



## 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<sup>a)</sup>・川島和磨<sup>a)</sup>・馬場翔太郎<sup>a)</sup>・遠藤文人<sup>a)†</sup>・黒田純平<sup>b)</sup>・内野大悟<sup>c)</sup>

小川和輝<sup>c)</sup>・池田圭吾<sup>d)</sup>・加藤太郎<sup>e)</sup>・成田正敬<sup>f)</sup>・加藤英晃<sup>f)</sup>

<sup>a)</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>b)</sup>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)

<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>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>e)</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>f)</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>, K. Kawashima<sup>a)</sup>, S. Baba<sup>a)</sup>, A. Endo<sup>a)†</sup>, J. Kuroda<sup>b)</sup>, D. Uchino<sup>c)</sup>,

K. Ogawa<sup>c)</sup>, K. Ikeda<sup>d)</sup>, T. Kato<sup>e)</sup>, T. Narita<sup>f)</sup>, and H. Kato<sup>f)</sup>

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

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

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

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

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

<sup>f)</sup> 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<sup>1)~3)</sup>。

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<sup>4)</sup>。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<sup>5)~6)</sup>。

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<sup>7)</sup>。

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<sup>8)~9)</sup>。しかしなが

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

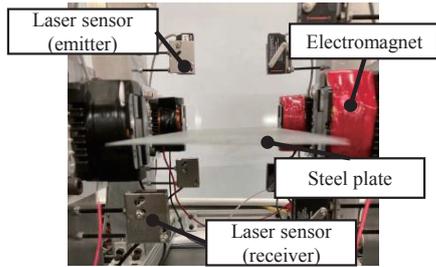


Fig. 1 Edge type magnetic levitation system.

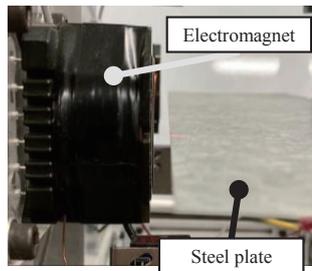


Fig. 2 Levitation distance from electromagnet to flexible steel plates.

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

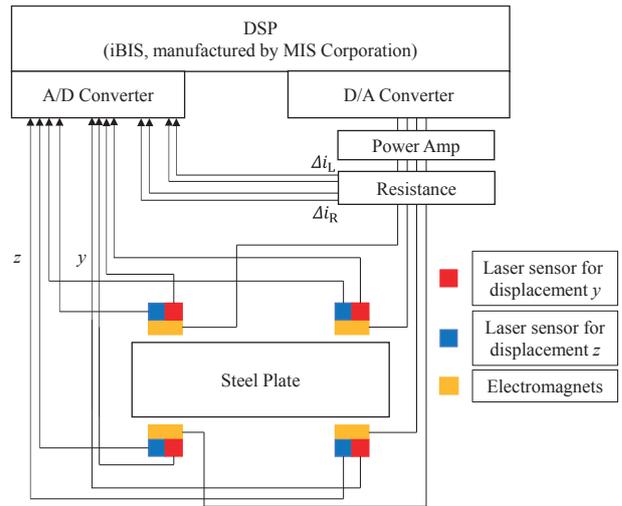


Fig. 3 Proposed magnetic levitation system.

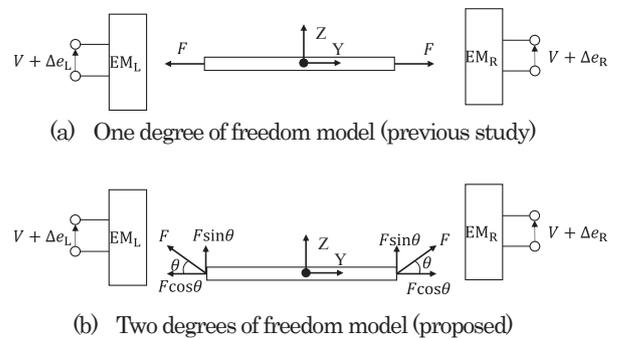


Fig. 4 Models of magnetic levitation for steel plates.

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。

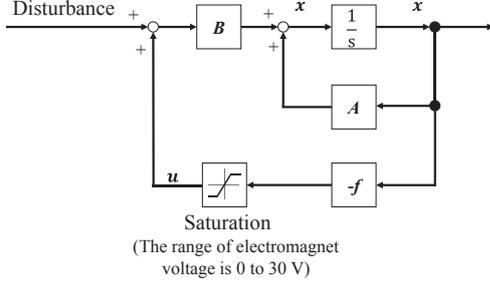
## 3. 2 自由度振動制御システム

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<sup>8)</sup>。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、 $L_{\text{eff}}/\Gamma_0$ : 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],  $\Gamma_0$ : 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],  $\Delta i_z$ ,  $\Delta i_y$ : 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],  $\Delta e_L$ ,  $\Delta e_R$ : 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。

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

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  $u$  を決定することとした。そのため、制御入力  $u$  は式(9)のように決定される。

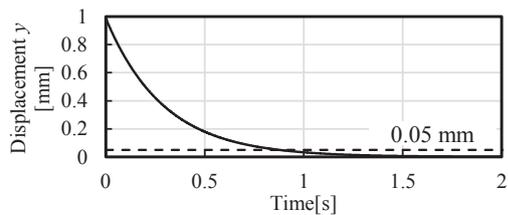
$$\begin{aligned} u &= -fx \\ f &= [f_z \quad f_{\dot{z}} \quad f_y \quad f_{\dot{y}} \quad f_{\Delta i_z} \quad f_{\Delta i_y}] \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、フィードバック行列  $f$  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。

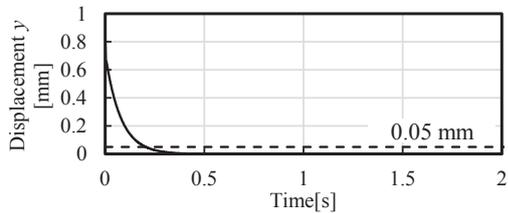
## 4. 各軸方向の運動が制御へ及ぼす影響

### 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

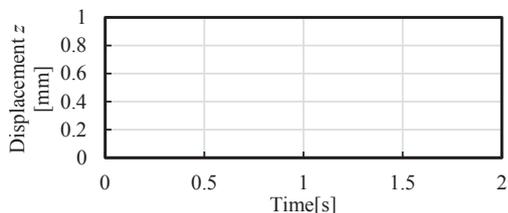


(a) Steady current: 0.1 A

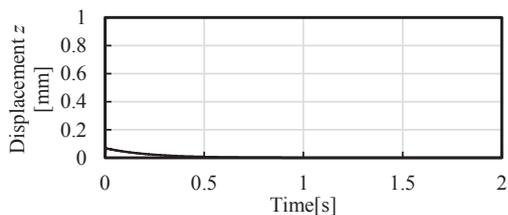


(b) Steady current: 1.0 A

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

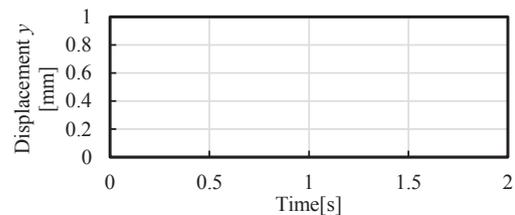


(a) Steady current: 0.1 A

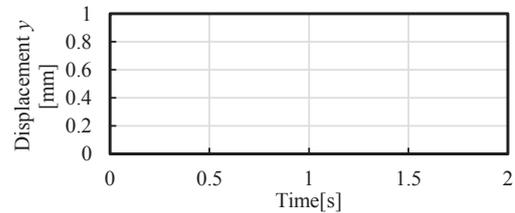


(b) Steady current: 1.0 A

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

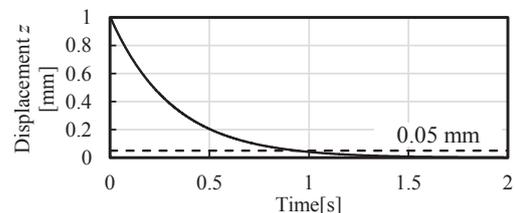


(a) Steady current: 0.1 A

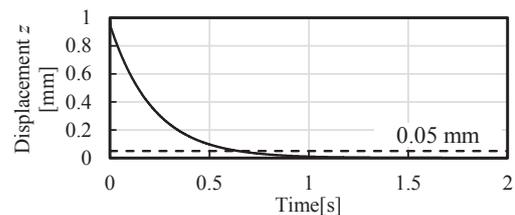


(b) Steady current: 1.0 A

**Fig. 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. 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1 mm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0~30 V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3 A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0.1~1.0 A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<sup>8)</sup>。

#### 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1 mm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)0.1 A、(b)1.0 A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

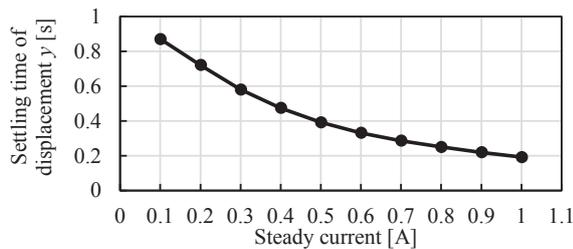


Fig. 10 Settling time of displacement  $y$  in each steady current condition.

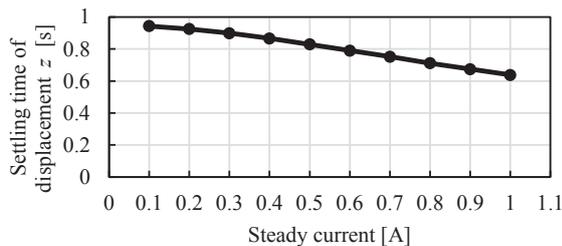


Fig. 11 Settling time of displacement  $z$  in each steady current condition.

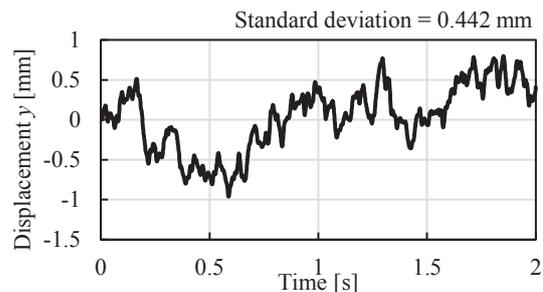
くなるとともに変位  $z$  も増大している。変位  $z$  が発生している解析結果では制限範囲を超える電圧が計算され、30 V に制限されたためであることを確認している。そのため、電圧の制限によって干渉が現れることが確認された。次に、Z 軸方向のみに 1 mm の初期変位を与えた際の応答を Fig. 8, Fig. 9 に示す。ここで、Fig. 8 は変位  $y$ , Fig. 9 は変位  $z$  の時刻歴を示しており、定常電流の条件を(a) 0.1 A, (b) 1.0 A としている。前述の解析と同様に初期変位を与えられていない変位  $y$  は非常に小さいことがわかる。

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。

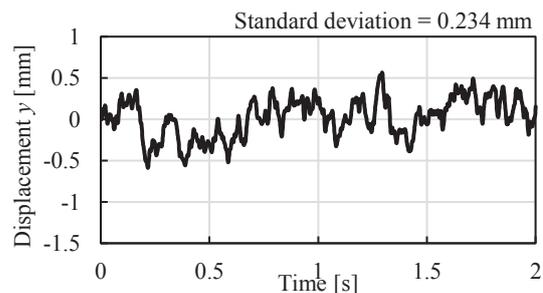
## 5. 外乱による制御性能への影響

### 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  $y$

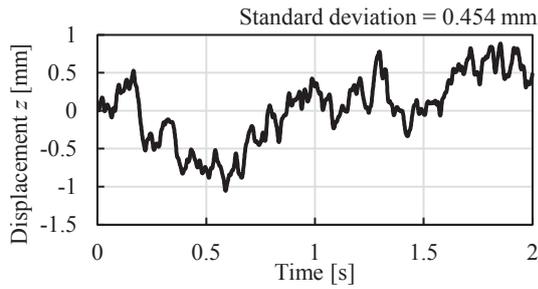
とが確認された。しかしながら、いずれも 1 方向の変位に対して初期変位を与えた状況での解析であり、実際の浮上を考えると水平方向と鉛直方向の 2 方向へ同時に外乱が入力されることが想定される。また、定常電流による制御性能についても不規則な外乱に対して十分な性能を発揮することが可能か明らかではない。そこで、制御入力に外乱を加えた際の応答を数値シミュレーションにより明らかにした。

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。

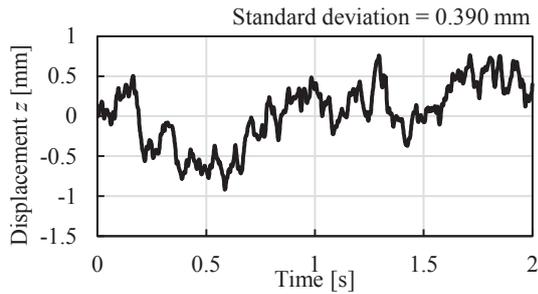
### 5.2 ランダムな外乱を入力した際の変位応答

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

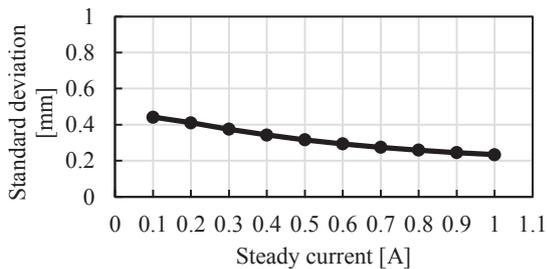


(a) Steady current: 0.1 A

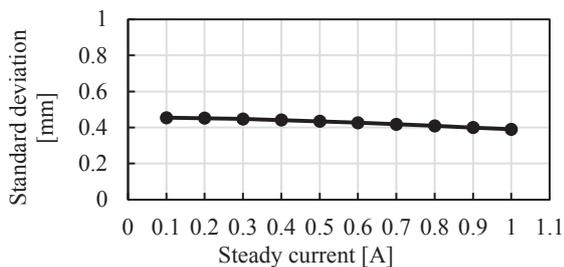


(b) Steady current: 1.0 A

**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<sup>8)</sup>。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られる。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