

東海大学大学院令和4年度博士論文

柔軟鋼板の湾曲磁気浮上システムに関する研究

指導 成田 正敬 講師

東海大学大学院総合理工学研究科
総合理工学専攻

小川 和輝

目次

第1章 序論	1
1.1 本論文の構成	2
1.2 研究背景	4
1.3 磁気浮上技術の概要	5
1.3.1 浮上支持力の発生原理	5
1.3.2 磁気浮上技術の長所と短所	5
1.4 従来の磁気浮上技術	8
1.4.1 浮上対象が回転運動をする場合	8
1.4.2 浮上対象が並進運動をする場合	9
1.4.3 薄板を対象とする場合	10
1.5 本研究の目的	14
第2章 湾曲磁気浮上システムの構築と基礎特性	31
2.1 はじめに	32
2.2 実験装置の構成	33
2.3 湾曲時の鋼板と電磁石位置の関係	46
2.4 薄鋼板のモデリング	48
2.4.1 仮想質量の運動方程式	48
2.4.2 電磁石に関するモデリング	48
2.4.3 状態方程式	52
2.5 離散時間系最適制御理論	55
2.6 最適制御理論を用いた湾曲磁気浮上制御	56
2.6.1 実験条件	56
2.6.2 実験結果	56
2.7 まとめ	64
第3章 柔軟鋼板の湾曲磁気浮上中の振動メカニズム	68
3.1 はじめに	69

3.2	パルス波を用いた湾曲磁気浮上鋼板の加振実験	70
3.2.1	実験条件	70
3.2.2	実験結果	70
3.3	正弦波を用いた湾曲磁気浮上鋼板の加振実験	74
3.3.1	実験条件	74
3.3.2	実験結果	74
3.4	薄鋼板の共振周波数解析	79
3.4.1	鋼板の湾曲形状	79
3.4.2	解析モデル	80
3.4.3	解析結果	80
3.5	まとめ	85

第4章 外乱状況下における湾曲磁気浮上制御システムの評価 ... 88

4.1	はじめに	89
4.2	最適制御を用いた湾曲磁気浮上システム	90
4.3	スライディングモード制御を用いた湾曲磁気浮上システム	91
4.3.1	スライディングモード制御理論	91
4.3.2	切替超平面の設計	91
4.4	フィードバック・フィードフォワード併用型制御を用いた 湾曲磁気浮上システム	94
4.4.1	フィードバック・フィードフォワード併用型制御における 鋼板のモデル化	94
4.4.2	フィードバック・フィードフォワード併用型制御モデルの 状態方程式	95
4.4.3	フィードバック・フィードフォワードゲインの決定	96
4.5	実験条件	97
4.5.1	入力する外乱の条件	97
4.5.2	浮上確率実験の方法	97
4.5.3	電磁石角度の設定	97
4.6	実験結果	100
4.7	まとめ	102

第 5 章 結論.....107

謝辞..... 111

付録.....112

第 1 章

序論

1.1 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章では研究背景と磁気浮上技術の概要を説明し、本研究の位置づけや目的、その特色について述べた。

第2章 湾曲磁気浮上システムの構築と基礎特性

第2章では薄く柔軟な浮上対象の非接触支持技術となる薄鋼板の磁気浮上システムの構築について述べた。薄鋼板を湾曲して磁気浮上させるために、浮上制御を行う電磁石ユニットを傾斜できる構造とし、湾曲磁気浮上が行える実験装置を構築した。この装置を用いて浮上実験を行い、電磁石位置における鋼板の変位を測定し、電磁石の傾斜角に対する鋼板の振動特性について検討を行った。また実験的な薄鋼板の浮上安定性を評価するために、実験回数に対する浮上成功の回数で算出される浮上確率を求めた。実験結果より、薄鋼板を湾曲して浮上させることで浮上中の鋼板の振動を低減でき、浮上確率も上昇した。以上の結果より提案する湾曲磁気浮上システムによって浮上安定性が向上できることを実験的に示し、最適な湾曲角度についても明らかにした。

第3章 柔軟鋼板の湾曲磁気浮上中の振動メカニズム

第3章では前章で得られた最適な電磁石角度で湾曲磁気浮上させた薄鋼板の振動特性について実験的に検討を行った。鋼板を浮上させた状態で、浮上制御を行っている電磁石ユニットに対して加振機を用いて鉛直方向に加振し、その際の浮上鋼板の挙動から湾曲磁気浮上中の薄鋼板の振動特性について検討を行った。加振機にパルス波を入力した実験と正弦波を入力して周波数を掃引した実験を行い、湾曲磁気浮上中に大きく振動する固有振動数などの振動特性を得た。また湾曲磁気浮上中の鋼板と同様の条件で振動解析を行い、実験の際に大きく振動している周波数のモード形状を得て、磁気浮上した鋼板の振動モードを明らかにした。

第4章 外乱状況下における湾曲磁気浮上制御システムの評価

第4章では前章で得られた湾曲磁気浮上中の鋼板の振動特性から、最も浮上性能が劣化すると考えられる条件で電磁石を鉛直方向に加振して磁気浮上実験を行った。外乱が入力された際の浮上性能を向上させるアプローチとして、本章では従来用いられている最適制御理論に加えて、モデル化誤差に対してロバスト性を持つスライディングモード制御理論とフィードバック制御とフィードフォワード制御を併用した制御モデルを構築し、それぞれ湾曲磁気浮上システムに適用して浮上実験を行い、浮上確率により浮上安定性を評価した。その結果、フィードバック・フィードフォワード併用型の制御モデルを導入することで、高い浮上安定性が得られることを明らかにした。

第5章 結論

第5章は本論文の結論を述べた。第2章、第3章、第4章の解析や実験を通して得られた本研究の成果を総合して述べるとともに、将来の展望、今後取り組むべき課題について述べた。

1.2 研究背景

近年，電磁力を応用した技術に関する研究・開発が積極的に行われている[1-1]-[1-20]．電磁力技術を応用した装置・製品の代表的な例としては，回転モータやリニアモータ，電子レンジ，IH調理器，MRI診断機[1-21]などがあり，産業用の製品や医療機器，生活に身近な家電製品など幅広い分野において電磁力技術を利用した製品が存在する．また，磁気浮上技術を応用した研究・開発も積極的に行われている．電磁力を利用した磁気浮上技術の応用には，リニアモーターカ[1-22],[1-23]や磁気ベアリングによる磁気浮上ロータ[1-24]などがある．

本研究の対象としている磁気浮上技術は，非接触で物体を支持，搬送を行うことが可能であるため，物体の接触による摩擦が発生しない．そのため，摩擦によるエネルギー損失が発生することなく，潤滑油も必要がないため，環境を汚染しない．また，装置自体をメンテナンスフリーとすることが可能であると考えられる．近年，省エネルギー化やSDGsを推進していくことが社会の課題であるが，磁気浮上技術は環境問題へ貢献できるポテンシャルを有していると考えられる．

本研究は電磁石によって磁場を発生させ薄鋼板を非接触支持し，その際に生じる鋼板の弾性振動を抑制して安定した磁気浮上装置の構築を目的としている．将来的な応用としては，鉄鋼製造プロセスにおける切板の磁気浮上搬送を目指している．また薄鋼板の磁気浮上制御は，弾性振動の発生や板の柔軟性による変形，電磁石の磁場の非線形性など，解決すべき課題が多数存在するテーマであり他の研究例がほとんどない．そのため，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．

1.3 磁気浮上技術の概要

1.3.1 浮上支持力の発生原理

磁気浮上を行うためには、浮上対象に磁力を与える必要がある。浮上対象を鉄などの磁性体とする場合、支持側と浮上対象が引き合う力（吸引力）を利用する。電磁石と浮上対象の性質によっては反発力を発生させることも可能である。

磁力を発生させる物体は大きく分けて永久磁石、常電導電磁石、超電導電磁石がある。以下にそれぞれの特徴を示す。

(1) 永久磁石

常電導状態において外部からの磁界やエネルギーなどを与えなくても定常的に自ら磁場を発生する。

(2) 常電導電磁石

鉄心(コア)にコイルを巻き、コイル電流を流すことにより磁化曲線に従って磁場を発生する。

(3) 超電導電磁石

超伝導体のコイルを流れる電流によって磁場を発生するものであり、大電流を用いて強力な磁場を得ることが可能である。コイルを短絡させた場合には永久電流が流れ、外部からのエネルギーなしに磁場を保持できる。超電導状態維持するためには温度を臨界温度以下に保つ必要がある。

1.3.2 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[1-25]。

(1) 装置と物体の非接触化

磁気浮上を行うことで装置と物体の非接触化が可能となり、摩擦・摩耗の問題が改善される。そのため搬送装置がメンテナンスフリーとなり、半永久的に使用可能となる。また、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。クーロン摩擦がなくなるため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。

(2) 使用環境

潤滑剤が不要のため，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．また，磁場に影響を与えない壁であれば，壁越しに物体を浮上させられる可能性もある．

(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，その形状を変化させることなく支持することができる．

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

制御用のセンサや計算機が必要なため従来の方式と比較して，価格が高くなる場合がある．

(3) フェイルセーフ問題

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えておく必要がある．

(4) 磁化

物体に磁場をかけるため，磁化する可能性がある．

このように磁気浮上技術のデメリットはいくつか存在するが，非接触による摩擦・摩耗レス化などのメリットから，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．

1.4 従来の磁気浮上技術

電磁石によって物体を非接触支持する場合，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．基本的な制御原理は，浮上対象の状態を検出し，その情報に基づいて制御量を計算し，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非接触支持状態を実現する．磁気浮上制御による物体の運動はおおまかに回転運動か並進運動に分類することができる．また，浮上対象は球体や構造物などの剛体が多く，鋼板を浮上対象としている研究は少ない．

1.4.1 浮上対象が回転運動をする場合

磁気浮上技術の中でも，物体の回転運動を制御する研究が行われている．代表的な研究は，磁気軸受や，磁気軸受を応用したベアリングレスモータが存在する．これらの研究分野は，ベアリングレスによるモータの高効率化・高寿命化や血液ポンプなどの医療分野への適用が期待されている．

以下に回転運動の磁気浮上制御に関する研究事例を列記する．

- 大島らは，永久磁石型ベアリングレスモータを提案するため，半径方向力を発生するのに必要な半径方向位置制御巻線電流を導き，半径方向力と電流，電圧の関係を明らかにしている．この関係から，半径方向力が効率的に得られる永久磁石の厚さの決定方法を提案している [1-26].
- 上野らは，磁気軸受の機能とモータの機能を併せ持つセルフベアリングモータであるアキシヤル型セルフベアリングモータを提案している．解析と実験より，制御手法について提案し，アキシヤル方向力とトルク特性について検討することで，その有用性について述べている [1-27].
- 栗田らは，磁気浮上モータの安定性向上のため，半径方向に2軸の制御と回転にベアリングレスモータを用い，軸方向の変位とロータの傾きの3自由度制御にアキシヤル磁気ベアリングを用い5自由度能動制御型磁気浮上モータを提案している [1-28].

- Asano らは，ベアリングレスモータの始動能力と安定した磁気サスペンションを実現するため，エアギャップを大きく確保することを目的に，4軸制御ベアリングレスモータの設計最適化法について検討している [1-29].
- Santosh は，磁気軸受に発生するエネルギー損失を低減を目的とした遺伝的アルゴリズムを用いた最適化手法の提案をしている [1-30].

以上のように，能動的な制御による軸受の非接触化に関する研究が多くなされている．

1.4.2 浮上対象が並進運動をする場合

並進運動の制御を対象とした磁気浮上制御は多数存在する [1-31]-[1-57]. 本研究における磁気浮上制御も浮上対象の並進運動を制御している．浮上対象の並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．

- 松村らは，1点支持の磁気吊り下げ系の運動方程式を構築し，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 [1-58].
- 滑川らは，球体を浮上対象とし，良好な過渡応答特性に加えてロバスト制御性能を有する制御システムを構築するため， μ -シンセシスを利用した H_{∞} DIA 制御を適用した磁気浮上システムを提案している [1-59].
- 森下らは，四点支持式磁気浮上車両を例とし，ゼロパワー制御磁気浮上を実現するための制御方式について述べ，制御対象の積載重量などのパラメータ変化が変化する場合のゼロパワー制御系設計方法の一例を示し，シミュレーションと実験によって，その妥当性について明らかにしている [1-60].
- 水野らは，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用いた荷重支持機構を提案している [1-61].
- Banerjee らは，巨大な電磁石（質量 2.6 kg）で固定されたガイドウェイに対して大きなギャップを保ちながら磁気浮上する電磁浮上システム（EMLS）用のコン

トローラーの設計と実装について述べている [1-62].

- David らは，高温超伝導体の電磁的挙動を有限要素法と臨界状態モデルを用いた数値解析を行う手法を提案しており，磁石と超伝導体を用いた磁気浮上システムの浮上力に関するシミュレーションと実験による比較を行っている [1-63].
- Mousa らは，磁気浮上システムの開発のための解析として，6自由度磁気浮上測位システムの反発磁気浮上力の計算手法を提案しており，永久磁石の磁力のポテンシャルとローレンツ力を考慮した解析手法を提案している [1-64].
- Postrekhin らは，超伝導体の上部に永久磁石を設置し，超伝導体が鉛直方向や水平方向に移動した場合に，超伝導体の位置や移動速度が，永久磁石に作用する浮上力にどのような影響があるか検討している [1-65].

これらの磁気浮上の研究事例における浮上対象は，球体や剛体の構造物であり，浮上対象は変形しないものとして考えることができる。

1.4.3 薄板を対象とする場合

現在自動車や電気製品その他の構造物として産業界に広く使われている板厚が 0.2 mm から 3.0 mm 程度の薄板は，材料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，コイル状または切板として生産される。特に冷間圧延を加えた冷延薄板は，寸法，形状等に高い精度で生産可能であり，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。

亜鉛めっき鋼板製造ライン (Fig. 1-1) では，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。また，ローラ側にも摩擦が発生するため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，ローラ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。

薄板を対象とした磁気浮上の研究事例を以下に列記する。

- 大路らは板厚 1 mm, 幅 70 mm, 長さ 240 mm アルミ板を浮上対象とし, 交流アンペール力による常電導誘導反発浮上方式による磁気浮上を実現している [1-66].
- Harigaya らは, 板厚 1.6 mm, 幅 260 mm, 長さ 290 mm の鋼板を磁気浮上させており, ギャップセンサやサイドスリップセンサを用いない磁気浮上制御を提案している [1-67].
- Suzuki らは, 板厚 0.18 mm, 幅 260 mm, 長さ 290 mm の鋼板を浮上対象としており, ツイストモード制御による浮上性能向上について検討している [1-68].
- Namerikawa らは, H_{∞} DIA 制御を用いた磁気浮上システムによって板厚 0.3 mm, 幅 500 mm, 長さ 500 mm の鋼板を磁気浮上させ, 浮上実験により, 提案したロバスト制御が鋼板の振動制御に有効であることを示した [1-69].

Fig. 1-2 に国内外の浮上対象が板材の磁気浮上技術に関する研究の浮上対象の面積と板厚の関係を示す。同図の左上に行くほど, 浮上対象はたわみやすく支持が難しくなるが, 柔軟な物体を浮上対象に選んでいる例が少ないことが分かる。これらの研究事例では, 板材を浮上対象としているが, 板材の面積が小さく, 板材自体の自重による変形の影響が生じないと考えられる。そのため, 浮上対象の変形が問題となるような柔軟な物体の磁気浮上の研究事例はほとんどない。また, 薄鋼板製造ラインでは, より大きな鋼板サイズに対応する磁気浮上システムが必要となる。

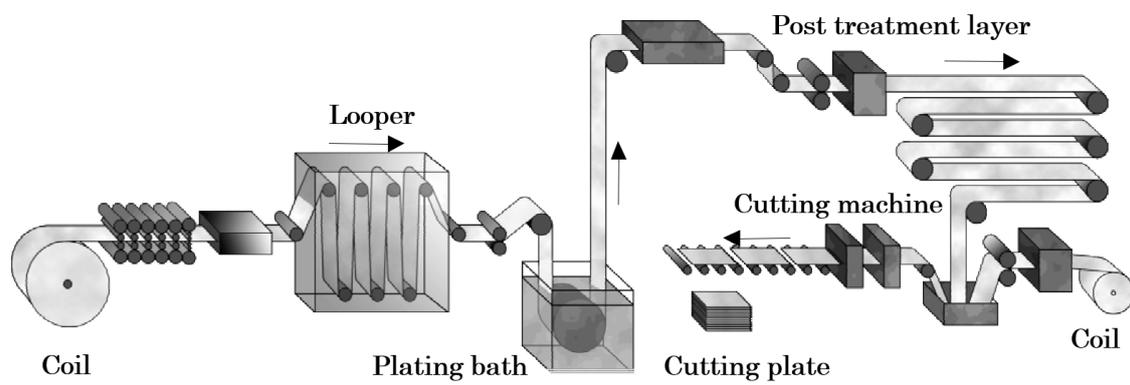


Fig. 1-1 Manufacturing process of zinc-coated steel plate

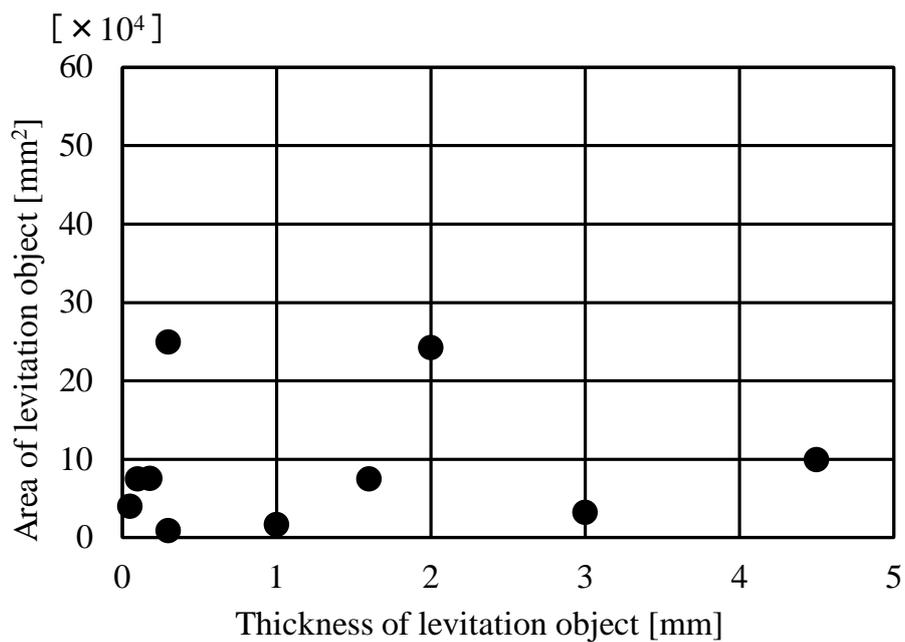


Fig. 1-2 Relationship between levitation target area and steel plate thickness [1-66]-[1-75]

1.5 本研究の目的

本研究では薄鋼板製造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。

1.3節で示したように，これまで研究されてきた磁気浮上技術のほとんどが浮上対象の剛性が高く，浮上対象自体の変形が問題とならない研究である。従来の研究として，磁気浮上システムの浮上安定性を確保するためには電磁石を用いたフィードバック制御による安定化が不可欠である。構築した磁気浮上装置に適切なフィードバック制御系を設計するためには，その数学的モデルを設計する必要がある。しかし実際の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ふ。

これらの不確かさが存在する場合においても，設計したモデルに対して実際の浮上対象の状態との誤差が生じなければ問題が無いが，磁気浮上システムは不安定系であることに加え，本研究の浮上対象である薄鋼板は，その薄さゆえに弾性振動やたわみを励起しやすく，その振動やたわみによって鋼板と電磁石の距離が変動するため，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。平板の曲げ剛性は次式によって表される。

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (1-1)$$

ここで， E :鋼板のヤング率 [N/m^2]， h :鋼板の厚さ [m]， ν :ポアソン比 [-]である。式(1-1)から，曲げ剛性は板厚の3乗で変化するため，薄鋼板は非常に曲げ剛性が低くたわみやすい。また，鋼板のたわみは板の大きさによっても変化するため，板厚が薄く，鋼板の面積が大きいほど磁気浮

上が困難である。つまり，Fig. 1-2 に示したグラフの左上の領域ほど安定した磁気浮上が困難となる。そこで，本研究では，浮上対象を，長さ $a = 800$ mm，幅 $b = 600$ mm，厚さ $h = 0.19$ mm の長方形亜鉛めっき鋼板 (SS400) と設定した。Fig. 1-3 に鋼板の概略図を示す。

Fig. 1-2 に前掲したグラフに本研究の浮上対象の板厚と面積をプロットしたグラフを Fig. 1-4 に示す。本研究の浮上対象の板厚と面積は，同図の四角でプロットの位置となる。そのため，柔軟性を有する薄鋼板の並進運動，弾性振動がいかなるメカニズムで浮上性能に影響を及ぼすかを振動工学の観点から理論的に解明することは学術的な意義が見込まれる。また，工場等における使用環境では何らかの外乱が磁気浮上性能に影響を及ぼすと考えられる。そのため外乱が加わることを前提とし，磁気浮上を安定化させる制御系設計をメカトロニクス，磁気工学の観点から行うことは，学術的な意義を有し，実験的検証によって工業的な発展性も十分見込めると考える。

また，従来の鋼板の搬送方法に対してコストが極端に高くなる磁気浮上システムでは，本研究の目的である鋼板搬送工程への磁気浮上システムの適用が困難になると考えられる。そのため，コストを最低限に抑えた磁気浮上システムが求められる。

一方，薄鋼板を磁気浮上させる場合，電磁石による吸引力が及ばない箇所ではたわみが生じるため，浮上性能が劣化する。たわみを発生させないためには，鋼板の全面に均一な吸引力をかけることが理想であるが，複数の支持体によって磁気浮上をする場合，磁場の強さには必ずムラができてしまう。また，電磁石や永久磁石を増やしてたわみを抑制し浮上性能を向上させることは，コストとトレードオフしてしまう。そこで，研究の目的を達成するためには，コストを抑えた磁気浮上システムを提案する必要があると考える。本論文では，薄鋼板搬送工程に磁気浮上による非接触搬送の適用を提案するため，湾曲磁気浮上システムについて検討する。薄鋼板はたわみ易く限られた電磁石数で支持が難しい。そこで，湾曲磁気浮上システムは，紙を持つときに湾曲させると持ちやすいという現象から着想を得て，あえて鋼板を湾曲させて磁気浮上させることで浮上安定性を向上させる磁気浮上装置であ

る．本論文は，湾曲磁気浮上システムの構築とその有用性について，解析や実験によって明らかにした．

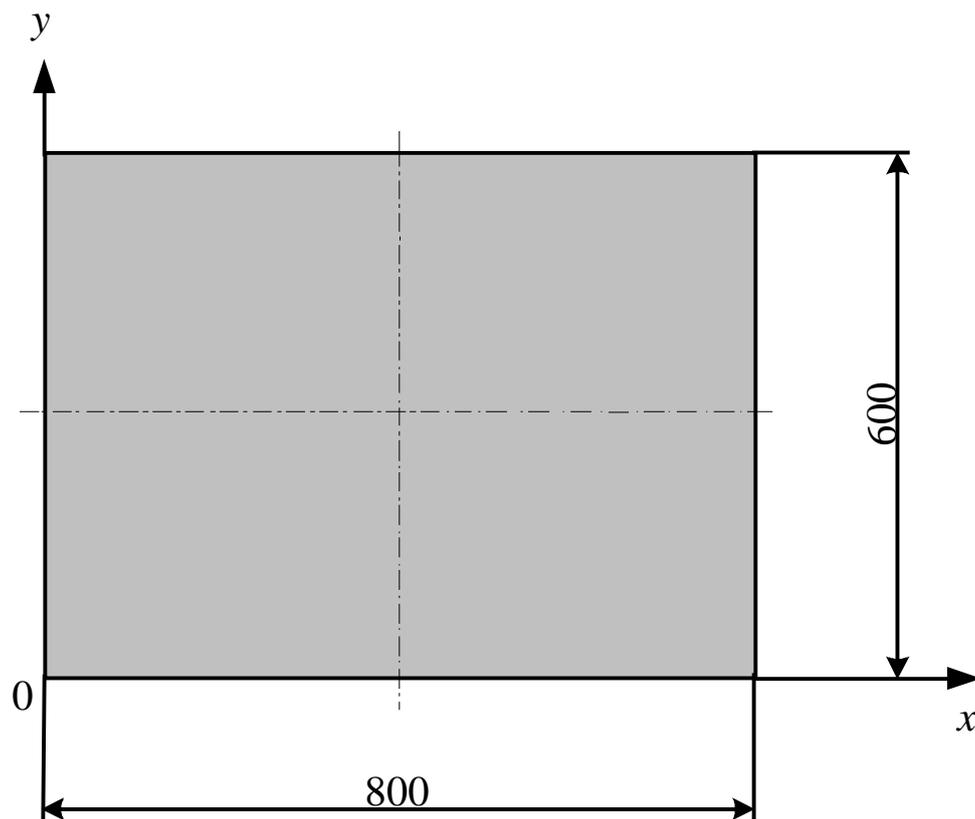


Fig. 1-3 Schematic diagram of steel plate

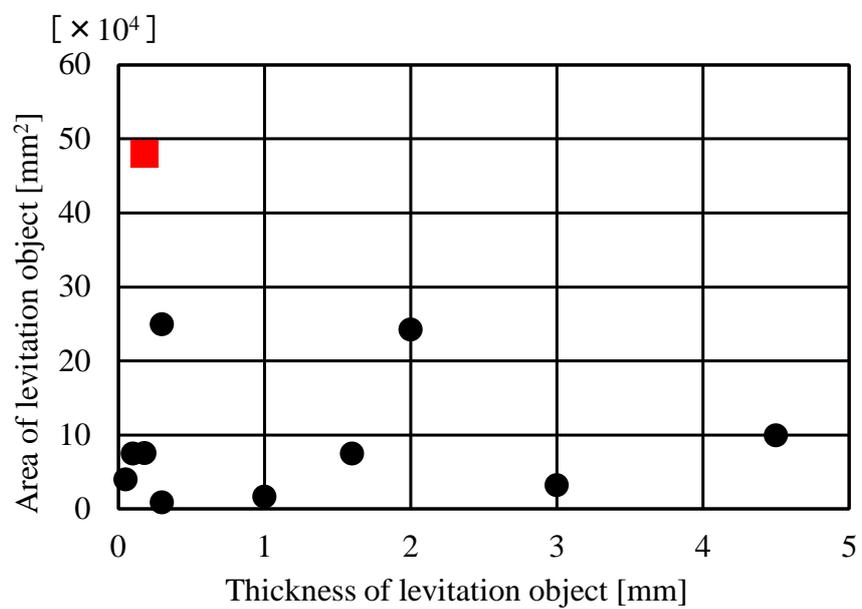


Fig. 1-4 Positioning of this study in electromagnetic levitation technology for plates [1-66]-[1-75]

第1章の参考文献

- [1-1] C. Navau, A. Sanchez, E. Pardo, Lateral Force in Permanent Magnet-Superconductor, Levitation Systems With High Critical Current, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 13, No. 2, pp. 2185-2188, (2003)
- [1-2] C. Elbuken, E. Shameli, M. B. Khamesee, Modeling and Analysis of Eddy-Current Damping for High-Precision Magnetic Levitation of a Small Magnet, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 43, No. 1, pp. 26-32, (2007)
- [1-3] K. Na, J. Yuan, S. Choi, Effects of Magnetic Field Annealing on a Micro-fluxgate Sensor, Proceedings of International Conference on Magnetics (INTERMAG), p. 134, (2006)
- [1-4] M. Ito, Y. Hamaguchi, Y. Takai, K. Ohashi, Noise Reduction of the Electroless Plated Soft Magnetic Under Layers by Annealing in a Magnetic Field, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 43, No. 6, pp.2301-2303, (2007)
- [1-5] S. Chen, Q. Zheng, S. Zhang, Q. Zhu, J. Wang, Q. Liu, Vortex Dynamics in Magnetic Nanodisks With a Ring of Magnetic Defects, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 51, No. 11, 4300504, (2015)
- [1-6] X. Han, Z. Wang, Q. Cao, Y. Feng, S. Zhang, L. Li, Numerical and Experimental Investigations on the Manipulation of Magnetic Particles in a Microsystem Using a Hybrid Magnet System, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 26, No. 4, 4401904, (2016)
- [1-7] Y. Liu, Q. Zhan, B. Wang, H. Li, Y. Wu, B. Chen, D. Sun, S.

- Mao, R. Li, Modulation of Magnetic Anisotropy in Flexible Multiferroic FeGa/PVDF Heterostructures Under Various Strains, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 51, No. 11, 2501404, (2015)
- [1-8] Q. Yang, F. Liu, Z. Zhao, D. Geng, S. Zhang, W. Yan, Development of an Alterable and Rotary Permanent Magnetic Field, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 20, No. 3, pp. 1001-1004, (2010)
- [1-9] C. Dobler, D. Wöckinger, G. Bramerdorfer, G. Goldbeck, W. Amrhein, Influence of the winding system on the measurement accuracy for characterising soft magnetic materials, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 564, Part1, 170004, (2022)
- [1-10] D. Roger, M. Rossi, H. Ichou, J. Blaszkowski, Magnetic behaviour of GOES wound cores of transformers fed by square or sine voltages, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 564, Part1, 170032, (2022)
- [1-11] K. Dong, Y. Yang, M. Zhang, R. Wang, Y. Lu, Analysis and design of an immunity test platform against D.C. and power-frequency magnetic field, Fusion Engineering and Design, Vol. 172, 112776, (2021)
- [1-12] X. Xiao, T. Li, X. Fan, C. N. Kim, Influence of the orientation of the magnetic field on the MHD unaligned isothermal flows, Fusion Engineering and Design, Vol. 173, 112806, (2021)
- [1-13] A. Lauria, P. Arpaia, M. Buzio, A. Gilardi, M. Parvis, M.

- Pentella, L. Sabbatini, E. Simoni, A. Vannozzi, Rotating-Coil Measurement System for Small-Bore-Diameter Magnet Characterization, *sensors* Vol. 22, No. 21, 8359, (2022)
- [1-14] B. Li, B. Yang, F. Xiang, J. Guo, H. Li, The Source Structure Design of the Rotating Magnetic Beacon Based on Phase-Shift Direction Finding System, *sensors* Vol. 22, No. 21, 8304, (2022)
- [1-15] I. Shimizu, K. Yamashita, E. Tokunaga, Development of a Simple Fabrication Method for Magnetic Micro Stir Bars and Induction of Rotational Motion in *Chlamydomonas reinhardtii*, *micromachines*, Vol. 13, No. 11, 1842, (2022)
- [1-16] B. Tian, S. Wen, X. Li, J. Ju, J. Tang, N. Xiong, PFMD: A Power Frequency Magnetic Anomaly Signal Detection Scheme Based on Synchrosqueezed Wavelet Transform, *applied sciences*, Vol. 12, No. 21, 10735, (2022)
- [1-17] C. Ostojic, G. Serrano, P. Ferrada, M. Escalona, V. Jiménez, M. T. González, A. Maureira, A. Panico, M. Zapata, M. Rivas, Effect of Static Magnetic Fields on the Composition of Marine Biofouling in Seawater Transportation Pipelines, *water*, Vol. 14, No. 21, 3362, (2022)
- [1-18] S. V. Belim, I. V. Bychkov, A Study of Magnetic Properties in a 2D Ferromagnetic Nanolattice through Computer Simulation, *nanomaterials*, Vol. 12, No. 20, 3705, (2022)
- [1-19] H. Elsherbiny, L. Szamel, M. K. Ahmed, M. A. Elwany, High Accuracy Modeling of Permanent Magnet Synchronous Motors Using Finite Element Analysis, *mathematics*, Vol. 10,

- No. 20, 3880, (2022)
- [1-20] Y. Shiao, M. B. Kantipudi, C. Weng, New Actuation Control for Hybrid Electromagnetic Valve Train, applied sciences, Vol.12, No. 20, 10449, (2022)
- [1-21] MRI 診断機 https://jp.medical.canon/general/mri_qa.
- [1-22] リニア中央新幹線, <https://linear-chuo-shinkansen.jr-central.co.jp/>
- [1-23] 愛知高速交通株式会社リニモ, <http://www.linimo.jp/>
- [1-24] 磁気浮上ロータ, <https://premium.ipros.jp/screen-sv/catalog/detail/600602/>
- [1-25] 日本機械学会編, 電磁力応用機器のダイナミックス, コロナ社, pp.4-5, (1990)
- [1-26] 大島政英, 宮澤悟, 泥堂多積, 千葉明, 中村福三, 深尾正, 永久磁石型ベアリングレスモータの解析と基礎特性, 電気学会論文誌D (産業応用部門誌), Vol. 115, No. 9, pp. 1131-1139, (1995)
- [1-27] 上野哲, 岡田養二, 永久磁石アキシヤル型セルフベアリングモータのアキシヤル方向力とトルク特性およびその制御, 電気学会論文誌D (産業応用部門誌), Vol. 119, No. 3, pp. 282-290, (1999)
- [1-28] 栗田伸幸, 石川赴夫, 手塚孝幸, 高田敬夢, 5自由度能動制御型磁気浮上モータに関する研究, 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 79, No. 801, pp. 1461-1474 (2013)
- [1-29] Y. Asano, A. Mizuguchi, M. Amada, J. Asama, A. Chiba, M. Ooshima, M. Takemoto, T. Fukao, O. Ichikawa, D. G. Dorrell, Development of a Four-Axis Actively Controlled

- Consequent-Pole-Type Bearingless Motor, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 45, No. 4, pp. 1378-1386, (2009)
- [1-30] S. Santosh, Loss analysis of radial magnetic bearing using genetic algorithm and gradient based method, Materials Today :Proceedings ELSEVIER, (2022)
- [1-31] 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)
- [1-32] 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)
- [1-33] 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)
- [1-34] 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)
- [1-35] 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)
- [1-36] K. Fujita, T. Sugiura, Characterization of LCR Parallel-Type Electromagnetic Shunt Damper for Superconducting Magnetic Levitation. Actuators, Vol. 11, No. 8, 216, (2022)
- [1-37] Laith S. I. Ciprian L. Hamid A. Design of Adaptive-RST Controller for Nonlinear Magnetic Levitation System Using

- Multiple Zone-Model Approach in Real-Time Experimentation. *Applied System Innovation*, Vol. 5, No. 5, 93, (2022)
- [1-38] Lidia M. B., Eva S., Antonio F. C., José A. S., Rafael M. Generalised Proportional Integral Control for Magnetic Levitation Systems Using a Tangent Linearisation Approach. *Mathematics*, Vol. 9, No. 12, 1424, (2021)
- [1-39] Nihal D., Dipankar D., Muyeen S. M. A Reference Model Assisted Adaptive Control Structure for Maglev Transportation System *Electronics*, Vol. 10, No. 3, 332, (2021)
- [1-40] Rahul S. G., Soundarya S., Kavitha P., Yuvaraja T., Ramya K., Shabana U., Enhanced Model Reference Adaptive Control Scheme for Tracking Control of Magnetic Levitation System. *Energies*, Vol. 14, No. 5, 1455, (2021)
- [1-41] C. Emil, Permanent Magnet Levitation Stabilized by Diamagnetic Materials: A case-study, *Proceedings of 6th International Conference on Computational Electromagnetics*, (2006)
- [1-42] C. Liu, S. Lin, Y. Yang, An Efficient Electromagnetic Model for Operational Behavior Predictions of a Non-contacting Industrial Steel Plate Conveyance System. *Proceedings of International Conference on Magnetism (INTERMAG)*, p. 812, (2006)
- [1-43] C. Lorin, I. Rasoanarivo, A. Colteu, A. Mailfert, Design and Optimization by z^n Complex Function of Magnet Electric

- Poles in order to obtain Magnetic Levitation, Proceedings of Annual Conference of Industrial Electronics Society, pp. 1035-1041, (2006)
- [1-44] D. Casini, A. Musolino, M. Raugi, R. Rizzo, E. Tripodi, Passive MAGLEV armature stabilization Proceedings of 17th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology, (2014)
- [1-45] U. Hasirci, A. Balikci, Z. Zabar, L. Birenbaum, 3D FEM analysis of a novel magnetic levitation system, Proceedings of 17th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology, (2014)
- [1-46] E. Perini, G. Giunchi, M. Geri, A. Morandi, Experimental and Numerical Investigation of the Levitation Force Between Bulk Permanent Magnet and M_gB_2 Disk, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 19, No. 3, pp.2124-2128, (2009)
- [1-47] G. Dhanya, E. Varghese, Fractional stabilizing controller for a magnetic levitation system, Proceedings of 2017 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT), (2017)
- [1-48] Gerald Küstler, Extraordinary Levitation Height in a Weight Compensated Diamagnetic Levitation System With Permanent Magnets, IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 48, No. 6, pp.2044-2048, (2012)
- [1-49] H. Chetouani, C. Jeandey, V. Haguët, H. Rostaing, C. Dieppedale, G. Reyne, Diamagnetic Levitation With

- Permanent Magnets for Contactless Guiding and Trapping of Microdroplets and Particles in Air and Liquids, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 42, No. 10, pp.3557-3559, (2006)
- [1-50] M. Ebrahimian, M. Khodabakhsh, G. Vossoughi, An Analytical 3-D Model for Calculating Eddy-Current Damping Force for a Magnetic Levitation System With Permanent Magnet, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 48, No. 9, pp. 2472-2478, (2012)
- [1-51] S. Zhang, X. Dang, K. Wang, J. Huang, J. Yang, G. Zhang, An Analytical Approach to Determine Coil Thickness for Magnetically Levitated Planar Motors, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 22, No. 1, pp. 572-580, (2016)
- [1-52] T. E. Alberts, G. Oleszczuk, A. M. Hanasoge, Stable Levitation Control of Magnetically Suspended Vehicles with Structural Flexibility, Proceedings of 2008 American Control Conference, (2008)
- [1-53] W. He, J. Zhang, S. Yuan, A. Yang, C. Qu, A Three-Dimensional Magneto-Electric Vibration Energy Harvester Based on Magnetic Levitation, IEEE Magnetics Letters, Vol.8, 6104703, (2017)
- [1-54] M. Osipov, D. Abin, S. Pokrovskii, I. Rudnev, Levitation Force of Magnetized HTS Tape Stacks, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 27, No. 4, 3601504, (2017)

- [1-55] G. Zhang, J. Zhu, Y. Li, Y. Yuan, Y. Xiang, P. Lin, L. Wang, J. Liu, L. Liang, Z. Deng, Simulation of the Braking Effects of Permanent Magnet Eddy Current Brake and Its Effects on Levitation Characteristics of HTS Maglev Vehicles, actuators, Vol. 11, No. 10, 295, (2022)
- [1-56] J. Huang, S. Xie, Z. Song, S. Li, J. Ruan, Theoretical and Experimental Study on Claw-Pole Magnetic Levitation Torque Motor for 2D Valve Using Cogging Torque, actuators, Vol. 11, No. 10, 301, (2022)
- [1-57] M. Trbušić, M. Jesenik, M. Trlep, A. Hamler, Energy Based Calculation of the Second-Order Levitation in Magnetic Fluid, mathematics, Vol. 9, No. 19, 2507, (2021)
- [1-58] 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).
- [1-59] 滑川徹, 瀬戸洋紀, μ -シンセシスを用いた磁気浮上システムの H_{∞} DIA 制御, 日本機械学会論文集(C編), Vol. 71, No. 708, pp.2509-2516, (2005).
- [1-60] 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(産業応用部門誌), Vol. 108, No. 5, pp.447-454, (1988).
- [1-61] 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).
- [1-62] S. Banerjee, T. K. Sunil Kumar, J. Pal, D. Prasad, Controller

- Design for Large-Gap Control of Electromagnetically Levitated System by Using an Optimization Technique, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 16, No. 3, pp. 408-415, (2008)
- [1-63] D. Ruiz-Alonso, T. A. Coombs, A. M. Campbell, Numerical Analysis of High-Temperature Superconductors With the Critical-State Model, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 14, No. 4, pp.2053-2063, (2004)
- [1-64] M. Lahdo, T. Ströhla, S. Kovalev, Repulsive Magnetic Levitation Force Calculation for a High Precision 6-DoF Magnetic Levitation Positioning System, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 53, No. 3, 7200106, (2017)
- [1-65] E. Postrekhin, K. B. Ma, H. Ye, W. Chu, Dynamics and Relaxation of Magnetic Stress between Magnet and Superconductor in a Levitation System, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, pp.1984-1987, (2001)
- [1-66] 大路貴久, 佐藤正章, 飴井賢治, 作井正昭, 非磁性金属薄板の内部渦電流に対する交流アンペール力発生法と誘導反発式磁気浮上への効果, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), Vol. 128, No. 3, pp. 236-243, (2008)
- [1-67] N. Harigaya, I. Oikawa, T. Nakagawa, Non-contact Conveyance Experiments for a Steel Plate under Levitation and Guidance Control without using Gap Sensors and Sideslip Sensors, Proceedings of 2019 12th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications

(LDIA)

- [1-68] O. Suzuki, D. Nagashima, K. Nishimura, T. Nakagawa, Magnetic Levitation Control by Considering the Twisting Mode of a 0.18 mm Thick Steel Plate, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 51, No. 11, 2015
- [1-69] T. Namerikawa, D. Misutani, S. Kuroki, Robust H^∞ DIA Control of Levitated Steel Plates, IEEJ Transactions on Industry Applications, Vol. 126, No. 10, (2006)
- [1-70] T. Nakagawa, T. Takada, Magnetic Levitation of 0.1-mm-thick Steel Plate Considering its Flexibility and Inductance Characteristics, IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 7, No. 4 pp.314-320, (2018)
- [1-71] 秋山涼介, 鳥居肅, 岩下聡, 高周波駆動の誘導反発型磁気浮上装置における非磁性導体の導電率の影響, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), Vol. 133 No. 11 pp. 1097-1103, (2013)
- [1-72] 岩下聡, 鳥居肅, 吸引磁気浮上における振動周波数可変方法の提案, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), Vol. 135 No. 5 pp. 475-480, (2014)
- [1-73] C. Liu, Y. Yang, S. Lin, Online Realizations of Dynamic Gap Detection and Control for Levitated Industrial Steel-Plate Conveyance System, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 49, No. 5, (2013)
- [1-74] 遠藤文人, 嘉山周汰, 椎名敦紀, ムハマドヌルハキミビンモハマドカマ, 小川和輝, 池田圭吾, 加藤太朗, 成田正敬, 加藤英晃, 水平方向からの磁場を用いた柔軟鋼板の磁気浮

上 (浮上中の振動特性に関する基礎的検討), 磁気学会論文特集号, Vol. 6, No. 1, (2022)

- [1-75] J. S. Choi, Y. S. Baek, Magnetically-Levitated Steel-Plate Conveyance System Using Electromagnets and a Linear Induction Motor, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 44, No. 11, (2008)

第 2 章 湾曲磁気浮上システム の構築と基礎特性

2.1 はじめに

本章では、薄鋼板の磁気浮上システムの構築について述べている。薄鋼板を磁気浮上させる場合、鋼板のたわみを抑制するためには、鋼板全面に均一に吸引力を与えて浮上させることが理想と考えられるが、永久磁石や電磁石が発生させる磁場の強さは非線形であり、空隙距離の2乗で変化する。そのため、鋼板に作用する磁場は必ずムラができる。鋼板全面に完全に均一な吸引力を与えることは困難である。また、鋼板に対して広範囲に吸引力を与えるためには、支持体を増やす必要がありコストが増加する。そこで、本研究では、限られた電磁石ユニットのみで薄鋼板を安定して磁気浮上させることを目標に、薄鋼板の浮上安定性の阻害要因であった柔軟性を積極的に利用した湾曲磁気浮上システムを提案した。本章では、装置の構成や使用した機器、アクチュエータである電磁石について述べた。また、薄鋼板のモデリングや最適制御理論を用いた制御システム[2-1]-[2-3]の構築について述べている。

構築した湾曲磁気浮上システムによって板厚 0.19 mm 鋼板の磁気浮上実験を行い、変位標準偏差と浮上確率による評価によって、湾曲磁気浮上システムの有用性と、最適な電磁石角度について明らかにした。

2.2 実験装置の構成

実験に使用した装置の概略図を Fig. 2-1 に示す。また、実験装置の写真を Fig. 2-2 に示す。電磁石ユニットの配置を Fig. 2-3 に示す。以下に装置各部について説明する。

制御ユニットはエムアイエス株式会社 Seagull mini の DSP を使用する。サンプリング周波数は 1000 Hz とした。

実験装置本体は肉厚 3 mm の 100×100 mm アルミ角材により構成されており、L 型アングル及び三角プレートをボルト止めして組み立てた。実験装置の主要部分であるため丈夫さを重視し設計を行った。底面には、装置を設置する床面に振動が伝わらないよう全面に 10 mm の防振ゴムが張り付けた。湾曲浮上実験を行う目的により電磁石ユニットを Fig. 2-3 に示した No. 1 ～ No. 4 までは傾けることができ、No. 5 を下方にスライド可能な機構になっている。また鋼板を浮上位置まで移動する装置として支持台を使用する。支持台は柔軟な材質を使用しており、浮上時と同じ湾曲形状を再現したまま、ジャッキによって浮上位置まで鋼板を移動することが可能な装置である。支持台の写真を Fig. 2-4 に示す。電磁石は E 型フェライトコアに $\phi 0.5$ mm のエナメル線を 1005 回巻いたものを使用した。この電磁石を変位センサを挟む形で 2 個配置し、直列接続で使用した。電磁石ユニットの構造を Fig. 2-5 に示す。

磁気浮上中の鋼板に振動を与えるため、電磁石を設置しているフレームの下に加振器を設置する。加振器は DSP からの外乱信号を使用し、アンプで増幅された電流により加振を行う。使用した加振器の仕様を Table 2-1 に示す。加振器の写真を Fig. 2-6 に示す。

変位及び速度の検出のために次の渦電流非接触変位計を使用した。その仕様を Table 2-2 に示す。なお、渦電流非接触変位計は電磁石の磁場の影響を受けないことを予備実験で確認している。

電磁石に流れる電流を検出するため、アンプと電磁石ユニットの間に抵抗部を設け電流を計測した。使用した抵抗部を Fig. 2-7 に示す。

電磁石ユニットに制御電圧を加えるための制御用アンプを使用した。No. 1 ～ No. 4 のアクチュエータのアンプ

の写真を Fig. 2-8, No. 5 のアクチュエータのアンプの写真
を Fig. 2-9 に示す.

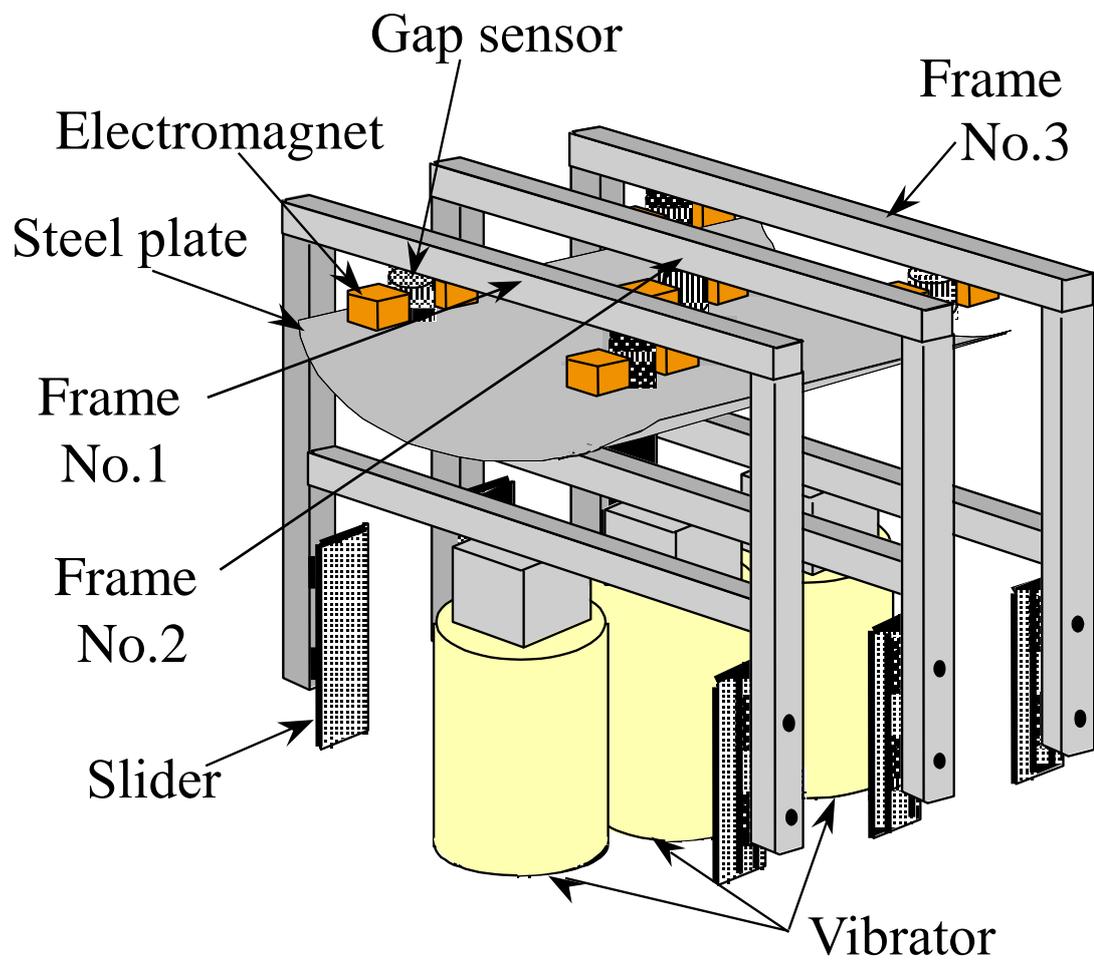


Fig. 2-1 Schematic illustration of experimental apparatus [2-4]

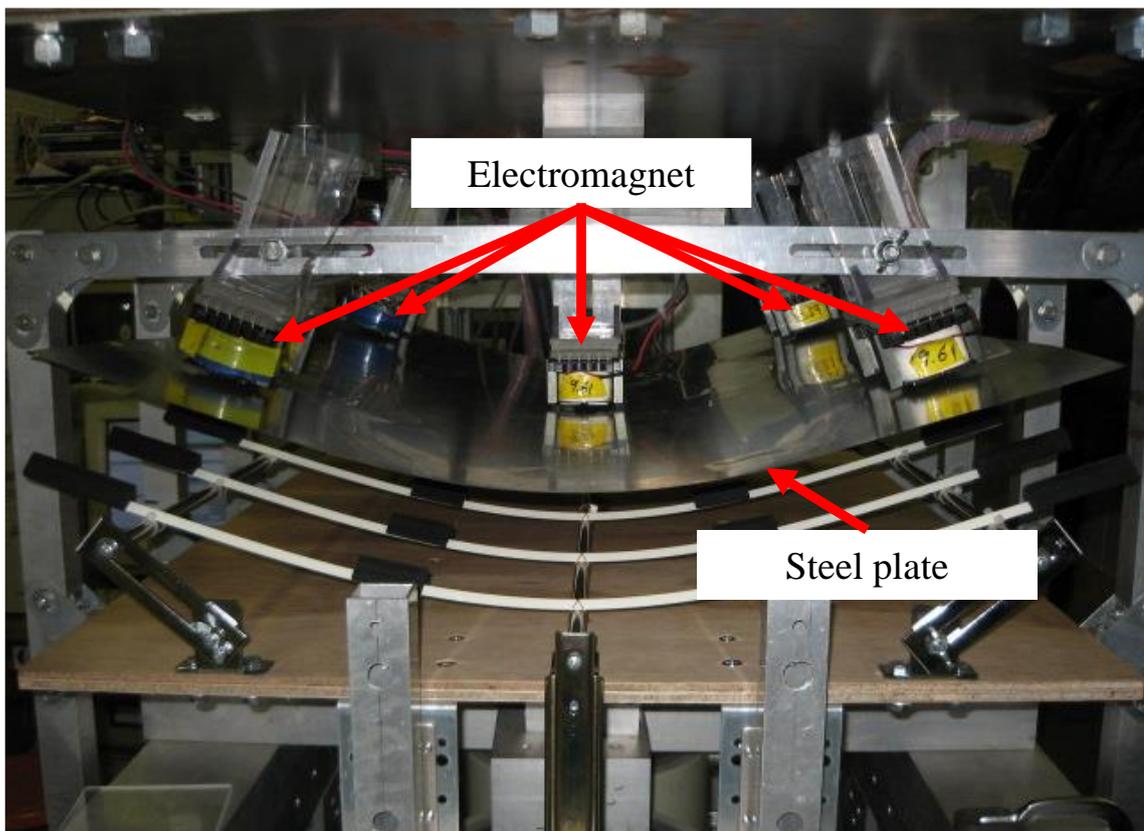


Fig. 2-2 Photograph of experimental apparatus

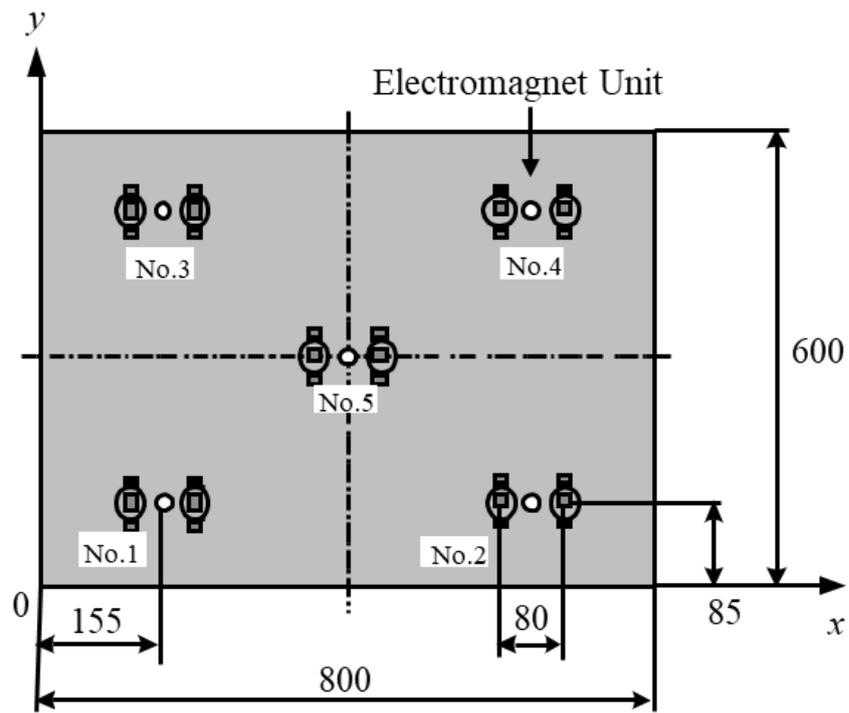


Fig. 2-3 Electromagnet arrangement

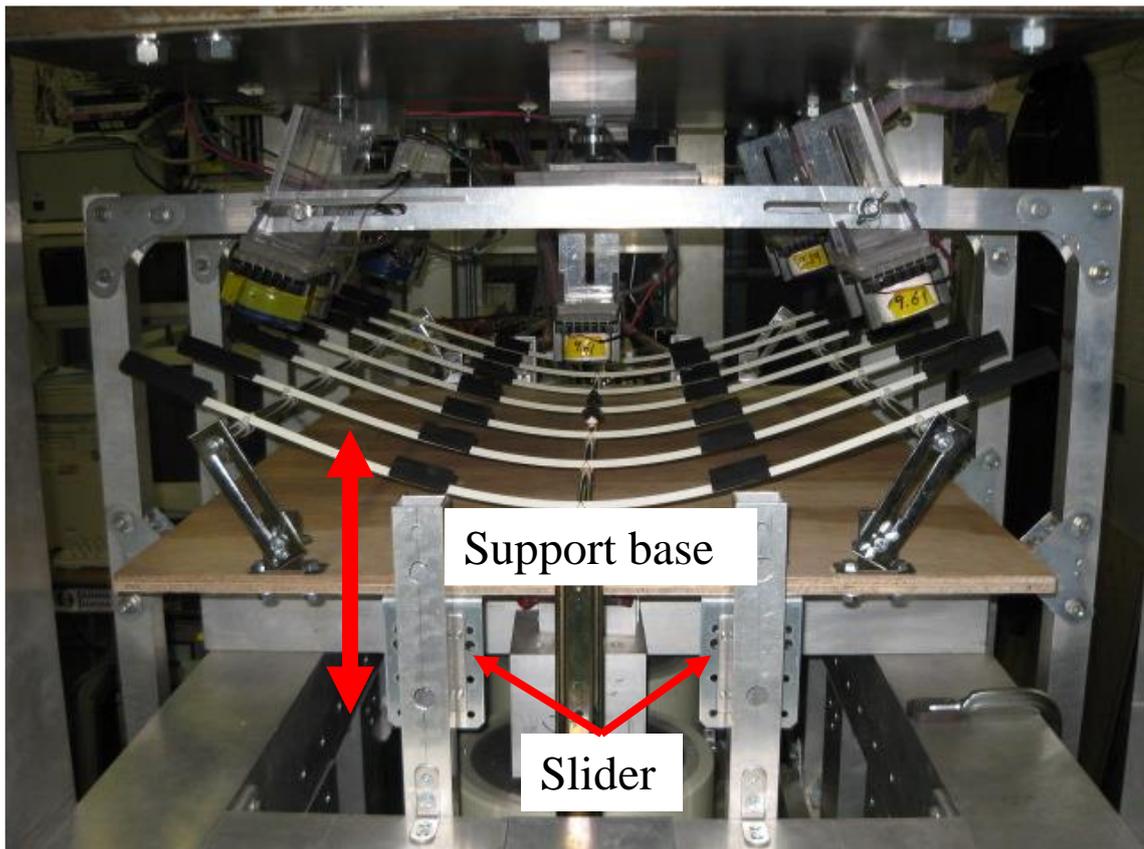


Fig. 2-4 Photograph of support base

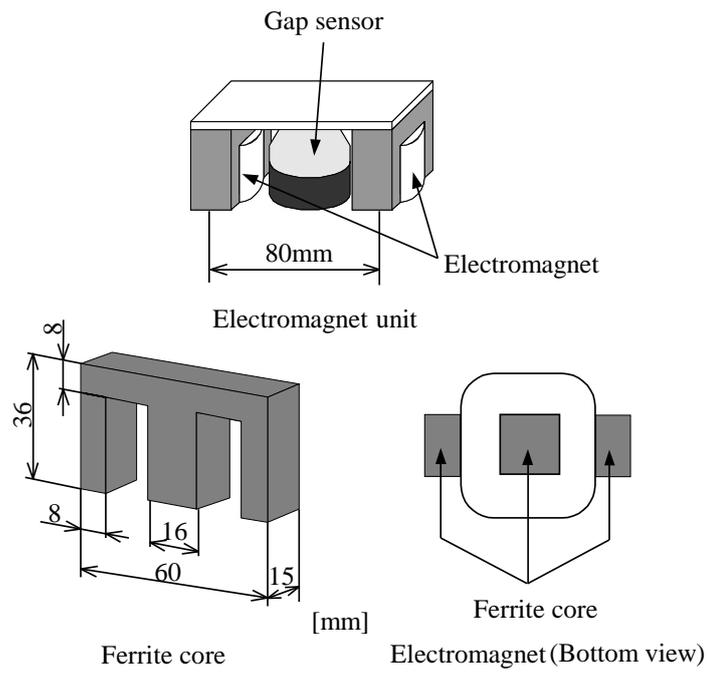


Fig. 2-5 Schematic illustration of electromagnet



Fig. 2-6 Photograph of vibrator

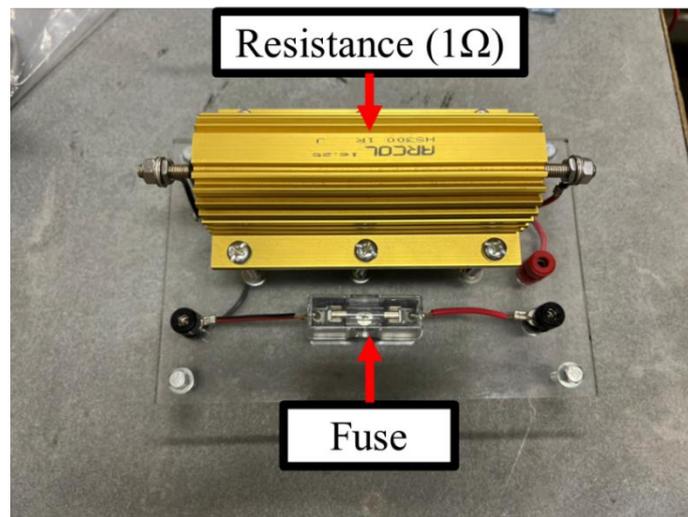


Fig. 2-7 Photograph of the resistance part



Fig. 2-8 Photograph of amplifier (1ch ~ 4ch)



Fig. 2-9 Photograph of amplifier (5ch)

Table 2-1 Vibrator

エミック株式会社 製 加振器 513-B	
最大加振力	98.1 N \pm 5%
最大加速力	264.8 m/s ² \pm 5%
周波数範囲	3 Hz \sim 13 kHz
軸共振周波数（無負荷時）	12.5 kHz \pm 5%
ばね定数	15 kgf/cm
最大入力電流	5.5 A \pm 5%
可動部質量	0.35 kg
最大速度	1.17 m/s
最大振幅（両振幅）	10 mm
インピーダンス（200Hz）	2.9 Ω \pm 5%
質量	約 26 kg

Table 2-2 Displacement sensor

株式会社センテック 製 LS-500 シリーズ	
コントローラ型式	LS-500-15
検出ヘッド型式	HA-302S
測定範囲	0~15 mm
出力電圧	0~1.865 V
直線性	1% of F.S
分解能	0.03% of F.S
応答性	DC~10 kHz
出力インピーダンス	52 Ω
温度ドリフト	コントローラ:0.01% of F.S/°C センサヘッド:0.02% of F.S/°C
使用温度	コントローラ:-10~60 °C センサヘッド:-20~70 °C
電源	AC100V/AC200V \pm 15% 50/60Hz

※ F.S=Full Scale

2.3 湾曲時の鋼板と電磁石位置の関係 [2-1]

鋼板を湾曲させて磁気浮上を行う際、電磁石ユニットの角度を変更することで、鋼板を湾曲させる。電磁石ユニットはフレームの取付け点を軸として回転させて角度の変更を行う。その際、電磁石が発生する磁場を鋼板に対して同じ位置に加えるためには電磁石間の距離を変更する必要がある。また中央の電磁石ユニットに関しては、鋼板の湾曲度合いに合わせて上下に動かす必要がある。これらの電磁石ユニットの位置は、鋼板の自然なたわみ形状を基に算出した。電磁石角度ごとの電磁石ユニット位置を Fig. 2-10 に示す。

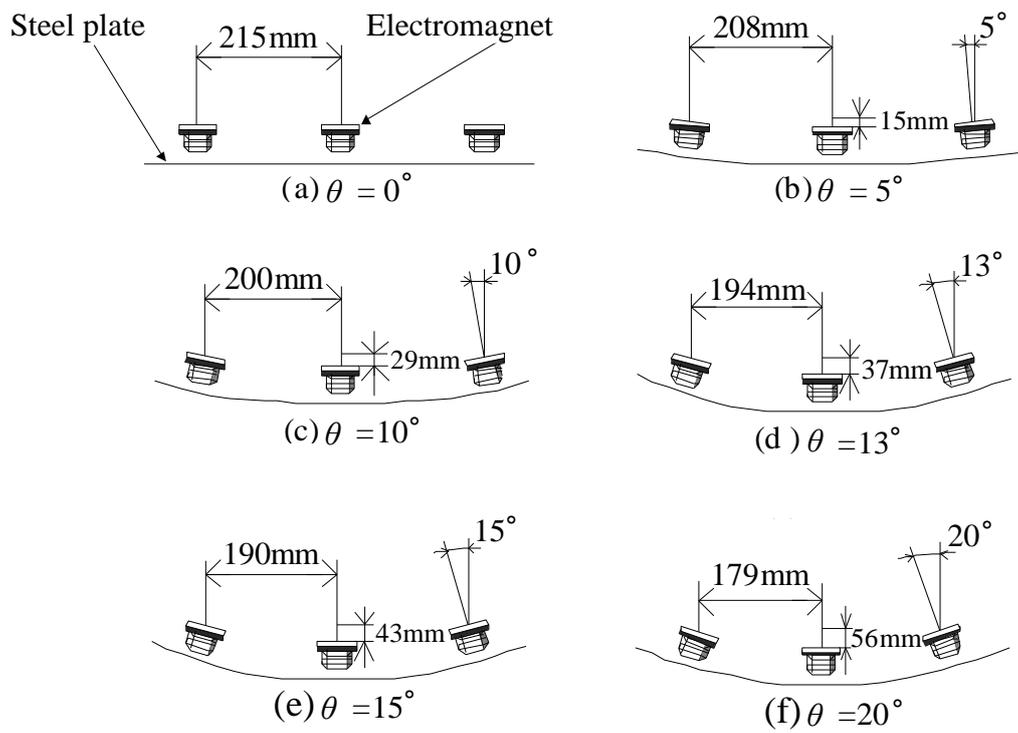


Fig. 2-10 Relationship between electromagnet angle and shape of steel plate

2.4 薄鋼板のモデリング [2-1]

2.4.1 仮想質量の運動方程式

本研究では鋼板のモデリングの1つとして簡易な1自由度モデルを採用する。1自由度モデルでは鋼板を各電磁石に対する5つの仮想質量に分割し、分割した質量の変位、速度および対応する電磁石コイル電流の定常値からの変動分をその電磁石のみにフィードバックすることで制御を行う。1自由度モデルの概略図を Fig. 2-11 に示す。電磁石からの静的吸引力によって仮想質量に分割した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は以下のようになる。

$$m_z \frac{d^2}{dt^2} z(t) = 2f_z(t) \quad (2-1)$$

ここで、 m_z : 鋼板を仮想的に5つに分割した質量 [kg], z : 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] である。

2.4.2 電磁石に関するモデリング

薄鋼板を非接触支持するために設置している任意の1つの電磁石に着目し、1自由度系の磁気浮上モデルを考える。電磁石コア内部の磁界を H 、空隙の磁界を H_0 とするとアンペールの周回積分の法則より

$$Hl + H_0 \cdot 2\gamma = \frac{1}{2} N_r I \quad (2-2)$$

となる。ここで、 l は磁路の長さ [m], γ は空隙距離 [m], N_r はコイルの巻き数 [回], I は電流 [A] である。(2-2)式において右辺に $1/2$ が入るのは Fig. 2-12 における左半面のみについて検討を行うため巻き数が全体の半分とみなすことが出来るためである。 μ [H/m] は透磁率であり、磁束密度 B [Wb/m²] は媒質の境界において法線成分が連続であることから空隙中とコア内では同様の値となるので

$$\mu H = \mu_0 H_0 = B \quad (2-3)$$

(2-3)式より(2-2)式を変形すると

$$B = \frac{N_r I}{2 \left(\frac{l}{\mu} + \frac{2\gamma}{\mu_0} \right)} \quad (2-4)$$

となる．コアの断面積を $S[\text{m}^2]$ とすると半面磁束 $\Phi' = BS[\text{Wb}]$ であるがコア全体を考慮すると，全体では $\Phi = 2\Phi'$ となる．よって全磁束は

$$\Phi = \frac{N_r S I}{\frac{l}{\mu} + \frac{2\gamma}{\mu_0}} \quad (2-5)$$

となる．コイルのインダクタンスを $L[\text{H}]$ とすると

$$L = \frac{N_r \Phi}{I} = \frac{N_r^2 S}{\frac{l}{\mu} + \frac{2\gamma}{\mu_0}} \quad (2-6)$$

となる．空気中の透磁率 $\mu_0 = 1.38 \times 10^{-6}$ はコアの透磁率と比較して十分に小さい（鉄の場合 2000 以上）ので(2-6)式左辺の分母にある l/μ の項は無視できるとみなす．よって

$$L = \frac{\mu_0 N_r^2 S}{2\gamma} = \frac{K}{\gamma} \quad \because K = \frac{\mu_0 N_r^2 S}{2} \quad (2-7)$$

となる．しかし(2-7)式に示されるインダクタンスの値は吸引力に寄与しない磁束の漏れを含んだ値，すなわち全インダクタンスを表している．そこで本研究ではインダクタンス L をより実用的な

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

で表し，有効インダクタンス L_{eff} と漏れインダクタンス L_{lea} を実験的に求める．

吸引力 F はコイルのエネルギーを γ で偏微分することにより得られ，

$$F = -\frac{\partial}{\partial \gamma} \left\{ \frac{1}{2} L(\gamma) i^2 \right\} = \frac{L_{\text{eff}} i^2}{2\gamma^2} \quad \because L(\gamma) = \frac{L_{\text{eff}}}{\gamma} + L_{\text{lea}} \quad (2-9)$$

となる．ここで浮上対象は平衡点近傍での微小変化のみを扱うものとし(2-9)式の線形化近似を行う．平衡状態における浮上対象と電磁石表面の距離，コイル電流値，吸引力を Γ_0 ， I_0 ， F_0 とし，浮上対象と電磁石表面間距離の変動分とコイル電流値の変動分を $\Delta \gamma$ ， Δi とすると

$$\gamma = \Gamma_0 + \Delta\gamma(t) \quad (2-10)$$

$$i = I_0 + \Delta i(t) \quad (2-11)$$

$$F_0 = \frac{L_{\text{eff}} I_0^2}{2\Gamma_0^2} \quad (2-12)$$

となる．この条件のもと吸引力 $F(\gamma, i)$ を (Γ_0, I_0) 近傍でテーラー展開をすると

$$\begin{aligned} F(\Gamma_0 + \Delta\gamma(t), I_0 + \Delta i(t)) &= F(\Gamma_0, I_0) + \left. \frac{\partial F}{\partial \gamma} \right|_{\Gamma_0, I_0} \cdot \Delta\gamma(t) + \left. \frac{\partial F}{\partial i} \right|_{\Gamma_0, I_0} \cdot \Delta i(t) \\ &= F_0 + \left. \frac{L_{\text{eff}} i^2 \cdot (-2)}{2\gamma^3} \right|_{\Gamma_0, I_0} \cdot \Delta\gamma(t) + \left. \frac{L_{\text{eff}} \cdot 2i}{2\gamma^2} \right|_{\Gamma_0, I_0} \cdot \Delta i(t) \\ &= F_0 - \frac{L_{\text{eff}} I_0^2 \cdot 2}{2\Gamma_0^2 \Gamma_0} \cdot \Delta\gamma(t) + \frac{L_{\text{eff}} I_0^2 \cdot 2}{2\Gamma_0^2 I_0} \cdot \Delta i(t) \\ &= F_0 - \frac{2F_0}{\Gamma_0} \cdot \Delta\gamma(t) + \frac{2F_0}{I_0} \cdot \Delta i(t) \end{aligned} \quad (2-13)$$

となる．ここで(2-13)式の F_0 は浮上対象に作用する静的な力である．よって平衡状態の浮上対象に加わる吸引力変動分 $f(t)$ は次式で示される．

$$f(t) = -\frac{2F_0}{\Gamma_0} \cdot \Delta\gamma(t) + \frac{2F_0}{I_0} \cdot \Delta i(t) \quad (2-14)$$

次に電磁石回路について考える．電磁石に加わる電圧 e と流れる電流 i の関係は

$$\begin{aligned} e(\gamma, i) &= Ri + \frac{d}{dt} \{L(\gamma) \cdot i\} \\ &= Ri + \frac{d}{dt} \left\{ \left(\frac{L_{\text{eff}}}{\gamma} + L_{\text{lea}} \right) \cdot i \right\} \end{aligned} \quad (2-15)$$

(2-15)式を (Γ_0, I_0) 近傍でテーラー展開すると

$$\begin{aligned}
 e(\Gamma_0 + \Delta\gamma(t), I_0 + \Delta i(t)) &= e(\Gamma_0, I_0) + \left. \frac{\partial e}{\partial \gamma} \right|_{\Gamma_0, I_0} \cdot \Delta\gamma(t) + \left. \frac{\partial e}{\partial i} \right|_{\Gamma_0, I_0} \cdot \Delta i(t) \\
 &= e_0 + R\Delta i(t) + \frac{d}{dt} \left(\frac{L_{\text{eff}}}{\gamma} + L_{\text{lea}} \right) \Delta i(t) - \frac{L_{\text{eff}} I_0}{\Gamma_0^2} \cdot \frac{d}{dt} \Delta\gamma(t) \\
 &= e_0 + R\Delta i(t) + L_0 \frac{d}{dt} \Delta i(t) - \frac{L_{\text{eff}} I_0}{\Gamma_0^2} \cdot \frac{d}{dt} \Delta\gamma(t)
 \end{aligned} \tag{2-16}$$

ただし,

$$\begin{aligned}
 e_0 &= RI_0 \\
 L_0 &= L(\Gamma_0) = \frac{L_{\text{eff}}}{\Gamma_0} + L_{\text{lea}}
 \end{aligned}$$

である. e_0 は平衡状態における電圧値であるから平衡点近傍における電圧値の変動分 Δe は

$$\Delta e = R\Delta i + L_0 \frac{d}{dt} \Delta i(t) - \frac{L_{\text{eff}} I_0}{\Gamma_0^2} \cdot \frac{d}{dt} \Delta\gamma(t) \tag{2-17}$$

従って, Fig2-11 に示すような本研究で用いる 1 自由度モデルにおける電磁石吸引力方程式および電磁石回路方程式は

$$f_z(t) = -\frac{F_z}{z_0} \cdot \Delta\gamma(t) + \frac{F_z}{I_z} \cdot \Delta i(t) \tag{2-18}$$

$$\frac{v_z}{2} = \frac{R_z}{2} \Delta i(t) + L_z \frac{d}{dt} \Delta i(t) - \frac{L_{\text{eff}} I_z}{z_0^2} \cdot \frac{d}{dt} \Delta\gamma(t) \tag{2-19}$$

となる. ここで F_z : 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_z : 静的吸引力を得るための定常電流 [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 : ペアの電磁石コイルの総抵抗値 [Ω], v_z : ペアの電磁石に加わる定常電圧からの変動値 [V] である. F_z は 2 つ電磁石から生じる静的吸引力の合計値であるため 1 つ分である (2-18) 式では半分にする必要がある. (2-19) 式の R_z , v_z が半分の値となるのは f_n がペアの電磁石のうち 1 つあたりの吸引力変動値であるため, ペア全体の値である R_z , v_z を半分にする必要があったためである. また, 当然 2 つのペアの電磁石には同じ電流が流れ, 同じ吸引力が発生するものとしている.

さらに鉛直方向変位 z とギャップ増減値 $\Delta\gamma$ の関係は鉛直方向上向きを正とすると

$$z(t) = -\Delta\gamma(t) \quad (2-20)$$

である。またコイル電流値の変動分を $i_z[\text{A}]$ とすると (2-18) 式, (2-19) 式は

$$f_z(t) = \frac{F_z}{Z_0} \cdot z(t) + \frac{F_z}{L_z} \cdot i_z(t) \quad (2-21)$$

$$\frac{d}{dt} i_z(t) = -\frac{L_{\text{eff}} L_z}{L_z Z_0^2} \cdot \frac{d}{dt} z(t) - \frac{R_z}{2L_z} i_z(t) + \frac{1}{2L_z} v_z(t) \quad (2-22)$$

となる。

2.4.3 状態方程式

制御系設計は現代制御理論を適用するためシステムを状態空間表現する。状態変数は仮想質量の変位, 速度および電磁石コイル電流の定常値からの変動分とする。ここで電流値を状態変数に加えるのは電流のフィードバックにより応答性の改善を狙ったものである。(2-1)式に(2-21)式を代入し, 変形すると

$$\begin{aligned} m_z \frac{d^2}{dt^2} z(t) &= 2f_z(t) = \frac{2F_z}{Z_0} \cdot z(t) + \frac{2F_z}{L_z} \cdot i_z(t) \\ \frac{d^2}{dt^2} z(t) &= \frac{2F_z}{m_z Z_0} \cdot z(t) + \frac{2F_z}{m_z L_z} \cdot i_z(t) \end{aligned} \quad (2-24)$$

1自由度モデルの状態方程式は以下のようなになる。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{z}} &= \mathbf{A}_z \mathbf{z} + \mathbf{B}_z v_z \quad (2-25) \\ \mathbf{z} &= [z \quad \dot{z} \quad i_z]^T \\ \mathbf{A}_z &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{2F_z}{m_z Z_0} & 0 & \frac{2F_z}{m_z L_z} \\ 0 & -\frac{L_{\text{eff}}}{L_z} \cdot \frac{1}{Z_0^2} & -\frac{R_z}{2L_z} \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_z &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{2L_z} \end{bmatrix}^T \end{aligned}$$

また, 1自由度モデルでは状態変数と観測値が一致するため完全な状態フィードバック制御となる。制御系設計は(2-25)式に対して制御理論を適用することで可能となり, 制御則を決定する。

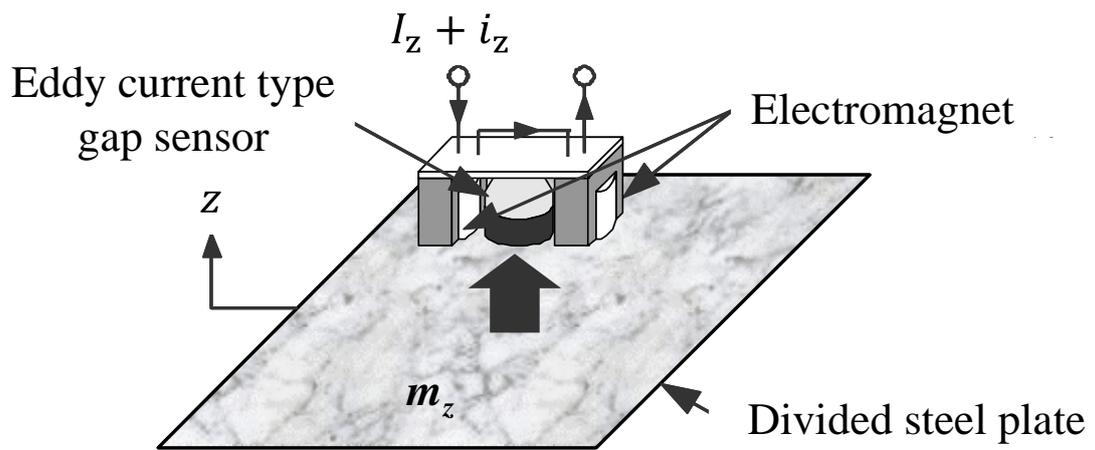


Fig. 2-11 1-degree-of-freedom model of the electromagnetic levitated steel plate

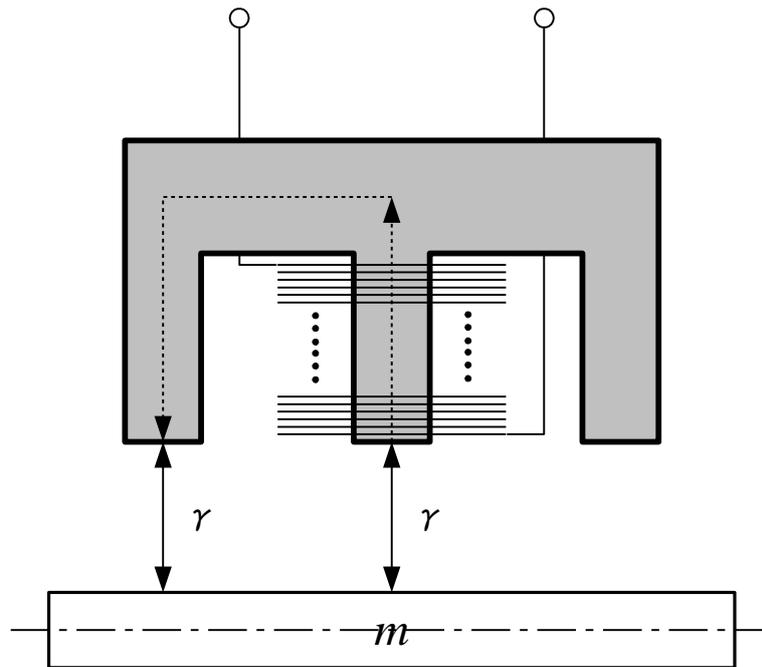


Fig. 2-12 Analysis model of the electromagnetic levitated system

2.5 離散時間系最適制御理論 [2-1]

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．

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_d(i+1) &= \mathbf{\Phi}\mathbf{z}_d(i) + \mathbf{\Gamma}\mathbf{v}_d(i) \\ \mathbf{\Phi} &= \exp(\mathbf{A}T_s), \mathbf{\Gamma} = \int_0^{T_s} [\exp(\mathbf{A}\tau)] d\tau \mathbf{B} \end{aligned} \quad (2-26)$$

ここで \mathbf{v}_d : 離散時間系における電磁石コイルの定常電圧からの変動値 [V], T_s : サンプリング時間である [s]. \mathbf{z}_d は離散時間系における鋼板の変位 z_d , 速度 \dot{z}_d および電流 i_d を含む状態変数行列である．ここで離散時間系の評価関数は次のように表される．

$$J_d = \sum_{i=0}^{\infty} [\mathbf{z}_d(i)^T \mathbf{Q}_d \mathbf{z}_d(i) + \mathbf{v}_d(i)^T r_d \mathbf{v}_d(i)] \quad (2-27)$$

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， r_d : 制御入力に関する重み係数である．式(2-27)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．

$$\mathbf{M} = \mathbf{\Phi}^T \mathbf{M} \mathbf{\Phi} + \mathbf{Q}_d - \mathbf{\Phi}^T \mathbf{M} \mathbf{\Gamma} (\mathbf{r}_d + \mathbf{\Gamma}^T \mathbf{M} \mathbf{\Gamma})^{-1} \mathbf{\Gamma}^T \mathbf{M} \mathbf{\Phi} \quad (2-28)$$

$$\mathbf{v}_d^0 = -\mathbf{F}_d \mathbf{z}_d \quad (2-29)$$

$$\mathbf{F}_d = (\mathbf{r}_d + \mathbf{\Gamma}^T \mathbf{M} \mathbf{\Gamma})^{-1} \mathbf{\Gamma}^T \mathbf{M} \mathbf{\Phi} \quad (2-30)$$

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 -Control System Toolbox (The MathWorks, Inc.) の lqrd を使用した．

2.6 最適制御理論を用いた湾曲磁気浮上制御

2.6.1 実験条件

最適制御理論を適用した湾曲磁気浮上システムによって板厚 0.19 mm 鋼板の磁気浮上を行う。なお、フィードバックゲインは全電磁石角度で浮上可能となるよう試行錯誤的に決定した。式(2-27)に使用する重み係数を Table 2-3 に示す。磁気浮上中の鋼板の振動の大きさを評価するため、変位標準偏差を計測した。電磁石ユニット No.1 の変位センサによって計測した鋼板の変位をデータロギングし、変位標準偏差を算出した。変位標準偏差は各電磁石角度に対し 10 回ずつ測定し、それらの結果の平均値を実験値とした。その際、過渡状態の影響を除くため浮上開始後約 10 秒後に測定を行った。

また、磁気浮上性能の評価として浮上確率を計測した。浮上確率は外乱入力後 30 秒間浮上が続いたものを浮上成功とし、50 回の浮上実験のうち浮上が成功した回数を百分率により算出した。また、人為的誤差や影響を軽減するため、Fig. 2-4 に示した支持台を利用し、湾曲浮上に用いた。なお、この装置は電磁石の傾斜角に対応し鋼板を浮上時と同じ形状にし、浮上位置まで移動する事が可能である。鋼板浮上後、この装置を浮上鋼板に影響のない位置まで離す。浮上確率の成功、失敗、やり直しの浮上パターンを Table 2-4 に示す。

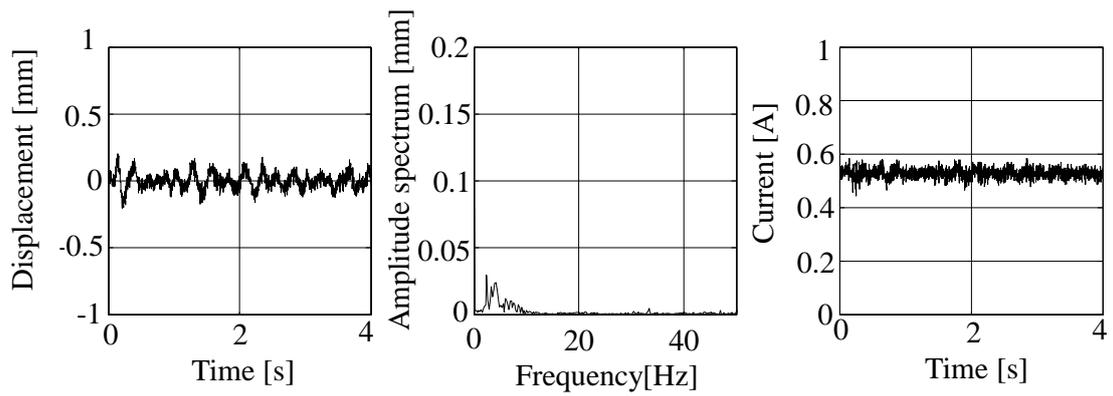
電磁石角度は Fig. 2-10 に示す、 0° ~ 20° の 6 通りとした。

2.6.2 実験結果

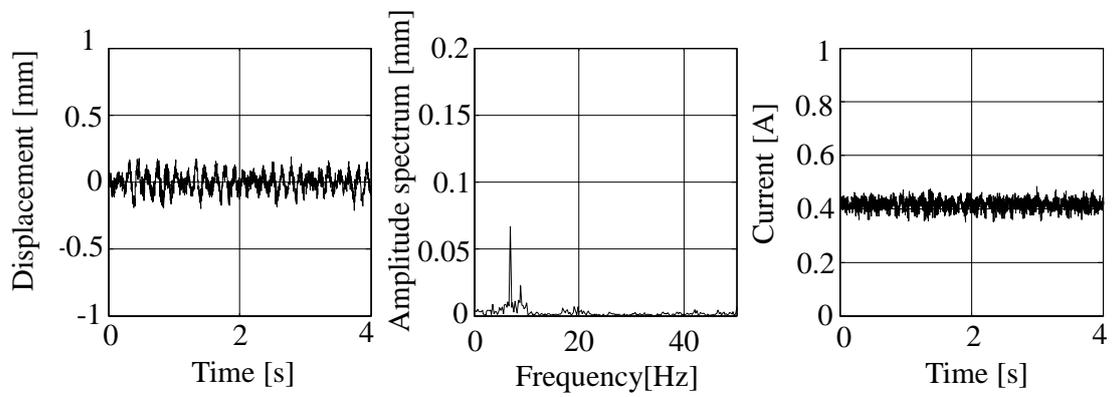
電磁石ユニットの変位センサから得られた鋼板の変位時刻歴と変位スペクトル、電磁石コイル電流値の時刻歴 (a)電磁石角度 0° ,(b)電磁石角度 5° ,(c)電磁石角度 10° ,(d)電磁石角度 13° ,(e)電磁石角度 15° ,(f)電磁石角度 20° を Fig. 2-13 に示す。また、電磁石角度と変位標準偏差の関係を Fig. 2-14 に示す。Fig. 2-14 より湾曲を行わない電磁石角度 0° 時よりも電磁石角度をつけ鋼板を湾曲させて磁気浮上を行うことで変位標準偏差が減少する角度が存在することがわかる。電磁石角度 5° では電磁石

角度 0° よりも変位標準偏差が増加し、鋼板の振動が増加するが、 10° を超えると変位標準偏差が減少し、電磁石角度 15° で最も低くなるという結果が得られた。また、電磁石角度 20° では変位標準偏差が増加傾向を示した。これは、湾曲させた形状から平らな形状に戻ろうとする鋼板の復元力によって鋼板振動の増加を引き起こしたと考える。

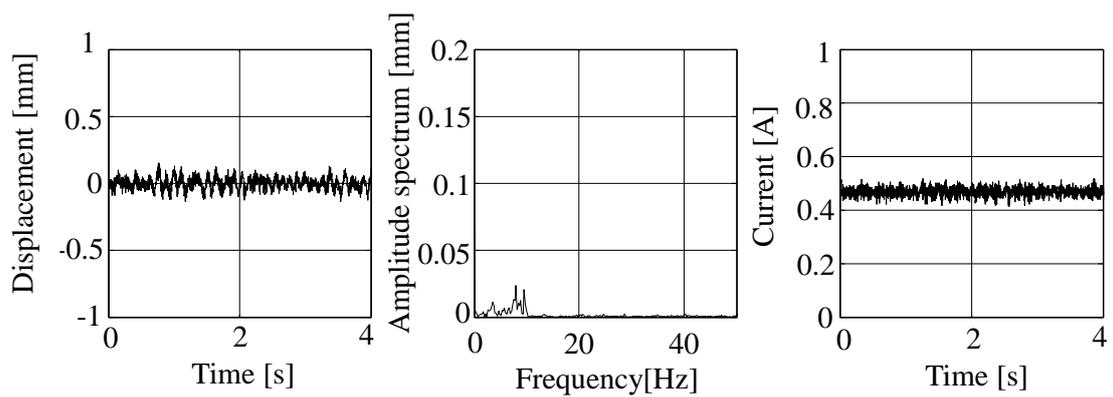
電磁石角度と浮上確率の関係を Fig. 2-15 に示す。Fig. 2-15 より、電磁石角度 0° で磁気浮上させるよりも、電磁石角度をつけ鋼板を湾曲させて磁気浮上させることで浮上確率が向上することを確認できた。電磁石角度 10° と 13° で浮上確率は最も高くなり、電磁石角度 15° では浮上確率は減少傾向となった。よって、変位標準偏差と浮上確率の結果から、板厚 0.19 mm の鋼板を磁気浮上させる場合、電磁石角度 13° で磁気浮上を行うことで最も浮上性能を向上することが確認できた。



(a) $\theta = 0^\circ$

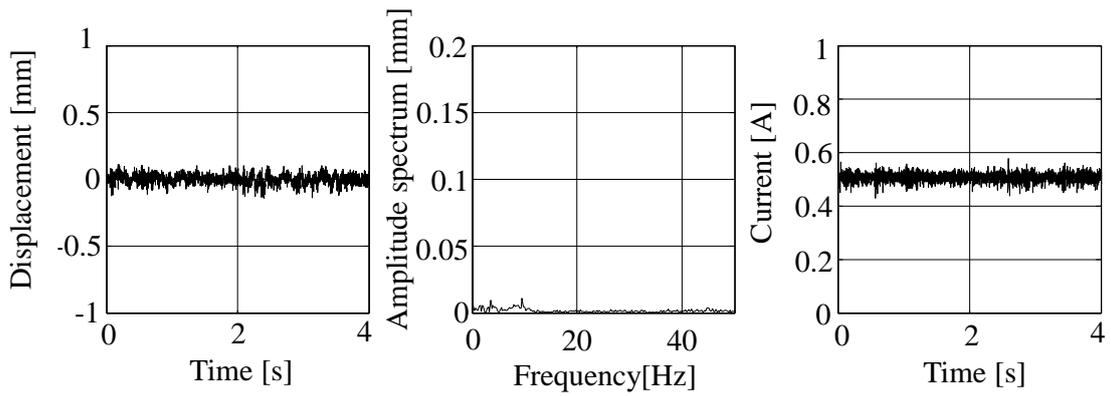


(b) $\theta = 5^\circ$

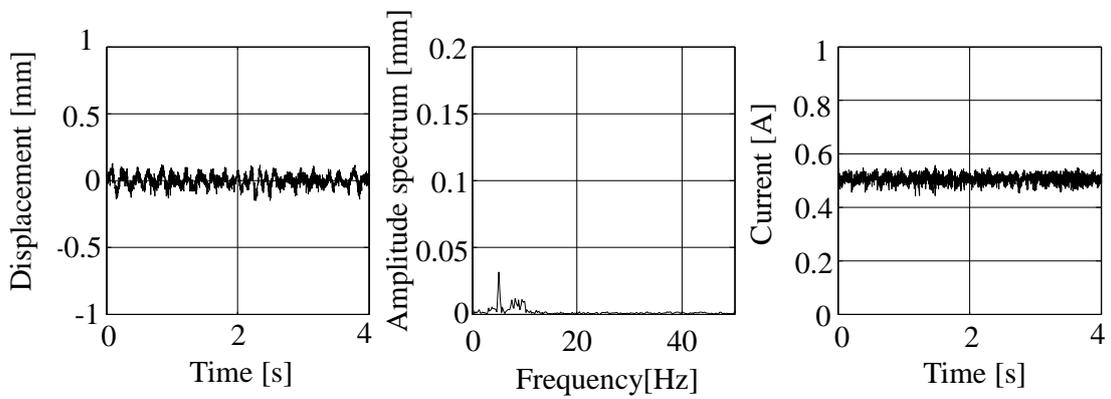


(c) $\theta = 10^\circ$

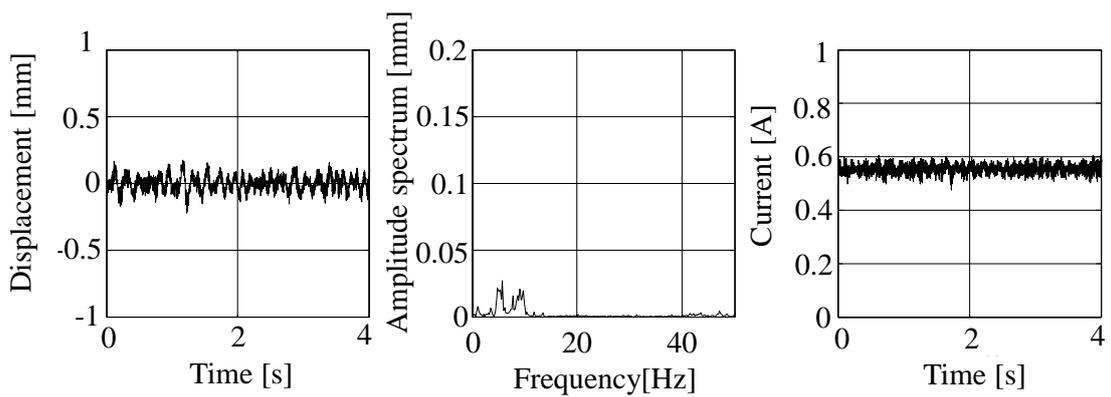
Fig. 2-13 Levitation results at each electromagnet angle
(Time history of displacement, Displacement spectrum,
Time history of current)



(d) $\theta = 13^\circ$



(e) $\theta = 15^\circ$



(f) $\theta = 20^\circ$

Fig. 2-13 Levitation results at each electromagnet angle
(Time history of displacement, Displacement spectrum,
Time history of current)

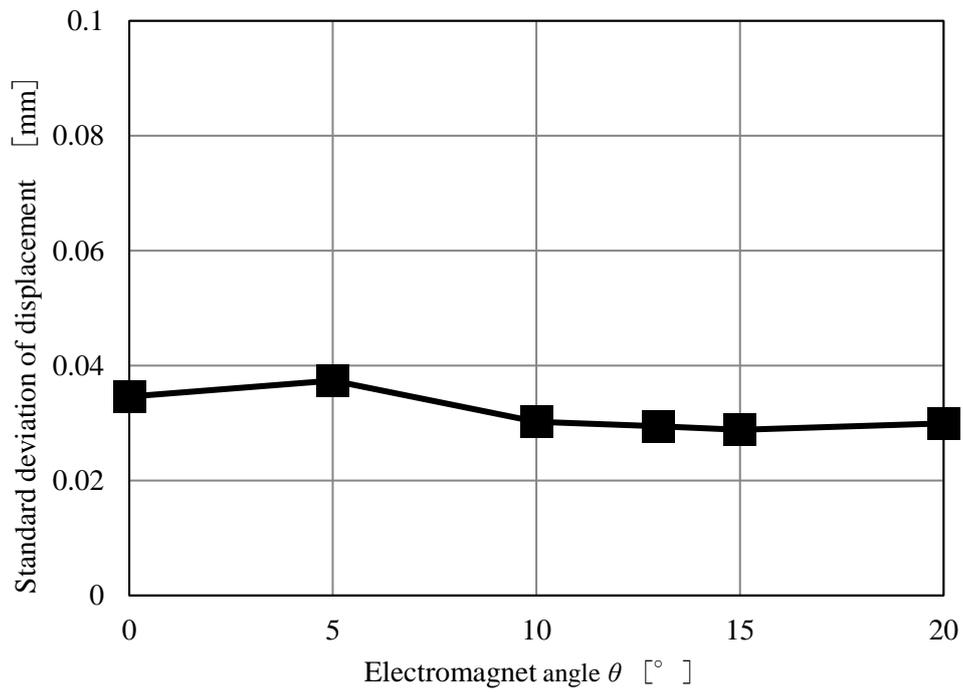


Fig. 2-14 Relation between standard deviation of displacement and electromagnet angle

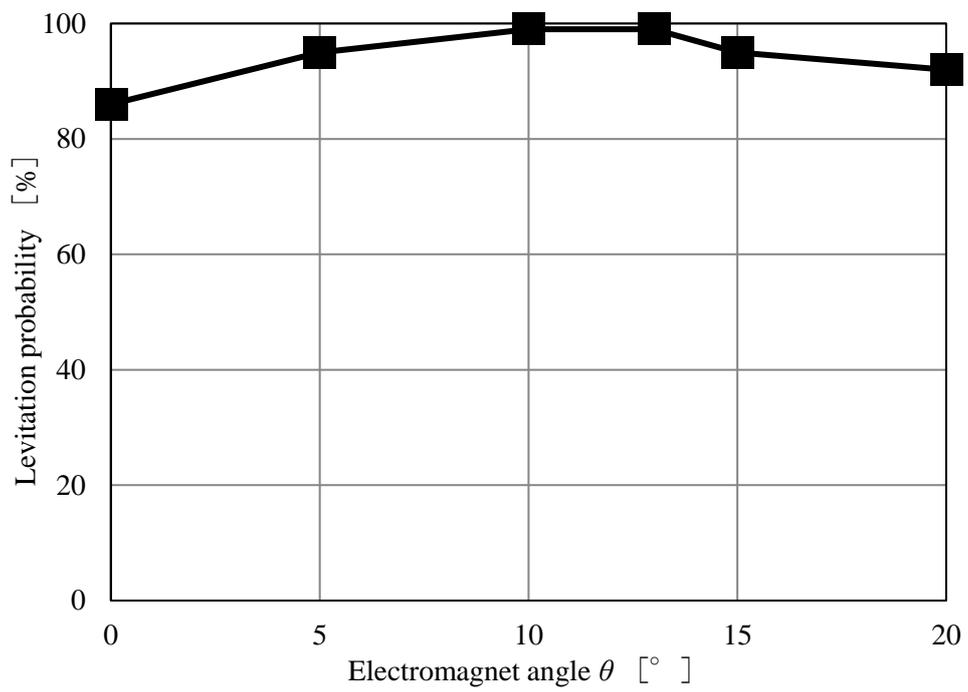


Fig. 2-15 Relation between levitation probability and electromagnet angle

Table 2-3 Weighting coefficients

Q_d	r_d
$\text{diag}(1.394 \times 10^5, 1.0 \times 10^{-1}, 0.2 \times 10^1)$	0.5×10^{-2}

Table 2-4 Judging results of levitation probability
experiment

	浮上パターン	結果
1	鋼板が支持台から離れた後，電磁石に接触することなく30秒間浮上	○
2	鋼板が支持台から離れた後，30秒間浮上せず，落下または電磁石に接触	×
3	制御を開始した瞬間に鋼板が電磁石に接触または，鋼板と電磁石の距離が遠すぎて浮上しない	やり直し
4	支持台を下げている途中で鋼板が落下または電磁石に接触	やり直し
5	鋼板の中心位置が明らかにずれている	やり直し

2.7 まとめ

本章では，装置の構成や薄鋼板のモデリングや最適制御理論を用いた制御システムの構築について説明し，薄鋼板の磁気浮上システムの構築について述べた．

また，構築した湾曲磁気浮上システムによって板厚 0.19 mm 鋼板の磁気浮上実験を行い，変位標準偏差と浮上確率による評価によって，湾曲磁気浮上システムの有用性と，最適な電磁石角度について検討した．本検討によって得られた成果は以下のとおりである．

1. 構築した湾曲磁気浮上システムによって板厚 0.19 mm の鋼板を磁気浮上させることに成功し，電磁石角度 0° ～ 20° までの磁気浮上実験を行うことができた．
2. 湾曲を行わずに磁気浮上させるよりも電磁石角度を変化させ湾曲を行って磁気浮上を行うことで，変位標準偏差は減少し，鋼板の振動が抑制される傾向を確認した．
3. 電磁石角度は 15° で変位標準偏差が最も小さくなり， 20° では増加した．これは，鋼板を大きく湾曲させると，鋼板の復元力が作用してしまうため，振動が増加したと考える．
4. 浮上確率も変位標準偏差と同様に湾曲を行わないよりも，鋼板を湾曲させて磁気浮上を行ったほうが高いという結果を得た．最も浮上確率が高くなったのは，電磁石角度 13° であり，それ以上の電磁石角度では，浮上確率は減少傾向となる．

本研究で構築した湾曲磁気浮上システムでは，変位標準偏差と浮上確率の結果より，板厚 0.19 mm の鋼板を磁気浮上させる場合，電磁石角度 13° で湾曲磁気浮上を行うことで，浮上性能が最も向上することを確認した．

Appendix 本章で用いたおもな記号

- m_z : 鋼板を仮想的に5つに分割した質量 [kg]
 z : 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]
 H : 電磁石コア内部の磁界 [A/m]
 H_0 : 空隙の磁界 [A/m]
 l : 磁路の長さ [m]
 γ : 空隙距離 [m]
 N_r : コイルの巻き数 [回]
 I : 電流 [A]
 μ : 透磁率 [H/m]
 B : 磁束密度 [Wb/m²]
 S : コアの断面積 [m²]
 Φ : 全磁束 [Wb]
 L : コイルのインダクタンス [H]
 μ_0 : 空気中の透磁率 [H/m]
 L_{eff} : 有効インダクタンス [Hm]
 L_{lea} : 漏れインダクタンス [H]
 F : 電磁石の吸引力 [N]
 Γ_0 : 平衡状態における対象と電磁石表面の距離 [m]
 I_0 : 平衡状態におけるコイル電流値 [A]
 F_0 : 平衡状態における吸引力 [N]
 e : 電磁石に加わる電圧 [V]
 i : コイルに流れる電流 [A]
 e_0 : 平衡状態における電圧値 [V]

- F_z : 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_z : 静的吸引力を得るための定常電流 [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 : ペアの電磁石コイルの総抵抗値 [Ω]
- v_z : ペアの電磁石に加わる定常電圧からの変動値 [V]
- f_n : 電磁石 1 つあたりの吸引力変動値 [N]
- i_z : コイル電流値の変動分 [A]
- v_d : 離散時間系における電磁石コイルの定常電圧からの変動値 [V]
- T_s : サンプルング時間である [s]
- \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
- r_d : 制御入力に関する重み係数

第2章の参考文献

- [2-1] H. Kato, K. Ogawa, M. Tada, Y. Oda, X. Liu, A. Endo, K. Ikeda, T. Narita, A Study on Levitation Performance Improvement of Bent Flexible Steel Plate, Mechanical Engineering Journal, Vol. 5, No. 5, 18-00080, (2018)
- [2-2] 椎名敦紀, 嘉山周汰, ムハマドヌルハキミビンモハマドカマ, 小川和輝, 遠藤文人, 成田正敬, 加藤英晃, 湾曲させた柔軟鋼板の磁気浮上搬送システムの開発(電磁力の印加位置に対する基礎的考察), 日本磁気学会論文特集号, Vol.6, No.1, pp.81-86, (2022)
- [2-3] 椎名敦紀, 嘉山周汰, ムハマドヌルハキミビンモハマドカマ, 小川和輝, 成田正敬, 加藤英晃, 湾曲させた柔軟鋼板の磁気浮上搬送システムの開発(搬送方向が搬送中の浮上性能に与える影響), 日本磁気学会論文特集号, Vol.5, No.2, pp.60-66, (2021)
- [2-4] 小川和輝, 多田誠, 成田正敬, 加藤英晃, 柔軟鋼板の湾曲磁気浮上制御(外乱相殺制御の基礎的検討), 日本磁気学会論文特集号, Vol. 3, No. 1, pp.101-106, (2019)

第 3 章 柔軟鋼板の湾曲磁気 浮上中の振動メカニズム

3.1 はじめに

切板の振動特性に関する検討[3-1],[3-2]は様々行われているが、磁気浮上中の鋼板の振動特性に関する検討は少ない。本章では、2章で得られた最適な電磁石角度によって湾曲磁気浮上させた薄鋼板にどのような振動モードが存在し、それらの振動モードが浮上性能にどのような影響を与えるのかを検討した。これにより、なぜ鋼板を湾曲させて磁気浮上を行うことで浮上性能を向上させることができるのか明らかにした。また、工場等における外乱を想定するためには、湾曲磁気浮上システムによって磁気浮上させた鋼板の共振周波数を把握することで、最も浮上性能が劣化する外乱を想定できると考える。

平板の振動特性を把握する方法として、インパルスハンマーを用いた打撃試験を複数箇所で行い、平板上に貼付した加速度センサとの伝達関数から、固有振動数、モード形状を得る方法がある[3-3]。しかしながら浮上中の鋼板に対して打撃試験など接触を用いた外乱を入力する方法で振動特性を得ることは現実的に困難である。そこで浮上制御を行っている電磁石ユニットにインパルス入力と同様に複数の周波数成分を持つステップ状のパルス波の変位を与え、このときの応答から浮上中の鋼板の振動特性を把握した。さらに得られた固有振動数付近で正弦波によって加振することで、鋼板の振動しやすい振動数について検討した。

加えて、湾曲磁気浮上中の鋼板の振動特性を解析的に検討するため、板厚 0.19 mm の鋼板のモデルを作成しモデル解析および周波数応答解析を行った。実験で得られた磁気浮上鋼板の共振周波数と解析によって得られた振動モードを比較し、磁気浮上鋼板の振動特性について明らかにした。

3.2 パルス波を用いた湾曲磁気浮上鋼板の加振実験 [3-4]

3.2.1 実験条件

浮上中の薄鋼板に最も影響する外乱を実験的に探索するため、電磁石ユニットが備え付けられているフレームをパルス波で加振させた外乱入力実験を行った。パルス波で加振させたフレームの変位時刻歴波形を Fig. 3-1 に示す。

このとき、浮上中鋼板の振動は各電磁石ユニットに取り付けてある渦電流式非接触変位センサで取得した。また、電磁石の設置角度 θ は第2章で振動が抑制された $\theta = 10, 13, 15^\circ$ に設定した。また、フレーム加振の振幅は 0.7 mm に設定した。なお、入力した振幅 0.7 mm は最悪の外乱であり、予備実験にてこれ以上振幅値を増加させた場合に浮上が困難であることを確認している。

3.2.2 実験結果

パルス波を用いてフレームを加振させた際の鋼板の変位時刻歴波形およびスペクトル波形を Fig. 3-2 に示す。同図より、最大のスペクトルは 0.0335 mm であり、そのときの周波数は 5.75 Hz である。同様の実験を 10 回行った際に測定された共振周波数の最小値と最大値を Table 1 に示した。Fig. 3-2 および Table 3-1 から、本実験で使用している鋼板の共振周波数は約 2.5 ~ 10 Hz の範囲内に存在することが分かった。

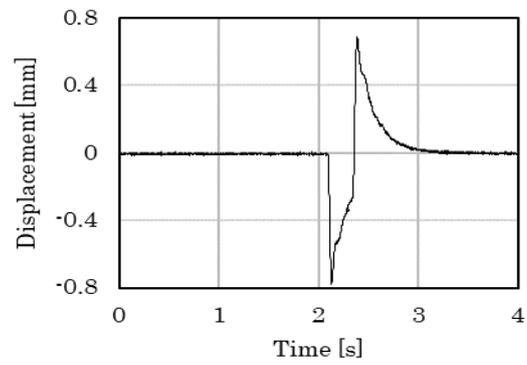


Fig. 3-1 Time history of displacement of vibrating frames by the pulse disturbance [3-4]

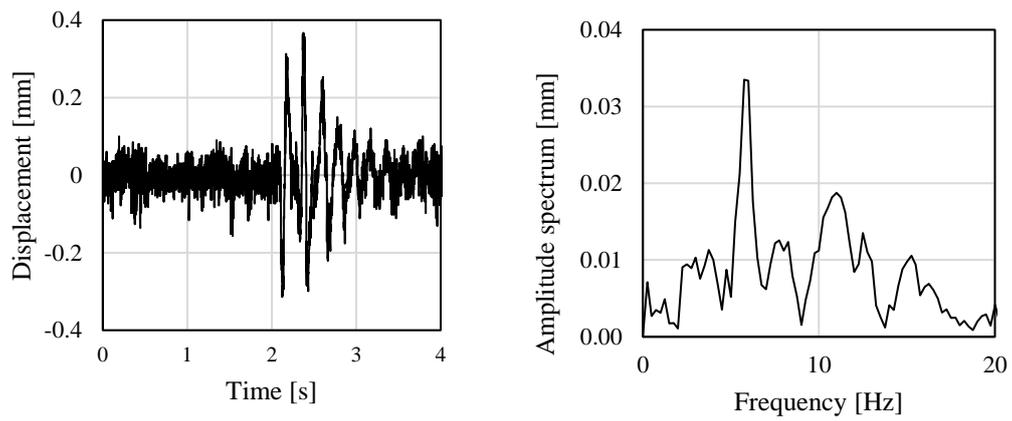


Fig. 3-2 Time history and amplitude spectrums of displacement of steel plate when vibrating frames by the pulse disturbance ($\theta = 13^\circ$) [3-4]

Table 3-1 Representative value of resonance frequency
[3-4]

Electromagnet angle [deg.]	Resonance frequency [Hz]
10	2.67 - 10
13	3.56 - 9.78
15	3.11 - 10

3.3 正弦波を用いた湾曲磁気浮上鋼板の加振実験 [3-4]

3.3.1 実験条件

共振周波数に近い周波数で外乱を入力するため、周波数を一定に設定した正弦波を用いて電磁石ユニットを加振させ、そのときの湾曲浮上性能を検討する外乱入力実験を行った。

浮上中鋼板の振動を取得するため、Fig. 3-3 に示すように鋼板中央付近に渦電流式非接触変位センサを設置した。この変位標準偏差から外乱入力時の鋼板の浮上安定性を評価した。Fig. 3-4 にフレームの時刻歴波形およびスペクトル波形の例を示す。このとき、正弦波の両振幅は 0.5 mm 一定とし、正弦波の周波数は 3.2 節の結果を参考に 3~10 Hz の範囲内で 1 Hz 毎に実験を行った。また、電磁石角度 θ は 2 章で最も振動が抑制された $\theta = 13^\circ$ で行った。

3.3.2 実験結果

Fig. 3-5 に周波数毎の変位標準偏差を示す。同図より、正弦波の周波数を高めると変位標準偏差は増加し、5 Hz で最も標準偏差が高くなり、5 Hz 以降は標準偏差が低下した。

Fig. 3-6 に 3 Hz, 5 Hz および 8 Hz の正弦波を入力した際の鋼板の変位の時刻歴を示す。(b) 固有振動数に近い 5 Hz のときは振幅約 0.7 mm で振動するが、(a) 3 Hz および (c) 8 Hz では 5 Hz と比べると振幅は半分以下となった。

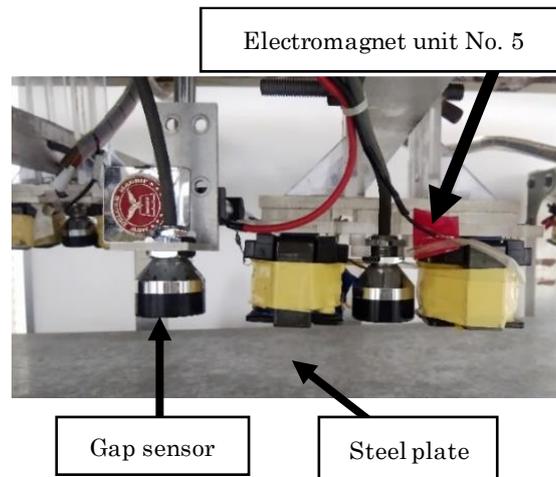


Fig. 3-3 Eddy-current gap sensor in central part of steel plate [3-4]

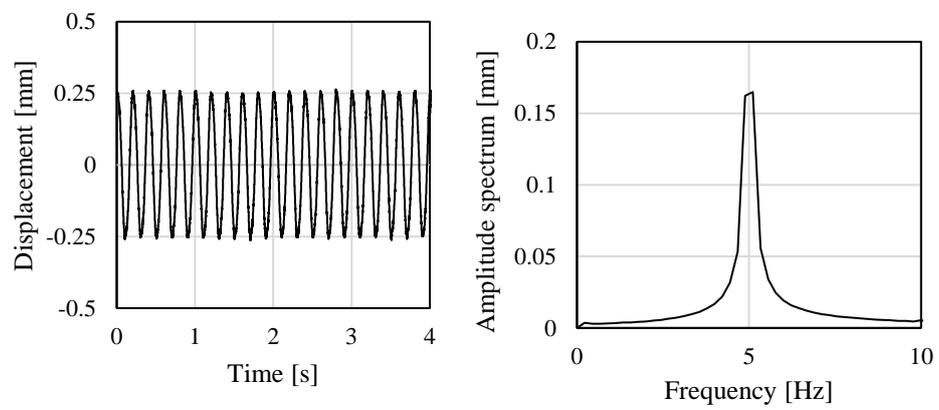


Fig. 3-4 Time histories of displacement and amplitude spectrums of vibrating frames by the sin disturbance ($f = 5$ Hz) [3-4]

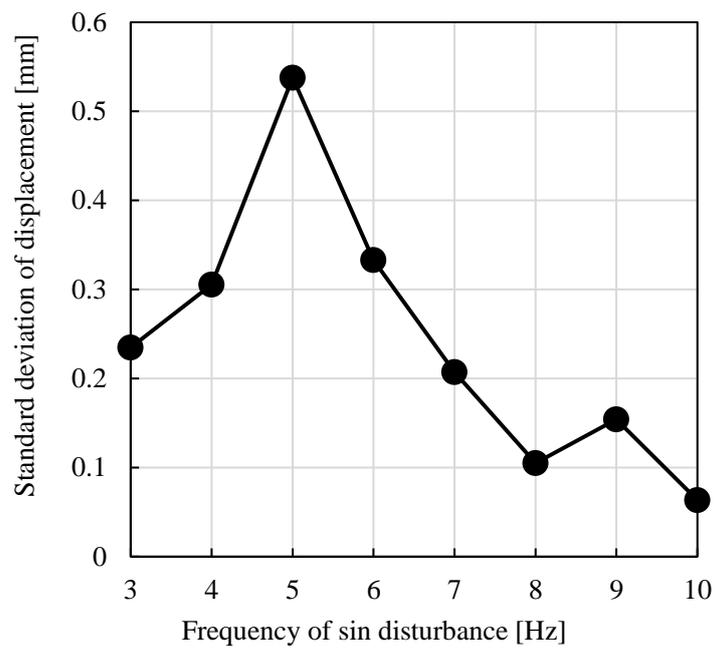
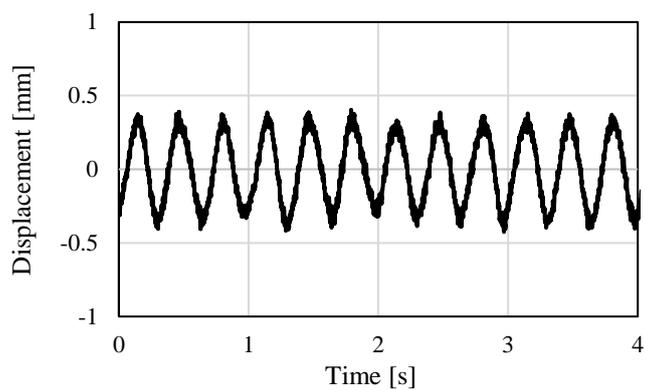
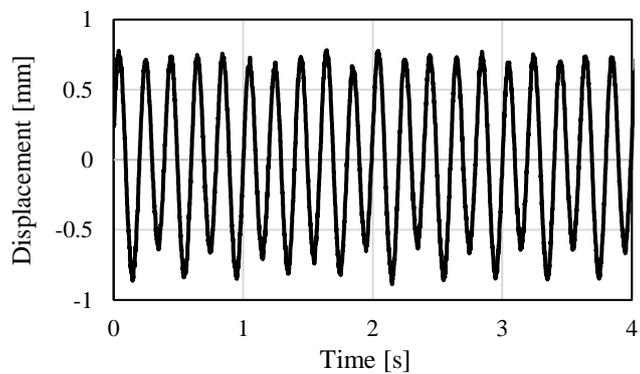


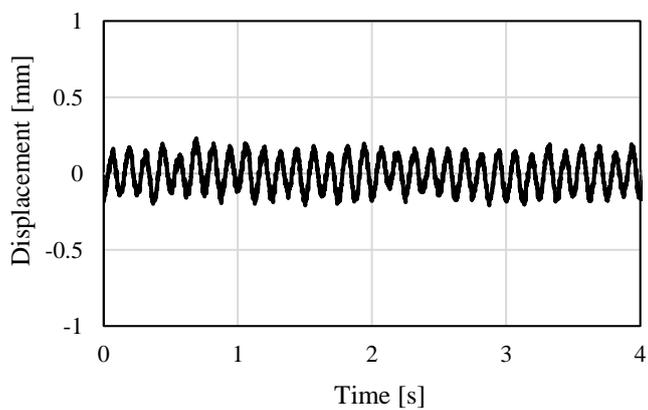
Fig. 3-5 Standard deviation of displacement when vibrating the frames by the sin disturbance [3-4]



(a) $f = 3$ Hz



(b) $f = 5$ Hz



(c) $f = 8$ Hz

Fig. 3-6 Time histories of displacement when vibrating the frames by the sin disturbance [3-4]

3.4 薄鋼板の共振周波数解析 [3-4]

3.4.1 鋼板の湾曲形状

薄鋼板の振動形状解析を行うため、湾曲浮上中の薄鋼板の湾曲形状および電磁石の支持力を導出する。このとき、Fig. 3-7 に示す、長方形鋼板の y 方向を突き出しはり（はね出し単純はり）と考え、1次元のはりのたわみ形状を Fig. 3-7 の鋼板 x 方向に押し出したものとする。

Fig. 3-8 に鋼板を短手方向から見たはりと仮定したモデルを示す。このモデルにおける支持点 D, E は周囲に設置した電磁石ユニット No.1～No.4 の位置で、点 C は中央の電磁石の位置 (No. 5) である。また支持力 F_5 は中央電磁石ユニットの支持力を表している。本研究では、中央電磁石ユニットの支持力 F_5 の値を変化させることにより鋼板の湾曲形状を再現させるため、Fig. 3-8 のように支持点 D と E で単純支持され、C 点で集中荷重 F_5 が作用している。このとき鋼板にはたわみが生じ、支持点での鋼板の角度をたわみ角 φ と定義する。このモデルからたわみ角 φ とその時の支持力 F_5 の関係式を算出することにより各電磁石ユニットに印加する定常電流値を算出した。

中央の支持点 No. 5 での支持力 F_5 の関係は次式で表される。

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

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

$$F_1 = F_2 = F_3 = F_4 = \frac{\rho ahgb - F_5}{4} \quad (3-2)$$

ここで、 a :板の長さ[m]、 b :板の幅[m]、 h :板厚[m]、 ρ :鋼板の密度[kg/m³]、 g :重力加速度[m/s²]、 l : x 軸に見た電磁石ユニット No.1 と No.3, あるいは No.2 と No.4 の距離[m]、 d : x 軸に見た電磁石ユニット No.1, No.2, No.3, No.4 から鋼板端部までの距離[m]、 E :鋼板のヤング率[N/m²]である。

3.4.2 解析モデル

薄鋼板の振動形状および共振周波数を検討するため、モーダル解析および周波数応答解析を行った。解析モデルは ANSYS Workbench Mechanical にて長さ 800 mm、幅 600 mm、厚さ 0.19 mm の薄鋼板を電磁石設置角度 $\theta = 13^\circ$ で湾曲させた時の鋼板の形状を再現した。電磁石角度 13° に設定した理由は、2章にて最も変位標準偏差が低くなり、鋼板の振動が抑制され、最も浮上する確率の高かった電磁石角度のためである。このとき、鋼板は四辺自由であり、支持条件は Fig. 3-7 に示す電磁石の設置位置と同じ場所で支持した。

3.4.3 解析結果

Fig. 3-9 に解析で使用した鋼板モデルを示す。このモデルを用いて薄鋼板のモーダル解析と周波数応答解析を行った。Fig. 3-10 の結果は、周波数応答解析の結果にて突出した周波数のモード形状のみ抜粋して掲載した。それぞれ (a) 短手方向の弾性 1 次モードで 6.20 Hz、(b) 短手方向の弾性 3 次モードで 11.71 Hz、(c) 長手方向の弾性 1 次と短手方向の 3 次が組み合わさったモードで 19.65 Hz、(d) 短手方向の弾性 5 次モードで 41.69 Hz という結果になった。(a) の弾性 1 次モードは、周囲電磁石の箇所が節となり、鋼板短手方向中央部が腹となる振動形状である。(b)、(c) および (d) のモードは、(a) 弾性 1 次モードと同様短手方向中央に腹が存在する奇数次モードが突出した。これらのモードが突出している理由として、鋼板短手方向を湾曲させることで弾性 1 次モードに近い形状となるため、鋼板長手方向の振動モードや鋼板中央部が節になる偶数次のモードが抑制されていることが考えられる。よって、薄鋼板を湾曲浮上させることによって、弾性 1 次などの奇数次モードが支配的になり、他の振動モードを抑制することができることが分かった。また、3.2 節のパルス波を用いた加振実験では、変位スペクトルより 5.75 Hz の振動が大きいことがわかっており、解析では 6.20 Hz で弾性 1 次モードの振動が発生しているという結果になった。したがって、実際の湾曲磁気浮上実験においても弾性 1 次モードが支配的であると考えることができる。

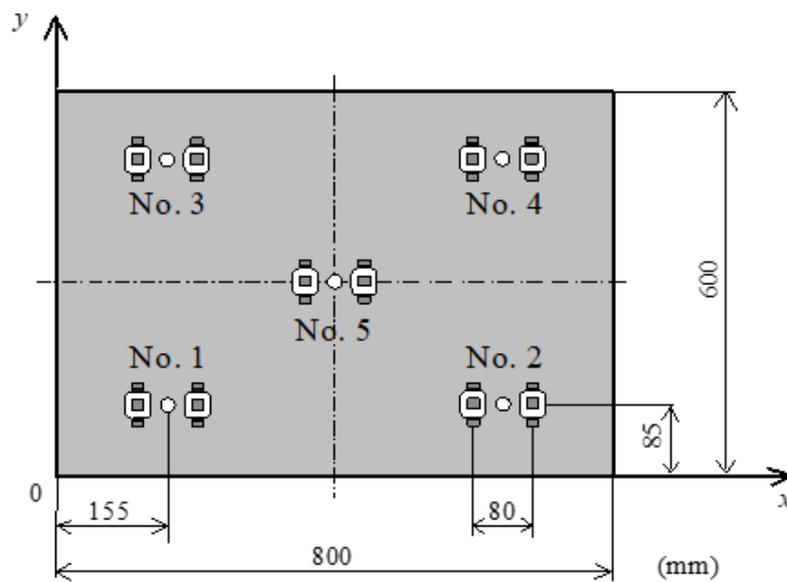


Fig. 3-7 Dimension of steel plate and arrangement of electromagnets [3-4]

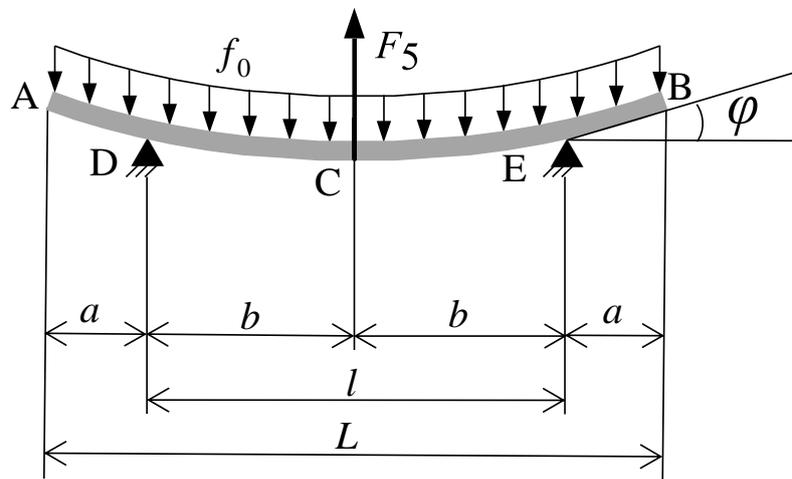


Fig. 3-8 Protruding beam [3-4]

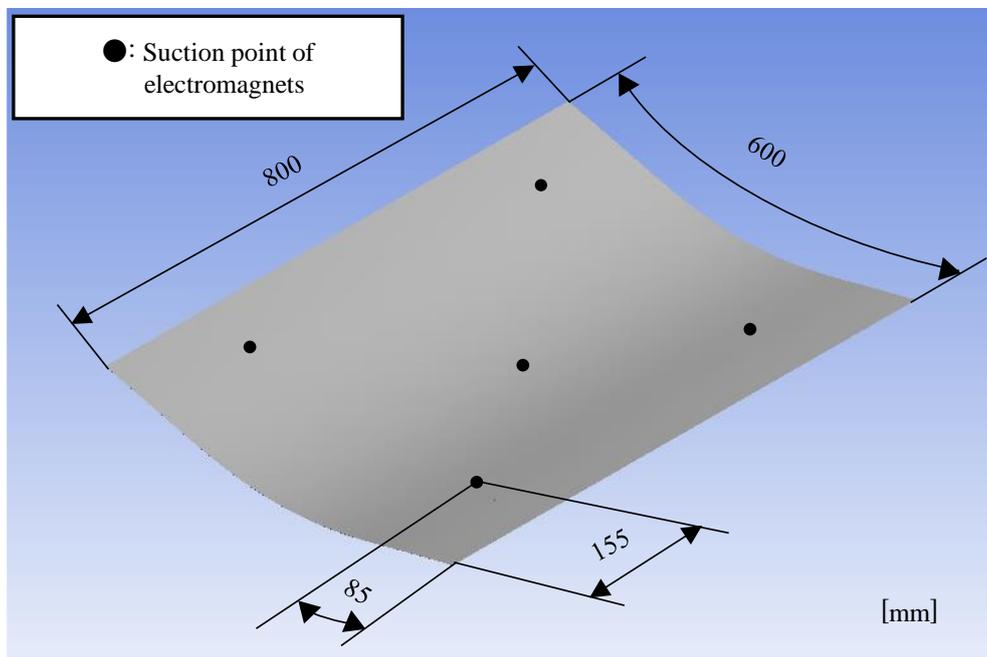
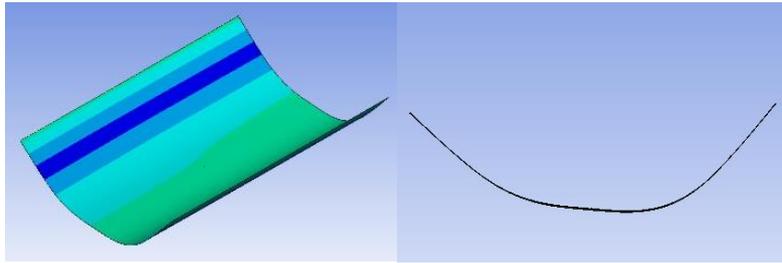
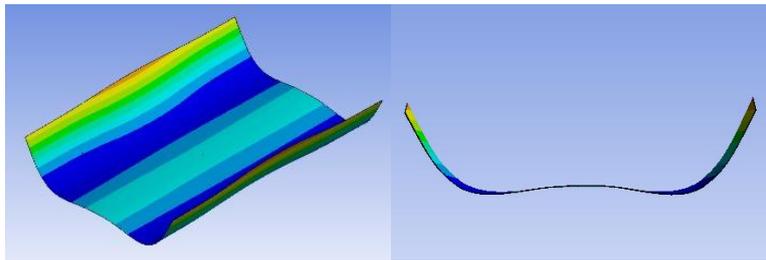


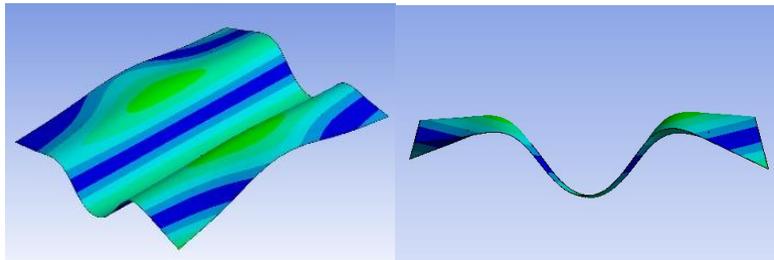
Fig. 3-9 Shape analysis of steel plate [3-4]



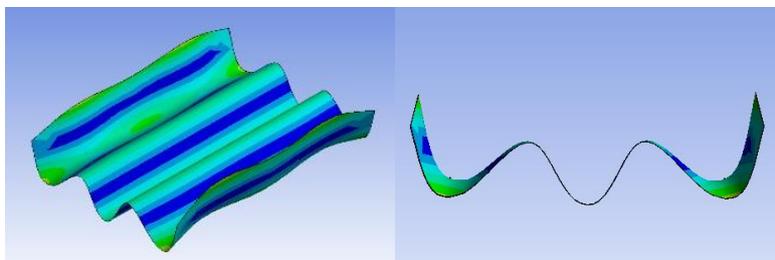
(a) Elastic 1st mode in y direction ($f = 6.20$ Hz)



(b) Elastic 3rd mode in y direction ($f = 11.71$ Hz)



(c) Elastic 3rd mode in y direction and elastic 1st mode in x direction ($f = 19.65$ Hz)



(d) Elastic 5th mode in y direction ($f = 41.69$ Hz)

Fig. 3-10 Shape analysis of steel plate [3-4]

3.5 まとめ

本章では、2章で得られた最適な電磁石角度によって湾曲磁気浮上させた薄鋼板にどのような振動モードが存在し、それらの振動モードが浮上性能にどのような影響を与えるのかを検討した。板厚 0.19 mm の鋼板のモデルを作製しモーダル解析および周波数応答解析を行った。また、湾曲磁気浮上中の鋼板をパルス波や正弦波によって加振することで、鋼板の揺れやすい振動数について検討した。本検討によって得られた成果は以下のとおりである。

1. 鋼板短手方向を湾曲させることで短手方向の弾性 1 次モード (6.20 Hz) に近い形状となるため、鋼板長手方向の振動や鋼板中央部が節になる偶数次のモードが抑制できる。よって、薄鋼板を湾曲浮上させることによって、弾性 1 次などの奇数次モードが支配的になり、他の振動モードを抑制することができることが確認できた。
2. 磁気浮上中の鋼板にパルス波で加振した際の、最大変位スペクトルは 5.75 Hz であり、同様の実験 10 回の結果より、2.5~10 Hz で最大変位スペクトルとなることから、鋼板の共振周波数は 2.5~10 Hz の範囲に存在することを確認した。
3. 磁気浮上中の鋼板に正弦波を与えた結果、変位標準偏差は 5 Hz で最も変位標準偏差が大きくなり鋼板が振動していることが確認できた。
4. モーダル解析では、弾性 1 次モードは 6.20 Hz であり、実際の湾曲磁気浮上実験においても弾性 1 次モードが支配的であると考えることができる。

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

Appendix 本章で用いたおもな記号

- y : Fig. 3-7 に示す y 方向の軸
- x : Fig. 3-7 に示す x 方向の軸
- F_5 : 中央電磁石ユニットの支持力 [N]
- φ : たわみ角 [°]
- a : 板長さ [m]
- b : 板の幅 [m]
- h : 板厚 [m]
- ρ : 鋼板の密度 [kg/m^3]
- g : 重力加速度 [m/s^2]
- l : x 軸に見た電磁石ユニット No. 1 と No. 3, あるいは No. 2 と No. 4 の距離 [m]
- d : x 軸に見た電磁石ユニット No. 1, No. 2, No. 3, No. 4 から鋼板端部までの距離 [m]
- E : 鋼板のヤング率 [N/m^2]
- θ : 電磁石角度 [°]

第3章の参考文献

- [3-1] S. Kumar, V. Ranjan, P. Jana, Free vibration analysis of thin functionally graded rectangular plates using the dynamic stiffness method, *Composite Structures*, Vol. 197, pp.39-53, (2018)
- [3-2] M. W. Teng, Y. Q. Wang,, Nonlinear forced vibration of simply supported functionally graded porous nanocomposite thin plates reinforced with graphene platelets, *Thin-Walled Structures*, Vol. 164, 107799, (2021)
- [3-3] T. Kato, R. Suzuki, T. Narita, H. Kato, Y. Yamamoto, Basic study on active noise control for considering characteristics of vibration of plate by giant magnetostrictive actuator, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 52, No. 1-2, pp.153-160, (2016)
- [3-4] 多田誠, 小川和輝, 成田正敬, 加藤英晃, 湾曲磁気浮上薄鋼板に発生する振動メカニズムに関する基礎的考察, *日本磁気学会論文特集号*, Vol.3, No.1, pp.107-112, (2019)

第 4 章 外乱状況下における 湾曲磁気浮上制御システム

4.1 はじめに

磁気浮上システムを鋼板搬送工程に適用することを考えると、システムに何らかの外乱が入力された状況下でも安定して磁気浮上を行うことが求められる。そこで、第4章では、構築した湾曲磁気浮上システムの有用性について検討するため、あえて磁気浮上を行うことが困難な状況を設定し磁気浮上実験を行った。外乱を磁気浮上システムに入力する方法は、いくつか考えることができる。制御電流にノイズを入力する方法[4-1]や、風を当てる外乱の入力方法[4-2]もあるが、本研究では、電磁石を物理的に振動させる方法を設定した。これは、磁気浮上制御の難しいポイントでもある磁場の非線形な特性から、磁気浮上性能に最も影響が出る外乱の入力方法と考えたためである。加振器に入力する外乱信号は、3章で得られた、湾曲磁気浮上中の鋼板の共振周波数の結果から、最も浮上性能が劣化すると考えられる外乱を設定した。

湾曲磁気浮上システムの浮上性能を向上させるためには、鋼板のたわみや弾性振動を制御するアクチュエータを増やすことが考えられるが、コスト増加は望ましくないと考える。そこで、コスト増加を抑えたアプローチとして、制御理論を変更することを検討した。これまで使用してきた最適制御理論のほかに、スライディングモード制御理論[4-3]とフィードバック・フィードフォワード併用型制御[4-4]を適用した湾曲磁気浮上システムを新たに構築し、外乱状況下における浮上性能を検討した。

4.2 最適制御を用いた湾曲磁気浮上システム

最適制御理論はある評価関数を最小とすることを目的とした制御理論であり，多入力多出力系に対しても制御系の設計が容易に行えるという実用的に優れた特長を有している．なお制御系の設計は 2.6 離散時間系最適制御理論の通りに行った．

4.3 スライディングモード制御理論を用いた湾曲磁気浮上システム [4-3]

4.3.1 スライディングモード制御理論

制御系を離散時間系で構成するため、離散時間系のスライディングモード制御理論に基づいてスライディングモード制御則を求める。離散時間系の状態方程式は次のように表される。なおここで新たに登場しない変数に関しては2章と同様とする。

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_d(i+1) &= \Phi \mathbf{z}_d(i) + \Gamma \mathbf{v}_d(i) \\ \Phi &= \exp(AT_s), \Gamma = \int_0^{T_s} [\exp(A\tau)] d\tau \mathbf{B} \end{aligned} \quad (4-1)$$

ここで \mathbf{v}_d : 離散時間系における電磁石コイルの定常電圧からの変動値 [V], T_s : サンプルング時間である [s]. \mathbf{z}_d は離散時間系における鋼板の変位 z_d , 速度 \dot{z}_d および電流 i_d を含む状態変数行列である。ここで離散時間系の評価関数は次のように表される。

$$J_d = \sum_{i=0}^{\infty} [\mathbf{z}_d(i)^T \mathbf{Q}_d \mathbf{z}_d(i) + \mathbf{v}_d(i)^T r_d \mathbf{v}_d(i)] \quad (4-2)$$

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, r_d : 制御入力に関する重み係数である。式(4-2)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。

$$\mathbf{M} = \Phi^T \mathbf{M} \Phi + \mathbf{Q}_d - \Phi^T \mathbf{M} \Gamma (\mathbf{r}_d + \Gamma^T \mathbf{M} \Gamma)^{-1} \Gamma^T \mathbf{M} \Phi \quad (4-3)$$

$$\mathbf{v}_d^0 = -\mathbf{F}_d \mathbf{z}_d \quad (4-4)$$

$$\mathbf{F}_d = (\mathbf{r}_d + \Gamma^T \mathbf{M} \Gamma)^{-1} \Gamma^T \mathbf{M} \Phi \quad (4-5)$$

4.3.2 切換超平面の設計

切換超平面を \mathbf{S}_d とし, 入力の切換関数 $\sigma(i)$ を次式で表す。

$$\sigma(i) = \mathbf{S}_d \mathbf{z}_d(i) \quad (4-6)$$

また等価制御入力 $\mathbf{v}_{eq}(i)$ は次式となる。

$$\mathbf{v}_{eq}(i) = -(\mathbf{S}_d \Gamma)^{-1} \mathbf{S}_d (\Phi - \mathbf{I}) \mathbf{z}_d(i) \quad (4-7)$$

ここで、 \mathbf{I} は Φ と同じサイズの単位行列である。式(4-7)の $v_{\text{eq}}(i)$ を式(4-1) $v_d(i)$ として代入すると等価制御系は次のように表すことができる。

$$\mathbf{z}_d(i+1) = \{\Phi - \Gamma(\mathbf{S}_d\Gamma)^{-1}\mathbf{S}_d(\Phi - \mathbf{I})\}\mathbf{z}_d(i) \quad (4-8)$$

ここで \mathbf{S}_d は式(4-8)のシステムが安定するように選択する必要がある。本研究ではこの設計法にシステムの零点を利用する方法を用いた。

$$\mathbf{S}_d = (r_d + \Gamma^T \mathbf{M} \Gamma)^{-1} \Gamma^T \mathbf{M} \Phi \quad (4-9)$$

ただし、 \mathbf{M} は式(4-3)の正定解である。

続いて状態を超平面に収束させ、スライディングモードを発生させる制御入力を考える。チャタリングを抑止する離散時間系スライディングモード制御を設計するためにこの条件を満たすようなスライディングモード制御則として次のように与えられるものを用いる。

$$\left. \begin{aligned} v_d(i) &= v_{\text{eq}}(i) + v_{\text{nl}}(i) \\ v_{\text{eq}}(i) &= -(\mathbf{S}_d\Gamma)^{-1}\mathbf{S}_d(\Phi - \mathbf{I})\mathbf{z}_d(i) \\ v_{\text{nl}}(i) &= -\{\alpha(i) + \beta(i)\} \text{sgn}\{\sigma(i)\} \end{aligned} \right\} \quad (4-10)$$

$$\alpha(i) = \eta \frac{\|\sigma(i)\|}{\|\mathbf{S}_d\Gamma\|} \quad (4-11)$$

$$(0 < \eta < 2, \quad \beta(i) \geq F_{\text{max}})$$

ここで v_{nl} ：状態を超平面に拘束するための非線形制御入力， η ：チャタリングを起こさずに状態を超平面に拘束する制御ゲイン， $\beta(i)$ ：外乱抑圧項， F_{max} ：外乱の最大値である。

またスライディングモード制御理論における切換関数 \mathbf{S}_d を決定する際に用いる重み行列（式(4-2)），ならびに式(4-11)における非線形入力項の値を Table 4-1 に示す。

Table 4-1 Weighting coefficients for sliding mode control [4-3]

\mathbf{Q}_d	r_d	η	$\beta(i)$
diag($7.2 \times 10^4, 0.01 \times 10^1, 2.0 \times 10^0$)	2.9×10^{-3}	0.06	1.1

4.4 フィードバック・フィードフォワード併用型制御を用いた湾曲磁気浮上システム [4-4] - [4-6]

4.4.1 フィードバック・フィードフォワード併用型制御における鋼板のモデル化

本研究では鋼板のモデリングの一つとして簡易な1自由度モデルを採用する。鉛直方向変位 z に関する運動方程式は以下のようなになる。

$$m_z \frac{d^2}{dt^2} z(t) = 2f_z(t) \quad (4-12)$$

ここで、 m_z ：鋼板を仮想的に5つに分割した質量 [kg]， z ：鋼板の絶対変位 [m]， f_z ：電磁石1個当りの吸引力の変動値 [N]である。

さらにフレームの変位を w とすると、電磁石と鋼板の間の距離は $Z = z(t) - w(t)$ と表すことができる。電磁石1個当たりのコイルのインダクタンス L を次式のように距離 Z に反比例する成分と磁束の漏れに相当する成分の和として近似する。

$$L(Z) = \frac{K_{em}}{Z} + L_{lea} \quad (4-13)$$

ここで K_{em} ：電磁石の吸引力の比例定数 [Hm]， L_{lea} ：電磁石1個あたりの漏れインダクタンス [H]である。

電磁石に加える電圧をとコイルに流れる電流 I の関係は、電磁石コイルの抵抗を R_z とすると、

$$V_z(Z, I) = R_z I + \frac{d}{dt}(L(Z)I) \quad (4-14)$$

である。平衡点 (Z_0, I_z) 近傍でテーラー展開すると、電磁石コイルに加わる定常電圧から変動値 v_z は

$$v_z = R_z i_z + L_z \frac{d}{dt} i_z - K_{em} \frac{I_z}{Z_0^2} \frac{d}{dt}(z(t) - w(t)) \quad (4-15)$$

ここで 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 ：平衡浮上状態における電磁石コイ

ルに流れる電流 [A], i_z : 電磁石コイルに流れる電流の変動値 [A], L_z : 式 (4-13) をより求めた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] 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に流れる電流に関する方程式は以下のようになる.

$$f_z(t) = \frac{F_z}{Z_0}(z(t) - w(t)) + \frac{F_z}{I_z}i_z(t) \quad (4-16)$$

$$\frac{d}{dt}I_z(t) = -\frac{K_{em}I_z}{L_zZ_0^2}\frac{d}{dt}(z(t) - w(t)) - \frac{R_z}{2L_z}i_z(t) + \frac{1}{2L_z}v_z(t) \quad (4-17)$$

ここで F_z : 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] である.

4.4.2 フィードバック・フィードフォワード併用型制御モデルの状態方程式

状態変数として鋼板の絶対変位, 絶対速度, 電磁石コイルに流れる電流, フレームの変位, 速度を採用し, 式 (4-12), (4-16), (4-17) を整理して以下のような状態方程式を得る.

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}_z \mathbf{z} + \mathbf{B}_z v_z + \mathbf{d}_z w \quad (4-18)$$

ただし,

$$\mathbf{z} = [z \quad \dot{z} \quad i_z]^T$$

$$\mathbf{w} = [w \quad \dot{w}]^T$$

$$\mathbf{A}_z = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{2F_z}{m_z Z_0} & 0 & \frac{2F_z}{m_z I_z} \\ 0 & -\frac{K_{em} I_z}{L_z Z_0^2} & -\frac{R_z}{2L_z} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_z = [0 \quad 0 \quad \frac{1}{2L_z}]^T$$

$$d_z = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{F_z}{m_z Z_0} & 0 \\ 0 & \frac{K_{em} I_z}{L_z Z_0^2} \end{bmatrix}$$

4.4.3 フィードバック・フィードフォワードゲインの決定

フィードバック・フィードフォワード併用型制御におけるフィードバックゲインならびにフィードフォワードゲインの決定には、離散時間系最適制御理論を用いた。本研究で扱うモデルの場合、鋼板の絶対変位の定常位置からの変動分、絶対速度ならびに電磁石コイル電流の定常値からの変動分のみを状態量として評価する必要がある。しかしフレーム加振による入力外乱の検出が容易であることから外乱を予測したフィードフォワード補償を行うことによりフィードバックのみの場合と比較して制御性能の向上が期待できる。状態変数と制御入力を評価する無次元量の評価関数を次式のように定義した。

$$J = (1/2) \sum_{k=1}^{N-1} \{z_{arg}^T(k) Q_z^{arg} z_{arg}(k) + R_z^{arg} v_z^2(k)\} \quad (4-19)$$

ただし、

$$z_{arg} = [z^T \quad w^T]^T$$

$$Q_z^{arg} = \text{diag}[1.394 \times 10^5, 1.0 \times 10^{-1}, 0.2 \times 10^1, 40.0 \times 10^{10}, 40.0 \times 10^{10}]$$

$$R_z^{arg} = 0.5 \times 10^{-2}$$

ただし、 Q_z^{arg} ：状態変数に対する重み係数行列、 R_z^{arg} ：制御入力に対する重み係数行列である。またこのときのフィードバック制御入力は以下のようなになる。

$$V_z(k) = F_z^{arg} z^{arg}(k) \quad (4-20)$$

$$F_z^{arg} = [F_z^{FB} \quad F_z^{FF}] \quad (4-21)$$

ここで F_z^{FB} ：フィードバックゲイン、 F_z^{FF} ：フィードフォワードゲインである。

4.5 実験条件

4.5.1 入力する外乱の条件

3章の検討にて、板厚 0.19 mm 鋼板の共振周波数は、0～10 Hz の間に存在することが確認できた。そのため、磁気浮上中の鋼板にとって最も浮上性能を劣化させる外乱は 0～10 Hz の帯域のランダムノイズであると考えた。そこで、電磁石を設置しているフレームに 0～10 Hz の帯域のランダムノイズによって物理的な振動を加えた。フレーム加振の振幅は電磁石角度 10～15° において鋼板を浮上させることのできる最大の振幅（フレーム変位標準偏差約 0.18 mm）を用いた。フレームの変位時刻歴を Fig. 4-1 に示す。

4.5.2 浮上確率実験の方法

2.6 節の浮上確率の実験方法と同様に磁気浮上性能の評価として浮上確率を計測した。浮上確率は外乱入力後 30 秒間浮上が続いたものを浮上成功とし、50 回の浮上実験のうち浮上が成功した回数を百分率により算出した。また、人為的誤差や影響を軽減するため、支持台を利用し、湾曲浮上に用いた。なお、この装置は電磁石の傾斜角に対応し鋼板を浮上時と同じ形状にし、浮上位置まで移動する事が可能である。鋼板浮上後、この装置を浮上鋼板に影響のない位置まで離す。なお 2.6 節の Table 2-4 に示した浮上パターンの判定方法に基づいて浮上確率を計測した。

4.5.3 電磁石角度の設定

2章の実験結果より、板厚 0.19 mm の鋼板を磁気浮上させる場合、電磁石角度 13° で磁気浮上させるのが最も浮上性能が向上することを確認した。そこで、本章では、湾曲をさせない電磁石角度 0° と湾曲を行う電磁石角度 13° の 2 種類の電磁石角度を設定した。設定した電磁石角度を Fig. 4-2 に示す。

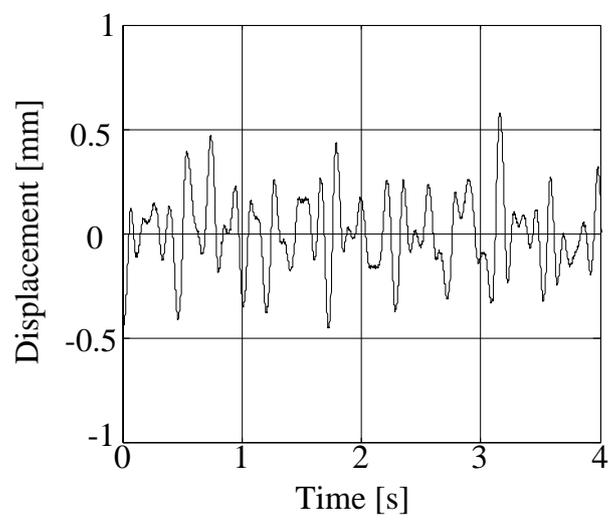


Fig. 4-1 Time histories of displacement of vibrating frames by random disturbance [4-6]

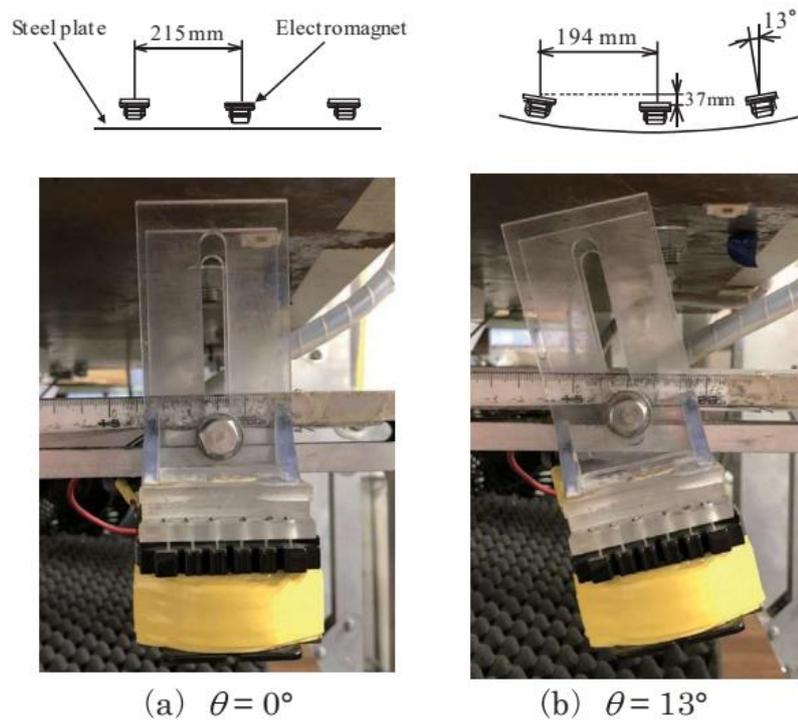
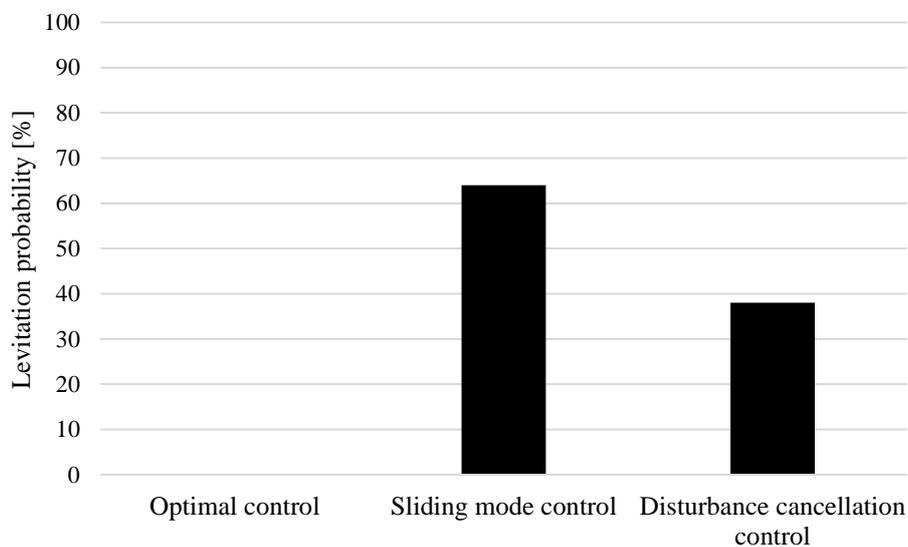


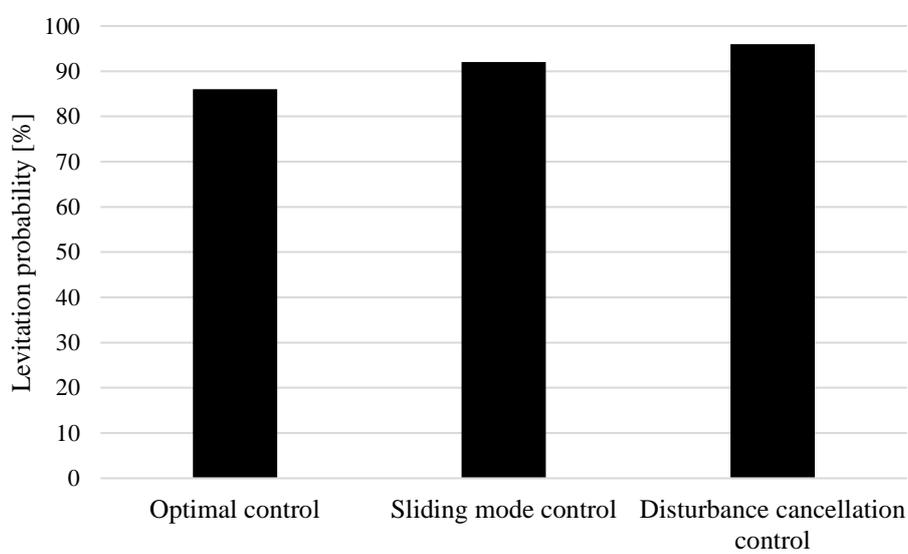
Fig. 4-2 Relationship between tilt angle of electromagnets θ and shape of steel plate [4-3]

4.6 実験結果

外乱状況下にてそれぞれの制御理論を用いて、浮上確率実験を行った。Fig. 4-3に制御理論ごとの浮上確率(a)電磁石角度 0° (b)電磁石角度 13° を示す。Fig. 4-3より、こちらでも電磁石角度 0° 時と 13° 時を比較すると、外乱状況下においても、電磁石角度 13° で鋼板を湾曲させて磁気浮上を行うことで、浮上確率が向上することが確認できる。これは、すべての制御理論を適用した場合においても浮上確率が向上した。また、制御理論で比較すると電磁石角度 0° では、スライディングモード制御が最も浮上確率が高いという結果を得た。また、電磁石角度 0° では、最適制御理論では磁気浮上を行うことができないため、浮上確率は0%となった。電磁石角度 13° では、フィードバック・フィードフォワード併用型制御が最も浮上確率が高くなり、スライディングモード制御、最適制御理論の順に浮上確率は減少傾向となった。外乱に対してロバスト性の低い最適制御理論を適用した磁気浮上システムでも、鋼板を電磁石角度 13° で湾曲させて磁気浮上を行うことで、浮上確率が大幅に向上することを確認した。また、電磁石角度 13° 時のフィードバック・フィードフォワード併用型制御では、外乱状況下においても浮上確率が96%となり100%に近い結果を得た。



(a) Electromagnet angle $\theta = 0^\circ$



(b) Electromagnet angle $\theta = 13^\circ$

Fig. 4-3 Levitation probability

4.7 まとめ

本章では、湾曲磁気浮上中の鋼板の共振周波数の結果から、最も浮上性能が劣化すると考えられる外乱を設定し、磁気浮上実験を行った。浮上性能を向上させるアプローチとして、制御理論を変更することで、浮上性能が向上させることができるか検討した。本研究では、最適制御理論のほかに、スライディングモード制御理論とフィードバック・フィードフォワード併用型制御を適用した湾曲磁気浮上システムを構築し、外乱状況下における浮上性能を検討した。本検討によって得られた成果は以下のとおりである。

1. 外乱状況下においても、鋼板を湾曲させずに磁気浮上させるよりも、最適な電磁石角度によって湾曲させて磁気浮上を行うことで、浮上確率が向上することを確認した。これは、すべての制御理論において同様の傾向を得られた。
2. 最適制御理論でも、湾曲磁気浮上を行うことで浮上確率が向上することを確認した。
3. スライディングモード制御では、最適制御理論よりも浮上確率が高くなるという結果を得た。
4. フィードバック・フィードフォワード併用型制御では浮上確率が高いという結果を得た。そのため外乱状況下において最も浮上性能が高い制御理論は、フィードバック・フィードフォワード併用型制御であることが確認できた。

フィードバック・フィードフォワード併用型制御は、最も浮上性能が高くなるという結果を得たが、アクチュエータ数は同じであっても、フィードフォワードを行うためのセンシングが必要であり、センサ数が増加する。そのため、最適制御理論やスライディングモード制御のようなフィードバックのみの制御よりもコストが増加してしまふ。費用対効果の観点から考えるとスライディングモード制御を適用した湾曲磁気浮上システムにすることでコストを抑えつつ高い浮上性能を実現できる。制御ユニットのチャンネル数の都合や、コストを抑えるためであ

れば、スライディングモード制御有効であると考えられる。制御ユニットのチャンネル数に余裕があり、センサを増やすことができるならば、フィードバック・フィードフォワード併用型制御を適用することで最も高い浮上性能を実現することが可能である。

Appendix 本章で用いたおもな記号

- v_d : 離散時間系における電磁石コイルの定常電圧からの変動値 [V]
- T_s : サンプルング時間である [s]
- 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
- S_d : 切換超平面
- $\sigma(i)$: 入力の切換関数
- $v_{eq}(i)$: 等価制御入力 [V]
- v_{nl} : 状態を超平面に拘束するための非線形制御入力 [V]
- η : チャタリングを起こさずに状態を超平面に拘束する制御ゲイン
- $\beta(i)$: 外乱抑圧項
- F_{max} : 外乱の最大値
- m_z : 鋼板を仮想的に5つに分割した質量 [kg]
- z : 鋼板の絶対変位 [m]
- f_z : 電磁石1個当りの吸引力の変動値 [N]
- w : 電磁石を設置しているフレームの変位 [m]
- L : コイルのインダクタンス [H]
- K_{em} : 電磁石の吸引力の比例定数 [H/m]
- L_{lea} : 電磁石1個あたりの漏れインダクタンス [H]
- R_z : 電磁石コイルの抵抗 [Ω]

- 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 : 平衡浮上状態における電磁石コイルに流れる電流 [A]
- i_z : 電磁石コイルに流れる電流の変動値 [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]
- F_z : 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]
- $\mathbf{Q}_z^{\text{arg}}$: 状態変数に対する重み係数行列
- $\mathbf{R}_z^{\text{arg}}$: 制御入力に対する重み係数行列
- \mathbf{F}_z^{FB} : フィードバックゲイン
- \mathbf{F}_z^{FF} : フィードフォワードゲイン

第4章の参考文献

- [4-1] 長谷川真也, 押野谷康雄, 石橋一久, スライディングモード制御を用いた磁気浮上薄鋼板の弾性振動抑制に関する検討, 日本機械学会論文集(C編), Vol.74, No. 740, pp823-832, (2008)
- [4-2] 鈴木應来, 中川聡子, 0.18mm厚鋼板の非接触磁気浮上の実現と外乱に対する安定性の検証, 日本AEM学会誌, Vol. 25, No.2, (2017)
- [4-3] 小川和輝, 多田誠, 成田正敬, 加藤英晃, 薄鋼板の湾曲磁気浮上システムの開発(スライディングモード制御を用いた浮上性能の実験的検討), 日本磁気学会論文特集号, Vol. 4, No. 2, pp.122-128, (2020)
- [4-4] 小川和輝, 多田誠, 成田正敬, 加藤英晃, 柔軟鋼板の湾曲磁気浮上制御(外乱相殺制御の基礎的検討), 日本磁気学会論文特集号, Vol. 3, No. 1, pp.101-106, (2019)
- [4-5] K. Ogawa, M. Tada, T. Narita, H. Kato, Bending Magnetic-Levitation Control for Flexible Steel Plate (Fundamental Consideration on Disturbance Cancellation Control under Disturbance Conditions), Proceedings of 12th Asian Control Conference (IEEE), pp.984-986, (2019)
- [4-6] K. Ogawa, M. Tada, T. Narita, H. Kato, Electromagnetic Levitation Control for Bending Flexible Steel Plate: Experimental Consideration on Disturbance Cancellation Control, actuators Vol.7, No.3, 43, (2018)

第 5 章

結 論

本研究は、薄鋼板生産時の接触搬送による鋼板表面の品質劣化という問題を解決するため、薄鋼板の非接触搬送技術となる薄鋼板の磁気浮上システムの構築を目的に行った。薄鋼板の浮上安定性の阻害要因であった柔軟性を積極的に利用した湾曲磁気浮上システムを構築し、工場等の使用環境を想定した外乱を入力した場合における湾曲磁気浮上システムの有用性について検討した。

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章では研究背景と磁気浮上技術の概要を説明し、本研究の目的やその特色について述べた。

第2章 湾曲磁気浮上システムの構築と基礎特性

薄鋼板を湾曲させて磁気浮上を行うため、湾曲磁気浮上システムを構築した。装置構成や鋼板のモデリングや最適制御理論を適用した制御システムについて述べた。

構築した湾曲磁気浮上システムによって板厚 0.19 mm の鋼板を磁気浮上させることに成功し、電磁石角度 0° ~ 20° までの磁気浮上実験を行った。その結果、湾曲を行わずに磁気浮上させるよりも電磁石角度を変化させ湾曲を行って磁気浮上を行うことで、変位標準偏差は減少し、鋼板の振動が抑制される傾向を確認した。浮上確率実験でも同様の傾向を確認した。変位標準偏差と浮上確率の結果より、板厚 0.19 mm の鋼板を磁気浮上させる場合、電磁石角度 13° で湾曲磁気浮上を行うことで、浮上性能が最も向上することを確認した。

第3章 柔軟鋼板の湾曲磁気浮上中の振動メカニズム

湾曲磁気浮上させた薄鋼板にどのような振動モードが存在し、それらの振動モードが浮上性能にどのような影響を与えるのかを考察した。湾曲磁気浮上中の鋼板をパルス波や正弦波によって加振することで、鋼板の揺れやすい振動数について検討した。また、板厚 0.19 mm の鋼板のモデルを作製しモーダル解析および周波数応答解析を行った。

磁気浮上中の鋼板にパルス波で加振した際の、最大変位スペクトルは 5.75 Hz であり、正弦波を与えた実験で

は、変位標準偏差は5 Hzで加振した際に最も変位標準偏差が大きくなり鋼板が振動していることが確認できた。解析結果では、鋼板短手方向を湾曲させることで短手方向の弾性一次モード(6.20 Hz)に近い形状となるため、鋼板長手方向の振動や鋼板中央部が節になる偶数次のモードが抑制できる。よって、薄鋼板を湾曲浮上させることによって、弾性一次などの奇数次モードが支配的になり、他の振動モードを抑制することができることが確認できた。実験結果と解析結果を比較すると湾曲磁気浮上中の共振周波数は弾性一次モードとほぼ一致するため、鋼板を湾曲させて磁気浮上を行うことで、振動モードを弾性一次モードに限定できることが確認できた。これにより、湾曲磁気浮上によって浮上性能が向上するメカニズムを解明した。

第4章 外乱状況下における湾曲磁気浮上制御システムの評価

湾曲磁気浮上中の鋼板の共振周波数の結果から、最も浮上性能が劣化すると考えられる外乱を設定し、磁気浮上実験を行った。湾曲磁気浮上システムの制御理論を変更することで、浮上性能が向上するか検討するため、最適制御理論、スライディングモード制御理論、フィードバック・フィードフォワード併用型制御を適用した湾曲磁気浮上システムを構築し、外乱状況下における浮上性能を検討した。

実験結果より、外乱状況下においても、鋼板を湾曲させずに磁気浮上させるよりも、最適な電磁石角度によって湾曲させて磁気浮上を行うことで、浮上確率が向上することを確認した。

フィードバック・フィードフォワード併用型制御は、最も浮上性能が高くなるという結果を得たが、センサ数が増加するため、最適制御理論やスライディングモード制御のようなフィードバックのみの制御よりもコストが増加してしまう。スライディングモード制御を適用した湾曲磁気浮上システムにすることでコストを抑えつつ高い浮上性能を実現できる。制御ユニットの性能や、センサを増やす予算を考慮して制御理論を選択することで用途に応じた湾曲磁気浮上システムを提案できる可能を示すこ

とができた。

以上の研究成果により，薄鋼板の湾曲磁気浮上システムを提案し，その有用性を示すことができた。

今回の成果を踏まえて，今後取り組むべき課題として考えられることを以下に示す。

1. 本研究では，薄鋼板生産時の鋼板搬送工程における非接触搬送を提案するため，湾曲磁気浮上システムを検討した。しかし，この研究は，基礎的な研究段階のため，鋼板をその場で静止させた状態で検討を行っている。そのため，鋼板を移動させるための検討が必要である。将来的には，湾曲磁気浮上システム自体を水平移動できる装置を構築し，検討をする必要がある。
2. 本研究で設計した制御モデルは，鋼板の質量を仮想的に5つに分割し，各電磁石ユニットの位置で検出した変位，速度，電流値を同じ位置の電磁石にフィードバックする1自由度モデルである。そのため，5か所の電磁石ユニットはそれぞれ独立して制御を行う。5か所の電磁石ユニットを統合的に制御するモデルを採用することでより高い浮上性能を実現できる可能性がある。
3. 加振器を制御に利用した，電磁石と加振器の2自由度制御を行うことで，鋼板をその場で完全に静止させるような制御を行うことができる可能性がある。
4. 現在の湾曲磁気浮上システムでは，手動にて電磁石角度を変更しているが，電磁石角度を変更するアクチュエータを作製することで，その時の鋼板の振動状態に応じて電磁石角度をリアルタイムに制御するシステムを構築できる可能性がある。
5. 現在の検討では，鋼板が平らな状態から最適な湾曲角度まで変化する過渡状態を除外して検討している。今後は，平らな状態から最適な電磁石角度に湾曲させる手法について検討する必要がある。

謝 辞

本研究を行うにあたり多大なるご指導，ご鞭撻ならびにお尽力を賜りました本学 工学部機械システム工学科 成田正敬講師ならびに加藤英晃講師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 工学部機械システム工学科 森山裕幸 教授，落合成行 教授，奥山淳 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。

なお，本研究の一部は日本学術振興会(特別研究員奨励費 22J14069)の助成を受けたものです。

最後に本学の諸先生，諸先輩，同僚，大学院生ならびに加藤・成田研究室の諸氏に感謝いたします。

令和 5 年 1 月

小 川 和 輝

付録 本論文に記載された内容の引用元

本論文は参考文献 [2-1], [2-2], [2-3], [2-4], [3-1], [4-3], [4-4], [4-6] に掲載された内容を基に構成されている。Mechanical Engineering Journal に掲載された内容 [2-1] は第 2 章 2.1 節と 2.3～2.5 節, 日本磁気学会論文特集号に掲載された内容は [2-2], [2-3], [2-4] が第 2 章 2.1 節, [3-1] が第 3 章 3.2～3.4 節, [4-3] が第 4 章 4.1 節, 4.3 節, 4.5 節, [4-4] が第 4 章 4.1 節と 4.4 節, *actuators* に掲載された内容 [4-6] は第 4 章 4.1 節と 4.4 節を構成している。