

# 永久磁石と電磁石を併用した走行磁性体の ロボスト非接触案内制御

熊谷博昭\*<sup>1</sup>・柏原賢\*<sup>2</sup>・押野谷康雄\*<sup>3</sup>・石橋一久\*<sup>4</sup>・粕谷平和\*<sup>3</sup>

## Robust Noncontact Guide Control for Traveling Elastic Steel Plate Using Permanent Magnets and Electromagnets

by

Hiroaki KUMAGAI, Ken KASHIWABARA,  
Yasuo OSHINOYA, Kazuhisa ISHIBASHI, and Hirakazu KASUYA

(Received on March 31, 2006 & accepted on June 21, 2006)

### Abstract

In a typical factory, a continuous thin steel plate subjected to iron and steel processes and supported by rolls tends to undergo plate vibrations that lower the quality of surface finish. In the plating process, the steel plate is conveyed 20-50 m in the vertical direction for drying, during which the steel plate is negligibly supported by rollers and other mechanisms. Therefore, plating nonuniformity due to the generation of vibration and other factors prevents an increase in productivity. To solve this problem, we have developed a noncontact guide system in which electromagnetic forces are applied to the edges of the steel plate. The control performance of replacing the electromagnet with a permanent magnet that has no running cost has been examined. However, the deleterious effect of the negative spring force of a permanent magnet has not been examined to date. In this study, we examine the possibilities for the robustness of the negative spring force of a permanent magnet using the sliding-mode-control theory.

**Keywords:** Steel plate, Noncontact guide, Sliding mode control, Permanent magnet, Vibration control

## 1. 緒言

工業製品で広く利用されている鋼板は製造工程においてローラにより接触支持搬送されている。その際、鋼板は走行中ローラによる接触支持により適度に張力を調節することで振動が抑制されている。しかしめっきなどの表面処理後、乾燥のため鉛直方向などへ20~50m搬送される際ローラによる支持が行えず、同時に高い張力の付加ができないことにより、振動、波動が発生する。この影響で支持ローラと走行連続鋼板の間に摩擦力変動が生じ、鋼板の表面に発生する傷、ひずみ、めっきの剝離など解決すべき課題が数多く存在する。

このような問題の解決方法として、流体を利用して帯鋼を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<sup>1), 2)</sup>。これに対し当研究グループでは、連続鋼板のエッジ近傍に電磁石を設置し磁力を付加することによって、走行する連続鋼板の鋼板平面内の走行方向に直角な方向および鋼板の平面に直角な方向の振動を抑制する非接触案内を提案している<sup>3)</sup>。これまでにこの非接触案内を連続鋼板が直線走行する部分や、進行方向を変更しながら走行する部分に対して適用し、その有効性について報告をしている<sup>4)~7)</sup>。

また、ランニングコストの削減を目的として、使用する電磁石の一部を永久磁石に置き換え、永久磁石と電磁石を併用した最適制御理論による非接触案内に関する検討も行っている<sup>8), 9)</sup>。永久磁石は鋼板の平面に直角な方向において見かけ上正ばねの力、すなわち拘束力として作用することで鋼板の平面に直角な方向のパッシブな振動抑制効果が得られることを明らかにしている。しかしその際鋼板平面内の走行方向に直角な方向においては、永久磁石が見かけ上負ばねとして作用し外乱的要因となってしまうことから、電磁石による鋼板平面内の走行方向に直角な方向のアクティブな振動抑制効果を劣化させる問題が残されていた<sup>3)</sup>。そこで本研究ではこの問題を解決することを目的とし、外乱に強いロボスト制御のひとつであるスライディングモード制御理論<sup>10)</sup>を用いて、永久磁石による鋼板平面内の走行方向に直角な方向の制御性能の劣化低減を試みる。また、その有効性を検討するために、現代制御理論の中でも標準的な制御手法のひとつである最適制御理論<sup>11)</sup>を用いて比較を行う。

## 2. 非接触案内

### 2.1 実験装置

本研究で使用した走行連続鋼板の非接触案内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、

\*1 工学研究科機械工学専攻修士課程  
\*2 第二工学部機械工学研究員  
\*3 工学部動力機械工学科教授  
\*4 第二工学部機械工学科教授

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。本研究では鋼板が直線的に走行する部分の振動を抑制するために、既に提案している非接触位置決め制御機構<sup>3)</sup>と同様の電磁石(Fig.2)をプーリの中心から鉛直下方 1000mm(Fig.1 の No.2)と 2000mm(同図 No.4, No.5)に設置し、永久磁石をプーリの中心から鉛直下方 500mm(同図 No.1)と 1500mm(同図 No.3)に設置した。これは No.2 の電磁石が、プーリと No.4 の電磁石を支持点とした、振動が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ためである。同様に永久磁石も No.1 の永久磁石がプーリと電磁石を支持点とし、No.3 の永久磁石は 2 つの電磁石を支持点とした、振動が最も発生しやすい弾性振動最低次モードの腹付近に配置した。また、図中の  $x_1 \sim x_5$  はそれぞれの位置における鋼板の走行方向の座標(以下  $x$  方向と記す)、図中の  $y_1 \sim y_5$  はそれぞれの位置における鋼板平面内の走行方向に直角な座標(以下  $y$  方向と記す)、図中の  $z_1 \sim z_5$  はそれぞれの位置における鋼板の平面に直角な方向の座標(以下  $z$  方向と記す)を示している。本実験では永久磁石による  $y$  方向への外乱の影響を低減することが可能であるのかを確認するため、最も永久磁石の  $y$  方向への外乱の影響が電磁石に加わる上下に永久磁石で挟まれた No.2 の電磁石部分で測定を行った。さらに、電磁石により永久磁石にどのような影響が現れるのかを検討するため、電磁石による影響が最も永久磁石に加わる電磁石にはさまれた No.3 の永久磁石位置においても測定を行った。

本研究で用いた永久磁石(Fig.3)は表面磁束密度 0.055T であり、これまで行ってきた永久磁石の表面磁束密度と鋼板との距離の検討<sup>9)</sup>に基づき、この永久磁石を 4 段重ねることとした。このとき表面磁束密度は 0.124T であり、鋼板エッジ部と永久磁石表面との距離を 16mm として設置し実験を行った。

## 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.4 に示すような制御システムを用いる。本研究では、制御対象質量を同図の連

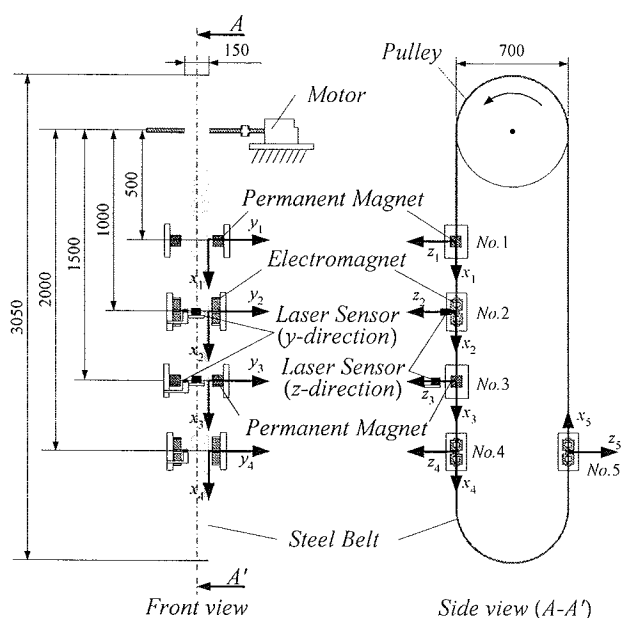


Fig.1 Noncontact guide system for a traveling steel belt.

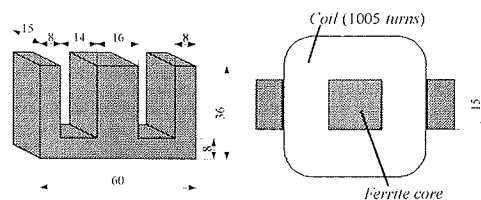


Fig.2 Specification of electromagnet.

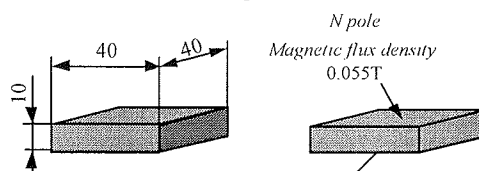


Fig.3 Specification of permanent magnet.

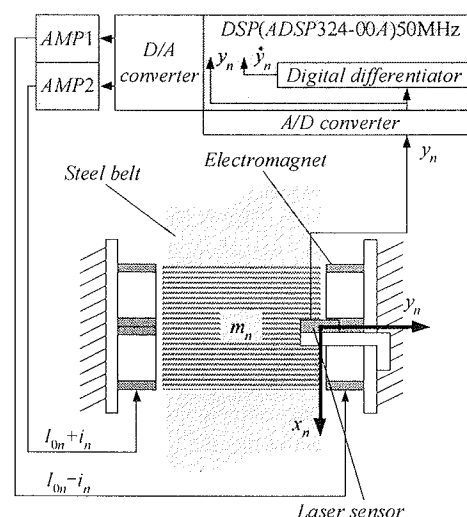


Fig.4 Control system of the noncontact guide system.

続鋼板のメッシュで示した電磁石の前方を通過する質量  $m_n$  ( $n=2,4,5$ ) と近似する。鋼板エッジ部分の横揺れ変動値を検出するためのレーザーセンサを設置し、変位、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。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。

## 3. モデリングと制御手法

### 3.1 運動方程式

本研究では走行する連続鋼板の  $y$  方向に設置した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(Fig.4)。それぞれの制御対象となる質量を  $m_n$  とし、電磁石からの制御力  $u_n$  とした並進 1 自由度モデルとして運動方程式は次のようになる。

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

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

また本研究においてアクチュエータとして使用している電磁石のダイナミクスを考慮した特性式は次式のようにになる。

$$v_n = R_n i_n + L_n \frac{d}{dt} i_n - L_{effn} \frac{I_{0n}}{\Gamma_{0n}^2} \frac{d}{dt} y_n \quad (3)$$

$m_n$ : 制御質量[kg],  $y_n$ : 鋼板と平衡点からの  $y$  軸方向変位[m],  
 $u_n$ : 鋼板エッジ部分に設置した電磁石の片側 2 個あたりの吸引力の変動値[N],  $F_{0n}$ : 電磁石 1 個当たりから発生する平衡状態における定常的な吸引力[N],  $\Gamma_{0n}$ : 平衡状態における電磁石と対象物のギャップ[m],  $I_{0n}$ : 平衡状態における定常的な電磁石コイル電流[A],  $R_n$ : 2 個の電磁石コイルの抵抗値[Ω],  $v_n$ : 電磁石コイルの定常電圧からの変動値[V],  $i_n$ : 電磁石コイル電流の定常電圧からの変動値[A],  $L_n$ : 全インダクタンス[H],  $L_{effn}$ : 鋼板へ有効に作用するインダクタンス[Hm].

アクチュエータとして使用している電磁石の一次遅れ特性などのダイナミクスを考慮すると, モデル誤差に対してスライディングモード制御はマッチング条件<sup>10)</sup>を満たさない. そこで本研究では, 電流フィードバックのゲインを大きくし, 電磁石回路方程式を理想化することによりマッチング条件を満たすようなモデリング<sup>11)</sup>を行う. 式(3)の電磁石回路方程式を理想化するために十分に大きい電流フィードバックを用いる. このことにより, 電磁石コイルの定常電圧からの変動値  $v_n$  を, 変位, 速度をフィードバックすることにより求まる制御電圧と, 電流フィードバックより求まる制御電圧に分ける.

$$v_n = v_{fbn} - f_m i_n \quad (4)$$

$v_{fbn}$ : 変位, 速度をフィードバックすることによって求まる制御電圧[V],  $f_m$ : 電流フィードバックゲイン[V/A].

この式(4)を式(3)に代入すると次式となる.

$$i_n = -\frac{L_n}{(R_n + f_m)} \frac{d}{dt} i_n + \frac{L_{effn} I_{0n}}{(R_n + f_m) \Gamma_{0n}^2} \frac{d}{dt} y_n + \frac{1}{(R_n + f_m)} v_{fbn} \quad (5)$$

この時, 十分に大きい電流フィードバックゲイン  $f_m$  を用いることにより,  $R_n + f_m$  が大きくなり電磁石コイルの抵抗値を見かけ上, 上昇させることが可能である. このため, 式(5)の第 1 項, 第 2 項の分母  $R_n + f_m$  が分子に対して十分に大きくなり, インダクタンスによる電流の一次遅れ特性と逆起電力の項は微小となる. これにより, 式(5)の電磁石回路方程式は理想化され次式で表すことができる.

$$i_n = \frac{1}{(R_n + f_m)} v_{fbn} \quad (6)$$

ここで式(6)を式(2)に代入することによって次式を得る.

$$u_n = \frac{2F_{0n}}{\Gamma_{0n}} y_n + \frac{2F_{0n}}{I_{0n}(R_n + f_m)} v_{fbn} \quad (7)$$

状態変数として薄鋼板の変位, 速度を採用し, 式(1), (7)を整理して以下のような状態方程式を得る. これより状態方程式は

$$\dot{y}_n = A_{yn} y_n + B_{yn} v_n \quad (8)$$

ただし,

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

$$A_{yn} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{4F_{0n}}{m_n \Gamma_{0n}} & 0 \end{bmatrix}, \quad B_{yn} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{4F_{0n}}{m_n I_{0n} (R_n + f_m)} \end{bmatrix}$$

## 3.2 最適制御理論

最適制御理論では, 以下に示す二次形式評価関数を最小とするコントローラを求める. ただし, 右辺第一項は応答性に関する項で誤差の二乗積分値をあらわす. また, 第二項は制御に必要なエネルギーをあらわし, これを小さくすることは小さなエネルギーで制御を行うことを意味する.

$$J_{ym} = \sum_{i=0}^{\infty} \left[ y_n^T \circ Q_{ym} y_n + \circ r_{ym} \circ v_n^2 \right] \quad (9)$$

ただし,

$$\circ Q_{ym} = \text{diag}(\circ q_{yn} \quad \circ q_{vm})$$

$$\circ v_n = -F_{yn} y_n$$

$$F_{yn} = -\circ r_{ym}^{-1} B_{ym}^T P$$

$\circ v_n$ : 制御電圧 [V],  $\circ r_{ym}$ : 制御入力に関する重み係数[V<sup>2</sup>],  
 $\circ q_{yn}$ : 変位に関する重み係数[m<sup>2</sup>],  $\circ q_{vm}$ : 速度に関する重み係数[s<sup>4</sup>/m<sup>2</sup>].

$P$  は連続時間系 Riccati 型代数方程式

$$P A_y + A_y^T P - P B_y \circ r_{ym}^{-1} B_y^T P + \circ Q_{ym} = 0 \quad (10)$$

の一意正定解である.

## 3.3 スライディングモード制御理論

スライディングモード制御理論の切換関数を次式で表す.

$$\sigma = S_n y_n \quad (11)$$

本研究では前節で述べた最適制御理論を用いて切り替え超平面の設計を行う<sup>10)</sup>. なお, その場合の重み係数を  $\circ q_{yn}$  [m<sup>2</sup>],  $\circ q_{vm}$  [s<sup>4</sup>/m<sup>2</sup>],  $\circ r_{ym}$  [V<sup>2</sup>]とする.

次に状態を超平面に収束させ, スライディングモードを発生させる制御入力を考える. チャタリングを低減させる設計法<sup>12)</sup>が提案されているため, 本研究ではその方法を用いる. 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式が与えられる.

$$\left. \begin{aligned} \circ v_n &= \circ v_{eqn} + \circ v_{nlm} \\ \circ v_{eqn} &= -(S_n B_{ym})^{-1} S_n (A_{yn} - I) y_n \\ \circ v_{nlm} &= -\{\alpha \text{sgn}\{\sigma\} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

ここで  $\alpha$  は次式の通りである.

$$\alpha = \eta \frac{\|\sigma\|}{\|S_n B_{ym}\|} \quad (13)$$

## 4. 制御実験

### 4.1 実験条件

本研究では永久磁石を使用しない電磁石のみの場合と, 永久磁石と電磁石を併用した場合の 2 条件にて走行実験を行った. 本実験では実機処理工程に非接触案内を適用した時の状況を模擬するため 100m/min~600m/min まで 100m/min ごとに走行速度を変化させた.

すでに述べたように, 鋼板のエッジ近傍に永久磁石を設置した場合, 永久磁石は鋼板  $z$  方向において見かけ上正ばねとし

Table 1 The symbols and values.

Symbol	Value
$m_n$	0.19kg
$F_{0n}$	0.83N
$r_{0n}$	$5 \times 10^{-3}m$
$I_{0n}$	0.5A
$L_n$	$2.3 \times 10^{-2}H$
$L_{effn}$	$2.1 \times 10^{-3}Hm$
$f_n$	180 V/A
${}^o r_{yn}$	$1.0 \times 10^4 V^{-2}$
${}^o q_{yn}$	$7.0 \times 10^6 m^{-2}$
${}^o q_{vm}$	$5.0 \times 10^1 s^4/m^2$
${}^s q_{yn}$	$1.0 m^{-2}$
${}^s q_{vdm}$	$1.0 s^4/m^2$
${}^s r_{yn}$	$1.0 V^{-2}$
$\eta$	0.4

で作用しパッシブな振動抑制効果がある。しかし、鋼板 y 方向では見かけ上負ばねとして作用し電磁石によるアクティブな振動抑制効果を劣化させる。そこでスライディングモード制御理論を適用することで、永久磁石による y 方向への外乱の影響を低減することが可能であるのかを確認する。なお最適制御理論適用時とスライディングモード制御理論適用時の性能比較を行うために、永久磁石を設置していない場合の y 方向変位の標準偏差が等しくなるようにコントローラの重み係数調整を行った。ただし、走行速度は 600m/min のときである。本制御システムでは走行速度によって制御ゲインを変更させる適応制御のよう

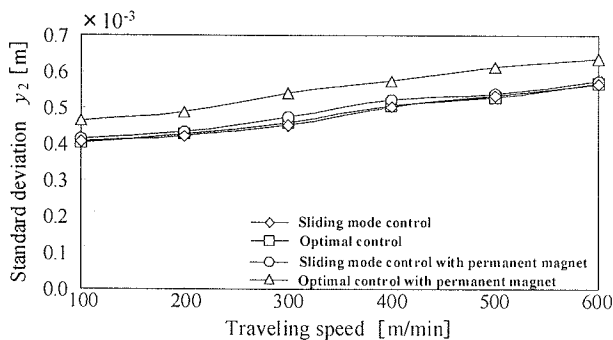


Fig. 5 Standard deviation of  $y_2$ -displacement.

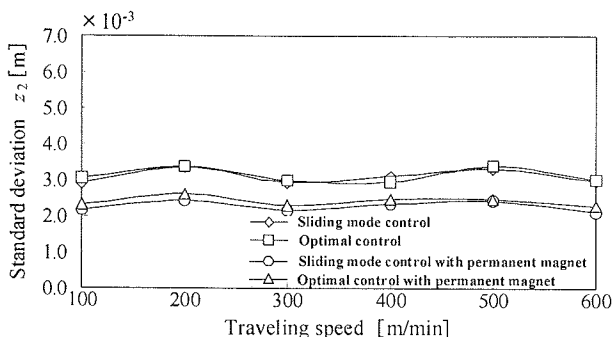


Fig. 6 Standard deviation of  $z_2$ -displacement.

なコントローラを考えていないため、本実験における最高走行速度 600m/min に対して設計したコントローラによって調整を行った。実験装置および各制御理論の重み係数の値は表 1 に示す通りである。

## 4.2 実験結果及び考察

### 4.2.1 電磁石設置位置に関する検討

No.2 の電磁石設置位置での y 方向における変位の標準偏差を Fig.5 に、z 方向における変位の標準偏差を Fig.6 に示す。なお横軸は走行速度を示す。

Fig.5 より最適制御適用時(□, △印)では、永久磁石を設置した場合(△印)、外乱の影響により各走行速度における標準偏差が大きくなり、電磁石のみの場合(□印)と比較して約 18%制御性能が劣化した。しかし、スライディングモード制御適用時(◇, ○印)では、永久磁石を設置した場合(○印)と、電磁石のみの場合(◇印)における標準偏差とほぼ同様の値となり制御性能に劣化は見られなかった。これはスライディングモード制御によって、y 方向における外乱の要素となる永久磁石の影響を減少することができたためである。

Fig.6 より z 方向においては、制御手法にかかわらずその変位の標準偏差は電磁石のみの場合(◇, □印)同士がほぼ等しくなっており、同様に永久磁石を併用した場合(○, △印)同士がほぼ等しくなっている。これは z 方向の振動に対して電磁石によるアクティブ制御を行っていないので、適用した制御手法が何であれ制御性能に影響を及ぼさないことを示している。また、電磁石のみの場合と永久磁石を併用した場合の結果を比較すると、後者の方が約 37%制御性能が向上している。このことより、永久磁石を併用することで制御性能の向上が行えることを確認できた。

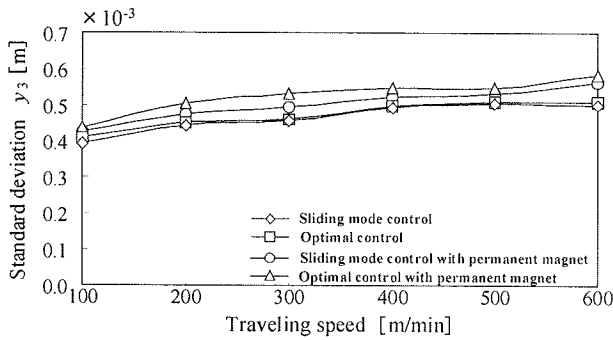
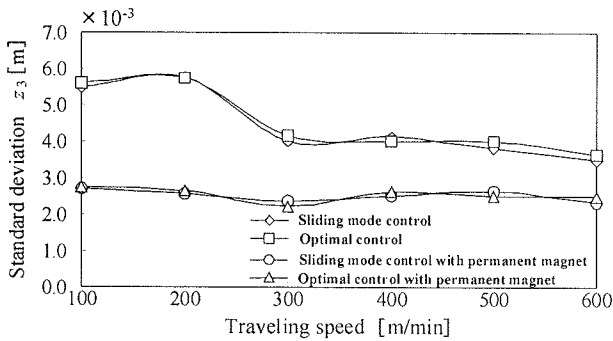
### 4.2.2 永久磁石設置位置に関する検討

本項では電磁石にはさまれた永久磁石設置位置における性能を検討する。No.3 の永久磁石設置位置での y 方向における変位の標準偏差を Fig.7 に、z 方向における変位の標準偏差を Fig.8 に示す。

Fig.7 より永久磁石位置では、永久磁石の y 方向の磁力により外乱となる影響が強く、スライディングモード制御適用時における永久磁石を設置した場合(○印)の標準偏差は電磁石のみの場合(◇印)と比較して約 12%制御性能の劣化が見られた。しかし最適制御適用時における永久磁石を設置した場合(△印)は電磁石のみの場合(□印)と比較して約 16%制御性能の劣化が見られた。したがって本報告のように、y 方向の振動に不利になるような位置に永久磁石を設置しても、スライディングモード制御を適用した場合の方が電磁石と永久磁石を併用した非接触案内には有効であることが分かった。

また、Fig.8 より z 方向においては 4.2.1 項と同様の傾向があり、制御手法にかかわらず電磁石のみの場合(◇, □印)より、永久磁石を併用した場合(○, △印)の方が最大で約 53%制御性能が向上している。

永久磁石を利用することによるパッシブ制御の有効性を明確にするために、ここで視点を変え、Fig.6 と Fig.8 の結果を比較する。両図における永久磁石を設置せず電磁石のみの場合(両図の◇, □印)の標準偏差を比較すると、電磁石設置位置における結果(Fig.6)より永久磁石設置位置(実際には計測位置)における

Fig. 7 Standard deviation of  $y_3$ -displacement.Fig. 8 Standard deviation of  $z_3$ -displacement.

結果(Fig.8)の方が大きくなっている。しかし、永久磁石を設置することにより、Fig.8の結果(○, △印)はFig.6の結果(○, △印)に近いところまで振動を抑制できている。

## 5. 結言

これまで当研究室では連続鋼板の $z$ 方向の振動を効果的に抑制するためにエッジ付近に電磁石と永久磁石を併用した非接触案内を提案している。しかしながら、鋼板のエッジ付近に電磁石と永久磁石を併用して設置した場合、 $y$ 方向の振動に対して永久磁石による磁力が外乱として作用し、振動抑制効果が劣化した。そこで本研究では非接触案内の制御システムにロバスト性を有するスライディングモード制御理論を用いることで永久磁石による $y$ 方向に対する外乱の影響を減少させ、永久磁石を効果的に用いる検討を行った。

走行実験において、スライディングモード制御適用時と最適制御適用時を比較した結果、スライディングモード制御を適用することによって $y$ 方向における永久磁石の外乱的要因の抑制が可能であることを確認できた。また、 $z$ 方向では振動をアクティブに制御していないため、それぞれの制御理論を適用することによる大きな振動抑制効果の変化は発生しなかったが、永久磁石を利用することで、電磁石のみの場合と比較して $z$ 方向の振動抑制効果が十分向上していることが確認できた。

## 謝辞

本研究に際して、東海大学大学院生 小倉浩一郎氏(現 株式会社共立)、東海大学学部生 長田淳氏(現 株式会社 OA 研究所)には多大な協力を得た。ここに感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 藤原, 今田, 木田, 安富: 高温用フローラの空力特性について, 日本機械学会通常総会講演会講演論文集, (1993), pp.314-316.
- 2) 平井, 東尾, 田沢, 三本竹, 宮川, 山下: 帯鋼用浮上式ヘリカルターナの実用化, 三菱重工技報, Vol.36, No.6, (1999), pp.312-315.
- 3) 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), CD-ROM.
- 4) 柏原, 押野谷, 石橋: 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), 東海大学紀要工学部, Vol.43, No.1, (2003), pp.59-64.
- 5) 柏原, 押野谷, 石橋: 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), 日本応用磁気学会誌, Vol.29, No.3, (2005), pp.326-331.
- 6) 柏原, 押野谷, 石橋: 電磁力による走行磁性体の進行方向変更部分に対する非接触案内(加減速時に対する基礎的検討), 東海大学紀要工学部, Vol.43, No.2, (2003), pp.53-58.
- 7) 柏原, 押野谷, 石橋: 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, 日本 AEM 学会誌, Vol.11, No.4, (2003), pp.235-241.
- 8) 柏原, 押野谷, 石橋: 薄鋼板のエッジ方向に加える電磁力が薄鋼板の垂直振動に及ぼす影響, 東海大学紀要工学部, Vol.44, No.1, (2004), pp.75-81.
- 9) 小倉, 柏原, 三賢, 押野谷, 石橋: 薄鋼板のエッジ方向に設置する永久磁石の最適な磁力と位置の関係に対する検討, 東海大学紀要工学部, Vol.44, No.2, (2004), pp.43-48.
- 10) 例えば, 野波, 田: スライディングモード制御, コロナ社(1994).
- 11) 例えば, 土谷, 江上: 現代制御工学, 産業図書, (1991).
- 12) 野波, 田, ロバスト最小次元 VSS オブザーバを適用した弾性ロータ・磁気軸受系のスライディングモード制御, 日本機械学会論文集 C, Vol.60, No.571, (1994), pp.897-905.