

逆磁歪式電磁誘導型振動発電デバイスの片持ち梁中における 応力と磁束の分布関係

中村優太・石川瑛士・大竹充
(横浜国大)

Distribution Relationship between Stress and Magnetic Flux Change
in Cantilever of Inverse Magnetostrictive Electromagnetic Vibration Powered Generator

Yuta Nakamura, Eishi Ishikawa, and Mitsuru Ohtake
(Yokohama Nat. Univ.)

はじめに IoT デバイスなどの自立型電源として、振動発電技術の活用が期待されている。電磁誘導を利用した振動発電には、磁石揺動式、逆磁歪式¹⁻⁴⁾、垂直/水平/斜め磁界アシスト式^{5,6)}があり、これらはそのデバイスサイズに応じて、磁性体断面積、適合可能な振動周波数、コイルの巻数などが異なるため、発電量も変化する。片持ち梁を用いた逆磁歪式は、マイクロメートルからサブメートルまでの幅広いサイズでのデバイスが検討されており、今日では、一般的な発電方式として認知されている。片持ち梁では、中立面を境に上下面で引張と圧縮の異なる応力が作用するため、通常、中立面と交わらないように磁性材料が配置される。また、この現象を最大限活用することを目的に、正磁歪と負磁歪を持つ材料を上下に組み合わせるバイモルフ構造にすることで、ユニモルフ型と同様な周波数と位相で大きな振幅の出力波形を得る手法も報告されている^{4,5)}。一方で、上下面がともに同じ正磁歪もしくは負磁歪材料であっても、振動の異なる位相のタイミングで磁束変化が生じる場合、振幅は増加しないが、周波数が2倍となり、その結果、電力量も約2倍になることが期待できる。中立面の上下で異なる磁束変化挙動を示す場合、位相変化を考えれば、周波数は2倍になることが考えられる。また、片持ち梁では、自由端から固定端に向かって応力が増加するため、梁となる板の厚さ方向（上下面）だけでなく長さ方向も加味して、応力と磁束分布を理解する必要がある。そこで、本研究では、異なる断面構造の板の梁を利用して厚さ方向、また、梁の長さ方向に沿って梁内の磁束密度変化が捉えることができる磁束検出コイルを利用して長さ方向の応力と磁束の関係を理解することを試みた。

実験方法 梁を構成する磁性材料として方向性 Fe-Si 板 (JIS 規格: 30P120)、非磁性材料として Fe-Si 板に機械的特性が近い Cu 板 (JIS 規格: C1100P) を用いた。そして、異なる厚みの Fe-Si および Cu 板を積層させ、エポキシ接着剤で接合させることにより、異なる4種類の断面構造の板を作製した。積層構造は、Fig. 1 に示すように、(a) Fe-Si(100 μm) 上板/Cu(200 μm) 中下板、(b) Cu(200 μm) 上中板/Fe-Si(100 μm) 下板、(c) Fe-Si(100 μm) 上板/Cu(100 μm) 中板/Fe-Si(100 μm) 下板、(d) Fe-Si(300 μm) 上中下板とした。また、板の長さおよび幅はそれぞれ 50 mm および 10 mm で一定とした。そして、長さ方向の端から 10 mm の部分までを固定することにより、片持ち梁の状態にした。磁束検出用コイルには Fig. 2 に示す2種類を使用した。Fig. 2(a)と(b)は、それぞれ、全体平均および局所的な梁の長さ方向に対する磁束を検出するものである。そして、梁のみを加振機を用いて強制振動させ、コイルの出力波形をオシロスコープで観察した。このとき、振動の加速度は 1.5 G で一定とし、周波数は各材料の共振周波数としたが、概ね 100 Hz 程度であった。また、バイアス磁界をヘルムホルツコイルを用いて梁の長さ方向に印加し、最適な磁界強度は各材料でわずかに異なったが、概ね 15 Oe であった。

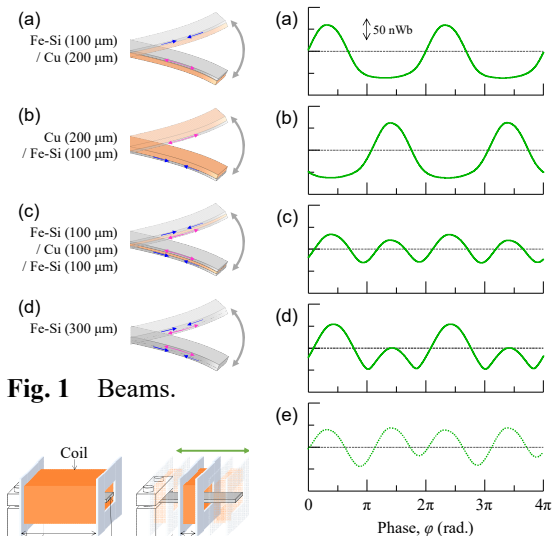


Fig. 1 Beams.

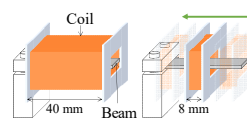


Fig. 2 Coils.

Fig. 3 Waveforms.

実験結果 Fig. 3(a)~(d)に、4種類の梁における全体平均の磁束波形を示す。(a)と(b)では、磁性材料の位置が上下で逆になっていることから、出力電圧の位相が π ずれていることが読み取れ、変化挙動が逆になっていることが分かる。(c)では、出力電圧波形の周波数が、片側のみ場合の2倍になっていた。上下面が非磁性材料により分断されていない(d)においても、(c)とほぼ同様の磁束挙動を示した。Fig. 3(e)には、(a)と(b)の磁束を計算で足し合わせた波形を示す。この波形は、(c)および(d)と同様の挙動を示しており、本研究で用いた Fe-Si 板では、上下面でそれぞれ独立して逆磁歪効果が生じ、発電に寄与していることが示唆された。当日は、局所的な梁内の磁束変化についても報告し、応力と磁束の関係をまとめる。

- 1) T. Ueno and S. Yamada: *IEEE Trans. Magn.*, **47**, 2407 (2011).
- 2) S. Fujieda, S. Suzuki, A. Minato, T. Fukuda, and T. Ueno: *IEEE Trans. Magn.*, **50**, 2505204 (2014).
- 3) Z. Yang, K. Nakajima, R. Onodera, T. Tayama, D. Chiba, and F. Narita: *Appl. Phys. Lett.*, **112**, 073902 (2018).
- 4) 阿部宏恒, 後藤太一, 直江正幸, 荒井賢一, 石山和志: 第47回日本磁気学会学術講演会概要集, p. 266 (2023).
- 5) 大竹充, 川井哲郎, 二本正昭「発電装置」特願 2022-086851 / 特開 2023-174153 (2022).
- 6) 大竹充, 中村優太「発電装置」特願 2024-084029 (2024).

垂直磁界アシスト式電磁誘導型衝撃発電デバイスの 軟磁性梁中における磁束分布に及ぼす永久磁石による局所磁界の影響

神谷颯・中村優太・大竹充
(横浜国大)

Influence of Local Magnetic Field Applied by Permanent Magnets on the Magnetic Flux Distribution
in Soft Magnetic Beam of Perpendicular Magnetic Field Assisted Electromagnetic Impact Powered Generator
Soh Kamiya, Yuta Nakamura, and Mitsuru Ohtake
(Yokohama Nat. Univ.)

はじめに IoT デバイスの急速な普及に伴い、その自立型電源として振動/衝撃発電が注目されている。電磁誘導型振動/衝撃発電の方式として、磁石揺動式¹⁾や逆磁歪式²⁻⁴⁾とは異なる垂直磁界アシスト式⁵⁾を著者らは提案している。この方式では、軟磁性材料からなる梁の表面に対して垂直方向にアシスト磁界を永久磁石により印加する。そして、片持ち梁が振動すると、アシスト磁界の面内成分の方向が 180° 変化することになる。その結果、軟磁性材料の磁化反転が生じ、電磁誘導により梁周辺のコイルに起電力が発生する。昨年の学術講演会では、基本動作を確かめることを目的に、ヘルムホルツコイルを用いて梁に対して一様磁界を印加し、衝撃による発電を行った結果を報告した⁶⁾。一方、実デバイスでは、一様磁界ではなく、撓み角が大きくなる自由端近傍に局所磁界を永久磁石により印加することが想定され、軟磁性梁内における磁束分布も不均一になることが考えられる。そこで、本研究では、その影響を実験的に明らかにし、衝撃発電デバイスを設計する上での磁石配置とアシスト磁界強度に関する知見を得ることを目的とした。

実験方法 梁材料には無方向性珪素鋼板 (JIS 規格 35A270) を使い、長さを 80 mm、幅を 10 mm、厚さを $350\ \mu\text{m}$ とした。そして、端部から 10 mm の部分までを固定することにより片持ち梁の状態とした。梁の長さ方向に対する局所磁束を調べるために、検出コイル (抵抗: $945\ \Omega$, リアクタンス: $582\ \text{mH}$, 巻数: 5000 回, 最内径: $14\ \text{mm} \times 14\ \text{mm}$, 全長: 8 mm) を Fig. 1 に示すようにトレースさせた。また、自由端から上下 23 mm の位置にネオジム磁石を配置した。そして、自由端に 4 mm の変位を与えることにより衝撃発電の試験を行った。

実験結果 Fig. 2 に $x_{\text{coil}} = 44\ \text{mm}$ における磁束密度の時間変化を一例として示す。最大磁束密度変化量 $\Delta B = 0.82\ \text{T}$ を生じたのち、自由振動により振幅の減衰に伴い、アシスト磁界の面内成分が減少し、梁中の磁束密度が小さくなっていくことが分かる。また、Fig. 3 に ΔB のコイル位置依存性を示す。永久磁石のある自由端に検出コイルが近づくにも関わらず、 $x_{\text{coil}} = 44\ \text{mm}$ より自由端側では ΔB は増加せず減少に転じた。この理由として、梁の端部付近では磁極の形成により磁区構造が複雑になり、その結果、磁束が長手方向に一様分布しなかったためであると考えられる。当日は梁の変位や磁石の磁界強度を変化させた場合も含め、局所磁界と磁束分布の関係について詳細に報告する。

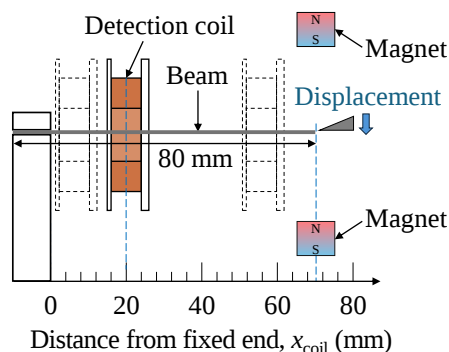


Fig. 1 Schematic diagram showing positional relationship between beam, coil, and a pair of magnets.

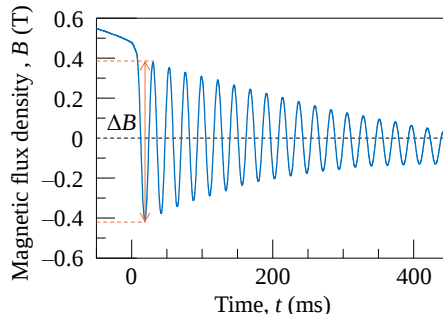


Fig. 2 Magnetic flux density at coil position $x_{\text{coil}} = 44\ \text{mm}$.

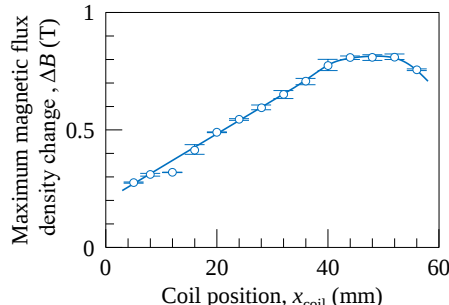


Fig. 3 Coil position dependence of maximum magnetic flux density change.

- 1) H. Wakiwaka, Y. Kumakura, A. Yamada, K. Otakae, and A. Izuno: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **31**, 250 (2007).
- 2) T. Ueno and S. Yamada: *IEEE Trans. Magn.*, **47**, 2407 (2011).
- 3) S. Fujieda, S. Suzuki, A. Minato, T. Fukuda, and T. Ueno: *IEEE Trans. Magn.*, **50**, 2505204 (2014).
- 4) 長内史也, 桐修一郎, 石山和志: 平成 31 年電気学会全国大会論文集, p. 146 (2019).
- 5) 大竹充, 川井哲郎, 二本正昭「発電装置」特願 2022-086851 / 特開 2023-174153 (2022).
- 6) 神谷颯, 石川瑛士, 明田俊祐, 中村優太, 大竹充, 川井哲郎, 二本正昭: 第 47 回日本磁気学会学術講演会概要集, p. 260 (2023).

水平および斜め磁界アシスト式電磁誘導型振動発電デバイスの基本原理

今村圭佑・中村優太・神谷颯・大竹充
(横浜国大)

Fundamental Principle of Horizontal and Oblique Magnetic Field Assisted Electromagnetic Vibration Powered Generators

Keisuke Imamura, Yuta Nakamura, Soh Kamiya, and Mitsuru Ohtake

(Yokohama Nat. Univ.)

はじめに 電磁誘導型振動発電の方式として、磁石揺動式と逆磁歪式¹⁻³⁾が一般的に知られているが、著者らは垂直磁界アシスト式⁴⁾に加え、最近、水平および斜め磁界アシスト式⁵⁾を開発した。本研究では、その基本原理を明らかにすることを目的とする。磁界アシスト式は、軟磁性材料から構成される梁を片持ち状態にし、磁性体内の磁束変化を周囲に設置したコイルにより電磁エネルギー変換させ、出力を得る。磁束を変化させるメカニズムは垂直と水平/斜め磁界アシスト式で同じであるが、2つの永久磁石によるアシスト磁界の梁に対する印加方向が異なる。前者では垂直方向であるのに対して、後者ではFig. 1(a)に示すように長手方向とする。磁石と梁の距離に応じて、梁に印加される磁界強度が変化し、また、磁界強度に応じて梁は吸着力を受け、振動特性も変化することが考えられる。そこで、梁の長さ方向と磁石の磁極面の垂線を平行にした場合（水平磁界アシスト式）における梁-磁石間距離 d_{bm} および2つの磁石間距離 d_{mm} を変化させ、振動および発電特性を調べた。次に、梁の自由端の軌跡の法線方向にアシスト磁界が印加されるように磁石の磁極面の角度 θ を変化させた場合（斜め磁界アシスト式）の検討を行った。

実験方法 梁材料にはJIS規格35A270の無方向性珪素鋼板（80 mmL × 20 mmW × 350 μ mT）を用い、長手方向の端から20 mmの部分までを固定することにより片持ちの状態にした。発電コイルは全長が54 mm、最内径が26 mmW × 22 mmH、巻数が21600回、抵抗が5.56 k Ω 、インダクタンスが7.42 Hのものを使用した。永久磁石としてはネオジム磁石（3 mmL × 30 mmW × 10 mmH、L方向に着磁）を用い、梁自由端からの距離 d_{bm} を3から10 mmの間で変化させた。また、磁石間距離 d_{mm} および磁極面角度 θ についても検討した。Fig. 1にこれらの関係を纏めたものを示す。そして、加振機を用いてシステム全体を強制振動させ、発電試験を行った。振動の加速度は2.0 Gで一定とし、周波数は各アシスト磁界条件における梁の共振周波数とした。

実験結果 $d_{bm} = 6$ mm, $d_{mm} = 0$ mm, $\theta = 0$ deg.の場合において共振周波数65 Hzの正弦波振動を与えた際の加速度、梁自由端の変位、磁束密度、出力電圧の波形をFig. 2に示す。梁自由端の振動に伴って磁束密度が0.58 T変化し、23.2 Vのピーク電圧が得られている。 $d_{mm} = 0$ mm, $\theta = 0$ deg.において d_{bm} を変化させたときのピーク電圧および梁の振幅をFig. 3に示す。 d_{bm} の増加につれて、ピーク電圧は増大していき、その後 $d_{bm} = 6$ mm を境に減少している。 d_{bm} の増加に伴って、梁に印加される磁界強度は減少する一方で、吸着力の減少により梁の共振周波数および振幅は増加するため、その兼ね合いによってピーク電圧が最大となる d_{bm} が存在したものと解釈される。当日は、 d_{mm} や θ を変化させた場合を含め、水平および斜め磁界アシスト式の磁石配置が梁の振動と発電特性に与える効果について詳細に報告する。

- 1) T. Ueno and S. Yamada: *IEEE Trans. Magn.*, **47**, 2407 (2011).
- 2) S. Fujieda, S. Suzuki, A. Minato, T. Fukuda, and T. Ueno: *IEEE Trans. Magn.*, **50**, 2505204 (2014).
- 3) 長内史也, 栢修一郎, 石山和志: 平成31年電気学会全国大会論文集, p. 146 (2019).
- 4) 大竹充, 川井哲郎, 二本正昭「発電装置」特願 2022-086851/特開 2023-174153 (2022).
- 5) 大竹充, 中村優太「発電装置」特願 2024-084029 (2024).

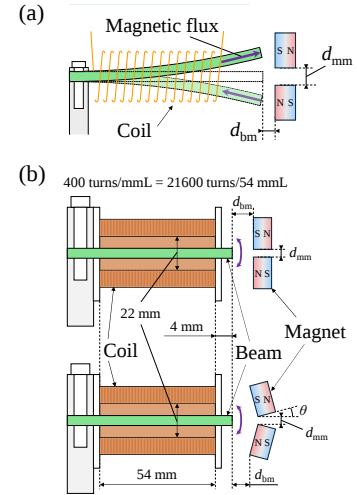


Fig. 1 (a) Direction of magnetic flux in beam. (b) Positional relationships between beam, two magnets, and coil.

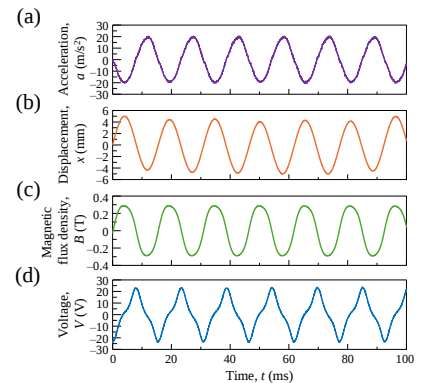


Fig. 2 Waveforms of (a) acceleration, (b) displacement, (c) magnetic flux density, and (d) output voltage.

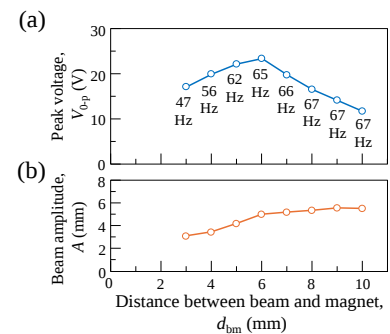


Fig. 3 Dependences of d_{bm} on (a) peak voltage and (b) beam amplitude.

梁の共振による高出力電磁発電機の提案

青木英恵、増本博
(東北大学)

High-output vibrating electromagnetic power generator with beam resonance

Hanae Aoki and Hiroshi Masumoto

(Tohoku University)

背景

近年、橋梁等の老朽化から構造ヘルスマモニタリングの需要が高まり、その実現に必要な膨大なセンサ群を支える電源確保が課題となっている。電池交換の労力や設置の安全性、コスト低減のために、電池や商用電源に代わる自律型環境発電電源の開発が望まれる。人による検査に匹敵する多機能センサを搭載したデバイスには、1-3W以上の電源確保が望まれるが、冬季期間に発電できない太陽光発電を除く環境発電の出力は、数100 mW以下であり、機能を制限せざるを得ないのが現状である。環境中の振動を電力に変換する「振動発電」は、有害で不要な振動を電力に変換する発電技術であり、他の発電と異なる環境(日照のない冬や屋内)に適応できるエネルギーミックスの観点からも期待される。もし、振動発電機の出力を現状の10倍以上に向上することができるならば、振動発電の電源としての適用範囲を大幅に拡大でき、バッテリーレス多機能センサネットワークの実現が期待できる。本研究では、梁の共振と電磁誘導を発電原理とし、軟磁性体により発電出力を大幅に向上した梁振動型電磁発電機を提案する。

実験方法

梁振動型電磁発電機は、銅線1000回巻(抵抗90Ω)のアモルファス箔積層軟磁性コア(MaDC-A®プロテリアル)を樹脂製片持ち梁の自由端に固定した振動部と、自由端からギャップ(g)を設けて磁極面を対向させたバックヨーク(BY)付きNdFeB永久磁石(最大磁束密度4.3kOe)からなる。励振加速度および周波数可変な振動試験機を用いて、上記装置全体を励振させ、コイルの両端に生じる誘導起電力をデジタルオシロスコープで観測し、発電量を評価した。

実験結果

図1(左)に振動試験の様子を示す。梁の共振周波数21 Hz、励振加速度 9.8 m/s^2 において、自由端における梁の振幅は20 mmであり、図1(右)の発電波形が得られた。永久磁石の前を梁が上下に振動することによる軟磁性コアの極性の時間変化(図1右上)は、コイルの誘導起電圧の出力と対応している。コイルは中央付近のBY付永久磁石を梁の振動1周期に2回通過するため、48 msの間に最大起電圧 $V_{pp} \sim 60 \text{ V}$ が2度現れている。最大電力は20W、実効電力は963 mW、1周期のエネルギーは46 mJであった。現在、1W以上の出力向上に挑戦しており、多機能センサの電源への適用を目指している。

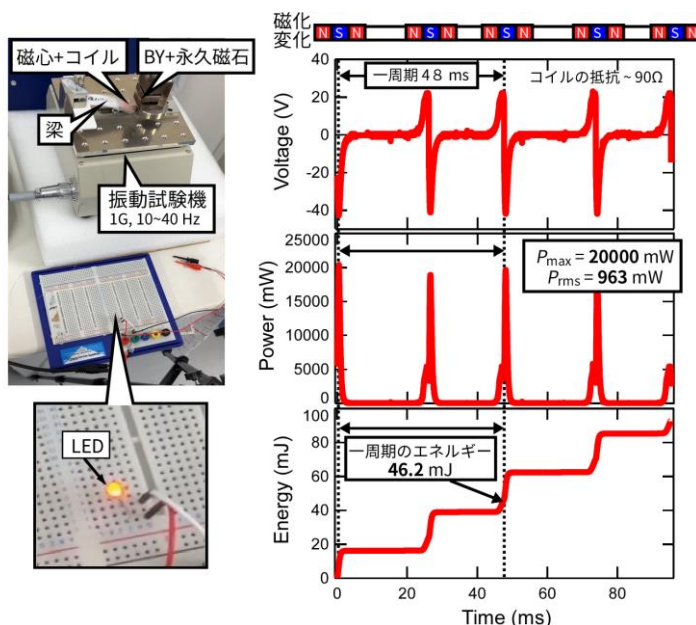


図1 振動試験の様子(左)および発電波形(右)

謝辞

アモルファス箔は株式会社プロテリアル様よりご支給いただきました。感謝申し上げます。

振動が励起された湾曲柔軟鋼板の磁気浮上システム (外乱入力時の定常応答に関する実験的検討)

内田大日、小川和輝^{*1}、小林一景、黒田純平、内野大悟^{*2}、池田圭吾^{*3}、加藤太朗^{*4}、遠藤文人^{*5}、
成田正敬、加藤英晃

(東海大、^{*1}愛知工科大学、^{*2}沼津高専、^{*3}北海道科学大、^{*4}東京工科大、^{*5}福工大)

Electromagnetic levitation system for excited bending flexible steel plate

(Experimental consideration on steady state response under disturbance input)

Y.Uchida, K.Ogawa, I.Kobayashi, J.Kuroda, D.Uchino, K.Ikeda, T.Kato, A.Endo, T.Narita, H.Kato

(Tokai Univ., ^{*1}Aichi Univ. Tech., ^{*2}NIT. Numazu., ^{*3}Hokkaido Univ. Sci., ^{*4}Tokyo Univ. Tech., ^{*5}FIT)

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、浮上中の鋼板に定常的な外乱を入力し、変位センサを電磁石の吸引力が及びづらい領域の箇所に設置し、鋼板の硬さによる指導特性の差について検討した。

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、変位センサを A～D 点に設置した。浮上対象は長方形鋼板（長さ $x = 800$ mm、幅 $y = 600$ mm）とし、2種類の板厚の鋼板（0.19 mm、0.30 mm）を用いた。本報告では磁気浮上中の鋼板に Fig. 3 のような正弦波状の外乱を Fig. 1 における実験装置の Frame No. 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-D 点での変位時刻歴を示す。この結果より A-D 間で位相差が生じており、0.19 mm の方が振幅が大きいことが確認された。

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.

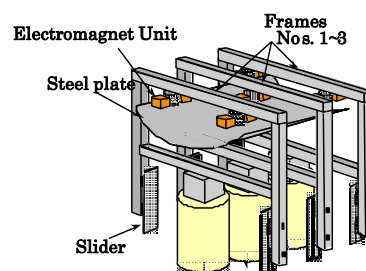


Fig. 1 Schematic illustration of experimental apparatus

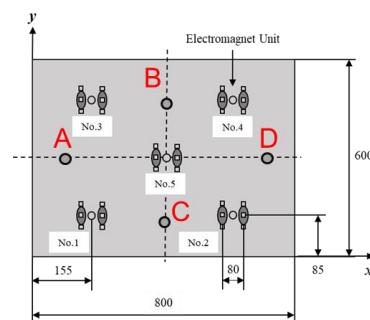


Fig. 2 Placement of Displacement sensors

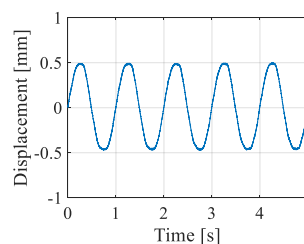
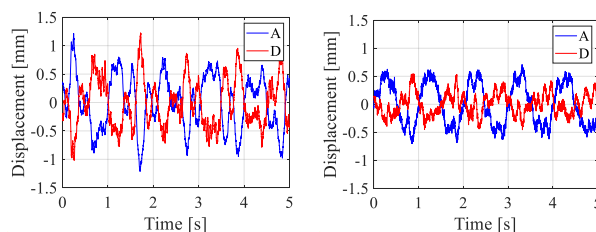


Fig. 3 Time history of sinusoidal disturbance



(a) 0.19 mm, 13°

(b) 0.3 mm, 5°

Fig. 4 Measured displacement of levitated steel plate

磁性体の位置制御のための磁石角度の最適化

佐久間洋志, 澤田 舜
(宇都宮大)

Optimization of magnet angles for magnetic motion control

H. Sakuma and S. Sawada
(Utsunomiya Univ.)

はじめに

3つの永久磁石をモータにより回転させて微小な永久磁石の位置を3次的に制御する技術が報告されている¹⁾。しかしながらこれは、被制御磁石をある方向に移動させるために磁場制御用磁石（以下ベース磁石と呼ぶ）をどの方向に回転させればよいかを示しているに過ぎない。被制御磁石がある位置に置かれたとき、それに働く力がゼロとなるようなベース磁石角度を求めることは、位置制御の高速・高精度化において重要である。本研究では、covariance matrix adaptation evolution strategy (CMA-ES)^{2,3)}を用いてベース磁石の角度を最適化する。

計算方法と結果

ベース磁石は径方向に着磁した円筒状ネオジウム磁石（直径 20 mm，長さ 50 mm）である。3つのベース磁石（M0～M2）は1辺の長さが 180 mm の正三角形の辺の中央に置かれている。被制御磁石は直径 3 mm，高さ 3 mm の円筒状フェライト磁石である。（位置を認識するために直径 6 mm のプラスチック球に埋め込まれ，方向を認識するために長さ 6 mm のプラスチック棒が取り付けられている）。Fig. 1 に示すように，正三角形の中心を原点として被制御磁石の位置を定義する。ベース磁石の角度（ $\theta_0 \sim \theta_2$ ）は，N 極が+z 方向を向いているときをゼロとし，外向きの回転を正とする。あるベース磁石角度において，ある位置に置かれた被制御磁石に働く力を求めるために，有限要素法シミュレータ Femtet（ムラタソフトウェア）を用いた。Python 用進化計算ライブラリ DEAP⁴⁾を用いて CMA-ES を実行した。1組のベース磁石角度を1個体として，1世代において7つの個体を生成した。その中から3つの優れた個体（x, y 方向の磁力がゼロに近く，z 方向の磁力と（重力－浮力）の差がゼロに近い個体）を選択する。その他の条件は CMA-ES における標準的な値²⁾を用いた。Fig. 2 に被制御磁石の位置を $x = y = 0, z = 55$ mm としてベース磁石角度を最適化した結果を示す。 $\theta_0 \sim \theta_2$ は $\pm 90^\circ$ の範囲の乱数からスタートして約 0° に収束し，実験とほぼ一致した。発表では様々な位置における最適化結果を報告する予定である。

参考文献

- (1) H. Sakuma, *Sci. Rep.* **13**, 18052 (2023). (2) N. Hansen and A. Ostermeier, *Evol. Comput.* **9**, 159 (2001). (3) H. Sakuma, *J. Magn. Magn. Mater.* **566**, 170315 (2023). (4) F.-A. Fortin et al., *J. Mach. Learn. Res.* **13**, 2171 (2012).

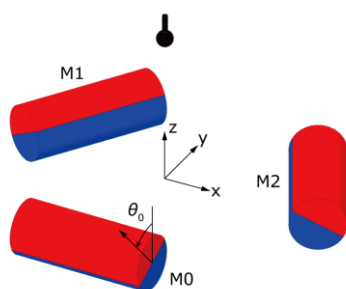


Fig 1. Schematic of magnetic motion control system with magnet numbers, magnet angles, and coordinates of the magnetic object.

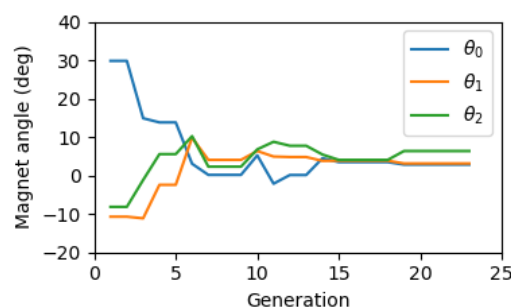


Fig 2. Change in magnet angles with progress of optimization.