

# 論文の内容の要旨

論文題目「柔軟鋼板の湾曲磁気浮上システムに関する研究」

学位申請者 小川 和輝

キーワード：磁気浮上，柔軟鋼板，非接触支持，振動制御，浮上安定性

磁気浮上技術は、浮上対象と装置が物理的に接触しないため、エネルギー損失や浮上対象の摩耗、破損、騒音といった問題点を根本的に解決できる特長を有し、省エネルギー化やSDGsの推進といった社会の課題に対する解決策となりうる技術である。本研究は薄鋼板の製造ラインに着目し、鋼板とローラの接触搬送によって発生する表面品質の劣化に対して、磁性体の浮上対象に磁場を加えた際に発生する吸引力を利用して対象を磁気浮上させる非接触支持技術の構築を目的としている。

吸引力を利用した方式の磁気浮上技術に関する多くの先行研究において、浮上対象は十分な板厚があり、面積も小さい鋼板であるため、剛体として扱われる。この浮上対象が剛体のシステムでは電磁石付近の変位や速度などの状態をフィードバックし、容易に位置決め制御を行うことができ、高い浮上安定性を得ることができる。しかし、板厚が薄く面積の大きい鋼板の場合、浮上対象の曲げ剛性が低いことが問題となる。電磁石の吸引力が及ぶ部分はフィードバック制御によって位置決めが可能であるが、電磁石の吸引力が作用しない部分は自重によってたわみが発生し、浮上制御を困難にする高次の弾性振動を発生しやすくなる。この問題を解決するためには、振動制御を行う電磁石の系統を増やすことが考えられるが、システムが冗長となるため現実的ではない。そこで限られた電磁石数で磁気浮上中の安定性を向上させる手段として、薄鋼板の柔軟性を積極的に活用する方法が考えられる。本論文は、鋼板を塑性変形しない範囲で湾曲させて非接触支持することで、浮上安定性を向上させる磁気浮上方式について検討を行った。また実際の搬送ラインでの利用を考慮すると、鋼板を搬送させる際に磁気浮上装置自体に振動が加わり、その振動によって浮上した鋼板が制御不能になり、落下や電磁石に接触してしまうことが考えられる。本研究は磁気浮上装置自体に外乱が入力された際の浮上安定性を確保する観点から、鋼板の振動特性の把握と安定性を向上する制御方式を提案し、実験により評価を行った。

本論文は5章で構成されており、以下に各章の概要を述べる。

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。