

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 関係に対する基礎的検討

小倉浩一郎*¹・柏原賢*²・三觜佳彦*¹・押野谷康雄*³・石橋一久*⁴

Fundamental Consideration of Optimal Relationship between Magnetic Force and Location of Permanent Magnet Installed in Edge Direction of Thin Steel Plate

by

Kouichirou OGURA, Ken KASHIWABARA, Yoshihiko MITSUHASHI
Yasuo OSHINOYA and Kazuhisa ISHIBASHI

(Received on September 30, 2004 & accepted on January 25, 2005)

Abstract

In a factory, a continuous thin steel plate subjected to iron and steel processes supported by rollers tends to experience plate vibrations that lower the quality of the surface finish. 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 vibrations and other factors prevents an increase in productivity. To solve this problem, we developed a noncontact guide system in which electromagnetic forces are applied at the edges of the steel plates. Moreover, the control performance achieved by replacing the electromagnet with a permanent magnet, thus eliminating the running cost, has been examined. However, the negative effect caused by the negative spring force of the permanent magnet has, to date, not been examined. In this study, the optimal relationship between the magnetic flux density of a permanent magnet and the gap between the steel plate and the surface of the permanent magnet was examined.

Keywords: Steel Plate, Noncontact Guide, Permanent Magnet, Magnetic Field, Spring Constant, Evaluation Function.

1. 緒言

工業製品で広く利用されている薄鋼板は、製造ラインにおいて長さが数 km にも及び、ローラにより接触支持されている。この際、薄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整することで振動を抑制している。しかしメッキや塗装などの表面処理後、乾燥のため鉛直方向や水平方向へ 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。乾燥後、ローラによって支持された際に、この影響で支持ローラと走行薄鋼板の摩擦力変動が生じ、薄鋼板表面に傷、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。

この問題解決方法として、柳ら⁽¹⁾による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。また、岡田ら⁽²⁾、中川ら⁽³⁾、村岸ら⁽⁴⁾は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を行っている。これに対し当研究グループでは、薄鋼板のエッジ方向(第

2章, Fig.1 の y 方向に相当)に電磁石を設置し磁力を付加することによって、走行連続薄鋼板のエッジおよび平面方向の振動を抑制する非接触案内機構を提案している⁽⁵⁾。また、薄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おいて、提案している非接触案内機構の薄鋼板に与える影響について報告をしている^{(6)~(9)}。さらに、薄鋼板直線走行部分のエッジ方向に設置した一部の電磁石をランニングコストの削減のために永久磁石に置き換えた場合の制振性能についても実験的検討を行っている⁽¹⁰⁾。薄鋼板エッジ方向に永久磁石を設置した場合、永久磁石は薄鋼板平面方向において正ばねとして作用するが、薄鋼板エッジ方向では外乱となる負ばねとして作用する。しかし走行実験において、このような相反する作用を考慮した永久磁石の設置位置に関する詳しい検討は行っておらず、トライアルアンドエラーによって永久磁石の表面磁束密度と、薄鋼板と永久磁石表面との距離の効果的な組み合わせを決定している。そこで本研究では、薄鋼板エッジ方向に設置する永久磁石の表面磁束密度と、薄鋼板と永久磁石表面との距離の最適な関係に対する検討を行う。特に薄鋼板平面方向のみかけの正ばね定数とエッジ方向のみかけの負ばね定数をパラメータとした評価関数において検討を行うことにより、永久磁石の磁力と設置位置

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

に関する基礎的検討を行う。

2. 走行薄鋼板の非接触案内装置における永久磁石の利用について

著者らがこれまでに提案している走行薄鋼板の非接触案内装置⁽¹⁰⁾の概要図を Fig.1 に示す。焼き入れした薄鋼板をベルト状に溶接したものをプーリに取り付け DC サーボモータで駆動する。図中の x は薄鋼板の走行方向の座標を示す。 z は薄鋼板の平面に垂直な方向の座標を示す(以下、この方向を平面方向と記す)。また、薄鋼板のエッジ方向の横揺れを示す座標を y とする(以下、この方向をエッジ方向と記す)。この実験装置を用いて行っている走行実験において、薄鋼板直線走行部分のエッジ方向にランニングコストの削減のため、Fig.1 の破線部に示したように永久磁石を設置して走行実験を行っている。この場合、薄鋼板平面方向において正ばねとして作用し走行薄鋼板の平面方向振動を抑制する。一方、薄鋼板エッジ方向では永久磁石吸引力が負ばねとして作用するために、走行薄鋼板にとっては外乱的な要素となる。したがって永久磁石を利用する場合、薄鋼板平面方向の正ばねが強く、エッジ方向の負ばねが弱い最適な組み合わせを決定するためのプロセス提示が重要な課題である。そこで次章以降では、薄鋼板平面方向の正ばね定数およびエッジ方向の負ばね定数を測定し、永久磁石の磁力と設置位置に関する検討を行う。

3. 永久磁石利用による薄鋼板平面方向のばね特性に関する検討

3.1 永久磁石の表面磁束密度

本研究では走行実験に使用している永久磁石と同様のフェライト永久磁石を使用した。永久磁石の1個当りの表面磁束密度は0.055T(実測値)であり、寸法は Fig.2 の通りである。なお、本実験では市販の永久磁石を使用しており、寸法、形状に関する最適化等の検討は行っていない。永久磁石の表面磁束密度を変化させた場合に対する実験を行うために、Fig.2 の永久磁石を重ねて使用することで表面磁束密度を変化させた。Fig.3 に解析お

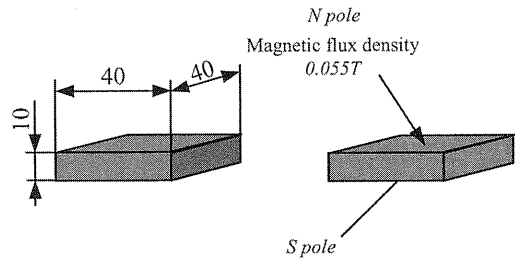


Fig.2 Specification of permanent magnet.

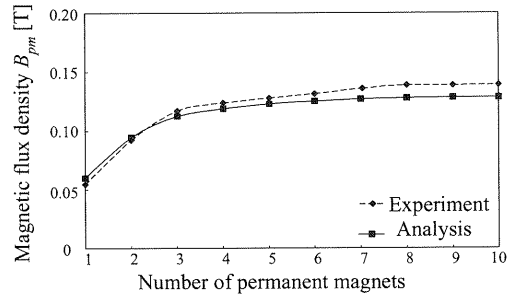


Fig.3 Relationship between number of permanent magnets and magnetic flux density.

よび実験より求めた永久磁石の重ねた段数と表面磁束密度の関係を示す。横軸は永久磁石の重ねた段数、縦軸は表面磁束密度 B_{pm} である。永久磁石は同寸法、同形状であっても表面磁束密度に多少の差がある。そのため永久磁石を重ねた時に1段の永久磁石よりも強い表面磁束密度の永久磁石を2段目以降に使用したため、2段を境に実験値と理論値の大小関係が交差している。実験値と解析値は最大で8%の誤差が生じているが、傾向は良く一致している。永久磁石の段数を増やすことで表面磁束密度が増加しているが、5段付近より段数を増加させても磁束の飽和が発生し始めているためあまり変化が見られない。そこで本実験では永久磁石の段数を1段~6段までとし表面磁束密度0.055T~0.131Tの範囲に対する検討を行う。なお解析に Photon(株式会社 Photon)、ポストプロセッシングには FEMAP(Enterprise Software Products, Inc)を用いた。

3.2 振動特性測定方法

永久磁石利用による薄鋼板平面方向の振動特性を検討するために、Fig.4 に示すような実験装置を製作した。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、これを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薄鋼板平面に対し両側から取り付けてある。このようにして薄鋼板を剛体とみ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平面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。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の位置に永久磁石を設置した。なお、振れ角を微小とし、永久磁石の磁力が作用する部分に対しては薄鋼板の振動は並進運動とみなせるような条件で実験を行った。同図(a)は永久磁石を設置していないものである(以下、未設置と記す)。(b)は永久磁石表面を薄鋼板のエッジ部と任意の距離(以下ギャップ y_a と記す)で設置したものである。

Fig.5 に Fig.4(b)の破線で囲まれた部分に設置する永久磁石の

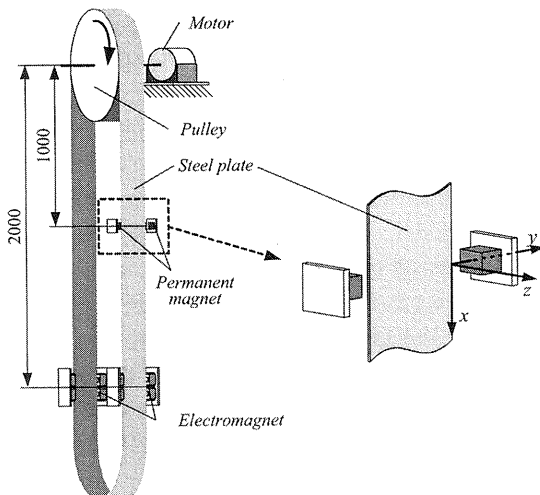
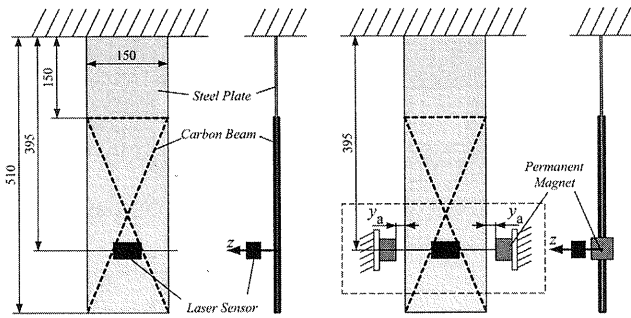


Fig.1 Noncontact guide system for a traveling steel belt.



(a) Without permanent magnet (b) With permanent magnet
Fig. 4 Experimental apparatus of one-degree-of-freedom system.

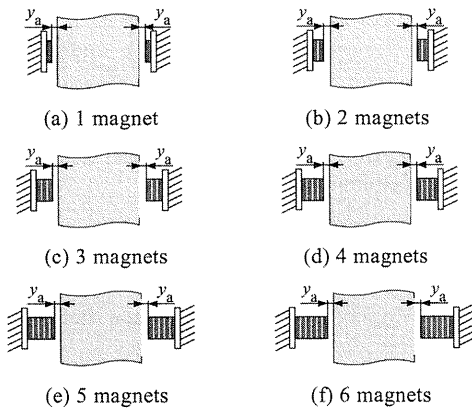


Fig. 5 Number of permanent magnets.

場合分けを示す。1 段から 6 段まで重ねた各段数における永久磁石の表面磁束密度は(a)1 段の時 0.055T, (b)2 段の時 0.092T, (c)3 段の時 0.117T, (d)4 段の時 0.124T, (e)5 段の時 0.128T, (f)6 段の時 0.131T である(以下それぞれの表面磁束密度の条件を A, B, C, D, E, F と記す)。Fig.5 に示した条件(表面磁束密度 A ~F)に対してギャップ y_a を 1mm~25mm の間で 1mm ずつ変化させた時の自由振動実験を行った。

3.3 平面方向振動特性

前述のように実験では、Fig.4 (a)永久磁石未設置の条件と、Fig.5 表面磁束密度 A~F の永久磁石を設置した 7 条件において、薄鋼板自由振動時の永久磁石の設置位置における平面方向振動の時間応答波形を測定した。Fig.6 にそれぞれの表面磁束密度における時間応答波形の一例を示す。同図は未設置の波形と、薄鋼板と永久磁石の距離が 1mm と 25mm の場合の各表面磁束密度における応答波形である。

時間応答波形より求めたみかけのばね定数を Fig.7 に示す。横軸はギャップ y_a 、縦軸はみかけのばね定数 k_e である。また、図中の破線は未設置時のばね定数である。みかけのばね定数は時間応答波形の周期より振動数を求めて算出した⁽¹¹⁾。なお、永久磁石の磁場によるばね力は、エッジ方向からの永久磁石による磁場が薄鋼板平面方向に作用する分布的な磁束の不均一により平面方向に復元力として作用するために生じる⁽¹²⁾。同図より、表面磁束密度 A の場合、永久磁石の薄鋼板に作用する分布的な磁束が小さいため復元力も小さくばね定数が最小となった。また、永久磁石を 2 段にした表面磁束密度 B では表面磁束密度 A に比べ表面磁束密度が大きく増加しており、ばね定数も最大で

約 2 倍に増加した。しかし表面磁束密度 E, F では Fig.3 で示すように磁束密度の変化が少ないためばね定数の差も小さい。またギャップ y_a の増加にともない平面方向のばね定数の差が減少する。これはギャップ y_a の増加にともない未設置時のばね定数に収束するためである。

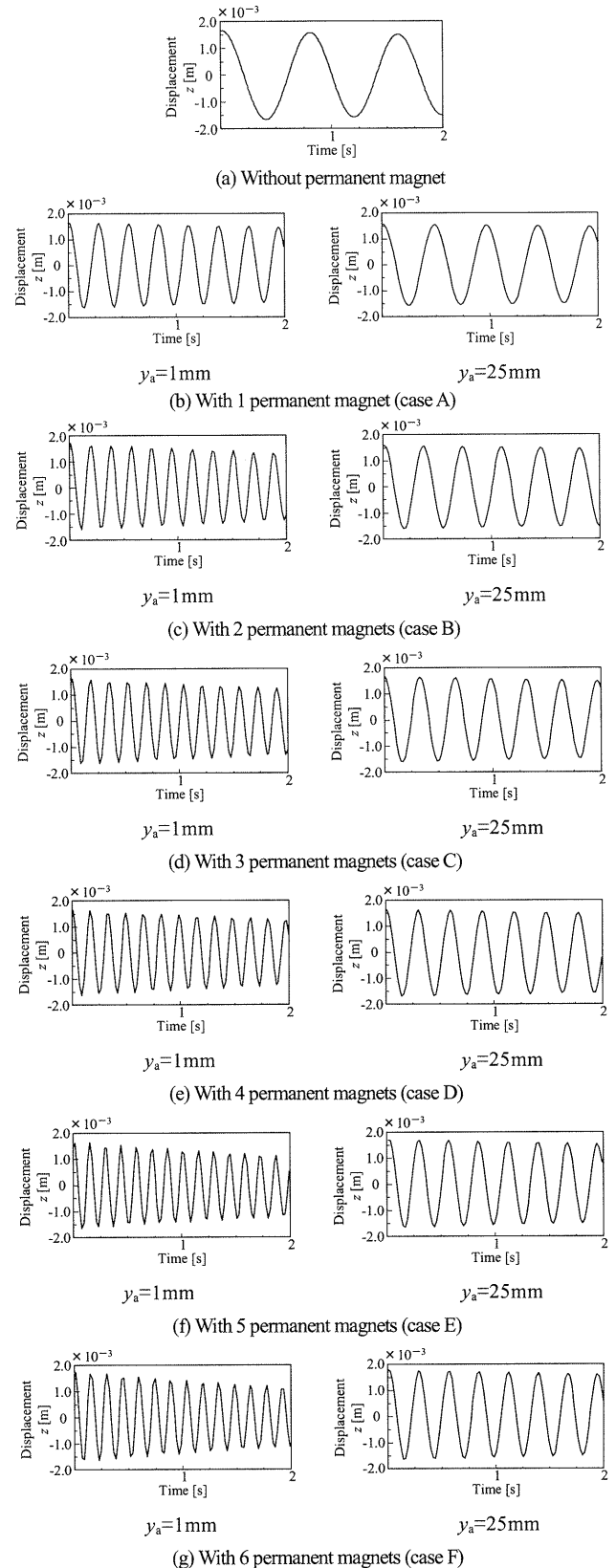


Fig. 6 Time histories of planar direction displacement.

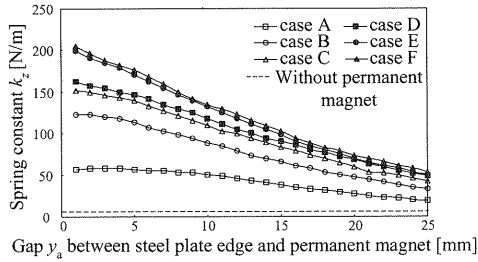


Fig.7 Spring Constant of the system in the planar direction.

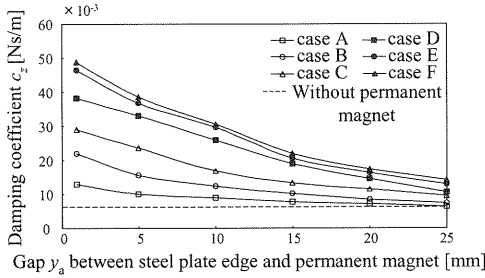


Fig.8 Damping coefficient of the system in the planar direction.

さらに、みかけの減衰係数は時間応答波形から対数減衰率を用いて減衰比を求め算出した⁽¹¹⁾。Fig.8に平面方向振動のみかけの減衰係数を示す。横軸はギャップ y_a 、縦軸はみかけの減衰係数 c_z である。なお、永久磁石の磁場による減衰力は復元力とローレンツ力により生じる⁽¹³⁾。前述したように復元力は磁束が増加することにより増加し、また同様にローレンツ力は磁束の強さと薄鋼板の振動速度に比例して増加する。このために表面磁束密度の増加にともない薄鋼板平面方向に作用する磁束も増加し、減衰力が増加することで、みかけのばね定数と同様にみかけの減衰係数も増える傾向にあることが分かる⁽¹⁴⁾。

また、表面磁束密度 A の場合、ギャップ y_a が 25mm になると磁力の影響をほとんど受けなくなり、未設置の場合とほぼ等しくなる。各表面磁束密度の減衰係数の最大値 ($y_a=1\text{mm}$) と最小値 ($y_a=25\text{mm}$) の値を比較すると表面磁束密度 F の場合の変化が最大となっている。しかし Fig.8 のみかけの減衰係数の結果からも分かるように減衰係数の値が最大で $49 \times 10^{-3} \text{Ns/m}$ (case F, $y_a=1\text{mm}$) と、ばね定数の影響力と比較して非常に小さい。そこで本研究では永久磁石を用いることによる減衰の影響を無いのとする。

4. 永久磁石利用による薄鋼板エッジ方向のばね特性に関する検討

前章で示したように薄鋼板エッジ方向に永久磁石を設置することによって、薄鋼板平面方向に対して磁力がばねの力、すなわち復元力として作用することが分かった。しかし薄鋼板エッジ方向においては吸引力が外乱として作用する。そこで本章では、エッジ方向に作用する吸引力による負ばねの影響について検討を行う。

4.1 吸引力測定方法

エッジ方向への吸引力を測定するため、Fig.9のような実験装置を製作した。2つの電子秤を用いてエッジ方向の吸引力を測定する。永久磁石の土台となる部分の厚さを変えることでギャップ y_a が任意の値にできるようになっている。また薄鋼板が垂直になるようにL字アングルを用いて固定した。

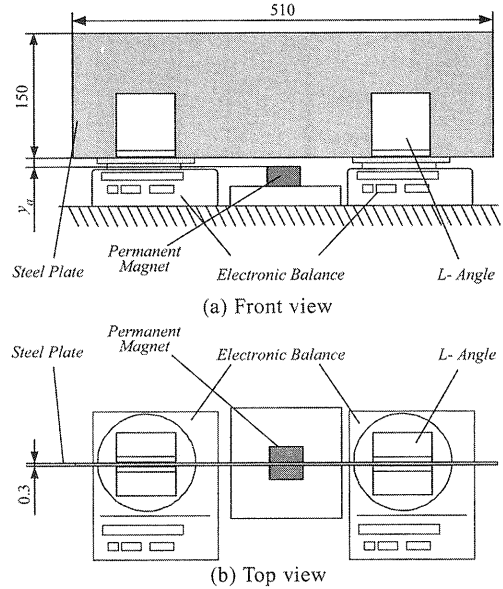


Fig.9 Measuring device of permanent magnetic attractive force in the edge direction.

この実験装置を用いて永久磁石エッジ方向の吸引力を測定する際、前章で示したのと同様に表面磁束密度を A~F まで変化させ、ギャップ y_a は 1mm~25mm 間で 1mm ずつ変化させて測定した。

4.2 薄鋼板エッジ方向の吸引力特性

Fig.10に吸引力の測定結果を示す。横軸がギャップ y_a 、縦軸が吸引力 F_y である。表面磁束密度 A と表面磁束密度 B の場合を比較すると、薄鋼板エッジ方向における永久磁石の吸引力差が、各ギャップ y_a 全てにおいて大きな値となっている。さらに、表面磁束密度を増加させていくと Fig.3 で示したように永久磁石の磁束密度が飽和していくため吸引力の差は徐々に減少する。またギャップ y_a が小さいと各表面磁束密度 A~F 共に吸引力は大きい、ギャップ y_a の増加にともない各表面磁束密度におけるエッジ方向の吸引力が減少していく。これは平面方向と同様に磁束が距離の二乗に反比例して減少しているためである。

4.3 エッジ方向のばね特性

ばね定数は Fig.10 の各点の傾きより求めた。Fig.11 に各表面磁束密度におけるエッジ方向のばね定数を示す。同図より、ばね定数は負の値であり、薄鋼板エッジ方向では負ばねとして作用していることが確認できる。またばね定数はギャップ y_a が増加すると 0 に収束し、ギャップ y_a が減少するにともないばね定数は非線形的に減少する。

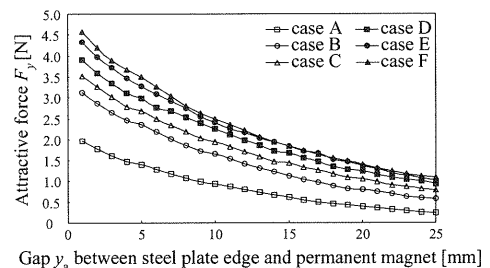


Fig.10 Characteristics of attractive force of the permanent magnet in the edge direction.

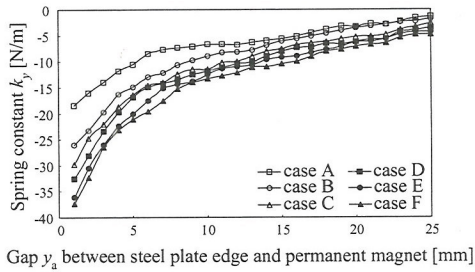


Fig.11 Spring Constant of permanent magnet in the edge direction.

5. 最適な永久磁石の表面磁束密度とギャップの関係に対する検討

5.1 評価関数

提案している非接触案内制御において永久磁石を利用する場合、永久磁石の平面方向の正ばねが大きくエッジ方向の負ばねが小さくなる表面磁束密度とギャップが良いことは既に述べた通りである。そこで第3章、第4章の実験結果より各表面磁束密度における1~25mm間で、平面方向の正ばね定数とエッジ方向の負ばね定数を用いて評価を行う。また、薄鋼板平面方向において永久磁石吸引力は薄鋼板の振動を抑制する正ばねとして作用する。一方、薄鋼板エッジ方向では永久磁石吸引力が外乱的な要素となる負ばねとして作用する。このように永久磁石吸引力は、平面方向の影響とエッジ方向の影響がトレードオフ関係にあるので、評価を行うにあたり次のような重み係数法を用いた評価関数 J を用いた⁽¹⁵⁾。重み係数法とは、多目的最適化手法の一つで重みつき目的関数の総和を最小にするようにする手法である。式(1)では評価する薄鋼板平面方向の正ばね定数 k_z を評価基準となる正ばね定数 k_{z0} で割り、反対にエッジ方向の負ばね定数の評価基準となる k_{y0} を評価する負ばね定数 k_y で割り最小化を行い評価した。また、重み α と β は各項目に優先度をつける重み値であり、百分率で表すために重み α と β の和で割っている。

$$J(k_z, k_y) = \left(\alpha \frac{k_{z0}(y_a, B_{pm})}{k_z(y_a, B_{pm})} + \beta \frac{k_y(y_a, B_{pm})}{k_{y0}(y_a, B_{pm})} \right) / (\alpha + \beta) \quad (1)$$

ただし、 α :平面方向の正ばね定数に対する重み、 β :エッジ方向の負ばね定数に対する重み、 k_{z0} :評価基準となる平面方向の正ばね定数、 k_z :評価対象となる平面方向の正ばね定数、 k_{y0} :評価基準となるエッジ方向の負ばね定数、 k_y :評価対象となるエッジ方向の負ばね定数、 y_a :薄鋼板と永久磁石表面の距離、 B_{pm} :表面磁束密度である。

なお、平面方向、エッジ方向において基準となるばね定数の値は表面磁束密度 A、薄鋼板と永久磁石の距離が 1mm の場合とする。

これより評価関数 J の値が最小値を持つ場合の表面磁束密度、ギャップ y_a がその最適値となる。そこで、以下に示すような重み α 、 β の3条件において評価を行い比較検討した。

- (1)平面方向の振動抑制とエッジ方向の負ばねによる外乱の影響を同等に評価する場合($\alpha : \beta = 1:1$)
- (2)主に平面方向の振動を抑制したい場合($\alpha : \beta = 4:1$)
- (3)主にエッジ方向の負ばねによる外乱の影響を小さくしたい場合($\alpha : \beta = 1:4$)

5.2 探索結果

Fig.12 に評価関数 J の計算結果を示す。 X 軸が表面磁束密度、 Y 軸がギャップ y_a 、 Z 軸が評価関数 J である。また、Table 1($\alpha : \beta = 1:1$, $\alpha : \beta = 4:1$, $\alpha : \beta = 1:4$)に各表面磁束密度(case A~F)において最も良い評価値とその時のギャップ y_a を示す。

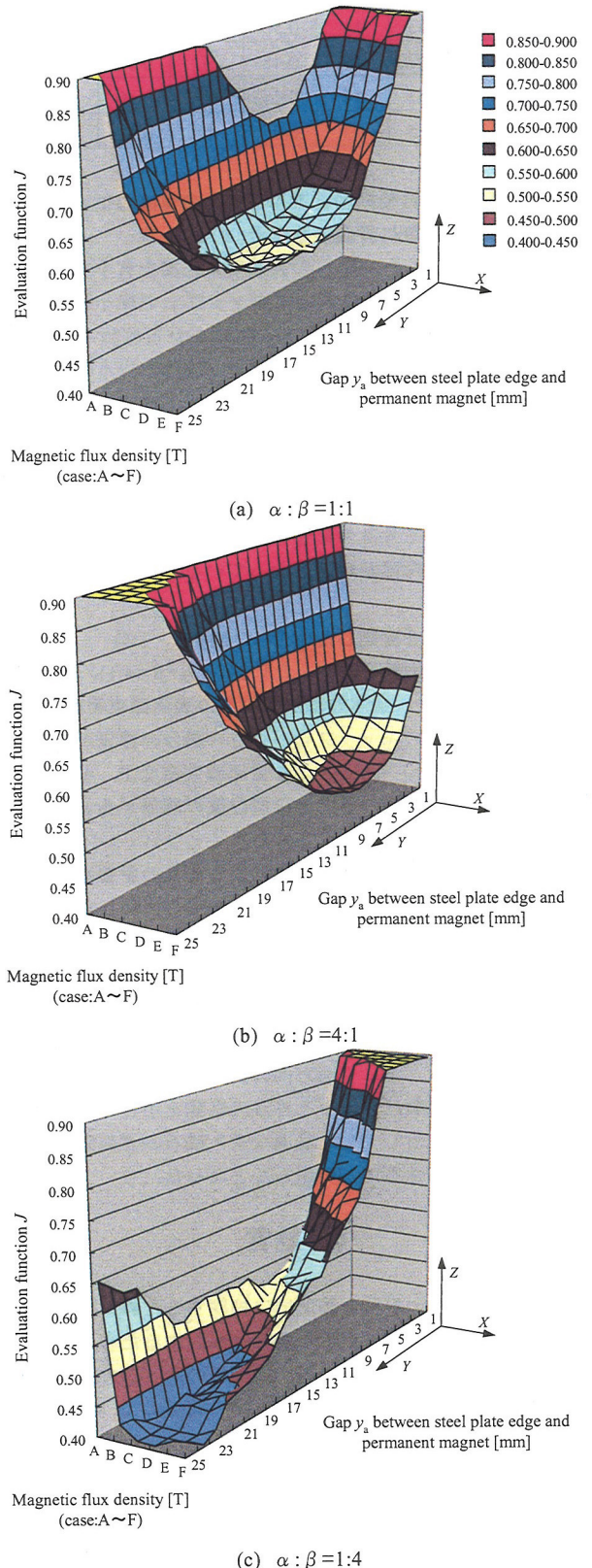


Fig.12 Evaluation value of experimental results.

Table 1 Results of optimal arrangement

Magnetic flux density	$\alpha:\beta=1:1$		$\alpha:\beta=4:1$		$\alpha:\beta=1:4$	
	J	y_a^{opt} [mm]	J	y_a^{opt} [mm]	J	y_a^{opt} [mm]
Case A	0.72	9	0.91	4	0.51	10
Case B	0.56	11	0.56	4	0.39	20
Case C	0.53	14	0.50	6	0.38	24
Case D	0.52	16	0.48	6	0.39	23
Case E	0.53	14	0.45	7	0.40	23
Case F	0.55	13	0.47	8	0.40	23

5.2.1 平面方向の振動抑制とエッジ方向の負ばねによる外乱の影響を同等に評価した場合($\alpha:\beta=1:1$)

Fig.12(a)の結果より、A-Fの表面磁束密度を有する永久磁石を用いた場合、それぞれにおいてギャップ y_a の極小値の存在が推測できる。これは、Fig.7とFig.11におけるばね k_z と負ばね k_y の結果が、ギャップ y_a に対して減少と増加という相反する傾向になっていることから、これらのトレードオフ関係における中間的な評価値を探索できていることになる。

また、Fig.12(a)においては大局的な極小値も存在し(表面磁束密度D:0.124T, ギャップ:16mm), 平面方向の振動抑制とエッジ方向の負ばねによる外乱の影響を同等に評価する場合の最適な磁力と設置位置の探索が可能となっている。

5.2.2 重み α , β を変動した場合($\alpha:\beta=4:1, 1:4$)

主に平面方向の振動を抑制したい場合($\alpha:\beta=4:1$), 重みが $\alpha:\beta=1:1$ の場合に比べ全体的に永久磁石の表面磁束密度が強く、薄鋼板と永久磁石のギャップ y_a が小さい場合の評価が良くなった(Fig.12(b)). また、Table 1より表面磁束密度E, ギャップ y_a が7mmのとき、最適な磁力と設置位置の関係があることが分かった。

一方、主にエッジ方向の負ばねによる外乱の影響を小さくしたい場合($\alpha:\beta=1:4$), 重みが $\alpha:\beta=1:1$ の場合に比べ永久磁石の表面磁束密度が弱く薄鋼板と永久磁石のギャップ y_a が大きい場合の評価が良くなった(Fig.12(c)). また、Table 1より表面磁束密度C, ギャップ y_a が24mmのとき、最適な磁力と設置位置の関係があることが分かった。

以上の結果より、主に平面方向の振動を抑制したい場合や、主にエッジ方向の負ばねによる外乱の影響を小さくしたい場合などの制御目的に対しても、最適な永久磁石の表面磁束密度とギャップが探索できることが明らかとなった。

6. 結言

走行する薄鋼板の振動を補助的に抑制するために用いる永久磁石の磁力と設置位置の最適な関係を検討するための実験による基礎的考察を行った。その際、薄鋼板のエッジ方向に設置する永久磁石の表面磁束密度とギャップの関係について評価関数を用いて検討を行った。探索結果より、主に平面方向の振動を抑制したい場合や、主にエッジ方向の負ばねによる外乱の影響を小さくしたい場合においても、最適な永久磁石の表面磁束密度とギャップが探索できることが分かった。これまでは走行実験において実験を繰り返して実施することによって、良い永久磁石の表面磁束密度とギャップの組み合わせを決定していたが、

本実験の結果を基づいて永久磁石の表面磁束密度とギャップを決定することにより、実験の効率化や走行実験の制御性能が向上することを期待できる。

今後は、走行薄鋼板に対して永久磁石を複数設置する場合において、永久磁石の個数や形状などを同時に最適化するための解析的な検討の必要がある。

謝辞

本研究に際して、東海大学工学部4年生・林和博氏、熊倉潤氏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) 柳, 田口, 平井: 製鉄機械プロセスライン用汎用テストライン, 三菱重工技報, Vol.25, No.4, (1988), pp.311-314.
- (2) 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), pp.219-222.
- (3) 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), pp.527-530.
- (4) 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), pp.597-600.
- (5) 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.
- (6) Ken Kashiwabara, Yoshihiko MITSUHASHI, Yasuo Oshinoya, Kazuhisa Ishibashi: Study on Noncontact Guide for a Change Part in Traveling Direction of Traveling Elastic Steel Plate Using Electromagnetics Force (Basic Research on High-Speed Traveling), 7th International Symposium on Magnetic Suspension Technology, (2003), pp.232-239.
- (7) 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.
- (8) 柏原, 三賢, 小倉, 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), 第28回日本応用磁気学会学術講演概要集, (2004), pp.439.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) 例えば, 小出: 「物理学」, (1975), 東京裳華房.
- (12) 福島, 長谷川, 押野谷, 石橋: 薄鋼板磁気浮上搬送システムにおける水平方向位置決め時の振動特性変化に関する基礎的検討, 第13回交通物流部門大会, (2004), pp.149-150.
- (13) 柏原, 福島, 押野谷, 石橋: 薄鋼板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.
- (14) 例えば, 山田, 宮沢, 別所: 「基礎応用磁気」, (1975), 学研社.
- (15) 例えば, 北野: 「遺伝的アルゴリズム 2」, (1995), 産業図書.