

# 永久磁石と電磁石を併用した薄鋼板の磁気浮上装置の開発 (遺伝的アルゴリズムを用いた永久磁石の最適配置に 張力印加位置が与える影響に関する基礎的考察)

## Development of Electromagnetic Levitation System for Thin Steel Plate with Electromagnets and Permanent Magnets (Fundamental Consideration on Effect of Acted Position of Tension on Optimal Arrangement of Permanent Magnets Obtained by Genetic Algorithm)

嘉山周汰<sup>a)</sup>・ムハマドヌルハキミビンモハマドカマ<sup>a)</sup>・椎名敦紀<sup>a)</sup>

・小川和輝<sup>a)</sup>・遠藤文人<sup>b)</sup>・成田正敬<sup>a)†</sup>・加藤英晃<sup>a)</sup>

<sup>a)</sup> 東海大学, 神奈川県平塚市北金目 4-1-1 (〒259-1292)

<sup>b)</sup> 福岡工業大学, 福岡県福岡市東区和白東 3-30-1 (〒811-0295)

S. Kayama<sup>a)</sup>, M. N. Hakimi<sup>a)</sup>, A. Shiina<sup>a)</sup>, K. Ogawa<sup>a)</sup>, A. Endo<sup>b)</sup>, T. Narita<sup>a)†</sup>, and H. Kato<sup>a)</sup>

<sup>a)</sup> Tokai Univ., 4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka-shi, Kanagawa, 259-1292, Japan

<sup>b)</sup> Fukuoka Institute of Technology, 3-30-1 Wajiro-higashi, Higashi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka, 811-0295, Japan

In thin steel plate production lines, contact conveyance by rollers is used, so scratches on the surface of the plates and plating defects are problems. Therefore, non-contact magnetic levitation conveyance of thin steel plates using the attractive force of electromagnets has been proposed. We studied a magnetic levitation system for thin steel plates that uses both electromagnets and permanent magnets. While a thin steel plate was magnetically levitated, we investigated the effect of changing the position where tension is applied by a magnetic field from the horizontal direction on the placement of permanent magnets optimized by a genetic algorithm. From the result, we found that this change had a positive effect on levitation performance.

**Key words:** electromagnetic levitation control, thin steel plate, permanent magnet, genetic algorithm

### 1. はじめに

超電導体を利用しない磁気浮上方式である常電導磁気浮上は、低温の温度管理が不要で、浮上対象が磁性体であれば適用できるため汎用性が高く様々な分野で応用が検討されている<sup>1-4)</sup>。中でも製造工程に対し非接触支持搬送技術を導入することにより薄鋼板のめっき層の傷や剥がれなど、表面品質が劣化するという問題の解決が期待でき、薄鋼板の高品質化につながる。しかしながら薄鋼板は曲げ剛性が低く、浮上支持力の及ばない箇所たわみや複雑な振動が生じることから、柔軟構造体の非接触支持搬送は困難を極める。このため浮上対象を柔軟構造体と捉え、静的あるいは動的応答特性を考慮した磁気浮上システムの構築は非常に重要な検討課題と位置づけられる。一般的に、このような対象を安定して浮上させるためには、多数の電磁石を設置して吸引力の及ばない箇所を極力減らしてたわみを抑制する必要があるが、制御入力が増加、コスト増加が問題となる。

そこで、当研究グループでは既報にて永久磁石から発生する吸引力を電磁石からの浮上支持力の補助とする手法を提案している<sup>5)</sup>。このとき、浮上用電磁石の周囲に永久磁石を等間隔に配置することによって鋼板のたわみが抑制され、浮上安定性を向上することができた。一方でより高い浮上安定性を得るためには「永久磁石の個数」や「永久磁石の配置」、「永久磁石と鋼板の距離」などのパラメータを検討する必要があるが、これらのパラメータの組み合わせは膨大なため、最適な永久磁石配置を実験的に得るのは困難である。

そこで、最適化アルゴリズムの一つである遺伝的アルゴリズム

(以下 GA) を用いて鋼板のたわみを最も抑制することが出来る永久磁石の配置探索を行った。GA は永久磁石を設置したときの鋼板形状を評価し、たわみを抑制できるパラメータを探索する。このとき鋼板形状の各解析点の平均たわみを算出して鋼板の全体的なたわみを評価し、同時に最大たわみから局所的なたわみを評価した。得られた永久磁石配置を用いて浮上実験を行い、浮上安定性が向上することを確認した<sup>6,7)</sup>。さらに、水平方向から張力を加えた磁気浮上鋼板のたわみを最も抑制できる浮上補助用永久磁石配置を GA により探索し、浮上実験を行い、たわみを抑制できることを確認した<sup>8)</sup>。

しかし、水平方向電磁石の電磁石中心間距離を変化させた際の、永久磁石と鋼板の距離に関する詳細な検討は行われていない。そこで本論文では、水平方向電磁石の電磁石中心間距離と永久磁石と鋼板の距離を変化させ、GA から得られた永久磁石の配置結果と鋼板形状の比較と考察を行った。

### 2. 磁気浮上システムの最適化

#### 2.1 磁気浮上モデルの概略

磁気浮上システムの概略図を Fig. 1 に示す。磁気浮上システムは鉛直方向の浮上制御システムと永久磁石で構成される。浮上対象は長さ  $l = 800$  mm, 幅  $w = 600$  mm, 板厚 0.24 mm の長方形亜鉛めっき鋼板 (材質 SS400) とする。鋼板を浮上させる電磁石ユニットを鋼板の中央 1 ヶ所と周囲の 4 ヶ所に設置し、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

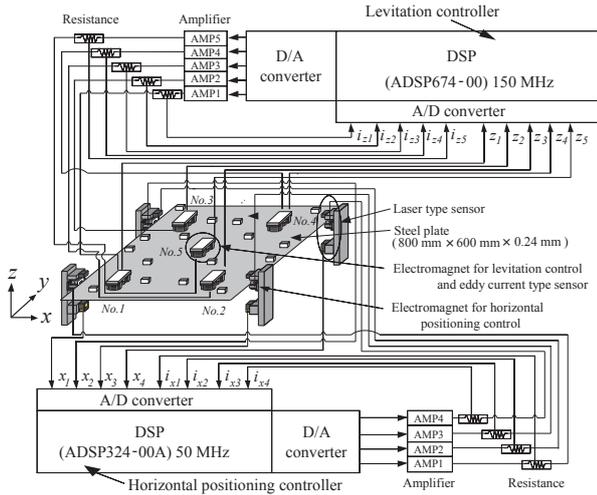


Fig. 1 Outline of electromagnetic levitation control system with permanent magnets.

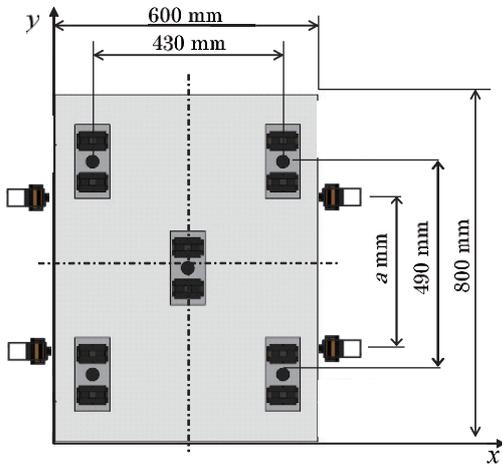


Fig. 2 View from above of placement of electromagnets.

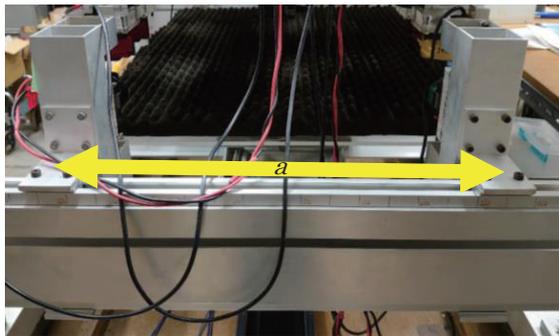


Fig. 3 Slide mechanism of electromagnet for horizontal positioning control.

磁気浮上させる。浮上用と同じ電磁石 1 個と透過型レーザ変位センサによる水平方向電磁石ユニットを鋼板の長手方向エッジ付近に 4 ヶ所対向して設置し、電磁石表面と鋼板のエッジとの距離が 5 mm になるよう位置決め制御を行う。浮上用および水平方向電磁石ユニットは Fig. 2 に示すように設置した。また、本磁気浮上システムは Fig. 3 のように水平方向電磁石の位置を変更できる構造とした。このとき、水平方向電磁石の電磁石中心間距離を  $a$  [mm] とする。

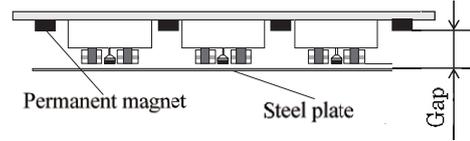


Fig. 4 Side view of gap between permanent magnets and steel plate.

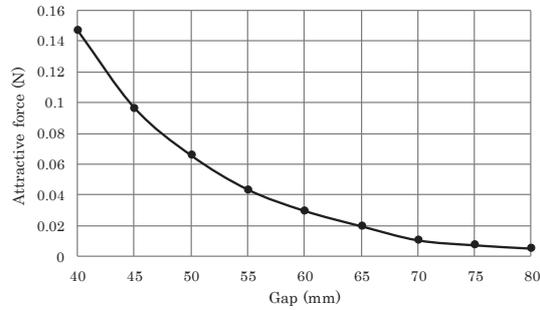


Fig. 5 Relationship between gap and attractive force in analysis.

## 2.2 解析モデル

本システムでは電磁石の吸引力が印加されない箇所に永久磁石の吸引力を印加することで浮上中の薄鋼板のたわみを抑制し、浮上安定性を向上させる。そこで、永久磁石の吸引力が印加された際の浮上中の薄鋼板形状を解析により求める。Fig. 1 に示す浮上対象の薄鋼板に対し、重力および永久磁石吸引力が作用する際の薄鋼板のたわみ量を計算する。永久磁石 (30 mm × 30 mm × 15 mm) の材質はフェライトであり、表面磁束密度は 0.12 T、磁化方向は鋼板側が N 極となるよう配置する。この永久磁石が鋼板に発生させる吸引力は Fig. 4 に示すような永久磁石表面と薄鋼板表面間の距離 (以下 Gap) に応じて変化する。電磁界解析より得られた Gap と鋼板に発生する吸引力の関係を Fig. 5 に示す。重力と永久磁石吸引力が作用する際の薄鋼板のたわみ量について薄鋼板の静的なたわみの方程式より計算する。ここで  $E$ : 薄鋼板のヤング率 [N/m<sup>2</sup>],  $h$ : 薄鋼板の厚さ [m],  $\nu$ : 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],  $f_x$ : 水平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/m<sup>2</sup>],  $f_y$ : 水平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水平方向の外力 [N/m<sup>2</sup>],  $f_{PM}$ : 設置された永久磁石によって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<sup>2</sup>],  $\rho$ : 薄鋼板の密度 [kg/m<sup>3</sup>],  $g$ : 重力加速度 [m/s<sup>2</sup>] である。

$$D\nabla^4 z = f_z + f_x \frac{\partial^2}{\partial^2 x} z + f_{PM} - \rho hg \quad (1)$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2)$$

$$\nabla^4 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4} \quad (3)$$

薄鋼板は浮上用電磁石ユニットの位置で単純支持されるものと仮定し、式(1)を用いて、薄鋼板のたわみを有限差分法 (以下 FDM)

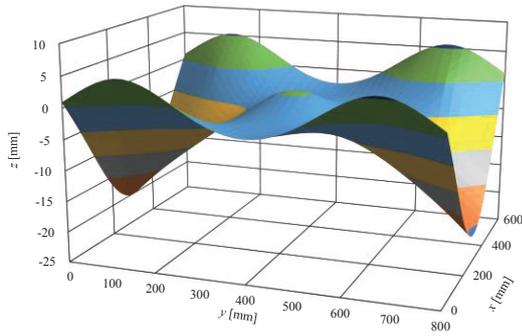


Fig. 6 Bird's eye view of shape of steel plate levitated with only electromagnets. ( $a = 640$  mm).

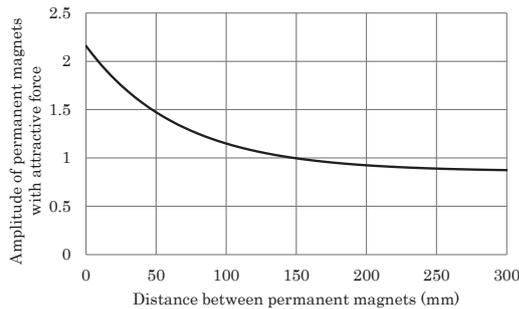


Fig. 7 Amplitude of permanent magnets with attractive force at each distance between permanent magnets.

によって計算する. このとき, 差分解析格子の大きさは  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  とした. なお数値解析の結果より, 浮上用電磁石ユニットは永久磁石を設置しない場合において, 最も薄鋼板全体のたわみが少なくなる位置に設置した. Fig. 6 に  $a = 640$  mm の際の式(1)を FDM により解いて得られた電磁石のみを用いて鋼板を浮上させた際の鋼板形状を示す. これまでの検討により, 永久磁石から発生する吸引力は同極の永久磁石が複数配置すると磁場の相互作用によって磁石間距離に応じて吸引力が増加することを電磁界解析と実験から確認している<sup>9)</sup>. このとき, 永久磁石を 1 個設置した際に鋼板に働く吸引力を 1 とし, 永久磁石同士の相互作用による吸引力の増加率と永久磁石間距離の関係を Fig. 7 に示す. GA のプロセスにおいて, 永久磁石の配置が生成されると, それぞれの永久磁石間距離を算出し, 最も接近した永久磁石との距離に応じて永久磁石の吸引力を変化させ,  $f_{PM}$  を計算した.

### 2.3 評価関数

薄鋼板のたわみを効果的に抑制する最適な永久磁石の個数と配置, Gap を探索するため, 差分解析により永久磁石からの吸引力が加わった鋼板形状から評価値を設定し, 鋼板のたわみを評価する. まず, 平均たわみ量  $J_Z$  を式(4)のように定義した.

$$J_Z = \frac{\sum_{i=1}^N |z_i|}{N} \quad (4)$$

$z_i$  は薄鋼板の各解析点のたわみ,  $N$  は解析点の総数であり,  $N = 4941$  である. 次に鋼板の最大たわみ量  $J_D$  を式(5)のように定義した.

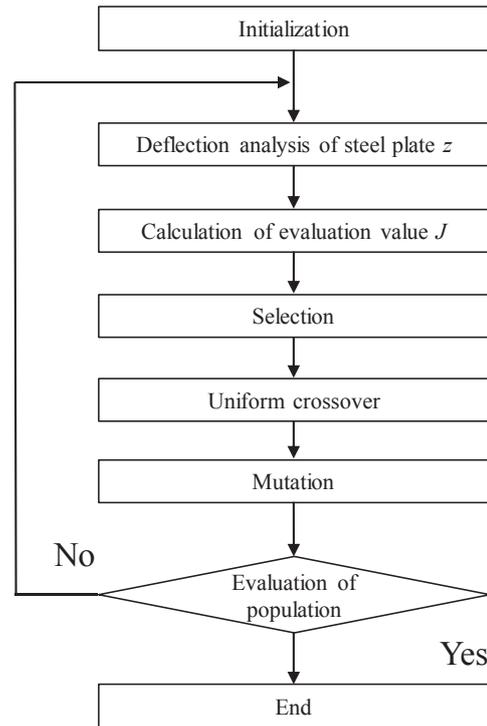


Fig. 8 Flow chart of genetic algorithm for finding optimal arrangement of permanent magnets.

$$J_D = |z_{\max}| \quad (5)$$

$z_{\max}$  は得られた鋼板形状の全解析点におけるたわみ量のうち, 絶対値の最大値である. 永久磁石を設置せず, 電磁石から吸引力が加わった場合の  $J_Z$ ,  $J_D$  を  $J_{Z0}$ ,  $J_{D0}$  と定義した. 一般的に複数の評価指標に対して最適化を行う場合, それぞれに重み係数をかけて一つの評価値とする手法がとられている. そこで平均たわみ量, 最大たわみ量に関する重み係数  $W_Z$ ,  $W_D$  をそれぞれ導入し, 評価値  $J$  はそれぞれの項を無次元化した式(6)の評価関数を用いた.

$$J = \frac{J_Z}{J_{Z0}} \times W_Z + \frac{J_D}{J_{D0}} \times W_D \quad (6)$$

$$W_Z = W_D = 0.5$$

評価値  $J$  は電磁石のみ設置した場合に 1 となり, 数値が低いほどたわみの抑制効果が高いことを示す.  $W_Z$ ,  $W_D$  はそれぞれ平均たわみ量, 最大たわみ量に関する重み係数である.

## 3. 磁気浮上制御への最適配置の適用

### 3.1 最適配置の探索法

永久磁石の吸引力は Gap によって変化するため, 各 Gap における薄鋼板のたわみを効果的に抑制する最適な永久磁石の個数と配置の最適化をそれぞれ行う. しかし, 実験的に最適値を探索することは探索パターンが非常に膨大であるため現実的に困難である. そこで最適化アルゴリズムである GA を用いて最適な永久磁石配

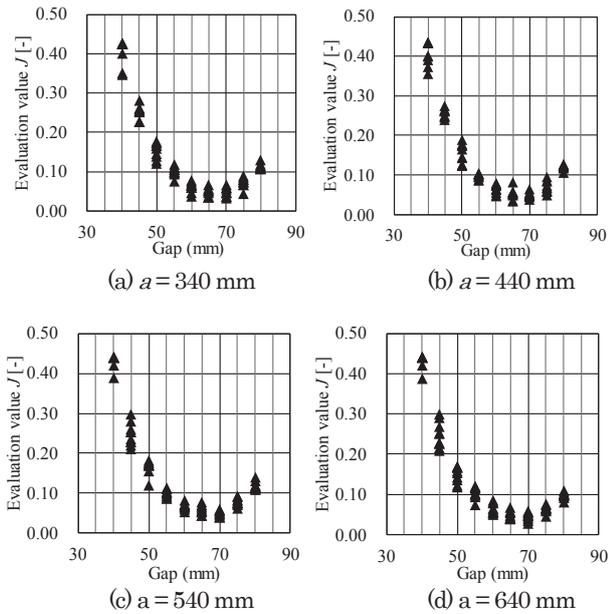


Fig. 9 Results of evaluation value  $J$  at gap between permanent magnets and steel plate.

置の探索を行った。GAのフローチャートをFig. 8に示す。まず、永久磁石の個数と初期配置をランダムに決定する (Fig. 8における Initialization: 初期集団発生数 32)。次に重力と永久磁石の吸引力が作用する際の薄鋼板の形状を計算し (Deflection analysis of steel plate), 上述の式(6)より評価値  $J$  を計算する (Calculate the evaluation value)。この評価関数によって最適配置の候補を選出し (Selection: 上位 2 位を無条件に残すエリート保存則を適用), これらの中で更に一定の確率で新たな配置を生成させ最適解へと近づける (Uniform crossover: 一様交叉を用い交叉率は 90%)。しかし、類似した配置パターンの集団は局所解に陥る可能性を有するために、1%の確率で配置を分散させ多様性を確保する (Mutation)。評価値が一定世代変化しない場合探索を終了するが、予備的な検討から 300 世代以上では同様の結果が得られることを確認している。本論文では評価関数の最終値が 300 世代変化しない場合、計算を終了する。Gap の探索範囲は先の研究結果を踏まえて 40 mm から 80 mm まで、刻み値を 5 mm とした。なお、GA の性質上、得られた最適値が局所解に陥る可能性があるため、同じ Gap にて 10 回の探索を行うものとした。これらを、水平方向電磁石の電磁石中心間距離を 340 mm から 640 mm まで 100 mm ごとに変化させて行った。すなわち、各電磁石中心間距離において 90 回の探索を行っている。

### 3.2 探索結果

GAにより得られた永久磁石の個数、配置、Gapから式(1)を用いて、薄鋼板のたわみをFDMによって得られ、このときの平均たわみ  $J_z$  と最大たわみ  $J_D$  が算出される。式(6)より、これらの値と重み係数から評価値  $J$  を求める。Fig. 9に各電磁石中心間距離の10回の探索結果の評価値  $J$  を示す。このときの各電磁石中心間距離において、評価値  $J$  が最も小さい探索結果をその電磁石中心間距離の最適値とした。Fig. 9 (b)のとき、評価値  $J$  が最も低かった

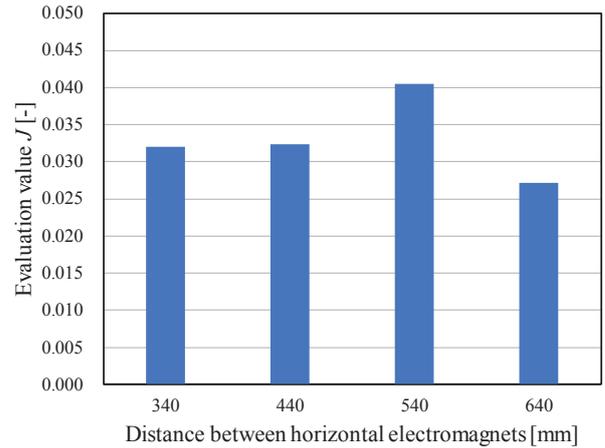


Fig. 10 Evaluation value  $J$  at each distance between horizontal electromagnets.

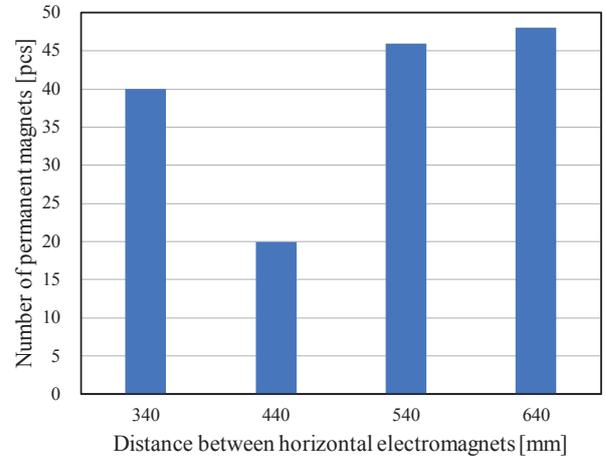
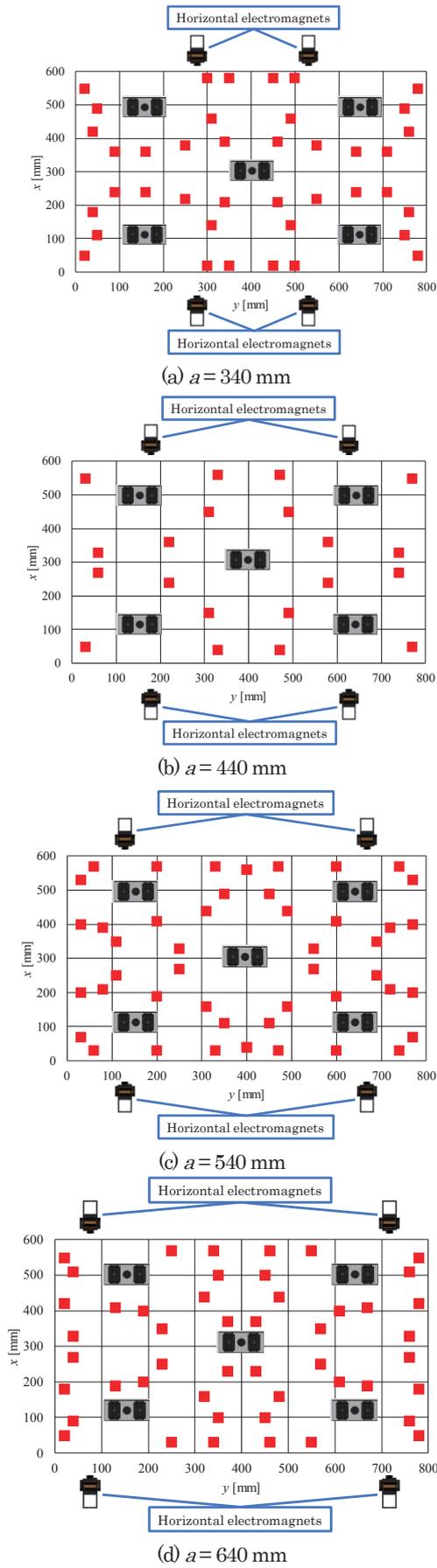
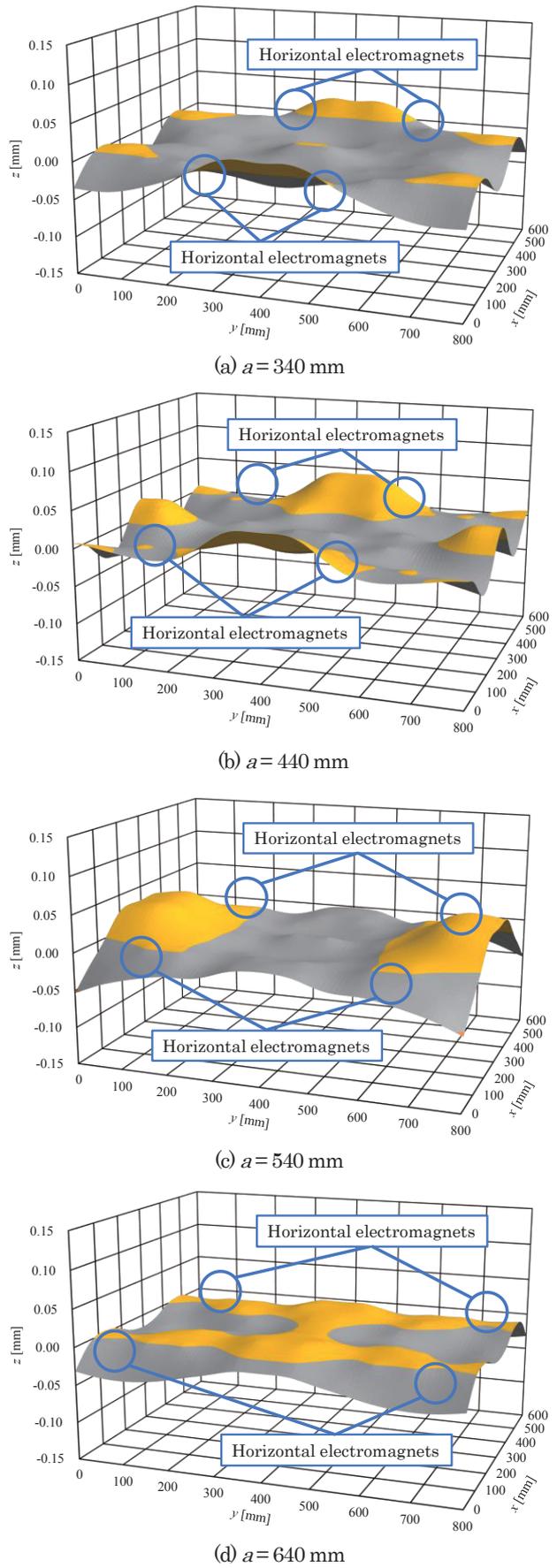


Fig. 11 Number of permanent magnets at each distance between horizontal electromagnets.

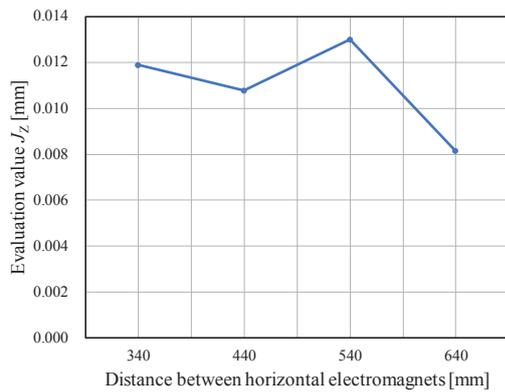
のは Gap が 65 mm のときであり、Fig. 9 (a), (c), (d) のとき、評価値が最も低かったのは Gap が 70 mm であった。また、各電磁石中心間距離において Gap が 40 mm のときが最も評価値が高くなることを確認した。これは永久磁石と鋼板の距離が近すぎる場合、永久磁石の鋼板に対する吸引力が大きく働きすぎたため、永久磁石によるたわみの抑制ができなかったと考えられる。また、永久磁石と鋼板の距離が Gap の最適値より離れた場合では、鋼板に働く永久磁石の吸引力が小さくなったため、たわみの抑制ができなかったと考えられる。Fig. 10 に各電磁石中心間距離での評価値  $J$  の最適値を示す。いずれの電磁石位置においても評価値  $J$  が 0.05 以下であり、平均たわみ、最大たわみが 5% 以下に低減されており、最適化が同等に行われていることが分かる。また、Fig. 11 に各電磁石中心間距離での最適化された永久磁石の個数を示す。  $a = 440$  mm の際に個数が減少したが、全体的に 40 個前後となった。  $a = 640$  mm のとき永久磁石の個数は 48 個と最も多い結果となった。最適値の永久磁石配置を Fig. 12 に示し、Fig. 13 に浮上中の鋼板形状を示す。Fig. 12 と Fig. 13 はそれぞれ (a)  $a = 340$  mm, (b)  $a = 440$  mm, (c)  $a = 540$  mm, (d)  $a = 640$  mm の結果である。



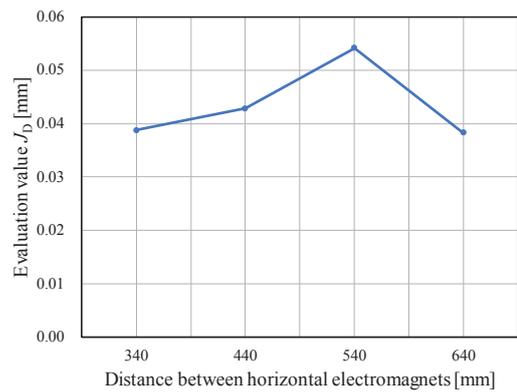
**Fig. 12** Optimal arrangement of permanent magnets.



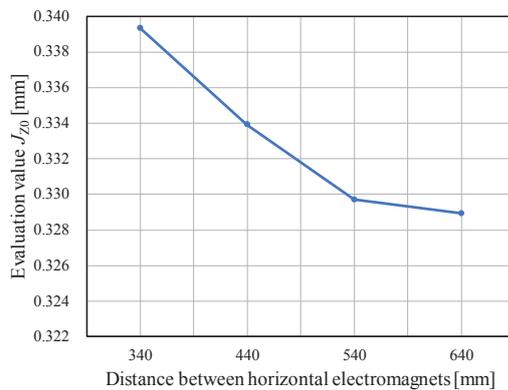
**Fig. 13** Optimized shape of steel plate from bird's eye view.



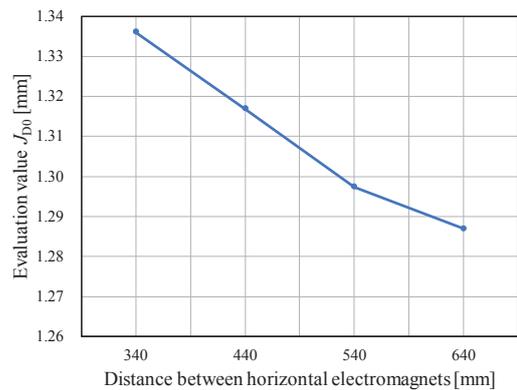
**Fig. 14** Evaluation value  $J_z$  at each distance between horizontal electromagnets.



**Fig. 16** Evaluation value  $J_D$  at each distance between horizontal electromagnets.



**Fig. 15** Evaluation value  $J_{z0}$  at each distance between horizontal electromagnets.



**Fig. 17** Evaluation value  $J_{D0}$  at each distance between horizontal electromagnets.

Fig. 9, Fig. 12, Fig. 13 よりそれぞれの水平方向電磁石の電磁石中心間距離で得られる最適な永久磁石配置およびGapが異なることが確認できる。また、永久磁石は電磁石の吸引力が加わっていない位置に多く設置され、電磁石の近傍にはあまり設置されていない。Fig. 13 より、各電磁石中心間距離における永久磁石の最適配置において、Fig. 5 の電磁石のみで鋼板を浮上させた際の鋼板形状と比較して、鋼板が最もたわんでいる領域のたわみが抑制されていることが確認できる。Fig. 5 と Fig. 13 は鋼板形状を明確に示す都合上、 $z$ 軸のスケールは異なっていることを付言する。

また、各電磁石中心間距離によって最適化の初期形状  $J_{z0}$ 、 $J_{D0}$  が異なるため、Fig. 10 の評価値  $J$  のみで比較することはできない。そこで、磁石中心間距離に対する鋼板の平均たわみ量  $J_z$  を Fig. 14、鋼板の平均たわみ量  $J_{z0}$  を Fig. 15、鋼板の最大たわみ量  $J_D$  を Fig. 16、鋼板の最大たわみ量  $J_{D0}$  を Fig. 17 に示す。Fig. 15 と Fig. 17 より、鋼板の平均たわみ量  $J_{z0}$ 、最大たわみ量  $J_{D0}$  が最も小さいのは  $a = 640$  mm のときであった。Fig. 14 と Fig. 16 の鋼板の平均たわみ量  $J_z$ 、最大たわみ量  $J_D$  では  $a = 640$  mm と他の電磁石中心間距離との差が小さくなっていることが確認でき、永久磁石によって鋼板のたわみが抑制されたことが分かる。

Fig. 8 より、各電磁石中心間距離で、最も評価値  $J$  が小さくなったのは  $a = 640$  mm のときであった。水平電磁石の距離が近い場合では、鋼板形状から鋼板の長辺の中心付近で鋼板が上方に大き

くたわんでいることが確認でき、互いの水平方向電磁石の張力が干渉し、たわみが増加したと考えられる。水平方向電磁石の距離が離れると、鋼板形状の長辺に発生していたたわみは小さくなるということが確認できた。これは鋼板の四辺に張力を印加することができるため、鋼板のたわみが抑制されたと考えられる。

#### 4. まとめ

本論文は、電磁石の吸引力の及ばない箇所に永久磁石を設置し、薄鋼板の浮上性能を向上させるシステムについて検討を行った。このとき、水平方向電磁石の電磁石中心間距離を変化させ、永久磁石と鋼板の距離を変更して最適化を行った結果、水平方向電磁石による張力印加位置によって、鋼板の全体的なたわみと局所的なたわみをそれぞれ抑制できる配置が得られた。今後は、各電磁石中心間距離の最適値を用いて鋼板の磁気浮上実験を行い、最適化の妥当性について実験的に検討を行っていく。さらに様々な外乱条件下で実験を行い、評価値と浮上安定性の関係についてより詳細な検討を行っていく予定である。また、本論文における最適化においては鋼板の静的形状を元に探索を行った。搬送時の加減速や空気抵抗、渦電流の影響など、より実挙動を考慮した探索を行うため、慣性項、減衰項を加えた動的挙動を最適化のプロセスに組み込む手法についても検討を行っていく。

## References

- 1) S. Matsumoto, Y. Arai, and T. Nakagawa: *IEEE Trans. Magn.*, **50**, 8600304 (2014).
- 2) T. Namerikawa and D. Mizutani: *Trans. IEEJ*, **36**, 1319 (2006).
- 3) M. Morishita and M. Akashi: *IEEE Trans. Industry Appl.*, **119**, 1289 (1998).
- 4) Y. Oda, Y. Ito, K. Okuno, M. Kida, T. Suzuki, A. Endo, T. Narita, H. Kato, and H. Moriyama: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **43**, 1 (2019).
- 5) Y. Oshinoya, K. Ishibashi, and T. Sekihara: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser. C*, **68**, 1428 (2002).
- 6) T. Narita, S. Hasegawa, and Y. Oshinoya: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **37**, 2 (2016).
- 7) T. Narita, S. Hasegawa, and Y. Oshinoya: *Proc. Schl. Eng. Tokai Univ., Ser. E*, **38**, (2013).
- 8) T. Suzuki, M. Kida, Y. Oda, T. Narita, H. Kato, and H. Moriyama: *J. Jpn. Soc. Appl. Elec. Mech.*, **26**, 1, (2018).
- 9) H. Ishii, T. Narita, and H. Kato: *J. Jpn. Soc. Appl. Electromag. Mech.*, **24**, (2016).

2021年11月07日受理, 2022年01月15日採録