

柔軟鋼板の湾曲磁気浮上制御（外乱相殺制御の基礎的検討）

Magnetic Levitation Control and Bending of Flexible Steel Plate (Fundamental Study on Disturbance Cancellation Control)

小川和輝^{a)}・多田誠^{a)}・成田正敬^{a)†}・加藤英晃^{a)}

^{a)} 東海大学工学部, 神奈川県平塚市北金目 4-1-1 (〒259-1292)

K. Ogawa^{a)}, M. Tada^{a)}, T. Narita^{a)†}, and H. Kato^{a)}

^{a)} Department of Prime Mover Engineering, Tokai Univ., 4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka-shi, Kanagawa 259-1292, Japan

In the conveyance systems of production lines for thin steel plates, there is a problem in that the quality of the plate surface deteriorates because the plates are always in contact with rollers. To solve this problem, electromagnetic levitation technologies have been studied. When an ultrathin and flexible steel plate is to be levitated, controlling the levitation becomes difficult because the plate undergoes increased flexure. In this study, we herein propose a method of levitating an ultrathin steel plate that is bent to an extent that does not induce plastic deformation. To investigate the levitation stability of an ultrathin steel plate, we applied disturbance cancellation control in a bending and levitation system. The object of electromagnetic levitation was a rectangular zinc-coated ultrathin steel plate (SS400) with a length of 800 mm, width of 600 mm, and thickness of 0.19 mm. A vibrator was attached below three frames on which an electromagnet unit was installed so that the frames could be vibrated up and down. We conducted experiments on levitation performance when the electromagnet was displaced by frame vibration in the system. The results show that stable levitation can be realized even with an input external disturbance when levitating at the optimum bending angle.

Key words: magnetic levitation, vibration control, bending and levitation, optimal control, disturbance cancellation control

1. はじめに

近年、物体を非接触に把持・搬送することができる磁気浮上技術に注目が集まっており、磁力の特性を積極的に利用した活発な検討が行われている¹⁻⁶⁾。一方、表面の高品質化が要求される冷間圧延など薄鋼板製造ラインに磁気浮上技術を適用することが期待されるが、その板厚と面積に起因する柔軟性から弾性振動が励起され、浮上時の安定性が著しく損なわれる。この課題を解決するために浮上安定性に関する検討が行われている。一方、フィードバックのみの最適制御において、薄鋼板を塑性変形しない範囲で湾曲させ、磁気浮上させる方法を提案している⁷⁾。また、より実機に近い環境ではセンサおよび電磁石ユニットなどの装置自体に突発的あるいは定期的な振動が加わり、浮上性能が劣化する可能性がある。そこで、電磁石ユニットに振動を与えた場合の検討を行い、外乱状況下においても最適な湾曲度合いで浮上させることで、湾曲させずに浮上させるよりも高い浮上安定性を得ることが可能であることを確認している⁸⁾。しかし、これまでのような電磁石と鋼板との相対変位を一定に保つような制御を行う場合、鋼板を湾曲させることで装置自体に入力される外乱に対して受動的に浮上安定性を向上させることはできるが、従来の手法で対応不可能な外乱が入力された際に、浮上の維持は不可能となる。このため装置に入力される振動を検知し、装置自体の絶対変位を考慮した上で、浮上制御を行う必要がある。

当研究グループでは湾曲させない薄鋼板を用いて、外乱相殺制御を適用している⁹⁾。この制御モデルを湾曲磁気浮上システムに適用し、定期的な外乱であるランダムノイズで加振した浮上実験を行い、安定性が向上したことを確認している¹⁰⁾。

本研究は、突発的な外乱に対する薄鋼板における浮上安定性向上の為、外乱相殺制御を湾曲磁気浮上装置に適用し、

浮上用電磁石ユニットを取り付けているフレームにパルス波による振動を与えた状態で浮上実験を行った。フィードバックのみの最適制御と外乱相殺制御との比較から薄鋼板における制御性能に関する評価を行った。

2. 薄鋼板の湾曲制御システム

Fig. 1 に制御システムの概略図、Fig. 2 に湾曲浮上装置の概略図、Fig. 3 に実験に使用している電磁石ユニットを示す。浮上対象は長方形亜鉛めっき鋼板(長さ $a = 800$ mm, 幅 $b = 600$ mm, 厚さ $h = 0.19$ mm)を使用している。電磁石本体は E 型フェライトコアに直径 0.5 mm のエナメル線を 1005 回巻いたものである。渦電流式非接触変位センサを 2 個の電磁石で挟むように配置した電磁石ユニットを、3 台の加振器によってそれぞれ独立に上下加振させることが可能な 3 本のフレームに設置してある。

また、この 3 本のフレーム変位を検出するために別途 3 個の渦電流式非接触変位センサを設置している。長方形の薄鋼板を 5 か所の電磁石ユニットにより Fig. 4 に示すように吊り下げるようにして非接触支持するため、鋼板の絶対変位およびそのデジタル微分値である絶対速度、電磁石コイルに流れる電流の定常値からの変動分の観測値をフィードバックし、制御電圧を計算する。また外乱相殺制御を行う場合は、上述の観測値の他に電磁石ユニットを設置しているフレームの変位をフィードフォワードし制御量を計算する。D/A コンバータから電力供給用アンプへ制御電力を出力し、5 か所の電磁石ユニットから発生する吸引力を制御し、鋼板変位が絶対座標上で一定となるように磁気浮上させる。5 個の電磁石ユニットのうち周囲の No. 1~4 は傾け

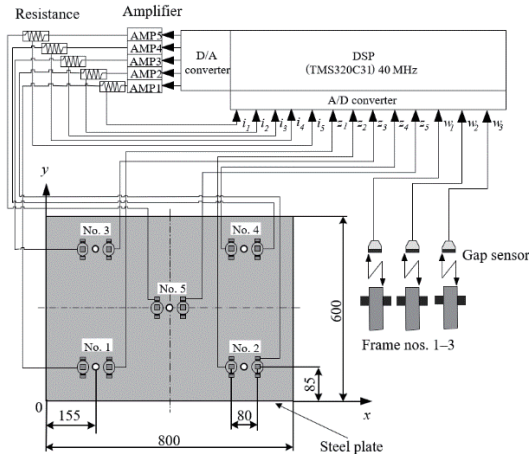


Fig. 1 Electromagnetic levitation control system.

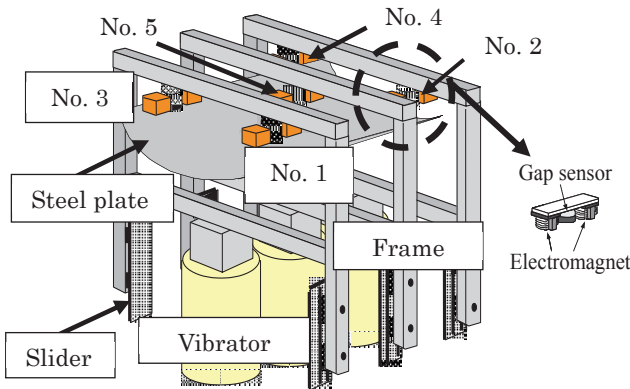


Fig. 2 Schematic illustration of experimental apparatus.

ることができる機構になっている。このように電磁石ユニットの角度を変更することで、鋼板を湾曲させて浮上させることができる。また、鋼板を湾曲させても電磁石が同じ位置に吸引力を印加できるように周囲の電磁石ユニット No. 1~4 は水平方向に、中央の電磁石ユニット No. 5 は鋼板の湾曲度合いに応じて垂直方向に動かすことができる。

加振器は、周波数一定の正弦波を用いてフレームの振幅および位相が一定になるように調整した後、フレームを振動させることで浮上鋼板に外乱を入力した。

3. 運動方程式

本研究では鋼板のモデリングの一つとして簡易な 1 自由度モデルを採択する。1 自由度モデルでは 5 個の電磁石ユニットが独立して浮上制御を行うため、鋼板を各電磁石に対する 5 つの質量に仮想的に分割し、分割した質量の変位、速度および対応する電磁石コイル電流それぞれを集中定数系としてモデル化を行う。鋼板を浮上させるためには、電磁石に定常電流を流すことによって発生する吸引力により鋼板の自重を支持する。さらにこのシステムは不安定系の

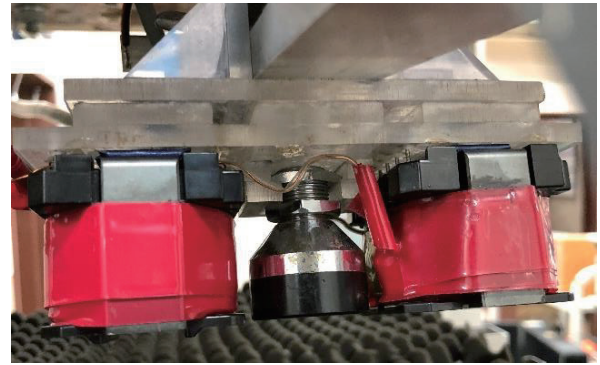


Fig. 3 Photograph of electromagnet.

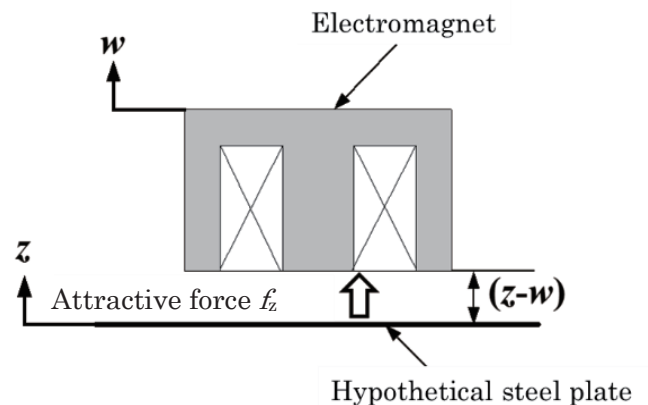


Fig. 4 One degree-of-freedom model of levitation control of steel plate.

ため、制御電流を加えて鋼板と電磁石の距離が 5 mm に維持できるように制御を行っている。電磁石からの静的吸引力によって仮想的に分割した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は以下ようになる。

$$m_z \frac{d^2}{dt^2} z(t) = 2f_z(t) \quad (1)$$

ここで、 m_z : 鋼板を仮想的に 5 つに分割した質量[kg], z : 鋼板の絶対変位[m], f_z : 電磁石 1 個当たりの吸引力の変動値[N]である。

さらにフレームの変位を w とすると、電磁石と鋼板の間の距離は $Z = z(t) - w(t)$ と表すことができる。電磁石 1 個当たりのコイルのインダクタンス L を次式のように距離 Z に反比例する成分と磁束の漏れに相当する成分の和として近似する。

$$L(Z) = \frac{K_{em}}{Z} + L_{lea} \quad (2)$$

ここで K_{em} : 電磁石の吸引力の比例定数 [Hm], L_{lea} : 電磁石 1 個あたりの漏れインダクタンス [H] である。

電磁石に加える電圧をとコイルに流れる電流 I の関係は、電磁石コイルの抵抗を R_z とすると

$$V_z(Z, I) = R_z I + \frac{d}{dt}(L(Z)I) \quad (3)$$

である。平衡点 (Z_0, I_0) 近傍でテーラー展開すると、電磁石

コイルに加わる定常電圧から変動値 v_z は

$$v_z = R_z i_z + L_z \frac{d}{dt} i_z - L_{\text{eff}} \frac{I_z}{Z_0^2} \frac{d}{dt} (z(t) - w(t)) \quad (4)$$

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ギャップ [m], L_z : 平衡浮上状態における電磁石コイルに流れる電流 [A], i_z : 電磁石コイルに流れる電流の変動値 [A], L_z : 式 (2) をより求めた平衡浮上状態における電磁石コイルのインダクタンスである。

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。

$$f_z(t) = \frac{F_z}{Z_0} (z(t) - w(t)) + \frac{F_z}{L_z} i_z(t) \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} i_z(t) = -\frac{L_{\text{eff}} I_z}{L_z Z_0^2} \frac{d}{dt} (z(t) - w(t)) - \frac{R_z}{2L_z} i_z(t) + \frac{1}{2L_z} v_z(t) \quad (6)$$

ここで F_z : 平衡浮上状態においてペアの電磁石の両方から発生する静的吸引力の合計値 [N] である。

また、フィードフォワード併合制御ではシステムに既知である外乱の周波数特性を組み込み、制御性能の向上を図る。そのため電磁石を支持しているフレームが振動した場合のフレーム絶対変位のパワースペクトル密度における周波数特性を近似する外乱成形フィルタを設計する。本研究では基礎的な検討を行うため外乱成形フィルタの次数は 2 次とし、状態変数の増加を最小限とした。外乱成形フィルタの伝達関数は s 領域において以下に示すように表される。

$$G(s) = \frac{\omega_f^2}{s^2 + 2\zeta_f \omega_f s + \omega_f^2} \quad (7)$$

ここで ζ_f , ω_f はこの伝達関数の出力がフレーム外乱変位のパワースペクトル密度にカーブフィットするよう決定した。

4. 外乱相殺制御モデルの状態方程式

4.1 磁気浮上システムの状態方程式

状態変数として鋼板の絶対変位, 絶対速度, 電磁石コイルに流れる電流, フレームの変位, 速度を採用し, 式(1), (5), (6)を整理して以下のような状態方程式を得る。

$$\dot{z} = A_z z + B_z v_z + d_z w \quad (8)$$

ただし

$$z = [z \quad \dot{z} \quad i_z]^T \quad (9)$$

$$w = [w \quad \dot{w}]^T \quad (10)$$

$$A_z = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{2F_z}{m_z Z_0} & 0 & \frac{2F_z I_z}{m_z L_z} \\ 0 & -\frac{K_{\text{em}} I_z}{L_z Z_0^2} & -\frac{R_z}{2L_z} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$B_z = [0 \quad 0 \quad \frac{1}{2L_z}]^T \quad (12)$$

$$d_z = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{F_z}{m_z Z_0} & 0 \\ 0 & \frac{K_{\text{em}} I_z}{L_z Z_0^2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

4.2 フレーム変位生成システム

式 (7) で表された外乱成形フィルタを状態空間表現する。状態変数 w_f として直接検出可能なフレームの絶対変位 w_f , フレームの速度 \dot{w}_f を選り状態空間表現すると以下のようになる。

$$\dot{w}_f = A_f w_f + d_f w_{\text{wh}} \quad (14)$$

$$w_f = [w_f \quad \dot{w}_f]^T$$

$$A_f = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_f^2 & -2\zeta_f \omega_f \end{bmatrix}$$

$$d_f = [0 \quad \omega_f^2]^T$$

$$E\{w_{\text{wh}}(t)\} = 0$$

$$E\{w_{\text{wh}}(t) w_{\text{wh}}^T(t')\} = k_{\text{wh}} \delta(t - t')$$

ただし w_{wh} は白色雑音 (変位) であり, $E\{\cdot\}$ は数学的期待値, k_{wh} は白色雑音のインテンシティ, $\delta(\cdot)$ はディラックのデルタ関数を意味している。

4.3 拡大システム

1 自由度系の磁気浮上システムとフレームからの外乱への生成システムを併合し, 白色雑音を入力とする拡大システムを設計する。なお, 制御系設計はこの外乱周波数特性を含んだ拡大システムに基づいて行うことになる。状態変数 z_{arg} として z , w_f を選ぶと, 式 (8), (14) から拡大システムの状態方程式は次式のようになる。

$$\dot{z}_{\text{arg}} = A_z^{\text{arg}} z_{\text{arg}} + B_z^{\text{arg}} v_z + D_z^{\text{arg}} w_{\text{wh}} \quad (15)$$

$$z_{\text{arg}} = [z^T \quad w_f^T]^T$$

$$A_z^{\text{arg}} = \begin{bmatrix} A_z & d_z \\ 0_{2 \times 3} & A_f \end{bmatrix}$$

$$B_z^{\text{arg}} = [B_z^T \quad 0_{1 \times 2}]^T$$

$$D_z^{\text{arg}} = [0_{1 \times 3} \quad d_f^T]^T$$

本研究では離散時間系最適制御理論 \mathcal{N} に基づいて制御系を設計した。本研究で扱うモデルの場合, 鋼板の絶対変位の定常位置からの変動分, 絶対速度ならびに電磁石コイル電流の定常値からの変動分のみを状態量として評価するのが最も基本的な方法である。しかしフレーム加振による入力外乱の周波数特性が既知であり, その検出が容易であることから外乱を予測したフィードフォワード補償を行うことによりフィードバックのみの場合と比較して制御性能の向上が期待できる。

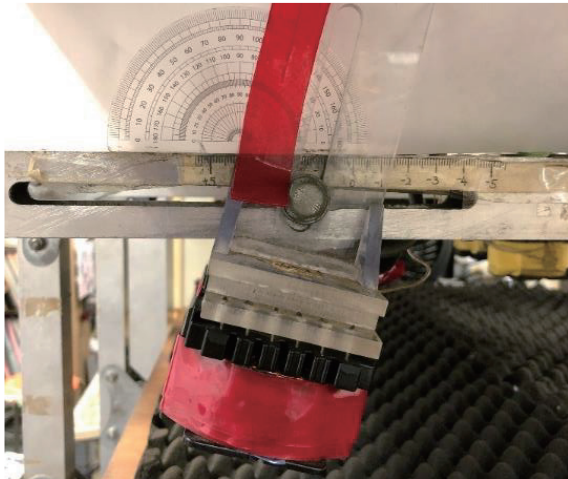
5. 最適制御理論

本研究では離散時間系最適制御理論に基づいて制御系を設計した。状態変数と制御入力を評価する無次元量の評価関数を次式のように定義した。

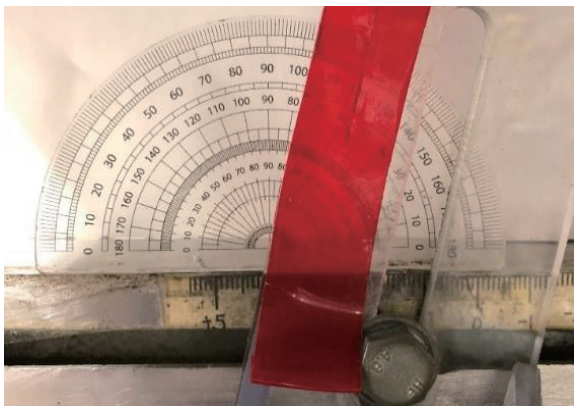
$$J = (1/2) \sum_{k=1}^{N-1} \{z_{\text{arg}}^T(k) Q_z^{\text{arg}} z_{\text{arg}}(k) + R_z^{\text{arg}} v_z^2(k)\} \quad (16)$$

ただし Q_z^{arg} : 状態変数に対する重み係数行列, R_z^{arg} : 制御入力に対する重み係数行列である。またこのときのフィードバック制御入力は以下のようになる。

$$v_z(k) = F_z^{\text{arg}} z_{\text{arg}}(k) \quad (17)$$



(a) Photograph of side view of electromagnet.



(b) Enlarged view.

Fig. 5 Electromagnet angle ($\theta = 13^\circ$).

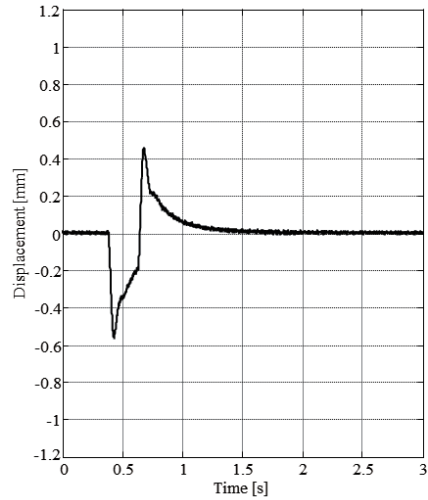
$$\mathbf{F}_z^{\text{arg}} = [\mathbf{F}_z^{\text{FB}} \quad \mathbf{F}_z^{\text{FF}}] \quad (18)$$

ここで \mathbf{F}_z^{FB} : フィードバックゲイン, \mathbf{F}_z^{FF} : フィードフォワードゲインである.

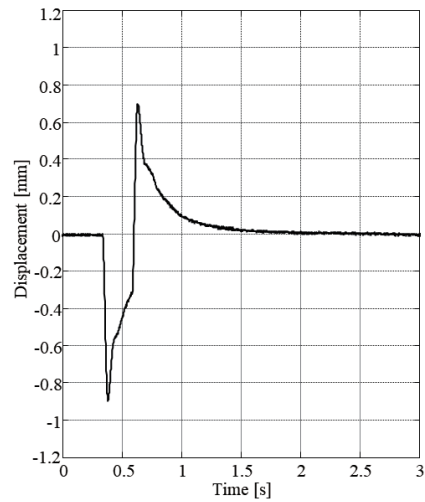
6. パルス波を用いた外乱入力実験

6.1 実験条件

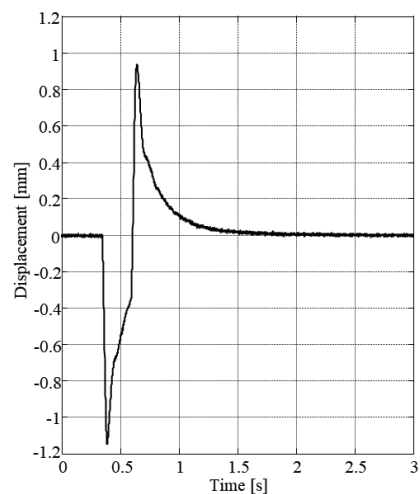
電磁石ユニットを取り付けているフレームに対して鉛直方向にパルス波の振動を与えた場合の浮上安定性について実験的に評価を行う. 本実験では提案する外乱相殺制御モデルと既報⁷⁾にて適用していた相対変位による1自由度フィードバック制御モデルを適用した. Fig.5 に電磁石角度 13° 時の写真を示す. 電磁石の角度は, 0.19 mm 鋼板において最も浮上性能が向上する 13° で湾曲浮上を行った. フレームを加振する条件として, フレームのパルス状振動の両振幅を $1.0 \text{ mm}_{\text{p-p}}$, $1.6 \text{ mm}_{\text{p-p}}$, $2.0 \text{ mm}_{\text{p-p}}$ になるように加振器を設定した. 3種類の振幅で加振させたフレームの変位時刻歴を Fig. 6 に示す. なお, 測定開始後 0.2 秒 後にパルス波を入力している.



(a) Amplitude: $1.0 \text{ mm}_{\text{p-p}}$.

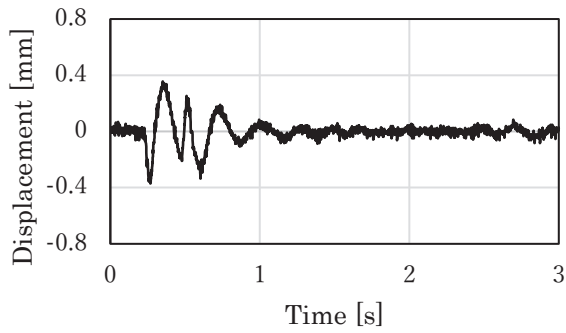


(b) Amplitude: $1.6 \text{ mm}_{\text{p-p}}$.

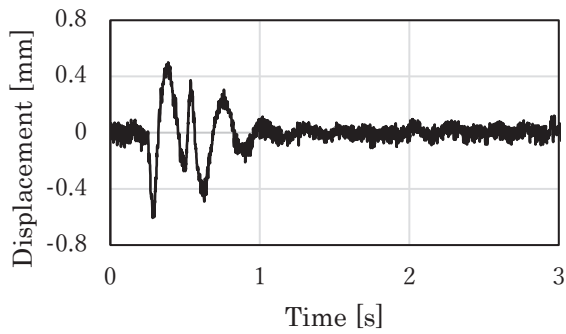


(c) Amplitude: $2.0 \text{ mm}_{\text{p-p}}$.

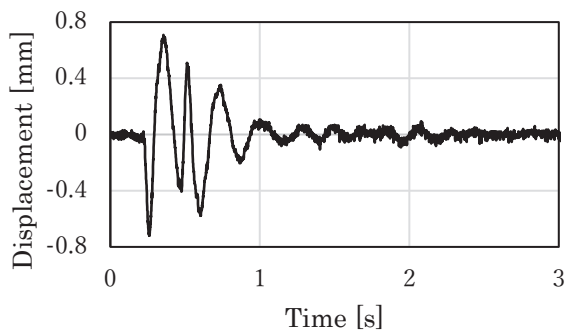
Fig. 6 Time histories of displacement of frames when vibrated by pulse disturbance.



(a) Amplitude: 1.0 mm_{p-p}.

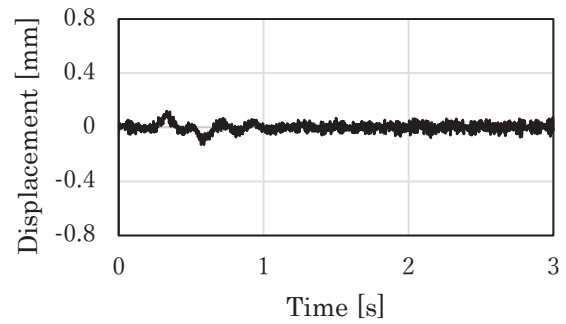


(b) Amplitude: 1.6 mm_{p-p}.

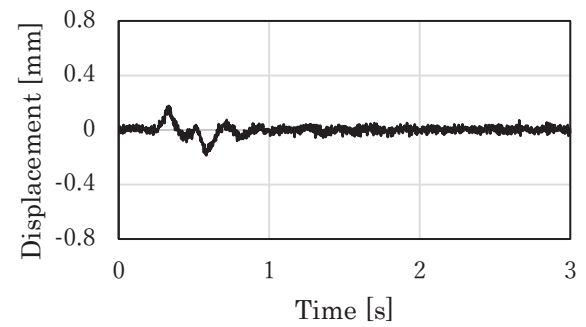


(c) Amplitude: 2.0 mm_{p-p}.

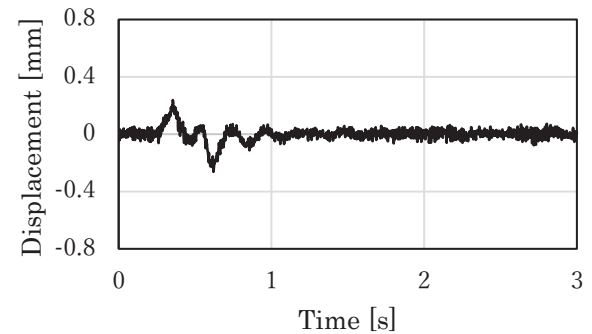
Fig. 7 Time histories of displacement of thin steel plate (1 DOF feedback control model).



(a) Amplitude: 1.0 mm_{p-p}.



(b) Amplitude: 1.6 mm_{p-p}.



(c) Amplitude: 2.0 mm_{p-p}.

Fig. 8 Time histories of displacement of thin steel plate (disturbance cancellation control model).

6.2 実験結果

Fig. 7 に 1 自由度フィードバック制御モデルを用いた場合のそれぞれの振幅における薄鋼板の変位時刻歴, Fig. 8 に外乱相殺制御モデルを用いた場合の薄鋼板の変位時刻歴を示す. 両図の(a)は 1.0 mm_{p-p} の場合, (b)は 1.6 mm_{p-p}, (c)は 2.0 mm_{p-p} の結果である. Fig. 7 および Fig. 8 より 1 自由度フィードバック制御モデルを適用した場合と外乱相殺制御モデルを適用した場合の鋼板の変位時刻歴の両振幅を比較すると, どの振幅の振動を入力した場合であっても, 外乱相殺制御モデルの方が, 薄鋼板の両振幅を制御することができた. 1 自由度フィードバック制御モデルの場合, 加振振幅が大きくなるに従って, 鋼板変位の両振幅も増加

する傾向にあるが, 外乱相殺制御モデルの場合は, 加振振幅を増加した場合でも, 鋼板変位の両振幅はほぼ一定である. また, 振動の減衰に関しては, 1 自由度フィードバック制御モデルでは与えられた振動が収束するまでに必要とする時間は 1 秒~1.5 秒であるが, 外乱相殺制御モデルを適用した場合は, 1 秒以内に振動を収束することができた.

7. おわりに

本研究では湾曲磁気浮上装置における電磁石ユニットに関する基礎的な考察として, 鋼板の絶対変位をフィードバックする外乱相殺制御を適用し薄鋼板の湾曲磁気浮上実験

を行った。その結果、外乱相殺制御を適用することにより、
1 自由度フィードバック制御モデルと比較し振動を抑制する性能を飛躍的に向上できることが確認できた。今後の予定として、他の板厚おける浮上性能傾向を同じ実験装置で考察を行う。

References

- 1) T. Mizuno: *J. Jpn. Soc. Prec. Eng.*, **68**, 1180 (2002).
- 2) A. Javed, T. Mizuno, M. Takasaki, Y. Ishino, M. Hara, and D. Yamaguchi: *MDPI Actuators*, **7**, 21 (2018).
- 3) M. Morishita, M. Akashi, and T. Azukizawa: *IEEEJ Trans. Ind. Appl.*, **120**, 509 (2000).
- 4) Y. Odajima, Y. Takada, I. Oikawa, and T. Nakagawa: *IEEEJ Trans. Ind. Appl.*, **138**, 692 (2018).
- 5) S. Iwashita, and S. Torii: *IEEEJ Trans. Ind. Appl.* **135**, 475 (2015).
- 6) T. Mizuno, M. Kosugi, and S. Fukuzawa: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **31**, 445 (2007).
- 7) H. Marumori, H. Yonezawa, T. Narita, H. Kato, and Y. Oshinoya: *Trans. of Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **81**, 14-00471 (2015).
- 8) M. Tada, H. Yonezawa, H. Marumori, T. Narita, and H. Kato: *Int. J. Appl. Elec. Mech.*, (Accepted).
- 9) S. Hasegawa, Y. Oshinoya, and K. Ishibashi: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **29**, 582 (2005).
- 10) K. Ogawa, M. Tada, T. Narita and H. Kato: *MDPI Actuators*, **7**, 43 (2018).

2018年10月31日受理, 2019年2月28日再受理, 2019年3月5日採録