

平成 30 年 8 月 31 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02976

研究課題名(和文) インフラ安全監視センサを駆動する広帯域カオス振動発電機

研究課題名(英文) Wide-band chaotic vibration harvester for safety surveillance of infrastructure

研究代表者

五十嵐 一 (Igarashi, Hajime)

北海道大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：90212737

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、橋梁、トンネル、送電線鉄塔などインフラ構造物の安全状態モニタリングを行うための無線センサを開発した。バッテリーの交換が不要な無線センサ実現するため、これら構造物の広い周波数帯の振動からエネルギーを効率的に吸収するカオス振動発電機を開発した。本振動発電機は、重力加速度の1/10程度の振動加速度で無線センサICを駆動できる電力を発電することができることを実証した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have developed a wireless sensor for monitoring of health condition of infrastructures such as bridges, tunnels and transmission line towers. To realize the wireless sensor which works without batteries, we have developed a novel chaotic-vibration energy harvester which can harvest powers from the vibration of the infrastructures with wideband spectrum. It is experimentally shown that the energy harvester can drive the wireless sensor from the excited vibration whose amplitude is about 0.1G.

研究分野：エネルギーハーベスティング

キーワード：エネルギーハーベスティング 振動発電 カオス振動

1. 研究の目的

本研究ではインフラ構造物の安全状態を監視するための無線センサを実現することを目標とする。このため構造物の振動から無線センサの駆動する電力を回収する振動発電機を開発する。特に、広帯域の振動周波数で発電を可能にするため、カオス振動を利用するカオス振動発電機を開発する。

2. 研究成果

(1) 振動発電機の開発と評価

構造物の0.1G程度の低い振動加速度、広いスペクトルの振動から効率的に発電を行うため、図1に示す新しい構造の振動発電機を開発した。この発電機は磁石対を振動方向に3つ備えている。振動の上端および下端で閉磁路が形成されるため、コイルと鎖交する磁束を増やすことができる。図2に作成した振動発電機の外観を示す。筐体は3次元プリンタで作成した。

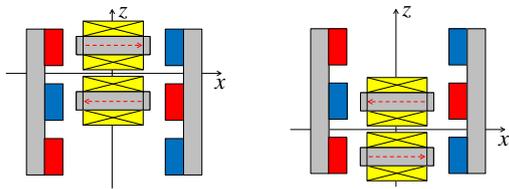


図1 振動時の磁路

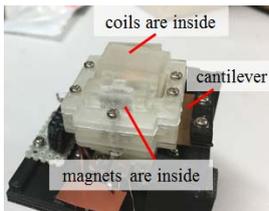
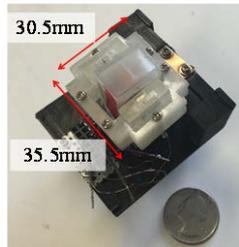


図2 カオス振動発電機の外観

(2) 構造物の振動測定

実際のインフラ構造物の振動特性を測定した(図3)。測定は、北海道朝里の建設用架橋にて行った。連携研究者 蟹江教授, NEXCO 東日本の協力の下、研究代表者が測定した。平均加速度は約0.1Gであった。図4に測定の様子と測定された振動スペクトルを示す。

(3) 振動発電機の特長

(3.1) シミュレーションによる検討

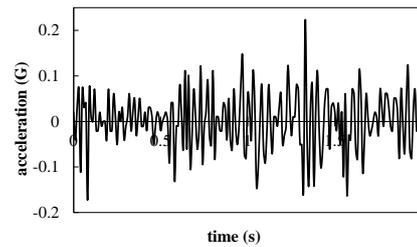
振動発電機の基本特性を理解するために、シミュレーションを用いて運動を解析した。まず有限要素法を用いて3次元磁界解析を行い、コイル中心に埋め込まれた電磁鋼板と永久磁石(ネオジウム

磁石)との間に働く磁気力を求めた。磁気力から振動子のポテンシャルを計算した。図5に結果を示す。ここでは永久磁石とコイル端部間のギャップ長を表す。ギャップが十分狭いときには、2重井戸構造のポテンシャルが得られることがわかる。またギャップを広げるとこの構造が失われることがわかる。よって、振動発電機作成時には、ギャップ長の管理が重要であることがわかった。図6に周波数を変化させたときの振動状態を示す。周波数が十分低いときには2重井戸間を遷移する振動となり、35Hz付近ではカオス振動が得られる。さらに周波数を増加すると、ポテンシャル障壁を超えられないようになり、ひとつのポテンシャル井戸にトラップされた微小振動となる。

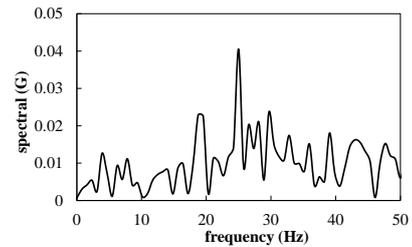
図7に減衰係数と入力加速度を変化させたとき



図3 仮設橋の振動測定



(a) 振動加速度の時間変化



(b) 振動スペクトル

図4 仮設橋の振動測定結果

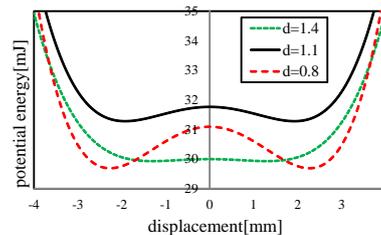


図5 振動発電機のポテンシャルエネルギー

の振動形態をまとめた。減衰は空気摩擦やコイルの渦電流により生じる。ヒステリシスは、周波数の増加、減少で応答が異なる非線形振動を表す(カオス振動ではない)。ギャップ距離を適切に長くすると、2重ポテンシャル井戸間のポテンシャル障壁が低くなるため、小さな入力加速度でカオス振動が得られる。また減衰係数が小さくすると、カオス振動が得られやすいことがわかる。

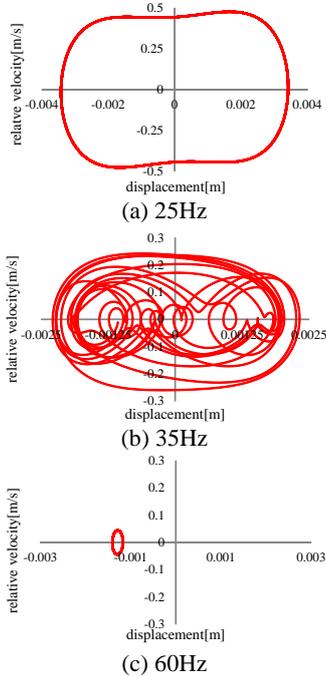


図6 振動形態の周波数依存性

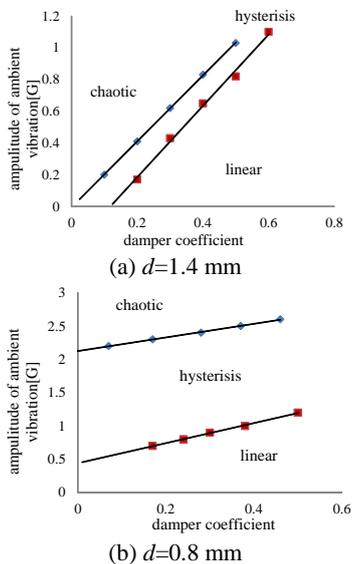


図7 振動状態チャート

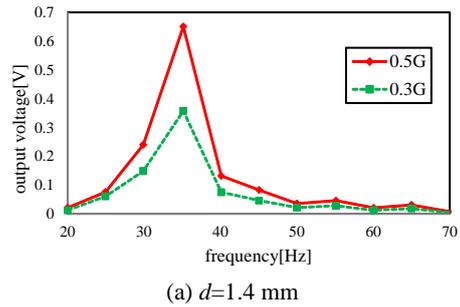
(3.2) 実験結果

図8に実測した振動の周波数特性を表す。 $d=1.4\text{mm}$ のときにはヒステリシスなどの非線形挙動が観測されないが、 $d=0.8\text{mm}$ のときにはヒステリシス性が確認される。これらでカオス振動が観測されないのは、入力加速度が低いためだと考えられる。図9に周波数を37.4Hz、入力加速度を2.6Gにしたときに観測されたカオス振動を示す。図10に振動発電機により得られた開放電圧を示す。

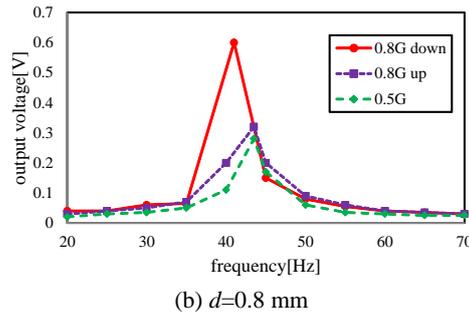
す。いずれの場合にも、広い周波数帯域で発電できていることがわかる。図9,10では1G以上の入力加速度に対する応答を考えたが、実際の橋梁の振動は0.1G程度であると考えられる。このためより低い入力加速度で発電できるように振動発電機を改良することが求められる。このためつぎの2点の改良を行った。

1. 発電電圧を増加させるため、発電部のコイルの巻き数を700巻(24Ω)から1200巻(44Ω)に増加した。
2. 製造誤差を軽減するため、コイル設置部を強度の高いアルミで作製した。

1つ目の改善点により、誘導起電力が増加し、出力電圧の向上が見込まれる。2つ目の改善点により、製造誤差が低減するため、振動子とコイル設



(a) $d=1.4\text{ mm}$



(b) $d=0.8\text{ mm}$

図8 振動の周波数特性

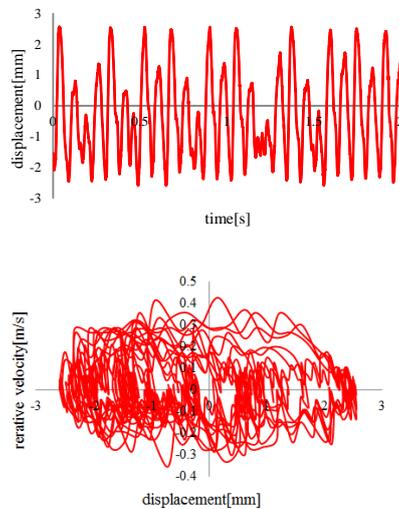


図9 観測されたカオス振動 (37.4Hz, 2.6G)

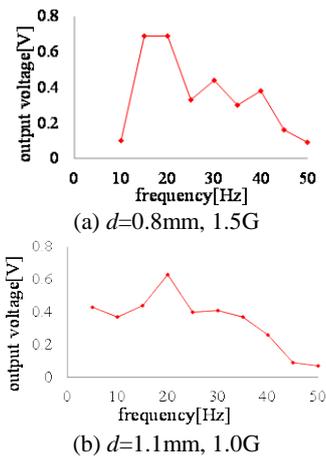


図 10 誘起電圧の周波数特性

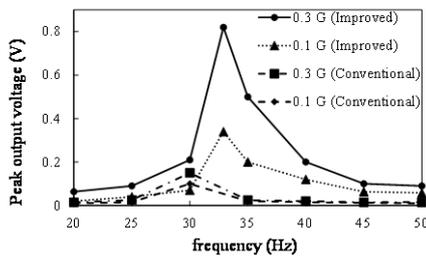


図 11 改良による誘起電圧の増加

置部分の接触による摩擦の低下が見込まれる。接触摩擦が低下することで、より大きく振動するようになるので、出力向上につながる。また、共振周波数は振動発電機のポテンシャルエネルギーにより決まるので、振動子の重さ、ギャップ幅の大きさ、バネ定数を変化させることで、調整することが可能である。なお、コイルに用いる銅線の一部の被膜が剥がれ、コイル軸の電磁鋼板と通電状態となることがあるので、電磁鋼板は絶縁体で被膜をした。改良前と改良後の振動発電機の周波数特性の比較を図 11 に示す。ここで、コイルには $100\text{k}\Omega$ の抵抗を接続し、その両端電圧を測定した。改良前では入力振動の加速度を 0.3 G としても、得られる電圧は最大で 0.2 V (Peak)弱であった。一方、改良後では 0.1 G で 0.3 V (Peak)程度、 0.3 G で 0.8 V (Peak)程度の電圧が得られている。これにより、入力振動の加速度を 0.1 G としても共振点ではダイオードの閾値電圧(約 0.2 V)以上の電圧が得られており、蓄電回路の動作が可能であると考えられる。なお、コイルに 200Ω の抵抗を接続したとき、共振点付近の 35 Hz 、入力加速度 0.1 G で 0.3 mW の電力が得られた。

(4) 発電・通信実験

(4-1) 昇圧・蓄電回路の作成

前述のように、無線センサには、振動発電機で発電した交流電圧を増幅かつ整流する回路と、蓄電モードと放電モードを切り替える回路が必要である。本研究では、超低消費電力昇圧コンバータ BQ2550 を用いて昇圧・蓄電回路を作成した。昇圧・蓄電回路の構成を図 12 に示す。BQ25504 への入力

を通して振動発電の出力を直流に変換している。BQ25504 の動作電圧は 330 mV であり、振動発電機への入力振動が小さいときこの電圧を上回ることが難しい。このため整流回路として昇圧の機能をあわせ持つコッククロフト・ウォルトン回路を採用した。ここで、ダイオードはショットキーバリアダイオード(11EQS04)、コンデンサは $100\mu\text{F}$ の電解コンデンサを用いた。11EQS04 は約 0.2 V 以上の電圧で動作するため、振動発電機の出力電圧が 0.2 V 以上であるときの蓄電回路が動作可能である。蓄電用のコンデンサとしては 1 mF の電解コンデンサを用い、後の蓄電実験ではこのコンデンサの両端電圧の時間変化を測定した。

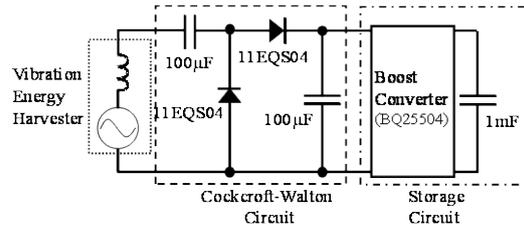


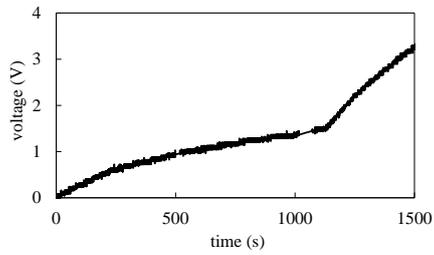
図 12 昇圧・蓄電回路

(4-2) 蓄電実験結果

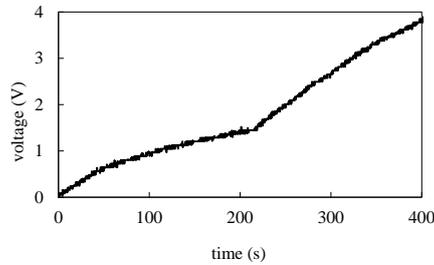
蓄電実験では、改良を施した振動発電機を加振機(abworks, ET-132)により励振し、蓄電用コンデンサの両端電圧の時間変化を測定した。ここで入力振動は 35 Hz の正弦波とし、加速度は 0.1 G 、 0.3 G 、 0.5 G の 3 つの場合で測定した。測定結果を図 13 に示す。途中電圧の上昇率が変化しているのは、使用した BQ25504 内で用いられる昇圧コンバータが 1.8 V を境により効率の良いものに切り替わるためである。蓄電回路が放電状態に切り替わる 3.3 V まで蓄電されるために、加速度 0.1 G 、 0.3 G 、 0.5 G でそれぞれ、 1500 秒、 350 秒、 260 秒を要した。入力加速度が大きくなるほど、振動発電機の出力電圧が大きくなるので、蓄電にかかる時間が減少している。このように本実験では 0.1 G という微小な振動においても、約 25 分で蓄電回路が放電状態に切り替わる 3.3 V まで蓄電が可能であることがわかった。

(4-3) 無線ワイヤレスセンサの構成

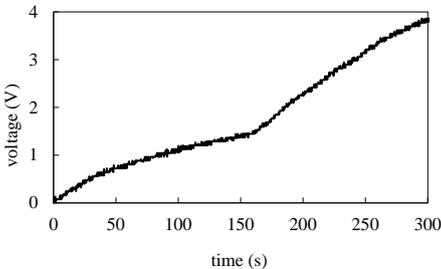
通信モジュールとして、送信モジュール IM315TX と受信モジュール IM315R を用いた。通信実験では、振動発電機によって発生した電力により IM315TX を駆動し、図 14、15 に示すように IM315TX の端子情報を受信モジュールで受信し、LED で状態を表示する。IM315TX と IM315RX は対応する 8 つの端子を有しており、送信側の端子が GND に接続されていると ON、開放状態で OFF となる。通信状態では、送信側の ON の端子に対応した受信側の端子の LED が点灯する。通信を行う際は、蓄電モードと通信モードの切り替えを制御しなければならない。これらを考慮して、図 16 に示す無線センサを作成した。動作原理を以下にまとめる。



(a) 0.1 G



(b) 0.3 G



(c) 0.5 G

図 13 蓄電実験結果

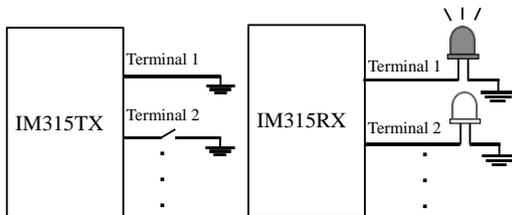


図 14 通信デバイスの設定

1. 振動発電機で発生した電力が、整流・昇圧回路を通して 1 mF のコンデンサに蓄電される。
2. 1 mF のコンデンサの両端電圧がある電圧値

V_1 を超えるとコンデンサの両端電圧と同電圧の出力 V_{OUT} が出力される。

3. V_{OUT} が出力されると FET によりスイッチが ON となり、レギュレータを介して無線通信モジュール IM315TX に電力が供給される。

4. 1 mF のコンデンサの両端電圧がある電圧値 V_2 を下回ると V_{OUT} が 0 V となり、再び蓄電モードとなる。

放電モードでは 3 端子レギュレータにより電圧を安定化させたのち、通信モジュール IM315TX(送信側)へ電力を供給する。ここで電圧 V_1 , V_2 はそれぞれ 3.5 V, 3.25 V と設定した。

(4-4) 通信実験

蓄電・通信回路を搭載した振動発電機を図 18 に示す。図 17 に示すように蓄電回路を基板上に作成した。通信実験において入力振動は 35 Hz の正弦波とし、その加速度は 0.1 G とした。実験室内での測定のため、通信モジュール間の距離は約 2 m とし、受信側はファンクションジェネレータを電源とし駆動させた。なお、仕様では IM315 の通信可能距離は、50m である。通信実験中の蓄電用のコンデンサの両端電圧の時間変化を図 18 に示す。コンデンサ両端電圧が 3.5 V 程度となったところで電圧降下が見られているが、これは V_{OUT} が ON となり、放電状態へと切り替わったためである。このとき、送信側の GND に接続した端子に対応する受信側の端子に接続された LED が点灯し、通信が行われた。コンデンサ両端電圧が 3.3 V ほどまで降下すると、 V_{OUT} が OFF となり、再び蓄電モードへと切り替わるため、コンデンサ両端電圧は上昇する。本実験では、蓄電開始から無線モジュールが駆動するまでに約 25 分程度要し、通信は約 1 分間隔で行われた。

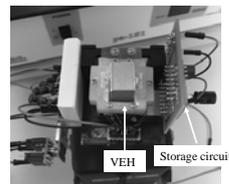


図 16 作成した無線センサ

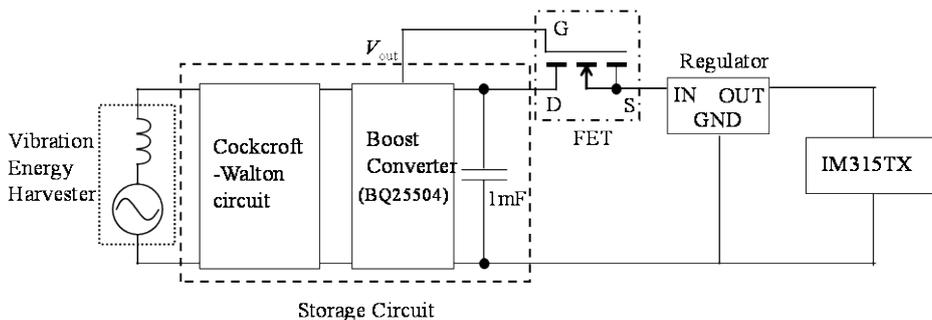
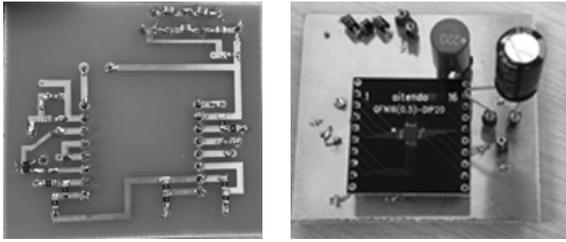


図 15 振動発電機・整流昇圧回路を備えた通信デバイス



(a) Back (b) Front

図 17 作成した蓄電回路

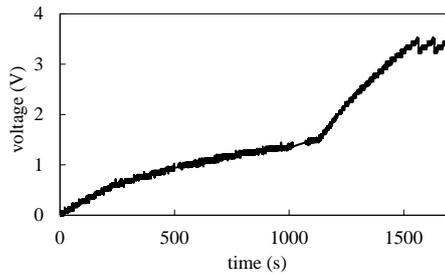


図 18 出力電圧

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 12 件)

- (1) 杉澤健, 丸尾昭人, 蟹江俊仁, 五十嵐 一, 電磁誘導型振動発電機を用いた無線センサー, 日本 AEM 学会論文誌, 査読有, 26 巻, 2018
- (2) S.Hiruma, H.Igarashi, Fast Three-Dimensional Analysis of Eddy Currents in Litz Wire Using Integral Equation, IEEE Transactions on Magnetics, 査読有, 53, 6, 2017, 7000704 DOI:10.1109/CEFC.2016.7816272
- (3) Y. Sato, T. Shimotani, H. Igarashi, Synthesis of Cauer-Equivalent Circuit Based on Model Order Reduction Considering Nonlinear Magnetic Property, IEEE Transactions on Magnetics, 査読有, 53 巻, No.6, 2017, 1100204 DOI:10.1109/TMAG.2017.2684242
- (4) Y. Sato, H. Igarashi, Homogenization Method Based on Model Order Reduction for FE Analysis of Multi-turn Coils, IEEE Transactions on Magnetics, 査読有, 53, 2017, 1100104 DOI: 10.1109/TMAG.2017.2671449
- (5) Y. Sato, H. Igarashi, Time-periodic Eddy Current Analysis using Model Order Reduction and Time-periodic Explicit Error Correction Method, 電気学会論文誌B, 査読有, 137 巻, No.3, 2017, 202-207 DOI: <https://doi.org/10.1541/ieejpes.137.202>
- (6) T.Sugisawa, H.Igarashi, Properties of chaotic vibration energy harvester: comparison of numerical results with experiments, International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, 査読有, 30, 2016 DOI:10.1002/jnm.2205
- (7) T.Shimotani, Y.Sato, H.Igarashi, Direct Synthesis of Equivalent Circuits from Reduced FE Models using Proper Orthogonal Decomposition, COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 査読有, 35, 2016, 2035-2044 DOI:10.1108/COMPEL-03-2016-0088
- (8) T. Shimotani, Y. Sato, H. Igarashi, Equivalent-Circuit Generation from Finite-Element Solution Using Proper Orthogonal Decomposition, IEEE Transaction on Magnetics, 査読有, 52, No.3, 2016, 7206804 DOI:10.1109/TMAG.2015.2482540

- (9) H. Igarashi, Semi-Analytical Approach for Finite-Element Analysis of Multi-Turn Coil Considering Skin and Proximity Effects, IEEE Transaction on Magnetics, 査読有, 53, No.1, 2017, 7400107 DOI:10.1109/TMAG.2016.2601066
- (10) Y. Ito, H. Igarashi, Effect of Magnetic Contact on Macroscopic Permeability of Soft Magnetic Composite, IEEE Transaction on Magnetics, 査読有, 52, No.3, 2016, 9400804 DOI:10.1109/TMAG.2015.2489227
- (11) T. Mori, H. Igarashi, Topology optimization of wideband array antenna for microwave energy harvester, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有, 52, No. 1-2, 2016, 631-639 DOI:10.3233/JAE-162057
- (12) T. Sato, Y. Sato, H. Igarashi, Model Order Reduction for Moving Objects: Fast Simulation of Vibration Energy Harvesters, COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 査読有, 34, no.5, 2015, 1623-1636 DOI:<http://dx.doi.org/10.1108/COMPEL-02-2015-0043>

〔学会発表〕(計 15 件)

- (1) H. Igarashi, Model Order Reduction, Homogenization and Their Combination, COMPUMAG2017 (招待講演) (国際学会), 2017 年
- (2) 五十嵐 一, 橋梁等の微小振動で動作する構造物モニタリング用無線センサーの開発, 北海道 CIM-GIS セミナー (招待講演), 2017
- (3) A. Maruo, H. Igarashi, Magnetic Circuit Model of Chaotic Vibration Energy Harvester, ISEM2017 (国際学会), 2017
- (4) S. Hiruma, H. Igarashi, Eddy Current Analysis of Litz Wire Using Homogenization-based FEM in Conjunction with Integral Equation, COMPUMAG2017, (国際学会) 2017
- (5) 丸尾, 五十嵐, 電磁誘導型振動発電機の磁気回路モデルの検討, 計算力学講演会, 2017
- (6) H. Igarashi, Y. Ito, Y. Sato, S. Fujita, Homogenized analysis of fine wires, The 10th International Symposium on Electric and Magnetic Fields (EMF 2016) (国際学会), 2016
- (7) 杉澤, 五十嵐, 電磁誘導型振動発電機の蓄電実験, 第 28 回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム, 2016
- (8) 藤田, 五十嵐, 表皮・近接効果を考慮した巻線の均質化法解析, 第 28 回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム, 2016
- (9) 丸尾, 杉, 五十嵐, 磁気回路法による非線形振動系の解析, 非線形問題の解法に関する研究会, 2016
- (10) 杉澤, 丸尾, 五十嵐, 電磁誘導型振動発電機の広帯域化のための設計最適化, 計算力学講演会, 2016
- (11) A.Maruo, T.Sugisawa, H.Igarashi, Magnetic Circuit Model of Vibration Energy Harvester Based on Electromagnetic Induction, JSST2016 (国際学会), 2016
- (12) 五十嵐, マルチスケール問題の電磁界解析: 均質化とモデル縮約法, 平成28年度磁性流体連合講演会(招待講演), 2016
- (13) 杉澤, 佐藤, 五十嵐, 電磁誘導型振動発電機と回路の結合係数値シミュレーションおよび実験, 電磁力関連ダイナミクス講演論文集, 2015
- (14) Y. Watanabe, H. Igarashi, Shape Optimization of Chipless RFID Tags Comprising Fractal Structures, ISEM2015(国際学会), 2015
- (15) 杉澤, 五十嵐, 閉磁路型振動発電機の提案, MAGDA2015, 2015

〔その他〕

ホームページ <http://hbd.ist.hokudai.ac.jp/research.html>

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
五十嵐 一 (IGARASHI, Hajime)
北海道大学・情報科学研究科・教授 研究者番号: 90212737
- (2) 連携研究者
蟹江 俊仁 (KANIE, Shunji)
北海道大学・工学研究院・教授 研究者番号: 10332470