

逆磁歪効果型歪センサの高周波振動特性の評価

Evaluation of high-frequency vibration characteristics of inverse-magnetostrictive effect-type strain sensor

高野凌¹⁾・石山和志^{1)†}・星貴之²⁾¹⁾東北大学電気通信研究所, 仙台市青葉区片平 2-1-1 (〒980-8577)²⁾ピクシーダストテクノロジーズ, 千代田区神田三崎町 2-20-5 (〒101-0061)R. Takano¹⁾, K. Ishiyama^{1)†}, T. Hoshi²⁾¹⁾ Research Institute of Electrical Communication, Tohoku Univ., 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577, Japan²⁾ Pixie Dust Technologies, Inc., 2-20-5 Kandamisaki-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-0061, Japan

Our laboratory reports the characteristics of an inverse-magnetostrictive effect-type vibration sensor that detects high frequency vibrations. Our sensor has a sensitivity of 0.61 mrad/ppm when static strain is applied to it. However, we estimate that our sensor can detect high frequency vibration without deterioration in sensitivity. Therefore, we conducted an experiment to evaluate the capability of the sensor for high-frequency vibration detection. As a result, it is revealed that the sensor has a sensitivity of 1.09 mrad/ppm at, in this paper, 20 kHz. It can be said that this inverse-magnetostrictive effect-type vibration sensor has high sensitivity even in high-frequency vibration.

Key words: inverse-magnetostrictive effect, strain sensor, vibration sensor, high frequency vibration, magnetic thin film

1. はじめに

工学分野において、物体の振動を測定することで被測定物の状態・性質・安定性等を察知する事例は多々存在している^{1),2)}。その中でも kHz 帯で高感度な振動測定が可能になることによって期待される応用例として、設備の健全性監視が挙げられる。私たちの生活を支えている化学プラントや発電所といった大型設備には回転機械が多く備えられており、これらの回転機械を構成する重要な部品として軸受がある。この部品の異常発見が遅れると設備を長期間にわたって停止させてしまう恐れがある。一般に、軸受へ異常が発生すると数 kHz~数十 kHz 帯の振動が生じるとされており、現在これらの検知には圧電式や MEMS 方式、AE センサといった振動センサが使われており^{3)~7)}、これらの振動センサのゲージ率(歪に対する抵抗・インピーダンス変化率)・感度はそれぞれ Table. 1 のようになっている⁸⁾~¹⁰⁾。現在使われているセンサよりもさらに高感度なセンサを用いることで、異常によって生じる振動をさらに早く察知し早期に対応が可能になることで設備の停止を最小限にすることができると考えられる。

本研究室ではこれまで逆磁歪効果を用いた歪センサの研究を行ってきた^{11),12)}。世の中には一般的に電気抵抗式・半導体方式といった原理の歪センサが知られているが、それらのゲージ率はそれぞれ 2 ~ 5 近傍、100 ~ 200 程度である^{13)~16)}。それに対し我々が研究している逆磁歪効果型歪センサの歪感度は数千 ~ 10000 程度と、他方式に比べて高感度が得られている¹⁷⁾。

このセンサを用いて振動センサを試作した先行研究において^{18),19)}は、センサ基板の片端を固定してカンチレバー構造とし、測定治具ごと加振器により振動させることで自由端を自由振動させセンサに歪を印加する手法や、センサを

ピエゾ素子へ接着させて強制振動をさせる手法を用いることでセンサの振動センサとしての特性を測定した。その結果、2 kHz 以下の領域において高い感度を有することを示した。

しかしながら、我々の作製している逆磁歪効果型歪センサは薄膜構造のため渦電流損が小さいこと・検出回路のキャリア周波数が振動周波数に比べてはるかに高い 150 MHz 程度であるという特徴を持っていることから、2 kHz 以上の周波数の振動も高感度を維持して測定が可能であると推測される。

そこで本研究ではこのセンサの 2 kHz 以上における感度評価を目的とした。本稿では振動印加装置の構築、ならびに振動印加時のセンサの振動測定感度の評価を行った。

2. 実験方法

2.1 素子構造及び素子作製

Fig. 1 に本センサの構造・形状を示す。センサは厚み 200 μm の Si 基板上に RF スパッタ法、およびリフトオフ法を用いて成膜された金属薄膜であり、1 ターンミランダ形状の厚さ 1 μm 、長さ 13 mm の Mo 導体層を厚さ 1 μm 、長さ 6 mm の $\text{Fe}_{72}\text{Si}_{14}\text{B}_{14}$ の短冊状磁性層で上下から挟んだ三

Table 1 Comparison of the sensitivity of other sensor.

Sensor	Gauge factor
Piezoelectric strain sensor ⁸⁾	167
MEMS capacitive sensor ⁹⁾	430
	Sensitivity
AE sensor ¹⁰⁾	1 mV/nm

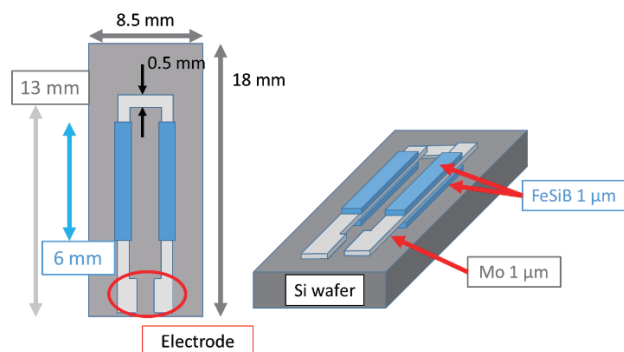


Fig. 1 Schematics of sensor structure.

層構造となっている。成膜後に回転磁場中熱処理を Fig. 2 の条件で行った。磁界強度 240 kA/m の回転磁界を昇温時と、663 K において 120 min 間印加した後、回転磁界を印加したままおよそ 6 ~ 7 時間炉冷させ室温まで降温させた。

2.2 動作原理

Fig. 3 にセンサへ歪を印加したときのセンサ状態の変移を示す。印加されている歪が 0 の状態(Fig. 3(a))で磁性膜の長手方向に磁気異方性の容易軸が向いた状態を基準とすると、圧縮歪が印加されていくにつれて逆磁歪効果により幅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. 3(b)~(d)に示すように印加圧縮歪が増えるにつれて磁性膜の異方性は見かけ上消失したのち幅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ことで磁性膜の幅方向透磁率が変化するため、導体層長手方向へ流れる高周波電流によりインピーダンスの変化として印加歪量を捉えられる。本研究ではインピーダンスの位相変化を検出することで歪の検出を行っている。本センサの位相変化検出には DMTD 法 (Dual Mixer Time Difference method) を用いている [18,20]。Fig. 4 に検出回路のブロック図を示す。

2.3 予備実験

2.3.1 静的な印加歪に対する位相変化特性の測定

予備実験としてセンサの基本的な特性の一つである、印加された静的な歪に対するセンサの位相変化特性を測定した。測定装置は Fig. 5 に示すような測定治具を用いた。センサの電極側を固定端としたカンチレバー方式で、自由端側にマイクロメーターヘッドを押し当てることにより歪を印加した。位相変化はネットワークアナライザにより 2 port で計測を行い、計測された伝送特性 S_{21} からインピーダンスの位相特性を測定した。

2.3.2 位相変化検出回路の出力特性測定

予備実験として本実験で用いている位相変化検出回路の位相変化量—出力特性を測定した。実験は Fig. 6 に示すような回路構成を用いた。センサの代わりにフェイズシフターを接続し、位相変調を加えることで疑似的に回路を動作させた。フェイズシフターへ加える制御信号を変化させることで検出回路へ印加する位相変化量を制御し、それに応じた検出回路からの出力を測定した。出力の測定には本実験では検出回路から繋いだオシロスコプの FFT 機能を用いており、スペクトルの大きさ [dB] を出力とした。

2.3.3 振動印加装置の構築

本実験では、振動源としてランジュバン型振動子を導入し、センサ基板をカンチレバー構造として自由端側を振動

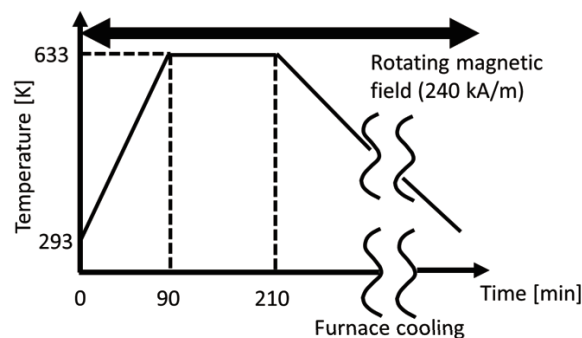


Fig. 2 Heat treatment condition.

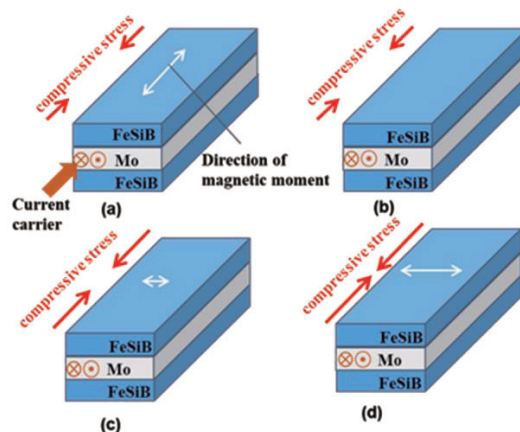


Fig. 3 Magnetic anisotropy changes of magnetostrictive layers under applied stress.

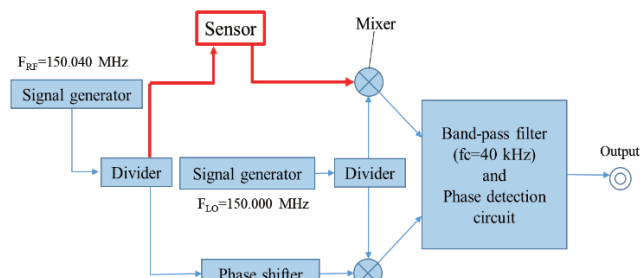


Fig. 4 Block diagram of phase-change detection circuit.

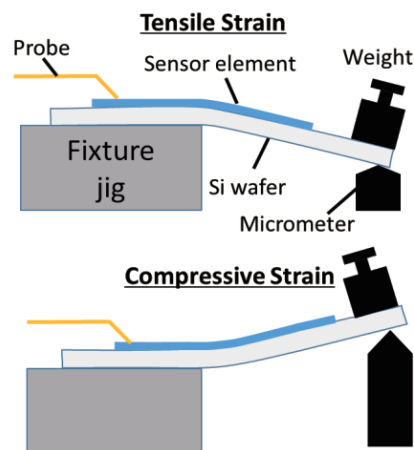


Fig. 5 Setup for measurement of sensor.

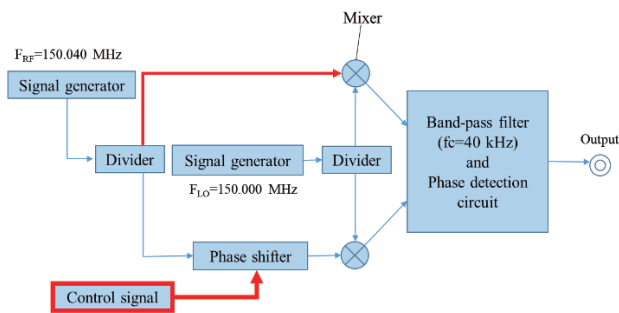


Fig. 6 Setup for carrying out experiment with phase-change-detection circuit.

子で強制振動させることで 20 kHz の振動をセンサへ印加することを試みた。Fig. 7 にカンチレバー方式と振動子を用いた振動印加装置の模式図を示す。振動子が上下に伸縮することでセンサへ圧縮・引張歪を生じさせる構造とした。センサ基板と振動子・プリント基板はエポキシ樹脂にて接着を行い、それぞれの接着面は 3 mm の長さで接着した。

予備実験として構築した振動装置の動作を確認するために、実際に振動子によって 20 kHz で振動させた際にカンチレバーへ生じる歪量の見積もりを行った。20 kHz で先端を変位させているカンチレバー上の固定端側から任意の距離における変位量をレーザー変位計により測定し、静的な先端変位を印加したカンチレバーの変位と比較をした。

2.4 動的なセンサ感度の測定

本研究の目的である動的な歪を印加した際のセンサ感度を求めるために本実験では振動させられたセンサからの出力を測定し、その出力から感度を求めるという手法をとった。

本センサの感度は、微小な歪変化を印加したときに変化が与えられる前の歪量から変化が与えられた後の歪量の間でどれだけ位相変化が生じるかで表わされる。つまり、これは後述するセンサの静的な位相特性(Fig. 9)の傾きに相当している。本センサの感度(グラフの傾き)は一定ではなく、印加されている静的な歪量の地点によって異なっている。

そのためセンサの最大感度を測定するためには、予めセンサへ印加する静的な歪量(以下、バイアス歪と呼称)を最大感度が得られる様に調節しながら振動を印加するような実験装置が必要であった。

そのために本実験は Fig. 8 の模式図が示すように、カンチレバーの固定端を乗せている Z 軸ステージの高さを調整することでセンサへ任意のバイアス歪をかけながら振動を与える実験装置を構築し測定を行った。

3. 実験結果

3.1 センサの静的な位相変化特性

Fig. 9 に測定したセンサの静的な位相変化特性を示す。今回の測定では、印加歪量が 0 ppm の時の位相を 0 基準として測定を行っている。センサの最高歪感度はグラフの傾きが最も急峻となる印加歪量 +50 ~ 80 ppm 近傍で求めたところ 0.61 ± 0.07 mrad/ppm と得られた。

3.2 位相変化検出回路の出力特性

測定した位相変化検出回路の位相変化量—出力特性を横

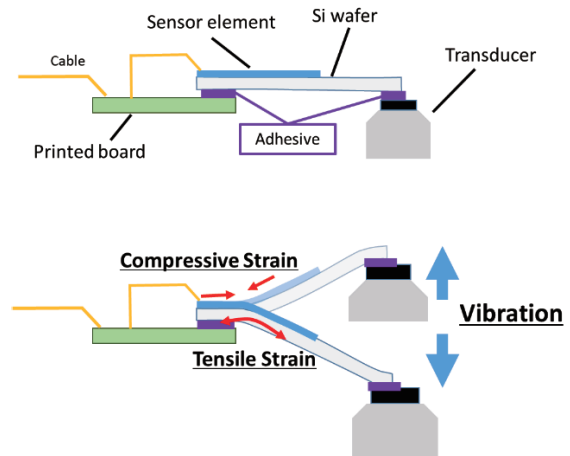


Fig. 7 Setup for vibration experiment.

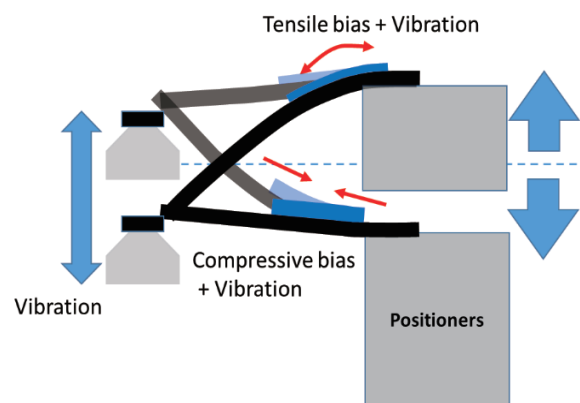


Fig. 8 Setup for vibration experiment with bias strain applied.

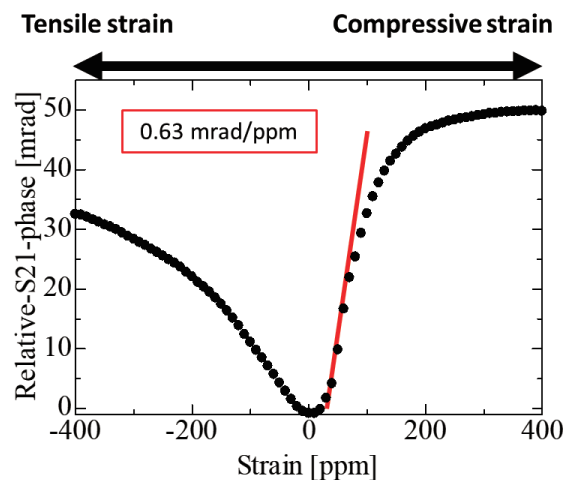


Fig. 9 Sensor's phase against applied strain.

軸に位相変化量[mrad]、縦軸に検出回路の出力[dB]として Fig. 10 に示す。位相変化量を x 、出力を y とするとこのグラフの近似直線から次の換算式(1)が得られた

$$y = -76.3 + 9.98 \ln(x) \quad (1)$$

また、検出回路のノイズレベルは -80 dB であり位相変化

量に換算すると 0.70 mrad であった。

3.3 センサへ与えられる歪量の推察

測定結果を Fig. 11 に示す。この結果から 20 kHz で先端変位するカンチレバーは静的な先端変位を与えたカンチレバーの計算値と同じように変位していることが分かった。このことから、20 kHz の振動をセンサ素子へ与えた時に印加される歪量は静的な先端変位を与えた時のカンチレバーに生じる歪量の式(2)を用いて得られることとした。

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

ここで d はカンチレバー先端変位量、 H はカンチレバー厚み、 L はカンチレバー長さ、 x は固定端からの距離を示す。本実験ではセンサ基板自体をカンチレバーとしており、カンチレバーの先端を振動させている振動子の振幅は $14 \pm 2 \mu\text{m}$ であるため、これらのパラメータは $d = 14 \pm 2 \mu\text{m}$ 、 $H = 200 \mu\text{m}$ 、 $L = 12 \text{ mm}$ 、 $x = 3 \text{ mm}$ となっている。式(2)にこれらのパラメータを代入することで、カンチレバーへ印加されている歪量は $21.84 \pm 3.12 \text{ ppm}$ と計算された。

また、(3.1),(3.2)より、本センサの静的な歪感度は最大で $0.61 \pm 0.07 \text{ mrad/ppm}$ 、位相変化検出回路の検出限界は 0.70 mrad と得られている。このことから、歪検出の限界値は 1.1 ppm と計算される。

このことから、検出限界よりも十分に大きな 20 kHz の歪を印加可能な実験装置を構築し測定を行った。

3.4 バイアス歪変化によるセンサの動的な実測出力測定

実際にセンサへバイアス歪を変化させながら 20 kHz の振動を印加した時の出力を Fig. 12 に示す。本実験では引張バイアスをかけた状態から圧縮バイアスをかける方向、圧縮バイアスをかけた状態から引張バイアスをかける方向の二通りに測定を行ったところ、ほぼ同一な傾向のデータが得られた。加えて、先述したようにバイアス歪の変化により出力値に変化が見られ、最大出力は $-44 \pm 1 \text{ dB}$ と得られた。

-44 dB の出力は式(1)より位相変化量に換算すると $23.09 \pm 2.26 \text{ mrad}$ となり、これを印加した歪量 $21.84 \pm 3.12 \text{ ppm}$ で割ることにより、20 kHz で振動させたセンサの感度が $1.09 \pm 0.25 \text{ mrad/ppm}$ と得られた。

4. 考察

動的な歪感度は(3.1)で求めた静的な歪感度 $0.61 \pm 0.07 \text{ mrad/ppm}$ よりも二倍程度高くなっている。その原因として二点考えられる。一点目として、各測定の誤差が重なった可能性が挙げられる。本実験では動的な感度を求めるために複数の予備実験にて得られたデータを用いているが、それらのデータにはアライメントや治具の強度など実験上の誤差が内包されている。そのため感度の計算結果が一致しないと考えられる。二点目として、振動するセンサ素子へ加わる歪量の計算が正確ではないことが挙げられる。本実験では振動しているセンサへ生じる歪量が静的な変形をしているカンチレバーの表面に生じる歪量と等しいと仮定して式(2)から求めた。しかし、式(2)はカンチレバーの先端

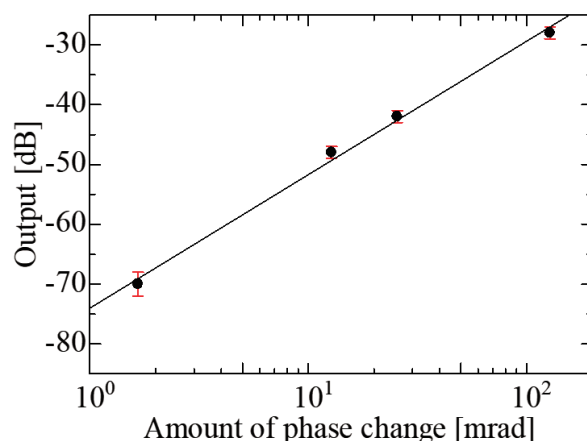


Fig. 10 Output of phase-detection circuit against amount of phase change.

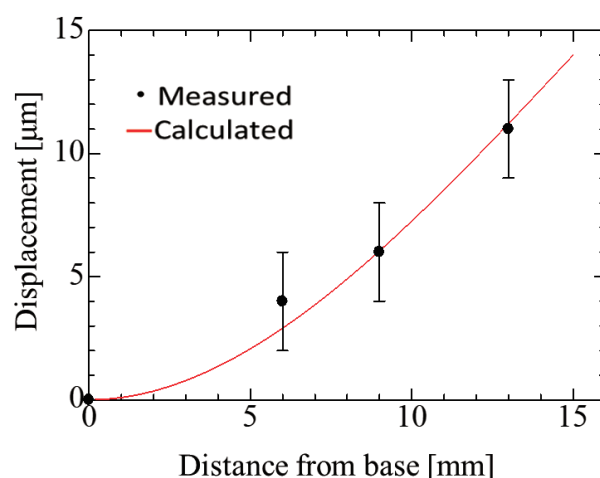


Fig. 11 Calculated vs. measured displacement.

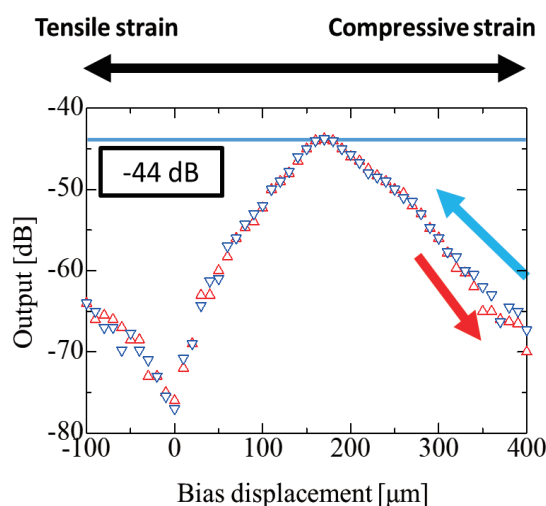


Fig. 12 Vibration measurement result with change in bias strain.

のみを一点で押し込んだ場合を想定しているため、本実験のように先端を面で接着させて振動させている場合、正確な見積もりができていない。加えて、動的な変形(振動)をし

ている物体は一般的にいくつかの振動モードが重畳した状態で変形しているが、計算式では考慮されていない。その結果、計算で求められる歪量が現実と異なるため感度が大きくなってしまった可能性が考えられる。しかしながら本論文の目的である、低周波数で高感度が確認されているセンサが高周波数においても高感度を有することを示すことは達成されており、具体的な感度の数値の差異について今回は議論しないものとした。

5. まとめ

本研究では逆磁歪効果型歪センサの 20 kHz における振動計測感度を評価した。静的な歪感度が 0.61 ± 0.07 mrad/ppm 得られているセンサで 20 kHz の振動印加実験をしたところ、動的な歪感度は 1.09 ± 0.125 mrad/ppm と得られた。無視できない誤差が重なった可能性はあるもののこの結果から、20 kHz という高周波領域においても逆磁歪効果型歪センサが高い感度を有することを明らかにした。今後は正確な追実験と共に、さらに高い周波数領域における評価を行う。

References

- 1) A. Kawamoto, M. Inagaki, T. Aoyama, and N. Mori: *JSME Trans. Jpn.*, **63**, 3428 (2001).
- 2) H. Yaguchi: *JSME Trans Jpn.*, **63**, 41 (1997).
- 3) T. Yuji, T. Bouno, T. Hamada, and H. Toya: *J. IEIE Jpn.*, **25**, 584 (2005).
- 4) EE Times Japan homepage: <https://eetimes.itmedia.co.jp/e/articles/1907/18/news072.html> (As of Sept. 27, 2021).
- 5) MACNICA, Inc. homepage: https://www.macnica.co.jp/business/semiconductor/articles/analog_devices/134317/index.html (As of Sept. 27, 2021).
- 6) I. Sato: *T. IEE Japan*, **109**, 145 (1989).
- 7) T. Sako: Jikuuke ni okeru ijotyouko no soukikenshuto to sindan ni kansuru kenkyu (in Japanses), Doctoral dissertation of Waseda University (2012).
- 8) V. Tilak, A. Vertiatchikh, J. Jiang, *et al.*: *phys. stat. sol. (c)*, **3**, 2307 (2006).
- 9) C. Zhang, S. Y. Zhang, L.F. Wang: *IEEE Sensors Journal*, **21**, 22527 (2021).
- 10) G.H. Feng, M.Y. Tsai: *Sensors and Actuators A: Phys.*, **162**, 100 (2010).
- 11) K. H. Shin, M. Inoue, and K. I. Arai: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **23**, 1425 (1999).
- 12) Y. Miwa, J. Shin, Y. Hayashi, S. Hashi, and K. Ishiyama: *IEEE Trans. Magn.*, **51**, 2000604 (2015).
- 13) H. Hempel, D. Nezich, J. Kong, and M. Hofmann: *NANO LETTERS*, **12**, 5714 (2012).
- 14) Microtech Co.,Ltd. homepage: http://microtech-inc.net/product_semia.php (As of Sept. 27, 2021).
- 15) T. Kozuma: *OYO BUTURI*, **43**, 324 (1974).
- 16) A&D Co., Ltd. homepage: https://www.aandd.co.jp/pdf_storage/catalog/industrial/c_gauge.pdf (As of Sept. 27, 2021).
- 17) D. Sora: Tyoukoukando hizumisensa to sono sindousensa eno ouyou (in Japanses), Doctoral dissertation of Tohoku University (2020).
- 18) Y. Kubo, S. Hashi, H. Yokoi, K. Arai, and K. Ishiyama: *IEEJ Trans. SM*, **138**, 153 (2018).
- 19) D. Sora, S. Hashi, and K. Ishiyama: *T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)*, **4**, 41 (2020).
- 20) S. Yabukami, K. Kato, Y. Kamo, T. Ozawa, and K. I. Arai: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **32**, 483 (2008).

2021年11月9日受理, 2022年1月14日再受理, 2022年1月20日採録