# 湾曲柔軟鋼板の最適浮上角度 丸森 宏樹<sup>\*1</sup> 米澤 暉<sup>\*1</sup> 成田 正敬<sup>\*2</sup> 加藤 英晃<sup>\*3</sup>

## Optimal Levitation Angle of Bent Flexible Steel Plate

by

Hiroki MARUMORI<sup>\*1</sup>, Hikaru YONEZAWA<sup>\*1</sup>, Takayoshi NARITA<sup>\*2</sup> and Hideaki KATO<sup>\*3</sup> (Received on Sep. 30, 2014 and accepted on Dec. 18, 2014)

#### Abstract

We have proposed the levitation of the flexible thin steel plate that has been bent to an extent which has not induced plastic deformation. To elucidate the bending levitation performance, ultrathin steel plate with a thickness of 0.24 mm, 0.27 mm and 0.30 mm were levitated and the relationship between tilt angle of electromagnets, standard deviation of displacement and levitation probability was evaluated. Furthermore, to elucidate the effective tilt angle of electromagnets for bending, the shape of the steel plate was analyzed using the finite difference method. As a result, the standard deviation of displacement decreased and levitation probability increased by bending the steel plate to the extent that did not exceed natural deflection angle. Also, the optimal tilt angle of electromagnets was estimated by shape analysis result and it matched with the experimental result. When levitating thin steel plate at the optimal tilt angle of electromagnets attained by the finite difference method, stable levitation performance can be achieved.

Keywords: Magnetic levitation, Thin steel plate, Levitation stability, Optimal levitation angle

## 1. はじめに

自動車産業をはじめ多くの工業製品に薄鋼板は幅広く 用いられている.特にその表面品質の高品質,高生産性 を確保することは重要であるが、圧延工程で発生する擦 り傷や表面処理工程で発生するめっき等の不良により品 質,生産性に悪影響を与えることがある.この問題の解 決方法として磁気浮上技術の応用による非接触搬送に関 する研究がなされている <sup>1)~3)</sup>. しかし、鋼板は板厚が薄 くなるほど,電磁石吸引力が持つ非線形性や電磁石の発 熱による抵抗値変動<sup>4)</sup>など微細な不確定要素の影響によ る振動が励起しやすくなるために、浮上状態を維持する こと自体が困難となる.加えて磁気浮上システムにおい て 0.3 mm 以下の極薄鋼板 5)を浮上対象とする場合には たわみが大きくなり浮上制御は困難となる. そこで押野 谷らが板厚 0.18 mm の極薄鋼板を湾曲させて磁気浮上さ せることについて報告<sup>の</sup>したように,当研究グループで は浮上の障害となっていた極薄鋼板の柔軟性を積極的に 利用し、対象が塑性変形しない範囲に曲げた状態で浮上 させることを提案している. 薄鋼板を曲げて浮上させる 場合、その長さ、幅、厚さ、材質などを総合的に考慮し て最適な電磁石の個数や設置位置,湾曲度合いを理論的 に求める必要がある.

そこで本論文ではその基礎検討として鋼板のサイズ

- \*1 工学研究科機械工学専攻修士課程
- \*2 諏訪東京理科大学工学部
- \*3 工学部動力機械工学科助教

(長さ,幅)が同一であり厚さのみが変化した場合を対象とし,有限差分法(FDM)を用いて湾曲浮上中の静た わみ解析を行う.これにより算出された鋼板形状から評価値を定義し,さらに鋼板を一自由度系としてモデル化 した浮上制御実験結果との比較を行い,解析より導出した最適な浮上角度の有用性に関して検討を行う.

#### 2. 湾曲浮上装置

Fig. 1 に電磁石ユニットの写真を示す. 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むように配置してある.

制御システムの概略を Fig. 2, 装置の写真を Fig. 3 に示



Fig. 1 Photograph of electromagnet unit



Fig. 2 Electromagnetic levitation control system



Fig. 3 Photograph of experimental apparatus

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 = 0.24 mm, 0.27 mm, 0.30 mm)と する. 薄鋼板を 5 か所の電磁石ユニット(No. 1~5)に より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,検出した変位をディジタ 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.

Fig. 4 に電磁石ユニットの設置位置を示す. 5 個の電磁石 ユニットのうち周囲の No. 1~4 は Fig. 3 のように傾けるこ とができる機構になっている.

Fig. 5に各電磁石ユニット傾斜角θに対する鋼板の浮上の 様子を示す. θを変更しても電磁石表面と鋼板表面との距離 が 5 mmを保つように制御を行い,鋼板に対し吸引力の作 用する位置が一定になるよう, No. 1~4 は鋼板の自然な たわみ形状をもとに水平方向位置を調整する. また薄鋼 板の湾曲度合いに合わせて No. 5 は上下方向に移動させ る. なお傾斜角θに対する各支持力は以下の通りとなる.

$$F_{5} = \frac{2ah}{3l^{2}} \left\{ \rho g l \left( l^{2} - 6d^{2} \right) - 2Eh^{2} \theta \right\}$$
(1)

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

ここで, ρ: 鋼板の密度[kg/m<sup>3</sup>], g: 重力加速度[m/s<sup>2</sup>],



Fig. 4 Arrangement of electromagnets



Fig. 5 Relationship between tilt angle of electromagnets  $\theta$ and shape of steel plate

*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. なお予備実験により吸 引力の実験値と計算値は誤差 10%以下であることを確認 している.

さらに電磁石ユニット No. 5 の支持力  $F_5 = 0$  のとき, No. 1~No. 4 のみで鋼板を支持した際の支持点における たわみ角を自然たわみ角  $\theta_{na}$ と定義し,次式で表す.

$$\theta_{na} = \frac{\rho g l}{2Eh^2} \left( l^2 - 6d^2 \right) \tag{3}$$

## 3. モデル化および状態方程式

本論文では鋼板のモデル化として各電磁石ユニットの 変位,速度,電磁石コイルの電流値をその電磁石ユニッ トに対してのみフィードバック制御する一自由度モデル を適用する<sup>7)</sup>.状態変数として鋼板の変位 *z*<sub>n</sub>,速度 *ż*<sub>n</sub> お よび電流 *i*<sub>n</sub>を採用し,以下のような状態方程式を得る.

$$\dot{\boldsymbol{z}}_{\boldsymbol{n}} = \boldsymbol{A}_{\boldsymbol{n}}\boldsymbol{z}_{\boldsymbol{n}} + \boldsymbol{B}_{\boldsymbol{n}}\boldsymbol{v}_{\boldsymbol{n}} \tag{4}$$

ただし、 $z_n = \begin{bmatrix} z_n & \dot{z}_n & i_n \end{bmatrix}^T$ ( $A_n$ ,  $B_n$ の各要素に関しては既報<sup>7)</sup>を参照)





(c) h = 0.15 mm

Fig. 6 Shape analysis of steel plate ( $\theta = 10^{\circ}$ )

なお本報告では既報 <sup>7)</sup>に示すとおり離散時間系の最適 制御理論に基づき制御系設計を行った.

## 4. 湾曲浮上鋼板のたわみ解析

薄鋼板の安定浮上を実現するにあたり最適な湾曲の度 合いを検討する必要がある. 薄鋼板を浮上させる場合, 電磁石の吸引力が印加されない場所にたわみが生じ鋼板 を平坦に浮上させることが難しくなることから、浮上中 のたわみを抑制することが浮上安定性の向上につながる と考えられる. そこで薄鋼板を湾曲させて全体を面で支 持した状態を理想的な鋼板形状(以下,理想形状)と定 義する. なお理想形状は鋼板を x 軸に見た場合のはりと 考え、一次元のはりのたわみ形状を鋼板サイズに押出し たものとする.この理想形状に対する総たわみ量を評価 するために湾曲薄鋼板に重力が作用した際の形状を算出 する<sup>8)</sup>. 薄鋼板のたわみの方程式は次式で示される.

$$D\nabla^4 z = \rho g h - f \tag{5}$$

$$\hbar \tilde{\tau} \tilde{\tau}, \quad D = \frac{Eh^3}{12(1-v^2)} \quad , \quad \nabla^4 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4}$$

ここでv:ポアソン比, z:薄鋼板の鉛直方向変位[m], f: 電磁石ユニット No. 5 により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>]である.

薄鋼板は電磁石ユニットNo.1~4で単純支持するもの とし, No. 1~4 における鋼板の曲げ角度がθになるよう 式(1)より支持力 F5を算出する.式(1)より求めた F5が作 用する鋼板部分は解析モデルにおける節点に分布荷重と して作用すると仮定してfを求めた.fを鋼板中央部に作 用させ、式(5)を用いて有限差分法によって計算する.こ のとき差分解析格子の大きさはたわみ形状が十分把握で き,かつ計算時間を考慮し10mm×10mmとした.なお 解析手法の妥当性については既報<sup>9</sup>にて確認している.

(d) Optimal shape

x [mm]

解析結果の一例として a = 800 mm, b = 600 mm, h = 0.22 mm, 0.18 mm, 0.15 mm の極薄鋼板に対し, 電磁石 ユニットNo.1~4の電磁石位置における鋼板の曲げ角度 が 10° になるように f を入力した鋼板形状を Fig. 6 (a), (b), (c)に示す. ここで, Fig. 6 (d)は鋼板の曲げ角度が 10° における x 軸方向のたわみを拘束した理想形状である. 理想形状に対する総たわみ量が板厚に対してどの程度で あるのかを示すために評価値 / を次式のように定義した.

$$j = \frac{\sum_{i=1}^{N} |z_i - z_0|}{h \cdot N} \tag{6}$$

z<sub>i</sub>: 薄鋼板の各解析点における z 成分の変位[m], z<sub>0</sub>: 理想形状のz成分の変位[m],N:解析点の総数である.

Fig. 6 より板厚が薄くなる程たわみ量が増え理想形状 からの総たわみ量が大きくなり,評価値 j も増えている

Table 1 Natural deflection angle

Plate thickness	Natural deflection angle
<i>h</i> [mm]	$ heta_{na} \left[ egin{array}{c} \circ \end{array}  ight]$
0.24	10.8
0.27	8.5
0.30	6.9

Table 2 Parameters and values

Parameter	Value
ρ	7500 kg/m <sup>3</sup>
l	0.43 m
d	0.085 m
Ε	206 GPa
v	0.3

ことが分かる.評価値 j はその値が低くなるほど,理想 形状からのたわみ量の総和が小さく,吸引力が印加され ない部分のたわみを抑制した形状であることを意味する. なお浮上性能向上に対する評価方法はその挙動の複雑さ ゆえに様々な指標を取りうるが,本論文においては上記 の理由からたわみ量を採用した.同じ鋼板の曲げ角度 10°において板厚が変化すると浮上特性も変化すると考 えられるが,次章では実験とjを比較し,jによる最適な 電磁石の曲げ角度について考察していく.

#### 5. 実験方法

浮上対象として市場で流通しており薄く柔軟な h = 0.24 mm, 0.27 mm, 0.30 mmの極薄鋼板を使用し、電磁 石の傾斜角θに対する制振性能について検討する. ここ で2章にて示した各板厚の自然たわみ角 $\theta_{na}$ はTable1の 通りである. 電磁石の傾斜角 θ は前掲 Fig. 5 のように 0° から基本的に 5°ごとに変更し、特に特性の確認が必要 な場合は任意の角度に設定して浮上実験を行う. 制振性 能として鋼板を浮上させたときの時刻歴波形を取得する. 薄鋼板の時刻歴応答は比較的不規則な性質を有している ことから標準偏差にて評価を行う.8秒間の時刻歴波形 を取得し、鋼板と電磁石表面との平衡浮上位置からの標 準偏差とする. その際過渡状態の影響を除くため浮上か ら約10秒後に測定を開始した.なお標準偏差は電磁石ユ ニット No. 1 のものであり,他の電磁石ユニットにおい ても同じ傾向を示すことを確認している. また取得した 変位標準偏差の変動係数はいずれの電磁石角度において も 5%以下である. 重み係数は試行錯誤的に探索し, 板 厚毎に  $\theta = 0^{\circ}$  の変位標準偏差が等しくなるものを採用 した.本研究における各パラメータ値を Table 2 に示す.

## 6. 結果および考察

#### 6.1 電磁石の傾斜角 θ に対する制振性能

Fig. 7(a)に板厚 h = 0.24 mm における変位標準偏差を示 す.  $\theta = 0^{\circ}$  から 5° に傾けた際に変位標準偏差が増加す るが、8° では減少し、 $\theta = 10^{\circ}$  以上では変位標準偏差は 増加する結果となった.また Table 1 で示した鋼板の自然 たわみ角  $\theta_{ng}$  よりも鋼板を湾曲させると変位標準偏差は



(c) h = 0.30 mm



大きく増加する結果となった. また $\theta = 5^{\circ}$ で変位標準偏差が増加するのは $\theta = 0^{\circ}$ の平坦な浮上形状から湾曲形状に変化する過渡的な状態であり,鋼板形状が不安定であるためであると考えられる.

ここで、各傾斜角  $\theta$ で浮上させた際の浮上性能を評価 するために鋼板の浮上確率を取得し Fig. 8(a)に示した. 浮上確率は $\theta$ に対して 50 回実験を行い、30 秒以上浮上 する場合を浮上成功として百分率で表した.なお 30 秒間 浮上する場合は実用上問題とならない 10 分以上浮上継 続が可能であることを予備実験より確認している.浮上 確率に着目すると $\theta$ =0°から $\theta$ を増加させるに伴い浮上 確率は増加していることが分かる. $\theta$ =8°で浮上確率は





最大となった.

100

Fig. 7, 8 に示す(b) h = 0.27 mm, (c) h = 0.30 mm 鋼板に ついても同様に,  $\theta$  の増加に伴い浮上確率は増加し, 浮 上確率が最も高くなるのは h = 0.27 mm が $\theta = 7^{\circ}$ , h = 0.30 mm が $\theta = 5^{\circ}$  であり, 浮上確率が最大となる $\theta$ では 変位標準偏差も小さく,良好な浮上状態を維持している ことが確認できる.これらの結果から各板厚の自然たわ み角  $\theta_{na}$ を超えない傾斜角  $\theta$  で鋼板を湾曲させることに より浮上性能を向上できることが分かる. h = 0.24 mm 鋼 板については自然たわみ角  $\theta_{na}$ より小さい $\theta = 10^{\circ}$ にお いて変位標準偏差が増加,浮上確率が低下するが,自然 たわみ角  $\theta_{na}$ 以下の $\theta = 8^{\circ}$  で最高性能を示している.こ



(a) h = 0.24 mm



(b) h = 0.27 mm



(c) h = 0.30 mm



のことから自然たわみ角  $\theta_{na}$ を導出することにより、薄鋼板の厚さが変化した場合でも簡易的に最適な湾曲度合いを推定することが可能となった.

#### 6.2 電磁石の傾斜角 θ に対する評価値 j

各板厚における評価値 j を Fig. 9 に示す. 傾斜角  $\theta$  の 増加にともない評価値 j は減少している. また  $\theta$  が  $\theta_{na}$ より大きくなり浮上確率が低下する場合, j は増加して いることが分かる. 前述の通り j はその値が低くなるほ ど,理想形状からのたわみ量の総和が小さいことを表し ているが,理想形状により近くなるような電磁石の傾斜 角度であれば振動も抑制され浮上確率は高くなる.



Fig. 10 Relationship between plate thickness h and optimal tilt angle of electromagnets  $\theta$ 

ここで浮上確率が最も高くなる電磁石の傾斜角  $\theta$ と解 析より評価値 j が最小となる電磁石の傾斜角  $\theta$ を整理し Fig. 10 に示す.板厚 h = 0.24 mm, 0.27 mm, 0.30 mm の 実験により浮上性能が最も良かった  $\theta$ と解析による評価 は概ね一致し,評価値 j が最小となる電磁石の傾斜角  $\theta$ で鋼板を浮上させることにより,安定した浮上状態を実 現できることが確認できた.

## 7. 結論

本論文は柔軟鋼板の最適な湾曲度合いについて検討す るために,静たわみ解析と浮上制御実験から最適浮上角 度に関して考察した.本研究で得られた結論は以下のと おりである.

- (1)各板厚の自然たわみ角を超えない程度に湾曲させる ことで鋼板は安定した浮上を示す.これにより薄鋼 板の厚さが変化した場合でも簡易的に最適な湾曲度 合いを推定することが可能である.
- (2) FDM を用いた静たわみ解析の結果から,鋼板を湾曲 させることで吸引力が及ばない範囲のたわみの抑制 される湾曲度合いを推定でき,その湾曲度合いにて 浮上制御実験を行うことで浮上安定性を向上できる.

#### 謝辞

本研究を進めるにあたり故押野谷康雄教授には懇切丁 寧にご指導を賜りました.このことに敬意を示し,深く お礼申し上げます.

#### 参考文献

- T. Nakagawa, M. Hama, T. Furukawa : Study of Magnetic Levitation Technique Applied to Steel Plate Production Line, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 36, No. 5, pp. 3686-3689 (2000).
- M. Sase, S. Torii : Magnetic levitation control with real-time vibration analysis using finite element method, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 13, No. 1-4, pp. 129-136 (2001/2002).
- Jung Soo Choi, Yoon Su Baek : Magnetically-Levitated Steel-Plate Conveyance System Using Electromagnets and a Linear Induction Motor, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 44, No. 11, pp. 4171-4174 (2008).
- 4) 中村信貴,長谷川真也,押野谷康雄,石橋一久,粕 谷平和:薄鋼板の磁気浮上制御(発熱による電磁石 特性変化の影響に関する検討),第18回電磁力関連 のダイナミクスシンポジウム,pp. 53-54 (2006).
- 5) 例えば JFE 鋼板株式会社, http://www.jfe-steel.co.jp/products/car/products/surface /thin/
- 中村信貴,長谷川真也,押野谷康雄,石橋一久,粕 谷平和:極薄鋼板の磁気浮上制御(曲げた鋼板の安 定浮上に関する基礎的検討),第15回 MAGDA コン ファレンス, pp. 304-305 (2006).
- 長谷川真也, 押野谷康雄, 石橋一久: スライディン グモード制御を用いた磁気浮上薄鋼板の弾性振動 抑制に関する検討, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 74, No. 740, pp. 71-80 (2008).
- H. Marumori, H. Yonezawa, T. Narita, H. Kato, S. Hasegawa, Y. Oshinoya: Effective Plate Thickness Range in Bending Technique for Levitation Control of flexible Steel Plate, Proceeding of the School of Engineering of Tokai University, Series E, Vol. 39, pp. 59-66 (2014).
- 成田正敬,長谷川真也,押野谷康雄:永久磁石を用いた薄鋼板のハイブリッド磁気浮上システム, Journal of the Magnetics Society of Japan, Vol. 37, No. 2, pp. 29-34 (2013).