

直交フラックスゲート型歪センサの特性評価

Evaluating characteristics of orthogonal fluxgate strain sensor

千田健太^{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, 宮城県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, 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980-8577)

Kenta Chida^{a, b)}, Taichi Goto^{b)}, and Kazushi Ishiyama^{b) †}

^{a)} Graduate school of Engineering, Tohoku Univ., 6-6 Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan

^{b)} RIEC Tohoku Univ., 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8577, Japan

We propose a novel strain sensor utilizing an orthogonal fluxgate sensor system with bulk materials. Instead of a magnetic field, strain is applied to an orthogonal fluxgate magnetic field sensor to produce an output. In this study, verification experiments were conducted to validate that the sensor works according to its principle. We also explored operational conditions to enhance sensitivity. Furthermore, to confirm the effectiveness of the orthogonal fluxgate system as a strain sensor using bulk materials, we compared it with the magneto impedance system. Results confirmed the functionality of the orthogonal fluxgate system, as evidenced by the observation of magnetic domains under stress and strain-output characteristics at a frequency of 250 kHz. The peak sensitivity reached 6.72 mV/ppm with a bias magnetic field of 2 Oe and a carrier frequency of 250 kHz. When compared with the magneto impedance system, there was a 87-fold difference in sensitivity, indicating potential as a highly sensitive strain sensor.

Key words: orthogonal fluxgate sensor, strain sensor, inverse-magnetostrictive effect, amorphous ribbon, soft magnetic

1. はじめに

近年, 橋梁の老朽化対策¹⁾や機器の健全性診断²⁾などを目的に歪センサの需要が高まっている. この歪センサには, 圧電材料を用いた歪センサ³⁾, 歪ゲージ⁴⁾など様々存在するが, 対象物に応じた感度やサイズの選定が重要となる. ここで, 最も一般的に用いられる歪ゲージを例に挙げる. ねじの締結状態を確認するために用いられる歪ゲージには小型のものが求められる⁵⁾. 一方, 橋梁に用いられるコンクリートやモルタルを対象とした場合は必ずしも小型のものが求められない⁶⁾.

本研究室では, 磁気インピーダンス方式による歪センサの研究を行ってきた^{7)~9)}. このセンサは Si もしくはガラス基板上にスパッタ法を用いて金属薄膜を成膜しているため, 小型化が可能である. しかし, 前述の通りセンサは適材適所であるため, 対象物をコンクリートやモルタルと想定した場合, 歪センサとして薄膜を用いるのではなく, 僅かな歪で大きな磁化変化量を得られるバルク材が有利になると考えた. しかし, 磁気インピーダンス方式はキャリア周波数が数百 MHz のため, 実用化を想定した場合, 大きな容量の高周波電源を必要とするなどの問題が少なからず残る.

そこで我々は, 直交フラックスゲートセンサ方式を適用した新しい歪センサ¹⁰⁾を提案する. 直交フラックスゲート磁界センサは数百 kHz の高周波電流を通電した磁性材料にコイルが巻かれた構造をしている. そこに外部磁界を印加する事で, 磁気モーメントが容易軸方向から変化し, 高周波電流によって生じた幅方向交流磁界によりモーメントの首振り運動が起こる. そのため, 通電方向の磁化変化が生じ, その磁化変化量(出力

電圧)は印加した磁界に応じて変化する. ここで, 磁気モーメントの方向を変化させるために, 磁界ではなく歪を印加する事で歪センサが実現できる. つまり, 歪印加による逆歪効果を利用して磁気モーメントの方向を変化させ, 印加した歪に応じた磁化変化量(出力電圧)を得るものである.

本研究ではバルク材として高磁歪かつ優れた軟磁性を有するアモルファスリボン 2605SA1¹¹⁾ (プロテリアル製) を採用し, これに直交フラックスゲート方式を適用する事で歪センサを実現した. アモルファスリボン 2605SA1 の代表的な特性を Table 1 に示す^{12)~13)}. そして, 歪センサが原理通り動作することを確認するために, 応力印加時の磁区観察, 単一の周波数における歪-出力測定を行った. また, 高感度化を目的として動作条件の検討を行った. さらに, バルク材を用いた歪センサとして直交フラックスゲート方式が有効であることを確認するために磁気インピーダンス方式との比較を行った.

2. 直交フラックスゲート型歪センサの提案

2.1 直交フラックスゲート型歪センサの原理

Fig. 1 にセンサへ歪を印加したときのセンサ内部の異方性, 磁気モーメントの状態の偏移を示す. また Fig. 2 に歪-出力特性のグラフを示す. Fig. 1 と Fig. 2 の(a)~(d)はそれぞれ対応している. 印加されている歪が 0 の状態(c)で, 磁性体の幅方向に磁気異方性が誘導された状態を基準にすると, 引張歪が印加されるにつれて逆歪効果により長手方向を容易軸とする磁気異方性が誘導される. そのため, Fig. 1(a), (b) に示すように印加引張歪が増えるにつれて, 磁性体の異方性は見かけ上消失したのち, 長手方向を向くようになる. このように磁気異方性が変化する事で, 磁気モー

Corresponding author: K. Ishiyama
(e-mail: kazushi.ishiyama.d8@tohoku.ac.jp).

Table 1 Typical properties of 2605SA1.

Alloy	Composition	Saturation flux density (T)	Coercive force (A/m)	Saturation magnetostriction (ppm)	Maximum DC permeability
2605SA1	Fe-Si-B	1.56	2	27	600000 (Annealed) 45000 (As cast)

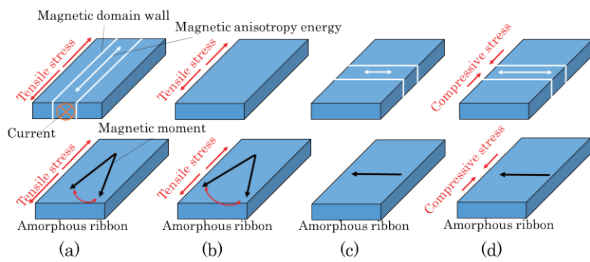


Fig. 1 Magnetic anisotropy and moment changes of amorphous ribbon under applied stress.

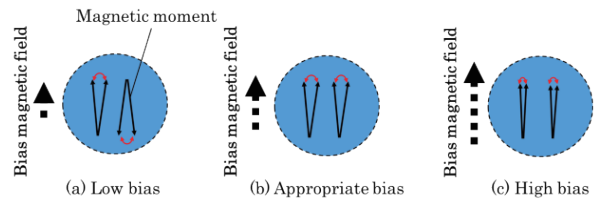


Fig. 3 Change of moment by bias magnetic field.

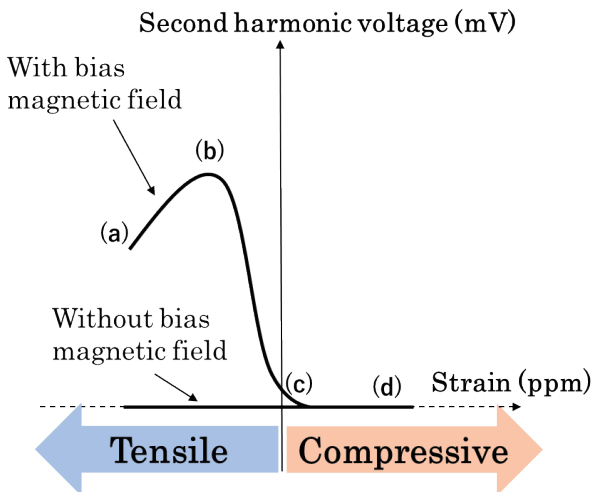


Fig. 2 Strain-output characteristics.

メントの方向も変化するため、具体的に磁気モーメントに着目すると幅方向にモーメントが向いている(c),(d)では、幅方向交流磁界と平行しているため長手方向の磁化変化が生じず、出力は観測されない。しかし、見かけ上の異方性が消失した状態(b)では、面内全てが容易軸方向となり、長手方向の磁化変化が最大となる事から出力も最大となる。長手方向異方性に誘導された状態(a)では、モーメントを長手方向に拘束するエネルギーが増えることになるため、幅方向交流磁界への反応が低下し、出力が減少する。これらの変化の際、幅方向交流磁界 1 周期の間に、通電方向の磁化変化が 2 度生じるため倍周期成分が現れる。この検出方式は、直交フラックスゲートセンサに着想を得た新しい方式である。

2.2 バイアス磁界の影響

直交フラックスゲート型歪センサではバイアス磁界の印加が必須となる。これは歪印加のみでは、磁性体中のモー

メントを長手方向に揃えることが出来ず、出力を打ち消してしまうからである。例えば、バイアス磁界を印加しない場合にはモーメントが互いに逆方向を向き、消磁状態となるため、Fig. 2 の Without bias magnetic field と示した線のように出力が得られないことになる。そこで実際にはバイアス磁界を印加し、モーメントの方向を揃えることで出力を得ている。しかし、バイアス磁界の大きさによって出力は変化する。バイアス磁界によるモーメントの変化を Fig. 3 に示す。Fig. 3(a)のようにバイアス磁界が小さい場合にはモーメントは互いに反平行に容易軸方向に向いている状態となる。そのため、通電電流により幅方向に高周波交流磁界を印加した場合には磁化回転に伴う長手方向の磁化変化が一部打ち消されてしまい、コイルに誘起される電圧は僅かになる。一方、Fig. 3(c)のようにバイアス磁界が大きい場合にはモーメントが長手方向に拘束され、幅方向交流磁界への反応が低下する事から出力が減少する。つまり、Fig. 3(b)のような適切なバイアス磁界でのセンサ駆動が重要となる。

2.3 磁気インピーダンス方式による歪センサとの比較

磁気インピーダンス方式による歪センサは、2.1 節の直交フラックスゲート方式と同様に、歪を印加して磁気異方性が変化することを利用する。その時に、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。磁気インピーダンス方式と直交フラックスゲート方式では、高周波電流を通電し、センサ素子幅方向に交流磁界を発生させる部分は同様である。しかし、磁気インピーダンス方式は、幅方向の透磁率変化を介してインピーダンスの変化として検出するのに対し、直交フラックスゲート方式は交流磁界と直交する長手方向の磁化変化をコイルによる電磁誘導の法則を利用して検出するものである。

3. 実験方法

3.1 素子構造及び素子作製

Fig. 4 に本センサの構造を示す. 短冊形状に加工したアモルファスリボン(プロテリアル製 2605SA1, 1 mm × 26 mm, 厚さ $t=25\ \mu\text{m}$) に対し, 残留応力除去兼磁気異方性を誘導するために回転磁界中熱処理(3 kOe, 400 °C, 2 h)と幅方向に静磁界中熱処理(3 kOe, 400 °C, 2 h)を施した. 熱処理後, アモルファスリボンの両端に電極として銅箔を半田付けし, アルミ基板(13 mm × 26 mm, 厚さ $t=0.4\ \text{mm}$) 上にエポキシ樹脂で貼り付けた.

3.2 磁区観察手法

実験装置を Fig. 5, 歪印加方法を Fig. 6 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, 自由端から 5 mm の位置をマイクロメータで変位させることで歪を印加した. 歪量は引張 266 ppm から圧縮 266 ppm まで 133 ppm 間隔とした. この際, 先端から 12.5 mm の位置を磁気光学 Kerr 効果顕微鏡(対物レンズ倍率 5 倍)にて観察した.

3.3 歪-出力特性の測定

歪印加方法を Fig. 7 に示す. 作製したセンサに対し, カンチレバー方式にて先端から 5 mm の位置に $\pm 200\ \mu\text{m}$ の変位を与えた. この時に印加される歪量は, 変位を与えた際のカンチレバーに生じる歪量の式(1)を用いて得られる¹⁴⁾.

$$\epsilon = 3dH(L-x)/2L^3 \quad (1)$$

ここで d は変位量, H はカンチレバー厚み, L は固定端からマイクロメータまでの長さ, x は固定端からの距離を示す. 本実験では $H=0.4\ \text{mm}$, $L=15\ \text{mm}$, $x=7.5\ \text{mm}$ としているため, 変位により引張 266 ppm から圧縮 266 ppm

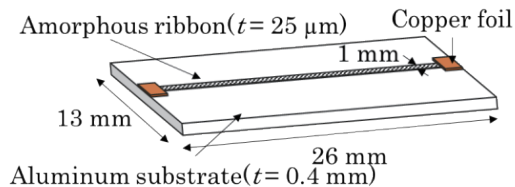


Fig. 4 Diagram of sensor element.

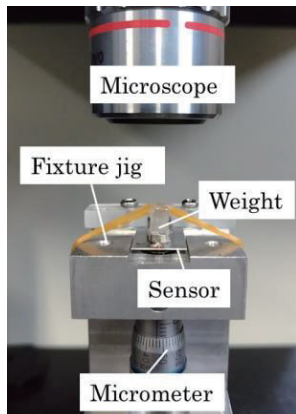


Fig. 5 Magneto-optical Kerr microscope.

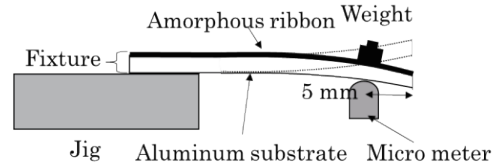


Fig. 6 Method of applying strain.

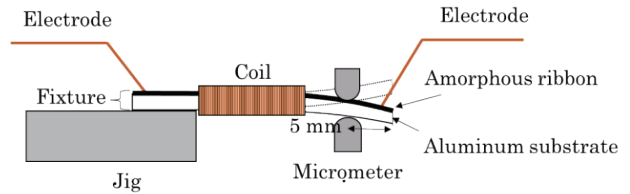
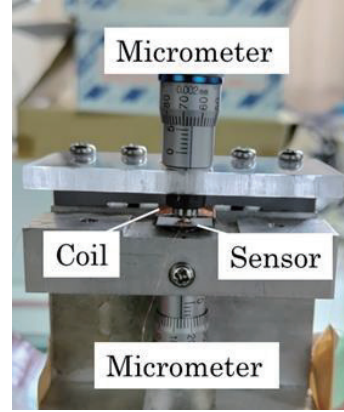


Fig. 7 Method of applying strain

までの歪をセンサに印加できた. また, アモルファスリボン中の磁気モーメントを長手方向に揃えるためのバイアス磁界をヘルムホルツコイルにて印加した. センサ幅方向に交流磁界を印加するためにセンサに通電する電流は二乗平均平方根が 0.2 A_{RMS} の正弦波とし, 300 ターンコイルにて磁化変化を検出した. 出力波形はオシロスコープにて観察し, FFT 機能を用いて倍周期成分(実効値)を測定した.

3.4 磁気インピーダンス方式による歪センサ

直交フラックスゲート型歪センサとの比較を行うために, 歪-インピーダンス特性を測定した. 歪-出力特性の条件と揃えるためのバイアス磁界を印加した. また, 作製したセンサに対し, 3.2 節と同様にカンチレバー方式にて引張 266 ppm から圧縮 266 ppm までの歪を印加した. インピーダンス変化はネットワークアナライザを用いて反射法により測定した.

4. 実験結果及び考察

4.1 歪印加時の磁区観察

歪印加時の磁区観察結果を Fig. 8 に示す. 歪無印加状態から引張歪を印加する事で, 長手方向に異方性が変化した. さらに, 引張側, 圧縮側ともに印加した歪量が大きいほど,

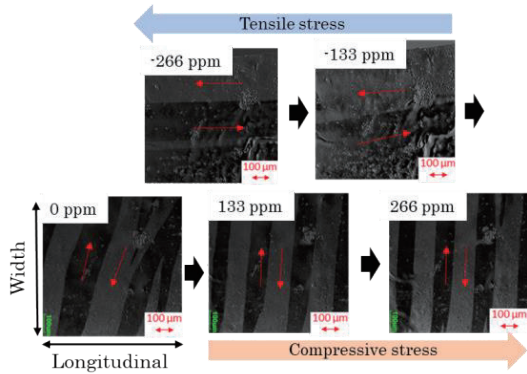


Fig. 8 Domain images during strain application.

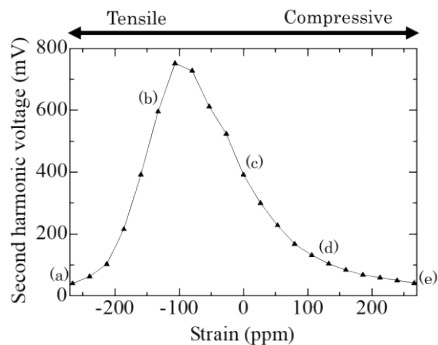


Fig. 9 Strain-output characteristics at frequency of 250 kHz.

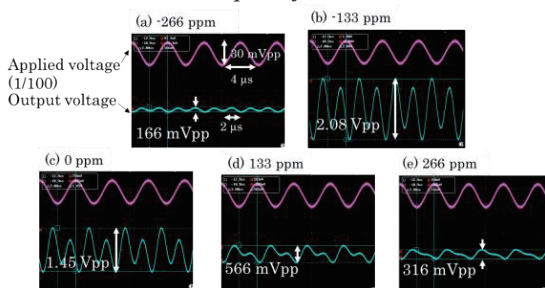


Fig. 10 Output waveforms.

それぞれ長手，幅方向の異方性が大きくなり，きれいなストライプドメインが観察された。したがって，引張歪印加により異方性が変化する事を確認した。

4.2 250 kHz 時の出力特性

通電周波数を 250 kHz，バイアス磁界を 2 Oe とした際の歪出力特性を Fig. 9 に示す。歪無印加状態から引張歪約 100 ppm まで出力は増加し，さらに引張歪印加により出力は低下した。Fig. 9(a)~(e)における出力波形を Fig. 10 に示す。(各波形画像上部がセンサ印加電圧(1/100)，下部が出力電圧を表す。)出力に倍周期成分が現れ，その大きさは印加した歪に応じて変化した。しかし，基本波成分も現れていることから一部モーメントが長手方向から傾いていたと考えられる。以上から，歪印加による出力の変化，倍周期成分の出現を確認し，さらに 4.1 節の磁区観察結果から直交フラックスゲート型歪センサが原理通りに動作することを確認した。

4.3 バイアス磁界による出力特性の変化

適切なバイアス磁界の検討を行うために測定を行った。通電周波数 250 kHz，バイアス磁界を 1, 2, 2.5, 4, 10 Oe と変化させた際の歪出力特性を Fig. 11 に示す。バイアス磁界が 2 Oe の時に出力，変化量が最大となった。2 Oe 未満では長手にモーメントを揃えることが出来ず，出力の低下に繋がり，2 Oe 以上では長手に拘束するエネルギーが大きく，幅方向交流への反応が低下したことから出力が低下したと考えられる。また，バイアス磁界を大きくするほどピーク位置が圧縮側に移動することがわかった。これはバイアス磁界が大きいほど，幅方向に誘導していた異方性が見かけ上小さくなったことが原因だと考えられる。

4.4 通電周波数による出力特性の変化

適切な通電周波数の検討を行うために測定を行った。4.3 節よりバイアス磁界を 2 Oe，通電周波数 100, 200, 250, 300, 400, 500 kHz と変化させた際の歪出力特性を Fig. 12 に示す。出力には周波数特性があり，通電周波数 250 kHz 付近で最大となった。250 kHz における最大変化量は 6.72 mV/ppm であり，金属ひずみゲージ(0.001 mV/ppm)の 6720 倍の高感度を得た。出力電圧はファラデーの電磁誘導により磁化変化を時間微分しているため 250 kHz 以下では，周波数上がるにつれ出力は増加したのに対し，250 kHz 以上ではコイルの浮遊容量に起因する自己共振により出力が低下したと考えられる。コイルでは倍周期成分を検出しているため，共振周波数を約 500 kHz とし共振が起こっていたと考えられる。そこで，コイルのインピーダンス特性を測定したところ 600 kHz 付近で共振していることがわかった。歪出力特性測定時とインピーダンス特性測定時は動作条件を完全に揃える事ができないため，容量成分にずれがあったと考えられるが，概ね一致した。

今回の最大変化量はピーク位置より引張側となった。歪無印加時に幅方向に異方性があるため，理想的には幅方向異方性が長手方向異方性に切り替わるピーク位置より圧縮側で最大変化量が得られる。この原因としては，アモルファスリボンに異方性の不均一があったことやカンチレバーの都合上センサに印加される歪量が場所により異なることで，ピーク位置より圧縮側での変化量が低下したためと考えられる。

4.5 磁気インピーダンス方式との比較

磁気インピーダンス方式と直交フラックスゲート方式の比較を行うために，歪インピーダンス特性を測定し，その結果を Fig. 13 に示す。直交フラックスゲート方式と条件を揃えるためのバイアス磁界を 2 Oe 印加した。2 MHz までは圧縮側での低下が見られず，3 MHz 以上では圧縮側での低下が見られる理想的な出力特性が得られた。2 MHz 以下では，磁化回転以外に磁壁移動による透磁率変化が生じていたと考えられる。Fig. 14(a), (b)に最適動作周波数における直交フラックスゲート方式の出力結果(通電周波数 250 kHz)と磁気インピーダンス方式の出力結果(通電周波数 6 MHz)を示す。直交フラックスゲート方式における最大変化

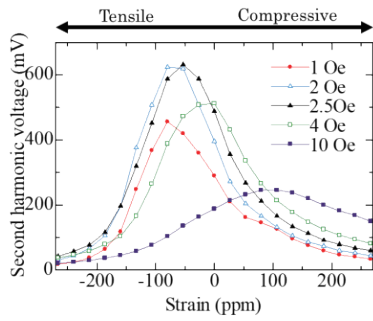


Fig. 11 Variation in strain-output characteristics by bias magnetic field.

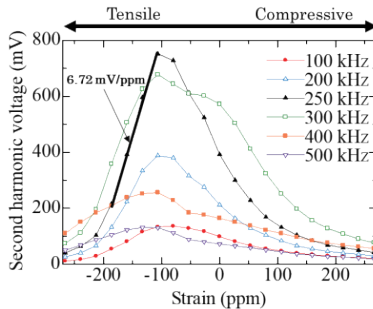


Fig. 12 Variation in strain-output characteristics by carrier frequency.

量は 6.72 mV/ppm であるのに対し、磁気インピーダンス方式ではゲージ率が 154 となった。ゲージ率を単位歪当たりの出力に換算する¹⁵⁾と 0.077 mV/ppm のため 87 倍の感度が得られた。磁気インピーダンス方式の測定では、この周波数帯ではインダクタンス変化が支配的となった。通電電流の周波数をより高くすることによって抵抗変化が大きくなり、特性が向上する可能性はあるものの、この周波数帯では直交フラックスゲート方式を適用する事で、より高感度な歪センサが実現可能であると考えられる。

5. まとめ

バルク材を用いた歪センサとして、直交フラックスゲートセンサ方式を適用した新しい歪センサの提案を行った。そこで、本方式歪センサが原理通りに動作する事を確認するために歪印加時の磁区観察と通電周波数が 250 kHz 時の歪-出力特性の測定を行った。そして、磁区観察から引張歪の印加により異方性が変化する事を確認し、歪-出力特性から歪印加による出力の変化、倍周期成分の出現を確認したため原理通り動作する事を明らかにした。さらに高感度化に向けた条件の検討を行い、バイアス磁界 2 Oe、通電周波数 250 kHz 時に最大変化量 6.72 mV/ppm を達成し、金属ひずみゲージの 6720 倍の高感度を得た。最後に、磁気インピーダンス方式との比較から、バルク材を用いた歪センサとして直交フラックスゲート方式の適用が有効であると示した。今後は、更なる高感度化へ向けてセンサ構造の検討や理論的考察を行う。

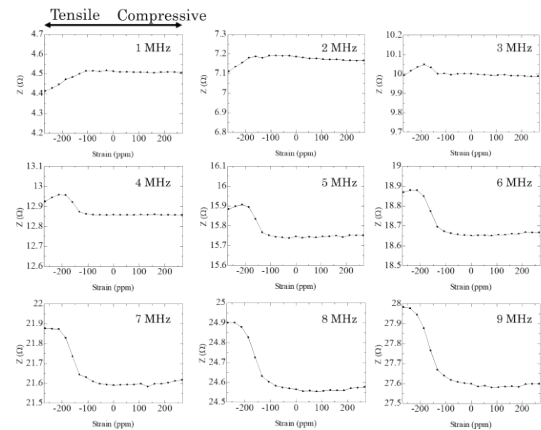


Fig. 13 Strain-impedance characteristics.

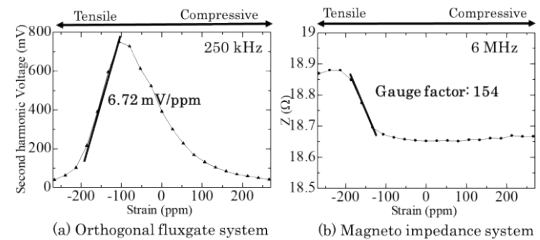


Fig. 14 Comparison of orthogonal fluxgate system and magneto impedance system.

References

- 1) Kokudokoutsusyou: Douro no Roukyukataisaku no Honkak u jissi ni Kansuru Teigen (in Japanese)(2014).
- 2) The Mechanical social Systems Foundation: Kikai shisutem u nado no hirou rekka sindan monitaringu gijutsu no kaihat su ni kansuru fujibirisutadhi (in Japanese)(2008).
- 3) T. Yamashita, S. Takamatsu, H. Okada, T. Itoh, T. Kobayashi: *IEEJ Trans. Sens. Micromachines*, **137**, 438 (2017). (in Japanese).
- 4) Y. Shimada: *J. Soc. Inst. Control Eng.*, **45**, 329 (2006). (in Japanese).
- 5) Tokyo Measuring Instruments Laboratory Co., Ltd HP: https://tml.jp/solution/sensor/minimum_part.html (as of Oct. 9, 2023). (in Japanese).
- 6) Tokyo Measuring Instruments Laboratory Co., Ltd HP: https://tml.jp/solution/sensor/concrete_gauge.html (as of Oct. 9, 2023). (in Japanese).
- 7) K. Toyoda, T. Goto, K. Ishiyama: *T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)*, **7**, 108 (2023). (in Japanese).
- 8) R. Takano, K. Ishiyama, T. Hoshi: *T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)*, **6**, 23 (2022). (in Japanese).
- 9) D. Sora, S. Hashi, K. Ishiyama: *T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)*, **4**, 41 (2020). (in Japanese).
- 10) K. Chida, T. Goto, K. Ishiyama: "Evaluating static characteristics of strain sensor using amorphous ribbon" *Annual Meeting Record I.E.E. Japan*, (2023.3), p. 114. (in Japanese).
- 11) Proterial, Ltd HP: https://www.proterial.com/products/soft_magnetism/metglas.html (as of Oct. 9, 2023). (in Japanese).
- 12) Metglas, Inc: Metglas 2605SA1 Technical Bullentin (2009).
- 13) Metglas, Inc HP: <https://metglas.com/magnetic-materials/> (as of Jan. 12, 2024).
- 14) I. Taher, M. Aslam, M. A. Tamor, T. J. Potter, and R. C. Elder: *Sensors and Actuators A*, **45**, 35 (1994).
- 15) T. Kumagai: *J. Soc. Inst. Control Eng.*, **45**, 323 (2006). (in Japanese).

2023年10月12日受理, 2023年12月28日採録