

電磁石と永久磁石を併用した磁気浮上システムにおける 鋼板形状に関する実験的検討

Experimental study on steel plate shape in magnetic levitation system using both electromagnet and permanent magnet

伊藤 誉淳・小田 吉帆・椎名 敦紀・成田 正敬[†]・加藤 英晃

東海大学, 神奈川県平塚市北金目 4-1-1 (〒259-1292)

Y. Ito, Y. Oda, A. Shiina, T. Narita[†], H. Kato

Tokai Univ., 4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka-shi, Kanagawa 259-1292, Japan

In the process of manufacturing thin steel plates, the deterioration in the surface quality of steel plates is a serious problem caused by contact between the plates and rollers. To solve this problem, our research group considered non-contact suspension by using electromagnetic levitation. When the thickness of a steel plate is too thin, levitation control becomes difficult because the deflection of the steel plate leads to complex vibration. Therefore, we previously proposed adding permanent magnets to suppress the deflection. The patterns in which the magnets were arranged were too large in number to find the optimum arrangement experimentally, so we applied a genetic algorithm to search for the optimum arrangement. In the previous study, optimization was carried out to suppress the average and maximum deflection of steel plates equally, and we confirmed that the levitation performance was improved by applying an optimized arrangement of permanent magnets. In this paper, we optimized the arrangement by changing the weight factor of the average and maximum deflection with the genetic algorithm and performed a levitation experiment by using this optimized arrangement. From the results, 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¹⁻⁴⁾。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⁵⁾。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。しかし、「永久磁石の個数」や「永久磁石の配置」、「薄鋼板と永久磁石間の距離」などのパラメータを検討する必要がある。しかし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 (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^{6,7)}。

これまでの検討では薄鋼板の平均たわみと最大たわみをどちらも抑制することに重点を置いて最適なパラメータの探索を行ってきた。しかし、薄鋼板の平均たわみと最大たわみの重み付けが、得られる最適配置に与える影響と実際の浮上性能について検討が行われていない。そこで、本論文では GA の平均たわみと最大たわみに対する重み付けを変化させ、GA から得られた永久磁石の配置結果の比較と考察を行った。さらに、得られた永久磁石配置を用いて板厚 0.24 mm を対象に浮上実験を行い、薄鋼板の振動抑制効果について検討を行った。

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, の長方形垂鉛めっき鋼板 (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磁気浮上させる。

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)

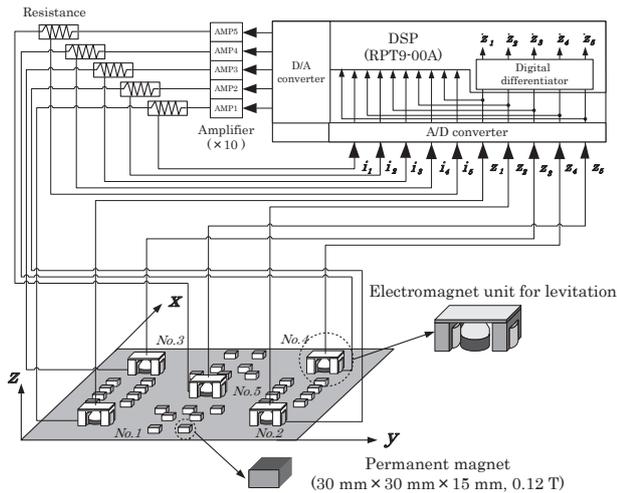


Fig. 1 Outline of electromagnetic levitation control system with permanent magnets.

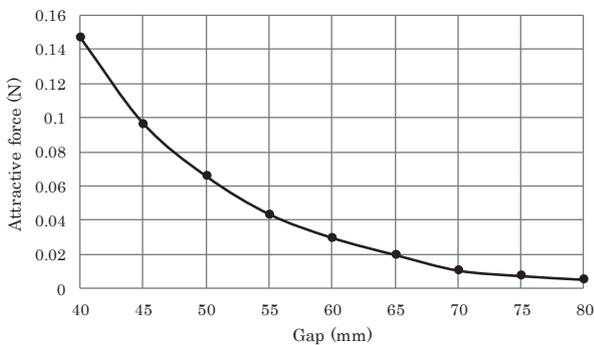


Fig. 2 Relationship between gap and attractive force in analysis.

の表面磁束密度は 0.12 T である。この永久磁石が鋼板に発生させる吸引力は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。この特性を把握するため、200 mm × 200 mm × 0.24 mm の鋼板の上方に永久磁石が設置されたモデルを作成し、有限要素法による電磁界解析を行った。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図 2 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。

$$D\nabla^4 z = f_{PM} - \rho hg \quad (1)$$

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

$$\nabla^4 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4}$$

ここで E : 薄鋼板のヤング率 [N/m²], h : 薄鋼板の厚さ [m], 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_{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当たりの吸引力 [N/m²], ρ : 薄鋼板の密度 [kg/m³], g : 重力加速度 [m/s²] である。

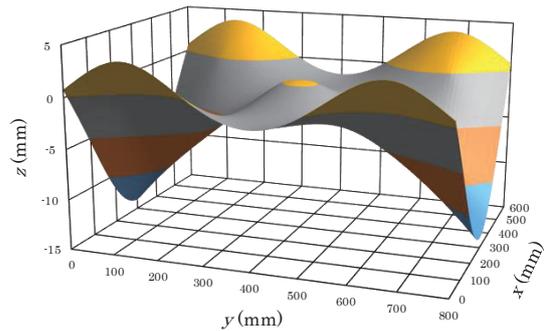


Fig. 3 Bird's eye view of shape of steel plate levitated with only electromagnets.

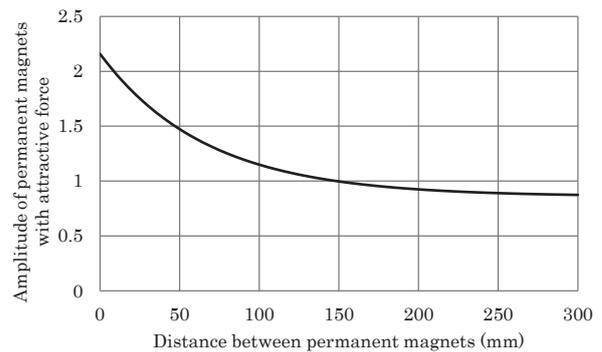


Fig. 4 Amplitude of permanent magnets with attractive force at each distance between permanent magnets.

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 (FDM) によって計算する。このとき、差分解析格子の大きさは 10 mm × 10 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. 3 に式 (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⁹⁾。Fig. 4 に相互作用による永久磁石間距離と吸引力の増加率の関係を示す。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(2)のように定義した。

$$J_z = \frac{\sum_{i=1}^N |z_i|}{N} \quad (2)$$

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、 $N =$

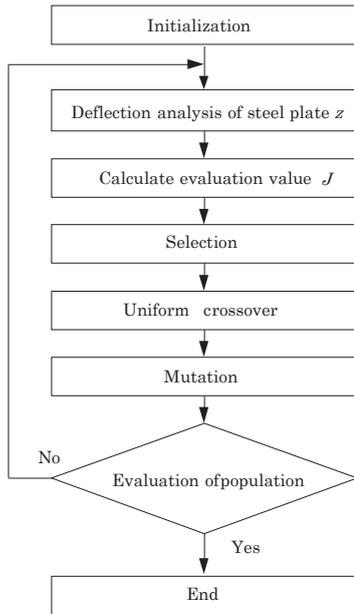


Fig. 5 Flow chart of genetic algorithm for finding optimal arrangement of permanent magnets.

4941 である。次に鋼板の最大たわみ量 J_D を式(3)のように定義した。

$$J_D = |z_{\max}| \quad (3)$$

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(4)の評価関数を用いた。

$$J = \frac{J_z}{J_{z0}} \times W_z + \frac{J_D}{J_{D0}} \times W_D \quad (4)$$

$$W_z + W_D = 1.0$$

評価値 J は永久磁石を設置していない電磁石のみの場合に 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置の探索を行った。GA のフローチャートを Fig. 5 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. 5 における

Table 1 Search condition.

Pattern	Weighting factor of the average deflection W_z	Weighting factor of the maximum deflection W_D
1	0.0	1.0
2	0.1	0.9
3	0.3	0.7
4	0.5	0.5
5	0.7	0.3
6	0.9	0.1
7	1.0	0.0

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 (4) 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ふまえて, 40 mm から 80 mm まで, 5 mm ごととした。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, 重み係数を変化させて行った。変化させた重み係数は Table 1 のように 7 パターンに分けて行った。すなわち, 各パターンにおいて 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(4)より, これらの値と重み係数から評価値 J を求める。このとき各重み係数のパターンにおいて評価値 J が最も小さい探索結果をその重み係数のパターンの最適値とした。Fig. 7 に各重み係数のパターンにおける最適値の平均たわみ J_z , 最大たわみ J_D を示し, この時の永久磁石配置と Gap を Fig. 8 に示す。同図の (a) には重み係数 $W_z=0.1$, $W_D=0.9$, (b) は重み係数 $W_z=0.5$, $W_D=0.5$, (c) は重み係数 $W_z=0.9$, $W_D=0.1$ の結果である。また Fig. 9 に Fig. 8 のように永久磁石を配置した際の浮上中の鋼板形状を示す。なお各条件は Fig. 8 と対応している。

これらの結果からそれぞれの重み係数で得られる最適な永久磁石配置および Gap が異なり, 鋼板に生じる各たわみ量も変化していることが確認できる。平均たわみを重視することで鋼板の平均たわみ量が減少するが, 平均たわみを重視したため, 最大たわみ量は増加している。Fig. 2 より, Gap によって永久磁石からの吸引

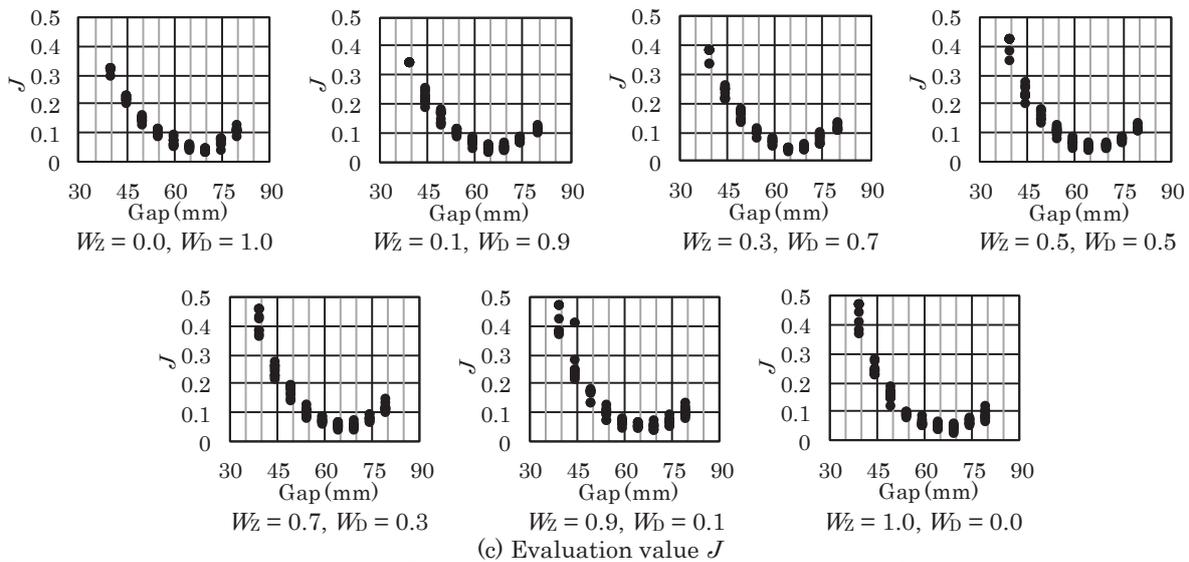
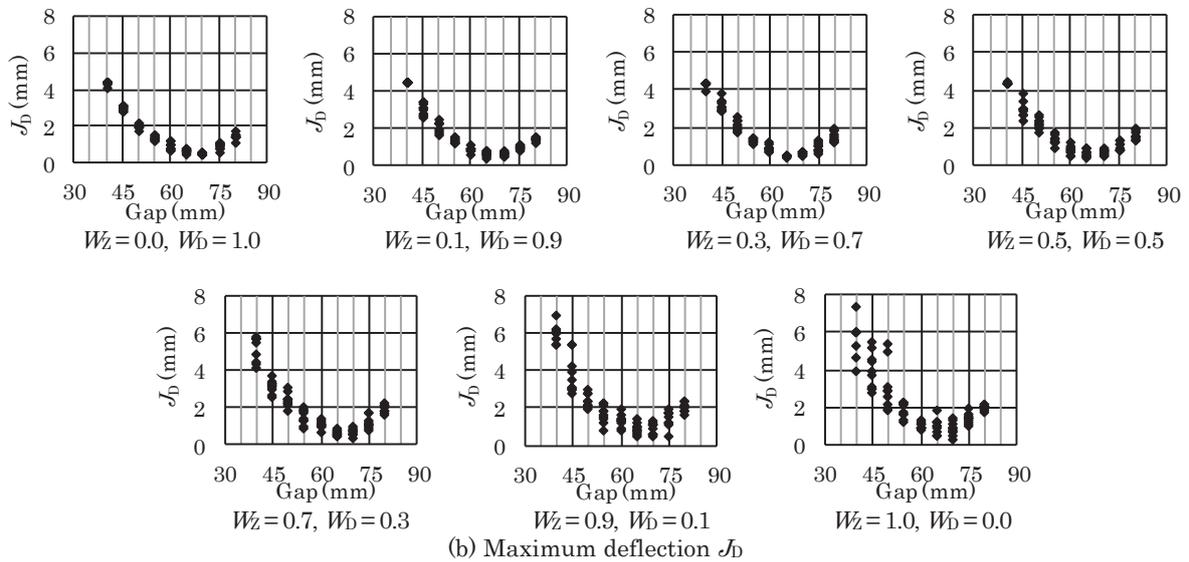
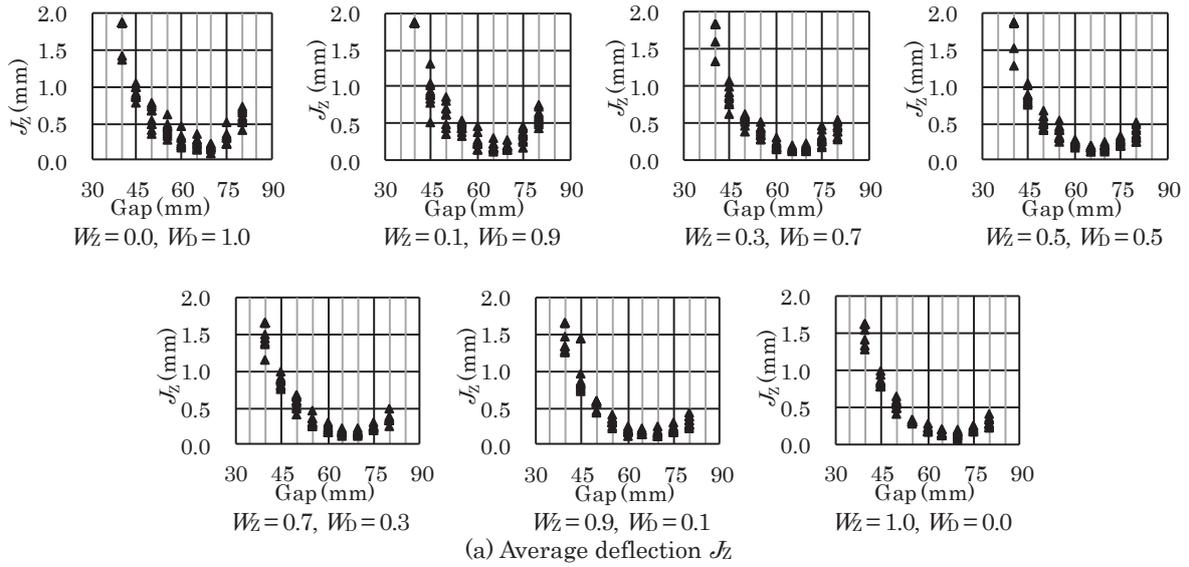


Fig. 6 Results of optimized average deflection, maximum deflection, and evaluation value for each weighting factor.

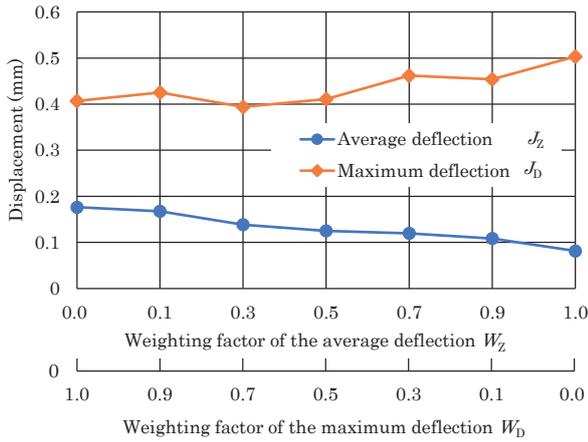
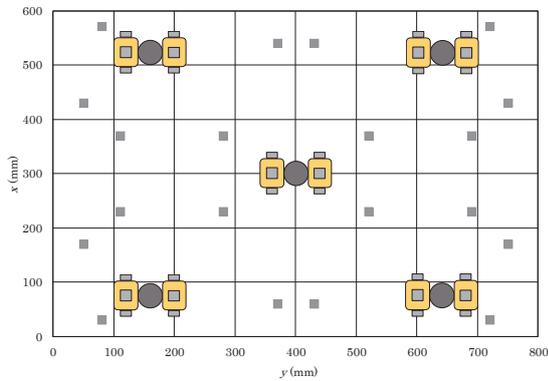
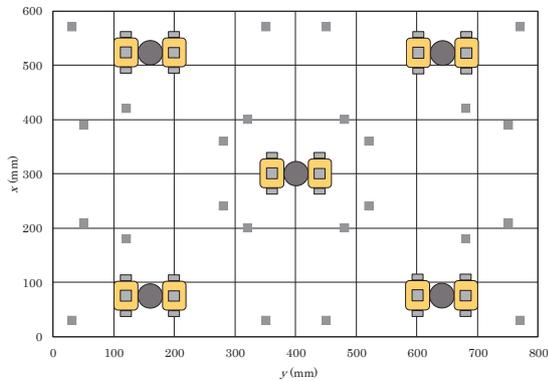


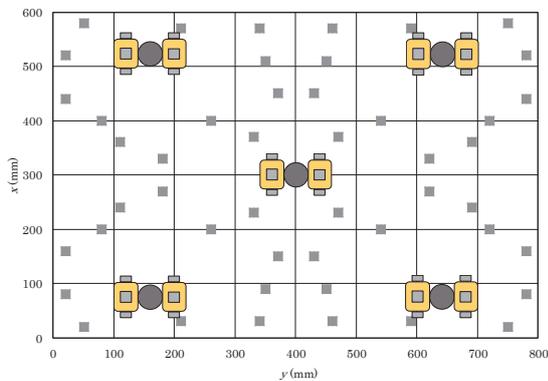
Fig. 7 Relationship between weighting factors and displacement in analysis.



(a) $W_z=0.1, W_d=0.9$ [Gap 65 mm]

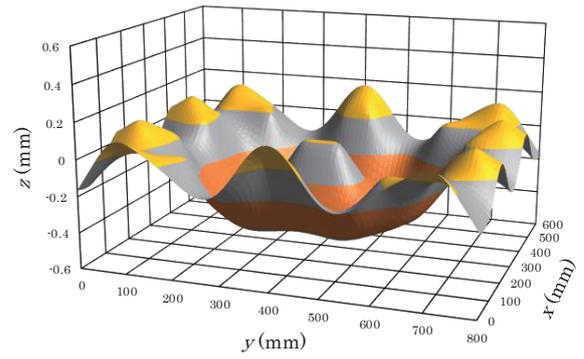


(b) $W_z=0.5, W_d=0.5$ [Gap 65 mm]

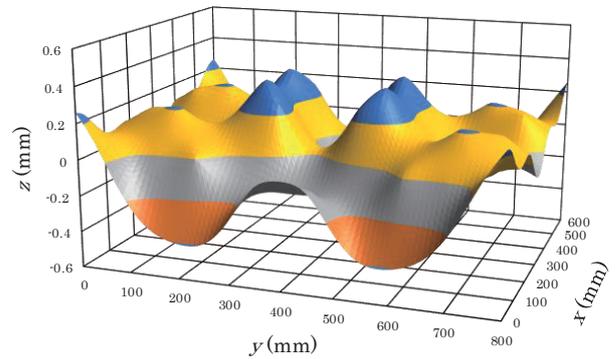


(c) $W_z=0.9, W_d=0.1$ [Gap 70 mm]

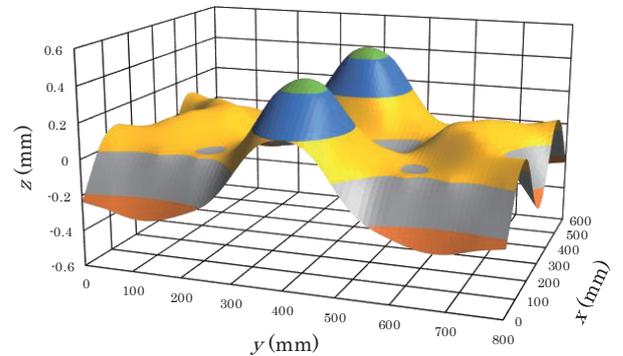
Fig. 8 Optimal arrangement of permanent magnets.



(a) $W_z=0.1, W_d=0.9$



(b) $W_z=0.5, W_d=0.5$



(c) $W_z=0.9, W_d=0.1$

Fig. 9 Optimized shape of steel plate from bird's eye view.

力が変化するので、Gapが大きくなれば1つの永久磁石の吸引力が小さくなる。よって、Fig. 8から永久磁石はGapが小さいほど設置する個数が少なく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効い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. 9からすべての最適配置でFig. 3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. 3とFig. 9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。

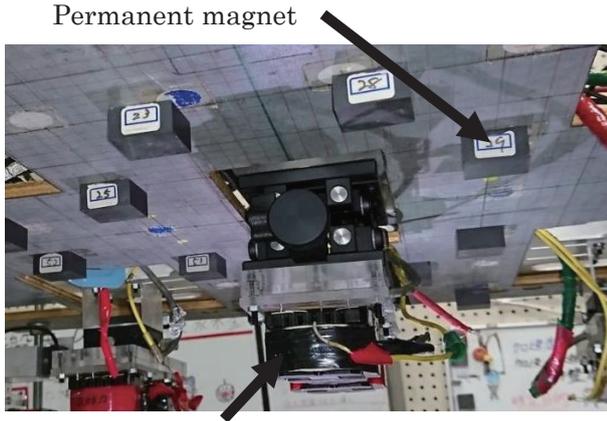


Fig. 10 Photograph of experimental device using electromagnet and permanent magnets.

4. 電磁石と永久磁石を併用した薄鋼板の磁気浮上システム

4.1 実験装置

浮上用電磁石ユニットは2つ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触変位センサで構成されている。使用する電磁石のコイルは線径が0.5 mm、巻数は1005回とした。2つのコイルの電気回路は直列結合されており、回路に印加される電流を検出した。本システムでは各電磁石ユニットから得られる変位ならびに電流の合計10個の観測値をA/DコンバータからDSPに入力し制御電圧を計算する。制御電圧はD/Aコンバータから電流供給用アンプへ出力され、薄鋼板を磁気浮上させる。

4.2 鉛直方向の浮上制御モデル

Fig. 10に永久磁石を設置した際の電磁石周辺の写真を示す。本研究では1カ所の電磁石位置で検出した変位、速度と電磁石コイルの電流値をその電磁石に対してのみフィードバックする。そこでFig. 11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および電磁石回路方程式と平衡点近傍での電磁石の特性方程式から以下のような状態方程式が得られる。

$$\dot{z} = A_z z + B_z v_z \quad (5)$$

$$z = [z \quad \dot{z} \quad i_z]^T$$

$$A_z = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{2F_z}{m_z Z_0} & 0 & \frac{2F_z}{m_z I_z} \\ 0 & -\frac{L_{\text{eff}}}{L_z} \times \frac{I_z}{Z_0^2} & -\frac{R_z}{2L_z} \end{bmatrix},$$

$$B_z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{2L_z} \end{bmatrix}^T$$

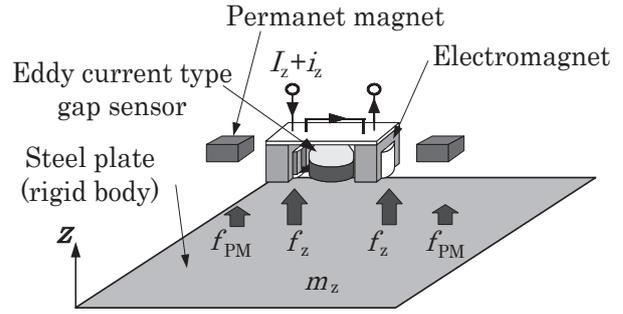


Fig. 11 Modeling of levitation control for one electromagnet unit with permanent magnets.

ここで Z_0 : 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], F_z : 電磁石ユニットから発生する静的な吸引力[N], I_z : 静的吸引力を得るための定常電流値[A], i_z : 電磁石コイル電流の変動値[A], 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つ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], L_{eff}/Z_0 : 電磁石の有効磁束に相当する定数[H], L_{lea} : 電磁石の漏れ磁束に相当する定数[H]である。

5. 浮上実験

第4章で得られた制御モデルをFig. 1のDSPに実装し、薄鋼板の浮上実験を行った。このとき第3章で得られた薄鋼板の振動抑制効果が高い永久磁石配置を検証した。板厚は解析と同様に0.24 mmの薄鋼板を用いて、それぞれの重み係数で得られた永久磁石配置を用いた。本実験では0 Hzから20 Hzのホワイトノイズを外乱としてFig. 1中のNo. 5の電磁石ユニットから入力した。実験はそれぞれ5回行い、測定した鋼板における変位の標準偏差を算出した。

Fig. 12にすべての重み係数パターンにおける変位標準偏差の平均値を示す。Fig. 12から平均たわみの重み係数 W_z を大きくすることで薄鋼板の変位標準偏差は少しずつ減少していき、 $W_z=0.5$, $W_D=0.5$ で最も低い変位標準偏差になることが確認できる。そして、さらに平均たわみの重み係数 W_z が大きくなることで変位標準偏差は上昇することが確認できる。Fig. 13に鋼板の時刻歴波形を示す。Fig. 13の(a)は $W_z=0.1$, $W_D=0.9$ を、(b)は $W_z=0.5$, $W_D=0.5$ を、(c)は $W_z=0.9$, $W_D=0.1$ を示す。Fig. 12より比較的変位標準偏差が高かったFig. 13の(a), (c)を見ると、(b)に対して数秒に1度ではあるが振幅が2倍程度となる時があることが確認できる。

以上の実験結果から平均たわみと最大たわみを変化させることで鋼板の振動にも影響を与えることを確認した。最も鋼板の振動を抑制できた永久磁石配置は平均たわみと最大たわみをどちらも同じくらいに抑制しようとして探索を行った $W_z=0.5$, $W_D=0.5$ の場合であり、平均たわみ、最大たわみだけを抑制する永久磁石配置は鋼板の振動を悪化させてしまうことを確認した。

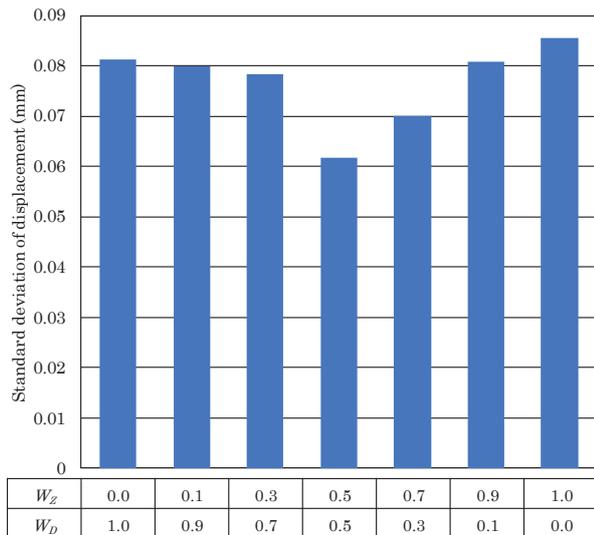


Fig. 12 Standard deviations of displacement in case of optimal arrangement for each condition.

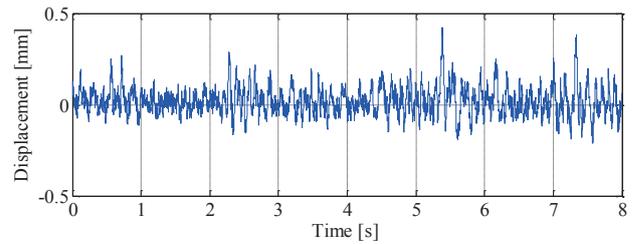
6. まとめ

本論文は浮上中の鋼板の全体的なたわみと局所的なたわみを評価して、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、それぞれのたわみに対する重み係数を変更して最適化を行った結果、重み係数に応じ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。

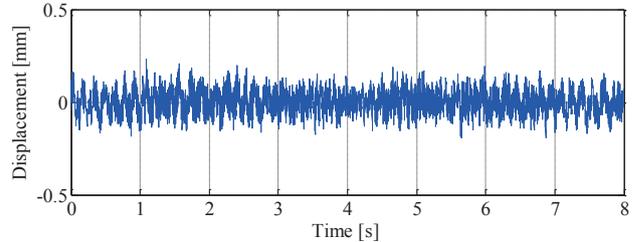
得られた配置を用いて浮上実験を行った結果、平均たわみ、最大たわみの両方を抑制するように重み係数を設定することで、薄鋼板の浮上性能を最も向上できる永久磁石配置を得られることが実験的に確認できた。

References

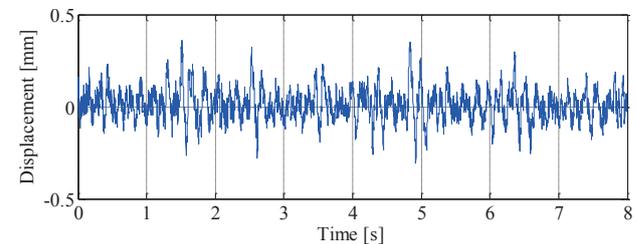
- 1) S. Matsumoto, Y. Arai, and T. Nakagawa: *IEEE Trans. Magn.*, **50**, 8600304 (2014).
- 2) T. Namerikawa and D. Mizutani: *Trans. IEEJ*, **36**, 1319 (2006).
- 3) M. Morishita and M. Akashi: *IEEJ Trans. Industry Appl.*, **119**, 1289 (1998).



(a) $W_z = 0.1, W_D = 0.9$



(b) $W_z = 0.5, W_D = 0.5$



(c) $W_z = 0.9, W_D = 0.1$

Fig. 13 Time histories of displacement of steel plate in case of optimal arrangement.

- 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) H. Ishii, T. Narita, and H. Kato: *J. Jpn. Soc. Appl. Electromag. Mech.*, **24**, (2016).

2019年11月08日受理, 2019年12月24日再受理, 2020年1月9日採録