

## 湾曲磁気浮上薄鋼板に発生する振動メカニズムに関する基礎的考察

## Fundamental consideration on vibration mechanism in thin steel plate with curvature during magnetic levitation

多田誠<sup>a)</sup>・小川和輝<sup>a)</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)M. Tada<sup>a)</sup>, K. Ogawa<sup>a)</sup>, T. Narita<sup>a)†</sup>, and H. Kato<sup>a)</sup><sup>a)</sup> Tokai University, 4-1-1 Kita Kaname, Hiratsuka-shi, Kanagawa 259-1292, Japan

Research was conducted on non-contact transfer technology for applying magnetic levitation technology that uses electromagnets to thin steel plates. We previously succeeded in improving the levitation performance by bending a thin steel plate within a range that did not plastically deform it. In this study, to clarify the vibration mechanism of the steel plate during levitation, we performed a modal analysis, a frequency response analysis on a plate, and a bending and levitation experiment with a type of disturbance that has the most influence on such plates. As a result, it was found that the bending and magnetic levitation is effective for improving the levitation performance because the vibration mode became dominant when bending the thin steel plate and the levitation performance could be maintained even when the disturbance was input.

**Key words:** magnetic levitation, vibration control, modal analysis, frequency response analysis, elastic vibration

## 1. 緒言

磁気浮上技術は、物体を非接触に把持および搬送できるという長所があり、鉄道の高速化<sup>1)</sup>、歯車や軸受の高効率化<sup>2,3)</sup>などを目的に様々な研究が行われている。特に、薄鋼板の製造ラインでは、接触搬送による鋼板表面の品質劣化を防止するため、磁気浮上技術による非接触搬送の導入が望まれており、浮上対象が薄鋼板で電磁石の吸引力を利用した吸引式磁気浮上に関する研究が活発に報告されている<sup>4-6)</sup>。鋼板を磁気浮上させるための研究には、鋼板をねじりなど変形しない剛体として扱うものが多く存在するが、浮上対象の板厚や面積、制御装置の仕様によって鋼板の変形や弾性振動が問題となる場合がある。実際、浮上中の薄鋼板は力学的に四辺自由の平板に重力と支持力が加わっている状態と考えることができる。このとき支持力が発生しない箇所には重力によって静的にはたわみが、動的には多数の振動モードによる弾性振動が発生する。弾性振動を抑制するためには定常的に大きく振動するモードの腹にアクチュエータを設置する必要がある。しかし、あるモードの腹となる点が、他の振動モードでは振幅が0となる節になる場合もあり、全てのモードに対応するためにはモードを観測するための多数のセンサとモードを抑制するための多数のアクチュエータが必要となり、このような装置を構築することは現実的に不可能である。また、振動モードは高次になるほど固有振動数が増加する。このため、アクチュエータの動作可能な周波数帯域以上の振動モードに由来する弾性振動は仮に観測できたとしても制御できなくなる問題もある。

そこで、当研究グループはこれまでに安定した浮上制御を阻む要因であった柔軟性を積極的に利用し、厚さが0.3 mmより薄い薄鋼板を塑性変形させない範囲で湾曲させて浮上させる方法を提案した。このとき、湾曲させた鋼板の静的なたわみに着目し、形状解析から鋼板のたわみを抑制できる最適な湾曲角度を算出した<sup>7)</sup>。

さらに鋼板を湾曲させて浮上実験を行い、求めた最適角度で最も安定して浮上可能であることを実験的に示した。そして、湾曲させることで浮上安定性が向上し、さらに制御出力へのノイズや磁気浮上装置の振動など外乱が入力された場合でも最適な湾曲角度で浮上させることで浮上性能の劣化を防ぐことができることを示した<sup>8-10)</sup>。

しかし、湾曲して浮上させた鋼板にどのような振動モードが存在し、どの振動モードが浮上性能に大きく影響するのか詳細な検討が行えていなかった。本研究ではこの湾曲磁気浮上システムの浮上対象である薄鋼板の振動モードと共振周波数を有限要素解析より得て、外乱を入力した実験から最も支配的なモードを探索した。さらに得られた固有振動数を含む近傍の帯域において、周波数一定の外乱を入力して浮上実験を行い、湾曲浮上性能の検討を行った。

## 2. 薄鋼板の共振周波数解析

## 2.1 鋼板の湾曲形状

薄鋼板の振動形状解析を行うため、湾曲浮上中の薄鋼板の湾曲形状および電磁石の支持力を導出する。このとき、長方形鋼板の短手方向を突き出しはり(はね出し単純はり)と考え、一次元のはりのたわみ形状を鋼板長手方向に押し出したものとする。

Fig. 1に本実験で使用する長方形鋼板の寸法および電磁石の配置図を、Fig. 2に鋼板を短手方向から見たはりと仮定したモデルを示す。このモデルにおける支持点D、Eは周囲に設置した電磁石ユニットの位置(Nos.1~4)で、点Cは中央の電磁石の位置(No.5)である。また支持力 $F_0$ は中央電磁石ユニットの支持力を表している。本研究の磁気浮上システムでは、中央電磁石ユニットの支持力 $F_0$ の値を変化させることにより鋼板を湾曲させるため、Fig. 2のように支持点DとEで単純支持され、C点で集中荷重 $F_0$ が作

用している。このとき鋼板にはたわみが生じ、支持点での鋼板の角度をたわみ角  $\varphi$  と定義する。このモデルからたわみ角  $\varphi$  とその時の支持力  $F_5$  の関係式を算出することにより各電磁石ユニットに印加する定常電流値を算出した。

中央の支持点 No. 5 での支持力  $F_5$  の関係は次式で表される。

$$F_5 = \frac{2ah}{3l^2} \{ \rho g l (l^2 - 6d^2) - 2Eh^2 \varphi \} \quad (1)$$

また鋼板の質量より、外側の支持点 No.1~No.4 での支持力  $F_1 \sim F_4$  は次式となる。

$$F_1 = F_2 = F_3 = F_4 = \frac{\rho ahgb \cdot F_5}{4} \quad (2)$$

ここで、 $a$ : 板長さ [m],  $b$ : 板幅 [m],  $h$ : 板厚 [m],  $\rho$ : 鋼板の密度 [kg/m<sup>3</sup>],  $g$ : 重力加速度 [m/s<sup>2</sup>],  $l$ :  $x$  軸に見た電磁石ユニット No.1 と No.3, あるいは No.2 と No.4 の距離 [m],  $d$ :  $x$  軸に見た電磁石ユニット No.1, No.2, No.3, No.4 から鋼板端部までの距離 [m],  $E$ : 鋼板のヤング率 [N/m<sup>2</sup>] である。

## 2.2 解析モデル

薄鋼板の振動形状および共振周波数を検討するため、モーダル解析および周波数応答解析を行った。解析モデルは ANSYS Workbench Mechanical にて長さ 800 mm, 幅 600 mm, 厚さ 0.19 mm の薄鋼板を電磁石設置角度  $\theta = 13^\circ$  で湾曲させた時の形状を再現した。 $\theta = 13^\circ$  という湾曲角度は、過去の実験<sup>9)</sup>にて最も振動の振幅が抑制され、最も浮上する確率の高かった条件である。このとき、鋼板は四辺自由であり、支持条件は Fig. 1 に示す電磁石の設置位置と同じ場所で支持した。

## 2.3 解析結果

Fig. 3 に解析で使用した鋼板モデルを示す。このモデルを用いて薄鋼板のモーダル解析と周波数応答解析を行った。Fig. 4 の結果は、周波数応答解析の結果にて突出した周波数のモード形状のみ抜粋して掲載した。それぞれ (a) 短手方向の弾性一次モードで 6.20 Hz, (b) 短手方向の弾性三次モードで 11.71 Hz, (c) 長手方向の弾性一次と短手方向の三次が組み合わさったモードで 19.65 Hz, (d) 短手方向の弾性五次モードで 41.69 Hz という結果になった。(a) の弾性一次モードは、周囲電磁石の箇所が節となり、鋼板短手方向中央部が腹となる振動形状である。(b), (c) および (d) のモードは、(a) 弾性一次モードと同様短手方向中央に腹が存在する奇数次モードが突出した。これらのモードが突出している理由として、鋼板短手方向を湾曲させることで短手方向の振動が支配的になる弾性一次モードに近い形状となるため、鋼板長手方向の振動や鋼板中央部が節になる偶数次のモードが抑制されていることが考えられる。よって、薄鋼板を湾曲浮上させることによって、弾性一次などの奇数次モードが支配的になり、他の振動モードを抑制することができることが分かった。

## 3. 外乱入力対応の湾曲磁気浮上装置

前章の解析にて得られた湾曲薄鋼板の振動モードが実際の磁気浮上状態にてどのような影響を及ぼすのか確認するために、外乱を入力できる磁気浮上装置を用いて実験を行った。

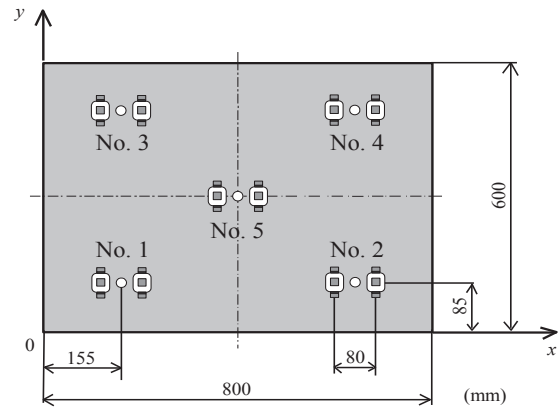


Fig. 1 Dimension of steel plate and arrangement of electromagnets.

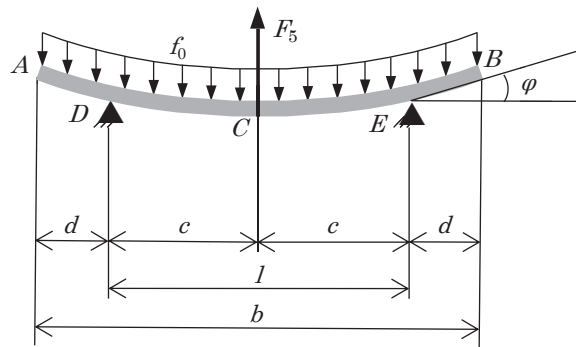


Fig. 2 Protruding beam.

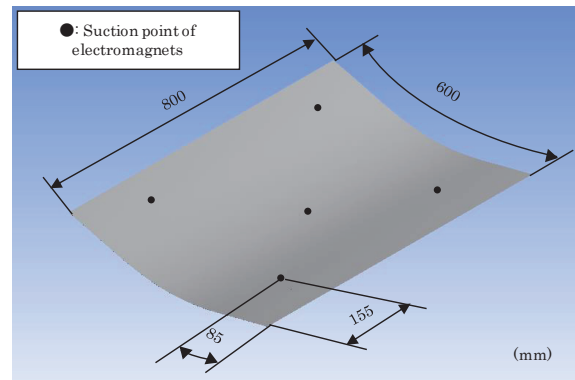


Fig. 3 Shape analysis of steel plate.

Fig. 5 に制御システムの概略図, Fig. 6 に実験装置の概略図を示す。浮上対象は長さ 800 mm, 幅 600 mm, 厚さ 0.19 mm の長方形垂鉛メッキ鋼板を使用する。電磁石ユニットは鋼板周囲の 4 か所および鋼板の重心になる中央部に設置した。これら 5 つの電磁石ユニットを用いて鋼板を非接触支持するために、鋼板の変位を 5 個の渦電流式非接触変位計により検出し、検出した変位をデジタル微分により速度に変換する。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 15 個の観測値を入力し制御則を計算する。なお電磁石ユニットは 2 つの電磁石と 1 つの渦電流式非接触変位センサから構成されている。電磁石は 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。この電磁石の電気回路は直列結合されており、変位センサを中央に挟

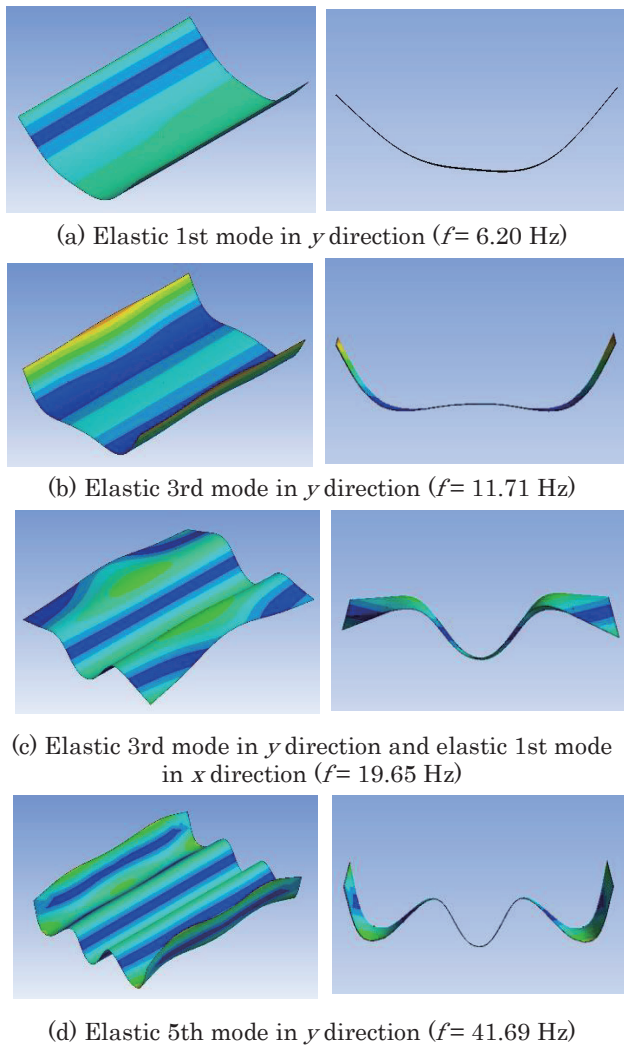


Fig. 4 Shape analysis of steel plate.

むように配置してある。

5 個の電磁石ユニットのうち周囲の Nos. 1~4 は Fig. 6 の正面図のように傾け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取り付け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は水平方向に、中央の電磁石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。

制御システムは過去の研究で用いた手法<sup>9)</sup>と同様に、ある位置での電磁石の変位、速度、コイル電流の検出値の情報を同じ電磁石にのみフィードバックする独立制御を行い、離散時間系の最適制御理論に基づいて最適制御則を求める。Fig. 7 に示すように鋼板を 5 つの仮想質量  $m_m$  に分割し、それぞれを集中定数系としてモデル化を行う。鋼板を浮上させる方法は電磁石の定常電流  $I_m$  によって発生する吸引力  $F_m$  により鋼板を支持し、そこに制御電流  $i_m$  を加え鋼板と電磁石の距離が 5 mm になるように制御を行っている。電磁石角度  $\theta$  における各電磁石の吸引力は式 (1), (2) より求めた。

電磁石ユニットを設置しているフレームには加振器が備え付け

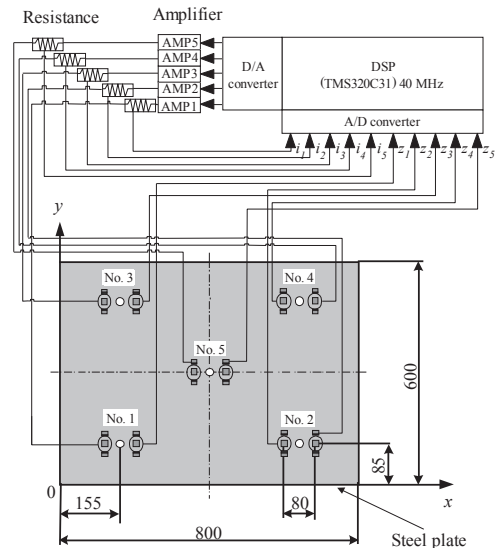


Fig. 5 Electromagnetic levitation control system and arrangement of electromagnets.

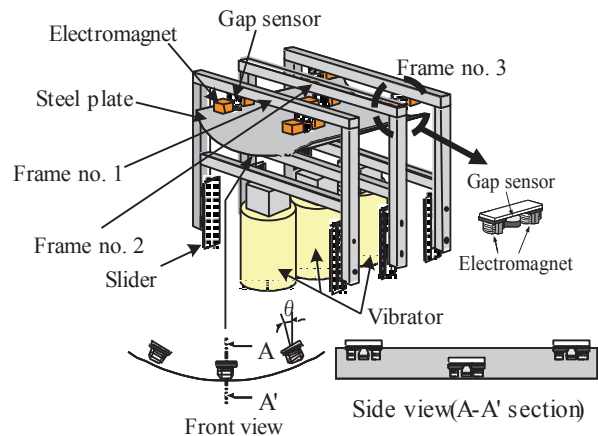


Fig. 6 Schematic illustration of experimental apparatus.

られており、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することができる。なお各フレームには Fig. 8 に示す渦電流式非接触センサを設置し、加振中のフレームの変位を測定した。

#### 4. パルス波を用いた外乱入力実験

##### 4.1 実験条件

浮上中の薄鋼板に最も影響する外乱を実験的に探索するため、電磁石ユニットが備え付けられているフレームをパルス波で加振させた外乱入力実験を行った。パルス波で加振させたフレームの変位時刻歴波形を Fig. 9 に示す。

このとき、浮上中鋼板の振動は各電磁石ユニットに取り付けてある渦電流式非接触変位センサで取得した。また、電磁石の設置角度  $\theta$  は過去の実験<sup>9)</sup>で振動が抑制された  $\theta = 10, 13, 15^\circ$  に、フレーム加振の振幅は 0.7 mm に設定した。なお、入力した振幅 0.7

**Table 1** Representative value of resonance frequency.

Tilt angle of electromagnets [deg]	Resonance frequency [Hz]
10	2.67 - 10
13	3.56 - 9.78
15	3.11 - 10

mm は最悪の外乱であり、予備実験にてこれ以上振幅値を増加させた場合に浮上が困難であることを確認している。

#### 4.2 実験結果

パルス波を用いてフレームを加振させた際の鋼板の変位時刻歴波形およびスペクトル波形を Fig. 10 に示す。同図より、最大のスペクトルは 0.0335 mm であり、そのときの周波数は 5.75 Hz である。同様の実験を 10 回行った際に測定された共振周波数の最小値と最大値を Table 1 に示した。Fig. 10 および Table 1 から、本実験で使用している鋼板の共振周波数は約 2.5 ~ 10 Hz の範囲内に存在することが分かった。また、2 章の解析では 6.20 Hz で弾性一次モードの振動が発生しているという結果になったが、この結果が本章の実験結果の範囲内にあることが分かる。したがって、実際の湾曲磁気浮上実験においても弾性一次モードが支配的であると考えることができる。

### 5. 正弦波を用いた外乱入力実験

#### 5.1 実験条件

過去の研究<sup>9)</sup>では、ランダムノイズなど複数の周波数成分が含まれた外乱を入力してきたが、できる限り共振周波数に近い周波数で固定した外乱を入力するため、本章では周波数を一定に設定した正弦波を用いて電磁石ユニットを加振させ、そのときの湾曲浮上性能を検討する外乱入力実験を行った。

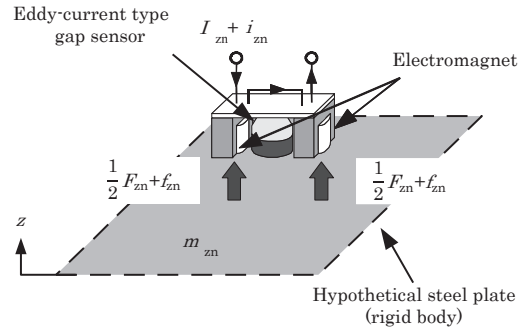
浮上中鋼板の振動を取得するため、Fig. 11 に示すように鋼板中央付近に渦電流式非接触変位センサを設置した。この変位標準偏差から外乱入力時の鋼板の浮上安定性を評価した。Fig. 12 にフレームの時刻歴波形およびスペクトル波形の例を示す。このとき、正弦波の振幅は 0.25 mm 一定とし、正弦波の周波数は 4 章の結果を参考に 3~10 Hz の範囲内で 1 Hz 刻み毎に実験を行った。また、電磁石の設置角度  $\theta$  は過去の実験<sup>9)</sup> で最も振動が抑制された  $\theta = 13^\circ$  で行った。

#### 5.2 実験結果

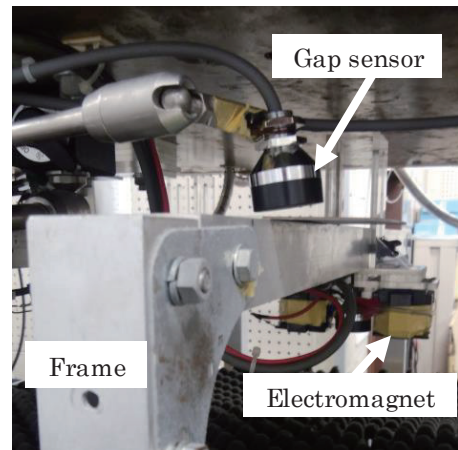
Fig. 13 に周波数ごとの変位標準偏差を示す。同図より、正弦波の周波数を高めると変位標準偏差は増加し、5 Hz で最も標準偏差が高くなり、5 Hz 以降は標準偏差が低下した。

Fig. 14 に 3 Hz、5 Hz および 8 Hz の正弦波を入力した際の鋼板の変位時刻歴波形を示す。(b) 固有振動数に近い 5 Hz のときは振幅約 0.7mm で振動するが、(a) 3 Hz および (c) 8 Hz では 5 Hz と比べると振幅は半分以下となった。

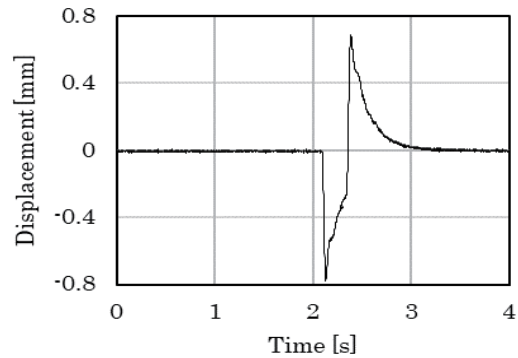
これらの結果を 2 章 Fig. 4 と比較すると、Fig. 13 で最も高い偏差を記録した 5 Hz の振動は、約 6 Hz で振動した Fig. 4 (a) の短



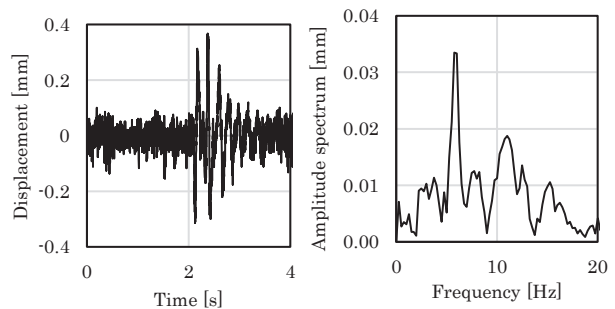
**Fig. 7** Theoretical model of levitation control.



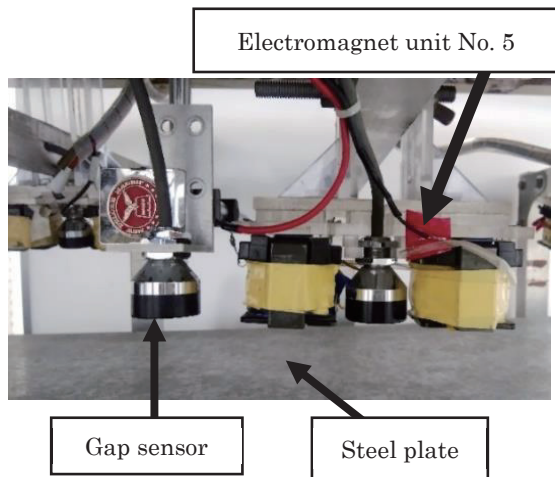
**Fig. 8** Eddy-current gap sensor for frame (No. 2).



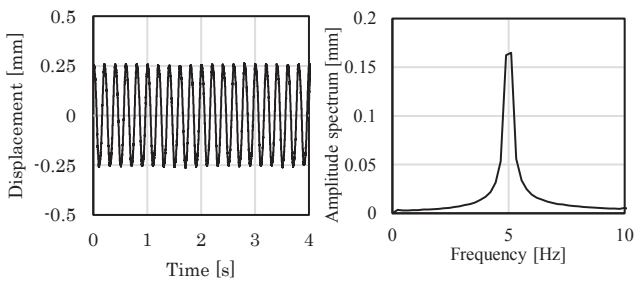
**Fig. 9** Time history of displacement of vibrating frames by the pulse disturbance.



**Fig. 10** Time history and amplitude spectrums of displacement of steel plate when vibrating frames by the pulse disturbance ( $\theta = 13^\circ$ ).



**Fig. 11** Eddy-current gap sensor in central part of steel plate.



**Fig. 12** Time histories of displacement and amplitude spectrums of vibrating frames by the sine disturbance ( $f=5$  Hz).

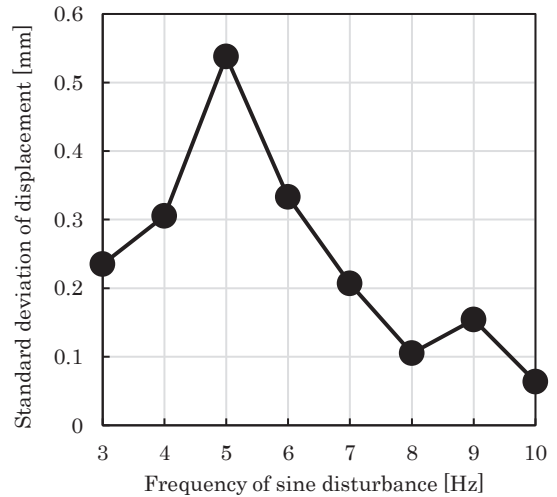
手方向の弾性一次モードが最も近い振動モードであるといえる。しかしながら、鋼板を湾曲させることで固有振動数に近い外乱によって弾性一次モードが励起され、鋼板と電磁石の間隔 5mm に対して 10%以上の振幅で振動している状況下でも鋼板は落下することなく浮上を続けることができた。

## 6. 結言

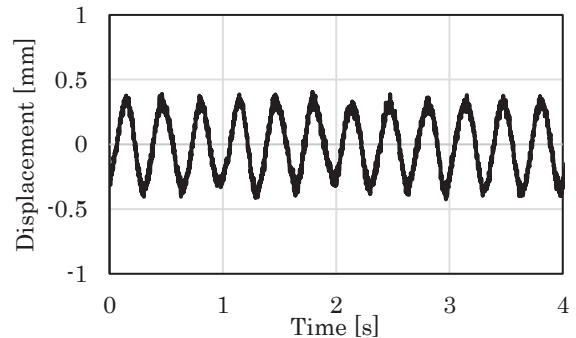
本報告では浮上中鋼板の振動メカニズムを明らかにするために、薄鋼板のモーダル解析および周波数応答解析を行った上で浮上中鋼板に最も影響する外乱を入力した湾曲浮上実験を行った。

解析および実験の結果、薄鋼板を湾曲させ奇数次の振動モードが励起しやすい状態を作ることによって他の振動モードが発生しにくくなり、浮上安定性が向上することを鋼板の弾性振動の観点から示した。さらに固有振動数付近の外乱を入力した状態でも浮上状態を維持できたことから、湾曲磁気浮上によって浮上性能が向上できたことを実験的に確認することができた。

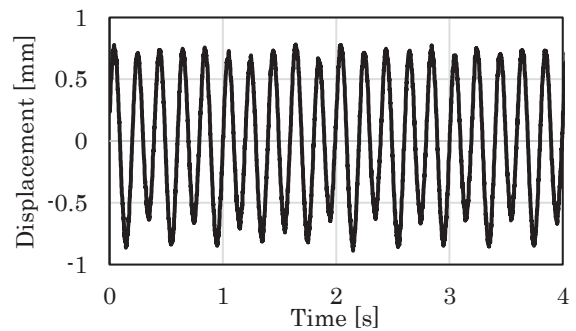
今後の研究計画として、外乱を相殺する制御手法の開発を予定しており、より浮上性能の高い磁気浮上制御を目指していく。



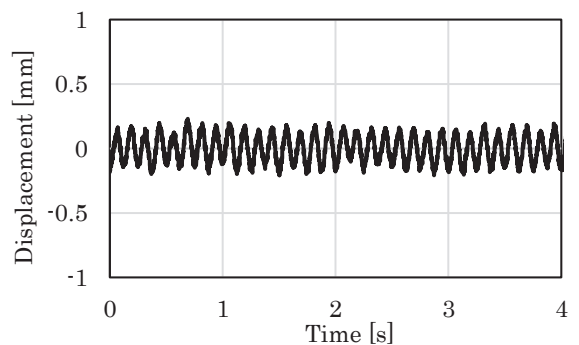
**Fig. 13** Standard deviation of displacement when vibrating the frames by the sine disturbance.



(a)  $f=3$  Hz



(b)  $f=5$  Hz



(c)  $f=8$  Hz

**Fig. 14** Time histories of displacement when vibrating the frames by the sine disturbance.

## References

- 1) Y. D. Chung, C. Y. Lee, D. W. Kim, H. Kang, Y. G. Park and Y. S. Yoon: *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, **27**, 3601805 (2017).
- 2) E. Morimoto, N. Niguchi and H. Hirata: *IEEJ Trans. on Industry Applications* (in Japanese), **138**, 164 (2017).
- 3) Y. Ishino, T. Mizuno, M. Takasaki, M. Hara and D. Yamaguchi: *Journal of the JSAEM* (in Japanese), **26**, 178 (2018).
- 4) S. Iwashita and S. Torii: *IEEJ Trans. on Industry Applications* (in Japanese), **135**, 475 (2015).
- 5) Y. Odajima, Y. Takada, I. Oikawa and T. Nakagawa: *IEEJ Trans. on Industry Applications* (in Japanese), **138**, 692 (2018).
- 6) Y. Oshinoya and T. Obata: *JSME International Journal Series C*, **45**, 60 (2002).
- 7) H. Marumori, H. Yonezawa, T. Narita, H. Kato and Y. Oshinoya: *Trans. of Japan Society of Mechanical Engineers* (in Japanese), **81**, 14-00471 (2015).
- 8) H. Kato, H. Marumori, H. Yonezawa and T. Narita: *Trans. of ASME Journal of Vibration and Acoustics*, **138**, VIB-15-1159 (2016).
- 9) M. Tada, H. Yonezawa, H. Marumori, T. Narita and H. Kato: *Int. J. Appl. Elec. Mech.* (Accepted).
- 10) K. Ogawa, M. Tada, T. Narita and H. Kato: *MDPI Actuators*, **7**, 43 (2018).

2018年11月8日受理, 2019年2月26日採録