

高速往復運動用リニアアクチュエータ (磁石比率が推力に及ぼす影響に関する基礎的検討)

黒田純平, 木村海斗, 田中雅人, 内野大悟, 小川和輝*¹,
加藤太朗*², 池田圭吾*³, 遠藤文人*⁴, 成田正敬, 加藤英晃
(東海大学, *¹愛知工科大学, *²東京工科大学, *³北海道科学大学, *⁴福岡工業大学)

Linear Actuator for High-Speed Reciprocating Motion

(Fundamental Consideration of Thrust on Ratio of Permanent Magnet Size)

J. Kuroda, K. Kimura, M. Tanaka, D. Uchino, K. Ogawa, T. Kato,
K. Ikeda, A. Endo*, T. Narita, H. Kato

(Tokai Univ., *¹AUT., *². Tokyo Univ. Tech, *³Hokkaido Univ. Sci., *⁴ FIT)

はじめに

機械における直線運動は機構などによって回転運動から変換されている。機構による直線運動は、運動性能が機構の形状に左右される。これらの機構をリニアアクチュエータに置き換えることでダイレクトドライブが可能となり、高効率な直線運動が実現できる。交流で動作するリニアアクチュエータは構造が複雑になりやすく、高速運転時に交流の周波数を上げると、コイルのインダクタンスにより推力特性が劣化するという問題がある⁽¹⁾。そこで当研究グループでは、高速往復運動に適した、ローレンツ力を利用したボイスコイルモータ型のリニアアクチュエータを提案します。本報告では電磁界解析を利用したアクチュエータ内の永久磁石比率が推力特性に与える影響について基礎的検討を行った。

アクチュエータ内の磁石比率の変更

Fig. 1 に新たに作成したリニアアクチュエータの概略を示す。同図のアクチュエータは永久磁石とソレノイドコイルで構成されている。ソレノイドコイルに電圧を印加することでローレンツ力が発生し軸方向にコイルが駆動する。コイルの変位量を 0 mm から 10 mm に設定し、コイルを 1 mm 毎に変位させた際の推力と磁束の様子を電磁界解析によって求めた。解析によって得られた変位 0 mm における磁束密度のベクトルプロットを Fig. 2 に示す。同図より磁束がコイルに直交しており、各永久磁石によって磁束のループが形成されていることが分かる。今回の解析によって、各変位点の推力を平均すると、約 68.6 N の推力を得ることができた。

参考文献

- 1) Shi Kejian et al. "Design and simulation analysis of permanent magnet linear motor actuator used in circuit breaker." 2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE) (2020).

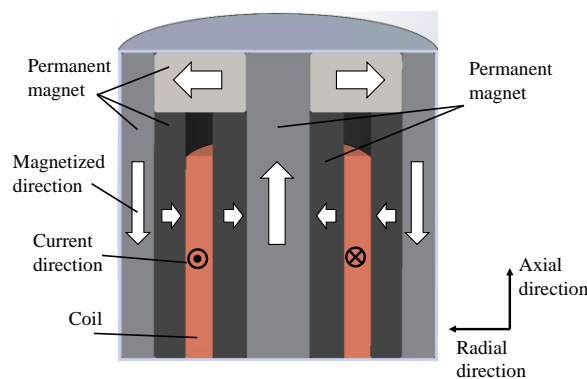


Fig. 1 Analysis model of linear actuator.

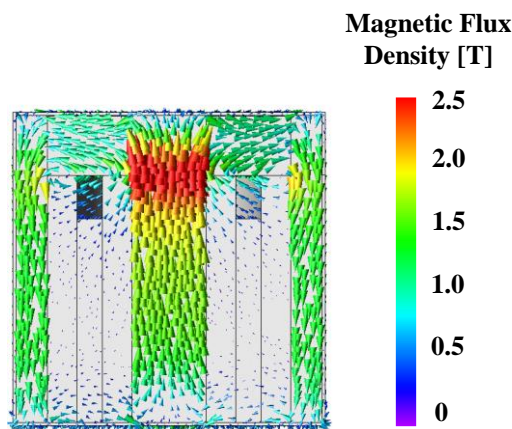


Fig. 2 Vector plot of magnetic flux density

デュアルハルバツハ配列を用いた高速往復運動用 リニアアクチュエータ (固定子の永久磁石形状に関する基礎的検討)

田中雅人、木村海斗、黒田純平、内野大悟、小川和輝、
加藤太朗、池田圭吾、遠藤文人、加藤英晃、成田正敬
(東海大学、*¹愛知工科大学、*²東京工科大学、*³北海道科学大学、*⁴福岡工業大学)

Linear Actuator for High-Speed Reciprocating Motion Using Dual-Halbach Array (Fundamental Consideration on Shape Permanent Magnet Array in Stator)

M. Tanaka, K. Kimura, J. Kuroda, D. Uchino, K. Ogawa, T. Kato, K. Ikeda, A. Endo, H. Kato, T. Narita
(Tokai Univ., *¹Aichi Univ. Tech., *²Tokyo Univ. Tech., *³Hokkaido Univ. Sci., *⁴FIT)

はじめに

現在、機械製品において直線運動を利用するシチュエーションは非常に多い。具体例としては工作機械やレシプロエンジンにおける吸排気バルブの開閉、コンプレッサーなどが挙げられる。しかし、このような機械製品はカムシャフトやギア、チェーンなどの機械部品による回転運動から直線運動を生み出すが、製品の大型化や性能依存、機械損失を招いてしまう。そこで、著者らは直線往復運動を可能とした円筒型リニアアクチュエータ¹⁾の実現を目的として、固定子の永久磁石配列にデュアルハルバツハ配列を用いたリニアアクチュエータを提案し検討を行っている。²⁾本報告は、永久磁石形状を変化させた際に推力特性に与える影響について検討を行った。

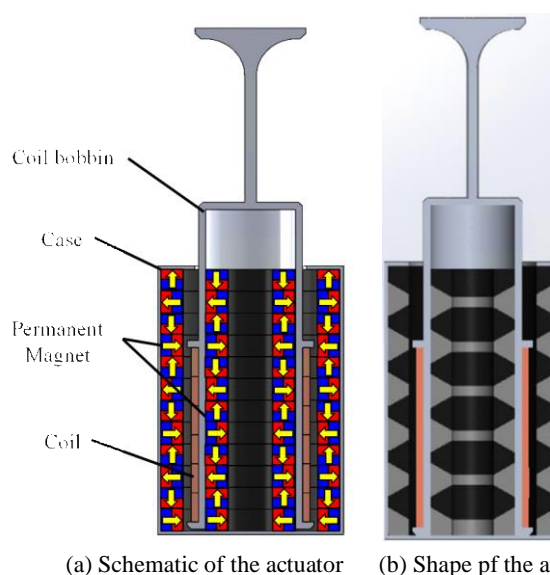


Fig. 1 Analysis model of linear actuators with dual Halbach arrays

電磁界解析を用いた永久磁石形状と推力に関する検討

Fig. 1(a)にハルバツハ配列を用いたリニアアクチュエータの概略図を示す。このリニアアクチュエータは永久磁石を配列した固定子と可動子となるコイルで構成され、ローレンツ力により可動子を駆動する。可動子の変位量は最大2.4mmとし、1ステップ0.1mmごとに上下方向へ変位させた際の推力を電磁界解析によって求めた。アクチュエータ内に配置する永久磁石の断面形状を台形としたモデルをFig. 1(b)に示す。解析によって得られた変位0mmにおける磁束密度のベクトルプロットをFig. 2に示す。永久磁石の断面形状を台形としたモデルでも推力を発生させることができた。

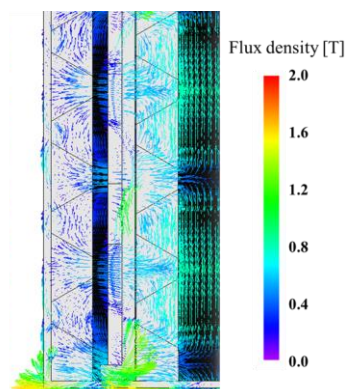


Fig. 3 Vector plot of magnetic flux density

参考文献

- 1) 李友行, 牧直樹. 円筒型リニア同期モータの特性解析と推力脈動改善. 電気学会論文誌, Vol. 126, No. 4, pp.519-524, No. 9, (2001).
- 2) Kuroda, Jumpei et al. 'Basic Study on High Precision Positioning in Electromagnetic Valve Drive System for Improving Internal Combustion Engine Using Linear Actuator'. 1 Jan. 2023 : S333 - S341.

吸排気バルブ駆動用リニアアクチュエータの研究 (アクチュエータ内の磁石配置に関する基礎的検討)

木村海斗、黒田純平、田中雅人、内野大悟、小川和輝^{*1}、
加藤太朗^{*2}、池田圭吾^{*3}、遠藤文人^{*4}、成田正敬、加藤英晃
(東海大学、^{*1}愛知工科大学、^{*2}東京工科大学、^{*3}北海道科学大学、^{*4}福岡工業大学)

A Study on Linear Actuator for Intake and Exhaust Valve Drive
(Fundamental Consideration of Permanent Magnet Arrangement in Actuator)

K. Kimura, J. Kuroda, M. Tanaka, D. Uchino, K. Ogawa^{*1}, T. Kato^{*2},
K. Ikeda^{*3}, A. Endo^{*4}, T. Narita, H. Kato

(Tokai Univ., ^{*1}Aichi Univ. of Tech., ^{*2}Tokyo Univ. of Tech., ^{*3}Hokkaido Univ. of Sci., ^{*4}FIT)

はじめに

近年、先進国において自動車の電動化が進む中、今後もハイブリッド車の普及が想定される。それに伴い、内燃機関の性能向上が求められていくと予想される。現在用いられているエンジンの吸排気バルブはカム機構によって駆動しているが、バルブの運動はカムの形状に依存するため動作タイミングに制限があり、全てのエンジン回転数に対して適切な空気流入が出来ない。これらの問題を解決する手法として、リニアアクチュエータを用いてエンジンバルブを駆動させる方法が検討されている^{1,2)}。このリニアアクチュエータは無段階でのバルブリフト及びバルブタイミングを実現させることが出来る。しかしながら、高回転域での駆動においては高い推力が求められる。そこで当研究グループでは、より高推力なリニアアクチュエータの開発を行い、より高性能な内燃機関の実現を目指す。本報告では電磁界解析ソフトを利用し、アクチュエータ内における磁石配置が推力に与える影響について基礎的検討を行った。

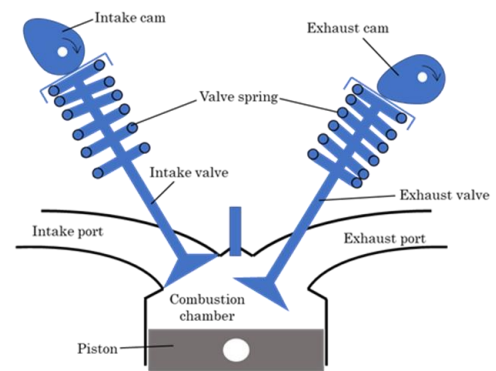


Fig. 1 Schematic of conventional cylinder head mechanism.

磁石配置の変更によるリニアアクチュエータの推力に関する検討

Fig. 1 に自動車用エンジンの吸排気バルブに用いられる、カム機構の概略を示す。吸排気バルブ駆動用リニアアクチュエータは Fig. 2 のように配置し、バルブを電磁駆動させる。リニアアクチュエータは永久磁石とコイルを用いて構成され、ローレンツ力を発生させて駆動する。今回検討するリニアアクチュエータのモデルは外形寸法を直径 100mm、高さ 100mm、電圧を 5V、コイルの巻き数を 461turn、永久磁石の材料をネオジム磁石の NMX-S52、バルブの変位量を最大 10mm で統一し、磁石配置のみを変更して電磁界解析を行い、推力を比較した。解析結果より、最も高推力となったモデルの平均推力は 57.2N であった。

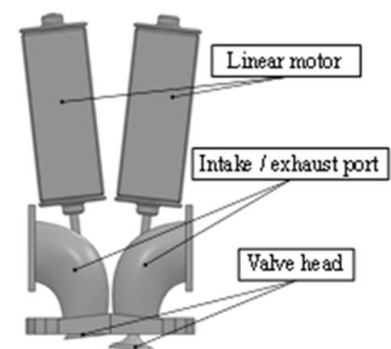


Fig. 2 Schematic of proposed electromagnetic valve drive system

参考文献

- 1) 宇野, 村口, 金野, 岡田, 「運動と振動の制御」 シンポジウム講演論文集, Vol. 10, (2007), 177-180.
- 2) 柴崎, 岡崎, 小倉, 日本機械学会関東学生支部総会講演会論文集, Vol. 19, (2013), 451-452

円筒型リニア誘導モータを用いた非接触アクチュエータの開発 (テザー直径が及ぼす影響に関する基礎的検討)

野阪肇、黒田純平、内野大悟、小川和輝^{*1}、池田圭吾^{*2}、
加藤太郎^{*3}、遠藤文人^{*4}、成田正敬、加藤英晃
(東海大学、^{*1}愛知工科大学、^{*2}北海道科学大学、^{*3}東京工科大学、^{*4}福岡工業大学)

Development of Non-Contact Actuator Using Cylindrical Linear Induction Motor
(Fundamental Consideration on Effect of Tether Diameter)

H. Nosaka, J. Kuroda, D. Uchino, K. Ogawa, K. Ikeda, T. Kato, A. Endo, T. Narita, H. Kato
(Tokai Univ., ^{*1}AUT, ^{*2}Hokkaido Univ. Sci., ^{*3}Tokyo Univ. Tech., ^{*4}FIT)

はじめに

超高層ビルなどの大型建造物において人や荷物などを運搬する際にエレベータなどの昇降用デバイスが利用される。従来のエレベータの概略図を Fig.1 に示す。この従来のエレベータでは一本のテザーに1つのカーゴを取り付けるため、高層建造物においてある階層においてエレベータの占有する面積が大きくなるため、カウンターウェイトを使用せず、両端を固定した1本のテザー上をアクチュエータによって昇降するエレベータを検討している。このようなデバイスを昇降させるには滑車やタイヤなどを用いてテザーと接触させることにより発生する摩擦力を利用して昇降する駆動方式が一般的である¹⁾。しかしながらこの手法は効率の低下や、異物の巻き込みによるケーブルの破損の原因となる。そこで著者らは導電体で様なテザー（リアクションプレート）を鉛直方向に昇降する円筒型リニア誘導モータを用いたアクチュエータについて検討を行っている²⁾。提案したリニア誘導モータが円筒型であることの利点は、アクチュエータからテザーに対して磁力を均一に印加できる点である。本報告は、有限要素法による電磁界解析を行い、テザー直径の変化が推力特性に与える影響について検討を行った。

解析モデル

作成した有限要素解析モデルを Fig. 2 に示す。可動子となる1次側には、6個のコイルとコア、ボビンが設置され、導体であるテザーが固定子となる。コイルは3相交流源に接続されており、上からU⁺、W⁻、V⁺、U⁻、W⁺、V⁻相となる。各コイルの巻数は182回、電流値は7.85 A、周波数は0-100 Hzとした。またテザー直径を100 mm、110 mm、120 mm、130 mm、140 mm、150 mmと変化させ、可動子とのエアギャップは1 mmとした。以上の解析条件をもとに過渡応答解析を行い、発生する鉛直方向の推力について検討を行った。解析の結果から、平均推力や標準偏差、推力重量比といった推力特性だけでなく磁束密度なども得ることが出来た。

参考文献

- 1) 松野, 最近のエレベータ制御技術, 計測と制御, Vol. 21, No. 7, pp. 686-689, 1982
- 2) 森尋, 古関, 正田, 円筒型リニア誘導モータの鉛直移動への応用可能性の検討, 電気学会論文誌 D, Vol. 122, No. 12, pp. 1149-1156, 1991.

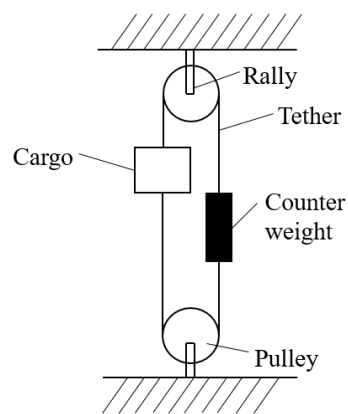


Fig.1 Conventional elevator

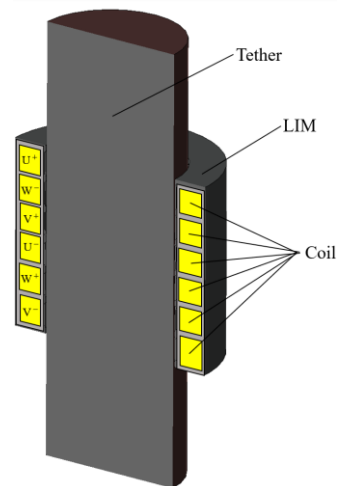


Fig.2 Finite element analysis model

湾曲させた極薄鋼板の磁気浮上搬送システム (張力の印加位置の変更による浮上鋼板形状に関する基礎的検討)

長吉竜也、市川優介、川村慎太郎、黒田純平、内野大悟
小川和輝*¹、遠藤文人*²、池田圭吾*³、加藤太郎*⁴、成田正敬、加藤英晃
(東海大学、*¹愛知工科大学、*²福岡工業大学、*³北海道科学大学、*⁴東京工科大学)

Electromagnetic Levitation and Transportation System for Bent Ultra-Thin Steel Plate
(Fundamental Consideration on Shape of Levitated Steel Plate with Change of Place Applying Tension)

T. Nagayoshi, Y. Ichikawa, S. Kawamura, J. Kuroda, D. Uchino,
K. Ogawa*¹, A. Endo*², K. Ikeda*³, T. Kato*⁴, T. Narita, H. Kato
(Tokai Univ., *¹AUT., *²FIT., *³Hokkaido Univ. Sci., *⁴Tokyo Univ. Tech)

はじめに

工業製品に広く使用される薄鋼板の製造において、ローラによる接触搬送が行われている。しかし、薄鋼板とローラとの接触により傷や凹凸が生じ表面品質の劣化が問題となっている。そこで、電磁石の吸引力を利用した薄鋼板の非接触磁気浮上搬送が提案されている¹⁾。当研究グループでは、これまでに水平方向位置決め制御システムと、湾曲磁気浮上システムを併用した薄鋼板の磁気浮上システムの浮上性能について検討してきた²⁾。しかし、水平方向位置決め制御システムと湾曲磁気浮上システムを併用した極薄鋼板の磁気浮上システムの浮上性能について、エッジ部に設置した電磁石と鋼板の把持位置を変更した際の浮上安定性の評価について十分な検討が行えていない。そこで本報告では、張力の印加位置が浮上鋼板形状に与える影響について基礎的検討を行った。

実験装置

実験装置の概略を Fig. 1 に示す。浮上対象は長さ 800 mm、幅 600 mm、厚さ 0.18 mm の長方形亜鉛めっき鋼板 (材質 SS400) とする。鋼板をアルミフレーム製装置内に設置した 5 か所のペアの電磁石を用い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センサにより検出し、非接触位置決め制御を行う。鋼板水平方向 (x 方向) の位置決めは同図に示した通り、電磁石を鋼板端部の相対する 2 辺に対向するように 4 か所配置し、レーザ式センサを利用することによって水平方向の変位を非接触に測定する。

鋼板形状の算出

水平方向電磁石をエッジ部に設置して張力を加えた際に鋼板形状に与える影響を検討するため有限差分法を用いて浮上中の鋼板形状を算出した。このとき湾曲角度を 5 度、水平方向電磁石の定常電流を $I_x = 0.5$ A、水平方向電磁石の中心間距離を 400 mm、480 mm、560 mm、640 mm とした。Fig. 2 に水平方向電磁石の中心間距離を 400 mm とした際の解析により求めた浮上時の鋼板形状を示す。

参考文献

- 1) 松島他, 日本 AEM 学会誌, Vol. 20 (2012), No. 1, pp. 220-225.
- 2) 椎名他, 日本 AEM 学会誌, Vol. 29, No. 1, (2021), pp. 111-117.

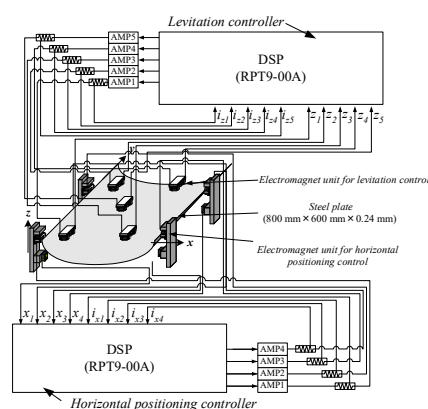


Fig. 1 Electromagnetic levitation control system.

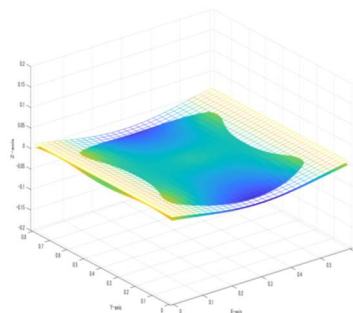


Fig. 2 Difference between obtained shape of levitated steel plate and reference shape.

振動が励起された湾曲柔軟鋼板の磁気浮上システム (浮上中鋼板の振動特性に関する基礎的検討)

内田大日、小川和輝*¹、小林一景、黒田純平、内野大悟、池田圭吾*²、加藤太朗*³、遠藤文人*⁴、
成田正敬、加藤英晃

(東海大、*¹愛知工科大学、*²北海道科学大、*³東京工科大、*⁴福工大)

Electromagnetic Levitation System for Excited Bending Flexible Steel Plate
(Fundamental Consideration on Vibration Characteristics of Levitated Steel Plate)

Y.Uchida, K.Ogawa, I.Kobayashi, J.Kuroda, D.Uchino, K.Ikeda, T.Kato, A.Endo, T.Narita, H.Kato
(Tokai Univ.,*¹Aichi Univ. Tech.,*²Hokkaido Univ. Sci.,*³Tokyo Univ. Tech.,*⁴FIT)

はじめに

電磁石の吸引力を利用した非接触支持を行うため、磁気浮上技術の検討が盛んにおこなわれている¹⁾。当研究グループでは、過去に磁気浮上による非接触搬送の実現性を確認している²⁾。また薄鋼板を対象とする場合には、鋼板を塑性変形しない範囲で曲げた状態で浮上させる湾曲磁気浮上を考案した³⁾。しかし、磁気浮上中の鋼板振動については、詳しく検討されていない。そこで本報告では、浮上中の鋼板に外乱を入力し、変位センサーをx軸方向に複数設置することによって、鋼板の振動特性に関する検討を行った。

湾曲磁気浮上実験

Fig. 1に湾曲磁気浮上装置の概略図を示す。湾曲磁気浮上装置は、5か所の電磁石ユニットによって薄鋼板を磁気浮上させることができる。本報告ではFig. 2のように、変位センサーをA~Fに設置した。浮上対象は長方形鋼板(長さ $x = 800$ mm、幅 $y = 600$ mm)とし、厚さの違う二種類の鋼板(0.19 mm、0.3 mm)を用いた。本報告では磁気浮上中の鋼板にFig. 3のようなパルス波をFig. 1における実験装置のFrame 3に入力し、鋼板の振動特性について検討した。また、過去の検討よりそれぞれの鋼板は浮上を安定させる最適の角度に湾曲させた。Fig. 4にA点での実験結果を示す。この結果より0.19 mmの方が振幅が大きいことがわかる。

参考文献

- 1) 油野他, 日本磁気学会誌, Vol. 35, No. 2, (2011), pp. 123-127.
- 2) 丸森他, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 823, (2015), 14-00471.
- 3) 小川他, 日本磁気学会論文特集号, Vol. 3, No. 1, (2019), pp. 101-106.

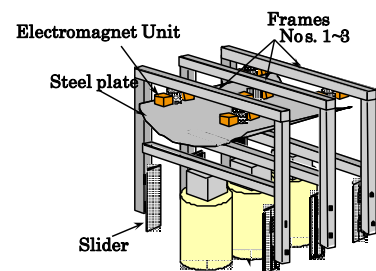


Fig. 1 Schematic illustration of experimental apparatus

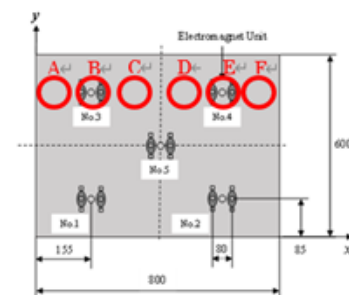


Fig. 2 Displacement sensors placement

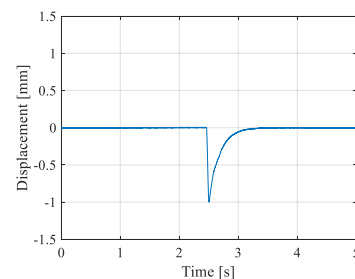
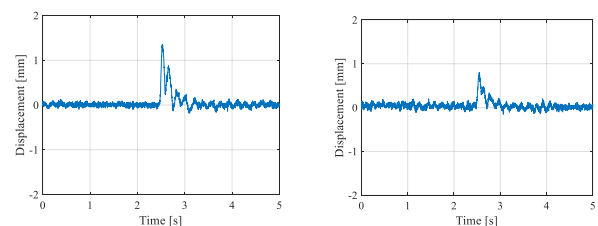


Fig. 3 Time history of input pulse wave



(a) 0.19 mm, 13° (b) 0.3 mm, 5°
Fig. 4 Measured displacement of levitated steel plate

永久磁石と電磁石を併用した薄鋼板の磁気浮上システム (張力の印加位置が永久磁石の最適配置に与える影響に関する基礎的検討)

市川優介、長吉竜也、川村慎太郎、小川和輝^{*1}、黒田純平、内野大悟、
池田圭吾^{*2}、加藤太朗^{*3}、遠藤文人^{*4}、成田正敬、加藤英晃
(東海大学、^{*1}愛知工科大学、^{*2}北海道科学大学、^{*3}東京工科大学、^{*4}福岡工業大学)

Electromagnetic Levitation System for Thin Steel Plate Using Electromagnets and Permanent Magnets
(Fundamental Consideration of Optimized Arrangement of Permanent Magnets on Applying Position of Tension)

Y. Ichikawa, T. Nagayoshi, S. Kawamura, K. Ogawa^{*1}, J. KURODA, D. Uchino,
K. Ikeda^{*2}, T. Kato^{*3}, A. Endo^{*4}, T. Narita, H. Kato
(Tokai Univ., ^{*1}AUT, ^{*2}Hokkaido Univ. Sci., ^{*3}Tokyo Univ. Tech., ^{*4}FIT)

はじめに

薄鋼板の製造ラインでは、ローラによる接触搬送が行われており、薄鋼板のめっきの傷や剥がれなど表面品質の劣化が問題視されている。そこで長方形薄鋼板の磁気浮上装置を用いた非接触磁気浮上搬送制御の検討が行われている¹⁾。しかし、鋼板の板厚が非常に薄い場合、鋼板のたわみや弾性振動が大きくなるため、限られた数の電磁石では生じるたわみを抑制することができず、薄鋼板の落下の原因となる。そこで、浮上する鋼板の上方に永久磁石を多数設置し、永久磁石の静的吸引力を浮上補助利用する電磁石と永久磁石を併用した磁気浮上システムを提案している。これまでに、安定した浮上のために最適な永久磁石の配置の検討を、遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて静的な鋼板のたわみを抑制する配置を探索し、浮上安定性を向上することを確認している²⁾。本報告では、浮上方向に加えて水平方向電磁石を設置した磁気浮上システムについて、永久磁石と鋼板の距離と得られる永久磁石の配置の関係について詳細な検討を行った。

磁気浮上装置

Fig.1に浮上装置の概略図を示す。浮上対象は長さ 800 mm、幅 600 mm の長方形亜鉛めっき鋼板 (SS400) を使用する。浮上した鋼板のエッジに対して水平方向電磁石ユニットによる吸引力を加え、鋼板の相対する 2 辺に沿って電磁石を 2 個ずつ設置している。水平方向位置決め制御は各電磁石表面から鋼板エッジまでの距離を 5 mm になるように制御を行う。Fig.2 に GA による探索を行った永久磁石の配置を示す。GA による探索を行った結果、GAP が大きいほど磁石の数が増えた傾向を示した。

参考文献

- 1) 石井他, 日本 AEM 学会誌, vol. 24, no. 3, pp.149-154, 2016.
- 2) 嘉山他, 日本磁気学会論文特集号, vol. 6, no. 1 pp.93-99, 2022.

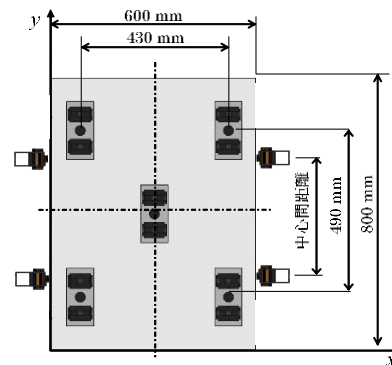


Fig.1 Electromagnetic levitation system

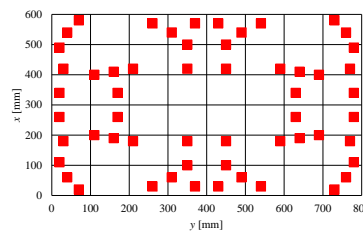


Fig.2 Optimized arrangement of permanent magnets at each distance between horizontal electromagnets.