

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 9 月 18 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24310117

研究課題名(和文) 社会インフラの遠隔安全監視を行う振動発電式セミパッシブ無線センサ

研究課題名(英文) Development of passive wireless sensor powered by vibration generator for safety surveillance of social 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) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)： 橋梁やトンネル、高圧送電線網などのインフラストラクチャの状態監視を行うためには、バッテリー交換の必要のない無線センサが有効である。本研究ではこのような無線センサに電力を供給するための振動発電機を開発した。本振動発電機は構造物の微小振動からエネルギーを回収するため、無線センサーの自律的な動作を可能とすることができる。

構造物は通常、広い周波数帯域の振動スペクトルを有しているが、従来の振動発電機は線形振動を用いているため、共振周波数以外ではほとんど発電できなかった。本研究では、振動発電機の構造を工夫することによりカオス振動を発生させ、従来よりも広い周波数帯域での発電を可能とした。

研究成果の概要(英文)： Batteryless wireless sensors are very effective for safety surveillance of infrastructures such as bridges, tunnels and steel towers of the power-transmission lines. In this study, vibration generators which power the wireless sensors have been developed. These vibration generators, which harvest energy from minute vibration of the structures, allow us to realize autonomous operation of the wireless sensors.

Although the structures usually have wide vibration spectra, the conventional vibration generators, which have linear vibration modes, cannot harvest sufficient energy at nonresonant frequencies. In this study, it has been found that it is possible to generate chaotic vibration by introducing new design to the vibration generator and this leads to energy harvesting in wider vibration spectra.

研究分野：社会システム工学・安全システム

キーワード：振動発電 エネルギーハーベスティング 環境発電 無線センサ RFID

1. 研究開始当初の背景

(1)社会的背景：近年，高度成長期に建設した架橋や高圧送電線鉄塔などの老朽化が進んでいる．現状のまま放置すると，台風や地震など自然災害によってこれらインフラストラクチャが崩壊する危険性がある．また塩害や凍害によるトンネルやダムなどコンクリート構造物の崩落が大きな問題となっている．さらに，鉄道線き電線の焼損により列車が長期間運転不能になるという事故も起きている．このような重大な事態を未然に防ぐためには，構造物・設備の温度やひずみ，応力などを高い空間密度で高頻度に計測監視することが有効である．

(2) 内外の動向と位置づけ：上記のような社会インフラの広域状態測定のために，センサに無線機能を搭載したセンサネットワークが広く研究されている．しかし現状のセンサネットワークで用いられるアクティブセンサは電磁波を放射するため，バッテリーが必須となっている．このため，高圧送電線や橋梁など危険が伴う箇所に配置した場合の保守が難しく，また広域にセンサを設置した場合，バッテリー交換には膨大なコストが発生してしまう．一方，リーダ(reader)から放射された電磁波エネルギーで動作するUHF帯域(950MHz)のパッシブRFID(radio frequency identification)タグは，バッテリーが不要という利点がある．しかしリーダの放射電力が高出力(1W)の場合は10m程度の通信が可能であるが，法令により工場内等の構内の使用に限定される．2010年には運輸の作業効率化や商品管理を想定した屋外用の中出力(0.25W)パッシブタグが法令で認められたが，通信距離は2m程度であるため，このままでは上記のような社会インフラの安全監視には使用できない．



図1

(3) 研究代表者は，パッシブタグの技術を基本として，バッテリーの不要な無線センサを開発してきた(図1)．本無線センサは極低消費電力($10\mu\text{W}$ 以下)の測定回路と高効率のアンテナからなる．測定においては，車や電車等に搭載したリーダから放射されたUHF帯域の電磁波エネルギーを受けて，無線センサの回路が起動する．さらに無線センサは測定値に応じてアンテナのインピーダンスを変化させ，電磁波の反射率を変化させる(反射波

に変調をかける)．リーダはこの反射波を読み取ることで，測定値を得ることができる．この無線センサを屋外で使用する場合，通信距離は最大で2m程度であり，鉄塔や橋梁などの安全監視には通信距離が短い．そこでこれら構造物の振動から回路を起動するエネルギーを得ることにより，通信距離を拡大することを着想した．特に電磁誘導式の振動発電では数 $10\sim 100\mu\text{W}$ 程度の電力が得られるため，このようなセミパッシブ(半受動)式の無線センサの実現は可能であると考えた．

2. 研究の目的

(1) 研究目的：本研究では，構造物・設備の振動からエネルギーを回収する振動発電機を開発する．特に，比較的高い電力が得られ，外部電源が不要な電磁誘導型を検討する．また無線センサの回路とアンテナは，パッシブ無線センサの技術を核として開発する．さらに振動発電機の基本特性と性能を実証的に研究する．具体的に，研究期間内に以下の事項を明らかにする．

① 振動発電機のサイズや方式に対して，得られる電力と電圧がどのように変化するかを明らかにする．また発電機サイズを一定とした条件で，電力と電圧を最大化する構造と材料を見出す．

② 無線センサを設置する構造体として，橋梁や鉄塔，トンネルなどを想定し，これらの振動スペクトルに共振可能な，振動発電機用板バネの構造，材質，調整法を見出す．また温度・湿度等の環境要因により共振周波数が変化したときの，発電量の変化を明らかにする．

③ リーダが屋外で使用可能な中出力(0.25W)の電磁波を放射したとき，振動発電機を備えたセミパッシブ無線センサが持ちうる通信可能距離を明らかにする．また無線センサの通信可能距離が最大となるような，小型アンテナの構造と回路構成を見出す．

(2) 学術的な特色・独創的な点と波及効果：上記のようなセミパッシブ無線センサを開発するためには，数 $10\mu\text{W}$ 程度で動作する測定回路(アナログ量の測定値をデジタル量に変換するAD変換回路)が必須であるが，通常のAD変換回路は数 $100\mu\text{W}$ の消費電力を持つため，使用できない．研究代表者らは，極低電力($10\mu\text{W}$ 以下)で動作するAD変換回路を開発した．本回路は，サーミスタの抵抗変化を回路時定数の変化に置き換え，コンパレータによりデジタル信号をつくる．研究代表者らはJST特許出願支援制度の審査を受けて，本AD変換回路を国際特許申請した．また，無線パッシブセンサはリーダからの電磁波を受けて動作するため，電磁波エネルギーを高効率で受信する小型アンテナが必要である．一方アンテナはできるだけ小型であることが求められるが，アンテナを電磁波の波長(UHFでは約30cm)の半分以下にすると，回路

部とのインピーダンス整合を取ることが難しく，電磁波を効率的に受信することが難しい．このた

め、研究代表者らは線を折り曲げた形状を有するミアンダラインアンテナの受信電力を最大化する最適形状を決定する方法を開発した(Makimura, Igarashi, et al., IEEE Trans. Magn.). さらに、パッシブ無線センサの設計においては、アンテナ単体、回路単体の解析では正確な結果が得られないため、これらが強く連成した系の動作をシミュレーションすることが必要である。このため研究代表者らは、時間領域差分法(FDTD法)を基礎とした高速解析法を開発した(Watanabe, Igarashi, IEEE Trans. Antenna and Prop., Watanabe, Igarashi et al., IEEE Trans. Magn.).

振動発電機の開発には永久磁石、磁気コア、コイルの構造と材料を最適化する必要がある。研究代表者らは重要な電子部品であるフェライトインダクタの構造最適化(小型化と高性能化)のために、有限要素法と進化型最適化法をベースとした手法を開発しており(Watanabe, Igarashi et al., IEEE Trans. Magn.), 本手法を最大活用して振動発電機を最適設計する。

本研究では、自律的に動作するセミパッシブ無線センサの実現を目指す。このために磁界、電磁波・回路の解析最適化技術を駆使し、無線センサに電力を供給するための振動発電機を開発する。これにより現状で最高の性能を持つ無線センサを実現し、信頼性の高い実測データを得ることで遠隔安全監視システムの実現に寄与することを目指す。このような自律動作する無線センサにより、航空機や車両のエンジン・モータ、風力発電機などの遠隔状態管理も実現できる。これにより装置内のケーブル量を削減でき、軽量化と高信頼化につながることを考える。

端部を固定

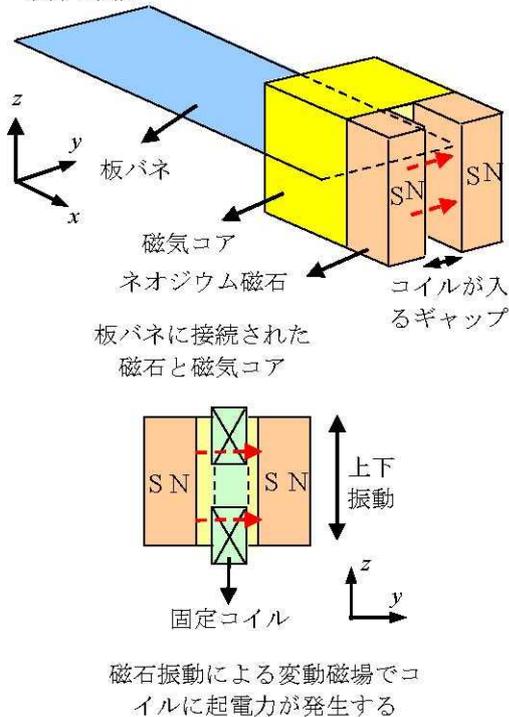


図2 開発する振動発電機の構成と原理

3. 研究の方法

(1) 研究方法の概要：セミパッシブ無線センサのための振動発電機を開発し、その基本特性と性能を明らかにするために以下の研究を行う。

① 軽量、小型の電磁誘導型振動発電装置を開発するために、板バネ、磁石、磁気コアからなる構造・電磁系の高精度かつ詳細な数値シミュレーションコードを開発する。解析結果を基に、発電機の構造・形状を進化型手法により最適設計する。つぎに発電装置を試作し、加振装置を用いて発電量、共振周波数等の基礎データを測定する。

② 電磁誘導型振動発電装置により得られたエネルギーで動作する無線センサの電子回路およびアンテナを、回路解析および電磁界解析を用いて最適設計する。さらに発電装置とこれらを結合したプロトタイプを作成し、通信可能距離、測定精度などの基本性能を測定評価する。

(2) 開発する振動発電機：図2は電磁誘導を用いた振動発電機の基本構造を示す。Beebyらは電磁誘導型の振動発電機を提案しているが(J.

Micromech. Microeng., 17, 1257-1265, 2007), 性能を支配する磁気コアとコイル形状が最適に設計されていない。また振動発電方式として、他の振動発電の方式として圧電や磁歪を用いる方法が提案されているが、前者は経時劣化や発電能力が失われる消極という問題があり、後者は外部電源が必要である。設計する図3の発電機において、先端に磁石・磁気コアが設置された板バネが、測定対象の振動を受けて上下に振動する。板バネの共振周波数は、板バネの構造・材料を変化させて測定対象の基本振動数に合わせるようにする。板バネの振動により磁石が上下に移動すると、コイルと鎖交する磁束密度が変化するため、電磁誘導によりコイルに起電力が発生する。この起電力は、磁石の強度(動作点における磁束密度 B と磁界強度 H)・構造および磁気コア・コイルの構造と材料に大きく依存するため設計最適化が必要になる。

4. 研究成果

(1) 振動発電機の高速度解析手法の開発：振動発電機を設計するためには、コンピュータシミュレーションにより、各種設計パラメータと振動振幅、発電量などを求める必要がある。そこで振動発電機の数値解析コードを作成した。本解析では振動発電機中の磁界を要素法で求め、磁界により磁石に作用する力からバネの運動を求め、さらにコイルを鎖交する磁束の時間変化から誘導起電力を求めた。実際の解析では、磁界の方程式(アンペールの法

則)と運動方程式、回路方程式を弱連成法(それぞれの方程式を順に解き、すべての解が収束するまで反復させる方法)で解いた。また磁界解析においては、磁石とコイルの位置が時々刻々変化するため、非適合ボクセル有限要素法を用い、物体運動によるメッシュのずれを許容するようにした(論文(4))。さらに振動発電機の設計においては、上記のような解析を何度も繰り返し、最適な設計

パラメータを求める必要がある。しかし開発した解析コードは計算時間がかかり長かったため、最適設計が難しかった。そこで、有限要素方程式の未知数をモデル縮約法を用いて縮減し、解析時間を大幅に短縮した(論文(1))。

図3 振動発電機の構造

(2)振動発電機の設計と試作、実験：(1)で開発した解析コードを活用して、振動発電機を開発した。開発した振動発電機の構造を図3に示す。本振動発電機では、コイルに鎖交する磁束を増加させるため、コイル中心軸に磁性体(フェライト)を埋め込んでいる点が新しい。またコイル中心軸の磁性体と磁石には非線形な磁気力が働くため、非線形振動を発生させることができる。実際、シミュレーションではカオス振動を発生できた。カオス振動を発生できると、従来よりも広い周波数帯域の振動で発電できるという利点がある。

3次元プリンターを用いて、振動発電機を作成した(図4)。本振動発電機の運動を実測したところ、カオス振動を実際に発生できることがわかった。また広い周波数帯域での発電が確認された(図5)。これらの研究成果は論文(2)、(9)にて報告されている。しかし、現在のところカオス振動を安定的に発生させることができず、またコイル中心軸の磁性体としてフェライトよりも高い透磁率を有する電磁鋼板(ケイ素鋼板)を用いると、カオス振動が得られないことがわかった。この原因を明らかにするため、今後も研究を継続することが必要である。

(3)電圧増倍回路および整流回路：振動発電機により発電された交流電圧を増幅し、直流に整流するための回路を検討した。回路を設計するために、振動発電機の等価回路モデルを作成し、インピーダンス整合の条件を求めた(学会発表(1))。また振動発電機は強い非線形性を有しているため、電気回路によるモデル化には限界があることがわかった。そこで、振動発電機の挙動をDuffing方程式で表し、ダンピング定数や磁石・コイルの位置関係とカオス振動発生の有無の関係を検討した。

現状の振動発電機では1Gの加速度で0.45Vの電圧を発電できているが、橋梁の振動加速度は数10mGの程度であるため、微小な振動に対して有効な電力を発電できる機構の検討が必要である。

1. 3cm1. 8cm

図4 作成した振動発電機

03060901201502030405060708090output
power (μ W)input frequency (Hz)

図5 発電量の周波数特性

(4) 低消費電力無線センサの研究：振動発電機を搭載する無線センサに関する基礎研究を行った。

無線センサはリーダから送られた信号を受信して動作を開始し、測定した温度等のデータを反射波に載せてリーダに送り返す。このような通信にはセンサ回路に整合し、かつゲインの高いアンテナが必要である。このため、電磁界解析による最適化を用いて無線センサ用アンテナを開発した(論文(3)、(6)、(7))。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件)

(1)Takahiro Sato, Hajime Igarashi, Model Order Reduction for Moving Objects: Fast Simulation of Vibration Energy Harvesters, COMPEL, 査読有, 掲載決定

(2)Takahiro Sato, Hajime Igarashi, A Chaotic Vibration Energy Harvester Using Magnetic Material, Smart Materials and Structures, 査読有, vol.24, no.2, 025033, 2015.

DOI:10.1088/0964-1726/24/2/025033

(3)Takuya Mori, Ryo Murakami, Yuki Sato, Felipe Campelo, Hajime Igarashi, Shape Optimization of Wideband Antennas for Microwave Energy Harvesters Using FDTD, IEEE Transaction on Magnetics, 査読有, vol.51, no.3, 8000804, 2015. DOI:10.1109/TMAG.2014.2359677

(4)Takahiro Sato, Kota Watanabe, Hajime Igarashi, Coupled Analysis of Electromagnetic Vibration Energy Harvester with Nonlinear Oscillation, IEEE Transactions on Magnetics, 査読有, vol. 50, no. 2, 7007604, 2014.

DOI:10.1109/TMAG.2013.2284253

(5)佐藤孝洋, 五十嵐一, 電磁誘導型振動発電-非線形振動による広帯域化-, 日本AEM学会誌, 査読有, vol.22, no.3, 374-379, 2014

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsaem/22/3/22_374/_article

(6) M. Ikebe, Recent progress in the technology linking sensors and digital circuits, IEICE Electronics Express, 査読有, vol. 11, no. 3, 20142003, 2014

DOI: 10.1587/elex.11.20142003

(7)Yuta Watanabe, Kota Watanabe, Hajime Igarashi, Shape Optimization of Double Antenna for Long Range Passive UHF-Band RFID, IEEE Transactions on Magnetics, 査読有, vol.49, no.5, pp.2133-2136, 2013.

DOI:10.1109/TMAG.2013.2241752

(8)Yuki Sato, Felipe Campelo, Hajime Igarashi, Meander Line Antenna Design Using an Adaptive Genetic Algorithm, IEEE Transactions on Magnetics, 査読有, vol.49, no.5, pp.1889-1892, 2013.

DOI:10.1109/TMAG.2013.2239979

(9)Takahiro Sato, Hajime Igarashi, A New wideband Electromagnetic Vibration Energy Harvester with Chaotic Oscillation, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, vol. 476, 012129, 2013.

DOI:10.1088/1742-6596/476/1/012129

〔学会発表〕（計11件）

- (1) 杉澤 健, 佐藤孝洋, 五十嵐 一, 倍電圧整流回路を接続した電磁誘導振動発電の性能評価, 電気学会全国大会, 13-A1_3-117, 東京都市大学(東京), 2015年3月24日
- (2) 渡部雄太, 五十嵐 一, フラクタル構造を有するチップレスRFIDタグの解析, 電気学会全国大会, 1BB-A1_1-023, 東京都市大学(東京), 2015年3月24日
- (3) 村上稜, 五十嵐一, パッシブ型温度センサーの開発, 第23回MAGDAコンファレンスin高松, サポートホール高松 (香川県高松市), 2014年12月5日
- (4) T. Sato, H. Igarashi, An Electromagnetic Vibration Energy Harvester With Strong Electro-mechanical Coupling, GREENBAN2014, 2014 Sorbonne University (Paris, France), 2014年11月7日
- (5) T. Mori, Y. Sato, R. Adriano, F. Campelo, H. Igarashi, Optimal Design of RF Energy Harvesting Circuit Using GA, GREENBAN2014, 2014 Sorbonne University (Paris, France), 2014年11月7日
- (6) 佐藤孝洋, 五十嵐一, 電磁誘導型振動発電の数値解析と実験結果の比較, 電気学会全国大会, 愛媛大学(愛媛県, 松山市), 2014年03月19日
- (7) Takahiro Sato, Kota Watanabe, Hajime Igarashi, Three Dimensional Shape Optimization of Electromagnetic Devices Based on Nonconforming Voxel Finite Element Method, 15th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, 大分オアシスタワーホテル(大分県大分市), 2012年11月12日
- (8) Yuta Watanabe, Hajime Igarashi, Analysis of UHF-band Passive RFID Antennas Loaded by Dickson Charge Pump, JSST 2012 International Conference on Simulation Technology, 神戸大学統合研究拠点 (兵庫県神戸市), 2012年9月28日
- (9) Yuta Watanabe, Hajime Igarashi, Robust Optimization of Patch Antennas for UHF-band Passive RFID, 12th International Workshop on Optimization and Inverse Problems in electromagnetism, Ghent University (Ghent, Nederland), 2012年9月20日
- (10) Yuta Watanabe, Hajime Igarashi, Robust Optimization of Passive RFID Antennas Loaded by Non-linear Circuits, 15th International IGTE Symposium, Technical University of Graz (Graz, Austria), 2012年9月18日
- (11) Takahiro Sato, Kota Watanabe, Hajime Igarashi, Three Dimensional Optimization of Inductors Based on Nonconforming Voxel Finite Element Analysis, International Magnetics Conference 2012, Vancouver Convention Center (Vancouver, Canada), 2012年5月11日

〔図書〕（計1件）

- (1) 宮田健治, 池田文昭, 高橋康人, 美舩威, 五十嵐一 他, 電気学会技術報告第1317号, 電気学会, 149ページ(担当46-48), 2014

〔その他〕

ホームページ等

<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・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号：90212737

(2)研究分担者

渡邊 浩太 (WATANABE, Kota)

室蘭工業大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：20322828

(3)研究分担者

池辺 将之 (IKEBE, Masayuki)

北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号：20374613

(4)研究分担者

本久 順一 (MOTOHISA, Junichi)

北海道大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号：60212263