

| |
|-------------|
| <p>学術論文</p> |
|-------------|

電磁力による走行磁性体の非接触エッジコントロールに関する基礎的検討

Noncontact guide for a traveling elastic steel plate using magnetic force

| | | | |
|-------|-----------|--------|--------|
| 柏原 賢 | (東海大学大学院) | 押野谷 康雄 | (東海大学) |
| 石橋 一久 | (東海大学) | | |

| | |
|--------------------|----------------|
| Ken KASHIWABARA | Student Member |
| Yasuo OSHINOYA | Member |
| Kazuhisa ISHIBASHI | Member |

The continuous thin steel plate subjected to iron and steel processes is supported on a series of rollers during processes such as rolling; the thin steel plate moves on the rollers at a speed of 10 m/s or more. In the plating process, the steel plate is conveyed 20-50 m in the vertical direction for drying, during which the steel plates are not supported by rollers and other mechanisms. Therefore, plating nonuniformity due to the generation of vibration and other reasons prevents the increase of productivity. In this study, a noncontact guide mechanism using electromagnetic attractive force applied to the edge of the conveyed steel plate is proposed. We experimentally examined the effect of the absolute spatial positioning of the edge by active edge control of the conveyed steel plate, and the suppression effect of elastic vibration in the continuous steel plate.

Key Words: Steel Plate, Traveling, Edge Control, Noncontact Guide, Vibration Control, Elastic Vibration, Permanent Magnet

1 緒言

多くの工業製品で利用されている薄鋼板は、製造時の連続熱処理工程や圧延工程及び連続表面処理工程でのローラ支持搬送において装置上を毎秒 10 メートル以上の速度で走行している。このような連続処理の一つであるめっき処理工程では、処理後に鋼板は 20～50 m 鉛直方向へ搬送される。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。このことが要因

となって、支持ローラと走行鋼板の摩擦力変動が生じ、鋼板表面に傷、ひずみ、めっきの剥離などの表面品質劣化を起こすことが問題となっている。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 [1][2][3]。また、製鉄プロセスラインにおける実用例として、森井ら [4]、藤崎 [5] が形状制御、制振制御や中心位置決め装置について提案している。岡田ら [6]、中川ら [7]、村岸ら [8] によって静止している長尺の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が、いずれの場合も電磁石吸引力を鋼板表面に対して作用させ制御を試みている。この場合、電磁石を鋼板に十分に接近させることによって、制御性能の向上を期待できるが、実機において高速

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

走行している薄鋼板には変形や振動など様々な要因があるため電磁石を十分に接近させることは難しい。これを解決する手法の一つとして、本研究では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、走行する鋼板の振動を抑制する非接触制御機構を提案する。さらに、電磁石を配置していない部分にランニングコスト無しの永久磁石を同様に配置することにより、さらなる弾性振動抑制効果も検討した。薄鋼板が実機処理工程で高速走行している状態を模擬するために、ベルト状に形成した薄鋼板をプーリにより支持させ回転を与えることでエンドレスに走行させることのできる実験装置を製作した。

2 非接触エッジコントロールシステム

2.1 実験装置

本研究で作製した非接触エッジコントロール制御実験装置 [9] の概要図を Fig. 1 に示す。長さ 6894 mm, 幅 150 mm, 厚さ 0.3 mm の焼入れした鋼材 (SK3) をベルト状に溶接したものを、直径 700 mm, 幅 154 mm のプーリに図の様に吊り下げた。プーリは DC サーボモータから直径 100 mm の駆動用プーリを介して駆動する。また、ベルト下部にはプーリを設置せず、将来的に直線部分と曲がり部分の非接触案内支持制御の実現性を検討することも視野に入れて設計している。これは、水平方向に搬送されてきた連続鋼板がめっき処理槽を通過した後、鉛直方向に送られる部分や、その後下方向に送り返される部分、さらにはルーパなどにおける方向転換部分を想定している。

既に提案している非接触位置決め制御機構 [10] と同様の電磁石をアクチュエータとして、プーリの中心から鉛直下方 2000 mm の位置に設置した。Fig. 2 に実験装置の写真を示す。

2.2 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. 3 に示すような制御システムを構築した。ベルトのエッジ部分の横揺れ変動値 (y 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フィードバックして電磁石の吸引力を算出して制御を行う。この際のフィードバックゲインは 4 章に示す最適制御理論を適用した。電磁石は 2 個

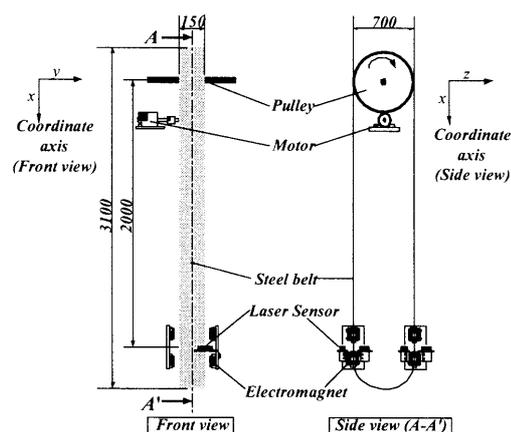


Fig. 1 Noncontact guide system for a traveling steel belt.

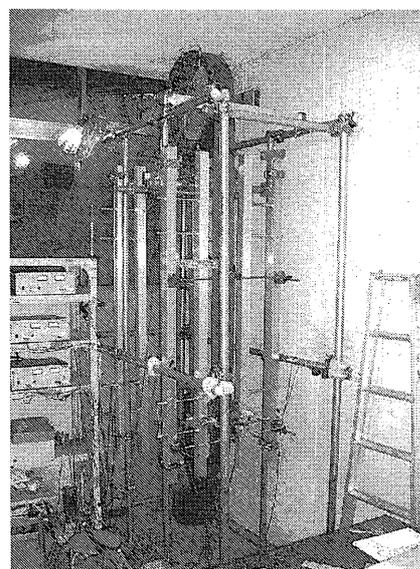


Fig. 2 Photograph of the experimental apparatus.

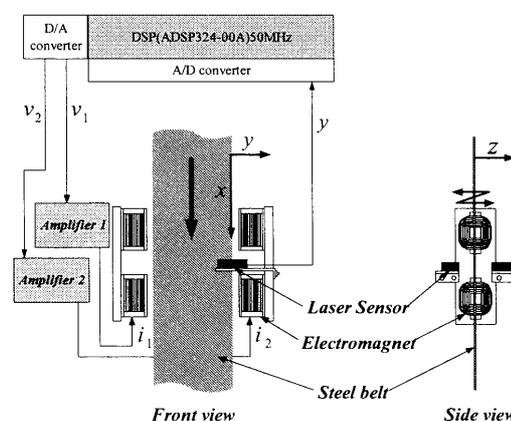


Fig. 3 Control system of noncontact guide.

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鋼板エッジとの距離を 5 mm に維持できるように設定し、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 0.83 N (電磁石コイル定常電流 0.5 A) である。

3 モデリング

3.1 基礎方程式

本論文では、Fig. 1 に示すプーリから下部の鋼板全てが近似的に剛体振り子として運動するとしてモデル化を行う。そこで予備実験として、初期変位を与えた時の自由振動波形を測定した。計測は鋼板の鉛直部分数か所で行ったが、距離に比例して変位も比例的に増加し、対象全体が剛体的なふるまいをしていることを確認している。ただし、プーリと鋼板の境界部分においては局所的に鋼板のねじりが発生しているため、Fig. 4 に示すような支持点にねじり振動軸を持つ 1 自由度系物理振り子としてモデル化を行う。ただし、回転運動は振り子の長さに対して小さいものとする。

$$J\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + K\theta = L_1 f - mgL_2\theta \quad (1)$$

J : プーリから下に垂れ下がっている鋼板全体を剛体とみなしたときの等価的な振り子の慣性モーメント [kgm^2], C : ローラ部境界における鋼板のねじりによって生じる等価的な粘性減衰係数 [Nms], K : ローラ部境界における鋼板のねじりによって生じる等価的なばね係数 [Nm/rad], f : 電磁石による制御力 [N], m : プーリから吊り下がっている部分を振り子に近似したときの相当質量 [kg], g : 重力加速度 [m/s^2], L_1 : 電磁石制御位置 [m], L_2 : 振り子重心位置 [m].

ばね係数及び粘性減衰係数は初期変位 1.2 mm から自由振動実験を行い、その減衰波形に式 (1) を用いた数値シミュレーション結果を適合するように数値パラメータを推定した。Fig. 5 はこのときの時刻歴、Fig. 6 はパワースペクトルである。($C=0.371 \text{ Nms}$, $K=200 \text{ Nm/rad}$), 慣性モーメントは物理振り子と平行軸の定理より算出し、 $J=5.12 \text{ kgm}^2$ 。なお、その他のパラメータは次に示すとおりである。 $L_1=2.0 \text{ m}$, $L_2=1.14 \text{ m}$, $m=2.01 \text{ kg}$ 。

また電磁石吸引力特性を、コイル電流の 2 乗に比例し、電磁石と鋼板のギャップに反比例すると近似した。この関係式を平衡状態におけるコイル電流とギャップ

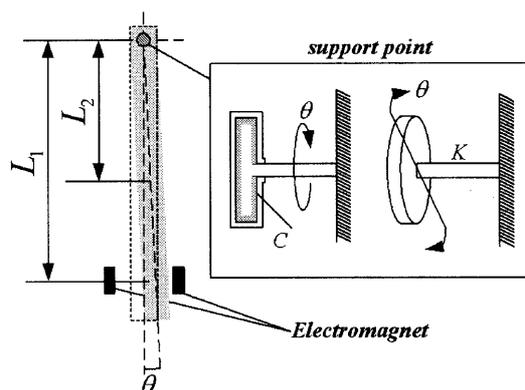


Fig. 4 Model of noncontact guide system for a traveling steel belt.

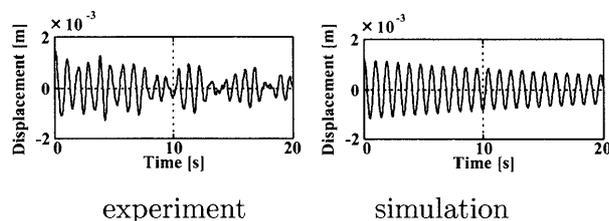


Fig. 5 Time histories of displacement.

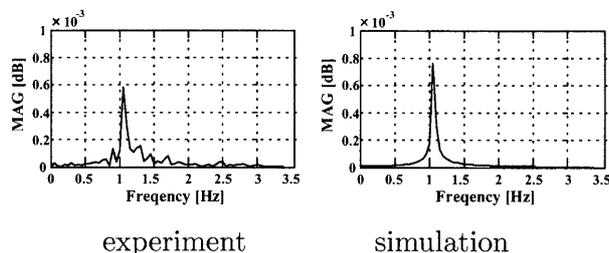


Fig. 6 Spectrums of displacement.

の近傍でテーラー展開し、電磁石吸引力の変動値に関する線形化近似を行った。導出した電磁石の特性式は以下のように表される。

$$f = \frac{4F_0}{\gamma_0} L_1 \theta + \frac{4F_0}{I_0 R} v \quad (2)$$

なお、各パラメータは、 γ_0 : 平衡状態における電磁石と対象物のギャップ (5 mm), I_0 : 平衡状態における定常的な電磁石コイル電流 (0.5 A), F_0 : 電磁石から発生する平衡状態における定常的な吸引力 (0.83 N), R : 電磁石の抵抗 (10 Ω), y : 制御対象の変動値 [m], v : 制御電圧 [V] 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。ただし, $y = L_1\theta$ とする。

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

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{A}_y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{4F_0}{J\gamma_0} L_1^2 - \frac{mgL_2}{J} - \frac{K}{J} & -\frac{C}{J} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_y = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{4F_0}{Jl_0R} L_1^2 \end{bmatrix}$$

4 最適制御理論

4.1 連続時間系最適制御

以下に示す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 v_y^0 を求める。

$$J = \lim_{t_f \rightarrow \infty} \int_0^{t_f} (\mathbf{y}^T \mathbf{Q}_y \mathbf{y} + r_y v_y^2) dt \quad (4)$$

$$\mathbf{Q}_y = \text{diag}(q_y \quad q_{\dot{y}})$$

$$v_y^0 = -\mathbf{F}_y \mathbf{y} \quad (5)$$

$$\mathbf{F}_y = -r_y^{-1} \mathbf{B}_y^T \mathbf{P} \quad (6)$$

ここで $q_y, q_{\dot{y}}$ は変位, 速度に関する重み係数, r_y は制御入力に関する重み係数, \mathbf{P} は連続時間系 Riccati 型代数方程式

$$\mathbf{P} \mathbf{A}_y + \mathbf{A}_y^T \mathbf{P} - \mathbf{P} \mathbf{B}_y r_y^{-1} \mathbf{B}_y^T \mathbf{P} + \mathbf{Q}_y = \mathbf{0} \quad (7)$$

の一意正定解である。

4.2 離散時間系最適制御

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。式 (4) で表される連続系の評価関数と等価な離散時間系の評価関数は次のように表される [11]。

$$J_d = \sum_{i=0}^{\infty} [\mathbf{y}_d(i)^T \mathbf{Q}_{yd} \mathbf{y}_d(i) + r_{yd} v_{yd}(i)^2] \quad (8)$$

$$\mathbf{Q}_{yd} = \text{diag}(q_{yd} \quad q_{\dot{y}d})$$

ここで \mathbf{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 (8) 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

$$\mathbf{M} = \Phi^T \mathbf{M} \Phi + \mathbf{Q}_{yd} - \Phi^T \mathbf{M} \Gamma (r_{yd} + \Gamma^T \mathbf{M} \Gamma)^{-1} \Gamma^T \mathbf{M} \Phi \quad (9)$$

において正定対称解 \mathbf{M} を求めることで得られ,

$$v_{yd}^0 = -\mathbf{F}_{yd} \mathbf{y}_d \quad (10)$$

$$\mathbf{F}_{yd} = (r_{yd} + \Gamma^T \mathbf{M} \Gamma)^{-1} \Gamma^T \mathbf{M} \Phi \quad (11)$$

となる。ただし,

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

$$\Gamma(T_s) = \int_0^{T_s} [\exp(\mathbf{A}_y \tau)] d\tau \mathbf{B}_y$$

であり, T_s はサンプリング時間 ($T_s=0.0078$ s) である。本研究では離散系 Riccati 型代数方程式の解を求める際, MATLAB 内の組み込み関数である lqr を使用した。

5 未走行状態の鋼板におけるシミュレーションと実験の比較検討

走行していない状態において制御を実施し, y 方向へ初期変位 1.2 mm を与えた実験を行い, 同条件のシミュレーションとの比較を行った。フィードバックゲインは式 (8) において $q_{yd}=8000$, $g_{yd}=400$, とし算出した値を使用している。Fig. 7, Fig. 8 に実験結果及びシミュレーション結果の変位と速度の時刻歴を示す。変位, 速度共にほぼ一致することから本装置における y 方向のモデル化の妥当性が確認できた。

6 走行実験

6.1 実験条件

本研究では Fig. 9 に示すような (a) 未制御, (b) 電磁石のみの制御および, (c) 永久磁石と電磁石を併用した場合の 3 条件において実験を行う。永久磁石は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使用することを試みる。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 (プーリ中心から 1000 mm) に設置した。使用し

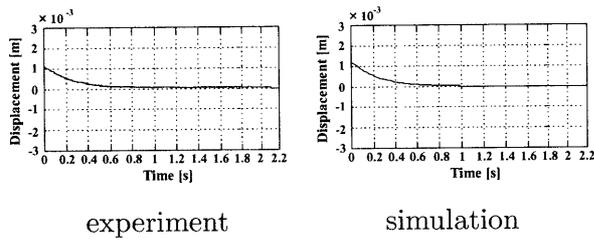


Fig. 7 Time histories of displacement.

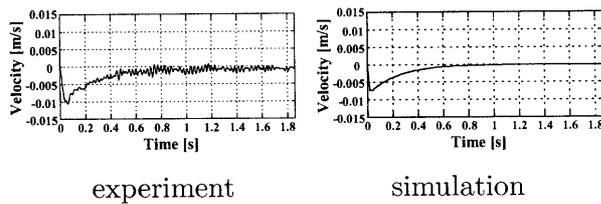


Fig. 8 Time histories of velocity.

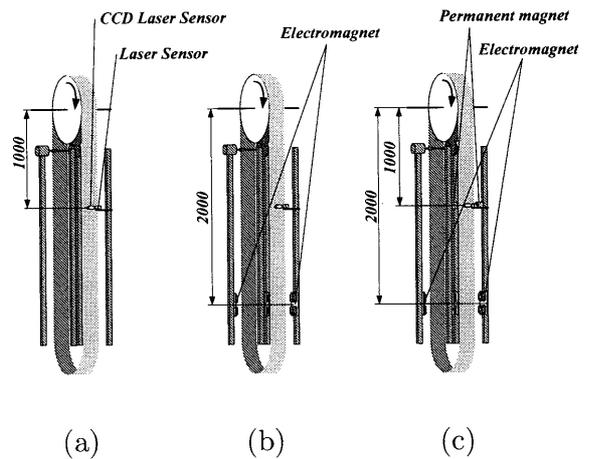
た永久磁石は、Fig. 10 に示すようにフェライト製で4枚を重ね合わせて使用しており、総表面磁束密度は0.166 Tである。磁石表面と鋼板エッジの距離と吸引力の関係は同図に示した通りである。本実験ではその距離を10 mmと設定するが、このとき約3.2 Nの吸引力を発生する。

鋼板の走行速度を1.0 m/sから5.0 m/sまで変化させその制振効果について検討した。鋼板エッジの横揺れ変動値の測定用として帯状レーザセンサ (Laser sensor No.1) とベルト平面に垂直な方向 (z 方向) の振動計測用として CCD レーザ変位センサ (Laser sensor No.2) をプリー中心から1000 mmの位置に設置した。

6.2 実験結果及び考察

6.2.1 y 方向振動に関する検討

Fig. 11 に1 m/sと5 m/sの走行状態における y 方向変位の時刻歴の一例を示す。比較的低速な1 m/sの場合、未制御状態では最大片振幅が10 mm近く発生している (同図 (a))。これに対し制御を行うと最大片振幅が2 mm程度まで抑制されており (同図 (b))、さらに永久磁石を併用した場合においても同程度に制御できている。これに対して5 m/sに走行速度を上昇させた場合においても同様に効果をあげている。そこで、走行速度変化に伴う y 方向振動抑制効果について変位標準偏差を比較対象として Fig. 12 にまとめた。未制御時 (同図◆印) に対して、電磁石による制御を実



(a) Noncontrol
(b) With electromagnet
(c) With electromagnet & permanent magnet

Fig. 9 Layout of electromagnet and permanent magnet.

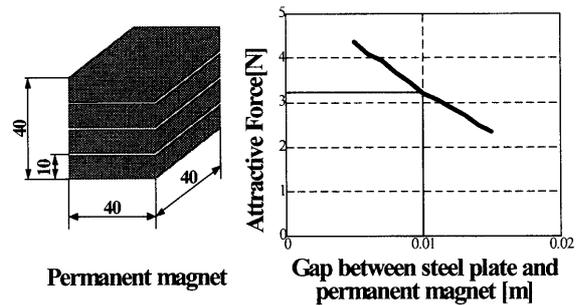


Fig. 10 Characteristics of attractive force of permanent magnets

施することによって最大85%の振動抑制が可能であることが明らかになった。一方、永久磁石を付加した場合の制御性能 (同図▲印) が多少低下していることがわかる。これは、永久磁石吸引力が鋼板に対して、 y 方向では負ばねとして作用することが外乱的な要素になったことに起因している。

6.2.2 z 方向振動に関する検討

Fig. 13 は Fig. 11 と同一状況下における z 方向の変位の一例である。ここで特徴的なことは未制御時 (同図 (a)) に対して電磁石のみによる y 方向の制御時 (同図 (b)) の制御性能はほとんど変化しないが、永久磁石を付与することによって大きな振動抑制効果が得られている (同図 (c))。Fig. 14 は Fig. 12 と同様、

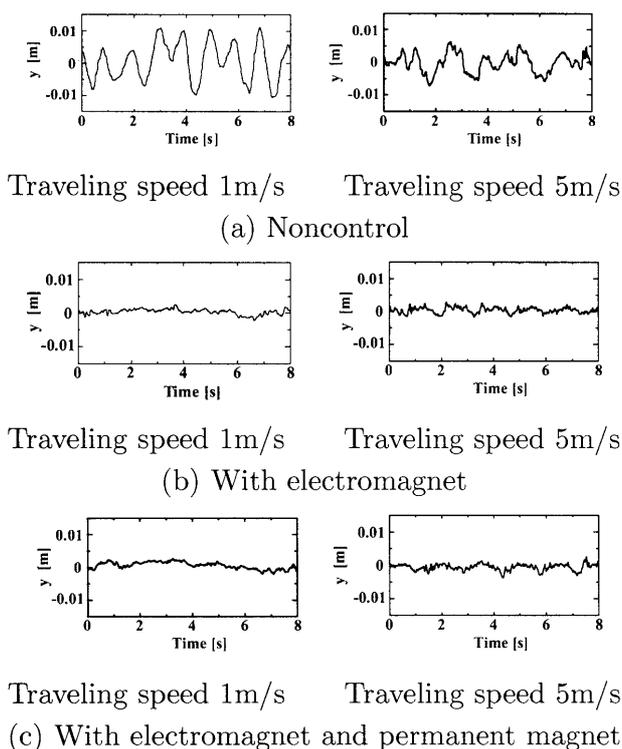


Fig. 11 Time histories y axis displacement.

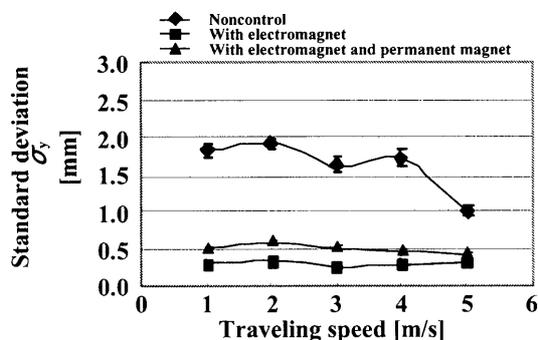


Fig. 12 Standard deviation of displacement (y direction).

走行速度に対する変位の標準偏差を示す。z 方向は張力の影響が大きいので、未制御状況下では 1 m/s に比べ 5 m/s の状態では 40 % 程度変位の標準偏差が低減されている。y 方向のアクティブ制御にともない z 方向も未制御時と比較して全走行速度に対してほぼ平行移動したように振動抑制できている (図中■印)。さらに、永久磁石を配置した場合の抑制効果は非常に大きく、低速 1 m/s では未制御に比べ約 90% の低減が見られ、抑制効果は走行速度にかかわらずほぼ一定にその効果を発揮していることが確認できた。これは永久磁石吸引力が z 方向では鋼板に対して拘束力として作

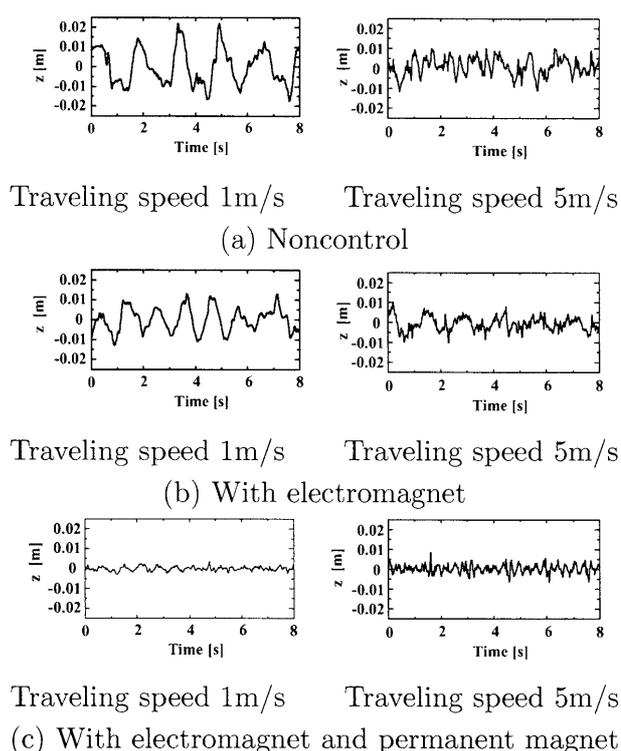


Fig. 13 Time histories z axis displacement.

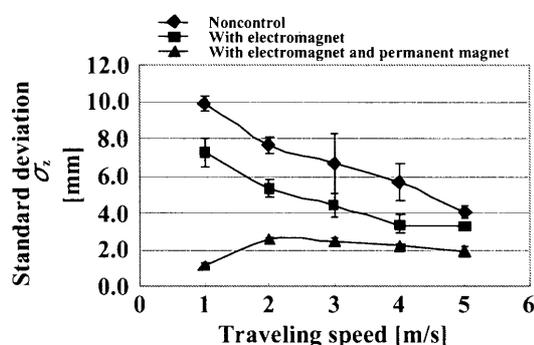


Fig. 14 Standard deviation of displacement (z direction).

用したことに起因すると考えられる。なお、z 方向に対する永久磁石吸引力に関しては現在磁場解析を含めて検討中であり、今後報告していく予定である。これにより y 方向からの吸引力がその鉛直方向成分に対する振動抑制に対して非常に効果的であり、ランニングコスト無しの永久磁石利用に対する有効性を示すことが出来た。

7 まとめ

本研究では走行する薄鋼板の振動を抑制するために、エッジ方向から電磁吸引力を作用させるシステムを提案した。その結果、鋼板エッジ方向の振動に対して提案した非接触制御機構が有効であることが明らかとなった。さらに、鋼板平面方向の振動に対してエッジ方向からの電磁吸引力が効果的に作用することも確認できた。よって、1方向 (y 方向) 非接触制御による2方向 (y, z 方向) 振動抑制の可能性を提示できたといえる。今後は、永久磁石を利用することで得られる制振効果の厳密なモデル化、実機処理工程への実装を想定してより高速走行時の制御の検証などを行っていく予定である。

謝辞

本研究に際して、東海大学大学院生 (現 全日空システム企画 (株)) 大杉祐介氏には多大な協力を得た。ここに感謝の意を表す。

(2003年3月1日受付, 2003年10月27日再受付)

参考文献

- [1] 押野谷, 下郷: 走行弾性ベルトの磁気浮上制御, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 56, No. 531, pp. 2911-2918 (1990)
- [2] 押野谷, 下郷: 走行弾性ベルトの磁気浮上制御 (センサとアクチュエータの配置に関する検討), 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 57, No. 536, pp.1246-1253 (1991)
- [3] 押野谷, 下郷: 走行弾性ベルトの磁気浮上制御 (臨界速度を超えた走行速度における制御性能に関する考察), 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 58, No. 556, pp.3473-3480 (1992)
- [4] 森井, 井上, 製鉄プロセスラインのストリップ形状制御・制御装置, 日本機械学会誌, Vol. 100, No. 943, p.74 (1997)
- [5] 藤崎, 鉄鋼プロセスへの電磁気応用, 日本 AEM 学会誌, Vol.5, No. 2, p.1-8 (1997)
- [6] 佐藤, 岡田, 薄鋼板の振動制御, 第 11 回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム講演論文集, pp. 219-222 (1999)
- [7] 田中, 中川, ストリップ磁気特性と電流センサを用いた制振制御に関する検討, 第 11 回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム講演論文集, pp. 527-530 (1999)
- [8] 村岸, 木村, 加藤, 今林, 電磁力による薄板鋼板の振動・形状制御, 第 12 回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム講演論文集, pp. 597-600 (2000)
- [9] 大杉, 押野谷, 石橋, 走行弾性ベルトの非接触案内に関する基礎的検討, 第 11 回 MAGDA コンファレンス講演論文集, pp.205-208 (2002)
- [10] 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研究, 日本 AEM 学会誌, Vol. 6, No. 4, pp. 52-57 (1998)
- [11] 例えば, 土谷, 江上, 現代制御工学, 産業図書 (1991)