

# 薄鋼板の非接触支持・搬送に関する研究

押野谷康雄<sup>\*1</sup>，石橋一久<sup>\*2</sup>

Study on Noncontact Support and Transportation of a Thin Steel Plate

by

Yasuo OSHINOYA and Kazuhisa ISHIBASHI

(Received on Sept.27, 2001)

## Abstract

Cold-rolled steel sheets, such as steel plates for automobiles, are conveyed on rollers to undergo many processes, such as rolling, plating, coating and drying and ultimately, the steel plates are rolled as products. In this type of continuous-web handling system, production lines are generally constructed for the purpose of improving production yield and productivity while suppressing energy loss, coating nonuniformity and flaws as much as possible. However, these problems have conventionally been tackled via experience-based techniques accumulated at each production site and systematic approaches to cope with these problems have not been sufficiently developed. Under such circumstances, a new method involving the application of electromagnetic technology is under consideration for improving the surface quality of steel plates of which deterioration of which has been observed in the conventional contact conveyance system. In this thesis, we discuss four aspects concerning the electromagnetic levitation control of a sheet steel which authors are researching recently, that is, effective use of permanent magnets, noncontact horizontal positioning control, conveyance control, and elastic vibration control for the thin steel plate with free edges.

**Keywords:** *Electromagnetic Levitation, Steel Plate, Handling System, Permanent Magnet, Elastic Vibration*

## 1. 緒言

現在，自動車産業をはじめ多くの工業製品に広く用いられている薄鋼板は通常ローラで支持，搬送されている．しかし，ローラによって圧延工程では傷が発生し，表面処理工程ではめっき等の不良が発生するために鋼板表面の品質が劣化する場合も少なくない．この問題を解決するために鋼板の磁気浮上制御に関する研究が行われている<sup>1)~23)</sup>．しかし，鋼板が薄いために，限られた個数の電磁石では柔軟連続体ゆえに生じる静的なたわみや高次モードの弾性振動を十分抑制することができず，十分に安定な浮上および搬送制御を実現できていない．本報告では，著者らが最近行なっている薄鋼板の磁気浮上制御における4つのアプローチ，すなわち永久磁石の利用（第2章），水平方向からの位置決め制御（第3章），搬送制御（第4章），弾性振動抑制（第5章）について，特に切り板の非接触支持制御という視点から総合的に言及する．

## 2. 永久磁石を用いた多点非接触支持装置の開発<sup>14,15)</sup>

2.1 はじめに 数多くの電磁石を使用すれば，非常に柔軟である薄鋼板の磁気浮上が容易に実現可能となることは想像できる．しかし同時に，コスト面やメンテナンスの面などで実用的でないことも否めない．そこで本章では，周辺自由端の長方形薄鋼板の非接触支持制御において，電磁石吸引力がほとんど作用していない部分に永久磁石を分布的に配置し，これらの吸引力を浮上安定化のために有効利用することを提案する．また，永久磁石の磁力による拘束が鋼板全体にわたって連続的に分布することにより，薄鋼板の横振動抑制効果も期待できる．この基礎となる考え方は弾性基礎上の梁の振動問題<sup>24)</sup>であるが，磁性体に対する永久磁石の磁力は吸引力としてのみ作用するのでモデル化において工夫を必要とする．さらに，永久磁石の利用は，いわゆるゼロパワー制御<sup>25)</sup>とは異なるものの，ランニングコスト不要な永久磁石と電磁石とのハイブリッドシステムによるローコスト磁気浮上制御装置の開発を可能とする．本章ではFEMを用いて電磁石と永久磁石を配置した磁気浮上システムの電磁力解析を行い，その有効性を示すとともに

\*1 工学部動力機械工学科助教授，未来科学技術共同研究センター研究員， \*2 第二工学部機械工学科教授

に、永久磁石利用にともなうシステムへの影響を簡便な方法でモデル化する手法を示し、提案した長方形薄鋼板の磁気浮上制御装置に対する有効性を実験によって検証する。

**2.2 制御システム** 制御システムの概略図を図 1 に示す。本研究では、長さ  $a=800\text{mm}$ 、幅  $b=600\text{mm}$ 、厚さ  $h=0.3\text{mm}$  の長方形亜鉛めっき薄鋼板を浮上対象とした。薄鋼板を 5 か所の電磁石によって電磁石表面から  $5\text{mm}$  の位置に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、その速度と共にフィードバックする。さらに電磁石コイル電流も検出してフィードバック制御を行う。1 か所の電磁石は図 1 のように、回路として直列結合させた 2 つの電磁石から構成され、渦電流式非接触変位計を中央に挟むように設置してある。これによりセンサとアクチュエータがコロケートされた状態を実現している。なお、電磁石磁場による渦電流式非接触変位計への影響を計測したところ、測定誤差は 1% 以下であり制御には影響ない範囲であるとした。一方、永久磁石は電磁石吸引力の作用しない部分に等分布になるよう 30 個配置した。本研究では、例えば床面に置いてある薄鋼板を非接触把持することを想定し、鋼板の上側だけにセンサや電磁石、永久磁石を設置した装置を設計する。したがって鋼板に作用する鉛直下向きの力は重力のみである。以下で電磁石、永久磁石の設計に関して言及する。

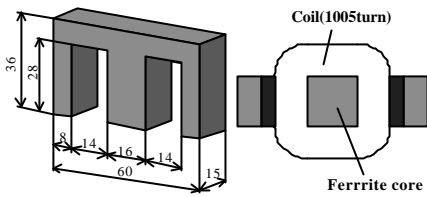


Fig. 2 E-type ferrite core

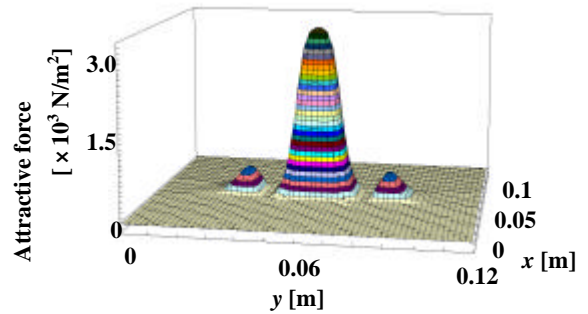


Fig. 3 Distribution of attractive force of electromagnet

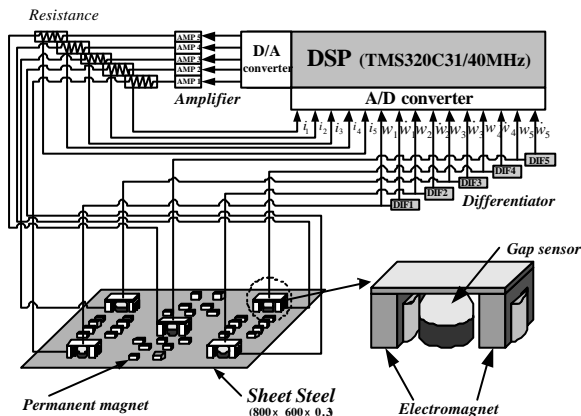


Fig. 1 Electromagnetic levitation control system for a rectangular sheet steel with permanent magnets

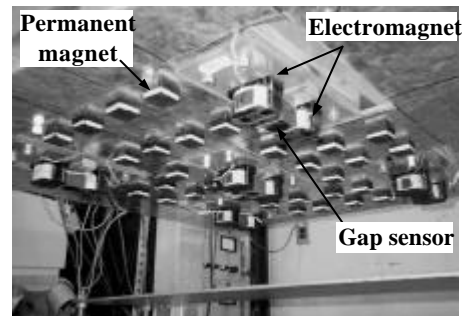


Fig. 4 Photograph of permanent magnets, electromagnets and sensors

**2.3 電磁石の設計** 電磁石コアは、図 2 のような E 型フェライト製コアを使用する。実際に薄鋼板を非接触支持する場合に相当した電磁石吸引力分布とその大きさを FEM 解析で求めた。図 3 はその計算結果の一例である。

**2.4 永久磁石による支持機構の設計** 本研究で使用する永久磁石は  $30\text{mm} \times 30\text{mm}$ 、高さ  $15\text{mm}$ 、表面磁束密度  $0.12\text{T}$  の直方体磁石である。永久磁石の大きさは使用している電磁石とほぼ同程度のものとし、材質は実用性を考慮に入れ廉価なフェライト磁石を使用している (図 4)。

図 4 のように配置した永久磁石の吸引力分布を図 5 に示した。ただし、鋼板までの距離は  $45\text{mm}$  として計算している。同図より、30 個の永久磁石による吸引力がピン支持のように鋼板に作用していることが分かる。

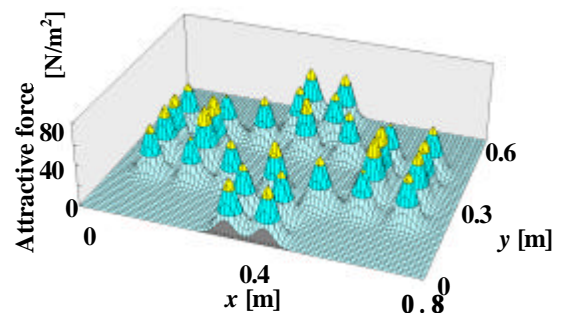


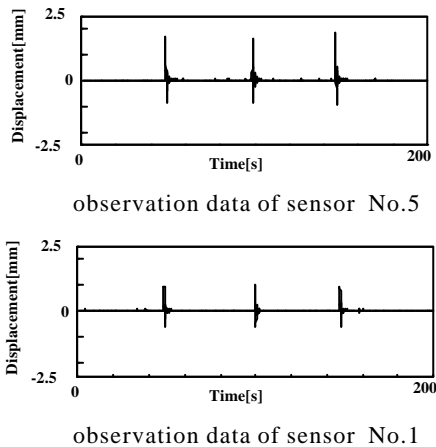
Fig. 5 Distribution of attractive force of permanent magnets (Pole N,S)

**2.5 基礎方程式** 鋼板の重力を各電磁石の静的吸引力と各永久磁石の吸引力によって支持すれば、鋼板が電磁石、

永久磁石から一定の距離に保たれる平衡状態が存在する．そこからの上下変位に関する運動方程式を導く．ここで，1個の電磁石から発生する吸引力は図3の解析結果を考慮に入れ，鋼板表面に対して一点に集中して作用すると仮定する．また，永久磁石による影響はこれまでに述べたように，運動方程式を記述するうえで薄鋼板の減衰係数，ヤング率の値が，本来鋼板が有する固有の値から見かけ上変化したとして扱えるものと仮定する<sup>15)</sup>．電磁石1個当たりの吸引力に関する式および電流に関する式は，薄鋼板の平衡浮上位置近傍で線形化近似を行うことにより表すことができるものとする．

**2.6 制御系設計** 薄鋼板の平衡浮上位置からの変位は，固有関数と基準座標を用いて展開する．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で表すことができると仮定する．また，永久磁石の吸引力の影響によって，両端自由梁の固有関数形状が変化しないと仮定する．固有関数の直交条件を用いて基礎方程式を整理し，状態方程式を得たうえで最適制御理論を適用する．

**2.7 実験結果** 図6は浮上中の鋼板に打撃加振を行ったときの変位応答である．中央のセンサ No.5 と隅のセンサ No.1 からの測定結果を200秒間示しており，外乱による浮上性能の劣化が無いことを確認した．なお，永久磁石を全く使用せず，5か所の電磁石のみで浮上実験を試みたが，薄鋼板の静的なたわみが大いいため，浮上は非常に困難で，成功した場合でも比較的弱い外乱を加えるだけで非接触支持が保てない状態であった．



**Fig.6 Impulse displacement response of the sheet steel (gap between permanent magnets and sheet steel=45mm)**

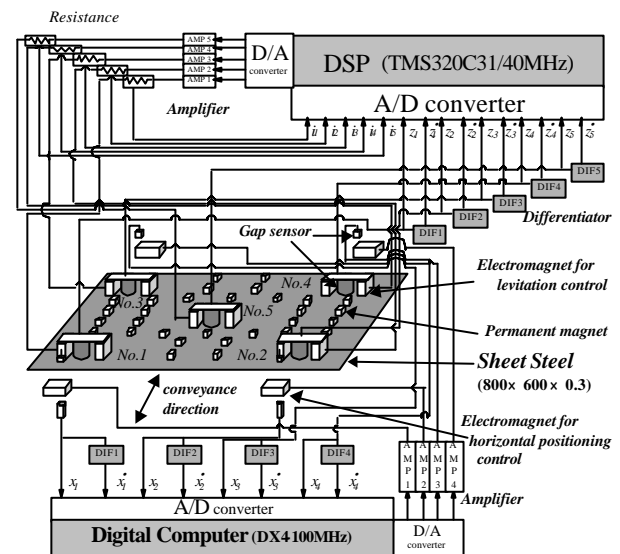
**2.8 まとめ** 本章では，永久磁石と電磁石を用いた長方形薄鋼板の磁気浮上制御装置を提案し，薄い鋼板を安定に非接触支持できることを実験的に確認した．永久磁石を効果的に利用することによって十分な浮上の安定化が実現でき，コスト面等でも実用的発展性を有するシステムが開発できた．

### 3. 磁気浮上鋼板の水平方向非接触位置決め制御機構の開発<sup>13,16)</sup>

**3.1 はじめに** 前章で切り板の非接触制御装置の提案を行ない，その実現性を明らかにした．次の段階としては，切り板の非接触高速搬送が考えられるが，この場合鋼板質量の慣性力による横滑りの発生という問題が生じる．これに関して，さまざまなアプローチがなされている<sup>3)-5)</sup>．一方，著者らは高速搬送時の横滑りの問題を解決するために，薄鋼板の相対する二辺に対向するように電磁石を配置した非接触位置決め制御システムを提案している<sup>13)</sup>．

そこで本章では，特に浮上している薄鋼板に対し水平面内の位置決め制御を行った際，薄鋼板のエッジ部方向から電磁石によって加えられる電磁石吸引力によって弾性振動が抑制できるという結果について報告する<sup>16)</sup>．

**3.2 制御システム** 制御システムを図7に示す．本実験では基礎的考察を行なうために，相対する長手方向二辺の自由端にプラスチック製の軽量梁を取り付け弾性振動が発生する方向に制約を加えた薄鋼板に対して，デジタル最適制御による磁気浮上制御を行う．対象の薄鋼板を高速非接触搬送させることを本研究課題のひとつの目的としているが，本報告では水平方向からの電磁石吸引力の変化が薄鋼板の弾性振動にどのような影響を与えるかを検討するために搬送は行わない．



**Fig.7 Electromagnetic levitation control system with permanent magnets and horizontal positioning controller**

搬送方向の位置決め制御システムは，図7における中央の鋼板より下側に示してある．浮上した鋼板の相対するエッジに対して，二組の電磁石によって両側に引き合いながら非接触位置決め制御を行う．各電磁石表面から鋼板エッジまでの距離を5mmに非接触位置決め制御する．本研究では搬送方向の制御系設計とその性能の基本的な検討が目的であることから，水平方向の運動は一軸搬送方向のみの1自由度系としてモデル化する(図8)．

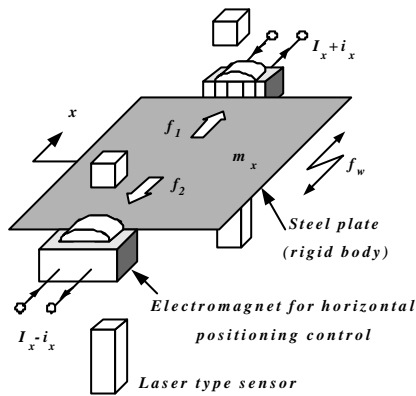


Fig.8 Theoretical model of horizontal positioning control of the rigid body steel plate

3.3 薄鋼板に対する電磁石特性 水平位置決め用および浮上用電磁石におけるコイル電流と鋼板への吸引力の関係を調べるため、電磁石コイル電流を変化させたときの電磁石吸引力をそれぞれ計測した（電磁石表面と鋼板端部、または鋼板表面とのギャップは 5mm 一定に保った）。図 9 に電磁石コイル電流（二乗値）と吸引力との関係を示す。水平位置決め電磁石（印）の場合、電磁石コイル電流が  $I=0.9A$ （図横軸では  $I^2=0.81A^2$ ）程度以上では磁気飽和を生じたが、 $I=0.6A$ （ $I^2=0.36A^2$ ）程度までは電流の二乗値と吸引力がほぼ線形とみなせる領域が存在した（同図斜線部）。さらに、電磁石表面と鋼板端部のギャップを 3,4,6,7mm の 4 通りとして同様な実験を行ったところ、吸引力が電流の二乗に比例し、ギャップの二乗に反比例する結果が得られた。一方、浮上用電磁石（印）は、水平位置決め用電磁石と比較して吸引力が約 2.3 倍（ $I=0.5A$  において）得られ、磁気飽和もより電流値の高いところから始まっていることがわかる。同図より、 $I=0.7A$ （ $I^2=0.49A^2$ ）程度までは電流の二乗値と吸引力がほぼ線形とみなせる領域が存在した（同図ハッチング部）。

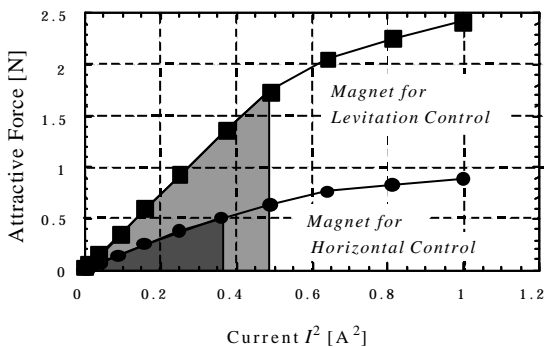


Fig.9 Characteristics of electromagnetic attractive forces for levitation and horizontal positioning control

3.4 制御系の設計 磁気浮上システムと、水平位置決めシステムは同一対象の運動を記述していることから、制御時には相互に影響を及ぼす可能性が考えられる。しかし、

これらの干渉は無視できる範囲にあると仮定し、それぞれの制御系を独立に設計する。

3.5 制御実験 浮上制御用のフィードバックゲインは、基本的に 5 力所の電磁石に対してすべて同じものを用いたが、鋼板の中央に配置してある電磁石コイル電圧を計算するための速度成分のフィードバックゲインのみ、約 30 分の 1 の値に数値を変更した。これによって、浮上中（水平位置決め制御なし）の薄鋼板中央部にインパルスを加えたとき、図 10 に見られるような鋼板の弾性 1 次モードに相当する振動が残留した。

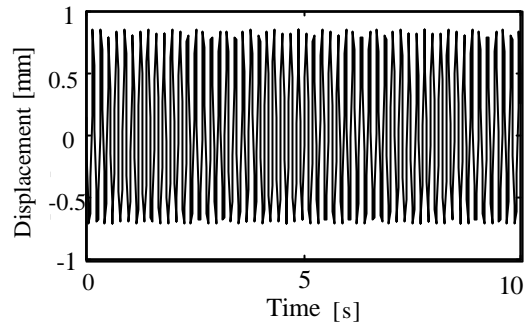


Fig.10 Time response of vertical displacement of sheet steel without horizontal positioning control

図 11 は、図 10 の場合と同様のフィードバックゲインを用いて薄鋼板を浮上させ、水平方向の位置決め制御を行った後、薄鋼板中央部にインパルスを加えたときの鉛直方向変位である。静的吸引力（定常電流値）によって浮上状態の薄鋼板の弾性振動に対する抑制効果が得られることが図より明らかである。一方、図 11 の振動のスペクトルを測定した結果、水平方向未制御時（図 10）より約 2% の振動数の上昇はみられたものの、さほど大きな変化は得られなかった。すなわち、電磁石吸引力による張力の付加によって、薄鋼板の等価的な剛性の増加はほとんど生じていないということである。したがって、本研究で得られた薄鋼板の弾

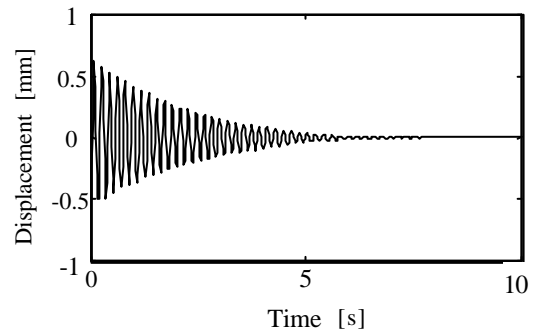


Fig.11 Time responses of vertical displacement of sheet steel with horizontal positioning control in the steady current changes

性振動抑制のメカニズムは、電磁石吸引力によって本来自由端である薄鋼板エッジ部（境界）がたわみ（鉛直）方向に拘束されたことに起因すると考えられる。

3・6 まとめ 本章では、磁気浮上薄鋼板に生じる弾性振動が、著者らの提案した水平方向非接触位置決め制御システムにおける静的吸引力の変化によってどのような影響を受けるかを明らかにするために、実験的考察を行った。その結果、提案した制御系では静的吸引力を上昇させることによって効果的な弾性振動抑制作用の獲得を確認できた。

薄鋼板の弾性振動を抑制するには、これまで薄鋼板の平面方向への電磁石による制御のみに依存していた。しかし、本研究ではエッジ方向からの電磁力によっても弾性振動を抑制できるという新しい知見を得た。本研究の成果は、薄鋼板の非接触搬送技術における新しい方向性を提示し、かつ工学的にも非常に興味深い電磁現象を示している。

#### 4. 磁気浮上鋼板の非接触搬送に関する検討<sup>16,17)</sup>

4・1 はじめに 磁気浮上した鋼板を搬送するためには横滑り、落下という問題をクリアしなければならないが、これに関する一解決方法を前章で提案した。これは、一例として磁気浮上用電磁石がロボットアーム先端に設置され、鋼板を非接触把持しながら搬送する工程などを想定している。そこで本章では、磁気浮上している鋼板に水平方向からの非接触位置決めを実施し、搬送時に生じる水平方向慣性力に対する非接触位置決め制御性能について数値シミュレーションと実験によって考察を行う。ただし、磁気浮上した薄鋼板にエッジ方向から非接触位置決め制御する試みはこれまでにないため、鋼板の弾性振動が搬送中の位置決め制御性能にどれほど影響を及ぼすかが明らかでない。そこで本章では、極軽量カーボンファイバ製の梁によって薄鋼板を補強し、運動は剛体として振舞うが電磁力が作用する部分の吸引力特性は薄鋼板と同一であるような制御対象を製作し、提案した制御機構の基本性能とその有効性を検討する。

4・2 制御機構 厚さ 0.3mm の鋼板に極軽量のカーボンファイバ製パイプ（直径 6 mm、使用した全パイプ質量の薄鋼板質量に対する割合は約 8 %）を図 12 の点線で示したように取り付け、鋼板の弾性振動発生を抑制し、磁気浮上対象を剛体と見なした。磁気浮上制御システム（図 12 の上半分に相当）を、図 13 に示すアルミフレーム製装置内の天井に設置し各電磁石表面から 5mm の位置に鋼板を磁気浮上させる。また、このアルミフレーム全体を搬送路中央に設置してありリアモータを用いて一軸方向に搬送させる。図 14 に実験装置全体の写真を示す。

本研究では、1カ所の電磁石位置で検出した変位、速度と電磁石コイル電流値を、その電磁石に対してのみフィードバックする、いわゆるローカルフィードバック制御を行う。そこで、図 15 に示すような、磁気浮上対象の5分の1に相当する質量を浮上させる1自由度系としてモデル化する。

4・3 数値シミュレーションと制御実験 図 16 に図 13 で示したフレーム搬送用リアモータの搬送速度（指令値）とそのときの加速度（実測値）を示す。搬送加減速度 0.5m/s<sup>2</sup>、最大搬送速度 0.6m/s（いずれも指令値）で 1.9m 搬送している。

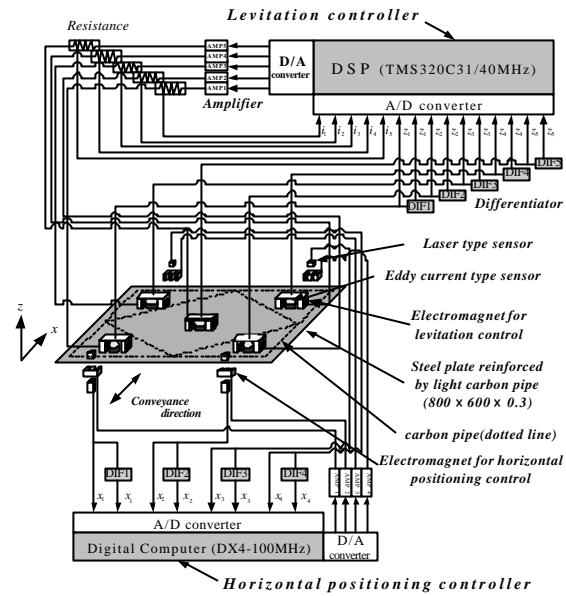


Fig.12 Electromagnetic levitation control system with horizontal positioning controller

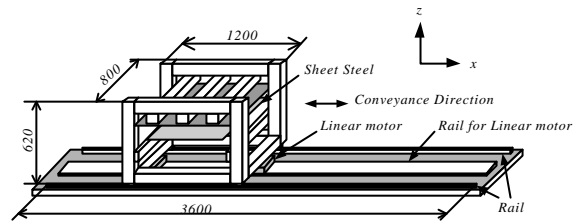


Fig.13 Conveyance system of the plate

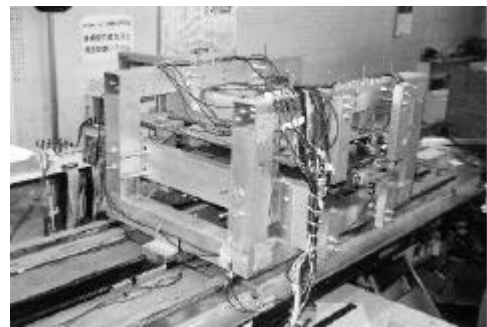


Fig.14 Photograph of the conveyance system

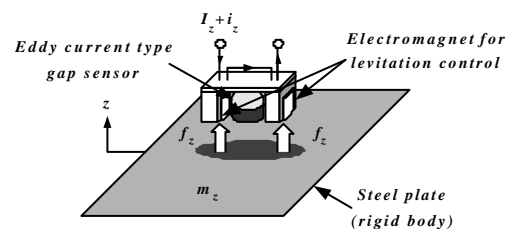


Fig.15 Theoretical model of levitation control of the rigid body steel plate

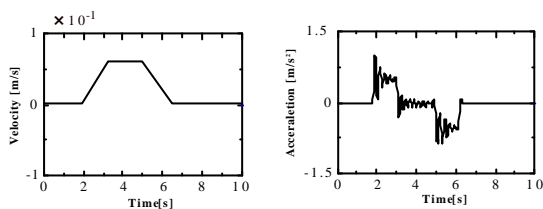


Fig.16 The command value of transportation speed and its observed acceleration

図 17 は磁気浮上している鋼板に対して水平位置決め制御を行い、図 16 の条件で搬送を行った時の鋼板の水平方向変位の実験結果の一例と、同様の条件における数値シミュレーションの結果である。図の縦軸の零は搬送方向の平衡位置（各電磁石から 5 mm の位置）を示す。実験結果とシミュレーション結果はよく一致しており、モデリングの有効性が確認できた。

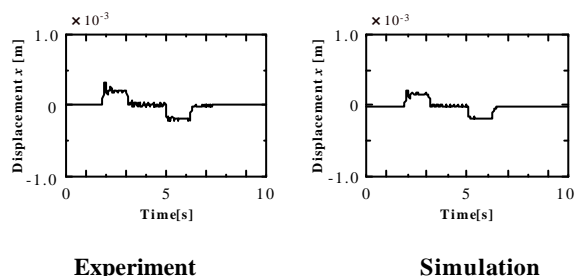


Fig.17 Horizontal displacements of the plate on transport (experimental and simulation results)

図 18 は、図 17 で行った実験時の鋼板の鉛直方向変位を測定した結果である。2 秒付近より搬送を開始しており、7 秒付近で搬送を終了している。鉛直方向変位はピッチング運動を生じている様子が観測できるが、その量は電磁石と鋼板の定常ギャップ 5 mm の約 2 % 以内に制御可能であることが確認できた。なお、水平位置決めを行わないで搬送した場合、加・減速時において鋼板は並進的な横滑りを起こし、鋼板は搬送直後に落下することを確認している。

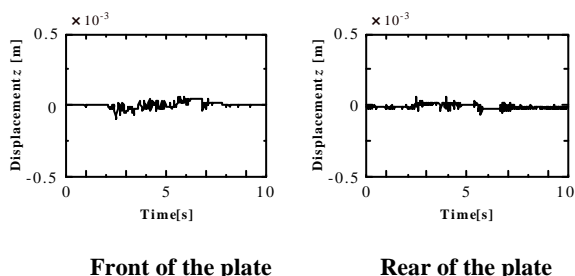


Fig.18 Experimental result of time responses of the plate on transport

4.4 まとめ 本章では、前章で提案した磁気浮上している薄鋼板の搬送に対して、薄鋼板のエッジ方向から非接触位置決め制御を実施し、一軸方向の搬送を行なった。最適制御理論に基づいたフィードバック制御系を設計し、そ

の実現性を数値シミュレーションと実験によって検討した。いくつかの条件で検討を行った結果、著者が提案している水平方向の非接触位置決め制御機構を用いて搬送を行えば、安定な搬送が行えることが分かり、その有効性を示すことができた。

## 5. 強制的な外乱に対する薄鋼板の弾性振動抑制制御に関する検討<sup>20,21)</sup>

5.1 はじめに 第 1 章で述べたように、薄鋼板を磁気浮上制御によって非接触支持する試みが始められてから最近に至るまで、数多くの研究者によって研究がなされているが、対象が柔軟体であることに伴う弾性振動の発生が、この研究の大きな障壁になっていることはこれまでの報告からも明らかである<sup>12)</sup>。そこで著者らは、磁気浮上鋼板に対して強制的に弾性振動を発生させることが可能な実験装置を製作し、最適制御理論を適用して弾性振動モードの抑制効果について検討を行っている<sup>20)</sup>。しかし、センサ数の制約からオブザーバ等を構成しない制御系では限られた弾性振動モードしか制御系で考慮できず、その結果として、制御系から漏れた弾性振動モードがスピルオーバー問題を引き起こすことになった。本章では、前述の最適制御コントローラではスピルオーバーに相当するモードに対して制御可能なシステムの構築を目的とする。そのために、弾性振動のスピルオーバーを考慮した準最適制御を適用し、最適制御理論による制御と実験的比較を行い、その有効性について検討する。

5.2 制御システム 制御システムを図 19 に示す。本章では弾性振動抑制の基本的な考察を行うことから、浮上状態の安定性を保つために、カーボンファイバー製パイプ(直径 4mm)を図の点線で示すように 3 本取り付け(電磁石直下)、短手の方向(y 軸方向)の弾性振動の発生を抑制した。特に鋼板を非接触支持した際に生じる弾性振動の中で、低次モード(1 次, 2 次モード)を中心に考察を行う。低次モードを扱う上で、上述のカーボンファイバー製パイプを鋼板に貼り付けたことによる影響はほとんどないことを確認している(使用した全パイプ質量の鋼板質量に対する割合は 5% 未満である)。実験装置の概略図を図 20 に示す。3 台の加振器により鉛直方向に独立加振可能な 3 本のフレームに、電磁石、センサが設置してある。この装置により浮上鋼板に鉛直方向の外乱を入力し、発生する鋼板の弾性振動に対する振動抑制実験を行う。

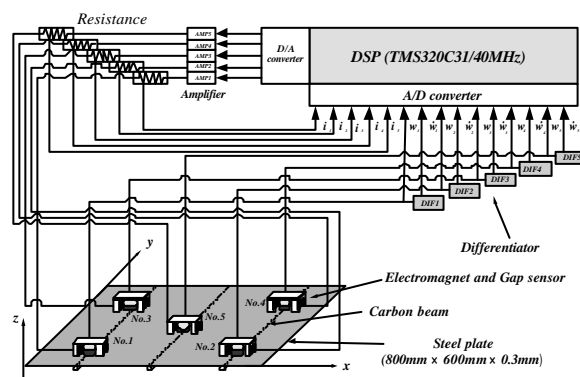


Fig.19 Electromagnetic levitation control system

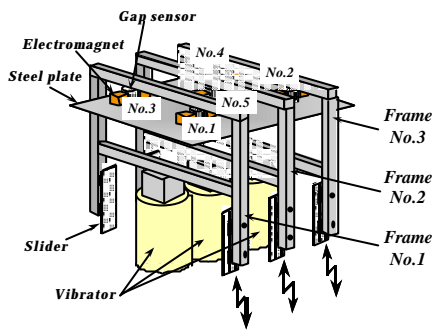


Fig.20 Experimental apparatus

5.3 モデル化 磁気浮上対象は  $y$  軸方向がカーボンファイバー製パイプにより補強されているため  $x$  軸方向の弾性振動のみを考慮してモード展開を行う．図 21 は固有関数であり，1 次～3 次モードは剛体モード，4 次モードはねじりモードおよび 5 次モード以降は弾性振動を示す．ただし，5 次モードは弾性 1 次モード，6 次モードは弾性 2 次モード（以下同様）に相当することになる．

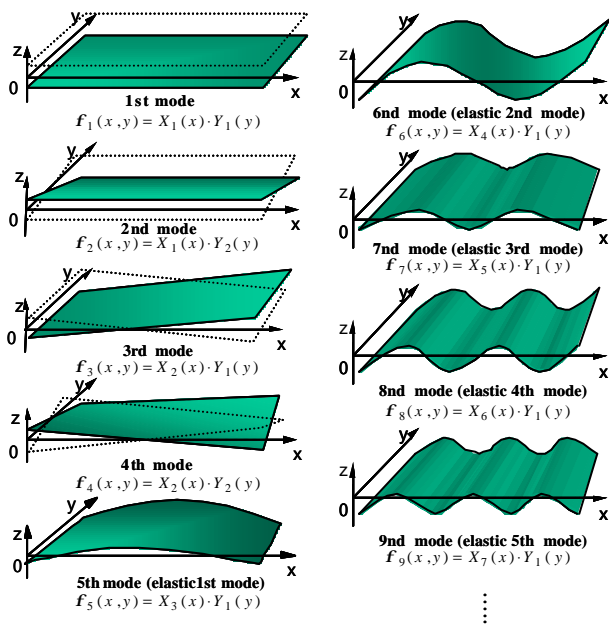


Fig.21 Mode shape of the steel plate

5.4 制御理論 浮上制御には最適制御理論を適用する．センサ数が 5 個であるということから，オブザーバ等を用いずに制御系を設計することを考えた場合，図 21 の 5 次モードまで ( $M=5$ ；剛体の 3 モード，ねじりモード，弾性 1 次モード) を制御系設計上考慮できる．しかし，最適フィードバックゲインを用いた場合，無視された 6 次モード以上（弾性 2 次モード以上）の影響によるスピルオーバー不安定を招くことがある．そこでこれによる制御性能の低下を補うため，吉田<sup>26,27)</sup>が提案したスピルオーバーを考慮した低次元化モデル制御（準最適制御）の手法を適用する．

5.5 制御実験 入力外乱は，最も明確に振動モードが出現するフレーム No.3 のみをランダム波で加振する方法を採用した．このときのフレーム No.3 の絶対変位の時刻歴，パワースペクトルを図 22 に示す．変位の標準偏差は，

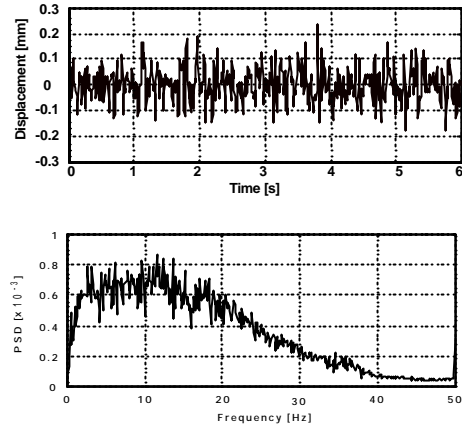
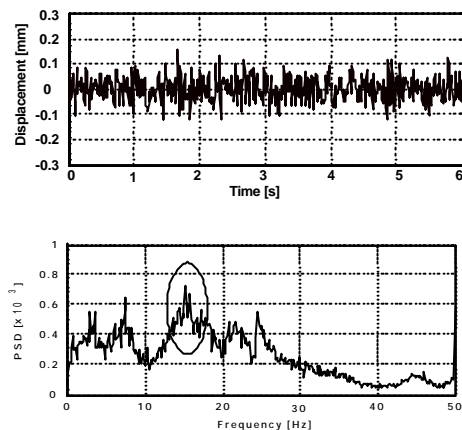
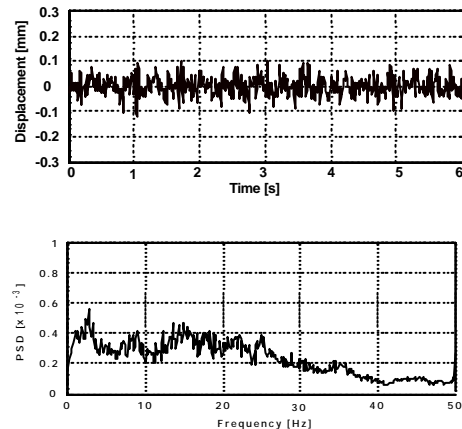


Fig.22 Time history and power spectrum of absolute displacement of the frame No.3



(a) In the case of using optimal control



(b) In the case of using suboptimal control

Fig.23 Time histories and power spectra of gap between the steel plate and the electromagnet

0.062mm であり，加振器の特性上 0~20Hz 程度までは，ほぼフラットなパワーを有する外乱となっている。

図 23(a)は最適制御理論、(b)は準最適制御理論によって浮上させた鋼板に図 22 に示す外乱を入力した結果である。フレーム No.3 に設置してあるセンサ No.2 において検出した電磁石表面と鋼板表面との距離の時刻歴(縦軸のゼロは電磁石表面から 5mm の位置を示す)とそのパワースペクトルを示す。準最適制御理論を適用しスピルオーバーのモードを考慮することで，最適制御理論を適用したモデルで発生する 15Hz の弾性 2 次に対応するモード(図 23 (a)中の丸印)が抑制され，理論の優位性が十分現れていることが分かる。さらに準最適制御理論を適用した場合，弾性 2 次モード以降の周波数域でも制御性能の差が顕著に現れていることが分かる。

**5・6 まとめ** 本章では，四辺自由鋼板の磁気浮上に対して，最適制御理論と準最適制御理論を適用した制御系をそれぞれ設計し，弾性振動のスピルオーバー抑制に関する比較検討を行った。その結果，最適制御理論と比較してゲイン計算における数学的取り扱いが複雑でなく，制御系設計が簡便な準最適制御理論を適用することにより，スピルオーバーのモードを十分抑制できることを実験的に確認した。

## 6. 結 言

以上のように著者らは，いくつかのアプローチによって，切り板の非接触支持・搬送制御の理論的，実験的検討を行ない，その有効性と実現性について検討を行なった。その結果，提案した装置や適用した制御手法によって，これまでに不可能とされてきた薄鋼板の非接触支持を可能とし，さらにその搬送や弾性振動の抑制についても新たな知見を提示した。

今後の課題を以下に記す。

(1) 浮上制御に用いた永久磁石吸引力の非線形性等を含めたシステムの厳密なモデリングや，永久磁石と電磁石の磁気的相互作用についての詳細な理論的・実験的検討等を行い，実用性の高い制御系設計指針を示す。

(2) それぞれ独立として扱っている浮上方向と水平方向の制御システムを 1 つのシステムに統合し，浮上方向の検出量を水平方向の制御に利用することによって，薄鋼板の弾性振動をさらに効果的に抑制する。

(3) 水平方向制御用電磁石吸引力による薄鋼板の境界条件の変化などの詳細な検証ならびに強力な磁力を鋼板のエッジ方向から付加できる電磁石の設計とその制御システムを開発する。

(4) 弾性振動をさらに強力に抑制できるロバスト性を十分有する制御系を設計する。

## 参考文献

- 1) 川田，森井，片山，高橋，薄鋼板の磁気浮上特性，第 2 回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム，(1990)，pp.59-62.
- 2) 岡田・永井・他，走行薄板の非接触アクティブ制御，第 2 回電磁力関連のダイナミクス講演論文集，(1990)，pp.389-394.
- 3) 森下・明石，磁気浮上鋼板の傾斜案内制御実験，電気学会全国大会講演論文集，(1997)，pp.183-184.
- 4) 中川・浜，ギャップ長指令値修正による薄鋼板の磁気浮上制御，電気学会論文誌，120-D，No.4，(2000)，pp.489-494.
- 5) 林屋・大崎・正田，横方向磁束型リニアモータを用いた鋼板の

- 磁気浮上搬送，電気学会論文誌，120-D，No.7，(2000)，pp.928-933.
- 6) M.SASE, S.TORII, Magnetic levitation control with analyzing vibration on real time by Finite Element Method, Proc. The 10th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics. (2001), pp.69-70.
- 7) Y.OSHINOYA, T.SHIMOGO, Electro-Magnetic Levitation Control of a Traveling Elastic Plate, Proc. Int. Conf. on ADVANCE MECHANICS, (1989), pp.845-850.
- 8) 押野谷，下郷，走行弾性ベルトの磁気浮上制御，日本機械学会論文集(C編)，56巻，531号，(1990)，pp.73-80.
- 9) Y.OSHINOYA, T.SHIMOGO, Electromagnetic Levitation Control of a Traveling Steel Plate, JSME Int. Jour. , 3, Vol.35, No.1,(1992)，pp.109-115.
- 10) 押野谷，下郷，走行弾性ベルトの磁気浮上制御(センサおよびアクチュエータの配置に関する実験的考察)，日本機械学会論文集(C編)，57巻，536号，(1991)，pp.172-179.
- 11) 押野谷，下郷，走行弾性ベルトの磁気浮上制御(臨界速度を越えた走行速度における制御性能に関する考察)，日本機械学会論文集(C編)，58巻，556号，(1992)，pp.19-26.
- 12) 押野谷，小林，丹野，相対する二辺が梁で補強された薄鋼板の磁気浮上制御，日本機械学会論文集(C編)，62巻，600号，(1996)，pp.127-133.
- 13) 押野谷，薄鋼板の水平方向非接触位置決め制御に関する基礎的検討，日本 AEM 学会誌，Vol.6，No.4，(1998)，pp.52-57.
- 14) 押野谷，電磁石と永久磁石を用いた四辺自由鋼板の磁気浮上搬送に関する検討，日本 AEM 学会誌，Vol.6，No.4，(1998)，pp.58-65.
- 15) 押野谷，石橋，長方形薄鋼板の磁気浮上制御装置の開発，日本機械学会論文集(C編)，(2001)，9月号掲載決定.
- 16) 押野谷，石橋，関原，磁気浮上薄鋼板の水平方向非接触位置決め時における弾性振動抑制効果に関する実験的考察，日本 AEM 学会誌，Vol.9，No.1，(2001)，pp.39-45.
- 17) T.SEKIHARA, Y.OSHINOYA and K.ISHIBASHI, Study on horizontal non-contact positioning control for a magnetic levitation plate, Proc. The 10th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics , (2001), pp.67-68.
- 18) K.MARUNAGA, Y.OSHINOYA and K.ISHIBASHI, Computer simulations of magnetic levitation of thin steel plate in consideration of gravity, Proc. The 10th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics , (2001), pp.33-34.
- 19) A.IGUSA, Y.OSHINOYA and K.ISHIBASHI, Elasticity vibration of steel plate with magnetic force for restraining horizontal position in magnetic levitation, Proc. The 10th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics , (2001), pp.39-40.
- 20) 押野谷，石橋，小畑，四辺自由鋼板の非接触振動制御に関する実験的考察，日本 AEM 学会誌，Vol.9，No.3，(2001)，Vol.9，No.3，(2001)，pp.378-383.
- 21) 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，(2001)，Vol.9，No.3，(2001)，pp.384-392.
- 22) 押野谷，石橋，小畑，四辺自由鋼板の非接触振動制御(スライディングモード制御適用時の外乱抑制性能に関する実験的考察)，日本 AEM 学会，Vol.9，No.4，(2001)，掲載決定.
- 23) Y.OSHINOYA and T.OBATA, Noncontact Vibration Control of a Magnetic Levitated Rectangular Thin Steel Plate, JSME International Journal, 投稿中.
- 24) S.Timoshenko, D.Young and W.Weaver, Jr, Vibration Problems in Engineering, (1974), John Wiley & Sons.
- 25) 森下・小豆沢，電気学会論文集，D-108，(1987)，pp.447-454.
- 26) K.YOSHIDA, "Sub-Optimal Control Taking Account of Spillover for Elastic Structure System", Proc. IMACS/IFACS Inter. Conf. on Modeling and Simulation of Distributed Parameter System, (1987), pp.633-639.
- 27) R.L.Kosut, "Sub-Optimal of Linear Time-Invariant Systems Subject to Control Structure Constraints", IEEE Trans. on Automatic Control, (1970), pp.557-563.



