
ノッティンガム大学（イギリス） 研修報告書

エンジン振動を想定した柔軟発電体の設計に関する研究

工学研究科 輸送・環境システム専攻 男武悟

1. はじめに

2016年8月2日から同年8月30日の間、イギリスのノッティンガム大学において研究を行った。以下にその報告内容を示す。

2. 共同研究テーマ

ノッティンガム大学は圧電素材を用いたエナジーハーベスティングに関する研究に取り組んでおり、そこでは数値シミュレーションを用いた研究が盛んに行われている。また広島大学はエンジン振動を利用したエナジーハーベスティング技術の開発に取り組んでいる。そこでノッティンガム大学とエンジン振動下での発電シミュレーション技術に関する研究を行う。

3. 共同研究スケジュール

8月1日 出国

8月3日～8月30日 研究、プレゼンテーション

9月1日 帰国

4. 共同研究派遣先の概要

大学名：University of Nottingham

所在地：イギリス イングランド ノッティンガム

指導教員：Prof.Atanas.Popov

5. 共同研究内容

5. 1 緒言

近年、環境への配慮が高まるにつれて環境に優しい再生可能エネルギーの需要・活用が増加している。現在主流な発電方法である火力発電は大量の二酸化炭素を排出するため、地球温暖化といった環境問題に起因している。そこで昨今、広く実用化されているのは太陽光発電や風力発電であり、一般家庭への導入も行われている。さらに、今まで捨てられていた微小なエネルギーを回収し、電力として再利用するというエナジーハーベストへの関心も高まっている。また、再生可能な新エネルギーとして圧電材料を用いたエネルギー回収技術にも注目が集まっており、実用化に向けた取り組みを行っている。こうした背景から、私の研究室においても圧電材料を用いた研究として Fig. 1 に示すような柔軟発電体(Flexible Piezoelectric Device :以下 FPED)を提案し、再生可能エネルギーを活用した発電技術の開発を進めてきた。

一方で、自動車の分野でも燃料価格の高騰や環境への配慮から、省エネルギー化に対する取り組みが行われている。エネルギー効率、CO₂ 排出量の面で優れた性能を持つ電気自動車やハイブリッド自動車は普及に向けた取り組みが世界各国で活発に進められている。しかし、連続走行距離の短さやインフラ整備が整わないことから、未だ普及しているとは言い難い。昨今ではむしろ、ガソリンよりも低価格である軽油を使用し、技術開発から CO₂ の排出量も少ないクリーンディーゼル車の普及が広まってきた。こうしたことから先、エンジン車が主流な方式として活躍することは確実である。そこで今後はエンジンそのものの燃焼技術とともに、周辺領域でエネルギー回収する技術の重要度が大切になってくるとと思われる。有効利用が期待されるエネルギーとして、熱エネルギーや振動エネルギーなどがあげられる。そこで再生可能エネルギーのうちの振動エネルギーに注目し、振動エネルギーを利用した柔軟発電体の環境発電の有用性を検討してきた。

以上を踏まえ、本研究ではエンジン振動を想定した FPED の構造を最適化するための理論計算方

法の開発を目的とする．本計算法は、「柔軟発電デバイスの変形モードにおけるモード分離型解法を用いた理論計算法」によって構成されている．FPED は共振点でのみ大きく振動し，電力を発生する特徴があることから，FPED1 本の場合だと限られた加振振動数でのみしか電力を発生しないといった問題がある．この問題を解決するために複数の FPED を使用することによって，FPED 周波数帯域を広げられると考えられる．本稿では，複数の FPED を用いた構造の FPED および複数の FPED をバネで連結した構造の FPED の発電実験結果と理論計算結果を比較し，発電理論計算法の精度検証を行う．

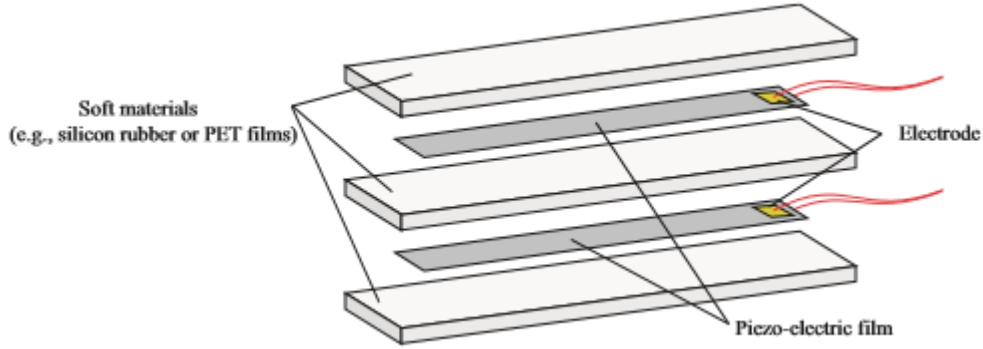


Fig. 1 Basic structure of the FPED

5. 2 発電理論計算法

本章では，ノッティンガム大学の Patel らによって導出された圧電素材と弾性材から構成されるはり部材を対象とした材料力学理論を用いて発電理論計算法の開発を行う．本理論モデルでは加振条件によって振動モードが予測されるため，計算負荷が小さなモード分離型解法を用いている．以下に，本計算に用いた支配方程式を示す．本計算手法では，まず始めに Transfer Matrix Method を用いて，区間 i 番目の左端の座標を x^{iL} ，区間 i 番目の右端の座標を x^{iR} とすることで固有角振動数 ω を求め，その後，空間依存項であるモードシェイプ W を求める．これによって，時間依存項であるモード振幅 η と起電力 V の 2 個の変数以外のすべての項を求めることができる．この変位量の非定常計算には，ニューマーク β 法を，起電力の計算には 4 次のルンゲ・クッタ法を用いることとした．それぞれ W はモードシェイプ， θ はたわみ角， M は曲げモーメント， Q はせん断力を表している．

$$\begin{pmatrix} W(x^{3R}) \\ \theta(x^{3R}) \\ M(x^{3R}) \\ Q(x^{3R}) \end{pmatrix} = (U^3)(I^{32})(U^2)(I^{21})(U^1) \begin{pmatrix} W(x^{1L}) \\ \theta(x^{1L}) \\ M(x^{1L}) \\ Q(x^{1L}) \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \ddot{w}(t) + 2\gamma\omega\dot{w}(t) + \omega^2\eta(t) \\ & = \ddot{w}_{base}(t) \int_0^L \mu(x)W(x)dx - \varepsilon V(t)[W(x_1 + x_2) - W(x_1)] \end{aligned} \quad (2)$$

$$C_p \frac{\partial V(t)}{\partial t} + \frac{V(t)}{R_{load}} = -E_p d_{yx} t_{pc} b_p \left[\frac{\partial W(x)}{\partial x} \right]_{x_1+x_2} \dot{w}(t) \quad (3)$$

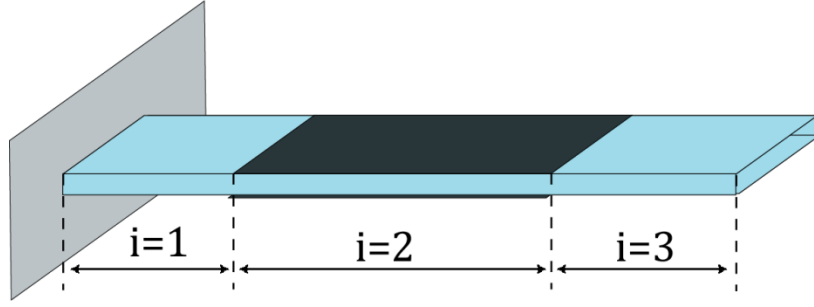


Fig.2 Transfer Matrix Method model of FPED

次に, Fig.3, Fig.4 に示すような FPED をばねで連結した物体の固有振動数及び各固有振動数での FPED の振動モードの計算方法について考える. Fig.4 よりばねのばね定数を K (N/m)とした際の各区間における曲げモーメントとせん断力は以下の式により得ることが出来る.

$$W_1(x^{3RK}) = W_1(x^{3R}) \quad (4)$$

$$Q_1(x^{3RK}) = Q_1(x^{3R}) \quad (5)$$

$$M_1(x^{3RK}) = M_1(x^{3R}) \quad (6)$$

$$Q_1(x^{3RK}) = Q_1(x^{3R}) + K(W_2(x^{3R}) - W_1(x^{3R})) \quad (7)$$

$$W_2(x^{3RK}) = W_2(x^{3R}) \quad (8)$$

$$Q_2(x^{3RK}) = Q_2(x^{3R}) \quad (9)$$

$$M_2(x^{3RK}) = M_2(x^{3R}) \quad (10)$$

$$Q_2(x^{3RK}) = Q_2(x^{3R}) + K(W_1(x^{3R}) - W_2(x^{3R})) \quad (11)$$

(4)~(11)をマトリックス形式で表すと以下のような式となる.

$$\begin{pmatrix} W_1(x^{3RK}) \\ \theta_1(x^{3RK}) \\ M_1(x^{3RK}) \\ Q_1(x^{3RK}) \\ W_2(x^{3RK}) \\ \theta_2(x^{3RK}) \\ M_2(x^{3RK}) \\ Q_2(x^{3RK}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K & 0 & 0 & 1 & K & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ K & 0 & 0 & 0 & -K & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_1(x^{3R}) \\ \theta_1(x^{3R}) \\ M_1(x^{3R}) \\ Q_1(x^{3R}) \\ W_2(x^{3R}) \\ \theta_2(x^{3R}) \\ M_2(x^{3R}) \\ Q_2(x^{3R}) \end{pmatrix} \quad (12)$$

(12)式により得られた固有角振動数 ω 及びモードシェイプ W を同様の手順により (2), (3)式に代入することにより解を得ることが出来る. FPED を 3 つ以上ばねで連結する場合においても同じ手順で求めることが出来る.

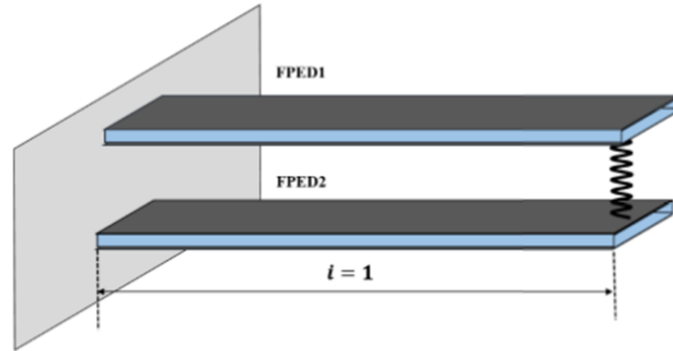


Fig. 3 FPED connected by spring

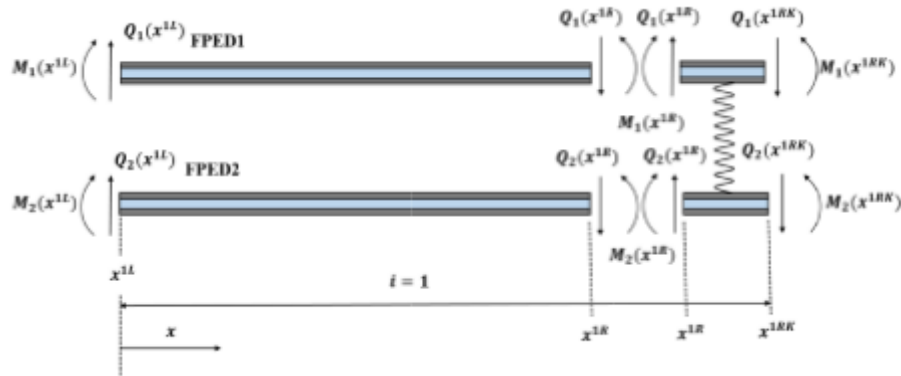


Fig. 4 shear force diagram and bending moment diagram of FPED

5. 3 実験結果と理論計算結果の比較

以下 Fig.5, Fig.6 に示す FPED を用いて強制振動実験を行った．実験は片端支持，内部インピーダンスは $1M\Omega$ にて行っている．実験はそれぞれ，ばねなし，ばね定数 90 (N/m) で結合，ばね定数 490 (N/m) で結合の 3 パターン行っている．PET 樹脂の厚さを変えることによる固有振動数の差を利用して発電可能領域の広域化を試みる．エンジンマウントに FPED を設置することを考えた際に，エンジン振動の鉛直方向への振動加速度が約 10m/s^2 であることから実験値では振動加速度を 10m/s^2 に固定している．以下に実験結果及び理論計算結果を示す．Fig.7 より理論計算により求められた発生電力及び固有振動数の妥当性を確認できる．さらに，ばねの剛性を変えることにより，発電量増大，発電可能領域の広域化も確認できる．

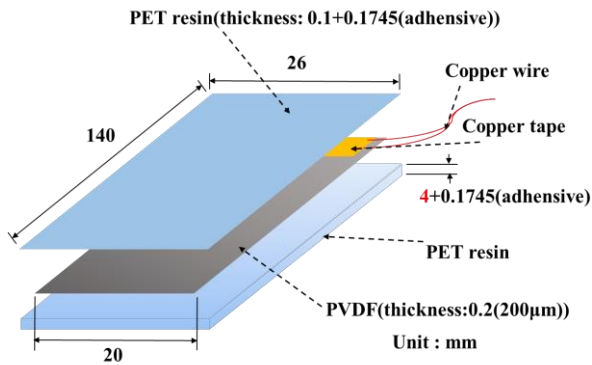


Fig.5 FPED1

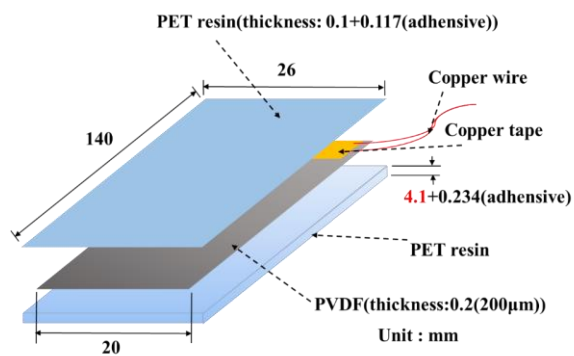


Fig.6 FPED2

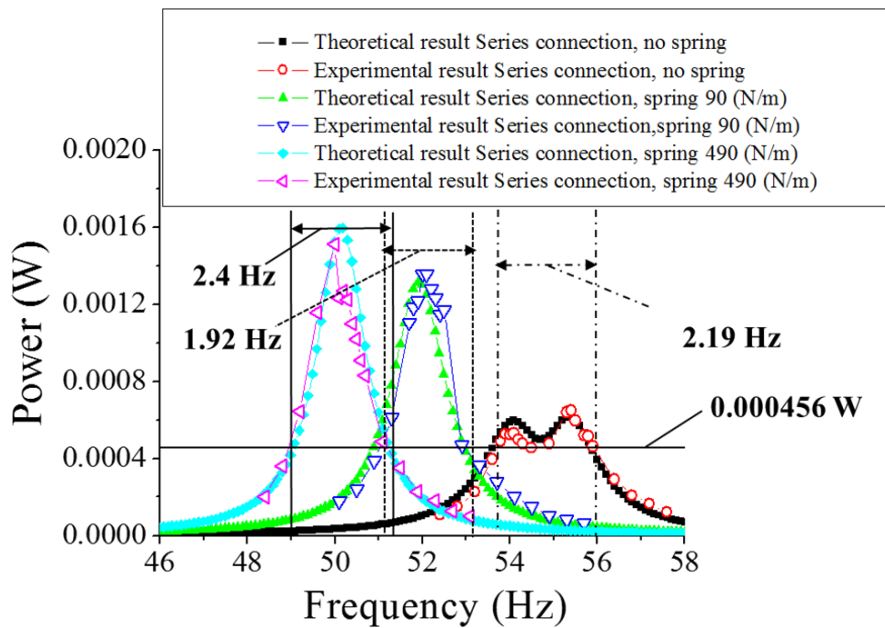


Fig.7 Theoretical result and Experimental result of FPED

5. 4 結言

本研究では、ノッティンガム大学が保有しているモードカップリングに基づく理論計算法にばねの力を付与することで、複数の FPED を用いた構造の FPED および複数の FPED をバネで連結した構造の FPED の発電理論計算法の検証を行った。実験値と理論計算値を比較することで今回作成した理論計算結果の妥当性を確認することが出来る。今後、FPED の枚数を増やすことにより、発電量の増加や発電可能領域の広域化につながると思われる。今後の課題として今回は片端支持での理論解析及び実験を行ったが、境界条件を変えたモデルでの解析も行っていく。

6. まとめ・謝辞

約 1 ヶ月間の海外共同研究を通して、自分の持っている英語力のつたなさを痛感した。しかし、自分から積極的にコミュニケーションをとろうとする姿勢が重要だと感じた。また、海外で実際に生活する事によって得た英国文化との交流はとても貴重な体験であった。

本共同研究を指導していただいた Atanas Popov 先生, Stewart McWilliam 先生, 陸田秀実准教授, 田中義和助教授, イギリスの研究室方々, そして海外共同研究プログラムの諸先生方, 学生支援グループ国際事業担当の皆様には深く御礼申し上げます。