

走行磁性体に対する非接触案内制御 (高速走行時に対する基礎的検討)

Noncontact Guide System for Elastic Steel Plates: Fundamental Considerations on High-Speed Travel

柏原賢・押野谷康雄*・石橋一久**

東海大学大学院, 神奈川県平塚市北金目 1117 (〒259-1292)

*東海大学工学部動力機械工学科, 神奈川県平塚市北金目 1117 (〒259-1292)

**東海大学第二工学部機械工学科, 東京都渋谷区富ヶ谷 2-28-4 (〒151-8677)

K. Kashiwabara, Y. Oshinoya*, and K. Ishibashi**

Graduate School of Tokai University, 1117 Kitakaname, Hiratsuka-shi, Kanagawa 259-1292, Japan

*Department of Mechanical Engineering, Tokai University, 1117 Kitakaname, Hiratsuka-shi, Kanagawa 259-1292, Japan

**Department of Mechanical Engineering, School of Engineering II, Tokai University, 2-28-4 Tomigaya, Shibuya-ku, Tokyo 151-8677, Japan

Recently, along with high-end products, users have come to demand steel plates with high quality and high added value manufactured by a continuous steel plate process. In the factory, a continuous thin steel plate subjected to iron and steel processes is supported by a series of rollers during processes such as rolling. In the plating process, the steel plate is conveyed 20–50 m in the vertical direction for drying, during which time it is not supported by rollers or other mechanisms. Therefore, plating nonuniformity due to the generation of vibration and other factors prevents an increase in productivity. To solve this problem, we developed a noncontact guide system for high-speed traveling steel plates in which electromagnetic forces are applied at the edges of the steel plates. The control performance in replacing the electromagnet with a permanent magnet, moreover thus eliminating the running cost, was examined, and the efficacy of the proposed system was verified by experiments.

Key words: steel plate, noncontact guide, vibration control, high-speed travel, permanent magnet

1. はじめに

製鉄所において薄鋼板のラインの長さは数 km にも及び、ローラにより接触支持されている。このような連続処理の一つであるめっき処理工程では、処理後に薄鋼板は乾燥のため鉛直方向や水平方向へ 20–50m 搬送される。その間乾燥のためにローラなどの支持ができず、同時に高い張力の付加ができないことから、鋼板支持のために設置されている上下ローラ間では振動、波動が発生する。特に、表面処理において品質の向上には、この振動を抑制することが重要な課題となっている。この問題解決法として、柳ら¹⁾、田口ら²⁾によって帯鋼をガスによって浮上させるフロータを用いた非接触帯鋼搬送装置などの研究がなされている。これに対して当研究グループでは、水平方向に走行する薄鋼板の電磁石による非接触支持制御システムを設計し実験、理論的考察を行っている³⁾⁴⁾。また、岡田ら⁵⁾、中川ら⁶⁾、正田ら⁷⁾によって静止している鋼板の電磁石による振動抑制に関する研究がなされている。

これまでに著者らはこの問題を解決する手法の一つとして、連続鋼板に対する薄鋼板のエッジ方向から電磁力を付加することによって、走行する薄鋼板の振動を抑制する非接触案内制御を提案

している⁹⁾。また、この非接触案内制御を薄鋼板が直線的に走行する部分¹⁰⁾や、薄鋼板が進行方向を変更しながら走行する部分¹¹⁾について低速走行時(1–5m/s)における制振性に関する実験的考察を行っているが、実機と同レベル程度の走行速度に対する検討には至っていない。そこで本研究では、直線走行部分を実機と同レベル程度の高速走行(6–10m/s)する薄鋼板に対して、提案している非接触案内制御を適用し制御の実現性を実験的に検討する。さらに、高速走行する薄鋼板に対して複数個使用する非接触案内用電磁石の一部を、ランニングコストのかからない永久磁石に置き換えることによる制振性に関する検討結果も報告する。

2. 走行する薄鋼板の非接触案内制御

2.1 実験装置

本研究で使用した走行薄鋼板の非接触案内実験装置⁹⁾の概要図を Fig.1 に示す。長さ 6894mm, 幅 150mm, 厚さ 0.3mm の焼入れした鋼材(SK3)をベルト状に溶接したものを、直径 700mm, 幅 154mm のプーリに図の様に吊り下げた。プーリは DC サーボモータにより駆動する。また、ベルト下部にはプーリを設置していない。これは、薄鋼板の進行方向変更部分における非接触案内支持制御の検討するためである¹¹⁾。既に提案している非接触位置決め制御と同様の電磁石(Fig.2)をアクチュエータとして、Fig.1 のようにプーリの中心から鉛直下方 2m の位置に 2 箇所設置した。設置箇所を図のように No.1, 2 とする。図中の x_1 , x_2 はそれぞれの電磁石位置での鋼板の接線方向の座標を示し、 z_1 , z_2 は電磁石位置での鋼板の平面に垂直な方向の座標を示す(以下、この方向の振動を垂直方向振動と記す)。また、同様に電磁石位置における鋼板のエッジ方向の横揺れを示す座標を y_1 , y_2 とする。

2.2 実験条件

本研究では Fig.3 に示すような(a)電磁石、永久磁石の設置なし(以後、未設置と記す)、(b)プーリ中心から 2m の位置に電磁石を設置、(c)プーリ中心から 1m と 2m の位置に電磁石を設置、(d)プーリ中心から 2m の位置に電磁石、プーリ中心から 1m の位置に永久磁石を設置した場合の 4 条件において実験を行う。ここで、実験条件(c)、(d)において電磁石または永久磁石をプーリ中心から 1m の位置に

設置した理由は、プーリー中心から2mの位置に電磁石を設置した場合、1mの位置が直線走行部分において最も発生しやすい弾性振動最低次モードの腹付近に相当するからである。なお、Fig.1は実験条件(b)と同様のものである。

実験条件(c)では、薄鋼板の平面に垂直な振動成分、すなわち弾性振動をより効果的に抑制するために、直線走行部分の弾性振動最低次モードの腹付近に相当する位置(プーリー中心から1m)にも電磁石を設置している。また、実験条件(d)では、実験条件(c)においてプーリー中心から1mの位置に設置した電磁石を、ランニングコストのかからない永久磁石に置き換えて使用することを試みる。使用した永久磁石は、Fig.4に示すようにフェライト製で3枚を重ね合わせて使用しており、総表面磁束密度は0.147Tである。実験では薄鋼板の走行速度を6m/sから10m/sまで変化させその制振効果について検討した。なお、薄鋼板のエッジ方向(y_3 方向)変動値と垂直な方向(z_3 方向)の振動計測用として2個のレーザセンサをプーリー中心から1mの位置に設置した。

2.3 制御システム

電磁石によるアクティブ制御を行うためFig.5に示すような制御システムを構築した。本研究では、制御対象質量をFig.5の薄鋼板のメッシュで示した電磁石の前方を通過する質量と近似した。制御実験ではプーリーの中心から鉛直下方2mの位置に、実験条件(b)～(d)のように2箇所の電磁石($n=1, 2$ と番号を付す)を設置している。また、実験条件(c)ではさらにプーリーの中心から鉛直下方1mの

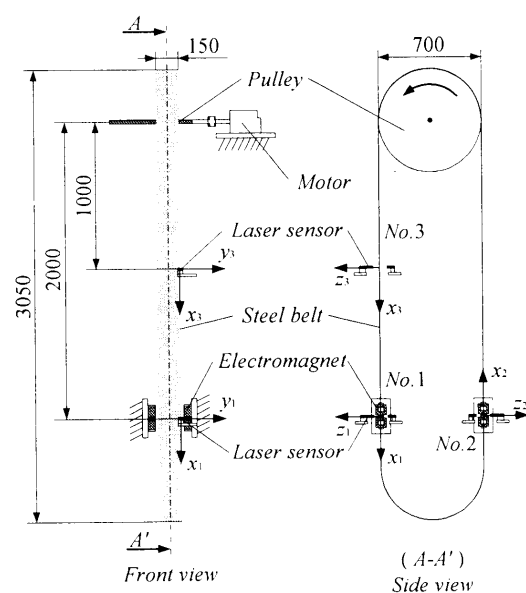


Fig. 1 Noncontact guide system for a traveling steel belt.

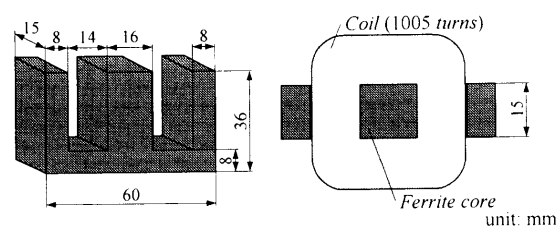
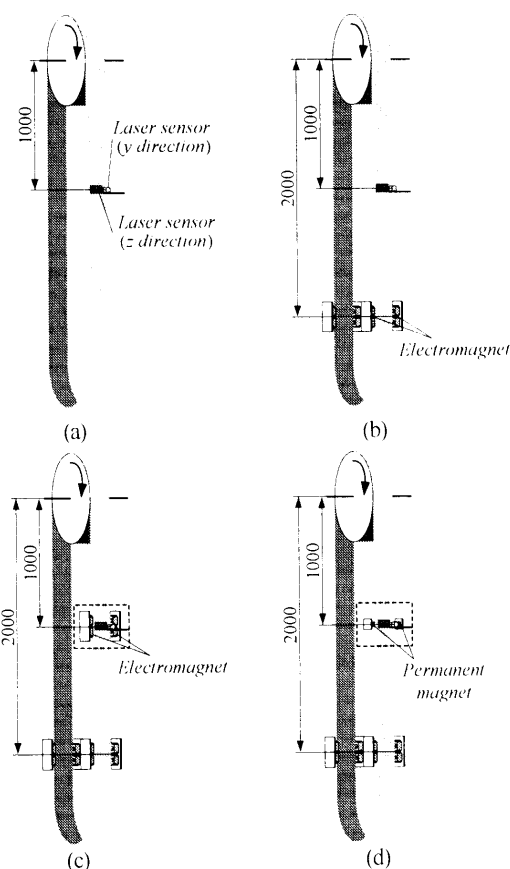


Fig. 2 Specification of the electromagnet core.

位置($n=3$)にも設置している。どの制御実験においても、1箇所の電磁石位置で連続薄鋼板のエッジ部分の横揺れ変動値(y_n 方向)を検出するために帯状のレーザ光によって位置を検出できるセンサを設置し、変位、及びこれをデジタル微分して得られる速度の二つの情報を、その電磁石に対してのみフィードバックするローカルフィードバック制御を行う。この際のフィードバックゲインは4章に示す離散時間系最適制御理論を適用した。電磁石はFig.2に示したものを2個直列接続し、対向するように配置して一つのアクチュエータとした。本実験では電磁石表面と薄鋼板エッジとの距離を5mmに維持できるよう設定し、そこからの変動値の制御を行う。なお、使用した電磁石の静的吸引力は定常位置において約0.83N(電磁石コイル定常電流0.5A)である。



(a) Without electromagnet or permanent magnet
(b) With electromagnet (2 m)
(c) With electromagnets (1 m, 2 m)
(d) With electromagnet (2 m) and permanent magnet (1 m)

Fig. 3 Layout of electromagnets and permanent magnets.

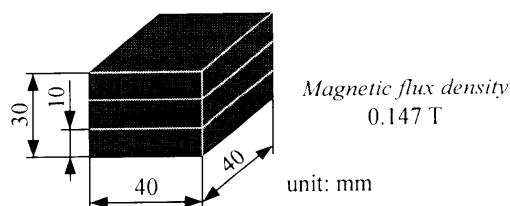


Fig. 4 Specification of the permanent magnet.

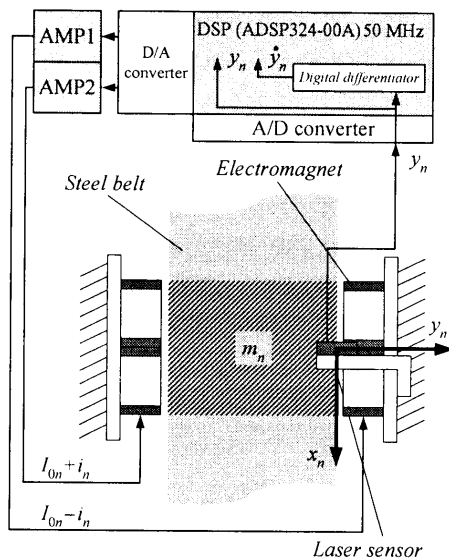


Fig. 5 Control system of the noncontact guide.

3. モデリング

3.1 運動方程式

前章で述べたように、本研究では電磁石の前方を通過する質量部分を制御対象としている。それぞれの制御対象の質量を $m_n (= 0.087 \text{ kg})$ とし、電磁石からの制御力を f_n とした並進 1 自由度モデルとすると、運動方程式は次式のようにになる ($r=1 \sim 3$)。

$$m_n \ddot{y}_n = 2f_n \quad (1)$$

また、本実験で使用した電磁石の特性は平衡点近傍で線形近似することより、以下の様に表される⁴⁾。

$$f_n = \frac{2F_{0n}}{\Gamma_{0n}} y_n + \frac{2F_{0n}}{I_{0n} R_n} v_n \quad (2)$$

ただし、

$$v_n = R_n i_n$$

なお、各パラメータは、 Γ_{0n} : 平衡状態における電磁石と対象物のギャップ (5mm)、 I_{0n} : 平衡状態における定常的な電磁石コイル電流 (0.5A)、 F_{0n} : 電磁石から発生する平衡状態における定常的な吸引力 (0.83N)、 R_n : 電磁石の抵抗 (10Ω)、 y_n : 制御対象の変動値 [m]、 v_n : 制御電圧 [V]、 i_n : 制御電流 [A] である。

3.2 状態方程式

状態変数として鋼板の変位、速度を採用し、式(1)、(2)より以下のような状態方程式を得る。

$$\dot{\mathbf{y}}_n = \mathbf{A}_y \mathbf{y}_n + \mathbf{B}_y v_n \quad (3)$$

ただし

$$\mathbf{y}_n = [y_n \quad \dot{y}_n]^T, \quad \mathbf{A}_y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{4F_{0n}}{m_n \Gamma_{0n}} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_y = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{4F_{0n}}{m_n I_{0n} R_n} \end{bmatrix}$$

4. 離散時間系最適制御理論

本研究では制御系を離散時間系で構成するため、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。離散時間系の評価関数は次のように表される。

$$J_d = \sum_{i=0}^{\infty} [y_{nd}(i)^T Q_{yd} y_{nd}(i) + r_{yd} v_{yd}(i)^2] \quad (4)$$

$$Q_{yd} = \text{diag}(q_{yd} \quad q_{yd})$$

ここで Q_{yd} : 変位、速度に関する重み係数行列、 r_{yd} : 制御入力に関する重み係数である。式(4)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

$$\mathbf{M} = \Phi^T \mathbf{M} \Phi + Q_{yd} - \Phi^T \mathbf{M} \Gamma (r_{yd} + \Gamma^T \mathbf{M} \Gamma)^{-1} \Gamma^T \mathbf{M} \Phi \quad (5)$$

において正定対称解 \mathbf{M} を求めることで得られ、

$$v_{ynd}^o = -\mathbf{F}_{ynd} y_{nd} \quad (6)$$

$$\mathbf{F}_{ynd} = (r_{yd} + \Gamma^T \mathbf{M} \Gamma)^{-1} \Gamma^T \mathbf{M} \Phi \quad (7)$$

となる。ただし、

$$\Phi(T_s) = \exp(\mathbf{A}_{yn} T_s)$$

$$\Gamma(T_s) = \int_0^{T_s} \exp(\mathbf{A}_{yn} \tau) d\tau \mathbf{B}_{yn}$$

であり、 T_s は使用している Digital Signal Processor の最速の処理速度であるサンプリング時間 ($T_s = 1.0 \times 10^{-3} \text{ s}$) とした。本研究では離散系 Riccati 型代数方程式の解を求める際、MATLAB (The Math Works (Inc.)) 内の組み込み関数である `lqrd` を使用した。

5. 薄鋼板のエッジに対する

電磁石および永久磁石の影響に関する検討

5.1 1 自由度実験装置

本研究では 2.2 節でも述べたように、高速走行する薄鋼板に対してブリー中心から 1m の位置に設置した電磁石 (実験条件(c)) を、薄鋼板の垂直方向への影響¹²⁾ が同等の永久磁石に置き換えた (実験条件(d)) 走行実験による検討を行う。そこで、本研究で使用する電磁石および永久磁石による薄鋼板の垂直方向振動へ与える影響について基礎的な検討を行う。

Fig.3(c), (d) の破線で囲んだ部分を通過する薄鋼板を部分的に剛体とみなし、薄鋼板垂直方向の剛体振り子 1 自由度システムとして、Fig.6 に示すような実験装置を製作した。同図(a)が Fig.3(c) と、同図(b)が Fig.3(d) と対応している。電磁石は薄鋼板エッジと磁石表面との距離が 5mm になるように設置した。この設置条件の電磁石と同等の薄鋼板垂直方向振動に与える影響を持つ永久磁石の配置を検討するために、永久磁石表面と薄鋼板エッジとの距離 (Fig.6(b) の y_{pm}) を 1mm から 25mm の間を 1mm 間隔で変化させ自由振動実験を行った。なお、実験で使用した薄鋼板は長さ 510mm、幅 150mm、厚さ 0.3mm の亜鉛めっき鋼板である。また、剛体と見なせるように極軽量のカーボンファイバー製パイプを取り付けてある。これはカーボンパイプを取り付けることで薄鋼板を剛体と見なせるようにすることにより、弾性振動などの影響を取り除き、薄鋼板のエッジに加えた磁力が薄鋼板の垂直方向における振動特性変化に及ぼす影響のみを明確にするためである。また、カーボンパイプを取り付けていない薄鋼板の吊り下げ部は板ばねと見なした。この薄鋼板を天井に固定し吊り下げ、固定部から鉛直下向きに 395mm の位置に電磁石または永久磁石を設置した。

5.2 実験結果および考察

実験では、(a)未設置、(b)電磁石設置、(c)永久磁石設置($v_{PM}=1\text{mm}\sim 25\text{mm}$)の条件において薄鋼板自由振動時の電磁石または永久磁石の設置位置における垂直方向振動の時間応答波形の測定を行った。Fig.7 に実験より求めた自由振動時における固有周波数を示す。横軸が永久磁石表面と薄鋼板エッジとの距離、縦軸がみかけの固有周波数である。また、図中の破線が未設置時の固有周波数、一点鎖線が電磁石を設置したときの固有周波数である。同図より、永久磁石表面と薄鋼板エッジ距離が 17mm の時に、電磁石設置時と固有周波数は一致している。Fig.8 は未設置、電磁石設置、永久磁石設置($v_{PM}=17\text{mm}$)における垂直方向振動の時間応答波形の一例である。また、Table 1 にこのときのシステムの固有周波数、減衰比、ばね定数、減衰係数の実測値を示す。電磁石を設置した場合と未設置時を比較すると固有周波数が約 3.4 倍、減衰比が約 0.55 倍、ばね定数が 11.7 倍、減衰係数が約 1.8 倍となっている。一方、電磁石設置時を永久磁石設置時と比較すると固有周波数とばね定数では一致しており、また、減衰比が約 4%、減衰係数が約 2% 減少と非常に微小な差となっている。以上の実験的検討より、電磁石を薄鋼板エッジから 5mm に設置した場合との、薄鋼板垂直方向の振動特性がほぼ同等である永久磁石設置距離は 17mm であるとする。

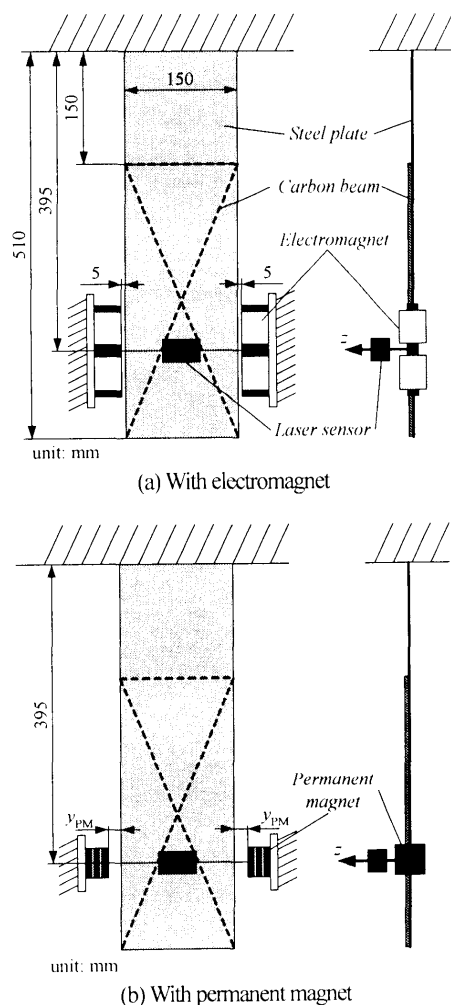


Fig. 6 Experimental apparatus for a one-degree-of-freedom system.

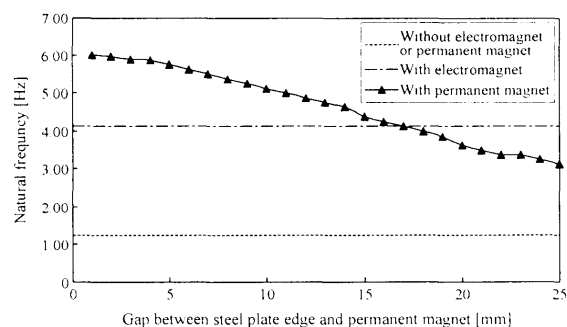


Fig. 7 Natural frequency of the system.

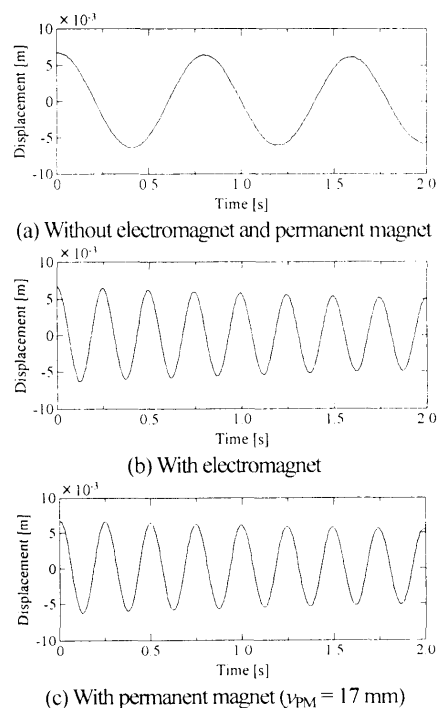


Fig. 8 Time histories of the planar direction displacement of the steel plate.

Table 1 Measured system parameters.

	Without electromagnet or permanent magnet	With electromagnet	With permanent magnet ($v_{PM}=17\text{ mm}$)
Natural frequency [Hz]	1.21	4.13	4.12
Damping ratio	1.10×10^{-2}	6.08×10^{-3}	5.85×10^{-3}
Spring coefficient [Nm/rad]	0.99	11.6	11.6
Damping coefficient [Nms]	2.90×10^{-3}	5.30×10^{-3}	5.20×10^{-3}

6. 走行実験および考察

前章で電磁石表面と薄鋼板エッジ部分との距離を 5mm に設置した場合と、永久磁石表面と薄鋼板エッジとの距離を 17mm に設置した場合では、薄鋼板の垂直方向振動に与える影響がほぼ同等であることを示した。そこで、2.2 節で示した実験条件(d)では、永久磁石を薄鋼板エッジとの距離が 17mm となるように設置して走行実験を行う。

6.1 垂直方向振動に関する検討

Fig.9に6m/sと10m/sの走行状態におけるプーリ中心から1mの位置での垂直方向(z_3 方向)変位の時刻歴の一例を示す。走行速度が6m/sの場合、未設置状態では最大片振幅が約20mm近く発生している(同図(a))。これに対し電磁石を設置することで、垂直方向ではアクティブに制御を行っていないにもかかわらず、最大片振幅が約10mm程度まで抑制されている(同図(b))。これは、著者ら¹²⁾が既に発表しているように、エッジ方向に設置した電磁石が薄鋼板垂直方向では、エッジ部にばね、ダンパとして作用していることに起因している。さらに、プーリ中心から1mの位置に電磁石を設置することにより最大片振幅は約7mmまで抑制される(同図(c))。また、電磁石を永久磁石に置き換えた場合(同図(d))においても、同様の効果が得られている。これは前章において示したように、薄鋼板エッジから5mmに設置した電磁石と、17mmに設置した永久磁石の薄鋼板垂直方向に及ぼす影響を同等にしているためである。一方、10m/sに走行速度を上昇させた場合においても同様の傾向が発生している。

そこで、未設置時を除いた制御時の走行速度変化に伴う垂直方向振動抑制効果について変位の標準偏差を比較対象としてFig.10にまとめた。プーリ中心から2mの位置に電磁石を設置した場合(図中●印)と、さらにプーリ中心から1mの位置に電磁石を設置した場合を比較すると最大26%の振動が抑制できている(図中■印)。これはTable1で示したように、薄鋼板エッジ方向に設置した電磁石が平面方向においてばねの力、すなわち拘束力として作用していることに起因する。一方、永久磁石を付加した場合においても、制御性能(図中▲印)が電磁石を1mと2mの位置に設置した場合と同様に振動の抑制効果が得られていることが分かる。ここで特徴的なことは、永久磁石が電磁石と比較して12mm離れた距離に設置してあるにもかかわらず、電磁石と同程度の制振性能を得られていることである。非接触による薄鋼板の搬送では、アクチュエータと薄鋼板が離れた距離にあれば、振動などによる接触などの問題が減少し有効である。また、電磁石に流す電流を大きくすることで永久磁石と同様に離れた位置から振動を抑制できることも考えられるが、その場合では発熱、磁気飽和の問題が生じる。また、飽和しない電磁石を設計できた場合でも、電流値の増加にもなってランニングコストが高くなる等の問題が発生してしまう。以上のことより、永久磁石を利用することの有効性は明らかである。

6.2 エッジ方向振動に関する検討

Fig.11はFig.9と同一条件下におけるエッジ方向の変位の一例である。走行速度が6m/sの場合、未設置状態では最大片振幅が約20mm近く発生している(同図(a))。これに対し電磁石による制御を行うと最大片振幅が約2.7mm程度まで抑制されている(同図(b))。さらに、プーリ中心から1mの位置に電磁石を設置し制御することにより最大片振幅は約2.3mmまで抑制される(同図(c))。一方、永久磁石を設置した場合(同図(d))では最大片振幅が約3.4mmと電磁石による制御のみの場合と比較して増加している。しかしながら、未設置時と比較した場合においては最大片振幅が約83%の振動が抑制されており、ランニングコストなしの永久磁石を設置するこ

とによって十分良い制振性能が得られている。

Fig.12はFig.10と同様、走行速度に対するエッジ方向変位の標準偏差を示す。プーリ中心から2mの位置に電磁石を設置した場合(図中●印)と、変位の測定位置である1mの位置にも電磁石を設置した場合(図中■印)では、最大26%の振動抑制が可能であることが明らかになった。一方、永久磁石を設置した場合(図中▲印)では、制御性能が電磁石を1mと2mの位置に設置した場合と比較して、低下していることがわかる。薄鋼板エッジ方向では、平衡状態において薄鋼板両側に設置した永久磁石の吸引力が釣り合っているが、振動などによってこの平衡状態からエッジ方向に変位すると、両側に取り付けた永久磁石による薄鋼

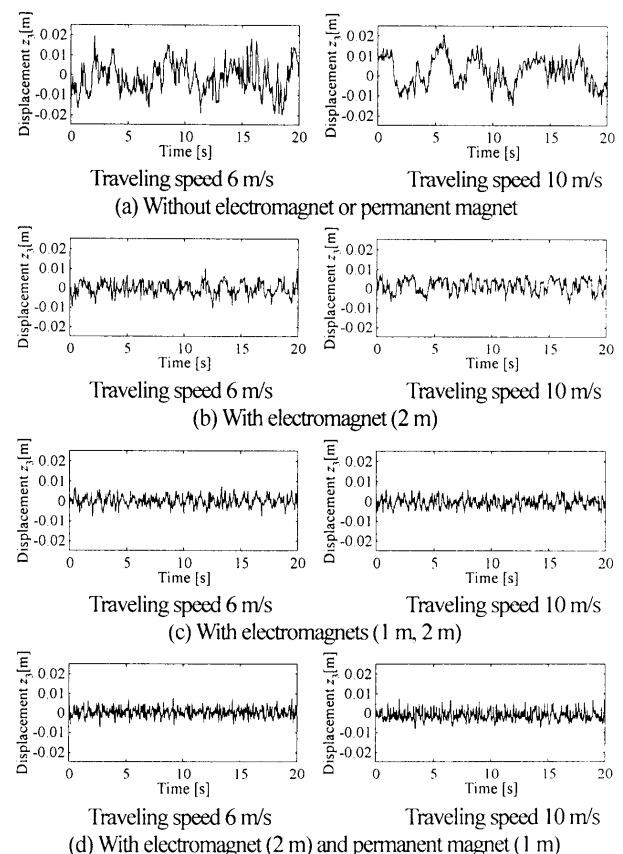


Fig. 9 Time histories of z - displacement.

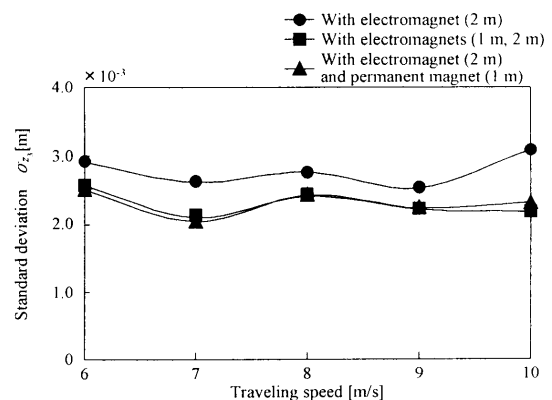


Fig. 10 Standard deviation of z - displacement.

板左側と右側に作用する吸引力の不均一によって永久磁石は負ばねとして作用する。このことが原因となり制御性能が劣化すると考えられる。しかしながら上述の様に、未設置時と比較すると(6~10m/s)の標準偏差の平均値は約 4.6×10^{-3} m) 大幅な振動抑制ができています。

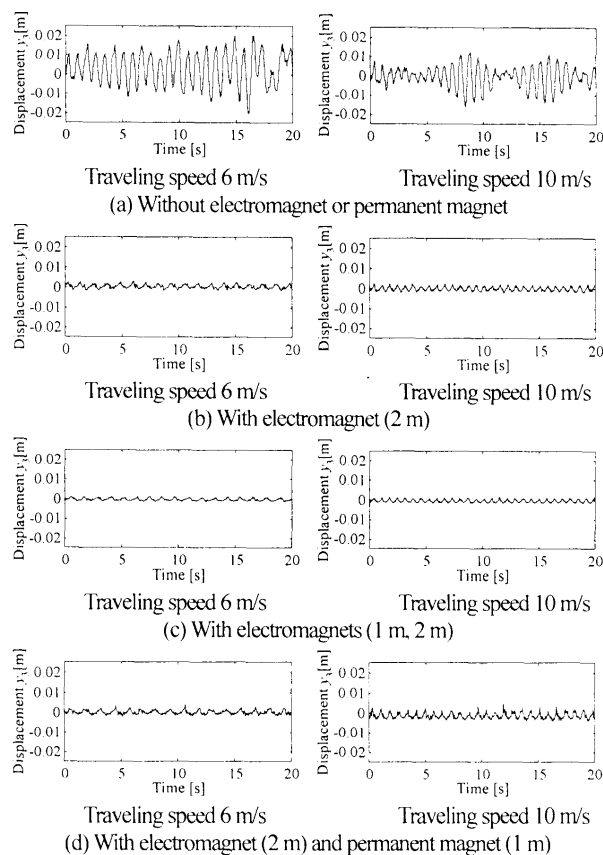


Fig. 11 Time histories of y – displacement.

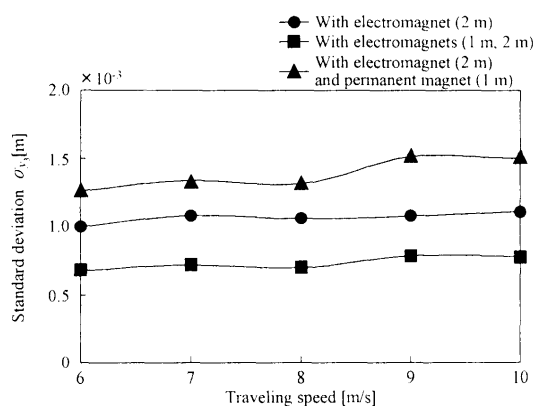


Fig. 12 Standard deviation of y – displacement.

7. おわりに

本研究では、実機と同レベル程度の高速走行する連続薄鋼板に対してエッジ方向からの磁力による非接触案内制御の振動抑制効果に関する実験的考察を行った。その結果、高速走行する場合において、薄鋼板エッジ方向の振動に対して提案している非接触案内制御が十分に有効であることを確認できた。さらに、アクティブに制御していない薄鋼板の垂直振動成分に対しても高速走行時に良い制振性能を持つことを実験的に明らかにした。

また、ランニングコストのない永久磁石を電磁石の代わりに使用することを試みた結果、エッジ方向においては負ばねとして作用し制振性能に多少の劣化が見られた。しかし、薄鋼板の垂直方向振動に関しては、永久磁石が電磁石と比較して離れた距離に設置している場合でも、電磁石と同程度の制振性能を得られることが実験的に示され、永久磁石を利用することの有効性を確認した。

今後の課題として、電磁石および永久磁石の最適な配置や、エッジ方向に設置した永久磁石による薄鋼板の振動に対するより厳密な影響を磁場解析も含め解明することである。

謝辞 本研究に際して、東海大学大学院生・三皆佳彦氏、小倉浩一郎氏には多大な協力を得た。ここに感謝の意を表する。

References

- 1) K. Yanagi, T. Taguti, and E. Hirai: *Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review*, **25**, 311 (1988).
- 2) T. Taguti, E. Hirai, and H. Suemori: *Current Advances in Materials and Processes*, **5**, 1494 (1992).
- 3) Y. Oshinoya, T. Shimogo: *Proc. of Int. Conf. on Advanced Mechatronics*, 845 (1989).
- 4) Y. Oshinoya, T. Shimogo: *JSME International Journal, Series III*, **35**, 109 (1992).
- 5) Y. Oshinoya, T. Shimogo: *JSME(C)*, **58**, 3473 (1992).
- 6) M. Satou, Y. Okada: *The 11th SEAD*, 219 (1999).
- 7) T. Tanaka, S. Nakagawa: *The 11th SEAD*, 527 (1999).
- 8) H. Hayashiya, N. Araki, PADDISON J E, H. Oosaki, and H. Shouda: *IEE*, **117**, 238 (1997).
- 9) K. Kashiwabara, Y. Oosugi, Y. Oshinoya, and K. Ishibashi: *JAP. JOINT AUTOMATIC CONTROL CONFERENCE*, **45**, 279 (2002).
- 10) K. Kashiwabara, Y. Oshinoya, and K. Ishibashi: *JSAEM*, **11**, 235 (2003).
- 11) K. Kashiwabara, Y. Oshinoya, and K. Ishibashi: *The 7th ISMST*, 232 (2003).
- 12) K. Kashiwabara, Y. Fukushima, Y. Oshinoya, and K. Ishibashi: *Proc. School of Eng., Tokai Univ.*, **44**, 1, 75 (2004).

2004 年 10 月 8 日受理, 2005 年 1 月 14 日採録