

水平方向からの磁場を用いた柔軟鋼板の磁気浮上装置 (浮上支持力に関する実験的検討)

小田吉帆、木田将寛、鈴木稔樹、成田正敬、加藤英晃
(東海大学)

Electromagnetic levitation system for flexible steel plate
using magnetic field from horizontal direction
(Experimental consideration on suspension force for levitation)

Y. Oda, M. Kida, T. Suzuki, T. Narita, H. Kato
(Tokai Univ.)

緒言

薄鋼板は工業製品に広く用いられるが、搬送工程ではローラの接触によるメッキ不良や表面品質の劣化が生じる。この問題の解決方法として磁気浮上を用いた非接触支持技術が検討されている¹⁾。著者らは支持方向だけでなく水平方向に電磁石を設置し、位置決め制御を行うことで安定した非接触搬送を行う手法を提案している²⁾。このとき水平方向からの磁場のみによって鋼板が浮上する支持力を得られることを電磁界解析により確認している³⁾。しかし解析的に確認している鋼板に発生する支持力について実験的な検証は未だ行っていない。そこで本報告は板厚 0.19 mm の薄鋼板に対して有限要素法を用いた電磁界解析と実験から鋼板に加わる浮上支持力を求め、水平方向からの磁場を用いた柔軟鋼板の磁気浮上装置に関する基礎的な検討を行った。

水平方向から磁場を加えた際の吸引力

鋼板に発生する鉛直方向の吸引力 f_z について解析と実験から求める。Fig. 1 に実験装置の概略図を示す。幅 100 mm、長さ 200 mm、板厚 0.19 mm の薄鋼板 (SS400) の長さ方向の一端を固定し、その自由端のエッジ部にフェライトコア表面が 5 mm となるように電磁石を設置した。鋼板に発生する鉛直方向の支持力 f_z は、非接触変位センサより得られた鋼板のたわみ量から算出した。電磁石に流す定常電流 I_x は 0.3 A から 2.0 A まで 0.1 A 刻みで変化させた。このとき鋼板のたわみを非接触変位センサを用いて測定した。また電磁界解析ソフト JMAG を用いて同様のモデルを作成し、 f_z を算出した。

解析と実験から得られた定常電流 I_x と鉛直方向の支持力 f_z の関係を Fig. 2 に示す。解析値と実験値は非常に一致を示し $I_x=0.7$ A 以下では I_x の変化に対し f_z は大きく変化することが分かった。

結言

水平方向から磁場を加えた際に鋼板に発生する支持力について解析と実験から比較検討を行った。今後は得られた実験結果を基に装置を作製し浮上実験を行う予定である。

参考文献

- 1) F. Kubota et. al., Proceedings of IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE, (2013), 3439-3444.
- 2) 押野谷他, 日本機械学会論文集 C 編, 68-69, (2002), 1428-1434.
- 3) 成田他, 第 23 回 MAGDA コンファレンス講演論文集, (2014), 123-128.

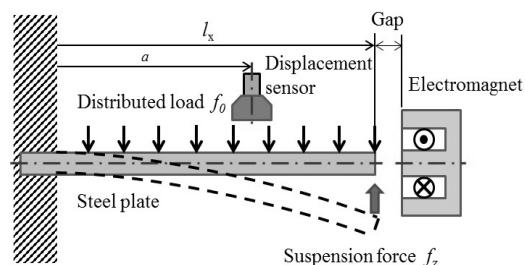


Fig. 1 Experimental apparatus for electromagnetic suspension.

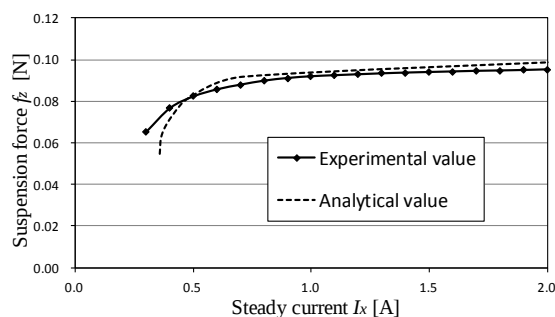


Fig. 2 Relation between steady current and suspension force.

柔軟鋼板の湾曲浮上制御 (湾曲鋼板の弾性振動に関する基礎的検討)

多田誠、米澤暉、丸森宏樹、成田正敬、加藤英晃
(東海大学)

Bending levitation control for flexible steel plate
(Fundamental consideration on elastic vibration of bending steel plate)

M. Tada, H. Yonezawa, H. Marumori, T. Narita, H. Kato
(Tokai Univ.)

はじめに

近年、磁気浮上技術の応用による非接触搬送に関する検討が盛んに行われている^{1,2)}。当研究グループは、これまでに板厚 0.30 mm 鋼板を用いた磁気浮上に関する検討を行い、その実現性を確認している³⁾。また、さらに薄い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ことを提案し、安定した浮上状態の実現を確認している⁴⁾。本研究では更なる浮上性能の向上を目指す新システム構築の前段階として、鋼板に生じる振動のメカニズムに関して部分的に剛性を高めた鋼板を用いて実験的に検証した。

浮上実験

Fig. 1 に装置の概略図を示す。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とする。鋼板を 5 箇所の電磁石により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する。浮上中の鋼板に生じる振動メカニズムを特定するために厚さ 0.20 mm のポリ塩化製シールを鋼板に貼付し剛性を部分的に高め、制振性能の比較検討を行った。シールは Fig. 2 に示すように(a)鋼板短手方向端部および(b)短手方向中央部に貼付して電磁石曲げ角度 15° で浮上を行った。

結果および考察

Fig. 3 に振動の抑制効果として浮上鋼板と電磁石表面との平衡浮上位置からの変位の時刻歴およびスペクトルを示す。スペクトルに着目すると(b)では 50~100 Hz 付近高周波の振動が抑制されていることがわかる。

参考文献

- 1) 松島他, 日本 AEM 学会誌, 21-2, (2013), 296-301.
- 2) 広瀬他, 電気学会論文誌 D, 133-5, (2013), 536-542.
- 3) 押野谷他, 日本機械学会論文集 C 編, 62-95, (1996), 127-133.
- 4) 丸森他, 日本機械学会論文集, 81-823, (2015), 14-00471.

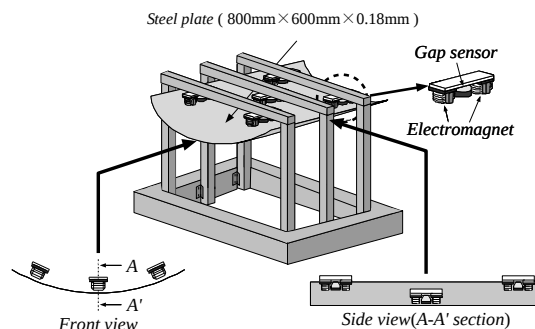


Fig. 1 Schematic illustration of experimental apparatus.

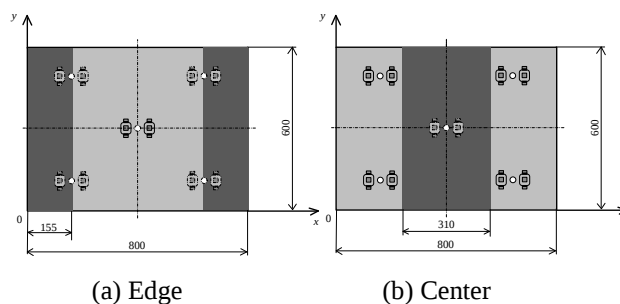


Fig. 2 Patterns of pasting seal on the steel plate.

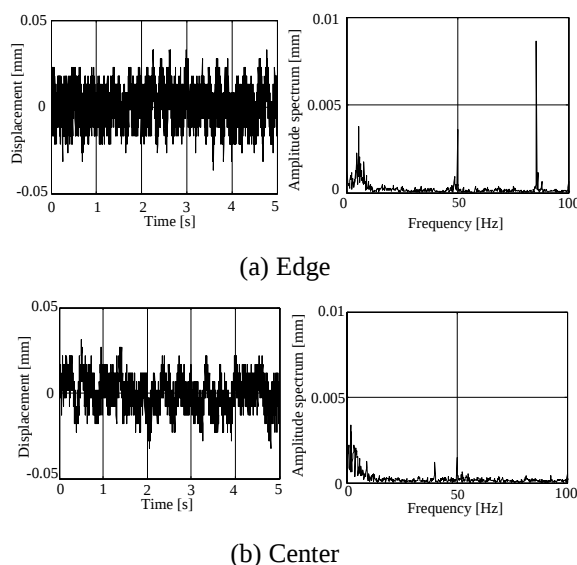


Fig. 3 Bending levitation result with seal patterns.

水平方向からの磁場が磁気浮上搬送鋼板に与える影響 (浮上特性に関する基礎的研究)

木田将寛、成田正敬、加藤英晃、森山裕幸
(東海大学)

Effect of a magnetic field from the horizontal direction on a magnetically levitated transport steel plate
(Fundamental study on the levitation characteristics)

M. Kida, T. Narita, H. Kato, H. Moriyama
(Tokai Univ.)

はじめに

薄鋼板の製造工程では、ローラーとの接触による表面品質の劣化が問題であるが、その解決策として電磁力による鋼板の浮上・搬送制御が提案されている^{1,2)}。著者らはこれまでに浮上中の鋼板形状を差分法により求め、エッジに印加した磁場による鋼板のたわみ抑制効果について検討している³⁾。しかし、水平方向からエッジ部に設置した電磁石が磁気浮上搬送中の鋼板の浮上性能に与える影響については、未だ十分な検討が行えていない。そこで本研究では板厚 0.18 mm の薄鋼板を対象とし、水平方向からの磁場が非接触搬送時に与える影響を実験的に検証する。

実験装置

磁気浮上システムの概略を 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する。鋼板水平方向 (x 方向) の位置決めは Fig. 1 に示した通り、電磁石を鋼板端部の相対する二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計測する。

搬送実験

搬送される磁気浮上鋼板に対して水平方向から印加する磁場の変化が浮上性能にどのような影響を与えるのか検証するため、最適制御理論より求めた浮上用ゲインを用いて搬送実験を行った。搬送装置が静止している状態から加速度 0.49 m/s^2 にて搬送を開始し、速度 0.6 m/s に達した時点で等速にて搬送、その後減速、停止という条件で行った。制御点にて測定した鋼板の水平方向の変位の時刻歴波形を Fig. 2 に示す。このとき、水平方向電磁石に印加する定常電流値を (a) 0.025 A と (b) 0.4 A とした。同図より、定常電流値 0.025 A に対し、定常電流値 0.4 A にて鋼板の水平方向の最大振幅値が抑制されることが確認できた。このことより、水平方向からの磁場が薄鋼板の安定した搬送に効果があることが確認できた。

参考文献

- 1) 川田他, 第 2 回電磁力関連のダイナミックスシンポジウム, (1990), 59-62.
- 2) 押野谷他, 日本機械学会論文集 C 編, 56-531(1990), 2911-2918.
- 3) 成田他, 第 22 回 MAGDA コンファレンス講演論文集, (2013), 71-72.

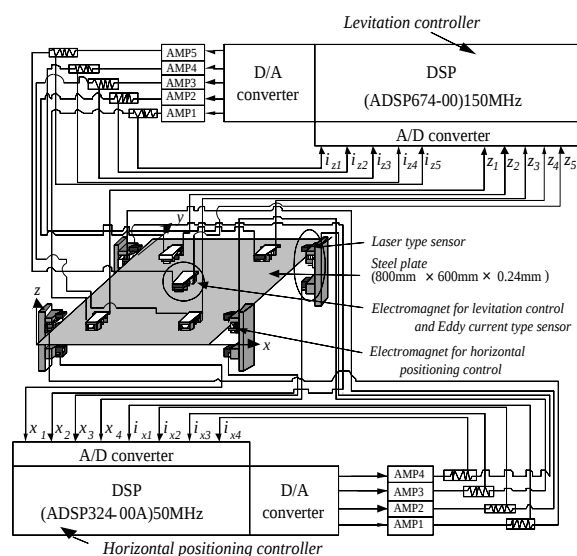


Fig. 1 Electromagnetic levitation control system.

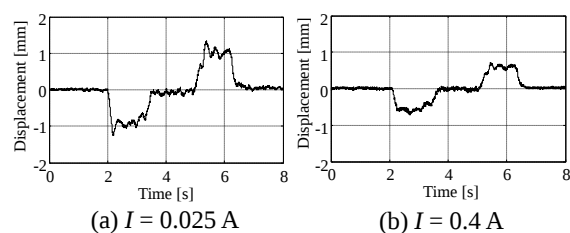


Fig. 2 Time histories of displacement of the steel plate in horizontal direction.

電磁石による走行磁性体の非接触案内 (FEM を用いた電磁石配置に関する基礎的検討)

川崎謙太、成田正敬、加藤英晃、森山裕幸
(東海大学)

Noncontact guide for traveling elastic steel plate using electromagnets
(Fundamental consideration on electromagnets placement using FEM)

K. Kawasaki, T. Narita, H. Kato, H. Moriyama
(Tokai Univ.)

はじめに

製鉄所における連続鋼板製造ラインは長さ数 km にも及び、その間連続鋼板はロールにより接触支持搬送されている。この様なロールによる連続鋼板の搬送ラインにおいて、鋼板とロールの接触による表面品質劣化などの問題が多数存在する。この問題を解決するため、当研究グループでは走行する連続鋼板のエッジ近傍に電磁力を印加することにより、鋼板の振動を抑制する非接触エッジ制御を検討している¹⁾。また、連続鋼板が進行方向を変更しながら走行する部分に対する非接触案内を実施し、その有効性を確認している²⁾。しかし、電磁石配置位置など最適な案内路の設計手法は確立されていない。本報告では、走行中の鋼板の応力静的構造に着目し、解析結果からループ部分の最適な非接触案内路を設計するための基礎的検討を行った。

走行中の鋼板の応力解析

本研究では、吊り下がっている鋼板の解析モデルに張力³⁾を与えて静的構造解析を行った。解析は静的構造解析ソフトである ANSYS Workbench Mechanical を用いた。解析により得られたミーゼス応力の分布を Fig. 1 に示す。走行時の鋼板はループ形状部の下部に張力の影響を受けて応力が高くなる位置が得られた。

走行実験の結果および考察

解析より得られた応力の高い箇所に電磁石を集中的に設置した走行実験を行い、鋼板の面外方向の変位を測定標準偏差から振動抑制効果の評価を行った。本報告ではループ形状部分の入り口と中間と出口 (0° 90° 180°) に電磁石を配置した案内路 (A) と連続鋼板のループ形状部の下部に集中的 (20° 90° 160°) に電磁石を配置した案内路 (B) を用意し、鋼板の走行速度を 1000 m/min とした。各案内路を用いた走行鋼板の変位標準偏差を Fig. 2 に示す。それぞれの結果を比較すると、電磁石をループ形状部分下部に集中的に配置した案内路 (B) の方が (A) と比較して変位標準偏差が減少していることが確認できた。

以上の結果から解析により得られた応力の高い箇所に電磁石を集中的に設置することで走行中の安定性が高い案内路が得られることがわかった。

参考文献

- 1) 柏原他, 日本 AEM 学会誌, 11-4, (2003), 235-241.
- 2) 川崎他, 第 27 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, (2015), 52-53.
- 3) ベルト伝動技術懇話会, 新版 ベルト伝動・精密搬送実用設計, 養賢堂, (2006), 21-25.

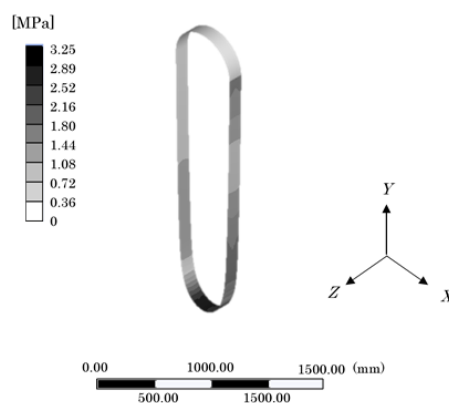


Fig. 1 Analysis result.

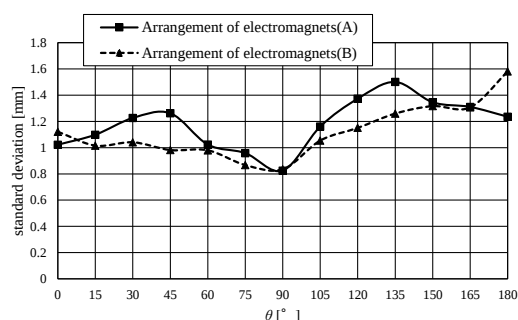


Fig. 2 Standard deviation of displacement.

永久磁石を用いた薄鋼板のハイブリッド磁気浮上システムにおける最適配置 (水平方向の磁場に関する基礎的検討)

鈴木稔樹、成田正敬、加藤英晃、森山裕幸
(東海大学)

Optimal placement of permanent magnet in hybrid magnetic levitation system for thin steel plate
(Fundamental considerations on effect of magnetic field from horizontal direction)

T. Suzuki, T. Narita, H. Kato, H. Moriyama
(Tokai Univ.)

はじめに

薄鋼板は搬送工程において通常ローラによる接触搬送が行われ、ローラの接触による傷やめつき不良など表面品質の劣化が問題となっている。この問題を解決するため磁気浮上による非接触支持に関する検討が盛んに行われている¹⁾。当研究グループでは、電磁石を設置していない部分に永久磁石を設置し、これらの磁力を浮上安定化のために有効利用したハイブリッド磁気浮上搬送システムを提案している²⁾。一方、浮上方向のみを制御する従来のシステムを用いて鋼板の非接触搬送を行った場合、加減速時に生じる慣性力によって浮上中の鋼板が横滑りし、落下する可能性が考えられる。そのため、これまでに著者らは浮上方向に加え水平方向に電磁石を設置し、位置決め制御を行うことで磁気浮上搬送に成功している³⁾。本報告はハイブリッド磁気浮上システムに水平方向の位置決め制御を加え、水平方向から磁場を変化させた場合における板厚 0.24 mm の鋼板のたわみを抑制する永久磁石の最適配置探索に関する検討を行った。

ハイブリッド磁気浮上システム

浮上対象である長さ 800 mm、幅 600 mm、板厚 0.24 mm の長方形亜鉛めっき鋼板 (材質 SS400) 上方の 5 ヶ所に電磁石ユニット、電磁石ユニットの周囲に複数のフェライト磁石、水平方向位置決め制御を加えた鋼板水平方向の位置決めは、電磁石を鋼板端部の相対する二辺に対向するように 4 か所配置し、水平方向の変位、速度、電磁石コイル電流をフィードバックし、定常電流 I_x を加えて鋼板の端部が各電磁石表面から 5 mm の距離を保つように制御を行う。

遺伝的アルゴリズムによる探索結果

$I_x = 0.1$ A および 0.5 A の条件で遺伝的アルゴリズムを用いた永久磁石の最適配置探索を行った。探索によって得られた各定常電流値における永久磁石配置を Fig. 1(a), (b) に示す。今後は本報告で得られた配置を用いて浮上実験を行い、たわみ抑制効果、浮上安定性について検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) T. Mizuno et. al., Mechanical Engineering Journal, 3-2, (2016), 15-00687.
- 2) 小村他, 第 28 回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム講演論文集, (2016), 232-233.
- 3) 押野谷他, 日本機械学会 C 編, 67-661, (2001), 2855-2862.
- 4) 栗原他, 第 27 回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム講演論文集 (2015), 53-54.

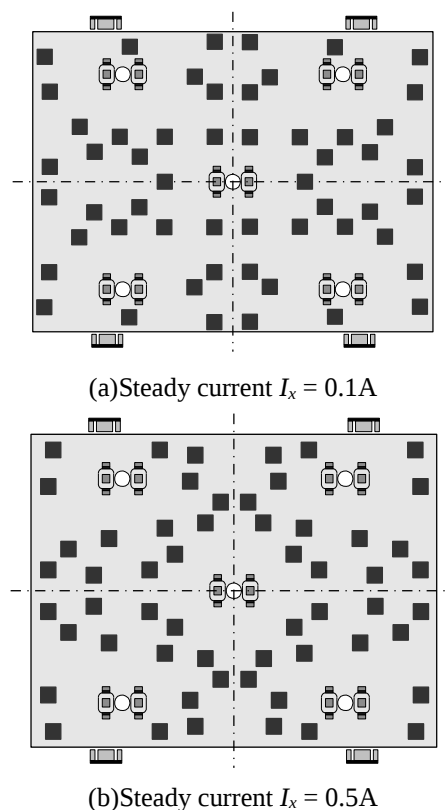


Fig. 1 Placement of permanent magnets.

アルミニウムリング引上げのための交流アンペール力の生成

大路貴久, 須田一輝, 飴井賢治, 作井正昭
(富山大学)

Generation of Ac Ampere force for pulling up an aluminum ring

T. Ohji, K. Suda, K. Amei, M. Sakui
(Univ. of Toyama)

はじめに

磁気浮上の一方式である交流誘導式では、アルミニウム (Al) 等の非磁性金属 (浮上対象物) と交流電磁石との間に準定常な反発力が生じる。このとき交流電磁石の上方に浮上対象物を配置し、自重に逆らうように反発力を発生させることで非接触浮上状態が得られる。筆者らの提案する交流アンペール式磁気浮上では、従来の交流誘導式で生じる誘導反発力に加え、金属内の誘導電流に対し外部磁束を印加することで交流アンペール力が生成される⁽¹⁾。交流電磁石を上方に配置し、浮上対象物をその下方に配置した場合、下向きの誘導反発力と浮上対象物の自重の和よりも大きな上向きの交流アンペール力を生成できれば、浮上対象物の引上げ動作が可能となる。本稿では、Al リングを浮上対象物とし、Al リングに誘導電流および交流アンペール力を生成するための装置を試作し、Al リングの引上げ動作試験を行った。

実験装置と引上げ試験

Fig. 1 は実験装置の写真である。中央上部には誘導電流発生用の交流電磁石 (EM1) が設置されており、パンケーキコイルと継鉄で構成されている。また、周囲には 6 個の交流電磁石 (EM2) が設置されている。EM1 と EM2 に囲まれた空間内で Al リング ($\phi 120 \text{ mm} \times \phi 110 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, 24g) の引上げ試験を行う。EM1 に対する EM2 の励磁電流位相差を任意に設定できるように 2 台の交流電源で別回線による回路を構築する。Fig. 2 は各部の相対位置を示しており、Al リング上面とパンケーキコイル表面とのギャップを d [mm] とする。

Fig. 3 は $d = 10 \text{ mm}$ を初期位置としたときの Al リングの引上げ動作結果を示す。各電磁石の励磁電流、周波数は $3 A_{\text{max}}$, 120 Hz とし、EM1 の励磁完了後に EM2 をステップ状、ランプ状 (3 種) に励磁した。図より全ての場合でスペーサに接触 ($d = 5.5 \text{ mm}$) しており、過渡的な跳ね上がりによるものではなく連続的な引上げ力による浮上であることが確認できる。なお、 $d = 8.0 \text{ mm}$ 付近の段差は、リングのある一カ所から順次引上げられたためである。

まとめ

Al リングに対し準定常的な交流アンペール力を生成するための装置を製作し、非磁性金属の安定的な引上げ動作が可能であることを示した。今後は対象物の形状や質量の制約を減らすとともに引上げ機構の最適化を図る。

本研究は科研費 (25289014) 助成を受けて実施した。

参考文献

- 1) T. Ohji, et al., J. Mater. Process. Tech., 181, pp. 40-43 (2007)

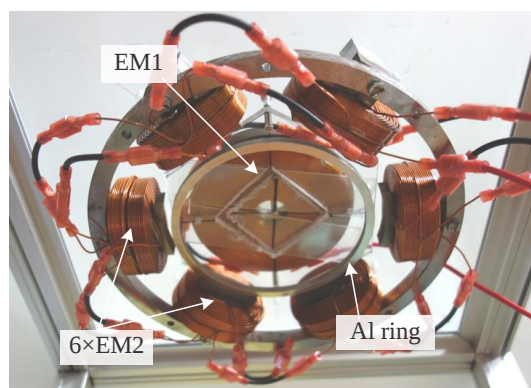


Fig. 1 Arrangement of EMs and an Al ring.

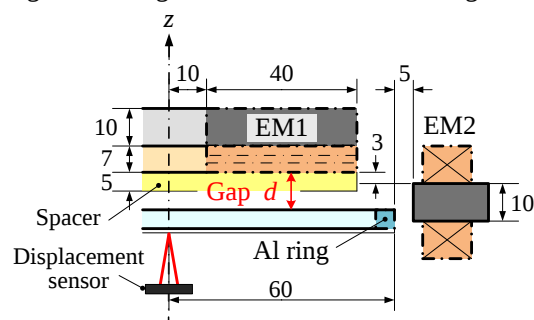


Fig. 2 Relative positions of EMs and an Al ring.

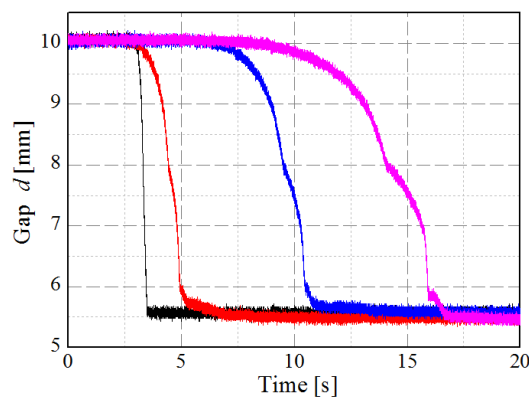


Fig. 3 Experimental results of magnetic pulling-up of Al ring.