湾曲させた柔軟鋼板の磁気浮上搬送システムの開発 (搬送方向が搬送中の浮上性能に与える影響)

Electromagnetic Levitation and Transportation System for Bent Thin Steel Plate (Effect of Transport Direction on Levitation Performance during Transportation)

椎名敦紀^{a)}・嘉山周汰^{a)}・ムハマドヌルハキミビンモハマドカマ^{a)}・小川和輝^{a)}・成田正敬^{a)†}・加藤英晃^{a)} ^{a)}東海大学,神奈川県平塚市北金目 4-1-1 (〒259-1292)

A. Shiina ^{a)}, S. Kayama ^{a)}, M. N. Hakimi ^{a)}, K. Ogawa ^{a)}, T. Narita ^{a)}[†], and H. Kato ^{a)} ^{a)} Tokai Univ., *4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka-shi, Kanagawa, 259-1292, Japan*

In the thin steel plate production line that is widely used for industrial products, contact conveyance is performed with rollers, but the deterioration in the quality of thin steel plates is a problem because scratches and irregularities occur on the surface of the plates. Therefore, non-contact magnetic levitation transfer of thin steel plates done using the attractive force of electromagnets has been proposed. However, we have not examined the levitation performance of a magnetic levitation system that uses a horizontal positioning control system and a curved magnetic levitation system. Therefore, we changed the bending direction of steel plates. It was found that the levitation stability tends to be different in the vertical and horizontal directions depending on the transport direction.

Key words: electromagnetic levitation control, thin steel plate, vibration control, transportation, magnetic field

1. はじめに

薄鋼板の製造工程では多数のローラによる接触搬送が行われて おり、このときローラと薄鋼板の間に摩擦が生じ、薄鋼板表面の傷 や凹凸による薄鋼板の品質劣化の問題がある。そこでこの問題の 解決策として磁気浮上による鋼板の非接触搬送技術が多く提案さ れている 1~3). しかし、多くの磁気浮上技術に関する研究では浮上 対象が剛体と考慮できる物体についての検討であり、複雑な変形 を起こす柔軟性がある物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薄く柔軟で浮上制御が困難である薄鋼板に着 目し、鉛直方向に浮上制御を行うだけでなく、鋼板のエッジ部に電 磁石ユニットを設置したシステムを提案している. エッジ部に設 置した電磁石により鋼板の水平方向に位置決め制御を行うことで 横滑りや落下を防止し、鋼板のたわみを抑制することで非接触支 持搬送が可能であることを明らかにした4.水平方向に設置した電 磁石から, 薄鋼板に発生する張力がたわみの抑制に寄与するが, 電 磁石の設置箇所に大きく依存する5. 薄鋼板の寸法によっては張力 が十分に加わらず局所的にたわみが生じ、これにより高次の弾性 振動が励起され、制御性能を劣化させる可能性がある.水平方向の 電磁石のみにより、たわみを発生する領域を狭めるには電磁石サ イズや個数の変更が考えられるが、システムが冗長になる可能性 がある.

一方著者らは、薄鋼板の柔軟性を積極的に利用し、塑性変形さ せない範囲で湾曲させる手法も提案し、板厚に対して最適な湾曲 角度を数値解析と実験から明らかにしている⁶.これにより電磁石 の数を増やさずに、薄鋼板の浮上性能を向上させることができた. しかし、このとき薄鋼板に入力される外乱は鉛直方向となる浮上 方向のみであり^{7,8}、薄鋼板搬送時に発生する空気抵抗や加速度な どの水平方向の外乱は想定されていない. それに加え、水平方向電 磁石による薄鋼板の位置決め制御システムと薄鋼板の柔軟性を積 極的に利用した湾曲磁気浮上システムを併用した磁気浮上システ ムの浮上性能についての検討は行われていない.

そこで著者らは湾曲させながら浮上させた鋼板を搬送させた際 の浮上性能を検討するため、浮上用電磁石を傾斜させ、かつ水平方 向から位置決め制御を行う磁気浮上装置を構築した⁹.しかしなが ら湾曲鋼板のどの部分を支持して搬送すれば安定性が向上できる のか評価の検討は行われていない.そこで本研究は、まず湾曲させ ながら水平方向から張力を加えた際の鋼板形状について有限差分 法により求めた.水平方向電磁石の定常電流値を変化させ、張力が 鋼板形状に与える影響について検討を行った.そして薄鋼板を湾 曲浮上させて搬送実験を行い、搬送による水平方向の外乱が入力 された際に、薄鋼板の搬送方向が浮上性能に与える影響について 検討を行った.

2. 薄鋼板の湾曲磁気浮上システムの構築

湾曲磁気浮上制御システムの概略図を Fig. 1 に示す. 浮上対象 は長さ800 mm,幅 600 mm,厚さ 0.24 mm の長方形亜鉛めっき 鋼板(材質 SS400)を使用する.なお同図に示すように鋼板の短 手方向を x 方向,長手方向をy 方向,鉛直方向をz 方向と定義し, 鋼板は x 方向もしくは y 方向に搬送される.浮上制御システムは 周囲と中央の 5 か所に浮上用電磁石ユニットを設置し,各電磁石 表面から鋼板表面までの距離を 5 mm に制御することで鋼板を磁 気浮上させる.浮上した鋼板のエッジに対して水平方向位置決め 制御用ユニットによる吸引力を加え,鋼板の相対する 2 辺に沿っ て 2 個ずつ設置している.各電磁石表面から鋼板エッジまでの距 離を 5 mm に非接触位置決め制御する浮上制御用電磁石ユニット と水平方向位置決め制御用ユニットは Fig. 2 のように配置されて



Fig. 1 Schematic of bending electromagnetic levitation control system and horizontal positioning control system.



Fig. 2 Layout of electromagnetics for levitation control and horizontal positioning control.

いる. Fig.2(a)のように, x軸方向に搬送する場合は鋼板の長手方向のエッジに水平方向電磁石を設置し, y軸方向に搬送する場合は Fig.2(b)のように鋼板の短手方向のエッジに水平方向電磁石を設 置した.つまり水平制御用電磁石は常に搬送方向に設置され



(a) *x* direction transport



(b) *y* direction transport **Fig. 3** Bending levitation control system.



Fig. 4 Tilted electromagnet for levitation control.

ており、x軸方向に搬送する場合は x 軸方向に張力が加わ り、y 軸方向に搬送する場合は x 軸方向に張力が加わるこ とになる.本研究では Fig. 2 中央の浮上制御用電磁石ユニット (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.x軸 方向の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 430 mm とした.同 様に y 軸方向の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, はり全体のたわみ量の総和が最小となる 490 mm とした.水平方 向位置決め制御用電磁石の磁石間距離は基礎検討の結果から 300 mm とした. また、実験装置のフレーム内の写真を Fig.3, Fig.4 に示す. 同図 (a)に x 軸方向に搬送する場合, (b)に y 軸方向に搬送する場合を示す. 鋼板を湾曲浮上させるために周囲の電磁石 (No. 1~No.4) には傾斜ステージを取り付け, Fig.4 に示すように電磁石を任意の角度に傾斜する. さらに、中央に設置してある電磁石

(No. 5) には高さが調整可能なステージを取り付けた. 電磁石の 傾斜角は, 既報の結果より, x軸方向に搬送した際に高い浮上安定 性を示した 5° とした.

3. 湾曲した磁気浮上鋼板に張力を加えた際の形状解析

3.1 鋼板形状解析モデル

水平方向電磁石を長手方向のエッジと短手方向のエッジに設置 して張力を加えた際に鋼板形状に与える影響を検討するため、有 限差分法を用いて浮上中の鋼板形状を算出した.長手方向、短手方 向の水平方向電磁石の吸引力が加わった長方形薄鋼板の静的なた わみの方程式は次式で表される.

$$D\nabla^{4}z = f_{xz} + f_{x}\frac{\partial^{2}}{\partial x^{2}}z + f_{yz} + f_{y}\frac{\partial^{2}}{\partial y^{2}}z + f_{5} - \rho hg \quad (1)$$
$$D = \frac{Eh^{3}}{12(1-v^{2})}, \nabla^{4} = \frac{\partial^{4}}{\partial x^{4}} + 2\frac{\partial^{4}}{\partial x^{2}\partial y^{2}} + \frac{\partial^{4}}{\partial y^{4}}$$

ここで E: 薄鋼板のヤング率 [N/m²], h: 薄鋼板の厚さ [m], v: ポアソン比, x: 薄鋼板の短手方向の座標 [m], y: 薄鋼板の長手方 向の座標 [m], z: 薄鋼板の変位 [m], f =: 長手方向に設置した電 磁石による薄鋼板の単位面積あたりに加わる鉛直方向の外力 [N/m²], £:長手方向に設置した電磁石による薄鋼板の単位長さあ たりに加わる水平方向の外力 [N/m], fg: 短手方向に設置した電磁 石による薄鋼板の単位面積あたりに加わる鉛直方向の外力 [N/m²], f: 短手方向に設置した電磁石による薄鋼板の単位長さあ たりに加わる水平方向の外力 [N/m], fs: 浮上制御用電磁石 No.5 による浮上方向の外力 [N/m²], ρ: 薄鋼板の密度 [kg/m³], g: 重 力加速度 [m/s²]である. なお, 電磁界解析ソフトを用いて定常電流 を流した際の電磁石1つあたりの吸引力を解析し、鋼板全体に発 生する fxz, fz, fyz, fyを算出した 10. x 軸方向に搬送する際の水平 方向電磁石の定常電流を I, y軸方向に搬送する際の定常電流を I, と定義する. なお、x方向に搬送する際はfz=0, f=0, y方向に 搬送する際は $f_{xz}=0, f_{x}=0$ となる.

フィードバック制御を行っていることから浮上方向電磁石 No. 1~4の位置で薄鋼板は単純支持され,水平方向電磁石は制御によって薄鋼板が制御点で静止していると仮定した.また \pounds の値を変 化させて鋼板の湾曲角度を決定する.式(1)を用いて,薄鋼板のた わみを有限差分法 (FDM) によって計算する.このとき,差分解 析格子の大きさは 20 mm×20 mm とした.得られた湾曲した磁気 浮上鋼板の形状を評価するため,短手方向のみに湾曲した基準面 を設定した.鋼板を x 軸方向の両端突出はりと見なし,浮上制御 用電磁石 No.1 (もしくは No.2) と No.3 (もしくは No.4)の位 置で単純支持し,自重による分布荷重と浮上制御用電磁石 No.5 が 発生する吸引力がはりの中央に加わった形状を求めた.この形状 をy方向に押し出し,基準面を得た.基準面の格子の大きさを 20 mm×20 mm とした.ここで設定した基準面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.

$$J = \frac{\sum_{i=1}^{N} |z_i - z_0|}{N}$$
(2)

a: 薄鋼板の各解析点における z 軸方向の変位 [m], a: 基準面の 各解析点における z 軸方向の変位 [m], N: 解析点の総数 (N= 1271) である.

3.2 解析結果

水平方向電磁石に定常電流値 L, L,を流して鋼板に張力を加えな がら電磁石ユニット No. 1~No. 4 の位置における鋼板の曲げ角度 が5°になるように5を入力した鋼板形状を有限差分法により式 (1)を解くことで求めた.水平方向電磁石の定常電流 L, L を 0.1 A, 0.5 A, 1.0 A とした際の x 軸方向に搬送した際の鋼板形状を Fig. 5、 y軸方向に搬送した際の結果を Fig.6 に示す. x軸方向に張力 を加えた場合は鋼板のたわみに大きな変化は見られなかっ た. しかし y 軸方向に張力を加えた場合は水平方向電磁石の定 常電流値 L を増加させることで評価値 J が減少する結果が得られ た. 定常電流 4. 4を0.1A~1.0Aまで0.1Aずつ変化させた際の x軸方向とy軸方向にそれぞれ張力を加えた場合の評価値Jと水 平方向電磁石の定常電流値の関係を Fig. 7 に示す. 同図から x 軸 方向に張力を加えた場合は水平方向電磁石の定常電流値 L を増 加させることで評価値 J は増加傾向にあるが、 y 軸方向に張力を 加えた場合は水平方向電磁石の定常電流値 Lyを増加させると評価 値 J は減少傾向となった.また、どの定常電流値においても y 軸 方向に張力を加えた場合の方が x 軸方向の結果と比べて評価値 J は小さくなった. これは鋼板の y 軸方向に張力を加えた場合 は鋼板の長手方向に張力が加わるため, x 軸方向に張力を 加えた場合より広範囲に張力による復元力が加わる. その 結果 x 軸方向に張力を加えた場合よりたわみが抑制された と考えられる.

4. 薄鋼板の湾曲磁気浮上システムの制御モデル

4.1 実験装置

使用する電磁石コイルは浮上方向,水平方向共に線径が0.5 mm, 巻数は1005回とし,鉄いは E 型に加工したフェライトコアを用 いた.各電磁石ユニットにおいて,電磁石の電気回路は2基が直 列に接続されている.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影響を及ぼ すことはほとんどないことを確認している¹¹⁾.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10個の観測値を AD 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,薄鋼板を磁気浮上さ せる.Fig.1に示す通り本実験装置の制御システムでは2基のDSP にて構成されている.鉛直方向の浮上制御と水平方向位置決め制 御についてそれぞれ独立して制御モデルを構築し,それぞれの DSP に実装して制御している.

4.2 鉛直方向の浮上制御システム

Fig.1上部に鉛直方向浮上制御システムの詳細を示す.本研究で はそれぞれの電磁石ユニットに1基設置した変位センサにより鋼 板の変位を測定し、そのディジタル微分値である速度、電磁石コイ



Fig. 7 Relationship between steady current and evaluation value.



ル電流をフィードバックし, 鋼板の端部が各電磁石表面から5mm の距離を保つように制御を行う.そこで, Fig.8に示すような磁気 浮上対象の5分の1に相当する質量を浮上させる1自由度系とし てモデル化する.電磁石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が存在する.そこからの鉛直 方向変位 z に関する運動方程式,線形化近似を行った電磁石吸引 力に関する方程式及び電磁石回路方程式が得られる¹²⁾.

$$\boldsymbol{z} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{z} & \dot{\boldsymbol{z}} & \boldsymbol{i}_{\boldsymbol{z}} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}},$$



Fig. 8 Theoretical model of levitation control of steel plate.

$$\dot{z} = A_{z} z + B_{z} v_{z}.$$
(3)
$$A_{z} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{4F_{z}}{m_{z} Z_{0}} & 0 & \frac{4F_{z}}{m_{z} I_{z}} \\ 0 & -\frac{L_{eff}}{L_{z}} \cdot \frac{I_{z}}{Z_{0}^{2}} & -\frac{R_{z}}{2L_{z}} \end{bmatrix},$$

$$B_{z} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{2L_{z}} \end{bmatrix}^{T}.$$

ここで $m_{z} = m/5$ [kg], m : 磁気浮上対象の質量 [kg], Z: 平衡浮上状態における電磁石表面と鋼板表面との間隔 [m], $E_{z}: 電$ 磁石ユニットから発生する静的な吸引力 [N], <math>L : 静的吸引力を得 $るための定常電流値 [A], <math>i_{z}: 電磁石コイル電流の変動値 [A], <math>L_{z}:$ 平衡浮上状態における電磁石コイルのインダクタンス [H], $R_{z}: 2$ 基の電磁石コイルの総抵抗値 [Ω], $v_{z}: 電磁石コイルに加わる定常$ 電圧からの変動値 [V]である. なお v_b は状態変数 <math>z をフィードバ ックして次式のように得られる.

$$\boldsymbol{v}_z = -\boldsymbol{F}_z \boldsymbol{z} \tag{4}$$

 $\boldsymbol{F}_{z} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{f}_{z1} & \boldsymbol{f}_{z2} & \boldsymbol{f}_{z3} \end{bmatrix}$

このとき Eはそれぞれの状態変数に対するフィードバックゲイン である.

4.3 水平方向位置決め制御システム

Fig.1下部に水平方向位置決め制御システムの詳細を示す.Fig.9に示すように、水平方向の運動は磁気浮上対象の2分の1に相当する質量を1軸方向のみに運動する1自由度系としてモデル化する.したがって鋼板の1辺に配置した2基の電磁石からは同じ吸引力を発生するようにした.鋼板の2辺に対向するように1基ずつ電磁石を配置し、同じ静的吸引力を加えることによって鋼板の平衡状態があり、そこからの鋼板の微小変化による水平方向の状態方程式を得る¹².x方向に搬送する際の状態方程式を次式に示す.

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{A}_{\boldsymbol{x}} \ \boldsymbol{x} + \boldsymbol{B}_{\boldsymbol{x}} \ \boldsymbol{v}_{\boldsymbol{x}}.$$

$$\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x} & \dot{\boldsymbol{x}} & \boldsymbol{i}_{\boldsymbol{x}} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}},$$
(5)



Fig. 9 Theoretical model of horizontal positioning control of steel plate.



Fig. 10 Conveyance system for steel plates (*y* direction transport).

$$A_{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{4F_{x}}{m_{x}X_{0}} & 0 & \frac{4F_{x}}{m_{x}I_{x}} \\ 0 & -\frac{L_{xeff}}{L_{x}} \cdot \frac{I_{x}}{X_{0}^{2}} & -\frac{R_{x}}{2L_{x}} \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{B}_{\boldsymbol{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{2L_{\boldsymbol{x}}} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}.$$

ここで、 $m_x = m/2$ [kg], F_x : 静的吸引力 [N], X_a : 平衡浮上状態 における電磁石表面とのギャップ [m], I_a : 静的吸引力を得るため の定常電流値 [A], I_x : 平衡浮上状態における電磁石コイルのイン ダクタンス [H], R_x : 2 基の電磁石コイルの総抵抗値 [Ω], r_a : 電 磁石コイルに加わる定常電圧からの変動値 [V]である. なお r_a は 状態変数 x をフィードバックして次式のように得られる.

$$\boldsymbol{v}_{x} = -\boldsymbol{F}_{x}\boldsymbol{x} \tag{6}$$

$$F_{x} = \begin{bmatrix} f_{x1} & f_{x2} & f_{x3} \end{bmatrix}$$

このとき Rはそれぞれの状態変数に対するフィードバックゲイン である.また、y軸方向に搬送する際も同様の状態方程式を得る.

5. 薄鋼板の湾曲搬送実験

5.1 実験条件

薄鋼板はFig.10示す通りフレーム内に設置された磁気浮上シス



Fig. 12 Relationship between standard deviation of vertical displacement of steel plate and steady current.

テムを装置ごとリニアモータで搬送させる. このとき, 鋼板は同図 のy方向に搬送され搬送装置が静止している状態から加速度 0.59 m/s² にて搬送を開始し, 速度 0.7 m/s に達した時点で等速にて搬 送, その後-0.59 m/s² にて減速, 停止させ, 搬送させる距離は 3.6 m とした. さらに, 水平方向電磁石の定常電流値は 0.1 A, 0.3 A, 0.5 A, 0.7 A, 0.9 A, 1.0 A で行った.

5.2 実験結果

鋼板の湾曲角度が 5° で水平方向電磁石の定常電流値を(a) $L = L_y = 0.1 \text{ A} \geq (b) L = L_y = 0.5 \text{ A} 流した際の鋼板を <math>x$ 軸方向と y 軸方向にそれぞれ搬送したときの Fig. 1 における浮上方向の電磁石ユニット No. 1 に設置した変位センサにより測定した薄鋼板の浮上





Fig. 13 Time histories of horizontal displacement of steel plate (x and y direction transport).



Fig. 14 Relationship between maximum horizontal displacement of steel plate and steady current.

方向の変位時刻歴を Fig. 11 に示す. 同図より定常電流値を 0.1 A から 0.5 A に変化させたところ薄鋼板の変位標準偏差は 18%増加 した. これは y 軸方向の張力が増加したことにより z 方向の復元 力も増加し鋼板に対する加振力となったためと考えられる.また, z 方向の復元力によって浮上方向の制御モデルにも誤差が 生じ,制御性能が劣化した可能性も考えられる.鋼板を y 軸 方向に搬送した際の水平方向電磁石の定常電流値と鋼板の浮上方 向変位標準偏差の関係を Fig. 12 に示す.また,同図に搬送方向が 浮上性能に与える影響を検討するため既報 ⁹の x 軸方向に搬送し た際の結果を合わせて示す. x 軸方向に搬送した場合では水平方向



Fig. 15 Relationship between steady current I_x and horizontal attractive force F_x .

電磁石の定常電流 $k = 0.1 \text{ A} \sim 0.5 \text{ A}$ では変位標準偏差が減少し, 0.5 A 以降は増加する傾向が得られた. 鋼板をy軸方向に搬送した 場合では 0.5 A で大きく振動する結果が得られたが,全体的に定常 電流 kを増加させると標準偏差が増加する傾向が得られた. この 結果から x 軸方向に搬送する場合,搬送方向に静的たわみが あるため,水平方向の張力による鉛直方向の復元力が増加 し,浮上方向の振動を抑制できることを確認した. また, どちらの方向に搬送する場合でも定常電流の増加によって 標準偏差が増加したが,これはz方向の復元力によって浮 上方向の制御モデルにも誤差が生じ,制御性能が劣化した と考えられる.

同様の条件でx軸方向とy軸方向にそれぞれ搬送したときのFig. 1 における水平方向の電磁石ユニット No. 1 に設置した変位セン サにより測定した薄鋼板の水平方向の変位時刻歴を Fig. 13 に示 す. Fig. 12 と同様に鋼板を x 軸方向と y 軸方向に搬送した際の水 平方向電磁石の定常電流値と鋼板の水平方向の最大振幅の関係を Fig. 14 に示す. Fig. 13 から定常電流値を 0.1 A から 0.5 A に変化 させたところ薄鋼板の最大振幅は55%抑制された. また, Fig. 14 より鋼板を x 軸方向と y 軸方向に搬送した場合では水平方向電磁 石の定常電流が0.1 A~0.5 A 定常電流を増加させると最大振幅は 減少する傾向を示し、0.5A以降は増加する傾向を示した.また、 定常電流 0.1 A の場合は、 x 軸方向搬送時は y 軸方向搬送 時と比較して加減速を行った際に大きく変位していること が確認できる.これは湾曲させている方向に搬送させたこ とで、鋼板の湾曲方向の弾性振動が励起されたためと考え られる. Fig. 15 に水平方向電磁石の定常電流 Ix に対する 水平方向の吸引力の関係を示す. 同図より 0.1 A~0.5 A ま での傾きと 0.5 A~1.0 A までの傾きが異なっている.本研 究の制御モデルは0.1A~0.5Aまでの吸引力の傾向から導 出したため、0.5 A~1.0 A までの範囲においてモデル化誤 差が生じ、制御性能が劣化したと考えられる. この結果から

水平方向電磁石の定常電流値を変化させた際,鋼板の湾曲方向 と異なる y軸方向に電磁石を設置した方が水平方向の最大振幅は 抑制できることを確認した.また,解析結果と比較すると y 軸方 向に搬送した場合の方が浮上性能は良くなるという傾向も一致し た.

6. まとめ

薄鋼板を湾曲させながら搬送した際の薄鋼板の搬送方向が浮上 性能に与える影響について、浮上用電磁石を傾斜させ、かつ水平方 向から位置決め制御を行う磁気浮上装置を構築し、薄鋼板を湾曲 浮上させた形状解析と搬送実験を行った.水平方向電磁石の定常 電流を変化させて搬送実験を行った結果、定常電流を増加させる ことにより、浮上方向では鋼板の湾曲方向によって浮上性能の傾 向が異なり、鋼板の長手方向エッジ部に電磁石を設置した方が浮 上方向の振動は抑制できた.水平方向では鋼板の搬送方向を変化 させても同じ傾向となり鋼板の湾曲方向と異なる y軸方向に搬 送した方が水平方向の最大振幅は抑制できた.また、解析結果と比 較すると鋼板の短手方向エッジ部に電磁石を設置した方が浮上性 能は良くなるという傾向も一致した.

今後は水平方向電磁石の磁場を加える位置を変更し、より浮上 性能が良くなる搬送条件を数値解析で求め、そこで得られた結果 をもとに実験を行い、解析結果との比較を行っていく予定である.

References

- S. Ohashi, D. Kumano, and Y. Goto: *IEEJ Trans. Indusrty Appl.*, **128**, 648 (2008).
- S. Matsumoto, Y. Arai, and T. Nakagawa: *IEEE Trans. Magn.*, 50, 8600304 (2014).
- M. Morihita and M. Akashi: *IEEJ Trans. Industry Appl.*, 119, 1289 (1998).
- 4) Y. Oshinoya, K. Ishibashi, and T. Sekihara: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. C*, 68, 1428 (2002).
- 5) Y. Ito, Y. Oda, T. Narita, and H. Kato, *J. Magn. Soc. Jpn.*, 3, 95, (2019).
- H. Marumori, H. Yonezawa, T. Narita, H. Kato, and Y. Oshinoya: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser*, **81**, 14-00471, (2015).
- K. Ogawa, M. Tada, T. Narita, and H. Kato, : J. Magn. Soc. Jpn., 3, 101, (2019).
- K. Ogawa, M. Tada, T. Narita, and H. Kato, : J. Magn. Soc. Jpn., 4, 122, (2020).
- 9) A. Shiina, M. N. Hakimi, K. Ogawa, T. Narita, and H. Kato: J. Jpn. Soc. Appl. Elec. Mech., accepted.
- 10) T. Narita, T. Kurihara, and H. Kato: Mech. Eng. J., 3, 15-00376 (2016).
- Y. Oshinoya, S. Kobayashi, and K. Tanno: Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. C, 62, 3067 (1996).
- 12) M. Kida, T. Suzuki, Y. Oda, T. Narita, H. Kato, and H. Moriyama: J. Magn. Soc. Jpn., 1, 76 (2017).

2020年12月31日受理, 2021年4月5日採録