学術論文

四辺自由鋼板の非接触振動制御に関する実験的考察

Experimental considerations on noncontact vibration control of a steel plate with free edges

押野谷康雄	(東海大学)	石橋 一久	(東海大学)
小畑 隆之	(東海大院)		

Yasuo OSHINOYA Member Kazuhisa ISHIBASHI Member Takayuki OBATA Student Member

This paper deals with a study on the elastic vibration control of an electromagnetic levitation steel plate. A new experimental apparatus that generates the elastic vibration on a steel plate has been proposed. In the paper, the optimal control techniques were applied for two kinds of models, and the effect of the suppression of the elastic vibration was investigated. One model is the simple one-degree-of-freedom system that considered the steel plate a rigid body and it is the comparatively complicated continuous model for the steel plate in another. To verify the usefulness of the two control systems, a digital optimal control experiments were performed for the steel plate with free edges (800 mm×600 mm×0.3 mm). As a result, it was shown that the control performance for elastic vibration was improved by using the control system for continuous model in the theory way.

Key Words: Steel plate, electromagnetic levitation, noncontact vibration control, elastic vibration, digital optimal control.

1 はじめに

工業製品に広く用いられている薄鋼板の表面品質を 維持するために、磁気浮上技術の応用研究が始められ ている [1]-[5]. しかし、鋼板が薄いために限られた個 数の電磁石では弾性振動を十分抑制することができて いない.したがって、適用する制御理論で弾性振動を 出来る限り除去すべきであることは言うまでもないが、 これまでに磁気浮上鋼板に対して積極的に弾性振動を 発生させ、これを抑制しようとする試みはない.そこ で、浮上している薄鋼板に対して強制的に外乱を入力 し弾性振動を発生させ、その抑制効果に関する実験的 検討が可能な装置を製作した.本研究では四辺自由鋼板を磁気浮上させるための電磁石そのものが,鉛直方向に振動する装置を設計したが,これは一例として,ロボットアームの先端に磁気浮上機構(非接触把持機構)が設置してあり,アームから上下方向の振動が鋼板に伝達されることに相当する.ただし本報告では,鋼板の水平方向の運動,すなわち鋼板の搬送に関しては考えないものとする.鋼板のモデル化として,剛体とみなした設計が簡易な一自由度モデルと,弾性振動を考慮した板の方程式によって運動を記述した連続体モデルの2つを取り上げ,それぞれの制御系に関する

(86)

連絡先: 押野谷康雄, 〒 259-1292 平塚市北金目 1117, 東海大学 工学部動力機械工学科, 未来科学技術共同研究センター, e-mail: ossy@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp



Fig. 1 Electromagnetic levitation control system.



Fig. 2 Experimental apparatus.

2 制御実験システム

制御システムを Fig.1 に示す.本研究では長さ a = 800 mm, 幅 b = 600 mm, 厚さ h = 0.3 mm 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.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,これをアナログ微分器に通して速度に変換する. 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 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4mm,使用し た全パイプ質量の薄鋼板質量に対する割合は5%未満) を同図の点線で示すように3本取り付け(電磁石真下 の位置), 短手方向 (y 軸方向) の弾性振動の発生を抑 制した、本研究では、鋼板を非接触支持した際に生じ る弾性振動の中で、特に低次モード(一、二次モード) を中心に考察を行う.低次モードを扱う場合,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 てそれぞれ独立に鉛直方向の振動が可能な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.この装置により浮上鋼板に鉛直方向の 外乱を入力し,これによって発生する鋼板の弾性振動 に対する振動抑制実験を実施する.

3 モデル化

3.1 一自由度モデル

ー自由度モデルでは、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制御を行う.そこで、Fig.3 に示すような、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モデル化する.回路が直列結合した2つの電磁石の中央に渦電流式センサがコロケーションとなるよう配置してある(Fig.3).



Fig. 3 One-degree-of-freedom model of levitation control of the steel plate.

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 に関する運動方程式,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 方程式は以下のようになる [6].

$$m_z \ddot{z} = 2f_z \tag{1}$$

$$f_z = \frac{2F_z}{Z_0}z + \frac{2F_z}{I_z}i_z$$
(2)

$$\frac{d}{dt}i_{z} = -\frac{L_{eff}}{L_{z}} \cdot \frac{I_{z}}{Z_{0}^{2}}\dot{z} - \frac{R_{z}}{2L_{z}}i_{z} + \frac{1}{2L_{z}}v_{z} \qquad (3)$$

$$L_z = \frac{L_{eff}}{Z_0} + L_{lea} \tag{4}$$

ここで, m_z :鋼板を仮想的に5つに分割した質量 [kg],z:鋼板の平衡浮上位置からの変位 [m], f_z :電 磁石1個当りの吸引力の変動値 [N], F_z :静的吸引力 [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_z :静的吸引力を得るための定 常電流 [A], i_z :電磁石コイル電流の変動値 [A], L_z : 平衡浮上状態における電磁石コイルのインダクタンス [H], R_z :2つの電磁石コイルの総抵抗値 [Ω], v_z :電 磁石コイルに加わる定常電圧からの変動値 [V], L_{lea} : 電磁石の漏れ磁束 [H] に相当する定数である.

3.2 連続体モデル

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,電磁石コイル電流合計15個のすべての情報 を用いて,5か所のそれぞれの電磁石に対してフィー ドバック制御を実施する.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 w(x,y) とすると,鋼板に対する運動方 程式は以下のようになる.

$$\rho h \frac{\partial^2}{\partial t^2} w + \frac{Ch^3}{12} \frac{\partial}{\partial t} \nabla^4 w + \nabla^4 w$$

= $\sum_{n=1}^5 f_n(t) \{ \delta(x - x_{a1n}) \delta(y - y_{a1n}) + \delta(x - x_{a2n}) \delta(y - y_{a2n}) \}$ (5)
 $\nabla^4 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4}$

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], w(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], $\delta($):ディ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] である.

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.

$$f_n = \frac{F_n}{Z_0}w(x_{sn}, y_{sn}) + \frac{F_n}{I_n}i_n \tag{6}$$

$$\frac{d}{dt}i_n = -\frac{L_{eff}I_n}{L_z Z_0^2} \frac{d}{dt}w(x_{sn}, y_{sn}) - \frac{R_z}{2L_z}i_n + \frac{1}{2L_z}v_n$$
(7)

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], 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], x_{sn} , y_{sn} : 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], i_n : 電磁石コイルの定常電流か らの変動値 [A] である.

4 制御系設計

4.1 一自由度モデルの状態方程式と制御系

一自由度モデルの状態方程式は次のように記述する.

$$\dot{\boldsymbol{z}} = \boldsymbol{A}_z \boldsymbol{z} + \boldsymbol{B}_z \boldsymbol{v}_z \tag{8}$$

$$\boldsymbol{z} = \begin{bmatrix} z & \dot{z} & i_z \end{bmatrix}^T \\ \boldsymbol{A}_z = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{4F_z}{m_z Z_0} & 0 & \frac{4F_z}{m_z I_z} \\ 0 & -\frac{L_{eff}}{L_z} \cdot \frac{I_z}{Z_0^2} & -\frac{R_z}{2L_z} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{B}_z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{2L_z} \end{bmatrix}^T$$

本研究では浮上制御のために最適制御理論を適用する.式 (9) の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則を求める.式 (10) の最適フィードバックゲイン F_z は, Riccati 型代数方程式を解くことによって得られる [7].

$$\boldsymbol{J} = \lim_{t_f \to \infty} \int_0^{t_f} (\boldsymbol{z}^T \boldsymbol{Q}_z \boldsymbol{z} + r_z v_z^2) dt \quad (9)$$

$$Q_z = diag(q_z \ q_{\dot{z}} \ q_{iz})$$
$$v_z = -F_z z$$
(10)

4.2 連続体モデルの状態方程式と制御系

薄鋼板の平衡浮上位置からの変位 w(x, y) は,固有 関数 $\phi_i(x, y)$ (Fig.4)と基準座標 $W_i(t)$ ($i = 1 \sim \infty$) 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 $X_{mm}(x)Y_{nn}(y)$ ($mm, nn = 1, 2, \cdots$)で表すこ とができると仮定する.本研究では、センサ数が 5 個 であることから 5 次モードまで (i = 5)を制御系設計 上考慮する.したがって Fig.4 に示すモード形状の中 で弾性一次モードまでを考慮することになる.

380

$$w(x,y) = \sum_{i=1}^{5} \phi_i(x,y) W_i(t)$$
(11)

$$\phi_i(x,y) = X_{mm}(x) \cdot Y_{nn}(y)$$

$$X_1(x) = 1, \quad X_2(x) = \frac{\sqrt{3}}{a} (2x-a)$$

$$X_{mm}(x) = \cos \frac{\lambda_{xmm}}{a} x + \cosh \frac{\lambda_{xmm}}{a} x$$

$$+ \frac{\sin \lambda_{xmm} + \sinh \lambda_{xmm}}{\cos \lambda_{xmm} - \cosh \lambda_{xmm}}$$

$$\times \left(\sin \frac{\lambda_{xmm}}{a} x + \sinh \frac{\lambda_{xmm}}{a} x \right)$$

$$\cosh \lambda_{xmm} \cdot \cos \lambda_{xmm} = 1$$

$$f_{xmm} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\lambda_{xmm}}{a} \right)^2 \sqrt{\frac{D}{\rho h}}$$

$$Y_1(y) = 1, \quad Y_2(y) = \frac{\sqrt{3}}{b} (2y-b)$$



Fig. 4 Mode shape of the steel plate.

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状態 変数として選ぶ.一方観測値は、各非接触変位計位置 での鋼板の変位 $w(x_{sn}, y_{sn})$ 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 (11) を式 (5)~(7) に代入し固有関数の直交条件を用 いて整理すると、以下のような式を得る.

$$\dot{\boldsymbol{W}} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{W} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{v} \tag{12}$$

$$\boldsymbol{w} = \boldsymbol{C}\boldsymbol{W} \tag{13}$$

$$W = [W_1 \cdots W_5 \quad \dot{W}_1 \cdots \dot{W}_5 \quad i_1 \cdots i_5]^T$$
$$v = [v_1 \cdots v_5]^T$$
$$w = [w_1 \cdots w_5 \quad \dot{w}_1 \cdots \dot{w}_5 \quad i_1 \cdots i_5]^T$$
$$(A, B, C \text{ の各要素に関しては文献 [8] を参照)}$$

連続体モデルにおいても一自由度モデルと同様に最 適制御理論を適用する.

$$J = \lim_{t_f \to \infty} \int_0^{t_f} (\boldsymbol{W}^T \boldsymbol{Q} \boldsymbol{W} + \boldsymbol{v}^T \boldsymbol{R} \boldsymbol{v}) dt (14)$$
$$\boldsymbol{Q} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{Q}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \boldsymbol{Q}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \boldsymbol{Q}_3 \end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{Q}_1 = diag(q_1 \cdots q_5), \quad \boldsymbol{Q}_2 = diag(q_{s1} \cdots q_{s5})$$
$$\boldsymbol{Q}_3 = diag(q_{i1} \cdots q_{i5}), \quad \boldsymbol{R} = r \cdot diag(1111)$$

$$\boldsymbol{v} = -\boldsymbol{F}\boldsymbol{W} \tag{15}$$

5 制御実験

5.1 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 kg, Z_0 =5 mm, F_z =1.85 N(但 し No.5 の電磁石のみ F_z =3.21 N), $F_1 \sim F_4$ =1.85 N, F_5 =3.21 N, R_z =20.6 Ω , L_z =0.204 H, L_{eff} = 0.762 × 10⁻⁵ Hm (上記のインダクタンス測定方法, 電磁石吸引力特性等

に関しては文献 [5] を参照) 固有振動数 弾性一次モード: 2.65 Hz (計算値 2.72 Hz), 弾性二次モード: 6.75 Hz (計算値 7.49 Hz) (上記固有振動数は制御をしていない薄鋼板固有の数値 である. 一方次節 5.2 で記述した数値は磁気浮上中の 薄鋼板に対して実測した値である.)

5.2 弾性振動モードに関する検討

制御性能の検討前に、磁気浮上状態の薄鋼板におけ る弾性一次モード、二次モードの発生に関する検討を 行った.一自由度モデルによるフィードバック制御で 浮上している薄鋼板に、Fig.2 における中央のフレー ムのみが鉛直方向に振動するように、中央の加振器か ら正弦波を外乱として入力した.予備実験で推定した 各モードの固有周波数近傍の正弦波を入力し、鋼板の 最大振幅から制御時におけるモードの固有振動数を探 索した(一次モード 3.5 Hz,二次モード 15.0 Hz). このときの両側のフレーム(未加振)に設置してある センサ No.1 と No.2 における鋼板の変位の相互相関 関数を Fig.5 に示す.横軸は 2 つのセンサから得られ た変位標本過程における任意の時刻の時間間隔(ずら し時間)であり,縦軸は位相の一致度(無次元)を示す (同位相ならば1となり,逆位相ならば-1).Fig.5(a) は加振周波数が3.5 Hz のときの結果であり,ずらし 時間 0s でセンサ No.1 と No.2 における鋼板の変位は ほぼ同位相を示していることから,この周波数におい て弾性一次モードを生じていることが確認できる.ま た同様に Fig.5(b)(加振周波数15.0 Hz)では,ずら し時間 0s において鋼板の変位はほぼ逆位相を示して おり弾性二次モードを生じていることを確認した.



(b) Excitation frequency = 15.0Hz

Fig. 5 Cross correlation function of displacement between sensor No.1 and No.2.

5.3 加振実験による弾性振動抑制効果の検討

入力外乱は、多くの外乱パターン(ランダム振動、ス ウィープ振動、入力周波数の帯域幅、入力継続時間、 加振するフレームの位置、個数)を試した中で、最も 明確に振動モードが出現する結果が得られたフレーム No.3 のみをランダム波で加振する方法を採用した. こ のときのフレーム No.3 の絶対変位の時刻歴、パワー スペクトルを Fig.6 に示す. 変位の標準偏差は 0.062 mm であり、加振器の特性上 0~20 Hz 程度までは、 ほぼフラットなパワーを有する外乱となっている.

Fig.7(a) は一自由度モデル,(b) は連続体モデルの 制御系によって浮上させた鋼板に Fig.6 に示す外乱を 入力した結果である.フレーム No.3 に設置してある センサ No.2 において検出した電磁石表面と鋼板表面 との距離の時刻歴 (縦軸のゼロは電磁石表面から5 mm の位置を示す) とそのパワースペクトルを示す.いず れの場合も加振によって横ずれし落下することなく浮 上可能であった.連続体モデルに最適制御理論を適用 し弾性一次モードを考慮することで,一自由度モデル では発生する 3.5 Hz の弾性一次モード (Fig.7(a) 図 中の丸内) が抑制されていることが分かる.すなわち



Fig. 6 Time history and power spectrum of absolute displacement of the frame No.3.



Fig. 7 Time history and power spectrum of gap between the steel plate and the electromagnet.



Fig. 8 Transient response of elastic first mode.

鋼板を連続体としてモデル化することの優位性が十分 現れている.しかし弾性一次モード以降の周波数域で は連続体モデルにおいても各振動モードに対して非考 慮であるためモデル化の違いによる制御性能の差は顕 著でない.そのために Fig.7(a)と(b)に示す時刻歴 において振幅はほとんど差がないことが分かる((a)の 標準偏差=0.044 mm,(b)の標準偏差=0.045 mm). すなわち,連続体モデルにおいて弾性二次モード以上 は制御系におけるスピルオーバ(漏れ)のモードであ ると言える.

5.4 過渡応答による一次モード抑制効果の検討

両制御手法で浮上させた鋼板に中央のフレームから 3.5 Hz の正弦波を外乱として入力し、鋼板に弾性一次 モードの振動を生じさせた. この状態からフレームの 加振を停止し、弾性一次モードの過渡応答に対する振 動抑制性能を比較した. Fig.8(a) は一自由度モデル, (b) は連続体モデルにおける実験結果であり、センサ No.5 (中央のフレーム) における変位の時刻歴である. 両図とも横軸における1秒の時点でフレームの加振が 停止している. Fig.7 のランダム加振の結果と同様,加 振時の一次モードの振幅は一自由度モデルのほうが2 倍以上大きくなっている. さらに振動の収束性を検討 するため, (a), (b)の結果で振幅がおよそ 0.2 mmの 状態から定常状態に落ち着くまでの時間を比較すると. (a) の一自由度モデルでは約3秒に対して, (b) の連 続体モデルは約0.7秒である.これらの比較からも鋼 板を連続体としてモデル化し弾性振動を考慮すること は、振幅、応答の速さに関して明らかに有利であるこ とが確認できた.

6 まとめ

本論文では、磁気浮上によって非接触支持した四辺 自由鋼板に外乱を強制的に入力する装置を製作し、浮 上性能の実験的な考察を行った.一自由度モデルと、 連続体モデルに対する制御系をそれぞれ設計し、その 制御性能に関する比較検討を行った.本研究で得られ た結果を要約すると、次のようである.

- 1. 製作した実験装置によって、浮上鋼板に弾性振動 を強制的に発生させることができ、これまでに行 えなかった磁気浮上鋼板の弾性振動に関する多様 な検討を行うことが可能となった.
- 2. モデル化が容易な一自由度系に対する制御系でも, 今回使用した浮上対象に対して磁気浮上可能なこ とが確認できた.
- 3. 連続体モデルは数学的取り扱いが若干複雑なとこ ろもあるが、制御系に考慮された弾性振動モード に対する抑制効果は十分あることを確認した.
- 4. 四辺自由鋼板の磁気浮上制御におけるモデル化の 妥当性を実験的に確認できたといえる.

今後は、二次モード以降の抑制が可能な制御系の確 立を目指す.また、現在は鋼板に取り付けられている 補強梁を取り外し、さらに実用性のあるシステムの構 築を行う.

(2001年5月21日受付)

参考文献

- 川田,森井,片山,高橋:薄鋼板の磁気浮上特性,第2 回電磁力関連のダイナミックスシンポジウム,(1990), pp.59-62.
- [2] 岡田, 永井, 張, 谷:走行薄鋼板の非接触アクティブ 振動制御, 第2回電磁力関連のダイナミックスシン ポジウム, (1990), pp.389-394.
- [3] Y. Oshinoya, T. Shimogo: Electro-Magnetic Levitation Control of a Traveling Elastic Plate, Proc, Int. Conf. on Advance Mechatronics, (1989), pp.845-850.
- [4] 押野谷、小林、丹野:相対する二辺が梁で補強された 薄鋼板の磁気浮上制御、日本機械学会論文集 (C 編), Vol.62, No.600 (1996), pp.127-133.
- [5] 押野谷:薄鋼板の水平方向非接触位置決め制御に関する基礎的検討,日本 AEM 学会誌,Vol.6,No.4 (1998), pp.52-57.
- [6] 電気学会編:磁気浮上と磁気軸受, コロナ社, (1993).
- [7] 例えば, 松村: 自動制御, 朝倉書店, (1979).
- [8] 押野谷,小林:電磁力を利用した周辺自由鋼板の浮 上制御,東海大学紀要工学部,Vol.34, No.1(1994), pp.291-299.