

# 走行連続鋼板の電磁力エッジコントロールに関する基礎的検討 (スライディングモード制御の適用)

柏原賢\*<sup>1</sup>・押野谷康雄\*<sup>2</sup>・石橋一久\*<sup>3</sup>

## Basic Research on Electromagnetic Edge Control for a Traveling Continuous Steel Plate (Application of Sliding Mode Control)

by

Ken KASHIWABARA, Yasuo OSHINOYA and Kazuhisa ISHIBASHI

(Received on 3.31.2003 & accepted on 7.16.2003)

### Abstract

A continuous thin steel plate subjected to iron and steel processes is supported by 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 negligibly supported by rollers and other mechanisms. Therefore, plating nonuniformity due to the generation of vibration and other reasons prevents the increase in productivity. In this study, a noncontact guide mechanism using an electromagnetic attractive force applied to the edge of the conveyed steel plate is proposed. The sliding mode control, which is one of the nonlinear robust controls, is applied. We experimentally examined the effect of the absolute spatial positioning of the edge by the active edge control of the conveyed steel plate, and the suppression effect of elastic vibration in the continuous steel plate.

**Keywords:** Steel Plate, Traveling, Electromagnet, Edge Control, Continuous Model, Sliding Mode Control

### 1. はじめに

近年、多くの工業製品で利用されている薄鋼板は、製品製造時の連続熱処理や圧延及び連続表面処理などの工程でローラによる接触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 20~50m鉛直方向へ搬送される。その間、乾燥のためにローラなどによる接触支持ができず、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が起る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<sup>(1)(2)(3)</sup>、また、製鉄プロセスラインにおける実用例として形状制御、制振制御や中心位置決め装置について提案されている<sup>(4)(5)</sup>。一方、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<sup>(6)(7)(8)</sup>がなされている。しかし、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に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、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、走行連続鋼板の振動を抑制する非接触制御機構を提案している<sup>(9)(10)</sup>。本報告ではコントローラとして非線形モデルを簡単に扱うことが可能なロバスト制御のひとつであるスライディングモード制御<sup>(11)</sup>を適用する。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配置することにより、さらなる弾性振動抑制効果も検討する。

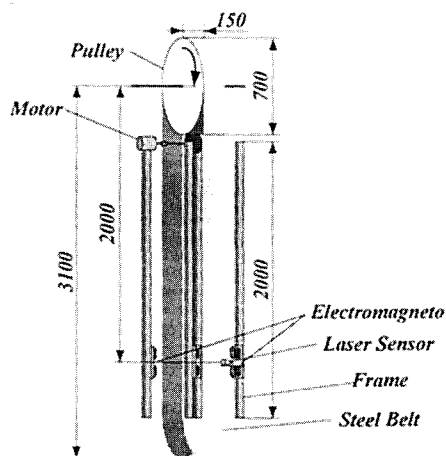
### 2. 電磁力エッジコントロール

#### 2.1 実験装置

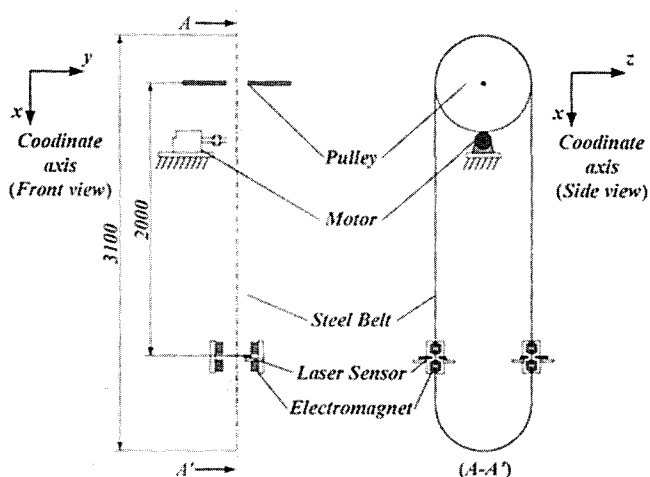
電磁力エッジコントロール制御実験装置の概要図を Fig.1 に示す。長さ 6894mm、幅 150mm、厚さ 0.3mm の焼入れした鋼材 (SK3) をベルト状に溶接したものを、直径 700mm、幅 154mm のプーリに図の様に吊り下げた。プーリは DC サーボモータから直径 100mm の駆動用平プーリを介して駆動する。また、ベルト下部にはプーリを設置せず、将来的に直線部分と曲がり部分の非接触案内支持制御の実現性を検討することも視野に入れて設計している。これは、水平方向に搬送されてきた連続鋼板がめっき処理槽を通過した後、鉛直方向に送られる部分や、そ

\* 1 工学研究科機械工学専攻博士課程後期  
\* 2 工学部動力機械工学科助教  
\* 3 第二工学部機械工学科教授

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<sup>(12)</sup>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 2000mm の位置に設置した．



(a) Angle view



(b) Front view and side view

Fig.1 Electromagnetic edge control system for a traveling steel belt

## 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.2 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章に示すスライディングモード制御理論を適用した．電磁石は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鋼板エッジとの距離を5mm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 0.83N（電磁石コイル定常電流 0.5A）である．

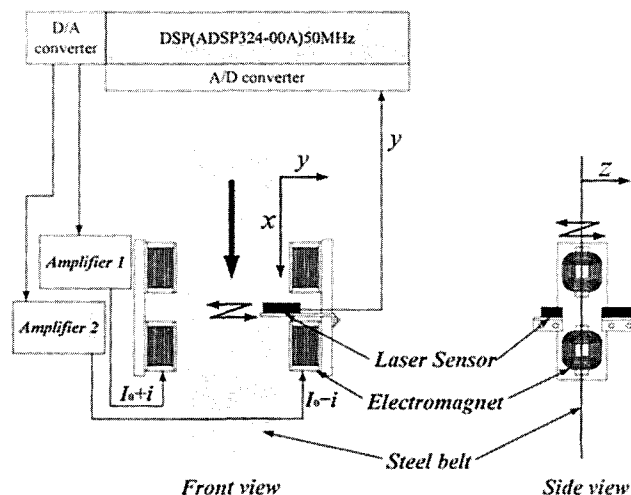
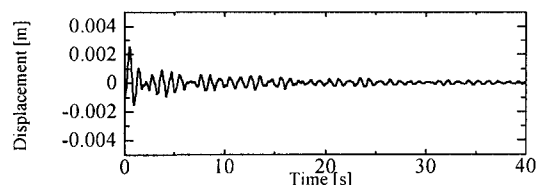


Fig.2 Control system

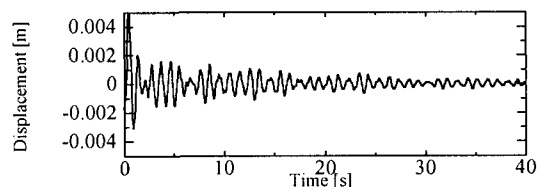
## 3. モデル化

### 3.1 運動方程式

本報告では，Fig.1 に示すプーリから下部の鋼板全てが  $y$  方向へ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， $y$  方向に初期変位を与えた時の自由振動波形をプーリ中心から 1m と 2m の部分で計測した (Fig.3(a), (b))．1m で計測した波形を 2 倍したものと，2m で計測した波形を重ね合わせて比較したところ非常に良い一致が得られることを確認している．このことより，鋼板の支持点からの距離に比例して変位も比例的に増加し，対象全体が  $y$  方向に剛体的な運動をしていることが確認できた．



(a) Sensing position 1m



(b) Sensing position 2m

Fig.3 Time histories of displacement

ただし，プーリと鋼板の境界部分においては局部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．ここで，回転運動は振り子の長さに対して小さいものとする．よって，以上のことよりモデル化による運動方程式は以下になる．

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

$J$ : 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<sup>2</sup>],  $C$ : 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<sup>2</sup>],  $L_1$ : 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 1.2mm 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 ( $C=0.371$ Nms,  $K=200$ Nm/rad). Fig.5はこのときの時刻歴とパワースペクトルである. 慣性モーメントは物理振子と平行軸の定理より算出し  $J=5.12$  kgm<sup>2</sup>, その他のパラメータは次に示すとおりである.  $L_1=2.0$ m,  $L_2=1.14$  m,  $m=2.01$ kg.

また, 本実験で使用した電磁石の特性式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.

$$f = \frac{4F_0}{\Gamma_0} y + \frac{4F_0}{I_0 R} v \quad (2)$$

ただし,

$$y = L_1\theta, \quad v = Ri$$

なお, 各パラメータは,  $\Gamma_0$ : 平衡状態における電磁石と対象物のギャップ(5mm),  $I_0$ : 平衡状態における定常的な電磁石コイル電流(0.5A),  $F_0$ : 電磁石から発生する平衡状態における定常的な吸引力(0.83N),  $R$ : 電磁石の抵抗(10Ω),  $y$ : 制御対象の変動値[m],  $v$ : 制御電圧[V],  $i$ : 制御電流[A]である.

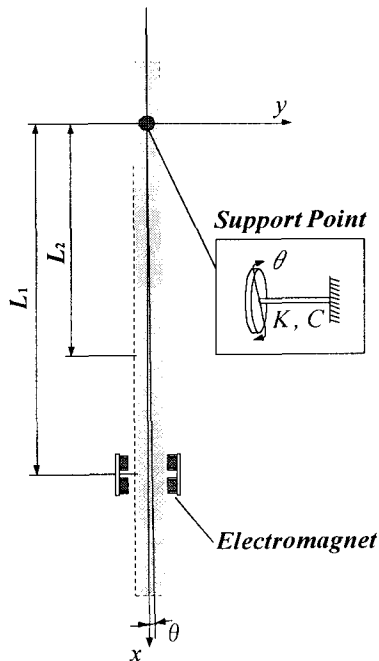


Fig.4 Model of electromagnetic edge control system for a traveling steel belt

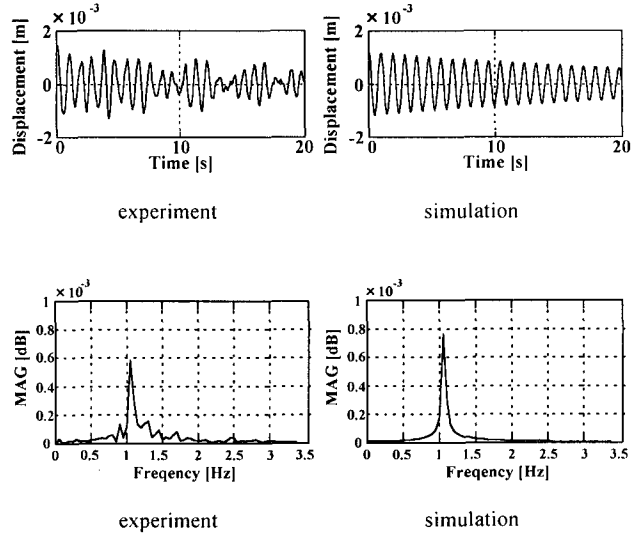


Fig.5 Time histories and Spectrums of displacement

### 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.

$$\dot{y} = A_y y + B_y v \quad (3)$$

$$y = [y \quad \dot{y}]^T$$

$$A_y = \begin{bmatrix} \frac{4F_0}{J\Gamma_0} L_1^2 - \frac{mgL_2}{J} & -\frac{K}{J} \\ -\frac{1}{J} & C \end{bmatrix}$$

$$B_y = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{4F_0}{J I_0 R} L_1^2 \end{bmatrix}$$

## 4. スライディング制御理論

### 4.1 離散時間切換超平面の設計

本報告では不確かさを含むシステムに対して優れたロバスト性を有するスライディングモード制御を, 第3章に示したモデルに対して適用する. また, コントローラとしては離散時間の制御系設計を行う.

離散時間系で記述された一自由度系の状態方程式は次式のようなになる.

$$y_d(i+1) = \Phi y_d(i) + \Gamma v_{yd}(i) \quad (4)$$

ただし,

$$\Phi(T_s) = \exp(A_y T_s)$$

$$\Gamma(T_s) = \int_0^{T_s} [\exp(A_y \tau)] d\tau B_y \quad (5)$$

である.

ここで切換関数を次式で表すことにする.

$$\sigma(i) = S_d y_d(i) \quad (6)$$

いま, スライディングモードが生じているとすると,  
 $\sigma(i) = \sigma(i+1) = \sigma(i+2) = \dots = 0$  (7)  
 これより等価制御入力は次式となる.

$$v_{eq}^s(i) = -(S_d \Gamma)^{-1} S_d (\Phi - I) y_d(i) \quad (8)$$

よって等価制御系は次のように表すことができる.

$$y_d(i+1) = \{\Phi - \Gamma(S_d \Gamma)^{-1} S_d (\Phi - I)\} y_d(i) \quad (9)$$

$S_d$  は式(9)のシステムが安定になるように選択する必要がある. 本研究ではこの設計法にシステムの零点を利用する方法を用いる<sup>(13)</sup>. 安定余裕を指定した連続時間系システム( $A_y^s, B_y^s$ )を離散化して得られるシステム( $\Phi, \Gamma$ )を考え, これに対して離散時間系最適制御理論を適用し  $S_d$  を得る. ここで安定余裕を指定したシステム  $A_y^s$  は次式で表される.

$$A_y^s = A_y + \varepsilon I \quad (10)$$

また,  $S_d$  は次式により求まる.

$$S_d^T = (r_{y_d}^s + \Gamma^T M^s \Gamma)^{-1} \Gamma^T M^s \Phi_\varepsilon \quad (11)$$

ただし,  $M^s$  は正定な重み係数行列に対する式(9)に示す離散時間系 Riccati 型代数方程式の正定解である. この  $S_d$  により等価制御系式(11)は安定となる.

#### 4.2 離散時間系スライディングモード制御コントローラの設計

ここでは状態を超平面上に収束させ, スライディングモードを発生させる制御入力を考える. 離散時間系での設計においてはチャタリングを低減させる設計法<sup>(14)(15)</sup>が提案されているため, 本研究ではその方法を用いる.

チャタリングを起こさないための条件は, あるサンプリング時刻  $i$  での切換関数の値  $\sigma(i)$  に対して, 次のサンプリング時刻  $i+1$  での切換関数の値  $\sigma(i+1)$  が超平面上に近づき, かつ超平面を行き過ぎなければよいことから以下のようなになる.

$$\begin{aligned} 0 \leq \sigma(i+1) \leq \sigma(i) & \quad \sigma(i) > 0 \text{ のとき} \\ \sigma(i) \leq \sigma(i+1) \leq 0 & \quad \sigma(i) < 0 \text{ のとき} \end{aligned} \quad (12)$$

この条件を満たすようなスライディングモード制御則として次のように与えられるものを用いる.

$$\left. \begin{aligned} v_{y_d}^s(i) &= v_{eq}^s(i) + v_{nl}^s(i) \\ v_{eq}^s(i) &= -(S_d \Gamma)^{-1} S_d (\Phi - I) y_d(i) \\ v_{nl}^s(i) &= -\{\alpha(i) + \beta(i)\} \text{sgn}\{\sigma(i)\} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

ここで

$$\alpha(i) = \eta \frac{\|\sigma(i)\|}{\|S_d \Gamma\|}, \quad 0 < \eta < 2, \quad \beta(i) \geq F_{\max}$$

$F_{\max}$ : は外乱の最大値である.

## 5. 制御実験および結果の考察

### 5.1 走行実験条件

本研究では Fig.6 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( $z$  方向)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 1000mm)に設置した. 使用した永久磁石は, Fig.7(a)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 0.166T である. 磁石表面と鋼板エッジの距離と永久磁石吸引力の関係は同図(b)に示した通りである. 本実験ではその距離を 10mm と設定し, このとき約 3.2N の吸引力を発生する.

鋼板エッジの横揺れ変動値( $y$  方向)の測定用として帯状レーザセンサ(Laser sensor)と鋼板の平面に垂直な方向( $z$  方向)の振動計測用として CCD レーザ変位センサ(CCD Laser sensor)をプーリ中心から 1000mm の位置に設置した.

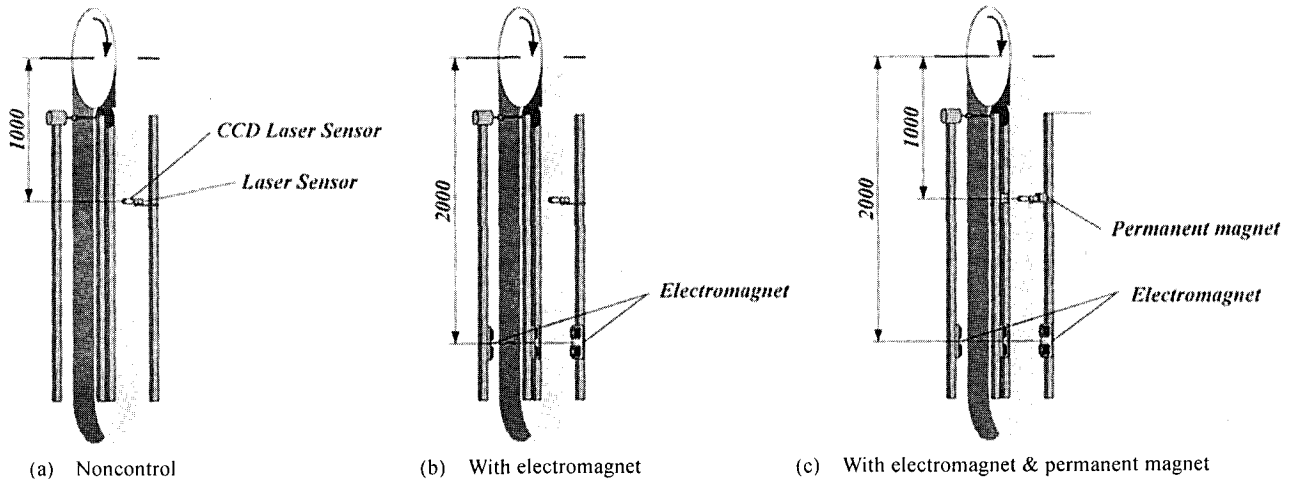


Fig.6 Layout of electromagnet and permanent magnet

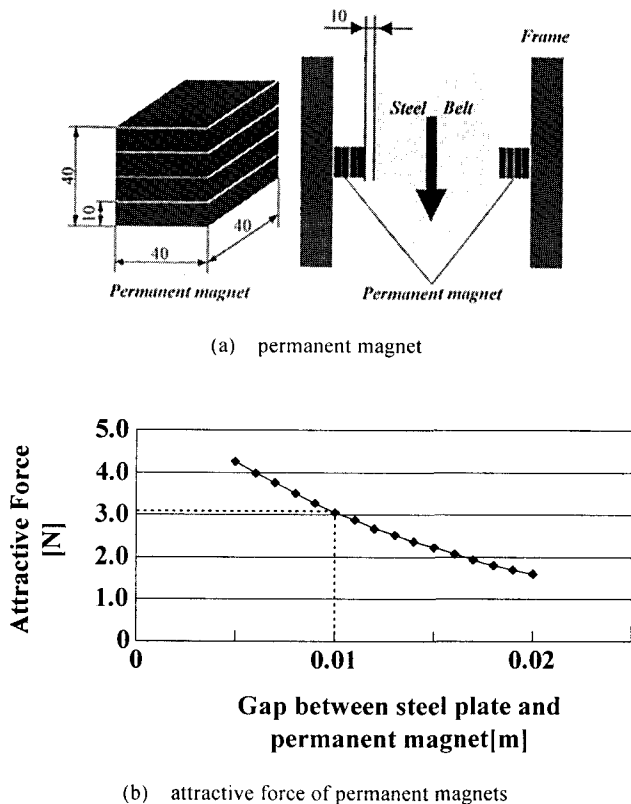


Fig.7 Characteristics of attractive force of permanent magnets

5.2 実験結果及び考察

5.2.1 y 方向振動に関する考察

実験結果の一例として、Fig.8 に 5m/s の走行状態における y 方向変位の時刻歴を示す。未制御状態では最大片振幅が約 10mm 近く発生している(同図(a))。これに対して電磁石のみによる制御を行うと最大片振幅が 2mm 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(同図(c))。そこで、鋼板の走行速度変化に伴う y 方向振動抑制効果について y 変位標準偏差を比較対象としたものを Fig.9 にまとめた。未制御時(図中◆印)に対して、電磁石による制御を実施することによって走行速度 1m/s のとき最大 80%, 5m/s のとき 60% の振動が抑制されていることが明らかになった。一方、永久磁石を併用した場合(図中▲印)が、併用しない場合(図中■印)に比べ制御性能が多少低下していることがわかる。これは、永久磁石の吸引力が負ばねとして鋼板に作用することが、y 方向に対して外乱的な要素になったことに起因している。

5.2.2 z 方向振動に関する考察

Fig.10 は Fig.8 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、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))では振動が抑制できているが、効果的であるとは言えない。しかし、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.11 は Fig.9 と同様、走行速度の変化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ため、未制御状況下でも 5m/s の状態では、

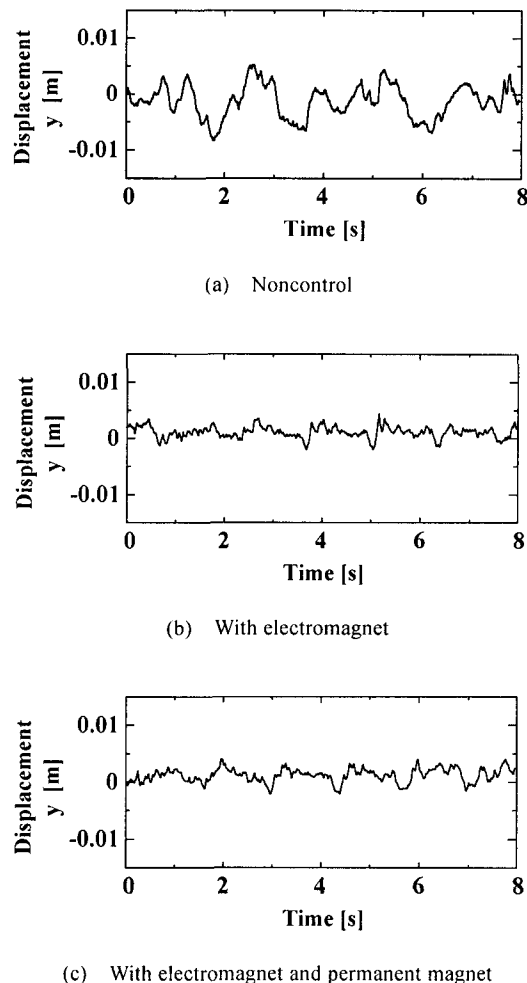


Fig.8 Time histories y axis displacement (Traveling speed 5m/s)

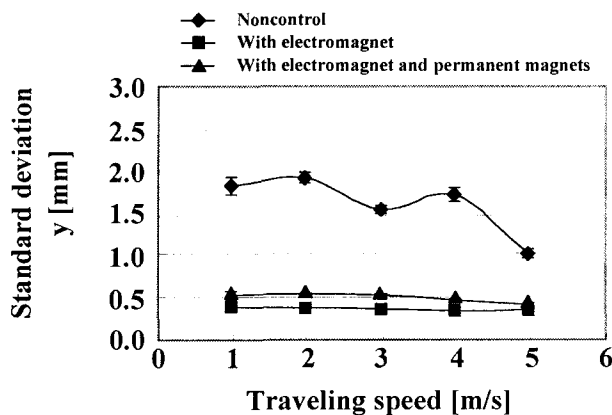


Fig.9 Standard deviation of displacement (y direction)

1m/s と比較して 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、1m/s では未制御に比べ約 86%, 5m/s でも 52% 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の振動抑制効果に対する有効性を示すことが出来た。

## 6. おわりに

本報告では走行連続薄鋼板の振動を抑制するために、非接触でエッジ方向から電磁吸引力を作用させるシステムにおいて、スライディングモード制御を適用し、その効果を検討した。その結果、鋼板エッジ方向の振動に対して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永久磁石吸引力も効果的に作用することが確認できた。よって、y 方向からの非接触制御による z 方向振動抑制の可能性を確認できた。

### 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 (1990), 2911-2918.
- (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 (1991), 1246-1253.
- (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 (1992), 3473-3480.
- (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 (1997), 74.
- (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, (1997), 1-8.
- (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, (1999), 219-222.
- (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, (1999), 527-530.
- (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, (2000), 597-600.
- (9) 柏原, 大杉, 押野谷, 石橋: 電磁力による走行柔軟磁性体の非接触案内, 第 45 回自動制御連合講演会論文集, (2002), 309-210.
- (10) 柏原, 大杉, 三髯, 押野谷, 石橋: 電磁力による走行柔軟磁性体の非接触案内に関するモデリング, 日本機械学会関東支部第 9 期総会講演会講演論文集, (2003), 209-210.
- (11) V.I.Utkin: 「Sliding modes in control and optimization」, Springer-Verlag, 1992.
- (12) 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, (1998), 52-57.
- (13) 野波, 仁科, 斎藤: 「ゼロパワー磁気軸受系の離散時間スライディングモード制御」, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.62, No.595, pp.157-165, 1996.
- (14) 野波: 「スライディングモード制御」, コロナ社, 1994.
- (15) 田, 野波: 「離散時間スライディングモード制御による弾性ロータ・磁気軸受系の高回転時特性」, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.60, No.580, pp.136-143, 1994.

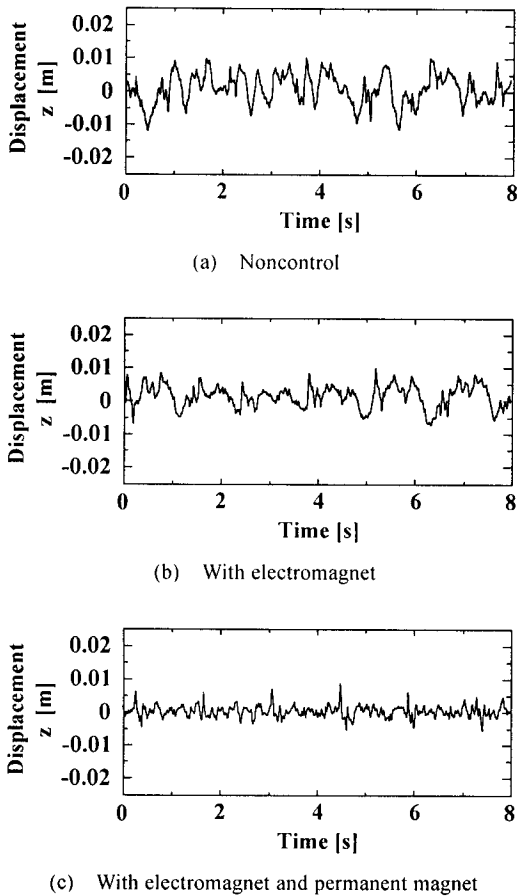


Fig.10 Time histories z axis displacement (Traveling speed 5m/s)

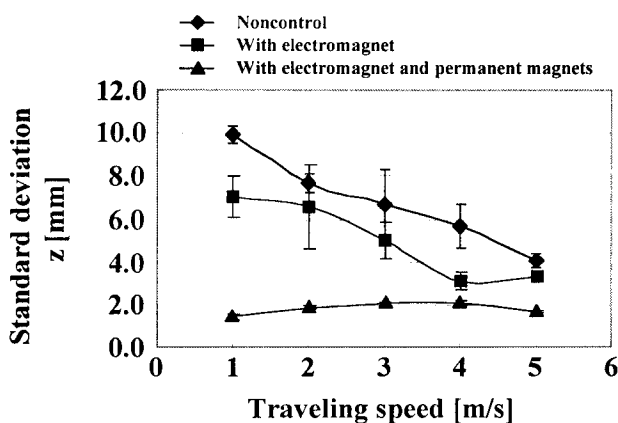


Fig.11 Standard deviation of displacement (z direction)