T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)., **6**, 87-92 (2022)

<Paper>

水平方向からの磁場を用いた柔軟鋼板の磁気浮上（浮上中の振動特性に関する基礎的検討）

Electromagnetic levitation for flexible steel plate using magnetic field from horizontal direction (Fundamental consideration on vibration characteristic in levitating)

遠藤文人 [a)†]・嘉山周汰 [b)]・椎名敦紀 [b)]・ムハマドヌルハキミビンモハマドカマ [b)]
小川和輝 [c)]・池田圭吾 [c)]・加藤太朗 [c)]・成田正敬 [d)]・加藤英晃 [d)]
[a)]福岡工業大学工学部，福岡県福岡市東区和白東 3-30-1（〒811-0295）
[b)]東海大学大学院工学研究科，神奈川県平塚市北金目 4-1-1（〒259-1292）
[c)]東海大学大学院総合理工学研究科，神奈川県平塚市北金目 4-1-1（〒259-1292）
[d)]東海大学工学部，神奈川県平塚市北金目 4-1-1（〒259-1292）

A. Endo [a)†], S. Kayama [b)], A. Shiina [b)], M.N. Hakimi [b)], K. Ogawa [c)], K. Ikeda [c)], T. Kato [c)], T. Narita [d)], and H. Kato [d)]
[a)] Faculty of Engineering, Fukuoka Institute of Technology, *3-30-1 Wajiro-higashi, Higashi-ku, Fukuoka 811-0295, Japan*
[b)] Course of Mechanical Engineering, Tokai Univ., *4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa 259-1292, Japan*
[c)] Course of Science and Technology, Tokai Univ., *4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa 259-1292, Japan*
[d)] Faculty of Engineering, Tokai Univ., *4-1-1 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa 259-1292, Japan*

Deterioration in the surface quality of steel plates is a problem because steel plates are transported by contact with a roller. A non-contact way of transporting steel plates using electromagnetic force has been proposed as a solution to these problems. In the previous system for magnetically levitating flexible steel plates, it was difficult to levitate thinner steel plates because of the deflection of the steel plates during levitation. To solve this problem, an edge-supported electromagnetic levitation system was proposed. This system is suitable for flexible steel plates and uses electromagnets installed in the horizontal direction. These electromagnets create tension force and suspension force that acts on the steel plates. It is possible to reduce the vibration of flexible steel plates because the tension force suppresses the deflection of the plates. In this paper, the characteristics of tension force on steel plates were investigated by electromagnetic field analysis. Moreover, the relationship between tension force and the reduction in vibration was investigated by experiments using a magnetic levitation system.

Key words: magnetic levitation, flexible steel plate, vibration control, electromagnet, non-contact levitation

1. 緒言

自動車や家庭用電気製品の製造には厚さの薄い柔軟鋼板が広く用いられている．柔軟鋼板は製造ラインにおいてローラ等を使って搬送される．この搬送方式ではローラと柔軟鋼板が接触することから表面品質の劣化が問題となっている．そこで，磁気浮上技術を使った柔軟鋼板の非接触把持および搬送が提案されている [1)~4)]．しかしながら，柔軟鋼板は厚さが薄くなるほど曲げ剛性が低下し，浮上中にたわみが生じやすくなる．柔軟鋼板を対象とした多くの研究では，柔軟鋼板の上方に設置した電磁石を使って，磁力によって柔軟鋼板を浮上させていたが，磁力の及ばない範囲では柔軟鋼板にたわみが生じる．このたわみによって柔軟鋼板は振動し，安定した浮上が困難になり，場合によっては落下する恐れがある．

このような背景から著者らは，柔軟鋼板の水平方向に電磁石を設置し，柔軟鋼板を水平方向へ引っ張るように浮上させる磁気浮上システムを提案した [5)~6)]．このシステムでは柔軟鋼板上方に電磁石を必要とせず，水平方向から絶えず張力を発生させることから柔軟鋼板がたわみにくくなる．そのため，曲げ剛性が低いことからたわみやすくなってしまう厚さの薄い柔軟鋼板において安定した浮上が実現できる可能性を示した．

これまでの研究では柔軟鋼板が運動しないような静的な状態を仮定して解析を行ってきた．さらに磁気浮上制御についても，静解析の結果を基に行ってきた．しかしながら浮上中の柔軟鋼板には振動が発生しており，この振動特性は柔軟鋼板の厚さや電磁石が発生する張力によって大きく変化すると考えられる．そのため柔軟鋼板の厚さや電磁石による張力が柔軟鋼板の動特性へ与える影響を明らかにすることで，より安定した磁気浮上を実現できると考えられる．そこで本論文では厚さが 0.05，0.19，0.24 mm の柔軟鋼板を対象とし，電磁石が発生する張力を変化させた際の振動状態を評価した．それにより，柔軟鋼板の厚さならびに電磁石による張力と浮上中の振動状態の関係性を明らかにした．

2. エッジ支持型磁気浮上システム

Fig. 1 に本研究で使用した磁気浮上装置の概略図を示す．装置を上面から見た際の電磁石とセンサの配置を Fig. 2，磁気浮上システムにおける実際の電磁石とセンサの配置を Fig. 3，柔軟鋼板を浮上させた際の様子を Fig. 4 に示す．柔軟鋼板の長手エッジ付近に 2 つずつ電磁石を対向して設置し，鋼板の端部に対して水平方向から電磁石による吸引力を与えて浮上させる．なお，本研究において

Corresponding author: A. Endo (e-mail: endo@fit.ac.jp).

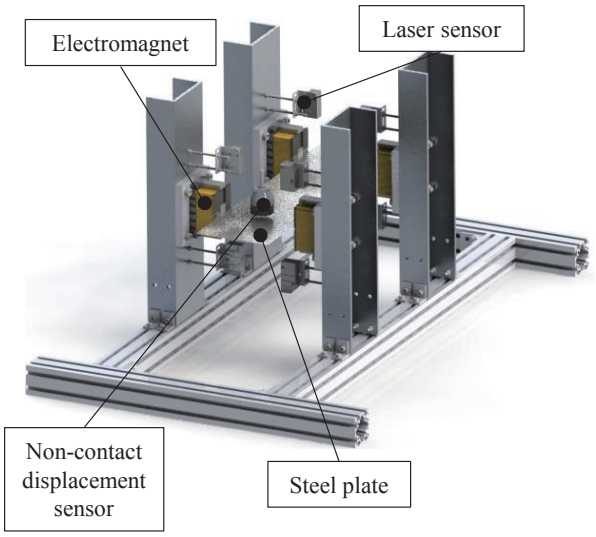


Fig. 1 Electromagnetic levitation system.

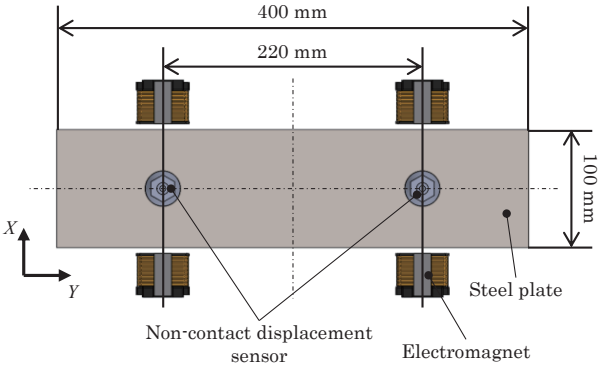


Fig. 2 Placement of electromagnet and sensor.

浮上対象とした柔軟鋼板には長さ 400 mm，幅 100 mm の長方形をした SS400 の亜鉛メッキ鋼板を用いた．

電磁石の配置は浮上中の柔軟鋼板の形状に影響を与える．このため，文献 7 で導いた，電磁界解析および有限差分法によるたわみ形状解析から算出した，最もたわみが小さく，かつ実験的に安定した浮上が実現できている配置とした．柔軟鋼板が水平方向に運動した際の変位計測には KEYENCE 社製レーザ式センサ（帯状のレーザ光の遮断量で変位を計測するセンサ）を用いた．これにより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を行った．さらに測定用の外部抵抗より電磁石に流れる電流を検出し，4 チャンネル，合計 8 個の観測値を A/D コンバータから DSP に入力し制御出力を算出した．

設置する電磁石は E 型のフェライトコアに対し，巻数 1005 回，直径 0.5 mm の銅線を施して構成した．

柔軟鋼板の鉛直（Z）方向の変位は Fig. 2 に示すセンテック社製渦電流式非接触変位センサを用いて計測した．このとき電磁石コアの中心から鉛直方向上向きを Z 軸正方向と定義し，平衡位置の変位を Z_0 とした．また，水平（X）方向の変位は Fig. 3 に示す KEYENCE 社製レーザ変位センサを用いて計測した．X 方向の変位は電磁石表面から遠ざかる方向を正とし，Z 方向の変位と同様に平衡位置での変位を X_0 とした．

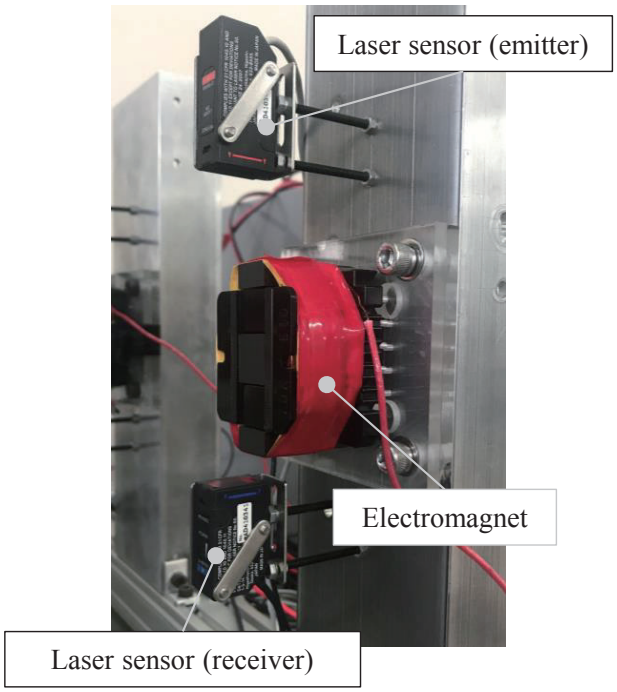


Fig. 3 Electromagnets for levitation.

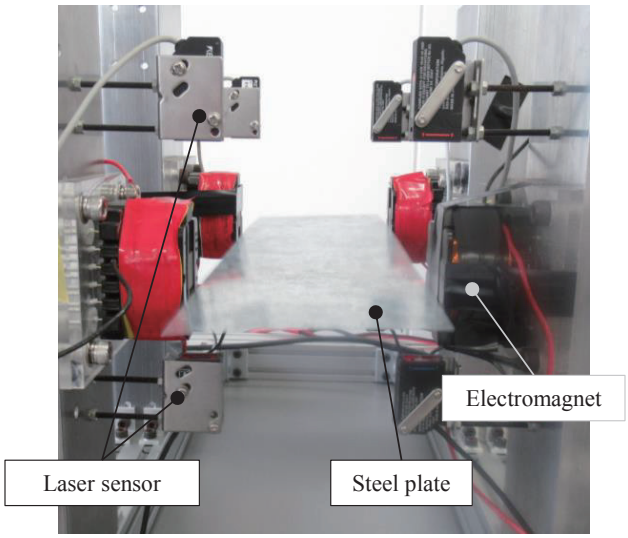
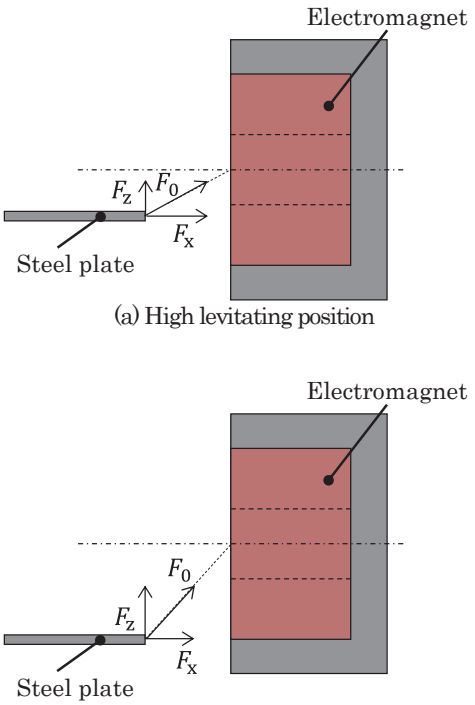


Fig. 4 Statement of levitating of flexible steel plate.

3. 浮上中の柔軟鋼板に発生する張力に関する解析的検討

Oda ら[8]は Fig. 5 に示すように浮上中の柔軟鋼板には電磁石の中心に向かう吸引力が発生し，吸引力の Z 軸方向の成分が柔軟鋼板にはたらく重力とつり合うとき，柔軟鋼板は浮上することを示している．そのため，本論文では Z 軸方向にかかる力を支持力と呼ぶ．また，同様に吸引力のうち X 軸方向にかかる力は柔軟鋼板を平坦になるように引っ張る力であることから張力と呼ぶ．

また，Narita ら[9]はどの板厚においても，電磁石のコイルを流れる定常電流値を大きくすることで，柔軟鋼板の浮上位置が電磁石の中心に近づくことを示している．この時，支持力ならびに張力の関係は Fig. 5 に示すように，浮上位置が高くなるほど，支持力は低下し，張力は上昇すると考えられる．Fig. 6 は先行研究[9]の一



(a) High levitating position

(b) Low levitating position

Fig. 5 Vertical suspension force F_z and horizontal tension force F_x for steel plate at levitating.

部を抜粋したものであるが，柔軟鋼板の厚さが薄いほど浮上位置が上昇している．そのため，薄い板厚では高い張力が得られると考えらる．そこで，本研究では板厚 0.05，0.19，0.24 mm の柔軟鋼板において，定常電流値によって柔軟鋼板にかかる張力を変化させることで，張力が浮上安定性に及ぼす影響を明らかにする．

本論文では浮上中の柔軟鋼板にかかる張力を明らかにするため，電磁界解析ソフトウェア JMAG を用いた有限要素法による電磁界解析を行った．Fig. 7 に本解析で使用した 3 次元モデルを示す．本解析では実際の磁気浮上システムを参考に，浮上対象の柔軟鋼板は SS400，電磁石のコアはフェライト（PC40）とし，それぞれ非線形な B-H カーブの特性を適用した．電磁石のコイルは銅線（比透磁率 1，抵抗率 1.673×10^{-8} Ωm）を用い，巻数は 1005 回に設定した．なお，空気領域は電磁石のコアを中心に 1 辺 500 mm の立方体の領域を設定し，モデルの要素数は 104420 点とした．

ここで x_m，z_m は電磁石の表面かつ中心になる位置を原点とした際の座標系である．電磁石表面と柔軟鋼板端部との間には 5 mm のギャップを設けている．電磁石中心から柔軟鋼板端部までの z_m 軸方向の距離は先行研究 [9] で得られている浮上位置を用いている．浮上位置は定常電流ならびに柔軟鋼板の板厚によって変化する．本解析では各板厚の柔軟鋼板における浮上位置 Z_0 を Fig. 6 に示すように設定した．柔軟鋼板は設定した浮上位置を平行位置として浮上している状態を想定し，一定の電流を流した状態を想定した静磁界解析を行った．なお，本解析では柔軟鋼板の質量を仮想的に 4 分割し，1 つの電磁石によって発生する張力を求めている．

Fig. 8 に解析で得られた各条件における柔軟鋼板端部にかかる張力を示す．同図に示すように全ての板厚において定常電流を大きくし，浮上位置が高くなると，柔軟鋼板端部にかかる張力が上昇した．特に今回の条件では板厚 0.24 mm の柔軟鋼板が張力の上昇量が多く，定常電流 0.8 A に対して 1.2 A では 1.48 倍の張力を発生させていることが明らかとなった．

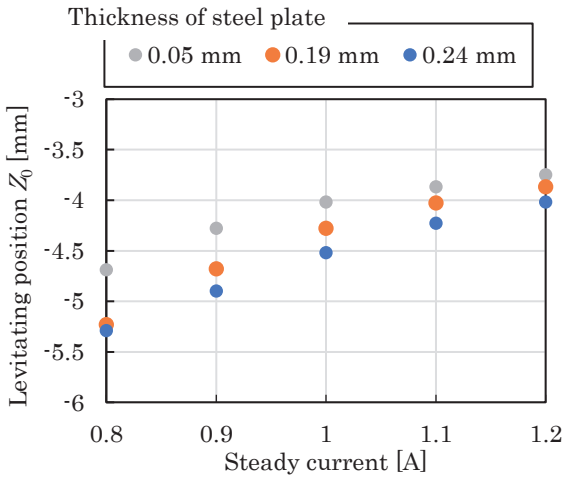
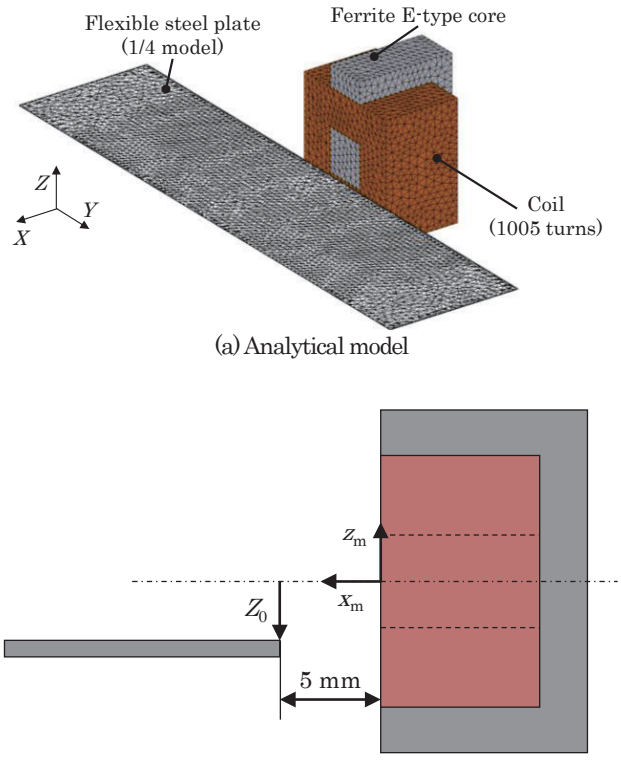


Fig. 6 Levitating position of each steady current [9].



(a) Analytical model

(b) Analytical condition

Fig. 7 Finite element method for magnetic field analysis.

4. エッジ支持型磁気浮上システムによる鋼板の浮上実験

4.1 磁気浮上システムの制御モデル

第 3 章の解析では柔軟鋼板の板厚が厚いほど，端部にかかる張力が大きくなることが明らかとなった．この張力は浮上中の柔軟鋼板のたわみを抑制するはたらきがあると考えられる．そのため，浮上中に柔軟鋼板の形状が変化しにくくなり，落下に寄与する弾

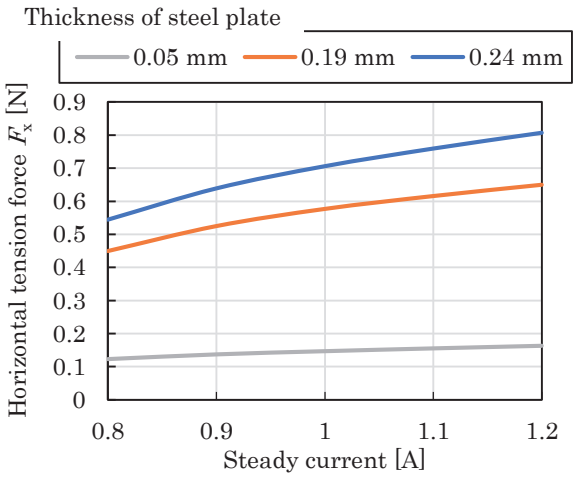


Fig. 8 Horizontal tension force at condition of steady current and thickness of steel plate.

性振動が抑制されると考えられる．そこで，本章では柔軟鋼板の張力が弾性振動に及ぼす影響を明らかにするため，解析で用いた柔軟鋼板の板厚ならびに定常電流にて浮上実験を行った．

本実験における磁気浮上システムの制御モデルを Fig. 9 に示す．このシステムでは鋼板を仮想的に 2 分割し，鋼板の X（水平）方向の運動を電磁石によってアクティブに制御する 1 自由度振動モデルとしてモデル化する．

鋼板を挟むように設置した 2 個の電磁石から同じ静的吸引力を加えることで，鋼板が双方の電磁石から一定の距離に保たれる平衡位置が存在する．そこからの変位を x とし，運動方程式と回路方程式を次のように記述する[10]．また，電磁石の吸引力は非線形性を持っているため，平衡点近傍で線形近似を行った．

$$m_x\ddot{x} = f_1 - f_2 = f_x \tag{1}$$

$$f_x = \frac{4F_x}{X_0}x + \frac{4F_x}{I_x}i_x \tag{2}$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}i_\mathrm{x} = -\frac{L_\mathrm{xeff}}{L_\mathrm{x}}\cdot\frac{I_\mathrm{x}}{{X_0}^2}\dot{x} - \frac{R_\mathrm{x}}{2L_\mathrm{x}}i_\mathrm{x} + \frac{1}{2L_\mathrm{x}}v_\mathrm{x} \tag{3}$$

$$L_\mathrm{x} = \frac{L_\mathrm{xeff}}{X_0} + L_\mathrm{xlea} \tag{4}$$

式(1)～(4)を整理して，以下のような状態方程式を得る．

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{A}_\mathrm{x}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{B}_\mathrm{x}v_\mathrm{x} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{x} = [x \quad \dot{x} \quad i_\mathrm{x}]^\mathrm{T}$$

$$\boldsymbol{A}_\mathrm{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \dfrac{4F_\mathrm{x}}{m_\mathrm{x}X_0} & 0 & \dfrac{4F_\mathrm{x}}{m_\mathrm{x}I_\mathrm{x}} \\ 0 & -\dfrac{L_\mathrm{xeff}}{L_\mathrm{x}}\cdot\dfrac{I_\mathrm{x}}{{X_0}^2} & -\dfrac{R_\mathrm{x}}{2L_\mathrm{x}} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B}_x = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dfrac{1}{2L_\mathrm{x}} \end{bmatrix}^\mathrm{T}$$

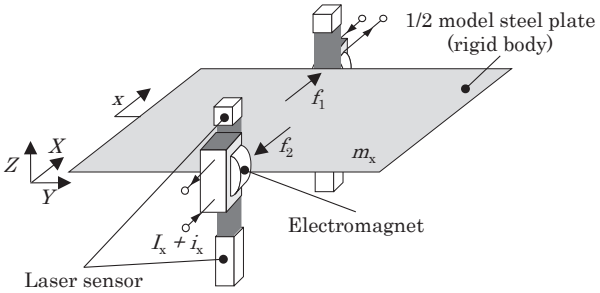


Fig. 9 Control model of Electromagnetic levitation system.

Table 1 Feedback gains of experiments.

Symbol	Value
f_x	1.04×10^3
f_v	3.66×10^2
f_i	42.0

ここで，m_x：浮上対象の質量 [kg]，F_x：静的吸引力 [N]，X_0：平衡位置における電磁石表面と鋼板表面との距離 [m]，I_x：静的吸引力を得るための定常電流値 [A]，i_x：定常電流値からの変動分に当たる電流値 [A]，L_x：平衡状態における電磁石用コイルのインダクタンス [H]，R_x：電磁石用コイルの抵抗値 [Ω]，v_x：電磁石用コイルへ加わる定常電圧からの変動分に当たる電圧値 [V]，L_xeff/X_0：電磁石の有効磁束に相当する定数 [H]，L_xlea：電磁石の漏れ磁束に相当する定数 [H]である．

なお，本制御システムでは最適制御測を用いて決定したフィードバックゲインにより以下の式(6)から制御入力 v_x を決定する．

$$v_\mathrm{x} = -\boldsymbol{f}\boldsymbol{x} \tag{6}$$

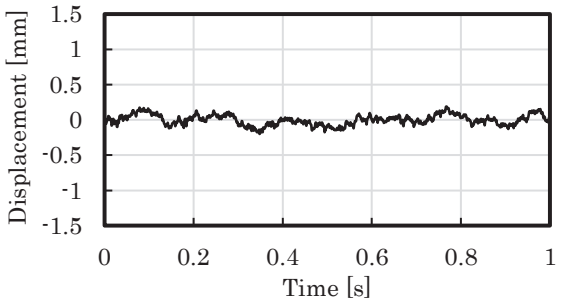
$$\boldsymbol{f} = [f_\mathrm{x} \quad f_\mathrm{v} \quad f_\mathrm{i}]$$

本研究で用いたフィードバックゲイン $\boldsymbol{f}$ を Table 1 に示す．なお，フィードバックゲインを決定する際の重み係数は実験から試行錯誤的に探索した．

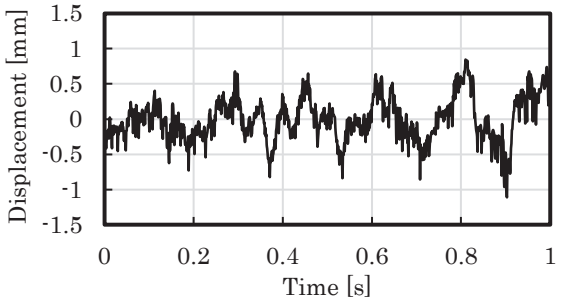
4. 2 浮上実験の条件

電磁石のコイルに流れる定常電流値 I_x は柔軟鋼板に対して定常的にかける張力の大きさに関わる．この張力は柔軟鋼板のたわみを抑制するようにはたらくことから，見かけ上，柔軟鋼板の曲げ剛性を向上させるような役割を持つと考えられる．本論文では板厚 0.05，0.19，0.24 mm の柔軟鋼板において，定常電流値を 0.8～1.2 A で 0.1 A 刻みで変化させて浮上実験を行った．その際，柔軟鋼板の鉛直ならびに水平方向の変位を計測し，各実験条件と柔軟鋼板の振動状態の関係性を明らかにする．

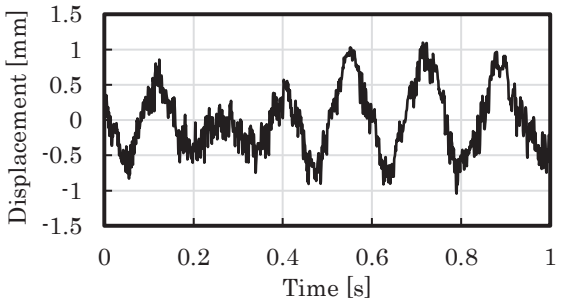
実験では手で柔軟鋼板を支持した状態から磁気浮上制御を始め，手を離して安定浮上した状態から計測を開始するものとした．な



(a) Thickness: 0.05 mm

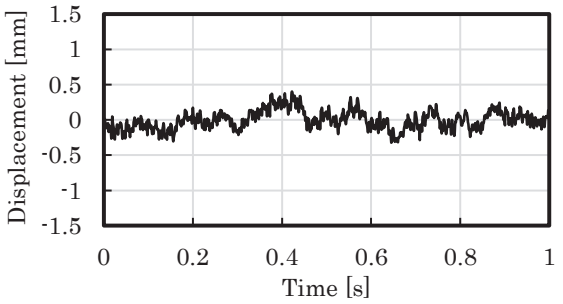


(b) Thickness: 0.19 mm

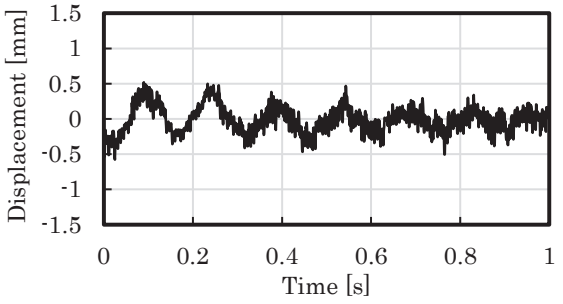


(c) Thickness: 0.24 mm

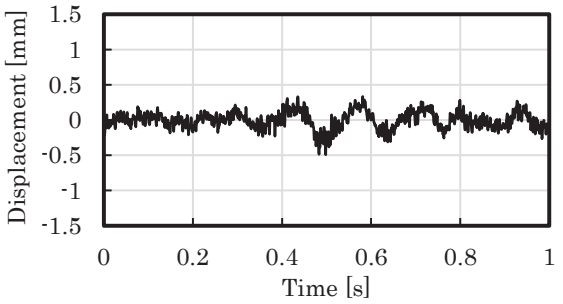
Fig. 10 Time histories of vertical displacement (steady current: 0.9 A).



(a) Thickness: 0.05 mm



(b) Thickness: 0.19 mm



(c) Thickness: 0.24 mm

Fig. 11 Time histories of vertical displacement (steady current: 1.2 A).

お，浮上中の柔軟鋼板における動的な挙動を比較するため，平衡浮上位置を 0 として Z 方向の変位を計測している．

なお，定常電流値は 0.8～1.2 A に制限しているが，0.8 A 未満の定常電流値では支持力が小さく，把持することが困難である．また 1.2 A よりも大きな定常電流値では電磁石のコイルにおける発熱が大きく，短時間しか浮上を維持できない．そのため，上記の範囲に定常電流値を収めている．

4. 3 浮上中における鉛直方向の振動

Fig. 10，Fig. 11 に Z 方向の変位時刻歴を示す．Fig. 10 は定常電流値を 0.9 A，Fig. 11 は定常電流値を 1.2 A とした実験で得られた時刻歴である．Fig. 10 および Fig. 11 では板厚が異なる条件で実施した時刻歴を示しており，両図とも(a) 0.05 mm，(b) 0.19 mm，(c) 0.24 mm の板厚での時刻歴を示している．なお，これらの時刻歴は各条件で 3 回実験を行ったうちの 1 つを抽出したものであり，同条件で実施した全ての実験において時刻歴が同様な波形となることを確認している．全ての条件において鉛直方向の変位には周期的な振動が発生している．振幅に着目すると 0.05 mm を除き，定常電流を大きくすることで鉛直方向の変位振幅が小さくなっていることが確認できる．

本研究では磁気浮上実験における変位振幅を定量的に評価するため，各条件で得られた鉛直方向の変位の標準偏差に着目し，3 回の実験の標準偏差の平均値を用いるものとした．各板厚における Z 方向の変位標準偏差と定常電流値の関係を Fig. 12 に示す．板厚が最も厚い 0.24 mm の柔軟鋼板では定常電流値を大きくするほど変位標準偏差が小さくなり，鉛直方向の振動が抑制されていくことが分かった．次に，板厚 0.19 mm の柔軟鋼板では定常電流値 1.1 A までは同様に定常電流値を大きくすると，鉛直方向の変位標準偏差が小さくなる傾向を示した．しかしながら，定常電流値 1.2 A では 1.1 A よりも鉛直方向の変位標準偏差が大きく，より振動していることを明らかにした．また，板厚 0.05 mm ではいずれの定常電流値においても板厚 0.19 mm ならびに 0.24 mm での実験と比べて鉛直方向の変位標準偏差が小さく，定常電流による振動抑制の効果が大きいことが示された．さらに，板厚 0.05 mm の柔軟鋼板では定常電流値 1.1 A 以降において定常電流値が大きくなると

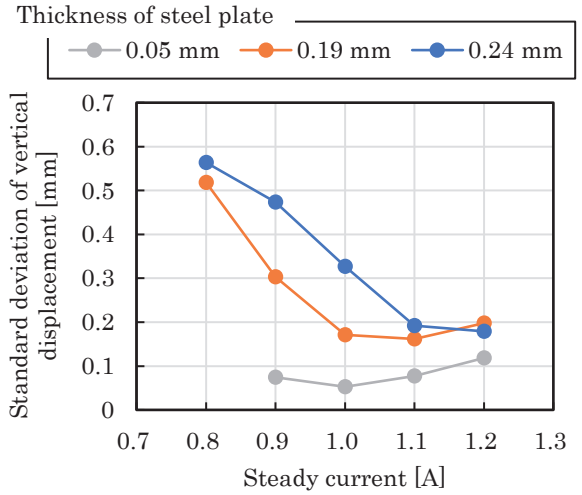


Fig. 12 Relationship between the steady current and the standard deviation of the vertical displacement each thickness of flexible steel plate.

鉛直方向の変位標準偏差も大きくなり，振動抑制の効果が小さいことを示した．なお，本実験結果では板厚 0.05 mm の柔軟鋼板において定常電流を 0.8 A とした際の変位標準偏差が示されていないが，これは該当する条件において実験を行ったところ，柔軟鋼板を浮上させることができなかったためである．

第 3 章の解析では柔軟鋼板の板厚が厚いほど柔軟鋼板端部にかかる張力が大きくなることから，鉛直方向の弾性振動も抑制される可能性が示されていた．しかしながら，全ての定常電流値において板厚の最も薄い厚さ 0.05 mm の柔軟鋼板が最も振動が抑制されていることが実験から明らかになった．

5. 結言

本研究では柔軟鋼板を対象とした磁気浮上システムにおいて，柔軟鋼板の厚さならびに電磁石による張力と浮上中の振動状態の関係性を明らかにした．まず，磁気浮上の際に柔軟鋼板端部にかかる張力を解析的に明らかにした．それにより，柔軟鋼板の板厚が厚いほど端部に発生する張力が大きくなり，浮上中に発生する弾性振動がより抑制できる可能性が示唆された．それに対して実験で得られた Z 方向の変位は，定常電流が 1.0 A 以上になるとどの板厚でも変位標準偏差の小さい安定した磁気浮上が可能であること，いずれの定常電流値においても板厚の薄い 0.05 mm の柔軟鋼板において最も振動が抑制されていることを明らかにした．

本研究では柔軟鋼板端部にかかる張力と浮上安定性の直接的な関係性は確認できなかったものの，浮上中における柔軟鋼板の鉛直方向の変位は周期的に振動している上，板厚や定常電流によって周期が変化していることから，板厚や定常電流が鉛直方向の弾性振動に影響している可能性が高いと考えられる．そのため今後は柔軟鋼板の振動特性も考慮し，より安定した磁気浮上の実現を目指す．

References

1) K. Ogawa, M. Tada, T. Narita, and H. Kato: *T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)*, **4**, 122 (2020).
2) Y. Odajima, Y. Takada, I. Oikawa, and T. Nakagawa: *IEEJ T. Ind. Appl.*, **138**, 692 (2018).
3) H. Hayashiya, H. Ohsaki, and E. Masada: *IEEJ T. Ind. Appl.*, **120**, 928 (2000).
4) A. Shiina, M. N. Hakimi, K. Ogawa, T. Narita, and H. Kato: *J. Jpn. Soc. Appl. Electromagn. Mech.*, **29**, 111 (2021).
5) T. Narita, M. Kida, T. Suzuki, and H. Kato: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **41**, 14 (2017).
6) Y. Oda, M. Kida, T. Suzuki, T. Narita, H. Kato, and H. Moriyama: *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, **59**, 985 (2019).
7) T. Narita, Y. Oda, Y. Ito, K. Okuno, and H. Kato: *Proc. ACTUATOR 2018*, 334 (2018).
8) Y. Oda, Y. Ito, K. Okuno, M. Kida, T. Suzuki, A. Endo, T. Narita, H. Kato, and H. Moriyama: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **43**, 11 (2019).
9) T. Narita, Y. Oda, Y Ito, and H. Kato: *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, **64**, 1191 (2020).
10) M. Kida, T. Suzuki, Y. Oda, T. Narita, H.Kato, and H. Moriyama: *T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)*, **1**, 76 (2017)

2021年11月9日受理，2021年12月12日再受理，2021年12月14日採録