

磁気浮上鋼板の水平方向非接触位置決め制御 (極薄鋼板に対する基礎的検討)

土井雅貴^{*1}・齋藤友志^{*1}・長谷川真也^{*2}
押野谷康雄^{*3}・石橋一久^{*4}・粕谷平和^{*3}

Horizontal Uniaxial Noncontact Positioning Control for a Magnetically Levitated Steel Plate (Fundamental Considerations for Ultrathin Steel Plate)

by

Masaki DOI, Tomoshi SAITO, Shinya HASEGAWA,
Yasuo OSHINOYA, Kazuhisa ISHIBASHI, and Hirakazu KASUYA

(Received on March 31, 2006 & accepted on June 28, 2006)

Abstract

In this paper, we report the suppression of the elastic vibration of levitated ultrathin steel plate under horizontal noncontact positioning control. For thin steel plates that are used in many industrial products including those of the automobile industry, we have proposed a magnetic levitation control system and confirmed its feasibility through a digital control experiment. However, there is a risk that side slipping or the dropping of the plate may occur owing to inertial force because the levitation control system does not provide a restraining force for the direction of travel. Therefore, we have proposed the addition of electromagnetic actuators to control the horizontal motion of a levitated steel plate. In addition, we have reported that it is possible to suppress the elastic vibration of a steel plate in the vertical direction using the electromagnetic actuators for horizontal positioning. An ultrathin steel plate generates elastic vibration easily and is not secured in terms of the levitation direction.

Keywords : Electromagnetic Levitation Control, Steel Plate, Vibration Control, Elastic Vibration

1. 緒言

工業製品で広く利用されている鋼板は、自動車、電機製品、製缶、その他材料としても幅広く用いられており、近年では板厚 0.1mm 以下の超極薄鋼板の製造も可能になり、その多岐にわたる需要から要求される表面品質は高級化の一途を辿っている。しかし、その搬送工程において表面処理工程におけるめっき等の不良が原因で、表面品質の劣化が生じている。この問題の解決方法として、電磁力による鋼板の非接触搬送が考えられている^{1)~3)}。そこで当研究グループでは、切り板の非接触搬送制御の実現を目的として、デジタル最適制御理論による磁気浮上制御に関する検討を行っている⁴⁾。

一方、磁気浮上した鋼板を高速搬送するためには横滑り、落下という問題を解決しなければならず、様々な検討がなされている^{5), 6)}。当研究グループでは、鋼板に対して水平方向の相対する二辺に対向するように電磁石を配置する制御系を設計することで平面内の非接触位置決め制御を行う手法を提案し、その有効性を報告している⁷⁾。これまでに板厚 0.3mm の鋼板を検討

対象とし、鋼板の水平方向に対して磁場を印加することにより鉛直方向弾性振動の抑制が可能であり^{8), 9)}、さらに重力によって垂れ下がった鋼板を引き上げ、鋼板を平坦に近づける効果があることを確認している¹⁰⁾。また、板厚 0.3mm の鋼板の浮上補助およびシステムのローコスト化を目的として、エッジ付近に永久磁石を配置した水平方向位置決め制御システムを提案している¹¹⁾。その際、水平方向の制御システムに μ -synthesis を用い、永久磁石吸引力の不確かさに対してロバスト性のある搬送システムの構築を行なっている。しかしながら、鋼板の磁気浮上システムを実機工程として実用化した場合を想定すると、様々な板厚の鋼板を安定して搬送可能な制御システムを構築することが必須となる。中でも、板厚が 0.11mm~0.19mm の範囲のものは極薄鋼板と呼ばれており¹²⁾、この鋼板に対する浮上安定性の確保は非常に難しい。そこで、今後益々需要の増加が予想される極薄鋼板を非接触搬送する場合を想定し、提案している水平方向非接触位置決め制御の有効性を明らかにすることを目的とする。本報告では磁気浮上対象として板厚 0.18mm の極薄鋼板を採用し、鋼板に作用する磁場の分布的な影響を考慮した有限差分モデルを作成して実験と比較することで、水平方向からの磁場が極薄鋼板に対しどのような影響を与えるかを検討する。

*1 工学研究科機械工学専攻修士課程
*2 第二工学部機械工学科非常勤助手
*3 工学部動力機械工学科教授
*4 第二工学部機械工学科教授

2. 磁気浮上システム

磁気浮上搬送システムの概略を 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 $h=0.3\text{mm}, 0.18\text{mm}$ の長方形亜鉛めっき鋼板（材質 SS400）とする。同図において磁気浮上システムは中央より上側に示してある。鋼板をアルミフレーム製装置内に設置した 5 か所のペアの電磁石（No.1～5）を用い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センサにより検出する。なおペアの電磁石の電気回路は直列結合されており、渦電流式非接触変位センサを中央に挟むように配置してある。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 10 個の観測値を A/D コンバータから DSP 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。

水平方向の位置決めシステムの概要は、Fig.1 における中央より下側に示してある。浮上した鋼板のエッジに対して、水平方向から電磁石吸引力を付加し、非接触位置決め制御を行う。鋼板エッジ部の水平方向の変位計測にはレーザ式センサ（帯状のレーザ光の遮断量で変位を計測）を用いる。また、電磁石は浮上システムで使用したものと同一のものを使用する。これらが Fig.1 に示したように、鋼板の相対する二辺に沿って 2 個ずつ設置されており、各電磁石表面から鋼板エッジまでの距離を 5 mm に非接触位置決め制御する。なお本研究では、エッジ方向からの磁場の影響が鋼板の弾性振動やたわみに与える影響をより明確にする目的から、極軽量のカーボンファイバー製パイプ（使用した全パイプ質量の鋼板質量に対する割合は約 8%）を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（ y 軸方向）の弾性振動の発生と静的なたわみを抑制した。なお取り付け方法としては市販のゴム系超強力両面テープを用いてパイプをそのまま鋼板に貼り付けた。

3. 解析モデル

重力及び磁界が存在する場において、鋼板の鉛直方向変位に関する運動方程式は次式で表される。

$$\rho h \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + \frac{C_s h^3}{12} \frac{\partial}{\partial t} \nabla^4 z + D \nabla^4 z = \sum_{m=1}^{10} f_{vm} + f_{hz} + f_{hx} \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} - \rho h g \quad (1)$$

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

ここで ρ : 鋼板の密度 [kg/m^3]、 h : 鋼板の厚さ [m]、 C_s : 鋼板の内部減衰係数 [Ns/m^2]、 $D = Eh^3/12(1-\nu^2)$ 、 E : 鋼板のヤング率 [N/m^2]、 ν : ポアソン比、 t : 時間 [sec]、 z : 鋼板の変位 [m]、 x : 鋼板の長手方向の座標 [m]、 y : 鋼板の幅方向の座標 [m]、 f_v : 磁気浮上用電磁石によって鉛直方向から鋼板の単位面積あたりに加わる外力 [N/m^2]、 f_{hz} : エッジ方向に設置した 4 つの電磁石によって鉛直方向から鋼板の単位面積あたりに加わる外力 [N/m^2]、 f_{hx} : エッジ方向に設置した 4 つの電磁石によって水平方向から鋼板に加わる外力 [N/m]、 g : 重力 [m/s^2]、なお浮上用電磁石の吸引力 f_{vm} は次式のように表すことができる。

$$f_{vm} = \kappa_m \frac{I_m^2}{z_m^2} \quad (3)$$

ここで κ_m : 単位面積あたりに加わる各電磁石の吸引力係数 [N/A^2]、 z_m : 各電磁石表面と鋼板のギャップ長 [m]、 I_m : 各磁気浮上用電磁石に流れる電流 [A]、また各磁気浮上用電磁石に加える電圧 e_m [V] と流れる電流 I_m [A] の関係は、各コイルの抵抗値を R_m [Ω]、インダクタンスを L_m [H] とすると次のように表すことができる。

$$e_m = R_m I_m + L_m \frac{dI_m}{dt} \quad (4)$$

本報告では振動解析に差分法を用いる。浮上対象として用いる鋼板に対して、重力、浮上用電磁石からの磁場、水平方向位置決め用電磁石からの磁場が作用する場合、鋼板の鉛直方向変位に関する運動方程式を差分近似すると次式で表される。

$$\frac{v_{n+1}}{\Delta t} + \frac{C_s h^3}{24 \rho h} \nabla^4 v_{n+1} = \frac{v_n}{\Delta t} - \frac{C_s h^3}{24 \rho h} \nabla^4 v_n - \frac{D}{\rho h} \nabla^4 z_n + \frac{f_v}{\rho h} + \frac{f_{hz}}{\rho h} + \frac{f_{hx}}{\rho h} \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} - g \quad (5)$$

$$z_{n+1} = z_n + v_{n+1} \Delta t \quad (6)$$

$$I_{m,n+1} = I_{m,n} + \frac{e_{m,n} - R_m I_{m,n}}{L} \Delta t \quad (7)$$

ここで、 v : 鋼板の鉛直方向の速度、 Δt : 時間刻みの幅、 n : 時間刻みの番号である。式(5)の右辺に示されるように、時間刻み番号 n における z を既知として、時間刻み番号 $n+1$ の z を求め、それを式(6)に代入し、時間刻み番号 $n+1$ の z を求めるという反復解法により鋼板の振動が求められる。また同様に各電磁石位置における鋼板の変位 z_m と式(7)で求めた電磁石コイル電流 I_m

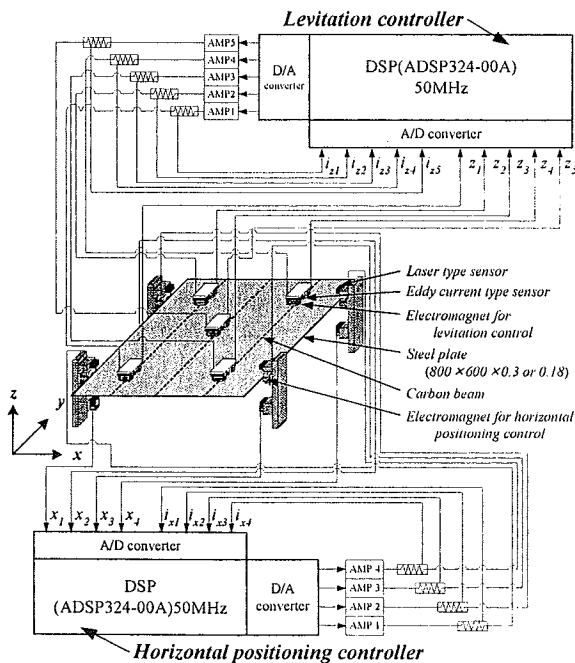


Fig.1 Electromagnetic levitation control system with horizontal positioning controller.

を式(3)に代入することによって浮上用電磁石の吸引力が決定される。このとき式(5)の各項の差分は次のように表される。

$$\frac{\partial^4 z}{\partial x^4} = \frac{z_{i+2,j} - 4z_{i+1,j} + 6z_{i,j} - 4z_{i-1,j} + z_{i-2,j}}{\Delta x^4} \quad (8)$$

$$\frac{\partial^4 z}{\partial y^4} = \frac{z_{i,j+2} - 4z_{i,j+1} + 6z_{i,j} - 4z_{i,j-1} + z_{i,j-2}}{\Delta y^4} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^4 z}{\partial x^2 \partial y^2} = & \frac{z_{i+1,j+1} - 2z_{i,j+1} + z_{i-1,j+1}}{\Delta x^2 \Delta y^2} \\ & + \frac{-2z_{i+1,j} + 4z_{i,j} - 2z_{i-1,j}}{\Delta x^2 \Delta y^2} \\ & + \frac{z_{i+1,j-1} - 2z_{i,j-1} + z_{i-1,j-1}}{\Delta x^2 \Delta y^2} \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、 Δx 、 Δy は x 方向、 y 方向におけるそれぞれの空間刻みの幅であり、 i 、 j は、それぞれ x 方向、 y 方向に対する空間刻みの番号である。鋼板のコーナーとエッジでは、板の境界を越える点が生じる。鋼板の外部に仮想点を設け、境界条件が満たされる条件により仮想点の値が消去でき、鋼板のコーナーとエッジの値を決定するための式が導かれる。また本報告では鋼板の y 方向にカーボンパイプを貼り付けているのでポアソン比 ν は 0 とし、かつ y 方向の剛性を無限大（数値計算上は非常に大きな値を代入）とすることによって y 方向には曲がらないものとして解析を行っている。ここで、磁気浮上用電磁石の吸引力、水平方向位置決め用電磁石の復元力、張力は y 方向に一様に加わるとすることでこの影響を模擬する。なお磁場解析には Photon(株式会社 Photon)、ブリポストプロセッシングには FEMAP(Enterprise Software Products, Inc.) を使用し、数値解析は式(3)、(5)、(6)、(7)に基づき行う。

4. 制御系設計

4.1 制御モデルの作成

4.1.1 磁気浮上モデル

鋼板に対して 5 箇所配置した渦電流式非接触変位計の各位置における鋼板の絶対変位、並びにそのデジタル微分値である絶対速度、一対の電磁石コイルに流れる電流を各電磁石それぞれの制御電圧の決定に用いる独立制御を実施する。そこで Fig.2 に示すように鋼板の質量を近似的に均等 5 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。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。

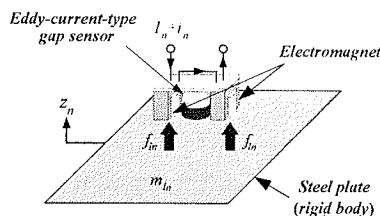


Fig.2 Theoretical model of levitation control of the steel plate.

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。

$$m_z \ddot{z} = 2f_z \quad (11)$$

$$f_z = \frac{2F_z}{Z_0} z + \frac{2F_z}{I_z} i_z \quad (12)$$

$$\frac{d}{dt} i_z = -\frac{L_{eff}}{L_z} \cdot \frac{I_z}{Z_0^2} \dot{z} - \frac{R_z}{2L_z} i_z + \frac{1}{2L_z} v_z \quad (13)$$

$$L_z = \frac{L_{eff}}{Z_0} + L_{lea} \quad (14)$$

ここで、 $m_z = m/5$ 、 m ：磁気浮上対象の質量、 z ：鋼板の平衡浮上位置からの変位、 f_z ：電磁石 1 個当りの吸引力の変動値、 F_z ：静的吸引力、 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_z ：静的吸引力を得るための定常電流、 i_z ：電磁石コイル電流の変動値、 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、 R_z ：2つの電磁石コイルの総抵抗値、 v_z ：電磁石コイルに加わる定常電圧からの変動値、 L_{lea} ：電磁石の漏れ磁束に相当する定数である。

4.1.2 水平方向位置決めモデル

水平方向の運動は一軸方向のみに運動する 1 自由度系としてモデル化する。したがって、鋼板の一辺に配置した 2 個の電磁石からは同じ吸引力が発生するとして Fig.3 に示すような鋼板の 2 分の 1 を対象としたモデルを考える。運動方程式は以下のようになる。

$$m_x \ddot{x} = f_1 - f_2 + f_w = f_x + f_w \quad (15)$$

$$f_x = \frac{4F_x}{X_0} x + \frac{4F_x}{I_x} i_x \quad (16)$$

$$\frac{d}{dt} i_x = -\frac{L_{xeff}}{L_x} \cdot \frac{I_x}{X_0^2} \dot{x} - \frac{R_x}{2L_x} i_x + \frac{1}{2L_x} v_x \quad (17)$$

ここで、 $m_x = m/2$ 、 x ：鋼板の水平平衡位置からの変位、 f_w ：外乱、 F_x ：静的吸引力、 X_0 ：平衡状態における電磁石表面と鋼板エッジとのギャップ、 I_x ：静的吸引力を得るための定常電流、 i_x ：電磁石コイル電流の変動値、 L_x ：水平方向位置決め電磁石コイルのインダクタンス、 R_x ：2つの電磁石コイルの総抵抗値、 v_x ：電磁石コイルに加わる定常電圧からの変動値、 L_{xlea} ：電磁石の漏れ磁束に相当する定数、 L_{xeff} ：電磁石の有効磁束に相当する定数である。

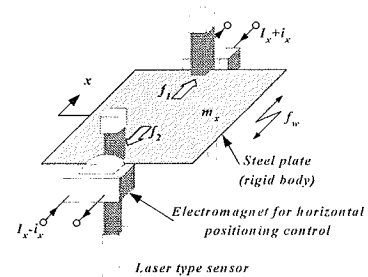


Fig.3 Theoretical model of horizontal positioning control of the steel plate.

4.2 最適制御理論

4.1 節において設計したシステムを用いて制御則を求める。本研究では制御系を離散時間系で構成する。そこで、磁気浮上制御、水平方向位置決め制御それぞれに対する連続系の評価関数を離散化し、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¹³⁾と次式のようになる。

$$z_d(i+1) = \Phi z_d(i) + \Gamma v_d(i) \quad (18)$$

$$\Phi = \exp(A_p T_s), \Gamma = \int_0^{T_s} \exp(A_p \tau) d\tau B_p$$

ここで離散時間系の評価関数は次のように表される。

$$J_d = \sum_{i=0}^{\infty} [z_d(i)^T Q_d z_d(i) + v_d(i)^T r_d v_d(i)] \quad (19)$$

ただし Q_d : 鋼板の絶対変位, 絶対速度, 電磁石コイルに流れる電流に関する重み係数を要素とする行列。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 型代数方程式において正定対称解 M を求めることで得られる。

$$M = \Phi^T M \Phi + Q_d - \Phi^T M \Gamma (r_d + \Gamma^T M \Gamma)^{-1} \Gamma^T M \Phi \quad (20)$$

$$v_d^0 = -F_d z_d \quad (21)$$

$$F_d = (r_d + \Gamma^T M \Gamma)^{-1} \Gamma^T M \Phi$$

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。

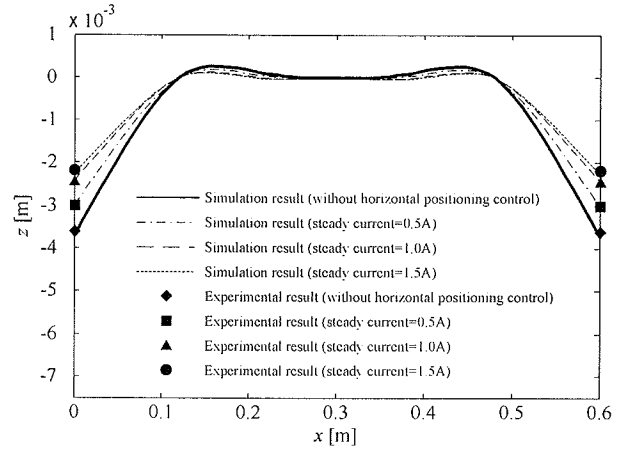
5. 実験ならびに数値解析

本報告では磁気浮上している鋼板の水平方向に対して磁場を印加した場合の磁気浮上鋼板の形状測定とインパルス外乱入力実験を行う。

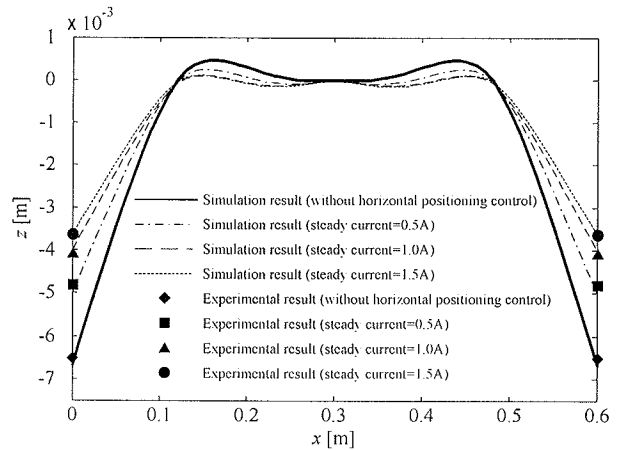
5.1 鋼板の形状変化に関する検討

最適制御理論によって板厚 0.3mm, 0.18mm それぞれの鋼板を浮上させた後、水平方向位置決め制御を行う。なおその際鋼板エッジ部に対する磁場を発生させるための水平方向電磁石の定常電流を 0.5A, 1.0A, 1.5A と 3 通りに変化させた。Fig.4 (a), (b) はそれぞれ厚さ 0.3mm, 0.18mm 鋼板を y 方向(Fig.1)から見た磁気浮上鋼板の形状である。なお図の y 軸の 0mm 位置は各磁気浮上電磁石から 5mm の平衡浮上位置を表しており鋼板の形状は浮上初期の過渡的な状態から十分時間が経過し、振動が収まった状態を表している。また図中の ● 等の記号はレーザーセンサを用いて計測した鋼板の両端部における実験値であり、実線、破線等は前節で示したモデルを用いた磁気浮上時の鋼板の解析値である。実験値は 10 個のデータの平均から算出した。ここで鋼板両端部における実験値と数値解析結果は 5% 以内の誤差範囲に収まっている。

両図において水平方向位置決め制御を行わない場合と、定常電流を 1.5A 付加した場合を比較すると厚さ 0.3mm 鋼板の最大たわみは 42% 低減されており、0.18mm の極薄鋼板においても最大たわみは 43% 低減されている。極薄鋼板に対しても水平方向からの磁場には重力により垂れ下がった鋼板を引き上げ、鋼板を平坦に近づける方向へ作用することが確認できた。



(a) Shape of steel plate (Plate thickness = 0.3mm).



(b) Shape of steel plate (Plate thickness = 0.18mm).

Fig.4 Deflection of the steel plate.

5.2 鋼板の弾性振動抑制に関する検討

Fig.5, 6 に板厚 0.3mm, 0.18mm の鋼板中央部の時間応答波形をそれぞれ示す。同図の縦軸は鋼板平衡浮上位置からの変位であり、(a) は水平方向位置決め制御を行わない場合、(b) は定常電流 0.5A で水平方向位置決め制御を行った場合、(c) は定常電流 1.0A で水平方向位置決め制御を行った場合、(d) は定常電流 1.5A で水平方向位置決め制御を行った場合である。同図より、両鋼板において、水平方向位置決め制御を適用することで過度応答時の弾性振動の振幅が小さくなり、定常電流を増加させるに従い収束が早くなることが確認できる。この結果は水平方向位置決め制御による鉛直方向への弾性振動抑制効果を示すものである。

また、同図における鋼板中央部の最大片振幅(1mm)が 2% 以内 に収束するまでの時間を比較すると、水平方向位置決め制御を行わない場合において、板厚が 0.3mm の場合では収束時間が約 1.5 秒であるのに対し、板厚が 0.18mm の場合では約 3.6 秒要している。これは板厚の薄い鋼板の方が曲げ剛性や内部減衰力が低いためであると考えられる。しかし水平方向位置決め制御を行った場合、定常電流 1.5A での収束時間は 0.3mm の場合で約 66% まで減少したのに対して、0.18mm の場合では約 29% にまで減少し、両者とも収束時間が約 1 秒とほぼ同程度にまで短くなっていることがわかる。この結果より、水平位置決め制御による鉛直方向の弾性振動抑制効果は、安定浮上制御が難しい極薄鋼板に対してより効果的であることがわかる。

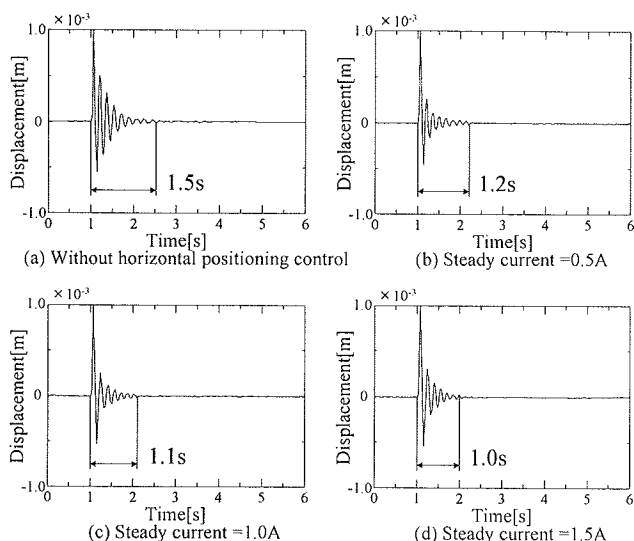


Fig.5 Time histories of vibration of steel plate (Plate thickness = 0.3mm).

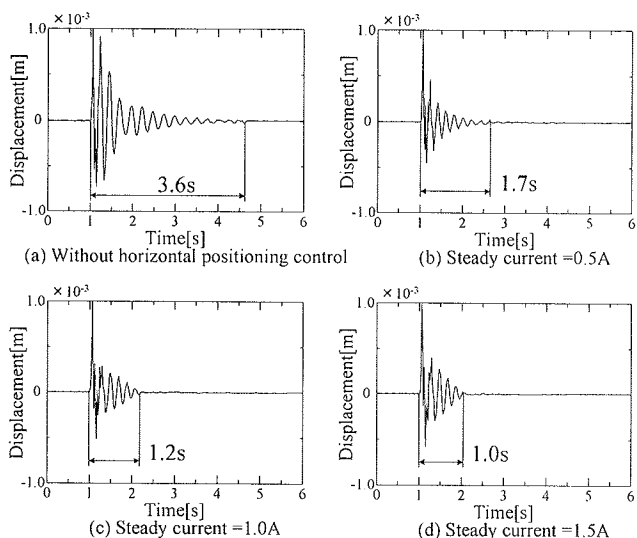


Fig.6 Time histories of vibration of steel plate (Plate thickness = 0.18mm).

6. 結言

本報告では、板厚 0.18mm の極薄鋼板が水平方向からの磁場によってどのような影響を受けるかを明らかにするために実験的検討を行った。

その結果、水平方向非接触位置決め制御は、板厚 0.3mm の鋼板と比較して 0.18mm の鋼板に対し、弾性振動の抑制に十分効果があることが明らかとなり、外乱などにより振動が発生しやすく、安定浮上が難しい極薄鋼板に対して水平方向位置決め制御が有効であることを確認できた。

謝辞

本報告に際して東海大学工学部(現 株式会社 OA 研究所)竹田 彰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) 押野谷, 小林, 丹野: 相対する二辺が梁で補強された長方形薄鋼板の磁気浮上最適制御, 日本機械学会論文集(C 編),

Vol.62, No.600, (1996), pp.127-133.

- 2) T.Nakagawa, M.Hama, and T.Furukawa : Study of Magnetic Levitation Technique Applied to Steel Plate Production Line, IEEE Trans Magn, Vol.36, No.5, (2000), pp.3686-3689.
- 3) M.Sase, S.Torii : Magnetic levitation control with real-time vibration analysis using finite element method, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol.13, (2001/2002), pp.129-136.
- 4) Y.Oshinoya, T.Obata : Noncontact Vibration Control of a Magnetic Levitated Rectangular Thin Steel Plate, JSME International Journal, Vol.45, No.1, (2001), pp.60-69.
- 5) 森下, 明石: 傾斜案内鋼板磁気浮上装置用アクチュエータ制御方式の検討電気学会全国大会講演論文集, (1997), pp.183-184.
- 6) 林屋, 大崎, 正田: 横方向磁束型リニアモータを用いた鋼板の磁気浮上搬送, 電気学会論文誌(D 編), Vol.120, No.7, (2000), pp.928-933.
- 7) 押野谷, 石橋, 関原: 磁気浮上長方形薄鋼板の搬送制御(弾性振動を抑制した鋼板の水平方向慣性力に対する非接触制御機構の提案), 日本機械学会論文集(C 編), Vol.68, No.669, (2002), pp.86-92.
- 8) 押野谷, 関原: 四辺自由鋼板の磁気浮上搬送制御(平面内位置決めに関する基礎的考察), 第 11 回電磁力関連のダイナミックスシンポジウム, (1999), pp.154-155.
- 9) 長谷川, 土井, 押野谷, 石橋: 四辺自由鋼板の磁気浮上搬送制御(有限差分法を用いた振動解析), 第 17 回電磁力関連のダイナミックスシンポジウム, (2005), pp.153-156.
- 10) S.Hasegawa, Y.Oshinoya and K.Ishibashi : Study on Conveyance Control for a Levitated Flexible Thin Steel Plate, ISMST'7, (2003), pp.240-247.
- 11) 長谷川, 土井, 齋藤, 押野谷, 石橋, 粕谷: 磁気浮上薄鋼板の非接触位置決め制御における水平方向安定化に関する検討, 東海大学工学部紀要, Vol. 46, No.1 (2006), 掲載可.
- 12) 例えば JFE 鋼板株式会社ホームページ
URL : <http://www.jfe-kouhan.co.jp/>.
- 13) K.Ogata : Modern Control Engineering, Prentice-Hall, inc, New Jersey, (1997), p915.