薄鋼板の振動制御*

松本 浩一^{*1}, 松田 健一^{*2}, 岡田 養二^{*2}

Active Vibration Control of Thin Steel Sheet

Hirokazu MATSUMOTO, Ken-ichi MATSUDA and Yohji OKADA

The commercial rolling process used in the steel industry to manufacture thin steel sheets tends to cause plate vibrations that lower the quality of the surface finish. This paper introduces a non-contact method of active vibration control for reducing the flexural vibrations of a thin steel sheet using the push-pull type electromagnet. The electromagnet is designed to produce enough magnetic force to control the thin steel sheet. The dynamics of it is improved by a flux feedback technique. The eddy current loss in the steel sheet decreases the dynamic property of the actuator which is successfully improved by the proposed method. A simple experimental setup is made to confirm the proposed technique.

Key Words: Vibration Control, Magnetic Bearings, Flexible Steel Sheet, Flux Feedback, Digital Control

1 はじめに

薄鋼板は電気製品や自動車などの各種工業製品に広く利用されており、板幅600~1800mm、板厚0.3~6mm程度が使われる。製鉄所では、この薄鋼板に焼鈍やメッキを行うが、そのライン長さは数kmに及ぶ。その間、ローラガイドなどで薄鋼板に張力をかけ支持、搬送しているが、ローラガイドの間隔は長いところでは50mにも及び、その際に振動が生じてしまう。とくに、メッキなどの表面処理において品質の向上を行う際、この振動を抑えることが重要な課題となる。

この問題を解決する手段として、磁気搬送と同じような電磁石を使用し、電磁力をアクティブに制御することによって振動を抑制し、安定な走行を実現させることが提案されている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。しかし、これらの研究成果の産業界への普及は今一步というのが現状である。その原因として、電磁石の吸引力不足が挙げられる。これは、薄鋼板の磁気飽和に関係する。また、薄鋼板には渦電流が誘導されやすく、これにより高周波において応答の遅れが生じることも問題となる。

そこで本論文では、有限要素法解析ソフト ANSYS を使用して、薄鋼板の磁気飽和の影響をあまり受けずに、実際の製鉄ラインに取り入れられ得る、十分な吸引力を発生する電磁石を設計する。また、応答の遅れを改善する手段として、すでに

磁気軸受に応用され、良好な結果が得られている磁束フィードバック⁽⁴⁾を適用する。簡単な実験装置を用いて薄鋼板の振動制御実験を行ったところ、良好に制振することが可能となったので、その結果を報告する。

2 電磁石の解析と設計

電磁石をアクティブに制御して、鋼板を支持、搬送する方法としては、次の3種類の磁気浮上系が考えられる。

1. 鋼板が水平方向に搬送されている場合、電磁石を鋼板の上方に1つ配置して、電磁石の吸引力で釣り下げる方法。
2. 電磁石を鋼板の両側に配置し、鋼板の位置によってそれぞれ独立に吸引を行い、任意の位置に制御する方法。
3. 鋼板の両側に配置することで鋼板を貫通するバイアス磁束を発生させるコイルと、制御磁束を発生させるコイルとで構成された電磁石を用いて、両側吸引により任意の位置に制御するプッシュプル制御法。

ここで2の場合、駆動する電磁石は1つなので、駆動していない側はただの鉄心を配置していることになる。この3種類の磁気浮上系について、それぞれ有限要素法解析ソフト ANSYS を使用して磁場解析を行い、その結果を考察する。

2.1 解析のための仮定 解析対象として、積層鋼板で作られたE型の電磁石を適用する。そのモデル化に関して、以下の仮定を設けた。

- z 方向は無境界とし、 (x, y) 平面の二次元場で行う。
- y 軸を対称面とした1/2領域の解析モデルを考える。

* 原稿受付 1998年5月15日。

^{*1} 学生員、茨城大学大学院(☎ 316-8511 日立市中成沢町4-12-1)。^{*2} 正員、茨城大学工学部。

E-mail: okada@mech.ibaraki.ac.jp

Fig. 1 B-H Curve

Fig. 2 Analytical Model

Table 1 Design Parameters of Electromagnet

Item	Wire Dia. [mm]	Turns	Current [A]
Bias Coil	1.0	484	4
Control Coil	1.0	165	1

- 電磁石のコア部及び薄鋼板は図1のような特性を持つ非線形材料とする。
- 渦電流は発生しない。

解析モデルを図2に示す。磁性体の周りに最小限の空気層を図2のように作成した。コイルの諸元を表1に示す。

2.2 磁束線図・磁束密度分布図 図3～5は、前述1～3の磁気浮上系の解析結果である。3図とも薄鋼板を上方向に吸引している場合の結果である。左図は磁束線図を、右図は磁束密度分布図を示す。右側のスケールは磁束密度であり、単位は[T]である。図3の磁束線図において、薄鋼板付近の磁束が丸くなり漏れが多いこと、及び磁束密度分布図において、最大磁束密度が約1.7[T]であることから、薄鋼板内で磁気飽和が生じている様子がわかる。また、図4においても同様に磁気飽和が生じているが、磁気飽和後、図4では少量の磁束が鋼板内を貫通して、下部の鉄心のほうに流れ込むため、薄鋼板内の磁束密度は軽減される。その結果、図3より鋼板に到達する磁束が増えるため吸引力は大きくなる。図5はプッシュプルの場合の解析結果を示すが、このときの薄鋼

Fig. 3 Flux Lines and Magnetic Flux Density of Single Electromagnet

Fig. 4 Flux Lines and Magnetic Flux Density of Electromagnet and Core

板内の磁束密度は1.262[T]で、磁気飽和には至っていない。つまり磁束のほとんどは板を貫通しており、吸引力は大きくなる。

2.3 吸引力計算結果 それぞれの磁気浮上系について、コイルに流す電流を変化させ、そのときの吸引力の変化を調べた。ただし、プッシュプルの場合はバイアスコイルに2[A]の一定電流を流して計算し、それ以外の場合は、バイアスコイル、制御コイルを1つのものとして扱い、ともに電流を変化させて行った。計算は仮想変位法とマクスウェル法の2種類の方法で行った。

図6は1、2の場合の計算結果である。ここで、白が仮想変位法による計算結果、黒がマクスウェル法による計算結果を示す。この結果から、どちらも約0.8[A]から磁気飽和が生じ、吸引力が横這いになっていくことがわかる。しかし、2の上下にコアを配置したほうが、磁気飽和後の吸引力が大きくなっている。これは前節で述べたように、2の場合の方が、磁気飽和後は鋼板に到達する磁束が増えているためである。この

Fig. 5 Flux Lines and Magnetic Flux Density of Push-Pull Electromagnet

Fig. 6 Magnetic Force of Single Electromagnet and Electromagnet Core Pair

結果から、釣り下げによる薄鋼板の搬送においても、磁気飽和に対して有利になるように、電磁石の反対側に磁性材を配置することによって、電磁石の効率を上げることができると考えられる。図7はプッシュプルの場合の計算結果を示している。この場合は、約1.2[A]から磁気飽和が生じ、吸引力が横這いになっているが、磁気飽和以前では、吸引力の大きさは図6のものよりも2倍以上大きくなっており、かつ吸引力と電流の比例関係がよい。しかし、磁気飽和後の吸引力はほとんど変化せず、磁気飽和の影響を受けやすい。これは、薄鋼板のB-H曲線は横這いになった後も微少であるが増加していくため、制御コイルのみの変化よりも全コイルの変化のほうが磁界を増加させるためである。

2.4 電磁石の設計と吸引力の測定 これまでの有限要素法解析結果から、磁気飽和の影響を考慮すると、プッシュプルによる場合が最も効率が良いと思われる。そこで、より効率がよく、実際の製鉄ラインに取り入れられ得る十分な吸引力を発生させるプッシュプル電磁石を、磁場解析により設計した。解析方法は、図2の解析モデルにおいて、薄鋼板の厚さ0.5[mm]、電磁石間距離10[mm]として、それ以外の寸法

Fig. 7 Magnetic Force of Push-Pull Electromagnet

Fig. 8 Dimension of Electromagnet

Table 2 Design Parameters of Electromagnet

Item	Wire Dia. [mm]	Turns	Current [A]
Bias Coil	1.0	530	4
Control Coil	0.8	165	1

は自由に変更し、かつバイアスコイルは線径1[mm]で4[A]、制御コイルは線径0.8[mm]で1[A]を流すとして、それぞれの巻数を変更して行った。また、磁気飽和の影響を受けないように、薄鋼板及び電磁石コアは磁束密度1.2[T]以上にならないようにした。設計した電磁石の諸元を図8、表2に示す。ただし、積層鋼板の積み厚は厚くしたほうが吸引力は増えるが、実験では30mmの物を使用した。図9にこの電磁石の解析結果を示す。コアの対向面積及びコアの間隔をできるだけ広く採ることにより、図9の磁束線図のように、漏れ磁束を少なくでき、効率を上げることができた。また磁束密度分布図から、薄鋼板内の磁気飽和に影響を与えず、吸引力を増やすために、バイアスコイルの巻数をコアが磁気飽和しない程度まで増やし、制御コイルの巻数は薄鋼板内で磁気飽和が生じない程度まで少なくした。

この電磁石の吸引力を測定し、ANSYSによるシミュレーション結果との比較を行った。この結果が図10である。図10の四角がバイアスコイルに1[A]の電流を流した場合、三角がバイアスコイルに2[A]の電流を流した場合である。また、黒が実験結果、白がシミュレーション結果を示している。図10より、制御コイルに1.2[A]の電流を流した付近から吸引力が

Fig. 9 Comparison of Calculated and Experimental Force of Push-Pull Electromagnet

Fig. 10 Flux Lines and Magnetic Flux Density of Push-Pull Electromagnet

Table 3 Model Parameter

e_1, e_2	Driving Voltage
I_0	Bias Current
i	Control Current
ϕ_1, ϕ_2	Magnetic Flux
R	Reluctance
N	Coil Turns
i_e	Eddy Current
R_e	Resistance of Eddy Current Effect
N_e	Coil Turns of Eddy Current Effect
x	Displacement of Plate
X_0	Distance between Plate and Electromagnet
S	Cross Sectional Area

横這いになっている。これは磁気飽和による影響である。しかし、磁気飽和以前では、吸引力が線形化されていることがわかる。また、実験結果とシミュレーション結果はほぼ一致しており、シミュレーションの妥当性が検証される。

3 薄鋼板制振系のモデリング

薄鋼板制振系の磁気回路モデルを図11に示す。渦電流の影響を考慮するために、コイルとは別に第3の巻線を薄鋼板に考え、この両端に負荷抵抗を接続して、それに生じる電流を近似的に渦電流の影響とした。各パラメータは表3に示すと

Fig. 11 Magnetic Circuit Model

おりである。ここで、漏れ磁束はない、鋼板及びコアの磁気抵抗は無視するという仮定のもとで解析を行う。式を簡単にするため空隙部の磁気抵抗を上下とも R とすると、 ϕ_1 、 ϕ_2 は次式となる。

$$\begin{cases} \phi_1 = \frac{N(I_0 + i) + N_e i_e}{R} \\ \phi_2 = \frac{N(I_0 - i) - N_e i_e}{R} \end{cases} \quad (1)$$

一方、駆動コイルの電気抵抗を無視すると、電圧 e_1 、 e_2 は、

$$e_1 = \frac{dN\phi_1}{dt}, \quad e_2 = \frac{dN\phi_2}{dt} \quad (2)$$

となる。また、電気回路の方程式は次のようになる。

$$\frac{d}{dt}(N_e(\phi_1 - \phi_2)) + R_e i_e = 0 \quad (3)$$

以上の式より、制御電流 i から吸引力 f までの伝達関数を導くと次式となる。

$$G(s) = \frac{F(s)}{I(s)} = \frac{4N^2 I_0}{\mu_0 S R} \times \frac{R_e}{2N_e^2 s + R_e R} \quad (4)$$

ただし、 μ_0 は空隙の透磁率である。式(4)から、電流と力の間には一次遅れ要素が存在していることがわかる。したがって、電流フィードバックのみでは、渦電流の影響により、高周波数になるほど動特性が悪化することが考えられる。

4 磁束フィードバック

前章の解析により、電流駆動では、電磁石は起磁力を発生するが、力の変化になるには渦電流による遅れがあることがわかった。この問題を解決するために、常に力に対して線形の関係を持ち、時間遅れの存在しない磁束をフィードバックすることが有効である。

電流フィードバック K_i と磁束フィードバック K_b を含んだ、制御入力から力までの伝達関数は、次式となる。

$$G_1(s) = \frac{2K_f R_e L}{(2NR_e L + 2LK_i)s + R_e(2LK_b + NK_i)} \quad (5)$$

Fig. 12 Frequency Response of Eq. (5)

ここで、 L はインダクタンス、 K_f は磁束から力への力係数であり、バイアス磁束を ϕ_0 とすると、

$$K_f = \frac{2\phi_0}{\mu_0 S} = \frac{2LI_0}{\mu_0 SN} \quad (6)$$

となる。これはバイアス電流を流すことによって発生する吸引力を表している。各パラメータ値を、 $S = 9 \times 10^{-4} [\text{m}^2]$ 、 $R_e = 10 [\Omega]$ 、 $L = 4 [\text{mH}]$ 、 $I_0 = 1 [\text{A}]$ 、 $N = 165$ として、MATLABにより求めた式(5)の周波数応答を図12に示す。実線が $K_b=0$ とした電流フィードバックのみの場合であり、破線が磁束フィードバックを加えた場合である。この結果より、磁束フィードバックを用いた方が、周波数特性が改善されていることが分かる。

近似磁束フィードバックを追加したパワーアンプの回路図を、図13に示す。これは、バイアスコイルに一定電流を供給する回路と、指令電圧に比例して励磁電流を制御コイルに供給する回路で構成されている。式(2)より、図13の e には、磁束の変化が現れる。したがって、 V_B には e の磁束の変化を積分したもの、すなわち、近似的な磁束が検出できる。

この磁束フィードバックを加えたパワーアンプの特性を調べるため、入力電圧 V_{in} から磁束が現れると考えられる V_B までの周波数応答を測定した。パワーアンプを、後述の実験装置に取り付けて測定した周波数応答を、図14に示す。前節の解析では、渦電流の影響によって単純な一次遅れが生じていた。しかし図14の場合、電流フィードバックのみの場合では、約1k[Hz]でピークが現れる二次遅れとなっている。この原因の一つとして、薄鋼板の高次振動の一つが影響していると考え

Fig. 13 Schematic of Amplifier's Circuit and Regulated Current Source's Circuit

Fig. 14 Frequency Response of Amplifier

えられる。しかし、磁束フィードバックを追加した場合では、ほぼフラットな関係を保っており、高周波において特性が改善されていることが確認できる。

5 振動制御実験

5.1 実験装置 図15に振動制御実験装置の概略図を示す。幅300mm、板厚0.5mmの薄鋼板が固定端間距離1700mmで両端支持されており、そのほぼ中央に電磁石を1個設置した。また、電磁石間のギャップは10mmである。

制御系の構成を図16に示す。高速デジタル制御を実現するために、DSPを使用している。振動制御のコントローラにはPID制御を用いた。今回の実験でのサンプリング時間は

Fig. 15 Diagram of Experimental Setup for Vibration Control

Fig. 16 Schematic of Control System

$1.0 \times 10^{-4}[\text{sec}]$ 、微分時定数は $3.14 \times 10^{-4}[\text{sec}]$ である。

5.2 実験結果 実験は、たわんだ鋼板を位置制御した後、薄鋼板の変位が約2[mm]下に下がるようなインパルスを与え、その結果生じる振動の制御を行った。図17に電流フィードバックのみの場合の実験結果を示す。上図はインパルス応答を示しており、下図は上図で残っている微振動が、十分に時間をおいた30秒後の状態である。この時の比例ゲイン $K_P=8[\text{V/mm}]$ 、微分ゲイン $K_D=0.006[\text{Vsec/mm}]$ 、積分ゲイン $K_I=0.0002[\text{V/mmsec}]$ であり、これ以上ゲインを大きくすると発振してしまった。また制振可能領域では、下図で示すような高周波振動が現れた。下図から、この振動の周波数は約1k[Hz]となり、図14におけるピーク時の周波数とほぼ一致している。

図18は磁束フィードバックを追加した場合の結果である。この時のゲインは、 $K_P=18[\text{V/mm}]$ 、 $K_D=0.03[\text{Vsec/mm}]$ 、 $K_I=0.0002[\text{V/mmsec}]$ であり、図17の場合よりも、ゲインの範囲を広く採ることができる。両図の基本振動成分を1自由度減衰振動で近似すると、図17では減衰率が約0.05であったが、図18では約0.1と2倍程度の改善が得られ、1kHzの不安定振動は全く現れず、制振効果が改善されている。また、上

Fig. 17 Impulse Response (Current Feedback)

Fig. 18 Impulse Response (Current Feedback and Flux Density Feedback)

図において、微振動が残っているが、時間をおけば下図のように完全に制振することができる。これは鋼板のねじれ振動と考えられる。以上の結果から、磁束フィードバックを追加することにより、安定性が大幅に改善できた。

5.3 電磁石2個による振動制御実験結果 図18のような鋼板のねじれ振動による微振動が残らないように、プッシュプル電磁石を板幅方向に2個配置して制御を行う。実験は、前節の1個の場合と全く同じ状況で行った。この2軸制御での実験結果を図19に示す。各ゲインは、2つとも独立のPID制御

Fig. 19 Impulse Response (2 Axis Vibration Control)

で、 $K_P=10[\text{V/mm}]$ 、 $K_D=0.02[\text{Vsec/mm}]$ 、 $K_I=2[\text{V/mmsec}]$ である。図19より、鋼板の振動は約1秒で制振されており、微振動も約2秒で完全に消滅することができた。

6 結論

3種類の薄鋼板の磁気浮上系について、有限要素法解析を行って電磁石を設計した。実際の製鉄ラインに取り入れられ得る、十分な吸引力を発生するプッシュプル電磁石を設計製作し、実験を行った。また渦電流の影響を考慮した薄鋼板制振系を理論解析し、アンプに近似的な磁束フィードバック回路を取り付けて薄鋼板の振動制御実験を行い、次の結論を得た。

1. 磁束フィードバックにより制振可能な制御ゲインの設定範囲が広がり、かつ電流フィードバックのみの制振可能領域での高周波振動を無くすなど動特性を改善できた。
2. プッシュプル電磁石を2個配置することによって、約2秒で微振動も含めた完全な制振が得られた。

今後は、全周自由鋼板を、4個以上の電磁石で浮上させる計画である。

参考文献

- (1) 吉橋、ほか3名: 機論, 60 - 578C, (1994), 76-81
- (2) 森井、ほか4名: 第4回シンポジウム電磁力関連のダイナミクス講演論文集, (1996), 429-432
- (3) 林屋、ほか4名: 電気学会産業応用部門全国大会論文集, (1996), 75-80
- (4) S. Hara, et.al.: Fifth International Symposium on Magnetic Bearings, Kanazawa, Japan, Aug. 28-30, (1996), 49-54