

電磁石による走行磁性体の非接触案内 (FEM を用いた電磁石配置に関する基礎的検討)

Non-Contact Guide for Traveling Elastic Steel Plate Using Electromagnets: Fundamental Consideration of Electromagnet Placement Using FEM

川崎謙太^{a)}・成田正敬^{a)†}・加藤英晃^{a)}・森山裕幸^{a)}

^{a)} 東海大学, 神奈川県平塚市北金目 4-1-1 (〒259-1292)

K. Kawasaki^{a)}, T. Narita^{a)†}, H. Kato^{a)}, and H. Moriyama^{a)}

^{a)} Tokai University, Kitakaname, Hiratsuka-shi, Kanagawa 259-1292, Japan

These days, users of products manufactured by the continuous steel plates process demand high quality, and high added value as well as high grade products. In the factory, a continuous thin steel plate subjected to iron and steel processes is supported by rollers during processes such as rolling, where; the thin steel plate moves along 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 time it is negligibly supported by rollers or other mechanisms. This results in plating non-uniformity due to the generation of vibration and other factors, which ultimately degrades productivity. We have developed a non-contact guide system for a high-speed traveling elastic steel plate in which electromagnetic forces are applied by actuators at the edges of the plate to control its position. In this work, we focus on the stress static structure of the traveling steel plate, and designed the optimal non-contact guide in the loop-shaping part on the basis of analytical results.

Key-words: steel plate, electromagnet, travelling, noncontact guide

1. 緒言

鋼板の製造プロセスでは、長さ数 km に及ぶ連続鋼板の状態では圧延や表面処理などの様々な工程を経て製品となる。その間連続鋼板は多数のローラにより接触支持搬送されており、ローラと鋼板表面の接触によってキズなどが発生し、表面品質の劣化が問題となる。また表面処理の工程で鋼板に亜鉛めっきが施されるが、めっき工程直後は塗布した亜鉛が凝固するまでは接触支持を行うことができない。このため実際の表面処理工程では、めっき直後の連続鋼板は上方に約 40 m にわたり一切の接触支持なく搬送され、めっきが凝固した後にローラによって再び接触搬送される。この接触が行えない区間で振動が発生し、めっきの剥離や鋼板の反りの発生が重大な問題となっている。

これら問題点の解決方法として、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・開発が行われている¹⁾。しかし、めっき処理工程などにおいて鋼板の表面に発生する風紋やむらは避けられない。また鋼板の上下面に電磁石を設置し、吸引力を利用して連続鋼板を非接触に支持する手法²⁾が一部に導入されており、面外の振動については抑制効果が報告されているが、鋼板平面内の走行方向に垂直な方向は制御を行わないため、蛇行の問題は未だ解決できていない。

当研究グループでは直線を走行する連続鋼板のエッジ近傍に電磁力を印加することにより、鋼板の鋼板平面内の走行方向に垂直な方向の振動を抑制する非接触エッジ制御を提案し、鋼板平面内の走行方向に垂直な方向の案内だけでなく、鋼板に張力を加えることによって面外の振動も抑制できることを明らかにしている^{3,4)}。さらに連続鋼板が進行方向を変更しながら走行する部分に対して非接触案内を

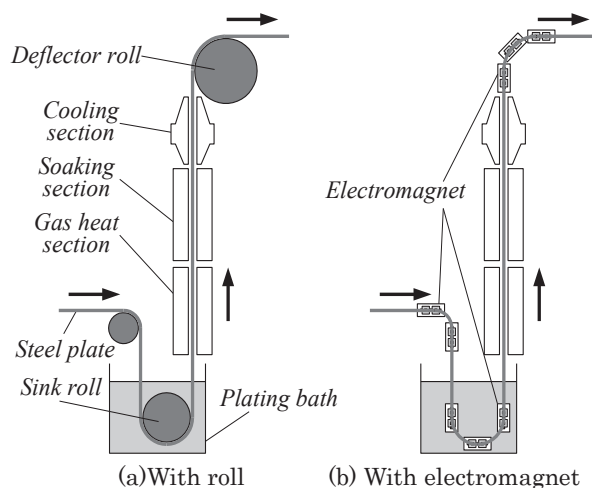


Fig. 1 Manufacturing process of continuous steel plates.

施し、その有効性を確認している⁵⁾。このとき連続鋼板の進行方向変更部分のループ形状は走行により非対称な形状になるが、鋼板走行時の形状に合わせて電磁石を配置することで制振効果の向上を図れることを実験的に明らかにした⁶⁾。これまでにマルチボディダイナミクス (以下 MBD) と有限要素法 (以下 FEM) を用いて走行時の鋼板形状を算出し、実際の走行形状と比較した結果より一致が見られ、走行時の非対称形状を算出する手法が確立できた^{7,8)}。しかし電磁石配置位置について最適な案内路の設計手法は確立されていない。本論文は FEM を用いて連続鋼板の応力について静的構造解析を行い、解析結果に基づいてループ部分に電磁石を設置し、走行実験により最適な非接触案内路を設計するための基礎的検討を行った。

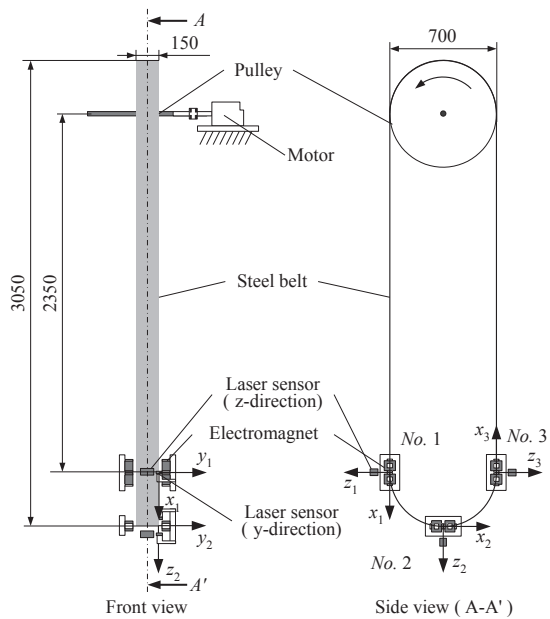


Fig. 2 Schematic illustration of non-contact guide.

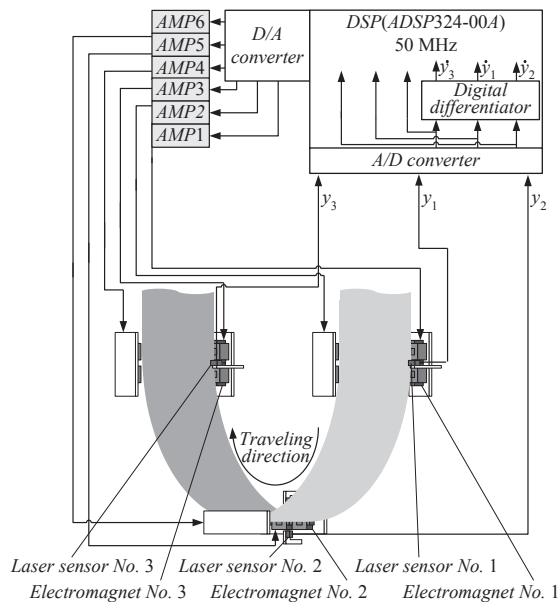


Fig. 3 Control system of non-contact guide.

2. 実験装置

Fig. 1 (a) に示すように、連続鋼板の製造ラインにおけるめっき処理工程などではデフレクターロールやシンクロールにより鋼板は接触支持されている。本研究ではロール部分に対して、同図(b)に示すような電磁石を用いた非接触案内路の形成を目的とする。そこで Fig. 2 に示すように連続鋼板がめっき処理槽を通過する部分などを模擬した装置を製作した。長さ 6894 mm、幅 150 mm、厚さ 0.2 mm の焼入れした鋼材 (SUS632) をベルト状に溶接した連続鋼板を直径 700 mm、幅 154 mm のプーリに同図の様に吊り下げた。なお、本実験において鋼板の幅を 150 mm としたのは、鋼板平面内の走行方向に垂直な方向の変形や弾性振動等を減少させ、エッジ制御システムがループ形状部分に与

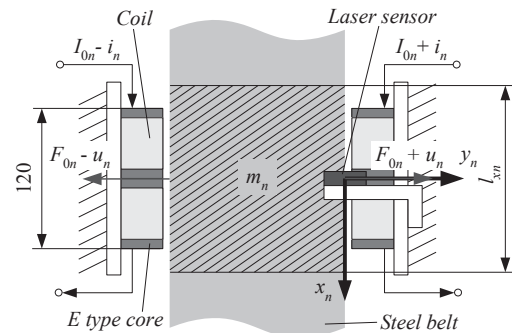


Fig. 4 Model of noncontact guide.

える影響を明確に考察するためである。

プーリは DC サーボモータにより駆動し、連続鋼板のエンドレス走行を可能としている。また、電磁石は 3 か所に設置したパターンと 2 箇所を設置したパターンで実験を行った。3 箇所設置は同図のようにそれぞれ No. 1, 2, 3 とし、2 箇所は No. 2 を取り除いたものとする。Fig. 2 中の $x_1 \sim x_3$ (以下、この方向を x 方向と記す) は各電磁石位置における鋼板の走行方向の座標を示している。また、 $y_1 \sim y_3$ は電磁石位置における鋼板平面内の走行方向に垂直な座標 (以下、この方向を y 方向と記す)、 $z_1 \sim z_3$ は電磁石位置における鋼板の平面に垂直な方向の座標 (以下、この方向を z 方向と記す) を示す。

3. 非接触エッジ制御システム

走行鋼板 y 方向に対して電磁石によるアクティブ制御を行うために構築した制御システムを Fig. 3 に示す。本実験では吸引力不足を補うため、電磁石を 2 個直列接続し、連続鋼板の両側エッジ近傍に対向するように設置した。電磁石を設置した 3 箇所において、電磁石表面と連続鋼板エッジとの距離を両側とも 5 mm に維持できるように設定し、そこからの変位、速度、電流の 3 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。

一方、 z 方向において鋼板は、未走行時における初期位置から電磁石コイルの中心へと案内される。これは y 方向の位置決め制御を行うために発生している磁場が、 z 方向においてはコイル中心への吸引力として作用することによる。なお、この吸引力が z 方向の鋼板に作用する範囲は、今回使用した電磁石コイルの最外周程度であることを実験的に確認している。

4. モデリング

Fig. 4 に任意の電磁石位置におけるモデル図を示す。本研究では 3 箇所すべてで共通のモデル化を行う。鋼板の両側エッジ近傍に設置した電磁石の間を通過する部分の制御質量を m_n [kg] とし、その走行方向における連続鋼板の長さを L_{xn} [m] とする。 n は電磁石位置番号である ($n=1, 2, 3$)。同図に示すように電磁石が

Table 1 Symbols and values.

Symbol	Value	Symbol	Value
M_n	0.042 kg	L_n	$2.3 \times 10^{-2} \text{H}$
F_{0n}	1.7 N	${}^o q_{vn}$	$14.5 \times 10^6 \text{m}^{-2}$
Γ_{0n}	$5.0 \times 10^{-3} \text{N}$	${}^o q_{vn}$	$16.7 \times 10^5 \text{s}^2/\text{m}^2$
I_{0n}	0.5 A	${}^o r_n$	$1.0 \times 10^4 \text{V}^2$
R_n	20 Ω		

($n=1, 2, 3$)

Table 2 Tension on the steel sheet during travel.

	600 m/min	800 m/min	1000 m/min
T_t	32 N	53 N	80 N
T_n	55 N	84 N	118 N

らの制御力を u_n とした場合の y_n 軸方向の並進 1 自由度系としてモデル化する。ここで鋼板の両側に設置した電磁石に定常電流 I_{0n} を流すことにより発生する吸引力によって鋼板を引き合うことで、鋼板エッジ部と電磁石表面の距離が一定に保たれる平衡状態が存在する。その平衡状態からの y_n 軸方向の運動方程式は次式のようになる。

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

ただし、 u_n は鋼板エッジ近傍に設置した片側 2 個の電磁石総吸引力の変動値 [N] である。また、線形化近似を行った電磁石吸引力に関する方程式は以下のようになる。

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

F_{0n} : 2 個の電磁石から発生する平衡状態における定常的な総吸引力 [N], Γ_{0n} : 平衡状態における電磁石と鋼板のギャップ [m], I_{0n} : 平衡状態における定常的な電磁石コイル電流 [A], i_n : 電磁石コイル電流の定常電流からの変動値 [A] 以上より、鋼板の変位、速度を状態変数とし、式(1)、(2)を整理して以下のような状態方程式を得る。

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

$$\dot{\mathbf{y}}_n = \begin{bmatrix} y_n \\ \dot{y}_n \end{bmatrix} \quad \mathbf{A}_n = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{2F_{0n}}{m_n \Gamma_{0n}} & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_n = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2F_{0n}}{m_n I_{0n} R_n} \end{bmatrix}$$

5. 制御理論

本研究で用いる制御理論は最適制御理論とし、以下に示す二次形式評価関数 J_{dn} を最小とする制御電圧 ${}^o v_{dn}$ を求める。なお、記号の添え字 d は離散化を表わしており、その際のサンプリング周期は $1.0 \times 10^{-3} \text{s}$ とした。

$${}^o v_{dn}(k) = -\mathbf{K}_{dn} \mathbf{y}_{dn}(k) \quad (4)$$

$$J_{dn} = \sum_{k=0}^{\infty} \left\{ \mathbf{y}_{dn}(k)^T {}^o \mathbf{Q}_n \mathbf{y}_{dn}(k) + {}^o r_n {}^o v_{dn}(k)^2 \right\} \quad (5)$$

$${}^o \mathbf{Q}_n = \text{diag}({}^o q_{yn} \quad {}^o q_{vn})$$

\mathbf{K}_{dn} : フィードバック行列, ${}^o q_{yn}$: 変位に関する重み係数, ${}^o q_{vn}$: 速度に関する重み係数, ${}^o r_n$: 制御入力に関する重み係数

実験装置および各制御理論に関する各パラメータの値は Table 1 に示す通りである。

6. 走行中の鋼板の応力解析

本研究では連続走行時の鋼板に発生する張力をオイラーの摩擦理論⁹⁾により算出し、このときの鋼板に作用する応力分布を FEM より求めた。なお静止形状は MBD により算出し、その形状を FEM にてモデル化し張力を作用させた。なお MBD による静止形状の算出に関しては既報⁸⁾の通りである。

オイラーの摩擦理論より走行する連続鋼板の有効張力 T_e と張り側張力 T_t 、緩み側張力 T_s は次式で表される。

$$T_e = \frac{P}{V} \quad (6)$$

$$T_t = \frac{T_e \times e^{\mu\psi}}{e^{\mu\psi} - 1} + mV^2 \quad (7)$$

$$T_s = \frac{T_e}{e^{\mu\psi} - 1} + mV^2 \quad (8)$$

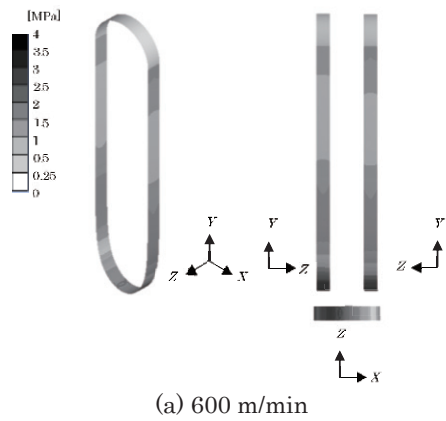
ここで V : 鋼板走行速度 [m/s], P : モータ出力 [W], μ : 鋼板とプリー間の摩擦係数, ψ : ベルトがプリーに接触する部分の巻き付け角度 [rad], m : 鋼板ベルトの単位長さあたりの質量 [kg/m] である。鋼板走行速度 600 m/min, 800 m/min, 1000 m/min における張り側張力 T_t 、緩み側張力 T_s を Table 2 に示す。走行速度が上がるに従い張力は増加する傾向が得られた。

MBD により算出した静止時の鋼板形状のモデルに走行時に働く緩み側張力と張り側張力をそれぞれ与えて静的構造解析を行った。解析には ANSYS Workbench Mechanical (以下 ANSYS) を用いた。解析モデルを Fig. 5 に示す。メッシュはシェル要素で定義し、鋼板とプリーが接触する上部は固定とした。オイラーの摩擦理論より算出された T_t 、 T_s が鋼板に等しく分布していると仮定して、静止時の鋼板形状におけるプリーから見て緩み側、張り側の面内全ての節点に等分布荷重として与えた。

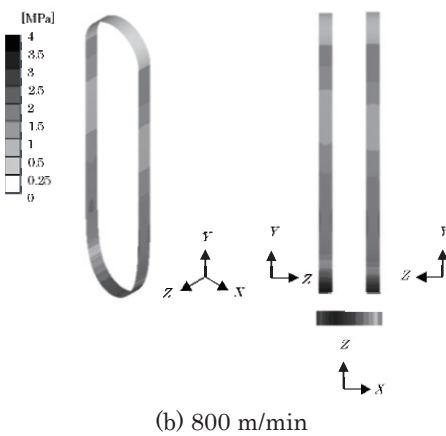
各走行速度におけるミーゼス応力の分布を Fig. 6 に示す。同図左方に俯瞰図を、右方は各軸方向から見た左右側面図と下面図である。すべての走行速度において走行時の鋼板



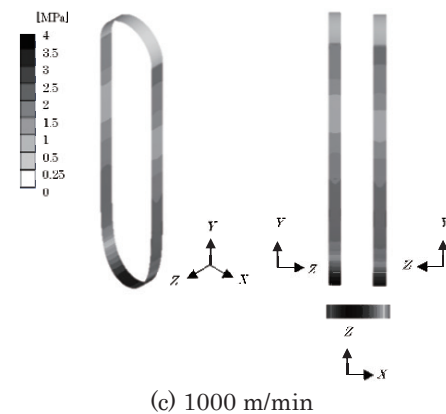
Fig. 5 Analysis model.



(a) 600 m/min

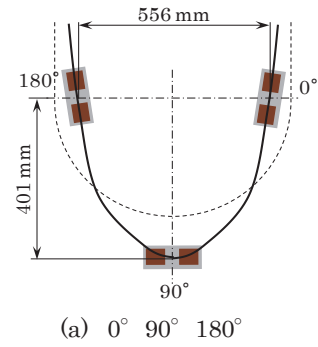


(b) 800 m/min

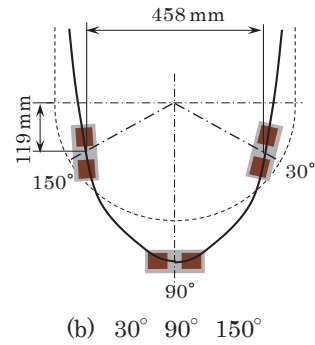


(c) 1000 m/min

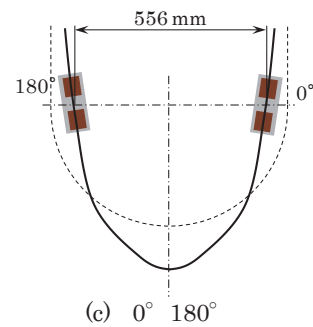
Fig. 6 von Mises stress of continuous steel plate.



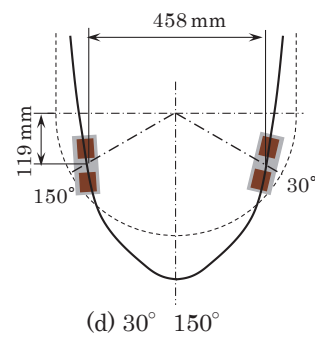
(a) 0° 90° 180°



(b) 30° 90° 150°



(c) 0° 180°

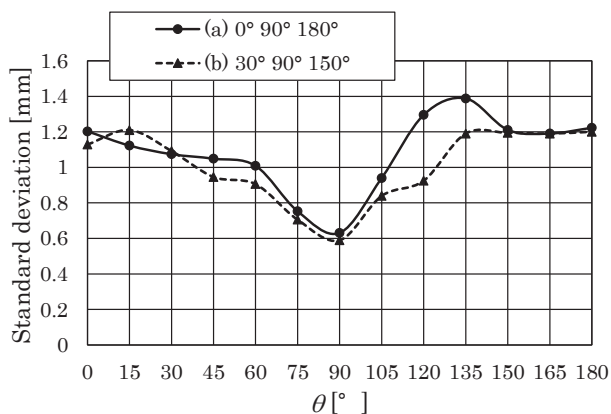


(d) 30° 150°

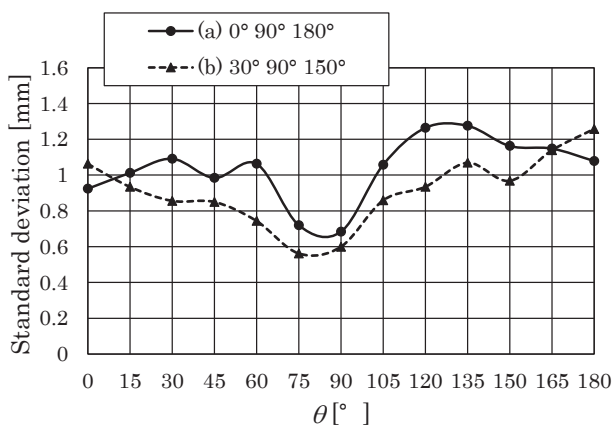
Fig. 7 Arrangement of electromagnets.

は張力の影響を受けて鋼板下部の応力が高くなる傾向が確認できた。また、走行速度が上がるにつれて下部にかかる応力が高くなることも明らかとなった。

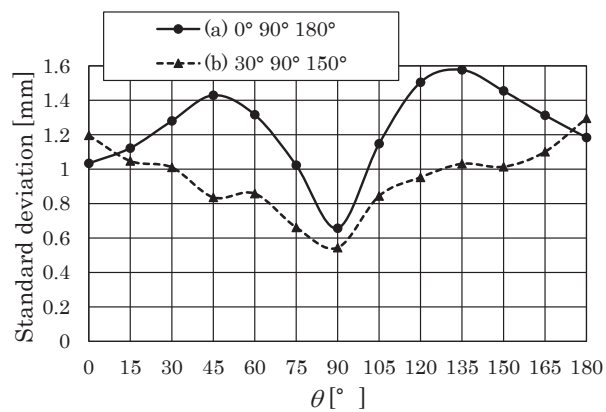
本解析結果から、ミーゼス応力の高くなった箇所において面外方向に変位が発生して振動が励起されやすくなると考えられる。この振動に対して電磁石から張力を加えて面外方向の復元力を与えることで、振動抑制効果が期待できる。以降の実験的な検討においては、応力の比較的高く分



(a) 600 m/min



(b) 800 m/min



(c) 1000 m/min

Fig. 8 Standard deviation of measured displacement z (3-electromagnet arrangement).

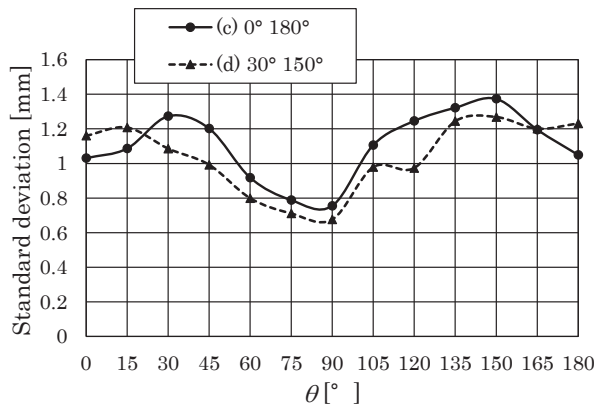
布する鋼板の位置に電磁石を設置し、走行実験を行う。

7. 走行実験

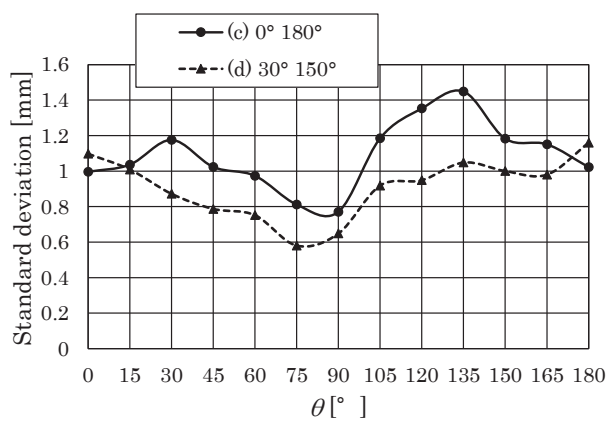
7.1 実験条件

前章では走行により生じる鋼板の応力分布を確認した。本章では応力の比較的高く分布する鋼板の位置（進行方向変更部分）に電磁石を設置し走行実験を行う。

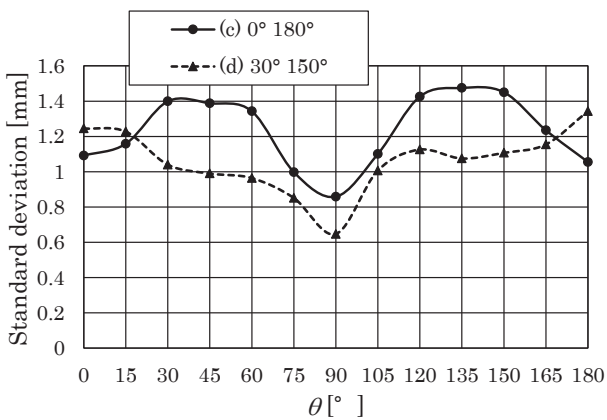
電磁石の設置方法を Fig. 7 に示す。同図(a)は著者が従来検討してきた MBD にて算出した鋼板形状に沿わせ、ルー



(a) 600 m/min



(b) 800 m/min



(c) 1000 m/min

Fig. 9 Standard deviation of measured displacement z (2-electromagnet arrangement).

プ形状部分の入り口、中間、出口の 0° 90° 180° に電磁石を配置した案内路である。同図(b)はループ形状部の応力が比較的高く推移した(a)よりも更に下部に、それぞれの電磁石ユニットと干渉させずに可能な限り下方に設置した 30° 90° 150° に電磁石を配置した場合である。またコスト面を考慮した 90° 地点の電磁石を除いた(c) 0° 180° の場合、(d) 30° 150° の場合を用意した。なお鋼板は走行速度により走行形状が変化するが、MBD の結果からすべて鋼板の走行形状に一致させるように電磁石を配置した。走行速度は本論文における解析条件と同一の 600, 800, 1000

m/min の3つのパターンでそれぞれの電磁石位置で実験を行った。

鋼板の振動抑制効果は、ループ形状部分である 0° から 180° まで 15° 間隔で変位レーザーセンサを設置し鋼板の振動振幅を30秒間測定した。さらに本実験において取得した振動は比較的不規則な傾向を示すため、変位振幅の標準偏差を算出した。データは10回計測し、そのときの平均で評価を行った。

7.2 実験結果

電磁石を 0° 90° 180° (Fig. 7(a)) と 30° 90° 150° (Fig. 7(b)) に設置した場合の各測定点における変位標準偏差を Fig. 8 に示す。同図(a)は走行速度 600 m/min, (b) は 800 m/min, (c) は 1000 m/min の結果である。走行速度 600 m/min では2種類の電磁石配置による変化はほとんど見られなかった。走行速度が増加するに従い、Fig. 7(a)の配置では 45° と 135° をピークに標準偏差が増加する傾向が得られた。一方 Fig. 7(b)の配置の実験結果は Fig. 7(a)の結果と比較して、どの走行速度においてもほぼ全ての測定点で標準偏差が低減できた。特に 45° と 135° 付近の振動が大きい領域の振動抑制効果が高く、走行速度 1000 m/min において Fig. 7(a)の結果と比較して約 30%標準偏差を低減できた。以上の結果から電磁石をミーゼス応力の高い領域に集中して配置することで、効果的に走行連続鋼板の振動が抑制できることが明らかになった。

次いで電磁石を 0° 180° (Fig. 7(c)) と 30° 150° (Fig. 7(d)) に設置した場合の各測定点における変位標準偏差を Fig. 9 に同様に示す。Fig. 8の結果と同様に 0° 180° に電磁石を配置した場合には走行速度を増加させるに従い 45° と 135° をピークに標準偏差が増加する傾向を示したが、Fig. 7(d)のように電磁石を配置することによって連続鋼板の振動を抑制できた。以上に結果から 90° に配置した電磁石の有無にかかわらず、走行連続鋼板のミーゼス応力の高い位置に電磁石を配置することによって高い振動抑制効果が得られることが分かった。

8. 結言

本研究は走行連続鋼板を安定に非接触案内するために最適な電磁石配置位置を決定するため、ANSYS によって走行時に加わる張力差を連続鋼板に与えた際に発生するミーゼス応力を算出して評価を行った。解析の結果ループ下部に応力が高い領域が発生した。この結果から応力が高い領域に電磁石を集中的に配置して走行実験を行った結果、ループ形状部全域で高い振動抑制効果を得ることができた。またコスト面を考慮して電磁石を2個設置する場合においても、応力が高い領域に配置することで同様の振動抑制効果を得られることが分かった。今後は応力解析のほかに ANSYS による鋼板振動モード解析なども行っていき、更なる電磁石の最適な配置位置について検討を行っていく。

References

- 1) Y. Shimokawa, H. Ishikawa, K. Sakai and H. Nitto: *Tetsu-to-Hagane*, **69**, 1175 (1983).
- 2) A. Inoue, H. Hujioaka, S. Morii, and M. Komori: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. C*, **74**, 52 (2008).
- 3) K. Kashiwabara, Y. Oshinoya and K. Ishibashi: *J. Jpn. Soc. Appl. Electromagn. Mech.*, **11**, 235 (2003).
- 4) K. Kashiwabara, Y. Oshinoya and K. Ishibashi: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **29**, 326 (2004).
- 5) T. Narita, H. Fujita, T. Uchiyama, Y. Oshinoya, S. Hasegawa and H. Kasuya: *Proc. 22nd Symp. Elec. Dynamics.*, Moji, 648 (2010).
- 6) T. Narita, Y. Oshinoya and S. Hasegawa: *Proc. School of Eng. Tokai Univ. Ser. E*, **35**, 35 (2010).
- 7) K. Kawasaki, T. Narita, H. Kato and H. Moriyama: *Proc. 28th Symp. Elec. Dynamics.*, Tokyo, 216 (2016).
- 8) K. Kawasaki, K. Sakaba, H. Kato and T. Narita: *Proc. Int. Conf. Elec. Eng.*, Okinawa, 90043 (2016).
- 9) T. Koyama: Practical design of belt transmission (in Japanese), pp. 21–25 (Yokendo, Tokyo, 2006).

2016年11月3日受理, 2017年2月20日採録