振動制御用電磁石を用いた可撓性鋼板の磁気浮上システム

学生員 林 屋 均 (東京大)

学生員 荒 木 登 (東京大)

非会員 J. E. Paddison (東京大)

正 員 大 崎 博 之 (東京大)

正 員 正 田 英 介 (東京大)

Magnetic Levitation System of a Flexible Steel Plate with Vibration Suppressing Electromagnets
 Hitoshi Hayashiya, Student Member, Noboru Araki, Student Member, Jonathan E. Paddison, Non-Member,
 Hiroyuki Ohsaki, Member and Eisuke Masada, Member (The University of Tokyo)

A magnetic levitation system is applied to the non-contacting conveyance of steel plate in a steel mill. In this system, the flexibility of the steel plate may deteriorate the levitation characteristic and so it is proposed to arrange the electromagnets along the steel plate length. A low pass filter is used to reduce the influence of the steel plate natural vibrations. Simulation results of the levitated plate's response by a finite element method and magnetic levitation experiments are presented. The results show the vibration suppressing electromagnet which only uses the velocity of the levitated object as a feedback is able to control the low frequency natural vibration effectively and a low pass filter is able to avoid the excitation of the high frequency natural vibration.

キーワード：磁気浮上、可撓性鋼板、固有振動、振動制御

1. はじめに

近年の鉄鋼業分野においては、製品の高品質化・高付加価値化がますます進む傾向にあり、製品の表面品質の向上が一つの課題となっている。このような製品品質を向上させる一手法として、現行のローラなどを用いた接触型の搬送形態に代わって、鋼板を非接触に搬送する技術の実用化が期待されている。

本研究では、このような非接触搬送を実現する手段として、図1に示すような磁気吸引浮上方式により鋼板を非接触に支持しリニア誘導モータを用いて鋼板の非接触駆動を行う搬送システムを考え、研究を進めている。鋼板の非接触搬送が実現されれば、製品表面に搬送痕が残らないために製品品質を向上できることの他に、装置の摩擦がないために設備費用の削減につながることで、表面処理工程への応用などにおいては生産効率が向上できること、振動・騒音を低減でき工場内環境を改善できること、などの利点が考えられる。

図1 鋼板の接触搬送と非接触搬送

Fig. 1. Contacting and Non-Contacting Conveyance of the Steel Plate

鋼板の磁気浮上搬送に関する研究は、搬送対象の可撓性、即ち鋼板のたわみやすさを問題とした研究⁽¹⁾、薄

板内での磁気飽和に関する研究⁽²⁾、センサレス磁気浮上系の研究⁽³⁾など、各方面からの取り組みがなされている。

本論文では、この様な非接触搬送システムについて、鋼板の水平方向への搬送は考慮せずに、その前段階として、可撓性を有する鋼板を複数の電磁石により非接触に安定支持することを目的とする。実際の搬送工程では鋼板は時々刻々移動していくことになる。本論文における様に、鋼板が静止した系において可撓性鋼板の安定支持に適した磁気浮上システムを検討することは、実工程における電磁石設計や電磁石配置の検討や、また、その実現性の検討を行う上での一助となると考えている。

本論文で述べる内容を以下に示す。

1. 可撓性鋼板の多点支持系について
2. 振動制御用電磁石を用いた磁気浮上系について
3. 可撓性鋼板における固有振動の励振の回避について

2. 振動制御用電磁石を用いた磁気浮上系

〈2・1〉 可撓性鋼板の磁気浮上系の特色 可撓性の強い鋼板の磁気浮上搬送系においては、以下の様な固有の問題がある。

- 搬送対象の可撓性が強く、複数の固有振動が浮上特性に影響を及ぼす。
- 固定された電磁石群の下を搬送対象が移動していくために、鋼板への吸引力の作用点が時々刻々変化していく。
- 多数の電磁石を同時に制御しなくてはならない。
- 搬送対象が極めて薄い鋼板の場合、鋼板部で磁束が飽和する可能性がある。

良く知られているように、振動モードの節においてはそのモードは不可制御となる⁽⁴⁾。上記の様に鋼板の磁気浮上搬送系においては、鋼板の移動に伴い電磁石吸引力の作用点も移動していくために、一つの電磁石が常に振動モードを可制御な位置で鋼板を支持することは不可能である。したがって、本システムでは電磁石を鋼板ライン上に複数連続配置し、なるべく多くの点で鋼板を支持・制御する系が望ましいといえる。

可撓性鋼板を連続・多点支持する利点としては、

- 多数の電磁石が鋼板上に適切に配置されることで、振動モードが不可制御となる状況を避けやすい。
- 電磁石による鋼板の支持間隔を狭くすることで、鋼板が大きくたわむことを防ぐことができる。
- 多点支持により鋼板の質量を分散支持することで電磁石あたりの支持質量が減り、鋼板内の磁気飽和を回避しやすい。

などが挙げられる。

〈2・2〉 可撓性鋼板の連続・多点支持系 可撓性鋼板を連続・多点支持することの有効性を示すために、ここでは、1次元オイラー梁の有限要素解析を用いて、鋼板応答のシミュレーションを行う。モデル化した鋼板は、後章

の実験で用いる物と同じ長さ 1000mm、厚さ 2.3mm で、要素数は 20 要素としてモデル化した。また、電磁石は理想化し、吸引力指令値 f^* は PD 制御により算出した。鋼板の水平方向への移動は行わない。初期状態では電磁石の下方 4mm に鋼板が水平におかれ、時刻 $t = 0$ より各節点に重力・吸引力が作用し、ギャップ指令値 $x_{ref} = 3\text{mm}$ で浮上を開始される。前述の様に実際の搬送工程においては鋼板が時々刻々移動していくことになるが、薄板鋼板が低速で搬送されていく場合には渦電流の影響は非常に小さくなる⁽⁵⁾。実用上の搬送速度についての要請や可能性については今後、詳細な検討が必要である。

鋼板の両端から 100mm の位置で支持を行った場合の鋼板応答を図 2 に、200mm の位置で支持を行った場合を図 3 に、両端から 100mm と中央部で支持を行った場合を図 4 に示す。

図 2 の場合、支持点間隔が広すぎるために鋼板の可撓性が影響し、大きくたわんだ状態での支持となってしまうことが分かる。また図 3 では、支持点が 2 次モードの固有振動の節に近いためにモードが不可制御となり、振動が減衰されていない様子が分かる。これらに対して図 4 では、支持点数を増したことで鋼板のたわみが抑制され、さらに、浮上開始直後から振動モードの影響なく安定した浮上となっていることが分かる。

この様に可撓性鋼板を多点で支持することで鋼板のたわみが改善され、また、固有振動の浮上特性への影響が低減されている。

〈2・3〉 振動制御用電磁石の利用 前述のように、固定された電磁石の下を鋼板が移動して行く本磁気浮上系では、電磁石を連続的にライン上に配置することが望ましい。一方、電磁石による振動制御性を向上させるには応答性の良い小型の電磁石を用いる方が望ましいが、その場合、鋼板の全質量を支持するだけの十分な吸引力を生じることが難しい。そこで本論文では、鋼板の支持・制御を行う電磁石の他に、振動制御のみを行う電磁石を付加的に導入した磁気浮上システムを提案する。このような振動制御用電磁石には、式 (1) に示すようにギャップ長の差分により算出した鋼板の速度成分 $\dot{x}$ のみをフィードバックし、鋼板運動にダンピングを与えるような機能を持たせる。

$$f_{vib}^* = k_{vib} \dot{x} \cdots \cdots \cdots (1)$$

ここに、 f_{vib}^* は振動制御用電磁石の制御力指令値、 k_{vib} は制御係数である。

振動制御用電磁石を可撓性鋼板の磁気浮上システムに導入することは、簡易な構成が可能であるために長ライン上への多数連続配置に適していること、速度成分のみのフィードバックを行うために鋼板位置を拘束せず、鋼板支持にとって冗長な支持要素とならないこと、などの利点がある。

図2 両端から100mmの位置で支持した場合の鋼板応答
Fig. 2. The Response of the Steel Plate Supported at 100mm from Each Edge

図3 両端から200mmの位置で支持した場合の鋼板応答
Fig. 3. The Response of the Steel Plate Supported at 200mm from Each Edge

図4 両端から100mmと中央で支持した場合の鋼板応答
Fig. 4. The Response of the Steel Plate Supported at 100mm from Each Edge and the Center

〈2・4〉 ローパスフィルタによる固有振動の励振回避
振動制御を行う応答性の良い振動制御用電磁石を多数設置することで、可撓性鋼板をほぼ剛体とみすことができ、よって、制御系を簡単に構成することができると考えられる。しかし、制御系を鋼板の振動モードを考慮せずに設計した場合には、振動用電磁石により制御されない高次モードの固有振動により浮上特性が劣化する、いわゆ

るスピルオーバーが生じる可能性がある。そこで筆者らは、このような浮上特性を劣化させる高次モードの固有周波数に遮断周波数を持つノッチフィルタを挿入することで、コントローラその周波数成分に対する感度を低下させ、浮上特性の改善を行ってきた⁽⁶⁾。しかし、可撓性の非常に強い鋼板においては浮上特性に悪影響を及ぼす振動モードは複数存在すると思われる、これらに対して全てフィルタを挿入していくことは実用的ではない。また、製品サイズに応じてフィルタを設計し直すことも好ましくない。

そこで本論文では、雑音除去に必要な周波数よりもさらに遮断周波数の低いローパスフィルタを挿入し、高次モードによる浮上特性の劣化を防ぐことを試みる。フィルタはAD変換直後に雑音除去用の5次FIR型ローパスフィルタ(遮断周波数500Hz)を挿入し、さらにその後段に浮上特性改善用の遮断周波数の低い34次FIR型ローパスフィルタを挿入する。フィルタの係数は式(2)、式(3)により決定した⁽⁷⁾。

$$k \neq l_f: e_k = \frac{\Omega_c \sin((k - l_f)\Omega_c)}{\pi (k - l_f)\Omega_c} \dots\dots\dots (2)$$

$$k = l_f: e_k = \frac{\Omega_c}{\pi} \dots\dots\dots (3)$$

ここに k は整数で e_k はフィルタの係数、 l_f は遅れ、 Ω_c は次式で表され、 T_s は制御周期、 f_c は遮断周波数である。

$$\Omega_c = \omega_c T_s, \quad \omega_c = 2\pi f_c \dots\dots\dots (4)$$

本研究では、 $k = 34, l_f = 0$ とし、 f_c は300Hz, 120Hzおよび40Hzとして設計を行った。使用した34次FIR型フィルタの周波数特性を図5に示す。なお、直流ゲインを

図5 使用したローパスフィルタの周波数特性
Fig. 5. Frequency Characteristics of FIR LPF

ほぼ1とするために、 e_l を調整してある。また、ここではフィルタの遅れが無い様に遅れ係数を $l=0$ と設定したが、多少の遅れを持たせた方がフィルタの遮断特性は向上し、また、直線位相特性も得られる。しかし実験において、フィルタの遅れが $2\text{msec}(l_f=4)$ 程度になると浮上特性に悪影響を及ぼすようになった。

3. 磁気浮上実験

〈3.1〉 実験機の構成 速度成分のみをフィードバックした振動制御用電磁石を用いた磁気浮上系の浮上特性、および、ローパスフィルタを用いることで高次固有振動の励振が抑制されることを確かめるために、実スケールの約10分の1の大きさの実験機において可撓性鋼板の磁気浮上実験を行った。実験機の写真を図6に、また、実験機の構成の概要を図7に、鋼板上の電磁石の配置を図8に示す。

図6 実験機の写真

Fig. 6. Picture of the Experimental Machine

図7 実験機の構成

Fig. 7. Configuration of the Experimental Machine

図8中、Mag1からMag4が支持制御電磁石、Mag5は振動制御用電磁石である。ギャップ長 x の測定は各電磁石の直下に配置されたうず電流型非接触ギャップセンサにより行い、この値を用いて電流指令値 i^* をパーソナルコンピュータにおいて算出する。コイル電流は絶縁型電流

図8 鋼板と電磁石の配置

Fig. 8. Location of Electromagnets and a Steel Plate

センサにより測定し、アナログ回路により電流マイナーループが構成され、各電磁石が独立にPWM制御される。

実験機の電源と制御器の諸元を表1に示す。また、実験に用いた電磁石の寸法を図9に示す。支持制御磁石では支持質量を支えるだけの十分な支持力を出す必要があるのに対して、振動制御用電磁石では速い応答性が要求されるために、支持制御電磁石に対して小型のものが望ましいと考えられるが、本実験では同じサイズのものをを用いている。

表1 電源および制御器の仕様

Table 1. Specifications of Power Source and Controller

電源	形式	単相インバータ
	直流電圧	$\pm 40\text{V}$
	キャリア周波数	20kHz
	ゲート信号	PWM
制御器	CPU	Pentium (クロック 100[MHz])
	制御周期	0.50ms
	A/D, D/A	12bit

図9 実験機における電磁石の寸法

Fig. 9. Size of Electromagnet in the Experimental Machine

〈3.2〉 制御系の構成 支持磁石制御系のブロック図を図10に示す。振動制御用電磁石では、PID制御の代わりに速度成分のみをフィードバックする。

図 10 制御系のブロック図

Fig. 10. Block Diagram of the Control System

制御系はカスケード構造をしており、メインループで鋼板の運動制御を、マイナーループで電流の安定化を行っている。これにより電磁石の非線形性や遅れの鋼板運動制御への影響を小さくすることが可能となり⁽⁵⁾、また、電流を制御の状態変数から外すことで制御系の簡略化を計っている。

吸引力指令値 f_m^* の算出には式 (5) に示すような PID 制御を行っており、本実験では各電磁石が支持すべき等価質量 m_e は既知のものとして与えてある。

$$f_m^* = k_p x_d(k) + k_d \frac{x_d(k) - x_d(k-1)}{\tau} + k_i \sum \tau x_d(k) + m_e g \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 k_p, k_i, k_d は制御係数、 x_d はギャップ長 x とギャップ指令値 x_{ref} の差、 τ は制御周期である。以下の実験においては、支持磁石の制御係数は $k_p = 17.75 \text{ N/m}$ 、 $k_i = 2000 \text{ N/m} \cdot \text{s}$ 、 $k_d = 5.65 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 、 $\tau = 0.5 \text{ ms}$ 、 $x_{ref} = 3 \text{ mm}$ としてある。また、式 (1) で表される振動制御用電磁石の制御係数 k_{vib} は $k_{vib} = 0.5 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ とした。

固定された電磁石群に対して移動を伴う鋼板を考えると、等価質量 m_e の値は時々刻々変化していくことになるが、その様な変化に対しては、積分制御を強めるか、ギャップ長 x より等価質量 m_e の値を補償し直す方法⁽⁸⁾などが考えられる。

吸引力指令値 f_m^* から電流指令値 i^* の算出には、式 (6) に示すような非線形関係式を用いており、ここに、 μ_0 は真空の透磁率、 N はコイルの巻数、 S_F は磁極断面積である。

$$i^* = x \sqrt{\frac{f_m^*}{\alpha}}, \quad \alpha = \frac{\mu_0 N^2 S_F}{4} [\text{Nm}^2/\text{A}^2] \dots \dots \dots (6)$$

通常の磁気浮上系において本来非線形な電磁石の特性を動作点まわりで線形化したモデルを用いた場合、動作点が平衡点から大きく外れた時の安定性を確保するためにギャップへの重みを大きくとった制御が行われるが、可撓性の強い鋼板においてはこのような制御によって鋼板の固有周波数領域でもハイゲインとなり、鋼板の固有振動が励振されてしまう可能性がある。そこで、本研究では電流指令値 i^* の算出において式 (6) に示したような非線形

関係式を用いることで、広いギャップ長範囲で鋼板運動を安定化することを図っている。

(3.3) 実験結果 この様な実験機を用いて、可撓性鋼板の磁気浮上支持実験を行った。吸引力指令値 f_m^* の算出の前段に挿入した 34 次 FIR 型ローパスフィルタとして、遮断周波数 $f_c = 300 \text{ Hz}$ のフィルタを挿入した場合のギャップ応答を図 11 に、そのパワースペクトル密度 (PSD) を図 12 に示す。また、遮断周波数 $f_c = 120 \text{ Hz}$ のフィルタを挿入した場合のギャップ応答とそのパワースペクトル密度を図 13、図 14 にそれぞれ示す。ここに、ギャップ応答とは全ての振動モードが可観測である鋼板端部 (Mag1, 2 側) における鋼板応答である。

本実験における支持制御電磁石は 1 次の固有振動の節の近くに配置されているために 1 次固有振動モードは不可制御となるが、振動制御用電磁石がこのモードを可制御な位置に配置されているために、1 次の固有モードは発散せずに制御されている。振動制御用電磁石を用いない場合は、不可制御である 1 次モードが抑制されずに、不安定な浮上特性となりやすい⁽⁶⁾。

遮断周波数 $f_c = 300 \text{ Hz}$ のローパスフィルタを用いた場合、非接触支持は維持されているものの、10 Hz 前後の 1 次振動モードから、200 Hz 以上の高次振動モードが鋼板に生じていることが伺える。これに対して遮断周波数 $f_c = 120 \text{ Hz}$ のローパスフィルタを用いた場合、これらのモードは生じず、安定した浮上が実現されていることが分かる。

カスケード構造を構成した本磁気浮上系においても、電流指令値 i^* に対する電磁石電流 i は PWM のゲインおよび直流電圧に依存してやや遅れること、鋼板内に生じるうず電流の影響で電磁石電流 i から鋼板への電磁石吸引力 f_m への伝達関数は 1 次遅れ系となること⁽⁹⁾、などの理由により、現在の実験装置においては 100 Hz 以上の高次振動モードを電磁石により制御することは難しいと考えられる。この様な高周波振動の情報をローパスフィルタでカットすることにより、安定した浮上を達成できていると言える。

遮断周波数 $f_c = 40 \text{ Hz}$ のローパスフィルタを用いた場合は、低周波領域でも大きな位相遅れが生じているために安定した浮上は実現されなかった。本研究では、初期ギャップ x_{int} とギャップ指令値 x_{ref} が異なるために、IIR 型フィルタではなく FIR 型フィルタを用いたが、この場合、遮断周波数 f_c の低いフィルタを構成した場合の周波数特性に注意する必要がある。

4. 結言

鉄鋼業分野において製品品質の向上につながると考えられる可撓性鋼板の磁気浮上搬送システムについて、その問題点を示し検討を行った。

固定された電磁石に対して鋼板が移動して行くような本磁気浮上システムにおいては、鋼板の連続・多点支持系を

図 11 300Hz-LPF を用いた場合のギャップ応答
Fig. 11. Gap Response of the Plate with 300Hz LPF

図 12 300Hz-LPF を用いた場合のギャップ応答の PSD
Fig. 12. PSD of Gap Response with 300Hz LPF

図 13 120Hz-LPF を用いた場合のギャップ応答
Fig. 13. Gap Response of the Plate with 120Hz LPF

図 14 120Hz-LPF を用いた場合のギャップ応答の PSD
Fig. 14. PSD of Gap Response with 120Hz LPF

構成することが望ましいと考えられるが、振動制御の観点から、速度成分のみをフィードバックする振動制御用電磁石を多数分散配置した磁気浮上系を提案した。また、剛体モードのみを考慮して制御系を設計した場合、可撓性鋼板の高次振動モードにより浮上特性が劣化する可能性があるが、遮断周波数の低いローパスフィルタを用いることでこれらのモードの影響を低減することを試みた。

これらについて実験機を用いて可撓性鋼板の磁気浮上実験を行い、安定した浮上を実現した。これにより、水平方向への鋼板の移動を伴った可撓性鋼板の磁気浮上搬送システムにおいても、安定した鋼板の非接触支持が可能であることが示唆された。

(平成 8 年 5 月 31 日受付, 平成 8 年 8 月 23 日再受付)

文 献

- (1) 押野谷, 下郷. 「薄板の磁気浮上特性」. 第 2 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp. 63-64, 1990.
- (2) 和嶋, 道岡, 定木, 藤崎, 植山. 「磁気飽和を考慮した鋼板磁気浮上系のモデル化とシミュレーション」. リニアドライブ研究会資料, Vol. LD-93-101, pp. 21-28, 1993.
- (3) 吉橋, 松田, 近藤, 岡田. 「薄平板のセルフセンシング振動制御」. 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 60, No. 578, pp. 76-81, 1994.
- (4) 美多. 「デジタル制御理論」, pp. 81-93. 昭晃堂, 1987.
- (5) 林屋, 瀬戸, 大崎, 正田. 「電流マイナーループを用いた磁気浮上系における浮上特性」. 第 7 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp. 461-466, 1995.
- (6) 林屋, 荒木, 大崎, 正田. 「振動制御用電磁石付加による柔軟鋼板の磁気浮上」. 平成 8 年電気学会全国大会講演論文集, No. 1125 in 5, pp. 194-195, 1996.
- (7) 谷萩. 「デジタル信号処理の理論 2」. コロナ社, 1985.
- (8) H. Hayashiya, J. Seto, H. Ohsaki, and E. Masada. "Control Method for Switching Multi Supporting Magnets in a Magnetic Levitation System of a Flexible Steel Plate". In *proceedings of LDIA '95*, ML-5, pp. 115-118, 1995.
- (9) 山田. 「改訂 交流回路計算法」, pp. 344-348. コロナ社, 1961.

林屋 均 (学生員) 1970 年 6 月 28 日生。1994 年東京大学工学部電気工学科卒。1996 年東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻修士課程終了。同年東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程入学、現在に至る。主として、リニアドライブ、磁気浮上システムの研究に従事。日本学術振興会特

別研究員。

荒木 登

(学生員) 1973 年 4 月 28 日生。1996 年東京大学工学部電気工学科卒。同年東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻修士課程入学、現在に至る。主として、磁気浮上、超電導応用の研究に従事。

大崎 博之

(正員) 1961 年 3 月 12 日生。1983 年東京大学工学部電気工学科卒。1988 年同大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。同年同大学工学部電気工学科助手、1993 年同助教授、現在に至る。主として、リニアドライブ、超電導応用の研究に従事。1988 年 3 月工学博士。IEEE 会員。

J.E.Paddison(非会員)

He was born in Lincoln, England in 1968. He received his Bachelor of Engineering Degree and Doctor of Philosophy from Loughborough University of Technology in 1991 and 1995 respectively. From 1992 until 1993 he was a DAAD Scholar at the Institute of

Robotics and System Dynamics, Germany. He is currently a E.U. Science and Technology Fellow in the Department of Electrical Engineering, The University of Tokyo. Dr Paddison is a Corporate Member of the IMECHE and IEE.

正田 英介

(正員) 1937 年 12 月 9 日生。1960 年東京大学工学部電気工学科卒。1965 年同大学大学院数物系研究科電気工学専攻博士課程修了。同年同大学工学部電気工学科講師、同助教授を経て、1982 年同教授、現在に至る。主として、電気機器及び制御システムの研究に従事。1965 年 3 月工学博士。1992 年度電気学会東京支部長、1996 年度同会長代理。IEEE,VDE,TRB, 日本工学アカデミー会員。