

福岡工業大学 学術機関リポジトリ

安定して柔軟鋼板を非接触支持するマグレブシステム

— 重力を活用した浮上システムに関する解析的考察 —

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 福岡工業大学総合研究機構 公開日: 2022-12-20 キーワード: Flexible steel plate, Magnetic levitation, Non-contact support 作成者: 遠藤, 文人, 糸山, 凜太郎 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/11478/00001741

安定して柔軟鋼板を非接触支持するマグレブシステム — 重力を活用した浮上システムに関する解析的考察 —

遠藤 文人 (工学部電気工学科)

糸山 凜太郎 (工学部電気工学科)

Maglev System for Non-Contact Stable Support of Flexible Steel Plate — Analytical Consideration on Levitation System using Gravity —

ENDO Ayato (Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering)

ITOYAMA Rintaro (Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering)

Abstract

Generally, flexible steel plates are transported by rollers. However, the contact between the roller and steel plate degrades the surface quality. One of the solutions to the problems is the non-contact transport system by magnetic levitation using electromagnetic force. However, flexible steel plate is easy to fall by deflection. Therefore, in this paper, magnetic levitation system by changing direction of flexible steel plate was proposed for decreasing the deflection of steel plate. Moreover, characteristics of attractive force for flexible steel plate was investigated by magnetic field analysis. The results suggested that flexible steel plate is levitated by realizable coil current condition.

Keywords : Flexible steel plate, Magnetic levitation, Non-contact support

1. 緒言

自動車や家庭用電気製品、缶の製造には鋼板が用いられており、特に厚さ 0.3 mm 以下の柔軟鋼板は製品の軽量化を目的として広く用いられるようになってきている。製造された柔軟鋼板は基本的にローラの上を転がす接触搬送によって製造ライン上を運搬される。この搬送方式ではローラと柔軟鋼板が接触するため、表面処理工程におけるメッキ不良や鋼板表面に傷がつくことが考えられる。近年は柔軟鋼板に高品質化が求められることもあり、メッキ不良や傷といった表面品質の劣化が問題視されている。

そこで、磁気浮上を用いて柔軟鋼板を非接触に把持・搬送する技術が提案されている^{(1)~(3)}。これらの磁気浮上システムでは柔軟鋼板の板厚方向が鉛直方向となるように把持している。この場合、柔軟鋼板の鉛直方向に電磁石を配置し、柔軟鋼板の自重とつり合うような吸引力を電磁石によって発生させ、非接触把持を実現している。しかしながら、柔軟鋼板は薄くなるほど曲げ剛性が低下する。そのため、電磁石近傍は電磁石と柔軟鋼板のギャップを一定に保って浮上することができるが、電磁石から離れている吸引力の及ばない範囲では柔軟鋼板が湾曲し、たわみが発生する。このたわみによって柔軟鋼板は浮上中に複雑な形状となり、制御が難しい複雑な弾性振動が発生することになる。さらにこの

弾性振動は柔軟鋼板の落下に寄与することとなる。

以上のことより Narita らは、柔軟鋼板の水平方向に電磁石を設置することで、柔軟鋼板を水平方向へ引っ張り上げ、柔軟鋼板のたわみを抑制しながら、非接触把持を実現する磁気浮上システムを考案した⁽⁴⁾。この磁気浮上システムでは E 形コアの電磁石を使用している。このような電磁石では中心方向へ吸引力が発生する特性を応用し、柔軟鋼板の重力に対向する方向へ発生する支持力と柔軟鋼板のたわみを抑制する水平方向への張力を同時に発生させる。電磁石が発生させることができる支持力は従来の方式と比べて小さくなることから、大型な柔軟鋼板を浮上させることは難しいものの、小型な柔軟鋼板であれば従来方式では浮上が困難であった、剛性が小さい 0.05 mm 程度の非常に薄い柔軟鋼板であっても浮上できることが実験的に明らかにされている⁽⁵⁾。

著者らは前述の磁気浮上システムにおいて、柔軟鋼板に定常的に印加する張力が浮上安定性に及ぼす影響について実験的に検討を行ったところ、張力により柔軟鋼板の振動特性が変化し、板厚によっても安定した浮上を実現可能な張力が異なることを明らかにした⁽⁶⁾。そのため、水平方向から引っ張り上げるような磁気浮上システムでは、板厚が変化しても安定した磁気浮上を実現するために 1 つの電磁石によって支持力ならびに張力を制御する必要があり、制御

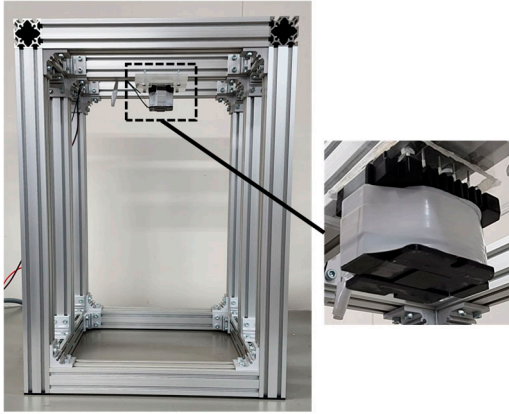
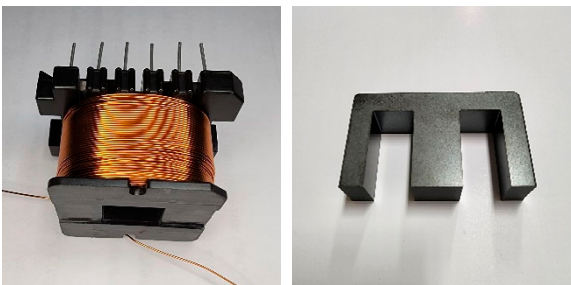


図 1 磁気浮上システムと電磁石

Fig. 1. Magnetic levitation system and electromagnet.



(a) コイル (a) Coil.
(b) E型フェライトコア (b) E-type ferrite core.

図 2 磁気浮上用電磁石

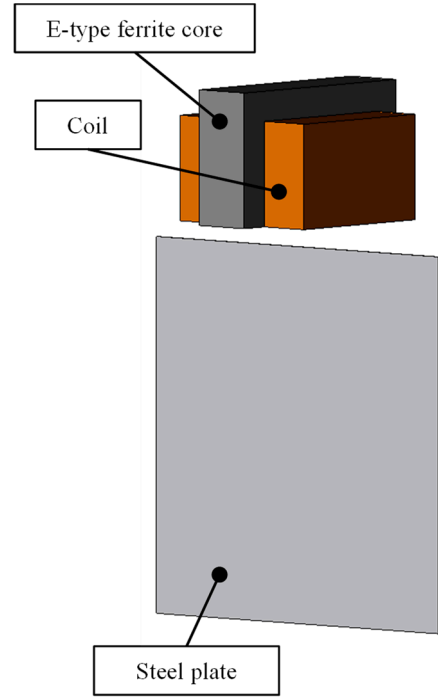
Fig. 2. Electromagnet for magnetic levitation.

システムの複雑化が懸念される。そこで、本研究では従来の磁気浮上システムとは異なり、柔軟鋼板の板厚方向が水平方向となるように把持する磁気浮上システムを提案する。本方式では電磁石を柔軟鋼板の鉛直方向に配置するため、柔軟鋼板にかかる重力によってたわみを抑制することができる。そのため、電磁石では張力を制御する必要がなくなり、制御システムの簡略化や電流量を低減することが可能となる。

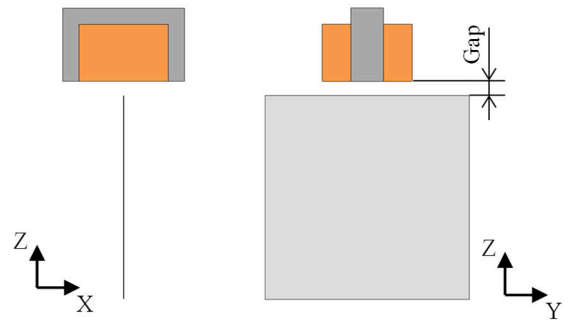
本報告では新たに提案する磁気浮上システムにおいて電磁界解析を用いて電磁石の吸引力特性や浮上実現性について検討を行った。

2. 自重を活用した磁気浮上システム

本報告では図 1 のような磁気浮上システムを想定している。この磁気浮上システムでは電磁石に電流を流すことで柔軟鋼板の自重とつり合う吸引力を発生させ、柔軟鋼板を空間上で非接触に把持することができる。浮上対象は実際に市販されている短手方向 100 mm, 長手方向 400 mm, 厚さ 0.24 mm の柔軟鋼板 (SS400) とした。図 2 には本磁気浮上システムで使用する電磁石を示している。電磁石には E 型のフェライトコアに対し、線径 0.5 mm の銅線を用いた巻数 1005 回のコイルを取り付けている。



(a) 解析モデルの全体図
(a) Overall view of model.



(b) 解析条件
(b) Analytical condition.

図 3 磁気浮上システムの解析モデル

Fig. 3. Analytical model of magnetic levitation system.

3. 浮上中の吸引力に関する解析的検討

本報告では浮上中の柔軟鋼板にかかる吸引力を明らかにするため、電磁界解析ソフトウェア JMAG を用いた有限要素法による電磁界解析を行った。図 3, 4 に本解析で使用した 3 次元モデルを示す。本解析では実際の磁気浮上システムを参考に、浮上対象の柔軟鋼板は板厚 0.24 mm の SS400, 電磁石のコアはフェライト (PC40) とし、それぞれ非線形な B-H カーブの特性を適用した。電磁石のコイルは銅線 (比透磁率 1, 抵抗率 $1.673 \times 10^{-8} \Omega \text{m}$) を用い、巻数は 1005 回に設定した。なお、空気領域は電磁石のコアを中心に 1 辺 500 mm の立方体の領域を設定し、モデルの要素数は 104420 点

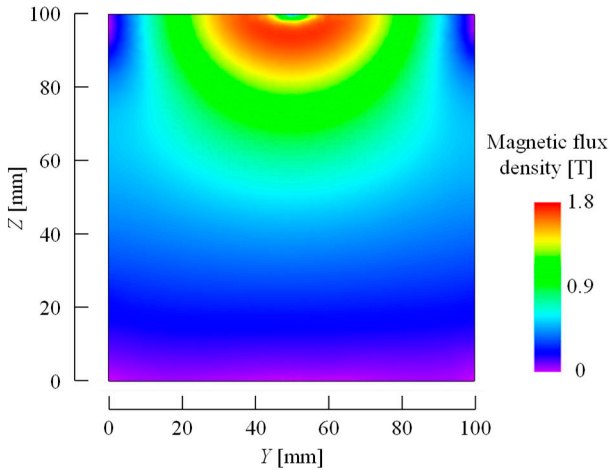


図4 柔軟鋼板の磁束密度分布

Fig. 4. Magnetic flux density distribution of steel plate.

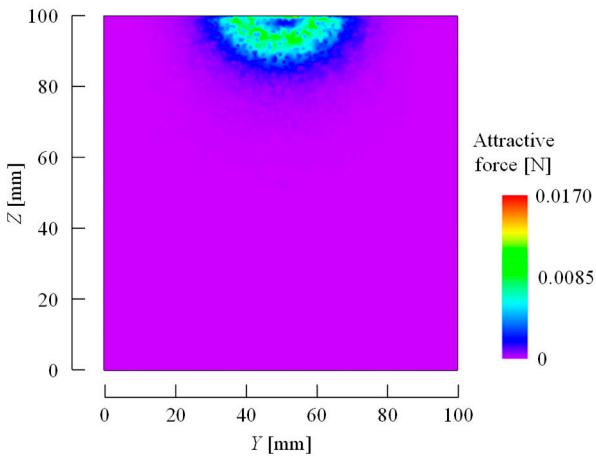


図5 柔軟鋼板の吸引力分布

Fig. 5. Attractive force distribution of steel plate.

とした。解析では電磁石のコイルを流れる電流値を 0~3 A まで変化させ、その際に X, Y, Z それぞれの方向に発生する吸引力を算出した。なお、本システムで使用する電磁石のコイルに流れる電流の条件は発熱を空冷で対応できるように 0~3 A とした。

ここで、電磁石表面と柔軟鋼板端部との間（ギャップ）は浮上中に電磁石と接触することなく、発熱を考慮し、電磁石に流す電流も小さくなるようにする必要がある。本報告では双方を実現可能な 7 mm のギャップを設けた解析モデルによって検討を行った。

また本解析では柔軟鋼板の長手方向を実際の長さから 1/4 とした 100 mm のモデルを用いている。これは電磁石によって柔軟鋼板へ発生する吸引力が寄与する範囲は柔軟鋼板全体でなく、電磁石近傍であるためである。

本報告の予備的な検討として柔軟鋼板における磁束密度ならびに吸引力の分布について解析を行っている。図 4 には柔軟鋼板における磁束密度分布、図 5 には吸引力分布を

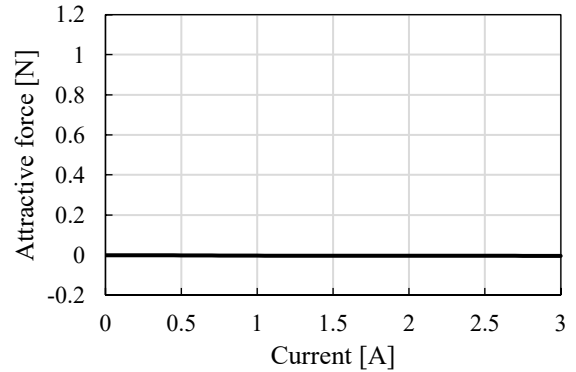


図6 柔軟鋼板における X 方向の吸引力

Fig. 6. Attractive force of steel plate (X-direction).

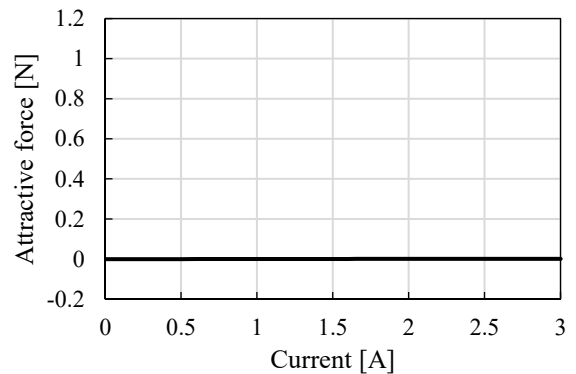


図7 柔軟鋼板における Y 方向の吸引力

Fig. 7. Attractive force of steel plate (Y-direction).

示している。図 4, 5 とともに電磁石には 1 A の電流が流れている条件で解析を行っている。また解析では図上部に電磁石が配置されている。図 4 から分かるように柔軟鋼板における磁束密度は電磁石から離れるほど小さくなり、最下部付近ではほぼ 0 T に近づいている。さらに、図 5 で示している吸引力分布は電磁石近傍を除きほぼ 0 N であり、電磁石近傍以外は柔軟鋼板の吸引力には影響がないことが分かる。電磁石のコイルに 3 A の電流が流れた際にも吸引力分布から柔軟鋼板にかかる吸引力を十分に評価可能であることを確認しており、本解析モデルにおける柔軟鋼板の長手方向の長さを 100 mm とした。

4. 浮上状態における吸引力とコイル電流

3 章の条件で解析を行った結果として図 6~8 に電流と吸引力の関係を X, Y, Z 方向に分けてそれぞれ示している。図 6, 7 から分かるようにコイルを流れる電流が 0~3 A の範囲においては X ならびに Y 方向にかかる吸引力はほぼ 0 N である。そのため、本解析条件を平衡状態とするような磁気浮上環境においては柔軟鋼板が横滑りするような状況で X ならびに Y 方向へ変位することはなく浮上すると考えられる。また、図 8 には Z 方向へかかる吸引力とコイル電流の関係を示している。柔軟鋼板にとって Z 方向の吸引力は自重と対向する方向であり、自重と Z 方向の吸引力が釣り合うこ

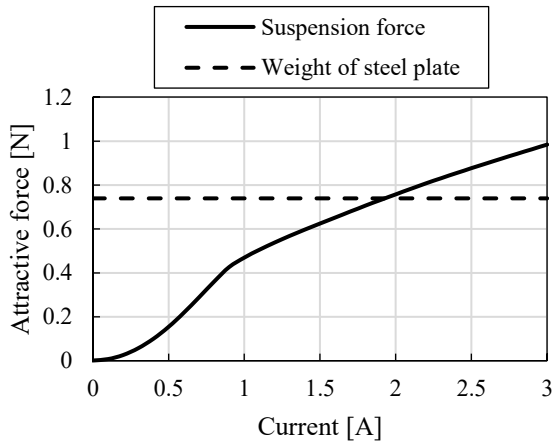


図8 柔軟鋼板におけるZ方向の吸引力

Fig. 8. Attractive force of steel plate (Z-direction).

とで非接触浮上を実現する。図8において破線は磁気浮上システムで浮上させることを想定している長手方向400 mm, 短手方向100 mm, 厚さ0.24 mmの柔軟鋼板の自重を示している。そのため, 破線と実線が交わる点が自重と吸引力が釣り合う点であり, 本解析結果では1.93 Aの電流をコイルに流すことで浮上できることを示している。また, 浮上可能な電流値近傍では電流に対する吸引力の特性がほとんど線形の特性を示しており, 電流値も実用可能な範囲内であることから, 本磁気浮上システムにおいてギャップ7 mmとした場合に浮上可能であることが示された。

5. 結言

本報告では柔軟鋼板の板厚方向を水平方向とし, 自重をたわみの抑制に活用した新しい磁気浮上システムを提案し, そのシステムの妥当性と吸引力特性について電磁界解析によって検討を行った。その結果, 柔軟鋼板の非接触把持を電磁石において実用可能な電流の範囲内で実現することが可能であることを示した。本報告では板厚0.24 mmの鋼

板を対象としたが, より板厚の薄い柔軟鋼板であっても同様な吸引力特性となると考えられ, 異なる板厚でも実現可能であると考えられる。本システムは柔軟鋼板上端で支持しており, 下端は支持のない状態であるため, 浮上中に発生する振動による浮上安定性への影響が懸念される。今後は本報告の静解析の結果を基に動的環境下における鋼板の特性を明らかにし, 本システムを用いた際の浮上安定性への効果について検討していく。

謝辞

本研究は本学エレクトロニクス研究所の2021年度研究スタートアップ支援制度により実施したものである。

文 献

- (1) 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, 4(2) (2020) p. 122.
- (2) 小田島悠祐, 高田裕介, 及川育人, 中川聡子: 薄鋼板のインダクタンスモデル式を用いたギャップセンサを用いない磁気浮上システムの構築と浮上案内実験, 電気学会論文誌D (産業応用部門誌), 138(8) (2018) p. 692.
- (3) O. Guney, A. Bozkurt, and K. Erkan: Centralized Gap Clearance Control for Maglev Based Steel-Plate Conveyance System, Advances in Electrical and Computer Engineering, 17(3) (2017) p. 101.
- (4) T. Narita, M. Kida, T. Suzuki, and H. Kato: Study on Electromagnetic Levitation System for Ultrathin Flexible Steel Plate Using Magnetic Field from Horizontal Direction, Journal of the Magnetics Society of Japan, 41(1) (2017) p. 14.
- (5) T. Narita, Y. Oda, Y. Ito, and H. Kato: A basic study on levitation characteristics of metal foil by edge-supported electromagnetic levitation system, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 64 (2019) p. 1191.
- (6) 遠藤文人, 嘉山周汰, 椎名敦紀, ムハマドヌルハキミンモハマドカマ, 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), 日本磁気学会論文特集号, 6(1) (2022) p. 14.