対して、圧電素子を用いる場合は、電子回路基板を介しての 2port 接続をせざるを得ないため、測定前の校正が十分にできないことなどが挙げられる。

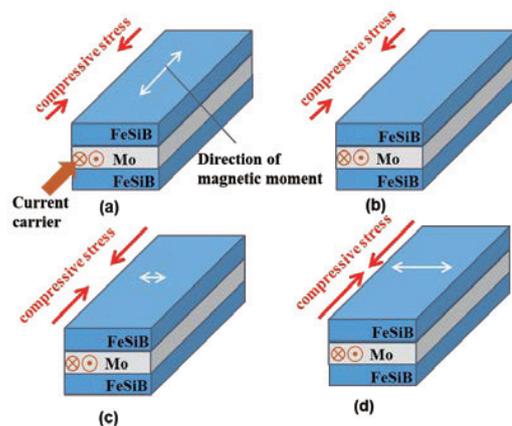


Fig. 3 Magnetic anisotropy changes of magnetostrictive layers under applied stress<sup>4)</sup>.

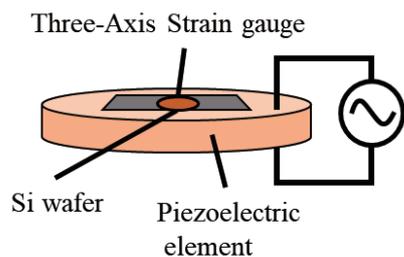


Fig. 4 Strain measurement for rectangular shaped Si substrate by strain gauge.

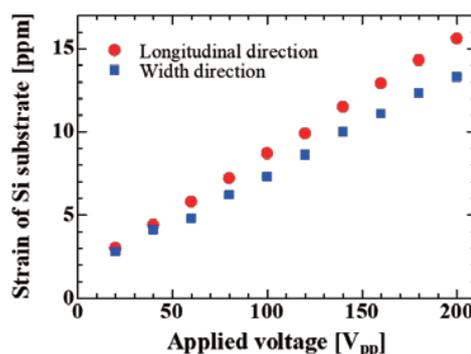


Fig. 8 Strain gauge outputs against applied voltage.

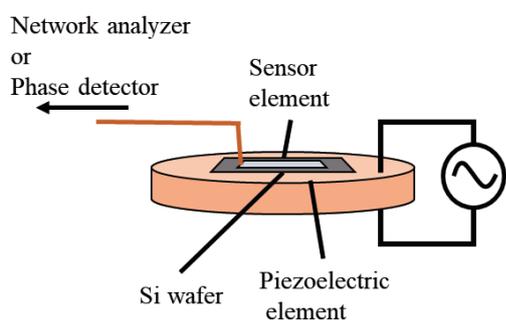


Fig. 5 Measurement of static and dynamic characteristics of strain sensor using piezoelectric elements.

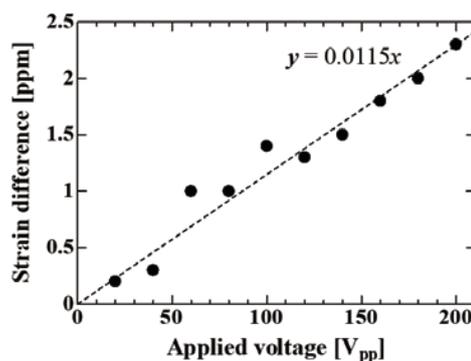


Fig. 9 Strain difference in the longitudinal and width directions.

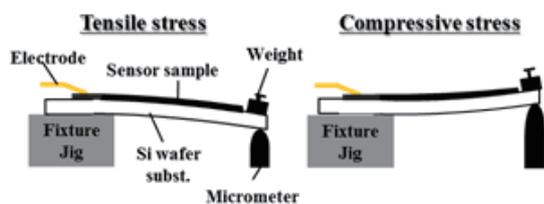


Fig. 6 Measurement of static characteristic as cantilever structure<sup>5)</sup>.

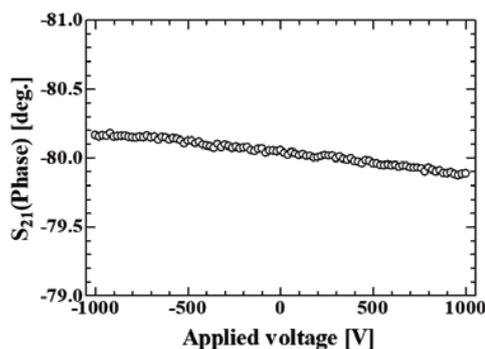


Fig. 10 Static characteristic measurement results using piezoelectric elements.

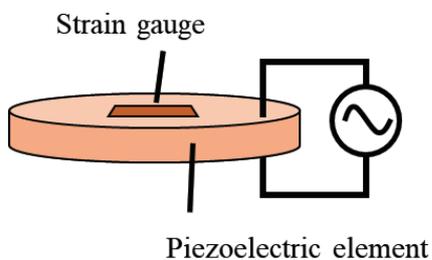


Fig. 7 Measurement of dynamic characteristics of strain gauge using piezoelectric elements.

### 3.3 動特性測定結果

Fig. 12 は圧電素子を 210 Hz で振動させた際のセンサの出力をオシロスコープに表示した結果である。印加されているひずみが約 2 ppm と非常に微小であり、また電源からの 50 Hz のノイズが大きく波形として観察することが困難であるため、高速フーリエ変換(FFT)することで周波数スペクトルを確認した。FFT はハミング窓により解析が行われている。横軸は 1 目盛当たり時間が 2 sec., 周波数が 50

Hzであり、図左端から右端まで0~20 secまでの時間波形、0~500 Hzまでのスペクトル解析結果を表示している。Fig. 12に示したスペクトルから、-80 dBをノイズレベルとし、出力との差分を印加電圧の周波数に対してプロットした結果をFig. 13に示す。圧電素子には200 V<sub>pp</sub>を印加することで、センサ素子には長手一軸に約2 ppm程度のひずみが印加されていると考えられる。Fig. 13より、周波数を上げるにつれて出力が徐々に低下し1.9 kHzまではセンサによる出力を確認できたが、2 kHz以上ではノイズレベルと同等という結果になった。周波数の増加につれてセンサ出力が減少した原因には、測定に使用した位相検波回路に遮断周波数160 Hzの低域通過フィルタ (R=10 kΩ, C=0.1 pF)を用いていたために、その減衰特性が現れていたと考えられる。低域通過フィルタによる信号の減衰を補正した結果をFig. 14に示す。比較として、圧電素子にひずみゲージを接着し、周波数特性を測定した結果をFig. 15に示す。Fig. 14及びFig. 15を比較した結果、おおよそ同等の減衰が確認できたことから、上述の結果は圧電素子の高周波に依る振動の振幅低下による特性が現れていたと考えられる。以上より、強制振動によるひずみセンサの振動特性を正しく測定することができた。

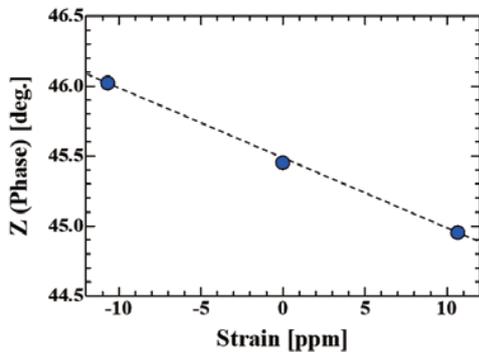


Fig. 11 Static characteristic measurement results using a cantilever.

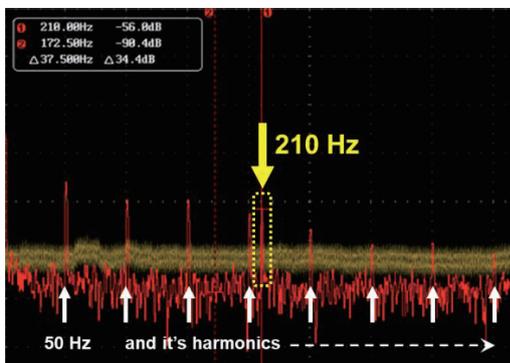


Fig. 12 Fast Fourier transform of sensor output waveform using oscilloscope.

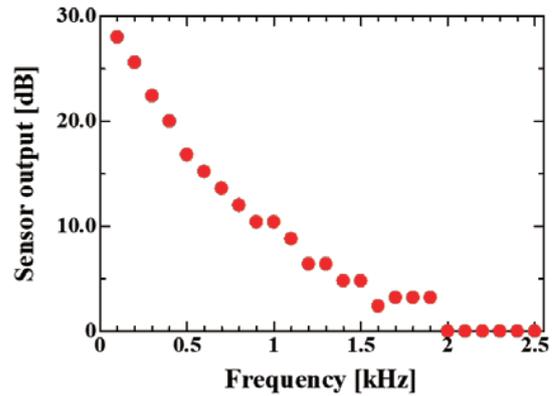


Fig. 13 Dynamic characteristic measurement results with piezoelectric elements.

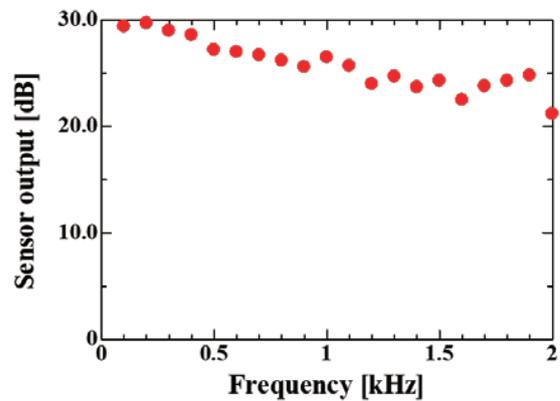


Fig. 14 Dynamic characteristic measurement results with piezoelectric elements (After correction of signal attenuation by Low-Pass Filter).

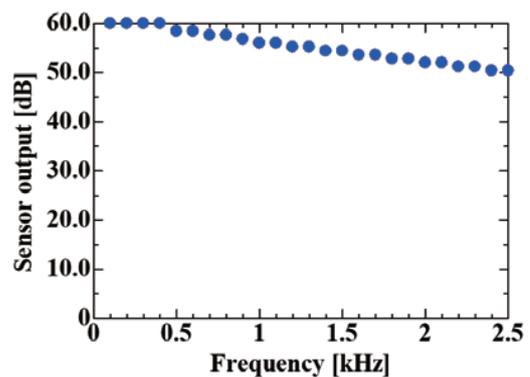


Fig. 15 Dynamic characteristic measurement results with piezoelectric elements using strain gauge.

#### 4. まとめ

先行研究において、カンチレバー状態で自由振動させて評価していたセンサについて、本研究では圧電素子を用いて強制振動させることで特性の評価を行った。その結果としてDCから2 kHz未満までの広い周波数帯において、ひずみ及び振動センサとしての動作を確認することができた。

また圧電素子を用いることで直接センサにひずみを印加する方法の有効性を示すことができた。しかしながら、センサと測定器や検出回路の接続方法を改善する必要があり、またセンサ素子の長手方向により大きな歪みを印加可能な圧電素子形状やセンサ基板形状などについて、検討を行い最適化する必要がある。

### References

- 1) Kokudokoutsusyou: Douro no Roukyukataisaku no Honkaku-jisshi ni Kansuru Teigen (in Japanese) (2014).
- 2) M. Nakamura, K. En: *Report of Obyashi Corporation Technical Research Institute*, **76**, 1 (2012).
- 3) T. Kuroda, H. Nishida, T. Ozaki, T. Hinoue, R. Akai: *OMRON TECHNICS*, **51.025JP**, (2019).

- 4) Y. Kubo, S. Hashi, H. Yokoi, K. Arai, K. Ishiyama: *IEEEJ Trans. SM*, **138**, 4 (2018).
- 5) Shinkawa Electric Co. HP : <https://www.shinkawaelectric.com/column/20110517.html> (as of May. 17, 2011).
- 6) Kyowa Electric Instruments Co. HP : [https://www.kyowa-ei.com/jpn/technical/strain\\_gages/principles.html](https://www.kyowa-ei.com/jpn/technical/strain_gages/principles.html).
- 7) K. H. Shin: Jikidanseikouka wo Mochiita Micro Sensor System to Sono Ouyou (in Japanese), Doctoral dissertation of Tohoku University, p.1 (1999).
- 8) K. I. Arai, N. Tsuya: *J. Appl. Phys.*, **49**, 1718 (1978).
- 9) K. I. Arai, N. Tsuya: M. Yamada, T. Masumoto, *IEEE Trans. Magn.*, **12**, 936 (1976).
- 10) C. Modelewski, H. T. Savage, L. T. Kabacoff, and A. E. Clark: *IEEE Trans. Magn.*, **17**, 2837 (1981).

2019年11月4日受理, 2020年3月9日再受理, 2020年3月26日採録