

FeSiBNb 薄膜を用いた電磁誘導式ひずみセンサによる微小振動検知

Detection of small mechanical vibrations by induction-type strain sensor using amorphous FeSiBNb thin film

前納洸矢^{a)}・柳田真佑汰^{a)}・藤原裕司^{a)†}・神保睦子^{a)}・大島大輝^{b)}・加藤剛志^{b)c)}

^{a)} 三重大学大学院工学研究科, 三重県津市栗真町屋町 1577 (〒514-8507)

^{b)} 名古屋大学大学院工学研究科, 愛知県名古屋市千種区不老町 (〒464-8603)

^{c)} 名古屋大学未来材料・システム研究所, 愛知県名古屋市千種区不老町 (〒464-8603)

K. Maeno^{a)}, M. Yanagida^{a)}, Y. Fujiwara^{a)†}, M. Jimbo^{a)}, D. Oshima^{b)}, and T. Kato^{b)c)}

^{a)} Faculty of Engineering, Mie Univ., 1577 Kurimamachiya-chou, Tsu, Mie 514-8507, Japan

^{b)} Graduate School of Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603, Japan

^{c)} Institute of Materials and Systems for Sustainability, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603, Japan

We attempted to detect small mechanical vibrations by utilizing the electromagnetic induction and inverse magnetostriction effect of an amorphous FeSiBNb thin film. The vibration sensor consisted of a 300-nm-thick amorphous FeSiBNb thin film, a 100-turn pick-up coil, a Helmholtz coil for applying an AC magnetic field, and a circuit for converting the pulse voltage induced in the pick-up coil to DC voltage. The gauge factor of this sensor for compressive strain was approximately 25,000. The output voltage changed in response to changes in acceleration due to vibration. We found that when the maximum value of the applied AC magnetic field was 1.23 kA/m, it was possible to detect vibrations with a frequency of 0.17 Hz and an acceleration of 0.03 G.

Key words: vibration sensor, soft magnetic material, inverse magnetostriction effect, amorphous thin film

1. はじめに

近年、振動センサの技術は著しい進展を遂げており、特に構造物の健康監視¹⁾や産業機器の状態監視²⁾において重要な役割を果たすことが期待され、様々な周波数や加速度の評価に適したセンサの開発が求められている。高層ビルはその高さにも依存するが風圧や地震などで0.1 Hz から数 Hz 程度で振動し^{3,4)}、吊橋なども風の影響により同程度の周波数で振動する³⁾との報告があり、これら構造物の劣化や損傷の早期兆候を把握するためには、0.1 Hz から数 Hz 程度の微小振動に対応した高感度な振動センサの開発が必要である。振動センサには金属ひずみゲージや圧電素子を用いたものもあるが、磁気機械結合係数が高いことから、比較的大きな磁歪定数を示す強磁性アモルファス薄膜の利用が有効であると指摘されており⁵⁾、FeSiB 薄膜を利用した振動センサに関する研究が報告されている⁵⁻⁷⁾。

我々のグループではこれまでに、アモルファス FeSiB 薄膜に Nb を少量添加することで、保磁力の低減が可能であることを報告している⁸⁾。さらに、この薄膜の磁壁移動が圧縮ひずみに敏感に反応することを利用して、電磁誘導式ひずみセンサを構築したところ、ゲージ率が 37,500 程度と非常に大きな値を示し、アモルファス FeSiBNb 薄膜がひずみセンサ材料として有望であることを示すことができた⁹⁾。そこで本研究では、この高感度なひずみセンサを利用して、微小振動を検出するセンサの開発を試みた。

2. FeSiBNb 薄膜の作成と磁気特性

2.1 実験方法

試料は DC, RF 電源を持つマグネトロンスパッタリング装置を用いて、水冷したガラス基板(10×20×0.16 mm)上に成膜した。膜構成は sub./FeSiBNb(300 nm)/SiN(30 nm)である。FeSiBNb

層の Nb 組成は約 5 at.%であり、成膜時に一軸異方性を誘導するために、基板長手方向に磁界を印加しながら成膜した。SiN は酸化防止のための保護膜である。その他の成膜条件は Table 1 の通りである。

2.2 実験結果

作製した FeSiBNb 薄膜の静磁化特性を Fig. 1 に示す。同図より、FeSiBNb 薄膜は一軸異方性を示し、成膜中に磁界を印加した基板長手方向が磁化容易軸 (E.A.)、基板短手方向が磁化困難軸 (H.A.) となっていることがわかる。また、E.A.の磁化曲線は高い角型比を示しており、磁化が急峻な磁化反転を起こしていることがわかる。この試料の保磁力は約 140 A/m、飽和磁化は約 1.1 Wb/m²であった。

Table 1 Sputtering conditions.

Base pressure	< 7 × 10 ⁻⁵ Pa	
Ar pressure	0.42 Pa	
Target	Nb Chips on Fe ₇₇ Si ₁₄ B ₉	Si ₃ N ₄
Power	DC 45 W	RF 100 W
DC magnetic field	approx. 16 kA/m (longitudinal direction of substrates)	

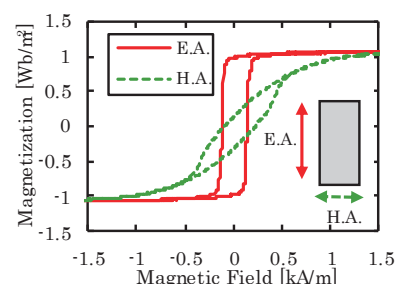


Fig. 1 Magnetization curves of FeSiBNb film.

Corresponding author: Y. Fujiwara (e-mail: fujiiwara@phen.mie-u.ac.jp).

3. ひずみ-出力電圧特性

3.1 実験方法

Fig. 2 にひずみ-電圧特性評価装置の概略を示す。ピックアップコイル (100 回巻, 長径約 25 mm 短径約 5 mm の楕円形) に挿入した FeSiBNb 薄膜をセラミック棒上に設置した。ヘルムホルツコイル (半径 120 mm) で外部から基板長手方向に交流磁界 (最大値 1.23 kA/m, 周波数 60 Hz) を印加することで, 磁化反転が生じ, ピックアップコイルにパルス状の電圧が誘起される。マイクロメータの先端に接続したコの字型の治具とセラミック棒で, 試料を 4 点曲げることにより, ひずみの印加が可能である。本装置で印加できるひずみの最小値は 4×10^{-6} である。引張りひずみ印加時には膜面を上, 圧縮ひずみ印加時には膜面を下向きにしてセラミック棒上に設置する。ピックアップコイルに発生するパルス電圧を直流電圧に変換する回路を Fig. 3 に示す。パルス電圧をカットオフ周波数 723.4 Hz のローパスフィルタに通し, 約 1000 倍に増幅したあと, 直流に変換している。A 端子では直流変換前の増幅されたパルス, B 端子では直流変換後の信号が観測できるようになっている。

3.2 実験結果

Fig. 4 に得られた出力信号を示す。(a)は Fig. 3 の A 端子で観測したパルス電圧波形であり, 正弦波状の信号は 60 Hz の印加交流磁界を示している。最大値は約 12.3 kA/m である。パルス電圧波形には, 若干の直流電圧成分と 60 Hz の交流成分が観測されているが, これは補償不足およびオペアンプのオフセット電圧が信号電圧に重畳したためであると考えている。パルス状の電圧信号は, おおよそ保磁力付近から立ち上がっていることが確認でき

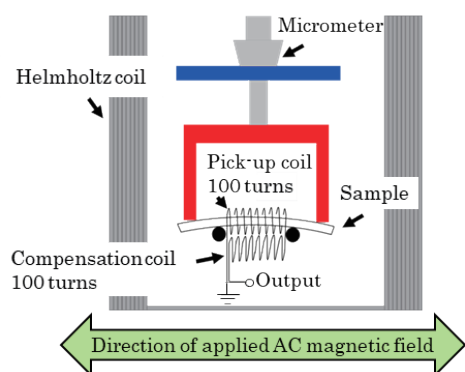


Fig. 2 Schematic of experimental setup.

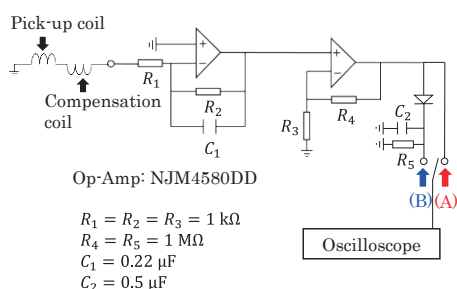


Fig. 3 Pulse-to-DC conversion circuit.

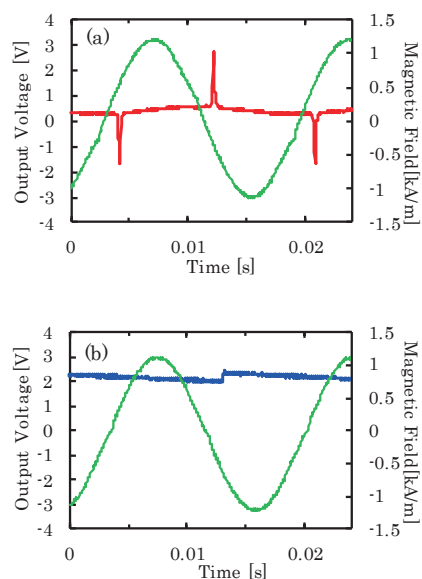


Fig. 4 Typical waveforms. (a) Amplified pulse signal after filtering observed at A terminal. (b) DC converted signal observed at B terminal. Sinusoidal waves indicated by green solid line show applied AC magnetic field at 60 Hz.

た。Fig. 3 の B 端子で観測した直流信号を同図(b)に示す。電圧値は(a)の最大値とほぼ同じ値であった。平滑化に使用しているコンデンサの容量が小さく, 約 0.2 V, 60 Hz のリップルが観測されている。

Fig. 5 にひずみ-出力電圧特性を示す。出力電圧は Fig. 3 の B 端子で観測した直流電圧値である。印加交流磁界の最大値は 12.3 kA/m, 周波数は 60 Hz である。各測定点は 5 回測定の実験値, エラーバーはその最大値と最小値を示している。引張りひずみ領域では, ひずみを大きくしても出力電圧に大きな変化がなかった。これは引張りひずみで試料に誘導される磁気異方性と, 成膜時の磁界印加によって誘導された磁気異方性が同じ方向であり, 磁壁移動に大きな影響を与えなかったためであると考えられる。一方, 圧縮ひずみ領域では, 出力電圧はひずみ印加に対して敏感に反応し, 約 2×10^{-5} のひずみ印加で出力電圧はほぼ最小値の約 0.5 V まで減少した。この出力電圧の最小値は補償不足およびオペアンプのオフセット電圧が原因である。圧縮ひずみ領域における出力電圧の低下は, 圧縮ひずみによりサンプル内に基板短手方向の磁気異方性が生じ, 基板長手方向の磁壁移動が妨げられることによるものと

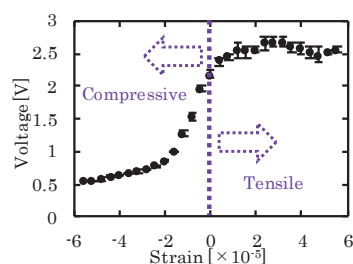


Fig. 5 Dependence of peak pulse voltage on strain. Amplitude and frequency of applied magnetic field are 12.3 kA/m and 60 Hz, respectively.

考えている⁹⁾。この素子のゲージ率を $K=(\Delta V/V_{\max})/\Delta\epsilon$ と定義すると、 $K=25,000$ となる。ここで、ひずみの変化 $\Delta\epsilon=2\times 10^{-5}$ 、出力電圧変化 $\Delta V=1.4\text{ V}$ 、出力電圧最大値 $V_{\max}=2.8\text{ V}$ としている。以前報告した、 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ で熱処理した FeSiBNb 薄膜で得られたゲージ率⁹⁾に比べ、今回の熱処理なしの試料で得られたゲージ率は小さい値となっている。FeSiBNb 薄膜は、熱処理により薄膜中の応力や応力分布が変化することで磁気特性が大きく変化するため⁸⁾、ゲージ率も変化するものと考えられる。

4. 加速度-出力電圧変化特性

4.1 実験方法と振動検出原理

Fig. 6 に加速度-出力電圧変化特性の測定回路の概略図を示す。加振装置は市販のギアなどのプラスチックパーツで自作したスライダクランク機構と DC サーボモータで構成されている。加振装置の振幅は約 30 mm 一定であり、加振周波数は 0.17 Hz から 2.25 Hz まで可変である。ヘルムホルツコイル (半径 120 mm) の内部にこの加振装置を設置し、片持ち梁形式の試料を振動台に固定した。ピックアップコイル (100 回巻、長辺約 35 mm 短辺約 25 mm の長方形) は振動による誘導電圧の発生を防ぐために、加振装置外に固定した。圧縮ひずみ領域での高感度な出力電圧変化を利用するために、試料の膜面は下向きとした。また、固定端と逆の端部には 2.8 g のおもりを乗せることで、約 1.0×10^{-5} のバイアス圧縮ひずみを印加した。この状態で試料を加振しながら、磁化反転を誘起するための交流磁界 (周波数 60 Hz) を印加し、ピックアップコイルからの出力パルス電圧を Fig. 3 に示した回路で直流に変換し、観測した。

Fig. 7 に検出原理の模式図を示す。振動がない状態では、試料に

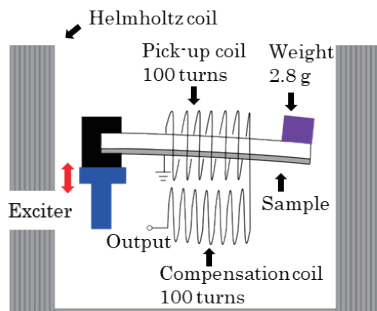


Fig. 6 Schematic of experimental setup.

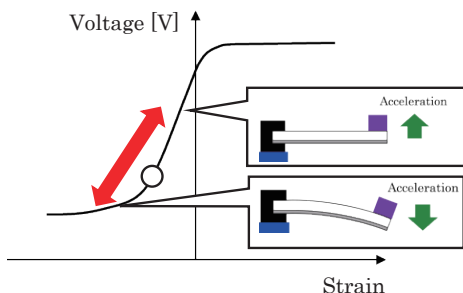


Fig. 7 Principle of vibration detection.

圧縮ひずみが印加された状態であり、図中○で示された位置での出力電圧が得られる。ここで、試料が下向きに変位した場合、重力加速度に加えて、上向きの加速度 (負の加速度) が作用し、薄膜の圧縮ひずみが緩和するため、出力電圧が増加する。試料が上向きに変位した場合、下向きの加速度 (正の加速度) が作用し、薄膜にさらに圧縮応力が印加されるため、出力電圧は減少する。この電圧変化を読み取ることで、振動検出が可能となる。

4.2 実験結果

Fig. 8 に周波数 2.25 Hz および 0.17 Hz で振動台を加振し、市販の加速度計 (WIT Motion WT901BLECL) で測定した振動台の加速度の時間変化および高速フーリエ変換で得られた周波数スペクトルを示す。(a)は 2.25 Hz で加振した場合の加速度の時間変化である。正の最大加速度は大きく、負の最大加速度は小さくなっており、加振装置の振動が非対称であることがわかる。また、加速度の正負の最大値は一定ではないことがわかる。(b)は(a)の周波数スペクトルである。拡大図も同時に示している。 2.2 Hz 、 4.4 Hz 付近に強いピークが存在し、かつ 40 Hz 程度まで比較的強い高調波成分が含まれていることがわかった。これらの結果から、自作の加振装置では単一周波数での加振が行えていないことがわかる。(c)(d)は 0.17 Hz で加振した場合の結果である。(c)の時間変化では、正負最大加速度の非対称性は 2.25 Hz の加振に比べて、小さくなっているが、約 6 秒 の加振周期より、短い周期の振動が重畳しているように思われる。(d)の周波数スペクトルから、振動の基本波の周波数は 0.17 Hz であるが、同等の強度を持つ振動成分が 10 Hz 近傍に現れており、 0.17 Hz の加振では強い高周波成分が含まれることがわかった。以降の実験では、負のバイアスひずみを印加し、負の加速度に対して大きな電圧変化を生じることから、負の加速度の大きさを検出可能な加速度とした。加振周波数を $0.17\sim 2.25\text{ Hz}$ で変化させたときの、検出可能な加速度の最大値は約 $0.03\sim 0.4\text{ G}$ と見積られた。

Fig. 9 は振動台に試料を固定した上で、加振せず、 60 Hz の交流磁界のみを印加した場合の出力電圧の波形である。出力電圧は Fig. 2 の B 端子で観測した直流電圧である。(a)は印加交流磁界の最大値が 1.23 kA/m の結果であり、拡大図も同時に示している。 1.1 V 程度の出力電圧信号に、 0.2 V 程度のノイズが存在するように見えるが、拡大図から、Fig. 4(b)に見られた 60 Hz リップルであることがわかる。(b)は印加交流磁界の最大値が 0.17 kA/m の結果である。補償不足およびオペアンプのオフセット電圧に起因した 0.5 V 程度の電圧信号と 0.05 V 程度のノイズが確認される。このノイズの大きさは(a)の拡大図で見られるノイズの大きさと同程度である。実験に使用した試料の保磁力は約 140 A/m であるが、試料におもりを乗せたことにより圧縮応力が入り、 0.17 kA/m の印加磁界では磁化反転が起らなかったため、パルス電圧が発生せず、リップルが現れなかったと考えている。

Fig. 10 に加振せず 60 Hz の交流磁界のみを印加した場合の出力電圧の印加磁界強度依存性を示す。●はおもりを乗せバイアスひずみを印加した場合の結果であり、出力電圧は印加磁界強度の増加に対して単調に増加し、 1.23 kA/m の印加磁界強度で約 1.1 V となる。●はおもりを乗せず測定した結果である。出力電圧は同様に単調に増加し、 1.23 kA/m の印加磁界強度で約 1.5 V となった。

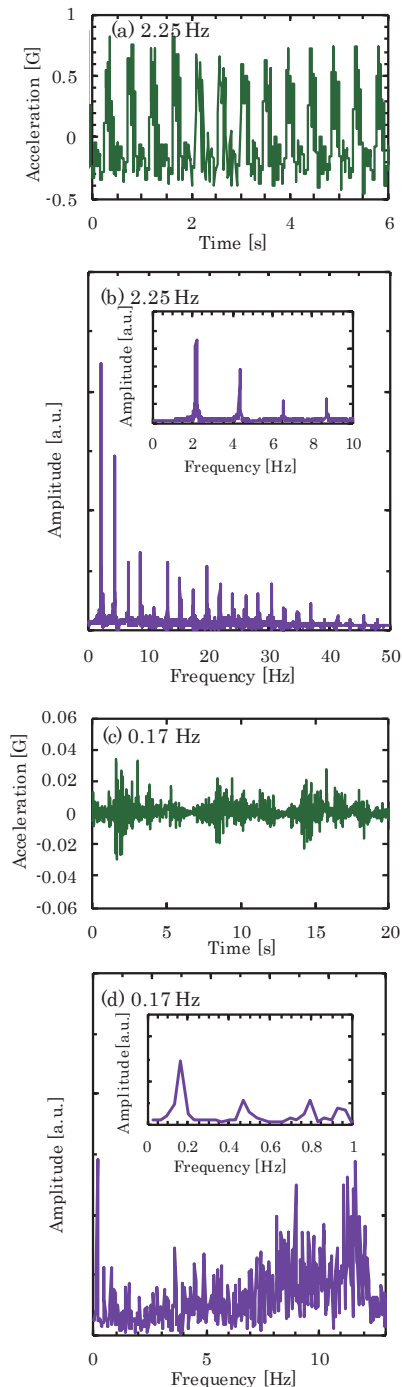


Fig. 8 Typical acceleration waveforms of sample stage and their FFT spectra. Vibration frequencies are (a) (b) 2.25 Hz and (c) (d) 0.17 Hz.

基板の自重によるひずみを無視できると仮定すると、おもりの場合がひずみ 0 での出力電圧に対応する。

Fig. 11 に加振した場合の電圧変化の例および周波数スペクトルを示す。印加交流磁界の最大値は 12.3 kA/m、周波数は 60 Hz である。(e) は参考のためのバックグラウンド（薄膜堆積のないガラス基板のみを試料として実験した結果、加振周波数 0.17 Hz）である。(a) は 2.25 Hz で加振した場合の出力電圧の時間変化であり、加速度の最大値は約 0.4 G である。矢印で示した信号に注目する

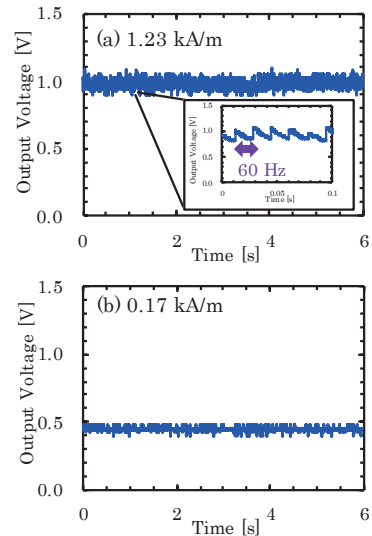


Fig. 9 Output voltage waveforms without vibration. Amplitude and frequency of applied magnetic field are (a) 12.3 kA/m, 60 Hz and (b) 0.17 kA/m, 60 Hz.

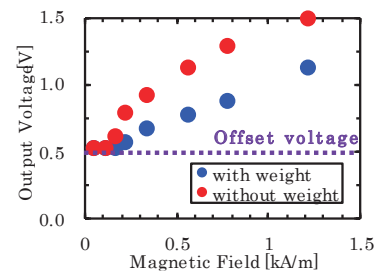


Fig. 10 Applied magnetic field dependence of output voltage with and without weight. Vibration is not applied. Frequency of applied magnetic field is 60 Hz.

と、出力電圧は約 1.1 V のバイアス電圧（約 1.0×10^{-5} のバイアス圧縮ひずみ時の出力電圧）から約 1.8 V まで増加していることがわかる。これは、負の加速度による圧縮ひずみの緩和が原因である。Fig. 10 のおもりのない結果はひずみが 0 の場合の出力電圧に対応しており、印加交流磁界の最大値が 12.3 kA/m の場合、約 1.5 V 以上の出力が出ている場合には試料に引張ひずみが導入されていることになる。今回の実験では、1.5 Hz 以上で試料を加振した場合に、出力電圧が 1.5 V に達することがあり、1.5 Hz 以上の加振で試料に引張ひずみが導入されると考えられる。出力電圧は最大を示した後、徐々に減少し、約 1.1 V のバイアス電圧を下回る（1.1 ~ 0.8 V の領域）。これは正の加速度により、バイアス圧縮ひずみより大きな圧縮ひずみが印加されるためである。矢印で示した以外の信号は 1.8 V に達していないが、Fig. 8 (a) に示した通り、負の加速度の最大値が一定ではないことが原因である。(b) は (a) の周波数スペクトルである。拡大図も同時に示している。拡大図から、2.2 Hz および 4.2 Hz 付近に強いピークが確認されていることがわかる。これは、Fig. 8 (b) の拡大図に類似した傾向であり、電磁誘導式ひずみセンサで振動が検知できることを示している。ただし、10 Hz 程度以上の高周波領域では、ピークがほぼ確認できていない。この実験では、おもりを乗せた片持ち梁状のガラス基板

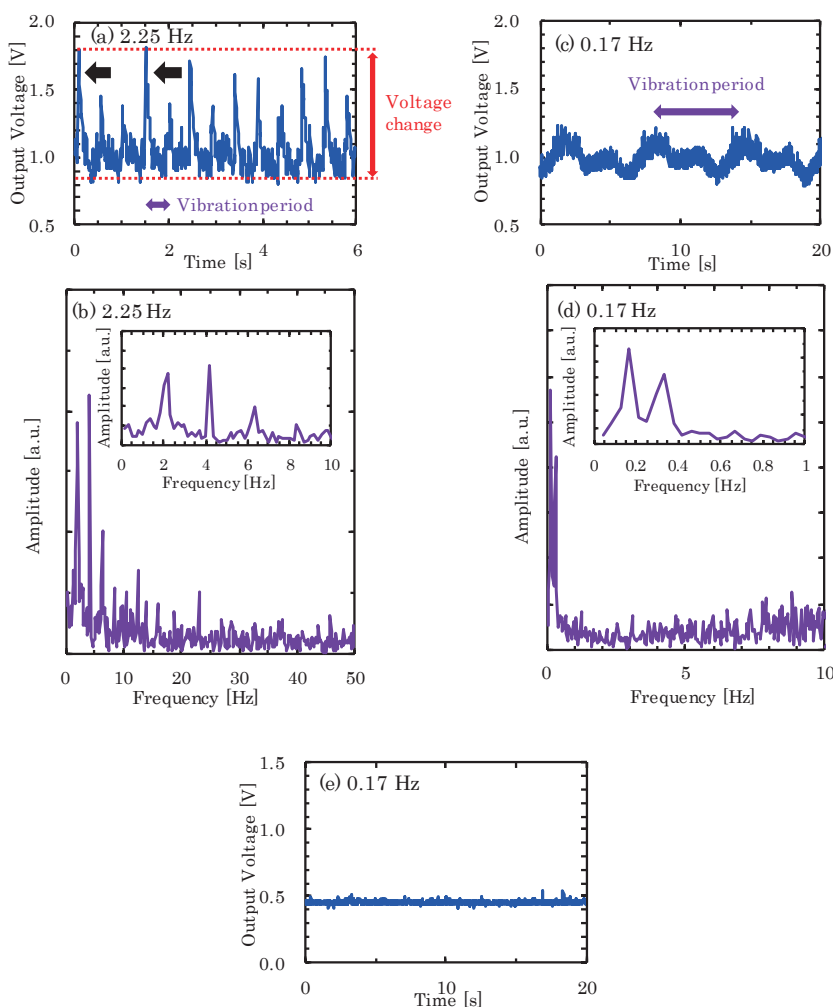


Fig. 11 Output DC voltage waveforms and FFT spectrum with vibration. Amplitude and frequency of applied magnetic field is 12.3 kA/m and 60 Hz. Vibration frequencies are (a) (b) 2.25 Hz and (c) (d) 0.17 Hz. (e) shows an experimental result using only glass substrate for comparison.

を加振することで、FeSiBNb 薄膜にひずみを印加しているため、片持ち梁の共振周波数以上での加振では、ガラス基板を十分に振動させることができないと考えられる。また、2.2 Hz のピークより、4.2 Hz のピーク強度の方が強いことから、今回の試料の共振周波数は 4 Hz 程度ではないかと推察している。(c)は加振周波数 0.17 Hz の結果であり、加速度の最大値は 0.03 G である。約 1.0 V を中心に電圧の変動が観測されている。Fig. 8(c)とは異なり、明らかに高周波成分が少ない。(d)は(c)の周波数スペクトルであるが、おおよそ 1 Hz 以上ではピークが観測されていない。ただし、1 Hz 以下の領域では、おおよそ 0.17 Hz および 0.33 Hz に明らかなピークが観測されており、また、非常に低周波の振動を高感度に検出できていることがわかる。

Fig. 11 の検出電圧波形の peak-to-peak 電圧の加振周期依存性を Fig. 12 に示す。印加交流磁界の最大値は 1.23 kA/m および 0.17 kA/m、周波数は 60 Hz である。1.23 kA/m の場合は最小 0.17 Hz、0.03 G が検出できていると考えられる。印加磁界の最大値が 1.23 kA/m の場合には、検出電圧は 2 Hz 程度までは周波数（加速度）の増加とともに単調に

増加した。これは周波数（加速度）の増加にともない、負の加速度の最大値が大きくなり、薄膜の圧縮応力緩和が増大したためである。また前述の通り、加振周波数が高くなると、試料に引張りひずみが導入され始めるが、Fig. 5 からわかるように、引張りひずみ領域では、 2×10^{-5} 程度までは出力電圧は増加するが、さらに大きなひずみが印加されても出力電圧は大きくならないため、2.5 Hz 以上の加振周波数領域では、出力電圧変化はほぼ一定になるものと予想される。ただし、Fig. 11 の周波数スペクトルから分かる通り、

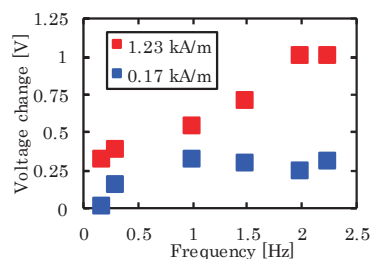


Fig. 12 Dependence of output voltage change on vibration frequency.

高周波の振動を検出することはできない。0.17 kA/m では無加振時にはオフセット電圧の約 0.5 V の信号しか得られないが、0.3 Hz（加速度 0.04 G）以上の加振時には基板の圧縮歪みが緩和され出力電圧変化が検出できた。1 Hz（加速度 0.1 G）以上では、出力電圧変化が約 0.25 V 程度で一定となる傾向にある。これは、印加磁界 1.23 kA/m の場合と同じく、加振周波数が高い領域では、試料に引張りずみが導入されるが、引張りずみ領域ではひずみの増加に対して、出力電圧が大きくなりえないことが原因であると考えている。

5. まとめ

逆磁歪効果を利用してアモルファス FeSiBNb 薄膜の磁化反転を制御することで、微小振動の検知を試みた。磁化反転を誘起するための外部交流磁界の最大値が 1.23 kA/m の場合、周波数 0.17 Hz、最大加速度 0.03 G 程度の微小振動を検出可能であることがわかった。また、装置の小型化、省電力化を念頭に、外部交流磁界を変化させたところ、0.17 kA/m の外部磁界印加の場合でも、0.3 Hz、最大加速度 0.04 G の振動が検出できた。今回、既成のプラスチック部品とサーボモータを用いた自作の加振装置を用いて実験を実施

したが、単一周波数での加振が行えなかった。今後、金属部品を利用した加振装置を作製し、さらに詳細な実験を実施したい。

謝辞 本研究は名古屋大学未来材料・システム研究所における共同利用・共同研究として実施された。

References

- 1) O. S. Sonbul, and M. Rashid: *Sensors*, **23**, 8468 (2023).
- 2) M. Tiboni, C. Remino, R. Bussola, and C. Amici: *Appl. Sci.*, **12**, 972 (2022).
- 3) S. Zhao, C. Zhang, X. Dai, and Z. Yan: *Buildings*, **23**, 13 (2023).
- 4) T. Matsushita, T. Nishizawa, J. Tobita, and N. Fukuwa: *AIJ J. Technol. Des.*, **20**, 879 (2014).
- 5) D. Sora, S. Hashi, and K. Ishiyama: *Trans. Magn. Soc. Jpn.*, **4**, 41 (2020).
- 6) Y. Kubo, S. Hashi, H. Yokoi, K. Arai, and K. Ishiyama: *IEEE J. Trans. SM*, **138**, 153 (2018).
- 7) S. Hashi, D. Sora, and K. Ishiyama: *IEEE Magn. Lett.*, **10**, 8110604 (2019).
- 8) Y. Fujiwara, Y. Takeuchi, S. Nozue, T. Uwabe, and M. Jimbo: *J. Magn. Magn. Mater.*, **540**, 168410 (2021).
- 9) K. Maeno, Y. Fujiwara, M. Jimbo, D. Oshima, and T. Kato: *J. Magn. Magn. Mater.*, **611**, 172604 (2024).

2024年10月21日受理, 2025年1月25日再受理, 2025年3月21日採録