

日本磁気学会論文特集号

7巻2号

ONLINE ISSN: 2432-0471

Electronic Journal URL: <https://www.jstage.jst.go.jp/browse/msjtsmj/-char/ja/>

CONTENTS

Thin Films, Fine Particles, Multilayers, Superlattices

局所異方性測定による歪センサの動作解析

..... 豊田恵伍・後藤太一・石山和志 108

Power Magnetism

柔軟鋼板を対象としたエッジ支持型磁気浮上システム

(2自由度振動制御モデルに関する基礎的検討)

..... 鬼塚晴大・川島和磨・馬場翔太郎・遠藤文人・黒田純平・内野大悟・

小川和輝・池田圭吾・加藤太朗・成田正敬・加藤英晃 112

Board of Directors of The Magnetism Society of Japan

President:	Y. Takemura
Vice Presidents:	T. Ono, A. Kikitsu
Directors, General Affairs:	H. Yuasa, T. Yamada
Directors, Treasurer:	A. Yamaguchi, S. Murakami
Directors, Planning:	M. Mizuguchi, Y. Okada
Directors, Editorial:	S. Yabukami, T. Taniyama
Directors, Public Relations:	K. Kakizaki, R. Umetsu
Directors, International Affairs:	H. Kikuchi, Y. Nozaki
Specially Appointed Director, Contents Control & Management:	K. Nakamura
Specially Appointed Director, Societies & Academic Collaborations:	A. Saito
Specially Appointed Director, IcAUMS:	H. Yanagihara
Auditors:	K. Kobayashi, H. Saito

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.

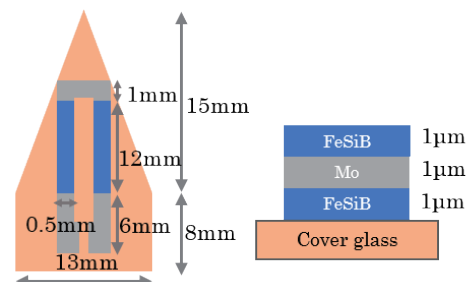


Fig. 1 Schematics of sensor structure.

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 μm 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 μm の上下に, 短冊状の 72Fe-14Si-14B 磁性膜 1 μm 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).

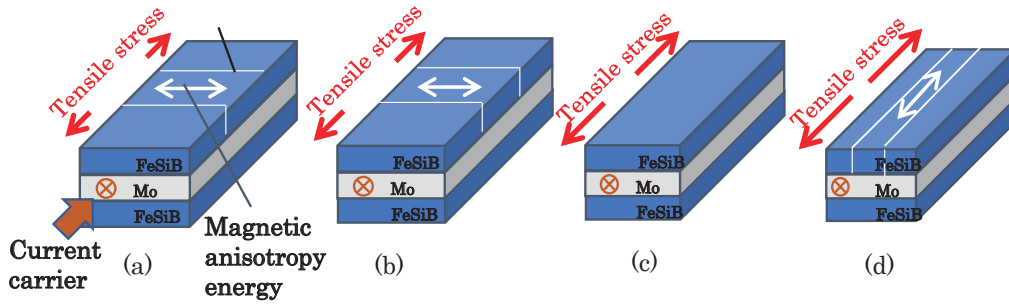


Fig. 2 Magnetic anisotropy changes of magnetostrictive layers under applied stress.

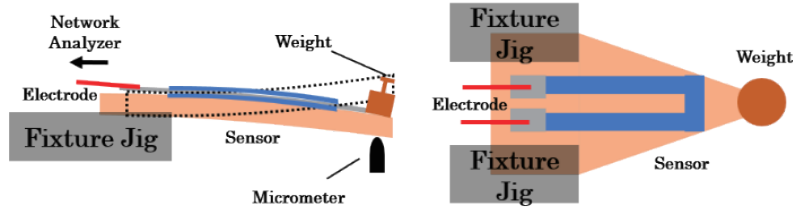


Fig. 3 Setup for measurement of sensor.

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

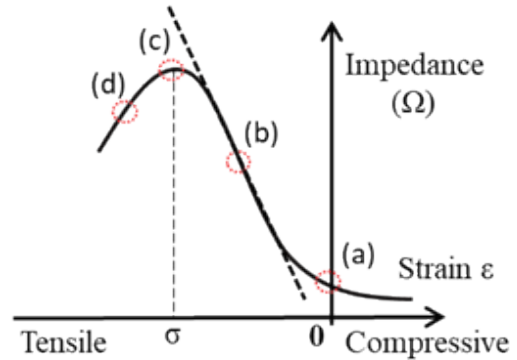


Fig.4 Strain-impedance characteristics.

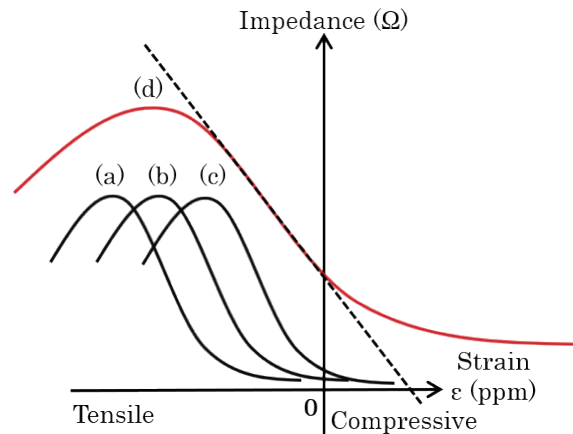


Fig. 5. Local and overall strain-impedance characteristics.

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。

$$B_s H_k / 2 = 3\lambda\sigma / 2 \tag{1}$$

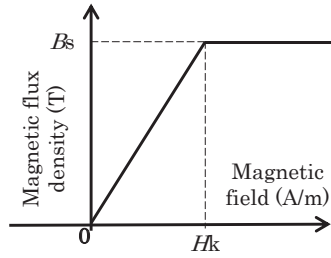


Fig. 6 BH loop.

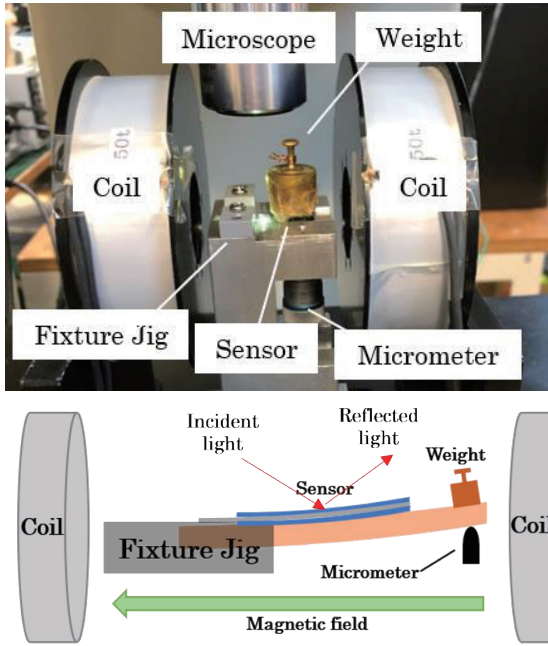


Fig. 7 Setup for measurement of local BH loop.

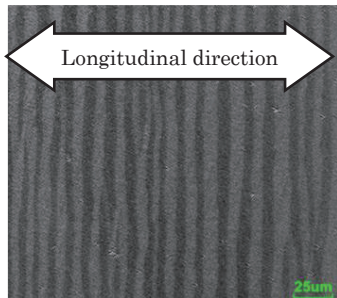


Fig. 8 Magnetic domain image ($\epsilon=0, H=0$).

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

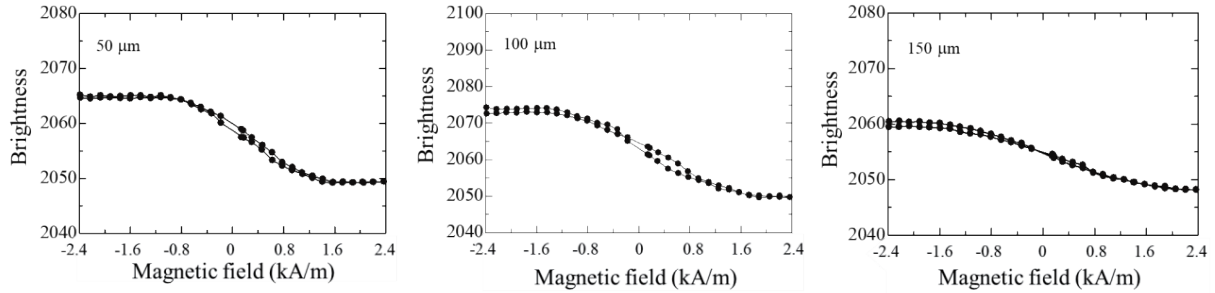


Fig. 9 Change of local BH loop under compressive strain.

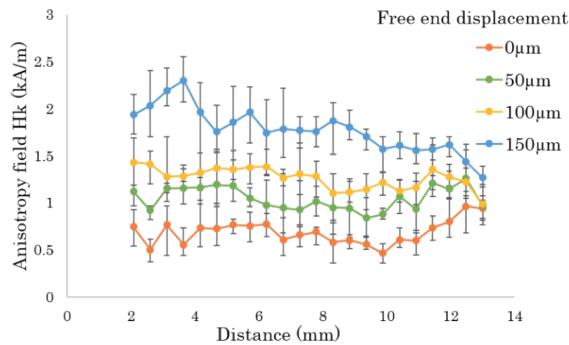


Fig. 10 Variation of anisotropy field by measurement position.

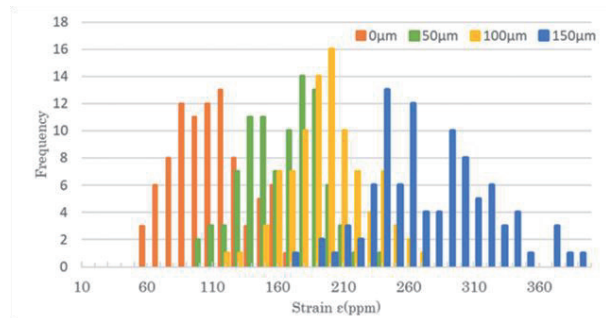


Fig. 11 Frequency distribution of strain ϵ .

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

柔軟鋼板を対象としたエッジ支持型磁気浮上システム (2自由度振動制御モデルに関する基礎的検討)

Edge Support Type Magnetic Levitation System for Flexible Steel Plates (Fundamental Consideration on Two-degree-of-freedom Vibration Control Model)

鬼塚晴大^{a)}・川島和磨^{a)}・馬場翔太郎^{a)}・遠藤文人^{a)†}・黒田純平^{b)}・内野大悟^{c)}

小川和輝^{c)}・池田圭吾^{d)}・加藤太郎^{e)}・成田正敬^{f)}・加藤英晃^{f)}

^{a)}福岡工業大学工学部, 福岡県福岡市東区和白東 3-30-1 (〒811-0295)

^{b)}東海大学大学院工学研究科, 神奈川県平塚市北金目 4-1-1 (〒259-1292)

^{c)}東海大学大学院総合理工学研究科, 神奈川県平塚市北金目 4-1-1 (〒259-1292)

^{d)}北海道科学大学工学部, 北海道札幌市手稲区前田 7 条 15 丁 4-1 (〒006-8585)

^{e)}東京工科大学工学部, 東京都八王子市片倉町 1404-1 (〒192-0982)

^{f)}東海大学工学部, 神奈川県平塚市北金目 4-1-1 (〒259-1292)

S. Onitsuka^{a)}, K. Kawashima^{a)}, S. Baba^{a)}, A. Endo^{a)†}, J. Kuroda^{b)}, D. Uchino^{c)},

K. Ogawa^{c)}, K. Ikeda^{d)}, T. Kato^{e)}, T. Narita^{f)}, and H. Kato^{f)}

^{a)} Faculty of Engineering, Fukuoka Institute of Technology, 3-30-1 Wajiro-higashi, Higashi-ku, Fukuoka 811-0295, Japan

^{b)} Course of Mechanical Engineering, Tokai Univ., 4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa 259-1292, Japan

^{c)} Course of Science and Technology, Tokai Univ., 4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa 259-1292, Japan

^{d)} Faculty of Engineering, Hokkaido University of Science, 7-15-4-1 Maeda, Teine-ku, Sapporo, Hokkaido 006-8585, Japan

^{e)} Faculty of Engineering, Tokyo University of Technology, 1404-1 Katakura-machi, Hachioji, Tokyo 192-0982, Japan

^{f)} Faculty of Engineering, Tokai Univ., 4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa 259-1292, Japan

Thin flexible steel plates are used in the manufacturing of household appliances and other products. Since the plates are conveyed by rollers during the manufacturing process, deterioration on the surface of the plates such as abrasions has become a problem. To solve this, non-contact gripping and conveyance of flexible steel plates using magnetic levitation technology have been proposed. A suitable method for levitating thin flexible plates, is a magnetic levitation system using electromagnets placed only at the edges of the plates. The previous control model considers only the horizontal direction. Levitation is possible with this model; however, under some conditions, it is not possible to suppress vertical vibration, and there is the possibility of plates falling off. Therefore, in this paper, a two-degree-of-freedom vibration control system that consider both horizontal and vertical directions is proposed for stable levitation. Moreover, the control performance was investigated by applying the optimal control theory to the proposed system.

Keywords: magnetic levitation, flexible steel plate, vibration control, electromagnet, non-contact levitation

1. はじめに

薄い柔軟鋼板は自動車や家庭用電気製品などの製造に使用されている。この製造工程の中で柔軟鋼板は、ローラ等により搬送されることが多い。この搬送方式の場合、柔軟鋼板とローラの間で摩擦が生じるため、柔軟鋼板に擦り傷などの劣化が生じてしまうことが問題となっている。そこで磁気浮上技術を用いた柔軟鋼板の非接触把持および搬送が提案されている^{1)~3)}。

磁気浮上は浮上対象の上部に電磁石を配置して、重力とつり合う吸引力を発生させることで実現することができる。剛性の低い柔軟鋼板を浮上対象とした場合には、浮上中における鋼板のたわみが安定した磁気浮上にとって課題となる。浮上中に発生するたわみによって柔軟鋼板は複雑な形状となり、種々のモード形状で振動が励起される要因となりうる。こういった変形や振動はモデル化誤差を大きくし、安定した浮上を困難なものとしてきた。そのため著者らは柔軟鋼板のエッジ部にも電磁石を設置し、柔軟鋼板

に対して両端から張力を発生させることで、浮上中の柔軟鋼板に発生するたわみを抑制する磁気浮上システムを提案した⁴⁾。この磁気浮上システムによって、慣性力といった外乱が入力される搬送時においても浮上確率が向上することが明らかになっている^{5)~6)}。

張力を発生させる目的で導入されたエッジ部の電磁石は E 型コアを用いることで、板の端部を電磁石中心に吸引するよう力を発生させることから、張力だけでなく、重力に対向する吸引力も発生させることができる。従来のように柔軟鋼板の上部に電磁石を配置した際と比較すると吸引力は小さくなるものの、サイズの小さい柔軟鋼板であれば十分に浮上を実現することが可能である。特に板厚が 0.1 mm 以下の非常に薄い鋼板は剛性もより小さくなることから、上部に電磁石を配置した際のたわみが大きくなり、浮上を実現させることが困難である。そこで、より薄い柔軟鋼板を対象とし、柔軟鋼板のエッジ部のみに電磁石を配置するエッジ支持型磁気浮上システムを提案した⁷⁾。

エッジ支持型磁気浮上システムは小型かつ板厚の薄い柔軟鋼板を安定して磁気浮上させることを実現している^{8)~9)}。しかしなが

Corresponding author: A. Endo (e-mail: endo@fit.ac.jp).

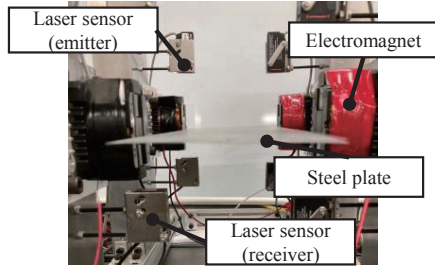


Fig. 1 Edge type magnetic levitation system.

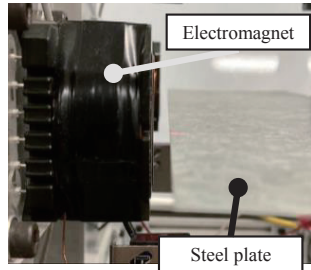


Fig. 2 Levitation distance from electromagnet to flexible steel plates.

ら、提案されたエッジ支持型磁気浮上システムは柔軟鋼板が水平方向のみに振動するものと仮定してモデル化を行っており、実際に浮上している柔軟鋼板は鉛直方向へ振動しながらも浮上を維持している。そのため、非接触な把持は実現できているものの、搬送時に発生する慣性力といった外乱に対しては十分な安定性を発揮できず、落下する可能性が考えられる。

本研究では更なる安定浮上を実現するために、柔軟鋼板の両端に配置した電磁石によって鉛直方向および水平方向の振動を制御する 2 自由度振動制御システムを提案および検討を行う。方法として平衡点近傍や定常電流の条件を変えた際の浮上特性を明らかにすることで、浮上中の状態について解析的に検討を行った。特に、実際の磁気浮上装置では電磁石に印加できる電圧には制限があり、2 つの運動方向に対する制御が互いに干渉する可能性も考えられる。そこで、実環境を想定した電圧条件下における制御特性について解析的に明らかにした。

2. エッジ支持型磁気浮上システム

Fig. 1 に著者らが提案したエッジ支持型磁気浮上システムを示す。この磁気浮上システムは柔軟鋼板の長手エッジ付近に片側 2 つずつ柔軟鋼板を挟むように電磁石を設置している。そのため、合計 4 個の電磁石を使用している。設置している電磁石はフェライトの E 型コアに直径 0.5 mm の銅線を 1005 回巻いたコイルを取り付けた構成となっている。この電磁石に電流を流すことで、柔軟鋼板の端部に対して電磁石の中心へ向かうような吸引力が発生し、磁気浮上を実現している。浮上対象である柔軟鋼板は長さ 400 mm、幅 100 mm、厚さ 0.24 mm、SS400 のものを対象としている。実際のシステムでは各電磁石と同じ位置にレーザーセンサを設置し、柔軟鋼板の変位を計測する。従来の磁気浮上システムでは Fig. 2 に示すように柔軟鋼板エッジ部と電磁石表面のギャップが 5 mm を保持するように制御していた。また、電磁石と直列で接続した外

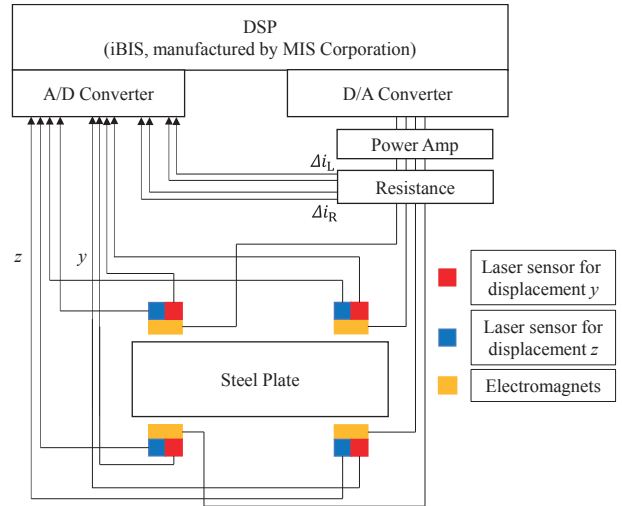


Fig. 3 Proposed magnetic levitation system.

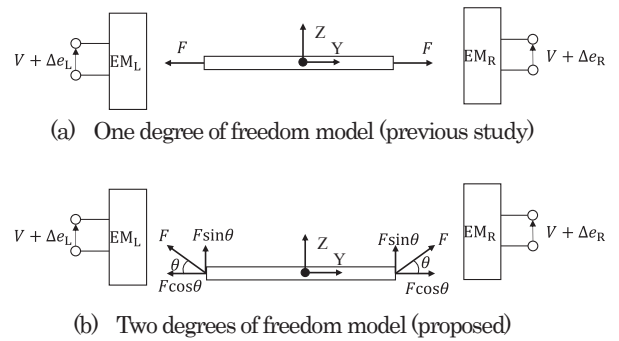


Fig. 4 Models of magnetic levitation for steel plates.

部抵抗を用いて電磁石を含む回路に流れる電流を計測する。計測された変位や電流は Fig. 3 に示すようにデジタルシグナルプロセッサ (DSP) に入力され、状態フィードバック制御を行うために電磁石のコイルへ印加する制御電圧を算出する。制御電圧は増幅器を通じて電磁石のコイルを含む回路へ印加される。

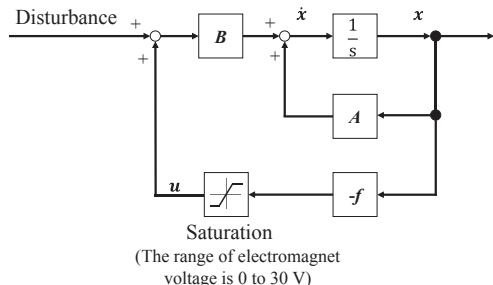
3. 2 自由度振動制御システム

従来の制御システムでは Fig. 4(a)に示すように磁気浮上中の柔軟鋼板は水平方向のみに運動すると仮定していた。そのため、浮上中の柔軟鋼板における水平方向の振動は抑制できているものの、条件によっては鉛直方向に振動しており、浮上安定性が劣化することを明らかにしていた⁸⁾。そのため、本研究では磁気浮上中の柔軟鋼板が鉛直方向ならびに水平方向へ運動すると仮定し、両方向へ発生する振動を抑制する制御システムを構築する。Fig. 4(b)に本研究で対象とする磁気浮上モデルを示す。

本研究では柔軟鋼板を仮想的に 2 つに分割し、向かい合う左右の電磁石が 1 つずつとしたモデルを考える。ここで柔軟鋼板の運動について水平方向を Y 方向、鉛直方向を Z 方向とした。また電磁石のコイルに電流が流れることによって柔軟鋼板に対して発生する吸引力は電磁石の中心に向かって発生するため、吸引力は Y 軸ならびに Z 軸方向の成分に分解できる。ここで Y 軸方向の吸引力を張力、Z 軸方向の吸引力を支持力と呼ぶ。本磁気浮上システムでは支持力が柔軟鋼板の自重とつり合うことで磁気浮上を実現す

Table 1 Feedback gains in experiment.

Parameter	Value
Q_{xd}	$\text{diag}(1.0 \times 10^5, 1.0 \times 10^4, 1.0 \times 10^5, 1.0 \times 10^4, 1.0 \times 10^1, 1.0 \times 10^1)$
r_{xd}	$\text{diag}(1.0 \times 10^0, 1.0 \times 10^0)$

**Fig. 5** Block diagram of simulation.

ることができる。

Fig. 4(b)に示すように張力や支持力は非線形であることから制御システムを構築するために線形化を行った。本システムでは電磁石に一定の電流が流れている際に発生する静的吸引力が柔軟鋼板の自重とつり合い磁気浮上する点を平衡点位置として考え、平衡位置近傍で線形化を行った。平衡位置近傍において1つの電磁石が柔軟鋼板に与える吸引力 F_0 を式(1)に示す。

$$F_0 = \frac{L_{\text{eff}} \cdot I_0^2}{2\Gamma_0^2} \quad (1)$$

ここで、 L_{eff}/Γ_0 ：電磁石の有効磁束に相当する定数 [H]、 I_0 ：柔軟鋼板の自重とつり合う吸引力を発生させるため、定常的に回路へ流す定常電流 [A]、 Γ_0 ：鋼板との距離 [m]である。この F_0 を Z 方向ならびに Y 方向に成分を分解し、平衡点近傍で線形化を行うことで、鋼板に対して Z 方向ならびに Y 方向へかかる吸引力を式(2)、(3)のように示すことができる。

$$\begin{aligned} F_z &= F_{zR} + F_{zL} \\ &= F_{0zR} + \left(\frac{F_0}{\Gamma_0} - \frac{3F_0Z_0^2}{\Gamma_0^3} \right) z + \left(-\frac{3F_0Z_0Y_0}{\Gamma_0^3} \right) y + F_{0zL} \\ &\quad + \left(\frac{F_0}{\Gamma_0} - \frac{3F_0Z_0^2}{\Gamma_0^3} \right) z + \left(-\frac{3F_0Z_0Y_0}{\Gamma_0^3} \right) (-y) + \frac{2F_0Z_0}{\Gamma_0 I_0} \Delta i_z \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} F_y &= F_{yR} + F_{yL} \\ &= F_{0yR} + \left(-\frac{3F_0Z_0Y_0}{\Gamma_0^3} \right) z + \left(\frac{F_0}{\Gamma_0} - \frac{3F_0Y_0^2}{\Gamma_0^3} \right) y - F_{0yL} \\ &\quad + \left(\frac{3F_0Z_0Y_0}{\Gamma_0^3} \right) z + \left(\frac{F_0}{\Gamma_0} - \frac{3F_0Y_0^2}{\Gamma_0^3} \right) (-y) + \frac{2F_0Y_0}{\Gamma_0 I_0} \Delta i_y \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 F_{zL} , F_{zR} ：Fig. 4(b)において左側 (L) および右側 (R) の電磁石から Z 方向に発生する吸引力[N]、 F_{yL} , F_{yR} ：Fig. 4(b)において左側 (L) および右側 (R) の電磁石から Y 方向に発生する吸引力[N]、 F_{0zL} , F_{0zR} ：Fig. 4(b)において左側 (L) および右側 (R) の電磁石から Z 方向の浮上位置を保つための吸引力[N]、 F_{yL} , F_{yR} ：Fig. 4(b)において左側 (L) および右側 (R) の電磁石から Y 方向の浮上位置を保つための吸引力[N]、 Z_0 ：鉛直方向の浮上位置[m]、

Y_0 ：水平方向の浮上位置 [m]、 z ：Z 軸方向への鋼板変位[m]、 y ：Y 軸方向への鋼板変位[m]、 Δi_z , Δi_y ：鉛直方向および水平方向の運動へ寄与する電流の変動量 [A]である。電磁石が発生させる吸引力は本来 Z 方向および Y 方向の運動に影響を及ぼすが、電磁石を対向するように配置することで式(2)、(3)で示されているように相殺される。これらを踏まえ、Z 方向ならびに Y 方向の運動方程式を式(4)、(5)のように示すことができる。

$$\frac{dz}{dt} = 2 \left(\frac{F_0}{\Gamma_0 m} - \frac{3F_0Z_0^2}{\Gamma_0^3 m} \right) z + \frac{2F_0Z_0}{\Gamma_0 I_0 m} \Delta i_z \quad (4)$$

$$\frac{dy}{dt} = 2 \left(\frac{F_0}{\Gamma_0 m} - \frac{3F_0Y_0^2}{\Gamma_0^3 m} \right) y + \frac{2F_0Y_0}{\Gamma_0 I_0 m} \Delta i_y \quad (5)$$

ここで、 m ：柔軟鋼板の質量 [kg]である。さらに電磁石を含む電気回路についても平衡点近傍で線形化を行い、式(6)、(7)のように示される。

$$\frac{d\Delta i_z}{dt} = -\frac{R}{L_0} \Delta i_z + \frac{2Z_0 L_{\text{eff}} I_0}{L_0 (\sqrt{Y_0^2 + Z_0^2})^3} z + \frac{\Delta e_L}{L_0} + \frac{\Delta e_R}{L_0} \quad (6)$$

$$\frac{d\Delta i_y}{dt} = -\frac{R}{L_0} \Delta i_y + \frac{2Y_0 L_{\text{eff}} I_0}{L_0 (\sqrt{Y_0^2 + Z_0^2})^3} y + \frac{\Delta e_L}{L_0} - \frac{\Delta e_R}{L_0} \quad (7)$$

ここで、 L_0 ：全インダクタンス [H]、 R ：電磁石を含む回路の全抵抗 [Ω]、 Δe_L , Δe_R ：Fig. 4(b)において左側 (L) および右側 (R) の電磁石への印加する電圧の変動値 [V]である。

また式(4)~(7)を整理することで以下のような状態方程式を得ることができる。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \\ \mathbf{x} &= [z \quad \dot{z} \quad y \quad \dot{y} \quad \Delta i_z \quad \Delta i_y]^T \\ \mathbf{u} &= [\Delta e_L \quad \Delta e_R]^T \end{aligned} \quad (8)$$

本研究で提案する制御システムでは状態フィードバックにより制御入力 \mathbf{u} を決定することとした。そのため、制御入力 \mathbf{u} は式(9)のように決定される。

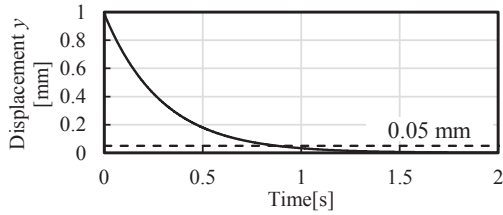
$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= -\mathbf{fx} \\ \mathbf{f} &= [f_z \quad f_{\dot{z}} \quad f_y \quad f_{\dot{y}} \quad f_{\Delta i_z} \quad f_{\Delta i_y}] \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、フィードバック行列 \mathbf{f} はそれぞれ柔軟鋼板における Z 方向変位、Z 方向の速度、Y 方向の変位、Y 方向の速度、Z 方向の運動に寄与する電流の変動量、Y 方向の運動に寄与する電流の変動量のフィードバックゲインを示している。また、フィードバックゲインは最適制御則によって決定した。なお、フィードバックゲインの算出に必要な重み係数は後述の数値シミュレーションにおいて電磁石の許容電流を超えないような条件から試行錯誤的に選択した。本研究で使用した重み係数を Table 1 に示している。また、フィードバックゲインの算出には MathWorks 社製 MATLAB における lqr 関数を用いた。

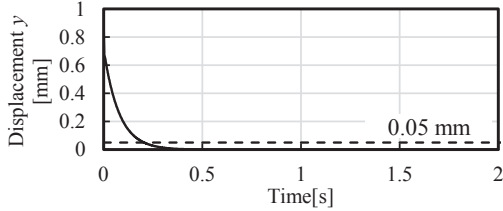
4. 各軸方向の運動が制御へ及ぼす影響

4.1 ステップ入力を用いた数値シミュレーション

本来、一方の電磁石が発生する吸引力による鋼板の運動を考え

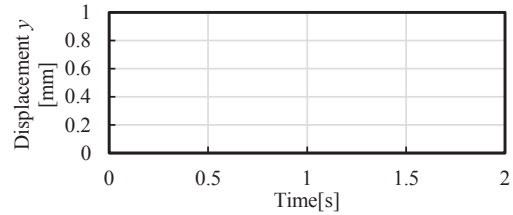


(a) Steady current: 0.1 A

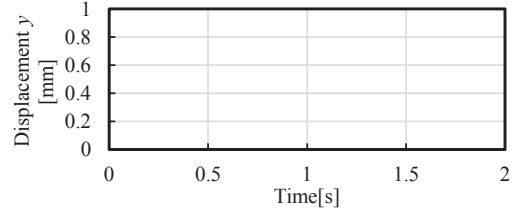


(b) Steady current: 1.0 A

Fig. 6 Time histories of vertical displacement y under condition of setting initial displacement y .

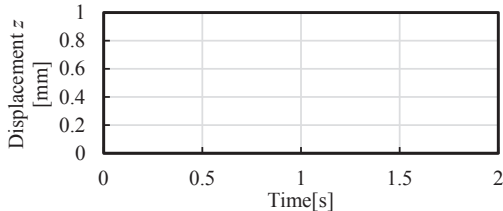


(a) Steady current: 0.1 A

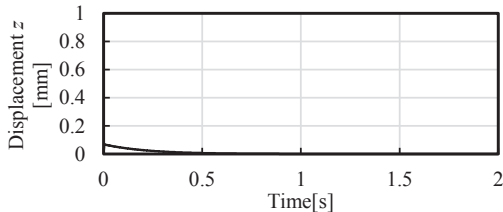


(b) Steady current: 1.0 A

Fig. 8 Time histories of vertical displacement y under condition of setting initial displacement z .

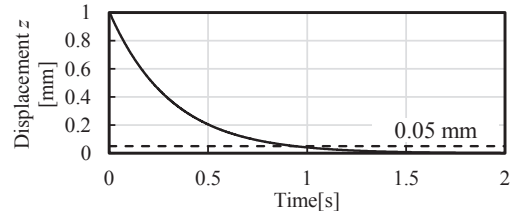


(a) Steady current: 0.1 A

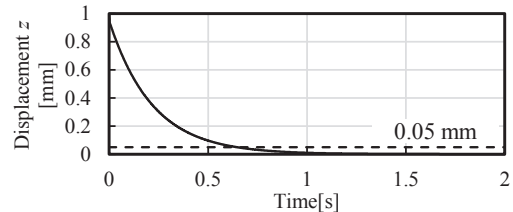


(b) Steady current: 1.0 A

Fig. 7 Time histories of vertical displacement z under condition of setting initial displacement y .



(a) Steady current: 0.1 A



(b) Steady current: 1.0 A

Fig. 9 Time histories of vertical displacement z under condition of setting initial displacement z .

た場合にはZ方向およびY方向の運動の双方に影響を与える。しかしながら3章で示した通り、対向する電磁石を用いることでZ方向およびY方向の運動が干渉しないモデルとして考えることが可能であることを示した。一方で実際の磁気浮上システムでは電磁石へ印加できる電圧や電磁石コイルの電流には制約がある。理想的にはZ方向ならびにY方向の運動は干渉しないが、双方の方向への変位や速度から計算された制御電圧に制約がある場合には干渉する可能性が考えられる。そのため、本章では前章で構築した磁気浮上システムのモデルを用いた数値シミュレーションにより、電圧の制限が制御性能に及ぼす影響を明らかにする。

本解析では柔軟鋼板のY方向ならびにZ方向の変位に1mmの初期変位を与えた際の応答を数値シミュレーションによって算出した。シミュレーションにはFig. 5に示すようなブロック図で構成されるモデルを用いた。印加可能な電圧は0~30Vの範囲内とし、それを超えるような電圧が計算された場合には最も近い極値の電圧を入力するものとした。また、電流が3Aを超えるシミュレーション結果については除外するものとした。また、エッジ支持

型磁気浮上システムでは浮上を維持するために柔軟鋼板の自重とつり合う支持力を常時発生させる必要がある。そのため、電磁石のコイルには定常電流を流しているが、定常電流を変化させると柔軟鋼板の重力と支持力がつり合う位置が変化する。この浮上位置の変化によってインダクタンス L_0 や静的吸引力 F_0 といったパラメータが変化するため、制御性能にも影響を与えるものと考えられる。そのため、本解析では定常電流を0.1~1.0Aの間で変化させ、制御への影響を明らかにした。なお、インダクタンス L_0 や静的吸引力 F_0 といったパラメータは文献8と同様に電磁界解析によって得られたパラメータを使用している⁸⁾。

4.2 2方向変位の相互作用と制御性能の比較

まず、Y軸方向のみに1mmの初期変位を与えた際の応答のうち、変位 y の時刻歴をFig. 6、変位 z の時刻歴をFig. 7に示している。なお両図ともに定常電流の条件を(a)0.1A、(b)1.0Aとした時刻歴を示している。いずれの条件においても変位 y を収束させるために電圧を印加しているにもかかわらず、初期変位を与えられていない変位 z にも変位が発生しており、特に定常電流が大き

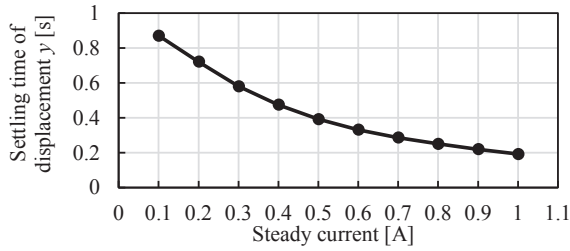


Fig. 10 Settling time of displacement y in each steady current condition.

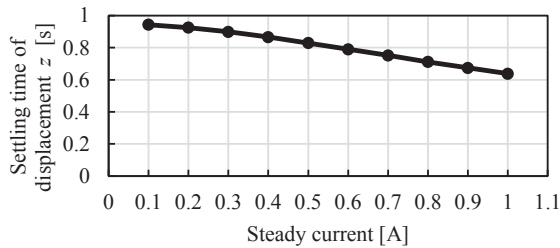


Fig. 11 Settling time of displacement z in each steady current condition.

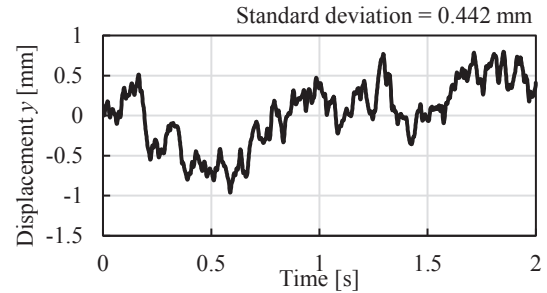
くなるとともに変位 z も増大している。変位 z が発生している解析結果では制限範囲を超える電圧が計算され、30 V に制限されたためであることを確認している。そのため、電圧の制限によって干渉が現れることが確認された。次に、Z 軸方向のみに 1 mm の初期変位を与えた際の応答を Fig. 8, Fig. 9 に示す。ここで、Fig. 8 は変位 y 、Fig. 9 は変位 z の時刻歴を示しており、定常電流の条件を(a) 0.1 A、(b) 1.0 A としている。前述の解析と同様に初期変位を与えられていない変位 y は非常に小さいことがわかる。

ここで、初期変位を与えられた方向の変位は Fig. 6(a), Fig. 6(b) からわかるように定常電流によって収束するまでにかかる時間が変化している。そこで、定常電流による制御性能の変化を明らかにするため、各条件における時刻歴の整定時間を算出した。整定時間とは最大振幅の 5% へ収束するまでの時間であり、本解析では全ての条件において初期変位の 1 mm が最大値となっていることから、変位が 0.05 mm へ到達するまでの時間とした。Fig. 10 には変位 y に初期変位を与えたときにおける変位 y の整定時間、Fig. 11 には変位 z に初期変位を与えたときにおける変位 z の整定時間を示す。これらの図から変位 y 、 z どちらにおいても定常電流を大きくすることで整定時間が短くなっており、制御性能が向上していると考えられる。

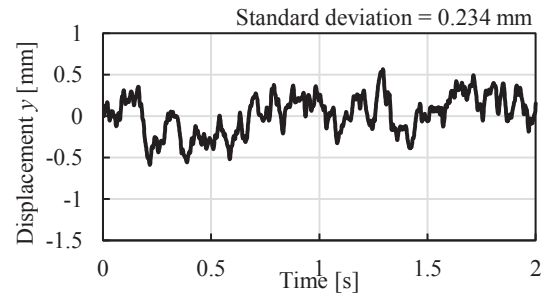
5. 外乱による制御性能への影響

5.1 ホワイトノイズによる数値シミュレーション

4 章では提案する制御システムによる変位 y および z の制御が双方に及ぼす影響について解析的に明らかにした。その結果、初期変位を与えた数値シミュレーションによってそれぞれの変位が互いに与える影響は小さいことが明らかになった。さらに定常電流を大きくすることで整定時間も短くなり、制御性能が向上するこ



(a) Steady current: 0.1 A



(b) Steady current: 1.0 A

Fig. 12 Time histories of horizontal displacement y

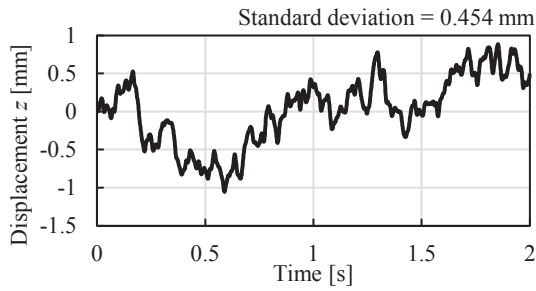
とが確認された。しかしながら、いずれも 1 方向の変位に対して初期変位を与えた状況での解析であり、実際の浮上を考えると水平方向と鉛直方向の 2 方向へ同時に外乱が入力されることが想定される。また、定常電流による制御性能についても不規則な外乱に対して十分な性能を発揮することが可能か明らかではない。そこで、制御入力に外乱を加えた際の応答を数値シミュレーションにより明らかにした。

本解析では 4 章と同様に 3 章で述べた制御モデルを用いて実施した。ただし、初期変位は変位 y 、 z ともに 0 mm とし、入力である右側・左側双方の電磁石の制御電圧に外乱としてホワイトノイズを入力した。また、電磁石のコイルへ流れる電流が 3.0 A を超えない範囲でのシミュレーションを対象とするため、ホワイトノイズは標準偏差が 7.03 V となるように設定した。なお、本解析では入力である制御電圧で外乱を設定する都合上、最悪な外乱状況を想定し、印加可能な電圧範囲内で最大となるような標準偏差のホワイトノイズを設定している。

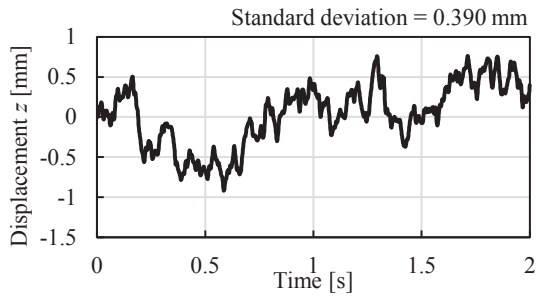
5.2 ランダムな外乱を入力した際の変位応答

数値シミュレーションによって得られた変位 y の時刻歴を Fig. 12、変位 z の時刻歴を Fig. 13 に示す。また、定常電流の条件を(a) 0.1 A、(b) 1.0 A としている。なお、Fig. 12 および Fig. 13 の右上にはそれぞれの時刻歴における変位標準偏差を示している。これらの図は変位が微小であることから似た波形となっているが、標準偏差からも異なる結果であることが確認できる。

本解析から双方の電磁石に対して同様なホワイトノイズを制御電圧に加えて印加した場合、変位 y ならびに変位 z は同様に推移しているが、変位 y の振幅の方が小さいことが確認できる。また、変位振幅は定常電流によっても変化しており、変位 y 、変位 z 共に定常電流が大きくなるほど振幅が小さくなっていることが確認で



(a) Steady current: 0.1 A



(b) Steady current: 1.0 A

Fig. 13 Time histories of horizontal displacement z .

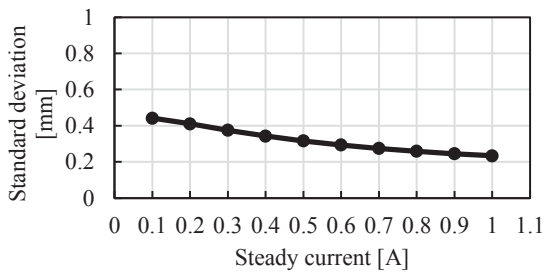


Fig. 14 Standard deviation of vertical displacement y in each steady current condition.

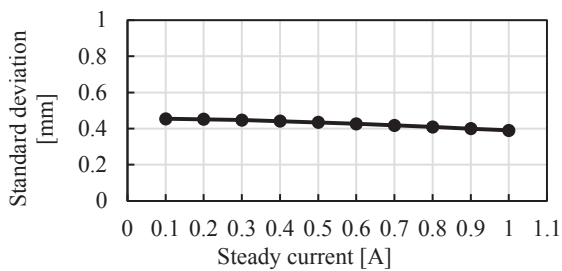


Fig. 15 Standard deviation of horizontal displacement z in each steady current condition.

きる。Fig. 14 と Fig.15 には各定常電流条件で得られた変位 y および変位 z の標準偏差を示している。変位の標準偏差は大きいほど平衡点からの変位振幅が大きく、浮上安定性が劣化していると評価することができる⁸⁾。変位 y および変位 z 共に定常電流が大きくなるにつれて変位標準偏差が小さくなっており、浮上安定性

が向上していると考えることができる。これは定常電流が大きくなることで平衡点近傍での吸引力が大きくなり、浮上安定性に寄与しているものだと考えられる。

6. おわりに

本研究では柔軟鋼板を対象としたエッジ支持型磁気浮上システムにおいて更なる安定浮上を実現するために、柔軟鋼板の鉛直方向および水平方向の振動を制御する 2 自由度振動制御システムを提案し、浮上中の特性について数値シミュレーションから解析的に検討を行った。4 章では定常電流を大きくすることで整定時間が短くなり、収束性が高まる一方で、電圧の制限によって初期変位を与えていない方向の変位にも影響が現れることが示された。5 章では定常電流を大きくすることで標準偏差が小さくなり、浮上安定性に影響が現れることが明らかになった。3 章で示したモデルのように左右それぞれの電磁石に印加する電圧は状態フィードバックによって決定されること、電圧の制約により十分な制御電圧を印加できないことからモデル上は干渉しない Y 方向ならびに Z 方向の変位がそれぞれに影響し合うことが考えられる。実際にシミュレーションでは定常電流が大きくなるにつれてそれぞれの方向の変位に影響を及ぼすことが明らかになった。一方で定常電流はホワイトノイズのようなランダムな外乱に対する安定性を向上させることも確認しており、今回対象とした磁気浮上の範囲では定常電流が 1.0 A において最も高い浮上安定性となることを明らかにした。

今後は実機を用いた実験から柔軟鋼板の変形のしやすさや浮上中に発生する弾性振動が 2 自由度振動制御システムに及ぼす影響を明らかにし、さらなる浮上安定性の向上について検討を行う。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP22K14228 の助成を受けたものである。

References

- 1) A. Shiina, M. N. Hakimi, K. Ogawa, T. Narita, and H. Kato: *J. Jpn. Soc. Appl. Electromagn. Mech.*, **29**, 111 (2021).
- 2) M. Tada, H. Yonezawa, H. Marumori, T. Narita, and H. Kato: *J. Jpn. Soc. Appl. Electromagn. Mech.*, **25**, 82 (2017).
- 3) O. Suzuki, and T. Nakagawa: *J. Jpn. Soc. Appl. Electromagn. Mech.*, **25**, 118 (2017).
- 4) Y. Ito, Y. Oda, T. Kato, X. Liu, A. Endo, K. Ikeda, T. Narita, and H. Kato: *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, **64**, 597 (2020).
- 5) Y. Ito, Y. Oda, T. Narita, and H. Kato: *T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)*, **3**, 95 (2019).
- 6) A. Shiina, S. Kayama, M.N. Hakimi, K. Ogawa, T. Narita, and H. Kato: *T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)*, **5**, 60 (2021).
- 7) T. Narita, Y. Oda, Y. Ito and H. Kato: *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, **64**, 1191 (2020).
- 8) A. Endo, S. Kayama, A. Shiina, M.N. Hakimi, K. Ogawa, K. Ikeda, T. Kato, T. Narita, and H. Kato: *T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)*, **6**, 87 (2022).
- 9) Y. Oda, Y. Ito, K. Okuno, M. Kida, T. Suzuki, A. Endo, T. Narita, H. Kato, and H. Moriyama: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **43**, 11 (2019).

2022年11月11日受理, 2023年3月1日再受理, 2023年3月28日採録

Editorial Committee Members • Paper Committee Members

S. Yabukami and T. Taniyama (Chairperson), N. H. Pham, D. Oyama and M. Ohtake (Secretary)					
H. Aoki	M. Goto	T. Goto	K. Hioki	S. Inui	K. Ito
M. Iwai	Y. Kamihara	H. Kikuchi	T. Kojima	H. Kura	A. Kuwahata
K. Masuda	Y. Nakamura	K. Nishijima	T. Nozaki	T. Sato	E. Shikoh
T. Suetsuna	K. Suzuki	Y. Takamura	K. Tham	T. Tanaka	M. Toko
N. Wakiya	S. Yakata	A. Yao	S. Yamada	M. Yoshida	
N. Adachi	K. Bessho	M. Doi	T. Doi	T. Hasegawa	R. Hashimoto
S. Haku	S. Honda	S. Isogami	T. Kawaguchi	N. Kikuchi	K. Kobayashi
T. Maki	S. Muroga	M. Naoe	T. Narita	Y. Sato	S. Seino
M. Sekino	Y. Shiota	S. Sugahara	I. Tagawa	K. Tajima	M. Takezawa
T. Takura	S. Tamaru	S. Yoshimura			

Notice for Photocopying

If you wish to photocopy any work of this publication, you have to get permission from the following organization to which licensing of copyright clearance is delegated by the copyright owner.

〈All users except those in USA〉

Japan Academic Association for Copyright Clearance, Inc. (JAACC)
6-41 Akasaka 9-chome, Minato-ku, Tokyo 107-0052 Japan
Phone 81-3-3475-5618 FAX 81-3-3475-5619 E-mail: info@jaacc.jp

〈Users in USA〉

Copyright Clearance Center, Inc.
222 Rosewood Drive, Danvers, MA01923 USA
Phone 1-978-750-8400 FAX 1-978-646-8600

If CC BY 4.0 license icon is indicated in the paper, the Magnetics Society of Japan allows anyone to reuse the papers published under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
Link to the Creative Commons license: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>
Legal codes of CC BY 4.0: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>

編集委員・論文委員

藪上 信 (理事)	谷山智康 (理事)	Pham NamHai (幹事)	大竹 充 (幹事)	小山大介 (幹事)					
青木 英恵	伊藤啓太	乾 成里	岩井守生	神原陽一	菊池弘昭	藏 裕彰	桑波田晃弘	小嶋隆幸	
後藤 太一	後藤 稜	佐藤 拓	仕幸英治	末綱倫浩	鈴木和也	高村陽太	田中哲郎	都甲 大	
Kim Kong Tham		仲村泰明	西島健一	野崎友大	日置敬子	増田啓介	八尾 惇	家形 論	
山田晋也	吉田征弘	脇谷尚樹							
安達信泰	磯上慎二	川口昂彦	菊池伸明	小林宏一郎	佐藤佑樹	塩田陽一	菅原 聡	清野智史	
関野正樹	田倉哲也	田河育也	竹澤昌晃	田島克文	田丸慎吾	土井達也	土井正晶	直江正幸	
成田正敬	白 怜士	橋本良介	長谷川 崇	別所和宏	本多周太	榎 智仁	室賀 翔	吉村 哲	

複写をされる方へ

当学会は下記協会に複写複製および転載複製に係る権利委託をしています。当該利用をご希望の方は、学術著作権協会 (<https://www.jaacc.org/>) が提供している複製利用許諾システムもしくは転載許諾システムを通じて申請ください。

権利委託先：一般社団法人学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル

電話 (03) 3475-5618 FAX (03) 3475-5619 E-mail: info@jaacc.jp

ただし、クリエイティブ・コモンズ [表示 4.0 国際] (CC BY 4.0) の表示が付されている論文を、そのライセンス条件の範囲内で再利用する場合には、本学会からの許諾を必要としません。

クリエイティブ・コモンズ・ライセンス <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>
リーガルコード <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>

日本磁気学会論文特集号

Vol. 7 No. 2 (通巻第14号) 2023年9月1日発行

Vol. 7 No. 2 Published Sep. 1, 2023

by the Magnetics Society of Japan

Tokyo YWCA building Rm207, 1-8-11 Kanda surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo 101-0062

Tel. +81-3-5281-0106 Fax. +81-3-5281-0107

Printed by JP Corporation Co., Ltd.

Sports Plaza building 401, 2-4-3, Shinkamata Ota-ku, Tokyo 144-0054

Advertising agency: Kagaku Gijutsu-sha

発行：(公社)日本磁気学会 101-0062 東京都千代田区神田駿河台 1-8-11 東京YWCA会館 207 号室

製作：ジェイピーシー 144-0054 東京都大田区新蒲田 2-4-3 スポーツプラザビル401 Tel. (03) 6715-7915

広告取扱い：科学技術社 111-0052 東京都台東区柳橋 2-10-8 武田ビル4F Tel. (03) 5809-1132

Copyright ©2023 by the Magnetics Society of Japan