

薄鋼板磁気浮上システムにおける 弾性振動抑制に関する基礎的検討

長谷川真也^{*1}・押野谷康雄^{*2}・石橋一久^{*3}

Basic examination on elastic vibration control of an electromagnetic levitation system for thin steel plate

by

Shinya HASEGAWA, Yasuo OSHINOYA and Kazuhisa ISHIBASHI

(Received on September 30, 2003 & accepted on January 7, 2004)

Abstract

A method involving the application of electromagnetic technology is under consideration for improving the surface quality of conveyed steel plates. However, these studies have been conducted using experience-based techniques for the tuning of the controller such as the optimal control theory. The sliding mode control theory can solve this problem in the levitation mode of the steel plates. In this study, we aim to develop a noncontact support system for thin steel plates with high robustness using sliding mode control, which is tolerant to factors such as disturbance with respect to control signals and the external force of the system. We applied the 1DOF model and a continuous model for the modeling of sheet steel. Then, experiments were carried out under several conditions, and the obtained results were compared with the optimal control results. As a result, it was verified that the suppressive effect of the sliding mode control on disturbance is sufficient and the application of the continuous model enables the construction of a system with robustness to the disturbance of the external force.

Keywords: Steel plate, electromagnetic levitation, disturbance, elastic vibration, continuous model, optimal control, sliding mode control

1. 緒言

薄鋼板は自動車や電化製品その他の構造材として現代の産業界においても幅広く用いられており、その多岐にわたる需要から要求される表面品質は更に高級化の一途を辿っている。近年ではその対応策として磁気浮上搬送技術の応用による非接触搬送に関する研究が行われている^{(1)~(3)}。しかし簡略化した数学モデルに基づく制御系設計を行った場合、様々な外乱により期待した制御特性を得ることは困難である。従って従来のPD制御などのコントローラではロバスト性の不足は否めず、限られたアクチュエータの中で外乱に対してより強いロバスト性を有する制御系の構築が急務となっている。そこで著者らは非線形モデルを簡単に扱うことが可能なスライディングモード制御⁽⁴⁾による薄鋼板磁気浮上制御を試みている。スライディングモード制御は入力レンジスペースに存在する外乱やモデル化誤差に対する強いロバスト性というユニークな特徴を有している。よって薄鋼板の磁気浮上系に適用した場合、種々の外乱により生じる薄鋼板の弾性振動抑制に効果があると推測される。本研究グ

ループではこれまでに簡易な一自由度モデルに対してスライディングモード制御を適用し、その優位性が実現可能であることを明らかとしている⁽⁵⁾。そこで本報告では更なる外乱抑制性能の実現を目指し、鋼板のモデリングを平板の運動方程式により鋼板の運動を記述する弾性一次モードまで考慮した連続体モデルとした場合にスライディングモード制御を適用する。さらに薄鋼板を浮上させている電磁石への制御電流に対する外乱の強制入力印加により、その外乱および考慮した振動モードの抑制効果に関して最適制御適用時との実験的な比較検討および一自由度モデル適用時との制御性能の差異についての検討を行う。ただし本報告では、鋼板の鉛直方向の振動のみを考察対象とし水平方向の運動に関しては考えないものとする。

2. 制御実験システム

制御システムの概略を Fig.1 に示す。磁気浮上対象は長さ $a=800\text{mm}$ 、幅 $b=600\text{mm}$ 、厚さ $h=0.3\text{mm}$ である長方形垂鉛めっき鋼板 (材質 SS400) とする。長方形薄鋼板を 5 か所の電磁石により吊り下げるようにして非接触把持するために、鋼板の変位を 5 個の渦電流式非接触変位計により検出する。また、これをデジタル微分により速度に変換する。さらに電磁石コイル電流を測定用の外部抵抗より検出し、合計 15 個の観測値を

*1 工学研究科機械工学専攻博士課程後期

*2 工学部動力機械工学科助教授

*3 第二工学部機械工学科教授

A/D コンバータから DSP (TMS320C31, 45MHz) に入力し、制御則を計算する。D/A コンバータから電流供給用アンプへ制御電圧を出力し、5 個の電磁石吸引力を制御し、鋼板を電磁石表面から 5mm の位置に磁気浮上させる。また本研究では、制御信号に対する外乱によって生じる弾性振動抑制の基本的な考察を行うため極軽量のカーボンファイバー製パイプ (直径 10mm, 使用した全パイプ質量の薄鋼板質量に対する割合は約 6%) を同図の点線で示す位置 (電磁石直下) に 3 本取り付け、長手方向 (x 軸方向) の弾性振動の発生と静的なたわみを抑制した。低次の弾性振動モードを扱う場合、上述のカーボンファイバー製のパイプを鋼板に貼り付けたことによる影響はほとんどないことを確認している。実験で用いる制御信号への外乱は Function Generator によって作成する。実験装置の概略図を Fig.2 に示す。3 本のフレームに、電磁石、非接触変位計からなるユニットを設置してある。なお、電磁石の固定された 3 本のフレームはそれぞれ加振器に設置されており独立に加振可能となっている。

3. 鋼板のモデル化

3.1 一自由度モデル

一自由度モデルでは 1 か所の電磁石位置で検出した変位、速度、電磁石コイル電流値を、その電磁石に対してのみフィードバックする独立制御を行う。そこで、Fig.3 に示すように、鋼板を 5 つの仮想質量に分割し、それぞれを集中定数系としてモデル化する。

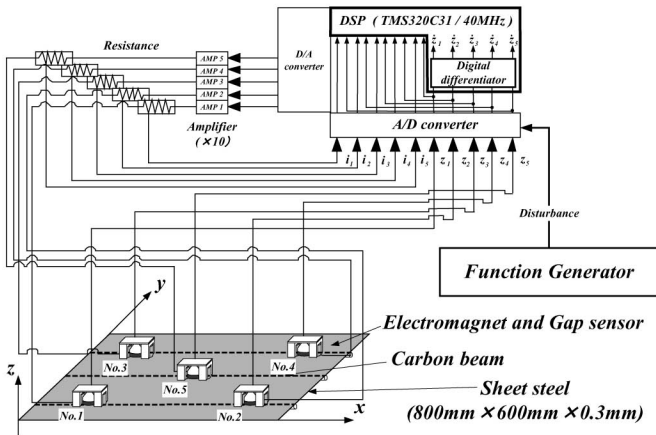


Fig.1 Electromagnetic levitation control system.

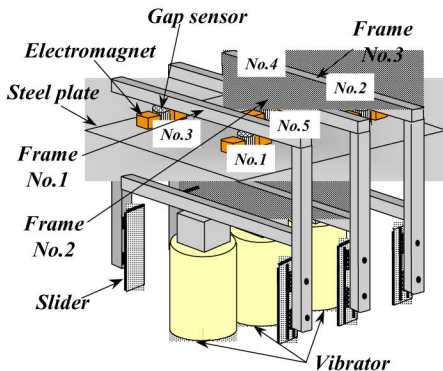


Fig.2 Experimental apparatus.

電磁石からの静的吸引力によって鋼板を支持すれば一定の距離に保たれる平衡状態が存在する。そこからの鉛直方向変位 $z(x, y)$ に関する運動方程式は以下ようになる。

$$m_z \ddot{z} = 2f_n \quad (1)$$

ここで、 m_z : 鋼板を仮想的に 5 つに分割した質量 [kg], $z(x, y)$: 鋼板の平衡浮上位置からの変位 [m], f_n : 電磁石 1 個当りの吸引力の変動値 [N] である。

次に線形化近似を行った電磁石吸引力に関する方程式および電磁石回路方程式は以下ようになる⁽⁵⁾。

$$f_n = \frac{F_n}{Z_0} z(x_m, y_m) + \frac{F_n}{I_n} i_n \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} i_n = -\frac{L_{eff} I_n}{L_z Z_0^2} \frac{d}{dt} z(x_m, y_m) - \frac{R_z}{2L_z} i_n + \frac{1}{2L_z} v_n \quad (3)$$

$$L_z = \frac{L_{eff}}{Z_0} + L_{lea} \quad (4)$$

ここで F_n : 平衡浮上状態においてペアの電磁石の両方から発生する静的吸引力の合計値 [N], Z_0 : 平衡浮上状態における電磁石表面と鋼板表面とのギャップ [m], I_n : 平衡浮上状態における電磁石コイルの定常電流値 [A], i_n : 電磁石コイルの定常電流からの変動値 [A], L_z : 平衡浮上状態における電磁石コイル 1 個当りのインダクタンス [H], R_z : ペアの電磁石コイルの総抵抗値 [Ω], x_m, y_m : センサの位置 [m], v_n : 電磁石コイルの定常電圧からの変動値 [V], L_{eff}/Z_0 : 電磁石 1 個当りにおける有効インダクタンス [H], L_{lea} : 電磁石 1 個当りの漏れ磁束 [H] である。

3.2 連続体モデル⁽⁶⁾

連続体モデルでは 5 か所の電磁石位置で検出した変位、速度、電磁石コイル電流の合計 15 個の検出値を 5 か所のそれぞれの電磁石に対してフィードバックする統合制御を実施する。鋼板の重力を各電磁石の静的吸引力によって支持すれば、鋼板が電磁石から一定の距離に保たれる平衡状態が存在する。そこからの鉛直方向変位を $z(x, y)$ とすると、鋼板に対する運動方程式は以下ようになる。

$$\rho h \frac{\partial^2}{\partial t^2} z + \frac{Ch^3}{12} \frac{\partial}{\partial t} \nabla^4 z + D \nabla^4 z = \sum_{n=1}^5 f_n(t) \{ \delta(x - x_{a1n}) \delta(y - y_{a1n}) + \delta(x - x_{a2n}) \delta(y - y_{a2n}) \} \quad (5)$$

$$\nabla^4 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4}$$

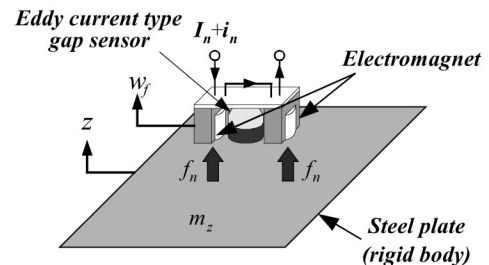


Fig.3 Theoretical model of levitation control of the steel plate.

ここで $D = Eh^3/12(1-\nu^2)$, $f_n(t)$: 各電磁石の吸引力の変動値 [N], h : 鋼板の厚さ [m], t : 時間 [s], $z(x, y)$: 鋼板の平衡浮上位置からの鉛直方向変位 [m], x : 鋼板の長手方向の座標 [m], x_{a1n} , x_{a2n} : ペアの電磁石の x 方向の位置 [m], y : 鋼板の幅方向の座標 [m], y_{a1n} , y_{a2n} : ペアの電磁石の y 方向の位置 [m], $\delta(\cdot)$: デイラックのデルタ関数 [1/m], ν : ポアソン比, ρ : 鋼板の密度 [kg/m³], E : 鋼板の縦弾性係数 [N/m²], C : 鋼板の内部減衰係数 [Ns/m] である。

なお電磁石吸引力, 回路方程式は一自由度モデルの場合と同様にして導出する。

4. 状態方程式

4.1 一自由度モデルの状態方程式

状態変数として鋼板の変位, 速度および電磁石コイル電流を採用し, 式(1)~(4)を整理して以下のような状態方程式を得る。

$$\dot{z} = \mathbf{A}_z z + \mathbf{B}_z v_n \quad (6)$$

$$z = [z \quad \dot{z} \quad i_n]^T$$

$$\mathbf{A}_z = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{2F_n}{m_z Z_0} & 0 & \frac{2F_n}{m_z I_n} \\ 0 & -\frac{L_{eff}}{L_z} \cdot \frac{I_n}{Z_0^2} & -\frac{R_n}{2L_z} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{2L_z} \end{bmatrix}^T$$

4.2 連続体モデルの状態方程式

薄鋼板の平衡浮上位置からの変位 $z(x, y)$ は, 固有関数 $\phi_i(x, y)$ と基準座標 $W_i(t)$ ($i = 1 \sim M$) を用いてモード展開する。また, 鋼板の固有関数は x 方向, y 方向にそれぞれ独立な両端自由梁の固有関数の積 $X_{mm}(x) \cdot Y_{nn}(y)$ ($mm, nn = 1, 2, \dots$) で表すことができると仮定する。ただし, 磁気浮上対象は x 軸方向がカーボンファイバー製パイプにより補強されているため y 軸方向の弾性振動のみを考慮してモード展開を行う。また, 本研究ではセンサ数が5個であるため $M=5$ とし, 5次モードまで(弾性一次モード)の固有関数を定義する (Fig.4)。以下にモード展開式を示す。

$$z(x, y) = \sum_{i=1}^M \phi_i(x, y) W_i(t) \quad (7)$$

$$\phi_i(x, y) = X_{mm}(x) \cdot Y_{nn}(y) \quad (mm, nn = 1, 2, \dots) \quad (8)$$

$$X_1(x) = 1 \quad (9)$$

$$X_2(x) = \frac{\sqrt{3}}{a} (2x - a) \quad (10)$$

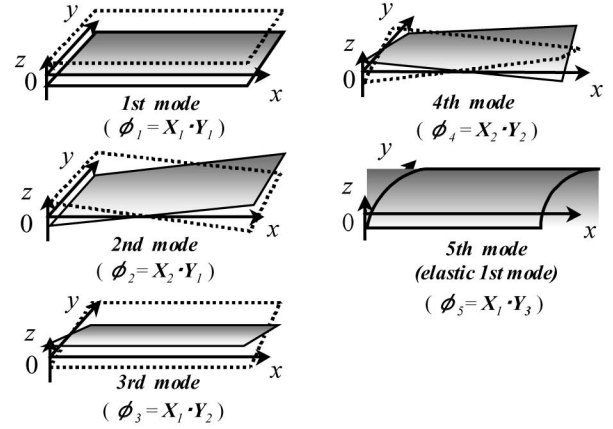


Fig.4 Mode shape of the magnetically levitated steel plate for the continuous model.

$$Y_1(y) = 1 \quad (11)$$

$$Y_2(y) = \frac{\sqrt{3}}{b} (2y - b) \quad (12)$$

$$Y_{nn}(y) = \cos \frac{\lambda_{y,nn}}{b} y + \cosh \frac{\lambda_{y,nn}}{b} y + \frac{\sin \lambda_{y,nn} + \sinh \lambda_{y,nn}}{\cos \lambda_{y,nn} - \cosh \lambda_{y,nn}} \left(\sin \frac{\lambda_{y,nn}}{b} y + \sinh \frac{\lambda_{y,nn}}{b} y \right) \quad (13)$$

$$\cosh \lambda_{y,nn} \cdot \cos \lambda_{y,nn} = 1 \quad (nn = 3, 4, \dots) \quad (14)$$

$$f_{y,nn} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\lambda_{y,nn}}{b} \right)^2 \sqrt{\frac{D}{\rho h}} \quad (15)$$

状態変数として鋼板の各振動モードの基準座標とその時間微分値および各電磁石コイル電流の定常値からの変動分を選ぶ。一方観測値は, 各非接触変位計位置での鋼板の変位 $z(x_{sn}, y_{sn})$ とその時間微分値および各電磁石コイル電流の定常値からの変動分である。式(7)を式(2)~(5)に代入し固有関数の直交条件を用いて整理すると, 以下に示す式を得る⁽⁷⁾。

$$\dot{\mathbf{W}} = \mathbf{A}_w \mathbf{W} + \mathbf{B}_w v \quad (16)$$

$$\mathbf{w} = \mathbf{C}_w \mathbf{W} \quad (17)$$

$$\mathbf{W} = [W_1 \dots W_M \quad \dot{W}_1 \dots \dot{W}_M \quad i_1 \dots i_5]^T$$

$$\mathbf{v} = [v_1 \dots v_5]^T$$

$$\mathbf{w} = [w_1 \dots w_5 \quad \dot{w}_1 \dots \dot{w}_5 \quad i_1 \dots i_5]^T$$

5. 制御理論

5.1 離散時間系最適制御⁽⁸⁾

離散時間系で記述された1自由度磁気浮上系の状態方程式は次式ようになる。

$$z_d(i+1) = \Phi_z z_d(i) + \Gamma_z v_{zd}(i) \quad (18)$$

制御系を離散時間系で構成するため、離散時間系の最適制御理論に基づいて最適制御則を求める。離散時間系の評価関数は次のように表される。

$$J_{zd} = \sum_{i=0}^{\infty} [z_d(i)^T Q_{zd} z_d(i) + r_{zd} v_{zd}(i)^2] \quad (19)$$

ここで Q_{zd} : 変位、速度および電磁石コイル電流に関する重み係数を要素とする行列, r_{zd} : 制御入力に関する重み係数である。式(19)を最小にする離散時間系最適制御則は次の離散時間系 Riccati 型代数方程式

$$M_z = \Phi_z^T M_z \Phi_z + Q_{zd} - \Phi_z^T M_z \Gamma_z (r_{zd} + \Phi_z^T M_z \Gamma_z)^{-1} \Phi_z^T M_z \Phi_z \quad (20)$$

において正定対称解 M_z を求めることで得られ、

$$v_{zd}^o = -F_{zd} z_d \quad (21)$$

$$F_{zd} = (r_{zd} + \Gamma_z^T M_z \Gamma_z)^{-1} \Gamma_z^T M_z \Phi_z$$

$$\Phi_z(T_s) = \exp(A_z T_s), \Gamma_z(T_s) = \int_0^{T_s} [\exp(A_z \tau)] d\tau B_z$$

であり、 T_s はサンプリング時間(0.2ms)である。本研究では離散系 Riccati 型代数方程式の解を求める際、MATLAB-toolbox (The Math Works, Inc) の lqrd を使用した。

5.2 離散時間系スライディングモード制御⁹⁾

本研究では外乱に対してロバスト性を有するスライディングモード制御を磁気浮上系に対して適用する。最適制御理論適用時と同様に、コントローラはコンピュータ内で実現されるため離散時間系の制御系設計を行う。

切換関数を次式で表すことにする。

$$\sigma(i) = S_d z_d(i) \quad (22)$$

また、等価制御入力は次式となる。

$$v_{eq}^s(i) = -(S_d \Gamma_z)^{-1} S_d (\Phi_z - I) z_d(i) \quad (23)$$

よって等価制御系は次のように表すことができる。

$$z_d(i+1) = \left\{ \Phi_z - \Gamma_z (S_d \Gamma_z)^{-1} S_d (\Phi_z - I) \right\} z_d(i) \quad (24)$$

S_d は式(24)のシステムが安定になるように選択する必要がある。本研究ではこの設計法にシステムの零点を利用する方法を用いる。安定余裕を指定した連続時間系システム (A_z^s, B_z) を離散化して得られるシステム (Φ_z, Γ_z) を考え、これに対して離散時間系最適制御理論を適用し S_d を得る。ここで安定余裕を指定したシステム A_z^s は次式で表される。

$$A_z^s = A_z + \varepsilon I \quad (25)$$

また、 S_d は次式により求まる。

$$S_d^T = (r_{zd}^s + \Gamma_z^T M_z^s \Gamma_z)^{-1} \Gamma_z^T M_z^s \Phi_z \quad (26)$$

ただし、 M_z^s は正定な重み係数行列に対する式(19)に示す離散時間系 Riccati 型代数方程式の正定解である。この S_d により等価制御系式(24)は安定となる。

続いて状態を超平面に収束させ、スライディングモードを発生させる制御入力を考える。離散時間系での設計においてはチ

ャタリングを低減させる設計法¹⁰⁾が提案されているため、本研究ではその方法を用いる。この条件を満たすようなスライディングモード制御則として次のように与えられるものを用いる。

$$\left. \begin{aligned} v_{zd}^s(i) &= v_{eq}^s(i) + v_m^s(i) \\ v_{eq}^s(i) &= -(S_d \Gamma_z)^{-1} S_d (\Phi_z - I) z_d(i) \\ v_m^s(i) &= -\{\alpha(i) + \beta(i)\} \text{sgn}\{\sigma(i)\} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

ここで

$$\alpha(i) = \eta \frac{\|\sigma(i)\|}{\|S_d \Gamma_z\|}, \quad 0 < \eta < 2, \quad \beta(i) \geq F_{max} \quad (28)$$

F_{max} : 外乱の最大値

である。

6. 制御実験

6.1 実験装置緒元

本研究における各パラメータの値は以下の通りである(実測値)。

$m=1.08\text{kg}$, $Z_0=5\text{mm}$, $F_z=1.85\text{N}$ (但し No.5 の電磁石のみ $F_z=3.21\text{N}$), $F_1 \sim F_4=1.85\text{N}$, $F_5=3.21\text{N}$, $R_z=20.6\ \Omega$, $\rho=7500\text{kg/m}^3$, $E=217\text{GPa}$, $\nu=0.3$, $C=2.49 \times 10^8\ \text{Ns/m}$, $L_z=0.225\text{H}$, $L_{eff}=1.8 \times 10^4\text{Hm}$, $L_{leo}=0.1891\text{H}$

6.2 制御系パラメータの決定方法¹¹⁾

本研究では、最適制御を一自由度、連続体モデルに適用した場合と、スライディングモード制御を一自由度、連続体モデルに適用した4つパターンについて検討を行う。そこで、比較する制御系の基準として電磁石が設置されたフレームが振動した際の応答を用いる。実験では鋼板を磁気浮上させた後、Fig.2に示すフレーム No.2のみを不規則加振するものとした。Fig.5に実験を行った際のフレーム No.2 の鉛直方向変位の時刻とそのパワースペクトル密度を示す。変位の標準偏差は約0.1mmである。Fig.6にフレームを強制加振した際、鋼板中央部の電磁石 No.5 のセンサから検出した鋼板中央部の変位の時刻歴とそのパワースペクトル密度を示す。Fig.6(a)は一自由度モデルに対して最適制御を適用した場合、(b)は連続体モデルに対して最適制御を適用した場合、(c)は一自由度モデルに対してスライディングモード制御を適用した場合、(d)は連続体モデルに対してスライディングモード制御を適用した場合の制御系に対して実験を行った結果である。時刻歴の縦軸ゼロは鋼板の平衡浮上位置、即ち電磁石表面と鋼板の距離が5mmであることを示している。Fig.6(a)~(d)を比較すると時間、周波数双方の領域において応答がほぼ同様となっていることを確認できる。このときの各制御系のパラメータを以下に示す。

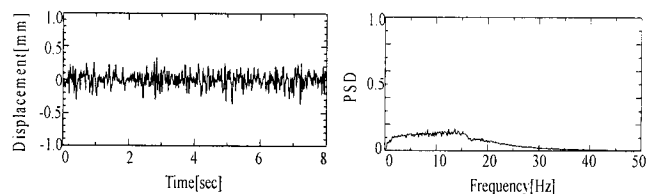


Fig.5 Time history and power spectrum of displacement at frame No.2.

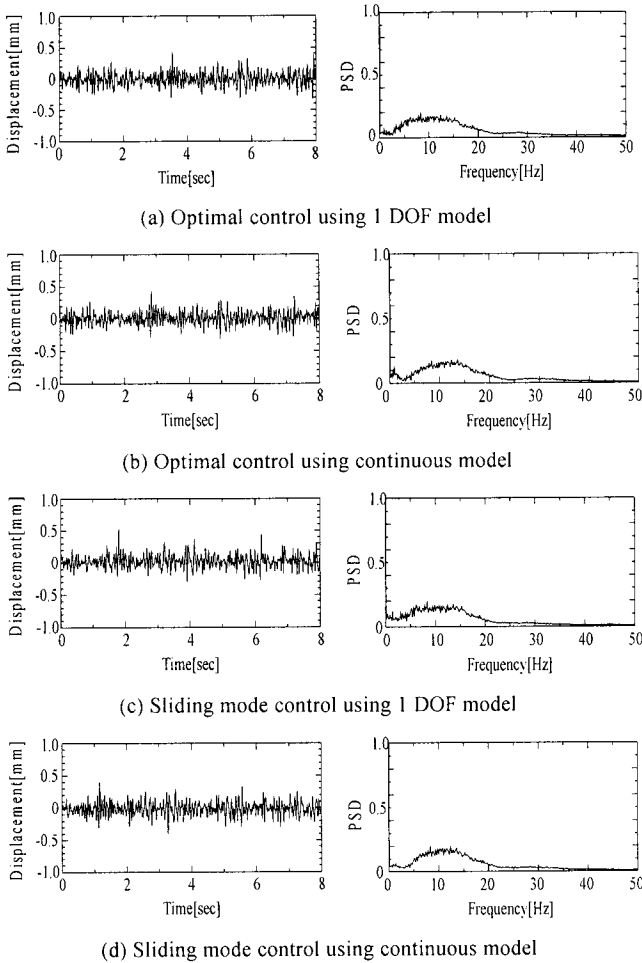


Fig.6 Time histories and power spectrums of displacement at center of the steel plate under random excitation from frame No.2.

最適制御 (式 (21)) における重み行列:

- ・一自由度モデル: $Q_{2d}^{l,opt} = I, r_{2d}^{l,opt} = 1$
- ・連続体モデル: $Q_{2d}^{c,opt} = I, r_{2d}^{c,opt} = 1$

スライディングモード制御における切換関数 S_d を決定する際に用いる重み行列 (式 (21)), 並びに式 (30) における非線形入力項におけるパラメータ:

- ・一自由度モデル: $Q_{2d}^{l,smc} = I, r_{2d}^{l,smc} = 1, \eta = 0.05, \beta = 3$
- ・連続体モデル: $Q_{2d}^{c,smc} = I$ (但し, $Q_{2d}^{c,smc}$ (10,10)成分のみ 4.7×10^4), $r_{2d}^{c,smc} = 1, \eta = 0.05, \beta = 3$

以後の実験は上述の制御系にて行うものとした。

6.3 制御信号への外乱入力実験

本実験では薄鋼板磁気浮上系におけるスライディングモード制御の制御信号への外乱に対するロバスト性実現および、連続体モデルを適用することによる弾性一次モード振動抑制の可能性についての検証を行う。

6.3.1 固有振動数

一自由度モデル・最適制御適用時の制御系で鋼板を浮上させ、その時の各制御入力での速度フィードバックゲインを元の値の30%としたときに浮上実験を行い、浮上中の鋼板における弾性一次モードの固有振動数を確認した。Fig.7 に実験を行った際の鋼板中央部変位の時刻歴とそのパワースペクトル密度を示す。これにより浮上中の鋼板に生じる弾性一次モードがおおよそ4.0Hzであることを推定した。

6.3.2 最悪外乱入力に関する考察

制御信号への外乱入力実験では最悪な状況での制御性能に関する検討を行うため、Function Generator によって作成した4.0Hzの正弦波を弾性一次モードの腹にあたる鋼板中央部の電磁石 No.5の制御入力のみに加えた。振幅は約0.05Aであり、これは定常状態での電流値のおよそ10%に相当する。Fig.8 に実験結果の一例として一自由度モデルに対して最適制御を適用し制御実験を行った際の鋼板中央部変位の時刻歴とそのパワースペクトル密度を示す。

Table 1 は各制御手法適用時において上述の実験を行った場合の鋼板中央部変位の標準偏差をまとめたものである。また、一自由度モデル最適制御適用時の標準偏差を100%とした際の各手法適用時の値を百分率で示している。結果より、一自由度モデル、連続体モデル共にスライディングモード制御適用時では最適制御適用時と比較して標準偏差を低減していることが確認できる。不確かさやパラメータ変動に強いスライディングモード制御を適用することで制御入力へのノイズがキャンセルされ、より優れた制御系を実現出来ていることがわかる。

また鋼板に励起された一次モードの振動は連続体モデルにおいて有効に制振されるため、スライディングモード制御、最適制御共に一自由度モデル適用時と比べ連続体モデルが優位に振動を減少させていることが確認できる。

以上よりスライディングモード制御と連続体モデルを同時に適用することで制御入力への外乱抑制と鋼板に励起する弾性振動の抑制を同時に実現出来ることが明らかになった。

6.3.3 ステップ外乱入力に関する考察

次にステップ状の外乱を制御入力に加えた場合の検討も行った。さらに数値シミュレーションとの比較を行い実験結果の妥当性の検討もあわせて行った。外乱のステップ幅は0.05Aである。Fig.9 にステップ外乱を制御入力に加えた際の鋼板中央部における変位の時刻歴を示す。Fig.9 (a)は一自由度モデル・最適制御、(b)は連続体・最適制御、(c)は一自由度モデル・スライディングモード制御、(d)は連続体モデル・スライディングモード制御を適用した場合の制御系での実験および数値シミュレーション結果を示している。Fig.9(a)~(d)を比較するとTable 1の結果

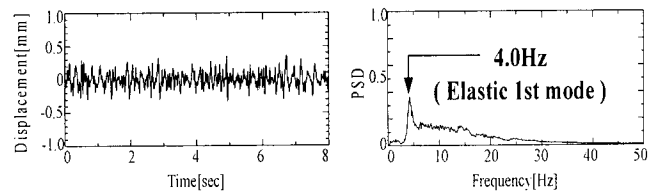


Fig.7 Time history and power spectrum of displacement at center of the steel plate under preliminary experiment.

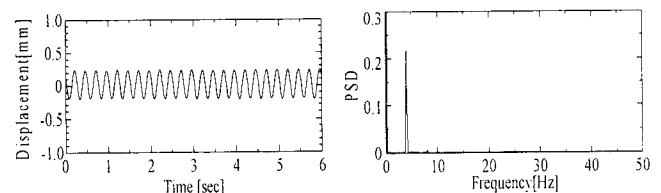


Fig.8 Time history and power spectrum of displacement at center of the steel plate.

Table 1 Relative decreasing ratio of the standard deviation on time history (In case that the disturbance was applied for the control input).

Theory and model	Standard deviation (mm)	Relative decreasing ratio
Optimal control using 1DOF model	5.15×10^{-2}	100%
Optimal control using continuous model	4.25×10^{-2}	83%
Sliding mode control using 1DOF model	3.23×10^{-2}	63%
Sliding mode control using continuous model	2.85×10^{-2}	55%

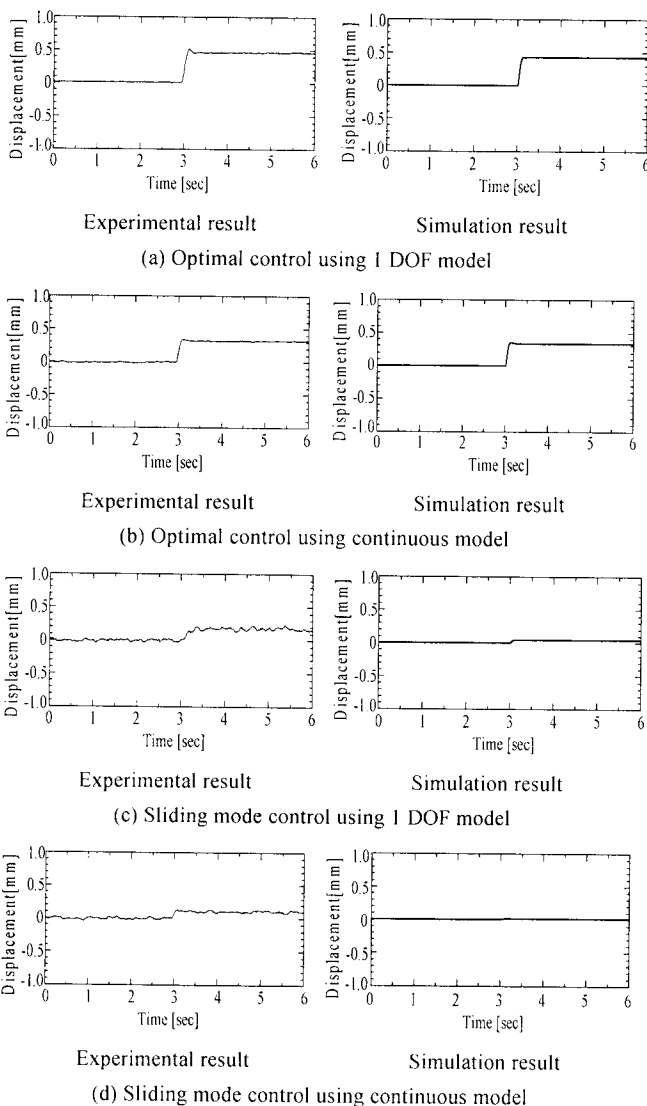


Fig.9 Experimental results and numerical simulation results of step response.

と同様に最適制御適用時と比較してスライディングモード制御適用時では平衡点からの変位の変動値が小さくなっていることが確認できる。また数値シミュレーションもほぼ同様の結果を示していることから本報告で得られた結果が妥当なものであることを確認できた。

7. 結言

本研究では薄鋼板磁気浮上系の外乱抑制システム構築を目指し、連続体モデルに対するスライディングモード制御適用の可能性について検討を行った。その結果、スライディングモード制御と連続体モデルを同時に制御系に対し適用することで制御入力への外乱抑制と鋼板に励起する弾性一次モード振動の抑制を同時に実現出来ることが明らかになった。

今後はフレームからの振動絶縁システムの実現を目指した基礎的な検討、また H_{∞} 制御理論などの制御理論を適用することでより優れた制御系を構築していく。

謝辞

本研究に際して東海大学大学院 小畑隆之氏、小堀正樹氏、太田伸行氏、東海大学学部生 ムハマド・ラムズル氏、早川明秀氏に多大な協力を得た。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- (1) 森下, 明石:「磁気浮上鋼板の傾斜案内実験」, 電気学会全国大会講演論文集, (1997), pp.183-184.
- (2) 林屋, 大崎, 正田:「鋼板の非接触搬送に関する諸方式の検討」, 第 9 回電磁力ダイナミックスシンポジウム, (1997), pp.409-410.
- (3) 浜, 中川:「浮上ギャップ長変更による薄鋼板の水平制御に関する基礎研究」, 第 10 回電磁力関連のダイナミックスシンポジウム講演論文集, (1998), pp.437-442.
- (4) V.I.Utkin:「Sliding modes in control and optimization」, Springer-Verlag, (1992).
- (5) 押野谷, 石橋, 小畑:「磁気浮上薄鋼板の外乱抑制に関する実験的考察(一自由度モデルに対するスライディングモード制御の適用)」, 日本 AEM 学会誌, Vol.9, No.4, (2001), 516-523.
- (6) 押野谷, 石橋, 小畑:「四辺自由鋼板の非接触振動制御」, 日本 AEM 学会誌, Vol.9, No.3, (2001), pp.378-383.
- (7) Oshinoya, Obata:「Noncontact Vibration Control of a Magnetic Levitated Rectangular Thin Steel Plate」, JSME International Journal, Vol.45, No.1, (2001), pp.60-69.
- (8) 例えば, 土谷, 江上:「現代制御工学」, 産業図書, (1991).
- (9) 野波:「スライディングモード制御」, コロナ社, (1994).
- (10) 野波, 仁科, 斎藤:「ゼロパワー磁気軸受系の離散時間スライディングモード制御」, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.62, No.595, (1996), pp.157-165.
- (11) 押野谷, 石橋, 小畑:「磁気浮上鋼板の振動絶縁に関する基礎的検討」, 第 12 回 MAGDA コンファレンス講演論文集, (2003), pp.145-150.