

東海大学大学院平成 25 年度博士論文

柔軟鋼板の磁気浮上制御に関する研究

指導 押野谷 康雄 教授

東海大学大学院総合理工学研究科
総合理工学専攻

成田 正敬

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の背景	2
1.1.1	磁気浮上技術の長所と短所	2
1.1.2	各種の磁気浮上方式	4
1.1.3	磁気浮上技術の実用例	5
1.1.4	磁気浮上技術の鉄鋼プロセスへの応用	8
1.2	本論文の目的と従来の研究	11
1.3	本論文の構成	15
第2章	水平方向位置決め制御を有する薄鋼板の磁気浮上システム	17
2.1	本章の目的	20
2.2	水平方向位置決め制御を有する磁気浮上システム	20
2.2.1	システムの概要	20
2.2.2	磁場解析	25
2.2.3	浮上鋼板の形状解析	28
2.2.4	解析モデルの検証	30
2.2.5	水平方向からの磁場が有効な板厚の検討	32
2.2.6	浮上鋼板の振動解析	34
2.3	水平方向位置決め制御を有する磁気浮上システムの制御モデル	35
2.3.1	磁気浮上モデル	35
2.3.2	水平位置決め制御モデル	37
2.3.3	状態方程式	39
2.3.4	離散時間系最適制御	39
2.4	水平方向からの磁場を印加した浮上実験	40
2.4.1	浮上実験	40
2.4.2	浮上確率実験	43
2.5	まとめ	45
第3章	永久磁石を用いた柔軟鋼板のハイブリッド磁気浮上システム	46
3.1	本章の目的	48
3.2	ハイブリッド磁気浮上システム	48
3.2.1	システムの概要	48
3.2.2	浮上補助用永久磁石	50
3.2.3	解析モデル	52
3.2.4	評価関数	53

3.2.5	永久磁石の設置が有効な板厚の検討.....	53
3.2.6	最適配置探索方法.....	55
3.2.7	最適配置探索結果.....	55
3.3	ハイブリッド磁気浮上システムの制御モデル.....	61
3.4	ハイブリッド磁気浮上システムの浮上実験.....	64
3.5	まとめ.....	66
第4章	湾曲磁気浮上システム.....	67
4.1	本章の目的.....	69
4.2	湾曲磁気浮上システム.....	70
4.2.1	システムの概要.....	70
4.2.2	湾曲浮上機構.....	70
4.2.3	湾曲浮上中の鋼板形状解析.....	73
4.3	湾曲磁気浮上システムの制御モデル.....	76
4.3.1	鋼板のモデル化.....	76
4.3.2	状態方程式.....	77
4.4	湾曲浮上実験.....	78
4.4.1	実験方法.....	78
4.4.2	異なる板厚の薄鋼板を用いた湾曲浮上実験.....	80
4.4.3	異なるフィードバックゲインを用いた湾曲浮上実験.....	82
4.5	まとめ.....	84
第5章	結論.....	85
	謝辞.....	92
	参考文献.....	93

第 1 章

序論

1.1 研究の背景

中央新幹線の整備計画[1-1]が決定し、2013年8月29日より42.8kmに延伸された新実験線にて営業線仕様の車両L0系が走行実験を開始した[1-2]。2027年には東京―名古屋間が先行開業して最速40分で結ぶ予定である[1-3]。このように近年、磁気に関する様々な研究、開発が積極的に行われており、磁気軸受やリニアモータ等の非接触制御以外に、圧電アクチュエータ、磁性流体アクチュエータ、静電マイクロアクチュエータ等の開発が進展している。さらに磁気閉じ込め核融合炉、超電導発電機、医療におけるMRI診断装置等に対する応用がなされ、我々にとってますます電磁力技術は身近なものになりつつある。本研究で取り上げたものは、この中の磁気浮上技術に関するテーマである。常電導電磁石の吸引力を制御することによって薄い鋼板を非接触支持し、その際に生じる弾性振動を抑制して安定な搬送制御を実現することを目的に置いている。具体的な応用例としては、鉄鋼プロセスにおける切板の搬送が最も近いが、柔軟な物体の磁気浮上制御の基礎研究という観点からも多くの応用や発展が期待できる。

1.1.1 磁気浮上技術の長所と短所

磁気浮上技術の長所並びに短所を述べる。様々な従来形の装置に磁気浮上技術を取り入れることによる利点として以下が挙げられる[1-4]。

(1) 非接触化

磁気浮上により非接触化することによって、摩擦・摩耗の問題が少なくなる。またそれに伴い、寿命が半永久的でかつメンテナンスフリーとなり、接触による振動・騒音が大幅に低減され高速化が可能となる。またクーロン摩擦がなくなり滑らかな動きが得られるとともにエネルギー損失が少なくなる等の特長が得られる。

(2) 特殊環境での使用

潤滑の問題が完全になくなるので、無重力空間、真空中、クリーンルーム内、高温・低温中、水蒸気中、特殊ガス中、生体内等、特殊環境で使用可能となる。

(3) 制御性

能動制御を取り入れたものでは、振動減衰能力、位置制御能力、可変剛性機能（支持の強さを状況に応じて変える機能）、コンピュータ制御の容易さ、制御系のフレキシブル化等の特長が得られる。

(4) 特殊機能の付与

隔壁として磁場の通過が可能な物質を用いれば、壁を隔てて対象に駆動力を与えることが可能となり、記憶・学習・判断能力等のインテリジェント化、運転状態の監視・記録・診断機能等が得られる。

(5) 力の分布

例えば普通の列車では車輪とレールが接触する部分に集中的に力が加わるが、磁気浮上列車では力は磁石のある面に広く分布する。この結果、列車走行の際の軌道に対する荷重

条件を和らげることができる。磁気軸受では軸位置を強制的に固定せず、支持力を分布させることができるので、回転子に不平衡があっても回転に対する軸振動を和らげることができる。さらに薄鋼板のように、非常に柔軟な対象を浮上させる場合にも力が分布的に作用するために、その形状を変化させることなく支持することができる。

以上、(1)～(5)で直接的な効果を挙げたが、それに付随して生ずる副次的な効果が多くある。例えば、油潤滑が不要になるということは、油圧ポンプ、油圧システムのパイプ類、油を浄化する装置が不要になり、汚染の問題がなくなる。システムとして床面積が少なくなる、設置場所に対する制約が少なくなる等様々な利点が生まれる。このように磁気浮上技術には多くの優れた特長があり、かつ、電気、機械技術一般の進歩の趨勢もあり、今後ますます応用が広まっていくと考えられる。幸いにも、現在次のように有利な条件が整ってきている。

- ① 各種センサ、DSP (Digital Signal Processor)、パワートランジスタ等が高性能、低コストで使えるようになり、電気制御が容易になってきていること。
- ② 強磁性材料、永久磁石、超電導材料、構造材料等で優れたものが出現していること。
- ③ 多変数制御系やロバスト制御系を扱える制御理論が進歩していること。また MATLAB® (The MathWorks, Inc.) 等の制御系設計支援ソフトウェアも急速に進歩していること。
- ④ コンピュータの演算処理能力の向上によって機械要素、電磁石やシステムの解析、最適設計が容易になっていること。
- ⑤ 超 LSI の製造、新材料開発や宇宙開発に見られるように、技術が高度化・多様化していると共に、省エネルギー化や公害問題対策等社会情勢の変化もあり、各種応用分野で磁気浮上技術開発の要望が強くなってきていること。

このようにして、磁気浮上技術は多くの長所を含んだ技術として期待されている。

次に磁気浮上技術の短所を示す。

(1) 磁界の漏れ

磁気浮上装置の磁界が漏れることによって、外部機器に影響を及ぼす恐れがある。

(2) 価格

従来の方式と比較して、価格が高くなる場合がある。

(3) 安全面

制御系の場合、停電や安定化制御の失敗に対する対策を考慮しておく必要がある。

しかし価格について言えば、磁気浮上システム単体では従来型に比べて高価であるとしても、潤滑システムが不要になる、電子制御が容易になる等、システム全体の価格とその保守費用を考えると十分引き合うと考えられる。これらのメリットから、物体を非接触で把持・搬送できる磁気浮上技術は工業の分野においても応用が非常に期待されている。

1.1.2 各種の磁気浮上方式

磁気浮上には多くの方式が提唱され、また実用化されている。磁力を発生する主なものとして、永久磁石、常電導電磁石、超電導磁石の 3 種がある。一方、電流あるいは磁力線を通しやすい物質の代表的なものとして、超電導体、強磁性体、金属導体の 3 種がある。以上 6 種の物体の組み合わせによって各種の磁気浮上方式が生まれる[1-5]-[1-7]。以下に代表的な組み合わせを示す。

(1) 永久磁石と超電導体との間に働く反発力を利用する方式

第 2 種超電導体において下部臨界磁界を超えた領域ではピン止め効果があり反発力を生ずる。

例……高温超電導体の磁気浮上、超電導反発式磁気軸受

(2) 永久磁石と強磁性体との間に働く吸引力を利用する方式

例……磁気浮上式搬送機（永久磁石と電磁石による複合磁石が使用されている）

(3) 常電導電磁石と強磁性体との間に働く吸引力を利用する方式

この方式は EMS (Electro-Magnetic attraction System) と呼ばれる。EMS は一定のギャップ長を持って支持するには電磁石の電流を制御する必要がある。その制御方法は確立されており[1-8], [1-9], また磁力の一部を永久磁石で置き換えることもできる。支持力は $2.5 \times 10^5 \text{N/m}^2$ までは十分に得られる。

例……イギリス・バーミンガム空港システム、日本・東部丘陵線 (Linimo)、ドイツ・トランスラピッド、中国・上海トランスラピッド、多くの磁気軸受、磁気浮上式搬送機

(4) 超電導磁石と強磁性体との間に働く吸引力を利用する方式

例……NASA の磁力支持天秤装置 (MSBS : Magnetic Suspension and Balance System) [1-10] 磁力支持天秤装置は、風洞試験におけるモデル (供試体) の浮上支持並びに水平方向の制御を電磁石によって行い、さらにモデルに働く流体力学的な力やモーメントを計測できるようにしたものである。1930 年代後半に磁力支持天秤装置の考え方が現れ、1950 年代後半にフランスで世界初の磁力支持天秤装置が製作された。また JAXA では、5 自由度磁力支持装置を製作している。これはモデルの軸方向、上下左右それぞれの方向に 1 対ずつの電磁石でモデルの位置姿勢を制御している[1-11]。

(5) 常電導電磁石と金属導体との間に働く反発力を利用する方式

電磁石に交流電流を流した場合、電磁誘導作用で金属導体に渦電流が流れ、その電流ともとの磁界との間に力が働く。

例……各種の常電導誘導反発浮上方式、渦電流型磁気軸受

大路らは交流アンペール力を利用して Al 板を浮上させることに成功している[1-12], [1-13]。

(6) 超電導磁石と金属導体との間に働く反発力および吸引力を利用する方式

これら二つの物体が相対的に運動を伴うとき、金属導体には渦電流が誘導され反発力または吸引力が働く。この方式は EDS (Electro-Dynamic repulsion System) と呼ばれる。

例……JR 宮崎リニア実験線初期の磁石

コイル配置では反発力を利用していた。これは反発型超電導誘導方式と呼ばれる。一方、現在の山梨リニア実験線では反発力とともに吸引力を浮上に利用するヌル・フラックス型超電導誘導方式を用いている。

(7) 超電導磁石と常電導電磁石との間に働く吸引力を利用する方式

例……サザンプトン大学における磁力支持天秤装置[1-14]

(8) 常電導電磁石と永久磁石との間に働く吸引力を利用する方式

ボイスコイル型スピーカの原理による浮上方式もこの分類に含まれる。

例……永久磁石と電磁石を複合した磁石による磁気浮上式リニア同期モータ，ドイツ・Mバーン

ただし M バーンでは接触を伴っており，半浮上式と呼ばれる。

(9) 常電導電磁石同士の間で働く吸引力を利用する方式

この方式も前述の EMS システムに含まれる。

例……ドイツ・トランスラピッド，中国・上海トランスラピッドの支持系では，固定子側は交流電磁石，車上側は直流電磁石である。

(10) 永久磁石同士の間で働く反発力を利用する方式

この方式は PRS (Permanent magnet Repulsion System) と呼ばれる。最も簡単な受動的な方法で， $1 \times 10^5 \text{N/m}^2$ 程度までの支持力を発生できる特徴があるが，Earnshaw の定理により本質的に不安定である問題を持つ。

例……永久磁石反発型磁気浮上式搬送システム

本研究では対象が柔軟鋼板であり，常電導電磁石を用いてその振動制御を行うことを目的としているので，多くの磁気軸受にも用いられている EMS を採用する。

1.1.3 磁気浮上技術の実用例

本研究で行うような吸引式磁気浮上の場合，完全非接触支持するためには，少なくとも 1 自由度の運動を能動的に制御する必要がある。このような吸引式磁気浮上における基本的な制御原理は，支持する物体の運動を検出し，その信号に基づいて直流電磁石の吸引力を調整するというフィードバック制御によって復元力を得るものである。すなわち，機械式のばねにおける剛性，減衰特性と等価な性質を磁気浮上系に与える制御方式である。

現在までに，このような制御方式を適用した機械構造物の磁気浮上制御に関する研究が数多く行われているが，これらは，直進運動するもの（磁気浮上式鉄道，磁気浮上形クリーンルーム内無塵搬送システム等）と回転運動するもの（磁気軸受形ターボ分子ポンプ，磁気軸受スピンドル形工作機械等）に大きく分けることができる。

直進運動に対する磁気浮上制御は 1938 年に Kemper が磁気浮上鉄道を指向した能動型磁気浮上を提案したことに始まっている。日本では山村が「超高速列車の磁気軌道」につい

て 1971 年に電気学会誌で解説を行い、また吸引電磁石形磁気浮上方式の研究[1-15]を行って、十分な安定度と剛性を持った 2 点支持系のシステムの開発に成功している。直進運動に対する磁気浮上制御に関する主要な研究としては以下が挙げられる。

- 松村文夫, 山田外史[1-16]は 1 点支持の磁気吊り下げ系の運動方程式の基準化を行い、制御系の設計法を一般に導き、シミュレーションと実験によって有効性を確認している。
- 大西公平, 山村昌, 林武人[1-17]は最適制御理論を 1 点支持モデル磁気浮上系の制御回路設計に適用し、理論と実験からその設計法の有効性を確かめている。
- 神代邦雄, 岡本勲, 笹井健次郎, 岩崎文夫, 掛樋豊, 寺田勝之[1-18]は、車体振動をフィードバック制御によりアクティブに抑える手法（空気ばね+電磁石、電磁石のみ等）についての研究状況を、具体的な構造を示しながら解説している。
- 野波健蔵, J. W. Wang, 山崎章二[1-19]は磁気浮上系のスピルオーバー不安定現象をノッチフィルタにより安定化した実験結果を示し、次にロバスト制御理論の H_{∞} 制御法を適用してスピルオーバー不安定を防止した制御系の設計を行っている。
- M. Maggiore, R. Becerril[1-20]は半導体生産におけるフォトリソグラフィプロセスを改善し、機械的接触を避けるための磁気浮上技術を提案し、三つの鉄心から成る永久磁石リニア同期モータを採用して 3 自由度を持つ対象を位置決めする理想化されたデバイスの理論特性を検討している。
- A. El Hajjaji, M. Ouladsine[1-21]は鉄球の磁気浮上システムに対する非線形モデルを提案し、提案モデルを用いて微分幾何に基づく非線形制御法則を構築している。鉄球の質量の変化や電磁石の抵抗及びインダクタンスの温度上昇に伴う変化に対するロバスト性試験を行い、提案した非線形制御手法が優れた特性を有することを明らかにしている。
- 水野毅, 木下大輔, 高崎正也, 石野裕二[1-22]は浮上対象物に作用する外力に対してゼロパワー磁気浮上系が負のばね特性を有しているかのように動作することに着目して通常のばねとゼロパワー磁気浮上系とを中間台を介して直列に結合する除振装置に並列にばね要素を負荷した荷重支持機構を提案している。

このような能動的磁気浮上制御は振動の抑制はもちろん粘着駆動の限界がなくなることと、接触騒音から解放されることから急速に適用範囲が広がっている。またクリーン環境下の移動手段に適していることから、超精密部材の工場内搬送システムに多く利用されるようになってきている。

磁気浮上を回転体に適用したのが磁気軸受である。磁気軸受の研究の歴史は古く 1937 年にバージニア大学の Holmes, Beams[1-23]は世界で最初の能動的磁気軸受を実現させるために縦軸型の遠心分離機回転子を電磁石で浮上させることを試みた。これは半径方向には安定であるが軸方向には不安定な性質をもっている。そこで、回転子の位置を光電管によって検出し真空管による 2 段の直流増幅器で電磁石電流を制御し安定な浮上を得た。また微小な鋼球を浮上させて高速回転させる実験も行い、 5×10^5 rev/s という極めて高い回転を達成した。イギリス・インペリアルカレッジの Laithwaite は、交流リニア誘導モータの研究とともに、交流磁界による誘導反発式磁気浮上の研究をしていた。1966 年の王立協会クリスマス講演で直径 30 インチ (約 760 mm)、重さ 85 ポンド (約 39 kg) の中空のアルミ球を浮かせる実験を中心に講演している。このクリスマス講演は永い歴史のあるもので、ファラデー等の著名な科学者も講演を行ったといわれる[1-24], [1-25]。1976 年には、フランスの S2M (Société de Mécanique Magnétique) 社が、磁気軸受の主要特許を出願している[1-26]。また清水久二、谷口修[1-27]は過去に発表された研究報告では理論解析、設計理論に関して十分吟味されていないことを指摘し、回転体の運動を含めた制御系の特性方程式を作り、対象物の平衡点近傍の微小変位だけに注目することを提案し、いくつかの実験と計算を行うことによって安定性に関して定量的評価を与えている。さらに同氏らは雑誌、「機械の研究」(1970) の中で「磁気軸受の原理とその応用」について詳細な解説を行っている[1-28]。磁気軸受に関する主要な研究としては以下が挙げられる。

- Schweitzer と Ulbrich[1-29]は最適制御理論に基づいた制御を行い制御ループの中に積分器やオブザーバを入れることによって、ロータの回転数が臨界値に達したときの反応がどのように改善されるかを実験的に検討している。
- J-P. Yonnet[1-30]は磁気軸受に対してアクチュエータが及ぼす電磁吸引力の評価を行ない、アクチュエータの最適設計について考察を行っている。
- 松村文夫、小林英彦、秋山勇治[1-31]はジャイロ効果を含めた運動方程式を導き、次に吸引式電磁石における電圧、電流、吸引力の関係を明らかにし、これらの式を総合して状態方程式、出力方程式を導いている。さらに、制御系は積分系の構成にすることが望ましいことを述べ、シミュレーションによって、回転子形状と制御系の関係、回転子の回転が軸の振れに及ぼす影響および系の制御方法についての有益な結果を得ている。
- 樋口俊郎、水野毅[1-32]はジャイロ効果による相互干渉のある 2 自由度系の最適レギュレータ問題を解き、ジャイロ効果を無視した場合の最適レギュレータ問題の解と数値的に比較している。この結果、クロスフィードバックなしでもジャイロ系を安定にできるが、同一の応答を得るには、ジャイロ効果を無視した場合かなり大きい制御入力が必要であることを示している。さらに同氏ら[1-33]は、支持する回転体に不釣り合いがある場合、回転体には回転に伴って回転数と同じ振動数の周期的な強制力が作用す

るが、回転同期信号を利用する不つり合い補償法を用いると回転速度が設定値から変動しても振れ回りを生じさせないで回転体を支持することができることを実験的に確認している。

- 湯本淳史，上田学，進士忠彦[1-34]は体内埋め込み用補助人工心臓に使用する遠心血液ポンプ用の扁平形状インペラの軸方向運動のみをフィードバック制御し，半径・傾き方向を永久磁石の吸引系と反発系の 2 つの受動型磁気軸受を併用して完全非接触支持する 1 自由度制御型磁気軸受を提案・試作し非接触浮上を確認している。また，湯本淳史，進士忠彦[1-34]により試作したモータの流量・圧力差特性，回転精度，磁気軸受，モータの消費電力を評価している。
- 朝間淳一，千葉明，深尾正[1-35]はネオジウム磁石を用いて径の小さなアキシヤル磁気軸受を提案している。
- 岡田養二，宮澤英俊，近藤良，榎園正人[1-35]は磁石としては一般的で低価格なフェライト系磁石を用いて実用的な軸受力が得られるような，磁束集束永久磁石配列を用いた磁気軸受を提案している。

以上のように磁気浮上技術は制御工学の立場から見ても大変興味がある問題であり，ロボ制御系設計の問題，学習制御等の適用，弾性ロータの振動制御問題など活発に研究が進められている。

1.1.4 磁気浮上技術の鉄鋼プロセスへの応用

現在自動車や電気製品その他の構造材として産業界に広く使われている板厚が 0.2mm から 4.0mm 程度の薄鋼板は，鋼片を熱間圧延と冷間圧延の 2 工程で圧延し，用途に応じてめっきや塗装を施して，コイルまたは切板として出荷する。特に冷間圧延を加えた冷延薄板は，寸法，形状等に高い精度が求められるため，その前工程である熱間圧延工程を含めて厳密な制御と管理が行われている。

しかし，圧延後の工程では，製品の流れはロール等の機械的接触を伴う搬送が行われており，ロールと鋼材との接触に起因する操業・品質上の問題発生件数は極めて多い。現実的にも鋼材表面に大きな傷が入ることが起きている。

溶融亜鉛めっきライン (Fig.1-1) では，めっき処理後鉛直方向に約 30~40m 鋼板を搬送し，この間に表面を乾燥させている。そのため予期せぬ振動が生じてめっきのむらが生じている。また，めっき処理後の切板の最終的な搬送も支持ローラを用いて搬送を行うために塗装の剥離が生じて鋼板表面が傷つけられる等の問題が起きている。宇宙建造物の外壁などにも用いられる薄鋼板の場合，製造プロセス中での傷発生は致命的な欠陥となる。

現状では薄鋼板搬送後の傷を取り除くため，整調工程を新たに設けることで対処しているが，ローラ側にも摩擦が発生するためにメンテナンスが必要であり，全体を通じて多大な時間とコストがかかっている。したがって，これらの工程に対して磁気浮上技術を適用

することによって非接触に振動を抑制することや、たとえ部分的にもロールによる搬送に代替することができれば、大きなプロセス革新が可能となるため非接触磁気浮上技術の確立が大いに求められている。

このため、本研究では上述の工程の中でも特に大きな傷、めっきの剥離の問題が発生している切板の最終的な搬送工程に着目し、ローラによって発生する傷を防止することを目的とした薄鋼板の磁気浮上システムの研究・開発を行うに至った。

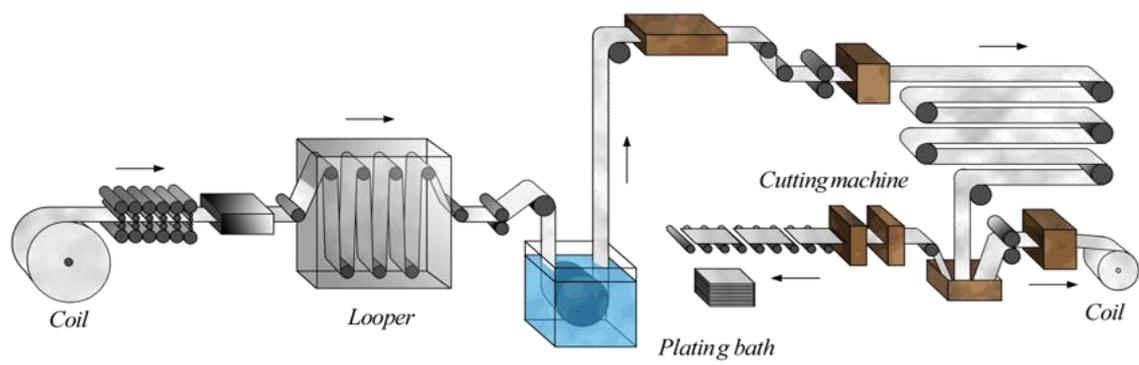


Fig. 1-1 めっき鋼板の製造プロセス

1.2 本論文の目的と従来の研究

従来の研究として、薄鋼板の磁気浮上システムの浮上安定性を確保するためにはフィードバック制御による安定化が不可欠である。ところが適切なフィードバック制御系を設計するためには、実在する薄鋼板の磁気浮上システムに対して、その数学モデルを導き出す必要がある。しかし物理的に存在する複雑な磁気浮上システムからその数学モデルを誘導しようとする際には、必ず何らかの理想化や簡略化が行われており、数学モデルに不確かさが存在する。例えば、電磁石の吸引力、鋼板の振動特性は全て非線形であるが、制御系設計時には線形化近似を行う場合が多い。このとき無視された非線形性はシステムに不確かさとして存在してしまう。

これらの不確かさが存在する場合においても、基本的に安定なシステムならば問題が無いが、磁気浮上システムは不安定系であることに加え、本研究の制御対象である薄鋼板は、その薄さゆえに微細な不確かさによる影響でも弾性振動やたわみを励起しやすく、容易に浮上安定性が欠落する。その結果浮上安定性を確保することは極めて困難となる。このため磁気浮上システムの浮上安定性向上のために様々な研究がなされている。

- 川田則幸, 森井茂樹, 片山圭一, 高橋恭郎[1-39]は幅 1m, 長さ 2m の切板鋼板（四辺自由）の磁気浮上制御を実験的なアプローチから検討している。6 個の電磁石を比例+位相進み方式によってそれぞれ独立に制御し、制御特性を板厚に応じて(厚さ 0.6~6mm) チューニングすることにより、ある程度、振動を抑えている。しかし、比例ゲインを実験ベースに決定しており、薄鋼板と比例ゲインの関係をいかに明確化するかが実験上のポイントになっている。
- 清水康博, 鳥居肅[1-40]はたわみ等の原因で生じる振動を抑制し、安定浮上を行うための 2 指令複合型制御を提案している。これは通常独立制御方式が電磁石それぞれに目標値を定めて制御するのに対して、2 指令複合型制御方式では決められた目標値に浮上させる定値制御電磁石と現在のギャップ値を目標値とする追従制御電磁石で構成されている。しかしながら検討対象は現状片持ち梁であり、磁気浮上制御に関する検討には至っていない。
- 岡田養二, 永井文秀, 谷順二[1-41]は厚さ 2.3mm, 長さ 810mm, 幅 350mm の薄鋼板を長手方向に固定し、2 点に電磁石を配置してローカル PD 制御をアナログ、デジタルのそれぞれの方式で行っている。その結果、簡単な PD 制御でも、ある程度の制御効果を期待することはできるが、多数の共振が現われ高次モードを安定に制御するアドバンスト制御の適用が今後の課題であるとしている。
- 長谷川真也, 押野谷康雄, 石橋一久[1-42]は厚さ 0.3mm, 長さ 800mm, 幅 600mm の薄鋼板に対し弾性 1 次モードまで考慮した制御モデルを構築し、非線形ロバスト制御であるスライディングモード制御を適用した検討を行っている。

一方磁気浮上システム永久磁石を併用する例として、薄鋼板に加わる重力を支えるために電磁石コイルに常時流す一定電流や、浮上位置を修正するために変動電流を流す代わりに、永久磁石を用いる方法検討されている。ただし永久磁石だけでは安定な浮上は得られないことから制御用電磁石も必要である。

- 須藤義之，和多田雅哉，鳥居肅，海老原大樹[1-43]は鉄心に永久磁石を組み込んだハイブリッド型多極電磁石を用いてコストを削減する方法を提案している。
- 長屋幸助，藤生正樹[1-44]は永久磁石と電磁石を結合した「永電磁石」により制御されるアクチュエータを開発している。さらに具体的応用例として両端を磁力で浮上された柔軟梁を考え、その床に外乱が作用する問題に対して床からの外乱と等価な制御力を与えて外乱を消去する外乱相殺制御と $H\infty$ 制御の組合せ制御法を提案している。
- 森下明平，小豆沢照男[1-45]は永久磁石を併用した電磁石によるゼロパワー磁気浮上制御を実現する方法として、電流積分帰還方式，外力帰還方式，フィルタ方式の三方式を提案し、積荷の重量変化により制御対象のパラメータが大きく変化する場合についての制御系設計方法の一例を示している。

しかし現在行われている磁気浮上技術に関する研究の多くは浮上対象が剛体と考慮できる物体について検討されており、浮上対象自体が複雑な変形を起こす物体の磁気浮上について考察している報告はまだ少ない。そこで本論文は浮上対象自体が柔軟で様々な変形を起こし、浮上が困難な柔軟鋼板に着目した。しかし柔軟鋼板は鉛直方向の支持力のみでは支持点以外の箇所にな大きなたわみが生じ、複雑な鋼板形状から弾性振動が発生して制御性能が劣化し、最悪落下してしまう可能性がある。この問題を解決するため、柔軟鋼板を安定して把持するための方法を提案し、鋼板の磁気浮上システムに適用する。これにより浮上安定性の向上を目指し、柔軟鋼板に対する磁気浮上技術の確立を目指す。

我々の身近な薄く柔軟な物体として紙が挙げられるが、薄い紙を手で安定して把持しようと考えた際、以下の3種類のアプローチがあると考えられる。

- (1) 両端から張力を与えて平坦にする (Fig.1-2)
- (2) 多数の支持点により平坦にする (Fig.1-3)
- (3) 折り曲げない程度に湾曲させる (Fig.1-4)

これらのアプローチを薄鋼板磁気浮上システムに適用し、安定浮上が可能なシステムの構築が本研究の目的である。

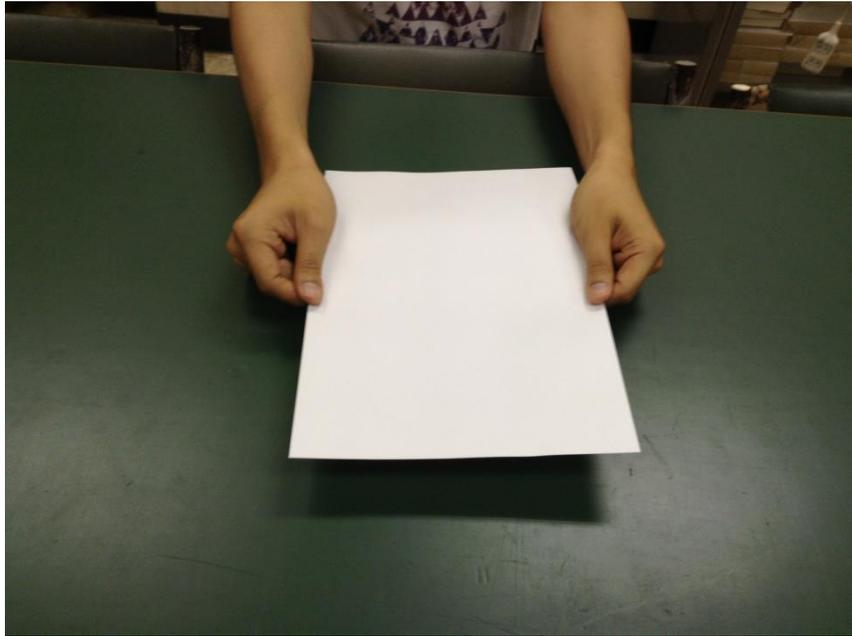


Fig. 1-2 両端から張力を与えて平坦にする手法

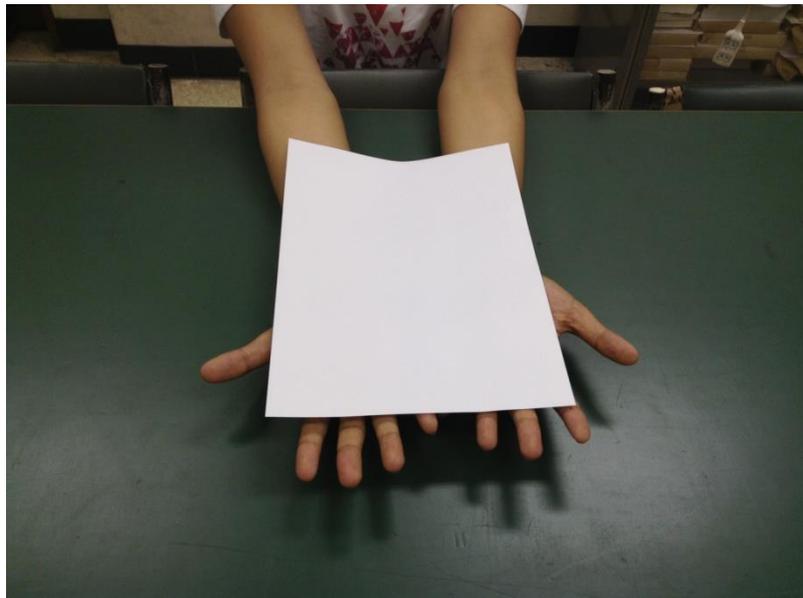


Fig. 1-3 多数の支持点により平坦にする手法

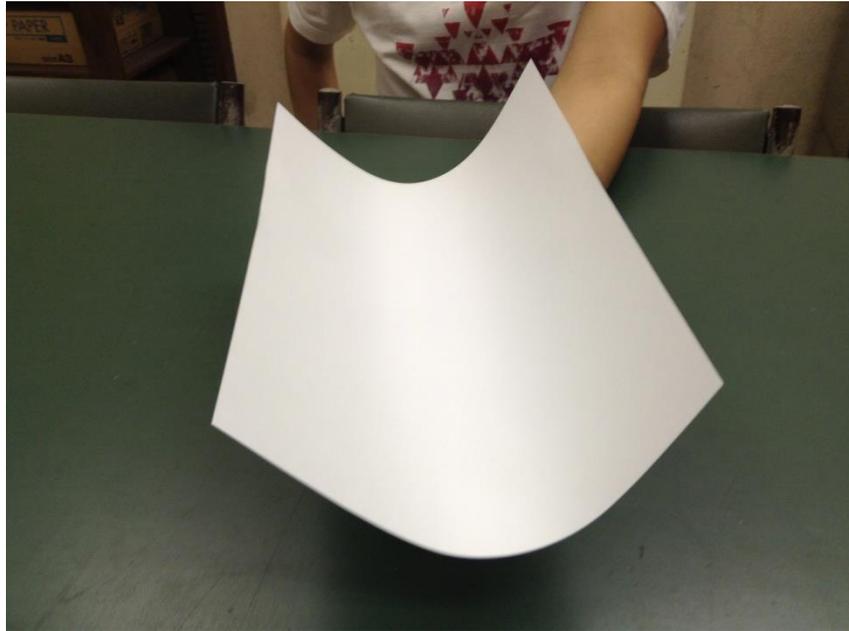


Fig. 1-4 折り曲げない程度に湾曲させる手法

1.3 本論文の構成

本論文は5章で構成されている。以下に各章の概要を述べる。

第1章 序論

第1章では研究の背景と従来の研究を概説すると共に本論文の目的と各章の概要について述べる。

第2章 水平方向位置決め制御機構を有する磁気浮上システム

第2章では「両端から張力を与えて平坦にする」というアプローチを磁気浮上システムに適用し検討を行っていく。薄鋼板磁気浮上システムにおいて水平方向から磁場を印加することにより鋼板水平方向の非接触位置決めが可能であること、さらに鋼板鉛直方向の弾性振動や静的なたわみの抑制が可能となる。また水平位置決め制御を行うことで浮上中の鋼板の横滑り、落下という問題が解決でき、非常に安定した浮上が行えることが期待できる。さらに磁気浮上装置にリニアモータを設置し装置ごと搬送させることで、非接触搬送が可能となる。水平位置決め制御機構を有する磁気浮上システムが柔軟鋼板に有効であるか磁場解析と有限差分法を用いた形状解析[1-46] - [1-48]をもとに検討し、浮上実験により水平方向からの磁場が磁気浮上鋼板の浮上安定性にどのような影響を与えるか確認し、本手法の有効性について検討を行う。

第3章 永久磁石を用いたハイブリッド磁気浮上システム

第3章では「多数の支持点により平坦にする」というアプローチを磁気浮上システムに適用し検討を行っていく。柔軟な薄鋼板は浮上させると、電磁石の吸引力が印加されない箇所にたわみが発生し、複雑な振動が発生して浮上性能が劣化する問題がある。この問題を解決するため、この磁気浮上システムの電磁石による吸引力が印加されない箇所に永久磁石を設置し、この磁力を鋼板のたわみ抑制による浮上安定化のために有効利用したハイブリッド磁気浮上システムが提案されている。これはアクチュエータの数を増やさずに永久磁石の吸引力を浮上に利用するためシステム全体の消費電力を低減でき、ランニングコストを削減することができる。しかし永久磁石は位置決め制御を行うことができないため外乱等によって永久磁石と鋼板の距離が接近し過ぎた場合、永久磁石が鋼板を吸着してしまい浮上が維持できなくなる可能性がある。このため設置する永久磁石の個数と配置、薄鋼板表面との距離を最適化する必要があるが、これらの組み合わせは非常に膨大であるため、実験的に最適な組み合わせを探索することは現実的に困難である。そこでハイブリッド磁気浮上システムの最適化手法として遺伝的アルゴリズム[1-49]-[1-51]を用いて、永久磁石の個数と配置、薄鋼板表面との距離の探索方法の検討を行う。

第4章 湾曲磁気浮上システム

第4章では「折り曲げない程度に湾曲させる」というアプローチを磁気浮上システムに適用し検討を行っていく。電磁石による吸引力を用いた磁気浮上システムにおいて薄鋼板を浮上させる場合、鋼板自体が変形することにより複雑な振動が発生し浮上制御は困難となる。そこで薄鋼板の柔軟性に着目し、塑性変形しない範囲で湾曲させることで安定して鋼板を浮上させる湾曲磁気浮上装置を提案する。また差分解析を用いて湾曲浮上中の鋼板形状を算出し、本装置が有効な板厚の検討を行う。この解析結果をもとに板厚の異なる柔軟鋼板を湾曲させて浮上実験を行い、実験的な浮上安定性の評価を行う。これらの解析と実験から本装置の有効性について検討を行う。

第5章 結論

第2章、第3章、第4章の理論解析や実験を通して得られた結論について述べる。

第2章

水平方向位置決め制御機構を有する

磁気浮上システム

本章で使用する記号を以下に示す.

E :	薄鋼板のヤング率[N/m ²]
h :	薄鋼板の厚さ[m]
ν :	ポアソン比
x :	薄鋼板の短手方向の座標[m]
y :	薄鋼板の長手方向の座標[m]
z :	薄鋼板の変位[m]
f_z :	水平方向に設置した電磁石による薄鋼板の単位面積あたりに加わる鉛直方向の外力[N/m ²]
f_x :	水平方向に設置した電磁石による薄鋼板の単位長さあたりに加わる水平方向の外力[N/m]
F :	浮上用電磁石によって薄鋼板の単位面積あたりに加わる外力[N/m ²]
ρ :	薄鋼板の密度[kg/m ³]
g :	重力加速度[m/s ²]
z_i :	薄鋼板の各解析点のたわみ[m]
N :	解析点の総数
J_z :	平均たわみ量[m]
J_{z0} :	水平方向からの磁場を印加しない場合の平均たわみ量[m]
t :	時間[s]
C :	内部減衰係数[Ns/m ²]
F :	浮上用電磁石によって薄鋼板の単位面積あたりに加わる外力[N/m ²]
m :	磁気浮上対象の質量[kg]
m_z :	鋼板質量 m を仮想的に 5 分割した質量[kg]
f_z :	電磁石 1 個当りの吸引力の変動値[N]
F_z :	静的吸引力[N]
Z_0 :	平衡浮上状態における電磁石表面と鋼板表面とのギャップ[m]
I_z :	静的吸引力を得るための定常電流[A]
i_z :	電磁石コイル電流の変動値[A]
L_z :	平衡浮上状態における電磁石コイルのインダクタンス[H]
R_z :	2 つの電磁石コイルの総抵抗値[Ω]
v_z :	電磁石コイルに加わる定常電圧からの変動値[V]
L_{lea} :	電磁石の漏れ磁束に相当する定数[H]
L_{eff} :	電磁石の有効磁束に相当する定数[H]
m_x :	鋼板質量 m を仮想的に 2 分割した質量[kg]
f_w :	外乱[N]

- F_x : 静的吸引力[N]
- X_0 : 平衡状態における電磁石表面と薄鋼板エッジとのギャップ[m]
- I_x : 静的吸引力を得るための定常電流[A]
- i_x : 電磁石コイル電流の変動値[A]
- L_x : 水平方向位置決め電磁石コイルのインダクタンス[H]
- R_x : 電磁石コイルの抵抗値[Ω]
- Q_d : 変位, 速度および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_d : 制御入力に関する重み係数
- T_s : サンプルング時間[s]

2.1 本章の目的

第 2 章では「両端から張力を与えて平坦にする」というアプローチを磁気浮上システムに適用し検討を行っていく。

鉛直方向だけでなく水平方向からも磁場を印加して支持する例として岡らはボイスコイルモータに設置した永久磁石を鉛直方向と水平方向に設置して鋼球の浮上に成功している[2-1]。また水野らは軸方向だけでなく半径方向に電磁石を設置した 3 自由度アクティブ制御型の磁気支持ジャイロを試作し、浮上に成功している[2-2]。しかし、これらのアプローチを柔軟な薄鋼板に適応した例は少ない。

そこで水平方向位置決め制御機構を有する薄鋼板磁気浮上システムについて検討を行い、これまで水平方向から磁場を印加することにより鋼板水平方向の非接触位置決めが可能であること、さらに鋼板鉛直方向の弾性振動や静的なたわみの抑制が可能であることは報告されている。また、水平位置決め制御を行うことで浮上中の鋼板の横滑りや落下という問題が解決でき、さらに磁気浮上装置をリニアモータで動かすことで、非接触搬送が可能であることを確認している[2-3]-[2-6]。

本章では水平位置決め制御機構を有する磁気浮上システムが柔軟鋼板に有効であるか磁場解析と有限差分法を用いた形状解析をもとに検討し、浮上実験により水平方向からの磁場が磁気浮上鋼板の浮上安定性にどのような影響を与えるか確認し、本手法の有効性について検討を行う。

2.2 水平方向位置決め制御を有する磁気浮上システム

2.2.1 システムの概要

実験装置の全景を Fig.2-1 に、概略図を Fig.2-2 に示す。また磁気浮上装置の写真を Fig.2-3 に、浮上電磁石ユニットを Fig.2-4 に水平方向位置決め制御ユニットを Fig.2-5 に示す。磁気浮上対象は長さ 800mm、幅 600mm の長方形亜鉛めっき鋼板（材質 SS400）とした。鋼板をアルミフレーム製装置内に設置した 5 か所の浮上用電磁石ユニットを用いて非接触支持する。鋼板の変位は 5 個の電磁石ユニットに設置されている渦電流式非接触変位センサにより検出する。電磁石ユニットは Fig.2-6 に示すような E 型フェライトコアに、直径 0.5mm のエナメル線を 1005 回巻いた電磁石 2 個が、渦電流式非接触変位センサを挟むように直列接続されている。なお、電磁場によるセンサの測定誤差[2-7]や、直列接続されている 2 個の電磁石から同じ吸引力が発生することによる制御性能への影響[2-8]は、ほとんど無いことを確認している。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 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。

浮上した鋼板のエッジに対して、水平方向から電磁石吸引力を付加し、非接触位置決め制御を行う。鋼板エッジ部の水平方向の変位計測にはレーザ式センサ（帯状のレーザ光の

遮断量で変位を計測)を用いる。また、電磁石は浮上システムで使用したものと同一のものを使用する。これらが Fig.2-2 に示したように、鋼板の相対する二辺に沿って2個ずつ設置されており、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。



Fig. 2-1 磁気浮上装置全景

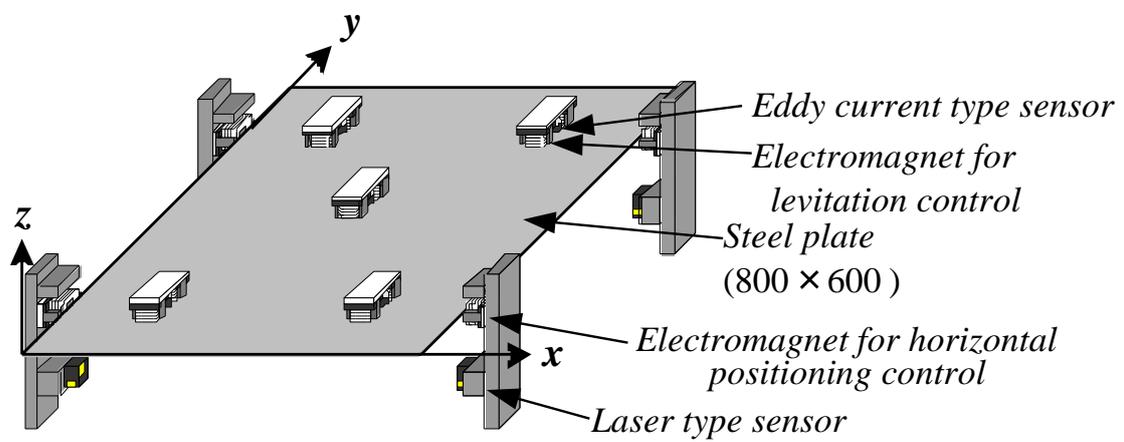


Fig. 2-2 水平方向位置決め制御機構を有する磁気浮上システムの概略図

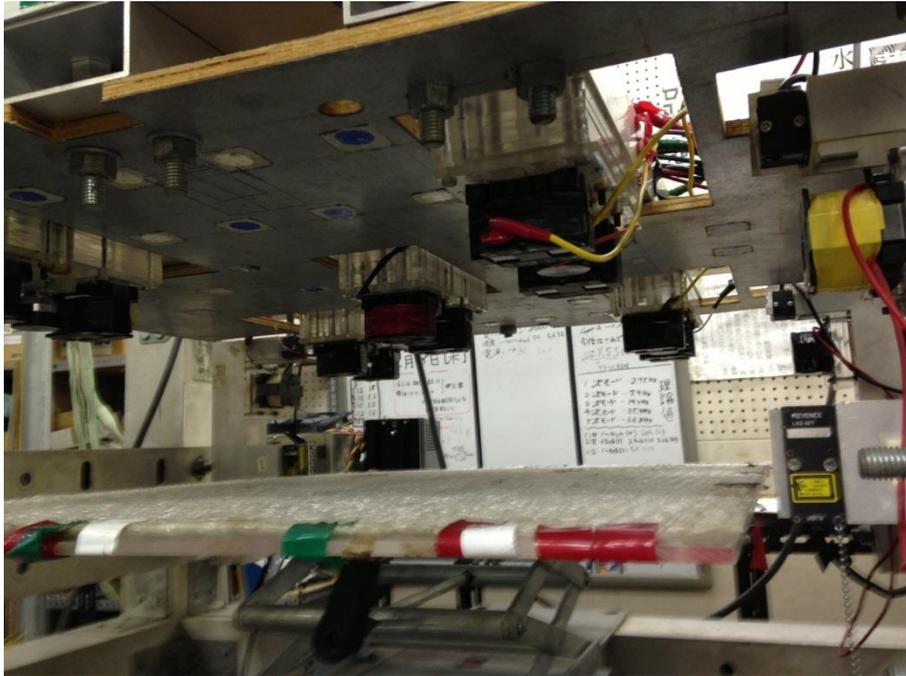


Fig. 2-3 磁気浮上装置

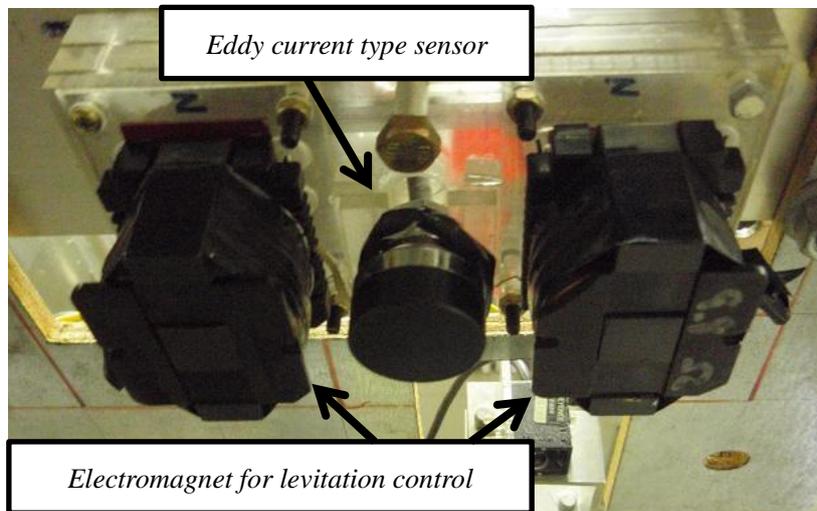


Fig. 2-4 浮上用電磁石ユニット

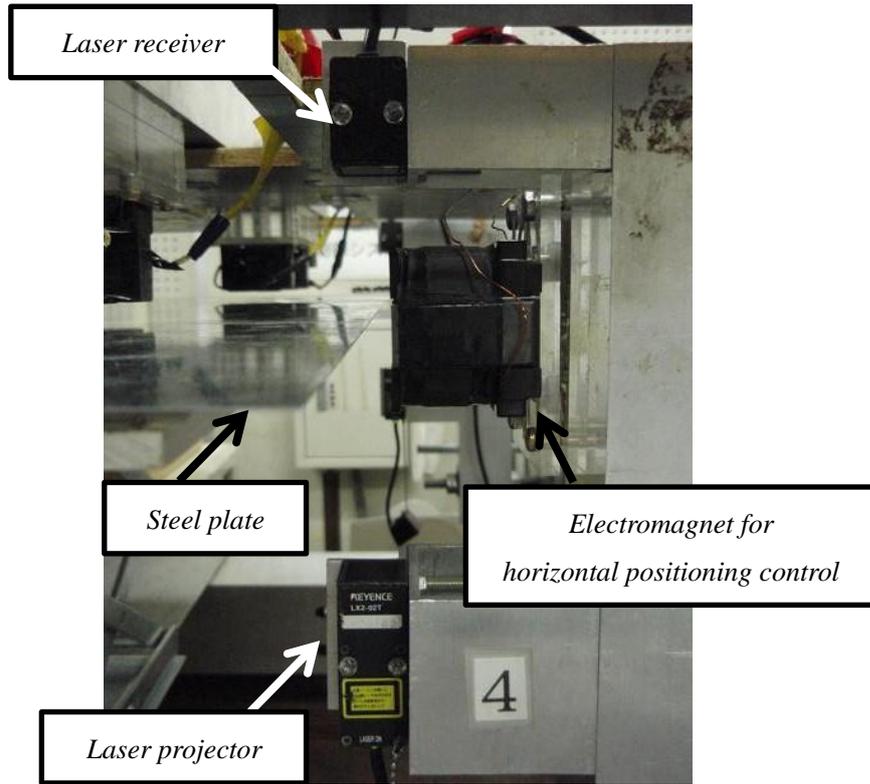


Fig. 2-5 水平方向位置決め制御用電磁石ユニット

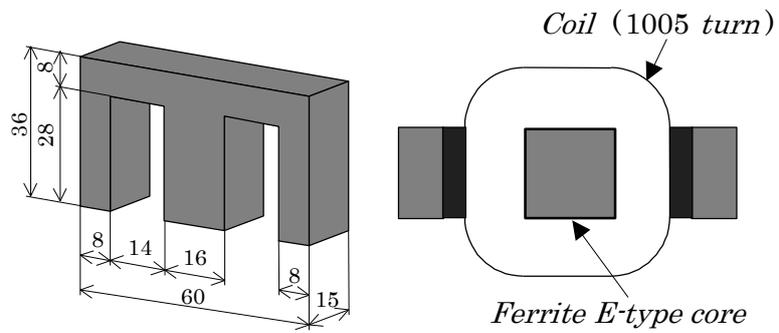


Fig. 2-6 電磁石概略図

2.2.2 磁場解析

浮上用電磁石ユニットの磁場分布について、電磁界解析ソフト JMAG を用いて算出した。結果の一例として電磁石に定常電流を 0.5A 印加したときの解析結果を Fig.2-7 に示す。

また、水平方向からの磁場が浮上中の薄鋼板に与える影響を明らかにするため薄鋼板の水平方向に設置した電磁石の定常電流を 0A から 1.0A まで 0.1A 刻みで変更し、鋼板全体を鉛直下向き 2 mm 変位を与えた場合の鉛直方向の復元力分布と、水平方向への張力についても同様に解析を行った。結果の一例として電磁石に定常電流を 0.5A 印加したときの解析結果を Fig.2-8 に、このとき解析点ごとに印加される鉛直方向の復元力分布を Fig.2-9 に示す。

また、磁場解析の結果を確認するため基礎実験を行った。鋼板の端部から水平方向に 5mm 離れた位置に電磁石を配置し、磁場を印加する。そこで、予備実験として柔軟鋼板（600mm×100mm×0.18mm）を用いて、吸引力を測定した。鋼板の端部から水平方向に 5mm 離れた位置から電磁石による磁場を印加し、吸引力を測定した。方法は電子ばかりを 2 台並べ、それに掛け渡すように鋼板を横に置き、電子ばかりをオフセットする。電流は 0.1A から 1.5A まで 0.1A ずつ変えて測定し、電子ばかり 2 台のメータを記録し、測定値の平均から吸引力を算出した。実験結果は Fig.2-10 に示す。印加する電流が増すにつれて吸引力が増加していることが確認できた。

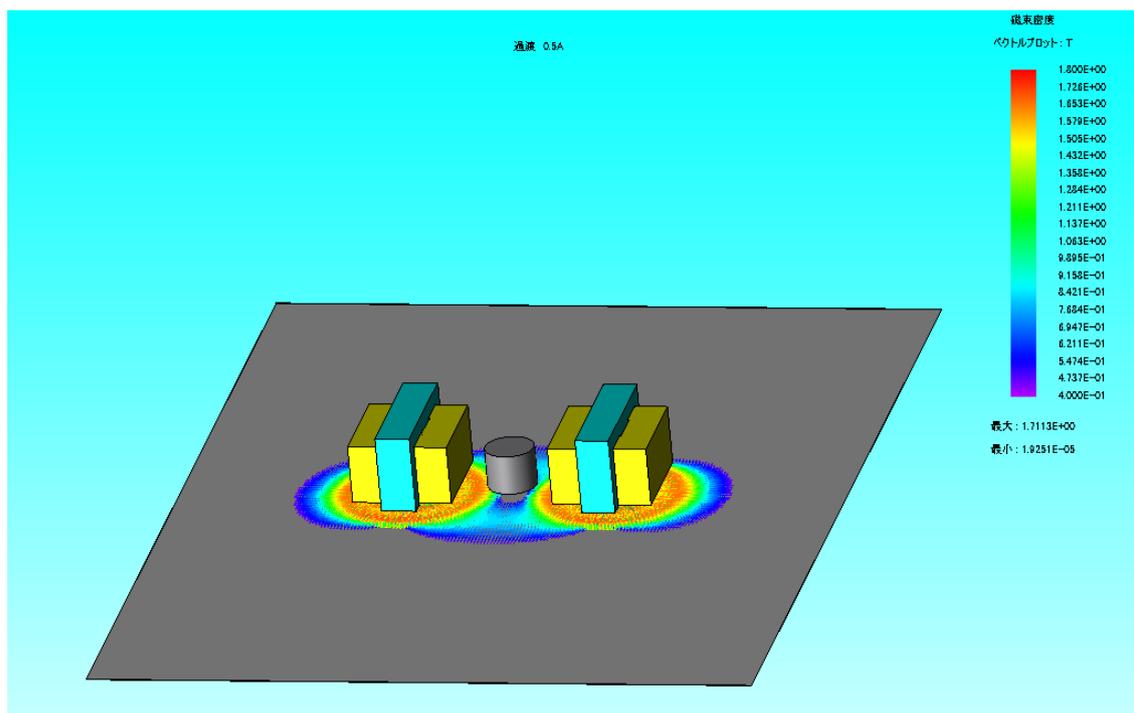


Fig. 2-7 浮上用電磁石の電磁界解析結果

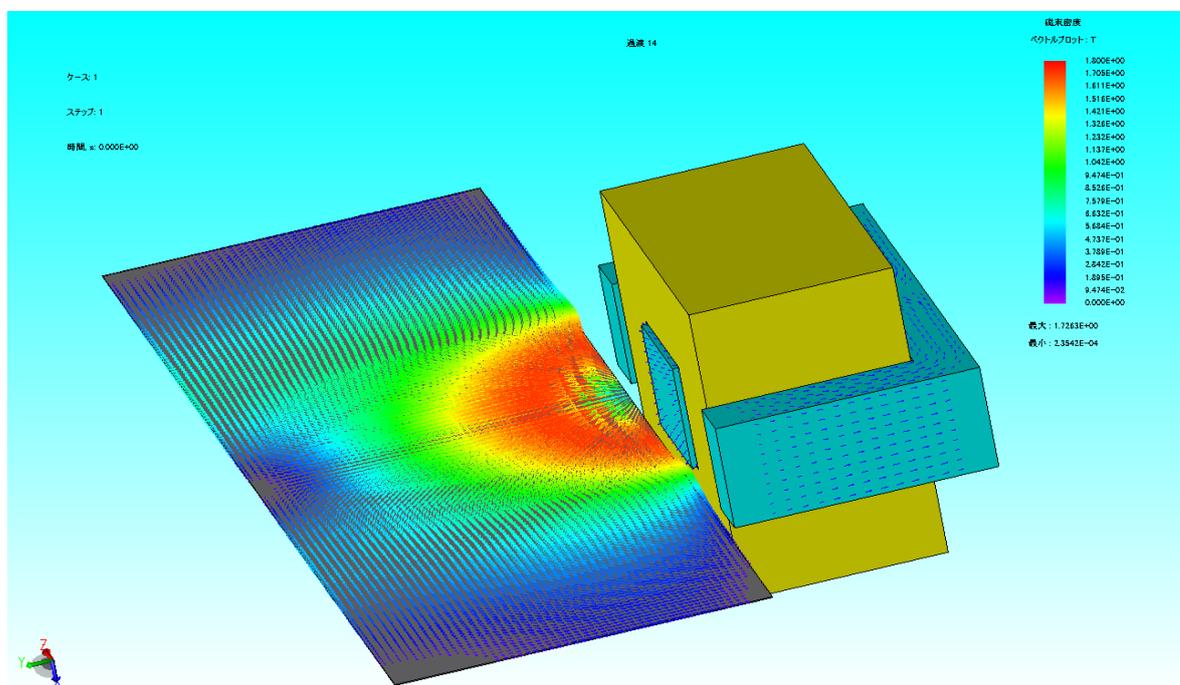


Fig. 2-8 水平方向電磁石の電磁界解析結果

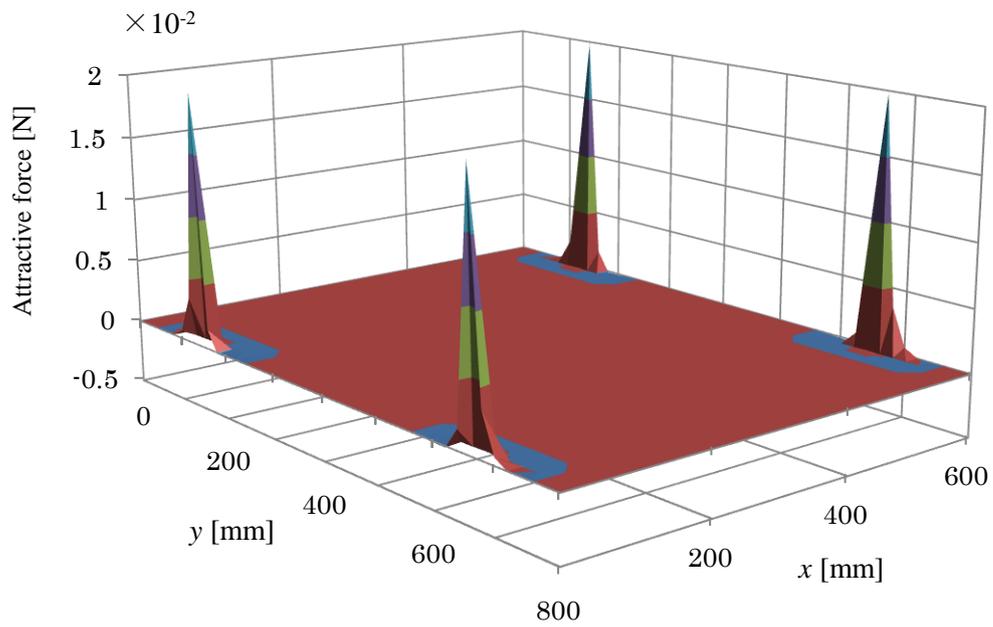


Fig. 2-9 鋼板に印加される復元力の分布

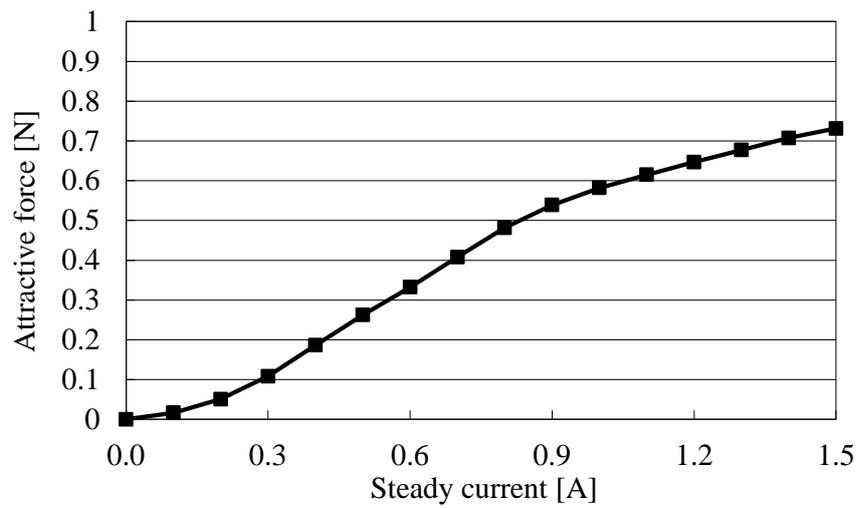


Fig. 2-10 鋼板に印加される張力の実験値 (板厚 0.18mm)

2.2.3 浮上鋼板の形状解析

水平方向からの磁場の効果を解析的に検討するため、薄鋼板を浮上させたときの鋼板形状を求める。長方形薄鋼板の静的なたわみの方程式は次式で表される[2-9].

$$D\nabla^4 z = f_{hz} + f_{hx} \frac{\partial^2}{\partial x^2} z - \rho hg \quad (2-1)$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}, \nabla^4 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4}$$

ここで E : 薄鋼板のヤング率[N/m²], h : 薄鋼板の厚さ[m], ν : ポアソン比, x : 薄鋼板の短手方向の座標[m], y : 薄鋼板の長手方向の座標[m], z : 薄鋼板の変位[m], f_{hz} : 水平方向に設置した電磁石による薄鋼板の単位面積あたりに加わる鉛直方向の外力[N/m²], f_{hx} : 水平方向に設置した電磁石による薄鋼板の単位長さあたりに加わる水平方向の外力[N/m], ρ : 薄鋼板の密度[kg/m³], g : 重力加速度[m/s²]である.

式(2-1)を用いて薄鋼板のたわみを差分法によって計算した。その一例として電磁石の定常電流を 0.5A 印加した場合の薄鋼板の形状を Fig.2-11 に示す。また Fig.2-12 は水平方向位置決め制御用の電磁石に定常電流 0.5A を印加して位置決め制御を行った場合の鋼板形状である。水平方向から磁場を印加することにより鋼板のたわみが低減されたことがわかる。この結果より水平方向からの磁場が重力により垂れ下がった鋼板を引き上げ、平坦に近づけるよう作用することが確認できる。

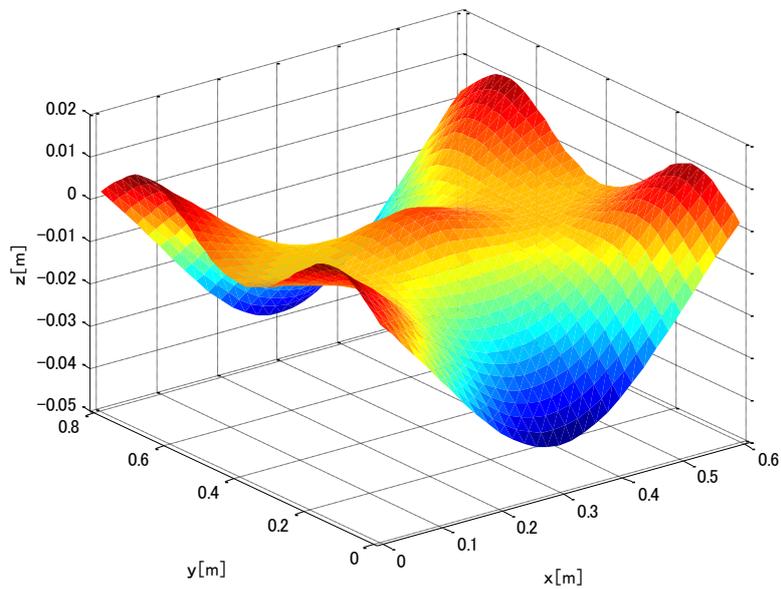


Fig. 2-11 形状解析結果（水平方向位置決め制御なし）

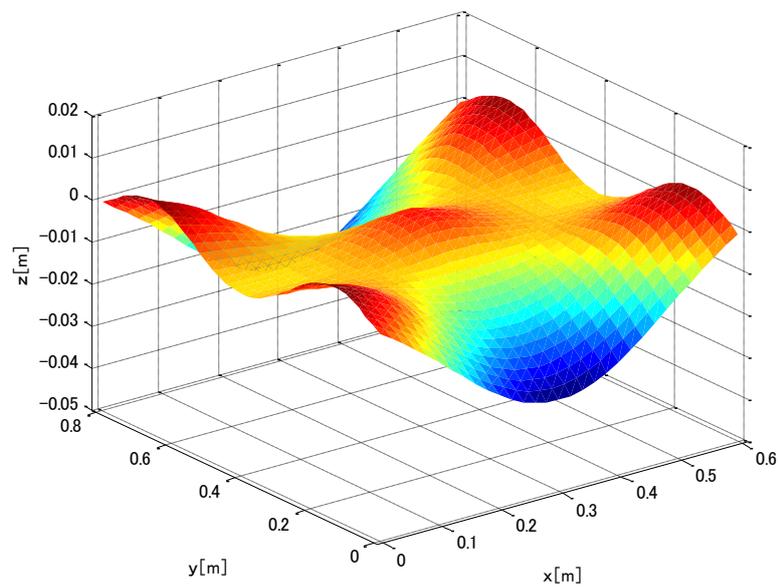
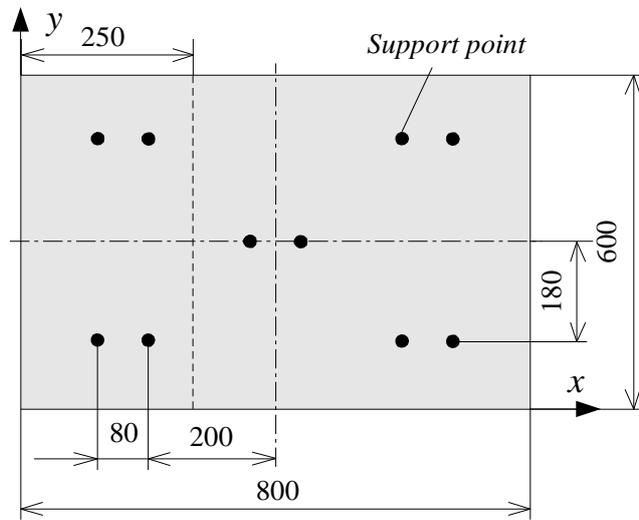


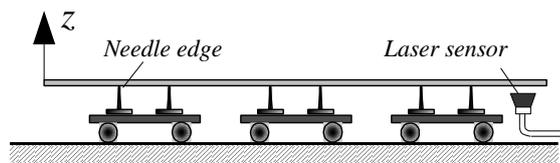
Fig. 2-12 形状解析結果（水平方向の定常電流 $I_x=0.5A$ ）

2.2.4 解析モデルの検証

形状解析により得られた薄鋼板形状の妥当性を検証するため、Fig.2-13 のような実験装置を使用し、板厚 0.3mm（市場で多く流通している鋼板の中で、薄く柔軟な為たわみが発生しやすい厚さである）、長さ 800mm、幅 600mm の薄鋼板におけるたわみの測定実験を行った。薄鋼板は電磁石の位置で針により単純支持した。この針は移動可能なスライダ機構を設けることにより、支持点でモーメントが発生しない構造になっている。薄鋼板のたわみをレーザーセンサにより測定した結果（ $x = 250\text{mm}$ における y 方向のたわみ）を Fig.2-14 に示す。実線が式(2-1)を用いた解析結果であり、■印が測定結果である。両者の傾向はほぼ一致しており、鋼板形状解析の妥当性を確認した。



(a) 上面図



(b) 側面図

Fig. 2-13 形状測定実験装置

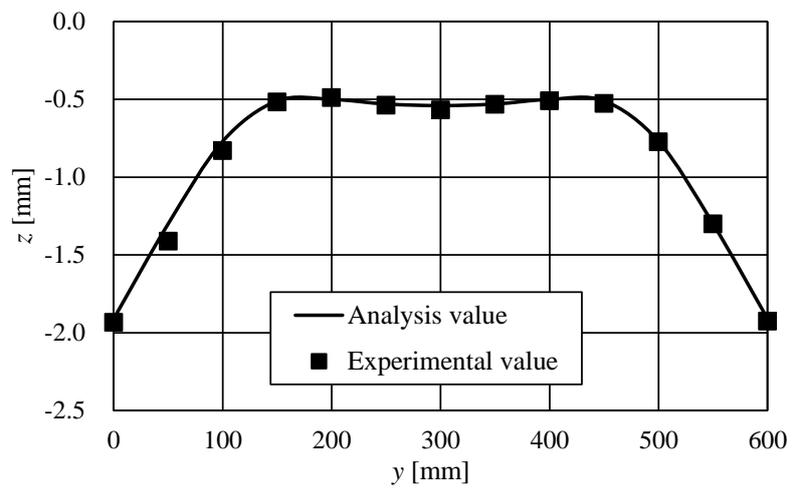


Fig. 2-14 形状測定結果と解析値の比較 ($x = 250$ mm)

2.2.5 水平方向からの磁場が有効な板厚の検討

水平方向位置決め制御が有効な薄鋼板の板厚の範囲を明らかにするため、板厚 0.03mm から 1mm まで、浮上中の鋼板形状解析を行った。また差分解析により得られた鋼板形状から平坦さを示す評価値を設定し、水平方向からの磁場による薄鋼板のたわみ抑制効果进行评估する。まず平均たわみ量 J_z を式(2-2)のように定義し、薄鋼板の全体的なたわみ量を示す。

$$J_z = \frac{\sum_{i=1}^N |z_i|}{N} \quad (2-2)$$

z_i は薄鋼板の各解析点のたわみ[m]、 N は解析点の総数であり、 $N=1271$ である。

また J_z は対象とする薄鋼板の大きさが同じであっても、板厚が異なれば数値が異なる。そこで、水平方向からの磁場を印加しない場合の J_z を J_{z0} と定義して無次元化した式(2-3)の評価値 J を用いる。

$$J = \frac{J_z}{J_{z0}} \quad (2-3)$$

板厚 0.18mm における板厚と平均たわみ量 J_z の関係を Fig.2-15 に示す。水平方向電磁石の定常電流を印加し制御を行うことにより評価値 J が大幅に低減された。また、得られた板厚と平均たわみ J_z の関係を Fig.2-16 に示す。板厚が厚くなることによって曲げ剛性が増加し、鋼板のたわみ量が非常に小さくなる。また、鋼板が薄くなるほど制御を行わない場合と制御を行った場合の差が大きくなり、水平方向から磁場を印加することにより鋼板形状が大幅に改善されることが分かった。

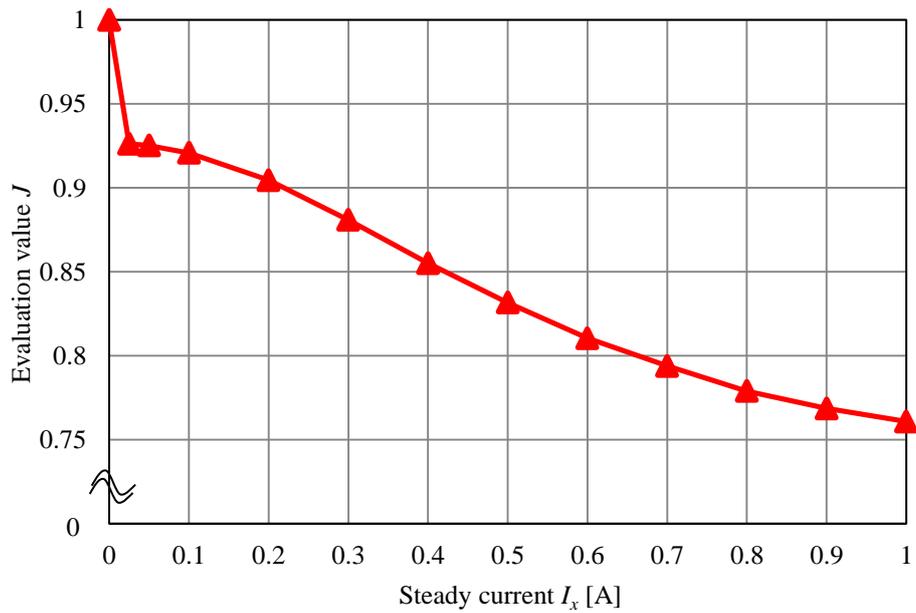


Fig. 2-15 水平方向の定常電流 I_x と評価値 J の関係 (板厚 0.18mm)

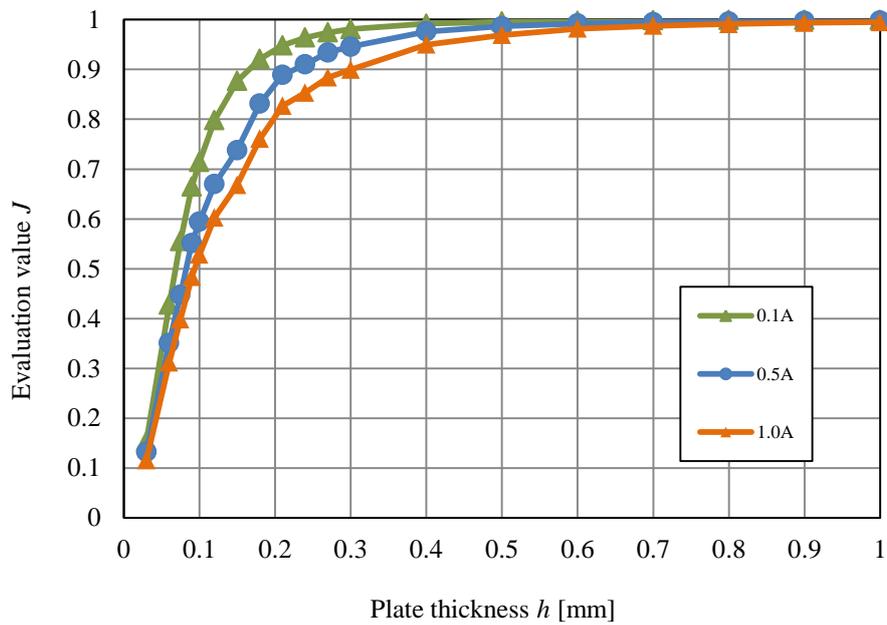


Fig. 2-16 板厚 h と評価値 J の関係

2.2.6 浮上鋼板の振動解析

振動解析は式(2-1)のたわみ解析に時間変化を加えたもので、偏微分方程式を扱うこととなる。本研究では空間刻みと時間刻みの間の拘束をうけない陰解法の一つ、クランク・ニコルソン法[2-10]を用いて振動解析を行う。クランク・ニコルソン法とは、時刻 n (n は時間刻みの分割番号) と時刻 $n+1$ に関する時間の 1 階微分を、それぞれの値の平均値で差分近似するものである。

薄鋼板の上下変位に関する運動方程式は、式(2-1)に慣性項、減衰項が加わった形であり次式で与えられる。

$$\rho h \frac{\partial^2}{\partial t^2} z + \frac{Ch^3}{12} \frac{\partial}{\partial t} \nabla^4 z + D \nabla^4 z = f_z + f_x \frac{\partial}{\partial x^2} z - \rho h g + F \quad (2-4)$$
$$\nabla^4 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4}$$

ここで t : 時間[s], C : 内部減衰係数[Ns/m²], F : 浮上用電磁石によって薄鋼板の単位面積あたりに加わる外力[N/m²]である。

2.3 水平方向位置決め制御を有する磁気浮上システムの制御モデル

磁気浮上システムの概略を Fig.2-17 に示す. 磁気浮上システムは中央より上側に, 水平方向の位置決めシステムの概要は中央より下側に示してある.

2.3.1 磁気浮上モデル

本研究では, 1 か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ローカルフィードバック制御を行う. そこで, Fig.2-18 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. 電磁石からの静的吸引力によって鋼板を支持すれば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 z に関する運動方程式, 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回路方程式は以下ようになる.

$$m_z \ddot{z} = 2f_z \quad (2-5)$$

$$f_z = \frac{2F_z}{Z_0} z + \frac{2F_z}{I_z} i_z \quad (2-6)$$

$$\frac{d}{dt} i_z = -\frac{L_{\text{eff}}}{L_z} \cdot \frac{I_z}{Z_0^2} \dot{z} - \frac{R_z}{2L_z} i_z + \frac{1}{2L_z} v_z \quad (2-7)$$

$$L_z = \frac{L_{\text{eff}}}{Z_0} + L_{\text{lea}} \quad (2-8)$$

ここで, $m_z = m/5$ [kg], m : 磁気浮上対象の質量 [kg], z : 薄鋼板の平衡浮上位置からの変位 [m], f_z : 電磁石 1 個当りの吸引力の変動値 [N], F_z : 静的吸引力 [N], Z_0 : 平衡浮上状態における電磁石表面と鋼板表面とのギャップ [m], I_z : 静的吸引力を得るための定常電流 [A], i_z : 電磁石コイル電流の変動値 [A], L_z : 平衡浮上状態における電磁石コイルのインダクタンス [H], R_z : 2 つの電磁石コイルの総抵抗値 [Ω], v_z : 電磁石コイルに加わる定常電圧からの変動値 [V], L_{lea} : 電磁石の漏れ磁束に相当する定数 [H], L_{eff} : 電磁石の有効磁束に相当する定数 [H] である.

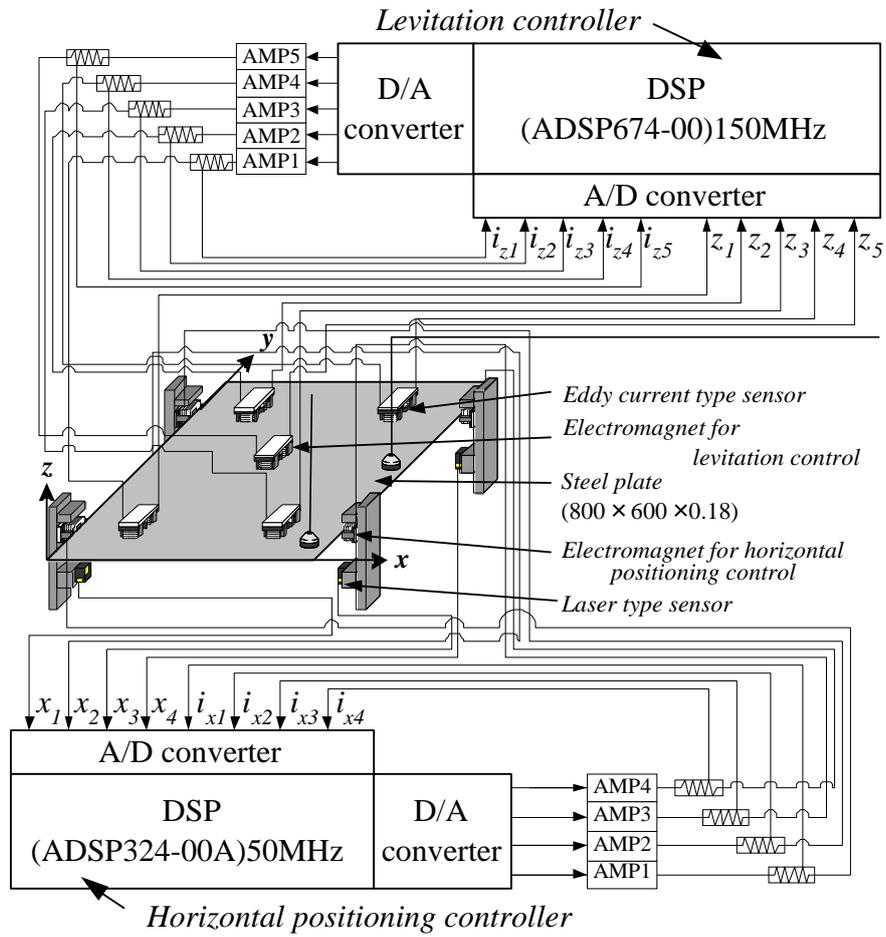


Fig. 2-17 制御システム概略図

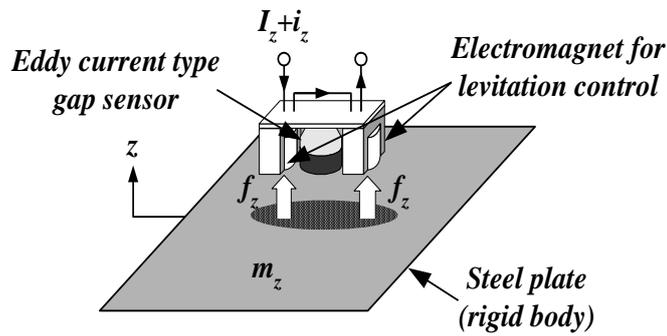


Fig. 2-18 浮上方向制御の制御モデル

2.3.2 水平位置決め制御モデル

水平方向の運動は Fig.2-19 のように一軸方向のみの 1 自由度系としてモデル化する。したがって、鋼板の一辺に配置した 2 個の電磁石からは同じ吸引力が発生するとして鋼板の 2 分の 1 を対象とした解析モデルを考える。鋼板の二辺に対向するように 1 つずつ磁石を配置し、同じ静的吸引力を加えることによって鋼板が 2 つの電磁石から一定の距離に保たれる平衡状態が存在する。そこからの水平一軸方向の変位を x とし、さらに系に入力される外乱を f_w として運動方程式を記述した。電磁石吸引力は浮上系と同様に平衡点近傍で線形化近似を行った。基礎方程式は以下ようになる。

$$m_x \ddot{x} = f_1 - f_2 + f_w = f_x + f_w \quad (2-9)$$

$$f_x = \frac{4F_x}{X_0} x + \frac{4F_x}{I_x} i_x \quad (2-10)$$

$$\frac{d}{dt} i_x = -\frac{L_{\text{eff}}}{L_x} \cdot \frac{I_x}{X_0^2} \dot{x} - \frac{R_x}{2L_x} i_x + \frac{1}{2L_x} v_x \quad (2-11)$$

$$L_x = \frac{L_{\text{eff}}}{X_0} + L_{\text{lea}} \quad (2-12)$$

ここで、 $m_x = m/2$ [kg], x : 薄鋼板の水平平衡位置からの変位 [m], f_w : 外乱 [N], F_x : 静的吸引力 [N], X_0 : 平衡状態における電磁石表面と薄鋼板エッジとのギャップ [m], I_x : 静的吸引力を得るための定常電流 [A], i_x : 電磁石コイル電流の変動値 [A], L_x : 水平方向位置決め電磁石コイルのインダクタンス [H], R_x : 電磁石コイルの抵抗値 [Ω], v_x : 電磁石コイルに加わる定常電圧からの変動値 [V], L_{lea} : 電磁石の漏れ磁束に相当する定数 [H], L_{eff} : 電磁石の有効磁束に相当する定数 [H] である。

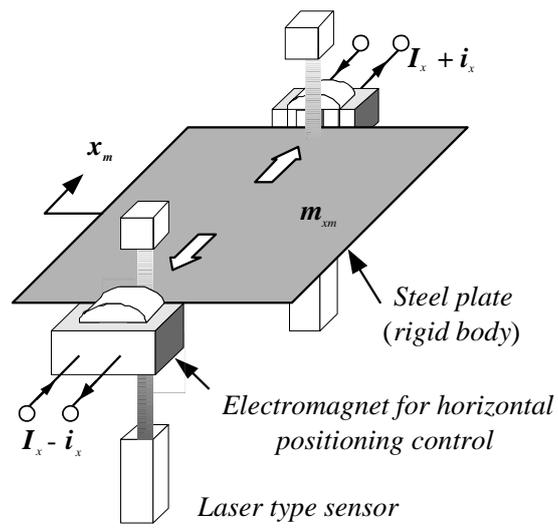


Fig. 2-19 水平方向位置決め制御の制御モデル

2.3.3 状態方程式

状態変数として鋼板の変位，速度および電磁石コイル電流を採用し，式(2-9)-(2-12)を整理して以下のような状態方程式を得る．

$$\dot{\mathbf{z}}_n = \mathbf{A}_n \mathbf{z}_n + \mathbf{B}_n v_n \quad (2-13)$$

$$\mathbf{z}_n = [z_n \quad \dot{z}_n \quad i_n]^T$$

$$\mathbf{A}_n = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{2F_n}{m_n Z_0} & 0 & \frac{2F_n}{m_n I_n} \\ 0 & -\frac{L_{\text{eff}} I_n}{L_n Z_0^2} & -\frac{R_n}{2L_n} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_n = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{2L_n} \end{bmatrix}^T$$

2.3.4 離散時間系最適制御

本研究では制御系を離散時間系で構成するため，連続系の評価関数を離散化し，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．ここでは次の離散時間系システムを考える．

$$\mathbf{z}_d(i+1) = \Phi \mathbf{z}_d(i) + \Gamma v_d(i) \quad (2-14)$$

$$\Phi = \exp(\mathbf{A}T_s), \Gamma = \int_0^{T_s} [\exp(\mathbf{A}\tau)] d\tau \mathbf{B}$$

ここで離散時間系の評価関数は次のように表される．

$$J_d = \sum_{i=0}^{\infty} [z_d(i)^T \mathbf{Q}_d z_d(i) + v_d(i)^T \mathbf{r}_d v_d(i)] \quad (2-15)$$

ただし \mathbf{Q}_d : 変位，速度および電磁石コイル電流に関する重み係数を要素とする行列， \mathbf{r}_d : 制御入力に関する重み係数である．式(2-15)を最小にする離散時間系最適制御則は次の離散時間系 Riccati 型代数方程式において正定対称解 \mathbf{M} を求めることで得られる．

$$\mathbf{M} = \Phi^T \mathbf{M} \Phi + \mathbf{Q}_d - \Phi^T \mathbf{M} \Gamma (\mathbf{r}_d + \Gamma^T \mathbf{M} \Gamma)^{-1} \Gamma^T \mathbf{M} \Phi \quad (2-16)$$

$$v_d^o = -\mathbf{F}_d z_d \quad (2-17)$$

$$\mathbf{F}_d = (\mathbf{r}_d + \Gamma^T \mathbf{M} \Gamma)^{-1} \Gamma^T \mathbf{M} \Phi \quad (2-18)$$

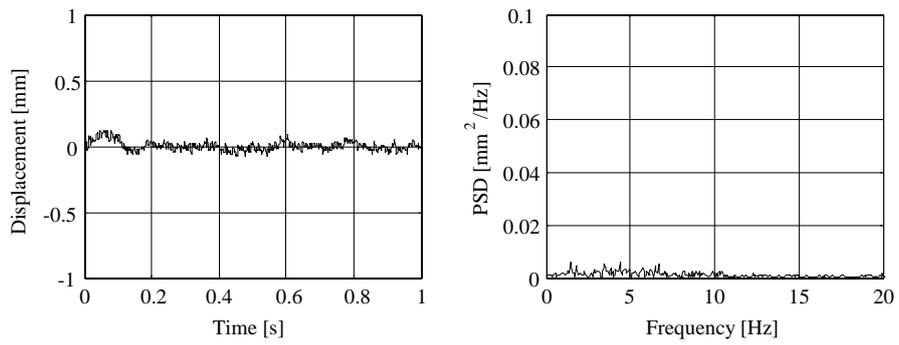
ここで T_s はサンプリング時間である．本研究では離散系 Riccati 型代数方程式の解を求める際，MATLAB – toolbox (The Math Works, Inc) の lqr を使用した．

2.4 水平方向からの磁場を印加した浮上実験

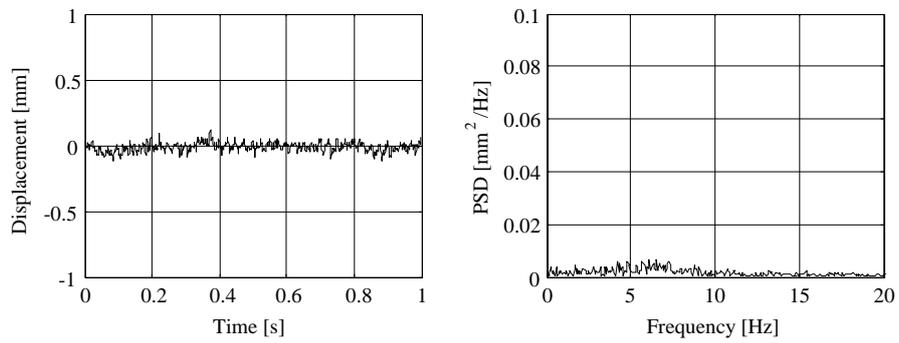
2.4.1 浮上実験

2.2.5 項の内容から、水平方向から印加する磁場によるたわみ抑制効果が見込める板厚の範囲の中で入手可能な最も薄い鋼板である板厚 0.18mm の鋼板を用いて浮上実験を行い、水平方向から印加する磁場が磁気浮上鋼板に対しどのような影響を与えるのかを確認する。各電磁石ユニットは最適制御理論により求めたフィードバックゲインを用いて制御を行う。Fig.2-17 における測定点 A（以下 A 点）、測定点 B（以下 B 点）の位置に渦電流式非接触変位センサを設置し鋼板の変位を測定した。A 点における水平位置決め制御を行わない場合と定常電流値を 1.0A として制御を行った場合の時間応答波形と周波数スペクトルの比較を Fig.2-20 に示す。また B 点における実験結果を Fig.2-21 に示す。Fig.2-21 より鋼板端部付近の B 点では大きく振動しており、周波数スペクトルを確認すると x 軸方向の弾性 1 次モードの共振周波数付近である 2Hz の成分が大きく抑制できていることが確認出来た。また Fig.2-20, Fig.2-21 より A 点、B 点共に約 70Hz の振動が残留していることを確認した。水平位置決め制御を行った際に A 点では変化が見られなかったが、B 点では振幅が大きく抑制できていることが確認出来た。これは A 点が浮上の制御点であり、浮上用電磁石によって振動が制御されていたためと考えられる。

以上の結果から、水平方向の磁場を印加することにより浮上中の薄鋼板の振動を抑制できることを確認した。



Attractive force=0N

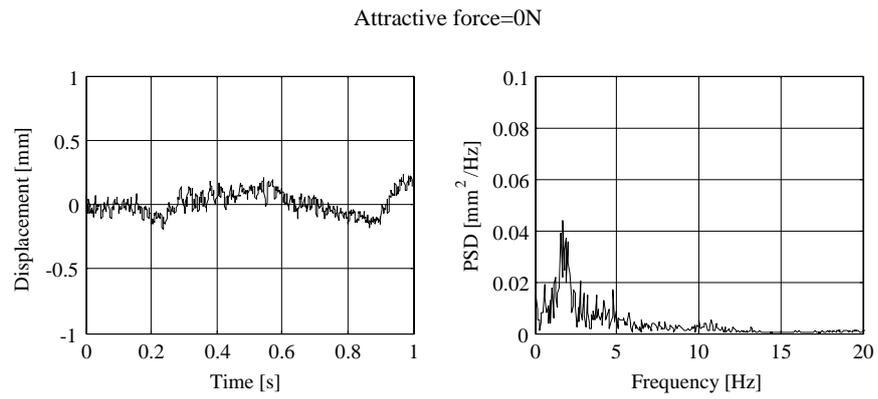
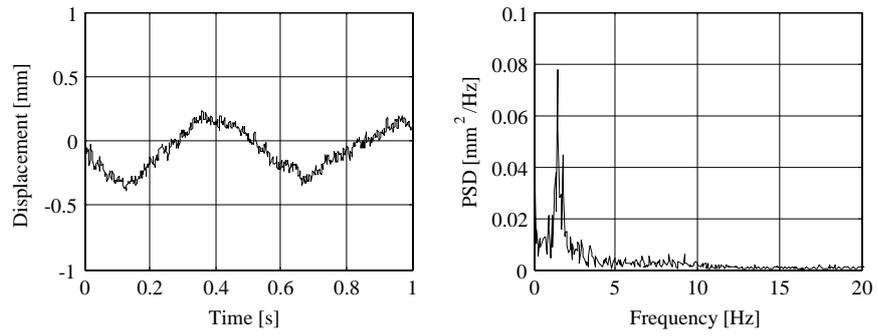


Attractive force=0.58N

(a) 時刻歴

(b) スペクトル

Fig. 2-20 実験結果 (測定点 A)



(a) 時刻歴

(b) スペクトル

Fig. 2-21 実験結果 (測定点 B)

2.4.2 浮上確率実験

水平方向からの磁場による効果が、本システムの浮上性能にどのような影響を与えるのかを確認する。浮上性能を比較するため、2.4.1項で使用した浮上用ゲインを **Gain1**、重みを変更した浮上用ゲインである **Gain2** を用いて実験を行った。水平方向電磁石に印加する定常電流値を 0.1A～1.0A まで変化させていき、それぞれのゲインを用いた際の各定常電流値における浮上実験を行った。このとき浮上実験を 100 回行い、30 秒間浮上し続けたときを浮上成功とする。各電流値における浮上確率を百分率で表したものを Fig.2-22 に示すその結果、水平方向位置決め制御用電磁石に印加する定常電流を 0A から 0.1A 印加した際に、ゲインの値に関わらず大きく浮上確率が上昇した。このことから位置決め制御を行うことにより浮上安定性が大きく向上することが確認出来た。また吸引力を増加することにより浮上確率が上昇していく傾向が得られた。以上の結果から水平方向からの磁場を印加することにより、薄鋼板の浮上安定性が向上することが確認出来た。

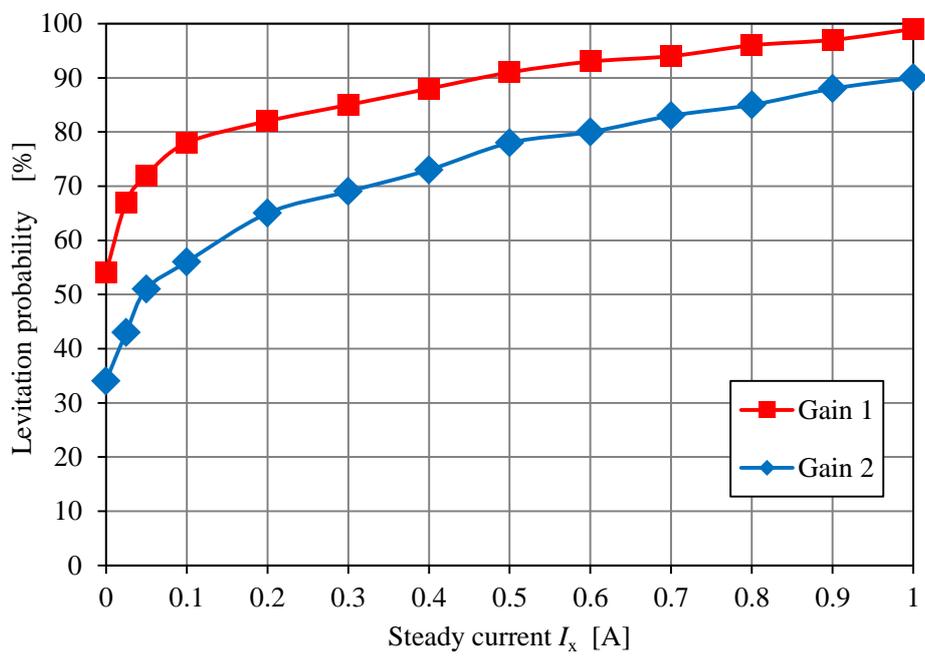


Fig. 2-22 水平方向の定常電流 I_x と浮上確率の関係

2.5 まとめ

本章では「両端から張力を与えて平坦にする」というアプローチを磁気浮上システムに適用した水平位置決め制御機構を有する磁気浮上システムが柔軟鋼板に有効であるか磁場解析と有限差分法を用いた形状解析をもとに検討した。また浮上実験により水平方向からの磁場が磁気浮上鋼板の浮上安定性にどのような影響を与えるか確認し、本手法の有効性について検討を行った。

- 電磁界解析により得られた水平方向からの磁場により発生する水平方向成分の張力と鉛直方向成分の復元力のそれぞれの分布を用いて水平方向から磁場が印加された浮上中の鋼板形状について有限差分法を用いて導出した。解析結果から水平方向からの磁場により浮上中の柔軟鋼板に発生するたわみを抑制する効果を確認した。
- 板厚 0.03mm～1mm の範囲の板厚において同様の解析を行い、シミュレーションによる浮上鋼板形状の評価方法を提案した。その結果、板厚が薄い範囲においては水平方向からの磁場により浮上中の鋼板形状の平坦化に効果が大きいことを明らかにし、超極薄鋼板の浮上の可能性を示した。
- 鋼板中央の電磁石ユニットに弾性 1 次モードを励起する外乱を加えて浮上実験を行なった結果、水平方向からの磁場により浮上中の薄鋼板の振動が抑制できることを実験的に明らかにした。
- 浮上確率の測定実験を行い、水平方向の位置決め制御を行なうことで浮上確率が大幅に上昇したことを確認した。また異なるフィードバックゲインを用いた実験においても同様の傾向を示したことから、水平方向からの磁場により磁気浮上鋼板の安定性が向上したことを実験的に確認し、シミュレーションによる評価値と浮上安定性の関係を明らかにした。

第3章

永久磁石を用いた

ハイブリッド磁気浮上システム

本章で使用する記号を以下に示す.

E :	薄鋼板のヤング率[N/m ²]
h :	薄鋼板の厚さ[m]
ν :	ポアソン比
x :	薄鋼板の長手方向の座標[m]
y :	薄鋼板の短手方向の座標[m]
z :	薄鋼板の鉛直方向変位[m]
f_{PM} :	永久磁石によって鉛直方向から薄鋼板に加わる単位面積当たりの吸引力[N/m ²]
ρ :	薄鋼板の密度[kg/m ³]
g :	重力加速度[m/s ²]
z_i :	薄鋼板の各解析点のたわみ[m]
z_{max} :	鋼板形状の全解析点のたわみ量の最大値[m]
N :	解析点の総数
J_Z :	平均たわみ量[m]
J_D :	最大たわみ量[m]
J_{Z0} :	永久磁石を設置しない場合の平均たわみ量[m]
J_{D0} :	永久磁石を設置しない場合の最大たわみ量[m]
m_n :	鋼板質量 m を仮想的に 5 分割した質量 (ただし永久磁石の吸引力による影響を考慮した値) [kg]
f_n :	電磁石 1 個当りの吸引力の変動値[N]
F_n :	平衡浮上状態において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_0 :	平衡浮上状態における電磁石表面と鋼板表面とのギャップ[m]
I_n :	平衡浮上状態における電磁石コイルの定常電流値[A]
i_n :	電磁石コイルの定常電流からの変動値[A]
L :	平衡浮上状態における電磁石コイル 1 個当りのインダクタンス[H]
R :	ペアの電磁石コイルの総抵抗値[Ω]
v_n :	電磁石コイルの定常電圧からの変動値[V]
L_{eff}/Z_0 :	電磁石 1 個当りにおける有効インダクタンス[H]
L_{lea} :	電磁石 1 個当りの漏れ磁束[H]

3.1 本章の目的

第 3 章では「多数の支持点により平坦にする」というアプローチを磁気浮上システムに適用し検討を行っていく。柔軟な薄鋼板は浮上させると、電磁石の吸引力が印加されない箇所にたわみが発生し、複雑な振動が発生して浮上性能が劣化する問題がある。この問題を解決するため、この磁気浮上システムの電磁石による吸引力が印加されない箇所に永久磁石を均等に設置し、この磁力を省電力化、鋼板のたわみ抑制による浮上安定化のために有効利用したハイブリッド磁気浮上システムについて検討がなされている[3-1]。しかし、設置する永久磁石の個数と配置、薄鋼板表面との距離の組み合わせは非常に膨大であるため、実験的に最適な組み合わせを探索することは現実的に困難である。

本章ではハイブリッド磁気浮上システムの最適化手法として遺伝的アルゴリズムを用いて、永久磁石の個数と配置、薄鋼板表面との距離の探索方法の検討を行う。また、様々な板厚に対しても同様な解析を行い、薄鋼板のたわみを抑制し、安定浮上できる最適な永久磁石配置などを明らかにする。さらに、これらの結果を利用して磁気浮上実験を行い、本手法の有用性について考察する。

3.2 ハイブリッド磁気浮上システム

3.2.1 システムの概要

ハイブリッド磁気浮上システムの概略図を Fig.3-1 に示す。浮上対象である長さ 800mm、幅 600mm、長方形亜鉛めっき鋼板（材質 SS400）上方の 5 ヶ所に電磁石ユニットを設置し、それぞれの吸引力により磁気浮上させる。電磁石ユニットは E 型フェライトコアに、直径 0.5mm のエナメル線を 1005 回巻いた電磁石 2 個が、渦電流式非接触変位センサを挟むように直列接続されている。5 ヶ所全ての電磁石ユニットは検出した鋼板の変位、速度、電磁石コイル電流値をそのユニットの電磁石に対してのみフィードバックし、電磁石表面から薄鋼板までの距離が 5mm になるよう独立制御を行なっている。また、電磁石は厚さ 0.5mm の天板（材質 SS400）に設置されており、この天板に永久磁石を設置し、その吸引力によって浮上補助を行う。電磁石と永久磁石の設置例として、実験装置の下部より撮影した写真を Fig.3-2 に示す。

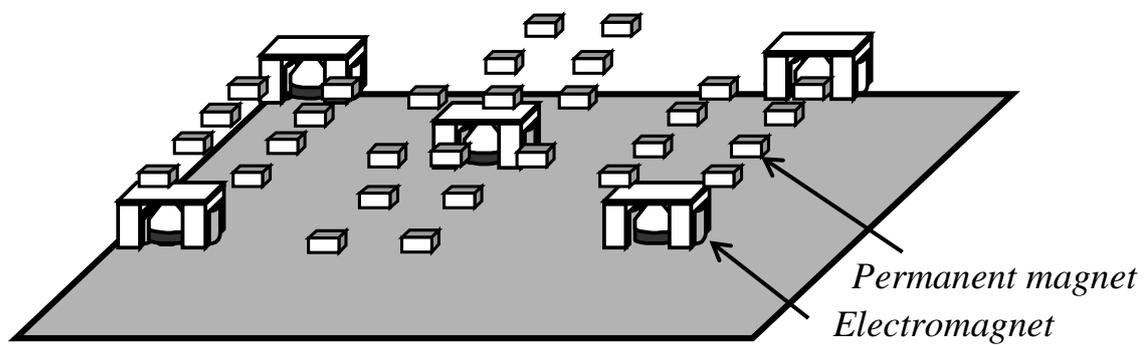


Fig. 3-1 ハイブリッド磁気浮上システムの概略図

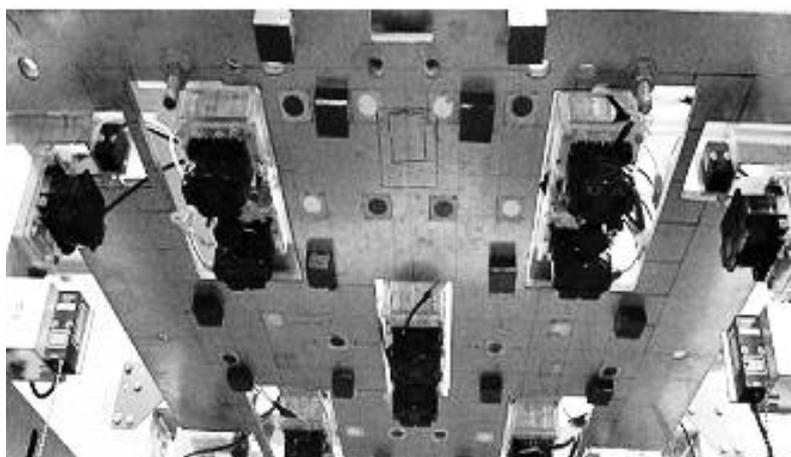


Fig. 3-2 ハイブリッド磁気浮上システム実験装置写真

3.2.2 浮上補助用永久磁石

ハイブリッド磁気浮上システムには浮上補助用の磁石として、幅30mm×30mm、厚さ15mm、表面磁束密度0.12Tのフェライト永久磁石を用いる。永久磁石の吸引力は鋼板に対して分布して印加されるが、厳密に吸引力の分布を考慮して解析を行うと多くの計算時間を要するため、吸引力は鋼板の1点に印加されるとした。永久磁石表面から薄鋼板表面までの距離（以下Gap）を変更した際の薄鋼板に印加される永久磁石1個あたりの吸引力を測定した。実験により得た板厚0.3mmにおけるGapと永久磁石の吸引力の関係を一例としてFig.3-3に示す。なお、本システムでは電磁石、永久磁石の極性は浮上対象である鋼板側が全てN極になるよう設定した。

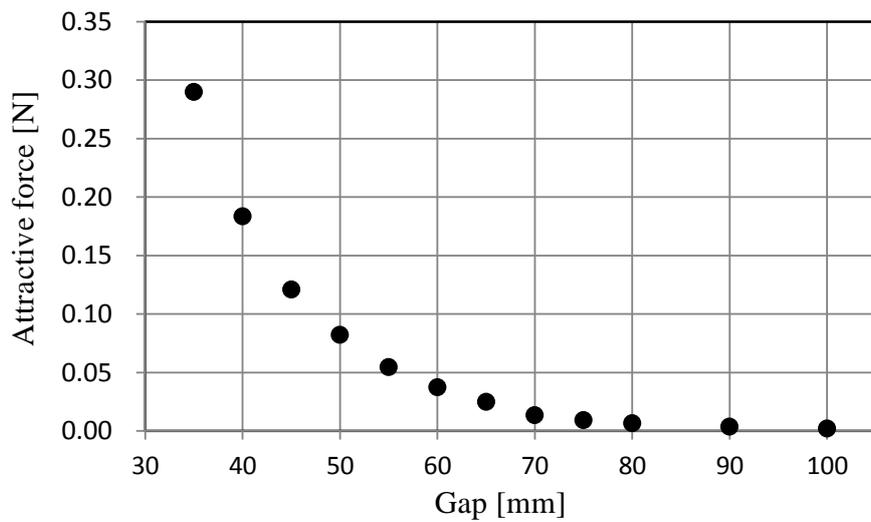


Fig. 3-3 永久磁石の Gap と鋼板に印加される吸引力の関係 (板厚 0.3mm)

3.2.3 解析モデル

本システムでは、電磁石の吸引力が印加されない箇所に永久磁石の吸引力を印加することで浮上中の薄鋼板のたわみを抑制し、浮上安定性を向上させる。そこで永久磁石の吸引力が印加された際の浮上中の薄鋼板形状を解析により求める。

長さ 800mm, 幅 600mm の薄鋼板に対し、重力及び永久磁石吸引力が作用する際の薄鋼板のたわみ量を計算する。薄鋼板の静的なたわみの方程式は次式で表される。

$$D\nabla^4 z = f_{PM} - \rho hg \quad (3-1)$$

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

ここで E : 薄鋼板のヤング率[N/m²], h : 薄鋼板の厚さ[m], ν : ポアソン比, x : 薄鋼板の短手方向の座標[m], y : 薄鋼板の長手方向の座標[m], z : 薄鋼板の鉛直方向変位[m], f_{PM} : 設置された永久磁石によって鉛直方向から薄鋼板に加わる単位面積当たりの吸引力[N/m²], ρ : 薄鋼板の密度[kg/m³], g : 重力加速度[m/s²]である。

フィードバック制御を行なっていることから電磁石の位置で薄鋼板は単純支持されるものと仮定し、式(3-1)を用いて、薄鋼板のたわみを有限差分法 (FDM) によって計算する。このとき、差分解析格子の大きさは 10mm×10mm とした。電磁石の位置は、永久磁石を設置しない場合において、最も薄鋼板全体のたわみが少なくなるよう数値解析によって決定した。

3.2.4 評価関数

薄鋼板のたわみを効果的に抑制する最適な永久磁石の個数と配置，Gap を探索するため，差分解析により得られた鋼板形状から評価値を設定し，平坦さを評価する．まず，平均たわみ量 J_Z を式(3-2)のように定義し，薄鋼板の全体的なたわみ量を示す．

$$J_Z = \frac{\sum_{i=1}^N |z_i|}{N} \quad (3-2)$$

z_i は薄鋼板の各解析点のたわみ， N は解析点の総数であり， $N = 4941$ である．

J_Z のみを評価値として最適化を行った場合[3-2][3-3]， J_Z がほぼ同等の評価値をとりながら，鋼板形状が大きく異なり，最適な解が得られないケースがあった．そこで検討の結果，鋼板の最大たわみ量 J_D を式(3-3)のように定義し，局所的なたわみ量も評価する．

$$J_D = |z_{\max}| \quad (3-3)$$

z_{\max} は得られた鋼板形状の全解析点のうち，絶対量の最大値である．

また J_Z ， J_D は対象とする薄鋼板の大きさが同じであっても，板厚が異なれば数値が異なる．そこで，永久磁石を設置しない場合の J_Z ， J_D を J_{Z0} ， J_{D0} と定義し，それぞれの項を無次元化した式(3-4)の評価関数を用いる．

$$J = \frac{J_Z}{J_{Z0}} \times w_Z + \frac{J_D}{J_{D0}} \times w_D \quad (3-4)$$

$$w_Z + w_D = 1$$

w_Z ， w_D はそれぞれ平均たわみ量，最大たわみ量に関する重み係数であり，トライアルアンドエラーを繰り返して， $w_Z = w_D = 0.5$ に決定した．

3.2.5 永久磁石の設置が有効な板厚の検討

永久磁石によるハイブリッド磁気浮上システムは浮上対象の曲げ剛性が低く，たわみ量が多い場合に特に有効である．そこで，現在製造されている最も薄い極薄鋼板にあたる板厚 0.075mm から板厚 5.0mm の長方形亜鉛めっき鋼板（長さ 800mm，幅 600mm）について，電磁石のみで浮上した際の形状を算出し，永久磁石を利用することが有効な薄鋼板の板厚の範囲について検討を行った．形状解析により得られた平均たわみ量 J_Z と板厚の関係を Fig.3-4 に示す．特に板厚が 1.0mm よりも厚い場合に平均たわみ量 J_Z が板厚の 10%以下となり，鋼板自体の曲げ剛性によってほとんどたわみが発生していない．そこで本研究で対象としている長さ，幅の鋼板においては，板厚は薄鋼板にあたる 1.0mm 以下を対象とした．

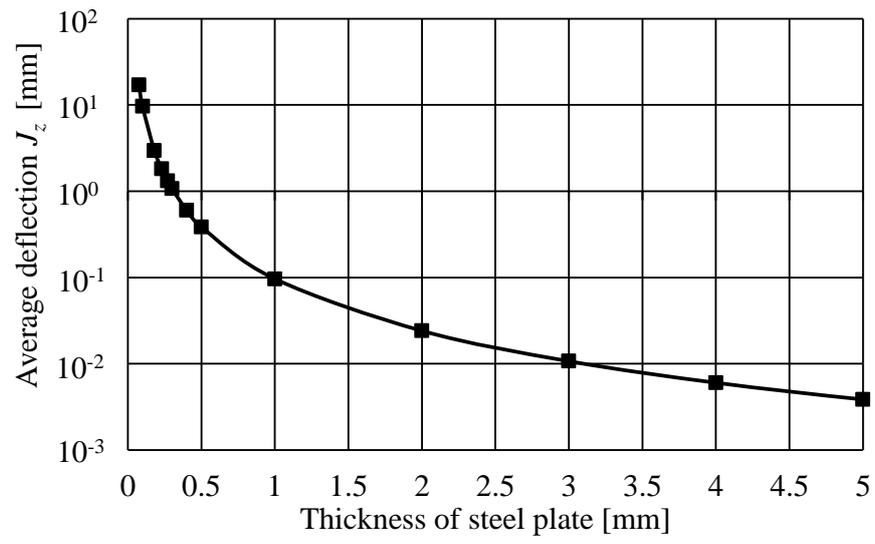


Fig. 3-4 形状解析による板厚と平均たわみ量 J_z の関係

3.2.6 最適配置探索方法

薄鋼板のたわみを効果的に抑制する最適な永久磁石の個数と配置, Gap を探索し, ハイブリッド磁気浮上システムの最適化を行う. しかし実験的に最適値を探索することは, 探索パターンが非常に膨大であるため現実的に困難である. そこで最適化アルゴリズムとして, 遺伝的アルゴリズムを用いて最適なパラメータの探索を行う. 遺伝的アルゴリズムでは下記の①~⑦のプロセスを 1 サイクル計算することを 1 世代とし, 計算を繰り返して最適値を求める.

- ①: 永久磁石の個数と初期配置をランダムに決定する.
(初期集団発生数 32)
- ②: 永久磁石が設置された際の薄鋼板の形状を, 式(3-1)を用いて計算する.
- ③: ②により得られた薄鋼板の形状から, 式(3-4)を用いて評価関数の値 (以下評価値) を計算する.
- ④: 評価値によって最適配置の候補を選出する.
(上位 2 位は無条件で次世代に残るエリート保存則を適用)
- ⑤: 一定の確率で新たな配置を生成し, 最適解へと近づける.
(一様交叉を用い交叉率は 90%)
- ⑥: 突然変異を発生させ, 配置パターンの多様性を確保する.
(突然変異率 1%)
- ⑦: 評価値が 300 世代変化しない場合, 計算を終了する.

①~⑦のプロセスを完了し, 与えられた Gap における最適な永久磁石の個数と配置を得, さらに Gap を変更して最適化を行う. Gap の探索範囲は先の研究結果[2-8]をふまえて, 40mm から 80mm までとし, 5mm 間隔で探索を行った. ある Gap に対して①~⑦のプロセスを完了する計算時間は 20 分程度である (CPU : Core i7-2600). しかし遺伝的アルゴリズムの性質上, 得られた最適値が局所解に陥る可能性があるため, 同じ条件で 10 回探索を行った.

3.2.7 最適配置探索結果

Fig.3-5 に Gap が 40mm から 80mm (5mm 間隔) における, 板厚 0.3mm の評価値 J の探索結果を一例として示す. 図中の◆印は 3.2.6 項で示した①~⑦のプロセスを 1 回完了した結果であり, 各 Gap に対して 10 点ずつ探索を行った. 評価値 J は永久磁石を設置していない電磁石のみの場合に 1 となり, 数値が低いほどたわみの抑制効果が高いことを示す. この結果より Gap が 55mm から 70mm のとき, 評価値 J が最も低い値を示していることが確認できる. その中で鋼板と永久磁石との距離が小さい Gap 55mm では, 補助的な静的吸引力が増加し電磁石の定常電流の低減が見込めることから, Gap 55mm の探索結果の中で評価値 J が最小 (Fig.3-5 における○印) となった値を最適値として採用する. 薄鋼板の板厚が 0.075mm から 1.0mm までの 9 種類の板厚について同様の探索を行い, 各板厚における最適値を決定した.

以上の最適化の結果から、各板厚とも最適値は Gap 55mm, 永久磁石数は 16 個となった。本研究では最適配置との比較のために、最適化により得られた 16 個の永久磁石を Fig.3-6(a) のように均等に設置した配置（以下均等配置）も検討する。また、板厚 0.3mm における最適な配置を一例として Fig.3-6(b)に示す。各板厚における探索結果を評価値 J について整理したものを Fig.3-7 に示す。図中の実線は電磁石のみの場合の評価値 J である。▲印は均等配置の場合であり、評価値 J は板厚に依存しないため均等配置の結果は一定となる。最適配置の評価値 J を図中◆印で示す。最適配置は、どの板厚においても電磁石のみの場合から一定の割合で薄鋼板のたわみが抑制できており、最適化が妥当に行われたと考えられる。また、電磁石のみの場合と比較して評価値 J は均等配置で 61%, 最適配置で平均して 98% 低減できていることから、永久磁石の設置によるたわみ抑制効果と、最適化によりたわみ抑制効果が向上したことを示すことができた。

また板厚 0.3mm の薄鋼板を浮上させた際の形状を Fig.3-8 に示す。Fig.3-8(a)が永久磁石を設置しない場合、Fig.3-8(b)が永久磁石を均等に配置した（Fig.3-6(a)）場合、Fig.3-8(c)が永久磁石を最適に配置した（Fig.3-6(b)）場合である。永久磁石が設置されない場合の鋼板形状と比較して、浮上中の薄鋼板が平坦な形状に近くなっていることが確認できる。

Fig.3-9 に板厚が 0.075mm から 1.0mm の最適化の結果による薄鋼板の平均たわみ量 J_z を示す。板厚が薄くなると電磁石のみ、均等配置の場合は薄鋼板が大きいたわむのに対し、最適配置ではたわみを十分抑制することができ、安定な浮上の可能性を示唆している。

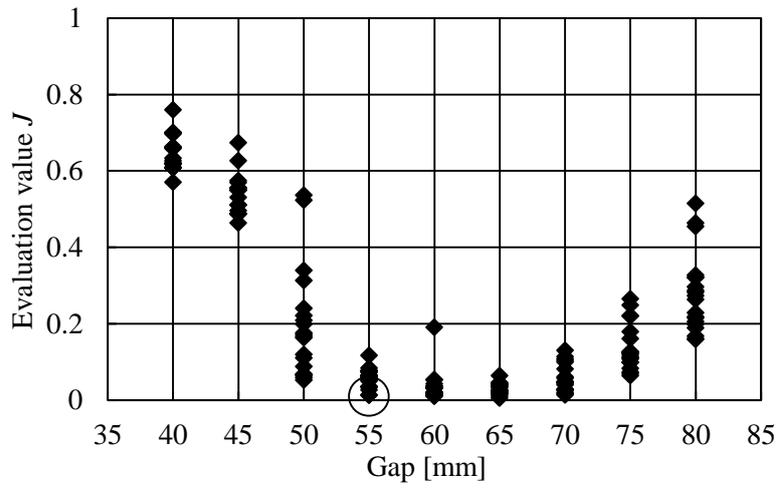
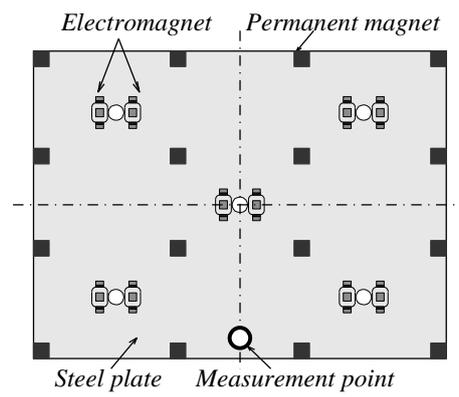
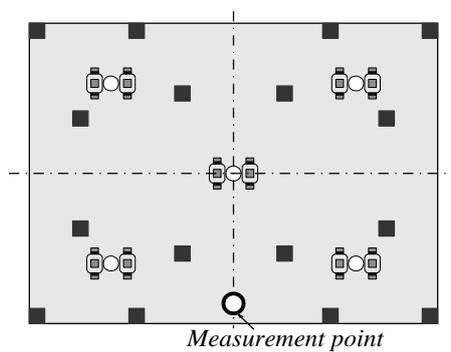


Fig. 3-5 Gap と最適化による評価値の関係 (板厚 0.3 mm)



(a) 均等配置



(b) 最適配置 (板厚 0.3mm)

Fig. 3-6 永久磁石配置

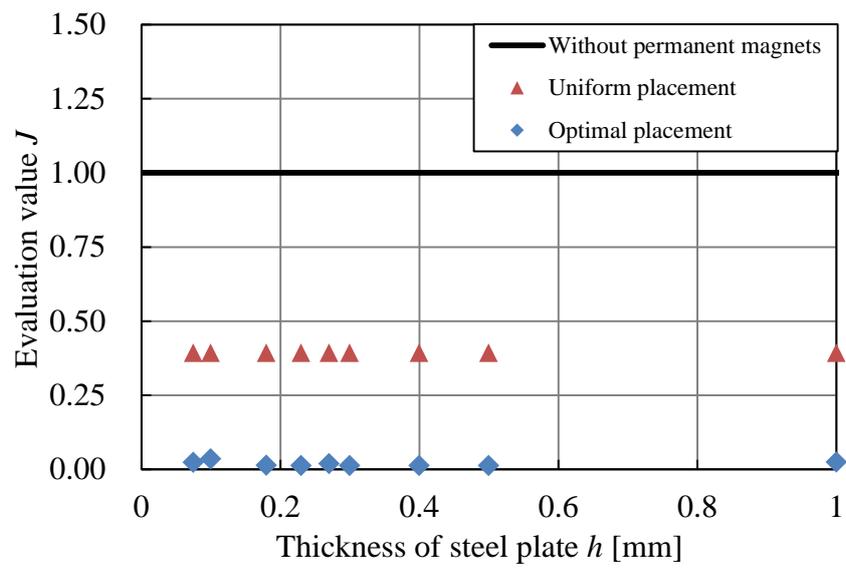
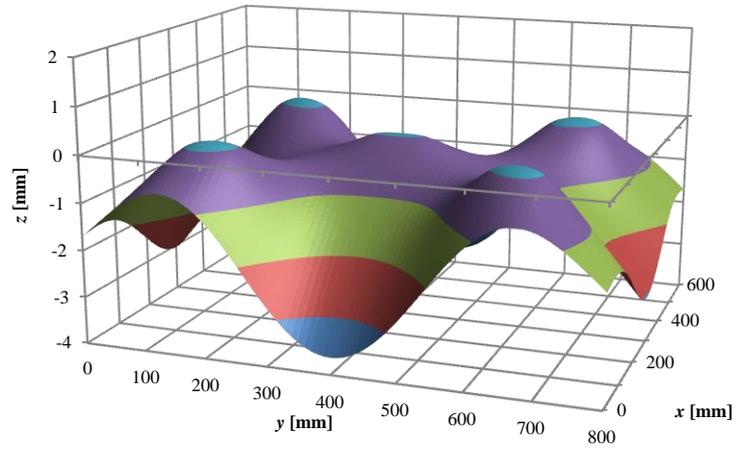
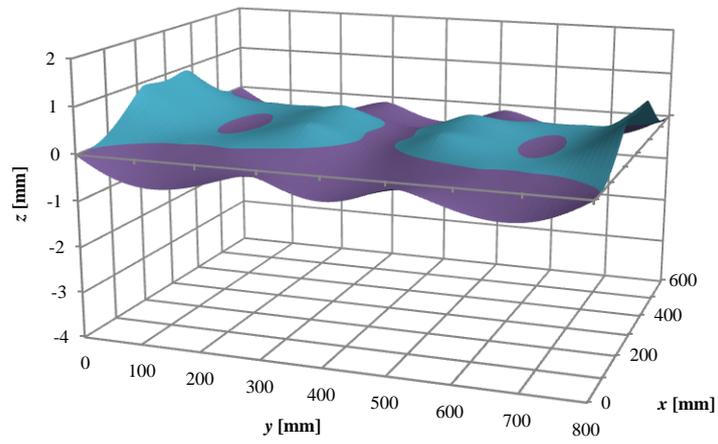


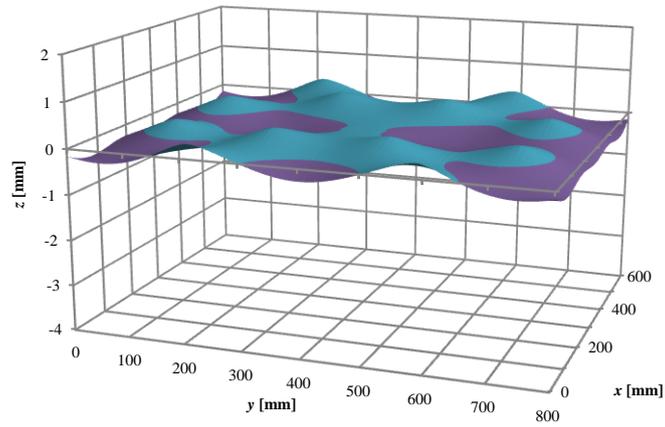
Fig. 3-7 板厚 h と評価値 J の関係



(a) 永久磁石を設置しない場合



(b) 均等配置



(c) 最適配置

Fig. 3-8 鋼板形状解析結果 (板厚 0.3 mm)

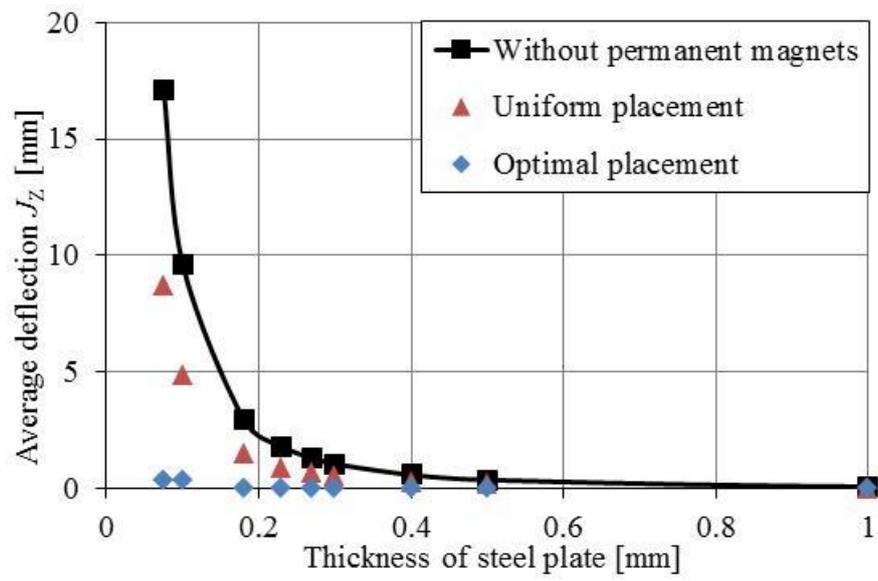


Fig. 3-9 各配置における板厚と平均たわみ量 J_z の関係

3.3 ハイブリッド磁気浮上システムの制御モデル

Fig.3-10 はハイブリッド磁気浮上システムの概略図である。本システムは5つの電磁石を独立に制御するため、Fig.3-11 に示すように、鋼板を5つの仮想質量に分割し、それぞれを集中定数系としてモデル化する。

電磁石からの静的吸引力によって鋼板を支持すれば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_n (n は Fig.3-10 の No.1~5 に相当する) とすると、運動方程式は以下のようなになる。

$$m_n \ddot{z}_n = 2f_n \quad (3-5)$$

ここで、 m_n : 鋼板質量 m を仮想的に5分割した質量 (ただし永久磁石の吸引力による影響を考慮した値) [kg], f_n : 電磁石1個当りの吸引力の変動値[N]である。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のようなになる。

$$f_n = \frac{F_n}{Z_0} z_n + \frac{F_n}{I_n} i_n \quad (3-6)$$

$$\frac{d}{dt} i_n = -\frac{L_{\text{eff}}}{L} \cdot \frac{I_n}{Z_0^2} \dot{z}_n - \frac{R}{2L} i_n + \frac{1}{2L} v_n \quad (3-7)$$

$$L = \frac{L_{\text{eff}}}{Z_0} + L_{\text{lea}} \quad (3-8)$$

ここで F_n : 平衡浮上状態において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_0 : 平衡浮上状態における電磁石表面と鋼板表面とのギャップ[m], I_n : 平衡浮上状態における電磁石コイルの定常電流値[A], i_n : 電磁石コイルの定常電流からの変動値[A], L : 平衡浮上状態における電磁石コイル1個当りのインダクタンス[H], R : ペアの電磁石コイルの総抵抗値[Ω], v_n : 電磁石コイルの定常電圧からの変動値[V], L_{eff}/Z_0 : 電磁石1個当りにおける有効インダクタンス[H], L_{lea} : 電磁石1個当りの漏れ磁束[H] である。

状態変数として鋼板の変位、速度および電磁石コイル電流を採用し、式(3-5)-(3-8)を整理すると以下のような状態方程式を得る。

$$\dot{\mathbf{z}}_n = \mathbf{A}_n \mathbf{z}_n + \mathbf{B}_n \mathbf{v}_n \quad (3-9)$$

$$\mathbf{z}_n = [z_n \quad \dot{z}_n \quad i_n]^T$$

$$\mathbf{A}_n = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{2F_n}{m_n Z_0} & 0 & \frac{2F_n}{m_n I_n} \\ 0 & -\frac{L_{\text{eff}}}{L} \cdot \frac{I_n}{Z_0^2} & -\frac{R}{2L} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_n = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{2L} \end{bmatrix}^T$$

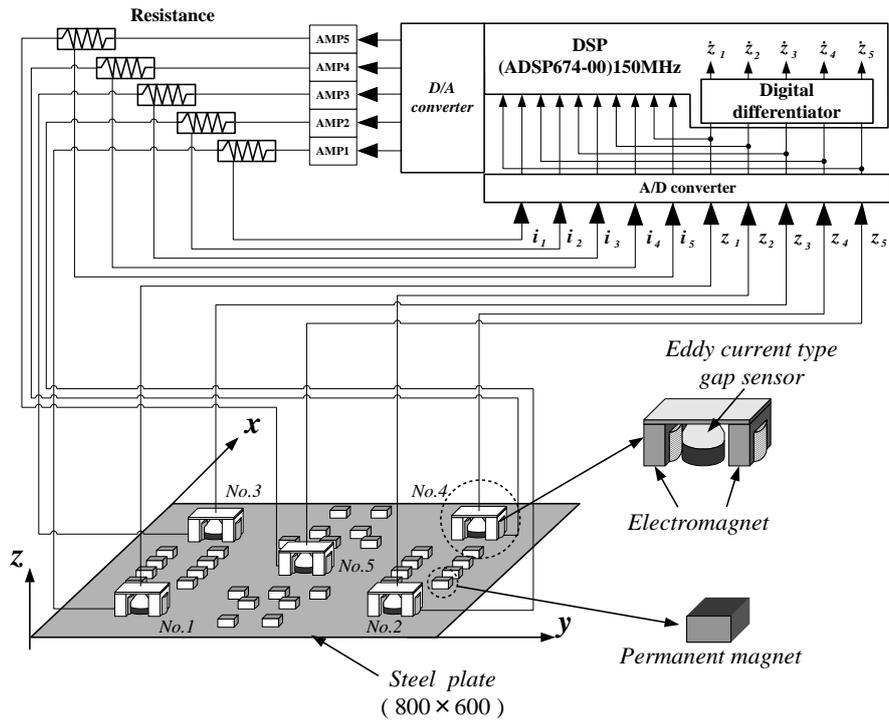


Fig. 3-10 ハイブリッド磁気浮上制御システムの概略図

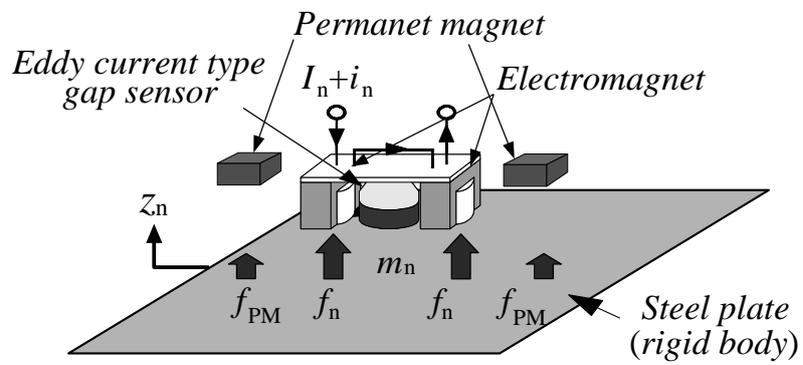


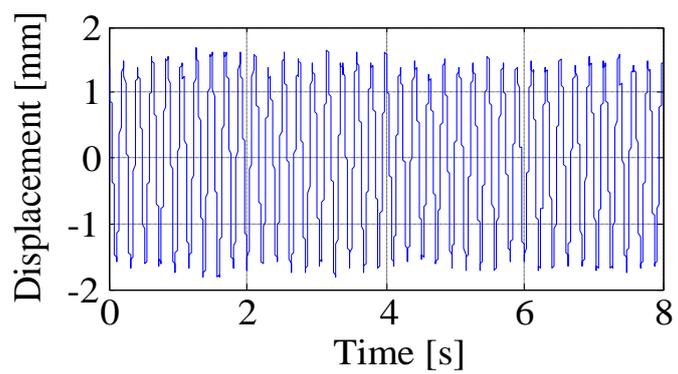
Fig. 3-11 磁気浮上制御モデル

3.4 ハイブリッド磁気浮上システムの浮上実験

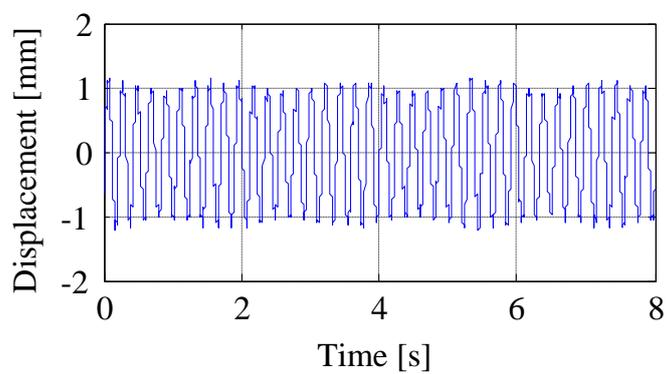
前節までに永久磁石の個数，配置，Gap を最適化することにより，浮上中の薄鋼板形状が平坦化され，浮上安定性が向上する可能性を示した．そこで，永久磁石の最適配置探索の有効性を検証するために Fig.3-10 に示した実験装置を用いて磁気浮上実験を行う．板厚 0.3mm の薄鋼板を用いて，永久磁石を配置していない電磁石のみの場合，永久磁石を均等配置した場合，永久磁石を最適配置した場合において実験を行った．

上記のそれぞれの場合において薄鋼板を磁気浮上させた後，最も振動が発生しやすい薄鋼板の y 軸方向弾性 1 次モードを検討対象とし，その固有振動数である 4.75Hz の正弦波を，Fig.3-10 中 No.5 の電磁石に外乱として入力し，薄鋼板を弾性振動させた．なお，外乱信号の振幅は電磁石に印加される定常電圧の 10% 程度となる 1V とした．Fig.3-6 に示した測定位置に渦電流非接触式変位センサを設置し，1 次モードの弾性振動による薄鋼板の鉛直方向変位の時間応答波形を測定し，それぞれの波形を比較した．このとき，5ヶ所全ての電磁石位置では式(3-9)から最適制御理論を用いて求めたフィードバックゲインをもとに弾性一次モードの振動形状が発生しやすいように速度ゲインを減少させ実験を行った．

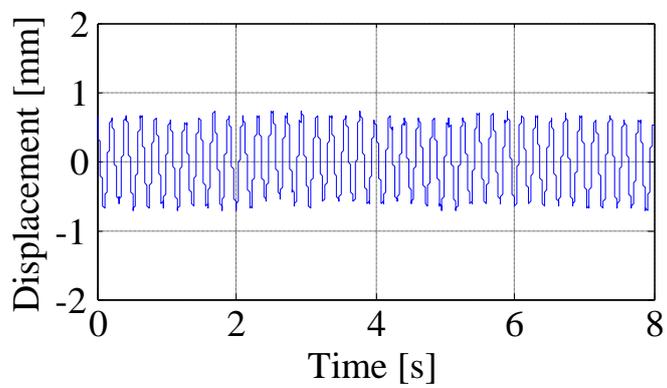
Fig.3-12(a)に永久磁石を配置していない電磁石のみの場合，(b)に永久磁石を均等配置した場合，(c)に永久磁石を最適配置した場合の結果をそれぞれ示す．各時刻歴とも，外乱信号と同一の周波数で振動している．また外乱信号との位相差は 180° であり，薄鋼板が弾性 1 次モード形状で振動していることも確認している．電磁石のみの場合と比較して，永久磁石を均等配置した場合は振幅が 30% 抑制され，最適配置を適用した場合 62% 振幅を抑制しており，永久磁石を用いることによる振動抑制効果が確認できた．



(a) 電磁石のみ



(b) 均等配置



(c) 最適配置

Fig. 3-12 加振実験による時刻歴

3.5 まとめ

本章では「多数の支持点により平坦にする」というアプローチを磁気浮上システムに適用し，電磁石による吸引力が印加されない箇所に永久磁石を均等に設置し，鋼板のたわみ抑制による浮上安定化のために有効利用したハイブリッド磁気浮上システムについて検討を行った．

- 浮上補助用に永久磁石を用いたハイブリッド磁気浮上システムにおいて，最もたわみ抑制の効果を発揮する永久磁石の個数，配置，Gap について，有限差分法を用いた解析と遺伝的アルゴリズムによって最適化を行った．その結果，今回対象とした鋼板において，本システムが浮上中の薄鋼板のたわみを効果的に抑制できる永久磁石パラメータを得ることを可能とする設計手法を確立した．
- 板厚 0.075mm から 1.0mm まで板厚を変更し永久磁石のたわみ抑制効果について検討を行ったが，どの板厚においても均等配置と永久磁石を設置しない場合と比較して一定の割合でたわみの抑制効果が得られた．また最適配置の場合は均等配置，永久磁石を設置しない場合に比べてさらにたわみの抑制効果が高くなることを明らかにした．
- 磁気浮上実験を行い，永久磁石を最適に配置し浮上中の薄鋼板のたわみを抑制することで，外乱が入力された際の浮上安定性が実験的に向上できたことから，搬送方向の両端に永久磁石を多く配置しなくても，永久磁石を最適に配置することで浮上安定性が向上することを明らかにした．

第4章

湾曲磁気浮上システム

本章で使用する記号を以下に示す.

E :	薄鋼板のヤング率[N/m ²]
h :	薄鋼板の厚さ[m]
ν :	ポアソン比
x :	薄鋼板の長手方向の座標[m]
y :	薄鋼板の短手方向の座標[m]
z :	薄鋼板の鉛直方向変位[m]
ρ :	薄鋼板の密度[kg/m ³]
g :	重力加速度[m/s ²]
z_0 :	基準面の鉛直方向変位[m]
l_x :	薄鋼板の短手方向の長さ[m]
l_y :	薄鋼板の長手方向の長さ[m]
l_{EM} :	短手方向端部から周囲の支持点までの長さ[m]
I :	短手方向から見た薄鋼板の断面 2 次モーメント[m ⁴]
θ :	電磁石の傾斜角[rad]
m_n :	鋼板質量 m を仮想的に 5 分割した質量 (ただし湾曲による影響を考慮した値) [kg]
f_n :	電磁石 1 個当りの吸引力の変動値[N]
F_n :	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_0 :	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_n :	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_n :	各電磁石コイルの定常電流からの変動値[A]
L_n :	平衡浮上状態における各電磁石コイル 1 個当りのインダクタンス[H]
R_n :	各ペアの電磁石コイルの総抵抗値[Ω]
v_n :	各電磁石コイルの定常電圧からの変動値[V]
L_{eff}/Z_0 :	各電磁石 1 個当りにおける有効インダクタンス[H]
L_{lea} :	各電磁石 1 個当りの漏れ磁束[H]

4.1 本章の目的

第 4 章では「折り曲げない程度に湾曲させる」というアプローチを磁気浮上システムに適用し検討を行っていく。電磁石による吸引力を用いた磁気浮上システムにおいて薄鋼板を浮上させる場合、鋼板自体が変形することにより複雑な振動が発生し浮上制御は困難となる。そこで第 2 章にて鉛直方向だけでなく水平方向に電磁石を設置し、エッジ方向の位置決め制御を行うことで浮上安定性を高める検討、第 3 章にて永久磁石の設置により浮上中の薄鋼板を平坦にすることで浮上安定性を向上する検討を行ってきた。しかしこれらの手法は装置や制御システムが複雑になる問題がある。さらに磁気浮上システムにおいて柔軟な薄鋼板を浮上対象とする場合には、その薄さゆえにたわみが大きくなり鋼板を平坦化しての浮上制御は困難となる。

そこで本研究は薄鋼板の柔軟性に着目し、塑性変形しない範囲で湾曲させることで安定して鋼板を浮上させる湾曲磁気浮上装置を提案する[4-1]。また差分解析を用いて湾曲浮上中の鋼板形状を算出し、本装置が有効な板厚の検討を行う。この解析結果をもとに板厚の異なる柔軟鋼板を湾曲させて浮上実験を行い、実験的な浮上安定性の評価を行う[4-2]-[4-3]。これらの解析と実験から本装置の有効性について検討を行う。

4.2 湾曲磁気浮上システム

4.2.1 システムの概要

制御システムの概略を Fig4-1 に示す。浮上対象は市場で多く流通している薄鋼板である長方形亜鉛めっき鋼板（材質 SS400）、寸法は長さ 800mm、幅 600mm とした。長方形薄鋼板を 5 か所の電磁石ユニット（No.1～5）により吊り下げようと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計により検出する。ユニットの電磁石は E 型フェライトコアに $\phi 0.5\text{mm}$ のエナメル線を 1005 回巻いたものを 2 個使用する。こ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。また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 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。

4.2.2 湾曲浮上機構

鋼板を浮上させるために要する 5 個の電磁石ユニットのうち、周囲の 4 個は Fig.4-1 の Front view のように傾斜させ、中央の電磁石は上下に移動させることで薄鋼板を湾曲浮上させる。周囲の電磁石は短手方向（y 軸）にも移動でき、湾曲浮上させた際に電磁石の吸引力が薄鋼板の同じ位置に印加されるようにしている。また電磁石による吸引力が印加される位置について、長手方向（x 軸）は薄鋼板を水平に浮上させた際に各電磁石に印加する定常電流がほぼ同等となる位置とした。y 軸方向は湾曲浮上させた際の安定性向上のため薄鋼板を x 軸方向から見た両端突出単純支持はりとして考え、湾曲浮上させた際に鋼板のたわみ量が最も少なくなる位置とした。この時の支持点のたわみ角を、その板厚の自然たわみ角と定義する。得られた電磁石配置を Fig.4-2 に示す。また Fig.4-3 に本装置を用いて薄鋼板を湾曲浮上させた際の様子を一例として示す。

また鋼板を x 軸から見た中央と左右の 3 点で支持された単純支持はりと考えると、周囲の支持点でのたわみ角 θ と中央の支持点での反力 F_5 の関係は以下の式で表される。

$$F_5 = \frac{4}{l_x} \left\{ \frac{\rho g h l_y}{6} (l_x - 6l_{EM}^2) - 4EI\theta \right\} \quad (4-1)$$

ただし l_x ：薄鋼板の短手方向の長さ[m]、 l_y ：薄鋼板の長手方向の長さ[m]、 h ：薄鋼板の厚さ[m]、 ρ ：薄鋼板の密度[kg/m³]、 g ：重力加速度[m/s²]、 l_{EM} ：短手方向端部から周囲の支持点までの長さ[m]、 E ：薄鋼板のヤング率[N/m²]、 I ：短手方向から見た薄鋼板の断面 2 次モーメント[m⁴]である。

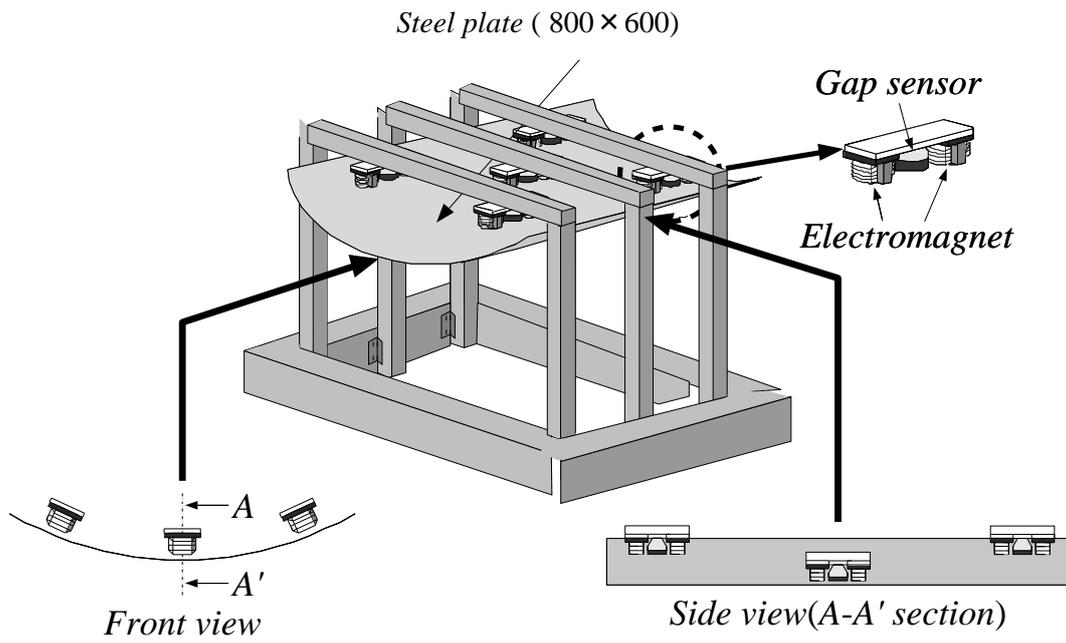


Fig. 4-1 湾曲磁気浮上システムの概略図

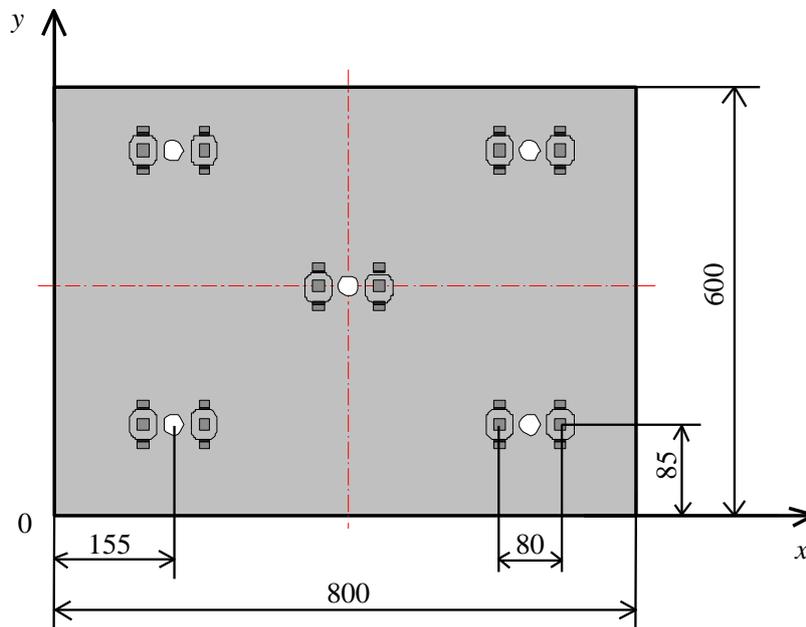


Fig. 4-2 電磁石配置図

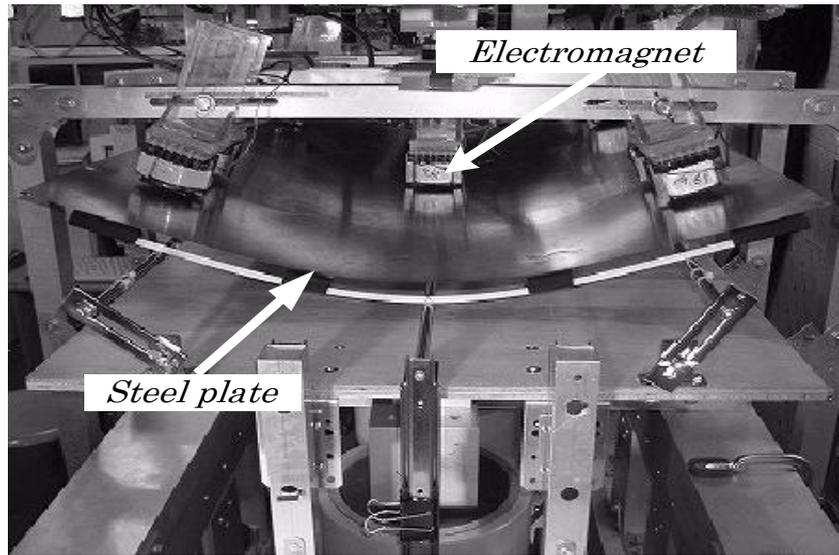


Fig. 4-3 湾曲浮上中の様子

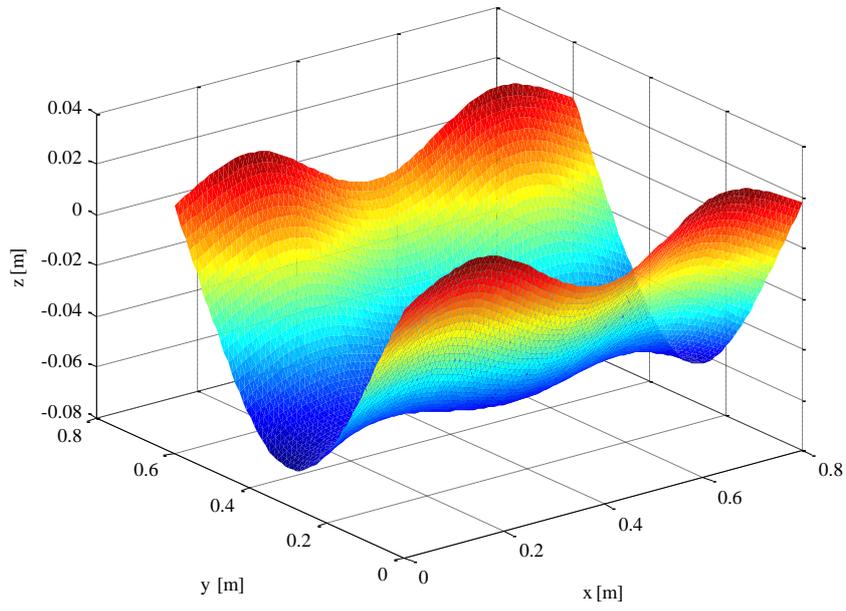
4.2.3 湾曲浮上中の鋼板形状解析

長さ 800mm, 幅 600mm の薄鋼板に対し, 重力が作用する際の薄鋼板のたわみ量を計算し, 湾曲浮上させた際の鋼板形状を算出する. 薄鋼板の静的なたわみの方程式は次式で表される.

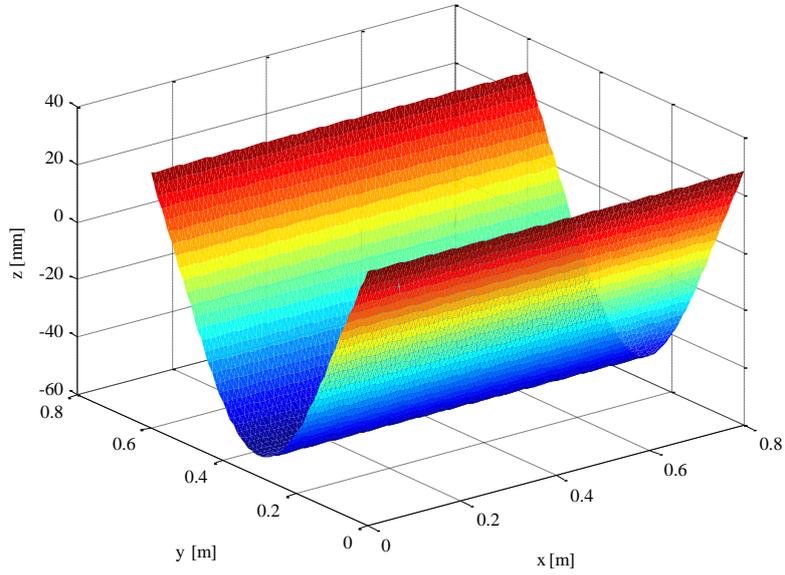
$$D\nabla^4 z = \rho hg \quad (4-2)$$

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

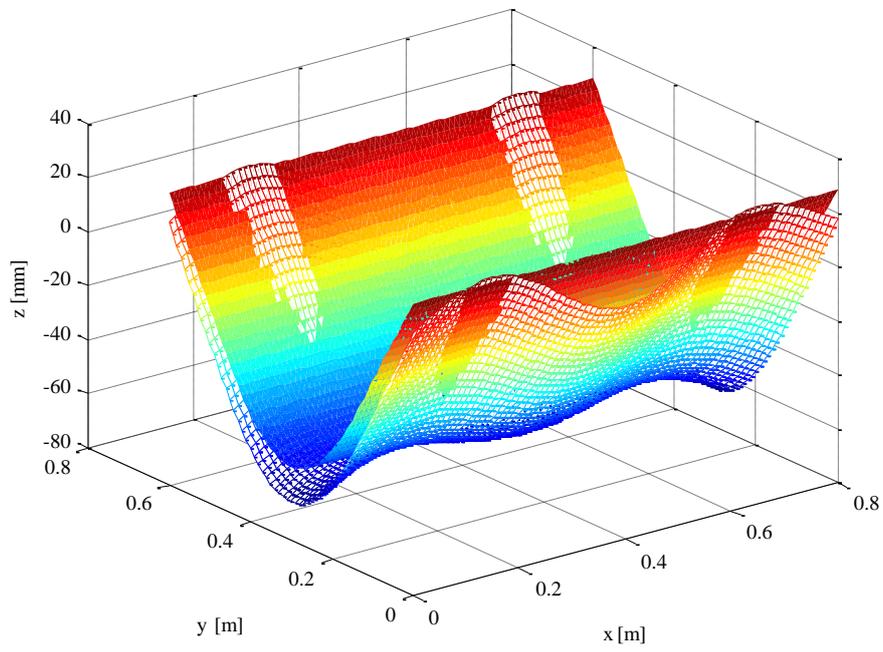
ここで E : 薄鋼板のヤング率[N/m²], h : 薄鋼板の厚さ[m], ν : ポアソン比, x : 薄鋼板の長手方向の座標[m], y : 薄鋼板の短手方向の座標[m], z : 薄鋼板の鉛直方向変位[m], ρ : 薄鋼板の密度[kg/m³], g : 重力加速度[m/s²]である. フィードバック制御を行なっていることから電磁石の位置で薄鋼板は単純支持されるものと仮定し, 式(4-2)を用いて, 薄鋼板のたわみを有限差分法 (FDM) によって計算する. このとき, 差分解析格子の大きさは 10mm×10mm とした. 解析結果の一例として板厚 0.3mm, 長さ 800mm, 幅 600mm の薄鋼板が浮上した際の形状を Fig.4-4(a)に示す. 得られた形状を評価し湾曲浮上に有効な板厚を検討する必要があるが, 板厚によって自然たわみ角は異なるため各板厚におけるたわみ量を直接比較することはできない. そこで同じ薄鋼板の y 方向の変形を拘束した Fig.4-4(b)に示すような形状を基準にとり, Fig.4-4(c)に示すように基準面からと比較したところ, 基準面から大きくたわんでいる箇所が存在した.



(a) 形状解析結果



(b) 基準面



(c) 形状解析結果と基準面の比較

Fig. 4-4 鋼板形状解析結果

4.3 湾曲磁気浮上システムの制御モデル

4.3.1 鋼板のモデル化

鋼板は1自由度系として扱いモデル化を行った。1自由度モデルでは1か所の電磁石位置で検出した変位，速度，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独立制御を行う。そこで鋼板を5つの仮想質量に分割し，それぞれを集中定数系としてモデル化する。

電磁石ユニットからの静的吸引力によって鋼板を支持すれば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の絶対変位を z_n (n は Fig.1 の No.1~5 に相当する) とすると，運動方程式は以下ようになる。

$$m_n \ddot{z}_n = 2f_n \quad (4-4)$$

ここで， m_n ：薄鋼板質量 m を仮想的に5分割した質量（ただし湾曲による影響を考慮した値）[kg]， f_n ：電磁石1個当りの吸引力の変動値[N]である。

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ようになる。

$$f_n = \frac{F_n}{Z_0} z_n + \frac{F_n}{I_n} i_n \quad (4-5)$$

$$\frac{d}{dt} i_n = -\frac{L_{\text{eff}} I_z}{L_n Z_0^2} \frac{d}{dt} z_n - \frac{R_n}{2L_n} i_n + \frac{1}{2L_n} v_n \quad (4-6)$$

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に知られている。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_n [H]を以下のように表す。

$$L_n = \frac{L_{\text{eff}}}{Z_0} + L_{\text{lea}} \quad (4-7)$$

ここで F_n ：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（ただし湾曲による影響を考慮した値）[N]， Z_0 ：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_n ：平衡浮上状態における各電磁石コイルの定常電流値（ただし湾曲による影響を考慮した値）[A]， i_n ：各電磁石コイルの定常電流からの変動値[A]， L_n ：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_n ：各ペアの電磁石コイルの総抵抗値[Ω]， v_n ：各電磁石コイルの定常電圧からの変動値[V]， L_{eff}/Z_0 ：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} ：各電磁石1個当たりの漏れ磁束[H]である。

湾曲させた際の電磁石に印加される定常電流値 I_n は，式(4-1)より得られた支持点での反力から算出した。なお予備実験により薄鋼板を湾曲浮上させた際，周囲と中央の電磁石に

印加されるそれぞれの定常電流において実験値と計算値の傾向が一致する事を確認している。

4.3.2 状態方程式

状態変数として鋼板の変位，速度および電磁石コイル電流を採用し，式(4-4)-(4-7)を整理して以下のような状態方程式を得る。

$$\dot{z}_n = A_n z_n + B_n v_n \quad (4-8)$$

$$z_n = [z_n \quad \dot{z}_n \quad i_n]^T$$

$$A_n = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{2F_n}{m_n Z_0} & 0 & \frac{2F_n}{m_n I_n} \\ 0 & -\frac{L_{\text{eff}} I_n}{L_n Z_0^2} & -\frac{R_n}{2L_n} \end{bmatrix}$$

$$B_n = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{2L_n} \end{bmatrix}^T$$

4.4 湾曲浮上実験

4.4.1 実験方法

市場で多く流通している鋼板の中で薄く柔軟で湾曲が可能な 0.18mm, 0.24mm, 0.27mm, 0.30mm の板厚の異なる 4 種類の薄鋼板を使用して浮上実験を行う。フィードバックゲインは最適制御理論をもとに決定した。各板厚の自然たわみ角を Table 4-1 に示す。電磁石の傾斜角 θ を変更した際の制御性能と浮上性能について比較検討する。 θ は 0° から 25° まで基本的に 5° 刻みで変更し、必要に応じて任意の角度に設定して浮上実験を行った。周囲の電磁石ユニットの y 方向の位置は鋼板の自然なたわみ形状をもとに調整し、電磁石の吸引力が 0° で浮上させた場合と同じ位置に印加されるようにしている。制御性能として鋼板を湾曲浮上させたときの変位標準偏差を測定する。その際過渡状態の影響を除くため浮上開始後約 10 秒後から測定し、各電磁石角度に対して 10 回測定した値の平均値を実験値とした。また浮上性能として鋼板を湾曲浮上させたときの浮上確率の測定を行う。各電磁石角度に対して 50 回浮上実験を行い、30 秒以上浮上した場合を成功として百分率を算出した。

Table 4-1 各板厚における自然たわみ角

Plate thickness h [mm]	Natural deflection angle [°]
0.18	19.2
0.24	10.8
0.27	8.5
0.30	6.9

4.4.2 異なる板厚の薄鋼板を用いた湾曲浮上実験

傾斜角が 0° のときの変位の標準偏差が同じになるようフィードバックゲインの調整を行い、板厚の異なる 4 種類の薄鋼板を使用して湾曲浮上実験を行った。Fig.4-5 に電磁石角度に対する変位標準偏差の結果を、Fig.4-6 に浮上確率の結果を示す。

板厚 0.18mm の薄鋼板は傾斜角が 0° から 5° に傾けた際に標準偏差が増加するが、 15° まで減少傾向を示した。浮上確率は 0° で 58% であったが傾斜角を大きくするとともに浮上確率も増加し 15° で最大の 98% となった。そして自然たわみ角である 19.2° よりも傾斜角を大きくすると標準偏差は増加し浮上確率は減少する傾向となり、 25° で浮上不可能となった。また 5° で標準偏差が増加するのは鋼板が 0° 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。これらの結果から板厚 0.18mm の薄鋼板は自然たわみ角を超えない範囲において湾曲させることにより浮上安定性が向上した。

板厚 0.24mm, 0.27mm の薄鋼板は板厚 0.18mm の場合と同様に、自然たわみ角よりも小さい範囲では傾斜角の増加に伴い浮上確率が増加する傾向が見られた。標準偏差は 5° で増加するがさらに傾斜角を大きくすると減少傾向となった。板厚 0.24mm, 0.27mm のそれぞれの自然たわみ角である 10.8° , 8.5° を超えた角度で鋼板を浮上させると標準偏差は増加し浮上確率は低下する傾向が得られ、それぞれ 11° , 13° で浮上が不可能となった。これらの結果から板厚 0.24mm, 0.27mm の薄鋼板においても自然たわみ角を超えない範囲において湾曲させることにより浮上安定性が向上した。

板厚 0.30mm の薄鋼板は湾曲させると変位標準偏差は増加し浮上確率は減少したことから、湾曲させる必要が無く電磁石角度 0° での浮上が最も安定した浮上状態となった。これは鋼板が十分な剛性をもつため湾曲させなくとも安定して浮上したと考えられる。従って、板厚が 0.30mm よりも厚い場合では鋼板を湾曲浮上させる必要性が無いことを確認した。

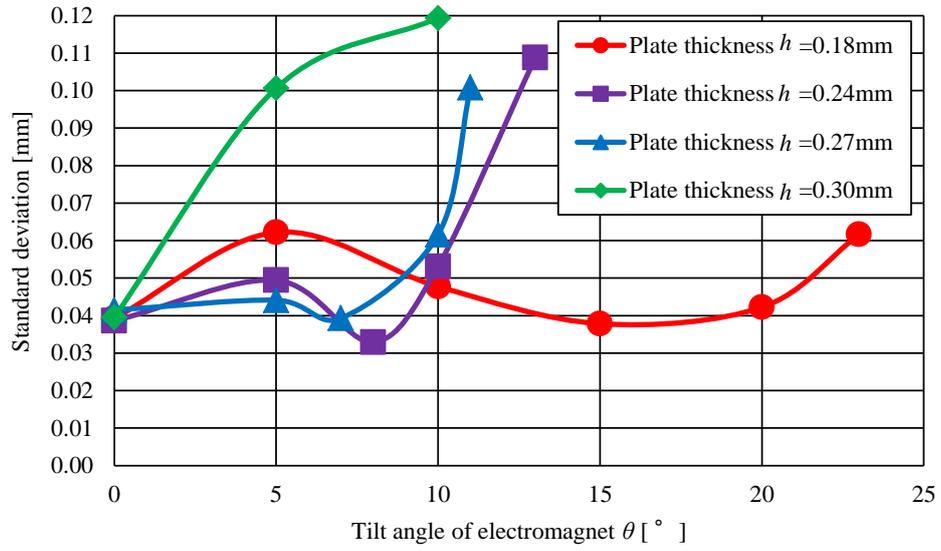


Fig. 4-5 各板厚における電磁石傾斜角と変位標準偏差の関係

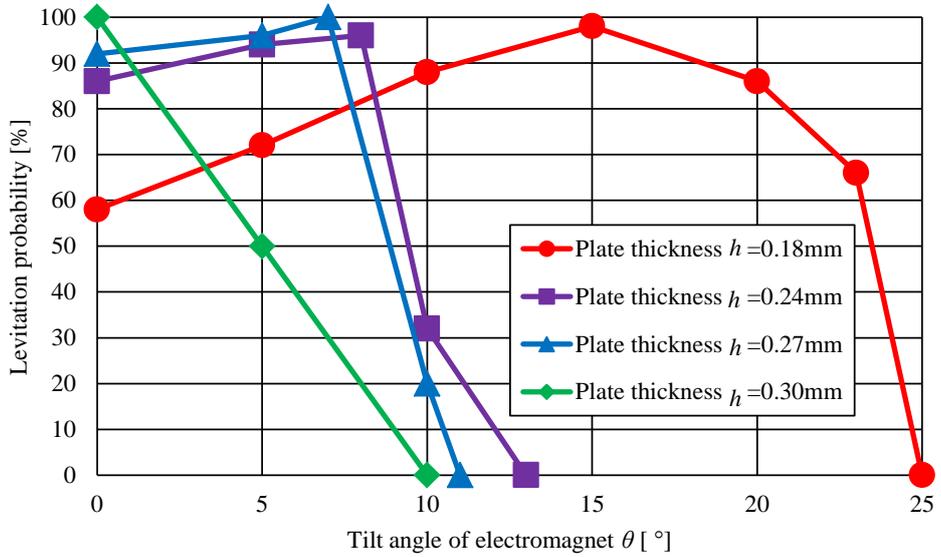


Fig. 4-6 各板厚における電磁石傾斜角と浮上確率の関係

4.4.3 異なるフィードバックゲインを用いた湾曲浮上実験

4.4.2 項にて湾曲浮上の有効性を確認した板厚 0.18mm, 0.24mm, 0.27mm の薄鋼板のうち浮上対象として板厚 0.18mm の薄鋼板を使用し, 3 種類の異なるフィードバックゲインを使用して湾曲浮上実験を行う。フィードバックゲインは予備実験により電磁石角度 0°における浮上性能に差が生じるよう試行錯誤的に決定した。それぞれのゲインを使用して湾曲浮上実験を行い, 変位標準偏差と浮上確率を測定した。電磁石角度に対する変位標準偏差を Fig.4-7, 浮上確率を Fig.4-8 に示す。また図中の Gain 3 は 4.4.2 項における板厚 0.18mm の場合の実験に使用したフィードバックゲインである。また電磁石角度 0°と 0.18mm 鋼板が安定した浮上状態となる電磁石角度 15°の変位の標準偏差の比較を Table 4-2 に示す。Fig.4-7, Fig.4-8 からいずれのフィードバックゲインを使用した場合においても, 鋼板を湾曲させることで変位標準偏差は減少し, 浮上確率が増加する結果が得られ, 湾曲浮上の有効性が確認できた。さらに Table 4-2 から, 電磁石角度 0°における変位標準偏差が大きい方が, 鋼板を曲げることによる変位標準偏差の減少率が大きくなる結果となり, 浮上が安定しない鋼板を湾曲させることによって, 安定浮上が可能となることを確認した。

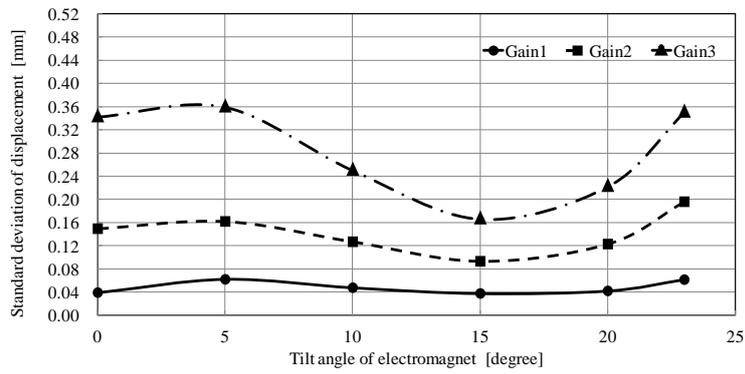


Fig. 4-7 電磁石傾斜角と変位標準偏差の関係 (板厚 0.18mm)

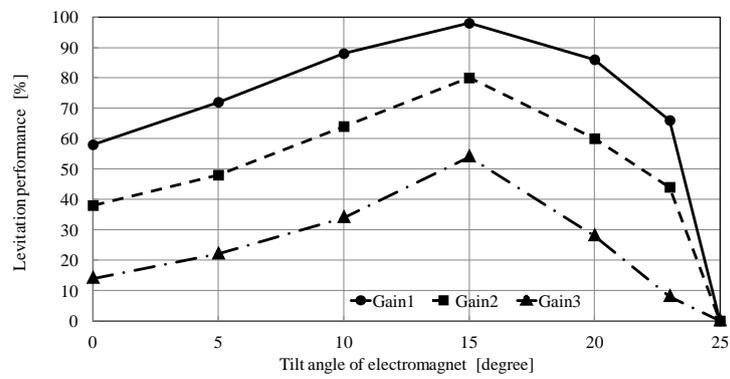


Fig. 4-8 電磁石傾斜角と浮上確率の関係 (板厚 0.18mm)

Table 4-2 各 Gain における変位標準偏差 (板厚 0.18mm)

	Tilt angle = 0° [mm]	Tilt angle = 15° [mm]	Decreasing rate [%]
Gain 1	0.039	0.038	2.5
Gain 2	0.15	0.093	38
Gain 3	0.34	0.16	52

4.5 まとめ

本章では「折り曲げない程度に湾曲させる」というアプローチを磁気浮上システムに適用し薄鋼板の柔軟性に着目し、アクチュエータやその他の設備を追加することなく、塑性変形しない範囲で湾曲させることで安定して鋼板を浮上させる湾曲磁気浮上装置を提案し検討を行った。

- 電磁石ユニットを傾斜させる機構を設置して薄鋼板を塑性変形しない範囲で湾曲させた状態で浮上させる湾曲磁気浮上システムを提案した。
- 有限差分法を用いて湾曲浮上中の鋼板形状を算出し、湾曲浮上が有効な板厚の範囲を検討できる可能性を示した。
- 湾曲浮上実験を行い、電磁石を傾けて湾曲浮上させることで浮上中の鋼板の振動が抑制され浮上安定性が向上することを明らかにした。
- 異なるフィードバックゲインを用いて浮上実験を行い湾曲して浮上させることにより浮上性能が向上したことから、湾曲浮上が有効な板厚の薄鋼板においてフィードバックゲインに関わらず、湾曲磁気浮上により薄鋼板は安定した浮上を行えることを明らかにした。

第 5 章

結論

本研究は切板の最終的な搬送工程に着目し、ローラによって発生する傷を防止することを目的とした薄鋼板の磁気浮上システムの浮上安定性向上の手段について検討を行っている。しかし薄鋼板はその柔軟性ゆえに鉛直方向の支持力のみでは支持点以外の箇所には大きなたわみが生じ、複雑な鋼板形状から弾性振動が発生して制御性能が劣化、最悪落下してしまう可能性がある。この問題を解決するため、以下の 3 種類のアプローチを薄鋼板磁気浮上システムに適用した。

- (1) 両端から張力を与えて平坦にする
- (2) 多数の支持点により平坦にする
- (3) 折り曲げない程度に湾曲させる

第 2 章, 第 3 章, 第 4 章にて(1), (2), (3)それぞれの手法を薄鋼板磁気浮上システムに適用し、浮上安定性に関する検討を行った。以下に各章において得られた研究成果について述べる。

第 1 章 序論

第 1 章では、本研究を行うに至った背景、磁気浮上技術の鉄鋼プロセスへの応用と展望、従来の研究について述べた。さらに本研究における提案並びに論文の構成を説明した。

第 2 章 水平方向位置決め制御機構を有する磁気浮上システム

第 2 章では「両端から張力を与えて平坦にする」というアプローチを磁気浮上システムに適用した水平位置決め制御機構を有する磁気浮上システムが柔軟鋼板に有効であるか磁場解析と有限差分法を用いた形状解析をもとに検討し、浮上実験により水平方向からの磁場が磁気浮上鋼板の浮上安定性にどのような影響を与えるか確認した。

- 電磁界解析により得られた水平方向からの磁場により発生する水平方向成分の張力と鉛直方向成分の復元力のそれぞれの分布を用いて水平方向から磁場が印加された浮上中の鋼板形状について有限差分法を用いて導出した。解析結果から水平方向からの磁場により浮上中の柔軟鋼板に発生するたわみを抑制する効果を確認した。
- 板厚 0.03mm~1mm の範囲の板厚において同様の解析を行い、シミュレーションによる浮上鋼板形状の評価方法を提案した。その結果、板厚が薄い範囲においては水平方向からの磁場により浮上中の鋼板形状の平坦化に効果が大きいことを明らかにし、超極薄鋼板の浮上の可能性を示した。
- 鋼板中央の電磁石ユニットに弾性 1 次モードを励起する外乱を加えて浮上実験を行った結果、水平方向からの磁場により浮上中の薄鋼板の振動が抑制できることを実験的に明らかにした。
- 浮上確率の測定実験を行い水平方向の位置決め制御を行なうことで浮上確率が大幅

に上昇したことを確認した。また異なるフィードバックゲインを用いた実験においても同様の傾向を示したことから、水平方向からの磁場により磁気浮上鋼板の安定性が向上したことを実験的に確認し、シミュレーションによる評価値と浮上安定性の関係を明らかにした。

第3章 永久磁石を用いたハイブリッド磁気浮上システム

第3章では「多数の支持点により平坦にする」というアプローチを磁気浮上システムに適用し、電磁石による吸引力が印加されない箇所に永久磁石を均等に設置し、この磁力を鋼板のたわみ抑制による浮上安定化のために有効利用したハイブリッド磁気浮上システムについて検討を行った。

- 浮上補助用に永久磁石を用いたハイブリッド磁気浮上システムにおいて、最もたわみ抑制の効果を発揮する永久磁石の個数、配置、Gapについて、有限差分法を用いた解析と遺伝的アルゴリズムによって最適化を行った。その結果、今回対象とした鋼板において、本システムが浮上中の薄鋼板のたわみを効果的に抑制できる永久磁石パラメータを得ることを可能とする設計手法を確立した。
- 板厚0.075mmから1.0mmまで板厚を変更し永久磁石のたわみ抑制効果について検討を行ったが、どの板厚においても均等配置と永久磁石を設置しない場合と比較して一定の割合でたわみの抑制効果が得られた。また最適配置の場合は均等配置、永久磁石を設置しない場合に比べてさらにたわみの抑制効果が高くなることを明らかにした。
- 磁気浮上実験を行い、永久磁石を最適に配置し浮上中の薄鋼板のたわみを抑制することで、外乱が入力された際の浮上安定性が実験的に向上できたことから、搬送方向の両端に永久磁石を多く配置しなくても、永久磁石を最適に配置することで浮上安定性が向上することを明らかにした。

第4章 湾曲磁気浮上システム

本章では「折り曲げない程度に湾曲させる」というアプローチを磁気浮上システムに適用し薄鋼板の柔軟性に着目し、アクチュエータやその他の設備を追加することなく、塑性変形しない範囲で湾曲させることで安定して鋼板を浮上させる湾曲磁気浮上装置を提案し検討を行った。

- 電磁石ユニットを傾斜させる機構を設置して薄鋼板を塑性変形しない範囲で湾曲させた状態で浮上させる湾曲磁気浮上システムを提案した。

- 有限差分法を用いて湾曲浮上中の鋼板形状を算出し，湾曲浮上が有効な板厚の範囲を検討できる可能性を示した．
- 湾曲浮上実験を行い，電磁石を傾けて湾曲浮上させることで浮上中の鋼板の振動が抑制され浮上安定性が向上することを明らかにした．
- 異なるフィードバックゲインを用いて浮上実験を行い湾曲して浮上させることにより浮上性能が向上したことから，湾曲浮上が有効な板厚の薄鋼板においてフィードバックゲインに関わらず，湾曲磁気浮上により薄鋼板は安定した浮上を行えることを明らかにした．

また、各手法のメリット、デメリットをまとめると以下のようになる。

水平方向位置決め制御機構を有する磁気浮上システム

メリット

- 水平方向のアクティブ制御を行うため水平方向の外乱に強く、搬送による外乱が入力されたとしても横滑りによる落下の可能性が極めて低い
- 鉛直方向の外乱に対しても張力が印加されていることによって複雑な振動が発生しにくく、浮上を維持しやすい
- 板厚が 0.03mm~0.6mm と薄い範囲において特に浮上安定性の向上が見込め、有効な板厚の範囲はやや広い

デメリット

- アクチュエータの数が増加するためシステム全体の消費電力は大きくなり、ランニングコストが増加する
- 測定するパラメータが増加するため、制御システムが大きく複雑になる
- 水平方向の制御力を強めても浮上安定性向上の効果が薄いためコストパフォーマンスが悪い

永久磁石を用いたハイブリッド磁気浮上システム

メリット

- アクチュエータの数を増やさずに鋼板のたわみ抑制効果を得ることができる
- 永久磁石の吸引力により鋼板をある程度支持するので浮上用電磁石の定常電流が低減でき、ランニングコストを削減することができる
- 広い板厚の範囲で効果が得られるため汎用性が高い

デメリット

- 永久磁石を均等に配置しただけではたわみ抑制効果が少ないので、Gap、個数、配置を最適化する必要があるが、組み合わせパターンは膨大で実験的に最適解を得ることは難しい
- 永久磁石は位置決め制御を行うことができないため外乱等によって永久磁石と鋼板の距離が接近し過ぎた場合、永久磁石が鋼板を吸着してしまい浮上が維持できなくなる可能性がある

湾曲磁気浮上システム

メリット

- アクチュエータの数を増やさずに鋼板の浮上安定性が向上できるためシステムが簡略になる

- 鋼板形状を 1 次モードの振動形状に固定するため、その他の複雑な振動が発生しにくい
- 最適な傾斜角度では高い浮上安定性を発揮する

デメリット

- 浮上安定性の向上が見込める板厚の範囲が 0.27mm 以下と比較的狭く、汎用性が低い
- 板厚によって最適な傾斜角が異なるため、形状解析などで予め最適角を求めておく必要がある

今後の課題

今後進むべき方向性として以下が挙げられる.

- 本研究では薄鋼板は水平方向について静止した状態で検討を行ったが、鋼板を水平方向に搬送させた際の浮上安定性についてはまだ検討が行えていない. 浮上鋼板に水平方向からの外乱が加わるようなシミュレーションを行ない浮上中の鋼板の挙動を検討するとともに、リニアモータ等で水平方向に薄鋼板を搬送させた際の実験による検討をすすめる必要がある
- 本研究においては鋼板側の永久磁石と電磁石の極を全て N 極として検討を行った. しかし、これらの永久磁石の相互作用による吸引力の変動を考慮していない. また、極性が異なる場合の相互作用についても今後検討を行なう必要がある. また、これらを考慮した最適化アルゴリズムを構築することで、より最適な永久磁石の組み合わせを得ることができると考えられる
- 本研究においては鋼板を仮想的に 5 分の 1 にした 1 自由度モデルを制御モデルに適用して検討を行ったが、連続体モデルやさらに異なる制御手法を適用することでさらに浮上安定性が向上できると考えられる
- 本研究では 3 つのアプローチに対してそれぞれ検討を行ったが、これらのアプローチや新たなアプローチを最適に複合させたより高い浮上安定性を実現する磁気浮上システムの構築が考えられる

謝辞

本研究を行なうにあたり多大なるご指導，ご鞭撻ならびにご尽力を賜りました本学 工学部 動力機械工学科 押野谷康雄 教授に心からお礼申し上げます。

本論文をまとめるにあたっては本学 工学部 精密工学科 山本佳男 教授，本学 工学部 機械工学科 岩森暁 教授，本学 工学部 精密工学科 槌谷和義 准教授，慶應義塾大学 理工学部 機械工学科 澤田達男 教授に細部にわたってご査読，ご叱正をいただきました。ここに紙面を借りて深謝いたします。

また，数々の貴重なご助言をいただきました本学 工学部 動力機械工学科 長谷川真也 講師に深く感謝の意を表します。

最後に，本学の諸先生，諸先輩，同僚，大学院生ならびに押野谷研究室の諸氏に感謝いたします。

平成26年 1月
成田 正敬

参考文献

第1章の参考文献

- [1-1] 交通政策審議会陸上交通分科会鉄道部会中央新幹線小委員会, 中央新幹線の営業主体及び建設主体の指名並びに整備計画の決定について, 答申, (2011).
- [1-2] JR 東海, 山梨リニア実験線 走行試験 (本試験) 再開について, <http://jr-central.co.jp/news/release/nws001274.html>.
- [1-3] 白國紀行, 新たな局面を迎えた超電導リニア, 日本機械学会誌, Vol.115, No.1118, pp.12-15, (2012).
- [1-4] 日本機械学会編, 電磁力応用機器のダイナミクス, コロナ社, pp.4-5, (1990).
- [1-5] 正田英介, リニアドライブシステムと磁気浮上, 電気学会論文誌 (D 編), Vol.108, No.5, pp.434-438, (1988).
- [1-6] B. V. Jayawant, Electromagnetic Levitation and Suspension Techniques, Edward Arnold, (1981).
- [1-7] 磁気浮上方式調査専門委員会編, 磁気浮上方式と関連技術, 電気学会技術報告 (II 部), 353 号, (1990).
- [1-8] P. K. Sinha, Electromagnetic Suspension Dynamics & Control, IEEE, (1987).
- [1-9] 松村文夫, 磁気浮上技術と応用の現状, 電気学会全国大会講演論文集, Vol.1989, No.6, pp.S.9.1-S.9.4, (1989).
- [1-10] W. R. Martindale, R. W. Butler, R. F. Starr, Study on Needs for a Magnetic Suspension System Operating with a Transonic Wind Tunnel, NASA Contract Report, p.118, (1985).
- [1-11] 澤田秀夫, JAXA 60cm 磁力支持天秤装置における有翼模型の空気力評価法, 日本航空宇宙学会論文集, Vol.57, No.668, pp.363-371, (2009).
- [1-12] 高見典幸, 大路貴久, 飴井賢治, 作井正昭, 交流アンペール式磁気浮上回転装置による Al 円板の浮上回転実験, Journal of the Magnetics Society of Japan, Vol.35, No.3, pp.303-307, (2011).
- [1-13] 大路貴久, 苗真, 高見典幸, 飴井賢治, 作井正昭, 交流アンペール式リニア誘導浮上搬送装置の磁極配置と Al 薄板の浮上特性, 日本 AEM 学会誌, Vol.19, No.3, pp.550-556, (2011).
- [1-14] R. W. Boom, Y. M. Eyssa, G. E. Mcintosh, M. K. Abdelsalam, R. G. Scurlock, Y. Y. Wu, M. J. Goodyer, K. Balcerek, C. P. Britcher, Superconducting Electromagnets for Large Wind Tunnel Magnetic Suspension and Balance Systems, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.21, No.2, pp.444-447, (1985).
- [1-15] 山村昌, 阿部茂, 林武人, 車両の吸引電磁石形磁気浮上方式について, 電気学会論文誌 (B 編), Vol.94, No.5, pp.255-262, (1974).
- [1-16] 松村文夫, 山田外史, 磁気吸引力によるつり下げ制御系の一制御方式, 電気学会論文誌 (B 編), Vol.94, No.11, pp.567-574, (1974).
- [1-17] 大西公平, 山村昌, 林武人, 吸引電磁石形磁気浮上方式の最適制御, 電気学会論文誌 (B

- 編) , Vol.98, No.4, pp.387-394, (1978).
- [1-18] 神代邦雄, 岡本勲, 笠井健次郎, 岩崎文雄, 掛樋豊, 寺田勝之, 鉄道車両振動のアクティブ・コントロール, 日本機械学会誌, Vol.85, No.764, pp.710-715, (1982).
- [1-19] 野波健蔵, J. W. Wang, 山崎章二, H^∞ 制御法を用いた磁気浮上システムのスピルオーバー対策, 日本機械学会論文集 (C 編) , Vol.57, No.534, pp.568-575, (1991).
- [1-20] M. Maggiore, R. Becerril, Modelling and Control Design for a Magnetic Levitation System, International Journal of Control, Vol.77, No.10, pp. 964-977 , (2004).
- [1-21] A. El Hajjaji, M. Ouladsine, Modeling and Nonlinear Control of Magnetic Levitation Systems, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.48, No.4, pp.831-838, (2001).
- [1-22] 水野毅, 木下大輔, 高崎正也, 石野裕二, ゼロパワー磁気浮上を利用した除振装置の開発 (第 2 報, 荷重支持機構の導入), 日本機械学会論文集 (C 編) , Vol.72, No.715, pp.714-722, (2006).
- [1-23] J. W. Beams, J. L. Young, J. W. Moore, The Production of High Centrifugal Fields, Journal of Applied Physics, Vol.17, pp.886-890, (1946).
- [1-24] E. R. Laithwaite, The Engineer in Wonderland, The English Universities Press Ltd. , (1967).
- [1-25] レイスウェイト著, 宮島竜興訳, ふしぎの国のエンジニア, みすず書房, (1974).
- [1-26] H. Habermann, G. L. Liard, Practical Magnetic Bearings, IEEE Spectrum, Vol.16, No.9, pp.26-30, (1979).
- [1-27] 清水久二, 谷口修, スラスト形磁気軸受制御系の研究, 日本機械学会論文集, Vol.33, No.255, pp.1753-1759, (1967).
- [1-28] 清水久二, 谷口修, 磁気軸受の原理とその応用, 機械の研究, Vol.22, No.12, pp.1620-1626, (1970).
- [1-29] G. Schweitzer, H. Ulbrich, Magnetic Bearings - a Novel Type of Suspension, 2nd International Conference on Vibrations in Rotating Machinery, pp.151-156, (1980).
- [1-30] J-P. Yonnet, Permanent Magnet Bearings and Couplings, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.17, No.1, pp.1169-1173, (1981).
- [1-31] 松村文夫, 小林英彦, 秋山勇治, 横軸形磁気軸受の基本方程式と制御系設計, 電気学会論文誌 (C 編) , Vol.101, No.6, pp.137-144, (1981).
- [1-32] 樋口俊郎, 水野毅, 5 自由度制御形磁気軸受制御系の研究 (ジャイロ効果による相互干渉のある系の最適レギュレータの構成), 計測自動制御学会論文集, Vol.18, No.5, pp.507-513, (1982).
- [1-33] 水野毅, 樋口俊郎, 磁気軸受の制御に関する研究 (回転同期信号を利用した不つり合い補償法), システムと制御, Vol.30, No.8, pp.512-520, (1986).
- [1-34] 湯本淳史, 上田学, 進士忠彦, 小型遠心血液ポンプ用 1 自由度制御型磁気軸受モータの研究, 日本機械学会論文集 (C 編) , Vol.77, No.779, pp.2822-2831, (2011).
- [1-35] 湯本淳史, 進士忠彦, 軸方向制御型磁気軸受モータを搭載した小型遠心血液ポンプ,

- 日本機械学会論文集 (C 編) , Vol.78, No.792, pp. 3064-3072, (2012).
- [1-36] 朝間淳一, 千葉明, 深尾正, 円筒磁石可動型コアレスラスタ磁気軸受の設計と性能評価, 電気学会論文誌 D, Vo.129, No.11, pp.1085-1091, (2009).
- [1-37] 岡田養二, 宮澤英俊, 近藤良, 榎園正人, 磁束集束ハイブリッド型磁気軸受に関する研究, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.77, No.775, pp.869-878, (2011).
- [1-38] 日本塑性加工学会編, ロール成形 - 先進技術への挑戦, コロナ社, (1990).
- [1-39] 川田則幸, 森井茂樹, 片山圭一, 高橋恭郎, 薄板鋼板の磁気浮上特性, 第 2 回電磁力関連のダイナミックシンポジウム講演論文集, pp.59-62, (1990).
- [1-40] 清水康博, 鳥居肅, 薄鋼板の 2 指令複合型制御における追従制御系の検討, 第 16 回電磁力関連のダイナミックシンポジウム講演論文集, pp.77-80, (2004).
- [1-41] 岡田養二, 永井文秀, 谷順二, 走行薄平板の非接触アクティブ振動制御, 第 2 回電磁力関連のダイナミックシンポジウム講演論文集, pp.389-394, (1990).
- [1-42] 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.823-832, (2008).
- [1-43] 須藤義之, 和多田雅哉, 鳥居肅, 海老原大樹, 薄鋼板浮上搬送用多極電磁石の有用性の検討及び設計, 電気学会リニアドライブ研究会資料, Vol.LD-99, No.42-53, pp.49-54, (1999).
- [1-44] 長屋幸助, 藤生正樹, 超伝導浮上アクチュエータを用いた外乱相殺と H_{∞} の組み合わせ制御による柔軟はりの振動制御, 日本機械学会機械力学・計測制御講演論文集, Vol.1993, No.B, pp.530-535, (1993).
- [1-45] 森下明平, 小豆沢照男, 常電導吸引式磁気浮上系のゼロパワー制御, 電気学会論文誌 (D 編), Vol.108, No.5, pp. 447-454, (1988).
- [1-46] J. Ortega, W. Rheinboldt, Iterative Solution of Nonlinear Equations in Several Variables, Academic Press, (1970).
- [1-47] A. Hadjidimos, Iterative Methods for the Solution of Linear Systems, North-Holland, (1988).
- [1-48] 高見穎郎, 河村哲也, 偏微分方程式の差分解法, 東京大学基礎工学双書, 東京大学出版会, (1994).
- [1-49] 伊庭斎志, 遺伝的アルゴリズムと進化論的な学習, 人工知能学会誌, Vol.9, No.4, pp.512-517, (1994).
- [1-50] 坂和正敏, 田中雅博, 遺伝的アルゴリズム, 朝倉書店, (1995).
- [1-51] 棟朝雅晴, 遺伝的アルゴリズム - その理論と先端的手法, 森北出版, (2008).

第2章の参考文献

- [2-1] 崔天時, 岡宏一, 政木慶次, 永久磁石トリニアアクチュエータを用いた磁気浮上機構 - 両側吸引浮上に関する考察-, 日本 AEM 学会誌 vol.4-1, pp.120-125, (2006).
- [2-2] 丸山裕, 水野毅, 高崎正也, 石野裕二, 3 自由度アクティブ制御型磁気支持ジャイロの開発, 日本機械学会論文集 (C 編), No.76, Vol.766, pp.1445-1451, (2010).
- [2-3] T. Narita, Y. Oshinoya, S. Hasegawa, Control of Electromagnetic Levitation Transport of Flexible Steel Plate (Fundamental Considerations on Elastic Vibration Control under Transport), Proceedings of International Power Electronics Conference Sapporo 2010, CD-ROM, (2010).
- [2-4] T. Narita, Y. Oshinoya, S. Hasegawa, Study on Horizontal Noncontact Positioning Control for a Magnetically Levitated Thin Steel Plate (Experimental Considerations on Elastic Vibration Control under Transport), Journal of International Council on Electrical Engineering, Vol.1, No.3, pp.292-297, (2011).
- [2-5] 伊藤淑人, 池田敬, 成田正敬, 長谷川真也, 押野谷康雄, 粕谷平和, 水平方向からの磁場が磁気浮上鋼板に与える影響 (薄鋼板の形状解析に関する検討), 日本機械学会関東支部第 18 期総会講演会講演論文集, pp.229-230, (2012).
- [2-6] Y. Ito, T. Narita, S. Hasegawa, Y. Oshinoya, Effect of Magnetic Field from Horizontal Direction on a Magnetically Levitated Steel Plate (Theoretical Consideration on the Shape Analysis of a Thin Steel Plate), Proceedings of International Conference on Electrical Engineering 2012, CD-ROM, (2012).
- [2-7] 押野谷康雄, 小林学, 丹野謙一, 相対する二辺が梁で補強された長方形薄鋼板の磁気浮上最適制御, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.62, No.600, pp.3067-3073, (1996).
- [2-8] 押野谷康雄, 石橋一久, 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, Vol.67, No.661, pp.107-114, (2001).
- [2-9] S. P. Timoshenko, Theory of plate and shells, McGraw-Hill Book Company, (1959).
- [2-10] 高橋健人, 差分方程式, 培風館, (1980).

第3章の参考文献

- [3-1] 押野谷康雄, 石橋一久, 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), Vol.67, No.661, pp.2855-2862, (2001).
- [3-2] 成田正敬, 小山内和輝, 吉田圭一, 長谷川真也, 押野谷康雄, 石橋一久, 粕谷平和, ハイブリッド磁気浮上システムにおける鋼板のたわみ抑制に関する基礎的検討, 第 34 回日本磁気学会学術講演会講演論文集, p.256, (2010).
- [3-3] T. Narita, Y. Oshinoya, S.Hasegawa, H. Kasuya, Fundamental Research on Optimal Position of Permanent Magnets in Magnetic Levitation Control System for Thin Steel Plate, Proceedings of the School of Engineering of Tokai University, Series E, Vol.35, pp.35-40, (2010).

第4章の参考文献

- [4-1] 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(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, pp304-305, (2006).
- [4-2] 成田正敬, 政木朋崇, 三浦圭, 押野谷康雄, 長谷川真也, 粕谷平和, 柔軟鋼板の湾曲浮上制御 (ロバスト性に関する基礎的検討), 第23回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, pp.277-280, (2011).
- [4-3] T. Narita, Y. Oshinoya, S. Hasegawa, H. Kasuya, Basic Study on Bending Levitation Control for Flexible Steel Plate Using Electromagnetic Force, Proceedings of the School of Engineering of Tokai University, Series E, Vol.36, pp.49-54, (2011).