

令和 3 年 5 月 27 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01664

研究課題名(和文) ハルバツハアレー振動発電機によるインフラ構造物状態モニタリングの実現

研究課題名(英文) Realization of Structural Health Monitoring Using Halbach-Array Vibration Energy Harvester

研究代表者

五十嵐 一 (Igarashi, Hajime)

北海道大学・情報科学研究院・教授

研究者番号：90212737

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、橋やダム、トンネルなど構造物の振動から電力を回収するための振動発電機を開発した。この振動発電機により、構造物の安全点検を行うワイヤレスセンサを駆動することができる。本研究では、振動発電機のために、片側に強い磁界をつくるハルバツハ磁石配列を拡張し、新しい2次元永久磁石配列を導入した。本研究では特に、コイルの誘導起電力が最大となるように2次元磁石配列を最適計算により決定した。さらに実際に最適な永久磁石配列を強磁性エラストマーを用いて作成し、その磁束密度を測定することで最適化の有効性を確認した。測定の結果、従来の永久磁石より約30%強い磁束密度が得られることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

わが国の橋やトンネルなどは高度成長期につくられたものが多いため、現在老朽化の問題に直面している。このような社会インフラの安全点検を人間が行うためには大きな労力が必要であり、また危険性が伴う。この問題を解決するためにワイヤレスセンサを構造物に多数配置し、状態監視を行うことが有効である。これらセンサをバッテリーで駆動すると、それらの交換のために労力が必要となるため、環境からエネルギーを回収してセンサを駆動させることが望ましい。本研究では、構造物の振動からエネルギーを回収する振動発電機のために、2次元永久磁石配列とコイルアレーを導入した。またその最適構造を決定し、実験により有効性を示した。

研究成果の概要(英文)： In this study, we have developed a new vibration energy harvester which generates energy from the vibration of constructions such as bridges, dams and tunnels. The energy harvester can drive the wireless sensors for safety inspection. In this study, we introduced a novel two-dimensional Halbach magnet array which is an extension of the conventional one-dimensional Halbach magnet to improve the energy generation efficiency. We determined an optimal structure of the magnet array by maximizing the induced voltage in the coils. Moreover, we manufactured the two-dimensional magnet array on the basis of the optimization result using the ferromagnetic elastomer to measure the magnetic field generated by the array. As a result, it is shown that the magnet array developed in this study has the magnetic field density which is 30% stronger than that of the conventional Halbach array.

研究分野：最適設計

キーワード：エネルギーハーベスタ 振動発電 ハルバツハ磁石 最適化

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

橋梁やトンネル、水道管など社会インフラの安全性を高めるために、構造物中の腐食物質濃度・温度等の継続的なモニタリングが有効である。環境中のエネルギー源から電力を回収するエネルギーハーベスティングを用いた自律無線センサを開発できれば、このようなモニタリングが実現できる。エネルギーハーベスティングには様々な方式があるが、構造物の振動からエネルギーを得る振動発電方式が注目を集めている。振動発電には圧電素子や磁歪素子を用いたものなどがあるが、動作周波数がインフラ構造物の振動周波数に比べて高いという問題がある。一方、電磁誘導型はインフラ構造物の振動周波数帯域でも動作が可能である。しかし、従来型の電磁誘導型発電機は通常、単一の永久磁石・コイル対を用いているため、構造物の0.1G程度の微小振動で無線センサを駆動するための十分なエネルギーを回収できていなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、広帯域かつ間欠的な0.1G以下の微小振動で無線センサを駆動する小型振動発電機を開発することである。このため、多数の磁極を平面上に高密度配置するとともに、写真印刷により多重巻きコイルを基板中に多数構成する。このような並列配置の磁極・コイルが振動により相対変位すると、各コイルに電圧が誘導される。これらを直列接続することで電圧を極数対分増倍し、無線センサ駆動に十分な電力を得ることを狙う。

3. 研究の方法

磁極配置として2次元のハルバツハ配列を用いることにより、コイルアレーに磁束を集中する。これまで、2次元ハルバツハアレーは報告されているが、磁束を最大化するような最適構造は知られていなかった。また同時に、誘導起電力を最大化するようなコイル配置も未知であった。このため本研究では、以下のような方法により、2次元ハルバツハアレーとコイルアレーの最適構造を決定するとともに、実験により最適構造の特性を明らかにした。

(a)2次元永久磁石アレーがつくる磁界を3次元有限要素解析で求め、コイルの誘導電圧が最大となるような永久磁石配列を最適計算により求める。最適化にはデジタルアニールによる超並列計算を用いる。

(b)最適化された永久磁石構造を実現するために、強磁性エラストマーを用いて単位構造を作成する。このため、最適構造の型をつくり、型に液体状の強磁性体を流し込み固化させる。さらにこの磁性体を磁化させることにより永久磁石を構成する。

(c)最適化された2次元永久磁石構造がつくる磁束密度を計測し、従来型の2次元ハルバツハ配列と比較する。

(d)(a)と同様な解析により、コイル配列と永久磁石配列の最適構造を求める。

4. 研究成果

研究項目(a), (b), (c)の研究を実施し、以下の研究成果を得た。

(a)図1の点Pの磁束密度を最大化するように最適化した2次元ハルバツハ配列を図2に示す。点pとの距離によって最適配置が異なることがわかる。また図3(b)に、(a)に示す4点での鎖交磁束が最大となるように最適化した2次元ハルバツハ配列を示す。図3(c)は従来提案されていたハルバツハ配列である。解析では、(b)の磁束密度は(c)のそれより17%増加することがわかった。

(b)図4に示す2次元永久磁石構造のつくる磁束密度を比較した。図5に強磁性エラストマーを用いて作成した永久磁石配列を示す。

(c)図6に2次元永久磁石配列の磁束密度の測定系を示す。ホールセンサーを2次元XYステージで移動させ、永久磁石配列がつくる磁束密度を測定した。測定結果を図7に示す。この結果より、最適化した配列の磁束密度は従来の配列より大きいことがわかる。磁束密度の最大値を比較すると、前者の方が約33%大きい。これより、最適化された2次元永久磁石配列の有効性が明らかになった。

(d)コイル構造と永久磁石配列を同時に最適化した結果を図8に示す。コイルと永久磁石の間隔が小さいときには、コイル・永久磁石が小さな構造に分割されるが、間隔が大きくなると大きな構造となることがわかった。

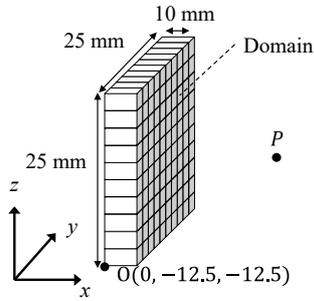


図1 設計領域と磁束密度の観測点P

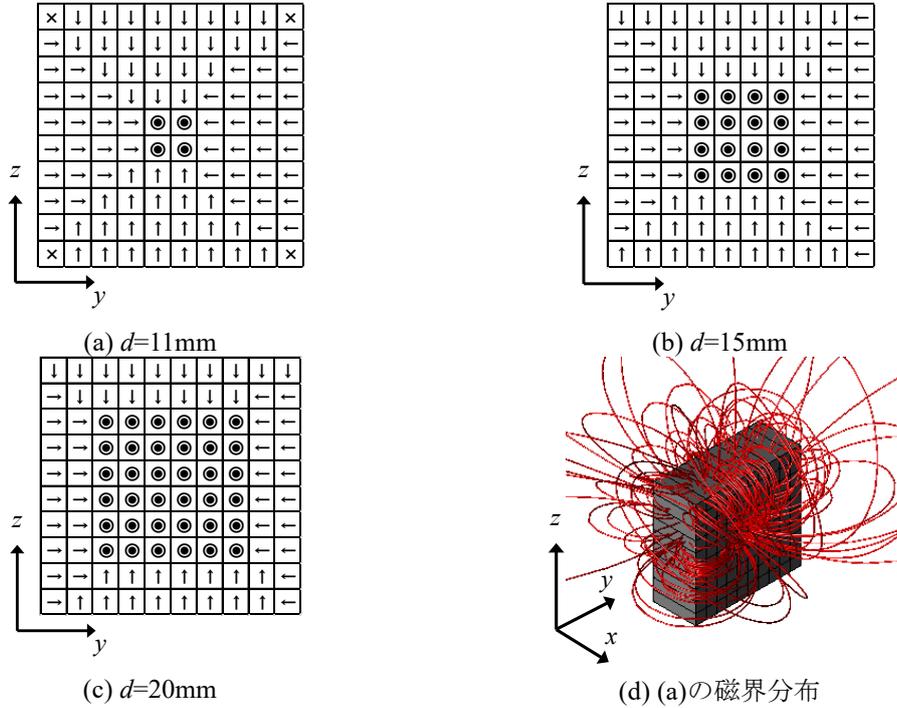


図2 最適な2次元永久磁石配列と磁界分布. は点Pと設計領域の距離を表す

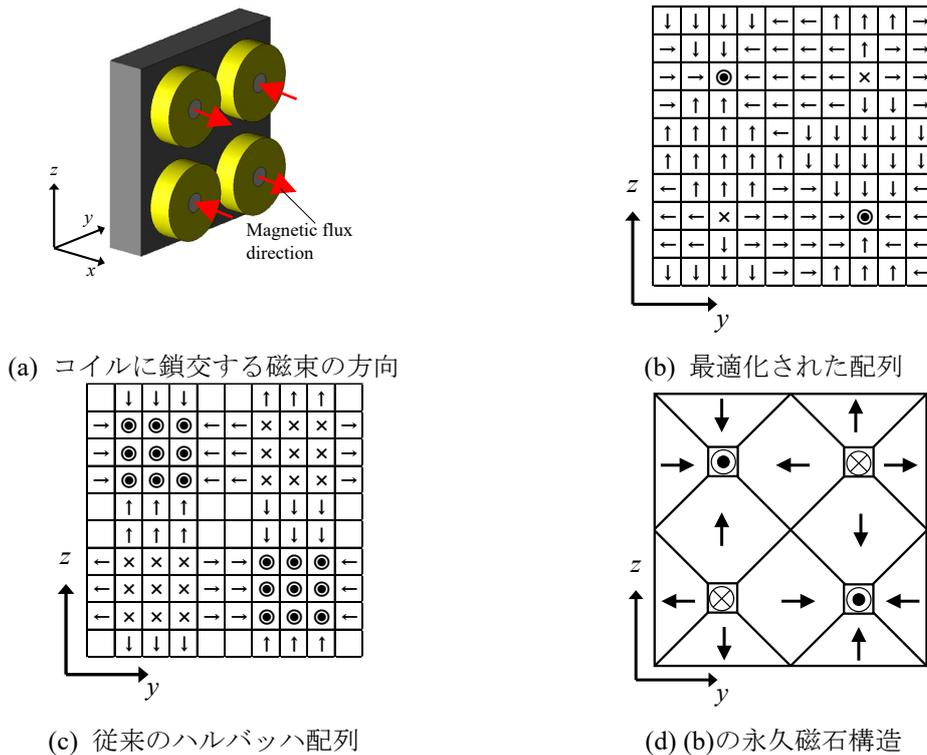
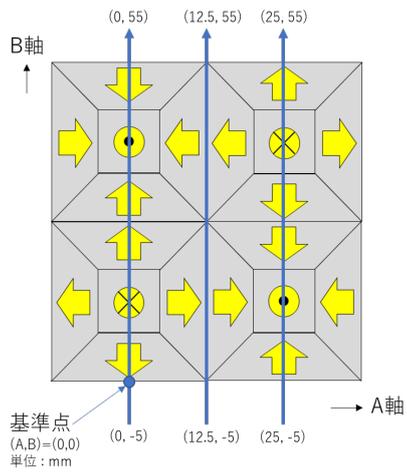
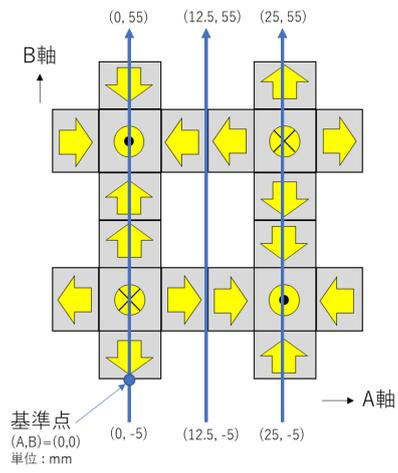


図3 コイルが4個の場合の最適な2次元永久磁石配列

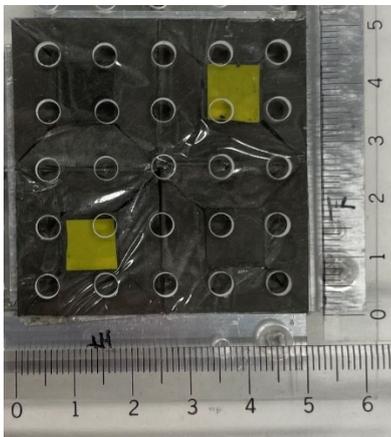


(a) 最適化された永久磁石配列

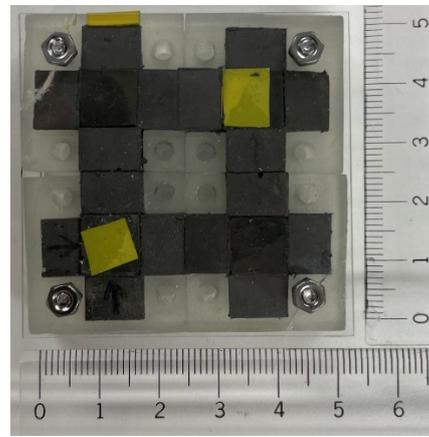


(b) 従来のハルバッハ配列

図4 実測のための永久磁石配列の配向. 青線に沿って磁束密度を測定した.



(a) 最適化された永久磁石配列



(b) 従来のハルバッハ配列

図5 強磁性エラストマーで構成した永久磁石配列



図6 測定系. XY ステージによりホール素子を移動させて磁束密度を測定した.

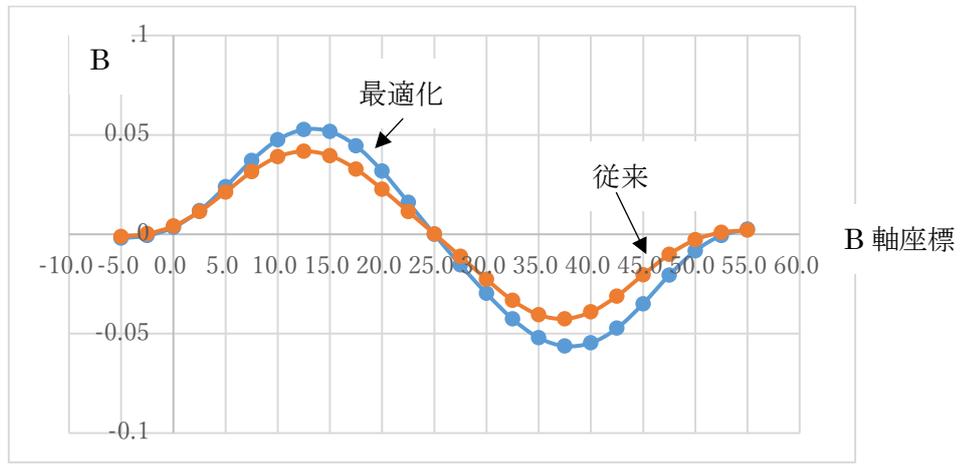


図7 磁束密度の測定結果. 図4のB軸に沿って計測した. 最適化, 従来はそれぞれ図4(a), (b)の測定結果を表す.

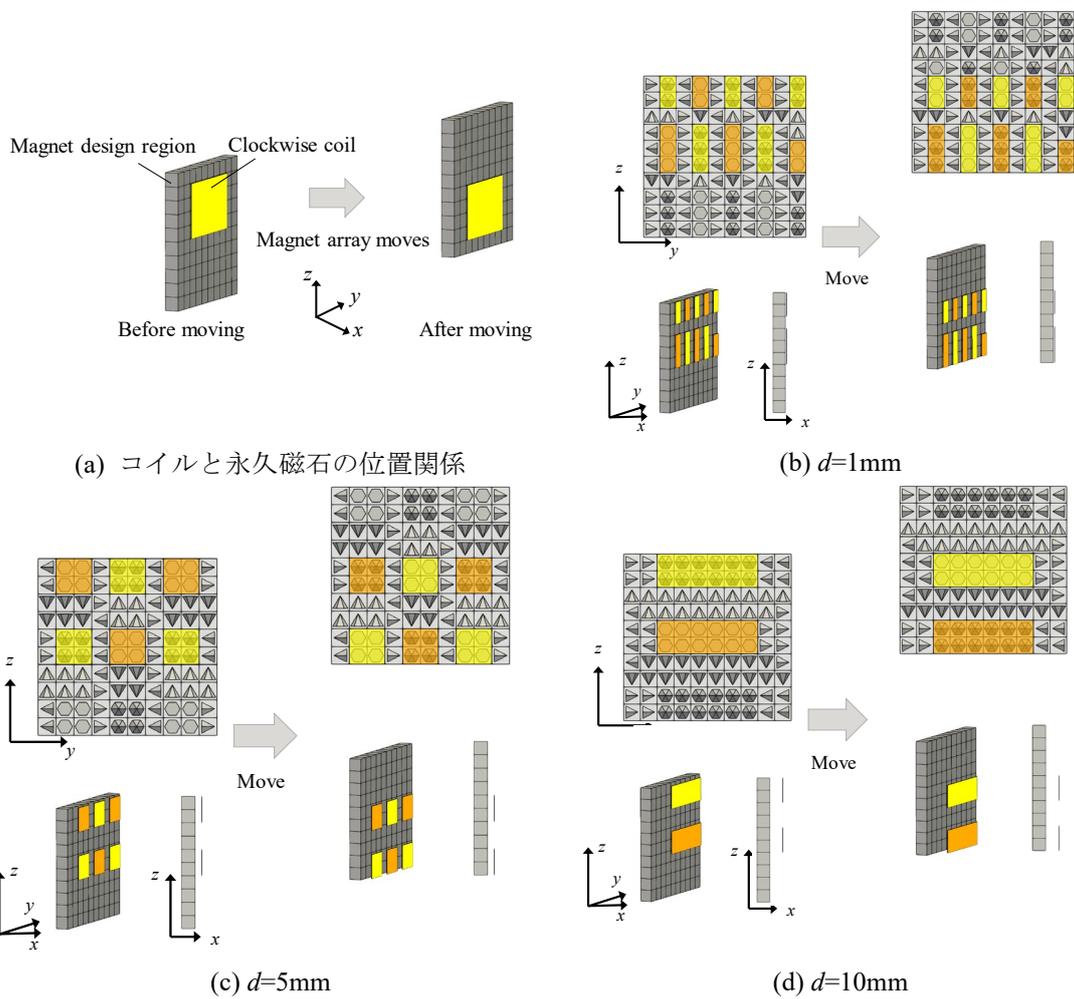


図8 コイルと永久磁石配列の同時最適化結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Y. Otomo, H. Igarashi	4. 巻 36
2. 論文標題 Synthesis of a Cauer Equivalent Circuit for Electric Devices From Computed and Measured Data	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Power Electronics	6. 最初と最後の頁 4513 ~ 4521
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TPEL.2020.3022167	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 H. Sato, H. Igarashi	4. 巻 Early access
2. 論文標題 Three-dimensional Analysis of Soft Magnetic Composite Using Discrete Element Method in Frequency Domain	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1 ~ 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2021.3059034	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 S. Fujita, H. Igarashi	4. 巻 38
2. 論文標題 Homogenization of Multi-turn Coil with Elliptic Cross Section Using Complex Permeability	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering	6. 最初と最後の頁 999, 1008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1108/COMPEL-09-2018-0356	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Y. Sato, Kenji. Kawano, D. Hou, J. Morroni, H. Igarashi	4. 巻 35
2. 論文標題 Cauer-Equivalent Circuit for Inductors Considering Hysteresis Magnetic Properties for SPICE Simulation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Power Electronics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TPEL.2020.2968749	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 A. Maruo, H. Igarashi, H. Oshima, S. Shimokawa	4. 巻 56
2. 論文標題 Optimization of Planar Magnet Array Using Digital Annealer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 7512104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2019.2957805	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 S. Hiruma, H. Igarashi	4. 巻 56
2. 論文標題 Model Order Reduction for Linear Time-invariant System with Symmetric Positive Definite Matrices: Synthesis of Cauer-equivalent Circuit	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 7400608
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2019.2962665	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 杉澤健, 丸尾昭人, 蟹江俊仁, 五十嵐一	4. 巻 vol.26, no.2
2. 論文標題 電磁誘導型振動発電機を用いた無線センサー	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本AEM学会誌	6. 最初と最後の頁 407, 412
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14243/jsaem.26.407	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 P. M. Pereira, F. Campelo, T. Mori, H. Igarashi, R. Adriano	4. 巻 -
2. 論文標題 A passive SPICE model for rectennas	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1108/COMPEL-04-2017-0163	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Otomo, H. Igarashi	4. 巻 -
2. 論文標題 A 3-D Topology Optimization of Magnetic Cores for Wireless Power Transfer Device	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2019.2900744	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 A. Maruo, H. Igarashi	4. 巻 -
2. 論文標題 Analysis of Magnetic Properties of Soft Magnetic Composite Using Discrete Element Method	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2019.2900287	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 A. Maruo, H. Igarashi, Y. Sato, K. Kawano	4. 巻 -
2. 論文標題 Identification of Magnetization Characteristics of Material From Measured Inductance Data	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2019.2896187	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 五十嵐 一
2. 発表標題 電磁誘導を用いた振動発電機
3. 学会等名 2020年度 第3回 EH コンソーシアム 総会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akito Maruo, Hirotaka Oshima, Hajime Igarashi
2. 発表標題 Design Optimization of Coils and Magnets in Vibration Energy Harvester Using Digital Annealer
3. 学会等名 19th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 丸尾昭人, 大島弘敬, 五十嵐一
2. 発表標題 デジタルアニーラを用いた薄型SPMモータの3次元磁石配置最適化
3. 学会等名 電気学会静止器回転機合同研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 丸尾昭人, 添田武志, 五十嵐一
2. 発表標題 デジタルアニーラを用いた電気機器のトポロジー最適化
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川田陽平, 井門康司, 岩本悠宏, 阪本裕之
2. 発表標題 永久磁石エラストマーの圧縮動的粘弾性特性の評価
3. 学会等名 第29回MAGDAコンファレンス
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大嶋泰雅, 井門康司, 岩本悠宏
2. 発表標題 楕円体形状の永久磁石エラストマーにおける磁歪効果
3. 学会等名 第29回MAGDAコンファレンス
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 五十嵐一
2. 発表標題 電磁界解析におけるモデル縮約と均質化
3. 学会等名 第2回大規模電磁界数値解析手法に関する研究シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 五十嵐一, 比留間真悟
2. 発表標題 モデル縮約法を用いた準静電磁界の等価回路表示について
3. 学会等名 数理解析研究所共同利用事業「諸科学分野を結ぶ基礎学問としての数値解析学」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Sato, A. Maruo, H. Igarashi
2. 発表標題 Analysis of Nonlinear Magnetic Properties of Soft Magnetic Composite Using Discrete Element Method
3. 学会等名 ISEM2019(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hajime Igarashi
2. 発表標題 Data-driven methods for computational electromagnetism
3. 学会等名 International Symposium on Numerical Modeling towards Digital Twin in Electrical Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 丸尾昭人, 大島弘敬, 五十嵐 一
2. 発表標題 デジタルアニーラを用いた振動発電デバイスの設計最適化
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Ido, Y. Iwamoto, K. Sato, J. Takeuchi, T. Deguchi, Y. Fujii, H. Yamamoto
2. 発表標題 Permanent Magnet Elastomer Having Anisotropic Internal Structure
3. 学会等名 17th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小坂翔, 岩本悠宏, 井門康司
2. 発表標題 ネオジム粒子分散系エラストマーの着磁による動的機械特性への影響
3. 学会等名 2019年度磁性流体連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大嶋泰雅, 岩本悠宏, 井門康司
2. 発表標題 分散媒の異なる永久磁石エラストマーの磁気特性
3. 学会等名 2019年度磁性流体連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Maruo, H. Igarashi
2. 発表標題 Optimization of Planar Magnet Array for Vibration Energy Harvester
3. 学会等名 OIPE2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Fujita, H. Igarashi
2. 発表標題 Homogenization of Multi-turn Coil with Elliptic Cross Section Using Complex Permeability
3. 学会等名 OIPE2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Hiruma, H. Igarashi
2. 発表標題 Homogenization Based on Continued Fraction: Application to Magnetic Field Analysis
3. 学会等名 JSST2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Maruo, H. Igarashi
2. 発表標題 Modeling of Soft Magnetic Composite Using Cell Automaton
3. 学会等名 JSST2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Fujita, H. Igarashi
2. 発表標題 Model Order Reduction of Conductive Thin Sheets for Time-Domain Analysis with IBCs
3. 学会等名 IGTE2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 五十嵐一
2. 発表標題 トポロジー最適化を用いたマイクロ波エネルギーハーベスタの開発
3. 学会等名 第51回野依フォーラム (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 丸尾昭人, 五十嵐一
2. 発表標題 離散要素法と有限要素法を用いた圧粉磁心の磁気特性解析
3. 学会等名 電気学会静止器回転機合同研究会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

エネルギーハーベスティング
<https://seeds.mcip.hokudai.ac.jp/jp/view/168/%E6%8C%AF%E5%8B%95%E7%99%BA%E9%9B%BB>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	井門 康司 (Ido Yasushi) (40221775)	名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授 (13903)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------