

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：12301  
研究種目：基盤研究(C)（一般）  
研究期間：2017～2019  
課題番号：17K00660  
研究課題名（和文）エネルギーマネージメントを考慮した振動発電による自己完結型電源システムの開発  
  
研究課題名（英文）Development of vibration power generation-based self-contained power supply system considering energy management  
  
研究代表者  
橋本 誠司（Hashimoto, Seiji）  
  
群馬大学・大学院理工学府・教授  
  
研究者番号：30331987  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、エネルギーマネージメントを考慮した振動発電による自己完結型電源システムの開発であり、高出力化のための各種発電構造の提案、発電した電力に対する駆動負荷を考慮したパワーマネージメントシステムの構築、発電装置の耐久性評価と高耐久化について実施した。その応用として、工場内の機械振動を利用した振動発電装置を開発し、これにより無線センサノードを駆動して機器の故障診断を自己完結的に行うシステムを構築した。また、災害医療現場で利用可能な発電靴を提案し、発電電力の携帯電話への給電システムの開発を実施した。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の機械共振に起因した狭帯域周波数での発電に対し、広帯域かつ高出力で発電可能な構造を提案したことで、発電から換電、蓄電までを含めたシステム構築により、応用機器に特化し高耐久かつ最適な自己完結型電源システムを設計したことが本研究の学術的意義である。

また、提案した自己完結型発電システムを実応用として、工場内での機器の機械振動を利用した発電による故障診断システムを構築したこと、被災地の医療現場で利用可能な発電靴とそれによるエネルギーマネージメントシステムを開発したことが社会的意義となる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is the development of the self-contained power supply system by the vibration power generation considering the energy management. For this purpose, various power generation structures for higher output have been proposed, and the power management system considering the driving load for the generated power has been constructed. Moreover, the durability evaluation of the developed power generator has been conducted. As an application, we have developed a vibration power generator that utilizes mechanical vibrations in the factory, and built a system that drives a wireless sensor node and diagnoses equipment failures in a self-contained manner. In addition, the power generation shoe that can be used at disaster medical field has been proposed, and the power supply system of the generated power to mobile phones has been developed.

研究分野：制御工学とその産業応用

キーワード：再生可能エネルギー 振動発電 衝撃構造 パワーマネージメント 故障診断 発電靴

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

経済産業省の「長期エネルギー需給見通し」では、2030年には電力需要は121%(2013年比)となるが、その4割を省エネと再生可能エネルギーでまかなうとしている。再生可能エネルギー分野では、政府成長戦略の一つである「エネルギー・環境投資の拡大」に伴い、新エネルギーに基づく環境発電技術が開発されていた。ここでは、新エネルギー同士の比較ではなく、利用技術の高度化により協調し適材適所で利用していくことが肝要であると認識されていた。

環境発電技術の一つである振動発電については、主要分野の国際会議はもとより、再生可能エネルギー世界展示会やテクノフロンティア等にも出展され、注目を浴びていた。例えば、NEDOプロジェクト2014ではエレクトレットを用いて100 $\mu$ W(0.15G, 30Hz)の発電量をえるシステムの開発報告や、テクノフロンティア2014では工場のモータ振動を利用し $\mu$ Wレンジの発電をし、故障診断用センサを駆動するなどの実験報告があった。また、歩行や交通振動によるLED点灯やセンサ情報のワイヤレス送信などでの利用拡大が実験・検討されていた。

しかし、これら振動発電の応用は一部製品や社会実験などに止まり、限定的である。その主たる原因は、①発電可能な周波数帯域が狭いこと(10数ヘルツ)、②発電電力が低く間欠的であること( $\mu$ Wレンジ)、③システム全体としての発電効率が悪く(最大80mW/cm<sup>3</sup>)、結果として寸法が大きくなることなどであった。

新エネルギーによる発電を出力密度の観点で見ると、太陽光発電では500~2,000mW/cm<sup>3</sup>、熱発電では2~200mW/cm<sup>3</sup>程度である。これに対し、振動発電では0.01~80mW/cm<sup>3</sup>程度である。また、代替エネルギーのリチウムイオン電池では1~2,000mW/cm<sup>3</sup>である。ここで、振動発電の出力密度を7倍に出来れば太陽光発電と同程度となり、RFIDタグ(10 $\mu$ W)からミリワット出力で駆動可能なIoT技術の代表であるBluetooth Low Energy(10mW)まで応用範囲の拡大が見込める状況であった。

### 2. 研究の目的

我々は、振動発電の広帯域・高出力化のために、今までに多軸・多モード振動や衝撃を利用した発電構造を提案し、研究を行ってきた。また、発電効率を最大化するための素子形状の開発や各種振動再現や応力解析のための振動試験用シミュレータ開発、PZT素子の耐久試験による基礎評価を行ってきた。この研究の過程で、間接衝撃による振動発電装置で、60Hz以上の帯域幅にわたり最大60mW/cm<sup>3</sup>の出力がえられる発電構造を開発した。また、曲げを用いた多軸・多モード振動発電でも、台形状のPZT素子を利用することで1秒あたり2.3回ワイヤレス送信機器が駆動できる(従来比約10倍)ことを確認した。これは従来研究に対して極めて優位であり、これらの技術を併用し実用化できれば、ボタン電池や充電電池、他の新エネルギーにかわる自己完結型の電源システムとなり、アプリケーションの拡大創出の可能性が高まる。

そこで、本研究では、エネルギーマネージメントを考慮した振動発電による自己完結型電源システムの開発を目的と設定した。これまでに個々に研究提案してきた間接衝撃と多軸・多モード曲げ構造を併用した発電装置の広帯域・高出力化し、発電装置としての性能向上を図る。次に、提案する発電装置に最適なエネルギーマネージメントシステムを構築し、自己完結型電源システムとして実用することにより、その実用化を目指す。同時に、これまでに開発した振動試験用シミュレータにより実用を考慮した耐久試験を実施し、エネルギーマネージメントシステムを含めた製品化に向けての信頼性向上を図る。

これらの開発を通し、収穫(発電)エネルギーを無駄なく必要なときに必要なだけ利用できる自己完結型電源システムの開発に加え、振動エネルギーが利用できるアプリケーションの創出、また、各種アプリケーションに最適な発電構造・方法を提案、設計できる技術の構築を目指すことを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究では、科学技術基本計画第5期(H28~32年度)の(1)徹底した省エネルギー投資、(2)再生可能エネルギーの導入拡大(エネルギー貯蔵技術等の開発)、(3)IoTを活用した新エネルギーシステムの構築、に沿って、エネルギーマネージメントを考慮した振動発電による自己完結型電源システムを開発する。開発テーマと計画を以下の3つに分類した。

#### (1) 衝撃・曲げ・圧縮による高出力・広帯域振動発電

これまでの開発により、衝撃発電構造による広帯域化、曲げモード発電における多軸・多モード化、PZT形状の最適化により高出力化を実現している。本研究では、衝撃と曲げを併用した広帯域・高出力発電構造を提案する。さらに、開発する振動発電構造の用途拡大に向け、圧縮力を

利用した発電構造を構築・開発し、特に地産地消費電力を必要とする EV やコミュニティーカーへの導入を検討する。

## (2) エネルギーマネージメントとセルフパワー装置への応用

衝撃や曲げモードによる発電では、構造の違いから発電電力の状態も異なる。現在、エナジーハーベスタ IC やスーパーキャパシタ、薄膜 2 次電池を利用した換電・蓄電システムの基礎実験により評価を行っている。本課題では、2 系統の入力を応用機器にあわせて損失を最小化する換電・蓄電するエネルギーマネージメントシステムを開発する。これにより、応用機器に対して、適切な発電構造とエネルギーマネージメントシステムを設計する技術を創出し、収穫（発電）エネルギーを必要とときに無駄なく利用できる、高効率で地産地消の自己完結型電源システムを開発する。

## (3) 自己完結型電源システムの高耐久化

PZT デバイス単体の耐久性に対する基礎試験・解析は実施済である。本課題では、それを応用した多軸・多モード、衝撃、圧縮発電構造での疲労試験を実施し、その結果を反映して耐久化を図る。また、踏力発電による灯火ペダルやセンサ信号のワイヤレス送信など、実負荷となる電子機器への応用を考慮し、機械系と電気系のシステム全体での耐久性( $10^7$  回の振動耐久性を目標)を検証し、実用化における信頼性向上を図る。本開発を通して、アプリケーションに最適な発電方法を提案、設計できる技術の構築を目指す。

上記の計画に対し、平成 29 年度は、上半期において衝撃モードと曲げモードの併用構造による発電の広帯域・高出力化を図った。これに伴い、2 系統入力のエネギーマネージメントも必須であるため、29 年度中の完成を目指してシステム開発を開始した。下半期には、衝撃構造に積層化技術を導入し、更なる発電電力の最適化を遂行した。あわせて、開発する発電装置とエネルギーマネージメントシステムをあわせた発電システムに対する疲労耐久試験を進めた。

30 年度は、29 年度に開発した発電システムを自己完結型の電源システムとして応用することを主眼とし、上半期には応用機器の創出と、それにあわせた負荷整合による消費電力最大化を進めた。また、発電構造としてもこれまでの知見を基に圧縮発電への展開を図った。29 年度の装置の疲労試験に基づく高耐久化の結果を踏まえ、実応用を考慮したシステム全体の信頼性向上( $10^7$  回の繰り返し振動耐久)についても検討した。

令和元年度上半期までに、予定の実施項目を遂行し、下半期には総合的なシステムの評価を行うとともに、えられた研究成果の発表や、要素技術の他分野展開を検討した。

## 4. 研究成果

本研究の目的である振動発電による自己完結型電源システムの開発とその応用に対し、(1) 衝撃と曲げの 2 つのモードの併用発電構造による広帯域・高出力化を検討した。ここでは、横型構造から縦型への構造変更と間接衝撃発電のシム径の見直しにより、(平均)発電電力において 50% 以上の高出力化( $3.5\text{mW/s}$ )を達成した。(2) 振動発電の用途拡大を目的に、圧縮発電構造について検討した。その特徴である出力が周波数に依存しない点を考慮し、自転車サドルへ導入し、発電特性に対する基礎実験を実施した。その結果、走行時の発電電力は最大  $11\text{mW}$  となり、1 回の無線センサモジュールの駆動が（路面状況によるが平均）6.6 s 毎に可能となることを検証した。(3) 2 次電池付きエネルギーマネージメントシステムを含めた間接衝撃発電構造に対し、各種の無線センサモジュール駆動試験を実施し、駆動時間の伸長（最大で 53%）を確認した。(4) 各種振動に対する最適構造（形状、厚さ、面積など）の短期開発を目指し、圧電デバイスを含む振動発電装置を製作・実験検証することなく、おおよその発電特性が推測できる（誤差数十パーセント）振動発電シミュレータを開発した。(5) 開発している自己完結型電源システムの高耐久化として、自転車ペダル用回転ハーベスタの耐久試験を実施し、最適はじき量を定量解析するとともに、その指針を明確化した。

続いて自己完結型電源システムの実応用についてであるが、(6) 応用分野として期待されている無線センサノードへの電源供給に向けたパワーマネージメントシステムの構築、最適発電構造の提案、製品化に向けた耐久性評価を実施した（図 1）。ここでは、機械工場設備の振動により加速度センサノードを駆動し、えられる間欠的なセンサ情報に基づく故障診断システムの構築を行った。本開発システムでは、振動からの再生エネルギーにより断続計測方式ではあるが、1 度の計測で 3 軸加速度センサノードを 50ms 間隔で駆動し、100 個のデータ計測が可能となっ

た。計測データに対して学習理論を導入した診断方法を提案し（特許出願済）、90%以上の精度で故障診断が可能となることを実際の工場振動を用いて実験検証した。電源確保からセンサ駆動、無線送信そして故障診断を行う総合的なシステムの開発が達成でき、今後の製品化、産業応用が期待できる。

更に、(7) 自己完結型電源システムの応用として、大規模災害など災害医療現場で利用可能な小電力機器用電源システムの開発を進めた。ここでは、昼間の作業時に災害医療派遣チームが履く安全靴で発電・蓄電し、夜間作業時にLED照明やスマホによる情報発信に利用可能な電源システムを構築し、その試作品を製作した。ここでは間接衝撃構造を応用することによる高出力化を目指した構造開発により1mW/step以上を達成し、あわせて汎用化のためのインソールに導入可能な構造の提案（図2）、発電電力の携帯電話への給電システムの開発を実施し、その有効性を実験検証した。今後、大学附属病院の医療現場での導入実験を検討している。

実施項目に関連する研究成果として、Journal論文6編ならびに国際学会4件、国内会議6件の発表、1件の特許出願を行った。自己完結型電源とセンサノードシステムによる故障診断システムの開発に関しては、UTeMEX2019 (UTeM イノベーション展 2019) で金メダルを受賞した。災害医療現場で利用可能な発電靴の開発に関しては、第6回ぐんぎんビジネスサポート大賞（努力賞）を受賞した。

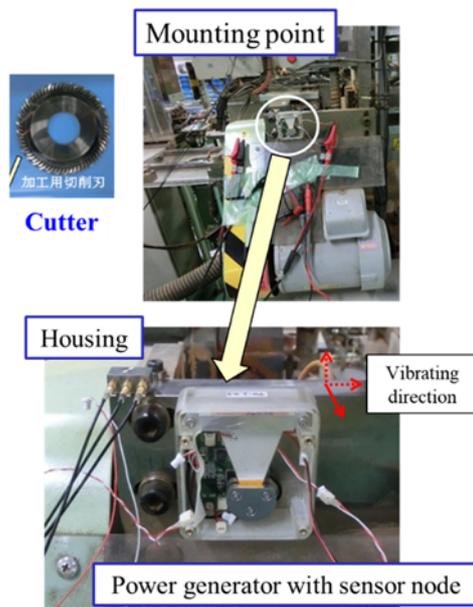


図1 自己完結型センサノードシステム

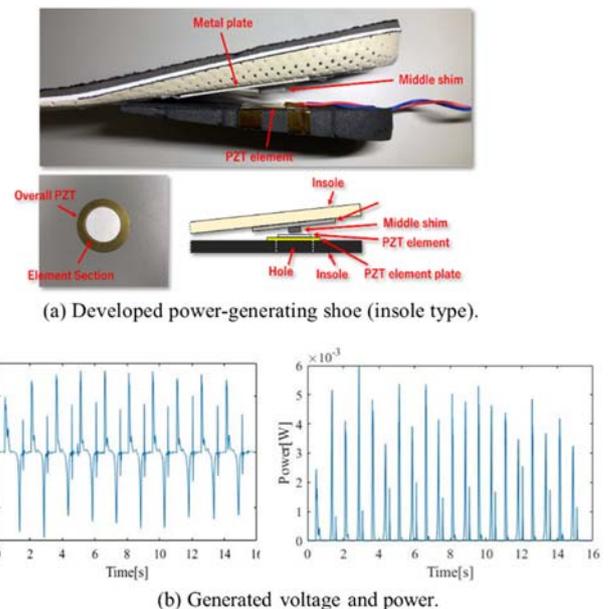


図2 発電靴構造と歩行発電量

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 N. A. A. Nawir, A. A. Basari, M. S. Md. Saat, N. X. Yan and S. Hashimoto	4. 巻 13
2. 論文標題 A REVIEW ON PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTER AND ITS POWER CONDITIONING CIRCUIT	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 2993-3006
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 該当する
1. 著者名 N. X. Yan, A. A. Basari, K. S. Leong, N. A. A. Nawir and S. Hashimoto	4. 巻 10
2. 論文標題 Evaluation of Interfaced Plate Parameters on Impact-Based Piezoelectric Power Generation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering	6. 最初と最後の頁 109-118
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 N. X. Yan, A. A. Basari, K. S. Leong, N. A. A. Nawir and S. Hashimoto	4. 巻 44
2. 論文標題 Investigation and experimental verification of the effectiveness of the interfaced plate parameters on impact-based piezoelectric energy harvester	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Ceramics International	6. 最初と最後の頁 17724-17734
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ceramint.2018.06.239	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 該当する
1. 著者名 A. A. Basari and S. Hashimoto	4. 巻 9
2. 論文標題 High Power Output of L-shape PZT Power Generator Working in Bending-Shear Mode	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering	6. 最初と最後の頁 41-45
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 S. Tsukagoshi, K. Seto, S. Hashimoto and A. Basari	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of a PZT device-based power-generating shoes for disaster-affected areas	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics	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) なし	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 Shintaro Okada, Seiji Hashimoto and A. Basari	4. 巻 -
2. 論文標題 Low-sampling rate data-based failure diagnosis by using self-powered system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics	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) なし	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

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 S. Hashimoto, S. Matsumoto, A. Basari, K. Suto, H. Okada, H. Okuno, and Y. Kawashima
2. 発表標題 An Overview of Self-Powered Energy Harvester based on Vibration
3. 学会等名 ICTSS2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大崎数馬, 橋本誠司, 須藤健二, 岡田宏昭, 奥野秀樹, 川島義親
2. 発表標題 無線センサノード向け自己完結型振動発電デバイスの構築
3. 学会等名 平成30年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大崎数馬 A. A. Basari, 橋本誠司, 須藤健二, 長谷部実, 奥野秀樹, 羽賀大真, 川島義親
2. 発表標題 無線センサノード向け自己完結型発電デバイスの構築
3. 学会等名 電気学会第9回栃木支所・群馬支所合同研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 瀬戸敬太, 塚越正太郎, 橋本誠司, 栗田伸幸
2. 発表標題 被災地利用のためのPZT素子を用いた発電靴の開発
3. 学会等名 電気学会第9回栃木支所・群馬支所合同研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 有隅梓, 岡田慎太郎, A. A. Basari, 橋本誠司, 須藤健二, 長谷部実, 奥野秀樹, 羽賀大真, 川島義親
2. 発表標題 低サンプリングなデータに対するニューラルネットワークを用いた工場機器の故障診断法
3. 学会等名 電気学会第9回栃木支所・群馬支所合同研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Ishii, T. Iwase, S. Hashimoto, B. Homma, K. Suto, H. Okada, H. Okuno and S. Kumagai
2. 発表標題 A Flapping-Based Piezoelectric Power Generator for Bicycle Applications
3. 学会等名 IEEE ISIE2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 太晶, 松本柊斗, 橋本誠司, 須藤健二, 岡田宏昭, 奥野秀樹, 川島義親
2. 発表標題 圧電素子を用いた高効率振動発電装置の開発とその工場設備への応用
3. 学会等名 電気学会第8回栃木支所・群馬支所合同研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松本柊斗, 金田登志樹, 石井巧, 橋本誠司, 須藤健二, 岡田宏昭, 奥野秀樹, 川島義親
2. 発表標題 PZT素子を用いた圧縮力に基づく高出力・広帯域振動発電
3. 学会等名 電気学会第8回栃木支所・群馬支所合同研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Hashimoto
2. 発表標題 Development of Vibration-based Energy Harvesters and Their Application to Self-powered Systems
3. 学会等名 International Conference on Technological and Social Innovations 2019(ICTSI2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Hashimoto
2. 発表標題 A Neural Network-Based Framework for Control and Diagnosis in Industries
3. 学会等名 2019 International Conference on Industrial Applications of Big Data and Artificial Intelligence (BDAl 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 異常検出システム	発明者 橋本誠司	権利者 群馬大学、ミツバ
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-134080	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

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
研究協力者	バサリ アマツ  (Basari Amat)		
研究協力者	ジャン ウェイ  (Jiang Wei)		