

薄鋼板のエッジに加える電磁力が薄鋼板の垂直振動に及ぼす影響

柏原賢*¹・福島雄介*²・押野谷康雄*³・石橋一久*⁴

Effect of Magnetic Force Applied to Edge of Steel Plate on Its Vertical Vibration

by

Ken KASHIWABARA, Yusuke FUKUSHIMA, Yasuo OSHINOYA and Kazuhisa ISHIBASHI

(Received on March 31, 2004 & accepted on July 17, 2004)

Abstract

In a factory, the continuous thin steel plate subjected to iron and steel processes supported by rolls tends to cause 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 plate is negligibly supported by rollers. Therefore, plating nonuniformity caused by vibration prevents the increase in productivity. To solve this problem, we have developed a noncontact guide system for parts of the steel plate at which its traveling direction changes by applying an electromagnetic force from the edge direction of the thin steel plate, and experimentally examined the effectiveness of the system. However, the theoretical examination has not been sufficiently carried out. In this paper, the effect of magnetic force to the edge direction of a steel plate by an electromagnet on planar direction vibration was examined using an one-degree-of-freedom system.

Keywords: Steel Plate, Noncontact Guide, Electromagnet, Magnetic Field, Spring Coefficient, Damping Coefficient.

1. はじめに

薄鋼板の製造プロセスにおいて、連続薄鋼板はローラにより接触支持され、同時に張力を調整されながら装置上を毎秒 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、処理後に薄鋼板は 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最上部と最下部のローラ間では振動、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。

これを解決する手法のひとつとして柳ら⁽¹⁾はフロータを用いた非接触搬送を提案しており、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、走行連続鋼板のエッジおよび垂直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⁾。これまでに電磁石によるエッジ方向から磁力を付加することによって鋼板の垂直方向振動が抑制されることを実験的に確認しているが⁽⁶⁾⁻⁽¹¹⁾、十分な理論的説明がされていない。そこで本研究では電磁石による薄鋼板エッジ方向からの磁力がその垂直方向振動に与えるメカニズムを明らかにするために、1自由度システムを用いた基礎的検討を行う。

2. 薄鋼板エッジ方向への電磁力増加にともなう垂直方向復元力の測定

2.1 実験装置

これまでの検討⁽⁹⁾では、Fig.1 に示す実験装置において電磁石で走行薄鋼板エッジ方向のみの位置制御を行うことにより、アクティブに制御していない薄鋼板の垂直方向振動も同時に抑制できることを報告している。そこで本報告では、Fig.1 の電磁石設置位置を通過する薄鋼板(Fig.1 の○印)を部分的に剛体とみなし、薄鋼板垂直方向の 1 自由度システムとしてモデル化し実験および解析を行う。

電磁石による薄鋼板エッジ方向への電磁力は、同時に薄鋼板の垂直方向運動に対する復元力として作用する。そこで、このときの垂直方向電磁力を計測するために Fig.2 に示すような実験装置を製作した。対象の薄鋼板は電子秤に取り付けられており、電磁石表面と鋼板エッジ部の距離が 5mm になるように配置した。電磁石コイル電流は 0.5A 一定の場合と 1.0A 一定の場合の 2 通りに関して検討を行った。Fig.3 に使用した電磁石の仕様を示す。電磁石の鉄心は E 型のフェライトコアで電磁石コイルの巻き数は 1005 回(直径 0.5mm の銅線)である。

Fig.2 における薄鋼板初期位置は、Fig.3 右図に示す破線の位置である。同図のように電磁石コア表面の中央に対して鋼板のエッジが位置する場合、上下方向からエッジを包み込む様な磁束の作用(後述 3.2 節 Fig.10 参照)によって、鋼板エッジ部が垂直方向に拘束される平衡点が存在する。この場合、電磁力の垂直方向成分は零となる。しかし、振動などによってこの平衡点から鋼板のエッジ部が垂直方向に変位すると、鋼板上面と下面

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

に作用する磁束の不均一によって復元力に相当する垂直方向の磁力が発生する。以下ではこの力の測定方法について記す。

まず Fig.3 右図に示す破線の位置を薄鋼板初期位置として、薄鋼板を電磁石表面に対して相対的に鉛直上向きへ 1mm 移動させる。次に、鋼板両エッジ部にある電磁石に電流を流すと、上述の理由により鋼板エッジ部に鉛直下向きの力が作用する(ただし製作した実験装置の都合上、鋼板は電子秤上に固定し、両側の電磁石を下向きに 1mm 移動させた)。このときの薄鋼板の質量増加分に相当する値を電子秤で測定することによって、電磁力の垂直方向成分を推定する。さらに、同様な実験を 1mm 間隔で 10mm まで行う。

なお、実験で使用した薄鋼板は長さ 100mm、幅 400mm、厚さ 0.3mm の垂鉛めっき鋼板である。薄鋼板には剛体とみなせるように極軽量のカーボンファイバー製パイプを Fig.2 破線の位置に取り付けた。これはカーボンパイプを取り付け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

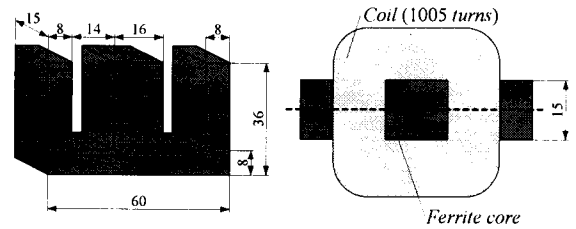


Fig.3 Specification of the electromagnet core.

響を取り除き、薄鋼板のエッジに加えた電磁力が垂直方向振動に及ぼす影響のみを明確に考察するためである。実際の走行実験では幅 150mm の鋼板を使用しているが、本報告では基礎的な考察を行うために対向配置した電磁石の磁場が干渉しないように幅 400mm の薄鋼板を使用した。

2.2 実験および解析結果と考察

電磁石コイル電流を 0.5A、または 1.0A とした場合の電磁力の鋼板垂直方向成分に関する測定結果を Fig.4 に示す。同図の横軸零は、前節で説明したように鋼板エッジ部が両側の電磁石表面の中央位置にある場合を示す。したがって横軸の 1mm は Fig.3 右図において鋼板を示す破線が上向きに 1mm 移動した場合に相当する。縦軸はこの時に発生した電磁力の垂直方向成分、すなわち鉛直下向きの力を示す。電磁石コイル電流が 0.5A のときと比較して 1.0A のときの電磁力は平均で約 165% 増加している。また、0.5A、1.0A の場合共に電磁力の垂直方向成分は電磁石中心より 6mm までほぼ線形的に増加している。7mm 以上において電磁力は減少傾向にあるが、これは Fig.3 から明らかのように薄鋼板が電磁石コアの外側に出て行く領域であることに起因する。本報告では薄鋼板の振動が大きくないとし、線形的に増加している 6mm までの電磁力の垂直方向成分より、電磁石による鋼板垂直方向の等価的なばね係数を算出する。

また、実験結果の妥当性を確認するために実験と同様の薄鋼板と電磁石を使用して実験と同条件で磁場解析をとまう数値計算を行った。Fig.4 より求めた電磁石のばね係数の実験値と、実験と同条件で解析を行った値を Table 1 に示す。同表より実験値と解析値が近い値を示していることより、実験結果および解析結果の妥当性が確認できる。

なお本研究では全ての磁場解析に Photon(株式会社 Photon)、ポストプロセッシングには FEMAP(Enterprise Software Products, Inc.)を使用した。

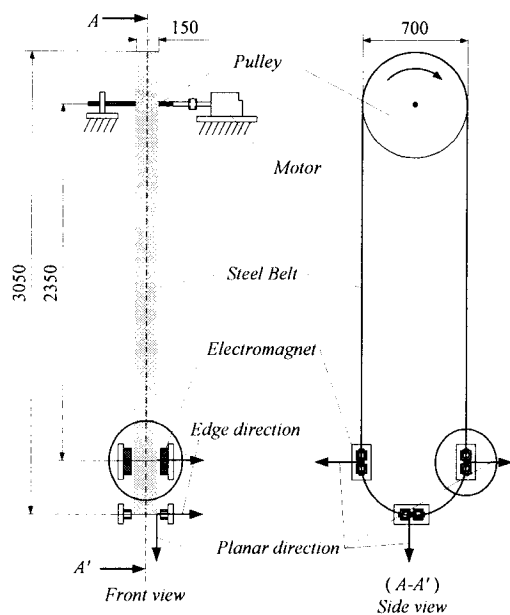


Fig.1 Noncontact guide system for a traveling steel belt.

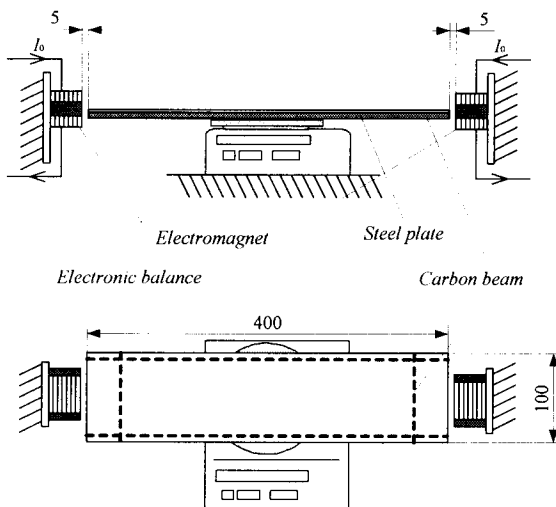


Fig.2 Measuring device of electromagnetic attractive force.

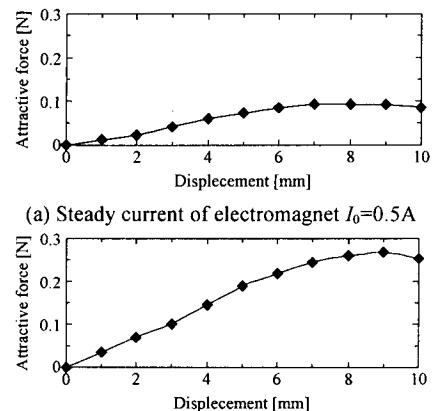


Fig.4 Attractive force of electromagnet.

Table 1 Spring coefficient in planer direction of the steel plate system.

Current [A]	Spring coefficient [N/m]	
	Experiment	Analysis
0.0	0	0
0.5	12.7	9.72
1.0	35.8	34.5

3. 1 自由度モデルを用いた振動特性の検討

3.1 自由振動実験による検討

3.1.1 実験装置

1 自由度システムを用いて、エッジ方向からの磁力付加時における薄鋼板の垂直方向振動特性変化に関する実験的検討を行うため、Fig.5 のような実験装置を製作した。実験装置のモデル図を Fig.6 に示す。実験で使用した薄鋼板は第 2 章と同様の垂鉛めっき鋼板であり、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取り付けてある。この薄鋼板を 4 本のばねにより吊り下げ、電磁石は薄鋼板エッジ部と電磁石表面が 5mm になるように取り付けた。なお、薄鋼板エッジ部と電磁石表面の距離を 5mm に維持するために、電磁石設置位置で検出したエッジ方向変位と、その変位をデジタル微分した速度を状態変数とするフィードバック制御を行う。Fig.7 に制御システムの概略を示す。この際のフィードバックゲインは最適制御理論により求めた⁹⁾。

3.1.2 実験結果および考察

エッジ方向電磁石コイル電流 I_0 をそれぞれ 0A, 0.5A, 1.0A の 3 通りに変化させ、鋼板自由振動時の鋼板中央部における垂直方向振動時間応答波形の測定を行う。また本研究では比較のために、エッジ方向からの電磁力が作用しないアルミニウム板を用いた実験も同様に行う。

Fig.8 に垂鉛めっき鋼板、Fig.9 にアルミニウム板の鋼板中央部垂直方向振動の時間応答波形の一例を示す。なお同図(a)はエッジ方向からの磁力を付加しない場合($I_0=0A$)、同図(b)は電磁石コイル電流を 0.5A にした場合、同図(c)は電磁石コイル電流を 1.0A にした場合である。両図における(b), (c)の点線は(a) ($I_0=0A$)の結果を比較のために示したものである。

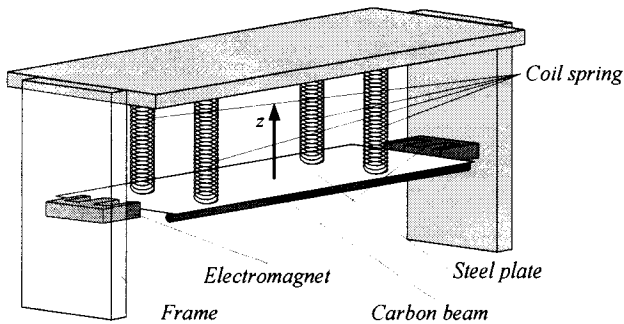


Fig.5 Experimental apparatus of one-degree-of-freedom system.

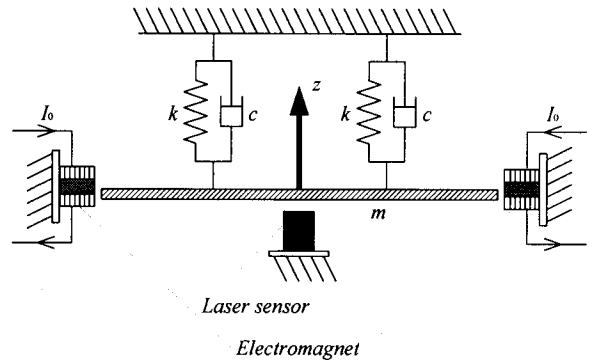


Fig.6 Analytical model.

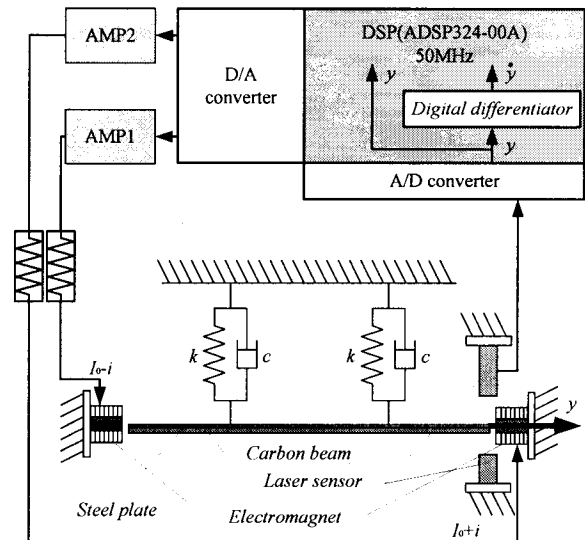


Fig.7 Position control system of the edge direction (y axis).

Table 2~4 に Fig.8, 9 の時間応答波形より算出した固有周波数、減衰係数、減衰比の実測値を示す。Table 2 より、垂鉛めっき鋼板において電磁石コイル電流を 0.5A にした場合、0A と比較して約 9%、1.0A にした場合は約 20%固有周波数が上昇している。このことよりエッジ方向からの磁力が垂直方向のばねとして鋼板に作用していることが再確認できる。一方アルミニウム板ではエッジ方向からの電磁力が作用しないので固有周波数は変化していない。

Table 3 の鋼板に関する結果において、電磁石コイル電流が 0A の場合と比較すると 0.5A では約 11%、1.0A では約 26%減衰係数が増加している。同様にアルミニウム板において電磁石コイル電流が 0A の場合と比較すると 0.5A では約 7%、1.0A では約 11%増加している。以上の結果より磁性体および非磁性体に共通する渦電流が振動の減衰に影響していることが推測される。

減衰比(Table 4)は、エッジ方向電磁石コイル電流が増加するにしたがい、鋼板において 0A と比較すると、0.5A では約 2%、1.0A では約 3%増加、同様にアルミニウム板では 0.5A で約 5%、1.0A で約 11%増加となっている。しかし減衰比そのものの値が 10^{-3} オーダーという微小な領域での変化であることから、渦電流による減衰力は、上述のばね力としての作用と比較して影響は小さいといえる。

3.2 磁場解析による検討

薄鋼板エッジ周辺を中心とした実験と同条件の磁場解析を実施し、その結果得られた磁束密度分布を Fig.10 に示す。解析は実験装置が左右対称であることより薄鋼板の左側半分のみを行った。なお同図(a)は電磁石コイル電流を 0.5A にした場合、同図(b)は電磁石コイル電流を 1.0A にした場合である。

Fig.10 より、電磁石コイル電流を増加させることにより磁束密度が増加しており、磁場は鋼板のエッジ部が最も強くなっていることがわかる。また Fig.11 に、Fig.10 中の任意の部分の磁束密度ベクトルを抽出し拡大図示した。同図より、磁束密度のベクトルは薄鋼板のエッジ方向成分と垂直方向成分を持っていることが分かる。このことより、電磁石による薄鋼板エッジ方向への磁場は薄鋼板エッジ方向の電磁力だけでなく、薄鋼板垂直方向において復元力として作用していることが磁場解析により確認された。

3.3 実験結果と解析結果の比較

実験結果および解析結果より求めたシステム全体の見かけ上のばね係数と減衰係数を Table 5(亜鉛めっき鋼板)、Table 6(アルミ板)に示す。

亜鉛めっき鋼板の場合(Table 5)、ばね係数の実験結果と解析結果を比較すると電磁石コイル電流 0A、0.5A では誤差が発生していないが電磁石コイル電流 1.0A の時に約 11%の誤差が発生している。また減衰係数の実験結果と解析結果を比較すると電磁石コイル電流 0A、0.5A では誤差が発生していないがばね係数と同様に電磁石コイル電流 1.0A の時に約 6%の誤差が発生している。これは電磁石コイル電流の増加にともない、磁束の飽和が生じはじめていることに起因していると考えられる。

アルミニウム板の場合(Table 6)、ばね係数の実験結果と解析

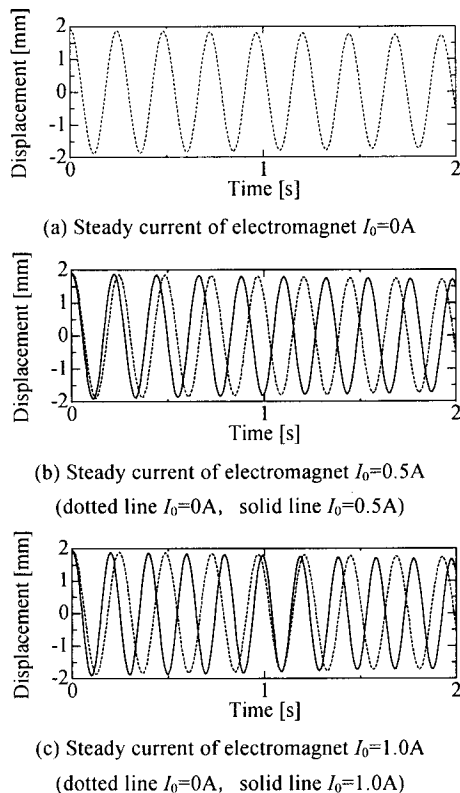


Fig.8 Time histories of planar direction displacement (steel plate).

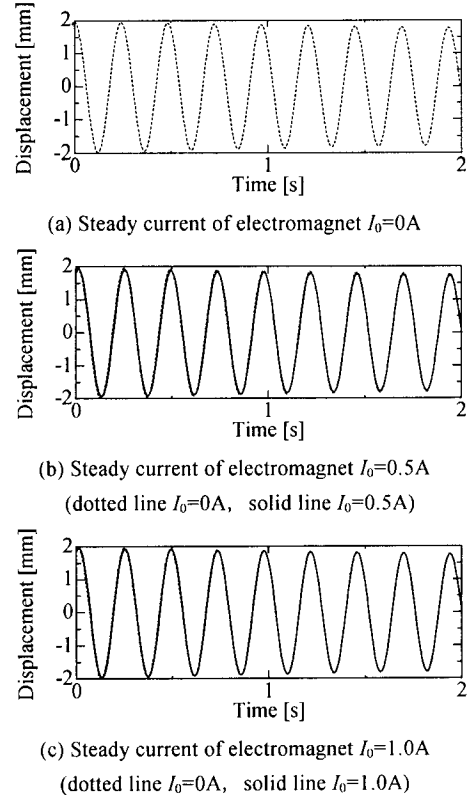


Fig.9 Time histories of planar direction displacement (aluminum plate).

Table 2 Natural frequencies of steel plate and aluminum plate systems.

Current [A]	Natural frequency [Hz]	
	Steel plate	Aluminum
0.0	4.17	4.17
0.5	4.55	4.17
1.0	5.00	4.17

Table 3 Damping coefficients of steel plate and aluminum plate systems.

Current [A]	Damping coefficient ($\times 10^{-2}$) [Ns/m]	
	Steel plate	Aluminum
0.0	1.17	1.18
0.5	1.3	1.26
1.0	1.47	1.31

Table 4 Damping ratios of steel plate and aluminum plate systems.

Current [A]	Damping ratio ($\times 10^{-3}$)	
	Steel plate	Aluminum
0.0	1.99	2.00
0.5	2.02	2.09
1.0	2.05	2.22

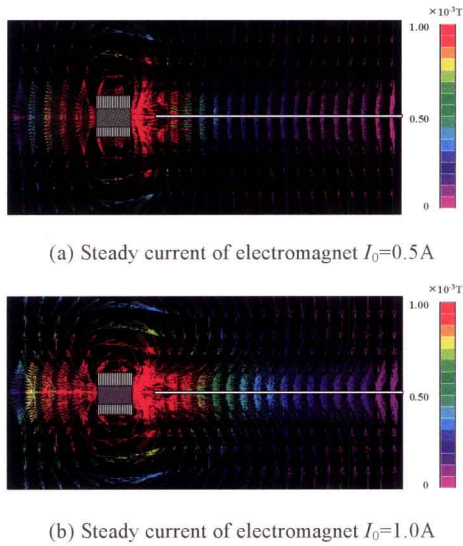


Fig.10 Distribution of magnetic flux density.

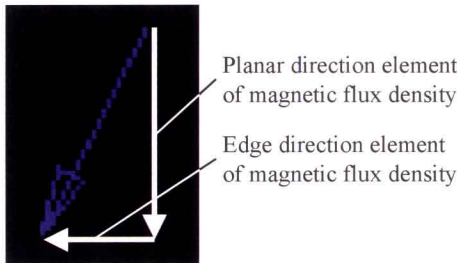


Fig.11 An element of magnetic flux density.

結果を比較すると垂鉛めつき鋼板と同様に電磁石コイル電流 0A, 0.5A では誤差が発生していないが、電磁石コイル電流 1.0A の時に約 11%の誤差が発生している。また、減衰係数の実験結果と解析結果を比較すると電磁石コイル電流 0A, 0.5A では誤差が発生していないが電磁石コイル電流 1.0A の時に約 2%の誤差が発生している。しかしながら垂鉛めつき鋼板、アルミニウム板共に実験結果と解析結果の傾向はほぼ一致していると言える。

以上の結果よりエッジ部に設置した電磁石によるエッジ方向からの磁力が薄鋼板垂直方向へ与える影響は、薄鋼板端部に見かけ上ばね、ダンパとして作用していることが明らかとなった。また、エッジ方向磁場による減衰力は小さいことも確認できた。

4. 強制振動に対する検討

4.1 解析モデル

第3章では、薄鋼板のエッジに加える電磁力が垂直方向振動に及ぼす影響について自由振動による検討を行った。本章ではより実際の工程に近い考察として、薄鋼板に対して継続的な外乱を加え制振性能に対する検討を行う。

前章では、電磁石による鋼板への影響は鋼板エッジ部に働く見かけ上のばね、ダンパに相当することを明らかにした。そこで、Fig.12 のようなモデル化を行った。ここで、 k はコイルスプリングのばね係数、 c はコイルスプリングの減衰係数であり数値は Table 5 の電磁石コイル電流 0A(電磁石を設置しない場合)の場合となる。 k_{EM} , c_{EM} は電磁石による見かけ上のばね係数、

Table 5 Spring coefficient and damping coefficient of steel plate system.

Current[A]	Spring coefficient [N/m]		Damping coefficient [Ns/m]	
	Experiment	Analysis	Experiment	Analysis
0.0	77.2	77.2	0.0117	0.0117
0.5	90.9	90.9	0.0130	0.0130
1.0	115	128	0.0147	0.0156

Table 6 Spring coefficient and damping coefficient of aluminum plate system.

Current[A]	Spring coefficient [N/m]		Damping coefficient [Ns/m]	
	Experiment	Analysis	Experiment	Analysis
0.0	77.1	77.1	0.0118	0.0118
0.5	76.9	77.2	0.0127	0.0122
1.0	76.9	77.2	0.0131	0.0133

減衰係数であり、Table 5 における 0A の数値からの増加分に相当する。ただし、数値解析では Table 5 の実験結果より求めた値を使用する。実験装置の運動方程式は次のように表される。

$$m\ddot{z} + (c + c_{EM})\dot{z} + (k + k_{EM})z = G(t) \quad (1)$$

ここで $G(t)$ は外力であり、鋼板中央部に設置した電磁石によって非接触に加える。Fig.13(a) は外乱用電磁石に加えた電圧の時刻歴、同図(b) はそのパワースペクトル密度の一例である。自由振動実験と同様に水平方向電磁石コイル電流 I_0 をそれぞれ 0A, 0.5A, 1.0A と変化させ、鋼板をランダム加振させたときの鋼板中央部における垂直方向振動時間応答波形の測定を行う。

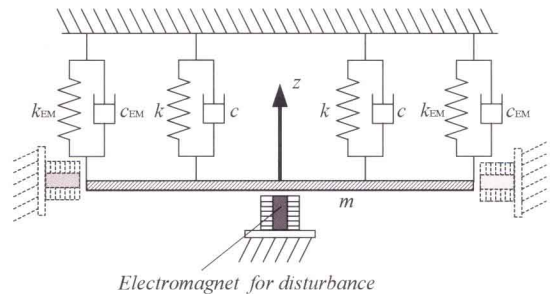


Fig.12 Analytical modeling of experimental apparatus.

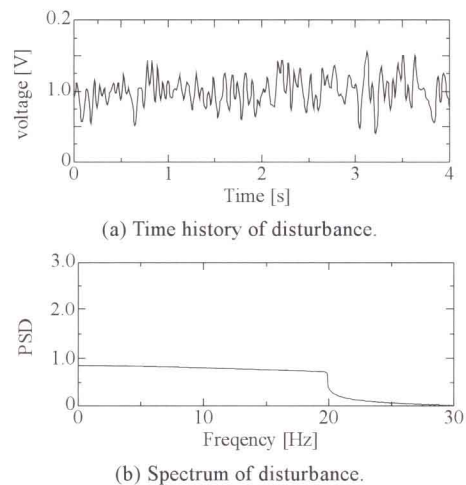


Fig.13 Time history and spectrum of disturbance.

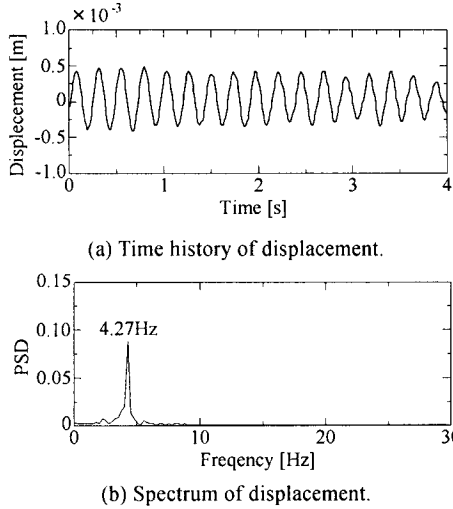


Fig.14 Experimental results of time history and spectrum of displacement ($I_0=0A$).

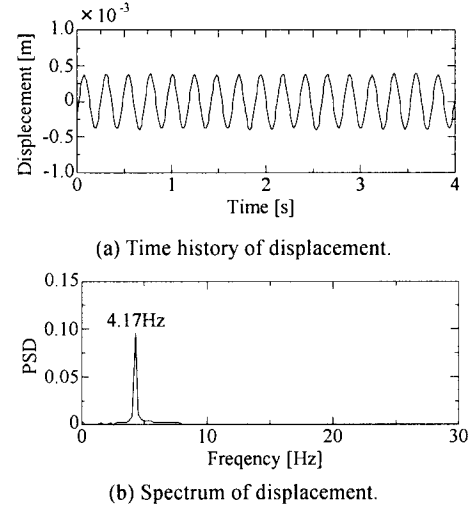


Fig.17 Analytical results of time history and spectrum of displacement ($I_0=0A$).

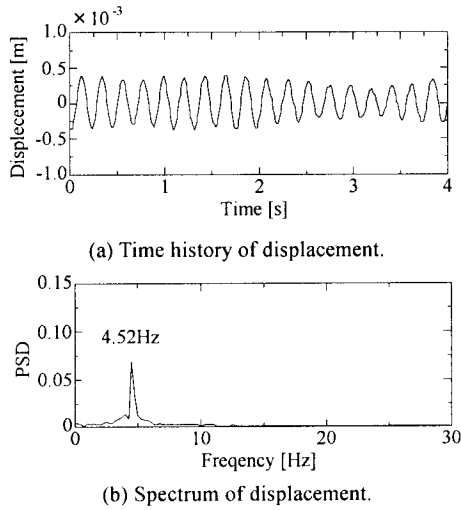


Fig.15 Experimental results of time history and spectrum of displacement ($I_0=0.5A$).

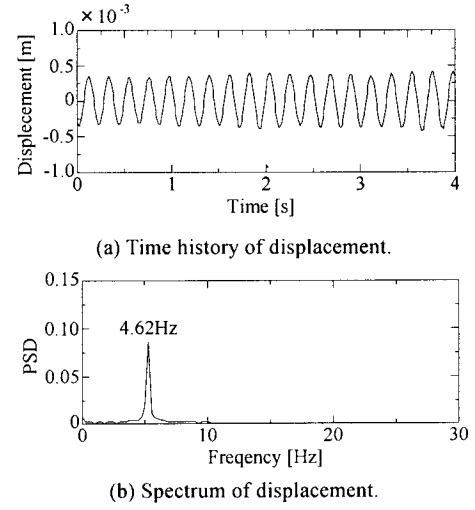


Fig.18 Analytical results of time history and spectrum of displacement ($I_0=0.5A$).

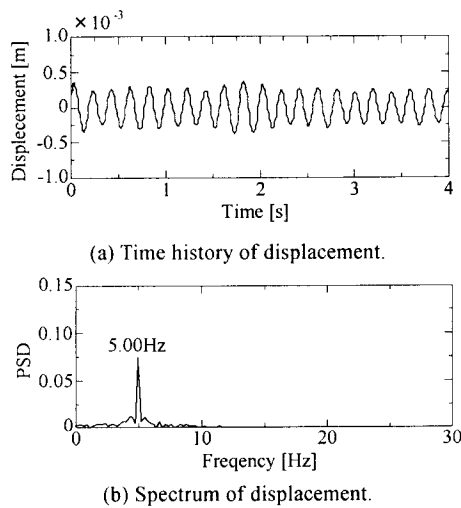


Fig.16 Experimental results of time history and spectrum of displacement ($I_0=1.0A$).

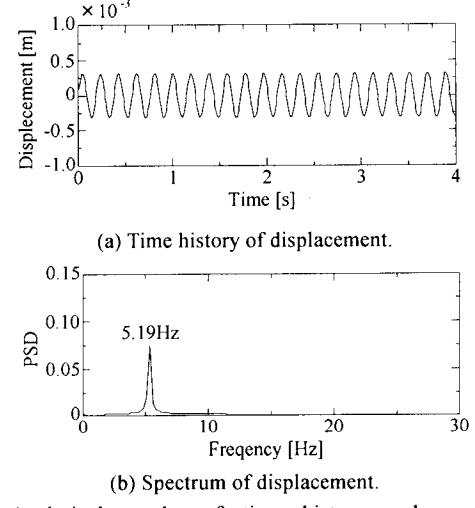


Fig.19 Analytical results of time history and spectrum of displacement ($I_0=1.0A$).

4.2 実験結果と解析結果および考察

強制振動時の垂鉛めつき鋼板中央部垂直方向振動の時間応答波形を Fig.14~16 に示す。なお、Fig14 は 0A, Fig15 は 0.5A, Fig16 は 1.0A の電流をエッジ方向に設置してある電磁石コイルに流したものである。

電磁石コイル電流が増加すると振動振幅が減少していることが分かる(Fig.14(a)~16(a))。また、実験ではパワースペクトルのピークが、0A は 4.27Hz, 0.5A は 4.52Hz, 1.0A は 5.00Hz に発生している(Fig.14(b)~16(b))。同様に解析結果(Fig.17(b)~19(b))でもパワースペクトルのピークが、0A は 4.27Hz, 0.5A は 4.63Hz, 1.0A は 5.19Hz 付近に発生している。これは Table 2 の固有周波数(0A は 4.17Hz, 0.5A は 4.5, 1.0A は 5.0Hz)とほぼ等しく傾向が一致している。以上の結果より、エッジ方向の磁力が垂直方向のばね力として作用していることが、ランダム加振実験および解析からも確認できた。

5. まとめ

本論文では、薄鋼板エッジ方向に設置した電磁石による磁力付加時における薄鋼板垂直方向振動への影響を明らかにするために、実験および磁場解析を含めた数値計算を行った。その結果、実験結果と解析結果の傾向がよい一致を示し、エッジ方向からの磁場によって発生する渦電流による減衰力は比較的小さいということが明らかとなった。また、薄鋼板のエッジに加える電磁石が薄鋼板の垂直振動に及ぼす影響は、主に垂直方向のばね力に相当するという知見が得られた。さらにこのばね力には線形性を有する範囲が存在することも明らかとなった。

謝辞

本研究に際して、東海大学大学院生・三髯佳彦氏、磯部嘉城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) K. Kashiwabara, Y. Oshinoya, K. Ishibashi: Noncontact Guide for a Traveling Steel Plate, The 12th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics in VERSAILLES, (2003), pp.66-67.
- (7) K. Kashiwabara, Y. Oshinoya, K. Ishibashi: Study on Noncontact Guide for a Traveling Steel Plate (Application to Change Part in Traveling Direction), 7th International Symposium on Magnetic Suspension Technology, (2003), pp.232-239.
- (8) 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.
- (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) K. Kashiwabara, Y. Mitsuhashi, Y. Oshinoya, K. Ishibashi: Study on Noncontact Guide for a Change Part in Traveling Direction of Traveling Elastic Steel Plate Using Electromagnetic Force (Basic Research on High-Speed Traveling), Proc. School of Eng., Tokai Univ, Vol. 44, No. 1, (2004), 投稿中.
- (11) 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), 掲載決定.