



## 水平方向からの磁場を用いた柔軟鋼板の磁気浮上 (2自由度モデルを考慮した制御システムの実験的検討)

# Electromagnetic Levitation for Flexible Steel Plate Using Magnetic Field from Horizontal Direction (Experimental Investigation on Control System Considering Two-degree-of-freedom Model)

鬼塚晴大<sup>a)</sup>・遠藤文人<sup>b)†</sup>・黒田純平<sup>c), d)</sup>・内野大悟<sup>c), d)</sup>・小川和輝<sup>e)</sup>・池田圭吾<sup>f)</sup>・  
加藤太郎<sup>g)</sup>・成田正敬<sup>h)</sup>・加藤英晃<sup>h)</sup>

<sup>a)</sup>福岡工業大学大学院工学研究科, 福岡県福岡市東区和白東 3-30-1 (〒811-0295)

<sup>b)</sup>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)

<sup>c)</sup>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)

<sup>d)</sup>東海大学総合科学技術研究所, 神奈川県平塚市北金目 4-1-1 (〒259-1292)

<sup>e)</sup>愛知工科大学工学部, 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2 (〒443-0047)

<sup>f)</sup>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)

<sup>g)</sup>東京工科大学工学部, 東京都八王子市片倉町 1404-1 (〒192-0982)

<sup>h)</sup>東海大学工学部, 神奈川県平塚市北金目 4-1-1 (〒259-1292)

S. Onitsuka<sup>a)</sup>, A. Endo<sup>b)†</sup>, J. Kuroda<sup>c), d)</sup>, D. Uchino<sup>c), d)</sup>, K. Ogawa<sup>e)</sup>, K. Ikeda<sup>f)</sup>,

T. Kato<sup>g)</sup>, T. Narita<sup>h)</sup>, and H. Kato<sup>h)</sup>

<sup>a)</sup> Graduate School of Engineering, Fukuoka Institute of Technology, 3-30-1 Wajiro-higashi, Higashi-ku, Fukuoka 811-0295, Japan

<sup>b)</sup> Faculty of Engineering, Fukuoka Institute of Technology, 3-30-1 Wajiro-higashi, Higashi-ku, Fukuoka 811-0295, Japan

<sup>c)</sup> Graduate School of Science and Technology, Tokai Univ., 4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa 259-1292, Japan

<sup>d)</sup> Research Institute of Science and Technology, Tokai Univ., 4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa 259-1292, Japan

<sup>e)</sup> Faculty of Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Bajo, Nishihassama, Gamagori, Aichi 443-0047, Japan

<sup>f)</sup> Faculty of Engineering, Hokkaido University of Science, 7-15-4-1 Maeda, Teine-ku, Sapporo, Hokkaido 006-8585, Japan

<sup>g)</sup> Faculty of Engineering, Tokyo University of Technology, 1404-1 Katakura-machi, Hachioji, Tokyo 192-0982, Japan

<sup>h)</sup> Faculty of Engineering, Tokai Univ., 4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa 259-1292, Japan

In the manufacturing process for flexible steel plates used for household electrical appliances and automobile bodies, surface treatment is performed followed by contact conveyance using rollers. During this process, the surface quality of the flexible steel plate deteriorates due to friction with the rollers. As a solution, a non-contact gripping and transport method using magnetic levitation technology has been proposed to improve the surface quality. The method of levitating the flexible steel plate is proposed by placing electromagnets at the edges of the plate. Conventional control models consider only horizontal directions of motion, and experiments with this model have shown that it is possible to levitate these plates. However, it was difficult to suppress the vibration amplitude in the vertical direction, which was not considered. In this paper, we propose a new model that also takes vertical motion into account. Furthermore, the levitation characteristics of the conventional system and the proposed system under different experimental conditions are compared and discussed.

**Key-words:** magnetic levitation, thin steel pleat, non-contact gripping, electromagnet, control

### 1. はじめに

家庭用の電気製品や自動車のボディなどに使用されている柔軟鋼板の製造工程では、表面処理が行われており、その後ローラを用いた搬送が行われている。その際にローラと接触して搬送が行われるため、摩擦が生じ柔軟鋼板の表面品質が劣化する。これを防止する方法として、磁気浮上技術を用いた非接触把持および搬送による表面品質の維持が提案されている<sup>1)4)</sup>。

浮上対象の柔軟鋼板は低剛性であるためたわみが生じやすく、浮上の際に種々の振動モードにより弾性振動が生じ、安定した浮上に影響を及ぼす可能性がある。特に搬送中の慣性力といった外乱が生じた際に浮上状態を保つことが困難になることが考えられ

る。

そこで、柔軟鋼板を塑性変形ない程度に湾曲させて搬送を行う方法<sup>2)3)</sup>や、電磁石から発生する吸引力が及ばない範囲内に永久磁石を配置し、浮上補助を行い、かつ平均たわみと最大たわみから評価値を最小にする永久磁石の最適配置を求める方法<sup>3)</sup>などが提案されている。また、柔軟鋼板の上部とエッジ部に電磁石を配置し、浮上を維持する制御を行う方法も提案されている<sup>5)</sup>。この磁気浮上システムは、上部に配置した電磁石で、鋼板の自重に対向する支持力を発生させることで浮上を実現することが可能となっている。さらに、エッジ部に配置した電磁石は、鋼板のたわみを抑制する張力を発生させ浮上安定性を向上させることができる。このシステムを用いることで、慣性などの外乱が生じる搬送時において、長手方向 800mm、短手方向 600mm、厚さ 0.3mm 以下の柔軟鋼板を安定

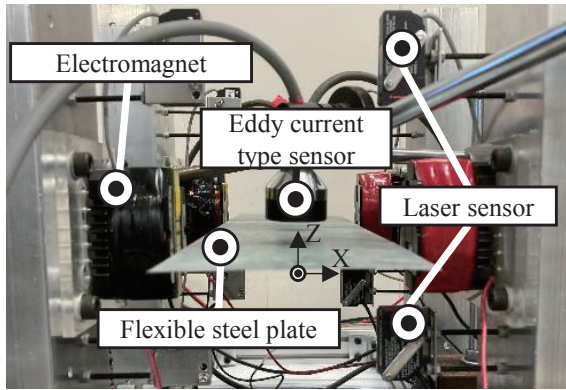


Fig. 1 Proposed edge-supported type magnetic levitation system.

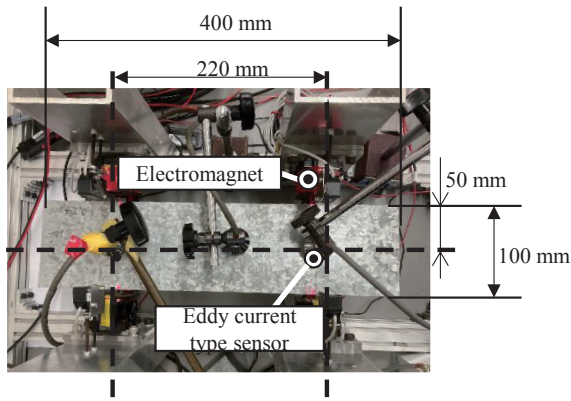


Fig. 2 Placement of electromagnets and eddy type current sensors.

して浮上させることが可能となっている<sup>9)</sup>。

従来の方法では、たわみを抑制するためにエッジ部に配置された電磁石には、E型コアが用いられており、柔軟鋼板を電磁石中心に吸引するような力を発生させる。そのため、柔軟鋼板のたわみを抑制する張力と自重に対向する支持力を発生させることが可能となっている<sup>7)</sup>。従来のように上部に電磁石を配置した方法と比較すると自重に対向してはたらく吸引力である支持力は低下しているものの、柔軟鋼板のサイズが小さく、厚さ0.3mm以下の場合には浮上させることが可能である。特に柔軟鋼板の厚さが0.1mm以下の場合には上部に電磁石を配置すると、柔軟鋼板が低剛性であるため、たわみが大きくなるという懸念がある。そのため、上部の電磁石で吸引力を発生させると浮上中の安定性が劣化することが考えられる。そこで著者らは、薄くサイズの小さい柔軟鋼板を浮上対象としたエッジ支持型磁気浮上システムを提案している<sup>9)</sup>。

これまでにエッジ支持型磁気浮上システムで用いられていた制御システムでは、電磁石を配置した水平方向にのみに柔軟鋼板が運動すると仮定した1自由度モデルから状態空間モデルを作成し、平衡点を保つように制御を行っていた。この制御システムを用いた場合、浮上することは確認されているが、搬送時に生じる慣性などの外乱に対して十分な安定性を保つことが困難であることが考えられる<sup>9)</sup>。そこで本研究では、外乱が生じる場合においても浮上を維持することができるシステムを構築するために、支持力を考慮した2自由度モデルを提案した。

本検討では、従来に提案されていた1自由度モデルと2自由度

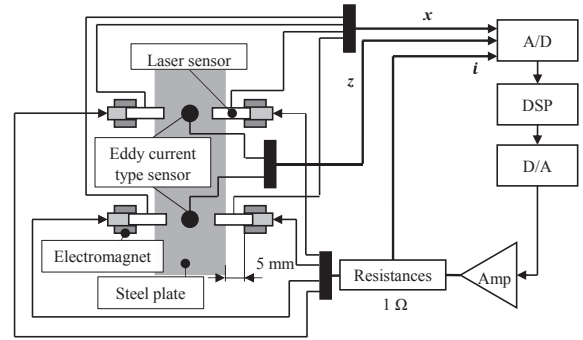


Fig. 3 Sensing and control methods for edge-supported type magnetic levitation system.

モデルにおいて、定常電流や実験条件を変化させた際の浮上特性について検討を行う。

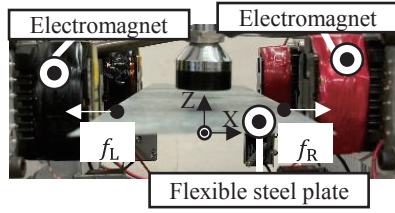
## 2. 柔軟鋼板を対象とした磁気浮上システムと制御

### 2.1 エッジ支持型磁気浮上システム

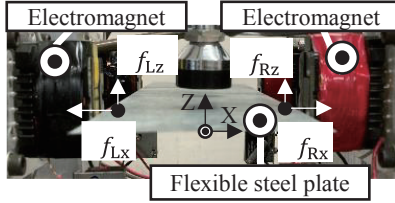
提案されている磁気浮上システムを Fig. 1 に示す。この磁気浮上システムでは、柔軟鋼板の長手側エッジ部に電磁石を配置する。電磁石は両辺に2つずつ挟むように配置しており、合計4つの電磁石を本システムでは用いている。使用する電磁石にはE型のフェライトコアに対し、直径が0.5mmの銅線を1005回巻いたコイルを取り付けた構造となっている。なお、電磁石の配置は先行研究において、支持力が得られやすく、低い電流値で浮上することが確認されている、磁気浮上装置の正面から見てコアがE型となるように配置とした<sup>10)</sup>。この電磁石に電流を流すことで、柔軟鋼板のエッジ部から電磁石中心に向かう方向に吸引力を発生させ、浮上を実現することが可能となっている。浮上対象の柔軟鋼板は、長手方向400mm、短手方向100mm、厚さ0.24mm、材質SS400の垂鉛メッキ鋼板を使用している。Fig. 2に本システムで使用した電磁石やセンサの配置を示す。電磁石の配置は、電磁界解析および有限差分法を用いたたわみ形状解析により、柔軟鋼板のたわみが最も小さくなる配置としているため、たわみによる弾性振動の影響は考慮しないものとした<sup>11)</sup>。Fig. 3に本磁気浮上システムの概略図を示す。各電磁石の上部には、柔軟鋼板のエッジ部から電磁石表面の水平方向の距離を測定するセンサを配置している。水平方向の距離は、KEYENCE社製レーザ式センサを使用しており、帯状のレーザ光の遮光量で変位を計測するセンサを用いている。水平方向の変位は、平衡点を中心とした変位を測定している。電磁石中心から柔軟鋼板表面の鉛直方向の変位計測にはセンテック社製渦電流センサを用いる。この鉛直方向変位は柔軟鋼板の自重と電磁石の吸引力がつり合う位置を平衡点とした鉛直方向変位を測定している。また回路に流れる電流は、電磁石に直列で1Ωの外部抵抗を接続し、その端子間電圧から算出している。測定した変位と回路電流は、デジタルシグナルプロセッサ(DSP)に入力している。測定した変位から速度を算出し、計測を行う。測定した変位、速度、電流から電磁石に印加する電圧を算出する。

### 2.2 1自由度モデルを考慮した制御システム

従来に提案された制御システムのモデル化を Fig. 4(a)に示す。本



(a) One degree of freedom model



(b) Two degree of freedom model

Fig. 4 Model of magnetic levitation.

図において、水平方向を X 方向、鉛直方向を Z 方向とした。この 1 自由度モデルでは、浮上する Z 方向の位置は変化せず、水平方向にのみ運動すると仮定してモデル化を行った。この制御システムでは、柔軟鋼板が水平方向に生じる運動を電磁石によりアクティブに制御しており、鉛直方向の運動はパッシブに制御を行うシステムとなっている。使用している電磁石は、全て独立した回路となっており、柔軟鋼板を挟むように左右に配置しているため、吸引力は  $f_L$ ,  $f_R$  としている。また浮上を実現させるには柔軟鋼板の自重と対向する静的吸引力を発生させる必要があるため、定常的な電圧を電磁石に印加する。

柔軟鋼板を挟むように設置した 2 個の電磁石から同じ定常電圧を印加した際に発生する静的吸引力によって、柔軟鋼板の自重とつり合い、左右の電磁石から一定の距離に保たれる平衡点位置が存在する。そこからの水平方向の変位を  $x$  とし、運動方程式を式(1), (2), 水平方向に加わる静的吸引力を式(3), 回路方程式を式(4), (5)に示す。また、電磁石の吸引力は非線形性を持っているため、平衡点近傍で線形近似を行った。

$$m\ddot{x} = f_R - f_L = f_x \quad (1)$$

$$f_x = \frac{4F_x}{X_0} x + \frac{4F_x}{I_0} i_x \quad (2)$$

$$F_x = \frac{L_{\text{xeff}} \cdot I_0^2}{2X_0^2} \quad (3)$$

$$\frac{di_x}{dt} = -\frac{L_{\text{xeff}}}{L_x} \cdot \frac{I_0}{X_0^2} \dot{x} - \frac{R}{L_x} i_x + \frac{1}{L_x} e_1 \quad (4)$$

$$L_x = \frac{L_{\text{xeff}}}{X_0} + L_{\text{xlea}} \quad (5)$$

ここで、 $L_{\text{xeff}}$ : 平衡点における電磁石コイルの有効インダクタンス [H·m],  $L_{\text{xlea}}$ : 漏れインダクタンスに相当する定数 [H],  $L_x$ : 平衡点における電磁石コイルの全インダクタンス [H],  $I_0$ : 静的吸引力を得るための定常電流 [A],  $i$ : 定常電流値から変動分にあたる電流値 [A],  $R$ : 電磁石用コイルの抵抗値 [ $\Omega$ ],  $e_1$ : 定常電圧値からの変動分にあたる電圧値 [V],  $X_0$ : 平衡位置における電磁石表面と鋼板表

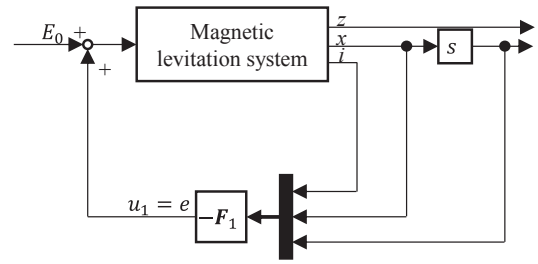


Fig. 5 Block diagram of one-degree-of-freedom model.

面との距離 [m], である。さらに、上式を整理すると、式(6)のような状態空間モデルが得られる。

$$\dot{x}_1 = A_1 x_1 + B_1 e_1 \quad (6)$$

$$x_1 = [x \quad \dot{x} \quad i]^T$$

なお、式(6)の 1 自由度モデルを考慮した制御システムのブロック線図を Fig. 5 に示す。このモデルでは 1 つの電磁石に定常に印加する電圧  $E_0$  に算出した制御電圧を重畳することで制御するシステムとなっている。

### 2.3.2 2自由度モデルを考慮した制御システム

2 章 2 節で提案した制御システムの場合、浮上を実現することができ、水平方向の運動を抑制することが可能となっていることが確認できている。しかしながら、実験条件によっては浮上ができず落下する場合がある。その原因として、鉛直方向に生じる変位を制御していないため、振動振幅を抑えることができないことが挙げられる。そこで Fig. 4(b) に示すモデルのように水平方向に加え、鉛直方向の運動を考慮した 2 自由度モデルを提案する。電磁石から柔軟鋼板に発生する吸引力は E 型コアの中心方向に発生しているため、X 方向と Z 方向に分解することが可能となっている。

本システムでは、従来のシステムと同様に、定常電流を電磁石に流した際に発生する静的吸引力によってつり合う平衡点からの運動を考慮し、線形化を行う。ここから水平方向の変位を  $x$ , 鉛直方向の変位を  $z$  としている。本モデルにおける電磁石の中心から柔軟鋼板のエッジ部までの距離を式(7), 平衡点での吸引力を式(8), 運動方程式を式(9), (10), Z 方向および X 方向に寄与する回路方程式を式(11)と(12), 全インダクタンスを式(13)に示す。

$$\Gamma_0 = \sqrt{X_0^2 + Z_0^2} \quad (7)$$

$$F_0 = \frac{L_{\text{eff}} I_0^2}{2\Gamma_0^2} \quad (8)$$

$$\frac{dz}{dt} = 2 \left( \frac{F_0}{\Gamma_0 m} - \frac{3F_0 Z_0^2}{\Gamma_0^3 m} \right) z + \frac{2F_0 Z_0}{\Gamma_0 I_0 m} i_z \quad (9)$$

$$\frac{dx}{dt} = 2 \left( \frac{F_0}{\Gamma_0 m} - \frac{3F_0 X_0^2}{\Gamma_0^3 m} \right) x + \frac{2F_0 X_0}{\Gamma_0 I_0 m} i_x \quad (10)$$

$$\frac{di_z}{dt} = -\frac{R}{L_0} i_z + \frac{2Z_0 L_{\text{eff}} I_0}{L_0 \Gamma_0^3} \dot{z} + \frac{e_L}{L_0} + \frac{e_R}{L_0} \quad (11)$$

$$\frac{di_x}{dt} = -\frac{R}{L_0} i_x + \frac{2X_0 L_{\text{eff}} I_0}{L_0 \Gamma_0^3} \dot{x} + \frac{e_L}{L_0} - \frac{e_R}{L_0} \quad (12)$$

$$L_0 = \frac{L_{\text{eff}}}{\Gamma_0} + L_{\text{lea}} \quad (13)$$

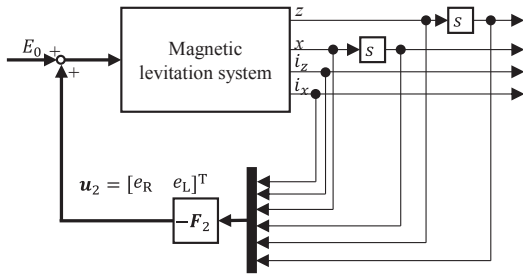


Fig. 6 Block diagram of two-degree-of-freedom model.

ここで、 $F_0$ ：平衡点における電磁石中心から鋼板までの変位 [m]、 $Z_0$ ：平衡点における電磁石中心から鋼板表面までの鉛直方向変位 [m]、 $L_{\text{eff}}$ ：平衡点 $F_0$ における電磁石コイルのインダクタンス[H・m]、 $e_R$ ：右の電磁石用コイルに加わる定常電圧から変動分に相当する電圧値[V]、 $e_L$ ：左の電磁石用コイルに加わる定常電圧から変動分に相当する電圧値[V]である。式(6)-(12)を整理して状態空間モデルにしたものを式(14)に示す。

$$\dot{x}_2 = A_2 x_2 + B_2 u_2 \quad (14)$$

$$x_2 = [z \ \dot{z} \ x \ \dot{x} \ i_z \ i_x]^T$$

$$u_2 = [e_L \ e_R]^T$$

なお、式(14)の2自由度モデルを考慮した制御システムのブロック線図をFig. 6に示す。

本検討では、式(6)の1自由度モデルと式(14)の2自由度モデルそれぞれを踏まえて実験を行った。

### 3. 定常電流が静止浮上状態に及ぼす影響

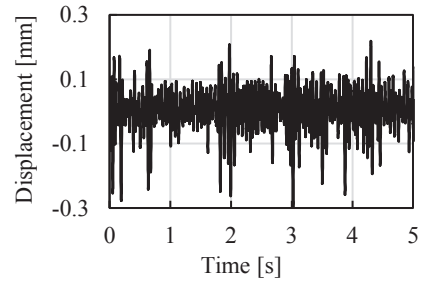
#### 3.1 定常電流と浮上状態の関係

本磁気浮上システムにおいて、柔軟鋼板の浮上を維持するために、柔軟鋼板の自重とつり合う静的吸引力を発生させる必要がある。そのため、電磁石のコイルには、定常電流を流す。静的吸引力は柔軟鋼板の厚さや柔軟鋼板が浮上する位置、定常電流などの大きさにより変化する<sup>12)</sup>。定常電流を高くすることで張力が大きくなるため、たわみを抑制することが可能になることが考えられる。しかしながら、柔軟鋼板が浮上している場合、コイルに熱が発生し、安定した浮上に影響を及ぼすことが考えられる。また先行研究において、同様の制御システムを使用し、定常電流を変化させた場合、浮上特性に影響をおよぼすことが示されている<sup>12)</sup>。そのため、1自由度モデルおよび2自由度モデルで作成した制御システムを使用し、定常電流を変化させた場合の浮上特性について比較する。

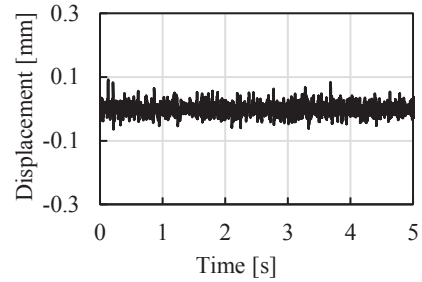
#### 3.2 磁気浮上実験による浮上状態の評価

各制御システムで設定した定常電流は0.8~1.2Aとした。0.8A以下の際には、支持力が小さく、把持することが困難であり、また1.2A以上の条件では十分な浮上を維持できなかったため、上記の範囲で実験を行う。また本磁気浮上システムに用いる回路の印加可能な電圧範囲は、0~30Vとし、範囲を超える電圧が算出された場合は最も近い極地の電圧を入力するものとした。

本検討で用いるフィードバックゲインの決定は、最適制御則を

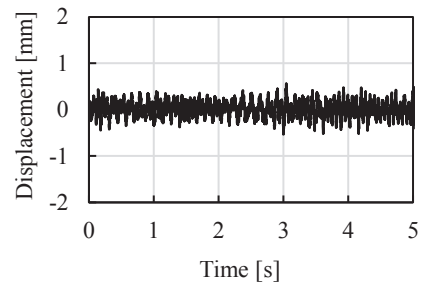


(a) One degree of freedom model

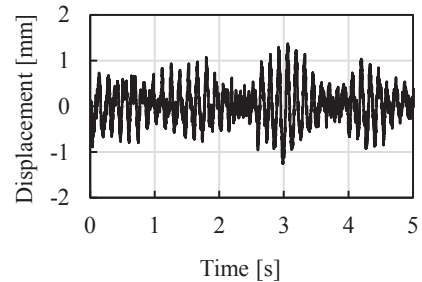


(b) Two degree of freedom model

Fig. 7 Time histories of horizontal displacement.



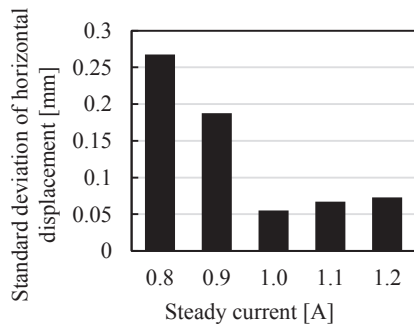
(a) One degree of freedom model



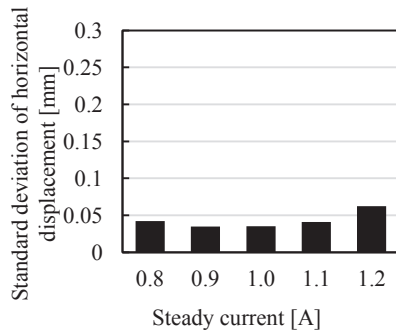
(b) Two degree of freedom model

Fig. 8 Time histories of vertical displacement.

用いて算出を行った。しかしながら、浮上位置やインダクタンスなどのパラメータは定常電流で異なっている。そのため、予備実験として、各定常電流で10秒以上、浮上が実現したフィードバックゲインを試行錯誤的に探索した。その結果から各定常電流で5つのフィードバックゲインを選定した。それぞれの条件で、5回の実験を行い、定常電流ごとの浮上特性を見る。水平方向と鉛直方向の変位および消費電力について実験的に浮上特性の評価を行う。本実験で用いたフィードバックゲインの計算には、MathWorks社製

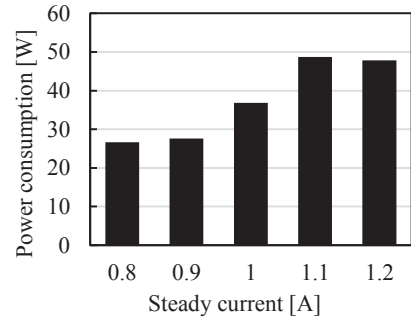


(a) One degree of freedom model

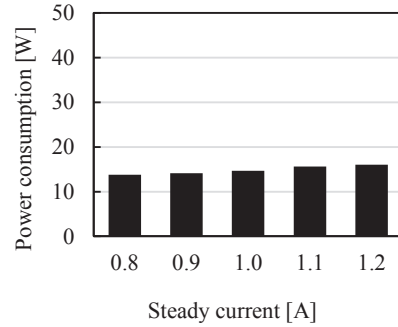


(b) Two degree of freedom model

**Fig. 9** Average of standard deviation of horizontal displacement  $x$  for each steady current.



(a) One degree of freedom model



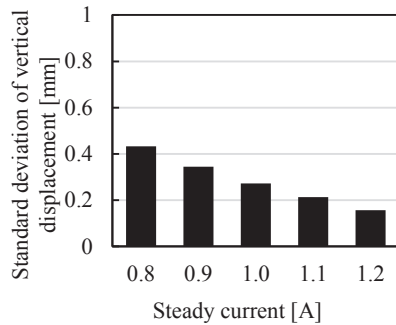
(b) Two degree of freedom model

**Fig. 11** Average of power consumption for each steady current.

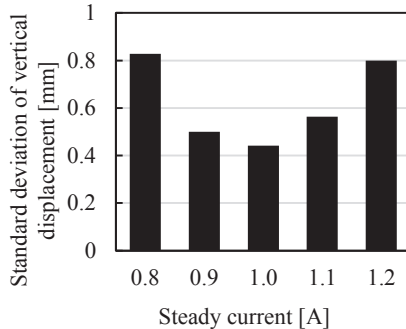
#### 4. 定常電流が制御システムに及ぼす影響

実験中の柔軟鋼板における水平方向の変位時刻歴波形を Fig. 7, 鉛直方向の変位時刻歴波形を Fig. 8 に示す. 時刻歴波形では, 両図ともに(a)を 1 自由度モデル, (b)を 2 自由度モデルとした際の結果を示している. ここでは一例として定常電流を 1.0A とした際の結果を示している. ここで示している時刻歴波形は, 平衡点を基準とした変位としており, 鉛直方向であれば変位が正に向かうほど平衡点の上方へ, 水平方向の変位であれば正に向かうほど Fig. 1 において紙面右側に変位している. 柔軟鋼板の磁気浮上では, 浮上中の平均的な振動振幅の大きさを標準偏差で評価することが一般的となっている<sup>12)</sup>. そのため, 本検討においても, 各制御システムで実験を行った際に得られた鉛直および水平方向の変位時刻歴から標準偏差を算出し, 評価を行う. また定常電流ごとの浮上特性について評価を行うために, 1 つの定常電流条件で得られた全 25 回分のデータからそれぞれの標準偏差を算出し, 平均値を求める. また消費電力も同様の方法で平均値を算出し評価を行う.

Fig. 9, Fig. 10 に各定常電流条件で得られた鉛直方向ならびに水平方向の変位標準偏差の平均値を示す. これらの図は, (a) 1 自由度モデル, (b) 2 自由度モデルでの結果を示している. 1 自由度モデルの場合, 水平方向の変位標準偏差は定常電流が 1.0A 以上とすると大きく減少することが示された. また鉛直方向の変位標準偏差は定常電流を大きくするにしたがって鉛直方向の変位振動が抑制されることが示された. 次に 2 自由度モデルの場合, 全ての定常電流条件において 1 自由度モデル適用時よりも水平方向の標準偏差が小さく, 柔軟鋼板の水平方向への振動が抑制されていた. また, 定常電流による水平方向変位標準偏差の変化はほとんどないことも示された. 対して鉛直方向の変位標準偏差は定常電流によって



(a) One degree of freedom model



(b) Two degree of freedom model

**Fig. 10** Average of standard deviation of vertical displacement  $z$  for each steady current.

MATLAB における `lqr` 関数を用いており, サンプルング時間は 0.001 秒としている.

変化し、定常電流 1.0A にて最小となった。しかしながら、いずれの定常電流条件においても 1 自由度モデル適用時より変位標準偏差が大きく、柔軟鋼板がより大きく振動していることが示された。先行研究では、柔軟鋼板を対象とした磁気浮上システムにおいて静止状態において変位標準偏差が小さい浮上条件は外乱が入力された際に浮上確率が高いことを示しており<sup>13)</sup>、本実験で得られた結果において変位標準偏差が小さいことはその方向の外乱に対して安定した浮上を維持できることを示すと考えられる。水平方向へ搬送した場合、柔軟鋼板には慣性力が外乱として加わるが、2 自由度モデルを適用した場合にはそのような外乱に対して安定した浮上を維持できることが示された。対して、鉛直方向の変位標準偏差は 1 自由度モデル適用時よりも大きく、鉛直方向への外乱に対して浮上安定性が劣化することが示された。Fig. 11 には各定常電流条件において電磁石コイルを含む回路で消費される電力の平均値を示している。Fig. 11 も同様に(a) 1 自由度モデル、(b) 2 自由度モデルでの結果を示している。全定常電流条件において 1 自由度モデル適用時の方が 2 自由度モデル適用時と比べ、消費電力が大きいたことが示された。また、1 自由度モデル適用時には定常電流 1.2 A の条件を除き、定常電流を大きくすることで消費電力も大きくなることが示された。それに対して、2 自由度モデル適用時には定常電流によって上昇する消費電力は小さいことが示された。

先行研究で示されているように本研究で使用したエッジ支持型磁気浮上システムでは定常電流を大きくすると共に平衡点において柔軟鋼板へ加わる水平方向への吸引力が増大する<sup>10)</sup>。この水平方向への吸引力は柔軟鋼板のたわみを抑制するようにはたらくと考えられ、Fig. 9(a)、Fig. 10(a)で示されているように 1 自由度モデル適用時には定常電流を大きくすることで変位標準偏差が小さくなると考えられる。また、定常電流の増大は鉛直方向の運動に対する剛性を高めることとなり変位が小さくなることも考えられる。対して 2 自由度モデル適用時には水平方向の変位標準偏差は小さいものの、鉛直方向の変位標準偏差は 1 自由度モデルと比べ大きくなっている。2 自由度モデルにより設計したシステムで浮上させた際にはいずれの定常電流条件でもコイル電流の標準偏差が 0.25 A 以上となり、定常電流に対して大きく振動している。これは定常電流近傍で線形化している本システムにとって誤差を大きくする要因となり、鉛直方向の変位標準偏差が増大したと考えられる。

しかしながら、2 自由度モデル適用時には消費電力が全ての定常電流条件において小さくなっており、鉛直方向の変位標準偏差は大きくなるものの、低い消費電力で浮上を維持することが可能になることが示された。そのため、電磁石の発熱が抑えられ、モデル化誤差を生じにくくさせ、安定した浮上を実現できる時間を延ばすことが可能になると考えられる。また、2 自由度モデル適用時において鉛直方向の変位標準偏差は定常電流 1.0A において最も抑制されており、適用する制御モデルによって適切な定常電流値が変化することが示された。本来であれば 1 自由度モデル適用時と同様に定常電流の増大によって張力や剛性が大きくなり変位標準偏差が小さくなることと推察される。しかしながら、本装置における電磁石コアは 0.9A 付近において吸引力特性が変化する非線形性を持っている<sup>12)</sup>。そのため、定常電流 1.1A 以降では張力や剛性による振動抑制効果よりもモデル化誤差による制御性能の劣化の影響

を強く受けていると考えられる。

## 5. 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浮上安定性の向上を実現させることを目的として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 自由度モデルについて検討した。特に定常電流が異なる場合の 1 自由度モデルと 2 自由度モデルで柔軟鋼板の厚さ 0.24 mm とした場合の浮上特性について検討を行った。その結果、定常電流によって浮上特性が変化することが示された。各方向の変位において、2 自由度モデルを適用することによって水平方向の変位標準偏差および消費電力は減少するが、鉛直方向の標準偏差はどの定常電流においても 1 自由度モデルより大きくなることが明らかとなった。また 1 自由度モデルでは定常電流の増大とともに消費電力が大きくなるが、2 自由度モデルでは定常電流によらず消費電力を抑えながら浮上を維持することが可能であることが示された。

本報告では、2 自由度モデルの有用性を示すことができた。しかしながら、柔軟鋼板のサイズや板厚が変化した場合、柔軟鋼板の振動特性が変化し、特に搬送時の慣性力といった外乱が入力された場合には安定した浮上を維持することが困難になる可能性もある。そのため、今後は外乱に対する 2 自由度モデルのロバスト性を明らかにしつつ、より実環境において安定浮上が可能なる制御システムの構築を目指していく。

**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) Y. Oshinoya, and K. Ishibashi: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. C.*, **67**, 2855 (2001).
- 2) H. Marumori, H. Yonezawa, T. Narita, H. Hideaki, and Y. Oshinoya: *Trans. JSME*, **81**, 14-00471 (2015).
- 3) Y. Ito, Y. Oda, A. Shina, T. Narita, and H. Kato: *T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)*, **4**, 96 (2020).
- 4) M. Tada, H. Yonezawa, H. Marumori, T. Narita, and H. Kato: *J. Jpn. Soc. Appl. Electromagn. Mech.*, **25**, 82 (2017).
- 5) Y. Ito, Y. Oda, T. Narita, and H. Kato: *T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)*, **3**, 95 (2019).
- 6) M. Kida, T. Suzuki, Y. Oda, T. Narita, H. Kato, and H. Moriyama: *T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)*, **1**, 76 (2017).
- 7) T. Narita, T. Kurihara, and H. Kato: *Mech. Eng. J.*, **3**, 15-00376 (2016).
- 8) T. Narita, Y. Oda, Y. Ito, and H. Kato: *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, **64**, 1191 (2020).
- 9) S. Onitsuka, K. Kawashima, S. Baba, A. Endo, J. Kuroda, D. Uchino, K. Ogawa, K. Ikeda, T. Kato, T. Narita, and H. Kato: *T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)*, **7**, 112 (2023).
- 10) T. Narita, Y. Ootuka, M. Ooshima, and Y. Oshinoya: *Proc. Jpn. Joint Auto. Cont. Conf.*, **57**, 83 (2014).
- 11) T. Narita, Y. Oda, Y. Ito, K. Okuno, and H. Kato: *Proc. 16th Int. Conf. New Actr.*, **16**, 334 (2018).
- 12) 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).
- 13) H. Marumori, H. Yonezawa, T. Narita, H. Kato, S. Hasegawa, and Y. Oshinoya: *J. Jpn. Soc. Appl. Electromagn. Mech.*, **23**, 6 (2015).

2023年10月31日受理, 2024年3月6日採録