

# 薄鋼板磁気浮上システムにおける振動絶縁制御 (剛体鋼板に対する基礎的検討)

長谷川真也<sup>\*1</sup>・押野谷康雄<sup>\*2</sup>・石橋一久<sup>\*3</sup>

## Vibration isolation control of electromagnetic levitation system for thin steel plate (Basic research on rigid steel plate)

by

Shinya HASEGAWA, Yasuo OSHINOYA and Kazuhisa ISHIBASHI

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

### Abstract

In thin steel plates used in many industrial products, flaws on the plate surface and peeling during a surface treatment process are induced due to the use of many rollers in the conveyance process. These lead to the deterioration of the quality of the plate surface. Electromagnetic levitation techniques can solve many problems in the conveyance modes of sheet steel. The authors have proposed a magnetic levitation control system for maintaining the relative distance of the plate surface and the electromagnet, and carried out an experiment on digital control. In this study, the equipment was designed so that electromagnets, which are used for the magnetic levitation of a steel plate, vibrate vertically. For basic research, a controlled object was assumed to be a single-degree-of-freedom model and PD control was used as the control method. The vibration isolation effect observed in the steel plate was confirmed by experimentation and simulation.

**Keywords:** Steel plate, electromagnetic levitation, vibration isolation, rigid body, PD control

### 1. 緒言

各種の工業製品に広く用いられている薄鋼板の搬送工程では現在主にローラが用いられているが、これを使用すると傷やめっきのはく離などの問題が発生し品質の劣化を招く恐れがある。この問題の解決方法として、電磁力による鋼板の非接触支持搬送が考えられ、近年では磁気浮上搬送技術に関する研究が活発に行われている<sup>(1)(2)(3)</sup>。しかし磁気浮上搬送する際、電磁石を設置しているフレームからの外乱や制御信号へのノイズにより浮上中の鋼板に予期せぬ弾性振動が発生し、落下してしまう恐れがあるのは容易に想像できる。このような外乱を出来る限り除去しなければならないのは言うまでもない。この問題を解決するため、著者らはこれまでに浮上中の鋼板へ強制的に外乱を入力し弾性振動を発生させ、その抑制効果について実験的検討を行ってきた。これまでの研究では、支持用電磁石表面に鋼板が接触しないようにその相対距離を一定に維持する、すなわち電磁石との衝突による表面品質劣化を避けるための制御系を設計し、その実現性を確認してきた<sup>(4)(5)</sup>。

また、一方のニーズとして、めっきや化粧処理直後の鋼板をロボットアーム等で搬送することを想定した場合、鋼板の弾性振動に起因する塗装むら発生防止が挙げられる。そのためには鋼板が鉛直方向の絶対座標軸上で静止していることが要求される。そこでこれに応えるべく、フレームの振動を絶縁する制御系すなわち、鋼板の絶対変位を一定に維持することが可能な制御装置を製作している<sup>(6)</sup>。本報告では電磁石を設置しているフレームにステップ入力及び不規則加振を加え、その外乱に対する振動絶縁性能を数値シミュレーションと実験によって検討し、モデル化と制御系設計の妥当性を検証する。その第1ステップという位置付けから、浮上対象は弾性振動の影響を取り除いた剛体鋼板とし、基礎的検討を行う。

### 2. 振動絶縁制御システム

制御システムを Fig. 1 に示す。本研究では長さ 800mm、幅 600mm、厚さ 0.3mm である長方形亜鉛めっき鋼板(材質 SS400)を磁気浮上対象とする。実験装置の概略図を Fig. 2 に示す。3台の加振器によってそれぞれ独立に上下加振させることが可能な3本のフレームに、電磁石、渦電流式非接触変位センサからなるユニットを設置してある。この3本のフレーム変位を検出

\*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

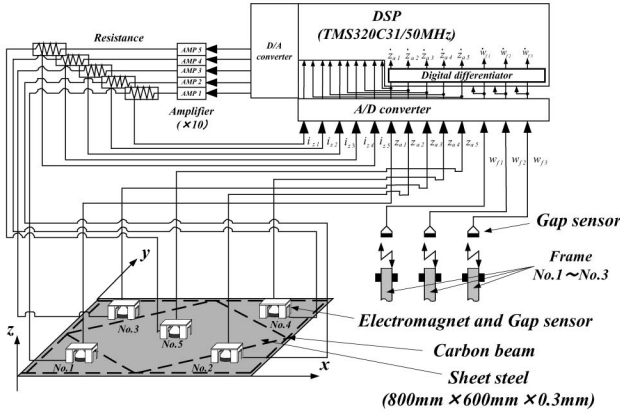


Fig.1 Electromagnetic levitation control system.

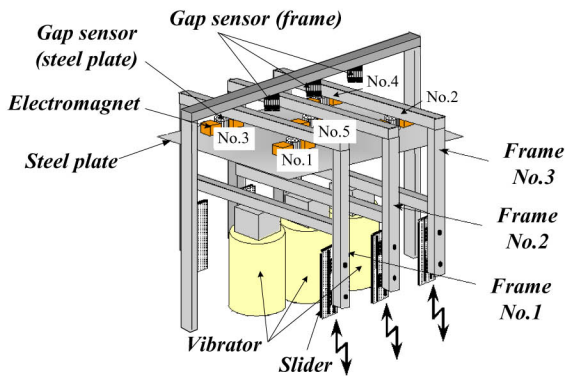


Fig.2 Experimental apparatus.

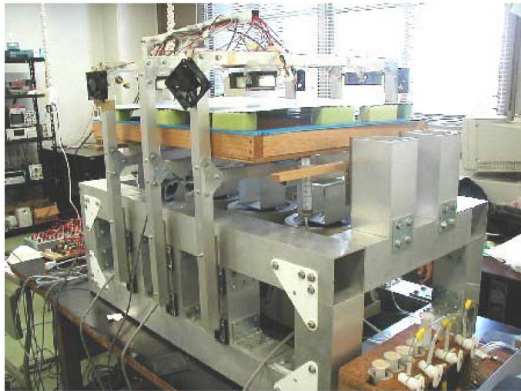


Fig.3 Photograph of the electromagnetic levitation control system.

するために別途 3 個の非接触変位センサが設置してある。長方形薄鋼板を 5 か所の電磁石により吊り下げようにして非接触支持するため鋼板の絶対変位、電磁石コイル電流の定常値からの変動分の観測値およびデジタル微分した絶対速度をフィードバックし、制御電圧を計算する。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、鋼板変位が絶対座標上で一定となるように磁気浮上させる。Fig. 3 に実験装置全体の写真を示す。

Fig. 4 は任意の 1 か所の電磁石位置における鋼板の絶対変位検出方法の説明図である。電磁石と同じフレームに設置してあ

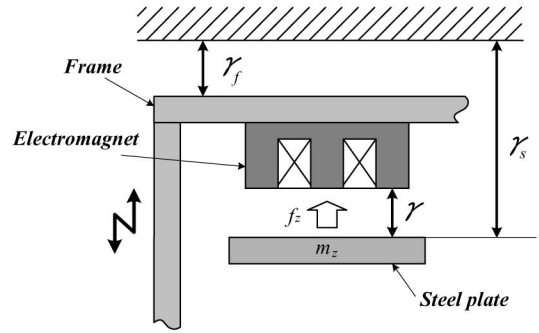


Fig.4 Measurement procedure of absolute displacement of the plate.

る変位センサによって電磁石表面と鋼板との相対変位  $\gamma$  を検出する。同時にこのフレームの絶対変位  $\gamma_f$  を、床を基準面として設置している別の変位センサによって検出し、これらの和から鋼板の絶対変位  $\gamma_s$  を得ている。鋼板は 3 本の電磁石設置フレームが静止している基準状態で、各電磁石表面から 5mm の絶対位置に浮上させる。

また第 1 章で述べたように、フレームに対する振動の絶縁効果をより明確にするために、カーボンファイバー製中空パイプ（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 10%）を Fig. 1 の点線で示したように鋼板に取り付け弾性振動の発生を抑制し、浮上対象を剛体とみなした。

### 3. モデリングと基礎方程式

本論文では 1 か所の電磁石位置での鋼板の絶対変位、絶対速度、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。そこで鋼板を仮想的に 5 つに分割し、それぞれを浮上させる一自由度系として Fig.5 のようにモデル化する。同図に示したように電気回路が直列接続した 2 つの電磁石の中央に渦電流式センサを配置した。Fig. 6 に使用した E 型電磁石鉄心の仕様を示す。本研究では渦電流による熱損失は無視できるものとしてフェライト製の鉄心を使用した。なお、電磁場によるセンサの測定誤差や、2 個の離れた場所に設置してある電磁石から同じ吸引力が発生することによる制御性能への影響はほとんどないことを確認している。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位置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絶対  $z_o$  に関する運動方程式は以下ようになる。

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

ここで、 $m_z = m/5$  ( $m$ : 磁気浮上対象の質量)、 $z_o$ : 薄鋼板の平衡浮上位置からの絶対変位、 $f_z$ : 電磁石 1 個当たりの吸引力の変動値である。 $f_z$  は以下の手順で導出する。

電磁石 1 個当たりのコイルのインダクタンス  $L_z$  を次式のように、鋼板と電磁石のギャップ  $Z$  に反比例する成分  $L_{z\text{eff}}/Z$  と磁束の漏れに相当する成分  $L_{z\text{lea}}$  の和として近似する。

$$L_z(Z) = \frac{L_{z\text{eff}}}{Z} + L_{z\text{lea}} \quad (2)$$

電磁石吸引力  $F_z$  は次式のように表すことができる。

$$F_z(Z, I_z) = -\frac{\partial}{\partial Z} \left\{ \frac{1}{2} L_z(Z) \cdot I_z^2 \right\} = \frac{L_{z\text{eff}} I_z^2}{2Z^2} \quad (3)$$

本研究では線形制御理論を適用するために、平衡点近傍での

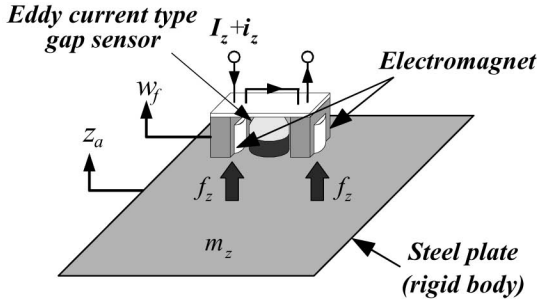


Fig.5 Single-degree-of-freedom model of levitation control of the steel plate.

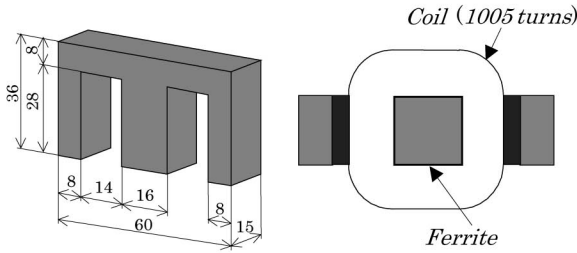


Fig.6 Specification of the electromagnet core.

微小変化を考え線形化を行う。ここで、 $Z_0$ ：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、 $I_{z0}$ ：静的吸引力を得るための定常電流、 $F_{z0} : Z_0, I_{z0}$ における静的吸引力、 $z_\gamma$ ：薄鋼板の平衡浮上位置からのギャップ、 $i_z$ ：電磁石コイル電流の変動値とすると

$$Z = Z_0 + z_\gamma \quad (4)$$

$$I_z = I_{z0} + i_z \quad (5)$$

$$F_{z0} = F_z(Z_0, I_{z0}) = \frac{L_{zeff} I_{z0}^2}{2Z_0^2} \quad (6)$$

となる。吸引力  $F_z(Z, I_z)$  を平衡点  $(Z_0, I_{z0})$  近傍でテーラー展開し整理すると、平衡状態の鋼板に加わる吸引力の変動分  $f_z$  は次式で示される。

$$f_z = -\frac{2F_{z0}}{Z_0} z_\gamma + \frac{2F_{z0}}{I_{z0}} i_z \quad (7)$$

また電磁石に加える電圧  $V_z$  とコイルに流れる電流  $I_z$  の関係は、電磁石コイルの抵抗値を  $R_z$  とすると

$$V_z(Z, I) = R_z I_z + \frac{d}{dt} \{L_z(Z) \cdot I_z\} \quad (8)$$

である。吸引力の式と同様に平衡点  $(Z_0, I_{z0})$  近傍でテーラー展開すると、電磁石コイルに加わる定常電圧からの変動値  $v_z$  は

$$v_z = R_z i_z + L_{z0} \frac{d}{dt} i_z - L_{zeff} \cdot \frac{I_{z0}}{Z_0^2} \frac{d}{dt} z_\gamma \quad (9)$$

となる。ただし  $L_{z0}$  は平衡浮上状態における電磁石コイルのインダクタンスであり、以下の式で表せる。

$$L_{z0} = L_z(Z_0) = \frac{L_{zeff}}{Z_0} + L_{zlea} \quad (10)$$

鉛直方向絶対変位  $z_a$  とギャップ増減値  $z_\gamma$  の関係は鉛直上向きを正とし、電磁石を設置しているフレームの定常位置からの変動分を  $w_f$  とすると

$$z_a - w_f = -z_\gamma \quad (11)$$

の関係があることから、式 (7)、(9) に式 (11) を代入し整理すると以下の式を得る。

$$f_z = \frac{2F_{z0}}{Z_0} (z_a - w_f) + \frac{2F_{z0}}{I_{z0}} i_z \quad (12)$$

$$\frac{d}{dt} i_z = -\frac{L_{zeff}}{L_{z0}} \cdot \frac{I_{z0}}{Z_0^2} (\dot{z}_a - \dot{w}_f) - \frac{R_z}{L_{z0}} i_z + \frac{1}{L_{z0}} v_z \quad (13)$$

なお本研究では  $Z_0 = 5\text{mm}$ 、 $I_{z0} = 0.5\text{A}$  として式(12)、(13)の線形化近似を行った。

## 4. 状態方程式

状態変数として鋼板の絶対変位、絶対速度、電磁石コイル電流、フレーム変位、速度を採用し、式(1)、(12)、(13)を整理して以下のような状態方程式を得る。

$$\dot{z}_a = \mathbf{A}_z z_a + \mathbf{B}_z v_z + \mathbf{D}_z w_f \quad (14)$$

ただし

$$z_a = [z_a \quad \dot{z}_a \quad i_z]^T$$

$$w_f = [w_f \quad \dot{w}_f]^T$$

$$\mathbf{A}_z = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{4F_{z0}}{m_z Z_0} & 0 & \frac{4F_{z0}}{m_z I_{z0}} \\ 0 & -\frac{L_{zeff}}{L_{z0}} \cdot \frac{I_{z0}}{Z_0^2} & -\frac{R_z}{L_{z0}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{L_{z0}} \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{D}_z = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{4F_{z0}}{m_z Z_0} & 0 \\ 0 & \frac{L_{zeff}}{L_{z0}} \cdot \frac{I_{z0}}{Z_0^2} \end{bmatrix}$$

なお本研究では、磁気浮上システムにおける制御電圧  $v_z$  の決定に PD 制御<sup>9)</sup>を適用する。このときのフィードバック係数行列は以下ようになる。

$$\mathbf{F}_b = [f_{bz} \quad f_{bzv} \quad 0] \quad (15)$$

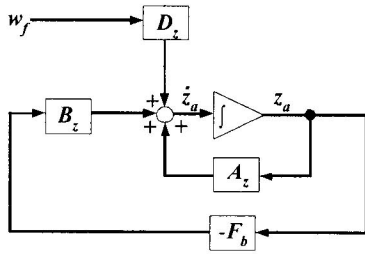


Fig.7 Block diagram of the feedback control system.

ここで  $f_{bz}$ ,  $f_{bzv}$  は磁気浮上制御における鋼板の絶対変位, 絶対速度に対するフィードバックゲインであり, 最後の 0 はコイル電流に関するフィードバックゲインである. 本研究では基礎的な検討を行うため, あえて電流フィードバックは実施せず変位と速度のみをフィードバックする制御系を設計する. 制御系全体のブロック線図を Fig. 7 に示す.

## 5. 制御実験

### 5.1 電磁石特性

浮上用電磁石におけるコイル電流と鋼板への吸引力の関係を調べるため, 電磁石コイル電流を変化させたときの電磁石吸引力を計測した (電磁石表面と鋼板表面とのギャップは 5mm とし一定に保った). Fig. 8 に電磁石コイル電流 (二乗値) と吸引力との関係を示す. 同図より,  $I_{z0}=0.7A$  ( $I_{z0}^2=0.49A^2$ ) 程度までは電流の二乗値と吸引力がほぼ線形とみなせる領域が存在する. 一方, Fig. 9 は浮上用電磁石一個のステップ電圧に対するコイル電流の応答結果の一例である. 同図より, 電磁石回路の電気的時定数は約 13ms であり, 本制御系には十分な応答性を有していることを確認した.

### 5.2 実験装置諸元

本研究における各パラメータの実測値は以下の通りである.  
 $m=1.08kg$ ,  $F_{z0}=1.06N$ ,  $R_z=10.3\Omega$ ,  $L_{zeff}=1.06 \times 10^{-4}Hm$ ,  $L_{zlea}=0.1891H$ .

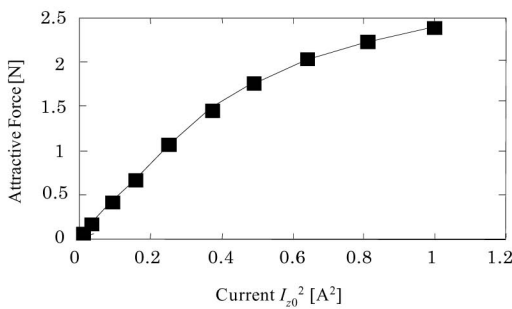


Fig.8 Characteristics of electromagnetic attractive force.

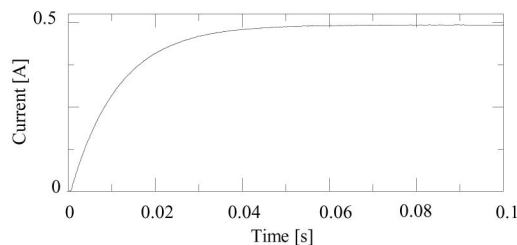


Fig.9 Step response of coil current of electromagnet.

実験の前段階として磁気浮上系の数値シミュレーションを実施した. その際, 式(14)の状態方程式に対して制御系設計ソフト MATLAB(The Math Works, Inc.)を用いて計算を行った. フィードバックゲインを変化させトライアルアンドエラーを繰り返しながら数値シミュレーションを実施し, 結果を比較しやすい, 比較的弱いフィードバックゲインと強いフィードバックゲインの 2 種類を探索した.

### 5.3 ステップ入力実験

本節においてはフレーム振動の鋼板に対する絶縁性能に対する基礎的な考察を行うため, 鋼板を浮上用電磁石から 5mm の平衡位置に浮上させた後, 電磁石を設置している 3 本のフレームに同一のステップ入力を加振器から加え, その際の磁気浮上性能に関する考察を行う. なおフレームに加えるオフセットは  $-1mm$  とした. これはフレーム未加振状態では鋼板表面から電磁石表面までの距離が 5mm であることから, その 20%に相当するオフセットである. その際のフレーム No.2 から検出した変位  $w_{f2}$  を Fig. 10 に示す. 同図において縦軸 0 は, フレームの定常位置である. また本節では, 数値シミュレーションと実験結果を比較することで第 3 章において構築したモデルの妥当性の検討も同時に行う. なお使用するフィードバックゲインは 5.2 節で記した方法に基づいて算出した(Table 1).

Fig. 11 は Table 1 におけるフィードバックゲイン No.1 を用いたときの実験結果である. 同図(a)は鋼板中央部の電磁石 No.5 と一緒に設置しているセンサから検出した鉛直方向絶対変位  $z_{a5}$  の時刻歴であり, (b)はその際のコイル電流  $i_{z5}$  である. また(a)の縦軸 0 は鋼板の絶対変位平衡浮上位置であることを示し, (b)の縦軸 0 は電磁石コイルに定常的に吸引力を発生させるための定常電流値 0.5A に相当する. (a)より横軸 4 秒付近においてフレームにステップ入力に加わり, 鋼板は絶対変位平衡浮上位置から鉛直上向きに約  $+0.5mm$  移動していることが確認できる. これは電磁石を設置しているフレームにマイナス方向のオフセットが加わることにより, 電磁石と鋼板との相対距離が縮まり鋼板に対する吸引力が増大したことに起因する. しかしながらフレームのオフセット  $-1mm$  に対し約 50%に鋼板変位を抑制しており, フレーム変位の鋼板への絶縁効果が確認できる.

Fig. 12 は Fig. 11 の実験と同様の条件に対する数値シミュレ

Table 1 Feedback gains for step response experiment and simulation.

	Feedback gain	
	$f_{bz}$ [V/m]	$f_{bzv}$ [V/(m/s)]
No.1	6300	260
No.2	10700	400

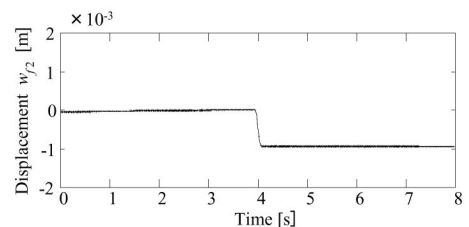


Fig.10 Displacement of the frame No.2.

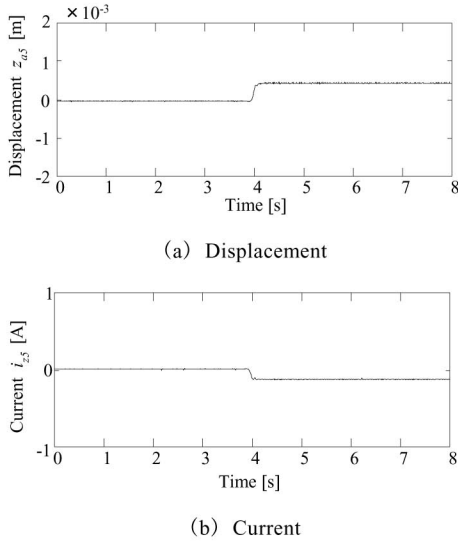


Fig.11 Step response of electromagnetic levitation control (experimental results using feedback gain No.1)

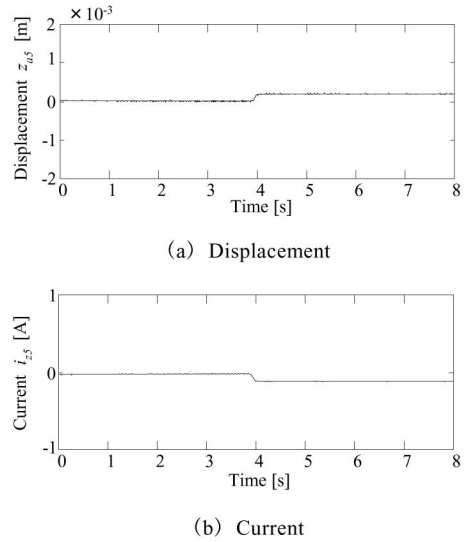


Fig.13 Step response of electromagnetic levitation control (experimental results using feedback gain No.2)

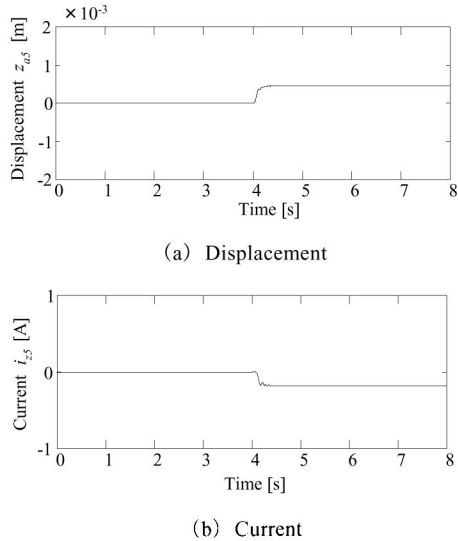


Fig.12 Step response of electromagnetic levitation control (simulated results using feedback gain No.1)

ーション結果である。Fig. 11 と Fig. 12 を比較すると、鉛直方向絶対変位、コイル電流ともに実験結果と良好な一致を示しており、第3章で構築した絶対変位系磁気浮上モデルの妥当性が確認できた。

またフィードバックゲインを適切に設定することによってさらにフレームのオフセットに対する鋼板変位を減少させることが可能である。そこでトライアルアンドエラーを繰り返しながら Table 1 における No.1 のゲインのチューニングを行い No.2 のゲインを決定し、これを用いて同様の実験を行った (Fig. 13)。同図における鋼板変位のオフセット量は約 0.25mm であり、フレーム変位の約 25%にまで鋼板変位を減少させている。また鋼板変位のオフセット量を減少させることにより、電磁石コイル電流のオフセットも同様に減少させることが可能となり、制御性能と省エネルギー性を同時に満たしていることが確認できる。Fig. 13 の結果より適切にフィードバックゲインをチューニングすることによって、より優れたフレーム変位の鋼板に対する絶縁性能の確保が可能であることが確認された。

5.4 ランダム加振実験

5.3 節ではステップ入力に関する考察を行ったが、本節では不規則外乱に対する考察を行う。

電磁石を設置している3本のフレームに0~50Hzに帯域制限したピリオディックランダム波を加振器から同時に入力し不規則加振するものとした。Fig. 14 に実験を行った際のフレーム変位  $w_f$  の時刻歴の一例とそのパワースペクトル密度を示す。フレーム変位の標準偏差は  $6.01 \times 10^{-5}$  m である。なお本節で使用

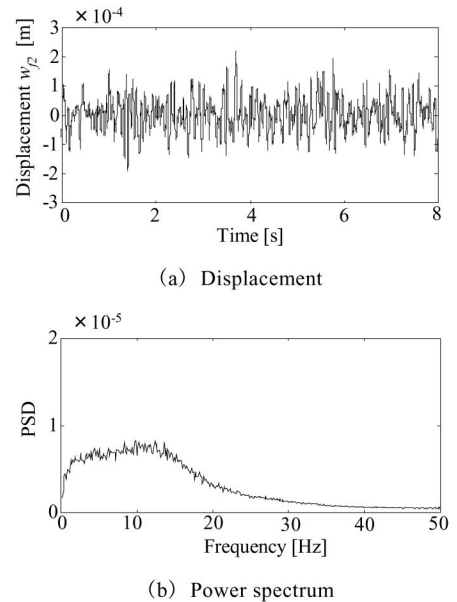


Fig.14 Time history and power spectrum of displacement of frame.

Table 2 Feedback gains for random excitation experiment and simulation.

	Feedback gain	
	$f_{bz}$ [V/m]	$f_{bzv}$ [V/(m/s)]
No.1	4800	250
No.2	8500	450

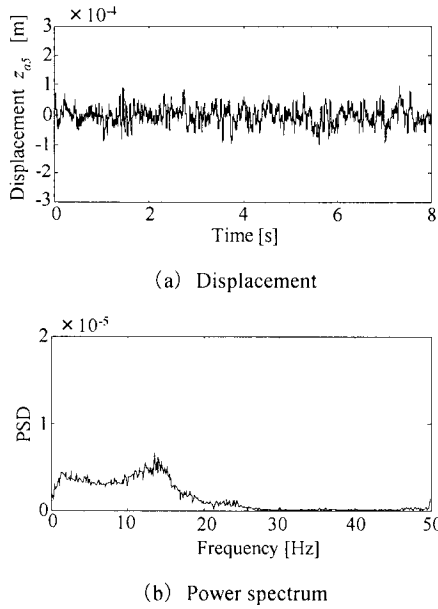


Fig.15 Time history and power spectrum of displacement of the steel plate under random excitation (experimental results using feedback gain No.1).

するフィードバックゲインを Table 2 に示す。本来、ステップ加振実験とランダム加振実験を同じフィードバックゲインを用いて比較検討すべきではあるが、本研究ではあくまで最適な制御状態を得ることに重点を置き、Table 1 のフィードバックゲイン No.1, No.2 の数値をそれぞれ基準として、ランダム加振時のシミュレーションを繰り返し実施し、これに適したフィードバックゲインを再探索した。なお Table 1 のフィードバックゲイン No.1 をチューニングすることにより Table 2 のフィードバックゲイン No.1 を、Table 1 のフィードバックゲイン No.2 をチューニングすることによって Table 2 のフィードバックゲイン No.2 をそれぞれ決定した。

Fig. 15 は Table 2 におけるフィードバックゲイン No.1 を用いたときの実験結果である。同図(a)はフレームを強制加振した際、鋼板中央部の電磁石 No.5 と一緒に設置しているセンサから検出した鋼板鉛直方向絶対変位  $z_{ns}$  の時刻歴であり、同図(b)はそのパワースペクトル密度である。また Fig. 16 は同一条件下での数値シミュレーション結果である。Fig. 15(a)における鋼板変位の標準偏差は  $3.01 \times 10^{-5}$  m であり、前述のフレームの振動に対し鋼板変位を約 50% に減少させている。一方、数値シミュレーション (Fig. 16(a)) における鋼板変位の標準偏差は  $2.78 \times 10^{-5}$  m となり実験値との誤差は 10% 程度である。これらの結果から不規則加振時の時間領域において、設計した制御系の妥当性が確認できる。なお、数値シミュレーションには、Fig. 14 で示した外乱実測データをそのまま用いている。また Fig. 15(b)では約 15Hz にパワースペクトル密度のピークが現れている。本研究は浮上対象として剛体を用いているため、同図において発生したパワースペクトル密度のピークはフィードバック制御を行うことによって生じた電磁石と鋼板間の仮想的なばねによる共振である。一方、Fig. 16(b)においても約 15Hz にパワースペクトル密度のピークが発生しており、実験結果のピークとほぼ一致していることが確認できる。これらの結果より周波数領域においても構築したモデルの妥当性が確認できたと言える。

またステップ入力と同様、不規則加振時においてもフィード

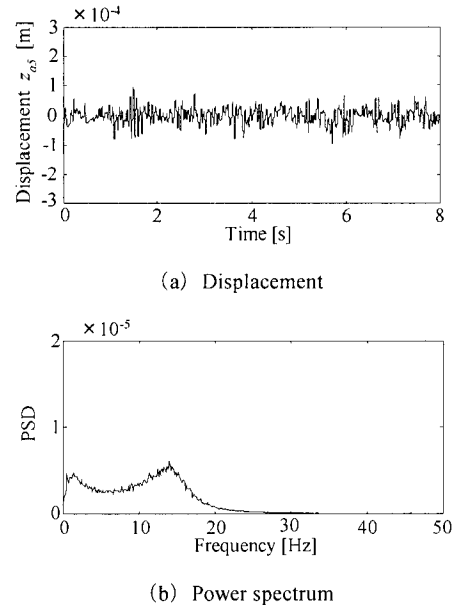


Fig.16 Time history and power spectrum of displacement of the steel plate under random excitation (simulated results using feedback gain No.1).

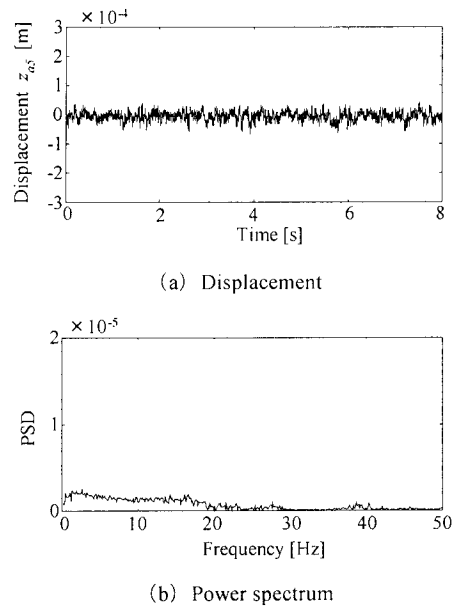


Fig.17 Time history and power spectrum of displacement of the steel plate under random excitation (experimental results using feedback gain No.2).

バックゲインを適切に設定することによってこのような共振現象を減少させ、振動絶縁性能を向上させることが可能である。そこで 5.3 節と同様にトライアルアンドエラーを繰り返しながらゲインのチューニングを行い No.2 のゲインを決定し、これを用いて同様の実験を行った (Fig. 17)。同図(a)における鋼板変位の標準偏差は  $1.54 \times 10^{-5}$  m であり、フレーム変位の約 25% にまで標準偏差を減少させている。また同図(b)には Fig. 15 のような共振は発生していない。これらの結果より適切にフィードバックゲインをチューニングすることにより、共振を抑えることが可能となり、ランダム加振に対しても優れた振動絶縁性能の確保が可能であることが確認できた。

## 6. 結言

本論文では鋼板磁気浮上システムにおける、電磁石設置フレームの振動に対する浮上鋼板への振動絶縁の基礎的な考察を行った。その結果、振動絶縁性能には改善の余地があるものの、本研究で用いた剛体1自由度モデルによって鋼板の絶対変位系に対する磁気浮上制御が可能であることを確認した。また、フィードバックゲインの数值を適切にチューニングすることによって振動絶縁に対する性能を向上できることが確認できた。本研究では基礎的な考察を行うため磁気浮上制御にPD制御を用いたが、今後はロバスト性を有するスライディングモード制御や $H_{\infty}$ 制御を適用し、弾性振動も考慮したモデルに対する効果的な制御性能獲得を目指す。

### 謝辞

本研究に際して東海大学大学院 小堀正樹氏、太田伸行氏、東海大学学部生 早川明秀氏、ムハマド・ラムズル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, 荒木, パディソン, 大崎, 正田:「振動制御用電磁石を用いた可撓性鋼板の磁気浮上システム」, 電気学会論文誌, Vol.117-D, No.2, (1997), pp.238-244.
- (3) A.Tanaka, S.Torii:「Magnetic Levitation Control with Real-Time and Sensor-Less Using Finite Element Method」, The 11th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, (2003), pp.122-123.
- (4) Oshinoya, Obata:「Noncontact Vibration Control of a Magnetic Levitated Rectangular Thin Steel Plate」, JSME International Journal, Vol.45, No.1, (2002), pp.60-69.
- (5) 長谷川, 押野谷, 石橋:「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」, 東海大学紀要工学部, 投稿中.
- (6) 押野谷, 石橋, 小堀:「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.
- (7) 例えば, 山本, 加藤:「PID制御の基礎と応用」, 朝倉書店, (1997).