

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06685

研究課題名(和文) 柔軟発電体とエンジン振動を組み合わせた環境発電の実用化に関する研究

研究課題名(英文) Study on practical energy harvesting using FPED and engine vibration

研究代表者

田中 義和 (TANAKA, Yoshikazu)

広島大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00335704

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：近年、豊富で活用されていないエネルギーを獲得する方法として機能性材料を用いた環境発電(energy harvesting)が注目を集めている。環境発電の観点から、未利用のエンジン振動のパワーは大変魅力的である。著者らは、圧電フィルムと柔軟素材(シリコンゴムなど)を用いた柔軟発電体(FPED)を提案している。そこで、本研究では、FPEDとエンジン振動による環境発電に着目し、研究を実施した。開発した理論評価方法の妥当性は、加振機を用いた強制振動実験およびエンジン振動を用いた実験により検証された。また、パラメータスタディにより、10個のFPEDを用いれば1 Wクラスの発電が可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：Energy harvesting methods that use functional materials have been attracting interest in recent years to take advantage of an abundant but underutilized energy source. Power from the engine vibration, an abundant source of vibration energy, is very attractive from the view point of the energy harvesting. The authors have proposed a flexible piezoelectric device (FPED), consisting of a piezoelectric film and soft materials. Therefore, we focused on the energy harvesting using the FPED and the engine vibration, and conducted the development of a theoretical evaluation method for the vibration and output power of the FPED and a system using the FPEDs. Validity of the developed theoretical evaluation methods have been verified through the experiments using a shaker and an actual engine vibration. Therefore, a parameter study assuming the engine vibration has been conducted, and the results shows that the energy harvesting system using 10 FPEDs can supply 1 W using the engine vibration.

研究分野：材料力学、振動学、電磁気学、計算力学

キーワード：環境発電 振動発電 柔軟発電体 圧電フィルム 再生可能エネルギー

1. 研究開始当初の背景

近年、再生可能エネルギー発電、環境発電もしくはエネルギーハーベスティングをキーワードとした研究が活発化してきている。その背景には、化石燃料の枯渇に対する懸念、二酸化炭素排出による地球温暖化対策、純粋な技術革新への意識、がある。再生可能エネルギーの代表としては、周知のように、太陽光発電、風力発電が挙げられる。一方、新しい発電技術として、熱電変換材料、磁歪材料、圧電材料などの機能性材料を用いた発電技術の研究開発が2000年代前半から活発化してきている。これらの技術は、現状において、太陽光発電や風力発電と比べ、1つ1つの発電装置から獲得できる電力は小さいため、環境発電もしくはエネルギーハーベスティングと呼ばれている。しかし、自動車からスマートグリッドまで幅広く活用できる技術と期待され、さまざまなアプリケーションの研究開発が、欧米を中心に進められている。アプリケーションの例として、ロンドンオリンピック開催時、人の歩行により発電する床（圧電材料を利用）が記憶に新しい。このように、エネルギーハーベスティングのアプリケーションは、様々な形態が考えられる。代表者らは、これまで圧電材料の1種である圧電フィルムを用いた柔軟発電体（以下FPED）の研究開発を行ってきた（図1）。国内外の圧電材料を用いた発電デバイスは、100Hz以上を動作環境とするものがほとんどである。一方、代表者らの発電デバイスの特徴としては、低周波数（100Hz以下）でのデバイスの設計が容易に可能である点が挙げられる。したがって、この特徴は、身近な100Hz以下の振動源を利用したエネルギーハーベスティングの可能性を我々のデバイスは有していることを意味する。

2. 研究の目的

振動エネルギーは身近に多種多様に存在している。風力エネルギー、海洋エネルギー、建物のゆれ、エアコンの室外機、工作機械の振動、など、さまざまなものが考えられる。最も消費者の規模が大きい自動車のエンジンに着目すると、エンジンの加速度は $5 \sim 20 \text{ m/s}^2$ 、振動数は $30 \sim 100 \text{ Hz}$ の範囲といわれており、代表者らのこれまで研究活動においてもそれを確認している。この振動エネルギーを活用できる技術を開発することは、自動車メーカーにとって非常に魅力的であると想定できる。この振動エネルギーを効率的に獲得するためには、まず、シンプルな形状の柔軟発電体の発電特性を理論的に予測できる方法を確立することが最も重要である。また、それを効率的に生産できる方法を同時に開発しておくことも将来のビジネスを展開していく上で重要である。そこで、本研究課題では、図2に示すように、代表者らが提案している柔軟発電体とエンジン振動を組み合わせた環境発電技術の開発を行う。



図1：柔軟発電体の概要

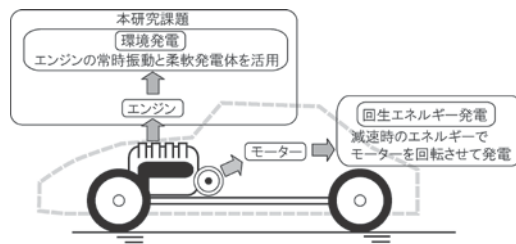


図2：本研究課題の目的

3. 研究の方法

(1) パネル型 FPED について

材料力学・振動学・電磁気学を基礎に、パネル型 FPED の振動・発電特性の理論評価方法を開発した。また、開発した方法の妥当性を検証するために加振機を用いた振動発電実験、エンジン振動を用いた振動発電実験、を行った。

(2) 複数の FPED を用いた発電システム
パネル型 FPED の理論的評価方法を拡張することにより、複数の FPED を有する発電システムの振動・発電特性の理論的評価方法を開発した。また、開発した方法の妥当性を検証するために、加振機を用いた強制振動実験を行った。さらに、開発した方法を用いて自動車エンジン振動で獲得できる電力について試算を実施した。

4. 研究成果

(1) パネル型 FPED について

パネル FPED の理論振動発電特性評価方法について検討を行った。開発した理論振動発電評価方法の概要を図 3 に示す。柔軟発電体はベルヌーイ・オイラーの仮定が成立するはりとみなしている。また、柔軟発電体の内部には圧電フィルムが積層されている。そこで、柔軟発電体の振動方程式と圧電材料の電気回路式を連成させ、FPED の振動・発電特性を解析している。振動モードの導出には、伝達マトリックス法を採用している。なお、様々な境界条件（片端固定-片端自由、両端ピン支持、片端固定-片端ピン支持など）に対応することが可能である。

開発した理論評価方法の妥当性を検証するため、加振機を用いた強制振動実験を実施した。図 4 に実験装置の構成を示す。FPED を両端ピン支持し、加振機で強制振動を行った。強制振動中にレーザー変位計による振動変位の計測、電圧計により電圧の計測

を行った。図 5 に実験結果と理論計算結果の比較を示す。図 5 は電圧-振動数の図であり、同図より開発した理論評価方法の妥当性が検証される。

開発した振動・発電特性評価方法の妥当性が検証されたので、当該評価方法を用いて、エンジン振動を想定した FPED を設計し、エンジン振動を用いた発電実験を行った。エンジン振動による発電実験結果を図 6 に示す。図 6 より設計した FPED より共振時において 2.9 mW 程度の発電量が得られることが確認された。

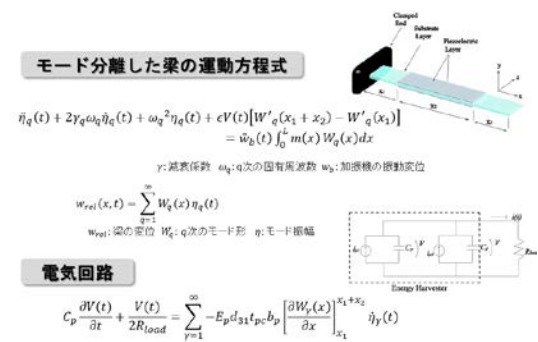
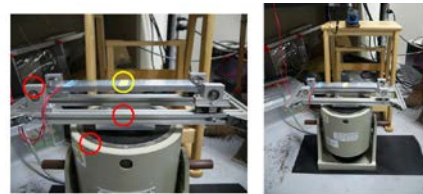


図 3：パネル型柔軟発電体の振動・発電特性の理論評価方法の概要



- 加振機を床上に設置し、実験装置の振幅を計測する
- FPED 支持部、フレーム中央、加振機の振動を計測
- 加速度計を用いて、振動加速度を 5.0m/s² 10.0m/s² で制御した計測を行う

図 4：実験装置の構成

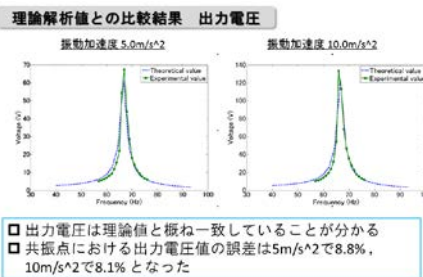


図 5：実験結果

(2) 複数の FPED を用いた発電システム
複数の FPED を用いた発電システムの振

動・発電特性評価方法の開発を行った。複数のパネルはバネで連結されているとしている。そこで、伝達マトリックス法において、バネが設置されている点での量（たわみ、たわみ角、曲げモーメント、せん断力）がバネによる力も含めて連続になるように定式化を行っている。

この評価方法の妥当性を検証するために加振機を用いた強制振動実験を実施した。図7に製作したFPEDを示す。自動車の振動特性を考慮し固有振動数が60 Hz 近辺になるようにFPEDを設計している。これらの製作したFPEDを用いて強制振動実験を行った。図8に3つのFPEDをバネで接続したときの実験結果を示す。図8より、実験結果と評価結果は良い一致をしていることを確認できる。図9に10個のFPEDを用いた発電性能の試算例を示しており、10個のFPEDと自動車エンジンの振動を用いれば、1 W程度の発電を期待することができる。

エンジン振動を利用した発電実験

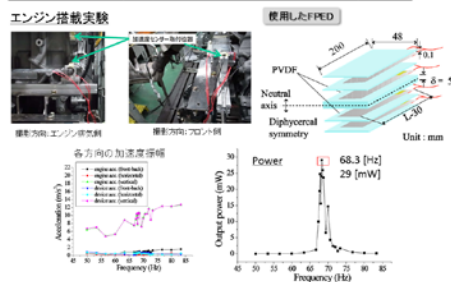


図6：エンジン振動を用いた実験結果

製作したFPED

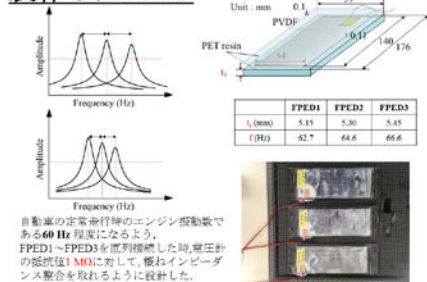


図7：製作したFPED

実験値と理論値の比較

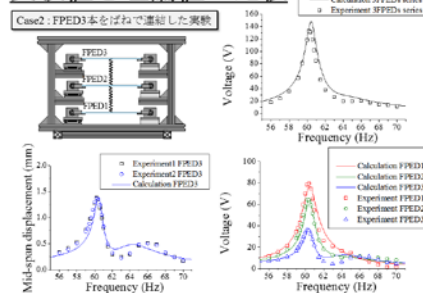


図8：3個のFPEDをバネで連結したときの強制振動実験

発電量の試算

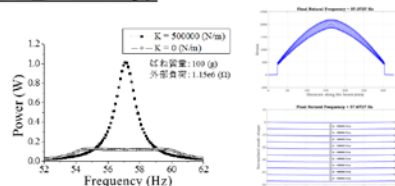


図9：10個のFPEDを用いた発電システムの発電特性試算

(3) まとめ

本研究課題を実施した成果として、

- パネル型FPEDの振動・発電特性の理論評価方法を開発した。開発した方法は、様々な支持方式に対応することが可能であり、設置状況に応じてパネル型FPEDを設計することが可能である。
- 複数のパネル型FPEDで構成される発電システムの振動・発電特性の理論評価方法を開発した。開発した方法は、バネで連結しているシステムにも対応することが可能である。この開発された方法により、設置状況に応じてパネル型FPED発電システムを設計することが可能である。
- 自動車エンジンの振動・加速度を想定して1 Wの発電が可能なパネル型柔軟発電体システムの案を示した。

となる。今後は、自動車エンジン以外の再生可能エネルギーへ本方法を適用し、獲得できるエネルギーについて試算し、有望な展開先を探索していくことが重要である。

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 5 件)

1. R. Patel, Y. Tanaka, S. McWilliam, H. Mutsuda, A. A. Popov, Model refinements and experimental testing of highly flexible piezoelectric energy harvesters, Journal of Sound and Vibration, 368(2016), pp. 87-102. (査読有)
2. Rupesh Patel, Yoshikazu Tanaka, Stewart McWilliam, Hidemi Mutsuda and Atanas A Popov, Simply-supported multi-layered beams for energy harvesting, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, pp. 1-20, 2016. (査読有)
3. Yoshikazu Tanaka, Takuya Oko, Hidemi Mutsuda, Kazuo Ichikawa, Toshihide Yamamoto and Keisuke Okihama, Study of power generation using FPED assuming engine vibration, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 52 (2016) , pp. 1377-1383 (査読有)
4. Hidemi Mutsuda, Yoshikazu Tanaka, Rupesh Patel, Yasuaki Doi, Harvesting flow-induced vibration using a highly flexible piezoelectric energy device, Applied Ocean Research 68 (2017) , pp. 39-52. (査読有)
5. Hidemi Mutsuda, Yoshikazu Tanaka, Rupesh Patel, Yasuaki Doi, Yasuo Moriyama, Yuji Umino, A painting type of flexible piezoelectric device for ocean energy harvesting, Applied Ocean Research 68 (2017) , pp. 182-193. (査読有)

[学会発表] (計 16 件)

1. Hidemi MUTSUDA, Motoki OTAKE, Kenichi MORISAKI, Yoshikazu TANAKA and Yasuaki DOI, Wave Energy Converter Using a Compressed Type of Flexible Piezoelectric Device, Proceedings of the 25rd International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), pp. 1059-1065, Hawaii, USA, 2015
2. Y. Tanaka, T. Oko, H. Mutsuda, K. Ichikawa, T. Yamamoto and K. Okihama, Study of Power Generation using FPED assuming engine Vibration, 17th international symposium on applied electromagnetics and mechanics ISEM2015, Awaji, Japan, Sep., 2015.
3. 森崎健一, ○大竹基喜, 陸田秀実, 田中義和, 柔軟発電デバイスによる風力エネルギー発電技術に関する研究, 第27回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp. 519-522, 5月, (2015)
4. 奥本悠季, ○横田俊介, 陸田秀実, 田中義和, 柔軟発電デバイスによる水力エネルギー発電技術に関する研究, 第27回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp. 523-526, 5月, (2015)
5. ○田中義和, 尾古卓也, 藤井光, 陸田秀実, 圧縮変形型柔軟発電体の発電特性に関する研究, 第27回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp. 527-530, 5月, (2015)
6. 田中義和, 尾古卓也, ○小山浩明, 陸田秀実, 両端単純支持した柔軟発電体の発電特性, 第27回「電磁力関連のダ

- イナミクス」シンポジウム講演論文集, pp. 531-534, 5月, (2015)
7. ○小山浩明, 田中義和, 陸田秀実, 柔軟発電体の構成に関するパラメータスタディ, 第28回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, 9月, (2015)
 8. ○小山浩明, 田中義和, 陸田秀実, 両端単純支持した柔軟発電体のパラメータスタディ, 第24回 MAGDA カンファレンス in Tohoku 講演論文集, pp. 303-306, 11月, (2015)
 9. ○小山浩明, 田中義和, 陸田秀実, 柔軟発電体のパラメータスタディに関する検討, 第28回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp. 96-99, 5月, (2016)
 10. ○男武悟, 田中義和, 陸田秀実, 海野雄士, 森山恭雄, 妹尾貴文, 塗布型圧電材料を用いた柔軟発電体の試作, 第28回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp. 102-105, 5月, (2016)
 11. ○志村仁, 陸田秀実, 田中義和, 土井康明, 柔軟発電素材を用いた弾性振動翼による流れエネルギー利用技術に関する研究, 第28回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp. 110-113, 5月, (2016)
 12. ○横田俊介, 秦俊介, 陸田秀実, 田中義和, 土井康明, 柔軟発電素材による浮漁礁型海洋エネルギー利用技術に関する研究, 第28回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp. 116-121, 5月, (2016)
 13. 田中義和, 小山浩明, ○男武悟, 陸田秀実, Rupesh Patel, Atanas Popov, Stewart McWilliam, バネで接続された圧電エネルギーハーベスターに関する研究, 第29回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp. 215-220, 5月, (2017), 倉敷, 5月18日~5月19日
 14. 田中義和, ○三宅潤, 男武悟, 陸田秀実, バネで接続された圧電エネルギーハーベスターに関する研究, 第29回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp. 221-224, 5月, (2017), 倉敷, 5月18日~5月19日
 15. ○三宅潤, 田中義和, 男武悟, 陸田秀実 (広島大学), 曲がり梁状発電体の振動応答に関する基礎的研究, 第26回 MAGDA カンファレンス in 金沢 講演論文集, 4 ページ, 10月, (2017)
 16. Yoshikazu TANAKA, Hiroaki KOYAMA, Satoru ODAKE, Hidemi MUTSUDA, Atanas A. POPOV, Rupesh PATEL and Stewart MCWILLIAM, Coupled FPEDs using springs for broadband energy harvesting, 18th international symposium on applied electromagnetics and mechanics ISEM2017, Chamonix, France, Sep., 2017.
- [その他]
ホームページ等
<http://seeds.office.hiroshima-u.ac.jp/search/index.html>
6. 研究組織
 - (1) 研究代表者

田中 義和 (TANAKA, Yoshikazu)
広島大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 00335704
 - (2) 研究協力者

陸田 秀実 (MUTSUDA, Hidemi)