

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 24 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26340098

研究課題名(和文) 高効率振動エネルギー回生技術の開発とセルフパワードシステムへの展開

研究課題名(英文) Development of high efficiency vibration energy regeneration technology and its application to self-powered systems

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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、申請者の提案する多軸・多モード振動発電装置の原理モデルに基づき、微小振動から高効率エネルギー回生を可能とするセルフパワードのための振動発電装置の開発とその応用研究を行った。ここでは、均一応力分布を考慮し、高耐久かつ回生エネルギーを最大化する構造を開発し、自動車振動による実験検証を行いその有効性を示した。また、広帯域な振動周波数に同調可能な構造として間接衝撃を利用した発電構造を提案し、エネルギー回生効率を最適化した。実応用に関してはパワーマネジメントシステムを構築し、無線送信機器や自転車ペダル、サドルなどへの応用を図り、その有効性を実験により検証した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to develop an efficient vibration power generator for self-powered applications based on the proposed multi-axis multi-mode structure. To achieve this purpose, considering uniform stress distribution, a structure that maximizes regenerative energy with high durability has been proposed. Moreover, we have proposed an indirect impact-based power generator which can apply to a broadband vibration frequency. The effectiveness of the proposed power generator has been experimentally verified by the vehicle vibration. For the practical application, a power management circuit has been developed, and then the combined system with the power generator has been applied to wireless transmission equipment, bicycle pedal, saddle etc.

研究分野：制御工学

キーワード：再生可能エネルギー 振動発電 パワーマネジメント

### 1. 研究開始当初の背景

2030年には世界のエネルギー消費量は現在の1.4倍に達する見込みであり、世界的なエネルギー不足問題が深刻化してきている。また、原子力や火力などの集中型発電ではエネルギー生成プロセスやリスク集中の問題、石油利用によるCO<sub>2</sub>排出に伴う地球温暖化問題も顕在化している。これに対し、再生可能エネルギーである振動エネルギーに着目した地産地消型の発電技術に期待が寄せられており、歩行時の振動を利用した「発電床システム」による駅構内での社会実験や、自動車による橋の振動を利用した「振動力発電装置」によるライトアップの電力を補う実証実験などが行われている。

このように、近年、振動エネルギーを利用した発電システムに関する技術開発は、この分野の著名な国際会議であるIEEE IASやIESの年次会議においてスペシャルセッションが設けられるほど活発に研究が行われているが、いまだに基礎研究の段階にとどまっているものが多い。研究が進まない大きな理由としては、効率的発電は共振周波数に限定された単一周波数のみであり、その方向も単軸方向に制約されることである。振動、特に振動発電のターゲットとなる自動車や産業機械における振動はその特性上、多軸方向で生じるとともに複数の振動周波数を有する。また、振動形状、振動周波数ともに変化する。これらを制御して振動発電に積極的に使おうとする研究はこれまでに皆無と言って良い。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究では、申請者が提案している多軸・多モード発電構造を、実際に応用する負荷システムとの整合を考慮し、入力される振動エネルギーが最大化されるよう振動制御技術を駆使し、回生する発電量とその効率が最大となる振動エネルギー回生システムを実現する。定量的目標は、現状の振動発電による発電量の20倍相当(試作機では5倍相当)となる13mW/cm<sup>3</sup>(太陽電池相当)の達成、開発中の振動発電装置の発電量は20mW程度であるが、の数値目標を達成することにより、発電装置として100mWまで向上させること、自己完結型のセルフパワードによるセンシング、ワイヤレス通信の実現と製品耐久性(10万km走行相当)の確保である。

(2) 本目標を達成するための具体的な実施項目は、-1 多軸・多モードの振動エネルギーを効率的に回生する構造の開発、-2 多軸・多モード振動のモデリングと高精度再現用シミュレータ、振動試験装置の開発、-1 振動発電装置の可変構造化による共振周波数への同調、-2 振動エネルギー回生装置の多軸応力試験に基づく発電効率の最適化、-3 振動エネルギー回生装置の応力・疲労試験と

解析による高耐久化、-1 電源配線を不要化したセルフパワード技術と実応用、-2 振動エネルギー回生装置に関する製品要求事項と市場性の調査である。

### 3. 研究の方法

研究の目的(2)で述べた項目 -1 については、多軸・多モード発電構造について、発電効率の向上を図るとともに他の項目で実施する振動解析や耐久試験結果等も考慮し、実用化に向け最適化していく。具体的には、一つの装置で多軸・多モード振動よりエネルギー回生できる構造(多質点・偏芯構造、多軸・多モード一体構造、高密度化構造など)の開発である。-2 については、多軸・多モード振動発電に特化した計測システムを構築し、(例えば自動車により)加振実験を行い、システム同定法により振動源と対象を高精度にモデル化する手法を開発する。また、モデル化した振動を広帯域にわたり高精度に再現する(サブHzから数百Hzまで再現する)シミュレータと、多軸・多モード振動試験装置を開発し、ストロークや制御力の制限下でも計測した振動の特徴を簡便にかつ忠実に再現できる多軸・多モード振動再現システムを構築する。

次に、項目 -1 では設置場所の振動周波数に対して、装置を構成するばね定数を可変にして同調(十数Hzの周波数同調機構)する簡便な機構を実現する。これにより振動増幅を行い、エネルギー回生効率を最大化する機構の開発を目指す。-2 では、多軸応力状態で荷重負荷試験を行い、各振動モードにおける効率評価を実施する。これにより、多軸・多モードでの発電効率の定量化を行うとともに、応力集中箇所への適切な圧電材料の設置、形状の最適化(3角形状の片持ちはりでは応力分布が均一となる、など)を通して発電効率の最大化を図る。-3 では、開発する発電装置の強度特性評価のために、多軸に対応した応力解析と、静的3点曲げ試験および連続使用を模擬した疲労試験を実施する。本試験結果と-2 で実施の圧電材料の形状と設置箇所の最適化により、高耐久でかつ効率的な装置構造を設計する。

項目 -1 では、-1 で開発する高出力発電装置を活用し、自動車や産業機械、介護機器に搭載される各電装品のスイッチ、センサ信号を発電・センシング・無線送信がワンパッケージとなった配線不要な自己完結型のセルフパワード通信装置として実現する。最後に、-2 は製品要求や市場性の調査であるが、振動発電装置の製品化に向けては、要求出力や耐久性、設置環境条件など複合的に考慮すべき事項が存在する。これらの要求項目とともに自動車、産業、介護分野での市場性、動向を的確に調査し本開発に反映していく。また、社会基盤技術として確立していくために解決が必要となる課題や、その後の起業化可能性についても検討する。

#### 4. 研究成果

(1) 振動エネルギーを多軸・多モードにより効率的に回生する構造の開発：項目 -1 の開発に対し、多軸・多モードエネルギー回生装置の応力解析を実施し、発電デバイスへの機械的な入力エネルギーを最大化し、かつそのエネルギーを効率よく電気エネルギーとして取り出すことが可能な発電デバイス形状を考案した（図 1 参照）。ここでは、均一応力分布となる三角形の圧電デバイスを片持ち梁に応用し、多質点構造とすることにより多軸・多モードの高出力なエネルギー回生を可能とした。

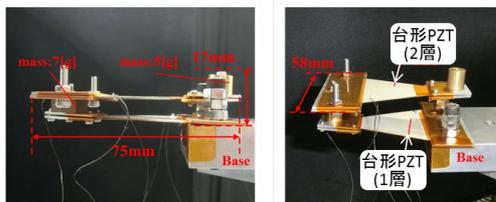


図 1 開発した多軸・多モード振動発電装置

また、衝撃構造と曲げ構造を併用した発電装置の最適構造を提案し、衝撃による大振幅電力回生と曲げによる持続した電力回生といった双方の特徴を併せ持つ発電手法を実現した。ここでは、持続的に数十ミリワットの出力が達成できたが目標の 100 mW までには不足した。しかしながら、提案構造では、発電可能な周波数帯域が約 100Hz と従来構造に対して極めて広く、当初予定の帯域幅を大幅に上回っており、実用化における期待は高い。自動車振動による負荷試験では、開発した多軸・多モードエネルギー回生装置が無線送信用の電源として使用可能であることを検証した。なお、本提案の多軸・多モードエネルギー回生装置は特許出願し、権利化された。

項目 -2 に対しては、開発する振動エネルギー回生装置に対し、多軸・多モードで加振可能な多軸・多モード振動試験装置を構築した。本装置では多軸のサーボモータを導入し、多軸・多モードを特徴とする自動車振動や産業機器の加速度振動に対し、ストロークや制御力の制限下でも実測した振動を広帯域（サブ Hz から百 Hz）かつ高精度に再現できる制御手法を提案し、実験によりその有効性を検証した。更に、開発した装置により駆動される無線送信機器や温度測定器などの各種負荷を模擬可能な電子負荷試験システムも構築した。

(2) 振動エネルギー回生装置の制御技術の開発：項目 -1 について、共振周波数への同調（発電デバイスの広帯域化）が可能な構造の実現として、衝撃を利用した発電構造を提案した（図 2 参照）。ここでは、提案構造の物理パラメータが発電に与える影響の定量的解析を実施し、間接的衝撃構造を導入した。また、その最適条件を導出することによる回

生エネルギーの最大化を図った。本開発では、提案の間接衝撃構造のみで最大 100Hz の帯域にわたり、数十ミリワットレベルの発電が可能となることを実験検証した。

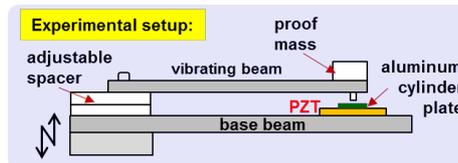


図 2 間接衝撃を利用した発電構造

また、圧縮力に着目した振動発電装置も新たに考案し、セルフパワー機器への応用について検討した。ここでは、バイクのサスペンションと自転車サドルへの導入を目的とした圧縮発電装置を開発し、各種走行条件下での発電特性の定量解析より、路面状況によっては毎秒数回の無線送信機器の駆動が可能となることを検証した。

項目 -2 の振動エネルギー回生装置の高耐久化については、多軸・多モード回生装置に導入する三角形の圧電デバイスに対し、動的疲労試験を行った。その結果、実験的にえられた疲労限度に対し、応用対象である自動車振動の最大荷重は約 45% 相当であり、実用化可能なレベルであることを検証した。次に、提案する多軸・多モード発電装置の実用を考慮し自動車振動加振実験を行った。その結果、各モードでの応力集中箇所における力は最大でも疲労限度の 42.5% であり、実用上十分な耐久性を有することを確認した。

(3) 振動エネルギー回生装置の応用技術の開発：項目 -1 については、まずは発電電力の有効利用のために、太陽光発電で実用化されている最大電力追従点(MPPT)制御について適用可能性を検討した。その結果、MPPT 制御を駆動するには少なくとも数十ミリワットの発電電力が必要であり、十分な効果を得るには更なる発電電力向上が必要であり、現状では現実的では無いことを確認した。次に、提案する発電装置の実用を考慮し、超低消費電力なレギュレータ回路と薄膜 2 次電池、その保護回路を含むパワーマネジメントシステムを構築し、その有効性を実験による定量解析により検証した。その結果、開発した振動発電装置により安定化した出力を得ることができ、間欠的ではあるが無線送信機器などの負荷装置をセルフパワーで駆動可能であることを確認した。

項目 -2 では、開発する振動発電に基づくエネルギー回生装置の応用先について検討し、まずは自転車ペダルの LED 灯火装置に、本発電構造を導入検討した（図 3 参照）。その結果、踏力を利用した発電構造と、回転力を利用した 2 種類の発電装置を提案・実機製作し、その有効性を検証した。本成果に基づき、3 件の特許出願を行った。また、前述の通り、圧縮力に基づく発電装置の応用例としてサドル下への導入と、それによる負荷装置

駆動試験を実施し、実用化可能性を検証している。



図3 回転形 LED ペダル振動発電灯火装置

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計9件)

A. Basari and S. Hashimoto, "High Power Output of L-shape PZT Power Generator Working in Bending-Shear Mode," *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*, Vol.9, No.1, pp.41-45, 2017. 査読有

T. Ishii, T. Iwase, S. Hashimoto, B. Homma, K. Suto, H. Okada, H. Okuno and S. Kumagai, "A Flapping-Based Piezoelectric Power Generator for Bicycle Applications," *Proc. of IEEE ISIE2017*, 2017(accepted). 査読有

A. Basari, S. Hashimoto, B. Homma, H. Okada, H. Okuno and S. Kumagai, "Design and optimization of a wideband impact mode piezoelectric power generator," *Ceramics International*, Vol.42, No.1, pp.6962-6968, 2016. 査読有, DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.01.082

S. Hashimoto, A. Basari, T. Iwase, B. Homma, H. Okada, H. Okuno, and S. Kumagai, "Evaluation of Impact Mode-Based Piezoelectric Power Generator," *Proc. of IEEE ICIEA2016*, pp.1131-1134, 2016. 査読有

A. Basari, S. Awaji, S. Sakamoto, S. Hashimoto, B. Homma, K. Suto, H. Okada, H. Okuno, K. Kobayashi, S. Kumagai, "Study of the effect of mechanical impact parameters on an impact-mode piezoelectric ceramic power generator," *Ceramics International*, Vol.41, No.9, pp.12038-12044, 2015. 査読有, DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.06.018

A. Basari, S. Awaji, S. Sakamoto, S. Hashimoto, B. Homma, K. Suto, H. Okada, H. Okuno, K. Kobayashi, and S. Kumagai, "Evaluation on Mechanical Impact Parameters in Piezoelectric Power Generation," *Proc. of ASCC2015*, pp.1330-1335, 2015. 査読有

A. Basari, S. Awaji, S. Sakamoto, S. Hashimoto, B. Homma, K. Suto, H. Okada, H. Okuno, K. Kobayashi, and S. Kumagai, "The Effect of the Parameters of a Vibration-Based Impact Mode Piezoelectric Power Generator," *Shock and Vibration*, vol. 2015, Article ID 345191, 9 pages, 2015. 査読有, DOI: 10.1155/2015/345191

A. Basari, S. Awaji, Y. Zhang, S. Wang, S. Hashimoto, S. Kumagai, M. Kasai, K. Suto, W. Jiang and S. Wang, "Comparison and

Evaluation of Vibration-Based Piezoelectric Power Generators," *Proc. of IPEC2014*, 21P8-3, pp.3194-3199, 2014. 査読有

A. Basari, S. Awaji, S. Wang, S. Hashimoto, S. Kumagai, K. Suto, H. Okada, H. Okuno, B. Homma, W. Jiang, S. Wang, "Shape Effect of Piezoelectric Energy Harvester on Vibration Power Generation," *Journal of Power and Energy Engineering*, Vol.2, No.9, pp.117-124, 2014. 査読有, DOI: 10.4236/jpee.2014.29017

〔学会発表〕(計18件)

岩瀬, A. Basari, 橋本, 本間, 岡田, 奥野, 熊谷: 「間接的衝撃を利用した広帯域振動発電装置の開発」, 平成28年電気学会産業応用部門大会, 2016年9月1日, 群馬大学(群馬県前橋市)

石井, 岩瀬, 橋本, 本間, 岡田, 奥野, 熊谷: 「振動発電を用いた自転車用ペダル灯火装置の開発」, 平成28年電気学会産業応用部門大会, 2016年8月30日, 群馬大学(群馬県前橋市)

金田, 坂本, 橋本, 本間, 岡田, 奥野, 熊谷: 「PZT素子を用いた振動発電装置の形状効果に対する実験解析」, 平成28年電気学会産業応用部門大会, 2016年8月30日, 群馬大学(群馬県前橋市)

A. Basari, S. Hashimoto, B. Homma, H. Okada, H. Okuno, and S. Kumagai: "Output Optimization of Wideband Impact Mode Piezoelectric Power Generator," 電気学会研究会, 2015年12月19日, 群馬大学(群馬県桐生市)

岩瀬, 橋本, W. Jiang: 「最大電力点追従制御法の振動発電への適用可能性」, 平成27年電気学会産業応用部門大会, 2015年9月2日, 大分大学(大分県大分市)

高橋, A. Basari, 橋本, 須藤, 本間, 岡田, 奥野, 小林, 熊谷: 「サーボシステムによる自動車振動の高精度再現手法」, 第57回自動制御連合講演会, 2014年11月10日, ホテル天坊(群馬県伊香保町)

A. Basari, S. Awaji, S. Sakamoto, S. Hashimoto, B. Homma, K. Suto, H. Okada, H. Okuno, K. Kobayashi and S. Kumagai: "Experimental Analyses on L-Shape PZT Vibration Power Generator Operates in Bending-Shear Mode," 第57回自動制御連合講演会, 2014年11月10日, ホテル天坊(群馬県伊香保町)

坂本, 淡路, A. Basari, 橋本, 本間, 須藤, 岡田, 奥野, 小林, 熊谷: 「多モード形状による高出力振動発電のための応力解析と実験検証」, 平成26年電気学会産業応用部門大会, 2014年8月26日, 東京電機大学(東京都足立区)

上野, 淡路, A. Basari, 橋本, 本間, 須藤, 岡田, 奥野, 小林, 熊谷: 「インピーダンス整合を考慮した振動発電デバイスの発電効率改善」, 平成26年電気学会産業応用部門大

会, 2014年8月26日, 東京電機大学(東京都足立区)

〔図書〕(計1件)

涌井伸二, 橋本誠司, 高梨宏之, 中村幸紀, コロナ社, 現場で役立つ制御工学の基本(演習編), 2017(6月出版予定)

〔産業財産権〕

出願状況(計3件)

名称: 自転車ペダル用灯体装置および自転車

発明者: 本間, 熊谷, 岡田, 奥野, 橋本, 石井

権利者: 株式会社ミツバ, 国立大学法人群馬大学

種類: 特許

番号: 特願 2016-038195 号

出願日: 平成 28 年 2 月 29 日

国内外の別: 国内

名称: 自転車ペダル用灯体装置および自転車

発明者: 本間, 熊谷, 岡田, 奥野, 橋本, 石井

権利者: 株式会社ミツバ, 国立大学法人群馬大学

種類: 特許

番号: 特願 2016-038196 号

出願日: 平成 28 年 2 月 29 日

国内外の別: 国内

名称: 自転車ペダル用灯体装置および自転車

発明者: 本間, 熊谷, 岡田, 奥野, 橋本, 石井

権利者: 株式会社ミツバ, 国立大学法人群馬大学

種類: 特許

番号: 特願 2016-038396 号

出願日: 平成 28 年 2 月 29 日

国内外の別: 国内

取得状況(計1件)

名称: 発電装置

発明者: 熊谷, 笠井, 橋本

権利者: 株式会社ミツバ, 国立大学法人群馬大学

種類: 特許

番号: 特許第 5954729 号

出願日: 平成 24 年 1 月 30 日

取得日: 平成 28 年 6 月 24 日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://hashi-lab.ei.st.gunma-u.ac.jp/~hashimotos/research/research02.html>

6. 研究組織

(1) 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