薄鋼板の湾曲磁気浮上装置の検討

丸森 宏樹^{*1}, 米澤 暉^{*1}, 成田 正敬^{*2}, 加藤 英晃^{*3}, 押野谷 康雄^{*4}

Consideration on bent magnetic levitation apparatus for thin steel plate

Hiroki MARUMORI^{*1}, Hikaru YONEZAWA^{*1}, Takayoshi NARITA^{*2},
Hideaki KATO^{*3} and Yasuo OSHINOYA^{*4}^{*1}Department of Mechanical Engineering, Tokai University
4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka-shi, Kanagawa 259-1292, Japan^{*2}Department of Electrical and Electronic Engineering, Tokyo University of Science, Suwa
5000-1 Toyohira, Chino-shi, Nagano 391-0292, Japan^{*3,*4}Department of Prime Mover Engineering, Tokai University
4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka-shi, Kanagawa 259-1292, Japan

Received 19 September 2014

Abstract

In the transport system of a thin steel plate production line, there is a problem that the quality of the plate surface deteriorates over time because the plate is usually in contact with rollers. Accordingly, studies of electromagnetic levitation technology have been carried out. However, when a flexible thin steel plate is targeted for levitation, levitation control becomes difficult because the thin plate undergoes increased flexure. To solve this problem, we proposed a levitation of a flexible thin steel plate that was bent to an extent which did not induce plastic deformation. Bent magnetic levitation apparatus was developed and bending levitation performance of thin steel plate was examined. Thin steel plates with a thickness of 0.18mm, 0.24mm, 0.27mm and 0.30mm were levitated to evaluate the relationship between tilt angle of electromagnets and levitation probability. Furthermore, to elucidate the optimal tilt angle of electromagnets, shapes of steel plates were analyzed using finite difference method and effective tilt angle was estimated. As a result, levitation probability increased by bending a steel plate to the extent that did not exceed natural deflection angle. Also, the optimal tilt angle of electromagnets can be estimated by shape analysis result and matched the experimental result. In developing the bent magnetic levitation apparatus, the optimal tilt angle of electromagnets was verified.

Key words : Magnetic levitation, Vibration control, Optimal control, Thin steel plate, Bending levitation control

1. 緒 言

リニア中央新幹線の営業運転の整備がはじまり磁気浮上技術はより身近なものになってきている。また輸送機械の分野にとどまらず物体を非接触で把持・搬送できる磁気浮上技術は製鉄プロセスラインなどの工業の分野における応用も非常に期待されている。中でも摩擦損失の低減や表面品質の劣化防止という課題に対して注目が集まり、磁気浮上技術の応用による非接触搬送に関する研究が活発になされている (Nakagawa, et al., 2000) (Namerikawa, et al., 2006) (大路他, 2011) (佐藤, 鳥居, 2008)。しかし磁気浮上技術に関する研究の多くは浮上対象が剛体と考慮できる物体について検討されており、複雑な変形を起こす柔軟体の磁気浮上についての報告は少ない。

当研究グループでは浮上が困難である薄鋼板に着目し、電磁石による吸引力を用いた薄鋼板磁気浮上システム

No.14-00471 [DOI: 10.1299/transjsme.14-00471], J-STAGE Advance Publication date : 2 February, 2015

^{*1} 学生員, 東海大学大学院 工学研究科 (〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 4-1-1)^{*2} 正員, 諏訪東京理科大学 工学部 (〒391-0292 長野県茅野市豊平 5000-1)^{*3} 正員, 東海大学 工学部^{*4} 正員, フェロー, 東海大学 工学部

E-mail of corresponding author: hkato@tokai-u.jp

Fig. 1 Schematic illustration of electromagnet unit

について検討を行なってきた（押野谷，小林，1994）．薄鋼板を浮上させる場合，鋼板自体が変形することにより複雑な振動が発生し浮上制御は困難となる．そのため，これまでに鉛直方向から鋼板を吊り下げるように設置した電磁石に加え，鋼板端部のエッジ部分に設置した電磁石にて水平方向から張力を印加するシステムの開発（押野谷他，2002）や電磁石の吸引力が及ばない範囲に永久磁石を設置する装置の提案（押野谷，石橋，2001）および永久磁石の最適な配置探索（成田他，2013）を行い浮上安定性の向上について継続的に検討してきた．しかしこれらの手法は装置や制御システムが複雑になるばかりでなく，設備投資やランニングコストが増加するという課題もあった．

薄鋼板を浮上させる場合，電磁石の吸引力が印加されない場所にたわみが生じるため，限られた電磁石の個数で鋼板を安定して浮上させることは困難であり，浮上中のたわみを抑制することが浮上安定性の向上につながると考えられる．そこで本研究では浮上の障害となっていた薄鋼板の柔軟性を積極的に利用し，対象が塑性変形せず浮上終了後の材料特性に影響を与えない程度に湾曲させることで最小限の電磁石のみによって浮上させる磁気浮上装置を提案する．先に述べた製鉄プロセスの搬送ラインでは，近年極めて薄い鋼板の製造も可能となり，多岐にわたる需要から表面品質を劣化させずに浮上搬送させることが重要であるが，この課題に対する有効な対策は講じられていない．

本論文で提案する電磁石に傾斜を設けることで鋼板を湾曲させる浮上システムを切板搬送ラインなどに適用することで，数多くの電磁石を用いて高度な制御理論により高い浮上性能を実現する従来の手法よりも簡易かつ低コストで製品の品質向上が期待できる．製鉄プロセスラインでは板厚やサイズの異なる鋼板を取り扱う必要があるが，これらのパラメータに対する磁石配置と湾曲度合いの最適化を行うことで，安定した湾曲磁気浮上システムを構築することが可能となる．本研究では切板の非接触搬送の基礎研究として，四辺自由端の長方形薄鋼板を曲げて浮上させる湾曲磁気浮上システムを検討する．

前述のとおり鋼板を湾曲浮上させる場合，その長さ，幅，厚さ，材質などを総合的に考慮して最適な電磁石の設置位置や湾曲度合いを理論的に求める必要がある．本論文ではその基礎検討として鋼板のサイズ（長さ，幅）が同一であり厚さのみが変化した場合を対象とする．なお検討の手法として有限差分法（FDM）を用い湾曲浮上中の静たわみ解析を行う．これにより算出された鋼板形状から評価値を定義し，さらに鋼板を一自由度系としてモデル化した浮上制御実験結果との比較を行い，本装置設計に対する基礎資料の提示を行う．

2. 薄鋼板の湾曲浮上装置

2・1 電磁石ユニットの配置

図1に電磁石ユニットの概略図を示す．電磁石ユニットは2つの電磁石と1つの渦電流式非接触変位センサから構成されている．電磁石はE型フェライトコアに直径0.5mmのエナメル線を1005回巻いたものである．この

Fig. 2 Arrangement of electromagnets

電磁石の電気回路は直列結合されており、変位センサを中央に挟むように配置してある。なお電磁石の磁場による変位センサへの影響を計測した結果、測定誤差は1%以下であり制御系に及ぼす影響はほとんどないことを確認している（押野谷他，1996）。

本研究では柔軟な長方形亜鉛めっき鋼板（材質 SS400，長さ $a = 800$ mm，幅 $b = 600$ mm）を浮上対象とする。薄鋼板は柔軟連続体ゆえに限られた個数の電磁石では静的なたわみや高次モードの弾性振動を十分抑制することができず，安定浮上は困難となる。数多くの電磁石を利用すればこれらの問題が解決可能となるが，前述の通りコストやメンテナンスの面などから実用的でない。そこで鋼板を支持するのに最低限必要である4つの電磁石ユニットを周囲に配置する。さらに鋼板の重心部分を支持するように鋼板中央部に電磁石ユニットを設置し，合計5か所から鋼板を吊り下げるようにして非接触支持する。

図2に x - y 平面における電磁石ユニットの設置位置を示す。鋼板の自重と5つの電磁石ユニットに印加される吸引力が釣り合うことで鋼板は浮上する。本研究では周囲の電磁石ユニット（No.1～4）の吸引力を増加させ，中央の電磁石ユニット（No.5）の吸引力を低下させることで鋼板を湾曲浮上させる。そのため湾曲させる度合いが大きくなるに伴い，鋼板中央の電磁石ユニット No.5 による支持力は小さくなり，No.1～4 の支持力が支配的となる。よって x 軸に見た電磁石位置は湾曲浮上させた際の安定性向上のため薄鋼板を電磁石ユニット No.1（もしくは No.2）と No.3（もしくは No.4）の2点で支持された両端突出単純支持はりとして考え，はり全体に生じる静的たわみ量の総和が最小となる位置とした。なお一様断面はりの断面二次モーメントは板の剛性と等価となるようにした。電磁石ユニットの吸引力は鋼板の面積に対して非常に狭い範囲に作用するため1点に力が加わると見なし，各電磁石ユニットの中央部にてピン支持とした。

同様に y 軸に見た電磁石位置は薄鋼板を電磁石ユニット No.1（もしくは No.3）と No.2（もしくは No.4）に加え中央の電磁石ユニット No.5 の3点で支持された両端突出単純支持はりとして考える。各電磁石ユニットでの支持力が等しくなるように，3点支持された支持力の比が2:1:2になる位置とした。

2・2 電磁石ユニットの吸引力

鋼板を湾曲させた際の各電磁石ユニットに印加する吸引力については，鋼板を x 軸に見た場合のはりと見なし算出した。電磁石ユニット No.1（もしくは No.2），No.5，No.3（もしくは No.4）の3点で支持された両端突出単純支持はりにおいて，外側の支持点 No.1～No.4 におけるたわみ角 θ ，および中央の支持点 No.5 での支持力 F_5 の関係は次式で表される。なお F_5 を求める(1)式は両端突出単純支持はりに等分布荷重が作用した場合と中央集中荷重が作用した場合の重ね合わせにより求めた。

$$F_5 = \frac{2ah}{3l^2} \left\{ \rho g l (l^2 - 6d^2) - 2Eh^2 \theta \right\} \quad (1)$$

Fig. 3 Schematic illustration of experimental apparatus

また鋼板の質量より，外側の支持点 No.1～No.4 での支持力 $F_1 \sim F_4$ は次式となる．

$$F_1 = F_2 = F_3 = F_4 = \frac{\rho a h g b - F_5}{4} \quad (2)$$

ここで， h ：板厚 [m]， ρ ：鋼板の密度 [kg/m^3]， g ：重力加速度 [m/s^2]， l ： x 軸に見た電磁石ユニット No.1 と No.3，あるいは No.2 と No.4 の距離 [m]， d ： x 軸に見た電磁石ユニット No.1, No.2, No.3, No.4 から鋼板端部までの距離 [m]， E ：鋼板のヤング率 [N/m^2] である．なお予備実験により，各電磁石ユニットにより発生する支持力の実験値と計算値は誤差 10 % 以下であることを確認している．

さらに電磁石ユニット No.5 の支持力 $F_5 = 0$ のとき，No.1～No.4 のみで鋼板を支持した際の支持点におけるたわみ角を自然たわみ角 θ_{na} と定義し，次式で表す（社団法人土木学会，1986）．

$$\theta_{na} = \frac{\rho g l}{2 E h^2} (l^2 - 6 d^2) \quad (3)$$

2・3 湾曲磁気浮上装置

製作した湾曲磁気浮上装置の概略図を図 3，写真を図 4 に示す．電磁石ユニット No.1～4 は図 4 (b) のように水平方向に移動させ，さらに電磁石の傾斜角 θ を調整できる機構とし，傾斜角 θ で鋼板は湾曲するものとする．また薄鋼板の湾曲度合いに合わせて電磁石ユニット No.5 は図 4 (c) のように上下方向に移動することができる．なお電磁石ユニット No.1～4 の傾斜角 θ を変更しても鋼板に対し吸引力の作用する位置が一定になるように，電磁石ユニット No.1～4 は鋼板の自然なたわみ形状をもとに水平方向位置を調整する．電磁石の傾斜角 θ に対する鋼板形状を図 5 に示す．

3. 有限差分法を用いた薄鋼板のたわみ解析

3・1 解析モデル

薄鋼板の安定浮上を実現するにあたり，最適な湾曲の度合いに関して検討する必要がある．そこで薄板全体を面で支持した状態を理想的な鋼板形状と考え，理想形状と定義する．なお理想形状は鋼板を x 軸に見た場合のはりと考え，一次元のはりのたわみ形状を鋼板サイズに押出したものとする．

鋼板を湾曲させた際の理想形状に対する総たわみ量を評価するために，重力が作用する際の薄鋼板のたわみ量を計算し，湾曲浮上させた鋼板形状を算出する．薄鋼板の静的なたわみの方程式は次式で示される．

(a) Bent thin steel plate being levitated (Front view)

(b) Tilt angle and horizontal adjustment mechanism of electromagnets (Electromagnet unit No.1~4)

(c) Vertical adjustment mechanism of electromagnets (Electromagnet unit No.5)

Fig. 4 Photograph of experimental apparatus

(a) $\theta = 0^\circ$

(b) $\theta = 5^\circ$

(c) $\theta = 10^\circ$

(d) $\theta = 15^\circ$

(e) $\theta = 20^\circ$

(f) $\theta = 25^\circ$

Fig. 5 Relationship between tilt angle of electromagnets and shape of the steel plate

$$D\nabla^4 z = \rho gh - f \quad (4)$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad \nabla^4 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4}$$

ここで ν : ポアソン比, x : 薄鋼板の長手方向の座標 [m], y : 薄鋼板の短手方向の座標 [m], z : 薄鋼板の鉛直方向変位 [m], f : 電磁石ユニット No.5 により鉛直方向から薄鋼板に加わる単位面積あたりの吸引力 [N/m^2] である.

薄鋼板は電磁石ユニット No.1~4 で単純支持するものとし, 式 (1) より No.1~4 における鋼板の曲げ角度が θ になるよう支持力 F_5 を算出する. 式 (1) より求めた F_5 が作用する鋼板部分は解析モデルにおける節点に分布荷重として加わると仮定して f を求めた. 吸引力 f を電磁石ユニット No.5 に作用させ, 式 (4) を用いて薄鋼板のたわみを FDM によって計算する. このとき, 差分解析格子の大きさは鋼板のたわみ形状が十分把握でき, かつ計算時間を考慮し $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ とした. なお解析モデルおよび手法の妥当性については既報 (成田他, 2013) にて確認している.

3・2 解析結果と評価値

解析結果の一例として長さ $a = 800 \text{ mm}$, 幅 $b = 600 \text{ mm}$, 板厚 $h = 0.20 \text{ mm}$, 0.16 mm , 0.13 mm の薄鋼板に対し, 電磁石ユニット No.1~4 の電磁石位置における鋼板の曲げ角度が 10° になるように f を入力した鋼板形状を図 6 (a), (b), (c) に示す. ここで, 図 6 (d) は鋼板の曲げ角度が 10° における x 軸方向のたわみを拘束した理想形状である. なお各図の右上には理想形状に対する鋼板のたわみ量を示している. ここで理想形状に対する総たわみ量を評価するために評価値 j を次式のように定義した.

$$j = \frac{\sum_{i=1}^N |z_i - z_0|}{h \cdot N} \quad (5)$$

z_i : 薄鋼板の各解析点における z 成分の変位 [m], z_0 : 理想形状の z 成分の変位 [m], N : 解析点の総数 ($N = 4941$) である.

図 6 より板厚が薄くなる程たわみ量が増え理想形状からの総たわみ量が大きくなり, 評価値 j も増えていることが分かる. 同じ鋼板の曲げ角度 10° において板厚が変化すると浮上特性も変化すると考えられるが, 次章では実験と j を比較し, j による最適な電磁石の曲げ角度について考察していく.

4. 薄鋼板の湾曲浮上システム

4・1 制御装置

制御システムの概略を図 7 に示す. 薄鋼板を 5 か所の電磁石ユニット (No.1~5) により吊り下げるようにして非接触支持するために, 鋼板の変位を 5 個の渦電流式非接触変位計により検出する. また検出した変位をデジタル微分により速度に変換する. さらに電磁石コイル電流を測定用の外部抵抗より検出し, 合計 15 個の観測値を A/D コンバータから DSP に入力し制御則を計算する. D/A コンバータから電流供給用アンプへ制御電圧を出力し, 5 個の電磁石吸引力を制御し, 鋼板を電磁石表面から 5 mm の位置に磁気浮上させる.

4・2 鋼板のモデル化

本論文では鋼板のモデル化として設計が簡易な一自由度モデルを適用する (Hasegawa, et al., 2006). 一自由度モデルでは各電磁石ユニットで検出した変位, 速度, 電磁石コイル電流値をその電磁石ユニットに対してのみフィードバック制御を行う. そこで図 8 に示すように鋼板を 5 つの仮想質量に分割し, それぞれを集中定数系としてモデル化する.

電磁石ユニットからの静的吸引力によって鋼板を支持すれば一定の距離に保たれる平衡状態 Z_0 が存在する. そこからの鉛直方向の変位を z_n とすると, 運動方程式は以下ようになる. なおすべての記号において添え字 n は電磁石ユニットの No.1~5 を示す ($n = 1 \sim 5$).

$$m_n \ddot{z}_n = 2f_n \quad (6)$$

Fig. 6 Shape analysis of steel plate ($\theta = 10^\circ$)

Fig. 7 Electromagnetic levitation control system

Fig. 8 Theoretical model of levitation control

ここで m_n : 鋼板質量 m を仮想的に 5 分割した質量 [kg], f_n : 電磁石 1 個あたりの吸引力の変動値 [N] である。

線形化近似を行った電磁石の吸引力および電磁石コイルに流れる電流に関する方程式は以下のようになる。

$$f_n = \frac{F_n}{Z_0} z_n + \frac{F_n}{I_n} i_n \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt} i_n = -\frac{L_{eff} I_n}{L_n Z_0^2} \frac{d}{dt} z_n - \frac{R_n}{2L_n} i_n + \frac{1}{2L_n} v_n \quad (8)$$

電磁石コイルのインダクタンスは鋼板表面と電磁石表面との距離に反比例する成分と磁束の漏れに相当する成分の和で表すことが一般に知られている (社団法人日本機械学会, 1995). そこで平衡浮上状態における電磁石 1 個あたりのコイルのインダクタンス L_n [H] を以下のように表す。

$$L_n = \frac{L_{eff}}{Z_0} + L_{lea} \quad (9)$$

ここで F_n : 各電磁石ユニットの 2 個の電磁石から発生する定常的な吸引力 [N], Z_0 : 平衡状態における電磁石ユニット表面と鋼板表面との距離 [m], I_n : 平衡状態における定常的な電磁石コイルの電流 [A], i_n : I_n からの変動値 [A], L_n : 平衡状態における電磁石コイル 1 個あたりのインダクタンス [H], R_n : 電磁石ユニットの抵抗値 [Ω], v_n : 電磁石コイルの定常電圧からの変動値 [V], L_{eff} : 電磁石 1 個あたりの鋼板へ有効に作用するインダクタンス [Hm], L_{lea} : 電磁石 1 個あたりの漏れ磁束 [H] である。

また図 3 の Front view にて示した通り, 周囲の電磁石を傾け, 鋼板のたわみ形状に合わせて中央の電磁石の位置を調節することにより鋼板を湾曲させるため, 鋼板の湾曲形状にかかわらず電磁石吸引力は鋼板に対して常に垂直に作用する。従って鋼板を湾曲させた際のモデル化についても近似的に一自由度系としてモデル化を行う。

4・3 制御系設計

状態変数として鋼板の変位 z_n , 速度 $\dot{z}_n$ および電流 i_n を採用し, 式 (6) ~ (9) を整理して以下のような状態方程式を得る。

Table 1 Natural deflection angle

Plate thickness h [mm]	Natural deflection angle θ_{na} [°]
0.18	19.2
0.24	10.8
0.27	8.5
0.30	6.9

$$\dot{z}_n = A_n z_n + B_n v_n \quad (10)$$

$$z_n = [z_n \quad \dot{z}_n \quad i_n]^T, \quad A_n = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{2F_n}{m_n Z_0} & 0 & \frac{2F_n}{m_n I_n} \\ 0 & -\frac{L_{eff} I_n}{L_n Z_0^2} & -\frac{R_n}{2L_n} \end{bmatrix}, \quad B_n = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{2L_n} \end{bmatrix}^T$$

制御系を離散時間系で構成するため、離散時間系の最適制御理論に基づいて最適制御則を求める。離散時間系の評価関数は次のように表される。

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} [z_n(k)^T Q_n z_n(k) + r_n v_n(k)^2] \quad (11)$$

ここで Q_n : 変位 z_n 、速度 $\dot{z}_n$ および電流 i_n に関する重み係数を要素とする行列、 r_n : 制御入力に関する重み係数である。 J を最小にするよう制御則を決定した。

5. 湾曲浮上実験

5・1 実験方法

浮上対象として市場で流通しており薄く柔軟な $h=0.18$ mm, 0.24 mm, 0.27 mm, 0.30 mm の鋼板を使用し、電磁石の傾斜角 θ による浮上性能について検討する。ここで 2・1 節にて示した各板厚の自然たわみ角 θ_{na} は表 1 の通りである。電磁石の傾斜角 θ は前掲図 5 のように 0° から 25° まで基本的に 5° ごとに変更し、特に特性の確認が必要な場合は任意の角度に設定して浮上実験を行う。各電磁石角度に対して 50 回浮上実験を行い、30 秒以上浮上する場合を浮上成功として浮上確率を百分率で表す。なお 30 秒間浮上する場合は実用上問題とならない 10 分以上浮上継続が可能であることを予備実験により確認している。重み係数は試行錯誤的に探索し、板厚ごとに $\theta=0^\circ$ の変位標準偏差が等しくなるものを採用した。本研究における各パラメータの値を表 2, 3 に示す。

5・2 電磁石の傾斜角 θ に対する浮上性能

図 9 に板厚 $h=0.18$ mm, 0.24 mm, 0.27 mm, 0.30 mm における浮上確率の結果を示す。横軸は電磁石の傾斜角 θ である。図 9 には表 1 にて示した自然たわみ角 θ_{na} を破線で示した。本検討において最も薄い鋼板である (a) $h=0.18$ mm に着目すると $\theta=0^\circ$ での浮上確率は 58 %であったが、 θ の増加に伴い浮上確率は増加し、 $\theta=15^\circ$ で最大の 98 %となった。さらに自然たわみ角 $\theta_{na}=19.2^\circ$ よりも θ を大きくすると浮上確率は低下していき $\theta=25^\circ$ で 0 % (浮上不可能) となった。

Table 2 Parameters and values

Parameter	Value
ρ	7500 kg/m ³
l	0.43 m
d	0.085 m
E	206 GPa
ν	0.3
Z_0	5×10^{-3} m
R_n	21.0 Ω
L_{eff}	2.55×10^{-4} Hm
L_{lea}	0.090 H

Table 3 Weighting coefficients

Parameter	Value
Q_n ($h = 0.18$ mm)	diag(7.2×10^4 , 1.0×10^{-1} , 2.0×10^0)
r_n ($h = 0.18$ mm)	2.9×10^{-3}
Q_n ($h = 0.24$ mm)	diag(1.5×10^5 , 5.0×10^{-2} , 1.0×10^2)
r_n ($h = 0.24$ mm)	1.0×10^{-1}
Q_n ($h = 0.27$ mm)	diag(1.5×10^5 , 5.0×10^{-2} , 5.5×10^1)
r_n ($h = 0.27$ mm)	1.0×10^{-1}
Q_n ($h = 0.30$ mm)	diag(1.4×10^5 , 1.0×10^{-1} , 2.0×10^0)
r_n ($h = 0.30$ mm)	1.5×10^{-1}

Fig. 9 Relationship between tilt angle of electromagnets θ , levitation probability and evaluation value j

ここで図 10 (a) ~ (c) に $h = 0.18$ mm の鋼板を $\theta = 0^\circ$, 15° , 23° で浮上させた際の時刻歴波形と振幅スペクトルの一例を示す. なお各波形は電磁石ユニット No.1 のものであり, 他の電磁石ユニットにおいても同じ傾向を示すことを確認している. また時刻歴波形の縦軸の 0 は鋼板と電磁石表面との距離が 5 mm の位置に相当する. ここでこれらの応答が比較的不規則な性質を有していることから標準偏差にて評価を行う. 標準偏差は 8 秒間の時刻歴応答より算出しており, その際過渡状態の影響を除くため浮上から約 10 秒後に測定を開始した. それぞれの傾斜角で 10 回ずつ測定した変位標準偏差の平均値は $\theta = 0^\circ$ が 0.040 mm, $\theta = 15^\circ$ が 0.038 mm, $\theta = 23^\circ$ が 0.062 mm であり, 浮上確率が最大となる $\theta = 15^\circ$ が最も振動が抑制されていることが確認できる. また振幅スペクト

Fig. 10 Time histories and amplitude spectrums ($h = 0.18$ mm)

ルに着目すると $\theta = 0^\circ$ では 3 Hz, 14 Hz, 80 Hz, 94 Hz などの周波数が卓越していることを確認できるが, $\theta = 15^\circ$ ではそれらの振動が抑制されており, これにより浮上性能が向上したと考えられる. なお $\theta = 15^\circ$ においても 80 Hz 付近の振動が発生しているがこれは鋼板 x 軸方向の鋼板端部から電磁石ユニットまでの領域の弾性振動によるものであることを確認している. さらに自然たわみ角 θ_{na} よりも鋼板を湾曲させた $\theta = 23^\circ$ では 10 Hz 以下の振動が顕著に表れ, これにより浮上確率が低下したと考えられる. 図 9 (b) ~ (d) に示した浮上結果より, 板厚の大きい鋼板を使用した浮上においても同様に, 電磁石の傾斜角 θ が θ_{na} を超えない程度に設定して鋼板を浮上させることにより, $\theta = 0^\circ$ よりも浮上確率が向上した.

5・3 浮上確率と評価値 j

各板厚における評価値 j を図 9 に青い線で示す. 傾斜角 θ の増加にともない評価値 j は減少している. また θ が θ_{na} より大きくなり浮上確率が低下する場合でも j は増加していることが分かる. 前述の通り j はその値が低くなるほど, 理想形状からのたわみ量の総和が小さいことを表しているが, 理想形状により近くなるような電磁石の傾斜角度であれば鋼板の各部分でのたわみが減少し, 振動が抑制されることから浮上確率は高くなる.

ここで浮上確率が最も高くなる電磁石の傾斜角 θ と解析より評価値 j が最小となる電磁石の傾斜角 θ を整理し図 11 に示す. 板厚 $h = 0.18$ mm, 0.24 mm, 0.27 mm, 0.30 mm の実験により浮上性能が最も良かった θ と解析による評価は概ね一致し, 評価値 j が最小となる電磁石の傾斜角 θ で鋼板を浮上させることにより, 安定した浮上状態を実現できることが確認できた. 本論文では比較検討を行う都合上 $\theta = 0^\circ$ の振動がどの板厚でも同等になるような重み係数を採用しているが, 上記で得られた最適な傾斜角 θ において最高性能となる重み係数を求めれば本論文のように比較的簡単なシステムであっても浮上確率が 100 % となり実用上問題無いといえる.

Fig.11 Relationship between plate thickness h and optimal tilt angle of electromagnets θ

6. 結 言

本研究では対象が塑性変形しない程度に薄鋼板を湾曲させることで最小限の電磁石のみにて安定した磁気浮上を可能とする装置の提案を行った。薄鋼板を湾曲浮上させる場合、サイズや材質などを総合的に考慮して最適な電磁石の設置位置や湾曲度合いを決定する必要がある。本論文ではその基礎検討として長さ、幅が一定であり、厚さの異なる薄鋼板を対象とし静たわみ解析と鋼板を一自由度系としてモデル化した浮上制御実験から最適な鋼板の湾曲度合いに関して考察を行った。本研究で得られた結論は以下の通りである。

- (1) 従来のように湾曲させずに鋼板を浮上させた場合では薄い板厚であるほど浮上安定性は低下する傾向にあるが、本論文で提案した湾曲磁気浮上システムではこのようなより薄い厚さの鋼板に対して極めて高い効果を発揮することが分かった。
- (2) FDM を用いた静たわみ解析の結果から、5つの電磁石ユニットで鋼板を支持した場合にその吸引力が及ばない範囲のたわみを最も抑制できる鋼板の湾曲度合いが推定できた。さらに、このときの湾曲度合いにて浮上制御実験を行うと振動は抑制され、浮上性能が向上することを確認した。
- (3) 各板厚において鋼板の自然たわみ角を超えない程度の湾曲度合いであれば安定した浮上を実現できることを実験的に示した。これにより薄鋼板の厚さが変化した場合でも簡易的に最適な湾曲度合いを推定することが可能となった。

今後は鋼板の挙動を厳密にモデル化した場合やロバスト性を有する制御理論を適用した場合の性能についても検討を行っていく。さらに、各種薄鋼板に対する最適な電磁石の設置をリニアモータなどのアクチュエータを用いて自動的に行う位置決め制御の実現も行う。

文 献

- Hasegawa, S., Oshinoya, Y. and Ishibashi, K., Consideration on Elastic Vibration Control of a Magnetically Levitated Thin Steel Plate Using Sliding Mode Control, JSME international journal, Series C, Vol.49, No.4 (2006), pp.983–993.
- Nakagawa, T., Hama, M. and Furukawa, T., Study of magnetic levitation technique applied to steel plate production line, Transactions of the IEEE on magnetics, Vol.36, No.5 (2000), pp.3686–3689.
- Namerikawa, T., Mizutani, D. and Kuroki, S., Robust H_∞ DIA control of levitated steel plates, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.126, No.10 (2006), pp.1319–1324.
- 成田正敬, 長谷川真也, 押野谷康雄, 永久磁石を用いた薄鋼板のハイブリッド磁気浮上システム, Journal of the

Magnetics Society of Japan, Vol.37, No.2 (2013), pp.29–34.

大路貴久, 苗真, 高見典幸, 飴井賢治, 作井正昭, 交流アンペール式リニア誘導浮上搬送装置の磁極配置とAl薄板の浮上特性, 日本 AEM 学会誌, Vol.19, No.3 (2011), pp.550–556.

押野谷康雄, 石橋一久, 長方形薄鋼板の磁気浮上制御装置の開発, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.67, No.661 (2001), pp.2855–2862.

押野谷康雄, 小林学, 周辺自由板の非接触支持制御, 日本機械学会第 71 期通常総会講演論文集 (1994), pp.578–580.

押野谷康雄, 石橋一久, 関原孝宣, 磁気浮上長方形薄鋼板の搬送制御 (弾性振動を抑制した鋼板の水平方向慣性力に対する非接触制御機構の提案), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.68, No.669 (2002), pp.1428–1434.

押野谷康雄, 小林学, 丹野謙一, 相対する二辺が梁で補強された長方形薄鋼板の磁気浮上最適制御, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.62, No.600 (1996), pp.3067–3073.

佐藤彦彦, 鳥居肅, リアルタイム振動解析手法を用いた薄鋼板センサレス支持制御, 電気学会論文誌 D, Vol.128, No.3 (2008), pp.267–273.

社団法人土木学会, 構造力学公式集(1986), p.156.

社団法人日本機械学会, 新技術融合シリーズ第一巻磁気軸受の基礎と応用(1995), pp.24–29.

References

Hasegawa, S., Oshinoya, Y. and Ishibashi, K., Consideration on Elastic Vibration Control of a Magnetically Levitated Thin Steel Plate Using Sliding Mode Control, JSME international journal, Series C, Vol.49, No.4 (2006), pp.983–993.

Nakagawa, T., Hama, M. and Furukawa, T., Study of magnetic levitation technique applied to steel plate production line, Transactions of the IEEE on magnetics, Vol.36, No.5 (2000), pp.3686–3689.

Namerikawa, T., Mizutani, D. and Kuroki, S., Robust H_{∞} DIA control of levitated steel plates, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.126, No.10 (2006), pp.1319–1324.

Narita, T., Hasegawa, S. and Oshinoya, Y., Hybrid electromagnetic levitation system for thin steel plates using permanent magnets, Journal of the Magnetics Society of Japan, Vol.37, No.2 (2013), pp.29–34 (in Japanese).

Ohji, T., Miao, Z., Takami, N., Amei, K and Sakui, M., Magnetic pole arrangement in a linear induction type magnetic levitation conveyer system by ac ampere force and levitation characteristics of an aluminum thin plate, Transactions of the JSAEM, Vol.19, No.3 (2011), pp.550–556 (in Japanese).

Oshinoya, Y. and Ishibashi, K., Development of electromagnetic levitation control device for a rectangular sheet steel, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.67, No.661 (2001), pp.2855–2862 (in Japanese).

Oshinoya, Y. and Kobayashi, S., Noncontact supported control for a plate with free edges, The 71st JSME spring annual meeting, (1994), pp.578–580 (in Japanese).

Oshinoya, Y., Ishibashi, K. and Sekihara, T., Conveyance control for an electromagnetic levitation rectangular sheet steel (Proposition of noncontact control mechanism for the horizontal inertial force of the steel plate which suppressed the elastic vibration), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.68, No.669 (2002), pp.1428–1434 (in Japanese).

Oshinoya, Y., Kobayashi, S. and Tanno, K., Optimal electromagnetic levitation control of a thin rectangular steel plate with two opposite edges reinforced by a beam, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.62, No.600 (1996), pp.3067–3073 (in Japanese).

Sato, K. and Torii, S., Sensorless support control of thin-steel-plate using the real-time vibration analysis technique, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.128, No.3 (2008), pp.267–273 (in Japanese).

Syadanhujin Dobokugakkai, Kouzourikigaku koushikimondaisyuu (1986), p.156 (in Japanese).

Syadanhujin Nihonkikaigakkai, Shingijyutsuyugou series dai 1kan jikijikuuke no kiso to ouyou (1995), pp.24–29 (in Japanese).