

水平方向からの磁場が磁気浮上鋼板に与える影響 (張力の印加位置に関する実験的検討)

Effect of Magnetic Field from Horizontal Direction on Magnetically Levitated Steel Plate (Experimental Consideration of Applied Position of Tension)

伊藤誉淳^{a)}・小田吉帆^{a)}・成田正敬^{a)†}・加藤英晃^{a)}

^{a)} 東海大学大学院工学研究科機械工学専攻, 神奈川県平塚市北金目 4-1-1 (〒259-1292)

Y. Ito^{a)}, Y. Oda^{a)}, T. Narita^{a)†}, H. Kato^{a)}

^{a)} Tokai Univ., 4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka-shi, Kanagawa 259-1292, Japan

Thin steel plates are widely used in various industrial products, and these products demand plates with a high-quality surface. However, there is a problem in that surface quality and metal plating are degraded during transport. As a solution to this, non-contact transport of steel plates electromagnetic force has been proposed. It was previously confirmed that, by applying a magnetic field in the horizontal direction, the levitation stability of transported thin steel plates improved under different transport conditions. However, the positions at which to install the electromagnets in the horizontal direction has not yet been investigated. Therefore, in this report, we investigated the positions at which a magnetic field should be applied in the horizontal direction and confirmed that the positions are related to improving the levitation stability of steel plates.

Key words: electromagnetic levitation control, thin steel plate, magnetic field, transportation, finite difference methods

1. はじめに

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大きな問題が生じている。この問題の解決策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¹⁻³⁾。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性がある物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。エッジ部に設置した電磁石により鋼板の水平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⁴⁾。さらに有限要素法による水平方向の磁場の電磁界解析を行い鋼板に加わる吸引力を得て、有限差分法を用いた浮上中の鋼板形状を算出した。これに基づき実施した浮上実験では、水平方向からの磁場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⁵⁾。エッジ部に設置した電磁石からの磁場の強さを変化させることで様々な搬送条件でも浮上安定性が向上することを確認している。一方、エッジ部に設置した電磁石から鋼板に印加する磁場の位置によって浮上鋼板の形状が変化することが考えられる。それにより鋼板の浮上性能に変化がある。そこで、本研究では電磁石の位置が変化した際の鋼板形状の影響を検討するため、薄鋼板の

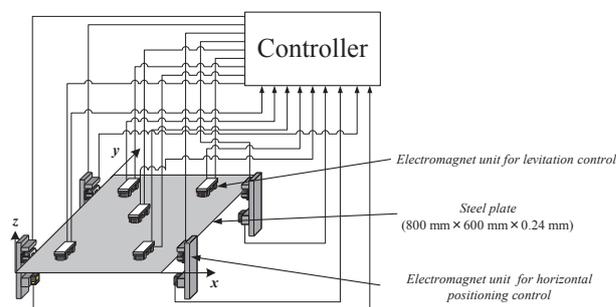


Fig. 1 Outline of electromagnetic levitation control system with horizontal positioning control.

柔軟性によるたわみが生じる板厚 0.24 mm の薄鋼板を対象とし、エッジ部に設置した電磁石の位置が浮上鋼板に与える影響を実験より検証する。

2. 鋼板形状の算出

2.1 磁気浮上システムの概略

磁気浮上システムの概略図を Fig. 1 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。浮上対象は長さ $l = 800$ mm, 幅 $w = 600$ mm, の長方形亜鉛めつき鋼板 (材質 SS400) とする。浮上制御システムは周囲と中央の 5 か所に浮上用電磁石ユニットを設置し、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。浮上した鋼板のエッジに対して水平方向位置決め制御用ユニットによる吸引力を加え、鋼板の相対する 2

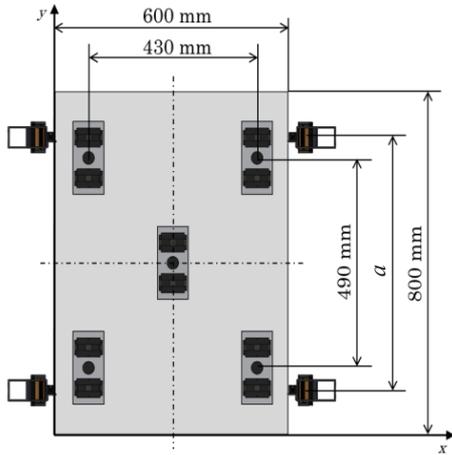


Fig. 2 Layout of electromagnetic levitation system.

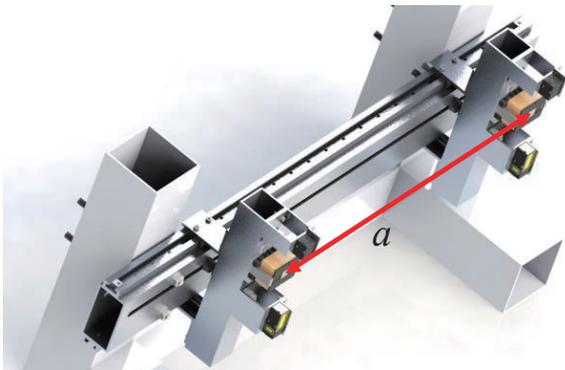


Fig. 3 Horizontal electromagnetic positioning mechanism.

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浮上用電磁石ユニットと水平方向位置決め制御用ユニットは Fig. 2 のように配置されている。水平方向位置決め制御用ユニットは Fig. 3 のように可動することができる。

2.2 鋼板形状解析モデル

電磁石中心間距離 a を変化させた際の浮上中の鋼板に水平方向からの磁場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算出する。水平方向の電磁石には鋼板の位置決め制御を行う制御電流（後掲 Fig. 8 の i_k ）と定期的に吸引力を発生させるための定常電流値（後掲 Fig. 8 の I_k ）が流れている。本解析では定常電流値 I_k は 0.025 A とする。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。

$$D\nabla^4 z = f_z + f_x \frac{\partial^2}{\partial x^2} z - \rho hg \quad (1)$$

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

ここで E : 薄鋼板のヤング率 [N/m²], h : 薄鋼板の厚さ [m], ν : 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/m²], 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], ρ : 薄鋼板の密度 [kg/m³], g : 重力加速度 [m/s²] である。なお、電磁界解析ソフト JMAG を用いて電磁石 1 つあたりの吸引力を解析し、電磁石中心間距離 a をもとに、鋼板全体に発生する f_x , f_z を算出した⁵⁾。

フィードバック制御を行っていることから浮上方向電磁石の位置で薄鋼板は単純支持され、水平方向電磁石は制御によって薄鋼板が制御点で静止していると仮定し、式(1)を用いて、薄鋼板のたわみを有限差分法 (FDM) によって計算する。このとき、差分解析格子の大きさは 10 mm×10 mm とした。差分解析により得られた各解析点のたわみを z_i とし、平均たわみ J_z を次式のように定義した。

$$J_z = \frac{\sum_{i=1}^N |z_i|}{N} \quad (2)$$

2.3 解析結果

式(1)を用いて、FDM により算出した鋼板形状を Fig. 4 に示す。Fig. 4 から電磁石中心間距離 $a = 220$ mm のとき鋼板の x 軸方向が最も大きなたわんでいる。しかし、電磁石中心間距離 a を徐々に長くしていくことで鋼板の x 軸方向のたわみは抑制され、鋼板のたわみは y 軸方向に移動していることが分かる。しかし、電磁石中心間距離 $a = 540$ mm よりも長くなってしまえば鋼板のたわみは完全に y 軸方向に移動してしまい、鋼板の y 軸方向のたわみが最も大きくなる。このことから水平方向電磁石は鋼板の中心よりも端部に設置した方がたわみ抑制効果が大きいたことが判明した。式(2)から算出した平均たわみ J_z と電磁石中心間距離 a の関係を Fig. 5 に示す。Fig. 5 から電磁石中心間距離 a が長くなっていくことで鋼板の平均たわみが減少していることが分かる。そして、電磁石中心間距離 a が 440 mm から 540 mm の間で最も平均たわみが抑制され、さらに電磁石中心間距離 a を長くしていくことで平均たわみも上昇していくことが確認できた。最もたわみを抑制できる電磁石位置で浮上性能の向上が期待できる。

3. 薄鋼板の磁気浮上システム

3.1 実験装置

磁気浮上装置のシステム詳細を Fig. 6 に示す。浮上用電磁石ユニットは 2 つの電磁石と薄鋼板までの変位を測定するための渦電流式非接触変位センサで構成されており、渦電流式非接触変位センサを中央に電磁石で挟むように配置してある。水平方向位置決め制御用ユニットは浮上用電磁石ユニットと同じ電磁石を 1 つとレーザ式センサの 1 基にて構成される。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。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

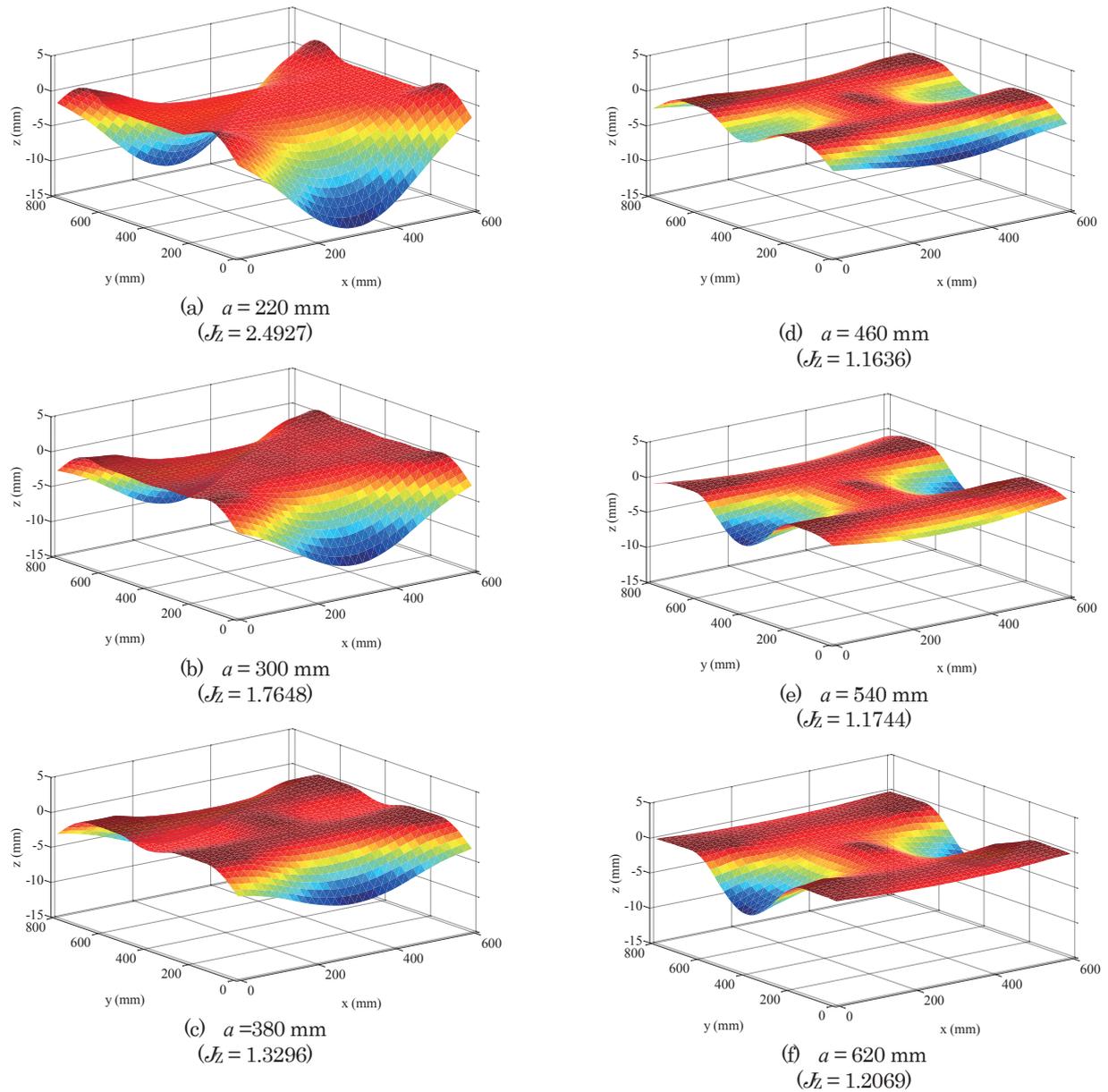


Fig. 4 Analytical shape of levitated steel plate (steady current $I_k = 0.025$ A, $h = 0.24$ mm).

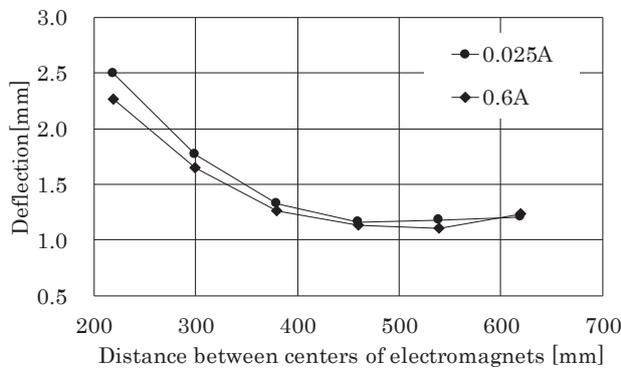


Fig. 5 Relationship between distance between center of electromagnet and average deflection.

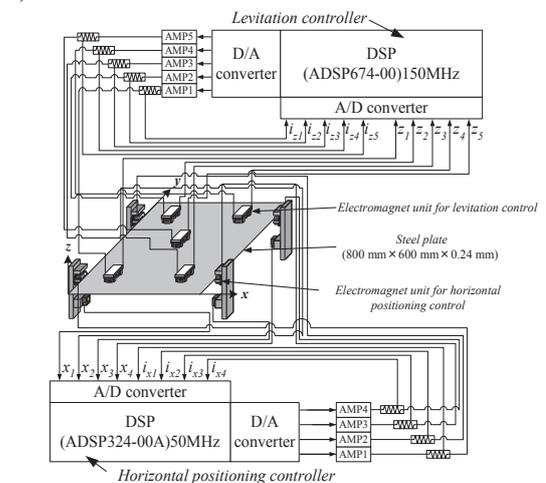


Fig. 6 Electromagnetic levitation control system with horizontal positioning control.

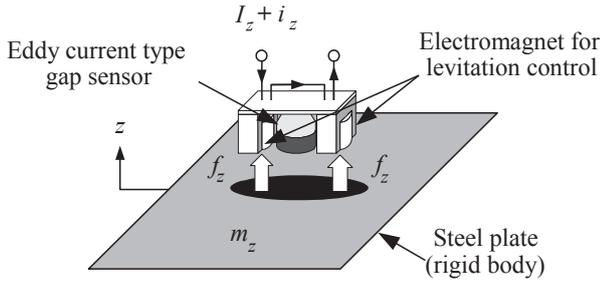


Fig. 7 Theoretical model of levitation control of steel plate.

及ぼす影響はほとんどないことを確認している⁶⁾。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。Fig. 6に示すとおり、本実験装置の制御システムでは2基のDSPで構成される。鉛直方向の浮上制御と水平方向位置決め制御についてそれぞれ独立して制御モデルを構築し、それぞれのDSPに実装して制御を行っている。

3.2 鉛直方向の浮上制御モデル

Fig. 6 上部に鉛直方向の浮上制御システムの詳細を示す。本研究では1カ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、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と平衡点近傍での電磁石の特性方程式から以下のような状態方程式が得られる⁷⁾。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{z}} &= \mathbf{A}_z \mathbf{z} + \mathbf{B}_z \mathbf{v}_z \\ \mathbf{z} &= [z \quad \dot{z} \quad i_z]^T, \\ \mathbf{A}_z &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{4F_z}{m_z Z_0} & 0 & \frac{4F_z}{m_z I_z} \\ 0 & -\frac{L_{\text{eff}}}{L_z} \cdot \frac{I_z}{Z_0^2} & -\frac{R_z}{2L_z} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B}_z &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{2L_z} \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (3)$$

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], I_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

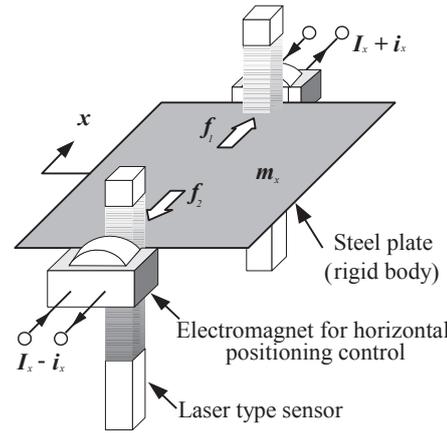


Fig. 8 Theoretical model of horizontal positioning control of steel plate.

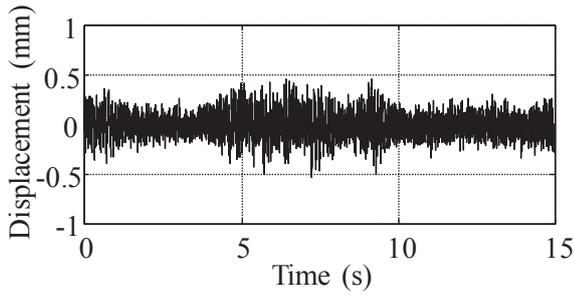
磁石コイルのインダクタンス[H], R_z : 2つの電磁石コイルの総抵抗値[Ω], v_z : 電磁石コイルに加わる定常電圧からの変動値[V], L_{eff}/Z_0 : 電磁石の有効磁束に相当する定数[H], L_{lea} : 電磁石の漏れ磁束に相当する定数[H]である。

3.3 水平方向の位置決め制御モデル

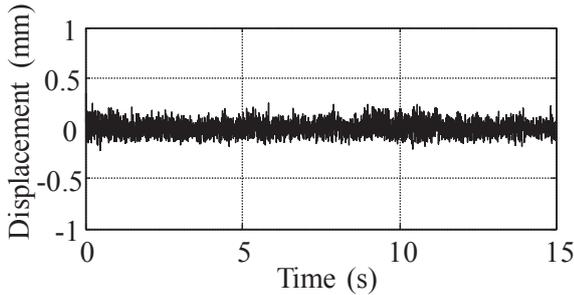
Fig. 6 下部に水平方向の位置決め制御システムの詳細を示す。Fig. 8に示すように、水平方向の運動は1軸方向のみに運動する1自由度系としてモデル化する。したがって、鋼板の1辺に配置した2個の電磁石からは同じ吸引力が発生するとした。鋼板の2辺に対向するように1つずつ電磁石を配置し、同じ静的吸引力を加えることによって鋼板の平衡状態があり、そこからの鋼板の微小変化による水平方向の状態方程式を得る⁷⁾。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}_x \mathbf{x} + \mathbf{B}_x \mathbf{v}_x \\ \mathbf{x} &= [x \quad \dot{x} \quad i_x] \\ \mathbf{A}_x &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{4F_x}{m_x X_0} & 0 & \frac{4F_x}{m_x I_x} \\ 0 & -\frac{L_{\text{xeff}}}{L_x} \cdot \frac{I_x}{X_0^2} & -\frac{R_x}{2L_x} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B}_x &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{2L_x} \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (4)$$

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], L_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[Ω], v_x : 電磁石コイルに加わる定常電圧からの変動値[V], L_{xeff}/X_0 : 電磁石の有効磁束に相当する定数[H], L_{lea} : 電磁石の漏れ

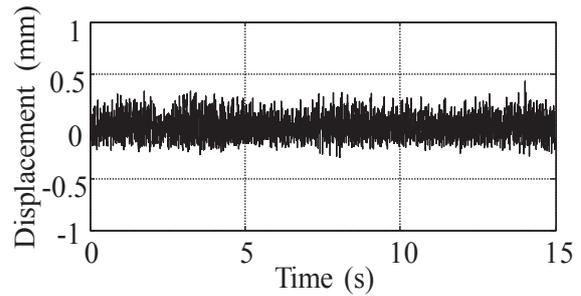


(a) $a = 150$ mm

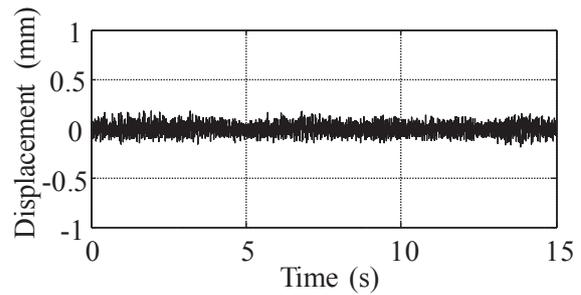


(b) $a = 550$ mm

Fig. 9 Time history of vertical displacement of steel plate ($I_k = 0.025$ A).



(a) $a = 150$ mm



(b) $a = 550$ mm

Fig. 10 Time history of vertical displacement of steel plate ($I_k = 0.5$ A).

磁束に相当する定数[H]である。なお v_x は状態変数 \mathbf{x} をフィードバックして次式のように得られる。

$$v_x = -F_x \mathbf{x} \quad (5)$$

$$F_x = [f_x \quad f_v \quad f_i]$$

このとき F_x はそれぞれの状態変数に対するフィードバックゲインである。

4. 浮上実験

4.1 実験条件

鋼板の浮上安定性を評価するために、浮上させた鋼板に対して水平方向からの磁場を印加し、電磁石中心間距離 a を変化させた浮上実験を行った。このとき、水平方向電磁石に印加する定常電流値は 0.025 A と 0.5 A の 2 種類を用いた。また、浮上方向、水平方向ともに電磁石中心間距離 a が変化した際にも同一のフィードバックゲインを用いた。なお、フィードバックゲインの探索は基礎実験において最も浮上困難であった電磁石中心間距離 $a = 150$ mm の位置で安定した浮上が可能であり、最高性能となるようなゲインを試行錯誤的に求めた。電磁石中心間距離 a は 150 mm から 650 mm まで、150 mm 刻みで 8 秒間、鋼板を浮上させた。

4.2 実験結果

定常電流値 I_k が 0.025 A と 0.5 A のときの制御点にて観測した鋼板の浮上方向の変位時刻歴波形を Fig. 9 と Fig. 10 に、電磁石中心間距離 a と鋼板の浮上方向変位標準偏差の

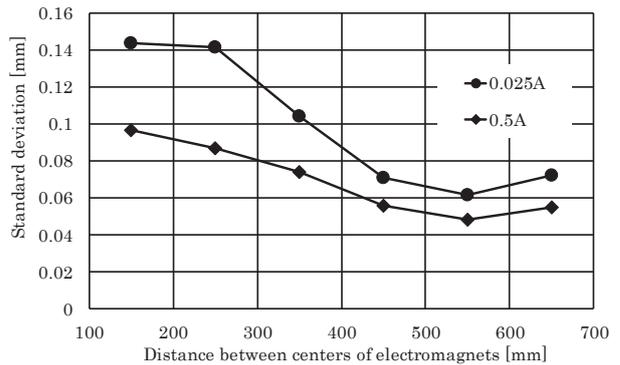


Fig. 11 Relationship of distance between centers of electromagnets and standard deviation.

関係を Fig. 11 に示す。Fig. 9 から電磁石中心間距離 a を 150 mm から 550 mm に変化させたところ薄鋼板の変位標準偏差が 57%抑制された。また、Fig. 10 から電磁石中心間距離 a を最適な位置に移動させることにより薄鋼板の変位標準偏差が 50%抑制された。さらに Fig. 11 から電磁石中心間距離 a が増加していくと変位標準偏差が減少していき、 $a = 550$ mm のとき最も変位標準偏差が低くなる。電磁石中心間距離 a を増加させていくと変位標準偏差も増加していく。この傾向は定常電流値が変化しても同様である。また、鋼板形状解析と一致することから、他の条件で安定浮上させる際には鋼板形状解析を行うことで水平方向電磁石の最適位置を求めることが可能であることが判明した。

5. まとめ

板厚 0.24 mm の薄鋼板に対し水平方向からの磁場を印

加させる位置を変化させたときの磁気浮上鋼板に与える影響を検証するために浮上中の柔軟鋼板のたわみ形状を算出し、それらをもとに浮上実験を行い薄鋼板の浮上安定性に関する検討を行った。その結果、水平方向から磁場を印加させる位置を変化することによって浮上中の薄鋼板の安定性が向上することを確認した。さらに、実験結果と解析結果の傾向が一致したことから、条件が限定的ではあるが鋼板形状解析を行うことで安定した浮上制御が可能な電磁石位置を推定することができた。

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. Morishita and M. Akashi: *IEEEJ 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.*, **3**, 15-00376 (2016).
- 6) Y. Oshinoya, S. Kobayashi, and K. Tanno: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. C*, **62**, 3067 (1996).
- 7) M. Kida, T. Suzuki, Y. Oda, T. Narita, H. Kato, and H. Moriyama: *Trans. Magn. Special Issues*, **1**, 76 (2017).

2018年10月31日受理, 2019年1月23日採録