<Paper>

湾曲させた柔軟鋼板の磁気浮上搬送システムの開発 (電磁力の印加位置に対する基礎的考察)

Electromagnetic Levitation and Transportation System for Bent Thin Steel Plate (Fundamental Consideration on Acting Position of Electromagnetic Force)

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)}・遠藤文人^{b)}・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)
^{b)}福岡工業大学,福岡県福岡市東区和白東 3-30-1(〒811-0295)

A. Shiina ^{a)}, S. Kayama ^{a)}, M. N. Hakimi ^{a)}, K. Ogawa ^{a)}, A. Endo ^{b)}, T. Narita ^{a)}[†], and H. Kato ^{a)}

^{a)} Tokai Univ., 4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka-shi, Kanagawa, 259-1292, Japan

^{b)} Fukuoka Institute of Technology, 3-30-1 Wajiro-higashi, Higashi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka, 811-0295, Japan

In the thin steel plate production line that is widely used for industrial products, contact conveyance is performed with rollers, but deterioration in the quality of the 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. So far, studies have been conducted on changing the bending angle and the conveying direction of thin steel plates with the magnetic levitation system that uses a horizontal positioning control system and the curved magnetic levitation system. Therefore, in this study, the distance between the centers of the horizontal electromagnets was changed. It was confirmed that the levitation performance was improved by increasing the distance between the centers of these electromagnets.

Key words: electromagnetic levitation control, thin steel plate, finite difference methods, transportation, magnetic field

1. はじめに

自動車をはじめとする工業製品に広く使用されている薄鋼板の 製造では多数のローラによる接触搬送が行われている. このとき 薄鋼板とローラ間の摩擦で薄鋼板表面に傷や凹凸が生じ、表面品 質が劣化するという問題がある. そこで, この問題の解決策として 電磁石の吸引力を利用した薄鋼板の非接触磁気浮上搬送技術が多 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 うことで搬送時の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^の.これにより電磁石の 個数を増やさずに、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.加えて水平方向電磁石 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これまで行われていない.

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、薄鋼板の湾 曲角度や搬送方向が浮上性能に与える影響について検討を行って きた^{9,10}.しかしながら湾曲させた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、薄鋼板を湾曲させながら水平方向から加わる張力 の印加位置を変えた際の鋼板形状について有限差分法により求め、 張力の印加位置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、エッジ部から加わる張力の印加位 置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 方向に搬送される.浮上用電磁石ユニットの詳細図を Fig. 2 に示す.浮上制御システムは周囲と中央の 5 か所に浮上用電磁

Transaction of the Magnetics Society of Japan (Special Issues) Vol.6, No.1, 2022

Corresponding author: T. Narita (e-mail: narita@tsc.u-tokai.ac.jp).



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



Fig. 2 Schematic of electromagnet unit for levitation control.



Fig. 3 Positional relationship between electromagnet and steel plate.

石ユニットを設置し、2 基の電磁石と薄鋼板までの変位を測定する ための渦電流式非接センサを 2 基の電磁石で挟むように配置して 構成されている.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.Fig.3に示すように浮上 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、電磁石表面から鋼板エッジまでの距離を 5 mm になるように制御を行う.水平方向位置決め制御用ユニットは鋼 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 Fi



Fig. 4 Layout of electromagnets for levitation control and horizontal positioning control.



Fig.5 Slide mechanism of electromagnet for horizontal positioning control.



Fig. 6 Bending levitation control system.



Fig. 7 Tilted electromagnet for levitation control.

Table 1 Symbols and values.

Symbol	Value
m	$0.837~\mathrm{kg}$
E	$2.17\! imes\!10^{11}\mathrm{N\!/m}^2$
V	0.3
h	0.24 m
ρ	$7.266\! imes\!10^3\mathrm{kg/m}^3$
g	9.80655 m/s^2

g.4のように配置されている.水平方向位置決め制御用ユニットは Fig. 5 ように可動することができる. 本研究では Fig. 4 中央の浮 上制御用電磁石ユニット (No.5) の位置を下方に移動させること で鋼板を湾曲させながら浮上させる. 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 v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. また,実験装置のフレー ム内の写真を Fig.6, Fig.7 に示す. 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. 7に示すように電磁石を任意の角度に傾斜する. さらに, 湾曲させ る角度によって薄鋼板中央部分の高さが変わるため中央に設置し 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. 湾曲磁気浮上鋼板に張力の印加位置を変更した際の形状解析

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.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.

$$D\nabla^4 z = f_z + f_x \frac{\partial^2}{\partial x^2} z + f_5 - \rho hg \tag{1}$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 \cdot v^2)}, \nabla^4 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4}$$
(2)

ここで m: 薄鋼板の質量 [kg], 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_z : 水平方向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_x : 水平方向電磁石による薄鋼板の単位面積あた りに加わる水平方向の外力 [N/m], f_5 : 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. 各パラメータ値を Table 1 に示す. 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 f_z 、 f_x を算出した¹¹.

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 f_5 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 軸方向 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.

$$J = \frac{\sum_{i=1}^{N} |z_i - z_0|}{N}$$
(3)

zi: 薄鋼板の各解析点における z 軸方向の変位 [m], z): 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.

c

3.2 解析結果

水平方向電磁石に定常電流を流して板厚0.24mmの鋼板に張力 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f5を入力した鋼板形状を有限差分法



Fig. 10 Difference between obtained shape of levitated steel plate and reference shape.

により式(1)を解くことで求めた.水平方向電磁石に定常電流を0.5 A 流し、中心間距離 $a \ge 400 \text{ mm}$ から600 mm まで40 mm ずつ 変化させた a = 600 mm のときに得られた鋼板形状を一例として Fig.8に、基準面の鋼板形状をFig.9に示す.各電磁石位置におけ る得られた鋼板形状と基準面の差分値をFig.10に示す.同図は赤 い部分と青い部分の色が濃いほど基準面からのたわみが大きいことを意味している. 鋼板の角や長手方向の中央部など電磁力の吸引力が加わらない部分で大きく負方向にたわんでいる様子が確認できる. 定常電流を 0.5 A 流した場合は中心間距離 a 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. 定常電流を 0.1 A~



Fig. 11 Relationship between steady current and evaluation value.



(b) a = 600 mmFig. 13 Time histories of vertical displacement of steel plate.



1.0A (0.1A 刻み) まで流し、中心間距離 a を変化させた際の評価





値 Jと水平方向電磁石の中心間距離の関係を Fig. 11 に示す. 同図 から定常電流が 0.1 A のとき中心間距離 a を増加させても評価値 Jはほぼ一定の傾向にあるが,定常電流 0.2 A 以降は中心間距離 a を増加させると評価値 J は減少する傾向となった.

4. 薄鋼板の湾曲磁気浮上搬送システムの制御モデル

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,鉄心は 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¹²⁾.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 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,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.なお制御モデルは既報と同一のモ デルを使用した¹³⁾.

5. 湾曲させた薄鋼板の張力印加位置を変更した搬送実験

5.1 実験条件

薄鋼板は長さ 800 mm,幅 600 mm,厚さ 0.24 mm の長方形亜 鉛めっき鋼板(材質 SS400)を使用し,Fig.12示す通りフレーム 内に設置された磁気浮上シス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 磁石の定常電流を 0.5 A 流し、水平方向電磁石の中心間距離 $a \epsilon$ 300 mm から 600 mm まで 50 mm ずつ変化させて搬送実験を行 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を 0.5 A 流 し, 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方向の変位 時刻歴を Fig. 13 に示す. 同図より水平方向電磁石の中心間距離 a を 300 mm から 600 mm に変化させたところ薄鋼板の変位標準偏 差は 30%減少した. 水平方向電磁石の中心間距離 a と鋼板の浮上 方向変位標準偏差の関係を Fig. 14 に示す. 水平方向電磁石の定常 電流が 0.5 A 場合では水平方向電磁石の中心間距離 a を増加させ ると変位標準偏差が減少する傾向が得られた.

同様の条件で 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. 15 に示す.同図より水平方向電磁石の中心間距離 a を 300 mm から 600 mm に変化させたところ薄鋼板の最大振幅は 24%抑制された. Fig. 14 と同様に水平方向電磁石の中心間距離 a と鋼板の水平方向の最大振幅の関係を Fig. 16 に示す.水平方向電 磁石の定常電流が 0.5 A 場合では水平方向電磁石の中心間距離 a を増加させると最大振幅が減少する傾向が得られた.よって鋼板 の湾曲角度 5°で水平方向電磁石の定常電流を 0.5 A 流し た場合,浮上方向と水平方向共に水平方向電磁石の中心間 距離 a を増加させることで振動を抑制できることを確認し た.

6. まとめ

湾曲角度 5°の薄鋼板に対して水平方向からの磁場の印加位置 が浮上性能に与える影響について,湾曲磁気浮上制御と水平方向 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 0.5 A 流し,水平方向電磁石の中心間距離を変化させて搬送実 験を行った結果,中心間距離を増加させることで浮上方向と水平 方向の振動は抑制できた.また,解析結果と実験結果の傾向が一致 したことから本論文で提案した静的形状解析からたわみを評価し て水平方向電磁石位置を設計することで,安定して搬送できる構 成を解析的に求める手法が有効であることを示した.

今後は実験条件の範囲を拡大すると共に、薄鋼板の湾曲角度を 変化させた検討を行い、より浮上性能が良くなる搬送条件を数値 解析と搬送実験で求めていく予定である.

References

- 1) 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). (in Japanese)
- Y. Ito, Y. Oda, T. Narita, and H. Kato: *T. Magn. Soc. Jpn.* (Special Issues)., 3, 95, (2019). (in Japanese)
- H. Marumori, H. Yonezawa, T. Narita, H. Kato, and Y. Oshinoya: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser*, **81**, 14-00471, (2015). (in Japanese)
- 7) K. Ogawa, M. Tada, T. Narita, and H. Kato: *T. Magn. Soc. Jpn.* (Special Issues)., **3**, 101, (2019). (in Japanese)
- 8) K. Ogawa, M. Tada, T. Narita, and H. Kato: *T. Magn. Soc. Jpn.* (Special Issues)., **4**, 122, (2020). (in Japanese)
- 9) A. Shiina, M. N. Hakimi, K. Ogawa, T. Narita, and H. Kato: J. Jpn. Soc. Appl. Elec. Mech., **29**, 1, (2021). (in Japanese)
- 10) A. Shiina, S. Kayama, M. N. Hakimi, K. Ogawa, T. Narita, and H. Kato: *T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)*, **5**, 2, (2021). (in Japanese)
- 11) T. Narita, T. Kurihara, and H. Kato: Mech. Eng. J., 3, 15-00376 (2016).
- 12) Y. Oshinoya, S. Kobayashi, and K. Tanno: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. C*, **62**, 3067 (1996). (in Japanese)
- 13) M. Kida, T. Suzuki, Y. Oda, T. Narita, H. Kato, and H. Moriyama: *T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues).*, 1, 76 (2017). (in Japanese)

2021年11月7日受理, 2021年12月6日再受理, 2021年12月8日採録