

## 水平方向の位置決め制御を用いた磁気浮上搬送システムにおける薄鋼板の板厚が浮上特性に与える影響

### Effects on Levitation Characteristics by Plate Thickness of Thin Steel Plate on Magnetic Levitation Transport System Using Horizontal Positioning Control

木田将寛<sup>a)</sup>・鈴木稔樹<sup>a)</sup>・小田吉帆<sup>a)</sup>・成田正敬<sup>a)†</sup>・加藤英晃<sup>a)</sup>・森山裕幸<sup>a)</sup>

<sup>a)</sup>東海大学, 神奈川県平塚市北金目 4-1-1 (〒259-1292)

M. Kida<sup>a)</sup>, T. Suzuki<sup>a)</sup>, Y. Oda<sup>a)</sup>, T. Narita<sup>a)†</sup>, H. Kato<sup>a)</sup>, and H. Moriyama<sup>a)</sup>

<sup>a)</sup> Tokai Univ., 4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka-shi, Kanagawa 259-1292, Japan

Thin steel plates are widely used in various industrial products. However, there are problems with deterioration of surface quality and metal plating that occur during transport. As a solution to these problems, the non-contact transport of steel plates by using electromagnetic force has been proposed. However, there is a risk that side slipping or dropping of the plate may occur. We propose the addition of electromagnetic actuators to control the horizontal motion of levitated steel plates. In this study, we examine the change in levitation stability during non-contact transport with the addition of positioning control in the horizontal direction in the case of changed thickness of the steel plate. Results, show that the application of a magnetic field in the horizontal direction improves the levitation stability of transported thin steel plates with different thicknesses of the plate.

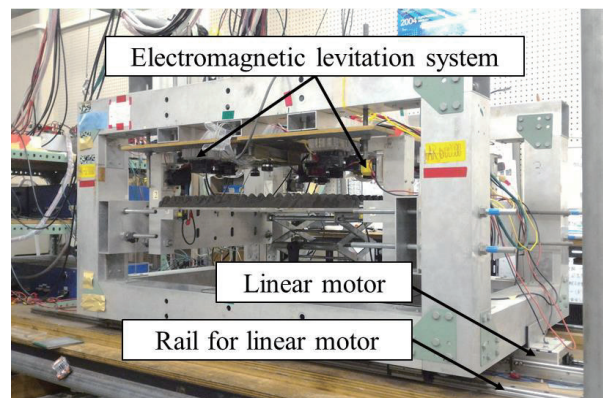
**Keywords:** electromagnetic levitation control, thin steel plate, vibration control, magnetic field, transportation

#### 1. 緒言

薄鋼板は多種多様な工業製品に広く重用されているが、その製造工程においてローラとの接触によるメッキの不良や表面品質の劣化により多大な損失が生じている。この問題の解決方法として磁気浮上による鋼板の非接触搬送技術が活発に検討されている<sup>1)3)</sup>。しかし磁気浮上技術に関する研究の多くは浮上対象が剛体と考慮できる物体についての検討であり、複雑な変形を起こす柔軟体の磁気浮上についての報告は少ない。

当研究グループでは薄く柔軟で浮上制御が困難である薄鋼板に着目し、鉛直方向に浮上制御を行うだけでなく、鋼板のエッジ部に電磁石ユニットを設置したシステムを提案している。これまでにエッジ部に設置した電磁石により鋼板の搬送方向に位置決め制御を行うことで横滑りや落下を防止し、非接触支持搬送が可能であることを明らかにした<sup>4)</sup>。さらに汎用有限要素法磁場解析ソフトJMAGにより搬送方向に設置した電磁石から鋼板に加わる吸引力を算出し、吸引力に対するたわみ形状を独自開発した有限差分法プログラムから求めた。これに基づき搬送させずに実施した浮上基礎実験では、水平方向に設置した電磁石からの吸引力により柔軟鋼板のたわみが抑制でき、浮上中の安定性を向上できることを明らかにした<sup>5)</sup>。

一方、実際の搬送工程を想定した場合、加減速による搬送方向の外乱が入力された際の浮上安定性も向上させていく必要がある。しかしながら磁気浮上鋼板の搬送中における浮上性能に与える影響については、未だ十分な検討は行っていない。そこで本研究では板厚0.24 mmおよび0.18 mmの薄鋼板を検討対象とし、搬送方向に設置した電磁石からの吸引力が非接触搬送時に与える影響を解析と実験より検証する。



**Fig. 1** Photograph of conveyance system of the steel plate.

#### 2. 薄鋼板の磁気浮上搬送システム

本システムは磁気浮上システムを収めたフレームと、フレームを搬送するためのリニアモータにより構成される。鋼板を搬送させる際は磁気浮上システムにより鋼板を磁気浮上させ、リニアモータを使用して磁気浮上システムごとフレームを移動させる。

搬送システムに搭載された磁気浮上システムの写真をFig. 1に、下面から見た電磁石の配置をFig. 2に、薄鋼板に対する浮上方向および水平方向電磁石の配置をFig. 3に示す。磁気浮上システムは鉛直方向の浮上制御システムと水平方向の位置決め制御システムにより構成される。また、磁気浮上システムの概略図をFig. 4に、搬送システムの概略図をFig. 5に示す。なお搬送方向を $x$ 軸、鋼板の面内で搬送方向に垂直な方向を $y$ 軸、鉛直方向を $z$ 軸と定義する。

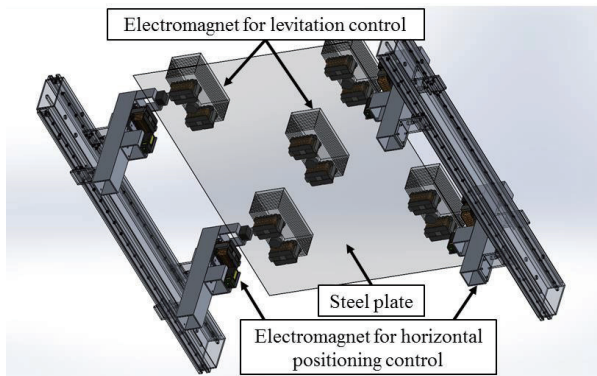


Fig. 2 Schematic illustration of electromagnetic levitation system.

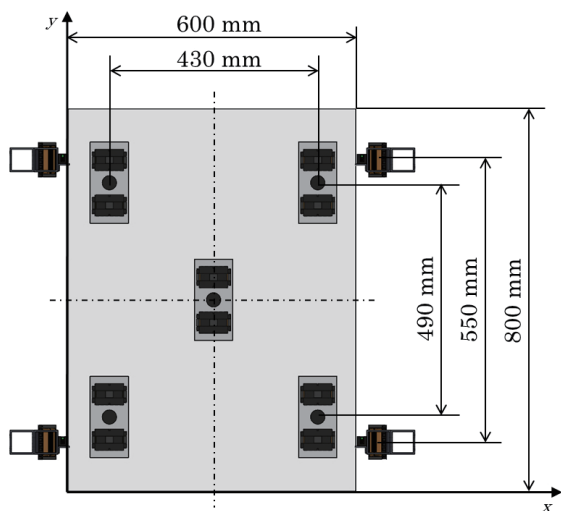


Fig. 3 Placement of electromagnetic levitation system.

浮上制御システムを Fig. 4 の上部に示す。浮上対象は長さ 800 mm、幅 600 mm の長方形垂鉛めっき鋼板 (材質 SS400) とする。浮上制御システムは Fig. 3 に示したように周囲と中央の 5 か所にペアの電磁石を設置し、各電磁石表面から鋼板表面までの距離を 5 mm に制御することで鋼板を磁気浮上させる。使用する電磁石コイルは線径が 0.5 mm、巻数は 1005 回とした。鉄心の断面積は 225 mm<sup>2</sup> で鉄心は Fig. 6 に示すようなフェライトを E 型に加工したものをを用いた。この電磁石の電気回路は直列結合されており、渦電流式の非接触変位センサを中央に挟むように配置してある。なお電磁石の磁場による変位センサ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ている<sup>6)</sup>。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、薄鋼板を磁気浮上させる。

水平方向の位置決め制御システムを Fig. 4 の下部に示す。浮上した鋼板のエッジに対して水平方向から電磁石による吸引力を加え、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 Fig. 6 で示した浮上制御システムで使

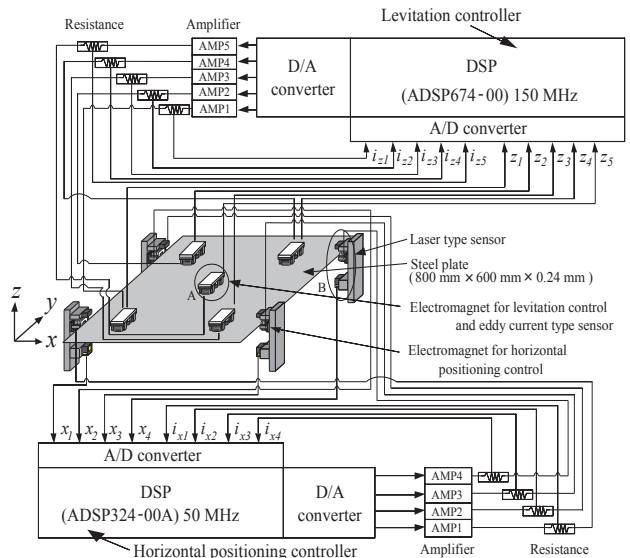


Fig. 4 Electromagnetic levitation control system with horizontal positioning control.

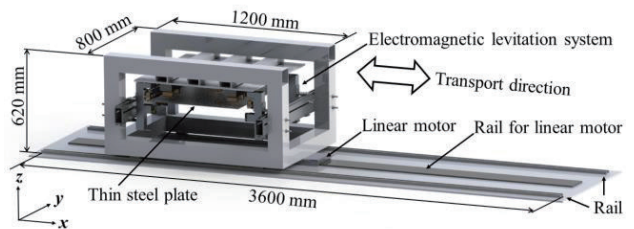


Fig. 5 Conveyance system of the steel plate.

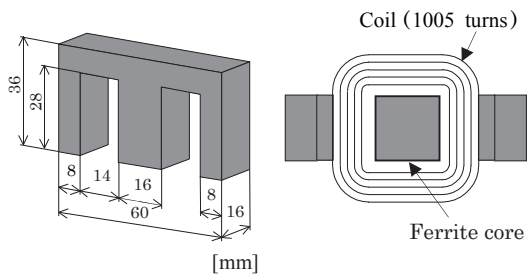


Fig. 6 Schematic illustration of electromagnet.

用したものと同一のものを使用する。これらが Fig. 2 および Fig. 3 に示したように、鋼板の相対する 2 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。

### 3. 制御モデル

#### 3.1 鉛直方向の浮上制御モデル

本研究では 1 か所の電磁石位置で検出した変位、速度と電磁石コイルの電流値をその電磁石に対してのみフィードバックする。そこで Fig. 7 に示すような磁気浮上対象の 5 分の 1 に相当する質量を浮上させる 1 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、

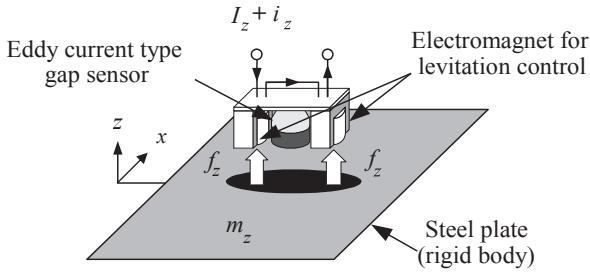


Fig. 7 Theoretical model of levitation control of the steel plate.

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。

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

ここで、 $m_z = m/5$  [kg]、 $m$ : 磁気浮上対象の質量 [kg]、 $z$ : 薄鋼板の平衡浮上位置からの鉛直方向変位 [m]、 $f_z(\theta)$ : 電磁石1個あたりの吸引力の変動値 [N]と置く。平衡点近傍での偏差が微小であるとすると、電磁石の特性方程式は式(2)~(4)のように線形化される。

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

$$\frac{d}{dt} i_z = -\frac{L_{zeff}}{L_z} \cdot \frac{I_z}{Z_0^2} \dot{z} - \frac{R_z}{2L_z} i_z + \frac{1}{2L_z} v_z \quad (3)$$

$$L_z = \frac{L_{zeff}}{Z_0} + L_{zlea} \quad (4)$$

式(1)~(4)を整理して以下のような状態方程式を得る。

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}_z \mathbf{z} + \mathbf{B}_z \mathbf{v}_z \quad (5)$$

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} z & \dot{z} & i_z \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathbf{A}_z = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{4F_z}{m_z Z_0} & 0 & \frac{4F_z}{m_z I_z} \\ 0 & -\frac{L_{zeff}}{L_z} \cdot \frac{I_z}{Z_0^2} & -\frac{R_z}{2L_z} \end{bmatrix},$$

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

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間隔 [m]、 $F_z$ : 電磁石ユニットから発生する静的な吸引力 [N]、 $L_z$ : 静的吸引力を得るための定常電流値 [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

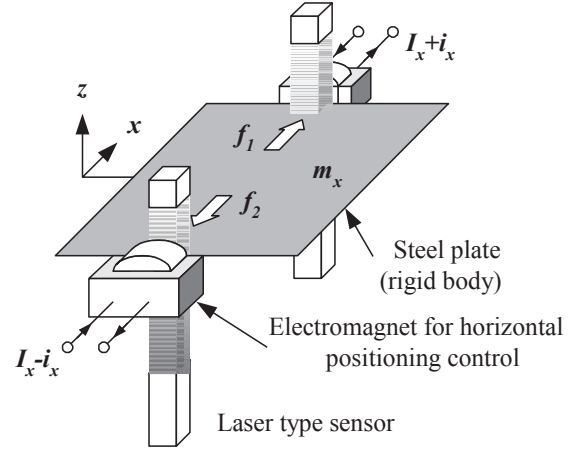


Fig. 8 Theoretical model of horizontal positioning control of the steel plate.

ルに加わる定常電圧からの変動値 [V]、 $L_{zeff}/Z_0$ : 電磁石の有効磁束に相当する定数 [H]、 $L_{zlea}$ : 電磁石の漏れ磁束に相当する定数 [H]である。

### 3.2 水平方向の位置決め制御モデル

Fig. 8に示すように、水平方向の運動は1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1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た。鋼板の2辺に対向するように1つずつ電磁石を配置し、同じ静的吸引力を加えることによって鋼板の平衡状態があり、そこからの鋼板の微小変化による水平方向の運動方程式は次のように表される。

$$m \ddot{x} = f_1 - f_2 = f_x \quad (6)$$

$$f_x = \frac{4F_x}{X_0} x + \frac{4F_x}{I_x} i_x \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt} i_x = -\frac{L_{xeff}}{L_x} \cdot \frac{I_x}{X_0^2} \dot{x} - \frac{R_x}{2L_x} i_x + \frac{1}{2L_x} v_x \quad (8)$$

$$L_x = \frac{L_{xeff}}{X_0} + L_{xlea} \quad (9)$$

式(6)~(9)を整理して以下のような状態方程式を得る。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_x \mathbf{x} + \mathbf{B}_x \mathbf{v}_x \quad (10)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x & \dot{x} & i_x \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{A}_x = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{4F_x}{m_x X_0} & 0 & \frac{4F_x}{m_x I_x} \\ 0 & -\frac{L_{xeff}}{L_x} \cdot \frac{I_x}{X_0^2} & -\frac{R_x}{2L_x} \end{bmatrix},$$

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



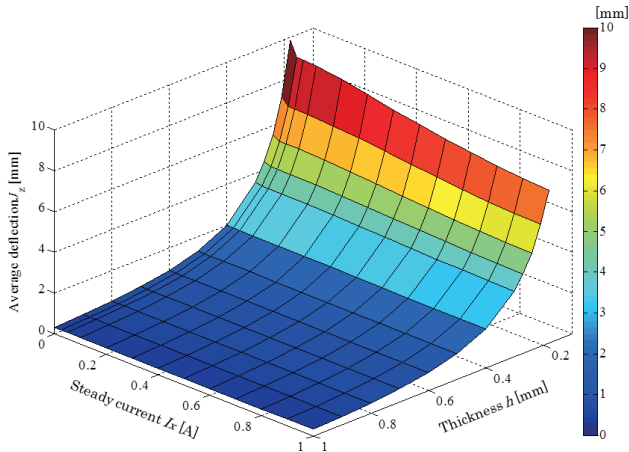


Fig. 9 Relationship between steady current  $I_x$ , thickness  $h$  and average deflection  $J_z$ .

ここで、 $F_x$ : 静的吸引力 [N],  $X_0$ : 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],  $I_x$ : 静的吸引力を得るための定常電流値 [A],  $i_x$ : 電磁石コイル電流の変動値 [A],  $L_x$ : 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],  $R_x$ : 2つの電磁石コイルの総抵抗値 [ $\Omega$ ],  $v_x$ : 電磁石コイルに加わる定常電圧からの変動値 [V],  $L_{\text{eff}}/X_0$ : 電磁石の有効磁束に相当する定数 [H],  $L_{\text{lea}}$ : 電磁石の漏れ磁束に相当する定数 [H]である。

#### 4. 薄鋼板の形状解析

浮上中の鋼板に水平方向に設置した電磁石からの吸引力が与える影響を明らかにするため鋼板の水平方向に電磁石を設置し、鋼板全体を鉛直下向きに変位を与えた場合の鋼板の平均たわみを電磁界解析ソフト JMAG を用いて算出した。水平方向の電磁石に与える電流値  $I_x$  は 0 A ~ 1.0 A の範囲で変化させた。また鋼板の板厚は 0.18 mm ~ 1.0 mm の範囲で解析を行い、各条件において  $I_x$  を変化させ平均たわみの算出を行った。

Fig. 1 の装置によって薄鋼板を浮上させたときの鋼板形状を求める。長方形薄鋼板の静的なたわみの方程式は次式で表される。

$$D \nabla^4 z = f_z + f_x \frac{\partial^2}{\partial x^2} z - \rho h g \quad (11)$$

$$D = \frac{E h^3}{12(1-\nu^2)}, \quad \nabla^4 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4}$$

ここで  $E$ : 薄鋼板のヤング率 [N/m<sup>2</sup>],  $h$ : 薄鋼板の厚さ [m],  $\nu$ : ポアソン比,  $x$ : 薄鋼板の短手方向の座標 [m],  $y$ : 薄鋼板の長手方向の座標 [m],  $z$ : 薄鋼板の変位 [m],  $f_x$ : 水平方向に設置した電磁石による薄鋼板の単位面積あたりに加わる鉛直方向の外力 [N/m<sup>2</sup>],  $f_z$ : 水平方向に設置した電磁石による薄鋼板の単位長さあたりに加わる水平方向の外力 [N/m],  $\rho$ : 薄鋼板の密度 [kg/m<sup>3</sup>],  $g$ : 重力加速度 [m/s<sup>2</sup>]である。

式(11)を用いて、薄鋼板の平均たわみを差分法によって計算した。その結果を Fig. 9 に示す。同図より、板厚が厚い場合は  $I_x$  を増加させても平均たわみ  $J_z$  がほぼ変化しないことが分かった。しかし

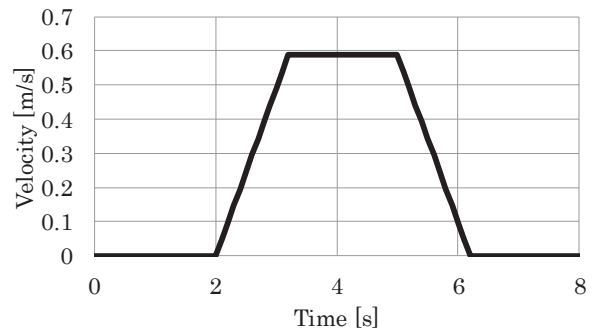


Fig. 10 Time history of command transportation velocity.

板厚が薄くなるほど  $I_x = 0$  A のときの平均たわみ  $J_z$  が増加し、 $I_x$  を増加させたときの平均たわみ  $J_z$  の抑制量も増加した。特に板厚が最も薄い 0.18 mm では  $I_x = 0$  A で 10 mm に対し、 $I_x = 1.0$  A で 6.5 mm とたわみが 65% 低減でき、 $I_x$  を増加させたときの効果が顕著に表れた。これより水平方向に設置した電磁石からの吸引力の印加は鋼板の板厚が薄くなるほど平均たわみを抑制する効果があることを確認した。

### 5. 磁気浮上鋼板の搬送実験

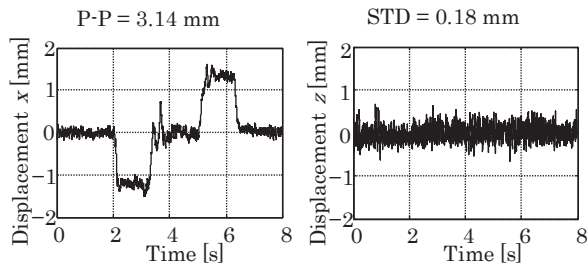
#### 5.1 実験条件

搬送した際の磁気浮上鋼板の安定性を評価するため、磁気浮上鋼板の搬送実験を行った。搬送装置に搭載したリニアモータの速度指令値の時刻歴を Fig. 10 に示す。磁気浮上鋼板を含むフレームは初期静止状態から 1.2 秒間一定の加速度で走行し等速で走行した後、加速時と同等の減速度で停止する。実験条件は加速度 0.49 m/s<sup>2</sup>、速度 0.6 m/s とした。測定開始から 2 秒後に搬送を開始し、搬送させる距離は 1.8 m とした。このとき浮上させた鋼板に対して水平方向位置決め制御の定常電流値を  $I_x = 0$  A ~ 0.5 A の範囲で変更した。

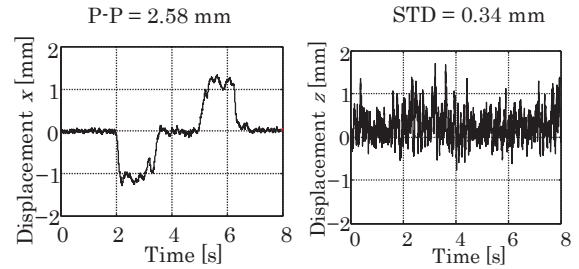
#### 5.2 振動抑制効果

Fig. 11 は板厚  $h = 0.24$  mm、搬送方向電磁石の定常電流値  $I_x = 0.025, 0.2, 0.4$  A における鋼板の変位時刻歴波形である。左側のグラフは搬送方向の変位であり、加減速時の鋼板の変位量を評価するため、図中に最大振幅値を P-P として記載した。また右側のグラフは鉛直方向の変位であり、比較的不規則な鋼板の振動を評価するため、図中に標準偏差を STD として記載した。同様に Fig. 12 に板厚  $h = 0.18$  mm の結果を示す。

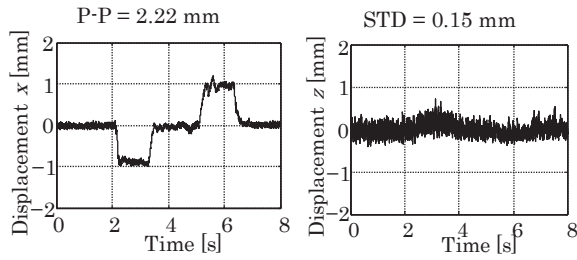
Fig. 11 と Fig. 12 の結果を比較すると、両板厚にて定常電流値  $I_x$  を増加させることで鋼板搬送方向の最大振幅が減少し、鉛直方向の振動も抑制できたことが分かる。板厚の薄い 0.18 mm の場合、 $I_x = 0.025$  A における搬送方向の最大振幅が 2.58 mm であるのに対し、 $I_x = 0.4$  A では 1.64 mm となり、最大振幅が約 40% 抑制できた。またいずれの板厚においても等速で走行する区間の搬送方向の変位は十分に制御されていることから、等速区間の速度は搬送性能に影響しないことが分かった。鉛直方向の標準偏差は  $I_x = 0.025$  A では 0.34 mm であったのに対し、 $I_x = 0.4$  A では 0.11 mm となり、浮上制御のパラメータはすべて一定であるにもかかわらず振動が約 70% 抑制できた。



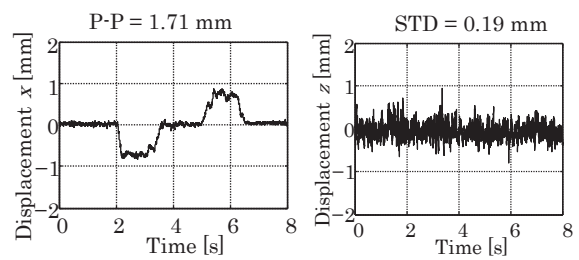
(a)  $I_x = 0.025 A$



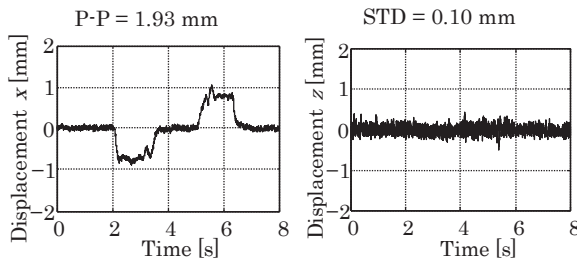
(a)  $I_x = 0.025 A$



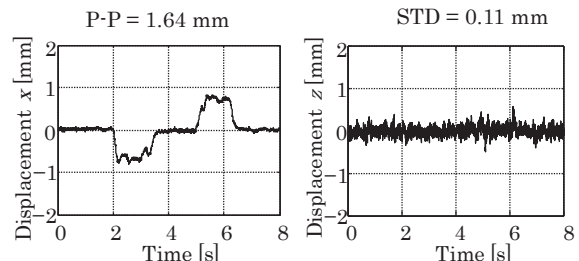
(b)  $I_x = 0.2 A$



(b)  $I_x = 0.2 A$



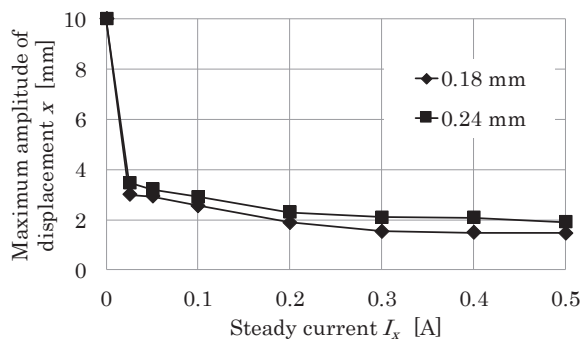
(c)  $I_x = 0.4 A$



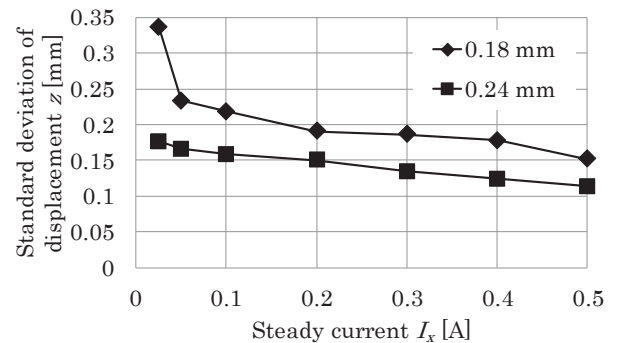
(c)  $I_x = 0.4 A$

**Fig. 11** Time histories of vertical and horizontal displacement of the steel plate. (0.24 mm)

**Fig. 12** Time histories of vertical and horizontal displacement of the steel plate. (0.18 mm)



**Fig. 13** Relationship between steady current  $I_x$  and maximum amplitude of displacement  $x$ .



**Fig. 14** Relationship between steady current  $I_x$  and standard deviation of displacement  $z$ .

各搬送条件における搬送方向変位の最大振幅と定常電流値  $I_x$  の関係を Fig. 13 に示す。0 A の場合には搬送中に搬送方向の電磁石に接触したため変位量は 10 mm とした。いずれの板厚においても、水平方向の位置決め制御を行うことにより安定した搬送を行うことができ、定常電流値が増加することで搬送方向の変位は抑制されることが分かった。なお搬送方向変位の傾向は、0.18 mm

の方が 0.24 mm よりも振幅の抑制が確認できる。Fig. 9 の電磁界解析結果より、定常電流  $I_x = 0.5 A$  における鋼板に発生する吸引力は板厚 0.18 mm で 0.184 N, 0.24 mm で 0.236 N であった。このとき鋼板 1 g あたりの吸引力は 0.18 mm で  $2.72 \times 10^{-4} N$ , 0.24 mm で  $2.61 \times 10^{-4} N$  となる。以上のことから板厚が薄い方が鋼板の重量に対する制御力が大きいため、加減速時の変位が抑制できたと考

えられる。

一方、鉛直方向の変位標準偏差と定常電流値  $I_x$  の関係を Fig. 14 に示す。本実験ではすべての条件において浮上制御のシステム特性は一定である。それにもかかわらず搬送方向制御の定常電流値により同方向の張力を増加させることで浮上方向の安定性も高まることが確認できた。なお搬送方向とは異なり、鉛直方向では板厚が薄い方が振動しやすい傾向となった。

### 5.3 浮上確率実験

搬送方向に設置した電磁石からの吸引力が本システムの浮上性能に与える影響を実用的な面から評価するため、搬送中の浮上確率を取得した。搬送条件は5章と同様、加速度  $0.49 \text{ m/s}^2$  とし、 $I_x = 0 \text{ A} \sim 0.6 \text{ A}$  の範囲で変更した。各条件にて50回搬送実験を行い、搬送中の浮上確率を測定した。このとき搬送後30秒間浮上し続けた場合を浮上成功とし、搬送中に鋼板が鉛直方向および搬送方向の電磁石に接触した場合や落下した場合を失敗とした。なお30秒間浮上する場合は実用上問題とならない10分以上浮上継続が可能であることを予備実験より確認している。

各搬送条件における定常電流値  $I_x$  と浮上確率の関係を Fig. 15 に示す。同図より未制御ではどの搬送条件においても浮上が維持できなかったが、 $I_x = 0.025 \text{ A}$  を印加することにより、浮上確率が大きく上昇した。また薄鋼板の板厚が薄い  $0.18 \text{ mm}$  の場合の方が搬送中の浮上確率は全体的に低下するが、定常電流値を増加させるに従い、浮上確率は上昇する傾向が得られた。なお本システムは  $I_x = 1.0 \text{ A}$  以内であれば実用上十分な時間鋼板を浮上させることができるが、 $I_x = 0.5 \text{ A}$  であれば両条件において浮上確率は100%となり、十分な浮上安定性が得られることが分かった。

## 6. 結言

本研究は搬送方向に設置した電磁石からの吸引力が搬送中の磁気浮上鋼板の浮上性能に与える影響について検討するため、板厚  $0.24 \text{ mm}$  および  $0.18 \text{ mm}$  の鋼板を用いて搬送方向電磁石の定常

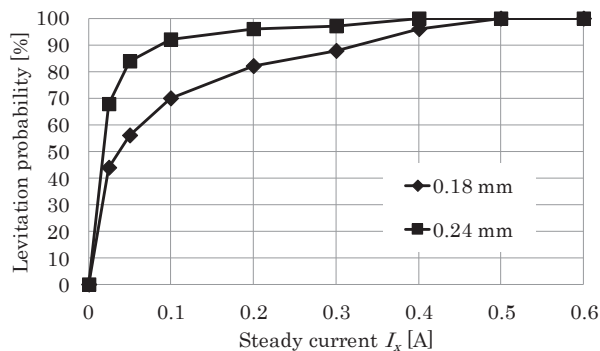


Fig. 15 Relationship between steady current  $I_x$  and levitation probability.

電流値を変化させて解析と実験を行った。その結果水平方向に設置した電磁石の定常電流値により鋼板に加わる張力を増加させることで、横滑りなどの要因である水平方向の変位は抑制でき、板厚が薄いほど鉛直方向の振動の低減効果も得られた。このことから水平方向からの磁場が鉛直方向の浮上制御系に依存せず搬送時に発生する振動を抑制する効果があることを明らかにした。

## References

- 1) S. Matsumoto, Y. Arai, and T. Nakagawa: *IEEE Trans. Magn.*, **50**, 8600304 (2014).
- 2) T. Namerikawa, and D. Mizutani: *Trans. IEEJ.*, **36**, 1319 (2006).
- 3) M. Morisita, and M. Akasi: *IEEJ Trans. Industry Appl.*, **119**, 1289 (1998).
- 4) Y. Oshinoya, K. Ishibashi, and T. Sekihara: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. C*, **68**, 1428 (2002).
- 5) T. Narita, T. Kurihara, and H. Kato: *Mech. Eng. J.*, accepted.
- 6) Y. Oshinoya, S. Kobayashi, and K. Tanno: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. C*, **62**, 3067 (1996).

2016年11月3日受理, 2017年3月21日採録