

# 薄鋼板磁気浮上システムにおける外乱相殺制御 (剛体鋼板に対する基礎的検討)

長谷川真也\*1・太田伸行\*2・押野谷康雄\*3・石橋一久\*4

## Disturbance Cancellation Control of Electromagnetic Levitation System for Thin Steel Plate (Basic Research on Rigid Steel Plate)

by

Shinya HASEGAWA, Nobuyuki OHTA, Yasuo OSHINOYA and Kazuhisa ISHIBASHI

(Received on March 31, 2004 & accepted on May 26, 2004)

### Abstract

In thin steel plates used in many industrial products, including those of the automobile industry, flaws on the plate surface and peeling during the 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. We 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 disturbance cancellation 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, Optimal Control, Disturbance Cancellation Control

### 1. 緒言

薄鋼板は自動車、電機製品、製缶など様々な材料として現代の産業界において幅広く用いられており、表面品質に対する高度な要求が増加している。しかし搬送時には主にローラを用いているために圧延工程では傷が発生し、表面処理工程ではめっき等の不良が発生する場合も少なくない。近年ではその対応策として磁気浮上技術の応用による非接触搬送に関する研究が活発になされている<sup>(1)(2)(3)</sup>。著者らはこれまでに磁気浮上搬送工程における鋼板の落下防止や、電磁石との接触回避を目的とし、電磁石と鋼板の相対距離を一定に維持する磁気浮上制御系を構築してきた<sup>(4)(5)</sup>。

しかし、めっきや化粧処理直後の鋼板を磁気浮上搬送する場合を想定すると、鋼板の振動に起因する塗装むらの発生防止がニーズとして挙げられる。そのためには搬送時に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>。しかし著者らがこれまでに報告しているフィードバック制御を基本とする磁気浮上制御は系に外乱の情報を含まないために電磁石を設置しているフレームに外乱が加わる場合においては振動絶縁性能を保持することが困難であった<sup>(7)</sup>。この問題を解決する有効な手法のひとつとして、外乱の情報をフィードフォワードする外乱相殺制御<sup>(8)(9)</sup>が挙げられる。外乱相殺制御は外乱の情報を正しく検出できる場合においては理論上完全に外乱を除去できる特徴を有しており、薄鋼板磁気浮上システムに適用した場合、フレームからの振動に対し優れた振動絶縁性能を示すことが期待できる。

そこで本報告では最適制御を併用した外乱相殺制御を用いて鋼板を浮上させ、電磁石を支持しているフレームに外乱を加えた際の振動絶縁性能について検討を行う。また制御性能の比較を行う目的から最適制御のみを用いて鋼板を浮上させ、同様の実験を行う。同時に実験結果と数値シミュレーション結果の比較を行い適用した数学モデルの妥当性を検証する。なお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、本報告で用いる浮上対象は弾性振動の影響を取り除いた剛体鋼板とした。

\*1 工学研究科機械工学専攻博士課程後期  
\*2 工学研究科機械工学専攻博士課程前期  
\*3 工学部動力機械工学科助教  
\*4 第二工学部機械工学科教授

## 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 本のフレーム絶対変位を検出するために別途 3 個の渦電流式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る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。外乱相殺制御を行う場合は上述の観測値の他に電磁石を設置しているフレームの変位をフィードフォワード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において、各電磁石表面から 5mm の絶対位置に浮上させる。

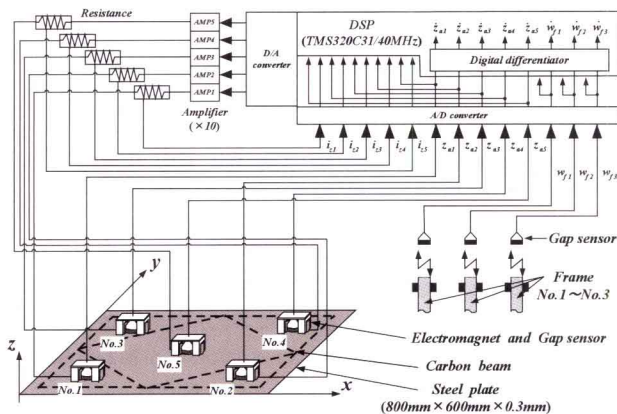


Fig.1 Electromagnetic levitation control system.

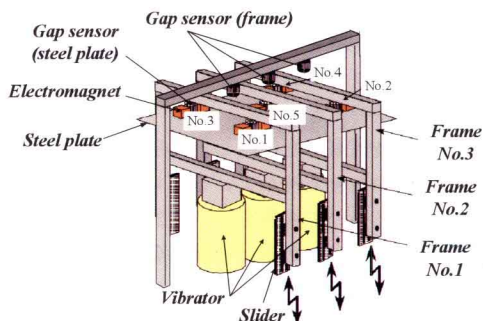


Fig.2 Experimental apparatus.

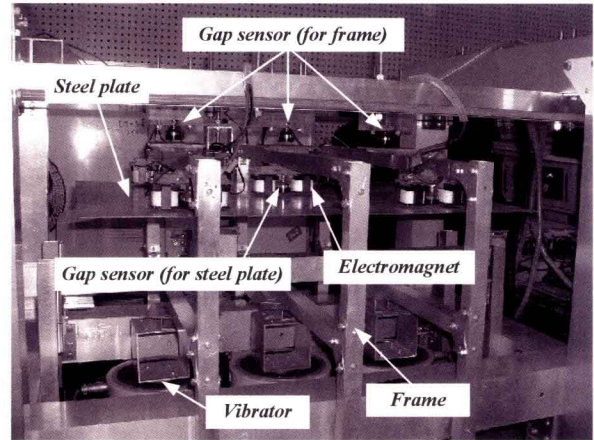


Fig.3 Photograph of the electromagnetic levitation control system.

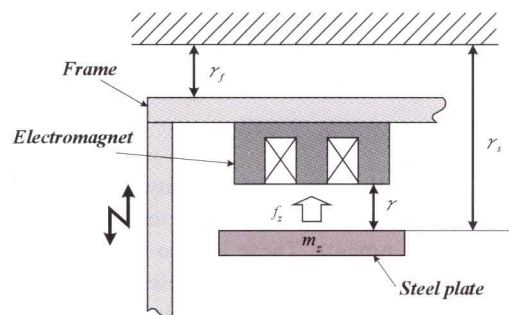


Fig.4 Measurement procedure of absolute displacement of the plate.

なお、実際の搬送工程を想定すると、電磁石設置フレームの加速度を加速度ピックアップによって検出し、それを積分することによってフレーム絶対変位を得ることが望ましい。しかし加速度ピックアップ使用に伴うノイズ、オフセットや積分動作による誤差が振動絶縁性能の基礎的検討という目的を不明確にする恐れがある。そこで本報告では比較的計測誤差が少ない渦電流式非接触変位センサを 2 個用いてフレーム絶対変位の計測を行った。また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第 1 章で述べたよう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。

なお電磁石磁場による渦電流式非接触変位計への影響を計測した結果、測定誤差は 1% 以下であり制御系に及ぼす影響はほとんどないことを確認した。

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対  $z_a$  に関する運動方程式は以下ようになる。

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

ここで、 $m_z = m/5$  ( $m$ : 磁気浮上対象の質量),  $z_a$ : 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  $L_{zeff}/Z$  と磁束の漏れに相当する成分  $L_{zlea}$  の和として近似する。

$$L_z(Z) = \frac{L_{zeff}}{Z} + L_{zlea} \quad (2)$$

電磁石吸引力  $F_z$  は次式のように表すことができる。

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

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,  $F_{z0} = F_z(Z_0, I_{z0})$  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

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

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

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

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、以下の式で表せると仮定する。

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

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絶対変位の変動分を  $w_f$  とすると

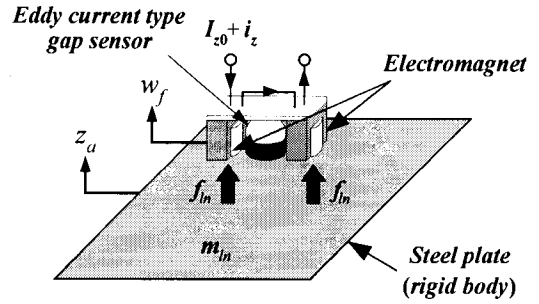


Fig.5 Single-degree-of-freedom model of levitation control of the steel plate.

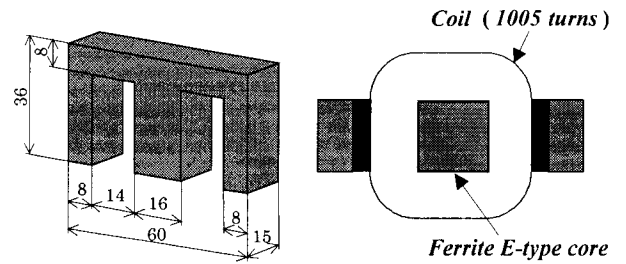


Fig.6 Specification of the electromagnet core.

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

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

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

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

#### 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、フレームの絶対変位、絶対速度を採用し、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

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

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

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

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

$$D_z = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{4F_{z0}}{m_z Z_0} & 0 \\ 0 & \frac{L_{z\text{eff}} I_{z0}}{L_{z0} Z_0^2} \end{bmatrix}$$

## 5. 制御理論

### 5.1 最適制御

以下に示すような二次形式評価関数を最小にする状態フィードバックの制御入力  $v_{z0}$  を求める。

$$J_z = \lim_{t_f \rightarrow \infty} \int_0^{t_f} (z_a^T Q_z z_a + r_z v_{z0}^2) dt \quad (15)$$

ここで  $Q_z$ : 鋼板の絶対変位, 絶対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,  $r_z$ : 制御入力に関する重み係数とする。またこのときのフィードバック制御入力は以下のようになる。

$$v_{z0} = -[f_{bz} \quad f_{bzs} \quad f_{bzi}] z_a \quad (16)$$

なお,  $f_{bz}$ ,  $f_{bzs}$ ,  $f_{bzi}$  は浮上制御における変位, 速度, 電流に対するフィードバックゲインである。

### 5.2 外乱相殺制御

本報告では電流フィードバックを行っているため, 電磁石コイルの一次遅れ特性はほとんど無視できると仮定する。インダクタンスによる電流の遅れが微小である場合, 式(13)は近似的に次式のように表すことができる。

$$v_z = R_z i_z \quad (17)$$

ここで式(12)におけるフレーム変位  $w_f$  の振動絶縁を目的とし, 最適制御を併用した外乱相殺制御の制御入力を

$$v_{z\text{odc}} = -[f_{bz} \quad f_{bzs} \quad f_{bzi}] z_a + f_{fv} w_f \quad (18)$$

とする。平衡浮上状態においては  $v_z$  と制御電圧  $v_{z\text{odc}}$  は等しいことになるので, 式(17), (18)より制御電流  $i_z$  は

$$i_z = \frac{-f_{bz} z_a - f_{bzs} \dot{z}_a + f_{fv} w_f}{R_z + f_{bzi}} \quad (19)$$

と表すことができる。次に式(19)を式(12)に代入し, 制御目的である平衡状態では鋼板に加わる吸引力の変動分  $f_z$ , 鋼板の絶対変位  $z_a$ , 絶対速度  $\dot{z}_a$  が 0 であることを考慮し整理すると, フィードフォワードゲイン  $f_{fv}$  は次式で表せる。

$$f_{fv} = \frac{I_z (R_z + f_{bzi})}{Z_0} \quad (20)$$

## 6. 制御実験

### 6.1 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。

$m=1.08\text{kg}$ ,  $F_{z0}=1.06\text{N}$ ,  $R_z=10.3\ \Omega$ ,  $L_{z\text{eff}}=1.06 \times 10^{-4}\text{Hm}$ ,  $L_{z\text{lea}}=0.1891\text{H}$ 。

また 6.2 節, 6.3 節において最適制御適用時と, この最適制御に外乱相殺制御を併用した場合の制御性能の比較を行うが, そ

の際に用いるフィードバックゲイン並びにフィードフォワードゲインは第 5 章で記した方法に基づいて算出した。なお Table 1 に本報告にて用いる値を示す。

### 6.2 ステップ外乱の入力実験

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外乱を加える。そして上述の外乱が磁気浮上鋼板に加わる場合において最適制御適用時と, この最適制御に外乱相殺制御を併用した時の振動絶縁性能の比較及び検討を行う。同時に数値シミュレーションと実験結果を比較することで第 4 章において構築したモデルの妥当性の検討も行う。なおフレームに加えるオフセットは +1mm とした。これはフレームに外乱を加えない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 の変位  $w_f$  を Fig.7 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。

Fig.8, Fig.9 に上述のステップ外乱を加えた際の磁気浮上鋼板中央部変位の時刻歴の一例を示す。Fig.8 は最適制御を用いた場合, Fig.9 は外乱相殺制御を併用した場合の実験結果である。また縦軸 0 は鋼板の絶対変位平衡浮上位置であることを示す。

最適制御を用いた場合 (Fig.8) では横軸 4 秒付近においてフレームにステップ外乱が加わり, 鋼板は絶対変位平衡浮上位置から鉛直下向きに約 -1.5mm 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プラ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広がり鋼板に作用する吸引力が減少したことに起因する。

しかしながら外乱相殺制御を併用した場合 (Fig.9) ではフレームにオフセットが加わった場合においても, 鋼板が絶対空間上で静止していることが確認できる。本報告のように外乱が完全に検出できる場合においては, 外乱相殺制御を用いることによりフレーム外乱が鋼板に加わる点での外乱相殺が可能となり, フレームのオフセットに対し非常に優れた制御性能を有することが確認できた。

Table 1 Feedback gain and feedforward gain for levitation control.

		Feedback gain			Feedforward gain
		$f_{bz}$	$f_{bzs}$	$f_{bzi}$	$f_{fv}$
No.1	Optimal control	9307	142	79	Non
No.2	Optimal control with disturbance cancellation control	9307	142	79	8930

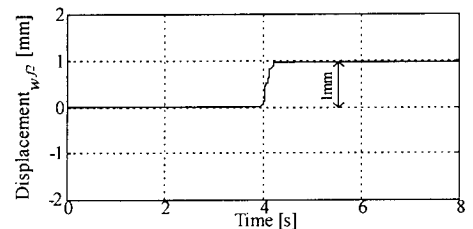


Fig.7 Time history of step input of the frame No.2.

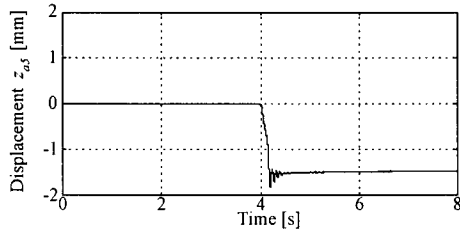


Fig. 8 Time history of displacement of the steel plate under of step input (experimental result using optimal control).

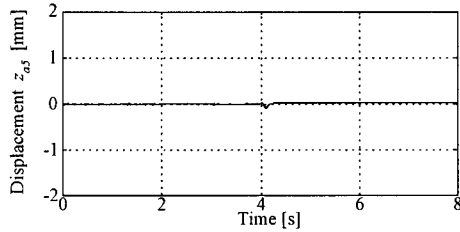


Fig. 9 Time history of displacement of the steel plate under of step input (experimental result using optimal control with disturbance cancellation control).

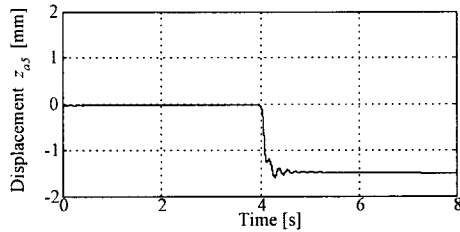


Fig. 10 Time history of displacement of the steel plate under of step input (simulated result using optimal control).

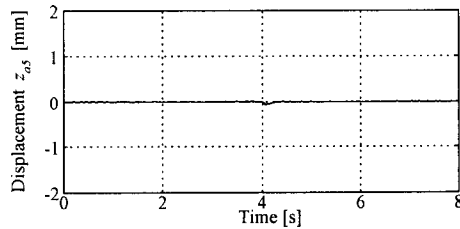


Fig. 11 Time history of displacement of the steel plate under of step input (simulated result using optimal control with disturbance cancellation control).

Fig. 10, Fig. 11 は Fig. 8, Fig. 9 の実験と同様の条件に対する数値シミュレーション結果である。なお数値シミュレーションでは外乱実測値(Fig. 7)を式(14)中の  $w_f$  に数値データとして入力している。数値シミュレーション結果はオフセット量、過渡応答ともほぼ実験結果と一致しており、ステップ入力フレームに加わる場合において本報告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。

### 6.3 不規則加振実験

前節では電磁石を設置しているフレームにステップ入力がかかる場合の検討を行ったが、本節では不規則外乱が全てのフレームに加わる場合の検討を行う。また前節と同様、数値シミュレーション結果と実験結果の比較を行う。Fig. 12 に外乱を加え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(PSD)を示す。フレーム変位の最大片振幅は約 1mm であ

り、前節と同様に電磁石表面までの距離の約 20%に相当する。なお標準偏差は  $3.11 \times 10^{-1}$ mm である。

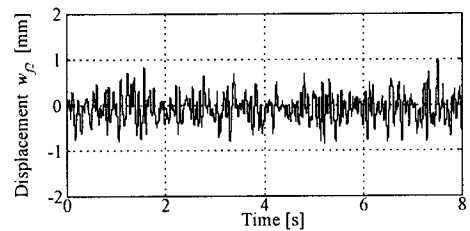
Fig. 13, Fig. 14 は上述の外乱を加えた際の磁気浮上鋼板中央部変位の時刻歴の一例とそのパワースペクトル密度である。また Fig. 13 は最適制御を用いた場合、Fig. 14 は外乱相殺制御を併用した場合の実験結果である。

最適制御を用いた場合 (Fig. 13) における鋼板絶対変位の標準偏差は  $3.14 \times 10^{-1}$ mm であり、フレームの振動に対し鋼板絶対変位は約 101%に増加している。また 2Hz 付近のパワースペクトル密度にピークが発生していることが確認できる。本研究は浮上対象に剛体鋼板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。数値計算から求めた仮想的なばねの共振周波数も 2.2Hz であり (Fig. 15) 実験結果 (Fig. 13) とほぼ一致している。

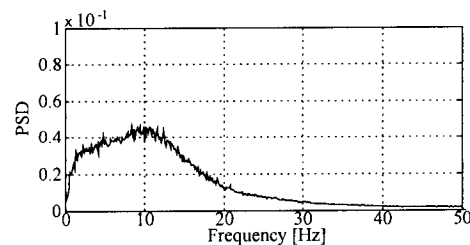
一方、外乱相殺制御を併用した場合 (Fig. 14) では鋼板絶対変位の標準偏差は  $0.53 \times 10^{-1}$ mm であり、フレームの振動に対し約 17%に鋼板絶対変位を抑制している。また 2Hz 付近のパワースペクトルには顕著なピークが現れておらず、外乱相殺制御を併用することで磁気浮上時の鋼板に生ずる共振を抑えることが可能となり、不規則加振時に対しても優れた振動絶縁性能を確保できることが確認できた。

しかしながら 8Hz 付近のパワースペクトル密度にはわずかではあるがピークが確認できる。本報告で用いた外乱相殺制御は全ての周波数領域において外乱を一律に相殺しているために、特定周波数に対する制御を行うことが出来ない。その結果フレーム変位のパワースペクトル密度とほぼ同等の周波数にピークが発生すると考えられる。この問題は今後課題として検討する必要がある。

また Fig. 15, Fig. 16 は Fig. 13, Fig. 14 の実験と同様の条件に対する数値シミュレーション結果である。数値シミュレーション結果の時刻歴、パワースペクトル密度ともに実験結果と良好な一致を示しており、時間領域、周波数領域共に本報告で用いた磁気浮上モデルの妥当性が確認できたと言える。

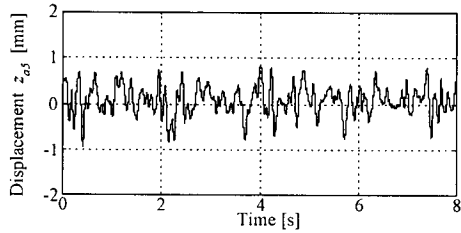


(a) Displacement

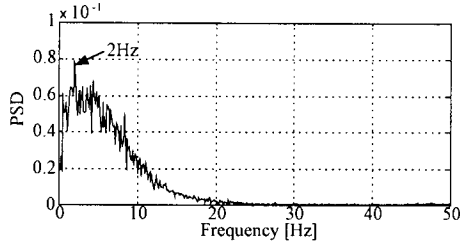


(b) Power spectrum density

Fig. 12 Time history and power spectrum density of displacement of frame No. 2.

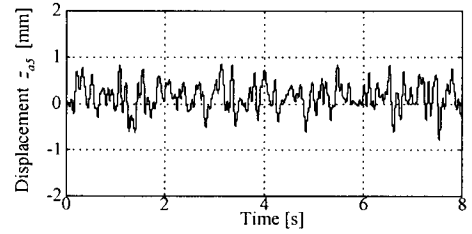


(a) Displacement

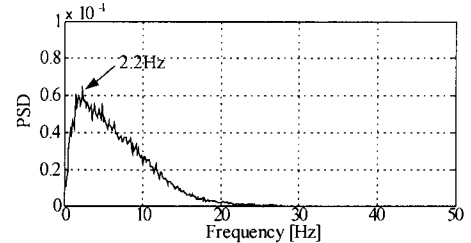


(b) Power spectrum density

**Fig.13** Time history and power spectrum density of displacement of the steel plate under random excitation (experimental results using optimal control).

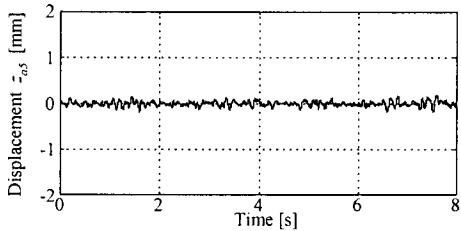


(a) Displacement

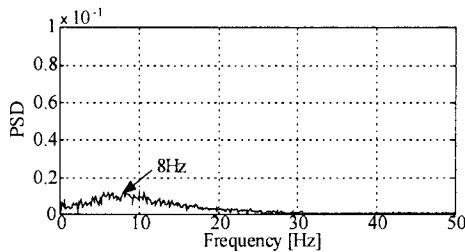


(b) Power spectrum density

**Fig.15** Time history and power spectrum density of displacement of the steel plate under random excitation (simulated results using optimal control).

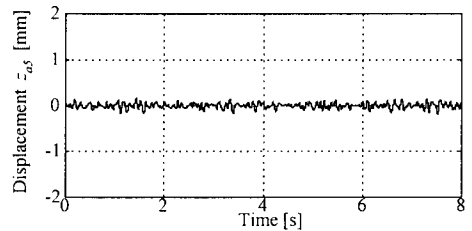


(a) Displacement

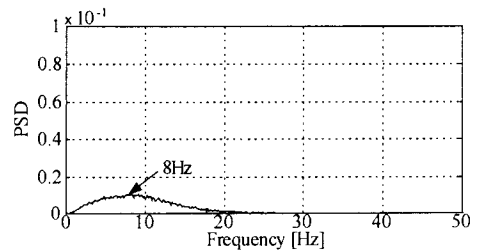


(b) Power spectrum density

**Fig.14** Time history and power spectrum density of displacement of the steel plate under random excitation (experimental results using optimal control with disturbance cancellation).



(a) Displacement



(b) Power spectrum density

**Fig.16** Time history and power spectrum density of displacement of the steel plate under random excitation (simulated results using optimal control with disturbance cancellation).

## 7. 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。これまでの検討ではフレームにステップ入力加わる場合には鋼板変位に生ずるオフセットを完全に除去することが出来なかったが、本報告では最適制御と外乱相殺制御を併用することによって鋼板を絶対空間上に静止させることが可能となった。また不規則外乱がフレームに加わる場合においても、振動絶縁性能の飛躍的な向上が確認できた。なお本研究で検討した全てのケースにおいて、実験結果と数値シミュレーションは時間領域、周波数領域共によく一致しており、本論文で用いた数学モデルの妥当性を確認できた。

本報告では時間領域のみの外乱相殺を行ったが今後は有色雑音が電磁石設置フレームに加わる場合を想定し、周波数領域での振動絶縁性能獲得を目指す。

## 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) Y.Oshinoya, T.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, Vol.43, No.2, (2003), pp.59-64.
- (6) 長谷川, 小堀, 太田, 押野谷, 石橋 : 「磁気浮上鋼板の振動絶縁に関する検討」, 第12回交通・物流部門大会, (2003), pp.139-140.
- (7) 長谷川, 押野谷, 石橋 : 「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)」, 東海大学紀要工学部, Vol.43, No.2, (2003), pp.65-71.
- (8) 水野, 樋口 : 「不つり合い補償機能を備えた磁気軸受制御系の構成」, 計測自動制御学会論文集, Vol.20, No.12, (1984), pp.1095-1101.
- (9) 野波 : 「調和励振力を受ける他自由度振動系の外乱相殺制御」, 日本機械学会論文集(C編), Vol.57, No.534, (1991), pp.22-28.