

局所異方性測定による歪センサの動作解析

Analysis of strain sensor operation by local anisotropy measurement

豊田恵伍^{a) b)}・後藤太一^{b)}・石山和志^{b) †}

^{a)} 東北大学大学院 工学研究科, 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6 (〒980-8579)

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

K. Toyoda^{a) b)}, T. Goto^{b)}, and K. Ishiyama^{b) †}

^{a)} Graduate School of Engineering, Tohoku Univ., Aramaki Aoba 6-6, Aoba-Ku, Sendai 980-8579, Japan

^{b)} Research Institute of Electrical Communication, Tohoku Univ., Katahira 2-1-1, Aoba-Ku, Sendai 980-8577, Japan

We have been studying strain sensors based on the inverse magnetostriction effect. In our previous research, we evaluated the sensitivity characteristics of an entire strain sensor by measuring the change in the direction of magnetic anisotropy when strain was applied to the sensor as an impedance change using a network analyzer. When a directional change in magnetic anisotropy occurs simultaneously across the entire sensor when strain is applied to the sensor, the impedance change becomes steeper, and the sensitivity improves. Therefore, in this study, the change in local magnetic anisotropy due to the inverse magnetostriction effect that occurs when strain is applied to the sensor was obtained from a local BH loop obtained using the Kerr effect, and the uniformity of the local magnetic anisotropy was evaluated. As a result, it was confirmed that the magnetic anisotropy varied from place to place when stress was applied. Since quantitative evaluation of local magnetic anisotropy and strain was possible through local BH loop measurement using a Kerr effect microscope, this measurement could be used to further increase the sensitivity of the sensor.

Key words: inverse-magnetostrictive effect, strain sensor, local BH loop, local magnetic anisotropy, magnetic thin film

1. はじめに

近年, 老朽化した構造物の数が増加しており, 崩落の危険性が高まっている. 例えば, 耐用年数の 50 年を経過した橋梁の割合は 2029 年に 50%を超えるとされている¹⁾. そこで, 事故を未然に防ぐために建造物の健全性を検査する必要がある. 現在, 構造物の健全性診断の手法は打音検査が主流だが, この手法は危険を伴う作業であることや人員不足などの問題がある. これらを解決するための方法の一つとして, 高感度な振動センサが求められている¹⁾.

これまで我々は, 逆磁歪効果を用いた歪センサの研究を行っており, 高感度歪センサを振動センサとして用いることで前述の課題解決が可能と考えられる²⁾. 先行研究においては, 歪センサ基板の片側を固定してカンチレバーとし, 自由端をマイクロメータで変位することで歪を印加し, そのときの磁気異方性の方向変化をインピーダンス変化としてネットワークアナライザを用いて測定することにより, センサ全体の感度特性を評価してきた³⁾. 歪センサに歪を印加すると逆磁歪効果により磁気異方性の大きさが変化し, ある歪でその方向が変化する. この方向変化がセンサ全体で同時に起こると, インピーダンス変化が急峻になり感度が向上する. そのため, 磁気異方性が均一であれば方向変化するときの歪が同一であるため, センサ全体で同時に方向変化し高感度化につながる.

そこで, 本研究ではセンサに歪を加えたときの逆磁歪効果による局所磁気異方性の変化を, カー効果を利用して取得した局所 BH ループから求め, 局所磁気異方性の均一性の評価と誘導過程の解析を行った.

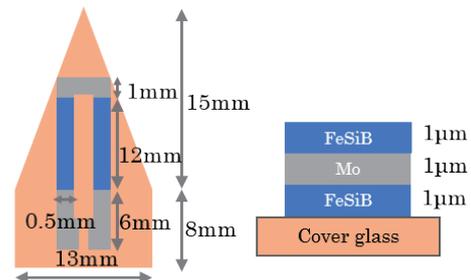


Fig. 1 Schematics of sensor structure.

2. 実験方法

2.1 素子構造と動作原理

本研究において作製したセンサ素子の構造を Fig.1 に示す. 厚さ 150 μ m のカバーガラス上にスパッタ法を用いて 72Fe-14Si-14B, Mo を成膜した. 1 ターンミアンダ形状の Mo 膜の導体層 1 μ m の上下に, 短冊状の 72Fe-14Si-14B 磁性膜 1 μ m を配置した 3 層積層構造となっている.

以下にセンサの動作原理について説明する³⁾. Fig.2 にセンサに歪を印加した時の, センサ内部の状態の変化の過程を示す. 印加歪が 0 の時に薄膜幅方向に磁気異方性が誘導された状態を基準に考える. Fig.2(a)に示すような初期状態から薄膜長手方向に引張歪を印加しその印加量を (b)-(c)-(d) と大きくしていくと, 磁歪膜内部に生じる応力により磁気弾性エネルギーが変化し, それに伴い, 磁気異方性の大きさは変化する. 具体的には, 印加歪を大きくしていくと Fig.2(c)のように磁気異方性が見かけ上キャンセルされたのち, Fig.2(d)のように磁気異方性が長手方向を向くようになる. このように, 歪を

Corresponding author: K. Ishiyama (e-mail: ishiyama@riec.tohoku.ac.jp).

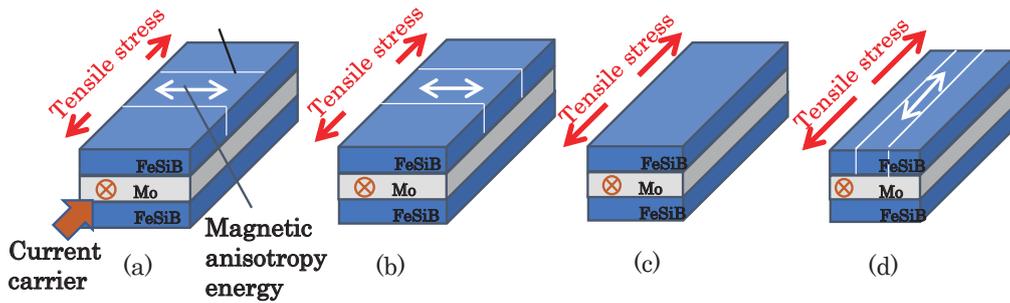


Fig. 2 Magnetic anisotropy changes of magnetostrictive layers under applied stress.

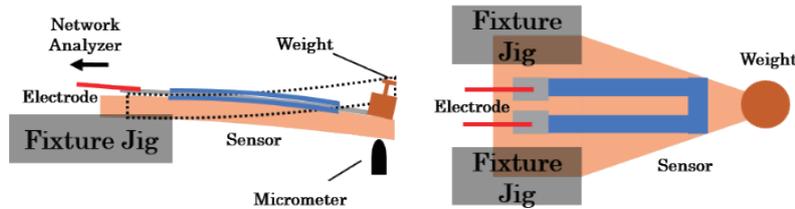


Fig. 3 Setup for measurement of sensor.

印加して磁気異方性が変化すると磁歪膜の幅方向透磁率が変化し、高周波でのインピーダンスが変化するため、歪の変化をインピーダンスの変化として検出することが可能となる。

2.2 歪-インピーダンス特性の測定

印加歪に対するセンサのインピーダンス変化の測定を行った。実験装置を Fig.3 に示す。作製したセンサ基板の片側を治具で固定してカンチレバーとし、自由端側をマイクロメータで変位させることで歪を印加する。そのときのインピーダンス変化をネットワークアナライザによって測定した。

歪-インピーダンス特性のグラフを Fig.4 に示す。Fig.2 と Fig.4 の(a)~(d)はそれぞれ対応している。Fig.2(c)では磁気異方性がセンサ全体でキャンセルされているが、実際には異方性が不均一であるために場所によってキャンセルされていない部分がある。ある場所で磁気異方性がキャンセルされる際の歪の大きさと、別の場所で磁気異方性がキャンセルされる際の歪の大きさは異なり、Fig.4(c)の歪(これを ε_0 と置く)はばらつく。場所ごとの歪-インピーダンス特性とセンサ全体の歪-インピーダンス特性のグラフを Fig.5 に示す。Fig.5 の(a)~(c)のように場所ごとに ε_0 がばらついていると、センサ全体として Fig.5(d)のように傾きが緩やかになる。ゆえに、歪を加えたときのインピーダンス変化が小さくなり感度悪化につながる。

2.3 BH ループと歪-インピーダンス特性の関係

場所ごとの ε_0 を評価するうえで必要な BH ループと歪-インピーダンス特性の関係について説明する。BH ループを Fig.6 に示す。BH ループより、センサが元々もつ磁気異方性エネルギーは $B_s H_k / 2$ で表すことができる。そのセンサに歪を加えた際の磁歪によるエネルギーは $3\lambda\sigma / 2$ で表され、2つのエネルギーの大きさが等しいときに、磁気異方性は見かけ上キャンセルされて透磁率が最大

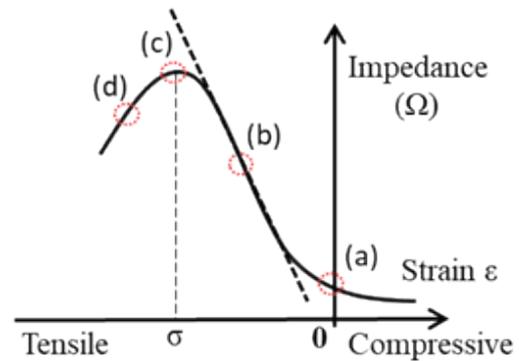


Fig.4 Strain-impedance characteristics.

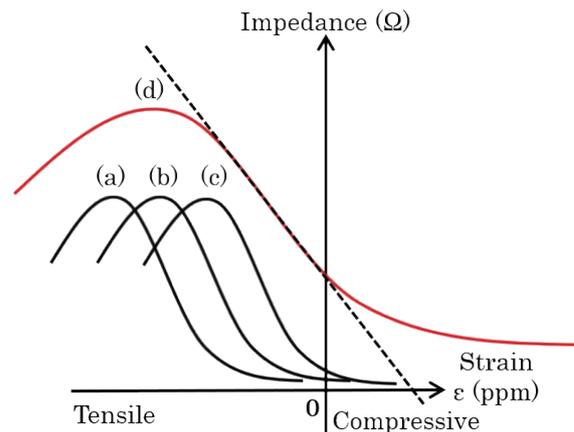


Fig. 5. Local and overall strain-impedance characteristics.

となる。すなわち以下の条件を満たすとき透磁率が最大となる。

$$B_s H_k / 2 = 3\lambda\sigma / 2 \quad (1)$$

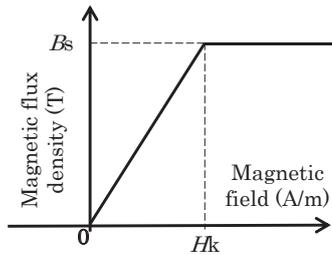


Fig. 6 BH loop.

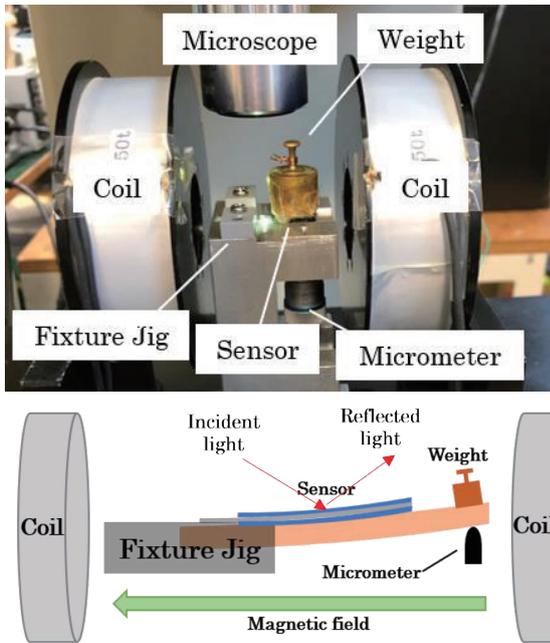


Fig. 7 Setup for measurement of local BH loop.

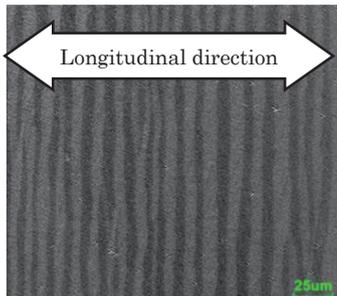


Fig. 8 Magnetic domain image ($\epsilon=0, H=0$).

実験に用いた磁性膜の特性から、 $B_s = 1.5$ (T)、磁歪定数 $\lambda = 30 \times 10^{-6}$ 、応力 $\sigma = E \times \epsilon$ (N/m²)、ヤング率 $E = 110 \times 10^3$ (MPa) より、 H_k (Oe) と歪 ϵ の関係は次式で表される。

$$\epsilon = 0.15 H_k \quad (2)$$

これより、BH ループ計測により H_k を求めれば歪-インピーダンス特性においてインピーダンスが最大となる歪 ϵ_0 を求めることができる。

2.4 BH ループの測定原理

カー効果顕微鏡を利用した局所 BH ループの測定を行った。実験装置を Fig. 7 に示す。カー効果顕微鏡を用いて磁性膜の約 200 μm 四方の領域を観察した磁区構造を Fig.8 に示す。これは無磁界無応力での観察であり、成膜時に誘導された異方性により薄膜幅方向に容易軸をもつストライプドメインになっている。困難軸である薄膜長手方向に $-2.4 \sim +2.4$ kA/m の範囲で磁界をかけた際の磁区写真を撮影し、その磁区画像の輝度の平均値を取得する。横軸に印加磁界、縦軸に輝度をとることで局所 BH ループを得た。

3. 実験結果及び考察

3.1 圧縮歪印加時の磁気特性変化

圧縮歪を印加した際の BH ループの変化を Fig.9 に示す。薄膜幅方向に容易軸をもつセンサの片側を固定し、自由端側をマイクロメータで押し上げて圧縮歪を加えている。自由端変位が 50 μm 、100 μm 、150 μm の際に、困難軸である薄膜長手方向に磁界を加えた際の BH ループを測定した。印加する圧縮歪の増加とともに H_k が増加することが確認できた。これは、元々薄膜幅方向に容易軸をもつセンサにさらに圧縮歪を印加することで、磁気弾性エネルギーの分だけ H_k が増えているためである。これにより、磁気弾性効果によって磁気異方性が誘導されていることが分かる。

次に、BH ループを場所ごとにさらに細かく測定した。縦軸に H_k 、横軸にその測定場所をとったグラフを Fig.10 に示す。使用したカンチレバーは先端に行くにつれ幅が狭くなっているため、カンチレバー長さ方向で均一の応力がかかるはずである。実際の実験結果でも自由端変位を 0 μm 、50 μm 、100 μm 、150 μm と変化させて圧縮歪を強くしていくごとに H_k は長さ方向でほぼ一定値を保ったまま増加しており、カンチレバー長さ方向で一定の歪が印加されていること、そして歪みにより異方性が誘導されることが確認できた。しかし、全体的に H_k の場所によるばらつきが見られること、さらに固定端付近で H_k が収束していくような傾向が確認された。 H_k の場所によるばらつきは薄膜表面のわずかな傷や付着物がある部分に応力が加わってしまったためと考えられる。また、固定端付近で H_k が収束するように見える理由は、インピーダンス測定端子を取り出すために理想的な固定端になっていないことが原因の一つと考えられ、今後設計を見直した治具で再検討を行う予定である。

3.2 H_k 分布の感度への影響

実際に圧縮歪を印加して測定した H_k から ϵ を求め、 ϵ についての度数分布をグラフにしたものを Fig.11 に示す。前述の通り、Fig.4(c)における歪の大きさが場所により均一であれば傾きが急峻になり、小さな歪で大きなインピーダンス変化をする高感度なセンサであると言えるため、 H_k の均一化すなわち ϵ の均一化により Fig.11 の各グラフの尖度を大きくすることで、センサの高感度化

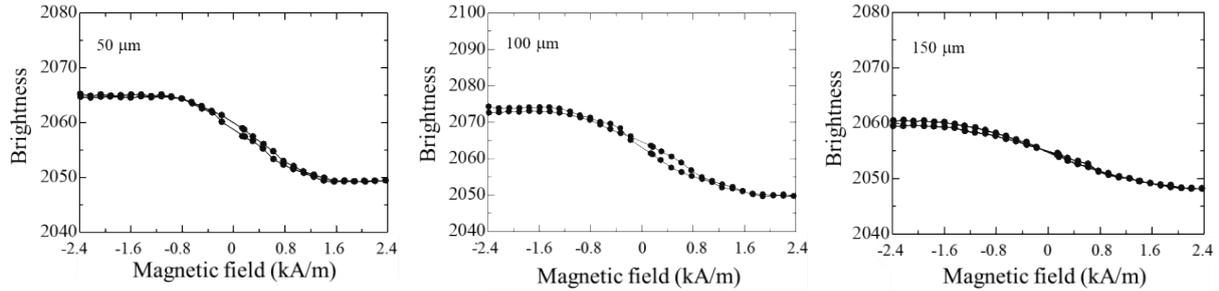


Fig. 9 Change of local BH loop under compressive strain.

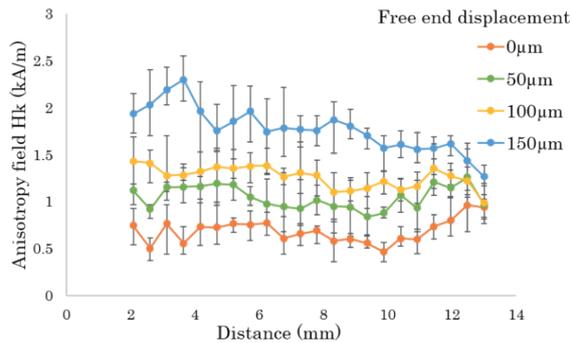


Fig. 10 Variation of anisotropy field by measurement position.

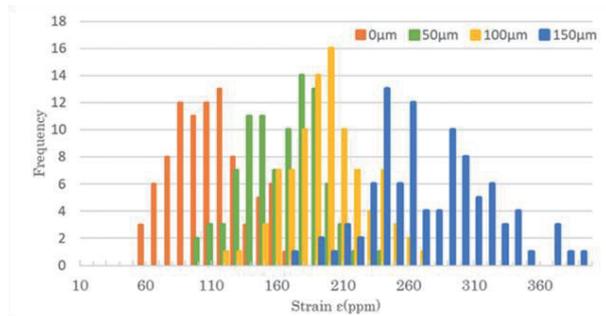


Fig. 11 Frequency distribution of strain ϵ .

を見込むことができる。

以上のように、センサの感度特性を決める歪や局所磁気異方性の関係を定量的に明確化するための手法を確立した。今後、この手法を用いて材料特性を評価することで、高感度センサ実現のための材料開発が加速されると考えられる。

4. まとめ

歪センサの局所磁気異方性の評価を行った。そこで、圧縮歪印加による磁気異方性の誘導過程を確認するとともに、応力印加下であっても磁気異方性が場所によってばらつくことを確認した。カー効果顕微鏡を利用した局所BHループ測定を通して局所の磁気異方性や歪についての定量的な評

価が可能となったため、この測定手法を活用してセンサの更なる高感度化の可能性が期待できる。今後は、今回の結果を踏まえた高感度化のためのセンサの設計や作製プロセスの検討を行う。

References

- 1) D. Sora, S. Hashi, K. Ishiyama: *T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)*, **4**, 41 (2020).
- 2) Y. Miwa, J. Shin, Y. Hayashi, S. Hashi, K. Ishiyama: *IEEE Trans. Magn.*, **50**, 7029240 (2015).
- 3) Y. Kubo, S. Hashi, H. Yokoi, K. Arai, K. Ishiyama: *IEEEJ Trans. SM*, **138**, 153 (2018).

2022年10月28日受理, 2023年08月04日採録