

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実験的検討)

中村信貴^{*1}・長谷川真也^{*2}・押野谷康雄^{*3}・石橋一久^{*4}・粕谷平和^{*3}

Electromagnetic Levitation Control for Thin Steel Plate (Experimental Considerations on Effect of Characteristics of Electromagnetic Variation Induced by Heat Generation)

by

Nobutaka NAKAMURA, Shinya HASEGAWA, Yasuo OSHINOYA,
Kazuhisa ISHIBASHI and Hirakazu KASUYA

(Received on, March 31, 2006 & accepted on, June 3, 2006)

Abstract

In recent years, research on the noncontact conveyance system with the application of electromagnetic levitation technology has been active. However, because of the high nonlinearity of the attractive force of an electromagnet and various uncertainties in circuit current such as changes in resistance attributable to heat generation by the electromagnet, the stability of levitation is not sufficiently ensured. In addition, for an actual steel plate conveyance process, it will be necessary to develop a control system that takes into consideration various parameter errors, such as the nonuniformity of plate thickness and the associated weight variation. In this study, we examine the possible achievement of the robustness of the effect of the characteristics of electromagnetic variation induced by heat generation using μ -synthesis.

Keywords : Steel plate, Electromagnetic levitation, Disturbance, Resistance variation, μ -synthesis, Optimal control

1. 緒言

自動車、電機製品、製缶、その他の材料として薄鋼板は現代の産業界において幅広く用いられている。近年では極めて薄い鋼板の製造も可能となり、その多岐にわたる需要から要求される表面品質は高級化の一途を辿っている。しかし薄鋼板生産ラインの搬送工程においては、主にローラによる接触搬送が行われているために表面品質の劣化という問題が発生している。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活発になされている^{1)~3)}。しかし電磁石を用いて薄鋼板を浮上制御する場合、電磁石の発熱による抵抗値の変動や電源ノイズ等、様々な不確定要素は制御性能に大きな影響を及ぼし、最悪の場合には鋼板が落下する問題が発生する。磁気浮上搬送システムを工業的に実現するためには、システムに不確定要素が含まれる場合にも、これを許容するように制御系を設計することが、実用上極めて重要となる。

この問題に対して石井ら⁴⁾は薄鋼板の磁気浮上システムに対して最適制御を行うことにより安定な磁気浮上システムを構築することを目的とした検討を行っているが、システムに不確定

要素が含まれる場合には制御が破綻してしまい、安定浮上状態の実現には至っていない。また滑川ら⁵⁾も H_∞ 制御理論を用いてロバスト性を有する制御系を設計し、制御実験により定常状態における鋼板の振動、目標値追従特性を検討している。浮上制御は実現しているが、電磁石の発熱による抵抗値の変動や電源ノイズ等、様々な不確定要素を考慮しきれていないために、浮上中の鋼板には常に振動が残留している。このように、磁気浮上システムが有する不確定要素を許容し、薄鋼板を実際の搬送工程に適用可能なほど安定して浮上させることに成功した報告は国内外においても皆無である。

この問題に対する有効な制御手法のひとつとして、 μ -synthesis が提唱され注目を集めている。 μ -synthesis はシステムが有する不確定要素の範囲を定義し、これを陽に含んだモデルを作成することによって、非常に優れたロバスト性能を有するコントローラを構築することが可能であり、大型柔軟衛星、磁気軸受などに対する適用が報告されている^{6), 7)}。そこで本報告では μ -synthesis を用いることによって磁気浮上システムが有する様々な不確定要素に対して、安定性の確保が可能なシステムを構築し、電磁石の発熱による特性変動や外乱が存在する場合においても薄鋼板の安定浮上が可能なシステムの実現を目指す。

*1 工学研究科機械工学専攻修士課程
*2 第二工学部機械工学科非常勤助手
*3 工学部動力機械工学科教授
*4 第二工学部機械工学科教授

2. 制御システム

実験装置の概略図を Fig. 1 に、その写真を Fig. 2 に示す。磁気浮上対象は長さ 800mm、幅 600mm、厚さ 0.3mm の長方形亜鉛めっき鋼板（材質 SS400）とする。長方形薄鋼板を 3 本のフレームに設置した 5 箇所のペアの電磁石（No.1~5）により吊り下げるようにして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センサにより検出する。なおペアの電磁石の電気回路は直列結合されており、センサを中央に挟むように配置してある。Fig. 3 は制御システムの概略図である。電磁石コイル電流を測定用の外部抵抗より検出し、合計 10 個の観測値を A/D コンバータから DSP に入力し制御則を計算する。D/A コンバータから電流供給用アンプへ制御電圧を出力し、5 個の電磁石吸引力を制御し、鋼板を電磁石表面から 5mm の位置に磁気浮上させる。

Fig. 4 に使用した E 型電磁石鉄心の仕様を示す。本研究ではフェライト製の一体型鉄心を使用しているが、渦電流による熱損失等は無視できると仮定している。なお電磁石の磁場による渦電流式非接触変位計への影響を計測した結果、測定誤差は 1% 以下であり制御系に及ぼす影響はほとんどないことを確認している。

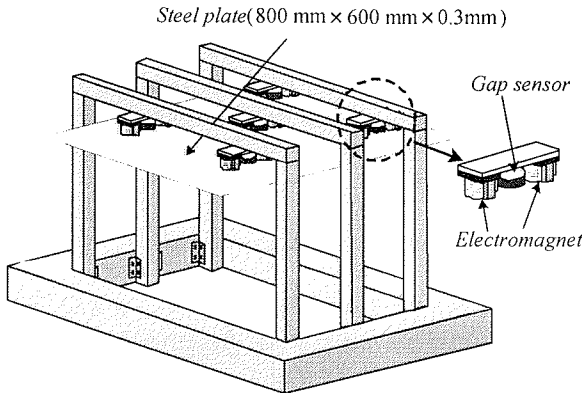


Fig. 1 Experimental apparatus.

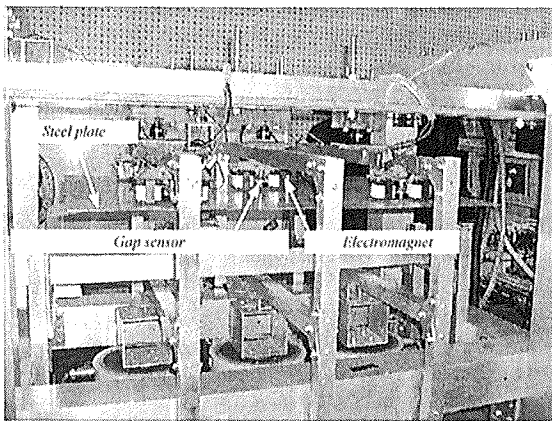


Fig. 2 Photograph of the electromagnetic levitation control system.

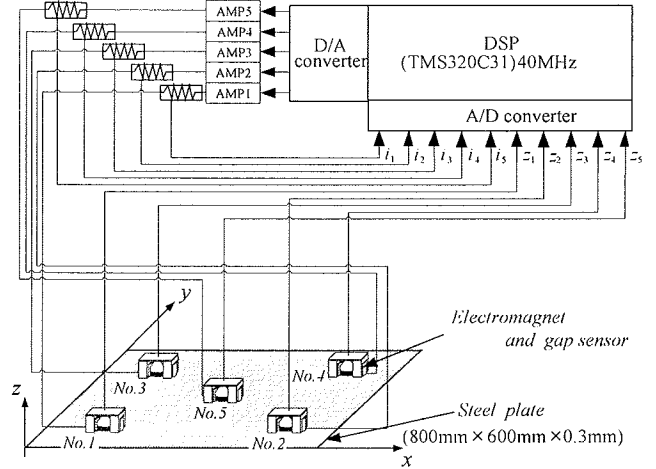


Fig. 3 Electromagnetic levitation control system.

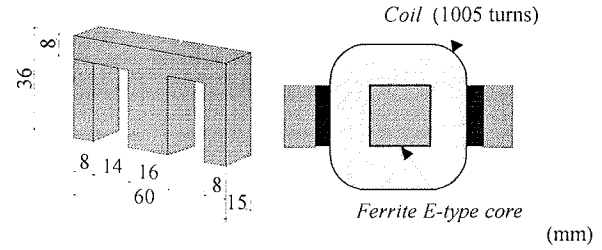


Fig. 4 Specification of the electromagnet core.

3. 基礎方程式

鋼板を各電磁石の静的吸引力によって支持すれば、鋼板が電磁石から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を $z(x, y)$ とすると、鋼板に対する運動方程式は以下ようになる。

$$\rho h \frac{\partial^2}{\partial t^2} z + \frac{Ch^3}{12} \frac{\partial}{\partial t} \nabla^4 z + D \nabla^4 z = \sum_{n=1}^5 f_{zn} \{ \delta(x - x_{a1n}) \delta(y - y_{a1n}) + \delta(x - x_{a2n}) \delta(y - y_{a2n}) \} \quad (1)$$

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

ここで ρ : 鋼板の密度 [kg/m³], h : 鋼板の厚さ [m], C : 鋼板の内部減衰係数 [Ns/m], $D = Eh^3/12(1 - \nu^2)$, E : 鋼板の縦弾性係数 [N/m²], ν : ポアソン比, f_{zn} : 各電磁石の吸引力の変動値 [N], t : 時間 [s], $z(x, y)$: 鋼板の平衡浮上位置からの鉛直方向変位 [m], x : 鋼板の長手方向の座標 [m], x_{a1n}, x_{a2n} : ペアの電磁石の x 方向の位置 [m], y : 鋼板の幅方向の座標 [m], y_{a1n}, y_{a2n} : ペアの電磁石の y 方向の位置 [m], $\delta(\cdot)$: ディラックのデルタ関数⁸⁾である。

また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電流に関する方程式は以下になる。

$$f_{zn} = \frac{F_{zn}}{Z_{zn}} z(x_{sn}, y_{sn}) + \frac{F_{zn}}{I_{zn}} i_{zn} \quad (3)$$

5. 制御理論

5.1 μ -synthesis を用いた制御系設計

Doyle の記法¹²⁾を用いると式(7)(8)は以下のように表せる。

$$P_z = \begin{bmatrix} A_\xi & B_\xi \\ C_\xi & \theta \end{bmatrix} \quad (9)$$

本報告で用いる一般化プラントの構成を Fig. 5 に示す。 μ -synthesis^{13), 14)}は, Fig 5 のように不確かさを陽に含んだ枠組みをもち, そのなかでロバスト安定, ノミナル性能, ロバスト性能を同時に達成するコントローラを求めることが可能である。

μ -synthesis におけるロバスト制御性能問題を H_∞ ノルムを 1 以下にするというロバスト安定化問題に帰着させるために, 同図において e_z から d_z の間に仮想的な摂動 A_z を導入した。ここで e_z は制御量, d_z は外部入力, z_z は A_z への入力, w_z は A_z からの出力である。Fig. 5 において点線で囲った部分は以下の入出力関係を持つ。

$$\begin{bmatrix} z_z \\ e_z \\ y_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} O & W_{za} & W_{za} \\ W_{zm} & W_{zm}P_z & W_{zm}P_z \\ I & P_z & P_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_z \\ d_z \\ v_z \end{bmatrix} \quad (10)$$

このとき外乱抑制制御に関する重み W_{zm} および加法的誤差に関する重み W_{za} は次のように選んだ。

$$W_{zm} = \text{diag}(W_{zm1} \ W_{zm2} \ W_{zm3} \ W_{zm4} \ W_{zm5}) \quad (11)$$

$$W_{za} = \text{diag}(W_{za1} \ W_{za2} \ W_{za3} \ W_{za4} \ W_{za5}) \quad (12)$$

加法的誤差に対する重み W_{za} は, 磁気浮上システムが有する様々な不確かさを許容するよう以下のように選択する必要がある。ノミナルな公称モデルと, 様々な不確かさを有する実プラントとの間のモデル化誤差を考慮するために, 公称モデルだけではなくプラントモデルの集合を考え, 実プラントがその中に存在すると仮定する。そこでモデル化誤差を以下のように定義する。

$$A_z(j\omega) = P_f(j\omega) - P_z(j\omega) \quad (13)$$

公称伝達関数とそれぞれの摂動モデルの伝達関数 P_f とのゲインの差により, 様々な周波数特性を持つモデル化誤差が得られる。本研究において P_f は, 薄鋼板の板厚, 電磁石の非線形特性などのパラメータ変化を十分考慮し選択することが重要になる。

ここで不確かさに対する周波数重み W_{za} を以下の式を満たすように設計する。

$$\|A_z(j\omega)\| \leq \|W_{za}(j\omega)\| \quad (14)$$

これにより, 無視された非線形性やパラメータの誤差や変化などに起因する不確かさを厳密に $A_z W_{za}$ に取り込むことが可能となる。本磁気浮上システムにおける考慮していないダイナミクスやセンサノイズなどに起因する不確かさは陽に取り扱っていないが, それらの不確かさも $A_z W_{za}$ に取り込まれていると仮定する。そこで W_{za} は高周波帯域において比較的大きなゲインを持つように選定する。

また, W_{zm} は磁気浮上制御の応答性を左右するために, 低周波数域で大きくする必要があるのである。

$$\frac{d}{dt} i_{zn} = -\frac{L_{eff} z_n I_{zn}}{L_{zn} Z_n^2} \frac{d}{dt} z(x_{sn}, y_{sn}) - \frac{R_{zn}}{2L_{zn}} i_n + \frac{1}{2L_{zn}} v_{zn} \quad (4)$$

電磁石コイルのインダクタンスは, 鋼板表面と電磁石表面のギャップに反比例する成分と漏れに相当する成分の和で表すことが一般的に知られている⁹⁾。そこで平衡浮上状態における電磁石 1 個当たりのコイルのインダクタンス L_{zn} [H] を以下のように表す。

$$L_{zn} = \frac{L_{eff} z_n}{Z_n} + L_{lea} z_n \quad (5)$$

ここで x_{sn}, y_{sn} : 渦電流式非接触変位センサの位置 [m], F_{zn} : 平衡浮上状態において各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], Z_n : 平衡浮上状態における各電磁石表面と鋼板表面とのギャップ [m], I_{zn} : 平衡浮上状態における各電磁石コイルの定常電流値 [A], i_{zn} : 各電磁石コイルの定常電流からの変動値 [A], L_{zn} : 平衡浮上状態における各電磁石コイル 1 個当たりのインダクタンス [H], R_{zn} : 各ペアの電磁石コイルの総抵抗値 [Ω], v_{zn} : 各電磁石コイルの定常電圧からの変動値 [V], $L_{eff,zn}/Z_n$: 各電磁石 1 個当たりにおける有効インダクタンス [H], $L_{lea,zn}$: 各電磁石 1 個当たりの漏れ磁束 [H] である。

4. 状態方程式

薄鋼板の平衡浮上位置からの変位 $z(x,y)$ を, 固有関数 $\phi_M(x,y)$ と基準座標 $\xi_M(t)$ ($M=1\sim 5$) を用いてモード展開する。このとき鋼板の固有関数は x 方向, y 方向にそれぞれ独立な両端自由梁の固有関数の積 $X_{mm}(x) \cdot Y_{nn}(y)$ ($mm,nn=1,2,\dots$) で表すことができると仮定する。ただし本研究では電磁石の設置位置の関係より, 鋼板の短手方向の弾性振動モードが顕著に励起される。そのため弾性振動モードは y 軸方向のみを検討対象とする。またセンサ数が 5 個であるため 5 次モード (弾性 1 次モード) まで考慮した制御を行う。以下にモード展開式を示す。

$$z(x,y) = \sum_{M=1}^5 \phi_M(x,y) \xi_M(t) \quad (6)$$

状態変数として鋼板の各振動モードの基準座標とその時間微分値および各電磁石コイル電流の定常値からの変動分を選ぶ。式(6)を式(1)に代入し固有関数の直交条件を用いて整理すると以下に示す式を得る¹⁰⁾。

$$\dot{\xi} = A_\xi \xi + B_\xi v_z \quad (7)$$

$$y_z = C_\xi \xi \quad (8)$$

$$\xi = [\xi_1 \dots \xi_5 \ \dot{\xi}_1 \dots \dot{\xi}_5 \ i_{z1} \dots i_{z5}]^T, \ v_z = [v_{z1} \dots v_{z5}]^T$$

$$y_z = [\xi_1 \dots \xi_5]^T$$

ここで, 行列 A_ξ, B_ξ, C_ξ の詳細に関しては, 紙面の都合上省略する¹¹⁾。

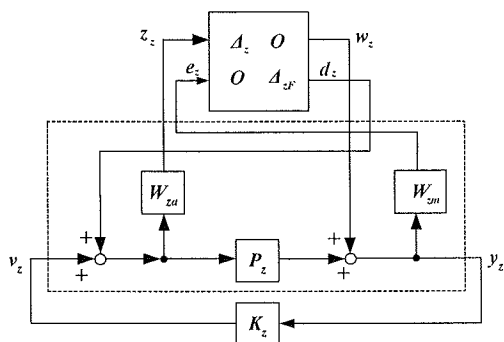


Fig. 5 Block diagram of generalized plant.

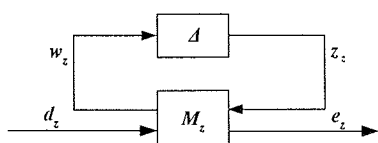


Fig. 6 Closed loop system.

次に Fig. 5 に示したシステムを変換し, Fig. 6 に示されるような等価な閉ループシステム M_z を考える. ここで $\|A\|_{\infty} \leq 1$ が与えられるとき,

$$\text{Sup}_{\sigma(A) \leq 1} \|F_{zu}(M_z, A)\|_{\infty} \leq 1 \quad (15)$$

となる磁気浮上用のコントローラ K_z を設計する. ここで F_{zu} は LFT (線形分数変換) である. 式(16)は構造化特異値 μ を用いて, これと等価な次式によって表すことができる.

$$\mu_A(M_z) \leq 1 \quad (16)$$

ここで $\mu_A(M_z)$ は次式で定義される.

$$\mu_A(M_z) = \frac{1}{\min\{\sigma(A): A \in \mathcal{A}, \det(I - M_z A) = 0\}} \quad (17)$$

ただし, $\det(I - M_z A) = 0$ となる $A = A$ が存在しない場合, $\mu_A(M_z) = 0$ とする.

これらの条件のもと D-K イテレーション¹⁵⁾を4回行い, 式(15)の左辺を最小とするコントローラの作成を行った. なおコントローラの次数の増加を避けるために, このコントローラとは独立した電流フィードバックを行う¹⁶⁾. これにより各電磁石コイル電流の一時遅れ特性を改善することができると同時に, μ -synthesis コントローラの可解条件を緩やかにすることによって, 次数を減少させることが可能となる.

5.2 最適制御理論を用いた制御系設計

本研究では, μ -synthesis 適用時における薄鋼板の浮上性能を評価するために, 現代制御理論の中でも標準的な制御手法である最適制御を適用し比較, 検討を行う.

最適制御理論¹⁷⁾では, 式(7)を用いて以下に示す二次形式評価関数を最小とするコントローラを求める.

$$J = \lim_{t_f \rightarrow \infty} \int_0^{t_f} (\xi^T Q_{opt} \xi + v_{z,opt}^T R_{opt} v_{z,opt}) dt \quad (18)$$

なお Q_{opt} : 各モードの基準座標とその微分値, さらに電磁石コイル電流に関する重み係数を要素とする行列, R_{opt} : 制御入力に関する重み係数を要素とする行列である. 式(18)を最小にする最適制御則は次式で表せる.

$$v_{z,opt} = -F_{opt} \xi \quad (19)$$

$$F_{opt} = R_{opt}^{-1} B_{\xi}^T P_{opt} \quad (20)$$

なお P_{opt} は以下に示す Riccati 型代数方程式の正定対称解である.

$$P_{opt} A_{\xi} + A_{\xi}^T P_{opt} - P_{opt} B_{\xi} R_{opt} B_{\xi}^T P_{opt} + Q_{opt} = 0 \quad (21)$$

6. 制御実験

6.1 実験装置諸元

本研究における各パラメータの値は以下の通りである (実測値).

Table 1 The symbols and values.

Symbol	Value	Symbol	Value
m	1.08kg	ρ	$7.50 \times 10^3 \text{kg/m}^3$
Z_0	$5.00 \times 10^{-3} \text{m}$	E	217GPa
$F_1 \sim F_4$	1.85N	ν	0.30
F_5	3.21N	C	$2.49 \times 10^8 \text{Ns/m}^2$
$I_1 \sim I_4$	0.51A	L_z	0.225H
I_5	0.67A	K	$3.60 \times 10^{-2} \text{Hm}$
$R_1 \sim R_5$	20.6 Ω	L_{lea}	0.189H

6.2 制御系相互の比較基準設定について

兩制御系相互の性能を比較するためには何らかの基準を定めなければならない. そこで浮上している板厚 0.3mm の薄鋼板中央部振動の標準偏差がほぼ同等となるように双方の制御システムを構築する.

まず, μ -synthesis コントローラ設計時における式(11)の W_{zm} は数値シミュレーションによる試行錯誤を繰り返し, コントローラが上述の目的の制御性能を得ることができるように, 以下のように選定した.

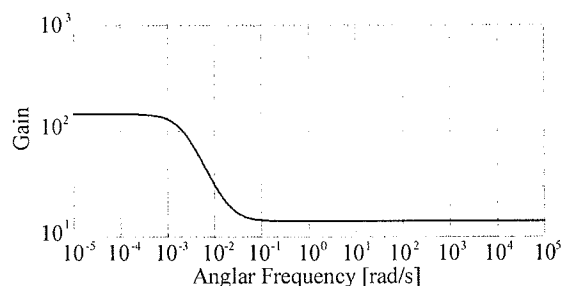
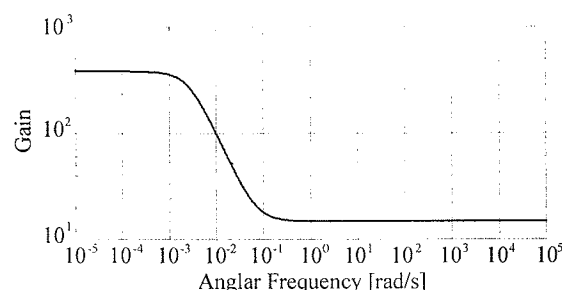
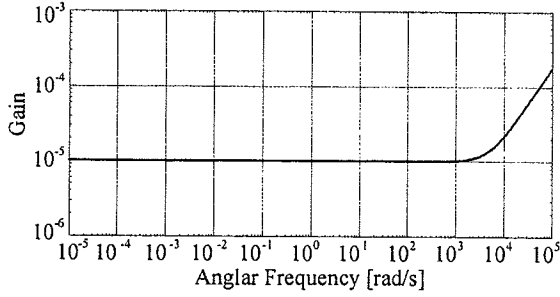
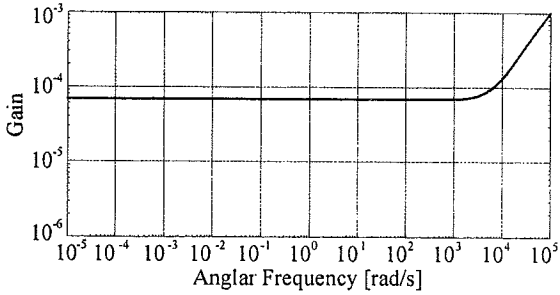

 (a) Weighting function for 1st - 4th mode (W_{zm1-4})

 (b) Weighting function for 5th mode (W_{zm5})

 Fig. 7 Frequency responses of W_{zm} .



(a) Weighting function for 1st - 4th mode ($W_{z1\sim4}$)



(b) Weighting function for 5th mode (W_{z5})

Fig. 8 Frequency responses of W_{zn} .

$$W_{z1\sim4} = \frac{7500s+100}{500s+1}, \quad W_{z5} = \frac{56400s+384}{380s+1}$$

次に、式(12)における W_{zn} は式(14)を満たすように決定し、考慮していない不確かさに対してもロバスト性を確保するために、高周波帯域において比較的大きなゲインを持つように以下のように選定した。

$$W_{z1\sim4} = \frac{0.0002s+1}{0.0002s+10000}, \quad W_{z5} = \frac{0.0005s+3}{0.025s+4400}$$

なお $W_{z1\sim5}$ の周波数伝達特性を Fig. 7 に、 $W_{z1\sim5}$ の周波数伝達特性を Fig. 8 に示す。

また最適コントローラ設計時における式(18)の重み行列は $Q_{opt}=I, R_{opt}=I$ とした。

6.3 電磁石コイルの発熱による特性変化に対する浮上性能に関する検討

磁気浮上システムを安定化する場合に、平衡浮上状態を保つために電磁石コイルに一定の電流を流す必要がある。しかし、その電流によって電磁石が発熱し、コイルの抵抗値、インダクタンス、吸引力が変化してシステムのパラメータの変動が生じるため、長時間に亘る安定な磁気浮上は困難となる。この解決方法として電磁石コイルを空冷する等の方法が考えられるが、空冷用のファンによる送風は、磁気浮上している鋼板にとって大きな外乱となる。また水冷式の冷却を行った場合でも、冷却水の漏れの危険性は常に存在し、メンテナンスにコストが掛かるという問題点がある。よって、制御系で電磁石の発熱によるコイル特性の変化を許容することは実用上極めて重要となる。そこで本節では電磁石の発熱に対するロバスト性について検討を行う。

まず実際に電磁石コイルの発熱による抵抗値、吸引力、インダクタンスの変動に関する実験を行う。Fig.9 に抵抗値、Fig.10

に吸引力、Fig.11 にインダクタンスそれぞれの基準値からの時間的変動を示す。なおこのとき電磁石コイルには、鋼板平衡浮上時における中央部電磁石の定常電流である 0.58A を印加した。Fig.9, Fig.10 より、電磁石コイルの温度が上昇するに従い、40分経過時には抵抗値が 18% 上昇し、それに伴い電磁石吸引力が 18% 減少している。また同様に Fig.10 ではインダクタンスが 8% 上昇し、電磁石の応答特性が劣化していることが確認できる。特に磁気浮上システムは本質的に不安定系であるために、吸引力の減少などはシステム全体を不安定化する致命的な要因となると考えられる。

次に実際に鋼板を長時間浮上させ、電磁石の発熱による制御性能の変化について検討を行った。Fig.12 の(a)に最適制御適用時、Fig.12 の(b)に μ -synthesis 適用時における鋼板中央部変位の時刻歴の一例を示す。なお両図において縦軸の 0 は電磁石表面から 5mm の平衡浮上位置を示している。Fig.12 の(a)では時間の経過に伴う電磁石の発熱による抵抗値の上昇が原因で、徐々に鋼板が電磁石から遠ざかり平衡浮上位置から鉛直下向きに約 1mm 離れた時点(約 20 分経過時)で電磁石は鋼板を支えきれなくなり落下している。一方 Fig.12 の(b)では時間が経過し電磁石が発熱しても鋼板が電磁石との距離 5mm の位置である平衡浮上状態を保ち、実験を行った約 30 分間、浮上状態を保持することが可能であった。

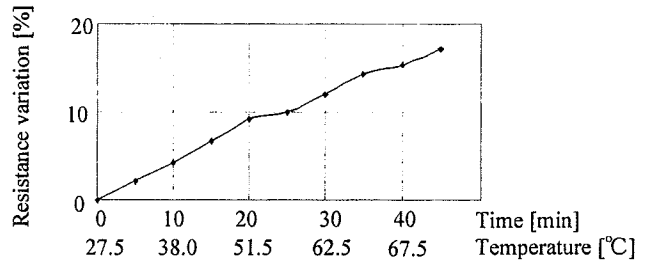


Fig.9 Experimental result of resistance variation of electromagnet.

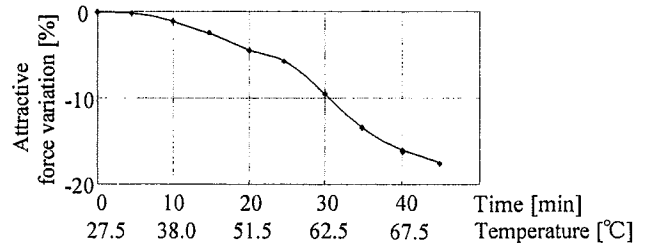


Fig.10 Experimental result of attractive force variation of electromagnet.

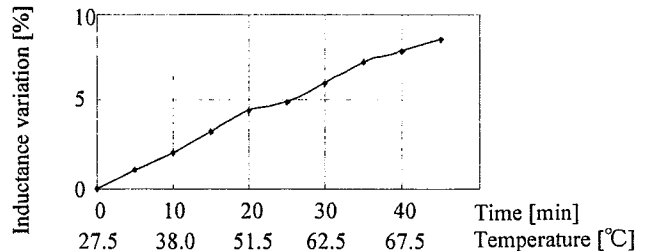


Fig.11 Experimental result of inductance variation of electromagnet.

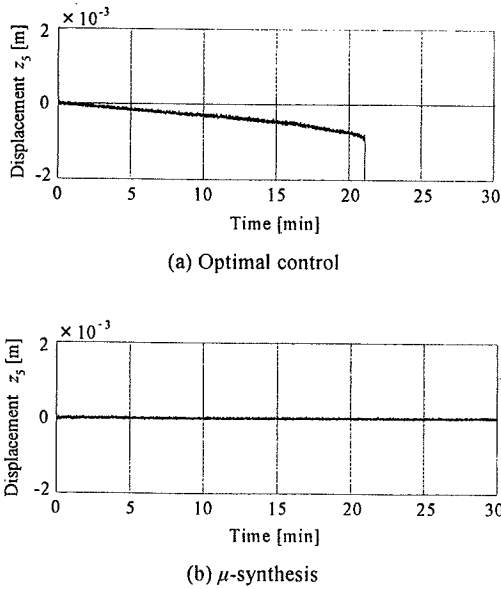


Fig.12 Experimental result of time histories of displacement at center of the steel plate.

7. 結言

本報告では μ -synthesis を用いることによって磁気浮上システムが有する様々な不確定要素に対して、安定性の確保が可能なシステムを構築し、電磁石が発熱した場合においても薄鋼板の安定浮上が可能なシステムの実現を目指した検討を行った。

その結果、 μ -synthesis を制御システムに適用することによって、磁気浮上システムに含まれる不確定要素を許容することが可能となり、薄鋼板を安定して浮上可能な優れた磁気浮上制御システムを実現できることが明らかになった。

謝辞

本研究に際して東海大学学部生 崎野直宏氏(現 三菱電機ビルテクノサービス株式会社)、中田大地氏(現 東海大学大学院)には多大な協力を得た。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) K. Matsuda, M. Yoshihashi, Y. Okada, and A. C. C. Tan : Self-Sensing Active Suppression of Vibration of Flexible Steel Sheet, Trans. ASME Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 118, No.3, pp.469-473, (1996).
- 2) T. Nakagawa, M. Hama, and T. Furukawa : Study of Magnetic Levitation Technique Applied to Steel Plate Production Line, IEEE Trans. Magn, Vol.36, No.5, pp.3686-3689, (2000).
- 3) 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).
- 4) 石井 中川 : H^∞ 制御を用いた鋼板磁気浮上装置のロバスト制御, 第 9 回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム, pp401-402, (1997).
- 5) 滑川, 水谷 : 磁気浮上系のロバスト制御に関する考察, 電気学会リニアドライブ研究会資料, Vol.LD-04, No.84-96, pp.31-36, (2004).
- 6) 長塩, 木田 : パラメータ変動のある宇宙構造物の制御 ディスクリプタ形式による μ 設計, 日本機械学会論文集(C編), Vol.65, No.635, pp.2693-2699, (1999).
- 7) Y.Xu, 野波 : 磁気軸受のファジィモデリングと μ 設計理論によるロバスト超平面を有するスライディングモード制御, 日本機械学会論文集(C編), Vol.68, No.666, pp.398-405, (2002).
- 8) C. R. Wylie : 工業数学 (上), ブレイン図書 (1962).
- 9) 社団法人日本機械学会新技術融合シリーズ:第 1 巻磁気軸受の基礎と応用, 養賢堂, (1995).
- 10) 押野谷, 石橋, 岡本 : 四辺自由鋼板の非接触振動制御 弾性振動のスピルオーバーに関する実験的考察, 日本 AEM 学会誌 Vol.9, No.3, pp.384-392, (2001).
- 11) 長谷川, 押野谷, 石橋 : 柔軟磁気浮上鋼板の振動絶縁に関する検討, 日本応用磁気学会誌, Vol.29, No.5, pp582-588, (2005).
- 12) J.C.Doyle, B.A.Francis, A.R.Tannenbaum(藤井隆雄訳) : 制御の理論, コロナ社, (1992).
- 13) 藤田, 滑川 : 磁気浮上系のロバスト制御, 機械の研究, Vol.46, No.3, pp.15-23, (1994).
- 14) 野波, 西村, 平田 : MATLAB による制御系設計, 東京電機大学出版局, (1998).
- 15) A. Packard, J. Doyle : The complex structured singular value, Automatica, Vol.29, No.1, pp.71-109, (1993).
- 16) 長谷川, 太田, 押野谷, 石橋 : 薄鋼板磁気浮上システムにおける外乱相殺制御(剛体鋼板に対する基礎的検討), 東海大学紀要工学部, Vol.44, No.1, pp.67-73, (2004).
- 17) K. Ogata : Modern Control Engineering, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, (1997).